

2019년 4차 이사회 (호텔19층 심함)

11.14(목)	제 1 발표장 (그랜드볼룸A)	제 2 발표장 (무궁화)	제 3 발표장 (로즈룸)	제 4 발표장 (동백룸)	제 5 발표장 (그랜드볼룸B)
	SESSION 1 : 연소불안정 I 좌장: 신동혁	SESSION 2 : 석탄연소 I 좌장: 양원	SESSION 3 : 화재 좌장: 이상민	SESSION 4 : 연소응용 좌장: 윤성환	2019 산업미세먼지 기술정책 포럼 주최/주관 : 산업부/한국생산기술연구원 산업미세먼지저감기술센터
12:00~13:00	음향적 커플링이 연소특성에 미치는 영향 황동현, 박수진, 안규복(충북대)	석탄가스화기 내 버너 이상거동에 따른 유동 및 반응특성에 대한 전산해석 연구 남준영, 김무경, 손근, 류창국(성균관대), 김봉근(두산중공업)	구리전선을 전파하는 화염에 대해 전기장 인가에 따라 발생하는 현상에 대한 연구 강민성(부경대), 박순호(부경대), 임인권(영지대), 이대근(한국에너지기술연구원), 김승곤(한국에너지기술연구원), 광영태(한국에너지기술연구원), 권오봉, 박정(부경대), 정석호(KAUST)	예혼합 연소합성법을 적용한 TiO ₂ nanoparticle 생성에 관한 연구 이호연, 차천륜, 유창현, 황순수(인천대)	구분 시간 행사내용 비고
13:00 ~ 14:20 (80분)	환형연소기에서의 음향적 불안정성에 관하여 당량비 변화를 통한 대칭성 파괴의 효과 김재현, 이희도, 이기민(순천대)	595MW급 대항류 석탄화력 보일러의 공기다단공급에 따른 연소 및 NOx 발생 특성 해석 이지서, 조현민, 류창국(성균관대), 정계현(BHI)	원자력발전소용 케이블의 열화에 따른 연소생성물 독성 특성에 관한 실험적 연구 장은희, 김민호, 이석희, 이민철(인천대), 이상규, 문영섭(한국원자력안전기술원)	PNG 연료의 가스렌지 연료 호환성 리신취, 박예슬, 탐카이원(부산대), 이종성, 김동민(한국가스공사연구원), 최경민(부산대)	1부 Prologue (60분)
	마이크로믹서 타입 모형 가스터빈 연소기의 화염 응답 특성 이태승, 진욱화, 김해빈, 김규태(한국과학기술원)	Numerical Assessment on Blended Pulverized Coal Combustion by Large Eddy Simulation Seongyool Ahn, Hiroaki Watanabe, Toshiaki Kitagawa(Kyushu University)	원자력발전소용 안전등급 케이블의 열화기간에 따른 화재안전성 분석 김민호, 장은희, 이석희, 이민철(인천대), 이상규, 문영섭(한국원자력안전기술원)	예혼합 분쇄화염의 정적열역 현상에서 동축류 속도 효과 주용우(한국해양대), 박대근(한국생산기술연구원), 이창엽(한국생산기술연구원), 윤성환, 최재혁, 김중수(한국해양대)	14:10-14:30 [초청강연①] - 대기 미세먼지 라이드 사이클 및 예측 모델링에 대한 고찰 이창연 교수 (인하대학교)
	모델 가스터빈 연소기에서 크로스톡을 통한 음향 소산이 연소기 상호작용에 미치는 영향 문기훈, 김규태(한국과학기술원)	Two-Stage DTF에서 메탄가스 재연소를 이용한 NOx 저감에 관한 연구 김민우, 김강민, 김규보, 전충환(부산대)	비압축성 난류 예혼합 화염의 전파 특성에 대한 조건평균 연구 권재성, 김범수, 양정현(경성대), 허강열(포항공과대)	화염 동적 거동에 대한 방사형 전기장의 영향 김영민, 김희재(한국해양대), 박대근, 이창엽(한국생산기술연구원)윤성환, 최재혁, 김중수(한국해양대)	14:30-14:50 [초청강연②] - 통합환경관리제도에서 미세먼지 저감을 위한 업종별 BAT-AEL 선정기준 배영준 박사 (서울대학교)
	SESSION 5 : 연소불안정 II 좌장: 김대식	SESSION 6 : 석탄연소 II 좌장: 임호	Special Session : 김석준 박사님 퇴임기념 좌장: 송영훈	SESSION 7 : 연소응용 II 좌장: 이종성	15:00-15:20 [총괄발표] - 제조산업 미세먼지 저감 기술개발 현황(사업총괄) 김홍대 센터장 (산업미세먼지저감기술센터)
