

질산 화학사고 사례분석 및 독성피해 영향범위에 대한 연구

이현승, 신창현*
화학물질안전원

A study on the case analysis of Nitric acid chemical accident and establishment of preventive measures

Hyun-Seung Lee, Chang-Hyun Shin*
National Institute of Chemical Safety

요약 본 연구는 국내·외에서 질산화학사고를 바탕으로 사업장, 실험실, 병원, 용기파손, 화학물질 오 주입으로 이상반응으로 인한 유독가스가 발생하고, 여러 사례들을 바탕으로 질산의 위험성과 화학사고 발생 시 발생할 수 있는 상황과 안전성에 대한 사례검토를 통해서 5년간의(2014년부터 2018년까지) 질산 화학사고 사례 대상으로 각 연도별, 사고현황, 사고유형, 사고원인, 사고 장소 등의 사례를 분석하여 안전교육과 질산화학사고 발생 시 개선 방안을 검토하였다. 그 결과 36건의 질산 화학사고가 조사되었으며, 그중 16건의 작업자 부주의사고가 발생하였고, 8건의 운송사고와 12건의 시설관리 부족과 같은 사고가 발생하였다. 질산화학사고는 지속적으로 발생하고 있으며, 이를 바탕으로 CARIS를 활용한 독성영향범위를 최악에 시나리오를 산정하여, 피해영향범위를 통해서 효과적인 사고대응 범위를 측정하였고, 질산화학 사고 초기대응방법과 사고예방을 위해서 안전교육 강화와 비상조치계획과 상관관계식을 바탕으로 영향범위를 예측하여, 정량화된 자료를 파악하였다. 또한 주민대피 선정이 수월하게 할 수 있는 상관관계식을 바탕으로 영향범위의 신뢰성을 검토하고, 실제 사업장 사고 시나리오에 적용하여 사고 시 비상상황에 사고대응 효과와 예방대책을 제시하였다.

Abstract This study was based on nitrate chemical accidents at home and abroad. Toxic gases due to adverse reactions are generated in the workplace, laboratory, hospital, container damage, and chemical misinjection. Through a case review of possible situations and safety, this study analyzed various cases of accidents, accident status, accident type, cause of the accident, location of the accidents, etc. from 2014 to 2018. The plans for improvement in education and nitrate accidents were reviewed. As a result, 36 nitrate chemical accidents were investigated, including 16 careless worker accidents, eight transportation accidents, and 12 facilities shortages. Nitrate chemical accidents are occurring continuously. Based on this, the range of toxic effects using CARIS was calculated at the worst-case scenario, and the effective response range was measured through the damage impact range. For this purpose, the impact range was predicted based on the strengthening of safety education, emergency action plan and correlation, and the quantified data was identified. In addition, the reliability of the scope of impact was reviewed based on the correlation formula that could facilitate the evacuation of residents, and it was applied to actual accident scenarios of the workplace to present the effects of the accident response and preventive measures.

Keywords : Chemical Accident, Nitric Acid Chemical Control Act, Facilities, CARIS, Damage Distance, Toxic Substance

*Corresponding Author : Chang-Hyun Shin(National institute of chemical safety)

email: yjoy122@korea.kr

Received November 11, 2019

Accepted March 6, 2020

Revised December 31, 2019

Published March 31, 2020

1. 서론

1.1 연구배경

국내·외에서 질산에 대한 화학사고 사례들이 보고되고 있다. 먼저 국외 사고사례를 살펴보면, 2009년 6월 24일, 미국 보스턴대학교 과학공학센터 실험실에서 보관 중이던 실험용 질산 폐수저장용기가 폭발하여 건물이 붕괴되고, 3단계 위험물질경보(Hazmat Alert)가 발령되었다. 또한 질산 증기 흡입이 의심되는 30여명의 학생들은 응급의료 조치를 받았다. 미국 노동부 산하의 산업안전보건청(OSHA: Occupational Safety and Health Administration) 자료를 보면, 2002년 4월 Hydrate 화학회사에서 염산탱크 주입구를 질산탱크 주입구로 오인 연결하여 3톤이 넘는 질산이 염산탱크에 주입되어, 이상 반응으로 인해서 유독가스가 발생한 사고가 있었다[5]. 유럽연합집행위원회(European Commission)에서 운영하는 MARS(The Major Reporting System)에서 조사한 바에 따르면, 질산 저장탱크에 다른 물질을 오주입하여 이산화질소 등의 이상 반응가스가 발생한 사고가 보고된 바 있다.

