



화학물질 누출에 따른 긴급 확산 방재시스템 개선 방안 연구

이덕재*** · 윤정현** · †유병태**

*인천대학교 안전공학과, **화학물질안전원

(2018년 7월 25일 접수, 2018년 10월 9일 수정, 2018년 10월 24일 채택)

A Study on the Improvement of Emergency Block and Diffusion Prevention System for Hazardous Chemicals Leakage

Deok-Jae Lee*** · Yun-Jeong Hyeon** · †Byung-Tae Yoo**

*Department of Safety Engineering, Incheon National University,

**National Institute of Chemical Safety

(Received July 25, 2018; Revised October 9, 2018; Accepted October 24, 2018)

요약

화학물질을 취급하는 중·소업체의 경우 누출 사고 시 자동화 시스템이 갖춰진 안전장치에 의한 방재체계가 아닌 근로자에 의한 긴급 방재가 주로 이루어져 인명·환경피해 등의 발생 가능성이 높다. 본 연구는 이러한 한계점을 개선하기 위해 화학물질 취급과정 중 누출 사고 발생 빈도에 따라 누출 예상지점에 선별적으로 쉽게 탈·부착이 가능한 긴급 확산방재시스템에 대해 연구하였다. 이를 통해 사고대응이 상대적으로 취약한 중소기업의 화학사고를 시스템적으로 예방하여 화학물질 누출사고에 의한 인명, 환경피해를 방지할 수 있다.

Abstract - In the case of medium and small-sized businesses handling hazardous chemicals, emergency disaster prevention by workers, rather than a disaster prevention system using a safety device equipped with an automation system in case of a leak accident, is highly likely to occur. In order to solve these limitations, in this study investigated an emergency disaster prevention system that can be easily removed and adhered to the expected point of leakage according to the occurrence frequency of the leak during the chemical handling process.

Key words : Diffusion Prevention, Leakage, Hazardous Chemicals

I. 서론

2015년도 국내 화학물질 배출량은 전국 3,634개 사업장에서 총 5만 3,732 ton이 배출되고 있으며 배출되는 화학물질 중 자일렌(31.4%), 톨루엔(15.3%), 아세트산에틸(8%), 메틸에틸케톤(7.3%) 등 4개 화학물질이 전체 화학물질 배출량의 62%를 차지하고 있다⁽¹⁾. 환경부는 화학물질의 건강위험성, 반응성과 인체·환경에 누출되었을 경우 큰 피해가 발생하는 물질에 대해서 '사고대비물질'로 별도 지정하여 관리하고 있다. 하지만 '사고대비물질'과 같은 화학사고

발생 가능성이 높은 화학물질을 취급하는 업체의 대다수는 20년 이상 노후화된 산업단지에 위치하고 있다. 2014년 말 기준 국내 1,074개 산업단지 중 20년 이상 노후화된 산업단지는 총 368개로 그 중 국가산업단지는 28개이며 입주한 화학물질 취급업체의 대부분은 중·소기업으로 전체 업체수의 약 96%를 점유하고 있다⁽²⁾. 20년 이상 노후화된 산업단지에 입주한 중·소 화학물질 취급업체의 경우 화학물질 누출 사고 발생 시 자동화 시스템에 의한 방재 보다는 인력에 의한 긴급 방재가 주로 이루어지고 있으며 이로 인한 인명·환경상의 유해성·위해성이 증대되고 있다. 대부분의 중·소 화학물질 취급업체는 화학사고 예방 차원의 안전관리 시설 투자 소홀, 책임 회피성 화학물질 취급공정의 외

[†]Corresponding author: flyduck@korea.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

주 발주 관리 등 많은 문제점에 노출되었으나 재원 부족, 전문 인력 충원 등의 어려움으로 소극적인 태도를 취하고 있다. 이와 같은 환경에서는 화학사고 시 인명, 환경피해가 발생할 확률이 높기 때문에 이를 대비한 화학사고 예방 등의 종합적인 접근과 대책이 필요한 시기이다.

2012년 9월 경북 구미 불산 누출사고 이후 환경부를 중심으로 종합 화학물질 관리 대책^[2]이 마련되어 2015년부터 화학물질 영업허가제, 장외영향평가, 위해관리계획 등 화학사고 예방 중심의 화학물질 관리체계가 강화되어 시행되고 있다. 하지만 이와 같은 노력에도 불구하고 2014년부터 2017년까지 매년 80~100여건 총 383건의 화학사고가 발생하였다. 주요 화학사고 발생유형은 시설관리미흡(159건, 42%), 작업자부주의(133건, 34%), 운송차량사고(83건, 22%), 기타(8건(자연재해), 2%) 순으로 조사되었다. 발생 원인으로는 누출(283건, 74%), 폭발(40건, 10%), 화재(23건, 6%), 이상반응(23건, 6%), 복합(14건, 4%) 순으로 조사된다^[3]. 발생 원인에서 확인할 수 있듯이 누출에 의한 화학사고가 전체 사고의 약 74%로 이 중 대부분의 화학사고가 화학물질을 취급하는 산업현장에서 발생하였다. 세부 누출원인은 저장탱크에 저장된 상태에서 배관 이송시 누출, 배관 내 과압 생성에 의한 배관 파손 및 플랜지 틈새로 누출, 노후화된 개스킷 불량에 의한 누출 등으로 확인되었다. 또한 여러 화학사고 사례에서 볼 수 있듯이 화학사고 발생 초기에 자동화 방재시스템 여부, 인력에 의한 방재, 전문적인 방재 장비 활용 여부 등에 따라 인명, 환경, 재산 등 피해 규모의 차이가 발생하였다.

