

제13회 한국위험물학회 학술대회 논문집

첨단 기술 시대, 위험물 안전의 새로운 패러다임

일시 2025.6.18(수) 13:00 ~ 20(금) 12:30
장소 소노캄 제주
주최 (사)한국위험물학회
후원 소방청

협찬 GS칼텍스(주), 삼성전자(주), LG경영연구소, 한방유비스(주), 한국소방산업기술원, 한국산업안전보건공단, 한국가스안전공사, 산업안전보건연구원, (주)유티이씨, 한화에어로스페이스(주), 새빛테크(주), (주)코너스, 한솔피엔에스(주), (주)도부, 올라이트라이프(주), 육송(주), 선두전자(주), (주)종우앤종우소방기술단, (주)한백에프앤씨, (주)지엠이앤에스, 엠케이청효(주), 차스텍이앤씨(주), 가천대학교

제13회 한국위험물학회 학술대회 논문집

첨단 기술 시대, 위험물 안전의 새로운 패러다임

일시 2025.6.18(수) 13:00 ~ 20(금) 12:30
장소 소노캠 제주
주최 (사)한국위험물학회
후원 소방청

협찬 GS칼텍스(주), 삼성전자(주), LG경영연구소, 한방유비스(주), 한국소방산업기술원, 한국산업안전보건공단, 한국가스안전공사, 산업안전보건연구원, (주)유틸이씨, 한화에어로스페이스(주), 새빛테크(주), (주)코너스, 한솔피엔에스(주), (주)도부, 올라이트라이프(주), 육송(주), 선두전자(주), (주)종우앤종우소방기술단, (주)한백에프앤씨, (주)지엠이앤에스, 엠케이청효(주), 차스텍이앤씨(주), 가천대학교

Contents

A1 가스안전

- A101 수소 혼입 도시가스의 방폭 등급 적합성 분석을 위한 MIC 실험 연구 1
서명진·이화영·김정환(한국가스안전공사 가스안전연구원)
- A102 CFD Tool을 활용한 액화수소 취급 시설에서의 수소 누출 시나리오에 대한 분석 연구 2
박주현·김정환(한국가스안전공사 가스안전연구원)
- A103 도시가스 내 수소 혼입에 따른 상업용 가스튀김기의 연소성능 및 안전성 평가 3
정승균·신현국·조영광(한국가스안전공사 가스안전연구원)·채수백·임형택(린나이코리아R&D본부)
- A104 고압수소배관 재료의 안전성 확보를 위한 연구동향 및 규정 비교분석 4
김소영·김예원·김정환·박요한(한국가스안전공사 가스안전연구원)
- A105 액화수소 규제특례 동향 및 관련 안전기준 제도화 추진 현황 5
황재석·이민경·김학래(한국가스안전공사 가스안전연구원)
- A106 수소 배관용 고신뢰성 금속소재 개발 및 설계기준 적용성 검토 6
박요한·김정환·김예원·김소영(한국가스안전공사 가스안전연구원)
- A107 암모니아 공급설비 소재 적절성 분석을 위한 양자역학(DFT) 및 분자동역학 시뮬레이션 적용 효율성 검토 7
이우귀연(가스안전공사 가스안전연구원)
- A108 ASME B31.12 기반 수소 배관 재료 취성 피로시험 평가 8
김학래·이민경·임승현·강승규(한국가스안전공사 가스안전연구원)
- A109 액화수소 핵심부품 성능평가를 위한 국내외 기준 분석 9
황장환·최대현·강승규(한국가스안전공사 가스안전연구원)

A2 온라인

- A201 데이터센터의 향온습기 작동에 따른 가스계소화설비 소화성능에 관한 연구 10
김준식((주)진창엔지니어링)
- A202 화재경보음 인지도 개선방안에 관한 연구 12
오소영((주)진일엠이씨)
- A203 연결송수관설비의 효과적인 활용방안에 관한 연구 13
박정주(인천소방학교)·최돈목(가천대학교)
- A204 유별 위험물 혼재 위험성에 관한 실험적 재현사례에 관한 연구 14
현성호·차정민(경민대학교)

A205	교육시설의 화재안전관리 실효성에 관한 연구	15
	이용재·김인범(경민대학교)	
A206	소화입형펌프의 내진해석에 관한 연구	16
	이광열((주)주원에프엔씨)	
A207	위험물 분야 국가자격 체계 개편 및 도입에 관한 연구	17
	황종록(경민대학교)	

A3

특별세션(1)_구조 및 복합재료 연구소(가천대학교)

A301	하이브리드 적층 구조를 활용한 Type IV 수소저장용기의 복합재 거동 분석	18
	김건우·박규환·김원식·김한상(가천대학교)	
A302	ANN 및 MLP 기반 유전 알고리즘을 이용한 수소저장용기 복합소재부 최적화 기법 연구	19
	김혜원·박범수·조경석·김한상(가천대학교)	
A303	수소 환경에서 기밀부의 구조적 안정성 및 내구 수명 평가를 위한 유한요소해석 연구	20
	박한민·강세진·Omar Dagdag·김한상(가천대학교)	
A304	Type 4 수소저장 용기의 인증 비용 절감을 위한 가속화 시험 평가의 해석 연구	21
	정경현·Omar Dagdag·구재현·김한상(가천대학교)	

A4

소방안전

A401	전기차 해상운송 화재 대응을 위한 제연 전략:실물화재시험 기반의 FDS 연구	22
	이수형·곽건희((재)KCL)·김태중((주)CFEL)·민세홍(가천대학교)	
A402	계단실을 풍도로 사용하는 급기가압 제연시스템의 개발 연구	23
	김채운((주)에스앤에프 시스템)·민세홍(가천대학교)	
A403	금속발열 필름히터를 이용한 배관 동결방지시스템 개발	24
	오미라·최규출·강현찬·오홍규(스마일이앤지)	
A404	소방배관 시스템의 소화성능 확보를 위한 배관 부식사례 및 개선방안	25
	최두찬·임정삼·김상일(한방유비스(주))·이정훈(한국소방기술사회 제도개선위원회)	
A405	휴식	
A406	석유화학 플랜트 화재안전 강화를 위한 스마트 모니터링 및 자동방수 시스템 연구	26
	최한빛·오수민·최두찬(한방유비스(주))	
A407	물류시설 화재안전성 강화를 위한 개선 기준 및 지침안의 설계적용 연구	27
	주유빈·김경호·최두찬(한방유비스(주))	
A408	로봇 투입 장소 선정을 위한 수요자 인식조사 및 요인 분석	28
	김경민(한방유비스(주))·방장원(호서대학교)·손은수(한방유비스(주))	
A409	상업용 주방 덕트의 열화상카메라 이용한 화재 감지 시스템 연구	29
	이생곤(동양미래대학교)·민세홍(가천대학교)	

A410	군용화약류 수출입 운송을 위한 위험물 분류 체계의 국제 표준 부합화 방안	30
	나현빈(명지대학교)·고권현(동양대학교)	

A5

특별세션(2)_가천대학교 ICT융복합화재·재난과학연구센터

A501	냉장·냉동창고 화재대응시스템의 실증적 성능평가 연구	31
	이종규·이재문·사재천·민세홍(가천대학교)	
A502	고온 환경에서 구조물 응력 변화와 거동 분석	32
	안승민·사재천·이재문·민세홍(가천대학교)	
A503	냉장창고 화재 안전성 강화를 위한 기술기준 및 매뉴얼 확립 방향 고찰 - 공기흡입형 감지기를 대상으로	33
	주민연(한국소방산업기술원)·이종규·민세홍(가천대학교)	
A504	건축법 개정에 따른 방화담퍼 적용 방안 고찰	34
	송성범·임태섭(벨리모서울(주))	
A505	방화담퍼 적용 사례를 통한 앞으로의 나아갈 방향 고찰	35
	송성범·임태섭(벨리모서울(주))	
A506	전기차 배터리 화재시 지하 주차장의 천장 높이에 대한 연기 차단막 길이와 연기이동 및 화재 거동의 상관관계에 대한 수치적 연구	36
	이영만·이병권·HA THIEN KHIEU(올라이트라이프(주))	

B1

석유화학

B101	화학물질관리법 검사기준 및 검사체계 개편	37
	김중우·곽솔림·김찬식·천아인·윤이(화학물질안전원)	
B102	화학물질관리법에 따른 석유화학 플랜트 유해화학물질 분야 안전진단 사례	38
	오세형(한국환경공단)	
B103	열매유 취급시설 사고사례 및 공정안전관리	39
	최창열(한국산업안전보건공단)	
B104	위험물 상압 저장탱크 샘플링시 위험요소와 화재·폭발 방지대책에 관한 연구	40
	최우진·정인희·황성범·정순원·황승울(화학물질안전원)	
B105	저비점 THC 처리특성 및 안전성 시뮬레이션	41
	구치완·이찬섭·오세현·마병철(전남대학교)	
B106	IEC 61508-6 Edition 2.0의 PFDavg공식 개선 제안	42
	박진형(한국요꼬가와전기)·전진우·한상욱·윤효섭·박교식(승실대학교)	
B107	석유화학 방폭 및 화재 안전 시뮬레이션 사례 연구	43
	임채완·여운성·문병학·백승현·마병철(전남대학교)	

B2

특별세션(3)_한방유비스

- B201 국내 원전 피난유도 프로그램 개발 위한 피난시뮬레이션 수행 44
양현혁·김경민·최두찬(한방유비스(주))
- B202 화재 조기 감지를 위한 용도별 케이블의 VOCs 및 연기 농도 비교 연구 45
김재민·문선여·박주열·황철홍(대전대학교)
- B203 콘 칼로리미터에서 입사 열유속이 국내 원전 케이블의 연소물성에 미치는 영향 46
박주열·문선여·김재민·황철홍(대전대학교)
- B204 원전 전기캐비닛 화재시나리오의 심각도 추정을 위한 열방출률 DB 구축에 관한 연구 47
윤가영(방재시험연구원)
- B205 공기흡입식 화재감지시스템을 위한 단일 파이프 네트워크 모델링 연구 48
김동우·Ha Thien Khieu·이영만(올라이트라이프(주))

B3

원자력안전

- B301 원자력 안전 해석을 위한 정사영 이미지를 이용한 단일 기포의 기계학습 기반 3차원 복원 기법 49
신상오·송민섭(한양대학교)
- B302 몬테카를로 코드 기반 용융염원자로 모델링 및 차폐 분석 50
이효은·조재현(중앙대학교)
- B303 Vapor Chamber를 활용한 핵연료다발의 열 관리 성능 분석: 기존 설계와의 비교 평가 51
이혁준·송민섭(한양대학교)
- B304 격납건물 피동열침원 응축열전달 해석 고도화를 위한 기구학적 액막 모델 개발 52
강정훈·이연건(세종대학교)
- B305 부유식 용융염 원자로의 내부 및 외부 특성에 따른 초기 사건 식별 및 분류 연구 53
김진수·이혁준·유영근·송민섭(한양대학교)

B4

소방청

- B401 포르말린 누출사고 대응 고도화를 위한 포집·제거 기술 방안 마련 54
조철희(국립소방연구원)
- B402 리튬금속 화재의 소화 전략 적용 방안: 리튬 일차전지 화재 대응 중심으로 55
조철희(국립소방연구원)
- B403 자기발열성 물질의 감정분석을 위한 물질 특성 평가 방법 연구 56
최아영(국립소방연구원)·남기훈(창신대학교)·최유열(국립소방연구원)
- B404 대용량포방사시스템을 활용한 UTK 유류탱크 전면화재 대응 사례 분석 57
김량선·강우철(중앙119구조본부)·김지연(성균관대학교)
- B405 전기차 리튬-이온 배터리 침수기반 안정화 시간에 대한 실증 연구 58
이상범(국립소방연구원)

B406	위험성 평가 프로그램의 피해 영향 비교 분석: 수소충전소를 중심으로	59
	김해진(중앙119구조본부)	

B5 환경안전 및 Risk 관리

B501	화학사고 민·관 공동방재지원체계 구축 방안	60
	정성경·김지윤·김호연·박춘화(화학물질안전원)	
B502	지속가능한 지역화학사고대비체계 구축 방안 연구: 지방자치단체 적용 중심으로	61
	안성용·정성경·김호연·박춘화(화학물질안전원)	
B503	화학안전정책포럼의 숙의 과정을 통한 리스크 관리 방안	62
	이근탁·김신범·최영은(노동환경건강연구소)	
B504	2023년 국내 유해화학물질 취급 현황 분석 연구	63
	김정곤·윤준현(화학물질안전원)	
B505	화학사고 화재 폭발 조사 사례를 통한 방지대책 제안	64
	최광수·이현용·전상호·조아름(서산화학재난합동방재센터)	
B506	연구실사고 발생 현황 분석 및 시사점	65
	이명환·송무화·김승준·이황원(한국생명공학연구원 국가연구안전관리본부)	
B507	트랜스포머 셀프어텐션 모델 적용을 통한 스마트 하수처리 사례 개선방안	66
	윤형준·허재성((주)유티이씨)	
B508	화학물질 운송차량 사고대응 및 안전관리	67
	이세용·허선화·구본운·김병훈(원주지방환경청 충주화학재난합동방재센터)	

B6 해양위험물

B601	위험유해물질(HNS) 해양사고 대응가이드 활용방안 -시차별 화학사고 대응단계를 중심으로-	68
	이선중·김정환·박세진(해양경찰청)	
B602	해상화학사고 대응강화를 위한 중점관리대상물질 관리 방안	69
	김혜미·김정환·박세진(해양경찰청)	
B603	가스운반선 충돌사고 대응사례에 관한 고찰 -LNG운반선-화물선 충돌사례 사고대응-	70
	이효근·강상진·최현규(제주지방해양경찰청)	
B604	가상현실(VR)기반 해상 화학사고 안전교육 콘텐츠 개발 및 교육효과분석	71
	이동훈·신수빈·김민우·이청수·임용순(화학물질안전원)	
B605	항만 위험물 저장시설 화재폭발사고와 해양오염 -UTK 저장탱크 사고사례-	72
	박정호·유대선(울산소방본부)	

B7

특별세션(4)_한국소방산업기술원

- B701 위험물 옥외탱크저장소에서 마이크로파일 적용을 위한 지지력 안전성 연구 73
조호담·임종진·박우인(한국소방산업기술원)
- B702 할로젠 화합물 구조 특성에 따른 인화성 연구 74
반준화·주민연·양성환·박주영(한국소방산업기술원)
- B703 옥외탱크저장소의 지진가속도 및 하부 수평내력 산정방법 연구 75
황수현·임종진·김재현(한국소방산업기술원)
- B704 낙구식타격감도시험에서 표준물질의 50% 폭점 높이를 결정하기 위한 연구 76
박인숙·양성환·박우인(한국소방산업기술원)
- B705 화학공정 내 위험물의 이상반응 평가 연구 77
반준화·최유진·박주영(한국소방산업기술원)
- B706 준특정옥외탱크저장소 안전성 향상을 위한 안전성능검사 확대 도입 고찰 78
강기민·박우인·박주영(한국소방산업기술원)

C1

보건안전

- C101 동영상 기반 위험물 사고 응급 대응 교육 개발과 시범 적용 79
왕순주(한림대학교)·한민섭·안은애·최다운·김지현(한림대학교동탄성심병원)
- C102 동아시아에서의 의도적 위험물 사고의 동향 80
왕순주(한림대학교)·한민섭·안은애·최다운·김지현(한림대학교동탄성심병원)
- C103 메타버스 기반 위험물 유출사고 환자 대응 훈련 콘텐츠 개발의 필요성과 적용 가능성 82
박선영·모효정(주식회사 뉴베이스)
- C104 응급환자 이송 중 데이터 불연속성 문제를 해결하는 Edge+Cloud 이중저장 시스템 84
박시운((주)달구 부설 테크볼런스 연구소)
- C105 위험물 사고 안전을 위한 생성형 인공지능 활용 정보 제공 연구 85
왕순주·한민섭·안은애·최다운·김지현(한림대학교)

C2

위험물 리스크 평가 및 사고 대응 경진대회

- C201 폐배터리 리튬 침출 공정에서의 위험성 평가 86
장기원·이근원·정승호(아주대학교)

C3

반도체 안전

- C301 반도체 제조공정 위험물시설 특례기준 적용의 정성적 효과 분석 87
박은우·권혁화·최광문(SK하이닉스)

C302	반도체 산업에서의 고압가스안전관리법 정책 제언	88
	이석용·박은우·권혁화·최광문(SK하이닉스)	

P

포스터발표

P01	소규모 사업장을 위한 화학사고 리스크 관리 플랫폼 개발 연구	89
	김호현·곽윤경·안선민·조하진(서경대학교)·이준상·양준용(㈜키미아비전)·김민수(㈜위즈아이)·정승호(아주대학교)	
P02	자원순환시설에서의 대형화재 확산경로 및 위험성에 대한 시뮬레이션 분석	91
	안승민·이종규·이재문·사재천·민세홍(가천대학교)	
P03	리치오일(Rich Oil)의 화재·폭발 위험성평가	92
	김천동·고인희·서동현·최이락·이한희(한국산업안전보건공단)	
P04	액침냉각을 활용한 고속 충전 배터리 열적 위험 감소 방안	93
	문재원·송해민·백승현·마병철(전남대학교)	
P05	화학물질 누출사고 해석을 위한 3차원 CFD 프로그램 개발	94
	최정열·변영민·김민수(엘솔텍)·정승호(아주대학교)·이상돈·김현식(넥스트폼)·김형석·임동연((주)이솔로지)	
P06	개방형 위험물 제조소에 적합한 제3류 위험물 복합 소화전략에 대한 고찰	95
	홍성민·임종진·박우인·박주영(한국소방산업기술원)	
P07	액상 혼합물 인화점 시험 중 잔류물 형성 문제 및 평가 방안 연구	97
	최성훈·주민연·반준화·양성환·박주영(한국소방산업기술원)	
P08	FLACS-ANSYS를 통한 증기운 폭발에 따른 FSI(CFD-FEA) 해석	98
	오세현·심승현·문명환·마병철(전남대학교)	
P09	침윤소화약제의 리튬이온배터리 화재 적응성 연구	99
	합정모·김라영, 최규출(한국방염기술)	
P10	침윤소화약제의 소화방법이 소화효과에 미치는 영향에 관한 연구	100
	합정모·김라영·최규출(한국방염기술)	
P11	리튬이온배터리 화재용 에코노바-K와 F-500 소화약제의 성능 비교	101
	합정모·김라영·최규출(한국방염기술)·이강영(한국건설생활환경시험연구원)	
P12	SCR 및 공정의 온실가스 저감 설계·제어 개선 LLM기반 AI 에이전트	102
	신동일·송가은·나누리(명지대학교)	

Author Index	103
---------------------------	-----

수소 혼입 도시가스의 방폭 등급 적합성 분석을 위한 MIC 실험 연구

서명진·이화·김정환[†]
한국가스안전공사 가스안전연구원

MIC-Based Evaluation of Explosion-Proof Classification Suitability for Hydrogen-Blended City Gas

Myoung Geon Seo·Hwa Young Lee·Jeong Hwan Kim[†]

Korea Gas Safety Corporation

[†]Corresponding author: abbu2k@kgs.or.kr

최근 탄소중립 실현을 위한 도시가스에 수소를 혼입하는 방안이 제시되면서, 수소가 혼입된 도시가스의 안전성을 정량적으로 평가하는 기준 마련이 요구되고 있다. 수소는 높은 연소 속도와 낮은 최소점화 에너지를 갖는 대표적인 고위험 연료로, 도시가스에 혼입될 경우 점화 특성에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 혼입된 수소가 기존 도시가스의 방폭 등급(IIB)에 어떠한 영향을 미치는지는 핵심 변수 중 하나이다.

본 연구는 도시가스에 수소를 20% 혼입했을 때의 최소점화전류(MIC, Minimum Ignition Current)를 통해 실험적으로 분석하였다.

분석 결과, 수소가 혼입됨에 따라 MIC 값은 소폭 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 연료 혼합물의 점화 민감도가 증가했음을 시사한다. 그러나 모든 측정값은 여전히 IIB 등급 가스의 MIC 범위 내에 존재하여, 20% 수준의 수소 혼입이 방폭 등급을 현저히 변화시키지는 않는 것으로 해석된다.

이러한 결과는 수소 혼입 도시가스의 산업적 활용 가능성과 안전성 확보 사이의 균형을 가늠하는 기초 자료로 활용될 수 있다.

다만, 본 연구는 하나의 혼입 농도(20%)와 단일 조건에서 측정된 MIC 데이터에 기반하고 있어, 다양한 조성 및 실환경을 반영한 반복 실험이 수행되지 못했다는 한계가 존재한다. 또한, 혼입 가스의 유동 특성, 미세한 압력 변화, 점화원 종류에 따라 MIC 결과가 달라질 수 있으므로, 향후에는 실환경 시나리오를 반영한 실험 설계가 필요하다.

감사의 글: 이 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00232515, 수소혼입 도시가스 배관 수소취성 평가 및 수명예측 안전기술 개발/실증)

CFD Tool을 활용한 액화수소 취급 시설에서의 수소 누출 시나리오에 대한 분석 연구

박주현·김정환*

한국가스안전공사 가스안전연구원

A Study on hydrogen leak scenario analysis in liquefied hydrogen handling facilities using a CFD Tool

Juhyeon Park·Jeonghwan Kim[†]

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

[†]Corresponding author: abbu2k@kgs.or.kr

전 세계적으로 기후 변화 대응과 지속 가능한 에너지 전환을 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 탄소중립 달성을 위한 다양한 노력의 일환으로 수소에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 수소는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않기에 친환경적이지만 누출 시 점화원에 의해 폭발 및 화재와 같은 중대 사고로 이어질 수 있는 위험성이 상존한다. 이러한 위험성이 존재하지만, 수소의 장점을 극대화함으로써 다양한 산업 분야에서의 실질적인 활용을 위해 노력하고 있다. 특히, 액화수소는 극저온 상태로 저장 및 운송되며, 누출 시 높은 인화성과 확산성을 갖는 수소의 특성으로 인해 취급 시 높은 수준의 안전성이 요구된다.

본 연구에서는 액화수소 취급 시설의 배관에서 발생할 수 있는 수소 누출 시나리오를 HAZOP 분석기법을 통해 도출하였으며, 전산유체역학(CFD)을 통해 시나리오 해석을 진행하였다. 모델링 및 시뮬레이션은 FLACS 프로그램을 사용하였으며, 다양한 누출 조건을 통해 수소가스의 거동을 분석하였다. 배관의 누출공 크기에 따라 수소 누출 유량이 달라지기에 해당 누출 지점에서 발생하는 수소가스의 확산 거동 등을 통해 주변 시설에 미치는 피해 영향 범위를 파악하였다.

따라서, 이러한 연구 결과를 토대로 액화수소 취급 시설의 안전성을 검토하고 안전관리방안 등 안전기준 수립 및 사고 대응 방안 마련을 위한 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

* 본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업 “액화수소 저장탱크/압력용기류의 진공 단열 성능평가 기술/안전기준 개발”(과제번호 20227310100020)의 지원으로 진행됨.

Key words : Liquid hydrogen(액화수소), Liquid hydrogen technologies(액화수소 기술), Cryogenic design(극저온 설계), Test certification(인증 시험), Empirical evaluation(실증 평가)

도시가스 내 수소 혼입에 따른 상업용 가스튀김기의 연소성능 및 안전성 평가

정승균*·신현국*·조영광**·채수백**·임형택**
한국가스안전공사 가스안전연구원*·린나이코리아 R&D본부**

Evaluation of Combustion Performance and Safety of a commercial Gas Fryer with Hydrogen-Blended Natural Gas

Seong Gyun JUNG* · Hyun Gook SHIN* · Yeong Gwang JO**
Su Baek CHAE** · Hyeong Tack LIM**
Korea Gas Safety Corporation, Gas Safety R&D Institute*
Rinnai Korea Corporation Research&Development Headquarters
†Corresponding author: jyg202@kgs.or.kr

탄소중립 목표 달성을 위한 대안 에너지 기술 중 하나로, 기존 도시가스 공급망에 수소를 혼입하는 방안이 국내외적으로 주목받고 있다. 수소는 이론적 연소속도가 빠르고 점화에너지가 낮은 특성을 가지기 때문에, 도시가스에 일정 비율로 혼입될 경우 기존 연소기기의 연소 특성 및 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 특히 상업용 조리기와 같은 다중 이용시설용 연소기는 화염안정성과 배출가스 제어가 중요하여, 수소 혼입에 따른 성능 변화에 대한 정밀한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 상업용 가스튀김기를 대상으로 하여 수소 혼입 연료 사용 시 연소성능 및 안전성 변화 양상을 실험적으로 평가하였다. 실험은 도시가스를 모사한 등가가스(R-gas)를 기준 연료로 설정하고, 여기에 수소를 단계적으로 5%, 10%, 15%, 20% 비율로 혼입하여 총 5종의 시험가스를 구성하였다. 시험 환경은 일반적인 상업용 조리기 사용 조건을 고려하여 설정되었으며, 역화의 위험성을 판단하기 위해 1.0~2.5kPa의 가스압력으로 시험하였다.

주요 평가지표는 한국가스안전공사의 KGS CODE 및 한국산업표준(KS)에 근거하여 다음과 같은 6가지 항목으로 구성하였다: △ 가스 소비량 및 정격 열량 변화, △ 연소 화염 특성 및 안정도, △ 가스 누출 유무, △ 배출가스 중 CO 및 NO_x 농도 변화, △ 연소기 내부의 역화 발생 여부, △ 안전차단장치의 정상 작동 여부. 이들 항목을 종합 분석함으로써, 수소 혼입 비율 증가에 따른 연소기 성능 및 안전성의 한계점을 파악하고, 수소 혼입 연료 사용 시 상업용 연소기기의 적합성을 기술적으로 검증하였다.

* 이 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00237341, 주택용/산업용 연소기·가스기기 연소성능 안전성 검증 및 안전기술 개발).

고압수소배관 재료의 안전성 확보를 위한 연구동향 및 규정 비교분석

김소영 · 김예원 · 김정환 · 박요한[†]
한국가스안전공사 가스안전연구원

A Comparative Study of Regulations and Research Trends on the Safety of Materials for High-Pressure Hydrogen Pipelines

Soyoung Kim · Yewon Kim · Junghwan Kim · Yohan Pak[†]
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
[†]Corresponding author: yohan253@kgs.or.kr

According to the International Energy Agency's Global Hydrogen Review 2024, global hydrogen demand reached 97 million tonnes in 2023, marking a 2.5% increase from the previous year. This growth reflects the steady expansion of the hydrogen economy worldwide. In Korea, gas pipelines are regulated under several laws—including the High-Pressure Gas Safety Control Act, the Liquefied Petroleum Gas Safety Control and Business Act, and the Urban Gas Business Act—depending on their intended use and the characteristics of the transported fluid. Safety is ensured through inspections and certifications conducted by the Korea Gas Safety Corporation (KGS).

As demand surges from large-scale hydrogen consumers, such as refueling stations and hydrogen cities, a variety of hydrogen storage and transport technologies are being developed to address the gas's low volumetric energy density. Among these, high-pressure hydrogen pipelines offer a particularly fundamental and efficient means of transportation and limited storage, and their deployment is expected to increase significantly alongside the expansion of hydrogen infrastructure.

However, hydrogen can cause hydrogen embrittlement in metallic materials, reducing their mechanical integrity. As such, the selection and evaluation of pipeline materials are critical to ensuring the safety of hydrogen distribution systems. This study reviews key material testing methods relevant to hydrogen pipeline applications and analyzes domestic safety standards, with a particular focus on the KGS Code.

액화수소 규제특례 동향 및 관련 안전기준 제도화 추진 현황

황재석·이민경·김학래

한국가스안전공사 가스안전연구원 안전연구실

Trends of Temporary Regulatory Suspension and the Legal Institutionalization for Liquid Hydrogen policy

수소경제 활성화 로드맵, 2050 탄소중립 추진전략 등 정부의 정책 추진에 따른 수소산업 확대 및 육성을 위한 신소재, 신제품 개발 등 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 다만, 액화수소는 극저온의 가연성 액체 특성을 갖고 있어 그 위험도를 감안하여 규제특례 실증을 통한 안전성 평가를 진행하여 검증 데이터를 수집하고 있다.

규제특례를 통한 액화수소 실증 사업은 지속적으로 증가하고 있으며, 수소 전체 과제의 40퍼센트 이상을 차지할 정도로 다양한 분야의 양적 확장이 이루어지고 있는 상태이다. 생산 분야는 국내 생산에 더해 해외로부터 수입하는 인수기지·수송선·병커링에 대규모 투자가 진행 중이며, 이송 분야에서는 육상에서 운행 중인 액화수소 운송 트레일러에 더해 선박용 대용량 저장탱크 개발을 추진하고 또한, 사용 분야에서 액화수소 드론, UAM, 건설기계 및 상용차 등 다양한 모빌리티 적용을 위해 다양한 접근이 진행되고 있다.

규제특례를 통한 실증에서 안전성 검증이 완료되는 경우 법령 정비, 국가 기준 제·개정 등을 통해 제도화 하여 일반 사업화가 가능하도록 제도가 마련되어 있으나, 규제특례 취득, 운영 및 실증에 대부분의 사업 추진 주체가 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다.

본 발표에서는 규제특례 취득을 위한 정부와 사업자의 추진 절차와 진행 절차를 점검하고, 반복해서 지연되거나 오해의 소지가 있는 부분을 명확하게 정리함과 동시에 관련 실증기준, 제도화를 위한 절차 등을 분석하여 액화수소 사업 활성화에 기여함을 목적으로 한다.

수소 배관용 고신뢰성 금속소재 개발 및 설계기준 적용성 검토

박요한·김정환·김예원·김소영
한국가스안전공사 가스안전연구원

A Study on High-Reliability Materials for Hydrogen Piping and the Applicability of Design Codes

Yohan Pak·Jeonghwan Kim·Yewon Kim·Soyeong Kim
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
†Corresponding author: yohan253@kgs.or.kr

수소경제 확대에 따라 수소의 생산, 저장, 운송 인프라가 고도화되고 있으며, 특히 10 MPa 이상의 고압 수소 배관 시스템에서 사용할 수 있는 신뢰성 높은 금속소재의 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 본 연구는 이러한 고압 환경에 적합한 배관용 금속소재의 국산화와 함께, 이를 실제 설계에 적용하기 위한 국내외 설계기준의 기술적 적용 가능성을 종합적으로 검토하였다. 우선, 미국의 ASME B31.3, B31.8, B31.12 및 국내 KGS 설계기준(FP111, FP217, FP451 등)을 대상으로 적용범위, 수소취성 저감 설계요소(Mf, Hf) 반영 여부 등을 중심으로 세부 항목을 비교·분석하고, 국내 기준의 보완 방향을 제시하였다. 또한, 수소취성에 대한 소재의 내구성을 정량적으로 검증하기 위해 SSRT(저속 변형 인장 시험)와 수소취성 한계 응력확대계수(K_{IH}) 측정을 수행할 수 있는 in-situ 평가 시스템을 구축 할 예정이다. 해당 시스템은 10 MPa 수준의 수소 가압이 가능한 소형 시험 챔버 기반으로 구성되었으며, 시험 조건은 ASME Sec.VIII Div.3 및 KGS AC111 기준을 참조하여 수립되었다.

* 본 연구는 과학기술정보통신부 나노 및 소재기술개발사업 “고압 수소 배관용 원천소재 국산화를 위한 소재 설계, 제조 및 평가 기술개발”(과제번호: RS-2024-00445038)의 지원으로 진행됨.

암모니아 공급설비 소재 적절성 분석을 위한 양자역학(DFT) 및 분자동역학 시뮬레이션 적용 효율성 검토

이우귀연

가스안전공사 가스안전연구원

Efficiency Review of Quantum Mechanics (DFT) and Molecular Dynamics Simulations for Analyzing Material Suitability in Ammonia Supply Facilities

Ugwiyeon Lee[†]

Korea Gas Safety Corporation

[†]Corresponding author: lyullee@gmail.com

암모니아 혼소 발전의 상용화를 위해 공급설비에 사용되는 부품·소재의 화학적 안정성과 내구성 확보는 필수적이다. 본 연구는 암모니아 공급설비 소재의 적절성을 분석하기 위한 양자역학(Density Functional Theory, DFT) 및 분자동역학(Molecular Dynamics, MD) 시뮬레이션 기법의 적용 가능성과 효율성에 대해 고찰한다. DFT는 금속 및 산화물 표면에서의 암모니아 흡착 특성, 전자 밀도 분포, 반응성, 표면 결합 안정성, 부식 유도 반응의 에너지 장벽 등을 정밀하게 분석할 수 있으며, 소재의 화학적 반응성을 예측하는 데 강점을 가진다. 반면, MD 시뮬레이션은 나노~마이크로 스케일에서의 암모니아 분자의 확산, 물리적 침투, 열적 충격에 따른 구조 변형, 응력 부식 균열(SCC) 발생 가능성 등을 동적으로 해석할 수 있어 시간 축 기반의 소재 안정성 평가에 유용하다.

본 연구에서는 이러한 분석을 위해 Python 기반의 오픈소스 시뮬레이션 라이브러리인 ASE(Atomic Simulation Environment), Quantum ESPRESSO, LAMMPS 등의 활용 가능성을 검토하였으며, 소재 구조 정의, 계산 조건 설정, 후처리 시각화까지 통합된 파이썬 워크플로우 구축이 가능함을 확인하였다. 또한, 암모니아 및 유사 부식성 가스 환경에서의 금속/합금 소재에 대한 DFT/MD 기반 연구가 이미 다양한 산업 영역(수소, 화학 플랜트, 연료전지 등)에서 점진적으로 확대되고 있음을 문헌 고찰을 통해 제시하였다.

이러한 결과는 암모니아 취급 설비 설계 시 재료 선택의 과학적 근거 확보, 표면 코팅/보호재 개발, 신규 합금 설계 방향 제시 등에 있어 DFT/MD 기반 시뮬레이션 기술이 정량적이고 예측 가능한 분석 도구로서 활용될 수 있음을 시사한다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2024-00437207).

ASME B31.12 기반 수소 배관 재료 취성 피로시험 평가

김학래·이민경·임승현·강승규^{†**}
한국가스안전공사 가스안전연구원

Hydrogen Piping Material Brittleness Fatigue Test Evaluation

Hak Rae Kim¹·Min Kyung Lee²·Seunghyun Lim³·Seungkyu Kang^{4†**}
Gas Safety Research Institute, Korea Gas Safety Corporation (KGS)
[†]Corresponding author: skkang@kgs.or.kr

수소 기반 에너지 인프라의 확대에 따라 고압 수소 배관의 구조적 건전성 확보가 중요한 이슈로 부각되고 있다. 특히, 수소 취성에 의한 균열의 조기 발생과 피로 하중에 의한 균열 성장 거동에 대한 정량적 평가가 요구된다.

본 연구에서는 수소 배관용 금속 재료의 취성 및 피로 특성을 평가하기 위한 ASME B31.12 기반 균열 성장 시뮬레이션 기법과 실제 수소 환경을 모사할 수 있는 시험장비의 설계 및 구축을 수행하였다.

ASME B31.12 해석을 통한 초기 균열 크기, 응력 확장 계수 범위, 물성 계수 등을 바탕으로 수소 분위기 하에서의 균열 성장 속도를 예측하고, 반복 하중 조건에 따른 피로 수명을 분석하였다. 시뮬레이션 결과는 다양한 재료 조건(X52, 65, 70)에 대한 수소 취성 영향 평가에 활용하며, 수소 가스 하중 조건에서의 실험 결과와 비교 검증될 예정이다.