	연소기의 저주파 공진에 관한 분석 김선영, 윤명근, 김대식(강릉원주대)	초분계 바이오매스 혼소시 첨가제 투입 영향에 관한 실험적 연구 임호, 이재우, 채대영, 이용은, 양원(한국생산기술연구원)	플라즈마 연료개질을 활용한 대기오염 저감연구 송영훈, 이대훈, 김석준(한국기계연구원)	천연가스 열량저하에 따른 국내 기존 가스터빈 연소기 연료호환성 및 외국사례 검토 이종성, 김동민(한국가스공사)	2부 산업계 현황 (80분)
	LDI 가스터빈 연소기에서 연료와 공기의 혼합에 따른 연소불안정 특성에 관한 연구 곽상혁(서울대), 주성필(인천대), 안영근, 최재홍(서울대), 이민철(인천대), 윤영빈(서울대)	0.1 MW 급 소산소 순환유동중 연소시스템에서 이산화탄소 포집 및 고효율 연소에 관한 연구 문지홍, 조성호, 문태영, 박성진, 김재영, 백건우, Nguyen Hoang Khoi, 이재구(한국에너지기술연구원)	폐자원에너지 기술의 미래 방향 윤용승(고등기술연구원)	500MW급 석탄 보일러 Digital Twin 구축을 위한 ROM 인자의 영향 연구 이우진, 장원우, 한우주, 허강열(포항공과대)	15:20-15:40 [기술발표①] - 철강분야 미세먼지 저감기술 적용현황 차홍식 책임 (현대제철)
	FilterBank를 이용한 연소 불안정 평가 기법에 관한 연구 최종훈, 주성필, 이민철, 김남근(인천대)	석탄화력 기준 SCR 계통 촉매층 회분 퇴적 및 마모에 관한 유동특성에 관한 연구 김태형, 박병철, 김태형(한국남동발전)	파일럿 스케일 버너에서 커피찌꺼기 바이오원료의 연소 특성에 관한 연구 최상규(한국기계연구원)	난류 제트에서 Scalar Dissipation Rate of 통계학적 특성 Vlad Aparece-Scutariu(the University of Edinburgh, UK), Edward S Richardson(University of Southampton, UK), 신동혁(KAIST)	15:40-16:00 [기술발표②] - 발전분야 미세먼지 저감기술 적용현황 서주식 차장 (한국남부발전(주))
	모사 가스터빈 연소기내에서 음압 가진 실험을 통한 연소동압 계측 적정성 연구 - 동압 측정위치를 따른 신호 계측 특성 장대진, 전병철, 주성필, 이민철(인천대)	Effects of air staging on Exhaust Tube Vortex structure in a swirl-stabilized pulverized coal flame Kaiwen Deng, Xinzhou Li, (Pusan National University), Minsung Choi(KIMM), Gyungmin Choi(Pusan National University)	가정용 가스보일러의 친환경 기술개발 동향 장기형(귀뚜라미)	TDLAS를 이용한 MILD 연소기 축 방향 온도 측정 봉철우, 이준권, 신호중, 정진규, 박문수(성균관대)	16:00-16:20 [기술발표③] - 발전분야 미세먼지 저감기술 적용현황 김도은 책임 (한국조선해양)
16:10 ~ 16:40	[초청 강연 1] Fire safety standard in space environments - flame spread in micro/reduced gravity - Prof. Shuhei Takahashi / Gifu University				16:20-16:30 Coffee Break&네트워킹
16:40 ~ 17:10	[초청 강연 2] Recent advances in plasma-assisted combustion for gas turbine applications - Prof. Deanna Lacoste / KAUST				16:30-17:30 [패널토론] - 주제 : 미세먼지 정부정책방향과 산업계 대응기술 전략 - 좌장 : 김중민 박사(한국생산기술연구원) - 패널 : 이창연 교수(인하대), 배영준 박사(서울대), 차광식 책임(현대제철), 김도은 책임(조선해양), 김홍대 센터장(산업미세먼지저감기술센터)
17:10 ~ 17:40	[초청 강연 3] 한국기계연구원과 나의 연소 연구 - 김석준 연구위원 / 한국기계연구원				17:30- [폐회]
18:30 ~ 20:30	정기총회 및 만찬 (호텔2층 그랜드볼룸) 진행: 이민철				