앞에서 언급하였듯이 재원 부족, 전문 인력 충원의 어려움 등이 있는 중·소기업 경우 화학물질 누출 사고 발생 시 자동화된 시스템에 의한 방재 보다는 인력에 의한 긴급 방재가 주로 시행되고 있다. 이와 같은 인력에 의한 긴급 방재 시 화학물질에 의한 직·간접 피부 접촉, 호흡기 흡입 등 인명 피해가 발생할 가능성이 높고 긴급 방재에 소요되는 시간도 증가되기 때문에 인력에 의한 방재 투입 시기 등을 고려할 필요가 있다. 초기 긴급 방재 시에는 자동화된 방재시스템에 의한 감시, 자동 보고, 긴급 방재 등이 신속히 이루어진 후 인력에 의한 최종 확인, 점검 순으로 진행되어야 한다. 하지만 일부 대기업을 제외하고 대부분의 중·소기업은 자동화된 방재 시스템을 갖추기 위해 필요한 재원과 시스템을 운영할 수 있는 숙련된 엔지니어 부족 등의 제한사항 때문에 자동화된 방재시스템을 쉽게 도입할 수 없는 실정이다. 따라서 화학물질을 취급

하는 전체 공정라인에 자동화된 긴급 방재시스템을 구축하기 위해서는 막대한 시간과 비용 등이 소요된다. 재원과 시간 등이 부족한 중·소기업체는 화학물질을 취급하는 전체 공정라인 중 선택과 집중의 원리를 적용하여 누출 등 화학사고의 발생 가능성이 높은 예상지점 위주로 소규모의 자동화된 긴급 방재시스템 도입이 필요할 것으로 판단되며 이에 대한 장비 개발, 차단·배출 방법 등 다각적인 연구가 필요하다.

화학물질 누출 차단을 위한 긴급 방재시스템에 대한 국내·외 기존 연구로 Park은 화학물질 및 휘발성 화학물질 누출 위험을 감소하기 위해서 밸브 유형에 따라 적용 가능한 씰(Seal) 중 패킹력이 우수한 벨로우즈씰(Bellows Seal)에 대한 기술적인 특징과 적용 방안에 대하여 연구하였다^[4]. Yoon et al.은 불산, 암모니아 등 화학물질 누출 시 화학사고 초동대응기관에서 참고 가능한 비상 긴급 차단 장치, 긴급 누출방지 및 방재방법, 국내·외 이동형 탐지장비 등 미국, 캐나다 환경청의 화학물질 별 사고대응 테크니컬 리포트 등을 정리하여 소개하였다^[5]. Park et al.은 화학물질을 사용하는 플랜트에서 화학물질의 누출사고에 대응하기 위해 고정형 감지기의 위치에 따른 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산 유체 역학) 시뮬레이션 결과를 도출하여 고정형 감지기의 위치별 이동속도 최적화 방안에 대하여 연구하였다^[6]. KIDS는 화학물질 사고에 효과적으로 대응하기 위하여 일반인도 사용할 수 있는 모바일 기반의 App/Web 등 시스템을 융합하는 Web 3.0 스마트 소셜 방재 플랫폼 개발에 대해서 연구하였다^[7]. Ren et al.은 유류와 가스 등이 이송되는 파이프라인의 부식에 의한 누출을 감시하기 위해서 OFDR (Optical Frequency Domain Reflexibility, 광 주파수 영역 반사율)을 이용한 시뮬레이션 결과 도출과 적용 가능성을 연구하였다^[8]. Rui et al.은 기존의 가스 파이프라인 누출 관련 모델링은 단일 누출 지점에 대해서는 신뢰성이 있으나 2개 이상 다중 누출지점의 경우 적용하기 어렵기 때문에 다중 누출에 대한 시나리오 개발, 모델링에 대해서 연구하였다^[9]. 국내·외 선행 연구의 주된 연구 방향은 선진국에서 활용되는 누출 방재 및 탐지 장비 소개와 CFD, OFDR 등 시뮬레이션 결과를 바탕으로 누출지점 추적, 감시가 가능한 모델링 개발, 가능성 연구에 치중하는 경향을 보였다. 하지만 누출지점 예측과 같은 모델링 연구에 비해 실제 누출에 대비한 누출지점 차단·방재에 대한 장비 개발, 적용 등 실용 분야에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 화학물

질을 취급하는 공정에서 화학물질 누출 사고 시 활용 가능한 소규모의 자동화 긴급 확산방재시스템에 대한 개선방안을 제시하는데 목적을 두고 연구하였다.

II. 긴급 확산 방재시스템 개선방향

2.1. 화학사고 사례연구

국내에서 발생한 화학사고는 환경부 화학물질안전원의 화학안전정보공유시스템(CSC)⁽⁹⁾과 한국안전보건공단의 중대 산업사고 사례연구⁽¹⁰⁾를 활용하여 2014년 1월부터 2017년 12월까지 화학물질을 취급하는 공정에서 발생한 주요 누출사고에 대해서 Table 1에 발생날짜, 발생지점, 사고물질, 인명피해, 발생원인 순으로 정리하였다. 주요 화학사고 물질은 암모니아, 사염화규소, 포스겐, 삼불화질소 등으로 인명·환경에 누출이 되었을 때 피해 가능성이 높은 ‘사고대비물질’, ‘유독물질’이 대부분이며, 저장탱크 및 파이프라인의 과압·과손·폭발 등으로 인한 누출사고가 주요 사고 원인으로 확인되었다. Table 1에서 언급한 화학물질 누출사고 중 주요 화학사고의 사례연구를 진행하여 사고원인, 사고 예방 대책 등을 도출하였다.

(1) 사염화규소 누출사고

- 사고일시 : 2015. 06. 22 16:03경
- 사고개요 : 폴리실리콘 제조 공장의 상부 배관에 설치된 10 inch(25.4 cm) 벨로우즈 밸브 보닛(Bellows valve bonnet)의 균열로 사염화규소 등 혼합물이 누출된 사고
- 인명피해 : 근로자 1명, 인근 주민 15명 부상

주민 294명 병원 진료

- 사고원인
 - 벨로우즈 밸브 보닛 제작 결함 또는 외부 압력 등에 의한 균열 발생
 - 고장설비에 대해 임시 조치 후 운전 진행에 따른 사고 발생(근본 원인 미조치)
- 사고 예방 대책
 - 공정 내 압력 상승, 이상반응 발생 등 불안전 공정 조건에 의해 사고 발생 위험이 높으므로 가동 중인 공정을 중단하고 위험성·유해성이 높은 화학물질이 배출된 안전한 상태에서 정비·보수 작업이 이루어져야 함.
 - 위험성이 높은 설비 보수 작업은 위험성·유해성이 높은 화학물질이 취급되는 저장탱크, 밸브, 배관 등의 정비·보수 작업의 안전에 대한 충분한 검토 후 작업 허가 필요
 - 자동화 방재 시스템에 의한 누출 감지, 전파, 차단될 수 있는 시스템 구축 필요