본 연구는 수소 배관 부품의 신뢰성 확보를 위한 핵심 평가기술 개발에 기여하며, 향후 수소 배관 설계 및 유지관리 기준 마련에 있어 실질적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

액화수소 핵심부품 성능평가를 위한 국내외 기준 분석

황장환·최대현·강승규[†]
한국가스안전공사 가스안전연구원

A Study on Domestic and International Standards for Performance Evaluation of Liquid Hydrogen Components

Janghwan Hwang·Daeheon Choi·Seungkyu Kang[†]
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
[†]Corresponding author: skkang@kgs.or.kr

액화수소는 친환경 에너지로서 미래 수소경제 실현의 핵심 자원으로 주목받고 있으며, 이를 안전하게 저장·운송·활용하기 위한 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 액화수소는 극저온에서 보관되며, 누설 시 화재·폭발 위험이 크기 때문에 시스템 전반에 걸친 고도의 안전성이 요구된다. 이러한 특성으로 인해 액화수소 설비에 적용되는 부품들, 특히 유사시 즉각적인 작동이 요구되는 긴급차단밸브(Emergency Shut-off Valve)와 과압 방출을 담당하는 안전밸브(Safety Valve)는 전체 시스템의 안전성과 직결되는 핵심 요소로 간주된다. 이들 밸브는 정상 작동 조건뿐만 아니라 사고 상황에서도 신속하고 정확하게 동작해야 하며, 극한 환경에서도 높은 내구성과 기밀성을 유지해야 한다. 현재 적용 중인 KGS AA311(고압가스용 용기부속품 제조의 시설·기술·검사 기준), AA317(긴급차단장치 제조의 시설·기술·검사 기준), AA319(고압가스용 안전밸브 제조의 시설·기술·검사 기준) 등의 국내 기준은 액화수소를 다루기에는 미흡하다. 반면 극저온 부품 국제표준의 경우, 품목에 따라 안전밸브(ISO 28921-1) 등의 적용기준에 따라 운영 중에 있다. 따라서 해당 품목에 따른 국제 기준을 비교·분석하여 국내에 적용할 필요가 있다.

본 연구에서는 액화수소 환경에서 적용될 핵심부품의 주요 안전 성능을 평가하기 위해 관련 기준을 분석하고, 이를 비교하여 국내 기준 개발에 대한 기초 자료로 활용하고자 한다. 이를 기반으로 극저온·초고압 액화수소 부품 검사·평가 기술 및 장치 개발을 목표로 하며 실증을 통해 확보된 기술을 활용하여 액화수소 핵심부품 신뢰성 향상 및 부품 국산화 개발에 이바지하고자 한다.

* 본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(과제번호: 20227310100090, 액화수소 핵심부품 성능검사 기술 및 안전 기준 개발)

데이터센터의 향온향습기 작동에 따른 가스계소화설비 소화성능에 관한 연구

김준식
(주)건창엔지니어링

The study of the operation and stop of the CRAH during operation of
gas fire extinguishing facilities in Data centers

Kim Jun Sik
Geonchang Engineering Co., Ltd.
†Corresponding author: junsikims@daum.net

국내의 데이터센터는 ICT(Information and Communication Technology, 정보통신기술) 산업의 발전과 사회, 경제 및 문화 전반에 걸쳐 빠른 변화를 가져오는 환경에서 필요성이 빠르게 증가되고 있다. Data의 안정성 확보 및 재난 상황시 업무를 지속시킬 수 있는 데이터센터의 구축사례가 증가하면서 사업연속성(BCP : Business continuity Planning) 확보를 추구하고 있다.

과거에는 전체시스템의 각 구성요소를 통합하여 주는 SI(System Integration)업체 등 ICT 관련기업이 전문적으로 시스템을 구축하고 대형서버 연계 및 Data의 안정성을 확보하는 서비스를 제공하는 방식으로 일정 공간과 회선을 임대 제공하는 코로케이션(Colocation)사업을 위해서 데이터센터를 구축했지만, 최근에는 각종 서비스의 증가와 데이터의 용량이 큰 폭으로 증가함에 따라 금융권, 건설사, 기업체, 게임사, 해외기업들이 직접 데이터센터를 구축하거나 시장 진출 준비에 나서고 있다.

데이터센터의 구축사례가 증가하면서 화재와 같은 재난상황에 대한 대책 및 에너지 절약적인 서버룸의 냉각기술이 더욱 필요하게 되었다. 만약, 데이터센터와 같은 특수공간에서 사고가 발생되게 되면 직접적인 손실 리스크뿐만 아니라 간접적인 손실, 즉 데이터의 손실, 업무의 중단, 이용자의 불편이 발생할 수 있으며, 상당한 피해 규모에 이르게 된다.

직접적인 손실 리스크를 보면 자산가치 측면에서는 데이터센터 공간의 단위면적당 자산가치의 손실이 일반적인 제조시설 및 창고보다 상당히 높다. 화재위험 측면에서는 컴퓨터 대부분의 구성품은 가연성이고, 높은 열원에 노출이 되면 일부 구성품이 손상이 되고 화재 시에는 수직 또는 수평으로 배열된 구획된 구조내에서 빠른 화재확산으로 대형화재를 초래할 수 있다.

간접적인 손실 리스크를 보면 업무중단으로 오는 리스크는 사전에 수립된 비상계획이나 신속한 대응 여부에 따라서 사고여파, 네트워크에 주는 영향범위, 서비스 중단 시간 등의 차이가 있다. 각 층별로 구성되어 있는 서버룸은 중요 데이터를 보관하는 장소로서 일정 온도에 도달 시에 중요한 데이터가 소실된다면 재산적인 피해규모를 상상할 수 없을 정도이다.

데이터센터는 대표적인 에너지 다소비 건축물로 효율적인 냉각능력의 향상과 에너지절약에 대한 중요도가 높아지면서 Hot Aisle Containment(밀폐형 열복도 차폐)와 Cold Aisle Containment(밀폐형 냉복도 차폐) 시스템은 서버룸의 환경조성을 위한 가장 중요한 기술로 고려되고 있다.

이에 본 연구에서는 데이터센터의 안정적인 운영을 위하여 24시간 365일 작동을 하고 있는 항온항습기의 운영방식을 비교해 보고, 국내의 가스계소화설비에서 일반적으로 적용하고 있는 항온항습기의 정지상태에서 소화약제를 방출하는 하강모드(Descending Interface Mode)와 항온항습기를 작동시키면서 소화약제를 방출하는 혼합모드(Mixing Mode)인 경우에 소화효과를 비교해보고자 한다.

데이터센터의 안정적 운영과 사업연속성 확보를 위해서는 서버룸의 환경조건과 성능기준을 고려하지 않고, 항온항습기를 정지시키고 소화약제를 방출시키는 것이 타당한 것인지를 분석해보고 개선방안을 제시하고자 본 연구를 수행하였다.

화재경보음 인지도 개선방안에 관한 연구

오소영
(☞)진일엠이씨

A Study on the Improvement about Recognition of Fire Alarm Sound.

So-Young Oh¹
KUNIL MEC

†Corresponding author: os-young@daum.net

건축물 공간의 다양화 및 대형화로 인한 차음성능이 향상되면서 재실자가 화재경보음이나 비상방송 안내음을 인지하기 어려워 피난이 지연되고, 그로 인한 인명피해가 증가되고 있는 것이 현실이다. 이에 따라 재실자가 명확한 화재경보음을 통한 화재상황을 인지하고 대피행동을 판단할수 있도록 효율적인 화재경보음을 인식할 수 있는 방안이 요구되고 있다.

이에 화재경보음 중 경종을 이용한 화재알림의 감각적인 지각(Perception)과 비상방송의 음성을 이용한 화재상황 인지(Recognition)의 두가지를 활용하여 피난소요시간 중 반응시간을 단축시키는 방법을 구현하고자 한다.

화재상황의 인지에 있어서의 문제점은 건축물의 용도에 따라 주거공간과 비주거공간으로 구분하여 설명될 수 있다. 주거공간에 있어서의 경종과 스피커가 분리되어 있어서 잘 들리지 않는 상황과 비주거공간에 있어서의 화재경보장치인 경종과 비상방송설비의 음향장치인 스피커가 너무 가까이 근접하게 설치되어 있어서 발생하는 문제점이 있다.

이 연구에서는 비주거공간에 대한 화재경보장치가 화재발생 경보시 경종의 음향과 스피커의 비상방송 음성이 동시에 출력되어 경종의 음량에 비상방송설비의 음성경보가 중첩되어 재실자에게 화재상황에 대한 음성전달이 잘 되지 않는것에 대한 문제점을 고려하여 이에 개선방안을 구현하였다.

본 연구를 위하여 국내 여러 현장의 50여개의 위치를 실태조사한 결과 경종과 스피커의 설치 위치가 일률적이지 않고 너무 가깝게 설치되어 있는 것을 확인하였다.

본 연구는 화재발생시 화재인지 시간을 단축시킬 수 있는 화재경보음의 인지도를 개선하기 위한 방안으로 두 음향장치간의 설치 위치에 대한 음성명료도 분석을 통하여 초기 단계의 빠른 인지를 위한 방안을 제시하는데 목적이 있다.

화재음향설비의 설계시 두 음향간의 설치위치에 대한 규정을 제안하여 화재상황 인지시간을 단축시키는 방안으로 활용하고자 한다.

연결송수관설비의 효과적인 활용방안에 관한 연구

박정주*·최돈묵**†

*인천소방학교, **가천대학교 교수

A study on effective use of Standpipe System facilities

Jung Ju Park*·Don Mook Choi**†

*Incheon Fire Academy, Korea Sobang University **Dept. of Building Equipment System & Fire Engineering Graduate School, Gachon University, Professor. †

†Corresponding author: metis119@naver.com

사회가 발달할수록 도심지의 과밀화 현상은 필연적인 현상으로, 현대의 도시는 1960년대 이후 산업화·도시화가 급속히 전개되면서 대형건축물이 곳곳에 들어서고 있다. 정부의 수도권 인구 분산정책과 주택문제 해결방안으로 고층아파트 단지 조성과 맞물려 초고층화, 고밀도화를 추구하면서 그 구조와 형태가 다양하게 변화하고 있다.

이와 같은 고층빌딩에서는 다양성과 복잡성으로 많은 인구가 밀집되고 불특정다수인이 거주하는 공간으로써 경제적 활성화가 이루어지는 반면, 화재와 같은 재난 시 공간의 수직적 분포로 인하여 화재확산이 크고 그에 따른 소방활동상 대응과 안전성 확보에 많은 어려움이 있다.

현재 소방시설법령상 연결송수관은 5층 이상으로서 연면적 6천㎡이상 또는 지하층을 포함한 층수가 7층 이상인 특정대상물에 설치기준을 적용하고 있다. 이는 소방대가 화재진압을 위해서 소방호스를 연결하는 시간을 최소화함으로써 신속하게 화점으로 이동하여 원활히 공급되는 소화용수로 최선의 작전을 수행할 수 있도록 하기 위함이다. 그러나 실제 현장에서는 연결송수관과 옥내소화전·스프링클러 연결송수구가 다 같이 겸용으로 설치되어 화재 시 여러 가지 문제점이 나타나고 있으며, 허술한 화재안전기준(NFSC 502)은 화재현장에 출동한 소방관으로 하여금 혼란만 가중하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 소방대상물에 설치된 연결송수관 설비를 비롯한 옥내소화전·스프링클러 연결송수구 활용을 통한 보다 효과적인 소방활동을 위하여 먼저, 국내 화재사례와 선행연구를 살펴보고, 현지 조사를 통하여 법적/제도적 규정이 현실에서는 어떻게 반영되고 있는지 분석하였으며, 연결송수관 설비를 활용한 소화활동을 중심으로 그동안 소방관으로서 화재현장에서 직접 경험하며 느낀점을 기술하고 현재의 화재대응시스템의 문제점을 도출하여 개선방안을 제시함으로써 효과적인 대응방안을 강구하고 소화설비시스템 안전성을 확보하고자 한다.

Keywords : Connected water pipe Equipment, High rise building fire, NFSC 502, NFSC 604.

유별 위험물 혼재 위험성에 관한 실험적 재현사례에 관한 연구

현성호[†]·차정민

경민대학교 소방안전관리과

A Study on Experimental Reproduction Cases On the Risk of Mixing Different Types of Hazardous Materials

Seong-Ho Hyun[†]·Jeong-Min Cha

Dept. of Fire Protection Safety Management, Kyungmin Univ.

[†]Corresponding author: shhyun@kyungmin.ac.kr

위험물은 산업현장에서 사용자가 위험물을 제대로 숙지하고 사용하면 매우 유용하게 사용될 수 있으나 사용자의 잘못된 상식과 부주의로 인해서 대형사고로 이어지는 양면성을 지니고 있다. 즉 위험물은 폭발성·발화성·방사성 등의 특성을 가지고 있어서 화재발생 및 화재확대 위험성이 매우 커서 초기 소화가 어려워 대형 화재사고가 발생할 수 있는 것이다. 따라서 위험물은 정상이 아닌 상태를 나타내고, 그것을 통제할 수 없는 상황에 이르는 사고를 미연에 방지하기 위해서는 철저한 사전교육과 예방대책이 필요한 것이다. 이와같은 사전교육을 성공적으로 이끌기 위해서 실험사례를 통한 위험물질의 성질에 대해 제대로 파악하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서의 실험사례로서 혼촉발화는 3가지 형태를 나타낸다. 첫째, 혼촉하여 즉각 반응이 일어나는 경우의 사례로 제1류 위험물에 해당하는 삼산화크롬과 제4류 위험물에 해당하는 메틸알코올의 혼촉 발화로서 나타낼 수 있다. 둘째, 혼촉 후 일정한 시간이 경과 한 다음 반응이 일어나는 사례로는 제1류 위험물로서 과망가니즈산칼륨과 제4류 위험물로서 글리세린을 혼촉하는 경우로 나타낼 수 있다. 셋째, 혼촉 후 원래의 물질보다 발화하기 쉬운 상태가 되는 경우로 제4류 위험물에 해당하는 아세톤과 제6류 위험물에 해당하는 과산화수소를 혼재하는 경우 원래 물질의 위험성보다 더 위험해지는 경우를 실험으로 재현되는 것이 확인되었다.

교육시설의 화재안전관리 실효성에 관한 연구

이용재·김인범*
경민대학교

Study on the effectiveness of fire safety management in educational facilities

YongJae Lee·InBeom Kim*
Kyungmin University
viplyj@naver.com

일반 건축물뿐만 아니라 교육시설은 화재 등 다양한 유형의 사고로부터 안전해야 하며, 특히 화재사고의 발생은 사회적 안전망 차원에서 중대한 부분이다. 2021년 전국의 교육시설은 약 2만 3천 여 곳에 달하고 있으며, 최근 수년간 연평균 200건 내외의 화재 사고가 발생하고 있다. 2003년 발생한 대구지하철 사고 이후 같은 해 3월 26일 천안초등학교 축구부 합숙소에서 발생한 화재로 인해 8명의 어린이가 숨지고 축구부 코치를 포함 17명이 중경상을 입는 등 모두 25명의 사상자가 발생했다. 교육시설이라는 측면에서 인명피해의 크기뿐만 아니라 사회적 파장이 매우 심각했다.

이 사건 이후 교육시설의 화재안전대책이 강화되어 화재발생건수는 대폭 감소하여 최근에는 5년간 매년 약 200여건의 화재가 발생하고 있고, 사망자는 1명 내외 부상자 8명~28명 정도로 감소 되었다.

2025년 현재 교육시설 화재안전을 위한 제도적인 대책으로는 “소방시설설치유지 및 관리에 관한 법률”(이하 소방시설법)에 의한 소방시설 “자체점검”, 교육부 주관의 2020년 12월 4일 시행에 들어간 “교육시설 등의 안전 및 유지관리에 관한 법률”에 의한 “교육시설 안전인증제”가 있으며, “교육시설법”에 의한 “소방시설 실태조사”가 2022년 6월 29일부터 시행에 들어갔다.

따라서 본 연구의 내용 및 목적은 첫째, 교육시설과 관련된 “자체점검”, “교육시설 안전인증제”, “소방시설 실태조사”를 대상으로 점검 및 인증의 내용을 비교분석하여 제도의 문제점을 도출한다. 둘째, 이상의 제도에 대한 실효성을 바탕으로 개선방안을 제안할 목적으로 한다.

연구 결과, 교육시설은 화재위험성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났으며, 교육시설 화재안전을 위한 동일한 검사 및 인증제도가 중복되어 그 효과가 매우 낮을 뿐만 아니라 행정적·재정적 낭비가 큰 것으로 판단된다. 실질적인 안전성 확보 및 효율성 확보 측면에서 보완되어야 한다.

소화입형펌프의 내진해석에 관한 연구

이광열
(주)주원에프엔씨

A Study on Seismic Analysis of Fire Extinguishing Pumps

Lee kwang yul
Juwon FNC Co., Ltd.

최근 세계적으로 빈번하게 발생하고 있는 지진으로 인해 사회 기간망인 파이프 라인시설의 손상 등 이유로 2차적 화재 및 폭발이 발생하여 피해가 커지고 있으며 국내의 경우 2016년 9월 12일 경주에서 지진 관측 사상 가장 큰 규모 5.8의 지진이 발생하고 그 다음해 2017년 11월 15일 규모 5.4의 지진이 포항에서 발생하면서 다시 증가하는 추세였다. 또한 국내 지진발생횟수는 디지털 관측을 실시한 이후 연 평균 70.8회로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 특히 최근 지진의 발생횟수가 증가하여 이로인한 지진 화재로부터의 2차적인 피해를 예방하기 위해 국내도 소방시설의 내진능력 확보의 필요성을 느껴 2016년 소방시설의 내진설계기준 제정하여 실무적용했으며 22년 개정을 통하여 세부적인 지침을 마련하여 지진으로부터 소화시설에 대한 안전성 확보의 의미를 부여하였으나 실무에선 소방펌프 응용능력 부족으로 지진 발생시 전도, 이동, 파손 등 소방펌프 기능유지가 어려워 화재발생시 2차적 큰 피해가 발생할 가능성이 있어 소방펌프의 정량적 내진설계를 구현할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 지진화재 사례를 통한 내진설계 필요성을 확인하고 비구조요소 내진설계기준 검토를 통해 검증을 위한 내진설계기준 제정전 설치된 6가지 입형다단펌프 모델링을 구현하고 검증을 위한 지진하중의 크기 도출 및 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션에 의한 구조해석 결과치로 구조부재 응력과 앵커볼트 반력은 펌프자중과 형태가 영향을, 구조부재 변위량은 연결배관에 영향있음을 확인했으며 결과치를 통해 기존에 설치된 펌프의 내진성능 검증이 필요함을 제시하고자 한다.

위험물 분야 국가자격 체계 개편 및 도입에 관한 연구

황종록
경민대학교

A study on the Reorganization and Introduction of the National qualification system in dangerous materials

Jong Rok Hwang*

Kyungmin University, 545 sebu-ro, Uijeongbu, KOREA

우리나라 경제가 발전하고 개인의 소득이 높아질수록 환경, 안전, 재난 등에 대한 관심도가 높아지고, 이에 따라 정부는 지속적으로 재난, 안전관리, 환경 등에 대한 관리 체계를 강화하고 있는 추세이며, 화학물질 관리체계에서 각종 법령을 정비하여 관리하고 있으며, 화학물질 누출, 화재가 발생함에 따라 화학물질의 안전관리 중요도가 증대되고 있으며, 정부에서는 지속적으로 국민의 생명, 안전을 지키고 재해 예방을 위해 화재의 위험성이 큰 화학물질을 관리하기 위해 「위험물안전관리법」을 제정하여 지정수량 이상 위험물을 저장·취급하는 경우 허가를 받도록 하고 있다. 또한 허가 받은 모든 업체는 의무적으로 제1류~제6류 중 취급하는 위험물에 적절한 자격증 취득자를 채용하도록 하고 있어 각 해당위험물의 제조·저장·운반과 관련한 전문인력의 육성 수요는 지속적으로 요구되고 있는 실정이다.

국내 위험물 관련 있는 산업으로는 위험물(제1~6류)의 제조, 저장, 취급 전문업, 도료제조, 고무제품 및 플라스틱제품 제조, 화장품제조 염료제조와 같은 화학물질 및 화학제품제조업 등에서 지정수량 이상의 위험물을 취급하는 산업군으로 분류하고 있으며, 전국 위험물 제조소 등의 현황(24년도 기준)은 제조소 2,657개소, 취급소 24,599개소, 저장소 81,573개소 등 총 108,829개소가 있는 것으로 조사 되었다¹⁾.

이들 위험물제조소등에 대하여 위험물안전관리 업무수행을 통한 화재, 폭발 등 재난으로부터 인명 및 재산을 보호하기 위해 관련 법령에서 “위험물안전관리자” 선임해야할 86,063개소의 제조소들 중 위험물 안전관리자 선임자 수 59,582명이며, 그 중 국가기술자격 취득자는 33.8%인 반면 안전교육수료자 등 기타 자격 선임자가 66.2%를 차지하고 있다.²⁾

이와 같이 위험물 관련 산업 규모의 확대, 전문인력에 필요성 증대, 관련 교육기관의 확대 추세에 있으나, 위험물과 관련한 국가자격 체계는 “위험물 안전관리자”로서 직무 수행과 관련하여 1974년 국가기술자격법 제정 이래 현재까지 기능장, 산업기사, 기능사 3등급 체계를 유지하고 있어 교육 및 산업현장과 괴리, 위험물 분야 경력개발 경로 단절, 위험물 제조, 관리 등에 대한 전문성의 한계 및 제한 등의 요인을 가지고 있으며, 가스, 산업안전 등 안전관리 타 분야의 자격 종목 등급 체계와 비교할 때 위험물 분야의 전문성, 고도화 등에 한계점을 나타내고 있다.

따라서 위험물 취급, 제조, 저장과 관련한 전문인력 양성 및 위험물 안전관리 체계의 고도화를 위해서는 위험물안전관리, 위험물 시설관리, 감리 등에 대한 직무 및 수준의 재정립 하여 개별 법령에 따른 자격제도 도입, 국가기술자격 세분화 등의 개선이 필요하다.

1) 2025년도 위험물통계자료(소방청) 7p 참조

2) 2025년도 위험물통계자료(소방청) 67p참조

하이브리드 적층 구조를 활용한 Type IV 수소저장용기 복합재 거동 분석

김건우·박규환·김원식·김한상
가천대학교 기계공학과

Analysis of composite behavior in Type IV hydrogen storage vessel using hybrid layered structure

Gunwoo Kim·Kyuhan Park·Wonsik Kim·Hansang Kim

Department of mechanical engineering, Gachon Univ., 1342, Seongnam-dearo, Sujeong-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
Corresponding author: hskim70@gachon.ac.kr

최근 주요국의 환경 규제 강화로 수소 산업 관련 연구가 활발해지면서 수소의 안전한 활용을 위해 수소저장용기의 안전성 평가 연구가 부각되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 내부 압력과 같은 단일 하중 조건에서 수소저장용기의 안전 성능을 입증하는 데 집중될 뿐 실제 제조 및 산업 현장에서 요구되는 원가 절감 측면에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 복합재 구조에 단일 하중(내압)이 작용할 때 각 재료가 분담하는 응력이 재료의 방향별 탄성계수와 기하학적 특성에 따라 달라지는 특성을 이론적으로 해석하고, CFRP와 GFRP를 혼합한 하이브리드 적층 구조가 구조 내 응력 거동에 미치는 영향을 분석하여 재료 물성 차이에 따른 응력 집중 및 분산 현상을 정량적으로 평가하며 이를 기반으로 기존 대비 무게효율 및 성능이 향상된 적층 설계 방안을 제시함으로써 원가 절감을 위한 설계 기초를 마련하고자 하였다. 이를 위해 고전 적층 이론을 활용하여 탄성 계수 불일치가 구조 거동에 미치는 영향을 체계적으로 고찰하였다. 이후 GFRP 삽입 위치, 다중 삽입 위치, 연속·불연속 구조 및 와인딩 각도 등을 주요 설계 변수로 설정하고 각 변수의 조합에 따른 구조해석을 수행하였다. 특히 수소저장용기는 돔과 실린더 영역으로 구분되며, 두 구간은 곡률과 하중 전달 경로가 상이하기에 동일한 적층 구조라도 응력 분포 특성이 다르게 나타난다. 이에 구간별 구조 응답을 분리하여 분석하였고 일반적인 최대 섬유방향응력 비교만으로는 전체 구조 성능을 대표하기 어려움에 따라 구간별 섬유방향응력 및 면내전단응력의 최대, 평균 및 편차 등을 주요 지표로 설정하여 분석하였다. 본 연구에서는 이와 같은 결과를 통해 다양한 하이브리드 적층 조건에서 수소저장용기의 응력 거동을 정량적으로 평가할 수 있는 기반과 향후 원가 절감이 가능한 최적 적층 설계 방안 도출에 기여할 수 있는 결과를 도출하였다.

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 “국가표준기술개발 및 보급(R&D)”의 지원과 (RS-2024-00467679) 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 “신재생에너지핵심기술개발(R&D)”의 지원을 (RS-2024-00449107) 받아 연구한 과제입니다.

ANN 및 MLP 기반 유전 알고리즘을 이용한 수소저장용기 복합소재부 최적화 기법 연구

김혜원·박범수·조경석·김한상[†]
가천대학교 기계공학과

A Study on the Optimization of Composite Structures in Hydrogen Storage Vessels Using ANN and MLP Based Genetic Algorithms

Hyewon Kim·Beomsoo Park·Gyeongseok Cho·Hansang Kim[†]

Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 1342, Seongnam-dearo, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

[†]Corresponding author: hskim70@gachon.ac.kr

As South Korea's hydrogen economy rapidly expands, the utilization of hydrogen across diverse industries is intensifying. Concurrently, lightweight design and structural reliability of hydrogen storage vessels have emerged as critical challenges for enhancing the efficiency and safety of hydrogen transportation and storage systems. In particular, the composite materials section of Type IV storage vessels must simultaneously satisfy dual demands of weight reduction and structural integrity, making optimal design essential.

This study comparatively analyzes optimization methods that integrate artificial neural networks (ANN), deep learning (DL) based predictive models (Multilayer Perceptron, MLP), and genetic algorithms (GA) for the optimal design of composite materials. Finite element analysis (FEA) software ABAQUS was employed to generate structural behavior data under varying design parameter combinations, which were then compiled into a training dataset. ANN and MLP models were trained using this dataset and subsequently deployed as fitness functions within a GA-driven optimization framework.

The final optimized designs were validated for structural performance using ABAQUS. Both methods significantly reduced computational time compared to conventional FEA based optimization while delivering superior design outcomes. Notably, the MLP-GA approach demonstrated higher prediction accuracy and enhanced optimization efficiency than ANN-GA, confirming the effectiveness of deep learning-based optimization in designing composite hydrogen storage vessels.

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 “신재생에너지핵심기술개발(R&D)”의 지원을 받아 연구한 과제입니다. (No. RS-2024-00449107)

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 “천연가스배관망수소혼입안전성검증및안전기술개발(R&D)”의 지원을 받아 연구한 과제입니다. (No. RS-2023-00234839)

수소 환경에서 기밀부의 구조적 안정성 및 내구 수명 평가를 위한 유한요소해석 연구

박한민·강세진·Omar Dagdag·김한상[†]
가천대학교 기계공학과

Finite Element Analysis of Structural Stability and Durability of Sealing Components in Hydrogen Environments

Hanmin Park·Sejin Kang·Omar Dagdag·Hansang Kim[†]

Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 1342 Seongnam-daero, Sujeong-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do 13120, Republic of Korea

[†] Corresponding author: hskim70@gachon.ac.kr

수소는 높은 에너지 밀도와 친환경성으로 인해 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. 그러나 수소는 분자 크기가 매우 작아 고압 조건에서 누출되기 쉬우며, 이는 폭발이나 화재와 같은 안전사고로 이어질 수 있다. 따라서 수소 연료전지 차량, 배관, 저장 용기 등에서의 기밀성 확보는 매우 중요하다. 특히, 저장 및 수송 과정에서 반복되는 압력 변동은 씰링 부품에 지속적인 기계적 하중을 유발하여 변형, 압출, 손상을 초래할 수 있다. 또한, 씰링 재료 내부로 흡수된 수소는 감압 시 팽창하면서 팽윤 및 물리적 열화를 유발할 수 있다.

본 연구에서는 수소 환경에서의 씰링 부품의 구조 변형과 내구성을 예측하기 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 수행하였다. 초탄성, 멀린스 효과(Mullins effect), 찢김 에너지와 같은 고무 재료 고유의 기계적 특성, 피로 특성에 대한 실험 데이터를 해석 모델에 반영하여 정확성을 향상시켰으며, 다양한 씰링 형상 구조에 따른 기계적 거동을 비교 분석하였다. 해석 결과는 수소 환경에서의 씰링 재료의 성능 예측과 수명 평가에 대한 기초 자료를 제공함으로써, 수소 에너지 시스템의 안전성과 신뢰성을 향상시키기 위한 설계에 기여할 수 있다.

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 “천연가스배관망수소혼입안전성검증및안전기술개발(R&D)”의 지원과 (No. RS-2023-00234839) 한국에너지기술평가원(KETEP)의 “신재생에너지핵심기술개발(R&D)”의 지원을(No. RS-2024-00449107) 받아 연구한 과제입니다.

Type 4 수소저장 용기의 인증 비용 절감을 위한 가속화 시험 평가의 해석 연구

정경현·Omar Dagdag·구재현·김한상[†]
가천대학교 기계공학과

Analytical Study of Accelerated Test for Reducing Certification Costs of Type 4 Hydrogen Storage Vessels

Kyung Hyun Chung·Omar Dagdag·Jae Hyun Koo·Han Sang Kim[†]
School of Mechanical Engineering, Gachon Univ.
[†]Corresponding author: hskim70@gachon.ac.kr

고압 수소저장용기가 상용화된 현재, 부피 대비 에너지 밀도가 높지 않은 고압 저장 방식의 수소저장 용기는 용기 내부 수소 기체의 압축 한도에 한계가 있기 때문에 주행 거리를 늘리기 위하여 용기의 대형화가 필수적이다. 이에 따라 수소 상용차, 상용차용 대형 고압 수소저장용기의 상용화 및 개발이 진행되었고, 수요 또한 크게 증가하였다.

따라서, 대용량 고압 수소저장용기의 가스 반복 시험의 비용을 절감하고자 실린더 길이를 제외한 모든 부분의 설계가 원 시제와 동일한 형상을 가진 축소 시제를 활용한 시험 평가 방법을 해석적으로 검증하였다. Ansys-Fluent를 활용하여 2D Axisymmetric 유동 해석을 수행하였고, 해당 결과를 다시 활용하여 ABAQUS를 활용한 열전달 해석 및 구조해석을 수행하였다. ABAQUS WCM을 활용하여 수소저장용기 복합재료 부를 설계하였으며, 사용 압력의 2.25배인 1575 MPa의 내압을 부여하는 파열압 시험 해석을 수행하여 저장용기 복합재료 부 탄소 섬유 방향 인장 응력이 항복 강도를 넘지 않아 파손 없음을 확인하였고, 그에 따라 와인딩 패턴 및 설계의 안전성을 확인하였다. Ansys Fluent를 통하여 일정 질량 유량을 유지한 유동 해석을 수행하였고, 축소 시제 및 원 시제 간의 유동 해석 결과, 최대 온도 크기 및 위치, 온도 분포의 유사성을 확인하였다. 이후 Fluent의 유동 해석 결과의 노드 별 온도 데이터를 ABAQUS 수소저장용기 모델에 Mapping 하여 열전달 해석을 수행하였다. 그 결과로 저장용기 구조의 노드 별 충전 완료 시점에서의 용기 온도 분포를 얻어내었고, 열전달 해석을 통하여 얻은 온도 변화와 내압(사용압, 70 MPa)을 적용하여 충전 상황에서 압력과 온도 변화에 의해 용기에 가해지는 응력의 분포를 확인하였다.

본 연구에서는 축소 시제를 활용한 가스 반복 시험의 신뢰성을 해석적으로 검증하였으며, Ansys-Fluent와 ABAQUS를 활용한 수소저장용기 충전 상황 모사 해석의 방법론을 제시하였다.

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술기획평가관리원의 “소재부품기술개발사업”의 지원을 받아 연구한 과제입니다.(No. 20022511)

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원의 “에너지기술개발사업”의 지원을 받아 연구한 과제입니다.(No. 00234839)

전기차 해상운송 화재 대응을 위한 제연 전략: 실물화재시험 기반의 FDS 연구

이수행·곽건희*·김태중·민세홍^{†**}

(주)사람과안전 건설화재에너지연구원·*(재)한국건설생활환경시험연구원·**가천대학교

Smoke Control Strategy for Electric Vehicle Fires in Maritime Transport: FDS Analysis Based on Full-Scale Fire Testing

SuHaeng Lee·GeonHui Gwak*·TaeJung Kim·SeHong Min^{3†**}

CFEL Co., Ltd·*KCL·**Gachon University

[†]Corresponding author: shmin@gachon.ac.kr

전기차의 보급 확대와 함께 전기차 해상운송량도 가파르게 증가하고 있으며, 이에 따라 자동차 운반선(Ro-Ro[Roll-on/Roll-off], PCTC[Pure Car Truck Carrier])내 전기차 화재 사고가 수천억원에 달하는 재산피해 사례들로 새로운 글로벌 안전 이슈로 부상되었다. 특히, 다층 구조의 밀폐된 차량 적재 환경과 제한된 소화 여건은 화재 확산 속도와 규모를 급격히 증폭시키는 주요 원인으로 지목되고 있다. 이러한 문제의식을 바탕으로, 해상운송 중 전기차 화재 발생 시 선원소방대의 초기 대응 안전성을 확보할 수 있는 실질적인 제연 전략을 도출하기 위해 연구가 진행되었다.

비효율적 환기 구조 또는 Worst-case 상황에서도 적용 가능한 위험성 평가 기준과 자동차 운반선 설계 및 제연대응 가이드언스의 부재가 주요 문제로 분석되었으며, 이에 따라 본 연구는 실물화재시험 기반의 전산해석적 접근을 통해, 국제 기준에 반영 가능한 대응 프로토콜을 제안하는 기반을 마련하고자 한다.

연구의 주요 방법은 크게 두 가지로 구성된다. 첫째, 실제 해상운송 조건을 반영한 SOC 50%의 전기차 실물화재시험을 통해 화재 거동 특성을 분석하였다. 둘째, 해당 실험 데이터를 기반으로 Ro-Ro 선박 데크 구조를 반영한 전기차 FDS(Fire Dynamics Simulator) 전산해석을 실시하여 다양한 화재-제연 시나리오를 도출하였다. 이를 통해 수평·수직 연기 확산 구조, 환기 시스템의 배치 방향성, Lashing Hole의 영향을 반영한 다층 데크 환경에서의 연기 거동 및 제연 효과를 비교·분석하였다.

분석 결과, 초기 소화 활동과 선원소방대의 안전한 진입을 위해서는 단순한 환기량 증대가 아닌, 화재 위치 인지, 팬 방향 설정, 시간대별 대응전략 등 다요소가 결합된 체계적 제연 운용이 필요하다는 점이 도출되었다.

이러한 연구는 Ro-Ro 선박 구조적 특성과 전기차 화재 특수성을 동시에 고려함으로써, 향후 SOLAS, IMO, ClassNK 등 국제 규정 및 가이드언스 개정 시 공학적 근거 자료로 활용될 수 있는 실효성 높은 대응 방안을 제공하는 데 의의가 있다. 특히, 초기 소화 대응력을 극대화할 수 있는 제연 대응 가이드언스의 정립은 전기차 해상운송의 지속가능성과 안전성 강화를 위한 핵심 기반이 될 것이다.