2019년 제4회 편집위원회 개최 (1층 한라 레스토랑)

11.15(금)	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (무궁화)	제 3 발표장 (로즈룸)	제 4 발표장 (동백룸)	리셉션 홀
	SESSION 8 : 증류화염 좌장: 김남일	SESSION 9 : 버너/연소기 좌장: 최병철	SESSION 10 : 내연기관 좌장: 박성욱	SESSION 11 : 기초화염 좌장: 이기용	견학프로그램 : 한국중부발전 제주발전본부
9:00 ~ 10:40 (100분)	헬륨이 희석된 증류 동축류 제트에서의 진동화염 오수현(울산과학기술원), 반규호(부경대), 정기성, 유준상(울산과학기술원), 권오봉(부경대), 차민석, 정석호(KAUST), 박정(부경대)	다공성 매체 버너에서 수관 존재의 따른 화염 거동 및 연소 특성 비교 이희도, 김재현, 이기민(순천대)	소형 디젤엔진에서 분무 간섭과 화염 증점이 배기에 미치는 영향 홍동우, 강승우, 배중식(한국과학기술원)	좁은 간격의 원반형 버너의 길이 스케일에 따른 루이스수 효과 정태현, 이상민, 김남일(한국과학기술원)	 <p>홈페이지 사진신청(https://kosco.or.kr/) [중부발전투어신청] 사무국 사진신청 ~11월 1일까지 (25명 이내)</p>
	증류 비예혼합 부상 화염에서의 희석제에 따른 부상 높이 변화 오수현(울산과학기술원), 반규호(부경대), 유준상(울산과학기술원), 권오봉(부경대), 정석호(KAUST), 박정(부경대)	연소가스 내부재순환 연소기술 권민준, 김세원(한국생산기술연구원)	CONVERGE 수치해석을 통한 신형 GP 로터리 엔진의 유동 및 성능분석 유호현, 김도현, 박영준, 이창연(인하대)	Monomethyl Hydrazine/Nitrogen Tetroxide에 대한 축소 반응 메커니즘 이기용(안동대)	
	압력 및 이산화탄소 희석에 따른 메탄-순산소 비예혼합 동축류 화염의 특성 이지서, 황규진, 김남일(한국과학기술원)	FERPM을 적용한 석탄 바이오매스 혼소시 점선연소 보일러의 최적 운전조건에 대한 연구 오현석, 김강민, 전충환(부산대)	엔진 효율 향상을 위한 부분 예혼합 및 난류 공급에 따른 엔진 연소특성 분석 이지연, 강재원, 박성욱(한양대)	중동판 예혼합 연소기를 이용한 저 발열량 연료의 화염 특성 연구 남현택, 전유선, 오영택(전북대), 김중현(한국승강기), 이승로(전북대)	
	소화거동 내 SNG/Air 희박 예혼합 비대칭 이중 화염의 상호작용 현상 강연석, 안지환, 이기민(순천대)	초임계 이산화탄소 발전용 연소기의 수직모사: 산화제 온도에 따른 화염 형성 변화를 중심으로 김남수, 이대근, 노동순, 고창복, 이은경, 광영태, 김승곤, 이민정, 정우남, 이우경, 서동명(한국에너지기술연구원)	포트분사방식 가솔린 엔진에서의 에탄올 함유량에 따른 연소특성 및 미세입자 배출특성 장지환, 이호승, 박성욱(한양대)	비예혼합화염에서 외부가진 시 발생하는 Pinch-off 현상 분석 안영근, 곽상혁, 최재홍, 윤영빈(서울대)	
	가열된 동축류 내 정상-헤파트류 부상화염의 특성에 관한 수치해석적 연구 정기성, 김승욱(울산과학기술원), 정석호(KAUST), 유준상(울산과학기술원)	마이크로믹서 가스 터빈 모델 연소기에서의 메탄/수소/공기 연소에 대한 배기 특성 연구 최재홍, 안영근, 곽상혁(서울대), 이준근(University of Cincinnati), 윤영빈(서울대)	최신 Toluene Reference Fuel 메커니즘들의 열방출 특성에 대한 비교연구 김두현(충남대)	1/4 팟장 공명기에서 하향 전파하는 예혼합 화염의 열유향장에 관한 실험적 고찰 손광호, 서지원, 이원주, 윤성환(한국해양대)	