국내 사례를 살펴본 결과, 질산을 취급하는 중에 실험실, 도로, 병원 등 다양한 장소에서 사고가 발생한 것으로 조사되었다[12]. 서울대 실험실에서는 질산 용기파손으로 인한 사고와 이상반응으로 발생한 폭발한 사고가 2건이 발생하였다. 또한, 운반차량과 관련하여 폐산(질산 15%)을 운반하는 운반차량에서 지하탱크로 옮기던 중 밸브조작 미숙으로 사고가 발생하였고, 운반 중 적재 불량으로 질산용기(18 L)가 낙하하여 질산이 유출되는 사고가 있었다. 2013년 7월 4일에는 고속도로에서 질산 탱크로리가 파손되어 질산이 도로상 유출되는 사고가 발생하였다. 2014년 10월 29일 국립경찰병원에서 오래된 질산 원액 7 L을 폐기처분 하던 중 용기파손으로 질산 1 L이 바닥으로 흐르면서 연기가 발생하여 환자 및 병원관계자 1000여명이 긴급 대피하는 등 많은 사고가 발생한다[4] 등 국내·외에서 질산 화학사고가 끊이지 않고 있다.

질산은 자극성이 강한 부식성 가스로 흡입하면 점막 자극 또는 부종이 발생할 수 있고, 폐부종을 유발하는 등 인체 및 환경에 큰 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다 [1][2]. 질산은 잔류성이 높고 확산성이 있어 화학사고가 발생할 경우 환경, 인명, 재산 등의 심각한 손실 및 피해를 유발하는 경우가 많다[1]. 화학사고 예방·대응을 위해 정부차원에서 「화학물질안전관리 종합대책」(2013.7.5.)[5]를 「화학물질관리법」[11]이 2015년 1월부터 본격 시행

되었다. 질산 취급시설을 설치·운영하고자 하는 사업장은 화학물질관리법에 따라 착공일 30일전에 장외영향평가서를 작성하여 제출하여야 한다. 또한 질산은 사고대비물질로 지정되어 있어 질산을 제조·사용시설로 연간 2,250톤 이상, 보관·저장시설은 300톤 이상 취급하는 사업장은 사고예방, 장외평가 및 비상대응 프로그램을 작성·이행하고 관련정보를 주민에게 고지토록 하는 위해관리계획서를 제출하여야 한다. 아울러, 질산 취급 시 안전대책을 마련하기 위해 취급 사업장은 유해화학물질관리자를 선임해야하며, 질산을 3톤 이상 초과하여 운반하고자 하는 경우에는 운반자, 운반시간, 운반경로·노선을 포함하는 운반계획서를 환경부장관에게 제출하여야 한다.

한편, 질산 등 유해화학물질을 취급하는 사업장에 대한 법은 강화되고 있지만 유해화학물질 사고는 줄어들지 않고 있다. 화학안전정보공유시스템에 따르면, 2015년에는 2014년에 비해 8건이 증가한 113건의 화학사고가 발생한 것으로 나타났다. 이 중 질산에 의한 사고는 36건이 발생하였고, 매년 사고가 끊이지 않고 있어 추가적인 대책이 마련되어야 한다. 사고원인별로 분석하여 관리적 대책, 시설측면 등으로 예방관리 제도를 보완하고, 사고대응 사례를 조사하여 피해 최소화를 위한 사고대응 및 주민대피 방법 등 비상대응 체계를 개선할 필요가 있다. 본 연구에서는 본 연구에서는 국내에서 빈번하게 발생하고 있는 질산에 의한 사고사례를 살펴보고, 질산 취급 시 예방대책과 비상대응 체계를 개선하고자한다.

1.2 질산의 특성

질산의 포화증기압은 0.065kgf/cm²(@20℃)로 상온에서 휘발성은 낮으나 질산의 농도가 높을수록 흠(Hume)이 발생하는 특성이 있다. 이와 같은 특성 때문에 저장탱크 파손 등으로 인한 질산 누출 사고가 발생할 경우, 파손된 부위에서 대기 중으로 직접 증기가 확산 되는 것 보다는 누출된 액체 풀(Liquid pool)로부터 증기 또는 흠 형태로 대기 중으로 확산될 가능성을 고려하여야 한다. 특히 질산의 증기밀도는 1.5 g/ml(@20℃)로 공기보다 무거우며 발생한 증기나 흠은 지상에 영향을 미칠 가능성이 높다.