Keywords: 전기차 해상운송, 자동차 운반선, Ro-Ro, PCTC, SOC, 실물화재시험, FDS 전산해석

계단실을 풍도로 사용하는 급기가압 제연시스템의 개발 연구

김채은·민세홍^{†*}

(주)에스엔에프 시스템·*가천대학교

A Development Study on a Stairwell-Based Pressurized Smoke Control System

ChaeEun Kim·SeHong Min^{†*}

SNF SYSTEM Co., Ltd.·*Gachon University

[†]Corresponding author: shmin@gachon.ac.kr

최근 고층 건축물과 복합 건축물이 지속적으로 증가함에 따라 화재 발생 시 연기의 수직 확산을 효과적으로 제어하고 재실자의 피난 안전성을 확보할 수 있는 고도화된 제연시스템의 필요성이 더욱 강조되고 있다. 특히 기존의 급기가압 제연설비는 일정 기준 조건에서는 성능을 확보할 수 있으나, 다수 층의 출입문이 개방되거나 연돌효과와 같은 요인이 작용할 경우 성능이 저하되는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황은 실제 화재 시 피난 경로인 계단실에 연기가 유입되어 인명 피해로 이어지는 사례가 반복적으로 발생함에 따라 현행 시스템의 기술적 보완과 새로운 방식의 제연시스템의 개발 필요성을 오래 전부터 고민해왔다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하고 급기가압 제연시스템의 성능을 새로운 관점에서 개선하고자 계단실을 풍도로 활용하는 급기가압 제연시스템을 제안하고 실증 실험과 전산해석을 병행하여 적응성을 정량적으로 검증하였다. 이를 위해 리빙랩 환경을 공동주택 형태로 구축하고, 다양한 화재 시나리오를 설정하여 실제 건축물에서 발생할 수 있는 상황을 가정하여 실험을 수행하였다. 실험에서는 TAB 기준을 충족하는 것을 전제로 출입문 동시 개방 수 2개 층부터 12개 층 이상의 출입문을 동시에 개방하는 기준까지 차압 유지 및 방연풍속 확보 여부를 검증하였다. 제안된 시스템은 기존과 달리 계단실 자체를 급기 풍도로 활용하는 방식으로 별도의 수직 덕트를 설치하지 않고도 효율적인 압력 분포와 공기 흐름을 확보할 수 있는 구조적 이점을 가진다.

실험 결과 12개층 이상의 출입문이 개방되어도 평균 방연풍속 0.79 m/s, 비개방 차압 28~60 Pa 범위로 유지되어 NFPA 501A에서 요구되는 성능 기준을 모두 만족함을 검증하였다. 이는 실제 화재 발생 시 재실자의 안전한 피난 경로 확보에 큰 기여를 할 수 있는 결과로 해석된다.

또한, CONTAM과 SolidWorks Flow Simulation을 활용하여 계단실과 부속실 내의 공기 유동 경로 및 압력 분포를 시각화하고, 실제 실험 조건을 기반으로 한 정밀한 전산 해석을 수행하였다. 이를 통해 공기의 흐름 방향성, 차압 변화, 연돌효과의 유무에 따른 영향 등을 정량적으로 분석할 수 있었고, 실험 결과와의 높은 상관성을 확보함으로써 시뮬레이션 기반의 타당성을 함께 입증하였다.

결론적으로 본 연구는 단순히 기존 기준을 만족시키는 수준을 넘어 실제 현장에서 발생 가능한 Worst 조건에서도 안정적인 제연 성능을 유지할 수 있는 새로운 급기가압 제연시스템을 실증적으로 제시하였고, 향후 본 연구 결과가 소방의 기술 향상에 크게 기여할 것으로 기대하는 바이다.

금속발열 필름히터를 이용한 배관 동결방지시스템 개발

오미라*·최규출·강현찬·오흥규
*(주)스마일이앤지 기술연구소

Development of a pipe freezing prevention system using a metal heating film heater

Mira Oh**·Kyuchool Choi·Hyunchan Kang·Heunggyoo Oh
*SMILE E&G Co.,Ltd.,†Corresponding author: kcc5407@daum.net

특정소방대상물은 소방시설법에 따라 소방시설을 설치·관리하여야 한다. 같은 법 시행령이 정하고 있는 소방시설에는 소화설비, 경보설비, 피난구조설비, 소화용수설비 등이 있다. 수계 소화설비는 최근 급격하게 발생하는 지하 공간의 전기자동차 화재에 적합한 최적의 소화약제로 주목받고 있다. 물 소화약제가 영하로 떨어지는 겨울철에도 사용될 수 있는 동결방지시스템 설계요건을 분석하여 연구 개발하였다.

배관 동결방지시스템 설계 조건으로 다음 두 가지를 적용하였다. 첫 번째는 히터에서 발생하는 열과 균일도이다. 열을 발생시키는 발열체는 지금까지 저항이 큰 텅스텐이 주로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 기존 텅스텐 발열체보다 저항 열이 크고, 수명이 반영구적인 스테인리스 스틸을 히터의 발열체로 사용하였다. STS 금속을 발열체로 사용해도 충분한 열량이 발생하였고, 히터 수명이 반영구적으로 늘어나는 연구 결과를 얻었다. 두 번째 조건으로는 히터의 설치간격을 찾기 위해 배관 환경별로 시뮬레이션을 통하여 배치 간격을 설계하였다. 간격이 멀어지면 설치비용이 증가하기 때문에 시뮬레이션을 통하여 설치 간격을 결정하였다. 영하 20℃ 상태의 냉동창고에서 현장 실험으로 시뮬레이션 설치간격을 검증하여 완성하였다. 최적 거리는 배관 지름에 따라 달라지나 25미터 간격으로 설치한 경우 배관 내 소화수가 빙점 이하로 떨어지지 않음을 확인하였다.

겨울철 소화 용수가 동결되지 않도록 배관 열선 처리로 동결 방지 효과가 충분함을 확인하였다. 현재 주로 설치되고 있는 메탈히터보다 가격이 저렴한 저가형 금속발열체를 적용한 필름히터가 경제적이고, 기술적 측면에서도 효과가 높은 것을 확인하였다. 겨울철 지하 주차장 동결 우려로 수계소화설비 설치가 제한되던 습식 소화설비에 적용한다면 공동주택 지하공간 화재 진압에 도움이 될 것으로 기대한다.

Keywords: Freezing, Metal heating element, Fire suppression equipment, Thermal uniformity.

* 이 논문은 2024년도 중소벤처기업부(중소기업기술정보진흥원)의 중소기업기술혁신개발사업(시장확대형-상생협력) 및 한국토지주택공사 협력사업으로 지원된 연구과제임(과제번호:S3430603)

소방배관 시스템의 소화성능 확보를 위한 배관 부식사례 및 개선방안

최두찬·임정삼·김상일*·이정훈†**
 한방유비스(주)·*한국소방기술사회·**한국소방기술사회

Pipe corrosion cases and improvement measures to secure fire
 extinguishing performance of fire piping system

Lim Jung Sam·Kim Sang Il*·Lee Jung Hoon†**
 UBIS·*KSFPE·**KSFPE
 †Corresponding author: fperrr88@naver.com

물을 사용하는 수계소화설비의 부식은 화재진압 실패로 이어지는 치명적인 결함이며, 수계소화설비의 각 구성요소의 부식현상을 살펴보겠다.

특히, 소화배관(아연도강관 부식 13년)에서 부식이 발생되면, 마찰손실증가로 인한 방사압 감소로 노즐에서 규정 방사압과 유량을 확보할 수 없다.

소화수조 내부의 소화수원의 사수 발생시 오염된 소화용수가 스프링클러 배관에 부식을 발생시켜 스프링클러 노즐 오리피스가 막힐 우려가 있으며, 소화펌프는 경년변화에 따라 모터, 펌프몸체, 임펠러등에서 부식이 발생한다.

밸브 및 유수검지장치 장치에서의 부식은 밸브 개폐의 문제점, 완전개방 및 완전폐쇄불가 유수검지장치가 고착되어 작동하지 않을 수 있다

소화설비의 부식을 방지하기 위한 하드웨어적 대책으로 비파괴검사를 통한 소방배관 건전성 검사, 방사선을 통해 배관내부의 침전물 상태를 확인하는 감마스캔, 초음파검사, 내시경 검사, 주기적인 청소, 사수방지시스템 설치등이 있으며, 국내도 해외점검관련 법령등을 도입하여 관련규정을 제도화시켜 소화배관의 건전성 확보가 필요하다.

석유화학 플랜트 화재안전 강화를 위한 스마트 모니터링 및 자동방수 시스템 연구

최한빛·오수민·최두찬[†]
한방유비스(주)

Research on smart monitoring and automatic waterproofing system to enhance fire safety in petrochemical plants

Han Bit Choi·Su Min Oh·Doo Chan Choi[†]
KF UBIS CO., Ltd

[†]Corresponding author: cdc4111@kfubis.com

석유화학 플랜트는 인화성 및 폭발성 물질을 다량 취급하는 특성상 화재 발생 시 막대한 인명 및 재산 피해를 유발할 가능성이 높다. 따라서 효과적인 화재 예방 및 신속한 초기 진압 시스템 구축은 플랜트 안전 관리의 핵심 과제다. 본 연구는 석유화학 플랜트의 화재 안전을 강화하기 위해 스마트 모니터링 시스템과 자동 방수총 시스템을 결합한 새로운 화재 대응 방안을 제시한다.

제안 시스템은 화재 발생 시 스마트 모니터링을 통해 화재 발생 지점과 가장 중심이 되는 영역을 ‘그룹 1’으로, 그 인근 주변 영역을 ‘그룹 2’로 자동 구분한다. 이후 중앙 관제 시스템에서 사전에 입력된 시나리오에 따라 자동 방수총이 화재 진압 및 확산 방지 활동을 수행한다. ‘그룹 1’ 영역에는 화원에 직접적으로 타격하는 봉상주수 방식을 적용하여 신속한 화점 제압을 시도하며, ‘그룹 2’ 영역에는 적상주수를 통해 화원 주변으로의 연소 확대를 효과적으로 방지하는 데 중점을 둔다.

이러한 자동화된 스마트 화재 대응 시스템은 화재 초기 단계에서의 신속하고 정확한 대응을 가능하게 하여 화재 규모 확대를 최소화할 수 있다. 더불어, 근로자들이 화재 현장에 직접 접근하는 위험을 줄이고 안정적인 피난 경로를 확보함으로써 근로자의 피난 안전성을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 석유화학 플랜트의 안전성을 높이고 중대 산업재해를 예방하는 데 기여할 수 있는 실질적인 대안을 제시한다는 점에서 의의를 가지며, 국내외 석유화학 플랜트의 화재안전 기술에 대한 기존 연구들과 더불어, 실물 화재 실험을 통해 제안 시스템의 실효성을 검증하는 후속 연구가 진행될 예정이다.

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA163162).

물류시설 화재안전성 강화를 위한 개선 기준 및 지침안의 설계적용 연구

주유빈·김경호·최두찬[†]
한방유비스(주)

A Study on the Design Application of Improved Fire Safety Standards and Guidelines for Logistics Facilities

Yu Been Joo·Kyung Ho Kim·Doo Chan Choi[†]
KF UBIS CO., Ltd

[†]Corresponding author: cdc4111@kfubis.com

E-Commerce 시장의 확대와 함께 물류시설의 고밀도화 및 대형화가 가속되면서, 화재 발생 위험성 또한 증가하고 있다. 이에 따라 물류시설의 특성을 반영한 체계적인 화재안전 관리 기준의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구는 「물류시설 화재안전성 및 위험도 관리 기술 개발」 과제의 일환으로, 물류시설 내 주요 화재위험요소를 개선하기 위해 도출된 15개의 기준 및 지침안을 분석하고, 이 중 설계 적용이 가능한 항목에 대한 사례연구(Case Study)를 수행하고 있다.

도출된 기준 및 지침안은 피난 및 인명안전, 방화 및 차단설계, 배연설비 설계, 기존 시설의 성능개선, 화재위험 평가 및 관리 등 주요 화재안전 분야를 포함하고 있으며, 설계 전반에 걸쳐 적용 가능한 기술 요소를 제시하고 있다. 사례연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 각 기준의 설계 적용 가능성을 분석하고, 둘째, 기존 설계와 비교하여 화재확산 방지 및 피난안전 확보 측면의 개선 효과를 평가하며, 셋째, 개선안 적용 시의 비용을 검토하고, 넷째, 장기적으로 실효성 있는 기술기준으로의 고도화 방향을 제시하는 것이다.

현재 피난, 방화, 배연, 냉동창고 화재대응시설 등을 중심으로 실제 물류시설의 설계안에 기준을 적용하는 가능성을 검토 중이며, 기준 적용 전·후의 설계 변화와 화재안전성 향상 정도에 대한 정량적·정성적 분석을 병행하고 있다. 현장 여건에 따라 기준 적용의 제약요소도 일부 존재하며, 이에 대한 개선방안 도출 역시 병행하고 있다. 본 사례연구는 실제 설계 적용 가능성을 중심으로 도출된 기준의 실효성을 입증하는 데 중점을 두고 있다.

본 연구는 향후 물류시설의 설계 및 인허가 과정에서 활용 가능한 기술기준 마련에 기여하고, 개선 기준의 실효성과 적용 가능성에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00156237)

로봇 투입 장소 선정을 위한 수요자 인식조사 및 요인 분석

김경민·방장원*·손은수^{†**}
한방유비스(주)·호서대학교·**한방유비스(주)

A Study on User Perception and Factor Analysis for Selecting Robot Deployment Locations

Kyeong Min Kim·Jang Won Bang*·Eun Soo Son^{†**}

Korea Fire Protection UBIS CO., Ltd.*Hoseo University**Korea Fire Protection UBIS CO., Ltd

[†]Corresponding author: ses6856@kfubis.com

본 연구는 소방대원을 대상으로 인식조사 및 요인 분석을 수행하여, 소방용 4족 보행 로봇의 투입 장소를 선정하기 위한 기초자료를 도출하는 것을 목적으로 하였다. 설문에 응답한 소방대원의 직종은 구조대원 28.7%, 화재진압대원 20.7%, 지휘관 9.2%, 기타 직종 41.4%로 구성되었으며, 근무경력은 10년 이하가 50.6%로 대부분 현재 현장직에서 근무하는 인원들로 구성하였고, 11년 이상이 49.4%로 현장 지휘 대원 위주로 구성하여 조사되어, 대상자의 현장 경험 및 전문성이 충분하다고 판단된다.

소방활동에 로봇이 참여하는 것에 대한 전반적인 인식에서는 응답자의 92.9%가 긍정적인 반응을 보였으며, 4족 보행 로봇이 화재 현장에 투입되어 작업을 보조하는 역할에 대해 기대하는 응답이 다수를 차지하였다. 특히, 로봇의 활용이 기대되는 주요 작업으로는 화재현장 내 위험물질 탐지 및 제거, 불꽃 및 열원에 대한 대응, 현장 환경 모니터링, 인명 구조 지원 등이 제시되었다.

로봇의 투입이 적합하다고 판단되는 장소에 대한 응답 결과, 대형 물류창고(36.6%), 지하시설물(35.5%), 대형 지하주차장(23.3%)이 상위 3순위로 나타났으며, 이들의 합계 비율은 95.4%로 집계되었다. 이는 해당 시설들이 대형 화재로 발전할 가능성이 높고, 소방대원에게 높은 위험을 초래할 수 있는 환경임을 반영하는 것으로 해석된다.

또한, 작업환경이 혹독한 시설물 유형에 대한 추가 설문에서는 위험물 저장 및 처리시설, 지하주차장, 공장, 창고시설에 대해 각각 15% 이상의 응답 비율을 보이며, 이들 시설에 로봇을 투입해야 한다는 수요가 다수 존재하는 것으로 나타났다.

더불어, 각 시설물의 위험요소에 대한 후속 조사를 통해 건축물의 용도에 따라 소방대원이 경험하는 작업환경 악화 요인이 상이하게 도출되었으며, 이는 로봇의 역할과 요구 기능이 시설물 특성에 따라 달라질 수 있음을 시사한다.

* 본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술평가관리원 재난 및 위험작업 현장 근로자의 사고방지를 위한 안전 로봇 기술 개발 연구사업(20026194)의 연구비 지원으로 수행된 연구임

상업용 주방 덕트의 열화상카메라 이용한 화재감지 시스템 연구

이생곤
동양미래대학교

A Study on the Fire Detection System Using Thermal Imaging Cameras in Commercial Kitchen Ducts

LEE SAENG-GON
Dong-Yang Mirae University

2018년 2월 신촌의 한 대형병원 푸드코트에서 화재가 발생하였는데 덕트에 늘어붙은 기름 찌꺼기에서 화재가 발생을 하며 순식간에 화재가 퍼져나갔다. 병원내에는 400여명의 입원환자가 있었지만 다행히 인명 피해는 없었다. 이외에도 2024년 여의도 지하 식당가 화재, 2025년 성남시 복합상가 화재 모두 음식점에서 화재가 시작하여 덕트를 통해 화재가 확산된 사례들이다. 최근5년간 음식점에서 조리중 발생한 화재는 해마다 평균 2,600여건 이상발생을 하는데 대부분이 부주의에 의한 화재발생이다. 이렇게 화재가 발생하게 되면 상부 후드와 덕트를 통해 건물 전체로 확산되는데 이는 덕트 내 기름때와 먼지가 쌓이며 쉽게 착화되기도 하고 덕트가 건물 곳곳을 연결하고 있어 화재확산통로가 되기 때문이기도 하다. 이러한 덕트 화재를 막는 방법으로 방화댐퍼를 설치하는 것이다. 2021년 8월 7일부터 방화댐퍼는 그동안 사용했던 열퓨즈 방식의 방화댐퍼는 사용이 금지가 되었고, '건축물의 피난·방화 구조등의 기준에 관한 규칙'에 의하면 화재로 인한 연기 도는 불꽃을 감지하여 자동적으로 닫히는 구조로 하라고 나와있다. 다만, 주방 등 연기가 항상 발생하는 부분에는 온도를 감지하여 닫히는 구조로 할 수 있다고 규정하고 있다. 이러하듯이 주방 등에는 항상 음식을 조리하는 환경 특성 때문에 연기감지기를 설치하게 되면 빈번한 비화재보가 발생하게된다. 그래서 상업용 주방 덕트 내부 화재의 효율적인 감지를 위하여 평상시 내부 온도를 측정하여 감시하고 화재시 급격한 온도 상승에 따른 온도차를 이용한 화재 판단기능과 작업자가 설정한 온도에서 화재를 감지하는 두 가지 기능을 모두 만족시키고자 열화상카메라를 이용한 화재감지를 제안하였다. 더구나 상업용 주방같은 경우에는 일반 가정용 주방과 달리 상시 고온의 화열을 다루는 작업적 환경 특성상 설정된 온도에서 작동하는 정온기능이 필수적이기 때문이다. 그리고, 덕트 전용연기감지기는 튜브를 통한 기류를 검출하여 공기흡입형 감지기(VESDA)와 같은 에어샘플링방식으로 인식하는 감지기인데, 중식당이나 패스트푸드점, 대형 쇼핑몰의 푸드코트는 기름을 많이 사용하는 음식을 조리하기 때문에 덕트내에 기름때가 끼는데 이때 연기감지기 튜브에 기름때로 인해 감지기 튜브폐쇄가 일어나면 화재확산에 의한 덕트 내부 연기감지를 하는 기능이 저하된다. 열화상카메라는 열에너지 차이를 이미지로 생성하여 즉각적인 반응을 보여주기 때문에 덕트전용연기감지기보다 반응속도 면에서도 효과적이다. 금번 실험에서는 실제 주방에서 사용하는 덕트를 직접 제작하여 덕트 내부에 기름때를 형성하여 화재 확산시 열화상카메라에 보여주는 이미지를 통해 방화댐퍼와 연동을 하거나, 주방화재를 소화하는 등으로 연동할 수 있도록 실험을 진행하였다.

실험을 한 결과 기름으로 인한 순식간에 확산되는 덕트 내부 온도변화를 열화상카메라는 빠른 시간내에 감지하여 반응을 보였다. 화재 감지시스템을 구성함에 있어 초기에 감지하여 빠른 소화와 덕트로 인한 화재 확산을 막는데 열화상카메라 통해 알아본 실험을 통한 결론을 도출할 수 있었다.

군용화약류 수출입 운송을 위한 위험물 분류 체계의 국제 표준 부합화 방안

나현빈* · 고권현*

명지대학교 화학공학과 · *동양대학교 스마트안전시스템학부

Harmonization of Military Explosives Classification with International Standards for Transport and Trade

Hyon Bin Na[†] · Gwon Hyun Ko^{*}

Department of Chemical Engineering, Myongji University · *School of Smart Safety System, Dongyang University

[†]Corresponding author: hyonbin@mju.ac.kr

군용화약류인 폭발물의 안전한 취급 및 운송을 위해서는 명확한 분류 체계와 적절한 안전 지침이 필수적이다. 우리나라의 군용 폭발물 분류 체계는 「총포·도검·화약류 등의 안전관리에 관한 법률」과 「방위사업법」에 기반하고 있으나, 국제기준에 비해 세부 분류가 부족하고 방위산업체를 위한 명확한 지침이 미비하다.

본 연구는 UN 「위험물 운송에 관한 권고사항(RTDG)」, 「국제해상위험물규칙(IMDG Code)」, 「국제민간항공기구(ICAO) 기술지침(Doc 9284)」 등 국제 기준과 미국, NATO, 영국 등 주요 선진국의 분류 기준과 비교·분석을 통해 우리나라 분류 체계의 문제점을 진단하였다. 연구 결과, 국내 군용 폭발물 분류 체계는 국제 기준과 구조적으로 유사한 틀을 가지고 있으나, 세부 분류와 최신 개정 내용 반영에 한계가 있는 것으로 나타났다. 예를 들어, UN RTDG는 총 376종의 폭발물을 여섯 개 세부 Division(1.1~1.6)으로 분류하고 있으나, 국내 기준은 그 중 일부만 포함하고 있어 포괄적 기준으로 보기 어렵다. 또한, 미국 국방부의 DESR 6055.09나 NATO의 AASTP-3와 같이 방위산업체에 적용이 가능한 세부 지침이 마련된 선진국들과 달리, 국내에는 방위산업체에 적용이 가능한 공식 분류 체계가 부재한 실정이다.

이에 본 연구는 국제기준을 반영하여 우리나라 군용 폭발물 분류 체계의 개선을 위해 (1) 군용 폭발물 분류에 대한 법적 근거 명확화, (2) UN RTDG 기반의 세부 분류 기준 명시적 채택, (3) 방위산업체에 적용이 가능한 공식 지침서의 마련을 제안한다. 이러한 개선을 통해 우리나라 방위산업체가 군용화약류를 국제기준에 맞게 제조·저장·운송·수출할 수 있도록 지원할 수 있을 것으로 기대한다.

냉장·냉동창고 화재대응시스템의 실증적 성능평가 연구

이종규·이재문·사재천·민세홍[†]
가천대학교

Experimental Performance Evaluation of Fire Response Systems in Refrigerated Storage

JongGyu Lee·JaeMoon Lee·Jaecheon Sa·SeHong Min^{†**}
Gachon University

[†]Corresponding author: shmin@gachon.ac.kr

최근 냉장·냉동창고에서의 화재 발생 빈도와 피해 규모가 증가함에 따라, 저온 환경에 적합한 화재안전시스템의 신뢰성과 작동 가능성 확보가 시급한 과제로 부상하고 있다. 특히 수계 소화설비는 배관 내 잔수의 결빙 및 오작동 등으로 인해 화재 시 정상 작동이 어려워, 이를 보완할 수 있는 대체 시스템의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 그럼에도 불구하고 현행 「화재안전기술기준(NFTC 103, NFTC 609 등)」은 극저온 환경의 특수성을 충분히 반영하지 못하고 있으며, 냉동시설에 적용할 수 있는 스프링클러 시스템의 설계 및 운영 기준 또한 구체적으로 제시되어 있지 않은 실정이다.

이에 본 연구는 저온 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 화재대응시스템을 제안하고, 그 성능을 실험 및 시뮬레이션을 통해 실증적으로 검증하고자 하였다. 이를 위해 총 3가지 성능평가 시나리오를 구성하였으며, 실제 냉동창고의 제원을 바탕으로 유사한 구조 및 환경 조건을 갖춘 성능검증장에서 실증 실험을 수행하였다. 각 시나리오에 맞춰 설치된 화재대응시스템을 통해 준비작동식 스프링클러의 감지기 작동 후 소화수 방출 지연에 따른 배관 내 결빙 발생 시점과, 배관 시스템의 동결 주요 위치를 확인하였다. 또한, 화재 시뮬레이션을 활용하여 표준형 스프링클러 헤드와 조기반응형 헤드의 반응 속도를 정량적으로 비교 분석하였다.

실험 결과, 감지기 작동 후 15분 이내에 소화수가 방출되지 않을 경우 배관 내 결빙이 발생하여 시스템 작동 실패 위험이 급격히 증가하는 것으로 확인되었으며, 배관을 실제로 분리하여 점검한 결과, 벽체 관통부에서 응축수가 다량으로 누적되는 현상을 확인하였다. 또한, 냉장·냉동창고 화재시뮬레이션을 통해 조기반응형 스프링클러 헤드가 표준형헤드에 비해 더 낮은 온도에서 빠르게 작동하며, 화재 초기 확산 단계에서 효과적인 억제력을 발휘하는 것으로 분석되었다.

본 연구는 냉장·냉동창고에 적응성 있는 화재대응시스템의 구성과 작동 특성을 실증적으로 검토하고, 이를 통해 현행 화재안전기준의 적용 한계를 보완할 수 있는 기술적 개선방안을 제시하였다. 향후 본 연구 결과는 냉동창고 등 특수 환경 시설의 화재안전성 확보를 위한 설비 설계 기준 마련, 유지관리 매뉴얼 제정, 관련 법령 개정 등 다양한 정책적 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글 : 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(RS-2022-00156237)

고온 환경에서 구조물 응력 변화와 거동 분석

안승민·사재천*·이재문*·민세홍†**
가천대학교

Analysis of Structural Stress Variation and Behavior in High-Temperature Environments

SeungMin Ahn·JeaChun Sa*·JaeMoon Lee*·SeHong Min†**
Gachon University

†Corresponding author: shmin@gachon.ac.kr

건축 구조물은 화재와 같은 고온 환경에 노출될 때 구조적 안전성을 급격히 상실할 수 있다. 철골과 콘크리트는 대표적인 구조 재료로서 고온에 취약한 특성을 가지며, 이로 따라 화재 상황에서는 급격한 열팽창, 강도 저하, 구조 변형 등이 발생한다. 그러나 실제 구조물이 고온에 노출되었을 때의 거동과 응력 변화 양상을 정량적으로 분석한 연구는 아직 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 철골 및 콘크리트 구조물을 대상으로 고온 환경에서 열-구조 연성 해석을 수행하여 구조적 취약성과 대응 방안을 도출하고자 한다.

고온 환경에 노출된 건축 구조물은 열팽창, 재료 강도 저하, 열응력 집중 등 복합적인 요인으로 인해 구조적 안정성이 전반적으로 약화한다. 특히 화재와 같은 급격한 온도 상승이 발생하는 환경에서는 철골과 콘크리트 구조물의 기계적 특성이 크게 변하며, 좌굴, 처짐, 파단 등의 위험이 동반된다. 본 연구는 철골 및 콘크리트 구조물을 대상으로 열-구조 연성 해석을 수행하여 고온 환경에서의 구조적 응력 변화 및 변형 거동을 정량적으로 분석하였다. 해석 과정에서는 고온 노출에 따른 물성 변화와 열전달 특성을 반영하였고, 부재의 경계조건과 하중 조건을 고려하여 응력 분포 및 구조 성능 저하 경향을 평가하였다.

시뮬레이션 결과, 구조물은 일정 온도를 초과하면 안정성이 현저히 저하되는 임계 조건을 가지며, 이에 따른 국부 손상 및 전체 구조 계의 연쇄 반응 가능성이 존재함을 확인하였다. 특히 단일 부재의 열적 약화가 인접 부재 및 접합부까지 영향을 미쳐 구조 시스템 전체의 불균형을 초래할 수 있음이 분석되었다. 이를 통해 고온 환경에서는 전체 구조 계의 연성, 안정성, 파괴 등 모두를 종합적으로 고려한 대응이 필요함을 시사하였다.

이러한 연구 결과는 고온 환경에서의 구조물 성능 예측 및 내화 설계 기준 마련에 실질적인 기초자료로 활용될 수 있다. 아울러 고온 노출이 예상되는 구조물에 대한 사전 위험 평가, 부재별 보강 계획, 접합부 내화 처리, 피난 동선 확보 등 다양한 대응 전략 수립에도 적용이 가능하다. 본 연구는 고온 대응 구조 설계 및 재난안전 기술 개발에 있어 과학적 근거를 제공할 수 있으며, 복합건축물, 산업시설, 자원순환시설 등 고위험 시설물에 대한 구조 안정성 확보에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

냉동창고 화재 안전성 강화를 위한 기술기준 및 매뉴얼 확립 방향 고찰 - 공기흡입형 감지기를 대상으로 -

주민연·이종규·민세홍[†]
가천대학교

A Study on the Establishment Direction of Standards and Manual for Reinforcing Fire Safety in Cold Storage Focusing on Air Sampling Detector -

Ju Min-eon·Lee Jong-gyu·Min Se-hong[†]
Gachon University

[†]Corresponding author: shmin@gachon.ac.kr

냉동창고 화재가 지난 5년간(2020~2024) 매년 70건 이상 발생하고 있으며, 이 과정에서 많은 재산 및 인명피해를 야기하였다. 화재 확산의 위험이 큰 냉동창고의 피해를 최소화하기 위해서는 초기 화재 감지 및 진압이 필수적이다. 하지만 냉동창고는 저온 환경 특성상 화재대응시설의 성능을 확보하는 데 한계점을 가진다. 특히 냉동창고에 설치되는 공기흡입형 감지기는 결로, 감지 성능 저하, 샘플링 파이프 늘어짐 등이 발생한다.

본 연구에서는 공기흡입형 감지기를 대상으로 현장 조사 및 성능평가를 진행하여, 냉동창고 내 공기흡입형 감지기 설치 및 유지관리 시 요구되는 조건을 도출하였으며, 그 내용은 아래와 같다.

- 1) 저온 환경 내 공기흡입형 감지기의 경보임계값은 상온 조건에서보다 민감하게 설정한다.
- 2) 공기흡입관은 저온 환경에 의해 늘어지지 않도록 지지대, 와이어, 클립 등을 설치한다.
- 3) 공기흡입관과 감지기 본체 사이에 배수장치를 설치하여 응축수로 인한 고장을 방지한다.

현재 냉동창고는 자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재안전기술기준(NFPA 203)에서 '고온도 및 저온도로써 감지기의 기능이 정지되기 쉽거나 유지관리가 어려운 장소'에 해당하여, 감지기 설치 제외 대상이다. 앞서 언급한 바와 같이, 냉동창고는 화재를 초기에 감지할 수 있는 감지기 설치가 필수적이다.

따라서 성능평가를 수행한 내용을 토대로 저온 환경에서 공기흡입형 감지기의 성능 확보 방안을 위와 같이 도출하였으며, 이를 기반으로 자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재안전기술기준(NFPA 203) 및 창고시설의 화재안전기술기준(NFPA 609) 등 기준 개정안 및 매뉴얼을 확립하였다.

건축법 개정에 따른 방화댐퍼 적용 방안 고찰

송성범[†]·임태섭
벨리모서울(주)

Consideration of the application of fire damper according to the revision of the Building Act

Sungbum Song^{†**}·Taesub Lim
Belimo seoul, Ltd.

[†]Corresponding author: sbsong@belimoseoul.com

2017년 12월 발생한 제천스포츠센터 화재와 2018년 1월 발생한 밀양 세종병원 화재는 많은 인명 피해가 발생한 최악의 참사였다. 특히 화재 지점과는 동떨어진 곳에서 많은 인명 피해가 발생했고, 원인으로서는 건물 내 공조 또는 환기용으로 설치된 덕트가 화재 시 연기 확산의 통로가 되었고, 방화구획마다 설치되어 있는 방화댐퍼가 제 역할을 발휘하지 못해서 피해가 커졌다. 이에 대한 개선 방안으로 2019년 8월 6일 건축법이 개정되었고, 2년간의 유예기간을 거쳐 지난 2021년 8월 7일 개정된 건축법이 시행되었다. 법 개정 주요 내용은 방화댐퍼가 동작하는 기준을 변경한 내용과 방화댐퍼에 대한 성능 기준을 규정한 것이다. 최소한의 기준만 규정하고 있으므로 개정된 건축법에 따른 방화댐퍼를 적용하기 위해서는 법 개정 취지에 맞는 방식과 운영상의 문제점 등을 고려하여 검토되어야 한다.

건물의 화재 중 많은 비중을 차지하는 것이 전기로 인한 것이다. 이 경우 정전을 동반하는 경우가 많으므로 화재 시 방화댐퍼의 전원 공급이 차단되어도 방화구획을 차단할 수 있는 방식이 적용되어야 한다. 미국, 유럽 등 방화댐퍼의 모터에 대한 글로벌 표준은 'spring-return 방식' 이다. 덕트를 통해 연기가 확산되는 것을 방지하기 위해 법 개정이 이루어졌으므로, 방화댐퍼 차단에 대한 기준은 덕트형 연기감지기를 적용하는 것이다. 이 경우 먼지 등을 연기로 오인하여 감지기가 동작하는 경우가 발생할 수 있다. 연감지기 오동작에 대한 해결 방안도 검토되어야 한다. 방화댐퍼의 오동작으로 인해 설비적인 문제가 발생할 수 있는 경우 해당 방화댐퍼는 중앙에서 감시/제어가 가능한 통신형 제품으로 검토되어야 한다. 통신형을 적용해야 하는 경우와 로컬형을 적용해야 하는 경우에 대한 기준 검토도 필요하다. 개정된 건축법 상에 방화댐퍼의 성능 기준을 정하고 이에 따라 적용되는 방화댐퍼는 적합한 시험성적서를 가지고 있어야 한다. 시험성적서의 종류와 적용 가능한 범위에 대한 이해가 필요하다.

본 발표는 개정된 건축법에 따른 방화댐퍼를 건물에 적용할 경우 법에는 규정되어 있지 않지만 반드시 고려해야 할 항목들에 대한 기준을 제시하고, 개정된 법 개정의 취지에 맞게 방화댐퍼가 적용될 수 있도록 하는데 목적을 두고 있다. 이를 기준으로 방화댐퍼 제어 도면에 대한 표준을 제시하고, 세부 법령을 검토할 때 기준 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

방화댐퍼 적용 사례를 통한 앞으로의 나아갈 방향 고찰

송성범[†]·임태섭
벨리모서울(주)

Consideration of the future direction through the application of fire damper

Sungbum Song^{†**}·Taesub Lim
Belimo seoul, Ltd.

[†]Corresponding author: sbsong@belimoseoul.com

2021년 8월 법 시행이후 지난 4년간 국내 여러현장에 개정된 건축법 기준에 따른 다양한 방식으로 방화댐퍼가 적용되었다. 글로벌 표준과는 다른 방식의 방화댐퍼가 적용된 사례, 방화댐퍼 성능을 규정한 시험성적서와 다른 방화댐퍼가 설치된 사례, 건축비 이슈로 무조건 로컬형으로만 설치한 사례 등 무수히 많은 건물에 적합하지 않는 방화댐퍼가 설치되었다. 법 개정 취지에 따르지 않는 구체적인 사례를 살펴 보고 이에 대한 올바른 방향이 검토되어야 한다.

구미 지역 A 프로젝트 사례를 통해 시험성적서에 대한 잘못된 해석으로 인한 적합하지 않는 방화댐퍼가 적용될 수 있고, 이는 건축법에서 규정하고 있는 성능 인증을 만족하지 못하는 사례로 준공 시 제출해야 하는 방화댐퍼 품질확인서를 발급할 수 없는 문제가 발생하게 된다.