(2) 포스겐 누출사고

- 사고일시 : 2016. 05. 27 19:40경
- 사고개요 : MDI(Methylene Diphenyl Diisocyanate) Chamber 내에서 반응기 맹판 제거 작업 중 배관 내부에서 가압된 포스겐 가스가 플랜지(Flange) 사이로 누출된 사고
- 인명피해 : 사망 1명
- 사고원인
 - 맹판과 벤트배관에 압력 존재 여부를 확인하기 위한 탐지 장비 부족
 - 압력이 존재하는 배관 차단밸브에서는 누출

Table 1. Major domestic hazardous chemical spill accident(2014~2017)

Date	Region	Substance (CAS No.)	Casualty (Unit : people)	Major reason
2014. 02. 13	Namyangju city	Ammonia* (7664-41-7)	Fatality 1, Injury 2	Leakage due to abnormal pressure
2015. 06. 22	Gunsan city	Tetrachlorosilane (10026-04-7)	Injury 16	Leakage due to overpressure in the storage tank
2016. 05. 27	Yeosu city	Phosgene* (75-44-5)	Fatality 1	Leakage due to overpressure in the pipeline
2016. 06. 04	Geumsan county	Hydrogen fluoride* (7664-39-3)	-	Leakage due to automatic pump failure in the sump tank
2016. 08. 03	Ulsan city	Nitrogen trifluoride (7783-54-2)	Injury 7	Leakage from pipeline explosion after repair of the pressurized pump
2017. 08. 07	Ansan city	Nitric acid* (7697-37-2)	-	Leakage due to pipe breakage

* Accident preparedness substances

이 가 능하 기 때 문 에 작 업 전 작 업 위 험 성 평 가 등 세 밀 한 점 검 이 필 요 했 으 나 미 흡

- 사 고 예 방 대 책
 - 유 독 성 가 스 등 감 지 기 에 의 한 감 지, 경 고 시 정 확 한 확 인 없 이 오 작 동 으 로 오 판 하 는 일 이 없 도 록 확 실 한 원 인 규 명, 확 인 필 요
 - 누 출 된 가 스 를 원 격 제 어 밸 브 로 차 단 할 수 있 는 시 스템 구 축 필 요

(3) 삼 불 화 질 소 폭 발 · 누 출 사 고

- 사 고 일 시 : 2016. 08. 03 10:32 경
- 사 고 개 요 : 삼 불 화 질 소(NF₃) 제 조 공 정 의 최 중 정 제 탱 하 부 펌 프 를 운 전 하 는 도 중 유 량 및 토 출 압 력 등 이 정 상 운 전 조 건 을 벗 어 나 는 이 상 이 발 생 하 여 예 비 펌 프 로 교 체 후 가 동 스 위 치 를 누 르 는 순 간 폭 발 이 발 생, 펌 프 및 배 관 등 이 파 손 되 고 삼 불 화 질 소 가 누 출 된 사 고
- 인 명 피 해 : 부 상 7 명
- 사 고 원 인
 - 예 비 펌 프 교 체 후 가 동 전 펌 프 점 검 미 실 시 로 폭 발 에 의 한 삼 불 화 질 소 누 출
- 사 고 예 방 대 책
 - 펌 프 운 전 상 태 감 지 를 위 한 원 격 제 어 시 스템 구 축 필 요
 - 폭 발 에 의 한 누 출 사 고 발 생 시 누 출 지 점 을

차 단 · 배 출 할 수 있 는 자 동 방 제 시 스템 구 축 필 요

(4) 화 학 사 례 를 통 한 개 선 점

앞 의 화 학 사 고 사 례 에 서 공 통 적 인 사 고 원 인 과 개 선 점 을 Table 2 에 정 리 하 였 다. 공 통 적 인 사 고 원 인 은 첫 째, 정 기 · 수 시 점 검 표 에 의 해 서 공 정 단 위 별 점 검 이 충 분 히 되 지 않 은 시 설 관 리 부 주 의 를 뽑 을 수 있 다.

둘 째, 공 정 가 동 및 재 가 동 전 누 출 감 지 등 에 의 한 누 출 여 부 확 인, 안 전 상 태 를 확 실 히 확 보 한 상 태 에 서 작 업 이 이 루 어 지 지 않 은 작 업 자 부 주 의 가 원 인 으 로 작 용 하 였 다. 셋 째, 자 동 화 방 제 시 스템 에 의 한 누 출 감 지, 전 파, 차 단 이 이 루 어 질 수 있 도 록 화 학 물 질 을 취 급 하 는 공 정 에 대 한 위 험 도 분 석 에 따 른 자 동 화 방 제 시 스템 이 구 축 되 어 야 하 나 미 흡 하 여 인 명 및 환 경 등 피 해 상 황 이 확 대 되 었 다. 따 라 서 단 위 공 정 별 점 검 표 에 의 한 정 기 · 수 시 점 검 이 철 저 히 이 루 어 질 수 있 도 록 안 전 문 화 정 착 선 행 과 지 속 적 인 안 전 교 육, 비 상 조 치 훈 련 을 통 해 서 화 학 사 고 예 방 및 발 생 시 조 치 사 항 을 습 득 이 필 요 하 다. 또 한 화 학 사 고 발 생 시 신 속 한 누 출 에 따 른 전 파, 방 제 가 이 루 어 질 수 있 도 록 화 학 물 질 취 급 공 정 별 위 험 도 를 분 석 에 따 른 자 동 화 방 제 시 스템 구 축 을 통 해 서 인 명, 환 경 피 해 가 발 생 되 지 않 도 록

Table 2. Prevention measures by major leaked chemical accidents

Category	Major reason	Major preventive measures
Insufficient facility management and careless workers	Overpressure in the storage tank	Pre-work risk check and establish an automatic disaster prevention system
	Overpressure in the pipeline	
	Pipeline explosion	

Table 3. Major facilities and processes for handling chemicals

Storage and transportation facilities	Product manufacturing process	Environmental pollution prevention facility
·Storage facility - storage tank - a warehouse, a silo, etc. ·Transportation, distribution, measuring facilities - Piping - Truck, etc.	·Mixing process ·Chemical reaction process ·Bending and coating process ·Heat treatment process ·Degreasing, cleaning, bleaching process ·Segregation, refining process ·Mechanical processing process ·Assembling, packaging, inspection process ·Solvent recovery process	·Air pollution prevention facility - dust collector - absorption facility, etc. ·Waste water treatment facility - Sedimentation facility - Membrane transducer, etc. ·Waste treatment facilities - incinerator facility, etc.

