www.kosco.or.kr

초록집

한국연소학회

2025년도 제70회 추계학술대회

70th KOSCO CONFERENCE

2025. 11. 19수 – 22토 · 경주 소노캄

◀ 웹 프로시딩 보기 http://symposium.jkosco.org

주 관 사단법인 한국연소학회 The Korean Society of Combustion

후 원 Hanwha Aerospace · HD현대중공업 · KOMI · DOOSAN 두산에너빌리티 · CATech

회원사 한국전력공사 · Kiturami · LG전자 · SOOKOOK Corporation · 한국서부발전(주) · DOOSAN 두산에너빌리티 · HD현대인프라코어 · HYUNDAI STEEL · Hanwha Aerospace · KOMIPO 한국중부발전 · (주)부스타 · (주)남양주열병합 · testo · HORIBA · INNOEN

이 학술지는 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로 한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 발간되었음

사단법인 한국연소학회 The Korean Society of Combustion

제 70회 KOSCO CONFERENCE

2025년 한국연소학회 추계학술대회

일 자 | 2025년 11월 19일(수)~22일(토) **장 소** | 경주 소노캄 **주 최** | 사단법인 한국연소학회 The Korean Society of Combustion

11월 19일(수요일)

	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
15:30 ~ 16:45 (75분)	**S-SESSION 1 : 철강분야 탄소중립을 위한 무탄소 연료전환 및 에너지 효율향상 기술개발 (비공개)** 좌장 : 채민석(세아창원특수강)	**SESSION 2-1 : 석탄연소** 좌장 : 양원(한국생산기술연구원)	**SESSION 3-1 : 공해물질 I** 좌장 : 김성일(한국생산기술연구원)	**S-SESSION 10 : IEA-AMF 특별세션** 좌장 : 박수한(건국대학교)	**SESSION 5-1 : 층류화염** 좌장 : 신동혁(한국과학기술원)
	40만Nm3/hr급 수소예열 엔지니어링 기술 개발 윤시경(포스코)	무탄소 발전을 위한 미분탄-암모니아 혼소 시 바이오매스 적용성 연구 김태윤, 이지환, 문형빈, 이윤재, 홍덕(부산대학교), 김승모(청정화력발전에너지연구소), 전충환(부산대학교)	NOx-O3 반응의 실시간 분광 진단 및 N2O5 생성 메커니즘 검증 박진수, 손창우, 강우린, 박문수(성균관대학교)	IEA-AMF 개요 및 활동 보고 박수한(건국대학교)	반경 단차 원판 연소기 (RSDB: Radial-Stepwise-Disk-Burner)를 이용한 예혼합화염의 불안정성과 화염전파특성 연구 한충호, 김남일(한국과학기술원)
	상용운전조건에서 수소연소기 Nox저감 제어방안 연구 김우형(한국내화)	Pilot-scale 단일버너 연소 시스템에서의 석탄/암모니아 혼소 특성 분석: 공기단계 연소 및 석탄 등급에 따른 영향 심우현, 황성환(한국생산기술연구원/성균관대학교), 이재욱, 변창희, 이재호, 양원, 채태영(한국생산기술연구원), 류창국(성균관대학교)	열분해 기반 수소 생산과 청정 연소로의 활용 연구 유지호(한국생산기술연구원/연세대학교), 이은지(한국생산기술연구원/과학기술연합대학원), 이승현, 김성일(한국생산기술연구원/고려대학교), 엄현진, 김휘동(한국생산기술연구원), 이은도, 양원(한국생산기술연구원/과학기술연합대학원), 이영재(한국생산기술연구원)	수소 건설기계 개발 및 기술 동향 김준석(한국건설기계연구원)	Experimental and Numerical Study on the Effect of NH3/COG Co-Combustion in Laminar Diffusion Flames 정형빈, 구민종, 김경호, 이병화, 전충환(부산대학교)
	Ladle Preheater용 무탄소 연소기 개발 성택진(SAC)	미분탄-암모니아 혼소 버너의 부하 변화 시 스월 구조에 따른 화염 안정성 평가 최진현(한국에너지기술연구원/고려대학교), 정재원(고려대학교), 이후경(한국에너지기술연구원/과학기술연합대학원대학교)	수소 혼소용 이중선회 인젝터의 화염구조와 NOx 배출특성에 관한 실험적 연구 홍준표, 이기만(국립순천대학교)	발전분야 탄소중립을 위한 수소터빈의 역할 김대식(국립강릉원주대학교)	연료 밀도에 의한 부력 효과가 제트 확산화염 프리커링 거동에 미치는 영향 강성종(울산과학기술원), 박정(국립부경대학교), 이원준(한국기계연구원), 정석호(KAUST), 유춘상(울산과학기술원)
	저NOx 암모니아 전소 복사관 연소기 개발 곽영태(한국에너지기술연구원)	전산해석 기반 암모니아-미분탄 혼소 버너의 화염 형태 최적화 장윤창, 강우석, 하선교(성균관대학교), 정시율, 김동선, 정재현(BHI), 류창국(성균관대학교)	중형 폐기물 소각로의 SNCR 제어 효율 향상을 위한 AI기반 적응형 요소수 분사 기술 개발 박성민, 김희윤(성균관대학교), 신동민, 이재호, 손지훈(SK에코플랜트), 류창국(성균관대학교)	무탄소 연료 연소 기술 동향 박철웅(한국기계연구원)	전기장 인가에 따른 예혼합 수소-프로판 화염의 연소 불안정성 변화 최준혁, 김태훈, 김혜민(국립한국교통대학교)
	가열로 열회수장치 설계 방법론 권진규(포항산업과학연구원)	순환유동층 보일러용 암모니아 버너 개발 현황 김규종, 김범종, 이경래(현대중공업파워시스템), 김동원, 박지홍(한국전력공사 전력연구원), 채태영, 양원, 이재욱(한국생산기술연구원), 문태영, 박성진(한국에너지기술연구원)	무화염 연소열 기반 수소화합물 직접 열분해에 관한 연구 유지호(연세대학교/한국생산기술연구원), 홍종섭(연세대학교), 김성일(한국생산기술연구원/과학기술연합대학원), 이영재(한국생산기술연구원)	메탄올과 암모니아의 착화 및 연소 특성 비교 박성욱(한양대학교)	Self-attention Based Prediction of Velocity Fields in 2D Laminar Oscillating Flames Mert Yakup Baykan, Kanghwan Kim, Dong-Hyuk Shin (KAIST)
	3MW급 연소버너 설계/제조 및 실증 기술개발 권진규(포항산업과학연구원)				

11월 20일(목요일)

	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
09:00 ~ 10:15 (75분)	**S-SESSION 2 : NCC 공정 열공급을 위한 무탄소 연소기술** 좌장 : 이민정(서울과학기술대학교)	**SESSION 2-2 : 난류화염** 좌장 : 정기성(국립부경대학교)	**SESSION 3-2 : 공해물질 II** 좌장 : 이영재(한국생산기술연구원)	**S-SESSION 11-1 : 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 워크숍(비공개)** (09:00~12:30) 좌장 : 정재우(한국자동차연구원)	**SESSION 5-2 : 기초화염** 좌장 : 황정재(한국기계연구원)
	NCC 공정 무탄소 연료 전환 기술 동향 이민정(서울과학기술대학교)	이중선회 인젝터 내 메탄/수소 화염의 형상과 재부착 거동에 관한 연구 김진성, 이기만(국립순천대학교)	용융 금속과의 다단 열분해 반응을 통한 플라스틱의 수소로의 전환에 관한 연구 이은지, 양원(과학기술연합대학원대학교/한국생산기술연구원), 엄현진, 이영재(한국생산기술연구원)	09:00 ~ 09:20 정재우(한국자동차연구원) 소형 수소엔진 시스템 성능 최적화에 관한 연구	가스터빈 단일 버너의 암모니아 크래킹 모사 연료 연소 특성 황정재, 김민국, 강도원, 이원준, 민경욱, 김재현, 박순호, 조주형(한국기계연구원)
	납사 크래킹 공정의 무탄소 연료 전환을 위한 벽면 복사 버너 설계 연구 김희윤, 하정우, 박지연, 유미연, 김대해, 이창엽(한국생산기술연구원)	인공신경망과 대표 화학종 그룹을 활용한 다차원 난류 반응 유동 계산 가속화 연구 류병완, 정기성(국립부경대학교), 김경택(포스코홀딩스)	수소 MILD 연소에서 vitiated gas 조건에 따른 화염 거동 및 NOx 배출 실험적 연구 이기현, 이기만(국립순천대학교)	09:20 ~ 09:40 이경석(한국자동차연구원) 무탄소 수소엔진 NOx 정화 저온활성 복합촉매시스템 개발	
	천연가스/수소 비율이 파일럿 버너의 화염 특성에 미치는 영향 김인수((주)세화이앤씨)	1000 MWe급 대향류 보일러의 당량비 및 크래킹에 따른 암모니아 전소 성능 평가 박기범, 강우석, 하선교, 이정호, 이성재, 류창국(성균관대학교)	CFD-ERN 결합 해석을 통한 항공용 가스터빈엔진의 배출가스 농도 변화 연구 오길규(초당대학교), 이기용(국립경국대학교)	09:40 ~ 10:00 정연식(테너지) 최종 수소 엔진형상 DB 구축 및 고도화된 해석모델 개발	수소-메탄 연료의 가스 터빈 노즐에서의 예혼합 연소 특성 연구 황하람, 장원석, 김성엽(전북대학교), 김호근(두산에너빌리티), 이승로(전북대학교)
	무탄소 연료 부분 예혼합 화염 연소 특성 및 총괄 반응 메커니즘 개발 전동석, 김세훈, 김남일(한국과학기술원)	이중 선회 인젝터에서 파일럿 노즐 구성이 난류 화염 특성에 미치는 영향 김인호, 이기만(국립순천대학교)	Alkane 연료의 Soot 발생에 관한 실험적 연구 강예진, 권희원, 성지환, 한가람, 손채훈(세종대학교)	10:00 ~ 10:20 라영철(Michigan Tech.) 3D 수치해석에 기반한 1D 수소 연소 모델 개발 및 검증에 관한 연구	
	멀티스케일 접근을 통한 연소 반응의 이해 및 응용 권형욱(서울과학기술대학교)	반응성 유동용 차원축소모델에서 주성분 분석이 미치는 영향에 대한 매개변수 연구 손경호, 박해람, 정기성(국립부경대학교)	PFR 모델을 활용한 기체상 탄화수소의 열분해에 대한 수치해석 검증 및 분석에 관한 연구 이승현(고려대학교/한국생산기술연구원), 임성균(고려대학교), 엄현진, 이영재(한국생산기술연구원)	10:20 ~ 10:40 Coffee Break	CH4-H2 화염의 NOx 생성 메커니즘 및 배출량 비교 박영준, 박태준, 염상윤, 이창언(인하대학교)

10:25 ~ 10:55	[초청강연1] 힘센엔진 e-Fuel 플랫폼 개발	안성찬 상무(HD현대중공업 엔진기계사업부 엔진연구소)	좌장: 박성욱(한양대학교) 그랜드볼룸
11:00 ~ 11:30	[초청강연2] 국내 자동차 배출가스 관리정책 현황 및 성과, 그리고 향후 과제	박준홍 센터장(국립환경과학원 모빌리티환경연구센터)	좌장: 박성욱(한양대학교)
11:30 ~ 12:55	2025년도 제 5회 정기 이사회 (소담) + 일반 참석자 중식 (셰프스 키친)		

11월 20일(목요일)	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
12:55 ~ 14:10 (75분)	**S-SESSION 3 : Carbon Neutral Fuel 2025 (3rd International Symposium on CNF Technology)** (12:30~15:25) Chair : Choongsik Bae(KAIST)	**S-SESSION 5-1 : International Session for Young Combustion Engineers I** 좌장 : 심형섭(한국과학기술원)	**S-SESSION 8-1 : [산학연계] 첨단 항공 엔진 연소기/후기연소기 개발 현황 I (한화에어로스페이스)** 좌장 : 이동곤(한화에어로스페이스)	**S-SESSION 11-1 : 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 워크숍(비공개)** (09:00~12:30) 좌장 : 정재우(한국자동차연구원)	**S-SESSION 12-1 : 이기만 교수 퇴임기념 I** 좌장 : 이창엽(한국생산기술연구원)
	Time / Speaker / Titles 12:30 ~ 12:50 Choongsik Bae (KAIST) Carbon Neutrality Scenario of IEA and Automotive E-fuel Engine Development 12:50 ~ 13:20 Noboru Uchida (New Ace, Japan) Variety of e-fuels and its global trend of R&D 13:20 ~ 13:50 Haifeng Liu (Tianjin University, China) E-methanol application to Transportation in China 13:50 ~ 14:00 Break 14:00 ~ 14:20 Ki-Won Jun (Gas Entec) Green Methanol Production Technology 14:20 ~ 14:40 Jongik Yoo (Solutiscnt) SAF (Sustainable Air Fuel) Production and Supply 14:40 ~ 15:00 Dong Hyun Chun (KIER) e-Fuel Production via Fischer-Tropsch Synthesis 15:00 ~ 15:20 Daero Joung (Doosan Enerbility) Carbon-Neutral Fuel for Gas Turbine 15:20 ~ 15:25 Closing	Effects of secondary air on turbulent premixed partially cracked ammonia combustion in a two-stage swirl burner Jinzhou Li, Peng Ma, Samir Boset Rojas Chavez, Surendra Kumar Soni, Shumeng Xie, Huangwei Zhang (National University of Singapore) Linear stability characteristics of laminar planar premixed ammonia flames supported by nitrous oxide Shumeng Xie, Huangwei Zhang (National University of Singapore) Extinction Characteristics of NH_3/ NO-Air Combustion in a Counterflow Diffusion Configuration Xuren Zhu, Shumeng Xie, Huangwei Zhang (National University of Singapore) Electrochemical screening of pyroelectric solid propellants Rajendra Rajak , Daehong Lim, Jia Xuan Lim (Seoul National University), Gnanaprakash Kanagaraj (IIT Hyderabad), Jai-Ick Yoh(Seoul National University)	첨단 항공엔진 개발전략 김종호(한화에어로스페이스) 첨단 항공엔진 연소기 개념설계 곽상혁(한화에어로스페이스) 첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 라이너 EFA 및 냉각 시험 평가 조형희(연세대학교) 첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 Heat Transfer 통합 Flow Network 모델 개발 송한호(서울대학교) 첨단 항공엔진 인력 확보 방안 석예담(한화에어로스페이스)	수소 혼합과정이 성층 연소 특성에 미치는 영향에 관한 연구 10:40 ~ 11:00 배충식(한국과학기술원) 수소분사 계측기술 고도화 및 통합 예측모델 구축 11:00 ~ 11:20 문석수(인하대학교) 수소 엔진의 연소실 형상에 따른 연소 속도에 관한 연구 11:20 ~ 11:40 민경덕(서울대학교) 내연기관에서 수소 연료의 자발화 기반 연소 특성에 관한 연구 11:40 ~ 12:00 이정우(충남대학교) 12:00 ~ 12:30 전체 토의	산업용 가스연소기에서 사용하는 저녹스연소 기술과 수소연소 적용에 대한 고찰 박주용, 박재언(㈜수국) 소형 수소 가스터빈 개발 현황 정병규, 최인찬, 한민석, 정대로, 배태원, 정대석(두산에너빌리티) 두산에너빌리티 발전용 및 항공용 가스터빈 개발 현황 한민석, 최인찬, 정병규, 강기중, 이동훈, 정대석(두산에너빌리티) 수소 혼소율에 따른 한국형 도시가스의 호환성 판정에 관한 연구 박태준, 이창언(인하대학교) 수소충전소 밸브 시험 및 충전소 성능평가 심근선(한국가스안전공사)
14:20 ~ 15:20 (60분)		**S-SESSION 5-2 : International Session for Young Combustion Engineers II** 좌장 : 이형주(국립부경대학교)	**S-SESSION 8-2 : [산학연계] 첨단 항공 엔진 연소기/후기연소기 개발 현황 II (한화에어로스페이스)** 좌장 : 이동곤(한화에어로스페이스)	**S-SESSION 11-2 : Heavy-duty 11L급 직분식 수소엔진 개발기술 자문단 평가(비공개)** (14:00~16:15)	**S-SESSION 12-2 : 이기만 교수 퇴임기념 II** 좌장 : 김호근(두산에너빌리티)
		Compact cyclohexane kinetic mechanism for predicting aromatics and soot formation in non-premixed flames: A CFD approach Anurag Dahiya, Meng-Syun, Kuang C. Lin (National Tsing Hua University) Hydrogen-Assisted Reduction of Combusted Iron Particles in a Micro-Fluidized Bed Yu-Ming Chuang, Dong-En Wu, Chao-Wei Huang (National Cheng Kung University) Combustion Behaviour of Electrophoretically Assembled Al/CuO Nanothermite Meshes Containing Triphenylphosphine-Coated Aluminium Nanoparticles Ying-Shuo Cheng, Xin-Rong Lu, Chao-Wei Huang, Ming-Hsun Wu(National Cheng Kung University) Investigating Thermal Runaway in Lithium-ion Batteries for Aerospace Mobility Applications Ayushi Mehrotra, Pragya Berwal, Yejun Lee, Jack J. Yoh (Seoul National University)	첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 화염 구조 시험 평가 도형록(서울대학교) 첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 고신뢰성 액체 연소 해석 체계 구축 이복직(서울대학교) 첨단 항공엔진 후기연소기 개념설계 진욱화(한화에어로스페이스) 첨단 항공엔진 후기연소기 개발을 위한 연소불안정 계측 및 저감방안 연구 김규태(한국과학기술원)	14:00 ~ 14:30 한국자동차연구원 1. 후처리평가용 실도로 DB 기반 엔진시험모드 개발 현황 2. 후처리장치 - 실물 scale up 개발 현황 14:30 ~ 15:00 Michigan Tech. 3. 분사/연소모델 예측 정확성 - 정적연소실 수소 연소압력 개발 현황 4. 분사 및 연소모델 - 연소모델 프로그램 개발 현황 15:00 ~ 15:30 HD현대인프라코어 5. 엔진 시제작 - 1차엔진 제작 개발 현황 15:30 ~ 16:00 HD현대인프라코어 6. 엔진 컨셉/상세 설계 개발 현황 16:00 ~ 16:15 전체 토의 7. (기타발표) 한국과학기술원 과제 진행 현황	AM 마이크로 슬릿 인젝터를 이용한 연료 유연형 제트 안정화 연소 시스템 강연세, Jose Basil, Fabian Hampp(University of Stuttgart) AM Space-Filling Injector Designs for Robust Partially Cracked Ammonia Turbulent Jet Combustion 안지환, Vicente Rubio, Sohan Acharya, Hans-Christian Mohring, Peter Kraus, Fabian Hampp(University of Stuttgart) 암모니아/수소 이중선회 화염 구조 분석 조서희, 이복직(서울대학교), 이기만(국립순천대학교) 한국생산기술연구원 무탄소 연료기반 산업용 연소기 개발 소개 김정현, 김대해, 이창엽(한국생산기술연구원)

15:30 ~ 16:10	[초청강연3] Low-gravity Flames in the Lab?	Prof. Yuji Nakamura(Toyohashi University of Technology)	좌장: 손채훈(세종대학교) 그랜드볼룸
16:15 ~ 16:55	[초청강연4] K-항공엔진과 한화에어로스페이스	김용련 상무(한화에어로스페이스)	좌장: 김대식(국립강릉원주대학교)
17:00 ~ 17:40	[전임회장 은퇴기념 강연] 남기고 싶은 나의 연소실험실과 COEX 36th ISOC 행사 이야기	이기만 교수(국립순천대학교)	좌장: 임성균(고려대학교)
17:40 ~ 18:00	Exhibition Networking Time - Booth Stamp Tour (로비)		
18:00 ~ 20:00	시상 및 만찬 (경주 소노캄, 그랜드볼룸)		사회: 심형섭(한국과학기술원)

11월 21일(금요일)	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
08:30 ~ 09:45 (75분)	**S-SESSION 4-1 : 힘센(HiMSEN)엔진 I** 좌장 : 이경록(HD현대중공업)	**S-SESSION 6 : 가스터빈연소** 좌장 : 김호근(두산에너빌리티)	**S-SESSION 9-1 : 내연기관 특별세션 I** 좌장 : 오세철(부산대학교)	**SESSION 4-5 : 버너/연소기 I** 좌장 : 이민정(서울과학기술대학교)	**SESSION 5-5 : 연소불안정** 좌장 : 이민우(국립한밭대학교)
	HD현대중공업의 선박/육상발전용 탄소중립연료(e-fuel) 엔진 소개 윤욱현(HD현대중공업)	두산 F급 Retrofit DART 가스터빈 연소기 부산복합 실증현황 석정민, 정대식, 김호근, 배태원, 정한진, 김홍영(두산에너빌리티)	Center-injection GDI 가시화 엔진에서 분사 패턴에 따른 촉매 가열 조건의 연소 특성 고건우, 강동우(한양대학교), 박상재, 손유상(현대자동차), 박성욱(한양대학교)	연소기 형상에 따른 암모니아-공기 예혼합화염 안정화에 대한 실험적 연구 손병우, 이민정(서울과학기술대학교)	실 엔진 형상의 Can-annular 가스터빈에서 연소기 출구 음향 경계조건 도출을 통한 음향장 모델링 정다빈, 이형주, 김대식(국립강릉원주대학교)
	해상 연료를 위한 수소의 생산, 운송 경로에 따른 Well-to-Tank 비용 및 배출량 평가: Ro-Pax 및 LH2 캐리어 사례 연구 유예진, 문세인, 김홍민, Anna Lena Keil, 송한호(서울대학교)	DGT-100 가스터빈 연소기 ASC 기술 적용에 따른 영향 정명기, 정대식, 김호근, 배태원, 정병규, 정한진, 한민석(두산에너빌리티)	1L급 FFV 엔진에서 모사합성연료와 가솔린 배출가스 특성 비교 박정현(건국대학교), 권석주, 이시원(한국자동차연구원), 윤승현(영남이공대학교), 박수한(건국대학교)	암모니아/수소 혼소 스월 연소기에서의 소염한계 및 배출 경향 분석 전호빈, 김한영, 김도연, 김경천, 오세철(부산대학교)	화염의 구조적 특성을 고려한 네트워크 모델 개선 및 검증 김주원, 국승민, 이민우(국립한밭대학교)
	선박용 암모니아 Dual-fuel 인젝터의 분무 및 연소 특성 양승호, 박성욱(한양대학교)	대형 가스터빈 수소 연소 노즐 설계 및 고압 환경에서의 혼소/전소 성능 분석 신영준, 김호근, 정대식, 배태원, 김부성(두산에너빌리티)	가솔린 직분사 엔진에서 스파크 플러그 위치가 유동 및 연소에 미치는 영향 강동우, 김남호, 고건우(한양대학교), 박상재, 손유상(현대자동차), 박성욱(한양대학교)	100 kWth 암모니아 전소 버너를 이용한 Swirl 강도에 따른 NOx 배출 특성에 대한 실험적 연구 황성환(한국생산기술연구원/성균관대학교), 이재욱(한국생산기술연구원), 심우현(한국생산기술연구원/성균관대학교), 양원(한국생산기술연구원), 권오채(성균관대학교), 채태영(한국생산기술연구원)	제어시스템 접근법 기반 가스터빈 연소기의 시간영역 열음향 모델링 정준우, 윤명근, 김대식(국립강릉원주대학교)
	힘센엔진 예연소실 냉각 성능 개선 연구 및 야드 배기관 폭발 압력 예측 모델 개발 연구 양성민, 용현진, 박일웅(인하대학교)	축방향 다단 연소 노즐 형상 및 위치 변화가 가스터빈 연소기 성능에 미치는 영향 연구 정대로, 정대식, 김호근, 신영준, 노태준(두산에너빌리티)	0D 수치 해석 모델을 이용한 천연가스-암모니아 혼소 SI 엔진의 암모니아 후분사 전략에 따른 실린더 내 DeNOx 양상에 대한 연구 김한영, 김민규, 오세철(부산대학교)	항공용 터보엔진 연소기 설계 및 해석 연구 신준수, 황동현, 홍윤기, 유경원(국방과학연구소)	화염면 감쇠 영역에서 조화 진동 V-화염의 운동학 모델링 김강환, 신동혁(한국과학기술원)
		수소 가스터빈용 H2-NG Blending System 설계 김강일, 강현복, 남삼식(두산에너빌리티)	소형 SI 암모니아 연료 엔진에서 PTJI 기반 다단점화 전략의 수치해석적 연구 주강민, 박정수(조선대학교)		축방향 다단연소 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석 권우현, 정준우, 김대식(국립강릉원주대학교)
09:55 ~ 11:10 (75분)	**S-SESSION 4-2 : 힘센(HiMSEN)엔진 II** 좌장 : 윤욱현(HD현대중공업)	**S-SESSION 7 : 송영훈 박사 퇴임기념** 좌장 : 이대훈(한국기계연구원)	**S-SESSION 9-2 : 내연기관 특별세션 II** 좌장 : 문석수(인하대학교)	**SESSION 4-6 : 버너/연소기 II** 좌장 : 최민성(국립강릉원주대학교)	**S-SESSION 13 : 다점점화(비공개)** (11:20~12:35) 좌장 : 박성욱(한양대학교)
	SCR 믹서 유동 가시화 기술 개발 김동(울산대학교)	콜드 스타트 대응을 위한 플라즈마-촉매 암모니아 분해 기술 연구 최성일, 최현식, 이대훈, 최정안(한국기계연구원)	EGR 조건에서 가솔린 직분사식 엔진의 연소성능 개선을 위한 분사전략 최적화 박재원, 이강현, 강동우, 김지수, 박성욱(한양대학교)	CFD 및 열음향 모델을 통한 수소 혼소율 및 노즐 형상 변화에 따른 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석 장재우(국립강릉원주대학교), 박소정, 윤영빈(서울대학교), 석정민(두산에너빌리티), 김대식(국립강릉원주대학교)	고 에너지 연소지연 기술적용 EGR율 향상과 연비개선 기술개발 나병철, 신윤섭(한국자동차연구원)
	암모니아 추진선 시대를 향한 준비와 전망 문건필, 김상훈, 임동국, 이익성, 강수민, 김학찬, 최용석(한국선급)	고유황 디젤 대응 플라즈마 DPF 시스템 개발 및 몽골 노후버스 적용 연구 최정안, 강홍재, 송호현, 송영훈, 이대훈(한국기계연구원)	가솔린-메탄을 혼합연료의 층류 연소 속도 및 반응 메커니즘 해석 신재훈, 류동우, 문석수(인하대학교)	연료 적용성 향상을 위한 bluff body offset 기반 전단층 형성 및 화염 안정화 특성에 관한 연구 김종현, 김민혁, 김승민, 박정수(조선대학교)	모사 EGR 조건에서 다단점화 코일의 점화 에너지량 변화가 직접 분사 불꽃 점화 엔진의 연소 특성에 미치는 영향 이강현, 이호승(한양대학교), 송영석(이림전자), 박성욱(한양대학교)
	선박용 암모니아 내연기관 실증을 위한 암모니아 연료공급시스템 육상실증설비 구축 현황 이창하, 조성규, 김유진, 정진원, 신재용, 김준배 (한국조선해양기자재연구원)	수소 열플라즈마 토치 및 이를 활용한 폐유기물 전환공정 시스템 개발에 관한 연구 송호현, 이희수, 김유나, 강홍재, 최정안, 정민호, 정찬미, 조동현, 최수빈, 이대훈, 송영훈(한국기계연구원)	가솔린-메탄을 혼합연료의 GT-Power 기반 엔진 해석을 위한 연소 모델링 방법론 검토 류동우, 신재훈(인하대학교), 이호승, 박성욱(한양대학교), 문석수(인하대학교)	벽면 열 조건에 따른 수소 혼소 스월 화염의 역화 거동 해석 최민준, 백민하(한국과학기술원), 류제일(New York University Abu Dhabi), 신동혁(한국과학기술원)	정적 연소 환경에서 EGR의 화학적 효과가 무탄소 연료의 난류 제트 점화에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구 김정현, 주강민, 박정수(조선대학교)
		NOx abatement using in-situ fuel-based reductant under rotating arc plasma condition and its applications 이희수, 김유나, 이대훈, 송영훈(한국기계연구원)	선박용 디젤 인젝터를 활용한 Ducted Fuel Injection 노즐 설계변수에 따른 분무 및 연소 특성 이호승(한양대학교), 박현춘(HD현대중공업), 박성욱(한양대학교)	고압 멀티 EV 버너에서 수소-메탄 혼소 화염 상호작용에 따른 연소 및 배출 특성 연구 이상현, 이재빈, 오정석, 장재우, 김대식(국립강릉원주대학교), 강도원, 김민국(한국기계연구원), 최민성(국립강릉원주대학교)	대체연료 내연기관용 EGR Valve 및 Cooler의 적용성 분석과 성능 향상·소재 개선 연구 김영권(㈜코렌스글로벌)
	선박용 저압 암모니아-디젤 혼소 엔진의 연소 특성 박찬수, 박철웅, 김민기, 장형준, 박경태, 김경훈(한국기계연구원)	반도체 공정 배출 PFCs 제거를 위한 플라즈마 스크러버 개발 이대훈, 최정안, 송호현, 이희수, 정민호, 조동현, 송영훈(한국기계연구원)	Borghi-Peters diagram을 통한 수소 SI엔진의 공기과잉률에 따른 난류예혼합화염 특성 분석 손종윤(충남대학교), 박원아(경성대학교), 김기연(충남대학교), 김정호, 민경덕(서울대학교), 민경욱(한국기계연구원), 이정우(충남대학교)		내연기관의 연소 효율 개선을 위한 점화 성능 증대 방안 연구 최광돈, 송영석, 이연서, 정재덕(㈜이림전자)
11:20 ~ 12:00	[초청강연6] 플라즈마 화학과 열화학의 특성 : 이론 및 응용			송영훈 박사(한국기계연구원)	좌장: 박정(국립부경대학교) 그랜드볼룸
12:00 ~ 12:40	[초청강연7] 수행한 연소 실험 공유 및 Reduced Mechanism 개발과 응용			이기용 교수(국립경국대학교)	좌장: 오길규(초당대학교)
12:40 ~ 13:40	중 식 (셰프스 키친)				
13:40 ~ 14:55 (75분)	포스터 및 가시화 사진전 (로비)				좌장 : 조은성(한화파워시스템), 주성필(국방과학연구소)

1	헬름홀츠 공명기의 최적화 검증을 위한 리케 튜브의 설계 및 제작	이재훈, 김진건, 이민우(국립한밭대학교)	2	무탄소 NH3/H2/N2 연료의 폭발특성에 관한 실험적 연구	김민규, 이기만(국립순천대학교)
3	가솔린 직분사 가시화 엔진에서 점화 직전 분사량에 따른 촉매 가열 조건의 연소 안정성과 PM 배출 특성	정천일, 고건우, 강동우(한양대학교), 박상재, 손유상(현대자동차), 박성욱(한양대학교))	4	수소 혼소율과 과잉 공기비 변화에 따른 산업용 복사관 버너의 연소 특성에 관한 수치 연구	하성봉, 안진열, 서정원, 이동규, 정다운(계명대학교), 배병윤, 권종서(플랜텍), 이광구(계명대학교)
5	니켈 촉매 기반의 메탄 수증기 개질 반응기의 실험적 성능 평가	서성민, 최병철(호서대학교)	6	제철공정 배출가스를 모사한 수소-메탄 혼합가스의 예혼합 화염 연소특성	장원석, 이서라, 이관우, 이승로(전북대학교)
7	Development of a GUI-Based Tool for Predicting Thermoacoustic Damping Characteristics of Acoustic Liners and Helmholtz	Burinthorn Suksupaet, 김대식(국립강릉원주대학교)	8	Assessment of chemical kinetic models in hydrogen direct-injection engine simulation to enhance efficiency and reduce emissions	Quangkhai Pham(건국대학교), Nguyen Ngoc Dung(University of Transport Ho Chi Minh City), 윤승현(영남이공대학교), 박수한(건국대학교)
9	메탄 스월 화염에서 산화제 조성 변화에 따른 질소산화물 저감 특성 연구	김실비아, 도형록(서울대학교)	10	수치해석을 통한 암모니아 연료의 연소 시 점화지연특성 분석	김규보, 김량균, 임호, 박영도, 김준희(포항산업과학연구원)
11	메탄-수소 역확산화염의 스월 설계변수에 따른 연소 및 배기특성	소리, 전유선(전북대학교), 금성민(한라대학교), 이승로(전북대학교)	12	메탄-암모니아 혼소 다단연소 특성 연구	조은성, 조문수, 제갈현욱, 김세미(한화파워시스템)
13	수소 및 암모니아 혼소 비율 별 점화지연기간 및 층류화염전파속도에 대한 화학반응 모델 기반 계산 분석	김나연, 손종윤, 장일품, 이정우(충남대학교), 민경욱(한국기계연구원)	14	Computational Particle Fluid Dynamics 기반 순환유동층 보일러의 암모니아 혼소에 따른 유동 특성 및 연소실 온도 평가	김서영(한국생산기술연구원/성균관대학교), 양원(한국생산기술연구원), 박문수(성균관대학교), 김성일(한국생산기술연구원)
15	사각 재생냉각 채널에서 가열 벽면 위치에 따른 JP-8의 초임계 열전달 특성에 대한 수치적 연구	고상호, 길유창, 박성우(한국항공대학교)	16	문헌에서 보고된 실험 데이터 학습 기반 머신 러닝 모델에서의 다중 회귀분석을 통한 연소 특성 예측 가능성 연구	유지호(연세대학교/한국생산기술연구원), 김동휘(한국생산기술연구원), 홍종섭(연세대학교), 이영재(한국생산기술연구원)
17	저발열량 연료 활용 순산소 버너 개발 연구	김태영(포항산업과학연구원), 안형준(포스코홀딩스), 권진규(포항산업과학연구원)	18	5kW히터를 이용한 CO2합성연료 연소특성 조사	김광영, 강병준, 하동균, 남형석(경북대학교)
19	가스터빈 연소기의 암모니아/메탄 혼소에 따른 배기배출 특성 연구	오소빈, 황인우, 장혁준, 최낙정, 한가람, 박정국(한국전력공사 전력연구원)	20	BKNO3 점화 펠렛 연소 생성물에 대한 구조 및 성분 특성 분석	안명근, 장승교(국방과학연구소)
21	(가시화사진전) Pre-detonator 내 DDT 및 데토네이션파 가시화	길유창, 박성우(한국항공대학교)			

11월 21일(금요일)	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
13:40 ~ 14:55 (75분)	**SESSION 1-7 : 점화/화학반응 I** 좌장 : 이형주(국립부경대학교)	**SESSION 2-7 : 연소해석 I** 좌장 : 채태영(한국생산기술연구원)	**SESSION 3-7 : 가스터빈** 좌장 : 박정극(한국전력공사 전력연구원)	**SESSION 4-7 : 연소시스템** 좌장 : 이후경(한국에너지기술연구원)	**SESSION 5-7 : 고체연료연소** 좌장 : 심형섭(한국과학기술원)
	스파크 간극에 따른 암모니아/공기 점화 특성 박순호(KAUST/한국기계연구원), 차민석(KAUST/한국에너지공과대학교)	3kW급 소형 연소기를 이용한 메탄-철 하이브리드 화염의 열전달 특성에 관한 실험적 연구 변창희, 채태영, 이재욱, 양원(한국생산기술연구원)	모사 가스터빈 동압 응답의 정량 분석과 스피커 특성 고려 음압가진 실험 전민재(인천대학교), 장대진(Lund university), 이민철(인천대학교)	수소 환원 제철 공정을 위한 유동 환원 반응기 내 철광석의 유동화 및 환원 특성 최형석(부산대학교), 김민우(청정화력발전에너지연구소), 전충환(부산대학교)	램제트 연소기 입구 조건에 따른 연료과농 추진제의 후퇴율 및 연소 특성에 관한 수치해석 연구 김은총, 윤린(세종대학교), 박익수, 진상욱, 김도현, 류재훈 (국방과학연구소), 심한슬(세종대학교), 심형섭(한국과학기술원)
	플라즈마 기반 메탄 변환에서 CH/CH3 라디칼의 PF-PLIF 측정 박진(한국에너지공과대학), Aswath Mohanan(KAUST), Sebastian Nilsson, Jonas Ravelid, Andreas Ehn (Lund Univesity), 차민석(한국에너지공과대학)	Ammonia Co-Firing for Power-Plant Decarbonization: Impact of Boiler Type on Combustion Characteristics and NOx Emissions Yijie Zeng, 김승모, 전충환(부산대학교)	Thermodynamic Analysis of a Hydrogen-Ammonia Fueled Gas Turbine with Integrated Ammonia Cracking Bimal Bhandari, 송정현(부산대학교), 박예슬(국립목포대학교), 최경민(부산대학교)	액체금속 반응기 기반 청록수소 생산 및 온실가스 저감을 위한 동특성 해석 최적화 연구 한건우, 최현록(한국생산기술연구원/성균관대학교), 김휘동, 이은도, 양원(한국생산기술연구원), 박문수(성균관대학교), 김성일(한국생산기술연구원)	전기제어고체추진제의 화염구조에 대한 금속 영향에의 실험적 분석 임대홍, Rajendra Rajak, 임가선, 여재익(서울대학교)
	극초음속 비행체용 재생냉각 미세채널 설계를 위한 1차원 비정상 해석 코드 개발 및 검증 이승현, 이형주(국립부경대학교)	예가열 케로신 연료 분사 스크램제트 연소기의 연소장에 대한 공동의 역할 정승민, 이경재, 이양지, 이상훈, 김보연, 양인영 (한국항공우주연구원)	다양한 압력에서 수소 가스터빈용 마이크로믹서 노즐의 NOx 배출지수에 관한 연구 이건률, 이기만(국립순천대학교)	개방형 방사 구조 버너에서 홀 구조 변화가 연소 특성에 미치는 영향 분석 공준오(국립목포대학교), 이재빈(국립강릉원주대학교), 김민준, 김이준(국립목포대학교), 최경민(부산대학교), 최민성(국립강릉원주대학교), 박예슬(국립목포대학교)	Molecular Dynamics Simulation of Thermophysical Behavior of Polymeric Solid Fuels Alqassier Abdullah Mohammad A(세종대학교), 심형섭(한국과학기술원), 홍성욱(Loyola Marymount University), 조병운, 심한슬(세종대학교)
	머신러닝을 활용한 분자동역학 기반 흡열 반응 메커니즘의 최적화 연구 최은교, 이성민(세종대학교), 심형섭(한국과학기술원)	전이 학습을 활용한 희소 데이터셋 조건에서의 대형 탄화수소 연료의 점화 현상 예측 박해람, 정기성(국립부경대학교)	암모니아 전소 가스터빈 연소기의 연료분배비에 따른 연소특성 연구 황인우, 오소빈, 장혁준, 최낙정, 한가람, 박정극 (한국전력공사 전력연구원)	0.7 ton/h 연속식 강판 소둔로의 연소/전기 가열 방식에 따른 열적 특성 분석 이후경(한국에너지기술연구원/과학기술연합대학원대학교), 정우남(한국에너지기술연구원/한국과학기술원), 이대근, 이은경, 고창복(한국에너지기술연구원)	암모니아 전소 보일러에의 철 연소 적용을 위한 1-D 해석 모델 연구 배영(한국생산기술연구원/고려대학교), 김성일, 양원(한국생산기술연구원), 박기범, 류창국(성균관대학교), 임성균(고려대학교)
	초임계 n-dodecane의 재생냉각 미세채널 내부 흡열분해 특성 전산해석 이민서, 이형주(국립부경대학교)	Numerical study on the Evaporation and Combustion of a Two-Component Diesel Surrogate Droplet Surya Balusamy, 이기용(국립경국대학교)		무탄소 연료 혼소에 따른 산업용 보일러 열 성능 평가 안종환, 최현록(한국생산기술연구원/성균관대학교), 양원(한국생산기술연구원), 류창국(성균관대학교), 김성일(한국생산기술연구원)	금속화 고체추진제 연소 표면 상의 응집체 모델링 최홍석, 여재익(서울대학교)
15:05 ~ 16:20 (75분)	**SESSION 1-8 : 점화/화학반응 II** 좌장 : 박성우(한국항공대학교)	**SESSION 2-8 : 연소해석 II** 좌장 : 정기성(국립부경대학교)	**SESSION 3-8 : 연소응용** 좌장 : 김민국(한국기계연구원)	**SESSION 4-8 : 화재(Fire)** 좌장 : 윤성환(국립한국해양대학교)	
	Pre-detonator 내 DDT에 대한 실험적 연구 길유창, 박성우(한국항공대학교)	다중 충실도 모델을 활용한 화학 반응기 네트워크의 성능 향상 방법론 연구 서준석(국립부경대학교), 모현수, 유춘상(울산과학기술원), 정기성(국립부경대학교)	모델 연소기 내 승압 및 승온 조건에서의 암모니아-수소/공기 제트화염의 연소특성 연구 김주한, 김재현, 김태원, 권오채(성균관대학교)	DC 전기장 인가 하의 단열재 화재에서 연기 제어 및 연소 지속 시간 단축에 관한 실험적 분석 김준석, 김수현(국립한국해양대학교), 김양균(한국건설기술연구원), 박대근(한국생산기술연구원), Hui Yan(Chongqing University of Science and Technology), 윤성환(국립한국해양대학교)	
	저압에서 DTBP와 CHP 첨가제가 연료의 점화지연에 미치는 효과 성지환(세종대학교), 최호진, 박동창(국방과학연구소), 손채훈(세종대학교)	데이터 증강 물리정보신경연산자를 활용한 연소 예측 연구 조준형, 이동훈(일리노이대학교), 유지형(한양대학교)	이벤트 카메라 기반 화염 시각화 및 주파수에 대한 연구 박건호, 이민정(서울과학기술대학교)	배터리 열폭주 및 화재 확산 차단을 위한 질산리튬 기반 용융염 상변화 열 차폐재 최재연, 박민홍, 여재익(서울대학교)	
	리튬이온 배터리의 극고온 열화 거동에 관한 실험적 연구 장채윤, Pragya B. Singh, Ayushi Mehrotra, 여재익(서울대학교)	화학 반응 분석을 통한 CH4/NH3 혼소 조건에서 주요 반응 및 배출 특성에 관한 연구 김민혁, 김종현, 김승민, 박정수(조선대학교)	과도 운전 조건에서 수소 혼소 가스터빈 캔 연소기의 역화 억제 제어 기법에 관한 연구 이원준, 황정재, 강도원, 민경욱, 김재현, 박순호, 최승규, 김민국 (한국기계연구원)	AC 전기장이 인가된 니켈크롬 와이어에 매달린 에탄올 액적의 연소 특성 김승현(울산과학기술연구원), 박정(국립부경대학교), 정석호(KAUST), 유춘상(울산과학기술연구원)	
	암모니아 크래킹 가스의 잔류 암모니아 농도에 따른 NOx 배출 특성 박진현, 이민정(서울과학기술대학교)	시간 의존 기저 기반 차원축소모델을 활용한 연소 해석 매개변수 연구에서의 유사성 활용 이준형, 김재중(울산과학기술원), Cristian E. Lacey (Sandia National Laboratories), 정기성(국립부경대학교), Jacqueline H. Chen(Sandia National Laboratories), 유춘상(울산과학기술원)	오픈소스 CFD 플랫폼에서의 LHHW 표면 반응 프레임워크 개발: 증기 메탄 개질 이재훈, Danh Nam Nguyen(울산과학기술원), 서해원, 안형준(포스코홀딩스), 유춘상(울산과학기술원)	정립 및 도립 조건에서 18650 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘 비교 실험 성승현, 박주원(국립한국해양대학교), 박대근(한국생산기술연구원), 윤성환(국립한국해양대학교)	
	대체연료 구성 화학종에 따른 연료 자발화 점화 지연 특성 연구 민경욱, 김민국, 황정재, 이원준, 박순호(한국기계연구원), 이정우, 손종윤, 김나연(충남대학교)	DC 전기장이 인가된 니켈크롬 와이어 위의 액적 연소의 동적 거동에 대한 연구 정윤환(국립부경대학교), 김승현(울산과학기술원), 이원준(한국기계연구원), 유춘상(울산과학기술원), 박정(국립부경대학교), 정석호(KAUST)	모델 연소기 내 2차 공기 주입에 따른 암모니아-수소/공기 스월 예혼합화염의 연소특성 연구 김태원, 김재현, 김주한, 권오채(성균관대학교)		

11월 22일(토요일)	산학연 패널 토론	좌장: 여재익(서울대학교)

학 회 장 | 여재익(서울대학교) **조직위원장 |** 박성욱(한양대학교) **조 직 위 원 |** 김대식(국립강릉원주대학교), 박수한(건국대학교), 심형섭(한국과학기술원)

후 원 사 | Hanwha Aerospace HD현대중공업 KOMI KOREA OPTICAL METROLOGY INDUSTRY DOOSAN 두산에너빌리티 CATech Clean Air Technology

진행 일정

일시 _ 2025년 11월 19일(수)~22일(토)
장소 _ 경주 소노캄

11월 19일(수요일)					
Room	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
15:30~16:45 (75분)	S-SESSION 1 : 철강분야 탄소중립을 위한 무탄소 연료전환 및 에너지 효율향상 기술개발 (비공개) 좌장 : 채민석	SESSION 2-1 : 석탄연소 좌장 : 양원	SESSION 3-1 : 공해물질 I 좌장 : 김성일	S-SESSION 10 : IEA-AMF 특별세션 좌장 : 박수한	SESSION 5-1 : 층류화염 좌장 : 신동혁

11월 20일(목요일)					
Room	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
09:00~10:15 (75분)	S-SESSION 2 : NCC 공정 열공급을 위한 무탄소 연소기술 좌장 : 이민정	SESSION 2-2 : 난류화염 좌장 : 정기성	SESSION 3-2 : 공해물질 II 좌장 : 이영재	S-SESSION 11-1 : 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 워크숍(비공개) (09:00~12:30) 좌장 : 정재우	SESSION 5-2 : 기초화염 좌장 : 황정재
10:25~10:55	[초청강연1] 힘센엔진 e-Fuel 플랫폼 개발 안성찬 상무(HD현대중공업 엔진기계사업부 엔진연구소) 좌장 : 박성욱				
11:00~11:30	[초청강연2] 국내 자동차 배출가스 관리정책 현황 및 성과, 그리고 향후 과제 박준홍 센터장(국립환경과학원 모빌리티환경연구센터) 좌장 : 박성욱				
11:30~12:55	2025년도 제 5 회 정기 이사회 (소담) + 일반 참석자 중식 (셰프스 키친)				

11월 20일(목요일)					
Room	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
12:55~14:10 (75분)	S-SESSION 3 : Carbon Neutral Fuel 2025 (3rd International Symposium on CNF Technology) (12:30~15:25)	S-SESSION 5-1 : International Session for Young Combustion Engineers I 좌장 : 심형섭	S-SESSION 8-1 : [산학연계] 첨단 항공 엔진 연소기/ 후기연소기 개발 현황 I (한화에어로스페이스) 좌장 : 이동곤	S-SESSION 11-1 : 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 워크숍(비공개) (09:00~12:30) 좌장 : 정재우	S-SESSION 12-1 : 이기만 교수 퇴임기념 I 좌장 : 이창엽
14:20~15:20 (60분)	Chair : Choongsik Bae	S-SESSION 5-2 : International Session for Young Combustion Engineers II 좌장 : 이형주	S-SESSION 8-2 : [산학연계] 첨단 항공 엔진 연소기/ 후기연소기 개발 현황 II (한화에어로스페이스) 좌장 : 이동곤	S-SESSION 11-2 : Heavy-duty 11L급 직분식 수소엔진 개발기술 자문단 평가 (비공개) (14:00~16:15)	S-SESSION 12-2 : 이기만 교수 퇴임기념 II 좌장 : 김호근
15:30~16:10	[초청강연3] Low-gravity Flames in the Lab? Prof. Yuji Nakamura(Toyohashi University of Technology) 좌장 : 손채훈				
16:15~16:55	[초청강연4] K-항공엔진과 한화에어로스페이스 김용련 상무(한화에어로스페이스) 좌장 : 김대식				
17:00~17:40	[전임회장 은퇴기념 강연] 남기고 싶은 나의 연소실험실과 COEX 36th ISOC 행사 이야기 이기만 교수(국립순천대학교) 좌장 : 임성균				
17:40~18:00	Exhibition Networking Time - Booth Stamp Tour (로비)				
18:00~20:00	시상 및 만찬 (경주 소노캄, 그랜드볼룸) 사회 : 심형섭				

11월 21일(금요일)					
Room	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (에메랄드 I)	제 3 발표장 (에메랄드 II)	제 4 발표장 (사파이어 I)	제 5 발표장 (사파이어 II)
08:30~09:45 (75분)	S-SESSION 4-1 : 힘센(HiMSEN)엔진 I 좌장 : 이경록	S-SESSION 6 : 가스터빈연소 좌장 : 김호근	S-SESSION 9-1 : 내연기관 특별세션 I 좌장 : 오세철	SESSION 4-5 : 버너/연소기 I 좌장 : 이민정	SESSION 5-5 : 연소불안정 좌장 : 이민우
09:55~11:10 (75분)	S-SESSION 4-2 : 힘센(HiMSEN)엔진 II 좌장 : 윤욱현	S-SESSION 7 : 송영훈 박사 퇴임기념 좌장 : 이대훈	S-SESSION 9-2 : 내연기관 특별세션 II 좌장 : 문석수	SESSION 4-6 : 버너/연소기 II 좌장 : 최민성	S-SESSION 13 : 다점점화(비공개) (11:20~12:35) 좌장 : 박성욱
11:20~12:00	[초청강연6] 플라즈마 화학과 열화학의 특성 : 이론 및 응용 송영훈 박사(한국기계연구원) 좌장 : 박정				
12:00~12:40	[초청강연7] 수행한 연소 실험 공유 및 Reduced Mechanism 개발과 응용 이기용 교수(국립경국대학교) 좌장 : 오길규				
12:40~13:40	중 식 (셰프스 키친)				
13:40~14:55 (75분)	SESSION 1-7 : 점화/화학반응 I 좌장 : 이형주	SESSION 2-7 : 연소해석 I 좌장 : 채태영	SESSION 3-7 : 가스터빈 좌장 : 박정극	SESSION 4-7 : 연소시스템 좌장 : 이후경	SESSION 5-7 : 고체연료연소 좌장 : 심형섭
15:05~16:20 (75분)	SESSION 1-8 : 점화/화학반응 II 좌장 : 박성우	SESSION 2-8 : 연소해석 II 좌장 : 정기성	SESSION 3-8 : 연소응용 좌장 : 김민국	SESSION 4-8 : 화재(Fire) 좌장 : 윤성환	
Room	로비				
13:40~14:55 (75분)	포스터 및 가시화 사진전 좌장 : 조은성, 주성필				

11월 22일(토요일)
산학연 패널 토론 좌장 : 여재익

Special Session

일시 _ 2025년 11월 19일(수)
장소 _ 제 1 발표장

S-Session 1 철강분야 탄소중립을 위한 무탄소 연료전환 및 에너지 효율향상 기술개발(비공개) 15:30~16:45

좌장 : 채민석(세아창원특수강)

SS1-01	40만Nm^3/hr급 수소예열 엔지니어링 기술 개발 - 윤시경(포스코)
SS1-02	상용운전조건에서 수소연소기 Nox저감 제어방안 연구 - 김우형(한국내화)
SS1-03	Ladle Preheater용 무탄소 연소기 개발 - 성택진(SAC)
SS1-04	저NOx 암모니아 전소 복사관 연소기 개발 - 곽영태(한국에너지기술연구원)
SS1-05	가열로 열회수장치 설계 방법론 - 권진규(포항산업과학연구원)
SS1-06	3MW급 연소버너 설계/제조 및 실증 기술개발 - 권진규(포항산업과학연구원)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 19일(수)
장소 _ 제 2 발표장

Session 2-1 석탄연소 15:30~16:45 좌장 : 양원(한국생산기술연구원)

S2-1-01	무탄소 발전을 위한 미분탄-암모니아 혼소 시 바이오매스 적용성 연구 - 김태윤, 이지환, 문형빈, 이윤재, 홍덕(부산대학교), 김승모(청정화력발전에너지연구소), 전충환(부산대학교)
S2-1-02	Pilot-scale 단일버너 연소 시스템에서의 석탄/암모니아 혼소 특성 분석: 공기단계 연소 및 석탄 등급에 따른 영향 - 심우현, 황성환(한국생산기술연구원/성균관대학교), 이재욱, 변창희, 이재호, 양원, 채태영(한국생산기술연구원), 류창국(성균관대학교)
S2-1-03	미분탄-암모니아 혼소 버너의 부하 변화 시 스월 구조에 따른 화염 안정성 평가 - 최진헌(한국에너지기술연구원/고려대학교), 정재원(고려대학교), 이후경(한국에너지기술연구원/과학기술연합대학원대학교)
S2-1-04	전산해석 기반 암모니아-미분탄 혼소 버너의 화염 형태 최적화 - 장윤창, 강우석, 하선교(성균관대학교), 정시율, 김동선, 정재헌(BHI), 류창국(성균관대학교)
S2-1-05	순환유동층 보일러용 암모니아 버너 개발 현황 - 김규종, 김범종, 이경래(현대중공업파워시스템), 김동원, 박지훈(한국전력공사 전력연구원), 채태영, 양원, 이재욱(한국생산기술연구원), 문태영, 박성진(한국에너지기술연구원)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 19일(수)
장소 _ 제 3 발표장

Session 3-1 공해물질 I 15:30~16:45 좌장 : 김성일(한국생산기술연구원)

S3-1-01	NO_x-O_3 반응의 실시간 분광 진단 및 N_2O_5 생성 메커니즘 검증 - 박진수, 손창우, 강우린, 박문수(성균관대학교)
S3-1-02	열분해 기반 수소 생산과 청정 연소로의 활용 연구 - 유지호(한국생산기술연구원/연세대학교), 이은지(한국생산기술연구원/과학기술연합대학원), 이승현, 김성일(한국생산기술연구원/고려대학교), 엄현진, 김휘동(한국생산기술연구원), 이은도, 양원(한국생산기술연구원/과학기술연합대학원), 이영재(한국생산기술연구원)
S3-1-03	수소 혼소용 이중선회 인젝터의 화염구조와 NOx 배출특성에 관한 실험적 연구 - 홍준표, 이기만(국립순천대학교)
S3-1-04	중형 폐기물 소각로의 SNCR 제어 효율 향상을 위한 AI기반 적응형 요소수 분사 기술 개발 - 박성민, 김희윤(성균관대학교), 신동민, 이재호, 손지훈(SK에코플랜트), 류창국(성균관대학교)
S3-1-05	무화염 연소열 기반 수소화합물 직접 열분해에 관한 연구 - 유지호(연세대학교/한국생산기술연구원), 홍종섭(연세대학교), 김성일(한국생산기술연구원/과학기술연합대학원), 이영재(한국생산기술연구원)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 19일(수)
장소 _ 제 4 발표장

S-Session 10	IEA-AMF 특별세션 15:30~16:45 좌장 : 박수한(건국대학교)
SS10-01	IEA-AMF 개요 및 활동 보고 - 박수한(건국대학교)
SS10-02	수소 건설기계 개발 및 기술 동향 - 김준석(한국건설기계연구원)
SS10-03	발전분야 탄소중립을 위한 수소터빈의 역할 - 김대식(국립강릉원주대학교)
SS10-04	무탄소 연료 연소 기술 동향 - 박철웅(한국기계연구원)
SS10-05	메탄올과 암모니아의 착화 및 연소 특성 비교 - 박성욱(한양대학교)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 19일(수)
장소 _ 제 5 발표장

Session 5-1	층류화염 15:30~16:45 좌장 : 신동혁(한국과학기술원)
S5-1-01	반경 단차 원판 연소기 (RSDB: Radial-Stepwise-Disk-Burner)를 이용한 예혼합화염의 불안정성과 화염전파특성 연구 - 한종호, 김남일(한국과학기술원)
S5-1-02	층류 확산 화염 내 산소 부화 조건에서 암모니아/코크스 가스 혼소에 대한 실험 및 수치해석 연구 - 정형빈, 구민종, 김경호, 이병화, 전충환(부산대학교)
S5-1-03	연료 밀도에 의한 부력 효과가 제트 확산화염 프리커링 거동에 미치는 영향 - 강성종(울산과학기술원), 박정(국립부경대학교), 이원준(한국기계연구원), 정석호(KAUST), 유춘상(울산과학기술원)
S5-1-04	전기장 인가에 따른 예혼합 수소-프로판 화염의 연소 불안정성 변화 - 최준혁, 김태훈, 김혜민(국립한국교통대학교)
S5-1-05	Self-attention Based Prediction of Velocity Fields in 2D Laminar Oscillating Flames - Mert Yakup Baykan, Kanghwan Kim, Dong-hyuk Shin(KAIST)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 1 발표장

S-Session 2	NCC 공정 열공급을 위한 무탄소 연소기술 09:00~10:15 좌장 : 이민정(서울과학기술대학교)
SS2-01	NCC 공정 무탄소 연료 전환 기술 동향 - 이민정(서울과학기술대학교)
SS2-02	납사 크래킹 공정의 무탄소 연료 전환을 위한 벽면 복사 버너 설계 연구 - 김희윤, 하정우, 박지연, 유미연, 김대해, 이창엽(한국생산기술연구원)
SS2-03	천연가스/수소 비율이 파일럿 버너의 화염 특성에 미치는 영향 - 김인수, 노동순, 오정석, 이창희(㈜세화이앤씨)
SS2-04	무탄소 연료 부분 예혼합 화염 연소 특성 및 총괄 반응 메커니즘 개발 - 전동석, 김세훈, 김남일(한국과학기술원)
SS2-05	멀티스케일 접근을 통한 연소 반응의 이해 및 응용 - 권형욱(서울과학기술대학교)

S-Session 3	Carbon Neutral Fuel 2025 (3rd International Symposium on CNF Technology) 12:30~15:25 좌장 : Choongsik Bae(KAIST)
SS3-01	Carbon Neutrality Scenario of IEA and Automotive E-fuel Engine Development - Choongsik Bae(KAIST)
SS3-02	Variety of e-fuels and its global trend of R&D - Noboru Uchida(New Ace, Japan)
SS3-03	E-methanol application to Transportation in China - Haifeng Liu(Tianjin University, China)
SS3-04	Green Methanol Production Technology - Ki-Won Jun(Gas Entec)
SS3-05	SAF (Sustainable Air Fuel) Production and Supply - Jongik Yoo(Solutiscnt)
SS3-06	e-Fuel Production via Fischer-Tropsch Synthesis - Dong Hyun Chun(KIER)
SS3-07	Carbon-Neutral Fuel for Gas Turbine - Daero Joung(Doosan Enerbility)

Oral Session / Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 2 발표장

Session 2-2 난류화염 09:00~10:15 좌장 : 정기성(국립부경대학교)

S2-2-01	이중선회 인젝터 내 메탄/수소 화염의 형상과 재부착 거동에 관한 연구 - 김진성, 이기만(국립순천대학교)
S2-2-02	인공신경망과 대표 화학종 그룹을 활용한 다차원 난류 반응 유동 계산 가속화 연구 - 류병완, 정기성(국립부경대학교), 김경택(포스코홀딩스)
S2-2-03	1000 MWe급 대향류 보일러의 당량비 및 크래킹에 따른 암모니아 전소 성능 평가 - 박기범, 강우석, 하선교, 이정호, 이성재, 류창국(성균관대학교)
S2-2-04	이중 선회 인젝터에서 파일럿 노즐 구성이 난류 화염 특성에 미치는 영향 - 김인호, 이기만(국립순천대학교)
S2-2-05	반응성 유동용 차원축소모델에서 주성분 분석이 미치는 영향에 대한 매개변수 연구 - 손경호, 박해람, 정기성(국립부경대학교)

S-Session 5-1 International Session for Young Combustion Engineers I 12:55~14:10
좌장 : 심형섭(한국과학기술원)

SS5-1-01	Effects of secondary air on turbulent premixed partially cracked ammonia combustion in a two-stage swirl burner - Jinzhou Li, Peng Ma, Samir Boset Rojas Chavez, Surendra Kumar Soni, Shumeng Xie, Huangwei Zhang(National University of Singapore)
SS5-1-02	Linear stability characteristics of laminar planar premixed ammonia flames supported by nitrous oxide - Shumeng Xie, Huangwei Zhang(National University of Singapore)
SS5-1-03	Extinction Characteristics of NH_3/ NO–Air Combustion in a Counterflow Diffusion Configuration - Xuren Zhu, Shumeng Xie, Huangwei Zhang(National University of Singapore)
SS5-1-04	Electrochemical screening of pyroelectric solid propellants - Rajendra Rajak, Daehong Lim, Jia Xuan Lim(Seoul National University), Gnanaprakash Kanagaraj(IIT Hyderabad), Jai-Ick Yoh(Seoul National University)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 2 발표장

S-Session 5-2	International Session for Young Combustion Engineers II 14:20~15:20 좌장 : 이형주(국립부경대학교)
SS5-2-01	Compact cyclohexane kinetic mechanism for predicting aromatics and soot formation in non-premixed flames: A CFD approach - Anurag Dahiya, Meng-Syun, Kuang C. Lin(National Tsing Hua University)
SS5-2-02	Hydrogen-Assisted Reduction of Combusted Iron Particles in a Micro-Fluidized Bed - Yu-Ming Chuang, Dong-En Wu, Chao-Wei Huang(National Cheng Kung University)
SS5-2-03	Combustion Behaviour of Electrophoretically Assembled Al/CuO Nanothermite Meshes Containing Triphenylphosphine-Coated Aluminium Nanoparticles - Ying-Shuo Cheng, Xin-Rong Lu, Chao-Wei Huang, Ming-Hsun Wu(National Cheng Kung University)
SS5-2-04	Investigating Thermal Runaway in Lithium-ion Batteries for Aerospace Mobility Applications - Ayushi Mehrotra, Pragya Berwal, Yejun Lee, Jack J. Yoh (Seoul National University)

Oral Session / Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 3 발표장

Session 3-2 공해물질 II 09:00~10:15 좌장 : 이영재(한국생산기술연구원)

S3-2-01	용융 금속과의 다단 열분해 반응을 통한 플라스틱의 수소로의 전환에 관한 연구 - 이은지, 양원(과학기술연합대학원대학교/한국생산기술연구원), 엄현진, 이영재(한국생산기술연구원)
S3-2-02	수소 MILD 연소에서 vitiated gas 조건에 따른 화염 거동 및 NOx 배출 실험적 연구 - 이기현, 이기만(국립순천대학교)
S3-2-03	CFD-ERN 결합 해석을 통한 항공용 가스터빈엔진의 배출가스 농도 변화 연구 - 오길규(초당대학교), 이기용(국립경국대학교)
S3-2-04	Alkane 연료의 Soot 발생에 관한 실험적 연구 - 강예진, 권회원, 성지환, 한가람, 손채훈(세종대학교)
S3-2-05	PFR 모델을 활용한 기체상 탄화수소의 열분해에 대한 수치해석 검증 및 분석에 관한 연구 - 이승현(고려대학교/한국생산기술연구원), 임성균(고려대학교), 엄현진, 이영재(한국생산기술연구원)

S-Session 8-1 [산학연계] 첨단 항공 엔진 연소기/후기연소기 개발 현황 I (한화에어로스페이스) 12:55~14:10
좌장 : 이동곤(한화에어로스페이스)

SS8-1-01	첨단 항공엔진 개발전략 - 김종호(한화에어로스페이스)
SS8-1-02	첨단 항공엔진 연소기 개념설계 - 곽상혁(한화에어로스페이스)
SS8-1-03	첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 라이너 EFA 및 냉각 시험 평가 - 조형희(연세대학교)
SS8-1-04	첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 Heat Transfer 통합 Flow Network 모델 개발 - 송한호(서울대학교)
SS8-1-05	첨단 항공엔진 인력 확보 방안 - 석예담(한화에어로스페이스)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 3 발표장

S-Session 8-2 [산학연계] 첨단 항공 엔진 연소기/후기연소기 개발 현황 II (한화에어로스페이스) 14:20~15:20

좌장 : 이동곤(한화에어로스페이스)

SS8-2-01	첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 화염 구조 시험 평가 - 도형록(서울대학교)
SS8-2-02	첨단 항공엔진 연소기 개발을 위한 고신뢰성 액체 연소 해석 체계 구축 - 이복직(서울대학교)
SS8-2-03	첨단 항공엔진 후기연소기 개념설계 - 진욱화(한화에어로스페이스)
SS8-2-04	첨단 항공엔진 후기연소기 개발을 위한 연소불안정 계측 및 저감방안 연구 - 김규태(한국과학기술원)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 4 발표장

S-Session 11-1 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 워크숍(비공개) 09:00~12:30

좌장 : 정재우(한국자동차연구원)

SS11-1-01	소형 수소엔진 시스템 성능 최적화에 관한 연구 - 정재우(한국자동차연구원)
SS11-1-02	무탄소 수소엔진 NOx 정화 저온활성 복합촉매시스템 개발 - 이경석(한국자동차연구원)
SS11-1-03	최종 수소 엔진형상 DB 구축 및 고도화된 해석모델 개발 - 정연식(테너지)
SS11-1-04	3D 수치해석에 기반한 1D 수소 연소 모델 개발 및 검증에 관한 연구 - 라영철(Michigan Tech.)
SS11-1-05	수소 혼합과정이 성층 연소 특성에 미치는 영향에 관한 연구 - 배충식(한국과학기술원)
SS11-1-06	수소분사 계측기술 고도화 및 통합 예측모델 구축 - 문석수(인하대학교)
SS11-1-07	수소 엔진의 연소실 형상에 따른 연소 속도에 관한 연구 - 민경덕(서울대학교)
SS11-1-08	내연기관에서 수소 연료의 자발화 기반 연소 특성에 관한 연구 - 이정우(충남대학교)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 4 발표장

S-Session 11-2	Heavy-duty 11L급 직분식 수소엔진 개발기술 자문단 평가(비공개) 14:00~16:15
SS11-2-01	후처리평가용 실도로 DB 기반 엔진시험모드 개발 현황 - 한국자동차연구원
SS11-2-02	후처리장치 - 실물 scale up 개발 현황 - 한국자동차연구원
SS11-2-03	분사/연소모델 예측 정확성 - 정적연소실 수소연소압력 개발 현황 - Michigan Tech.
SS11-2-04	분사 및 연소모델 - 연소모델 프로그램 개발 현황 - Michigan Tech.
SS11-2-05	엔진 시제작 - 1차엔진 제작 개발 현황 - HD현대인프라코어
SS11-2-06	엔진 컨셉/상세 설계 개발 현황 - HD현대인프라코어
SS11-2-07	(기타발표) 한국과학기술원 과제 진행 현황 - 한국과학기술원

Oral Session / Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 5 발표장

Session 5-2 기초화염 09:00~10:15 좌장 : 황정재(한국기계연구원)

S5-2-01	가스터빈 단일 버너의 암모니아 크래킹 모사 연료 연소 특성 - 황정재, 김민국, 강도원, 이원준, 민경욱, 김재현, 박순호, 조주형(한국기계연구원)
S5-2-02	수소-메탄 연료의 가스 터빈 노즐에서의 예혼합 연소 특성 연구 - 황하람, 장원석, 김성엽(전북대학교), 김호근(두산에너빌리티), 이승로(전북대학교)
S5-2-03	CH_4-H_2 화염의 NOx 생성 메커니즘 및 배출량 비교 - 박영준, 박태준, 염상윤, 이창언(인하대학교)

S-Session 12-1 이기만 교수 퇴임기념 I 12:55~14:10 좌장 : 이창엽(한국생산기술연구원)

SS12-1-01	산업용 가스연소기에서 사용하는 저녹스연소 기술과 수소연소 적용에 대한 고찰 - 박주용, 박재언(㈜수국)
SS12-1-02	소형 수소 가스터빈 개발 현황 - 정병규, 최인찬, 한민석, 정대로, 배태원, 정대석(두산에너빌리티)
SS12-1-03	두산에너빌리티 발전용 및 항공용 가스터빈 개발 현황 - 한민석, 최인찬, 정병규, 강기중, 이동훈, 정대석(두산에너빌리티)
SS12-1-04	수소 혼소율에 따른 한국형 도시가스의 호환성 판정에 관한 연구 - 박태준, 이창언(인하대학교)
SS12-1-05	수소충전소 밸브 시험 및 충전소 성능평가 - 심근선(한국가스안전공사)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 20일(목)
장소 _ 제 5 발표장

S-Session 12-2 이기만 교수 퇴임기념 II 14:20~15:20 좌장 : 김호근(두산에너빌리티)

SS12-2-01	AM 마이크로 슬릿 인젝터를 이용한 연료 유연형 제트 안정화 연소 시스템 - 강연세, Jose Basil, Fabian Hampp(University of Stuttgart)
SS12-2-02	AM Space-Filling Injector Designs for Robust Partially Cracked Ammonia Turbulent Jet Combustion - 안지환, Vicente Rubio, Sohan Acharya, Hans-Christian Mohring, Peter Kraus, Fabian Hampp(University of Stuttgart)
SS12-2-03	암모니아/수소 이중선회 화염 구조 분석 - 조서희, 이복직(서울대학교), 이기만(국립순천대학교)
SS12-2-04	한국생산기술연구원 무탄소 연료기반 산업용 연소기 개발 소개 - 김정현, 김대해, 이창엽(한국생산기술연구원)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 1 발표장

S-Session 4-1 힘센(HiMSEN)엔진 I 08:30~09:45 좌장 : 이경록(HD현대중공업)

SS4-1-01	HD현대중공업의 선박/육상발전용 탄소중립연료(e-fuel) 엔진 소개 - 윤욱현(HD현대중공업)
SS4-1-02	해상 연료를 위한 수소의 생산, 운송 경로에 따른 Well-to-Tank 비용 및 배출량 평가: Ro-Pax 및 LH2 캐리어 사례 연구 - 유예진, 문세인, 김홍민, Anna Lena Keil, 송한호(서울대학교)
SS4-1-03	선박용 암모니아 Dual-fuel 인젝터의 분무 및 연소 특성 - 양승호, 박성욱(한양대학교)
SS4-1-04	힘센엔진 예연소실 냉각 성능 개선 연구 및 야드 배기관 폭발 압력 예측 모델 개발 연구 - 양성민, 용현진, 박일웅(인하대학교)

S-Session 4-2 힘센(HiMSEN)엔진 II 09:55~11:10 좌장 : 윤욱현(HD현대중공업)

SS4-2-01	SCR 믹서 유동 가시화 기술 개발 - 김동(울산대학교)
SS4-2-02	암모니아 추진선 시대를 향한 준비와 전망 - 문건필, 김상훈, 임동국, 이익성, 강수민, 김학찬, 최용석(한국선급)
SS4-2-03	선박용 암모니아 내연기관 실증을 위한 암모니아 연료공급시스템 육상실증설비 구축 현황 - 이창하, 조성규, 김유진, 정진원, 신재웅, 김준배(한국조선해양기자재연구원)
SS4-2-04	선박용 저압 암모니아-디젤 혼소 엔진의 연소 특성 - 박찬수, 박철웅, 김민기, 장형준, 박경태, 김경훈(한국기계연구원)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 1 발표장

Session 1-7	점화/화학반응 I 13:40~14:55 좌장 : 이형주(국립부경대학교)
S1-7-01	스파크 간극에 따른 암모니아/공기 점화 특성 - 박순호(KAUST/한국기계연구원), 차민석(KAUST/한국에너지공과대학교)
S1-7-02	플라즈마 기반 메탄 변환에서 CH/CH3 라디칼의 PF-PLIF 측정 - 박진(한국에너지공과대학), Aswath Mohanan(KAUST), Sebastian Nilsson, Jonas Ravelid, Andreas Ehn(Lund Univesity), 차민석(한국에너지공과대학)
S1-7-03	극초음속 비행체용 재생냉각 미세채널 설계를 위한 1차원 비정상 해석 코드 개발 및 검증 - 이승현, 이형주(국립부경대학교)
S1-7-04	머신러닝을 활용한 분자동역학 기반 흡열 반응 메커니즘의 최적화 연구 - 최은교, 이성민(세종대학교), 심형섭(한국과학기술원)
S1-7-05	초임계 n-dodecane의 재생냉각 미세채널 내부 흡열분해 특성 전산해석 - 이민서, 이형주(국립부경대학교)

Session 1-8	점화/화학반응 II 15:05~16:20 좌장 : 박성우(한국항공대학교)
S1-8-01	Pre-detonator 내 DDT에 대한 실험적 연구 - 길유창, 박성우(한국항공대학교)
S1-8-02	저압에서 DTBP와 CHP 첨가제가 연료의 점화지연에 미치는 효과 - 성지환(세종대학교), 최호진, 박동창(국방과학연구소), 손채훈(세종대학교)
S1-8-03	리튬이온 배터리의 극고온 열화 거동에 관한 실험적 연구 - 장채윤, Pragya B. Singh, Ayushi Mehrotra, 여재익(서울대학교)
S1-8-04	암모니아 크래킹 가스의 잔류 암모니아 농도에 따른 NOx 배출 특성 - 박진현, 이민정(서울과학기술대학교)
S1-8-05	대체연료 구성 화학종에 따른 연료 자발화 점화 지연 특성 연구 - 민경욱, 김민국, 황정재, 이원준, 박순호(한국기계연구원), 이정우, 손종윤, 김나연(충남대학교)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 2 발표장

S-Session 6 가스터빈연소 08:30~09:45 좌장 : 김호근(두산에너빌리티)

SS6-01	두산 F급 Retrofit DART 가스터빈 연소기 부산복합 실증현황 - 석정민, 정대석, 김호근, 배태원, 정한진, 김홍영(두산에너빌리티)
SS6-02	DGT-100 가스터빈 연소기 ASC 기술 적용에 따른 영향 - 정명기, 정대석, 김호근, 배태원, 정병규, 정한진, 한민석(두산에너빌리티)
SS6-03	대형 가스터빈 수소 연소 노즐 설계 및 고압 환경에서의 혼소/전소 성능 분석 - 신영준, 김호근, 정대석, 배태원, 김부성(두산에너빌리티)
SS6-04	축방향 다단 연소 노즐 형상 및 위치 변화가 가스터빈 연소기 성능에 미치는 영향 연구 - 정대로, 정대석, 김호근, 신영준, 노태준(두산에너빌리티)
SS6-05	수소 가스터빈용 H2-NG Blending System 설계 - 김강일, 강현복, 남삼식(두산에너빌리티)

S-Session 7 송영훈 박사 퇴임기념 09:55~11:10 좌장 : 이대훈(한국기계연구원)

SS7-01	콜드 스타트 대응을 위한 플라즈마-촉매 암모니아 분해 기술 연구 - 최성일, 최현식, 이대훈, 최정안(한국기계연구원)
SS7-02	고유황 디젤 대응 플라즈마 DPF 시스템 개발 및 몽골 노후버스 적용 연구 - 최정안, 강홍재, 송호현, 송영훈, 이대훈(한국기계연구원)
SS7-03	수소 열플라즈마 토치 및 이를 활용한 폐유기물 전환공정 시스템 개발에 관한 연구 - 송호현, 이희수, 김유나, 강홍재, 최정안, 정민호, 정찬미, 조동현, 최수빈, 이대훈, 송영훈(한국기계연구원)
SS7-04	NOx abatement using in-situ fuel-based reductant under rotating arc plasma condition and its applications - 이희수, 김유나, 이대훈, 송영훈(한국기계연구원)
SS7-05	반도체 공정 배출 PFCs 제거를 위한 플라즈마 스크러버 개발 - 이대훈, 최정안, 송호현, 이희수, 정민호, 조동현, 송영훈(한국기계연구원)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 2 발표장

Session 2-7 연소해석 I 13:40~14:55 좌장 : 채태영(한국생산기술연구원)

S2-7-01	3kW급 소형 연소기를 이용한 메탄-철 하이브리드 비예혼합화염의 열전달 특성에 관한 실험적 연구 - 변창희, 채태영, 이재욱, 양원(한국생산기술연구원)
S2-7-02	Ammonia Co-Firing for Power-Plant Decarbonization: Impact of Boiler Type on Combustion Characteristics and NOx Emissions - Yijie Zeng, 김승모, 전충환(부산대학교)
S2-7-03	예가열 케로신 연료 분사 스크램제트 연소기의 연소장에 대한 공동의 역할 - 정승민, 이경재, 이양지, 이상훈, 김보연, 양인영(한국항공우주연구원)
S2-7-04	전이 학습을 활용한 희소 데이터셋 조건에서의 대형 탄화수소 연료의 점화 현상 예측 - 박해람, 정기성(국립부경대학교)
S2-7-05	Numerical study on the Evaporation and Combustion of a Two-Component Diesel Surrogate Droplet - Surya Balusamy, 이기용(국립경국대학교)

Session 2-8 연소해석 II 15:05~16:20 좌장 : 정기성(국립부경대학교)

S2-8-01	다중 충실도 모델을 활용한 화학 반응기 네트워크의 성능 향상 방법론 연구 - 서준석(국립부경대학교), 모현수, 유춘상(울산과학기술원), 정기성(국립부경대학교)
S2-8-02	데이터 증강 물리정보신경연산자를 활용한 연소 예측 연구 - 조준형, 이동훈(일리노이대학교), 유지형(한양대학교)
S2-8-03	화학 반응 분석을 통한 CH4/NH3 혼소 조건에서 주요 반응 및 배출 특성에 관한 연구 - 김민혁, 김종현, 김승민, 박정수(조선대학교)
S2-8-04	시간 의존 기저 기반 차원축소모델을 활용한 연소 해석 매개변수 연구에서의 유사성 활용 - 이준형, 김재중(울산과학기술원), Cristian E. Lacey(Sandia National Laboratories), 정기성(국립부경대학교), Jacqueline H. Chen(Sandia National Laboratories), 유춘상(울산과학기술원)
S2-8-05	DC 전기장이 인가된 니켈크롬 와이어 위의 액적 연소의 동적 거동에 대한 연구 - 정윤환(국립부경대학교), 김승현(울산과학기술원), 이원준(한국기계연구원), 유춘상(울산과학기술원), 박정(국립부경대학교), 정석호(KAUST)

Special Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 3 발표장

S-Session 9-1 내연기관 특별세션 I 08:30~09:45 좌장 : 오세철(부산대학교)

SS9-1-01	Center-injection GDI 가시화 엔진에서 분사 패턴에 따른 촉매 가열 조건의 연소 특성 - 고건우, 강동우(한양대학교), 박상재, 손유상(현대자동차), 박성욱(한양대학교)
SS9-1-02	1L급 FFV 엔진에서 모사합성연료와 가솔린 배출가스 특성 비교 - 박정현(건국대학교), 권석주, 이시원(한국자동차연구원), 윤승현(영남이공대학교), 박수한(건국대학교)
SS9-1-03	가솔린 직분사 엔진에서 스파크 플러그 위치가 유동 및 연소에 미치는 영향 - 강동우, 김남호, 고건우(한양대학교), 박상재, 손유상(현대자동차), 박성욱(한양대학교)
SS9-1-04	0D 수치 해석 모델을 이용한 천연가스-암모니아 혼소 SI 엔진의 암모니아 후분사 전략에 따른 실린더 내 DeNOx 양상에 대한 연구 - 김한영, 김민규, 오세철(부산대학교)
SS9-1-05	소형 SI 암모니아 연료 엔진에서 PTJI 기반 다단점화 전략의 수치해석적 연구 - 주강민, 박정수(조선대학교)

S-Session 9-2 내연기관 특별세션 II 09:55~11:10 좌장 : 문석수(인하대학교)

SS9-2-01	EGR 조건에서 가솔린 직분사식 엔진의 연소성능 개선을 위한 분사전략 최적화 - 박재원, 이강현, 강동우, 김지수, 박성욱(한양대학교)
SS9-2-02	가솔린-메탄올 혼합 연료의 층류 연소 속도 및 반응 메커니즘 해석 - 신재훈, 류동우, 문석수(인하대학교)
SS9-2-03	가솔린-메탄올 혼합연료의 GT-Power 기반 엔진 해석을 위한 연소 모델링 방법론 검토 - 류동우, 신재훈(인하대학교), 이호승, 박성욱(한양대학교), 문석수(인하대학교)
SS9-2-04	선박용 디젤 인젝터를 활용한 Ducted Fuel Injection 노즐 설계변수에 따른 분무 및 연소 특성 - 이호승(한양대학교), 박현춘(HD현대중공업), 박성욱(한양대학교)
SS9-2-05	Borghi-Peters diagram을 통한 수소 SI엔진의 공기과잉률에 따른 난류예혼합화염 특성 분석 - 손종윤(충남대학교), 박원아(경성대학교), 김기연(충남대학교), 김정호, 민경덕(서울대학교), 민경욱(한국기계연구원), 이정우(충남대학교)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 3 발표장

Session 3-7 가스터빈 13:40~14:55 좌장 : 박정극(한국전력공사 전력연구원)

S3-7-01	모사 가스터빈 동압 응답의 정량 분석과 스피커 특성 고려 음압가진 실험 - 전민재(인천대학교), 장대진(Lund university), 이민철(인천대학교)
S3-7-02	Thermodynamic Analysis of a Hydrogen-Ammonia Fueled Gas Turbine with Integrated Ammonia Cracking - Bimal Bhandari, 송정현(부산대학교), 박예슬(국립목포대학교), 최경민(부산대학교)
S3-7-03	다양한 압력에서 수소 가스터빈용 마이크로믹서 노즐의 NOx 배출지수에 관한 연구 - 이건률, 이기만(국립순천대학교)
S3-7-04	암모니아 전소 가스터빈 연소기의 연료분배비에 따른 연소특성 연구 - 황인우, 오소빈, 장혁준, 최낙정, 한가람, 박정극(한국전력공사 전력연구원)

Session 3-8 연소응용 15:05~16:20 좌장 : 김민국(한국기계연구원)

S3-8-01	모델 연소기 내 승압 및 승온 조건에서의 암모니아-수소/공기 제트화염의 연소특성 연구 - 김주한, 김재현, 김태원, 권오채(성균관대학교)
S3-8-02	이벤트 카메라 기반 화염 시각화 및 주파수에 대한 연구 - 박건호, 이민정(서울과학기술대학교)
S3-8-03	과도 운전 조건에서 수소 혼소 가스터빈 캔 연소기의 역화 억제 제어 기법에 관한 연구 - 이원준, 황정재, 강도원, 민경욱, 김재현, 박순호, 최승규, 김민국(한국기계연구원)
S3-8-04	오픈소스 CFD 플랫폼에서의 LHHW 표면 반응 프레임워크 개발: 증기 메탄 개질 - 이재훈, Danh Nam Nguyen(울산과학기술원), 서해원, 안형준(포스코홀딩스), 유춘상(울산과학기술원)
S3-8-05	모델 연소기 내 2차 공기 주입에 따른 암모니아-수소/공기 스월 예혼합화염의 연소특성 연구 - 김태원, 김재현, 김주한, 권오채(성균관대학교)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 4 발표장

Session 4-5 버너/연소기 I 08:30~09:45 좌장 : 이민정(서울과학기술대학교)

S4-5-01	연소기 형상에 따른 암모니아-공기 예혼합화염 안정화에 대한 실험적 연구 - 손병우, 이민정(서울과학기술대학교)
S4-5-02	암모니아/수소 혼소 스월 연소기에서의 소염한계 및 배출 경향 분석 - 전호빈, 김한영, 김도연, 김경천, 오세철(부산대학교)
S4-5-03	100 kWth 암모니아 전소 버너를 이용한 Swirl 강도에 따른 NOx 배출 특성에 대한 실험적 연구 - 황성환(한국생산기술연구원/성균관대학교), 이재욱(한국생산기술연구원), 심우현(한국생산기술연구원/성균관대학교), 양원(한국생산기술연구원), 권오채(성균관대학교), 채태영(한국생산기술연구원)
S4-5-04	항공용 터보엔진 연소기 설계 및 해석 연구 - 신준수, 황동현, 홍윤기, 유경원(국방과학연구소)

Session 4-6 버너/연소기 II 09:55~11:10 좌장 : 최민성(국립강릉원주대학교)

S4-6-01	CFD 및 열음향 모델을 통한 수소 혼소율 및 노즐 형상 변화에 따른 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석 - 장재우(국립강릉원주대학교), 박소정, 윤영빈(서울대학교), 석정민(두산에너빌리티), 김대식(국립강릉원주대학교)
S4-6-02	연료 적용성 향상을 위한 bluff body offset 기반 전단층 형성 및 화염 안정화 특성에 관한 연구 - 김종현, 김민혁, 김승민, 박정수(조선대학교)
S4-6-03	벽면 열 조건에 따른 수소 혼소 스월 화염의 역화 거동 해석 - 최민준, 백민하(한국과학기술원), 류제일(New York University Abu Dhabi), 신동혁(한국과학기술원)
S4-6-04	고압 멀티 EV 버너에서 수소-메탄 혼소 화염 상호작용에 따른 연소 및 배출 특성 연구 - 이상현, 이재빈, 오정석, 장재우, 김대식(국립강릉원주대학교), 강도원, 김민국(한국기계연구원), 최민성(국립강릉원주대학교)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 4 발표장

Session 4-7 연소시스템 13:40~14:55 좌장 : 이후경(한국에너지기술연구원)

S4-7-01	수소 환원 제철 공정을 위한 유동 환원 반응기 내 철광석의 유동화 및 환원 특성 - 최형석(부산대학교), 김민우(청정화력발전에너지연구소), 전충환(부산대학교)
S4-7-02	액체금속 반응기 기반 청록수소 생산 및 온실가스 저감을 위한 동특성 해석 최적화 연구 - 한건우, 최현록(한국생산기술연구원/성균관대학교), 김휘동, 이은도, 양원(한국생산기술연구원), 박문수(성균관대학교), 김성일(한국생산기술연구원)
S4-7-03	개방형 방사 구조 버너에서 홀 구조 변화가 연소 특성에 미치는 영향 분석 - 공준오(국립목포대학교), 이재빈(국립강릉원주대학교), 김민준, 김이준(국립목포대학교), 최경민(부산대학교), 최민성(국립강릉원주대학교), 박예슬(국립목포대학교)
S4-7-04	0.7 ton/h 연속식 강판 소둔로의 연소/전기 가열 방식에 따른 열적 특성 분석 - 이후경(한국에너지기술연구원/과학기술연합대학원대학교), 정우남(한국에너지기술연구원/한국과학기술원), 이대근, 이은경, 고창복(한국에너지기술연구원)
S4-7-05	무탄소 연료 혼소에 따른 산업용 보일러 열 성능 평가 - 안종환, 최현록(한국생산기술연구원/성균관대학교), 양원(한국생산기술연구원), 류창국(성균관대학교), 김성일(한국생산기술연구원)

Session 4-8 화재(Fire) 15:05~16:20 좌장 : 윤성환(국립한국해양대학교)

S4-8-01	DC 전기장 인가 하의 단열재 화재에서 연기 제어 및 연소 지속 시간 단축에 관한 실험적 분석 - 김준석, 김수현(국립한국해양대학교), 김양균(한국건설기술연구원), 박대근(한국생산기술연구원), Hui Yan(Chongqing University of Science and Technology), 윤성환(국립한국해양대학교)
S4-8-02	배터리 열폭주 및 화재 확산 차단을 위한 질산리튬 기반 용융염 상변화 열 차폐재 - 최재연, 박민홍, 여재익(서울대학교)
S4-8-03	AC 전기장이 인가된 니켈크롬 와이어에 매달린 에탄올 액적의 연소 특성 - 김승현(울산과학기술연구원), 박정(국립부경대학교), 정석호(KAUST), 유춘상(울산과학기술연구원)
S4-8-04	정립 및 도립 조건에서 18650 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘 비교 실험 - 성승헌, 박주원(국립한국해양대학교), 박대근(한국생산기술연구원), 윤성환(국립한국해양대학교)

Oral Session / Special Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 5 발표장

Session 5-5 연소불안정 08:30~09:45 좌장 : 이민우(국립한밭대학교)

S5-5-01	실 엔진 형상의 Can-annular 가스터빈에서 연소기 출구 음향 경계조건 도출을 통한 음향장 모델링 - 정다빈, 이형주, 김대식(국립강릉원주대학교)
S5-5-02	화염의 구조적 특성을 고려한 네트워크 모델 개선 및 검증 - 김주원, 국승민, 이민우(국립한밭대학교)
S5-5-03	제어시스템 접근법 기반 가스터빈 연소기의 시간영역 열음향 모델링 - 정준우, 윤명곤, 김대식(국립강릉원주대학교)
S5-5-04	화염면 감쇠 영역에서 조화 진동 V-화염의 운동학 모델링 - 김강환, 신동혁(한국과학기술원)
S5-5-05	축방향 다단연소 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석 - 권우현, 정준우, 김대식(국립강릉원주대학교)

S-Session 13 다점점화(비공개) 11:20~12:35 좌장 : 박성욱(한양대학교)

SS13-01	고 에너지 연소지연 기술적용 EGR율 향상과 연비개선 기술개발 - 나병철, 신윤섭(한국자동차연구원)
SS13-02	모사 EGR 조건에서 다단점화 코일의 점화 에너지량 변화가 직접 분사 불꽃 점화 엔진의 연소 특성에 미치는 영향 - 이강현, 이호승(한양대학교), 송영석(이림전자), 박성욱(한양대학교)
SS13-03	정적 연소 환경에서 EGR의 화학적 효과가 무탄소 연료의 난류 제트 점화에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구 - 김정현, 주강민, 박정수(조선대학교)
SS13-04	대체연료 내연기관용 EGR Valve 및 Cooler의 적용성 분석과 성능 향상·소재 개선 연구 - 김영권(㈜코렌스글로벌)
SS13-05	내연기관의 연소 효율 개선을 위한 점화 성능 증대 방안 연구 - 최광돈, 송영석, 이연서, 정재덕(㈜이림전자)

Oral Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금)
장소 _ 제 5 발표장

Session 5-7	고체연료연소 13:40~14:55 좌장 : 심형섭(한국과학기술원)
S5-7-01	램제트 연소기 입구 조건에 따른 연료과농 추진제의 후퇴율 및 연소 특성에 관한 수치해석 연구 - 김은총, 윤린(세종대학교), 박익수, 진상욱, 김도헌, 류재훈(국방과학연구소), 심한슬(세종대학교), 심형섭(한국과학기술원)
S5-7-02	전기제어고체추진제의 화염구조에 대한 금속 영향에의 실험적 분석 - 임대홍, Rajendra Rajak, 임가선, 여재익(서울대학교)
S5-7-03	Molecular Dynamics Simulation of Thermophysical Behavior of Polymeric Solid Fuels - Alqassier Abdullah Mohammad A(세종대학교), 심형섭(한국과학기술원), 홍성욱(Loyola Marymount University), 조병운, 심한슬(세종대학교)
S5-7-04	암모니아 전소 보일러에의 철 연소 적용을 위한 1-D 해석 모델 연구 - 배영(한국생산기술연구원/고려대학교), 김성일, 양원(한국생산기술연구원), 박기범, 류창국(성균관대학교), 임성균(고려대학교)
S5-7-05	금속화 고체주진제 연소 표면 상의 응집체 모델링 - 최홍석, 여재익(서울대학교)

Poster Session

일시 _ 2025년 11월 21일(금) 13:40~14:55
장소 _ 로비

포스터 및 가시화 사진전

좌장 : 조은성(한화파워시스템), 주성필(국방과학연구소)

P-01	헬름홀츠 공명기의 최적화 검증을 위한 리케 튜브의 설계 및 제작 - 이재훈, 김진건, 이민우(국립한밭대학교)
P-02	무탄소 $NH_3/H_2/N_2$ 연료의 폭발특성에 관한 실험적 연구 - 김민규, 이기만(국립순천대학교)
P-03	가솔린 직분사 가시화 엔진에서 점화 직전 분사량에 따른 촉매 가열 조건의 연소 안정성과 PM 배출 특성 - 정천일, 고건우, 강동우(한양대학교), 박상재, 손유상(현대자동차), 박성욱(한양대학교)
P-04	수소 혼소율과 과잉 공기비 변화에 따른 산업용 복사관 버너의 연소 특성에 관한 수치 연구 - 하성봉, 안진열, 서정원, 이동규, 정다운(계명대학교), 배병윤, 권종서(플랜텍), 이광구(계명대학교)
P-05	니켈 촉매 기반의 메탄 수증기 개질 반응기의 실험적 성능 평가 - 서성민, 최병철(호서대학교)
P-06	제철공정 배출가스를 모사한 수소-메탄 혼합가스의 예혼합 화염 연소특성 - 장원석, 이서라, 이관우, 이승로(전북대학교)
P-07	Development of a GUI-Based Tool for Predicting Thermoacoustic Damping Characteristics of Acoustic Liners and Helmholtz - Burinthorn Suksupaet, 김대식(국립강릉원주대학교)
P-08	Assessment of chemical kinetic models in hydrogen direct-injection engine simulation to enhance efficiency and reduce emissions - Quangkhai Pham(건국대학교), Nguyen Ngoc Dung(University of Transport Ho Chi Minh City), 윤승현(영남이공대학교), 박수한(건국대학교)
P-09	메탄 스월 화염에서 산화제 조성 변화에 따른 질소산화물 저감 특성 연구 - 김실비아, 도형록(서울대학교)
P-10	수치해석을 통한 암모니아 연료의 연소 시 점화지연특성 분석 - 김규보, 김량균, 임호, 박영도, 김준희(포항산업과학연구원)
P-11	메탄-수소 역확산화염의 스월 설계변수에 따른 연소 및 배기특성 - 소리, 전유선(전북대학교), 금성민(한라대학교), 이승로(전북대학교)
P-12	메탄-암모니아 혼소 다단연소 특성 연구 - 조은성, 조문수, 제갈현욱, 김세미(한화파워시스템)

P-13	수소 및 암모니아 혼소 비율 별 점화지연기간 및 층류화염전파속도에 대한 화학반응 모델 기반 계산 분석 - 김나연, 손종윤, 장일품, 이정우(충남대학교), 민경욱(한국기계연구원)
P-14	Computational Particle Fluid Dynamics 기반 순환유동층 보일러의 암모니아 혼소에 따른 유동 특성 및 연소실 온도 평가 - 김서영(한국생산기술연구원/성균관대학교), 양원(한국생산기술연구원), 박문수(성균관대학교), 김성일(한국생산기술연구원)
P-15	사각 재생냉각 채널에서 가열 벽면 위치에 따른 JP-8의 초임계 열전달 특성에 대한 수치적 연구 - 고상호, 길유창, 박성우(한국항공대학교)
P-16	문헌에서 보고된 실험 데이터 학습 기반 머신 러닝 모델에서의 다중 회귀분석을 통한 연소 특성 예측 가능성 연구 - 유지호(연세대학교/한국생산기술연구원), 김동휘(한국생산기술연구원), 홍종섭(연세대학교), 이영재(한국생산기술연구원)
P-17	저발열량 연료 활용 순산소 버너 개발 연구 - 김태영(포항산업과학연구원), 안형준(포스코홀딩스), 권진규(포항산업과학연구원)
P-18	5kW히터를 이용한 CO2합성연료 연소특성 조사 - 김광영, 강병준, 하동균, 남형석(경북대학교)
P-19	가스터빈 연소기의 암모니아/메탄 혼소에 따른 배기배출 특성 연구 - 오소빈, 황인우, 장혁준, 최낙정, 한가람, 박정극(한국전력공사 전력연구원)
P-20	BKNO3 점화 펠렛 연소 생성물에 대한 구조 및 성분 특성 분석 - 안명근, 장승교(국방과학연구소)
P-21 (가시화사진전)	Pre-detonator 내 DDT 및 데토네이션파 가시화 - 길유창, 박성우(한국항공대학교)

힘센엔진 e-Fuel 플랫폼 개발

안성찬*†

HiMSEN Engine e-Fuel Flatform Development

Sung Chan An*†

ABSTRACT

전 세계적으로 강화되는 배출가스 규제에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 규제에 대응하기 위해 학계와 산업계에서는 탄소 배출을 저감하기 위한 다양한 연구를 활발히 진행하고 있다. 수송 분야 중 자동차 산업에서는 기존 내연기관을 기반으로 한 하이브리드 엔진, 배터리 기반 전기자동차(EV), 그리고 수소를 에너지원으로 사용하는 연료전지차(FCEV) 등 친환경 기술의 상용화가 이미 이루어졌다. 그러나 이러한 배터리나 연료전지 기반 기술을 선박 분야에 직접 적용하기 위해서는 에너지 저장 및 공급 시스템, 안전성, 운항 효율성 등 추가적인 연구와 기술적 검증이 여전히 필요하다. 이에 따라 선박 분야에서는 기존 화석연료를 대체할 수 있는 저탄소·무탄소 연료, 즉 메탄올, 암모니아, 수소를 사용하는 차세대 친환경 엔진 개발이 활발히 추진되고 있다. 이들 연료는 기존 화석연료 대비 이산화탄소 배출량을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 발열량이 약 절반 수준으로 낮아 동일 출력을 얻기 위해서는 더 많은 연료 공급이 필요하다. 또한 연료의 운송 및 저장 과정에서의 안정성 확보와 효율적인 시스템 구축이 주요 문제로 남아 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, HD현대중공업은 기존 화석연료인 디젤 엔진 시스템에 다양한 대체연료 적용이 가능한 HiMSEN엔진 e-Fuel 플랫폼을 도입하여, 연료 선택의 유연성을 확보하고자 하고 있다. HiMSEN엔진 e-Fuel 플랫폼은 세계 최초의 메탄올 엔진(H32DF-LM)의 상업적 적용이 본격화되었고, 동시에 LNG 이중연료 엔진도 출력 라인업을 확보하여 메탄슬립저감 연구를 수행하고 있다. 이어 2024년 10월에는 고압 직분사 방식의 세계 최초 고출력 암모니아 엔진(H22CDF-LA) 개발에 성공하여 상용화 기반을 확립하였다. 현재는 여기에 더해 수소 혼소 및 전소 엔진에 대한 연구개발도 지속적으로 수행하고 있다.

HD현대중공업은 이처럼 다양한 연료와 선종에 대응이 가능한 HiMSEN 엔진 라인업을 구축하였으며, 앞으로도 해운 산업의 탈탄소화를 선도하기 위한 기술 개발에 매진할 계획이다.)

* HD현대중공업 엔진기계사업부 엔진연구소장
† 연락저자, scan@hd.com
TEL : (052)203-8628

국내 자동차 배출가스 관리정책 현황 및 성과, 그리고 향후 과제

박준홍*†

ABSTRACT

자동차는 마차의 환경오염을 해결할 수 있는 수송수단으로 출발했지만, 산업화의 고도화와 함께 그 수가 크게 증가되면서 대기오염과 온실가스의 주요 배출원으로 지목되어 왔다. 내연기관의 연소로 발생되는 HC, CO, NOx, PM은 주요 대기오염물질로, CO2, CH4, N2O는 기후변화를 유발하는 주요 온실가스로 간주되고 있다.
그간 많은 연구자와 자동차 제작사의 노력으로 대기오염물질을 대부분 감소시킬 수 있는 배출가스저감장치와 온실가스를 크게 감축할 수 있는 에너지 소비효율 향상기술 및 전기-내연기관 하이브리드화 기술이 개발되었고 상용화 되어왔다.
주요 자동차 생산국에서는 대기오염 방지와 기후변화 영향 감소를 위해 정부 차원에서 저감 기술의 상용화 시점을 고려하여 배출허용기준을 강화하고, 촘촘한 사후관리를 통해 부적합 차량에 대한 벌칙을 부과왔으며, 궁극적으로는 배출가스가 없는 전기차, 수소연료전기차로의 전환을 모색하고 있다.
우리나라는 2000년대부터 본격적으로 대기오염물질 배출허용기준을 강화해왔는데, 휘발유차에는 미국, 경유차에는 유럽의 배출허용기준을 도입하였고, 2009년 이후에는 이들 국가와 동일한 시점에 동등한 기준을 도입할 정도로 단기간에 규제가 강화되었다. 또한, 2012년부터 소형차에 대한 평균 온실가스 및 연비 관리제도를 도입하였고 미국, 유럽과 비교될 수 있는 수준으로 기준을 설정하여 수송부문의 온실가스 감축에 중요한 정책수단으로 활용하고 있다.
본 발표에서는 2000년대 이후 국내의 자동차 배출가스 규제 변화와 성과를 소개하고 향후 동향에 대한 정보를 공유하고자 한다.

* 기후에너지환경부 국립환경과학원 모빌리티환경연구센터
† 연락저자

Low-gravity Flames in the Lab?

Yuji Nakamura
Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

Having a low gravity field is demanding to ensure the safety in future space mission or simply to understand the gravity response on combustion processes. Yet it has been also well-known that achieving such extremely-unusual condition is difficult task and quite costly even in short time.. Even successfully achieved, unwanted disturbance which only available under such extreme environment, and it makes us even harder to understand the physics under low-gravity.
In this presentation, several trials and examples attempted by presenter are shared and open the gate to the interesting combustion problem, especially the usefulness of "scale modeling concept" is emphasized.

플라즈마 화학과 열화학의 특성 : 이론 및 응용

송 영 훈

초 록

플라즈마를 소개하는 여러 문헌에 기술된 바와 같이 연소 화학반응이 진행되는 일부 화염 공간은 전기적 극성을 띤 전자와 이온이 존재하는 플라즈마 상태에 놓여 있다. 이에 따라 실제로 화염에 전기장을 가해주면 화염의 형상 또는 화학반응 속도는 전기장에 의해 상당한 영향을 받게 된다. 그러나 전기장이 없는 조건에서 연소 화학반응을 해석하는 경우, 에너지가 큰 전자에 의해 화학반응이 좌우되는 플라즈마 화학(plasma chemistry)은 배제한 채 오로지 온도에만 화학반응 속도가 결정되는 열화학(thermochemistry)만을 고려하는 것이 일반적이다. 이는 화염 내부에 전자가 존재하더라도 외부로부터 강한 전기장이 가해지지 않는다면 전자가 연소 화학반응에 미치는 영향이 크지 않기 때문으로 볼 수 있다. 산업현장에서 많은 경우 연소 화학반응은 강력한 열에너지를 방출하는 특성으로 인해 어렵지 않게 열화학 반응이 순조롭게 진행되면서 화염이 유지되는 편이다. 이에 따라 그동안 연소 화학반응에서 플라즈마 화학의 도움이 필요했던 경우란 온도가 극히 낮아 스스로 연소 화학반응이 일어나지 않는 조건 즉, 초기 점화(ignition)가 필요한 경우가 대부분이었다. 한편, 최근 지구온난화 이슈를 비롯해 연료의 다변화 등이 요구되면서 유동이 수반된 화학반응을 일으키기 위해 그동안 활용해 온 열화학 반응 이외에도 플라즈마 화학반응을 활용하려는 시도가 증가하고 있다. 대표적인 예로 연료의 부분산화 (partial oxidation) 및 열분해(pyrolysis)와 같이 산화제가 부족하거나 아예 없는 경우에 고온 및 저온 플라즈마를 활용하려는 연구 사례를 들 수 있고, 일부 국가에서는 해당 기술의 상용화 사례가 등장하기 시작했다. 본 발표에서는 플라즈마 화학의 기본적인 특성 즉, 플라즈마의 정의 및 플라즈마의 다양한 종류를 우선 살펴보았다. 또한 플라즈마 화학반응과 열화학 반응의 비교를 통해 각 반응 간의 뚜렷한 차이점을 부각하고자 하였다. 본 발표에서는 지난 수십 년간 한국기계연구원에서 수행되어 온 플라즈마를 활용한 디젤 연소기, 연료 개질 반응기(fuel reformer), 열분해 기술 등을 함께 소개하면서 열화학 반응만으로는 불가능한 화학반응의 사례를 소개하였다. 그리고 향후 해결해야 할 과제에 대한 언급도 간략하게 다루었다.

수행한 연소 실험 공유 및 Reduced Mechanism 개발과 응용

이 기 용
국립경국대학교 전자·기계공학부

ABSTRACT

지금까지 수행해 온 주요 연소 실험들에 대한 정보를 공유하고, 다음과 같은 실험들의 중심으로 논의할 것이다.

○ 저온 실험 (천연가스 열량 측정을 위한 촉매 가스 센서)
○ Micro-gravity 실험 (저 신장률 대향류 화염)
○ Pool fire 실험 (화염온도, Heat flux, Soot volume fraction 측정)
○ 화염속도 측정 실험 (고압조건, 억제제 첨가)
○ 단일 액적 증발 및 연소 실험 (SiC fiber 활용)

수치해석을 이용하여 연소현상을 규명하고자 다양한 연료에 대한 상세 화학반응 메커니즘(Detailed chemical kinetic mechanism)이 개발되어 오고 있다. 상세 메커니즘은 많은 화학종 및 반응식으로 구성되어 있어 수치해석에 사용할 경우 수치 계산시간이 많이 소요되고, 수렴하기 쉽지 않다. 화학종 수의 제곱에 비례하는 수치 계산시간을 줄이기 위해 1980년 중반부터 탄화수소 연료에 대한 Reduced Mechanism이 개발되어 왔다. 상세 화학반응 메커니즘에 근거하여 축소 반응 메커니즘(Short Mechanism 또는 Skeletal Mechanism)의 개발, 축소 반응 메커니즘으로부터 Reduced Mechanism 개발하는 과정에 대하여 논의한다. 또한 Reduced Mechanism을 1차원 Chemkin-Pro 및 3차원 ANSYS Fluent에 적용하는 방법에 대하여 발표한다.

무탄소 발전을 위한 미분탄-암모니아 혼소 시 바이오매스 적용성 연구

김태윤* · 이지환* · 문형빈* · 이윤재* · 홍덕* · 김승모** · 전충환*,**,†

Investigation of Biomass Utilization as a Carbon-Neutral Fuel in Pulverized Coal-Ammonia Co-Firing Towards Carbon-Free Power Generation

Tae-Yoon Kim*, Ji-Hwan Lee*, Hyeong-Bin Moon*, Yoon-Jae Lee*, Nguyen Hong Duc*, Seung-Mo Kim**, Chung-Hwan Jeon*,**,†

전 세계적으로 온실가스 문제에 대한 인식이 점차 높아지면서, 에너지 분야에서는 친환경 정책들이 적극적으로 추진되고 있다. 특히 전력 발전 분야에서는 온실가스 감축을 위해 무탄소 발전 기술 도입이 요구되고 있다. 한국 정부는 2030년까지 2018년 대비 40% CO_2 배출 감축 목표로 설정하고, 화석 연료 및 석탄 화력발전의 비중을 줄이는 동시에 재생에너지와 탄소중립 연료를 적극적으로 도입할 계획이다. 수소와 수소 기반 연료의 발전 용량은 2030년까지 2.1%, 2036년까지 7.1%까지 확대될 것으로 전망된다[1]. 암모니아는 단위 질량당 열량이 타 연료에 비해 낮고 자발화 온도는 타 연료에 비해 높으며, 기존 탄화수소계 연료에 비해 낮은 층류 화염속도, 화염온도, 가연한계 등으로 인해 반응성이 낮다. 또한 연료 내 질소 성분으로 인해 NOx와 같은 오염물질 배출 문제가 발생할 수 있다. 그럼에도 불구하고 암모니아는 연소 과정에서 CO_2를 배출하지 않으며, 최근 연구에서는 석탄과 암모니아 혼소가 NOx 및 미연분(UBC)저감, 연소 안정성 개선과 같은 긍정적인 효과를 나타낼 수 있음이 보고되고 있다[2]. 한편, 바이오매스는 연소 시 배출되는 CO_2가 생장 과정에서 흡수된 CO_2와 상쇄되므로 순배출이'0'으로 탄소중립 연료로 간주된다. 또한, 높은 휘발분 함량을 통해 암모니아 혼소 시 연소 반응성을 보완할 수 있다. 특히 반탄화 과정을 거친 바이오매스는 에너지 밀도와 분쇄성이 향상되어 석탄과 유사한 물성을 가지므로, 암모니아 혼소 조건에서 연소성과 배출 특성을 개선할 수 있는 잠재력이 있다. 따라서 본 연구에서는 고체연료-암모니아 보일러 조건을 모사한 실험실 규모의 Lab-scale 층류반응기(Ammonia Drop Tube Furnace, ADTF)를 활용하여 석탄-바이오매스-암모니아 혼소 조건에서의 연소성 및 배출 특성을 확인하고자 수행하였다.

실험에 사용된 석탄은 실제 미분탄 보일러에서 사용되는 역청탄과 바이오매스, 반탄화 바이오매스 각 1종과 혼탄 조건의 시료를 사용하였다. ASTM D3172 및 D3176, D5865에 따라 공업분석 및 원소분석과 발열량 분석을 진행하였고, 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Coal/Biomass properties

Sample	High-rank coal	Raw biomass	Torrefied biomass
Proximate analysis (AD[1], wt.%)			
Moist.	1.10	4.54	3.03
V.M.	24.64	73.68	51.72
Ash	15.56	1.84	2.82
F.C.	58.70	19.94	42.43
Ultimate analysis (DAF[2], wt.%)			
C	81.93	49.92	65.19
H	4.45	5.98	5.31
O	10.43	43.69	28.86
N	2.06	0.37	0.57
S	1.13	0.04	0.07
Calorific value (kcal/kg)			
LHV	6,261	4,062	5,627

[1]AD : Air Dry
[2]DAF : Dry Ash-free

* 부산대학교 기계공학부
** 청정화력발전에너지연구소(PCERI)
† 연락저자, chjeon@pusan.ac.kr
TEL : (051)-510-3051 FAX : (051)-515-7189

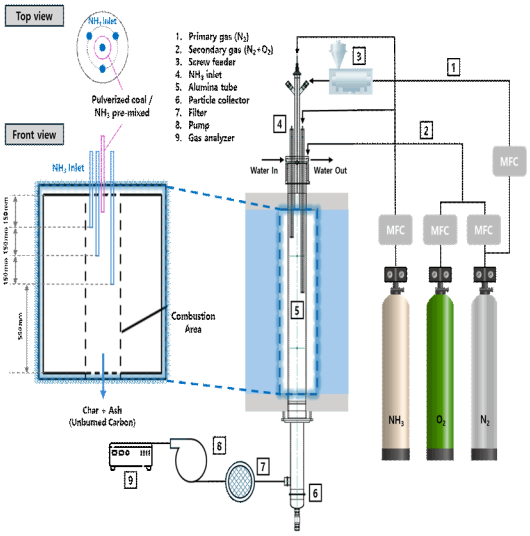


Fig. 1 Ammonia drop tube furnace(ADTF)

석탄-바이오매스-암모니아 혼소 특성을 확인하기 위해 사용된 국내 미분탄 보일러의 연소 환경을 모사한 ADTF 장치의 계략도를 Fig. 1에 나타내었다. ADTF는 크게 세가지 부분으로 이루어져 있다. 연료 및 가스 주입을 위한 주입부, 연소로인 반응부, 그리고 연소가스 및 연소 후 입자를 포집하는 포집부로 구성된다. 주입부에서 장비 상단에 연료인 석탄이 carrier gas와 함께 피더를 통해 공급된다. 또한, NH_3 주입구를 통해 석탄-바이오매스와 NH_3가 사전 혼합되는 조건을 모사한다. 포집부는 싸이클론을 이용하여 가스와 입자를 분리하고, 분리된 입자를 Ash Tracer Method를 이용하여 UBC(Unburned carbon)를 분석하였다[3]. 배출가스는 FT-IR 방식의 가스분석기를 통해 성분 분석을 진행하였다.

실험은 암모니아 혼소율 0%, 20% 조건에서 수행하였으며, 석탄과 바이오매스 공급량은 5600kcal/kg(LHV) 석탄 발열량 기준 전소 시 1.0g/min, 암모니아 20% 혼소 시 0.8g/min으로 공급하였다. 석탄 입자는 국내 미분탄 보일러에서 사용되는 미분탄 입자크기를 고려하여 75-90 ㎛, 바이오매스는 45-125㎛로 실험을 진행하였다. 자세한 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 ADTF operating condition

NH_3 ratio	0%, 20%
Total flow rate	26L/min
SR	1.2
Coal supply rate	1.0, 0.8g/min @5,600kcal/kg (LHV)
Temperature	1,300℃
Particle size	역청탄: 75~90㎛ 바이오매스: 45~125㎛

석탄-바이오매스 혼탄의 전소 및 암모니아 20% 혼소 시 NOx, UBC 결과를 각 Fig. 2, 3에 나타내었다. 석탄 100% 전소(189.45 ppm)에 비해 바이오매스 10% 혼소 시(165.70 ppm) NOx가 감소하지만, 바이오매스 혼탄비가 증가할수록 NOx가 함께 증가한다. 반탄화 바이오매스 혼탄 시에도 같은 경향이 나타나며, raw 바이오매스에 비해 NOx가 소폭 증가한다. 또한, 같은 조건들에서 고체연료 대신 암모니아 20%를 혼소 시, 모든 경우에서 NOx 배출이 증가하며 바이오매스 혼탄에 따른 경향 역시 전소와 유사하다.

석탄 전소 시 UBC는 약 24.7%, 암모니아 20% 혼소 시 24.2%로 거의 동일한 결과를 나타내었다. 그러나 바이오매스 혼소 비율이 증가함에 따라 석탄 전소 대비 UBC는 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 바이오매스의 연소성이 향상되어 초기 휘발분 연소 단계에서 산소 소비가 증가하고, 그 결과 연료의 완전 연소가 촉진되어 미연소 탄소가 줄어든 것으로 해석된다. 반면 이러한 연소성의 증가는 NOx 발생량 증가로 이어졌으며 특히, 바이오매스의 높은 휘발성 물질이 석탄보다 먼저 연소하면서 국부적으로 연소 온도가 상승, fuel Nox 및 thermal NOx의 생성이 촉진되었다[4].

또한, 휘발분의 조기 연소는 char 연소 영역에서의 산소 농도 변화 및 fuel-lean 영역 발생으로 인해 NO 환원 반응이 저하되는 결과를 낳는다. 기존 연구에서도 혼합 char의 반응성이 휘발분의 조기 연소로 인해 저하될 수 있으며, char의 구조적인 제한과 산소 확산 제한이 NO 환원 능력을 감소시켜 결국 최종 NO 생성 증가에 기여했다고 보고되었다[5,6]. 본 연구에서 관찰된 NOx 증가 경향은 바이오매스 혼소에 따른 fuel-N 감소 효과보다도, 바이오매스 휘발분의 조기 연소로 인한 thermal NOx 생성 증가와 char 연소 단계에서의 NO 환원 능력 저하가 더욱 우세했음을 나타낸다.

반탄화 바이오매스 혼합 시 NOx 증가 추이는 일반 바이오매스와 유사하게 나타났으며, 뚜렷한 NOx 저감 효과는 확인되지 않았다. 하지만 반탄화 바이오매스는 저장과 취급성, 연료 분쇄성 등 운전 및 관리 측면에서 명확한 장점을 가지며, 기존 발전소 설비에 보다 적합한 특성을 보인다. 또한 높은 발열량과 낮은 수분 함량은 연료 공급의 효율성을 높이고 운송 비용을 절감할 수 있어 경제적 이용에 유리하다.

더 나아가, NOx 저감을 위해 공기 staging, 선택적 비촉매 환원법(SNCR), 재연소 기술 등의 후처리 저감 기술과의 결합이 필요하며, 이를 통해 반탄화 바이오매스 혼소 시 NOx 문제를 효율적으로 관리할 수 있을 것으로 기대된다. 본연구에서는 암모니아 주입 위치 변동에 따른 공기 staging의 NOx 저감 및 연소 안정성에 관한 후속 연구를 진행할 예정이다.

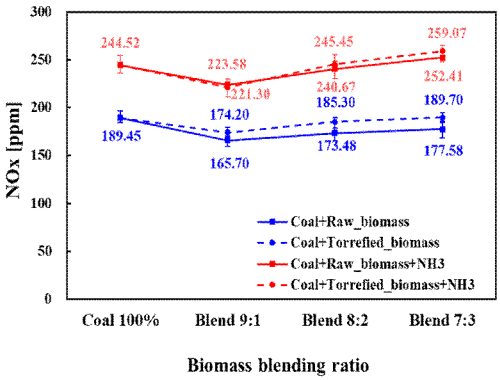


Fig 2. NOx emission according to biomass blending ratio

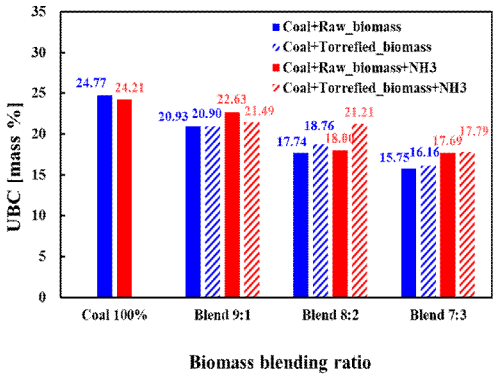


Fig 3. UBC results according to biomass blending ratio

후 기

본 연구는 한국연구재단의 친환경 스마트 선박 부품기술혁신(RLRC) 센터사업 (No.2020R1A8018822)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] The 10th Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2022-2036), Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023.
[2] S-H Song. “Experimental evaluation of ammonia injection strategies for different solid fuel types in drop tube furnace for carbon-free energy transition in thermal power plants”, Journal of the Energy Institute, Vol. 120, 2025.
[3] WH. Chen, "Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces", Bioresource Technology, Vol. 111, 2012, pp. 433-438.
[4] M-S Choi. “Detailed in-furnace measurements in a pulverized coal-fired furnace with combined woody biomass co-firing and air staging”, Journal of mechanical science and technology, Vol. 32, 2018, pp. 4517-4527.
[5] Jie Xu. “Effect of Char Particle Size on NO Release during Coal Char Combustion”, Energy &Fuels, Vol. 31, 2017.
[6] Matthew B. Tilghman. “Impact of Co-firing Coal and Biomass on Mixed Char Reactivity under Gasification Conditions”, Energy&Fuels, Vol. 30, 2016.

Pilot-scale 단일버너 연소 시스템에서의 석탄/암모니아 혼소 특성 분석: 공기단계 연소 및 석탄 등급에 따른 영향

심우현*,** · 황성환*,** · 이재욱* · 변창희* · 이재호* · 양 원* · 채태영*† · 류창국**

Pilot-scale Single-burner Combustion System: Coal/Ammonia Co-firing Characteristics and the Effects of Air Staging and Coal Rank

Woohyun Sim*, Jaewook Lee*, Changhrr Byeon*, Jeaho Lee*,
Won Yang*, Taeyoung Chae*† ,Changkook Ryu**

1. 서 론

탄소중립이라는 국가적 목표 아래, 막대한 온실가스를 배출하는 석탄 화력발전소는 탄소 배출을 획기적으로 줄여야 한다는 강한 압박을 받고 있다. 이러한 시대적 요구 속에서 석탄 발전 부문은 강화되는 환경 규제와 에너지 전환 요구에 적극 대응할 필요성이 커지고 있다. 석탄 화력발전소의 이산화탄소 배출 저감 방안은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 발전 시스템 후단에서 이산화탄소를 직접 포집하는 방식이며, 다른 하나는 전단에서 무탄소 연료를 부분적으로 혹은 전면적으로 대체 연소하는 방식이다[1-5]. 대표적인 무탄소 연료인 암모니아는 상온에서의 액화압력이 1.03 MPa에 불과하여 저장 및 운송이 용이하고, 비용이 저렴하며, 연소 시 탄소나 미세입자가 거의 발생하지 않는 장점을 지닌다. 이에 따라 암모니아와 석탄을 혼합 연소하는 고효율·저오염 연소 기술은 화석연료 대체와 청정 연소를 동시에 달성할 수 있는 효과적인 방안으로 주목받고 있다. 그러나 암모니아는 연료 희박 연소 시 NO_x배출 증가, 연료 농후 연소 시 암모니아 슬립 발생 가능성 등으로 인해 실용적 적용에 한계가 존재한다[6-11].

선행 연구에서는 암모니아와 석탄의 혼소 특성을 규명하기 위한 다양한 실험이 수행되었다. Hadi[12]는 석탄의 휘발분 함량에 따라 화염 전파 속도가 달라짐을 확인하였으며, 저등급탄의 경우 순수 암모니아보다 빠른 연소 특성을 보였다. Tan[13]은 암모니아 주입 위치가 NO_x 생성에 미치는 영향을 분석했으나, 한 종류의 석탄만을 대상으로 하여 석탄 등급에 따른 차이는 고려하지 못했다. 실제로 석탄의 물성 차이는 주 연소영역 형성 지점과 연소 거동에 큰 영향을 미치며, 이는 곧 NO_x의 생성 및 저감 특성과도 밀접히 연관된다. 따라서 혼소 시 최적의 연소 조건을 규명하기 위해서는 석탄 물성과 공기 스테이징 조건을 함께 고려한 체계적인 연구가 필요하다.

현재까지의 연구는 실험 조건이 제한적이고 결과가 일관되지 않아, 특히 역청탄과 아역청탄을 대상으로 한 혼소 비교 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 80 kW_{th} 규모의 down-firing 단일 버너 연소 시스템을 활용하여 혼소율(0, 20, 40%) 및 다양한 공기 스테이징 조건에서 암모니아/역청탄, 암모니아/아역청탄의 혼소 특성을 체계적으로 실험하였다. 본 연구 결과는 향후 발전소 보일러에 암모니아/석탄 혼소 기술을 적용하기 위한 중요한 기술적 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1. 연소 시스템

연소 장치의 전체 구성과 연소로 내부 온도 측정 지점은 Fig. 1에 각각 나타내었다. 연소 장치는 연소로, 열교환기, 싸이클론, 집진기로 구성되며, 석탄은 미분탄 형태로 투입된다. 연료는 로드셀 기반 공급장치로 정량 제어되며, 보조연료인 암모니아는 6개의 50 kg 탱크에서 공급된다. 암모니아 공급라인은 히팅라인으로 감싸져 예열온도 50℃로 설정되며, 이는 선행 연구[14]에서 48℃ 이상에서는 추가 온도 증가가 연소에 미치는 영향이 미미함이 보고되었기 때문이다. 암모니아는 MFC로 유량이 정밀 제어되어 전단부 온도 보정을 통해 투입된다. 산화제는 두 개의 ring blower로 공급되며, 1차 및 2차 공기는 air heater를 통해 가열되어 연소로로 유입된다. 1차 공기는 연료 수송과 혼합용, 2차 공기는 버너 내

* 한국생산기술연구원 저탄소배출저감연구부문
** 성균관대학교 기계공학과 에너지공학연구실
† 연락저자, hitae0@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8577 FAX : (041)-589-8323

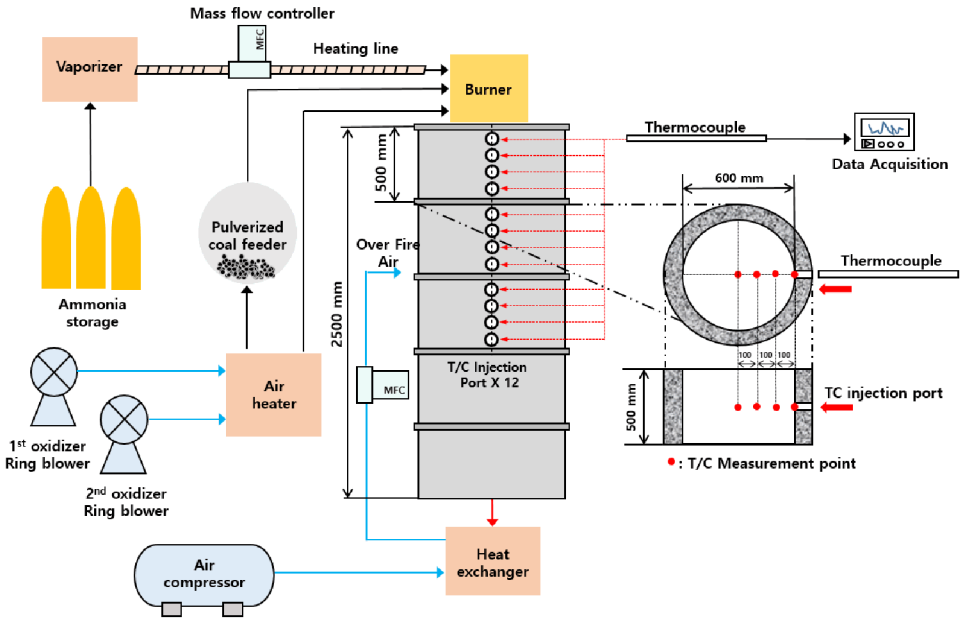


Fig. 1. Combustion system schematic diagram

45° 접선 tangential vane을 지나 선회류 형태로 주입된다. 연소로는 총 5단 구조로 각 단의 높이는 500 mm이며, 주요 연소영역은 상단 1-3단에 형성된다. 미분탄/암모니아 혼소 버너가 설치되며, 초기 착화 및 예열을 위한 가스 버너도 장착된다. OFA(Over-fire air)는 2단과 3단에 설치된 주입 노즐을 통해 공급되며, 각 단면에 4개의 OFA 노즐이 등간격으로 배치되어 회전 흐름을 유도한다. OFA는 에어 컴프레셔에서 공급되며, 열교환기를 통해 약 150℃로 가열된 후 MFC로 유량 제어된다. 온도는 각 단 벽면에 부착된 10개의 R-type 열전대로 측정되며, 추가로 12개의 열전대 포트를 통해 온도가 측정된다. 가스 성분은 연소로 후단에서 ABB AO2000 ND-IR (Non-Dispersive Infrared) 분석기를 통해 측정되며, NH_3 및 N_2O 농도는 Gasmet DX 4000 FT-IR(Fourier Transform Infrared) 분석기로 계측된다.0

2.2. 버너 구조

본 연구에서 사용된 연소 버너는 석탄/암모니아 혼소 조건에 맞춰 설계된 전용 다층 구조의 원통형 버너로, Fig. 2 (a) 및 (b)에는 각 조건에 따른 개략도와 단면 형상이 나타나 있다. 해당 도면은 연료 및 산화제 주입 흐름의 방향성과 유속 조건을 반영하여 실제 직경 비율에 맞게 제작되었다. 버너는 중심축을 기준으로 동심 원통 구조를 이루며, 가장 안쪽부터 순차적으로 다음과 같은 흐름 통로로 구성된다. 1st NH_3은 버너 중심에 위치하며, 혼소율 20% 조건에서 NH_3가 주입된다. Fig. 2 (a), (b)에서 노란색으로 표시된 이 노즐은 암모니아 전용이다. 2nd NH_3은 첫 번째 노즐 외곽에 위치하며, 혼소율 40% 실험 시 추가적인 암모니아 주입을 담당한다. 2nd NH_3 노즐은 동일한 유속 조건을 유지하기 위해 1st NH_3 노즐과 동일한 단면 유량을 확보할 수 있도록 직경이 제작되었다. 2nd NH_3 노즐 외곽에는 미분탄과 석탄 이송 공기가 지나가며, 이는 붉은색으로 표시되어 있다. 마지막으로, 2차 산화제는 가장 외곽에 배치되어 있으며, 흐름은 파란색으로 표현된다.

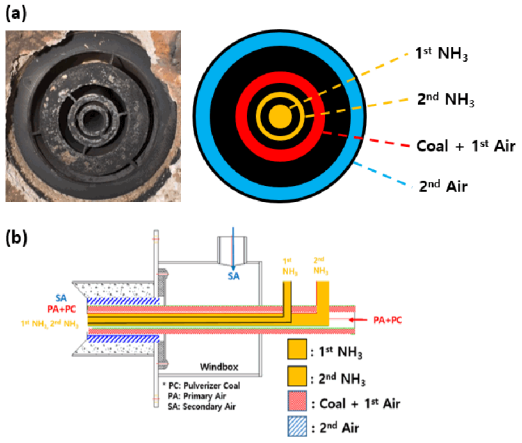


Fig. 2. (a) Nozzle Design of the Coal/NH3 Burner, (b) Schematic Configuration of the Coal/NH3 Burner

3. 실험 조건

본 연구에 사용된 석탄은 아역청탄 Adaro와 역청탄 Flame을 사용하였으며, 석탄의 조성은 Table 1에 나타나 있다. 수분, 휘발분, 회분은 ASTM D7582-24 표준에 따라 측정하였고, 고정탄소는 ASTM D3172-13 표준을, 탄소, 수소, 질소는 ASTM D5373-21 표준에 따라 측정하였다. 저위발열량은 ASTM D5865/D5865M-19 표준에 따라 측정하였다.

Table 1. Comparison of Elemental and Proximate Analysis for Adaro and Flame Coals

Element	Adaro (Sub-Bituminous Coal)	Flame (Bituminous Coal)
Ultimate analysis (wt%)		
C	59.0	65.2
H	6.0	4.5
O	17.8	11.8
N	0.9	1.4
S	0.0	0.5
Cl	0.0	0.0
Proximate analysis (wt%)		
FC	40.6	47.3
Volatiles	43.1	36.2
Moisture	14.6	11.1
Ash	1.7	5.4
LHV(MJ/kg)	21.7	25.01
LHV(kcal/kg)	5180	5973

4. 결과 및 고찰

4.1. 아역청탄 혼소시 NO 배출 특성

아역청탄은 휘발분 함량이 높고 반응성이 뛰어나 연소 초기 단계에서 빠르게 화염이 형성된다. 이로 인해 NO 형성이 촉진되며, ASR8 조건에서 NO 농도는 350 ppm에서 1030 ppm으로 급격히 증가한다. 암모니아가 연료에 포함된 상태에서 연소 환경이 산화제 과잉인 경우, Fuel-N이 NO로 전환되는 반응이 촉진된다. 그러나 ASR이 증가하면서 화염의 고온 반응 환경이 약화되고, 환원 분위기가 형성되어 NO 생성이 억제된다. ASR17 조건에서는 NO 농도가 눈에 띄게 감소하며, 이는 OFA 영역에서 NO의 환원이 일어난 결과로 해석된다. 혼소율이 증가할수록 NO 배출 농도는 상승하나, ASR33 조건에서는 NO 배출이 급격히 감소하며 암모니아 슬립이 증가한다. 이는 과도한 공기 스테이징으로 산화제 공급이 제한되어 암모니아가 완전히 분해되지 못한 결과이다.입속도가 버너 별로 존재하게 된다.

4.2. 역청탄 혼소시 NO 배출 특성

역청탄은 낮은 휘발분과 높은 탄화도를 가지고 있어 연소 반응 속도가 느리며, 고온 유지가 길다. 이에 따라 NO 배출 농도는 ASR이 증가함에 따라 일관되게 감소한다. ASR17에서 약 250 ppm의 NO가 배출되었고, ASR33에서 150 ppm으로 감소하였다. 암모니아 혼소율이 증가할수록 NO 농도는 더욱 감소하였다. 이는 암모니아의 환원 반응 기여가 주요 원인으로 작용한 결과로, 역청탄의 높은 단열화염온도와 느린 연소 특성이 NO 생성을 억제하고 환원 반응을 유도한 것으로 해석된다. 또한, 역청탄 기반 조건에서는 NH3 슬립이 관측되지 않아 모든 혼소 조건에서 암모니아는 완전 연소되었고, NO 형성 대신 환원이 우세하게 진행되었다.

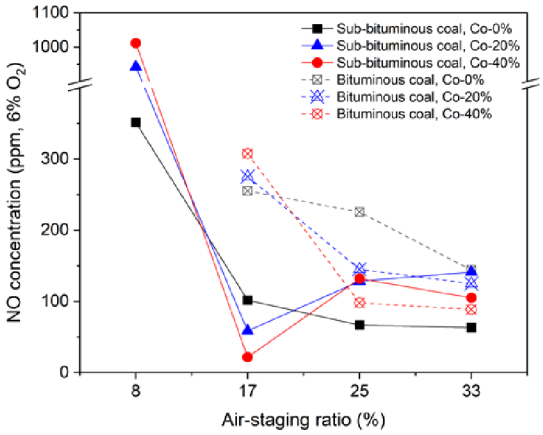


Fig. 3. NO emission concentration according to air staging ratio by coal grade

5. 결 론

이 연구는 석탄과 암모니아를 혼소할 때 NOx 배출 특성에 대한 최적 조건을 규명했다. 실험 결과, 석탄의 등급(아역청탄, 역청탄)과 공기 스테이징 비율에 따라 NO 배출 농도가 달라졌으며, 특히 아역청탄은 높은 휘발분 함량과 반응성으로 연소 초기에서 NO 배출이 급격히 증가하는 반면, 역청탄은 낮은 휘발분과 높은 탄화도로 인해 NO 배출이 상대적으로 낮았다. 또한, 암모니아 혼소율이 증가함에 따라 NO 배출이 증가했지만, 공기 스테이징 비율을 조절함으로써 NO 배출을 억제할 수 있었다.

참고문헌

[1]. Keboletse, K.P., F. Ntuli, and O.P. Oladijo, Influence of coal properties on coal conversion processes-coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: a review. International Journal of Coal Science & Technology, 2021. 8(5): p. 817-843.

[2]. Li, Q., The view of technological innovation in coal industry under the vision of carbon neutralization. International Journal of Coal Science & Technology, 2021. 8(6): p. 1197-1207.

[3]. Chu, H., et al., Soot formation in high-pressure combustion: Status and challenges. Fuel, 2023. 345.

[4]. Bui, M., et al., Carbon capture and storage (CCS): the way forward. Energy & Environmental Science, 2018. 11(5): p. 1062-1176.

[5]. Mai, T., et al., Getting to 100%: Six strategies for the challenging last 10%. Joule, 2022. 6(9): p. 1981-1994.

[6]. Chai, W.S., et al., A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. 147.

[7]. Valera-Medina, A., et al., Ammonia for power. Progress in Energy and Combustion Science, 2018. 69: p. 63-102.

[8]. Fang, J., et al., Utilization of carbon-based energy as raw material instead of fuel with low CO2 emissions: Energy analyses and process integration of chemical looping ammonia generation. Applied Energy, 2022. 312.

[9]. Aich, S., B.K. Nandi, and S. Bhattacharya, Combustion characteristics of high ash Indian thermal, heat affected coal and their blends. International Journal of Coal Science & Technology, 2021. 8(5): p. 1078-1087.

[10]. Yapicioglu, A. and I. Dincer, Performance assesment of hydrogen and ammonia combustion with various fuels for power generators. International Journal of Hydrogen Energy, 2018. 43(45): p. 21037-21048.

[11]. Kobayashi, H., et al., Science and technology of ammonia combustion. Proceedings of the Combustion Institute, 2019. 37(1): p. 109-133.

[12]. Hadi, K., et al., Effect of fuel ratio of coal on the turbulent flame speed of ammonia/coal particle cloud co-combustion at atmospheric pressure. Proceedings of the Combustion Institute, 2021. 38(3): p. 4131-4139.

[13]. Tan, J., et al., Experimental study on co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a staged combustion drop tube furnace. Proceedings of the Combustion Institute, 2023. 39(3): p. 3217-3225.

[14] Wang, Z., et al., Effect of ammonia on the characteristics of coal combustion. Journal of the Energy Institute, 2023. 109.

미분탄-암모니아 혼소 버너의 부하 변화 시 스월 구조에 따른 화염 안정성 평가

최진헌[*,**] · 정재원[**] · 이후경[*,***†]

Evaluation of Flame Stability under Load Variations in a Pulverized Coal-Ammonia Co-firing Burner with Different Swirl Configurations

Jinheon Choi[*,**], Jaewon Chung[**], Hookyung Lee[*,***†]

전 세계 에너지 전환 가속화에 따라 석탄화력발전의 탄소배출 저감과 유연운전 기술의 확보가 필수적으로 요구된다 [1, 2]. 그 일환으로 무탄소 연료인 암모니아를 활용한 혼소 기술이 주목받고 있으나, 낮은 연소 속도를 가지는 연료 특성으로 인해 부하 변화 시 화염 불안정성 문제를 야기한다. 혼소 버너에서 고체 연료보다 제어가 용이한 기체 연료(암모니아)의 유량 조절을 통해 부하 제어가 가능하나, 저부하 조건에서의 연소 안정성 확보 방안은 아직 명확히 제시되지 않았다.

본 연구는 미분탄-암모니아 혼소 버너의 부하 변화 조건에서 스월 구조 변화가 화염 안정성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 실규모 발전소 혼소 버너의 설계 개념을 도입하여 랩-스케일 미분탄-암모니아 혼소 버너를 제작하였고, 노즐 개수 및 주입 위치에 따른 스월러를 모듈식으로 교체할 수 있도록 설계하였다. 스월러 구조의 영향을 정량적으로 비교하기 위해 총 6개의 스월 조건을 구성하였으며, 각 조건에 대해 부하 변화 시 화염 거동, 유동장, 에디 점성계수 분포를 분석하였다. 냉각 유동 조건의 3차원 CFD 해석에서는 k-ω SST 난류모델과 SIMPLEC 기법을 적용하였고, 격자 품질과 수렴성을 검증하였다.

실험 결과, 정격 부하(5 kW_{th}) 조건, 케이스A(하단 배치 노즐 8개)는 재순환 영역이 짧고 하부 중심에 집중되어 화염이 짧고 두꺼운 부착형 구조로 안정적인 연소가 가능하였다. 반면 케이스B(하단 배치 노즐 4개)는 재순환 영역이 길어지고 와류 확산이 강해져 화염 기둥이 요동하며 불안정한 경향을 나타냈다. 이는 부하 저감 시 화염 분리 및 소염 현상이 스월 구조 설계에 따라 완화될 수 있음을 시사한다. 연소부하 20~100 %(1~5 kW_{th}) 범위 모든 케이스에서 정격 부하(100 %)에서 최소 부하(20 %)로 운전될수록 스월수(S: 0.71→0.62) 및 유동장 재순환 영역(CRZ) 감소로 인해 화염 불안정성을 보였다. 또한 암모니아 단독 연소에 비해 미분탄 혼소 시 모든 케이스에서 약 40 %의 소염 영역이 증가했다. 본 연구는 미분탄-암모니아 혼소 시스템에서 부하 변화 시 화염 안정성을 확보하기 위한 스월 구조 설계 기준 및 하드웨어 개선 방향을 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 부하 변화 조건별 배기가스 조성과 열유속 계측을 통해 연소 효율 및 NOx 저감 효과를 정량적으로 평가할 예정이다.

* 한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부
** 고려대학교 기계공학과
*** 과학기술연합대학원대학교 에너지공학과
† 연락저자, hk.lee@kier.re.kr
TEL : (042)860-3307

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (RS-2023-00237140).

참고 문헌

[1] International Energy Agency, "Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector (Revised Version, October 2021)", International Energy Agency, 2021.
[2] A Energiewende, "Flexibility in Thermal Power Plants - With a Focus on Existing Coal-Fired Power Plants", Agora Energiewende, Berlin, Germany, 2017.

전산해석 기반 암모니아-미분탄 혼소 버너의 화염 형태 최적화

장윤창* · 강우석* · 하선교* · 정시율** · 김동선** · 정재헌** · 류창국*†

Flame Structure Optimization of Ammonia-Coal Co-Firing Burner Based on Numerical Analysis

Yunchang Jang*, Woosuk Kang* Seonkyo Ha*, Siyul Chung**, Dongseon Kim**, Chaehon Chong**, Changkook Ryu*†

ABSTRACT

When applying newly designed ammonia-cofiring swirl burners to a full-scale coal-fired boiler, the large furnace volume with interactions between burners may alter the flame structures and deteriorate the combustion performance. This study investigates the flame structure of ammonia co-firing burners in a 1000 MW opposed-fired boiler using computational fluid dynamics at a 20% ammonia co-firing ratio. The flame structures were evaluated by varying secondary air (SA) usage, burner quarl angle, and tertiary air (TA) swirl intensity. Without SA supply, the extended primary-air/fuel jet promotes fuel-oxidizer mixing and reduces bottom-ash unburned carbon, leading to higher wall heat flux and boiler efficiency. In addition, reducing the quarl angle and increasing TA swirl intensity broaden the internal recirculation zone, thereby improving overall combustion performance. Compared with coal-only firing, NO emissions were slightly reduced across all evaluated co-firing cases.

Key Words : Pulverized Coal, Ammonia Co-Firing, Burner Design, Internal Recirculation Zone

산업혁명 이후 화석연료의 사용과 온실가스 배출로 인해 대두된 지구온난화 문제를 해결하기 위해, 각 국가는 저마다 온실가스 감축 정책들을 수립하고 있다. 한국은 발전 분야에서 기존 연료인 석탄에서 무탄소 연료(암모니아, 수소)로의 전환하는 것을 주요 온실가스 저감 방안의 하나로 추진하고 있다.

암모니아는 석탄과 유사한 발열량을 가지며, 저장 및 운송에 이점이 존재한다. 그러나 석탄-암모니아 혼소의 경우 CO_2 배출량이 감소하는 반면, 암모니아의 연소 특성이 석탄과 상이하고 연료에 포함된 질소 성분으로 인해 연소 분위기에 따라 질소산화물(NOx)의 다량 발생이 가능한 문제가 있다. 따라서 암모니아 석탄 혼소의 화염 특성 및 NOx 저감을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만, 주로 축소 버너에 대한 연구가 대부분이며 상용급 보일러에 대한 연구는 부족한 상황이다. 특히 상용급 보일러는 수십 개의 버너가 설치되므로 개발된 버너의 적용시 버너간의 상호작용과 이에 따른 화염 구조 및 연소특성 변화를 평가하여 보일러 성능을 향상시키기 위한 추가적인 설계 개선이 필요하다.

본 연구에서는 1000 MW_e급 대항류 석탄화력 보일러를 대상으로 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 이용하여 혼소 버너의 화염 형태를 평가하고 개선 방안을 도출하였다.

Fig. 1은 해석 대상 보일러와 버너의 개략도를 나타낸 것이다. 해당 보일러는 한 단에 6개의 버너가 전·후벽에 각각 3단으로 구성되어 있고, 전벽 최상단 버너단은 stand-by로 연료가 투입되지 않는다. Secondary air port (SAP)는 전·후벽 외각에 2개씩 총 4개, Over-fire air(OFA)는 전·후벽에 6개씩 총 12개로 구성되어 있다.

버너는 중앙 oil port에서 암모니아가, 그 외곽으로 석탄과 1차 공기(Primary air, PA)가 투입된다. 2차 공기 (Secondary air, SA)는 고정형 swirler를 통해 선회 강도가 유지된 상태로 투입된다. 3차 공기 (Tertiary air, TA)는 axial vane swirler를 거쳐 투입되며, swirler의 위치에 따라 TA의 선회 강도와 SA-TA의 유량비가 결정된다. Quarl 각도는 버너 축과 TA 외벽이 이루는

* 성균관대학교 기계공학과
** BHI 청정연료보일러개발 TFT
† 연락저자, cryu@skku.edu
TEL : (031) 299-4841 FAX : (031)-290-5889

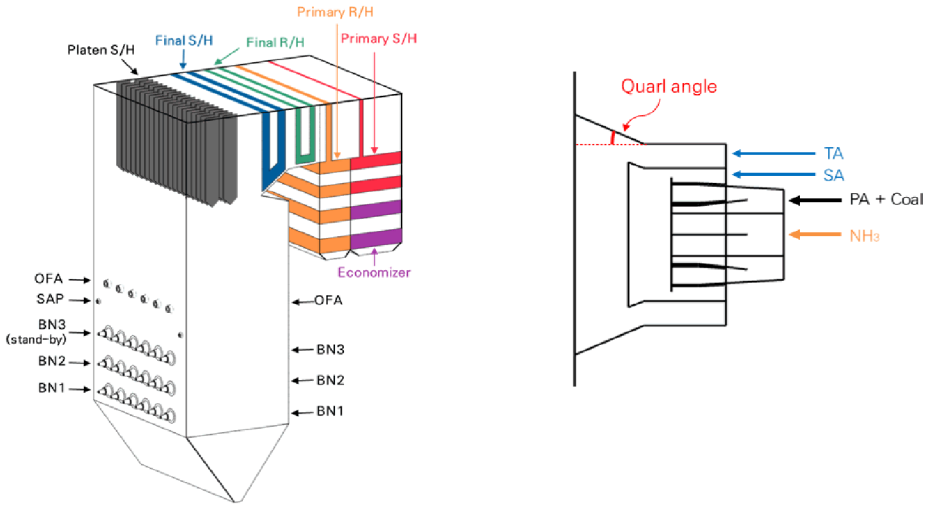


Fig. 1 Schematic diagram of opposed-fired boiler and burner

각으로 정의하였으며, 설계 각도는 45°이다.

격자는 총 22,106,635개의 육면체로 구성하였으며, 화염 형상 모사의 신뢰성을 위해 버너 영역은 더욱 조밀하게 형성하였다.

Table. 1은 사용되는 석탄의 조성을 나타낸 것이다. 전체 입열량 2200 MW_{th}(Lower heating value, LHV) 기준 암모니아 혼소 비율은 20%이며, 설계조건에 따라 전체 당량비는 1.13, 버너 영역 당량비는 0.84로 설정하였다. 선행 해석에서 단일 버너 대상으로 axial vane swirler 위치에 따른 SA-TA 유량비 및 TA선회 강도의 적정 범위를 도출했고, 이를 바탕으로 기준 조건을 설정하였다.

Table. 2는 해석한 case의 조건을 나타낸 것이다. Case 1은 버너 설계조건에 따라 quarl 각도를 45°로 설정하였고, SA와 TA를 모두 사용하였다. 또한, 선행 해석 결과를 바탕으로 SA와 TA의 선회 강도를 각각 2.01, 0.87로 설정하였다. Case 2는 case 1과 동일한 조건에서 SA의 유량을 모두 TA로 투입하였다. Case 3의 경우 SA를 사용하지 않으며 quarl 각도는 25°로 설정하였고, TA의 선회 강도를 1.00으로 높였다.

Table 1 Fuel properties of design coal

Parameter		Design Coal
Proximate analysis (wt.%)	Total M	16.47
	Inherent M	9.92
	VM	34.05
	FC	47.10
	Ash	8.93
Ultimate analysis (wt.%daf)	C	77.29
	H	5.33
	O	15.63
	N	1.22
	S	0.53
HHV (kcal/kg)		5626
LHV (kcal/kg)		5312

해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS FLUENT 2022 R1을 사용하였다. 미분탄 입자는 Discrete phase method를 통해 투입되는 입자별로 경로를 추적하여, 반응을 통해 생성되는 휘발분은 기체상의 생성항으로 적용하였다. 미분탄의 탈휘발 속도와 휘발분 조성은 PCCoalLab의 Flashchain[1]을 이용해 도출하였다. 촤 연소는 고온의 조건에서 촤 코어 크기의 감소와 이에 따른 반응속도 저하를 반영한 Unreacted core shrinking model[2]을 적용하였다.

기체상의 반응은 Jones-Lindstedt mechanism[3]을 채택하였으며, 난류에 의한 혼합과 화학반응의 상호작용을 고려한 Kinetic rate/eddy dissipation model[4]을 반응 속도 모델로 선정하였다.

난류 모델은 선회류 유동에서 해석 신뢰성이 높은 Shear-stress transport k-ω model[5]을 사용하였으며, 복사는 Discrete ordinates model[6]을 적용하였다. CO_2와 H_2O의 복사열전달 특성을 정확히 반영하기 위해, 가스의 흡수 계수는 Weighted sum of gray gas model[7]을 적용하였다.

NOx 해석의 경우, FLUENT의 내장 모델은 post-processing을 사용하나 이를 암모니아 혼소에 그대로 적용할 경우 NH_3의 반응 및 NOx가 정확히 반영되지 않는 문제가 있다. 이를 해결하기

Table 2 Design parameters of co-firing burners evaluated

Case	SA	Swirl ratio		Quarl angle
		SA	TA	
1	O	2.01	0.87	45
2	X	-		
3			1.00	25

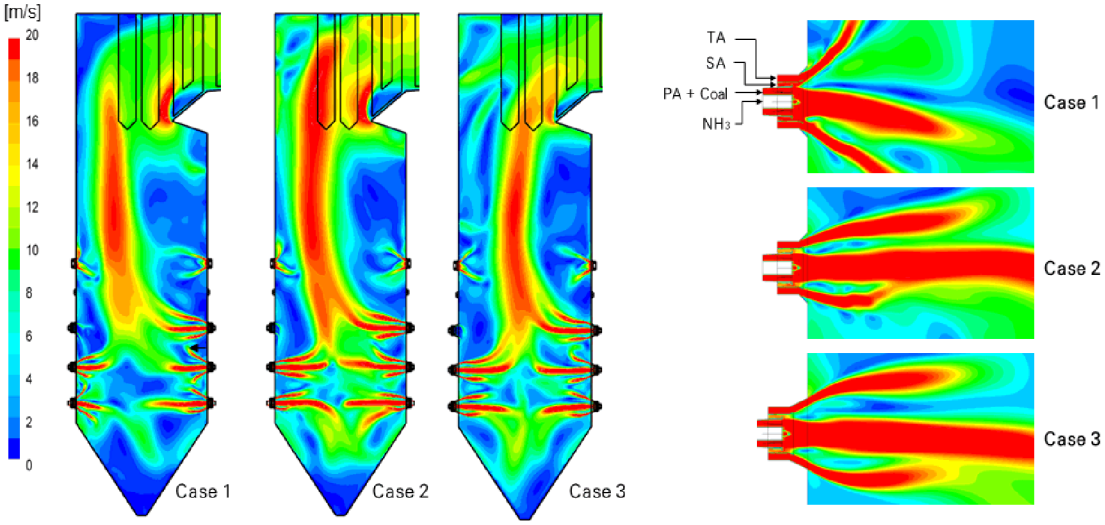


Fig. 2 Velocity contours of each case and lower burner

위해 석탄과 암모니아의 연소, 그리고 NOx 산화/환원을 동시에 계산하는 기법을 개발하여 다양한 User-defined function을 통해 적용하였다.

Fig. 2는 각 조건 별 속도 분포를 나타낸 것이다. Case 1의 경우 버너 축을 따라 PA/연료 제트가 형성되고 SA의 높은 선회 강도로 인해 SA·TA 유동이 벽면 쪽으로 확장되었다. 이 유동과 제트 사이에 internal recirculation zone (IRZ)이 형성되었으며, 전벽 하단 버너에서는 SA·TA 유동이 과도하게 확장되어 PA/연료 제트와의 간격이 크게 벌어졌다. Case 2와 3은 SA를 사용하지 않아 TA 유동이 확장되지 않고 축 방향으로 유지되어 PA/연료 제트와의 간격이 감소하였고, 그 경계를 따라 가늘고 긴 IRZ가 형성되었다. Case 3에서는 quarl 각도를 줄이고 TA 선회 강도를 높여 TA가 quarl을 충분히 채워 강한 선회가 유지되었고, case 2보다 더 넓고 강한 IRZ2가 형성되었다.

Fig. 3은 각 조건 별 온도와 미연탄소(unburned carbon, UBC)의 분포를 나타낸 것이다. Case 1에서는 PA/연료 제트를 따라 저온 코어가 형성되고 이를 둘러싼 IRZ 내에서는 고온의 가스가 유입되며 고온 영역이 형성되었다. 전벽 하단 버너에서는 고온 영역이 SA·TA 유동과 PA/연료 제트 간극에서 넓게 형성된 뒤, 벽면까지 과도하게 확장되었다. 이로 인해 연료와 공기의 혼합이 효과적으로 이루어지지 못하였고, 그 결과 다량의 미연분이 호퍼 영역에 잔류하거나 바닥으로 낙하하여 바닥재 내 unburned carbon (UBC) 농도가 48.8%로 매우 높았다. Case 2와 3에서는 PA/연료 저온 코어가 더 길게 유지되었고, 그 주변의 IRZ를 따라 얇고 긴 고온 영역이

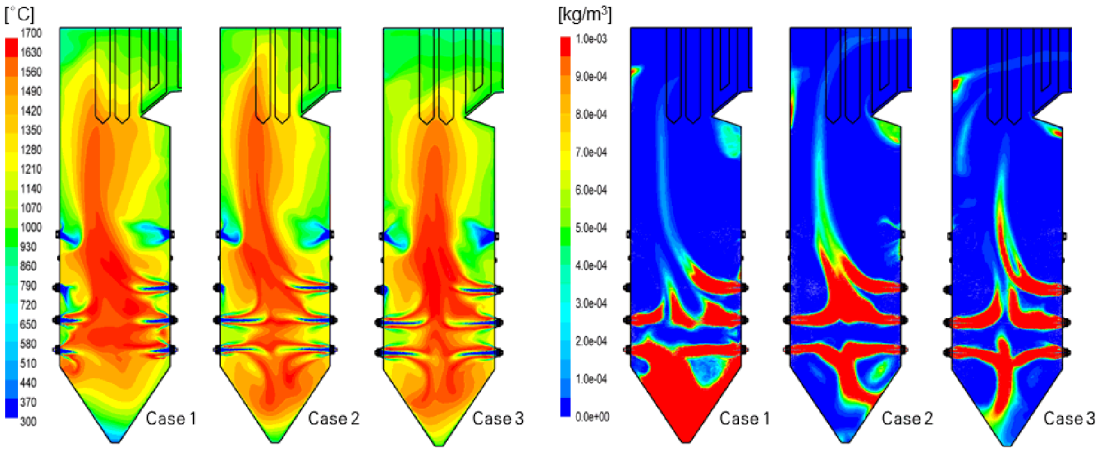


Fig. 3 Temperature and unburned carbon distribution contour of each case.

Table 3 Comparison of key performance metrics between design (coal-only) and co-firing cases.

Case		Design	1	2	3
NOx (ppm, 6% O_2)		137	126	133	122
Exit O_2 (dry%)		-	2.88	2.63	2.47
UBC (%)	Fly ash	-	2.95	2.93	2.44
	Bottom ash	-	48..8	22.1	21.1
	Total	-	3.83	3.28	2.67
Heat absorption (MW_{th})	Furnace wall	873	832	851	862
	Others	1234	1239	1238	1246
	Total	2111	2071	2089	2108
Boiler efficiency (%LHV)		95.9	94.0	94.9	95.7

형성되었다. 연장된 저온 코어를 따라 미분탄이 노 중앙까지 이송되어 연료/공기의 혼합이 촉진되었고, 이에 따라 고온 영역과 상승 유동이 강화되면서 바닥으로 낙하하는 미연분이 감소하였다. Case 3의 경우 case 2보다 더 넓게 형성된 IRZ를 따라 버너 영역에서 고온 영역이 확장되었다.

Table. 3은 석탄 전소 기준인 설계 조건과 각 조건의 주요 결과값을 나타낸 것이다. Case 1은 버너 영역에서 연료-공기 혼합이 덜 이루어져 total UBC가 3.83%로 가장 높았고, 이에 따라 벽면 전열량 832 MWth, 보일러 효율 94.0%로 가장 낮았다. Case 2는 로 중심 방향으로 길게 유지된 저온 코어와 그 주변의 고온 영역으로 인해 유속이 높아 바닥으로 떨어지는 미연분이 감소하였다. 그 결과 벽면 전열량이 851 MWth로 case 1에 비해 약 19 MWth 상승하였으며 보일러 효율도 94.9%로 개선되었다. 두 case의 비산재 내 UBC 농도가 유사하므로, 전열량의 격차는 주로 바닥재 내 미연분 차이에서 기인한 것으로 판단된다. Case 3은 넓은 IRZ을 따라 형성된 고온 영역으로 인해 버너 영역의 연소성이 개선되었으며, 벽면 전열량 862 MWth를 포함해 모든 지표에서 성능이 가장 우수하였다. 석탄 전소 기준의 설계조건과 비교하면, 총 전열량 및 보일러 효율이 낮았지만 차이가 매우 작았다. NOx 배출농도는 모든 case에서 석탄 전소 대비 약간 낮았고, case 3이 최저인 122 ppm으로 나타났다.

본 연구에서는 암모니아 혼소 버너의 설계인자인 SA의 사용여부, quarl 각도, TA의 선회 강도를 달리하여 그 화염구조를 CFD로 분석하였다. SA를 사용하지 않는 경우 축방향 PA/연료 제트가 유지되어 혼합이 개선되었고, 바닥재 UBC가 감소하며 벽면 전열량 및 보일러 효율이 증가하였다. 추가로, quarl 각도를 줄이고 TA의 선회 강도를 높이면, TA가 quarl을 충분히 채워 강한 선회가 유지되고 IRZ가 넓고 안정적으로 형성되어 버너 영역의 연소성이 개선되며, 벽면 전열량과 보일러 효율 등 주요 지표가 가장 우수하게 나타났다. NOx 배출농도는 모든 혼소 조건에서 석탄 전소 대비 소폭 감소하였다.

후 기

This research was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry, and Energy (Grant number: RS-2023-00249065)

참고 문헌

[1] Niksa S. PC Coal Lab version 4.1: user guide and tutorial, Niksa Energy Associates LLC, Belmont, CA, United States, 1997.

[2] W. P. Jones, R. P. Lindstedt, "Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion", Combustion Flame, Vol. 73, 1988, pp.233-249.

[3] B. F. Magnussen, B. H. Hjertager, "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Internal Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Vol. 16, 1976, pp.719-729.

[4] C. Y. Wen, T. Z. Chaung, "Entrainment Coal Gasification Modeling", Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 18, 1979, pp.684-695.

[5] Menter, Florian R.. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.", AIAA Journal, Vol. 32, 1994, pp.1598-1605.

[6] E. H. Chui, G. D. Raithby, "Computation of radiant heat transfer on a nme method", Numerical Heat Transfer Part B-fundamentals, Vol. 23, 1993, pp.269-288.

[7] T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman. "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model", J. Heat Transfer, Vol. 104, 1982, pp.602-608.

순환유동층 보일러용 암모니아 버너 개발 현황

김규종*†. 김범종*. 이경래*. 김동원**. 박지훈**. 채태영***. 양원***. 이재욱***. 문태영****. 박성진****

Development Status of an Ammonia Firing Burner for Circulating Fluidized Bed Boilers

Kyujong Kim*†, Beomjong Kim*, Kyungrae Lee*, Dongwon Kim**, Jihun Park**, Taeyoung Chae***, Won Yang ***, Jaewook Lee***, Taeyoung Mun****, Sungjin Pak****

ABSTRACT

This study was conducted to develop an ammonia firing burner for circulating fluidized bed boilers. Scaled-down ammonia firing burners with capacities of 20kW$_{th}$, 0.1MW$_{th}$, and 1MW$_{th}$ were designed and manufactured, and combustion test were carried out at pilot facilities in the Korea Institute of Energy Institute (KIER), the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) and the Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), respectively. From the results of these pilot tests, design factors enhancing combustion stability and abating NO_x emissions can be derived. The design of a commercial-grade ammonia-firing burner with an 18 MW$_{th}$ capacity for circulating fluidized bed boilers has been completed.

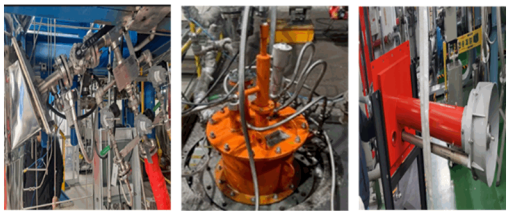
Key Words : Circulating Fluidized Bed, Ammonia, Burner, NO_x Emission

제 11차 전력수급계획 및 2030 국가온실가스 감축 목표 상향 안에 따라 온실가스 배출량 저감 및 그로 인한 기존 화력발전 설비의 좌초자산 방지를 위하여 기술개발 및 대응이 필요하다[1]. 암모니아는 탄소 성분이 없고 단위 질량당 열량이 18.6MJ/kg으로 석탄과 비슷하며, 수소에 비해 저장 및 운송이 용이하여 최근 무탄소 연료 및 수소 대량 이동수단으로 많은 연구가 진행중이다.

순환유동층 보일러에서 암모니아를 투입할 수 있는 방법은 크게 두가지로 연소로에 직접(공기투입노즐, 기동용 버너)주입하는 방식, 연소로 하부 분산판을 통해 공급되는 1차 공기와 혼합하여 주입하는 방식으로 구분된다[2, 3]. 순환유동층 보일러의 낮은 운전온도 및 암모니아의 연소특성을 고려하여 기존 설비의 기동용 버너를 통한 암모니아 혼소방식을 선정하였다. 기동용 버너는 Oil 이나 Gas를 사용한 기동(Start-up) 기능, 정상운전중에는 암모니아만을 단독으로 연소할 수 있는 기능이 요구된다. 또한 기동용 버너가 설치되는 연소로 하부 층(Bed)에는 층물질이 격렬하게 유동되기 때문에 화염안정성, 내마모성 및 내부식성 등 장기운전 안전성 확보가 필요하다.

암모니아의 연소 기능에 추가로 운전조건에 대한 요구사항도 충족되어야 한다. 연소로의 Bed Temperature, FEGT(Furnace Exit Gas Temperature) 등 운전 온도는 석탄 단독연소 대비 동등(± 3℃) 하여야 하며, NO_x 등 Emission은 동등 내지 이하 배출 달성을 목표로 하여야 한다.

본 연구는 상용급 순환유동층 보일러용 암모니아 버너 개발을 위하여 20kW$_{th}$, 0.1MW$_{th}$, 1MW$_{th}$ 규모의 축소 암모니아 버너를 설계 및 제작하였으며 각각, 에너지기술연구원(20kW$_{th}$), 생산기술연구원(0.1MW$_{th}$), 전력연구원(1MW$_{th}$) Pilot 시험설비에서 연소시험을 실시하였다(Fig. 1). 이를 바탕으로 18MW$_{th}$ 규모의 암모니아 버너를 개발하였다.



(a) 20kW$_{th}$ (b) 0.1MW$_{th}$ (c) 1MW$_{th}$

Fig. 1 암모니아 버너

20kW$_{th}$ 암모니아 버너는 공기와 암모니아가

* 현대중공업파워시스템
**전력연, ***생기연, ****에기연
† 연락저자, hhikim@hhi-power.co.kr
TEL : (031)220-9596 FAX : (052)-203-5192

함께 공급되는 Pre-mixed 방식이며 상용유동층 보일러의 기동용 버너와 유사하게 dense bed 상부에 30도 기울기로 설치하여 버너 단독으로 암모니아 연소시험을 수행하였다. 시험결과 암모니아 100% 연소에 성공하였으며, 공기비가 감소할수 록 NO의 발생량은 줄어드나 N_2O의 발생량이 증가하는 경향을 나타내었다(Table 1).

Table 1 20kW$_{th}$ 암모니아 전소 버너 시험결과

Run	NH_3 flow (lpm)	공기비	Gas composition		
			O_2	NO	N_2O
1	87	1.40	5.4	3,279	3.0
2		1.23	4.0	608	0.3
3		1.16	2.8	347	62
4		1.07	1.5	119	106

0.1MW$_{th}$ 암모니아 버너는 중앙부에 암모니아 Main 노즐이 위치하고, 화염의 안정성을 위한 Pilot 버너로 측면부에 Pre-mixed 버너가 장착된 형태이다. Pre-mixed 버너가 가동된 상태에서 암모니아 Main 노즐의 화염은 안정적이었다. 하지만 암모니아 Main 노즐 단독으로는 화염이 유지되지 않았다. 이는 Pilot 버너의 화염이 존재하는 상태에서 주변의 노즐로부터 암모니아를 공급할 경우 안정적인 화염을 유지할 수 있음을 의미하며, 암모니아 버너 Scale-up시 암모니아 노즐 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단되었다.

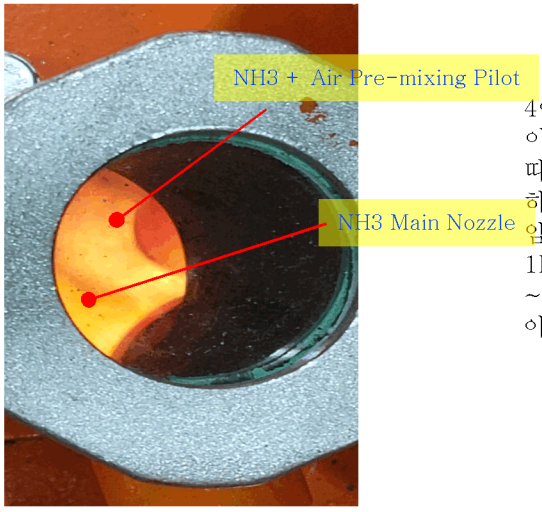


Fig. 2 암모니아 버너 화염(0.1MW$_{th}$)

0.1MW$_{th}$ 실험결과 20kW$_{th}$ 버너 테스트 결과와 동일하게 암모니아 버너의 공기비가 낮아짐에 따라 NO_x 배출은 감소하는 경향을 나타내었으며, 실험결과 중 최적의 조건은 공기비1.2(버너존 0.9, OFA(Over Firing Air) 0.3)로 NO_x 250ppm을 나타내었다.

1MW$_{th}$ 암모니아 버너는 Single Gun Multi Nozzle Type으로 Single Gun의 중앙에 Oil 또는 Gas 보조연료가 공급되는 내통노즐, 공기와 암모니아가 Pre-mixing 되어 공급되는 중간노즐 그리고 중간노즐의 외측에 배치되고 다수의 외부 멀티노즐로 분개되어 암모니아가 공급되는 외통노즐로 구성된다. 각 중간노즐, 외부멀티노즐 사이에는 스월러 및 Guide Pipe가 배치되어 Air의 선회 및 분배가 가능하도록 설계되었다. 1MW$_{th}$ 암모니아 버너는 20kW$_{th}$ 및 0.1MW$_{th}$ 버너에 사용된 Pre-mixed Pilot 버너를 측면부에 별도로 사용하지 않고 Single Gun 중간 노즐을 사용하여 구현 한 것을 특징을 가지고 있다.

연소 시험은 연소로 온도를 고려하여 0.8MW$_{th}$ 부하 조건에서 실시되었으며, 암모니아 버너의 화염은 안정적으로 유지되었다(Fig. 3).

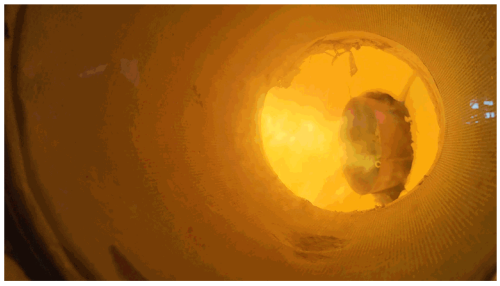


Fig. 3 암모니아 버너 화염(1MW$_{th}$)

1MW$_{th}$ 암모니아 버너의 Emission 특성을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 버너존 공기비가 1.2에서 0.9까지 변화함에 따라 NO_x는 568.1ppm에서 47.1ppm으로 감소하였으며, 버너존 공기비 0.93이하에서 N_2O 및 암모니아 slip이 증가하는 경향을 나타내었다. 1MW$_{th}$ 암모니아 버너의 최적 연소조건은 0.93 ~ 0.94 인 것으로 판단되며 NO_x, N_2O 및 암모니아 측정값은 다음과 같다.

@ 버너존 공기비 0.94

· NO_x : 120, N_2O : 5, NH_3 : 0 ppm

@ 버너존 공기비 0.93

· NO_x : 76.2, N_2O : 9.8, NH_3 : 0 ppm

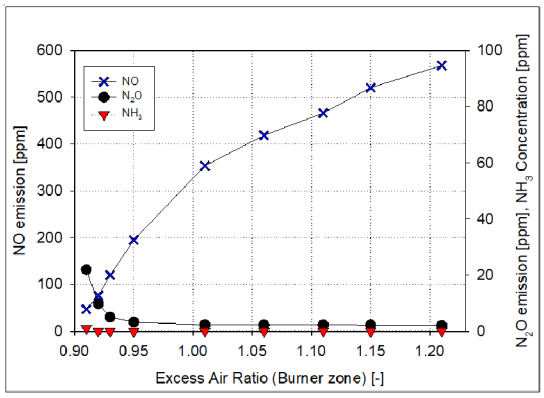


Fig. 4 암모니아 버너 Emission 특성(1MW$_{th}$)

20kW$_{th}$, 0.1 MW$_{th}$ 및 1MW$_{th}$ 암모니아 버너 연소시험 결과로부터 연소안정성 확보를 위한 Pre-mixed Pilot Flame과 Cone 보염기, NO$_x$등 Emission 저감을 위한 Fuel Staging과 Air Staging을 채택하여 18MW$_{th}$ 버너에 설계에 적용하였다. 또한 순환유동층 보일러의 적용을 위한 내구성 향상 대책으로서 버너를 사용하지 않을 경우에 Gun Retractable 할 수 있는 기능 및 화염 노출 부위에 Thermal Metal Coating 도 적용되었다.

결과적으로 20kW$_{th}$, 0.1 MW$_{th}$ 및 1MW$_{th}$ 암모니아 버너 연소시험으로부터 확보된 설계인자를 바탕으로 18MW$_{th}$ 상용급 순환유동층 보일러용 암모니아 버너를 개발하였다(Fig. 5).

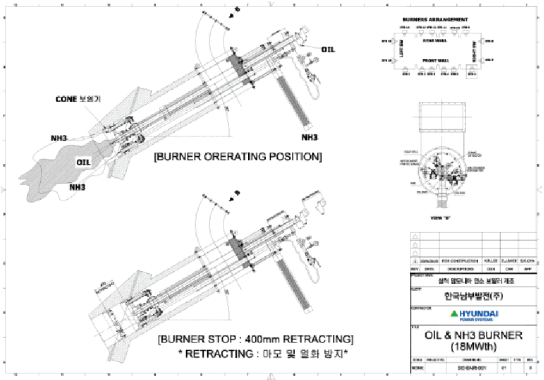


Fig. 5 상용급 암모니아 버너(18MW$_{th}$)

후 기

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원의 "USC급 보일러 암모니아 혼소발전 기술개발 및 실증(RS-2023-00253089)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] "제11차 전력수급기본계획(2024-2038)", 산업통상자원부, 2025

[2] Dong-won Kim, Kyoungil Park, Gyu-Hwa Lee, Kang-Min Kim, Jong-Min Lee, Jungho Hwang, Experimental investigation of combustion characteristics of ammonia with sub-bituminous coal in a pilot circulating fluidized bed combustor, Fuel, Volume 378, 2024, 132880

[3] Seong-Ju Kim, Sung-Jin Pak, Sung-Ho Jo, Hookyung Lee, Sang-Jun Yoon, Ho-Won Ra, Sung-Min Yoon, Dongfang Li, Kyubock Lee, Tae-Young Mun, "Combustion characteristics on ammonia injection velocity and positions for ammonia co-firing with coal in a pilot-scale circulating fluidized bed combustor", Applied Thermal Engineering, Volume 257, 2024, 124338

NO_x-O_3 반응의 실시간 분광 진단 및 N_2O_5 생성 메커니즘 검증

박진수*.손창우*.강우린*.박문수*†

Real-time Optical Diagnostics of NO_x-O_3 reaction systems for Validation of the N_2O_5 Formation Mechanism

Jinsu Park*, Changwoo Son*, Woorin Kang*, Moon Soo Bak*†

ABSTRACT

Nitrate is a key component of fertilizers and can be efficiently produced from NO_x by converting it to N_2O_5 and subsequently dissolving the N_2O_5 in water. However, the detailed reaction mechanisms of N_2O_5 synthesis via the NO_x-O_3 reaction lack validation in terms of rate coefficients derived from time-resolved species concentration profiles. In this study, the N_2O_5 formation mechanism in the NO_x-O_3 reaction was investigated using real-time UV-Vis absorption spectroscopy. A genetic Algorithm (GA) was developed to deconvolute complex, overlapping spectra and simultaneously quantify the concentrations of multiple species. The experimentally derived concentration profiles showed excellent agreement ($R^2 > 0.95$) with a Cantera-based kinetic model, thereby validating the N_2O_5 formation mechanism.

Key Words: N_2O_5, NO_x, Genetic Algorithm, Absorption Spectroscopy, Reaction Mechanism

탄소중립 사회 구현을 위한 핵심 과제 중 하나는 질산염 생산 공정의 전기화이다. 현재 비료로 사용되는 질산염은 Haber-Bosch 공정으로 암모니아를 합성한 후 Ostwald 공정을 거쳐 생산하는데, 이 과정에서 대량의 화석연료가 소비되고 CO_2가 배출된다. 열 플라즈마 기반 질소고정화는 공기 중의 N_2와 O_2를 직접 반응시켜 NO_x를 대량으로 생성할 수 있는 유망한 대안 기술이다. 그러나 생성된 NO_x를 액상의 질산염(NO_3^-)으로 효율적으로 전환하기 위해서는 물에 대한 용해도가 높은 N_2O_5로의 전환이 필수적이다. NO_x와 오존(O_3)의 반응을 통해 N_2O_5를 빠르게 형성하는 반응이 기존연구를 통해 제안되었으나, 반응에 참여하는 화학종들의 농도를 실시간으로 추적하여 상세화학반응 메커니즘을 직접적으로 검증한 기초 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 NO_x-O_3 반응계에서 N_2O_5 생성 메커니즘을 실시간 분광 진단을 통해 검증하고 수치 시뮬레이션으로 검증하였다. Fig. 1은 실험 장치 개략도를 보여준다. 유전체 장벽 방전(Dielectric Barrier Discharge, DBD) 플라즈마에 Air를 1 LPM으로 공급하여 1900-2200 ppm의 O_3를 생성하고, 1.59 L 부피의 반응 챔버(Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR)로 가정)로 주입하였다. 이때 NO_x-N_2 가스(NO 1250-2000 ppm 또는 NO_2 2000-4000 ppm)는 Air 또는 N_2로 희석하여 1 LPM으로 동시에 공급하였으며, NO와 NO_2 가스, 가스 별 두 가지 다른 농도, 그리고 Air와 N_2의 두 가지 희석 조건(총 8개 조합)에 대해 실험이 진행되었다.

* 성균관대학교 기계공학부
† 연락저자, moonsoo@skku.edu
TEL : (031) 299-4849

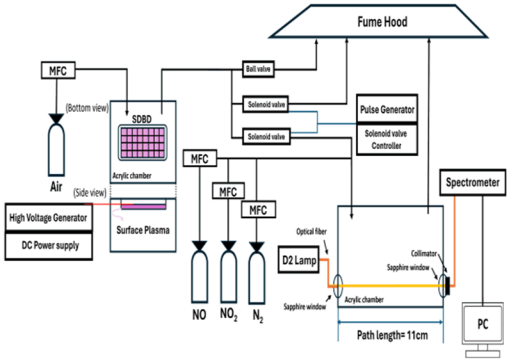


Fig. 1 Schematic of the experimental setup for real-time optical diagnosis of NO_x–O_3 reaction systems.

듀테리움 램프 광원과 사파이어 윈도우를 이용한 UV-Vis 흡수 분광법으로 200-600 nm 파장 범위에서 5초 간격, 500초 동안 실시간 측정을 수행하였다. NO_x 혼합 가스를 먼저 주입하여 정상상태에 도달시킨 후, 데이터 취득을 개시하였고, 데이터 취득 개시 후 30초 시점에 O_3를 주입하였다. Beer-Lambert 법칙을 적용하여 광학 깊이(Optical Depth)를 계산하고, 광 경로 11 cm와 문헌의 흡수 단면적(Absorption Cross Section, ACS) 데이터를 활용하여 광학 깊이를 각 화학종의 농도로 변환하였다. NO의 경우 자가흡수(self-absorption) 현상으로 인해 문헌 ACS 값과 실측 값의 편차가 컸다. 따라서 NO 가스를 0-2500 ppm 농도 범위에서 별도 측정하여 실험 조건에 맞는 ACS를 매핑하여 사용하였다.