송도 지역 B 프로젝트의 사례를 통해 다양한 종류의 성적서가 준비되어 있지 않아서 실제 요구되는 기준과 다르게 적용되었을 때 발생되었던 문제점을 살펴보고, 또한 시험성적서를 발급받은 제품이어도 내구성에 대한 부분은 어떻게 보증할 것인가에 대한 문제점도 살펴봐야 함을 알 수 있다.

김해 지역 C 프로젝트의 경우 욕실에 적용되는 원형 방화댐퍼가 시험성적서는 있는데, 내구성 문제로 시운전 단계에서 30% 가까운 물량을 교체해야 하는 문제가 발생하였다. 또한 각형 방화댐퍼의 경우 모터 고장으로 인해 시운전이 원활하지 않았던 문제가 발생하였다.

이와 같이 법 개정에 대한 취지를 살피고, 이에 적합한 제품이 적용되지 않으므로 인해 현장에서는 제품 교체, 재 설치 등 시운전 단계에서의 불편함 뿐 아니라, 준공 이후 설치된 방화댐퍼가 성능을 유지하여 화재 발생 시 제 역할을 할 수 있을지에 대한 의구심을 갖게 된다.

본 발표는 개정된 건축법에 따라 여러 현장에 방화댐퍼가 적용되었던 사례를 살펴보고, 반드시 검토되어야 할 항목들에 대한 기준을 제시하고, 법 개정 취지에 적합한 방화댐퍼가 설치될 수 있게 기준을 제시하고, 또한 글로벌 표준에 따른 방화댐퍼에 대한 정기 점검 및 점검 방법에 대한 기준도 함께 제시하여 프로젝트 진행 시 기준 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

전기차 화재에서 연기 차단막 길이와 천장 높이 비율이 연기 이동 및 화재 거동에 미치는 영향에 대한 수치 해석 연구

이영만^{*}·이병권·HA THIEN KHIEU
화재예방안전연구소-올라이트라이프(주)

Numerical Study of the Effect of Smoke Barrier Length Relative to Ceiling Height on Smoke Movement and Fire Behaviour in Battery Electric Vehicle Fires

Young Man Lee^{**}·Byung Kwon Lee·HA THIEN KHIEU
Fire Prevention System Institute, Alllifelife Co. Ltd
^{*}Corresponding author: ymlee@alllifelife.com

폐쇄된 주차장에서의 화재 안전은 특히 배터리 전기차(BEV)의 채택 증가와 함께 점점 더 중요한 문제로 대두되고 있습니다. BEV와 관련된 화재는 전통적인 내연기관 차량과 비교하여 독특한 도전 과제를 제시하는데, 이는 주로 높은 열 방출률(Heat Release Rate, HRR)과 배터리 화재와 관련된 연소 시간이 길다는 특성 때문입니다. 이 연구는 폐쇄된 주차장에서 BEV 화재 시나리오에 중점을 두고 연기 차단벽의 길이가 연기 이동 및 화재 행동에 미치는 영향을 조사합니다. 천장 근처에 설치된 연기 차단벽은 연기 흐름을 제어하고 인접 지역으로의 확산을 방지하며 배기 시스템으로 연기를 유도하는 중요한 역할을 합니다. 그러나 BEV 화재에 대한 최적의 차단벽 구성은 아직 충분히 연구되지 않았습니다.

이 연구는 수치 시뮬레이션 기법, 특히 화재 동역학 시뮬레이터(Fire Dynamics Simulator, FDS)를 사용하여 연기 차단벽과 BEV 화재 동역학 간의 상호작용을 분석합니다. 시뮬레이션은 BEV 배터리 화재가 점화원 역할을 하는 전형적인 폐쇄된 주차장을 모델링합니다. 이 모델은 실험 데이터를 통해 검증되었으며, 맞춤형 시뮬레이션 모델의 개발로 이어졌습니다. 검증된 모델을 바탕으로 연기 차단벽 길이가 연기 이동 및 화재 행동에 미치는 영향을 체계적으로 조사했습니다. 연구는 크기가 7,800 x 7,800 x 3,250 mm 인 지하 주차장에서 진행되었으며, 연기 차단벽 길이는 천장 높이의 1/5, 1/4, 1/3으로 조정되었습니다.

연구 결과는 짧은 연기 차단벽(예: 천장 높이의 1/5)이 연기를 배기 시스템으로 효과적으로 유도하지 않음, 충분한 커버리지 부족으로 인해 일부 측면 확산이 발생한다는 것을 보여줍니다. 중간 길이의 차단벽(예: 천장 높이의 1/4)은 연기 채널링과 층화를 향상시키면서도 난류를 일으키지 않아 최적의 균형을 제공합니다. 반면 긴 차단벽(예: 천장 높이의 1/3)은 자연적인 공기 흐름을 방해하여 하층 지역의 가시성을 감소시키고 국소적인 연기 축적을 초래합니다. 또한 가장 긴 차단벽 길이는 연기가 고착되고 열이 축적되어 가장 높은 온도 분포를 유발합니다. 이 온도 분포 패턴은 배기 시스템 설계를 최적화하는 데 유용하게 사용될 수 있습니다.

결론적으로, 이 연구는 폐쇄된 주차장에서 BEV 화재 발생 시 연기 이동과 화재 행동을 관리하는 데 있어 연기 차단벽 길이가 중요한 역할을 한다는 점을 강조합니다. 천장 높이에 비례하여 차단벽 길이를 체계적으로 변화시킨 이 연구(1/5, 1/4, 1/3)는 더 안전한 주차 시설을 설계하고 BEV 채택 증가에 대응하는 화재 안전 표준을 발전시키는 데 중요한 통찰을 제공합니다.

화학물질관리법 검사기준 및 검사체계 개편

김종우[†]·곽솔림·김찬식·천아인·윤이
화학물질안전원

Revision of Inspection Standards and System under the Chemical Substances Control Act

Kim, Jongwoo[†] · Kwak, Sollim · Kim, Chansik · Cheon, Ain · Yoon, Yi
National Institute of Chemical Safety
[†]Corresponding author: jwoo47@korea.kr

기존 유해화학물질로 지정되면, 획일적 기준으로 관리하던 「화학물질관리법」과 「화학물질의 등록 및 평가에 관한 법률」이 유해성에 따라 인체급성, 인체만성, 생태유해성으로 지정·관리되도록 개정(24.2)되어, 시행(25.8)을 앞두고 있다. 법 개정 주요사항은 화학물질의 유해성과 취급량에 따라서 화학물질 관리법상의 영업허가, 검사 및 안전진단 주기를 차등 관리하는데 있다. 특히, 화학물질관리법 상 영업자 및 비영업자로 이원화 관리하고 있던 검사·진단 체계가 취급물질의 유해성과 취급량, 위험도에 따라 차등화된다. 그리고 검사의 기준이 되는 화학물질안전원고시인 유해화학물질 취급시설 설치 및 관리에 대한 고시도 유해성을 고려하여 차등화되었다. 여기서는, 변경된 검사체계와 검사기준을 소개하고자 한다. 주요내용으로 첫째, 유해성 및 취급량을 고려한 검사·진단체계 변경이다. 기존 화학물질관리서 위험도에 따라 4년에서 12년까지 차등화된 진단 주기가 취급량 및 위험도에 따라 정기검사 주기가 변경되고, 정기검사 4회차에 안전진단을 시행하도록 변경된다. 둘째, 유해성에 따라 차등화된 시설기준이다. 특히, 민·관·산 등 이해관계자가 함께 취급시설 전문가 협의체 논의를 통해 마련한 유해성을 고려한 차등화된 시설기준으로 급성유해성 물질은 화학사고 예방대응관리, 만성유해성 물질은 인체노출저감, 생태유해성 물질은 환경배출 최소화에 집중하였다. 셋째, 고기준의 배치는 화학사고의 전개 단계를 고려하여 사고예방, 사고저감, 피해저감 등 항목으로 구성하였다. 마지막으로 기존 9개의 세분화된 시설기준을 5개의 고시로 통합하고, 그간 현장에서 느꼈던 불편사항, 운영상 미비사항 등을 보완하여 안전과 제도 이행력을 강화하고자 하였다.

화학물질관리법에 따른 석유화학 플랜트 유해화학물질 분야 안전진단 사례

오세형[†]

한국환경공단 화학시설검사부

A Case Study on Safety Inspection in the Hazardous Chemical Substance Sector of a Petrochemical Plant According to the Chemical Substances Control Act

Sehyung Oh[†]

Korea Environment Corporation Chemical Facilities Inspection Division

[†]Corresponding author: oshyung@keco.or.kr

석유화학 플랜트는 우리나라의 대표적인 장치산업으로서 시설 규모가 크고, 공정이 복잡하여 화학사고를 유발할 수 있는 위험요인이 다른 업종에 비해 많으며, 사고 발생 시 그 피해도 막대하기 때문에 이를 최소화 할 수 있도록 철저한 안전관리가 요구된다.

화학물질관리법에서는 유해화학물질로 인한 사고를 예방하기 위해 사업장의 위험도를 가, 나, 다로 분류하고, 각각 4년, 8년, 12년 주기로 유해화학물질 취급시설에 대한 안전진단을 전문기관에 의뢰하여 실시하도록 규정하고 있다. 우리 기관은 화학물질관리법에 따라 지정된 안전진단 수행기관으로서, 2019년부터 다양한 유해화학물질 취급시설에 대한 안전진단을 수행하고 있다.

본 발표에서는 석유화학 플랜트에 대한 유해화학물질 취급시설 안전진단 사례를 바탕으로 △취급물질 위험성 △취급공정 위험성 △취급설비 위험성 △취급방법 위험성 4종류의 진단항목으로 구분하여 소개하고자 한다. 진단항목별 진단기법을 제시하고, 실제 진단 과정에서 확인된 주요 안전관리 미흡사례를 공유함으로써, 석유화학 사업장의 화학사고 위험요소 제거 및 예방에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

열매유 취급시설 사고사례 및 공정안전관리

최창열
한국산업안전보건공단

Accident cases and process safety management at facilities handling heat transfer fluid

Choi Chang Yeol

Korea Occupational Safety and Health Agency

†Corresponding author: ccy118@naver.com

최근 산업현장에서 화재 및 폭발 위험이 높은 열매유(熱媒油, Heat Transfer Fluid)를 사용하는 공정이 증가하면서, 이에 따른 중대 사고 위험성도 함께 증대되고 있다. 열매유는 높은 온도에서 운전되는 특성상 누출이나 관리 미흡 시 대형 화재로 직결될 수 있으며, 특히 폐쇄된 공간 내에서의 누유나 온도 센서 오작동 등은 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 본 발표에서는 실제 산업현장에서 발생한 열매유 관련 사고사례를 분석하고, 이를 통해 공정안전 관리요소를 체계화하여 전반적인 열매유 취급시설에 대한 안전관리 방안을 조망하고자 한다.

대표적인 사고사례로는 ○○ 공장에서 발생한 열매유 히터 폭발 사고와 △△ 공장회사에서 발생한 열매유 누유 및 폭발 사례를 들 수 있다. 이들 사례는 공통적으로 ▲열매유 증기의 누출 관리, ▲열매유 증기에 대한 점화원 관리, ▲열매유 취급설비의 구성요소 미흡, ▲주요 생산설비가 아닌 유틸리티로 공정 위험성평가 등 관리요소 부재 등의 문제가 있었다. 특히 공정 변경 후 위험성 평가가 미이행된 채 운전이 지속된 경우, 열매유 증기 발생 및 점화원에 의한 폭발 사고로 이어진 사례가 있었다.

이러한 사례 분석을 바탕으로 본 발표에서는 열매유 취급시설에서 반드시 고려해야 할 공정안전관리 요소들을 다음과 같이 제안한다. 첫째, 열매유의 물리적 특성과 분해 생성물의 위험성을 명확히 이해하고 공정안전자료에 반영해야 한다. 둘째, 위험성평가 단계에서는 열전달 유체의 최고 사용온도와 설계압력 조건에 대한 검토가 선행되어야 하며, 누출 시 화재 가능성을 중심으로 시나리오 분석이 이뤄져야 한다. 셋째, 정기적인 설비 점검 및 유지보수는 단순한 법적 요건을 넘어서 사고 예방을 위한 핵심 활동으로 인식되어야 한다.

또한, 비상시 대응계획 수립 시 열매유 취급설비의 이상 발생 시 근로자가 상주하는 장소에 이상발생 알람을 인지할 수 있도록 시스템을 갖춰 열매유 누출에 대한 상황 인식 및 신속한 비상 대응을 할 수 있도록 대처해야 한다.

결론적으로, 열매유는 효율적인 열전달 매체이지만 고위험 공정에 해당하므로, 물리적 위험성과 운전 특성을 종합적으로 반영하여 공정 위험성평가를 수행하고 적절한 안전조치 계획을 수립하여야 한다. 본 발표를 통해 관련 시설의 안전관리 수준을 제고하고, 유사 사고 재발을 방지하는 데 실질적 기여가 되기를 기대한다.

위험물 상압 저장탱크 샘플링시 위험요소와 화재·폭발 방지대책에 관한 연구

최우진*·정인희·황성범·정순원, 황승율

A Study on the Risk Factors and Fire/Explosion Prevention Measures During Sampling of Atmospheric Storage Tanks for Hazardous Materials

Woo Jin Choi*·In Hee Jung·Seong Beom Hwang·Sun Won Jung·Seung Yul Hwang
화학물질안전원

National Institute of Chemical Safety, Cheongju-si, 28164, Korea

화학공장에서 널리 사용되는 위험물 저장탱크는 대부분 상압 조건에서 액체 위험물을 보관하고 있으며, 저장탱크에서 위험물을 출고하기 전 품질 관리를 위해 탱크 상부에서 직접 샘플링을 수행하는 사례가 많다. 그러나 이러한 상부 샘플링은 인화성 증기의 누출, 정전기 유발, 작업자의 인체 정전기 방전 등으로 인해 화재 또는 폭발 사고로 이어질 위험이 상존한다.

본 연구는 국내에서 실제 발생한 화학사고 사례 조사를 바탕으로 실제 탱크시설의 샘플링 설비 구조나 샘플링 기구에 대한 분석을 진행하였으며 특히 점화원으로 추정되는 정전기 발생 메커니즘을 심층 분석하여 정전기 방전 조건과 가연성 혼합기체 형성 가능성 등을 중심으로 연구하였다. 주요 위험요소는 첫째 샘플링 기구와 저장된 유류와의 마찰, 샘플링 기구와 작업자의 접촉 및 분리에 의한 정전기 발생 및 방전, 둘째는 탱크 내부에서의 가연성 혼합기체 형성, 셋째는 탱크 내부에 불활성화 미실시(연소에 필요한 산소량(MOC) 이하로 공기를 관리) 등의 위험요소가 있다.

화재·폭발 방지대책으로 제안하는 것은 첫째 샘플링 도구와 탱크 본체를 연결하는 접지의 설치 등 정전기가 체류될 수 없는 조건을 만들어야 하며 둘째는 탱크 내부에 질소와 같은 불활성 가스를 충전함으로써 가연성 혼합기체의 형성을 방지하며 셋째는 샘플링시 원격 또는 폐쇄형 샘플링 방식을 도입 검토해야 하며 넷째는 샘플링 표준작업절차(SOP)를 수립 및 교육을 실시해야한다.

본 연구는 상압 저장탱크 상부에서의 샘플링 작업 시 발생한 실제 사고사례를 기반으로 내재된 위험요소를 제시하였고, 이를 기반으로 실효성 있는 방지대책을 제안하는 것을 목표로 작성하였다.

Keywords: 정전기, 가연성 혼합기계, 불활성화

저비점 THC 처리특성 및 안전성 시뮬레이션

구치완¹·이찬섭¹·오세현¹·마병철^{1,2*}
 전남대학교 화학공학과¹·*전남대학교 공정혁신 시뮬레이션센터²

Treatment characteristics and safety simulation of low boiling point THC

Chiwan Ku¹·Chanseop Lee·Sehyeon Oh·Byungchol Ma^{1,2*}

Dept. of Chemical Engineering, Chonnam National University¹·*Center for Process Innovation Simulation, Chonnam National University²

[†]Corresponding author: anjeon@jnu.ac.kr

국내에서 2005년도부터 대기환경보전법에 따라서 도장시설에 대한 THC(이하 Total Hydro Carbon)의 규제가 시작되었으며, 현재는 탄화수소 전체를 규제농도인 200ppm을 넘는 대상시설의 확대로 규제가 강화되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 LDPE 공정에 사일로에서 미반응된 원료인 C2계열에 Ethylene 또는 C3계열에 Propylene의 배출을 방지하기 위한 시설을 선정하기 위해 최적가용기법을 적용하여 최종적으로 RTO(regenerative thermal oxidizer)를 선정하였다. 연소방식인 RTO의 처리효율은 우수할 수 있으나 먼지, 황산화물, 질소산화물과 같은 2차 오염물질을 생성 및 폐가스의 낮은 열량으로 지속적 연료의 사용이 필요하고 내부에 인화성 가스가 항상 체류하여 폭발에 취약하다. 이에 피해 저감을 위한 다양한 방안 중 하나인 폭발 방산구(Explosion venting)를 그 방안으로 선정하여 내·외부에 형성되는 폭발 과압을 FLACS 시뮬레이션으로 도출한다. 폭발 방산구 면적(m²)을 결정하기 위해 NFPA 68을 기준으로 설정하고 폭발 방산구에 위치에 따른 내부에 형성되는 과압과 외부로 방출되는 과압의 정도를 가연성 범위인 LEL과 가장 큰 폭발 과압을 형성하는 화학양론농도로 설정하여 확인한다. 이를 통해 Ethylene과 Propylene 등 저비점 THC를 처리하기 위한 RTO 설비에서의 효과적인 폭발 방산구 설치 효과를 분석함으로써 안전 관리에 도움이 될 것으로 기대한다.

IEC 61508-6 Edition 2.0의 PFDavg 공식 개선 제안

박진형[†]·전진우^{*}·한상욱^{*}·윤효섭^{*}·박교식^{*}
한국요꼬가와전기·승실대학교

The Improvement Proposal for PFDavg Formula of IEC 61508-6 Edition 2.0

Jinhyung Park[†]·Jinwoo Cheon^{*}·Sangwook Han^{*}·Hyoseob Yoon^{*}·Kyoshik Park^{*}
Yokogawa Electric Korea^{*}·Soongsil University
[†]Corresponding author: jinhyung.park@yokogawa.com

Average probability of dangerous failure on demand (PFDavg) formula is derived in IEC 61508 edition 2.0 part 6 issued in 2010. But this formula is not consistent with the reality applied in safety instrumented function (SIF) design concept of process industry. Nowadays the safe detected failure, safe undetected failure and dangerous detected failure of sensor, logic solver and final element are designed to immediately lead to shutdown and system alarm in accordance with fail safe concept. But the PFDavg formula in IEC 61508 edition 2.0 is derived based on the condition that dangerous detected failure does not lead to shutdown for mean repair time (MRT) after failure. So the PFDavg formula shall need to be improved to suit the reality of plant. In this research, the PFDavg formula are derived by reliability block diagram (RBD) methodology considering that only dangerous undetected failure leads to accident. Common cause factor (β) and proof test coverage (PC) are included in PFDavg. The remaining two methodologies to determine result safety integrity level (SIL) like architectural constraint and systematic capability (SC) are excluded in this research. The votings discussed in this research are 1001, 1002, 2002, 2003 and 1003. The lower PFDavg will be derived by more realistic PFDavg formula than the formula in IEC 61508 edition 2.0 if new PFDavg is applied to real plant design. This new formula make the safer design and operation possible with the lower instrument investment cost.

석유 화학 방폭 및 화재 안전 시뮬레이션 사례 연구

임채완·여운성*·문병학·백승헌·마병철*

전남대학교 공정혁신시뮬레이션센터·전남대학교 화학공학부

A Case Study of Explosion Proof and Fire Safety Simulation in Petrochemical Plant

Lim Chaewan·Yeo Woonseong*·Moon Byunghak·Baek Seongheon·Ma Byungchol

Chunnam National University Center for Process Innovation Simulation·

Chunnam National University Chemical Engineering*

*Corresponding author: anjeon@jnu.ac.kr

여수국가산업단지는 단일 단지 규모로는 아시아 최대 수준으로 방폭 설비 및 화재 예방 시스템과 관련된 기술, 장비 및 인력에 대한 수요가 매우 높은 지역이다. 그러나 다수의 생산 설비가 장기간 운행되었고 시설의 노후화로 인해 인화성 액체 및 가스를 비롯한 위험물의 저장·이송·처리 과정에서 폭발이나 화재와 같은 산업재해에 빈번하게 노출되어 있다. 실제로 최근 10년간 여수산단 내에서는 약 130건에 달하는 사고가 발생하였고 이로 인한 인명 피해와 재산 손실의 규모는 상당하다. 따라서 사고 대응과 더불어 사전에 위험을 예측하고 차단할 수 있는 체계적인 안전진단 및 위험성 평가의 필요성이 부각되고 있다. IEC 60079 국제표준은 폭발위험장소의 구분 및 설계 시 분석 수단으로서 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 활용을 권장하고 있으며, 최근 컴퓨팅 기술의 급속한 발전과 함께 이를 실제 산업 현장에 적용하려는 움직임이 활발히 이뤄지고 있다. 또한 시뮬레이션 기법은 엔클로저(Enclosure) 내 압력 분포, 온도 상승, 연소 시 화염 전파 특성 등을 예측할 수 있고 설비 구조의 최적화 설계뿐만 아니라 실제 화재·폭발 시의 피해 영향 범위 예측, 방호 거리 산정, 대피 시간 계산 등 다양한 분야에서 활용도가 높아지고 있다. 이에 따라 다수의 사업장에서 시뮬레이션을 도입하고자 하는 수요가 증가하고 있다. 그러나 시뮬레이션 기법은 고성능 연산 장비(HPC)와 전문 소프트웨어 라이선스, 분석 인력 확보 등의 초기 진입 장벽이 존재하며 비용 부담과 기술 인프라 부족 등의 문제로 인해 도입에 실질적인 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다.

이에 본 연구에서는 여수국가산단 및 인근 지역에 소재한 화학물질 취급 사업장을 대상으로 시뮬레이션 기반의 방폭 및 화재 안전진단을 수행하고 이를 정량적으로 분석하였다. 또한 도출된 시뮬레이션 결과를 활용하여 현장 맞춤형 시제품(Mock-up) 제작하고 공정 개선 방안과 사례를 고찰하였다. 이를 통해 본 연구는 석유화학 공정의 안전 향상을 도모하고 근로자의 건강과 환경에 기여하고자 한다.

국내 원전 피난유도 프로그램 개발 위한 피난시뮬레이션 수행

양현혁·김경민·최두찬*
한방유비스(주) R&D센터

A study of Evacuation Simulation for the Development of an Emergency Guidance Program in domestic Nuclear Power Plants

Hyeon-Hyeok·Yang·Kyeong-Min·Kim·Doo-Chan·Choi^{*†}
Future Initiative R&D Center, Korea Fire Protection UBIS Co., Ltd.
[†]Corresponding author: cdc4111@kfubis.com

국내 전기에너지 발전량 중 원자력발전은 2022년 기준 29.6%의 비율을 차지하고 있으며, 안정적인 전력공급의 관점에서 높은 경제성을 보유하고 있으며, 운영종료 예정인 원전의 계속 운전 여부에 대한 조사 응답자 전체 중 78.9%가 '안전성 및 경제성을 평가하여 결정'으로 응답할 정도의 핵심 에너지 발전자원으로 인식되고 있다.

하지만 운영 중인 국내·외 원자력발전소(Nuclear Power Plants)의 노후화로 인한 화재사고 발생에 따라 최종 사용자인 국민의 불안감 및 안전성에 대한 관심도가 증가하고 있다. 특히, 원자력산업 종사자의 인명안전에 대한 관심이 점차 높아지고 있으며, 화재사고와 같은 비정상 상태에서 원자력발전소에서 근무 중인 상주 및 비상주 운전원의 안전한 피난은 원자력발전소의 안전성에 관한 정성적인 평가의 핵심적인 평가 변수로 작용될 수 있다.

이에 본 연구에서는 연구 목적으로 작도된 참조 원전의 건축도면을 반영하여, 국내 원전에 적용 가능한 피난유도 프로그램 개발의 기초자료 확보를 목적으로, 피난시뮬레이션을 활용한 부분적 피난안전성평가가 수행되었다. 원전 내 화재시나리오에 따른 보행거리 및 피난요구시간(RSET, Required Safe Egress Time) 등 재실자(Agent)의 피난 안전성을 평가하는 주요 변수를 확인하고자, 국내 피난안전성평가에 주로 사용되는 시뮬레이션 Tool 중, Pathfinder와 Simulex를 활용한 시뮬레이션 수행 및 결과 분석이 수행되었다. 해석 대상은 미국 NRC 보고서를 기반으로 발전소 내부의 다양한 실과 점화원이 적용되었으며, 적용 시나리오에는 국내·외 피난안전성평가 관련 기준 및 선행연구를 기반으로 현실적인 시나리오가 적용되었다.

본 연구에서 산출된 피난시뮬레이션 수행 결과를 기반으로, 국내 원전을 대상으로 한 피난유도 프로그램에 적용될 피난경로 산출 및 유도 알고리즘 컨셉(안)이 제안되었다. 이를 통해 다양한 원전 화재시나리오를 기반으로 정량적으로 도출된 피난안전성평가의 주요 변수를 적용한 피난유도 프로그램 개발 가능성이 확인되었다. 향후 본연구에서 사용된 참조원전을 대상으로 화재시뮬레이션을 통한 결과를 적용한 고도화된 피난안전성평가를 통해, 실제 국내 원전을 대상으로 적용 가능한 프로토타입의 피난유도 프로그램 및 그 시스템 개발로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

Keyword: Nuclear Power Plants, Evacuation Simulation, Emergency Guidance Program

Acknowledge: 본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20224B10200110, 국내 원전 화재사고 저항성 강화기술).

화재 조기 감지를 위한 용도별 케이블의 VOCs 및 연기 농도 비교 연구

김재민·문선여·박주열*·황철홍†

대전대학교 소방방재학과·*대전대학교 대학원 소방방재학과

Comparative Study on VOCs and Smoke Density of Application-Specific Cables for Early Fire Detection

Jae-Min Kim·Sun-Yeo Mun·Ju-Yeol Park*·Cheol-Hong Hwang†

Department of Fire and Disaster Prevention, Deajeon University ·

*Department of Fire and Disaster Prevention, Graduate School, Deajeon University

†Corresponding author: chehwang@dju.ac.kr

현대 사회에서 전력 및 통신 인프라가 빠르게 확장됨에 따라, 케이블은 원자력 발전소, 산업 시설, 주거 공간 등 다양한 설치 환경에 맞춰 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 다양한 용도에 따라 케이블은 외피, 절연체, 내부 전도체 등 구성 재료와 난연/비난연등의 성능에서 차이를 보인다. 이는 화재 시 케이블의 열분해 과정에서 발생하는 휘발성 유기화합물(VOCs) 및 연기의 조성과 방출 시점에도 직접적인 영향을 미친다. 하지만 현재 대부분의 감지 시스템은 일반적인 열 감지기 또는 연기 감지기를 일괄적으로 적용하고 있다. 이로 인해 실제 화재 초기 단계에서 열 축적이 부족하거나 연기 농도가 낮은 상황에서는 감지기의 반응이 지연되어 조기 대응에 실패할 가능성이 존재한다.

본 연구는 이러한 문제의식을 바탕으로, 케이블의 용도별 재질 특성이 VOCs 및 연기 생성에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험에 적용된 케이블은 실제 사용 환경을 반영하여 원자력 발전소용 케이블(3종류), 산업용 케이블(2종류), 가정용 케이블(1종류)로 구분하여 선정하였다. 본 실험에서는 ISO 5660-1 장치를 활용하여, 점화가 발생하지 않는 복사열 유속 조건(20 kW/m²)에서 수행하였다. 또한 케이블을 구성하고 있는 외피만을 분리하여 동일한 조건에서 실험이 수행되었으며, 외피에 대한 연기 농도 및 VOCs 농도를 측정하였다. 연기 농도는 OPM(Obscuration per Meter) 기준으로 5%/m, 10%/m, 15%/m의 세 구간으로 나누어 측정하였으며, 각 구간에서의 VOCs 성분도 동시에 정성 및 정량 분석하였다.

본 연구 결과 산업용 케이블에서는 연기 방출량이 VOCs 비해 많이 발생되었으며, 원자력용 및 가정용 케이블에서는 연기보다는 VOCs의 발생량이 더욱 두드러졌다. 이러한 결과는 케이블이 설치되는 환경과 기능적 요구사항에 따라 재료 구성과 열분해 반응이 상이하게 나타남을 시사한다. 이는 곧, 조기 감지 시스템을 설계할 때 연기 농도뿐만 아니라 VOCs의 조기 방출 특성 또한 함께 고려해야 하며, 케이블의 용도와 설치 환경에 따라 감지 방식이 차별화되어야 함을 의미한다.

본 연구는 케이블 화재 조기 감지의 신뢰성과 정확성을 높이기 위해 케이블의 사용 용도별 특성 차이에 주목하였으며, 케이블 화재에 대한 안전성 향상 및 피해 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: Early detection, Cable, VOCs, Smoke, Obscuration per meter (OPM)

감사의 글: 이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224B10200110, 국내 원전화재사고 저항성 강화기술).

콘 칼로리미터에서 입사 열유속이 국내 원전 케이블의 연소물성에 미치는 영향

박주열·문선여*·김재민*·황철홍†*

대전대학교 대학원 소방방재학과·*대전대학교 소방방재학과

Effect of Incident Heat Flux on the Combustion Properties of Domestic Nuclear Power Plant Cables in Cone Calorimetry

Ju-Yeol Park·Sun-Yeo Mun*·Jae-Min Kim*·Cheol-Hong Hwang†*

Department of Fire and Disaster Prevention, Graduate School, Deajeon University·

*Department of Fire and Disaster Prevention, Deajeon University

†Corresponding author: chehwang@dju.ac.kr

원자력 발전소에 사용되는 전력 및 통신용 케이블은 용도, 설치 환경, 기능적 요구사항에 따라 다양한 구조와 특성을 가진다. 이러한 케이블은 정상 운전 시 전기적 기능을 안정적으로 수행하지만, 화재 발생 시 열과 연소 반응에 민감하게 반응하여 화염 확산, 열 방출, 유해가스 생성 등 다양한 화재 위험 요소로 작용할 수 있다. 특히 원전과 같은 고위험 시설에서는 케이블이 계측 제어, 신호 전달, 안전 계통 운전 등 핵심 기능을 수행하기 때문에 케이블 화재는 단순한 설비 손상을 넘어 인명 피해와 발전소의 주요 기능 마비로 이어질 수 있다. 이에 따라 원전용 케이블의 연소 특성에 대한 정량적이고 체계적인 분석은 화재 안전성 확보를 위한 핵심적인 기반이 된다.

케이블의 연소물성은 소재의 열적 안정성, 절연 및 외피 재질의 난연성, 구조 형상, 두께 등 다양한 요인의 영향을 받으며, 동일한 입사 열유속 조건에서도 점화 특성, 열방출률 및 유해가스의 방출량 등에서 차이를 보일 수 있다. 이러한 고체가연물의 연소물성 측정을 위해서 대표적으로 콘 칼로리미터(Cone calorimeter)가 사용된다. 본 연구에서는 국내 원자력 발전소에서 사용되는 다양한 종류의 케이블을 대상으로, 입사 열유속 변화에 따른 연소 특성을 실험적으로 측정하였으며, 정량적 데이터를 체계적으로 제시하였다. 실험은 국제 표준 방식인 ISO 5660-1에 의해 수행되었으며, 입사 열유속 조건은 20, 30, 40, 50 kW/m²로 설정하였다. 각 조건에서 열방출률(Heat Release Rate, HRR), 질량감소율(Mass Loss Rate, MLR), 점화온도(Ignition temperature), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 및 Soot yields 등의 주요 연소 물성을 측정하였다. 이들은 케이블의 발화 특성과 연소 지속성뿐만 아니라 연소 시 방출되는 위험물질의 정량적 특성을 파악하는 데 중요한 지표가 된다. 실험 대상은 국내 원전에서 실제 사용 중인 케이블을 대상으로, 안전 등급(1E Class), 비안전 등급(Non-1E Class), 통신용 케이블로 분류되며, 각각 구조, 단면 두께, 절연/외피 재질 등에 차이를 가진다. 실험 결과, 이러한 구성 요소의 차이가 입사 열유속에 따른 연소생성물 및 연소 특성에 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

본 연구는 다양한 입사 열유속 조건에서 국내 원전용 케이블의 연소 물성을 정량적으로 제시하고, 열 및 연소 반응과 관련된 주요 물리량을 비교·분석할 수 있는 실험 데이터를 제공하였다. 본 결과는 향후 원전 화재 시뮬레이션 정확도 향상, 케이블 화재 위험성 평가 및 화재 안전 기준 수립 등에 신뢰성 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 원전 내 케이블의 화재 대응 성능을 과학적으로 평가하는 데 필요한 근거를 마련하고, 관련 후속 연구의 기반 자료로도 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

Keywords: Cone calorimeter, Nuclear power plant cables, Combustion properties

감사의 글: 이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224B10200110, 국내 원전화재사고 저항성 강화기술).

원전 전기캐비닛 화재시나리오의 심각도 추정을 위한 열방출률 DB 구축에 관한 연구

윤가영
방재시험연구원 전문위원

A Study on the Heat Release Rate DB Construction to Estimate the Severity Factor of Nuclear Power Plant Electrical Cabinets Fire Scenario

Yoon, Ga-Yeong
Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea

원전 내부에는 절연유, 케이블 피복재 등 다양한 종류의 가연물이 존재하며, 이는 화재 발생의 잠재적 원인이 될 수 있다. 특히 원전 화재 사고 분석에 따르면 전기적 요인이 주 원인이며, 대부분 케이블 및 각종 전기부품이 내장되어 있는 전기캐비닛에서 발생하는 것으로 확인되었다. 이러한 전기캐비닛은 원전에 대량 배치되어 있기 때문에 화재시 다른 설비로 연소 확대 가능성이 높으며, 심각할 경우 전체 시스템 작동에 큰 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 이는 원전 화재 안전의 주요 관심사이다. 통상적으로 원전은 위험도를 평가하기 위한 방법으로 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 방법을 적용하고 있으며, 화재는 PSA에 기여하는 주요 인자로 고려된다. 원전 화재리스크는 노심손상빈도(Core Damage Probability, CDF)에 초점을 맞추고 있으며, 화재발생빈도 및 화재 심각도(Severity factor, SF) 등을 통해 평가된다. 현재 화재심각도는 NUREG-2178에 제시된 전기캐비닛 분류에 따른 확률론적 열방출률 및 감마분포의 매개변수에 의해 추정하게 된다. 그러나 이 확률론적 열방출률은 대상 캐비닛에서 발생할 수 있는 최대 열방출률로써 전문가 패널에 의해 합의된 결과이며, 실험에서 측정된 최대 열방출률 대비 10배 이상의 매우 높은 예측값임에도 불구하고 이를 선정한 기준은 매우 불분명한 것으로 확인되었다. 또한 캐비닛 화재실험은 정형화된 캐비닛을 대상으로 하지 않으며, 실험방법 또한 국제적으로 정립되어 있지 않기에, 결과적으로 원전 화재안전 기술 개발에 기여하기에는 한계를 나타내고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 전기캐비닛의 화재특성 DB를 구축하고 심각도 추정을 위한 명확한 가이드라인을 개발하고자 한다. 이를 위해 국내 원전 캐비닛 화재시험 방법을 설계하였으며, 원전 캐비닛의 형태 특이성을 기반으로 화재시나리오를 정립하였고, 이를 대상으로 열방출률 DB를 구축하였으며, 최종적으로 확률론적 열방출률을 선정 및 이에 따른 심각도를 추정하였다. 향후 연구에서는 총 144건의 전기캐비닛 화재시나리오에 대한 열방출률 DB를 구축하고, 확률론적 열방출률 값을 선정하기 위한 통계분석을 실시할 예정이다. 본 연구를 통해 도출된 전기캐비닛의 화재특성 DB 및 화재 심각도 추정은 원전캐비닛 화재안전성 평가에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224B10200110, 국내 원전 화재사고 저항성 강화기술).