11.15(금)	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (무궁화)	제 3 발표장 (로즈룸)	제 4 발표장 (동백룸)	리셉션 홀
	SESSION 12 : 증류화염II 좌장: 윤성환	SESSION 13 : 고체연료연소/점화 및 화학반응 I 좌장: 이대근	SPECIAL SESSION : IEA COMBUSTION TCP 특별세션 - 대체연료 좌장: 배충식	SESSION 14 : 산업 미세먼지 좌장: 이창엽	 <p>[한국중부발전 제주발전본부 전경]</p>
10:50 ~ 12:00 (80분)	가열된 동축류의 희석 효과가 메탄/수소 자발화 증류 부상화염에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구 신혜빈, 정기성, 김경택(울산과학기술원), 박정(부경대), 정성호(KAUST), 유춘상(울산과학기술원)	Zr계 에너지 물질 노화로 인한 반응 인자 변화 및 연소 성능 저하 한병현, 박윤식, 여재익(서울대)	대체연료 엔진 연소 기술 동향 배충식(한국과학기술원)	Catalytic property of vanadium-based composite material on NH ₃ -SCR for wide temperature window 김태욱, 정보라, 예보라, 이명진, 김진우, 전승엽, 김성이, 김태효, 이덕현, 김홍대(한국생산기술연구원)	
	합성가스(H ₂ /CO) 조성비에 따른 증류 제트 화염의 열음향 불안정성에 관한 연구 김주한, 이기만(순천대)	낙화놀이용 바이오매스 숲의 연소특성 연구 김철호, 최병철, 이세진, 양성수(전남대)	합성가스이용 엔진발전 기술 오승욱, 김창업, 이용규, 박현욱(한국기계연구원), 이준순(과학기술연합대학원)	황산화물의 제거를 위한 중공사막의 유동해석 윤영식, 김병환, 최창식, 조성수(고등기술연구원)	
	대항류 예혼합화염에서 FGR과 FIR 효과에 대한 수치해석적 조서희, 이기만(순천대)	폭발적 연소특성을 가진 바이오매스 숲의 물질특성 분석 최병철, 김문용, 정경갑, 변성천(전남대)	예혼합가스 스파크 점화와 화염전파에 관한 연소공학적인 이해 김남일(한국과학기술원)	시차주사열량측정법에 의한 석회석 및 시멘트 조합원료의 열분해 특성 문기연, 최문관, 백철송, 조진상, 조계홍(한국석회석신소재연구소)	
	직접연소식 초임계 CO ₂ 순산소 연소조건에 대한 대항류 화염의 질소산화물 발생특성에 관한 수치해석적 연구 정기성, 박현수, Nam Danh Nguyen(울산과학기술원), 이복직(서울대), 유춘상(울산과학기술원)	개별 입자가 고려된 단일 및 복합 조성 화약에서의 수치 해석적 충격파 전달 폭굉 연구 최상훈(서울대), 김보훈(Graduate Aerospace Laboratory, California Institute of Technology), 여재익(서울대)	단일연료체계를 위한 대형 압축화염엔진에서의 JP-8 연소 특성 나용현, 김우영, 배충식(한국과학기술원)	연료 농후조건 연소 배기가스 내 O ₂ 및 CO 농도 실시간 측정에 관한 연구 소성현, 박지연, 정낙원, 송아란, 배성우, 김대해, 유미연, 박대근, 이창엽(한국생산기술연구원)	

12:00 ~ 12:50	중식 (호텔2층 한정식 사라)				
12:50 ~ 13:20	[초청 강연 4] 친환경 발전소로 전환을 통한 청정제추 구현 - 이호태 발전환경처장 / 한국중부발전			좌장: 류창국	
13:20 ~ 13:50	[초청 강연 5] 산업용 보일러 저NOx 연소 기술 현황 - 박재언 대표이사 / 수곡			좌장: 이기만	