측정된 UV-Vis 흡수 스펙트럼은 여러 화학종(NO, NO_2, O_3, NO_3, N_2O_5, N_2O_4)의 흡수가 중첩되어 나타난다. 각 화학종의 농도를 정량화하기 위해 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)-기반 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 측정된 광학 깊이와 각 화학종의 ACS를 기반으로, 실험 스펙트럼과 계산 스펙트럼의 오차를 최소화하는 농도 조합을 반복적으로 탐색하는 최적 화학종 농도 조합을 도출한다. 계산은 각 스펙트럼에 대해 진행되어, 측정한 spectra로부터 NO, NO_2, O_3, NO_3, N_2O_5, N_2O_4 화학종에 대한 시간별 농도를 추출할 수 있었다.

실험 결과의 검증을 위해 화학반응 시뮬레이션 도구인 Cantera를 사용하였다. 선행 연구들의 반응 메커니즘을 검토한 결과 N_2O_5 농도를 과대 또는 과소 예측하는 한계가 확인되었다. 이를 개선하기 위해 반응 메커니즘을 수정하고, CSTR 모델로 시간에 따른 화학종 농도 변화를 계산하였다. 참고로 NO_x로부터 N_2O_5 생성의 주요 반응은 다음과 같다:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2,$$

$$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2,$$

$$NO_2 + NO_3 \rightleftharpoons N_2O_5.$$

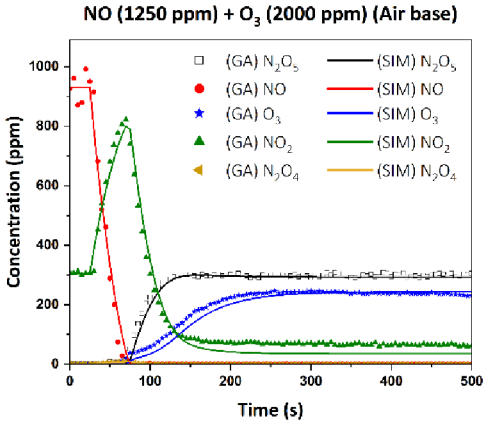


Fig. 2 Model validation for the NO-O_3 reaction, comparing GA-fitted experimental data with Cantera simulation.

Fig. 2는 NO+O_3 반응에 대한 GA 피팅 결과와 Cantera 시뮬레이션의 비교를 보여준다. 실험에서 측정된 화학종들의 시간에 따른 농도 변화가 시뮬레이션 결과와 높은 일치도를 나타냈다. 특히 N_2O_5의 생성 거동이 정확히 예측되었으며,

NO의 소모와 NO_2의 생성 경로가 명확히 확인되었다.

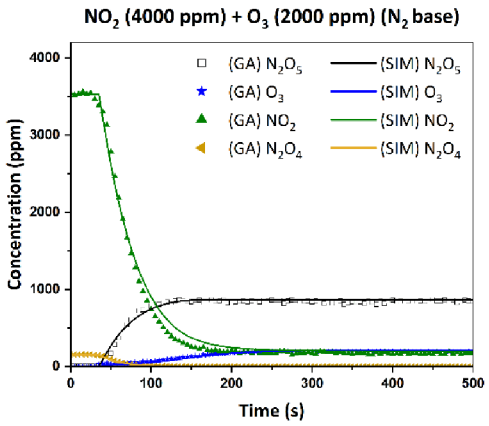


Fig. 3 Model validation for the NO_2-O_3 reaction, comparing GA-fitted experimental data with Cantera simulation.

Fig. 3은 NO_2 + O_3 반응에 대한 검증 결과를 나타낸다. NO_2가 초기 반응물인 경우 NO_3 생성이 빠르게 진행되며, 이후 NO_2 + NO_3 평형 반응을 통한 N_2O_5 생성이 지배적임을 확인하였다. 실험과 시뮬레이션 결과의 정량적 일치는 제안된 반응 메커니즘의 신뢰성을 입증한다.

Table 1 R^2 values for N_2O_5 concentration prediction comparing experimental data with Cantera simulation.

Condition	Air base	N_2 base
NO (1250 ppm) + O_3	0.9888	0.9803
NO (2000 ppm) + O_3	0.9556	0.9729
NO_2 (2000 ppm) + O_3	0.9795	0.9521
NO_2 (4000 ppm) + O_3	0.9531	0.9801

Table 1은 8가지 실험 조건에서 N_2O_5에 대한 실험과 시뮬레이션 비교 결과를 보여준다. Air 희석 조건(실험 1-4)과 N_2 희석 조건(실험 5-8) 모두에서 $R^2 > 0.95$의 높은 결정계수를 나타내어, 단일 반응 메커니즘으로 다양한 초기 조건을 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다. 이는 제안된 메커니즘이 NO_x 농도 및 희석 가스 종류에 관계없이 일관되게 적용 가능함을 의미한다.

기존 문헌의 반응 메커니즘들은 N_2O_5 농도를 과대 또는 과소 예측하는 경향을 보였으나, 본 연구에서 구성한 메커니즘은 실험 결과와 높은 일치도를 보였다. N_2O_5의 생성 경로는 NO + O_3 → NO_2 + O_2를 거쳐 NO_2 + O_3 → NO_3 + O_2가 진행되고, 최종적으로 NO_2 + NO_3 ⇌ N_2O_5 평형 반응이 N_2O_5 생성을 지배하는 것으로 확인되었다.

본 연구는 NO_x-O_3 반응계의 실시간 분광 진단 기법을 확립하고, 유전알고리즘 기반 다중 화학종 정량화 방법론을 제시하였다. 기존 연구와 달리 5초 간격의 높은 시간 분해능으로 중간 화학종의 농도 변화를 실시간 추적하였으며, 실험과 시뮬레이션의 통합 검증을 통해 N_2O_5 생성 메커니즘의 신뢰성을 입증하였다. 이는 질소고정화 공정에서 NO_x를 N_2O_5로 전환하여 수용성 질산염을 효율적으로 생산하는 공정 설계에 중요한 기초 데이터를 제공한다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-00555077, No. RS-2025-00512709).

참고 문헌

[1] S. Park, W. Choe, and C. Jo, "Interplay among ozone and nitrogen oxides in air plasmas: Rapid change in plasma chemistry", Chemical Engineering Journal, Vol. 352, 2018, pp. 1014-1021.

[2] J. Kim, H. Lee, S. Huh, et al., "Competitive formation of NO, NO_2, and O_3 in an air-flowing

plasma reactor: A central role of the flow rate", Chemical Engineering Journal, Vol. 468, 2023, 143548.

[3] S. P. Sander et al., "Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies, Evaluation Number 15", JPL Publication 06-2, NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2006.

열분해 기반 수소 생산과 청정 연소로의 활용 연구

유지호[*,**] · 이은지[*,***] · 이승현[*,****] · 김성일[*,****] · 엄현진[*] · 김휘동[*] · 이은도[*,***] · 양원[*,***] · 이영재[*†]

Research on pyrolysis-based hydrogen production and its use in clean combustion

Jiho Yu[*,**] · Eunji Lee[*,***] · Seunghyeon Lee[*,****] · Seongil Kim[*,****] · Hyeonjin Eom[*] · Whidong Kim[*] · Uendo Lee[*,***] · Won Yang[*,***] · Youngjae Lee[*†]

열에너지를 활용하는 산업계에서는 탄화수소 기반 연료를 사용시 필연적으로 대표적 온실가스인 이산화탄소(CO_2)를 배출하게 된다. 이에 산업계에서는 탄소 기반 연료를 저탄소 또는 무탄소 대체 연료로 전환하거나 기존 에너지원을 전기로 대체하여 탄소중립을 달성하고자 하나, 전기 기반 에너지 전환은 산업 전반에 걸쳐 다양한 기술적 제약에 직면해 있다. 이러한 배경에서 기존 열에너지 생산 인프라를 활용할 수 있는 대안으로 수소가 주목받고 있으며, 수소의 공급 및 활용 기술 고도화가 중요한 과제로 부상하고 있다.

현재 공급 중인 수소 중 일부는 천연가스의 열화학적 전환 기반의 Steam Methane Reforming (SMR)을 바탕으로 이미 상용화되어 활용되고 있으나, 기후변화 대응을 위한 CF100을 달성하기 위해서는 무탄소 에너지 확보가 필수적이다. 상용화된 SMR 기술은 CCUS(Carbon Capture Utilization and Storage) 기술과의 연계를 통해 이산화탄소의 직접 배출을 저감하는 것이 가능하나, 실효성 있는 CCUS 기술을 도입할 수 있는 도시 혹은 국가는 제한적일 것이다. 따라서, 수소 생산 과정에서 온실가스 배출을 최소화할 수 있는 그린수소(Green hydrogen)과 청록수소(Turquoise hydrogen)에 관한 국가적, 산업적 관심이 높아지고 있다. 이 중 청록수소는 탄화수소계 원료에 포함되어 있는 수소와 탄소를 열화학적으로 분리하여 탄소를 이산화탄소가 아닌 고체상의 탄소 부산물으로 전환하여 수소 생산 공정 내 이산화탄소 발생을 근원적으로 제어할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 청록수소는 SMR 대비 높은 반응 온도를 필요로 하며 고체상의 탄소 부산물이 발생하기 때문에 열 공급, 소재 선정, 탄소 회수 및 고부가화 등 추가적인 기술적 고려가 필요하다. 청록수소에 대한 관심이 높아지면서 다양한 접근의 청록수소 기술 개발을 통해 기술적 난제들을 극복하고자 노력 중이다.

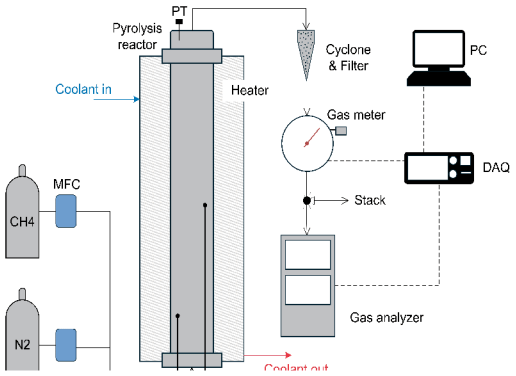
열분해 기반의 청록수소는 기존의 천연가스 공급 인프라를 활용할 수 있기 때문에 수소 생산과 활용이 동시에 이루어질 수 있으며, 대량 수소 생산에 대한 잠재성을 가지고 있다. 하지만 수소와 일부의 탄소수소로 구성된 열분해 생성 기체를 직접 연소시 수소의 높은 화염 온도로 인해 thermal NO_x 배출이 증가할 수 있으며 반응 온도 및 체류시간에 따라 열분해 생성물의 조성의 변동성이 현저히 높아 연소 안정성을 확보하는 것이 중요하다.

암모니아는 수소에 비해 단위 부피당 저장 밀도가 높아 경제적인 수소 운송이 가능하여 수소 캐리어로써 각광받고 있다. 암모니아는 그대로를 연료로써 사용하거나 개질을 거쳐 수소를 추출하여 사용할 수 있다. 하지만 암모니아 혹은 암모니아 열분해 생성물인 수소를 연료로 사용할 때 다량의 질소산화물이 배출된다는 문제가 있다. 단열화염 온도가 높아 열적 질소산화물(Thermal NOx)이 다량 생성되는 수소 연료와 질소 분자를 포함하고 있어 연료 질소산화물(Fuel NOx)이 다량 생성되는 암모니아 연료를 사용하기 위하여 질소산화물 배출에 대한 연구가 필수적이다.

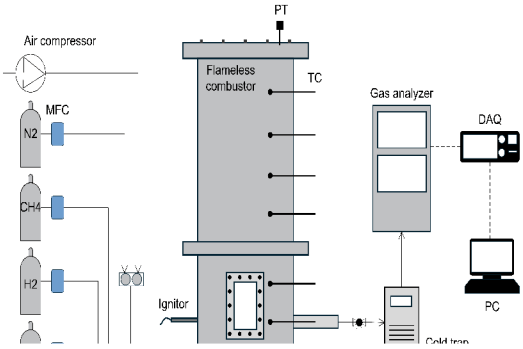
따라서, 본 연구의 첫 번째 목적은 메탄, 탄화수소, 암모니아, 플라스틱 등 다양한 수소화합물을 원료로 활용하여 열분해를 통해 수소를 생산 혹은 추출할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 두 번째로는 생산된 수소의 청정 연소로의 활용을 위해 무화염 연소 기술을 적용하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위한 한 가지의 대표적인 방법으로 메탄 열분해를 통해 청록수소를 생산하고, 생성된 수소, 탄화수소, 그리고 잔류 메탄을 무화염 연소 기술에 적용하여 기존 연소 방식의 한계를 극복하고자 하였다. 무화염 연소는 균일한 온도장 형성, 저 NO 및 CO 배출, 높은 연소 안정성, 우수한 에너지 효율성을 특징으로 한다. 이를 통해 메탄 열분해 생성물의 연료 활용 가능성을 평가하고, 연소 시 발생하는 NO 배출량을 최소화하는 것을 주요 목표로 설정하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 메탄 열분해와 무화염 연소를 위해 활용된 두 가지 반응기 및 연소기의

* 한국생산기술연구원 지속가능기술연구소
** 연세대학교 기계공학과
*** 과학기술연합대학원 청정공정·에너지시스템공학
**** 고려대학교 기계공학과
† 연락저자, leeyj@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8464 FAX : (041)-589-8323



(a) Methane pyrolysis reactor



(b) Flameless combustor

Fig. 1 Schematic diagrams of (a) methane pyrolysis reactor and (b) flameless combustor.

개략도를 나타낸 것이다. 메탄 열분해 반응기는 촉매를 배제하고 순수 열적인 분해를 통해 수소를 생산하며, 생성된 고체 탄소는 사이클론과 필터를 통해 포집된다. 열분해 기체 생성물의 수율을 측정을 위한 유량계를 설치하였으며, 유량 측정 후 가스 분석기를 통해 주요 생성물의 농도를 측정하였다. 무화염 연소기는 안전을 고려하여

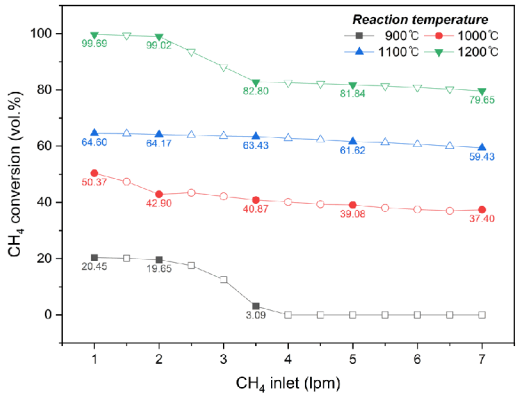
Table 1 Experimental condition

Parameter	Unit	Value
Pyrolysis		
Pressure	atm	1
Temperature	℃	900-1200
Flow rate	lpm	1-7
Flameless combustion		
Pressure	atm	1
Equivalence ratio	-	0.9
Oxygen fraction	%	17, 21
Heat input	kWth	3-4.5

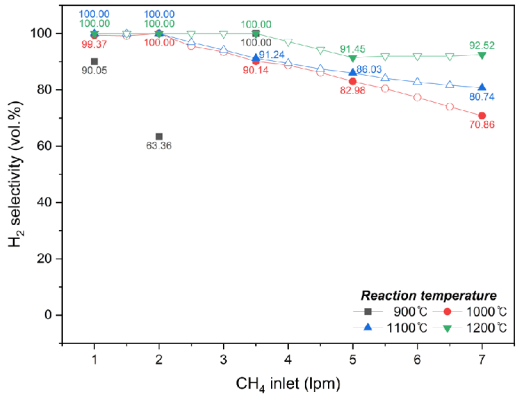
열분해 기체 생성물의 모사 연료를 투입할 수 있도록 구성되었다. 주요 연소기 내부 온도를 측정할 수 있는 열전대가 설치되어 있으며, 배가스는 응축을 통해 수분을 제거하고 가스 분석기를 통해 생성물의 농도를 측정하였다.

메탄 열분해 반응과 무화염 연소를 위해 적용한 실험 결과는 Table 1과 같다. 촉매가 없는 조건에서의 메탄 열분해는 최소 900℃ 이상의 온도에서 분해가 되므로 반응 온도 범위는 900-1200℃로 선정하였으며, 본 반응기의 최대 유량을 고려하여 메탄 투입량은 최대 7 lpm까지 진행하였다. 무화염 연소는 당량비를 0.9로 고정하였으며, 산화제인 공기 중 질소 함량을 높여 산화제 내 산소 함량을 17%까지 낮췄다. 입열량의 경우 메탄 열분해 조건에 따라 투입되는 연료의 조성이 달랐기 때문에 최대 4.5kWth까지 투입하였다. 참고로 모든 실험은 대기압 조건에서 수행되었다.

Table 1에서 제시된 실험 조건을 바탕으로 Fig. 1(a)의 메탄 열분해 반응기를 활용하여 반



(a) Methane conversion rate



(b) H_2 selectivity

Fig. 2 (a) Methane conversion rate and (b) H_2 selectivity with respect to temperature and CH_4 flow rate

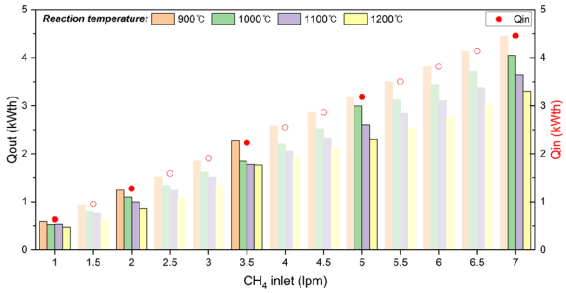


Fig. 3 Comparison with chemical energy of CH_4 feed(Q_{in}) and pyrolysis gas(Q_{out})

응 온도 및 메탄 투입 유량에 따른 메탄 전환율과 수소 선택도를 Fig. 2와 같이 도출하였다. 열분해 온도가 높고 메탄 유량이 낮을수록 메탄의 흡열 반응을 위한 에너지 흡수율이 높아지게 되며 체류 시간도 증가하기 때문에 메탄 전환율이 증가하게 된다. 하지만 비선형적인 거동으로 인해 비실험 조건에 대한 정확한 예측은 일부 선형적인 구간에 한정적일 것으로 예상된다.

메탄 열분해시 수소로의 전환을 의미하는 수소 선택도를 나타낸 Fig. 2(b)는 (a)의 메탄 전환율과 비교해 모든 조건에 높은 값을 나타낸다. 반응 온도 900℃를 제외한 모든 반응 온도에서 메탄 유량 증가에 따른 민감도가 낮았으며, 약 70% 이상의 수소 선택도를 나타냈다. 이를 통해 메탄 열분해시 탄화수소로의 합성이 일어나지만 미미하며, 대부분 수소로 전환된다는 것을 알 수 있다.

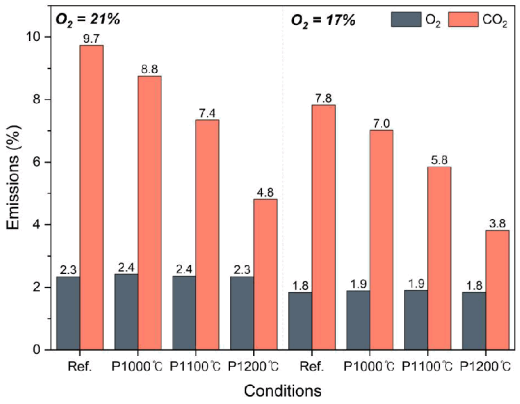
Fig. 3은 메탄 열분해에 투입된 메탄의 총 화학 에너지와 열분해 후 생성된 기체의 총 화학 에너지를 비교한 결과이다. 총 화학 에너지 계산은 고위발열량(Higher heating value, HHV)를 기준으로 산정하였으며, 화학 에너지만을 고려하기 위해 투입된 메탄과 기체 생성물의 현열을 고려하지 않았다. 열분해 온도가 증가함에 따라 메탄 전환율이 증가함에 따라 고체 탄소의 생성량이 증가하게 된다. 이로 인해 생성 기체 내 수소 함량은 증가되었으나, 탄소가 가지고 있는 화학 에너지가 손실로 작용하게 된다. 이로 인해 투입된 메탄의 총 화학 에너지 대비 생성 기체의 총 화학 에너지는 감소하게 된다.

Table 2 Fuel composition determined by methane pyrolysis

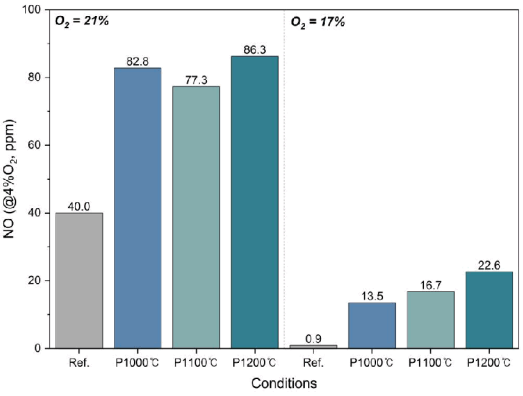
Case	Fuel composition(Vol.%)		
	CH_4	H_2	C_2H_4
Ref.	100	-	-
P1000℃	51	43	6
P1100℃	28	67	4
P1200℃	12	86	2

위와 같이 도출된 메탄 열분해 실험 결과를 바탕으로 메탄 유량 7lpm을 기준으로 Table 2과 같은 메탄 열분해 반응 온도에 따른 모사 열분해 기체 조성을 도출하였다. 참고로 메탄 열분해에 따른 탄화수소 생성량이 낮아 탄화수소 내 함량이 가장 높은 에틸렌의 단일종으로 단순화하였다.

Fig. 4는 Table 2의 모사 연료 조성을 바탕으로 연소 후 배가스 조성에 대한 결과를 나타낸 것이다. 모든 조건에서 CO 배출은 발생하지 않았으며, 안정적인 완전 연소가 달성되었음을 알 수 있었다. 당량비를 0.9로 고정한 조건에서 산화제 내 산소 분율이 21%일 때 O_2 농도는 2.3-2.4%, 17%일 때는 1.8-1.9%로 안정적으로 제어되었다. 열분해 온도가 높아질수록 고체 탄소 생성이 증가됨에 따라 연료 내 탄소 함량이 낮아져 CO_2 배출량은 점진적으로 감소하였다. 메탄 대비 열분해 기체를 적용하게 되면 수소와 에



(a) O_2 and CO_2 concentrations



(b) NO concentration

Fig. 4 Flue gas compositions with respect to methane pyrolysis conditions and oxygen fractions

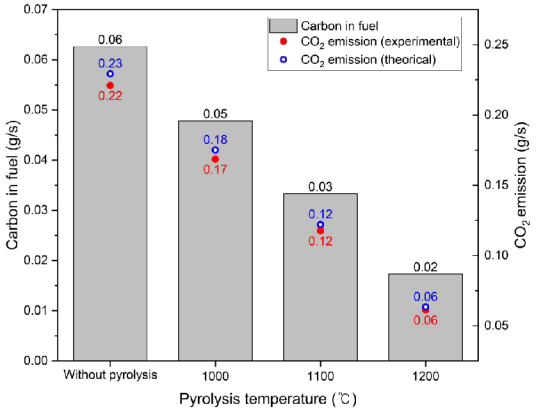


Fig. 5 Carbon emisssion analysis for pyrolysis temperatures

틸렌에 의한 NO 생성이 증가하게 된다. 하지만 산화제 내 산소 분율을 17%로 감소시킨 경우 총 NO 배출량이 74-97% 감소하게 되며, 대부분의 조건에서 25 ppm 이하의 NO 배출량을 보였다.

Fig. 5는 메탄 열분해 온도에 따라 무화염 연소에 적용하였을 경우에 연료 내 포함되어 있는 탄소량과 이에 따른 연소 후 배출되는 이산화탄소량을 정량적으로 비교한 것이다. 본 연구에서 고체 탄소 생성량을 정량적으로 계측하지 않았기 때문에 실제 실험에서 계측된 CO_2 배출량과 메탄 전환율을 기반으로 이론적으로 도출된 CO_2 배출량을 함께 비교하였다. 먼저, 실험적으로 계측된 CO_2 배출량과 이론값과의 차이는 무시할 정도로 유사하기에 고체 탄소 생성량에 대한 분석 신뢰도가 높다는 것을 의미한다.

Fig. 5에서 열분해 온도가 증가할수록 고체 탄소 생성량 증가로 인해 연료 내 탄소 함량이 감소하게 된다. 연료 내 탄소 함량이 감소함에 따라 연소 후 배가스 내 CO_2 함량이 감소하게 된다. 메탄 연료를 직접 무화염 연소에 사용했을 경우와 비교하여 CO_2 배출량은 반응 온도 1000℃에서는 약 22.7%, 1100℃에서 약 45.5%, 그리고 1200℃에서 약 72.7% 감소하였다. 이를 통해 메탄 열분해를 통해서 생성된 기체를 연소에 직접 활용하는 경우 고체 탄소로 손실되는 화학 에너지는 불가피하지만 연소 후 배출되는 이산화탄소를 현저히 저감할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 메탄 열분해를 통해 고체 탄소를 분리함으로써 연료 내 탄소 함량을 효과적으로 저감하고 이를 통해 이산화탄소 배출량을 동시에 저감할 수 있음을 확인하였다. 또한, 무화염 연소 기술 적용을 통해 질소산화물 동시 저감에 대한 효과를 확인하였으므로 향후 온실가스 및 대기 오염 물질 저감을 위한 청정 에너지 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP22024-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-석유대체 친환경 화학기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. 2022M3J5A1051728).

수소 혼소용 이중선회 인젝터의 화염구조와 NOx 배출특성에 관한 실험적 연구

홍준표* · 이기만*†

An Experimental

Junpyo Hong* · Keeman Lee*†

인류와 생태계에 심각한 영향을 미치고 있는 지구온난화에 대응하기 위해 전 세계적으로 이에 대한 대안을 찾기 위한 노력이 지속적으로 이루어져왔다. 하지만 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 농도가 최고치를 경신하는 등 추가적인 노력이 요구되고 있다. 이를 위해 발전과 같은 산업 분야에서는 탄소 중립을 향해 나아가기 위해 기존의 탄화수소 연료를 수소와 암모니아 같은 무탄소 연료로 대체하기 위한 연구를 지속하고 있다. 본 연구에서는 대표적인 무탄소 연료 중 수소를 가스터빈에 적용하기 위해 이중선회 인젝터에서 수소 혼소 및 전소가 화염 구조와 NOx 배출특성에 미치는 영향을 분석하고 논의하였다.

본 연구에 사용된 인젝터는 중앙의 파일럿 노즐과 외부의 메인 노즐에 각각 선회기가 부착된 이중선회 인젝터로 파일럿 노즐의 내부 선회기에는 시계 방향의 vane type 선회기가, 메인 노즐의 외부 선회기에는 반시계방향의 tangential type 선회기가 부착된 역선회 배열을 갖고 있다. 또한 메인 노즐에 예혼합된 메탄과 산화제를, 파일럿 노즐에 순수 수소를 주입하여 선회 화염과 수소 연료로 인한 역화 현상을 방지하였다.

역선회 인젝터의 화염형상은 크게 화염 선단이 파일럿 노즐팁에 부착된 부착화염과 화염 선단이 연소실 중간에서 반응이 시작된 부상화염 두가지 형태로 나타났다. 부착화염은 메탄 전소 조건과 수소 혼소율 80 ~ 100% 조건에서 나타났고, 부상화염은 수소 혼소율 20 ~ 60% 조건에서 나타났다. 파일럿 노즐에 주입된 수소로 인해 두 화염형상 모두에서 내부 화염과 외부 화염 두가지 반응영역이 관찰되었다. 내부화염은 파일럿 노즐의 수소 유동과 내부 재순환 유동의 전단층 영역에 형성된 반응영역이고, 외부 화염은 메인 노즐의 예혼합된 메탄과 산화제 유동과 파일럿 노즐의 수소 유동의 전단층 영역에서 형성된 반응영역이다.

두 화염형상의 화염 선단의 안정화 경향을 파악하기 위해 반응 유동장을 관찰하였다. 부상화염의 경우 화염 선단이 부착될 수 있는 파일럿 노즐 팁 근처에서 부착화염 조건에 비해 높은 유속이 관찰되었다. 또한 역방향의 내부 재순환 유동의 정체점이 부상화염의 경우 덤프면 위쪽에 형성되었지만, 부착화염의 경우 덤프면까지 관찰되지 않아 파일럿 내부 노즐에 형성된 것을 예상할 수 있었다. 이를 통해 파일럿 노즐 팁 근처의 상대적 높은 유속으로 인해 화염이 부상되고, 재순환 유동을 통해 유입된 열에너지가 화염이 부착되는 원인으로 분석되었다.

수소 혼소율에 따른 NOx 배출 특성이 조사되었다. 수소 혼소율과 글로벌 당량비가 높아질수록 높은 화염온도로 인해 NOx 배출량이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 수소 혼소율 60%에서 전소 조건은 메탄 전소에서 수소 혼소율 40% 조건에 비해 큰 차이를 보이지 않았다. 수소 혼소율 80% 조건과 수소 전소 조건에서 글로벌 당량비 0.35 ~ 0.4 조건에서 NOx 배출이 폭발적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 부착되어있던 화염이 높은 유속과 낮은 글로벌 당량비로 인해 부상되면서 화염떨림 현상이 발생하고, 이로 인한 연소진동으로 인해 NOx 배출이 급격히 증가한 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2025학년도 국립순천대학교 글로컬대학 사업비의 지원을 받아 연구되었음.

* 순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : (061)750-3828

중형 폐기물 소각로의 SNCR 제어 효율 향상을 위한 AI기반 적응형 요소수 분사 기술 개발

박성민*, 김희윤*, 신동민**, 이재호**, 손지훈***, 류창국*†

Development of AI-Based Adaptive Urea Injection for Effective SNCR Control in a Medium-scale Waste Incinerator

Seongmin Park*, Heeyoon Kim*, Dongmin Shin**, Jaeho Lee**, Jihoon Son**, Yongkeun Yun**, Changkook Ryu*†

ABSTRACT

Based on data accumulated in our previous study for O_2-based control of urea injection, this study develops an AI-based adaptive urea injection control for NOx reduction in a 48-ton/day medium-scale waste incinerator. An ensemble deep learning model combining MLP and LSTM/GRU structures was trained on operational data from an O_2-based SNCR control system. The AI model achieved 11-step (2 min 45 sec) NOx prediction with R^2=0.98 and demonstrated superior dynamic tracking (cross-correlation: 0.304 vs 0.279) compared to the O_2-based model, while maintaining comparable 34% urea reduction versus manual control with stable NOx emission compliance.

Key Words : waste incinerator, artificial intelligence, SNCR, urea injection, NOx emission

중소형 폐기물 소각로는 저비용의 NOx 배출제어를 위해 SNCR(선택적 비촉매 환원) 방식을 주로 사용한다. SNCR은 암모니아나 요소수(Urea)를 고온 영역에 분사하여 NOx를 저감하는 방식으로, 적정 온도 구간(850-1050 ℃)이 좁고 폐기물 성상 변화에 따른 연소 조건 변동이 빈번하여 실시간 제어가 어렵다. 이로 인해 NOx 농도의 변화가 크고 요소수가 과도하게 분사되는 경우가 많아 운영비 증가 및 암모니아 슬립 등의 문제가 발생한다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 AI 기반 연소 제어 및 NOx 예측 모델에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며[1 - 3], 이는 기존의 수치 해석이나 규칙 기반 제어보다 실시간 적용성과 적응성이 우수한 것으로 보고되고 있다[4 - 5].

본 연구팀은 선행 연구[6]에서 배기가스 O2 농도 기반 요소수 분사 제어 시스템을 개발하여 수동 제어 대비 요소수 소비를 절감하였다. 또한 이를 통해 요소수 유량 변화에 뜨른 NOx 배출 농도 데이터를 확보하였따. 이를 기초로 본 연구에서는 AI 기반의 NOx 농도 선행 예측과 요소수 분사량 최적 제어 알고리듬을 개발하여 기존 O_2 기반 제어 모델과 SNCR 성능을 비교하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 2t/h 규모 소각로의 개략도를 나타낸다. 폐기물은 크레인을 통해 호퍼에 투입된 후 램 피더를 거쳐 화격자에 공급된다. 1차 공기는 화격자 하부 및 측면에서, 2차 공기는 연소실 전·후벽을 통해 각각 투입되며, 연소 과정에서 발생한 고온의 열에너지는 연소실

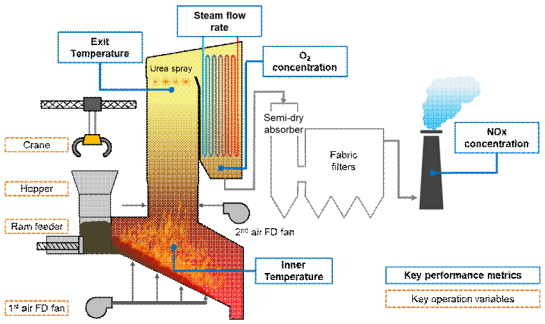


Fig. 1 Schematic of the target incinerator and key performance parameters (T_{gas}, m_{steam}, C_{O2}, and C_{NOx})

* 성균관대학교 기계공학과
** SK에코플랜트
† 연락저자, cryu@skku.edu
TEL : (031)299-4841

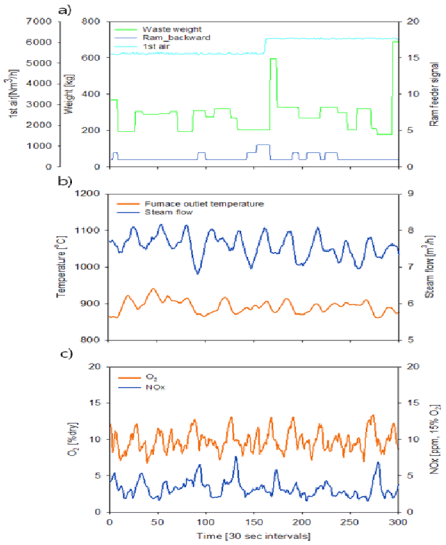


Fig. 2 Examples of operating variables and key performance parameters: a) feeding rate, ram feeder status, and primary air flow rate b) T_{gas}, m_{steam}, c) C_{O2}, and C_{NOx}.

벽면 증발기와 후단 관군부에서 증기로 회수된다. 배기가스는 SNCR 시스템, 백필터, 반건식 흡수 장치를 순차적으로 통과하여 정화된다. 주요 성능 지표인 연소실 출구 온도(T_{gas}), 증기 유량(m_{steam}), 산소 농도(C_{O2}), 질소산화물 농도(C_{NOx})는 Fig. 1에 표시된 각 측정 위치에서 실시간으로 모니터링된다.

본 연구를 위해 2025년 6~8월(3개월) 동안 선행 연구의 O_2 기반 SNCR 제어 시스템을 실증 소각로에서 운영하며 15초 간격으로 138개 운전 항목(폐기물 투입량, 1·2차 공기량, 연소실 온도, O_2/NOx 농도 등)을 수집하였다. 이 중 6개 주요 입력 변수를 상관성 분석을 통해 선정하였다. 폐기물 투입량은 호퍼 게이트 및 램 피더 이벤트 신호를 활용하여 실제 투입 시점을 보정하였고, 전체 데이터를 훈련 80%, 검증 5%, 테스트 15%로 분할하여 AI 모델 학습에 활용하였다.

Fig. 2는 약 150분간의 실제 운전 데이터에서 폐기물 투입 거동과 주요 운전 변수의 변화를 보여준다. 폐기물 투입량과 공급 주기는 일정하지 않으며, T_{gas}는 큰 폭으로 변동하고 이에 따라 m_{steam} 및 C_{O2}도 불규칙하게 변화한다. C_{NOx} 역시 T_{gas}및 C_{O2}와 부분적으로는 비슷한 경향을 보이지만, 전체적으로는 시간 지연이 동반된 비선형적이고 복합적인 거동을 나타낸다.

Fig. 3은 선행 연구[6]의 O_2 기반 요소수 제어 함수를 나타낸다. 이 시스템은 최근 6시간 평균 O_2의 110%를 전환점으로 설정하여, 저NOx(고산소) 구간에서는 소량, 고NOx(저산소) 구간에서는

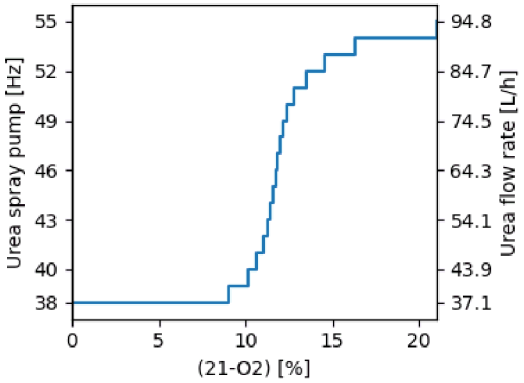


Fig. 3 O_2-based urea flow function (p_{O2})

다량의 요소수를 분사한다. 그러나 O_2는 NOx의 간접 지표이며 시간 지연이 존재하여 실시간 추종성이 제한적이었다. 식 (1)~(5)는 해당 제어 모델의 핵심 수식이다.

$$P_{O_2} = (1-\sigma)y_{low} + \sigma y_{high} \quad (1)$$

$$\sigma = 1/1+\exp(-10(x - x_{avg,6h})) \quad (2)$$

$$y_{low} = p_{\min} + (y_0 - p_{\min})\exp((x - x_{avg,6h})) \quad (3)$$

$$y_{high} = y_0 + (p_{\max} - y_0)\frac{\log(30 \cdot r + 1)}{\log(31)} \quad (4)$$

$$r = (x - x_{avg,6h})/(x_{\max} - x_{avg,6h}) \quad (5)$$

(x: 예측 산소농도, $x_{avg,6h}$: 6시간평균×1.1, y_0: 기준점의 펌프값, p_{min}/p_{max}: 펌프 최소/최대)

Fig. 4는 O_2 기반 제어 시스템 적용 전후를 비교한 것이다. 제어 전(Fig. 4a)은 고정 분사(평균 75.9 L/h)로 NOx 변동폭이 컸으나(평균 18.6 ± 13.7 ppm), 제어 후(Fig. 4b)는 연소상황에 따라 요소수 유량이 변동하는 것을 알 수 있다. 이를 3개월 운영한 결과, Table 1과 같이 요소수 분사

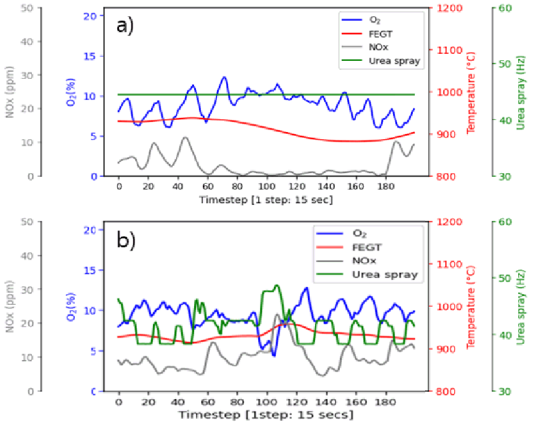


Fig. 4 Comparison of operating variables before and after O_2-based SNCR control implementation

Table. 1 O_2-based SNCR control: before and after performance comparison

	Before (4 months)	After (3 months)	Reduction
Urea water (L/h)	75.9	52.7	30.6 %
Average NOx (ppm)	18.6	9.9	46.8 %
Average std of NOx	13.7	10.4	23.9 %

량 30.6% 저감(평균 52.7 L/h), NOx 46.8% 감소(9.9±10.4 ppm)를 달성하였다. 이는 폐기물 성상 변화를 감안하여도 유의미한 개선으로 판단된다.

본 연구의 앙상블 모델(Fig. 5)은 두 가지 병렬 경로로 구성된다. 세그먼트 #1은 현재 시점의 운전 변수와 성능 지표를 스냅샷 형태로 입력받아 다층 퍼셉트론(MLP) 모델로 처리하며, 세그먼트 #2는 과거 시계열 데이터를 LSTM(Long Short-Term Memory) 네트워크에 입력하여 장기패턴을 학습한다. 두 경로의 출력은 최종 MLP 레이어에서 결합되어 11개 타임스텝(약 2분 45초)의 미래 NOx 농도를 예측한다. 실시간 제어에는 첫 번째 예측값(15초 후)을 사용하며, 전체 11개 값은 시나리오 분석에 활용된다. 모델 훈련 시 물리적 인과관계 강화를 위해 consistency loss를 적용하였다.

Fig. 6는 Ensemble_LSTM 구조의 실시간 예측 모델로 테스트 구간 동안 예측한 NOx 농도 결과를 제시한다. 실시간 예측모델은 NOx 농도 피크 구간 및 급격한 변동을 포함한 전체 프로파일을 안정적으로 추정하였으며, R^2 0.98, RMSE 1.81 ppm의 높은 정확도를 보였다. 연소 조건이 급변하는 상황에서도 예측 성능이 전 구간에 걸쳐 일관되게 유지되어, 실시간 NOx 농도 추정에 충분한 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

Fig. 7는 Scenario model의 예측-실측 비교이다. 원형 마커는 예측 시작점이며, 폐기물이 화격자에 실제로 투입되는 시점이다. 해당 구간에서 예측 경향과 실측 변동의 방향이 잘 부합하고 있어, 선제적 제어 가능성을 확인하였다.

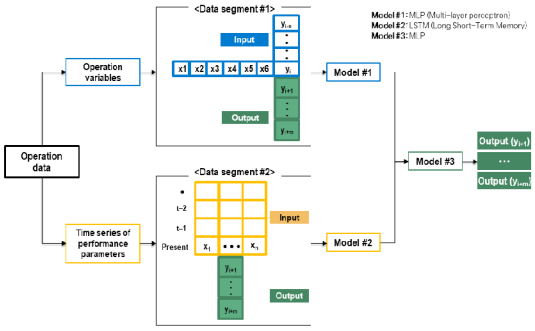


Fig. 5 Schematic of the ensemble prediction model

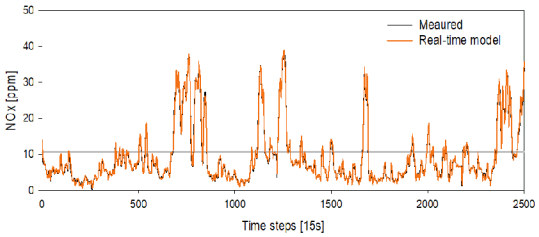


Fig. 6 Real-time model prediction of NOx concentration

Fig. 8은 동일 운전 데이터에 대해 O_2 기반 제어 모델과 AI 모델의 요소수 분사 패턴을 비교한 것이다. O_2 기반 모델은 해당 구간 내 요소수 절감률 30.6%를 달성하였으나, 분사패턴이 상대적으로 정적이며 교차상관계수가 0.279로 낮았다. 반면 AI 모델은 요소수 절감률은 26.2.%로 소폭 낮았으나, 교차상관계수 0.304로 NOx 실측값과의 동기화가 약 9% 향상되어 NOx 변동에 대한 실시간 추종성이 개선되었다. 이는 AI 모델이 급격한 연소 조건 변화에 더 민감하게 반응하며, 과도한 요소수 투입을 억제하면서도 NOx 제어 안정성을 유지함을 의미한다. 종합적으로 AI 모델은 O2 기반 모델과 유사한 수준의 저감 효율을 유지하면서 동적 응답성을 개선하였다.

본 연구는 중형 폐기물 소각로의 NOx 저감을 위해 MLP-LSTM 앙상블 기반 적응형 요소수 분사 제어 시스템을 개발하였다. 개발된 AI 모델은 11-step 미래 NOx 예측을 기반으로 선제적 제어 전략을 수립하며, 기존 O_2 기반 모델 대비 동적 응답성(교차상관계수 0.304 vs 0.279)이 약 9% 향상되었다. 수동 제어 대비 요소수 소비량 26.2% 절감을 달성하였으며, 이는 O_2 기반 시스템의 절감 성능(30.6%)과 유사한 수준이다. NOx 배출 농도는 규제 기준 대비 안정적으로 유지되었다. 다만, 본 연구는 단일 소각로의 약 3개월 운전 데이터를 기반으로 수행되었으므로, 다양한 폐기물 성상 및 소각로 규모에 대한 일반

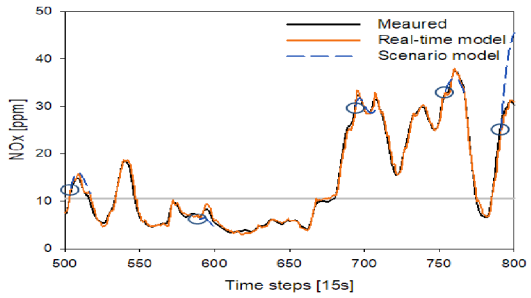


Fig. 7 Scenario model prediction of NOx concentration

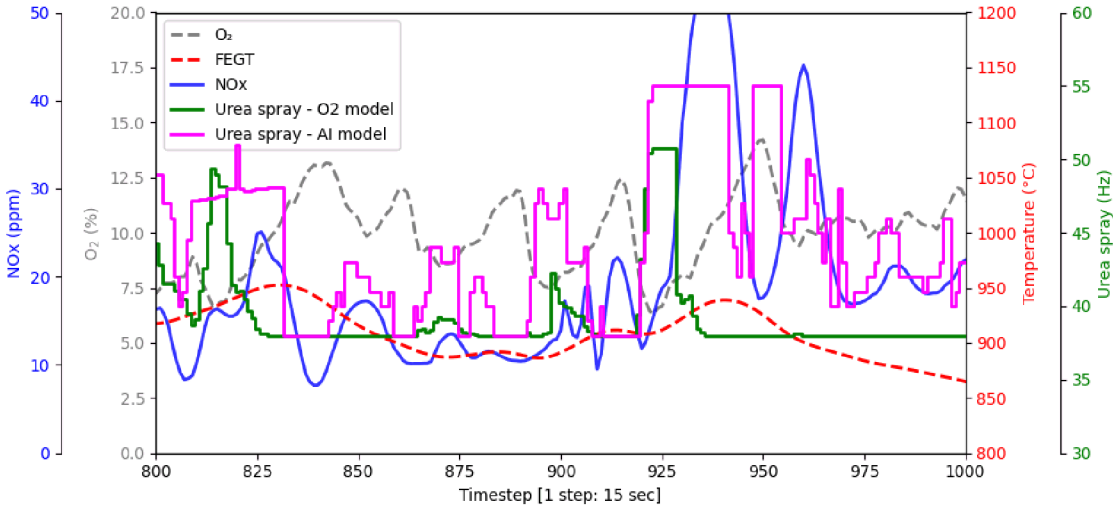


Fig. 8 Comparison of urea injection control between O_2-based model and AI model

화 성능 검증이 필요하다. 또한, 암모니아 슬립 예측 및 제어 통합, 강화학습 기반 실시간 최적화, 다중 소각로 데이터 확장을 통한 범용 모델 개발이 향후 연구 과제로 남아 있다. 본 연구는 폐기물 소각로 운전 데이터 기반 AI 제어의 실효성을 입증하였으며, 중소형 소각 시설의 환경 규제 대응 및 운영비 절감에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 환경부 환경산업기술원의 사업장 미세먼지 지능형 최적 저감·관리 기술 개발의 일환(RS-2023-00219321)으로 수행되었습니

참고 문헌

[1] Sarakikya, H., Mashingo, P., & Kilonzo, F. (2021). Design and computational fluid dynamics modeling for a municipal solid waste incineration process. Open Journal of Fluid Dynamics, 11(4), 177-191.

[2] Vanierschot, M., Hoang, Q. N., Croymans, T., Pittoors, R., & Van Caneghem, J. (2023). A CFD-based porous medium model for simulating municipal solid waste incineration grates: A sensitivity analysis. Fuel, 345, 128221.

[3] Tang, J., Zhuang, J., Aljerf, L., Xia, H., Wang, T., & Gao, B. (2023). Numerical simulation modelling on whole municipal solid waste incineration process by coupling multiple software for the analysis of grate speed and air volume ratio. Process Safety and Environmental Protection, 176, 506-527.

[4] Thameem, M., Raj, A., Berrouk, A., Jaoude, M. A., & AlHammadi, A. A. (2024). Artificial intelligence-based forecasting model for incinerator in sulfur recovery units to predict SO_2 emissions. Environmental Research, 249, 118329.

[5] Wen, C., Lin, X., Ying, Y., Ma, Y., Yu, H., Li, X., & Yan, J. (2023). Dioxin emission prediction from a full-scale municipal solid waste incinerator: deep learning model in time-series input. Waste Management, 93-102.

[6] Park, S., Kim, H., Shin, D., Lee, J., Son, J. Yun, Y., Ryu, C. (2025). NOx-O2 Correlation Analysis and AI-based Prediction for Efficient SNCR Control in a Waste Incinerator. 69th KOSCO SYMPOSIUM.

무화염 연소열 기반 수소화합물 직접 열분해에 관한 연구

유지호*,**.홍종섭*.김성일**,***. 이영재**†

Study on direct thermal decomposition of hydrogen compounds by flameless combustion heat

Jiho Yu*,**, Jongsup Hong*, Seongil Kim**,***, Youngjae Lee**†

최근 전 세계적으로 온실가스 배출에 의한 지구 온난화 문제가 심화되고 있어 파리 협정에 따라 각국은 온실가스 감축 목표(NDC, Nationally Determined Contribution)를 설정하고 5년 주기로 상향된 목표를 제출하고 있다. 이산화탄소 감축 목표를 달성하기 위해서는 에너지 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소를 줄일 필요가 있다. 현재 산업에서 사용되는 대부분의 열에너지는 화석연료의 연소를 통해 얻어지며, 이는 이산화탄소의 주요 배출원이다. 따라서 기존 화석연료를 무탄소 혹은 저탄소 연료로 대체하는 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다.

무탄소 연료의 대표적인 예로는 수소(H_2)가 있다. 수소는 단위 부피당 에너지 밀도가 낮고 운송과 저장이 어렵다는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수소를 질소와 결합하여 암모니아(NH_3)의 형태로 저장 및 운송하는 방법이 연구되고 있다. 암모니아는 상온 및 상압에서 액화가 용이하고, 상대적으로 에너지 밀도가 높아 대규모 저장 및 운송이 가능하다. 그러나 암모니아는 연소 범위가 좁고 연소 속도가 느려 단독으로 연소시키기에 어려움이 있다.

이러한 한계를 극복하기 위한 방법 중 하나로 아래 식과 같이 암모니아 일부 또는 전부를 다시 수소와 질소로 열분해하는 방법이 있다.

$$\boldsymbol{NH_3 \rightarrow \frac{\alpha}{2}N_2 + \frac{3\alpha}{2}H_2 + (1-\alpha)NH_3} \qquad (1)$$

* 연세대학교 기계공학부
** 한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부문
*** 과학기술연합대학원
† 연락저자, leeyj@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8464 FAX : (041)-589-8323

암모니아 열분해를 통해 얻은 수소는 암모니아보다 높은 반응성을 가지므로 암모니아와의 혼합 연소를 통해 안정적인 연소를 달성할 수 있다[1]. 따라서 암모니아 열분해는 수소 생산 및 연소 특성 개선의 두 가지 목적을 동시에 만족할 수 있는 방법으로 평가된다.

또한, 탄화수소계 연료(CH_4, C_2H_6, C_3H_8 등)는 연소 시 다량의 이산화탄소를 배출한다. 이산화탄소를 저감하기 위한 방법으로, 탄화수소를 열분해하면 다음과 같이 고체 탄소와 수소 및 경탄화수소를 생성할 수 있다.

$$\boldsymbol{C_nH_m \rightarrow xC_{(s)} + yH_2 + zC_kH_l} \qquad (2)$$

열분해 반응을 통해 탄화수소계 연료의 탄소를 고체로 분리하고, 동시에 저탄소 연료로 전환할 수 있다.

열분해 반응을 위한 열원은 전기로, 플라즈마, 촉매 반응기 등 다양한 방법이 존재하나, 대규모의 열분해 시스템으로 확장하기 위해서는 연소 기반 열원이 필수적이다. 그러나 일반적인 화염 연소는 고온의 국부적 반응 영역에서 열적 질소산화물이 다량으로 생성되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 질소산화물 배출 저감을 위해 무화염 연소(Flameless combustion)를 적용하여 열분해 열원을 공급하고자 한다.

무화염 연소는 연료와 산화제가 균일하게 혼합되어 연소가 일어나는 영역의 온도 구배가 작고, 산화제 농도가 낮은 상태에서 연소 반응이 일어난다. 이로 인해 반응 영역의 최고온도가 일반 화염 온도에 비해 낮게 유지되어 열적 질소산화물 배출이 크게 감소한다[2].

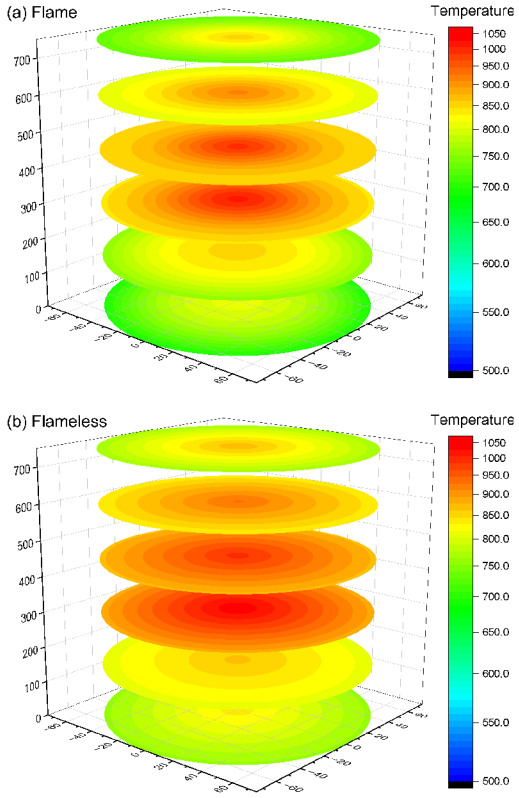


Fig. 1 Temperature distribution of methane (a) flame and (b) flameless combustion

Fig. 1은 메탄 연소 실험에 대한 화염 및 무화염 모드에서의 연소실 내부 온도장이다. 일반 화염 연소에 비해 무화염 연소에서의 고온부가 더 넓게 형성되었고, 온도장이 더 균일하게 형성되었다. 이는 연소기 내부의 열분해 반응기에 더 균일한 열을 공급할 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 무화염 연소의 균일한 열원을 이용하여 암모니아 및 탄화수소와 같은 수소화합물의 직접 열분해를 수행하는 것을 목표로 한다.

무화염 연소 및 열분해 실험을 위하여 D80 mm X H350 mm 크기의 열분해 반응기가 내장된 D150 mm X H750 mm 크기의 bench-scale 원통형 무화염 연소기를 활용하였으며, 이에 대한 그림을 Fig. 2에 나타내었다. 연소실 내부의 온도 측정을 위해 연소기 측면에 K-type 열전대 3개(Combustion T1, T2, T3)가 높이 방향으로 설치되어 있으며, 연소기 전면에 화염 존재 여부를 확인할 수 있는 가시창이 설치되어 있다. 또한, 열분해 온도를 측정하기 위한 두 가지 위치의 온도 측정이 가능한 K-type 열전대(Pyrolysis mid., bot.)가 열분해 반응기 내부에 수직 방향으로 설치되어 있다.

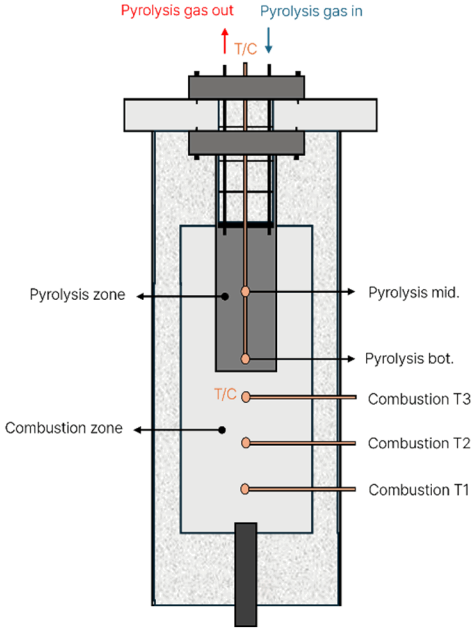


Fig. 2 Design of the flameless combustor with pyrolysis reactor

무탄소 및 저탄소 연료의 무화염 연소 실험 대상 연료는 수소 및 수소-메탄 혼합 가스로 하였고, 모든 조건에서 입열량 4 kW_{th}로 고정하여 투입하였다. 산화제는 공기로 공급하며 배출물 내 산소 농도는 0.5%, 그리고 산화제 내 산소 농도는 21% 및 14% 두 가지 조건으로 조절하여 무화염 연소 특성과 열분해에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 산화제 내 산소 농도를 감소시키면 무화염 연소의 균일성이 향상되어 질소산화물의 생성이 효과적으로 억제될 수 있다. 그러나 전체 연소 온도가 저하되어 열분해 반응에 필요한 온도도 동시에 낮아진다. 따라서 질소산화물 저감과 충분한 열분해 반응 사이의 균형을 고려한 최적의 산소 농도 조절이 필요하다.

Table 1 Experimental conditions of flameless combustion

Fuel	Oxidant	Excess O_2	O_2 in oxidant
H_2	Air	0.5%	21, 14%
CH_4+H_2	Air	0.5%	21, 14%

무화염 연소열을 활용한 열분해 대상 연료는 암모니아, 에탄, 그리고 프로판으로 하였으며, 무화염 연소기에 내장된 열분해 반응기에 투입되어 열분해된다. 대표적인 탄화수소인 메탄은 C-H 결합이 매우 강하여 열분해 시 고온을 필요로 하여[3] 제외하였다. 각 열분해 연료는 무화염 연소로부터 방출되는 균일한 복사열 및 대류열을 열원으로 공급받는다. 이에 대한 자세한 무화염 연소 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

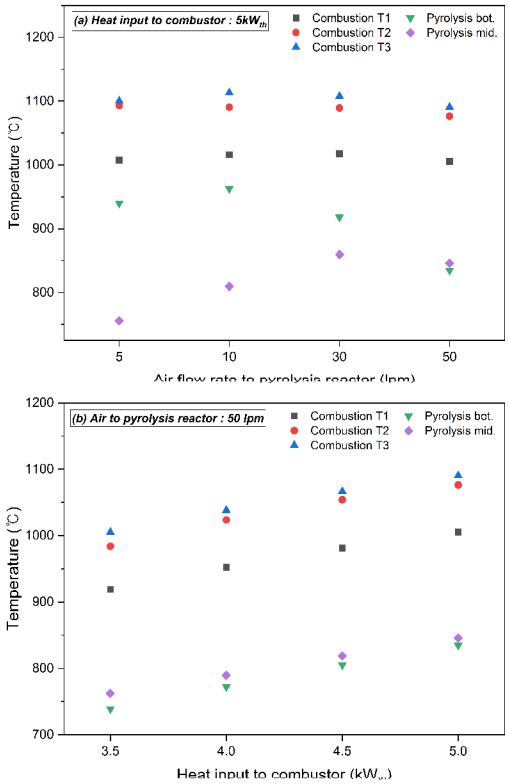


Fig. 3 Temperature distribution in the pyrolysis-combustor at different (a) air flow rates and (b) heat inputs

수소화합물의 열분해에 앞서, 무화염 연소기를 열원으로 사용하고 열분해 반응기에 공기를 투입하여 충분한 열 공급이 가능한 조건을 평가하였다. 연료는 메탄으로 하였으며 고위발열량을 기준으로 입열량을 3.5 kW_{th}에서 5 kW_{th}까지 0.5 kW_{th} 간격으로 증가시켰다. 열분해 반응기로 투입되는 공기의 유량은 50 lpm으로 하였고, 입열량이 5 kW_{th}일 때는 공기의 유량을 5 – 50 lpm으로 증가시키며 실험을 진행하였다. Fig. 3은 이에 대한 연소기 내부 온도와 열분해 반응기 내부 온도를 나타낸 결과이다. 동일한 입열량에서 열분해 반응기로 투입되는 공기의 유량이 증가할수록 열분해 반응기 하단의 온도는 증가하고 중앙의 온도는 감소하는 경향을 보였다. 이는 공기 유량 증가에 따라 열분해 반응기 내부의 대류 열전달이 강화되어 연소기로부터 전달되는 열이 더욱 효율적으로 전달되는 반면, 상부에서 유입된 공기가 중심부를 따라 흐르면서 낮은 온도 영역을 형성하기 때문이다. 또한, 공기 유량 증가로 인해 중심부의 희석 및 흡열 반응이 강화되어, 전체적으로 중앙부 온도 저하가 발생된 것으로 판단된다. 열분해 반응기로 투입된 공기의 유량이 동일한 경우, 연소기로 투입되는 연료의 입열량이 증가할수록 연소 온도가 증가하기 때문에 열분해 반응기의 온도가 증가하였다.

모든 조건 하에서 연소기 내부 온도는 900 – 1120 ℃, 열분해 반응기 내부 온도는 730 – 970 ℃ 범위에서 유지되었다. 이러한 온도 범위는 암모니아 및 탄화수소계 연료의 열분해에 필요한 충분한 흡열량을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 선행 문헌에 따르면, 암모니아는 750 ℃ 이상에서 열분해되며[4], 에탄은 700 ℃ 이상[5], 프로판은 970 K[6] 이상에서 열분해된다. 이는 무화염 연소열을 활용하여 다양한 수소화합물을 열분해할 수 있음을 의미한다.

무화염 연소 실험을 통해 이산화탄소와 질소산화물 저감과 동시에 균일한 반응 영역을 확보하였고, 이를 바탕으로 암모니아와 탄화수소계 연료의 열분해 반응과 연계하였다. 이러한 연구 결과는 이산화탄소 및 질소산화물 저감형 에너지

생산 기술 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합 연구사업(No. CAP22022-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] B. Yan, Z. Wu, S. Zhou, J. Lv, X. Liu, W. Wu, G. Chen, "A critical review of NH_3 -H_2 combustion mechanisms", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 196, 2024, 114363.

[2] A. Cavaliere, M.D. Joannon, "Mild combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 30, 2004, pp. 329-366.

[3] N. Xavier, A.J.R. Payne, G.F. Bauerfeldt, M. Sacchi, "Theoretical insights into the methane catalytic decomposition of graphene nanoribbons edges", Chem. Phys. Phys. Chem., Vol. 11, 2023.

[4] G. Lee, S. Lee, S. Hong, H. Jung, S.P. Jung, "Ammonia and liquid hydrogen as energy carriers: challenges and opportunities", J. Korean Soc. Environ. Eng., 2024, pp. 816-830.

[5] M. Kim, S. Lee, K. Yoon, "A Study on the Decomposition of Ethane Using Carbon Black Catalyst", Proc. Korean Soc. New Renew. Energy Conf., Vol. 11, 2007, pp. 93-96.

[6] Y. Kang, Y. Zhang, Y. Liu, Y. Li, "Experimental and theoretical study on propane pyrolysis to produce gas and soot", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 4, 2020, pp. 3096-3108.

반경 단차 원판 연소기 (RSDB: Radial-Stepwise-Disk-Burner)를 이용한 예혼합화염의 불안정성과 화염전파특성 연구

한종호*. 김남일*†

Instability and flame propagation characteristics of premixed flame using a Radial-Stepwise-Disk-Burner (RSDB)

Joungho Han*, Nam Il Kim*†

ABSTRACT

A new radial-stepwise disk burner (RSDB) was first developed to analyze the flame propagation characteristics across different length scales. Premixed flames could be stabilized at a specific radial location when their flame propagation velocities matched the local flow velocities. This study investigated the length scale effects on the premixed flame propagation characteristics using the RSDB. Various flame shapes and modes were found for the equivalence ratio of CH4/Air premixed flames.

Key Words : Radial-stepwise disk burner, Flame propagation velocity, Premixed flame, Meso-scale combustion.

화염 전파속도(flame propagation velocity, FPV)는 일정 크기의 화염이 특정 방향으로 미연가스를 연소시키는 상대적인 속도를 의미한다. 이러한 화염전파속도는 국부적인 화염면에 대해 정의되는 연소속도와는 조금 다르며, 실질적인 화염 연소 특성을 이해하는 데 있어 중요하다.

예로부터 화염 전파속도는 여러 연구자들에 의해 서로 다른 버너로 측정되었다. 시대에 따라 화염 전파속도가 크게 분산이 되어있었지만, 예혼합 화염의 이론이 발전되면서 분산이 줄어들게 됐다. 가장 대표적인 예로 화염의 스트레치 이론이 있다 [1]. 화염의 스트레치 이론에 따르면, 화염 전파속도(V_f)는 식(1)과 같이 표현된다.

$$V_f = S_L^0 - l_{Ma}\kappa \qquad (1)$$

이때, S_L^0는 층류화염속도, l_{Ma}는 마크슈타인 길이 스케일, κ는 화염의 스트레치를 나타낸다.

그러나 실제 화염은 곡률 및 화염 형상에 의해 발생하는 스트레치의 영향을 지속적으로 받기 때문에, 이상적인 층류화염과는 상당히 다르다. 따라서 화염의 전파 속도는 실제 화염 거동을 보다 잘 반영하며, 특정 형상의 화염이 각 전파 방향에서 미연가스를 소비하는 상대 유동 속도로 정의된다. 즉, 화염전파속도는 전체적인 유효 화염 면적의 변화에 주로 영향을 받는다. 화염전파속도는 화염의 특성적 거동을 이해하는 데 중요한 지표를 제공하며, 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_f = A_{eff}\left(S_L^0 - l_{Ma}\kappa\right) \qquad (2)$$

대부분의 이전 연구들은 개방된 공간에서의 화염 거동에 초점이 맞추어 왔으며, 이에 따라 화염 거동과 특성 길이(length scale, w) 간의 상관관계에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 다양한 특성 길이에서의 화염 전파 특성을 규명하는 것은 중요하다. 예를 들어, 소염현상은 화염 거동의 이해 및 버너 설계 측면에서도 핵심적인 요소이나, 소염 영역 근처에서의 화염 구조 및 전파 특성은 아직 충분히 규명되지 않았다.

수치해석 결과에 따르면, 채널 또는 관 내부에서의 화염 전파속도는 특성 길이에 의존하며, 화염 형상에 따라 열손실, 스트레치, 그리고 화염 면적을 결정하는 임계 화염 전파속도(critical FPV, $V_{f,crit}$)가 존재하는 것을 확인했다 [2,3].

이러한 목적을 위해, 환형 다단 연소기(annular-stepwise-diverging-tube, ASDT)가 개발되어 다양한 연료에 대해 관련 데이터가 보고된 바 있다 [4-7]. 또한 당량비, 특성길이, 화염 전파 속도 간의 관계를 농도-길이-속도(concentration-length-velocity, CLV-diagram)

* 한국과학기술원 기계공학과
† 연락저자, nikim@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3211

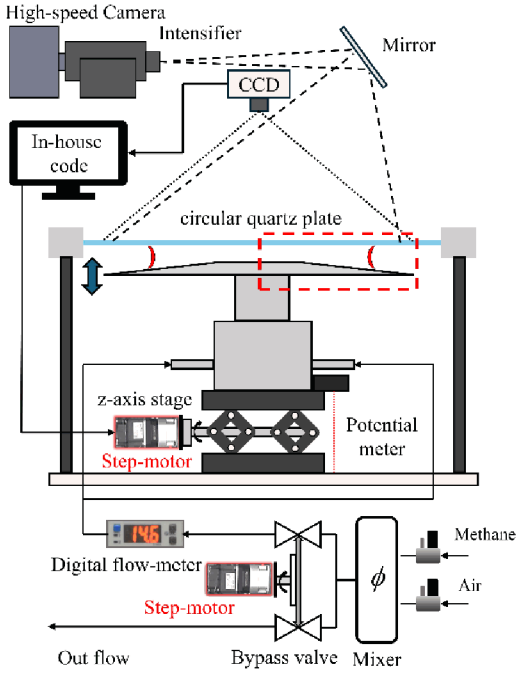


Fig. 1 Schematic diagram of RSDB setup and flow systems.

으로 제시하였다 [7]. 그러나 ASDT는 완전한 원형 단면을 구현하지 못함에 따라 실험적 해상도가 제한 되어있으며, 고압 조건 적용에도 어려움이 있었다.

본 연구에서는 이러한 ASDT의 한계를 극복하기 위해 반경 단차 원판 연소기 (radial-stepwise-disk-burner, RSDB)를 개발했으며, 이를 이용하여 화염 거동을 실험적으로 분석하였다. 아울러, 관찰된 화염 거동의 물리적 의미를 고찰하고, 개선 반향에 대해 논의하였다.

Fig.1는 RSDB 실험 셋업을 보여준다. 평판형 상부 석영판과 스테인리스 하부 디스크로 구성되었으며, 하부 디스크의 외경은 200 mm이며, 반경 방향으로 높이 차 0.3 mm, 간격 5 mm의 13단 계단 구조를 갖도록 설계하였다. 이에 따라 예혼합가스는 상부 석영판과 하부 디스크 사이의 다 유동 채널을 따라 흐르며 실험 해상도를 크게 향상시켰다.

석영판과 디스크 사이의 거리는 스테퍼 모터가 장착된 z축 스테이지로 정밀 조절하였고, 레이저 변위계를 이용해 두 판 사이의 거리를 측정하였다. 예혼합가스는 MFC를 통해 제어되어 중앙부의 소결 금속판을 거쳐 균일하게 분사되었다. 반경 방향으로 평균 유속과 특성길이가 달라지며, 화염은 유속과 FPV가 일치하는 단계에서 안정화된다.

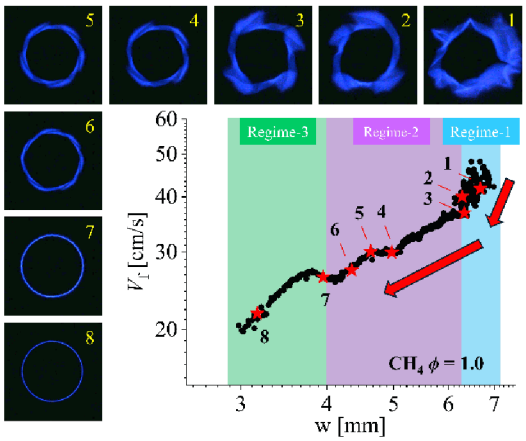


Fig. 2 Flame propagation velocity and flame images according to the length scale for a stoichiometric methane premixed flame.

화염 위치는 바이패스 유량 조절 및 z-axis stage를 통해 제어되었으며, 모든 구동계는 자체 제작한 소프트웨어로 실시간 운용되었다. 화염 거동은 직교 방향 CCD 카메라로 촬영하였고, 초고속카메라 (Photron FASTCAM Mini UX50, 1000 fps)와 image intensifier를 이용해 세부 화염 구조를 계측하였다. 상부 시야의 제한으로 인해 약 30° 측면에서 평면 거울을 통해 촬영하였으며, 후처리를 통해 평행 시야로 보정하였다. FPV와 length scale는 MATLAB (R2023a)을 이용한 영상처리를 통해 산출하였다.

당량비 1.0의 메탄 화염에 대해 V_f와 w 간의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 실험은 충분한 유량 조건에서 점화한 후, 유량을 점진적으로 감소시키면서 채널 갭을 조정하였다. 화염 전파 모드(mode)는 화염 구조에 따라 세 가지 영역(regime)으로 구분되었다. 그래프 주변에는 각 구간의 대표적인 화염 형상을 반시계 방향으로 배치하였으며, 그래프 상의 붉은 별 표시는 해당 화염 이미지의 위치를 의미한다.

먼저, 유량과 갭 거리가 비교적 큰 구간(regime-1)에서는 화염이 불규칙한 형상을 보이며 회전하는 거동을 나타냈다. 이후 유량과 길이 척도가 감소한 구간(regime-2)에서는 화염이 다각형 형태로 변하며, 이 두 구간 사이에서 임계 천이 조건(critical transition condition)을 정의할 수 있었다. 이때의 임계 천이 V_f는 당량비 1.0의 메탄 화염 LBV인 약 40 cm/s와 유사하였다.

유량이 감소함에 따라 화염의 엣지 수(number of edge, NOE)는 4~6개로 변화하였고, 화염은 여전히 회전하였으며 회전 방향은 터빈 블레이드의 압력면에서 흡입면으로 이동하는 방향과 일치하였다. 이러한 형상과 거동은 고온 평판 사이에

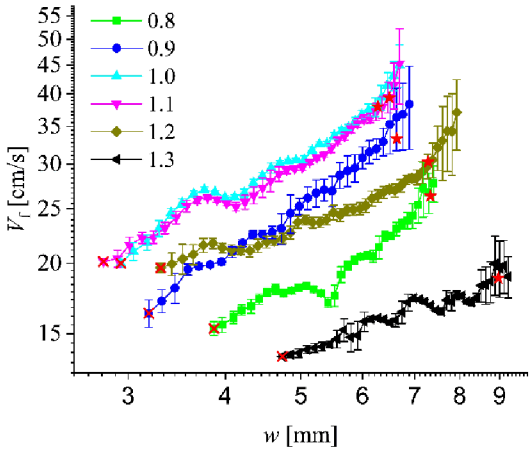


Fig. 3 Variation of FPV with critical point according to the length scale for a various equivalence ratio of methane premixed flame.

서 관찰된 Pelton-flame 구조[8]와 유사한 특성을 보였다. 한편, 유량과 갭 거리가 더욱 감소한 구간(regime-3)에서는 화염 회전이 멈추고 매끄럽고 정적인 형상이 형성되었으며, w 가 충분히 작아지면 화염이 소멸되어 이를 소염 거리(d_q)로 정의하였다.

메탄 예혼합화염에 대해 w에 따른 V_f 의 변화를 한눈에 비교하기 위해, 당량비마다 V_f 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 각 당량비 조건에서 $V_{f,crit}$ 과 d_q 는 각각 붉은 별과 십자 기호로 표시하였다. 전반적으로 당량비에 따라 유사한 경향성을 보였으며, 당량비가 0.8에서 1.3으로 증가함에 따라 FPV 특성이 변화하였다. 당량비가 화학양론 조건에 가까워질수록 $V_{f,crit}$ 는 증가하고 d_q 는 감소하였다. 한편, 일부 구간에서 w 와 V_f 간의 관계가 구불구불한 형상으로 나타났는데, 이는 유량 제어의 불연속성 또는 화염 구조 전이에 따른 영향으로 판단된다. 향후 보다 정밀한 제어를 통해 이러한 거동을 심층적으로 규명할 필요가 있다.

당량비에 따른 임계 전이 및 소염 조건은 각각 Fig. 4(a), (b)에 제시하였다. 이 데이터들은 기존 ASDT 연구 [7,9]결과와 비교되었으며, 연료 농후영역에서 일부 차이는 있었으나 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 따라서 regime-1과 regime-2 사이의 critical transition V_f 는 $V_{f,crit}$ 와 근접하며, 본 연구의 임계 천이 V_f 는 이를 대변한다고 볼 수 있다. 이와 같이, RSDB는 예혼합화염의 본질적 특성을 규명하기 위한 유효한 연구 도구로서 높은 잠재력을 지닌다.

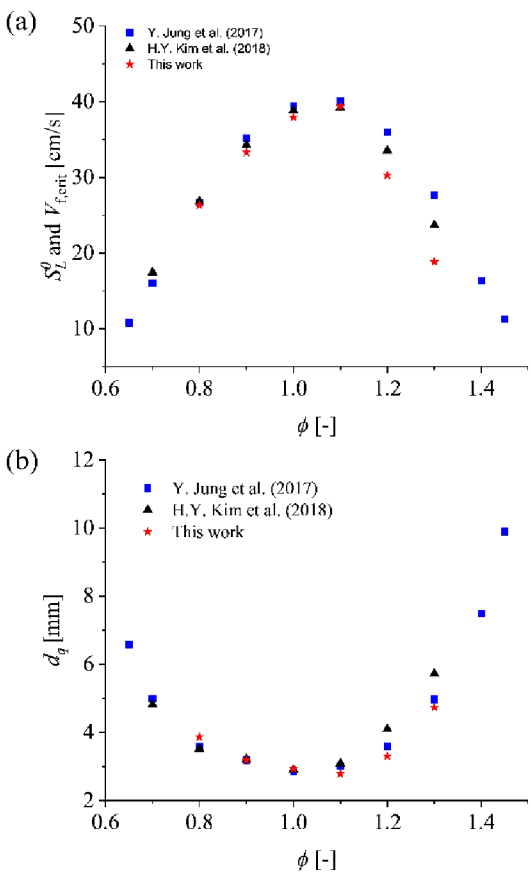


Fig. 4 Methane premixed flame (a) critical FPV, (b) quenching distance.

후 기

본 연구는 한국전력공사(Korea Electric Power Corporation)에서 지원을 받아 수행되었습니다(R23XO05-05).

참고 문헌

[1] G.H. Markstein, "Experimental and theoretical studies of flame-front stability", J. Aeronaut. Sci., Vol. 18, 1951, pp. 199-209.
[2] C.L. Hackert, J.L. Ellzey, O.A. Ezekoye, "Effects of thermal boundary conditions on flame shape and quenching in ducts", Combust. Flame, Vol. 112, no. 1-2, 1998, pp. 73-84.
[3] N.I. Kim, K. Maruta, "A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes", Combust. Flame, Vol. 146, no. 1-2, 2006, pp.

283-301.
[4] G.T. Kim, N.I. Kim, "Laminar burning velocity predictions by meso-scale flames in an annular diverging tube", Fuel, Vol. 90, 2011, pp. 2217-2223.
[5] Z. Liu, N.I. Kim, "An assemble annular stepwise diverging tube for the measurement of laminar burning velocity and quenching distance", Combust. Flame, Vol. 161, 2014, pp. 1499-1506.
[6] Y. Jung, M.J. Lee, N.I. Kim, "Direct prediction of laminar burning velocity and quenching distance of hydrogen-air-flames using an annular stepwise diverging tube", Combust. Flame, Vol. 164, 2016, pp. 397-399.
[7] Y. Jung, M.J. Lee, N.I. Kim, "Propagation and quenching of premixed flames in a concentration-length-velocity diagram", Proc. Combust. Inst., Vol. 36, 2017, pp. 4243-4251.
[8] S. Kumar, K. Maruta, S. Minaev, "On the formation of multiple rotating Pelton-like flame structures in radial microchannels with lean methane–air mixtures", Proc. Combust. Inst., Vol. 31, 2007, pp. 3261-3268.
[9] H.Y. Kim , J. Lee , N.I. Kim , Effects of N 2 /CO2 dilution on flame propagation velocities and quenching distances of oxy-methane premixed mixtures using an Annular-Stepwise-Diverging-Tube (ASDT), Math. Model. Nat. Phenom., Vol. 13, 2018, 55.

층류 확산 화염 내 산소 부화 조건에서 암모니아/코크스 가스 혼소에 대한 실험 및 수치해석 연구

정형빈* · 구민종** · 김경호** · 이병화** · 전충환*†

Experimental and Numerical Study on the Effect of Ammonia/COG Co-combustion in Laminar Diffusion Flames under oxygen-enriched conditions

Hyeong-Bin Jeong*, Min-Jong Ku**, Kyeong-Ho Kim**, Byoung-Hwa Lee**, Chung-Hwan Jeon*†

1. Introduction

최근 전 세계적으로 산업화로 인한 에너지 수요의 급격한 증가와 함께, 화석연료 의존적 에너지 시스템의 환경적 한계가 드러난다. 이러한 배경에서 철강 산업 등에서 발생하는 부산가스(By-product gas, BPG)의 효율적 활용은 에너지 효율 향상과 온실가스 저감의 중요한 대안으로 주목받고 있다. 대표적인 BPG로는 고로가스(BFG), 전로가스(LDG), 그리고 코크스로부터 발생하는 코크스오븐가스(Coke Oven Gas, COG)가 있다. COG는 약 60%의 수소(H_2)와 20%의 메탄(CH_4)을 주요 성분으로 하며, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 질소(N_2) 등이 포함되어 있다. 약 4400 kcal/Nm^3의 높은 발열량을 가지며 다른 산업 부산가스에 비해 연료로서의 잠재력이 높아, 제철소 내 보일러 및 가열로 연료로 널리 활용되고 있다. 그러나 COG 연소 시 배출되는 CO_2는 탄소중립 실현 측면에서 해결해야 할 주요 문제 중 하나이다.

이 문제를 해결하기 위한 방안으로, 이산화탄소를 배출하지 않는 무탄소 연료인 암모니아(NH_3)를 COG와 혼소하는 기술이 주목받고 있다. 암모니아는 액화 및 저장이 용이하며 연소 시 이산화탄소를 생성하지 않아 친환경 연료로서의 장점을 가진다. 그러나 낮은 화염온도와 느린 연소속도, 그리고 높은 점화 에너지로 인해 화염 안정성이 저하되는 한계가 존재한다. 이러한 연소 특성은 COG와의 혼소 시에도 화염 불안정성 및 연소 반응성 저하를 유발할 수 있다.

이를 보완하기 위한 대안으로 산소 부화 연소(Oxygen-enriched combustion) 기술이 제시되고 있다. 산소 농도를 높이면 혼합기의 반응성이 향상되고 화염 온도가 상승하여 점화성과 안정성이 개선될 수 있다. 그러나 지나친 산소 농도 증가는 열적 NOx 배출을 증가시킬 수 있으므로 최적의 산소 조건 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 층류 확산 화염(Laminar diffusion flame)을 대상으로 산소 농도 변화에 따른 암모니아/COG 혼소의 연소 실험 및 수치해석을 분석하였다. 본 연구의 목적은 화염 구조, 생성물 조성 및 NOx 배출 특성을 규명함으로써 철강 산업의 탄소 저감 및 안정적 연소 운영을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. Methodology

본 연구에서는 암모니아/COG 혼소의 산소 부화 조건에 따른 층류 확산 화염 특성을 규명하기 위해, 산소 농도를 21%(N_2 79%)의 공기 조건부터 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%까지 단계적으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 또한 COG 단독 연료를 기준으로 하여, 암모니아 혼입 비율을 10%, 20%, 30%로 증가시켜 X_{NH3} = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 혼소 조건으로 연소 실험을 진행하였다.

$$X_{NH3} = \frac{x_{NH3}}{x_{fuel} + x_{NH3}} \qquad (1)$$

실험 장치 Fig. 1는 크게 연소 시스템과 계측 시스템으로 구성하고 있다. 연소 시스템은 석영(quartz) 라이너로 둘러싸인 시각화용 버너(visualized burner)이다. 연료기는 SUS401 스테인리스강 튜브와 예혼합 챔버(premixing chamber)로 구성되어 있으며, 수소(H_2), 메탄(CH_4), 질소(N_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2)로 구성된 COG 성분이 균일하게 혼합되도록 설계하였다. 산화제는 동축(coaxial) 구조의 외부 유입구(외경 Do = 25 mm, 내경 Di = 21 mm)를 통해 산소와 질소 혼합 가스로 공급하였고, 예열된 연료는 중심 노즐(Do = 10 mm, Di = 8 mm)을 통해 공급하였다.

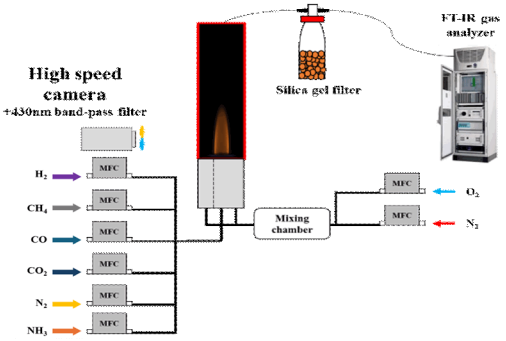


Fig. 1 Schematic diagram of laminar flow burner and flow systems.

배출가스는 화염 하류부에서 샘플링되어 응축을 방지하기 위해 일정 온도 이상으로 유지하였으며, 실리카겔 필터를 통과시킨 후 FT-IR 가스 분석기를 이용하여 CO_2, NO, NO_2, N_2O 등의 주요 배출 성분을 분석하였다. 또한, 중심 파장 430 ± 10 nm의 밴드패스 필터가 장착된 고속 카메라(Fastcam SA4)를 사용하여 CH_4 발광 화염 특성을 시각화하였다.

수치해석은 ANSYS Chemkin-Pro를 사용하여 수행하였다. 확산 화염 조건에서 NO 배출 특성과 산소 부화에 따른 주요 반응 경로(reaction pathway)를 분석하기 위해 **Okafor et al.**의 상세 반응 메커니즘을 적용하였다. Chemkin-Pro의 Diffusion Flame 모델을 기반으로 수행되었으며, 조건별 온도 분포, 주요 종의 농도(mole fraction), 그리고 NO 생성 경로를 정량적으로 비교·해석하였다. 이를 통해 실험 결과와 수치해석 결과를 상호 검증하며 산소 부화에 따른 반응 특성 변화를 규명하였다. COG의 조성은 표 1에, 실험 조건은 표 2에 요약하였다.

Table 1 Compositions of a coke oven gas

Fuel composition	Concentrations (% vol.)
H2	62
CH4	22
CO	6
CO2	3
N2	7

Table 2 Experiment conditions

Fuel composition	Concentrations (% vol.)
NH_3 ratio	0.0-0.3
Oxygen (%)	21/25/30/35/40/45/50/55
Fuel flow rate (L/min)	1

3. Results and discussion

Fig. 2는 X_{NH3}=0.0(COG 100%) 조건에서 산소 농도를 21%에서 55%까지 증가시키며 얻은 COG 층류 확산 화염 이미지이다. 산소 농도 21~30% 구간에서는 화염길이가 길고 강도가 약하며, 주로 약한 적색 화염을 띈다. 산소 농도가 증가할수록 화염길이가 짧아지고 강도가 증가하면서 청색 화염이 나타난다. 이러한 변화는 산소 부화에 따라 연료의 연소 반응성이 증가하고 화염 온도가 상승하면서, 점화와 연소 안정성도 함께 크게 향상됨을 의미한다.

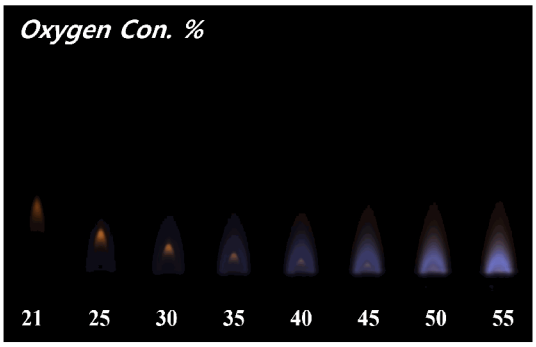


Fig. 2 Direct image of COG Flame (X_{NH3}=0.0) at different oxygen conditions

Fig. 3은 X_{NH3}=0.3(COG 70%) 조건에서 산소 농도가 21%에서 55%까지의 화염 이미지이다. 산소 농도 21~30%에서는 화염길이가 길고 적색 화염을 띈다. 이는 암모니아에서 발생하는 NH 계열의 스펙트럼 발광이 반영된 결과이다. 점차 산소 농도가 증가할수록 화염길이는 점점 짧아지며 강도가 증가한다. 산소 농도 증가는 화염의 반응성과 안정성의 개선을 보여준다. 특히 산소 부화 농도 40% 이상에서는 청색 화염이 유지되어, 높은 산소 농도 조건이 NH_3 혼소 시에도 연소 반응을 촉진하고 화염의 안정성을 확보하는데 효과적이다.

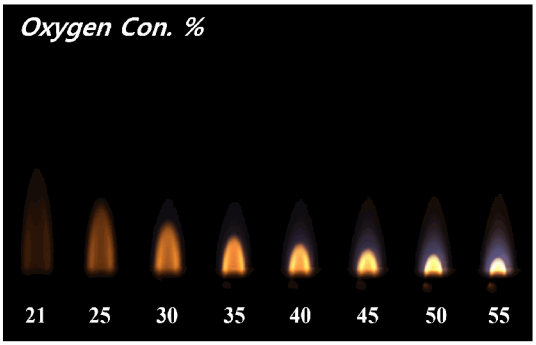


Fig. 3 Direct image of COG&NH_3 Flame (X_{NH3}=0.3) at different oxygen conditions

Fig. 4는실험을 통해 X_{NH3} = 0.0, 0.1, 0.3에서 NO 배출 결과이다. X_{NH3} = 0.0 경우 산소 농도가 증가함에 따라 NO 배출량이 증가한다. 산소 농도가 증가하면 연료와 산소가 화염 표면에서 만나 반응하는 확산 화염 특성으로 인하여 연소 반응을 활성화시켜 화염 온도가 상승하게 된다. 이로 인하여 고온에서 생성되는 Thermal NOx가 증가해 NO 배출량이 증가한다.X_{NH3} = 0.1 경우 연료 내 Fuel N이 증가하고 Fuel NOx 생성을 유발하여 21~40% 산소 농도에서 NO 배출량이 더 많다. X_{NH3} = 0.3 경우 연료 내 가장 많은 Fuel N을 가지고 있어 21~40% 산소 농도에서 NO 배출이 가장 많다. 하지만 산소 농도가 45% 이상에서는 X_{NH3} = 0.1 대비 더 낮은 NO 배출량을 갖는다. NH_3는 CH_4, H_2에 비해 발열량이 낮아 NH_3 첨가는 연료 전체의 발열량을 낮춘다. 이는 더 낮은 화염 온도로 인하여 Thermal NOx 생성이 감소한다.

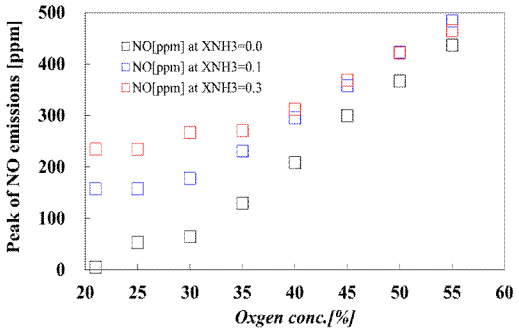


Fig. 4 Experimental peak of NO emissions at X_{NH3}=0.0, 0.1, 0.3

사 사

본 연구는 한국연구재단의 친환경 스마트 선박 부품기술혁신(RLRC) 센터사업 (No.2020R1A5A8018822)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Jeon. Yuseon, "Experimental and numerical study of ammonia addition effects on combustion characteristics of Coke Oven Gas (COG) in a premixed flame", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 74, 2025, 106839.

[2] Yu. Xia, "Emission characteristics of confined non-premixed ammonia-oxygen-nitrogen turbulent jet flames under oxygen-enriched conditions", *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. 40, 2024, 105704.

[3] Yifan Zhai, "Experimental and numerical study on laminar combustion characteristics of by-product hydrogen coke oven gas", *Energy*, Vol. 278, 2023, 127766.

[4] Jeong. Park, "Flame characteristics in H2/CO synthetic gas diffusion flames diluted with CO2: Effects of radiative heat loss and mixture composition', *International journal of HYDROGEN ENERGY*, Vol. 33, 2008, 7256-7264.

[5] Jie. Liu, " Numerical study of the chemical, thermal and diffusion effects of H2 and CO addition on the laminar flame speeds of methane-air mixture", *International journal of HYDROGEN ENERGY*, Vol. 40, 2015, 8475-8483

[6] Ki. Jung. "Differential diffusion effect on the stabilization characteristics of autoignited laminar lifted methane/hydrogen jet flames in heated coflow air', *Combustion and Flame*, Vol. 198, 2018, 305 - 319.

[7] Daisuke. Sato, "Combustion and emission characteristics of premixed coke oven gas-ammonia swirling flames", Fuel, Vol. 406, 2026, 137001.

연료 밀도에 의한 부력 효과가 제트 확산화염 프리커링 거동에 미치는 영향

강성종*. 박정**†. 이원준***. 정석호****. 유춘상*†

Effect of buoyancy induced by fuel density on flickering behaviors in jet diffusion flames

Sung Jong Kang*, Jeong Park**†, Won June Lee***, Suk Ho Chung****, Chun Sang Yoo*†

비정상 연소(unsteady combustion)는 화재 과학 및 실제 연소 시스템 모두에서 오랜 기간 주요한 연구 주제로 다뤄져 왔으며, 그 근본에는 화염 동역학과 불안정성이 존재한다. 그중 화염 프리커링(flickering) 현상은 촛불, pool fire, 제트 확산화염 등에서 가장 기본적이고 보편적으로 관찰되는 비정상 거동으로, 주기적인 진동 또는 화염 끝단의 분리 현상으로 특징지어진다. 이러한 프리커링은 주로 부력에 의해 형성된 전단층의 불안정성과 관련되어 있으며, 특히 낮은 레이놀즈 수에서는 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의해 유도되는 것으로 알려져있다. [1,2] 기존 연구에서는 프리커링 주파수가 노즐직경의 제곱근에 반비례하여 $f \propto D^{-1/2}$ (또는 $St \propto Fr^{-1/2}$) 관계를 따름이 밝혀졌다. 이후 리차드슨 수를 도입하여 제트 운동량의 영향을 고려한 보정식이 제시되었다. [3] 또한, 화염 주변에서 주기적으로 생성, 성장, 분리되는 트로이달 와류(toroidal vortex)의 거동이 프리커링에 지배적이라는 와류 동역학(vortex dynamics) 해석이 제시되었고, 동축(co-flow) 조건 변화에 따라 프리커링 주파수가 급격히 변하는 현상도 보고되었다.[4,5] 더 나아가 두가지 형태의 프리커링 모드가 제시되었다. 대칭(varicose) 모드와 비대칭(sinuous) 모드가 존재하며, 이들의 전이는 레이놀즈 수, 프루드 수, 점성계수 및 밀도비 등의 변수에 의해 결정된다는 결과도 제시되었다. [6]

최근에는 연료 밀도의 영향이 여러 연소 조건과 유동 환경에서 연구되고 있다. 일반적으로 연소가스에 의한 양(positive)의 부력 외에도 연료 제트 자체가 공기보다 가벼운경우 양의 부력을, 무거운 경우 음(negative)의 부력을 유동장에 부여할수있다. 동축류 부상 화염 실험에서는 연료와 희석 공기의 조성을 변화시키며 연료에 의해 유도된 부력이 화염의 안정화에 중요한 역할을 한다는 결과가 보고되었다. [7] 또한, 연료 제트에 He, N_2, Ar을 첨가하여 밀도를 변화시킨 실험에서는 부상 높이가 제트 속도의 증가에 따라 비단조하게 변하는 독특한 거동이 관찰되었으며, 불안정성의 발생 시점이 연료와 주변 공기의 밀도 차이에 크게 의존함이 확인되었다.[8] 아울러 연료 밀도는 제트 확산 화염에서 varicose 와 sinuous 모드 사이의 모드 전이에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.[9] 그러나 이러한 연료에 의해 유도된 부력 효과가 공기나 동류 공기보다 무거운 연료의 경우에 대한 영향은 화염 프리커링 관점에서 아직 체계적으로 규명되지 않았다.

본 연구에서는 CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10} 화염을 대상으로 He, N_2, CO_2 희석을 통해 연료 밀도를 폭넓게 조절하며 실험을 수행했다. 이를통해 연료 유도 부력이 화염 높이와 프리커링 주파수에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고, 연소 가스 및 연료의 특성을 모두 고려한 레이놀즈 수와 리차드슨 수 기반의 스케일링 해석을 통해 정규화된 화염 높이를 제시하였다. 또한 연료 밀도의 영향을 반영한 수정된 스케일링 관계식을 제안함으로써, 부력이 지배적인 조건에서 확산 화염의 동역학적 이해를 한층 확장하고자 한다.

Figure 1에는 본 연구에서 사용한 free jet 버너의 실험 장치 및 연소기의 개략도를 나타냈다. 노즐의 내경과 외경은 각각 10mm 와 12mm이

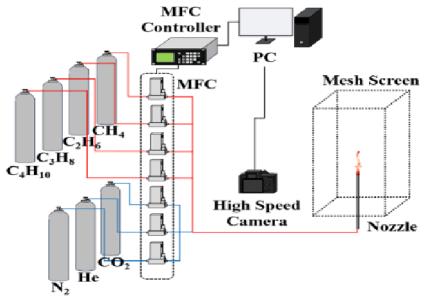


Fig. 1 Schematic diagram of free jet burner and experimental setup

* 울산과학기술원 기계공학과
** 부경대학교 기계공학과
*** 한국기계연구원
**** KAUST
†연락저자,jeongpark@pknu.ac.kr csyoo@unist.ac.kr
TEL : (051)629-6140

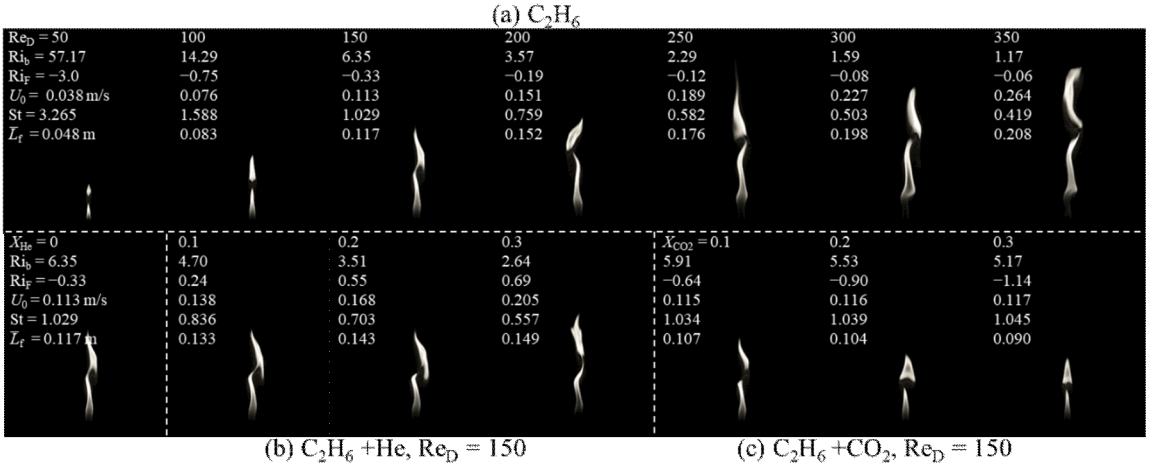


Fig.2 Instantaneous direct images of ethane flame with Re_D for pure enthane (a), and at Re_D = 150 with helium dilution (b) and with CO_2 dilution (c).

다. 노즐의 길이는 직경의 100배 이상의 길이가 되도록 하여 노즐 출구에서 완전 발달된 유동을 얻도록 설계되었다. 또한 외부 유동을 막기 위해 700 x 700 x 1000 mm 크기의 메쉬 스크린으로 버너를 둘러싸 외부 유동의 교란을 최소화하고 화염을 가시화했다. 연료는 CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}를 사용하였고 희석제는 He, N_2, CO_2를 사용했다. 모든 유체들은 전자식 켈리브레이터(Calibrator)로 보정된 MFC 및 MFC controller를 사용하여 각각 제어했다. 노즐에서 공급되는 연료의 Reynolds 수는 50 ~ 350으로 변화시켰고, 이에 따라 노즐출구의 속도를 변화시켰으며, 희석제의 혼소율을 0~30%로 변화시켰다. 화염 이미지는 초고속 카메라(Chronos 2.1)를 이용해 200 FPS로 20초간 촬영했으며, 총 3번의 촬영을 진행했다. 촬영한 이미지는 Matlab 기반 소프트웨어로 분석을 진행했다.

Figure 2(a) 에는 순수 C_2H_6 화염의 직접 이미지, 2(b), 2(c) 에는 레이놀즈 수 150조건에서 He, CO_2 몰분율에 따른 직접 이미지를 나타냈다. 스트로할 수는 $St = fD/U_0$ 로 정의되며, f는 프리커링 주파수를 의미한다. 연료에 의한 부력효과와 연소가스에 의한 부력효과를 나타내기 위해 두가지 리차드슨 수를 제안하며 정의는 다음과 같다.

$Ri_F = (\rho_a - \rho_F)gD/\rho_F U_0^2$, $Ri_b = (\rho_a - \rho_b)gD/\rho_F U_0^2$.

a는 주위공기를, F는 연료를 의미하고 b는 연소가스를 의미한다.

순수 C_2H_6 화염에서는 낮은 레이놀즈 수(≤ 100) 영역에서 화염이 대칭(varicose) 형태이며 레이놀즈 수가 더 증가하면 비대칭(sinuous) 형태로 전이됨이 관찰되며 평균 화염길이가 증가하고 스트로할 수는 감소한다. 레이놀즈 수 150 조건에서 순수 C_2H_6 화염에 He를 희석한 경우(Fig.2b) 희석율이 증가함에 따라 시간 평균 화염 길이는 증가하고 스트로할 수는 감소한다. 이때 Ri_F는 부호가 양수로 변하고 이는 연료의 부력이 양의 부력을 가지게 됨을 나타낸다. CO_2를 희석한 경우(Fig.2c) 희석율 증가에 따라 평균 화염길이는 짧아지고 스트로할 수는 증가한다. 이때 Ri_F는 음의 값을 가지고 절대값은 희석율 증가에 따라 커지게 된다. 이는 CO_2의 희석에 따라 연료 밀도가 음의 부력을 강화함을 나타낸

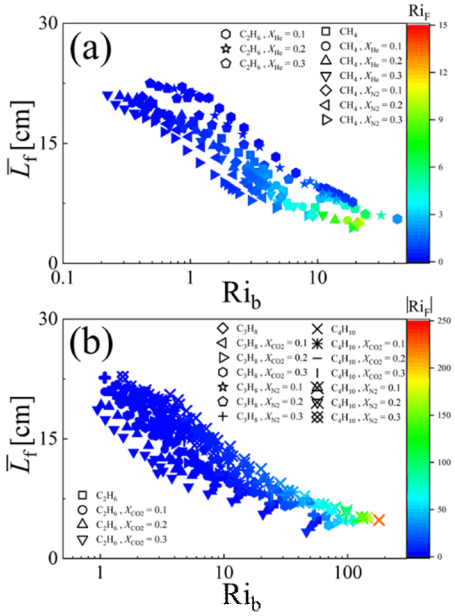


Fig. 3 Variations in flame height in terms of Ri_b and Ri_F: (a) $Ri_F > 0$ and $Ri_F < 0$.

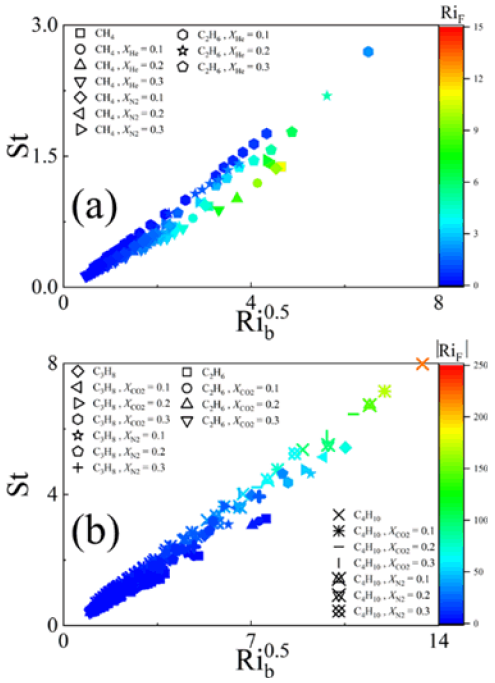


Fig. 4 Variations in Strouhal number in terms of Ri_b and Ri_F: (a) $Ri_F > 0$ and $Ri_F < 0$.

다.

Figure 3에는 다양한 연료와 연료 희석 조건에서의 평균 화염길이를 연소 가스의 리차드슨 수를 x축으로 연료의 리차드슨 수를 컬러맵 그래프로 나타냈다. 연료와 연소가스 모두 공기보다 가벼운 양의 부력조건에서는(Fig.3a) 평균 화염길이가 Ri_b와 Ri_F의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 연소 가스 또는 연료의 부력이 강할수록 주변 공기의 유입이 더욱 촉진되어 화염 길이가 감소함을 의미한다. 음의 연료 부력조건에서는(Fig.3b) Ri_b가 증가함에 따라 평균 화염 길이가 감소하는 경향을 보인다. 그러나 Ri_F의 절대값이 커질수록 그 거동이 단순하지 않으며, 이는 연료 유도 부력과 유동특성의 복합적 상호작용에 의해 화염 구조가 영향을 받음을 나타낸다. 이러한 경향을 포괄적으로 설명할 수 있는 이론 모델을 개발하기 위해, 본 연구에서는 선행 연구를 기반으로 화염 끝단의 화학양론 조건과 부력에 의한 공기 유입을 기반으로 한 스케일 해석을 수행해 보고할 예정이다.

Figure 4에는 다양한 연료와 연료 희석 조건에서의 스트로할 수와 리차드슨 수의 관계를 나타냈다. 연료 부력의 영향을 분리하여 분석하기 위해 Ri_b의 함수로 나타냈고, 선행연구들의 스케일 법칙에 따라 제곱근의 함수로 나타냈다. 양의 연료 부력 조건(Fig.4a)에서는 스트로할 수가 Ri_b의 증가에 따라 증가하며 동일한 Ri_b 조건에서는 Ri_F가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 반면 음의 부력 조건(Fig.4b)에서는 스트로할 넘버가 Ri_b와 Ri_F의 절대값이 증가함에 따라 모두 증가하는 경향을 나타낸다. 두 경우 모두에서 연료 유도 부력이 커질수록 데이터의 분산이 뚜렷하게 증가하며 이는 연료에 의해 유도되는 부력의 영향이 무시될 수 없음을 보여주며, 모델 해석시 명시적으로 고려되어야 함을 의미한다.

본 연구에서는 프리커링 거동이 단순히 외부 연소가스의 부력에 의해서만 결정되는 것이 아니라 연료 자체가 유동장에 부여하는 부력또한 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 기존의 부력 지배 확산 화염에 대한 스케일 법칙을 확장하여 연료 밀도 차이에 기인한 부력 효과를 정량적으로 반영할 수 있는 무차원수 Ri_F를 새롭게 도입해 다양한 연료 및 희석 조건에서의 화염 길이와 프리커링 주파수를 통합적으로 설명할 수 있는 신뢰성 높은 경험적 상관식을 제시할 계획이다.

후 기

This research was supported by Balanced Academic Development Project in National Research Foundation of Korea (RS-2023-00241310617820643401 03)

참고 문헌

[1] J. Buckmaster, N. Peters, The infinite candle and its stability-a paradigm for flickering diffusion flames, Proc. Combust. Inst. 21(1) (1986) 1829-1836.

[2] D. Durox, F. Baillot, P. Scouflaire, R. Prud' homme, Some effects of gravity on the behavior of premixed flames, Combust. Flame 82(1) (1990) 66-74.

[3] B.M. Cetegen, T.A. Ahmed, Experiments on the periodic instability of buoyant plumes and pool fires, Combust. Flame 93(1-2) (1993) 157-184.

[4] H. Zhang, Y. Yang, L. Li, Y. Peng, X. Xia, F. Qi, Frequency jump of a flickering buoyant jet diffusion flame influenced by ambient coflow, Proc. Combust. Inst. 40 (2024) 105321.

[5] B.M. Cetegen, Y. Dong, Experiments on the instability modes of buoyant diffusion flames and effects of ambient atmosphere on the instabilities, Exp. Fluids 28(6) (2000) 546-558.

[6] H. Zhang, X. Xia, Y. Gao, Instability transition of a jet diffusion flame in quiescent

environment, Proc. Combust. Inst. 38 (2021) 4971-4978.
[7] K.H. Van, J. Park, S.H. Yoon, S.H. Chung, M.S. Cha, Mechanism on oscillating lifted flames in nonpremixed laminar coflow jets, Proc. Combust. Inst. 37 (2019) 1997-2004.
[8] K.H. Van, S. Oh, M.S. Cha, C.S. Yoo, J. Park, S.H. Chung, Effects of Schmidt number on non-monotonic liftoff height behavior in laminar coflow-jet flames with diluted methane and ethylene, Proc. Combust. Inst. 38(2) (2021) 1913-1921.
[9] S.J. Kang, J. Park, S.H. Chung, C.S. Yoo, Effect of buoyancy by fuel on flickering mode transition in jet diffusion flames, Proc. Combust. Inst. 41 (2025) to appear.

전기장 인가에 따른 예혼합 수소-프로판 화염의 연소 불안정성 변화

최준혁* · 김태훈* · 김혜민*†

Changes in Combustion Instability of Premixed Hydrogen - Propane Flames Induced by Electric Field Application

Joonhyeok Choi*, Taehun Kim*, Hyemin Kim*†

ABSTRACT

This study investigated the effects of electric fields on the thermoacoustic behavior of premixed hydrogen - propane flames. To characterize the flame dynamics, a microphone and a high-speed camera were employed. When a low-frequency (200 Hz) electric field was applied, the SPL decreased, reducing from 71 dB at 0 Hz to 68 dB. In contrast, when high-frequency electric fields (400, 500 Hz) were applied, the SPL remained. The suppression effect became stronger at higher hydrogen fractions, with the SPL dropping from 88 dB at 0 Hz to 67 dB at 100 Hz with a 50% hydrogen fraction. Consequently, the AC electric field effectively mitigates thermoacoustic instabilities in hydrogen-enriched flames.

Key Words : Hydrogen-enriched flames, Instability, Ionic wind, Electric field

수소는 탄화수소계 연료와 달리 연소시 이산화탄소가 발생하지 않는다는 장점을 가져 차세대 연료로 각광받고 있다. 그러나 수소는 높은 화염 속도와 빠른 반응성으로 인해, 연소 시 불안정성이 크게 증가하는 문제가 있다.[1] 특히 열음향 불안정성은 화염의 열방출 영역과 연소기 내 음향장이 결합하여 발생하며, 연소기 구조에 손상을 초래할 수 있다. 따라서 이러한 열음향 불안정성을 억제하기 위한 방안이 요구된다.

전기장 인가는 화염의 불안정성을 억제할 수 있는 방안 중 하나이다. 화염에 전기장을 인가하면, 가속된 이온들이 중성분자에 운동량을 전달하여 이온풍(ionic wind)을 형성한다. 선행연구에 따르면 이러한 이온풍은 화염의 진동을 억제하여 열음향 불안정성을 저감할 수 있음이 확인되었다.[2] 특히 지배 주파수의 진폭이 감소하여 화염이 보다 안정된 상태로 전이되었다. 그러나 기존 전기장 연구는 주로 탄화수소계 연료를 대상으로 진행되어 수소 혼소 조건에서의 전기장 제어 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 수소 혼소 화염에 교류 전기장(AC)을 인가하였을 때, 예혼합 수소-프로판 화염의 연소 불안정성을 다양한 조건에서 분석하였다. 특히 전기장 인가에 따른 화염 거동과 연소 불안정성 소음 변화를 중점적으로 분석하였다.

본 연구의 실험 계략도를 Fig. 1에 도시하였다.

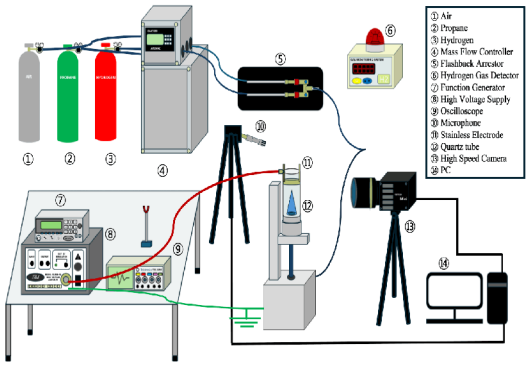


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

본 연구에서 연료로 프로판(C_3H_8)과 수소(H_2)를, 산화제로 공기를 사용하였다. 혼합기는 mixing chamber를 통해 연료와 공기를 완전히 예혼합

* 국립한국교통대학교 항공·기계설계학과
† 연락저자, enok2695@ut.ac.kr
TEL : (043)841-5838 FAX : (043)-841-5372

후, 버너로 공급하였다. 수소 혼소율은 부피비(volumetric fraction) 기준으로 0%, 25%, 50%로 설정하였다. 화염의 가시적 관찰을 위해 내경 50 mm, 두께 2.5 mm, 길이 300 mm의 석영관(quartz tube)을 설치하였다. 화염에 전기장을 인가하기 위하여 석영관 내부에 전극을 설치하였으며, 전극의 위치는 버너 표면 상단으로부터 30 mm 지점에 고정하였다. AC 전기장은 지배 주파수 변화가 관측되는 임계 주파수를 기준으로 6 kVpp의 전압에서 100 Hz 간격으로 총 500 Hz 까지 인가하였다. 화염 거동을 분석하기 위해 초고속 카메라(Photron, Mini UX-100)을 사용하였다. 획득한 화염 이미지를 후처리하여 화염 표면적을 추출하였으며, 연소 불안정성 소음을 계측하기 위해 석영관 상단에 마이크(GRAS, 46BE)를 설치하였다. 계측된 압력 값은 SPL(Sound pressure level)으로 표현하였다.

Fig. 2는 유속 1.3 m/s 조건에서 AC 전기장을 인가했을 때, 수소 혼소율 및 당량비에 따른 SPL 분포를 나타낸다. 전반적으로 수소 혼소율이 증가함에 따라 LBO(Lean Blow-off) 한계와 SPL이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 수소의 높은 화염속도, 낮은 점화 에너지로 인해 희박 조건에서도 연소가 가능하여 가연한계가 확장되기 때문이다. 또한 수소 혼소율 증가에 따른 SPL의 증가는 수소의 높은 화염 온도로 인한 열방출 강도 증가로 열음향 불안정성이 증가되기 때문이다.[3] 반면, 당량비가 낮은 조건에서는 열방출 강도가 감소하고, 이에 SPL도 AC 전기장 인가 여부와 관계없이 전반적으로 감소하였다.

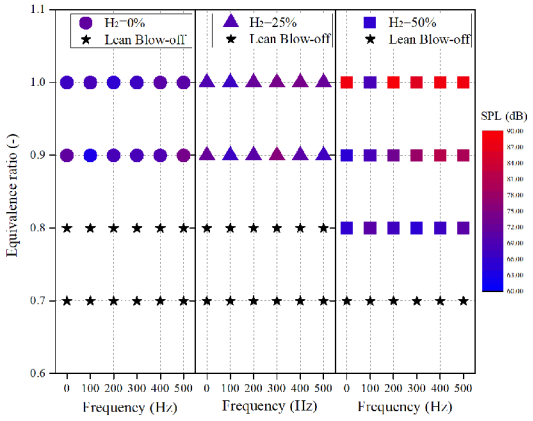


Fig. 2 SPL maps of hydrogen enriched flames under applied AC electric fields

AC 전기장을 인가한 경우, 순수 프로판 화염에서는 200 Hz AC 전기장을 인가했을 때, SPL이 전기장 미 인가 조건인 71 dB에서 68 dB로 감소하였고, 혼소율이 증가하여도 비슷한 경향을 보였다. 이는 저주파 영역에서 형성된 이온풍이 화염의 열방출 영역과 압력 진동 간의 위상 결합을 교란하여 열음향 불안정성을 억제하기 때문이다. 반면, 각각 400 Hz, 500 Hz의 상대적으로 고주파수 전기장 인가시 SPL 값이 72 dB, 73 dB로 변화가 거의 관측되지 않았는데, 이는 고주파수 대역의 전기장 방향이 빠르게 변해 이온 이동이 제한되므로 그 효과는 미미하기 때문이다.[4] 또한 이론 당량비 조건에서 수소 혼소율 0%의 경우 0, 100 Hz 조건의 AC 전기장 인가 시 SPL이 각각 71 dB에서 68 dB로 감소하여 상대적으로 효과가 미약하였으나, 수소 혼소율 50%에서는 같은 AC 전기장 인가시 88 dB에서 67 dB로 현저히 감소하였다. 이러한 결과는 수소 혼소율이 증가할수록 AC 전기장이 열음향 불안정성을 효과적으로 제어할 수 있는 기법임을 시사한다.

후 기

이 성과는 2023년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2023-00249422)

참고 문헌

[1] JJ. Strollo, S. Peluso, and J. O'Connor, Effect of hydrogen enrichment on steady-state and transient thermoacoustic instability in a model gas turbine combustor, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 143 (7), (2021), 071023.

[2] T.H. Kim, H.M. Kim, The Effect of Electric Field on Thermo-Acoustic Instability in a Laminar Premixed Flame, Journal of Korean Society. Combustion. 30(2) (2025) 11-18.

[3] A. Kumar, S. Dutta, R. K. Malhotra, Effects of hydrogen enrichment on thermoacoustic and helical instabilities in swirl-stabilised partially premixed flames, Flow, Turbulence and Combustion, 111, (2023), 1109 - 1128.

[4] M. K. Kim, S. H. Chung, and H. H. Kim, Effect of electric fields on the stabilization of premixed laminar Bunsen flames at low AC frequency: Bi-ionic wind effect, Combustion and Flame, 159(3), (2012), 1151 - 1159.

Self-attention Based Prediction of Velocity Fields in 2D Laminar Oscillating Flames

Mert Yakup Baykan*, Kanghwan Kim*, Dong-hyuk Shin*†

ABSTRACT

A self-attention based transformer model was developed to predict the velocity field of 2D oscillating flames by using the temperature field. By learning the two dimensional spatial dependency of the velocity field to the temperature field, the model predicts the velocity field to a high accuracy, providing a fundamental method for future digital twins

Key Words : Oscillating Flame, Digital Twin, Self-attention, Transformer

Abstract

Recently, data driven and machine learning (ML) based reduced order models have gained attention for their ability to re-create or model flow fields at significantly reduced computational cost. For example, proper orthogonal decomposition (POD), have been utilized to create digital twins [1]. Another research of interest has been super resolution of flames via using convolutional neural networks [2]. Recently a more powerful deep learning architecture called a Transformer have emerged, which makes use of the self-attention mechanism to learn global dependencies found in the data [3]. By utilizing this powerful architecture, we introduce a self-attention based machine learning architecture to predict velocity fields of 2D oscillating flames [insert reference].

Methodology

For the dataset, adaptive mesh refinement (AMR) based DNS code was utilized (PeleLM) to simulate a 2D laminar oscillating premixed flame with a methane/air inflow at $\phi = 0.7$ [4]. Level-2 AMR grid with grid spacing and time step reduced by a factor of two at each level was utilized. Oscillating amplitude of the flame holder amplitude (ε) was varied between 0.2-0.6 mm, and the oscillating frequency (f) of the flame holder was varied between 500 to 700 Hz.

A transformer U-net (TransUNet) model was utilized for the predictive model. The TransUnet architecture consists of three parts. (1) The encoder, (2) the transformer, and (3) the decoder. Convolutional layers are employed at the encoder and decoder layers, to compress, and upscale the data respectively. Skip connections from the encoder to the decoder are utilized to feed spatial information at different resolutions to the decoder. Between the encoder and the decoder lies the transformer, where at the lowest resolution it extracts the long range spatial relationships by applying the self-attention mechanism, allowing the model to learn the overall structure of the flame.

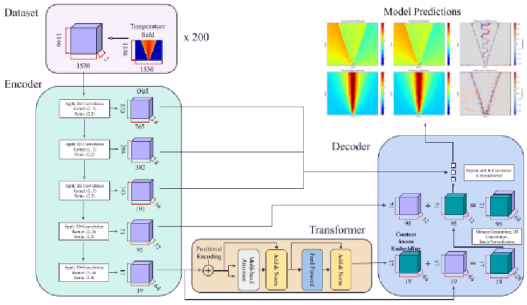


Fig. 1 Transformer Architecture.

* KAIST
† Corresponding Author, donghyuk.shin@kaist.ac.kr

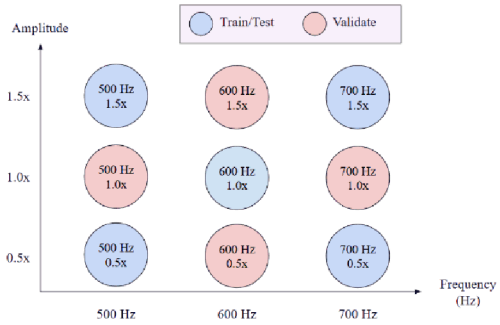


Fig. 2 Cases used for model training and validation .

Results & Discussion

The model successfully predicts the y-velocity and the x-velocity accurately, where the maximum relative error is within 2% for y-velocity and within 100% for the x-velocity field. The 100% error seen in x-velocity field calculations is due to regions where the x-velocity is near zero or changing direction rapidly. The absolute error of the predictions remains low. Figures 3, 4 and 5 illustrate these results for 500 Hz, 600 Hz and 700 Hz flames at 0.4 mm flame holder amplitude (1.0x), out of which the first and the last are interpolation cases and were not used during training. Future work will involving testing the extrapolation capabilities of the model, as well as visualizing the self-attention mechanism to understand how to model identifies the flame.

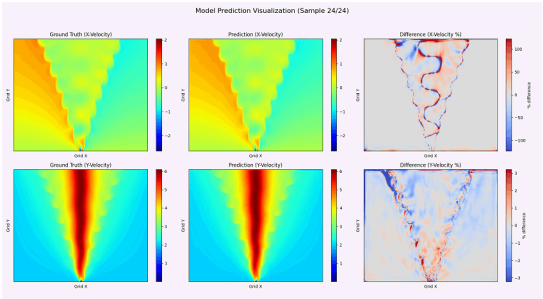


Fig. 3 Model predictions and relative error for ε = 0.4 mm and *f* = 500 Hz (untrained condition).

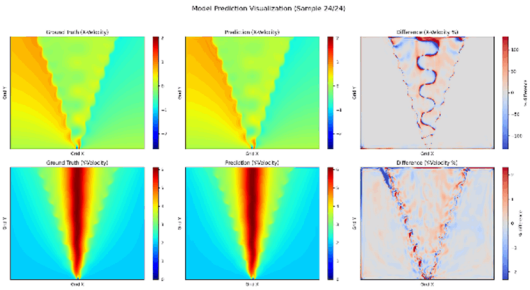


Fig. 4 Model predictions and relative error for ε = 0.4 mm and *f* = 600 Hz (trained condition).

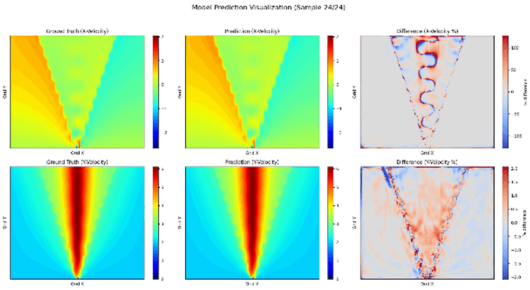


Fig. 5 Model predictions and relative error for ε = 0.4 mm and *f* = 700 Hz (untrained condition).

References

[1] G. Aversano, et al., "Digital twin of a combustion furnace operating in flameless conditions: reduced-order model development from CFD simulations", Proc. Combust. Inst., Vol. 38, 2021, pp. 5373-5381.

[2] M. Bode, et al., "Using physics-informed enhanced super-resolution generative adversarial networks for subfilter modeling in turbulent reactive flows", Proc. Combust. Inst., Vol. 38, 2021, pp. 2617-2625.

[3] A. Vaswani, et al., "Attention is all you need", Adv. Neural Inf. Process. Syst., Vol. 30, 2017, pp. 5998-6008.

[4] M. S. Day, and J. B. Bell, "Numerical Simulation of Laminar Reacting Flows with Complex Chemistry", Combust. Theory Model., Vol. 4, 2000, pp. 535-556.

NCC 공정 무탄소 연료 전환 기술 동향

이민정*†

Effect of LNG/H2 Fraction on Flame Stability in Pilot Burners

Min Jung Lee*†

ABSTRACT

The Naphtha Cracking Center (NCC) requires high-temperature heat traditionally produced by fossil fuels. To achieve carbon neutrality, hydrogen and ammonia are promising carbon-free fuels. Hydrogen offers high reactivity but causes flashback and NOx issues, while ammonia ensures zero carbon yet low stability. Recent progress in cracked ammonia and staged combustion enhances performance. This study reviews advances and prospects for carbon-free fuel transition in NCC processes.

Key Words : Naphtha Cracking Center, Ammonia Combustion, Hydrogen Fuel, Carbon-Free Transition, NOx Reduction

석유화학 산업의 핵심 공정인 나프타 크래킹 센터(Naphtha Cracking Center, NCC)는 고온(> 800°C) 공정열을 필요로 하며, 현재까지는 주로 LNG 또는 나프타 기반 연료에 의존하고 있다. 그러나 탄소중립 실현을 위한 산업부문의 탈탄소화 요구가 심화됨에 따라, NCC 공정의 무탄소 연료 전환 기술 개발이 중요한 연구 과제로 부상하고 있다. 본 연구에서는 NCC 공정의 연소열 공급 시스템을 대상으로 수소 및 암모니아 연료를 활용한 무탄소 연소 기술의 최근 동향을 분석하였다.

우선, 수소 연료의 적용은 고온 열효율 향상과 연소 반응 속도의 이점을 가지지만, 역화와 고온부 NOx 배출 증가 등의 문제가 병존한다. 이를 해결하기 위해 고스월(Swirl) 구조를 이용한 빠른 재순환 영역 형성, 이중 스테이지 연료 분사(Dual-stage injection), EGR 및 희박연소 제어 기술이 활발히 연구되고 있다. 반면, 암모니아는 탄소를 포함하지 않아 직접적인 CO_2 배출이 없지만, 낮은 반응성으로 인해 화염 안정성 및 연소 효율 저하가 주요 문제로 지적된다. 최근 연구에서는 열분해 기반 크랙킹 암모니아(Partially Cracked NH_3) 연료를 활용하여 H_2 함량을 제어함으로써 화염 안정성과 NOx 특성을 동시에 개선하는 접근이 제시되고 있다[1-2].

국내외적으로 일본의 IHI, JERA, 한국의 정부출연연구소 및 산업체 컨소시엄을 중심으로 MW급 무탄소 연소기 및 발전용 보일러 실증 연구가 추진 중이며, 최근에는 NCC 공정의 레트로핏형 연소 시스템 설계, 안전성 평가 및 수소 및 암모니아 혼소 최적화 해석 모델 개발이 진행되고 있다. 특히, NCC 공정의 특성상 고온 열부하와 촉매 반응기 전단의 균일 열유속 유지가 필수적이므로, 연료 전환 시 열유속 분포 제어 및 재료 내열성 평가가 향후 핵심 과제로 부상할 전망이다.

본 발표에서는 이러한 기술적 요소를 종합적으로 검토하고, NCC 공정의 단계별 탈탄소화 전환 기술 로드맵을 제안하면서, 산업 공정의 지속가능한 에너지 전환 전략 수립에 기여하고자 한다.

* 서울과학기술대학교 미래에너지융합학과
† 연락저자, mj.lee@seoultech.ac.kr
TEL : (02)970-9752

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(RS-2025-13772968)로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K.D.K.A. Somarathne, E.C. Okafor, "Science and Technology of Ammonia Combustion", Proc. Combust. Inst., Vol. 37, 2019, pp. 109-133.

[2] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I.F. David, P.J. Bowen, "Ammonia for Power", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 69, 2018, pp. 63-102.

납사 크래킹 공정의 무탄소 연료 전환을 위한 벽면 복사 버너 설계 연구

김희윤* · 하정우* · 박지연* · 유미연* · 김대해*† · 이창엽*†

Design study of a radiant-wall burner for carbon-neutral fuel transition in the naphtha cracking furnace

Heeyoon Kim*, Jungwoo Ha*, Jiyeon Park*, Daehae Kim*, Changyeop Lee*†

ABSTRACT

The naphtha cracking process(NCC) is one of the most energy-intensive operations in the petrochemical industry, where high-temperature radiant heat from burners is required to induce endothermic cracking reactions in tubular reactors. With increasing global attention to decarbonization, the introduction of carbon-neutral fuels such as hydrogen is being actively investigated on the NCC furnace burners. In this study, a novel design of wall-fired radiant burner for hydrogen co-firing was proposed to achieve low NOx emissions and stable flame attachment to the furnace wall. By utilizing dual Coanda effect, the mixing zones of fuel and oxidizer were divided into two stage, therby promoting uniform flame distribution along the wall, surpressing the formation of localized high-temperature zones and effectively reducing thermal NOx generation. Future work will focus on experimental validation using a full-scale prototype burner to evaluate flame attachment behavior and NOx emission characteristics under hydrogen blending.

Key Words : naphtha cracking, radiant-wall burner, hydrogen, coanda effect.

납사 크래킹 공정(Naphtha cracking process, NCC)은 석유화학 산업에서 에틸렌, 프로필렌 등 기초 유분을 생산하기 위한 핵심 열분해 공정으로, 반응관 내부에서의 열분해 반응을 유지하기 위해 약 800-900 °C의 로 내 고온 유지가 중요하다. 이러한 열은 Fig. 1의 NCC 공정 개략도와 같이 로의 바닥에 위치한 노저 버너(hearth burner)와 벽면 복사 버너(radiant-wall burner)를 통해 열분해 관 군부에 직접 또는 복사열을 통해 공급된다. 현재는 열원으로써 천연가스 또는 공정 부산가스가 주요 열원으로 사용되고 있으나, 탄소중립 전환 요구가 강화됨에 따라 화석연료를 대체할 수 있는 무탄소 연료(수소, 암모니아 등)의 적용 가능성이 주목받고 있다. 그러나 수소는 CO_2를 배출하지 않는다는 장점을 가지고 있으나, 화염 전파속도가 빠르고 점화 에너지가 낮으며 확산계수가 커 기존의 탄화수소 버너 구조에서는 역화와 화염 안정성 문제가 빈번하게 발생한다. 또한, 수소는 높은 화염온도를 가지며 확산성이 높아 기존 탄화수소 계열 버너 적용 시 역화 및 화염 안정성의 문제와 다량의 NOx 생성 우려가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 NCC 공정의수소 연소 적용을 위해 안정적으로 화염을 벽면 부착하며 배가스 재순환과 다단 연소를 통해 NOx 생성을 억제하는 새로운 형태의 벽면 복사 버너를 설계하고자 한다.

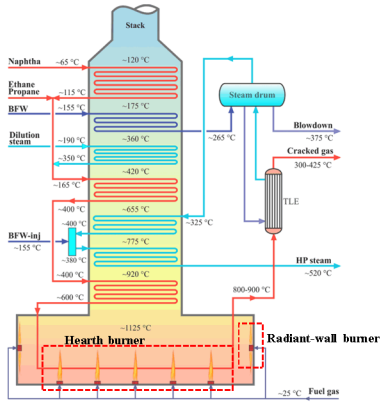


Fig 1. Schematic of a typical naphtha cracking process and furnace [1]

* 한국생산기술연구원
† 연락저자, cylee@kitech.re.kr
TEL : (041)5898-414, FAX : (041)-5898-430

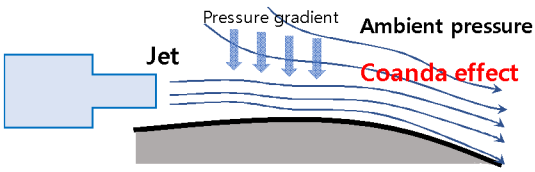


Fig 2. Coanda jet flow on a curved surface

기존의 벽면 복사 버너는 코안다 효과(Coanda effect)를 적용하여 화염의 벽면 부착을 통해 복사열로 납사를 열분해하는 버너이며, 대표적인 사례로는 미국 John Zink사의 제품이 있다.[2] 코안다 효과는 고속 제트가 인접한 고체 표면 근처를 지날 때 점성력과 압력 구배에 의해 표면에 부착되는 현상을 말한다(Fig. 2 참조). 이는 제트 외부의 유동이 제트 중심부로 유입되면서 벽면 쪽으로의 압력이 감소하기 때문에 따라 제트가 곡면을 따라 휘어지는 흐름을 형성하게 된다. 일반적으로 코안다 부착 조건은 다음과 같다. [3, 4]

$$0.02 \le h/R \le 0.3,$$
$$2\times10^3 \le Re \le 2\times10^5$$

h: 제트 높이
R: 코안다 벽면 곡률 반경

위의 범위 내에서 제트는 벽면을 따라 안정적으로 부착되어 흐르며, 유동 확산에 의해 화염이 벽면에 밀착된다. 이에 본 연구는 해당 조건을 참조하여 벽면 복사 버너 설계에 코안다 효과를 적용하였다.

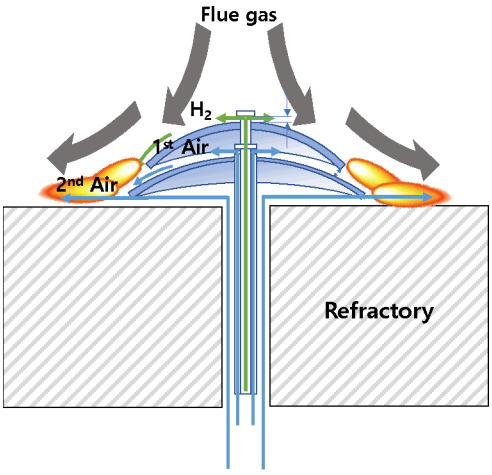


Fig 3. Flame and flow structure on the dual Coanda burner

기존의 코안다 버너는 단일 코안다로 화염의 벽면 부착이 가능하지만, 고속 수소 제트의 난류 강도와 열방출로 인해 부착 안정성이 저하될 수 있다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 이중 코안다(dual Coanda) 개념을 도입하였다. 상층부의 코안다 벽면에서 연료를 슬릿형 노즐로 분사하여 1차 주 화염을 형성한다. 이후, 하부의 코안다 벽면에서 저속의 공기 또는 희석 가스를 분사하여 외측 압력장을 안정화하고, 주 제트의 박리를 안정화한다. 마지막으로, 내화벽을 따라 공기를 추가 분사하여 내화벽의 열화 손상을 억제하며, 화염 부착 안정화를 유도한다. 동시에 화염 형성 영역의 분리를 통해 온도장을 균일화하며 배가스 재순환 효과를 유도하여 thermal NOx의 생성을 억제한다.

본 연구는 향후 제안된 형상을 수치해석 및 실험을 통해 수소 혼소율에 따른 부착 거리, 복사 강도, NOx 배출 경향을 검증할 예정이다. 또한 실규모급 연소기 제작을 통해 코안다 형상 매개 변수의 실효성을 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 석유화학 무탄소연료 기반 NCC 공정기술개발의 일환(RS-2025-13762968)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] F. Mohammad, S. M. Seyed, "Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins; a state-of-the-art review III: Process modeling and simulation", Fuel, Vol. 252, 2019, pp. 553-556.
[2] Theis, et al. "Radiant wall burner", United States Patent Application Publication, US 2020/0400308 A1, 2020.
[3] A. Skotnicka-Siepsiak. "Pressure distribution on a flat plate in the context of the phenomenon of the Coanda effect hysteresis." Sci Rep 12, 2020, 12687.
[4] Sollevanti, M., Miozzi, M. & Romano, G.P. Coandă effect in free-surface shallow-water offset jets. Exp Fluids 66, 57 (2025).

천연가스/수소 비율이 파일럿 버너의 화염 특성에 미치는 영향

김인수*† · 노동순* · 오정석* · 이창희**

Effect of LNG/H_2 Fraction on Flame Stability in Pilot Burners

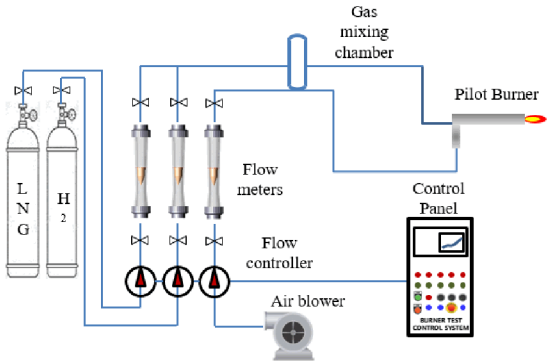
Insu Kim*†, Dongsoon Noh*, Jeongseok Oh*, Changhee Lee**

기후변화에 대한 영향을 줄이고자 EU에서는 CBAM(Carbon Border Adjustment Mechanism, 탄소국경조정제도)의 시행이 2026년1월1일부터 예정되어 있고, 기후변화협약에 따라 국내에서도 배출되는 온실가스를 2018년도 총 배출량 대비 2030년까지 40% 감축을 목표로 하고 있다. 이에 따라 석유화학공정에 있어서도 이산화탄소 감축이 큰 과제가 되었고 이산화탄소 배출이 가장 많은 NCC(Naphtha Cracking Center)에 있어 승온 및 보열용 버너의 연료를 기존의 천연가스에서 암모니아, 암모니아-수소 혼합 연료로 대체하는 기술이 주목을 받고 있다. 수소는 단위체적당 저위발열량은 2590kcal/Nm^3로 낮으나 연소 속도가 빨라서 화염 안정성에는 문제가 없다[1]. 그러나 암모니아의 경우 단위체적당 저위발열량은 3370 kcal/Nm^3로 수소보다도 더 높으나 연소 속도가 낮아 공업용 용량에서는 단독 연소가 어려운 상황이다[2]. 이 때문에 암모니아 연소기에서는 탄화수소계 연료를 사용한 파일럿 버너를 사용하여 암모니아 연료를 안정적으로 연소시키고 있으나 파일럿 버너에 대해 탄화수소계 연료 내 수소 첨가 등에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 상용의 파일럿 버너 3종류(예혼합 연소 1종류 및 확산 연소 2종류)에 대해 총열량 일정의 조건하에서 열량기준으로 LNG 대 수소의 혼합 비율에 따른 화염 특성을 실험을 통해 체계적으로 조사하였다.

본 연구를 통해 확산 연소 파일럿 버너는 예혼합 연소 버너에 비해 LNG 대 수소의 비율에 관계 없이 넓은 당량비 범위에서 화염이 안정됨을 알 수 있었다. 또한 확산 연소 버너에서는 수소 비율이 가장 높은 80%에 대해 실험한 모든 당량비 범위에서 화염은 안정적으로 유지가 되었으나 화염길이가 극단적으로 짧아지는 현상이 나타남을 알 수 있었다.

위의 사실로부터 상용의 파일럿 버너에 천연가스-수소 혼소를 안정적으로 구현하기 위해서는 총열량 기준으로 수소 비율을 40% 정도로 제한하여 확산 연소 버너에 적용해야 안정된 파일럿 화염의 역할을 할 수 있음을 알 수 있었다.



후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(RS-2025-13772968)로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] 정병규, 이기만, "C넓은 당량비 구간에서 수소함유량에 따른 합성가스(H2/CO)/공기 예혼합화염의 연소속도 및 화염구조에 관한 연구", 한국연소학회지, Vol. 19, 2014, pp. 17-28.

[2] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. Kunkuma A, Somarathne, Ekenechuckwu C. Okafor, "Science and technology of ammonia combustion, Proceedings of the Combustion Institute 37, 2019, pp. 109-133.

* 세화이앤씨 기업부설연구소
** 세화이앤씨
† 연락저자, combustionda@daum.net
TEL : (054)933-5155 FAX : (054)-933-5156

무탄소 연료 부분 예혼합 화염 연소 특성 및 총괄 반응 메커니즘 개발

전동석*. 김세훈*. 김남일*†

Characteristics of partially premixed flame with carbon-free fuels and development of global reaction mechanism

Dong Seok Jeon*, Se Hun Kim*, Nam Il Kim*†

ABSTRACT

The stabilization characteristics of partially-premixed flames were investigated using methane, hydrogen, and ammonia. The effects of fuel composition, jet Reynolds number, and temperature on flame behavior were examined. The modified relationship between the lift-off height and jet velocity was proposed, and the stabilization modes were introduced based on the experimental conditions. In addition, global reaction mechanisms were developed to reduce computational cost for the numerical simulations for hydrogen and ammonia mixtures.

Key Words : Carbon-free fuel, Partially-premixed flame, Global reaction mechanism

최근 강화된 환경 규제로 인해 수소(H_2)나 암모니아(NH_3)와 같은 무탄소 연료를 산업용 연소기에 적용하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 특히 발전용 가스터빈 연소기에 이러한 연료를 공급하며 화염 안정화 메커니즘과 배기 물질 배출 특성을 규명하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[1]. 가스터빈 연소기는 일반적으로 연료와 공기를 미세 규모에서 혼합하여 연소하는 마이크로 믹서(micro-mixer) 형태의 구조를 가진다. 즉, 연료와 산화제가 각각 공급되지만 일부가 혼합되어 부분 예혼합 화염이 형성된다. 이와 같은 부분 예혼합 화염은 화염 길이가 짧아 질소 산화물(NOx) 배출이 적고, 화염 안정화 범위가 넓다는 장점으로 인해 산업 현장에서 널리 활용되고 있다. 그러나, 이러한 연소 방식은 산업적으로 보편화되어 있음에도 불구하고 학술적인 측면에서는 여전히 규명되지 않은 부분이 많다. 가장 기본적인 형태인 난류 부상 화염의 경우, 지난 50여 년간 활발히 연구되어 왔음에도 그 안정화 메커니즘이 완전히 밝혀지지 않았다. 또한, 기존 이론들은 주로 메탄보다 분자량이 큰 탄화수소계 연료를 대상으로, 완전 난류 조건에서 얻은 실험 및 수치 해석 결과를 기반으로 구축되어 있다. 따라서 밀도가 낮은 수소 연료나 고온 조건에서의 암모니아 연소 특성을 예측하기에는 아직 이론적 기반이 충분히 확립되지 않았다고 할 수 있다.

이러한 학문적 공백을 해소하기 위해 Jeon과 Kim은 단일관 버너와 랩스케일 마이크로 믹서형 버너를 이용하여 메탄, 수소, 그리고 암모니아 크랙 가스 혼합 연료의 부상 화염 안정화 메커니즘을 체계적으로 연구하였다[2-4]. 그들은 산업

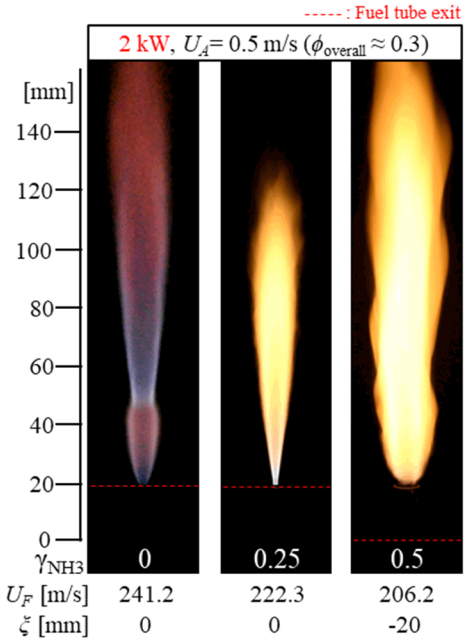


Fig. 1 Effect of NH_3 volume fraction on the non-premixed hydrogen jet flame.

* 한국과학기술원 기계공학과
† 연락저자, nikim@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3211

용 버너 설계에 직접 적용할 수 있도록, 비교적 낮은 레이놀즈 수 영역에서 부상 화염 높이를 정확히 예측할 수 있는 새로운 관계식을 제시하였다. 또한 레이저 계측 기법을 활용하여 화염 선단의 에지 화염 구조를 규명하고, 제트 유동 혼합 코어, 소염 거리, 난류 강도 등을 통해 화염 안정화 메커니즘을 설명하였다. 최근에는 고온 공기 조건에서의 암모니아 비예혼합 및 부분 예혼합 화염 특성을 규명함으로써 친환경 연소기 개발 기술에 기여하고 있다.

한편, 수소나 암모니아는 탄화수소계 연료에 비해 화학 반응 메커니즘이 단순하다는 장점이 있어, 이를 활용하는 수치해석적 연구도 활발히 수행되고 있다. 상세 화학 반응 메커니즘(DRM)은 화염 구조나 배기 물질 배출 특성을 높은 정확도로 예측할 수 있지만, 여러 연료가 혼합된 경우에는 각 연료에 따른 중간 생성물과 반응 경로가 모두 포함되어 계산 비용이 기하급수적으로 증가하는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 적은 수의 반응식을 통해 연소 속도를 효과적으로 모사할 수 있는 총괄 반응 메커니즘(GRM) 개발이 진행되고 있다[5]. 현재는 수소, 암모니아, 메탄을 위한 9개의 반응식으로 구성된 GRM이 개발되어 있으며, 향후에는 수소와 알케인/알코올계 연료 혼소를 고려한 반응 메커니즘으로의 확장이 이루어지고 있다. 결론적으로 본 연구에서는 지금까지 보고된 무탄소 연료 기반 부상 화염의 연소 특성과 화염 안정화 메커니즘을 종합적으로 고찰한다. 더 나아가, 상세 화학 반응 계산의 높은 비용을 줄이기 위한 효율적인 접근법으로서 무탄소 연료 혼소 조건에 적합한 총괄 반응 메커니즘 개발 방향을 제시한다.

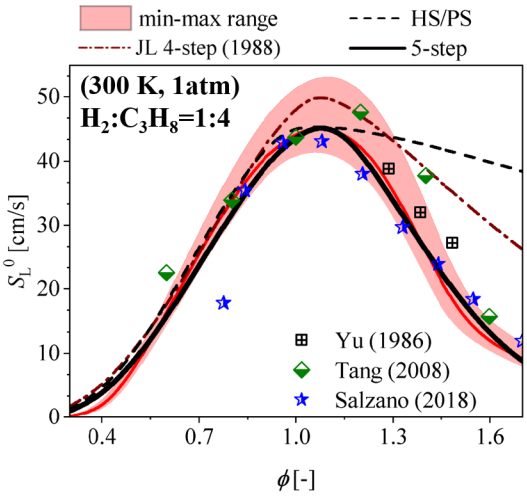


Fig. 2 Five-step global reaction mechanism for H_2+ C_3H_8+ air flames.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2025-13772968).

참고 문헌

[1] H. Kobayashi et al., "Science and technology of ammonia combustion", Proc. Comb. Inst., Vol. 37, 2019, pp. 109-133.

[2] D.S. Jeon, G.J. Hwang, N.I. Kim, "Overall lift-off characteristics of CH4/H2 non-premixed jet flames in laminar/turbulent transition", Combust. Flame, Vol. 258, 2023, 113072.

[3] D.S. Jeon, G.J. Hwang, N.I. Kim, "Lift-off characteristics of non-premixed jet flames of CH4 and cracked NH3 mixtures in laminar/turbulent transition", Combust. Flame, Vol. 265, 2024, 113462.

[4] J. Lee, N.I. Kim, "Stabilization and soot/NOx emission of hydrogen-enriched methane flames in a turbulent jet with coaxial air under elevated pressures", Int. J. Hydro. Energy, Vol. 48, 2023, pp. 37402-37414.

[5] H.M. Yang, N.I. Kim, "Global Reaction Mechanisms for H2 + NH3 + CO + CH4 at Conditions up to 600 K and 5 atm", Int. J. Hydro. Energy, Vol. 101, 2025, pp. 998-1013.

멀티스케일 접근을 통한 연소 반응의 이해 및 응용

권형욱*†

A Multiscale Approach to Understanding and Applying Combustion Reactions

Hyunguk Kwon*†

ABSTRACT

Combustion is a multi-scale phenomenon involving interactions from molecular reactions to flame structures, flow dynamics, and combustor design. This presentation introduces case studies that integrate quantum chemistry, molecular dynamics, and computational fluid dynamics to enhance understanding of combustion reactions. For fuels with well-established mechanisms, kinetic models are validated and refined through CFD simulations. For emerging fuels, computational chemistry tools are used to identify key reaction pathways, estimate rate constants, and accelerate mechanism development.

Key Words: Kinetic mechanism, density functional theory, molecular dynamics, computational fluid dynamics, multi-scale modeling

연소 현상은 전자 및 분자 수준의 반응에서부터 화염 구조, 반응 유동, 그리고 연소기 설계에 이르기까지 여러 공간적·시간적 스케일이 상호작용하는 복합적 과정이다. 이러한 다중 스케일 특성을 전산모사를 통해 정량적으로 이해하기 위해서는, 분자 수준의 반응 동역학에서 실제 연소기 응용에 이르는 계층적 접근이 필요하다.

미시 규모(microscale)에서는 양자화학과 분자동역학 계산 등을 통해 반응 경로 및 속도상수를 예측하고, 이를 기반으로 상세 반응 메커니즘을 구축하는 연구가 주를 이루어 왔다. 거시 규모(macroscale)에서는 구축된 반응 메커니즘이 적용된 전산유체역학(CFD) 해석을 통해 실제 운전 조건에서의 온도, 압력, 생성물 농도 등 거시적 반응 특성을 예측해 왔다. 그러나 일반적으로 이러한 연구들은 각 스케일별로 분리되어 수행되는 경우가 많아, 상호 연계성의 부족으로 인한 예측 한계가 존재한다.

본 발표에서는 양자화학, 분자동역학, 전산유체역학 해석을 유기적으로 연계함으로써 연소 반응의 이해를 향상시키기 위한 연구 사례를 소개하고자 한다. 특히, 관심 있는 연료에 대해 화학반응 메커니즘이 이미 개발된 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 접근하고자 한다. 먼저, 탄화수소, 암모니아, 수소 등과 같이 반응 메커니즘이 잘 정립된 경우, 기존 메커니즘의 신뢰성을 검증하고 향상 방안을 제시한 연구 사례를 다룬다. 이러한 경우에는 CFD 해석에 메커니즘을 적용하여 실험 결과와 비교함으로써 예측 정확도를 평가하고, 불일치가 발생할 경우 속도 파라미터나 반응 경로를 재검토하여 메커니즘을 보정 방안을 제안하였다.

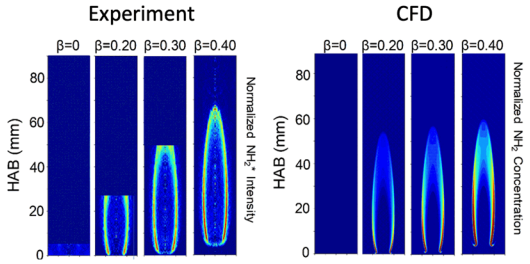


Fig. 1 NH_3-CH_4 층류 화염에서 NH_2의 실험 및 CFD 결과 비교

반면, 새로운 연료 조성이나 분자 구조로 인해 기존 반응 메커니즘이 존재하지 않는 경우에는, 양자화학 계산을 통해 반응 경로와 속도상수를 직접 도출하였다. 그러나 양자 화학 계산은 연구자가 사전 화학적 지식을 바탕으로 복잡한 반응 경로를 수동으로 정의해야 한다는 한계를 가진다. 이를 보완하기 위해, 본 연구에서는 ReaxFF 분자동역학 시뮬레이션을 활용하여 주요 반응 경로

* 서울과학기술대학교 미래에너지융합학과
† 연락저자, hkwon@seoultech.ac.kr
TEL : (02) 970-9756

를 탐색하고, 이를 통해 상세 반응 속도 개발을 가속화하는 전략을 제안하였다.

이러한 멀티스케일 접근은 복잡한 연료의 반응 메커니즘 이해와 예측 정확도를 동시에 향상시키며, 미래형 청정 연소 시스템 설계에 중요한 기반을 제공할 수 있다.

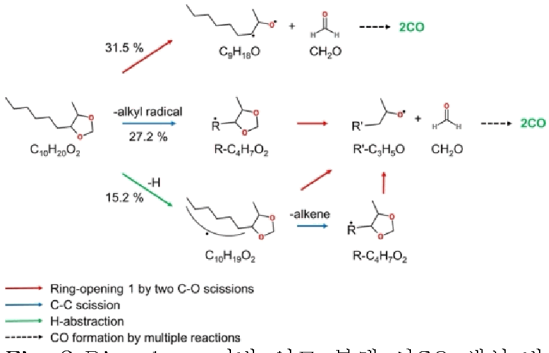


Fig. 2 Dioxolane 기반 연료 분해 시CO 생성 반응 경로 분석

후 기

본 발표는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제번호: RS-2025-13772968).

참고 문헌

[1] M.J. Montgomery, H. Kwon et al., "Effect of ammonia addition on suppressing soot formation in methane co-flow diffusion flames", Proc. Combust. Inst. 2021, pp.2497-2505.

[2] H. Kwon and Y. Xuan, "Pyrolysis of bio-derived dioxolane fuels: A ReaxFF molecular dynamics study", Fuel 2021, pp. 121616.

이중선회 인젝터 내 메탄/수소 화염의 형상과 재부착 거동에 관한 연구

김진성* · 이기만*†

A Study on the Flame Structure and Reattachment Behavior of CH_4/H_2 Flames in a Dual-Swirl Injector

Jinseong Kim*, Keeman Lee*†

ABSTRACT

In this study, the shape of CH_4 /H_2 co-firing flames and the reattachment behavior of lifted flames in a dual-swirl injector were investigated. High-speed OH-PLIF measurements were conducted to observe the flame structures under varying hydrogen contents and global equivalence ratios. In the attached flame, the reaction layers of the main and pilot flames are clearly separated, forming a thin reaction zone, whereas in the lifted flame, the two reaction layers merge, resulting in a stronger and thicker reaction region.

Key Words : Dual-swirl injector, CH_4-H_2 co-firing, Highpseed OH-PLIF measurement, Reattachment behavior, Flame stretch

최근 지구온난화 문제가 심각해짐에 따라 전세계적으로 이산화탄소의 배출을 줄이기 위해 기존 탄화수소 계열의 연료를 무탄소 연료로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 무탄소 연료로는 수소와 암모니아가 있다.

암모니아는 상온에서 약 10 bar 정도의 압력만 가하면 액화가 가능하여 에너지 저장 및 운송 측면에서 경제적 이점이 있어 수소 캐리어로써도 활용이 된다. 그러나 암모니아는 높은 자발화 에너지와 낮은 연소속도 등으로 인해 연소 운전 범위가 상대적으로 좁다는 단점이 있다. 반면, 수소는 높은 연소속도와 연소반응률을 가지고 넓은 가연한계를 가지며, 연료 내 탄소뿐만 아니라 질소 성분도 존재하지 않아 완전 연소시 이산화탄소와 질소 산화물을 적게 배출하는 장점이 있다.

수소는 활발한 연소반응률로 인해 예혼합 조건에서 상대적으로 높은 단열화염온도를 가지며, 이는 Thermal NO_X 생성을 촉진 시킨다. 이에 가스터빈 분야에서는 희박 예혼합 연소 방식을 많이 채택한다. 그러나 희박 예혼합 연소 시 연소불안정을 야기하게 된다. 스월 방식의 연소는 화염 내부에 재순환 영역을 형성하여 고온 생성물의 재순환을 유도해 지속적으로 점화원이 존재하도록 하여 화염을 안정화 시키지만 내부재순환 영역에 형성된 앵커링 포인트에서 CIVB (Combustion Induced Vortex Breakdown) 메커니즘에 의한 역화가 발생할수도 있다[1]. 따라서 역화의 위험성을 최소화하고, 안정적인 연소를 하기 스월에 의해 형성된 내부 재순환 영역을 유연하게 컨트롤할 수 있어야 한다. 이중선회 연소 방식은 동축으로 구성된 각 노즐에서 스월 강도 및 방향과 유량 분배를 다양하게 조절하며, 화염의 형상과 내부재순환 및 외부재순환 영역을 보다 유연하게 제어할 수 있기 때문에 역화 위험성을 줄이고 연소 안정성을 높일 수 있는 잠재력을 가지고 있다[2]. A. Aniello 등은 수소/공기 동축 이중선회 확산화염에서 부착화염과 부상화염의 반응영역에서의 혼합구조를 LES 분석을 통해 파악하였다. 해당 연구에 따르면 두 화염의 화염면은 각각 다른 혼합방식으로 형성된다고 보고되었다[3].

본 연구에서 이중선회 연소기 내 CH_4/H_2 혼합연료 화염의 거시적인 형상과 스트레치 특성에 초점을 맞추었으며, 부착화염과 부상화염의 형상을 관찰 및 비교하고, 스트레치 특성에 대해 비교하는 연구를 진행하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 이중선회 연소기의 구조를 나타낸다. 인젝터에서 바깥쪽 메인 유로계에는 CH_4와 Air가 예혼합된 상태로 공급되고,

* 순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : (061)750-3828

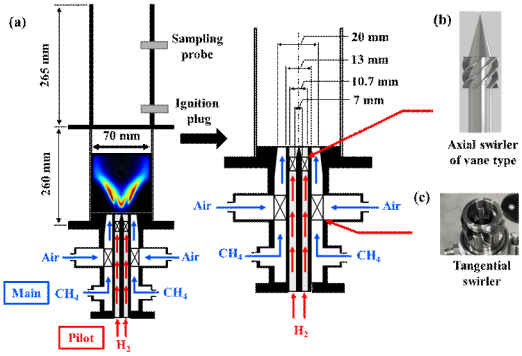


Fig. 1 Schematic diagram of the dual-swirl combustor.

안쪽 파일럿 유로계에는 수소가 단일연료로 공급이 된다. 연소실은 광학측정을 용이하게 하기 위하여 사각 챔버 형태로 이루어져 있다. 메인 스월러는 접선방향 타입이고, 파일럿 스월러는 축방향 타입이다. 이중선회 화염의 단면 형상을 관찰하기 위하여 시드니 대학교에서 고속 OH-PLIF 이미지 계측을 수행하였다[4]. Edgewave의 Nd:YAG와 SIRAH Dye laser를 통해 10 kHz로 283 nm의 레이저를 발생시키고, LaVision IRO 인텐시파이어가 장착된 Photron HSS6 고속 카메라를 통해 10 kHz의 샘플링 레이트로 OH PLIF 이미지를 취득하였다.

실험은 메인 벌크 유속 (U_M)을 10 m/s, 15 m/s으로 고정하여 진행하였으며, 주요 변수로는 글로벌 당량비 (Φ_g), 수소혼소율 (X_{H_2})이 있으며, 본 연구에서 수행한 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Main bulk velocity (m/s)	10, 15
Global equivalence ratio (Φ_g)	0.5 - 0.7
Hydrogen content (%)	20-80
Thermal power (kW)	3.2 - 6.9

Fig. 2에서 U_M= 10 m/s 조건에서의 글로벌 당량비, 수소 혼소율에 따른 화염의 OH PLIF 평균 이미지와 직접 이미지를 나타내었다. 글로벌 당량비가 낮은 조건에서는 부착 화염의 형상을 띄는 반면 글로벌 당량비가 증가하면서 부상 화염의 형상을 띄는 것을 알 수 있다. 또한 수소 혼소율이 증가하면서 파일럿 화염의 부상 높이가 증하는데, 이러한 경향은 부착화염에서 더욱 뚜렷하게 관찰되는 것을 알 수 있다. 부착화염의 경우 메인과 파일럿 화염의 각 반응층이 얇은 반면, 부상 화염에서는 두 화염면이 같이 접합하여 강하고 두꺼운 OH 반응 영역을 형성한다.

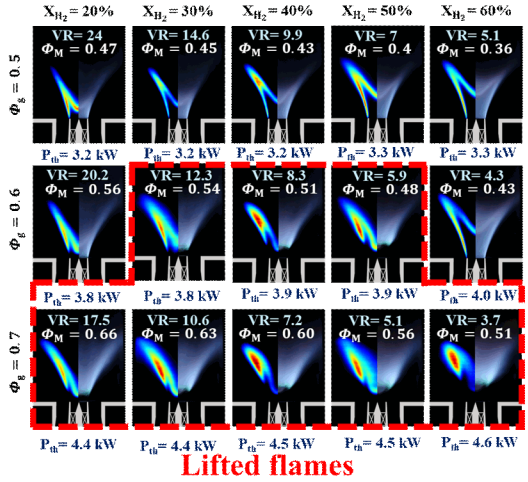


Fig. 2 Flame shapes for various global equivalence ratios and hydrogen contents at fixed main bulk velocity U_M= 10 m/s.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구과제이며 이에 감사드립니다(RS-2022-00155547).

참고 문헌

[1] M. Kröner, T. Sattlemayer, J. Fritz, F. Kiesewetter, C. Hirsch, “Flame Propagation in Swirling Flows-Effect of Local Extinction on the Combustion Induced Vortex Breakdown”, Combustion Science and Technology., Vol. 179, 2007, pp. 1383-1416.

[2] D. Hwang, K. Ahn, “Experimental Study on Dynamic Combustion Charactersitics in Swirl-Stabilized Combustors”, Energies., Vol. 14, 2021, pp. 1609.

[3] A. Aniello, D. Laera, S. Marragou, H. Magnes, L. Selle, T. Schuller, T. Poinsot, “Experimental and Numerical Investigation of Two Flame Stabilization Regimes Observed in a Dual Swirl H_2-air Coaxial Injector”, Combustion and Flame., Vol. 249, 2023, pp. 112595.

[4] T. Ahmed, A. Kourmatzis, G. Singh, A.R. Masri, “Turbulent Spray Flames of Kerosene Issuing from a Hybrid Electrohydrodynamic-Air-Blast Atomiser”, Combustion and Flame., Vol. 239, 2022, pp. 111573.

인공신경망과 대표 화학종 그룹을 활용한 다차원 난류 반응 유동 계산 가속화 연구

류병완*, 정기성*, 김경택**†

Acceleration of turbulent reactive flow simulations using an artificial neural network with representative species transport

Byeong Wan Ryu*, Ki Sung Jung*, Gyeong Taek Kim**†

ABSTRACT

본 연구는 직접수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS)에서 계산 비용의 상당 부분을 차지하는 화학 반응 소스항(chemical source term)을 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)으로 대체하여 계산 효율을 향상시키는 것을 목적으로 한다. ANN은 DNS 데이터를 기반으로 훈련되었으며, 복잡한 화학 반응 메커니즘을 갖는 연소 조건에서도 예측 성능을 유지하고 학습 효율을 높이기 위해 전체 화학종 중 주요 화학종만을 선별하여 학습에 사용하는 subset 기반 학습 기법을 적용하였다. 본 연구에서는 ANN이 DNS 계산 결과를 얼마나 정밀하게 재현할 수 있는지를 평가하고, 격자 해상도 변화에 따른 예측 성능 변화를 분석함으로써, 해상도 저하가 가능한 조건과 그 한계 메커니즘을 탐색하였다. 이러한 과정을 통해 ANN 기반 접근법이 DNS의 높은 계산 비용을 효과적으로 완화할 수 있음을 보이고자 한다.

Key Words: Artificial Neural Network, Direct Numerical Simulation, Chemical Source Term, Grid Resolution

1. Introduction

직접수치모사(Direct Numerical Simulation; DNS)는 연소 과정에서의 화학-유동 상호작용을 가장 정밀하게 재현할 수 있는 수치해석 기법으로 평가된다. 그러나 상세 화학 반응계의 소스항(chemical source term) 계산은 강한 비선형성과 다차원 반응 메커니즘으로 인해 전체 계산의 주요 병목 구간으로 작용한다. 이러한 병목을 완화하기 위해, 일부 연구에서는 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 이용하여 high-fidelity Simulation 내의 chemical kinetics 계산을 대체하는 방식을 제안해 왔다[1, 2]. 이를 통해, 고비용의 반응 계산 구간을 ANN으로 대체함으로써 전체 해석 시간을 단축할 수 있다는 점에서 주목받고 있다.

이때, 복잡한 화학 반응 메커니즘을 다루는 경우 모든 화학종을 ANN으로 학습시키는 것은 입력 차원이 지나치게 커 학습 효율과 계산 안정성을 저하시킬 수 있다. 이에 따라 일반적으로 주요 화학종만을 선별하여 ANN을 학습시키는 subset 기반 학습 기법이 적용된다[3]. 한편, subset을 적용시킨 기존 연구에서는, 주로 최대 질량분율(maximum mass fraction)을 기준으로 대표 화학종을 선택하였으며[4], 일부 연구에서는, subset 적용을 통해 기존 방식 대비 더 낮은 격자 해상도에서도 물리적 분포를 잘 유지할 수 있음을 보고하였다[5]. 이를 통해, 소스항 계산의 ANN 대체로 인한 기본적인 시간 절감에 더해, 격자 해상도 축소를 통한 추가적인 계산 효율 향상 가능성도 제시되었다.

본 연구에서는 이러한 선행 연구의 접근을 참고하여, 각 화학종의 최대값을 기준으로 subset을 구성하고, 이를 바탕으로 격자 해상도 변화에 따른 ANN 예측 성능의 변동 및 한계 조건을 분석하고자 한다.

2. Results

본 연구에서는 subset 기반 ANN 모델의 성능을 검증하기 위해, 5 atm 조건의 2차원 난류

* 국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공
** 포스코홀딩스 수소저탄소연구소
† 연락저자, 김경택(kaizen3@posco-inc.com)

메탄/공기 DNS 데이터를 기반으로 학습 및 평가를 수행하였다. 그림 1은 2차원 난류 화염의 주요 화학종인 CO의 질량 분율에 대한 ***y***방향의 평균 분포를 DNS로부터 계산한 결과를 나타낸다. 격자 민감도를 평가하기 위해 2차원 공간 내 격자 수를 320 × 640 에서 160 × 320 까지 단계적으로 감소시키며 계산을 수행하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 격자 수가 160 × 320으로 감소할 경우 해석 결과가 유의미하게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 해석 조건에서 격자사용의 한도는 200 × 400이라고 볼 수 있다.

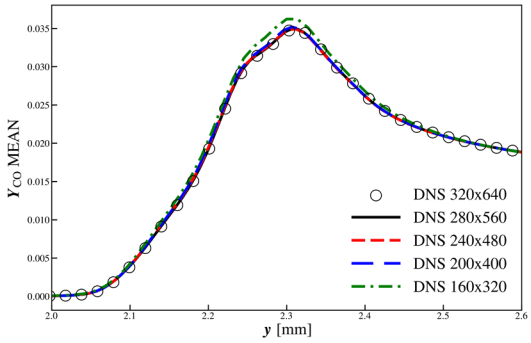


Figure 1. Comparison of the mean distribution of CO mass fraction obtained from DNS at different grid resolutions.

그림 2는 동일한 조건에서 ANN의 subset 개수를 변경해가며 계산을 수행했을 때의 예측 결과를 나타낸다. 이때 격자는 320 × 640 으로 설정하였으며, 모든 ANN 모델에서 공통적으로 subset으로 선택된 화학종인 CO_2에 대해서 ***y***방향 평균 값을 계산하였다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 subset의 개수를 적절히 설정할

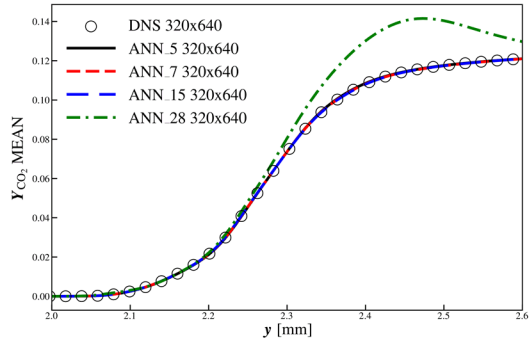


Figure 2. Comparison of the mean distribution of CO_2 mass fraction between ANN predictions and DNS results.

경우 DNS와 동일한 수준의 예측 정확도를 확보할 수 있었다.

그림 3은 subset의 개수를 7개로 설정했을 때 ANN의 예측 결과를 나타낸다. DNS와 동일한 조건에서 ANN의 격자 민감도를 평가하기 위해, 그림 1과 마찬 가지로 격자 수를 단계적으로 감소시키며 계산을 수행하였다. 그 결과, DNS의 경우와 달리, 격자 수를 160 × 320까지 낮추었을 때에도 격자 민감도가 발생하지 않았으며, ANN 결과가 DNS의 분포를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 이는 반응 시간 스케일이 빠른 화학종을 subset 리스트에서 제외하면 격자 민감도가 완화된다는 것을 의미하며, 이를 활용한다면 ANN 기반 모델의 계산 효율을 비약적으로 상승시킬 수 있음을 시사한다.

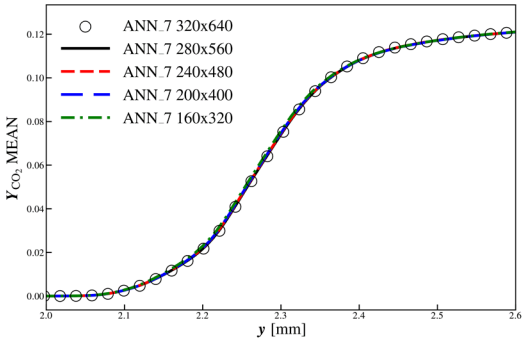


Figure 3. Comparison of the mean distribution of CO_2 mass fraction predicted by the ANN with subset size of 7 at different grid resolution.

한편, 그림 4는 subset 개수를 15개로 설정했을 때의 ANN의 예측 결과를 나타낸다.

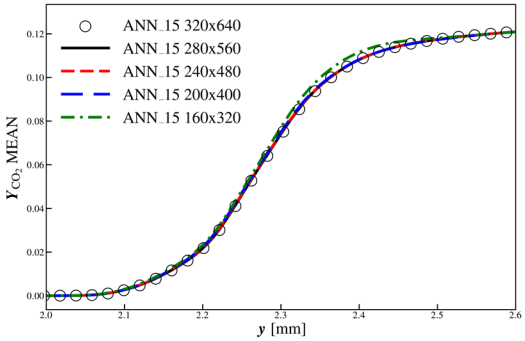


Figure 4. Comparison of the mean distribution of CO_2 mass fraction predicted by the ANN with subset size of 15 at different grid resolution.

앞선 그림 1과 3의 조건과 동일하게, ANN의 격자 민감도를 평가하기 위해 격자 수를 단계적으로 감소시키며 계산을 수행하였다. 그 결과, 이 경우에는 격자가 160 × 320 일 때 결과값의 차이가 확인되었다. 이는 그림 3의 결과와 달리 subset에서 시간 스케일이 빠른 화학종을 제외하더라도 격자 민감도가 완화되지 않는다는 것을 보여준다.

따라서, ANN의 예측 정확도를 향상시키기 위해서는 적절히 낮은 개수의 subset을 선택하여 ANN을 학습시키는 것이 필요하다. 그러나 이러한 조건이라 하더라도, 모든 subset 개수에서 동일하게 격자 민감도가 완화되는 것은 아님을 확인할 수 있다. 추후 연구에서는 다양한 매개변수를 변화시키며 여러 케이스의 ANN 모델을 훈련시키고, 각 모델의 계산 결과를 비교·분석함으로써 해상도 저하 조건에서 예측 성능의 차이를 유발하는 요인을 규명하고자 한다.

후 기

이 논문은 2022 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-현장연계미래선도인재양성 지원사업(No. RS-2022-NR-066640)과 2024 년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원(RS-2024-00450608)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

[1] T. Bai, Y. Huai, T. Liu, S. Jia, M. You, and N. Chang, "Acceleration of the complex reacting flow simulation with a generalizable neural network based on meta-learning", Fuel 372 (2024) 132173.

[2] J. An, F. Qin, J. Zhang, and Z. Ren, "Explore artificial neural networks for solving complex hydrocarbon chemistry in turbulent reactive flows", Fundamental Research 2 (2022) 595-603.

[3] A. Kumar and T. Echekki, "Physics-constrained machine learning for reduced composition space chemical kinetics", Data-Centric Engineering 6 (2025) e34.

[4] A. Kumar, M. Rieth, O. Owoyele, J. H. Chen, and T. Echekki, "Acceleration of turbulent combustion DNS via principal component transport", Combustion and Flame 255 (2023) 112903.

[5] K. S. Jung, A. Kumar, T. Echekki, and J. H. Chen, "On the application of principal component transport for compression ignition of lean fuel/air mixtures under engine relevant conditions", Combustion and Flame 260 (2024) 113204.

1000 MW_e급 대향류 보일러의 당량비 및 크래킹에 따른 암모니아 전소 성능 평가

박기범* · 강우석* · 하선교* · 이정호* · 이성재* · 류창국*†

Numerical evaluation on the influence of equivalence ratio and cracking on the performance of dedicated ammonia combustion in a 1000MW_e opposed-firing boiler

Gibeom Park*, Woosuk Kang*, Seonkyo Ha*, Jeongho Lee*, Sungjae Lee*, Changkook Ryu*†

ABSTRACT

Ammonia is a carbon-free fuel that can be stored and transported efficiently, making it a promising alternative for large-scale power generation. However, its low reactivity and strong NO_x formation tendency require optimized combustion strategies for stable and clean operation. In this study, computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to investigate the effects of ammonia cracking ratio and equivalence ratio on the combustion and heat-transfer characteristics of a 1000 MWe opposed-firing boiler. Three cracking ratios (0%, 10%, and 30%) and two air fuel equivalence ratios (ER, 1.10 and 1.05) were analyzed using a detailed reaction mechanism and steady diffusion flamelet model. Increasing the cracking ratio enhanced reactivity and raised both peak and mean flame temperatures, while the 10% cracking condition achieved the lowest NO emission by balancing fuel and thermal NO formation. A lower ER (1.05) reduced NO emissions by approximately 19% due to the intensified reducing atmosphere, though with a slight efficiency penalty. These findings demonstrate that the control of operating conditions through ammonia cracking and ER could be effective for achieving low-NO_x operation in full-scale ammonia-fired boilers.

Key Words : ammonia, wall-firing boiler, ammonia cracking, NOx

암모니아는 낮은 층류 화염 속도와 높은 발화점으로 안정적인 화염 유지가 어렵고, NOx 발생 가능성이 높다. 그러나 수소 캐리어로서 에너지 밀도가 높고 수송과 저장이 용이하여 탄소 중립을 위한 유망한 연료로 주목받고 있다. 산업용 보일러에 적용을 위해서는 이러한 문제점을 보완 가능한 암모니아 부분 크래킹과 같은 연소 기술이 필요하다. 암모니아 크래킹은 암모니아 일부를 열분해시켜 수소를 혼합함으로써 연료의 점화성과 반응성 향상과 연소 특성 변화에 직접적인 영향을 미치는 인자이다. 산업용 규모의 연소 시스템에서는 보일러의 배가스에서 회수한 폐열을 암모니아 크래킹 반응의 열원으로 활용할 수 있어 추가적인 열원 공급이 필요하지 않아 전체 효율에 영향을 미치지 않는 점 또한 기술적 이점으로 평가된다. 연료 대비 산화제의 상대적 공급비를 나타내는 당량비는 화염 온도와 NO 생성 경향을 결정하는 또 다른 주요 설계 인자이다. 암모니아 전소 시 안정적인 연소와 낮은 NO 배출을 위해서는 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD)를 활용하여 이러한 설계 인자

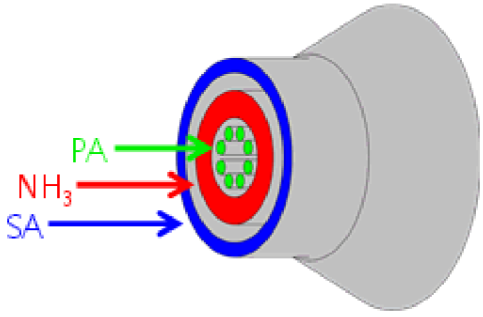


Figure 1 Schematic diagram of ammonia burner from previous study[1]

* 성균관대학교 기계공학과
† 연락저자, cryu@skku.edu
TEL : (031) 299-4841 FAX : (031) 290-5889

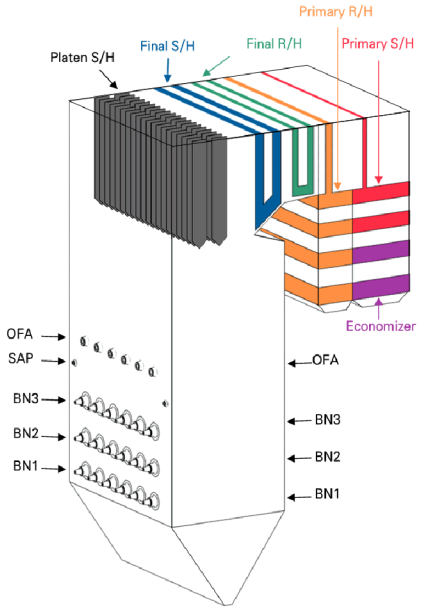


Figure 2 Schematic diagram of target boiler

및 연소 조건 최적화가 필요하다.