공기흡입식 화재감지시스템을 위한 단일 파이프 네트워크 모델링 연구

김동우·Ha Thien Khieu·이영만[†]
올라이트라이프(주)

A Study on Single-Pipe Network Modeling for Air Sampling Fire Detection Systems

Dong Woo Kim·Ha Thien Khieu·Young Man Lee^{3†}
Alliteife Co., Ltd.

[†]Corresponding author: ymlee@allitelife.com

본 연구는 공기흡입식 화재감지시스템(Aspirating Smoke Detection)의 파이프 내 흡입 공기 흐름을 정량화하기 위한 단일 파이프 다수 홀 네트워크 모델을 개발하고 이에 대한 검증을 수행하였다. 모델은 파이프 내부 마찰에 의한 주 손실과 홀을 통한 유입 시 발생하는 부차적 손실을 각각 전통적인 유체역학식을 기반으로 계산하며, 팬 성능곡선과의 연계를 통해 전체 시스템의 유량-압력 특성을 예측할 수 있도록 구성되었다.

개발된 모델은 VESDA, Securiton 등 상용 소프트웨어와 비교 분석되었으며, 이 과정에서 설정된 손실 계수(K값)에 따라 상이한 예측 경향이 확인되었다. 이에 따라 ANSYS FLUENT를 활용한 수치해석을 수행하였고, 기존 모델에서 과도하게 가정된 K값과 파이프 끝단 압력 조건이 오차의 주요 원인을 확인하였다.

수치해석 결과를 반영하여 파이프 끝단 압력 예측식과 수정된 K값을 모델에 반영함으로써 예측 정확도를 향상시킬 수 있었다. 또한 T자 형태의 배관을 고려한 멀티 파이프 모델 구조를 확장 제안하여, 넓은 공간에서도 ASD 시스템의 적용 가능성을 높이는 방향을 제시하였다. 특히 다양한 배관 조건에서도 유량 분포를 효과적으로 예측할 수 있어, 본 모델은 계산 효율성과 물리적 해석 가능성을 동시에 확보한 ASD 시스템 설계 지원 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keyword: Air Sampling, Single-Pipe Network, Fire Detection Systems

Acknowledge: 본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224B10200110, 국내 원전 화재사고 저항성 강화기술).

원자력 안전 해석을 위한 정사영 이미지를 이용한 단일 기포의 기계학습 기반 3차원 복원 기법

신상오·송민섭[†]
한양대학교 원자력공학과

Machine Learning-Based 3D Reconstruction of a Single Bubble from Projected Images for Multiphase Flow Analysis in Nuclear Safety Application

Sangoh Shin·Minseop Song[†]
Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222,
Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, South Korea
[†]Corresponding author: hysms@hanyang.ac.kr

현대 산업 전반에서 이상유동(multiphase flow)은 시스템의 설계 및 안전 해석에 있어 핵심적인 연구 대상이다. 특히 해양 송유관의 유체 수송, 화학 공정 내 혼합 흐름, 원자력 발전소 2차측의 열수력 현상 등 다양한 분야에서 기체와 액체의 복합 거동은 시스템의 안정성과 직결된다. 원자력 분야에서도 차세대 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)를 포함한 최신 원자로는 열전달 성능을 극대화하기 위해 나선형 열교환기 등 복잡한 기하 구조를 갖는 유로를 도입하고 있다. 직선관과는 다르게 나선관같은 곡관에서는 원심력 등의 추가적인 힘이 작용하고, 이는 2차 유동을 발생시켜 기포의 거동이 변하게 된다. 이러한 유동장에서의 기포 형태와 거동에 대한 정밀한 이해는 원자로의 열수력적 안정성과 안전 확보를 위한 중요한 기반이 된다.

최근에는 3D 프린팅 기술, 굴절률 일치 기법, 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)의 발전으로 복잡한 형상을 갖는 유로 내 유동을 실험적으로 가시화하는 것이 가능해졌다. 하지만 실험에서 얻어지는 기포의 정사영 이미지를 바탕으로 이를 정확히 3차원 형상으로 복원하는 기술은 정형 타원체 수준에 머물러 있으며, 실제 원자로 내에서 발생 가능한 비정형 기포를 다룰 수 있는 복원 기술은 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 실험 검증 기반의 원자력 안전 해석에 기여하기 위한 새로운 머신러닝 기반 3D 기포 복원 기법을 제안한다. Python 기반 메타볼 모델을 활용해 다양한 형태의 비정형 기포 형상을 자동 생성하고, 정면, 측면, 상단 방향에 대한 정사영 이미지를 획득하였다. 이후 각 기포에 대한 3차원 형상과 정사영 이미지 데이터셋을 대규모로 구축하고, 이를 기반으로 CNN(Convolutional Neural Network)을 학습시킴으로써, 실험에서 촬영된 기포 이미지를 바탕으로 실제 형상을 3차원으로 복원할 수 있는 AI 모델의 학습 기반을 마련하였다.

본 연구는 기존 기포 형상 복원 기법이 단순 형상에 적용이 되던 한계를 넘어, 비정형 형상에도 적용 가능한 3차원 복원 방법론을 제시한다. 이를 통해 복잡한 기하 구조 내 이상유동의 정량적 해석이 가능해지며, 실험 기반 데이터를 중심으로 한 접근을 통해 원자로 내 이상 유동 현상의 이해를 높이고, 안전성 평가 및 설계 최적화에 실질적인 기여를 할 수 있는 기술적 기반을 마련한다.

몬테카를로 코드 기반 용융염원자로 모델링 및 차폐 분석

이효은·조재현[†]
중앙대학교

Monte-Carlo Code Based Molten Salt Reactor Modeling and Shielding Analysis

Hyo Eun Lee · Jaehyun Cho[†]

Chung-Ang University

[†]Corresponding author: jcho@cau.ac.kr

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2050년까지 해양 분야의 탄소중립 달성을 목표로 하고 있으며, 화석 연료를 사용하는 해양 운송 분야에 대한 대체 에너지원의 필요성이 대두되고 있다. 이를 위한 대안 중 하나로 원자력 발전을 통해 동력을 공급하는 원자력 선박이 주목받고 있으며, 제한된 공간 내에 탑재할 수 있는 소형 4세대 원자로의 필요성이 제기된다. 그중에서도 용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 소형화된 설계가 가능하고, 노심 용융 사고를 근본적으로 배제할 수 있어 선박 적용 가능성이 높게 평가되고 있다.

그러나 원자로가 한정된 공간 내에서 운전되며, 핵물질을 실은 채로 여러 국가를 항해한다는 점에서 철저한 방사선 방호 설계는 필수적이다. 동시에 선박은 경제적 이익 창출을 목적으로 하며, 선체의 중량이 적을수록 연료 효율성과 운항비용 측면에서 유리하므로, 차폐체 설계 시 부피와 중량의 최소화 또한 중요하다.

본 연구에서는 MSR의 방사선 분포와 차폐 설계를 고안하기 위해 MCNP6(Monte Carlo N-Particle) 코드를 활용하여 원자로를 모델링하고, 이를 둘러싼 1차 차폐체를 설계하였다. MCNP6는 3차원 모델링과 몬테카를로 입자 수송 계산을 통해 높은 정확도의 차폐 분석을 수행할 수 있다. 모델링된 MSR은 지름 274cm, 높이 576cm의 원기둥 형태이며, HALEU(High Assay Low Enriched Uranium)를 포함한 NaCl-KCl-UCl₃의 액체 핵연료를 사용한다. 반응도 제어는 PbO 반사체와 B₄C 제어 드럼을 통해 이루어진다.

차폐체는 붕산수 탱크를 통해 중성자를 흡수하고, 납(Pb)을 통해 감마선을 차폐하도록 설계하였다. 이 때 사용되는 붕산수의 붕산 농도에 따른 차폐 성능 및 차폐체 중량을 분석하였으며, 0wt%부터 2wt% 범위 내에서 민감도 분석을 실시하였고, 0.8wt% 농도 고정 시의 붕산수 탱크 부피 변화도 측정하였다.

향후에는 다양한 차폐 물질을 이용한 다층 차폐 구조가 방사선 방호에 더욱 효과적일 것으로 판단되므로, 여러 물질에 대한 조사와 모델링을 바탕으로 차폐 최적화 연구를 지속할 계획이다.

Vapor Chamber를 활용한 핵연료다발의 열 관리 성능 분석: 기존 설계와의 비교 평가

이혁준·송민섭*
한양대학교 원자력공학과

Enhanced Thermal Management in Fuel Assemblies Using Vapor Chambers: A Comparative Assessment with Conventional Flow Designs

Hyuk Joon Lee·Minseop Song*
Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222,
Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, South Korea
*Corresponding author: hysms@hanyang.ac.kr

AI 데이터센터와 같은 전력 집약 산업의 확산과 기후 변화 대응을 위한 분산 전원의 확대, 현재 수메가와트 규모까지 출력이 축소된 마이크로리액터가 각광 받고 있다. 이처럼 제한된 설치 공간에서도 MW급 전력을 안정적으로 공급하려면, 단위 면적 당 출력(에너지 밀도)이 필연적으로 증가하며 효과적인 열제거가 설계의 핵심 제약이 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 단위 부피 당 열전달 면적이 큰 판형 핵연료를 적용하여 고출력 밀도를 확보하였다. 또한, 기존의 물을 사용한 냉각 방식이 아닌 베이퍼 챔버(Vapor Chamber) 적용을 제안한다.

본 연구는 고중성자속 연구용 원자로(High Flux Research Reactor)에서 Neutron Trap을 갖춘 설계의 열수력 파라미터를 채택하여, 연구용 원자로에 해당하는 대표적인 열수력 조건을 구현하였다. 핵연료 집합체는 연료판 20장, 폭 66.6 mm, 두께 1.52 mm, 유로 폭 2.28 mm로 구성된다. 냉각재 입구 온도는 35 °C, 냉각재 입구 유속은 0.5 m/s이며 시스템 압력은 152kPa이다. 본 연구는 베이퍼 챔버 적용 시 열제거 성능을 평가하기 ANSYS CFX로 이상유동 열전달 해석을 수행하였다.

전체 해석 영역은 약 648,267개의 격자로 구성하였다. 해석에는 Eulerian 다상 유동 모델, standard $k-\epsilon$ 난류 모델, 그리고 RPI 벽면 비등 모델을 적용하였다. 베이퍼 챔버는 열전도도가 높은 고체로 모사하였다. 열제거 성능 평가를 위해 출구 부분의 냉각재 온도와 베이퍼 챔버 내 최고 온도, 각 열제거 방식에 따른 cladding 및 핵연료의 최고온도를 비교하였다. 이를 통해 베이퍼 챔버 기반 설계의 열 제거 성능과 소형 원자로 설계 유연성을 정량적으로 평가하였다.

격납건물 피동열침원 응축열전달 해석 고도화를 위한 기구학적 액막 모델 개발

강정훈·이연건*

세종대학교 양자원자력공학과

Development of a Mechanistic Liquid Film Model to Advance Condensation Heat Transfer Analysis in Passive Heat Sinks of Containment

Jeong Hun Kang·Yeon-Gun Lee[†]

Department of Quantum and Nuclear Engineering, Sejong University

[†]Corresponding author: yglee@sejong.ac.kr

후쿠시마 사고 이후, 피동형 안전계통을 통한 열 제거와 중대사고 억제가 강조되었다. 2016년 개정 원자력안전법은 사고관리계획서의 결정론적 안전 기준을 제한구역 경계 선량으로 규정해 격납건물 건전성 확보를 핵심 과제로 삼는다. 특히 라이너판과 외부 콘크리트 벽 등 피동열침원은 다중고장사고로 살수계통이 실패 시 격납건물로부터 열을 제거하는 유일한 수단이 되므로, 응축 거동의 정밀 해석이 필수적이다.

증기의 응축으로 형성된 응축액은 벽면을 따라 얇은 막을 이루며 중력에 의해 하강하고, 이 액막은 두께가 1 mm 이하로 매우 얇아 일반적인 응축 해석에서는 이를 무시하거나 Nusselt 액막 모델을 적용해 단순화한다. Nusselt 모델은 층류 유동, 일정 물성, 순수 포화 증기, 계면 전단응력 무시 등 여러 단순 가정에 기반하고 있어 실제 대형 격납건물 내의 복합 열유동 현상을 반영하는 데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 Ghiaasiaan의 운동량 방정식을 기반으로 한 기구학적 액막 모델을 개발하였다. 제안된 모델은 응축면을 따라 하강하는 액막 유동의 거동을 계면 전단응력을 고려한 물리적 해석을 통해 정량적으로 계산한다. 무차원화된 액막 두께, 액막 하향속도, 계면 전단응력을 정의하고, 운동량 방정식으로부터 액막 내 속도 분포를 계산한다. 속도 분포, 액막 두께, 계면 전단응력을 액막 질량 유량의 물리적 보존에 기반하여 계산하므로, 대기 유동장 내 액막 거동에 영향을 미치는 응축량의 변화가 즉시 액막 질량 유량, 두께, 액막 하향속도, 계면 전단응력 등으로 연쇄적으로 전달되어 물리적 일관성이 유지된다. 반면, Nusselt 모델은 벽면에서 먼저 액막 두께를 계산한 후, 이를 바탕으로 액막 질량 유량과 속도 분포를 후속적으로 결정하므로, 응축 변화가 물리적으로 일관되게 반영되기 어렵다.

제안된 모델은 비응축성 기체가 존재할 때 증기의 응축을 구현하기 위해 CONAN 실험을 모의하여, 공기질량분을 변화에 따른 액막 두께 및 하향 속도 변화를 예측하고 이를 실험 결과와 비교하였다. 동일한 액막 질량 유량 분포를 가정한 Nusselt 모델과의 비교 결과, Nusselt 모델은 계면 전단응력을 무시하여 액막 두께를 과대 예측한 반면, 제안된 모델은 계면 전단응력의 작용으로 액막의 두께가 보다 얇아질 것으로 예측하였다. 따라서 제안된 모델은 기존 Nusselt 모델 대비 복잡한 계면 조건과 열전달 현상을 보다 현실적으로 설명할 수 있으며, 향후 피동열침원 응축 해석의 정확도 향상 및 열제거 성능 평가 고도화에 기여할 것으로 기대된다.

* 이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 가동 원전 안전성 향상 핵심기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: RS-2022-00144494).

부유식 용융염 원자로의 내부 및 외부 특성에 따른 초기 사건 식별 및 분류 연구

김진수·이혁준·유영근·송민섭[†]
 한양대학교 원자력공학과

Identification and Classification of Initiating Events for a Floating Molten Salt Reactor Based on Internal and External Characteristics

Jinsu Kim·Hyukjoon Lee·Yeonggeun Yu·Minseop Song[†]
 Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222,
 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, South Korea
[†]Corresponding author: hysms@hanyang.ac.kr

탈탄소화와 기후 변화 대응을 위한 글로벌 요구가 증가함에 따라, 탄소를 배출하지 않으면서도 안정적인 전력 공급이 가능한 원자력 발전의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 이에 따라 기존 대형 육상 원전의 단점을 보완하고, 다양한 운용 환경에 적용 가능한 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발이 세계적으로 활발히 추진되고 있으며, 대한민국 또한 혁신형 SMR 개발을 국가 차원에서 본격적으로 착수하였다.

그 중에서도 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 핵연료가 고온의 용융염에 용해된 액체 상태로 존재하며, 사고 발생 시 노심 하단에 위치한 동결 밸브(freeze valve)가 열려 연료염을 자동으로 드레인 탱크(drain tank)로 인출시켜 수동 개입 없이 열을 제거하는 피동형 안전 특성을 갖는다. 이러한 작동 방식은 고체 연료를 사용하는 기존 경수로형 원전과는 운전 원리와 사고 대처 전략 측면에서 근본적으로 다르며, 이로 인해 안전성 평가 방식에서도 중대한 차이를 요구한다.

특히 해양용 MSR은 해상 플랫폼에 설치되어 파랑, 충격, 염분 등 육상과는 전혀 다른 환경에 노출되므로, 해양 환경에서 발생할 수 있는 고유한 위험 요소들을 반영한 안전성 분석이 필수적이다. 따라서 기존의 육상 경수로형 원전을 기반으로 한 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 모델만으로는 이러한 새로운 기술과 운용 환경의 복잡성을 충분히 반영하기 어렵기 때문에, MSR의 특성과 해양 환경 요소를 모두 통합한 전용 PSA 모델의 개발이 필요하다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 해양용 MSR에 특화된 확률론적 안전성 평가 모델 개발의 기초 작업으로서, 초기 사건 도출 및 평가 구조 수립을 수행하였다. 먼저, 기존 PSA 모델이 경수로형 원전(Pressurized Water Reactor, PWR)을 기반으로 구성되어 있는 점을 고려하여, MSR과 경수로 간의 근본적인 차이점을 반영해 PSA 구성 요소 일부를 재정의하였다. 특히 PSA에서 평가 대상이 되는 최종 사건(Top Event)을 '연료염 계통의 연료염 누출'로 설정함으로써, MSR의 특수성을 고려한 분석 체계를 구성하였다.

재정의된 최종 사건을 중심으로 MSR의 주요 시스템에서 발생할 수 있는 용융염 이상 상태를 체계적으로 분류하고, 이를 도식화된 표 형태로 정리하여 내부 초기 사건 목록을 도출하였다. 더불어 해양 플랫폼에 적용되는 원자로 시스템의 특성을 반영하기 위해, 파랑, 충격, 염분, 구조물 손상 등 해양 환경에서 발생 가능한 외부 위험 요소를 추가적으로 도식화하고, 이를 내부 사건과 통합하여 해양용 MSR에 특화된 내부·외부 초기 사건 목록을 최종적으로 구성하였다. 도출된 초기 사건은 각 시스템 별로 분류하여 향후 사건 수목(Event Tree) 및 고장 수목(Fault Tree) 모델링의 기반으로 활용될 것으로 기대된다.

포르말린 누출사고 대응 고도화를 위한 포집제거 기술 방안 마련

조철희[†]

소방청 국립소방연구원

Developing Collection and Removal Technology to Improve Response to Formalin Leak Accidents

Chul-Hee Cho[†]

National Fire Agency, National Fire Research Institute

[†]Corresponding author: chcho119@korea.kr

폼알데히드(Formaldehyde, HCHO)는 실내 공기질 저하의 주요 원인물질로, 흔히 ‘새집증후군’의 주범으로 알려져 있다. 이 물질은 교육기관 과학실에서 동식물 표본을 보존하는 용도로 사용되는 수용액 형태의 유독물질인 포르말린(Formalin)에 포함되어 있으며, 높은 증기압 특성으로 인해 누출 시 기체 상태의 폼알데히드로 쉽게 방산되어 실내 공기 중에 빠르게 확산된다. 기체 상태의 폼알데히드는 국제암연구소(IARC)에서 지정한 1군 발암물질로, 학생 및 교직원의 호흡기를 통해 인체에 흡입될 경우 두통, 현기증, 호흡기 자극을 유발하며, 장기적으로는 심각한 건강 문제를 초래할 수 있다.

최근 8년간의 사고 이력 분석 결과, 포르말린 관련 사고의 약 85%(66건)가 교육기관에서 발생하였으며, 이는 해당 물질의 집중 사용과 관리 미비를 반영한다. 현행 소방 Hazmat 대응부서에서는 포르말린 용액 누출 사고 시 신속한 환기와 희석 작업을 통해 공기 중의 유해 물질 농도를 낮추는 동시에 화학 흡착포와 같은 물리적 흡착제를 이용해 액체 상태의 화학물질을 흡수하거나 제거하고 있으나, 대기 중으로 쉽게 확산되는 유해 “폼알데히드” 기체의 체계적인 포집·제거 대응 기술은 부족한 실정이다.

본 연구에서는 포르말린의 유해성을 근본적으로 차단하기 위한 화학적 처리 방법을 제안하고자, 염기성 화학물질(예: 수산화나트륨, 중탄산나트륨, 요소수)과 포르말린 간의 반응성을 실험적으로 검토하였다. 그 결과, 중탄산나트륨(NaHCO₃) 수용액이 포르말린을 효과적으로 중화 및 제거할 수 있는 안전하고 실용적인 대응 물질임을 확인하였다. 본 결과는 포르말린 누출 대응의 새로운 기술적 대안으로 활용될 수 있으며, 향후 교육기관 및 실내 공간에서의 화학사고 대응체계 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

리튬금속 화재의 소화 전략 적용 방안: 리튬 일차전지 화재 대응 중심으로

조철희[†]

소방청 국립소방연구원

Lithium Metal Fire Hazards and Fire Extinguishing Strategies: Focusing on Lithium Primary Battery Fire Response

Chul-Hee Cho[†]

National Fire Agency, National Fire Research Institute

[†]Corresponding author: chcho119@korea.kr

현행 「위험물안전관리법」상 리튬 일차전지는 제3류 위험물로 지정되어 있지 않지만, 그 주요 구성 물질인 알칼리금속 리튬(Li)은 제3류 금속성 물질에 해당하며, 이에 따라 화재 및 폭발 위험성이 매우 높다. 특히 리튬 일차전지 화재는 일반적인 화재와 달리 열폭주 현상에 따른 급격한 폭발과 다량의 유해가스 발생을 수반하므로, 이를 특수재난으로 분류할 수 있다. 한편, 전이금속, 전이후금속, 합금금속 등의 경우에는 점화되지 않은 상태에서는 물과의 반응성이 낮아 비교적 안정적이지만, 이들 금속이 용융된 적열 상태에서 물과 접촉할 경우, 가연성 수소(H₂, 폭발범위 4~75%) 가스 발생 및 열 방출과 함께 용융금속의 튐 현상 등으로 인해 폭발 및 확산 화재로 이어질 가능성이 크다. 반면, 알칼리금속인 리튬(Li) 및 소듐(Na)은 점화되지 않은 상태에서도 물과 접촉 시 수소(H₂) 가스와 엄청난 열 방출과 함께 화재 폭발이 동반된다. 이와 같이 금속 종류에 따른 화학 반응성과 위험성의 차이로 인해, 모든 금속 화재에 대해 일률적으로 건조사, 팽창질석 등의 질식소화 방법을 적용하거나, 통일된 D급 금속 화재 소화약제를 사용하는 것은 현장 대응 측면에서 비효율적이며 오히려 위험을 증가시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 금속 화재(D급)에 대한 명확한 정의를 정립하고, 금속 종류별 반응성과 위험성의 특성을 반영한 차별화된 소화 전략을 제시하고자 한다. 이는 현장에서의 실효적인 화재 대응뿐 아니라, 금속 화재에 적합한 맞춤형 소화약제의 선정과 제도적 기준 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

자기발열성 물질의 감정분석을 위한 물질 특성 평가 방법 연구

최아영 · 남기훈* · 최유열†

소방청 국립소방연구원*창신대학교

A Study on the Evaluation Method of Material Properties for the Fire Appraisal Analysis of Self-Heating Substances

A Young Choi · Ki Hun Nam · Yoo Youl Choi†

National Fire Agency, National Fire Research Institute

*Changsin University

†Corresponding author: yychoi00@korea.kr

매년 금속화재 및 폐기물 화재 등 자기발열성 물질에 의한 화재사고가 반복되고 있다. 특히, 이러한 자기발열성 물질은 일반적으로 대량 보관되는 경우가 많아 화재 발생 시 대형화재로 이어지고 화재 진압에도 많은 시간이 소요된다.

자기발열성 물질을 정의하면, 외부 에너지 공급없이도 공기와 반응하여 스스로 발열되는 고체, 액체 물질 또는 혼합물(자연(기)발화성 물질 제외)이라 할 수 있다. 예를 들어, 금속분말(폐기물 포함), 깻묵(참깨, 들깨 등), 식물성오일 및 불포화지방산 유기물 등이 해당하고, 최근에는 산업의 발전으로 신재생폐기물 등 자기발열성 물질의 종류가 계속 증가하고 있다. 그러나 현재 많은 자기발열성 물질은「위험물안전관리법」에 해당되지 않는 비위험물로 취급되어 화재 예방 및 대응에 매우 취약하다.

자기발열성 물질에 대한 시험은 UN-RTDG, GHS에서 제시되고 있으나, 해당 시험방법은 운송 및 일부 저장 환경을 고려하여 제정됨에 따라 많은 반응 조건 중 온도 인자만으로 기술되어있다. 그러나 실제 자기발열성 물질의 화재는 다양한 환경요인(온도, 습도, 산소농도, 표면적, 진동 등)에 따라 다양한 발열 메커니즘을 보인다.

그래서 본 연구에서는 자기발열성 물질에 대하여 다양한 환경 조건을 고려하여 자기발열 특성을 평가할 수 있는 재현실험장치를 개발(온도, 습도 조절장치, 시료스테이지 속도 조절 등)하고, 화재가 빈번한 자기발열성 물질을 선정(식물성오일, 깻묵, 마그네슘 폐기물 등)하여 기초실험을 통해 재현실험장치 성능을 검증하고, 실험데이터를 분석하였다.

본 연구에서는 대표적인 자기발열성 물질로 실험으로 특성을 확인할 수 있었고, 향후 가연성금속류, 곡식류, 재생폐기물 등 다양한 물질로 실험하여 데이터분석을 진행할 예정이며, 이 연구를 통해 자기발열성 물질 화재 증거물로 수거된 물질에 대한 과학적 검증 및 화재조사의 신뢰성 향상, 산업현장에서 쓰이는 다양한 물질들의 자기발열 특성에 대한 데이터베이스 구축을 통해 자기발열성 물질을 취급하는 사업장 등에 대한 화재 예방에 기여하고자 한다.

대용량포방사시스템을 활용한 UTK 유류탱크 전면화재 대응 사례 분석

김량선·강우철·김지연

중앙119구조본부 울산119화학구조센터·성균관대학교 빅데이터학과 석사

High-Capacity Foam Discharge System-Based Response Analysis to the UTK Oil Storage Tank Full-Surface Fire

Ryangseon Kim·Woocheol Kang·Jeeyoun kim

Ulsan Chemical Rescue Center, National 119 Rescue Headquarters,
Master's student, Department of Big Data, sungkyunkwan University

† Corresponding author: krs1003@korea.kr

2025년 2월 10일, 울산광역시에 위치한 UTK 유류저장시설 내 TK-607 탱크에서 고위험 인화성 액체인 SK-SOL7을 저장 중에 발생한 상부 폭발과 전면화재는 국내 유류탱크 전면화재 대응체계의 한계를 확인하고, 동시에 대용량포방사시스템의 실전 적용 가능성을 검증할 수 있었던 중대한 사례였다. 사고는 시료 채취 작업 중 탱크 상부에서 발생하였으며, 화재 확산 속도가 매우 빨라 2차 피해 우려가 컸다. 이에 따라 기존 고정식 설비(폼챔버, 물분무설비)만으로는 화재 확산을 제어하기에 역부족이었고, 화재 발생 약 36분 후 현장에 투입된 대용량포방사시스템이 실질적인 진압의 전환점 역할을 하였다.

본 연구에서는 해당 사고 대응 과정의 전반적인 흐름을 정리하고, 대용량포방사시스템의 실효성 및 개선방향을 기술적으로 분석하였다. 특히, 대용량포방사시스템의 방사 성능이 어떻게 화재 진압 및 억제에 기여했는지를 중심으로 살펴보았다. 또한, 유증기 억제를 위한 지속적 폼 방사, 잔존 유증기 관리, 재발화 방지를 위한 야간 대기 운용 등의 사례도 함께 기술하였다. 아울러 본 연구에서는 사고 이후 진행된 잔존유 배유계획, 오염물 이송 및 방유제 처리 등의 후속 대응 절차와 각 장비의 연계 운용 사례를 분석하고, 향후 대규모 화재 발생 시 각 단계별 적용 가능한 전술적·기술적 대응안을 제시하였다. 마지막으로 NFPA 및 API 기준과의 비교를 통해 현재 국내 유류탱크 화재 대응체계의 개선 필요성을 제안하고, 대용량포방사시스템의 표준화, 기동성 향상, 자동화 연계 등 향후 발전 방향에 대한 정책적·기술적 시사점을 도출하였다.

본 사례는 고 위험물 저장시설 화재에 대한 대응매뉴얼 구축 및 국가 재난 대응체계 개선에 있어 핵심적인 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

전기차 리튬-이온 배터리 침수기반 안정화 시간에 대한 실증 연구

이상범[†]

소방청 국립소방연구원 대응기술연구실

Experimental Analysis of Immersion Time Required for Stabilizing Lithium-Ion EV Batteries

Sang-Bum Lee[†]

National Fire Research Institute of Korea

[†]Corresponding author: tkdja221@korea.kr

전기차(EV)의 세계적 확산은 친환경 모빌리티 전환이라는 시대적 요구에 부응하는 중요한 흐름으로 자리잡고 있다. 특히 리튬이온 배터리를 기반으로 한 전기차는 내연기관 차량에 비해 에너지 효율이 높고 탄소 배출이 적은 장점을 지니며, 각국 정부의 세제 혜택, 보조금 지원, 충전 인프라 구축 확대 등의 정책과 맞물려 빠르게 대중화되고 있다. 그러나 전기차의 핵심 부품인 리튬이온 배터리는 고에너지 밀도 특성상 사고 발생 시 열폭주를 유발할 가능성이 높고, 이는 단시간 내 대형 화재로 확산될 수 있는 위험 요소로 작용한다. 더욱이 초기 화재 진압 후에도 배터리 내부에 잔존하는 전기적 에너지 및 반응성 물질에 의해 재발화가 발생하는 사례가 빈번히 보고되고 있어, 기존의 내연기관 차량 화재 대응 방식과는 구분되는 체계적인 접근이 필요하다.

현재 현장에서는 전기차 배터리 화재 진압 수단 중 하나로 발화된 배터리 또는 열폭주 가능성이 있는 배터리를 대형 수조에 침수시켜 잔류 전류를 제거하고 냉각을 병행함으로써 2차 발화를 억제하는 방식을 사용하고 있다. 실제로 많은 사고 현장에서 이 방식이 적용되어 왔지만, 침수 시간이 충분하지 않은 경우 수조에서 배터리를 꺼낸 이후 다시 불이 붙는 재발화 현상이 발생할 수 있으며, 이에 따라 정확한 침수 시간과 방전 종료 기준의 정립이 절실한 상황이다. 그럼에도 불구하고, 현재까지 관련된 과학적 데이터는 제한적이며, 체계적인 실험 기반 연구 역시 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 궁극적으로 전기차 배터리팩의 수중 침수를 통한 방전 안정화 시간과 조건을 규명하기 위한 기초자료를 확보하는 것을 목적으로 한다. 초기 단계로서, 본 실험에서는 전기차에 사용되는 리튬이온 배터리 셀을 소금물에 침수시켜 시간에 따른 방전 완료 시점을 측정하였다. 실험은 침수 시간에 따른 셀 상태를 기준으로 반복 수행되었으며, 그 결과는 향후 배터리 모듈 및 팩 단위 실험의 기초자료로 활용될 수 있다.

본 연구의 결과는 전기차 화재 진압 매뉴얼 개선뿐만 아니라, 구조현장에서의 안전 확보 및 위험물 관리 정책 수립에도 실질적인 기초자료로서 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

위험성 평가 프로그램의 피해 영향 비교 분석: 수소충전소를 중심으로

김해진[†]

소방청 중앙119구조본부

The Comparative Analysis of Damage Effect in Risk Assessment Programs: Focusing on Hydrogen Refueling Stations

Hae-Jin Kim[†]

National Fire Agency, National 119 Rescue Headquarters

[†]Corresponding author: 1q2w3e4r5@korea.kr

본 연구는 수소충전소에서 사고 발생 시 피해 영향 범위를 과학적이고 정량적으로 평가함으로써, 소방관의 안전한 현장 대응을 보장하고자 대표적인 대기확산 프로그램인 ALOHA와 국내 개발 프로그램인 Hy-KoRAM을 비교·분석하였다. 수소는 높은 에너지 밀도와 청정한 연소 특성으로 인해 미래 친환경 에너지원으로 주목받고 있으며, 특히 수소연료전지차(FCEV) 보급 확대에 따라 전국적으로 수소충전소 설치도 증가하고 있다. 그러나 수소는 분자량이 2밖에 되지 않아 확산 속도가 빠르며, 넓은 폭발한계를 가진 고인화성 물질로, 누출되어 폭발 시 대규모 인명 및 재산 피해를 초래할 수 있다. 실제로 강릉, 충주, 부산 등지에서 발생한 수소 관련 사고 사례는 고압 저장설비 및 충전 과정에서의 위험성을 보여주며, 향후 도심지 내 충전소 확산을 고려할 때 정량적 위험성 평가의 필요성이 더욱 강조된다. 본 연구에서는 전주시 덕진구에 위치한 수소충전소를 대상으로 최악의 사고 시나리오를 설정하고, ALOHA 프로그램을 활용하여 수소 누출 시 피해 영향 범위를 시뮬레이션하였다. 또한 기존 Hy-KoRAM 시뮬레이션 결과와 비교하였다. ALOHA는 화학물질의 확산 예측을 위한 모델로 기상 조건과 누출량 등을 기반으로 작동하나, 수소 특화 기능은 부족한 반면, Hy-KoRAM은 수소충전소의 구조적 특성과 고압 저장 조건을 반영한 시나리오 기반의 정량 평가가 가능하다. 분석 결과, 동일 사고 조건에서도 두 프로그램 간 예측된 피해 범위에 차이가 발생했으며, Hy-KoRAM이 보다 현실적이고 보수적인 결과를 제시함을 확인하였다. 본 연구 결과는 수소충전소의 안전거리 설정, 입지 기준 마련, 소방 대응 계획 수립 등에 실질적인 기준을 제공할 수 있으며, 향후 수소 기반 도시 인프라의 안전성 확보를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

화학사고 민·관 공동방재지원체계 구축 방안

정성경·김지윤·김호연·박춘화[†]
화학물질안전원 사고대응총괄과

A study on the Establishment of the National Public-Private Joint Disaster prevention Support System for Chemical Accident

Jeong Seong Kyeong·Ahn Seong Yong·Kim Ho Youn·Park Choon Hwa[†]
National Institute of Chemical Safety, Emergency Response Division
[†]Corresponding author: ch51245@korea.kr

화학사고 발생 시 유해 화학물질의 유출 및 누출에 따라 폐기물의 회수·처리 과정에서 방재 차량과 지정폐기물 운반 차량의 긴급 동원이 어려워 2차 사고가 발생하는 사례가 증가하고 있다. 특히 야간이나 주말과 같은 취약 시간대에는 방재자원의 확보가 더욱 어려워 신속한 대응에 한계가 존재한다. 또한, 육상에서 발생한 화학사고가 해상으로 확산되는 사례도 점차 늘어나고 있다.

울산 및 여수 국가산단은 화학사고가 빈번히 발생하는 지역으로, 대규모 사고 발생 시 인명 피해뿐 아니라 심각한 환경 피해로 이어질 수 있는 고위험 지역이다. 해당 지역은 원유 및 화학물질의 해상 수출입이 활발한 산업단지로서, 사고 발생 시 육상과 해상을 아우르는 공동 방재체계의 필요성이 크다. 이에 따라, 잔류 폐기물을 신속하게 수거·처리할 수 있는 체계적인 방재동원 시스템 구축이 절실하다.