강구 되어야한다.

2.2. 현행 화학물질 누출 방재기술

국내에서 발생한 화학사고의 사례연구를 통해서 화학사고 발생 시 사고원인과 사고 예방 대책 등을 확인하였다. 사례연구에서 볼 수 있듯이 인명피해가 발생한 화학사고의 경우 자동화된 긴급 방재시스템에 의한 화학물질 누출 감지, 경고, 자동 방재 등 기능이 탑재된 시스템이 미구축 되었거나 구축되어 있더라도 해당 공정에는 적용되지 않은 경우에 화학사고가 발생하였다. 자동화 방재시스템이 미구축되어 있는 경우 인력에 의한 초기 긴급 방재가 이루어져 인명피해와 환경피해 등 추가 피해 발생 가능성도 높았다. 이에 화학물질을 주로 사용하는 취급공정과 화학물질 누출 방재 관련 국내 법령 및 활용 기술 정리가 필요하며 이를 통해 현행 화학물질 누출 방재기술에 대한 제한사항을 도출하였다. 국내·외 누출 방재기술과 관련한 자료는 화학물질안전원과 미국의 TEEX(Texas A&M Engineering Extension Service Emergency Services Training Institute) 교육 자료와 한국환경공단의 유해화학물질 안전관리 안내서를 참고하였다.

화학물질을 주로 취급하는 공정은 저장 및 운반 시설, 제품제조공정, 환경오염 방지시설로 구분되며 Table 3에 정리하였다. 저장 및 운반시설은 저

장탱크, 창고, 사일로, 배관, 트럭 등이 대표적이다. 제품제조공정은 화학반응공정, 열처리공정, 분리정제공정 등에서 주로 취급한다. 환경오염시설은 집진장치, 흡수장치 등 대기오염방지시설과 침전장치, 막투과장치, 소각장치 등 폐수·폐기물처리시설에서 화학물질이 취급된다⁽¹¹⁾.

화학물질의 누출 방재의 목적은 화학사고 발생 시 현장 대응 인력의 위험 부담과 피해를 최소화하고, 누출을 억제하는데 있다⁽¹²⁾. 화학물질 누출 방재 기술은 방어적 기술과 공격적 기술로 구분된다. 대량 누출된 화학물질의 확산을 막기 위한 방어적 기술은 제방 쌓기(Diking), 우회(Diversion), 방출(Venting), 소각(Flaring), 희석(Dilution) 등으로 세분화된다. 공격적인 기술인 밀봉(Overpacking), 패칭(Patching), 막기(Plugging) 등은 화학물질의 누출을 막기 위해서 누출지점의 누출을 봉쇄하는 적극적인 방재활동으로 분류된다⁽¹²⁾.

국내·외 화학공정에서 원료 및 중간생성물을 저장 또는 취급하는 저장 탱크 등에서 발생하는 가스, 안전밸브 등을 통해 분출되는 폐가스(Off gas)는 비정상적인 조건(온도, 압력 등 상승) 하에 원료, 중간 생성물을 저장 또는 취급하는 시설에서 배출되며 인명·환경에 유해하다. 배출된 폐가스를 안전하기 처리하기 위한 국내·외에서 운용되는 주요 폐가스 처리공정은 플레어 시스템을 통한 연소

Table 4. Domestic legislation on the prevention of chemical accidents

Relevant law	Application organization	Purpose	Prevention equipment
Chemicals control act	Business establishment	Emergency block action	-
	NICS(National Institute of Chemical Safety)	Emergency plan for chemical accident	Anti-leaker bag, Leakage-blocking band, Leak collection gear, etc.
	Basin (regional) Environmental Office		-
Act on the safety control of hazardous substances	Joint disaster prevention center (Environmental team)	Emergency plan for chemical accident	-
	Special Chemical Rescue Unit		Anti-leaker bag, Leak tapes, Leak collection gear, etc.
Enforcement decree of marine environment management act	Joint disaster prevention center (Chemical rescue team)	Emergency plan for marine pollution accident	Leak collection gear, etc.
High-pressure gas safety control act	Korea Coast Guard, Office of Oceans and Fisheries	Emergency plan to secure emergency equipment	-

※ Reconstructed by authors on the basis of the related literatures

Table 5. Major Leakage Blocking and Discharge Equipments in Korea

Prevention equipment	Purpose	Blocking area and working pressure
Anti-leaker bag	Block leakage areas such as tank lorry, pipe, drum, etc. with a diameter of at least 50 cm	Small scale 9.5 ~19.5 cm Midium scale 50 × 30 cm Large scale 86 × 57 cm
Leakage-blocking band	Bands wrapped around pipes, belt bonds, and equipment to inflate and block bands.	Crack 19 ~ 38 cm
High pressure leak protection system	Inflated hose to narrow pipes, T-shaped pipes, and curvatures.	Pipe diameter 20 cm
Leak-blocking adhesive	Blocking small leaks on valve connections, pipe flanges, etc. with adhesive	Piping pressure 0.4 bar below
Leakage blocking and discharge vacuum bag	Equipment that can prevent leakage and discharge by using vacuum pack in case of leakage of large-scale container and storage tank	Minimum required pressure 6 bar
Leak blocking and discharge flange bag	A device that uses a zipper lock to block leakage and release residual hazardous liquids in the event of a leak in all types of flange	Minimum required pressure 1.5 bar

처리, 열/축매(산화) 소각처리, 스크러버(Scrubber)를 통한 흡수처리, 벤트 스택(Vent Stack)을 통한 대기 배출, 냉각응축처리, 분리막 기술 등 다양한 방법으로 처리하고 있으며 일부 처리기술에 대한 특징을 살펴보았다. 플레어 시스템을 통한 연소처리는 플레어 스택 상부의 플레어 팁에서 연소하여 연소 생성물을 대기 중으로 배출하는 기술이다. 열/축매(산화) 소각처리는 배출가스 중 VOC(휘발성 유기화합물)를 함유한 폐가스를 포집해서 예열하고 연소실에서 고온으로 태워 처리하는 공정이다. 스크러버를 통한 흡수처리는 물, 가성소다 등과 같은 흡수액에 폐가스를 접촉시켜 가연성 및 독성 성분을 흡수 처리하는 방법이다. 분리막 기술은 반투과성막을 사용하여 폐가스로부터 VOC 등의 탄화수소 성분을 선택적으로 분리하는 기술이다⁽¹³⁾.