선행연구[1]에서는 Figure 1에 나타낸 것과 같은 구조로 암모니아 전소 버너 최적안을 도출하고, 이를 상용급 보일러 해석에 적용하여 석탄 전소 시 결과와 비교, 분석하였다. 추가 연구를 통해 석탄 전소 시 실제 보일러 운전 조건에 맞는 후단 열교환 설비의 열전달 조건 업데이트를 진행하였고 결과는 다음과 같다. 석탄 전소 대비 암모니아 운전 시 NO 배출량은 136 ppm에서 221 ppm (dry, 6% O_2)로 증가하였고 후단 열교환기에서 전열량 감소로 저위발열량 (LHV) 기준 전체 보일러 효율은 96.3%에서 91.7%로 감소하였다. 암모니아 전소 시 보일러 효율의 감소는 석탄과 동일한 후단 열전달 조건을 적용하였기 때문에 과장되었을 가능성이 있으며, 연료에 적합한 열전달 조건 적용과 전열면 간격 조정 등 구조적 변경을 통해 문제를 개선할 수 있을 것이라 예상된다.

이러한 한계점을 고려하며 본 연구에서는 1000MWe 상용급 석탄 화력 보일러에서 암모니아 전소 시 석탄 전소 대비 연소 및 열전달 특성을 분석하고 암모니아의 크래킹 비율과 당량비에 따른 보일러 성능 평가를 전산해석을 통해 진행하였다.

Figure 2는 본 연구의 대상인 당진 9/10호기 (1000 MWe USC급) 보일러의 구조를 보여준다. 한 단에 6개의 버너가, 전・후벽에 각 3단씩 총 36개 설치되어 있으며 버너 영역 상부에 총 12개의 OFA 포트와 4개의 secondary over-fire air port (SAP)가 설치되어 있다. 보일러 내 전열량 분포 변화 분석을 위해 절탄기까지 포함하여 보일러의 1/2의 형상에 대해 총 23,233,829개의 육면체로 구성하고 symmetry 조건을 활용하였다. 주 연소영역인 버너영역의 격자를 더욱 조밀하게 제작하여 해석의 신뢰성을 높였다.

Table 1 Fuel composition and corresponding total heat input for different ammonia cracking ratios

Case		C0	C10	C30
Fuel composition (wt%)	NH_3	100	93.1	77.8
	H_2	0	1.2	3.9
	N_2	0	5.7	18.3
Heat input (MW_{th})		2,202	2,234	2,273

ANSYS FLUENT 2022 R1 상용 CFD 코드를 사용하였고, 난류 모델로는 shear-stress transport k-ω model[2]을 선정하였다. 해당 모델은 선회가 적용되는 전산해석에 사용하기 적합하다. 복사 열전달은 Discrete ordinates model을[3], 가스 흡수 계수는 Weighted sum of gray gases model[4]을 사용하여 계산하였다. 암모니아 전소 화학반응 메커니즘의 경우 2024년 UNIST에서 개발한 암모니아 반응 메커니즘 (23개의 화학종, 92개의 반응식)을 사용하여 연구를 진행하였고, 화학반응모델의 경우 산업용 설비의 전산해석에 충분히 활용될 수 있는 모델으로 검증된[5] steady/unsteady diffusion flamelet model을 사용하여 해석을 진행하였다.

기준 조건의 입열량은 LHV 기준 2,202는 MW_{th}이며, 전체 당량비는 1.1, 버너영역 당량비 0.9이다. 암모니아 크래킹의 영향을 분석하기 위하여, 연료의 질량 유량은 일정하게 유지한 상태에서 LHV 기준 수소의 발열 기여도가 각각 0%, 10%, 그리고 30%가 되도록 조성비를 조정하여 C0, C10, C30의 세 조건을 설정하였다. 크래킹 조건 별 연료 조성과 입열량은 표 1에 자세히 나타내었다. 암모니아 크래킹 시 연료 발열량이 순수 암모니아 대비 증가하는 것을 반영하여 크래킹 비율 증가 시 입열량이 증가한다. 추가적으로, 당량비 변화에 따른 영향 평가를 위하여 OFA에서 투입되는 공기량은 동일하게 유지한 채, 버너 영역에 더욱 강한 환원 분위기를 형성하기 위해 해당 영역 당량비를 0.9에서 0.85로 낮추어 전체 당량비를 1.05로 낮춘 Case C0-E1.05를 평가하였다.

Figure 3는 크래킹 비율 별 온도, 유속, NO 그리고 전열량 분포를 비교한 것이다. 각 조건별 온도와 유동 패턴에는 큰 차이가 없지만, 크래킹

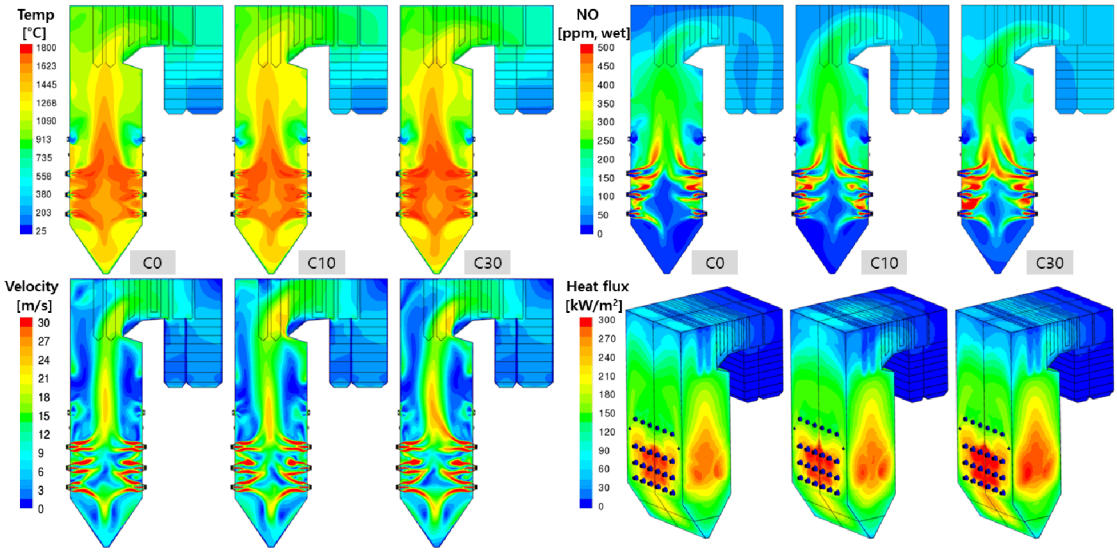


Figure 3 Distributions of temperature, NO concentration, and heat flux under different cracking conditions

비율이 증가함에 따라 노 내 최고 온도는 1824 °C에서 1870 °C까지, 버너 영역 평균 온도는 1313 °C에서 1334 °C까지 상승하였다. NO 농도의 경우, 수소 비율이 증가함에 따라 온도 상승으로 인한 thermal NOx 생성의 증가가 예상되었으나, C10에서 가장 낮고 C0에서 가장 높다. 이는 암모니아가 직접 산화되며 NO로 전환되는 경로의 영향이 더 크게 작용하기 때문이며, C10에서는 암모니아 투입량이 C0보다 적어 해당 경로로 생성되는 NO가 감소하고 C30 대비 수소 함량도 낮아 thermal NO 발생 또한 감소하기 때문이다. 모든 조건 에서 암모니아 slip은 2 ppm 이하로 미연 암모니아는 배출되지 않았다. Figure 4와 같이 각 열교환기 별 전열량 분포의 경우 모든 조건에서 유사하나, 크래킹 비율 증가로 인한 전체적인 온도 상승으로 전열량도 함께 증가한다. 하지만 크래킹 시 입열량이 증가하기 때문에 실제 저위발열량 기준 보일러 효율은 91.5% ~ 91.7% 정도로 해석 조건 간 차이는 크지 않다.

당량비에 따른 영향 평가를 위한 해석에 대한 주요 결과를 Figure 5와 같이 나타내었다. 당량비 변경 시 온도와 NO 분포 패턴에는 큰 차이가 없으며, 두 조건 모두 안정적인 혼합과 연소로 인해 미연 암모니아는 3 ppm 이하이다. C0-E1.05의 경우 버너 영역 당량비 감소로 인해 더욱 연료 농후한 영역을 형성하며, 이는 버너 영역에서 더욱 강한 환원 분위기 환경을 조성한다. 이로 인해 출구 NO 배출량이 180 ppm (dry, 6% O_2)로 C0 대비 약 19% 감소한다. 하지만 버너 영역에 투입되는 산화제 감소는 크게 두 가지 이유로 보일러 효율을 감소시킨다. 먼저, 노내 최고 온도는 1824 °C와 1825 °C로 큰 차이가 없으나, 버너 영역 최고 온도는 C0-E1.05에서 1304 °C로 C0 대비 10 °C 가량 낮다. 이는 버너 영역에 투입되는 산화제 감소로 연소성이 감소하기 때문이다. 또한, 버너에서 투입되는 유동의 운동량이 감소하여 보일러 중앙에서 충돌하여 측벽으로 퍼지는 유동이 감소한다. 이는 Figure 5의 전열량 분포에서도 확인할 수 있으며, 이러한 두 가지 현상들로 인해 LHV 기준 보일러 효율이 91.7%에서 90.9%로 하락한다.

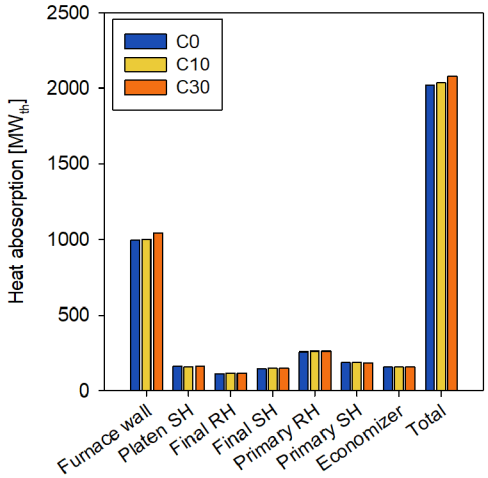


Figure 4 Comparison of heat absorption in heat exchangers for different cracking conditions

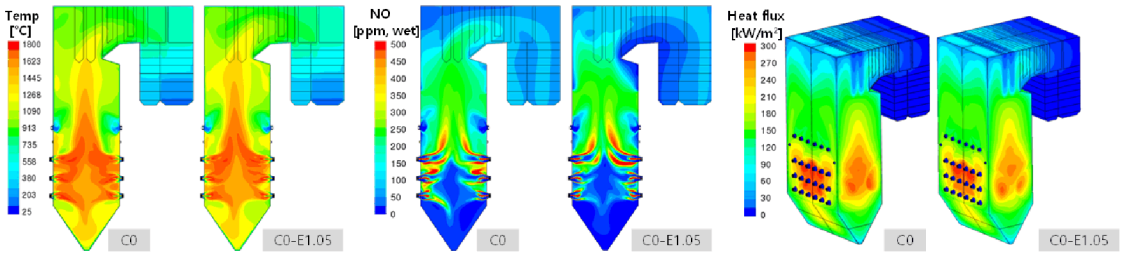


Figure 5 Distributions of temperature, NO concentration, and heat flux under different equivalence ratios

본 연구에서는 연료로서 암모니아의 단점을 보완하기 위해 크래킹 비율 및 당량비에 따른 암모니아 전소 성능 평가를 진행하였다. 석탄화력 보일러에서 암모니아 전소 시 안정적인 화염 형성 및 NO 배출은 최소화가 가능하나, 후단 열교환기 설계 개선을 통한 보일러 효율 증가가 필수적이다. 암모니아 크래킹 비율 변경 시 fuel NO와 thermal NO 기여가 모두 완화되는 10% 크래킹 조건에서 NO 배출이 가장 낮았고, 전체 당량비를 1.05로 낮출 경우 환원 분위기가 강화되어 NO 저감 효과가 나타났다. 이처럼 운전 조건의 변경을 통해 암모니아 전소 시 안정적인 연소와 NO 배출 저감을 동시에 달성할 수 있음을 확인하였으며, 이는 향후 실증 규모 보일러의 최적 운전 조건 도출에 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 2023년 착수 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : R23XO05-05)

참고 문헌

[1] G. Park, W. Kang, S. Ha, J. Lee, S. Lee, C. Ryu, Numerical analysis on the flame and heat transfer characteristics of pure ammonia combustion applied to a 1000 MWe opposed-firing coal boiler, 69th KOSCO symposium, May 14th-17th, 2025, 107-110.

[2] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA J., 32 (1994) 1598-1605.

[3] E.H. Chui, G.D. Raithby, Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method, Numer. Heat Transf. Part B, 23 (1993) 269-288.

[4] T.F. Smith, Z.F. Shen, J.N. Friedman, Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model, J. Heat Transf., 104 (1982) 602-608.

[5] G. Park, W. Yang, T. Chae, C. Ryu, Evaluation of a turbulent non-premixed combustion model for the design of an ammonia-fueled burner, J. Korean Soc. Combust., Vol. 29, No. 4, 2024, pp. 108-118.

이중 선회 인젝터에서 파일럿 노즐 구성이 난류 화염 특성에 미치는 영향

김인호* · 이기만*†

The influence of pilot nozzle configurations on turbulent flame characteristics in a dual swirl injector

Inho Kim*, Keeman Lee*†

ABSTRACT

Dual swirl injectors improve combustion efficiency and have the advantage of being able to supply mixtures with different equivalence ratios through the separation of the main passage and the pilot passage, so several studies are being conducted. However, the effect of pilot nozzle configuration on turbulent flame characteristics is not properly understood. Therefore, in this study, global equivalence ratio, hydrogen content, and SR (Stratification ratio) were selected as parameters, and the effect of pilot nozzle configuration on turbulent flame characteristics in a dual swirl injector was experimentally investigated.

Key Words : Dual-Swirl, Stratification ratios(SR), Flame structure, Turbulent flame

전 세계적으로 온실가스 배출을 줄이기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 대표적인 무탄소 연료인 수소는 기존의 메탄과 같은 탄화수소와 혼합하여 사용할 경우, 화염 안정성 향상 및 탄소 배출 저감 등의 효과로 인해 가스터빈 및 발전 분야에서 활발히 연구되고 있다. 특히, 연료 혼합 시, 연소 효율을 향상시키고, NOx 배출 감소에 효과적인 이중 선회 인젝터는 가스터빈 연소기, 내연기관 등에서 선호되고 있다[1]. 또한, 메인 유로와 파일럿 유로의 분리를 통해 서로 다른 당량비를 가진 혼합기의 공급이 가능하기 때문에 연소 특성을 향상시키는 성층화염의 특성을 조사할 수 있다는 장점이 있다[2,3]. 이러한 장점을 가지는 이중 선회 인젝터에 대한 이전 연구들이 다수 진행되고 있음에도 불구하고 파일럿 노즐 구성이 난류 화염 특성에 미치는 영향은 제대로 이해되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 글로벌 당량비, 수소 혼소율, SR(stratification ratio)을 매개변수로 선정하고 이중 선회 인젝터에서 파일럿 노즐 구성이 난류 화염 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

* 순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : 010-2357-1748

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구과제이며 이에 감사드립니다(RS-2025-07982969).

참고 문헌

[1] A.C. Alkidas, “Combustion advancemets in gasoline engines”, Energy Convers. Manag., Vol. 48, 2007, pp. 2751-2761.
[2] A.N. Lipatnikov, “Stratified turbulent flames: Recent advances in understanding the influence of mixture inhomogeneities on premixed combustion and modeling hallenges”, Proc. Combust. Inst., Vol. 35, 2017, pp. 87-132.
[3] R. Zhou, S. Balusamy, M.S. Sweeney, R.S. Barlow, S. Hochgreb, “Flow field measurements of a series of turbulent premixed and stratified methane/air flames”, Combust. Flame, Vol. 160, 2013, pp. 123-133.

반응성 유동용 차원축소모델에서 주성분 분석이 미치는 영향에 대한 매개변수 연구

손경호, 박해람, 정기성†

A parametric study on the influence of PCA in a reduced order modeling for reactive flow simulation

Gyeong Ho Son, Hae Ram Park, Ki Sung Jung†

ABSTRACT

본 연구는 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA)의 절차가 예측 정확도와 계산 효율 향상에 실제로 기여하는지 검증하기 위해, 인공신경망(Artificial Neural Network; ANN)을 이용하여 연소시스템의 비선형 복원을 PCA 적용 유무에 따라 수행하였다. 대형 탄화수소 연료로 n-heptane 메커니즘을 사용하였으며, chemical subset의 크기와 차원축소 강도를 체계적으로 변화시키며 비교하였다. PCA 적용 유무에 따른 차이를 평가하기 위해, 0-D 해석 데이터를 기반으로 차원이 축소된 입력-출력 데이터를 학습시킨 후 모델의 성능 평가를 위해, 정규화 평균 제곱 오차(Normalized Root Mean Square Error; NRMSE)로 예측성능을 정량적으로 검증하였다.

Key Words: Reduced-order modeling, Principal Component Analysis, Artificial Neural Network, Compression ignition

1. Introduction

최근 고정밀 난류 연소 해석을 위한 직접 수치모사(Direct Numerical Simulation; DNS)는 화학반응과 유동 사이의 상호작용을 정확히 해석할 수 있는 유일한 접근 방식으로 인정받고 있다. 하지만 DNS는 격자 수와 시간 해상도가 매우 높기 때문에 계산 자원과 시간이 막대하게 소요되며, 실시간 예측이나 설계 최적화와 같은 공학적 응용에는 적용이 제한적이다. 이를 극복하기 위해 다양한 차원 축소 기법이 제안되었다. 그 중 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA)은 화학 종 간의 상관관계를 기반으로 고차원 상태 벡터를 소수의 주성분으로 압축할 수 있는 효율적인 방법으로 주목받고 있다[1]. 특히, 난류 연소에서 수십 개의 화학종을 수송해야 하는 기존 방식과 달리, PCA를 기반으로 한 축소 차원 모델 (Reduced-Order Modeling; ROM), PC-transport ROM은 수송해야 할 변수의 수를 획기적으로 줄일 수 있고, 인공신경망 (Artificial Neural Network; ANN)을 통해 비선형 복원까지 가능하다는 점에서 높은 확장성을 가진다[2]. 최근 연구에서는 2차원 훈련 데이터를 이용해 PC transport-ROM을 구성했을 때, 해석에 필요한 격자 수를 크게 줄인 상태에서도 기존 DNS 결과를 정확히 재현할 수 있었으며, 더 조밀한 격자를 사용한 DNS와 비교해도 유사한 해상도를 달성함과 동시에 계산 시간을 효과적으로 단축할 수 있음을 확인하였다 [3,4]. 또한 2-D DNS 데이터를 활용하여 다양한 유동 조건 변화에 대한 PC-transport-ROM구조의 강건성을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 PCA를 적용한 추가적인 차원 축소절차의 유효성을 파악하기 위해, 0-D 조건에서 최대 질량분율이 높은 순으로 선택된 chemical subset의 규모와 PCA 강도를 달리하여 여러 유효 스칼라 개수(rank)를 구성하였다. 이를 기반으로, PCA를 적용한 차원 축소 절차가 예측 정확도와 계산 효율 향상에 실질적으로 기여하는지를 검증하고, PCA를 적용하지 않은 chemical subset 기반 ROM과 정량적으로 비교, 평가하였다. 이 과정을 통해 차원 축소 방법의 장점이 드러나는 경우와 차원축소를 사용하지 않아도 충분한 케이스를 구분하고, 향후 grid요구량 및 계산시간 단축, 3차원 난류 조건 예측으로 확장하기 위한 근거를 제시한다.

국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공
† 연락저자, 정기성(kjung@pknu.ac.kr)

2. Results

본 연구에서 수송 방정식에 포함되는 chemical subset의 크기와 PCA축소 강도를 달리하여 0-D 해석으로부터 구성한 축소된 입력-출력에 대해 ANN을 훈련을 수행하고, 그 결과를 NRMSE를 이용해 사전적으로 평가하였다. ANN 훈련 시 입력-출력 값을 아래 식으로 전처리를 수행하여, 반응속도(reaction rate)가 낮은 데이터의 경우에도 그 변화를 인지할 수 있도록 하였다.

$$\alpha = \mathrm{sign}(\alpha) \times |\alpha|^{1/\gamma}$$

여기서 sign(·)은 입력 값의 부호, | · |은 절댓값, γ는 데이터의 범위를 결정하는 파라미터를 나타낸다.

그림 1은 chemical subset의 개수에 따른 subset 기반 ROM과 같은 방식으로 선택된 chemical subset 개수에 따라 PCA를 통해 차원이 추가적으로 축소된 PC-transport ROM으로 수송되는 스칼라 개수(rank)가 같은 경우에 대해서 각각 rank = 3(위), rank = 7(중간), rank = 10(아래)에서의 반응속도의 예측성능을 평가한 그림이다. rank가 상대적으로 낮은 경우(rank = 3), chemical subset 기반 ROM과 PC-transport ROM은 일관되게 낮은 NRMSE를 보였다. 반면, rank가 높은 경우(rank = 10)에서는 ANN 훈련에 필요한 데이터의 입력 차원이 커지면서 입력-출력 사이관계의 복잡도가 증가하고, 이에 따라 ANN훈련 정확도가 중요해진다. 또한 PCA가 원 변수의 복합적인 선형결합을 유발하여 매핑 난이도가 증가하기 때문에, 이 경우 PCA를 생략한 직접 매핑이 더 낮은 NRMSE를 보인다.

PCA적용 전 후의 스칼라 개수가 같은 경우에서 PCA는 차원 축소의 역할을 하지 않고 기존 변수들 간의 선형 결합의 역할을 하기 때문에, 모델 성능의 저하에 기여를 하지 않을 것이다. 하지만 그림 1에서 차원 축소 전 후의 rank가 같은 경우(rank = 10) PCA를 기반으로 한 ROM의 NRMSE가 chemical subset기반 ROM의 값보다 확연하게 큰 것을 알 수 있다. 이는 전처리 과정이 PCA 과정에 포함되기 때문에 모델의 성능에 영향을 끼쳤음을 의미한다. 그림 2는 상기 언급한 식에 γ = 1, γ = 3을 각각 적용하여 전처리의 유무에 따른 반응속도의 예측성능을 NRMSE로 두 가지 ROM에 대해 비교한 그림이다. γ = 3의 경우 γ = 1보다 상대적으로 큰 NRMSE를 나타내며, γ = 1일 때 두 ROM 모두 낮은 NRMSE를 보인다. PCA 과정에 포함된 전처리는 ANN 훈련에 사용되는 데이터 관계가 복잡도를 높여 결과적으로 모델 성능에 영향을 끼쳤음을 보여준다.

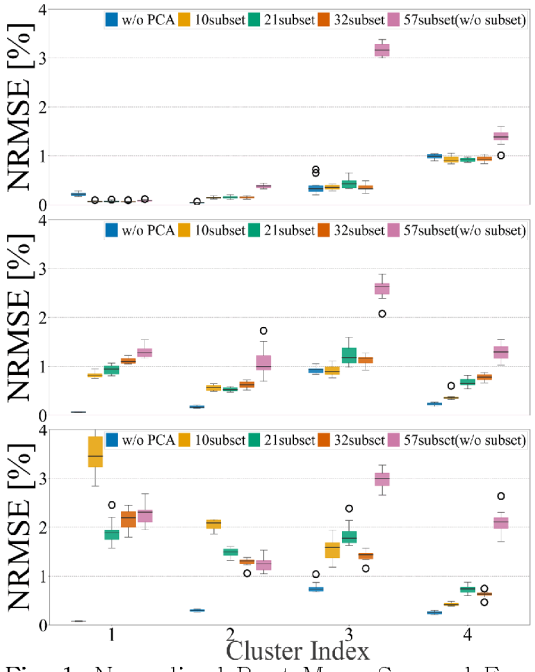


Fig. 1. Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE) for predicting the chemical source terms of the reduced scalars obtained from n-heptane DNS, shown as box plots for different ROMs (subset based and PCA based PC-transport-ROM) at three scalar dimensions: rank = 3 (top), rank = 7 (middle), and rank = 10 (bottom).

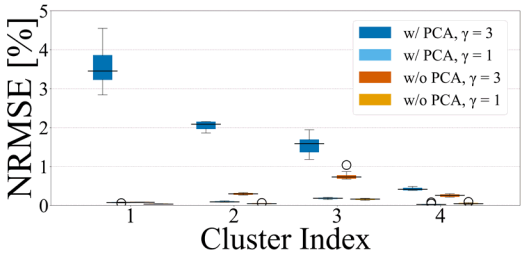


Fig. 2. Comparison of NRMSE for predicting reduced chemical source terms at rank = 10 for PC-transport-ROM and subset-based-ROM with different pre-processing parameter values (γ = 1 and γ = 3).

후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] J. C. Sutherland, A. Parente "Combustion modeling using principal component analysis", Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 1563-1570

[2] X. Han, M. Jia, Y. Chang, Y. Li, "An improved approach towards more robust deep learning models for chemical kinetics", Combustion and Flame 238 (2022) 111934

[3] K. S. Jung, A. Kumar, T. Echekki, J. H. Chen, "On the application of principal component transport for compression ignition of lean fuel/air mixtures under engine relevant conditions", Combustion and Flame 260 (2024) 113204

[4] A. Kumar, M. Rieth, O. Owoyele, J. H. Chen, T. Echekki, "Acceleration of turbulent combustion DNS via principal component transport", Combustion and Flame 255 (2023) 112903

Electrochemical screening of pyroelectric solid propellants

Rajendra Rajak *, Daehong Lim *, Jia Xuan Lim*, Gnanaprakash Kanagaraj**, Jai-Ick Yoh*†

ABSTRACT

Electrically controlled solid propellants enable precise ignition, throttling, and shutdown for micro-thrusters, yet Al-based systems suffer from oxide passivation and poor charge mobility. This study compares AlM5-20 and TiM5-20 using LSV, EIS, DSC, and TGA. Ti-based ECSPs deliver higher currents, lower resistance, and reduced activation energies. Performance gains arise from semi-conductive TiOx networks that promote mixed ionic-electronic transport, and catalytic heat release. Results demonstrate superior electro-thermo-chemical coupling in Ti systems, enabling energy-efficient, controllable propulsion applications.

Key Words: ECSP, Linear sweep voltammetry, Electrochemical impedance spectroscopy, Differential scanning calorimetry.

1 Introduction

Electrically controlled solid propellants (ECSPs) are smart energetic materials whose energy release can be modulated through applied voltage or current [1]. Their ability to ignite, throttle, and extinguish on command has made them highly attractive for CubeSat scale propulsion systems. Conventional ECSPs based on lithium perchlorate (LP) and polyvinyl alcohol (PVA) matrices employ aluminum (Al) as a thermal enhancer due to its high enthalpy of oxidation and electrical conductivity. However, the formation of an insulating Al_2O_3 shell limits charge transfer, hindering their responsiveness to electrical inputs. Recently, interest has been shown towards using Titanium (Ti) as an alternate metal additive which has thermal and ballistic properties similar to Al [2]. Gnanaprakash et al. [3] investigated the effect of tungsten as a metal additive in ECSP. The study conducted by He et al. [4] is on the effect of Al as a metal additive in ECSP. It is interesting to note that the LP-based ECSP showed higher thermal stability and better electrical control compared to HAN-based composition. In another study, Glascock et al. [5][6] investigated the impulse and performance of ECSP in ablation-fed pulsed plasma thruster.

In this study, it is seen that Ti offers a compelling alternative through multivalent redox chemistry, conductive TiO/Ti_2O_3 sub-oxides, and catalytic promotion of perchlorate decomposition. TiO_x domains lower interfacial and bulk resistance and enable mixed ionic-electronic transport, yielding lower ignition thresholds and smoother combustion. This study systematically compares Al- and Ti-based ECSPs via linear sweep voltammetry (LSV), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and differential scanning calorimetry (DSC), holding the $LiClO_4$-PVA matrix constant and varying metal from 5-20 wt% (AlM5/10/15/20; TiM5/10/15/20). This isolates metal-specific effects on electrochemical onset (LSV), transport and activation energies (EIS), and decomposition onset/enthalpy/residue (DSC). Ti-modified ECSPs consistently show lower resistance, reduced activation energies, and earlier, controlled exotherms, enabling lower ignition voltage and tighter throttling. Figure 1 shows that at the electrode/propellant interface a compact double layer forms, charge transfer across the interface is limited by R_{ct}. Species then relax through a diffusion layer that appears as a bounded Warburg element in impedance (transitioning from a 45° line to a more vertical tail at low frequency). Beyond these lies the bulk resistance R_b of the solid matrix. EIS therefore separates high-

*Dept. of Aerospace Engg. Seoul Nat'l University
**Dept. of Mechanical Engg. IIT Hyderabad, India
†Corresponding author, jjyoh@snu.ac.kr
TEL: 82-2-880-9334 FAX: 82-2-882-1507

frequency R_b (bulk), mid-frequency $R_{ct} \parallel C_{dl}$ (kinetics), and low-frequency Warburg (diffusion).

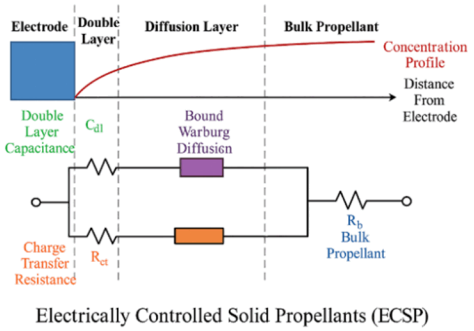


Figure 1: Schematic to understand electrochemical behavior of ECSP.

In LSV, as the over potential increases, the system evolves from injection-limited to SCLC and any accessible faradaic channels emerge as peaks/shoulders, precisely the behavior seen in Ti-modified ECSPs. Metal-additive effects on ECSP electrochemistry remain unexplored, this study systematically establishes their electro-thermal coupling mechanisms.

2 Experimental procedure

The ECSP matrix comprised LP (99% purity), PVA, (Mw 146-186k, ≥99% hydrolysis), boric acid (cross linker), and glycerol (plasticizer). Ti and Al powders (10 μm) were incorporated at 5-20 wt% to yield TiM/AlM ECSPs. LP: water ratio was fixed at 1:1.85; LP and PVA were first dissolved in water, then all components were homogenized in a planetary mixer (Thinky ARE-310, 45 min) and cast/dried. Electrochemical tests used stainless-steel blocking electrodes on a ZIVE SP2. EIS spectra were acquired from 1 MHz-1 Hz with 10 mV amplitude between 30-85 °C; LSV scans were 0-5 V at 10 mV s^{-1}. Thermal analysis employed Mettler DSC 3+ under nitrogen at 5-20 °C min^{-1}. Ionic conductivity was calculated from Nyquist intercepts as $\sigma = L/(R \cdot A)$; activation energy was obtained by Arrhenius fitting of σ(T). Reaction enthalpy (ΔH) was determined by DSC integration.

3 Results and Discussion

3.1 Electrochemical and thermal analysis

EIS-derived conductivity (Fig. 2) was obtained from the Nyquist high-frequency intercept (R_b) via $\sigma=L/(R_bA)$. Al-ECSP shows consistently higher R_b that grows with loading (AlM5→AlM20), indicating more Al_2O_3 interfaces. This wide-band-gap, trap-rich oxide blocks electron injection and disrupts Li^+/ClO_4^- hopping, increasing tortuosity and interfacial polarization; accordingly, conductivity stays low and declines with Al content. Ti-ECSP exhibits markedly lower R_b and higher σ at all loadings, peaking at TiM5 ≈0.033 S m^{-1}. Well-dispersed TiO_x domains supply donor-like sub-gap states and higher local permittivity, facilitating mixed ionic-electronic transport. It must be noted that Ti oxides are semi-conducting, whereas Al oxides are insulating in behaviour.

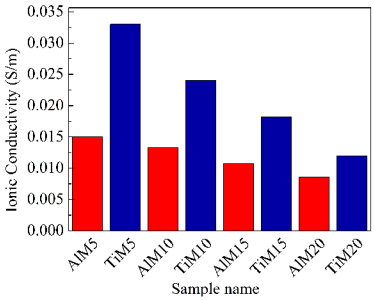


Figure 2: Ionic conductivity comparison.

With increasing Ti % (TiM10→TiM20), modest Rb growth and σ decline reflect agglomeration and reduced percolation. In Fig. 3, LSV corroborates the interfacial picture: Al-ECSP retains high activation energy (≈30-50 kJ mol^{-1}), rising again at 20 wt% from thicker, more passivating Al_2O_3; Ti-ECSP drops strongly with loading, reaching ≈19 kJ mol^{-1} at TiM20, consistent with Ti^{3+}/oxygen-vacancy states and semiconducting TiO_2 lowering the injection barrier. As seen from Fig. 4. Al-ECSP exhibits consistently higher EIS activation energy, which often increases with loading due to Al_2O_3 driven trapping and poor polarizability. Ti-ECSP shows lower activation

energy across all loadings, reflecting easier bulk transport via semiconducting TiO_x pathways and shallower traps. In Table 1, DSC data shows AlM5 ≈217, AlM15 ≈188, AlM20 ≈198 kJ mol^{-1}, implying moderate Al aids initiation, whereas excess Al heat-sinks and passivates.

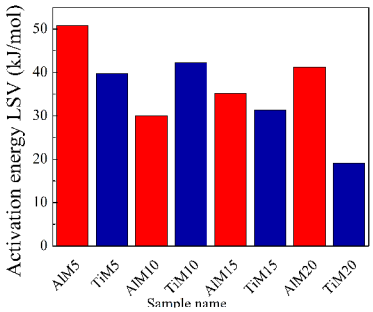


Figure 3: Activation energy from LSV.

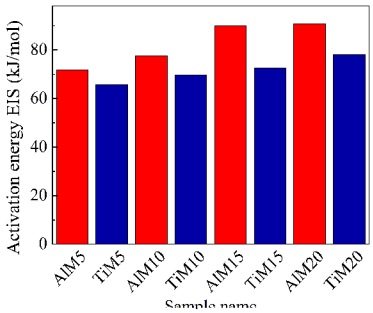


Figure 4:Ionic activation energy from EIS.

Table 1: Activation energy from DSC

Sample name	Average Activation energy form DSC	Error
AlM5	217.29	38.80
AlM10	177.79	35.60
AlM15	188.28	32.83
AlM20	197.88	35.13
TiM5	179.28	36.37
TiM10	145.19	26.01
TiM15	232.41	41.03
TiM20	185.27	45.76

In the Ti series, the value is lowest at TiM5 (≈179 kJ mol^{-1}) and increases with loading (TiM10 ≈145, TiM15 ≈232, TiM20 ≈185 kJ mol^{-1}), suggesting that small amounts of Ti help initiate decomposition efficiently, whereas higher Ti can introduce agglomeration/ceramic heat-sink effects so the dominant DSC step appears harder. Overall, AlM15 and TiM5 are the most favorable for low-barrier thermal initiation in this dataset.

From Fig. 5, at 85 °C the Al-ECSP shows a late, shallow current rise with broad, low-amplitude humps (≈3.4–4.8 V), reflecting an injection-limited regime imposed by wide-band-gap Al_2O_3 (E_g≈8–9 eV). This insulating, trap-rich layer at electrode/propellant and Al/ECSP interfaces hinders electron injection and fills deep traps slowly, keeping the sweep below the trap-filled limit: dI/dV is small and no redox peaks appear. Increasing Al (10→20 wt%) adds thermal conduction but not electronic percolation, so currents plateau and curves remain flattened.

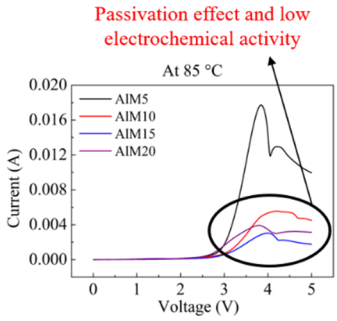


Figure 5: Voltammograms of Al-ECSP at 85℃.

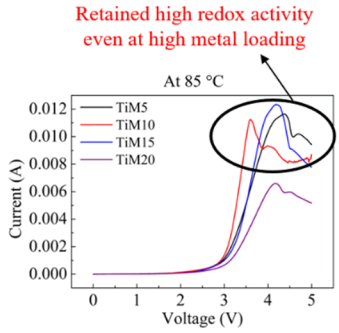


Figure 6: Voltammograms of Ti-ECSP at 85℃.

In contrast, from Fig. 6, the Ti-series (TiM5–20) exhibits an earlier turn-on (~3.0–3.3 V), steeper dI/dV, and well-defined maxima around 3.7–4.4 V, with TiM10–TiM15 giving the strongest responses. TiM20 shows reduction in peak height; likely from particle agglomeration and fewer accessible catalytic sites, but still maintains a pronounced redox signature. Overall, the band-gap asymmetry (Al_2O_3 > TiO_2) explains the earlier onset,

larger peak currents, and clearer redox structure in Ti-modified ECSPs relative to Al-modified ones. From these results, ECSP ignition follows a three-segment Triple stage electro-thermal ignition (TSETI) pathway (Fig.7). First, electro-injection and trap filling: carriers cross passive oxides; wide-gap, trap-rich Al_2O_3 blocks injection and slows current rise, while semiconducting TiO_2/TiO_x with donor states enables earlier, steeper turn-on. Second, electro-thermal coupling: once traps fill and mixed ionic-electronic paths connect, distributed Joule heating develops; interfaces stabilize, bulk resistance falls, and near-electrode diffusion improves. Third, autocatalytic decomposition and thermal feedback: when the kinetic threshold is reached, reaction heat reinforces electrical heating, driving combustion. Ti-modified ECSPs traverse all stages at lower field and with smoother, more uniform heating because TiO_2 /TiO_x lowers interfacial barriers, supports mixed conduction, and catalyzes early decomposition, whereas Al_2O_3 preserves a blocking interface that delays and roughens ignition.

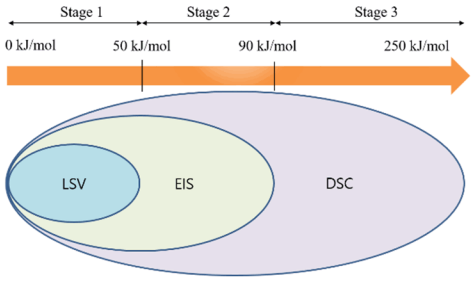


Figure 7: Triple stage electro-thermal ignition

4 Conclusion

Collectively, the data uphold TSETI: Ti-modified ECSPs traverse injection → electro-thermal coupling → runaway at lower field and with greater stability than Al. At 85 °C, LSV shows earlier turn-on and redox peaks for Ti, while Al remains injection-limited by Al_2O_3. EIS confirms lower Rb (higher σ) and smaller activation energies, indicating easier transport. DSC/TGA agree: Ti ignites earlier and more cleanly, though apparent DSC Ea can rise at high Ti from heat-sink/agglomeration. Compositionally, TiM15 balances electrochemistry; TiM5 minimizes thermal threshold; TiM20 minimizes injection barrier but is connectivity-limited. Added Al mainly raises resistance and preserves blocking interfaces. Thus, Ti-based ECSPs enable lower-voltage, faster, controllable ignition.

5 Acknowledgement

This work was financially supported by the National Research Foundation of Korea (RS-2024-00357969) contracted through IAAT and IOER at Seoul national University.

References

[1] W. Sawka, M. McPherson.(2013) Electrical Solid Propellants: A Safe, Micro to Macro Propulsion Technology. 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Jt. Propuls. Conf., 1: 1.

[2] R. Rajak, D. Lim, J. Oh, K. Gnanaprakash, J. J. Yoh, External Voltage Driven Linear Burning Rates for Improving Propulsion Efficiency and Control in Space Applications. Aerosp. Sci. Technol. 2025, 164 (January), 110413.

[3] Gnanaprakash, K.; Yang, M.; Yoh, J. J.(2022) Thermal Decomposition Behaviour and Chemical Kinetics of Tungsten Based Electrically Controlled Solid Propellants. Combust. Flame, 238:111752.

[4] He, Z.; Xia, Z.; Hu, J.; Li, Y. (2019). Lithium-Perchlorate/Polyvinyl-Alcohol-Based Aluminized Solid Propellants with Adjustable Burning Rate. J. Propuls. Power, 35: 512.

[5] Glascock, M. S.; Rovey, J. L.; Polzin, K. A. (2020): Impulse and Performance Measurements of Electric Solid Propellant in a Laboratory Electrothermal Ablation-Fed Pulsed Plasma Thruster. Aerospace. 7: 1.

[6] Glascock, M. S.; Rovey, J. L.; Polzin, K. A.(2019) Electric Solid Propellant Ablation in an Arc Discharge. J. Propuls. Power. 35: 984.

Compact cyclohexane kinetic mechanism for predicting aromatics and soot formation in non-premixed flames: A CFD approach

Anurag Dahiya*, Meng-Syun*, Kuang C. Lin*†

가시화 내용

Cyclohexane, commonly used as a surrogate fuel to study the kinetics of aviation fuel, is investigated in terms of oxidation. Toward the goals of understanding the chemistry involving in oxidation of cyclohexane, the study examines the prediction accuracy of the existing mechanism in terms of ignition delay times (T = 650-1812 K, P = 8-50 atm, ϕ = 0.5-2.0), flame speeds (T_u = 298-473 K, P = 1-10 atm, ϕ = 0.5-1.7) and species profiles in a jet stirred reactor (T = 500-1100 K, P = 1-10 atm, ϕ = 0.5-2.0). Among the existing kinetic mechanisms tested, a mechanism with 138 species and 584 reactions is identified to be the most accurate database to predict ignition delay times and jet stirred reactors. The present study further adds missing species and missing transport data in order to comprehensively predicting unsaturated normal chain hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a non-premixed co-flow flame. The rate constants are updated for refining the prediction accuracy of flame speed and the species profiles in premixed laminar tubular flame. By removing the multifuel components in the mechanism, a minimized skeletal cyclohexane-PAH mechanism is generated with 128 species and 710 reactions. The investigated chemical formulas include naphthalene ($C_{10}H_8$), acenaphthylene ($C_{12}H_8$), fluorene ($C_{13}H_{10}$), phenanthrene ($C_{14}H_{10}$), anthracene ($C_{14}H_{10}$), fluoranthene ($C_{16}H_{10}$) and pyrene ($C_{16}H_{10}$), which are up to 4 rings and have been classified by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) as the carcinogenic and mutagenic compounds to human health. For the first time, previously measured mole fractions of 15 hydrocarbons in the co-flow flame by photoionization time-of-flight mass spectrometer are computationally interpreted by the present 2-D CFD model coupled with the 128-species mechanism.

후 기

This study is financially supported by Ministry of Science & Technology (MOST) of Taiwan under Contract No. MOST 107-2628-E-007-004-MY3.

.

* National Tsing Hua University

† 연락저자, kclin@umich.edu

TEL : (+886)571531 Ext. 34365

Hydrogen-Assisted Reduction of Combusted Iron Particles in a Micro-Fluidized Bed

Yu-Ming Chuang*, Dong-En Wu*, and Chao-Wei Huang*†

ABSTRACT

This study developed a micro-fluidized bed for hydrogen-based reduction of iron particles from a vortex combustor. Experiments evaluated the effects of temperature, time, and gas composition on reduction performance and particle morphology. Kinetic analysis using the Johnson-Mehl-Avrami model showed diffusion-controlled behavior. Higher temperatures enhanced reactivity but caused sintering and poor fluidization, while increasing H_2 accelerated reduction and lowered activation energy but could not prevent agglomeration. The optimal conditions—500 °C, 50% H_2 - 50% N_2 , 60 min—provided high reduction with acceptable agglomeration. Lower temperatures with longer durations may further reduce sintering. Adding sand effectively decreased the sticking index, offering a practical way to limit agglomeration in fluidized systems.

Key Words: Iron fuel, Combusted iron, Hydrogen reduction, Reduction dynamic, Fluidized bed

Growing energy demand and emission concerns highlight the need for sustainable energy carriers. Iron-based fuels offer high energy density, easy handling, and a carbon-neutral cycle through hydrogen regeneration. This study focuses on improving iron-fuel performance in fluidized beds by examining flow behavior, particle adhesion, and microstructural changes, providing guidance for scalable iron-based energy systems.

In this study, a lab-scale fluidized bed reactor was designed using quartz with a total length of 200 mm, an inner diameter of 17 mm, and an outer diameter of 20 mm.

XRD analysis was conducted to evaluate how temperature affects the reduction of combusted iron particles. As shown in Fig. 2, magnetite peak intensity steadily decreases with increasing temperature, confirming progressive reduction. The calculated reduction degree rises sharply from 12.05% at 300 °C to 98.45% at 500 °C.

* National Cheng Kung University, Department of Engineering Science.
† 연락저자, huangcw@gs.ncku.edu.tw
TEL :(886-6) 2757575 #63335

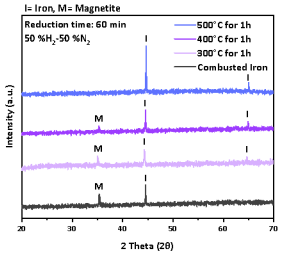


Fig. 2 XRD patterns of combusted iron reduced at different temperatures

X-ray Diffraction (XRD) analysis was performed to monitor the phase evolution and calculate the reduction degree of combusted iron particles as a function of reaction time (data shown in Fig. 3). The results indicate that the magnetite (M) peak intensity decreases progressively with increasing reaction time.

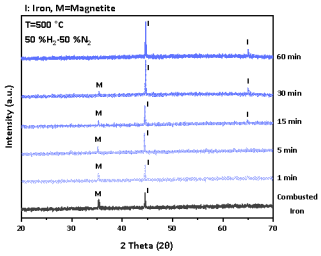


Fig. 3 XRD patterns of combusted iron reduced at different times

Hydrogen concentration strongly influences reduction efficiency and reactor stability. At 500 °C for 60 min, experiments using 30–50 vol.% H_2 showed clear improvements in performance. XRD results (Fig. 4) indicate that increasing H_2 from 30 to 50 vol.% raised the reduction degree from 86.74% to 98.45%.

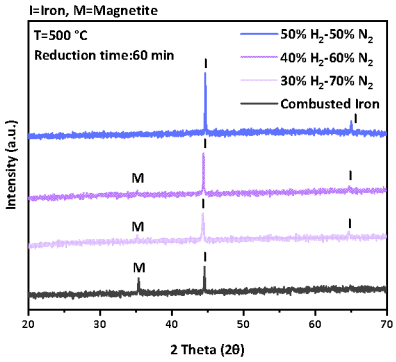


Fig. 4 XRD patterns of combusted iron reduced with different H_2 contents

Although the previous optimal conditions (500 °C, 50% H_2–50% N_2, 60 min) achieved high reduction, they also caused severe particle agglomeration. To address this, mixed beds of combusted iron and quartz sand were tested at different weight ratios. After reduction, samples were magnetically separated and analyzed by XRD (Fig. 5). The results show that varying the iron–sand ratio had little effect on the reduction degree.

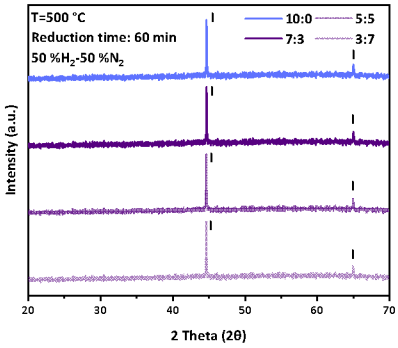


Fig. 5 XRD patterns of combusted iron reduced with different Fe/Si ratios

Agglomeration was quantified by defining particles larger than 150 μm as agglomerates after sieving and calculating the Sticking Index (SI) (see Fig. 6). Results showed that using only combusted iron particles led to severe agglomeration.

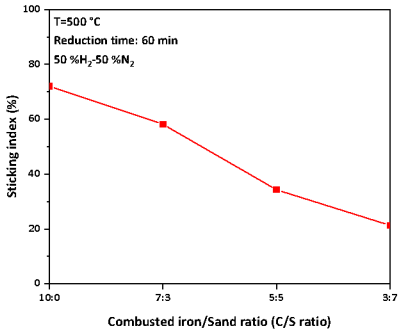


Fig. 6 The relationship between bed materials and the sticking index

This study developed a lab-scale quartz fluidized bed for hydrogen reduction of combusted iron particles. Raising the temperature to 500 °C increased the reduction degree from 12.05% to 98.45% via the $Fe_3O_4 \rightarrow Fe$ pathway. Higher H_2 concentration improved efficiency and lowered activation energy but promoted agglomeration. Adding quartz sand effectively reduced sticking, lowering the Sticking Index from 72 to 21 at an optimal Fe/sand ratio of 7:3. These results support scale-up of hydrogen-based iron reduction systems.

Combustion Behaviour of Electrophoretically Assembled Al/CuO Nanothermite Meshes Containing Triphenylphosphine-Coated Aluminium Nanoparticles

Ying-Shuo Cheng*, Xin-Rong Lu**, Chao-Wei Huang*†, and Ming-Hsun Wu**†

ABSTRACT

Triphenylphosphine (PPh_3) coatings stabilize aluminum nanoparticles but alter combustion behavior. This study examines Al@PPh_3 effects in Al/CuO nanothermites as burn-tube grains and electrophoretically deposited meshes. A thin PPh_3 layer suppressed burn rate with increasing Al@PPh_3, whereas a thicker coating enhanced it at 30 % but inhibited propagation beyond 50%. In confined meshes, reaction sustainability depended on composition and layering; PPh_3 delayed pressure rise and reduced propagation, revealing a trade-off between convective enhancement and coating-induced inhibition.

Key Words: aluminium nanoparticles, passivation, triphenylphosphine, electrophoretic deposition, confined combustion.

Aluminium-based nanothermites offer high volumetric energy density and rapid heat release, but their performance is strongly conditioned by the passivation layer on Al NPs [1]. Triphenylphosphine (PPh_3) coatings improve storage stability through hydrophobic protection [2], yet the coating's decomposition and the additional gas it generates can either assist or hinder flame propagation depending on formulation and geometry. Prior grain tests showed that low Al@PPh_3 proportions can increase apparent burn rate (~400 m s^{-1}), whereas high proportions suppress reaction ("No-go") in Al/CuO blends. Building on that, the present mesh study places Al/CuO on CuO-nanowire (NW) copper meshes and measures both flame/burn speed and pressure evolution in a confined channel to assess propulsion-relevant pressure dynamics.

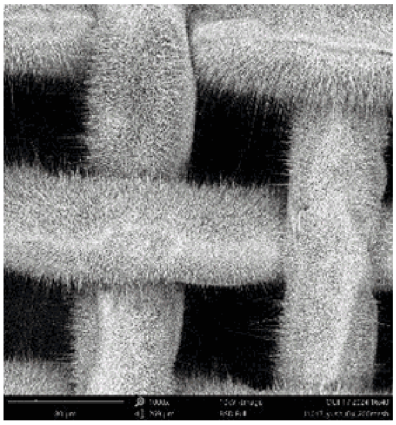
Thermites comprised 50 nm commercial Al with native oxide, laboratory-synthesised Al@PPh_3, and 80 nm CuO. Mixtures varied the Al@PPh_3 proportion (0–100 %) and the PPh_3-layer thickness by changing precursor ratio PPh_3:$AlCl_3$ from 1:10 (thinner) to 1:1 (thicker). Powders were dispersed (ultrasonic), solvent-evaporated, and loaded into 2 mm-ID glass tubes; ignition used an electric match and reaction fronts were filmed by a Miro 310 Lab high-speed camera with linear fits to front-position versus time for burn-rate extraction.

Fig. 1 shows CuO nanowires were grown on 1 × 8 cm copper meshes by thermal oxidation after 35 wt % HCl cleaning (1 min), DI rinse and sonication, then 550 °C/2 h in air. Three Al NP feedstocks—0 %, 50 %, 100 % Al@PPh_3—

* National Cheng Kung University,
Department of Engineering Science.
** National Cheng Kung University,
Department of Mechanical Engineering.
† 연락저자, huangcw@gs.ncku.edu.tw, minghwu@ncku.edu.tw
TEL :(886-6) 2757575 #63335
(886-6) 2757575 #62241

were dispersed at 3 mg mL^{-1} in ethanol and EPD-deposited at 60 V onto the CuO nanowire meshes [3]. The mesh was mounted in a sealed polycarbonate–copper fixture with an igniter and four pressure taps at 2 cm spacing along the channel. Dynamic pressure transducers (PCB 113B with 482 conditioner) and a Keysight DSO captured pressure histories; a MiroLab 310 camera synchronized imaging as shown in Fig. 2.

(a)



(b)

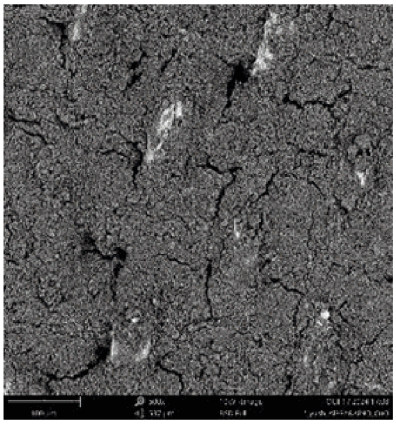
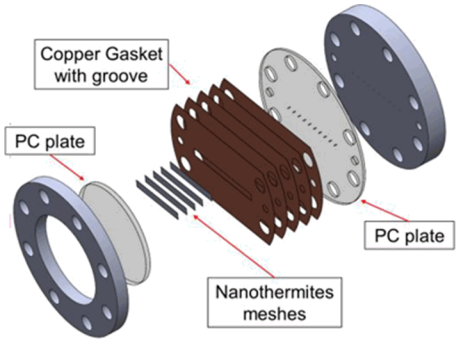


Fig.1 SEM image of the 200 mesh CuO grid (a) before and (b) after EPD of 50% Al@PPh_3 aluminum nanoparticles.

(a)



(b)

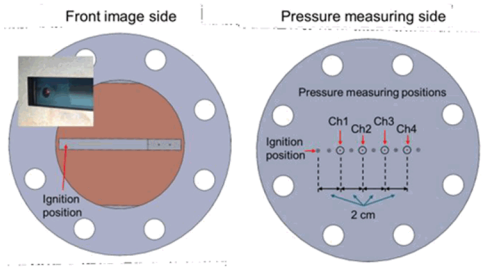


Fig. 2 Confined space nanothermites meshes combustion fixture (a) Machinery exploded figure. (b) Schematic diagram of ignition position and pressure measuring position.

With a thin PPh_3 layer (PPh_3:$AlCl_3$=1:10), increasing Al@PPh_3 proportion monotonically decreased burn rate from ≈ 308 m s^{-1} to ≈ 81 m s^{-1}; 100 % Al@PPh_3 did not ignite. The Al-only baseline was ≈ 329.5 m s^{-1}.

With a thicker layer (PPh_3:$AlCl_3$=1:1), a non-monotonic response emerged: at 30 % Al@PPh_3 the burn rate peaked at ≈ 387 m s^{-1}, exceeding the Al-only baseline, whereas ≥ 50 % again became "No-go". A mechanistic sketch proposes that small amounts of decomposing PPh_3 produce gas that reinforces forced convection in the narrow tube; however, at higher loading, the coating's endothermy and diffusion barrier suppress the Al–CuO redox reaction.

Self-sustained propagation in the confined channel depended on both Al@PPh_3 proportion and the number of stacked layers. Measured "Go/No-go" outcomes were: 0 % Al@PPh_3—Go

for 1- and 5-layer meshes; 50 %—No-go for 1-layer but Go for 5-layer; 100 %—No-go irrespective of layering. The trend emphasizes that reducing the surface-to-volume ratio (by increasing the number of layers) mitigates heat loss and can recover sustainability at intermediate compositions.

Pressure–time traces at 4, 6, and 8 cm show a small ≈ 0.035 bar rise at ≈ 0.07 s from the igniter, then the thermite-driven evolution. For 0% Al@PPh_3, a sharp surge began at ≈ 0.10 s and peaked near ≈ 0.20 s; for 50 %, the major surge was delayed to ≈ 0.30 s and peaked at ≈ 0.58 s. From inter-tap lags, the pressure disturbance travelled at ≈ 12.5 m s^{-1} (0 %) versus ≈ 1.3 m s^{-1} (50 %), confirming substantial slowdown with PPh_3. Notably, the peak pressure was slightly higher for 50 %, with a broader plateau, consistent with additional gas from PPh_3 decomposition.

Imaging shows a luminous reaction front advancing from the igniter. For 0 % Al@ PPh_3, sparkling ejecta appear downstream as the initial convective wave triggers subsequent redox. For 50 %, a detached parabolic front overlies a web-like upstream zone, consistent with hydrocarbon combustion from PPh_3 decomposition. Quantified late-stage burn speeds: ≈ 298 mm s^{-1} (five-layer, 0 %), ≈ 188 mm s^{-1} (single-layer, 0 %), and ≈ 45 mm s^{-1} (five-layer, 50 %), all much slower than early convective stages.

Powder grains: Small additions of thicker Al@PPh_3 can increase apparent burn rate via gas-driven convection in the tube (peak at 30 % Al@PPh_3 ≈ 387 m s^{-1}), whereas higher proportions impose endothermic and diffusive barriers that quench Al–CuO contact and suppress propagation (≥ 50–100 %: No-go).

Confined meshes, as illustrated in Fig. 3, the same coating retards both the convective onset and diffusion-limited stages; sustainability depends on layering to offset heat loss. PPh_3 increases the peak pressure slightly and broadens the peak, consistent with the generation of extra gas.

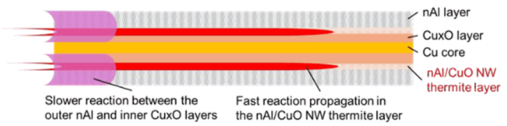


Fig.3 The combustion mechanism of nanothermites meshes in confined space.

In conclusion, the composition and coating thickness of triphenylphosphine (PPh_3) layers critically govern the combustion behavior of Al/CuO nanothermites. In burn-tube grains, a thicker PPh_3 layer at low proportions (≈ 30 %) enhances reaction propagation beyond that of uncoated aluminum (≈ 387 ms^{-1} versus 329.5 ms^{-1}), whereas higher loadings (≥ 50%) progressively suppress ignition; a thin coating, by contrast, yields a steady decline in burn rate, and complete coverage precludes ignition.

In confined configurations, architectural design dictates sustainability. Uncoated Al/CuO meshes sustain combustion readily, while systems containing 50 % Al@PPh_3 require multilayer stacking to offset heat loss; fully coated (100 %) meshes remain inactive. The PPh_3 coating delays ignition, slows the pressure-wave propagation (≈ 1.3 ms^{-1} versus 12.5 ms^{-1} for uncoated), yet slightly elevates the peak pressure through gaseous by-products of decomposition. The late-stage burn velocity diminishes sharply to ≈ 45 mm s^{-1} in five-layer, 50% Al@PPh_3 meshes, underscoring the kinetic inhibition imparted by the coating.

Collectively, these findings reveal a narrow formulation window in which modest, thicker PPh_3 passivation enhances convective transport and flame propagation, while excessive coverage or poor thermal design induces substantial inhibition. Effective utilization, therefore, requires co-optimization of composition, coating thickness, and architecture to balance energetic output, thermal management, and reaction stability.

Reference

[1] D.S. Sundaram, P. Puri & V. Yang, "Pyrophoricity of nascent and passivated aluminum particles at nano-scales", Combustion and Flame, Vol. 160, Issue 9, September 2013, 1870-1875.
[2] Cui Y, Zhao S, Tao D, Liang Z, Huang D, Xu Z. (2014). Synthesis of size-controlled and discrete core-shell aluminum nanoparticles with a wet chemical process. Materials Letters 121: 54.
[3] Chiang YC, Wu MH. (2017). Assembly and reaction characterization of a novel thermite consisting of aluminum nanoparticles and CuO nanowires. Proceedings of the Combustion Institute 36: 4201.

Investigating Thermal Runaway in Lithium-ion Batteries for Aerospace Mobility Applications

Ayushi Mehrotra *, Pragya Berwal *, Yejun Lee * Jack J. Yoh *†

ABSTRACT

Lithium-ion batteries (LIBs) are increasingly used in aerospace systems, from auxiliary aircraft power to satellite energy storage. However, thermal runaway (TR) under low-convection, low-oxygen conditions remains poorly understood. This study investigates TR initiation and propagation of LFP cells under simulated "aerospace" conditions using Differential Scanning Calorimetry (DSC) at high heating rates and reduced nitrogen purge. Results show that gas venting and varying states of charge (SoC) significantly influence heat release and TR behavior, offering critical insights for battery safety in aerospace environments.

Key Words: Thermal Runaway, Lithium-ion Batteries, Lithium Iron Phosphate, Differential Scanning Calorimetry (DSC), Aerospace Mobility

Lithium-ion batteries (LIBs) are increasingly being adopted in aerospace mobility sectors—satellites, UAVs, electric aircraft—where operational environments differ sharply from those in EVs or stationary storage. In aerospace service, modules often face low ambient pressure, reduced convection, and lower oxygen partial pressures, all of which impair heat dissipation and alter thermal runaway (TR) behavior [1,2]. While many studies have examined thermal runaway under standard ambient conditions, fewer have systematically explored TR initiation and propagation under "aerospace-like" thermal abuse—high heating rates, limited airflow, and sealed/gas-trapping geometries.

In this work, we perform differential scanning calorimetry (DSC) using the 'micro-cell' concept, on $LiFePO_4$-Silicon-Graphite Nanocomposite full cells (Cathode+ Anode+ Separator+ Electrolyte) at high heating rates (40, 60, 80 and 100 °C/min) under reduced Nitrogen purge (20 mL/min) and hermetically sealed pans to mimic low-convection, low-oxygen conditions. We test across multiple states of charge (SoC = 0, 25, 50, 75, 100 %) to quantify how SoC and heating rate influence onset temperatures, heat of reaction, and gas venting. Our goal is to elucidate critical thresholds for TR initiation under aerospace confinement, thus supporting safer design of LIB systems for flight and orbital applications.

* 서울대학교 항공우주공학과
† 연락저자, jjyoh@snu.ac.kr
TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-882-1507

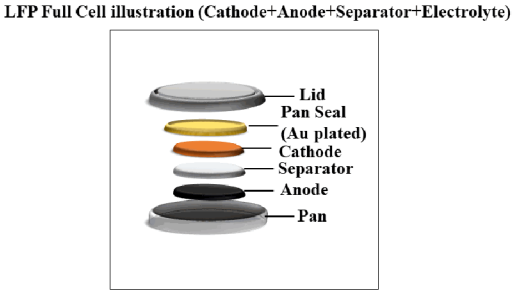


Fig. 1 Illustrative diagram of DSC 'micro-cell' sample used in this study.

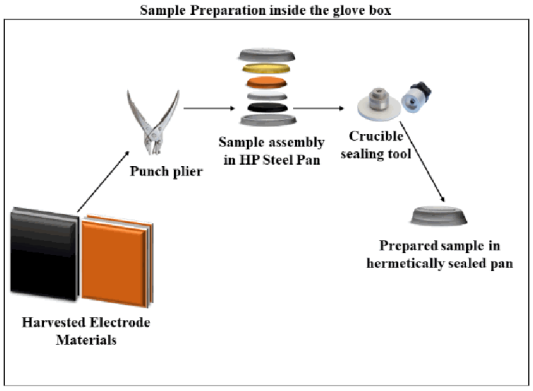


Fig. 2 Illustrative diagram of DSC 'Micro –cell' sample preparation.

.

Acknowledgement

This work was supported by the Samsung SDI Co., Ltd., Hyundai Motor Company, and National Research Foundation of Korea (RS-2024-00357969) contracted through IAAT and IOER at Seoul National University.

References

[1] Meng, D.; Weng, J.; Wang, J. Experimental Investigation on Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries under Low Pressure and Low Temperature. *Batteries* 2024, *10*, 243.

[2] Liu, Q., Zhu, Q, Zhu, W., Yi, X., Han., X., Thermal Runaway Characteristics of 18650 NCM Lithium-ion Batteries under the Different Initial Pressures, *Electrochemistry,* 2022, 90, 087004

[3] Sun, T., Wang, L., Ren, D. *et al.* Thermal Runaway Characteristics and Modeling of $LiFePO_4$ Power Battery for Electric Vehicles. *Automot. Innov.* 2023, 6, 414–424

용융 금속과의 다단 열분해 반응을 통한 플라스틱의 수소로의 전환에 관한 연구

이은지[a,b] · 양원[a,b] · 엄현진[b] · 이영재[b†]

Study on the conversion of plastics into hydrogen through multi-stage pyrolysis reactions with molten metal

Eunji Lee[a,b], Won yang[a,b], Hyeonjin Eom[b], Yeongjae Lee[b†]

ABSTRACT

In this study, we aim to develop a technology to produce hydrogen and carbon from plastics by applying pyrolysis technology. However, in order to produce hydrogen from plastics, a reaction temperature is required over 800℃, and the catalytic activity of solid catalysts can be degraded due to coking by produced carbon. Therefore, we utilized a molten metal catalyst to increase the hydrogen yield while maintaining the catalytic activity. To understand the characteristics of plastic pyrolysis using a molten metal catalyst, various operating parameters were examined and evaluated to increase the hydrogen yield from plastic. Additionally, molten metal was evaluated for its potential to reduce impurities, such as hydrogen chloride, which can be generated during the pyrolysis of waste plastics. It is expected that the results of this study can be utilized as a basic process technology for recycling waste plastics and producing hydrogen.

Key Words : Plastic, Multi stage pyrolysis, Molten metal, Hydrogen, Hydrogen chloride

전 세계적으로 플라스틱 생산량 및 사용량이 급증함에 따라 환경오염과 온실가스 배출 문제가 심각해지고 있다. 현재와 같이 플라스틱 사용량 증가 추세가 지속될 경우, 2050년까지 플라스틱 생산과 소비로 인한 이산화탄소 배출량은 약 560억 톤에 도달할 것으로 전망된다[1]. 기존 플라스틱의 처리 방식은 매립 및 소각으로 인해 대기오염 물질이 발생하기 때문에 자원순환을 위한 대체 기술이 필요하며, 특히 산업적 활용도가 높은 화학적 재활용에 관심이 커짐에 따라 폐플라스틱의 재자원화 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

화학적 재활용 기술 중 하나인 열분해는 무산소 조건에서 플라스틱의 고분자 사슬을 분해하여 단량체 화합물로 전환하는 화학반응으로 상 분리를 통해 고체상, 액체상, 그리고 기체상의 유용한 생성물을 얻을 수 있다. 플라스틱의 경우 종류에 따라 다양하나 대부분 수소와 탄소로 이루어져 있기 때문에 열분해 시 고체상의 촤, 액체상의 오일, 그리고 기체상의 비응축성 기체가 생성된다.

열분해의 주요 목적은 낮은 에너지 밀도의 물질을 높은 에너지 밀도의 물질로 변환시키는 것으로 동일한 부피에서 더 높은 에너지를 갖는 물질로 생성하기 위함이다. 폐플라스틱으로부터 높은 에너지 밀도를 가진 오일을 생성하여 연료로 전환하는 기술에 집중되어 왔다. 그러나 탄소 기반 연료의 경우 온실가스 배출의 원인이 되기 때문에, 최근에는 무탄소 연료인 수소로의 전환이 더욱 강조되고 있다. 수소는 화석연료와 달리 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않기 때문에 온실가스 감축에 기여할 수 있는 에너지원으로 주목받고 있으며 수소의 수요는 점점 증가할 예정이다. 하지만 수소는 2차 에너지로서 다른 원료로부터 추출해야 하기 때문에 수소를 생산하는 기술은 수요에 비해 현저히 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 화학적 재활용 방법 중 하나인 열분해 기술을 적용하여 플라스틱으로부터 수소를 생산하고자 하였다. 플라스틱에서 수소와 탄소를 생산하기 위한 방안으로 무촉매 열

* 과학기술연합대학원대학교
** 한국생산기술연구원
† 연락저자, leeyj@kitech.ac.kr
TEL : (041)-589-8464 FAX : (041)-589-8323

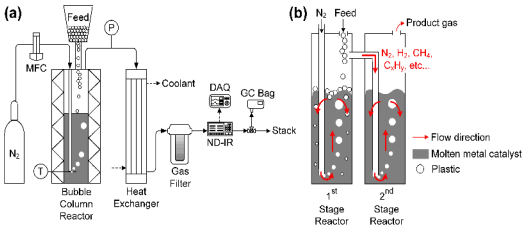


Fig. 1 Schematic illustrating the molten metal bubble column reactor

분해 기술은 높은 온도가 요구되고, 촉매의 경우 생성된 탄소로 인해 촉매의 효율이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에선 용융 금속 촉매를 적용함으로써 수소 생성 온도를 낮추고 탄소 부산물의 회수가 용이하도록 하였다. 또한 플라스틱이 용융 금속 표면 위에 뜨는 현상을 방지하기 위해 기포 컬럼 반응기를 적용하여 촉매 내부로 질소를 투입하였으며, 형성된 회전 유동을 통해 플라스틱이 촉매 속에 균일하게 섞이도록 하였다. 따라서 실험실 규모의 기포 컬럼 반응기를 기반으로 액체 금속 촉매를 적용하여 플라스틱의 열분해를 통한 비응축성 기체 생성 거동을 분석하였고, 수소 생성을 증가시킬 수 있는 운전 제어 인자를 도출하고자 하였다.

본 실험에서 적용된 액체 금속 기반의 기포 컬럼 반응기 구성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 (a)는 단일 반응기로 구성된 열분해 시스템으로 액체 금속이 포함되었으며, 대상 시료인 PP와 PE는 피더를 통해 투입된다. 액체 금속 내부에 연결되어 있는 튜브를 통해 질소를 주입되었으며, 열분해 후 생성된 기체는 포집하여 GC-TCD와 FID를 통해 정량 분석을 수행하였다. Fig. 1의 (b)는 단일 반응기와 동일 형태의 반응기가 병렬로 구성된 다단 반응기를 나타낸 그림이다. 두 번째 반응기의 액체 금속 촉매의 유동화는 첫 번째 반응기로 유입된 질소와 플라스틱으로부터 휘발된 기체상 생성물에 의해 형성된다.

Table 1은 본 연구에 수행된 실험 조건은 표 1에 나타내었다. 반응기 온도는 수소 생성을 증가시키기 위해 700~900℃에서 수행하였다. 액체 금속 촉매는 넓은 영역의 녹는 점을 가진 주석으로 선정하였고, 촉매 조성에 따른 효과도 검토하기 위해 반응 온도에서 액체로 존재할 수 있는 Ga을 혼합하여 용융 금속 합금(Ga-Sn)을 추가로 적용하였다. 합금의 혼합 비율은 질량비를 기준으로 1:9 (Ga:Sn)이며, 합금은 반응기에서 물리적으로 혼합하였다. 촉매의 양은 첫 번째 반응기에서 0.75 kg, 두 번째 반응기에서 1.5kg을 투입했으며, 이는 반응기 바닥으로부터 각각 약 5 cm와 10 cm 높이에 해당한다.

Table 1 Test conditions for PE and PP pyrolysis

Feed	Furnace Temp. (℃)	Catalyst	Amount of catalyst (kg)	
			1st stage	2nd stage
PE	800	None	0.75	1.5
	700	Sn		
	800			
	900			
	800	Ga-Sn		
	900			
PP	800	None		
	700	Sn		
	800			
	900			
	800	Ga-Sn		
	900			

Fig.. 2는 다단 반응기에서 반응 온도 800℃ 일때 주석 적용에 따른 비응축성 기체 조성을 나타낸 그림이다. 모든 조건에서 H_2, CH_4, C_2H_4의 분율이 전체 조성 중 80 vol.% 이상을 차지하였으며, CH_4이 기체 조성 중 가장 높은 것을 알 수 있다. 또한 PE에서 주석을 적용할 경우, H_2와 C_2H_4가 증가하였고, PP에서는 H_2와 CH_4이 증가하는 경향을 보였다. 공통적으로 주석을 적용할 경우 수소가 증가하였으며, 주석에 포함되어있는 약간의 활성도가 탄화수소의 분해 반응을 촉진하는 것으로 해석된다. 하지만 수소의 증가 분율은 5% 미만으로 무촉매 대비 큰 차이를 보이지 않았고, 이는 주석의 높이가 낮아 기체와의 반응이 충분히 이루어지지 않은 것으로 해석된다.

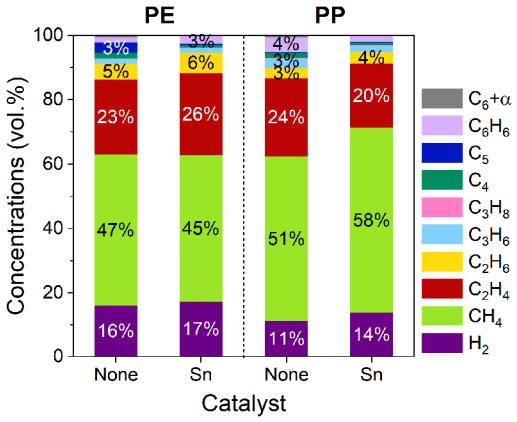


Fig. 2 Concentrations of non-condensable gases in the multi-stage reactor under catalysts at 800℃

반응 온도에 따른 영향을 분석하기 위해 주석을 적용한 다단 열분해 반응기에서 실험을 수행하였으며, 기체 조성 결과는 Fig. 3과 같다. 대상 시료 모두 온도가 증가함에 따라 H_2 분율이 2배 이상 증가하였으며 CH_4의 분율은 유사하였고, C_2H_4의 분율은 2배 이상 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 고온의 환경에서는 C-H 결합의 해리 반응이 촉진됨에 따라, 이중결합인 에틸렌(C_2H_4)에서 아세틸렌(C_2H_2)으로의 전환 과정임을 시사한다. 삼중결합을 가지는 아세틸렌은 결국 탄소화 과정의 전구체(precursor)가 되는 화학종으로 고온으로 진행됨에 따라 탄화수소 화합물은 탄소와 수소로 분리되는 반응을 촉진할 것으로 예상된다. 해당 반응 온도에서는 메탄의 경우 유사한 분율을 보였는데, 이는 메탄이 분해될 수 있는 활성도까지 미치지 못했거나, 상대적으로 무거운 탄화수소가 메탄으로 전환됐음에도 불구하고 메탄이 수소와 고체 탄소로 전환되어 700℃와 900℃ 사이에서 분율의 큰 차이를 보이지 못한 것으로 해석된다.

촉매의 종류에 따른 영향을 분석하기 위해 주석에 갈륨을 넣은 이종 금속(Ga-Sn) 촉매를 추가적으로 검토하였으며, 기체 조성 결과는 Fig. 4와 같다. 모든 조건에서 이종 금속을 적용한 경우 수소 분율이 증가하는 경향을 보였다. 공통적으로 단일 주석 대비 이종 금속의 활성도 증가로 인해 에틸렌의 분해에 의한 수소로의 전환이 증가된 것으로 확인하였다. 따라서, 수소 생성량을 증대시키기 위해서는 촉매와의 충분한 높이가 필요하며, 적절한 전이금속의 선정과 최적의 반응 온도를 복합적으로 고려하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

추가적으로, 폐플라스틱 열분해 시 발생할 수 있는 불순물 중 하나는 염화수소이다. 염화수소는 부식성이 강한 독성기체로 반응기 내부를 부식시킬 수 있으며 인체에 노출되면 치명적인 영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 추가적인 염화수소 제거 공정 없이 용융 금속 촉매에서의 염화수소 제거 가능성을 평가하고자 하였다. 기존의 실험 장치와 주석 촉매를 적용하여 반응

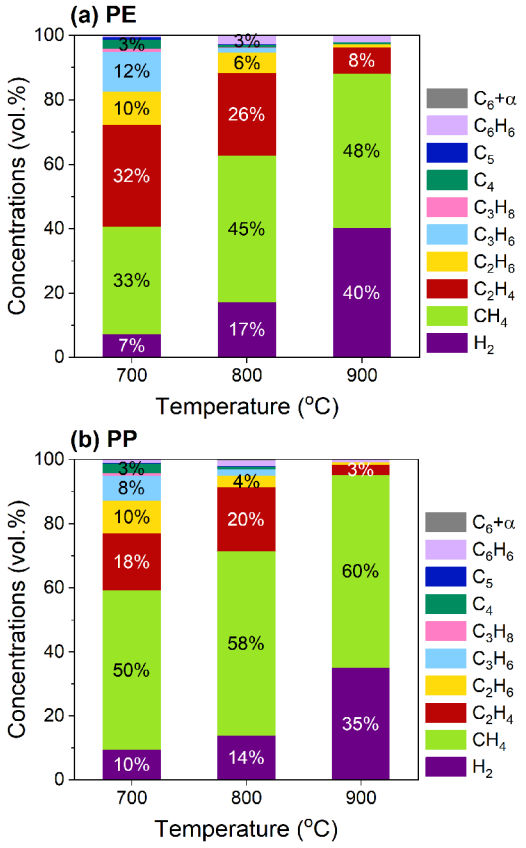


Fig. 3 Concentrations of non-condensable gases in the multi-stage reactor with the Sn catalyst

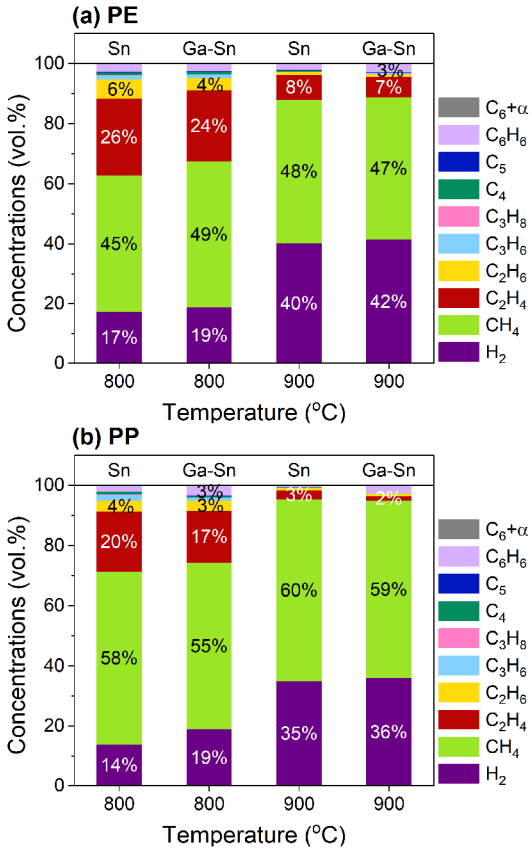


Fig. 4 Concentrations of non-condensable gases in the multi-stage reactor with Sn and Ga-Sn catalysts

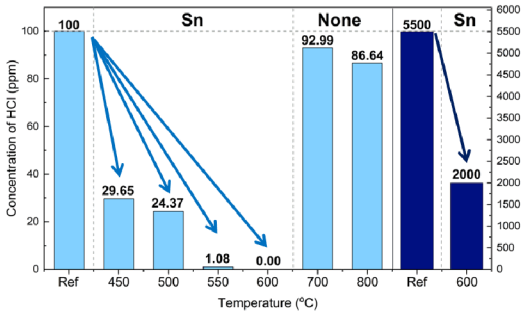


Fig. 5 Concentrations of hydrogen chloride with molten tin under the various temperature

온도, 반응기 개수, 그리고 투입 농도에 따른 염화수소 저감율을 검토하였다. Fig. 5의 하늘색 도표는 다단 반응기에서의 실험 후 저감된 염화수소 농도를 나타낸 것이고, 남색 도표는 단일 반응기에서의 저감된 염화수소 농도를 나타낸 것이다.

다단 반응기에 주석 적용 시 가장 낮은 반응온도인 450℃에서도 약 70% 이상 저감되는 결과를 보였지만 주석이 없는 조건에서는 대부분 제거되지 못한 양상을 보였다. 단일 반응기에서 처리량을 약 8배 늘린 조건에서도 반응 온도 600℃에서는 절반 이상 저감되는 효과를 보였다. 용융 금속의 관점에서 보면 금속이 반응물로써 작용하여 염화물(M-Cl)이 생성되는 경로와 촉매로써 작용하여 염소(Cl_2)와 수소(H_2)로 분리되는 경로로 두 가지 가능성이 존재할 수 있다.

염화수소의 저감 반응 경로를 확인하기 위해 반응기 후단에서 포집된 파우더 형태의 부산물을 SEM과 EDS 분석을 진행하였다. Table 1은 EDS로 분석한 조성 결과이고, Fig. 6는 SEM으로 분석한 표면에서의 형상 결과이다. 표면에서는 구형 형태와 비정형적인 입자 형태가 관찰되었으며 각각의 위치에서 조성을 확인한 결과, 구형 형태는 주석이 버블링 과정에서 토출되어 나

Table 2 EDS result of by-product powder

Type	Element	Weight %
Ball	O	46.48
	Cl	25.79
	Cr	7.77
	Sn	19.97
	Total	100.00
Powder	O	47.40
	Cl	12.93
	Sn	39.66
	Total	100.00

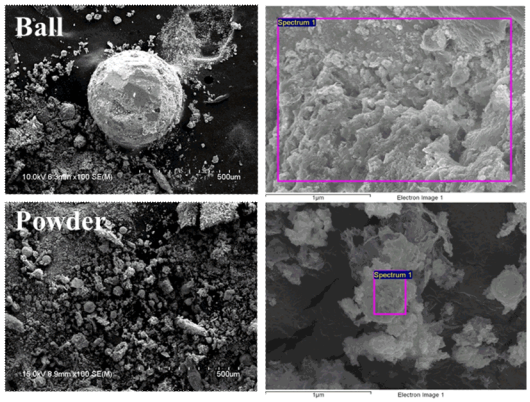


Fig. 6 SEM images of by-product powder

온 것으로 해석된다. 조성 결과 중 산소의 경우, 주석 표면에 산화막을 완벽히 제거하지 못하여 다량 검출된 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 두 입자 모두 염소가 검출된 것으로 보아 주석은 촉매가 아닌 반응물로써 염소와 결합된 것을 확인하였다.

본 연구는 폐플라스틱의 재자원화를 목적으로 열분해 기술을 적용하여 용융 금속 촉매의 적용 가능성에 대해 평가하였다. PE와 PP 단독 열분해의 경우 주석 적용 시 촉매로써 작용하여 수소 생성 효과를 확인하였지만, 효과를 더욱 증대시키기 위해서는 적절한 전이금속의 적용과 최적의 반응 온도를 고려할 필요가 있다. 염화수소와의 반응의 경우 주석은 반응물로써 작용하여 염화수소 제거 효과를 확인하였고, 향후 실제 폐플라스틱을 적용하여 용융 금속의 수소 생성 및 불순물 제거 효과에 대한 다각적인 검토를 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “스팀 개질 수소 생산 시스템용 무화염 연소 시스템 연료다변화 운영기술개발(KITECH UR-250105)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] L.A. Hamilton, and S. Feit, Plastic and Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet, Center for International Environmental Law (2019).

수소 MILD 연소에서 vitiated gas 조건에 따른 화염 거동 및 NOx 배출 실험적 연구

이기현*, 이기만*†

An experimental study of flame behaviors and NOx emissions with vitiated gas conditions in hydrogen MILD combustion

Gihyeon Lee*, Keeman Lee*†

ABSTRACT

A lab-scale MILD (Moderate or Intense Low-oxygen Dilution) jet combustor was developed to achieve carbon-free and low-NOx hydrogen combustion. The effects of vitiated gas temperature (800-900 °C) and oxygen concentration (4-12%) on NOx formation and heat release were investigated. Results show that higher vitiated gas temperature or lower oxygen concentration enhanced NOx reduction and broadened the reaction zone, demonstrating the potential of hydrogen-fueled MILD combustion for ultra-low-emission, distributed reaction operation.

Key Words : Hydrogen, MILD combustion, NOx emission, Heat release area, Vitiated gas

최근 지구온난화의 가속화로 인해 주요 원인인 온실가스를 규제하기 위해 전 세계에서 많은 노력을 기울이고 있다. 온실가스는 주로 탄화수소 계열(C_nH_n)인 화석연료 연소를 통해 많이 배출되기 때문에 이를 해결하기 위해 무탄소 연료인 수소(H2) 연료가 주목받고 있다.

수소 연료는 이론적으로 연소 시 오직 물(H2O)만 생성되어 이상적인 무탄소 연료 중 하나이다. 그러나 강렬한 반응성으로 인한 높은 단열화염온도를 특징으로 하여 화염 내 고온의 peak점에서 발생되는 thermal-NOx 배출을 피하기 어렵다. 따라서 이러한 수소 연료의 단점을 보완 가능한 새로운 연소 기법의 개발이 필요하다.

MILD(Moderate or Intense Low Oxygen Dilution)연소[1]는 저온 연소를 특징으로 하여 초 저 NOx 배출 성능을 보이는 연소기법으로 알려져 있다[2-3]. 따라서 본 연구는 고온을 특징으로 하는 수소 연료를 저온 연소를 특징으로 하여 초 저 NOx 배출 성능을 보이는 MILD 연소와 접목시켜 무탄소 연료와 동시에 저 NOx 배출 달성을 목표로 랩-스케일의 MILD 제트 버너를 구현하여 vitiated gas의 입구온도와 산소 농도에 따라 MILD 화염의 NOx 배출 경향, 열방출 영역을 수소 전소 조건에서 실험적 연구를 통해 조사하였다.

* 국립순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : 010-2357-1748

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구과제이며 이에 감사드립니다(RS-2022-00155547)

참고 문헌

[1] A. Cavaliere and M. de Joannon, “Mild combustion”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 4, 2004, pp. 329-366

[2] Yin, Z., Nau, P., Boxx, I., and Meier, W., "Characterization of a Single-Nozzle FLOX® Model Combustor Using kHz Laser Diagnostics,"Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, Montréal, Canada, Paper No. GT2015-43282.

[3] Tu, Y., Liu, H., Chen, S., Liu, Z., Zhao, H., and Zheng, C., 2015, "Numerical study of combustion characteristics for pulverized coal under oxy-MILD operation," Fuel Processing Technology, 135, pp. 80-90.

CFD-ERN 결합 해석을 통한 항공용 가스터빈엔진의 배출가스 농도 변화 연구

오길규* · 이기용**†

Numerical Study on Emission Concentration Variations in an Aircraft Gas Turbine Engine Using a Coupled CFD – ERN Analysis

Kilkyu Oh*, Ki Yong Lee***†

ABSTRACT

This study numerically investigated emission concentration variations(NOx, CO) in the combustor of an aircraft gas turbine engine(PW4056). CFD analysis using ANSYS Fluent was performed to analyze flow and temperature fields, and an Equivalent Reactor Network) was applied via Energico and Chemkin-PRO to estimate emission indices. Applying the POSF10325 and S66 mechanisms achieved ±5% accuracy compared with ICAO data, with the POSF10325+UIC combination showing superior efficiency and stability.

Key Words : Gas turbine engine, Reaction network, NOx, Jet-A, Surrogate mechenism

항공기 배출가스 중 NOx, 응결운(contrail) 등 비CO_2 성분은 복사강제 효과를 증대시켜 기후변화에 큰 영향을 미친다. ICAO-CAEP의 감축정책(CORSIA)이 시행 중이지만, 국내 등록 항공기 수와 질소산화물 배출량은 2000년 265대와 4,670 ton에서 2019년 853대와 11,600 ton으로 증가했다[1][2]. ICAO는 항공기 엔진에서 배출되는 NOx, CO, HC 등의 오염물질 배출지수를 LTO(이착륙) 단계를 기반으로 산정하여 Engine Emissions Databank(EEDB)[3]를 구축하였다. 하지만 순항 단계에 대한 자료는 부족하다. Nowacki 등[4]은 운항 시간이 가장 많은 순항 단계에서 배출이 가장 크다고 하였다.

본 연구에서는 항공유 Jet-A의 연소 특성을 정밀하게 모사하기 위해, POSF10325 surrogate 메커니즘[5]과 S66 축약 메커니즘[6]을 각각 적용하고, 질소 산화 반응 경로를 고려하기 위해 GRI3.0 및 UIC 메커니즘[7][8]을 함께 사용하였다. 각 메커니즘의 화학종과 기초 반응식을 Table 1에 제시하였다.

메커니즘 조합을 기반으로, Ansys 2023의 Fluent - Energico - Chemkin 연계 해석 체계를 구축하여 PW4056 연소실의 연소 및 NOx 배출 특성을 수치적으로 계산하였다. 또한 ICAO EEDB[3]와 타 연구자의 실험값을 활용하여 해석 결과의 신뢰성을 평가하고, 저배출 연소를 위한 주요 제어변수를 도출하였다.

Table 1 The chemical species and elementary reaction equations of each mechanism

Mechanism	SPECIES	REACTIONS
POSF10325	125	850
S66	30	66
GRI-3.0	18	106
UIC	83	748

연구 대상인 PW4056 터보팬 엔진은 B747-400 항공기에 장착된 대형 상용엔진으로, 애뉼러형(annular) 연소실을 사용한다. 실제 형상은 비공개이므로, 항공기정비메뉴얼(GMM)[9]을 참고하여 연소실 구조를 비례추정 방식으로 산정하였다. 이 과정을 통해 연소실의 길이 약 360mm, 직경 약 158mm를 기준으로, 연료노즐(fuel nozzle), 공기흡입구(air inlet), 라이너 홀(liner holes) 등 주요 구조 요소를 포함한 3차원 형상을 구축하였다. 해당 모델은 이후 CFD 해석의 기초 형상 데이터로 사용하였다.

이륙 조건에서의 연소실 입구 상태량은 브레이튼 사이클을 기반으로 계산하였으며, 온도 834.6K, 압력 29.38atm, 공기유량 125.37kg/s로 계산되었다. 계산 결과는 Benawra 등[10]의 실험값과 ±5% 이내의 오차 범위로 일치하였다. 연료유량은 ICAO EEDB 실험값인 2.45kg/s를 적용하였으

* 초당대학교 항공정비학과
** 국립경국대학교 전자·기계공학부
† 연락저자, kylee@gknu.ac.kr
TEL : (054)820-5899 FAX : (054)820-6127

며[3], 전체 공기유량은 모델링된 공기흡입구와 라이너 홀(liner holes)을 기준으로 6개 영역으로 분배하였다. 이 계산값을 CFD-ERN 해석의 기준 경계조건으로 사용되었다.

단열화염온도(Adiabatic Flame Temperature, T_{ad})는 Chemkin-PRO를 이용해 계산한 결과, 298K-1atm 조건에서 S66과 POSF10325 메커니즘의 T_{ad}는 각각 2290.7 K와 2288.9 K로 나타났다. 두 결과는 Xu 등[11]의 실험값 2280-2300K 범위 내에 위치하며, 수치해석과 일치했다. Fig. 1과 같이, 834.6K-29.4atm의 연소실 입구 조건에서도 두 메커니즘 간 온도 차이는 4.8K(0.2%)로 매우 작았다.

비예혼합화염(Non-premixed Flame) 조건에서도 S66과 POSF10325의 계산 결과는 각각 2489.2 K와 2493.9 K로 매우 유사하였다. 따라서 각 메커니즘의 화학종 수와 반응 수를 고려하여, CFD 해석에는 화학종과 반응이 상대적으로 적어 계산 효율이 높은 S66 메커니즘을 사용하였고, ERN 해석에는 화학종과 반응이 많아 정밀성이 높은 POSF10325 메커니즘을 적용하였다.

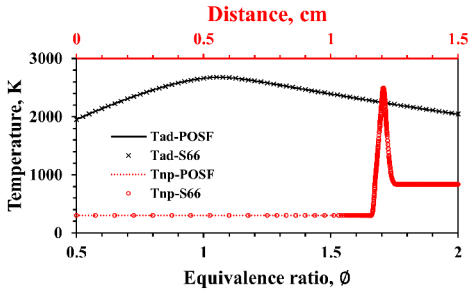


Fig. 1 Comparison of Adiabatic Flame Temperature and Non-premixed Flame Characteristics of POSF10325 and S66 Mechanisms(834.6K-29.4atm)

Fluent 해석은 Pressure-based Steady-State 조건에서 수행되었으며, 난류 모델로는 standard k - ε 모델을, 연소 모델로는 비예혼합(Non-premixed) 연소 모델을 적용하였다. 수렴 기준은 연속방정식 10^{-3}, 에너지방정식 10^{-6}으로 설정하여 안정적인 해석 수렴을 확보하였다. 해석 결과, 연소실 출구의 온도 분포는 약 1540-1650K 범위로 나타났으며, 출구 질량오차(Mass flux)는 0.002% 이하로, 질량 보존 및 수치 수렴성 모두 충족되었다.

Energico를 활용하여 Fluent 해석 결과를 기반으로 총 86개의 PSR(Perfectly Stirred Reactor)과 1개의 PFR(Plug Flow Reactor)로 구성된 Equivalent Reactor Network(ERN)을 생성하였다. 각 반응기는 CFD로부터 계산된 온도, 압력, 조성, 체류시간 데이터로 초기화되었으며, 입구 영역은 4개의 PSR로 재구성되었다. 각 Inlet PSR의 몰분율 및 질량유량의 총합은 Fluent 입력값과 완전히 일치하여, CFD-ERN 간 질량보존 및 에너지 정합성이 확보되었다.

Energico 계산에는 연료 및 질소 반응 기구를 조합한 4가지 메커니즘 조합이 적용되었다.

- S66+GRI : 47종 / 164반응
- S66+UIC : 11 종 / 769반응
- POSF10325+GRI : 142종 / 956반응
- POSF10325+UIC : 208종 / 1,598반응

이러한 조합은 연료화학기구(Fuel Mechanism)와 질소반응경로(Nitrogen Sub-Mechanism)의 상호작용을 비교·검증하기 위한 핵심 구성으로, Jet-A surrogate 모델의 반응 특성과 NOx 생성 경향의 민감도를 체계적으로 분석하기 위함이다.

배출지수(EI)는 Energico와 두 개의 독립 방정식[12]을 통해 계산할 수 있고, Fig. 2는 POSF10325+GRI 조합을 기준으로 계산된 결과를 나타낸다. Energico 계산값(EI_{NOx}=30.3g/kg-fuel)은 ICAO PW4056(EI_{NOx}=32.5g/kg-fuel)[3]와 약 6.8% 이내의 오차가 있다. 또한 전체 NOx 중 약 80 - 85%가 Thermal NOx로 구성되어, 이는 고온 조건에서의 Zeldovich 경로가 주요 반응 메커니즘이다.

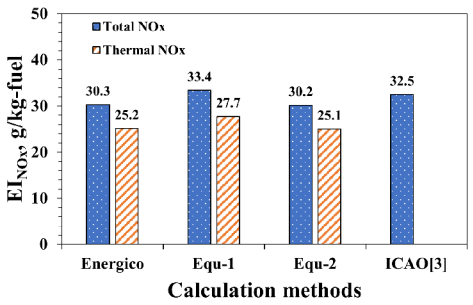


Fig. 2 Comparison of NOx Emission Index for the POSF10325+GRI Mechanism(834.6K-29.4atm)

Energico 계산 결과를 기준으로 수행한 네 가지 메커니즘 조합의 NOx 배출지수는 Fig. 3에 제시하였다. 그 결과, POSF10325+UIC 조합이 EI_{NOx}=31.4g/kg-fuel로 가장 높은 배출지수를 나타냈다. 전체 NOx 중 약 84%가 thermal-NOx로 확인되었다. 이는 고온 영역에서 라디칼 풀(CH, OH, O 등)이 형성되고, POSF10325+UIC 조합이 가장 많은 화학종과 반응식을 포함함으로써 연소 및 질소 반응을 보다 세밀하게 모사한 결과로 해석된다.

반면, S66+GRI 기반 조합은 가장 낮은 NOx 배출 지수을 보였으며, 이는 축약형 메커니즘의 단순화된 라디칼 반응망으로 인해 NO 생성 경로가

상대적으로 약화되었기 때문이다. 결과적으로, POSF10325+UIC 조합은 가장 높은 예측 정확도와 물리적 일관성을 확보하였고, S66+GRI 조합은 계산 효율 측면에서 가장 효율적인 조합으로 결정되었다.

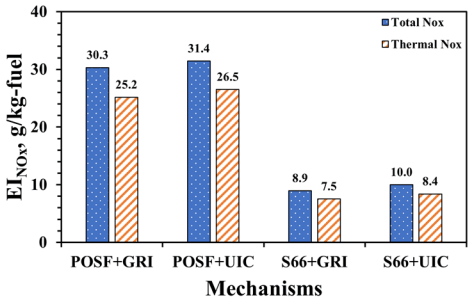


Fig. 3 NOx emission index comparison of four mechanisms based on Energico calculated data

온도 및 압력 변화에 대한 민감도 해석 결과, 압력 상승은 EI_{NOx}를 선형적으로 증가시키는 주요 인자로 나타났으며, 온도 상승은 고온 영역에서 증가율이 더욱 확대되는 비선형적 경향을 보였다.

최고 온도(peak temperature)는 2,398K로, 이는 단열화염온도(2,674K) 및 비예혼합화염온도(2,490K)보다 낮게 예측되어 물리적으로 타당한 범위 내에서 안정적인 연소 거동을 재현하였다. 또한 연소실 출구 온도는 ERN 1,332K로 예측되었으며, Benawra 등[10]의 실험값(1,574K)보다 낮았다. 이러한 차이는 단열가정, 반응기 단순화, 및 복사 손실 미고려 등 모델링 보수성에 기인한 것으로 분석된다. 이러한 결과는 본 모델이 실제 항공기 연소 특성을 정량적으로 재현하며, Energico 기반 ERN 해석이 NOx 배출을 신뢰성 있게 예측할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 CFD-Energico-Chemkin을 연계한 해석 체계를 구축하여 PW4056 가스터빈 연소실의 연소 및 NOx 배출 특성을 정량적으로 규명하였다. Fluent 기반의 유동 해석을 ERN(Equivalent Reactor Network)으로 변환함으로써 계산 효율을 높이고, 모델 간 질량 및 에너지 보존을 확보하여 물리적 정합성을 검증하였다.

분석 결과, POSF10325-UIC 조합이 연료화학적 대표성과 고온 영역에서의 NO 반응 보정을 동시에 충족하여 가장 신뢰성 높은 예측을 보였다. 반면, 축약형 연료 메커니즘인 S66은 계산 효율 측면에서 유리하나, 단순화된 반응망으로 인해 NOx 생성이 상대적으로 낮게 예측되었다.

또한, 압력 상승이 NOx 생성에 가장 큰 영향을 미치는 주요 요인으로 확인되었으며, 온도 상승은 혼합 균질도와 결합될 때 비선형적으로 배출을 증가시켰다.

본 해석 체계는 실험값과 비교에서 높은 정합도를 보였으며, 예측 신뢰성을 입증하였다. 항공기 엔진의 연소 해석과 SAF(Sustainable Aviation Fuel) 적용 연구, 순항단계 배출 인벤토리 고도화 등에 활용 가능한 수치해석 기반의 유효한 도구로 평가된다.

참고 문헌

[1] Aviation Technical Information System. (2024). Aircraft registration status. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT).

[2] 국가미세먼지정보센터. (n.d.). 대기오염물질 배출량 통계 (CAPSS).

[3] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2024). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (EEDB). Montreal, Canada: ICAO.

[4] Nowacki, M., & Olejniczak, W. (2019). Boeing 787-9 in-flight exhaust emission analysis for the selected flight. Transportation Research Procedia, 40, 419 - 426.

[5] Stanford University. (n.d.). HyChem Mechanism Download Page (POSF10325).

[6] Song, S., Wang, C., & Shao, J. (2024). Simplified reaction mechanisms for the oxidation of jet fuel. Combustion Science and Technology, 196(18), 5023 - 5047.

[7] Malewicki, T., et al. (2012). Experimental and modeling study on the oxidation of Jet A and the n-dodecane/iso-octane/n-propylbenzene/1,3,5-trimethyl benzene surrogate fuel. Combustion and Flame, 160, 17 - 30.

[8] Glarborg, P., Miller, J. A., Ruscic, B., & Klippenstein, S. J. (2018). Modeling nitrogen chemistry in combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 67, 31 - 68.

[9] Boeing. (2002). Aircraft General Maintenance Manual (GMM) for Boeing 747 Series. Seattle, WA: Boeing Commercial Airplanes.

[10] Benawra, Y., & Aygun, H. (2022). Analysis of NOx emissions from high-bypass turbofan engines under various flight phases. Aerospace Science and Technology, 123, 107 - 119.

[11] Xu, R., Wang, H., Colket, M., & Edwards, T. (2015, July 6). Jet fuel thermochemical analysis. National Jet Fuel Combustion Program.

[12] Turns, S. R. (2011). An introduction to combustion: Concepts and applications (3rd ed.). McGraw-Hill.

Alkane 연료의 Soot 발생에 관한 실험적 연구

강예진*. 권회원*. 성지환*. 한가람*. 손채훈*†

An Experimental Study on the Soot Formation of Alkane Fuels

Yejin Kang*, Hoewon Kwon*, Jihwan Seong*, Ga Ram Han*, Chae Hoon Sohn*†

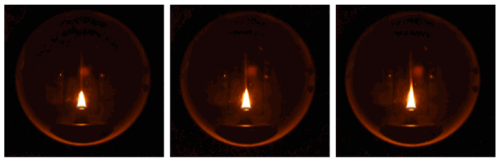
ABSTRACT

This study refined the Virtual Smoke Point (VSP) method to address the limitations of direct extrapolation and successfully measured the smoke points of hydrocarbon fuels exceeding 50 mm. Comparison with previous studies confirmed improved prediction accuracy. Using this refined method, the Threshold Sooting Index (TSI) could be accurately predicted for unmeasured or synthetic hydrocarbons, demonstrating strong applicability to combustion characterization and fuel design optimization.

Key Words : Alkane fuels, Threshold Sooting Index, Virtual Smoke Point

연료의 불완전한 연소로 생성되는 매연(Soot)은 대기질 악화와 인체 건강에 심각한 영향을 미친다. 또한, 연소기 내 매연이 발생하게 되면 연소 효율이 떨어지며, 연소로 인해 질소산화물과 같은 독성 물질이 생성되어 인체와 환경에 해로운 영향을 끼친다.

1980년 초반 Calote와 Manos는 연료의 연점(smoke point) 길이와 분자량(molecular weight)의 관계식을 통해 매연의 발생 정도를 나타내는 지표인 TSI (Threshold Sooting Index) 방법을 제안하였다[1]. Smoke Point는 ASTM D1322 측정 방법에 따라 측정할 수 있다.



(a) (b) (c)

Fig. 1 Examples of measuring Smoke Point in (a) incorrect operation, (b) correct operation, (c) smoky tail generation

* 세종대학교 기계공학과
† 연락저자, chsohn@sejong.ac.kr
TEL : (02)3408-3788

Fig .1은 Smoke Point 측정 그림을 나타냈으며, (b)가 Smoke Point를 측정할 수 있는 화염의 형상이다. 이때, (a)는 부정확한 Smoke Point이며, (c)는 Soot이 발생하는 Smoky tail 발생 조건으로 측정 조건에 부합하지 않다.

Dooley et al.[2]는 n-dodecane과 iso-octane 그리고 1.3.5-trimethylbenzene으로 구성된 항공기용 제트 모사연료의 TSI를 분석하였다. Won et al.[3] 은 iso-dodecane과 iso-octane 그리고 iso-cetane 등의 연료를 사용하여 TSI를 예측하였다.

그러나 ASTM D-1322 측정 방법은 Smoke Point가 50 mm가 넘는 연료를 측정하지 못 한다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 Haas et al.[4]은 Virtual Smoke Point(VSP) 방법을 제시하였고, 이는 Smoke Point가 50 mm가 넘어 직접 측정이 불가능한 연료의 Smoke Point를 외삽법을 통해 예측하는 방법이다. 측정이 불가능한 연료 i를 측정 가능한 연료 j와 다양한 비율로 혼합하여 Smoke Point를 측정한다. 측정한 값과 혼합물의 분자량을 이용하여 Fig. 2와 같이 외삽법을 이용하여 i 연료의 Smoke Point를 결정한다.

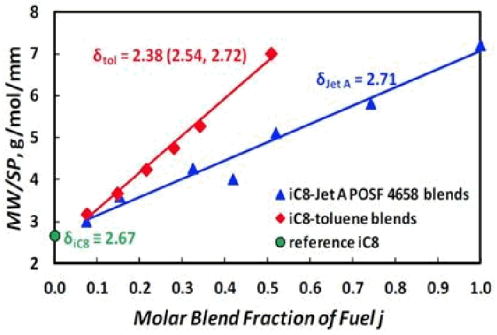


Fig. 2 Linear trends in MW/SP for blends of iC8 with either toluene or POSF 4658. The VSP of iC8 is computed from extrapolation to $X_i C8 = 1$ at the intercept $\delta = MW_i/SP_i$. [4].

Hass는 직접 외삽법을 적용하면 함수 형태 결정에 모호함이 있고 필요한 데이터의 범위와 개수의 모호함이 있음을 제기하였다.

본 연구는 이전에 제안되었던 VSP 기법에서 제기한 직접 외삽법의 한계를 보완하여 Smoke Point가 50 mm가 넘는 탄화수소 계열 연료의 Smoke Point를 측정하여 선행 연구와 비교하였으며, 보다 정확히 예측하는 것을 확인하였다.

향후 연구에서는 탄화수소 계열 뿐 아니라 다양한 연료를 대상으로 한 실험을 통해 실제 산업 및 환경에서의 응용 가능성을 탐구할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-KI002689, 우주 소재·부품·장비 전문인력양성사업)

참고 문헌

[1] Calcote H, Manos D, "Effect of molecular structure on incipient soot formation", Combust Flame 1983;49(1-3):289-304

[2] Dooley S, Won SH, Chaos M, Heyne J, Ju Y, Dryer FL, "A jet fuel surrogate formulated by real fuel properties", Combustion and Flame 2010;157(12):2333-9.

[3] Won SH, Haas FM, Tekawade A, Kosiba G, Oehlschlaeger MA, Dooley S, "Combustion characteristics of C4 iso-alkane oligomers: Experimental characterization of iso-dodecane as a jet fuel surrogate component", Combust Flame, 2016;165:137-43. 10.1016/j.combustflame.2015.11.006.

[4] Haas FM, Qin A, Dryer FL, "Virtual" Smoke Point Determination of Alternative Aviation Kerosenes by Threshold Sooting Index TSI) Methods", 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2014. 10.2514/6.2014-3468.

PFR 모델을 활용한 기체상 탄화수소의 열분해에 대한 수치해석 검증 및 분석에 관한 연구

이승현*,** · 임성균* · 엄현진** · 이영재**†

Study on numerical validation and analysis for thermal decomposition of gas-phase hydrocarbons using plug flow reactor (PFR) model

Seunghyeon Lee*,**, Seongkyun Im*, Hyeonjin Eom**, Youngjae Lee**†

현재 온실가스 배출 및 지구온난화에 의한 기후 변화에 대한 인식이 증가함에 따라 전 세계적으로 탄소 중립 전략에 대한 가속화가 진행되고 있다. 특히 온실가스 다배출 산업에서는 신재생에너지 확대, 바이오에너지 보급, 무탄소계 연료로의 전환 등을 통해 온실가스 배출 저감 방안을 제시하고 있다. 그중 무탄소계 연료의 전환으로 수소 연료가 주목받고 있으나, 기존의 수소 생성 공정을 통해 생산된 수소만으로는 수소 수요를 충족하는 것이 어렵기 때문에 대용량 수소 생산이 가능한 실용적인 기술이 필요하다.

메탄 열분해는 메탄의 열화학적 전환을 통해 식 (1)과 같이 이론적으로 수소와 고체 탄소로 분해될 수 있다. 이상적인 조건에서 수소 1 mol을 생성하기 위해 수전해와 SMR(Steam methane reforming)과 비교해 상대적으로 낮은 에너지를 필요로 한다[1]. 이외에도 기존 천연가스 인프라를 활용하여 수소를 지속 가능하게 생산할 수 있는 유망한 기술로 평가된다[2].

$$CH_4 \rightarrow C_{(s)} + 2H_2, \ \triangle H = 37.7\,kJ/mol \qquad (1)$$

다만, 메탄 열분해는 메탄과 천연가스를 포함하여 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 등의 탄화수소계 화학종으로부터 수소를 생산[3]하는 것이 가능하기 때문에 대용량 수소 생산 효과를 기대할 수 있다. 하지만 기존 메탄 열분해를 통한 수소 생산 연구는 주로 순수 메탄을 중심으로 진행되었다. 천연가스에 포함되어 있는 일부 탄화수소는 메탄 열분해와 차별점을 갖는 요인이 된다. 그러므로 메탄 외에도 에탄 및 여러 탄화수소가 포함된 천연가스를 활용하여 열분해 공정을 수행할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 메탄, 에탄 및 천연가스 기반 열분해를 통해 투입 원료 조성이 수소, 탄화수소 및 탄소 수율에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 또한, 메탄 열분해를 포함한 상세 화학 반응 기구 기반의 1차원 수치해석을 수행하고 실험 결과와의 비교를 통해 검증, 분석 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1의 실험실 규모 메탄 열분해 시스템을 활용하여 실험 연구를 수행하였다. 반응기 형상은 직경 28 mm, 길이 1500 mm의 반응기이며, 300 mm의 예열 구관과 1100 mm의 열분해 구간으로 구분하였다. Table 1에 제시된 바와 같이, 대기압 조건에서 주 반응 영역을 기준으로 900-1100 ℃를 적용하였으며, 메탄 예열 온도는 800 ℃로 고정하였다. 원료 투입 유량은 1-3 L/min으로 고려하였으며, 표준 압력 및 상온에서 MFC를 활용하여 정량적으로 제어하였다.

본 연구에서는 투입 원료에 따른 열분해의 특성은 수율을 통해 특성화할 수 있으며, 열분해에 의해 생성된 생성물의 수율은 식 (2)와 같이 정의하였다. 또한, 원료 투입량을 기준으로 생성될

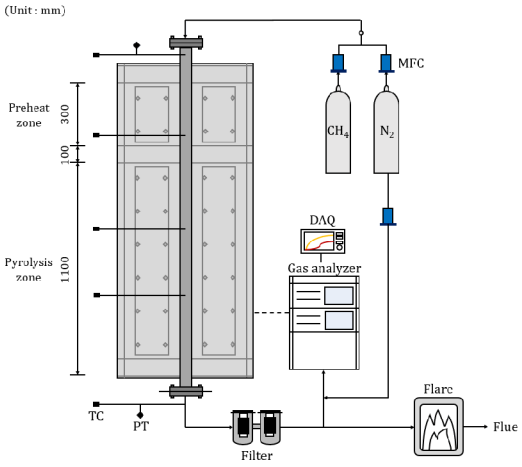


Fig. 1 Schematic diagram of the laboratory scale methane pyrolysis system

* 고려대학교 기계공학과
** 한국생산기술연구원 지속가능기술연구소
† 연락저자, leeyj@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8464 FAX : (041)-589-8323

수 있는 최대 수소 및 탄소의 질량이 결정된다. 투입된 원료 내 포함된 수소와 탄소 질량 중 열분해를 통해 생성된 수소와 탄소의 수율을 분석하여 기대 대비 실제 수율에 대한 특성을 분석하고자 하였으며, 이를 수식 (3)과 같이 specified product yield로 정의하였다.

$$Yield\,(wt.\%) = \frac{\dot{m}_{j,out}}{\dot{m}_{Reactant,\in}} \times 100, \qquad (2)$$

$$Specified\,prouct\,yield\,(wt.\%) = \frac{\dot{m}_{j,out}}{\frac{M_{j,out}}{M_{Reactant}} \times \dot{m}_{Reactant,\in}} \times 100 \qquad (3)$$

여기서 $\dot{m}_{Reactant,\in}$는 투입된 반응물의 질량 유량, $\dot{m}_{j,out}$는 열분해 반응 후 j 생성물의 질량 유량, $M_{Reactant}$는 투입된 반응물의 분자량, $M_{j,out}$은 반응물 내 j의 분자량을 의미한다.

실험실 규모 메탄 열분해 반응기 기반 실험 결과를 검증하기 위해 Aramco[4], GRIMech 3.0[5], Naik[6], NUIGMech 1.1[7], Westbrook[8] 반응 기구를 고려하였다. 대표 투입 원료인 메탄 열분해에 따른 열분해 시스템의 수치해석 조건은 실험 조건과 동일하게 적용하였으며, CHEMKIN PFR 모델을 사용하여 메탄 열분해 반응을 모사하였다.

모든 화학 반응 기구는 메탄의 열화학적 분해를 통해 수소 생성을 예측하였다. 반응기 출구에서의 메탄 및 수소의 몰 분율에 대한 실험 결과를 비교한 결과, 1000 ℃ 및 1100 ℃ 조건에서 Naik 반응 기구가 실험과 정성적으로 일치하는 경향을 보였다. 다만, 900 ℃에서는 모든 화학 반응 기구가 실험 경향과의 일치도가 감소하였다. 이는 메탄의 강한 C-H 결합으로 인해 높은 활성화 에너지를 필요로 하나[9], 낮은 온도로 인해 메탄이 충분히 분해되지 못한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 메탄 및 수소 몰 분율에 대해 가장 높은 정확도를 보인 Naik에 의해 제안된 화학 반응 기구를 활용하여 다양한 투입 원료에 따른 열분해에 의해 생성된 생성물의 수율에 대한 예측 및 분석을 수행하였다.

Table 1 Experimental and numerical conditions

Parameter	Value
Pressure (atm)	1
Preheat temperature (℃)	800
Pyrolysis temperature (℃)	900-1100
Reactant	CH_4, C_2H_6, NG*
Flow rate of reactant (lpm)	1-3
Model	PFR

*NG: Natural gas

Fig. 3은 투입 가스 질량 대비 잔류 메탄과 생성물의 질량에 대한 수율을 나타낸 결과이다. 각 성분에 대한 수율 도출에서 탄화수소 조성은 해석 결과를 활용하였다. 전반적으로 온도가 증가할수록, 투입 원료의 유량이 감소할수록 수소 수율이 증가하는 경향이 나타났다. 900 ℃ 및 1000 ℃에서 메탄 및 천연가스 열분해는 낮은 전환율로 인해 대부분 잔존 메탄으로

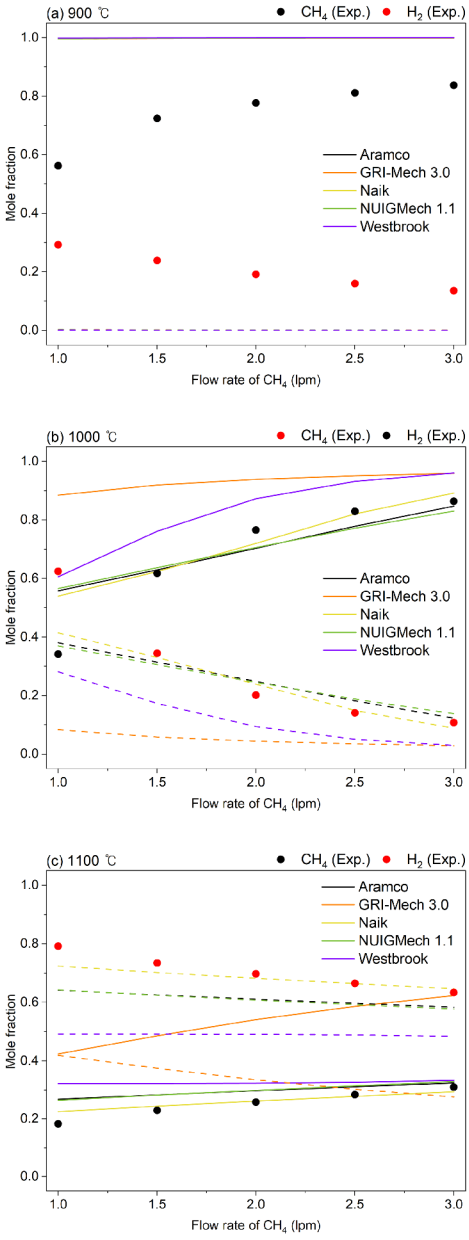


Fig. 2 Validation and comparison of the reaction mechanisms obtained using the plug-flow reactor (PFR) model. (Solid line: CH_4 mole fraction, Dashed line: H_2 mole fraction)

성되었으나, 에탄 열분해에서 대부분 더 높은 수소, 탄화수소 및 탄소 수율을 보였다. 특히, 투입 유량이 증가함에 따라 잔존 메탄이 감소하면서 수소 및 탄화수소는 증가하는 경향을 보였다. 1100 ℃에서는 메탄 및 천연가스 열분해에서 유량 변화에 따른 생성물의 수율 증감 폭은 유사하나, 메탄보다 천연가스 열분해에서 수소 수율이 증가하는 추세를 보였다. 에탄 열분해 반응에서는 탄화수소 및 탄소 수율이 높은 것으로 나타났다.

모든 온도 조건에서 에탄 열분해에 의해 탄화수소 및 탄소 생성량이 다량 생성되었으며, 고온·저유량 조건에서는 천연가스 열분해에 의해 더 많은 수소 생성량이 더 많은 것으로 판단된다. 이는 천연가스 내 에탄, 프로판과 같은 탄화수소는 메탄보다 낮은 온도에서 분해되기 시작하여 추가적으로 수소를 생산함에 따라 수소 수율이 증가한 것으로 분석된다[10].

Fig. 4는 메탄, 에탄 및 천연가스 열분해 반응에 의해 이론상 생성될 수 있는 생성물의 최대 질량 대비 실제 생성된 생성물의 질량에 대해 나타낸 결과이다. Specified product yield (Fig. 4)는 Fig. 3에 도시된 것과 동일한 경향을 보였다. 고온 기준 기대 수율을 예측한 결과, 천연가스 열분해에서 비교적 수소 수율이 증가하며, 에탄 열분해에서 탄소 수율이 증가하는 것으로 판단된다. 이는 에탄, 프로판과 같은 C_2, C_3 분자의 빠른 분해로 인해 탄소 수율이 증가하며, 생성된 탄소의 촉매 작용으로 수소 선택도를 증가시켜 높은 수소 수율을 보인 것으로 분석된다[3].

본 연구는 PFR 모델을 활용하여 탄화수소 기체 열분해에 따른 수치해석 검증 및 열분해에 대한 생성물 특성을 분석하였다. 고온 조건에서 에탄 열분해가 탄화수소 및 탄소 수율이 증가하였으며, 천연가스 열분해는 수소 수율이 증가하는 경향을 보였다. 본 연구를 통해 반응 온도 및 원료 내 탄화수소 조성에 따라 수소, 탄화수소 및 탄소 생성에 중요한 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 다양한 운영 조건에 따른 복합 탄화수소 기체 열분해에 따른 수소 생산 특성에 관한 실험 및 수치해석 연구를 수행할 예정이다.

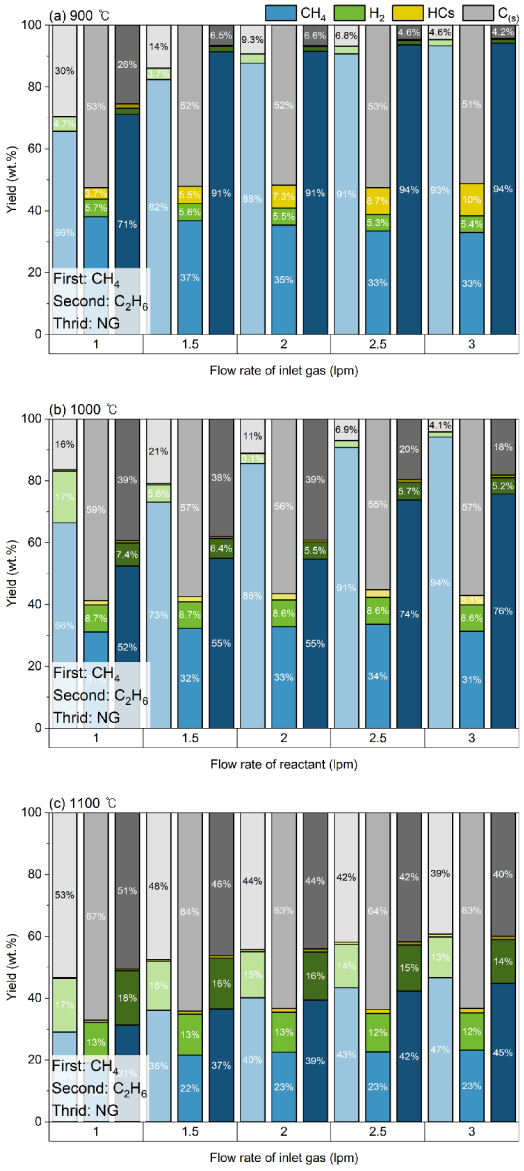


Fig. 3 Yields of H_2, CH_4 residue, hydrocarbons and solid carbon at pyrolysis temperature of (a) 900 ℃, (b) 1000 ℃, and (c) 1100 ℃

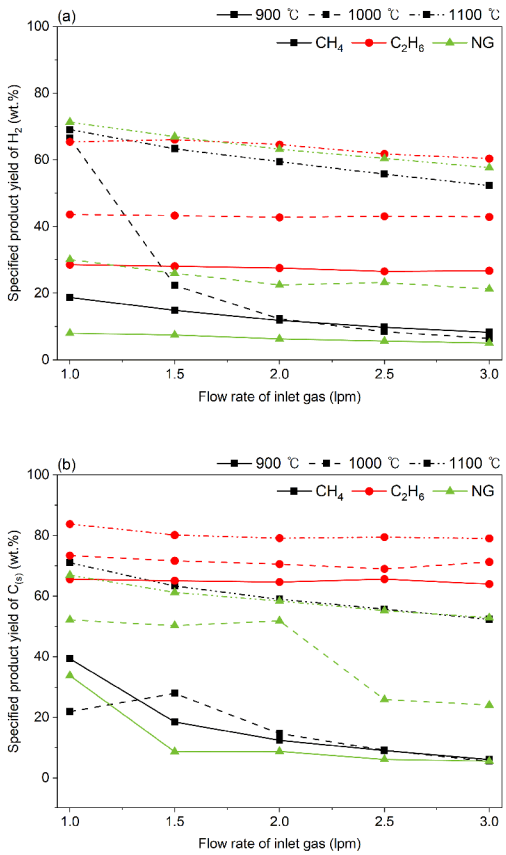


Fig. 4 Specified product yields of (a) H_2 and (b) solid carbon with respect to the temperature and flow rate of various feeds

후 기

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP22024-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] S. Dermühl, U. Riedel, “A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies”, Fuel, Vol. 340, 2023, pp. 127478

[2] L. Fulcheri, V.-J. Rohani, E. Wyse, N. Hardman, E. Dames, “An energy-efficient plasma methane pyrolysis process for high yields of carbon black and hydrogen”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 48, 2023, pp. 2920-2928.

[3] A. Çelik, I.B. Othman, H. Müller, O. Deutschmann, P. Lott, “CO2-free production of hydrogen via pyrolysis of natural gas: influence of non-methane hydrocarbons on product composition, methane conversion, hydrogen yield, and carbon capture”, Discov. Chem. Eng., Vol. 4, 2024, pp. 1-16

[4] A. Kéromnès, W. K. Metcalfe, K. A. Heufer, N. Donohoe, A. K. Das, C. -J. Sung, J. Herzler, C. Naumann, P. Griebel, O. Mathieu, M. C. Krejci, E. L. Petersen, W. J. Pitz, H. J. Curran, “An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures”, Combust. Flame, Vol. 160, 2013, pp. 995-1011

[5] G.P.S. Smith, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, et al., GRI-Mech 3.0, University of California, Berkeley, 1999 http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/

[6] C.K. Westbrook, F.L. Dryer, “Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion”, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 10, 1984, pp. 1 - 57

[7]] C.V. Naik, K.V. Puduppakkam, A. Modak, E. Meeks, Y.L. Wang, Q. Feng, T.T. Tsotsis, “Detailed chemical kinetic mechanism for surrogates of alternative jet fuels”, Combust. Flame, Vol. 158, 2011, pp. 434 - 445

[8] M. Baigmohammadi, V. Patel, S. Nagaraja, A. Ramalingam, S. Martinez, S. Panigrahy, A.A.E.S. Mohamed, K.P. Somers, U. Burke, K.A. Heufer, A. Pekalski, H.J. Curran, “Comprehensive experimental and simulation study of the ignition delay time characteristics of binary blended methane, ethane, and ethylene over a wide range of temperature, pressure, equivalence ratio, and dilution”, Energy Fuels, Vol. 34, 2020, pp. 8808 - 8823

[9] S.R. Patlolla, K. Katsu, A. Sharafian, K. Wei, O.E. Herrera, W. Mérida, “A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production”, Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 181, 2023, pp. 113323

[10] L.D. Liddo, F. Cepeda, G. Saegh, M. Salakhi, M.J. Thomson, “Comparative analysis of methane and natural gas pyrolysis for low-GHG hydrogen production”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 84, 2024, pp. 146-154

가스터빈 단일 버너의 암모니아 크래킹 모사 연료 연소 특성

황정재*† · 김민국* · 강도원* · 이원준* · 민경욱* · 김재현* · 박순호* · 조주형*

Combustion Characteristics of Ammonia Cracked Fuel for the Gas Turbine Single Nozzle

Jeongjae Hwang*† , Min-Kuk Kim*, Do Won Kang*, Won June Lee*, Kyungwook Min*, Jaehyun Kim*, Sun Ho Park*, Ju-Hyeong Cho*

최근 기후변화 대응과 온실가스 감축을 위한 탄소중립(Net-Zero) 달성이 공동의 핵심 목표로 부상하고 있다. 특히 2015년 파리협정 이후 각국은 산업 및 발전 부문에서의 이산화탄소(CO2) 배출 저감을 위해 다양한 정책과 기술적 대응을 강화하고 있으며, 에너지 생산 분야에서도 화석연료 의존도를 낮추고 저탄소·무탄소 에너지 체계로의 전환이 가속화되고 있다. 이러한 세계적 전환 흐름 속에서 수소(H2)는 연소 시 탄소를 배출하지 않는 청정 에너지원으로 주목받고 있으며, 발전, 운송, 산업 공정 등 다양한 분야에서의 적용 가능성이 활발히 검토되고 있다. 수소는 또한 재생에너지의 간헐성을 보완하고 에너지 저장 및 운송이 가능한 장점을 지니고 있어, 탄소중립 에너지 시스템의 핵심 매개체로 평가된다. 국내에서도 2050년 탄소중립 달성을 위한 국가 비전이 공식적으로 선언되었으며, 정부가 제시한 '2050 탄소중립 시나리오'에 따르면 무탄소 가스터빈 기술은 재생에너지 및 원자력과 함께 3대 주요 전원 믹스를 구성하는 핵심 기술로 전망되고 있다[1].

하지만 국내의 경우 재생에너지 자원이 풍부하지 않아 청정수소의 자급 생산 능력에 한계가 있으며, 이에 따라 수소의 상당 부분을 수입에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 그러나 수소는 저장 및 수송이 어렵고 이 과정에서 높은 비용이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 저장 및 운송이 용이한 암모니아(NH_3)가 수소의 운반체(carrier)로 급부상하고 있다. 암모니아를 수소로 합성한 뒤 소비지로 운송·저장하여 사용하는 방식이 일반적으로 제안되고 있으며, 소비지에서는 이를 다시 분해(크래킹, cracking)하여 수소를 생산하거나, 암모니아를 직접 연료로 활용할 수도 있다. 발전용 가스터빈 분야에서도 암모니아를 활용하기 위한 다양한 접근이 시도되고 있으며, 대표적으로 (1) 암모니아를 분해한 후 질소를 분리하고 고순도의 수소만을 연료로 사용하는 방식, (2) 암모니아를 직접 연료로 사용하는 방식, (3) 가스터빈 시스템 내에서 암모니아를 분해하여 생성된 크래킹 연료(수소+질소)를 직접 사용하는 방식 등이 연구되고 있다. 본 연구에서는 이 중 가스터빈 시스템 내에서 암모니아를 분해하여 생성된 크래킹 연료(수소+질소)를 적용하는 방식을 대상으로 하였다. 이를 위해 단일 버너를 이용한 암모니아 크래킹 연료의 연소 특성을 실험적으로 조사하였다.

암모니아 크래킹 연료는 수소와 질소가 부피비 3:1로 혼합된 혼합가스로 구성된다. 비록 질소가 포함되어 있으나, 여전히 천연가스에 비해 매우 높은 화염 전파 속도와 낮은 점화 에너지를 가지므로, 연소기 내부에서 화염 역화(flashback) 및 연소 불안정성(combustion instability)이 발생할 가능성이 크다. 또한 동일한 화염 온도 조건이라 하더라도 화염이 상류 영역에서 안정화될 경우, 혼합기의 불균일성이 증가하여 국부적으로 높은 화염 온도가 형성되고, 이로 인해 질소산화물(NOx) 배출이 증가하는 문제가 발생할 수 있다[2,3]. 따라서 암모니아 크래킹 가스터빈 연소기 개발에서는 화염 역화와 연소 진동에 대한 강인성을 확보할 수 있는 설계 전략에 초점을 맞추는 것이 중요하다.

본 연구의 대상 가스터빈인 GT24는 알스톰(Alstom)에서 개발한 60Hz용 고효율 가스터빈으로, 시퀀셜 연소(Sequential Combustion) 기술을 통해 높은 열효율과 낮은 배출가스를 동시에 달성한 모델이다. 이 가스터빈은 재열사이클(reheat cycle)을 적용한 모델로, 고압터빈과 저압터빈의 2단으로 구성되어 있고, 1단 연소기인 EV 버너에서 생성된 가스를 다시 2단 연소기인 SEV 버너로 보내 연소를 지속함으로써, 연소 온도를 제어하고 효율을 극대화하는 것이다[4,5]. GT24는 기존 천연가스를 연료로 사용하지만, 수소 혼소 및 암모니아 크래킹 연료 혼소 적용 가능성이 높

* 한국기계연구원 무탄소발전연구실
† 연락저자, hwangjj@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7273

은 시스템으로 평가되고 있고, 최근 여러 연구에서 수소 혼소 적용 시 연소 안정성과 질소산화물 배출 특성을 최적화하기 위한 다양한 설계 기법이 논의되고 있다.

본 연구에서는 암모니아 크래킹 연료와 천연가스의 혼소 특성에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 혼소율 50:50(LHV 기준)에 최적화된 연료홀 설계를 수행하고, 제작하여 Fig. 1에 나타난 기계연구원의 단일버너 연소성능 시험리그를 활용하여 혼소율에 따른 연소특성을 평가하였다. 후면의 사진 촬영을 통한 화염구조의 특성, 버너 출구 근처에서의 OH* 자발광 측정을 통한 화염선단 위치 특성 및 NOx 배출 특성 비교를 통해 혼소 최적화 설계에 대한 평가를 수행하였다. 기존의 50% 수소 혼소용으로 설계된 EV 버너[6]와 암모니아 크래킹 연료 50% 혼소용으로 재설계된 EV 버너에 대해 성능시험을 수행하여 비교하였다.

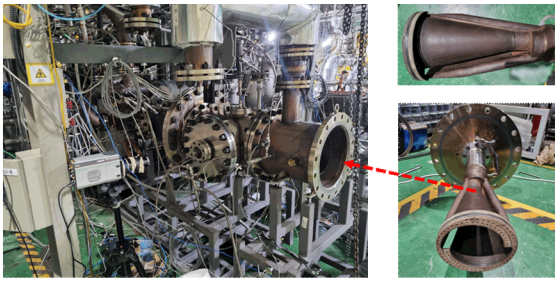


Fig. 1 GT combustion test rig in KIMM (left) and EV burner (right)

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기관 기본사업(project ID: NK254C)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

참고 문헌

[1] 2050 Carbon-neutral Strategy of The Republic of Korea, (2020)

[2] E-.S. Cho, S.H. Chung, and K.Y. Ahn, “Numerical analysis of the extinction and NOx emission in methane/air premixed flame by hydrogen addition”, Trans. Korean Hydro. New Energy Soc., Vol. 1, 2006, pp. 75-81.

[3] E-.S. Cho, S.H. Chung, “Improvement of flame stability and NOx reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion”, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 23(3), 2009, pp. 650-658.

[4] T. Wind, F. Guthe, K. Syed, “Co-Firing of Hydrogen and Natural Gases in Lean Premixed Conventional and Reheat Burners (Alstom GT26)”, 2014, GT2014-25813.

[5] F. Biagioli, F. Guthe, “Effect of pressure and fuel - air unmixedness on NOx emissions from industrial gas turbine burners”, Combust. Flame, Vol. 151, 2007, pp. 274-288.

[6] J. Hwang, W.J. Lee, K. Min, M.K. Kim, H.S. Kim, and D.W. Kang, "NOx Emission Characteristics of Hydrogen and Natural Gas Co-Firing Combustion for EV Burner Fuel Hole Design", J. Korean Soc. Combust, Vol. 29(4), 2024, pp. 119-126.

수소-메탄 연료의 가스 터빈 노즐에서의 예혼합 연소 특성 연구

황하람* · 장원석** · 김성엽* · 김호근*** · 이승로*,**,†

Combustion characteristics of hydrogen-methane premixed flame in gas turbine nozzle

Halam Hwang*, Wonseok Jang**, Seongyeop Kim*, Hokeun Kim***, Seungro Lee*,**,†

ABSTRACT

As global interest in environmental issues increases, carbon-free fuels are attracting growing attention. Hydrogen has been considered a representative carbon-free fuel because it does not emit carbon dioxide during combustion and has a high heating value and rapid diffusivity. In this study, the combustion characteristics of hydrogen - methane fuel in a gas turbine nozzle were investigated through numerical and experimental methods. Hydrogen extended the blowout limits, thereby enhancing the flame stability region.

Key Words : Hydrogen, OH radical visualization, Premixed flame, Flame stability, Gas turbine

전 세계적으로 환경 문제에 대한 관심이 증가하며 이에 따라 환경오염 규제가 강화되고 있다. 산업계에서도 이러한 규제에 맞춰 공해물질 배출량이 적은 저공해 연료에 대한 관심이 높아지고 있다. 산업통상자원부에서는 2019년 수소경제 활성화 로드맵을 통해 수소가스터빈 기술 개발 및 상용화를 수소경제 활성화를 위한 추진전략으로 발표하였으며[1], 국내뿐만 아니라 해외에서도 GE, Siemens 등 대표적인 가스터빈 제작사에서도 수소 터빈 기술 개발에 힘쓰고 있다[2]. 수소연료는 대표적인 무탄소 연료로서 연소 시 탄소 산화물을 배출하지 않으며 단위 질량당 높은 발열량, 높은 확산 속도 등의 특징을 가지고 있다. 또한 수소 연료는 역화 위험성이 높고 연소 시 높은 화염 온도로 인해 많은 질소 산화물을 배출한다는 문제점이 있다. 수소 연료를 사용한 가스터빈 연소기 개발 및 상용화를 위해 이러한 수소의 연소 특성을 고려한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실제 마이크로 믹서 타입 가스터빈 연소기의 단일 노즐을 모사하여 가스터빈 연소기의 연소 특성을 평가하였다. 기존 가스터빈 복합발전에 주로 사용되는 천연가스와 수소 연료의 연소 특성을 비교하기 위해 수소-메탄 혼소 연료의 연소 특성을 평가하였다.

* 전북대학교 기계 항공 전기 융합공학과
** 전북대학교 기계공학과
*** 두산에너빌리티
† 연락저자, seungrol@jbnu.ac.kr
TEL : (063)270-2334 FAX : (036)-270-2315

본 연구에서는 수치해석을 통해 연료에 따른 노즐 내부에서의 유동 및 혼합 특성을 분석하고, Unmixedness, Uniformity index, Non-uniformity index를 사용하여 연료와 산화제의 혼합도를 평가하였다[3].

연료 조건에 따른 연소 특성을 분석하고자 직접 사진, OH-PLIF, 자발광 이미지를 취득하여 화염 형상 및 연소 반응 영역 가시화를 진행하였다. 수소-메탄 혼소율과 예열 공기 온도에 따른 가연 범위를 확인하기 위해 역화 경계와 화염 날림 경계를 측정하였으며, 배기 특성 평가를 위해 NOx, CO 배출량을 측정하였다.

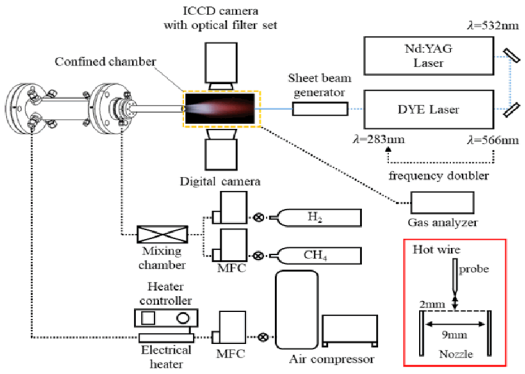


Fig. 1 Schematic diagram of gas turbine nozzle burner and experimental systems

Fig. 1은 본 연구의 실험 개요이다. 화염 형상 가시화를 위해 디지털 카메라(Cannon, EOS-5D Mark II)를 사용하여 직접 사진을 촬영하였다. 수소-메탄 연료의 혼소율에 따른 반응 영역을 가시화하고 비교하고자 PLIF(Planer Laser Induced Fluorescence)기법을 사용하였으며 ICCD(Intensified Charge-Coupled Device) 카메라를 사용하여 OH-PLIF 이미지를 취득하였다. ICCD 카메라는 OH-radical 가시화를 위해 307 nm band-pass filter를 장착하였다. Hot wire 시스템을 사용해 노즐 출구에서의 유속을 측정하였다. 배기가스는 가스 분석기를 이용하여 측정하였으며, 주변 공기 유입 차단을 위해 챔버를 설치하여 측정을 진행하였다.

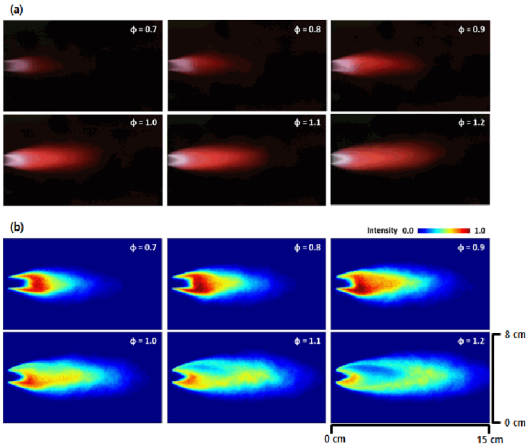


Fig. 2 (a) Direct image, (b) OH-PLIF image of hydrogen flame at 5 kW thermal power

Fig. 2는 열용량 5kW 조건의 수소 화염의 직접 사진과 OH-PLIF 사진이다. 직접 사진을 통해 당량비가 증가함에 따라 내부 예혼합 화염 길이는 줄어들고 외부 확산 화염 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있다. OH-PLIF 사진을 통해 당량비 증가에 따른 화염 반응 영역 길이가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 당량비가 희박 조건일 때는 내부 예혼합 화염 영역에서 강한 강도를 가지는 것과 달리 당량비가 증가함에 따라 직접 사진과 같이 외부 확산 화염 영역에서의 반응 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 상온 조건에서의 수소-메탄 화염의 역화 경계와 날림 경계를 나타낸 화염 안정성 영역 그래프이다. 수소의 비율이 증가할수록 화염 날림이 발생하는 열용량이 증가하였으며, 이와 유사하게 수소 비율이 증가할수록 역화가 발생하는 열용량이 증가하였다. 당량비가 증가할수록 화염 날림 경계와 역화 경계 모두 증가하는 경향을 보

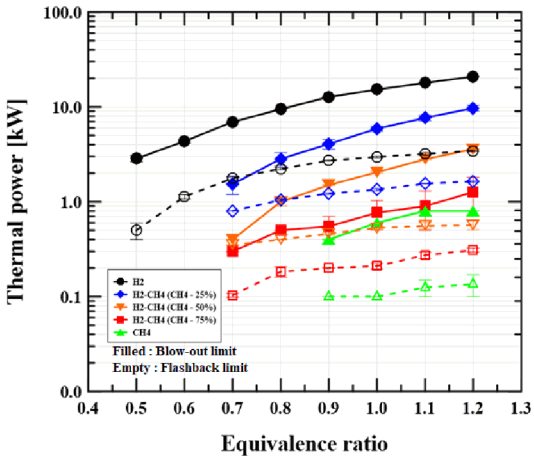


Fig. 3 Stability limits of hydrogen-methane flame

였다. 수소 100% 연료 조건의 경우 당량비 0.5의 희박 조건에서도 점화되었으나 메탄 100% 연료 조건에서는 당량비 0.9 이하 조건에서는 점화되지 않아 수소 전소 조건과 비교하여 더 적은 가연 범위를 가짐을 확인하였다.

본 연구를 통해 가스터빈 연소기에서의 수소-메탄 연료 혼소율에 따른 연소 특성을 규명할 수 있으며, 수소 가스터빈 연소기 개발의 기초 데이터로 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00449309)

참고 문헌

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, Roadmap for Hydrogen Economy, 2019, Republic of Korea.

[2] D. Kim, “Review on the Development Trend of Hydrogen Gas Turbine Combustion Technology”, J. Korean Soc. Combust., 24(2019), pp. 1-10.

[3] L. Y. Jiang, “An Alternative Approach to Evaluate Fuel/Air Mixing Quality”, Aeronautical Journal, 1291, pp. 1469-1483

CH_4-H_2 화염의 NOx 생성 메커니즘 및 배출량 비교

박영준* · 박태준* · 염상윤* · 이창언**†

Comparison of NOx Formation Mechanisms and Emissions in CH_4-H_2 Flames

YoungJoon Park*, TaeJoon Park*, SangYoon Youm*, Chang-Eon Lee**†

기후변화로 인해 수소, 암모니아 등 CO_2 배출이 없는 무탄소 연료가 주목받고 있으며, 무탄소 연료 연소와 관련된 연구가 진행되고 있다[1, 2, 3]. 본 연구진은 수소 연소기 개발을 최종 목적으로 하며, 우선적으로 이에 활용할 수 있는 적합한 수치해석 모델을 개발하고, 이 모델을 이용해 수소 화염의 특성을 파악하고자 한다.

Fig. 1은 실험으로부터 얻어진 메탄 및 수소의 NOx를 연료 유량 및 당량비에 따라 나타낸 것이다. 그림의 NOx는 0% O_2를 기준으로 환산하여 나타내었다. 우선 연료별 NOx 배출량 특징을 살펴보면, 예혼합 조건인 당량비 1 근방에서는 메탄과 수소의 NOx 배출량이 큰 차이가 없으나, 확산화염 조건에 가까워질수록 수소 화염의 NOx 배출량이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

메탄과 수소 연료 모두 유량에 따른 정량적인 NOx 배출량의 차이는 있으나, NOx 배출량 경향성은 동일하여 각 연료의 경향성은 연료 유량과 무관하게 비교할 수 있음을 알 수 있다.

메탄(blank symbol)의 NOx를 보면, 당량비 1에서부터 당량비가 무한대인 확산화염까지 NOx 배출량이 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. 메탄 연료의 주요 특징을 보면 당량비 1 ~ 2 구간에서 NOx 배출량이 증가하였다가 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 이 현상은 메탄의 모든 유량 조건에서 관찰되었으며 이는 메탄 연료의 주요 NOx 특징으로 판단된다. 반면 수소(solid symbol)의 NOx를 보면, 당량비 1에서 당량비 4까지 NOx가 크게 증가하며, 이후 점차 증가 폭이 작아져 수렴하는 형태로 나타난다. 유량 조건에 따른 수소의 NOx 배출량은 당량비 4까지는 거의 일정하게 나타났으며, 당량비가 4를 초과하는 조건에서 NOx 배출량의 차이가 두드러졌다. 메탄과 수소 연료의 NOx를 비교해보면, 당량비가 1.5 이하인 영역에서는 두 연료의 NOx 배출량의 차이가 미미하지만, 농후한 조건으로 갈수록 수소 연료의 NOx가 메탄 연료에 비해 크게 증가하는 특징을 가지는 것을 확인할 수 있다.

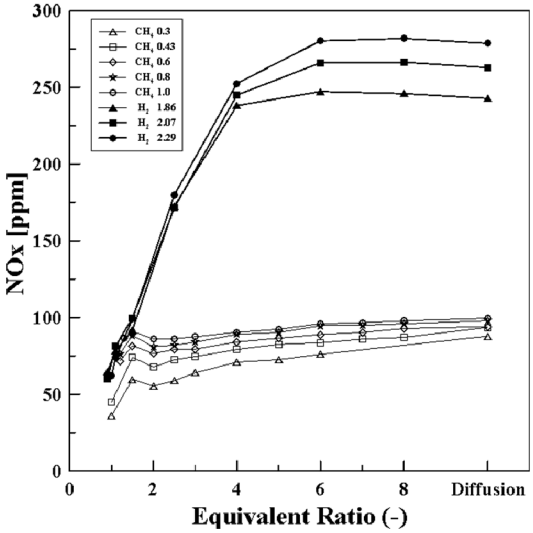


Fig. 1 Experimental NOx emissions corresponding to equivalence ratio of CH4 and H2 flames at different flow rates.

메탄 및 수소의 NOx 배출량은 모두 연료 유량이 증가할수록 증가하는 형태를 보였으며, 이는 화염의 크기가 커져 NOx가 생성되는 고온 영역이 확장되기 때문으로 판단된다.

Fig. 2는 메탄의 NOx 배출량 해석에 적합한 반응기구를 선정하기 위해 동일한 실험결과를 대상으로 GRI 2.11과 GRI 3.0 Reaction Mechanism을 사용하여 계산한 결과를 비교한 것이다. 실험을 통해 얻어진 메탄의 NOx는 (O) Symbol로 나타내었으며, GRI2.11은 (●) Symbol(파랑), GRI3.0은 (▲) Symbol(빨강)으로 나타내었다. 본 그림의 Total NOx는 실선으로, Thermal NOx는 점선으로 나타내었다. 예측된 Total NOx(실선)를 살펴보면, 수치해석을 통해 예측된 NOx는 모두 실험 값보다 크게 예측되었으나, 주요 메탄의 경향은 잘 예측하는 것으로 판단된다. 즉, 당량비 1 ~ 2 사이에서 NOx 배출량이 증가하였다가 감

* 인하대학교 기계공학과 대학원
** 인하대학교 기계기술공동연구소
† 연락저자, chelee@inha.ac.kr
TEL : (032)-860-7323 FAX : (032)-868-1716

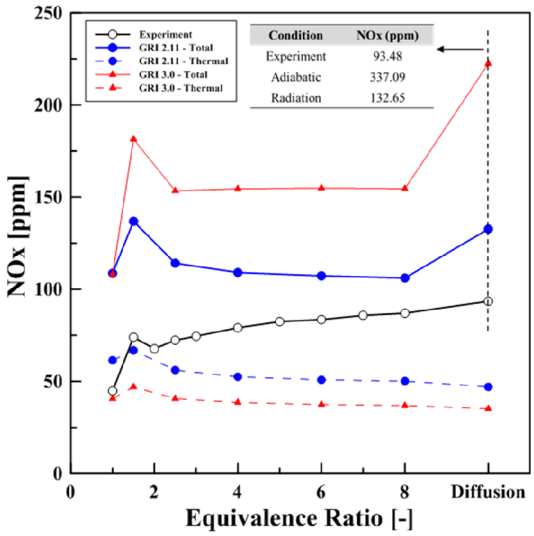


Fig. 2 Comparison of experimental and Numerical NOx of CH_4 using GRI2.11 and GRI3.0 reaction mechanism.

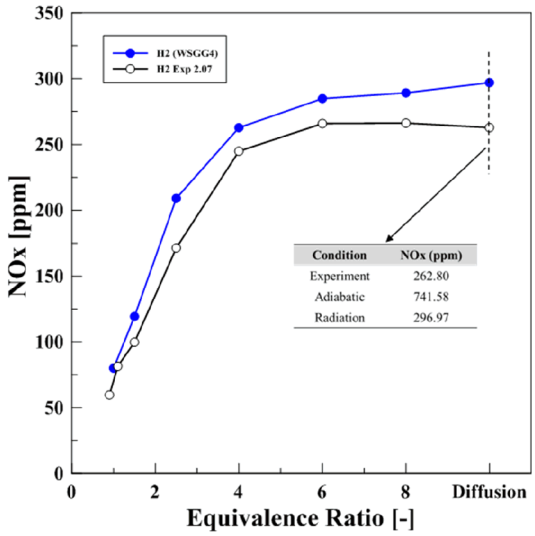


Fig. 3 Comparison of experimental and Numerical NOx of H_2 using Li et al. reaction mechanism.

소하는 특징과 이 영역을 제외한 농후한 영역에서의 완만한 NOx 배출량 특성도 잘 예측하였다고 판단된다. 확산 화염에서 Total NOx가 높게 예측된 것은 당량비 해석 조건이 8에서 무한대로의 급격한 변화에서 기인한 것으로 생각된다. Total NOx(실선)는 GRI3.0을 사용한 것이 GRI2.11을 사용한 것보다 매우 높게 예측되었으며, Thermal NOx(점선)는 GRI3.0을 사용한 것이 GRI2.11을 사용한 것보다 약간 낮게 예측되었다. 앞의 내용을 통해 Prompt NOx(Total NOx - Thermal NOx)는 GRI3.0을 사용한 것이 GRI2.1을 사용한 것에 비해 현저히 높게 예측되는 것을 알 수 있다. 본 연구진은 정량적으로 일치도가 높은 GRI2.11을 채택하여 메탄-수소 연소 특성을 분석할 계획이다.

Fig. 3은 실험을 통해 얻어진 수소의 NOx 배출량과 수치 해석을 통해 예측한 수소의 NOx 배출량을 비교 도시한 것이다. 수치해석에는 Li et al.의 반응 메커니즘을 사용하였다. 실험을 통해 얻어진 수소의 NOx는 (○) Symbol로 나타내었으며, 수치해석을 통해 예측한 수소의 NOx는 (●) Symbol로 나타내었다. 본 해석은 Total NOx만을 대상으로 수행하였다. 수치해석을 통해 얻어진 수소 연료의 NOx는 정량적, 정성적으로 모두 실험의 값을 매우 근사하게 잘 예측되었으며, 당량비 4까지 NOx가 크게 증가하고, 이후 점차 수렴하는 형태의 경향도 잘 예측되었다.

본 연구진은 위의 수치해석 모델을 이용하여 메탄과 수소 화염의 특성을 정성적 및 정량적으로 분석하고, 도출한 결론들을 저 NOx 수소 연소기 개발에 활용할 예정이다.

후 기

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.(23-CM-ER-04)

참고 문헌

[1] J. Li, S. Lai, D. Chen, R. Wu, N. Kobayashi, L. Deng, H. Huang, "A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel", Front. Energy Res. 2021, 9:760356.

[2] J. Runyon, I. Psomoglou, R. Kahraman, A. Jones, "Additive Manufacture and the Gas Turbine Combustor: Challenges and Opportunities to Enable Low-Carbon Fuel Flexibility", Presented at: 10th International Gas Turbine Conference, Brussels, Belgium, October 11-15, 2021.

[3] M. Zhang, X. Wei, Z. An, E.C. Okafor, T.F. Guiberti, J. Wang, Z. Huang, "Flame stabilization and emission characteristics of ammonia combustion in lab-scale gas turbine combustors: Recent progress and prospects", Prog. Energy Combust. Sci. 2025, 106, 101193.

해상 연료를 위한 수소의 생산, 운송 경로에 따른 Well-to-Tank 비용 및 배출량 평가: Ro-Pax 및 LH2 캐리어 사례 연구

유예진*.문세인*.김홍민*.Anna Lena Keil*.송한호*†

A Well-to-Tank Assessment of Hydrogen Pathways for Marine Fuel Applications: A Case Study on Ro-Pax and LH2 Vessels

Yejin Yu*.Sein Moon*.Hongmin Kim*.Anna Lena Keil*.Hanho Song*†

ABSTRACT

This study evaluates the Well-to-Tank (WTT) cost and greenhouse gas (GHG) emissions of various hydrogen supply chains for a Ro-Pax ferry and LH2 vessels. A comprehensive analysis tool was developed to assess different pathways, including domestic (Korean) and overseas production (e.g., Australia, Saudi Arabia), using methods like SMR, ATR, and electrolysis. Key transport scenarios involving liquid hydrogen (LH2) and ammonia (NH3) carriers were compared. Results indicate that overseas production is significantly more cost-effective, primarily due to lower renewable energy and natural gas prices abroad.

Key Words : Hydrogen, Well-to-Tank (WTT), Life Cycle Assessment (LCA), Marine Fuel, Ammonia Carrier

국제해사기구(IMO)는 2050년 국제 해운의 Net-Zero 달성을 위해 연료전주기 (Well-to-Wake, WTW) 기반의 온실가스 연료 집약도 (Greenhouse Gas Fuel Intensity, GFI) 규제를 도입했다. 이에 차세대 선박 연료로 수소 또한 주목받기 시작하였는데, 수소엔진 및 수소연료전지를 활용 시 직접적인 탄소 배출이 없어 TTW (Tank-to-Wake) 배출량이 타 동력원 대비 낮을 것으로 기대되기 때문이다. 그러나 수소는 낮은 부피 에너지 밀도의 단점을 극복하기 위해 에너지 집약적인 액화/압축 과정이 필수적이므로, WTT(Well-to-Tank) 단계에서 타 연료 대비 높은 비용 상승과 온실가스 배출을 야기한다. 따라서 본 연구는 Ro-Pax 선박 및 LH2 vessel을 대상으로 다양한 수소 공급 경로에 대한 WTT 비용 및 온실가스 배출량을 평가하고, 경제적, 환경적으로 최적화된 공급망을 분석한다.

분석을 위해 자체 개발한 평가 툴을 사용하였으며, 이를 통해 생산 방식(SMR, ATR, 수전해), 생산 국가(한국, 호주, 사우디아라비아 등), 수소 캐리어(액화수소, 암모니아) 및 국내외 T&D 시나리오에 따른 WTT 비용과 GHG 배출량을 산출하였다. 분석에 활용된 시나리오는 Fig 1. 와 table 1. 에서 확인할 수 있다.

* 서울대학교 기계공학과
† 연락저자, hhsong@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1652 FAX : (02)880-1652

분석을 위해 자체 개발한 평가 툴을 사용하였으며, 이를 통해 생산 방식(SMR, ATR, 수전해), 생산 국가(한국, 호주, 사우디아라비아 등), 수소 캐리어(액화수소, 암모니아) 및 국내외 T&D 시나리오에 따른 WTT 비용과 GHG 배출량을 산출하였다.

분석 결과, 수소 운송 방식에서는 액화수소(LH2)의 경우 액화 과정에서 막대한 양의 전력이 소모되어, 그리드 전력을 사용할 경우 T&D 단계의 GHG 배출량이 약 40 gCO2e/MJ까지 증가하는 주요인으로 작용하였다. 암모니아를 수소 캐리어로 사용할 경우, 분해(cracking) 시 외부 연료 대신 암모니아 자체를 열원으로 활용하면 GHG 배출량을 10~20 gCO2e/MJ 가량 줄일 수 있었으나, 최종 수소 비용은 약 $0.02/MJ 증가하는 트레이드오프 관계가 존재했다.

결론적으로, 액화수소 경로는 액화 공정의 전력원에 따라 GHG 배출량이 크게 좌우되므로, 저탄소 전력원의 확보가 핵심이다. 암모니아 경로는 운송 및 분해 과정에서의 비용과 GHG 배출량 간의 상충 관계를 고려한 최적화 전략이 필요하다. 본 연구 결과는 향후 국내 수소 기반 친환경 해운 연료 공급망 구축을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

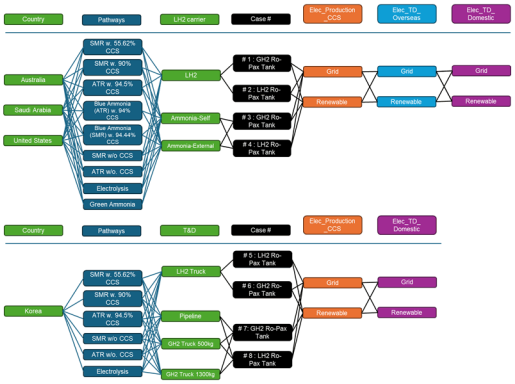


Fig. 1 (Above) Overseas production pathways, (Below) domestic production pathways

Table 1 T&D scenarios

1	Oversea Production + LH2 Carrier + GH2 Ro-Pax Tank
2	Oversea Production +LH2 Carrier + LH2 Ro-Pax Tank
3	Oversea Production +NH3 Carrier + GH2 Ro-Pax Tank
4	Oversea Production +NH3 Carrier + LH2 Ro-Pax Tank
5	Domestic Production + Liquefaction + LH2 Truck + LH2 Ro-Pax Tank
6	Domestic Production + Liquefaction + LH2 Truck + GH2 Ro-Pax Tank
7	Domestic Production + GH2 Pipeline/Truck + GH2 Ro-Pax Tank
8	Domestic Production + GH2 Pipeline/Truck + Liquefaction + LH2 Ro-Pax Tank

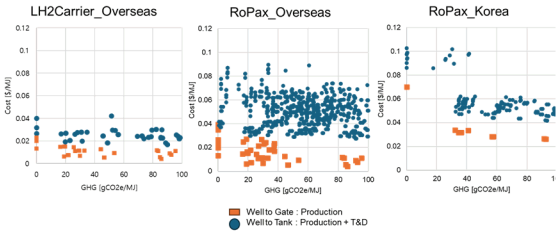


Fig. 2 Costs and GHG results of overseas and domestic cases of Ro-pax and LH2 vessels

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “글로벌산업기술협력센터 사업으로 수행된 연구 결과입니다(연구개발과제번호 P0028457).

참고 문헌

[1] Shin, W. J., Lee, Y., Yu, Y., Ko, M., Lee, C., & Song, H. H. (2023). Comparative life cycle greenhouse gas analysis of clean hydrogen pathways: Assessing domestic production and overseas import in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, *425*, 138907.

[2] International Energy Agency. (2021). *Ammonia technology roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizer production*. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap

[3] International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen: Assumptions*. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen

스파크 간극에 따른 암모니아/공기 점화 특성

박순호[*,**], 차민석[*,***†]

Ignition Characteristics of Ammonia/Air Mixtures with Varying Spark Gap

Sun Ho Park[*,**], Min Suk Cha[*,***†]

[*]Clean Energy Research Platform, Physical Science and Engineering (PSE) Division, King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Thuwal, 23955-6900, Saudi Arabia
[**]Department of Carbon-free Power generation, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), Daejeon, 34103, South Korea
[***]Department of Energy Engineering, Korea Institute of Energy Technology (KENTECH), Naju, 58326, South Korea
†연락저자, minsuk.cha@kentech.ac.kr

산업혁명 이후 화석연료의 연소는 인류 사회의 비약적인 발전을 이끌어왔으나, 그에 따른 이산화탄소 배출 증가는 지구온난화와 기후변화를 심화시켜 왔다. 이에 따라 전 세계적으로 2050 탄소중립 실현을 목표로 배출 규제 강화와 탄소가격제 도입이 추진되고 있으며, 이를 대응하기 위한 대체 에너지 운반체의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

대표적인 무탄소 연료로는 수소, 암모니아(NH_3), 바이오매스, e-fuel 등이 있으며, 이 중 암모니아는 높은 수소 저장 밀도와 용이한 액화 특성으로 인해 저장 및 운송 측면에서 우수한 장점을 지닌다 [1]. 암모니아는 주로 수소 운반체로 연구되어 왔으나, 직접 연소를 활용할 경우 개질 과정 없이 탄소 배출이 전혀 없는 연소가 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 그러나 높은 옥탄가(~130)로 인해 자발 착화성이 낮고 점화 지연이 길어, 기존의 스파크 점화 방식만으로는 안정적인 연소 확보가 어렵다 [2]. 따라서 암모니아 연소의 실용화를 위해서는 향상된 점화 기술의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 pin-to-pin 전극 구성을 기반으로 한 실험을 통해, 스파크 간극 변화가 암모니아/공기 혼합기의 점화 특성에 미치는 영향을 규명하였다. 특히 희박연소 조건에서 스파크 간극에 따른 점화 한계 확장과 초기 화염 성장에 미치는 효과를 분석하였다.

Fig.1 은 Constant-volume combustion chamber, pin-to-pin electrode, high-voltage 시스템, 측정 시스템으로 구성된 실험장치 개략도이다. CVCC 전면에는 직경 120 mm의 석영창을 설치하였으며, 좌우면에 핀 형태의 전극을 삽입하여 pin-to-pin 구성을 형성하였다. 전극사이 간격 (d)은 1–10 mm 범위에서 변화하였다. CVCC 챔버에는 암모니아/공기 주입 및 배기용 포트, 압력 측정을 위한 포트가 각각 2개씩 설치되었다.

고전압 전원장치(Trek 40/15)는 함수발생기(Keysight 33600A)의 펄스 신호로 구동되었으며, 좌측 전극에 인가되고 우측 전극은 접지하였다. 점화에너지는 100 mJ을 선택하였다. 이를 기준으로 d 가 변화됨에 따라 전압 펄스 지속시간(t_p)을 조절하여 점화에너지를 일정하게 유지하였다. 인가된 전압과 전류는 고전압 프로브와(Tektronix, 6015A) 전류 프로브 (Tektronix, TCPA300)를 이용해 오실로스코프로 계측하였으며, 절대압력 센서 (Keller, PAA-33X/80794)를 통해 암모니아/공기의 partial pressure를 측정하였다.

압력은 1 atm으로 설정하였으며, 주입 후 15분간 안정화한 뒤 점화를 실시하였다. 각 실험 후 잔류 가스를 제거하기 위해 0.1 atm까지 감압 후 3.5 atm까지 공기를 주입하는 퍼징 과정을 두 차례 반복하였다. 희박연소 한계는 당량비(ϕ)를 0.9에서 시작하여 0.01씩 감소시키며 결정하였다. 점화 및 점화 커널의 거동은 고속카메라(Photron FASTCAM SA4)로 촬영하였으며, 딜레이 발생기(Stanford DG535)를 이용해 점화 시점과 동기화하였다.

Fig. 2는 전극사이 간격에 따른 점화한계를 점화에너지가 100 mJ인 경우에 나타낸 것이다. 전극사이 간격이 2 mm인 경우 ϕ = 0.87로 테스트한 전극사이 간격 중 가장 높은 것을 알 수 있다. 전극사이 간격이 4 mm 에서는 ϕ = 0.66, 6 mm 에서는 ϕ = 0.62까지 점화한계가 확장되는 것을 알 수 있다. 전극 사이 간격이 6 mm 보다 높은 경우에는 전극사이 간격에 따라 점화한계 확장이 미미한 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 전극사이 간격이 2와 10 mm인 경우에

화염이 점화 된 후 전파하는 형상을 t = 0, 4, 64, 128 ms 인 경우에 초고속카메라를 통해 촬영한 그림이다. 그림에서 보는 것처럼 두 경우 모두 점화가 성공적으로 이루어 졌으며, 전극 사이 간격이 10 mm인 경우가 2 mm인 경우에 비해 초기 점화 커널의 크기가 큰 것을 알 수 있다. 또한, t = 128 ms 인 경우에 전극사이 간격이 10 mm인 경우가 2 mm인 경우보다 화염의 크기가 큰 것을 알 수 있다.

이를 통해, 전극사이 간격이 증가할수록 점화 한계 확장이 가능할 뿐만 아니라 초기 화염 성장이 가속화 되는 것을 알 수 있다.

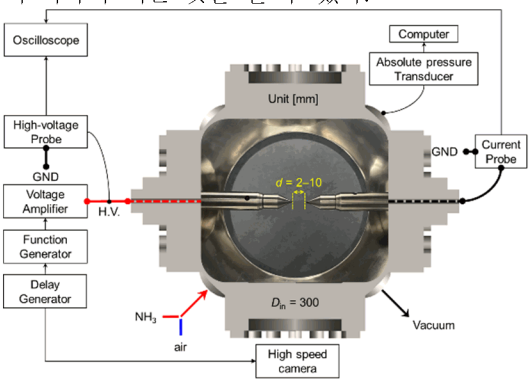


Fig. 1 Schematics of experimental setup.

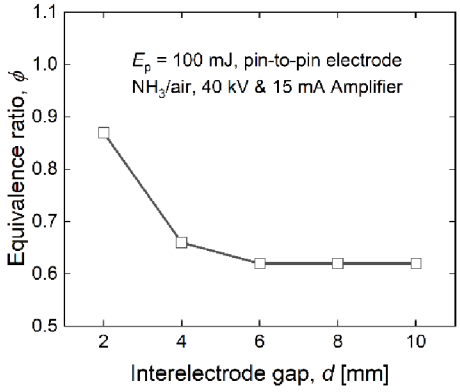


Fig. 2 Domain of burning state, equivalence ratio in terms of interelectrode gap

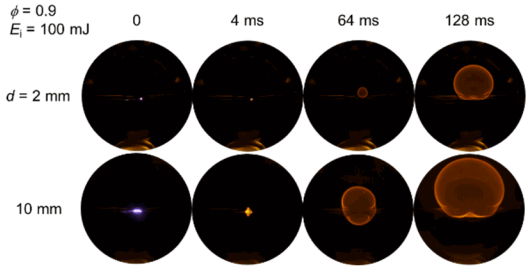


Fig. 3 Flame evolution for d = 2 and 10 mm at ϕ = 0.9 and E_p = 100 mJ.

후 기

The research was supported by funding from King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), under Award Number BAS/1/1384-01-01. M.S.C was partly supported by Korea Institute of Energy Technology.

참고 문헌

[1]H. Kobayashi, A. Hayakawa, K.K.A. Somarathne, E.C. Okafor, Science and technology of ammonia combustion, Proc. Combust. Inst. 37 (2019) 109–133.

[2]A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I. David, P.J. Bowen, Ammonia for power, Prog. Energy Combust. Sci. 69 (2018) 63–102.

플라즈마 기반 메탄 변환에서 CH/CH3 라디칼의 PF-PLIF 측정

박진*, Aswath Mohanan**, Sebastian Nilsson***, Jonas Ravelid***, Andreas Ehn***, 차민석*†

PF-PLIF measurement of CH/CH_3 radicals in plasma-induced methane conversion

Jin Park*, Aswath Mohanan**, Sebastian Nilsson***, Jonas Ravelid***, Andreas Ehn***, Min Suk Cha*†

메탄(CH_4)은 천연가스의 주요 성분으로, 전통적으로 열개질 공정을 통해 수소(H_2)를 생산하는 원료로 활용되어 왔다. 최근에는 플라즈마 공정이 에너지 효율성과 선택성이 우수한 대안으로 주목받고 있으며, 수소뿐만 아니라 일산화탄소(CO), 에틸렌(C_2H_4), 아세틸렌(C_2H_2) 등 다양한 유용 부산물을 생성할 수 있다 [1-3] 플라즈마 기반 메탄 개질 반응은 전자 충돌에 의한 CH_4 분해로 시작되며, 생성된 메틸(CH_3)과 메틸리딘(CH) 라디칼이 수소 생성 경로를 지배한다. CH_3 라디칼은 H 라디칼 및 H_2 형성에 직접적으로 기여하고, CH 라디칼은 반응 연쇄를 촉진하여 전체 수소 수율에 영향을 준다. 본 연구에서는 유전체 장벽 방전 (DBD) 플라즈마의 마이크로방전 내에서 Photo-fragmentation Planar Laser Induced-Fluorescence (PF-PLIF) 기법을 이용해 CH 및 CH_3 라디칼의 거동을 시각화 하였으며 [4], 희석가스로 사용된 Ar과 N_2의 비교를 통해 희석가스 영향을 분석하였다. 또한 0차원 키네틱 모델링을 수행하여 CH/CH_3 라디칼의, CH_4 초기 농도 변화에 따른 라디칼 생성 및 소멸 특성을 규명하였다.

본 실험에서는 pin-to-line 형태의 전극을 갖는 DBD 반응기를 사용하였다 [5]. PF-PLIF 실험 장치의 세부 사항은 그림 1에 나타내었다. 자세한 실험 방법과 후처리 방법은 우리의 이전 논문에서 자세히 소개되었다 [4].

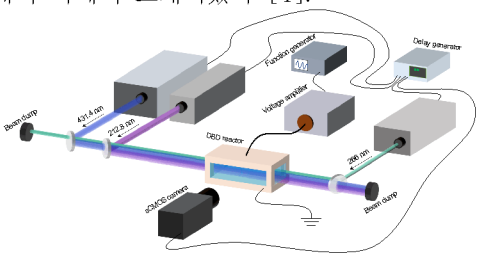


Fig. 1 Experimental setup of PF-PLIF measurement.

0D 시뮬레이션에 활용된 플라즈마 화학 메커니즘은 77종과 944개 반응으로 구성되었다. CH_4의 전자 충돌 해리에 대한 cross-section은 Janev와 Reiter가 제시한 방법으로 얻어졌고 [6A], CH_4의 이온화 cross-section은 Straub 등의 연구를 참조하였다 [6]. CH_4의 진동 여기 cross-section에 대한 데이터는 IST-Lisbon 데이터베이스에서 얻었으며 [7], CH_3, CH_2 및 CH와 관련된 반응에 대한 전자 충격 단면적은 Janev 등의 연구를 참조하였다 [8, 9]. N_2에 대한 전자 충돌 단면적은 Phleps 데이터베이스를 참조하였다 [10]. 해당 데이터베이스에느 진동-병진(VT) 완화, 진동-진동(VV) 교환 반응 및 진동으로 여기된 질소와 관련된 추출 반응과 같은 필수 프로세스가 포함되어있다. 여기된 N_2와 CH_4가 포함되는 반응의 반응 계수느 Uddi et al. [11] 및 Pintassilgo et al. [12]의 연구를 참조하였으며, CH_3, CH_2 및 CH가 관련된 반응은 Legrand et al. [13] 의 연구 결과를 차용하였다. Argon의 전자 충돌 cross-section, 이온화 반응 및 여기, 해리 반응에 대한 정보 또한 이전 연구에서 차용되었다 [14-25]. 시뮬레이션에 활용된 소프트웨어는 KAUST에서 개발한 플라즈마 케미스트리 솔버인 KAUSTKin을 활용하였다 [26].

그림 2는 PF-PLIF 측정을 통해 얻어진 방전 영역에서 CH 및 CH_3 라디칼의 공간 분포를 보여준다. 각 이미지는 50장의 방전에 대해 평균화되었다. 그림 2에서 제시된 PLIF 신호는 정량적으로 보정되지 않았기 때문에 CH_3와 CH 간의 직접적인 비교는 불가능하다. CH와 CH_3 라디칼의 공간적 분포에서 몇 가지 특징이 관찰되었다; 1) CH_3 및 CH 라디칼은 방전을 따라 분포한다, 2) CH_3 및 CH 농도는 모두 상부 전극 근처에서 가장 높고 이미지의 하단 (방전 전파 방향)으로 갈수록 점차 감소한다, 3) 전반적으로 CH_3와 CH 농도는 Ar과 희석된 경우에 비해 N_2와 희석된 경우에 상당히 약해진다, 4) N_2 희석의 경우, CH_3와 CH 라디칼의 분포는 상부 전극과 매우 가까운 지역에서만 관찰된다.

* 한국에너지공과대학
** King Abdullah University of Science and Technology
*** Lund University
† 연락저자, minsuk.cha@kentech.ac.kr

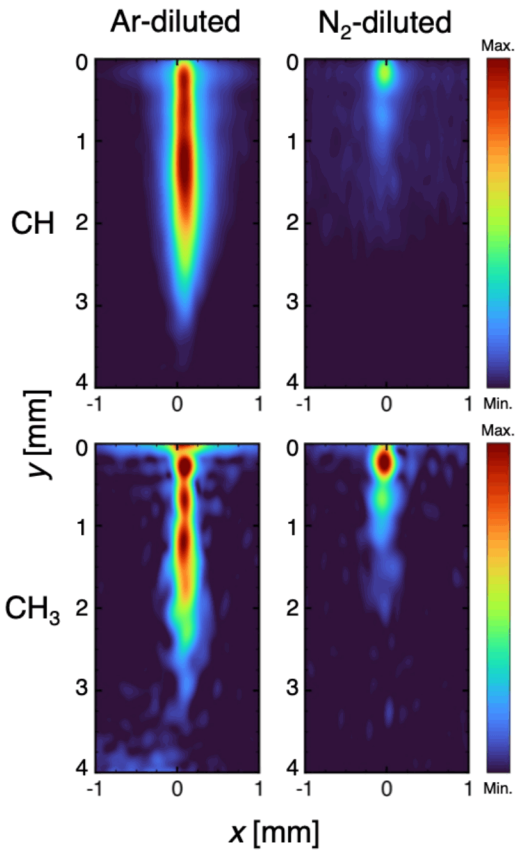


Fig. 2 PF-LIF images of CH_4/Ar mixture and CH_4/N_2 mixture, both with initial methane concentration of 5 vol%.

우리는 레이저 딜레이 타임을 바꾸어 가며 CH와 CH_3 라디칼의 시간에 따른 감쇠를 측정하였다. 그리고 이를 0D 시뮬레이션 결과와 비교하여 그림 3에 나타내었다. Ar 희석 혼합물(그림 3a)의 경우, CH_3의 감쇠 프로파일은 E/N = 50 Td에서의 시뮬레이션 결과로 잘 예측되었다. 마찬가지로, E/N = 100 Td에서의 시뮬레이션 결과는 N_2 희석 혼합물(그림 3b)에서의 실험적 CH_3의 감쇠 경향을 잘 예측하였다. 해당 전기장 강도는 QV plot으로 측정된 전기장 강도와 합리적으로 일치하였다.

두 희석가스에서 E/N의 라디칼 감쇠 경향에 대한 민감도에서 눈에 띄는 차이는 H 및 CH_3 라디칼을 생성하는 전자 및 준안정 반응에서 E/N의 역할 때문일 수 있다. CH_3는 주로 H와 재결합 하여 CH_4를 형성하는 반응과 두 개의 CH_3가 결합하여 C_2H_6를 형성하는 반응에 소비됩니다. 따라서, H 및 CH_3 라디칼의 농도가 CH3의 감쇠 속도를 결정한다. Ar 희석 혼합물의 경우, E/N 증가는 H 생성 증가를 초래하지만 CH_3 생성은 감소시킨다 (그림 4a 및 4b). E/N 증가에 따른 H 증가와 CH_3 감소 사이의 이러한 상충 효과는 그림 3a에 나타난 바와 같이 붕괴 추세의 변화를 어느 정도 최소화한다. 한편, E/N 증가는 N_2 희석 혼합물에서 H와 CH_3 생성을 모두 증가시켜 (그림 4c 및 4d) 그림 3b에 나타난 추세에서 상당한 변화를 초래한다.