효율적인 방재체계를 마련하기 위해서는 민간 업체와 국가기관 등 다양한 유관기관의 협업이 핵심적이다. 공동방재지원체계는 육상과 해상에서 발생한 화학사고로 인한 피해를 최소화하기 위해 긴급 방재자원을 신속히 투입할 수 있는 체계로, 방제선, 폐기물 수거장비, 케미컬 흡착포, 보호장비, 인력 등으로 구성된다.

화학물질안전원은 2024년부터 지방 유역청, 해양경찰, 지자체, 방재전문 업체, 사업장 협의체 등과 협력하여, 화학사고가 빈번한 지역을 중심으로 공동방재지원체계를 구축해 오고 있다. 이를 통해 환경오염을 방지하고 사고 피해를 최소화하는 데 기여하고자 한다.

지속가능한 지역화학사고대비체계 구축 방안 연구: 지방자치단체 적용 중심으로

안성용·정성경·김호연·박춘화[†]
화학물질안전원

Study on how to establish a sustainable regional chemical accident
perparedness system: focusing on local government applications

Ahn, seongyong·Jeong, seongkyeong·Kim, hoyoun·Park, choonhwa

National Institute of Chemical Safety

[†]Corresponding author: ch51245@me.go.kr

본 연구는 지방자치단체의 화학안전 거버넌스 운영을 통해 지역사회의 지속가능한 화학사고 대비체계를 효과적으로 구축 할 수 있는 전략을 제시하는 것을 목적으로 한다. 최근 빈번히 발생하고 있는 화학사고는 단순한 물리적 피해를 넘어, 지역 주민의 불안과 사회적 갈등을 야기하며 지역사회 전반에 부정적인 영향을 미치고 있다. 이러한 복합적 문제에 대응하기 위해서는 단편적인 대응 중심의 사고관리에서 벗어나, 예방과 협력 중심의 지역 화학안전 거버넌스 체계를 제도화하고 내실화하는 것이 필요하다.

지방자치단체는 지역 특성과 여건에 맞춘 화학물질 안전관리체계를 구축할 주체로서, 민·관·주민 간의 협력 기반을 조성하고, 거버넌스 구조의 지속 가능성과 실효성을 확보하는 역할을 수행해야 한다. 본 연구는 이러한 거버넌스 체계의 효과적인 운영을 위해 성과를 정량적·정성적으로 진단하고 피드백할 수 있는 평가체계의 필요성을 강조한다. 평가체계는 거버넌스 구성의 다양성, 참여의 실질성, 정책 연계성, 정보공유의 투명성, 대응 역량 강화 등 핵심 영역에 대한 지표를 바탕으로 설계되었으며, 지방자치단체가 거버넌스 운영을 보다 체계적이고 책임감 있게 수행할 수 있도록 지원하는 도구로 기능한다. 또한, 평가체계 운영을 통해 지방정부의 행정 역량을 진단하고, 부족한 부분은 보완하며, 우수한 사례는 다른 지역으로 확산하는 데 기여할 것이다. 또한, 평가지표를 기준으로 성과를 체계적으로 관리함으로써 지방자치단체가 보다 책임감 있고 투명하게 화학안전 정책을 수행할 수 있도록 유도할 수 있으며, 주민의 생명과 환경에 직결되는 정책 분야일수록 행정의 책임성과 신뢰성이 중요해지며 평가는 이를 제고하는 핵심적인 장치가 될 수 있을 것이다. 이를 통해 지방정부는 화학사고 예방 및 대응 역량을 제고할 수 있을 뿐 아니라, 주민 신뢰를 기반으로 한 상시 협력 체계를 정착시킬 수 있다. 본 연구는 지속가능한 지역사회 구축을 위한 지방정부 주도의 화학안전 거버넌스 강화 방안과 그 성과를 관리하기 위한 평가체계의 이론적 근거 및 적용 전략을 제시함으로써, 향후 지역 화학안전 정책의 제도적 안정성과 실행력을 높이는 데 기여하고자 한다.

Keywords: 화학안전 거버넌스, 지역화학사고대비체계, 화학사고, 지속가능성 확보

화학안전정책포럼의 숙의 과정을 통한 리스크 관리 방안

이근탁*·김신범·최영은†
노동환경건강연구소

Risk Management Strategies through Deliberative Processes of the Chemical Safety Policy Forum

Lee, Geuntak*·Kim, Shinbum·Choi, Youngeun†
Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health
†Corresponding author: ye.choi@hanmail.net

현대 사회는 과학기술의 발전과 산업 고도화 등으로 인해 복잡적이며 예측 불가능한 위험에 직면하고 있으며, 환경문제는 광범위하게 발생되고 복잡한 성질이 있다. 이에 특정 국가 주도 혹은 소수의 전문가 만으로는 사회적 수용성이나 정책의 정당성을 확보하기 어려운 상황이다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구는 환경 민주주의(국민의 환경 정보 접근권·의사결정 참여권·사법 접근권) 실현을 위한 공론장이 화학안전 분야의 리스크 관리를 위한 효과적인 방안이 될 수 있다는 문제의식에서 출발하였다. 본 연구는 화학안전 관련 이해당사자가 참여하는 “화학안전정책포럼(이하 포럼)”의 운영규정과 주요 회의 결과를 분석함으로써, 이를 통한 효과적인 리스크 관리 방안을 탐색하고 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

2021년 출범한 포럼은 정부, 산업계, 시민사회, 전문가 등 다양한 주체가 참여하는 투명하고 개방적인 소통의 장으로 마련되었다. 포럼은 운영규정과 토론주제를 당사자 간 합의를 통해 설정하며, 민·산·관 기획위원이 동수로 참여하고 만장일치 원칙에 따라 안전을 협의하는 구조를 갖추고 있다. 또한, 실시간 중계와 결과 공개, 의견 수렴 창구의 마련 등은 투명성, 개방성 그리고 신뢰성을 높이는 데 기여하였다. 이러한 구조는 단순한 의견수렴을 넘어, 이해당사자 간 신뢰 구축과 정책 수용성을 높이는 토의의 장으로 기능하였다. 그 결과, 화학물질등록평가법 및 화학물질관리법 개정안 마련, 화학물질 안전관리 중장기계획(전환전략 2033) 수립 등 주요 정책 성과로 이어졌다.

본 연구는 포럼이 화학안전 분야의 정책 결정과정에서 수용성과 정당성과 동시에 확보한 사례임을 보여준다. 이는 복잡하고 불확실성이 높은 현대 위험사회에서 국민을 포함한 다양한 이해당사자들이 참여하는 협력적 거버넌스 공론장이 사회적인 리스크 대응 역량을 강화하는 효과적인 대안이 될 수 있음을 시사한다.

Keywords: 화학안전정책포럼, 숙의 민주주의, 리스크 관리, 공론장, 협력적 거버넌스

2023년 국내 유해화학물질 취급 현황 분석 연구

김정곤[†]·윤준현
화학물질안전원

A Study of 2023 Domestic Hazardous Chemicals Handling Status

Jungkon Kim[†]

National Institute of Chemical Safety

[†]Corresponding author: jungkon@korea.kr

환경부에서는 화학안전을 위해 유독물질, 허가물질, 제한물질, 금지물질, 사고대비물질 등의 유해화학물질을 취급할 때는 사전에 허가를 받도록 규정하고 있다. 또한, 매년 취급 실적을 의무적으로 보고하도록 하는 유해화학물질 세부실적보고 제도를 운영하고 있다. 본 연구에서는 2023년 한 해 동안 국내 유해화학물질 취급 현황을 분석하였다. 이를 위해, 사업장에서 유해화학물질의 제조, 사용, 보관·저장, 운반, 판매, 수입한 수량을 보고한 자료를 활용하였다. 유해화학물질을 취급한 사업장 수는 12,365개소였고 1,781개 사업장이 새롭게 영업허가를 받았으며 3,348개 사업장이 폐업하였다. 취급된 총 유해화학물질 수는 896종이었고 유독물질이 805종, 제한물질이 14종, 금지물질이 33종, 사고대비물질은 90종이었다. 전체 유해화학물질의 취급량은 307.6백만톤이었다. 취급량을 유해화학물질별로 세분하면 유독물질이 190.3백만톤, 제한물질이 4.0백만톤, 금지물질이 15.7톤, 사고대비물질이 191.5백만톤으로 보고되었다. 취급 형태별로는 제조량이 145.6백만톤, 사용량이 80.1백만톤, 보관·저장량이 9.8백만톤, 운반량이 12.9백만톤, 판매량은 50.9백만톤, 수입량은 7.1백만톤이었다. 지역별로는 전라남도가 99.6백만톤으로 취급량이 가장 많았고 다음으로는 충청남도가 77.7백만톤, 울산광역시 49.1백만톤, 서울특별시가 36.0백만톤, 경상북도가 19.8백만톤 순이었다. 물질순으로는 일산화탄소의 취급량이 110.4백만톤으로 가장 많았고 크실렌이 23.6백만톤, 수산화나트륨이 19.4백만톤, 1,3-부타디엔이 19.0백만톤, 황산이 13.3백만톤, 벤젠이 11.5백만톤, 이소프렌이 10.1백만톤 순이었다. 제조량과 사용량이 가장 많은 물질은 일산화탄소(각각 69.5백만톤, 40.9백만톤), 운반량이 가장 많은 물질은 수산화나트륨(2.9백만톤), 판매량이 가장 많은 물질은 1,3-부타디엔(6.2백만톤), 수입량이 가장 많은 물질은 메탄올(1.5백만톤)로 보고되었다.

화학사고 화재 폭발 조사 사례를 통한 방지대책 제안

천광수·이현용·전상호·조아름[†]
 서산화학재난합동방재센터

A Study on the Improvement of Chemical Accident Classification System

Kwangsoo Cheon·Hyeonyong Lee·Sangho Jeon·Areum Jo[†]
 Seosan Chemical Disaster Prevention Center
[†]Corresponding author: chunks71@korea.kr

화학사고의 증가 원인은 산업화, 도시화, 정보화 등 급속한 사회의 발전으로 인해 그 유형이나 원인이 복잡·다양성에서 기인하며 이는 복합적인 사고와 피해를 유발한다. 또한, 한번의 화학사고는 대형 인명 피해뿐만 아니라 환경·생태 피해까지 국가차원의 재난으로 확대될 수 있는 위험성이 존재하기 때문에 유사사고 예방 및 대책 마련을 위한 구체적인 사고원인 분석이 필요한 실정이다. 이에 따라, 화학사고를 예방하고 피해 저감 방안 마련을 위해 과학적이고 검증된 화학사고 조사가 필수적이다. 특히 화재 폭발 사고의 경우는 지속적으로 증가하는 추세로 다양한 원인으로 인해 발생하고 있다. 원인을 살펴보면 가연물을 제거하지 않은 상태에서 작업과 작업자의 안전의식 결여, 점화원 발생 조건 등 세부적인 화재 폭발 발생 조건에 대한 명시가 있어야 한다.

주요 화재 폭발 사고의 원인을 분석한 결과 크게 작업형태는 반응기 또는 교반기에서 원료를 주입하는 과정에서 낙하에 의한 마찰대전, 충돌대전에 의한 사고가 많이 발생했고, 작업자가 수작업으로 작업하는 과정에서는 가연물인 폭발성 인화성 물질의 증기가 발생함에도 불구하고 가연물 제거를 위한 방지시설이 설치되어 있지 않거나 작업자의 안일한 의식에 의해 발생하는 경우도 많은 실정이다. 이렇게 조사 결과를 바탕으로 분석된 화학사고 사례를 활용하여 동종업종 및 유사업종에게 사고재발을 방지하기 위해 다양한 사고발생 원인과 방지대책을 강구하기 위한 노력이 필요하며 산업계에서도 화재·폭발 사고를 차단하기 위하여 작업중에 발생하는 가연물인 인화성물질 증기의 체류를 최소화 하기 위해서는 대기 방지시설(배기장치)을 통해 제거하여야 하며 그리고 점화원의 역할을 하는 정전기 방전 예방을 위해 인체대전, 충돌대전, 유동대전 등에 대해서는 접지 및 본딩 구축 및 인체제전복 착용을 통해 차단을 위한 노력이 필요하다. 다음은 유속제한 관리로 인화성증기의 와류 및 비말예방을 최소화하기 위해 드럼 및 용기에 물질 주입 시 액위가 배관의 직경 2배가 될 때 까지 정전기 발생량을 무시할 수 있는 1m/s 이하로 유속제한을 실시하여야 충전 전류가 증가하지 않아 사고를 차단할 수 있다. 이렇듯 사고원인 조사를 통해 생산되는 결과물은 재발방지 대책 마련의 기틀이 될수 있으며 산업계에도 지속적으로 알려 사고재발을 방지하고 현장안전 관리 강화 등 실질적인 안전사고 예방책으로 활용될수 있을것이라 기대한다.

연구실사고 발생 현황 분석 및 시사점

이명환·송무화·김승준·이황원[†]
한국생명공학연구원 국가연구안전관리본부

A Study on the Status of Laboratory Accidents and Related Implications

Myung-Hwan Lee·Mu-Hwa Song·Seung-Jun Kim·Hwang-Won Lee[†]

National Research Safety Headquarters

[†]Corresponding author: leehw@kribb.re.kr

과학기술분야 연구실은 연구활동의 특성상 화학적, 생물학적 유해인자 등 다양한 유해인자를 취급하고, 새로운 장치·물질 및 공정 등을 개발함에 따라 위험의 범위와 크기 등을 예측하기 어렵다는 특징을 가지고 있다. 또한, 대학생과 초임 연구원 같은 비숙련자부터 교수와 전문 연구원 같은 숙련자까지 다양한 신분의 연구활동종사자가 연구활동에 참여하고 있다. 이러한 특성을 반영하듯 최근 크고 작은 연구실 사고가 연평균 300여건 이상씩 발생하고 있다.

이에 본 연구에서는 최근 5년('20~'24)동안 과학기술정보통신부로 보고된 연구실사고조사표 정보를 바탕으로 사고 기인물, 발생 시점, 발생 원인, 피해자의 신분(연령대), 상해 정도 등의 주요 요인을 분류하고 빈도, 교차분석을 실시하였으며, 연구실사고의 주요 발생분야의 대표적인 사례를 확인해보고자 하였다.

연구 결과, 연구실사고는 대학, 연구기관, 기업부설연구소 순으로 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 사고 피해자의 대부분은 20대로 신분은 학생연구원, 비숙련 연구자로 확인되었다. 또한, 연구분야별 상해유형으로는 기계·물리 연구실에서는 위험·기계기구 취급 중 신체의 절단, 끼임 등 외상사고가 발생하였고, 화학·화공 연구실에서는 화학물질 반응에 의한 폭발 또는 누출에 의한 화상사고가 발생하며 의학·생물 연구실에서는 멸균기, 알콜램프 취급 중 화상사고가 대표적인 사고유형에 해당되는 것으로 확인되었다.

본 연구결과를 통해 연구실사고의 발생 현황을 공유하고, 향후 연구실 사고 예방 및 안전관리를 강화를 위한 개선 방안을 도출하는 데 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

트랜스포머 셀프어텐션 모델 적용을 통한 스마트 하수처리 사례 개선방안

윤형준[†]·허재성
(주)유테이씨

Improvement measures for smart wastewater treatment cases through the application of the Transformer self-attention model.

Hyung Joon Yoon[†]·Jea Seong Huh
UTEK CO., Ltd

[†]Corresponding author: hjyoon@utec.kr

본 연구는 기존 스마트 하수처리 기술의 구조적 한계와 운영상 비효율성을 극복하고자, 트랜스포머(Transformer) 기반 셀프어텐션(Self-Attention) 모델을 활용한 지능형 공정제어 기술을 제안한다. 기존의 스마트 하수처리 시스템은 일부 자동운전 기능을 갖추었으나, 여전히 정형화된 엔지니어링 로직 기반 제어 방식에 의존하고 있으며, 공정 특성과 시계열 변화에 대한 반응 능력이 낮다. 특히 복잡한 비선형 공정과 장·단기 센서값 변동에 유연하게 대응하지 못하고, 운전자의 경험과 개입에 따라 운전 효율이 좌우되는 기술적 한계를 가지고 있다. 또한, 개발 당시의 조건에 맞춰 고정된 제어 로직은 실시간 공정 변화에 대한 대응력이 낮고, 에너지 과소비 및 방류수질 불안정으로 이어질 가능성을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 트랜스포머 모델의 시계열 데이터 분석 및 장기 의존성 학습 능력을 활용하여 다변량 센서 데이터(예: NH_4^+ , DO, 송풍량 등) 간의 복합적인 관계를 파악하고, 이를 기반으로 실시간 공정제어 결정을 수행할 수 있는 인공지능 기반 제어 프레임워크를 설계하였다. 이 프레임워크는 정적인 로직 중심 제어가 아닌, 공정 조건 변화에 따라 동적으로 재학습 및 적응이 가능한 구조로, 기존 기술의 한계를 보완한다.

해당 기술은 기존 스마트 하수처리 시스템의 문제점을 개선하기 위해 개발된 프로토타입 AI 공정제어 소프트웨어 EnvAIs-AIR로 구현하였으며, 공법의 종류와 관계없이 다양한 처리 방식(A2O, SBR, 담체계열 등)에 적용가능한 범용 제어 능력을 갖춘 것이 특징이다. 트랜스포머의 멀티헤드 어텐션 구조는 센서 간 상호작용과 시간 지연, 미생물 반응 특성 등 복잡한 동적 특성을 반영하여 공정 최적화에 필요한 제어값(송풍량, 밸브 개도율, 제어 간격 등)을 도출한다.

EnvAIs-AIR는 공정 데이터에 기반한 실시간 예측 및 제어를 통해 에너지 소비를 효과적으로 절감하면서도, 방류수의 총질소(T-N), 총인(T-P) 농도를 법정 수질 내에서 안정적으로 유지할 수 있다. 기존 기술이 운전자의 지속적인 개입과 경험에 의존했다면, 본 시스템은 자율적 운전이 가능하며, 시간이 지남에 따라 반복 학습을 통해 성능이 향상되는 특징을 가진다.

본 연구는 트랜스포머 모델의 시계열 예측 역량을 하수처리 제어에 적용하여 기존 기술의 기술적·운영상 한계를 극복하고, 향후 AI를 통한 하수처리장의 완전 자동운전 구현을 위한 핵심 기술로서의 가능성을 제시한다.

화학물질 운송차량 사고대응 및 안전관리

이세용[†]·허선화·구본운·김병훈
원주지방환경청 충주화학재난합동방재센터

Accident response and safety management for chemical transport vehicles

Seyonglee[†]·Sunhwa heo·Bonwun Gu·Byoungsoon Kim
Chemical emergency preparedness center, Wonju regional environment office,
Ministry of Environment, Republic of Korea
[†]Corresponding author: leesy79@korea.kr

본 연구는 국내에 화학물질 운송·운반 차량사고 현황을 분석하고, 최근에 현장에서 대응한 사고 사례와 원인 조사 결과를 통한 안전관리 방안에 대해 제시하였다. 최근 10년간 국내에 화학물질의 제조량, 수입량은 지속적으로 증가하였고, 이에 따라 화학물질이 유통되는 양이 증가하여 화학물질에 의한 사고 증가 우려가 있다. 환경부, 환경청, 화학물질안전원 등 화학물질 사고 예방·대응·수습 관련 기관에서 다양한 화학사고 예방 활동을 추진하고 있어, 화학물질의 증가한 유통량에 비해 사고는 지속적으로 증가하고 있지는 않았다. 다만, 일부 화학물질은 생산, 운송, 사고대응 과정에서 관련법과 관리부처가 다원화되어 체계적인 관리에 한계가 있다. 폐기물관리법상 폐유, 폐유기용제, 폐페인트 등 폐기물을 자원화하여 생산된 재생연료유는 위험물안전관리법에 의해 관리를 받는 알루미늄 재질의 탱크에 실려 수요업체로 이동한다. 최근 발생한 사고에서는 운송차량 탱크의 알루미늄이 높은 pH에서 발열과 부식 반응이 발생된 것으로 보이고, 염소 이온의 검출과 공식(Pitting corrosion)에 의한 파공(Pit) 형태는 염소 이온이 탱크 부식을 가속화한 것으로 판단된다. 유사사고 재발 방지를 위해 화학물질 수요자 대상으로 안전 관리방안을 마련하였고, 사고 대응 과정에서 사고 대응 인력의 안전을 확보하기 위해 사고대응 장비(열화상카메라) 측정 권고안을 마련하고 있다. 근본적으로는 사각지대에 놓인 화학물질에 대해 관계 부처간 소통과 협업을 통해 화학물질을 체계적이고 통합적으로 관리할 필요가 있다.

위험·유해물질(HNS) 해양사고 대응가이드 활용방안 - 시차별 화학사고 대응단계를 중심으로 -

이선종[†]·김정환·박세진
해양경찰청 기동방제과[†]

A Strategy for Using the HNS Marine Accident Response Guide Focused on Time-Phased Reponse Stages

Lee, Sun-Jong[†]·Kim, Jeung-Hwan·Park, Se-Jin
Korea Coast Guard Marine Pollution Response Division
[†]Corresponding author: waterwork@korea.kr

급속한 산업변화 등으로 인해 해상으로 운송되는 화학물질의 물동량과 종류의 증가는 해상화학사고 발생 우려도 함께 가중되고 있다. 기존의 해양환경에서는 선박 등에서의 기름유출로 인한 사고가 이슈가 되어왔다면, 앞으로는 다양한 화학물질에 의한 화재·폭발을 동반한 복합사고와 LNG, 메탄올, 암모니아 등과 같은 친환경선박 연료 도입 증가에 따른 화학사고의 위험성이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 다양한 HNS 운송과정에서의 해상화학사고 대응에 적합한 절차 확립이 필수적이 되었다.

기존과 대비하여 해양경찰에서 활용 중인 HNS 해양사고 대응 가이드는 항만시설과 같은 육상 중심에서의 대응과 지원 임무로 구성이 되었다면, 이번 새롭게 개편한 가이드에서는 해상 중심으로 대응단계를 구분하여 필수적으로 고려할 사항을 포함한 내용으로 개정하여 활용할 수 있도록 하였다. 주요 구성내용으로는 사고선으로부터 사고발생을 확인하는 상황접수단계부터 대응세력이 사고현장에 도착하여 조치하는 단계, 사고의 위험성을 판단하여 우선적으로 긴급한 조치를 시행하는 단계(필요시 오염물질 방제조치), 마지막으로 긴급조치가 마무리되어 사고선 안전이동, 사고조사 등의 사후 안전관리까지의 단계로 구분하여 시차별 총 5단계로 정리하였다.

특히나, 사고발생 초기부터 화재·폭발, 충돌·침수 등 유형별로 사고선 자체적으로 긴급하게 조치하여야 할 비상계획에 따른 이행사항을 확인하고, 의무조치를 유도하는 등의 단계를 통하여 2차 사고 예방 및 피해를 최소화하고, 사고의 위험성 판단단계에서는 처음 발생한 사고의 양상과 선체의 안전, 기상 등 환경적인 영향으로 인해 전개될 수 있는 피해예측 과정을 통해 긴급한 조치 판단이 신속하게 이루어져 대응할 수 있도록 하였다. 각 조치단계에서는 상황실, 경비정 등 각 부서명칭을 표기하여 임무에 대한 혼선을 방지하고, 대응절차와 고려사항을 기록하여 명확한 임무수행이 가능하도록 하였다.

새롭게 개정된 HNS 해양사고 대응 가이드는 단기적으로 각 기능별 임무, 화학물질 대응정보 확인, 초기 비상조치 시행 등 실제 화학사고 시 대응에 활용하고, 대응부서에서 전문성 강화를 위한 교육 및 훈련 교재로 활용, 실증하여 지속 보완할 계획이며, 사고대응 정보를 지속 구축하여 AI 기반 본 가이드 내용의 정보를 활용하여 사고유형별 의사결정, 사고 지휘 등의 자료로 활용해 갈 예정이다.

해상화학사고 대응강화를 위한 중점관리대상물질 관리 방안

김혜미[†]·김정환·박세진
해양경찰청 기동방제과[†]

Management Plan of Material Subject to Critical Management for Strengthening Response to Marine Chemical Accidents

Kim, Hye-Mi[†]·Kim, Jeung-Hwan·Park, Se-Jin
Korea Coast Guard Marine Pollution Response Division
[†]Corresponding author: neverbroken@korea.kr

국제해사기구(IMO)의 온실가스 배출감축 전략에 따른 LNG·암모니아·메탄올 연료 추진 선박 및 화학물질 해상 물동량 증가로 화재·폭발 등 복합재난사고 위험성이 증가하고 있다. '08년도 국가긴급방제계획에 중점관리대상 물질 68종을 지정·고시하고 있으나 최근 기준 물동량 및 종류의 증가로 해상환경 변화에 대응하기 위한 물질 재정비가 필요함에 따라 '24년 연구용역을 통해 물동량의 위험성과 유해성을 추가한 물질선정 기준을 마련하였다.

이에 따라 해양환경관리법 유해액체물질 799종 중 해상물동량 중심으로 평가대상 목록을 선정하였고 화학, 환경, 보건 등 학식과 경험이 풍부한 전문가로 인력풀을 구성하여 후보 물질에 대한 자문을 진행, 의견을 수렴한 평가방법과 기준을 통해 후보물질을 선정하였다.

후보물질 선정에는 최근 5년 평균 국내 운송 HNS물동량 10m³이상 40여종을 우선 선종하였고 나머지 물질은 확보된 국·내외 물질자료를 기반으로 물동량 50%, 위험성 30%, 유해성 20%의 비중으로 평가, 41종의 후보물질을 선정 추가하였다.

위와 같이 선정된 물질은 해양환경관리법 제61조에 의거 국가긴급방제계획에 포함하는 중점관리대상 물질로 개정하고 고시물질에 해당되는 HNS취급시설·선박에 대한 양·적하 물동량을 파악하여 안전관리 및 비상계획서 점검에 활용하고자 한다. 또한 고시물질의 사고대응 정보 확보 및 장비·자재 비축기준을 마련하고 사고 예방과 대응에 필요한 해양환경관리법 개정을 추진할 예정이다.

가스운반선 충돌사고 대응사례에 관한 고찰 - LNG운반선-화물선 충돌사례 사고대응 -

이효근[†]·강상진·최현규
제주지방해양경찰청 해양오염방제과[†]

Review of Marine Pollution Prevention and Emergency Response through Case Studies of Gas Carrier Collision Accidents

Lee, Hyo-Geun[†] · Kang, Sang-Jin · Choi, Hyun-Kue
Korea Coast Guard Region-Jeju Marine Pollution Response Division
[†]Corresponding author: lhk7103@korea.kr

해상교통량의 증가와 친환경 연료 선박의 증가로 복합해양사고 발생 가능성이 점점 높아지고 있으며, 그 피해 규모도 상대적으로 커지고 있는 추세이다. 본 연구는 2024년 2월 17일, 여서도 남서방 해상에서 LNG운반선(에스엠제주LNG1호)과 화물선(케이에스헤르메스호) 간 충돌 사고에 대해 고찰하였다. 위험물(액화천연가스, LNG)운반선과 대형 화물선 충돌로 인한 화재, 폭발, 해양오염 등 2차 사고 위험이 내재된 복합 해양 사고로, 신속하고 체계적인 대응이 요구되는 사고였다.

대부분의 해양 사고는 현장 기상이 불량하거나, 선박의 정상적인 부양 상태가 아닌 경우가 많아 사고 수습에 있어 접근 방식이 다양하게 요구된다. 사고 직후 해양경찰 경비함정과 및 관계기관은 현장에 신속 출동하여 인명구조, 선체 안전점검 및 사고 확산 방지 등의 긴급조치를 실시하였고, 총 77명의 승선원이 전원 구조되었다. 또한 사고 선박의 손상 상태와 위험물 탱크의 누출 가능성에 대한 합동점검 및 안전관리, 방제대책이 즉각 이행되었다.

특히, 본 사건은 국내에서 LNG운반선과 화물선과의 충돌은 처음 발생한 사고로 사고대응 절차 등은 지속적인 연구가 필요하다. 아울러 해양경찰은 2차 사고 예방을 위해 비상예인줄 설치, 사고선 내 안전구역 설정, 고출력 예인선 투입 등 복수의 안전조치가 병행되었다. 해양오염 확산예측 및 모니터링, 민간자원 및 장비 동원 등 유관기관 협업체계가 효과적으로 운영되었다. 사고 후속 조치로 선체 안정성 확보, 잔류가스 및 위험물 처리, 환경 피해 차단, 조선소 이동 및 복구작업까지 단계별로 실시되었다.

본 사례는 대형 위험물 선박 충돌사고 시 기존의 기름유출 위주의 사고대응에 집중되었으나, 가스 운반선 사고는 사고 대응세력의 접근 방식과 조치에 있어 추가적인 안전조치가 필요하다.

특히 기존의 사고대응 방식과 같이 인명구조를 우선하다 보니 선체의 안전조치를 위한 사전 예방적 조치에 대한 추가적인 대응에 관한 검토가 필요하다.

본 연구는 가스 운반선 사고 시 효과적인 초동대응, 유관기관 협업, 그리고 2차 피해 확산 방지를 위한 실질적 안전관리 방안과 향후 유사 사고 대응을 위한 정부의 사고대응 차원의 개선점을 검토한 것으로, 해양 위험물 운송 및 사고대응 분야에서의 실질적 시사점을 제공할 것이다.

가상현실(VR)기반 해상 화학사고 안전교육 콘텐츠 개발 및 교육효과분석

이동훈·신수빈·김민우·이청수·임용순
 환경부 화학물질안전원

Development and Evaluation of Virtual Reality-Based Safety Training
 Content for Marine Chemical Accidents

DongHun Lee·SuBin Shin·MinWoo Kim·ChungSoo Lee·YongSun Im
 National Institute of Chemical Safety, Government of Environment
 †Corresponding author: kihm@kihm.org

최근 해양을 통한 유해화학물질(HNS: Hazardous and Noxious Substances) 운송이 증가하면서 선박 내 화학사고의 발생 가능성이 높아지고 있다. HNS는 누출 또는 반응 시 화재, 유독가스 발생, 해양 오염 등 중대한 2차 피해를 유발할 수 있어, 사고 초기의 신속한 판단과 유관기관 대응 인력의 사전 교육과 훈련이 중요한 역할을 수행하지만 현재 훈련체계는 문서 중심 도상훈련에 머물러 있어 반복성과 몰입도, 실시간 협업능력에 한계가 있다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해, 가상현실(VR, Virtual Reality)을 기술을 활용한 해양 HNS 사고 대응 시나리오 기반의 훈련체계를 개발하고, 그 교육 효과를 정량적·정성적으로 분석하였다. 콘텐츠는 최근 화학사고 경향과 위험성을 반영한 자일렌과, 인화알루미늄(훈증제) 화학사고를 기반으로 사고 발생 인지, 물질특성확인, VTS통신, 농도측정, 방제 대응 등의 시나리오를 가상 환경에서 반복 체험할 수 있도록 구성하였다. 교육 참가자를 대상으로 지식평가, 상황판단력, 몰입도를 포함한 만족도에 대해 정성적·정량적 지표를 분석한 결과, VR 기반 교육이 기존 방식 대비 유의미한 효과 향상을 보이는 것으로 나타났다.

개발한 VR 훈련체계는 HNS 사고 대응의 실효성과 반복적 훈련을 통한 대응능력 향상, 사고 발생 시 신속한 의사결정 지원 등 다층적 효과를 기대할 수 있으며, HNS 사고 대응훈련의 실효성과 현실성을 강화함은 물론, 유관기관의 대응역량 향상에 기여할 수 있는 체계적인 훈련 플랫폼 개발의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

항만 위험물 저장시설 화재폭발사고와 해양오염 (부제: UTK 저장탱크 사고사례)

박정호·유대선
울산소방본부 특수대응단

Fire and explosion accident at port hazardous materials storage facility and marine pollution

Jeong-ho Park·dae-seon Yu
Ulsan Fire Department Special Response Team
Corresponding author: www.jojojo@korea.kr

세계적인 에너지 허브 울산항은 전체 화물의 약 80% 이상이 액체 화물(원유, 석유제품, 화학제품 등)이며, S-OIL, SK에너지, 현대오일뱅크, 한화토탈에너지 등 주요 정유·화학 기업들이 인근에 입지하고 있다. 또한 울산항은 액체 화물 물동량의 50% 이상을 처리하는 유류·화학물질 저장탱크, 위험물 창고 등이 인근에 밀집 되어있는 국내 최대 액체 화물 처리 항만이다.

2024년 12월 기준 울산항 상업용 탱크터미널 탱크수는 771기이며 저장용량은 4500274kℓ 로 주요 취급화물은 석유정제 및 액체화학제품 등 다양하다.

울산 신항에 위치한 유나이티드터미널코리아는 전용부두 2곳을 운영 중이며 보유탱크수는 64기, 저장용량은 468,450kℓ이고 주요 취급화물은 휘발유, 바이오디젤, 에탄올 등이다.

지난 2025년 2월 10일 솔베이트 1695kℓ가 저장된 옥외저장탱크 상부에서 취급부주의로 인해 폭발이 발생하여 작업자 2명 중 1명이 사망하고, 1명이 부상을 입었다. 이 폭발로 인해 옥외탱크 상부에서는 화재가 발생하였고 3시간 넘게 전면화재가 지속되면서 복사열로 인해 인접한 탱크가 연소확대로 이어질 수 있는 상황이었다.

신속한 대용량방사포 설치와 효과성이 뛰어난 포소화약제를 사용해서 연소확대가 되기 전 화재를 진압 할 수 있었다. 만약 대용량방사포 설치가 지연되었거나 소방용수 공급이 원활하지 않았다면, 영국 햄델 Buncefield 석유 저장소에서 발생한 폭발사고와 같이 저장시설 전체가 연소확대되어 국가재난으로 확산 될 수 있는 중대한 사건이었다.

2005년 12월 발생한 Buncefield 석유 저장소 화재로 인해 20개 이상의 저장탱크가 화재로 소실되었고, 인근 산업 시설과 주거 지역에 심각한 피해를 주었으며 수백명이 대피하고 수십명의 부상자가 발생하였다. 대형재난으로 인해 토양이 심각하게 오염 되었고, 현장에서 발생한 오염수만 약 34000kℓ가 넘었다. 이 중 일부는 콜른 강으로 유출되어 심각한 환경피해를 일으켰다. 옥외탱크저장소의 방유제는 위험물의 유출을 방지하고 화재 확산을 효과적으로 차단 할 것이라고 예상되지만 Buncefield 석유 저장소 재난사례와 같이 여러 개의 저장탱크에서 화재가 발생하면 엄청난 양의 소방용수가 필요하고 현장에서 사용된 오염수의 누출로 심각한 환경피해를 초래할 수 있다. 재난상황을 대비해서 위험물 저장시설의 안전관리 체계 강화와 비상대응기관의 합동대응체계 개선방안에 대해 고찰해 보고자 한다.

위험물 옥외탱크저장소에서 마이크로파일 적용을 위한 지지력 안전성 연구

조호담[†]·임종진·박우인
한국소방산업기술원

A Study on Safety of Bearing Capacity for Micropile Application in Aboveground Tank Storage of Hazardous Substances

CHO HODAM[†]·LIM JONG JIN·PARK WOO IN
Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: 2251@kfi.or.kr

In recent years, aboveground tank storage facilities with capacities exceeding 500,000 liters have been constructed in Korea using precast PHC (Pretensioned Spun High-strength Concrete) piles for foundations. This method has gained popularity due to the consistent quality of PHC piles and the well-established inspection and management system. However, in some practical construction situations, the use of precast PHC piles may be difficult due to space constraints. In such cases, in-situ cast micropiles are considered a viable alternative.