국내 화학물질 누출 방재 관련 국내 법령을 Table 4에 법령명, 기관, 목적, 장비 순으로 정리하였다. 화학물질관리법⁽¹⁴⁾과 위험물안전관리법⁽¹⁵⁾에서는 화학사고 긴급 방재를 위해 누출방지백, 누출테이프, 누출물수거용 장구 등이 구비 품목으로 권고되며 화학물질 취급사업장, 화학물질안전원, 유역(지방)환경청, 특수화학구조대 등에 적용된다. 해양에서 화학물질 누출사고 시에는 해양환경관리법⁽¹⁶⁾에 따라 누출물수거용 장비 등이 활용되어 해양오염사고 긴급 방재 조치에 사용된다. 고압가스 누출사고의 경우에는 고압가스안전관리법⁽¹⁷⁾에 안전관리규정 항목

의 비상조치계획에 따라 방재에 활용할 비상 장비 마련 필요성이 기술되어 있다.

Table 5는 국내에서 긴급 방재에 활용되는 화학물질 누출 차단·배출 장비를 장비명, 용도, 차단면적 및 작업압력 순으로 정리⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾하였으며 대표적인 장비로 누출차단백, 누출 차단썰기, 누출차단밴드 등이 있으며 긴급 방재 시에 주로 활용된다. 앞에서 현행 화학물질 누출 방재 관련 국내 법령과 국내·외에서 활용되는 누출 차단·배출 장비 등에 대해서 살펴보았으며 제한사항을 다음과 같이 도출하였다. 첫째, 산·염기, 기체·액체·고체, 인화성·폭발성·산화성 등 화학물질의 고유 특성별에 따른 적용 가능한 방재장비가 구별되어 있지 않다. 둘째, 누출 차단해야 할 부분의 작업 조건에 따라 평소 구비해야할 장비 목록 품목의 다양화와 이에 따른 장비 구매 비용 증대, 다양한 품목으로 인한 관리의 어려움, 1가지 장비로 누출 방재의 활용성 제한 등 여러 가지 제한사항이 발생한다. 셋째, 누출방지백, 누출테이프 등 대부분의 방재장비는 누출지점 차단·배출과 누출물 수거를 인력에 의해서 시행해야 하는 단점으로 인해서 누출 방재 시 잔류 화학물질 등에 피부접촉·흡입 등에 의한 인명피해 발생 가능성이 존재한다. 넷째, 방재장비의 조작 이해도와 사용 숙련도 등 개인별 역량에 따라 긴급 방재 이후 방재 결과의 차이가 발생 할 수 있다.

2.3. 긴급 누출 방재시스템의 개선방향

국내 화학사고 사례연구와 누출 방재 관련 국내 법령과 현행 활용되는 누출 방재 장비를 통해서 교훈과 제한사항을 도출하였다. 화학사고 사례에서 볼 수 있듯이 화학물질 누출에 따른 자동화된 시스템에 의한 긴급 방재 체계 구축 필요성 등을 확인할 수 있다. 현행 화학물질 누출 관련 국내 법령과 누출 차단·배출장비의 적용상의 제한사항으로 화학물질의 고유 특성에 따른 적용 가능한 방재장비의 구별 필요, 방재 품목의 다양화에 따른 장비별 효율성 저하, 구비 비용의 증대, 관리의 어려움 등이 도출된다. 또한 긴급 방재에 투입된 인력의 장비 이해도와 사용 숙련도에 따라 방재 결과의 상이와 긴급 방재 시 누출된 화학물질에 의한 피부 접촉·흡입 등에 의한 인명피해 가능성이 있다. 하지만 자동화된 긴급 방재 시스템을 구축하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요되며 일부 대기업을 제외하고 재원과 전문 인력, 가용 시간이 부족한 중·소기업에서는 구축과 구축 후 운영 중 많은 애로사항이 발생한다. 국내 화학물질 제조·수입기업 중 중·소기업이 전체 업체수의 약 96%를 차지하기 때문에 중·소기업에 맞춘 저비용, 소규모 화학물질 취급 공정에 적용 가능한 자동화된 긴급 방재 시스템 개발이 요구되며 장비 개발이 필요하다. 저

비용, 소규모 화학물질 취급공정에 적용 가능한 자동화된 긴급 방재시스템을 통해서 최초 긴급 방재 후 인력에 의한 최종 확인과 점검이 됨으로서 인명피해와 추가 환경피해를 최소화할 수 있을 것을 판단된다.

2.4. 방재안전 기술 개발 현황

국내에 등록된 화학물질 방재안전 관련 특허기술의 현황을 살펴보기 위해 특허청과 한국특허정보원에서 공동으로 운영, 관리하고 있는 특허정보넷 키프리스(KIPRIS, Korea Intellectual Property Rights Information Service)를 활용하였다²⁰⁾. 방재안전 관련 특허기술 등록 건수는 특허실용 약 2,200여건이었다. 반면에 정보통신(특허실용 약 518,600여건), 건축(특허실용 약 126,100여건), 바이오(특허실용 약 112,700여건) 등 타 연구분야와 등록건수를 비교하면 상대적으로 연구 성과가 적음을 확인할 수 있다. 화학물질 특허기술 등록건수가 적은 원인으로 방재안전 관련 국책 연구과제수가 타 분야에 비해 상대적으로 적어 연구자들의 관심도가 낮다. 한국연구재단의 최근 5년간(2014년 ~ 2018년 10월) 발주된 연구과제 중 화학물질 방재안전 현황은 16여건 이었다. 반면 정보통신분야 51여건, 건축분야 73여건, 바이오분야 1,300여건으로 조사

Table 6. Domestic patent technology related to safety system

Category	Content	Source	Object
Detection	Solid indicator for neutralization	Hazardous Chemicals	Determination of neutralization by hazardous chemicals
	Gas detecting system	Toxic gas	Color transformation gas sensor using carbon nano tube
Remove pollutants	Organic fiber powder	Crude oil	Solidification by injection of disaster prevention material into marine leaking oil
	Mobile toxic gas reducing apparatus	Toxic gas	Portable apparatus for air-diffusion toxic gas removal
Warning	Leak warning system	Hazardous Chemicals	Facilities management system according to received information
	Risk map by process and work hazard		Estimate process risk by calculating the work risk index
Corresponding system	Leak information system for hazardous chemical	Hazardous Chemicals	Providing correspondence information through mobile application module
	Integrated control system		Integrated control system using M2M, IoT, etc.