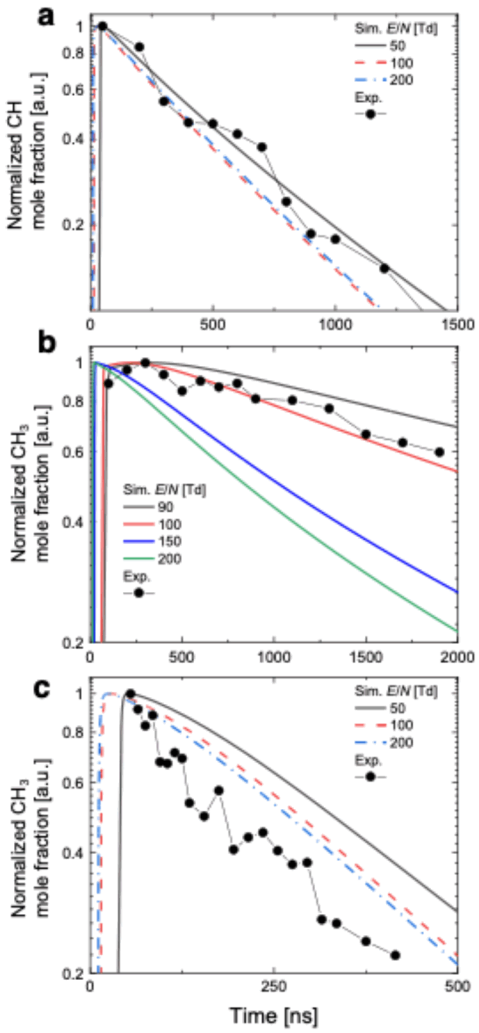


Fig. 3 Temporal evolution of CH and CH_3 radicals in post-discharge phase with E/N range of 50–200 Td; (a) Normalized CH_3 mole fraction in Ar-diluted mixture, (b) Normalized CH_3 mole fraction in N2-diluted mixture, and (c) Normalized CH mole fraction in Ar-diluted mixture

그러나 Ar 희석 혼합물에 대한 E/N = 50 Td 시뮬레이션은 그림 3c에 나타난 바와 같이 실험

적인 CH 감쇠 속도를 다소 과소 예측한다. 두 가지 주요 CH 소비 반응은 CH_4와 반응하여 C_2H_4를 생성하는 반응과 C_2H_4와 반응하여 C_3H_4를 생성하는 반응임을 고려하면, CH의 이러한 느린 감쇠는 시뮬레이션이 CH 생성을 과소 예측함을 시사한다. 따라서 Ar*에 의한 CH 생성 반응의 반응 속도 계수의 개선이 필요할 것으로 보여진다.

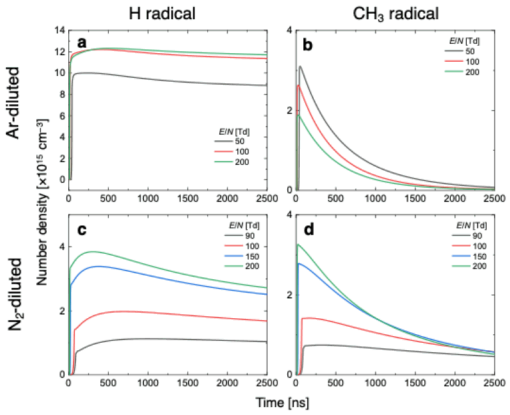


Fig. 4 Simulated temporal evolution of H and CH_3 radicals with various *E/N*: (a) H radical, and (b) CH_3 radical in Ar-diluted mixtures at initial methane concentration of 5 vol%; (c) H radical, and (d) CH_3 radical in N_2-diluted mixtures at initial methane concentration of 5 vol%.

후 기

본 연구는 Royal Physiographic Society of Lund and funding from LASERLAB-EUROPE (grant agreement no. 871124), U-projects HYFLEXPOWER (Project No. 884229), the ERC-project LAPLAS (Project No. 852394), KAUST (Award Number BAS/1/1384-01-01), KENTCH (20250000A4)의 지원 하에 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] H. F. Abbas and W. W. Daud, "Hydrogen production by methane decomposition: A review," International journal of hydrogen energy, vol. 35, 2010, pp. 1160–1190.

[2] T. Keipi, H. Tolvanen, and J. Konttinen, "Economic analysis of hydrogen production by methane thermal decomposition: Comparison to competing technologies," Energy Conversion and Management, vol. 159, 2018, pp. 264–273.

[3] S. R. Patlolla, K. Katsu, A. Sharafian, K. Wei, O. E. Herrera, and W. Mérida, "A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 181, 2024, p. 113323.

[4] S. Nilsson, J. Ravelid, J. Park, M. S. Cha, and A. Ehn, "Photofragmentation laser-induced fluorescence imaging of CH3 by structured illumination in a plasma discharge," Optics Express, vol. 32, 2024, pp. 26492–26499.

[5] J. Park and M. S. Cha, "Successive multi-microdischarges occurring in pin-to-line geometry of dielectric barrier discharge," Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 43, 2023, pp. 1435–1452.

[6] H. C. Straub, D. Lin, B. G. Lindsay, K. A. Smith, and R. F. Stebbings, "Absolute partial cross sections for electron-impact ionization of CH4 from threshold to 1000 eV," The Journal of Chemical Physics, vol. 106, 1997, pp. 4430–4435,

[7] IST-Lisbon database, www.lxcat.net, retrieved on November 12, 2024.

[8] R. K. Janev, I. Murakami, T. Kato, and J. G. Wang, "Cross sections and rate coefficients for electron-impact ionization of hydrocarbon molecules," Technical Report, Toki, Gifu, Japan, Oct. 2001, [Online]. Available: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20234432

[9] R. K. Janev and D. Reiter, "Collision processes of hydrocarbon species in hydrogen plasmas. part 1. the methane family," ChemInform, vol. 34, 2003.

[10] Phelps database, www.lxcat.net, retrieved on November 12, 2024.

[11] M. Uddi, N. Jiang, I. V. Adamovich, and W. R. Lempert, "Nitric oxide density measurements in air and air/fuel nanosecond pulse discharges by laser induced fluorescence," Journal of Physics D Applied Physics, vol. 42, 2009, p. 075205.

[12] C. D. Pintassilgo, C. Jaoul, J. Loureiro, T. Belmonte, and T. Czerwiec, "Kinetic modelling of a N2 flowing microwave discharge with ch4addition in the post-discharge for nitrocarburizing treatments," Journal of Physics

D: Applied Physics, vol. 40, 2007, pp. 3620–3632,

[13] J.-C. Legrand, A.-M. Diamy, R. Hrach, V. Hrachová, and reactib, "Kinetics of reactions in ch4/n2 afterglow plasma : A simplified model," Vacuum, vol. 50, 1998, pp. 491–495.

[14] Biagi-v7.1 (Magboltz version 7.1) database, www.lxcat.net, retrieved on November 12, 2024.

[15] H. A. Hyman, "Electron-impact ionization cross sections for excited states of the rare gases (Ne, AR, kr, Xe), Cadmium, and Mercury," Physical Review A, vol. 20, 1979, pp. 855–859.

[16] Y. P. Raizer, Gas discharge physics, 1991.

[17] N. A. Dyatko et al., "Experimental and theoretical study of the transition between diffuse and contracted forms of the glow discharge in Argon," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 41, 2008, p. 055204.

[18] J. Jonkers et al., "The role of molecular rare gas ions in plasmas operated at atmospheric pressure," Plasma Sources Science and Technology, vol. 12, 2003, pp. 464–474.

[19] A. J. Cunningham, T. F. O'Malley, and R. M. Hobson, "On the role of vibrational excitation in dissociative recombination," Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics, vol. 14, 1981, pp. 773–782.

[20] E. Castaños Martinez, Y. Kabouzi, K. Makasheva, and M. Moisan, "Modeling of microwave-sustained plasmas at atmospheric pressure with application to discharge contraction," Physical Review E, vol. 70, 2004, p.066405 .

[21] F. Kannari, A. Suda, M. Obara, and T. Fujioka, "Theoretical simulation of electron-beam-excited xenon-chloride (XeCl) lasers," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 19, 1983, pp. 1587–1600.

[22] A. Bultel, B. van Ootegem, A. Bourdon, and P. Vervisch, "Influence of Ar2+ in argon collisional–radiative model," Physical Review E, vol. 65, 2002, p.046406.

[23] J. Gregório, P. Leprince, C. Boisse-Laporte, and L. L. Alves, "Self-consistent modelling of atmospheric micro-plasmas produced by a microwave source," Plasma Sources Science and Technology, vol. 21, 2012, p. 015013.

[24] S. K. Lam, C.-E. Zheng, D. Lo, A. Dem'yanov, and A. P. Napartovich, "Kinetics of ar*2in high-pressure pure argon," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 33, 2000, pp. 242–251.

[25] R. Snoeckx, D. Jun, B. J. Lee, and M. S. Cha, "Kinetic study of plasma assisted oxidation of H2 for an undiluted lean mixture," Combustion and Flame, 2022, p. 112205.

극초음속 비행체용 재생냉각 미세채널 설계를 위한 1차원 비정상 해석 코드 개발 및 검증

이승현* · 이형주**†

Development and Validation of a One-Dimensional Unsteady Analysis Code for the Design of a Regenerative Cooling Channel in Hypersonic Vehicles

Seung Hyeon Lee*, Hyung Ju Lee**†

ABSTRACT

A numerical study was conducted on the unsteady heat transfer and endothermic decomposition of n-decane in regenerative cooling channels for hypersonic vehicles. The governing equations were solved with a finite volume-based semi-implicit scheme. The predicted temperature, conversion rate, and heat absorption showed good agreement with experimental data, confirming the validity of the numerical model. The developed code is expected to be useful for the design and analysis of regenerative cooling systems in hypersonic flight environments.

Key Words : Scramjet Engine, Hydrocarbon Fuel, Endothermic Decomposition

능동재생냉각시스템은 극초음속 비행체의 동체와 스크램제트 엔진 연소실의 고온 가열 문제를 해결하기 위한 핵심 열관리 기술로, 탑재된 연료를 냉매로 순환시켜 벽면의 열을 흡수함으로써 구조물을 효과적으로 냉각한다. 특히, 탄화수소 연료를 냉매로 사용할 경우, 이 과정에서 흡열분해가 동반되어 냉각 성능이 향상될 뿐만 아니라, 고온으로 가열 및 분해된 연료는 초음속 연소기의 짧은 체류시간 내에서도 빠르고 안정적으로 혼합 및 연소를 가능하게 한다.

이러한 재생냉각 채널을 따라 흐르는 연료는 벽면으로부터 지속적으로 열을 흡수하며 온도가 상승하고, 이에 따라 밀도, 비열, 점도, 열전도도 등 주요 열물리적 물성이 변화한다. 연료가 임계점 이상으로 가열되어 초임계 상태에 도달하면 이러한 물성 변화가 더욱 급격해지며, 일정 온도 이상에서는 흡열분해가 시작되어 연료의 조성이 변함에 따라 유동 및 열전달 특성에 복합적인 영향을 미친다.

실제 비행 환경에서는 비행체의 고도와 속도 변화에 따라 벽면으로 유입되는 열유속이 시간에 따라 변동한다. 이에 따라 재생냉각 채널을 순환하는 연료의 온도 분포와 전환율 또한 지속적으로 변화하며, 이러한 비정상(unsteady) 열전달 거동은 연소 특성에 직접적인 영향을 미쳐 시스템의 열적 안정성을 저하시킬 수 있다. 따라서 재생냉각 시스템의 신뢰성을 확보하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 열·유동 특성을 정량적으로 해석할 수 있는 모델의 구축이 필수적이다. 이를 통해 벽면 온도 및 연료의 상태를 예측하고, 설계 단계에서 냉각 성능을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 재생냉각 채널 내부의 비정상 열전달 현상을 효율적으로 해석할 수 있는 수치 모델을 개발하였다. 또한, 이를 기반으로 1차원 비정상 해석 코드를 구축하고, 실험 결과와의 비교를 통해 계산 정확성을 검증하였다.

비정상 해석 코드에 적용된 냉각채널 내 유동의 1차원 지배방정식은 질량, 운동량, 에너지, 그리고 화학종 보존 방정식으로 구성되며, 이는 각각 식 (1)~(4)와 같다. 또한, 벽면 온도 조건은 식 (5)와 같이 채널 벽을 통한 열전도 효과를 고려하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t}+\frac{\partial |\rho u| u}{\partial x}=-\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{f}{2d}(|\rho u| u) \tag{2}$$

* 국립부경대학교 대학원 기계공학과
** 국립부경대학교 기계공학전공
† 연락저자, hj.lee@pknu.ac.kr
TEL : (051)629-6138 FAX : (051)629-6126

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t}+\frac{\partial \rho u h}{\partial x}=\frac{4}{d}q_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y}{\partial t}+\frac{\partial \rho u Y}{\partial x}=\dot{\omega} \quad (4)$$

$$CM\frac{\partial T_w}{\partial t}=Q_w-q_f A_{inner}+\lambda_w A_{cs}\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (5)$$

또한, 해석기법으로는 finite volume 기반의 semi-implicit scheme을 적용하였다. 공간항은 1차 상류 차분으로, 시간 적분은 내재적 오일러(Backward Euler) 법으로 계산하였으며, 화학종 방정식의 반응항은 연산자 분할(operator splitting) 기법으로 처리하였다.

작동 유체로는 극초음속 비행체의 연료로 사용되는 JP-7, JP-8 등의 주성분인 n-decane을 사용하였으며, 열분해 생성물을 포함한 연료의 밀도, 비열, 열전도도, 점도 등의 열물리적 물성치는 Redlich-Kwong-Peng-Robinson Equation of State (RK-PR EoS), Chung et al. method, Modified propane-based TRAPP (TRAnsport Property Prediction) method을 이용하여 획득하였다.

한편, 연료의 열분해 반응은 전환율 70%까지 적용이 가능한 Jiao 등의 multi-step 모델을 사용하였다. 이때 반응 속도 상수는 식 (6)과 같은 아레니우스 식(Arrhenius expression)으로 계산되며, A 및 E_a의 값은 Qin 등의 결과를 참고하여 각각 1.60 × 10^{15} s^{-1} 및 251.94 kJ/mol을 사용하였다.

$$k=A\exp(-E_a/RT) \quad (6)$$

본 연구에서 개발한 해석 코드의 흡열분해 반응 모델과 전산해석 기법의 정확성을 검증하기 위해, 선행 실험[1]의 데이터와 비교해보았으며, 해석 형상은 참고 논문의 미세채널 유동반응 실험장치와 동일하게 설정하였다. 해석 대상은 내경 2 mm, 외경 3 mm의 원통형 관으로 설정하였으며, 총 길이 1000 mm 중 입구와 출구 각각 100 mm 구간은 단열 구간으로, 중앙 800 mm는 일정한 열유속을 가하는 가열 구간으로 구성하였다. 해석 조건은 실험과 동일하게 적용하였으며, 그 세부 내용은 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1에는 해석 결과와 실험 데이터의 흡열량 및 전환율을 온도에 따라 비교하여 도시하였다. 그림에 보이는 바와 같이 300 - 800 K 구간에서는 해석과 실험 모두 흡열량이 n-decane의 sensible heat과 거의 일치하며, 약 850 K 이상에서는 열분해에 따른 화학적 흡열이 더해지면서 곡선이 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 실험에서도 유사하게 나타나며, 또한 질량유량이 낮을수록 동일 온도에서 전환율과 흡열량이 더 크게 나타나는 특성 역시 두 결과에서 동일하게 확인된다. 이러한 결과는 본 연구에서 개발한 1차원 비정상 해석 코드가 미세채널 내 n-decane의 흡열분해 반응을 비교적 정확하게 모사함을 보여준다.

이와 같이 개발된 재생냉각시스템의 1차원 비정상 해석 코드는 향후 극초음속 비행체용 재생냉각 채널 설계와 운용에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

Table 1 Simulation condition

Parameter	Value
Outlet pressure	3 MPa
Inlet temperature	300 K
Inlet Mass flow rate	0.7 g/s, 1.0 g/s, 1.5 g/s
Constant Heat flux	50 ~ 500 kW/m^2

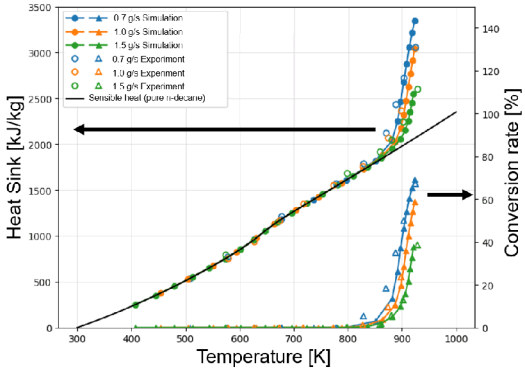


Fig. 1 Comparison of heat sink and conversion rate of n-decane at different mass flow rate with experimental data.

후 기

본 연구는 한국연구재단 학문균형발전지원사업(보호연구)(RS-2021-NR065835)에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] M. Lee, H. J. Lee, and S. Kim, "Measurement of Heat Sink Capacity of n-Decane by Using a Microchannel Flow Reactor System," J. Korean Soc. Propuls. Eng., vol. 29, no. 2, pp. 54-64, 2025.

머신러닝을 활용한 분자동역학 기반 흡열 반응 메커니즘의 최적화 연구

최은교* · 이성민** · 심형섭***†

Molecular Dynamics – Derived Endothermic Reaction Mechanisms Optimized with Machine Learning

Eungyo Choi* , Seongmin Lee** and Hyung Sub Sim***†

ABSTRACT

Understanding the pyrolysis behavior of hydrocarbon fuels for hypersonic propulsion is critical for evaluating regenerative cooling and combustion performance. Accurate interpretation of endothermic reactions requires a reaction model that predicts pathways and rate constants at the molecular scale. In this study, a pyrolysis mechanism was developed using ReaxFF molecular dynamics (MD) simulations and validated against high-temperature MD results, showing good agreement in conversion rates and product distributions. However, intrinsic high-temperature limits of MD led to discrepancies with lower-temperature experimental data. To address this, a genetic algorithm - based machine learning optimization was applied to key reaction parameters, significantly improving agreement with experiments and reproducing observed conversion and product trends. This study demonstrates a framework that integrates ReaxFF MD with optimization techniques, extending MD-derived mechanisms to experimentally relevant temperature regimes.

Key Words : Endothermic hydrocarbon fuel, ReaxFF molecular dynamics, Genetic algorithm optimization, Reaction mechanism

마하 5 이상의 속도로 비행하는 극초음속 비행체는 공력 가열과 스크램제트 연소로 인해 동체 및 엔진에 극심한 열부하가 발생하며, 이를 완화하기 위해 재생 냉각 기술이 주목받고 있다[1]. 이 기술은 연료가 냉각 채널 내에서 고온의 열을 흡수하는 흡열 반응을 이용하며, 이러한 반응은 냉각 효율뿐만 아니라 연소 특성과 추진 효율 향상에도 직접적인 영향을 미친다[2]. 따라서, 재생 냉각 과정에서 발생하는 연료의 열분해 반응 메커니즘을 이해하고 그 거동을 정밀하게 예측하는 것은 매우 중요하다.

열분해 반응은 다양한 라디칼 생성과 복잡한 반응 경로를 수반하기 때문에, 이를 실험적으로 정밀하게 규명하는 데에는 한계가 있다. 이러한 이유로 ReaxFF 기반의 분자동역학(Molecular Dynamics, MD)이 반응 메커니즘 해석에 널리 활용되고 있다. 최근 수행된 연구에서는 MD 시뮬레이션을 통해 exo-THDCPD 연료의 열분해 및 연소 메커니즘을 규명하고, 주요 분해 경로 및 속도론적 인자를 정량적으로 도출하였다[3-5]. 하지만 기존 MD 해석은 계산 시간의 제약으로 인해 수 나노초(ns) 수준의 시간 규모와 높은 온도 영역에 제한되어, 실제 운용 온도 조건에서의 반응 거동을 재현하기 어렵다는 한계를 지닌다[6-8]. 따라서, MD 시뮬레이션 기반의 반응 메커니즘을 실험 온도 영역까지 확장하기 위한 보정 및 검증 절차가 필요하다.

본 연구는 MD 해석 결과를 기반으로 전산유체해석(CFD)에 적용 가능한 열분해 반응모델을 개발하고, 이를 MD 결과와 비교하여 정합성을 검증하였다. 또한, 머신러닝 기반 유전 알고리즘을 활용하여 실험 데이터에 부합하도록 반응속도 인자를 최적화함으로써, 실험 온도 조건에서도 예측이 가능한 열분해 반응모델을

* 세종대학교 대학원 우주항공시스템공학과
** 세종대학교 우주항공시스템공학부
*** KAIST 항공우주공학과
† 연락저자, hyungsub.sim@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3724

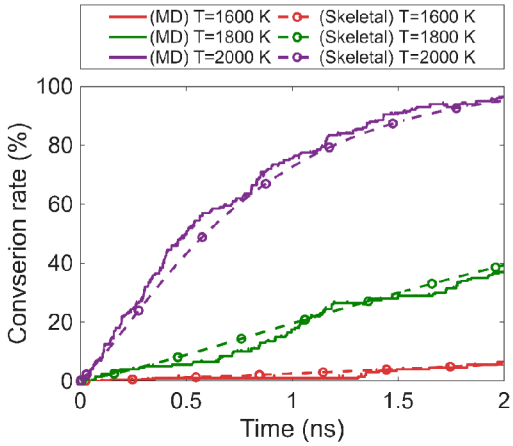


Fig. 1 Conversion rates of exo-THDCPD over time at different temperatures (1,600 - 2,000 K): (-) MD results and (-○-) skeletal model.

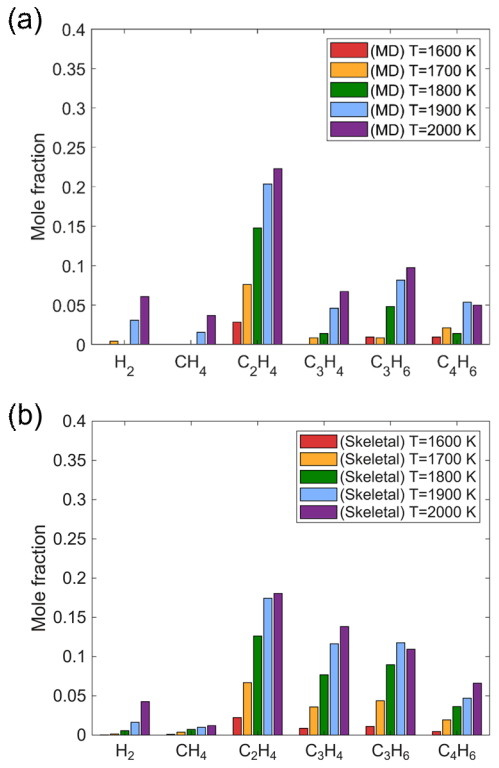


Fig. 2 Mole fraction distributions of gaseous products at different temperatures: (a) MD results, (b) skeletal model.

제시하였다. 최적화된 모델을 이용하여 연료의 전환율, 활성화 에너지, 주요 생성물 분포를 정량적으로 분석하였다.

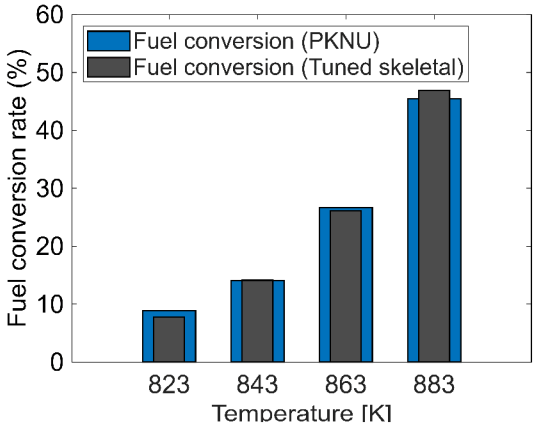


Fig. 3 Comparison of fuel conversion rates at 220 s between PKNU pyrolysis experiments[9] and the tuned skeletal model at various temperatures (823 - 883 K).

Fig. 1은 1,600 - 2,000 K의 온도 조건에서 MD 시뮬레이션 결과와 개발된 skeletal 반응모델이 예측한 exo-THDCPD의 전환율 변화를 비교한다. 모든 온도 조건에서 시간이 경과함에 따라 전환율이 상승하는 경향을 보였다. 개발된 skeletal 모델의 예측 결과는 MD 시뮬레이션 결과와 잘 일치하며, 전환율의 경향을 정확히 재현하였다. 이는 제시된 skeletal 모델이 MD 시뮬레이션의 반응 거동을 충실히 반영하고 있음을 보여준다.

Fig. 2는 1,600 - 2,000 K의 온도 조건에서 MD 시뮬레이션과 개발된 skeletal 모델이 예측한 주요 기체 생성물의 몰분율을 비교한 결과이다. 양쪽 모델 모두에서 C_2H_4가 주요 기체 생성물로 확인되었으며, 온도 상승에 따라 이들의 생성량이 증가하는 유사한 경향을 보였다. 특히, skeletal 모델은 MD 결과와 비교하여 각 생성물의 몰분율과 온도 의존성을 잘 재현하였다.

Fig. 3은 823 - 883 K 온도 범위에서 부경대학교(PKNU) 열분해 실험 결과[9]와 유전 알고리즘을 통해 최적화된 skeletal 모델이 예측한 220 s 시점의 연료 전환율을 비교한 결과를 나타낸다. 모든 온도 조건에서 모델의 예측값은 실험 결과와 잘 일치하였으며, 특히 온도 상승에 따른 전환율 증가 경향을 정확히 모사하였다. 이는 MD 기반 반응모델이 유전 알고리즘을 활용한 반응속도 인자 최적화를 통해 실험 온도 영역에서도 높은 예측 정확도를 확보했음을 의미한다.

Fig. 4는 전환율에 따른 주요 기체 생성물의 질량 분율 변화를 PKNU 열분해 실험과 최적화된 skeletal 모델의 비교 결과이다.

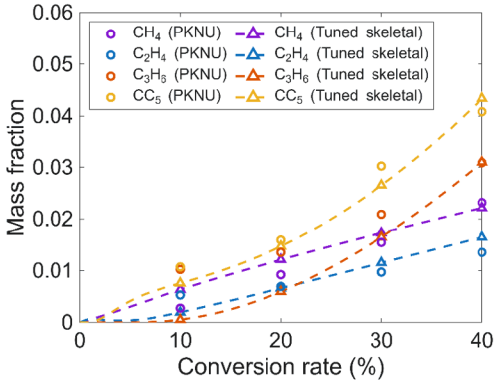


Fig. 4 Comparison of major gaseous product mass fractions between PKNU experiments[9] and the tuned skeletal model with respect to fuel conversion rate.

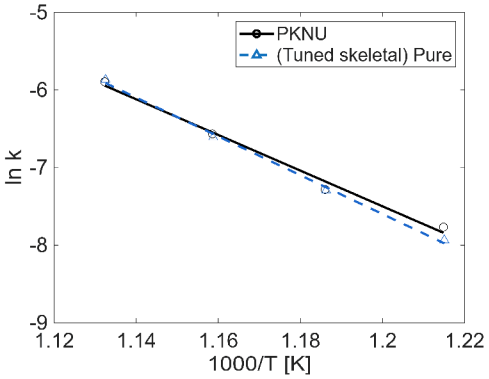


Fig. 5 Arrhenius plots comparing the PKNU experimental data[9] and the tuned skeletal model for the exo-THDCPD fuel.

Table 1 Comparison of activation energy and pre-exponential factor between PKNU experiments[9] and the tuned skeletal model.

Case	E_a (kcal/mol)	Log A	R^2
PKNU (Exp.)	45.69	8.73	-
Tuned skeletal model	48.94	9.74	0.9971

전환율이 증가함에 따라 CH_4, C_2H_4, C_3H_6 및 CC_5와 같은 주요 기체 생성물의 질량 분율이 증가하는 경향을 보였으며, 최적화된 skeletal 모델은 이러한 반응 경향을 실험 결과와 유사하게 예측하였다.

Fig. 5는 PKNU 열분해 실험과 최적화된 skeletal 모델로부터 계산된 Arrhenius kinetics 비교한 결과이다. 최적화된 모델의 예측값은 실험 데이터와 유사한 경향을 보인다. 또한, 온도 변화에 따른 반응속도 상수의 경향을 적절히 반영한다. Table 1에는 Fig. 5의 결과를 기반으로 계산된 활성화 에너지(E_a) 및 빈도인자(pre-exponential factor)를 나타낸다.

본 연구에서는 열분해 실험 결과와 유전 알고리즘을 결합하여 ReaxFF MD 기반 열분해 메커니즘을 실제 운용 온도 영역에 적용할 수 있도록 최적화하였다. 최적화된 모델은 exo-THDCPD 연료의 전환율, 생성물 분포, 활성화 에너지에 대해 실험 결과와 우수한 일치도를 나타냈다. 이를 통해 저비용의 ReaxFF MD 해석 결과를 실험 데이터에 효과적으로 보정함으로써, 실제 운용 조건에서의 적용 가능성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전 국방기술 연구개발사업(No. 915066201)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

[1] D.M. Van Wie, S.M. D'Alessio, M.E. White, "Hypersonic airbreathing propulsion", Johns Hopkins APL Tech. Dig., Vol. 26, 2005, pp. 430 - 437.

[2] W. Bao, Y. Duan, W. Zhou, D. Yu, "Hydrogen-fueled scramjet cooling system investigation using combustor and regenerative cooling coupled model", Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng., Vol. 228, 2014, pp. 820 - 830.

[3] E. Choi, S. L. Hong, C. M. Yoon, H. S. Sim, "Atomistic insights into catalytic role of platinum-graphene nanostructures in decomposition of high-energy-density fuels", Alex. Eng. J., Vol 130, 2025, pp. 420-436.

[4] H. S. Sim, C. Choi, S. L. Hong, C. M. Yoon, "ReaxFF molecular dynamics simulations of high-energy-density fuel combustion catalyzed by Pt-graphene hybrids", Combust. Flame, Vol 282, 2025, pp. 114474.

[5] E. Choi, S. Hong, C. M. Yoon, H. J. Lee, H. S. Sim, "ReaxFF Molecular Dynamics Simulations on Supercritical Pyrolysis of JP-10 with the Suspension of Nanoengineered Fuel Additives", AIAA AVIATION 2023 Forum, 2023, pp. 3789.

[6] H. S. Sim, S. Jekal, C. M. Yoon, S. L.

Hong, “Combined experimental and reactive molecular dynamics study on stability and oxidation of aluminum nanoparticles with silane-based coatings”, Prog. Org. Coat., Vol. 205, 2025, pp. 109289.
[7] H. S. Sim, R. A. Yetter, S. Hong, A. C. T. Van Duin, D. M. Dabbs, I. A. Aksay, “Functionalized graphene sheet as a dispersible fuel additive for catalytic decomposition of methylcyclohexane”, Combust. Flame, Vol. 217, 2020, pp. 212-221.
[8] H. S. Sim, R. A. Yetter, S. Hong, A. C. T. Van Duin, D. M. Dabbs, I. A. Aksay, “Enhanced fuel decomposition in the presence of colloidal functionalized graphene sheet-supported platinum nanoparticles”, ACS Appl. Energy Mater., Vol. 3, 2020, pp. 7637-7648.
[9] S. M. Park, S. H. Lee, J. S. Kang, H. Choi, D. C. Park, H. J. Lee, "Experimental Study for Development of Thermal Cracking Reaction Model of exo-THDCPD under Supercritical Condition", J. Propul. Energy, Vol 5, 2025, pp. 48-65.

초임계 n-dodecane의 재생냉각 미세채널 내부 흡열분해 특성 전산해석

이민서* · 이형주**†

Numerical Study of Endothermic Decomposition Characteristics of Supercritical n-Dodecane in a Regenerative Cooling Channel

Minseo Lee*, Hyung Ju Lee**†

Key Words : Hypersonic cruise vehicle, Scramjet engine, Hydrocarbon fuel, Thermal cracking, PPD model

스크램제트 엔진은 지구 대기권 내에서 마하 5 이상의 속도로 비행하는 극초음속 순항 비행체용 공기흡입식 추진기관으로 기존의 로켓 추진 시스템과 비교했을때 보다 우수한 비추력을 제공하며, 광범위한 초음속 비행 영역에서 운용 유용성을 가진다는 장점이 있다. 그러나 스크램제트를 적용한 극초음속 순항비행체 개발을 위해서는 동체의 극심한 공력가열 및 매우 빠르고 복잡한 유동 내에서 효율적으로 연료를 혼합 및 연소시켜야하는 초음속 연소 문제를 해결해야만 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 탑재된 탄화수소 항공유를 냉매로 이용하는 능동재생냉각시스템이 연구되고 있다. 이때 극초음속비행체는 매우 빠른 속도로 비행하기 때문에 고온, 고압의 상태로 대부분 임계점 이상의 초임계 상태에서 운용될 뿐만 아니라 고온에서 탄화수소 항공유가 기체 및 다양한 저분자량 탄화수소들로 분해되는 흡열분해 현상이 발생한다. 이러한 초임계 조건에서의 흡열분해 현상은 냉각채널 내부 유동 및 열전달에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 초임계 조건의 단일 채널에서의 열분해 반응 및 그에 따른 유동 및 열전달 특성을 규명하기 위한 수치해석을 수행하였다. 특히, 열유속과 질량유량의 변화에 따른 연료온도, 흡열량, 연료 전환율, 체류시간, Heat sink ratio(R_h)의 변화를 종합적으로 분석하고, 이러한 매개변수들간의 상호관계를 규명하였다.

작동유체로는 n-dodecane($C_{12}H_{26}$)을 사용하였으며, 흡열분해 반응모델로는 Zhang 등[1]이 제시한 primary, secondary reaction으로 구성된 PPD(Proportional Product Distribution) model를 적용하였다. 초임계 상태를 유지하기 위하여 해석 조건은 n-dodecane의 임계온도(658.1 K) 및 임계압력(1.81 MPa)보다 높은 665 K, 3 MPa로 설정하였다. 또한, 질량유량 0.6 ~ 1.66 g/s, 열유속 50 ~ 320 kW/m^{2}으로 다양하게 설정하여 총 21개의 조건에 대한 수치해석 결과를 획득하였다.

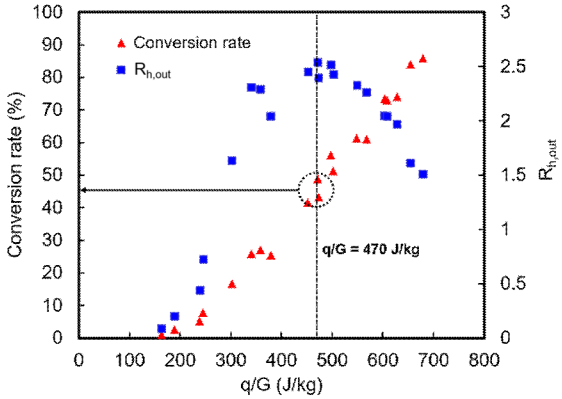


Fig. 1 Conversion rate and R_h with respect to heat-to-mass flux ratios (q/G).

다양한 열유속 및 질량유량 조건의 해석 결과는 재생냉각채널 내부에서 연료가 초임계 상태로 가열될 때 유동 및 열전달 특성을 결정하는 핵심 매개변수 중 하나인 열유속 대비 질량유속의 비(q/G)를 통해 분석하였다. 또한, 연료의 흡열분해 반응 특성을 평가하기 위한 파라미터로 Heat sink ratio(R_h)를 도입했는데, 이는 화학적 흡열의 변화율을 물리적 흡열의 변화율로 나눈 값으로 정의되며 식은 아래 (1)과 같다.

$$R_h = \frac{\Delta h_{chemical}}{\Delta h_{physical}} \quad (1)$$

* 국립부경대학교 대학원 기계공학과
** 국립부경대학교 기계공학전공
† 연락저자, hj.lee@pknu.ac.kr
TEL : (051)629-6138 FAX : (051)629-6126

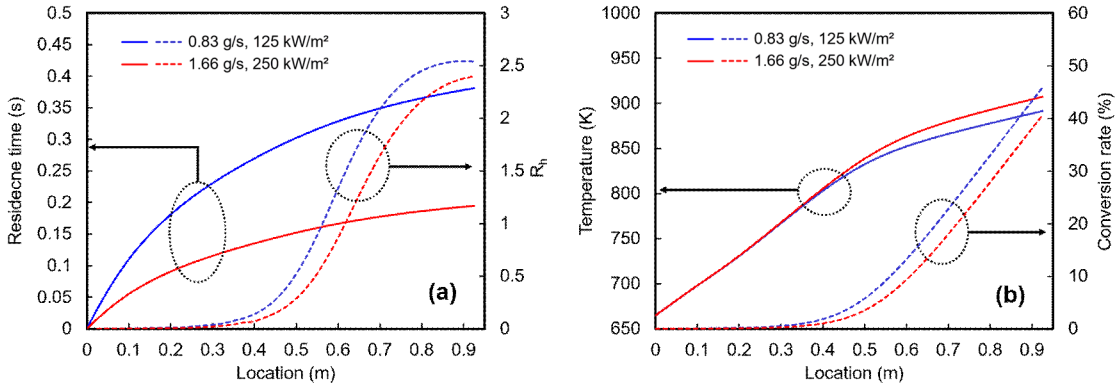


Fig. 2 (a) Residence time and R_h, (b) Temperature and conversion rate along the channel for two conditions with the same q/G = 470 J/kg.

연료 온도가 상승하면서 열분해가 시작되면 R_h가 급격히 증가하는데, 이는 화학반응이 가장 활발하게 일어나고 냉각 성능이 최대에 도달하는 non-equilibrium region에 해당한다. 이후 온도가 더욱 상승하면 연료 농도가 감소하여 화학반응이 저하되고, 결과적으로 물리적 흡열이 다시 지배적이게 되면서 R_h는 감소하는데 이 영역을 equilibrium region이라고 한다. 이를 바탕으로 Fig. 1에 나타낸 q/G에 따른 R_h 결과를 살펴보면 q/G가 증가함에 따라 R_h가 서서히 증가하여 non-equilibrium 영역에 진입했다가 최대값에 도달한 후 다시 감소하며 equilibrium 영역으로 전환되는 결과를 보인다. 또한, q/G = 470 J/kg이 될 때 R_h값이 최대값에 도달하는 것을 알 수 있는데, 이를 기준으로 q/G < 470 J/kg인 경우 연료는 non-equilibrium 상태로 채널을 빠져나가며, q/G > 470 J/kg인 경우 equilibrium region에 도달한 후에 채널을 통과한다. 이러한 결과는 주어진 미세채널의 형상 및 사용되는 연료에 대해 연료의 흡열성능을 정량화하는 매개변수인 R_h가 최대가 되는 최적의 q/G 값이 존재함을 의미한다. 더 나아가 Fig. 1의 연료전환율 결과를 살펴보면, q/G가 증가함에 따라 연료전환율도 증가하며, R_h가 최대가 되는 지점에서의 연료전환율은 약 40 ~ 50% 범위에 있는 것을 확인할 수 있다.

다음으로, 동일한 q/G 값을 가지는 서로 다른 열유속 및 질량유속 조건에 대한 흡열분해 특성을 비교해보았다. 이때 R_h가 최대에 도달하는 q/G = 470 J/kg인 질량유량 0.83 g/s, 열유속 125 kW/m^2 조건과 질량유량 1.66 g/s, 열유속 250 kW/m^{2}인 두가지 조건을 선정하였다. Fig. 2(a)에 두가지 조건의 체류시간 및 R_h값을 비교하여 도시하였는데, 열유속과 질량유속이 작을수록 체류시간은 증가한다. 체류시간이 길수록 벽면으로부터 열을 흡수하여 분해되는 시간이 더욱 증가하기 때문에 R_h도 같은 위치에서 더욱 높고 최대값도 더 높게 나타난다. 또한, Fig. 2(b)에 보이는 바와 같이 체류시간이 긴 조건의 경우 (0.83 g/s & 125 kW/m^2) 분해가 더 빨리 시작되고, 전환율도 같은 위치에서 더 높게 나타난다. 따라서 흡열분해가 시작되기 전까지 두 조건의 온도는 동일하게 유지되지만, 분해가 시작된 이후에는 0.83 g/s & 125 kW/m^2 조건에서 연료 온도가 더 낮게 유지된다. 결과적으로, 출구에서의 R_h값이 최대가 되는 q/G = 470 J/kg인 두 조건을 비교했을 때, 체류시간이 더 긴 경우가 더 높은 R_h값 및 R_h 최대값을 가지며, 더 높은 전환율로 인한 더 낮은 연료 온도를 가진다.

본 연구에서는 초임계 n-dodecane의 흡열분해 특성을 규명하기 위해 PPD 모델을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 여러 파라미터 간의 상호작용을 종합적으로 분석해보았다. 이러한 결과는 극초음속 비행체용 능동재생냉각시스템의 냉각효율을 극대화시키기 위한 최적설계에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 학문균형발전지원사업(보호연구)(RS-2021-NR065835)에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] D. Zhang, L. Hou, M. Gao, X. Zhang, “Experimental and Modeling on Thermal Cracking of n-Dodecane at Supercritical Pressure”, Energy Fuels, Vol. 32, 2018, pp. 12426-12434.

Pre-detonator 내 DDT에 대한 실험적 연구

길유창* · 박성우**†

Experimental Study of Internal DDT in a Pre-Detonator

Yuchang Gil*, Sungwoo Park**†

데토네이션 기반 추진기관은 기존의 Brayton cycle 기반 추진기관에 비해 약 20% 높은 열역학적 효율을 달성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 RDE(Rotating Detonation Engine)와 PDE(Pulse Detonation Engine)와 같은 데토네이션 기반 추진기관은 차세대 추진 기술로 주목받고 있으며, 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 RDE는 데토네이션파를 이용하여 압력 상승 연소(Pressure Gain Combustion, PGC)를 구현하는 고효율 연소 기술로, 항공기, 극초음속 비행체, 지상 발전 등 다양한 분야에 적용 가능성이 크다.

RDE의 안정적 운용을 위해서는 신뢰성 높은 점화 방식이 필수적이며, Pre-detonator를 이용한 점화는 기존의 스파크 점화 방식에 비해 높은 점화 신뢰성을 확보할 수 있는 방법으로 평가된다. 일반적으로 Pre-detonator 내부에서는 점화 이후 Deflagration 화염이 형성되고, DDT(Deflagration-to-Detonation Transition) 장치 등을 거치며 난류 화염으로 발달한 뒤 데토네이션(Detonation)으로 천이된다. 따라서 안정적인 RDE 운용과 초기 데토네이션파의 재현성 확보를 위해서는 Pre-detonator 내에서의 DDT 메커니즘에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 화염 및 데토네이션파의 자발광 이미지, 내부 슐리렌 이미지, 그리고 동압계 데이터를 종합적으로 활용하여 DDT 과정과 데토네이션파의 거동을 실험적으로 분석하고자 한다.

Pre-detonator의 DDT 및 데토네이션파의 전파 특성의 계측을 위해 Fig. 1의 연소기를 사용하였다. DDT 장치의 경우 선행연구[1]에 따라 BR(Blockage Ratio) 0.3에서 BR 0.7로 증가하는 형태의 Converging 형상의 DDT 장치를 사용하여 데토네이션 천이를 용이하게 하였다. 연료와 산화제는 각각 CH_4와 O_2를 사용하였으며, 연료는 Omega社의 FMA 2600 모델, 산화제는 Bronkhorst社의 mini CORI-FLOW M15 모델을 사용하여 추진제의 유량을 제어하였다. 실험 시퀀스는 연료 0.05 g/s, 산화제 0.20 g/s의 조건(ϕ=1.0)에서 5초 동안 공급한 후 0.5초 동안 스파크플러그를 작동하는 방식으로 진행하였다.

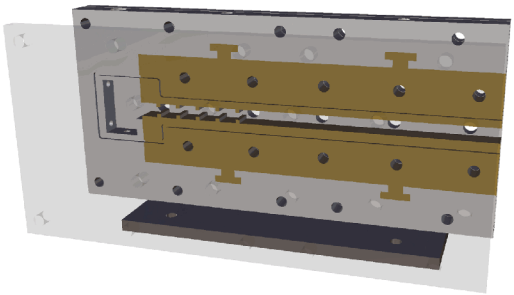


Fig. 1 Schematic diagram of the Pre-detonator.

자발광 이미지 및 슐리렌 이미지 측정을 위해 Phantom 社의 VEO710L 모델 및 Nikon 社의 50 mm F 1.4 렌즈를 사용하였으며, 100,000~450,000fps 해상도 조건에서 이미지 계측을 진행하였다. PCB Piezotronics 社의 113b28, 113b24 그리고 101a05 모델을 통해 동압 데이터를 측정하였으며, Keysight 社의 DSOX1204G 모델을 통해 10M Sample/s의 sampling rate로 데이터를 저장하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 연소실 내부에서 데토네이션파가 발달하고 전파되는 과정을 자발광 이미지를 통해 나타낸 것이다. Fig. 2는 DDT 장치부터 연소기 출구부까지의 구간을 촬영한 이미지로, 해상도는 1024 × 56이며 노출 시간은 1 μs, sampling rate은 100,000 fps로 설정하였다. Fig. 3은 데토네이션으로 천이되는 과정을 중점적으로 촬영한 결과로, 해상도는 128 × 56, 노출 시간은 1 μs, sampling rate은 400,000 fps이다. Fig. 2의 자발광 가시화 이미지에서 DDT 장치를 지난 화염은 벽면을 따라 전파되는 화염이 중심부보다 빠르게 진행하는 경향을 보인다. 이후 화염의 밝기 강도가 증가하며, 데토네이션파로 천이되는 것이 확인된다. 데토네이션파로 천이되기 전에는 불규칙하게 주름진 화염면을 보이나, 천이 이후에는 평탄한 화염면을 가지며 전파되는 것을 확인할 수 있다.

DDT 과정은 Fig. 3을 통해 보다 자세히 확인할

* 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
† 연락저자, sungwoo.park@kau.ac.kr

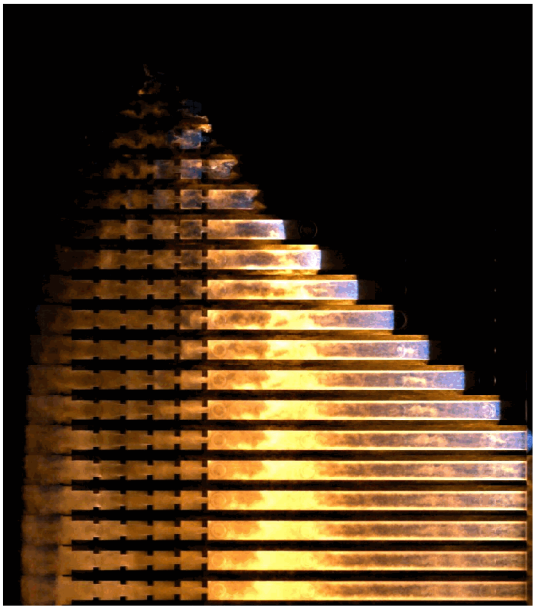


Fig. 2 Chemiluminescence images showing the flame acceleration and deflagration to detonation transition process within the pre-detonator.

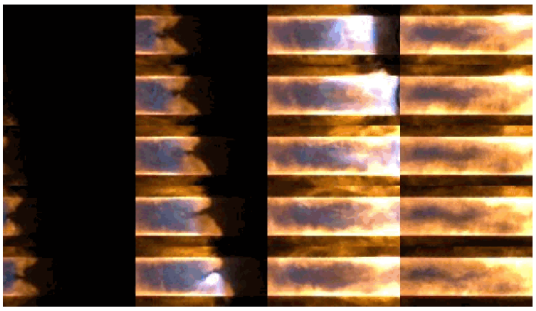


Fig. 3 Magnified chemiluminescence visualization of the DDT onset region.

수 있다. Fig. 2에서 관찰된 바와 같이, 데토네이션파로 전파되기 이전의 화염은 벽면을 따라 전파되는 화염이 중심부보다 빠르게 진행하는 양상을 보인다. 이후 밝기 강도가 한 지점에서 급격히 증가하는 것이 확인되며, 이는 국소 폭발(local explosion) 이 발생하여 데토네이션파로 전이되는 시작점으로 판단된다.

Fig. 4~6은 각각 DDT 장치 구간, 데토네이션 천이 영역, 그리고 출구 부근에서의 연소실 내부 슐리렌 이미지이다. Z형 슐리렌 장치를 사용하였으며, 해상도는 256 × 32, 노출 시간은 1 μs, 촬영 속도는 450,000 fps로 설정하였다.

Fig. 4에서 스파크 플러그에 의해 점화된 화염은 deflagration의 상태로 DDT 장치에 도달한다.

Fig. 4 Schlieren visualization in the DDT section immediately after ignition.

Fig. 5 Schlieren images in the transition region downstream of the DDT section.

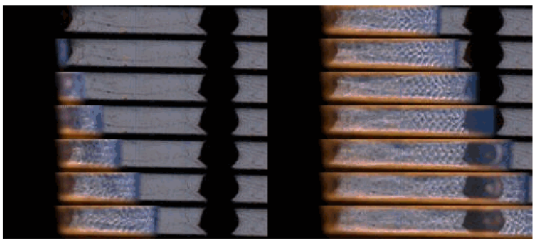


Fig. 6 Schlieren visualization near the exit region after DDT completion.

이후 장애물을 지나가며 점차 가속되는 것을 확인할 수 있다. 이후 Fig. 5에서 DDT장치를 지난 화염은 자발광 이미지에서 관측된 것과 같이 벽면이 빨리 전파되는 형상으로 전파되는 것을 확인할 수 있다. 이후 국소폭발을 일으키며, 화염면이 점차 평탄해지는 것을 확인할 수 있다. 이후 데토네이션파로 천이된 화염은 Fig. 6과 같이 충격파와 반응면이 결합된 상태로 전하되는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 데토네이션파 내부에 격자 무늬의 구조가 관측되었으며, 데토네이션파과 연소실 벽면과의 상호작용으로 판단

된다. 향후 연구를 통해 데토네이션파와 벽면 사이의 상호작용에 대한 연구를 진행하고자 한다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2021-KP002521, 탄소중립 고효율 가스터빈 연소기술에너지혁신연구센터).수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Gil, Y., Lee, S., Han, S., Park, S. "Impact of a Variable Blockage Ratio on the Detonation Transition in a Pre-Detonator", Fire., Vol. 8, 2025, pp. 263.

저압에서 DTBP와 CHP 첨가제가 연료의 점화지연에 미치는 효과

성지환* · 최호진** · 박동창** · 손채훈*†

Effects of additives of DTBP and CHP on ignition delay time of a jet fuel at low pressure

Jihwan Seong*, Hojin Choi**, Dongchang Park**, Chae Hoon Sohn*†

ABSTRACT

Reducing ignition delay time is crucial in the aspect of operation and performance of hypersonic vehicles. For the purpose of reducing ignition delay time of exo-THDCPD, di-tert-butyl peroxide, cumene hydroperoxide were blended and ignition delay time of the mixtures was compared to that of pure fuel at low and high temperature. To analysize the reason of reduction, kinetic models for the mixture were generated. It was found that methyl radical enhanced the generation of OH radical when DTBP was used while OH radical was generated immediately when CHP was used which resulted in the decomposition of fuel at the early overall process.

Key Words : Ignition delay time, Exothermic fuel, Organic peroxide, Sensitivity analysis, Reaction pathway

스크램제트와 같은 공기흡입식 극초음속 비행체는 연소 과정에 필요한 산화제를 대기로 사용하기 때문에 짧은 체류시간, 낮은 작동 압력으로 조건에서 운용된다[1-2]. 이러한 운용환경은 연료의 불완전 연소를 야기할 수 있으며 공해물질 배출 및 추력 성능 감소로 이어질 수 있다. 따라서 적절한 첨가제를 통해 연료의 점화지연시간 감소가 필요하다.

점화지연시간이란 연료가 여러 화학 반응을 통해 연소되기까지 소요되는 시간으로, 연료의 점화지연시간 감소를 위해 다양한 첨가제가 사용되고 있다. 유기과산화물(organic peroxide)은 낮은 결합 에너지로 인해 반응 초기에 라디칼 생성을 유도하며 hydrogen peroxide(H_2O_2), di-tert-butyl peroxide(DTBP), cumene hydroperoxide(CHP)가 대표적인 첨가제이다. 특히 hydrogen peroxide는 광범위한 온도에서 수행된 메탄, 에틸렌, 헵탄에 혼합물의 연구를 통해 연료의 초기 분해 반응의 유용성을 보였다[3-5]. DTBP는 낮은 O-O 결합에너지를 통해 메틸 라디칼을 생성하며 연료의 세탄가를 향상시키는데 사용되며 hydrogen peroxide와 마찬가지로 헵탄에 혼합하여 측정된 점화지연시간을 통해 연료의 점화지연시간을 감소시킬 수 있음을 보였다[6]. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 DTBP, CHP를 첨가제로 사용하여 연료의 점화지연시간을 감소시킨 연구는 많이 진행되지 않아 추가적인 측정 및 분석이 필요하다.

본 연구에서는 흡열연료인 exo-THDCPD에 DTBP와 CHP를 0.1 wt%만큼 혼합하여 각각 957-1285 K, 1042-1383 K의 온도범위와 2 atm, 당량비 1.0 조건에서 점화지연시간을 충격파관으로 측정하고 동일 온도에서 점화지연시간 감소 효과를 비교하였다. 비교 결과 저온에서는 DTBP와 CHP 모두 점화지연시간 감소에 크게 효과를 보였지만 고온에서는 DTBP의 점화지연시간의 감소 효과는 CHP에 비해 크지 않았다. 이러한 원인을 분석하기 위해 cyclopentadien 분해 반응과 C_0-C_{12}의 산화 과정을 모사하는 반응 모델을 사용하여 exo-THDCPD와 DTBP, CHP의 반응을 모사할 수 있는 반응 모델을 생성 및 최적화하였다. 해당 모델에서 exo-THDCPD 100%와 exo-THDCPD+첨가제 조건의 민감도 분석을 온도에 따라 수행하였고 이를 기반으로 주요 라디칼의 생성률 및 열방출율을 분석하였다. 분석 결과 DTBP를 첨가제로 사용할 경우 메틸 라디칼의 발생으로 인하여 OH 라디칼과 관련된 반응이 촉진되었으며 CHP의 경우 CHP의 분해로부터 OH 라디칼과 관련된 반응이 촉진되었다. 이를 통해 유기과산화물을 첨가제로 사용할 경우, OH 라디칼 반응이 촉진되어 연료의 점

* 세종대학교 기계공학과, 우주항공시스템공학과
** 국방과학연구소
† 연락저자, chsohn@sejong.ac.kr
TEL : 02-3408-3788

화지연시간을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

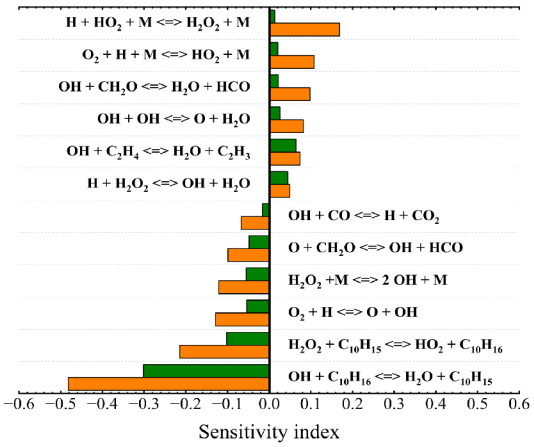


Fig. 1 Sensitivity analysis of pure fuel with and without additive at 2 atm, 1040 K.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(관리번호 UE231020SD)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2025년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문입니다.

참고 문헌

[1] J. Urzay, "Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 50, 2018, pp. 593-627.

[2] S. Jin. H. Choi, J.R. Byun, G. Park, "Combustion characteristics of a dual-mode ramjet engine with a supersonic aerodynamic ramp injector", Exp. Therm. Fluid Sci. Vol. 150, 2023, 111050.

[3] Golovitchev, V. I., M. L. Pilia, C. Bruno, "Autoignition of methane mixtures-the effect of hydrogen peroxide", J. Propuls. Power, Vol. 12, 1996, pp. 699-707.

[4] Peng, H. S., Zheng, D., Zhang, F., Zhong, T., "Effects of hydrogen peroxide on the low-temperature ignition delay times of ethylene/air/Ar mixtures in an RCM", Fuel, Vol. 358, 2024, 130282.

[5] Hui, X., Zheng, D., Zhang, C., Xue, X., Sung, C. J., "Effects of hydrogen peroxide on two-stage ignition characteristics of n-heptane/air mixtures", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 44, 2019, pp. 24312-24320.

[6] Wan, Z., Zheng, Z., Li, P., Zhang, C., "Experimental and kinetic study on di-tertiary butyl peroxide auto-ignition and its effect on the ignition of n-heptane", Fuel, Vol. 259, 2020, 116294.

리튬이온 배터리의 극고온 열화 거동에 관한 실험적 연구

장채윤*, Pragya B. Singh*, Ayushi Mehrotra*, 여재익*†

Experimental investigation of lithium-ion battery degradation under extreme high temperatures

Chaeyoon Chang*, Pragya B. Singh*, Ayushi Mehrotra*, Jack J. Yoh*†

ABSTRACT

Thermal runaway remains one of the most critical yet least understood safety challenges in lithium-ion batteries. This study investigates how internal heat generation evolves with temperature and state of charge using Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and differential scanning calorimetry (DSC). Distinct transitions in resistive, electrochemical, and chemical heating are identified. The results revealed sharp instability above 130°C associated with separator deformation and structural cracking of anode with insights that clarify microscopic origins of catastrophic battery failure.

Key Words: Lithium-Ion Battery, Thermal Runaway, Heat Generation, Electrochemical Impedance Spectroscopy, State of Charge

With the rapid global shift toward electrification and renewable energy, demand for lithium-ion batteries (LIBs) has become a great interest in power sources in automobile and aerospace applications. However, frequent thermal runaway (TR) incidents in energy storage systems (ESS), have caused serious safety concerns in recent years. Therefore, governments and regulatory bodies such as the International Electrotechnical Commission (IEC), have been tightening safety regulations for thermal abuse conditions in batteries. Therefore, the growing demand for higher energy density has heightened the need for quantitative thermal characterization to ensure safety in those energy storage systems.[1]

Li-ion Batteries has become indispensable in modern powertrain systems due to its high energy density as well as aligning with net-zero carbon emission characteristics. Moreover, their production chain is rapidly developing due to its cleaner energy infrastructure by recycling dead batteries and therefore local resource circulation reinforces the long-term carbon neutrality goals.

* 서울대학교 항공우주공학과
† 연락저자, jjyoh@snu.ac.kr
TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-882-1507

However, this rapid growth in extreme environments also have developed serious concerns over thermal safety, as heat generated within cells can trigger catastrophic failure leading to explosions. This thermal energy primarily originates from resistive heating & chemical decomposition reaction inside the battery. A cascade of exothermic events occur inside the system when total heat generation surpasses the cooling threshold, triggering temperature rise, separator melting, and gas formation. Consequently, self-quenching becomes impossible, leading to rapid thermal propagation across neighboring cells.[2]

Due to this motivation, this study quantitatively evaluates internal heat generation in lithium-ion batteries by combining the heating mechanism regimes: resistive, chemical and electrochemical. To quantify all of these heating source groups, combination of EIS and DSC techniques were utilized. The total heat-generation rate is expressed as:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{EIS} + \dot{Q}_{DSC}$$

Where $\dot{Q}_{EIS} = I^2(R_e + R_{ct} + Z_w)$ stands for resistive and electrochemical heating, and $\dot{Q}_{DSC} = m_0 \Delta H e^{-E_a/RT}$ represents heat due to chemical reactions.[3] This combined strategy

demonstrates a total threshold thermal energy to trigger TR.

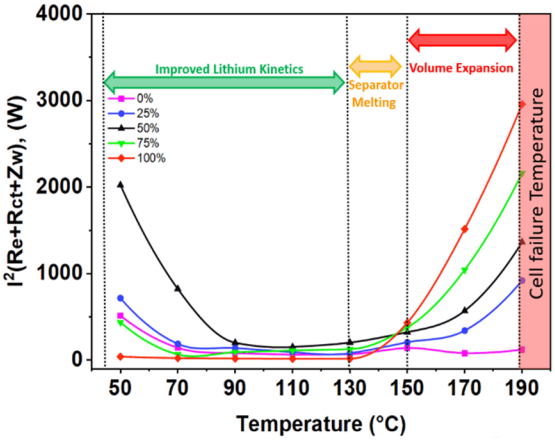


Fig. 1 Temperature and SoC dependent heat generation of the LFP-graphite full cell

Experimental result shown in Fig.1 represents the net $\dot{Q}_{EIS}$ corresponding to ohmnic+ electrochemical resistance up to its onset battery failure temperature, T=190°C.

At lower temperatures, sluggish lithium-ion transport increases internal resistance, which peaks near mid-SoC range(≈50%) due to two-phase reaction limitations. As temperature rises (up to 130°C), the resistance and heat generation has decreased due the enhanced ion mobility and kinetics in electrolyte. Beyond T≥ 140°C, however, the chemical leakage of the molten separator outside the expanded coincell was observed due to the gas evolution from ED/DMC liquid electrolyte. As a result, short-circuit leading to cell failure was observed due to physical contact between the cathode and anode at 190°C for all SoCs.

This observation is further corroborated by the Scanning Electron microscope (SEM) analysis of anode surfaces (Fig.2) at different states of charge. Upon heating, the delithiated anode (0% SoC) develops a porous and cracked morphology, increasing electrolyte contact and facilitating ion transport, which explains the lower resistance observed in the EIS data. Conversely, the fully lithiated anode (100% SoC) exhibits compact, densified surface structure-

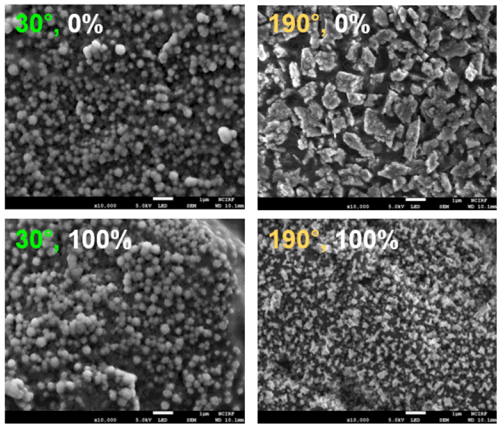


Fig. 2 Anode surface morphology at at 30°C, 190°C for SoC=0%,100%

-that limits wettability and hinders electrolyte penetration. These contrasting morphologies strongly correspond to the electrochemical trends shown in Fig.1, indicating that thermally induced structural instability of the anode governs the impedance evolution preceding thermal runaway.

Acknowledgements

This work was supported by the 2025 research fund of Samsung SDI Co., Ltd. and the National Research Foundation of Korea (NRF).

References

[1] M. Pepó et al., "Advances in standardised battery testing for enhanced safety and innovation in electric vehicles," Batteries, 11 (4), p. 157, 2025.

[2] C. Qi et al., "Study on the Multi-Stage Evolution of Thermal Runaway and the Flammability Threshold of Gas Generation in Lithium Iron Phosphate Batteries Based on SOC Gradient," Processes, vol. 13, no. 8, p. 1183, 2025

[3] W. Zhao et al., "Heat Generation in NMC622 Coin Cells during Electrochemical Cycling: Separation of Reversible and Irreversible Heat Effects," Batteries, vol. 6, no. 4, p. 55, 2020

암모니아 크래킹 가스의 잔류 암모니아 농도에 따른 NOx 배출 특성

박진현*. 이민정*†

Evaluation of NOx emission characteristics with respect to residual ammonia concentration in ammonia cracked fuel

Jinhyeon Park*, Min Jung Lee*†

ABSTRACT

This study investigates the effect of residual ammonia on NO_x formation in combustors using cracked ammonia fuel. Simulations were conducted under gas turbine-relevant conditions, including pressures of 1-25 bar, residence times of 2-10 ms, and equivalence ratios (ϕ) from 0.5 to 0.8. Residual NH_3 concentrations ranged from 10 to 10,000 ppm. Nine chemical kinetic mechanisms were compared. Results showed that low NH_3 concentrations led to pressure-driven NO_x increase via the thermal-NO pathway, while high NH_3 suppressed NO_x formation due to enhanced radical recombination. A crossover point (2000-5000 ppm) was identified, marking the transition between dominant NO formation mechanisms. These findings inform strategies for NO_x mitigation in gas turbines using cracked ammonia. These findings offer a fundamental information for optimizing residual ammonia control in gas turbines using ammonia cracked fuels.

Key Words : Gas turbine, Ammonia cracked fuel, Residual ammonia, NOx emission

암모니아는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않고 저장, 수송성이 좋아 탈탄소화 전략에서 수소 운반체이자 직접 연료로 주목받고 있다. 특히 가스터빈과 보일러 등 고온 연소 시스템에서 활용 가능성이 높다. 암모니아는 열분해(cracking)를 통해 H2, N2 혼합물로 전환될 수 있는데, 이는 낮은 반응성을 보완하기 위한 부분/완전 분해와 연소기 배기열을 이용한 열회수로 시스템 효율을 높이려는 목적에서 도입된다. 다만 실제 공정에서는 암모니아 완전분해 시스템이라고 해도, 분해율에 따라 연료 중에 잔류 암모니아가 ppm 수준으로 남을 수 있고, 이는 연소 거동과 오염물 배출에 유의미한 영향을 준다. 암모니아 연소에서 NOx는 고온에서 N2와 라디칼 반응으로 생기는 thermal-NO와, 연료 결합 질소가 산화되는 fuel-NO가 주 경로인데, 특히 fuel-NO 비중이 커서 잔류 암모니아가 소량이라도 존재하면 NOx 배출량이 크게 증가할 수 있다. 한편, TCR (thermochemical recuperation)과 같은 연료 전처리, 열회수 기술은 가스터빈 배기가스로도 400℃, 1 atm에서 이론적으로 99.99% 분해가 가능할 만큼 적용성이 높지만, 실제로는 분해되지 않은 암모니아가 남아 연소 효율 저하와 NOx 증가, 그리고 흡착식 후처리의 용량, 운전 주기 증가로 인한 비용 상승 문제를 야기한다. 지금까지는 NH3/H2 혼합 연소 특성이나 부분 분해의 효과를 다룬 연구가 다수였지만, 가스터빈 조건에서 "잔류 암모니아 농도"를 체계적으로 바꾸어 NOx에 미치는 정량적 영향을 평가한 연구는 부족하다. 이에 본 연구는 1-25 bar 압력, 체류시간 2-10 ms, 희박 조건(ϕ=0.5-0.8)에서 잔류 암모니아 농도 10-10,000 ppm 범위를 대상으로 NOx 형성 특성을 수치적으로 평가하여, 최소 요구 분해율과 잔류 암모니아 허용 기준, 흡착식 후처리 설계 임계값 등을 설정하는 데 필요한 기초 데이터를 제공한다. 추가적으로 상압 조건에서 미량의 잔류 암모니아가 존재할 때의

* 서울과학기술대학교 미래에너지융합학과
† 연락저자, mj.lee@seoultech.ac.kr
TEL : (02) 970-9752

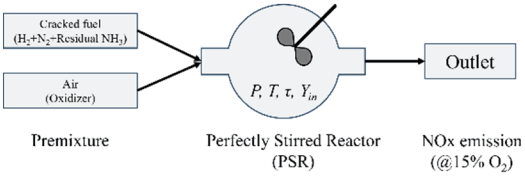


Fig. 1 Schematic of the PSR model used for NOx evaluation; NOx is reported on a dry basis at 15% O2

NOx 배출량을 정밀 계측하기 위한 연소 실험도 수행할 예정이다. 획득한 실험값은 다양한 반응 메커니즘 기반 모델의 수치해석 결과와 비교 검증하여 민감도와 불확실도를 정량화 할 수 있다. 이를 통해 잔류 암모니아 허용치 및 요구 분해율 산정에 대한 실증적 근거를 보강할 수 있다.

해석은 Chemkin-Pro의 0차원 PSR(완전교반반응기) 모델을 사용하여 진행한다. PSR은 공간적으로 균일, 완전 혼합을 가정해 유동 복잡성을 최소화하면서, 반응속도, 기구, 운전조건(압력, 체류시간)에 따른 반응물/생성물 농도 변화를 '화학반응 지배' 관점에서 분리해 보기 적합하다. 에너지 방정식을 포함해 연소 반응열로 인한 온도 변화를 고려하되, 경계 열손실이 없는 단열 조건을 적용했다. NOx는 건식 기준으로 산정한 뒤 15% O2 기준으로 보정해 문헌 간 비교 가능성을 확보했다.

가스터빈 실운전과의 정합을 위해 압력 1, 5, 15, 25bar, 체류시간 2, 5, 10ms, 희박영역 당량비 ϕ=0.5–0.8에서 해석했다. 초기 PSR 온도는 반응 개시 이후 상태를 반영해 1500K로 두었고, 유입 연료 측은 TCR을 거친 예열, 부분분해 상태를 모사하기 위해 600K로 설정했다. 잔류 암모니아는 10–10,000 ppm을

Table 1 Mole fraction of cracked fuel with variation of residual ammonia concentrations

Residual NH_3	10 ppm	100 ppm	1000 ppm	10000 ppm
NH_3 (mol%)	0.001	0.01	0.1	1
H_2 (mol%)	74.9993	74.9925	74.925	74.25
N_2 (mol%)	24.9998	24.9975	24.975	24.75

변수로, 나머지 연료는 전형적 크래킹 조성인 H2 : N2 = 3 : 1로 구성했다.

기본 비교 도구로 GRI-Mech 3.0, Okafor[1], Mei[2]메커니즘을 사용하였고, 민감도 확인을 위해 Konnov[3], Gotama[4], Zhang[5], Han[6], Zhou[7], Bertolino[8] 등 6종을 동일 조건으로 교차 검증했다. 대표 비교는 ϕ=0.7에서 압력 1 및 25 bar, 잔류 암모니아 100 ppm(저농도), 10,000 ppm(고농도) 케이스로 수행하여 압력 변화와 잔류 암모니아 농도에 따른 NOx 경향과 메커니즘 종속성을 평가했다.

잔류 암모니아 농도 변화(10–10,000 ppm)에서 압력(1, 5, 15, 25 bar)이 NOx 배출에 미치는 영향을 ϕ=0.7, τ=5 ms 조건으로 분석했다. 먼저 NOx는 NH3 농도가 증가할수록 비선형적으로 상승하지만, 압력에 따른 변화 방향은 잔류 암모니아의 크기에 따라 정반대로 나타난다. 즉 '저농도 구간'(대략 < 5800 ppm)에서는 압력이 높아질수록 NOx가 증가하고, '고농도 구간'(> 5800 ppm)에서는 압력이 높아질수록 NOx가 감소하는 상반 경향이 관찰되며, 두 곡선이 교차하는 'Crossover point'가 약 5800 ppm 부근에서 확인된다.

원인은 지배 메커니즘의 전환이다. 저농도에서는 연료 결합 질소(fuel-NO) 기여가 미미하여 thermal-NO(N2+O↔NO+N, N+O2↔NO+O)가 주도권을 가지며, 압력 상승이 라디칼(O, N) 유지와 고온 반응을 촉진해 NOx가 증가한다. 반면 고농도에서는 NH_3 산화로 유도되는 fuel-NO 연쇄(NH3→NH2→NH→N→NO)가 커지지만, 높은 압력에서는 NH2 · NH 등의 중간종이 3체 재결합(NH2+H+M→NH3+M)으로 더 빠르게 제거되어 NO 형성이 억제되므로, 결과적으로 압력이 높을수록 NOx가 감소한다. 이러한 상반 경향이 맞물려 앞서 언급한 교차점이 형성된다. 추가적으로, 압력이 높을수록 연료-NO 억제가 강화되어 thermal-NO가 지배적인 영역이 넓어지며, 이로 인해 동일한 전환이 일어나기 위한 잔류 암모니아 임계치(교차점)가 더 높은 농도 쪽으로 이동한다. 요컨대, 잔류 암모니아 농

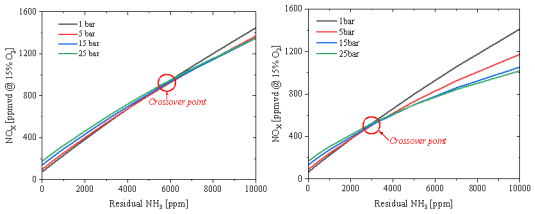


Fig. 2 NOx emissions with variation of residual NH3 concentration under different pressure conditions (1, 5, 15, and 25 bar) at φ = 0.7 and τ = 5 ms.

도와 압력의 결합이 thermal-NO와 fuel-NO의 상대적 지배를 바꾸며, 운전 압력 설계 시 이 교차 특성을 고려하는 것이 NOx 저감 최적화에 핵심이라는 결론이다.

참고 문헌

[1] E. C. Okafor *et al.*, "Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism," *Combust. Flame*, vol. 204, pp. 162–175, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.03.008.

[2] B. Mei *et al.*, "Experimental and kinetic modeling investigation on the laminar flame propagation of ammonia under oxygen enrichment and elevated pressure conditions," *Combust. Flame*, vol. 210, pp. 236–246, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.08.033.

[3] R. Li, A. A. Konnov, G. He, F. Qin, and D. Zhang, "Chemical mechanism development and reduction for combustion of NH3/H2/CH4 mixtures," *Fuel*, vol. 257, p. 116059, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116059.

[4] G. J. Gotama *et al.*, "Measurement of the laminar burning velocity and kinetics study of the importance of the hydrogen recovery mechanism of ammonia/hydrogen/air premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 236, p. 111753, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111753.

[5] X. Zhang, S. P. Moosakutty, R. P. Rajan, M. Younes, and S. M. Sarathy, "Combustion chemistry of ammonia/hydrogen mixtures: Jet-stirred reactor measurements and comprehensive kinetic modeling," *Combust. Flame*, vol. 234, p. 111653, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111653.

[6] X. Han, Z. Wang, Y. He, Y. Zhu, and K. Cen, "Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH3/syngas/air premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 213, pp. 1–13, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.11.032.

[7] Y. Zhu *et al.*, "The combustion chemistry of ammonia and ammonia/hydrogen mixtures: A comprehensive chemical kinetic modeling study," *Combust. Flame*, vol. 260, p. 113239, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.combustflame.2023.113239.

[8] A. Bertolino *et al.*, "An evolutionary, data-driven approach for mechanism optimization: theory and application to ammonia combustion," *Combust. Flame*, vol. 229, p. 111366, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.02.012.

대체연료 구성 화학종에 따른 연료 자발화 점화 지연 특성 연구

민경욱*†. 김민국*. 황정재*. 이원준*. 박순호*. 이정우**. 손종윤**. 김나연**

Autoignition Ignition Delay Time Study on Chemical Composition Analysis of Alternative Fuels

Kyungwook Min*†. Minkuk Kim*. Jeongjae Hwang*. Wonjun Lee*. Sunho Park*. Jeongwoo Lee**. Joongyoon Son**. Nayeon Kim**

ABSTRACT

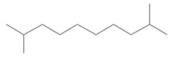
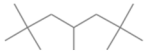
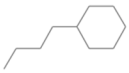
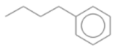
This study investigates ignition delay characteristics of representative hydrocarbon species (n-, iso-, cyclo-alkanes, and aromatics; C_{12} range) that represent alternative aviation fuels, and compares them with hydrogen and ammonia-cracked fuels. Experiments using RCM and shock tube were conducted at 10–20 bar and various equivalence ratios. Complementary kinetic simulations identified mechanisms capable of accurately predicting ignition behavior, particularly across NTC and low-temperature regimes.

Key Words : Alternative Fuels, Ignition Delay, Autoignition, RCM, Shock tube

인류가 대면한 급격한 지구의 기후변화는 지속가능한 발전을 위한 저/무탄소 연료로의 전환 기술 개발의 필요성을 강력하게 요구하고 있는 실정이다. 연료전환에 대응하는 연소 특성 연구는 탄소 배출 저감을 위한 대체 연료 도입은 물론 연료의 수급 환경에 따른 안정적인 연소시스템 운영기술 확보에도 필수적인 근간이 된다. 본 연구에서 다루는 연료의 연소지연시간은 층류/난류 화염 기초연구는 물론 왕복동 엔진, 가스터빈 연소기 등 다양한 연소 기술 적용 분야에 활용이 가능한 기초적인 연료의 연소 특성이다.

본 연구는 전통적인 기존의 화석연료에 대한 의존도를 줄여 탄소배출저감을 위한 항공용 대체연료를 구성하는 기본 화학종을 대상으로 수행한다. 항공유를 포함한 가솔린, 경유 등 일반적인 수송용 전통 화학연료는 1. 사슬형 알케인 2. 가지형 알케인 3. 고리형 알케인 4. 방향족 탄소화합물 네 종류의 화학종 그룹에 해당하는 성분들로 구성된다[1]. 항공용 항공유 혹은 등유의 경우 탄소수 C11~C12 범위의 화학종들이 주 성분이며, 이에 본 연구에서는 C12에 해당하는 화학종들을 선정하여(Table 1) 해당 연료 성분들의 연소특성을 실험 및 해석으로 파악하였다. 추후 무탄소 연료로의 전환을 고려하여 탄소가 포함되어 있지 않은 완전한 무탄소 연료인 수소와 암모니아 크래킹 연료를 포함하여 해석을 진행, 유사한 점화 지연시간을 갖는 연료의 조성을 파악하여 기존 연소 시스템에 적용 가능 여부를 가늠하는 기초 연구를 수행하였다.

Table 1 대상화학종 (대체연료 구성 화학종)

화학종	구분*	화학구조
n-dodecane	1.	
2,9-dimethyldecane	2.	
2,2,4,6,6-pentamethylheptane	2.	
butylcyclohexane	3.	
butylbenzene	4.	

*화학종구분: 1. 사슬형 알케인 2. 가지형 알케인 3. 고리형 알케인 4. 방향족

대상 화학종의 연소 지연시간 측정은 이전 연구[2]에 활용되었던 RCM(Rapid Compression Machine)과 ST(Shock Tube)를 활용하여 수행하였으며, 실험 수행 조건은 압축착화 도달 압력 20bar, 당량비(ϕ) 1.0, 0.5, 0.25 기본으로 하되, 연소 지연시간이 지나치게 길어 낮은 당량비에서 계측이 불가한 화학종도 존재하였으며, 압력에

따른 연소 지연시간 변화를 파악하기 위해 10bar 조건에서의 계측이 RCM장비를 활용하여 일부 화학종에 한하여 수행되었다. RCM 장비의 경우 혼합기의 압축을 진행하는 피스톤의 압축 행정의 물리적인 한계로 도달 가능 온도의 상한이 제한되며, ST의 경우 충격파와 팽창파의 간섭으로 연소지연시간 계측 가능 범위가 제한된다 (~<10ms). 이에따라 NTC(Negative Temperature Coefficient)현상이 관측되며 연료간 연소지연시간 특성이 상이하게 나타나는 중간 온도 영역의 실험 계측이 불가한 경우가 있는데, (Fig. 1) 화학 메커니즘 해석을 수행하여 해당 영역의 실험 데이터 공백을 채우고 예측하고자 하였다.

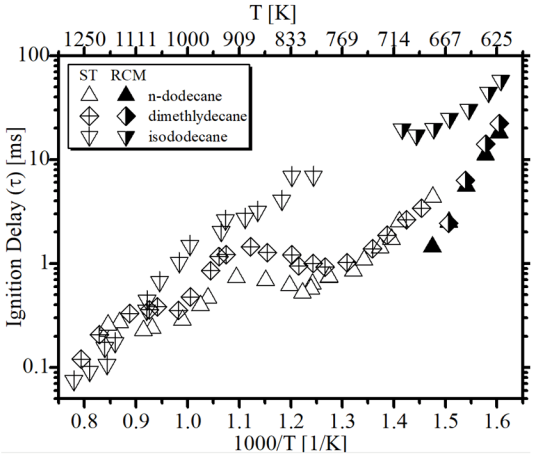


Fig. 1 C_{12} 이성질체의 RCM, ST 연소지연시간 계측 결과 (P = 20 bar, ϕ =1.0)

본 연구에서 연소지연시간 예측을 위한 화학 메커니즘 해석에 활용된 n-dodecane과 수소, 암모니아 메커니즘은 Table 2와 같으며, 저온 영역에서의 실험 계측 결과와의 비교 분석을 통해 해석 데이터의 정확도와 경향성 파악을 바탕으로 실험데이터 부재 영역의 예측 용도로의 활용 가능 여부 등을 파악하였다. 높은 온도 영역에서의 연소 지연시간 예측은 비교적 높은 정확도를 보였으나, 중간 온도영역인 NTC 영역과 저온 영역에서는 실험데이터와 메커니즘 해석 결과, 메커니즘간 해석 결과에도 간극이 존재하였으며, 이에 다양한 메커니즘을 활용한 해석을 진행하여 특정 조건에서 실제 연소 현상을 적절하게 모사 가능한 메커니즘 선별 및 민감도 분석을 수행하였다.

Table 2 연소지연시간 해석 메커니즘

화학종	메커니즘	연도	Species	Reaction
n-dodecane	Liming Cai et.al[3]	2016	1692	8934
n-dodecane	Krithika Narayanaswamy et.al[4]	2014	255	2289
n-dodecane	LLNL [5]	2019	65	1072
n-dodecane	Zhaoyu Luo et.al[6]	2014	105	286
n-dodecane	Shuai Zhao et.al[7]	2025	34	105
Ammonia, Hydrogen	Krishna P. Shrestha et.al[8]	2018	32	274
Ammonia, Hydrogen	Kang Pan et.al[9]	2025	52	275
Ammonia, Hydrogen	Junichiro Otomo et.al[10]	2018	32	213

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기관 기본사업 (암모니아 크래킹 가스터빈 복합발전 시스템 특화기술 개발, NK254C)의 지원을 받아 진행되었습니다.

참고 문헌

[1] Edwards, T., et al. Evaluation of combustion performance of alternative aviation fuels. in 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2010.
[2] Kyungwook Min, D.V., Anna Oldani, Tim Edwards, Tonghun Lee, Autoignition Behavior of Jet Fuel Relevant Pure Hydrocarbon Components in a Rapid Compression Machine. Proceedings of 10th U. S. National Combustion Meeting, 2017. 1: p. 2579.
[3] Cai, L., et al., Optimized reaction mechanism rate rules for ignition of normal alkanes. Combustion and Flame, 2016. 173: p. 468-482.
[4] Narayanaswamy, K., et al., A chemical mechanism for low to high temperature oxidation of n-dodecane as a component of transportation fuel surrogates. Combustion and Flame, 2014. 161(4): p. 866-884.
[5] G. Kukkadapu, S.W.W., M. Mehl, K. Zhang, C. K. Westbrook, W. J. Pitz, M. J. Mcnenly, S. M. Sarathy, A. Rodriguez, O. Herbinet, F. Battin-Leclerc, C. J. Sung. An updated comprehensive chemical kinetic model of C8-C20 n-alkanes. in 10th U. S. National Combustion Meeting. 2017.
[6] Luo, Z., et al., Development and validation of an n-dodecane skeletal mechanism for spray

combustion applications. Combustion Theory and Modelling, 2014. 18(2): p. 187-203.
[7] Zhao, S., et al., Skeletal oxidation mechanism for n-Dodecane in gas turbine combustor simulations. Chemical Engineering Journal, 2025. 505: p. 159399.
[8] Shrestha, K.P., et al., Detailed Kinetic Mechanism for the Oxidation of Ammonia Including the Formation and Reduction of Nitrogen Oxides. Energy & Fuels, 2018. 32(10): p. 10202-10217.
[9] Pan, K., et al., A reduced chemical kinetic mechanism for CFD modeling of combustion fueled by ammonia and its blends with methane/hydrogen. Chemical Engineering Journal, 2025. 505: p. 159253.
[10] Otomo, J., et al., Chemical kinetic modeling of ammonia oxidation with improved reaction mechanism for ammonia/air and ammonia/hydrogen/air combustion. International Journal of Hydrogen Energy, 2018. 43(5): p. 3004-3014.

3kW급 소형 연소기를 이용한 메탄-철 하이브리드 비예혼합화염의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

변창희* · 채태영* · 이재욱* · 양원*†

Experimental study on the heat transfer characteristics of methane-iron hybrid non-premixture flame with 3 kWth small combustor

Changhee Byun*, Taeyoung Chae*, Jaewook Lee*, Won Yang*†

ABSTRACT

This study provides a fundamental investigation of the heat-transfer characteristics of a non-premixed methane-iron hybrid flame. Experiments under varying oxygen concentrations show that oxygen enrichment shortens the ignition delay, shifts the ignition location upstream toward the top of the furnace, and concentrates the high-temperature/high-luminosity zone in the upper region. In addition, both the co-firing ratio and the oxygen concentration exhibit positive correlations with the in-furnace radiative power.

Key Words : Iron, Hybrid flame, Co-firing, Heatflux, Radiation

서 론

철(Fe)은 지구상 매장량이 풍부하고, 산화물이 고체로 남아 취급이 용이하며, 연소 중 강한 복사 방출을 나타내어 복사 지배형 열원으로 유리하다. Hulsbos, M. R.은 메탄-철-공기를 사용하여 연소실험을 진행하였으며 메탄-공기의 예혼합을 통해 철연소가 가능함을 보였다.[1] 하지만 순수 금속 분말 화염은 점화·안정성 확보에 제약이 있고, 반응이 기상 확산·표면 반응·산소 확산의 경쟁에 의해 좌우되므로 화염 제어가 까다롭다. 이러한 한계를 보완하기 위해 메탄-철 하이브리드 혼소 개념의 기상 연료(메탄)는 점화와 화염 안정화를 담당하고, 철 입자는 고온 발광으로 복사 성분을 증폭하여 전체 열전달 효율을 높이는 상보적 역할을 수행한다. 특히 비예혼합화염 구성이면 공급계통이 단순하고 연료 조성이 유연하여, 산소 농도와 입자 공급률을 변화시키며 방사·대류 열전달의 분담을 체계적으로 조사하기에 적합하지만 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 3 kW급 비예혼합 소형 연소기를 이용하여 메탄-철 하이브리드 화염의 열전달 특성을 실험적으로 규명한다.

* 한국생산기술연구원
† 연락저자, yangwon@kitech.re.kr
TEL : (041)-589-8323 FAX : (041)-589-8323

실험 장치 및 실험 방법

실험에 사용되는 연소로 및 기타 실험 장치의 실물사진을 Fig.1에 나타내었다. 연소로 상부에는 3개의 스탠리스 원형관으로 구성되며 주산화제, 메탄 그리고 철 입자가 각각 공급된다. 연소로 최상부에는 드럼 방식의 고체피더가 위치하며 주산화제의 회전관성을 증가시키기 위해 연소로 상부 산화제 공급관에 스월러를 위치케 하였다. 본 실험에 사용된 철파우더는 시브 테스트을 통해 평균 37um의 입자 크기를 사용하였다. 본 실험의 주요 실험변수는 입열량 기준으로 철혼소량 0~20%, 산소부하는 21%를 기준에서 40%까지 3%간격으로 변화하였다. 또한 버너의 총 출력은 3kW로 고정되며 연소로 내부 온도는 12개의 k-type열전대가 위치하며 대류 및 복사에너지가

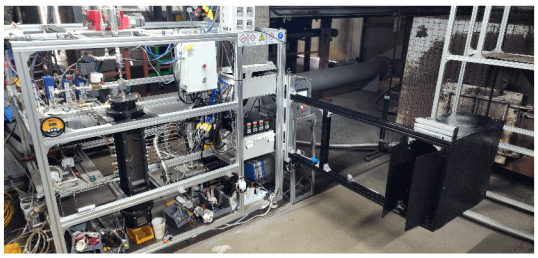


Fig. 1 Photograph of the methane-iron hybrid combustion furnace and experimental devices

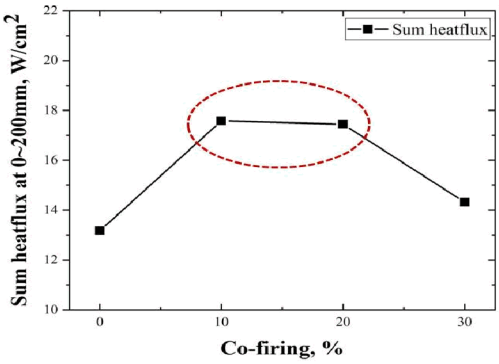


Fig. 2 Sum of heatfluxes with co-firing 0% to 30%

반영된 열유속계를 사용하였으며 석영창에서 18cm 떨어진 위치에는 Power meter를 설치하여 화염의 복사에너지를 측정하였다.

실험 결과

Fig. 2는 적정 메탄-철 혼소량을 파악하기 위해 혼소량에 대한 연소로 내부 열유속을 합산한 값을 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 혼소량이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보이며 연소로 내부 열전달에 대한 적정 혼소량은 10~20%정도인 것으로 나타났다.

Fig. 3은 메탄-철 혼소화염의 산소농도 증가에 따른 연소로 내부의 화염 형상을 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 (b)의 경우 메탄 화염에 철 분말을 공급하면 연소로 하류에서 가열·산화 유도시간을 거쳐 점화되고, 중심축을 따라 연속적인 발광 입자 기둥이 형성되는 것이 관찰되었다. 또한 산소부하율을 증가하게 되면 입자 점화가 더욱 빨라지고 산화율이 증가하여 발광 영역이 넓고 매우 밝아지며 복사 강도가 크게 증가하는 것이 관찰된다.

Fig. 4는 메탄-철 혼소율과 산소 농도 변화에 따른 복사에너지를 나타낸 그림이다. 여기서 혼소율은 20%까지이며 산소농도는 포화점을 얻기 위해 50%까지 측정하였다. 그림에서 보듯이 혼소율과 산소농도가 증가함에 따라 복사에너지가 증가하는 경향을 보인다. 철혼소율 10%에서 산소 농도가 증가함에 따라 복사에너지가 완만하게 증가하는 경향을 보였고 산소농도 47~50% 에서 약 180W 수준으로 포화 경향을 보인다. 또한 철 혼소율 20%에서는 산소 농도 33~37% 구간에서 약 380W에서 포화되는 경향이 관찰된다.

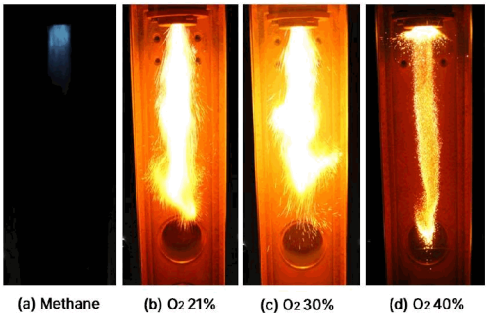


Fig. 3 In-furnace flame photos versus oxygen enrichment at a 10% co-firing ratio

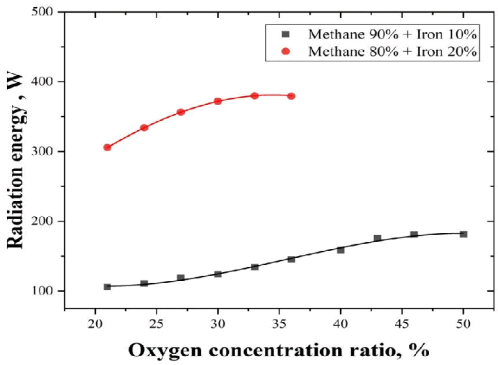


Fig. 4 Radiation energy of oxygen concentration ratio and Iron co-firing

결 론

본 연구는 메탄-철 하이브리드 연소에 대한 열전달 특성을 파악하는 것이다. 실험 결과, 순수 메탄화염은 낮은 발광의 청색 화염이지만 철 분말 혼소시 중심축을 따라 철발광 입자 기둥이 형성된다. 또한 산소 농도가 증가할수록 점화지연이 단축되고 점화 위치가 연소로 상부로 이동하며 고온·고발광 영역이 연소로 상부로 집중되는 것이 관찰되었다. 또한 혼소율과 산소농도가 증가함에 따라 복사에너지가 증가하는 경향이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 생산기술 국제공동 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] M.R. Hulsbos, Hermanns, R. J. M Bastiaans, P.D. Goey, “Laminar burning velocity of hybrid methane-iron-air flames”, Poster session presented at 39th International Symposium on Combustion(Vancouver, Canada), 2022

화력발전 탈탄소화를 위한 암모니아 혼소: 보일러 유형에 따른 연소 특성과 NOx 배출 영향

쩡이제[*,**] · 김승모[**] · 전충환[*,**†]

Ammonia Co-Firing for Power-Plant Decarbonization: Impact of Boiler Type on Combustion Characteristics and NOx Emissions

Yijie Zeng[*,**], Seung-Mo Kim[**], Chung-Hwan Jeon[*,**†]

전 세계적인 기후 위기가 심화됨에 따라 온실가스 배출 저감은 국제사회의 시급한 과제가 되었다. 전 세계 이산화탄소 배출의 주요 원인 중 하나인 석탄화력발전소는 탈탄소 전략의 핵심 대상이 되고 있다. 이러한 배경에서 무탄소 연료인 암모니아(NH_3)는 석탄화력발전 부문의 탈탄소를 위한 중요한 기술적 경로로 부상하고 있다 [1-5].

동아시아 주요 국가들은 이미 암모니아 에너지를 청정에너지 전략 체계에 포함시켰다. 일본은 제6차 에너지기본계획에서 암모니아 발전을 미래 에너지 구조의 핵심 요소로 확립하고, 암모니아 공급망 구축과 실증 프로젝트를 적극 추진하고 있다[8]. 중국은 '14차 5개년 계획'과 '2035 장기 목표'에서 수소와 암모니아를 탄소중립 실현을 위한 전략적 수단으로 규정하며, 녹색 에너지 전환에서의 핵심적 역할을 강조하고 있다[6].

동아시아의 주요 경제국인 한국은 글로벌 기후 행동에서 적극적인 역할을 수행하고 있다. 한국 정부는 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)」에서 2030년까지 온실가스 배출량을 2018년 대비 40% 감축하겠다고 약속했다. 「제11차 전력수급 기본계획」은 화석연료 발전 비중 감소, 재생에너지 설비용량 확대, 암모니아 등 무탄소 연료 도입을 포함한 구체적인 실행 경로를 제시하고 있다. 현재 한국은 석탄화력발전소에서 암모니아 혼소 실증사업을 추진하며, 대형 석탄보일러의 대체 연료로서 암모니아의 기술적 타당성을 평가하고 있다. 그러나 암모니아 혼소 기술의 실무 적용 경험이 아직 부족한 상황에서, 안전하고 신뢰성 있는 구현을 위한 체계적인 기초 연구가 시급히 요구된다 [6].

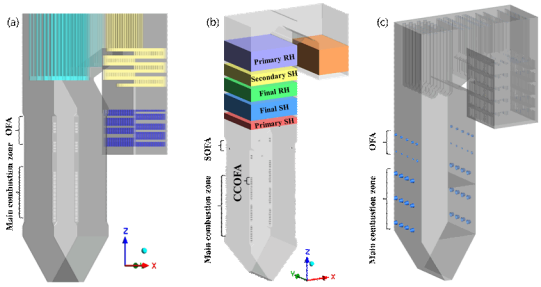


Fig. 1 Schematic diagrams of boiler structures with different capacities (a) 500 MW tangentially-fired boiler, (b) 550 MW ultra-low NOx tangentially-fired boiler, and (c) 1000 MW ultra-supercritical wall-fired boiler.

기존 연구 [7-9]에 따르면 암모니아 혼소 기술은 상당한 진전을 이루었다. 그러나 보일러 유형에 따라 연소 특성과 NOx 배출에서 뚜렷한 차이를 보이므로, 특정 시스템에 대한 심층적인 연구가 필요하다. 그림 1은 500MW, 550MW, 1000MW 보일러의 암모니아 혼소 시뮬레이션 결과를 나타내며, 로내 NO 농도 분포 특성을 보여주고 서로 다른 연소 시스템 간의 암모니아 혼소 특성 차이를 보여준다. 이에 본 연구는 한국의 대표적인 석탄보일러를 연구 대상으로 선정하여, 다양한 보일러의 암모니아 혼소 특성을 체계적으로 분석하고 그에 따른 최적화 전략을 제시함으로써, 한국 화력발전 산업의 탈탄소 전환을 위한 기술적 지원과 실무적 지침을 제공하고자 한다.

* 부산대학교 기계공학과
** 부산대학교 청정화력발전에너지연구소
† 연락저자, chjeon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-1285 FAX : (051)-515-7189

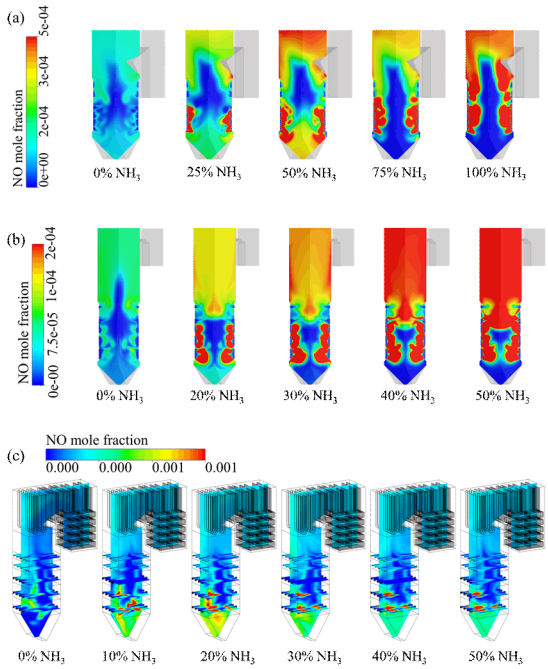


Fig. 2 Effects of ammonia co-firing ratio on NOx emission concentrations in boilers with different capacities (a) 500 MW tangentially-fired boiler, (b) 550 MW ultra-low NOx tangentially-fired boiler, and (c) 1000 MW ultra-supercritical wall-fired boiler.

후 기

This work was supported by the "National Research Foundation of Korea" funded by the Ministry of Science, ICT, and Future Planning (grant number 2022K1A4A8A01080312)

참고 문헌

[1] B.H. Lee, Y.H.Bae, S.H. Cho, G.M. Kim , C.H. Jeon "Comprehensive technical review for fundamental characteristics and application of NH3 co-firing with coal", Chem Eng J., Vol. 474, 2023, 144587.

[2] Y.J. Zeng, H.Y. Jo, S.M. Kim, B.H. Lee, C.H. Jeon, "NH_3 co-firing strategy in 500 MW tangential utility boiler: Impact of blending methods", J Energy Inst., Vol. 117, 2024, 101857.

[3] S.H. Song, J.H. Lee, H.B. Moon, S.M. Kim, G.M. Kim, C.H. Jeon, "Experimental evaluation of ammonia injection strategies for different solid fuel types in drop tube furnace for carbon-free energy transition in thermal power plants", J Energy Inst., Vol. 120, 2025, 102060.

[4] M.W. Kim, D.G. Lee, J.S. Kim, J.W. Kweon, C.H. Jeon, "NH3 Co-Firing Strategy in Bubbling Fluidized Bed Reactor: Experimental and Numerical Analysis for CO2 and NOx Reduction", Appl. Therm. Eng., Vol. 280, 2025, 128534.

[5] K.H. Kim, B.H. Lee, C.H. Jeon, "Carbon-free ammonia co-firing in fluidized bed combustion: Analysis of advanced chemical modeling and detailed mechanism", ACS Omega, Vol. 10, 2025, pp. 32712-32727.

[6] Y.J. Zeng, J.W. Kweon, G.M. Kim, C.H. Jeon, "Carbon-free power generation strategy in South Korea: CFD simulation for ammonia injection strategies through boiler burner configurations in tangentially fired boiler", Eng., Vol. 309, 2024, 13376.

[7] Y.J. Zeng, J.W. Kweon, H.B. Moon, B.H. Lee, C.H. Jeon, "An advanced combustion technology for high-ratio ammonia co-firing in tangentially fired boilers through spatial fuel partitioning and air staging", Fuel., Vol. 398, 2025, 135513.

[8] Y.J. Zeng, C.H. Jeon, "Advancing energy system decarbonization through high-ammonia co-firing: Performance optimization and environmental benefits in representative thermal power generation in South Korea", Eng., Vol. 334, 2025, 137572.

[9] Y.J. Zeng, G.M. Kim, K.M. Kim, S.M. Kim, C.H. Jeon, H.J. Yu, "Carbon-free power generation strategy in South Korea: CFD simulation for optimization of ammonia injection and blending ratio in tangentially fired boiler", Appl. Therm. Eng., Vol. 279, 2025, 127563.

예가열 케로신 연료 분사 스크램제트 연소기의 연소장에 대한 공동의 역할

정승민* · 이경재*† · 이양지* · 이상훈* · 김보연* · 양인영*

Role of the Cavity Flameholder in the Reacting Flowfield of a Preheated Kerosene-fueled Scramjet Combustor

Seung-min Jeong*, Kyungjae Lee*†, Yang Ji Lee*, Sanghoon Lee*, Boyeon Kim*, Inyoung Yang*

본 연구에서는 예가열 케로신을 연료로 사용하는 직렬 공동형 스크램제트 연소기에서, 각 공동이 연소장에 기여하는 바를 분석하였다. 이를 위하여, 지상 연소시험이 수행된 TBCC(Turbine-based Combined Cycle) 연소기에 대한 수치해석이 수행되었다.

Fig. 1에 해석 대상인 소형 스크램제트 연소기를 도시하였다. 직사각 단면의 격리부를 가지고 있으며, 격리부 단면은 높이 20 mm, 폭 100 mm이다. 해석 영역은 격리부 입구부터 연소실 출구까지로 구성되어있으며, 총 길이는 1,025 mm이다. 연소기의 냉각 및 연료의 예가열을 위하여, 상판 및 하판에 각 1개씩의 열교환기[1]가 장착되어 있다.

격리부 입구로는 마하수 2.0, 정온도 약 756 K, 정압력 약 1.0 bar 인 공기가 유입된다. 이러한 고 엔탈피 공기 공급을 위하여, 연소식 공기 가열기(VAH, Vitiated Air Heater)가 사용되었으며, 이로 인하여 소량의 최종 생성물(CO_2, H_2O)이 공급 공기에 포함되어 있다[2]. 본 연구에서는 여러 지상 연소시험 조건 중, 완전한 scram mode를 띄는 당량비 0.12 조건에서의 공동의 역할을 집중적으로 분석하였다. 당량비 0.12 조건에서는, 연료가 열교환기를 통한 예가열을 거쳐 분사기 tip에서 정압력 약 4.2 bar, 정온도 약 740 K의 음속 조건으로 분사된다.

수치해석은 밀도 기반, 유동-화학반응이 완전 결합된 형태의 in-house code[3,4]를 활용하여 수행되었다. IDDES 모델로 난류를 처리하였으며, 난류-연소 모델(TCI, Turbulent-Combustion Interaction)의 신뢰도 있는 고마하수 보정 방안은 아직 제시된 바 없기에, 난류-연소 모델은 사용하지 않았다. 2단계 총괄 모사 케로신 화학반응 기구를 사용하였으며[5], 5차 정확도의 oMLP 기법, 2차 중심차분으로 대류항 및 점성항을 처리하였다. ASUMPW+기법으로 수치 플럭스 분할을 수행하였으며, 완전 내재적 2차 정확도의 LU-SGS 기법으로 시간적분을 수행하였다. 시간적분은 최대 4회의 부 반복을 부과하였다. 폭 방향 중심을 기분으로 symmetric 해석이 수행되었고, 해석영역은 약 17백만개의 정렬격자로 구성시켰다. 해석 영역은 256개의 블록으로 분할, Zeon6 6980P CPU가 각 블록을 처리하도록 하였다.

4.0 ms 까지는 초음속 유동장 안정화를 위한 비반응 유동해석이 수행되었다. 이후부터 9.0 ms 까지는 연료 분사 및 반응 유동장 해석이 수행되었다.

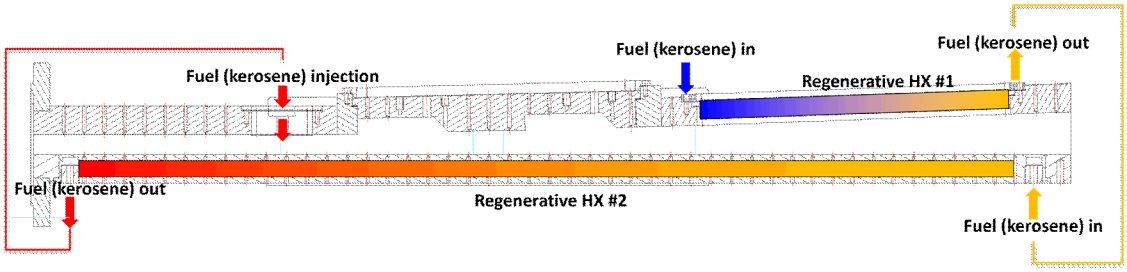


Fig. 1 Target of the present research: Kerosene-fueled scramjet combustor with multi-regenerative heat exchanger

* 한국항공우주연구원 미래항공추진팀
† 연락저자, lucia01@kari.re.kr

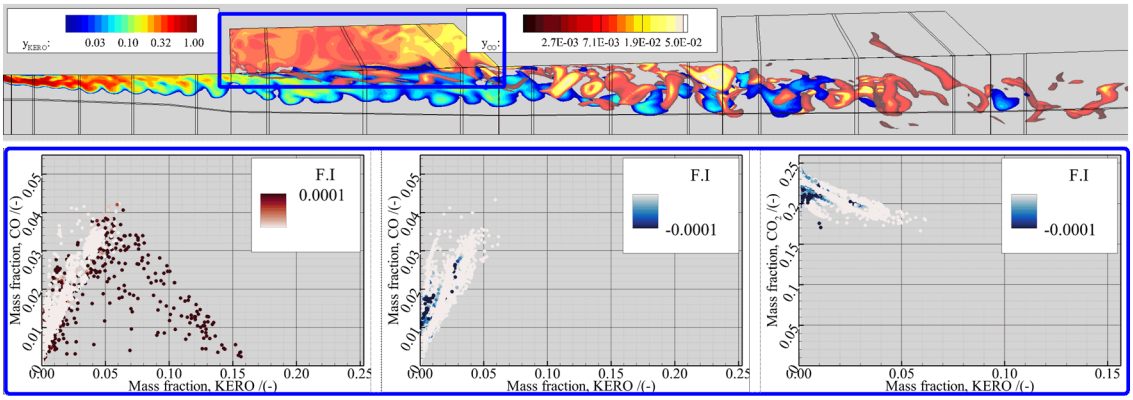


Fig. 2 (top) Instantaneous mass fraction of KERO and CO, (bottom) scatter plot of mass fraction of CO and CO_2 colored by flame index at the 1st cavity

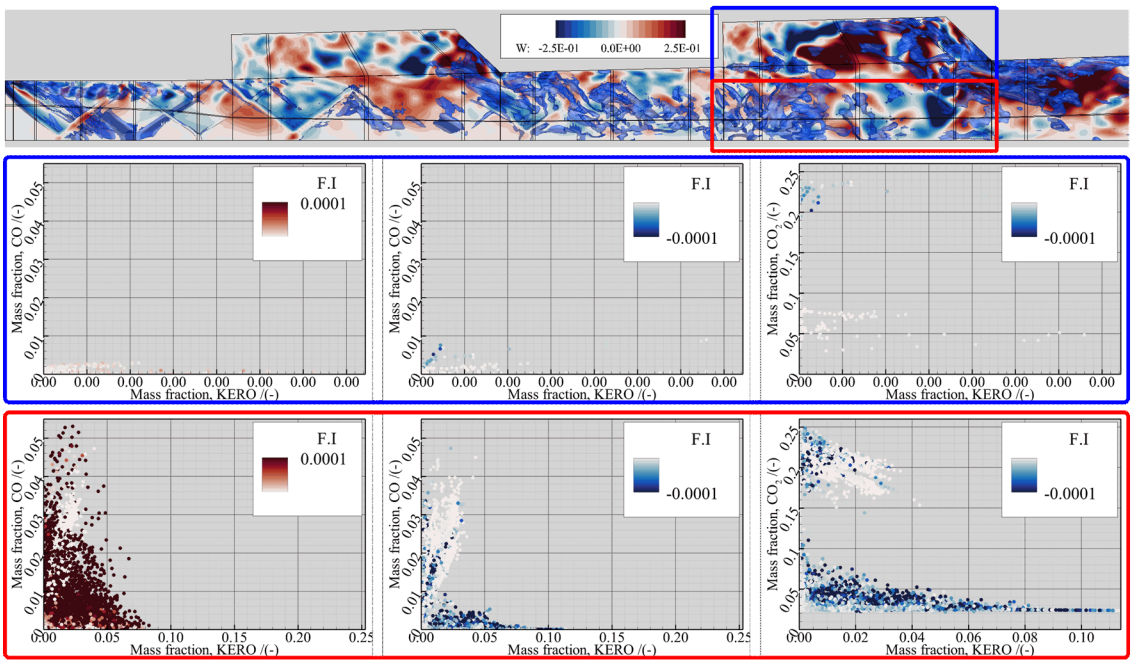


Fig. 3 (top) Instantaneous mass fraction of KERO and CO, (bottom) scatter plot of mass fraction of CO and CO_2 colored by flame index at the 2nd cavity

해석 결과, 첫 번째 공동과 두 번째 공동의 역할이 극명하게 대비되었다. 중심 평면에서의 연료 및 CO의 질량분율과, 공동 내부에서의 scatter plot을 Fig. 2에 도시하였다. 첫 번째 공동은 순간적으로 2500 K을 상회하는 고온의 온도장이 분포되나, 최종 생성물인 CO2가 화학종 대부분을 지배하고 있었다. 이는, 첫 번째 공동에서 소량의 연료 및 중간 생성물이 분포하고 있으나, 이미 기 연소된 상태가 지배적인 분포를 보인다. 따라서 첫 번째 공동은 대부분의 산화제(O2)가 소모된, 고온의 기 연소가스가 고정됨으로 연료 스트림이 자발점화 온도 이상으로 가열시키는 역할이 주요하게 수행하고 있음을 알 수 있다. 또한 벽면 분사기 tip의 형태를 떠나 대부분 CRVP(Counter-Rotatinf Vortex Pair) 형태를 띄는 연료 스트림의 voticity 구조를 볼 때 [6], 자연스럽게 소량의 연료가 공동 내부로 침투된다. 따라서 이 결과는 벽면 재생냉각 열교환기 등의 장치를 이용한 케로신을 예가열이 수반되는 시스템에서, 스크램제트의 화염유지를 위해 공동 내부의 pilot 분사기 등을 포함한 연료 분사가 이루어질 경우, 이 장치들이 오히려 화염을 소염시킬 수 있다는 결과를 보여준다.

두 번째 공동은, 열교환기를 통한 예가열 후

첫 번째 공동에 의해 연료 스트림이 다시 한번 예가열-혼합-연소되며 가장 큰 연소압이 고정되는 지점이다. Fig. 3에 중심 평면에서의 vorticity 결과 및 두 번째 공동 내-외부 지점에서의 scatter plot을 도시하였다. 두 번째 공동 내부는 명확히 지배적인 연소 특성을 구분지을 수 없다. 그러나, 두 연소 특성(non-premixed, premixed) 모두 상당히 좁은 연료 질량분율 영역을 따르고 있으며, 미연소-기연소 가스 모두 공종하는 분포를 보인다. 또한 두 번째 공동은 shock system의 붕괴와 함께, 후방 벽면에 의한 혼합 효과가 추가되어 heating 된 연료 스트림을 혼합-연소 시키는 주요한 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

본 연구는 분사된 연료 스트림이 형성시키는 자연스러운 vorticity 구조에 의해 첫 번째 공동에 고온의 기연가스가 고정되며, 이로 인하여 첫 번째 공동이 연료 스트림을 자발점화 온도로 다시 한번 상승시키는 역할을 하는 것을 보여준다. 더불어 두 번째 공동은 온도가 상승된 연료/공기 스트림을 다시 한번 혼합시키며 연소시키는 주요 역할을 한다. 각기 서로 분리된 역할을 담당하는 두 공동의 이같은 결과는, 케로신 연료의 예가열이 수반된다면, 공동 내부의 pilot 분사가 불필요하며 tandem 공동 및 연소기의 형상 설계로 연소 성능을 극대화할 수 있음을 알려준다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 기본사업의 일환으로 수행되는 극초음속 비행체 복합엔진 축소형 기술 시현 과제(FR25M01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] I. Yang, “Regenerative Cooling Channel Design of a Supersonic Combustor Considering High-Temperature Property of Fuel”, J. Korean Soc. Propuls. Eng. Vol. 22, 2018, pp. 37-46.

[2] I. Yang, K. Lee, Y. Lee, S. Lee, “Combustion Performance According to the Cavity Flameholder Location in a Supersonic Combustor”, J. Korean Soc. Propuls. Eng. Vol. 24, 2018, pp. 13-20.

[3] S.-M. .Jeong, J.-H. Lee, J.-Y. Choi, “Numerical investigation of low-frequency instability and frequency shifting in a scramjet combustor”, Proc. Combust. Inst., Vol. 39, 2023, pp. 3107 - 3116.

[4] B.-K. Sung, J. Kasahara, J.-Y. Choi, “Numerical investigation on the detonative tangential combustion instability in a rocket combustor”, Combust. Flame, Vol. 275, 2025, pp. 114092-114110.

[5] B. Franzelli, E.Riber, M. Sanjosé, T. Poinsot, “A two-step chemical scheme for kerosene - air premixed flames”, Combust. Flame, Vol. 157, 2010, pp. 1364 - 1373.

[6] S.-M. Jeong, J.-E. Kim, M.-S. Kim, B.-K. Sung, J.-Y. Choi, “Numerical study on the combustion characteristics and performances of single and multi-injectors in a scramjet combustor”, Aerosp. Sci. Technol., Vol. 155, 2024, pp. 109697-109715.

전이 학습을 활용한 희소 데이터셋 조건에서의 대형 탄화수소 연료의 점화 현상 예측

박해람, 정기성†

Transfer Learning for Predicting the Ignition of Large Hydrocarbon Fuel/Air Mixture with a Sparse Dataset

Hae Ram Park, Ki Sung Jung†

ABSTRACT

본 연구는 데이터 희소성이 존재하는 대형 탄화수소의 음의 온도계수(Negative Temperature Coefficient; NTC) 조건에서 전이학습(Transfer Learning; TL)의 적용 가능성과 예측성능을 평가한다. 그 결과 TL은 NTC가 강하게 나타나는 온도범위(800K-1000K)에서 n-heptane/공기 혼합물의 자발화 현상 경향을 안정적으로 추종하며, 특히 적절한 정규화(타깃 로컬 기준)에서 희소 데이터에서도 학습 안정성과 최대오차 억제가 향상됨을 확인하였다. 본 연구에서는 단순 연료에서 입증된 TL 접근을 NTC 거동이 지배적인 대형 탄화수소로 확장하여, 데이터 희소성 상황에서의 실용적 적용 가능성을 제시하며, 향후 2차원 환경으로의 확장을 위한 기초를 마련한다.

Key Words: Transfer learning, Artificial Neural Network, Negative Temperature Coefficient

1. 서론

최근 BLASTNet[1]을 중심으로 커뮤니티 주도의 데이터 공유가 활발히 이루어지면서, 연소 분야의 고정밀 시뮬레이션 데이터 공유가 체계화되고 있다. 그럼에도 모든 운전 조건을 포괄할 만큼의 데이터를 확보하기에는 아직 어려움이 있다. 이러한 데이터 희소성 문제를 완화하는 접근으로 전이학습(Transfer learning; TL)이 주목받고 있으며, 실제로 수소/공기 예혼합물의 0차원 점화 문제에서 적은 타깃 샘플로 성능을 향상하는 효과가 보고되었다[2].

다만 음의 온도계수(Negative Temperature Coefficient; NTC) 거동이 나타나는 대형 탄화수소의 경우에는 그 유효성이 검증되지 않았다. 음의 온도계수 구간은 두 단계 점화로 점화지연시간(ignition delay time)-온도 관계가 강하게 비선형 (S자형)이 되며, 운전 조건의 작은 차이에도 반응이 크게 달라진다. 이로 인해 소스와 타깃 데이터 간의 분포 이동이 커지고, 단순한 TL 설정은 부정적 전이(Negative Transfer) 위험이 생긴다.

따라서 본 연구는, 기존의 단순 연료에서 검증된 접근을 NTC 거동이 지배적인 대형 탄화수소 조건으로 확장하여, 데이터가 희소한 상황에서의 적용가능성과 효과를 체계적으로 평가하는 단계에 있다. 이 과정을 기반으로 향후 2차원 문제에서도 적용해보려 한다.

2. 결과

본 연구에서는 n-heptane/공기 혼합물의 0차원 점화 문제를 대상으로, 희소 타깃 데이터($N_\Phi=4$)에서 TL의 효과를 ignition delay time 중심으로 평가하였다. 여기에서 N_Φ 는 해석 케이스의 수를 의미한다. 비교군은 세 범주로 구성하였다: TL 미적용, 원천 도메인(source domain)을 기준으로 정규화 (normalization)한 TL, 타깃 도메인(target domain)을 기준으로 정규화 한 TL.

평가지표는 NTC 구간 (800K-1000K)에서의 민감도를 이용하였다. 구체적으로 초기 온도 대비 500K 이상 상승했을 때를 ignition의 시작으로 간주하였고, 오차는 상대오차로 계산되었다. 훈련 데이터는 초기 압력 40 atm, 당량비(ϕ)는 0.3으로 설정하였다. 초기 온도는

국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공
† 연락저자, 정기성(kjung@pknu.ac.kr)

800−1000K 범위 내에서 온도 간 ΔT =10K씩 변경해 나가며 총 21개의 케이스를 계산했으며, 각 케이스별로 10,000개의 훈련 샘플을 생성하였다. 이를 기반으로 인공신경망(Artificial Neural Network)을 학습시켰으며, 해당 모델의 검증을 별도의 테스트 세트를 만들어서 수행하였다. 테스트 세트의 경우 동일 조건에서 온도 범위가 805−995 K 내에서 ΔT=10K간격으로 설정하였으며, 실제 ANN기반 계산을 돌려 ignition delay time을 측정함으로써 그 예측 성능을 평가하였다.

그림 1은 ϕ = 0.4에서 CHEMKIN 기반의 0−D 해석 (Grounded 해석; DNS라고 명명)과, 충분한 데이터셋(N_Φ =21)및 희소 데이터셋(N_Φ =4)에서의 초기온도 별 ignition delay time 예측 결과를 비교한 것이다. N_Φ=21의 경우 전 온도 구간에서 DNS 결과를 정확하게 추종하는 반면, N_Φ=4의 경우는 오차가 크게 나타난다.

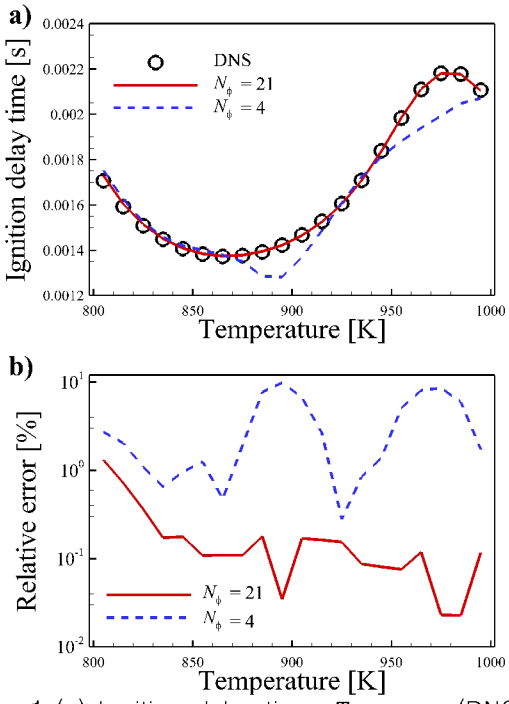


Fig. 1 (a) Ignition delay time−T_0 curves (DNS vs N_Φ=21 vs N_Φ=4), (b) Relative error (%) to DNS

그림 2는 source task(ϕ =0.3, N_Φ =21)와 target task(ϕ =0.4, N_Φ =4)를 설정하고, TL 미적용, TL을 source domain, target domain 기준으로 normalization을 각각 적용했을 때 초기온도별 ignition delay time 예측 결과를 DNS와 비교한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이, TL을 적용하지 않았을 때는 ignition delay time을 정확하게 추종하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 1에서 확인했듯, N_Φ =21로 설정한 후 ANN 모델을 훈련 시 그 정확도는 TL을 사용하지 않아도 매우 높은 것으로 확인되었으므로, 현재 N_Φ=4에서 TL을 사용하지 않았을 때 보이는 높은 오차는, 훈련 데이터의 희소성 때문에 기인한다고 볼 수 있다.

TL 적용군은 미적용 대비 ignition delay time 상대오차의 중앙값과 상한치를 일관되게 낮추었다. 특히 target domain 기준 normalization (TL−target)은 대부분의 온도에서 오차≤ 약 1%로 유지되어 DNS 결과와 유사하다. source domain 기준 정규화(TL−source)도 개선된 모습을 보이지만, 890K−980K에서 비교적 높은 오차를 보인다.

요약하면, 대형 탄화수소 희소 데이터에서 TL 학습이 효과적으로 활용될 수 있으며, 특히 TL의 안정성이 normalization 및 domain 행렬의 영향을 크게 받음을 확인하였다.

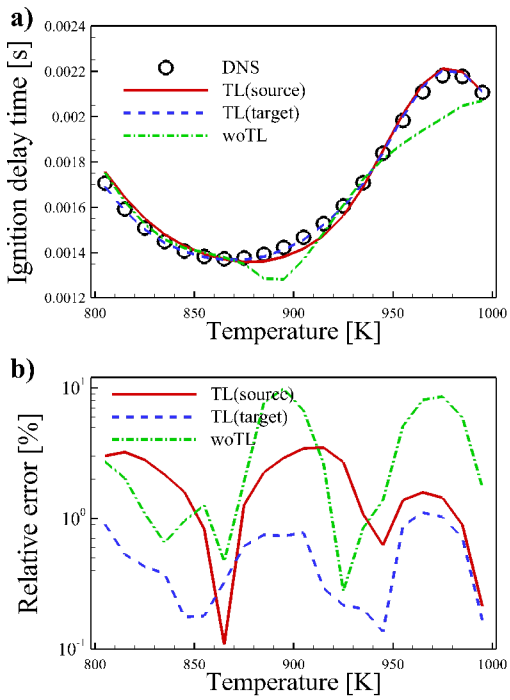


Fig. 2 (a) Ignition delay time−T_0 curves (DNS vs TL−source, TL−target, without TL), (b) Relative error (%) to DNS

후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] W. T. Chung, K. S. Jung, J. H. Chen, and M. Ihme," BLASTNet: A Call for Community-Involved Big Data in Combustion Machine Learning", Applications in Energy and Combustion Science, Vol. 12 (2022) 100087.
[2] K. S. Jung, T. Echekki, J. H. Chen, and M. Khalil "Transfer Learning for Predicting Source Terms of Principal Component Transport in Chemically Reactive Flow", Data-Centric Engineering 5 (2024) e42.

Numerical study on the Evaporation and Combustion of a Two-Component Diesel Surrogate Droplet

Surya Balusamy*, Ki Yong Lee*†

ABSTRACT

In this study, numerical simulations of isolated diesel fuel droplet evaporation and combustion were conducted using the Lagrangian-Eulerian approach. The objective was to investigate the evaporation and combustion of two-component diesel surrogate droplet and to validate with the available experimental data of other researchers. For the evaporation analysis, simulations of a pure n-dodecane droplet showed good agreement with experimental results. To determine the ignition delay time, a perfectly stirred reactor (PSR) combustion model was employed. The detailed kinetic mechanism for diesel surrogate (77% n-dodecane and 23% m-xylene) used in this study consisted of 362 species and 2,653 reactions. Overall, the results show that the lifetime of the diesel surrogate droplet was increased by 11% compared to n-dodecane droplet. Additionally, as the ambient pressure increased from 1.9 to 3.8 MPa, the cool flame becomes more stronger, and the ignition delay time decreased. Overall, the ignition delay-time results are in good agreement with the experimental data.

Key Words: n-dodecane, Diesel surrogate, Ignition delay time, OpenFOAM

1. INTRODUCTION

In diesel engines, injected fuel undergoes complex physical and chemical processes such as atomization, breakup, and evaporation caused by liquid-gas interactions. To simplify these phenomena, studies using single droplet fuel and multi-component surrogates provide valuable insights into surrogate fuel formulation. Isolated droplet studies also offer computational efficiency in DKM-based simulations using the L-E approach. Understanding and controlling LTI, cool flames, and the transition from cool to hot flames are crucial for enhancing engine performance and reducing emissions. Previous numerical work [1] focused on mono-component fuel droplet evaporation and combustion of n-heptane and n-dodecane. However, multi-component surrogate droplets with Low Temperature Ignition (LTI) have not been investigated due to the complexity of reaction rates under LTI conditions. In this study, two-stage ignition: LTI and HTI is observed for two-component diesel surrogates and validated against experimental data.

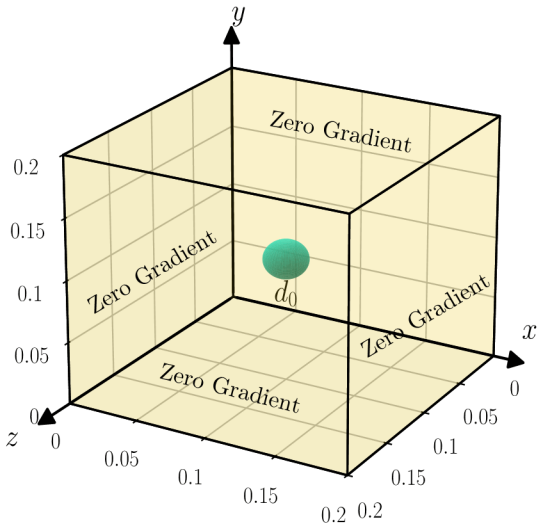
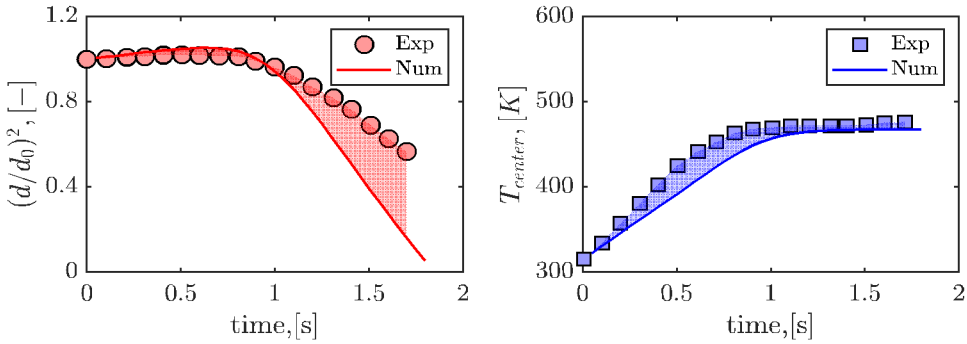
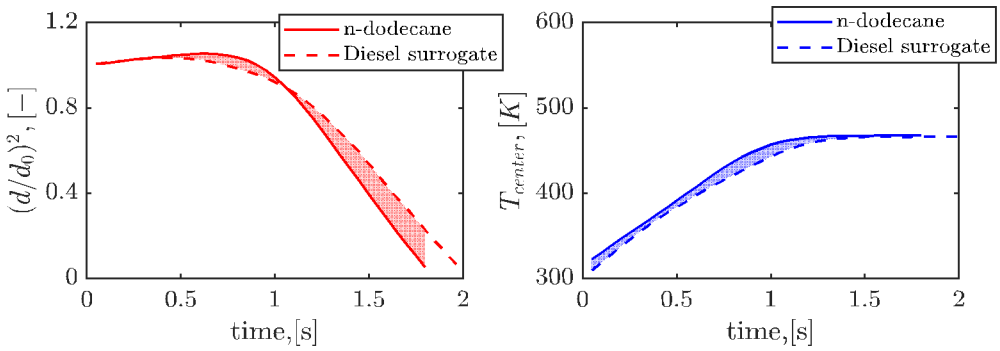


Fig. 1 3-D computational domain used in this study.

* 국립경국대학교 전자·기계공학부
† 연락저자, kylee@gknu.ac.kr
TEL : (054)820-5899 FAX : (054)-820-6127



(a) 100% n-dodecane



(b) n-dodecane and diesel surrogate

Fig. 2 Normalized squared diameter $(d/d_0)^2$ with respect to time (a) validation with experiments of Harada et al. [2] (b) comparison of n-dodecane and diesel surrogate.

2. METHODOLOGY

The simulation has been carried out using OpenFOAM V-2312 using PISO algorithm. The computational domain is a 3D-square prism of 0.2×0.2×0.2 (m) [1] and at the center of the prism the droplet is fixed as shown in Fig.1. The initial and boundary condition used for simulation is shown in Table.1. The grid configuration used in this study is based on our previous work [1]. The present work investigates the autoignition behavior of two-component diesel surrogates [3] using detailed chemical reaction mechanisms of Narayanasamy et al. [4]. These mechanisms were used to predict the autoignition delay time of the fuel–air mixture, emphasizing two-stage ignition and negative temperature coefficient (NTC) behavior.

Table. 1 Initial and boundary conditions

No	Parameter	Evaporation	Combustion
1	Fuel	n-dodecane, Diesel surrogate	Diesel surrogate [3]
2	Initial droplet diameter (d_0) [mm]	0.9	0.05
3	Ambient temperature, (T_a) (K)	773	750–1000
4	Ambient pressure, (P_a) (MPa)	0.1	1.9, 2.6, 3.8
5	Ambient gas	Air	Air
6	Gravity (m/s^2)	−9.81	0
7	Reaction Mechanism	-	362 S / 2653 R [4]
8	Experiment Validation	Harada et al. [2]	Kei Miwa et al. [5]

3. RESULT AND DISCUSSION

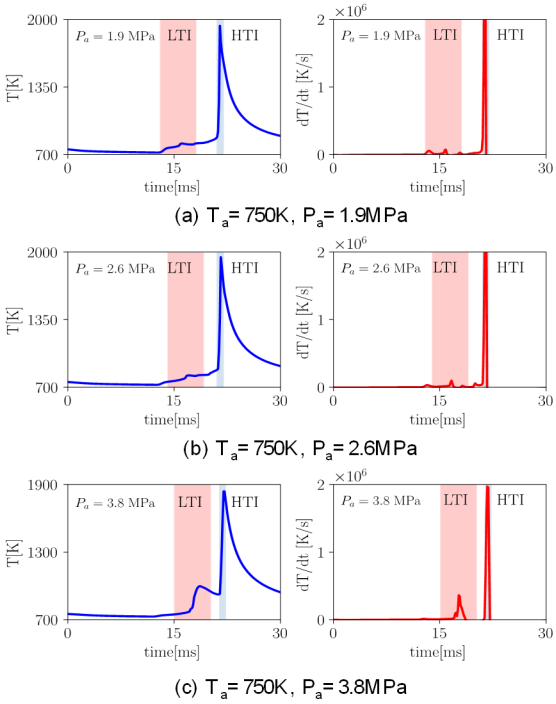


Fig. 3 Two stage auto-ignition of isolated diesel droplet.

The study was conducted in two phases: evaporation and combustion. For the evaporation phase, the numerical prediction of isolated n-dodecane droplet was in good agreement with the experiment [2], as illustrated in Fig. 2(a). A slight deviation was observed during the quasi-steady evaporation stage (c) [1] this is because in the experiment setup to suspend the fuel droplet the fiber was used and the fiber thermal conductivity accelerated the evaporation of the droplet but in numerical studies the droplet is fixed without any fiber. In Fig. 2(b) the fuel was changed to diesel surrogate which has 77% n-dodecane and 23% m-xylene and the lifetime of the droplet was increased from 11% compared to 100% n-dodecane. This is due to the higher latent heat of evaporation (h_{fg}) of m-xylene (~308kJ/kg) compared to n-dodecane(~251kJ/kg) at the T_{boil} of the fuel. An increase in h_{fg} in Eq. (1) reduces the Spalding heat transfer number (B), which in turn decreases the evaporation constant (K) in Eq. (2). Hence. the two-component diesel surrogate droplet exhibits a longer lifetime. The evaporation constant (K) for n-dodecane is 0.553 and for diesel surrogate droplet 0.512.

$$B = \frac{C_{pg}(T_a - T_s)}{h_{fg}} \quad (1)$$

$$-K = -\frac{8k_g}{\rho_l C_{pg}} \ln(1+B) \quad (2)$$

Table. 2 Ignition timing observed at different ambient pressures

P_a [MPa]	LTI [ms]	HTI [ms]
1.9	15.99	21.45
2.6	16.95	21.58
3.8	18.60	22.10

For the combustion study of diesel surrogate droplet, Fig. 3(a-c) shows the low temperature ignition (LTI) and high temperature ignition (HTI) at P_a-1.9-3.8 MPa. Table.2. lists the LTI and HTI ignition timing at different ambient pressure. It shows that the LTI increased from t=15.99ms to 16.95ms when the pressure increased from 1.9 to 2.6MPa.

The numerical criteria for detecting low-temperature ignition (LTI) and high-temperature ignition (HTI) are defined using Eqs. (3) and (4) [1]

$$\frac{\partial T_{center}}{\partial t} \geq 10^4 \text{ K/s} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_{center}}{\partial t} \geq 10^7 \text{ K/s} \quad (4)$$

Fig. 4(a-c), shows the autoignition delay time for isolated diesel surrogate droplet. The result shows that increasing the pressure leads to a decrease in the ignition delay time. The autoignition delay time was calculated for P_a=1.9-3.8MPa with Detailed Kinetic Mechanism (DKM) developed by Narayanaswamy et al. [4]. Additionally, the application of NTC is also required to predict the ignition delay time accurately at low temperature region. This mechanism accounts for low temperature chemistry and was validated with experimental results of Kei Miwa et al. [5] as shown in Fig. 4 (a-c).

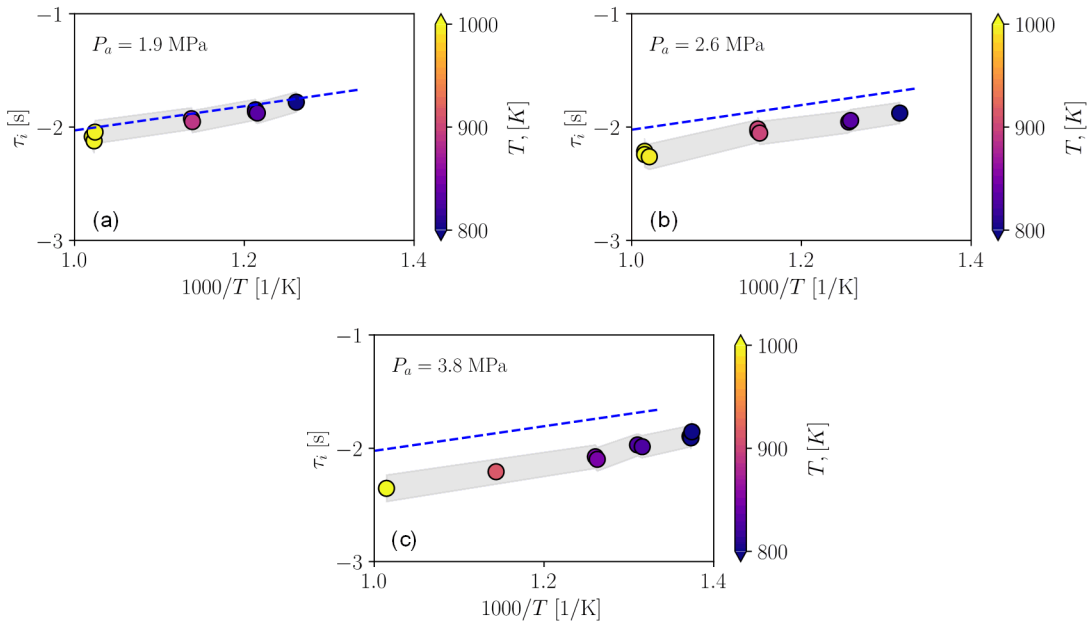


Fig. 4 Validation of autoignition delay time for diesel droplet with experiments of (○) Kei Miwa et al [5], (---) numerical.

4. CONCLUSION

This study investigated the evaporation and combustion behavior of an isolated two-component diesel surrogate droplet using detailed kinetic mechanisms. For the evaporation phase, replacing pure n-dodecane with a diesel surrogate composed of 77% n-dodecane and 23% m-xylene resulted in an 8% decrease in the evaporation constant (K), while the droplet lifetime increased by 11%. For the combustion phase, increasing the ambient pressure was found to strengthen the cool flame region and delay the low-temperature ignition (LTI) timing. The numerically predicted ignition delay times showed good agreement with experimental data. Future work will focus on incorporating a real-gas equation of state to improve the accuracy of combustion predictions under high-pressure conditions.

REFERENCE

[1] S. Balusamy and K.Y. Lee, "A detailed numerical investigation on evaporation and combustion of isolated n-heptane and n-dodecane droplet in argon–oxygen atmosphere," Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 255, Part 2, 2026.127895.

[2] T. Harada, H. Watanabe, Y. Suzuki, H. Kamata, Y. Matsushita, H. Aoki, and T. Miura, "A numerical investigation of evaporation characteristics of a fuel droplet suspended from a thermocouple," Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 54, Nos. 1–3, 2011, pp. 649–655.

[3] K.Y. Lee, "Effect of methyl decanoate addition on aromatic formation in counterflow non-premixed flame of diesel fuel surrogate", J. Korean Soc. Combust., Vol. 24, No. 4, 2019, pp. 11–17.

[4] K. Narayanaswamy, H. Pitsch, P. Pepiot, "A component library framework for deriving kinetic mechanisms for multi-component fuel surrogates: Application for jet fuel surrogates", Combust. Flame, Vol. 165, 2016, pp. 288–309.

[5] K. Miwa, T. Ohmija, T. Nishitani, "A study of the ignition delay of diesel fuel spray using a rapid compression machine", JSME Int. J. Ser. 2 Fluids Eng. Heat Transf. Power Combust. Thermophys. Prop., Vol. 31, No. 1, 1988, pp. 166–173.

다중 충실도 모델을 활용한 화학 반응기 네트워크의 성능 향상 방법론 연구

서준석*, 모현수**, 유춘상**, 정기성*†

Performance Enhancement of Chemical Reactor Networks through Multi-Fidelity Modeling Approaches

Jun Seok Seo*, Hyun Soo Mo**, Chun Sang Yoo**, Ki Sung Jung*

ABSTRACT

본 연구에서는 고충실도 DNS(Direct Numerical Simulation) 시뮬레이션 정보를 활용하여 저충실도 화학 반응기 네트워크(Chemical Reactor Networks) 모델의 예측 성능을 향상시키는 다중 충실도 학습 방법을 적용하였다. CRN 모델은 복잡한 연소기 내부를 간단하게 모사할 수 있으나, 단순화된 가정으로 인해 정확도에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해, CRN 학습을 통해 얻어진 신경망의 가중치(weight)와 편향(bias)을 CFD 기반 학습의 초기값으로 활용함으로써, 저충실도 정보를 고충실도 모델 학습 과정에 반영하였다. 이러한 절차를 통해 고충실도 모델의 안정성과 예측 성능을 향상시키면서 계산 효율성을 유지하였다. 본 연구 결과는 CRN과 DNS를 연계한 다중 충실도 모델이, 연소 시스템 해석에서 계산 효율성과 예측 성능을 동시에 향상시킬 수 있는 효과적인 전략임을 보여준다.

Key Words: Chemical Reactor Networks, Direct Numerical Simulation, Multi-Fidelity, Artificial Neural Network

1. Introduction

직접 수치 모사(Direct Numerical Simulation; DNS), 큰에디모사(Large Eddy Simulation; LES)와 같은 고신뢰성 수치모사는 반응 유동의 물리 현상을 정밀하게 재현하여 높은 예측 정확도를 제공하지만, 계산 비용이 매우 높아 다양한 조건을 폭넓게 해석하기에는 비효율적이다. 또한 디지털 트윈과 같은 첨단 알고리즘을 연소기에 적용하기 위해서는, 어느 정도의 오차는 감안하더라도 다양한 운전조건에서의 예측 결과를 즉시 얻어낼 수 있는 수치모델이 필요하다.

화학 반응기 네트워크(Chemical Reactor Network; CRN)는 복잡한 반응 시스템을 단순한 형태로 모사하여 해석할 수 있는 방법론으로서 다양한 연소기 형상에 적용하여 그 성능을 검증한 바 있다[1-3]. CRN의 기본 아이디어는 CFD 해석 도메인을 몇 가지 구획으로 나누어 각 구획을 대표하는 열화학 조건을 설정 후, 구획 간 연결을 PSR (perfectly stirred reactor) 혹은 PFR (plug-flow reactor)을 통해 0-D/1-D 문제로 단순화시킨다. 즉, 막대한 시간이 들어가는 CFD 계산 대신 해당 조건에서의 CRN을 만들 수 있게 된다면 혁신적으로 계산 시간을 절감할 수 있다 ($\boldsymbol{O}$ (일) → $\boldsymbol{O}$ (초)로 계산시간 절감 가능)

다만, CRN은 단순화된 가정에 기초하기 때문에 예측 정확도에 한계가 있다 [4]. 그 정확도를 올리기 위해서는 테스트 케이스를 가장 잘 따르게 하기 위한 CRN내 변수들을 미세조정해야 하나, 이는 (i) 테스트 케이스가 존재할 때 가능하며, (ii) 미세조정에 들어가는 물리적 시간 또한 무시할 수 없다. 즉, 기존 CFD와 CRN 두 모델은 정확도와 계산 효율성 측면에서 상반된 특성을 가지므로, 이를 상호 보완적으로 결합할 수 있는 다중 충실도(multi-fidelity) 기반 접근이 요구된다[5].

본 연구에서는 이러한 관점에서, CRN의 계산 효율성과 CFD의 예측 정확도를 함께 통합하는 다중 충실도 학습 방식을 적용하였다. 먼저 제한된 조건에서 고충실도 CFD 데이터를 확보하고, 이를 기준으로 선형 보간을

* 국립부경대학교 기계공학과
** 울산과학기술원 기계공학과
† 연락저자, 정기성(kjung@pknu.ac.kr)

수행하였다. 이 과정을 통해 지정된 조건 범위 내 CRN 해석 데이터(저충실도 데이터)를 대량 생성하였다. 생성된 저충실도 데이터를 이용해 인공신경망(Artificial Neural Network; ANN)을 1단계로 학습하여 초기 파라미터(가중치, 편향)를 확보했다. 이렇게 학습된 파라미터를 2단계 CFD 기반 학습의 초기화에 활용하였다. 이러한 접근을 통해 저충실도 데이터의 계산 효율성을 유지하면서도, 고충실도 학습의 안정성과 예측 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 적용한 다중 충실도 모델링 접근의 타당성을 검증하기 위해, 먼저 단순 형상의 분젠 버너(Bunsen burner) 연소기에 적용하였다. 이는 데이터 구축과 학습 과정을 한정된 조건에서 검증하기 위한 단계이며, 향후 복잡한 형상의 연소기 해석으로 확장하여 다양한 연소 조건에서의 적용 가능성을 검토할 예정이다

2. Results

본 연구에서 제시한 다중 충실도 모델링 접근을 분젠 버너 연소기에 적용하여 충실도 별 모델의 예측 성능을 비교하였다. 그림 1은 본 연구에서 다룬 훈련 데이터용 케이스와 테스트 케이스의 운전조건을 나타낸다. 분젠 버너 입구 온도와 입구 속도를 바꾸어 가며 총 9개의 CFD 해석을 수행하였고, 주어진 온도/입구 속도 범위 내에서 CRN 해석 데이터를 총 10,000개 생성하였다. 해당 CRN데이터를 통해 3개의 다른 ANN모델을 만들었으며 (Low-fidelity model; LF라고 명명함), 이 때 ANN의 input은 각 조건에서의 입구 속도 및 온도이며, output은 NO, NO_2, N_2O의 몰분율 [ppm]을 예측하도록 하였다.

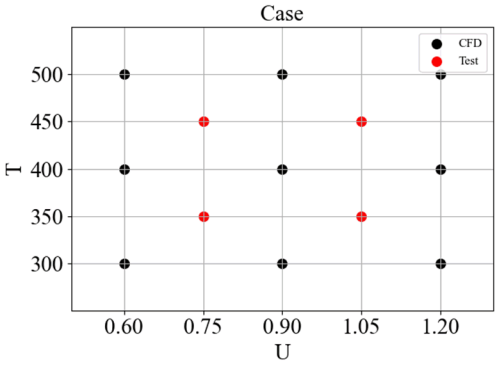


Fig. 1 Operating conditions for training and test cases.

사진 1처럼 9개의 CFD 데이터만으로 ANN 모델을 구성했다 (High-fidelity model; HF라고 명명함). 해당 모델의 훈련 데이터는 정확도는 높으나 데이터의 수가 희소하다고 할 수 있다. 마지막으로 본 연구에서 테스트한 다중 충실도 모델 (Multi-fidelity model; MF라고 명명함)을 구성하였다. 해당 모델은 LF의 ANN 파라미터를 초기값으로 둔 후, 9개의 HF 훈련 데이터를 이용해서 미세 조정하는 식으로 구성하였다. 미세 조정 시, LF 정보를 잃어버리지 않기 위해 regularization기반의 훈련 알고리즘 [6]을 사용했다.

그림 2는 테스트 케이스 별 (Case 1—4), 각 모델의 에러를 정답 (CFD 결과)과 비교했을 때의 결과이다. 보는 것과 같이, 다중 충실도 모델의 예측 오차가 단일 CRN기반 학습이나 단일 CFD기반 학습 모델에 비해 전반적으로 가장 낮았다. 이러한 개선은 저충실도 학습을 얻어진 가중치와 편향이 고충실도 학습의 초기화 단계에 반영되어 학습 안정성과 일반화 성능이 향상된 결과로 해석된다. 즉 이러한 접근을 통해 저충실도 정보를 효과적으로 반영함으로써, CRN 기반 모델의 예측 신뢰도가 향상될 수 있음을 확인하였다.

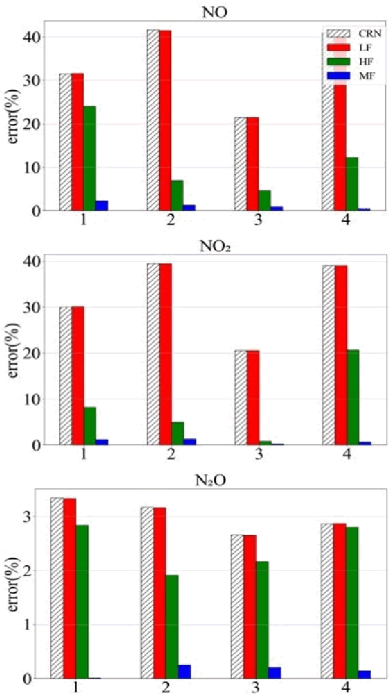


Fig. 2 Comparison of prediction errors for NO, NO_2, N_2O species predicted by the CRN, LF, HF, and MF models.

후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] Christian Romano, Matteo Cerutti, Giulia Babazzi, Lorenzo Miris, Rachele Lamioni, Chiara Galletti, Luca Mazzotta, Domenico Borello, Ammonia blends for gas-turbines: Preliminary test and CFD-CRN modelling, Proceedings of the Combustion Institute, 40 (2024).

[2] Shivansh Chaturvedi, R. Santhosh, Syed Mashruk, Rajneesh Yadav, Agustin Valera-Medina, Prediction of NO_x emissions and pathways in premixed ammonia-hydrogen-air combustion using CFD-CRN methodology, Journal of the Energy Institute, 111 (2023).

[3] Sören Dübal, Leon L. Berkel, Paulo Debiagi, Hendrik Nicolai, Tiziano Faravelli, Christian Hasse, Sandra Hartl, Chemical reactor network modeling in the context of solid fuel combustion under oxy-fuel atmospheres, Fuel, 364 (2024).

[4] André A. V. Perpignan, Rishikesh Sampat, Arvind Gangoli Rao, Modeling pollutant emissions of flameless combustion with a joint CFD and chemical reactor network approach, Frontiers in Mechanical Engineering, Vol. 5 (2019), Article 63.

[5] Rory F. D. Monaghan, Rabi Tahir, Alberto Cuoci, Gilles Bourque, Marc Füri, Robert L. Gordon, Tiziano Faravelli, Alessio Frassoldati, Henry J. Curran, Detailed multi-dimensional study of pollutant formation in a methane diffusion flame, Energy & Fuels, 26 (2012).

[6] Ki Sung Jung, Bruno S. Soriano, Jacqueline H. chen, Mohammad Khalil, A Hessian-based transfer learning approach for artificial neural networks based chemical kinetics with a sparse dataset, Proceedings of the Combustion Institute, 40 (2024).

데이터 증강 물리정보신경연산자를 활용한 연소 예측 연구

조준형*. 이동훈*. 유지형**†

Combustion prediction based on data-augmented physics-informed operator learning

Junhyoung Jo*, Tonhgun Lee*, Jihyung Yoo**†

ABSTRACT

A zero-dimensional constant volume hydrogen combustion process is modeled using data-augmented physics-informed operator learning. A total of 11 chemical species and thermodynamic state variable were trained with only 25 pre-labeled training datasets. A dedicated training strategy was developed to account for the set of stiff governing equations. Overall, the data-augmented neural operator produced results comparable to a purely data-driven model and showed approximately 1% error for temperature and less than 10^{-3} error for chemical species concentrations.

Key Words : Physics-informed machine learning, Neural operator, Hydrogen combustion, Chemical kinetics|

본 연구는 소량의 사전 라벨 학습 데이터를 이용하여 데이터 증강 물리 기반 연산자 학습 접근법을 통해 연소 현상을 예측하고자 합니다. 물리 기반 접근법은 데이터셋 크기를 최소화할 수 있으며, 데이터 기반 학습법에 필요한 대량의 학습 데이터셋을 생성하는 데 드는 막대한 비용을 줄일 수 있습니다. 또한, 모델의 정확도에 따라 최적의 학습 데이터셋 크기를 자유롭게 변경할 수 있습니다. 이와 더불어 신경망 연산자로 더 많은 화학종을 예측할 수 있는 모델을 학습시키기 위한 수정된 DeepONets 구조를 제안합니다. 기존의 연구결과에서 시간 및 공간 영역을 서로 다른 신경망으로 세분화하여 훈련한 모델의 수렴성과 정확성을 향상시켰습니다. 이에 의거하여 여러 화학종과 열역학 변수마다 신경망 구조를 할당한 적층 DeepONet 구조를 제안하여 모델의 해석성과 변수별 표현 유연성을 향상시키고자 합니다.

마지막으로 DeepONets 학습에 필요한 수렴성을 향상시키고 계산 비용을 줄이기 위해 연소 전용 학습 전략을 도입했습니다. 물리 기반 학습 방식은 기존의 데이터 기반 학습 방식에 비해 수치적 불안정성이 심화될 수 있으며 화학반응론 지배방정식은 일반적인 최적화 기법으로 수렴이 어려운 비볼록성 비용 함수를 가지고 있습니다. 그러므로 훈련중 발생하는 손실 함수 오차들이 증폭되어 모델이 수렴하지 않은 경우가 많습니다. 시간에 따른 급격한 속성 변화는 학습 중 발산 문제를 증폭시키고, 열화학 변수에 해당하는 손실 함수의 수가 증가함에 따라 다목적 최적화에 내재된 어려움이 발생하기 때문입니다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 완화하기 위해 다양한 학습 전략을 통합했습니다.

9개의 화학종과 21개의 반응을 고려한 데이터 증강 물리 기반 수소 연소 모델은 순수 데이터 기반 모델에 비해 5배 이상 빠르게 훈련을 마쳤으며 이론 값과 매우 비슷한 결과를 얻을 수 있었습니다.

* 일리노이대학교 기계공학과
** 한양대학교 미래자동차공학과
† 연락저자, jihyungyoo@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0452

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-24683109).

참고 문헌

[1] Goswami, Somdatta, et al. "Learning stiff chemical kinetics using extended deep neural operators." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 419 (2024): 116674.

[2] Karniadakis, George Em, et al. "Physics-informed machine learning." *Nature Reviews Physics* 3.6 (2021): 422-440.

화학 반응 분석을 통한 CH4/NH3 혼소 조건에서 주요 반응 및 배출 특성에 관한 연구

김민혁*.김종현*.김승민**.박정수**†

Study on Key Reactions and Emission Characteristics Under CH4/NH3 Co-Firing Condition on Chemical Kinetic Analysis

Minhyeok Kim*, Jonghyun Kim*, Seungmin Kim**, Jungsoo Park**†

ABSTRACT

Ammonia is a promising hydrogen carrier for the transition toward a hydrogen-based energy economy. Despite advantages such as infrastructure compatibility and carbon-free combustion, ammonia faces challenges including high autoignition temperature, low laminar flame speed, narrow flammability limits, and NOx emissions. This study evaluates combustion stability and emissions characteristics of methane/ammonia co-firing at stoichiometric conditions. A 0D simulation model incorporating three chemical reaction mechanisms (Okafor, GRI 3.0, and Marina) was developed and validated against experimental data from a premixed swirl-stabilized combustor. The results demonstrated good agreement in temperature prediction and NOx emission trends. Both Okafor and Marina mechanisms captured the non-monotonic NOx behavior with increasing ammonia blending ratio, consistent with experiments. While absolute NOx discrepancies were attributed to geometric factors not accounted for in the Chemkin model, the overall predictive reliability was confirmed. The validated model will enable subsequent detailed chemical reaction network analysis to identify NOx formation mechanisms.

Key Words : Ammonia, Chemical Reaction Network(CRN), co-firing, Combustion, 0D simulation

전 세계적으로 화석 연료 중심 발전에서 청정 에너지 중심으로의 전환이 추진되고 있으며, 최종 목표는 수소 기반 에너지 경제 구축이다[1]. 이 과정에서 수소의 운반 및 저장 매체로 활용될 수 있는 암모니아가 주목받고 있다[2, 3]. 암모니아는 기존의 인프라를 크게 변경하지 않고 사용할 수 있으며, 연소 시 이산화 탄소를 배출하지 않는다는 장점이 있다. 또한 수소에 비해 액화가 용이하고, 액체 상태에서 높은 에너지 밀도를 가져 연료로서 중요한 이점을 제공한다. 반면, 메탄과 수소에 비해 자발화 온도가 높고, 층류 화염 속도가 낮아 연소 안정성이 떨어지며, 가연 한계가 좁아 운전 조건에 제약이 따른다. 더불어 분자 구조에 질소가 포함되어 있어 NOx 배출 문제가 발생하는 등 환경적 과제도 존재한다[4].

암모니아 연료의 한계점을 극복하기 위해 다단 연소, RQL(Rich-Quench-Lean) 연소, MILD(Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution) 연소 그리고 SNCR(Selective Non-Catalytic Reduction) 등과 같은 다양한 접근법이 제시되었으며, NOx 배출 저감과 화염 안정성을 향상에 초점을 맞추고 있다[5]. 특히 내연기관에서는 TJI(Turbulent Jet Ignition) 기술을 통해 난류 강도를 높여 난연한계를 개선하고자 하였으며, 가스터빈과 보일러에서는 메탄 및 수소와의 혼소(Co-firing)를 활용하여 상대적으로 불안정한 연소 특성을 보완하고자 했다. 다양한 연구에서 메탄/암모니아 혼소 해석 및 실험을 다루었으며, 메탄을 혼소하는 것이 암모니아 연료의 불안정한 연소 특성을 개선한다고 보고하고 있다[6]. 그러나 선행 연구의 경우 배출 특성에 초점을 맞추었으며, 다양한 화학 반응 메커니즘에 따른 CRN(Chemical Reaction Network) 분석 결과는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 이론공연비 조건에서 메탄/암모니아 혼소 비율에 따른 연소 안정성과 배출 특성을 평가했으며, 다양한 화학 반응 메커니즘을 적용한 CRN 분석을

* 조선대학교 기계공학과 대학원
** 조선대학교 기계공학과
† 연락저자, j.park@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7057

수행하여 메커니즘 간 차이를 비교하였다.

Table 1은 분석에 사용된 메커니즘의 특성을 나타낸 것이며, Okafor, GRI 3.0, 그리고 Marina mechanism이 사용되었다[5, 7, 8].

Table 1 Reaction mechanism characteristics

Mechanism	Elements	Species	Reactions
Okafor	5	59	356
GRI 3.0	5	53	325
Marina	5	59	354

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 메탄/암모니아 혼소 실험에 대한 개략도이다. 메탄과 암모니아는 스테인리스 관에서 미리 혼합되어 분사되며, 공기와 함께 swirler를 통과하며 연소된다. 화염 가시화를 위해 노즐 팁 부근을 quartz로 구성하였으며, 0D simulation과의 vaildation을 위해 6개의 thermos coupler와 가스 분석기가 구성되었다.

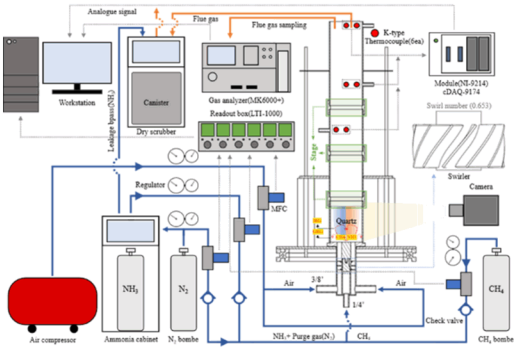


Fig. 1 Experimental schematic diagram of methane/ammonia co-firing

Fig. 2(a)는 Ansys Chemkin pro에서 상세한 화학 반응 분석을 위해 사용된 CRN 모델이며, (b)는 각 구성요소가 실제 연소기에서 수행하는 역할을 도식화 한 것이다. CRN 모델은 Gas mixer, PSR(Perfectly stirred reactor), 그리고 PFR(Plug flow reactor)로 구성되어 있다. 연소기의 재순환 특성을 모사하기 위해 여러 개의 PSR를 모사하였으며, 실험 결과와의 validation을 위해 여러 개의 PFR을 모사했다[9].

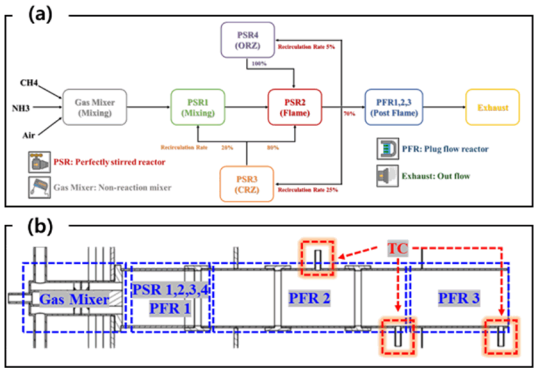


Fig. 2 (a)Chemical Reaction Network of methane/ammonia co-firing (b)Schematic showing the roles of each CRN component in the actual burner

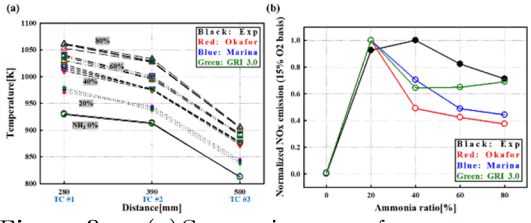


Fig. 3 (a)Comparison of measured temperatures with numerical data (Okafor, Marina, and GRI 3.0) at three TC positions (b)Comparison of normalized NOx emissions (15% O2 basis) with varying ammonia ratios between experimental data and three kinetic mechanisms

Fig. 3(a)는 세 가지 reaction mechanism에 대한 0D simulation 결과를 실험값과 비교한 것으로, 사용된 0D 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 수행되었다. 두 결과 간의 온도 차이는 거의 나타나지 않아 모델의 타당성을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 3(b)는 정규화된 NOx 배출량을 비교한 결과로, 실험과 해석 간에 다소 차이가 나타났다. 이는 Chemkin 프로그램이 실제 형상적 요인을 반영하지 못했기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 차이는 기존 선행 연구에서도 공통적으로 나타나는 경향이며, Okafor와 Marina 메커니즘에서 암모니아 혼소율이 증가함에 따라 NOx 배출량이 최대치에 도달한 뒤 다시 감소하는 경향은 실험 결과와 일치한다. 따라서 Fig 3의 결과를 통해 본 연구에서 사용된 0D 모델의 예측 신뢰성을 확인할 수 있었다. 향후에는 이를 기반으로 화학 반응 네트워크 내 주요 반응 경로를 분석하고, 혼소 비율 변화에 따른 NOx 생성

메커니즘을 정량적으로 규명할 예정이다.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 광주광역시의 재원으로 광주RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-05-013)

참고 문헌

[1] M. Samlan, X. Long, H. Wang, D. Zha, "Paris climate agreement and global environmental efficiency: New evidence from fuzzy regression discontinuity design", Energy Policy, Vol. 138, 2022, pp.113128.

[2] O. Herbinet, P. Bartocci, A. G. Dana, "On the use of ammonia as a fuel – A perspective", Fuel Communications, Vol. 11, 2-22, pp.100064.

[3] M. Aziz, A. T. Wijayanta, A. B. D. Nandiyanto, "Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization", Energies, Vol. 13(12), 2020, pp.3062.

[4] D. R. MacFarlane, P. V. Cherepanov, J. Choi, B. H. R. Suryanto, R. Y. Hodgetts, J. M. Bakker, F. M. F. Vallana, A. N. Simonov, "A Roadmap to the Ammonia Economy", Joule, Vol. 4(6), 2020, pp.1186-1205.

[5] E. C. Okafor, H. Yamashita, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, T. Kudo, T. Tsujimura, M. Uchida, S. Ito, H. Kobayashi, "Flame stability and emissions characteristics of liquid ammonia spray co-fired with methane in a single swirl combutor", Fuel, Vol. 287, 2021, pp.119433.

[6] L. Mengqing, H. Yituan, W. Yuhao, L. Shiyong, "Effects of methane addition on combustion characteristics of ammonia-air co-flow flames", Energy, Vol. 335, 2025, pp.138007.

[7] J. C. Ianni, "-A comparison of the Bader-Deuflhard and the Cash-Karp Runge-Kutta integrators for the GRI-MECH 3.0 model based on the chemical kinetics code Kintecus", Computational Fluid and Solid Mechanics 2023, 2023, pp.1368-1372.

[8] M. Kovaleva, A. Hayakawa, S. Colson, E. C. Okafor, T. Kudo, A. Valera-Medina, H. Kobayashi, "Numerical and experimental study of product gas characteristics in premixed ammonia/methane/air laminar flames stabilized in a stagnation flow", Fuel Communications, Vol. 10, 2022, pp.100054.

[9] J. Davies, S. Mashruk, D. Sato, L. Mazzotta, D. Pugh, A. Velera-Medina, "Emissions analyses of humidified cracked ammonia swirling flame, "Combustion and Flame", Vol. 274, 2025, pp.113984.

시간 의존 기저 기반 차원축소모델을 활용한 연소 해석 매개변수 연구에서의 유사성 활용

이준형*, 김재중*, Cristian E. Lacey**, 정기성**,***†,
Jacqueline H. Chen**, 유춘상*†

Leveraging Similarity in Parameterized Reactive Flow Simulations Using a Reduced Order Modeling with Time-Dependent-Bases

Jun Hyung Lee*, Jae Jung Kim*, Cristian E. Lacey**, Ki Sung Jung***†,
Jacqueline H. Chen**, Chun Sang Yoo*†

A reduced-order modeling (ROM) framework aims to represent complex reacting systems using a small number of dominant modes identified through their underlying correlation or similarity. In this context, a time-dependent-bases (TDB) ROM based on singular value decomposition (SVD) is employed to approximate transient combustion dynamics. Similar approaches, such as the time-dependent-bases CUR method by Jung et al. [1], have demonstrated significant computational benefits in reacting flow simulations. Accordingly, the SVD-based TDB-ROM explored in this study provides a foundation for achieving efficient low-rank representations and potential reductions in computational cost for combustion analysis.

While TDB-ROMs have shown strong potential in transient combustion analysis, they remain limited when applied to complex reacting systems that require a large number of modes to represent their full dynamics. This limitation becomes more pronounced in parameterized combustion simulations, where multiple operating conditions are simulated separately and each single-case ROM constructs its own independent low-dimensional manifold. As a result, redundant representations arise and the overall efficiency of the ROM approach deteriorates when extended to multi-case analysis. To overcome these issues, the present study introduces the concept of a Parameterized Partial Differential Equation (PPDE) framework, which jointly analyzes multiple cases under varying boundary and operating conditions. By leveraging cross-parametric similarity, the PPDE formulation integrates these cases into a unified low-rank manifold that captures shared physical and chemical structures across the parameter space, thereby improving both efficiency and consistency in parameterized combustion simulations.

In many reduced-order modeling studies, normalization and standardization are applied as preprocessing techniques to improve numerical conditioning and reconstruction accuracy. However, for spatially and temporally stiff reacting systems like combustion simulation, such preprocessing often distorts the intrinsic hierarchy of dominant species or spatial structures, leading to degraded model performance. Within the proposed PPDE framework, the physical importance within each case and the similarity across cases can be clearly separated. By applying preprocessing only to enhance inter-case similarity, the PPDE approach preserves the internal physical and chemical significance of each case while reinforcing cross-case correlations. Consequently, this methodology enables the construction of a more coherent and physically consistent low-rank manifold across parameter variations.

A detailed description of the proposed TDB-ROM-PPDE algorithm is provided in Table 1. The procedure follows the baseline TDB-ROM formulation based on singular value

* 울산과학기술원(UNIST) 기계공학과
** Combustion Research Faculty, Sandia National Laboratories
*** 부경대학교 기계공학과
† 연락저자
kjung@pknu.ac.kr, csyoo@unist.ac.kr

decomposition (SVD), extended to incorporate an additional parameter dimension representing multiple cases under varying boundary conditions.

In this framework, each case evolves through the TDB-ROM update while basic preprocessing steps are applied to maintain consistency and enhance similarity across cases.

Table 1 Algorithm of TDB-ROM w/ preprocessing

$\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{N_g \times (N_s \cdot N_{sam})}, \mathbf{\Sigma} \in \mathbb{R}^{(N_s \cdot N_{sam}) \times (N_s \cdot N_{sam})}, \mathbf{V} \in \mathbb{R}^{(N_s \cdot N_{sam}) \times (N_s \cdot N_{sam})}$
$\tilde{\mathbf{U}} \in \mathbb{R}^{N_g \times r}, \tilde{\mathbf{\Sigma}} \in \mathbb{R}^{r \times r}, \tilde{\mathbf{V}} \in \mathbb{R}^{(N_s \cdot N_{sam}) \times r}$
$\mathbf{\Phi}, \tilde{\mathbf{\Phi}} \in \mathbb{R}^{N_g \times (N_s \cdot N_{sam})}$ // mass fraction matrix
$\mathfrak{P} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_g}$ // Preprocessing operator
1: $\mathbf{\Phi}_{\mathbf{PP}} = \mathfrak{P}\mathbf{\Phi}$
2: $\mathbf{U\Sigma V}^{\mathbf{T}} = \mathrm{SVD}(\mathbf{\Phi}_{\mathbf{PP}})$
3: $\tilde{\mathbf{\Phi}}_{\mathbf{PP}} = \tilde{\mathbf{U}}\tilde{\mathbf{\Sigma}}\tilde{\mathbf{V}}^{\mathbf{T}}$
4: $\tilde{\mathbf{\Phi}} = \mathfrak{P}^{-1}\tilde{\mathbf{\Phi}}_{\mathbf{PP}}$
5: **for** $j = 1, J$
6: $\mathbf{F}_j \leftarrow f(\tilde{\mathbf{\Phi}}, \boldsymbol{T}, \boldsymbol{p})$
7: $\mathbf{\Phi} = \tilde{\mathbf{\Phi}} + b_j \mathbf{F}_j \Delta t$
8: **end for**

The proposed framework was validated using a one-dimensional premixed flame propagation configuration with the reduced Shell D gasoline-surrogate mechanism [2] (SDC8H14, 38 species). The unburnt mixture temperature was initialized above 800 K. The simulation duration was set to 0.5 ms, which provides sufficient time to assess error accumulation and to observe the propagation of the premixed flame under transient conditions.

Figures 1 and 2 compare the single-case TDB-ROM ($N_{\mathrm{sam}} = 1$) results obtained without and with preprocessing, respectively. When no preprocessing is applied, the ROM begins to capture the main flame structure accurately once the number of retained modes exceeds about half of the total rank (e.g., r ≈ 20 out of 38). However, even with the same rank, applying scaling operations such as normalization or standardization reduces the relative importance of dominant species, leading to a noticeable deterioration in overall accuracy. These results indicate that preprocessing have limited effectiveness for single-case ROMs and mainly act as factors that distort the intrinsic species-specific importance within the system.

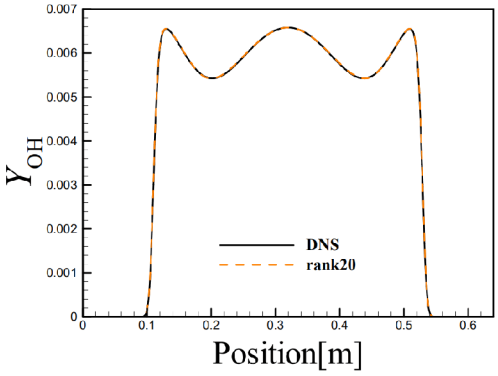


Fig. 1 Profiles of OH mass fraction by (dark line) DNS and (yellow dash) TDB-ROM w/o preprocessing by 20 rank of ROM

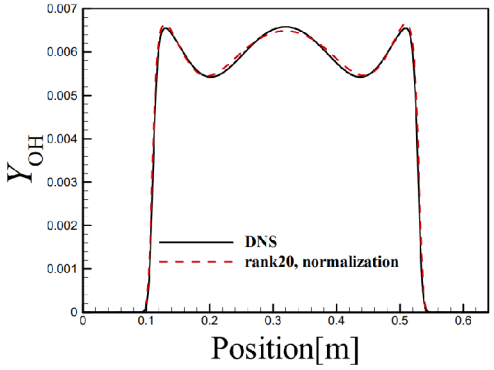


Fig. 2 Profiles of OH mass fraction by (dark line) DNS and (red dash) TDB-ROM w/ preprocessing by 20 rank of ROM

To evaluate the performance of the multi-case (PPDE) framework, five cases were constructed by varying the initial temperature in 10 K increments, while keeping all other conditions fixed. Figure 3 compares the reconstructed OH mass-fraction profiles with the DNS reference, showing that, unlike the single-case result in Figure 1, accurate reconstruction is achieved even when using a significantly lower rank (r = 10). Figure 4 presents the NRMSE variation with rank, demonstrating that errors remain consistently lower across all ranks compared to the single-case ROM. These results suggest that leveraging cross-case correlation inherent in the multi-case formulation enables the construction of a more expressive and

physically consistent low-dimensional manifold.

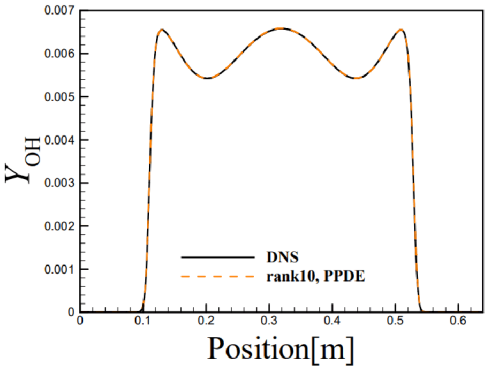


Fig. 3 Profiles of OH mass fraction by (yellow dash) DNS and (dark line) TDB-ROM, PPDE case with increment 10K, case 1

However, as shown in Figure 4, when the temperature increment between cases is increased to 50 K, the inter-case similarity decreases significantly, and the NRMSE values in the low-rank region ($r \approx 6$–8) become unacceptably high. This indicates that when the correlation between cases weakens, the low-dimensional manifold loses its representational adequacy, reducing the benefit of the parameterized formulation.

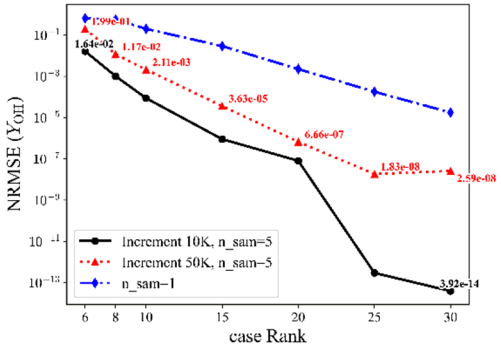


Fig. 4 NRMSE of single case (blue) and PPDE case ($N_{\mathrm{sam}} = 5$) for Increment 10K(dark), and 50K(red)

The degradation is also evident in Figure 5, where the reconstructed OH mass-fraction profiles show substantial spatial deviations from the DNS reference in the absence of preprocessing.

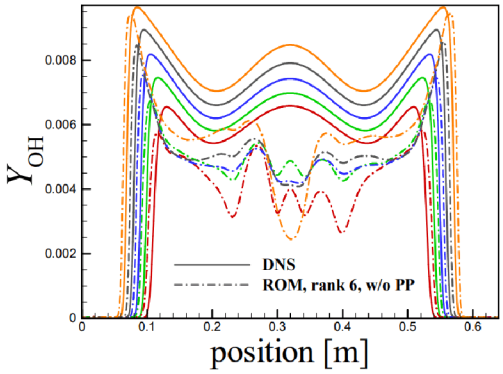


Fig. 5 Profiles of OH mass fraction by (solid lines) DNS and (dash lines) PPDE cases w/o preprocessing by 6 each case rank of ROM

Unlike preprocessing in the single-case, which degraded accuracy by distorting the species-specific importance, in the PPDE framework it can be applied to enhance cross-case similarity without altering intra-case weighting. As demonstrated in Figures 6 and 7, this similarity-oriented preprocessing significantly improves reconstruction accuracy even at low ranks, with reduced NRMSE values.

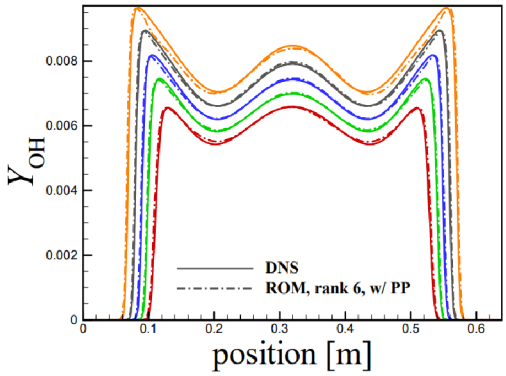


Fig. 6 Profiles of OH mass fraction by (solid lines) DNS and (dash lines) PPDE cases w/ pre- and postprocessing by 6 each case rank of ROM

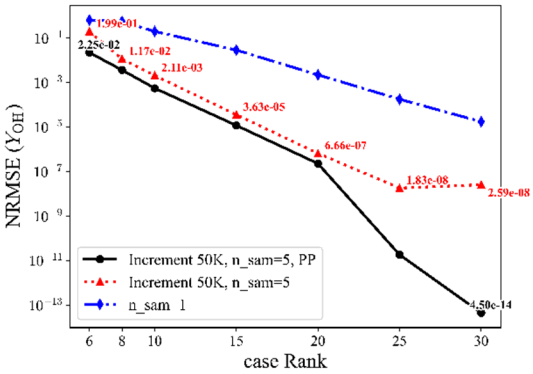


Fig. 7 NRMSE of single case (blue) and PPDE case ($N_{\mathrm{sam}} = 5$) for Increment 50K w/ PP(dark), and w/o preprocessing (red)

These results confirm that preprocessing acts as an effective similarity-alignment step, enabling the PPDE-based ROM to maintain high-fidelity low-rank reconstructions even for weakly correlated case groups.

We proposed a Parameterized Partial Differential Equation (PPDE) framework based on time-dependent bases (TDB) and singular value decomposition (SVD), which leverages inter-case similarity to construct more coherent low-dimensional representations across multiple reacting cases. By incorporating similarity-oriented preprocessing, the proposed method enhances cross-case correlation while preserving intra-case physical fidelity, resulting in accurate low-rank reconstructions with fewer modes. The results demonstrate that the ROM-PPDE achieves comparable accuracy to single-case models while offering a stronger generalization capability across different operating conditions. This framework also provides a foundation for extending toward a CUR based PPDE formulation, which is expected to further improve computational efficiency while maintaining high predictive accuracy in parameterized combustion studies.

후 기

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (RS-2024-00356149).

참고 문헌

[1] K. S. Jung, C. E. Lacey, H. Babaee and J.H. Chen, Accelerating high-fidelity simulations of chemically reacting flows using reduced-order modeling with time-dependent bases, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 437* (2025) 117758.