14:00 ~ 15:20 (80분)	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (무궁화)	제 3 발표장 (로즈룸)	제 4 발표장 (동백룸)	포스터 / 가시화사진전
	SESSION 15 : 고체연료연소/점화 및 화학반응 II 좌장: 손채훈	SESSION 16 : 공해물질/산업로 좌장: 박설현	SESSION 17 : 가스터빈/연소시스템 좌장: 유춘상		좌장: 이병준, 차동진 <div style="text-align: center;">하단 표기</div>
	표준 연료의 조성변화에 따른 점화지연시간 연구 한희선, 손채훈(세종대)	미세먼지 후처리장치 필터의 lab-scale 산화 반응성 실험장치 개발 우상인, 임상철, 이승훈, 박선호, 조구영(단국대)	저산화 선회기에서 난류생성판 직경변화에 따른 실험적 연구 한민석, 손찬호, 이기만(순천대)		
	Biomass Application for Ironmaking process: A Study on Biomass blended PCI Combustion Gyeong-Min Kim, Jong-Won Jeong(부산대), Jin-Ho Kim(Hyundai Steel), Chung-Hwan Jeon(부산대)	OpenFOAM을 활용한 용융환원로 내 입자 거동 및 반응 해석 김진영, 장권우, 허강열(포항공과대)	기체 에틸렌/산소 Tr-arc 회전 데토네이션 엔진 작동 특성 실험 이은성, 한형석, 최정열(부산대)		
	단입자 바이오매스 열분해 수치해석 모델 및 열분해 영향 인자 평가 김희윤(성균관대), 김민수(한국기계연구원), 류창국(성균관대)	미분탄의 연소과정에서 발생한 미세먼지 입자의 광학특성 이수한, 강별, 박설현(조선대)			
	DMD, CEM 을 이용한 수치연료분사 초음속 연소기의 연소특성 진단 정승민, 최정열(부산대)	초임계 순환 유동중 보일러 시스템의 주 증기 온도 동적 모사 및 제어 김성일(한국생산기술연구원), 최상민(한국과학기술원)			

11.16(토)	산학연 패널토론, 좌장: 이기만			
-----------------	--------------------------	--	--	--

포스터 / 가시화사진전	11월 15일(금) 14:00~15:20	좌장: 이병준, 차동진	
1	비대칭 화염 응답이 캔-캔 음향 상호작용에 미치는 영향 제갈현욱, 문기훈, 구자현, 김규태(KAIST)	2	합성천연가스 화염의 연소기 형상 변화에 따른 연소불안정 해석 윤규성(한밭대), 송원준(동신대), 차동진(한밭대)
3	ISO 5658-2 화염전파시험 장치를 이용한 Douglas-fir 화염전파실험의 FDS 전산모사 홍덕기(조선대), 이종원(한국항공우주연구원), 박설현(조선대)	4	바이오가스용 가스터빈의 점화 특성에 대한 연구 강길모, 김시영, 이병준(영남대), 홍성철, 이동업, 이충재, 박우진, 이동원(stx중공업)
5	증류화염편모델을 이용한 GH2-LOx 단일인젝터연소기 실제기체 연소해석 황원섭(부산대), 한우주, 허강열(포항공과대), 구성열, 이복직(서울대), 최정열(부산대)	6	북미항 프리미엄 가스 프로레인지 개발 이국형, 이종호, 위재혁, 박현우, 석준호, 김승윤, 김양호, 양대봉, 김영수(LG전자)
7	순환유동중 연소시스템에서의 국내 미이용 바이오매스 연소 특성 백건욱, 문지홍, 조성호, 박성진, 김재영(한국에너지기술연구원), Nguyen Hoang Khoi(군산대), 문태영(한국에너지기술연구원)	8	가압 순산소 연소 조건에서의 배기가스 응축기 내 압력과 체류시간에 따른 NO의 거동 특성 연구 이호수(연세대), 목진성, 최성원(한국생산기술연구원)
9	내부 배가스 재순환 방식을 활용한 가스 MILD 연소 특성과 NOx 배출 특성 연구 김동희(포항공과대학교, 한국생산기술연구원), 함재식(한국생산기술연구원), 허강열(포항공과대), 이영재(한국생산기술연구원)	10	기체 중심 스월 동축 분사기 간 거리에 따른 화염 형상 변화 조천현, 왕유엔강, 손채훈(세종대), 윤영빈(서울대)
11	방사형 전기장을 인가한 확산 화염 내에 이온풍 가시화 김영민, 김희재, 윤성환, 최재혁, 김중수(한국해양대)	12	전기방사 표면여과체의 제조와 미세먼지 여과특성 분석 권기범(전남대), 이우진(연세대), 허기준, 김연성, 엄현진(한국생산기술연구원)
13	내열성 고분자 섬유가 부착된 PTFE/Glass 3중층 폼코팅 여과체 제조기술 개발 김성훈, 정중호, 이현재, 조성준(참명산업)		