되었다⁽²¹⁾. 이와 같이 상대적으로 화학물질 방재안전 관련으로 발주되는 연구과제 건수가 적어 연구자 1인당 발주되는 편수가 적은 것이 가장 큰 원인이다.

최근 5년간(2014년 ~ 2018년 10월) 특허정보넷 키프리스에 등록된 화학물질 방재안전과 관련된 특허기술을 탐지, 오염물 제거, 경고, 대응시스템 등으로 분류하여 각 분류의 대표적인 최신 기술을 Table 6에 정리하였다. 탐지분야의 대표적인 최신 기술은 방재 후에 화학물질에 의한 중화여부를 확인할 수 있도록 고형지시약 기술 제안과 탄소나노튜브를 이용하여 특정 유독가스에 반응하여 색 변환을 일으키는 가스센서에 대해서 제안하였다. 오염물 제거분야는 해양에 누출된 원유를 회수하기 위해 원유만을 젤리모양으로 고형화할 수 있는 방재제 제시와 유독가스의 대기 확산을 방지하기 위해 이동식 유독가스 저감장치를 개발하였다. 경고분야는 수신된 표준 신호에 따라 누출 여부를 판단하는 시스템 개발과 화학물질 공정 및 작업 위험도에 따른 안전관리 방법을 제안하였다. 대응시스템 분야는 화학물질 누출에 따른 대응 정보를 모바일 어플리케이션을 통해 제공하는 정보시스템과 사물통신(M2M, Machine to Machine), 사물인터넷(IoT, Internet of Things)을 활용한 대응시스템을 제시하였다. 위에서 확인할 수 있듯이 화학물질의 누출을 감시, 전파, 차단 등 일괄적으로 적용할 수 있는 통합시스템 개발 보다는 방재제, 가스센서 등 개별 공정에 적용할 수 있는 특허기술 개발에 편중되고 있다. 따라서 화학사고 통합 방재시스템 개발을 적극 장려할 수 있는 보완책 마련이 필요하다.

III. 화학물질 누출 긴급 확산 방재시스템

화학공장, 도금·주물공장 등 화학물질 취급시설에서 불산, 암모니아, 염산 등 사고 위험성이 높은 화학물질을 다량 사용되고 있으며 취급공정의 챔버나 배관에서 외부로 누출 또는 폭발로 인명피해, 환경오염 이어질 가능성이 높다. 화학사고 예방·대응 차원에서 방재시스템의 중요성이 부각되고 있지만 현실은 이에 대한 연구와 관련 특허기술이 부족하다. 특히 방재시스템에 대한 특허기술 등록 건수에서 타 분야와 비교하면 현저히 적었다. 이와 같은 결과를 대처할 수 있는 대안을 제시하고자 한다. 또한 본 연구에서는 소규모 공정에도 적용할 수 있는 자동화된 시스템에 의한 감지, 전파, 긴급 방재가 통합된 시스템을 연구, 제시하였다. 본 연구에서 제안하는 화학물질 긴급 확산 방재시스

템은 화학사고 발생 가능성이 높은 지점에 탈·부착이 가능하여 구축비용이 적게 소요되는 특징으로 개념안을 설계하였다. 또한 화학물질 누출 시 신속하게 누출을 감지하고 화학물질의 누출지점을 빠르게 차단함으로써 피부접촉, 호흡기 흡입, 누출된 화학물질에 의한 폭발 등에 의한 2차 인명피해와 환경오염 등을 방지할 수 있다.

3.1. 방재안전 기술 개발 활성화 제안

화학물질 방재안전 관련 기술 개발 활성화에 대해서 다음과 같이 몇 개안을 제안하고자 한다. 첫째, 화학사고 예방 및 대응과 관련한 정부 부처인 환경부, 행정안전부, 소방청 등 통합으로 기술 개발 관련 심포지엄, 박람회, 연구성과 발표회 등 개최와 지원 등 활성화가 필요하다. 특히 우수성과에 대해서는 상용기술로 활용할 수 있도록 정책적 지원과 차후 연구 개발에 활용할 수 있게끔 포상금 범위의 확대가 필요하다. 둘째, 화학사고 방재안전 등 관련 분야의 연구자 관심도 상승을 위해서 국책연구과제의 건수 확대가 필요하며 이와 관련하여 연구과제 예산 확보가 우선시 된다. 현실적으로 급격한 예산 확충이 어렵기 때문에 환경부 등 관련 정부부처 주도의 가치 ‘화학안전 예방 및 대응 기술 개발 국민 펀딩’과 같이 국민과 기업 등이 자율적인 참여 가능한 기금 조성을 유도할 수 있으며 이를 통해 화학물질 방재안전 기술 개발 관련 연구과제 건수 확대와 화학물질 방재안전 분야의 연구 활성화가 가능하다. 셋째, 화학물질을 취급하는 기업에서 적극적으로 방재안전 기술을 개발, 활용할 경우 환경부의 장외영향평가, 위해관리계획 등과 같은 심사제도에서 인센티브를 받을 수 있도록 제도 개선도 한 가지 방안으로 제시한다.

3.2. 긴급 확산 방재시스템의 설계

화학물질 긴급 확산 방재시스템은 화학물질의 누출이 의심되거나 누출 가능성이 있는 배관, 플랜지 등과 같은 시설에 사전에 설치할 수 있으며 쉽게 탈·부착이 할 수 있어 필요한 때에 원하는 지점에 설치할 수 있는 특징으로 개념 설계하였다. 본 연구에서 개념 설계한 긴급 확산 방재시스템은 감지부(10), 수용부(20), 방지제(21), 분리부(22), 제어부(30), 경보부(31), 송수신부(32), 방출부(40), 방출구(41)로 구성되며 Fig. 1부터 Fig. 3까지 누출이 예상되는 지점의 형태에 따라 적용할 수 있는 다양한 긴급 확산 방재 시스템(원통형(A), 다각기둥(B), 원 또는 반구(C) 등)을 제시하였다. 감지부(10)는 수용부(20)와 인접하게 배치되어 화학물질 누출에 따른

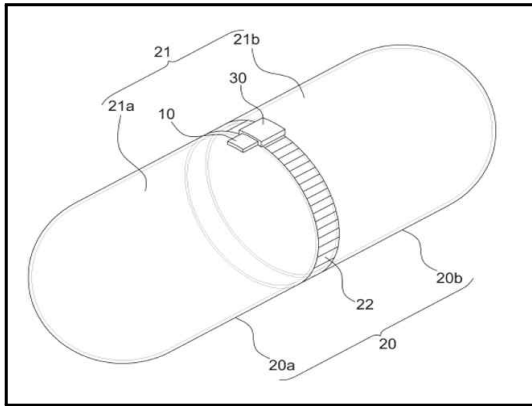


Fig. 1. Type of cylinder(A).