[2] A. P. Sarathy, C. K. Westbrook, M. Mehl, S. M. Sarathy, W. J. Pitz ,Comprehensive chemical kinetic modeling of long-chain hydrocarbon oxidation, *Combustion and Flame*, 158 (2011) 2338–2357.

DC 전기장이 인가된 니켈크롬 와이어 위의 액적 연소의 동적 거동에 대한 연구

정윤환*. 김승현**. 이원준***. 유춘상**†. 박정*†. 정석호****

Dynamic behaviors of burning n-decane droplet suspended on NiCr wire under applied DC electric field

Yoon hwan Jung*, Seung Hyun Kim**, Won June Lee***, Chun Sang Yoo**†,Jeong Park*†, Suk Ho Chung****

전기선 화재의 기본적인 특성은 코어와 절연체 재료, 전선 및 절연체 두께, 주변 유동 조건, 압력, 중력 등의 영향에 초점을 맞추어 광범위하게 연구되어 왔다[1-3]. 그러나 우주 환경에서의 전기선 화재에 대한 기존의 안전 규정[4] 및 대부분의 선행 연구에서는 전기장의 영향을 고려하지 않았다[1-3]. 실제 전기선 화재 상황에서는 회로가 차단된 이후에도 개방회로 형태로 전위가 잔존할 수 있으며, 이러한 잔류 전위는 화염의 전파 거동에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

최근 연구에서는 전기장이 인가된 전기선 위에서의 화염 전파가 화염의 형태, 크기, 그리고 전파 속도를 변화시킬 수 있음이 밝혀졌다. 가장 널리 연구된 절연체 재료 중 하나인 폴리에틸렌(PE)은 유전체(dielectric)이다. PE 절연 전선에 전기장이 인가되면 용융된 PE와 관련된 다양한 현상이 관찰되는데, 여기에는 연료 증기 분사(fuel vapor-jetting), 마랑고니 불안정성(Marangoni instability)에 의한 내부 재순환, 용융 PE의 드리핑, 전기분사(electrospray), 용융 PE의 진동 및 회전, 2차 용융 PE의 축 방향 이동, 그리고 화염 가장자리에서의 와류 형성(flame vortex formation) 등이 포함된다[5]. 이러한 복잡한 거동은 표면장력, 유전영동(dielectrophoresis), 전기분사(electrospray), 그리고 전기장에 의해 유도된 자기장 등의 물리적 메커니즘을 기반으로 설명되어 왔으며, 이에 대한 종합적 검토가 이루어진 바 있다[6]. 이러한 조건하에서는 화염 전파 속도를 기존의 열적 평형 메커니즘(thermal balance mechanism)만으로 예측할 수 없다[1-3].

전기선 화재의 복잡성을 단순화하기 위해, 전기장이 인가된 전선 위에 매달린 연소 중인 액적을 모사한 단순화된 모델 시스템이 제안되었다[7]. 이 시스템에서는 실제 전기선 화재에서 관찰되는 많은 동적 거동이 재현되었다. 그러나 교류(AC) 대신 직류(DC)가 인가된 보다 단순한 시스템에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 DC 전기장이 인가된 니켈크롬 전선에 매달린 n-decane 액적의 비연소 및 연소 거동을 조사하였다. 이를 통해 AC 전기장에서 시간에 따라 변하는 전압 및 극성의 영향을 배제하고, 전기장의 근본적인 작용 메커니즘을 보다 명확히 이해하고자 하였다. 또한 폴리에틸렌의 상대 유전율이 n-decane과 매우 유사하기 때문에, 연소 중인 n-decane 액적은 PE 절연 전선 화재를 연구하기 위한 효과적인 모델 시스템으로 사용될 수 있다.

그 결과, 이전에 보고된 바 없는 몇 가지 새로운 동적 거동이 관찰되었으며, 여기에는 반복적인 액적의 측면 확산(repetitive lateral spread)과 그을음 고리(soot ring)의 형성이 포함된다. 또한, DC 전기장이 인가된 조건에서의 액적 수명(droplet lifetime)을 측정하고 이에 대해 논의하였다.

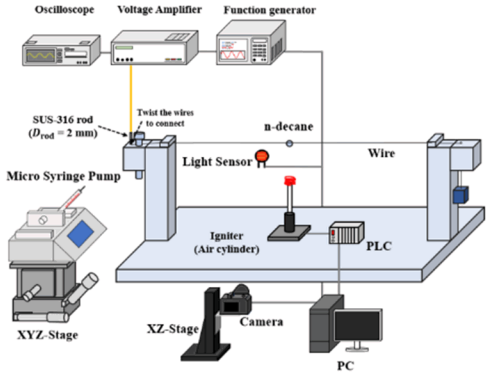


Fig. 1 Schematic of experimental.

Figure 1 에는 본 연구에서 사용한 실험장비의 개략도를 나타냈다. 실험 장치는 얇은 니켈크롬 전선과 그 지지대, 액적 공급 시스템, DC 전원공급기, 그리고 가시화 장치로 구성되었다. 직경 0.5mm, 길이 350 mm 의 전선은 아세탈 수지(acetal resin)로 제작된 비전도성 지지대 위에 수평으로 설치되었다[7]. 정밀 액적

* 부경대학교 기계공학과
** 울산과학기술원 기계공학과
*** 한국기계연구원
**** KAUST, CCRC
† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr
TEL : (051)629-7911

생성기는 자동화된 3 차원 이송 스테이지(3D translation stage)에 장착된 스텝 모터 구동 마이크로 실린지로 구성되어 있으며, 이를 이용해 전선 중앙에 액적을 정확히 위치시켰다. 액적의 비구형성으로 인해, 액적의 유효 직경 $D_{\mathrm{eff}} = 1.74\,\mathrm{mm}$는 주입된 액체 부피를 구형으로 가정하여 산출되었다. DC 전원공급기의 고전압 단자는 전선에 연결되고, 다른 단자는 접지되어, 개방회로 단일 전극 구성(open-circuit single-electrode configuration)을 이루었다. 이때 전기장 세기는 전선으로부터 무한대의 접지 방향으로 반경방향(radially)으로 감쇠한다. 인가 전압은 −10 kV 에서 10 kV 범위에서 변화시켰으며, 1000:1 프로브가 장착된 오실로스코프를 사용하여 모니터링하였다. 참고로, 우주선용 DC 전원공급기는 전력 분석기, 분광기, 카메라 등의 장비에 약 5 kV 수준의 전압을 사용하도록 설계되어 있으며, 지상 관측용 우주탑재 레이더 시스템의 경우 15 kV 를 초과하는 더 높은 전압이 사용된다.

점화 과도 현상을 고려하여, 전기장은 화염 폭이 최소가 되는 시점인 점화 후 약 $t = 0.25\,\mathrm{s}$에서 인가되었다. 전기장이 인가되지 않은 기준 조건(baseline case)과 약한 DC 전계 조건(뚜렷한 변화가 나타나지 않음)에서 측정된 액적의 수명은 모두 거의 동일한 $1.73\,\mathrm{s}$로 나타나, 실험 절차의 신뢰성과 전기장 인가 시점의 적절성이 확인되었다[7].

전압이 인가된 조건에서의 대표적인 화염 및 액적의 직접 영상은 Fig. 2 에 나타내었다.

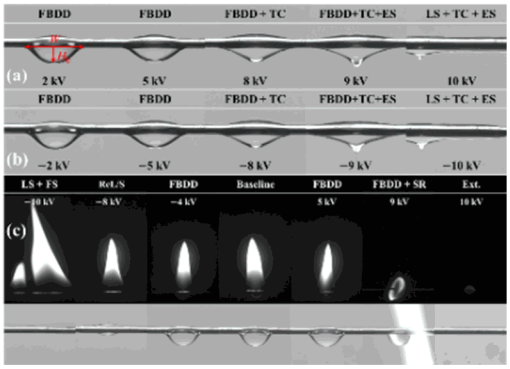


Fig. 2 Representative direct images of nonreacting droplets under (a) positive and (b) negative DC electric fields, and (c) those of burning droplets.

n-decane 은 고유한 이온을 가지지 않는 유전체 물질이므로, 표면 전하는 정전적으로 유도된다[6]. 액적의 상부(전기장 강도가 강함)와 하부(전기장 강도가 약함) 간의 기하학적 비대칭성, 그리고 액적 가장자리(약함)와 전선 표면(강함) 사이의 비대칭성으로 인해 수직 및 수평 방향의 유전영동력(dielectrophoretic force)이 발생한다. 여기에 맥스웰 응력(Maxwell stress) [8]에서 기인한 전기압력(electric pressure), 정전기력(electrostatic force), 표면장력, 중력이 동시에 작용하여, 관찰된 액적 거동은 이들 힘 사이의 동적 불균형(dynamic imbalance)에 의해 나타난다. 이러한 동적 거동의 세부 내용은 기존 연구에서 자세히 검토된 바 있다[6].

비연소 액적의 경우, 동일한 크기의 전압에서 거의 유사한 거동이 관찰되었다. $V_{\mathrm{DC}} = \pm 1\,\mathrm{kV}$ 에서는 기준 조건(baseline case)과 비교하여 액적의 변화가 거의 없었다. 그러나 $2 \leq |V_{\mathrm{DC}}| \leq 5\,\mathrm{kV}$ 구간에서는, 액적이 힘의 평형 상태에 도달한 이후 액적 폭 W 가 증가하였다[7]. 이 영역에서는 유전영동 효과(dielectrophoresis) [7]에 의해 $|V_{\mathrm{DC}}|$ 가 증가함에 따라 W 가 점진적으로 증가하며, 동시에 액적의 하단 높이 H_b 는 감소하였다. 이러한 DC 인가 후 액적 형상이 재안정화(restabilization)되는 현상을 본 연구에서는 '힘 평형 액적 변형(Force-Balanced Droplet Deformation, FBDD)'이라 부른다. $6 \leq |V_{\mathrm{DC}}| \leq 8\,\mathrm{kV}$에서는 이러한 경향이 계속 유지되며, 이때 액적 꼭대기 부분에서 전기압력이 표면장력을 초과하면 테일러 콘(Taylor cone, TC)[6]이 형성된다. $|V_{\mathrm{DC}}| = 9\,\mathrm{kV}$ 에서는 미세한 액적이 방출되는 약한 간헐적 전기분사(electrospray, ES)[6]가 테일러 콘으로부터 발생한다. 이때 W와 H_b는 전기분사 발생과 동시에 급격히 변동하며, 준안정적 확산(quasi-stable spreading)과 급변 현상이 주기적으로 반복된다. $|V_{\mathrm{DC}}| \leq 9\,\mathrm{kV}$에서는 액적의 치수 변화가 비교적 미약하지만, $|V_{\mathrm{DC}}| = 10\,\mathrm{kV}$ 에서는 수평 유전영동력이 표면장력을 극복하여 테일러 콘과 전기분사가 동반된 연속적인 측면 확산(continuous lateral spreading, LS)이 발생한다.

연소 중인 baseline 의 경우(Figs. 1 및 S2), 연소가 진행됨에 따라 액적 하부 중심부와 가장자리 사이의 표면장력 구배로 인해 마랑고니 대류(Marangoni convection)[7]가 유발되어 내부 재순환(internal recirculation)이 형성된다. 이후 액적 수명의 마지막 단계에서는 새로운 내부 재순환이 발생하며, 결과적으로 전선

주위를 중심으로 액적이 회전하는 현상이 나타난다. 이 현상은 이후에서 자세히 설명된다.

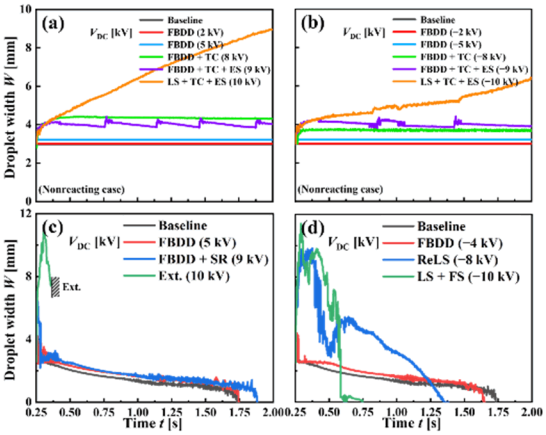


Fig. 3 Temporal variations in droplet width of nonreacting (a,b) and burning (c,d) droplets under positive and negative DC.

전압이 인가된 상태에서 연소 중인 액적(Figs. 2c 및 3c,d)은 뚜렷하게 다른 거동을 보인다. $1 \le V_{DC} \le 8\,\mathrm{kV}$구간에서는 액적이 FBDD(힘 평형 액적 변형) 거동을 나타내며, V_{DC} 가 증가함에 따라 액적 폭 W가 증가한다. $V_{DC} = 9\,\mathrm{kV}$ 에서는 이러한 경향이 유사하게 유지되지만, 저전압 조건에 비해 화염 폭이 감소한다. 또한, 액적의 중앙 평면(midplane) 부근에 그을음 고리(soot ring, SR)가 형성되어 좌우로 천천히 흔들리는(wobbling) 현상이 관찰되며, 이는 이후에 자세히 설명된다. $V_{DC} = 10\,\mathrm{kV}$ (Fig. S1c)에서는 전선에 전위가 인가되자마자 액적이 매우 빠르게 측면 방향으로 확산되며, 그 속도가 화염이 따라가기에는 너무 빨라 화염이 소멸(flame extinction)된다.

반면, $-5 \le V_{DC} \le -1\,\mathrm{kV}$ 에서는 연소 액적이 $-V_{DC}$ 조건에서도 FBDD 모드를 보인다. 그러나 $-8 \le V_{DC} \le -6\,\mathrm{kV}$ 구간에서는 액적이 좌우로 확산되었다가 다시 수축하는 주기적 거동을 보이며, 이는 축 방향 유전영동력(axial dielectrophoretic force)과 표면장력 간의 동적 평형(dynamic balance)에 의해 발생한다. 이러한 주기적 확산 및 수축 거동은 ReL/S(repeated lateral spread and shrinkage)로 정의된다(Figs. 2d 및 S1). 이 경우 시간에 따른 W 의 변화는 초기에는 급격히 증가하고, 이후 감소했다가 다시 증가한 후 다시 감소하는 형태를 보인다. 보다 큰 음전압(≤ −9 kV)에서는 W 가 급격히 증가한 뒤 수축 없이 유지되어, 화염이 두 개로 분리되는 화염 분리(flame splitting, FS)가 발생하며, 이는 LS(측면 확산)와 FS 가 결합된 형태이다.

주목할 점은, 비연소 액적에서 높은 $|V_{DC}|$ 조건에서 뚜렷하게 나타났던 테일러 콘(Taylor cone) 형성과 전기분사(electrospray)는 DC 전계가 인가된 연소 액적에서는 관찰되지 않는다는 것이다.

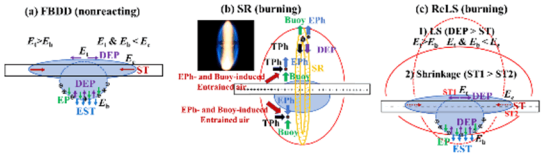


Fig. 4 Schematics of dynamic behaviors of droplets and flames with DC: (a) FBDD (nonreacting) (b) SR, and (c) ReL/S (FBDD, force-balanced droplet deformation; SR, soot ring; ReL/S, repetitive lateral spread and shrinkage).

정상 중력 조건에서 현수된 비연소 액적의 형상(Fig. 2)을 고려하면, 전기장이 인가될 때 액적 하부의 액체가 유전영동력(dielectrophoretic force)에 의해 위쪽으로 이동하면서, 이 힘은 점차 감소하고 반대로 하향 방향의 정전기력(electrostatic force)과 전기압력(electric pressure)은 증가한다. 이로 인해 액적은 상하 방향의 힘이 균형을 이루는 형태로 스스로 형상을 조정(self-adjusting)하며 안정화된다. 그 결과, Fig. 3a 및 b (또는 Fig. 4a)에 나타난 것처럼 액적의 폭이 증가하게 된다.

동시에, 액적 하단 중심부의 전기장 세기는 나전선 측면 근처의 전기장 세기보다 낮다. 이로 인해 액적 가장자리에는 바깥쪽으로 향하는 수평 유전영동력(lateral dielectrophoretic force)이 발생하여 액적 가장자리를 축 방향(axially)으로 밀어낸다. 가장자리가 이동할수록 전기장 강도 구배(intensity gradient)는 점차 감소하여 추가적인 이동이 억제된다. 축 방향 유전영동력이 표면장력과 균형을 이루면 액적은 축 방향 위치에서 안정화되며, 이때 나타나는 거동이 $|V_{DC}| \le 5$ kV 범위에서의 FBDD(Force-Balanced Droplet Deformation) 모드이다.

보다 높은 전압(6 ≤ $|V_{DC}|$ ≤ 8 kV)에서는 FBDD 모드가 지속된다. $|V_{DC}|$가 증가함에 따라 액적의 폭은 계속 증가하고, 하단 높이는 감소한다. 이때 하향 정전기력(전기압력 포함)이

표면장력보다 우세해지며, 액적은 점차 변형되어 테일러 콘(Taylor cone, TC)을 형성한다. 전압이 $|V_{DC}| = 9\text{kV}$로 증가하면 정전기력이 더욱 커져 콘의 꼭대기(apex)에서 미세 액적이 방출되는 전기분사(electrospray, ES)가 발생한다. 전압이 $|V_{DC}| = 10\text{kV}$로 더 증가하면 수평 유전영동력이 지배적으로 작용하여 연속적인 측면 확산(continuous lateral spreading, LS)이 나타나며, 이후 TC 와 ES 가 연이어 발생한다.

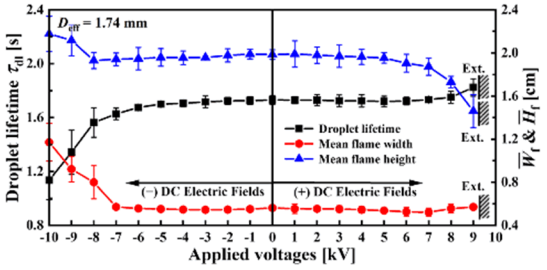


Fig. 5 Variations in droplet lifetime and mean flame width and height against applied voltage.

전선에 매달린 액적의 전체 연소 거동은 점화로부터 완전 연소(burnout)까지의 지속 시간을 의미하는 액적 수명(τ_{dl})으로 나타낼 수 있다.

Fig. 5 는 인가 전압 V_{DC} 에 따른 액적 수명(τ_{dl})의 변화를 보여주며, 동시에 연소 중의 시간 평균 화염 폭 $\bar{W}_f$ 와 높이 $\bar{H}_f$ 도 함께 나타내었다[7]. 결과에 따르면, $6 \le V_{DC} \le 9\,\text{kV}$ 범위에서는 τ_dl 이 점진적으로 증가하고, $-10 \le V_{DC} \le -6\,\text{kV}$ 에서는 $|V_{DC}|$의 증가에 따라 급격히 감소하며, $-5 \le V_{DC} \le 5\,\text{kV}$ 구간에서는 거의 일정하게 유지된다.

이질 확산 연소 시스템에서는 화염 폭 또는 높이가 증가할수록 액적으로의 열 피드백(heat feedback)이 강화되어 증발이 촉진되고, 결과적으로 액적 수명(τ_{dl})이 감소한다. 따라서 액적 수명은 평균 화염 폭 및 높이와 반비례 관계를 가지며, $\bar{W}_f$ 와 $\bar{H}_f$ 가 작을수록 더 긴 수명이 나타난다.

$8 \le V_{DC} \le 9\,\text{kV}$ 구간에서 τ_{dl} 이 점진적으로 증가하는 것은 그을음 고리(soot ring)의 형성에 기인하며, 이는 전선 아래쪽에서 상승 부력(buoyant force)에 반하는 하향 전기영동력(electrophoretic force)을 발생시킨다. 이러한 상호작용은 공기의 하향 및 내향 유입(downward and inward entrainment)을 유도하여, 공기 유입이 억제되고 화염 높이가 감소하게 된다.

반면, $-10 \le V_{DC} \le -6\,\text{kV}$ 구간에서는 반복적인 측면 확산 및 수축(ReL/S)과 LS+FS 의 복합 모드로 인해 평균 화염 폭 $\bar{W}_f$와 높이 $\bar{H}_f$가 크게 증가하며, 그 결과 액적 수명은 현저히 감소한다.

후 기

This research was supported by Balanced Academic Development Project in National Research Foundation of Korea (RS-2023-00241310617820643401 03)

참고 문헌

[1] O. Fujita, Solid combustion research in microgravity as a basis of fire safety in space, Proc. Combust. Inst., 35 (2015), 2487−2502.

[2] X. Huang, Y. Nakamura, A review of fundamental combustion phenomena in wire fires, Fire Technol. 56 (2020) 315−360.

[3] Y. Ma, S. Tao, Z. Guo, Y. Gu, Z. Zhao, Z. Li, S. Ding, S.H. Chung, O. Fujita, L. Hu, Flame spread over solid materials under reduced buoyancy/gravity, Prog. Energy Combust. Sci. 111 (2025) 101251.

[4] NASA STD 6001B, Flammability, offgas sing, and compatibility requirements and test procedure, 2011

[5] M.S. Kang, J. Park, S.H. Chung, C.S. Yoo, Effect of the thickness of polyethylene insulation on flame spread over electrical wire with Cu−core under AC electric fields, Combust. Flame 240 (2022) 112017.

[6] J. Park, C.S. Yoo, S.H. Chung, Dynamic behaviors of flame and molten insulation on electrical wire under applied electric field, Proc. Combust. Inst. 41 (2025) 105862.

[7] S.H. Kim, J. Park, S.H. Chung, C.S. Yoo, Dynmiac behaviors of burning droplet suspended on NiCr−wire with applied AC electric field, Combust. Flame 274 (2025) 114024.

[8] T.B. Jones, Electromechanics of particles, Cambridge university press, 1995

Center-injection GDI 가시화 엔진에서 분사 패턴에 따른 촉매 가열 조건의 연소 특성

고건우*. 강동우*. 박상재**. 손유상**. 박성욱***†

Combustion Characteristics of Catalyst Heating Conditions According to Injection Pattern in a Center-Injection GDI Optical Engine

Geonwoo Ko*. Dongwoo Kang*. Sangjae Park**. Yousang Son**. Sungwook Park***†

ABSTRACT

Particulate Matter (PM) from Gasoline Direct Injection (GDI) engines is a key challenge, especially during CH mode. This study investigates how injector spray patterns affect combustion stability and PM in an optical engine. We identified three critical factors: securing a rich mixture near the spark plug improved ignition, while enhanced tumble flow promoted homogeneity. However, a trade-off exists, as spray strategies enhancing ignition can increase fuel wall wetting-a primary source of PM-requiring careful optimization for emission reduction.

Key Words: CH mode, Particulate Matter, Combustion stability, Spray pattern, Wall wetting

1. Introduction

전 세계적으로 자동차에서 발생하는 배기 규제가 강화되고 있다. 특히 가솔린 엔진에 직분사 전략을 적용하며 가솔린 엔진에서 입자상 물질(Particular Matter, PM)의 배출이 증가하게 되었는데, 이러한 입자상 물질에 대한 기준이 가솔린 엔진 기술 개발의 핵심 도전 과제가 되었다.

차량 운행 시 발생하는 입자상 물질의 상당 부분은 엔진이 충분히 예열되지 않아 엔진 온도가 낮은 냉간 운전 영역에서 배출된다. 이는 낮은 연소실 벽면 온도에 의한 연료 증발 성능 악화와 불균일한 혼합기 형성, 그리고 배기 후처리 장치의 촉매 활성화를 위해 고온의 배기열을 공급하는 운전 조건인 촉매 가열 조건의 제어 전략(예: 점화 시기 지각)이 복합적으로 작용하여 연소 안정성이 크게 저하되기 때문이다.

결과적으로 불안정한 연소는 국부적으로 농후한 영역을 형성하게 되어 PM 생성을 촉진한다. 이와 같은 PM 배출 문제를 해결하기 위해서는 연소 안정성을 향상시키는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 촉매 가열 조건에서 연소 안정성 향상과 PM 배출 저감 전략 수립을 목표로, 다양한 인젝터 분사 패턴에 따른 연소 특성을 비교 분석하였다.

2. Methodology

실험은 1,500 rpm, 흡기 압력 0.85 bar 조건에서 Center-mounted injector type의 2기통 SI 가솔린 직분사 가시화 엔진에서 수행하였다. 엔진의 구성부 및 가시화 엔진에 적용된 쿼츠 실린더는 Figure 1에서 확인할 수 있다. 엔진 제어는 National Instruments 社의 CompactRIO 시스템과 30 kW 급의 AC 동력계를 사용하여 수행되었다. 흡기 가열 챔버를 이용하여 흡기 온도를 제어하였고, MFC를 사용하여 흡기 유량을 제어하였다. 인젝터 분사 패턴 조건은 스파크 주변 당량비 확보와 텀블 유동 강화, 연료 웨팅 세 가지 관점에서 각 다섯 가지 조건을 설정하였다. 해당 조건에 대한 개략도는 Figure 2에서 확인할 수 있다.

화염 가시화 데이터는 가시화 엔진의 투명한 쿼츠 실린더 내부의 화염 이미지를 고속 카메라를 활용하여 취득하고, 해당 화염 이미지를 후처리하여 취득하였다. 실린더 유동 데이터와 연료

웨팅, 실린더 내 연료 분포 데이터는 CFD 해석을 통하여 데이터를 취득하였다.

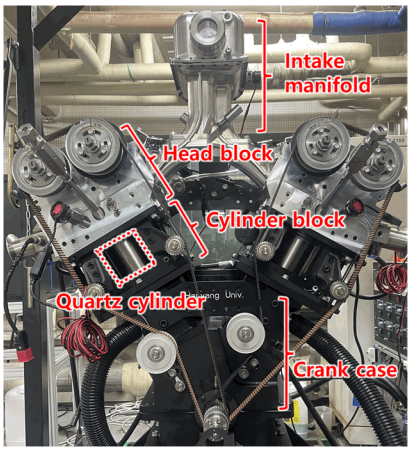


Fig. 1 Components of an Optical Engine and an Image of a Quartz Cylinder

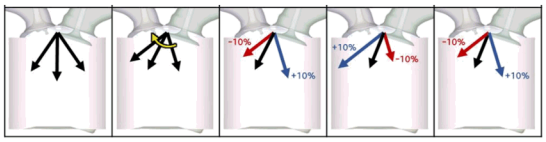


Fig. 2 Schematics of Injector pattern conditions

3. Results and discussion

인젝터 분사 패턴에 따른 연소 안정성과 PM 배출 특성은 다음 세가지 인자의 영향을 받았다.

첫번째 인자는 스파크 플러그 주변 당량비 확보이다. 본 연구에서는 실화를 줄이고 착화 성능을 향상시키기 위해 점화 시기 직전 분사 전략을 사용하였는데, 해당 전략을 사용하였을 때 스파크 플러그가 위치한 영역에 더 많은 연료를 분사하는 분사 패턴 조건의 연소 안정성이 눈에 띄게 향상되었다. 이는 점화 시기에 스파크 플러그 주변에 국부적으로 농후한 연료 분포 영역을 형성해줌으로서 착화 성능과 연소 안정성이 크게 향상되었기 때문이다. 따라서 국부적으로 농후한 영역에서 배출되는 PM이 개선된 연소 조건 하에서 충분히 산화될 수 있었고, 결과적으로 PM 배출량도 감소하는 결과를 보였다.

두번째 인자는 텀블 유동 및 난류 강화이다. Center-injection 특성상 서로 반대편에 위치한 인젝터 홀에서 분사된 분무 유동은 실린더 내부에서 서로 Counter-flow 역할을 하게 되고, 이는 결과적으로 텀블 유동의 세기를 약화시키는 결과를 야기했다. 그러나 분사 각도를 조절하여 텀블 유동 방향으로 분사 모멘텀을 강화하거나, 텀블 유동 방향 인젝터 홀의 분사 유량을 증가하였을 때 Counter-flow의 세기를 약화시키고 텀블 유동을 강화시켰다. 강화된 텀블 유동은 혼합기 균질도를 향상시켰고 점화 시기 스파크 주변 난류 강도를 강화시켜 착화 성능이 향상되고 연소 안정성이 증가하는 결과로 이어졌다.

세번째 인자는 연료 웨팅 저감이다. Near spark region 방향 인젝터 홀에서 분사된 분무 플럼은 흡기 유동과 상호작용하여 분무 도달 거리가 길어지는 양상을 보였다. 즉, Near spark region 연료 분사 강화는 스파크 주변에 농후한 영역을 형성하여 착화 성능을 개선하는데는 유리했지만 실린더 및 피스톤 벽면 웨팅을 증가시켜 오히려 PM을 유발하는 Trade-off가 존재하였다.

후 기

본 연구는 Hyundai Motor Company의 지원을 받아 수행되었습니다.

1L급 FFV 엔진에서 모사합성연료와 가솔린 배출가스 특성 비교

박정현*.권석주**.이시원**.윤승현***.박수한****†

A Comparative Study on the Emission Characteristics of Simulated Synthetic Fuel and Gasoline in a 1 L-Class FFV Engine

Jeonghyun Park *, Seokjoo Kwon**, Siwon Lee**, Seung Hyun Yoon***, Suhan Park****†

전 세계적으로 기후변화와 대기오염 문제가 심화되면서, 수송 부문에서의 탄소중립 실현이 중요한 과제로 부상하고 있다. 수송 부문에서 배출되는 온실가스는 에너지부문의 상당 부분을 차지하며, 이로 인해 각국은 화석연료 의존도를 낮추기 위한 다양한 대체에너지 기술을 모색하고 있다. 이러한 배경 속에서, 재생 가능한 전력으로 생산된 수소와 포집된 이산화탄소를 결합하여 제조하는 합성연료(e-Fuel)가 새로운 대안으로 주목받고 있다. 합성연료는 기존 내연기관과 연료 공급 인프라를 그대로 활용할 수 있으면서도, 연료의 조성을 설계적으로 조절하여 연소 및 배출 특성을 제어할 수 있는 장점을 가진다.

그러나 합성연료는 여전히 생산 비용, 효율, 그리고 인프라 구축 등의 이유로 상용화 단계에는 이르지 못했다. 따라서 실제 e-Fuel의 주요 물리·화학적 특성을 반영하여 조성한 모사 합성가솔린을 사용해 실험을 수행할 경우, 합성연료의 연소 및 배출 특성을 예측하고, 엔진 제어 및 배출 저감 전략을 사전에 검토하기 위한 실험적 대안으로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 1 L급 플렉서블 연료 차량(FFV) 엔진을 대상으로 모사 합성연료와 상용 가솔린의 주요 배출가스 특성을 비교하였다. 이를 통해 연료 조성 차이가 배출 성분(NOx, CO, THC 등)에 미치는 영향을 분석하고, 향후 합성연료의 실제 적용 시 엔진 적합성 평가 및 연료 설계의 기초 자료를 확보할 수 있다.

본 연구에서 사용된 모사 합성가솔린은 Fisher-Tropsch(FT)합성 공정에서 생성되는 탄화수소의 Anderson-Schulz-Flory(ASF)분포를 적용하여 제조하였다. 모사 합성연료의 구성 성분 중에서 연소 과정에서 포름알데하이드나 다환방향족탄화수소등의 유해 물질 발생 가능성을 줄이기 위해, 가솔린 중의 올레핀 및 방향족 성분을 최소화하였다.

다양한 운전 조건에서 배출되는 연소 특성을 분석하기 위해 저·고속 및 저·고부하 영역을 모두 포함하는 총 11개의 운전 조건을 설정하였다. 각 조건은 엔진 속도와 부하를 조합하여 실차 주행 범위를 모사하도록 구성되었으며, 중속·중부하 조건(2000 rpm, 85 N·m)을 연료 종류에 따른 배출 특성 비교의 대표 시험조건으로 선정하였다.

대표 조건에서 세 종류의 모사 합성가솔린(e-GSL)의 CO 배출량은 가솔린 대비 각각 4.19%, 5.17%, 3.45% 감소하였다. 이는 e-GSL이 방향족 성분을 포함하지 않아 연소 반응성이 낮고 안정성이 높기 때문으로 판단된다. 또한 e-GSL의 공기-연료비가 약 3-3.7% 낮게 나타나 완전 연소가 촉진되었으며, 이에 따라 연소 후 산소 농도 역시 2.4-9.9% 높게 측정되었다.

특히 e-GSL#1과 #2는 MTBE 첨가로 각각 0.97% 및 0.96%의 산소를 함유하고 있어 e-GSL#3보다 CO 배출이 더 낮게 나타났다. 반면 e-GSL#3은 증기압이 27.28 kPa로,

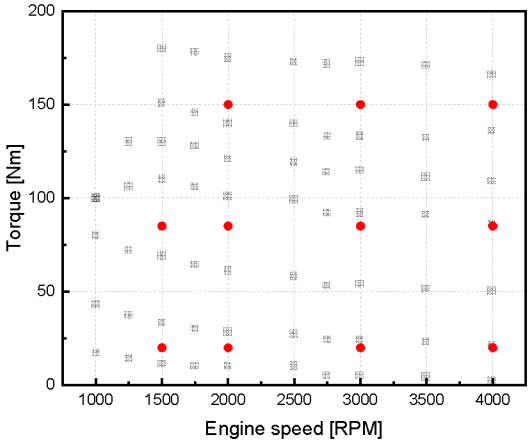


Fig. 1 Engine test conditions

* 건국대학교 기계항공공학부
** 한국자동차연구원 탄소중립기술연구소
*** 영남이공대학교 스마트 e-자동차과
**** 건국대학교 기계로봇자동차공학부
† 연락저자, suhanpark@konkuk.ac.kr
TEL : (02)450-3571

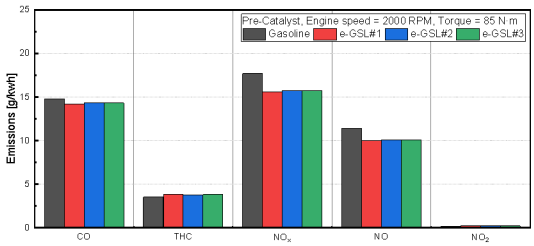


Fig. 1 Comparison of major emission characteristics between gasoline and simulated synthetic gasoline

e-GSL#1(47.56 kPa)과 #2(45.25 kPa)에 비해 낮아 연료 증발성이 떨어지며 CO 배출이 다소 높게 나타났다. 특히 e-GSL#1과 #2는 MTBE 첨가로 각각 0.97% 및 0.96%의 산소를 함유하고 있어 e-GSL#3보다 CO 배출이 더 낮게 나타났다. 반면 e-GSL#3은 증기압이 27.28 kPa로, e-GSL#1(47.56 kPa)과 #2(45.25 kPa)에 비해 낮아 연료 증발성이 떨어지며 CO 배출이 다소 높게 나타났다.

e-GSL의 총탄화수소 배출량은 가솔린 대비 각각 9.17%, 5.07%, 8.54% 증가하였다. 이는 e-GSL의 증기압이 가솔린(59.9 kPa)에 비해 낮아 연료 증발이 불충분하고, 혼합기의 균일성이 저하된 것이 원인으로 판단된다. 또한 본 연구에 사용된 엔진이 가솔린 및 에탄올 혼합연료에 맞추어 설계되어 있어, 상대적으로 저분자 성분 비율이 높은 e-GSL의 경우 점화 및 혼합 시기 최적화가 필요하다. 특히 화학적 안정성이 높은 나프텐계 성분의 비율이 높은 e-GSL#3에서는 최고 연소압이 가장 낮게 나타났다.

모사 합성가솔린 3종의 NOx배출량은 가솔린 대비 각각 12.11%, 12.67%, 11.51% 감소하였다. 모사 합성가솔린이 연소 반응성이 높은 올레핀 성분을 포함하지 않고, 대신 연소 속도가 느린 나프텐계 탄화수소 비율이 증가하여 화염 온도 상승이 억제되었기 때문이다. 또한 낮은 증기압으로 인해 연소 초기에 연료 증발 및 혼합 형성이 지연되어, 국부적인 연소지연 현상도 NOx 생성 저감에 일부 기여한 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원(20024960)에 의해 수행되었습니다. 지원 기관에 감사드립니다.

가솔린 직분사 엔진에서 스파크 플러그 위치가 유동 및 연소에 미치는 영향

강동우* · 김남호* · 고건우* · 박상재** · 손유상** · 박성욱***†

Effect of Spark Plug Location on Flow and Combustion Characteristics in a Gasoline Direct Injection Engine

Dongwoo Kang*, Namho Kim*, Geonwoo Ko*, Sangjae Park**, Yousang Son**, Sungwook Park***†

ABSTRACT

This study investigates the effect of spark plug location on in-cylinder flow and combustion characteristics in a gasoline direct injection (GDI) engine. A single-cylinder CFD model using CONVERGE v2.4 with the RNG k-epsilon turbulence and KH-RT spray models is established and validated. Results indicate that spark plug height affects tumble flow structure and turbulence distribution, suggesting that proper positioning is essential to ensure stable combustion in GDI engines.

Key Words : Gasoline Direct Injection (GDI), Spark plug location, Turbulent Kinetic Energy (TKE), Computational Fluid Dymanics (CFD)

최근 강화되는 환경 규제에 대응하기 위해, 가솔린 직분사(GDI) 엔진은 연료 소비율 저감을 통한 연소 효율과 열효율 향상을 목표로 개발이 이루어지고 있다. 이를 달성하기 위한 주요 접근 방식으로는 고압축비 및 희박 연소 전략의 적용이 있으며, 이러한 방식은 연소 효율을 향상시키는 데 효과적이지만, 노킹(knocking) 및 실화(misfiring)와 같은 비이상연소가 발생하여 사이클 간 편차 증가 및 연소 안정성 저하를 유발하는 한계를 가지고 있다. 이러한 비이상연소가 발생할 경우에는 미연가스 증가에 따른 배출가스 문제뿐만 아니라 노킹에 의한 엔진 손상 등의 다양한 문제가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 연소실 내부의 유동과 난류의 강도를 향상시켜 안정적인 연소를 구현하는 접근이 있다. 이에 따라 연료 분사 시기 및 분무 패턴, 실린더 보어-스트로크 비율, 피스톤 및 흡기 포트 형상 등 다양한 설계 및 제어 인자에 대한 최적화 연구가 활발히 수행되어 왔다.

본 연구에서는 이러한 기존 주요 인자들과는 다른 관점에서 점화가 이루어지는 위치에 변화를 주고자 해석 모델을 통해 스파크 플러그의 높낮이를 조정하여 실린더 내부 유동 구조 및 연소 과정에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 통해 점화 위치 변화가 연소 안정성 확보에 미치는 영향을 규명하고, 향후 GDI 엔진의 점화 설계 인자 최적화에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

가솔린 엔진의 내부 유동 특성을 해석하기 위해 상용 CFD 프로그램인 Converge v2.4를 활용하였다. 해석 모델은 흡기 및 배기 포트와 실린더 형상을 포함한 단기통 엔진 형태로 구축되었으며, 이를 기반으로 연소실 내 유동 및 연료 분무 거동을 수치적으로 분석하였다. 난류 해석에는 스월과 텀블 유동의 예측 정확도가 검증된 RNG k-ε 모델을 적용하였다[1]. 기존 격자 크기는 4mm로 설정하였고, Embedding 기법과 Adaptive Mesh Refinement (AMR) 기법을 병행하여 격자 크기를 효율적으로 조정하였다. 모델 신뢰성 확보를 위해 모터링 조건에서의 실험 결과와 비교하여 모델의 검증 과정을 수행하였다.

고압의 가솔린 직분사 인젝터 분무 거동을 재현하기 위해, 분무 분열 모델 해석에는 KH 및 RT 불안정성 이론을 결합한 KH-RT 모델을 적용하였다[2]. 연료로는 실제 가솔린과 분무 특성이 유사한 이소옥탄(iC8H18)을 대체연료로 사용하여 모델을 구성하였다. 본 모델은 원래 디젤 엔진의 고압 분사 조건을 모사하기 위해 개발되었으나,

* 한양대학교 융합기계공학과
** 현대자동차 엔진설계실
*** 한양대학교 기계공학부
† 연락저자, parks@hanyang.ac.kr
TEL : (02)-2220-0430 FAX : (02)-2220-4588

가솔린 직분사 인젝터의 고압 분사 특성에도 충분한 예측 신뢰성을 보이는 것으로 알려져있다. 또한, Mie-scattering 기법을 활용한 분무 가시화 실험 결과와의 비교를 통해 분무 해석 모델 또한 검증 과정을 수행하였다.

스파크 플러그 위치에 따른 텀블 유동 구조 및 난류 운동 에너지(TKE), 그리고 스파크 플러그 중심의 평균 난류 운동 에너지 및 당량비를 기준으로 유동 특성을 분석하였다. 스파크 플러그의 장착 위치에 따른 유동 특성 분석 결과, 플러그가 상부에 위치할 경우 흡기 유동과 충돌하는 현상이 생기며, 또한 점화 이후 화염 전파 영역이 헤드 디자인의 영향을 받는 단점이 존재한다. 반대로 스파크 플러그를 하부에 위치시킨 경우에는 압축행정 중 형성되는 회전 유동과 충돌하여 난류 운동 에너지의 일부가 소산되는 결과를 나타냈다. 따라서, 스파크 플러그의 높이는 유동 구조 및 연소 안정성에 일부 영향을 미칠 수 있으며 적절한 위치 선정이 필요함을 시사한다.

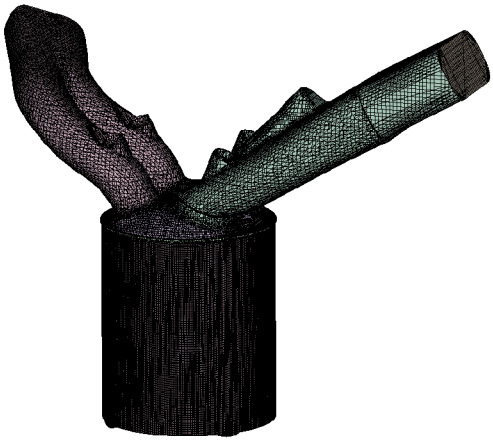


Fig. 1 Grid configuration of the single-cylinder geometry for numerical simulation

후 기

본 연구는 현대자동차의 지원에 의해 수행된 연구의 결과물임을 밝히며, 아낌없는 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Yakhot V, Orszag SA, Thangam S, Gatski TB, Speziale CG. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1992;4(7):1510-20.

[2] Reitz, R. D. and J. C. Beale (1999). "Modeling Spray Atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor Hybrid Model." Atomization and Sprays 9(6): 623-650.

0D 수치 해석 모델을 이용한 천연가스-암모니아 혼소 SI 엔진의 암모니아 후분사 전략에 따른 실린더 내 $DeNO_x$ 양상에 대한 연구

김한영*.김민규*.오세철*†

Investigation on In-cylinder $DeNO_x$ Strategy in a Natural Gas-Ammonia Dual-Fuel SI engine with Ammonia Post-Injection Strategy Using a 0D Numerical Simulation

Hanyoung Kim *, Mingyu Kim*, Sechul Oh*†

Key Words : In-cylinder $DeNO_x$, Selective-Non-Catalytic Reduction, Zero-dimensional Numerical Modeling, Dual-fuel combustion,

온실가스 배출로 인한 지구 온난화는 세계적으로 시급한 환경 문제 중 하나이다. 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO_2)뿐만 아니라, 아산화질소(N_2O), 질소산화물(NO_x) 같은 비탄소계 기체들도 지구온난화와 대기오염을 초래한다. 이러한 배출가스 저감을 위해 다양한 산업 분야들과 관련된 국제 기구들에서는 최근 강화된 배출 규제를 제정하고 있다. 예를 들어 국제해사기구 IMO (International Maritime Organization)에서는 2023년 개정된 온실가스 감축 전략을 발표하였다[1]. 해당 규제에서는 2030년까지 2008년 대비 20%의 CO_2 감축, 2050년까지 탄소중립 달성을 목표로 하고 있다. 이에 따라 저탄소 및 무탄소 배출 추진 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재 해상 운송 과정에서 배출되는 CO_2는 전 세계 배출량의 약 3%를 차지한다[2]. 기존의 SO_x, NO_x, PM 규제를 만족시키면서, 동시에 탄소 배출량을 저감하기 위해 최근에는 액화천연가스(LNG)를 활용한 이중연료 혼소 엔진이 사용되고 있다. 그러나 LNG 또한 CO_2를 배출하므로, 2050년 탄소중립 목표를 위해서는 친환경적인 방식으로 생산된 무탄소 연료 도입이 필수적이다.

육상 운송의 경우 최근 수소 또는 전동화 기반 추진시스템이 주목받고 있다. 하지만 Table 1의 결과에 따르면 수소와 전기 추진 시스템의 경우 상대적으로 낮은 체적 에너지 밀도를 가지고 있어, 선박용 에너지원으로 적합하지 않다. 반면 암모니아의 경우 수소와 같이 무탄소 연료이며, 상대적으로 두 에너지원에 비해 높은 체적 에너지 밀도를 가지고 있고, 기존 인프라의 활용성과 높은 기술 성숙도를 가지고 있어 차세대 선박용 연료로 주목받고 있다[3].

Table 1 Fuels volumetric energy [3]

Fuel	Volumetric energy density (Wh/L)
Ammonia	4325
Methanol	4600
Ethanol	6100
Gasoline	9700
Hydrogen	1305
Lithium-based battery	730~2039

하지만 암모니아는 높은 자발화 온도(924 K)와 낮은 층류 화염속도(0.07 m/s)로 인해 연소 안정성이 낮다는 단점을 가진다 [3]. 이를 해결하기 위해서 천연가스, 수소, 디젤 등 연소 특성이 우수한 연료와의 혼소가 제안되고 있다. 관련하여 Compression-ignition(CI) 엔진에 기반한 암모니아-디젤의 이중연료 혼소 연구들이 활발히 진행되어 왔으나, 최근 더 가혹한 연소 조건인 Spark-ignition(SI) 엔진에서 암모니아-천연가스 이중연료의 안정적인 혼소 가능성이 실험적으로 증명되었다 [4]. 해당 연구에서 예혼합 조건에서 천연가스-암모니아의 혼합비를 저위발열량(LHV) 기준 100:0에서 50:50까지 암모니아 비율을 증가시켰을 때, engine out emission에서 잔여 천연가스와 암모니아의 양은 소폭 증가하였으나, 후처리 장치를 통과한 이후에는 잔여 암모니아는 효과적으로 제거되었다고 보고했다.

암모니아 연료는 산화 과정에서 기존의 Thermal NO_x 외에 Fuel NO_x가 추가로 발생하기에 기존보다 NO_x 배출량이 증가하는 문제가 있다. 따라서 증가된 NO_x를 효과적으로 저감할 수 있는 후처리 전략이 필요하며, 기존 사

* 부산대학교 기계공학부
† 연락저자, sechuloh@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2430

례들에서는 선택적 촉매 환원 시스템(SCR)과, 선택적 비촉매 환원 시스템(SNCR)을 사용하였다. SCR은 촉매 환경에서 요소수를 사용하여 상대적으로 낮은 온도에서 NO_x를 환원시킨다. 해당 장치는 높은 저감 효율을 가지지만, 복잡한 구조, 귀금속 촉매로 인한 높은 유지비용, 부하 조건에 따라 저감 효율이 변하는 단점을 가지고 있다. 또한 암모니아 연료 사용으로 NO_x이 늘어남에 따라 SCR 장치 부피 증가 및 이로 인한 비용 증가가 예상된다. 반면, SNCR은 촉매 없이 NH_3를 이용해 NOx를 환원시키는 방식으로 구조가 단순하고, 유지비용이 작은 장점을 가지고 있다. 하지만 약 900K~1400K의 좁은 온도 영역에서만 환원반응이 활성화되며, 저감효율이 SCR 장치보다 낮은 단점을 가진다[5].

선행 연구에서는 SI엔진의 팽창과정에서 실린더 내의 온도 범위가 SNCR의 온도 범위에 해당함을 보고하였으며, 실린더 내의 잔여 암모니아에 의한 NO_x 저감 가능성을 언급하였다[4]. 따라서 CI엔진 대비 더 가혹한 연소조건인 예혼합 SI엔진에서 SNCR을 이용한 질소산화물 저감 가능성을 확인한다면 다양한 운용조건으로의 확장 가능성을 고려해 볼 수 있다.

본 연구에서는 0차원 엔진모델을 기반으로 천연가스-암모니아 혼소 SI엔진에서 실린더 내 암모니아 후분사를 통한 실린더 내의 질소산화물 저감 전략의 가능성을 수치해석적으로 분석하였다. 실제 엔진 실험 조건을 모사하여, 주요 변수인 후분사 시점, 후분사 양, 공기과잉비 등의 주요 변수 변화가 NO_x 저감 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 실린더 내의 SNCR 전략 가능성을 평가하고, IMO Tier Ⅲ 배기규제를 만족시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

천연가스-암모니아 혼소 엔진의 연소 실험 결과 [4]를 기반으로 엔진 모델을 구축하였다.
실험 결과를 엔진 모델로 재현한 후, 후분사 코드를 추가하여 SNCR 가능성을 수치적으로 분석하였다. Table 2의 엔진 제원을 기반으로 엔진 모델을 구축하였으며, 해당 엔진은 1100 rpm, 전부하 조건으로 구동되었다.

엔진 모델은 Table 3의 입력 조건을 바탕으로 Cantera에 기반하여 MATLAB 환경에서 구성하였다. 연소는 연소 구역과 미연소 구역으로 구분된 Two-zone 모델로 모사되었으며, 기존 문헌에서 사용된 모델을 참고하였다[6]. 연소 속도 모사 과정에서는 Wiebe 함수(식(1))를 적용하였다. 열전달 모델로 Woschni 관계식을, 화학 반응 계산에는 Glarborg 메커니즘을 적용하였다.

Fig 1에서 엔진 실험에서 얻은 연소 질량 분율(Mass Fraction Burned)곡선을 Wiebe 함수(식(1))와 비교하여 Wiebe 상수 a와 m을 산출하였다. 산출된 상수를 엔진모델에 반영한 뒤, 실험에서 측정된 압력 곡선을 엔진모델의 계산결과와 비교하여 계산에 필요한 주요 변수들을 보정하였다. 이러한 두 단계의 곡선 피팅을 통해 실험결과를 모델로 재현하였다.

Table 2 Engine specification

Parameters	Value
Compression ratio	10.5
Bore (mm)	123
Stroke (mm)	155
Connecting rod (mm)	275
Engine speed (rpm)	1100
Brake torque (N·m)	1000
Cylinder number	6
Intake Valve Close (°aBDC)	30
Exhaust Valve open (°bBDC)	40
Spark ignition timing (°bfTDC)	22.9
Engine mode	Full load

Table 3 0D engine model [6]

Category	Model/Method
Simulation tool	MATLAB + Cantera
Combustion zone configuration	Two-zone model (burned/unburned)
Combustion modeling	Wiebe function
Heat transfer model	Woschni correlation
Chemical kinetics	Glarborg model [5]

$$\text{Wiebe function}: x(\theta) = 1 - \exp\{-a(\frac{\theta-\theta_{soc}}{\Delta\theta_{dur}})^{m+1} \quad (1)$$

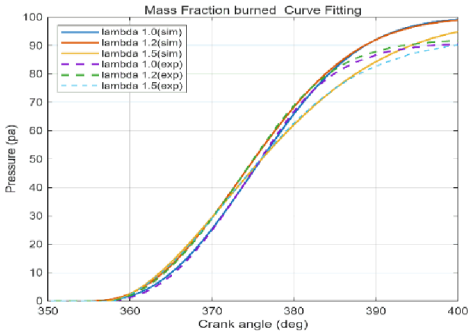


Fig 1 Mass fraction burned curve fitting

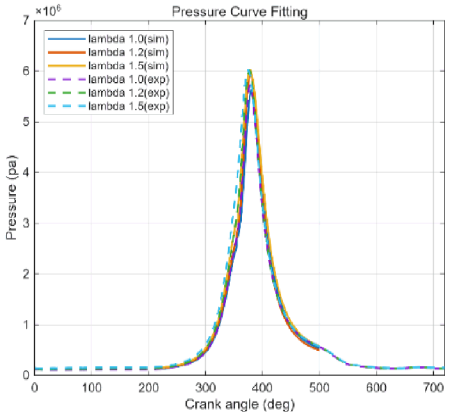


Fig 2 Pressure curve fitting.

Table 4 Post injection simulation conditions

Parameter	Without injection	With Post-injection		
		λ=1.0	λ=1.2	λ=1.5
Engine speed (rpm)	1100	1100	1100	1100
Fuel ratio (NG[1]: NH_3)	70:30	70:30	70:30	70:30
injection timing(°CA)	-	65~140	65~140	65~140
Baseline condition	-	10% of fuel NH_3	10% of fuel NH_3	10% of fuel NH_3
Increased condition	-	15%~20% of fuel NH_3	15%~20% of fuel NH_3	15%~20% of fuel NH_3

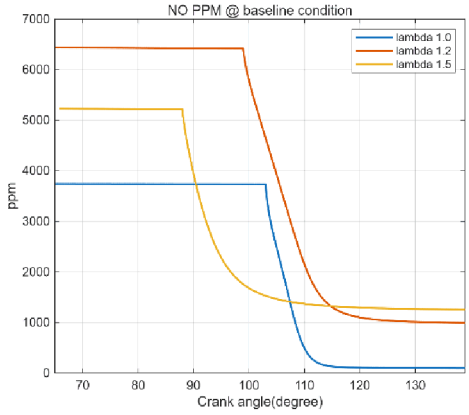


Fig 3 Baseline condition SNCR results

실험값을 엔진 코드로 모사 후 Table 4처럼 후분사 시뮬레이션을 진행하였다. 모든 경우에서 엔진 속도는 1100 rpm이며, 저위발열량 기준 천연가스와 암모니아의 혼합비가 70:30인 연료 조성이 적용되었고, 다양한 공연비에서 분석이 진행되었다. 후분사 과정은 연소 4행정 중 연소가 완료된 이후의 팽창과정에서 수행되었다. 팽창과정 내 후분사 시기를 변화시키며 분사 시점에 따른 NO 저감 경향을 확인하였다. 후분사량의 변화에 따른 영향을 보기 위해 기준 분사량을 설정하고, 이를 단계적으로 증가시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 연료로 사용된 암모니아의 10%에 해당하는 후분사량을 기본 분사량 조건인 Baseline condition으로 설정하였다. 이는 공기과잉비(λ) 1.2에서 배기밸브 개방(EVO) 시점의 NO와 NH_3의 몰수가 1:1이 되는 양에 해당한다. 후분사양을 기준 조건에서 최대 20%까지 증가시키며 NO_x 저감 경향을 확인하였다. 먼저 기준 조건에서 공기과잉비별 최적 후분사 분사 시점을 확인하였다. 또한 공기과잉비에 따른 후분사 특성을 분석하였다. 후분사량을 증가시키면서 본 전략이 IMO tier 3에 해당하는 NOx 배기규제를 충족시킬 수 있는지 평가하였다.

Fig 3은 각 공기과잉비 조건에서 Baseline condition의 후분사를 최적 후분사 시기에서 수행하였을 때 NO 농도(ppm) 변화를 크랭크각(CA)에 따라 나타낸 결과이다. 공기과잉비에 따라 최적 후분사시점과 NO 저감 효율이 상이하게 나타났으며, 희박 조건일수록 후분사 시점이 앞당겨지고 NO 저감 효율이 감소하는 경향을 보였다. 구체적으로, λ=1.0 조건에서는 후분사 이전 대비 약 97.5%, λ=1.2 조건에서는 약 85%, λ=1.5 조건에서는 약 76%의 NO가 저감되는 것을 확인하였다. 이는 공기과잉비에 따라 연소실 내부의 온도와 조성이 달라지고, 공기과잉비가 늘어날수록 실린더 내 잔여 산소량이 많아 후분사된 암모니아가 NO 를 선택적으로 환원시키는 반응이 상대적으로 제한되기 때문이다.

Fig 4는 공기과잉비(λ)가 각각 1.2, 1.5인 조건에서 후분사량의 변화에 따른 SNCR 반응 후 NO_x 배출량 (g/kWh)을 나타낸 것이다. 또한 각 공기과잉비 조건에서 계산된 잔여 NOx 배출량이 IMO Tier 3 배기규제를 충족하는지를 평가하였다. 후분사량이 증가함에 따라 NOx 저감 효과가 향상되는 경향을 보였으나, 일정 분사량 이상에서는 추가적인 저감 효과가 제한적으로 나타났다. 또한 반응하지 않고 잔류하는 암모니아의 양

[1] NG: natural gas

이 증가하였다. 이러한 결과는 공기과잉비 조건에 따라 후분사량의 최적 범위가 존재함을 시사한다.

정리하자면, 공기과잉비에 따라 최적 후분사 시점과 최적 분사량이 모두 상이하게 나타났다. 동일한 분사량 조건에서 공기과잉비가 증가할수록 NOx 저감 효과가 감소하는 경향을 보였으며, 반대로 분사량이 증가할수록 저감 효과가 향상되는 것이 확인되었다. 공기과잉비 1.2 및 1.5 조건에서 암모니아 후분사를 통해 IMO Tier Ⅲ 배기 규제를 충족할 수 있는 가능성이 확인되었다. 그러나 일정 분사량 이상에서는 추가적인 저감 효과가 제한적이며, 반응 후 잔류 암모니아의 양이 증가하는 경향이 확인되었다. 이러한 결과는 공기과잉비 조건에 따라 상이한 후분사 전략의 적용이 필요함을 시사한다.

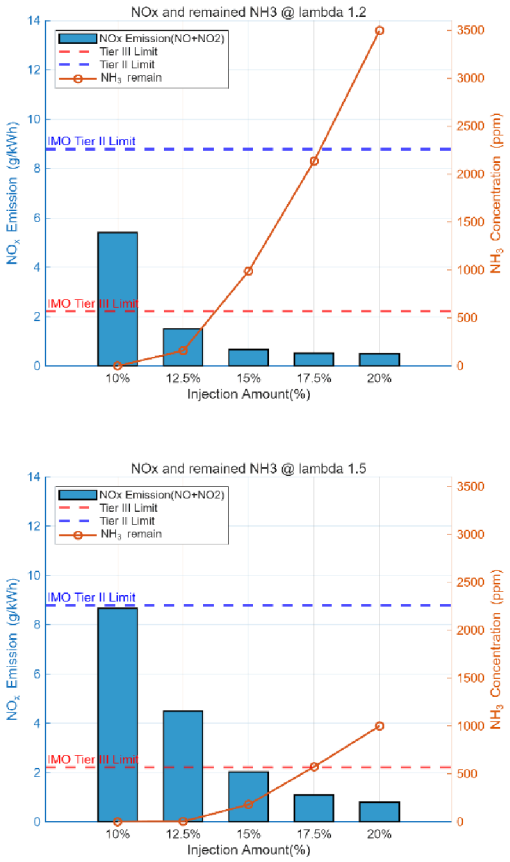


Fig 4 NOx emission and remaining NH_3 concentration variation with injection amount at λ = 1.2 and 1.5

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. RS-2024-00335567) 또한 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No.RS-2025-02221821)

참고 문헌

[1] International Maritime Organization, Revised GHG Reduction Strategy for Global Shipping Adopted, IMO, 2023.

[2] European Commission, "About the EU ETS," European Commission, 2025

[3] Wai Siong Chai, Yulei Bao, Pengfei Jin, Guang Tang, Lei Zhou, "A Review on Ammonia, Ammonia–Hydrogen and Ammonia–Methane Fuels," Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 147, 2021, Article 111254.

[4] Sechul Oh, Cheolwoong Park, Myungguen Ahn, HyeongJun Jang, Seonyeob Kim, "Experimental Approach for Reducing Nitrogen Oxides Emissions from Ammonia–Natural Gas Dual-Fuel Spark-Ignition Engine," Fuel, 2023, Article 126065.

[5] Peter Glarborg, James A. Miller, Branko Ruscic, Stephen J. Klippenstein, "Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 67, 2018, pp. 31–68.

[6] Jeongwoo Song, Han Ho Song, "Spark-Ignition Engine Speed Profile Optimization for Maximizing the Net Indicated Efficiency and Quantitative Analysis of the Optimal Speed Profile," Applied Energy, Vol. 307, 2022, Article 118162.

소형 SI 암모니아 연료 엔진에서 PTJI 기반 다단점화 전략의 수치해석적 연구

주강민*.박정수**†

Numerical study on PTJI based multi-stage ignition strategy in a small SI ammonia fueled engine

Kangmin Ju*, Jungsoo Park**†

ABSTRACT

Ammonia is promising carbon-free fuel for internal combustion engines due to its CO2-free characteristics, compatibility with existing infrastructure, and superior storage and transport properties compared to hydrogen. However, its low laminar flame speed, high ignition energy, and narrow flammability range lead to delayed ignition, cycle-to-cycle variation, and incomplete combustion, particularly under lean conditions. To address these limitations, this study investigates passive turbulent jet ignition (PTJI) and multi-stage ignition strategies in a two-cylinder, 800cc PFI engine fueled exclusively with liquid ammonia. Simulations were conducted at equivalence ratios from 0.8 to 1.3 and spark timings from -150° to -10° aTDC. The PTJI chamber was designed as 5% of clearance volume with six 1.5mm orifices to enhance turbulence and mitigate quenching effects. Results showed that PTJI stabilized combustion at practical timings (-25° aTDC), shortened burn duration, and reduced NH_3 slip while improving BSFC by up to 10%. Combining PTJI with multi-stage ignition further shortened ignition delay by ~20%, improved BSFC by 15%, reduced NH_3 slip by 30%, and maintained gasoline-like performance. These results demonstrate that PTJI and multi-stage ignition offer a viable retrofit pathway for stable, efficient, and low-emission ammonia engines.

Key Words : Ammonia, Engine, Flame propagation, Jet flame, Multi-stage ignition, Passive turbulent jet ignition.

탄소중립 달성을 위한 내연기관의 대안 연료로서 암모니아는 이산화탄소를 배출하지 않는 특성으로 인해 주목받고 있다. 특히 기존 연료 인프라와의 높은 적합성, 수소에 비해 우수한 저장/운송 용이성은 암모니아를 차세대 대체연료 후보로 부각시키는 요인이다. 그러나 암모니아는 낮은 연소속도(약 7-8cm/s, 메탄의 30% 수준), 높은 최소 점화에너지(12mJ, 가솔린의 3배 이상), 좁은 가연한계(Φ=0.6-1.2)와 같은 열역학적, 화학적 제약을 지니고 있다. 이러한 특성으로 인해 일반 스파크 점화 방식에서는 초기 화염핵 성성이 지연되고, 희박 조건에서는 사이클 간 변동성이 커져 안정적인 연소 확보가 어려운 것이 한계로 지적된다. 따라서 암모니아의 연소 안정성 확보와 희박 조건에서의 성능 개선을 달성하기 위한 새로운 점화 기술의 도입이 필수적이다 [1].

* 조선대학교 기계공학과 대학원
** 조선대학교 기계공학과
† 연락저자, j.park@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7057

이러한 배경에서 Turbulent Jet Ignition(TJI) 기술은 기존 스파크 점화와 달리 프리챔버 내에서 점화된 혼합물이 오리피스를 통해 제트 화염으로 분출되어 메인챔버 전역으로 확산되는 원리를 갖는다. 이 과정에서 난류 강도가 크게 증폭되며, 단일 점화원이 아닌 다점화 효과가 발생해 저반응성 연료의 점화 안정성을 확보하는 데 효과적이다. 특히 암모니아는 높은 점화에너지 요구로 단일 스파크 점화의 효율이 낮지만, TJI의 다점화 특성을 활용하면 초기 화염핵 생성을 강화하고 연소 지속 시간을 단축할 수 있다. 본 연구에서는 그중에서도 별도의 연료 분사 없이 메인챔버 혼합기를 활용하는 Passive TJI(PTJI)를 중심으로 분석했으며, 점화원의 공간적, 시간적 분산을 부여하는 다단점화 전략을 결합하여 희박 조건에서의 연소 특성을 심층적으로 평가했다.

본 연구에 사용된 참조엔진은 2기통, 800cc 배기량, 압축비 9.2, 그리고 연료는 포트분사(PFI) 방식의 액체 암모니아가 사용되었다. 수치해석은 1D 엔진 해석 프로그램과 3D 전산유체

해석을 결합하여 수행했다. 변수는 1600rpm을 기준으로 당량비(0.8-1.3), 점화시기(-150° ~ -10° aTDC) 등을 설정했으며, 이를 통해 연소 안정성, 열방출률(HRR), 열효율, 배출 특성을 정량적으로 평가했다. PTJI 시스템은 프리챔버 체적을 압축행정 간극 체적의 약 5% 수준으로 설계했으며, 직경 1.5mm 오리피스 6개를 배치했다. 이는 암모니아의 quenching distance를 고려하여 작은 오리피스 직경을 통해 화염 손실을 최소화하면서도 충분한 난류 제트 유동을 형성하도록 고려한 결과이다. 이러한 설계 근거는 기존 희박 혼합물의 flame kernel 성장 한계를 극복하고, 다점화 효과를 극대화하기 위함이다 [2].

해석 결과, 암모니아 연료는 농후조건(Φ=1.1)에서 가장 활발한 연소가 나타났으나, 안정적인 연소를 위해서는 점화시기 -90° aTDC이상의 극단적 초진각이 요구되었으며, 이는 실제 엔진 적용 관점에서는 비현실적임이 확인되었다. PTJI를 적용한 경우, 프리챔버 내 점화된 혼합기가 오리피스를 통해 고속 제트 화염을 분출하며 메인챔버 내 난류 에너지를 증폭시켰다. 이로 인해 점화시기를 -25° aTDC 내외로 조정하더라도 안정적인 연소가 확보되었으며, 연소 지속 기간이 단축되고 50% burned crank angle이 진각되는 결과가 나타났다. Φ=0.9의 희박 조건에서도 1800℃ 이상의 안정적인 연소를 확인했다. 전반적으로 PTJI의 적용으로 연료 소모율은 최대 10% 개선되었고, 배출 특성에서는 NO_x가 소폭 증가했으나 NH_3 슬립이 크게 감소하는 경향을 보였다.

PTJI와 다단점화 전략을 병행 적용한 경우, 암모니아 연소 특성이 한층 더 향상되었다. PTJI가 화염 전파를 가속화하고 점화 안정성을 확보하는데 효과적이었다면, 다단점화는 첫번째 점화에서 암모니아의 부분적 열분해를 유도하여 수소를 생성하고, 두번째 점화에서 잔여 암모니아 혼합물의 화염 전파를 촉진하는 역할을 수행했다. 이를 통해 희박조건에서 연소지연이 최대 20% 단축되었으며, 연비는 약 15% 개선되었다. 또한 NH_3 슬립은 약 30% 저감되었으며, 출력 특성은 가솔린 참조 엔진과 동등한 수준을 확보했다.

결론적으로, 본 연구는 암모니아 단일연료 엔진에서 PTJI와 다단점화 전략의 적용이 희박 연소 안정성 확보, 연소율 가속화, 연비 개선, 배출가스 저감 측면에서 효과적임을 정량적으로 제시했다. 특히 희박 조건에서는 PTJI만으로도 연소가 가능했지만, 다단점화 전략을 추가함으로써 점화지연 단축과 NH_3 슬립 저감이라는 실질적 개선 효과가 나타났다. 농후 조건에서는 PTJI가 이미 연소 안정성을 확보했으나, 다단점화 결합을 통해 추가적인 연비 개선과 배출 특성 최적화가 가능함을 확인했다. 본 연구는 단순히 기초 자료 차원을 넘어, PTJI 기반의 레트로핏 관점에서 운전 조건 별 최적 다단점화 타이밍을 도출하는 전략적 프레임워크를 제시했다는 점에서 의미가 있다.

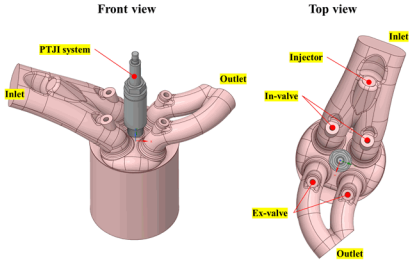


Fig. 1 Engine geometry with PTJI system.

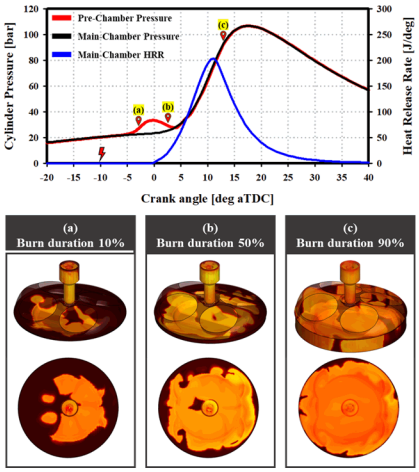


Fig. 2 Flame structure and HRR in ammonia PTJI combustion at burn durations.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 광주광역시의 재원으로 광주RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-05-013)

참고 문헌

[1] Vikas S,, Angad P,, Guillaume D.S., Steven B., "A Review of Ammonia Combustion and Emissions Characteristics in Spark-Ignition Engines and Future Road Map", Energies, 2024,.

[2] Novella R., Gomez-Soriano J., Barberya I., Libert C., "Numerical analysis of the passive pre-chamber ignition concept for light duty applications", Appl. Therm. Eng., 2022, vol. 213.

EGR 조건에서 가솔린 직분사식 엔진의 연소성능 개선을 위한 분사전략 최적화

박재원*.이강현*.강동우*.김지수*.박성욱**†

A Study on the Optimization of Injection Strategies for Improving Combustion Characteristics of GDI Engine under EGR conditions

Jaewon Park*, Kanghyun Lee*, Dongwoo Kang*, Jisoo Kim*, Sungwook Park**†

ABSTRACT

According to environmental regulations, internal combustion engines are required to reduce fossil fuel consumption. Engine downsizing and an increased compression ratio can enhance thermal efficiency; however, they also increase the knocking tendency.
An EGR system can suppress knocking, but it may prolong the combustion duration, thereby reducing thermal efficiency. In this study, a numerical analysis was conducted to optimize injection strategies for improving the combustion characteristics of a GDI engine under EGR conditions, investigating the effects of multiple injection

Key Words : CFD, GDI, EGR, Multiple injection, IMEP

기후변화에 의한 위협이 가속화됨에 따라 화석연료 사용에 대한 규제가 전 세계적으로 강화되고 있다. 이에 따라 내연기관 분야는 연료 소비율을 감소시키기 위한 개발에 집중하고 있다. 내연기관의 다운사이징 또는 압축비의 증가는 열효율을 증가시켜 연료 소비율을 감소시킬 수 있다 [1]. 하지만 높은 압축비와 엔진의 다운사이징은 연소실 내부의 압력 및 온도를 상승시키게 되고, 이는 연소실 내부에 노킹(knocking)을 발생시켜 엔진의 내구성에 영향을 끼칠 수 있다. 노킹은 점화시기를 지각시켜 해결할 수 있으나, 점화시기를 지각시키는 경우 열효율이 감소하여 연료 소비율이 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 내연기관 분야는 배기 가스 재순환(EGR) 시스템에 대한 연구를 진행중에 있다 [2]. EGR 시스템은 엔진에서 발생한 배기가스의 일부를 다시 연소실 내부로 순환시키는 장치로, 이를 통해 이산화탄소, 물, 질소의 비율을 증가시켜 연소실 내부의 온도가 상승하는 것을 억제하고 이를 통해 노킹의 발생 가능성을 낮추게 된다. 또한 연소실 내부의 온도 감소는 질산화물(NO_x)의 배출량을 감소시킬 수 있다. 그러나 EGR 시스템 적용으로 인한 산소와 연료 비율의 감소는 화염 전파 속도를 감소시키게 되고 이는 연소 속도의 감소로 이어지게 된다.
연소 기간이 길어지면 연소 과정에서 피스톤에 전달되는 도시평균유효압력(IMEP)가 감소하기 때문에 열효율이 감소하게 된다. 때문에 EGR 조건에서 연소 기간을 단축시키기 위한 연구가 진행되어야 한다. 예혼합 연소를 통해 동력을 발생시키는 GDI(Gasoline direct injection) 엔진에서 난류운동에너지(TKE)를 증가시키는 경우, 화염 전파 속도가 증가하게 된다. 이에 따라 연소실 내부의 TKE를 증가시키기 위한 여러 전략들이 연구되고 있다 [3, 4]. 본 연구에서는 EGR 조건에서 GDI 엔진에서 단분사 및 다단분사 수행 이후 유동 특성의 변화를 수치해석적으로 분석하여, 연소속도를 향상시키기 위한 분사전략을 도출하는 것을 목표로 하였다.

GDI 엔진의 유동 및 연소 특성을 수치해석적으로 분석하기 위하여 상용 소프트웨어인 CONVERGE v2.4를 활용하였다. 엔진의 형상은 상용 다기통 엔진 형상을 기반으로 단기통 엔진으로 모델링하였다. 기본 격자 크기는 2mm로 구성하였으며, Fixing embedding기법을 활용하여 연소실 내부의 격자는 1mm로 구성하였다. Adaptive mesh refinement(AMR) 기법을 통해 유속 및 온도 구배가 큰 영역에서는 격자의 크기를 조절하여 더 조밀하게 격자를 구성하였다. 난류 모델은 연소실 내부에 중요한 Tumble 및

* 한양대학교 융합기계공학과
** 한양대학교 기계공학부
† 연락저자, parks@hanyang.ac.kr
TE L : (02)2220-0430 FAX : (02)-2220-4588

Swirl 유동에 높은 신뢰성을 보이는 RNG k-epsilon을 활용하였다. 난류모델의 유효성 검증을 위해 Fig. 1에서 모터링 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

인젝터에서 분무 이후 발생하는 연료의 분열과정을 확인하기 위해, 고압의 가솔린 직분사 인젝터에서 높은 신뢰성을 보이는 KH-RT 분열 모델을 활용하였다. 분열 모델의 검증은 Fig. 2에서 Mie-scattering을 활용해 측정한 분무 도달거리와 해석결과를 비교하여 진행하였다.

GDI 엔진의 연소 해석을 위해 연료는 이소옥탄(IC_8H_{18})을 활용하여 해석을 진행하였으며, 난류 화염전파 속도에 따른 연소 특성을 비교하기 위해 G-equation 연소 모델을 활용하였다. 해석 조건은 Table 1과 같이 설정하였으며, 다단분사 적용에 따른 유동 및 연소 특성의 변화를 분석하였다.

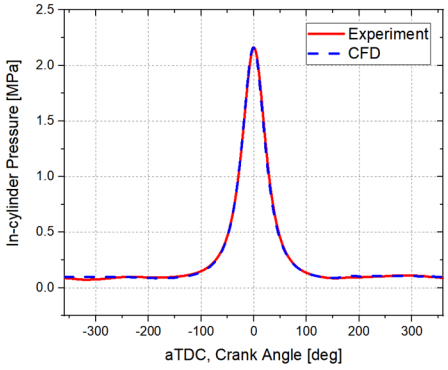


Fig. 1 Comparison of In-cylinder pressure between Experiment and CFD under motoring conditions.

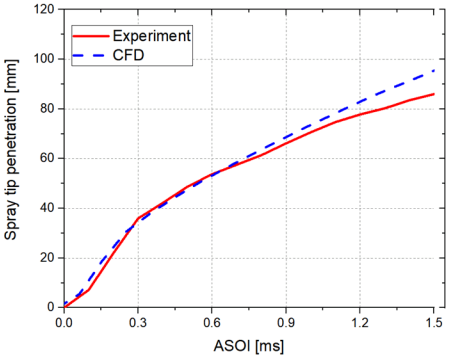


Fig. 2 Comparison of Spray tip penetration length between Experiment and CFD.

Table 1 CFD Condition

CFD conditions	Values
Engine Speed	1400 RPM
Intake Fresh Air Flow Rate	197 LPM
Injection Pressure	350 bar
Equivalence Ratio	1
EGR Rate	35%
Spark Timing	bTDC 3°

해석 결과 단분사에 비해 3단분사, 5단분사 조건에서 높은 Tumble ratio 및 TKE 값을 보였다. 5단분사의 경우 마지막 분사에서 연소실 내부 유동과 연료 분사 유동이 충돌하여 3단분사보다 낮은 TKE 값을 보였다. 연소속도의 경우 TKE 값이 가장 높은 3단분사 조건에서 가장 빠른 연소속도를 보였으며 5단분사와 단분사 조건에서 낮은 연소 속도를 확인하였다. IMEP는 다단분사 조건에서 단분사 조건보다 높은 값을 보였으며, TKE가 가장 높았던 3단분사 조건에서 가장 높은 IMEP를 보였다.

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)에서 연구비 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. ('No. 20018492')

참고 문헌

[1] Ryujiro Nozawa, Yoshiro Morita, Michinori Shimizu, "Effects of engine downsizing on friction losses and fuel economy", Tribology International, Vol.27, 1994, pp. 31-37.

[2] Pan, M., Wei, H., and Feng, D., "Effects of Exhaust Gas Recirculation on Knock Intensity of a Downsized Gasoline Spark Ignition Engine", ASME. J. Energy Resour. Technol, Vol.141, 2019.

[3] Jie Yang, Xue Dong, Qiang Wu, Min Xu, "Effects of enhanced tumble ratios on the in-cylinder performance of a gasoline direct injection optical engine", Applied Energy, Vol.236, 2019, pp. 137-146.

[4] Taehoon Kim, Jingeun Song, Sungwook Park, "Effects of turbulence enhancement on combustion process using a double injection

strategy in direct-injection spark-ignition (DISI) gasoline engines", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.56, 2015, pp. 124-136.

가솔린-메탄올 혼합 연료의 층류 연소 속도 및 반응 메커니즘 해석

신재훈* · 류동우* · 문석수*†

Analyzing the Laminar Flame Speed and Reaction Mechanisms of Gasoline-Methanol Blended Fuels

Jaehun Shin*, Dongwoo Ryu*, Seoksu Moon*†

ABSTRACT

The e-methanol, a carbon-neutral fuel, has been considered as an alternative fuel for current gasoline engines in the form of a mixture with gasoline. Since the blend of methanol with conventional gasoline alters crucial engine combustion parameters such as ignition delay and combustion speed, understanding the effect of methanol blending on those combustion parameters is of great importance. However, research on the laminar burning velocity of gasoline-methanol blends is limited, particularly in engine operating conditions. Therefore, in this study, the laminar burning velocity of gasoline-methanol blended fuels is studied in engine operating conditions with a wide range of equivalence ratios and methanol mixing ratios. To further analyze the trend of laminar burning velocity, the production rates of H+ radicals and OH- radicals are analyzed. The results showed that the laminar burning velocity increased with the increase in methanol blending ratio but it has a non-linear relationship with the methanol blending ratio. The trend of production rates of H+ radicals and OH- radicals showed a similar trend to that of laminar burning velocity.

Key Words : Carbon neutrality, Laminar burning velocity, e-Fuel, Combustion characteristics, Radical production rate

최근 지구온난화 등의 환경 문제가 사회적 문제로 대두됨에 따라 수송 분야에서의 탄소 중립을 위한 대체 연료로서, 기존의 인프라와 내연 기관을 사용할 수 있으면서 탄소 중립을 달성할 수 있는 e-Fuel이 주목받고 있다. 이중에서 e-Fuel 중의 하나인 e-Methanol은 합성 공정이 간단하고 기존 인프라를 사용할 수 있으며 가솔린 대비 낮은 배기 배출물 성능, 함산소 연료로 인한 높은 연소 성능 등의 장점이 있어 가솔린에 혼합하여 사용하는 방안이 빠른 시일 내에 적용될 수 있는 방안으로 고려되고 있다. 그러나 기존의 내연 기관에 대체 연료를 적용 시, 연소 특성의 변화가 따르게 되어 엔진의 배기 배출 성능과 효율이 저하될 수 있다. 특히, 대체 연료의 층류 연소 속도는 내연 기관의 효율 및 배기 성능, 노킹 등 엔진의 연소 안정화와 엔진 최적화와 관련되어 있기 때문에, 대체 연료의 층류 연소 속도 특성을 이해하는 것은 대체 연료의 내연 기관 적용성에 필수적이라고 할 수 있으며, 이를 파악하고자 메탄올 혼합 연료의 층류 연소 속도에 관한 연구들이 진행된 바 있다 [1-2].

그러나 이러한 연구들은 톨루엔 및 이소 옥탄 등 단일 성분의 연료에 메탄올을 혼합한 연구로, 다수의 성분이 혼합된 가솔린을 대표할 수 없다는 한계가 있으며, 온도와 압력 조건도 통상적인 내연 기관의 운전 조건보다 낮다는 점이 있다. 또한 상기 연구들에서는 메탄올 혼입률에 따른 층류 연소 속도의 경향성을 분석하기 위해 라디칼 분석을 몰 분율 단위로 실시하였으나, 몰 분율은 상대적인 농도를 비교하는 단위로써 배기가스의 양, 온도, 압력 등에 영향을 받기 때문에 보다 엄밀하게 라디칼을 분석하기 위해서는 절대적인 단위로 분석할 필요가 있다. 가솔린-메탄올 혼합 연료의 내연 기관 적용성을 평가하기 위해서는 가솔린의 성분들과 내연 기관의 운전 조건을 고려해야 하며, 층류 연소 속도 경향 분석을 위한 라디칼 분석도 절대적 지표로 평가해야 하나, 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 가솔린의 성분들을 고려함과 동시

* 인하대학교 기계공학과
† 책임저자, ss.moon@inha.ac.kr

에 내연 기관의 운전 조건과 유사한 고온, 고압 조건에서의 층류 연소 속도에 대해 다루고자 하며, 층류 연소 속도의 경향성 분석을 위한 라디칼 분석도 절대적인 지표로 분석하고자 한다. 온도와 압력 조건은 각각 600K, 10bar로 설정하였으며 가솔린은 여러 성분이 혼합된 연료로, 각 성분들의 조성이 일정하지 않다는 점을 고려하여, 연료는 가솔린의 층류 연소 속도를 가장 잘 모사하는 연료인 TRF (Toluene Reference Fuel, iC_8H_{18} 55%, nC_7H_{16} 17%, $C_6H_5CH_3$ 28%)로 가정하였다 [3-4]. 메탄올 혼입률은 0%부터 25%씩 증가하여 100%까지로 설정하였으며 통상적으로 내연 기관은 당량비 1 부근의 이론 연소 조건에서 운전되나, 운전 조건에 따라 희박, 농후 영역에서 운전될 것을 가정하여 당량비 조건은 0.6부터 1.5로 설정하였다.

Fig. 1은 메탄올 혼입률에 따른 TRF의 층류 연소 속도를 나타낸 그래프이며 해석에 적용한 매커니즘은 가솔린의 연소 해석에 적합한 LLNL Detailed mechanism (화학종 1389개, 반응식 5935개)을 사용하였다 [5]. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 희박 영역에서는 메탄올 혼입률에 따른 층류 연소 속도 차이가 크지 않으며, 이론 및 농후 영역에서는 메탄올 혼입률이 0%부터 50%까지는 큰 차이가 없다가 75%부터 100%까지 차이가 크게 나는 것으로 확인되었다. 또한 메탄올 혼입률 0% 조건과 비교 시, 메탄올 혼입률이 100% 조건에서 층류 연소 속도가 최대가 되는 당량비가 우측으로 이동했음을 알 수 있다.

이러한 메탄올 혼입률에 따른 비선형적인 층류 연소 속도의 증가 경향에 대한 원인으로는 메탄올과 관련된 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼과 같은 반응성이 큰 라디칼이 증가하여 연소 속도가 증가한 것으로 판단된다. 이러한 메탄올 혼입률에 따른 연소 속도가 비선형적으로 증가하는 현상에 대해 자세히 살펴보고자 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼의 생성률을 살펴보았다.

Fig. 2는 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼의 생성률을 절대적인 단위인 mol/cm^{3}s로 나타낸 그래프이다. 이때 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼은 반응성이 큰 라디칼인 바, 생성된 이후 다른 성분과 반응하여 소멸되기 때문에 최대 생성률로 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있다시피 메탄올 혼입률에 따른 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼의 최대 생성률의 경향이 Fig. 1에 나타낸 층류 연소 속도의 경향과 매우 비슷하다는 것을 볼 수 있다. 특히, 희박 영역에서는 메탄올 혼입률 증가에 따른 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼의 최대 생성률이 미미하고 농후 영역으로 갈수록 H^+ 라디칼과 OH^- 라디칼의 최대 생성률이 증가하다 이후 감소하는 것을 확인할 수 있다.

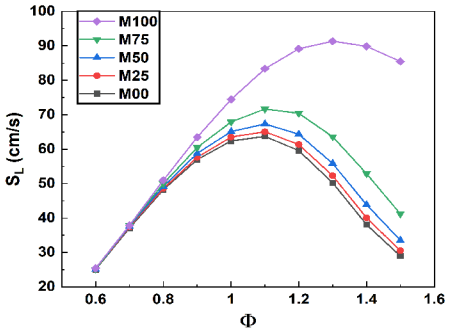


Fig. 1 Laminar flame speed of TRF-methanol blend fuel at 600K, 10bar at different methanol mixing ratios

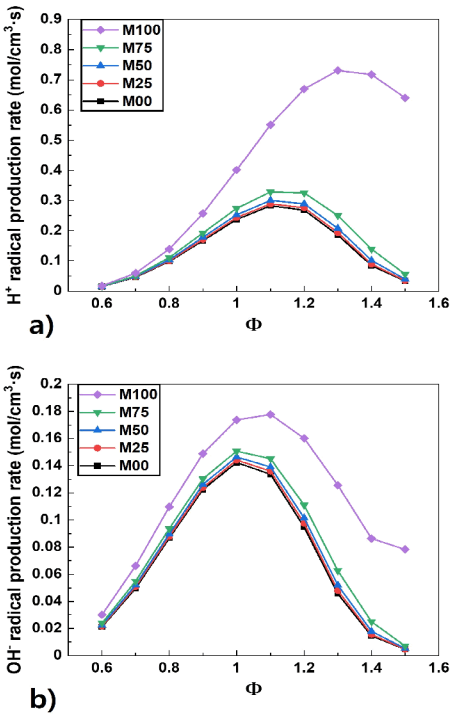


Fig. 2 Maximum production rate of a) H^+ radical and b) OH^- radical with methanol mixing ratio

이는 메탄올 혼입률이 증가할수록 H^+ 라디칼 및 OH^- 라디칼과 관련한 주요 반응식들의 반응률이 전체적으로 증가하였기 때문인 것으로 보인다. 또한 당량비에 따라 주요 반응식들의 반응률이 달라지게 되는 것으로도 판단되며, 향후 H^+ 라디칼 및 OH^- 라디칼의 생성과 관련된 지배적인 반응식들을 분석할 예정이다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호 : 20024960).

참고 문헌

[1] Zhang, Y., Li, Q., Liu, H., Yan, Z., & Huang, Z. (2019). Comparative study on the laminar flame speeds of methylcyclohexane-methanol and toluene-methanol blends at elevated temperatures. Fuel, 245, 534-543.
[2] Li, Q., Zhang, W., Jin, W., Xie, Y., & Huang, Z. (2016). Laminar flame characteristics and kinetic modeling study of methanol-isooctane blends at elevated temperatures. Fuel, 184, 836-845.
[3] Wang, H., Yao, M., Yue, Z., Jia, M., & Reitz, R. D. (2015). A reduced toluene reference fuel chemical kinetic mechanism for combustion and polycyclic-aromatic hydrocarbon predictions. Combustion and Flame, 162(6), 2390-2404.
[4] Sileghem, L., Alekseev, V. A., Vancoillie, J., Van Geem, K. M., Nilsson, E. J., Verhelst, S., & Konnov, A. A. (2013). Laminar burning velocity of gasoline and the gasoline surrogate components iso-octane, n-heptane and toluene. Fuel, 112, 355-365.
[5] Mehl M., W.J. Pitz, C.K. Westbrook, H.J. Curran, "Kinetic modeling of gasoline surrogate components and mixtures under engine conditions," Proceedings of the Combustion Institute 33:193-200 (2011).

가솔린-메탄올 혼합연료의 GT-Power 기반 엔진 해석을 위한 연소 모델링 방법론 검토

류동우*.신재훈*.이호승**.박성욱**.문석수*†

Evaluation of Engine Combustion Modeling Methodology for Gasoline-Methanol Blended Fuel in GT-Power

Dongwoo Ryu*, Jaehun Shin*, Hoseung Yi**, Sungwook Park**, Seoksu Moon*†

ABSTRACT

e-Methanol, the simplest synthetic e-Fuels, is considered a practical option for reducing carbon emission in conventional internal combustion engines. Its blend with conventional gasoline alters fuel properties, affecting combustion behavior, engine efficiency, and emissions. Therefore, it is crucial to assess the drop-in performance of gasoline-methanol blended fuels in conventional engines through experimental and numerical methods. However, there is limited research on gasoline-methanol blends in commercial engine simulation tools. This study focuses on a methodology for incorporating such blends into a 1D engine simulation tool, with a specific emphasis on predicting laminar flame speed, a key factor for modeling accuracy. Laminar flame speeds data were obtained through chemical kinetics analysis under various conditions and then represented through fitted correlations for modeling purposes. The proposed model demonstrated a prediction accuracy of over 0.93 when compared to single-cylinder engine experiments.

Key Words : e-Fuel, Gasoline-Methanol blended fuel, GT-Power Simulation, Combustion characteristics, Laminar flame speed

최근 수송 부분의 현실적 탄소 배출량 감축 방안으로써 기존의 엔진에 e-Fuel과 같은 탄소중립 연료를 사용하는 전략이 주목받고 있다. 특히 e-Fuel의 일종인 e-Methanol은 합성 공정이 비교적 단순하고 상온에서 액체 상태로 존재하여 기존의 시스템 및 인프라를 활용 가능하다는 특징이 있어, 기존의 가솔린에 혼입하여 사용하는 방식을 통해 빠른 시일 내 경쟁력 있는 가격으로 보급될 수 있을 것으로 기대된다 [1,2]. 그러나 기존의 엔진에 대체 연료를 적용하는데 있어 연료의 물리적, 화학적 특성 변화는 엔진 내 분무 및 연소 특성 변화를 수반하여 엔진 효율 감소 및 배기 특성 악화의 원인이 될 수 있다 [3,4]. 따라서 가솔린-메탄올 혼합연료의 상용화에 앞서 실제 엔진에서의 drop-in 성능을 파악하는 것은 매우 중요하며, 이를 파악하고자 하는 실험적 연구들이 활발히 진행되고 있다 [5-7]. 하지만 이러한 실험적 연구들은 시간적, 비용적 제약이 존재해 다양한 운전조건 및 엔진형상 설계 변경에 신속하게 대응하는 데 어려움이 존재한다. 따라서 다양한 엔진 형상 및 운전 조건에서 성능 변화를 파악하고 이를 최적화하기 위해서는 실험적 접근과 더불어 엔진 시뮬레이션의 활용이 필수적이나, 가솔린-메탄올 혼합연료에 대한 시뮬레이션을 수행하는 상용 코드나 연구 사례는 아직까지 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 1D 엔진 해석 소프트웨어인 GT-Power를 대상으로 가솔린-메탄올 혼합연료의 엔진 연소를 모델링하는 방법론에 대해 검토해보고자 한다.

GT-Power 기반으로 사용자 정의 혼합 연료의 엔진 해석을 수행함에 있어, 층류화염속도를 정확하게 예측하는 것은 모델 정확도 향상을 위해 매우 중요하다. GT-Power와 같은 1D 해석 소프트웨어는 연소율, 열전달, 유동 해석 등을 위한 여러 서브 모델들의 연계 작용으로 작동한다. 이때 난류 강도나 열전달 등 해석에 사용되는 대부분의 인자들은 엔진 형상에 따라 결정되므로 기존 모델을 통해 예측이 가능하며, 연료

* 인하대학교 기계공학과
** 한양대학교 기계공학부
† 연락저자, ss.moon@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7378

물성치 또한 기존 모델에 mixing rule을 적용해 근사할 수 있다. 그러나 층류화염속도는 연료의 화학 반응 특성에 직접적으로 좌우되므로 별도의 계산과 데이터베이스 구축이 필요하다. 본 연구에서는 가솔린-메탄올 혼합연료의 층류화염속도 데이터베이스 구축에 Python 인터페이스 기반의 오픈 소스 1D 연소 해석 툴인 Cantera를 사용하였다. Kinetic mechanism으로는 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)의 Gasoline Surrogate reduced mechanism II (323 species, 679 reactions)을 사용하였으며, 연료의 초기 조성은 가솔린을 모사한 연료인 TRF87 (iC_8H_{18}-69%, nC_7H_{17}-17%, $C_6H_5CH_3$-14%)에 메탄올을 체적비율로 각각 25, 50, 75% 혼합하여 사용하였다. 연료-공기 예혼합기의 초기 온도, 압력 및 당량비 조건의 범위는 Table 1에 제시되어 있다. 이 범위는 two zone combustion 이론을 기반으로, 가솔린과 메탄올 연료의 엔진 실구동 조건에서 실린더 내부 압력과 미연소 혼합기의 온도를 고려하여 선정한 수치이다.

Table 1 Initial conditions of Cantera simulation

Parameter	Value
Temperature (K)	500 - 950
Pressure (bar)	10 - 60
Equivalence Ratio	0.8 - 1.4

구축된 가솔린-메탄올 혼합연료의 층류화염속도 데이터베이스는 MATLAB 소프트웨어를 통해 GT-Power의 층류화염속도 예측식 Eq. (1) 형태로 후처리되어 연소 서브모델 SITurb에 적용되었다.

$$S_L = (B_m + B_\Phi(\Phi - \Phi_m)^2)\left(\frac{T_u}{T_{ref}}\right)^\alpha\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^\beta \quad (1)$$

이때, 상기 수식은 커브 피팅 단계에서의 복잡성을 줄이고 간단한 형태의 수식을 유지하기 위해 당량비, 온도, 압력의 영향을 구분하여 층류화염속도를 예측한다. 그러나 기준 온도(T_{ref}) 및 기준 압력(P_{ref}) 조건을 임의로 선택하여 커브 피팅을 수행할 경우, 다른 초기 조건에서의 경향성을 충분히 반영하지 못해 예측식과 데이터베이스 간의 수치 차이가 커질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 오차를 최소화하기 위해 상관계수 분석을 수행하였으며, 데이터베이스를 가장 잘 재현할 수 있는 예측식을 도출하는 기준 온도 및 압력 조건을 선정하였다.

이렇게 구축된 층류화염속도 예측식은 GT-Power의 서브 모델들에 적용 및 연계되어 엔진 성능을 해석하는 데 사용된다. 본 연구에서는 Table 2에 나타낸 서브 모델들과 구축한 층류화염속도 예측식을 활용하여 가솔린-메탄올 혼합연료의 엔진 거동을 평가하였으며, 이를 1.6L 급 SI 단기통 엔진에서의 실험 결과와 비교해 모델 정확도를 평가하였다. Fig. 1은 실험 및 구축한 GT-Power 모델을 이용해 평가한 실린더 내부 압력 및 열 방출율을 비교하여 나타낸다. 해석 결과의 모델 예측 정확도는 결정계수 (Coefficient of Determination, R^2) 분석을 통해 이루어졌으며, 이를 통해 본 연구에서 사용한 연소 모델링 방법론으로 0.93 이상의 정확도를 가지는 예측 모델을 구축할 수 있음을 확인하였다.

Table 2 Selected sub-models of GT-Power

Object	Model
Fluid	FluidMixtureCombined (indolene-combust, methanol-combust)
Injector	InjPulseConn
Combustion	SITurb
Heat Transfer	WoschiniGT
Flow	EngCylFlow (v2022)

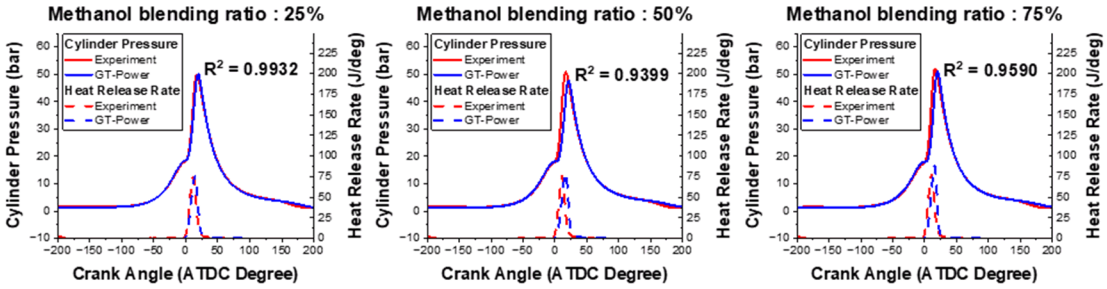


Fig. 1 Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate between experiment and GT-Power for Gasoline-Methanol blends.

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호: 20024960).

참고 문헌

[1] D. Francesco, A. Senatore, A. Marino, A. Gordano, M. Basile, A. Basile, "Methanol production and applications: an overview", Methanol. 2018, pp. 3-28.
[2] J. Son, G. Bae, S. Moon, "Injection rate and flow characteristics of gasoline-methanol blended fuels from GDI injector according to methanol blending ratio", International Communications in Heat and Mass Transfer. Vol. 169, 2025, 109545.
[3] R. Payri, J. Gimeno, P. Marti-Aldaravi, V.M. Alvarez, "Study of the hydraulic characteristics of two injectors fed with different fuels in a GDI system", Fuel. Vol. 317, 2022, 123196.
[4] X. Liu, H. Wang, Z. Zheng, J. Liu, R.D. Reitz, M. Yao "Development of a combined reduced primary reference fuel-alcohols (methanol/ethanol/propanols/butanols/n-pentanol) mechanism for engine application", Energy. Vol. 114, 2016, pp. 542-558.
[5] L. Shenghua, E.R. Cuty Clemente, H. Tiegang, "Study of spark ignition engine fueled with methanol/gasoline fuel blends", Applied Thermal Engineering. Vol. 27, 2007, pp. 1904-1910.
[6] A.K. Agarwal, H. Karare, A. Dhar, "Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol-gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine", Fuel Processing Technology. Vol. 121, 2014, pp. 16-24.
[7] H. Zhou, Y. Ge, J. Tan, H. Yin, J. Guo, W. Zhao, P. Dai, "Effects of different mixing ratios on emissions from passenger cars fueled with methanol/gasoline blends", Journal of Environmental Sciences. Vol. 23, 2011, pp. 1831-1838.

선박용 디젤 인젝터를 활용한 Ducted Fuel Injection 노즐 설계변수에 따른 분무 및 연소 특성

이호승*.박현춘**.박성욱*†

Effects of Ducted Fuel Injection Nozzle Design Parameters using a Marine Diesel Injector on Spray and Combustion Characteristics

Hoseung Yi*, Hyunchun Park**, Sungwook Park*†

ABSTRACT

Effects of ducted fuel injection (DFI) nozzle design parameters on spray and combustion characteristics were investigated using marine diesel injector and constant volume combustion chamber. The DFI duct increases spray penetration length and lift-off length and decreases spray angle which resulted in the reduction of soot formation. Design parameter study which includes duct diameter, length, and gap concluded that reducing duct diameter, increasing duct length and gap can reduce soot formation.

Key Words : Ducted Fuel Injection, Marine Diesel Injector, Soot, Two Color Method, KL factor

Ducted Fuel Injection (DFI)는 Fig. 1과 같이 노즐 앞에 덕트(Duct)를 설치, 디젤의 자발화를 지연시켜 디젤 분무와 공기가 상용 디젤 분무와 다르게 duct 내에서 더 균질하게 혼합될 수 있도록 하여 연소 시 Soot의 발생량을 감소하는 기술이다. 본 기술은 Mueller[1]가 처음으로 개발하였으며, 단공 디젤 인젝터를 활용하여 DFI의 분무 및 연소 특성을 확인하였다. 이후에는 본 기술을 활용하여 분무, 해석, 및 엔진 실험 등 다양한 연구가 진행되었다. 하지만 연구는 대부분 단공 인젝터를 활용하여 진행하였으며, 크기가 작은 상용 디젤 인젝터를 활용하여 실험을 진행하였다. 여기서, 단공 인젝터는 duct 간의 공기 유입 간섭을 확인하지 못하고, 상용 인젝터의 경우 흡배기 밸브와 인젝터 사이 공간이 협소하여 실험을 통하여 취득한 DFI 특성을 그대로 적용하는 데 어려움이 있다. 따라서, 공간의 여유가 있어 DFI를 실제로 적용할 수 있는 선박용 디젤 인젝터를 사용하고, duct간의 간섭을 고려할 수 있는 다공 인젝터를 활용하여 DFI의 설계변수에 따른 분무 및 연소 특성을 확인하기 위하여 실험을 진행하였다.

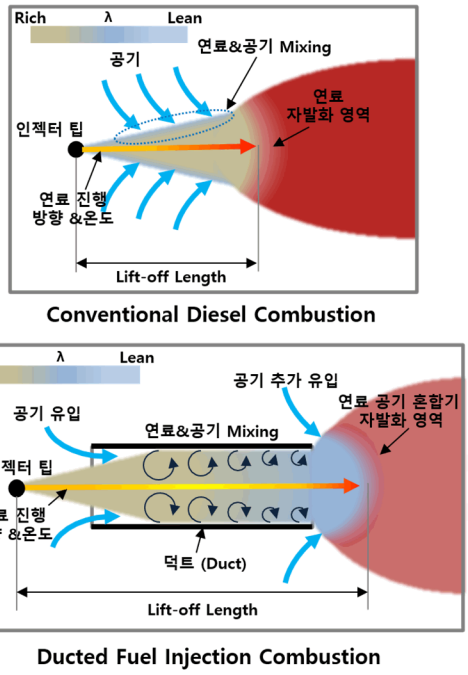


Fig. 1 Schematic Diagram of Conventional Diesel and Ducted Fuel Injection Combustion Mechanism.

* 한양대학교 기계공학부
** HD현대중공업 엔진기계사업부
† 연락저자, parks@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)-2220-4588

본 연구를 진행하기 위하여 11.95L 정적연소 챔버 (Constant Volume Combustion Chamber, CVCC)를 활용하여 분무 및 연소 가시화를 진행하였으며, CVCC의 사양은 Table 1에 상세히 표기되어 있다. 인젝터는 기계식 선박용 디젤 인젝터를 사용하였으며, 공압식 펌프, 연료 챔버, 및 솔레노이드를 사용하여 분사기간 및 분사량을 제어하였다. 또한, 인젝터 온도에 따른 성능 변화를 최소화하기 위하여 주위에 카트리지 히터를 설치하여 인젝터 온도를 제어하였다. DFI 노즐은 duct의 직경, 길이, 그리고 간격을 설계변수로 선정하여 설계하였으며, 메탈 3D 프린팅을 통하여 제작하였다. 분무 가시화의 경우 다양한 밀도 조건에서 진행하기 위하여 질소로 CVCC 내부를 가압하여 Mie-scattering 기법 및 고속카메라로 촬영하였다. 연소 가시화의 경우 Pre-burn 기법으로 다양한 부하 조건을 모사하여 실험을 진행하였으며, 고속카메라로 촬영한 후 이색법(two-color method)[2]으로 Fig.2와 같이 화염 온도와 더불어 soot의 농도를 가늠할 수 있는 KL factor를 취득하여 soot 발생 정도를 확인 및 비교하였다. 분무 및 연소 가시화 장치의 간략한 배치는 Fig. 3에 나타내었으며, 실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 또한, duct 설계 변수 도식도 및 그 조건은 각 Fig.4 와 Table 3에 나타내었다.

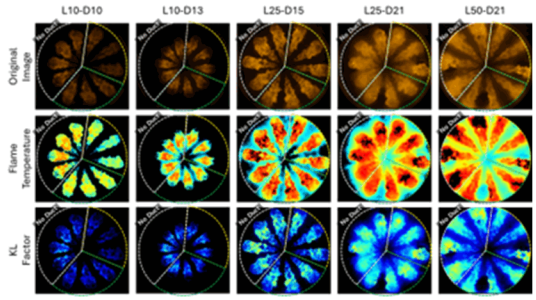


Fig. 2 Two-Color Method Results

Table 1 Specification of Constant Volume Combustion Chamber

Item	Specification
Internal Volume	11.95L
Material	SCM440
Window Diameter	220mm

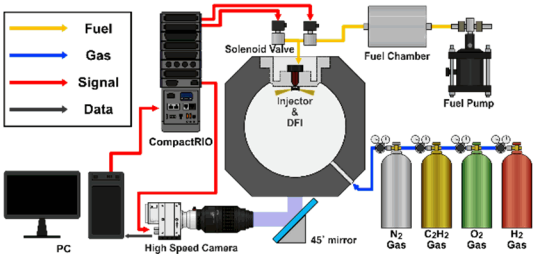


Fig. 3 Schematic Diagram of DFI Spray and Combustion Visualization System

Table 2 Spray and Combustion Visualization operating conditions

제어 변수	실험 조건
Injector Temp.	100℃
Injection Pressure	600-900 bar
Chamber Temp.	Spray : 328K Comb : 930-940K
Chamber Density	Spray : 10-50 kg/m^3 Comb. : 13-28 kg/m^3

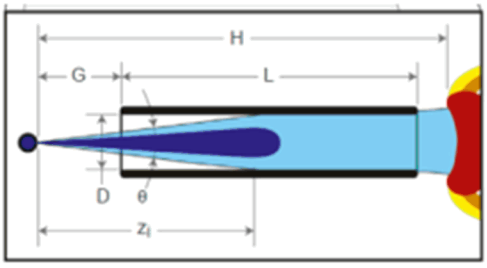


Fig. 4 Schematic Diagram of DFI Duct Design Parameters [1]

Table 3 DFI Duct Design Parameters

설계 변수	실험 조건
Diameter	Ref. ~ 1.4*Ref.
Length	0.75*Ref. ~ 1.25*Ref.
Gap	Ref. ~ 1.67*Ref.

실험 결과, reference duct를 장착한 경우 duct를 장착하지 않은 경우보다 분무 도달거리는 증가하고 분무각은 감소하였으며, lift-off length는 증가하고 KL 최대값은 최대 23% 정도 낮아져 Soot 저감 효과를 확인할 수 있었다. 위 결과를 바탕으로 DFI의 효용성을 확인하였기에 reference duct를 기준으로 설계변수를 변경하여 실험을 진행한 결과, duct 직경의 경우 직경이 작을수록 분무 도달거리가 소폭 증가하고 분무각이 감소하였으며 lift-off length가 증가하고 KL 최대값이 최대 25% 정도 감소하는 것을 확

인할 수 있었다. Duct 길이의 경우 duct 길이가 길어질수록 분무 도달거리가 크게 증가하고 분무각은 감소하였으며(Fig.5) lift-off length는 증가하고 KL 최대값이 최대 33% 정도 감소(Fig.6)하는 것을 확인할 수 있었다. Duct 간격은 간격이 커지더라도 분무 도달거리는 차이가 확인되지 않았으며 분무각은 간격이 커질수록 소폭 감소하였지만 모두 오차범위 이내로 유의미한 차이는 확인되지 않았다. 하지만 Lift-off length의 경우 duct 간격이 커질수록 증가하였으며 부하가 낮은 조건에서 KL 최대값이 최대 34% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 실험을 통하여 선박용 디젤 인젝터에 DFI를 적용할 경우 효과적으로 soot을 저감할 수 있으며 DFI duct 직경을 감소시킬수록, 길이를 늘릴수록, 그리고 간격을 키울수록 soot 발생량을 줄일 수 있다.

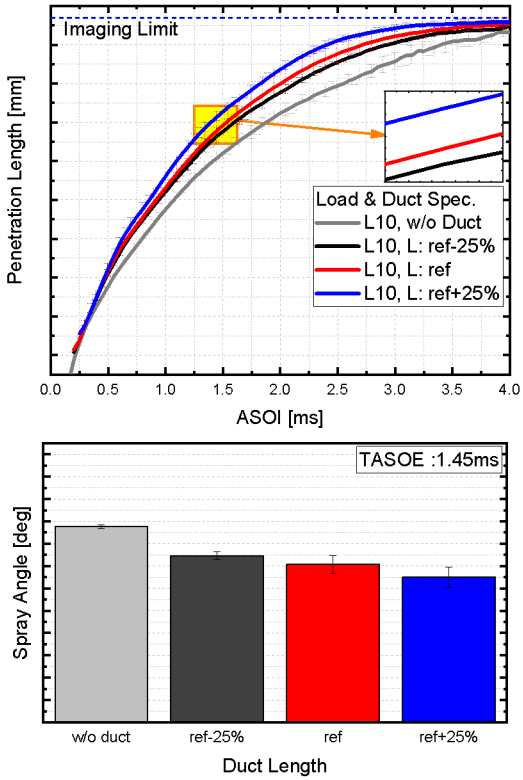


Fig. 5 Duct Length vs. Spray Penetration and Angle Results

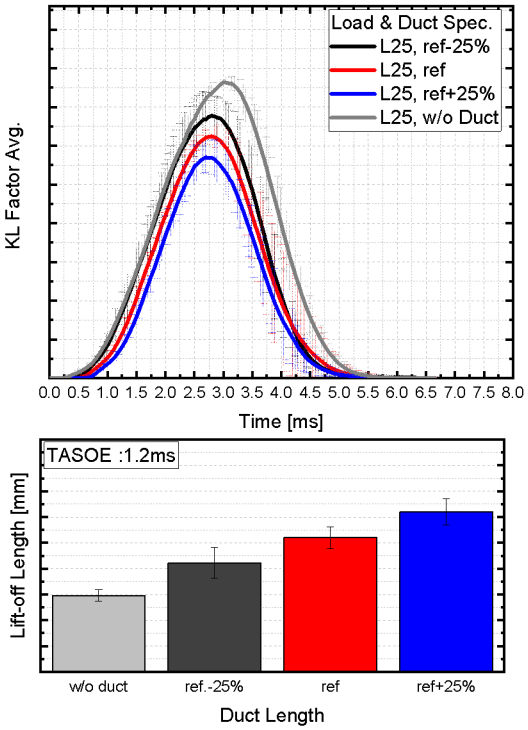


Fig. 6 Duct Length vs. KL factor and Lift-Off Length Results

후 기

본 연구는 HD현대중공업의 지원 및 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “글로벌산업기술협력센터 사업”의 지원을 받아 수행된 연구 결과임(연구개발과제번호 P0028457)을 밝히며, 아낌없는 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Mueller, C. J., Nilsen, C. W., Ruth, D. J., Gehmlich, R. K., Pickett, L. M., & Skeen, S. A. “Ducted fuel injection: A new approach for lowering soot emissions from direct-injection engines.”, Applied energy, Vol. 204, 2017, pp. 206-220.

[2] Yutaka, T., Hiroshi, T., Alexander, S., & Koki, U. “Flame Temperature Measurement in Diesel Engine on Two Color Method utilizing CMOS Camera (Measurement, Temperature).”, The international symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines, Vol. 2004, 2004, pp. 7-12.

Borghi-Peters diagram을 통한 수소 SI엔진의 공기과잉률에 따른 난류예혼합화염 특성 분석

손종윤*. 박원아**. 김기연*. 김정호***. 민경덕***. 민경욱****. 이정우*†

Analysis of Turbulent Premixed Flame Characteristics in a Hydrogen SI Engine According to Air-Excess Ratio Using the Borghi-Peters Diagram

Jongyoon Son*, Wonah Park**, Kiyeon Kim*, Jeongho Kim***, Kyoungdoug Min***, Kyungwook Min****, Jeongwoo Lee*†

ABSTRACT

With the intensification of global warming and stricter greenhouse gas regulations, hydrogen has emerged as a promising alternative fuel due to its wide flammability range and high laminar flame speed. In this study, simulations of a direct-injection hydrogen spark-ignition engine were conducted to evaluate turbulence intensity, laminar flame speed, integral eddy size, and flame thickness. These parameters were applied to the Borghi-Peters diagram to analyze turbulent premixed flame behavior under varying air-excess ratios.

Key Words : Air-excess ratio, Borghi-Peters diagram, Hydrogen spark-ignition engine, Turbulent premixed flame

지구온난화가 심화됨에 따라 온실가스 감축은 국제 사회의 시급한 과제로 부상하였다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 1.5 ℃ 이내로 제한하기 위해 2030년까지 전 세계 탄소 배출량을 절반 이상 감축해야 한다고 제시하고 있다[1, 2]. 이러한 기후 목표를 달성하기 위해 각국은 운송 부문을 포함한 에너지 전환 정책을 강화하고 있다. 유럽연합(EU)은 2030년까지 신차 평균 이산화탄소 배출량을 2021년 대비 55 % 이상 감축하는 규제를 시행하고 있으며[3, 4], 국제해사기구(IMO) 또한 2050년까지 해운 분야의 순배출을 '넷제로(Net-zero)'로 달성하기 위한 감축 전략을 발표하였다[5]. 이러한 글로벌 규제 강화는 내연기관 중심의 운송체계가 근본적인 전환을 요구받고 있음을 의미한다. 따라서 기존의 가솔린과 디젤을 대체할 수 있는 청정·무탄소 연료의 개발과 상용화는 더 이상 선택이 아닌 필수적 과제가 되고 있다. 수소는 화석연료를 대체할 수 있는 대표적인 청정연료로, 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않으며 높은 반응성과 열효율을 보인다. 특히 수소는 메탄이나 가솔린에 비해 약 5~8배 빠른 층류화염속도(Laminar flame speed)를 가지고 있어 연소 반응이 매우 빠르게 진행된다[6]. 또한 부피 기준 약 4–75%에 달하는 넓은 가연범위를 지녀, 희박 혼합조건에서도 안정적인 점화와 연소가 가능하다[7]. 한편, 수소의 화학양론적 조건에서 루이스 수(Lewis number, *Le*)는 약 0.3으로 대부분의 탄화수소계 연료($Le \approx 1.0$)에 비해 낮은 값을 가진다[8]. 이는 열확산과 물질확산의 속도 차이로 인해 화염면이 불안정해지고 미세한 주름(flame wrinkle)이 쉽게 형성됨을 시사한다. 따라서 난류 조건에서 화염면적 증가와 연소속도 향상을 정확히 예측하기 위해서는 화염주름 팩터(Ξ)의 정량적 계산이 매우 중요하다.

본 연구에서는 공기과잉률(λ) 2.0, 2.8 조건에서 수소 스파크점화(SI) 엔진의 연소 특성을 비교하기 위해 상용 전산유체역학 해석 프로그램인 *CONVERGE*를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 해석에는 난류모델로 Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) 방식을 적용하였으며, 연소모델로는 Extended Coherent Flame Model (ECFM)을 사용하였다. ECFM은 화염주름(Flame wrinkling)의 물리적 거동을 직접적으로 해석할 수 있는 모델로, 난류에 의해 증가하는 화염면적 밀도(Σ)와 화염주름

* 충남대학교 자율운항시스템공학과
** 경성대학교 기계자동차공학과
*** 서울대학교 기계공학부
**** 한국기계연구원 무탄소발전연구실
† 연락저자, jwoo@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-7222 FAX : (042)-821-7222

팩터(Ξ)를 물리적으로 계산한다.[9] 반면 G-equation 모델은 화염면의 전파를 레벨셋(Level-set) 방정식으로 추적하지만, 화염주름 효과는 실험식 또는 보정계수를 통해

간접적으로 고려하므로 실제 난류 연소에서의 물리적 정확도는 상대적으로 제한적이다.[10] 따라서 본 연구에서는 ECFM을 활용하여 λ = 2.0과 λ = 2.8 조건에서 유사한 연소기간이 나타나는 원인을 규명하고, 화염주름 팩터(Ξ)와 화염면적밀도(Σ)의 변화를 통해 그 물리적 상관관계를 분석하였다. 본 연구에서는 수소 연료의 희박 연소 조건에서 공기과잉률 변화(λ = 2.0–2.8)가 난류 화염 구조에 미치는 영향을 분석하기 위하여, CONVERGE CFD를 이용한 3차원 연소 해석과 MATLAB 기반의 후처리(post-processing)를 수행하였다. 연소 모델로는 Extended Coherent Flame Model(ECFM)을 적용하였으며, 점화 및 열전달 상관식은 실험 조건(1500 RPM, 동일 수소 분사 타이밍)에 맞추어 설정하였다.

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 실험과의 압력 이력 비교(Validation)를 수행하였다. 공기과잉률(λ) 2.0과 2.8 조건에서 동일한 분사 타이밍으로 측정된 실험 데이터를 이용하였으며, 시뮬레이션 결과는 전반적으로 실험과 유사한 압력 상승 경향을 보였다. 최대 압력 부근에서 일부 차이가 존재하였으나, 전체적인 위상과 크기가 일치하여 연소 해석 모델의 타당성이 검증하였다.

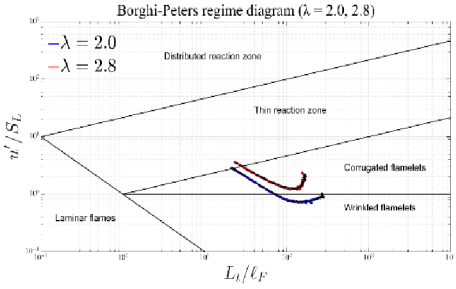


Fig. 1 Borghi–Peters diagram for λ (2.0, 2.8)

각 공기과잉률 조건에서 화염 구조의 난류 특성을 파악하기 위해 보기–피터스 다이어그램을 작성하였다. 이를 위해 난류 특성 길이(***Lt***), 층류 화염두께(ℓ_F), 난류 강도(u′), 층류 화염속도(S_L)를 CFD 결과로부터 추출하였다. 공기과잉률 2.0과 2.8을 비교했을 시 2.0의 경우 Corrugated flamelets 영역에서 연소가 시작되는 것에 반해 2.8의 경우 Ka=1에서 연소가 시작되는 것을 확인 할 수 있었다.

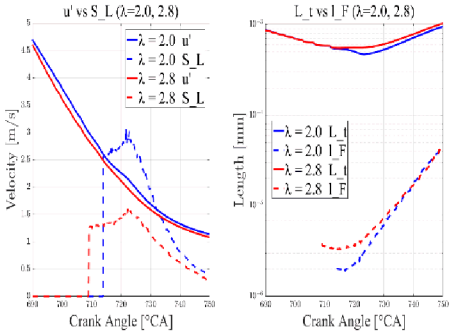


Fig. 2 Parameters in Borghi–Peters diagram for λ (2.0, 2.8)

보기 다이어그램을 구성하는 주요 변수의 크랭크각 변화(Lt, lF, u′, SL)를 각각 독립적으로 분석하였다. 이를 통해 공기과잉률 증가에 따라 난류 강도가 감소하고, 층류 화염속도가 저하되며, 화염두께가 증가하는 등 희박 혼합기의 전형적인 물리적 경향을 정량적으로 파악하였다. 공기과잉률 2.0과 2.8 조건을 비교한 결과, 당량비가 감소함에 따라 층류 화염속도가 상대적으로 낮아지는 것이 확인되었으며, 동일한 수소 분사 타이밍 조건으로 인해 두 경우 모두 유사한 난류 강도와 와류 크기를 나타냈다. 다만, 화염두께의 경우 λ = 2.8 조건에서 더 크게 형성되어 희박 혼합에 따른 확산 지배적 거동이 두드러지게 나타났다.

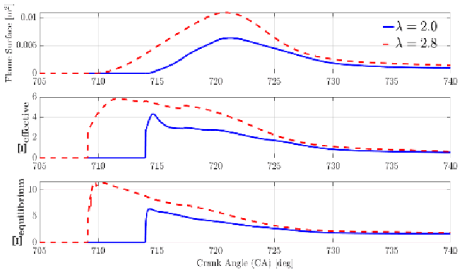


Fig. 3 Flame surface and wrinkled factor for λ (2.0, 2.8)

공기과잉률 2.0과 2.8 조건에서의 반응속도는 ECFM 모델에서 미연소가스의 밀도, 난류 화염속도, 그리고 화염면적밀도에 의해 결정된다. 본 연구의 조건에서는 미연소가스의 밀도가 거의 일정하므로, 반응속도는 주로 난류 화염속도와 화염면적밀도에 의해 지배된다. 난류 화염속도는 층류 화염속도와 화염주름 팩터의 곱으로 정의되며, 이는 난류에 의해 화염면이 얼마나 주름지는지를 나타낸다.

공기과잉률 2.0과 2.8을 비교하면, λ = 2.8 조건은 층류 화염속도가 상대적으로 낮고 화염주름 팩터 또한 작아 전체적인 난류 화염속도는 λ = 2.0보다

낮게 나타난다. 그러나 λ = 2.8 조건에서는 화염 주름 팩터의 증가에 따라 실제 화염면적이 확장되고, 이에 따라 화염면적밀도가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 화염면적의 증가는 난류 화염속도의 감소로 인한 반응속도 저하를 보상하여, 결과적으로 두 조건 모두 비슷한 연소기간을 가지는 이유를 해석할 수 있다.

본 연구에서는 수소 연료의 희박 연소 조건에서 공기과잉률 변화(λ = 2.0–2.8)가 난류 화염 구조와 연소 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 공기과잉률이 증가함에 따라 층류 화염속도는 감소하고 화염두께는 증가하여 희박 혼합기의 확산 지배적 거동이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 λ = 2.8 조건에서는 화염주름 팩터 증가로 인해 실제 화염면적밀도가 커지며, 이는 난류 화염속도의 저하로 인한 반응속도 감소를 보상하였다. 따라서 두 조건은 서로 다른 화염 특성을 가지더라도 유사한 연소기간을 나타내며, 이는 ECFM 모델에서 계산된 화염주름 팩터와 화염면적밀도의 상관성을 통해 해석할 수 있다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(P0023684, 산업혁신인재성장지원사업)과 한국산업기술평가관리원(과제번호 20018473, 무탄소 수소연료 기반 직접 분사식 수소엔진 원천기술 개발), 한국연구재단 우수신진연구(과제번호 2710082861, 탄소중립 연료 기반 선박의 선상 연료 생산/개질 및 xH_2/수소 융합연소 엔진 통합 시스템의 에너지 효율 분석 연구), 한국연구재단 미래유망 융합기술 파이오니어(도전형)(과제번호 2710085240, 플라즈마 활용 촉매 및 고효율 H_2/CO_2 저장 기술 기반 on-board 개질기 및 H_2/e-fuel 혼소 엔진 통합 시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 또한 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)에서 지원하는 연구과제(과제번호 RS-2025-02310831)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2022.

[2] IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report, IPCC, 2023.

[3] European Commission, Regulation (EU) 2019/631 on CO_2 emission performance standards for new passenger cars and light commercial vehicles, Official Journal of the European Union, 2019.

[4] European Commission, Implementing Decision (EU) 2023/1623 establishing CO_2 targets for 2025–2029 and 2030–2034, 2023.

[5] International Council on Clean Transportation (ICCT), Life-cycle Greenhouse Gas Emissions from Passenger Cars in the European Union, ICCT Report, 2025.

[6] C.K. Law, Combustion Physics, Cambridge University Press, 2006.

[7] F. Dryer, "Hydrogen Combustion Kinetics," Combust. Sci. Technol., Vol. 177, 2005, pp. 195–210.

[8] D. Matalon, "Flame instabilities," Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 39, 2007, pp. 163–191.

[9] S. Richard and D. Veynante, "A 0-D flame wrinkling equation to describe the turbulent flame," *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 343, 2015, pp. 36–45.

[10] N. Peters, *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000.

모사 가스터빈 동압 응답의 정량 분석과 스피커 특성 고려 음압가진 실험

전민재* · 장대진** · 이민철*†

Quantitative Analysis of Dynamic-Pressure Response in a Model Gas-Turbine Combustor via Acoustic-Forcing Experiments Accounting for Speaker Characteristics

Minjae Jeon*, Daejin Jang**, Minchul Lee*†

ABSTRACT

This study quantifies dynamic-pressure behavior during combustion instability using acoustic-forcing tests in a model gas-turbine combustor. Forcing frequencies spanned 160 - 960 Hz (fundamental to 6th mode), with voltage amplitudes stepped to characterize responses and compare with simulated standing-wave fields. Results show near-linear scaling between forcing voltage and measured dynamic pressure at most frequencies; linear mode-specific trends persist while peak-response locations shift with frequency. Calibrating for the speaker's intrinsic response sharpened interpretation of in-combustor dynamics and improved agreement with simulations.

Key Words : Model Gas Turbine Combustor (모사 가스터빈 연소기), Combustion Instability (연소 불안정), Dynamic Pressure (동압), Resonant Frequency(공진 주파수)

최근 CO_2 급증에 따른 지구온난화 심화가 전 지구적 의제로 부상했고, 이에 대응하여 2016년 파리기후협정이 채택되었으며 국내에서는 2025년 「제11차 전력수급기본계획」이 마련되었다. 대한민국 역시 2050 탄소중립 달성을 목표로 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」을 제정하고, 무탄소 가스터빈 실증사업 등 정책·기술개발을 병행하고 있다. 이러한 정책·시장 변화 속에서 기존 화석연료 기반 가스터빈 발전 시스템의 수소연료 가스터빈 전환 필요성이 커지고 있다.

한편 수소는 미래 에너지 전환의 핵심 연료로 주목받지만, 기존 화석연료와 연소 특성이 뚜렷하게 달라 적용 과정에서 다양한 제약이 따른다. 예컨대 수소의 연소속도와 단열화염온도는 약 2.65 m/s, 2200 ℃ 수준으로 메탄의 약 0.38 m/s, 1950 ℃에 비해 높아 열·음향 상호작용을 통한 연소 불안정(Combustion Instability)을 유발하기 쉽다.[1] 따라서 단순 치환만으로는 무탄소 연료(수소·암모니아) 혼소·전소 가스터빈의 안정 운전을 담보하기 어려우며, 추가적인 설계 고도화와 운전기술 정립이 필요하다.

무탄소 연료용 가스터빈 연소기의 안전한 전환 및 가동을 위해서는 연소기 내부 압력·온도·유동 특성에 대한 정량 데이터 확보가 선행되어야 한다. 특히 연소 불안정과 직접 연관되는 동압(Dynamic pressure) 응답은 실제 가스터빈 운전 시 불안정 진단에 활용되는 실용 지표다.

본 연구는 모사 가스터빈 연소기에서 가진 주파수와 해당 주파수의 가진 전압을 단계적으로 조정하며 동압 응답 특성을 체계적으로 분석하여, 모델 연소기 내부 동압 신호 특성을 정량적으로 규명하고자 했으며 추가적으로 가진 실험 중 스피커 자체 특성을 발견하여 스피커의 특성을 고려한 추가 실험을 통해 동압 특성을 보다 면밀히 정량화하였다.

본 연구에서는 상온(20℃)에서 GE사의 GE7FA DLN 2.6의 모사 가스터빈 연소기 (높이: 0.966 m, 내경:0.44m)를 수직 방향으로 설치하여 사용하였으며, 설비의 실제 사진 및 모식도를 Fig. 1에 도시하였다. 본 실험에는 동압 센서 8개를 적용하였다. 산업 현장에서 널리 쓰이는 PCB 102A07 4개와, 민감도가 높아 연구용으로 빈번히 활용되는 PCB 106B 4개를 선정하여 한 라인에 교

* 인천대학교 안전공학과
** Division of combustion physics, Department of physics, Lund university
† 연락저자, LMC@inu.ac.kr
TEL : (032)835-4515

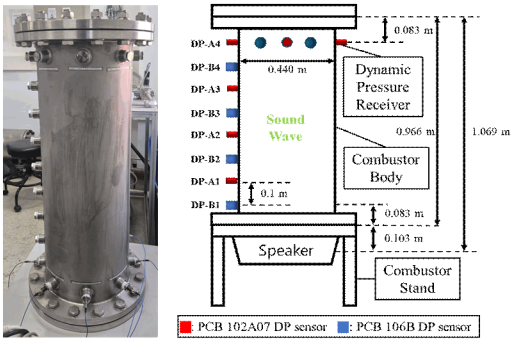


Fig. 1 Experimental layout of the model gas-turbine combustor

차 배치하고 네 쌍으로 운용하였다. 이렇게 구성해 기종 간·개체 간 신호를 상호 비교함으로써 계측값의 일치도와 신뢰도를 점검하도록 했다.

동압 센서의 설치는 Fig. 1에 제시한 것처럼 스피커의 음향 전파 방향을 따라 0.1 m 간격으로 플러시 마운트(매립식) 하였으며, 도식에서는 102A07을 적색, 106B를 청색으로 구분했다. 명명 규칙은 스피커에 가까운 위치부터 DP_{A1}, DP_{B1}, DP_{A2}, DP_{B2}, DP_{A3}, DP_{B3}, DP_{A4}, DP_{B4}의 순서로 부여하였다.

LapView프로그램을 이용하여서 동일한 가스터빈 모형을 사용한 선행 연구[(2-3)]를 기반으로 공진 주파수 160 Hz를 기반으로 6차 모드까지 가진 실험을 진행하여 동압 데이터를 수집하였다. 실험 결과 및 시뮬레이션을 통한 동압 결과 비교는 Fig. 2에 도시한바와 같다. 320 Hz에서 공진주파수(160 Hz)보다 약 1.34배 큰 반응을 보이는 현상관 같이 짝수모드에서 홀수모드보다 더 큰 동압 반응을 보였으며 고주파 모드에서 시뮬레이션 결과과 오차가 커지는 경향이 있었다.

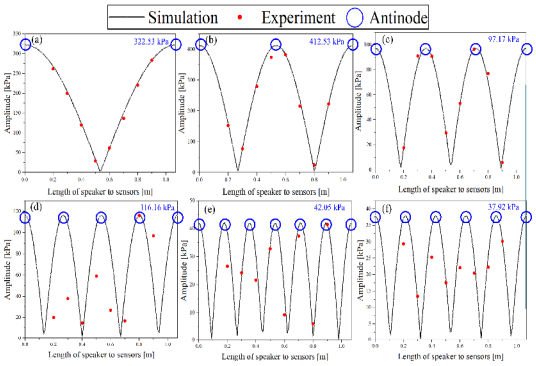


Fig. 2 Simulated longitudinal standing waves and comparison with experimental dynamic pressure: (a) 160 Hz, (b) 320 Hz, (c) 480 Hz, (d) 640 Hz, (e) 800 Hz, and (f) 960 Hz

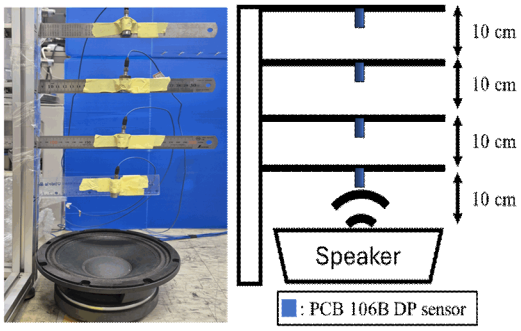


Fig. 3 Experimental layout of the speaker response test

추가적으로 스피커 자체의 응답 반응을 고려하기 위해 스피커 자체 Open-space에서 실험을 진행하였고 Fig. 3에 실험 환경을 도시하였다. Fig.3 에 도시한바와 같이 스피커에서 4개의 동압센서를 10 cm의 간격을 두어 설치하여 대상 주파수인 100~960 Hz의 범위에서 5 V의 동일한 전압으로 가진 실험을 진행하였다. 실험을 통해 얻은 데이터를 주파수별 응답을 통하여 스피커 자체 특성을 고려한 보정식을 유도하였다. 실험 결과 및 추세선은 Fi.g. 4와 같다. Fig. 4에 도시한 결과를 바탕으로 모사 가스터빈 음압 가진 실험에서 스피커 자체의 특성을 보정한다면 보다 정확하고 면밀한 동압 반응 결과를 얻을 수 있다. 본 연구는 동압 실험 결과와 시뮬레이션간의 비교, 스피커 자체 특성을 고려한 보정 절차를 통해 연소 불안정 가정하 공진 주파수 대역의 동압 진폭 특성을 정량화했으며, 모사 가스터빈 연소기에 대한 기초 실험 데이터셋을 구축하였다.

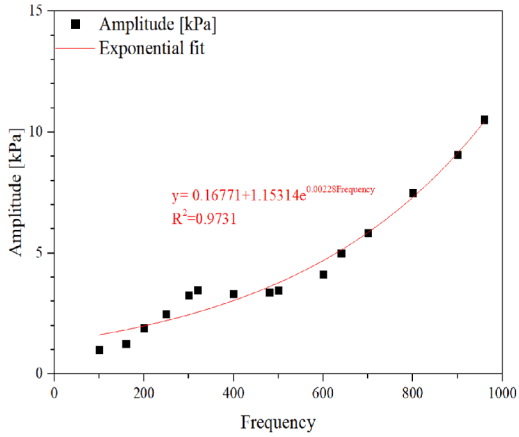


Fig. 4 Open-space speaker frequency-response results

후 기

본 연구는 행정안전부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호 RS-2025-02663037)

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02603127, 무탄소 연료 가스터빈 설계, 제작, 안전 혁신연구센터)

참고 문헌

[1] G. Pio and E. Salzano, “Laminar Burning Velocity of Methane, Hydrogen, and Their Mixtures at Extremely Low-Temperature Conditions,” Energy Fuels, Vol. 32, No. 8, 2018, pp. 8830 - 8836.

[2] D.J. Jang, B.C. Jeon, J.W. Choi, and M.C. Lee, “Dynamic Pressure Measurement Characteristics in a Model Gas Turbine Combustor and Development of Correction Formula,” Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 44, No. 6, 2020, pp. 397 - 406.

[3] M.C. Lee, J.H. Chung, W.S. Park, S. Park, and Y. Yoon, “The Combustion Tuning Methodology of an Industrial Gas Turbine Using a Sensitivity Analysis,” Appl. Therm. Eng., Vol. 50, No. 1, 2013, pp. 714 - 721.

암모니아 분해 통합형 수소-암모니아 연료 가스터빈의 열역학적 분석

반다리 비말*, 송정현*, 박예슬**, 최경민*†

Thermodynamic Analysis of a Hydrogen-Ammonia Fueled Gas Turbine with Integrated Ammonia Cracking

Bimal Bhandari, Jeonghyun Song, Yeseul Park, Gyung Min Choi

ABSTRACT

Hydrogen offers carbon-free power but faces storage and safety issues, while ammonia serves as an efficient hydrogen carrier. A J-series gas turbine was simulated in ASPEN Plus with integrated ammonia cracking using exhaust-heat recuperation. Performance was analyzed for varying degrees of control by Ammonia Split Ratio (ASR) and ammonia conversion rates. Higher ASR improved surge margin and fuel consumption rate, but lowered power, efficiency and exhaust temperature, while partial cracking improved power, efficiency and exhaust temperature at the expense of higher fuel demand and reduced compressor stability.

Key Words: Ammonia cracking, Gas turbine, Hydrogen, Integration, Performance

Hydrogen has become a leading contender for clean fuel applications as the global energy industry speeds up its shift to carbon neutrality. However, challenges in safety and storage hinder their widespread use. On the other hand, ammonia, a carbon-free hydrogen carrier with high volumetric energy density and easy storage, offers a viable option. The literature addressing in-situ hydrogen generation from ammonia for gas turbine applications remain scare. A study by Ji Hun Jeong et al.[1] proposed a new integrated system of GTCC with ammonia cracking however, it is still relied on natural gas for cofiring. Another study by Su et al. [2] presented a novel ammonia-driven, chemically recuperated micro gas turbine cycle that uses a dual-fuel mode with ammonia and hydrogen.

A J-series Mitsubishi gas turbine [3] was considered, and the design point analysis was conducted under ISO ambient conditions (15 ℃ and 1 atm). The baseline fuel considered was assumed to be 100% methane by mole fraction. Table 1 summarizes the key parameters used in the model. The both design and off-design conditions were simulated while maintaining constant Turbine Inlet Temperature (TIT) using ASPEN Plus software. The design point calculations were verified to satisfy all mass and energy balance equations, ensuring consistency of the model.

Eqs. (1) and (2) are used to determine the cooling mass flow rate for the turbine by bleeding air from compressor.

$$\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_g} \cdot \frac{c_{p,c}}{c_{p,g}} = C \cdot \frac{\varphi}{\varphi_\infty - \varphi} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{T_{g,\max} - T_{b,\max}}{T_{g,\max} - T_c} \quad (2)$$

The compressor work and turbine work were evaluated from respective enthalpy differences between inlet and outlet states, as shown by Eqs. (3) and (4) respectively. The net power output of the gas turbine was then obtained from Eq. (5), incorporating mechanical and generator efficiencies, while overall efficiency was obtained by Eq. (6).

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_{air}\left(h_{comp,out} - h_{comp,in}\right) \quad (3)$$

* 부산대학교 기계공학과
** 목포대학교 기계공학과
† 연락저자, choigm@pusan.ac.kr
TEL : 051-510-2476 FAX : 051-512-5236

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_g\left(h_{turb,in} - h_{turb,out}\right) \quad (4)$$

$$\dot{W}_{GT} = \left(\frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp}}{\eta_{mech,comp}}\right)\eta_{gen} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{GT}}{(\dot{m}\,LHV)_{fuel}} \quad (6)$$

As manufactures don't share the compressor and turbine characteristics map, a compressor map was developed using stage stacking method based on velocity triangle. The surge margin for operating condition is calculated using the relationship between operating pressure after matching and surge pressure as given by Eq. (7). The equation for swallowing capacity is given by Eq. (8). The off-design cooling mass flow rate depends on operating and design temperature and pressure and was determined by Eq.(9). The off-design power and efficiency were calculated by the same approach as design conditions.

$$SM = \frac{P_{surge} - P_{operation}}{P_{operation}} \quad (7)$$

$$\frac{\dot{m}_{in}\sqrt{T_{in}}}{\kappa A_{in} P_{in}} = constant, \quad where \quad \kappa = \sqrt{\frac{\gamma}{R}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{c,off\text{-}d} = \dot{m}_{c,d}\left(\frac{P_c}{P_{c,d}}\right)\left(\frac{T_{c,d}}{T_c}\right)^{0.5} \quad (9)$$

Table 1 Gas turbine modeling

Component	Parameter	Unit	Reference
Inlet Air	Temperature	K	288.15
	Pressure	bar	1
	Flow rate	kg/s	583.33
Compressor	No. of stages	–	15
	Pressure ratio	–	23
	Outlet temperature	K	733.15
Turbine	No. of stages	–	4
	Turbine inlet temperature	K	1873.15
Exhaust Gas	Temperature	K	912.15
	Pressure	bar	1
	Flow rate	kg/s	598.808
Performance	Power output	MW	317.9
	Efficiency (HHV)	%	36.5

A correlation curve for off-design modeling is validated using operational power and efficiency. The simulated results showed good accordance with operational values as illustrated in Fig. 1.

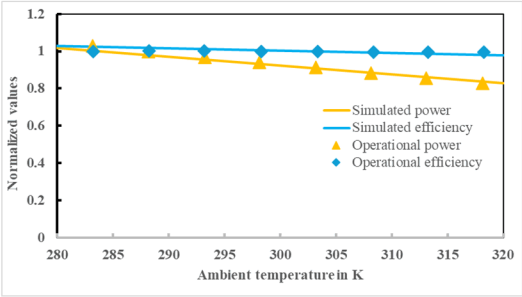


Fig. 1 Correlation curve validation with operational data

For sustainable hydrogen supply, a novel on-site ammonia cracking subsystem is set up by recycling exhaust heat from turbine through recuperation to carry out thermal decomposition. The schematic diagram in Fig. 2 represents an ammonia cracking system for partial or complete conversion of NH_3 to H_2 and N_2, and integrated to the gas turbine. Liquid ammonia is first vaporized in the vaporizer using heat recovered in recuperator from turbine exhaust, producing gaseous ammonia. A specific parameter, referred to Ammonia Split Ratio (ASR) is introduced in integrated configuration. The ASR, modeled in Aspen Plus using a splitter block, controls the fraction of ammonia entering the reactor. An ASR value of 0 indicates that all ammonia bypasses the reactor without cracking, whereas a value of 1 implies that the entire ammonia stream undergoes decomposition. Intermediate values correspond to partial cracking, where only a portion of ammonia is decomposed while the remainder bypasses the reactor. The main cracking process occurs in the equilibrium reactor which partially decomposes ammonia. For purifying, the

integration system comprises a PSA because unreacted NH_3 after decomposition also mixes with pure NH_3 along with H_2.

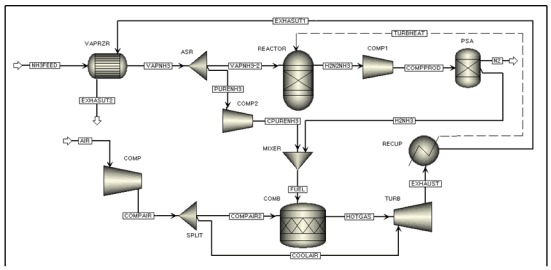


Fig. 2 Ammonia cracking integrated gas turbine schematic flow diagram

Three different conversion rates of NH_3 99%, 95% and 90% are taken into consideration for the analysis. For these conversion rates, cracking temperature in the NH_3 reactor is calculated and found out that 800K, 660K and 610K is needed for conversion rates of 99%, 95% and 90% respectively.

Fig. 3 represents the result of variation of normalized mass flow rate entering the combustor of gas turbine for different ASR and conversion rates. The results indicate increasing ASR reduces mass flow inside the combustor due to higher H2 fractions and greater LHV of the cracked fuel. Lower conversion consistently requires higher fuel mass flow compared to near complete conversion. The 90% conversion rate of ammonia cracking showed ~77% increase of mass flow at ASR=1, owing to the diluting effect of uncracked NH_3.

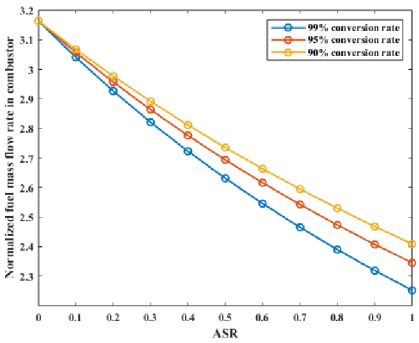


Fig. 3 Variation of normalized mass flow in the combustor with ASR at different conversion rates

The study demonstrated that while pure ammonia operation results in a low normalized SM (0.43) compared to hydrogen (0.91), partially cracked ammonia can significantly improve compressor surge. Increasing the ASR consistently enhances SM, with higher conversion rates further contributing to the compressor stability as in Fig. 4. It confirms that optimizing ASR and conversion rates is essential for enabling stable and efficient gas turbine operation.

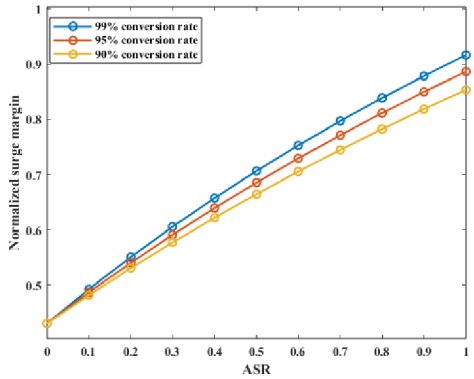


Fig. 4 Normalized surge margin variation with ASR at different conversion rates

The net power output generated by gas turbines decreases with higher ASR as reduced mass flow offsets the benefits of higher LHV as shown in Fig. 5. Partial conversion rate sustains higher power output compared to full conversions, since additional uncracked ammonia contributes to mass flow expansion despite lowering LHV of fuel mixture.

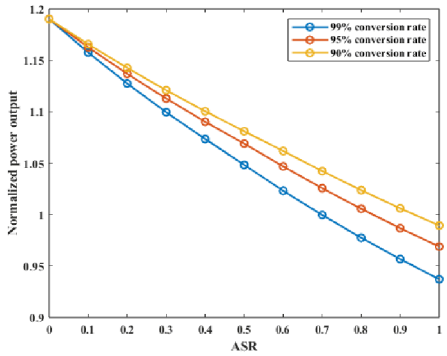


Fig. 5 Variation of normalized power output of the integrated system with ASR at different conversion rates

System efficiency declines gradually with

increasing ASR across all conversion cases (Fig. 6). However, the impact of conversion is modest: at lower ASRs. 90% conversion exhibits marginally higher efficiency than 99%, since greater mass flow partly compensates for lower chemical energy input.

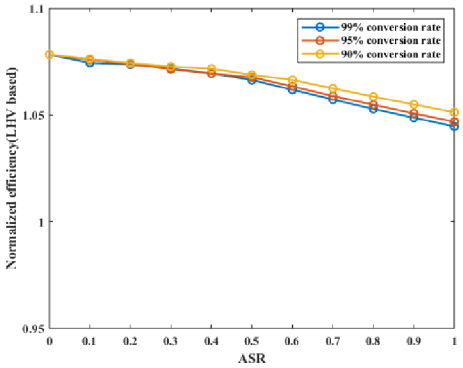


Fig. 6 Variation of normalized efficiency of the integrated system with ASR at different conversion rates

For a system design perspective, the exhaust temperatures have implications for another heat recovery in combined cycle configurations. Exhaust temperature also decreases with increasing ASR, reflecting reduced turbine outlet enthalpy as hydrogen rich mixtures enhance expansion work as in Fig. 7. Lowest conversion leaves more NH_3 in the fuel, raising exhaust temperature by up to ~7% compared to 99% conversion rate at ASR=1- potentially advantages for bottoming cycle heat recovery.

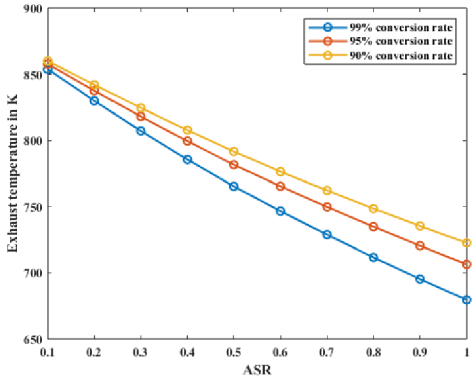


Fig. 7 Variation of exhaust temperature from the integrated system with ASR at different conversion rates

Overall, the analysis highlights that while higher conversion maximizes hydrogen utilization and fuel reactivity, while partial conversion with moderate ASR can balance the fuel consumption, surge margin, power output, efficiency, and exhaust heat availability.

후 기

This research was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT). (RS-2023-00304764). This research was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grants funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT of Korea) (No. RS-2024-00436693).

참고 문헌

[1] J. H. Jeong and T. S. Kim, "Integrating ammonia cracking with gas turbine combined cycle for enhanced hydrogen utilization and reduced CO2 emissions," Energy, vol. 319, Mar. 2025.

[2] B. Su et al., "Novel ammonia-driven chemically recuperated gas turbine cycle based on dual fuel mode," Appl Energy, vol. 343, Aug. 2023.

[3] Y. Park, M. Choi, and G. Choi, "Thermodynamic performance study of large-scale industrial gas turbine with methane/ammonia/hydrogen blended fuels," Energy, vol. 282, Nov. 2023.

다양한 압력에서 수소 가스터빈용 마이크로믹서 노즐의 NOx 배출지수에 관한 연구

이건률* · 이기만*,**†

A Study on the NOx Emission Index of a Micromixer Nozzle for Hydrogen Gas Turbines under Various Pressures

Geonryul Lee*, Keeman Lee*,**†

ABSTRACT

Distributed hydrogen gas turbine have been recognized as a promising solution for achieving carbon-neutral energy systems. This study experimentally investigates the effects of pressure on the flame structure and NOx of lean-premixed turbulent hydrogen flames in micromixer nozzles designed for hydrogen gas turbines. Experiments were conducted under operating conditions of up to 4 bar and 60 m/s. The influence of pressure on NOx was investigated using two emission indices, and both emission indices showed clear trends with respect to pressure.

Key Words : Gas turbine, Micromixer nozzle, Hydrogen, NOx, Emission indices

수소는 재생에너지의 저장과 전력생산이 가능하기 때문에 지속가능한 전력발전 인프라를 구축하기 위한 핵심 연료이다. 그러나 재생에너지는 간헐적으로 전력을 생산하며, 분산형 수소 가스터빈이 이 문제점을 극복할 수 있는 해결책으로 대두되었다. 수소 가스터빈은 고압조건에서 희박 예혼합 수소화염에 대한 근본적인 이해가 요구될 뿐만 아니라 배기가스 배출에 대한 평가가 필요하다. 기존 가스터빈 배출기준에 따르면, NOx 평가는 연소생성물에서 수분을 제거한 후 산소농도를 15%로 환산하는 방식으로 수행된다. 그러나 이 기준은 석탄 및 천연가스 연소를 위해 개발되었기 때문에, 순 수소 연소 및 수소혼소 시 배출되는 배기가스를 정확하게 비교하는 데 한계가 있다. Douglas 등[1]에 따르면, 예혼합 수소화염의 NO2를 부피 기준(ppmvd)으로 표기할 경우, 메탄 대비 약 40% 과대평가되었다. 이러한 점 때문에 실제로 배출된 NOx를 평가하기 부적합한 것으로 나타났고, 단위 공급에너지 당 NOx의 질량(ng/J)으로 평가하는 방법을 제안했다. 이 단위는 NOx가 배기가스의 체적에 의존하지 않으며 반응물 중 산소농도의 변화에 영향을 받지 않고 배기가스를 평가할 수 있기 때문이다[2]. 따라서 본 연구팀은 분산형 수소 가스터빈용 마이크로믹서 노즐에서 압력이 희박 예혼합 수소화염의 구조와 NOx 배출에 미치는 영향을 최대 4 bar, 60 m/s 조건에서 실험적으로 조사한다. 특히, NOx는 질량기반과 부피기반의 배출지수를 통해 평가되었고, 질량기반 배출지수에 대해서 자세히 조사한다.

실험조건은 Table 1에 나타내었다. 연소실험을 위하여 고압 연소실험 시스템을 구축하였고 본 연구팀의 이전 문헌[3]에 상세히 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Value
Pressure	1-4 bar
Bulk velocity	45, 60 m/s
Residence time	15-35 ms
Air temperature	293 K
Adiabatic flame temperature	1200-1700 K

Fig. 1은 단열화염온도에 대한 NOx 측정결과를 나타낸 것이다. 단열화염온도가 증가할수록 NOx 배출이 증가하였고 압력이 증가하면서 NOx 배출이 가속화된 것으로 나타났다. 또한 체류시간에 대해서 조사했을 때, 압력 영향이 동일하게 나타났다. 그리고 질량과 부피기반 배출지수 사이의 관계에 대해서 조사하였다. NOx 측정결과

* 국립순천대학교 우주항공공학과
** 국립순천대학교 우주항공연구센터
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : (061)750-3828

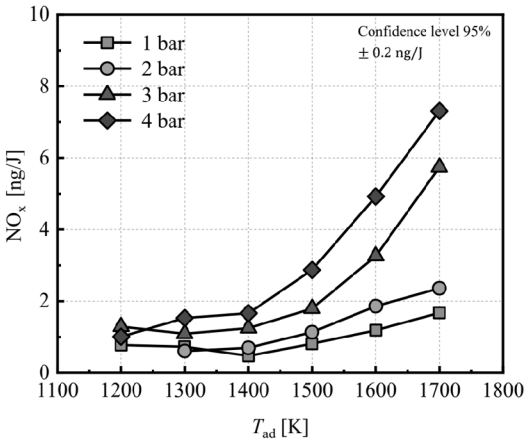


Fig. 1. NOx emission a function of adiabatic flame temperature(up to 4 bar).

를 부피기반 배출지수에 대하여 질량기반 배출지수를 나타내었을 때, 기울기 1 이하로 나타났고 압력이 증가할수록 기울기가 증가하는 경향성을 확인하였다. 더 나아가 실험결과를 기반으로 산업용 가스터빈의 운전압력에서 NOx 예측을 수행하였다. 단열화염온도 1600 K 이상에서 압력이 증가하면 NOx 예측값이 상당히 증가하였다.

본 연구팀의 실험적 연구는 희박 예혼합 수소화염에 대한 이해를 높이며 무탄소 발전 인프라 구축을 위한 유용한 결과를 제공할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구과제이며 이에 감사드립니다. (RS-2022-00155547)

참고 문헌

[1] Douglas, C. M., Shaw, S. L., Martz, T. D., Steele, R. C., Noble, D. R., Emerson, B. L., & Lieuwen, T. C. (2022). Pollutant emissions reporting and performance considerations for hydrogen - hydrocarbon fuels in gas turbines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 144(9), 091003.

[2] Garan, N., Dybe, S., Paschereit, C. O., & Djordjevic, N. (2023). Consistent emission correction factors applicable to novel energy carriers and conversion concepts. Fuel, 341, 127658.

[3] G. Lee, A. R. Masri, K. Lee, "Effects of pressure on flame structure and NOx emissions in lean-premixed turbulent hydrogen-air flames investigated using laboratory-scale micromixer nozzle representative of industrial turbines", Int. J Hydrogen Energy, 175, 2025, 151398.

암모니아 전소 가스터빈 연소기의 연료분배비에 따른 연소특성 연구

황인우*† 오소빈* 장혁준* 최낙정* 한가람* 박정극*

Effect of Fuel Split Ratio on Combustion Characteristics in a Neat Ammonia-Fueled Gas Turbine Combustor

Inwoo Hwang*† , Sobin Oh*, Hyuckjun Jang*, Nakjung Choi*, Karam Han*, Jungkeuk Park*

ABSTRACT

As a carbon-free fuel, ammonia is being studied for a substitute for natural gas in power generation due to its economical advantages in hydrogen storage and transportation. This study investigates the combustion characteristics of a full scale, F-class can-type gas turbine combustor fueled with neat ammonia. The results show that combustion characteristics including temperature, NO_X emissions vary with equivalent ratio during neat ammonia combustion of various test conditions.

Key Words : Carbon-free fuel, Ammonia, Gas turbine, NO_X

탄소중립 목표 달성을 위한 에너지 전환은 산업 전반에서 주목받는 화두이다. 그중에서도 탄소를 포함하지 않는 무탄소 연료로서 수소와 암모니아에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 제11차 전력수급 기본계획(2025)에 따르면 수소·암모니아 발전은 2030년 15.5TWh, 2038년에는 43.9TWh로 확대되어 총 발전량의 약 6.2%를 차지할 것으로 전망된다.

한편, 암모니아는 무탄소 연료임에도 불구하고 직접 연료로 사용되기보다 수소 운송의 경제성을 위한 수소 캐리어로서의 역할로 주로 검토되어왔다. 그러나 수소에서 전환한 암모니아를 재차 크래킹하지 않고 암모니아를 그대로 연료로 활용하여 발전하는 방식을 통해 비용 절감 및 열역학적 효율성을 제고하는 방안에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다[1]. 이를 위해 선행해야 할 과제로서 암모니아의 낮은 연소 속도로 인한 연소 불안정성과 과도한 NOx 배출을 해결하는 것을 우선 목표로 볼 수 있다.

본 연구는 F급 가스터빈 연소기를 바탕으로 암모니아 전소용으로 제작된 실규모 캔 연소기를 대상으로 연소 특성과 연소 후 배기가스를 분석하였다. 공기유량, 연료분배비, 당량비 등의 주요 변수가 연소 안정성 및 NO_X 배출량에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. GE사 7FA 캔 연소기 실험에 사용되었던 Test Rig에 적용 가능하도록 설계된 암모니아 전소 연소기를 대상으로 메탄으로 점화 후 암모니아 전소로 전환하여 연소 실험을 수행하였다. 공기와 노즐별 암모니아의 공급 유량 제어를 통한 부하와 공기분배비에 따른 노즐 및 연소기의 온도 측정 및 이후 배기가스 성분분석을 진행하였다.

이러한 연구를 통하여 암모니아 전소 연소기의 연료 분배비에 따른 연소 특성 및 배출물 성분 변화를 정량적으로 확인하였다.

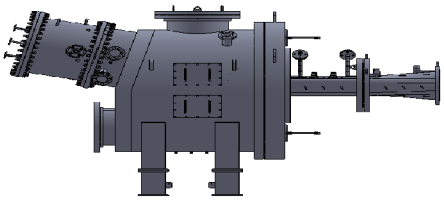


Fig. 1 3D Modeling of a full scale neat ammonia combustor test rig

참고 문헌

[1] 이민정 외 3인, “암모니아 전소 가스터빈 적용을 위한 고선회 연료 다단 암모니아 연소기 개발”, Development of high swirl and fuel-staging ammonia combustor for ammonia gas turbine application, KOSCO SYMPOSIUM 논문집, Vol. 65, 2023, pp. 97~98

* 한국전력공사 전력연구원
† 연락저자, hwang.inwoo@kepco.co.kr
TEL : (042)865-7635

모델 연소기 내 승압 및 승온 조건에서의 암모니아-수소/공기 제트화염의 연소특성 연구

김주한* · 김재현* · 김태원* · 권오채**†

Combustion characteristics of ammonia-hydrogen/air jet flames at elevated pressures and temperatures in a model combustor

Ju Han Kim*, Jae Hyun Kim*, Tae Won Kim*, Oh Chae Kwon**†

ABSTRACT

This study investigates the combustion characteristics of ammonia (NH_3)-hydrogen (H_2)/air and NH_3-H_2-nitrogen (N_2)/air non-premixed flames at elevated pressures and temperatures in a model combustor. As the combustor pressure (P) increases, third-body reactions become more active and promote chain-terminating reactions, while the thermal and mass diffusivities decrease, reducing the combustion stability limits. The P increase also lowers the OH radical concentration, which reduces NO_x emissions, compresses the flame and reduces its thickness, thereby shrinking the reaction zone and increasing unburned NH_3 emissions. In contrast, increasing the inlet temperature of the fuel and oxidizer (T_{in}) enhances combustion intensity and raises the flame temperature, which extends the combustion stability limits. The T_{in} increase enhances the OH radical concentration and therefore elevates NO_x emissions, while the enhanced combustion intensity reduces unburned NH_3 emissions. Because of the unique characteristics of non-premixed flames, operating condition where both NO_x and unburned NH_3 emissions are below 100 ppm is not observed within the present test conditions. With selective catalytic reduction (SCR), the specific operating conditions in this study are expected to yield the emission levels suitable for practical deployment.

초 록

본 연구에서는 산업용 버너에서 암모니아(NH_3)-수소(H_2) 혼합연료의 실용화 가능성을 파악하기 위해 승압 및 승온 조건에서 NH_3-H_2/공기 및 NH_3-H_2-질소(N_2)/공기 비예혼합화염의 연소 특성을 분석한다. 연소실 압력(P)이 증가할수록 third-body 반응이 활성화되어 chain-terminating 반응이 촉진되며, 열 및 질량 확산계수(thermal and mass diffusivity)가 감소하여 연소안정한계가 축소된다. 또한, NO 래디컬의 전구체인 OH 래디컬 농도를 줄여 질소산화물(NO_x) 배출량이 감소하며, 화염을 압축시키고 화염 두께를 감소시켜 반응 영역을 줄임으로써 미연 NH_3 배출량이 증가한다. 반면, 연료 및 산화제의 투입온도(T_{in})가 증가할수록 연소 강도가 강해지고 화염온도가 증가하여 연소안정한계가 확장한다. 또한 T_{in}의 증가는 OH 래디컬의 농도를 높여 NO_x 배출량을 증가시키며, 연소 강도를 높여 미연 NH_3 배출량을 감소시킨다. 비예혼합화염의 특성상 본 실험 조건 내에서 NO_x와 미연 NH_3 배출량 모두 100 ppm 이하가 되는 조건은 측정되지 않으나, SCR을 통해 실제 환경에 투입할 수 있는 수준의 양을 배출하는 작동 조건을 확보할 수 있다.

Key Words : Ammonia (암모니아), Hydrogen (수소), Blended Fuel (혼합연료), Elevated pressure condition (가압조건), Elevated temperature condition (승온조건)

* 성균관대학교 기계공학과
** 성균관대학교 기계공학부
† 연락저자, okwon@skku.edu
TEL : (031)290-7465 FAX : (031)290-5889

이벤트 카메라 기반 화염 시각화 및 주파수에 대한 연구

박건호*. 이민정*†

A Study on Flame Visualization and Frequency Analysis Using Event Cameras

Kunho Park*, Min Jung Lee*†

ABSTRACT

Conventional cameras struggle with combustion flame analysis due to high dynamic range (HDR), rapid dynamics, 'blind time', and massive data loads. Event cameras overcome these limitations with microsecond temporal resolution, high HDR, and low data redundancy. This study employs a hybrid event and frame-based camera system, synergistically combining temporal resolution with spatial context. Event-based data visualized subtle flame flickering and propagation phenomena and quantified flame dynamics in the frequency domain. Furthermore, the Background Oriented Schlieren (BOS) technique was applied, using displacement fields to track flow behavior and derive quantitative temperature fields from the integrated density. This work demonstrates the event camera as a powerful complementary tool for quantitative combustion analysis and dynamic characterization.

Key Words : Event Camera, Background Oriented Schlieren (BOS), Flame Flickering, Flame Stability

연소 화염은 넓은 다이나믹 레인지(HDR)와 점화 및 소염 시의 빠른 동적 특성을 갖는다. 기존 프레임 기반 카메라는 밝은 영역의 과노출 및 어두운 영역의 저노출 문제로 정량적 분석이 어려우며, 프레임 간 '보이지 않는 시간(blind time)'[1]으로 인해 핵심 물리 현상을 누락할 수 있다. 또한, 초고속 카메라의 방대한 데이터는 실시간 분석 및 능동 제어 적용에 제약이 된다.

이벤트 카메라(event camera)는 픽셀 밝기의 상대적 변화에 비동기식으로 반응하여 마이크로초 수준의 높은 시간 분해능, 넓은 다이나믹 레인지, 낮은 데이터 중복성의 장점을 제공한다[2].

본 연구에서는 이벤트 카메라의 높은 시간 분해능과 프레임 기반 카메라의 공간적 문맥 정보를 상호 보완적으로 활용하고자 두 센서를 동시에 운용하였다.그 결과, 이벤트 데이터를 통해 기존 카메라로는 포착이 어려운 미세한 화염 깜박임이나 전파 과정을 시각적으로 포착하였으며, 주파수 영역에서 화염의 동적 특성을 정량화하였다.

또한, 획득된 데이터는 배경 지향 슐리렌(Background Oriented Schlieren, BOS) 기법에 적용하여 화염 주변의 밀도 구배 변화를 시각화하였다. BOS 변위장 정보를 통해 화염면 부근 유동의 동적 거동을 추적하고, 밀도장 적분을 바탕으로 온도장을 정량적으로 분석하였다.

본 연구 결과는 이벤트 카메라가 기존 측정 방식의 한계를 보완하여 주파수를 비롯한 연소 현상의 동적 특성 규명 및 정량적 분석에 유용한 도구임을 시사한다.

* 서울과학기술대학교 미래에너지융합학과
† 연락저자, mj.lee@seoultech.ac.kr
TEL: (02)970-9752

참고 문헌

[1] D. Tedaldi *et al.*, Feature detection and tracking with the dynamic and active-pixel vision sensor (DAVIS), *Proc. 2nd Int. Conf. Event-based Control, Commun. Signal Process. (EBCCSP)*, IEEE, 2016.

[2] G. Gallego *et al.*, Event-based vision: A survey, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 44 (1) (2020) 154-180.

과도 운전 조건에서 수소 혼소 가스터빈 캔 연소기의 역화 억제 제어 기법에 관한 연구

이원준*. 황정재*. 강도원*. 민경욱*. 김재현*. 박순호*. 최승규*. 김민국*†

A study on control strategies for flashback suppression in hydrogen co-firing gas turbine can combustor under transient operating conditions

Won June Lee*, Jeongjae Hwang*, Do Won Kang*, Kyongwook Min *, Jaehyun Kim*, Sun Ho Park *, Seung Kyu Choi*, Min Kuk Kim*†

탄소중립 구현을 위해 발전용 가스터빈 연소기 분야에서는 기존의 탄화수소계열 연료 기반 연소 기술만으로는 강화되는 환경규제를 충족하기 어려운 상황에 직면해 있다. 이에 따라, 연료 다변화를 통한 차세대 연소기술 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 무탄소 연료로의 전환 기술은 탄소 배출물 저감 측면에서 중추적인 역할을 하고 있으며, 현재 전 세계적으로 많은 기관은 연료 다변화 기술에 관심을 갖고 관련 연구를 활발히 진행하고 있다.

특히, 연료 다변화 연소기술은 온실가스 배출 비중이 높은 가스터빈 발전 분야에 핵심적인 사안이며, 글로벌 OEM 기업에게 당면한 도전적이고 시급한 과제로 부여되고 있다. 이러한 연구는 크게 세 가지 방향으로 구분된다: 1. 천연가스를 기반 가스터빈 연소기에서 수소를 혼합한 저탄소 연소기술(수소 혼소)의 개발, 2. 천연가스에서 수소로의 완전한 연료 전환을 통한 무탄소 연소기술(수소 전소)의 개발, 3. 개질된 암모니아을 활용한 암모니아, 수소, 그리고 질소로 구성된 혼합 연료 기반의 무탄소 연소기술(부분 또는 완전 개질 연료)의 개발.

이 중에서도 수소 혼소 연소기술은 기존 천연가스 기반 가스터빈의 구조적 장점을 유지하면서 탄소 배출을 크게 줄일 수 있는 가장 현실적이고 즉시 적용 가능한 대안으로 각광받고 있다.

최신의 발전용 가스터빈은 배기가스 규제를 만족하기 위해 천연가스 기반 예혼합 화염을 적용하여 화염온도(flame temperature)를 제어하도록 설계되어 있다. 이러한 연소기의 주요 특징은 연료 특성을 고려하여 강한 선회기(swirler)를 적용한다는 점이다. 선회기의 존재로 형성되는 선회 유동은 연소기 내부에서 내부 및 외부 재순환 영역(inner & outer recirculation zone)을 생성하여, 화염 날림이 없이 화염 안정화가 된다.

앞서 언급된 선회가 동반된 반응 유동장 내에서 화염온도를 일정하게 유지한 상태로 수소 혼소율을 증가시키면, 수소 연료의 비율이 높아짐에 따라 증가된 화염전파속도(flame propagation velocity)는 화염역화(flashback)를 야기하는 주된 요인이 된다. 또한, 수소 연료의 혼합으로 인한 혼합기체의 체적 증가로 연료의 침투 깊이(penetration depth)를 변화시켜, 유로 내 공간상에 연료와 공기의 혼합도(mixedness)를 연쇄적으로 변화시킨다. 이러한 상황은 연료의 국부적 과농 상태가 형성되고, 이로 인해 연소진동 및 배기가스 농도에 직접적인 악영향을 미친다. 따라서, 수소 혼소 연소기술 개발은 부분적인 연소기 개조(연료 홀 튜닝)를 통해 개선된 연소기의 특성을 정량적으로 파악하고, 안정성과 배출 특성을 함께 확보하는 것을 주목적으로 한다.

한편, 강화된 배출 규제는 국가별 에너지 믹스(Energy Mix) 구조에 직접적인 영향을 미치고 있으며, 이로 인해 재생에너지 발전원의 비중이 빠르게 확대되고 있다. 태양광과 풍력과 같은 재생에너지는 탄소 배출이 없는 청정 에너지로서 핵심적인 역할을 수행하지만, 기상 조건에 따라 출력이 불안정하게 변하는 간헐성(intermittency)이라는 근본적인 한계를 지닌다.

이러한 간헐성을 보완하기 위해서는 신속한 출력 조정이 가능한 백업 전원이 필요하며, 그 중에서도 가스터빈은 급속 기동과 유연 발전을 동시에 제공할 수 있는 가장 현실적인 발전 기술로 주목받고 있다. 특히, 재생에너지 발전 비중이 증가함에 따라 전력 수요 변동이 심화되고 있어, 가스터빈의 급속 기동 및 부하 추종 성능은 전력망 안정화 측면에서 점점 더 중요해지고 있다.

그러나 이러한 과도 운전(transient operation) 과정에서는 연소기 내부의 압력, 유속, 화염 구조가 급격히 변화하기 때문에, 연소 시스템의 동

* 한국기계연구원 무탄소발전연구실 가스터빈 연구팀
† 연락저자, mkkim@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7276

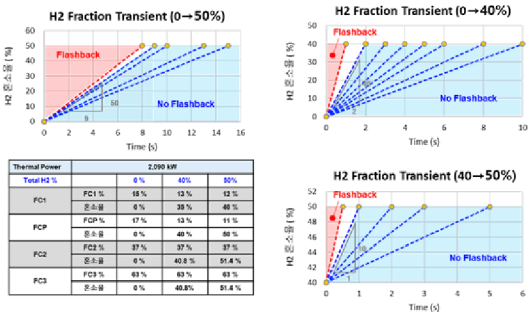
적 안정성(dynamic stability)이 저하될 수 있다. 즉, 정상상태의 정격조건에서 안정적으로 작동하던 연소기가 과도 상태에서는 연소진동, 배기가스 농도, 그리고 화염역화 등의 불안정 현상을 보일 개연성이 높다.

따라서, 재생에너지의 간헐성에 대응하기 위해서는 가스터빈의 과도응답을 정량적으로 이해하고, 이를 기반으로 한 연소기 동적 안정성 검증 및 제어 기술 개발이 필수적이다.

대형 발전용 가스터빈은 일반적으로 다수의 캔형 연소기로 구성되어 있으며, 각 캔 연소기는 여러 개의 다중 노즐로 이루어져 있다. 이러한 구조적 특성으로 인해 노즐 간의 상호작용은 연소 특성에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 노즐별 유동 및 화염 간섭은 연소기의 배기가스 조성과 연소진동 특성에 직접적인 관련이 있다.

따라서, 캔 연소기에서 노즐 간 연료 분배를 능동적으로 효과적인 제어할 수 있다면, 각 노즐의 화염 특성을 조정함으로써 전체 연소기의 안정성을 향상시킬 수 있다. 이러한 연료 분배 제어 전략은 배출가스 규제를 만족하면서도 연소 안정성을 유지하기 위한 핵심 기술로 기대하고 있다.

본 연구는 가스터빈의 급속 기동 조건을 모사하여, 연료 전환 및 연료 분배 제어 전략을 각 노즐에 적용 가능한 연료 제어기를 구현하였다. 이를 통해 기동 중에 발생할 수 있는 화염역화 현상을 실험적으로 규명하고, 화염역화의 억제 및 방지를 위한 제어 전략을 도출하였다.



Thermal Power		2,090 kW		
Total H2 %		0 %	40%	50%
FC1	FC1 %	15 %	13 %	12 %
	혼소율	0 %	35 %	40 %
FCP	FCP %	17 %	13 %	11 %
	혼소율	0 %	40 %	50 %
FC2	FC2 %	37 %	37 %	37 %
	혼소율	0 %	40.8 %	51.4 %
FC3	FC3 %	63 %	63 %	63 %
	혼소율	0 %	40.8%	51.4 %

Fig. 1 Characteristics depending on the ramp time during variation of the hydrogen co-firing ratio.

후 기

이 논문은 2025년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (202300270080, 수소터빈 연소기 시험평가 기술개발)

참고 문헌

[1] W. Culler, X. Chen, J. Samarasinghe, S. Peluso, D. Santavica, J. O'Connor, " The effect of variable fuel staging transients on self-excited instabilities in a multiple-nozzle combustor", Combustion and Flame, 2018

오픈소스 CFD 플랫폼에서의 LHHW 표면 반응 프레임워크 개발: 증기 메탄 개질

이재훈*, Danh Nam Nguyen*, 서해원**, 안형준**, 유춘상*,†

Development of an OpenFOAM-based library for LHHW reaction kinetics: An application for steam methane reforming

Jae Hun Lee*, Danh Nam Nguyen*, Hae Won Seo**, Hyung Jun Ahn**, Chun Sang Yoo*,†

ABSTRACT

An open-source framework for modeling catalytic surface reactions based on the Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (LHHW) kinetics has been developed within the OpenFOAM environment. This framework enables the detailed simulation of steam methane reforming (SMR) by implementing the classical kinetic mechanism proposed by Xu and Froment (1989). The model accounts for adsorption, inhibition, and near-equilibrium surface effects through a rate expression suitable for porous catalytic domains. The developed solver successfully reproduces the benchmark results of Lao et al. (2016), accurately capturing hydrogen conversion and wall heat flux characteristics in a tubular reformer. This study demonstrates the applicability of the developed framework to multi-region SMR simulations integrating reaction, transport, and conjugate heat transfer processes.

Keywords: Steam methane reforming, LHHW kinetics, Xu & Froment, OpenFOAM, surface chemistry

최근 수소(H_2) 생산은 전 세계적으로 큰 관심을 받고 있다. 수소는 특히 발전 분야에서 화석연료를 대체할 수 있는 효과적이고 청정한 에너지 매체로 주목받고 있으며, 이는 2050년 탄소중립 목표를 달성하기 위한 핵심 수단으로 간주된다 [1,2]. 여러 수소 생산 공정 중에서도 증기 메탄 개질(Steam Methane Reforming, SMR)은 현재 산업적으로 가장 널리 활용되는 공정으로, 전 세계 수소 생산량의 약 50% 이상을 차지한다. 이 공정은 니켈(Ni) 기반 촉매 표면에서 진행되는 강흡열(endothermic) 반응으로, 충분한 열 공급이 반응 속도와 전환율을 좌우한다. 그러나 증기 메탄 개질 공정의 반응 특성은 열전달, 확산, 표면 반응이 강하게 결합된 복합 다물리 현상이기 때문에, 이를 정확히 해석하기 위해서는 반응-전달 통합 모델링과 수치적 접근이 필수적이다.

이러한 개질 반응을 기술하기 위해 Xu & Froment(1989) 은 Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (LHHW) 이론을 기반으로 한 준경험적(semi-empirical) 반응속도식을 제안하였다. [3]. 이 메커니즘은 니켈 촉매 표면에서 일어나는 세 가지 주요 반응인 증기 메탄 개질(SMR), 수성가스전환(WGS), 역메탄화 반응 등을 통합적으로 기술하며 흡착 평형상수, 억제항, 평형상수, 전진·역반응 간의 차이를 모두 고려하는 확장된 형태로 구성되어 있다.

이 모델은 촉매층 내의 반응-전달 상호작용을 정량적으로 해석할 수 있다는 점에서 이후 수많은 CFD 연구의 기초가 되었으며, 실제 반응기 내 온도장, 농도장, 전환율을 해석하는 데 널리 활용되어 왔다. 이러한 복합 물리 현상을 다루기 위한 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics, CFD) 연구는 활발히 이루어져 왔으나, 대부분의 연구가 상용 코드(예: ANSYS Fluent, STAR-CCM+ , Aspen Plus 등)를 기반으로 수행되어 왔다. 예를 들어, Lao 등(2016)은 ANSYS Fluent 소프트웨어 환경에서 Xu & Froment 반응식을 적용하여 2차원 축대칭 튜브형 개질기의 온도 및 종 농도 분포를 예측하였으며, Tran 등(2017)은 동일한 소프트웨어를 활용하여 실제 산업 규모의 top-fired 증기 메탄 개질로를 대상으로 연소-개질 다중영역 해석을 수행하였다. 또한 Tutar 등(2021)은 STAR-CCM+ 상용 플랫폼을 이용하여 복합 개질 반응

* 울산과학기술원 기계공학과
** 포스코홀딩스 저탄소CCUS연구센터
† 연락저자, csyoo@unist.ac.kr

기의 열유동 및 개질 반응 복합 해석을 보고하였다 [4–6]. 이러한 연구들은 상용 CFD 환경에서도 개질 반응 해석이 가능함을 보여주었으나, 상용 프로그램은 여전히 계산 효율성과 사용자 편의성 외에는 뚜렷한 한계가 존재한다. 특히 높은 라이선스 비용과 폐쇄적인 코드 구조로 인해 연구자가 반응속도식이나 반응 메커니즘을 자유롭게 수정하거나 확장하기 어렵고, 새로운 반응 모델을 구현하기 위한 접근성도 제한적이다.