Zr계 에너지 물질 노화로 인한 반응 인자 변화 및 연소 성능 저하

한병헌*, 박윤식*, 여재익*†

Combustion Failure and Kinetics Parameter Degradation of Zr-based Energetic Material Caused by Aging

Byung Heon Han*, YoonSik Park* and Jack J. Yoh*†

고 에너지 물질은, 짧은 시간 안에 많은 에너지를 방출 할 수 있는 물질로, 파이로테크닉, 추진제, 폭약 등에 널리 활용 된다 [1]. 이러한 물질은 상온에서 높은 보관 기간을 보장해야 하지만, 높은 온/습도 등 가혹한 조건에서는 노화가 진행되어 신뢰성과 성능이 저하되는 문제를 야기한다. 고 에너지 물질의 노화는 상온 조건에서도 일어난다고 알려져 있으며, 산화제와 함께 보관 시에 더 가속화 될 수 있다 [2]. 노화로 인한 에너지 물질의 성능 저감은 발열량 감소, 초기 연 시간 지연(initial burn time delay), 전체 연소 시간(burning rate) 지연, 최대 발열량 감소, 연소 중 발생하는 빛의 세기 감소 등으로 나타나며, 이는 결국 절심 상을 야기하게 된다 [3]. 따라서, 에너지 물질의 노화의 원인과 노화에 따른 특성을 파악하는 것은 아주 중요한 문제이다.

따라서, 기존 연구들은 실제 보관 기간(shelf life), 서비스 가능 기간(service life) 등에 대한 연구를 수행해 왔었다. Suceska et al. 35년간 상온에서 자연 노화된 샘플에 대하여 service life가 감소함을 보였으며 [4], Sinapour et al.은 등은 가속 화를 시킨 추진제를 통해 storage capabilities 측정하는 연구를 수행하였다 [5]. Zr-Ni alloy와 $KClO_4$ 그리고 $BaCrO_4$ 로 구성된

물질은 파이로테크닉에서 주로 사용되는 물질로, 주로 긴 연소 시간을 이용하여 점화를 지연시키는 역할을 한다.

본 연구에서는, Zr_7Ni_{13} 과 Zr_3Ni_7 , $KClO_4$, 그리고 $BaCrO_4$ 로 구성된 지연제에 대하여, 3가지 조건(9년 자연 노화 그룹, 열 가속노화 그룹, 수분 가속노화 그룹)에 대해 노화를 시켰으며, 각 노화 인자에 대한 열적, 물리적, 화학적, 성능적 영향을 확인하였다. 특히 성능적인 영향에서는 초기 점화 지연(Initial burn time delay)와, 빛 방출량(Illumination)을 분석하여 성능적인 측면에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Modeling and Simulation을 통하여 오랫동안 노화된 샘플의 반응 지연이 상당함을 증명하였다. 노화 종류별 실험 대상 지연제 샘플은 아래 표1과 같다.

표 1. 노화 종류별 지연제 샘플

조건	지연제 샘플		
	열, °C	수분, %	기간
노화 없음	-	-	-
자연 노화	계절 변화		9 년
열 노화	-5	-	8 주
수분 노화	95	98	8 주

동일 샘플에 대한 DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 통한 복합적인 열 분석 실험과 TGA(Thermogravimetry Analysis)와의 상호 보완적인 분석 방법을 통해 reaction kinetics가 저온 범위에서 ZrNi alloy가 $KClO_4$ 와 먼저 반응함을 규명하였고, 이후 높은 온도 범위에서 $BaCrO_4$ 와 반응에 참여하지 않은 ZrNi alloy가 반응함을 확인 하였다.

XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)기법을 통한 화학 종 분석 방법은, 열 노화 샘플에서는 Zr의 산화가 일방적으로 진행된 반면, 수분 노화와 자연 노화 샘플에서는 Zr과 Ni 모두 산화가 진행되었음을 확인하였다. 또한 자연 노화 샘플과 수분 노화 샘플에서 $KClO_4$ 의 분해가 상당히 진행되었음을 확인하였다. 이를 통해 수분에 의한 노화는 $KClO_4$ 의 분해를 촉진 시키고 이를 통해 Zr과 Ni의 산화에 영향을 끼친다는 것을 규명하였고, 반면 열에 의한 노화는 산화제 분해를 진행시키지 못하기 때문에 Zr만 선별적으로 산화 시킴도 함께 규명하였다.

SEM-EDS(Scanning Electron Microscope - Energy Dispersion Spectroscopy)를 통해 ZrNi alloy의 표면을 확인하였다. 노화 되지 않은 샘플에서 매끈한 표면을 보인 반면, 열 노화 샘플에서는 일부 crack이 발생하였고, 자연 노화 샘플과 수분 노화 샘플에서는 crack의 propagation이 상당함을 확인하였다. 이는 $KClO_4$ 와 수분의 작용으로 인하여 산-염기 반응에 의한 표면 crack발생으로 확인 하였다.

지연제의 성능적인 측면의 변화를 확인하기 위하여 니크롬 와이어(nichrome wire)를 통해 40ml의 crucible에서 지연제의 연소 실험을 수행하였다. 아래 그림1은 crucible에서 지연제의 연소 거동을 보여주는 그림으로, 수분 가속 노화 샘플의 경우 연소가 일어나지 않았다. 초기 연소 시작 시간은 빛이 발산하기 시작하는 시간으로 측정하였다. 노화 되지 않은 샘플의 경우 1.10초가 걸린 반면, 9년간 자연 노화된 샘플에서는 1.81초가 걸렸다. 또한 가속 노화된 샘플에서는 점화가 일어나지 않았다. 결과적으로 $KClO_4$ 의

수분에 의한 분해는, 낮은 온도영역에서 반응을 불가하게 만들어, 점화까지 이르지 못하게 하는 것으로 나타났다. 또한 빛의 발산 정도도 노화 되지 않은 샘플에서 가장 강하게 일어났던 반면, 9년간 자연 노화된 샘플에서는 약한 빛을 방출하였는데, 이를 통해 연소의 세기가 약해졌음을 추론 할 수 있었다.

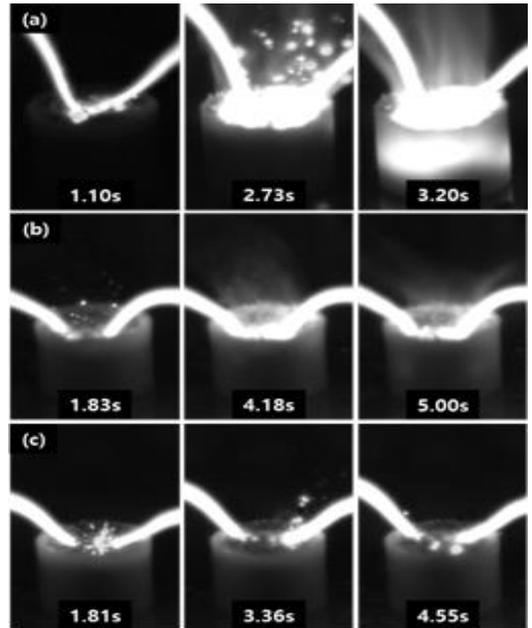


그림1. 지연제의 점화 거동(burning behavior) (a) 노화 되지 않은 샘플, (b)열 노화 샘플 (c)자연 노화 샘플

0-D Simulation을 통해 지연제의 반응 경과 모사를 수행하였다. Simulation에 사용된 식은 (1) 에너지 보존식과, (2)반응 경과(reaction progress)식이며, 사용된 kinetics는 DSC에서 추출된 데이터를 사용하였다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial \lambda}{\partial t} Q. \quad (1)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = A_i f(\lambda) \exp\left(-\frac{E_{\lambda}}{RT}\right). \quad (2)$$