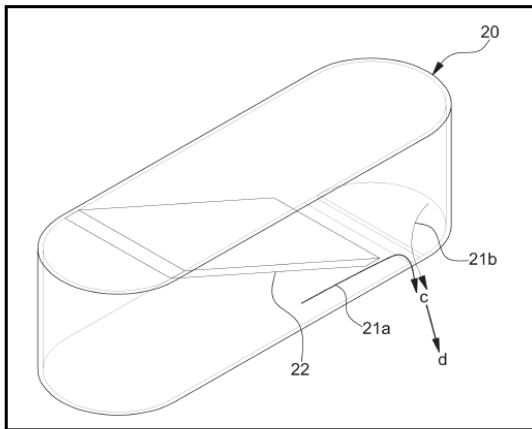


Fig. 2. Type of polygonal column(B).

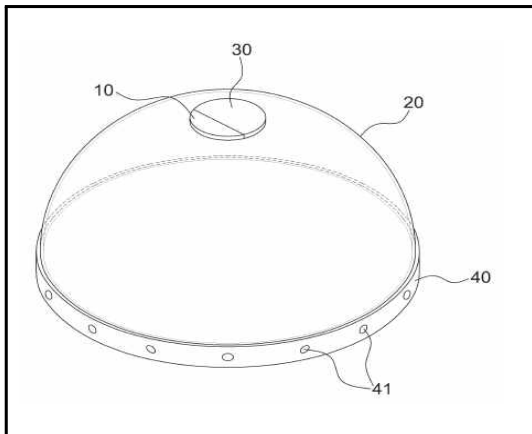


Fig. 3. Type of hemispherical(C).

온도·압력 변화 등의 이상 변화를 감지한다. 수용부(20)는 방지제(21)와 외부의 화학물질에 부식되거나 변형되지 않은 재질로 형성되며 방재에 필요하다. 또한 누출된 화학물질과 방지제(21)의 종류에 따라 수용부(20)의 재질이 달라진다. 방지제(21)는 외부로 방출되어 공기와 접촉하면 부풀었다가 수초 내에 경화되는 화학물질을 이용한다. 분리부(22)는 수용부(20) 내부에 배치되어 둘 이상의 방지제(21)가 수용부(20)에 포함될 때 방지제(21)가 섞이지 않도록 분리한다. 제어부(30)는 감지부(10)에 인접하게 배치되어 감지부(10)에서 받은 정보를 통해 긴급 확산 방재시스템의 작동을 제어한다.

3.3. 긴급 확산 방재시스템의 운영 개념

Fig. 4는 원통형 긴급 확산 방재시스템의 작동모습을 형상화하였다. 화학물질 누출사고가 발생하면 감지부(10)에서 누출여부를 감지하고 감지된 정보를 받은 제어부(30)는 분리부(22)를 개폐 또는 제거하도록 제어한다. 분리부(22)가 개폐되거나 제거되면 분리된 방지제가 섞여 분리부(22) 또는 방출부(40)를 통해 외부로 방출된다. 이와 동시에 순차적으로 제어부(30)는 경보부(31)를 제어하여 화학물질이 누출되었음을 경보음 등의 신호로 알리고 송·수신부(32)를 통해 누출 발생 시점 및 지점에 대한 정보를 긴급 확산 방재시스템과 무선(블루투스 등으로 통신)으로 연결되어 실시간 정보를 중앙상황실 또는 관리자의 핸드폰 등에 전달된다. 이를 통해 누출된 화학물질을 신속하게 감지, 차단되어 인명피해, 환경오염의 확산을 방지할 수 있다.

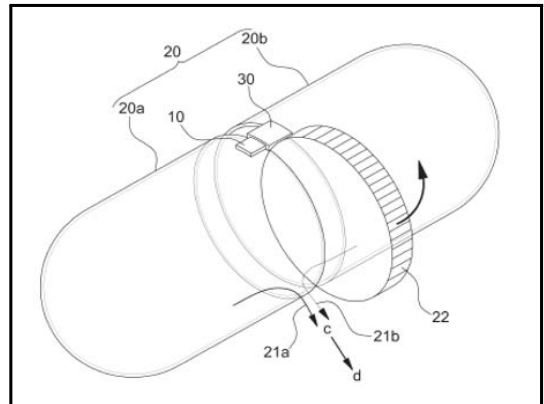


Fig. 4. Operational shape of preventing chemical diffusion equipment(Cylinder).

3.4. 연구의 제한사항

이 연구의 제한사항은 첫째, 재원의 부족으로 화학물질 긴급 확산 방재시스템에 대한 실용 제품을 개발하지 못하여 각 구성부(감지부, 수용부, 방지제 등)에 대한 특성과 제한사항에 대해서 구체화하지 못하였다. 둘째, 화학물질 누출 사고 시 누출물질의 물성(산·염기성 등), 누출지점의 공정조건(온도, 압력, 누출공 높이·크기 등), 누출 사고 발생 당시의 대기온도, 풍속 등 다양한 재난 환경에 맞춰진 실험, 연구를 진행하지 못하였다. 셋째, 미세 크랙에 의한 누출 미감지 등 방재시스템이 원활히 작동되지 않을 경우 후속대책에 대한 연구도 필요하여 후속 연구로 진행할 예정이다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 제시한 다양한 상황으로 추가 연구가 필요하며 연구 여건이 조성될 경우 Prototype 개발, 제작과 실증화 연구를 진행할 예정이다.