반면, C++ 언어 기반의 open-source CFD framework인 OpenFOAM은 높은 유연성과 확장성을 제공함에도 불구하고, 현재 기본 라이브러리에서 제공되는 Langmuir–Hinshelwood (LH) 반응속도 모델은 촉매 표면에서의 흡착–탈착 기반 반응을 일정 부분 모사할 수 있으나, Xu & Froment(1989) 이 제안한 LHHW 기반의 반응식을 직접적으로 구현하기에는 한계가 있다. [7] LHHW 반응식은 흡착 평형상수, 억제항, 평형상수, 그리고 전진·역반응 간의 차이를 모두 고려하는 확장된 형태로, 단순한 LH 모델이 가지는 이상화된 흡착 가정만으로는 이러한 다중 인자를 재현하기 어렵다. Xu & Froment이 제안한 증기 메탄 개질 반응 메커니즘은 니켈 촉매 표면에서 일어나는 다음 세 가지 주요 반응을 포함한다:

Ⅰ. (Steam Methane Reforming, SMR)

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2,\ \Delta H = +206kJ\ mol^{-1} \quad (1)$$

Ⅱ. (Water-Gas shift, WGS)

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2,\quad \Delta H = -41kJ\ mol^{-1} \quad (2)$$

Ⅲ. (Reverse Methanation, RM)

$$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2,\ \Delta H = +165kJ\ mol^{-1} \quad (3)$$

Xu & Froment(1989)는 이러한 반응계를 표면 흡착–탈착 평형과 반응 억제 효과를 동시에 고려하기 위해 다음과 같은 LHHW 형태의 반응속도식을 제안하였다 [3].

$$r_1 = \frac{k_1}{p_{H_2}^{2.5}}\left(p_{CH_4}p_{H_2O} - \frac{p_{H_2}^3 p_{CO}}{K_1}\right)/DEN^2 \quad (4)$$

$$r_2 = \frac{k_2}{p_{H_2}}\left(p_{CO}p_{H_2O} - \frac{p_{H_2}p_{CO_2}}{K_2}\right)/DEN^2 \quad (5)$$

$$r_3 = \frac{k_3}{p_{H_2}^{3.5}}\left(p_{CH_4}p_{H_2O}^2 - \frac{p_{H_2}^4 p_{CO_2}}{K_3}\right)/DEN^2 \quad (6)$$

여기서 $\mathrm{DEN} = 1 + \frac{K_{H_2O}p_{H_2O}}{p_{H_2}} + K_{CO}p_{CO} + K_{H_2}p_{H_2} + K_{CH_4}p_{CH_4}$이며, 이 항은 촉매 표면의 활성부위 점유율 변화와 수소 분압 증가에 따른 생성물 억제 효과(product inhibition)를 고려한다.

이번 연구에서는 본 연구그룹에서 개발한 OpenFOAM 기반 표면반응 프레임워크인 *surfaceChemistryModels* [8]을 확장하여 Xu & Froment(1989)이 제안한 LHHW 반응속도식을 통합한 표면 화학 라이브러리를 개발하였다.

개발된 라이브러리의 검증 및 활용을 위해, Lao 등(2016) [4]이 수행한 2차원 축대칭 튜브형 증기 메탄 개질기 시뮬레이션을 벤치마킹 데이터로 선정하였다. 반응기 튜브 벽면의 열전도 및 복합 열전달 거동을 정밀하게 모사하기 위해, 고체 영역을 해석 도메인 내에 포함시켜 유체–고체 간 에너지 방정식의 conjugate heat transfer analysis (CHT)을 수행하였다. 계산 영역의 형상 및 격자 구성은 그림 1에 제시하였으며, 유동 영역에는 반경 방향 2 mm, 축 방향 5 mm 해상도의 uniform structured grid를 적용하였다. 또한 mesh independence test 을 통해 해석 결과가 격자 해상도 변화에 유의미하게 달라지지 않음을 확인하였다.

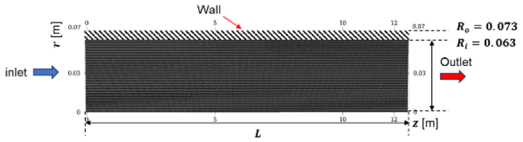


그림 1. 증기 메탄 개질용 반응기의 형상 및 격자 구성

다공성 촉매층 내부의 압력 강하와 열전달 효과를 고려하기 위하여, 운동량 방정식 내에 모멘텀 소스 항을 도입하였다. 다공성 매질에서의 압력 강하는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\nabla p = \mu\frac{150}{D_p^2}\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}u + \frac{1}{2}\rho\frac{3.5}{D_p}\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}u^2 \quad (7)$$

여기서 $\boldsymbol{\varepsilon}$은 공극률(porosity), $\boldsymbol{D_p}$는 촉매 입자 직경, $\boldsymbol{\mu}$는 점성계수이며, 첫 번째 항은 점성 손실, 두 번째 항은 관성 손실을 나타내며 Ergun model (correlation)에 따라 설정하였다. [9]

한편, 금속 촉매 입자에 의한 강화된 열전달 거동을 모사하기 위하여, 다공성 매질 내의 열전달은 유효 열전도도를 도입하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\boldsymbol{k}_{\mathrm{eff}} = \boldsymbol{\varepsilon k_g} + (\mathbf{1} - \boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{k_{cat}} \quad (8)$$

여기서 $\boldsymbol{k_g}$와 $\boldsymbol{k_{cat}}$는 각각 기체상과 고체상의

열전도도이다. 본 모델은 다공성 매질 내부에서의 고체–기체 간 복합 열전달 효과를 단일 등가 열전도도로 단순화하여, 반응–전달–열전달 연성 해석 시 촉매 입자 분포에 따른 열전달 강화 효과를 정량적으로 반영한다. 또한, 다공성층 내부의 유동 저항 및 열전달 특성을 재현하기 위하여, 모든 다공성 매질 관련 물성치와 매개변수는 Lao 등(2016) [4]에서 제시한 값을 인용하여 사용하였다. 촉매 및 튜브 벽의 열물성치는 표 1과 표 2에 정리하였으며, 촉매층은 Ni를 주촉매로 하는 알루미나(Al_2O_3) 지지체 기반의 다공성 촉매층으로 구성하였다.

표 1. 촉매 열 물성치

Properties	Symbol	Unit	Value
Density	ρ_{cat}	[kg/m^3]	3960
Heat capacity	$C_{p,cat}$	[J/kg-K]	880
Thermal conductivity	k_{cat}	[W/m-K]	33

표 2. 튜브 열 물성치

Properties	Symbol	Unit	Value
Density	ρ_{tube}	[kg/m^3]	7720
Heat capacity	$C_{p,tube}$	[J/kg-K]	502
Thermal conductivity	k_{tube}	[W/m-K]	29.58

또한 산업용 개질로의 운전 조건을 반영하기 위하여, 튜브 외벽의 온도 분포는 다항식 형태의 비균일 온도 경계조건으로 설정하였다. 이는 실제 top-fired 증기 메탄 개질로에서 축 방향 위치에 따라 변하는 복사 열유속과 벽면 온도를 근사적으로 재현하기 위함이다. 벽면 온도는 다음과 같은 3차 다항식으로 표현하였다.

$$T_{wall}(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (9)$$

여기서 $\boldsymbol{z}$는 축 방향 위치(axial position)이며, $\boldsymbol{a_0}$–$\boldsymbol{a_3}$는 Lao 등(2016) [4]의 연구에서 보고된 벽면 온도 분포 다항식 피팅 계수이다.

반응기 입구 경계조건은 Lao 등 (2016) [4]의 수치해석 기준과 동일하게 산업용 증기 메탄 개질(SMR) 운전 조건을 기준으로 설정하였다. 입구 압력은 3038.5 kPa, 온도는 773 K, 질량분율은 0.1161kg/s로 부여하였으며, CH_4/H_2O 몰비는 1:3으로 선정하였다. 자세한 화학종의 조성은 표 3에 정리하였다.

개발된 LHHW 반응속도 기반 표면 화학 라이브러리의 정확성과 적용 가능성을 검증하기 위하여, Lao 등(2016) [4]이 제시한 2차원 축대칭 튜브형 증기 메탄 개질기 시뮬레이션 결과를 기준으로 수치 비교 및 물리적 거동 분석을 수행하였다.

표 3. 개질기 입구 화학종 조성

Species	Mole fraction [-]
CH_4	0.2487
H_2O	0.7377
CO	0.0001
H_2	0.0018
CO_2	0.0117

그림 2는 본 연구와 Lao 등(2016) [4]의 해석 결과를 비교한 튜브 내벽 및 외벽의 축방향 온도 분포를 나타낸다. 입구 영역에서는 복사 가열에 의해 온도가 급격히 상승하며, 반응이 진행됨에 따라 축 방향으로 점차 완만한 온도 구배를 형성한다. 내벽 온도는 강흡열 반응인 증기 메탄 개질 반응의 열흡수로 인해 외벽보다 낮게 유지되며, 출구 인근에서는 양 벽면 간 온도 차가 약 20 K 이내로 수렴하였다.

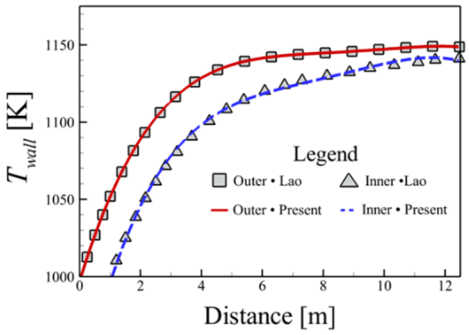


그림 2. 본 연구와 Lao의 튜브 내벽 및 외벽의 축방향 온도 분포 해석 결과

그림 3은 벽면을 따라 계산된 국소 열유속분포를 나타낸다. top-fired 조건에서 복사 가열이 집중되는 입구 단부에서 열유속이 최대를 보이며, 축 방향으로 진행할수록 완만하게 감소한다. 이는 입구에서 벽–유체 온도차(ΔT)와 복사 열유속이 가장 크고, 하류로 갈수록 유체 가열과 반응 진행으로 인해 온도 차이가 감소하며 벽내 열전도에

따른 온도 구배 완화가 발생하기 때문이다. 이러한 경향은 Lao 등(2016) [4]의 결과와도 정량적으로 일치한다. 이러한 결과는 본 연구의 conjugate heat transfer 기반 다영역 해석 모델이 상용 CFD 플랫폼 수준의 예측 정확도를 확보하고 있음을 입증한다.

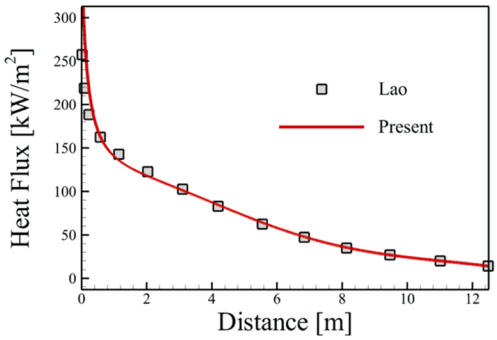


그림 3. 본 연구와 Lao의 튜브 열유속 분포 해석 결과

표 4는 본 연구와 Lao 등(2016) [4]의 결과를 비교하여, LHHW 반응식 구현의 정확성을 정량적으로 검증한 것이다. 출구부에서의 주요 화학종 몰분율 비교 결과, 수소(H_2) 및 H_2O) 농도는 각각 0.02 % 및 0.06 % 이내의 오차를 보였으며, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4) 의 차이 또한 2 % 이하로 나타났다. 이는 Xu & Froment (1989) [3]이 제안한 LHHW 반응식이 OpenFOAM 환경에서 정확히 구현되었음을 의미한다. 또한, 평균 벽면 열유속의 상대 오차는 0.75 % 에 불과하여, 시뮬레이션 계산 전반에서 수치적 일관성이 확보되었음을 확인하였다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 개발한 LHHW 기반 표면 화학 라이브러리가 기존 상용 CFD 코드의 결과와 동등한 수준의 예측 정확도를 가지며, 따라서 개발된 라이브러리는 향후 자열 개질(ATR) 및 건식 개질(DRM) 등 복합 개질 반응기의 고도 해석에도 적용 가능한 범용 수치 해석 플랫폼으로 기대된다.

표 4. 개질기 출구 주요 화학종 몰분율 및 평균 열유속 비교

Properties	Present study	Lao et al.	Error (%)
$\bar{x}_{H_2}^{outlet}$	0.4644	0.4645	0.02
$\bar{x}_{H_2O}^{outlet}$	0.3469	0.3467	0.06
$\bar{x}_{H_2O}^{outlet}$	0.0421	0.0426	1.17
$\bar{x}_{H_2O}^{outlet}$	0.0887	0.0873	1.60
$\bar{x}_{H_2O}^{outlet}$	0.0577	0.0588	1.87
Average Heat flux	69.49	68.97	0.75

Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2021R1A2C2005606) and the POSCO HOLDINGS.

참고 문헌

[1] I. Lucentini, X. Garcia, X. Vendrell, and J. Llorca, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 60, no. 51 (2021) 18560-18611.

[2] H. Tabassum, S. Mukherjee, J. Chen, D. Holiharimanana, S. Karakalos, X. Yang, S. Hwang, T. Zhang, B. Lu, M. Chen, Z. Tang, E Kyriakidou, Q. Ge, and G. Wu. Energy Environ. Sci., 15 (2022) 4190.

[3] Xu, J. and Froment, G.F. (1989). AIChE Journal, 35, 88-96.

[4] Lao, L., Aguirre, A., Tran, A., Wu, Z., Durand, H., & Christofides, P. D. (2016). Chemical Engineering Science, 148, 78–92.

[5] Tran, A., Aguirre, A., Durand, H., Crose, M., & Christofides, P. D. (2017). Chemical Engineering Science, 171, 576–598.

[6] Tutar, M., Üstün, C. E., Campillo-Robles, J. M., Fuente, R., Cibrián, S., Arzua, I., Fernández, A., & López, G. A. (2021b). Computers & Chemical Engineering, 155, 107504.

[7] The OpenFOAM Foundation Ltd, OpenFOAM: the open-source computational fluid dynamics (CFD) toolbox, version 8, available https://openfoam.org/

[8] D. N. Nguyen, J.H. Lee, H.W. Seo, H.J. Ahn, and C.S. Yoo, 19th International Conference on Numerial Combustion, Kyoto, Japan, May 7-10, 2024.

[9] S, Ergun. (1952). Fluid flow through packed columns. *CiNii Research*.

모델 연소기 내 2차 공기 주입에 따른 암모니아-수소/공기 스월 예혼합화염의 연소특성 연구

김태원* · 김재현* · 김주한* · 권오채**†

Combustion characteristics of premixed ammonia-hydrogen/air swirl flames with secondary air injection in a model combustor

Tae Won Kim*, Jae Hyun Kim*, Ju Han Kim*, Oh Chae Kwon**†

ABSTRACT

This study investigates the combustion characteristics of ammonia (NH_3)-hydrogen (H_2)/air and NH_3-H_2-nitrogen (N_2)/air swirl premixed flames with secondary air injection in a model combustor. Given the fixed total fuel-equivalence ratio (ϕ_{tot}), increasing the primary fuel-equivalence ratio (ϕ_{pri}) causes the main reaction zone of the primary flame to move downstream and reduces the flame wrinkling. As ϕ_{pri} increases, the secondary air flow rate also increases, leading to the enhanced OH radical intensity of primary flame and flame wrinkling in the secondary flame. As the H_2 mole fraction in the fuel ($x_{h,f}$) decreases, the reduced combustion intensity elongates the flame and reduces the quenching region, thereby influencing the deNO_x effect. The spectral characteristics observed in the secondary flame exhibit features more similar to those of the H_2 flame. With increasing pressure, the flame wrinkling of the primary flame intensifies, whereas the wrinkling and OH radical intensity of the secondary flame decrease due to the reduced secondary air velocity. Also, with increasing pressure, the NH_3-to-H_2 conversion rate decreases, and NO_x emissions are reduced due to the HNO route in the secondary flame and the deNO_x effect in the post-flame region. The present results indicate that NH_3-H_2 blends can be practically applied in gas turbine systems.

초 록

본 연구에서는 가스터빈에서의 암모니아(NH_3)-수소(H_2) 혼합연료의 실용화 가능성을 파악하기 위해 2차 공기 주입 조건에서의 모델 연소기 내 NH_3-H_2/공기 및 NH_3-H_2-질소(N_2)/공기 스월 예혼합화염의 연소 특성을 분석한다. 고정된 총당량비(ϕ_{tot}) 조건에서 주당량비(ϕ_{pri})가 증가할수록 1차 화염의 주반응영역이 후류로 이동하고, 화염주름이 감소한다. 또한, 본 실험 조건 내에서 ϕ_{pri}가 증가할수록 1차 화염의 OH 래디컬 세기가 증가하고, 2차 공기 유량이 증가하여 2차 화염의 화염주름이 증가한다. 연료 내 수소 비율($x_{h,f}$)이 감소할 경우 연소강도가 감소하여 화염길이가 증가하고, 1차 화염과 2차 화염이 합쳐져 소화 영역이 감소하여 탈질 효과에 영향을 미친다. 2차 화염에서는 NH_3 화염보다 H_2 화염에서 나타나는 스펙트럼 특징이 관찰된다. 압력이 증가할수록 1차 화염의 화염주름은 증가하지만, 2차 공기 유속이 감소하면서 2차 화염의 화염주름과 OH 래디컬 세기가 감소한다. 또한, 압력이 증가하면서 1차 화염에서는 암모니아-수소 전환율은 감소하며, 2차 화염에서의 HNO 경로와 화염 후 영역에서의 탈질 효과에 의해 NO_x 배출량이 감소한다. 본 연구의 연소 특성 결과를 종합적으로 고려하면 NH_3-H_2 혼합연료는 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : Ammonia (암모니아), Hydrogen (수소), Blended Fuel (혼합연료), Secondary air (2차 공기), Elevated pressure condition (가압조건)

* 성균관대학교 기계공학과
** 성균관대학교 기계공학부
† 연락저자, okwon@skku.edu
TEL : (031)290-7465 FAX : (031)290-5889

연소기 형상에 따른 암모니아-공기 예혼합화염 안정화에 대한 실험적 연구

손병우*.이민정*†

Experimental Study of Stability Characteristics of Ammonia-Air Premixed Flame with Varying Combustor Geometry

Byoungwoo Son*, Minjung Lee*†

Key Words : Ammonia, Tangential injection combustor, Flame stability, Swirl number

탄소 중립 달성을 위해 암모니아를 직접 연료로 사용하는 연구가 많이 이뤄지고 있다. 암모니아는 낮은 연소성능을 지니기 때문에 단독으로 연료로 사용하는 것보다, 수소-질소로 개질하거나 다른 탄화수소 계열 연료와 혼소(co-firing)하는 방법이 다뤄지고 있다.[1,2] 그러나 Net-Zero가 궁극적으로 지향하는 의미와 연소시스템의 단순하고 효율적인 설계 및 제어를 고려하였을 때, 암모니아 전소에 대한 연구가 필요함은 자명하다. 암모니아 전소는 특히 발전용 가스터빈 등 대형 열기관을 중심으로 연구가 진행되고 있다.[3,4] 이런 흐름에 따라 한국도 암모니아 전소 가스터빈 실증을 시작한 상황이다.

암모니아를 단독 연료로 운용하기 위해서는 암모니아의 낮은 연소성능과 Fuel NOx에 대한 문제를 해결해야 한다. 이러한 암모니아의 낮은 연소 성능은 가스터빈의 점화 과정과 주 화염의 안정성을 저하시켜 운용을 어렵게 한다. 이를 극복하기 위해서는 암모니아만을 연료로 사용하는 파일럿 버너 개발이 필수적이다. 암모니아-공기 화염은 강한 스월 유동에 의해 안정화되며, 이 때 암모니아 화염은 튜브 내부에 위치한다. 파일럿 버너로써 역할을 하기 위해서는 상온에서의 자체 점화가 가능하고, 주 화염에 충분한 열을 공급할 수 있어야 한다. 암모니아 전소 가스터빈이 실증되기 위해서는 이런 작동 환경에 맞춰진 설계가 필요하지만, 현재 이에 대해 체계적인 논의는 부족하다.

따라서, 본 연구에서는 암모니아 파일럿 설계에 초점을 맞춰 암모니아-공기 예혼합화염이 연소기 형상에 따라 어떤 거동을 보이는지 평가한다. 암모니아 화염은 강한 선회류와 함께 튜브 내부에서 안정화되므로 화염의 일부는 연소기의 끝단, 즉 노즐 출구 안쪽에 형성된다. 연소기 길이가 충분하면 화염이 내부에서 쉽게 안정화되지만, 연소기가 과열되는 문제가 발생한다. 반대로 연소기 길이가 짧다면 과열은 방지되나, 암모니아 화염이 안정되지 않는 문제가 발생한다. 또한, 암모니아 화염의 안정성은 스월 유동 강도에 영향을 받는다는 결과들이 보고되어 왔다.[5] 본 연구는 위와 같은 암모니아 화염 안정성의 특성에 기반하여 연소기 길이, 스월 유동 강도에 따른 암모니아 화염 안정성을 확인하고자 한다 본 연구에 사용한 접선형 연소기를 Fig. 1에 제시하였다. 각 접선 노즐에 설치된 밸브로 입구 포트 수를 조절하여 스월 강도를 제어하였다. 접선형 연소기의 기하학적인 스월 수(geometric swirl number, S_g)는 아래 식으로 계산하였다.[6]

$$S_g = \frac{\pi D_{sw} R_0}{A_t} \tag{1}$$

균일한 스월 유동 형성을 위해 입구 포트 수를 2,3, 그리고 6개로 설정하였으며, 각 조건의 S_g는 포트 2개 개방 시 $S_{g,2} \approx 3.3$, 6개 개방 시 $S_{g,6} \approx 1.1$ 로 계산되었다. 본 실험의 암모니아 화염은 석영관 내부에서 안정화된다. 이 석영관은

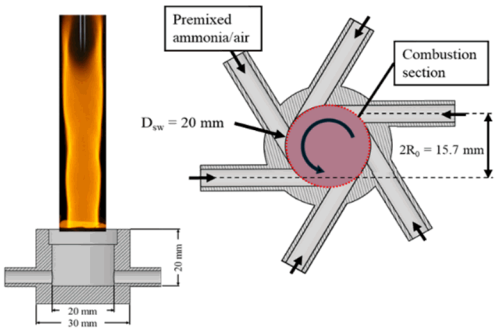


Fig. 1 Schematic diagram of tangential injection combustor

* 서울과학기술대학교 미래에너지융합학과
† 연락저자, mj.lee@seoultech.ac.kr
TEL : (02)- 970-9752

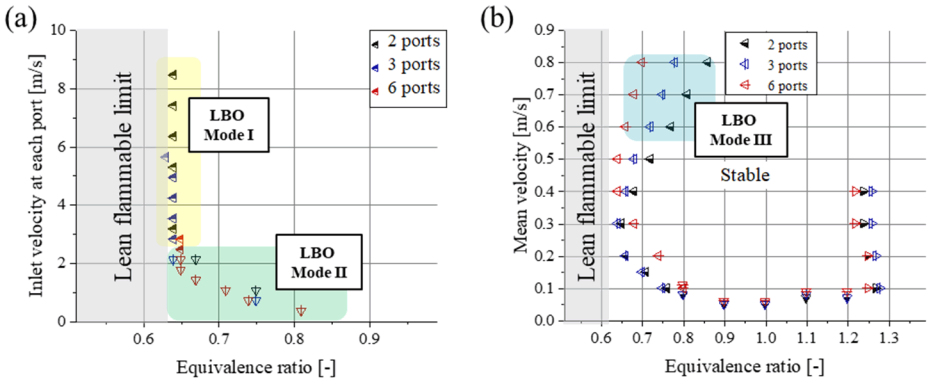


Fig. Stability at 200 mm quartz test section **Fig. Stability at 25 mm quartz test section**

Fig. 2 Ammonia flame stability regions and lean blowout classification

a) 200 mm quartz tube, b) 25 mm quartz tube

화염 가시창 역할뿐만 아니라 연소기 길이의 설계 변수로 사용하였으며, 길이는 25~200 mm 범위에서 조절하였다. 암모니아-공기 혼합기가 연소기입구 포트로 균일하게 공급되었으며, 이 과정은 질량 유량 조절기(MFC)로 제어되었다.

Fig. 2에는 길이 200 mm 연소기의 희박 가연한계와 25 mm 연소기의 가연한계를 제시하였다. 특히 희박 가연한계는 조건에 따라 상이한 소염 거동을 보였으며, 이는 조건에 따라 지배적인 소염 매커니즘이 달라지기 때문으로 판단된다. 입구 유속이 빠르고 연소기 길이가 충분할 때, 희박 가연한계는 $\Phi \approx 0.63$까지 확장되었다. 입구 유속이 낮은 실험조건에서는 재순환영역(Center Recirculation Zone)이 충분히 형성되지 않아, 낮은 연소속도로 인해 화염이 하류로 쓸려 내려가는 모습을 보였다. 짧은 연소기를 갖는 조건은 석영관 내 체류시간이 충분하지 않고, 유량이 증가할수록 희박 가연한계가 급격히 감소하였다.

본 연구를 통해 암모니아 화염의 가연한계는 연소기 형상뿐 아니라 운전 조건에 따라 달라지며, 소염 형상과 가연한계가 변화함을 확인하였다. 본 실험에서 확인한 결과를 토대로 암모니아 전소 파일럿 버너를 설계하고자 한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 신재생에너지핵심기술개발사업의 중소형급 무탄소발전기술 개발 및 실증의 일환(RS-2024-00455846)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Z. An *et al.*, "Experimental and Numerical Investigation on Combustion Characteristics of Cracked Ammonia Flames," *Energy Fuels*, vol. 38, no. 8, pp. 7412–7430, Apr. 2024,

[2] D. Cecere, M. Cimini, S. Carpenella, J. Caldarelli, and E. Giacomazzi, "Composition and Injection Angle Effects on Combustion of an NH3/H2/N2 Jet in an Air Crossflow," *Energies*, vol. 17, no. 20, p. 5032, Oct. 2024,

[3] A. O'Connell and N. E. T. Laboratory, "Investigation of Ammonia for Combustion Turbines (IACT)".

[4] T. Egawa, H. Nagahashi, A. Hayashi, S. Fukuba, K. Sato, and S. Nakamura, "Hydrogen/Ammonia-fired Gas Turbine Initiatives for Carbon Neutrality," vol. 60, no. 3, 2023.

[5] A. Hayakawa, Y. Arakawa, R. Mimoto, K. D. K. A. Somarathne, T. Kudo, and H. Kobayashi, "Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 19, pp. 14010–14018, May 2017,

[6] T. Lee, Y. T. Guahk, N. Kim, H. Lee, and M. J. Lee, "Stability and emission characteristics of ammonia-air flames in a lean-lean fuel staging tangential injection combustor," *Combustion and Flame*, vol. 248, p. 112593, Feb. 2023,

암모니아/수소 혼소 스월 연소기에서의 소염한계 및 배출 경향 분석

전호빈*.김한영*.김도연*.김경천*.오세철*†

Experimental Investigation of Lean Blowoff and Emission Characteristics in an Ammonia/Hydrogen Swirl Burner Experiments

Hobin Jeon*, Hanyoung Kim*, Do Yeon Kim*, Kyung Chun Kim*, Sechul Oh*†

ABSTRACT

Ammonia is a promising carbon-neutral fuel due to carbon-free composition. However, its low flame stability necessitates enhancements, achieved by blending with hydrogen. This study investigates the flame stability and emission characteristics of non-premixed ammonia/hydrogen combustion under lean conditions. Results show that increasing hydrogen fraction lowers the blowoff equivalence ratio, with sharp decline observed around 16-20%. Additionally, NO and N_2O exhibit a trade-off relationship between 20-30% hydrogen fraction, indicating that flame characteristics change significantly at specific hydrogen fraction.

Key Words : Ammonia/Hydrogen, Swirl Combustor, Non-premixed flame, Lean Blowoff, Exhaust Emissions

탄소중립에 대한 관심이 증가함에 따라, 대체연료들에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중 하나로 주목되는 암모니아는 탄소를 포함하지 않으며, 수소의 캐리어로서 유망한 연료다. 암모니아는 상온에서 8.8 bar 이상의 압력 조건일 때 액상 저장이 가능하고, 비료의 원료로써 널리 사용되어 왔기 때문에 저장 및 공급 측면에서 이점이 있다 [1]. 하지만 활용 측면에서, 암모니아 연소는 느린 화학반응속도, 낮은 연소속도, 좁은 가연 범위(Equivalence ratio: 0.63~1.40), 높은 점화온도(650°C)를 가지고 있어 낮은 화염안정성과 그로 인한 미연 암모니아(NH3 slip)배출을 유발한다[1]. 이러한 암모니아 연소특성을 보완하기 위해서 수소와 같은 고반응성 연료와의 혼소를 통해 전체 화염 구조를 안정시키는 실험이 진행되었다[2]. 일반적으로 수소는 높은 연소속도와 낮은 점화요구에너지를 가지고 있어, 암모니아와 혼합 시 점화 성능 향상 및 반응 영역 확장을 유도할 수 있다고 알려져 있다[1, 3]. 이를 바탕으로 기존 문헌에서 가스터빈 연소기에서의 암모니아/수소 예혼합 혼소의 희박 소염특성을 분석하였다[4]. 결론적으로 수소비율 (0~50 vol%)이 높아짐에 따라 소염한계도 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다.

* 부산대학교 기계공학부
† 연락저자, sechuloh@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2430

하지만 배출가스 측면에서는 암모니아-수소 예혼합 혼소의 희박조건에서 수소 체적분율이 증가함에 따라 NO가 증가하는 결과를 확인하였다[5]. 또한 해당 문헌에서 수소 체적분율이 낮을수록 N_2O 배출량이 증가한다고 보고하였다.

이에 반해, 암모니아-수소 비예혼합 혼소의 화염안정성 및 배출 특성에 대한 연구는 상대적으로 부족하다[6]. 따라서 본 연구에서는 기존에 사용된 비예혼합 고선회형 연소기를 이용하여, 다양한 희박조건 하에서 암모니아-수소 혼합 연료의 체적 혼합비를 변화시켜 각 혼합비에서의 소염 한계(Lean Blowoff Limit, LBO)를 실험적으로 규명하였다. 희박조건에서 수소의 혼합비에 따른 배출가스를 FT-IR(Fourier Transform - Infrared Spect roscopy) 장비를 통해 실험적으로 측정하였다. 배출가스 대상은 배기규제 대상인 NO_x(NO) 그리고 비탄소 온실가스인 N_2O를 대상으로 설정하였다.

본 연구에서 사용된 연소기는 암모니아 수소 혼합연료 적용을 위한 실험용 모델 연소기로 설계되었다[7]. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 비예혼합 스월 연소기의 실험 장치로, 암모니아-수소의 혼소가 가능하도록 구성하였다. 노즐은 직경 1 mm을 가진

24개의 원형 노즐로 구성되어 있으며 전체 노즐의 직경은 18.4 mm로, 연료 분사는 연소기 축 방향으로부터 45도 각도로 분사된다. 또한 공기는 내경 22.2 mm, 외경 34 mm의 축방향 스월러를 통해 공급되며 45도 각도로 설치된 8개의 베인을 통해 기하학적 선회 수 0.8의 고회전 유동을 형성한다. 연소기 출구는 내경 40 mm의 원형 배기관으로 연결되며, 챔버 출구와 배기관 사이에는 면적비 약 4.95의 수출 노즐형 연결부가 설치되어 있어 연소 후 가스가 원활하게 배출되도록 돕는다. 또한 연소기는 고온 내열성이 우수한 4개의 사각 단면의 석영판으로 제작되었고, 챔버 단면 치수는 84 × 84 mm^2 이며 총길이는 111 mm 로 설계되었다.

Fig. 2 는 본 연구에서 적용된 실험의 개략도를 보여준다. 산화제 및 연료는 각각 독립된 경로를 통해 공급된다. 산화제로 사용되는 공기는 연소기 하부에 위치한 플레넘을 통해 유입되며, 내부 유로 설계는 스월러에 균일한 유량 분포가 형성되도록 설계되었다. 공기 유량은 MFC(Bronkhorst, EL flow)를 통해 측정 및 제어되었으며 본 실험에서는 최대 165 L/min의 공기가 주입되었다. NH_3, H_2의 경우, 각각 독립된 실린더로부터 최대 10 L/min 으로 공급되며, MFC를 통해 유량을 제어하였다.

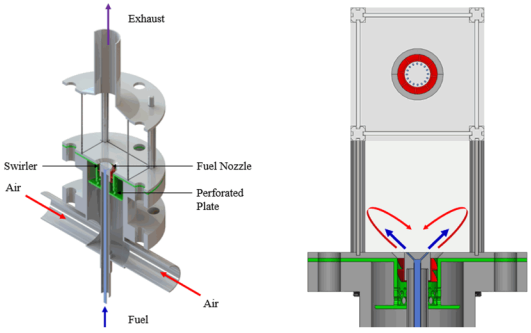


Fig. 1 Schematic of the swirler and fuel nozzle

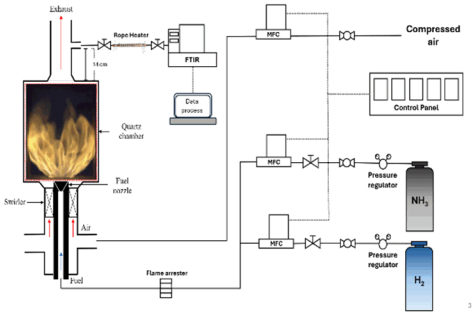


Fig. 2 Schematic of experimental setup for non-premixed high-swirl combustor

Table. 1 Experimental conditions

Phi	Power Density (MW/m^3)	H_2 Fraction(%)
0.6	2.12	7.41(LBO), 12.50 ~ 50
0.7		3.27(LBO), 5.43 ~ 50
0.8		2.50 ~ 50
0.6	2.78	2.50(LBO) ~ 50
0.7		2.50 ~ 50
0.8		2.50 ~ 50
0.6	3.35	5.01 ~ 50
0.7		2.08 ~ 50
0.8		2.08 ~ 50

LBO test를 수행하기 위하여 연료 유량을 고정시킨 후 화염이 소실될 때까지 공기 유량을 점진적으로 증가시켰다. 3번씩 반복하여 실험을 수행하여 재현성을 확인하였다.

또한 배출가스 분석을 위해, 배기라인 하단으로부터 약 14 cm 지점에 시료 채취 라인을 설치하였다. 해당 라인은 Rope Heater와 단열재로 보온 처리하여 수증기(H_2O)의 응결을 방지하였으며, Table. 1의 조건하에 FT-IR(Thermo Scientific™ Antaris ™ IGS Analyzer) 분석 장비를 이용하여 NO, N_2O를 측정하였다.

LBO test는 2.12, 2.78, 3.35 MW/m^3의 세 가지 출력 밀도 조건(Power Density, PD)에서 수행되었으며, 각 조건에서 수소 체적 혼합비 약 2%부터 약 26%까지 변화시켜 LBO test를 진행하였다.

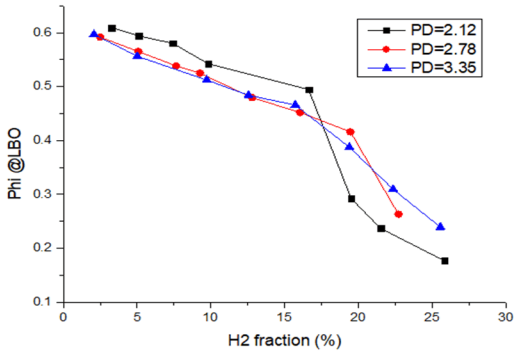


Fig. 3 Blowoff limits of non-premixed NH3-H2 flames

Fig. 3 에서, 모든 출력밀도 조건에서 수소 혼합비가 증가함에 따라 LBO 당량비는 점차 감소하고, 특히 수소 혼합비 약 16%-20% 부근에서는 LBO 당량비가 급격한 감소를 확인하였다. 그 중 2.12 MW/m^3 조건에서 LBO 당량비의 감소 폭이 가장 크게 나타났다.

Fig. 4 는 배기가스 농도를 FT-IR을 통해 Table. 1 조건에서 N_2O, NO를 측정한 결과이다. NO 그래프의 결과를 살펴보면, 수소 혼합비가 약 2.5%-20% 구간은 혼합비가 증가함에 따라 NO 배출이 점진적으로 감소하는 경향이 나타난다. 반면, 수소 혼합비 약 20%-30%구간에서는 NO 농도가 급격하게 증가하는 경향이 관찰되었으며, 이러한 경향은 더 낮은 당량비 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 한편, Fig. 5에서는 당량비 0.6과 0.7의 경우 수소 혼합비가 약 2.5%-20%까지 구간에서 N_2O 농도가 점진적으로 감소하는 경향이 관찰된다. 20%-30% 구간의 수소 혼합비에서는 NO 배출 경향과는 반대로 N_2O가 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 경향성은 더 낮은 당량비 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 수소 혼합비 30%이후부터는 모든 조건에서 N_2O는 약 50 ppm 이하 수준으로 유지되었다.

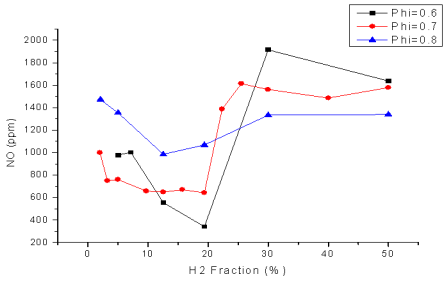


Fig. 4 Sampled NO emissions at different H_2 fraction and equivalence ratio
(Power Density = 3.35 MW/m^3)

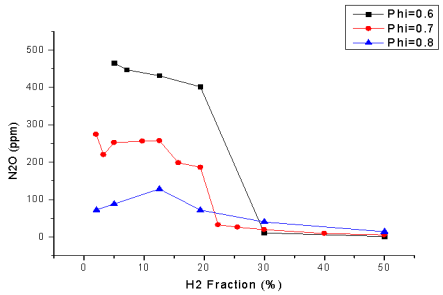


Fig. 5 Sampled N_2O emissions at different H2 fraction and equivalence ratio
(Power Density = 3.35 MW/m^3)

기존 문헌에 따르면, 암모니아-수소 혼소에서 배출되는 N_2O는 연소 과정 중 생성과 분해가 동시에 진행되는 특성을 가지며, 주요 생성 반응은 NO + NH = N_2O + H 이다[8]. 그러나 수소 혼합비 증가에 따라 H 라디칼의 농도가 증가하게 되면, 해당 생성 반응이 억제되며 N_2O 생성이 감소한다. 동시에, N_2O 분해는 H 라디칼 및 고온 환경에 의해 촉진되며, 주요 분해 반응은 다음과 같다.

$N_2O + H = N_2 + OH$

$N_2O(+M) = N_2 + O(+M)$ (열분해)

따라서 수소의 첨가는 이 두 분해 경로를 모두 촉진시켜, N_2O의 급격한 감소를 유도한 것으로 분석된다.

희박조건에서의 암모니아-수소 비예혼합 혼소에서 수소 혼합비 변화에 따른 화염 안정성과 배출가스 특성을 실험을 통해 확인하였다. 실험 결과, 두 특성 모두 특정 수소 혼합비에서 급격한 전이(transition)현상을 확인하였다. LBO test 결과의 경우, 수소 혼합비 약 16%-20%에서 LBO 당량비가 급격히 감소하였다. 배출가스 측면에서는 수소 혼합비 약 20%-30%에서 NO의 급격한 증가와 동시에 N_2O의 급격한 감소가 나타났다. 이러한 결과는 NO와 N_2O간의 특정 조건에서 뚜렷한 trade-off 관계가 존재함을 시사한다. 결론적으로 비예혼합 가스터빈에서의 암모니아-수소 혼소 적용 시 다양한 혼합비 적용을 바탕으로 더 효과적인 화염 안정성 개선이 가능하며 NO와 N_2O의 trade-off 관계로 인해 혼합비에 따라 다른 배출가스 저감 전략이 필요하게 될 것임을 시사한다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A5A8018822). 또한 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2025-02221821)

참고 문헌

[1] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K.D. K.A. Somarathne, E.C. Okafor "Science and Technology of Ammonia Combustion" Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 37, Issue 1, 2019, pp. 109-133

[2] Elbaz, A. M., Khalil, A. A. I., Said, M. A., Khalil, E. E., Attia, A. M., "Review on the Recent Advances on Ammonia Combustion from the Fundamentals to the Applications" Fuel Communications, Vol. 10, 2022, pp. 100053

[3] S. Essmann a, J. Dymke, J. Höltkemeier-Horstmann, D. Möckel, C. Schierding, M. Hilbert, C. Yu, U. Maas, D. Markus "Ignition characteristics of hydrogen-enriched ammonia/air mixtures" Applications in Energy and Combustion Science, Vol. 17, 2024, pp. 100254

[4] X. Wei, M. Zhang, J. Wang, Z. Huang "Investigation on Lean Blow-off Characteristics and Stabilization Mechanism of Premixed Hydrogen Enhanced Ammonia/Air Swirl Flames in a Gas Turbine Combustor "Combustion and Flame., Vol. 249, 2023, pp. 112600

[5] S. Mashruk, E.C. Okafor, M. Kovaleva, A. Alnasif, D. Pugh, A. Hayakawa, A. Valera-Medina "Evolution of N2O Production at Lean Combustion Condition in NH3/H2/air Premixed Swirling Flames" Combustion and Flame., Vol. 244, 2022, pp. 112299

[6] F. Zhang, G. Zhang, Z. Wang, D. Wu, M. Jangi, H. Xu "Experimental investigation on combustion and emission characteristics of non-premixed ammonia/hydrogen flame" International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 61, 2024, pp. 25-38

[7] H. Kim, E. Yun, K. Chun Kim, S. Oh "Investigation on Combustion Stability for Ammonia Co-Firing High-Swirl Combustor with Different Fuel-Air Composition by Flame Visualization" Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 23, 2025, No. 2 pp. 50-58

[8] A. Hayakawa , M. Hayashi, M. Kovaleva, G.J. Gotama, E.C. Okafor, S. Colson, S. Mashruk, A. Valera-Medina, T. Kudo, H. Kobayashi "Experimental and Numerical Study of Product Gas and N2O Emission Characteristics of Ammonia/Hydrogen/Air Premixed Laminar Flames Stabilized in A Stagnation Flow" Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 39, 2023, pp. 1625–1633

100 kW_{th} 암모니아 전소 버너를 이용한 Swirl 강도에 따른 NO_x 배출 특성에 대한 실험적 연구

황성환[*, **], 이재욱[*], 심우현[*, **], 양원[*], 권오채[**], 채태영[*, †]

Effects of Swirl intensity on NO_x Emissions in a 100 kW_{th} Ammonia Burner

Seonghwan Hwang [*, **], Jaewook Lee[*], Taeyoung Chae[*, †], Woohyun Sim[*, **], Won Yang[*], Oh Chae Kwon[**]

서 론

암모니아는 지구 온난화와 같은 기후 변화에 대응하여 주요 온실가스인 CO_2 배출을 줄이기 위한 연료로 주목받고 있다 [1]. 연료로써 암모니아는 상대적으로 저압에서 쉽게 액화될 수 있는 장점이 있어 저장과 운송이 용이하지만, 좁은 가연 한계, 높은 점화 에너지, 다량의 질소 산화물이 발생하는 단점이 존재한다. 특히, 질소 산화물 중 하나인 아산화 질소 (N_2O)는 대표적인 온실가스 중 하나로, 이산화탄소보다 310배 높은 Global Warming Potential (GWP)을 가지고 있어 대기로 배출 시 지구 온난화에 큰 악영향을 미친다. 이에 따라, 기후 변화에 대응하기 위한 청정 연료로써 암모니아를 이용하기 위해 안정적인 연소와 NO_x 배출을 최소화하는 암모니아 연소기 개발은 필수적이다. 대부분의 연소기에는 안정적인 연소를 위해 Swirl이 적용된다. Swirl 유동은 버너 노즐 근처에서 재순환 영역을 형성해 연쇄 반응을 유지하는 radical과 고온의 연소가스 순환을 돕고 연료의 체류시간을 증가시켜 안정적인 화염 형성을 가능하게 한다. 이러한 swirl 유동은 유동을 형성하는 연료 및 산화제의 유속과 swirl 강도에 따라 크게 영향을 받는다. Hwang et al. [2] 은 암모니아 비예혼합 화염에서 산화제 유량 분포가 암모니아의 연소 특성 및 NO_x 발생에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 산화제 유속이 암모니아 화염 내부의 재순환 영역 형성에 영향을 끼치며, 과도한 산화제 유속은 재순환 영역 형성을 저해하여 NO_x 배출 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이처럼 swirl은 암모니아 화염의 안정적인 연소를 가능하게 하지만, 과도하게 강한 swirl 강도나 빠른 산화제의 유속은 내부 재순환 영역의 축소로 인해 오히려 화염 안정성과 NO_x 배출에 부정적인 영향을 미친다. 또한, 대부분 연구에서 안정적인 연소에 초점을 두었기에 암모니아 연소 시 NO_x가 과량 배출되는 결과를 보이며, swirl 강도에 따른 암모니아 연소 특성과 NO_x 배출에 미치는 영향에 대한 분석을 기반으로 한 연소기 설계 전략이 요구된다. 본 연구는 100 kW_{th} 급 암모니아 버너에서 swirl 강도에 따른 암모니아 연소 특성을 평가하고, 암모니아 전소 버너의 설계 방안 제공을 목적으로 한다.

실험 설비

Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 100 kW_{th} 연소 시스템의 개략도를 나타내었다. . 연소로는 총 높이 2500mm, 내경 600mm의 실린더 형태이다. 연소로는 총 5개의 단으로 구성되어 있으며, 각 단의 높이는 500mm이다. 연소로 y = 0-1500 mm 구간의 벽면에는 내부 온도 분포를 측정을 위한 열전대 삽입 포트가 축 방향으로 100mm 간격으로 각 단에 4개씩 총 12개 설치되어 있다. 연소로 y = 1000-1500 mm 구간에는 공기 다단 연소를 위한 Over fire air (OFA) 투입 노즐이 설치 되어있다. OFA는 에어 컴프레셔로 공급되며, 열교환기에서 연소가스와 열교환을 거쳐 승온 후 MFC로 유량을 제어해 투입하였다. OFA 주입 노즐은 직경 12 mm로 단면의 둘레를 따라 4개가 배치되어 있으며, 반경 15도로 기울어져 회전 흐름을 형성해 미연소 성분과 OFA의 원활한 혼합을 촉진하도록 설계하였다. 암모니아는 저장 탱크에 액화 상태로 저장되어 있으며, 기화기를 통해 기화되어 투입된다. 이송관에는 Line heater를 설치하여 암모니아의 재액화를 방지하였으며, 투입 유량은 Mass Flow Controller (MFC)를 통해 제어하였다. 1차, 2차 산화제는 각각 독립적으로 유량 제어가 가능하도록 2 개의 링 블로어를 통해 공급하였으며, Air heater를 통해 약 320 ℃

까지 가열한 뒤 투입되었다. 연소 가스 조성은 연소로 후단에서 측정하였으며 Non dispersive infrared gas analyzers (ND-IR)을 이용해 NO와 O_2 농도를 Fourier-transform infrared spectrometer (FT-IR)을 이용해 N_2O와 NH_3 농도를 측정했다.

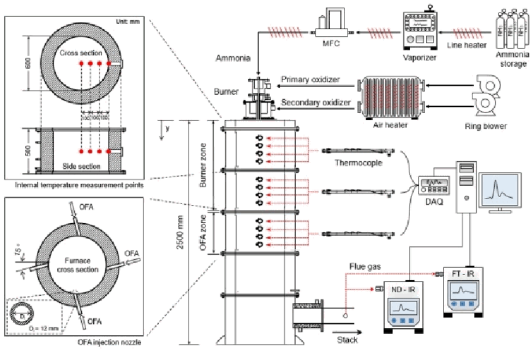


Fig. 1. Schematic diagram of 100 kW_{th} ammonia combustion system.

실험 조건

Table. 1은 1, 2차 산화제의 비율 및 swirl number 변화 실험의 조건 별 산화제 투입 비율을 나타내었다. 본 실험은 1, 2차 산화제의 비율 및 swirl number 변화에 따른 NO및 N_2O 배출 특성, 미연 암모니아 배출량 및 연소로 내부온도 분포 변화를 알아보기 위해 진행하였다. 암모니아 투입 열량은 고위 발열량 기준으로 100 kW_{th} 투입하였다. 총 당량비는 1.15로 버너 영역 당량비는 0.85, OFA 영역 당량비는 0.3으로 고정하였고 1, 2차 산화제 비율은 1:9에서 6:4까지 변경하였다. Table. 2는 버너 별 암모니아 및 각 산화제의 swirl 강도를 나타내었다. 암모니아의 swirl 강도는 고정하였으며, 1, 2차 산화제의 swirl 강도를 변경하여 3가지의 swirl 버너를 실험에 사용하였다.

Table 1 The oxidizer ratio for each injection nozzle based on experimental condition

Case	19	28	37	46	55	64
Burner	Type 1, 2, 3					
Fuel	NH_3					
1st:2nd	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4
1st (%)	7.4	14.8	22.2	29.6	37.0	44.4
2nd (%)	66.6	59.2	51.8	44.4	37.0	29.6
1st (m/s)	9.0	18.1	26.9	35.9	43.7	51.2
2nd (m/s)	20.4	18.4	15.9	13.6	11.1	8.6
OFA (%)	26					

Table 1 The oxidizer ratio for each injection nozzle based on experimental condition

Burner	Type 1	Type 2	Type 3
1st oxidizer	0.79	0.68	0.79
2nd oxidizer	0.70	1.05	1.05
NH_3		0.68	

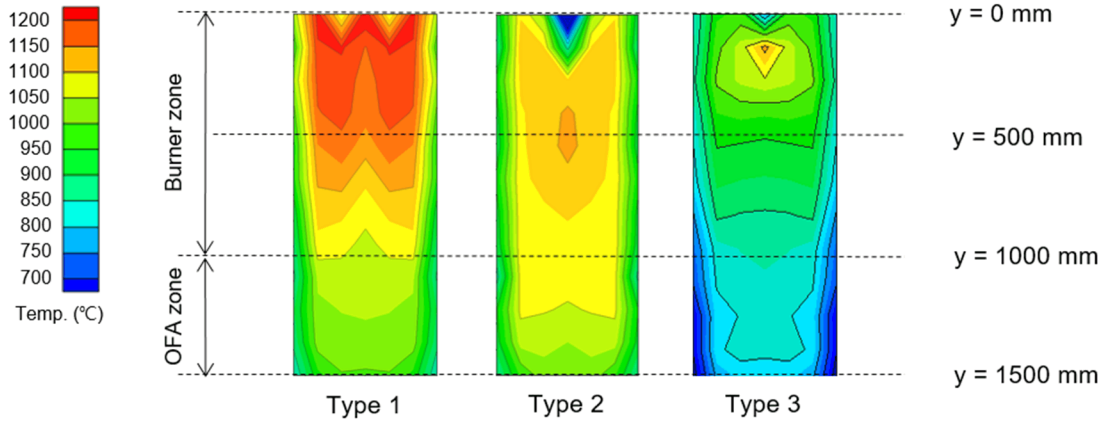


Fig. 2. Temperature distribution inside the furnace

실험 결과

1. 내부온도 분포

Fig. 2. 은 case55조건의 버너 별 내부온도분포를 나타낸 그림으로 산화제의 swirl number에 따라 내부온도분포가 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. Type 3의 경우, 내부온도분포가 상대적으로 저온 영역을 형성하는 것을 볼 수 있는데, 이는 암모니아의 불완전 연소에 의한 것으로, 1차, 2차 산화제의 과도한 swirl에 의한 것으로 판단된다. y = 0 – 500 mm 구간에서 Type 1 버너 조건은 1200 ℃ 이상의 온도 영역이 형성되어 3개의 Type 버너 중 가장 높은 온도 영역이 형성하였다. Type 2와 3의 경우, y = 0 mm 부근 (버너 노즐 부근)에서 상대적으로 저온 영역이 형성되었다. 이는 각 산화제의 swirl 강도 변화와 투입 위치에 의한 결과로, 2차 산화제는 버너 중앙을 기준으로 가장 바깥쪽에서 투입되며, 2차 산화제의 swirl 강도는 암모니아, 1차 산화제보다 상대적으로 크기 때문에 y = 0 부근에서 강한 재순환 영역을 형성하게 된다. 이러한 재순환 영역이 너무 강하게 형성되어 안쪽에 투입되는 암모니아와 1차 산화제의 혼합을 방해하였고 버너 노즐 부근에 저온 영역을 형성하게 된 것이다. 즉, 암모니아가 고온의 연소로 내로 투입되자마자 흡열 반응인 cracking 과정을 거치면서 저온 영역이 형성되었으며, 이후 Type 1 버너와 같이, 연소 과정이 진행되어 고온 영역이 형성되어야 하나 바깥쪽에서 투입되는 2차 산화제의 과도한 swirl에 의해 혼합이 방해되어 연소 반응이 진행되지 못한 것이다. 또한, 2차 산화제의 swirl 강도가 동일한 Type 2와 Type 3 버너 조건에서 서로 다른 온도 분포 결과를 보였는데, 이는 암모니아 안쪽에서 투입된 1차 산화제의 swirl 강도에 따른 영향으로 판단된다. 본 실험에서 사용된 버너는 암모니아의 안정적인 연소를 위해 암모니아 투입 노즐에 0.68의 강도인 swirl을 적용하였으며, 1차 산화제에는 Type 2, Type 3 각 각 0.68, 0.79의 swirl 강도가 적용되었다. 이에 따라, 1차 산화제가 암모니아와 유사한 swirl 강도를 가지는 Type 2 버너의 경우, 2차 산화제의 과도한 재순환 영역에도 불구하고 1차 산화제와 혼합되어 연소되었으며, Type 3의 경우, 1차 산화제와 암모니아의 swirl 강도 차이에 의해 혼합이 저해되어 안정으로 연소되지 않은 것이다. 이는 비예혼합 동축 버너에서 투입되는 연료 및 산화제는 유사한 swirl 강도를 가지는 요소들이 서로 혼합되어 연소되는 것을 의미한다. 즉, 본 실험에서는 암모니아 노즐과 유사한 swirl 강도를 가지는 산화제와 원활한 혼합이 이루어지는 것이다. Fig. 2.에서 y 방향으로 형성된 온도 분포를 보면 Type 1의 경우, 암모니아 노즐과 swirl 강도가 유사한 2차 산화제의 유동과 유사하게 바깥쪽으로 길게 형성된 것을 볼 수 있으며, Type 2의 경우, 1차 산화제의 유동과 유사하게 중심에서 길게 형성된 결과는 이러한 해석을 뒷받침한다.

2. 연소가스 농도

Fig. 3. 은 산화제 투입 비율에 따른 각 버너의 연소가스 농도를 나타낸 것이다. Type3의 버너의 경우, case55 조건이외의 조건에서 안정적인 연소가 이루어지지 않아 결과를 나타내지 않았다. Type1과 Type2 버너의 경우, case19부터 case 46까지 유사한 NO 발생량을 보이다. Case 55, case 64 조건에서는 Type2 버너가 더 많은 발생량을 보였다. 이는 Fig. 2. 에서 볼 수 있듯이,

OFA 영역에서 Type1 버너가 Type2버너보다 더 높은 온도 영역을 하였으며, 이는 OFA에 의해 더 많은 암모니아가 연소되었음을 의미한다. OFA 영역은 산화제가 추가 공급되는 영역으로, Fuel-lean한 영역이 형성되는 영역이다. 이러한 영역에서 연소되는 암모니아가 증가할수록 Fuel-lean한 연소 조건에 의해 Fuel-NO 발생량이 증가하게 된다. 또한, case 55에서 발생량이 증가한 이유는 1차 산화제 비율이 증가할수록, 1차 산화제의 과도한 유속에 의해 버너 영역에서 연소되지 않은 미연 암모니아가 증가했기 때문이다. Type 3 버너의 경우, NO는 34 ppm, N_2O는 65 ppm, NH_3 slip은 117 ppm 발생되며, case 55 조건에서 다른 두 버너보다 더 많은 NH_3 slip과 N_2O 발생량을 보였으며, 이는 버너의 과도한 swirl 강도에 따른 불안정한 연소에 의한 것으로 판단된다.

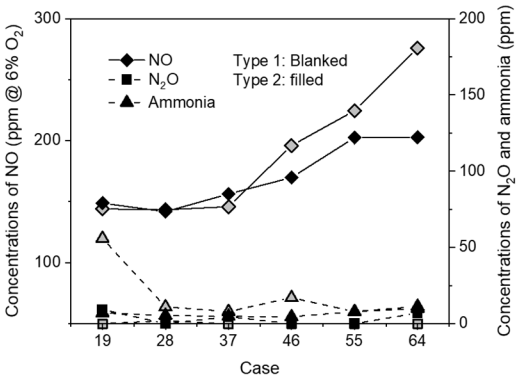


Fig. 3. NO, N2O and ammonia emissions for the burner type

결 론

본 연구는 100 kW_{th}에서 수행된 연구로 1, 2차 산화제 비율 변화 및 버너의 swirl 강도 변화에 따른 암모니아 연소 특성을 평가하였다. 1, 2차 산화제의 과도한 swirl은 산화제와 암모니아 혼합을 방해해 불안정한 연소 현상을 보였으며, 산화제의 swirl과 유속은 주연소영역 형성 위치에 영향을 끼쳐, NO 발생량이 변화하는 결과를 확인하였다. 안정적인 연소를 달성하기 위해 산화제의 분배와 swirl 강도의 최적화가 필요함을 의미한다. 이러한 결과는 암모니아의 연소 특성을 고려한 저 NOx 버너 개발에 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 KETEP의 "발전용 순환 유동층 보일러 암모니아 20% 혼소기술 최적화 및 실증(No.RS-2023-00253089)" 과제의 지원을 받아 수행하였습니다."

참고 문헌

[1] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne KD, Okafor E. Science and technology of ammonia combustion. Proc Combust Inst. 2019;37:109–33.

[2] Hwang S, et al. Effects of air flow distribution and equivalence ratios for staged combustion in an ammonia burner. *Energy*. 2025;137604.

항공용 터보엔진 연소기 설계 및 해석 연구

신준수*†, 황동현*, 홍윤기*, 유경원*

Design and Analysis of Aero-derivative Turbo Engine

Junsu Shin*†, Dong Hyun Hwang*, Yun Ky Hong*, Gyong Won Ryu*

본 연구에서는 항공용 터보엔진인 터보팬 엔진의 연소기의 설계와 그 해석에 대한 연구를 수행하였다. 가스터빈 엔진에서 연소기는 엔진의 심장과 같은 역할로, 공기와 연료를 효과적으로 연소시켜 터빈에 전달될 유동의 모멘텀을 만들어 터빈과 연결된 압축기가 지속적으로 압축 공기가 엔진 내로 유입되게 한다.

연소기의 설계 및 해석의 설계점은 엔진 정지 지상최대추력 조건을 기반으로 수행하였다. 연소기의 0-D 설계기법은 Mellor 등이 제안한 속도 분배법을 사용하였다. [1,2] 0-D 설계에서 도출된 결과를 사용하여 2-D 연소기 레이아웃을 작성하였으며, 이를 사용하여 3-D 모델링으로 작성 후 전산유체해석을 통해 상세설계를 진행하였다.

전산유체해석은 Ansys Fluent V23을 사용하였다. 난류모델은 standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였으며, 액상 연료의 주입은 Discrete Particle Method, 기화된 연료의 연소는 Flamelet-generated Manifold 기법을 사용하였다. 연소 반응 메커니즘의 경우에는 Stanford University에서 개발된 Hychem의 JP-8 연료의 메커니즘을 사용하였다.

Fig 1.에 전산유체해석으로 계산된 연소기 해석결과의 온도장 분포를 나타내었다. 공기 스월러의 중앙에 있는 Pilot 연료노즐과 바깥 방향에 위치한 Main 연료노즐에서 주입되는 연료에 의해 연소기 라이너 앞쪽에서는 당량비가 높아 온도가 낮은 영역이 나타나며, 이후 희석 공기가 주입되며 연소가 발생하여 연소기의 길이의 중앙 부근에서 가장 높은 온도가 발생한다. 이후 2차 희석공기에 의해 주입된 공기에 의해 연소가 종료되며 유동의 온도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

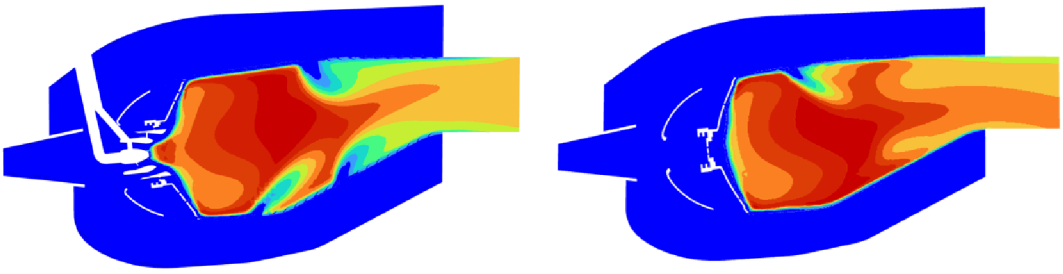
후 기

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] 김대식, 유경원, 황기영, 민성기, “항공용 가스터빈 연소기 기본설계 프로그램 개발: Part 1. 연소기 크기 결정”, 한국연소학회지, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 54-60

[2] 김대식, 유경원, 황기영, 민성기, “항공용 가스터빈 연소기 기본설계 프로그램 개발: Part 2. 공기유량 배분”, 한국연소학회지, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 61-67



(1) Center Plane (2) +5° Plane

Fig. 1 중심단면과 +5° 단면에서의 온도장 분포

* 국방과학연구소, Agency for Defense Development
† 연락저자, junsushin@add.re.kr
TEL : (042)821-4214

CFD 및 열음향 모델을 통한 수소 혼소율 및 노즐 형상 변화에 따른 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석

장재우* · 박소정** · 윤영빈** · 석정민*** · 김대식*†

CFD and Thermoacoustic Modeling of Combustion Instability in a Gas Turbine Combustor under Hydrogen Co-firing and Nozzle Geometry Variations

Jaewoo Jang*, Sojung Park**, Youngbin Yoon**, Jungmin Seok***, Daesik Kim*†

본 연구에서는 서울대학교의 Lab-scale 연소 시험리그[1]를 대상으로, 수소 혼소율 및 노즐 형상 변화가 연소불안정에 미치는 영향을 CFD 해석과 1D 열음향 네트워크 모델을 통해 분석하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 시험리그의 개략도를 나타내며, 이를 기반으로 구축된 CFD 및 네트워크 모델을 통해 실험에서 관측된 연소불안정 특성을 규명하였다.

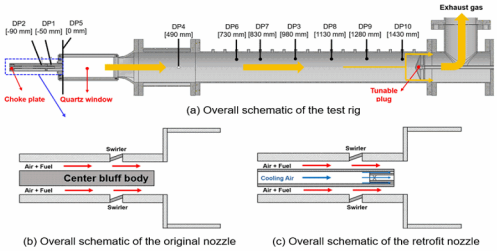


Fig. 1 Schematic diagram of lab scale combustion test rig

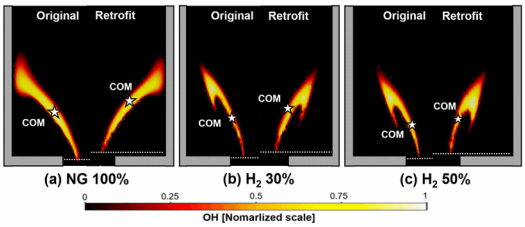


Fig. 2 Schematic diagram of lab scale combustion test rig

* 강릉원주대학교 기계공학과
** 서울대학교 항공우주공학과
*** 두산에너빌리티 GT연소기개발팀
† 연락저자, dkim@gwnu.ac.kr
TEL : (033)760-8728 FAX : (033)-760-8721

Fig. 2의 CFD 해석 결과에서 수소 혼소율 증가 시 OH 질량중심(COM)은 덤프면 쪽으로 점진적으로 이동하는 것을 확인하였으며, 동일 혼소율에서 Retrofit 노즐은 Original 노즐에 비해 화염이 약간 부상하며 COM도 후단으로 이동하는 특성을 확인하였다. 그 후, 이러한 해석 결과를 바탕으로 입자 체류 시간 측정을 통해 연소불안정 해석의 핵심 변수인 시간지연(τ)을 도출하였다[2].

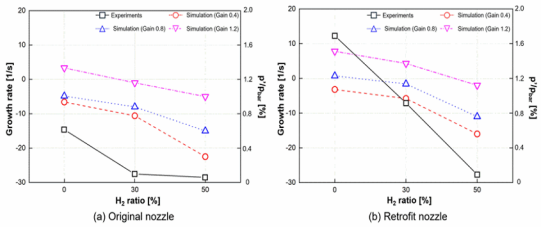


Fig. 3 Comparison of combustion instability analysis results with experimental data

Fig. 3은 Fig. 2의 CFD 해석을 통해 도출된 시간지연 값을 바탕으로하여 수행한 연소불안정 해석 결과를 나타낸다. 이득값(n)을 0.4, 0.8, 1.2로 변화시키며 수소 혼소율과 노즐 형상 변화에 따른 영향을 평가하였다. 분석 결과, 실험과 동일하게 혼소율이 증가하고 이득값이 감소할수록 성장률과 동압 진폭이 모두 감소하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다(No. 2023-00254668 & No. 2025-02662968).

참고 문헌

[1] S. Park, J. G. Lee, Y. Yoon, J. J. Yoh, “Effects of central air injection on flame blow-off characteristics in a CH4/H2 bluff-body combustor”, Int. J. Hydrogen Energy., Vol. 177, 2025, pp. 151202.
[2] J. Jang, J. Jung, M. K. Kim, J. Hwang, W. J. Lee, H. S. Kim, D. Kim, “Combustion Instability Analysis in a Hydrogen-Natural Gas Co-firing Gas Turbine Combustor with Varying Pilot Ratios Using CFD and 1D Network Modeling Approaches,” J. ILASS-Korea, Vol. 30, No. 1, 2025, pp. 1-10.

연료 적용성 향상을 위한 bluff body offset 기반 전단층 형성 및 화염 안정화 특성에 관한 연구

김종현*. 김민혁*. 김승민**. 박정수**†

A study on shear layer formation and flame stabilization characteristics based on bluff body offset for enhanced fuel-flexibility

Jonghyun Kim*, Minhyeok Kim*, Seungmin Kim**, Jungsoo Park**†

ABSTRACT

Ammonia is gaining attention as a carbon-free fuel, but its slow flame propagation speed poses challenges for flame stabilization. This study investigates shear layer formation and flame stabilization characteristics based on bluff body offset for fuel-flexible combustion systems. Unlike conventional approaches that rely on swirler design modifications with high pressure losses, this research proposes controlling swirl intensity through mixing length adjustment of central bluff body offset. Numerical and experimental analyses were conducted using CH_4/NH_3 co-firing from single-nozzle to multi-nozzle configurations. Results showed distinct flame structures: lifted flame (base), M-shaped flames (negative offset), and V-shaped flames (positive offset). This study demonstrates that bluff body offset effectively controls shear layer characteristics and flame anchoring mechanisms, providing practical design guidelines for fuel-flexible combustors.

Key Words : Ammonia combustion, Bluff body offset, Flame anchoring, Fuel-flexible combustion, Swirl intensity.

암모니아는 연소과정 중 탄소 배출량이 없어 무탄소 연료(CO_x free fuel)로 주목받고 있으나, 현저히 느린 화염전파속도와 높은 착화에너지 등 난연성으로 인해 화염 안정화에 어려움이 있다.

화염전파속도는 미연가스의 화염 진행 속도인 층류 화염 속도 (laminar flame speed, S_L)와 기연가스가 팽창하면서 발생하는 난류 화염 속도 (turbulent flame speed, S_T)의 합으로 정의할 수 있다. 층류 화염 속도는 온도 및 압력에 따라 결정되는 연료의 고유값이나, 난류 화염 속도는 연소 장치의 기하학적 형상에 따라 개선될 수 있는 여지가 있다 [1]. 따라서 연료 암모니아의 고유 특성인 층류 화염 속도로 인해 발생하는 난연 한계를 개선하고 산업시설에 적용하기 위해서는 연소실 설계 인자를 고려한 난류 화염 속도 개선이 필요하다.

Bluff body는 유동장 내에 의도적으로 배치된 기하학적 장치로, 주변의 유동 패턴에 영향을 미쳐 연소반응을 향상시키기 위해 사용되는 복합적인 설계인자 중 하나이다 [2]. 대표적으로 후단에 형성된 vortex core로 인해 재순환 영역이 생성되어 혼합도를 촉진하고 소염을 방지하는 역할을 한다. 빠른 유속과 고정부하 조건의 가스터빈에서는 swirler integrated type과 central body type이 주로 적용되며, 상대적으로 낮은 유속과 다양한 부하조건에서 운전하는 산업용 버너의 경우 보염기 형태로 적용된다 [3].

본 연구에서는 central bluff body가 구성된 노즐에서 offset을 통한 선회기 후단의 혼합길이 (mixing length, L_M) 조절이 선회강도(swirl intensity, S) 다변화와 전단층(shear layer) 형성에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. 기존 연구에서는 선회강도를 조절하기 위해 선회기 설계 변경에 의존하였으나, 강선회 구성은 연소 시스템의 압력 손실을 증가시켜 설계에 제약이 따른다. 본 연구에서 제안하는 bluff body의 혼합길이를 통한 선회강도와 전단층 제어는 이러한 설계 제약으로부터 비교적 자유롭다는 특징이 있다. 본 연구에서는 수치해석과 실험을 연계한 single-nozzle의 설계 및 검증을 수행하고, 노즐간 화염 간섭현상에 따른 영향을 확인하고자 multi-nozzle로 확장 분석을 수행하였다.

Fig. 1은 노즐에서 bluff body가 화염에 미치는 영향을 도식화 것으로 전단층 변화에 따른 유

* 조선대학교 기계공학과 대학원
** 조선대학교 기계공학과
† 연락저자, j.park@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7057

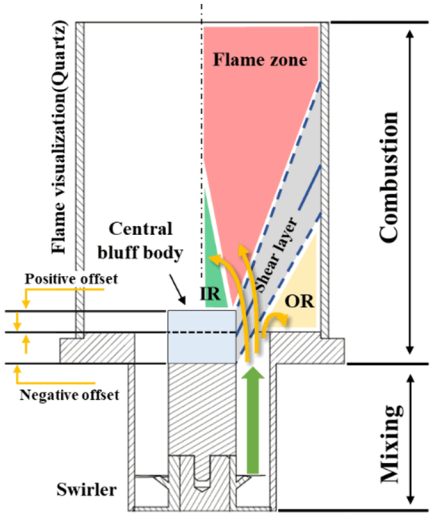


Fig. 1 Schematic diagram of bluff body offset effects on shear layer formation and flame stabilization

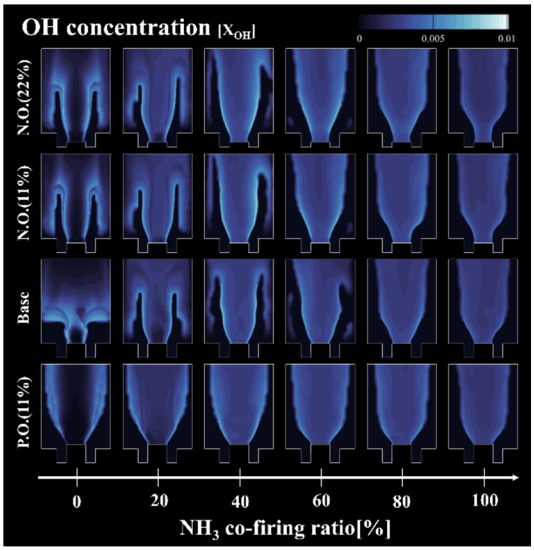


Fig. 2 Effects of bluff body offset on flame structure visualized through OH radical distribution at various NH_3 co-firing ratio.

동 특성을 보여준다. 선회력을 가진 공기/연료 혼합물이 연소 영역으로 유입될 때 노즐 팁을 경계로 강한 전단층이 형성되며, 미연가스가 전단층을 통과하여 기연가스와 혼합되는 과정이 flame anchoring 메커니즘이다. Bluff body는 노즐 팁에서 선회강도를 변화시켜 전단층 특성을 조절하며, 이를 통해 내·외부 재순환 영역의 특성을 변화시켜 화염 구조 변화를 유도한다.

연구에서는 상반된 화염전파속도를 가진 메탄과 암모니아를 활용하여 bluff body offset이 화염 구조와 안정화에 미치는 영향을 분석하였다. Fig.2는 총 입열량을 기준으로 20% 간격으로 혼소를 수행한 결과를 나타낸다. Base 조건의 경우 메탄 연소 시 연소 영역의 반경방향 제약으로 인해 부상화염(lifted flame)을 보이며, 연소실 벽면에 화염이 부착되어 있는 특징을 보였다. 이후 암모니아 혼소율 증가에 따라 화염 형태는 M자형에서 V자형으로 점진적인 변화를 보이며, 암모니아 전소 시 U자형 화염 구조를 형성하였다.

Negative offset의 경우 bluff body 후단에서 두 개의 화염 가지가 형성되는 M자형 화염을 보였으며, 이는 부상화염과 같이 반경방향 제약에 의해 발생하나 축방향 화염 전파에 의해 형성되는 점에서 차이를 갖는다. Positive offset에서는 메탄 연소 시 bluff body 후단에서 화염이 직접적으로 부착되어 있는 V자형 화염을 보였으며, 넓은 혼소율 범위에서 화염의 형태가 크게 변화하지 않는 특징을 보였다.

이러한 화염 구조는 offset으로 인한 노즐 팁에서의 선회강도 변화가 전단층 형성과 화염의 안착 위치 및 형태에 직접적인 영향을 미침을 보여준다. 연구에서는 single-nozzle의 결과를 바탕으로 multi-nozzle로 확장하여 노즐간 화염 간섭현상과 전단층 형성의 영향을 중점적으로 분석하였다. 이를 통해 다양한 연료 조건에서 안정적인 화염을 형성하는 노즐 구성과 특성을 도출하였다.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 광주광역시의 재원으로 광주RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-05-013)

참고 문헌

[1] Morovatiyan M., Shahasavan M., Aguilar J., Mack JH., "Effect of argon concentration on laminar burning velocity and flame speed of hydrogen mixtures in a constant volume combustion chamber", J Energy Resour Technol, 2021, pp.143.

[2]Candel S., Durox D., Schuller T., Bourgouin J-F., Moeck JP., "Dynamic of swirling flames", Annu Rev Fluid Mech, Vol.46, 2014, pp.147-173.

[3] Wintefeld G., "On processes of turbulent exchange behind flame holders", Symp Int Combust, Vol.10, 1965, pp.1265-1275.

벽면 열 조건에 따른 수소 혼소 스월 화염의 역화 거동 해석

최민준* · 백민하* · 류제일** · 신동혁*†

Analysis of the Effects of Wall Thermal Conditions on Flashback Behavior in Hydrogen-Enriched Swirl Flames

Minjun Choi*, Minha Baek*, Je Ir Ryu**, Dong-Hyuk Shin*†

탄소 중립을 실현하기 위해 이산화탄소를 배출하지 않는 수소 화염에 대한 관심이 늘어나고 있다. 이에 맞춰 가스터빈 분야에서도 탈탄소화에 대한 시도가 이어지고 있으며 수소 가스터빈 개발이 활발히 이루어지고 있다 [1, 2]. 그러나 기존의 화석연료 화염과 달리 매우 빠른 화염 속도를 가지는 수소 화염은 역화의 위험성이 매우 크다. 따라서 수소 가스터빈 연소기 개발을 위해서는 수소 화염의 역화에 대한 이해가 필수적이며 이에 따른 연구가 동반되어야 한다.

현재까지 실제 연소기에 사용되는 스월 연소기에서의 수소 전소/혼소 화염의 역화 연구는 실험적/수치적으로 이루어져 왔다. Xia 등 [3]은 LES 해석을 통해 원통형 스월 노즐에서의 수소 혼소 화염의 역화 거동을 벽면 열 조건에 따라 분석한 바 있다. Cheng 등 [4]은 스월 강도에 따른 화염의 역화 거동을 분석한 바 있으며, Ebi와 Clemens [5]는 스월 화염의 역화를 실험을 통해 그 역화 거동을 규명하였다.

본 연구에서는 기존의 원통형 스월 노즐보다 복잡한 형태를 가지는 PRECCINSTA 연소기를 이용하여 수소 혼소 화염의 역화 거동을 분석하였고 단열 벽면 및 복합 열전달 조건에서의 역화 거동의 차이를 분석하였다.

본 연구에 사용된 PRECCINSTA 연소기 형상은 Fig.1과 같다. 그림에서 좌측 공기 입구로부터 공기가 들어오고 swirler 아래에 위치한 12개의 연료 구멍으로부터 연료가 나와 공기와 혼합된다. 본 연구에서는 계산의 단순성을 위하여 완전 예혼합을 가정하여 예혼합된 공기/연료가 좌측의 공기 입구로부터 들어오도록 하였다. 시뮬레이션을 위해 약 1,100 만개의 poly-hexcore 격자를 구성하였으며, 화염이 위치한 영역의 격자 크기는 0.3 mm로 조밀하게 구성하였다.

시뮬레이션 수행을 위해 WALE 모델 [6]을 이용한 LES 해석을 수행하였고, 연소 모델로는 Thickened flame 모델 [7]을 사용하였다.

* KAIST 항공우주공학과
** Division of Engineering, New York University Abu Dhabi
† 연락저자, donghyuk.shin@kaist.ac.kr

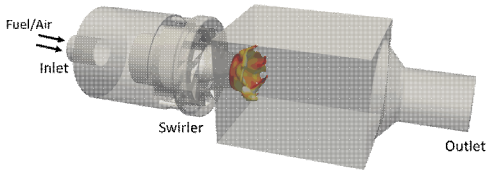


Fig. 1 The schematic of PRECCINSTA combustor.

시뮬레이션 초기 조건으로 Agostinelli 등 [8]이 수행한 수소/메탄 50% 혼소 화염 조건을 이용하여 화염을 안정화 하였고, 화염이 안정화된 뒤, 연료의 혼소율을 95%로 증가시켜 역화를 유도하였다. 또한 벽면 열 조건으로 단열 및 복합 열전달 조건을 적용하여 각각 시뮬레이션 하였고, 각 벽면 조건에 따른 화염의 역화 거동을 비교하였다.

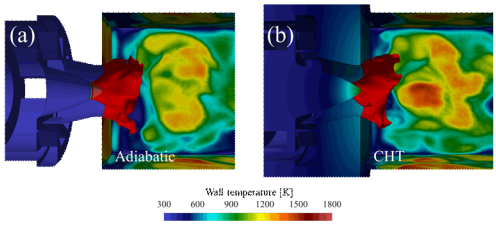


Fig. 2 Wall temperature field and flame front; (a) adiabatic conditions; (b) CHT condition.

Fig. 2는 각 벽면 열 조건 별 화염 및 벽면의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 단열 조건의 경우, 벽면으로부터의 열손실이 없으므로 화염은 벽면에 부착되어 있고 벽면의 온도 또한 화염의 온도와 동일하다. 반면 복합 열전달 해석의 경우, 벽면으로의 열손실이 존재하여 화염이 노즐의 하류에 위치하여 있고 벽면 부근에서 quenching이 발생하였다.

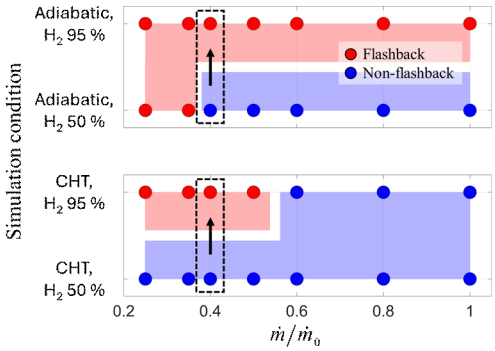


Fig. 3 Flashback occurrence maps for various inlet mass flow rates and H_2 fraction in the fuel for each wall thermal conditions.

Fig. 3은 벽면 열 조건 별 입구 유량에 따른 역화 한계를 도시한 그림이다. 역화는 그림과 같이 50% 혼소율에서 안정화된 화염을 입구 조건 및 미연소장을 95% 혼소율로 증가시켜 역화를 유도하였다. 이때 단열 벽면의 경우 모든 유량조건에서 역화가 발생하였으나, 복합 열전달 조건의 경우에는 입구 유량이 60% 미만일 경우에만 역화가 나타남을 확인하였다. 벽면 열 조건은 벽면 부근의 유동 특성을 변화시켜 역화 민감도 또한 변화 시킴을 의미한다.

Fig. 4는 복합 열전달 해석에서의 화염 역화 모드의 천이를 나타낸 그림이다. 기존의 스월 화염 역화 연구의 경우, 연소기의 내벽을 타고 일어나는 경계층 역화가 주요 메커니즘이었다. 그러나 복합 열전달 해석을 통해 PRECCISNTA 연소기에서 역화 해석을 수행하였을 때, 역화가 일어나면서 주요 역화 모드의 천이가 발생함을 확인하였다.

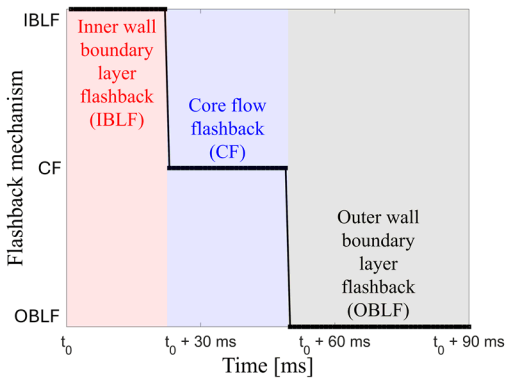


Fig. 4 Flashback mode transitions under the CHT condition.

후 기

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다. (No.RS-2021-KP002521, 탄소중립 고효율 가스터빈 연소기술 에너지혁신연구센터).

참고 문헌

[1] Y. Shin, et al. Development of 5MW Hydrogen Gas Turbine Suitable for Eco-Friendly Power Plant Energy Grid. in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2023. American Society of Mechanical Engineers.

[2] S. Cocchi and S. Sigali. Development of a low-NOX hydrogen-fuelled combustor for 10 MW class gas turbines. in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2010.

[3] H. Xia, et al., Numerical investigation of boundary layer flashback of CH4/H2/air swirl flames under different thermal boundary conditions in a bluff body swirl burner. Proceedings of the Combustion Institute, 2023. 39(4): p. 4541-4551.

[4] L. Cheng, et al., Investigation on the effects of swirl-strength on flashback phenomenon of premixed CH4/H2/air flame in a bluff-body swirl burner.International Journal of Hydrogen Energy, 2024. 90: p. 210-217.

[5] D. Ebi and N.T. Clemens, *Experimental investigation of upstream flame propagation during boundary layer flashback of swirl flames.*Combustion and Flame, 2016. 168: p. 39-52.

[6] F. Nicoud and F. Ducros, *Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor.*Flow, turbulence and Combustion, 1999. 62(3): p. 183-200.

[7] Charlette, F., Meneveau, C., and Veynante, D. A power-law flame wrinkling model for LES of premixed turbulent combustion Part I: non-dynamic formulation and initial tests. Combustion and Flame 131(1-2). 159-180. 2002.

[8] Agostinelli, P. W., et al. On the impact of H_2-enrichment on flame structure and combustion dynamics of a lean partially-premixed turbulent swirling flame. Combustion and Flame 241. 112120. 2022.

고압 멀티 EV 버너에서 수소-메탄 혼소 화염 상호작용에 따른 연소 및 배출 특성 연구

이상현* · 이재빈* · 오정석* · 장재우** · 김대식** · 강도원*** · 김민국*** · 최민성*,†

Study on the Combustion and Emission Characteristics Affected by Hydrogen-Methane Co-firing Flame Interactions in a High-Pressure Multi-EV Burners

Sanghyeon Lee*, Jaebin Lee*, Jeongseok Oh*, Dowon Kang**, Minkuk Kim**, Minsung Choi*,†

This study investigated the flame interaction and combustion characteristics in a three-EV-burner sector under hydrogen-methane co-firing conditions using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The simulations evaluated the flow field, reaction zones, and preheat zones using a RANS approach with the GRI 3.0 mechanism. Operating conditions included a pressure of 25.9 bar, an air temperature of 815.15 K, and a 60% hydrogen mole fraction. The results showed that the flow is characterized by critical recirculation zone structures. A continuous OH reaction zone along the shear layers and a thin upstream CH_2O distribution were observed, indicating robust flame anchoring and stable combustion.

Key Words : Multi-EV burners, Hydrogen co-firing, CFD analysis, Flame interaction

발전용 가스터빈에서 수소-메탄 혼소는 탈탄소 전환의 실용적인 해법이지만, 실제 가스터빈 연소기와 유사한 고압 및 희박 연소조건에서 멀티 버너의 화염 상호작용을 정량적으로 규명한 연구는 매우 제한적이다. 수소는 큰 확산계수와 빠른 화학 반응 속도 때문에, 미세한 혼합비 변동만으로도 화염 구조와 정착점이 크게 변하며, 이러한 특성은 인접한 제트 유동 및 재순환 영역과 결합하여 국부적인 열방출과 온도 분포를 예측하기 어렵다[1]. 특히 메탄-수소 혼소 심화되는 차등 확산은 연료와 산화제의 불균일한 혼합을 야기하여 국부적인 당량비를 변화시키고, 이는 연소 안정성 확보와 질소산화물 저감이라는 기존의 상충 관계를 더욱 악화시킨다. 그 결과, 멀티 버너 환경에서 역화, 소염 한계는 단일 버너 연구 결과와는 다른 양상을 보인다[2].

그럼에도 불구하고, 기존의 수소 혼소 연구는 대부분 단일 버너 구성 및 상압 조건에 집중되었다. 멀티 버너를 대상으로 한 연구들 또한 탄화수소 단일 연료에 국한된 경우가 많으며 수소 혼소율 변화가 화염 간의 상호작용, 재순환 유동과의 결합, 그리고 전단층 내 혼합 강화에 미치는 복합적인 영향을 체계적으로 규명하지 못한 한계가 있다.

이전 연구에서 이중 EV 버너를 활용하여 버너 간 상호작용을 통해 발생한 화염의 거동 및 전체적인 연소특성을 분석하였다. 그러나 2개의 버너 배열로는 중앙과 측면 화염 간의 간섭과 재순환 영역과의 상호 결합 효과를 정량적으로 평가하기에 한계가 있었다[3]. 이에 본 연구에서는 3개의 EV 버너로 확장해 실제 가스터빈 연소기와 유사한 복잡한 상호작용을 모사하고, 화염 안정성 및 배출 간 상충 관계를 보다 신뢰성 있게 평가하고자 한다.

상용 GT24 가스터빈은 총 30개의 EV 버너가 원주 방향으로 12° 간격으로 환형 배치되며, 본 연구에서는 이 중 3개의 버너로 구성된 섹터를 Fig. 1과 같이 모사하였다. 해당 버너는 별도의 와류 생성 장치 없이 공기 유입 경로의 고유한 형상을 통해 자체적으로 스월 유동을 형성하는 부분 예혼합 방식의 버너이다. 이러한 강한 선회 유동은 중심부에 안정적인 재순환 영역을 발달시키며, 이는 희박 연소 한계를 확장하고 화염 안정성을 향상시킨다.

* 국립강릉원주대학교 자동차공학과
** 국립강릉원주대학교 기계공학과
*** 한국기계연구원 무탄소연료발전연구실 가스터빈연구팀
† 연락저자, mchoi@gwnu.ac.kr
TEL : (033)760-8762 FAX : (033)760-8761

연소 해석을 위해 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS Fluent를 사용해서 정상상태 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) 시뮬레이션을 수행하였다. 난류 유동장 및 연소 반응 모사를 위해 각각 $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) 난류 모델과 Eddy Dissipation Concept (EDC) 연소 모델을 적용하였다. 화학반응 메커니즘으로는 GRI 3.0을 사용하였으며, 53개의 화학종과 325개의 반응식을 포함하여 메탄-수소의 화학반응을 정확히 모사하기 위한 상세한 화학반응 경로를 제공하기 때문에 본 연소해석 메커니즘으로 선정하였다[4].

본 해석 조건은 실제 가스터빈의 고압(25.9 bar) 및 고온(공기 815.15 K) 운전 조건을 반영하였다. 연료 조성은 메탄 연료에 대한 수소의 몰 분율을 60%로 설정한 혼소 조건에서 연소특성을 분석하였다. 이때 총 열 입력은 18.8 MW로 일정하게 유지하였다. 유량 및 상세 운전 조건에 대한 정보는 Table 1에 나타내었다.

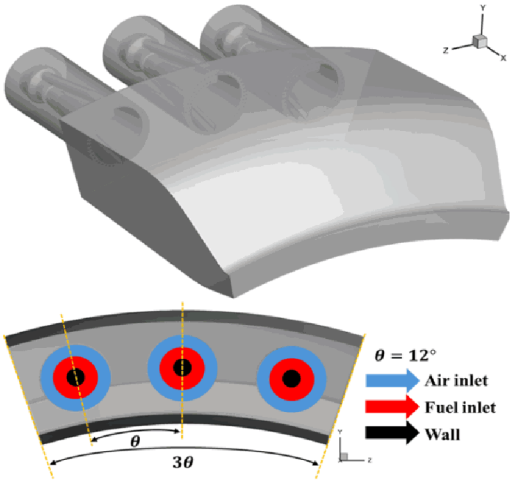


Fig. 1. Schematics of Multi-EV burners.

Table 1. Operating conditions.

Parameter	Unit	Value
Air temperature	K	815.15
Fuel temperature		291.71
Air mass flow rate	kg/s	7.27
Pressure	bar	25.9
H_2/CH_4 mass flow rate	Unit	Value
H_2-60%	kg/s	0.016 /0.086
Total thermal input	MW	18.8
Equivalence ratio		0.5

Fig. 2는 반응 유동장에서의 속도 분포 특성을 나타낸다. 세 개의 버너(#1 - #3)에서 분출된 축방향 유동의 상호작용을 분석한 결과, 각 버너의 좌·우 메인 제트가 서로 간섭하며 중앙부 유동 구조를 재편하는 양상이 확인된다. 모든 버너(#1 - #3)에서 제트는 상부로 상승한 후 하류로 갈수록 감속 및 확산되며, #1 - #2와 #2 - #3 사이의 중앙부 제트 접합부에서는 강한 전단층과 함께 인접한 버너 사이의 재순환 영역(ABRZ, Adjacent Burner Recirculation Zone)이 형성된다. ABRZ는 인접 제트의 상호 유도에 의해 버너 사이에 형성되는 저속 영역으로, 뜨거운 생성물의 재공급을 통해 화염 정착을 유도한다. 한편 ABRZ가 약해지면 체류시간 감소로 thermal-NO_x가 줄어들 수 있으나, 두 제트가 접하는 전단층이 과도하게 강해질 경우 국부 고온점이 발생하여 NOx 피크 농도가 증가할 수 있다[5]. 또한 ABRZ 외에도 각 버너 출구단 중앙에는 내부 재순환 영역(IRZ, Inner Recirculation Zone)이, #1과 #3의 벽면 근처에는 외부 재순환 영역(ORZ, Outer Recirculation Zone)이 형성되며, 이는 고온 가스의 재순환을 통해 중앙부 화염 안정화에 긍정적인 영향을 미친다[6].

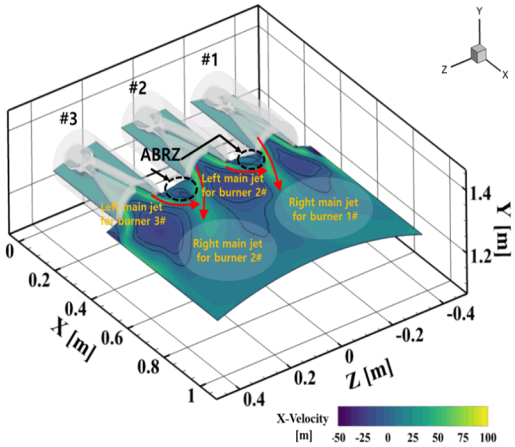


Fig. 2. Axial velocity distribution contours.

Fig. 3(a)의 OH 몰분율은 세 EV 버너의 전단층을 따라 고온 반응대가 연속적으로 형성되어 있음을 보여준다. 각 버너 출구부에서 시작된 고농도의 OH 띠는 인접한 버너 사이 접합부까지 이어지며, 특히 중앙 버너(#2) 주변에서는 좌·우 메인 제트가 형성한 전단을 따라 띠가 더 얇고 선명하게 나타난다. 이는 고온 생성물의 재순환과 강한 열방출이 전단을 따라 집중적으로 발생함을 시사한다. Fig. 3(b)의

CH_2O 몰분율 분포는 OH 띠의 상류측, 즉 예열 및 혼합이 우세한 차가운 반응 구간에서 얇고 국소적으로 분포하며, 버너 사이 상류부에는 뚜렷한 분포가 관찰되지 않는다. CH_2O가 얇고 산발적으로 분포하는 반면 OH 분포가 끊김 없이 이어지는 공간적 오프셋은, 혼합 - 점화 - 주반응 과정이 전단을 따라 정상적으로 진행되고 있고 인접 화염 간 영역에서도 미반응 영역이 존재하지 않음을 의미한다[7].

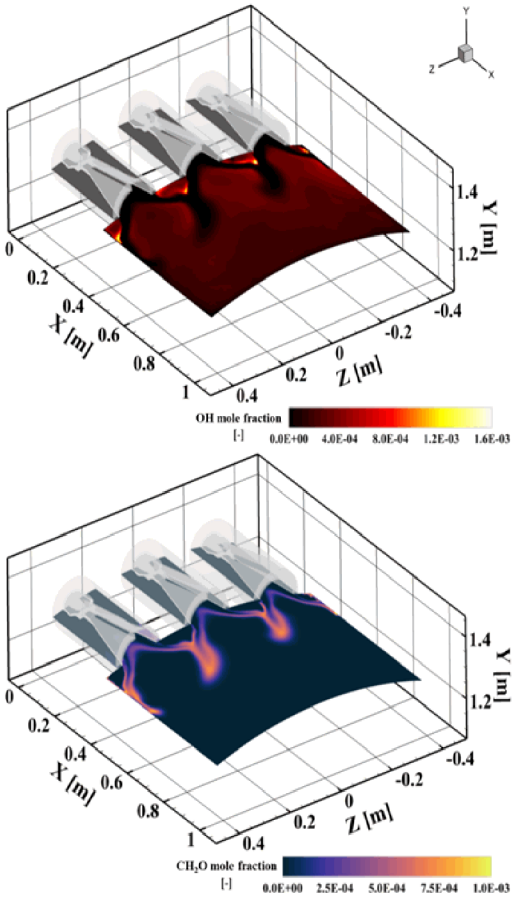


Fig. 3. Distribution of the (a) OH mole fraction and (b) CH_2O mole fraction.

후 기

본 연구는 2022년 한국중부발전(제2022-현장-16호)의 지원을 받아 수행되었습니다. 그리고 이 논문은 2023년도 정부(산업통산자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (RS-2023-00270080, 수소터빈 연소기 시험평가 기술개발, 기여율 50%).

참고 문헌

[1] B. Francolini, L. Fan, E. Abbasi-Atibeh, G. Bourque, P. Vena, J. Bergthorson, “Investigation of differential diffusion in lean, premixed, hydrogen-enriched swirl flames”, Appl. Energy. Combust. Sci. Vol. 18, 2024, 100272.

[2] H. Wang, Z. Zhu, E. Barakat, J. Hou, H. Hassan, J. Liu, W. Zeng, W. Tao, G. Wang, “Investigation of flow interaction and the impact on flame propagation in an annular combustor with centrally staged burners”, Fuel Vol. 390, 2025, 134694.

[3] S. Lee, J. Lee, D. Kang, J. Hwang, Y. Park, M. Choi, “Study on Combustion Characteristics according to the Interaction between Hydrogen-Methane Co-firing and Dual EV-Burners”, 68th KOSCO SYPOSIUM, Jeju, Korea, Nov. 6-9, 2024.

[4] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg , C.T. Bowman, R.K. Hanson, S.H Song, W.C Jr. Gardiner, V.V. Lissianski, Z.W Qin, GRI-MECH3.0. Available online: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech

[5] Y. Wang, C.H. Sohn, “Effects of swirl premixedflame interaction on NOx emission in a gas turbine combustor with multi-burners“, J. Energy Inst., Vol. 109, 2023, 101274.

[6] S. Taamallah, S. J. Shanbhogue, A. F. Ghoniem, “Turbulent flame stabilization modes in premixed swirl combustion: Physical mechanism and Karlovitz number-based criterion”, Combust. Flame, 166, 2016, 19 - 33.

[7] C.A. Fugger, S. Roy, A.W. Caswell, B.A. Rankin, J. R. Gord, “Structure and dynamics of CH_2O, OH, and the velocity field of a confined bluff-body premixed flame using simultaneous PLIF and PIV at 10 kHz”, Proc. Combus. Inst., Vol. 37, 2019, 1461 - 1469.

수소 환원 제철 공정을 위한 유동 환원 반응기 내 철광석의 유동화 및 환원 특성

최형석* · 김민우** · 전충환*†

A Study on the Fluidization and Reduction Characteristics of Iron Ore in a Fluidized Bed Reactor for Hydrogen-Based DRI Production

Hyeong-Seok Choi*, Min-Woo Kim**, Chung-Hwan Jeon*†

철강 산업은 현대 사회의 핵심 기간산업이지만, 동시에 전 세계 산업 부문 CO_2 배출량의 약 24% (IEA, 2021)를 차지하는 대표적인 에너지 다소비 및 탄소 다배출 산업이다. 기존의 고로 공정은 코크스(Coke)와 미분탄(PCI)을 주 환원제로 사용하여 CO_2 배출이 불가피하다. 이러한 배경 속에서, 기존의 탄소 환원 방식을 대체할 혁신 기술로 수소 환원 제철법이 주목받고 있다. 수소(H_2)를 이용한 직접 환원 공정은 철광석을 환원시키는 과정에서 부산물로 물(H_2O)만을 생성하므로, CO_2를 원천적으로 배출하지 않는 친환경 기술로 평가받는다. 특히, 분말 형태의 철광석을 직접 사용하는 기포 유동층 반응기(BFB, Bubbling Fluidized Bed)는 수소 기반 직접 환원철(DRI, Direct Reduced Iron) 생산에 가장 유망한 기술로 부상하고 있다.

유동층 공정의 효율은 철광석 분말(Iron Ore Fines)의 유동화 품질에 직접적으로 좌우되므로, 안정적이고 균일한 유동 상태를 확보하는 것이 중요하다. 유동층 공정에서 가스 유속이 최소 유동화 속도(U_{mf})에 미치지 못하면 입자 간 소결(sintering) 현상이 발생하기 쉬우며, 종말 속도(U_t)를 초과하면 입자가 반응기 밖으로 비산 될 수 있으므로, 안정적인 운전 범위 유지는 환원 효율에 필수적이다. 하지만 현재 사용하고자 하는 철광석 분말의 구체적인 유동 특성에 대한 연구는 부족하다. 따라서 실제 공정 적용에 앞서 해당 분말의 기초적인 유동화 거동을 실험적으로 규명하는 연구가 반드시 선행되어야 한다.

이에 본 연구의 핵심 목표는, 상온/상압(NTP) 조건의 투명한 석영(Quartz) 반응기에서 해당 철광석 분말의 유동 현상을 관찰하여 그 고유한 특성을 파악하고, 최소 유동화 속도를 실험적으로 도출하는 것이다. 그리고 이 결과를 고온 조건에 적용하기 위한 상온/상압 조건에서의 유동 상태를 스케일업(scale-up)하여, 고온 조건의 반응기에서 동일한 유동 상태를 정밀하게 모사할 수 있는 운전 조건을 예측하고자 한다. 최종적으로 예측된 조건 하에서 수소 및 일산화탄소 환원 실험을 수행하여, 안정적인 유동화가 환원 효율에 미치는 영향을 규명하는 것을 목표로 한다.

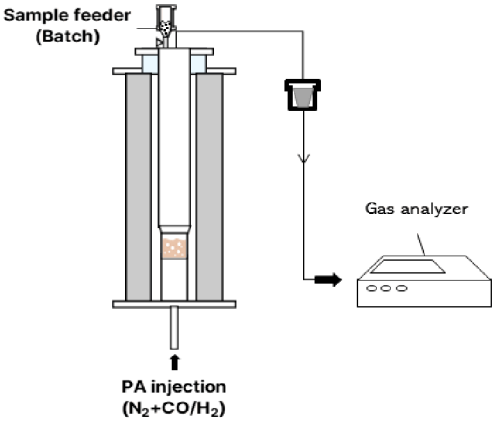


Fig. 1 Schematic diagram of lab-scale Bubbling fluidized bed reactor.

본 실험의 주원료로는 철광석 분말(Iron Ore Fines)을 사용하였다. 환원제로는 99.999% 이상의 고순도 수소와 일산화탄소를, 유동화 매체 및 희석 가스로는 질소를 사용하였으며, 모든 가스는 질량 유량 제어기(MFC, Mass Flow Controller)를 통해 정밀하게 제어하여 반응기로 주입하였다. 실험은 상온 유동화 특성 평가와 고온 환원 반응 평가를 위해 각각 다른 반응기를 사용하여 진행하였다. 상온/상압 조건에서의 유동 현상을 관찰하기 위해서는 석영으로 제작된 기포 유동층 반응기를 사용하였고, 600~800 °C의 고온 환경에서 환원 실험을 수행하기 위해서는

* 부산대학교 기계공학부
** 청정화력발전에너지연구소(PCERI)
† 연락저자, chjeon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)-518-3051

전기로(Electric Furnace) 내부에 설치된 Lab-scale의 기포 유동층 반응기를 사용하였다.

상온에서 관찰된 유동 상태를 고온에서 재현하기 위한 변수들은 아래의 상관식을 통해 계산 되었다.

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C}{T + C}\right)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \quad (1)$$

$$Ar = \frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (2)$$

$$Re_{p,mf} = \sqrt{(33.7)^2 + 0.0408 Ar} - 33.7 \quad (3)$$

$$U_{mf} = \frac{Re_{p,mf} \mu_g}{d_p \rho_g} \quad (4)$$

이를 통해 상온에서 관찰된 유동 상태를 재현할 수 있는 운전 조건을 설정하였다. 설정된 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions of Reduction tests

Case	1	2	3
Reduction Gas	CO(Reference)		
Concentration (Reduction gas %vol.)	5		
Temperature (℃)	600	700	800
Particle size (mm)	0.3-0.5		
U/Umf	3		
Total Flow rate (LPM @ STP)	11.42	10.71	10.11
Case	4	5	6
Reduction Gas	H_2		
Concentration (Reduction gas %vol.)	5		
Temperature (℃)	600	700	800
Particle size (mm)	0.3-0.5		
U/U_{mf}	3		
Total Flow rate (LPM @ STP)	11.90	11.16	8.58

고온 조건의 반응기에 시료를 충전하고 목표 온도로 승온시킨 후, 계산된 운전 조건에 따라 환원 가스를 주입하여 실험을 진행하였다. 반응 시간 동안 배출 가스의 조성을 실시간으로 분석하였으며 Figure 2에 나타난 시간에 따른 생성 가스의 농도 곡선을 시간에 대해 적분하면 제거된 산소의 총량을 구할 수 있으며, 이를 통해 아래 식 (5)와 같이 철광석의 최종 환원율(Degree of Reduction)을 계산할 수 있다.

$$R(t)[\%] = \frac{m_{o,Removed}(t)}{m_{o,initial}} \times 100 \quad (5)$$

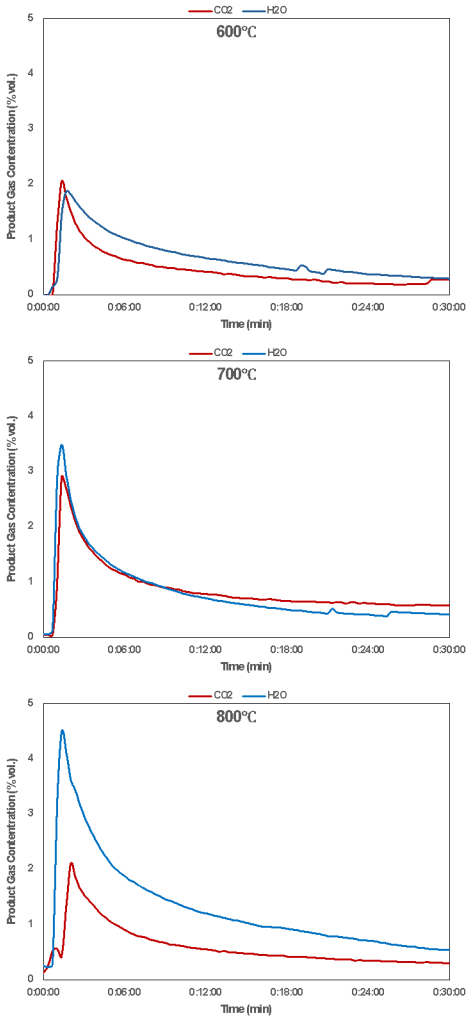


Fig. 2 Product Gas Concentration at Different Reaction Temperatures

Fig. 2는 각 조건에서 생성된 CO_2와 H_2O의 농

도 변화를 나타낸 결과이다. 각 온도 조건에서 모두, 반응 시작 직후 생성 가스의 농도가 급격한 최고점(peak)에 도달한 후 점차 감소하는 전형적인 기-고체 반응 양상을 보였다. 이는 미반응 핵 모델(Unreacted Core Model)로 설명할 수 있다. 반응 초기에는 환원 가스가 철광석 입자 표면과 쉽게 반응하여 반응성이 가장 높게 나타난다. 그러나 시간이 지나면서 입자 표면에 철 생성물 층이 형성되고, 이 층이 확산 저항으로 작용하여 환원 가스가 내부의 미반응 핵으로 침투하는 것을 방해한다. 이 확산 과정이 전체 반응의 속도를 결정하는 율속 단계(rate-determining step)가 되면서, 시간에 따라 전반적인 반응성은 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

환원제에 따른 반응성을 비교했을 때, 600°C와 700°C의 비교적 낮은 온도에서는 수소와 일산화탄소의 초기 반응성에 큰 차이가 관찰되지 않았다. 하지만 800°C 조건에서는 매우 유의미한 차이가 나타났다. 수소를 사용한 경우, 초기 반응 피크가 일산화탄소를 사용했을 때보다 약 2배 높은 반응성을 보였다. 또한, 일산화탄소의 반응성이 초기 피크 이후 급격히 감소하는 것과 달리, 800°C의 수소는 반응성이 크게 감소하지 않고 상대적으로 높은 수준을 장시간 유지하였다. 이는 800°C의 고온 환경이 수소 환원 반응을 월등히 촉진하여, 반응 전반에 걸쳐 높은 효율을 유지하게 함을 보여주는 직접적인 결과이다.

환원 반응 후 회수된 고체 시료는 X선 회절(XRD, X-ray Diffraction) 분석을 통해 최종 생성물의 결정상을 규명할 예정이다. 철광석 분말의 환원은 일반적으로 미반응 핵 모델(Unreacted Core Model)을 따르며, 초기 물질인 Hematite(Fe_2O_3)에서 중간 생성물인 Magnetite(Fe_3O_4)와 Wüstite(FeO)를 거쳐 최종적으로 Iron(Fe)으로 순차적으로 진행된다. 실제 실험 조건에서는 제한된 반응 시간으로 인해 반응이 불완전하게 종료될 수 있으며, 이 경우 목표 생성물인 금속철 외에 반응 중간체나 초기 반응물이 잔류할 수 있다. 따라서 XRD 분석은 가스 분석으로 계산된 환원율이 실제 어떤 고체 생성물의 조합으로 나타나는지 직접 확인하는 필수적인 검증 과정이다. 본 연구에서는 XRD 패턴 분석을 통해 각 실험 조건에서 생성된 최종 결정상을 확인하고 각 상(phase)의 상대적인 존재비를 정성적으로 분석하여, 환원제의 종류와 온도가 반응 완결성에 미치는 영향을 명확하게 비교 평가할 것이다.

본 연구에서는 5 vol.%의 환원 가스 농도 조건에서 얻어진 결과를 중심으로 논의를 진행하였다. 반응 속도에 미치는 농도의 영향을 보다 명확히 규명하고 반응 차수(reaction order)와 같은 핵심적인 속도론적 데이터를 확보하기 위해, 현재 10 vol.% 농도 조건에서의 추가 실험을 진행하고 있으며, 이를 종합하여 분석할 것이다.

후 기

This work was supported by the “National Research Foundation of Korea” funded by the Ministry of Science, ICT, and Future Planning (grant number 2022K1A4A8A01080312)

참고 문헌

[1] Zhang, T., Lei, C., & Zhu, Q. (2014). Reduction of fine iron ore via a two-step fluidized bed direct reduction process. Powder Technology, 254, 1 - 11.

[2] Lee, H., Yoon, S., Kim, S., Lee, Y., Shin, S., & Son, S. H. (2025). Fundamental modeling of a multistage fluidized bed reactor for hydrogen-based iron ore reduction. Chemical Engineering Journal, 511, 161755.

[3] N. Peters, R.J. Kee, "The Computation of Stretched Laminar Methane-Air Diffusion Flames Using a Reduced Four-Step Mechanism", Combust. Flame., Vol. 68, 1987, pp. 17-29.

액체금속 반응기 기반 청록수소 생산 및 온실가스 저감을 위한 동특성 해석 최적화 연구

한건우*,** · 최현록*,** · 김휘동* · 이은도* · 양원* · 박문수** · 김성일*†

Dynamic Analysis and Optimization Study of Turquoise Hydrogen Production and Greenhouse Gas Reduction Using a Liquid Metal Reactor

Geonwoo Han*,**, Hyeonrok Choi*,**, WhiDong Kim*, Uendo Lee*, Yang Won*, MoonSoo Bak**, Seongil Kim*†

기후변화와 탄소중립(Net-Zero) 기조 확산에 따라, 무탄소 연료로서 수소가 주목받고 있다[1]. 수소 생산 방식은 사용되는 자원과 공정에 따라 그레이·블루·청록·그린으로 구분된다. 현재 전 세계 수소는 대부분 증기메탄개질(Steam Methane Reforming, SMR) 기반의 그레이수소 방식으로 의존하고 있다. 따라서, 탄소 배출을 줄이기 위해서는 CCU 기술을 적용한 블루수소로의 전환이 필수적이다. 그러나, 이산화탄소 장기저장, 및 저장부지 등의 제약이 존재한다. 그린수소는 재생에너지 기반으로 CO_2를 배출하지 않지만, 재생에너지의 수급 변동으로 인한 안정적인 생산이 어렵다.

청록수소는 메탄을 고온에서 열분해해 수소와 고체 탄소를 얻는 방식이다. 식 (1)과 같이 반응 과정에서 CO_2가 발생하지 않기 때문에 탄소강도가 낮으며, 생성된 탄소가 고체 형태라 분리·처리도 용이하다. 그러나 청록수소는 1,000 ℃ 이상의 반응 분위기 형성이 필요하다[2]. 따라서, 그레이/블루수소와 같이 공정의 열원 공급과정에서 배출되는 CO_2는 발생할 수 있다. 또한 청록수소는 고체탄소가 공정 중에 반응기 내부에 지속적으로 축적되는 한계가 존재하여 이를 연속적으로 분리 및 회수하는 방안이 요구되고 있다[3]. 이와 함께, 동일한 메탄 투입량을 기준으로 할 때, 이론적 수소 수율이 그레이/블루수소 대비 상대적으로 낮다는 점도 주요 기술적 한계로 지적된다.

$$CH_4 \rightarrow C + 2H_2 \quad (\Delta H_r = +76 kJ/mol) \quad (1)$$

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 수소 생산량 100kg/day 규모의 액체금속 반응기 기반 신규 청록수소 생산 시스템을 제안하였다. 해당 시스템은 액체금속버블컬럼반응기(Molten Metal Bubble Column Reactor, MMBCR)를 사용한다. 버블 컬럼 반응기는 기체-액체 간 접촉면적이 넓고 열·질량전달이 우수한 유동 특성을 가진다[4]. 이를 통해 열전도도가 높은 액체금속의 열 활용 효율을 높일 수 있다. Figure 1은 본 연구에서 제안한 액체금속 반응기 기반 청록수소 생산 공정의 개념도이다. 공정은 부분산화(Partial oxidation, POX) - 메탄열분해(MMBCR1) - CO_2 전환(MMBCR2) 단계의 3단계로 구성된다. 각 단계 별 주요 반응은 Table 1에 정리된 바와 같으며, 공정의 열 및 물질 흐름이 연결되도록 구성하였다. POX 반응기는 메탄의 부분 산화 반응을 통해 CO, H_2를 생산하고 후속 열분해 공정에 필요한 열원을 공급하는 역할을 한다. MMBCR1 과 MMBCR2는 액체금속 반응기로 구성되어 있다. MMBCR1는 주요 수소 생산 반응기로 역할을 한다. MMBCR2는 CO_2 전환 반응기로 Mg를 MgO로 산화시키는 과정에서 POX 반응 단계에서 생성된 CO, CO_2 등을 고체 탄소로 전환하는 반응기이다.

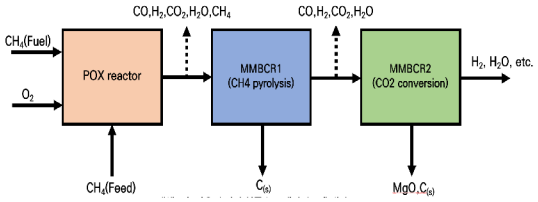


Fig. 1 액체금속 기반 청록수소 공정 개념도

공정 구성은 청록수소의 핵심 과제인 고온 열원 확보, 고체 탄소 처리, 수소 수율 향상을 동시에 고려하도록 설계하였다. 또한, 연속 운전 목적에 따라 Mode 1(수소 생산 중심)과 Mode 2(금속 재생 중심)의 교대 운전 개념을 고려하였다. Mode 1은 청록수소 생산에 초점을 맞춘 공정이며, Mode 2는 MMBCR2에서 산화반응으로 소모된 Mg의 재생에 초점을 맞춘 공정이다.

* 한국생산기술연구원 지속가능연구소 저탄소배출제어연구부문
** 성균관대학교 기계공학부
† 연락저자, ksungil85@kitech.re.kr
TEL : 041-859-8403 FAX : 041-589-8323

Table 1 Major reactions and heat effects in the POX - CH_4 pyrolysis - CO_2 conversion process

Stage	Mode	Major reaction	Heat effect
POX	1	$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	발열
	2	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	
CH_4 Pyrolysis	1	$CH_4 \rightarrow C + 2H_2$	흡열
	2		
CO_2 conversion	1	$Mg + CO_2 \rightarrow MgO + CO$ $MgO + Mg + CO \rightarrow 2MgO + C$	발열
	2	$MgO + CH_4 \rightarrow Mg + CO + 2H_2$	흡열

신규 청록수소 생산공정의 반응기 체적 설정 및 반응기 운전 및 제어 전략 등의 수립을 위하여 동특성 시뮬레이션이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 0차원(0D) in-house 코드로 동특성 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 시간에 따른 반응기 온도, 수소 생산량, 고체 탄소 축적, 산화물 재생 등과 같은 반응기 내부 특성을 핵심 지표로 설정하여 시스템 거동을 평가하였다. 분석에는 Table 2의 가정과 파라미터를 적용하였으며, Mode 2의 Mg 재생 메탄 전환율은 실험 데이터를 기반으로 설정하였다.

동적 시뮬레이션 결과를 바탕으로 메탄 투입량을 제어함으로써 POX - MMBCR1 - MMBCR2 반응 공정의 연계된 온도 변화를 확인했다. 이를 바탕으로 부분산화 반응이 시스템에 미치는 영향을 평가하고, 각 반응기의 조성변화를 확인하였다. 또한 시상수를 적용하여 반응기 질량을 산출했다. 이러한 분석을 기반으로 제안한 액체금속 기반 청록수소 공정을 동특성 해석으로 최적화하고자 하였다.

본 연구의 결과는 신규 청록수소 공정의 효율적 운전 전략 수립에 기초 자료로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 동적 모델과 유틸리티를 포함한 통합 시스템 모델링을 고도화하여 분석하고자 한다.

Table 2 Process Modeling Assumptions and Parameters

Process	Parameter	Value
All Units	Operating objective	100kg/day
Partial Oxidation Reactor	Oxidant type	O_2
	Feed temperature	400℃
	CH_4(fuel feed) conversion	100%
Molten Metal Reactor (MMBCR 1)	CH_4(thermal cracking) conversion	100%
CO_2 Conversion Reactor (MMBCR 2)	CO / CO_2 conversion	100%
	CH_4 (Mg regeneration) conversion	56 % (experimental)

참고 문헌

[1] International Energy Agency (IEA), Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, Paris: IEA, 2021.

[2] S. R. Patlolla, K. Katsu, A. Sharafian, K. Wei, O. E. Herrera, W. Mérida, “A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 181, 2023, 113323.

[3] N. Rahimi, D. Kang, J. Gelinas, A. Menon, M. J. Gordon, H. Metiu, E. W. McFarland, “Solid Carbon Production and Recovery from High Temperature Methane Pyrolysis in Bubble Columns Containing Molten Metals and Molten Salts”, Carbon, 151, 2019, pp. 181 - 191

[4] N. Kantarci, F. Borak, K.O. Ulgen, “Bubble column reactors”, Process Biochemistry, 40, 2005, pp. 2263 - 2283.

개방형 방사 구조 버너에서 홀 구조 변화가 연소 특성에 미치는 영향 분석

공준오* · 이재빈** · 김민준* · 김이준* · 최경민*** · 최민성**† · 박예슬****†

Analysis of the Effect of Hole Structure Changes on Combustion Characteristics in an Open Radial-type Burner

Junoh Kong*, Jaebin Lee**, Minjun Kim*, Leejun Kim*, Kyungmin Choi***, Minseong Choi**†, Yeseul Park****†

ABSTRACT

The effect of hole structure variations on the combustion characteristics of an open radial burner was numerically investigated using ANSYS Fluent 2024 R2 with a methane - air two-step reaction model. As the hole number decreased, the maximum temperature increased by 6.1%, and CO emissions decreased by up to 20% compared to the base case. Heat release rates showed nonlinear fluctuations within ±1%, indicating that jet interactions and mixing structures strongly influence flame behavior.

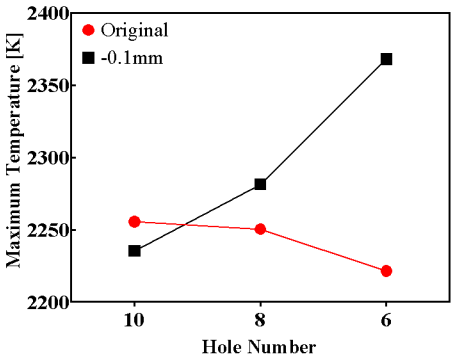
Key Words : Hole structure, Open radiant burner, Maximum temperature, Heat release rate, CO emission

최근 사회적으로 강화된 환경 규제와 에너지 효율 향상 요구에 따라, 가정용 연소기기의 연소 효율 개선 및 배출가스 저감 기술 개발이 중요해지고 있다. 개방형 방사 구조 버너의 연소 특성은 버너 헤드 홀의 형상과 배치에 따라 영향을 받으며, 특히 홀의 각도나 개수에 따라 유동의 구조가 크게 달라진다. 이에 따라 연료의 혼합 양상이 달라져 화염 구조가 변화하게 된다. 이러한 구조적 변화는 국소적인 회전 유동을 유발하여 혼합을 강화하기도 하지만, 동시에 화염 안정성에 복합적인 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이러한 홀 구조 변화가 연소 특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석하였다.

본 연구는 ANSYS Fluent 2024 R2를 사용하여 진행되었으며, Methane-Air 2-step 반응 모델을 적용하였다. Table 1과 같이 실제 상용 모델(Base Case)을 바탕으로, 내부 홀에 기하학적 각도를 부여하여 연료가 접선 방향으로 분사되도록 설계한 6개 Case를 구성하였다. 각 케이스는 홀의 개수와 너비를 조합하여 형상을 변경하였으며, 이를 통해 최고 온도, 고온 영역 체적, Heat Release Rate, 해석 도메인 내 CO 배출량, 반응대 체적을 비교·분석하였다.

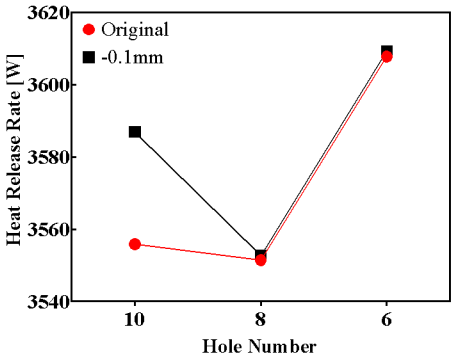
Table 1 Simulation cases

Model	Hole Number	Hole Width
Base Case	10	Original
Case 1	10	Original
Case 2	8	Original
Case 3	6	Original
Case 4	10	-0.1mm
Case 5	8	-0.1mm
Case 6	6	-0.1mm



(a)

* 국립목포대학교 기계공학과
** 강릉원주대학교 자동차공학과
*** 부산대학교 기계공학부
**** 국립목포대학교 기계·조선해양공학부
† 연락저자, yspark@mnu.ac.kr
TEL : (061)450-2412



(b)

Fig. 1 Variation of combustion characteristics with hole number and hole width: (a) Maximum Temperature, (b) Heat Release Rate

Fig. 1 (a)는 홀 개수 및 폭 변화에 따른 최대 온도(Maximum Temperature)를, (b)는 Heat Release Rate HRR의 변화를 각각 나타낸다.
해석 결과, 홀의 개수를 감소시킬수록 포트 간 간격이 넓어져 제트 화염 간 상호 간섭이 완화되고, 화염 중심부로 열이 집중되는 경향을 보였다.
그 결과, 최대 온도는 Case 6에서 2368.18 K로 Base Case(2231.3 K) 대비 약 6.1 % 상승하였다.
반면, HRR은 홀 구조 변화에 따라 Base Case 대비 ±1 % 이내의 비선형적 변동을 보였으며, 특히 Case 6 조건에서 3,609.29 W로 가장 높은 값을 나타냈다. 이는 유입 유동이 중심부로 집중되어 연소 반응대가 좁고 강하게 형성된 결과로 해석된다.
또한 홀의 개수 감소에 따라 해석 도메인 내 총 CO 배출량이 최대 20 % 감소하여 연소 완전도가 향상되는 경향을 보였고, 고온 영역 체적의 변화 역시 화염이 중심부로 집중되는 경향과 밀접하게 연관되어 있음을 확인하였다.

본 연구는 홀 구조 변화에 따른 연소 특성의 상관관계를 정량적으로 제시하였으며, 향후 고효율·저배출 가정용 버너 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문(저서)은 2025년 국립목포대학교 글로컬대학 지원에 의하여 연구되었음.

본 과제(결과물)는 교육부와 전라남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)와 연구결과입니다.

참고 문헌

[1] Ali Akbar Ahmadi, Alireza Rahbari, Mostafa Mohamadi, "Energy efficiency improvement and emission reduction potential of domestic gas burners through re-orientating the angle and position of burner holes: Experimental and numerical study", Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 32, 2022, pp. 101232.
[2] H.S. Zhen, C.W. Leung, T.T. Wong, "Improvement of domestic cooking flames by utilizing swirling flows", Fuel, Vol. 119, 2024, pp. 153-156.

0.7 ton/h 연속식 강판 소둔로의 연소/전기 가열 방식에 따른 열적 특성 분석

이후경[*,**†] · 정우남[*,***] · 이대근[*] · 이은경[*] · 고창복[*]

Comparative Thermal Analysis of a 0.7 ton/h Continuous Steel-Strip Annealing Furnace under Combustion and Electric Heating

Hookyung Lee[*,**†], Woo-Nam Jung[*,***], Dae Keun Lee[*], Eun Kyung Lee[*], Chang Bog Ko[*]

가열로를 대상으로 한 탄소배출 저감기술은 대부분 기존 시스템의 효율 향상을 통한 연료 사용량 저감이 주된 방법이었다 [1, 2]. 그리고 최근에는 기존 LNG 등 연료를 무탄소 연료인 수소, 암모니아로 대체하는 기술개발이 진행 중이다 [3]. 버너 등 요소 설계 기술은 완성된 수준이지만 지속적인 수소 연료의 대량 공급 문제와 높은 가격으로 인해 현실적으로 산업 현장에서 수소 기반 연소 시스템으로의 전환이 가능할지 의문이다. 가열로 무탄소화를 위한 또 한가지 유효한 방법은 열공급원을 전기식 발열체로 전환하는 것이다. 기존 연소 시스템의 (재생에너지를 통해 전력을 공급한다는 가정 하에) 전기화를 통해서 무탄소 시스템으로 전환할 수 있고, 기존의 연료 공급 및 배기 시스템, 유체의 유량 제어 시스템, 버너 등 부대 설비들을 완벽히 제거할 수 있는 장점을 가진다 [4]. 또한 연소 배가스가 없는 상황에서 가열로 내부의 배가스 부피를 고려할 필요가 없기 때문에, 대류 전열 효과가 무시할 만한 수준이며 그에 따라 복사 전열에 지배되는 공간의 부피를 줄여 매우 컴팩트한 가열 시스템 설계가 가능하다.

이전 연구에서는 기존 연소식 시스템의 전기화 전환 시 설비/시스템 구성 및 전열 메커니즘 변화를 정의하였다 [4]. 그리고 3-10 m/min의 느린 강판 이송 속도 조건에서 랩-스케일 전기식 가열로 내 강판의 동적 전열 특성을 실험적으로 파악하였다 [5]. 그리고 동시에 3차원 과도상태 CFD 해석 모델을 통해 수치적인 정합성을 비교하였다. 이전 연구에서 개발한 3차원 모델을 통해 발열체 간격 및 가열실 체적 등 설계 변수에 따른 전열 효율 등을 분석하였다 [6, 7]. 요소기술 면에서는 SiC 발열체의 열응력을 고온 환경에서 분석하였고 [8], 운영 중인 SiC 발열체의 파손을 대비하여 설치한 보호관의 재질에 따른 산화 특성(재료) 및 그에 따른 반사율을 분석하였다 [9].

* 한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부
** 과학기술연합대학원대학교 에너지공학과
*** 한국과학기술원 기계공학과
† 연락저자, hk.lee@kier.re.kr
TEL : (042)860-3307

이러한 일련의 일관된 근거 자료를 통해, 본 연구에서는 일반적인 용융아연도금 공정 내 연속 가열로에서 강판의 목표 출구 온도인 720-750 °C를 달성하기 위한 가열로를 설계하였다 (30 m/min 이송 속도 기준). 연속식 소둔로의 전기화 전환 가능성을 분석하기 위해, 동일한 가열로 구조에서 연소 가열 방식과 전기 가열 방식을 모두 테스트할 수 있도록 설계하였다. 이러한 접근 방법을 통해, 두 가지 가열 방식 사이의 공로 정상 상태 달성을 위한 승온 및 에너지 사용 패턴, 강판으로의 전열 특성, 설비 열효율, 환경오염물질 배출특성, 연료원단위 및 에너지원단위 등의 성능을 직접 비교할 수 있다. 본 논문에서는 전기화된 연속 강판 소둔로의 세계 최초 실증 운전을 통해 무탄소 시스템 구현이 가능하다는 점을 보고하고, 추후 스케일업 실험을 위한 계획을 제시하고자 한다.

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (RS-2023-00233397).

참고 문헌

[1] Lee, H., Seo, D. M., “Thermal and NOx Emission Characteristics of Periodic Fuel-Flow-Pulsed Combustion at a Nozzle-Mixed Burner in a Direct-Fired Furnace”, Applied Thermal Engineering, 263, 2025, 125326.

[2] Lee, H., Lee, D. K., Lee, C., Noh, D. S., “Development of High-Efficiency Continuous Reheating Furnace Design Software and Its Practical Application Case”, Transactions of Korean Society of Mechanical Engineering C, 13, 2025, 185-199.

[3] Lee, H., Lee, M. J., “Recent Advances in Ammonia Combustion Technology in Thermal Power Generation System for Carbon Emission Reduction”, Energies, 14, 2021, 5604.

[4] Yu, J., Seong, Y. H., Lee, H., “The Paradigmatic Shift in Facility Structures by Electrification of Combustion-based Continuous Steel-Strip Annealing Furnace in Continuous Galvanizing Lines”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 35, 2023, 610-624.
[5] Yu, J., Baek, K. C., Chung, J., Lee, H., “Transient Thermal Behavior of a Steel-Strip Loaded into a Continuous Annealing Furnace with SiC Electric Heaters”, Applied Thermal Engineering, 274, 2025, 126673.
[6] Choi, J., Chung, J., Lee, H., “Transient Heat Transfer Characteristics in an Electrically Heated Continuous Steel-Strip Annealing Furnace”, Journal of Mechanical Science and Technology, In Press.
[7] Choi, J., Lee, H., “Quantitative Analysis of Heat Transfer Affected by Heater Configuration and Strip Geometry in a SiC-Heated Continuous Annealing Furnace”, Thermal Science and Engineering Progress, In Press.
[8] Chun, T., Kim, S., Chung, J., Lee, H., “Numerical Study on Temperature and Thermal Stress Behaviors is Silicon Carbide Heating Elements within High-Temperature Annealing Furnaces”, Applied Thermal Engineering, 260, 2025, 125047.
[9] Choi, J., Lee, D. K., Lee, H., “Evaluation of the Influence of Oxidation Characteristics of Metal Protective Tubes for Electric Heating Elements on Reflectivity”, Case Studies in Thermal Engineering, In Press.

무탄소 연료 혼소에 따른 산업용 보일러 열 성능 평가

안종환*,** · 최현록*,** · 양 원* · 류창국** · 김성일*†

Thermal Performance Evaluation of Industrial Boilers by Carbon-Free Fuel Co-firing

Jonghwan An*,**, Hyeonrok Choi*,**, Won Yang*, Changkook Ryu**, and Seong-il Kim*†

다량의 탄소 배출로 인한 기후 변화에 대응하기 위해 전 세계 각국은 탄소 중립 실현을 목표로 다양한 탄소 배출 저감 전략을 수립·시행하고 있다. 국내의 온실가스 배출은 발전, 산업, 수송 등 여러 부문에서 발생하며, 이 중 발전 부문과 산업 부문이 전체 배출량의 상당 부분을 차지한다[1]. 산업 부문에서는 철강, 시멘트, 석유화학 등 에너지 다소비 업종이 주요 배출원이며, 고온 열원 확보를 위한 화석연료 기반 에너지 사용이 지배적이다. 특히, 산업용 보일러는 증기 및 온수 공급을 위한 핵심 설비로, 막대한 에너지 소비와 더불어 지속적인 탄소 배출원으로 작용한다. 따라서 산업용 보일러의 무탄소 연료 전환은 산업 부문 탄소 배출 저감의 관점에서 핵심적 과제로 평가될 수 있다.

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad (1)$$

$$NH_3 + \frac{3}{4}O_2 \rightarrow \frac{3}{2}H_2O + \frac{1}{2}N_2 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 볼 수 있듯이 수소와 암모니아는 연소 시 탄소를 배출하지 않는 무탄소 연료로, 기존 화석연료 의존도를 낮추며 탄소 중립을 실현하기 위한 핵심 대체 연료로 주목받고 있다. 이에 따라 수소 및 암모니아 연료 활용 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 유럽, 미국, 일본, 중국 등 주요 국가에서는 가정용·상업용 소형 보일러부터 산업용 대규모 보일러에 이르기까지 다양한 규모에서 수소 및 암모니아 혼소·전소 기술의 성능 검증과 상용화를 위한 연구가 진행되고 있다[2-4]. 이러한 국제적 흐름은 수소 전용 보일러, 도시가스와 혼소 가능한 보일러, 산업용 고출력 보일러 등 다양한 응용 분야를 포괄한다. 국내 역시 정부의 수소 경제 로드맵에 따라 수소 보급 확대와 관련 인프라 구축을 목표로, 가정용과 산업용 수소 보일러 개발 및 실증 연구를 적극적으로 추진하고 있다[5].

산업용 보일러의 기존 연료인 LNG에 수소 및 암모니아 혼소 시 배가스 조성 및 유량이 변화하며, 이는 열전달 특성에 직접적인 영향을 미친다. 기존의 보일러 시스템 대상 무탄소 연료 혼소 연구는 주로 열 손실법, 입출열법과 같은 에너지 수지 기반의 분석 방법을 적용하여 시스템 열 성능 평가를 실시하였다. 에너지 수지 기반의 분석 방법은 전체적인 에너지 흐름을 파악하는데 유용하지만, 세부적인 복사 및 대류 열전달 특성 변화를 정확히 반영하지 못하며, 연료 혼소에 따른 영향을 정량적으로 평가하기 어렵다는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 산업용 보일러를 대상으로 0차원 해석을 수행하여 열전달 특성을 정량적으로 분석하였으며, 이를 기반으로 보일러 열 성능을 평가하였다.

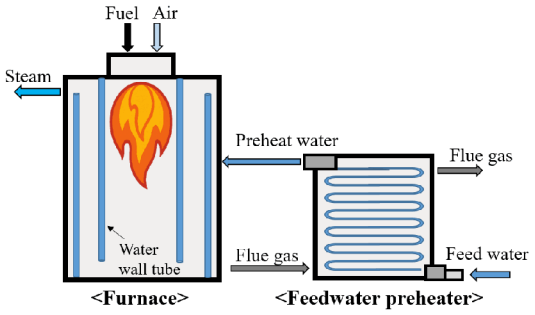


Fig. 1 Schematic configuration of a typical industrial boiler system

본 연구에서는 증기 생산량 0.5ton/hr의 산업용 관류 보일러를 대상으로, 연료를 메탄(CH_4)으로 단순화하여 공정 해석을 수행하였다. 대상 보일러는 Figure 1에 나타낸 것과 같이, 연소실과 급

* 한국생산기술연구원 지속가능연구소 저탄소배출제어연구부문
** 성균관대학교 기계공학부
† 연락저자, ksungil85@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8403 FAX : (041)-589-8323

수 예열기로 구성되며, 배가스 측과 물-증기 측의 열전달 특성을 고려해 세부 모델링하였다. 연소실은 지배적인 열전달 메커니즘에 따라 복사부와 복사·대류 혼합부로 구분된다. 복사부는 고온 화염이 벽면에 직접 노출되는 내측 수관 영역으로 복사 열전달이 지배적이며, 혼합부는 화염이 소멸된 이후 배가스의 복사와 대류가 함께 작용하는 외측 수관 영역이다. 이후 배가스는 급수 예열기로 이동하여 급수를 예열한 뒤 외부로 배출된다.

Table 1 Main operating conditions of the target industrial boiler

Component		Unit	Value
Excess air ratio		%	20
Heat input (based on LHV)		MW_{th}	0.4
Fuel	CH_4 flow rate	kg/hr	29
	Inlet Temperature	°C	25
Flue gas	Furnace outlet	°C	240
	Feedwater preheater outlet	°C	152
	Feedwater preheater Velocity	m/s	3.32
Water - steam	Flow rate	kg/hr	500
	Pressure	bar	11
	Feedwater Temperature	°C	20
	Preheat Temperature	°C	47.3
	Steam outlet Temperature	°C	183.2

보일러 성능 평가를 위한 기본 운전 조건은 Table 1에 정리하였다. 해석은 과잉공기비 20% 조건에서 수행되었으며, 연료는 상온(25°C) 투입으로 가정하였다[2]. Table 1에 정리된 바와 같이 메탄 유량은 29kg/hr로, 이에 해당하는 입열량은 약 0.4MW_{th}이다. 연소실에서 240°C로 배출된 배가스는 급수 예열기를 통과하며 152°C로 냉각되고, 이 과정에서 급수가 20°C에서 47.3°C까지 예열된 후 연소실 물-증기 측으로 공급된다. 최종적으로 급수는 공급 압력인 11bar의 포화 증기 온도인 183.2°C에 도달하여 증기로 전환된다. 혼소 해석에서는 메탄-수소 및 메탄-암모니아 혼소 조건을 고려하였으며, 부피 기준 혼합비를 활용하여 혼소율을 정의하였다. 각 조건에서 보일러의 총 입열량이 일정하게 유지되도록 혼소율에 따라 연료 투입 유량을 조정하였으며, 이를 기반으로 열 성능 평가를 수행하였다.

시스템 내 복사 열전달은 화염 온도와 배가스 온도, 화염 방사율 및 배가스 조성 변화에 따른 가스 방사율을 종합적으로 고려하여 분석하였으며, 대류 열전달은 배가스 온도와 유속, 열전도도, 점성도 등 유체 유동 특성에 따른 열전달 계수를 반영하여 평가하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 산업용 보일러 대상 무탄소 연료 혼소 및 전소 조건에서의 열전달 특성 변화를 정량적으로 분석하고, 복사 및 대류 열전달이 보일러 전체 열 성능에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 수소 혼소 시 화염 온도 상승 및 가스 방사율 변화로 인해 보일러 열 성능이 향상되는 경향을 보였으며, 암모니아 혼소 시에는 열 성능이 저하되는 결과를 확인하였다.

본 연구의 결과는 연료 종류와 혼소율에 따른 보일러 열 성능 변화를 정량적으로 제시하며, 향후 설계 및 운전 전략 수립에 유용한 기초 자료로 활용될 수 있다. 또한, 다양한 혼소 비율과 운전 조건에서의 실증 실험 및 최적화 연구를 수행하여 본 연구 결과의 신뢰성을 더욱 강화할 계획이다.

참고 문헌

[1] Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR), National Inventory Report for the Republic of Korea (1990–2022), Ministry of Environment, 2025.

[2] International Energy Agency, Ammonia technology roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizer production, 2021.

[3] Hydrogen Europe, Clean Hydrogen Monitor 2024, Hydrogen Europe, Brussels, 2024.

[4] Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Japan Hydrogen Strategy, 2023.

[5] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Hydrogen Economy Roadmap of Korea, 2019.

DC 전기장 인가 하의 단열재 화재에서 연기 제어 및 연소 지속 시간 단축에 관한 실험적 분석

김준석[*,**]. 김수현[*,**]. 김양균[****]. 박대근[*****]. Hui Yan[******]. 윤성환[**,***†]

Experimental Analysis on Fire Smoke Control and Combustion Duration Reduction in Insulation Material under Applied DC Electric Fields

Jun Seok Kim[*,**], Suhyeon Kim[*,**], Yangkyun Kim[****], Dae geun Park[*****], Hui Yan[******], Sung Hwan Yoon[**,***†]

이곳에 산업화로 인한 온실가스 배출이 증가하면서 건축물의 난방시스템에 따른 에너지 절감과 탄소 저감이 중요 과제로 대두되고 있다. 이를 위해 단열재 사용이 확대되고 있으며, 그중 Expanded Polystyrene (EPS)는 우수한 단열성능과 낮은 비용으로 널리 사용된다[1]. 그러나 EPS는 열원에 노출될 경우 낮은 연화점과 가연성 구조로 인해 착화가 용이하고 화염이 빠르게 확산되며, 연소 과정에서 인체에 유해한 CO, HCN, CO_2등 유독 가스를 다량 발생시키는 단점을 지닌다[2].

국가화재정보시스템(NFDS)에 따르면, 건축물 화재는 주로 실내에서 발생하며, 주요 사망 원인은 화염이 아닌 연기에 의한 질식으로 보고된다[3]. 이에 따라 대부분의 건축물에는 팬 또는 덕트를 이용한 전통적인 기계식 배연 시스템이 적용되고 있다. 그러나 이러한 방식은 화재 규모나 건축물 구조에 따라 plug-holing 현상이 발생하여 화재 규모가 성장하게 되는 한계가 있다[4].

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 DC 전기장을 이용한 이온풍(ionic wind)으로 화재 연기를 제어하고자 한다. 화염 내에서는 chemi-ionization 반응을 통해 전하가 생성되며, 이때 전기장을 인가하면 로렌츠 힘에 의해 전하가 가속된다. 가속된 전하는 다수의 중성 분자와 충돌하면서 운동량을 전달하고, 그 결과 체적 유동이 형성된다. 이러한 유동을 이온풍이라 한다.

이온풍을 이용하여 화재 연기 제어가 효과적으로 이루어짐을 확인하였으며, 추가적으로 연소 지속 시간 또한 단축되는 결과를 얻었다. 본 연구의 구체적인 실험 결과와 분석 내용은 구두 발표를 통해 상세히 논의하고자 한다.

* 국립한국해양대학교 기관시스템공학과
** 국립한국해양대학교 해양인공지능융합전공
*** 국립한국해양대학교 기관시스템공학부
**** 한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부문
***** 한국건설기술연구원 화재안전연구본부
****** School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology

† 연락저자, shy@kmou.ac.kr
TEL : (051)410-4261 FAX : (051)-404-3985

후 기

본 연구는 2025년도 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(KIMST)의 지원을 받아 수행되었으며(RS-2025-00256331, 선박배출온실가스(GHG) 통합관리 기술개발), 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF) 기본연구사업의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R1I1A3061305).

참고 문헌

[1] H. Anh, L. Duong, "An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials", J. Build. Eng., Vol. 44, 2021, pp. 102604.

[2] S. Vucinic, K. Hiroshi, S. Naqvi, R. Bedair, "Carbon monoxide poisoning", Toxicology Reports, 2020, pp. 169-173.

[3] National Fire Data System., https://www.nfds.go.kr. Accessed 17 Apr 2025

[4] Z. Peng, Z. Yuan, N. Yu, C. Linag, " Effect of heat release rate and exhaust vent settings on the occurrence of plug-holing during tunnel fires with two-point extraction ventilation", Tunn. Undergr. Space Tech., Vol. 106, 2020, pp. 103617.

배터리 열폭주 및 화재 확산 차단을 위한 질산리튬 기반 용융염 상변화 열 차폐재

최재연*.박민홍*.여재익*†

Next generation battery heat shield: $LiNO_3$ -based molten-salt phase change material for thermal runaway prevention

Jae-Yeon Choi*, Min-Hong Park*, and Jack J. Yoh*†

리튬이온 배터리(LIBs)는 높은 에너지 밀도를 바탕으로 전기차(EV) 등 다양한 분야에서 핵심 동력원으로 자리 잡았으나, 열폭주(Thermal Runaway, TR) 및 이로 인한 연쇄적인 열 전파(Thermal Runaway Propagation, TRP) 현상은 여전히 심각한 안전 문제로 남아있다 [1]. 배터리 열폭주는 일반적으로 고체 전해질 계면(SEI) 분해가 시작되는 80도, 자가 발열이 가속화되는 130도, 그리고 분리막이 녹아내려 내부 단락이 발생하는 190도의 주요 온도 구간을 거치며 진행된다. 따라서 130도에서 190도 사이의 온도 구간에서 효과적으로 열을 제어하는 것이 열폭주를 방지하는 핵심이다 [2].

기존의 열 관리 방안으로 사용되는 실리카 에어로젤과 같은 단열재는 열전도를 늦출 뿐, 배터리 자체의 발열을 흡수하지 못하는 한계가 있다 [3]. 파라핀 기반 상변화물질(Phase Change Material, PCM)은 잠열을 이용해 열을 흡수할 수 있지만, 대부분 130도 이하의 낮은 온도에서 녹고 열전도도가 낮으며 가연성이라는 단점을 가진다 [4]. 본 연구에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해, 비가연성이면서 높은 잠열을 가지는 질산리튬(LiNO3) 기반 용융염 PCM을 이용하여 TR 관리와 TRP 방지 두 가지 기능을 동시에 수행하는 차세대 열 차폐재를 개발하고자 하였다. 다양한 조성 탐색 및 시차 주사 열량 측정 분석(DSC)을 통해, 142도에서 용융을 시작하여 260도까지 308 J/g의 높은 잠열을 저장하는 최적화된 LiNO3-KCl 비공융 조성(LK90)을 확보하였다. 이 LK90 을 주조 틀에 넣고 굳혀 plate 형상으로 만든 뒤 스테인리스 스틸 파우치에 진공 밀봉한 PCM 열 차폐재(PCM-HS)는 동일 두께의 상용 실리카 에어로젤 시트 대비 뛰어난 열 관리 성능을 보였다.

* 서울대학교 항공우주공학과
† 연락저자, jjyoh@snu.ac.kr
TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-882-1507

최적화된 LK90 PCM의 성능을 종합적으로 검증하기 위해 세 가지 핵심적인 실험을 설계하였다. 첫째, 필름 히터를 이용한 점진적 승온 시험을 통해 열폭주와 유사한 급격한 온도 상승 조건에서 PCM-HS의 동적 열 흡수 및 차폐 성능을 에어로젤과 비교 평가하였다. 둘째, 250도 핫플레이트 시험을 통해 일정한 고온 환경에 지속적으로 노출될 때 PCM-HS가 얼마나 오랫동안 배터리 안전 온도를 유지할 수 있는지 정량적으로 측정하였다. 마지막으로, 국제 배터리 안전 규격(IEC 62133-2, UL 1642)을 참고하여 가혹 조건을 모사한 130도 오븐 시험을 90분간 진행하여, 실제 배터리 셀의 자가 발열을 억제하고 최종적으로 TR을 방지할 수 있는지를 실증적으로 검증하였다. 모든 실험에서 상용 배터리 모듈의 압착 조건을 모사하기 위해 일정한 기계적 압력을 시편에 가하였다.

필름 히터 시험 결과, PCM-HS는 에어로젤과 비교하여 히터와 맞닿은 전면부 온도를 150도 이상 현저히 낮게 유지했으며, 특히 후면부 온도가 분리막 융점 부근인 190도에 도달하는 시간을 500초 이상 효과적으로 지연시켰다. 이 과정에서 PCM-HS는 DSC 측정값과 거의 일치하는 309 J/g의 잠열을 흡수함을 실험적으로 확인하였다.

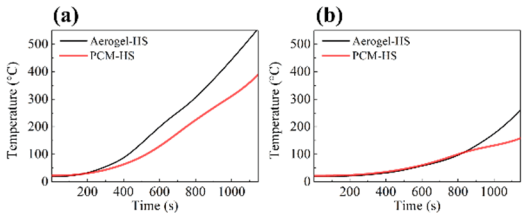


Fig. 1 필름 히터 시험에서 PCM-HS와 Aerogel-HS의 (a)전면 및 (b)후면 온도 프로파일

250도 핫플레이트 시험에서는 PCM-HS가 940초라는 긴 시간동안 보호면의 온도를 배터리 안전 임계 온도인 190도 미만으로 유지하여, 지

속적인 열 부하에 대한 높은 방어 성능을 다시 한번 입증하였다.

본 연구의 핵심적인 결과를 보여주는 130도 오븐 시험에서 두 샘플은 극명한 차이를 보였다. 에어로젤로 보호된 배터리 셀은 3623초부터 내부 자가 발열이 외부 오븐 온도를 추월하기 시작했으며, 결국 5506초에 190도를 넘어서며 폭발적인 열폭주로 이어져 셀 온도가 800도 이상으로 치솟았다. 반면, PCM-HS로 보호된 셀은 시험이 진행되는 90분 내내 셀 표면 온도를 131도 수준의 안정적인 상태로 유지하며 TR을 완벽하게 방지하였다. 이는 LK90 PCM이 142도 이상의 온도에서 잠열 흡수 메커니즘을 활성화하여 셀의 자가 발열을 효과적으로 억제하고 열적 평형 상태를 유지시켰음을 명확히 보여주는 결과이다.

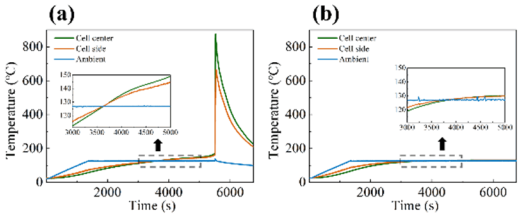


Fig. 2 130도 오븐 시험에서 (a)에어로젤과 (b)PCM-HS 적용 시 셀 온도 변화

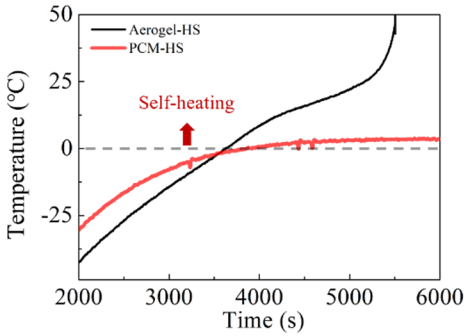


Fig. 3 130도 오븐 시험에서 셀의 자가 발열량 비교

본 연구에서 개발된 LK90 기반 PCM 열 차폐재는 130-190도의 핵심적인 배터리 안전 구간에서 잠열을 이용해 효과적으로 기능하는 단일 수동형 안전 솔루션임을 성공적으로 입증하였다. 별도의 부피 증가나 능동적 제어 없이 기존 전기차 배터리 모듈에 즉시 적용 가능하여, 차세대 고에너지 배터리 시스템의 안전성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 실용적인 방안을 제시한다. 향후 반복적인 용융-응고 사이클링 내구성, 파우치 부식 특성, 실제 cell-to-cell TRP 차단 실험 및 모듈 단위의 실증 연구를 통해 상용화 가능성을 더욱 높일 계획이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소 및 공학연구원과 협약한 과학기술정보통신부 보조금 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, J Power Sources 226 (2013) 272–288.

[2] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, X. He, Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review, Energy Storage Mater 10 (2018) 246–267.

[3] X. Yang, Y. Duan, X. Feng, T. Chen, C. Xu, X. Rui, M. Ouyang, L. Lu, X. Han, D. Ren, Z. Zhang, C. Li, S. Gao, An Experimental Study on Preventing Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Battery Module Using Aerogel and Liquid Cooling Plate Together, Fire Technol 56 (2020) 2579–2602.

[4] S. Wilke, B. Schweitzer, S. Khateeb, S. Al-Hallaj, Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study, J Power Sources 340 (2017) 51–59.

AC 전기장이 인가된 니켈크롬 와이어에 매달린 에탄올 액적의 연소 특성

김승현*. 박정**†. 정석호***. 유춘상*

Burning characteristics of ethanol droplet suspended on NiCr wire with applied AC electric field

Seung Hyun Kim*, Jeong Park**†, Suk Ho Chung ***, Chun Sang Yoo *†

탄화수소 화염에서는 이온과 전자가 다량 생성되며, 전기장이 가해질 경우 하전 입자들이 가속되어 중성 입자와의 충돌을 통해 이온풍 효과가 유발된다[1]. 이 이온풍은 화염의 크기, 형태, 확산 속도 등에 영향을 미치며, 전기선 화재 및 연료 연소 거동을 변화시키는 주요 요인으로 작용한다[2]. 특히 PE 절연 전기선에 교류 전기장이 인가되면 연료 증기 분사, 내부 순환, 전기분무, 유전영동에 의한 용융 PE 이동 등 복합적인 유체 거동이 동반되며, 이는 단순한 열전달 기반의 화염 확산 예측을 어렵게 만든다. 이러한 현상의 근본적인 이해를 위해서는 액체 연료 액적의 연소 특성과 동적 거동에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 본 연구에 앞서, n-decane 액적을 대상으로 전기장이 연소 거동에 미치는 영향을 분석한 결과, 액적 진동, 측면 확산, 화염 가장자리에서의 와류 형성, 화염 분열 등 다양한 동적 현상이 관찰된 바 있다[2]. 본 연구에서는 n-decane보다 유전율이 약 12배 높은 에탄올을 연료로 채택하고, NiCr 전선에 매달린 액적에 교류 전기장을 인가하여 연소 특성을 실험적으로 분석하였다. 전압과 주파수 조건을 변화시키며 액적 수명 및 화염의 동적 거동을 관찰하였으며, 이를 통해 연료 유전율이 전기장 하 액적 연소 거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

Figure 1에는 본 연구에서 사용한 실험장비의 개략도를 나타냈다. 실험 장치는 니켈크롬(NiCr) 전선과 지지대, 정밀 액적 생성기, 교류 전원 공급 장치, 시각화 시스템으로 구성되었다. 지름 0.5 mm, 길이 350 mm의 전선은 아세탈 수지 재질의 비전도성 지지대에 수평으로 장착되었으며, 전선 중앙에 마이크로 시린지를 이용해 액적을 위치시켰다. 액적은 구형으로 가정하여 주입된

* 울산과학기술원 기계공학과
** 부경대학교 기계공학과
*** KAUST, CCRC
† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr, csyoo@unist.ac.kr
TEL : (051)-629-6140

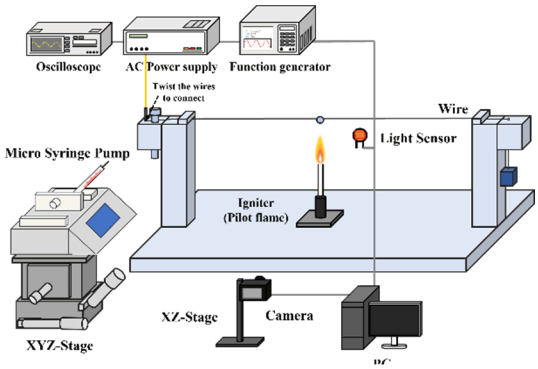


Fig. 1 Schematic of experimental

부피를 기준으로 유효 직경 1.74 mm로 환산하였다. 전선의 한쪽 끝은 고정 지지대에, 반대쪽은 스프링에 연결하여 열팽창에 따른 변형을 방지하였다. 전기장은 고전압 전원 장치를 통해 인가되었으며, 전압(V_{AC})과 주파수(f_{AC})는 각각 0–7 kV(RMS), 0–1000 Hz 범위에서 조절되었다. 단일 전극 개방 회로 구성으로 전기장은 전선으로부터 방사형으로 감쇠되며, 오실로스코프와 고전압 프로브를 통해 실시간으로 측정되었다.

액적 연소 중에는 교류 전압과 주파수의 영향으

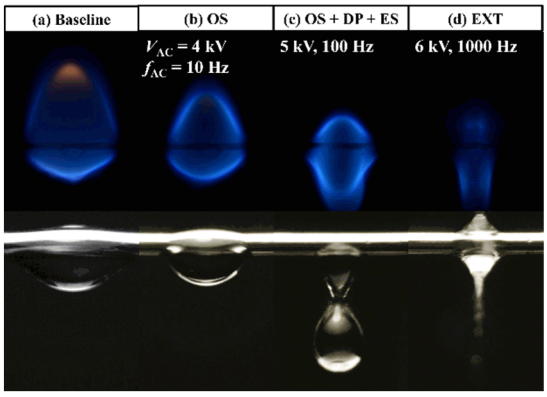


Fig. 2 Direct images of flame and droplet with applied electric filed

로 다양한 현상이 관찰되었다. 대표적인 화염 및 액적은 fig. 2에 나타나 있다. 전기장이 인가된 기준 조건(a)에서는 화염이 수직으로 길게 늘어나는 모습을 보인다. 전기장이 인가된 경우에도, V_{AC} 2 kV 이하일 때에는 화염과 액적의 거동에 눈에 띄는 변화가 관찰되지 않았다. V_{AC}가 더 증가하면 액적의 진동(OS)이 나타나며, 예를 들어 (4 kV, 10 Hz) 조건에서는 fig. 2(b)에서 그 현상이 확인된다. (5 kV, 100 Hz) 조건에서는 OS, 액적의 낙하 (DP), 전기분무 (ES) [3,4]가 혼합된 복합 모드가 관찰되었으며, (6 kV, 1000 Hz) 조건(d)에서는 액적 표면에서의 낙하 및 미세 액적의 분출로 인해 화염이 빠르게 소화되었다.

액적 및 화염의 다양한 동적 거동은 도식화하여 fig. 3에 나타내었다. 기준 조건에서는 액적 점화 이후 화염 가장자리로부터의 열전달로 인해 전선의 온도가 상승하며, 이로 인해 액적 내부로의 열 피드백이 증가한다. 이러한 열 피드백은 액적의 증발 속도를 증가시키고, 이어서 연소 속도도 증가시킨다.

에탄올은 고유 이온을 포함하지 않지만, 전기장 하에서는 전기 유도에 의해 액적 내 전화 재분포가 가능하다[1]. 에탄올은 실온에서 약 24 F/m의 높은 유전율을 가지며, 이는 전기장 하에서 상당한 분극을 유도할 수 있음을 의미한다. 이 분극은 쌍극자 정렬, 표면 전하 유도, 화염 주변 고온 영역에서의 이온화 등 메커니즘에 의해 발생된다.

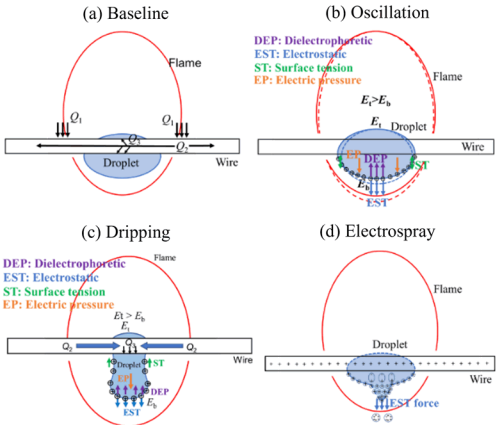


Fig. 3 Schematics of dynamic behaviors of droplet: (a) baseline, (b) OS, (c) DP, (d) ES (OS, oscillation of droplet; DP, Dripping; ES, electrospray)

한편 교류 전기장을 인가하면, 액적 내부의 유전적 응답 특성에 따라 유전 완화 주파수가 결정된다. f_{AC}가 f_{re}보다 낮을 때는 유도 쌍극자가 전기장 진동을 따라가므로 표면 전하가 축적되지 않아 정전기력이 작용하지 않는다. 반면 f_{AC}가 f_{re}를 초과하면 쌍극자의 응답이 지연되어 표면 전하가 축적되고, 이에 따른 정전기력이 발생하여 액적의 동적 거동에 영향을 미친다.

에탄올의 상대 유전율 ($\varepsilon_r = 24.0$)과 전기전도도 ($\sigma = 4.0 \times 10^{-7}$ S/m)는 n-decane ($\varepsilon_r = 24.0, \sigma = 2.0 \times 10^{-14}$ S/m)에 비해 크기 때문에, 계산된 유전 완화 주파수는 각각 약 300 Hz와 1.0×10^{-4} Hz로 나타났다. 따라서 실험에서 유전 완화 주파수보다 낮은 주파수에서는 유전영동력과 전기압력 간의 불균형이 액적의 주된 진동을 유도하였다. 특히 저주파에서는 전기장의 주기적 변화가 액적의 변형에 충분히 작용하여 큰 진폭의 수직 진동이 나타났고, 주파수가 증가함에 따라 진폭이 점차 감소하였다. 이러한 진동은 상하의 유전영동력과 하향의 전기압력 및 표면장력 사이의 주기적 힘 불균형으로 설명되며, 감쇠 강제조화 진동 형태로 기술될 수 있다.

V_{AC}와 f_{AC}가 충분히 클 경우, F_{ES}, F_{DEP}, 표면장력, 중력 사이의 불균형으로 인해 액적은 수직 방향으로 진동하게 된다. 중력과 표면장력은 F_{ES}, F_{DEP}보다 한 차원 작기 때문에 무시할 수 있으며, 이 경우 F_{ES}, F_{DEP}의 상호작용으로 인해 진동이 발생한다. 이 때 표면장력은 여전히 액적의 표면적을 최소화하며 형태를 유지하는 데 기여한다. 연소가 진행됨에 따라 표면장력은 감소하고, 진동 중 F_{ES}가 F_{DEP}를 초과하면 액적은 하방으로

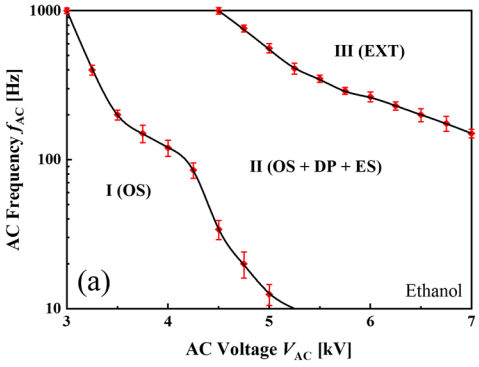


Fig. 4 Regime diagrams in VAC-fAC space for burning ethanol droplets. (OS, oscillation; DP, dripping; ES, electrospray; EXT, extinction).

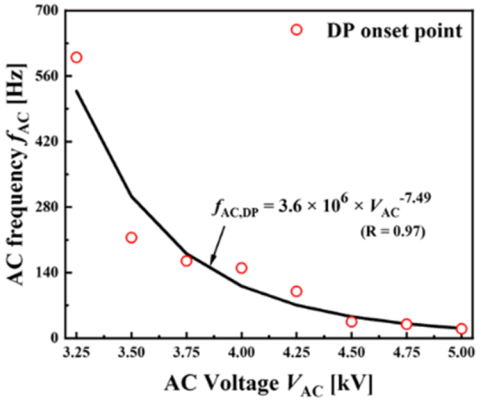


Fig. 5 Characterization of onset conditions for dripping.

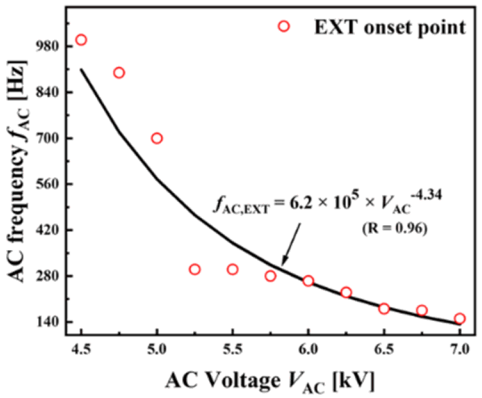


Fig. 6 Characterization of flame extinction.

늘어나 목(necking) 형성이 나타난다. 이 necking 부위가 얇아지면 액적 낙하가 시작된다. 낙하로 인해 액적 크기가 감소하면, 전하 밀도가 증가하면서 F_{ES}가 더욱 증대되어 액적 표면에 반경이 작은 테일러 콘이 형성된다. 결국, 액적 표면에서 미세 액적이 분사되는 전기분무 현상이 발생한다. 고전압 고주파 조건에서는 과도한 F_{ES}에 의해 액적 낙하가 급격히 촉진되고, 이어서 미세 액적의 빠른 분사가 발생하여 연료 질량 손실이 커짐에 따라 화염이 빠르게 소화된다.

액적 및 화염의 동적 거동을 바탕으로, V_{AC}-f_{AC} 공간에서 구간(regime) 다이어그램을 구성하였으며, 이는 fig. 4에 나타나 있다.

Regime Ⅰ과 Ⅱ, 그리고 Ⅲ의 경계는 V_{AC}가 증가함에 따라 f_{AC}가 감소하는 경향을 나타낸다. 특히, 액적 낙하(DP)는 Regime Ⅰ과 Ⅱ를 구분하는 데 중요한 역할을 한다. 중력 및 표면장력의 영향을 무시할 경우, 액적은 F_{ES}와 F_{DEP} 사이의 상호작용에 의해 지속적으로 진동하며, 이 때 액적의 상하단 사이 거리 h_b는 일정하게 유지된다. 이 때 액적 진동 진폭 A은 다음의 함수 형태를 따른다: $A = C_1 V_{AC}^m f_{AC}^n + C_2$

이때 $A \approx h_b$ 로 가정하면, DP 발생 조건은 $V_{AC}^m f_{AC}^n \approx contant$로 표현되며, 이를 변형하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다:$f_{AC,DP} = C/V_{AC}^p$

여기서 p는 상수이다. Fig. 5에 나타난 결과는 이를 잘 따르며, 최적 적합 상수는 $C = 3.6 \times 10^6$, $p = 7.49$, 결정계수 $R = 0.97$이다.

화염 소화는 비교적 높은 전압과 주파수 조건에서 관찰되며, 소화 경계는 전압이 증가할수록 더 낮은 주파수 방향으로 이동한다. 높은 V_{AC} 및 f_{AC} 조건에서는, 낙하(DP) 및 그 이후 전기분무(ES)에 의한 연료 질량 손실이 커지면서 화염이 소화된다. 이와 같은 소화 발생 조건 역시 동일한 형태의 함수식으로 표현할 수 있다: $f_{AC,EXT} = C/V_{EXT}^p$

Fig. 6에 나타난 결과는 이를 잘 설명하며, 최적 적합 상수는 $C = 6.2 \times 10^5$, $p = 4.34$, 결정계수 $R = 0.96$이다.

후 기

This research was supported by Balanced Academic Development Project in National Research Foundation of Korea (RS-2023-00241310617820643401 03).

참고 문헌

[1] J. Lawton, F.J. Weinberg, Electric aspect of combustion, Clarendon Press, Oxford (1969).
[2] E. Sher, G. Pinhasi, A. Pokryvailo, R. Bar-On, Extinction of pool flames by means of a DC electric field, Combust. Flame 94 (1993) 244-252.
[3] Kim, S. H., Park, J., Chung, S. H., & Yoo, C. S. (2025). Dynamic behaviors of burning droplet suspended on NiCr-wire with applied AC electric field. Combustion and Flame, 274, 114024.
[4] L. Rayleigh, On the equilibrium of liquid conducting 105 masses charged with electricity, Phil. Mag. 14(87) 106 (1882) 184-186.
[5] A. Gomez, K. Tang, Charge and fission of droplets in electrostatic sprays, Phys. Fluid 6(1) (1994) 404-414.

정립 및 도립 조건에서 18650 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘 비교 실험

성승헌[*,**].박주원[*,**].박대근[****].윤성환[**,***†]

Comparison Experiment of Fire Occurrence Mechanisms of 18650 Lithium-ion Battery under Upright and Inverted Conditions

Seunghun Seong[*,**], Juwon Park[*,**], Dae geun Park[****], Sung Hwan Yoon[**,***†]

지속 가능한 에너지 전환이 확산되는 가운데, 높은 에너지밀도와 우수한 저장효율을 지닌 리튬이온전지(18650)의 활용은 ESS와 전기자동차(EV)를 중심으로 빠르게 증대되고 있다[1].

그러나 수요 확대에 따른 운용 환경의 다양화와 대용량 집적은 열폭주에 기인한 화재 위험을 동반한다. 한편 실제 체계에서는 셀 패키징의 설계와 열관리 방안, CID의 배치 및 배출 경로, 그리고 가열·변형 등에 의해 유발될 수 있는 ISC의 발생 가능성 등 구조적 요인이 맞물려 화재위험의 양상을 좌우할 수 있다[2,3].

또한 현장에서는 동일 전지가 수평·수직 적층이나 상·하(단자 상·하) 배치 등 상이한 설치 방향으로 운용되는 사례가 보고되고 있어, 이에 대한 운용 맥락 기반의 비교 자료 축적이 요구된다. 그럼에도 실제 적층 환경을 모사한 정량적 근거는 아직 제한적이다.

본 연구는 외부 가열 조건에서 정립 및 도립 설치 방향의 18650 전지를 동일한 시험 절차로 다루고, 전압 변화·부분 회복 및 전류 변동 등 ISC에 기인할 수 있는 징후에 대한 전기적 응답, CID / 벤팅 디스크 작동과 같은 관측 지표를 비교함으로써 화재 발생 기전 해석에 필요한 실험적 근거를 제시한다..

후 기

본 연구는 2025년도 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(KIMST)의 지원을 받아 수행되었으며(RS-2025-00256331, 선박배출온실가스(GHG) 통합관리 기술개발), 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF) 기본연구사업의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R1I1A3061305).
.

참고 문헌

[1] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review", Energy Storage Material, Vol. 10, 2018, pp. 246-267.
[2] H. Chen, B. Gulsoy, A. Barai, P. Nakhanivej, M.J. Loveridge, J.Marco, "Experimental and numerical study of internal pressure of lithium-ion batteries under overheating", Journal of Energy Storage, Vol. 116, 2025, pp. 116066.
[3] D. Ren, X. Feng, L. Liu, H. Hsu, L. Lu, L. Wang, X. He, M. Ouyang, "Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition", Energy Storage Materials, 2021, pp. 563-573.

* 국립한국해양대학교 기관시스템공학과
** 국립한국해양대학교 해양인공지능융합전공
*** 국립한국해양대학교 기관시스템공학부
**** 한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부문

† 연락저자, shy@kmou.ac.kr
TEL : (051)410-4261 FAX : (051)-404-3985

실 엔진 형상의 Can-annular 가스터빈에서 연소기 출구 음향 경계조건 도출을 통한 음향장 모델링

정다빈* · 이형주** · 김대식*†

Acoustic Field Modeling by Deriving Combustor-Exit Acoustic Boundary Conditions in a Can-Annular Gas Turbine with Real-Engine Geometry

Dabin Jung*, Hyungju Lee*, Daesik Kim*†

ABSTRACT

Combustion instability arises when pressure and heat-release oscillations are in phase, making acoustic boundary conditions pivotal for mode shape and growth. Industrial gas turbines employ can-annular combustors with cross-talk. While many studies use idealized inlet conditions, recent work indicates operating-point- and frequency-dependent impedance. Here, numerically derived combustor-exit acoustic conditions are applied to an engine-representative can-annular system, and a 3-D Helmholtz finite-element solver compares resonance modes under theoretical versus frequency-dependent boundaries.

Key Words : Combustion instability, Acoustic boundary conditions, Can-annular system, 3D FEM

가스터빈에서 중요한 문제중의 하나인 연소 불안정은 연소실 내부의 압력 섭동과 열 방출 섭동이 in-phase 하여 발생하는 현상이다. 연소 불안정은 가스터빈 엔진의 구조적 손상, 효율 저하, 운전 범위 제한 등의 문제를 유발할 수 있다. 이러한 연소 불안정을 예측하고 제어하기 위한 핵심 파라미터인 음향 경계조건은 연소 불안정의 모드와 성장률을 결정하는 중요한 변수이다. 음향 경계조건으로 인해 연소 불안정 모드와 성장률은 큰 영향을 받기에 정확한 경계조건을 도출할 필요가 있다[1,2].

실제 발전용 가스터빈 시스템은 대부분 Fig. 1과 같은 Can-annular 형태의 연소 시스템을 채택한다. Can-annular 시스템은 다수의 캔이 배열되어 있고, 캔 연소기를 구조, 음향적으로 결합하는 Cross-talk 영역이 존재한다. 기존 연구에서는 Can-annular 시스템의 연소불안정을 해석하기 위해 터빈 입구 경계조건을 닫힘, 초킹등과 같은 이론적인 경계조건을 적용한다[3]. 이는 터빈 입구 가이드 베인에서 초킹이 되는 것으로 가정하기 때문이다. 하지만 최근 연구에서 수치해석적으로 도출한 터빈 입구 음향 경계조건은 운전점과 주파수에 의존하는 임피던스로 나타나는 추세다[4].

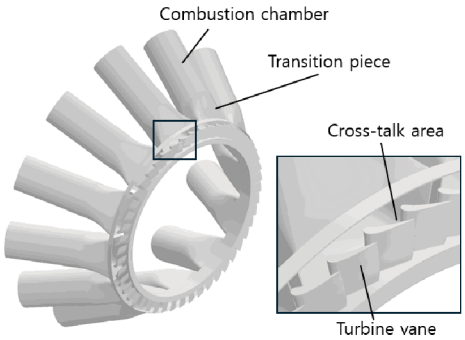


Fig. 1 Can-annular combustion system with turbine inlet guide vane

따라서 본 연구에서는 Can-annular 시스템의 출구 경계조건으로 선행 연구에서 도출한 음향 경계조건을 적용하여 음향 해석을 수행하였다. 해석을 위해 헬름홀츠 솔버 기반의 3차원 유한요소법을 이용 하였으며, 이론적인 경계조건과 주파수 의존 경계조건에서의 실규모 Can-annular 시스템의 공진 모드 특성을 각각 분석하였다.

* 강릉원주대학교 기계공학과
† 연락저자, dkim@gwnu.ac.kr
TEL : (033)760-8728

후 기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00449309, 중형급 유연 발전용 수소 전소 가스터빈 기반 발전시스템 실증, 기여율 100%)

참고 문헌

[1] W. Lang, T. Poinsot, S. Candel, "Active control of combustion instability", Combust. Flame, Vol. 70, 1987, pp. 281 - 289.
[2] N. Lamarque, T. Poinsot, "Boundary conditions for acoustic eigenmode computations in gas turbine combustion chambers", AIAA J., Vol. 46, 2008, pp. 2282 - 2292.
[3] A. Orchini, T. Pedergnana, P. E. Buschmann, J. P. Moeck, N. Noiray, "Reduced-order modelling of thermoacoustic instabilities in can-annular combustors", J. Sound Vib., Vol. 526, 2022.
[4] J. Brind, "Acoustic Boundary Conditions for Can-Annular Combustors", Int. J. Turbomach. Propuls. Power, Vol. 8, 2023.

화염의 구조적 특성을 고려한 네트워크 모델 개선 및 검증

김주원* · 국승민* · 이민우*†

Improvement and Validation of a Network Model Considering the Structural Characteristics of Flames

Juwon Kim*, Seungmin Guk*, Minwoo Lee*†

ABSTRACT

Thermoacoustic instability in practical combustion systems arises from the interaction between acoustic pressure fluctuations and unsteady heat release, potentially leading to severe performance degradation and structural damage. While low-order thermoacoustic network modeling offers high computational efficiency for instability prediction, most conventional models rely on the assumption of acoustically compact flames, which becomes invalid for long flames comparable to the acoustic wavelength. To address this limitation, this study proposes an improved multi-zone thermoacoustic network model that partitions the domain into unburned, flame, and burned zones, enabling the structural and thermal characteristics of long flames to be captured more accurately. We validate the model using three-dimensional simulations to extract local flame dynamics. The results show that the proposed approach reproduces the thermoacoustic response more effectively than the compact-flame assumption, demonstrating its potential as a practical tool for predicting and mitigating thermoacoustic instability in realistic combustion systems.

Key Words : Thermoacoustic Network Model, Combustion Instability, Flame Length

가스터빈과 등의 연속 연소 시스템에서는 시스템 내 음향 압력 섭동과 화염의 열 방출률 섭동 간의 상호작용으로 인해 열음향 불안정(thermoacoustic instability)이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 성능 저하뿐만 아니라 심각한 구조적 손상 및 파괴로 이어질 수 있으므로, 사전 예측과 회피가 매우 중요하다[1]. 이를 위해 실험적 진단 기법과 더불어 수치적 진단 기법이 활발히 활용되고 있으며, 대표적으로 URANS 및 LES 기반의 3차원 난류 연소 해석과 저차원 해석(low-order modeling) 기법이 있다. 이 중 저차원 해석 기법은 계산 비용과 시간이 상대적으로 적게 소요되기 때문에 실무적인 예측 도구로 많은 주목을 받고 있다.

저차원 해석 기법 중 하나인 열음향 네트워크 모델(Thermoacoustic Network Model)은 복잡한 연소 시스템을 단순화된 음향 요소로 분할하고, 각 요소를 전달 행렬(Transfer Matrix)로 표현하여 전체 시스템의 음향 응답을 해석하는 방식이다. 요소 간의 연결은 경계 조건과 점프 조건(Jump Condition)을 통해 구현되며, 화염은 화염 전달 함수(Flame Transfer Function, FTF) 또는 화염 묘사 함수(Flame Describing Function, FDF)로 모델링된다. 이 모델은 폐루프 형태로 시스템을 구성하여 고유진동수와 성장률을 계산함으로써 열음향적 특성을 평가한다[2].