계산된 결과는 아래 그림2와 같은데, 노화 되지 않은 샘플의 경우 반응이 1초 이내에 빠르게 끝나는 반면 수분 노화된 샘플의 경우 반응이 진행되지 않는 것을 확인 할 수 있다. 또한 반응 중

료 순서는 열 노화, 자연 노화, 그리고 수분 노화 순서로 수분에 의해 노화된 샘플의 경우 반응 종료까지 지연 시간이 길어 짐을 확인할 수 있었다. 한편, 반응 종료 시 최종 온도에서도 같은 경향성을 확인 할 수 있었는데, 수분 노화 샘플의 경우 반응이 진행되지 않고, 온도가 약 850K에 머물러 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 연소 실험 결과와 상당히 동일한 결과를 보여준다.

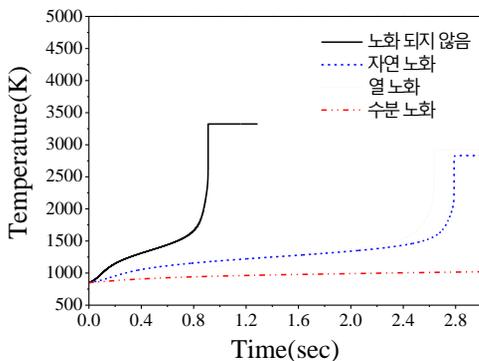
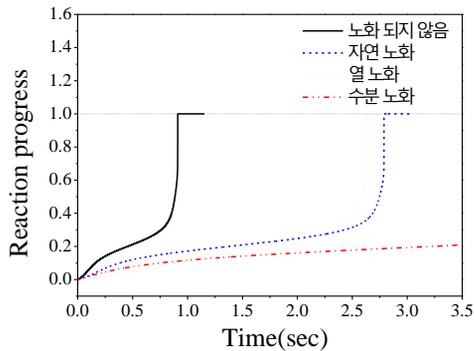


그림2. 각 노화된 샘플별 Simulation 결과. Reaction progress vs. time(위), Maximum temperature vs. time(아래).

결과적으로, 지연제의 노화에는 수분의 영향이 지대하며, 수분은 주요 산화제인 $KClO_4$ 의 분해에 크게 관여를 한다. 주로 낮은 온도영역에서 초기에 반응을 도와주는 역할을 하는 $KClO_4$ 의 분해는, 높은 온도범위 까지 반응을 억제하기 때문에 절심이 발생하는 원인으로 작용을 한다. Simulation 결과 또한 노화된 샘플의 경우 초기

에 반응을 시작하지 못한다는 것을 보여주어 수분에 의한 ZrNi alloy의 직접적인 영향보다 수분에 의한 산화제의 분해가 지연제의 노화에 치명적인 영향을 끼친다는 것을 증명하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 National Space Lab(2014 M1A2A2A02034903)의 지원과 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A1A02937421)입니다. 추가적으로, Hanwha Yeosu Grant(2018)의 추가 지원이 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] J.P. Agrawal, High Energy Materials: Propellants, explosives and pyrotechnics; John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [2] G.B. Manelis, Thermal decomposition and combustion of explosives and propellants, Taylor & Francis Group, London and Berlin, 2003.
- [3] A.M. Brian, R.R. Jeremy, W.K. Mark, Humidity induced burning rate degradation of an iron oxide catalyzed ammonium perchlorate/HTPB composite propellant, Combust. Flame, 161, 2014, 363-369.
- [4] M. Suceca, S.M. Musanic, I. Fiamengo, Study of mechanical properties of naturally aged double base rocket propellants, Cent. Eur. J. Energ. Mater 7, 2010, 47-60.
- [5] H. Sinapour, S. Damiri, H.R. Pouretdal, The study of RDX impurity and wax effects on the thermal decomposition kinetics of HMX explosive using DSC/TG and accelerated aging methods, J. Therm. Anal. Calorim 129, 2017, 271-279.

* 서울대학교 우주항공공학과

† 연락처자, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1507