IV. 결론

화학물질을 취급하는 업체 중 상당수가 화학물질 누출 사고 발생 시 인력에 의한 긴급 방재가 주로 이루어져 누출된 화학물질에 의한 피부접촉, 흡입 등에 의한 인명피해가 꾸준히 발생하고 있다. 특히, 화학물질을 취급하는 중·소기업의 경우 재원, 숙련된 엔지니어 등이 부족하여 화학물질 누출 사고 발생 시 자동화된 시스템에 의한 감지, 차단 등의 설비를 갖추기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 화학물질 방재안전 기술 개발의 제한사항과 활성화방안을 제시하였다. 또한 화학물질을 취급하는 공정에서 누출사고 발생이 예상되거나 소규모의 자동화 시스템으로 누출 차단이 가능한 화학물질 긴급 확산 방재시스템을 제안하였다. 다음은 본 연구에서 제안한 화학물질 방재안전 기술 개발 활성화 제안과 긴급 확산 방재시스템에 대해서 정리하였다.

1) 화학물질 방재안전 관련 기술 개발 활성화 방안으로 정부주도의 정기적인 박람회, 연구성과 발표회 등 활성화와 우수성공에 대한 실용화 정책지원 및 포상금 확대, 국민과 기업 등의 관심을 모을 수 있는 기술 개발 펀딩 도입, 기업의 자발적 방재안전 기술 개발을 유도할 수 있는 제도 개선을 제안하였다.

2) 긴급 확산 방재시스템은 감지부, 수용부 등으로 구성되며 누출지점에 따라 다양한 형태(원통형, 구 등)로 제작, 설치하다. 이를 통해 화학물질 취급 공정 중 누출 사고 발생 빈도가 높거나 예상되는 지점에 대해서 탈·부착이 용이하여 최소한의 재원,

인력 등 투입으로 효율적인 방재 설비 구축이 가능하도록 개념 설계하였다.

3) 실용제품에 대한 설계, 제작 등에 대한 재원 부족으로 실증화 연구를 진행하지 못하였으나 차후 연구 재원이 마련될 경우 Prototype 제작 후 다양한 조건(압력, 온도 변화 등)에 따른 추가 연구를 진행할 예정이다.

본 연구에서 제안한 긴급 확산 방재시스템을 통해서 화학물질 누출 사고 발생 시 신속하게 화학물질의 누출을 감지하고 차단할 수 있을 것이며 이를 통해 화학물질 취급 공정에 대한 누출 사고 예방, 효율적인 대응체계를 마련할 수 있는 기초 토대가 될 것으로 판단된다. 차후 연구예산 등 여건이 조성된다면 아래와 같은 방향으로 실증화 연구를 진행할 예정이다.

- 1) 밸브 등 누출부위에 대한 긴급 확산 방재시스템의 차단·봉쇄 효율에 대한 검증
- 2) 누출 부위에 고압 형성 시 긴급 확산 방재시스템의 정상 작동 가능성에 대한 검증
- 3) 다양한 조건(온도, 습도, pH 등)에 따른 긴급 확산 방재시스템의 작동 가능성에 대한 검증
- 4) 제안한 방재시스템이 정상 작동하지 못하는 조건(미세 크랙 등)에 대한 대응 대책 마련

위에 제시한 실증화 과제를 연구한다면 화학물질이 인명·환경 등에 확산 되는 것을 기존 화학물질 방재시스템 보다 선제적으로 방재할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Environment, "Press release July 27", (2017)
- [2] Ministry of Environment, "Basic Plan for the 1st Chemical Management 2016-2020", 3-14, (2017)
- [3] National Institute of Chemical Safety, "Chemical Safety Clearing-house(<http://csc.me.go.kr/main.do>)", (2017)
- [4] Park, E. M, "A Study on the Valve Sealing for the Risk of Hazardous Chemicals and Volatile Fluid Leakage", Journal of the Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2017 Winter Regular Conference, 185-186, (2017)

- [5] Yoon, S. Y., Cho, M. S., Kim, K. J., Lee, J. S., Park, Y. S., Hawng, D. G., Yoon, J. H. and Choi, K. H., "A Study on the Response Technique for Toxic Chemicals Release Accidents - Hydrogen Fluoride and Ammonia", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 2(1), 31-37, (2014)
- [6] Park, M. N., Kim, H. S., Cho, J. H., Lulu, A. and Shin, D. I., "Mobile Sensor Velocity Optimization for Chemical Detection and Response in Chemical Plant Fence Monitoring", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 21, No. 2, 41-49, (2017)
- [7] Korea Institute of Disaster & Safety, "Disaster Mitigation Research on Effective Response for Hazardous Chemical Substance Incidents", Retrieved from <http://www.ndsl.kr>, (2017)
- [8] Ren, L., Jiang, T., Jia, Z. G., Li, D. S., Yuan, H. N. and Li, H. N., "Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology", *Measurement* vol. 122, 57-65., (2017)
- [9] Rui, Z., Han, G., Zang, H., Wang, S., Pu, H. and Ling, K., "A new model to evaluate two leak points in a gas pipeline", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* vol. 46, 491-497., (2017)
- [10] Korea Occupational Safety & Health Agency, "A Case Study on the Major Industrial Accidents", 4-24, (2017)
- [11] National Institute of Chemical Safety, "Chemical accident response course(general)", 193-203, (2017)
- [12] Texas A&M Engineering Extension Service Emergency Services Training Institute(TEEX), "NFPA 472 Hazardous Materials Technician Training Participant Manual", FP HAZ20 TR vol.4.20.15, PM 3-17-3-25, 193-203, (2015)
- [13] Korea Environment Corporation, "Safe Management of Hazardous Chemicals and Personal Protective Equipment Selection Guide", 193-200, (2015)
- [14] Ministry of Environment, "Chemicals Control Act", (2017)
- [15] National Fire Agency, "Act on the Safety Control of Hazardous Substances", (2017)
- [16] Ministry of Oceans and Fisheries, "Marine Environment Management Act", (2017)
- [17] Ministry of Trade, Industry and Energy, "High-pressure Gas Safety Control Act", (2017)
- [18] National Fire Agency, "Rescue equipment retention criteria", Notification No.2017-2, (2017)
- [19] National Institute of Chemical Safety, "Chemicals specialist course(general)", 141-155, (2017)
- [20] Korea Intellectual Property Rights Information Service, "<http://www.kipris.or.kr>, (2018)
- [21] National Research Foundation of Korea, Retrieved from <http://www.nrf.re.kr>, (2018)