그러나 대부분의 기존 네트워크 모델은 화염의 길이가 음향파의 파장에 비해 충분히 짧다는 가정(acoustically compact flame)에 의존한다. 실제 화염 길이가 파장과 유사해지는 경우 이러한 가정은 더 이상 유효하지 않으며, 화염 구조 및 열적 특성이 열음향 응답에 미치는 영향을 충분히 반영하지 못하는 한계가 존재한다.

이러한 한계를 극복하기 위해 일부 연구에서는 화염을 다수의 구간으로 분할하여 각 위치의 FDF를 LES로 추출하고 네트워크 모델에 적용하는 방식을 시도하였다. 예를 들어, Li et al.[3]은 약 1 m 길이의 예혼합 화염에 대해 다중 분할 기법을 적용하여 열음향 특성을 분석하였다. 그러나 이와 같은 다중 분할 접근은 계산 복잡도를 증가시킬 뿐만 아니라, 화염 길이와 열음향 특성

* 국립한밭대학교 기계공학과
† 연락저자, mwlee@hanbat.ac.kr
TEL : (042)821-1158 FAX : (042)-821-1587

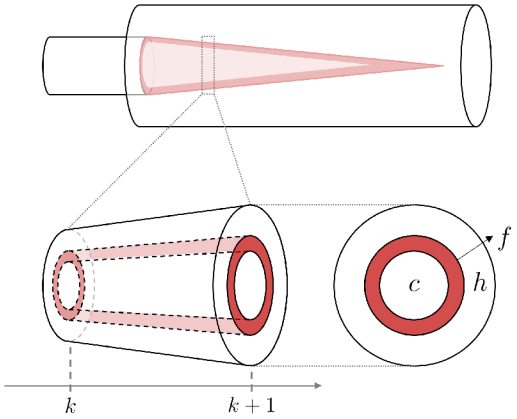


Fig. 1 Schematic diagram of a multi-zone (unburned - flame - burned) network modeling approach

간의 정량적 상관성에 대한 이해는 아직 충분하지 않은 상황이다.

이에 본 연구에서는 기존 네트워크 모델링 기법의 한계를 보완하고 화염 길이와 구조적 특성이 열음향 거동에 미치는 영향을 정량적으로 반영할 수 있는 개선된 다중 분할(multi-zone) 열음향 네트워크 모델을 제안한다. 제안된 모델은 해석 영역을 연소 전 영역(unburned), 화염 영역(flame), 연소 후 영역(burned)의 세 구간으로 분할하고(Fig. 1), 각 영역에 대해 오일러 보존 방정식을 적용하고자 하였다.

$$\rho_{k+1}^{c}u_{k+1}^{c}A_{k+1}^{c}+\rho_{k+1}^{f}u_{k+1}^{f}A_{k+1}^{f}+\rho_{k+1}^{h}u_{k+1}^{h}A_{k+1}^{h} = \rho_{k}^{c}u_{k}^{c}A_{k}^{c}+\rho_{k}^{f}u_{k}^{f}A_{k}^{f}+\rho_{k}^{h}u_{k}^{h}A_{k}^{h} \quad (1)$$

$$(\rho_{k+1}^{c}{u_{k+1}^{c}}^{2}+p_{k+1}^{c})A_{k+1}^{c}+(\rho_{k+1}^{f}{u_{k+1}^{f}}^{2}+p_{k+1}^{f})A_{k+1}^{f} +(\rho_{k+1}^{h}{u_{k+1}^{h}}^{2}+p_{k+1}^{c})A_{k+1}^{h} = (\rho_{k}^{c}u_{k}^{c^2}+\frac{A_{k+1}}{A_k}p_{k}^{c})A_{k}^{c}+(\rho_{k}^{f}u_{k}^{f^2}+\frac{A_{k+1}}{A_k}p_{k}^{f})A_{k}^{f} +(\rho_{k}^{h}u_{k}^{h^2}+\frac{A_{k+1}}{A_k}p_{k}^{c})A_{k}^{h} \quad (2)$$

$$\rho_{k+1}^{c}u_{k+1}^{c}H_{k+1}^{c}A_{k+1}^{c}+\rho_{k+1}^{f}u_{k+1}^{f}H_{k+1}^{f}A_{k+1}^{f} +\rho_{k+1}^{h}u_{k+1}^{h}H_{k+1}^{h}A_{k+1}^{h} = \rho_{k}^{c}u_{k}^{c}H_{k}^{c}A_{k}^{c}+\rho_{k}^{f}u_{k}^{f}H_{k}^{f}A_{k}^{f}+\rho_{k}^{h}u_{k}^{h}H_{k}^{h}A_{k}^{h} \quad (3)$$

여기서 ρ, u, A, H는 각각 밀도, 속도, 단면적, 엔탈피이며, 상첨자는 각 분할 영역의 물성치를 의미한다.

모델의 유효성을 검증하기 위해 ANSYS Fluent 2025 R1을 이용하여 암모니아 화염을포함하는 모델 연소기의 3차원 연소 해석을 수행하고, 각 분할 위치에서의 FDF를 추출하여 개선된 네트워크 모델의 입력값으로 활용하고자 하였다. 이후 COMSOL Multiphysics를 통해 반응 유동에 대한 3차원 열음향 해석을 수행하고 결과를 비교하였다. 분석 결과, 기존의 compact flame 가정에 기반한 단일 구간 모델은 실제 화염의 열음향 응답 특성을 충분히 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 반면, 제안된 다중 분할 접근법은 화염 길이에 따른 공간적 변화를 효과적으로 반영하여 실제 시스템의 열음향 거동을 보다 정확하게 모사할 수 있음을 확인하였다. 특히, 화염의 구조적 특성과 음향파의 상호작용이 고유진동수 및 성장률에 미치는 영향이 드러났다.

본 연구에서는 화염 길이와 열음향 특성 간의 상관성을 반영할 수 있는 개선된 다중 분할 네트워크 모델을 제안하고, LES 및 3차원 열음향 해석을 통해 그 유효성을 검증하였다. 이 결과는 기존 저차원 모델의 한계를 보완하고, 연소 시스템의 실질적 설계 및 불안정 예측에 유용한 방법론으로 활용될 수 있음을 보여준다[4].

참고 문헌

[1] S. Guk, S. Seo, M. Lee, An image-based spatiotemporal approach for detecting coherence resonance in annular model gas-turbine combustor, Phys. Fluids, Vol. 36, 2024, p. 054121.

[2] S. Guk, J. Lee, J. Kim, M. Lee, “Advances and challenges in thermoacoustic network modeling for hydrogen and ammonia combustors,” Energies, Vol. 18, No. 2, 2025, p. 346.

[3] J. Li, Y. Xia, A.S. Morgans, X. Han, “Numerical prediction of combustion instability limit cycle oscillations for a combustor with a long flame,” Combust. Flame., Vol. 185, 2017, pp. 28-43.

[4] Kim, J., Guk, S. Lee, M., “Numerical Study of Flame Length Effects on Low-Order Thermoacoustic Models,” J. Korean Soc. Combust., Vol. 30, No. 3, 2025, pp. 26-33.

제어시스템 접근법 기반 가스터빈 연소기의 시간영역 열음향 모델링

정준우* · 윤명곤* · 김대식*†

Time-Domain Thermoacoustic Modeling of Gas Turbines Combustors Based on Control System Approach

Junwoo Jung*, Myunggon Yoon* and Daesik Kim*†

가스터빈 연소기의 열음향 모델링은 광범위하게 연구되고 연소불안정 분석에 활용되어 왔으나, 대부분의 연구는 정상 상태의 안정한 운전 조건에 초점을 맞추고 있다. 하지만 현대 가스터빈은 신재생에너지 비중이 확대되면서 급속한 기동 및 정지뿐만 아니라 급격한 출력 변화가 요구된다. 이러한 과도 운전 구간에서는 연료-공기 혼합기 유동 및 화염 동특성이 변화하며, 이로 인해 연소불안정 특성 또한 달라질 수 있다[1]. 이에 따라 운전 조건이 변화하는 과도 구간에 대한 연소불안정 특성 파악의 필요성이 증대하고 있다. 본 연구에서는 과도 조건 해석에 앞서 제어시스템 접근법을 활용한 시간영역 열음향 모델링 방법을 제시하고, 화염전달함수(flame transfer function, FTF)의 주요 인자 변화에 따른 영향을 분석하고자 한다.

시간영역 열음향 모델은 제어시스템 이론을 기반으로 구성되며, 음향 전달함수(acoustic transfer function, ATF)와 FTF가 피드백을 통해 상호작용하는 폐루프 시스템으로 표현된다[2]. 본 연구에서는 Simulink를 활용하여 이를 시간영역 시스템으로 모델링하였다. ATF는 화염의 열방출 섭동을 입력으로, 노즐 내 속도 섭동을 출력으로 가지며, FTF는 노즐 내 속도 섭동을 입력으로, 화염의 열방출 섭동으로 구성된다. FTF는 기존 연구에서 널리 사용되는 $n-\tau$ 모델을 적용하였으며, limit cycle oscillation과 같은 비선형 효과를 모사하기 위해 saturation module을 FTF 출력단에 추가하여 일정 진폭 이상에서 포화되도록 설정하였다. 또한 실제 실험에서 동압 센서를 통해 측정되는 데이터와의 비교를 위해, 노즐 내 속도 섭동을 특정 위치의 동압 섭동으로 변환하는 모듈을 모델에 포함하였다.

본 연구의 시간영역 모델링은 운전 조건 변화 중 연소불안정 해석을 위한 기초를 제공하며, 전통적인 정상 상태 접근법을 넘어 열음향 해석을 확장한다. 이는 가스터빈 연소기의 운전 천이 중 발생하는 연소불안정 현상을 예측하고 분석할 수 있는 방법론을 제시한다.

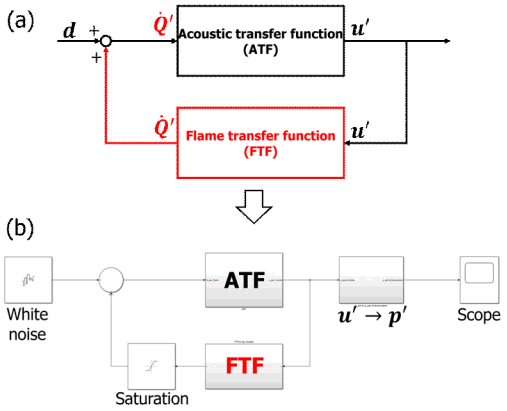


Fig. 1 Time-domain thermoacoustic modeling: (a) closed-loop feedback system, (b) Simulink implementation.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다(No. 2023-00270080 & No. 2025-02662968).

참고 문헌

[1] W. Culler, X. Chen, J. Samarasinghe, S. Peluso, D. Santavicca, J. O'Connor, "The effect of variable fuel staging transients on self-secited instabilities in a multiple-nozzle combustor", Combust. Flame, Vol. 194, 2018, pp. 472-484.

[2] M. Yoon, D. Kim, "Ascoutic transfer function of a combustion system with premixing chamber", J. Mech. Sci. Tech., Vol. 31, No. 12, 2017, pp. 6069-6076.

* 강릉원주대학교 기계공학과
† 연락저자, dkim@gwnu.ac.kr
TEL : (033)760-8728 FAX : (033)-640-3025

화염면 감쇠 영역에서 조화 진동 V-화염의 운동학 모델링

김강환*, 신동혁*†

Kinematic Modeling of Harmonically Oscillating Premixed V-Flames in Decaying Region

Kanghwan Kim* and Dong-hyuk Shin*†

ABSTRACT

The G-equation provides a computationally efficient approach for predicting flame dynamics, capturing essential unsteady features without incurring the high computational expense associated with detailed simulations. However, its practical application is often constrained by uncertainties in selecting the appropriate velocity field, particularly when attempting to represent realistic flow conditions along the flame surface accurately. To address this limitation, the present study introduces a novel velocity modeling framework that leverages instantaneous flame-structure data obtained from Direct Numerical Simulations (DNS) conducted using the PeleLM code. The proposed model specifically focuses on the flame wrinkle decay region. When integrated into the G-equation formulation, the model successfully reproduces flame-front dynamics across multiple perturbation intensities. The resulting integrated heat-release-rate response exhibits strong agreement with DNS results, accurately capturing both the amplitude and phase over a broad range of perturbation conditions within the wrinkle decay regime.

Key Words : G-equation, Direct numerical simulation, Flame kinematics

화염묘사함수(Flame Describing Function, FDF)는 연소 불안정의 한계 사이클을 분석하는 핵심 도구이나, 기존에는 실험 또는 고비용의 고충실도 비정상 해석에 의존하는 한계가 있었다. G-방정식(G-equation)은 FDF의 축소 차수 모델(reduced-order model)로, 화염면의 운동학 분석을 통해 화염의 응답을 계산하는 기법이다. 이번 연구에서는 기존 G-방정식의 속도 입력 모호성을 해소하여 보다 경제적으로 화염의 응답을 예측할 수 있는 모델링 기법을 제시한다. 직접수치해법(Direct Numerical Simulation, DNS)으로부터 얻은 순간 화염 구조를 활용하여 화염면 수직 방향 유동에 대한 모델을 도출하고, 조화가진 예혼합 V-화염의 화염면 링클(wrinkle) 감쇠 영역에서 전면 운동 및 열방출 응답 예측에 적용하였다.

대상 유동은 당량비 0.7의 메탄/공기 예혼합 V-화염이며, 2차원 DNS로부터 사전(*a priori*) 분석을 수행한 후, 도출한 모델을 G-방정식의 단순화 버전인 ξ-방정식에 결합해 사후(*a posteriori*) 검증을 진행하였다. 가진 조건은 주파수 f=100–700 Hz(100 Hz 간격), 진폭 ε=0.2–0.6 mm(0.2 mm 간격)로 총 21가지이다. 평균 V-화염 각도에 맞추어 화염면을 18° 좌표변환 시켜 화염면을 특정 축에 일가함수(single-valued function)형태가 되도록 하였다. 화염 전면은 T=1180 K 등온선으로 정의하였다. 좌표 변환된 화염 형상 및 화염면 위 좌표계의 방향벡터는 Fig. 1에 나타나 있다.

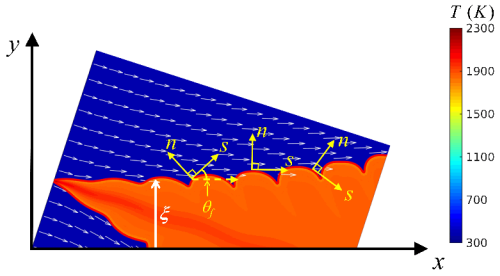


Fig. 1 Schematic of the extracted flame front in the coordinate-transformed and curvilinear coordinate systems.

링클 성장부의 복잡한 거동을 배제하고 모델의 보편성을 확보하기 위해 분석 구간은 주름 감쇠가 시작되는 위치 이후인 x/λ=4.5–9로 한정하였다.

* 한국과학기술원 항공우주공학과
† 연락저자, donghyuk-shin@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3772

유동 모델은 화염 국소 기울기와 국소 화염면에 수직한 방향의 속도 상관관계로부터 도출되었다. Fig. 2은 화염면 수직 유속 u_n과 화염면 국소 각도 $\sin\theta_f$의 상관관계를 나타낸 그래프로, 두 변수 사이에 선형적 상관관계가 존재함을 확인하였다.

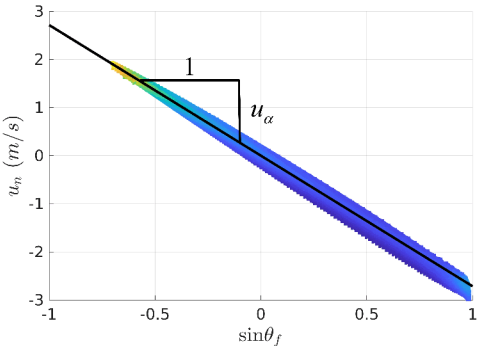


Fig. 2 Correlation between u_n and $\sin\theta_f$ at x/λ = 4.5-9 for f = 300 Hz and ε = 0.6 mm. color of each point indicates the point density, with blue representing lower density and yellow representing higher density.

유속과 화염각도 사이의 상관관계를 최소제곱 회귀(least-squares regression)을 통해 선형으로 모델링하였다. 선형 모델이므로, 단일 모델 계수 u_α를 도입하여, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다:

$$u_n = u_\alpha \sin\theta_f \ . \tag{1.1}$$

본 연구에서는 화염 전파와 열 방출 계산에 각각 다른 화염속도의 개념을 도입하였다. 화염면의 운동학 예측을 위한 화염변위속도(flame displacement speed, $S_{L,D}$)와 화염의 열 방출 계산을 위한 화염소모속도(flame consumption speed, $S_{L,C}$)이다. Markstein은 화염속도가 화염면의 형상의 변화에 대해 선형적으로 변화하는 현상을 보고하였으며, 후에 화염 스트레치 또는 곡률에 대한 화염속도의 변화 민감도는 Markstein length로 정립되었다 [1]. Figure 3은 화염변위속도와 화염소모속도가 곡률과 이루는 상관관계를 나타낸다. 유속 모델과 마찬가지로, 두 화염속도 모두 곡률 κ와 선형함수로 각각 모델링하였다. 각 상관관계를 최소제곱회귀로 나타냈을 때, 회귀선의 기울기가 Markstein length에 해당된다. Markstein length는 변위속도에 대해 σ_D=0.320 mm, 소모속도에 대해 σ_C=0.035 mm로, 두 속도의 곡률 민감도가 상이함을 보여준다. 각각 화염속도는 화염 곡률과 Markstein length로 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} S_{L,C} &= S_{L,0}\left(1-\sigma_C\cdot\kappa\right) \\ S_{L,D} &= S_{L,0}\left(1-\sigma_D\cdot\kappa\right) \end{aligned} \ . \tag{1.2}$$

곡률에 대한 화염변위속도와 소모속도의 민감도가 다르게 나타나는 현상은 다른 선행연구로부터 보고된 바 있다 [2, 3].

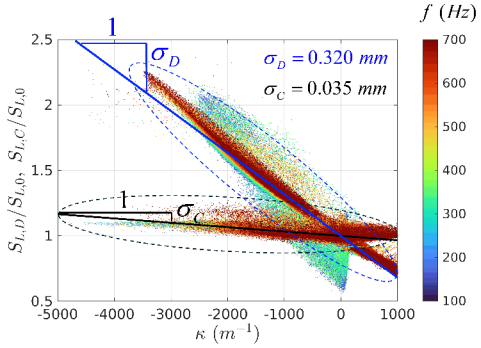


Fig. 3 Scatter plot of displacement speed ($S_{L,D}$) and consumption speed ($S_{L,C}$) versus flame curvature. The red and orange lines illustrate least-squares regressions of the correlations for $S_{L,D}$ and $S_{L,C}$, respectively.

식 (1.1)-(1.3)에서 정립된 유속과 화염속도 모델링을 ξ-방정식에 결합하여, 화염면 응답을 재생산하였다. 전체 모델링 프레임워크는 Fig. 4에 나타나 있다.

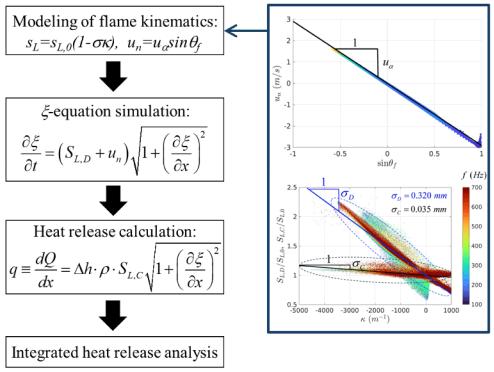


Fig. 4 Schematic of the modeling framework

도출된 모델을 ξ-방정식에 결합하여 감쇠 영역에서의 전면 위치, 법선 속도, 화염속도, 통합 열 방출 응답을 예측하였다. Figure 5는 DNS데이터와 ξ-방정식 모델링을 통해 계산된 데이터를 비교한 그림이다. 500–700 Hz의 고주파 조건에서 DNS와의 정량적 일치가 매우 우수했다. 특히 전면 형상과 법선 속도의 공간 분포, 그리고 화염변위속도 및 소모속도의 주요 피크 위치가 잘 재현되었

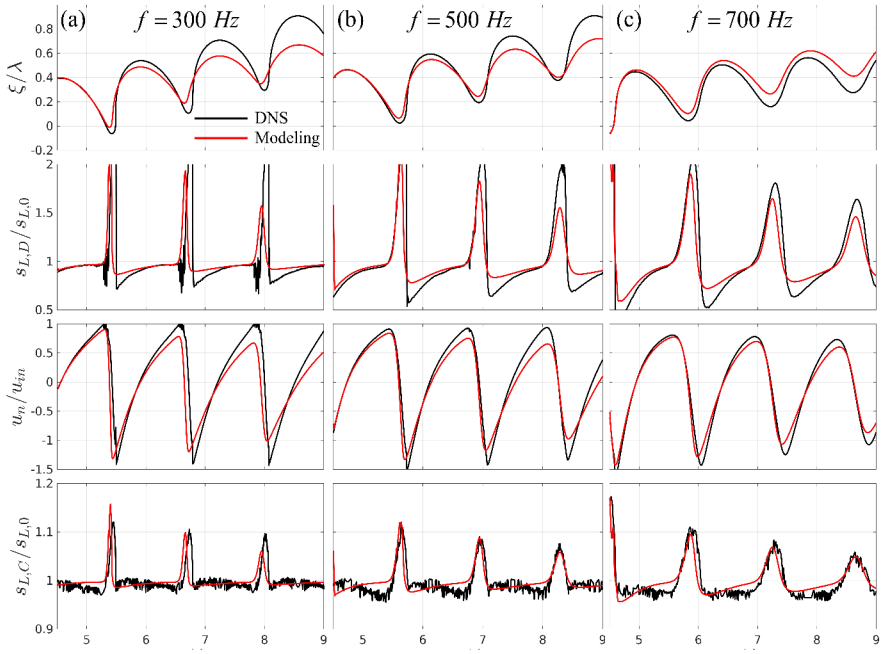


Fig. 5 Comparisons of flame position (ξ), flame displacement speed ($S_{L,D}$), the flow velocity normal to the flame surface (u_n), and local heat release rate ($S_{L,C}$) obtained from DNS and ξ-equation simulation for ε=0.6 mm and f=300, 500, and 700 Hz.

다. 반면 300 Hz와 같이 저주파이면서 큰 진폭(ε=0.6 mm) 조건에서는 주름이 오래 유지되고 첨예부(cusp)가 두드러지며, 이 구간에서 선형 u_n–$\sin\theta_f$ 상관의 유효성이 일부 약화되어 주름 크기와 최대치가 다소 과소예측되는 경향이 관찰되었다. 그럼에도 불구하고 통합 열방출에 대해 이득과 위상의 주파수 응답은 전 범위에서 DNS 경향을 성공적으로 재현하였으며, 700 Hz에서는 두 결과가 거의 중첩되었다.

Figure 6은 도메인 전체 화염의 열 방출 응답의 이득(gain)과 위상(phase)을 나타낸 그림이다. 열방출 응답은 주름 감쇠 영역만을 적분 대상으로 삼기 때문에, 저주파 극한에서 이득이 1로 수렴하지 않는 거동을 보인다. 이는 부착부 인근에서 정의되는 입력이 적분 영역에 포함되지 않기 때문이며, 부유 화염 연구에서 유사한 경향성이 보고된 바 있다 [4, 5]. 본 결과는 단순한 등가 대류장 가정($u'=u_0\exp(i(kx-\omega t))$)에 비해, 제안된 속도모델이 화염 구조에 부합하는 물리적 입력을 제공함으로써 FDF 예측의 정확도를 크게 높일 수 있음을 시사한다.

제안 기법의 실용적 장점은 모델 계수(u_α, σ_D, σ_C)만으로 DNS 경향을 압축하여 ξ-방정식 기반 예측을 분 단위의 저비용으로 수행할 수 있다는 점이다. 이는 연소기 설계 단계에서 주파수 응답 스캔과 불안정성 감쇠 전략 탐색을 빠르게 반복할 수 있게 하며, 고주파·감쇠 지배 조건에서 특히 높은 신뢰도를 제공한다. 다만 주름 성장 구간과 첨예부 지배 조건에 대해서는 비선형 u_n–화염형상 상관의 도입, u_α의 물리적 매개변수(밀도비, 전단, Reynolds 수 등) 의존성 일반화, 비단일 Lewis 수 연료(수소·암모니아) 및 3차원/난류 유동으로의 확장이 필요하다.

DNS로부터 도출한 법선 속도 상관($u_n= u_\alpha\sin\theta_f$)과 서로 다른 Markstein length 갖는 변위/소모 화염속도 모델을 ξ-방정식에 결합함으로써, 조화가진 예혼합 V-화염의 감쇠 영역에서 전면 운동과 통합 열방출 응답을 정밀하고 저비용으로 예측할 수 있었다. 고주파 조건에서 이득과 위상의 일치는 매우 강했고, 저주파에서는 주름 성장/첨예부 모델링의 추가 고도화가 요구됨을 확인하였다.

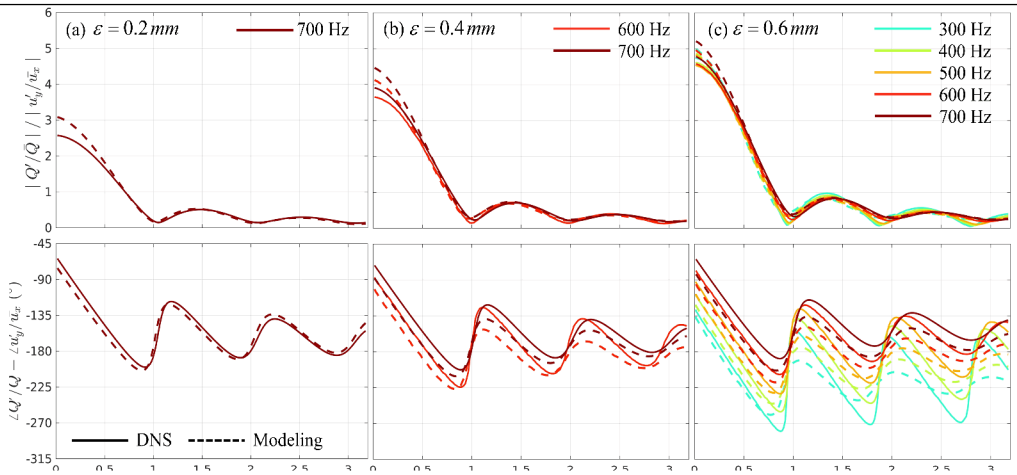


Fig. 5 Integrated heat release response on the Strouhal number domain obtained from (a) ε=0.2 mm, (b) ε=0.4 mm, and (c) ε=0.6 mm. The solid and dashed lines represent the data obtained with DNS and modeling, respectively.

후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korean government (MOTIE) (20214000000310, Energy Innovation Research Center for Carbon-Neutral High-Efficiency Gas Turbine Combustion Technology).

참고 문헌

[1] G.H. Markstein, Nonsteady Flame Propagation, Pergamon Press, London, 1964.
[2] F.H. Vance, Y. Shoshin, L. De Goey, J.A. van Oijen, A physical relationship between consumption and displacement speed for premixed flames with finite thickness, Proc. Combust. Inst. 38 (2021) 2215-2223.
[3] F. Thiesset, F. Halter, C. Bariki, C. Lapeyre, C. Chauveau, I. Gökalp, L. Selle, T. Poinsot, Isolating strain and curvature effects in premixed flame/vortex interactions, J. Fluid Mech. 831 (2017) 618-654.
[4] M. Malanoski, M. Aguilar, D.-H. Shin, T. Lieuwen, Flame leading edge and flow dynamics in a swirling, lifted flame, Combust. Sci. Technol. 186 (2014) 1816-1843.
[5] E. Freitag, On the measurement and modelling of flame transfer functions at elevated pressure, Technische Universität München, (2009).

축방향 다단연소 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석

권우현* · 정준우* · 김대식*†

Combustiton Instability Analysis in an Axial Staging Gas Turbine Combustor

Woohyun Kwon*, Junwoo Jung*, Daesik Kim*†

가스터빈의 터빈입구온도(TIT)는 열효율을 결정하는 핵심 변수이나, 이는 질소산화물(NOx) 배출량과 상충 관계에 있다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해, 연소 영역을 축방향으로 분산시켜 국소적인 화염 온도를 낮춤으로써 NOx 배출을 저감하는 동시에 높은 TIT를 유지할 수 있는 축방향 다단연소(Axial Staging) 기술이 주목받고 있다. 하지만 연소 영역을 분리하는 과정에서 화염 동특성이 변화하고, 이는 예기치 못한 연소불안정을 유발할 수 있는 잠재적 위험을 내포한다.

따라서 본 연구에서는 축방향 다단연소의 영향을 종합적으로 고려할 수 있는 1D 열음향 네트워크 모델을 개발하여, 축방향 다단연소 시스템의 연소불안정 메커니즘을 규명하고자 한다. 제어 이론[(1)]에 기반하여 연소기를 ATF(Acoustic Transfer Function)로 모델링하고, 각 단의 화염은 FTF(Flame Transfer Function)를 통해 표현하였다. 이때, Fig. 1과 같이 ATF는 각각 2개의 입력과 출력을 갖는 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 형태로 표현되었으며 이는 2개의 영역으로 나누어져 있는 다단연소의 특성을 전달함수 모델에 반영하고, 각 화염이 연소기에 미치는 영향을 직관적으로 확인하기 위함이다.

모델의 신뢰성을 확보하기 위해, 선행 실험 연구[(2)]에서 보고된 다단연소 시스템의 불안정 주파수 및 성장률 데이터를 이용하여 계산 결과를 정량적·정성적으로 검증하였다. 이후 검증된 모델을 활용해 연소기 각 위치에서의 온도, 2차 연료 인젝터[(3)], 2차 화염의 위치 등 주요 설계 및 운전 변수가 시스템 안정성에 미치는 영향을 분석하는 파라미터 연구를 수행하였다. 본 연구는 축방향 다단연소 환경에서 발생하는 불안정 현상에 대한 물리적 이해도를 높이고, 안정적인 차세대 고효율·저공해 연소기 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

* 강릉원주대학교 기계공학과
† 연락저자, dkim@gwnu.ac.kr
TEL : (033)760-8728 FAX : (033)-760-8721

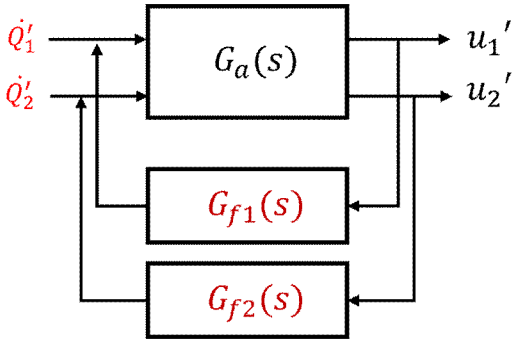


Fig. 1 MIMO(Multi-Input Multi-Output) system representation of the ATF and FTF

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다(No. RS-2024-00449309 & No. 2025-02662968).

참고 문헌

[1] J. Jung, D. Kim, M. Kim, J. Hwang, W. Lee, “Analysis of Combustion Instability Characteristics of a Single-Nozzle Combustor in a Natural Gas-Hydrogen Co-firing Gas Turbine under Varying Operating Pressures” J. Korean Soc. Combust. Vol. 30(2), 2025, pp. 27-35

[2] Y. Choi, G. Han, K.T. Kim, “Forced Response of Transverse Reacting Jet in Vitiated Crossflow to Harmonic Velocity Disturbances.” Combustion and Flame, Vol. 269, 2024, pp. 113670.

[3] M. Karlsson, M. Abom, “Quasi-Steady Model of the Acoustic Scattering Properties of a T-Junction.” Journal of Sound and Vibration, Vol. 330(21), 2011, 5131-5137.

고 에너지 연소지연 기술적용 EGR율 향상과 연비개선 기술개발

나병철* 신윤섭*

Enhancement of fuel economy using High-Energy Combustion Delay along with EGR Rate Improvement

Byung-Chul Na*, Yun-Sub Sin*,

환경 규제의 강화로 인한 엔진의 개발방향은 희박 연소 조건에도 안정적인 연소를 구현 할 수 있는 신규 점화 시스템 기술 개발이 필요, 이는 점화 플러그의 고에너지 출력 구현과 희박 연료 조건에서 화염 발생 전까지 점화를 할 수 있도록 에너지 공급 유지시간(Burn Duration)을 구현이 주요 핵심 요소 기술이며, 이를 달성하기 위해서는 하나의 코일만으로 개선하는 데에는 한계가 있음

Dual로 Multi-charge Ignition System을 적용하고 연소기간 지연을 통한 개선된 EGR Rate 구현을 통하여 연비개선을 도모할 수 있는 Turbo-GDI 엔진시스템을 개발하고자 함.

○ EGR+다단점화 대상엔진 대응 연료소모율 저감 성능검증
○ 대상엔진 대응 Raw NOx emission 저감 성능검증

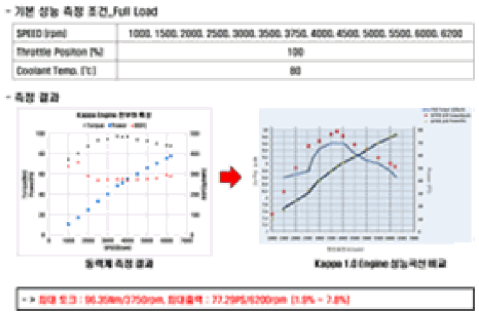


Fig. 1 Engine System Perfomance Evaluation

후 기

본 논문은 자동차산업기술개발사업(산업통상자원부 공고 제2022-90호) “연소 효율 개선을 위한 고에너지 다점 점화 및 배기가스재순환 시스템 기술 개발” 사업(과제번호20018492)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

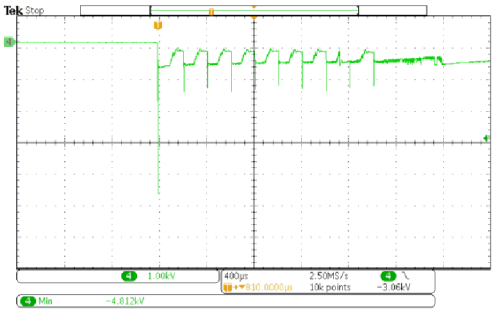


Fig. 2 Multi-Ignition Count(Combustion Delay)

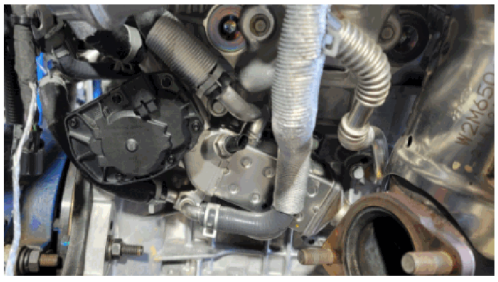


Fig. 3 Adjustable EGR 밸브+EGR쿨러

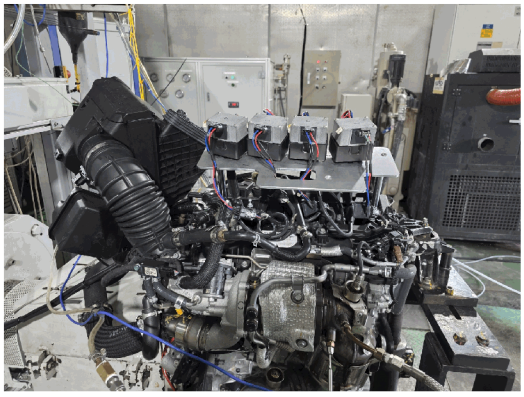


Fig. 4 Assembled Turbo-GDI Engine

* 한국자동차연구원 탄소중립기술연구소
† 연락저자, bcna@katech.re.kr
TEL : (041)559-3073

모사 EGR 조건에서 다단점화 코일의 점화 에너지량 변화가 직접 분사 불꽃 점화 엔진의 연소 특성에 미치는 영향

이강현*.이호승**.송영석***.박성욱**†

Effects of Multi-spark Coil Ignition Energy Variation on the Combustion Characteristics of a Direct Injection Spark Ignition Engine under Simulated EGR Conditions

Kanghyun Lee*, Hoseung Yi**, Youngseok Song***, Sungwook Park**†

ABSTRACT

This study investigates the effects of ignition energy variation on combustion characteristics under simulated EGR conditions using a multi-spark ignition system. To improve ignition stability, a continuous discharge ignition(C-mode) coil was applied. The C-mode multi-spark coil provided higher ignition energy than conventional ignition coil, improving initial flame formation and propagation. As the ignition energy of the C-mode multi-spark coil increased, the maximum in-cylinder pressure peak increased, enhancing overall combustion performance.

Key Words : Direct injection spark ignition engine, Simulated EGR, Multi-stage ignition coil, Indicated specific fuel consumption

지속적으로 강화되고 있는 전 세계 배출가스 규제와 연비 요구는 차세대 가솔린 엔진이 직면한 핵심 과제이며, 이에 따라 기존 연소 시스템에 대한 근본적인 개선이 요구되고 있다.[1] 특히 스파크 점화 엔진은 구조적 단순성과 우수한 연소 제어성으로 인해 여전히 다양한 분야에서 널리 사용되고 있으며, 이와 함께 연소 효율을 높이면서도 배출가스를 최소화할 수 있는 고효율 연소 전략을 실현하기 위해 다양한 기술이 개발되고 있다. 그 중에서도 혼합기의 희석을 통한 연소 제어는 대표적인 고효율 연소 기술로, 배기가스 재순환(EGR) 비율을 증가시키거나 초 희박 연소(ultra-lean combustion) 조건을 적용하는 방식이 주로 연구되고 있다. 그 중에서 배기가스 재순환(EGR) 장치는 엔진에서 연소된 배기가스의 일부를 다시 흡기로 유입하여 실린더 내부의 연소 과정에 영향을 주는 기술이다. 이 과정에서 연소된 불활성 가스가 연소실 내 혼합기에 포함되게 된다. 이러한 불활성 배기가스는 연소 과정 중 혼합기의 산소 농도를 감소시켜 희석시키고, 혼합기의 열용량을 증가시켜 연소 온도를 낮춘다. 연소 온도가 낮아지면 고온에서 생성되기 쉬운 질소산화물(NOx)의 생성이 억제되며, 이는 환경 규제에 효과적으로 대응할 수 있는 장점으로 작용한다.

그러나 이러한 연소 전략은 기존 점화 시스템의 기술적 한계를 명확히 드러낸다. 희석 조건에서는 혼합기의 반응성이 크게 저하되며, 이로 인해 화염 전파 속도의 감소, 연소 초기 착화 지연 및 실화 발생 가능성을 증가시킴으로써, 엔진의 작동 영역이 노킹(Knocking)과 실화 사이의 매우 좁은 범위로 제한된다. 결과적으로 기존 점화 시스템만으로는 고 EGR 또는 희박 연소 조건에서의 안정적인 운전이 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 초기 화염 핵 형성의 강화, 혼합기 희석 허용 한계의 확장 등을 실현할 수 있는 고성능 점화 기술의 도입이 필수적이다. 최근에는 연소 안정성과 연료 효율을 동시에 향상시킬 수 있는 고성능 점화 제어 기술들이 활발히 연구되고 있다. 대표적인 기술로는 고에너지 점화 시스템, 다단점화(Multi-spark ignition), 플라즈마 점화(Plasma-assisted ignition) 등이 있으며, 이러한 기술들은 혼합기 희석 조건에서도 안정적인 화염 형성과 빠른 전파를 가능하게 하여, 고 EGR 또는 초 희박 연소 환경에서 안정성

* 한양대학교 융합기계공학과
** 한양대학교 기계공학부
*** 이림전자
† 연락저자, parks@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)-2220-4588

Table 1 Specification of single cylinder engine

Item	Specification
Bore/Stroke(mm)	75.6/89.01
Displacement volume(cc)	399.55
Compression ratio	10.5:1
Connecting rod(mm)	145
Crank offset(mm)	10
Piston offset(mm)	0.6

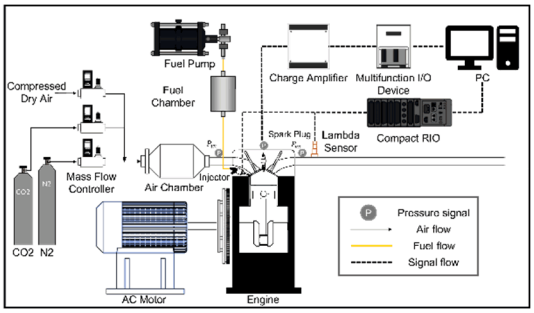


Fig. 1 Schematic diagram of the combustion engine system.

확보에 효과적인 것으로 알려져 있다. [2]

본 연구에서는 다단점화 코일을 적용하여, 모사 EGR 환경에서 점화 에너지량의 변화가 연소 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고자 한다. 특히, 기존의 스파크 플러그를 그대로 사용하면서도 다단 점화를 구현할 수 있도록 설계된 점화 코일을 적용함으로써, 시스템 구성의 복잡성 증가 없이 연소 성능의 향상 정도를 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 고 EGR 조건에서도 점화 에너지 제어를 통해 연소 안정성을 확보할 수 있는 가능성을 검토하고, 향후 고효율 내연기관 개발을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

본 연구에서는 1.6L 급 4기통 엔진을 기반으로 제작한 단기통 엔진을 사용하였으며, 엔진 제원은 Table 1, 엔진 실험 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. 연료 공급은 공기 압축식 펌프를 이용하여 가솔린을 고압으로 분사하였으며, 배기 가스 조성을 바탕으로 산출된 당량비를 기준으로 이론 공연비에서 연소될 수 있도록 폐루프 방식의 연료 제어를 수행하였다. 분사시기와 점화시기는 National Instruments社의 Compact RIO 플랫폼과 LabVIEW 기반 제어 프로그램을 사용해 실시간으로 동기화하여 구동하였으며, 점화 시스템은 기준용 상용 점화 코일과 연속 점화모드(C-mode)로 작동하는 다단 점화 코일을 사용하여, 각기 다른 점화 에너지 조건에서 연소

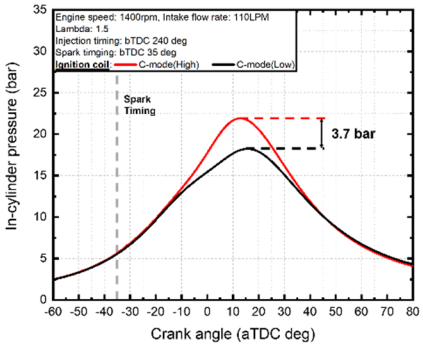


Fig. 2 In-cylinder pressure curves corresponding to varying ignition energy levels of the C-mode multi-spark ignition coil.

특성을 비교 분석하였다.

실험 결과, C-mode 다단점화 코일이 상용 점화 코일 대비 더 높은 점화 에너지량을 제공하였으며, 이로 인해 연소실 내 초기 화염 형성이 향상되었다. Fig. 2에서 희박 조건에서 C-mode의 점화 에너지량에 따른 연소 압력을 비교하였다. 점화 에너지량 증가에 따라 연소 압력 상승률이 개선되었으며, 그 결과 최대 연소 압력 또한 유의미하게 높은 수치를 나타냈다. 이러한 결과는 높은 에너지의 다중 방전 특성이 초기 연소 반응을 더욱 안정적이고 빠르게 유도함으로써, 보다 강한 화염 전파를 진행시켰기 때문으로 해석된다. 또한 고 EGR 환경에서도 충분한 에너지 공급을 통해 혼합기의 착화 가능성을 높임으로써, 연소 안정성을 확보하는데 기여했음을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다('No. 20018492').

참고 문헌

[1] J.D. Dale, M.D. Checkel, P.R. Smy, "Application of high energy ignition systems to engines", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 23, No. 5-6, 1997, pp. 379-398.

[2] C.E.C. Alvarez, G.E. Couto, V.R. Roso, A.B. Thiriet, R.M. Valle, "A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines", Appl. Therm. Eng., Vol. 128, 2018, pp. 107-120.

정적 연소 환경에서 EGR의 화학적 효과가 무탄소 연료의 난류 제트 점화에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

김정현*.주강민**.박정수***†

Numerical Study on the Chemical Effects of EGR On the Turbulent Jet Ignition of Carbon-Free Fuels In a Constant Volume Combustion Environment

Jeonghyeon Kim*, Kangmin Ju**, Jungsoo Park***†

ABSTRACT

Hydrogen and ammonia are key carbon-free fuels for clean combustion. TJI(Turbulent Jet Ignition) enhances combustion stability, while EGR(Exhaust Gas Recirculation) chemically suppresses NOx(Nitrogen Oxides) formation by lowering flame temperature. In a Constant volume combustion environment, a numerical analysis was conducted to investigate the chemical effects of TJI and EGR. Results reveal that elevated EGR rates effectively reduce NOx, but extends ignition delay, indicating a fundamental trade-off between combustion stability and emission reduction.

Key Words : Constant volume combustion environment, Emission reduction, Exhaust gas recirculation, Ignition delay, Turbulent jet ignition

IEA(International Energy Agency)의 2050 Net-Zero 시나리오에 따르면 2050년까지 전 세계 에너지 관련 이산화탄소 배출량을 Net-Zero로 달성하고 지구 평균 온도 상승을 1.5 이내로 제한하기 위해서 기존 탄화수소계 연료에서 수소(H_2)와 암모니아(NH_3)같은 무탄소 연료(Carbon-free fuel)의 전환이 필수 과제이다.

수소는 부피기준 4~75%의 넓은 가연 범위를 가지고 있어 우수한 연소 특성을 보이나, 약 0.01 MJ/L의 낮은 체적 에너지 밀도로 인해 저장 및 운송에 어려움이 존재한다 [1]. 반면 암모니아는 약 12.7 MJ/L의 높은 체적 에너지 밀도와 상온에서 약 1030kPa의 비교적 낮은 압력으로 액화가 가능하여 수소 캐리어로의 활용 가능성이 높다. 그러나 암모니아는 약 7 cm/s의 낮은 층류 화염속도(Laminar flame speed)로 연소 안정성 확보가 어렵고, 연료 자체에 질소 원자를 포함하여 연소 과정에 필연적으로 질소산화물(NOx) 발생이 불가피하다는 한계를 지닌다 [2].

따라서 무탄소 연료의 실용화를 위해서는 희박 가연 한계 확장 및 난연성 연료의 연소 안정성을 확보함과 동시에 NOx배출을 효과적으로 저감할 수 있는 연소 기술 개발이 요구된다.

TJI(Turbulent Jet Ignition)기술은 주 연소실 상단에 장착된 예비연소실(Pre-chamber)에서 연료·공기 혼합기를 점화하여 생성된 난류 제트 화염과 반응성 높은 고온 라디칼을 주 연소실로 분사하여 빠른 화염 전파 및 다점 점화(Multiple ignition)효과를 실현하는 기술이다 [3].

TJI는 점화플러그만 장착된 Passive방식과 점화플러그 및 추가 인젝터가 장착된 Active방식으로 구분되며, Passive방식은 가연 한계 확장과 구조적 단순성으로 인한 기존 시스템의 Retrofit 용이성과 Active 방식은 pre-chamber 내 국부적인 농후 혼합기를 형성하여 추가적 가연 한계 확장이 가능하다. TJI는 내연기관의 SI(Spark Ignition)뿐만 아니라 가스터빈 연소기에서도 적용되고 있으며, 빠른 연소를 통해 고온 영역의 체류 시간을 단축시켜 Thermal NOx 생성을 억제할 수 있다. 그러나 강화되는 배출가스 규제를 만족시키기 위해서는 TJI 기술과 함께 EGR(Exhaust Gas Recirculation)기술의 병행 적용이 필요하다 [4].

EGR은 연소 후 가스 일부를 재순환시켜 주 연소실 내 산소 농도를 낮추고 화염 온도를 낮추어 NOx생성을 억제하는 연소 과정 기술로 EGR의 NOx 저감 메커니즘은 크게 희석효과(Dilution effect), 열적 효과(Thermal effect) 그

* 조선대학교 기계공학부
** 조선대학교 기계공학과
*** 조선대학교 기계공학과
† 연락저자, j.park@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7057

리고 화학적 효과(Chemical effect)로 구분되며, 특히 H_2O와 CO_2 성분의 높은 비열 특성은 NOx를 효과적으로 억제할 수 있다.

본 연구는 무탄소 연료 기반 Passive TJI기술에 EGR을 적용하기위한 기초연구로서, 정적 연소 환경(Constant volume combustion environment)에서 EGR의 화학적 효과를 수치해석적으로 규명하였다. 해석에 사용된 정적 연소기의 형상은 Fig. 1과 같으며 EGR의 화학적 효과를 다음과 같은 세가지 조건 1. H_2O 단독 첨가 2. CO_2 단독 첨가 3. H_2O, CO_2 혼합 첨가로 설정하여 분석하였다.

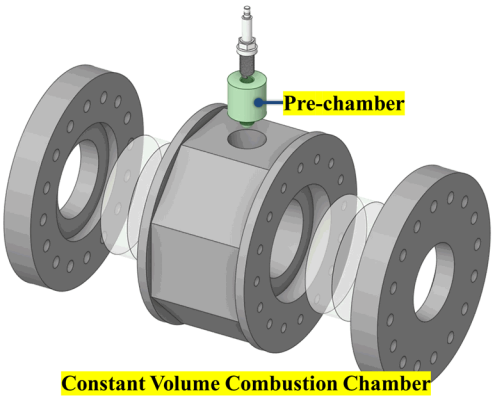


Fig. 1 Geometric modeling of constant volume combustion chamber with pre-chamber configuration

Ansys Chemkin-Pro를 이용한 0-1차원 균질 반응기 해석을 통해 EGR 성분이 무탄소 연료의 점화 지연(Ignition delay)과 층류 화염속도에 미치는 영향을 분석하였으며, 수소·암모니아의 단독 연료에 대해 EGR율 변화를 통한 화학 반응 경로와 주요 라디칼 종의 농도 변화 추적으로 각 성분이 NOx생성 경로에 미치는 영향을 비교하였다. 또한 CONVERGE 3.1을 활용한 정적 연소 환경에서 3차원 난류 제트 점화 과정을 모사하였다. 0차원 해석을 통해 도출된 최적의 EGR율을 적용하여 난류 제트 화염의 거동 및 주 연소실로의 화염 전파 과정을 시뮬레이션 하였다. 난류 모델은 RNG k-ε모델을 적용하였으며, 화학반응 메커니즘은 Okafor 메커니즘을 통해 암모니아와 수소의 상세 화학반응을 고려하였다.

해석 결과, EGR 성분의 첨가는 점화 특성 및 화염 발달 과정에 직접적인 영향을 미쳤으며 EGR율이 증가할수록 연소실 내 압력상승률이 감소하였다. NOx 배출 특성 분석 결과 H_2O와 CO_2는 각각 고유한 화학적 메커니즘을 통해 연소 반응 경로 및 주요 라디칼 농도를 변화시켜 NOx 생성을 효과적으로 억제하는 것으로 확인되었다. 특히 H_2O와 CO_2를 동시에 첨가한 경우, 높은 비열특성으로 인한 화염 온도를 낮추어 NOx저감 효율이 극대화되었다. 그러나 EGR율 증가에 따라 점화 지연시간이 증가하는 trade-off 관계가 관찰되었으며, 이를 고려하여 연소 안정성과 배출가스 저감 성능을 균형적으로 달성할 수 있는 최적의 EGR율을 도출하였다.

본 연구는 무탄소 연료 기반 Passive TJI에 EGR 시스템을 적용하기 위한 기초 연구로서, 정적 연소 환경에서 EGR의 화학적 효과를 수치해석적으로 규명하였다. 연구 결과는 무탄소 연료의 연소 안정성 확보와 배출 저감의 균형을 달성하기 위한 기초 설계 지침을 제시하며, 향후 내연기관 및 가스터빈 등 산업 시스템의 TJI-EGR 융합 기술 적용 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: 20018492)

참고 문헌

[1] J. Lee, J. Kim, H. Kim, D. Lee, J. Kim, S. Kang, C. Lee, M. Lee. and D. Kim, "Trends in the Development of Carbon-Free Fuel Technology Using Hydrogen and Ammonia to Respond to Carbon Neutrality", J. Energy. Clim. Change., Vol. 19, 2024, pp. 115-131.

[2] H. Lee, Y. Woo and M. Lee. "The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality – Part I Background and Economic Feasibility of Expanding the Supply of Fuel Ammonia, J. Korean Soc. Combust., Vol. 26, 2021, pp. 59-83.

[3] D. Han, K. Song, J. Huo, X. Li and C. Xu, "Combustion characteristics of ammonia-hydrogen mixture with turbulent jet ignition", Applied Thermal Engineering, Vol. 260, 2025.

[4] H. Hassan, K. Hu, C. Qian, H. Wang, H. Ge, G. Wang and E. Barakat, "Enhancing ignition stability in an annular combustor using a pre-chamber ignition system", Applied Thermal Engineering, Vol. 258, 2025.

대체연료 내연기관용 EGR Valve 및 Cooler의 적용성 분석과 성능 향상·소재 개선 연구

김영권*†

Application Feasibility, Performance Enhancement, and Material Improvement of EGR Valves and Coolers for Alternative-Fuel Internal Combustion Engines

Young-Kwon Kim*†

ABSTRACT

The global move toward carbon neutrality is driving research on alternative-fuel engines using hydrogen, ammonia, methanol, and e-fuels. EGR is effective for NOx reduction but faces issues of durability, corrosion, and fouling under these fuels. This study evaluates EGR valve and cooler applicability and proposes performance and material improvements. Hydrogen engines require better valve response and thermal durability for cooled EGR. Ammonia dual-fuel engines need high-sealing valves to manage combustion instability and N_2O/NH_3 slip. Methanol engines demand corrosion-resistant materials due to formic acid condensation. Synthetic fuels require optimized EGR cooling and fouling control. The study introduces high/low-pressure EGR loops, cooling mode switching, and MPC - AI control. Materials like SUS439/444 stainless steel, nickel brazing, and CrN/DLC coatings are suggested. The results guide durable EGR system design for efficient, low-emission alternative-fuel mobility.

Key Words : Alternative fuels, Hydrogen engine, Ammonia dual-fuel, Low Pressure EGR System

최근 전 세계적으로 탄소중립 정책과 전환이 가속화됨에 따라, 기존의 화석연료 중심의 내연기관은 수소(H_2), 암모니아(NH_3), 메탄올(CH_3OH), 합성연료(e-fuel) 등 대체연료 기반의 고효율·저배출 엔진으로 새롭게 정의되고 있다. 대체연료는 화학 조성, 연소 반응 경로, 배기가스 성분과 온도 조건에서 기존 연료와 차이를 보이기 때문에, 배출가스 제어 기술에서 요구되는 다양한 해결과제가 발견되고 있는 실정이다. 배기재순환(EGR, Exhaust Gas Recirculation)은 NO_x 저감에 매우 효과적인 기술이나, 대체연료 적용 시 내구성 저하, 부식 및 침전(Fouling), 응답지연, 열충격 손상, 시스템 최적화 어려움 등의 기술적 한계가 있다. 이에 본 연구는 이러한 기존 한계를 보완하기 위해 대체연료별 운전 환경에서 EGR 밸브 및 쿨러의 내식성, 열충격 내구성, fouling 특성을 실험적으로 평가하고, 예측제어 기반의 응답성 개선 전략 및 고내식 소재·코팅 적용 방안을 종합적으로 제시한다. 나아가 이러한 결과를 바탕으로 대체연료 내연기관의 EGR 시스템 설계 및 평가에 대한 새로운 기준을 제시하고, 향후 수소·암모니아 기반 친환경 엔진 및 선박용 파워트레인 개발에 기여하고자 한다.

선행연구에서는 주로 디젤 및 가솔린 엔진을 중심으로 EGR 시스템의 성능 열화 원인과 개선 방법이 다수 보고되었다. Park 등(2018)은 디젤 엔진 배기가스의 수분 및 입자 농도가 EGR 쿨러의 침적량과 열전달 성능 저하에 미치는 영향을 분석하였으며, 약 20% 내외의 성능 저하가 발생한다고 보고하였다. 또한 대체연료 연소가스의 응축물 내 산화물·탄화물 복합층이 부식의 시작점이 된다는 사실을 규명하였다.

EGR 밸브의 제어 응답성 향상에 대한 연구도 활발히 진행되었다. Zhang 등(2022)은 모델예측제어(MPC, Model Predictive Control) 기법을 적용하여 밸브 개폐 지연을 약 30% 단축시키고 과도 상태 NO_x 편차를 감소시킨 바 있다. 이러한 예측제어 기반 접근은 대체연료 엔진에서도 적용

† ㈜코렌스글로벌 미래사업전략팀
김영권 책임연구원, ykkim@korens.com
TEL : (055)371-6895 FAX : (055)-383-8480

가능성이 높으며, 향후 AI 기반 진단 알고리즘과 결합될 경우 실시간 보정 및 이상 탐지가 가능할 것으로 예상된다.

소재 및 표면 보호 기술 측면에서, Lee와 Min(2014)은 크롬 함량이 높은 페라이트계 스테인리스강이 기존 오스테나이트계 소재보다 부식 저항성과 fouling 억제 성능이 우수함을 확인하였다. Tejero-Martin 등(2018)은 CrN 및 DLC(Diamond-Like Carbon) 복합 코팅이 표면 경도와 내마모성을 개선하며, 열적·화학적 안정성이 높다고 보고하였다. 이러한 기술은 H_2 , NH_3 , CH_3 OH과 같은 고수분·산성 배기가스 조건에서 EGR 구성품의 내구성을 확보하는 데 매우 유효하다.

그러나 기존 연구는 대부분 디젤 및 가솔린 엔진 조건에 한정되어 있으며, 대체연료의 화학 반응성에 따른 내식성 열화 메커니즘이나 열충격 조건에서의 구조적 안정성 분석은 충분히 이루어지지 않았다. 또한 연료 종류에 따라 최적의 EGR 냉각·비냉각 운전 조건이 다름에도 불구하고 이를 정량적으로 비교·평가한 연구는 매우 부족하다.

본 연구에서는 가솔린 T-GDI 엔진에 적용되는 플랩형 저압 EGR 시스템을 대상으로 EGR 쿨러의 fouling 및 부식 특성과 밸브의 제어 응답성을 분석하였다. 또한, 내부 유로의 내식성 확보를 위한 소재 및 코팅 기술을 검토하여 대체연료 적용 조건에 적합한 EGR 시스템 최적화 방안을 제시하였다.

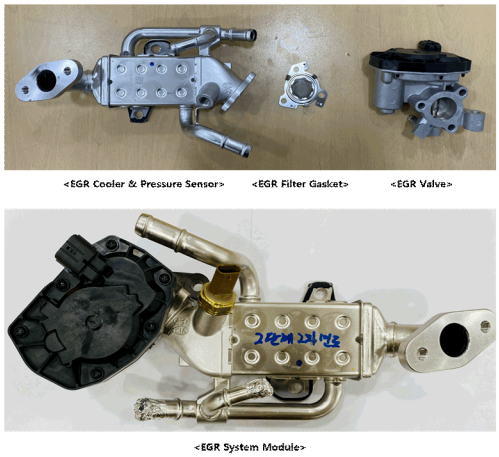


Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

NO3 환경에서 AC4C-T6 적용소재의 중량 변화율은 -0.9%로 안정적이었으나, CH3COOH와 COOH 환경에서 AC3AM 소재가 각각 -6.74%, -17.75%로 부식이 심하게 진행되었다.

Table 1 소재평가 및 분석(AL 적용소재)

NO_3 이온부식	AC4C-T6
시험 전 무게(g)	33.6
시험 후 무게(g)	33.3
무게 변화률(%)	-0.90
CH_3COOH 이온부식	AC3AM
시험 전 무게(g)	6.3
시험 후 무게(g)	5.9
무게 변화률(%)	-6.74
COOH 이온부식	AC3AM
시험 전 무게(g)	5.6
시험 후 무게(g)	4.7
무게 변화률(%)	-17.75

본 연구 결과를 통해서 수소, 암모니아, 메탄올, 합성연료 등 대체연료 내연기관용 EGR 밸브와 쿨러의 적용성을 분석하고 성능 및 내구성 향상 방안을 제시하였다. 또한. 대체 연료별로 EGR 요구조건이 달랐으며, 열충격 내구성, 부식, 연소 안정성, NH_3슬립 등이 주요 과제로 확인되었다. 고·저압 루프 병용과 MPC·AI 제어를 적용해 응답성 향상과 NOx저감을 달성하였으며, SUS444·Ni계 합금·CrN/DLC 코팅을 통해 내식성과 내열성을 강화하였다.

결과적으로 제안된 기술은 대체연료 엔진의 효율과 신뢰성을 높이고, 향후 친환경 모빌리티 및 선박 EGR 시스템 기술적용의 가능성을 검토할 수 있었다.

후 기

본 논문은 자동차산업기술개발사업(산업통상자원부 공고 제2022-90호) “연소 효율 개선을 위한 고에너지 다점 점화 및 배기가스 재순환 시스템 기술 개발(20018492)” 사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Park, S., Lee, K. S., & Park, J. (2018). Parametric Study on EGR Cooler Fouling Mechanism Using Model Gas and Light-Duty Diesel Engine Exhaust Gas. Energies, 11(11), 3161.

[2] Zhang, J., Amini, M. R., Kolmanovsky, I., et al. (2022). Development of a Model Predictive Airpath Controller for a Diesel Engine with Transient Thermal Dynamics. arXiv preprint, arXiv:2202.12803

[3] Lee, J., & Min, K. (2014). A study of the fouling characteristics of EGR coolers in diesel engines. Journal of Mechanical Science and Technology, 28, 3395 - 3401.

내연기관의 연소 효율 개선을 위한 점화 성능 증대 방안 연구

최광돈*†. 송영석*. 이연서*. 정재덕*

Research on the Improvement of Ignition Performance for Combustion Efficiency of Internal Combustion Engines

Kwang-Don Choi*†, Young-Seok Song*, Yeon-seo Lee*, Jae-Deok Jung*

Key Words : Improvement, Ignition Performance, Combustion Efficiency

국내외 친환경 정책의 확대로 유해가스 배출 기준 강화 등 자동차 및 선박을 포함한 모든 교통 분야에서 온실가스 감축이 시급히 해결하여야 할 과제가 되었다. 이를 위하여는 내연기관의 이론 공연비 연소에서 희박연소의 구현으로 안정적인 연소가 필요하며, 이를 실현 시킬 수 있는 점화 성능 향상이 필수적이다.

본 연구는 연소 효율 개선을 위한 점화 성능 증대 방안에 관한 기술들을 소개하며, 계속적인 시험을 진행할 계획이다. 점화 성능을 증대 시키는 연구 방법은 기존의 점화코일은 하나의 몸체에 하나의 점화 유닛으로 구성되어 있어 점화(방전)를 하기 위하여는 충전 후 방전의 사이클 이었다. 본 점화코일 연구는 몸체 하나에 두개의 점화 유닛으로 구성하여, 하나의 점화 유닛을 충전하는 시간에, 다른 점화 유닛은 방전을 할 수 있도록 하였다. 따라서 연소 시간이 짧아 불완전 연소되는 문제점을 연속 점화 동작으로 개선하였다. 두개의 점화 유닛을 동시에 방전 시킬 수 있음으로 기존 점화장치의 2배이상 고에너지를 출력 하여 희박연소가 가능하도록 개발 하였으며 또한, 연속점화 및 동시점화 시스템을 제어하도록 하는 제어기를 점화코일 내부에 장착하여 점화 장치와 제어기를 일체화 시켰다.

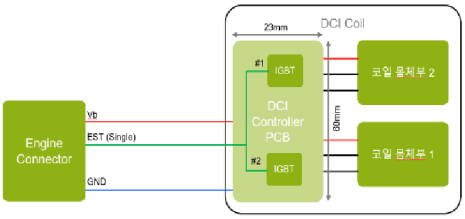


Fig. 1 Double Coil Ignition Diagram.

* ㈜이림전자
† 연락저자, kchoi@elim.com
TEL : 010-2849-0219 FAX : (043)-723-1084

또한 하나의 점화코일에 두개의 점화 유닛을 배치하는 방식에서는 점화코일의 특성 상 출력에너지 특성이 중요 함으로, 수치 해석을 통하여 코아의 배치가 보빈의 좌측 방향으로 배치하는 것이 출력에너지 측면에서 가장 우수한 성능이 나타나는 것을 확인하였다. 계산식으로는 2차코일에서 출력(방전)되는 에너지는 2차 코일의 전압과 전류의 곱을 적분한 값으로 알 수 있다. 2차 코일에서 승압되는 전압은 1,2차 권선수비율과 유도 기전력에 비례하기 때문에 아래 수식을 통해 계산 할 수 있다.

$$\epsilon = L\frac{dI}{dt}$$

$$n = \frac{N_2}{N_1}$$

$$V_2 = \epsilon \cdot n$$

$$E = \int I_2 \cdot V_2 \, dt$$

ϵ: Induced electromotive force
L: Inductance, I: Current, V: Voltage
N_1: Primary coil turns
N_2: Secondary coil turns
E: Output energy

본 연구를 통하여 내연기관의 연비 향상 및 배기 규제 대응을 위한 초희박 연소 기술을 위한 점화 장치를 개발함으로써

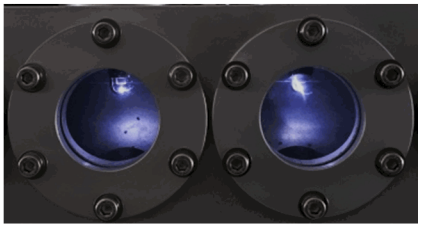


Fig. 2 기존 점화장치와 연구품의 화염 비교

기존장치 대비 2배 이상의 고에너지 출력 및 연속적인 방전으로 화염 전파 시간을 유지할 수 있다. 이 연구품은 자동차용 뿐만 아니라 선박 등 친환경 연료의 점화장치로도 사용 가능하다.

현재 이산화탄소가 배출되지 않는 친환경 연료로 주목 받고 있는 암모니아 및 수소 연료의 연소문제는 가솔린 보다 2배 이상 높은 발화점과 화염 및 연소 속도를 필요로 하는 문제점을 가지고있다.
본 점화장치의 동시점화 방식을 적용하여, 고에너지 출력으로 높은 발화점의 문제를 해결할 수 있으며, 연속 점화 방식을 적용하면 화염 및 연소의 문제점을 해결할 수 있다.
점화 장치의 사용 전압은 12V~48V 모두 자유롭게 사용 가능하도록 설계하였다.
결론적으로 차량 및 선박의 내연기관에서 연소효율 개선을 위한 점화 성능 증대로 안정적인 연소를 통한 연비 향상 및 배기가스 저감에 매우 효과적이란 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 자동차산업기술(그린카)의 연구개발비(과제번호20018492) 지원으로 수행되었습니다.

램제트 연소기 입구 조건에 따른 연료과농 추진제의 후퇴율 및 연소 특성에 관한 수치해석 연구

김은총* · 윤린* · 박익수** · 진상욱** · 김도헌** · 류재훈** · 심한슬*** · 심형섭****†
*세종대학교 대학원 우주항공시스템공학과, **국방과학연구소 제4기술연구원,
***세종대학교 우주항공시스템공학부, ****한국과학기술원 항공우주공학과

Numerical Investigation of Regression Rate and Combustion Characteristics of Fuel-Rich Propellant in Ramjet Combustor under Varying Inlet Conditions

Eunchong Kim*, Lin Yun*, Iksoo Park**, Sangwook Jin**, Doheon Kim**, Jaehoon Ryu**, Hanseul Shim***, and Hyung Sub Sim****†
*Department of Aerospace Systems Engineering, Graduate School, Sejong University
**The 4th R&D Institute, Agency for Defense Development
***Department of Aerospace Systems Engineering, Sejong University
****Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received for review 월 일, 2014; Revised 월 일, 2014; Accepted 월 일, 2014)

ABSTRACT

The regression rate of solid fuel is a critical performance parameter in solid-fuel ramjets, directly influencing thrust, specific impulse, and range. Therefore, accurate prediction of regression rate is essential for the design and optimization of solid-fuel ramjet propulsion systems. In this study, a coupled numerical framework combining condensed-phase pyrolysis and gas-phase combustion was developed to predict the regression rate and combustion characteristics of a fuel-rich propellant for solid-fuel ramjet applications. The regression rate was computed based on convective heat transfer from the flame and the Arrhenius-type pyrolysis relationship. Systematic analysis was conducted to examine the effects of inlet air mass flux and temperature on fuel regression and combustion performance. The predicted regression rate showed good agreement with experimental data, validating the proposed model. The results revealed that the local regression rate peaked near the reattachment point and gradually decreased downstream. Furthermore, increasing the air mass flux and temperature led to a higher regression rate. A regression rate correlation was derived, demonstrating that both air temperature and mass flux significantly influence the fuel regression rate.

Key Words : Solid Fuel Ramjet, Computational Fluid Dynamics, Regression Rate, Combustion Characteristics, Slab Combustor

† Corresponding Author, hyungsub.sim@kaist.ac.kr

기 호 설 명

A	: Pre-exponential factor [m/s]	k	: Thermal conductivity [W/m・K]
A_t	: Nozzle throat area [m^2]	k_{eff}	: Effective thermal conductivity [W/m・K]
$C^*_{exp,sim}$	: Actual characteristic velocity [m/s]	$\dot{m}_{air}$	: Air mass flow rate [kg/s]
$C^*_{theretical}$	: Theoretical characteristic velocity [m/s]	$\dot{m}_{fuel}$	: Fuel mass flow rate [kg/s]
D	: Port height [m]	p	: Static pressure [Pa]
E	: Total energy per unit mass [J/kg]	$\dot{r}$	: Regression rate [m/s]
E_a	: Activation energy [J/mol]	$\bar{\dot{r}}^*$	: Normalized mean regression rate
H	: Step height [m]	t	: Time [sec]
J_j	: Diffusive mass flux of species j [kg/m^2・s]	$\vec{v}$	: Velocity [m/s]
P_c	: Chamber pressure [Pa]	v_g	: Y-velocity of gas near the fuel surface [m/s]
R_u	: Universal gas constant [J/mol・K]	x	: X direction
S_E	: Energy source term [W/m^3]	y	: Y direction
S_f	: Mixture fraction source term [kg/m^3・s]	Δy	: Cell thickness adjacent to the fuel surface [m]
S_m	: Mass source term [kg/m^3・s]	η	: Combustion efficiency [%]
S_{mom}	: Momentum source term [N/m^3]	μ_t	: Turbulent viscosity [Pa・s]
S_{y-mom}	: Y direction momentum source term [N/m^3]	ρ	: Density [kg/m^3]
T	: Temperature [K]	ρ_g	: Gas density near the fuel surface [kg/m^3]
T_s	: Surface temperature [K]	ρ_s	: Density of propellant [kg/m^3]
f	: Mixture fraction	τ	: Viscous stress tensor [Pa]
h_g	: Specific enthalpy of the gas [J/kg]	τ_{eff}	: Effective viscous stress tensor [Pa]
h_j	: Specific enthalpy of species j [J/kg]	ϕ	: AP volume fraction in the propellant

1. 서 론

고체연료 램제트 추진기관은 마하 2~4 범위의 비행 속도에서 운용되는 공기흡입식 추진기관으로, 기존 고체연료 추진 시스템에 비해 우수한 비추력 성능과 연소효율을 제공할 뿐만 아니라 추력 제어 능력도 갖추고 있다[1-4]. 이러한 램제트 추진기관은 초기 작동을 위해 마하 2 이상의 고속 조건이 요구된다. 그러나 포탄에 적용할 경우, 높은 포구 초속으로 인해 별도의 가속 장치 없이도 작동 조건을 만족할 수 있으므로, 높은 실용성을 갖는 것으로 알려져 있다[5]. 또한, 이는 높은 비추력으로 인해 포탄의 사거리 향상뿐만 아니라 경제성 확보에도 기여할 수 있다. 이와 같은 장점을 바탕으로, 고체연료 램제트 추진기관을 포탄에 적용하기 위해 다양한 선행 연구가 활발히 수행됐다[3,6-7].

고체연료 램제트 추진기관의 연소 메커니즘은 난류 유동, 열전달, 열분해, 그리고 기체상 화학반응이 밀접하게 연관된 복합적 과정으로 이해된다[8-9]. 이 과정에서 열분해에 따른 고체연료의 후퇴율은 추진기관 성능과 직접적으로 연계되는 핵심 변수이다. 후퇴율은 연료 표면으로의 열전달에 의해 지배될 뿐만 아니라 공기 질량 유속, 온도, 연소실 압력 등 다양한 운전 조건과 연소 특성에 의해 비선형적으로 크게 변화한다[10]. 더 나아가, 연소기 내부 위치에 따라 국부 후퇴율 또한 크게 달라지기 때문에 그 예측은 매우 어렵다. 따라서 고체연료 램제트 추진기관에서의 연소 및 후퇴율 특성을 완전히 규명하는 데에는 근본적인 한계가 존재한다.

고체연료 램제트 추진기관에 대해 다양한 연소 조건에 따른 후퇴율과 연소 특성을 규명하기 위한 다수의 선행 연구가 수행되어왔다. 최근, 중국 난징 대학교 연구진은 다양한 고체연료를 바탕으로 연소실 형상 및 입구 조건의 변화가 후퇴율과 연소 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다[11-13]. 해당 실험 결과를 기반으로, 후퇴율 변화와 그 물리적 원인을 설명하기 위한 다양한 수치해석 연구도 진행되었다. 그 예로, 난징 대학교 연구진들[14-19]은 비정상 수치해석 기법을 개발하여, 다양한 연소 조건에서 시간에 따른 고체연료의 후퇴율과 연소 특성을 예측하고 실험 결과와 비교 검증하였다. Kadosh 등[20]은 상용 소프트웨어를 통해 hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) 연료의 열분해와 연소 과정을 모사하고 연소실 형상이 성능에 미치는 영향을 분석하였다. Rampazzo[21]는 횡류 연소 조건에서 순수 산소와 고체연료의 연소를 상용 전산유체역학 해석을 통해 모사하였다. 이를 위해 연료 표면에서의 대류 열 유속을 계산하고, 아레니우스 열분해 식을 기반으로 한 사용자 정의 함수(UDF) 모델을 적용하여 후퇴율을 산출하였다.

이러한 선행연구들은 실험 및 수치적 방법을 통해 고체연료 램제트 추진기관의 후퇴율과 연소 거동을 규명하는데 기여하였다.

다양한 추진제 및 연소 조건에서의 후퇴율과 연소 특성을 예측하고 이를 실험과 정량적으로 비교·분석하는 연구는 여전히 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 수치해석을 통해 이차원 슬랩 램제트 연소기에 대한 후퇴율과 연소 특성을 예측한다. 특히, 예측 결과는 국내 최초로 수행된 연소 시험 결과[22]와 직접 비교되어 교차 검증되었다. 이를 위해 앞서 언급한 선행 연구[14-21,23]의 열분해 모델링을 기반으로 연료과농 추진제에 대해 응축상 열분해와 기체상 연소 반응을 통합적으로 모사할 수 있는 수치해석 모델을 개발하였다. 또한, 해당 모델을 활용하여 다양한 공기 유량 및 온도 조건에 따른 후퇴율과 연소 특성을 체계적으로 분석하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 Ansys Fluent 2023 R2를 활용하여 고체연료 램제트 연소 환경에서 연료과농 추진제의 연소 해석을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 수행한 연소 해석 모델의 개략도이다. 해석 형상은 실제 연소 실험에서 사용한 연소기를 2차원으로 변환한 형상을 적용하였다. 또한, 해석 정확도와 계산 효율을 고려하여 전체 격자 수는 약 20만 개로 구성되었다.

2.1 HTPB/AP 추진제 모델링

본 연구에서 고체연료는 연료과농 추진제(HTPB/AP)를 고려하였다. 이때, HTPB는 1,3 부타디엔[21]으로, AP(NH_4ClO_4)는 Chu et al.[24]이 제안한 단일 총괄 반응 메커니즘에 따라 각각 분해된다고 가정하였다. 열분해 반응식은 식 (1)과 (2)에 나타내었다.

$$HTPB \rightarrow C_4H_6 \tag{1}$$

$$NH_3 + HClO_4 \rightarrow 1.62H_2O + 1.105O_2 + 0.265N_2 + 0.12N_2O + 0.23NO + 0.76HCl + 0.12Cl_2 \tag{2}$$

추진제의 물성치는 Chen et al.[25]의 균질화(homogenization) 이론을 통해 산출하였고, Table 1에 정리하였다. 균질화 이론은 HTPB 바인더에 AP 입자가 균일하게 분포한다고 가정한다. 따라서, 연료의 밀도와 정압비열은 각 조성의 질량 백분율을 기반으로 계산되었다. 열전도도는 Chen et al.[25]이 제시한 2차원 유효 열전도도 계산식을 통해 구하였고, 이를 식 (3)에 제시하였다.

$$f = \left[\frac{(f-\xi)}{(1-\phi)(1-\xi)}\right]^2 \quad where\ f = \frac{k_{HTPB/AP}}{k_{HTPB}},\ \xi = \frac{k_{AP}}{k_{HTPB}} \tag{3}$$

여기서, k_{AP}[26]와 k_{HTPB}[26], $k_{HTPB/AP}$는 각각 AP, HTPB, HTPB/AP 추진제의 열전도도이며, ϕ는 추진제 내 AP의 체적분율이다.

2.2 기체상 반응 모델링

본 연구에서 연소 모델은 비예혼합 확산 화염을 효과적으로 모사할 수 있는 화학평형 기반의 non-premixed combustion model(NPCM)을 적용하였다. 해당 모델의 자세한 내용은 선행 연구[4]에 상세히 기술되어 있다. Fig. 1에 공기와 연료 열분해 생성물 간의 기체상 연소 해석 영역을 붉은색 점선으로 나타내었다. 지배방정식은 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존 방정식과 혼합분율 수송 방정식으로 식 (4)-(7)에 제시하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\Delta p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + S_{mom} \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \vec{\nabla} \cdot \left(k_{eff}\vec{\nabla}T - \sum_j h_i \vec{J}_i + \bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v}\right) + S_E \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v f) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla f) + S_f \tag{7}$$

여기서, S_m, S_{mom}, S_E, S_f는 각 지배방정식에 대한 소스 항이다. 이는 연료의 열분해 및 화학 반응에서 기인한다. 따라서, 응축상 열분해 모델에서 계산되며, 2.3절에 해당 소스 항들에 대한 정의가 제시된다.

2.3 응축상 열분해 모델링

Fig. 1에 파란색 점선으로 나타낸 바와 같이,

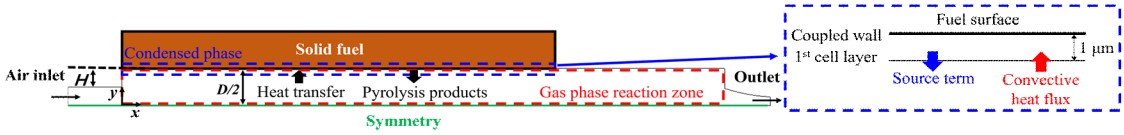


Fig. 1. Schematic of numerical modeling for crossflow combustion of solid fuel.

Table 1. Properties of HTPB/AP.

Property	Value
Density [kg/m^3]	1050
Specific heat [J/(kg・K)]	1735
Thermal conductivity [W/m・K]	0.243

본 연구에서는 고체연료의 응축상 열분해를 벽+소스 경계조건으로 모델링 하였다. 이는 연료 표면을 벽 조건으로 설정하고, 인접한 셀에 소스 항을 적용함으로써 열분해를 모사한다[27]. 또한, 응축상 열분해 모델을 통해 연료의 후퇴율과 기체상 반응 도메인으로 전달되는 소스 항을 계산한다. 연료 표면에서의 후퇴율은 아래 식 (8)과 같이 아레니우스 열분해 식을 통해 예측된다.

$$\dot{r} = Ae^{-E_a/(R_u T_s)} \tag{8}$$

여기서, A는 전지수 인자(pre-exponential factor), E_a는 활성화 에너지(activation energy)이며, R_u는 기체상수, T_s는 추진제 표면 온도이다. 추진제 물성치 계산과 동일하게, 균질화 이론을 적용하여 식 (9), (10)과 같이 추진제의 활성화 에너지와 전지수 인자를 도출하였다.

$$E_{HTPB/AP} = (1-\phi)E_{HTPB} + \phi E_{AP} \tag{9}$$

$$\log(A_{HTPB/AP}) = (1-\phi)\log(A_{HTPB}) + \phi\log(A_{AP}) \tag{10}$$

이때, $E_{HTPB/AP}$, E_{HTPB}, E_{AP}와 $A_{HTPB/AP}$, A_{HTPB}, A_{AP}는 각각 HTPB/AP, HTPB, AP의 활성화 에너지와 전지수 인자이다. HTPB와 AP 각각에 대한 열분해 상수는 선행연구[26]에서 제시된 값을 적용하였다. 최종적으로, 계산된 HTPB/AP의 열분해 상수를 Table 2에 나타내었다.

후퇴율을 기반으로 계산된 질량, y축 방향 운동량, 에너지, 혼합분율에 대한 4가지 소스 항을 식 (11)에 정리하였다.

$$S_m = \rho_s \dot{r}/\Delta y \qquad S_{y-mom} = \rho_s \dot{r} v_g/\Delta y$$
$$S_e = \rho_s \dot{r}\left(h_g + \frac{1}{2}v_g^2\right)/\Delta y \qquad S_f = \rho_s \dot{r}/\Delta y \tag{11}$$

여기서, v_g는 열분해 생성물의 y축 방향 속도로 기체상 도메인과 고체연료 표면 사이의 질량 보존을 통해 아래 식 (12)로부터 얻어진다.

$$\rho_g v_g = -\rho_s \dot{r} \tag{12}$$

이때, ρ_g는 열분해 기체 생성물의 밀도로 연료 표면에 가장 인접한 격자에서 온도와 압력에 따라 계산된다.

후퇴율 계산을 위한 연료 표면 온도는 식 (14)에 제시된 연료 표면에서의 에너지 보존 방정식 기반 복합열전달 해석을 통해 예측된다. 이러한 복합열전달 해석은 연료 표면에서 연료와 가스 영역의 열 유속이 수렴될 때까지 반복 연산을 통해 수행된다[28-29]. 식 (14)에서 좌변은 연료 표면에서의 점착 조건에 따른 대류 열 유속이며 우변은 연료 내부로 전도되는 열 유속이다.

$$k_g \left.\frac{dT}{dn}\right|_{gas,surf} = -k_s \left.\frac{dT}{dn}\right|_{solid,surf} \tag{14}$$

여기서, dT/dn은 법선 방향 온도 구배이며, k_s는 고체 추진제의 열전도도로 Table 1에 제시되어 있다. 또한, k_g는 열분해 생성물의 열전도도로 표면 온도와 유사한 조건에서의 값을 상수로 적용하였다[27].

Table 2. Arrhenius constants for the HTPB/AP used in this study.

	A [cm/s]	E_a/R_u [K]
HTPB/AP (present work)	1.70×10^4	7,885

2.4 해석 및 연소 실험 조건

Table 3에 본 연구에서 수행한 해석 조건을 정리하여 나타내었다. 공기 입구 조건(유속 및 온도)은 2차원 슬랩 램제트 연소 실험과 동일하게 설정하였으며, 각 변수를 최댓값으로 정규화하여 Table 4에 제시하였다. 또한, 흡입 공기 유속은 실험에서 연소 전후로 계측된 유속의 산술평균값을 반영하였다.

연소 실험은 연소식 공기 가열 장치(vitiated heater)와 직접 연결(direct-connected) 방식으로 구성된 2차원 슬랩형 램제트 연소기를 이용하여 수행되었다. 단일 연소실 형상 조건에서 유입 공

Table 3. Summary of simulation setup.

Model		Type
Simulation		RANS, 2-D, Steady
Solver		Pressure based (coupled)
Combustion model		Non-premixed combustion model
Turbulence model		k-ω SST
Boundary condition	Air inlet	Mass flow inlet
	Fuel surface	Coupled wall+source term (C_4H_6+AP monomers)
	Outlet	Pressure outlet (1 bar)

Table 4. Summary of normalized inlet conditions.

Test	G1T1	G1T2	G1T3	G2T1	G2T3	G3T1	G3T2	G3T3
G_{air}	0.56	0.52	0.50	0.73	0.71	1.00	0.96	0.95
T_{air}	0.7	0.9	1.0	0.7	1.0	0.7	0.9	1.0

기의 유속과 온도를 변화시키며 총 8가지 조건에 대해 실험을 진행하였다. 국부 후퇴율은 초음파 기법을 적용하여 측정하였다. 연소 실험에 대한 조건 및 결과는 선행연구[22]에 자세히 기술되어 있다.

2.5 연소효율 정의 및 계산 방법

본 연구에서는 다양한 램제트 입구 조건에 따른 연소효율을 비교하였다. 이를 위해, 연소효율은 식 (15)와 같이 정의된다[30].

$$\eta = \frac{C^*_{exp,sim}}{C^*_{theoretical}} \tag{15}$$

여기서, $C^*_{theoretical}$은 이론 특성속도로, ProPEP 3[31]을 활용하여 도출하였다. 또한, $C^*_{exp,sim}$은 실험 및 예측 특성속도이며, 식 (16)과 같이 계산된다[30].

$$C^*_{exp,sim} = \frac{P_c \cdot A_t}{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel})} \tag{16}$$

이때, P_c는 정상상태에서의 연소실 압력, A_t는 노즐 목 면적이며, $\dot{m}_{air}$과 $\dot{m}_{fuel}$은 공기 질량 유량, 평균 후퇴율로 계산한 연료 질량 유량이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 각 입구 조건에서 x축 방향 거리에 따른 추진제 표면의 국부 후퇴율 분포를 최댓값으로 정규화하여 나타낸 결과이다. 기호는 실험을 통해 측정한 값이며 실선은 수치해석을 통해 예측된 결과이다. 연소기 상류에서는 모든 조건이 실험값과 예측값 간에 다소 차이를 보이나, 이후 구간에서는 전반적인 경향과 절댓값 모두 실험 결과와 양호한 일치도를 보였다. 후퇴율은 연소기 상류에서부터 점진적으로 증가하여 약 x/H=7~10구간에서 최댓값에 도달한 후 다시 감소하여 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이처럼 후퇴율이 최대가 되는 구간은 재부착 지점이다. 해당 영역에서는 높은 열전달 계수와 난류 강도로 인해 표면 열전달이 급격히 증가하여 후퇴율이 최댓값에 도달한다. 이후 난류 경계층 내 화염이 발달함에 따라 후퇴율이 일정한 수준으로 유지되는 양상을 보인다. 추가적으로, 공기의 유속과 온도가 증가하면서 후퇴율 또한 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

다양한 입구 조건에서 공기 유속 및 온도의 변

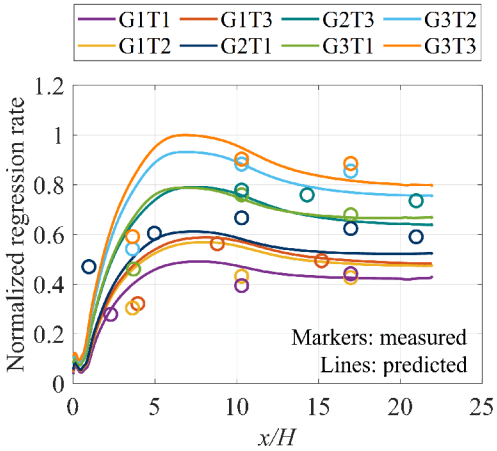


Fig. 2. Comparison of predicted and measured local regression rates of HTPB/AP propellant for various inlet conditions. Circles indicate ultrasonic measurements, lines represent model predictions.

화가 평균 후퇴율에 미치는 영향을 정량적으로 비교하기 위해, Fig. 3에 각 조건에서의 평균 후퇴율 결과를 최댓값으로 정규화하여 나타내었다. 실험과 해석 모두 평균 후퇴율은 국부 후퇴율의 산술 평균으로 계산하였다. 채워진 막대는 예측값을, 빈 막대는 측정값을 의미한다. 두 결과는 전반적으로 높은 일치도를 보였다. 다만, 저유속, 중온 조건에서는 예측값과 측정값 간의 오차가 상대적으로 높게 나타났다. Fig. 2의 국부 후퇴율 결과와 마찬가지로, 공기 유속 및 온도가 증가함

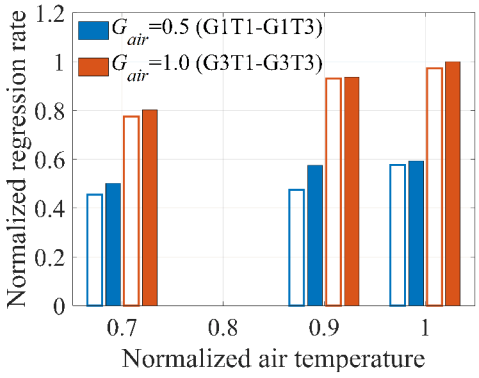


Fig. 3. Comparison of predicted and measured average regression rates at varying inlet air temperatures: hollow bars indicate measurements, filled bars represent predictions.

에 따라 평균 후퇴율 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 정규화된 공기 유속이 0.5에서 1.0으로 두 배 증가할 때, 평균 후퇴율은 약 38.9% 증가하였고, 정규화된 공기 온도가 0.7에서 1.0으로 증가할 때 평균 후퇴율은 약 17.6% 증가하였다[32-33].

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 연소실 압력과 연소효율에 대한 측정값과 예측값을 비교한 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, 모든 조건에서 연소실 압력의 예측값과 측정값은 매우 잘 일치한다. 연소효율의 경우에도 Fig. 4(b)에서 확인 수 있듯이, 전반적으로 측정값과 예측값이 잘 일치한다. 다만, Fig. 3에서 보인 것처럼 저유량 및 중온 조건에서 후퇴율 예측값과 측정값의 차이로 인해, 일부 조건에서는 연소효율이 과소 예측되는 경향이 나타난다.

다음으로, 공기 유속과 온도 조건에 따른 연소실 내 온도 및 연소장을 Fig. 5에서 각각 비교한다. Fig. 5(a)는 온도 분포와 유선을 함께 보여준다. 또한, 해석 조건 간 비교를 위해 재부착 지점의 위치를 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 재순환 영역 내부와 연료 표면 근처에서 고온의 화염 영역이 형성되었다. 공기 유속이 증가할 경우 고온 영역이 미세하게 전방으로 이동하는 반면, 공기 온도가 상승하면 고온 영역이 하류로 뚜렷하게 확장된다. Fig. 5(b)에서는 OH 라디칼 분포를 비교하였고, 각 x/H 위치에서의 최대 온도 지점을 함께 표시하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 공기 온도 상승에 따라 OH 라디칼 생성 영역 또한 하류로 확장되는 경향이 명확하게 확인되었다.

Fig. 6은 공기 유속, 온도, 연소실 압력과 후퇴율 간의 상관관계를 통해 후퇴율 예측치와 측정치를 비교한 결과를 나타낸다. 또한, 수치해석 결과를 기반으로 도출한 상관식을 함께 제시하였

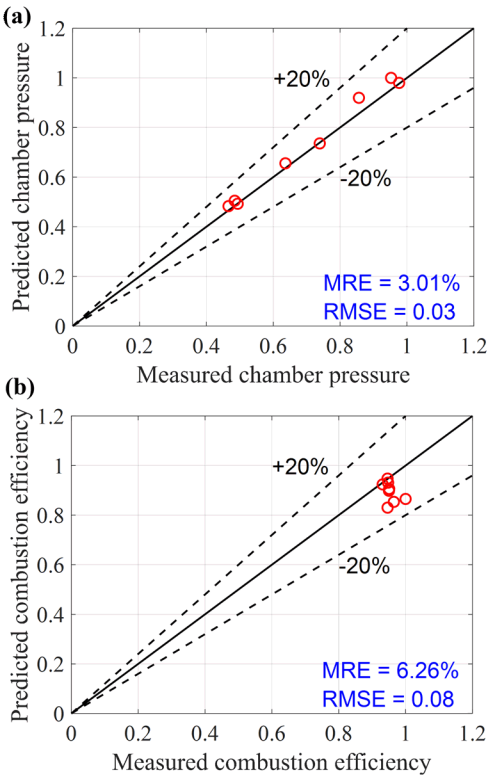


Fig. 4. Comparison of normalized predicted and measured values: (a) chamber pressure, (b) combustion efficiency. The solid line represents perfect agreement. Dashed lines denote ±20% error margins.

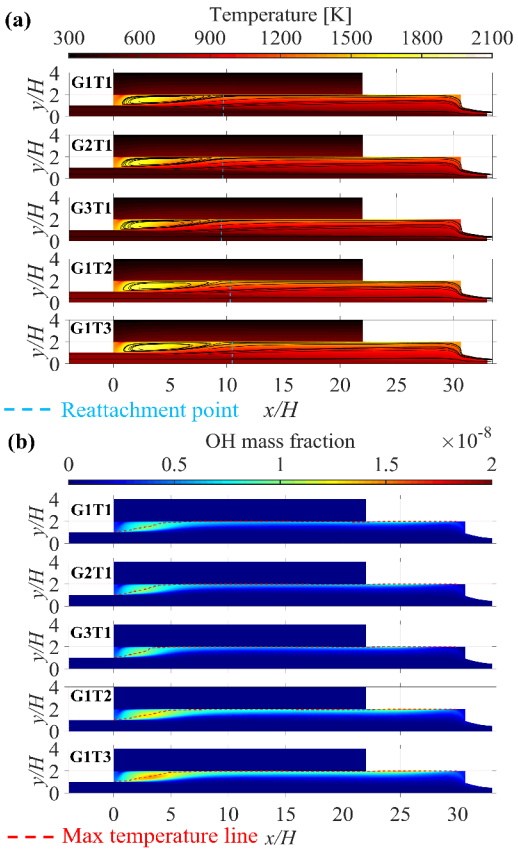


Fig. 5. Comparison across inlet conditions: (a) Temperature contours with superimposed streamlines; the cyan dashed vertical line indicates the reattachment location. (b) OH mass-fraction contours; the red dashed curve traces, at each x/H, the y/H position of the maximum temperature.

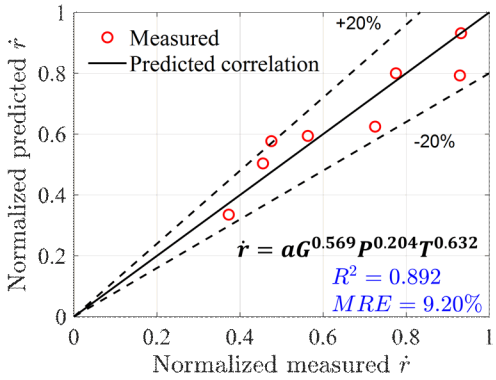
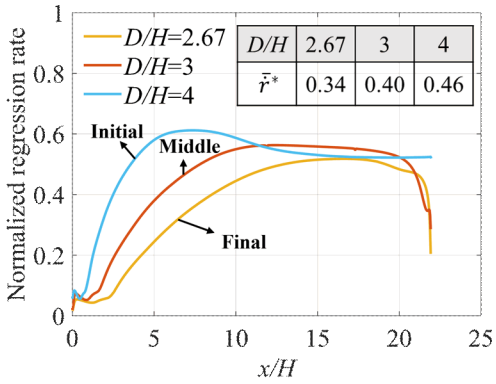


Fig. 6. Comparison of experimentally measured and correlation-predicted normalized regression rates. The solid line represents perfect agreement. Dashed lines denote ±20% error margins.



D/H	2.67	3	4
$\bar{\dot{r}}^*$	0.34	0.40	0.46

Fig. 7. Influence of *D/H* variation on local regression rate distribution along the fuel surface during combustion. The table below summarizes the normalized mean regression rate corresponding to each *D/H* condition.

다. 앞서 언급한 바와 같이 모든 조건에서 예측값과 측정값은 ±20% 이내의 오차범위에서 일치하는 경향을 보였다. 각 변수에 대한 지수항 분석 결과, 흡입 공기의 온도와 유속이 후퇴율에 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 연소실 압력은 상대적으로 낮은 민감도를 보였다. 이는 순수 HTPB를 대상으로 수행된 선행연구[34-37]에서 보고된 결과와도 일치한다.

Fig. 7은 포트/스텝 높이 비(*D/H*)에 따른 정규화된 국부 후퇴율 분포와 평균 후퇴율을 비교한다. 연소 초기, 중기, 말기에 해당하는 세 가지 *D/H* 조건에 대해 수치해석을 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, *D/H*가 증가할수록 연소실 상류에서의 국부 후퇴율은 크게 증가한다. 이에 비해 하류로 이동할수록 국부 후퇴율의 차이는 점차 감소한다. 이러한 경향은 *D/H*가 감소함에 따라 포트 단면적이 증가하면서 공기 유속이 낮아지고, 연료 표면으로의 대류 열전달 효과가 감소하기 때문이다. 또한, 연소 중기 및 말기에는 벽에 인접한 연료 끝단 부분에서 벽면 소화 효과에 의해 국부 후퇴율이 크게 감소하는 현상을 확인할 수 있다[38]. Fig. 7의 표에 정리된 바와 같이, 연료 표면 전체에 대한 평균 후퇴율도 *D/H* 증가에 함께 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 재부착 지점의 위치를 정량적으로 분석한 결과를 보여준다. 재부착 지점은 연료 표면의 가장 인접한 격자에서 *x*축 방향 속도가 0이 되는 지점으로 정의하였다. Fig. 5의 결과에서 논의한 바와 같이, 공기 유속이 증가할수록 재부착 지점은 상류로 미세하게 이동하는 반면, 공기 온도가 증가할수록 하류로 더욱 뚜렷하게 이동하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 6의 분석 결과와 일치

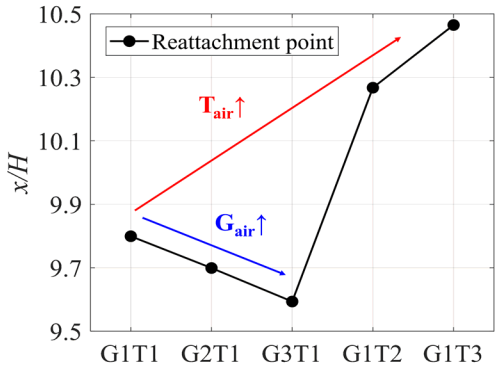


Fig. 8. Comparison across inlet conditions: predicted reattachment-point location (*x/H*).

하는 경향으로, 공기 온도가 후퇴율에 주요한 영향을 미치는 인자임을 뒷받침한다.

마지막으로 Fig. 9는 전단층에서의 최대 열방출률 분포를 비교한 결과를 나타낸다. 모든 조건에서 열방출률은 *x/H*=0 지점에서 최댓값을 보인 뒤, 하류로 갈수록 점진적으로 감소한다. 그러나 *x/H*=5~10 구간에서는 일시적으로 증가하는데, 이는 국부적으로 후퇴율이 높은 영역에서 연소 반응이 강화되면서 열방출률이 증가한 것으로 해석된다. 또한, 공기 유속이 증가할수록 전단층의 난류 강도가 커져 연료와 공기의 혼합이 촉진되기 때문에 열방출률이 전반적으로 상승하는 양상을 확인할 수 있었다. 반면, 공기 온도의 증가는 열방출률을 소폭 증가시키는 경향을 보였다.

4. 결 론

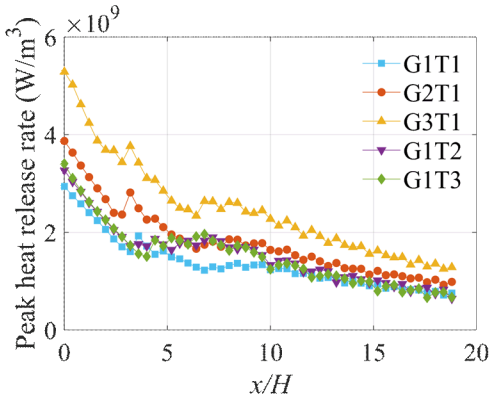


Fig. 9. Streamwise distribution of the peak heat-release rate in the shear layer for various inlet conditions.

본 연구에서는 고체연료 램제트 연소 환경에서 연료과농 추진제(HTPB/AP)에 대한 응축상 열분해와 기체상 연소 반응을 통합한 2차원 연소 해석을 수행하였다. 해석 결과는 실제 고체연료 램제트용 이차원 슬랩 연소기의 연소 실험 결과와 비교되었다. 아울러, 공기 질량 유속 및 온도의 변화가 추진제의 후퇴율과 연소 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과, 국부 및 평균 후퇴율, 연소실 압력, 그리고 연소효율에서 실험 결과와 양호한 일치를 나타냈다. 이를 통해 본 연구에서 적용한 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 또한, 공기 유속과 온도가 증가할수록 후퇴율도 함께 증가하였으며, 이는 연료 표면으로의 대류 열전달 증가에 기인한 현상임을 확인하였다. 상관관계 분석 결과, 공기 온도와 유속이 후퇴율에 지배적인 인자임을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 향후 고체연료 램제트용 연소기 설계의 성능 및 연소 특성 예측을 위한 강력한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(No. UE231063SD)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

[1] I. Park, C. Kim and J. Kim, A trend analysis and future opportunities on the solid fuel ramjet technology, J. Korean Soc. Propuls. Eng. 28(3) (2024) 128-146.

[2] W. Li, D. Zhao, X. Chen, L. Zhu and S. Ni, Numerical investigation of inlet thermodynamic conditions on solid fuel ramjet performances, Int. J. Aerosp. Eng. 2021 (2020).

[3] S. Krishnan, Solid-fuel ramjet assisted gun-launched projectiles: An overview, Proc. 5th Natl. Conf. Airbreathing Aerosp. Propuls., Hyderabad, India (2000) 1-21.

[4] E. Kim, I. Park, S. Han, J. Ryu and H. S. Sim, Numerical study on pyrolysis and combustion characteristics of grain in solid fuel ramjets, J. Korean Soc. Propuls. Eng. 29(2) (2025) 34-44.

[5] S. K. Lee, C. K. Kim and S. S. Lee, A study on the design and performance analysis of a gun-launched projectile with solid fuel ramjet (SFRJ), J. Korean Soc. Propuls. Eng. 12 (2008) 49-59.

[6] R. Oosthuizen, J. J. Buisson and G. F. Botha, Solid fuel ramjet propulsion for artillery projectile applications - concept development overview, Proc. 19th Int. Symp. Ballistics, Interlaken, Switzerland (2001) 403-410.

[7] F. Dionisio and A. Stockenstrom, Aerodynamic wind-tunnel test of a ramjet projectile, Proc. 19th Int. Symp. Ballistics, Interlaken, Switzerland (2001) 529-536.

[8] D. W. Netzer, Modeling solid-fuel ramjet combustion, J. Spacecr. Rockets 14(12) (1977) 762-766.

[9] W. C. Senior, R. M. Gejji and C. D. Slabaugh, Flame dynamics in an optically accessible solid fuel ramjet combustor, J. Propuls. Power 39 (2023) 718-727.

[10] O. Musa, C. Xiong, C. Zhang and W. Li, Effect of inlet conditions on swirling turbulent reacting flows in a solid fuel ramjet engine, Appl. Therm. Eng. 113 (2017) 186–207.

[11] L. Gong, X. Chen, O. Musa, H. Yang and C. Zhou, Numerical and experimental investigation of the effect of geometry on combustion characteristics of solid-fuel ramjet, Acta Astronaut. 141 (2017) 110–122.

[12] O. Musa, C. Xiong and C. Zhang, Experimental and numerical investigation on the ignition and combustion stability in solid fuel ramjet with swirling flow, Acta Astronaut. 137 (2017) 157–167.

[13] O. Musa, W. Li, C. Xiong, L. Gong and W. Li, Experimental investigation on the effect of swirling flow on combustion characteristics and performance of solid fuel ramjet, Acta Astronaut. 148 (2018) 163–174.

[14] O. Musa, C. Xiong and C. Zhang, Combustion characteristics and turbulence modeling of swirling reacting flow in solid fuel ramjet, Acta Astronaut. 139 (2017) 1–17.

[15] L. Gong, X. Chen, O. Musa, Y. Su and C. Zhou, Combustion characteristics of the solid-fuel ramjet with star solid fuel, J. Aerosp. Eng. 31(4) (2018) 04018030.

[16] O. Musa, C. Xiong, W. Li and W. Li, Combustion characteristics of a novel design of solid-fuel ramjet motor with swirl flow, Aerosp. Sci. Technol. 92 (2019) 750–765.

[17] O. Musa, C. Xiong, C. Zhang, Y.-K. Li and W.-H. Li, Investigations on the influence of swirl intensity on solid-fuel ramjet engine, Comput. Fluids 167 (2018) 82–99.

[18] W. Li, X. Chen, W. Cai and O. Musa, Numerical investigation of the effect of sudden expansion ratio of solid fuel ramjet combustor with swirling turbulent reacting flow, Energies 12(9) (2019) 1784.

[19] O. Musa, X. Chen, Y. Li, W. Li and W. Liao, Unsteady simulation of ignition of turbulent reactive swirling flow of novel design of solid-fuel ramjet motor, Energies 12(13) (2019) 2513.

[20] H. Kadosh and B. Natan, Internal ballistics of a boron-containing solid fuel ramjet, Combust. Sci. Technol. 193(15) (2021) 2672–2691.

[21] A. Rampazzo and F. Barato, Modeling and CFD simulation of regression rate in hybrid rocket motors, Fire 6(3) (2023) 100.

[22] L. Yun, D. Kim, S. Jin, D. Kim, J. Ryu, I. Park, and H. S. Sim, “Ultrasound-based diagnostics of local regression rates of solid fuel in ramjet combustors,” J. Korean Soc. Propuls. Eng., in press, 2025.

[23] E. Kim, L. Yun and H. S. Sim, Numerical investigation of regression rate and combustion characteristics of solid fuel using counterflow combustion simulations, J. Korean Soc. Combust., 29(3) (2025)

[24] W. W. Chu and V. Yang, Combustion of AP-based composite propellant in a rocket motor flow environment, 32nd Joint Propulsion Conf. & Exhibit, AIAA 96-2885 (1996).

[25] M. Chen, J. Buckmaster, T. L. Jackson and L. Massa, Homogenization issues and the combustion of heterogeneous solid propellants, Proc. Combust. Inst. 29(2) (2002) 2923–2929.

[26] X. Lyu, X. F. Pang, X. Liu, P. Wang and Y. Liu, Study on the thermal decomposition characteristics of AP/HTPB composite propellant under high heat flux, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. (2016) 5119.

[27] A. Rampazzo, Numerical analysis of hybrid rocket combustion physics, Master’s thesis, Università degli Studi di Padova, Italy (2022).

[28] T. L. Perelman, On conjugated problems of heat transfer, Int. J. Heat Mass Transf. 3(4)

(1961) 293-303.
[29] ANSYS Inc., ANSYS Fluent User's Guide, Release 2022 R1, Canonsburg, PA, USA (2022).
[30] L. K. Werling, M. Hassler, F. Lauck, H. K. Ciezki and S. Schlechtriem, Experimental performance analysis (c* & c* efficiency) of a premixed green propellant consisting of N2O and C2H4, 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf., AIAA 2017-5069 (2017).
[31] D. Cooper, ProPEP 3: A Windows-Based Propellant Evaluation Program, User Manual, NASSA (2012).
[32] M. Chiaverini, Review of solid-fuel regression rate behavior in classical and nonclassical hybrid rocket motors, in: Prog. Astronaut. Aeronaut., Vol. 218 (2007) 37-125.
[33] T. Marquardt and J. Majdalani, Review of classical diffusion-limited regression rate models in hybrid rockets, Aerospace 6(6) (2019) 75.
[34] G. Schulte, Fuel regression and flame stabilisation studies of solid-fuel ramjets, J. Propuls. Power 2 (1986) 301-304.
[35] C. J. Mady, P. J. Hickey and D. W. Netzer, Combustion behaviors of solid-fuel ramjets, J. Spacecr. Rockets 15 (1978) 131-132.
[36] J. Gobbo-Ferreira, M. G. Silva and J. A. Carvalho Jr., Performance of an experimental polyethylene solid fuel ramjet, Acta Astronaut. 45(1) (1999) 11-18.
[37] J. V. Evans, Experimental measurement and modeling of regression rate phenomena in solid fuel ramjet combustors, Ph.D. dissertation, Purdue Univ. (2023).
[38] R. DeBoskey, A. Sahoo, M. Khan, S. Gneuss, M. Fischer, and V. Narayanaswamy, Development and characterization of a small-scale optically accessible solid-fuel ramjet direct-connect facility, Aerosp. Sci. Technol. (2025).

저자정보

김은총은 세종대학교 대학원 우주항공시스템공학과 석사과정이며, 관심분야는 광계측, 층류 및 난류 화염, 부상화염, 냉염, 층류 및 난류 연소 해석 및 연소모델 개발이다.

윤린은 세종대학교 대학원 우주항공시스템공학과 석사과정이며, 관심분야는 광계측을 통한 층류 및 난류 화염의 가시화, 기계학습을 통한 연소 특성 예측 모델 개발이다.

심형섭은 한국과학기술원 항공우주공학과 교수이며, 관심분야는 광계측, 층류 및 난류 화염, 부상화염, 냉염, 층류 및 난류 연소 해석 및 연소모델 개발이다.

전기제어고체추진제의 화염구조에 대한 금속 영향에의 실험적 분석

임대홍*. Rajendra Rajak*. 임가선*.여재익*†

Experimental analysis of metal fuel effect on flame structure of electrically controlled solid propellants

Daehong Lim*. Rajendra Rajak*. Jia Xuan Lim*.Jai-Ick Yoh*†

서 론

고체추진체계를 이용하는 임무가 다변화됨에 따라, 단일 고체추진체계를 통한 다양한 추력 프로파일 대응을 목표하기 위해 전기제어고체추진제가 개발되었다[1]. 전기제어고체추진제는 추진제 양 끝단에 임계점 이상의 전위차를 인가하여 점화 및 지속연소를 달성하는 차세대 고체추진체계이다. 이때, 점화 및 연소반응은 대부분 양극에서 발생하는데, 이는 양극과 추진제의 접촉 계면에서 자유전자가 응집되어 주위 분자와의 충돌하도록 하여 전기분해를 유도하기 때문이다. 이와 동시에, 전기분해 과정에서 생성된 열에 의해, 추진제의 열분해가 차례로 유도되어 활성화기를 생성하고 분자간 화학반응을 야기한다. 즉, 전기/열 분해의 연쇄반응에 의해 고체추진제의 반응영역은 하부 레이어로 전파되고, 최상부 레이어가 연소되어 분출됨에 따라 접촉되어 있던 양의 전극은 그 하부의 레이어와 접촉하게 되며, 추진제의 연소율에 해당하는 속도로 반응영역의 전파가 이뤄진다. 전기분해가 전체 연소과정에서의 시발점이 되는 만큼, 전기분해의 강도가 변화함에 따라 연소율이 제어될 수 있는 특징을 갖는다[2]. 전기분해의 강도를 변경하기 위해서는 인가전력을 변화시키거나 첨가되는 금속연료를 변경하는 방법이 있다. 이때, 금속연료가 첨가됨에 따라 내부 폐회로의 효율이 변하기도 하고, 후류 화염 형상 역시 영향받는다. 전기제어고체추진제가 실제 추진체계에 적용되기 위해서는 화염 형상에 대한 기초연구가 필요하다. 이는 닫힌 연소기 내에서 화염의 거동과 내부 압력 간의 상관관계를 밝힐 수 있으므로 실제 운용 전 필수적으로 연구되어야 한다. 그러나 대부분의 선행연구는 전압과 조성에 따른 연소율 변화에 집중해왔다. 따라서 본 연구에서는 금속이 첨가된 전기제어추진제의 연소과정에서 발생한 화염의 구조와 금속연료의 영향을 분석하여, 향후 기초 데이터로 활용가능한 연구를 수행하고자 하였다.

* 서울대학교 항공우주공학과
† 연락저자, jjyoh@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1507 FAX : (02)-881-1507

실험장치 및 방법

전기제어고체추진제의 연소 동특성 분석을 위해 이용된 추진제는 과염소산리튬(LP, Lithium perchlorate, $LiClO_4$)과 폴리비닐알코올(PVA, Polyvinyl Alcohol, $(C_2H_4O)_x$)을 각각 산화제와 연료로 이용한다. 이때, 기타 첨가제를 포함한 추진제 조성은 표 1에 나타내었다. 첨가된 금속연료로는 티타늄(Ti)과 알루미늄(Al)을 이용하였으며, 질량비 기준으로 10% 첨가하였다.

Table 1 Composition of ECSPs.

Content [wt%]	S-Ti (Ti-10%)	S-Al (Al-10%)
H_2O	47.39	47.39
LP	25.61	25.61
PVA	10.00	10.00
Metal	10.00	10.00
Glycerol	5.00	5.00
H_3BO_3	2.00	2.00

금속연료가 화염면 생성 및 발달에 미치는 영향을 확인하기 위해 OH 평면 레이저 유도 형광법(PLIF, Planar Laser Induced Fluorescence)을 이용하여 화염면을 정의하였으며, 레이저 유도 플라즈마 분광법(LIBS, Laser-induced Breakdown Spectroscopy)을 이용하여 축 방향에 따른 첨가된 금속의 상태를 정의하고자 하였다. Nd:YAG 레이저(Surelite-II, Continuum Inc., 532 nm, 10 Hz) 와 염료레이저(ND6000, Continuum Inc., 283 nm, 10 Hz, 13 mJ)를 이용하여 레이저 시트를 화염영역 중앙에 조사하였으며, 이를 통해 화학반응 중 중간생성물로서 생성되는 OH 활성기의 위치를 검출하였다. 동시에, Intensified Charged-couple device (ICCD) 카메라(iStar, Andor, 1024 px by 256 px, exposure time of 1 μs)를 이용하여 형광신호를 포집하였다. LIBS 계측에서는 Nd:YAG 레이저(Surelite-I, Continuum Inc., 1064 nm, 10 Hz)를

플라즈마 생성원으로 이용하였으며, 분광기(MonoRa320i, 동우옵트론)와 ICCD 카메라(iStar, Andor, exposure time of 20 μs)를 이용하여 신호를 습득하였다.

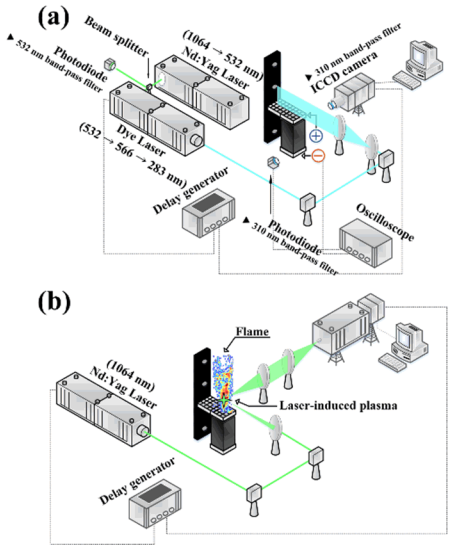


Fig. 1 Experimental setup for (a) OH-PLIF and (b) LIBS.

결 과

그림 2에는 S-Ti와 S-Al 시료의 연소과정에서 발생한 대표적인 화염 형상을 나타내었다. S-Ti의 경우, 3가지의 구간으로 화염 구조 분류가 가능하다. 먼저, 반응영역과 가까운 곳에서는 집합화염의 구조가 발생한다. 이 영역에서 연료와 산화제로 이용된 PVA와 LP가 해당 영역에서 분해 및 반응하여 가스 상의 화염을 생성한다. PVA와 LP 간의 강한 반응에 따라 금속입자의 영향은 억제된 것으로 확인된다. 이에 반해, S-Ti의 경우, 반응영역에서 가장 먼 위치에서는 입자의 영향이 지배적임을 확인할 수 있으며, 집합화염과 입자화염 구조의 중간에서는 그의 천이과정이 존재함을 확인할 수 있다. 이때, 입자화염 구조는 전체 화염길이를 큰 폭으로 연장시킨다. S-Ti의 화염구조와는 다르게, S-Al의 화염구조는 비교적 집합화염 구조에 더욱 가깝다. 화염 종단에서의 입자지배적 화염특성이 확인되지 않으며, 화염 경계면에서의 화염면 섭동 역시 감소된 것으로 확인된다. 이러한 화염 형상의 차이는 금속연료의 연소 참여도 차이에서 기인된다. 티타늄의 경우, 알루미늄에 비해 낮은 열 전도도 및 반응성, 높은 녹는점을 보인다[3]. 이러한 물성치 차이에 의해 연료, 산화제가 반응한 가스화염과 함께 금속연료가 전파되는 과정에서의 반응속도 차이가 발생하고, 최종적으로 화염면 구성이 달라진다.

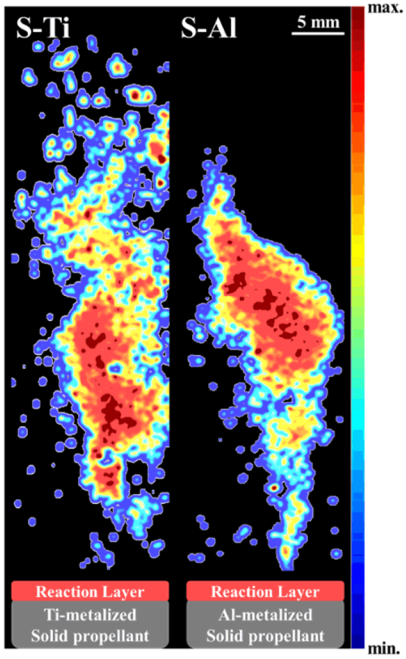


Fig. 2 Flame structure of S-Ti and S-Al.

전반적 화염 동특성을 확인하기 위해, 화염의 평균 길이에 관한 분석을 수행하였다. 그림 3에서는 각각 8 케이스 실험에 대해 화염의 평균이미지를 계측한 결과를 도시하였다. 이때, S-Ti의 경우는 26.47 mm, S-Al은 31.90 mm의 화염 길이를 보였다. 이는 순간 화염 형상과는 반대로, S-Ti의 집합 화염 끝단에서 발생하는 입자화염의 영향이 최소화된 데에서 기인한 것으로 확인된다. 따라서 평균 화염장은 두 추진제에 대한 집합화염 영역을 대표한다. 선술된 바와 같이, S-Al의 화염이 더 긴 원인은 알루미늄의 높은 반응성에 기인하며, 연소과정 중 더 활발히 참여한 것을 의미한다. 이는 국소적으로 더 높은 당량비를 형성하게 하여 전체적인 화염 길이를 증가시켰다. 반면, 티타늄은 반응성이 제한적이므로 연소 중 연료로서의 기여분이 적으며, 연소되지 않거나 주위 응집체에 함께 응집되어 전파된 것으로 판단된다. 주된 열방출이 일어나는 집합화염 구간이 S-Ti의 경우 상대적으로 짧은 만큼, 동일한 추진제 조성 하에서 S-Ti의 총 열 방출량은 S-Al 보다 낮을 것임이 추론 가능하다.

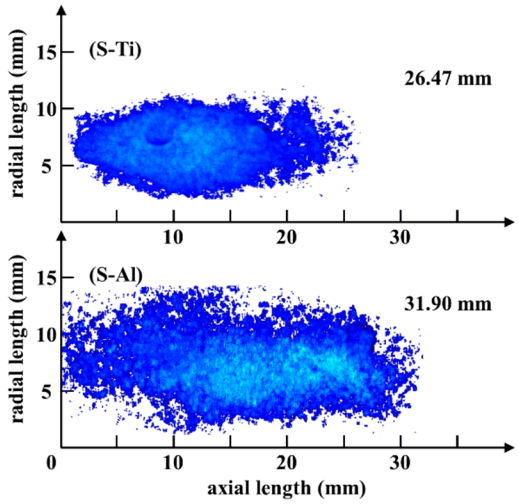


Fig. 3 Averaged flame structure of S-Ti and S-Al.

결 론

본 연구에서는 전기제어고체추진제에서 발생하는 화염 형상에 대한 티타늄과 알루미늄 첨가제의 영향을 분석하였다. 티타늄의 경우, 낮은 반응성에 따라 순간 화염 길이를 연장하는 경향이 두드러졌으며, 이는 대부분 입자 지배적 화염 구조에 기인한다. 반면 알루미늄의 경우, 연소과정에 참여하는 것으로 화염 영역 내 전파과정에서 대부분 산화 및 소모되어 더 확장된 집합화염 영역을 보인다.

후 기

본 연구는 교육부 및 한국연구재단의 BK21 사업, 항공우주신기술연구소를 통한 중견연구(RS-2024-00357969)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] W. Sawka, M. McPherson, “Electrical solid propellants: a safe, micro to macro propulsion technology”, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Jt. Propuls. Conf., 2013, AIAA 2013-4168.

[2] K. Gnanaprakash, J.J. Yoh, “Understanding the pyroelectric combustion behaviour of metallized electrically controlled solid propellants”, Proc. Combust. Inst., Vol. 39, 2022, pp. 5677-5686.

[3] Z.H. Wang, Y.F. Cheng, T. Mogi, R. Dobashi, “Flame structures and particle-combustion mechanisms in nano and micron titanium dust explosions”, J. Loss Prev. Process, Ind., Vol. 80, 2022, no.104876.

고분자 고체 연료의 열물리적 거동에 대한 분자동역학 시뮬레이션

Alqassier Abdullah Mohammad A*. 심형섭**†. 홍성욱***. 조병운*. 심한슬*

Molecular Dynamics Simulation of Thermophysical Behavior of Polymeric Solid Fuels

Alqassier Abdullah Mohammad A*, Hyung Sub Sim**†, Sungwook Leo Hong***, Byeong-Un Jo*, Hanseul Shim*

ABSTRACT

The widespread use of polymeric materials as solid fuels is primarily due to their outstanding mechanical and thermophysical properties. In this study, the thermophysical properties of two representative polymeric materials, hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) and poly(methyl methacrylate) (PMMA), are investigated using molecular dynamics (MD) simulations. Models of HTPB and PMMA were constructed to predict their density, coefficient of thermal expansion, glass transition temperature, and thermal conductivity. The predicted properties show excellent agreement with experimental measurements and earlier reported MD results. This agreement confirms that the developed models precisely capture the behavior of their respective materials, providing a reliable foundation for following simulations on pyrolysis and combustion.

Key Words: Polymeric Solid Fuels, Thermophysical Properties, Molecular Dynamics Simulation

Due to their versatility, ease of manufacture, and low cost, polymeric materials have become indispensable across a wide range of industries [1], from packaging and civil constructions to automotive parts and high-precision medical devices [2]. Furthermore, polymeric materials contribute to applications in aerospace systems, including adhesives, coatings, and composites [3], as well as functional solid fuels such as binders. Typically, about 10-15% of composite propellant formulations encompass polymeric materials employed as binders [4], playing a vital role because of their favorable mechanical properties and thermophysical behavior [5]. Among the different binders, HTPB surpasses other candidates due to its physicomechanical properties and high energy density [6]. From another perspective, PMMA, although not typically included in operational formulations like HTPB, serves as a surrogate for polymeric solid fuels in experiments owing to its optical transparency and recognized degradation [7]. Remarkably, it has been used as a model fuel for hybrid rocket motors and solid ramjets [8]. Thus, research interest on HTPB and PMMA is highlighted, specifically their thermophysical behavior such as glass transition temperature and thermal conductivity.

For instance, Zhu et al. measured viscoelastic and thermophysical properties of three HTPB samples synthesized by different methods [9], while Dossi et al. correlated the glass transition temperature of HTPB to its formulation using experiments and MD [10]. Veals et al. used MD to evaluate thermophysical properties of HTPB, such as density and heat of vaporization [11]. Supporting experimental works by Caruthers and Cohen [12] and Vasilev et al. [13] evaluated thermal expansion and conductivity of polybutadienes, respectively. Goods and Watson [14], Assael et al. [15], and Rudtsch and Hammerschmidt [16] characterized PMMA thermal expansion, conductivity, and specific heat. Shen et al. related PMMA glass transition temperature to its tacticity experimentally and

* Department of Aerospace System Engineering, Sejong University
** Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
*** Department of Mechanical Engineering, Loyola Marymount University
† Corresponding Author, hyungsub.sim@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3724

by MD [17]. Kim et al. also performed MD to compute density, glass transition temperature, and modulus of PMMA, among others [18].

In this study, we conduct MD simulations to predict the following critical thermophysical properties of HTPB and PMMA: density (ρ), coefficient of thermal expansion (CTE), glass transition temperature (T_g), and thermal conductivity (k). Particularly, we pursue three objectives: (1) construct representative models for both materials, (2) compute their properties, and (3) compare against experimental and other MD literature values - establishing a validated baseline and sample-preparation workflow for planned subsequent pyrolysis simulations. This study extends our ongoing efforts to model and simulate organic fuels with MD [19,20,21].

The current work performs MD simulations using the Amsterdam Modeling Suite (AMS) software [22,23]. In the beginning, the polymer models are constructed from their respective monomers in a random configuration. The HTPB model was created based on a commonly used formulation [5], consisting of 20% cis-1,4-butadiene, 20% vinyl-1,2-butadiene, and 60% trans-1,4-butadiene with a total of five repeating units. In contrast, the PMMA model was created from ten methyl methacrylate units.

Next, 20 chains were packed in periodic cells at a low initial density of ~0.1 g/cm^3, followed by a variable-cell geometry optimization that allows lattice vectors to vary until a reasonable density is attained. Then, the models were annealed in the canonical ensemble (NVT) to obtain uniform structures. The annealing schedule consisted of initial equilibration at 300K for 100ps, heating up to 600K at a rate of 0.5K/ps, cooling back to 300K at 2.0K/ps, and a final equilibration for 100ps. Fig. 1 shows a visualization for both annealed cells.

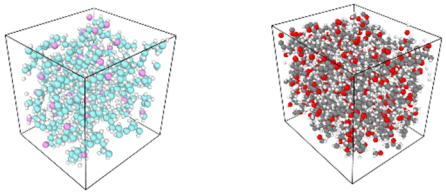


Fig. 1 Annealed cells of HTPB (left) and PMMA (right). Colors: sky-blue: HTPB carbon, pink: HTPB oxygen, dark grey: PMMA carbon, red: PMMA oxygen, and white: hydrogen.

For computing CTE and T_g, MD simulations were conducted at fixed number of molecules, pressure, and temperature (NPT) according to the methods defined by Vashisth et al. [24], but with adjusted simulation parameters. The following equation is used to calculate CTE:

$$CTE = \frac{1}{V_0}\left[\frac{dV}{dT}\right] \quad (1)$$

where V_0: volume of the first sampling point and $\frac{dV}{dT}$: slope of volume vs. temperature.

T_g is defined as the temperature at which a polymer shifts from a rubbery to a glassy state. The value can be estimated from a density-temperature plot as the intersection of the linear fits to the two distinct regions [24].

k was calculated using a modified version of the approach proposed by Moscarello et al. [25] under the NVT ensemble with the formula:

$$k = \frac{L}{2S\Delta T}\left[\frac{dE}{dt}\right] \quad (2)$$

where L: conduction length, S: conduction area, ΔT: temperature difference between heat source and heat sink, and $\frac{dE}{dt}$: energy gradient towards the heat sink.

Simulation parameters were modified either to extend the simulation times for achieving more stabilized values, or accounting for the intrinsic differences between polymers. For all simulations, the Universal Force Field [26] was used with Berendsen thermostat [27] in a time step of 0.25fs, but with Nose-Hoover chains thermostat [28] in 1fs steps for k. Berendsen barostat at 1atm was used for CTE and T_g. To confirm reliability, 5 independent samples of randomly-constructed polymers were tested in parallel, reported as 95% confidence interval.

Table 1 compares predicted thermophysical properties of HTPB and PMMA from MD simulations and corresponding experimental and MD reference data. For HTPB, the average density of the five samples deviates by 0.2% from experiments and 0.3% from MD reference. For PMMA, the deviation is only 0.3% from both experimental and MD values. This excellent agreement, despite the use of a different density optimization method than earlier MD studies, validates the present workflow based on the variable-cell geometry optimization.

Table 1 Computed thermophysical properties of HTPB and PMMA compared to references.

Material	HTPB			PMMA		
Source	This work	Ref. Exp.	Ref. MD	This work	Ref. Exp.	Ref. MD
ρ (g/cm^3)	0.918±0.027	0.920[6]	0.915[29]	1.166±0.017	1.170[30]	1.170[31]
CTE (*10^{-4}K^{-1})	7.15±1.10	7.00[32]	7.10[32]	2.15±1.44	2.22[14]	2.13[31]
T_g (K)	179±19	178[33]	183[10]	367±46	378[30]	407[18]
k (W/m-K)	0.176±0.016	0.182[34]	0.199[13]	0.249±0.032	0.25[35]	-

For CTE, a similar trend of good agreement is observed. For HTPB, the differences are 2% relative to experimental data and 0.7% relative to MD reference. For PMMA, the corresponding differences are 3% and 0.9%, respectively. Yet, the associated uncertainty percentages are relatively larger than those for density, indicating the need for longer equilibration and sampling periods to further reduce statistical fluctuations.

For T_g, the deviations for HTPB are 0.6% and 2% relative to experimental and MD values, respectively. PMMA exhibits differences of 3% and 10% relative to experimental and MD data, respectively. The relatively larger deviation for PMMA from MD reference is attributed to the natural variability of T_g with molecular tacticity [17]. Likewise, the high uncertainties in T_g calculations arises from the dispersion of values among the five independent simulation samples.

In terms of k, HTPB shows a difference of 3% relative to experiments but 12% relative to the MD reference, which is reasonable since the reference employed polybutadiene rather than HTPB [13]. PMMA shows excellent agreement with experiments, with a difference of only 0.4%. Unfortunately, no published MD data for PMMA's thermal conductivity could be found for direct comparison.

With these agreements, it can be concluded that the constructed MD models are indeed representative of their corresponding materials, enabling their incorporation into subsequent pyrolysis and combustion simulations with increased confidence in sample preparation. The validated models developed in this work are currently being applied to investigate their pyrolysis behavior, which is fundamentally critical in the aerospace field.

Acknowledgments

This research was supported by the Brain Korea (BK) 21 FOUR Program of the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (MOE), Republic of Korea. The first author also acknowledges the support of the General Authority for Military Industries (GAMI), Kingdom of Saudi Arabia.

References

[1] J. M. Jafferson, D. Chatterjee, "A review on polymeric materials in additive manufacturing", Mater. Today Proc., Vol. 46, 2021, pp. 1349-1365.

[2] J. J. Andrew, H. N. Dhakal, "Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities - A critical review", Compos. Part C: Open Access, Vol. 7, 2022, pp. 100220.

[3] W. W. Wright, "Polymers in aerospace applications", Mater. Des., Vol. 12, 1991, pp. 222-227.

[4] K. Dixit, V. Karde, A. Jauhari, S. C. Bhattacharyya, C. Ghoroi, "Flow improvement of fine oxidizer using nano – additives", Adv. Powder Technol., Vol. 33, 2022, pp. 103711.

[5] J. C. Quagliano Amado, P. G. Ross, L. M. S. Murakami, J. C. N. Dutra, "Properties of hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) and its use as a liner and binder for composite propellants: A review of recent advances", Propellants, Explos., Pyrotech., Vol. 47, 2022, pp. e202100283.

[6] S. Chaturvedi, P. N. Dave, "Solid propellants: AP/HTPB composite propellants", Arab. J. Chem., Vol. 12, 2019, pp. 2061-2068.

[7] F. S. Mechentel, B. R. Hord, B. J. Cantwell, "Optically Resolved Fuel Regression of a Clear Polymethylmethacrylate Hybrid Rocket Motor", J. Propuls. Power, Vol. 36, 2020, pp. 763-772.
[8] C. Dhandapani, G. Blanquart, A. C. Karp, E. T. Jens, J. Rabinovitch, "Combustion studies of MMA/GOx for a hybrid rocket motor", Combust. Flame, Vol. 256, 2023, pp. 112994.
[9] X. Zhu, X. Fan, N. Zhao, J. Liu, X. Min, Z. Wang, "Comparative study of structures and properties of HTPBs obtained via free radical, living anionic and ring-opening metathesis polymerization", Polymer, Vol. 149, 2018, pp. 103–113.
[10] E. Dossi, J. Earnshaw, L. Ellison, G. Rabello dos Santos, H. Cavaye, D. J. Cleaver, "Understanding and controlling the glass transition of HTPB oligomers", Polym. Chem., Vol. 12, 2021, pp. 2606-2617.
[11] J.D. Veals, C.-C. Chen, I.-C. Yeh, C.P. Stone, M.J. McQuaid, C. Dennis, "Property Estimates for Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (HTPB) Type R45M Derived from Atomistic Molecular Dynamics Simulations", ARL-TR-9714, U.S. Army DEVCOM Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, USA, Jun. 2023.
[12] J. M. Caruthers, R. E. Cohen, "Thermal expansion transients of a cis-1,4 polybutadiene elastomer at various levels of strain", Polymer Eng. Sci., Vol. 16, 1976, 1976, pp. 41–45.
[13] A. Vasilev, T. Lorenz, V. G. Kamble, S. Wießner, C. Breitkopf, "Thermal conductivity of polybutadiene rubber from molecular dynamics simulations and measurements by the heat flow meter method", Mater., Vol. 14, 2021, pp. 7737.
[14] S. H. Goods, R.M. Watson, "Thermal Expansion and Hydration Behavior of PMMA Molding Materials for LIGA Applications". Sandia Natl. Labs., Tech. Rep. SAND2003-8000, 2003.
[15] M. J. Assael, S. Botsios, K. Gialou, I. N. Metaxa, "Thermal Conductivity of Polymethyl Methacrylate (PMMA) and Borosilicate Crown Glass BK7", Int. J. Thermophys., Vol. 26, 2005, pp. 1595–1605.
[16] S. Rudtsch, U. Hammerschmidt, "Intercomparison of measurements of the thermophysical properties of polymethyl methacrylate", Int. J Thermophys., Vol. 25, 2004, pp. 1475–1482.
[17] J. Shen, E. Yildirim, S. Li, Y. Caydamli, M. A. Pasquinelli, A. E. Tonelli, "Role of local polymer conformations on the diverging glass transition temperatures and dynamic fragilities of isotactic-, syndiotactic-, and atactic-poly(methyl methacrylate)", Macromolecules, Vol. 52, 2019, pp. 4689–4700.
[18] D. Kim, J. Lim, D. Jung, S. G. Lee, "Thermal and mechanical properties of polymeric materials for automotive applications using molecular dynamics simulation", Mater. Today Commun., Vol. 36, 2023, pp. 106529.
[19] E. Choi, S. L. Hong, C.-M. Yoon, H. S. Sim, "Atomistic insights into catalytic role of platinum-graphene nanostructures in decomposition of high-energy-density fuels", Alexandria Eng. J., Vol. 84, 2025, pp. 103467.
[20] H. S. Sim, E. Choi, S. L. Hong, C.-M. Yoon, "ReaxFF molecular dynamics simulations of high-energy-density fuel combustion catalyzed by Pt–graphene hybrids", Combust. Flame, Vol. 282, 2025, pp. 114474.
[21] H. S. Sim, "Evaluation of the synergistic effect of platinum-supported graphene materials on methylcyclohexane decomposition via flow reactor experiments and reactive force-field molecular dynamics simulations", Fuel, Vol. 381, 2025, pp. 133554.
[22] Software for Chemistry & Materials, Amsterdam Modeling Suite, ver. 2025.1, 2025.
[23] E. J. Baerends, N. F. Aguirre, N. D. Austin, J. Autschbach, F. M. Bickelhaupt, R. Bulo, C. Cappelli, A. C. T. van Duin, F. Egidi, C. Fonseca Guerra, A. Förster, M. Franchini, T. P. M. Goumans, T. Heine, M. Hellström, C. R. Jacob, L. Jensen, M. Krykunov, E. van Lenthe, A. Michalak, M. M. Mitoraj, J. Neugebauer, V. P. Nicu, P. Philipsen, H. Ramanantoanina, R. Rüger, G. Schreckenbach, M. Stener, M. Swart, J. M.

Thijssen, T. Trnka, L. Visscher, A. Yakovlev, S. van Gisbergen, "The Amsterdam Modeling Suite", J. Chem. Phys., Vol. 162, 2025, pp. 162501
[24] A. Vashisth, C. Ashraf, C. E. Bakis, A. C. T. van Duin, "Effect of chemical structure on thermo-mechanical properties of epoxy polymers: Comparison of accelerated ReaxFF simulations and experiments", Polymer, Vol. 158, 2018, pp. 354-363.
[25] E. M. Moscarello, B. L. Wooten, H. Sajid, L. D. Tichenor, J. P. Heremans, M. A. Addicoat, P. L. McGrier, "Thermal conductivity of two-dimensional benzobisoxazole-linked covalent organic frameworks with nanopores: Implications for thermal management applications", ACS Appl. Nano Mater., Vol. 5, 2022, pp. 13787-13793.
[26] A. K. Rappé, C. J. Casewit, K. S. Colwell, W. A. Goddard III, W. M. Skiff, "UFF, a full periodic table force field for molecular mechanics and molecular dynamics simulations", J. Am. Chem. Soc., Vol. 114, 1992, pp. 10024-10035.
[27] H. J. C. Berendsen, J. P. M. Postma, W. F. van Gunsteren, A. Di Nola, J. R. Haak, "Molecular dynamics with coupling to an external bath", J. Chem. Phys., Vol. 81, 1984, pp. 3684-3690.
[28] G. J. Martyna, M. L. Klein, M. Tuckerman, "Nose-Hoover chains: The canonical ensemble via continuous dynamics", J. Chem. Phys., Vol. 97, 1992, pp. 2635-2643.
[29] J. B. Hooper, D. Bedrov, G. D. Smith, B. Hanson, O. Borodin, D. M. Dattelbaum, E. M. Kober, "A molecular dynamics simulation study of the pressure-volume-temperature behavior of polymers under high pressure", J. Chem. Phys., Vol. 130, 2009, pp. 144904.
[30] S. Rogers, L. Mandelkern, "Glass transitions of the poly-(n-alkyl methacrylates)", J. Phys. Chem., Vol. 61, 1957, pp. 985-991.
[31] D. Gurina, Y. Budkov, M. Kiselev, "Molecular dynamics study of the swelling of poly(methyl methacrylate) in supercritical carbon dioxide", Mater., Vol. 12, 2019, pp. 3315
[32] G. D. Smith, O. Borodin, D. Bedrov, W. Paul, X. Qiu, M. D. Ediger, "13C NMR spin-lattice relaxation and conformational dynamics in a 1,4-polybutadiene melt", Macromolecules, Vol. 34, 2001, pp. 5192-5199.
[33] B. Frick, C. Alba-Simionesco, K. H. Andersen, L. Willner, "Influence of density and temperature on the microscopic structure and the segmental relaxation of polybutadiene", Phys. Rev. E, Vol. 67, 2003, pp. 051801.
[34] S. Chen, Y. Tang, H. Yu, X. Guan, L. T. DeLuca, W. Zhang, R. Shen, Y. Ye, "Combustion enhancement of hydroxyl-terminated polybutadiene by doping multiwall carbon nanotubes", Carbon, Vol. 144, 2019, pp. 472-480.
[35] C. D. Armeniades, E. Baer, "Introduction to Polymer Science and Technology", Wiley, 1977, pp. 656.

암모니아 전소 보일러에의 철 연소 적용을 위한 1-D 해석 모델 연구

배 영*,**, 김성일*, 양 원*†, 박기범***, 류창국***, 임성균**

One-Dimensional Analytical Model for Integrating Iron Combustion into Ammonia-Fired Boilers

Pei Ying*,**, Seongil Kim*, Won Yang*†, Gibeom Park***, Changkook Ryu***, and Seongkyun Im**

전력 부문의 온실가스 감축을 위해 석탄 발전의 저탄소 전환이 활발히 추진되고 있다[1]. 그 중 하나의 접근이 석탄을 대체하거나 보완할 수 있는 무탄소 연료 기술이며[2, 3, 4], 대표적인 예가 미분탄-암모니아 혼소 기술이다.

암모니아는 탄소를 포함하지 않으며, 이를 연료로 사용하면 CO_2 배출을 피할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 암모니아는 질소 함량이 매우 높기 때문에, 연소 시 배기가스 내 NO_x 생성이 증가할 가능성이 크다[5]. 그리고 화염온도가 미분탄에 비해 낮기 때문에 보일러 효율이 저하되는 문제가 있다[6, 2].

이에 대응하여, 금속 분말을 무탄소 연료 혹은 에너지 운반체로 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있다[7, 8]. Al, Si, Zn 등 다양한 금속이 후보로 검토되고 있으나, 물질의 저장성, 운송 효율, 반복 사이클 효율, 안전성 등을 종합 고려했을 때 철(Fe) 분말이 가장 유력한 후보로 부상하고 있다[8, 9]. 철을 연료로 사용할 경우, 연소 시 이산화탄소가 전혀 발생하지 않으며, 고체 상태로 보관 및 운송이 용이하고, 연소 후 생성된 산화철을 다시 환원시켜 재활용할 수 있다는 장점을 지닌다[10]. 또한, 철 분말의 연소 화염 온도는 암모니아에 비해 높기 때문에, 암모니아 전소 시 낮아지는 보일러 효율을 보정하거나 회복시키는 역할을 할 가능성도 있다.

본 연구는 1000 MW 급 초초임계압(USC) 당진 석탄화력발전소를 대상으로 구축된 1-D 보일러 해석 모델을 기반으로 수행되었다. 이 모델은 기존 연구에서 석탄-암모니아 혼소 및 전소 조건에 대한 Heat flux, 배기가스 온도, 효율을 해석하는 데 활용되었다. 본 연구에서는 이를 기반으로 철 혼소율을 10%씩 0~50% 범위로, LHV 기준으로 철 연소 반응을 추가하여 모델을 확장하여 무탄소 연료 적용 가능성을 평가하였다.

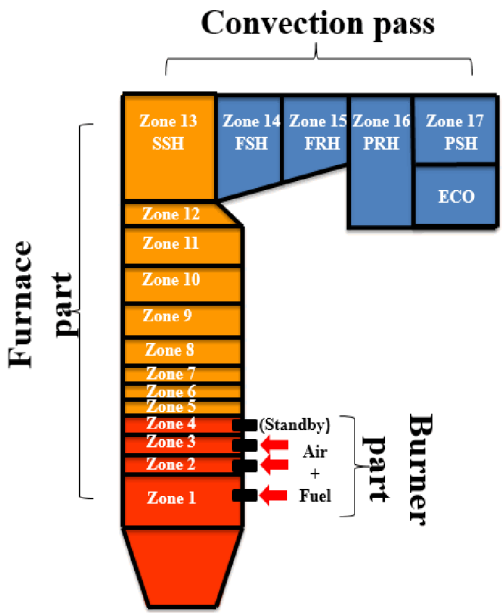


Fig. 1 1-D Boiler Model with Zonal Division.

모델은 furnace part와 convection pass로 구성되며, 총 17개 구역으로 세분화하였다. 하단의

* 한국생산기술연구원
** 고려대학교 기계공학과
† 연락저자, yangwon@kitech.re.kr
TEL : (041)-5898-265 FAX : (041) -5898-323

버너 구간에서 연소가 이루어지고, 복사부와 대류부를 따라 열이 전달된다. 대류부에는 Superheater, Reheater, Economizer가 배치되어 있으며, 본 연구에서는 Economizer를 분석 대상에서 제외하였다.

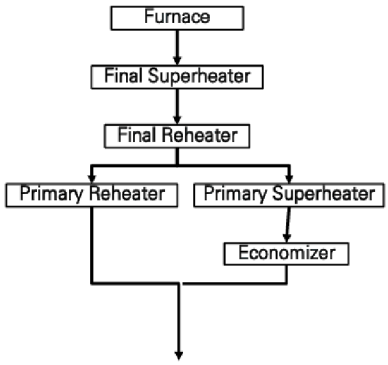


Fig. 2 Gas flow diagram

연소가스는 최종 Final Reheater 이후 두 경로로 분기되며, 질량 유량 비는 NR 기준으로 Primary Reheater 0.55, Primary Superheater 0.45로 설정된다.

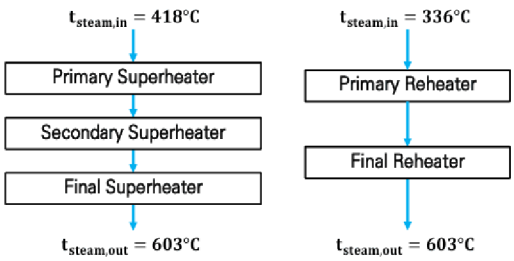


Fig. 3 Steam flow diagram

증기 계통은 superheated steam와 reheated steam으로 구성되며, 과열 증기는 418 °C에서 시작해 Primary–Secondary–Final Superheater를 거쳐 603 °C로 상승하고, 재열 증기는 336 °C에서 Primary–Final Reheater를 통과하며 동일하게 603 °C에 도달한다.

$$W^2 = K_P t + W_0^2, K_P = K_\infty \exp(-E_a / RT_P) \qquad (1)$$

암모니아의 산화 반응 속도는 CFD 결과를 기반으로 도출된 fitting 식을 통해 추정하였다. 철 산화량은 식(1)을 이용하여 계산하였다[11]. 여기서 $\boldsymbol{W}$는 단위 면적당 무게 증가량 $\boldsymbol{kg/m^2}$, $\boldsymbol{W_0}$는 초기값=0, $\boldsymbol{K_P}$는 온도에 대해 Arrhenius 형태의 의존성을 갖는 parabolic rate constant이다. 여기서 $\boldsymbol{K_\infty \approx 304.7\ kg^2/(m^4 s)}$, 활성화 에너지 $\boldsymbol{E_a \approx 157539\ \ J/mol}$ 이다.

$$\dot{Q}_B + \dot{H}_{Air} + \dot{H}_{FG,in} - \dot{H}_{FG,out} - \dot{Q}_{Rad} = 0 \qquad (2)$$

$\boldsymbol{\dot{Q}_B}$는 연료 연소에 의한 열 발생량, $\boldsymbol{\dot{H}_{Air}}$는 공기 유입에 따른 엔탈피 유입량, $\boldsymbol{\dot{H}_{FG,in}}$는 배기가스 유입 엔탈피, $\boldsymbol{\dot{H}_{FG,out}}$는 배기가스 유출 엔탈피, $\boldsymbol{\dot{Q}_{Rad}}$는 연소로 내벽으로 방사되는 복사열전달량이다.

$$\dot{H}_{FG,in} + \dot{Q}_{EM,in} - \dot{H}_{FG,out} - \dot{Q}_{EM,out} - \dot{Q}_p = 0 \qquad (3)$$

여기서 $\boldsymbol{\dot{Q}_{EM,in}}$, $\boldsymbol{\dot{Q}_{EM,out}}$는 Zone 내부 복사열 교환량, $\boldsymbol{\dot{Q}_p}$는 튜브를 통해 빠져나가는 열전달량이다.

본 연구에서는, 암모니아 전소 보일러를 기반으로 철 연소 적용 시 열전달량, 배기가스 온도, 효율 변화를 평가함으로써, 암모니아 전소 보일러 모델의 신뢰성을 기반으로 철 연소 적용 가능성 입증하고자 한다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2025-13772968).

참고 문헌

[1] ZHANG, Yun-Long, et al. Unveiling the evolution and future prospects: A comprehensive review of low-carbon transition in the coal power industry. Applied Energy, 2024, 371: 123649.
[2] LIN, Qifu, et al. Experimental study on ammonia Co-firing with coal for carbon

reduction in the boiler of a 300-MW coal-fired power station. Engineering, 2024, 40: 247-259.
[3] WEI, Daining, et al. Numerical investigation of hydrogen Co-firing in a 660 MW power plants: Combustion stability, heat transfer, and NOx formation. Journal of the Energy Institute, 2024, 113: 101558.
[4] JANICKA, Johannes, et al. The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron. Applied Energy, 2023, 339: 120950.
[5] PU, Yang, et al. Experimental study of combustion characteristics and ash-related issues of ammonia co-firing with high alkali pulverized coal in a 4 MW boiler. Proceedings of the Combustion Institute, 2024, 40.1-4: 105642.
[6] SUN, Wangping, et al. Simulation study on coal and ammonia co-firing in a tangential firing boiler under different ammonia injection methods. Scientific Reports, 2025, 15.1: 15768.
[7] HALTER, Fabien, et al. Recyclable metal fuels as future zero-carbon energy carrier. Applications in Energy and Combustion Science, 2023, 13: 100100.
[8] DIRVEN, Luc; DEEN, Niels G.; GOLOMBOK, Michael. Dense energy carrier assessment of four combustible metal powders. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018, 30: 52-58.
[9] SOHRABI, Mohammadmahdi, et al. Iron powder particles as a clean and sustainable carrier: Investigating their impact on thermal output. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 188: 957-969.
[10] DEBIAGI, Paulo, et al. Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 165: 112579.
[11] XU, Shijie, et al. Phase change and combustion of iron particles in premixed CH4/O2/N2 flames. Combustion and Flame, 2024, 259: 113171.

금속화 고체추진제 연소 표면 상의 응집체 모델링

최홍석*. 여재익*†

Cohesion-Aware Surface Tension Modeling of Agglomeration in Metallized Solid Propellants

Hong-Suk Choi* and Jack J. Yoh*†

금속화 고체추진제 연소 시 표면에서 발생하는 agglomeration은 화염 구조와 추진 성능을 좌우하는 핵심 현상이므로, 액상의 금속이 형성되고 병합되며 분리·진화하는 과정을 정량적으로 기술하는 것은 필수적이다 [1]. 알루미늄 기반 추진제와 다양한 금속화 조성에 대한 실험 연구들은 melt layer와 화염 인근에서의 agglomeration 거동을 밝혀내며 모델링을 위한 중요한 기준을 제시하였다 [2]. 기존의 모델들은 실험적 관계식, 포켓 개념, 충전 모델, 물리적 모델, condensed layer 모델 등으로 분류되며, 각각 결합된 물리 현상의 일부만을 설명한다 [3]. 수치적 접근으로는 분자동역학이 입자 수준의 미시적 과정을 해석할 수 있으나 작은 평형계로 한정되고, 몬테카를로 기법은 복잡 사건의 샘플링에는 유용하지만 전 반응장을 다루기에는 비실용적이다. 또한 이산요소법은 입자와 입자 및 입자와 기체 사이의 상호작용을 포착할 수는 있으나, 추가적인 힘과 높은 계산 비용이 요구된다. 군집 해석 기법은 형상 정보를 제공하지만 물리화학적 현상을 해석하는 데 있어서는 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 금속화 추진제의 표면 연소 반응 유동 해석을 기반으로 [4,5], 응집력과 계면 최소화 힘을 지배방정식 내부에 직접 포함하는 표면 장력 모델을 도입하였다. 이를 통해 반응, 상변화, 다상 수송이 동시에 전개되는 과정 속에서 agglomeration의 형성과 진화를 규명하는 것을 목표로 한다 [6].

본 연구의 코드는 고체, 액체, 기체 전 상에 대하여 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존식을 응력과 변형률과 함께 계산한다. 시간 차분에는 3차 Runge-Kutta 방법을, 공간 차분에는 3차 ENO 기법을 사용하였다.

Al과 $KClO_4$ 반응은 Arrhenius 법칙을 따르며, 활성화에너지와 지수인자는 다양한 가열 속도 조건에서 수행된 열중량 분석(TGA)을 통해 추출하였다. 특히 두 번째 발열 피크를 반응 개시 지표로 삼았다. 잠열 효과를 포함하여 상변화가 온도 및 반응 속도에 feedback되도록 구현하였다.

고체 및 액체에는 modified-Tait 상태방정식을, 고온 생성기체에는 Noble-Abel 상태방정식을 적용하였으며, 계수는 각 구성 성분의 기준 음속에 따라 설정하였다.

Agglomeration 해석에는 SPH 기반 surface tension 모델을 유한차분 격자에 적용하였다. 해당 모델은 짧은 거리에서 반발, 긴 거리에서 인력을 구현하는 spline kernel을 사용하는 응집항과, 국소 곡률에 의존하는 Gaussian kernel을 이용한 계면 최소화 항으로 구성된다. 이 과정은 Mie 퍼텐셜을 기준으로 교차 검증하여 중간 스케일에서의 인력-반발 균형을 보정하였다 [6]. 인접 입자 밀도가 부족한 영역에서는 대칭화된 보정항을 부여하여 기체-액체 계면에서의 힘을 강화하였다.

Level-set function은 물질과 상의 경계를 추적하며, 사전에 정의된 경계 내부에서 반응물과 생성물을 분리한다. 이 조합을 통해 연소와 용융 과정에서 상과 종을 보다 명확히 구분하였다.

검증은 단일 입자의 용융 시험과 다중 입자 환경에서 곡률에 의한 구형화, 병합, 분리, 관성 효과를 재현하는 것으로 수행하였다. 본 시뮬레이션의 주요 조건은 2 mm × 2 mm 도메인에서 Al과 $KClO_4$의 질량비를 34:66 wt%로 맞춘 2차원 이종 연소 해석이며, 연소 표면 인근에서 균일 점화를 가하였다.

액체 상태의 물질에만 surface tension이 작용하는 경우, 액체 영역은 곡률이 큰 모서리와 꼭짓점부터 수축된다. 국소적으로 작은 액적이 형성된 뒤 액적 사이 액체 다리(liquid bridge)를 통해 병합하며, 결국 기저면 위 안정된 구형 입자를 형성하였다. 초기에는 계면이 안쪽으로 움직이며, 안정 형상이 완성될수록 흐름이 줄어드는 과정이 구현되었다.

다수의 용융 입자가 존재하는 경우, 모델은 melt layer 내부의 전형적 agglomeration 과정

* 서울대학교 항공우주공학과
† 연락저자, jjyoh@snu.ac.kr
TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-882-1507

을 재현한다. 작은 액적은 고체와 액체 사이의 계면에서 생성되며, 응집 범위 내에 위치할 경우 병합된다. 이후 병합에 따른 관성과 압력 상승에 의해 표면에서 분리되며, 비대칭 형상은 이완 과정을 거쳐 구형으로 수렴하였다. 고밀도 영역에서는 빠른 성장과 병합이, 저밀도 영역에서는 고립된 액적이 관찰되었다.

연소 표면 인근에서의 온도장과 Al_2O_3 분율은 다수의 고온 agglomerate의 형성을 나타냈으며, 이는 국소적인 연료와 산화제의 비율과 상관성을 보였다. 모델은 melt pooling, 병합, 화염으로의 이탈, 그리고 전단력과 온도가 집중되는 코너에서의 원추형 연소 형상 발달을 포착하였다. 이러한 모서리 거동은 실험 결과와 정합성을 보였다 [7].

시뮬레이션과 실험의 입자 크기 분포는 강한 중첩을 보였다. Fig. 1과 2는 시뮬레이션과 실험의 입자 크기를 정성, 정량적으로 비교한다.

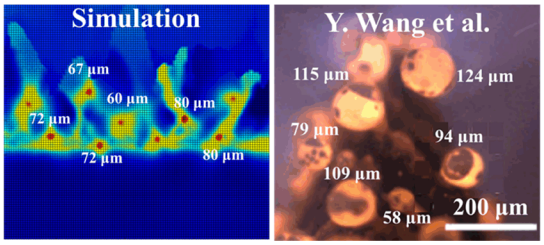


Fig. 1 Comparison of particle-size distributions, normalized by each dataset's average diameter, between the experimental reference data [7] and the present simulation.

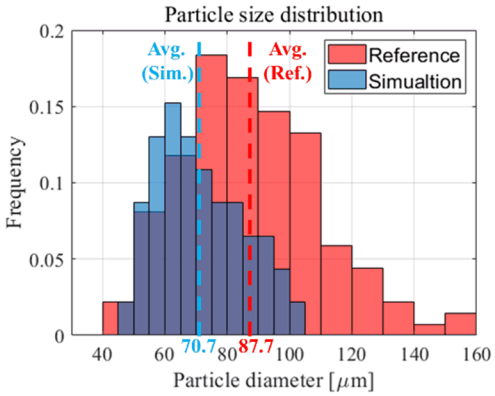


Fig. 2 Comparison of particle distributions between reference data and the simulation.

실험에서는 58, 79, 94, 109, 115, 124 μm의 대표 입자가 평균 87.7 μm로 관찰되었고, 시뮬레이션에서는 60, 67, 72, 72, 80, 80 μm의 입자가 평균 70.7 μm로 나타났다. 두 경우 모두 85% 이상이 50~110 μm 범위에 분포하였다.

시뮬레이션 분포는 다소 좁고 평균이 작게 나타났는데, 이는 이상적인 초기 조건과 환경 요인의 부재에 기인한다. 초기 불균질성과 경계 조건을 실험과 유사하게 반영하면 격차가 줄어들 것으로 예상된다 [7].

본 연구에서는 응집 효과를 반영한 surface tension 공식을 반응 유동 계와 결합하여 고체, 액체, 기체 계면을 반응 및 상변화와 함께 계산하였다. 그 결과 액상의 금속 액적이 형성, 병합, 분리, 진화하는 과정을 연계 수송과 화학 반응의 산출로써 재현하였다. 단일 및 다중 입자 검증, 그리고 이종 알루미늄 기반 추진제 시뮬레이션에서 곡률에 의한 구형화와 병합, 국소 패킹 및 응집 범위에 따른 민감도, 관성 매개 이완, 그리고 실험과 부합하는 입자 크기 분포를 확인하였다. 또한 본 연구는 티타늄과 붕소 시스템에도 적용 가능성을 보여 범용성을 갖추었으며, 향후 측정된 미세구조와 경계 조건을 반영함으로써 더욱 정확한 예측 능력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소 및 공학연구원과 협약한 과학기술정보통신부 보조금 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] T.R. Sippel, A. Storch, R.A. Yetter, "Exploring mechanisms for agglomerate reduction in composite solid propellants with polyethylene inclusion modified aluminum", Combust. Flame, Vol. 162, 2015, pp. 846–854.

[2] J.K. Sambamurthi, A.K. Sigman, J.W. Krier, "Aluminum agglomeration in solid-propellant combustion", AIAA J., Vol. 22, 1984, pp. 1132–1138.

[3] H. Gao, Y. Huang, Z. Chen, S. Jiang, H. Wang, "Research progress and prospects on agglomeration models and simulation methods of aluminum particles in aluminum-based composite propellants", Propellants, Explos. Pyrotech., Vol. 49, 2024, pp. e202400056.

[4] H.S. Choi, J.J. Yoh, "A grain-scale modeling on the surface burning and

agglomeration of the metalized solid propellants", Combust. Flame, Vol. 261, 2024, pp. 113284.
[5] H.S. Choi, J.J. Yoh, "Combustion fundamentals on the melt layer of metalized propellants with surface stress evolution", Combust. Flame, Vol. 272, 2025, pp. 113893.
[6] N. Akinci, M. Ihmsen, G. Akinci, B. Solenthaler, M. Teschner, "Versatile surface tension and adhesion for SPH fluids", ACM Trans. Graph., Vol. 32, 2013, pp. 1–8.
[7] Y. Wang, W. Zhou, X. Song, Q. Li, "Imaging the combustion characteristics of Al, B, and Ti composites", Combust. Flame, Vol. 252, 2023, pp. 1–12.

헬름홀츠 공명기의 최적화 검증을 위한 리케 튜브의 설계 및 제작

이재훈* · 김진건* · 이민우*†

Design of a Rijke Tube for the Optimization and Performance Validation of a Helmholtz Resonator

Jaehoon Lee*, Jingeon Kim*, Minwoo Lee*†

ABSTRACT

Thermoacoustic instability in practical combustion systems poses significant challenges to achieving stable and efficient operation, underscoring the need for effective passive control strategies such as the Helmholtz resonator (HR). To support the systematic validation of HR optimization methods, this study presents the design and fabrication of a modular Rijke tube test platform. The tube, 1000 mm in length with a 94 mm square cross-section, is equipped with resonator mounting points at 100 mm intervals, allowing flexible configuration and repeatable testing of various HR geometries. Preliminary simulations using OSCILOS identified a dominant instability at 304 Hz, establishing the baseline for resonator placement and tuning. The system is designed to accommodate parametric variations in neck length, cavity volume, and axial position to enable optimization using a genetic algorithm (GA). GA-based optimization increased the frequency spacing between split modes from 26.30 Hz to 42.98 Hz and reduced the growth rate from -40.34 rad/s to -44.44 rad/s, corresponding to a 21.9 - 33.5% improvement in damping performance. This reconfigurable experimental platform provides a robust basis for validating advanced HR optimization strategies and assessing their effectiveness in suppressing thermoacoustic instabilities in future practical combustor applications.

Key Words : Rijke tube, Helmholtz resonator, Thermoacoustic instability, Genetic Algorithm

산업용 연소기와 가스터빈 등에서 발생하는 열음향 불안정(thermoacoustic instability)은 안정적인 운전 및 제어를 어렵게 만드는 주요 요인 중 하나이다. 이러한 불안정은 시스템 내에 존재하는 음향 압력 섭동과 비정상적인 열 방출률이 동조될 때 발생한다. 이를 완화하기 위한 대표적인 수동 제어 장치가 헬름홀츠 공명기(Helmholtz resonator, HR)이다. HR은 공동(cavity)과 목(neck)으로 구성된 음향 소자로서, 특정 공진 주파수에서 음향 에너지를 저장·방출하여 압력 진동을 효과적으로 감쇠한다. 이러한 특성 덕분에 HR은 가스터빈 연소기 [1], 로켓 추진 시스템 [2], 모델 연소기[3] 등 다양한 연소 시스템에서 열음향 불안정 완화에 널리 적용되어 왔다. 그러

* 한밭대학교 기계공학과

† 연락저자, mwlee@hanbat.ac.kr

TEL : (042)821-1158 FAX : (042)-821-1587

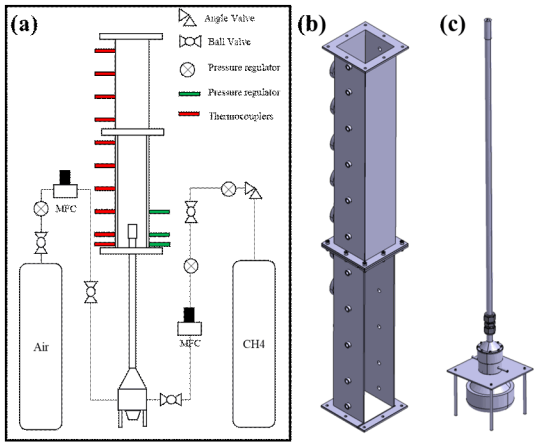


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the Rijke tube, (b) Geometrical configuration of the Rijke tube, and (c) Burner assembly used in the system.

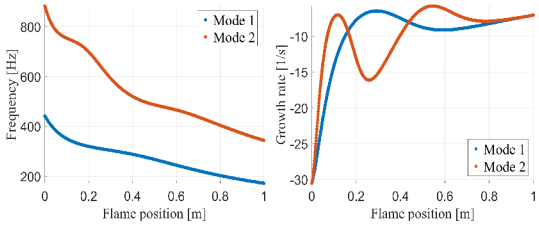


Fig. 2 Variation of frequency (left) and growth rate (right) with flame position.

Table 2 Simulation condition

Category	Parameter	Value
OSCILOS	Pressure (Pa)	101325
	Inlet Temperature (K)	293
	Inlet velocity (m/s)	0.5
	Combustion efficiency	1
GA	Population size	50
	Crossover fraction (%)	80
	Elite count	2
	Mutation rate (%)	3
	Neck length (mm)	20-50
	Area of Neck (mm^2)	100-500
	HR position (mm)	200-400

Table 1 Geometric parameters and experimental conditions of the Rijke tube

Parameter	Value	Unit
Rijke tube length	1000	mm
Rijke tube width	94	mm
Flame location	250	mm
Number of Nozzle Holes	3	-
Nozzle hole Diameter	4	mm
Nozzle Hole Spacing	6	mm
Nozzle exit velocity	1.6	m/s
Equivalence ratio	0.80-1	-
Total mass flow rate	3.62	SLPM
Air mass flow rate	0.28-0.34	SLPM
Fuel mass flow rate	3.27-3.33	SLPM

나 전통적인 HR은 좁은 흡음 대역과 제한된 형상으로 인해 설계 및 적용에 한계가 존재한다.

기존의 HR 설계에서는 단순화된 공명 주파수 계산식을 이용하여 초기 형상을 설정하지만, 실제 시스템의 음향 특성을 정확히 반영하기에는 한계가 있다. 또한 HR의 목 길이, 공동 체적, 설치 위치 등 다양한 설계 변수가 상호 연계되어 있어 단일 변수 접근만으로는 최적의 조건을 도출하기 어렵다. 따라서 다변수 설계 조건을 동시에 고려할 수 있는 최적화 기법이 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 기울기 정보 없이

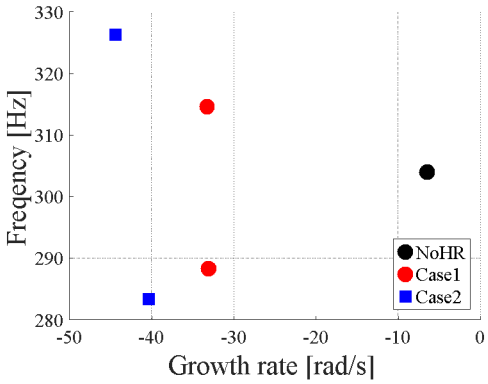


Fig. 3 Growth rate variation for baseline and GA-optimized resonator configurations (Case 1: before optimization, Case 2: after optimization).

Table 3 Geometry of Helmholtz resonators before (Case 1) and after (Case 2) the optimization.

Parameter	Case 1	Case 2
Neck length (mm)	30.0	21.0
Area of neck (mm^2)	314.0	245.0
Position (mm)	400.0	268.1
Volume of cavity (mm^3)	225,800	

전역 탐색이 가능하고 설계 공간을 폭넓게 탐색할 수 있는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 활용하고자 하였다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 HR의 형상을 최적화하여 리케 튜브 시스템의 열음향 불안정을 제어하는 것을 목표로 한다. 우선 연소 불안정 평가를 위해 리케 튜브(Rijke tube)[4] 시스템을 설계하고, 1차원 열음향 해석 도구인 OSCILOS[5]를 활용하여 성장률 변화를 해석하였다. 이후 GA를 적용해 HR 형상을 최적화하고, 불안정 모드의 성장률 최소화를 목적함수로 설정하였다. 기준 형상(baseline, Case 1)은 문헌[6]에서 제시된 공명기 설계를 기반으로 설정하였다.

본 연구에서 설계한 리케 튜브(Fig. 1)의 전체 길이는 1000 mm, 단면 폭은 94 mm이며, 100 mm 간격으로 공명기 설치 위치를 마련하였다. 화염은 해석을 통해 연소 불안정 특성을 명확하게 나타내는 위치인 유입부로부터 250 mm 지점에 배치하였으며, 예혼합 메탄-공기 혼합기(당량비 0.80-1.0)를 사용한다. 각 지점에는 열전대 및 동압 센서를 설치해 화염-음향 상호작용을 계측하도록 하였다. 사전 해석 결과(Fig. 2), 293 mm 지점에서 1차 종방향 모드(304 Hz)가 우세한 불안정 모드로 확인되었으며, 이를 기준으로 공명기 최적화를 수행하였다.

GA는 모집단 크기 50, 교차율 80%, 정예 개체 수 2, 돌연변이율 3%로 설정하였다. 최적화 변수는 목 길이(20 - 50 mm), 목 면적(100 - 500 mm^2), 설치 위치(200 - 400 mm)이며, 세부 조건은 Table 1 및 Table 2에 정리하였다.

GA 기반 최적화 결과, Table 3 및 Fig. 3과 같이 공명기 형상 조정을 통해 분절된 두 주파수 간격이 기존 26.30 Hz에서 42.98 Hz로 확장되었으며, 성장률은 각각 -40.34 rad/s, -44.44 rad/s로 기존 대비 21.9-33.5%의 감쇠율 향상이 예상되었다. 이는 공명기의 형상 최적화가 열음향 에너지 소산에 실질적으로 기여함을 보여준다.

본 연구에서는 유전 알고리즘을 적용하여 헬름홀츠 공명기의 형상을 최적화하고 리케 튜브 시스템의 열음향 불안정을 제어하는 방법을 제시하였다. 최적화 결과, 공명기의 주파수 분할 간격 확대와 성장률 감소가 달성되었으며, 이는 열음향 제어 성능 향상으로 이어졌다. 향후 연구에서는 주파수 간격과 성장률을 동시에 고려한 다목적 최적화 기법을 적용하고, 공명기의 형상 및 배치 변수 변화가 시스템 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 예정이다. 이를 통해 실제 연소기에 적용 가능한 고효율 열음향 제어 설계 기반을 확립하고자 한다.

참고 문헌

[1] J. Lepers, W. Krebs, B. Prade, P. Flohr, G. Pollarolo, A. Ferrante, "Investigation of thermoacoustic stability limits of an annular gas turbine combustor test-rig with and without Helmholtz-resonators", Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 4725, 2005, pp. 177-189.

[2] D.T. Harrje, "Liquid propellant rocket combustion instability", NASA SP-194, 1972.

[3] Z. Zhang, D. Zhao, N. Han, S. Wang, J. Li, "Control of combustion instability with a tunable Helmholtz resonator", Aerospace Science and Technology, Vol. 41, 2015, pp. 55-62.

[4] M. Lee, V. Gupta, L. K. B Li, "Fokker - Planck modeling of the stochastic dynamics of a Rijke tube," Chaos, Vol. 34, No. 8, 2024, 083117.

[5] D. Yang, C. Luzzato, A. S. Morgans, "Open source combustion instability low order simulator (OSCILOS-Long) technical report," Imperial College London, 2015, pp. 1-48.

[6] H. Lee, B. Yang, H. Cho, "Noise reduction analysis using extended neck of Helmholtz resonator within limited engine room", Int. J. Appl. Eng. Res., Vol. 12, No. 12, 2017, pp. 3444-3447.

무탄소 $NH_3/H_2/N_2$ 연료의 폭발특성에 관한 실험적 연구

김민규* · 이기만*†

Experimental Study on the Explosion Characteristics of Carbon-Free NH_3 /H_2 /N_2 Fuel

Mingyu Kim*, Keeman. Lee*†

ABSTRACT

Experiments were conducted in a cylindrical constant-volume combustion chamber using a carbon-free ammonia/hydrogen/nitrogen cracked model fuel. Tests were performed with a cracking ratio of 62% and equivalence ratios ranging from 0.8 to 1.2, during which P_{max} was measured. By analyzing the explosion characteristics of the ammonia-cracked model fuel, this study is expected to contribute to ensuring the safety of systems that utilize ammonia/hydrogen mixtures as future fuels.

Key words : Ammonia, Hydrogen, Partial cracking, Explosion index

화석연료의 사용량 증가 및 수송, 항공 이용이 늘어남에 따라 탄소 배출이 늘어나고 있다. 이에 따라 화석연료를 대체할 무탄소 연료에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수소는 대표적인 무탄소 연료이지만 빠른 화염 전파속도 및 높은 반응성으로 인해 운송 및 보관의 어려움과 안정성 측면에서 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 수소에 암모니아를 첨가하는 방법이 제안되고 있는데, 암모니아는 비교적 낮은 반응성, 좁은 가연한계, 높은 점화온도를 가지기 때문에 수소의 단점을 완화시킬 수 있다. 암모니아와 수소 혼합연료에 관한 연구는 활발히 연구되고 있지만 폭넓은 크래킹 비율에서의 폭발특성에 관한 연구는 아직 부족하다.

따라서, 본 연구에서는 초기압력 1bar에서 크래킹된 암모니아/수소/질소 혼합물의 화염을 통해 폭발특성을 확인하고자 한다. 암모니아, 수소, 질소의 크래킹 비율을 α라 하고 α는 아래의 식(1)으로 정의된다. Yi는 질량분율을 의미한다.

$$\alpha = \frac{Y_{H_2} + Y_{N_2}}{Y_{NH_3} + Y_{H_2} + Y_{N_2}} \qquad (1)$$

정의에 따라 부분 크래킹된 암모니아의 화학양론적 연소에 대한 반응식은 아래의 식(2)로 표현된다[1].

$$(1-\alpha)NH_3 + \alpha(\frac{3}{2}H_2 + \frac{1}{2}N_2) + \frac{3}{4}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \frac{3}{2}H_2O + 3.32N_2 \qquad (2)$$

이를 통해 선정한 크래킹 비율 α = 62%에서 당량비 Φ = 0.8 - 1.2까지의 범위에서의 폭발압력을 확인하였다.

본 연구는 원통형 정적연소기에서 실험을 진행하였고 화염 이미지를 취득하기 위해 슐리렌 기법을 이용하였다. 또한, 압력거동을 확인하기 위해 상단에 압력센서가 구성되어있었고 취득된 압력거동은 스무딩 필터(smoothing filter)를 이용하여 처리하였는데, 이 과정을 진행하지 않을

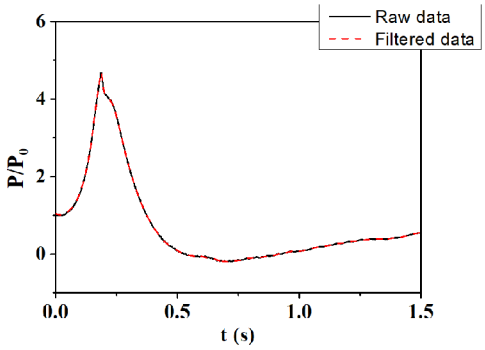


Fig. 1 Comparison of smoothing filtered data and raw data using Savitzky-Golay method (α =16%, Φ=1.0)

* 순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터
† 연락저자, kmlee@scnu.ac.kr
TEL : (061)750-3828

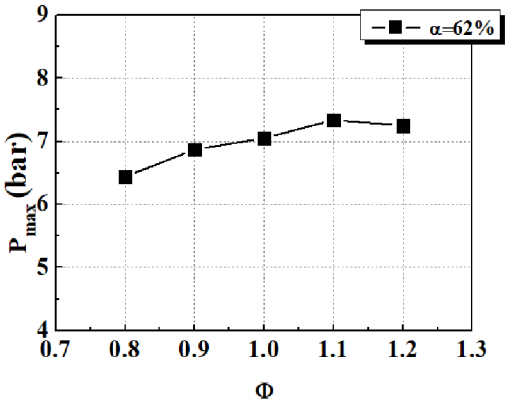


Fig. 2 Variation of maximum explosion pressure with equivalence ratio for different cracking ratios

시 압력값이 진동의 영향으로 평균값(filtered data) 주위로 흩어져 데이터의 정확도가 떨어지기 때문이다. 압력 진동에 따른 편차를 처리하기 위해 Savitsky-Golay 방법을 이용하였고 Fig. 1은 P/P_0의 Raw data와 스무딩 필터를 적용한 것이다.

Fig. 1을 보면 P/P_0의 최대값까지의 시간을 폭발시간(explosion time)이라 하고 그때의 압력값을 P_{max}라 한다.

Fig. 2 는 당량비에 따른 P_{max}값을 나타낸 것이다. 연료 희박조건에서부터 당량비에 따라 증가하다 당량비 1.1에서 최대값에 도달후 다시 감소하게 된다. 이러한 경향은 Cheng 등은[2] 암모니아/수소/공기 혼합물에서의 최대 폭발 압력은 당량비 1.1에서 최대값에 도달한다고 하였는데 이를 통하여 본 실험에서 확인한 결과와 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

P_{max}는 폭발 강도를 평가하는 매우 중요한 폭발 특성이다. P_{max}가 클수록 폭발 시 위험성이 높다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 설비 제작 시 필수적으로 고려하여 설계해야 설비의 안정성을 확보할 수 있다. 하지만 설계 시에는 최대 폭발 압력인 P_{max}뿐만 아니라 폭발 시간(explosion time, t_c), 열 손실(heat loss, q_{tr}), 폭발지수(explosion index, K_G), 최대 압력 상승률(maximum rate of pressure rise, $(dp/dt)_{max}$)등도 고려해야 한다. 따라서 추후 폭발시간, 열손실, 폭발지수 최대 압력 상승률에 대한 연구도 추가적으로 진행 할 예정이다.