This study investigates the bearing capacity and safety characteristics of micropiles for their potential application in aboveground tank storage of hazardous substances. Focusing on semi-specified outdoor tank storage facilities with capacities under one million liters, the research combines analytical modeling and full-scale field testing under various ground and loading conditions. The objective is to evaluate whether micropiles can achieve foundation stability equivalent to or superior to conventional PHC piles. Based on these findings, the study also seeks to discuss the feasibility of applying micropiles in specified outdoor tank storage facilities exceeding one million liters in capacity.

This special session will present the key outcomes and technical implications of the research, providing empirical evidence to support the use of micropiles under constrained site conditions. Furthermore, it aims to facilitate constructive dialogue with professionals from industry, academia, and regulatory bodies to advance foundation design practices and safety management standards for hazardous materials storage infrastructure.

할로젠 화합물의 구조 특성에 따른 인화성 연구

반준화^{†*}·주민언·양성환·박주영
한국소방산업기술원

Flammability study of halogen compounds via structural properties

JUN HWA BAN^{†*}·MIN EON JOO·SEONG HWAN YANG·JU YOUNG PARK

^{*}Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: 2240@kfi.or.kr

Halogen compounds refer to chemical compounds formed by the combination of halogen elements—fluorine (F), chlorine (Cl), bromine (Br), and iodine (I)—with other elements. These compounds are widely used in industries such as pharmaceuticals, pesticides, plastics, cleaning agents, and flame retardants, as well as in well-known fire extinguishing agents like halon and clean agents.

Despite the broad range of products and applications, there is limited knowledge regarding the physical hazards of halogen compounds. This is closely related to their known health and environmental hazards. Halogen compounds are recognized as health hazard substances that, depending on the type, can exhibit toxicity, carcinogenicity, and endocrine-disrupting effects. Furthermore, certain types are considered environmental hazards due to their contribution to ozone layer depletion and global warming.

Although halogen compounds are commonly used as fire extinguishing agents and flame retardants, their physical hazards are often overlooked because of their established health and environmental impacts. However, depending on their chemical structure, some halogen compounds can pose physical hazards, such as highly flammable gases or special flammable liquids.

This study aims to distinguish the contrasting properties of halogen compounds—namely their flame-retardant and fire-extinguishing characteristics versus their potential flammability—from an organic chemical structural perspective. The findings of this study will serve as foundational data for assessing the flammability risks of halogen compounds in hazmat safety management

옥외탱크저장소의 지진가속도 및 하부 수평내력 산정방법 연구

황수현·임종진[†]·김재현
한국소방산업기술원

A Study on the Estimation Method of the Seismic Acceleration and Base-Level Lateral Resistance of Above ground storage tanks

HWANG SOOHYUN·LIM JONGJIN[†]·KIM JAEHYUN

Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: jjlim@kfi.or.kr

The seismic load occurring in a general structure is expressed as the product of the weight of the structure and the seismic acceleration. The method of calculating this seismic acceleration has been established by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport as a seismic design standard. Similar to the ASCE code, which is the American Society of Civil Engineers standard, the ground is divided into 6 grades through shear wave velocity analysis, and the United States regulates the seismic design method of outdoor tanks through API650 based on this code.

However, the seismic design standards applied to outdoor tanks for hazardous materials in Korea are based on the Japanese law, and although they are similar in that they use the vibration model proposed by Housner in 1954, which divides the force generated during an earthquake into inertial force and convective force, there are differences in the calculation and application of the seismic coefficient.

Also, When an earthquake occurs, the ground shakes, so horizontal displacement inevitably occurs in outdoor tanks on the ground. When horizontal displacement occurs, depending on the amount of stored material, a uplifting force occurs at the bottom of the tank body due to the flow of liquid. In order to confirm the seismic performance of this part, the Hazardous Materials Safety Management Act requires a review of the horizontal strength of the holding, but the displacement pattern is completely different depending on the presence or absence of anchor bolts.

Even if the tank is heavy enough to not move under horizontal force, paradoxically, the bottom plate will experience a lifting force due to the moment caused by the weight of its contents. Therefore, this study proposes a new horizontal strength examination method that takes into account the presence or absence of anchor bolts and the seismic design standards of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

낙구식타격감도시험에서 표준물질의 50% 폭발 높이를 결정하기 위한 연구

박인숙[†]·양성환·박우인
한국소방산업기술원

A study on the determination of 50% probability of explosion height in a ball drop impact test for oxidizing reference material

PARK INSOOK[†]·YANG SUNGHWAN·PARK WOO-IN

Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: 2253@kfi.or.kr

낙구식타격감도시험은 폭발성 물질의 민감도를 쉽게 확인 할 수 있는 시험방법 중 하나이다. 낙구와 같은 물리적 충격에 의해 폭발성물질이 50%의 확률로 폭발하는 높이를 비교함으로써 폭발성 물질의 민감도 차이를 확인할 수 있으며, 50% 폭발 높이는 Bruceton up-and-down test를 통해 쇠구슬을 일정 높이에서 시료 위로 떨어뜨려 시료의 폭발여부를 관찰하여 통계적으로 산출할 수 있다. 위험물안전관리법에서는 제1류 산화성고체의 충격에 대한 민감성을 판단하기 위하여 낙구식타격감도시험을 적용하고 있다. 본 연구에서는 위험물안전관리법상 제1류 산화성고체 중 질산칼륨을 표준물질로 하여 질산칼륨과 적린의 혼합물이 50%의 확률로 폭발하는 높이를 결정하기 위해 낙구식타격감도시험 및 Bruceton up-and-down test를 수행하였다. 또한 시험 과정에서 50% 폭발 높이를 결정하는데 영향을 미치는 시료처리, 시험환경 및 장비상태 등의 외부요인을 파악하고 시험 결과의 재연성에 대하여 고찰하였다.

The drop weight impact sensitivity test is one of the simple and effective methods for evaluating the sensitivity of explosives. By comparing the height at which an explosive material detonates with a 50% probability due to a physical impact, such as a falling weight, it is possible to determine the relative sensitivity between explosives. The 50% explosion height (H_{50}) can be statistically derived using the Bruceton up-and-down method, in which a steel ball is dropped from a specific height onto the sample and the explosion is observed.

According to the act on the safety control of hazardous substances law in Korea, the drop weight impact sensitivity test is applied to evaluate the impact sensitivity of 1st group oxidizing solids. In this study, potassium nitrate as a reference material among 1st group oxidizing solids was used to perform the drop weight impact sensitivity test and the Bruceton up-and-down method to determine H_{50} of a mixture of potassium nitrate and red phosphorus.

Additionally, we examined the several factors that may influence the determination of the H_{50} value, such as sample preparation, laboratory environment, and equipment condition, and discussed the reproducibility of the results.

화학공정 내 위험물의 이상반응 평가 연구

반준화·최유진^{*·†}·박주영
한국소방산업기술원

Evaluation of abnormal reactions of hazardous substances in Chemical Processes

JUN HWA BAN·YU JIN CHOI^{*·†}·JU YOUNG PARK

^{*}Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: littleme96@kfi.or.kr

This study aims to explore methods for evaluating the risks associated with the mixture states of various hazardous substances used in chemical processes within national strategic industries, such as semiconductor manufacturing plants. Through this research, we seek to emphasize the necessity of assessing abnormal chemical reactions, especially in industrial sewage, involving hazardous materials in the course of chemical processing.

Semiconductor manufacturing, in particular, involves the use of numerous chemical substances that result in a wide range of mixtures during various process stages. The primary objective of this study is to identify and assess potential risks at each stage and composition of these processes. To this end, we propose a framework for evaluating abnormal reactions, leveraging the testing equipment, technical capabilities, and professional personnel of the Korea Fire Institute(KFI).

Six evaluation criteria were established: autoignition point measurement, viscosity measurement, detection of exothermic reactions, observation of precipitation, formation of gas bubbles, and phase separation. Assessments were conducted across five time points: immediately after mixing (Day 0), and on Days 1, 3, 4, and 7.

Four representative samples commonly handled in semiconductor plants were selected and tested across these six criteria according to specified mixture ratios. Over the 7-day evaluation period, tendencies in reaction and behaviors were tracked and analyzed.

Based on the results, this study discusses the observed tendencies for each test criterion, proposes considerations for other future risk assessment initiatives, and explores potential additional evaluation criteria. Furthermore, the applicability of this methodological framework to other industrial sectors beyond semiconductor manufacturing is also reviewed.

준특정옥외탱크저장소 안전성 향상을 위한 안전성능검사 확대 도입 고찰

강기민[†]·박우인·박주영

한국소방산업기술원

A Study on the Expansion of Safety Performance Inspections to Enhance the Safety of Semi-Specific Outdoor Tank Storage Facilities

KANG KI-MIN[†]·PARK JOO-YOUNG·PARK WOO-IN

Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: kimin.kang@kfi.or.kr

With the increasing scale of liquid hazardous material storage facilities, there is a growing need to enhance the safety management system for designated and semi-designated AboveGround tank storage facilities. Currently, safety performance inspections for designated AboveGround tank storage facilities (over 1 million liters) are comprehensively conducted by KFI and include foundation, ground, and welding (non-destructive) inspections. However, semi-designated facilities (500,000 to 1 million liters), which are structurally and risk-wise similar, are only subject to limited hydrostatic testing conducted by private tank inspectors.

This presentation proposes expanding the scope of safety performance inspections for semi-designated facilities, with the Korea Fire Institute of Industrial Technology as the leading inspection body. Statistical analysis and case studies clearly reveal the necessity of this improvement—highlighting, for example, a 98% rate of welding defects found in designated facilities and an average of 5 incidents annually involving AboveGround tanks. Additionally, the proposal is supported by precedent from Japan, the High-Pressure Gas Safety Act, and the Industrial Safety and Health Act, ensuring its legal and operational feasibility.

If implemented, this system would apply to approximately 47 new or modified facilities per year, enabling early-stage quality assurance and improved resilience against unforeseen natural disasters such as earthquakes and typhoons. Ultimately, this initiative is expected to strengthen public safety by reducing fire and explosion risks associated with hazardous material leaks and contribute to raising the overall safety standard across the hazardous materials industry.

동영상 기반 위험물 사고 응급 대응 교육 개발과 시범 적용

왕순주·한민섭*·안은애*·최다운*·김지현*
한림대학교·*한림대학교동탄성심병원

Development and Pilot Application of Video-based Hazmat Emergency Response Training

Soon-Joo Wang[†]·Minsub Han*·Eunae Ahn*·Daun Choi*·Jihyun Kim*
Hallym University·*Hallym University Dongtan Sacred Heart Hospital
[†]Corresponding author: wsjking@naver.com

위험물 사고에 대처하기 위하여 평소에 대비해야 할 가장 중요한 것이 사고 발생 시 대처를 위한 교육 훈련이며, 국내외에는 다양한 위험물 안전, 대응 관련 교육이 존재한다. 국내에는 다양한 기관에서 다양한 대상에 대해 위험물 사고에 대한 교육훈련 프로그램이 있으나 크게 보면 교육수준 기준으로 전문교육과 일반교육으로 구별할 수 있고, 단계별로 보면 예방교육과 대응교육으로 구분할 수 있다. 그러나 대부분 위험물 사고 피해자에 대한 실제적 인명피해 저감 조치에 대한 내용은 피상적이고 그 원리와 실제를 제대로 전달하지 못하는 문제가 있다. 이는 위험물 사고의 전 단계별로 치밀하게 대처하지 못하고 일부 단계만 집중해서 교육훈련을 하기 때문에 교육과정을 이수하더라도 전반적인 체계와 원리에 대한 이해도가 떨어지고 이에 따라 실제 적용 시 대처 수준을 저하시키는 요인이 되기도 한다. 많은 경우 교육용 동영상이 애니메이션으로 되어 있어 실제 환경을 구현하는 수준이나 전문성이 떨어지고, 이러닝 형태도 많아 교육강사가 현장에서 집중하고 이해시키도록 관리가 되지 않고 있다. 이에 본 연구진은 실제 시나리오에 기반한 실사 촬영을 통하여 위험물 사고에 대한 대상별, 수준별, 단계별 동영상을 제작하였다. 이 중 본 연구에서는 2차에 걸쳐 다양한 위험물을 취급하는 반도체 생산 기업의 위험물 사고 대응 종사자를 대상으로 교육훈련을 시행하였다. 동영상은 위험물 사고 발생을 가정하여 공통 교육, 현장 처치, 이송중 처치, 사고 사례, 사고 시 소생처치로 구성되어 4시간의 과정으로 실습을 포함하여 적용되었다. 교육에 참석한 인원 모두 교육에 대한 만족이 보통이상으로 교육자 중 90% 이상이 교육에 만족하였고, 대부분이 교육의 필요성을 인지하고 있었으며, 본 교육에 대한 동영상의 효과에 긍정적으로 응답하였다. 위험물 사고에 대한 교육 시 위험물 사고의 전 단계별 이해도를 높이고, 인명피해 저감을 위한 실제적능력 향상을 위하여 현장교육에 적절한 동영상의 활용은 효과적으로 판단된다.

핵심용어: 위험물, 동영상, 교육, 훈련, 위험물 사고

Keyword: Hazardous Material, Video, Education, Training, Hazmat

감사의 글

1. 본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발사업에서 지원받았습니다.
2. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2023R1A2C1002938).

동아시아에서의 의도적 위험물 사고의 동향

왕순주[†]·한민섭^{*}·안은애^{*}·최다운^{*}·김지현^{*}
한림대학교·*한림대학교동탄성심병원

Trends in Intentional Chemical Accidents in East Asia

Soon-Joo Wang[†]·Minsub Han^{*}·Eunae Ahn^{*}·Daun Choi^{*}·Jihyun Kim^{*}
Hallym University·*Hallym University Dongtan Sacred Heart Hospital
[†]Corresponding author: wsjking@naver.com

1. 총론

테러리즘이나 화학무기 사용을 포함한 의도적 화학물질 사용은 대규모 인명 피해와 공포를 유발할 수 있으며 지역적 안보와 공중 보건을 위협할 수 있다. 최근 진화하는 테러리즘으로 인해 전세계적인 의도적인 화학물질의 사용이 증가하고 있다. 그러나 이러한 패턴은 지역적 특성을 나타낼 수 있어, 한국이 포함된 동아시아의 패턴을 이해하는 것은 효과적인 대응책과 대비 전략을 개발하는 데 중요하다. 이 연구는 2020년 까지 51년간 발생한 의도적 화학 사고에서 화학물질 사용의 지리적 분포와 시간적 추세를 분석한다.

2. 연구 방법

본 서술적 관찰 연구는 1970년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지의 글로벌 테러리즘 데이터베이스(GTD)에서 데이터를 2024년 9월에 추출하였다. GTD는 메릴랜드 대학교가 주도하는 미국 국토안보부 명예 우수 센터에서 작성한 전세계적인 테러리즘, 의도적 사고 데이터베이스이다. 이 중 연구자는 12가지 분류 중 의도적인 화학사고를 중심으로 추출하고, 이후 전세계에서 분류된 12개 지역 분류 중 동아시아로 분류된 내용을 추출하였다. 데이터 추출은 사건 날짜, 위치, 지역적 맥락을 포함하였다. 지리적 공간 분석과 시간적 분류를 통해 추세와 주요 지역을 파악하였다.

3. 결과

51년간 총 209,706건의 테러, 의도적 사고 중 동아시아에서 발생한 내용은 847건이었다. 이 중 화학물질을 사용한 의도적 사고는 18건이었다. 이 중 일본이 13건으로 가장 많고 중국 3건, 대만과 홍콩이 각각 1건이었으며 국내에서 보고된 건수는 없었다. 같은 시기에 전세계적으로 총 270건의 화학무기 사고가 기록되어 동아시아는 많은 인구에도 불구하고 전세계에서 차지하는 의도적 화학사고의 비율은 6.7%로 낮게 나타났다. 같은 시기 중동과 북아프리카가 주요 다빈도 지역이었으며, 이라크와 시리아 같은 국가에서 중요한 클러스터가 형성되었다. 시기적으로는 동아시아에서는 일본의 1990년대가 18건 중 11건을 차지하여 이 당시의 사회상을 반영한다고 보인다. 21세기에 들어서는 동아시아의 다양한 국가에서 의도적 화학사고가 발생하는 추세적 변화를 보인다. 국내에서 보고가 되지 않은 것은 국내의 사고가 비의도적인 화학사고 위주로 발생함을 나타낸다.

4. 결과

본 연구는 국내의 화학사고 연구가 비의도적 사고의 국내 발생 위주로 연구되어 국제적인 시각과 추세에 대한 통찰이 필요함을 강조한다. 의도적 화학사고의 영향을 완화하기 위해서는 전통적인 화학사고 대책과 더불어 화학사고 종사자에 대한 훈련 강화, 자원의 우선적 할당, 국제적인 정책 공조가 필수적이다. 이 연구는 향후 새로운 위협에 대한 지속적인 모니터링과 적응의 중요성을 강조하면서 화학물질 안전에 대한 새로운 통찰력을 제공한다.

Acknowledgments

1. This subject is supported by Korea Ministry of Environment(MOE) as "the Chemical Accident Prevention Technology Development Project."
2. This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2023R1A2C1002938)

Keyword: 화학, 사고, 의도적, 동아시아, 테러(Chemical, Accident, Intentional, East Asia, Terror)

메타버스 기반 위험물 유출사고 환자 대응 훈련 콘텐츠 개발의 필요성과 적용 가능성

박선영·모효정
주식회사 뉴베이스

Assesing the Need and Feasibility of Metaverse-Based Training for Hazmat Spill Response

Sun-young Park·Hyo-jung Mo
Newbase Inc.

*Corresponding author: momo@newbase.kr

1. 배경 및 목적

국내 산업 현장에서의 위험물 유출사고는 지속적으로 증가하고 있다. 2024년 기준 총 85건이 발생하였으며, 이는 2022년(80건) 대비 6.3% 증가한 수치이다. 주요 사고 유형은 화재(42건), 폭발(20건), 누출(18건)로, 이 중 인적 요인에 기인한 사고가 50건에 달하며 사망 9명, 중상 32명, 경상 50명의 인명 피해가 보고되었다. 대표적 사례로는 울산신항에서의 디옥틸테레프탈레이트 유출사고, 경기지역 화학물질 누출로 인한 주민 대피 상황 등이 있다. 이러한 사고는 복잡한 현장 상황과 신속한 대응 역량을 요구하며, 반복적·몰입형 실습을 통해 실질적 대응력을 강화하는 교육 콘텐츠의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구는 메타버스 기반의 디지털 훈련 시스템이 이러한 요구에 어떻게 기여할 수 있는지 검토하고, 그 교육적 적용 가능성을 제안한다.

2. 위험물 사고 대응 훈련 현황 및 문제점

현행 위험물 사고 대응 교육은 소방청, 환경부 등 정부기관의 지침에 기반하나, 기관별로 분산 운영되고 있으며 대다수가 이론 중심 교육에 머무르고 있다. 법정 교육은 대상, 내용, 시간 등이 상이하여 일관성 있는 통합 훈련체계가 부족하며, 특히 환자 발생 시의 다기관 협업 대응이나 실전 시뮬레이션은 거의 시행되지 않고 있다. 이로 인해 실제 사고 시 대응 역량의 편차가 발생할 우려가 존재한다.

3. 위험물 대응 디지털 교육 콘텐츠 개발 현황

VR 및 메타버스 기술을 활용한 위험물 사고 대응 콘텐츠 개발이 최근 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, &저장탱크 유해화학물질 누출 대응 VR& 콘텐츠는 가상현장에서의 사고 징후 식별, 비상연락, 대피, 방제 과정을 체험할 수 있도록 설계되어 반복 학습을 가능하게 한다. 또한, &메타버스 기반 다기관 협업 훈련 플랫폼&은 사용자 간 실시간 상호작용과 다양한 시나리오 기반 대응 훈련을 통해 팀워크, 의사결정, 역할 수행 능력을 동시에 강화할 수 있다. 그러나 초기 개발 비용, 하드웨어 접근성, 실제 현장 조건의 완전한 재현 한계 등은 기술적·운영적 과제로 남아 있다.

4. 메타버스 기반 교육의 필요성과 기대 효과

위험물 유출 사고는 단시간 내에 화재 발생, 확산 통제, 다기관 협업 등의 복합적인 대응이 요구되는 고위험 상황이다. 메타버스 기반 시뮬레이션은 이러한 복잡한 상황을 현실감 있게 가상환경에서 재현하며, 반복적 실습과 사용자 간 협업 훈련을 통해 실제 대응 역량을 향상시킬 수 있다. 다수의 사용자가 동시에 접속하여 상호작용할 수 있어, 현장 의사소통 능력 및 조직적 대응능력의 향상도 기대된다.

따라서 메타버스 기반 위험물 유출사고 환자 대응 훈련 콘텐츠는 단순 지식 전달을 넘어, 실제적 행동 역량 강화를 위한 핵심 교육 도구로의 전환점이 될 수 있으며, 향후 산업안전 및 재난 대응 교육의 디지털 전환을 선도할 중요한 수단으로 평가된다.

응급환자 이송 중 데이터 불연속성문제를 해결하는 Edge+Cloud 이중저장 시스템

박시은¹

주식회사 달구 부설 테크볼런스 연구소1

Annual Conference of the KIHM : *A Dual Edge-Cloud Storage Architecture for Ensuring Data Continuity During Emergency Medical Transport*

si eun park¹

TechBalance R&D Center, a Subsidiary of Dallgoo Inc¹

[†]Corresponding author: dall9@kakao.com

In this study, we propose and validate a dual edge-cloud storage system designed to ensure seamless data continuity during emergency patient transport. Over the course of 2,000 ambulance dispatch cases across five vehicles, we identified critical issues of data discontinuity—particularly due to network instability and remote coverage limitations. By deploying our redundant architecture, which integrates local edge device buffering with cloud-based synchronization, we successfully resolved over 93% of previously observed data gaps.

To support real-time monitoring and visualization, we developed a semi-generic web-based Central Monitoring System (CMS) that meets medical-grade specifications. Built with Vue 3 and the Composition API, the CMS supports high-resolution, low-latency rendering of vital signs using HTML5 Canvas and optimized animation via requestAnimationFrame and CircularBuffer.

Our ECG module operates at 250Hz and includes adaptive R-peak detection, heart rhythm classification (normal/warning/emergency), interval measurement (PR/QRS/QT), and STEMI detection algorithms. The interface supports freeze-frame zoom, caliper-based measurements, and grid overlays aligned with medical standards.

The SpO₂ module features 25Hz sampling, automatic hypoxia event detection (<90%), real-time probe integrity monitoring, and signal strength evaluation. Both modules support snapshot capture, panning, zooming, and interactive measurements.

Real-time data ingestion is facilitated through a WebSocket interface, managing device-specific streams and auto-handling latency or signal dropouts with transitional status flags.

This architecture demonstrates a scalable, field-ready solution for improving data integrity and clinical safety during critical medical transports, particularly in environments where connectivity is intermittent or unreliable.

위험물 사고 안전을 위한 생성형 인공지능 활용 정보 제공 연구

왕순주[†]·한민섭^{*}·안은애^{*}·최다운^{*}·김지현^{*}
한림대학교·한림대학교동탄성심병원

A Research on Providing Information using Generative Artificial Intelligence for Hazmat Safety

Soon-Joo Wang[†]·Minsub Han^{*}·Eunae Ahn^{*}·Daun Choi^{*}·Jihyun Kim^{*}
Hallym University^{*}·Hallym University Dongtan Sacred Heart Hospital
[†]Corresponding author: wsjking@naver.com

위험물 안전 분야에서는 인공지능이 주로 위험물 사고의 예측, 교육훈련, 위험물 탐지 및 판독 등의 분야에 많이 적용, 연구되어왔다. 이는 주로 전문가나 관련 종사자들을 위한 내용이었으나, 최근 생성형 인공지능 분야의 비약적인 발전으로 그간 정확하고 신속한 정보 취득이 어려웠던 위험물 안전 분야에서 비전문가들도 정보 취득이 용이하게 되었다. 그러나 생성형 인공지능은 환각 현상이 발생할 수 있어 정확한 정보제공에 한계가 있으며, 따라서 비전문가가 사용하면 잘못된 정보를 제공받을 개연성이 있다. 이에 연구진은 위험물 사고 시 일반인이 필요한 안전정보 내용을 정리, 분류하고, 이 중 대표적인 안전 관련 주제를 선정하여서, 각 주제별로 가상적으로 위험물 사고 시 안전에 대한 정보를 요청하는 일반인의 역할을 맡아 위험물사고 시 특정 안전 방안과 위험에 대한 질문을 생성형 인공지능에 제기하였다. 주요 결과로는 일반적인 안전정보에서 나온 내용 외에도 위험물 사고에만 적용되는 안전과 위험에 대한 문제점이 같이 제기되었다. 연구 결과는 생성형 인공지능을 위험물 사고 안전 정보 및 조연의 출처로 사용할 때 주의해야 함을 나타낸다. 또한 위험물 사고 안전 정책 입안자, 위험물 사고 안전 당사자는 생성형 인공지능을 전문적인 정보 출처로 사용하면 그 내용의 정확성을 담보할 수 없다는 것을 인식해야 한다. 위험물 사고 시 안전정보 제공에 생성형 인공지능 시스템의 투명성, 책임성 및 공정성이 개선되어야 하며, 이는 이에 대한 인식 및 기술의 발전으로 계속 보강되고 있다. 위험물 사고 시 안전정보 사용자는 생성형 인공지능에서 제공하는 정보를 비판적으로 평가하고 객관적인 전문자료와의 확인이 필요하며, 전문가의 조언을 구해야 위험물 안전에 대한 잘못된 정보를 예방할 수 있다.

핵심용어: 위험물, 인공지능, 생성형 인공지능, 안전정보, 위험

Keyword: Hazardous Material, Artificial Intelligence, Generative AI, Safety Information, Risk

감사의 글

1. 본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발사업에서 지원받았습니다.
2. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2023R1A2C1002938).

폐배터리 리튬 침출 공정에서의 위험성 평가

장기원·이근원^{†*}·정승호^{†*}

아주대학교 대학원 환경공학과·아주대학교 환경안전공학과

Risk Assessment in the Lithium Leaching Process of Waste Batteries

Kiwon Jang¹·Keunwon Lee^{†*}·Seungho Jung^{†*}

Department of Environmental Engineering, Ajou University·

^{*}Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

[†]Corresponding author: leekw0@ajou.ac.kr

국내 산업 현장에서 무기산 물질의 사용량이 증가함에 따라 관련 누출 사고도 지속적으로 발생하고 있다. 화학물질안전원의 화학사고 통계에 따르면, 무기산 누출 사고 중 염산과 황산의 사고 발생 비율이 각각 전체 물질 중 두 번째, 세 번째로 높은 것으로 보고되고 있다. 특히 2023년 전북 군산의 한 공장에서 반응기 하부 천공으로 인해 약 930kg의 황산이 누출되는 사고가 발생하는 등, 무기산 누출은 현재도 지속적으로 발생하고 있는 실정이다.

무기산은 이차전지 제조 및 재활용 공정, 석유 정제 공정 등 다양한 산업 공정에 사용되며, 높은 부식성과 독성을 지니고 있어 설비 손상뿐만 아니라 환경 및 인체에 심각한 피해를 유발할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이차전지 재활용 공정 중 침출(leaching) 공정을 대상으로 HAZOP을 활용한 위험성 평가를 수행하였다.

먼저 HAZOP 분석을 통해 침출 공정 내 잠재적 위험요인과 운전상 문제점을 도출하였고, 위험도 대조표를 통해 각 위험요인의 위험도를 산정하였다. 이후 LOPA 분석을 통해 방호계층(Protection Layer)의 실패 확률을 고려한 사고 발생 가능성을 정량화하였으며, 이를 바탕으로 사고 빈도가 높은 주요 위험요인을 선정하였다. 선정된 위험요인에 대해서는 EFFECTS 프로그램 등을 활용하여 사고 시나리오의 영향범위를 평가하고, 무기산 독성물질의 확산 범위를 확인하였다.

추가로 Probit 함수를 통해 인체 피해 영향을 정량화하고, 해당 시나리오의 사고 발생 빈도와 결합하여 F-N Curve를 작성하였다. 이를 통해 침출 공정 내 위험요인이 사회적으로 허용 가능한 범위 내에 있는지를 평가하였으며, 허용 가능 기준을 초과한 경우에는 피해 영향 및 발생 빈도를 저감할 수 있는 방호 조치를 제안하였다.

* 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재성장사업(과제번호: P0012787)으로 수행되었음.

반도체 제조공정 위험물시설 특례기준 적용의 정성적 효과 분석

박은우·권혁화*·최광문†**
SK하이닉스·SK하이닉스·**SK하이닉스

Qualitative Analysis of the Special Standards for Hazardous-Material facilities in Semiconductor-Manufacturing Processes

Eun Woo Park·Hyuk Hwa Kwon*·Kwang Moon Choi†**
SK hynix Inc.·*SK hynix Inc.·**SK hynix Inc.
†Corresponding author: kwangmoon.choi@sk.com

국내 반도체 산업은 1990년대부터 대한민국 10대 수출품목의 최상위 자리를 유지해왔고, 현재는 첨단 제조공정을 기반으로 한 기술 경쟁력을 바탕으로 국가핵심전략산업으로 자리매김하고 있다. 그럼에도 불구하고, 반도체 산업의 구조적 특수성과 산업 생태계를 충분히 반영하지 못한 안전 관련 법령의 제·개정이 반복되어 왔다.

「위험물안전관리법」은 2004년 제정 이후 수차례 개정되었으나, 반도체 제조공정 구조적 특수성과 급변하는 설비 환경을 반영하지 못해 법령 이행에 있어 한계점이 지속적으로 제기되었다. 현행법상 반도체 제조공정은 ‘일반취급소’로 분류되어 법상 ‘제조소’로 분류되는 시설의 기준을 준용해야 하나 반도체 클린룸 내 집유설비 설치, 환기·배출설비 및 분말 소화설비 설치 등 실제 기술기준 적용이 어려운 것이 현실이다. 이에 반도체 공장 신·증설 때마다 특례심사(안전성평가)를 통해 동일한 구조임에도 허가 과정에서 반복적 특례심사(안전성평가) 실시로 행정적, 기술적 부담이 발생해왔다. 이로 인해 허가심사 지연, 설계 변경 등 공장 건설 및 운영 단계 전반에 걸친 애로사항이 누적되어 왔으며, 이는 법적 기준과 산업 현실 간 구조적 불일치가 고착화되어 있음을 의미하였다.

이러한 문제를 해소하기 위해 정부는 반도체 업계와 전문가 의견 수렴을 통해 2024년 5월 20일 「위험물안전관리법 시행규칙」 및 별표 16을 개정하여, ‘반도체 제조공정 내 위험물시설에 대한 특례기준’을 신설하였다. 이는 법적, 기술적 요건을 합리화 함으로써 반도체 산업의 안전관리 수준을 유지하면서도 산업 특성에 맞춘 기존 법령의 형식적 기준을 유연하게 해석하였다.

본 연구는 해당 특례기준이 실제 적용된 이후 나타난 정성적 효과를 중심으로 분석하였다. 주요 효과로는 인허가 절차 간소화, 공정 설계의 유연성 확대, 기업 주도의 자율안전관리 강화, 정부기관과의 협업체계 개선, 그리고 글로벌 기준 정합성 확보 등을 확인할 수 있었다.

이러한 사례는 법령의 형식적 일률성으로 인해 반복적인 규제 이행의 어려움을 겪고 있는 구조적 불일치 산업군에 대한 실효적인 규제 설계 방향을 제시 가능한 기술 친화적 규제모델로 기능할 수 있을 것으로 기대된다.

반도체 산업에서의 고압가스안전관리법 정책 제언

이석용·박은우·권혁화·최광문
SK하이닉스·SK하이닉스·*SK하이닉스·**SK하이닉스

Policy Recommendations for the High-Pressure Gas Safety Management Act in the Semiconductor Industry

Seok Yong Lee·Eun Woo Park·Hyuk Hwa Kwon*·Kwang Moon Choi
SK hynix Inc.·SK hynix Inc.·*SK hynix Inc.·**SK hynix Inc
†Corresponding author: kwangmoon.choi@sk.com

반도체 산업은 급속한 기술 혁신과 고도화된 생산 시스템을 기반으로 국가 전략산업으로 자리매김하고 있다. 초미세 공정, 자동화 설비, 청정 생산 환경의 확대 등 기술의 정밀성과 속도가 증가함에 따라, 반도체 생산현장에서는 고압가스의 사용 빈도와 압력이 동반 상승하고 있다. 특히, 차세대 반도체 제조 장비는 다양한 조건의 운전 조건과 특수한 구조를 갖추고 있어 투입되는 고압가스설비는 기존 산업과는 구별되는 형태와 안전요구를 갖는다.

이러한 산업 환경의 변화 속에서, 현재 운용 중인 「고압가스안전관리법」과 그에 따른 기술기준(KGS Code)은 산업 전반을 대상으로 하는 기준체계로서 안정적인 안전관리의 틀을 제공하고 있다. 그러나 반도체 산업의 경우, 기술 개발 주기가 매우 짧고 설비의 형태가 고도로 다양화되어 있어, 일부 특수설비에 대해서는 현행 제도의 적용 과정에서 현실적인 해석과 적용의 유연성이 요구되는 사례가 증가하고 있다. 예컨대, 밀폐형 또는 비정형 구조를 갖는 설비, 항온 또는 항습이 필요한 특수 설비 등은 현재의 규정 내에서 일률적으로 적용하기 어려운 경우가 있으며, 이에 대한 명확한 기준 부재로 인해 산업 현장에서는 해석의 혼란, 행정절차, 검사 부담의 증가 등을 경험하고 있는 실정이다.

이와 같은 흐름은 반도체 산업의 특수성과 기술 동향을 반영한 보완적 기준 체계의 필요성으로 이어지고 있으며, 이를 제도적으로 수용할 수 있는 방향에 대한 논의가 필요한 시점이다. 이에 본 연구는 반도체 산업에 특화된 고압가스설비의 안전관리 기준 마련 도입 필요성에 대한 정책 제언을 하고자 한다. 다음의 방향성을 포함한다. 첫째, 반도체 현장의 기술 현실을 반영한 KGS Code 내 세부기준 마련, 둘째, 일정 요건을 충족한 무사고 설비에 대한 정기검사 간소화 또는 유예제도, 셋째, 위험성평가 결과를 반영한 유연한 검사 적용, 넷째, 특수장비에 대한 예외 적용 명문화 등이다. 이러한 제언은 기존 제도의 정합성을 유지하면서도, 기술 발전을 수용할 수 있는 규제 유연성을 확보하는 데 목적이 있다. 궁극적으로는 반도체 산업의 경쟁력 강화와 함께, 정부 정책의 실행력과 산업 현장의 안전성을 동시에 제고하는데 기여할 수 있을 것이다.