후 기

2025년 순천대학교 학술연구비로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] N.N. Shohdy, M. Alicherif, D.A. Lacoste, “Transfer Functions of Ammonia and Partly Cracked Ammonia Swirl Flames” Energies Vol. 16, 2023, 1323.

[2] Jun Cheng, Bo Zhang, “Experimental study on the explosion characteristics of ammonia-hydrogen-air mixtures” Fuel, Vol 363, 2024, 131046.

가솔린 직분사 가시화 엔진에서 점화 직전 분사량에 따른 촉매 가열 조건의 연소 안정성과 PM 배출 특성

정천일*.고건우**.강동우**.박상재***.손유상***.박성욱*†

Effect of pre-spark injection quantity on combustion stability and PM emission in GDI optical engine under catalyst heating mode

Cheonil Jeong*, Geonwoo Ko**, Dongwoo Kang**, Sangjae Park***, Yoosang Son***, Sungwook Park*†

내연기관의 배출가스에 대한 환경 규제는 계속해서 강화되고 있다. 특히 가솔린 엔진에서 직분사 전략을 도입하며 이에 따른 PM(particulate matter) 배출 문제에 대응하기 위해 다양한 전략이 연구되고 있다. Maria Bogarra등의 연구에 따르면 엔진 시동 직후 $1.4\times10^{8}/cm^{3}$의 입자가 측정되고 50초 후 $3\times10^{7}/cm^{3}$로 지속적으로 감소하였다. 이러한 현상은 촉매가 작동온도에 도달하기 전까지 지속되며, 전체 운전 사이클 중 PM 배출의 50% 이상이 초기 단계에서 발생한다.[1] 또한 Koshiro Kimura등의 연구에 따르면 일반적인 촉매 가열 조건에서는 IMEP COV가 급격히 증가하며 초기 연소 지속시간이 불안정하다.[2] 따라서 촉매 가열조건에서 연소 안정성과 PM 배출 저감을 동시에 달성할 수 있는 방안이 필요하다.

본 연구에서는 1.2L 2기통 V형 GDI optical engine을 사용하였고 점화 직전 분사량을 동일한 전체 분사량 대비 4.75%(Case 1), 6.25%(Case 2), 9%(Case 3)로 설정한 3단분사 전략을 시행하여 조건에 따른 연소 및 PM 특성을 동일 조건에서의 CFD 해석 결과와 함께 확인하였다. 자세한 실험 조건과 실험 장치도는 Table 1과 Fig. 1에서 확인할 수 있다. NI 社의 Compact-RIO와 Labview 소프트웨어를 사용하여 연료의 분사량과 분사 시기를 제어하였고, Pegasor 社의 PPS-M을 사용하여 PM 배출량을 측정하였다. 화염 가시화 데이터는 Phantom VEO 1310 고속 카메라를 활용하여 Quartz cylinder 내부의 화염 이미지를 얻었다. 고속 카메라로 촬영한 화염 이미지는 전처리, HSV 분해 및 경계검출 과정을 걸쳐 연소 및 PM 특성과의 비교를 위해 사용되었다.

* 한양대학교 기계공학부
** 한양대학교 대학원 융합기계공학과
*** 현대자동차
† 연락저자, parks@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)-2220-4588

Table 1 Engine operating conditions

Control variable	Experimental Value
Engine speed [rpm]	1,500
Pressure of intake [bar]	0.85
Temperature of intake[℃]	30
Intake valve timing [degree of bTDC]	IVO : 329 , IVC : 103
Exhaust valve timing [degree of aTDC]	EVO : 127 , EVC : 343
Injection pressure [bar]	250
Start of injection (1st | 2nd | 3rd) [degree of bTDC]	275 | 210 | -5
Injection quantity [%]	Case 1(10:10:1) / Case 2(7.5:7.5:1) / Case 3(5:5:1)

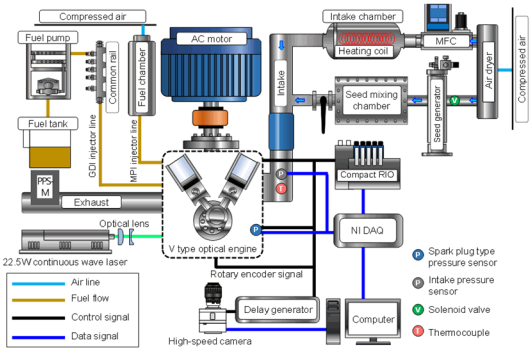


Fig. 1 Schematic diagram of optical engine

실험 결과, Case 1(농후한 점화 직전 분사량)조건에서는 IMEP가 가장 높고 IMEP COV가 가장 낮지만 PN(particle number)은 가장 높게 측정되었다. 이는 점화 직전 분사량을 증가시킬수록 점화시점에서 스파크 플러그 주변 TKE가 높아져 연소 속도와 연소 안정성이 향상된다는 해석 결과와 일치한다. 더불어 화염 이미지로부터 획득한 겉보기 화염 경계 속도가 IMEP 및 IMEP COV와 유사한 추세를 따르며, 조건별 화염 이미지 내 적염 밝기(단위 픽셀당)가 조건별 PN 변화와 동일한 경향을 가짐을 확인하였다.

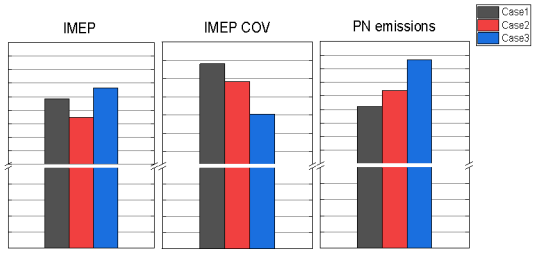


Fig. 2 Comparison of IMEP, IMEP COV and PN emissions at various injection quantities

또한 Fig. 2의 그래프를 통해 점화직전 분사량에 따른 연소 안정성과 PM 배출이 trade-off 관계를 가짐을 알 수 있며, 이는 촉매가열 조건에서 3단분사 전략 사용시 점화직전 분사량의 최적화가 필요하다는 것을 보여준다.

후 기

본 연구는 현대자동차의 지원에 의해 수행된 연구의 결과물임을 밝히며, 아낌없는 지원에 감사합니다.

참고 문헌

[1] Bogarra, Maria, Herreros, J. M., Hergueta, C., Tsolakis, A., York, A. P., & Millington, P. J., "Influence of three-way catalyst on gaseous and particulate matter emissions during gasoline direct injection engine cold-start." Johnson Matthey Technology Review 61.4 (2017): 329-341.

[2] Kimura, Koshiro, et al. "An investigation for reducing combustion instability under cold-start condition of a direct injection gasoline engine." International Journal of Engine Research 20.4 (2019): 470-479.

수소 혼소율과 과잉 공기비 변화에 따른 산업용 복사관 버너의 연소 특성에 관한 수치 연구

하성봉* · 안진열* · 서정원* · 이동규* · 정다운* · 배병윤** · 권종서** · 이광구*†

Numerical Study of Combustion Characteristics in an Industrial Radiant Tube Burner with Hydrogen Co-Firing and Excess Air

Seongbong Ha*, Jinyeol Ahn*, Jeongwon Seo*, Dongkyu Lee*, Daun Jeong*, Byungyun Bae**, Jongseo Kwon**, Gwang G. Lee*†

ABSTRACT

The combustion characteristics of CH_4-H_2 co-firing were numerically investigated in a radiant tube burner (RTB) under varying H_2 volume fractions and excess air ratios. CFD analysis revealed that the internal temperature of the RTB increases with the H_2 ratio by up to approximately 11% at 100% H_2. However, this temperature rise can be partially mitigated by applying EGR, resulting in an approximate 6% reduction at 20% EGR. These results indicate that stable combustion, in terms of temperature level (that is NOx), can be achieved through appropriate adjustment of operating conditions.

Key Words : Radiant tube burner, Hydrogen co-firing, Excess air ratio, CFD, EGR

국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면 2024년 이산화탄소 배출량이 전년도 대비 0.8% 증가한 약 378억 톤으로 최고치를 기록하였다[1]. 전 세계는 지구온난화에 대응하고자 파리기후협약을 통해 탄소 중립을 선언하였다. 이에 따라 국내 철강 산업계에서도 온실가스 저감을 위해 화석연료를 대체할 에너지원인 수소에 관한 관심이 커지고 있다. 수소는 탄소 기반 연료 대비 높은 에너지 밀도를 갖고 있으며, 이산화탄소 배출이 없는 장점이 있다. 그러나 빠른 화염 전파 속도에 의한 관 내부 손상 및 불균일한 표면 온도 분포를 초래하며, 높은 반응성에 의한 고온 화염은 질소산화물(NOx) 배출을 증가시킨다. 질소산화물은 대기 오염인자일 뿐만 아니라 인체에 직접적인 악영향을 미치는 유해성으로 인해, 배출 허용 기준이 강화되고 있다.

복사관 연소기(RTB)와 같은 설비에서 수소 도입을 시도하는 철강 업계에서는 이러한 규제에 대응하기 위해, 수소 혼소 조건에서 CO와 NOx 저감을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 공기의 다단 분사를 통해 최대 화염 온도를 낮추거나[2], 노즐 입구 직경 및 위치를 조절하여 NOx 배출 영향을 파악하고 있다[3]. 국부적인 고온 화염 영역에서 형성되는 열산화질소(thermal NOx) 저감을 위해서는 RTB 내부의 온도 불균일성을 해결하고, 최고 화염 온도를 낮추어야 한다.

본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 활용하여 수소 혼소율과 과잉공기비 변화에 따른 RTB 내부의 LNG-수소 연소 특성을 분석하였다. 선행연구의 W 형태 곡관 구조는 동일하되[4], 공기 유입구(d_a=57.28mm)를 위·아래로 분리하여 설치하였다. 연료는 축 방향 분사구($d_{f,z}$=4.2mm) 1개와 원주 방향으로 서로 직각을 이루며 X자 모양으로 배치된 반경 방향 분사구($d_{f,r}$=7.4mm) 4개(총 5개의 연료 분사구)를 통해 공급되었다. EGR 유입구(d_{egr}=42mm)는 첫 번째 직관 구간(Pipe 1) 상류에 배치하고 23.5mm 간격으로 설치된 7장의 다공판을 통과하여 균일하게 분포된 상태에서 연료-공기와 혼합되도록 설계했다. RTB 형상은 약 800만 개의 비정렬 격자로 구성되어 Ansys Fluent(2024 R1)로 해석되었다.

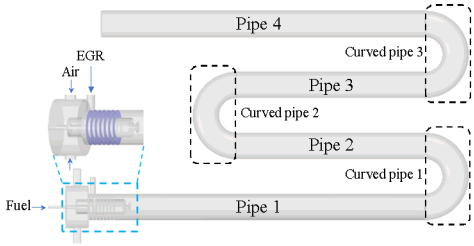


Fig. 1 Schematic diagram of a W-shaped radiant tube burner.

* 계명대학교 기계공학과
** 플랜텍
† 연락저자, combggy@kmu.ac.kr
TEL : (053)580-5217 FAX : (053)-580-5165

연료 중 LNG는 주성분인 메탄으로 가정되었다. 난류 및 연소해석을 위해 각각 SST k-ω와 EDC(Eddy Dissipation Concept) 모델을 적용하였다. 해석 조건 중 과잉공기율은 λ=1.00~1.20, 연료 중 수소의 부피 비율은 0~100%, EGR 비율은 0~20% 범위에서 변화하였다. 수소의 화학 반응은 Chemkin 반응기구(21 step)를 적용하였다. 입구에서 연료는 발열량 100,000kcal/h에 맞춰진 속도로 공급되었다. RTB 벽면의 대류 열전달 계수는 h=1W/m^2·K, 방사율은 α=0.85, RTB가 설치된 노(Furnace) 내부의 온도는 950 ℃로 설정하였다. Fig. 2는 메탄 100% 조건에서 RTB 중심 단면의 온도 분포를 보여주고 있다.

Fig. 2 Temperature contour at the central cross-section of the radiant tube burner (100 % CH_4 with 10% excess air).

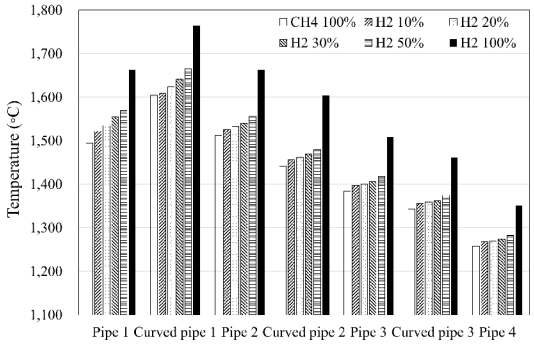


Fig. 3 Mass-weighted mean temperature by region according to volume ratio of H_2(10% excess air).

Fig. 3은 수소 혼소율에 따른 복사관 내부의 구간별 온도를 나타내고 있다. 연료 분사구 부근(Pipe 1구간)의 온도는 H_2 100% 조건에서 H_2 0%(CH_4 100%) 조건보다 약 11% 높다. Fig. 4는 과잉공기비와 수소 혼소 비율에 따른 온도 변화를 보여주고 있다. 화학양론(stoichiometry) 조건 대비 과잉공기 20% 조건에서의 온도 분포가 전 혼소 비율 범위에서 평균 약 7.5% 감소한다. Fig. 5는 EGR 적용에 따른 온도 변화를 나타내고 있다. EGR 비적용 조건 대비 EGR 적용 시 모든 수소 혼소 비율에서 온도가 평균 약 6.0% 감소하여 NO_X 생성량 감소의 효과가 예상된다.

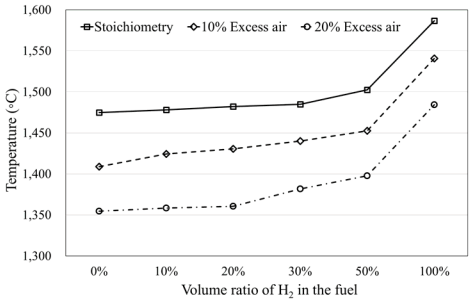


Fig. 4 Mass-weighted mean temperature over the entire RTB according to excess air ratio.

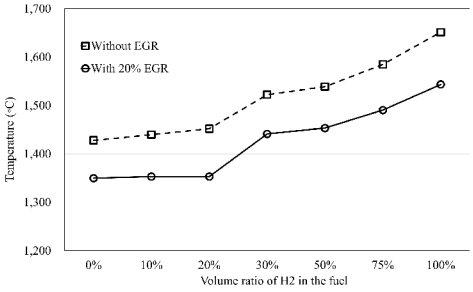


Fig. 5 EGR effect on mass-weighted mean temperature in Pipe 1 according to volume % of H_2

후 기

본 연구는 산업통산자원부 및 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 20024215. 공업로 무탄소 연료 적용 연소기 개발 기술). 또한 본 연구의 CFD 해석은 계명대학교와 Ansys의 산학협력 협약에 따라 라이선스를 지원받았으며, 이에 Ansys Korea의 기술 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] IEA. (2025). Global Energy Review 2025, https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions.

[2] F. Xia, Z. Yang, A. Adeosun, A. Gopan, B.M. Kumfer, R.L. Axelbaum, "Pressurized oxy-combustion with low flue gas recycle: Computational fluid dynamic simulations of radiant boilers", Fuels, Vol. 181, 2016, 1170-1178.

[3] Q. Wang, E. Wang, X. Li, Z. Hu, D. Liu, Y. Yu, "Numerical Investigation and Improvement of Coke Oven Gas-Fired W-Shaped Radiant Tubes for NOx Reduction", Energy Fuels, Vol. 34(4), 2020, 4925-4933.

[4] H. Jeon, D. Jeong, G. G. Lee, "Numerical Simulation of a Hydrogen Co-fired Radiant Tube Burner", The 68th KOSCO Symposium, 2024, 351-352.

니켈 촉매 기반의 메탄 수증기 개질 반응기의 실험적 성능 평가

서성민*, 최병철*†

Experimental Performance Evaluation of a Nickel Catalyst-based Steam Methane Reforming Reactor

Seong Min Seo*, Byung Chul Choi*†

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 산업 폐열을 모사하기 위해서 압축 공기를 히터로 가열시키고, 개질 반응기 내부로 유입시킨 가열된 공기는 1-2 및 2-3 과정에서 열교환 및 개질 반응에 이용된다. 4-5 및 6-7 과정에서 메탄과 함께 주입된 물은 증기로 상변화하며, 메탄과 수증기가 개질 반응을 일으키게 된다. 각 상태의 온도와 압력을 측정하여 열 및 질량 균형을 분석하였다. 공급가스의 유량 조절 및 출구의 농도 측정을 통하여 개질 변환율을 확인하였다. 그리고 실험값 및 이론값을 비교하여 본 개질 반응기의 성능을 평가하였다.

일반적으로 메탄 수증기 개질 반응을 위해 니켈 촉매를 사용되며, 메탄과 수증기가 반응하면서 수소와 일산화탄소 혹은 이산화탄소를 생성하며, 이 과정에서는 고온의 열을 필요로 한다.

$$\mathbf{CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2, 흡열 + 164.9kJ/mol} \quad (1)$$

$$\mathbf{CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2, 흡열 + 206.1kJ/mol} \quad (2)$$

수성 가스 전환 반응(Water-Gas Shift reaction, WGS)은 개질 반응으로부터 형성된 일산화탄소가 수증기와 반응하여 이산화탄소와 수소를 생성하는 발열 반응이다.

$$\mathbf{CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2, 발열 - 41.15\ kJ/mol} \quad (3)$$

향후에는, 개질된 가스의 조성으로 연소기에 기본 연료에 혼입하여 연소 특성을 비교하는 연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단(2022R1I1A3063360), 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술지흥원 (RS-2023-00255929, RS-2025-02304029)과 2025년 호서대학교의 재원으로 대학혁신지원사업 (2024-0282-01)의 지원에 의해 수행된 결과입니다.

* 호서대학교 기계공학과
† 연락저자, byungchul.choi@hotmail.com
TEL : (041)540-5805 FAX : (041)540-5808

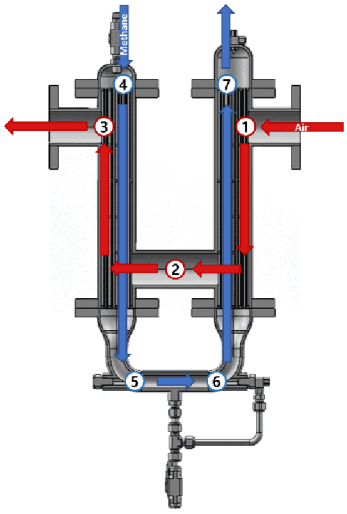


Fig. 1 개질 반응기의 개략도

참고 문헌

[1] S.N. Subramanya, V.S.C. Reddy, V. Madav "Performance Evaluation of Various Ni-Based Catalysts for the Production of Hydrogen via Steam Methane Reforming Process", Engineering Proceedings, Volume 59(1), 2023, Pages 138.

[2] N. Zhang, X. Chen, B. Chu, C. Cao, Y. Jin, Y. Cheng "performance of Ni catalyst for steam methane reforming in a micro-channel reactor at high pressure" Chemical Engineering and Processing: Process Intensification Volume 118, August 2017, Pages 19-25.

제철공정 배출가스를 모사한 수소-메탄 혼합가스의 예혼합 화염 연소특성

장원석*, 이서라*, 이관우*. 이승로*,**,†

Combustion characteristics of premixed hydrogen-methane blended fuels simulating by-product gases

Won Seok Jang*, Seo Ra Lee*, Gwan Woo Lee*, Seungro Lee*,**,†

ABSTRACT

Various by-product gases are emitted during steelmaking, among which coke oven gas (COG), mainly composed of hydrogen and methane, shows great potential as a clean and efficient energy source. This study investigates the fundamental combustion characteristics of hydrogen-methane blended fuels. Laminar burning velocities were measured using a Schlieren optical system and compared with CHEMKIN-PRO simulations to select the best kinetic mechanism. Additionally, OH-PLIF and CH*chemiluminescence imaging were conducted to analyze flame structures.

Key Words : Hydrogen addition, Laminar burning velocity, Flame-structure

친환경 연료에 대한 관심이 증가하고 배출 규제가 강화되는 추세 속에서, 산업 제조 부문에서 발생하는 다양한 부산물 가스들이 여전히 충분히 활용되지 못하고 있다. 이들 가스는 대부분은 연소되거나 그대로 대기중에 방출되어 에너지원으로의 잠재력이 낭비되고 있는 상황이다. 그 중 제철공정에서 발생하는 코크스 오븐 가스 (Coke Oven Gas)는 주로 수소와 메탄으로 구성되어 있어 친환경적인 에너지원 으로써의 활용 가능성이 매우 크다.

이러한 수소-메탄 혼합 가스를 안정적이고 고효율로 연소시키기 위해서는 연료의 기본적인 화염 특성에 대한 이해가 필수적이다. 특히 수소는 반응성과 확산계수가 높기 때문에 수소함량 변화에 따른 화염구조, 연소속도 등의 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 이에 본 연구는 COG를 해석하기 위해 다양한 수소 함량이 포함된 연료의 연소 특성을 정량적으로 분석하고, 신뢰성 있는 화염 구조 데이터 베이스를 구축하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 다양한 수소 혼합비 조건에서 슐리렌 광학 시스템을 활용하여 층류 연소속도(Laminar Burning Velocity)를 실험적으로 측정하였고 측정된 연소 특성은 ANSYS chemkin-pro의 Premix 코드를 이용한 수치해석 결과와 비교함으로써 화학 반응 메커니즘의 타당성을 검토하고 최적의 메커니즘을 선정하였다. 본 연구의 결과는 향후 고부가가치 부생가스의 재활용 및 저탄소 친환경 연소 시스템 설계의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig.1은 실험에 사용한 예혼합 연소 시스템이다. 메탄-수소 혼합연료의 층류 연소 속도를 측정하기 위해 슐리렌 시스템을 적용하였으며, 해당 시스템은 120 W LED 광원, 직경 100 mm 렌즈, 나이프 엣지, 그리고 디지털 카메라로 구성하였다. 화염의 고온으로 인해 발생하는 밀도 차이에 따른 빛의 굴절 현상을 포착하여 연소 속도를 측정하였다. 카메라 설정은 Canon EOS-5D Mark II(고성능 디지털 카메라)를 사용하였으며, ISO 125, F 2.8, 1/640 s의 셔터 속도, Monochrome 모드로 설정하였다. 또한 화염 가시화를 위해 ICCD 카메라를 이용하여 OH-PLIF

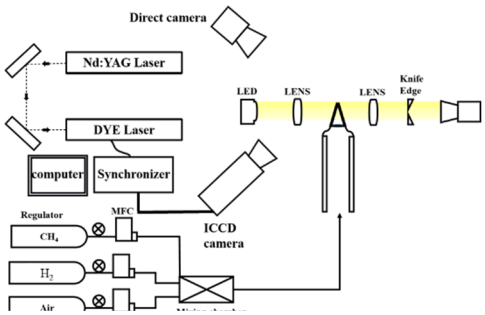


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up

* 전북대학교 기계공학과
** 전북대학교 기계항공전기융합공학과
† 연락저자 seungrol@jbnu.ac.kr
TEL : (063)270-2334 FAX : (036)-270-2315

과 CH^* 자발광을 측정하였으며, 디지털 카메라로 화염의 Direct image를 촬영하였다.

메탄-수소 혼합연료의 연소 안정성 평가를 바탕으로, 수소 함량을 0%, 20%,40%,60%로 변화시켜 슐리렌 광학 시스템을 이용하여 층류 연소속도를 측정하였다. 측정된 연소 속도는 수치해석을 통해 계산된 값과 비교하여 Fig.2 에 나타내었다. 수치해석에는 GRI 3.0, Okafor, San Diego 의 세 가지 화학 반응 메커니즘을 적용하였으며, 그 결과 메탄 100%조건 뿐만 아니라 수소 혼합 조건에서도 GRI 3.0 메커니즘이 실험 결과와 가장 우수한 일치를 보였다. 특히, 각 메커니즘의 평균 상대 오차를 실험값 기준으로 비교한 결과 GRI 3.0은 약 2.5%, Okafor 는 약 4.7%, San Diego는 약 6.2%의 오차를 보여 GRI 3.0 메커니즘이 가장 낮은 값을 보였다. 이를 통해 GRI 3.0 메커니즘이 수소 혼합 조건에서도 높은 예측 정확도를 유지하며, 실험값과의 정량적 일치도가 가장 우수함을 확인 하였다.

Fig.3 은 화염의 CH^* 자발광을 당량비와 수소 함량에 따라 나타낸 것이다. 메탄-수소 혼합 연료 화염의 CH^* 자발광 특성을 분석하였다. 실험은 수소 혼합비 0%, 40%, 60% 및 당량비 0.9, 1.0, 1.2의 조건에서 수행되었으며, 레이놀즈 수는 약 1350으로 고정하여 안정된 화염 상태를 유지하였다. 수소 혼합비가 증가함에 따라 연소 범위가 확장되고, 자발광 강도 분포가 점차 노즐 입구 방향으로 이동하는 경향이 나타났다. 특히 당량비 1.0 조건에서 CH^* 신호가 가장 강하게 관찰되었으며, 이는 층류 연소속도가 최대가 되는 조건과 유사한 경향을 보였다. 당량비 1.2의

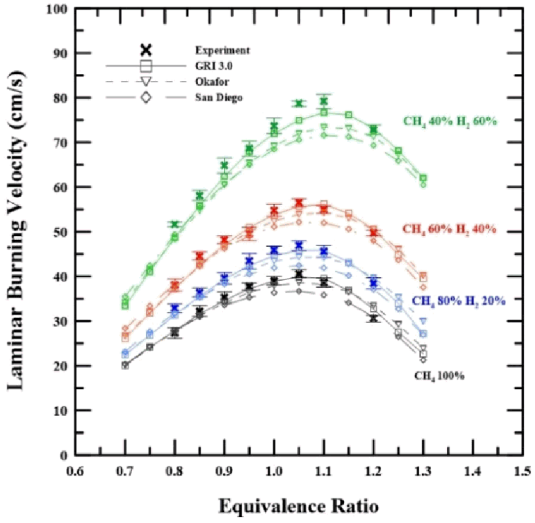


Fig. 2 Laminar burning velocity at different equivalence ratio

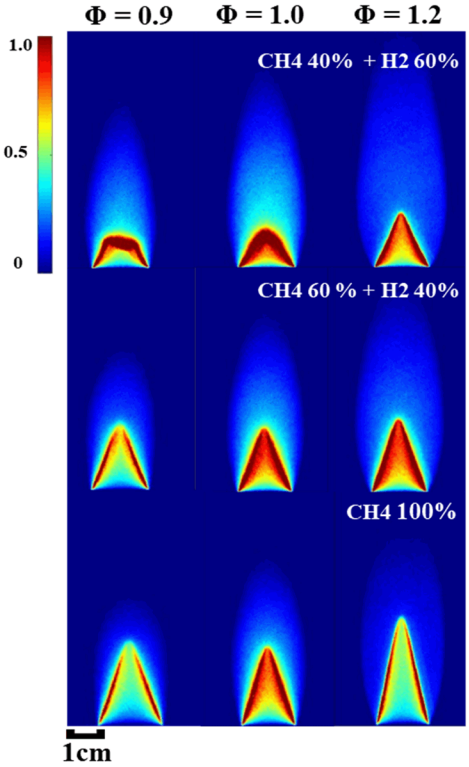


Fig. 3 CH^* chemiluminescence at various hydrogen addition

과농 조건에서는 화염 중심부보다 외곽 영역에서 CH^* 분포가 확산되는 양상이 나타나, 연소 반응이 화염 전면의 바깥쪽으로 이동하는 특성이 확인되었다.

Fig.4는 메탄-수소 혼합 연료 화염에 대해 OH-PLIF 이미지와 Direct 이미지를 분석한 것이다. 당량비 1.0 조건에서는 OH 신호가 가장 뚜렷하고 균일하게 분포하여 연소 반응이 가장 활발하게 일어나는 조건임을 확인하였다. 반면, 과농 조건인 당량비 1.2에서는 화염 중심부보다 외곽 영역에서 OH 발광이 강하게 나타나, 연소 반응이 중심부에서 바깥쪽으로 이동하는 경향이 관찰되었다. 또한, 수소 첨가로 인해 연소 속도가 증가함에 따라 동일한 유속 조건에서도 화염 전파가 빨라지면서 반응 구간이 짧아지고 화염 길이가 점차 감소하는 양상이 나타났으며, 이러한 경향은 당량비 1.2 조건에서 더욱 두드러지게 나타났다.

본 연구에서는 슐리렌 시스템을 이용하여 메탄-수소 혼합 연료의 층류 연소속도를 정밀하게 측정하고, 수소 혼합비(0%, 20%, 40%, 60%) 변화에 따른 당량비 별 연소 특성을 체계적으로 분석하였다. 실험 결과를 Chemkin-pro 수치해석 결

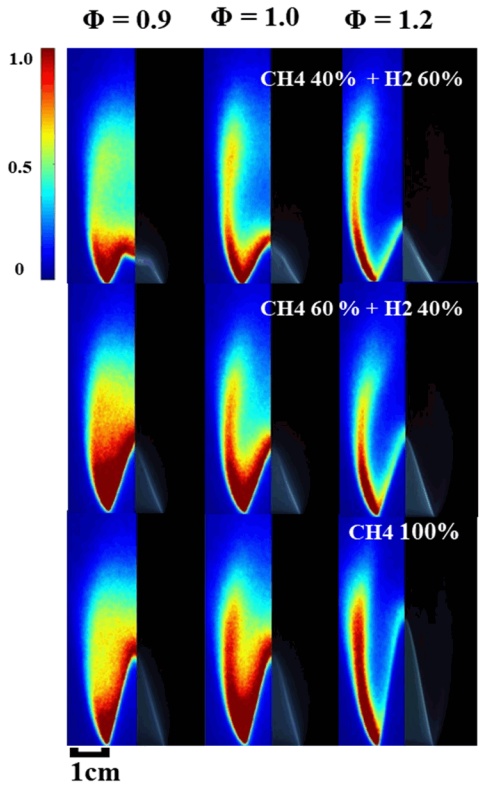


Fig. 4 OH distribution and Direct images at various equivalence ratio

과와 비교하여 반응 메커니즘을 검증한 결과, GRI 3.0 메커니즘이 본 조건에서 가장 높은 신뢰성을 보임을 확인하였다. 또한 CH^* 자발광 및 OH PLIF 기법을 활용한 화염 가시화 실험을 통해 반응 구역의 특성을 정성적으로 파악하였으며, 수소 함량 증가에 따른 반응대 폭 축소 및 라디칼 분포 변화 양상을 관찰하였다. 마지막으로, 검증된 메커니즘을 바탕으로 수행한 수치해석을 통해 주요 종의 몰분율 변화를 정량적으로 확인하고 이를 실험 결과와 비교함으로써 메탄-수소 혼합 연료의 기초 연소 특성을 종합적으로 규명하였다.

후 기

본 연구는 2025 년 산업 통상 자원부(MOTIE)의 재원으로 한국 산업 기술기획 평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구 (RS-2025-04332968)와 교육부와 한국 연구 재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 첨단분야 혁신 융합 대학 사업(에너지 신 산업)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

[1] Ortiz-Imedio, Rafael, et al. " Comparative performance of coke oven gas, hydrogen and methane in a spark ignition engine. " International Journal of Hydrogen Energy 46.33 (2021): 17572-17586.

[2] Huang, Zhixin, et al. "Numerical and experimental investigation of H2/CH4/Air combustion characteristics and thermal performance in the combustor with multi-bluff-body." Fuel 367 (2024): 131435.

[3] Shin, Cheolhee, Hyeon Taek Nam, and Seungro Lee. "Effect of hydrogen addition on flame stability and structure for low heating value coaxial non-premixed flames." Combustion Science and Technology 195.12 (2023): 2933-2951.

[4] Nam, Hyeon Taek, Seungro Lee, and Heejung Jung. "Effect of hydrogen addition on combustion and thermal characteristics of impinging non-premixed jet flames for various heating value gases." Case Studies in Thermal Engineering 49 (2023): 103173.

GUI 기반 음향 라이너와 헬름홀츠 레조네이터의 열음향 댐핑 특성 예측 툴 개발

숙수펫 부린톤* · 김대식*†

Development of a GUI-Based Tool for Predicting Thermoacoustic Damping Characteristics of Acoustic Liners and Helmholtz Resonators

Burinthorn Suksupaet*, Daesik Kim*†

본 연구는 음향 라이너와 헬름홀츠 공명기의 열음향 댐핑 성능을 신속하게 예측하기 위한 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 기반 해석 툴을 개발하는 것을 목표로 한다. 가스터빈 연소기와 같은 실제 구동 환경에서는 그레이징 유동 및 바이어스 유동과 같은 평균 유동이 존재하며, 이는 댐퍼의 음향 임피던스 특성을 크게 변화시켜 연소 불안정성 제어 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 설계 초기 단계에서 이러한 유동 효과를 정밀하게 고려한 음향 감쇠 성능 예측이 필수적이다.

개발된 예측 툴은 Python을 기반으로 구현되었으며, 핵심 해석 로직으로 전달 행렬법(Transfer Matrix Method)을 적용하였다. 이를 통해 다공판 라이너와 헬름홀츠 공명기에 대한 이론적인 임피던스 모델을 통합하고, 평균 유동의 영향을 고려한 주파수별 음향 특성 분석이 가능하다. 사용자는 직관적인 GUI를 통해 댐퍼의 형상 및 유동 조건을 입력하고, 계산된 음향 임피던스와 감쇠 특성 결과를 즉각적으로 시각화하여 확인할 수 있다. [1-2]

툴의 해석 정확성을 검증하기 위해 상용 유한요소해석(FEM) 소프트웨어의 결과와 비교 분석을 수행하였으며, 두 결과가 매우 높은 수준으로 일치함을 확인하여 신뢰성을 확보하였다. 본 예측 툴은 반복적인 파라미터 연구가 요구되는 음향 댐퍼의 초기 설계 과정 효율을 극대화하고, 최종적으로 연소 불안정성 제어를 위한 최적의 댐퍼 설계를 도출하는 데 기여하는 효과적인 공학적 도구이다.

* 강릉원주대학교 기계공학과
† 연락저자, dkim@gwnu.ac.kr
TEL : (033)760-8728 FAX : (033)760-8721

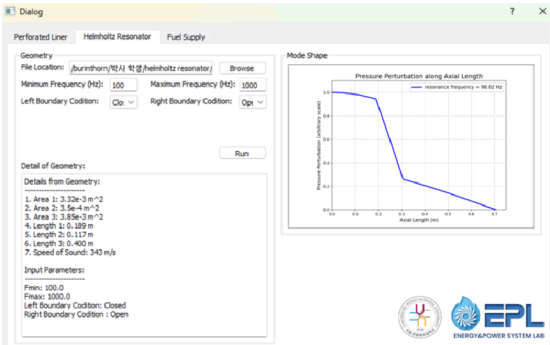


Fig. 1 Graphical User Interface (GUI) of the thermoacoustic damping prediction tool.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다(No. 2023-00254668 & No. 2025-02662968).

참고 문헌

[1] Suksupaet B, Kim D. Analytical study on damping characteristics of a perforated liner using an optimized acoustic impedance model. Journal of Vibration and Control. 2025;0(0). doi:10.1177/10775463251362914

[2] Suksupaet B, Kim D. Analytical Characterization of Low-Frequency Instabilities in a Simple Duct System. Int. J. Aeronaut. Space Sci. 26, 186 - 195 (2025). https://doi.org/10.1007/s42405-024-00763-z

수소 직접분사 엔진의 효율 향상과 배출 저감을 위한 화학 반응 동역학 모델 평가

Quangkhai Pham*. Nguyen Ngoc Dung **. 윤승현***. 박수한 ****†

Assessment of chemical kinetic models in hydrogen direct-injection engine simulation to enhance efficiency and reduce emissions

Quangkhai Pham*, Nguyen Ngoc Dung**, Seung Hyun Yoon***, Suhan Park****†

Abstract

Hydrogen combustion engines offer a promising path toward reducing emissions while maintaining performance standards. However, they face fundamental challenges concerning abnormal combustion owing to higher flame propagation speed, back-ignition and engine knock. In this study, a concept termed chemical kinetic models by Ansys Forte is applied to simultaneously improve thermal efficiency and reduce the unburned NH_3, NO_x, and N_2O emissions of a hydrogen direct injection combustion engine. First, the engine performance and unburned emissions were evaluated at lean condition (λ = 2.5), engine speeds (1200 rpm) and injection timing (-35 to 0^0

CA at TDC) conditions with a chemical kinetic model through validation against experimental data. Building upon this validated model, further assessments were conducted to improve thermal efficiency and reduce unburned emissions across varying injection timing (-35^0 to -15^0 CA at TDC), engine speeds (1000, 2000, 5000 rpm) and lean hydrogen-fuel ratios (λ = 1.5 and 3). The results show that the development of a chemical reaction mechanism with λ = 1.5 at engine speeds = 2000 rpm and injection timing (-25^0 CA at TDC) effectively enhances engine thermal efficiency by 15.8%. In addition, the unburned NH_3 and N_2O gas emissions dropped to 73.8% and 90.8%, respectively, compared to the previous operation of the intake port injection type hydrogen fueled engine. However, this mode raised concerns the NOx emissions. It can be concluded that these harmful emissions can be effectively reduced by optimizing hydrogen lean levels and injection timing. Further, it can be suggested that further studies are needed on the split of the injection process for combustion characteristics of hydrogen fuel with the aim of improving engine performance and reducing emissions.

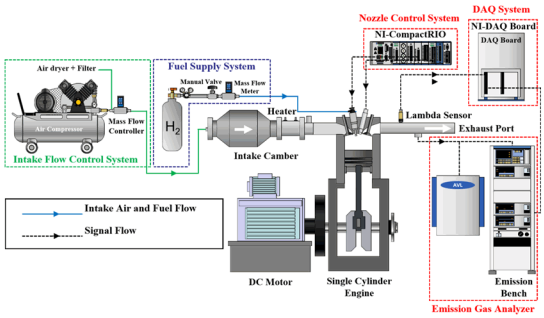


Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

* 건국대학교 기계로봇자동차공학과과

** University of Transport Ho Chi Minh City

*** 영남이공대학교 스마트 e-자동차과

**** 건국대학교 기계로봇자동차공학과부

†책임저자, 회원, 건국대학교 기계로봇자동차공학과부

Email: suhanpark@konkuk.ac.kr

TEL : 82-2-450-3571 - FAX : 82-2-444-6670

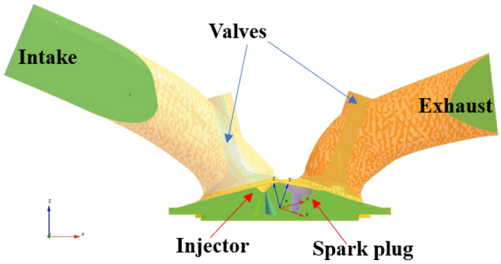


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

Table 1 Engine and numerical operation specifications.

Parameters	Values
Engine operation specifications.	
Engine speed (rpm)	1200
Operating condition	$\lambda = 2.5$ for spark timing at −15 CAD aTDC
Fuel injection timing	−360 CAD aTDC
Fuel mass (mg/cycle)	19.5
Numerical operation specifications.	
Engine speed (rpm)	1000, 2000 and 5000
Operating condition	λ = 1.5, 2.5 and 3.5
Fuel injection timing	−35, −30, −25, −20, −15
Fuel mass (λ = 1.5, 2.5 and 3.5)	21.25 – 19.5 – 14.25 (mg/cycle)

후 기

This study was financially supported by the Basic Science Research Program (RS-2023-00208502) funded by the National Research Foundation of Korea (NRF), and the Automotive Industrial Technology Development Program(RS-2024-00508322), funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

메탄 스월 화염에서 산화제 조성 변화에 따른 질소산화물 저감 특성 연구

김실비아*.도형록*†

Investigation of Nitrogen Oxides Reduction Characteristics in Methane Swirl Flames under Varying Oxidizer Compositions

Silvia Kim*, Hyungrok Do*†

ABSTRACT

A membrane-based nitrogen dilution strategy was developed to reduce thermal NOx in premixed methane-air swirl flames. The approach passively enriches nitrogen through polymeric hollow fibers, enabling stable oxidizer control. Experiments varying oxidizer nitrogen content showed significant NOx reduction. This simple and practical method offers an effective retrofit solution for combustion systems and demonstrates the potential of coupling membrane separation with flame chemistry for emission control.

Key Words : Membrane Filter, Nitrogen Dilution, Thermal NOx, Swirl Flame

대기 규제가 강화되고 있음에도 불구하고, 고온 연소 시스템에서 지속적으로 배출되는 질소산화물(NOx)은 여전히 주요 환경 및 공중보건 문제로 인식되고 있다 [1]. NOx는 산화제 혹은 연료 내 질소와 산소의 반응으로 생성되며, 다양한 생성 경로 중 thermal NOx는 반응 속도가 지수적으로 증가하는 고온 조건에서 지배적인 생성 경로로 작용한다 [2]. 이러한 이유로 가스터빈이나 산업용 연소기와 같이 높은 화염 온도에서 작동하는 시스템에서는 NOx 배출 저감이 지속적인 과제로 남아 있다.

Thermal NOx 생성을 억제하기 위해 연소 조건을 조정하는 다양한 방법이 적용된다. 예를 들어, 1 MWth 석탄 연소로에서 바이오매스 혼소 및 재연소 조건을 적용하여 NOx 배출을 유의미하게 저감하였으며, 혼소 비율 변화에 따라 저감 효과가 달라짐을 보고하였다 [3]. 그러나 이러한 접근법은 연소기 내부 구조나 공급계의 변경이 필요하다는 점에서, 기존 시스템에 즉각적으로 적용하기에는 일정한 제약이 따른다.

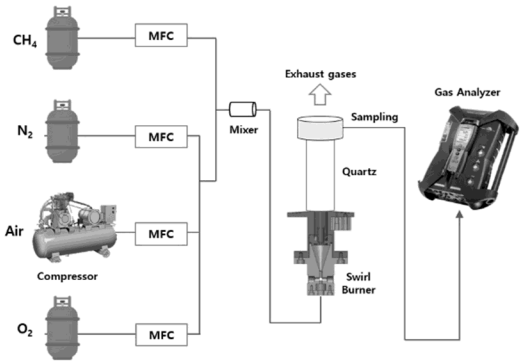


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental combustion setup used for NOx measurements.

본 연구에서는 고분자 중공섬유 기반의 막(membrane) 모듈을 이용한 질소 희석 기반 산화제 조성 제어 전략을 제안하여, 예혼합 메탄-공기 스월 화염에서의 thermal NOx 생성을 효과적으로 저감하고자 하였다. 제안된 방법은 상용 질소 생성용 막 모듈의 작동 원리를 모사한

* 서울대학교 기계공학과
† 연락저자, hyungrok@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1597

것으로, 산화제 내 질소 농도를 증가시키고 산소의 농도를 감소시킴으로써 화염 온도를 저감하고 thermal NOx 생성을 억제하는 원리에 기반한다. 복잡한 화학 제어나 능동 피드백 시스템 없이도 안정적이고 신뢰성 있는 산화제 조성 제어가 가능하다.

Fig. 1은 연소 실험 설비의 개략도를 나타낸 것이다. 실험은 대기압 조건에서 스월 수 0.6의 버너를 사용하였으며, 연료 및 산화제 유량은 질량유량제어기(MFC)를 통해 조절하였다. NOx 농도는 가스 분석기(Testo 350)로 측정하였다.

실험은 세 가지 조건(A, B, C)으로 구분하여 수행하였다. 실험 A에서는 산화제 내 질소 유량을 단계적으로 증가시켰고, 실험 B에서는 산화제 총 유량을 일정하게 유지한 상태에서 질소 비율을 조정하였으며, 실험 C에서는 공기 유량을 증가시켜 비교하였다. Table 1은 실험 조건을 간략히 보여주고 있다.

Table 1. Experimental conditions

Condition	A	B	C
N_2 ratio in oxidizer	↑	↑	=
O_2 ratio in oxidizer	↓	↓	=
Oxidizer flow rate	↑	=	↑
CH_4 flow rate	=	=	=
Equivalence ratio(Φ)	=	↑	↓

실험 결과, 산화제 내 질소 농도가 증가할수록 (실험A) NOx 배출이 뚜렷하게 감소하였다. 산화제 내 질소 비율이 84.1%일 때 기준 공기 대비 약 45%의 NOx 저감효과가 나타났으며(Fig. 2), 이는 반응물인 산소 농도와 화염 온도 저감에 기인한 것으로 해석된다. 한편, 질소 대신 비교적 운영 비용이 낮은 공기 유량을 증가시킨 실험 C 조건에서는 산화제 유량 증가에 따라 화염 온도는 저감되었으나, 반응물인 산소와 질소의 농도가 증가하는 조건이 형성되었다. 그 결과, Fig.3에서 나타나듯이 일정 당량비까지는 NOx 배출이 오히려 증가하였다가, 이후 온도 저감 효과가 우세해지면서 감소하는 경향을 보였다.

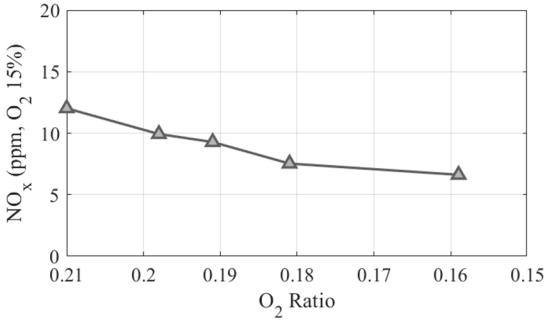


Fig. 2 NOx emissions under experimental conditions with increasing nitrogen flow rate.

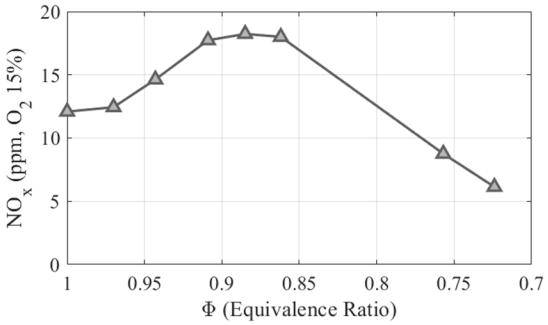


Fig. 3 NOx emissions under experimental conditions with increasing air flow rate.

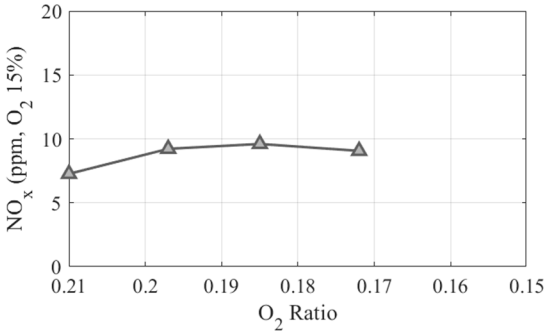


Fig. 4 NOx emissions under experimental conditions with constant oxidizer flow rate.

실험 B 조건(산화제 유량을 일정하게 유지한 상태에서 질소 비율을 변화시킨 조건)에서는 NOx 저감 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다(Fig. 4). 이를 분석하기 위해 CH^* 자발광 화염 영상을 Abel 역변환하여 화염의 체적(V_f)을 계산하고, 이를 이용해 체류시간을 추정하였다. 체류시간은 노즐 출구 속도(u_a)와 노즐 단면적(A)을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\tau_{res} = V_f \ / \ u_a A \qquad (1)$$

분석 결과, 산화제 내 질소 비율 증가 시 화염 부피 및 체류시간이 모두 증가하는 경향을 보였으며, 이에 따라 NOx 농도가 상승하는 결과가 나타났다. 이는 체류시간 증가에 따른 NOx 생성 누적 효과 때문으로 판단된다. Fig. 5는 기준 공기 조건과 질소 비율이 82.8%로 증가한 동일 유량 조건의 CH^* 자발광 화염 영상 및 Abel 역변환 결과를 보여준다. 이 조건에서 기준 공기 대비 체류시간이 약 30% 증가하였다.

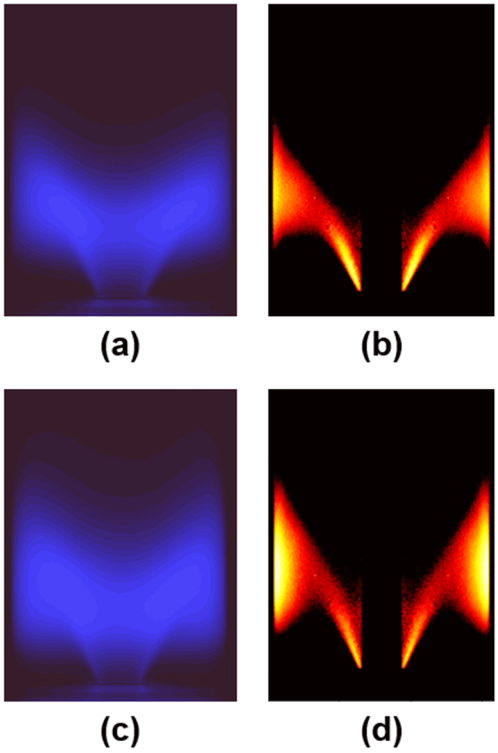


Fig. 5 CH* chemiluminescence images (a) and corresponding Abel inversion results (b) under the reference air condition and nitrogen-enriched oxidizer conditions (c, d).

본 연구는 예혼합 메탄-공기 스월 화염에서 산화제 조성을 제어하여 thermal NOx를 효과적으로 저감하는 방법을 제시하였다. 특히 동일 당량비 조건에서 산화제 내 질소 비율을 증가(실험A)시킴으로써 thermal NOx 생성이 뚜렷하게 감소함을 확인하였다. 또한, 막 필터 기반 산화제 조성 제어 개념을 모사하여, 복잡한 화학 제어나 추가적인 제어 장치 없이도 안정적 조성이 가능한 방안을 제안하였다. 제안된 접근법은 고온 연소 시스템에 비교적 단순한 개조만으로 적용 가능한 대안을 제시하며, 강화되는 환경 규제 대응에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] World Health Organization, "Air Quality, Energy and Health – Nitrogen Dioxide", WHO, 2025.

[2] C.T. Bowman, "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulations", Proc. 24th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1992, pp. 859–878.

[3] T.Y. Chae, " NOx Reduction by Co-Firing and Reburning of Biomass in 1MWth Coal Combustion ", J. Korean Soc. Combust., Vol. 25, No. 3, 2020, pp. 48–53.

수치해석을 통한 암모니아 연료의 연소 시 점화지연특성 분석

김규보*†, 김량균*, 임호*, 박영도*, 김준희*

Numerical Analysis of Ignition Delay Characteristics during Combustion of Ammonia Fuel

Gyubo Kim*†, Ryanggyoon Kim*, Ho Lim*, Yeongdo Park*, Junhee Kim*

ABSTRACT

This study investigates the ignition delay characteristics of ammonia (NH_3), hydrogen (H_2), methane (CH_4), and two NH_3-based blended fuels. Numerical analyses of ignition delay time (IDT) were conducted using CANTERA, varying initial temperatures and equivalence ratios. Pure NH_3 exhibited long delays, whereas H_2 blending significantly reduced delay and minimum ignition energy. CH_4 blending improved flame stability. The results provide practical guidelines for optimizing NH_3-based fuel blends to achieve stable, efficient combustion.

Key Words : Ammonia, Ignition Delay Time, Fuel Blending, Preheating Air, CANTERA

기후변화로 인해 무탄소 연료에 대한 요구가 증가되고 있다. 무탄소 연료로 수소(H2)와 암모니아(NH3)에 대한 관심이 높아지고 있고, 특히 수소 캐리어로서 암모니아로 이송 후 다시 수소 전환하지 않고 바로 암모니아를 연료로 적용 가능함에 따라 암모니아를 연료로 이용하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

그러나 이러한 암모니아를 연료로 사용하여 연소시킬 경우, 기술적인 어려움에 봉착하게 된다. 암모니아와 공기를 이용하여 연소시킬 경우 층류 화염의 최대연소속도는 메탄(CH4)의 20% 수준에 불과하고 자연발화온도는 650℃ 이상의 높은 온도가 필요하다. 또한 암모니아를 연료로 사용할 경우 연료 내 포함된 질소성분으로 인해 fuel-NOx 생성이 상대적으로 높게 발생할 수 있어 점화 및 화염안정성 그리고 저NOx 연소기술의 확보가 필수적이다.[1]

암모니아의 연소성과 관련하여 다양한 연구가 진행되었는데, Hassanein 등[2]은 암모니아/수소 혼소를 통해 화염의 거동을 살펴보았고 특히 화염속도, 점화지연, 안정성 및 난류조건의 영향을 살펴보았다.

Xuren 등[3]은 연소, 플라즈마 보조 연소 등을 통해 안정성과 배출물 저감의 상반관계를 도출하였다. Yuxiang 등[4]은 암모니아에 수소의 혼소율에 따른 암모니아 반응성을 다양한 조건에서 수치적 해석을 통해 암모니아 반응성 변화를 살펴보았다.

Duanzheng 등[5]은 암모니아에 수소를 혼소하여 엔진에서의 연소를 수치해석을 통해 분석하였으며, 연소안정성, 점화 및 화염전파에 미치는 영향을 분석하였다.

점화 및 화염안정성을 확보하고 저NOx를 동시에 만족하기 위한 기술로 예열공기 또는 배가스재순환기술과 혼소기술과 같은 접근성이 용이한 기술이 필요하다.

암모니아는 착화온도가 높고 연소속도가 낮아 착화지연시간이 길고, 부상화염 또는 소화되는 경우가 일반적이다. 따라서, 이러한 암모니아를 안정적으로 착화시키고 연소속도를 확보할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 암모니아의 착화지연시간(Ignition Delay Time, IDT)에 대한 예열공기온도 및 수소와 메탄을 각각 혼소하였을 때의 영향을 살펴보고자 하였으며, CANTERA를 이용하여 GRI3.0을 기반으로 수치적으로 분석해 보았다.

* 포항산업과학연구원 환경연구소
† 연락저자, gbkim09@rist.re.kr
TEL : (061)797-5916

Table 1 Characteristics of selected fuels

Types	LHV [MJ/kg]	S_L [cm/s]	AIT [°C]	폭발범위 [%]
NH3	18.6	7	651	15-28
H2	120	200	585	4-75
CH4	50	38	537	5-15
NH_3:H_2 (0.8:0.2)	38.88	44.6	637.8	25.2
NH_3:CH_4 (0.8:0.2)	24.88	13.2	628.8	12.4

Table 2 Characteristics of selected fuels

Types	역화 위험도	안정성	부상화염 위험
NH3	낮음	낮음	매우 높음
H2	매우높음	매우높음	매우낮음
CH4	중간	낮음	낮음
NH_3:H_2 (0.8:0.2)	높음	중간	낮음
NH_3:CH_4 (0.8:0.2)	낮음	낮음	높음

Table 1과 2에는 본 연구에서 고려된 연료의 연소특성을 비교하였다. 전반적으로 NH3의 경우 화염의 안정성이 낮고 부상화염 위험도가 매우 높아 안정적으로 연소시키기 위한 검토가 필요하며, 화염의 안정성 및 부상화염의 위험도를 낮추기 위해서는 반응속도를 높일 수 있는 방안을 검토할 필요가 있다.

특히 점화성지수(II, Ignition Index, SL/AIT)를 검토해 보면 NH3는 약 0.0108로 점화가 매우 어려우며, 상대적으로 H2는 0.34로 매우 용이하고 CH4는 약 0.07로 중간정도의 점화성지수를 나타내었다.

Fig. 1에는 당량비 1.0일 때 NH3만 연소시킬 경우 초기 예열온도에 따른 점화지연시간을 계산하여 나타내었으며, Fig. 2에는 NH3=0.8, H2=0.2의 혼소 시 초기 예열온도에 따른 점화지연시간을 계산하여 나타내었다. Fig. 3에는 NH3=0.8, CH4=0.2의 혼소 시 점화지연시간을 계산한 것이다.

Fig. 1의 결과를 살펴보면 적어도 1600K 이상의 온도로 예열할 경우 11초 이내, 1700K 이상 되었을 때 약 3초정도로 점화지연시간이 나타났다. NH3의 경우 단독으로 점화시키는데 많은 에너지가 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2의 H2가 20% 혼소된 경우를 살펴보면 비록 IDT 값의 차이가 크게 나타나긴 하지만

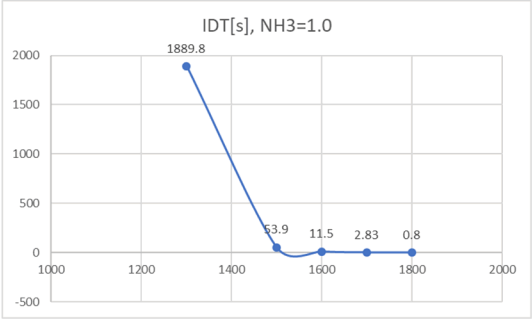


Fig. 1 Ignition Delay Time (IDT) of Pure Ammonia at Different Preheating Temperatures.

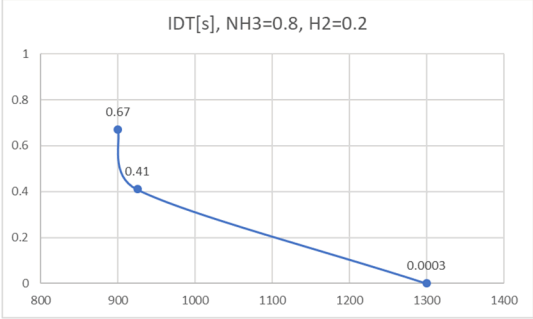


Fig. 2 Ignition Delay Time (IDT) of NH3=0.8, H2=0.2 at Different Preheating Temperatures.

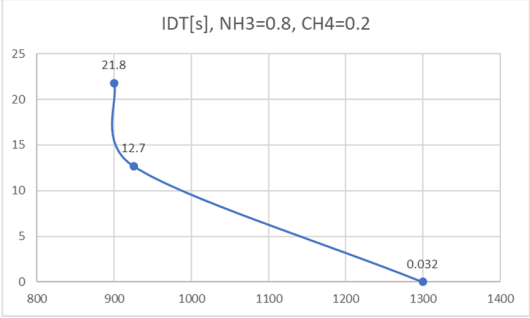


Fig. 3 Ignition Delay Time (IDT) of NH3=0.8, CH4=0.2 at Different Preheating Temperatures.

900K 조건에서 0.67s의 IDT를 나타냄으로써 점화지연시간 없이 바로 점화가 가능한 것을 확인할 수 있다.

Fig.3의 CH4를 20% 혼소한 경우에서도 925K 정도로 예열 되더라도 NH3 100%일 때의 1600K 예열조건과 비슷한 IDT 특성을 나타냄으로써 점화지연시간을 단축시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 NH3의 경우는 단독으로 버너와 같은 연소기에서 사용할 경우, 초기에 예열을 하더라도 안정적인 연소가 거의 불가능하다는 것을 확인할 수 있었으며, NH3를 안정적으로 점화지

연의 문제를 제거하면서 연소시키기 위해서는 H2나 CH4와 같은 반응성이 높은 연료가 추가적으로 필요하다는 것을 확인하였고, 특히 무탄소 연소를 구현하기 위해서는 H2가 필수적이라는 것을 확인하였다.

참고 문헌

[1] 김동현·김지원·박성우, 암모니아 반응 메커니즘 연구 동향, 한국연소학회지, vol. 30, 2025. pp.18-31.

[2] Hassanein M. Hussain, Samer Mohammed Abdulhaleem, " A REVIEW ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF AMMONIA/ HYDRO GEN/AIR MIXTURES", The Iraqi Journal for Mechanical and Materials Engineering, Vol. 24 No. 1 , 2025.

[3]Xuren Zhu, Jianguo Du, et al, " NO_x Emission and Control in Ammonia Combustion: State-of-the-Art Review and Future Perspectives", Energy & Fuels. Vol 38, 2024.

[4] Yuxiang Zhu, Henry J. Curran, Sanket Girhe, Yuki Murakami, Heinz Pitsch, Kelly Senecal, Lijun Yang, Chong-Wen Zhou, "The combustion chemistry of ammonia and ammonia/hydrogen mixtures: A comprehensive chemical kinetic modeling study ", Combust. Flame., Vol. 260 2024. pp. 113-239.

[5] Duanzheng Zhao, Wenzhi Gao, Yuhuai Li, Zhen Fu, Xinyu Hua, Yuxuan Zhang, "Simulation Study on Combustion Performance of Ammonia-Hydrogen Fuel Engines", Energies, vol. 17 2024. pp.1-17.

메탄-수소 역확산화염의 스월 설계변수에 따른 연소 및 배기특성

소리* · 전유선* · 금성민**.이승로*,***†

Effects of swirl parameters on combustion and emission characteristics of hydrogen-methane inverse diffusion flame

Ri So*, Yuseon Jeon*, Sung-Min Kum**, SeungroLee*†

ABSTRACT

An inverse diffusion flame (IDF) supplies fuel and oxidizer in the opposite direction compared to a diffusion flame. It is valuable as an industrial burner due to its advantages of high flame stability and low soot formation. An inverse diffusion flame with a swirler improves the mixing of oxidizer and fuel, generating the recirculation zones. This study reports on the combustion characteristics and emission performance of a Swirl-IDF. The swirling flow enhanced the mixing effect and decreased CO emissions.

Key Words : Swirling flow, Inverse diffusion flame, Hydrogen addition, Emission characteristics, Mixing effect

대표적인 연소방식인 예혼합 화염은 화염 온도가 높고 그을음 배출이 적다는 장점이 있다. 반면, 확산 화염은 안전성이 높지만 연료와 산화제 간의 혼합도가 높지 않아 대기오염물질의 배출량이 많다. 역확산 화염(Inverse diffusion flame, IDF)은 예혼합 화염과 비예혼합 화염의 이점인 화염 안정성과 배출 물질 감소와 같은 특징을 모두 가져 가스터빈, 로켓 추진과 같은 산업분야에서 활발히 활용되고 있다.

스월은 연료와 산화제 간의 혼합강도를 높여 충분한 산화에 기여할 수 있다. 또한, 재순환 영역을 발생시켜 고온 생성물을 다시 순환시켜 재점화하므로 화염 길이를 축소시킬 수 있다.

수소와 암모니아는 대표적인 무탄소 연료로서, 대기오염물질 감축을 위한 연료 연구에 필수적이다. 암모니아는 느린 연소속도(약 7cm/s)와 좁은 가연성 범위를 가질 뿐만 아니라, NOx 배출을 급격히 상승시키는 치명적 단점을 지닌다. 반면, 수소는 높은 고위발열량(142MJ/kg)과 C원자 감소로 인한 CO배출 감소를 달성할 수 있기 때문에 탄화수소 연료에 수소를 첨가하는 것은 안전성이나 환경적 측면에서 유리하다. 따라서, 본 연구에서는 수소를 최대 50%까지 첨가하여 수소 첨가율에 따른 스월 역확산 화염의 특성을 확인하고, 공해물질을 저감하는 것을 목적으로 한다. 화염 거동 및 구조는 직접사진과 OH radical 분포를 통해 가시화하였으며, Blow-out limits 측정을 통해 화염 안정성을 확인하였다. 또한, NOx와 CO측정을 통해 배출 성능을 확인하였다.

역확산 화염 버너 실험 개요도는 Fig.1과 같다. 내부 노즐에는 산화제를 공급하며, 외부 노즐에는 연료를 공급한다. 스월러는 내부 산화제 노즐에 적용되었으며, 스월러의 베인 직경은 15mm, 허브 직경은 6mm, 스월각도는 30°, vane 개수는 8개이다. 스월의 형상이 유동에 미치는 영향을 평가하기 위해 스월 수를 정의하여 선회강도를 나타낸다. 스월 수는 다음의 식으로 정의된다[1].

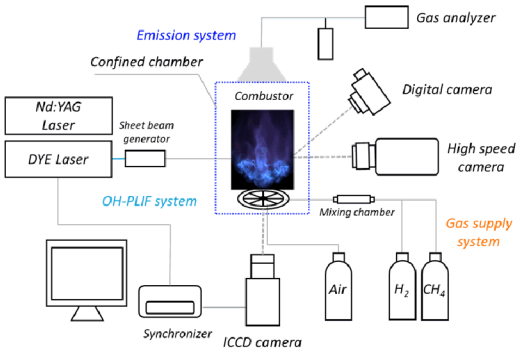


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system of inverse diffusion flame combustor

* 전북대학교 기계항공전기융합공학과
** 한라대학교 기계자동차공학과
*** 전북대학교 기계공학과
† 연락저자, seungrol@jbnu.ac.kr
TEL : (063)270-2334 FAX : (036)-270-2315

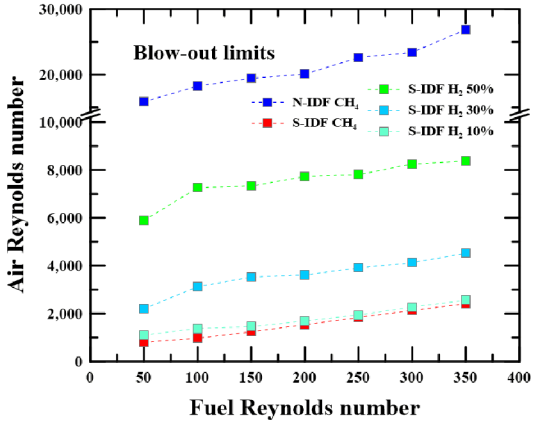


Fig. 2 Blow-out limits of Normal-IDF and Swirl-IDF at different hydrogen addition rate

$$S = \frac{2}{3}\left[\frac{1-(d_i/d_o)^3}{1-(d_i/d_o)^2}\right]\tan\alpha \qquad (1)$$

여기서 d_i와 d_o는 허브직경과 베인 직경을 나타내며, α는 스월 각을 의미한다. 실험에 사용된 스월 수는 0.428이다.

실험 장치는 연소 시 주변 공기와의 희석을 차단하고 배기 가스 포집을 위한 챔버가 설치되었다. 화염의 거동은 High speed camera (Photron, NOVA S9)를 이용하여 가시화하였다. OH radical 분포를 확인하기 위한 OH-PLIF 시스템은 Nd:YAG laser(Continuum, Surelite III)와 Dye laser (Radiant Dyes, Narrow Scan)로 구성된다. ICCD 카메라(PI-MAX4, Princeton Instruments)는 UV 렌즈와 OH가 방출하는 307nm의 파장을 받아들이는 longpass filter, bandpass filter를 장착하여 OH radical을 측정하였다. 배기가스 측정은 가스 분석기(Testo 340, Testo Inc.)를 사용해 측정하였다.

Fig.2는 메탄-수소 연료의 Normal-IDF와 Swirl-IDF 에서의 연료 레이놀즈 수에 따른 blow-out limits를 보여준다. 메탄 N-IDF에 비해 S-IDF는 낮은 화염 안정성 한계를 보인다. 이는 스월 유동에 의한 예혼합적 특성 때문이다. 예혼합 화염은 유동 불안정성이 높을 때 lift off 또는 blow-out 현상을 발생시킬 수 있으며, 부상된 화염은 안정성을 감소시킨다. 반면, 수소 첨가율이 증가함에 따라 blow-out limits이 확연히 증가한다. 수소의 높은 연소 반응성으로 인해 메탄 S-IDF에 비해서 안정성이 매우 향상되며 화염의 부상이 억제되기 때문이다. 이 결과는 수소를 첨가함으로써 S-IDF의 화염 안정성을 충분히 보완할 수 있음을 증명한다.

Fig.3는 S-IDF의 연료 레이놀즈 수 300에서의 OH radical 분포를 보여준다. 낮은 모멘텀비((O/F)m=10)

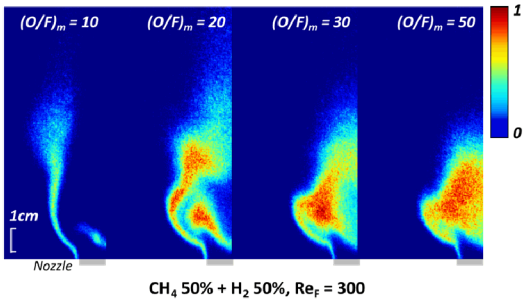


Fig. 3 OH radical distribution of Swirl-IDF at fuel Reynolds number 300

((O/F)m=10)에서는, 연료 노즐 쪽에서의 OH intensity가 높다. 모멘텀비가 낮을수록 산화제의 공급이 적어져 연료와 주변공기와의 혼합이 더 강하게 발생함을 확인할 수 있다. 모멘텀비가 증가할수록 산화제 공급이 증가하며 내부 선회유동에 의한 재순환영역이 형성되어 혼합효과가 향상된다. 또한, 수소 50% 첨가율의 화염에서는 높은 모멘텀비에서도 화염이 부상되지 않고 노즐에 부착되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 것처럼, 수소의 첨가가 부상효과를 감소시키고 안정성 영역을 넓히는 역할을 수행한다는 결과를 뒷받침한다.

본 연구를 통해 선회형 IDF 노즐을 산업용 버너에 활용하기 위한 데이터베이스를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업과(NRF-2021R1I1A3052326) 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-25427224), 2025년 전북대학교 글로컬대학30프로젝트의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

[1] Lilley DG. Swirl flows in combustion: A review, AIAA Journal 15(8) (1922) 1063-78.

[2] Zhen HS, Leung CW, Cheung CS. Thermal and emission characteristics of a turbulent swirling inverse diffusion flame. International Journal of Heat and Mass Transfer 53.5-6 (2010) 902-909.

[3] Jeon Y, Kim MY, Jung H, Lee S. Experimental study on flame structure, stability, and emission characteristics of CH4-H2 swirl-induced inverse diffusion flame. Case Studies in Thermal Engineering (2025) 106342.

메탄-암모니아 혼소 다단연소 특성 연구

조은성† · 조문수 · 제갈현욱 · 김세미

Study on the Characteristics of Methane-Ammonia Co-firing Staged Combustion

Teo Cho†, Moonsoo Cho, Hyunwook Jegal, Semi Kim

지구온난화에 대응하기 위한 CO_2 저감 연구가 활발히 진행되고 있으며, 무탄소 연료인 수소와 암모니아가 주목받고 있다. 특히, 가스터빈에서 수소 연소에 대한 연구는 OEM 업체들에 의해 집중되고 있으며, 수소의 빠른 화염 속도로 인한 역화 (flashback) 현상에 대한 해결이 필요하다.

최근 일본을 중심으로 암모니아를 직접 연소하는 연구가 시작되었으며, 이 과정에서 기존의 희박예혼합 (Lean Premixed) 방법을 통한 NO_x 저감과는 다른 특성이 나타난다. 암모니아 연소 시 상대적으로 높은 NO_x 발생을 줄이기 위해 다단연소 방법이 적용되고 있다.

또한, 암모니아의 낮은 화염 안전성 문제로 인해 이종 연료를 이용한 점화 후 암모니아로 전환하는 방식이 선호되고 있으며, 천연가스와의 혼소 연구도 중요해지고 있다. 이는 향후 지속 가능한 에너지 시스템 구축에 기여할 것으로 기대된다.

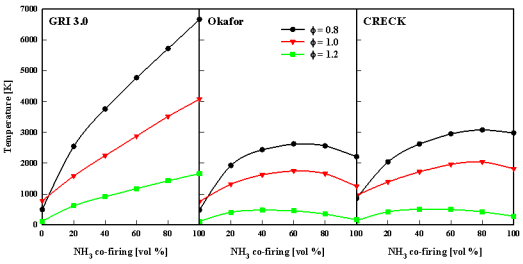


Fig. 1 NO_x emission trends in with co-firing ratio for various reaction mechanism.

암모니아 연소를 정확히 해석하기 위해서는 사용되는 메커니즘에 따라 결과가 달라질 수 있으며, 이에 대한 비교 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 본 연구에서는 세 (3) 가지 메커니즘을 비교하여 혼소율에 따른 NO_x 발생을 Fig. 1에 나타내었으며, 환원반응을 잘 모사하는 메커니즘 중 최종 Okafor 메커니즘을 채택하였다 [2].

* 한화파워시스템 친환경솔루션개발팀
† 연락저자, teo.cho@hanwha.com
TEL : (070)7147-4873 FAX : (031)-8018-1234

Fig. 2에서는 다단연소 조건에서 혼소율에 따른 NO_x 발생 특성을 분석하였다. 이 결과, 1단 연소와 달리 NH_3 혼소율에 따라 NO_x 발생이 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이에 대한 추가 분석이 필요하다고 판단된다.

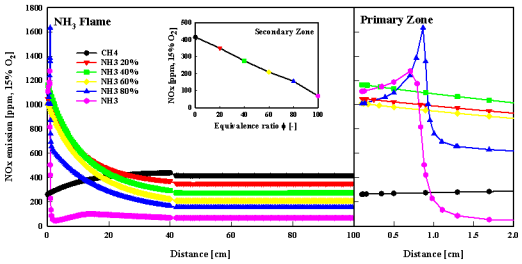


Fig. 2 NO_x emission trends in staged combustion with co-firing ratio [3].

이러한 기초연구를 기반으로 암모니아 전소 연소기 개발을 통한 조속한 상용화를 위해 많은 노력이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받은 연구의 일환(RS-2025-16066050, 암모니아 연료 직접 활용을 위한 중소형 가스터빈 저 NO_x 연소기 상용화 핵심 기술 개발)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] D. Kim, J. Kim, S. Park, "Recent research trends in ammonia reaction mechanism", J. Korean Soc. Combust. 30(1) (2025) 18-31.
[2] E.C. Okafor et. al, "Measurement and modeling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressure using a reduced reaction mechanism, Combust. Flame, 204 (2019) 162-175.
[3] E.-S. Cho et. al., "Study on zero-carbon ammonia staged combustion", J. Korean Soc. Combust. 30(2) (2025) 1-10.

수소 및 암모니아 혼소 비율 별 점화지연기간 및 층류화염전파속도에 대한 화학반응 모델 기반 계산 분석

김나연*. 손종윤*. 장일품*. 이정우**. 민경욱*†

Computational Analysis of Ignition Delay Time and Laminar Flame Speed in Hydrogen-Ammonia co-fueled combustion as varying Ratios

Nayeon Kim*, Joongyoon Son*,Ilpum Jang*, Jeongwoo Lee**, Kyungwook Min *†

ABSTRACT

This study numerically analyzed the ignition delay time and laminar flame speed of hydrogen-ammonia mixtures using detailed chemical kinetic modeling. Calculations were performed at 20 bar and φ=1.0 for different hydrogen-ammonia blending ratios.

Key Words : Ammonia, Hydrogen, Ignition delay time, Laminar flame speed

지구 온난화 가속화됨에 따라 탄소 배출 저감을 위한 무탄소 연료의 활용이 활발히 연구되고 있다. 그중 암모니아는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않는 무탄소 연료로 주목받고 있으며, 저장과 운송이 용이하다는 장점을 가진다. 그러나 암모니아는 높은 점화 에너지, 느린 화염 전파 속도, 좁은 가연 범위 등으로 인해 연소 반응성이 낮고 효율이 떨어지는 한계를 지닌다.[1] 이러한 암모니아의 연소적 한계를 극복하기 위해 암모니아를 부분적으로 분해하여 생성된 수소를 함께 사용하는 방법 또는 외부에서 수소를 혼합하는 방법이 있다. 이러한 혼소는 암모니아의 점화성 및 화염 전파 특성을 개선하고, 보다 안정적이고 효율적인 연소를 유도할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수소-암모니아 혼소 조건에서의 화학반응 특성을 수치적으로 분석하고, 혼합 비율에 따른 점화지연시간 및 층류화염전파속도의 변화를 계산함으로써 향후 수소-암모니아 혼소 시스템의 적절한 연료 조성비 제안을 위한 초석을 마련한다.

본 연구에서는 당량비 1.0 조건에서 산화제를 공기 조성비인 O_2:N_2 = 1:3.76으로 가정하였다. 수소와 암모니아의 혼합비에 따라 화학량론적 산소 요구량을 계산하여, 연료가 완전 연소되도록 초기 조성을 설정하였다.

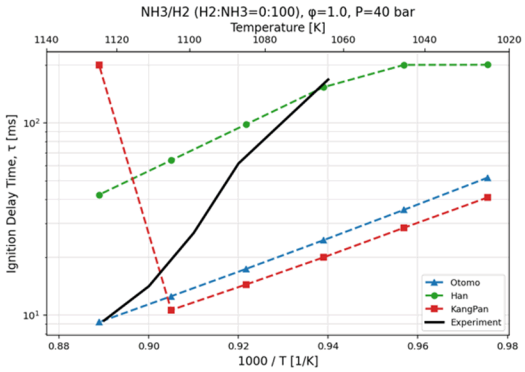


Fig. 1 Ignition delay time of pure NH_3[2]

* 충남대학교 자율운항시스템공학과
** 연락저자, jwoo@cnu.ac.kr
† 한국기계연구원 무탄소발전연구실
TEL : (042)821-7222 FAX : (042)-821-7222

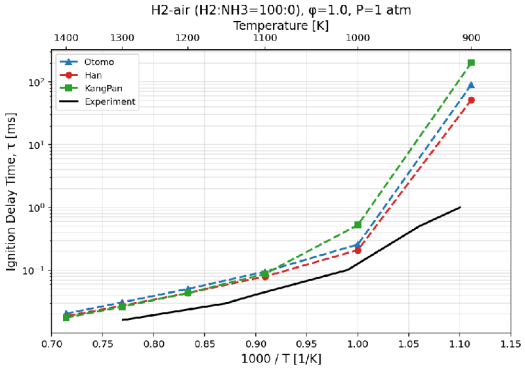


Fig. 2 Ignition delay time of pure H_2[3]

수소-암모니아 혼소 조건에서의 실험 데이터를 기반으로, Otomo et al., Han et al.[4], KangPan의 메커니즘을 적용하여 점화지연시간을 계산하고 비교하였다.[2] 그 결과, Otomo et al.의 메커니즘이 실험값과 가장 일치하여 이후의 계산에서는 본 메커니즘을 사용하였다.

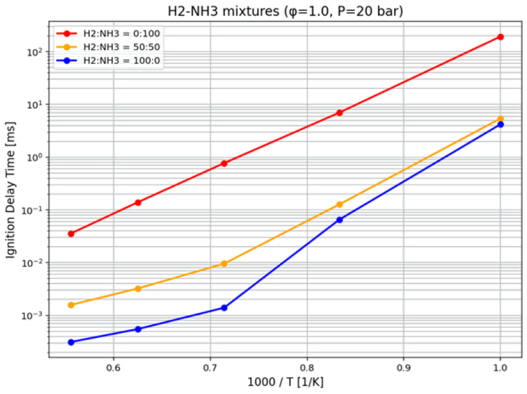


Fig. 3 Ignition delay time of NH_3/H_2 mixtures

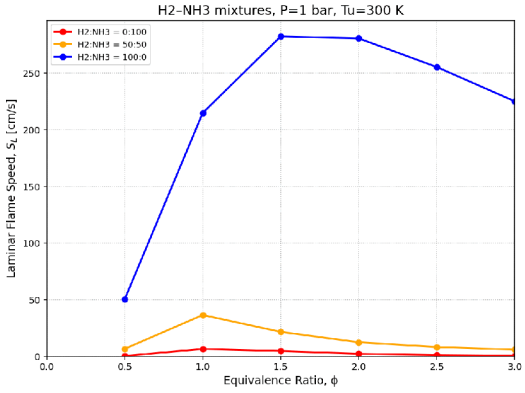


Fig. 4 Laminar flame speed of NH_3/H_2 mixtures

앞서 선택한 Otomo et al.의 메커니즘을 사용하여 수소와 암모니아의 혼합비를 0:100, 50:50, 100:0으로 설정하여 점화지연시간과 층류화염전파속도를 계산하였다. 계산한 결과 수소의 혼합비율이 증가할수록 점화지연시간이 짧아지는 경향을 보였으며, 이는 수소의 높은 반응성과 빠른 라디칼 생성 반응에 기인한다. 또한, 암모니아 단독 연료의 낮은 화염전파속도가 수소의 혼합비율이 증가함에 따라 점진적으로 향상되는 것을 확인하였다. 즉, 수소 첨가가 암모니아의 낮은 반응성을 보완하여 전반적인 연소 안정성과 반응속도를 개선함을 알 수 있다.

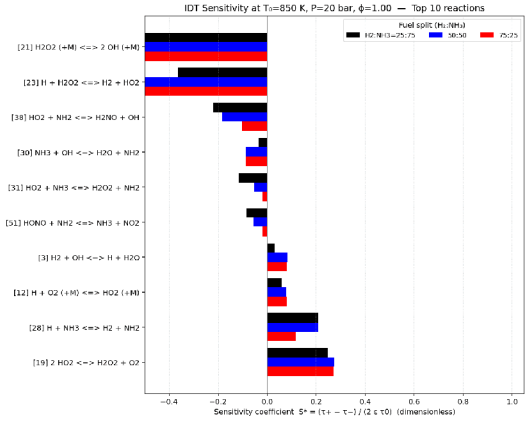


Fig. 5 Sensitivity analysis on ignition delay time of NH_3/H_2 mixtures

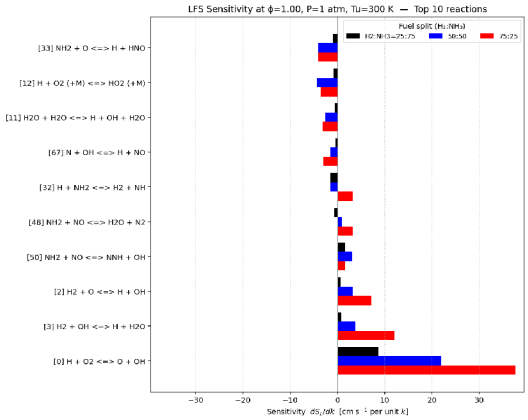


Fig. 6 Sensitivity analysis on laminar flame speed of NH_3/H_2 mixtures

수소와 암모니아의 혼합비를 25:75, 50:50, 75:25으로 설정하고 T=1000 K, P=20 bar, $\phi = 1$ 조건에서 점화지연시간과 층류화염전파속도에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석에서 음의 값(-)은 해당 반응이 점화를 촉진함을 의미하며, 양의 값(+)은 점화를 억제함을 의미한다.

Fig. 5의 수소 혼합 비율이 증가할수록 [12] $H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$ 반응이 활발해지며, 이는 연쇄 가지 반응을 유도하여 라디칼 생성 경로를 활성화시킨다. 이로 인해 OH 라디칼 농도가 증가하고, 결과적으로 정반응이 촉진되는 경향을 보인다.[5] Fig. 6의 층류화염전파속도 민감도 분석 결과, 수소의 혼합비가 증가할수록 [0] $H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$, [3] $H_2 + OH \rightleftharpoons H + H_2O$, [2] $H_2 + O \rightleftharpoons H + OH$의 라디칼 생성 반응이 활성화되어 정반응이 촉진된다.

결론적으로, 본 연구에서는 Otomo et al.의 메커니즘을 적용하여 수소-암모니아의 혼소 조건에서의 점화지연시간과 층류화염전파속도를 수치적으로 분석하였다. 그 결과, 암모니아 단독 연료의 경우 높은 점화지연시간과 느린 화염전파속도를 보여 낮은 연소 반응성을 나타내었으며, 수소의 혼합 비율이 증가할수록 점화지연시간이 감소하고 화염전파속도가 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 민감도 분석을 통해 수소 라디칼 관련 반응이 점화에 지배적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서 수소 첨가를 통한 암모니아의 연소 특성 개선이 효과적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(P0023684, 산업혁신인재성장지원사업)과 한국산업기술평가관리원(NO. 20018473, 무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 개발),한국연구재단 우수신진연구(NO. 2710082861, 탄소중립 연료 기반 선박의 선상 연료 생산/개질 및 xH2/수소 융합 연소 엔진 통합 시스템의 에너지 효율 분석 연구), 한국연구재단 미래유망융합기술 파이오니어(도전형)(NO. 2710085240, 플라즈마 활용 촉매 및 고효율 H2/CO2 저장 기술 기반 on-board 개질기 및 H2/e-fuel 혼소 엔진 통합 시스템 개발), 한국기계연구원 기관 기본사업(암모니아 크래킹 가스터빈 복합발전 시스템 특화기술 개발, NK254C)의 지원을 받아 진행된 연구이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

[1] X. Hu, J. Li, J. Pan, R. Zhang, H. Wei, G. Shu, "On combustion and emission characteristics of ammonia/hydrogen engines: Emphasis on energy ratio and equivalence ratio," *Fuel*, Vol. 365, 2024, Article 131183.

[2] X. He, B. Shu, D. Nascimento, K. Moshammer, M. Costa, R.X. Fernandes, "Auto-ignition kinetics of ammonia and ammonia/hydrogen mixtures at intermediate temperatures and high pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 206, 2019, pp. 189–200.

[3] V. P. Zhukov, "Verification, Validation and Testing of Kinetic Mechanisms of Hydrogen Combustion in Fluid-Dynamic Computations," *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2012, Article ID 475607, 2012.

[4] X. Han, Z. Wang, Y. He, Y. Zhu, K. Cen, "Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH_3/syngas/air premixed flames," *Combustion and Flame*, Vol. 213, 2020, pp. 1–13.

[5] L. Xiang, H. Jiang, F. Ren, H. Chu, and P. Wang, "Numerical study of the physical and chemical effects of hydrogen addition on laminar premixed combustion characteristics of methane and ethane," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 4, 2020, pp. 20501–20514.

Computational Particle Fluid Dynamics 기반 순환유동층 보일러의 암모니아 혼소에 따른 유동 특성 및 연소실 온도 평가

김서영*,** · 양원* · 박문수** · 김성일*†

Evaluation of Flow Characteristics and Furnace Temperature in a Circulating Fluidized Bed Boiler under Ammonia Co-firing using Computational Particle Fluid Dynamics

Seoyoung Kim*, Won Yang*, Moonsoo Bak**, Seongil Kim*†

최근 에너지 산업 전반에서 탄소 중립 실현을 위한 탈탄소화 움직임이 가속화 되고 있다. 이에 따라 온실가스 배출이 없는 연료 개발과 저탄소 연소 기술 확보가 중요한 과제로 부상하였다. 이러한 배경 속에서 이산화탄소(CO_2)를 배출하지 않는 무탄소 연료인 암모니아가 차세대 에너지 자원으로 주목받고 있다. 암모니아는 연소 시 이산화탄소를 발생시키지 않는 장점이 있으나, 높은 착화 온도와 낮은 화염 안정성, 그리고 연소 과정에서 질소산화물(NO_X)이 다량 생성될 수 있다는 단점을 동시에 지니고 있다[1]. 따라서 기존 석탄과의 혼소(Co-firing) 방식이 현실적인 대안으로 검토되고 있다. 순환유동층 보일러(Circulating Fluidized Bed Boiler, CFBC)는 다양한 연료 적용이 가능하고, 연소 효율이 높으며, 유동 특성으로 연소실 온도를 비교적 균일하게 유지할 수 있다. 현재 순환유동층 보일러에서 암모니아 혼소 전략으로 기존 기동버너위치(Start-up burner, SUB)에 암모니아 혼소 전략을 채택하고 있다. 그러나 암모니아 혼소 시 연료 주입구 및 버너 부근에 국소적 고온 영역(Hot spot)이 형성될 수 있다. 이는 NO_X 배출 증가뿐 아니라 내화물 손상과 운전 안정성 저하로 이어질 가능성이 있다. 따라서 암모니아 혼소 조건에서 순환유동층 내 유동 및 열 특성을 해석하고, Hot spot 발생 가능성을 평가하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 삼척화력발전소의 순환유동층 보일러를 대상으로 Computational Particle Fluid Dynamics(CPFD) Barracuda VR 기반 암모니아 혼소 시 연소실 내부 유동 및 열 특성의 전산해석을 진행하였다.

전산해석에서는 전체 보일러 형상 중 1/8로 축소하였으며, 해당 형상은 Fig 1에 나타내었다. 구성요소로 순환 유동층 연소실, 사이클론, Intrex로 구성되어 있다. 이를 기반으로 3차원 계산 격자를 생성하여 연소실과 주요 유동 경로를 반영하였다. 내부 기체-고체 유동은 희박상(Dilute phase)과 조밀상(Dense phase)의 특성을 동시에 고려할 수 있는 WenYu-Ergun 기반 드래그 모델을 적용하여 모사하였다[3]. 분석 과정에서는 석탄 전소 조건에서 배가스 조성, 벽면 열전달량 및 반응기 내부 온도를 평가하여 기본 거동을 검증하였다. 이후 암모니아 혼소 조건에서 연소실 온도 분포와 국소 고온 영역(Hot spot)의 발생 위치를 분석하였다.

연료 조건은 석탄 전소와 암모니아 20% 혼소를 대상으로 설정하였다. Table 1은 석탄 및 암모니아 유량, Primary air(PA), Lower secondary air(LSA). Upper secondary air(USA)의 공기 유량을 나타내었다. 석탄 전소 시 유량은 공급계약서 기준 1/8 값을 계산하여 적용하였으며, 암모니아 유량은 발열량을 기준으로 산정하였다. 공기유량은 과잉공기비(Excess air ratio) 1.2를 적용하여 계산하였다.

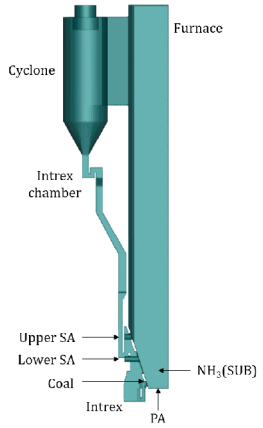


Fig. 1 Fuel and Air Flow rates applied in Modeling

* 한국생산기술연구원 지속가능기술연구소 저탄소배출제어연구부문
** 성균관대학교 기계공학과
† 연락저자, ksungil85@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8403 FAX : (041)-589-8323

Table 1 Fuel and Air Flow rates of the CPFD model for the 1/8-scale target CFB boiler sytem

Co-firing Ratio	Coal 100%	NH_3 20%
Coal [kg/s]	9.52	7.61
Ammonia [kg/s]	-	1.48
PA [kg/s]	36.94	31.04
LSA [kg/s]	12.14	11.30
USA [kg/s]	12.26	11.19

Table 2 Chemical Reactions applied in Modeling [4]

Devolatilization VM(s) → 0.108509 Tar + 0.260359 CO + 0.120881 CO_2 + 0.090877 CH_4 + 0.154827 H_2 + 1.35759 H_2O + 0.009356 H_2S + 0.071394 NH_3
Tar cracking Tar → 7.75283 C(S) + 0.180008 CO + 2.857328 CH_4
Char gasification C(s) + H_2O ↔ CO + H_2 2CO ↔ C(s) + CO_2 C(s) + 2H_2 ↔ CH_4
Char oxidation 2C + O_2 → 2CO
Tar oxidation Tar + 13.5574 O_2 → 10.7901 CO_2 + 5.71463 H_2O
Water gas shift CO + H_2O ↔ CO_2 + H_2
CO combustion CO + 0.5 O_2 → CO_2
H2 combustion H_2 + 0.5 O_2 → H_2O
CH4 combustion CH_4 + 2O_2 → CO_2 + 2H_2O
Moisture release H_2O(s) → H_2O

Table 2에는 연소 반응 해석에 적용된 반응식과 주요반응 목록을 나타내었다. 해석에는 탈휘발(Devolatilization), Tar 분해 및 산화, Char 가스화 및 산화, 수성 가스 전환, CO/H_2/CH_4 연소, 수분 방출 등을 고려하였다. 각 반응 계수와 속도 상수는 C3M(Carbonaceous Chemistry for Computational Modeling) 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 벽면 열전달 초기조건은 공급계약서 기준값을 적용하였다. 전열면적은 Evaporator(EVA), Superheater4(SH4), Cyclone(SH1), Intrex Chamber(IC), Intrex(SH5)를 고려하였다. SH4 열교환기의 상세 형상은 모델링에서 제외되었으며, 전열면적은 EVA에 합산하여 계산에 반영하였다.

석탄 전소 전산해석은 85초 동안 수행하였으며, 연소실 내부 유동이 안정화되는 30초 시점부터 석탄을 주입하였다. 석탄 전소모델은 공급계약서의 조건과 해석 결과를 비교하여 검증하였다. 암모니아 혼소 모델은 120초 동안 전산해석을 수행하였으며, 연소 반응을 직접 해석하지 않고, hot spot 영역을 파악하기 위해 암모니아가 100% 연소되었다고 가정하였다. 이에 따라, 암모니아 연소가스로부터 생성되는 온도와 조성 유량을 경계 조건(Boundary condition)으로 설정하여 30초 시점부터 연소실에 투입하도록 구성하였다.

전산해석 결과, 석탄 연소조건에서 예측된 배가스 조성과 연소실 평균 온도가 실제 운전 조건과 유사하게 나타나 CPFD 모델의 타당성을 확인하였다. 또한, 적용된 경계 조건을 기반으로 수행한 암모니아 20% 혼소 해석을 통해 연료 주입부(SUB) 주변의 국소 고온 영역(Hot spot)을 분석하고, 연소실 전체 온도 분포에 대한 영향성을 파악하였다.

참고 문헌

[1] J Li, S Lai, D Chen, R Wu, N Kobayashi, L Deng, H Huang, H, "A review on combustion characteristics of ammonia as a carbon-free fuel", Frontiers in Energy Research, Vol. 9, 2021, pp. 760356.

[2] H Zhang, J Lyu, G Yue, "A review on research and development of CFB combustion technology in China.", Powder Technology, Vol. 414, 2023, pp. 118090.

[3] R Stanly, G Shoev, "Detailed analysis of recent drag models using multiple cases of mono-disperse fluidized beds with Geldart-B and Geldart-D particles", Chemical Engineering Science, Vol. 188, 2018, pp. 132-149.

[4] C Yang, J Jeong, Y Kim, B Bang, U Lee, "Numerical simualtion of a circulating fluidized bed combustor and evaluation of empirical models for estimating solids volume fraction", Powder Technology, Vol. 393, 2021, pp. 786-795.

사각 재생냉각 채널에서 가열 벽면 위치에 따른 JP-8의 초임계 열전달 특성에 대한 수치적 연구

고상호* · 길유창** · 박성우*†

Numerical Study on Supercritical Heat Transfer Characteristics of JP-8 in Rectangular Regenerative Cooling Channels with Different Heated Wall

Sangho Ko*, Yuchang Gil**, Sungwoo Park*†

스크램제트 엔진의 극초음속 비행 과정에서는 엔진 내부의 고온 가열 문제와 동체 표면의 공력 가열 문제가 동시에 발생한다. 이러한 열관리 문제를 완화하기 위하여 재생냉각 채널이 사용된다. 제트연료는 재생냉각 채널 내의 고온, 고압의 환경에서 냉매로 작용하여 연소실로부터 많은 양의 열을 흡수한다. 이 과정에서 연료가 임계점을 초과하면 초임계 상태로 전환되며, 이는 일반적인 액체 상태의 제트연료와 비교할 때 유동 및 열전달 특성에 변화를 초래한다. 따라서 재생냉각 시스템은 스크램제트 엔진의 열관리 문제 해결에 필수적이며, 이를 위한 초임계 유체의 복잡한 유동 및 열전달 거동에 대한 연구가 필요하다.

스크램제트 엔진과 극초음속 미사일의 재생냉각 채널 내 제트연료는 중력이 작용하는 환경에서 운용되므로, 부력이 유동 특성에 영향을 미친다. 특히 부력의 작용으로 저밀도의 유동이 채널 상부로 이동하면서 secondary flow가 형성되고, 이로 인해 유동 고립부가 발생하여 열전달 악화(Heat transfer deterioration, HTD) 현상이 나타난다[1]. 또한, 채널에 투입되는 연료의 질량유량과 열유속 조건에 따라서도 열전달 성능이 달라진다[2]. 따라서 다양한 조건에서의 재생냉각 채널 내부 유동 및 열전달 특성에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

이와 관련하여 국내외적으로 재생냉각 채널에서 제트연료의 초임계 열전달 특성에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히, n-decane과 같이 제트연료를 대체할 수 있는 단일 화학종을 이용하여 관련 연구가 수행되고 있다[1-5]. 한편, 국외에서는 제트연료를 대체하기 위한 모사연료를 활용한 초임계 열전달 연구도 활발히 수행되고 있다[6-8]. 그러나 국내에서는 혼합물 기반 제트연료의 초임계 열전달에 대한 연구가 아직 부족한 실정이다. 제트연료는 임계 압력 이상에서 온도에 따라 물성치가 급변할 뿐만 아니라 연료를 구성하는 탄화수소의 종류에 따라서도 물성치가 달라진다. 따라서 국내에서 널리 사용되는 Jet-A과 JP-8과 같은 복잡한 조성을 가진 제트연료의 열전달 및 물리화학적 특성을 단일 화학종만으로 완전히 모사하는 데에는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 JP-8 모사연료를 이용하여 재생냉각 채널 내 초임계 열전달 특성을 분석하였다. 특히, 중력으로 인한 부력의 영향으로 고온의 저밀도 유동이 채널 상부로 이동하므로, 한쪽 면만 가열되는 재생냉각 채널 특성상 가열 벽면의 위치에 따라 유동장 내 온도와 밀도 분포가 달라진다. 따라서 본 연구에서는 가열 벽면 위치에 따른 제트연료의 재생냉각 채널 내의 열전달 특성을 해석적으로 분석하였다.

본 연구에 사용된 모사연료는 실제 연료의 물성치를 기반으로 유전 알고리즘 원리를 이용해 구성하였으며, 그 조성은 Table 1과 같다. Table 2에 나타난 바와 같이, 모사연료는 실제 연료 물성치[9]와 높은 유사성을 보였다. 또한, 전산 해석을 위해 NIST SUPERTRAPP을 이용하여 JP-8의 임계 압력 이상인 3 MPa 조건에서 300~1000 K 구간의 물성치 데이터를 도출하였다. Fig. 1과 같이, 모사연료는 3 MPa 조건에서 약 710 K의 pseudo critical temperature를 가지며, 이 온도를 기준으로 물성치가 급격히 변화하는 특성을 보였다.

Table 1 Chemical composition of surrogate

	name	mole fraction
species 1	n-tetradecane	0.344
species 2	pentamethylheptane	0.244
species 3	decalin	0.197
species 4	1,2,4-trimethylbenzene	0.213

* 한국항공대학교 항공우주및기계공학과
** 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과
† 연락저자, sungwoo.park@kau.ac.kr
TEL : (02)300-0078

Table 2 Properties of surrogate

properties	JP-8[9]	surrogate	% error
MW	161.0	162.3	1
CN	50.1	50.1	0
LHV	43.3	43.3	0
TSI	23.0	22.9	0.4
H/C	1.93	1.96	1.5

Table 3 Cases based on heating-wall position

case name	heating position
Case 1	bottom wall
Case 2	top wall
Case 3	left wall

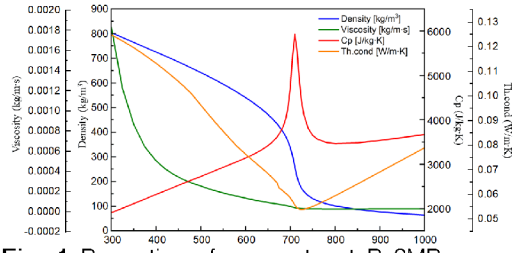


Fig. 1 Properties of surrogate at P=3MPa

본 연구에 사용된 채널 형상은 스크램제트 엔진에 사용되는 정사각 단면 채널을 모사하였으며, 연소실로부터 공급되는 열유속이 한쪽 면에 작용하도록 실제 환경과 유사하게 적용하였다. 채널 한 변의 길이는 2 mm, 채널의 길이는 1 m로 설정하였으며, 유동장 앞과 뒤에 150 mm의 유동 안정화 구간을 설정하였다[10]. 또한, 격자 구성 시 유동의 속도를 고려하여 첫 번째 격자의 y+가 1보다 작도록 높이를 9.65e-7 m로 설정하였으며 격자 개수는 wall을 포함하여 총 9,827,250개로 구성하였다.

전산 해석을 위해 ANSYS Fluent를 사용하였으며, steady 조건에서 SST k-ω 난류 모델을 이용하였다. 해석 조건은 입구 온도 300 K, 작동 압력은 3 MPa로 설정하였으며, 유량 조건은 Zhang 등[9]이 제시한 스크램제트 엔진의 운용 조건을 참고하여 5 g/s로 부여하였다. 또한, 채널 내부에서의 cocking을 최대한 방지하며 초임계 조건에 도달하기 위해, 2.5 MW/m^{2}의 열유속을 Table 3의 case에 따라 채널 각 면에 적용하였다. 이때 측면 벽 가열의 경우, 좌우 가열에 대한 열전달 해석 결과가 대칭으로 동일한 경향을 나타낼 것으로 판단되어, 좌측면에 대한 열전달 해석만 수행하였다.

해석 결과, 가열 면의 위치에 따라 상변화가 발생하는 구간이 서로 다르게 나타났다. 가열 면 인근의 유동이 우선적으로 가열되어 상변화가 먼저 일어났으며, 이 과정에서 밀도가 급격히 감소하는 등 물성치의 급변이 관찰되었다. 유동이 진행됨에 따라 충분히 가열된 영역에서는 유동이 혼합되며 고온의 초임계 상태에 도달하였다. 이때 부력의 영향으로 인해 고온 저밀도의 유동이 상부로 이동하는 secondary flow가 발생하였고, 이러한 상하부의 유동의 불균일성과 가열 면 위치의 차이로 인해 각 case에서 서로 다른 열전달 특성이 나타났다.

Case 1에서는 유동 하부에서 가열되어 고온 영역이 하부에서 먼저 형성되었으며, 유동이 진행되면서 저밀도의 고온의 유동이 상부로 이동하여 상부 영역에 저밀도 유동이 형성되었다. Case 2에서는 상부 가열에 의해 유동 상부에서 밀도가 급격히 감소하였고, 저밀도 유동이 부력의 영향으로 상부에 체류하였다. 이후 중심부 유동이 지속적인 열전달을 통해 가열되면서 후류에서는 전체 유동이 초임계 상태에 도달하였다. 마지막으로 Case 3에서는 좌측 벽면이 가열되면서 좌측 영역에서 저밀도 유동이 우선적으로 발생하였고, 부력의 영향으로 해당 유동이 우선적으로 상부로 이동하여 xy 단면에서 비대칭 유동이 관찰되었다.

결론적으로, 모든 해석 case에서 채널 내 초임계 제트연료의 열전달 현상이 관찰되었으며, 중력이 아래 방향으로 작용함에 따라 가열 면의 위치에 따라 유동 및 열전달 특성에 차이가 나타났다. 이러한 결과는 추진기관 연소실 내 재생냉각 채널의 배치 위치에 따른 열전달 성능을 예측하는 데 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 본 연구의 결과를 바탕으로, 고온 조건에서 열분해 반응이 수반되는 제트연료의 특성을 고려하여, 향후에는 열분해 반응을 포함한 재생냉각 채널 내 열전달 거동을 모사연료 기반 수치해석을 통해 분석할 예정이다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2021-KP002521, 탄소중립 고효율 가스터빈 연소기술에너지혁신연구센터).수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Y. Chen, Y. Li, B. Sunden, G. Xie, "The abnormal heat transfer behavior of supercritical n-decane flowing in a horizontal tube under regenerative cooling for scramjet engines", Appl. Therm. Eng., Vol. 167, 2020, 114637.

[2] Y. Li, C.N. Markides, B. Sunden, G. Xie, "Heat transfer deterioration in upward and downward pipe flows of supercritical n-decane for actively regenerative cooling", Int. J. Therm. Sci., Vol. 168, 2021, 107066.
[3] B. Liu, Y. Zhu, J. Yan, Y. Lei, B. Zhang, P. Jiang, "Experimental investigation of convection heat transfer of n-decane at supercritical pressures in small vertical tubes", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 91, 2015, pp. 734 - 746.
[4] J. Liu, M. Xu, K. Ma, C. Liu, W. Xi, "Heat transfer and flow structures of supercritical n-decane in a regenerative cooling channel loaded with non-uniform heat flux", Front. Energy Res., Vol. 10, 2022, 985220.
[5] Y. Li, G. Xie, B. Sunden, "Flow and thermal performance of supercritical n-decane in double-layer channels for regenerative cooling of a scramjet combustor", Appl. Therm. Eng., Vol. 180, 2020, 115695.
[6] H. Pu, H. Chang, J. Wang, Y. Shang, M. Dong, S. Li, "Experimental investigation and analysis of convective heat transfer to supercritical pressure aviation kerosene RP-3 in vertical miniature tubes based on the pseudo-boiling theory", Appl. Therm. Eng., Vol. 219, 2023, 119651.
[7] K. Tian, Z. Tang, J. Wang, T. Ma, M. Zeng, Q. Wang, "Numerical investigation of pyrolysis and surface coking of hydrocarbon fuel in the regenerative cooling channel", Energy, Vol. 260, 2022, 125160.
[8] J. Wen, H. Huang, Z. Jia, Y. Fu, G. Xu, "Buoyancy effects on heat transfer to supercritical pressure hydrocarbon fuel in a horizontal miniature tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 115, 2017, pp. 1173 - 1181.
[9] A. Shrestha, Z. Zheng, Z. Badawy, N. Henein, P. Schihl, "Development of JP-8 surrogates and their validation using ignition quality tester", SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 7, No. 1, 2014, pp. 337 - 351.
[10] S. Zhang, J. Qin, K. Xie, Y. Feng, W. Bao, "Thermal behavior inside scramjet cooling channels at different channel aspect ratios", J. Propuls. Power, Vol. 32, 2016, pp. 57 - 70.

문헌에서 보고된 실험 데이터 학습 기반 머신 러닝 모델에서의 다중 회귀분석을 통한 연소 특성 예측 가능성 연구

유지호*,**. 김동휘**. 홍종섭*. 이영재**†

Feasibility study on prediction of combustion characteristics through multiple regression analysis in machine learning models based on experimental data reported in literature

Jiho Yu*,**, Donghwi Kim**, Jongsup Hong*, Youngjae Lee**†

철강, 화학, 에너지, 수송 등 다양한 산업 분야에서 연소 기술이 적용되고 있다. 산업용로, 보일러, 가스터빈, 내연기관 등 연소 기술을 활용하는 설비에서는 대기오염, 지구온난화 등의 문제와 직결되는 NO_x, CO, CO_2 등과 같은 오염물질에 대한 제어 및 저감이 필수적인 과제이다. 그렇기에 전 세계적으로 배출가스 규제를 강화하고 있으며[1] 이를 충족시키기 위해 다양한 연소 기술이 연구 및 개발되고 있다.

학계, 연구계, 그리고 산업계에서 연구 및 개발을 통해 축적되는 방대한 연구 데이터를 효과적으로 활용하기 위해 최근 급격하게 발전하고 있는 인공지능 및 머신 러닝 기술을 적용하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 머신 러닝은 대규모 데이터를 기반으로 복잡한 비선형 관계를 학습하여 예측, 분류, 최적화 등에 활용될 수 있으며, 이는 화학 반응 해석, 연소 모델링, 엔진 성능 예측 및 최적화, 연료 설계 등 연소 분야의 연구 방법에 적용되고 있다[2]. 따라서, 본 연구는 선행 문헌에서 보고된 다양한 연소 실험 데이터 기반으로 머신 러닝 모델의 학습을 통해 특정 조건에서의 연소 특성 예측에 대한 가능성을 확인하는 것을 목표로 한다.

본 연구에서는 기체 연료를 활용한 연소 실험관련 선행 문헌에서 보고된 611개의 실험 데이터를 활용하여 의사 결정 나무 구조 형태를 기반으로 하는 다양한 모델을 적용하여 종속 변수에 대한 예측 성능을 비교하였다. 이를 위해 설정된 독립변수와 종속 변수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Data organization for machine learning

Parameter	Unit	Variable
Fuel		
Composition	Vol.%	Independent
Flow velocity	m/s	
Flow rate	g/s	
Temperature	K	
Oxidant		
Composition	Vol.%	Independent*
Flow velocity	m/s	Independent
Flow rate	g/s	
Temperature	K	
Oxygen fraction	Vol.%	
Operation		
Dilution ratio	–	Independent
Equivalence ratio	–	
Temperature	K	
Pressure	Atm	
Combustion mode**	–	Dependent*
Emission		
NO_x	ppm	Dependent
CO	ppm	Independent
CO_2	Vol.%	
O_2	Vol.%	

*Categorical variable
**Flame or Flameless combustion

* 연세대학교 기계공학과
** 한국생산기술연구원
† 연락저자, leeyj@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8464 FAX : (041)-589-8323

독립 변수로는 연료 조건, 산화제 조건, 운전 조건, 그리고 배출물 농도를 사용하였으며, 종속 변수로는 NO_x 배출 농도와 연소 형태를 설정하였다. 보고된 선행 문헌에서 실험 조건이 모두 동일하게 제시되어 있지 않아 일부 변수에서는 누락된 데이터가 발생하였기 때문에 누락 데이터의 비율이 가장 낮아 지도학습에 용이한 NO_x 배출 농도와 연소 모드를 주요 예측 목표로 설정하였다. 이러한 데이터를 기반으로, 종속 변수의 유형에 따른 예측 모델을 구축하고 예측 성능을 비교하기 위한 머신 러닝 도구로 데이터 분석 및 모델 학습 과정에는 오픈 소스 머신 러닝 소프트웨어를 활용하였다.

NOx 배출 농도 및 연소 모드 예측을 위한 예측 모델의 구조는 Fig. 1과 같으며 다음과 같은 과정을 수행한다. 문헌에서 보고된 실험 데이터를 수집하고 수집한 실험 데이터를 불러와 머신 러닝 툴이 학습 가능한 형태로 변형할 필요가 있다.

학습에 사용되는 종속 변수와 예측하고자 하는 목표인 독립변수를 설정하고 데이터를 학습 데이터와 검증 데이터로 분할하여 사용하고자 하는 학습 모델에 적용하여 학습시킨다. 최종적으로 모델의 검증 데이터에 대한 예측 결과와의 비교를 통해 성능을 평가하고 이에 대한 예측 성능 지표를 확인하였다. 이를 바탕으로 최종적인 예측 모델의 성능을 평가하였다.

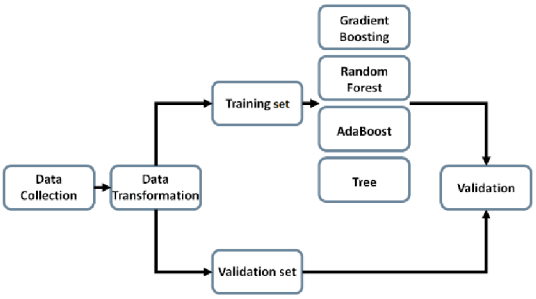


Fig. 1 Flow diagram for machine learning models

Table 1에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 예측하고자 하는 종속 변수는 NO_x 배출 농도와 연소 모드이다. 해당 종속 변수 값을 예측하는 예측 모델을 구축하기 위해 선택한 학습 모델은 비선형적이고 복잡한 상호작용을 하는 독립 변수와 종속 변수의 관계를 잘 설명하는 것에 적합할 것으로 판단되며, 회귀 및 분류에 모두 적용이 가능한 대표적인 범용 학습 모델인 의사 결정 나무 구조 형태를 기반으로 하는 Gradient Boosting, Random Forest, AdaBoost, 그리고 Tree 모델을 고려하였다.

전체 611개의 실험 데이터 중 NO_x 배출 농도에 대해 누락 데이터가 발생한 경우를 제외한 380개의 학습 데이터를 바탕으로 머신 러닝 모델을 학습하였다. 학습 데이터를 제외한 161개의 검증 데이터를 바탕으로 NO_x 배출 농도 예측 결과와 실험 결과와의 산점도 및 오차율에 대한 결과를 Fig. 2와 Table 2에 비교, 평가하였다.

의사 결정 나무 구조 형태에 기반한 네 가지 모델들을 적용하여 예측한 NO_x 배출 농도 결과는 산점도 상에서 일부 오차가 존재하나, 대부분의 예측 결과는 실험 결과와의 대칭선 위에 존재하여 높은 예측 성능을 보이는 것으로 판단된다. 하지만, 실험 결과와 예측 결과와의 오차가 큰 조건의 경우 머신 러닝 모델과 상관없이 NO_x 배출 농도가 300 ppm 이상의 구간에서 도출된 것으로 나타났다. 해당 구간의 실험 데이터를 분석한 결과 연료 조성비 중 CO_2의 비율이 약 50 Vol.% 수준으로 학습에 활용된 데이터들과 비교하여 이례적으로 높았으며, 그 외에도 산화제 중 산소 분율이 2~13% 수준으로 낮았으며, 약 300~600 ppm의 높은 NO_x 배출 농도 등 학습 데이터와 비교하여 데이터 불균형이 심한 구간에 발생한 오차로 판단된다.

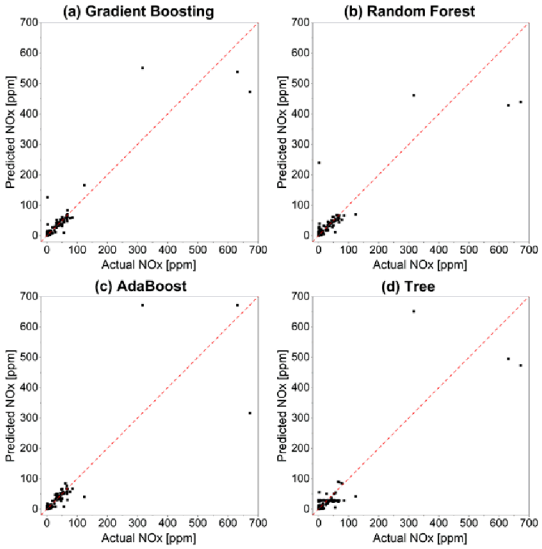


Fig. 2 Scatter diagram of experimental and predicted results for NO_x (a)Gradient Boosting, (b)Random Forest, (c)AdaBoost, (d)Tree

예측 모델 성능을 판단할 수 있는 보편적인 지표는 Coefficient of Determination(R^2), Mean Squared Error(MSE), Root Mean Squared Error(RMSE), 그리고 Mean Absolute Error(MAE)가 있다. R^2은 모델이 독립변수와 종속변수 사이의 관계성에 대한 정확도를 나타내는 지표로 0~1의 값을 가지며 값이 높을수록 예측 모델의 신뢰성이 높다. Table 3에서 네 가지 모델 모두 R^2 값이 0.7 이상으로 일정 수준 이상의 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다. 그러나 비선형 모델의 경우 R^2만으로는 성능을 판단하기 어렵기 때문에 MSE, RMSE, 그리고 MAE에 대해 추가적으로 검토하였다. MAE를 비교한 결과, Tree 모델이 가장 높은 수치로 평균 실제 NO_x 배출 농도 28.35 ppm 으로부터 약 ±14.75 ppm의 오차를 보여 약 52%의 상대적 오차를 나타냈다. 반면 Gradient Boosting 모델은 평균 절대 오차가 ±8.32 ppm으로 이는 실제 평균값과 대비하여 약 29.35%의 가장 작은 상대적 오차로 상대적으로 가장 우수한 예측 성능을 보였다.

Table 2 Evaluation of NO_x prediction for various models

Model	R^2	MSE	RMSE	MAE
Gradient Boosting	0.90	622.92	24.96	8.32
Random Forest	0.89	662.75	25.74	8.68
AdaBoost	0.72	1674.59	40.92	9.90
Tree	0.77	1352.53	36.78	14.75

Fig. 3은 학습 모델별 연소 모드에 대한 예측 결과에 대한 통계를 나타낸 결과이다. 전체 611개의 실험 데이터 중 학습 데이터로 활용된 428개의 실험 데이터를 바탕으로 각 머신 러닝 모델을 학습하였다. 그 결과 Tree 모델이 가장 적은 169개의 예측이 가능하였고, NO_x 배출 농도 예측에서 상대적으로 좋은 성능을 보였던 Gradient Boosting, Random Forest, AdaBoost 모델이 각각 176개, 175개 그리고 175개의 데이터를 예측하여 Tree 모델에 대비하여 높은 예측 정확도를 보인다.

학습 모델별 분류 예측에 대한 성능 지표는 Classification Accuracy(CA), Area Under the Curve(AUC), F1-score, Precision, Recall 등 다양하나, 연소 모드에 대한 예측은 앞서 언급한 바와 같이 이진 분류이므로 CA가 가장 직관적인 지표라고 판단되며 이에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다.

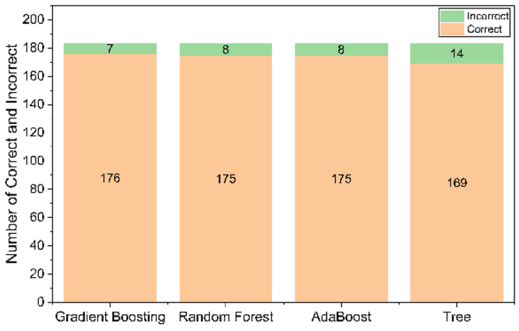


Fig. 3 Predicted results of combustion mode for each classification model

Table 3 Classification Accuracy of Each Prediction Model

Model	CA[%]
Gradient Boosting	96.17
Random Forest	95.63
AdaBoost	95.63
Tree	92.35

성능지표에서 Gradient Boosting, Random Forest, 그리고 AdaBoost가 95% 이상의 높은 정확도를 보였기에 회귀 및 분류 형태의 연소 특성 예측을 위한 머신 러닝 모델은 위 세 가지 학습 기법을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

결론적으로, 본 연구에서는 문헌에서 보고된 실험 데이터들을 기반으로 회귀 및 분류 특성의 종속변수 예측을 위한 예측 모델을 생성하고, 교차검증을 통해 예측 성능을 비교 및 평가하였다. 그 결과 Gradient Boosting, Random Forest, 그리고 AdaBoost 모델이 높은 정확도와 안정적인 예측 성능을 보이기 때문에 연소 특성 예측에 적합하다고 판단된다. 그 중 일부 데이터 구간에서 높은 오차가 발생하였으나, 이는 실험 데이터의 불균형에 의한 것으로 생각된다. 본 연구를 통해 머신 러닝 예측 모델의 활용 가능성을 확인하였으며, 향후 본 연구 과정에서 발생된 다양한 연소 실험 데이터를 활용하여 연소 특성 예측 모델의 성능 개선과 적용성에 대한 평가를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-석유대체 친환경 화학기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. 2022M3J5A1051728).

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP22024-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] 관계부처합동, "탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획", 2023.

[2] L. Zhou, Y. Song, W. Ji, and H. Wei, “Machine learning for combustion." *Energy and AI*, vol. 7. Elsevier BV, p. 100128, Jan-2022.

저발열량 연료 활용 순산소 버너 개발 연구

김태영*† · 안형준** · 권진규*
*포항산업과학연구원 에너지연구센터
**포스코홀딩스 미래기술연구원 수소저탄소연구소

Research on Development of an Oxy-fuel Burner Utilizing Low-Calorific Value Fuels

Taeyoung Kim*† , Hyungjun Ahn**, Jin Gyu Kwon*
*Energy Research Center, Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST)
**Hydrogen and Low-Carbon Research Institute, POSCO N.EX.T Hub

(Received for review 월 일, 2014; Revised 월 일, 2014; Accepted 월 일, 2014)

ABSTRACT

This study aims to establish design parameters for an oxy-fuel burner to efficiently combust LDG, a low-calorific fuel from steelmaking processes. Using a 100,000 kcal/h experimental burner, combustion characteristics were analyzed with design parameters including *Re*, *J* and S/D number. The results indicated that the momentum flux of the oxygen jet significantly impacts combustion. Variations in the S/D number affected the flow of fuel and external air. CO emissions increased when the S_F/D_A number exceeded 1.5 due to insufficient fuel entrainment. To reduce NO emissions, minimizing external air entrainment by adjusting the number of oxygen nozzles and maximizing the S/D number was effective. This research provides essential design parameters for stable and efficient combustion of low-calorific fuels like LDG.

Key Words : Byproduct gas combustion, Oxy-fuel burner, Low-calorific fuels

기 호 설 명

Re : Reynolds number	S/D : S/D ratio
J : Momentum flux	*R* : Recess length
S : Nozzle center-to-center distance	*v* : Velocity
D : Average nozzle diameter	*ρ* : Density

1. 서 론

철강 공정에서 사용되는 연소설비는 일반적으로 가스연료 및 공기를 주 연료 및 산화제로 사용하여 열과 에너지를 생산한다. 특히 일관제철소의 경우, 전체 공정 효율 향상을 위해 조업 간 발생하는 부생가스의 대부분을 회수하여 생산 공정 및 자체 전력 생산을 위한 연료로 사용하고 있다. 철강 공정에서 발생하는 주요 부생가스는

† Corresponding Author, tykim_rist@rist.re.kr

BFG(Blast Furnace Gas), COG(Coke Oven Gas), LDG(Lintz-Donawiz Converter Gas)가 있다. BFG는 쇳물(용선, pig iron)을 생산하는 고로에서 발생을 하며, 발생량은 가장 많으나 발열량은 약 800 kcal/Nm^3(이하 저위발열량 기준)로 부생가스 중 가장 낮다. COG는 코크스 생산 공정에서 발생하며 발열량이 약 4,000 kcal/Nm^{3}로 부생가스 중 가장 높고, 조성의 50% 이상이 수소로 이루어져 있어서 화염의 안정성이 가장 높다. LDG는 제강 공정의 전로 취련 과정에서 발생하며, 조성의 60% 가까이 CO로 이루어져 있고 발열량은 약 2,000 kcal/Nm^3 이다.

부생가스 회수 활용을 통한 철강 공정 효율 향상에는 각 부생가스의 물리적 특성뿐만 아니라 부생가스의 발생과 사용 간 균형을 유지하는 것이 매우 중요하다. 부생가스 발생량이 필요량보다 많은 경우에는 소각 등의 방법을 통해 대기 방산 처리해야 하므로 그만큼의 에너지 손실로 작용한다. 반대로 부생가스 양이 부족한 경우 천연가스 등을 통해 대체해야 하므로 연료 비용 부담 증가로 이어진다. 또한 설비별 활용되는 부생가스 기준이 달라서 잉여되는 타 부생가스가 있더라도 대체 활용되지 못하고 버려지는 경우도 발생한다. 따라서 제철 공정 전체의 효율을 높이기 위해서는 안정적인 부생가스 활용처를 확보 및 확장함으로써 부생가스의 회수 활용 비율을 최대화하고 공정 내 연료가스 수배급 균형의 유연성을 높이는 것이 중요하다.

이러한 부생가스 활용처 확대에 어려움으로 작용하는 요인 중 하나는 부생가스의 낮은 열량 및 연소 특성이다. BFG, LDG의 경우 통상의 가스 연료 대비 단위체적당 발열량이 매우 낮고 단독 적용 시 화염 유지가 어려운 난연성 연료이다. 따라서 보통 열량이 높은 연료와 섞어 사용하는 혼소 방식이나 연소용 공기를 예열 공급하는 설비에 적용하는 방식으로 사용된다. 혼소 활용의 경우 안정적 연소 유지를 위한 주 연료의 투입이 기본이 되어야 하며, 공기 예열 경우 연소 시스템이 안정화 상태에 도달해야 하므로 초기 시동 조건 등에서는 구현에 제약이 있다. 따라서 이러한 난연성 저발열량 부생가스의 안정적 활용처 확보를 위해서는 별도의 설비나 연료 투입 없이 단독으로 구동이 가능한 연소 방식의 도입이 요구된다.

이에 대하여 산화제로 산소를 이용함으로써 난연성 저발열량 부생가스의 연소 안정성 개선을 통한 활용성 증대를 꾀할 수 있다. 일반적으로 산화제로 산소를 이용할 경우, 연소속도 증가와 가연한계 확장 등의 효과와 더불어 공기 연소 대비 배기가스 유량 감소 등에 의한 연소 시스템 효율 향상 효과 등이 보편적으로 알려져 있다[1-3]. 하지만 현실적으로는 별도의 산소 생산 및 공급 비용에 따른 경제성 측면이 산소 연소 기술 확대에 큰 어려움 중 하나로 작용하고 있다. 그러나 일관제철소의 경우 공정용 산소 공급을 위한 대규모의 산소 플랜트를 자체 보유하고 있어 별도의 설비 구축이 요구되는 일반적인 상황에 비하여 투자비 측면에서 용이한 여건이며, 운영비 측면에서는 최근 연료 비용 급증으로 순산소 연소 기술 적용을 통한 연료 절감 효과가 산소 비용과 견줄 수 있을 만한 수준으로 향후 경제성 확보 가능성이 예상된다.

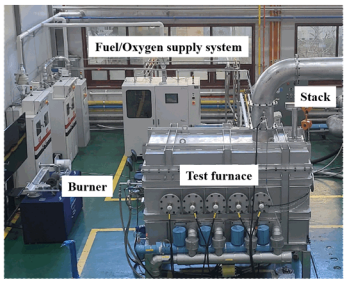
다만, 산소를 활용하여 부생가스를 연소하고자 하더라도 연소 목적에 부합하는 성능 달성을 위한 버너 설계기술 및 기반 데이터 확보가 요구된다. 널리 사용되는 통상적 연료의 경우에는 그간 경험적 내용을 포함한 다양한 데이터를 기반으로 연소 기술 개발 및 버너 형상 최적화 등이 이루어져 있다. 그러나 제철 부생가스의 경우 제철 공정에 국한하여 발생 및 활용되는 여건상 연료 및 산화제 조건 변경에 따른 버너 설계를 위한 기반 데이터가 부족한 실정이다. 컴퓨팅 기술 발전에 따라 버너 설계 및 개발에도 CFD 활용이 증가하고 있으나, 여전히 많은 시간과 비용이 소요되며 실험 결과와의 검증 및 교정이 요구된다는 면에서 다소 제한점이 있다. 특히, 근원적으로는 버너 설계를 위해 통용될 수 있는 마땅한 설계 인자나 물리 모델이 제안되고 있지 못한 실정이다[4-5]. 따라서 본 연구에서는 제철소 내 저발열량 부생가스 연료의 활용성 증대를 목적으로, 축소 모델 버너 실험을 통해 순산소 버너 개발을 위한 기초 설계 인자 확보 연구를 진행하였다. 순산소 버너의 적용 대상은 제철소 내의 건조로를 선정하였다. 건조로 버너는 쇳물을 받기 위한 래들(Ladle)의 내화물 건조를 목적으로 한다. 건조로 버너는 화염이 외부에 노출되어 있고, 외부 공기가 유입되는 환경에서 작동한다.

2. 실험장치 및 방법

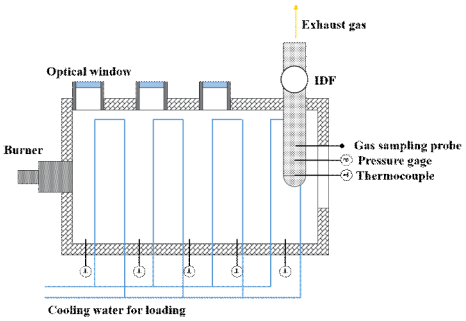
2.1 실험장치

본 실험에 사용된 연소 실험 설비는 크게 직접가열식 실험로, 버너, 배기가스 배출 스택, 연료/산화제 공급장치로 구성되어 있다. 직접가열식 연소 실험 설비(연소 용량: 100,000 kcal/h)의 개략도는 Fig.1과 같다. 실험로는 W1.0xH1.0xL2.0(m)의 내부 유효체적을 갖고 있으며, 내화물로 단열처리를 하였다. 화염을 관찰할 수 있는 광학창(optical window)이 측면에 3곳이 있고, 반대쪽 측면에는 실험로 내부의 온도 분포를 측정할 수 있도록 5개의 R-type 열전대가 부착되어 있다. 버너를 마주보는 벽은 실험로

를 개폐할 수 있는 문(W0.5xH0.4)이 설치되어 있고, 본 연구에서는 건조로 환경을 모사하기 위하여 외부 공기가 유입되도록 문을 개방하였다. 실험로 바닥에는 화염에서 방출되는 복사열을 흡수하기 위한 냉각수관이 설치되어 있다. 배기가스 배출스택에는 배기가스 조성을 측정할 수 있도록 가스 샘플 프로브가 설치되어 있고, 압력 측정을 위한 압력계와 온도를 측정을 위한 R-type 열전대를 설치하였다. 배기가스 조성은 배기가스에 포함된 수분을 제거하기 위한 트랩을 지난 뒤 가스분석기(Testo 350K)를 통해 분석하였다. 로 내 압력제어를 위해 IDF를 설치하였다. 연료와 산소는 연료/산화제 공급장치를 통해 공급하며, 다수의 MFC로 구성되어 있다. 이를 통해 H_2, CO, NG, NH_3, N_2, O_2를 공급하며, 필요한 연료/산화제 조성에 따라 혼합하여 공급할 수 있다. 직접사진 촬영을 위한 DSLR(Canon 100D), CCD(pco.panda .4.2)를 포함한 OH^* 자발광(OH^* chemiluminescence) 가시화 시스템을 구성하였고, 이를 통해 화염의 반응 영역 및 구조를 파악하였다. OH^* 자발광 이미지는 노출 시간 50 ms로 측정하였고, 50장의 이미지를 평균처리하여 획득하였다. OH^* 자발광 강도는 0-100 범위이며, 이미지 내에서 강도가 낮은 곳은 파란색, 높은 곳은 붉은색으로 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 1 Combustion test facilities (a) and schematic diagram of the direct heating test furnace (b).

2.2 실험방법

실험에 사용할 버너는 난류에서의 free jet 이론[6]을 기반으로 설계하였다. Fig. 2는 난류에서의 free jet의 유동을 보여주고 있다. 분사 노즐을 통해 분사된 가스는 x축을 따라 이동하며 유속이 감소하며, 이때의 속도 v는 식(1)과 같고 식(2)의 모멘텀 플럭스(J)에 영향을 받는다. 화염의 폭(δ)은 식(3)과 같고 오직 x축 거리에만 영향을 받는다. 화염으로 유입되는 가스의 양(E)은 식(4)와 같고, x축 거리에는 독립적이며, 오직 모멘텀 플럭스에만 영향을 받는다. 따라서, 버너 설계에 있어 가장 중요한 파라미터는 모멘텀 플럭스로 고려하였고, 이를 기준으로 설계하였다.

$$v(x) = 7.2\left(\frac{J}{\rho_\infty}\right)^{1/2} x^{-1} \tag{1}$$

$$J = \rho_0 v_0^2 \tag{2}$$

$$\delta(x) = 0.44x \tag{3}$$

$$E(x) = 0.282(\rho_\infty J)^{1/2} \tag{4}$$

Fig. 3은 실험에 사용할 버너의 개략도를 보여주고 있다. A 그룹 버너는 산화제가 4곳에서 분사되는 형태의 대칭형 버너이다. B 그룹 버너는 산화제가 1곳에서 분사되는 형태의 비칭형 버너이다. 여기서 R, D_N, D_F, D_O, S_O, S_F는 각각 리세스(Recess) 길이, 버너 노즐 지름, 연료 노즐 지름, 산소 노즐 지름, 산소 노즐 중심에서 길이, 연료/산소 노즐 중심에서 길이이다. 리세스 길이는 버너 노즐팁에서 연료/산화제 분사 노즐 사이의 이격 길이로 정의한다.

리세스 길이는 화염의 안정성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[7]. 리세스 길이 또한 free jet 이론을 기반으로, 연료/산화제 노즐에서 형성된 화염이 버너 팁에 닿지 않는 조건 내에서 최대한 긴 길이를 가질 수 있도록 설계하였다. 선행연구를 통해 산화제가 연료 노즐 내부에서 분사되는 형태의 버너와 리세스가 없는 형태의 버너는 안정적 연소의 구현이 어려움을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 산화제 노즐이 연료 노즐 외부에 위치하고, 산소를 대칭(A 그룹) 및 비대칭(B 그룹)으로 분사하는 형태의 버너에 대해서만 실험을 진행하였다.

Table 1 Burner design conditions at heat input 100,000 kcal/h

Burner	Re_F	J_F (kg/m·s^2)	Re_O	J_O (kg/m·s^2)	R/D_N	S_F/D_A	S_O/D_O
A1						1.33	6.22
A2	50,679	874	24.843	7,622	1.12	1.45	6.79
A3						1.58	7.35
B1						1.18	
B2	56,761	1,375	62,108	18,608	1.12	1.36	-
B3						1.55	

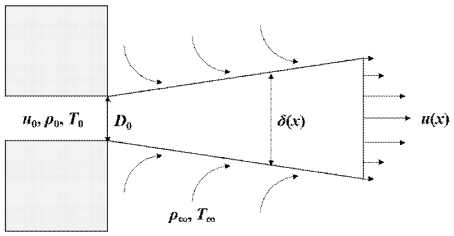


Fig. 2 Diagram of a free turbulent jet.

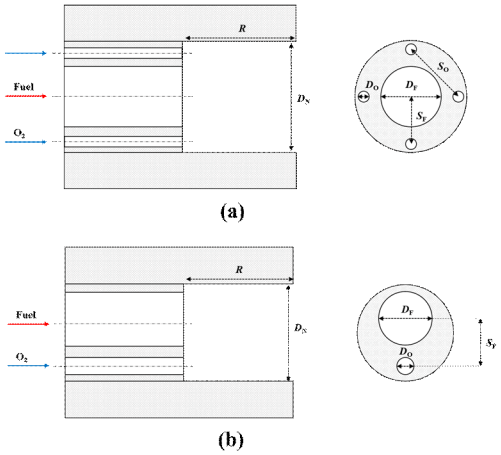


Fig. 3 Schematic diagram of the burner structure for burner group A (a) and burner group B (b).

실험에 사용한 버너의 설계 조건은 Table 1과 같다. 최대 공급열량 100,000 kcal/h를 기준으로 하였다. 본 연구에서는 버너 설계 주요한 파라미터로 *Re*(Reynolds number), *J*, S/D 수로 정의하였다. S/D 수는 각 노즐의 배치를 무차원 수로 표현할 수 있는 파라미터이며, 두 노즐 중심에서 길이 S에서 두 노즐 평균 지름 D를 나눈 값으로 정의된다[8]. 여기서 아래첨자 F, O는 각각 연료, 산소이며, D_A는 연료와 산소 노즐의 평균 직경이다.

Table 2는 실험에 사용한 연료의 조성을 보여주고 있다. 제강 공정에서 발생하는 LDG를 모사하기 위하여 H_2, CO, N_2로 구성된 혼합가스를 연료로 사용하였고, 연료의 발열량은 저위발열량 기준 약 1,800 kcal/h 이다. 실험 조건은 Table 3과 같고, 최대 공급열량 100,000 kcal/h까지 부하율을 높이면서 진행하였다. 이때 과잉산소비는 20%로 고정하였다. 화염 길이는 육안 관찰을 통해 측정하였고, NO 및 화염 가시화는 정상상태에 도달 후에 측정하였다.

Table 2 Fuel composition

Fuel composition (Vol.%)	
H_2	1.2
CO	57.2
N_2	41.6
Total	100.0

Table 3 Test conditions

Load (%)	Heat input (kcal/h)
20	20,000
40	40,000
60	60,000
80	80,000
100	100,000

3. 실험결과

3.1 화염 가시화

Fig.4는 A 그룹 버너 화염의 직접사진 및 OH^* 자발광 이미지를 보여주고 있다. A 그룹 버너의 경우 S_F/D_A=1.33-1.58, S_O/D_O=6.22-7.35이다. 부하율이 증가함에 따라 화염의 밝기와 연소 강도가 증가하며, 안정적인 부착 화염이 관찰되었다. 부하율 100% 조건에서 산소의 모멘텀 플럭스가 강해 연료와 외부 공기가 산소 제트 방향으로 유

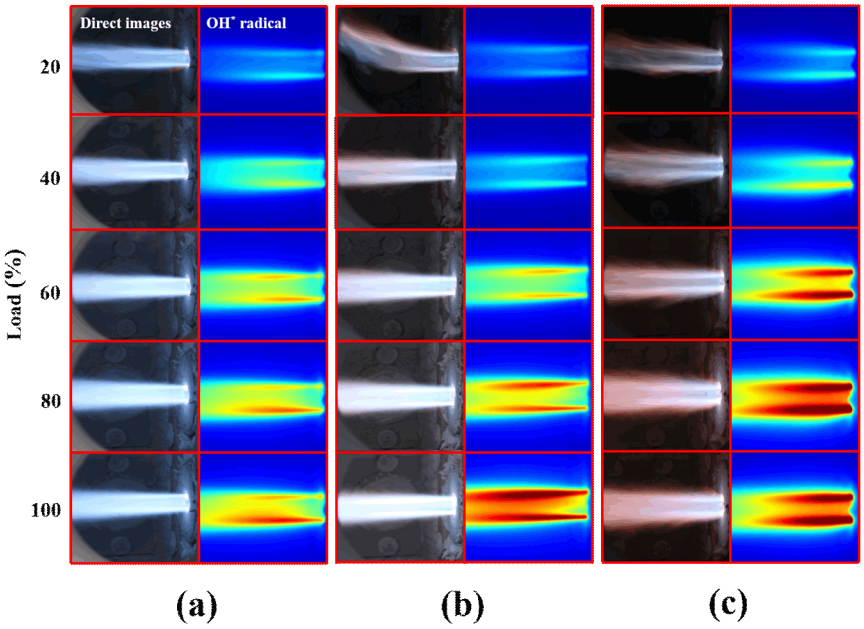


Fig. 4 Direct and OH* radical images of burner group A ((a) S_F/D_A=1.33; (b) 1.45; (c) 1.58) under various load conditions.

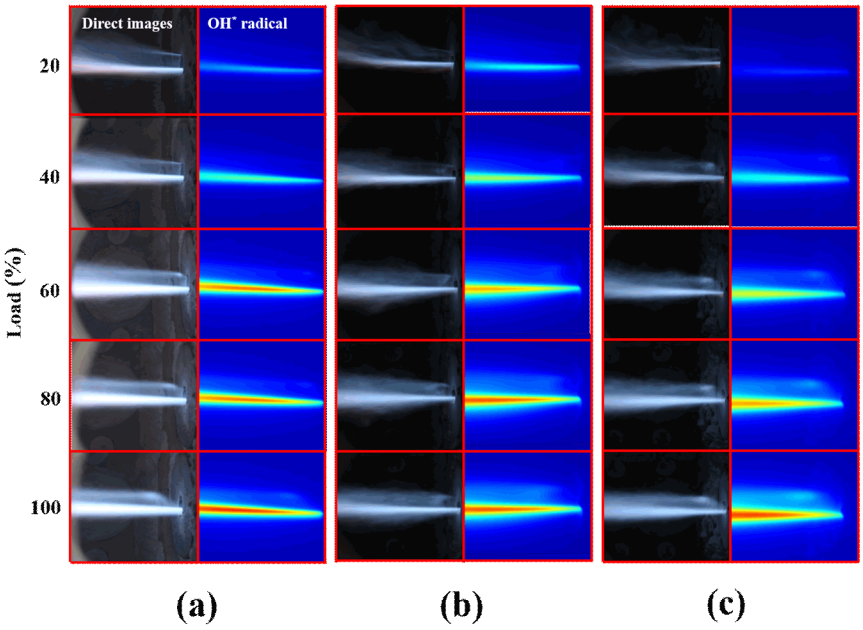


Fig. 5 Direct and OH* radical images of burner group B ((a) S_F/D_A=1.18; (b) 1.36; (c) 1.55) under various load conditions.

입되며, 이는 OH^* 자발광 이미지에서 산소가 분사되는 노즐 방향을 따라 OH^* 강도가 높게 나타나는 것을 통해 확인된다. S_F/D_A 수가 증가함에 따라 붉은색 화염이 관찰되었고 반응 영역이 확장되는 것을 확인하였다. 이는 S_F/D_A 수가 증가함에 따라 연료 제트로부터 멀어진 산소 제트가 외부 공기를 더 많이 유입하게 되고, 유입된 외부 공기가 일부 연료와도 반응하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.5는 B 그룹 버너 화염의 직접사진 및 OH^* 자발광 이미지를 보여주고 있다. B 그룹 버너의 경우 형상계수는 S_F/D_A=1.18-1.55이다. 부하율이 증가함에 따라 화염의 밝기와 연소 강도가 증가하였고, 산소 제트를 따라 안정적인 부착 화염이 관찰되었다. B 그룹 버너의 경우, 연료를 단일 노즐을 통해 분사함으로 비대칭 형태의 화염이 관찰되고, 산소 제트를 따라서 높은 강도의 OH^* 강도가 나타났다. 산소 제트 주위가 아닌 일부 영역에서도 낮은 강도의 화염이 관찰되는데 이는 주위 공기와 일부 연료가 반응하여 나타나는 화염으로 판단된다. 이는 A그룹의 버너와 마찬가지로 산소 제트가 연료 제트보다 모멘텀이 높아서 산소의 방향으로 연료가 유입되어 반응하기 때문인 것으로 판단된다. S_F/D_A 수가 증가함에 따라 화염의 밝기 및 OH^* 강도가 감소함이 나타났다. 이는 S_F/D_A 수가 증가함에 따라 연료와 산소의 노즐 거리가 멀어져서 연료와 산소의 혼합이 감소하기 때문이다.

3.2 화염길이 및 배기 배출 특성

Fig.6 (a)는 A 그룹 버너의 화염 길이를 보여주고 있다. 전체적으로 부하율 80% 범위까지는 부화율이 증가함에 따라 화염의 길이는 증가한다. 그러나 100% 부하의 경우에는 화염 길이가 80% 부하율 대비 감소하는데, 이는 난류 강도의 증가로 화염 길이가 짧아지는 것으로 판단된다. S_F/D_A=1.33-1.45에서는 S_F/D_A 수가 증가함에 따라 화염의 길이는 증가하였다. 그러나 S_F/D_A=1.58에서는 화염 길이가 감소하였는데, 이는 외부 공기 유입 증가로 빠르게 연료가 반응하여 화염 길이가 감소한 것으로 판단된다. Fig.6 (b)는 B 그룹 버너의 화염 길이를 보여주고 있다. A 그룹과 마찬가지로 부하율이 증가함에 따라 화염의 길이는 감소하고, 100% 부하 조건에서는 화염의 길이가 감소한다. B 그룹 버너의 화염 길이는 A 그룹 버너보다 짧다. 이는 B 그룹 버너의 경우 산소 제트의 모멘텀 플럭스는 A 그룹 버너보다 높지만, 산소 노즐의 수에서 차이가 있다. 따라서 식(4)에 의해 산소 제트로 유입되는 외부 공기의 양은 A 그룹 버너가 많기 때문에 화염의 길이가 긴 것으로 판단된다. 이는 앞서 OH^* 이미지 결과와 동일한 결과이다.

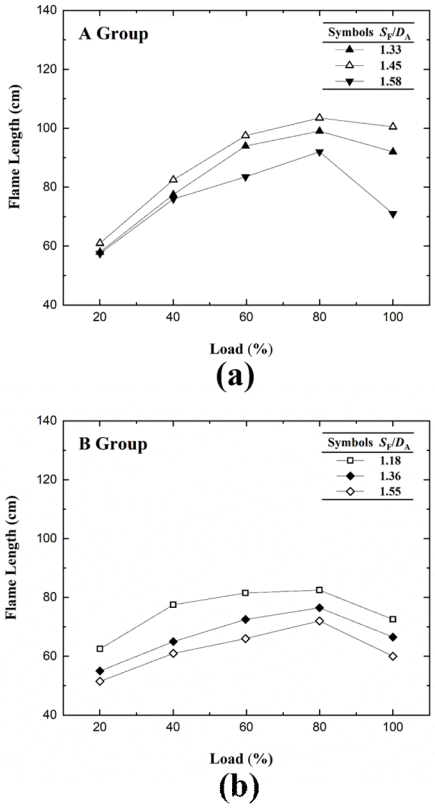


Fig. 6 Flame length of burner group A (a) and B (b) under various load conditions.

Fig.7 (a)는 A 그룹 버너의 CO 배출 농도를 보여주고 있다. A 그룹 버너 모두 전반적으로 비슷한 수준의 CO 배출 농도를 보였다. 다만, S_F/D_A=1.58의 경우 부하율 20%에서 CO 배출 농도가 증가하였다. 40% 이상의 부하율 조건에서는 산소 제트의 모멘텀 플럭스가 외부 공기 및 연료를 산소 제트로 충분히 유입하지만, 20% 부하율 조건에서는 산소 제트의 모멘텀 플럭스가 충분하지 못한 것으로 판단된다. Fig.7 (b)는 B 그룹 버너의 CO 배출 농도를 보여주고 있다 S_F/D_A=1.18-1.36의 경우 부하율에 상관없이 비슷한 수준의 CO 배출 농도가 나타났다. S_F/D_A=1.55의 경우 불완전연소로 CO 배출 농도가 증가하였다. 이는 산소 제트로 유입되는 외부 공기를 연료 제트로 충분히 공급하지 못하는 것으로 판단된다. A, B 버너 그룹 모두 S_F/D_A 수가 증가함에 따라 외부 공기 유입량은 증가하지만, 유입되는 외부 공기의 양은 앞서 설명과 같

이 A 그룹 버너가 많다. 따라서 S_F/D_A 수 증가에 따라 산소 제트와 연료 제트의 거리가 멀어짐에도 불구하고, A 그룹의 버너는 B 그룹의 버너보다 많은 양의 외부 공기를 연료 제트로 공급하여 S_F/D_A>1.5 조건에서 두 그룹 모두 CO 배출 농도가 증가하지만, A 그룹이 B 그룹 대비 낮다.

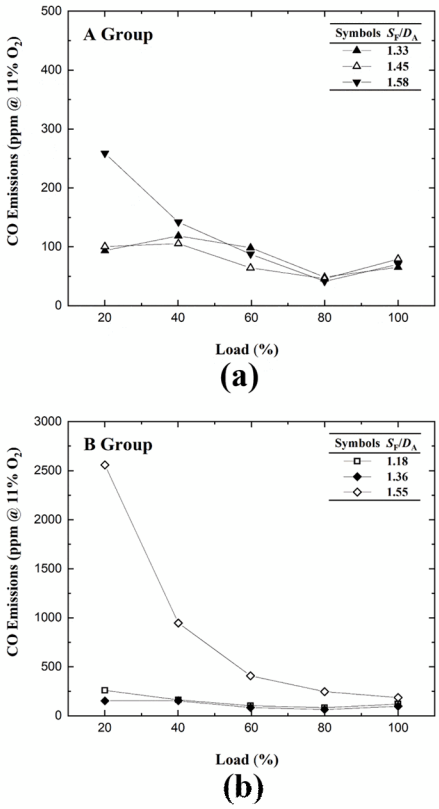


Fig. 7 CO emissions of burner group A (a) and B (b) under various load conditions.

Fig.8 (a)는 A 그룹 버너의 NO 배출 농도를 보여주고 있다. 부하율이 증가함에 따라 NO 배출 농도는 증가하였다. 또한 S_F/D_A 수 증가에 따라 NO 배출 농도가 증가하였다. 이는 Fig. 4에서 기술한 내용과 같이 산소 제트로 더 많은 외부 공기를 유입하기 때문인 것으로 판단된다. Fig.8 (b)는 B 그룹 버너의 NO 배출 농도를 보여주고 있다. 마찬가지로 부하율이 증가함에 따라 NO 배출 농도는 증가하였지만, S_F/D_A 수 증가에 따라 NO 배출 농도는 감소하였다. 이는 산소와 연료의 혼합 감소 및 반응 강도 감소에 따른 영향으로 판단된다. S_F/D_A=1.55에서는 불완전연소가 발생하고 이에 따른 화염 온도 감소로 NO 배출 농도가 감소한 것으로 판단된다.

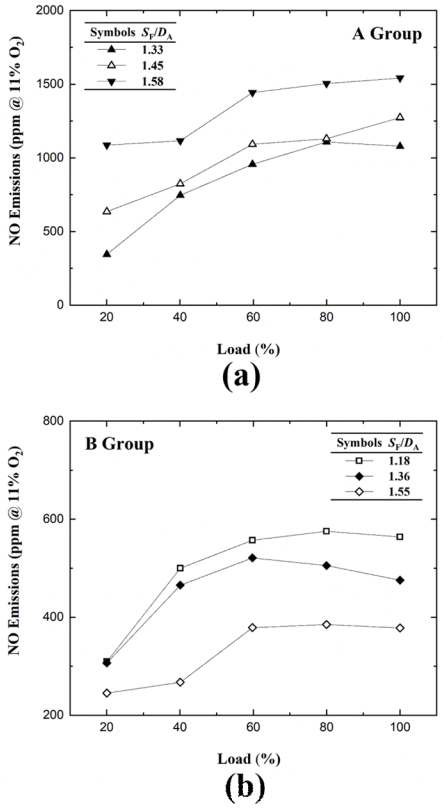


Fig. 8 NO emissions of burner group A (a) and B (b) under various load conditions.

4. 결 론

본 연구는 철강 공정에서 발생하는 저발열량 연료인 LDG를 효율적으로 연소하기 위한 순산소 버너의 설계 파라미터를 확보하는 것을 목표로 한다. 주어진 조건에서 연소 특성을 분석하기 위하여, 실험로 내에서 100,000 kcal/h급 LDG/순산소 버너를 사용하고, 설계 파라미터(*Re*, *J*, S/D 수)에 따른 화염 특성과 배기가스를 측정하였다. 버너는 리세스 길이를 통해 화염 안정성이 커지도록 설계되었으며 산소 분사 방식에 따라 A 그룹(중앙 연료 노즐 및 4개의 외부 산소 노즐)과 B 그룹(중앙 연료 노즐 및 1개의 외부 산소 노즐)으로 구분되었다.

결과적으로, 산소 제트의 모멘텀 플럭스와 더불어 S/D 수가 연소 특성에 중요한 영향을 미치 것을 확인하였다. 이로 인해 산소 제트에 유입되는 연료와 외부 공기의 양이 달라지는 것을 확인하였다. CO 배출 농도는 S_F/D_A가 1.5를 초과할

때 증가했으며, 이는 산소의 모멘텀 플럭스에 의해 유입되는 외부 공기를 연료 제트에 충분히 공급하지 못해서 발생한 현상으로 판단된다. NO 배출 농도를 줄이기 위해서는 외부 공기의 유입을 줄여야 하며, 이를 위해 산소 노즐의 수를 줄이고 S/D 수를 최대로 높이는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 LDG와 같은 저발열량 연료의 안정적이고 효율적인 연소를 위한 설계 파라미터를 제공할 수 있었다. 이를 기반으로 실규모의 건조로 버너 개발을 위한 연구를 이어서 진행할 계획이다.

후 기

이 연구는 POSCO의 지원을 받아 수행한 연구과제(2024A039)입니다.

참고문헌

[1] C.E. Baukal, Oxygen-Enhanced Combustion, CRC Press, Boca Ration, FL, 1998.

[2] K.K. Wu, Y.C. Chang, C.H. Chen, Y.D. Chen, High-efficiency combustion of natural gas with 21–30% oxygen-enriched air. Fuel 89(9) (2010) 2455-2462.

[3] C.E. Baukal, Industrial Burners, CRC Press, Boca Ration, FL, 2003.

[4] M.W. THRING, M.P. NEWBY, Combustion length of enclosed turbulent jet flames. Symposium (international) on combustion. Elsevier (1953) 789-796.

[5] F.J. DAVISON, Nozzle scaling in isothermal furnace models. Journal of the Institute of Fuel 41(335) (1968) 470.

[6] J.M. Beer, N.A. Chigier, Combustion Aerodynamics, Robert E. Krieger, Malabar, FL, 1983

[7] M.E. Feyz, J.A. Esfahani, I. Pishbin, S.M. Razavi, Effect of recess length on the flame parameters and combustion performance of a low swirl burner. Applied Thermal Engineering 89 (2015) 609-617.

[8] J. MI, P. LI, C. ZHENG, Impact of injection conditions on flame characteristics from a parallel multi-jet burner. Energy 36(11) (2011) 6583-6595.

5kW히터를 이용한 CO2합성연료 연소특성 조사

김광영* · 강병준* · 하동균* · 남형석*†

CO2 synthetic fuel combustion characteristic investigation via 5kW heater

Gwang Yeong Kim*, Byeong Jum Kang* , Dong Gyun Ha* , Hyungseok Nam*†

산업혁명 이후 지구 대기 중 이산화탄소 농도는 250 ppm에서 460ppm까지 지난 100년 동안 계속 증가하고 있다. 이를 해결하기 위한 전기 및 수소를 동력으로 하는 이동수단을 써 기존 내연기관을 대체하려고 했으나 실질적인 효과 및 보급률은 미미한 수준이며 전기차를 충전하기 위한 전기를 생산하는 발전 비중은 2024년 기준 화석연료+원자력이 80%를 차지함. 본 연구는 포집된 이산화탄소를 수소와 3:1 비율로 합성해서 만든 이산화탄소 합성연료를 활용하여 이산화탄소 합성연료가 상용 연료를 대체할 수 있는지 확인하기 위해 연구를 수행했음. 이산화탄소 합성연료와 기존에 사용하던 상용 연료의 연소 특성을 분석하기 위해 [1]에서 제작했던 보일러를 바탕으로 Fig. 1과 같은 5kW급 히터를 제작했고, 히터 운전은 6단 조건에서 진행함. 식(1)에 맞춰서 각 당량비 (0.7-1.0)에 따른 히터 내부 온도를 측정했고 연소 시 발생하는 배기가스의 조성 분석을 위해 후단에 IR 가스 분석기를 설치했음.

$$\Phi = \frac{(m_{Fuel}/m_{air})_{actual}}{(m_{Fuel}/m_{air})_{stoichiometric}} \qquad (1)$$

또한, 히터 내부 온도를 확인하기 위해 3개의 K-type 온도계를 연소실 내부에 설치했으며. 연소실 온도계 포함 총 7개의 온도계를 보일러 외부, 내부에 설치함.

* 경북대학교 기계공학과
† 연락저자: namhs219@knu.ac.kr
TEL :053-279-2841

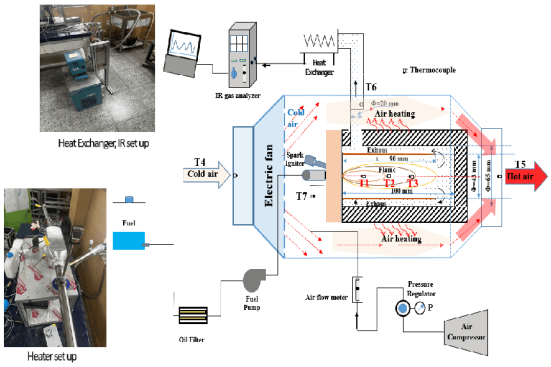


Fig.1 Heater, IR gas analyser set up

Table 1 HHV and Elemental analysis

Types of fuel	Diesel	Raw Syntetic CO2 fuel	Distilled CO2 Fuel	10%-CO2
HHV(MJ/kg)	43.5	39.8	44.9	43.6
C(%)	85.7	83.5	84.0	85.5
H(%)	14.5	13.0	13.5	14.4
N(%)	0.00	0.50	2.28	0.23
O(%)	0.00	3.03	0.23	0.02
S(%)	0.00	0.00	0.00	0.00
O/C	0.00	0.06	0.00	0.00
H/C	2.02	1.87	1.91	2.01

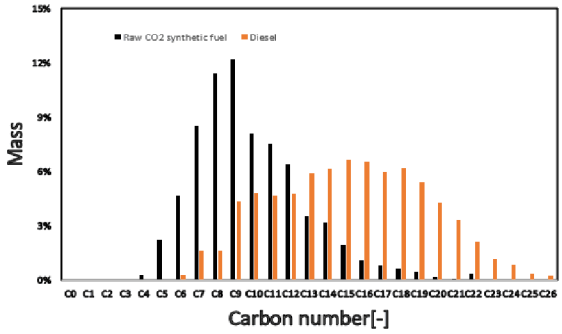


Fig.2 Diesel and Raw CO2 synthetic fuel Carbon number distribution

Table 1에서 볼 수 있듯이 Raw CO2 fuel은 디젤에 비해 고위발열량(HHV)이 낮다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig.2의 GC-MS 결과에 따르면 Raw CO2 synthetic Fuel은 경유(Diesel)에 비해 탄소 길이가 짧아 대부분 올레핀 영역이 주를 이룬다는 것을 알 수 있다. 또한, 단독으로 연소 시 배기가스가 과도하게 생성되는 것을 확인할 수 있었음. 이에 따라 본 연구에서는 Raw CO2 synthetic Fuel을 원 상태로 보일러에 사용하기에는 무리라고 판단하여, 연료에서 가벼운 부분을 날리고 무거운 부분만 남긴 후 디젤과 혼합하여 연소 실험을 진행하였음.

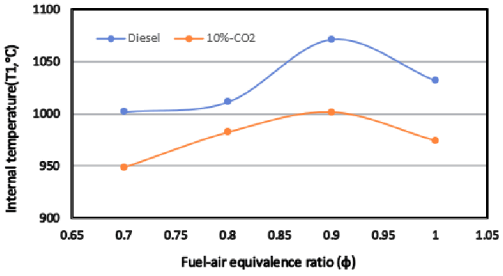


Fig.3 Heater Internal temperature (T1)

Fig.3에서 볼 수 있듯이 보일러 내부에서 연소가 진행되면 연소 당량비(Φ)에 따라 내부 온도가 계속 증가하다가 당량비(Φ)가 0.9일 때 가장 높은 온도를 보이고 이후에는 히터 내부 온도가 감소한다는 것을 알 수 있었다.

$$Q_i = m_f \cdot h_{comb} \tag{2}$$

$$Q_o = m_{air} \cdot C_{p,air} \cdot (T5 - T4) \tag{3}$$

$$\eta = \frac{Q_o}{Q_i} \tag{4}$$

Fig 4는 히터 열효율 값을 보여주는 그래프이며 히터에서 연소 시 발생하는 Q_o 값을, 식(3)을 이용해서 구하고 1분당 히터에 들어가는 연료량 값으로 계산한 식(2)의 Q_i값을 이용하여 식(4)처럼 연소 열효율 값(η)을 계산했음.

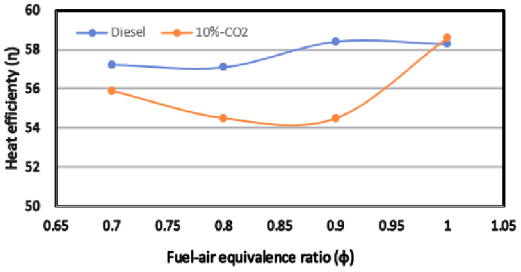


Fig.4 Combustion efficiency

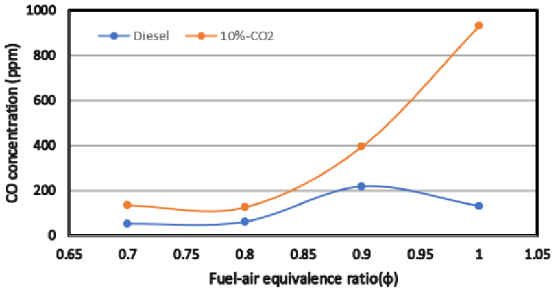


Fig.5 Emission analysis of CO

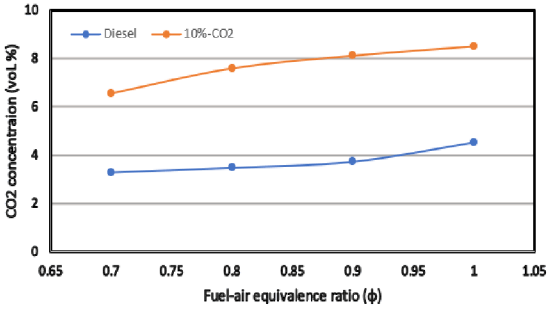


Fig.6 Emission analysis of CO2

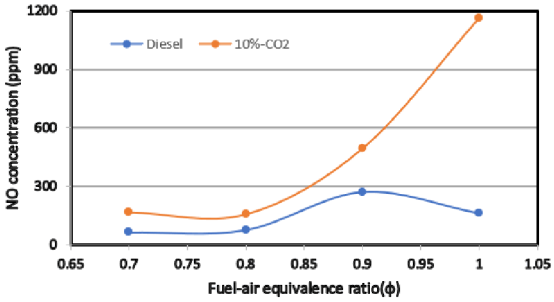


Fig.7 Emission analysis of NO

Fig.5,Fig.7 그래프에서는 연소 시 발생하는 배기가스의 일산화탄소(CO)와 일산화질소(NO)를 측정했으며 Fig.6 그래프에서는 연소 시 발생하는 배기가스의 이산화탄소(CO2) 농도를 측정하였다. 그래프에 의하면 10%-CO2 연료가 당량비(Φ) 1.0 기준에서 일산화탄소와 일산화질소의 ppm이 1,000ppm 이상 발생하였으며 또한, 이산화탄소(CO2) 농도가 디젤 대비 약 2배 이상 발생했다. 이러한 결과로 이산화탄소 합성연료는 지금 사용하고 있는 상용 연료보다 더 많은 대기오염 가스가 발생하며 이러한 점은 환경을 오염시키고 나아가 사람에게 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 수준의 배기가스 농도이다. 그러기에, 이산화탄소 합성연료는 상용 연료를 대체하기에 힘들다는 것이 본 연구의 결론이다.

참고 문헌

[1] Shuang Wang, David Aaron Rodriguez Alejandro, Hana Kim, Jae-Young Kim, Yu-Ri Lee, Walid Nabgan, Byung Wook Hwang, Doyeon Lee, Hyungseok Nam, Ho-Jung Ryu, “Experimental investigation of plastic waste pyrolysis fuel and diesel blends combustion and its flue gas emission analysis in a 5 kW heater”, Energy., Vol. 247, 2022, pp. 3-10

가스터빈 연소기의 암모니아/메탄 혼소에 따른 배기배출 특성 연구

오소빈*† · 황인우* · 장혁준* · 최낙정* · 한가람* · 박정극*

Study on the Exhaust Emission Characteristics of an Ammonia/Methane Co-firing Gas Turbine Combustor

Sobin Oh*† , Inwoo Hwang*, Hyuckjun Jang*, Nakjung Choi*, Karam Han*, Jungkeuk Park*

ABSTRACT

Ammonia has emerged as a promising carbon-free fuel for power generation, offering compatibility with existing LNG infrastructure and potential for carbon-neutral operation. This study investigates the exhaust emission characteristics of a gas turbine combustor under ammonia/methane co-firing and pure ammonia(ammonia 100%) combustion using a full-scale test rig with continuous gas analysis. Results show that while pure ammonia combustion is essential for carbon-free power generation, partial methane co-firing can enhance combustion stability and efficiency.

Key Words : Gas turbine, Ammonia, Methane, Co-firing, Combustion characteristics

전 세계적으로 탄소중립 목표 달성을 위한 에너지 구조 전환이 가속화되면서, 무탄소 연료를 활용한 발전 기술이 대안으로 주목받고 있다. 특히 제11차 전력수급기본계획(2025)에서는 수소 및 암모니아 가스터빈의 발전량 비중을 단계적으로 확대할 계획을 제시하며, 총 발전량의 약 6.2%를 차지할 것으로 전망된다.

수소·암모니아 연료 중 암모니아는 수소 캐리어의 역할과 동시에 탄소를 포함하지 않는 친환경 연료이지만, 낮은 반응성으로 인한 연소불안정과 다량의 질소산화물(NO_x)을 발생한다는 단점을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 메탄 등 고반응성 연료와의 혼소를 통해 점화성과 연소 안정성을 확보하고, 체류시간 증가 및 다단연소를 통한 NO_x 저감 기술이 필요하다.[1]

하지만 무탄소 연료인 수소에 비해 암모니아의 기초 연소 특성에 대한 연구는 활발히 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 암모니아/메탄 혼소 및 암모니아 전소 조건에서 연소기의 배기배출 특성을 분석하여, 암모니아 기반 연소 특성 기초자료를 확보하고자 하였다.

이를 위해 Figure 1과 같이 실규모 연소기의 체류시간 증가를 위해 Test Rig를 구축하였으며, 암모니아 공급 및 제어, TIT 및 압력 측정, 가스분석기를 통해 NO, NO_2, O_2 등의 가스 분석을 수행하였다. 또한 Table 1과 같이 Fuel Split Ratio에 따른 암모니아-메탄 혼소 특성 및 당량비에 따른 암모니아 전소의 배출 특성을 살펴보았다. 발전 효율 및 안정성 측면에서는 메탄 등 고반응성 연료를 소량 혼소하는 운전 방안 또한 유효한 대안이 될 수 있음을 본 연구를 통해 확인하였다.

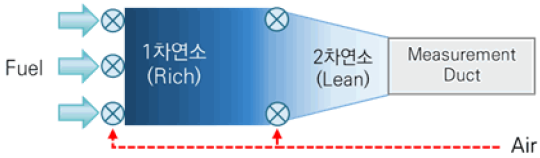


Figure 1 Schematic diagram of test rig

Table 1 Summary of test conditions

Parameter	Value
T_{air} (℃)	350
$\dot{M}_{air}$ (g/s)	400
Equivalence Ratio (%)	0.6, 0.7, 0.9, 1.06
Fuel Split Ratio (%)	20, 100
Ammonia Mixing Ratio (%)	0, 70, 90, 100

참고 문헌

[1] 박세익 외 4인, “발전용 가스터빈 캔형 연소기(W501F)대상 암모니아 혼소 성능 평가”, Evaluation of NH3 co-firing performance of gas turbine can type combustor for power generation, KOSCO SYMPOSIUM 논문집, Vol. 64, 2022, pp. 172~174

* 한국전력공사 전력연구원
† 연락저자, sobin_oh@kepco.co.kr
TEL : (042)865-7651

$BKNO_3$ 점화 펠렛 연소 생성물에 대한 구조 및 성분 특성 분석

안명근* · 장승교*†

Structural and component characterization of BKNO3 ignition pellet combustion products

Myunggeun Ahn*, Seung-gyo Jang*†

본 논문은 $BKNO_3$(Boron-Potassium Nitrate) 점화제의 연소생성물에 대해 SEM-EDS(주사전자현미경) 계측을 통해 금속 알칼리 성분 분석을 수행한다.

로켓모터에 적용되는 C-SiC는 용융 금속(알루미늄, 구리 등)과 알칼리 금속 염, 금속 산화물 등에 의해 부식 뿐 아니라 파단이 발생할 가능성이 존재한다. 따라서 점화제로 널리 활용되고 있는 $BKNO_3$ 펠렛(MIL-P-46994B)과 이를 점화시키는 착화기의 연소 생성물에 대해 SEM-EDS(Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 계측하여 알칼리 성분 질량 분율을 분석하였다. 이에 따라 본 연구의 목적은 $BKNO_3$의 연소생성물 내 알칼리 금속 함유량을 분석하여 C-SiC에 미치는 영향을 간접적으로 분석하는데 있다.

$BKNO_3$는 고체추진기관의 점화 화약에 범용적으로 적용되어 사용되어 왔으며 우수한 성형성과 내탄도 내탄도 성능과 고고도 점화 성능이 우수하다. $BKNO_3$의 조성 및 특성은 다음과 같다.

Table 1 Characteristics of $BKNO_3$

Composition	Boron 23.7% KNO3 70.7%. Laminac 5.6%
Burning rate	0.92 @100 psia, N_2
Auto-Ignition Temp.	350-480℃
Heat of Reaction	1,550 cal/g
Flame Temperature	2,743 K
Ignition Sensitivity	1.10 cal/cm^2 @15 psia, N_2
Electrical Sensitivity	3.214 J

$BKNO_3$는 우수한 성형성 특성으로 파우더, 펠렛 등 다양한 형태로 제작 가능하며 본 연구에서는 II-D 펠렛 (12.7*6.35 mm) 형태의 펠렛 2개를 사용하였다. II-D 펠렛의 개당 무게는 약 1 g으로 총 2 g에 해당하는 연소생성물을 획득 후 SEM-EDS를 계측하였다.

* 국방과학연구소 제4기술연구원
† 연락저자, jsg4580@add.re.kr

연소생성물을 정량적으로 계측하기 위한 SEM-EDS의 전처리는 다음과 같다. 카본테이프를 이용하여 시료를 채취하였으며 $BKNO_3$ 연소생성물은 비전도성 물질이기 때문에 Pt 코팅을 90초 수행하였다.

Fig. 1 $BKNO_3$ combustion products measured by SEM-EDS.

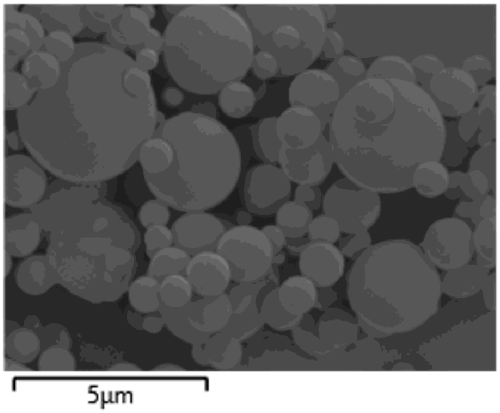


Fig. 1은 $BKNO_3$ 연소생성물의 SEM 결과이다. 대부분의 생성물이 구형이며 큰 구형 주변에 작은 구형이 서로 접착되어 있다. 먼저 연소생성물이 구형으로 형성하는 이뉴는 다음과 같다. $BKNO_3$ 연소 후 금속 입자들이 응고되며 표면장력에 의해 구형 입자 형태로 굳는 것이다. 큰 구형 입자들은 국부적으로 높은 온도에서 용융 구형체로 형성되는 것으로 보이며 주변에 작은 구형들은 응결에 의한 K, Na 등의 염류 성분인 것으로 보인다. 따라서 Fig. 1은 연소 온도가 균일하지 않았던 부분 또는 급냉 가능성이 있다는 것이다.

Table 1은 EDS 결과로 Fig. 1의 이미지에서 알칼리 금속 원소를 정량적으로 계측하였다. B, C, Mg가 계측된 이유는 다음과 같다. B의 경우 EDS의 계측 중 의도치 산출물로 일반적으로 많이 검출된다. C의 경우 전처리를 위한 카본테이프에 의한 검출이며 Mg는 매우 적은 양으로 오염에 의한 검출로 볼 수 있다. 따라서 알칼리 금속인 K만이 정상적으로 검출되었으며 그 질량분율은

33.96%로 KNO3에 의한 연소생성물 결과이다. 이에 따라 C-SiC에 악영향을 미칠 수 있는 원소인 알칼리 금속이 연소생성물에서 검출된 것을 확인하였다.

고온 환경의 C-SiC 표면에 알칼리 금속이 접착했을 때 모세관 현상에 의해 미세 크랙 사이로 알칼리 금속이 흡수되고 반응하여 짧은 시간 내 손상을 야기할 수 있다. 따라서 이후 연구에서는 실제 알칼리 금속이 C-SiC에 미치는 메커니즘을 규명한다.

Pre-detonator 내 DDT 및 데토네이션파 가시화

길유창* · 박성우**†

Visualization of DDT and Detonation Waves inside the Pre-Detonator

Yuchang Gil*, Sungwoo Park**†

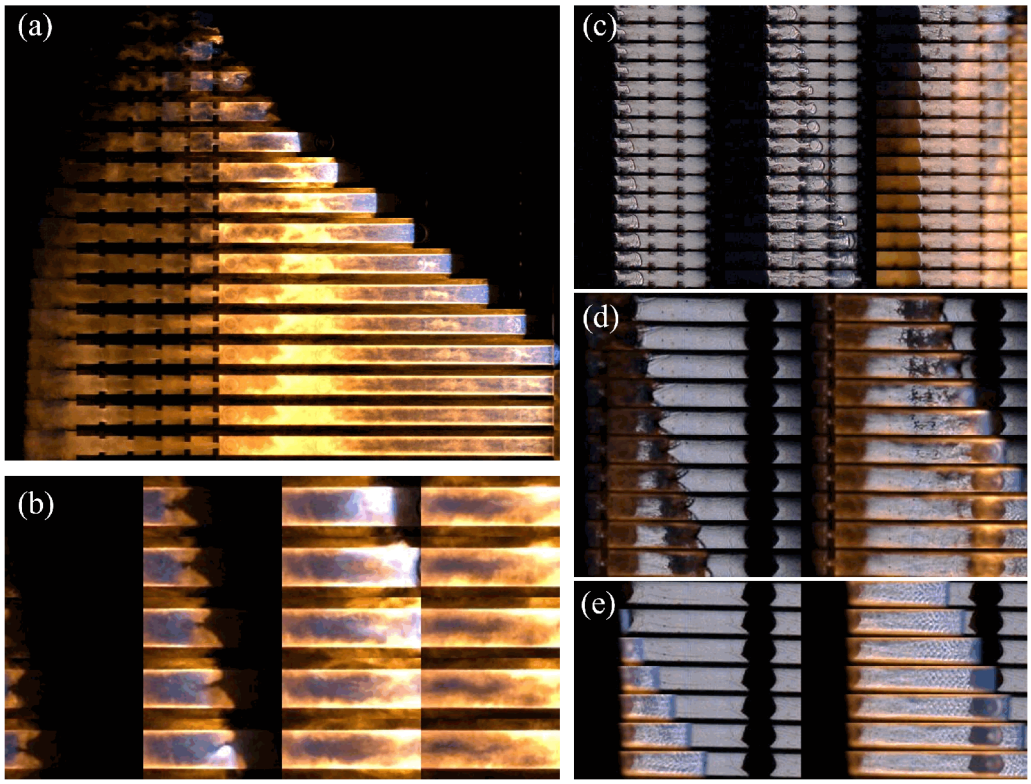


Fig. 1 Chemiluminescence and schlieren visualization of flame acceleration, DDT, and detonation propagation in the pre-detonator.

Pre-detonator 내부의 자발광 및 슐리렌 기법을 통해 데토네이션파의 천이 및 전파 특성을 가시화하였다. (a)와 (b)는 자발광 이미지로, (a)는 DDT 장치로부터 연소기 출구까지의 영역을, (b)는 데토네이션으로 천이되는 과정을 중점적으로 촬영한 결과이다. 해당 이미지를 통해 Deflagration 상태의 화염이 국소 폭발(local explosion)을 거쳐 데토네이션파로 천이되는 과정을 확인할 수 있으며, 천이된 파는 평탄한 화염면을 가지며 전파되는 것이 관찰된다. (c), (d), (e)는 각각 DDT 장치 구간, 데토네이션 천이 영역, 그리고 출구 부근의 연소실 내부 슐리렌 영상이다. 슐리렌 이미지를 통해 DDT 장치 내 화염의 가속 및 천이 과정을 관찰할 수 있으며, 데토네이션파로 천이된 이후에는 벽면과의 상호작용으로 인해 격자 무늬 구조가 형성되는 것으로 판단된다.

* 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
† 연락저자, sungwoo.park@kau.ac.kr

후 기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2021-KP002521, 탄소중립 고효율 가스터빈 연소기술에너지혁신연구센터).수행되었습니다.

초록집

한국연소학회

2025년도 제70회 추계학술대회

70th KOSCO CONFERENCE

학 회 장 여재익(서울대학교)

조직위원장 박성욱(한양대학교)

조 직 위 원 김대식(국립강릉원주대학교), 박수한(건국대학교), 심형섭(한국과학기술원)

사단법인 한국연소학회
The Korean Society of Combustion