소규모 사업장을 위한 화학사고 리스크 관리 플랫폼 개발 연구

김호현·곽윤경·안선민·조하진·이준상·양준용·김민수·정승호
 서경대학교 나노화학생명공학과·생활 및 산업환경연구소·서경대학교 대학원
 환경화학공학과·(주)키미아비전·(주)위즈아이·아주대학교 환경안전공학과

Research on the Development of a Risk Management Platform for Chemical Accidents in Small Enterprises

Ho-Hyun Kim·Yoon-Kyung Gwak·Sun-Min An·Ha-Jin Jo·Jun-Sang Lee·Jun-Yong
 Yang·Min-Soo Kim·Seung-Ho Jung

Department of Nano-Chemical, Biological and Environmental Engineering, Seokyeong University·
 Department of Research Institute for Living and Industrial Environment in Seokyeong
 University·Department of Environmental and Chemical Engineering, Seokyeong University Graduate
 School·ChimiaVision Co., Ltd.·WIZAI·Ajou University Department of Environmental and safety
 Engineering

† Corresponding author: ho04sh@skuniv.ac.kr

2015년「화학물질관리법」과「화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률」이 개정되었음에도 화학사고는 여전히 지속해서 발생하고 있다. 화학물질안전원의 화학물질종합정보시스템에 의하면 최근 5년 화학사고 발생 건수는 2023년 115건(누출 91건, 화재 15건, 폭발 7건, 기타 2건)으로 가장 많았다. 화학사고는 다수의 인명 피해와 환경, 재산 피해를 발생시키며 대규모 재난으로도 확대될 수 있어 철저한 안전관리와 예방이 매우 중요하다. 이에 본 연구기관은 해당 기술이 필요한 소규모 사업장을 중심으로, 화학사고 예측 및 대응 체계를 구축하고자 Data, Network, AI 기술을 적용한 플랫폼을 개발하고 있다.

본 연구는 2022년 4월부터 2026년 12월까지 진행되며, 워크숍, 기업 설명회, 지자체 및 기업 간 MOU 체결 등을 통해 빅데이터를 수집하고, 이를 바탕으로 운영시스템을 구축하고 있다. 향후 개발된 플랫폼은 지자체나 중소기업에서 실질적으로 활용할 수 있도록 사용자 매뉴얼도 제작할 예정이다.

현재 개발된 플랫폼은 총 3가지 모델로 구성되어 있다. 모델 1은 고용 산재보험 가입 현황, 공장등록 현황 등 공공 데이터를 활용해 화학사고 발생 가능성을 예측하는 모델이다. 모델 2는 NFPA 위험성 정보와 기상 데이터를 종합해 사고 위험도를 분석하는 리스크 평가 모델이다. 모델 3은 기존 모델(KORA, CARIS 등)과의 차별성을 위해 기업의 공정 장비 유지보수, 운전조건 등 공정 관련 정보를 반영한 예측 모델이다. 이에 본 연구기관은 지자체 등의 협조를 통해 일부 기업과 MOU 체결을 진행하여 기업 공정 데이터를 수집하고 있다. 그러나, 대부분 중소기업의 경우 공정 정보가 전산화되어 있지 않고 대부분 수기로 관리되고 있어 충분한 데이터를 보유하지 못한 경우가 존재하는 것을 확인하였다. 이에 추가 공정 데이터 확보를 위해 화학 안전 거버넌스 및 화학사고 지역협의체 등을 적극 활용하여 기업 공정 데이터를 확보할 계획이다.

향후 본 플랫폼은 사업장이 스스로 화학사고의 영향과 발생 빈도를 줄이고 사고 위험을 체계적으로 관리할 수 있도록 지원할 것이다. 또한, 지자체 및 중소기업의 지도·점검, 화학사고 관련 조례 개정 등의 정책 제안에 활용할 수 있는 기초 자료로도 쓰일 수 있을 것이다.

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 화학사고 예측·예방 고도화 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2022003620003).

자원순환시설에서의 대형화재 확산경로 및 위험성에 대한 시뮬레이션 분석

안승민·이종규*·이재문*·사재천*·민세홍***
가천대학교

Simulation Analysis of Fire Spread Pathways and Risk in Large-Scale Fires at Resource Recycling Facilities

SeungMin Ahn·JongGyu Lee*·JaeMoon Lee*·JeaChun Sa*·SeHong Min***
Gachon University

†Corresponding author: shmin@gachon.ac.kr

자원순환시설은 다양한 가연성 폐기물이 밀폐된 공간에 저장되는 구조적 특성으로 인해, 화재 발생 시 급격한 확산과 대형화로 이어질 수 있는 위험을 내포하고 있다. 그러나 현재까지 현장 중심의 구조 점검이나 시뮬레이션을 기반으로 한 화재 확산 분석 사례는 부족한 실정이다. 본 연구는 실제 자원순환시설을 대상으로 화재 확산 특성과 구조적 취약 요인을 분석하고, 효과적인 대응 전략 수립을 위한 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 한다.

본 연구는 C사의 자원순환시설을 대상으로 방화구획 구성, 소방설비의 유지관리 상태, 주요 구조물의 내화 성능 등을 점검하고, 이를 바탕으로 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램으로 Fire Dynamics Simulator(FDS)를 활용하였으며, 열방출률, 구조물 온도 상승, 산소 농도 감소, 연기 확산 등의 주요 요소를 중심으로 분석을 진행하였다.

이러한 결과는 자원순환시설의 구조적 취약성과 화재 확산 양상을 명확히 보여주는 사례이며, 시뮬레이션 기반의 정량적 분석을 통해 실제 위험 요인을 사전에 파악하고 대비할 가능성을 제시한다.

자원순환시설의 화재 안전성을 확보하기 위해서는 구조적 보강과 조기 감지 시스템의 도입이 필수적이며, 연기 차단 및 열 확산을 억제할 수 있는 방화구획의 적절한 구성 또한 중요하다. 다양한 조건과 변수에 따른 반복 실험과 사례 비교를 통해 맞춤형 대응 방안이 마련되어야 하며, 이를 통해 시설의 구조와 운영 환경을 반영한 정밀한 화재 시뮬레이션 기법이 실무에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 소방대의 신속한 접근을 위한 환경 조성과 함께 피난 유도 시스템, 초기 감지 및 경보 체계의 개선이 병행되어야 한다. 본 연구는 정책 입안자와 현장 실무자에게 실질적인 개선 방향을 제시하며, 자원순환시설의 재난 대응체계 고도화 및 화재 대응 계획 수립에 유용한 자료로 활용될 수 있다.

분석 결과, 화재 발생 후 일정 시간 경과에 따라 구조물 온도가 상승하면서 구조적 안정성이 저하되었으며, 감지기가 설치되지 않았거나 방화구획이 불완전한 구역에서는 화염과 연기의 확산 속도가 더욱 빨라지는 경향을 보였다. 또한 산소 농도의 급격한 감소로 인해 피난이 어려워지고, 초기 소방대의 진입 역시 제한될 수 있음이 확인되었다.

이러한 결과는 자원순환시설의 구조적 취약성과 화재 확산 양상을 명확히 보여주는 사례이며, 시뮬레이션 기반의 정량적 분석을 통해 실질적인 위험 요인을 사전에 파악하고 효과적으로 대비할 가능성을 제시한다.

리치오일(Rich Oil)의 화재·폭발 위험성평가

김천동[†]·고인희·서동현·최이락·이한희

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원·한국산업안전보건공단 전문기술실

Risk Assessment of Fire and Explosion Hazards of Rich Oil

Kim, Chun Dong[†]·Ko, In-Hui·Seo, Dong-Hyun·Choi, Yi-rac·Lee, Han Hee

Occupational Safety and Health Research Institute, Professional Engineering Bureau, KOSHA

[†]Corresponding author: sakarasano@kosha.or.kr

제철소에서는 철광석과 더불어 석탄(유연탄)이 원료로 쓰인다. 이 석탄은 고온에서 코크스로 제조되는데 이때 부산물로 발생하는 가스를 코크스오븐가스(COG, Cokes Oven Gas)라고 하며 고로의 열원 등으로 사용된다. 이 COG는 나프탈렌, 일산화탄소 등 여러 성분으로 구성되어 있으며, 성분 중 BTX (Benzene, Toluene, Xylene)를 흡수·증류하여 부산물로 생산한다. COG 내의 BTX 성분 추출을 위하여 흡수유를 사용한 공정을 거치고 나면 흡수유+BTX 상태가 되는데 이를 리치오일(Rich Oil)이라고 하며, 이 리치오일 중 흡수유를 제외한 BTX 성분을 추출한 제품을 조경유라고 한다.

조경유는 Benzene(-11℃), Toluene(4℃), Xylene(25℃) 등 인화점이 낮은 물질의 혼합물이며, 조경유와 흡수유가 혼합되어 있는 리치오일도 산소(산화제)와 점화원이 있으면 화재폭발 발생 가능성이 있다. 또한 탄화수소계 물질의 평균 최소점화에너지(MIE, Minimum Ignition Energy)가 0.2mJ 인 것을 고려할 때 리치오일의 인화성 증기가 공기와 혼합되어 폭발범위(LEL~UEL, Lower Explosive Limit ~ Upper Explosive Limit)에 들어가면 작은 에너지에도 화재·폭발이 발생할 위험이 있다. 실제로 202X년 전남 소재 사업장에서 리치오일 탱크 하부의 내용물을 비우기 위하여 펌프 가동 중 화재가 발생하여 작업자 2명이 2도 화상을 입는 사고가 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 리치오일에 대한 물리적 위험성을 평가하기 위하여, 태그밀폐식(TAG4), 클리블랜드 개방식(CLA4)으로 인화점을 측정하였으며, 시차주사열량계(DSC)를 이용한 열분석을 실시하여 열적 위험성을 평가하였다. 이를 통하여 안전작업을 위한 화재·폭발사고 예방대책을 제시하였다.

액침냉각을 활용한 고속 충방전 배터리 열적 위험 감소 방안

문재원¹·송해민¹·백승헌²·마병철^{1,2*}

전남대학교 화학공학과¹, 전남대학교 공정혁신시뮬레이션센터²

Mitigation of thermal risks in fast-charging/discharging batteries using immersion cooling

Jaewon Moon·Haemin Song*·Seongheon Baek·Byungchol Ma[†]

Chonnam National University School of Chemical Engineering

[†]Corresponding author: anejon@jnu.ac.kr

리튬이온배터리는 안전한 사용과 성능 유지를 위해 15 °C~35 °C 사이로 셀의 온도를 관리할 것이 권장된다. 그러나, 최근 배터리의 고속 충방전 수요가 증가하는 상황에서 기존의 열관리 시스템은 셀의 성능을 유지하며 냉각하기에 열적 측면의 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 고속 충방전 배터리에 대한 열관리 시스템의 냉각 경쟁력 향상을 위해 액침냉각 기반 냉각 효율 증진 방안을 탐구한다. 먼저 ANSYS Fluent 시뮬레이션을 활용하여 동일한 전력량을 소비하는 배터리 시스템을 구성하여 냉각 유체의 물성에 따른 냉각 성능 영향인자를 분석하였다. 이후 동일한 크기의 배터리 팩에서 셀의 배열각도를 0°, 15°, 30°, 45°로 다르게 하여 냉각 시뮬레이션을 구동한 후 냉각 성능 개선방안을 도출하였다. 그 결과, 동일한 전력량을 소비하는 배터리 팩에서는 유체의 점도에 따라 22.23%의 셀 최대온도 차이가 발생하였으며, 동일한 크기의 배터리 팩 내에서 셀 배열 각도를 증가시킬수록 배터리 팩의 평균 온도를 1.86% 감소시켜 냉각 성능을 증진할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 유체 물성에 따른 냉각효과 비교를 통해 액침냉각 배터리 열관리 시스템의 영향인자를 파악하였다. 또한, 동일한 크기의 배터리 팩에서 셀 배열 변화를 통해 배터리 팩 내부의 bypass 흐름 형성의 억제를 통해 냉각 효과의 증진 가능성을 확인하였다. 이를 통해 유체 특성과 배열 각도에 의한 액침냉각 열관리 시스템의 효과를 분석하며 배터리 팩의 온도 균일화를 증진하여 배터리 팩의 안전성을 확보하고 액침냉각 시스템의 성능 및 경쟁력을 극대화할 수 있을 것으로 기대한다.

화학물질 누출사고 해석을 위한 3차원 CFD 프로그램 개발

최청열[†]·변영민·김민수·정승호^{*}·이상돈^{**}·김현식^{**}·김형석^{***}·임동연^{****}
 (주)엘솔텍^{*}·아주대학교 환경안전공학과^{**}(주)넥스트폼^{***}(주)헤르스^{****}(주)이솔로지

Development of a Three-Dimensional CFD Framework for Simulating Chemical Leak Accidents

Choengryul Choi[†]·Young Min Byun·Min Su Kim·Seungho Jung^{*}
 Sang Don Lee^{**}·Hyun-Sik Kim^{**}·Hyoung Seok Kim^{***}·Dong Yun Lim^{****}
 ELSOLTEC^{*}·Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University·
^{**}NEXTfoam Co., LTD.^{***}Herss Co., Ltd.^{****}eSology Co., Ltd.
[†]Corresponding author: crchoi@elsoltec.com

화학물질 누출 사고 발생 시 인명·환경 피해를 최소화하기 위해서는, 대기 중 물질 확산 과정을 지형·구조물 및 기상 변화까지 고해상도로 반영할 수 있어야 한다. 그러나 기존 Gaussian 플룸 모델은 지형·건물·설비의 3차원 형상과 시간에 따라 변화하는 풍향·풍속·기온 등의 기상 조건을 충분히 반영하지 못해, 산업단지나 도시 환경에서의 예측 정확도에 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 오픈소스 기반 3차원 CFD 플랫폼 ‘CESARE’를 개발 중이다. CESARE는 KORA 시스템과 연동된 DB를 통해 물질별 물리·화학 특성을 자동 취득하고, 기상청 API를 활용하여 과거·실시간·예측 기상 데이터를 메쉬 생성 단계부터 해석 전 과정에 통합 적용한다. 또한, 국토정보플랫폼 지형·건물 DB를 활용하고, 설비 형상 CAD 자동 불러오기와 Mesh 자동 생성 기능을 통해 지형·건축물·설비 형상을 신속히 도입하며, 누출·제트 분출·확산(화재)까지 아우르는 고급 해석 모듈과 보고서·후처리 자동화 기능을 하나의 환경에서 제공하고자 한다.

특히, CESARE의 핵심 기술인 ‘풍향 반응형 도메인 자동 회전 기법’은 외부 더미 영역과 Sliding Mesh 스타일의 동적 인터페이스를 활용하여, 풍향 변화에 따라 유입 경계면을 자동 회전시킨다. 이로써 CAD 재메싱 및 격자 재생성 없이도 연속적인 해석이 가능하며, 격자 왜곡 및 수치 불안속 현상을 제거하여 해석의 수치적 안정성을 획기적으로 향상시킨다.

개발된 기술을 경부고속도로 동탄 인근 암모니아 탱크로리 전복 사고 사례에 적용한 검증 결과, 단일 시뮬레이션 설정만으로 연속되는 풍향 변화에 유연하게 대응하며 오염물질 이동 경로를 실시간으로 정확히 추적하였고, 반복적 CAD 수정 및 메쉬 생성 작업 없이도 안정적인 해석 수행이 가능함을 확인하였다.

이처럼 CESARE는 고품질 CFD 해석 기법과 실시간 데이터 연동, 자동화된 전·후처리 기능을 결합하여 산업단지 안전 계획, 도시 대기질 관리, 긴급 사고 대응 시스템 등 다양한 분야에서 확산 예측 도구로 활용될 수 있다. 향후 연산 속도 최적화 및 다중 환경 데이터 연동을 통해, 사고 발생 시 실시간 분석과 즉각적인 방재 대응이 가능한 혁신적 플랫폼으로 자리매김할 것이다.

후기: 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 화학사고 예측·예방 고도화 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00218759).

개방형 위험물 제조소에 적합한 제3류 위험물 복합 소화전략에 대한 고찰

홍성민·임종진·박우인·박주영
한국소방산업기술원

A Study on the Combination Fire Extinguishing Strategy of Class 3 Hazardous Materials Suitable for Open-Air Hazardous Materials Manufacturing Plants

HONG SUNG MIN[†] · LIM Jong-jin · PARK WOO-IN · PARK JOO-YOUNG

Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: HSM@kfi.or.kr

The increasing scale and structural complexity of hazardous materials manufacturing facilities have led to the growing adoption of open-type structures. In parallel, rising industrial demand and investment in Class III hazardous materials, particularly those with pyrophoric and water-reactive properties, underscore the urgent need for advanced fire safety response strategies. In sectors such as semiconductors, fine chemicals, and secondary batteries, the use of high-risk materials such as trichlorosilane (TCS) and trimethylaluminum (TMA) is expanding. Given their high reactivity and flammable gas emissions upon ignition, these substances are recommended to be stored in open-structured environments for safety.

However, the current Hazardous Materials Safety Control Act in Korea restricts applicable fire extinguishing agents for Class III substances to dry chemical powders, which have critical limitations in open-air conditions due to easy dispersion by wind and radiant heat. To address these shortcomings, this study proposes a three-phase hybrid fire suppression system based on “Absorption-Blocking-Elimination,” and conducts pilot-scale comparative testing using small samples of TCS and TMA to evaluate the performance gap against conventional dry powder extinguishing methods.

Conventional powders showed limited effectiveness in open environments, being prone to dispersion and insufficient in suppressing reignition. In contrast, the proposed hybrid system—combining absorbent media, medium-expansion foam application, and controlled removal via burn pits—demonstrated notable performance improvements in key indicators such as shorter suppression times, enhanced foam blanket durability, higher removal rates, and reduced surface temperatures. These results confirm the system’s potential for expanded full-scale implementation.

Furthermore, the proposed strategy aligns with international standards, including ASTM Manual Series MNL33, as well as guidelines from European, U.S., and Japanese silicon industry associations, and is expected to contribute to the development of practical fire safety design criteria for open-type hazardous material facilities.

Keywords: Class III hazardous materials, Trichlorosilane (TCS), Trimethylaluminum (TMA), hybrid fire suppression, dry chemical limitations, open-structured facility, pilot-scale test, fire safety design standards

액상 혼합물 인화점 시험 중 잔류물 형성 문제 및 평가 방안 연구

최성훈[†]·주민언·반준화·양성환·박주영
한국소방산업기술원

A Study on Residue Formation and Evaluation Approaches During Flash Point Testing of Liquid Mixtures

CHOI SEONG HOON[†]·JOO MIN EON·BAN JUN HWA·YANG SEONG HWAN·PARK JU YOUNG
Korea Fire Institute

[†]Corresponding author: khsd1227@kfi.or.kr

Flash point testing is a fundamental method for evaluating the fire hazards of liquid substances. It is widely used across industries—not only in petrochemicals but also in areas such as chemical transport regulation, waste classification, quality control of adhesives, paints, and pharmaceuticals, and fuel contamination analysis.

However, certain multi-component mixtures containing volatile components such as water may exhibit unexpected behavior when heated above 100°C. As volatile components evaporate during testing, the sample may undergo phase changes—forming high-viscosity residues or semi-solid deposits. These residues often behave differently than the original liquid and may not be accurately assessed by conventional flash point methods.

This study investigates this phenomenon using a water-based vinyl acetate/ethylene copolymer dispersion—a formulation commonly found in industrial adhesives and coatings. Flash point testing was conducted using four methods: Cleveland Open Cup, Pensky-Martens Closed Cup, and Setaflash with both 1-minute and 6-minute equilibrium conditions. All tests were performed under elevated temperatures, typically above 80°C.

The results showed that COC and PMCC, being non-equilibrium methods, exhibited significant issues such as rapid water evaporation, sample spillage, and poor reproducibility due to uneven heating and residue adhesion. While PMCC showed lower flash points due to vapor retention in a sealed system, its reproducibility was still compromised. In contrast, the extended 6-minute Setaflash method provided more consistent and stable results, particularly after residue formation, due to better heat distribution and vapor stabilization in small-sample conditions.

These findings highlight the limitations of conventional methods like COC in accurately assessing the flammability of mixtures that generate residues. We propose a dual testing strategy: using COC for initial vapor-phase ignition detection, followed by a long-equilibrium Setaflash test for post-evaporation residue evaluation. This approach provides a more comprehensive understanding of the fire hazards posed by such mixtures and enhances safety in the handling of water-containing polymer dispersions in industrial applications.

FLACS-ANSYS를 통한 증기운 폭발에 따른 FSI(CFD-FEA) 해석

오세현·심승현·문명환·마병철^{†*}

전남대학교 화학공학과·*전남대학교 공정혁신 시뮬레이션센터

Coupled FSI (CFD-FEA) Simulation of Vapor Cloud Explosions Using FLACS-ANSYS

Sehyeon Oh·Seunghyun Sim·Myunghwan Moon·Byungchol Ma^{†*}

Dept. of Chemical Engineering, Chonnam National University·*Center for Process Innovation Simulation, Chonnam National University

[†]Corresponding author: anjeon@jnu.ac.kr

지구온난화 및 환경 문제로 지속 가능한 에너지 전환의 필요성이 대두되고 있어 세계적으로도 화석 연료 중심의 에너지에서 대체 가능한 에너지로의 전환에 관심이 많다. 또한, 세계적인 에너지산업에서도 더 적은 탄소 배출을 목표로 신재생에너지에 대한 수요가 크게 증가할 것으로 전망된다. 대표적으로 CO₂ 배출이 기존 화석 연료보다 적은 액화천연가스(LNG)와 액화석유가스(LPG)가 있고, CO₂ 배출이 없는 청정에너지인 수소(H₂)가 있다. 이러한 가스 산업에서 에너지 활용성을 높이기 위해 가스 취급 및 저장시설은 확충과 더불어 누출에 의한 폭발 가능성이 항상 존재하고 있다. 앞서 설명한 LNG, LPG, H₂는 대표적인 인화성 가스로 폭발 방지를 위한 안전 대책이 잘 마련되어 있으나, 가스 폭발 사고 사례를 볼 때 대부분 예측하지 못한 인재에 의한 폭발임을 알 수 있다. 따라서, 인화성 가스 누출에 따른 화재·폭발로부터 인적·물적 피해 저감을 위해서는 물리적인 공간구획 방법인 방호벽 설치를 고려할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 대표적인 인화성 가스를 취급하는 수소충전소에서의 수소 누출에 의한 증기운 폭발로부터 방호벽에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 고압 수소 누출로 형성된 증기운 폭발을 FLACS 소프트웨어로 시뮬레이션하고 그 결과인 폭발 하중은 ANSYS 소프트웨어의 Explicit Dynamic에 맵핑(mapping)하여 증기운 폭발로부터 방호벽에 미치는 구조 응답을 분석한다. 이를 통해 방호벽 설계 방안 및 효과적인 취급시설 안전관리 방안을 마련하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

침윤소화약제의 리튬이온배터리 화재 적응성 연구

함정모·김라·최규출*
*(주)한국방염기술 기술연구소

Study on lithium-ion battery fire adaptability of seepage fire extinguishing agent

Jungmo Ham·Rayoung Kim·Kyuchool Choi
*KFPT Co.,Ltd.,†Corresponding author: jmham@kfptech.com

리튬이온을 이용한 이차전지 사용이 늘어나면서 화재 발생도 증가하고 있다. 리튬이온배터리 화재는 열폭주를 동반하기 때문에 적응성 있는 소화약제를 찾기 어렵다. K급 화재용 소화약제로 개발된 침윤 소화약제가 리튬이온배터리 화재에 적응성이 있는지를 실증시험을 통해 분석하였다.

소화시험은 1,000Wh 이하 용량의 리튬이온배터리에 외부에서 열을 가해 화재를 유도한 후, 침윤 소화약제를 분사하여 소화 상태를 확인하는 방식으로 진행되었다. 소화에 사용된 약제는 한국방염기술이 개발한 ‘에코노바-K’라는 명칭의 제품이며, 6kg 용량의 소화기를 사용하였다. 화염이 발생한 배터리에 약제를 분사한 후 약 5분이 경과한 시점에서 화염은 사라지고 연기만 분출되었다. 분사 중에 소화가 완료되었고, 분사 종료 이후 60분 동안 재발화가 일어나지 않아 소화시험은 성공으로 판정되었다. 재발화 기준은 KFI의 배터리 소화기 시험 기준을 적용하였다.

자체시험 결과, KFI의 배터리 소화기 시험 기준에 따라서, ‘에코노바-K’ 6kg 소화약제만으로 화재진압이 가능함을 확인하였다. 반면, 전기자동차처럼 배터리 모듈이 층층이 적층되어 있는 경우에는 진압이 어려운 것으로 나타났다. 이번 자체시험을 통해, 소형 리튬이온배터리 화재에서는 침투력이 우수한 침윤 소화약제로 효과적인 진압이 가능함을 확인하였다. 침윤 소화약제는 냉각 작용과 질식 작용을 통해 배터리 화재를 억제한다.

Keywords: Seepage Extinguishing Agents, Lithium-ion battery, Thermal Runaway

* 이 논문은 2024년도 정부(중소기업기술정보진흥원)의 재원으로 창업성장기술개발(디딤동_성장네트워크) 과제와 관련된 사업으로 지원받아 수행된 연구임(과제번호 : RS-2024-00468359).

침윤소화약제의 소화방법이 소화효과에 미치는 영향에 관한 연구

함정모·김라·최규철*

*(주)한국방염기술 기술연구소

Study on the effect of digestion method of seepage fire extinguishing agent on digestion effect

Jungmo Ham·Rayoung Kim·Kyuchool Choi

*KFPT Co.,Ltd.,†Corresponding author: jmham@kfpotech.com

리튬이온배터리 화재가 빈번하게 발생하고 있는 산업현장에서 소화약제의 선택이 어려운 의견이 많다. 최근 자주 발생하는 배터리 화재에 대한 적응성 있는 소화약제가 마땅히 없기 때문이다. 철도 궤도 유지보수에 사용되고 있는 특수차량에 설치된 리튬이온배터리에서 발생한 화재를 사례로 140kWh 용량의 대형 화재에 대한 소화시험을 실시하였다. 소화는 침윤소화약제를 분사식과 침수식으로 실시하여 소화 효과를 분석하였다.

본 연구는 선행연구에서 제시된 침윤성 소화약제의 배터리 화재 적응성 분석 결과를 바탕으로 특수차량에 적용 가능한 침수형 소화 시스템을 설계하였다. 실증시험은 ‘소방청 고시 제2024-31, 36호 및 NTA 8133’ 등 관련 시험기준을 기반으로 설계하였다. 감지기는 공기흡입식(ASD)을 사용하였고, 침윤소화약제(제품명,EcoNova-K)를 사용하였다. 1차 시험은 140kWh 용량의 배터리에 화재를 유발해 50kg 용량의 소화약제를 분사하였다. 2차 시험은 시험 챔버 내에서 화재를 발생시킨 후 소화약제 주입으로 약제 속에 배터리를 침수시켰다.

시험 결과 ASD는 5~10초 이내에 연기 및 오프가스를 감지하였다. 침수형 소화 방식은 분사식 소화보다 약제 양이 50% 이상 절감되었다. 침수형의 경우 소화 시간 단축, 냉각 속도 향상(60℃ 도달 시간 약 8배 개선), 연기 저감 등의 효과를 나타냈다. 또한 모든 시험조건에서 10분 이내 화염 제거, 1시간 이상 재발화 억제, 잔존 셀 전압 정상 유지($\geq 3.7V$)를 달성하였다. 본 연구에서는 침윤소화약제를 기반으로 한 침수형 소화 방식이 철도 특수차 리튬이온배터리 화재 대응에 있어 효율적인 기술임을 확인하였다. 향후 관련 형식승인 기준 수립과 산업융합 신제품 인증 추진을 위한 실증적 기반 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Keywords: Immersion-type Fire Suppression System, Lithium-ion Battery, Thermal Runaway, Infiltrating Extinguishing Agent, Aspirating Smoke Detector

* 이 논문은 2025년도 민관협력 오픈이노베이션 지원(서울시청, 서울교통공사)

리튬이온배터리 화재용 에코노바-K와 F-500 소화약제의 성능 비교

함정모·김라영·최규출·이강영

*(주)한국방염기술 기술연구소·한국건설생활환경시험연구원

Comparison of the performance of Econova-K and F-500 extinguishing agents for lithium-ion battery fires

Jungmo Ham·Rayoung Kim·Kyuchool Choi·GangYoung Lee

*KFPT Co.,Ltd.,†Corresponding author: jmham@kfptech.com

Korea Conformity Laboratories

리튬이온배터리의 열폭주(Thermal runaway)는 고온, 고압, 인화성 가스 방출 및 자체 산소 발생을 수반하는 복합 열화학 반응이 일어난다. 열폭주 현상에 따라 일반 화재와 구별되는 특성을 갖는다. 이러한 특성은 전기차 및 에너지저장장치(ESS) 등에서 화재진압을 어렵게 하며 이에 대응하는 특화된 소화약제의 개발과 성능 평가 체계의 확립이 요구된다.

본 연구는 자체 개발된 침윤소화약제(약제명, EcoNova-K)와 미국에서 생산되어 보급된 'F-500' 약제를 대상으로 시험하였다. 두 약제의 물리화학적 특성에 대한 정량적인 측면을 비교하였다. 분석 항목은 접촉각 기반 표면에너지, 비열(DSC), 용점, 열분해 특성(TGA), 점도(Rheometer) 등을 같은 실험 조건에서 진행하였다.

실험 결과, EcoNova-K는 비극성 기판에서 낮은 접촉각과 4.8 J/g·°C의 비열을 나타내어 우수한 젖음성 및 열 흡수 특성을 보였다. 전단 조건 변화에도 점도 안정성이 유지되었다. 반면, F-500은 용점이 -28°C로 4.2 J/g·°C의 비열을 보였고, EcoNova-K(-23°C)보다 낮아 저온 환경에서의 유리한 특성을 보였다. 비열은 4.2 J/g·°C로 확인되었다. 휘발성 중심 조성에 따라 초기 냉각 및 증발 반응 속도는 상대적으로 빠르게 나타났다.

본 연구에서는 리튬이온배터리 화재 대응을 위한 수계 소화약제의 성능 특성을 계측 기반하에서 체계적으로 비교·분석하였다. 본 연구 결과로 환경 조건별 약제 선택과 성능 기반 인증 기준 마련을 위한 기초 데이터를 제공할 수 있는 결과를 얻었다.

Keywords: Seepage Extinguishing Agents, Econova-K, F-500, Thermal runaway

* 이 논문은 2024년도 정부(중소기업기술정보진흥원)의 재원으로 창업성장기술개발(디딤동_성장네트워크) 과제와 관련된 사업으로 지원받아 수행된 연구임(과제번호:RS-2024-00468359).

SCR 및 공정의 온실가스 저감 설계·제어 개선 LLM기반 AI 에이전트

신동일*·송가은·나누리
명지대학교 화학공학과 지능형시스템연구실

LLM-Based AI Agent for Autonomous Enhanced Design and Control of SCR and Related Processes for Greenhouse Gas Reduction

Dongil Shin^{†**}·Gaeun Song·Noo Ree Na
Intelligent Systems Engineering Lab, Dept. of Chemical Engineering, Myongji University
[†]Corresponding author: dongil@mju.ac.kr

본 연구는 Selective Catalytic Reduction (SCR)을 비롯한 공정산업의 온실가스 배출 저감 및 지속 가능성 향상에 기여할 수 있는 혁신적인 설계/재설계/제어개선 접근 방안으로, 대규모 언어 모델(LLM) 기반의 자율 설계 AI 에이전트를 제안한다. AI 에이전트는 공정의 핵심 정보를 입력받아 심층적인 분석을 수행하며, 사용자는 공정의 기본 개요, 투입되는 원료의 종류 및 조성, 주요 전환 반응 메커니즘, 생성되는 주요 배출 물질의 종류와 특성, 제어 개선 위한 soft sensor 설계 정보 등을 텍스트 형태로 입력할 수 있다.

LLM은 내장된 방대한 화학 반응, 촉매 특성, 배출 물질 저감 기술, 공정 설계, 제어 및 운전 지식을 활용하여 입력된 정보를 종합적으로 이해하고 분석하며, 목표 저감 성능을 달성하기 위한 최적의 반응 경로 및 공정 개선 방안을 자율적으로 탐색하고 설계한다. 이를 위해, AI 에이전트는 다음 핵심 기능을 수행한다: (a) 운전 조건 분석 및 최적화: 운전 조건을 분석하고, 목표 저감 성능을 만족시키면서 에너지 효율을 극대화할 수 있는 최적 운전 조건 제안, (b) 공정 구조 개선 방안 설계: 병목 지점을 파악하고, 반응기 형태 변경, 추가적인 분리 및 정제 공정 도입, 에너지 회수 시스템 통합 등 공정 구조 개선 방안 설계, (c) 저감 요구 물질 분석 및 맞춤형 저감 기술 추천: 배출되는 온실가스 및 특정 유해 물질의 종류와 양을 분석하고, 각 물질에 최적화된 흡수, 흡착, 촉매 전환 등의 저감 기술 추천 및 추천된 저감 기술을 기존 공정에 통합 위한 구체적인 설계 방안 제시, (d) 개선된 공정 흐름도(PFD) 자동 설계: 제안된 반응 및 공정 개선 방안과 최적 운전 조건을 반영하여, 목표 저감 성능을 달성할 수 있는 개선된 PFD를 자동으로 생성하여 사용자에게 제공, (e) soft sensor 및 이에 기반한 고급 제어 알고리즘 자율 생성 등.

개발된 LLM 기반 자율 설계 AI 에이전트의 SCR 등 실제 공정산업 적용 가능성을 검증하기 위해, (연소)반응 기반의 대표 공정을 대상으로 온실가스 배출량 감축, 에너지 효율 증대, 부산물 가치 증진 등 지속가능성 향상 사례연구를 실시하였다. 연구에서 제안한 LLM 기반 AI 에이전트는 통합 공정 설계 및 제어의 자동화 및 지능화를 통해, 전문인력 의존도를 낮추고 설계 시간을 단축함으로써 안전하고 효율적이며 환경친화적인 무인 자율 제조 플랜트 구축에도 핵심적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

Author Index

ㄱ

강기민 B706
 강정훈 B304
 구치완 B105
 권혁화 C302
 김건우 A301
 김경민 A408
 김동우 B205
 김량선 B404
 김소영 A104
 김예원 A107
 김재민 B202
 김정곤 B504
 김종우 B101
 김준식 A201
 김진수 B305
 김채은 A402
 김천동 P03
 김학래 A108
 김해진 B406
 김혜미 B602
 김혜원 A302
 김호현 P01

ㄴ

나현빈 A410

ㄷ

문재원 P04

ㅅ

박선영 C103
 박시은 C104
 박요한 A106
 박은우 C301
 박은우 C302
 박인숙 B704
 박정주 A203
 박정호 B605
 박주열 B203
 박주현 A102
 박진형 B106
 박한민 A303
 반준화 B702, B705

ㅇ

서명건 A101
 송성범 A504
 송성범 A505
 신동일 P12
 신상오 B301

ㅈ

안성용 B502
 안승민 A502, P02
 양현혁 B201
 오미라 A403
 오세현 P08
 오세형 B102
 오소영 A202
 왕순주 C101, C102, C105
 윤가영 B204

윤형준 B507
 이광열 A206
 이근탁 B503
 이동훈 B604
 이명환 B506
 이상범 B405
 이생곤 A409
 이석용 C302
 이선종 B601
 이세용 B508
 이수행 A401
 이영만 A506
 이용재 A205
 이종규 A501
 이혁준 B303
 이효근 B603
 이효은 B302
 임채완 B107

ㅊ

장기원 C201
 정경현 A304
 정성경 B501
 정승균 A103
 조철희 B401, B402
 조호담 B701
 주민언 A503
 주유빈 A407

ㅋ

천광수 B505
 최광문 C302
 최두찬 A404

최성훈	P07
최아영	B403
최우진	B104
최창열	B103
최청열	P05
최한빛	A406



함정모	P09, P10, P11
현성호	A204
홍성민	P06
황수현	B703
황장환	A109
황재석	A105
황종록	A207

이 발표논문집은 산업안전보건연구원의 지원을 받아 발간되었음.

제13회 한국위험물학회 학술대회 논문집

2025. **6.18**(수) 13:00 ~ **20**(금) 12:30 / 소노캄 제주



(사)한국위험물학회
Korean Institute of Hazardous Materials

서울 서대문구 연세로 50 연세대학교 공학원 416B (사)한국위험물학회
Tel: 02-313-9375, E-mail: master@kihм.or.kr