Hall 등에 의해 보고된 질산 흠(Hume) 노출 사례에 의하면[6], 38%의 질산 37.8 L이 누출된 사고로 인해 질산 흠(Hume)에 노출된 20명중 호흡곤란 증상이 모든 대상자에게 나타났으며 93%, 기침증상은 87%, 위 또는 혹은 폐 통증, 인후 통, 두통은 73%, 현기증과 메스꺼움은 53%, 구토증상이 나타난 것으로 보고되었다. 일반적인

로 노출 3주 후에 이러한 증상이 33% 확률로 재발하였고 평균 15.5일간 증상이 지속되었다. 또한 질산은 물과 반응하여 열과 독성 및 부식성 흡(과산화질소, 질소산화물)을 생성하고, 공기 중 수분을 흡수해 연기를 발생시킨다[7]. 부식성과 발연성이 있는 강산으로, 색깔이 없고 냄새가 심하다.

질산은 미국의 국제화재방호협회(NFPA 704: National Fire Protection Association, Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response)에서 규정한 건강이 4, 반응 1로 분류되는 강산성 물질이다[8]. 물과 모든 비율로 용해되고, 이 과정에서 열과 독성 및 부식성 흡(과산화질소, 질소산화물)을 생성한다. 주로 염료나 폭약, 산화제 비료원으로 많이 이용된다. 질산 사고가 발생할 경우 사고대응과 사람의 대피거리 선정을 위한 떨어진 거리는 화재동반 운송사고 발생 시 대피거리는 반경 800 m, 초기이격거리는 소규모 일때 30 m, 대규모시 150 m 이상을 확보해야 하는 것으로 조사되었다[13].

2. 연구방법

2.1 연구대상 및 분석방법

본 연구에서는 2014년부터 2018년까지 발생한 449건의 화학사고 중 질산 화학사고 자료를 수집하였다. 분석 결과, 암모니아(48건), 염산(38건), 질산 화학사고가 36건으로 화학사고 발생하였다[12]. 지난 5년 동안 질산 화학 사고를 선별하여 각 연도별 사고유형, 사고원인 등의 화학물질사고 특성을 분석하였다. 사고원인을 파악하기 위해 작업자 부주의, 시설관리 미흡, 운송차량 사고로 분류하여 각 연도별 사고발생 현황을 조사하였으며, 유형별로 유·누출, 이상반응, 화재, 폭발, 복합사고 등으로 구분하였다. 장소별로는 병원, 사업장, 연구소, 학교(실험실), 운반 등으로 분류하여 조사하였다.

2.2 자료 분석

국내에서 발생한 화학사고 자료는 환경부 화학물질안전원에서 운영하고 있는 화학안전정보공유시스템의 자료를 활용하였다[12]. 자료의 통계분석은 SPSS ver19(IBM Co. USA) 프로그램을 이용하였다. 자료의 배치·분석도 기준 연구에서 사용한(2) 일원배치 분산분석(One way-ANOVA)을 통해 사고유형(유출·누출, 화재, 폭발,

이상반응)에 따른 사고 발생에 대한 차이검정을 실시하였고, Independence T-test를 통해 사업장, 도로, 기타 등 사고발생 장소와 작업자 부주의, 시설관리 미흡에 따른 사고발생 원인의 차이 검정을 수행하였다. 이 경우 통계치의 유의수준(p-Value)은 0.05를 기준으로 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 질산 화학사고 발생현황

3.1.1 연도별 발생 현황

2014년부터 2018년까지 발생한 총 화학 사고는 449건으로 이중 질산에 의한 화학 사고는 총 36건(8.0%) 발생하였다. Table. 1에서 연도별 질산 화학사고 발생 현황을 살펴보았다. 2014년 한 해 동안의 전체 사고 중 10건, 2015년 7건, 2016년 7건, 2017년 8건, 2018년 4건이 발생한 것으로 조사되었다. 또한, 전체 질산 화학사고 대비 비율로 알아보면 2014년에 9.5%, 2015년 6.2%, 2016년 9.0%, 2017년 9.2%, 2018년 6.1%순으로 차지하는 것으로 조사 되었다. Fig. 1에서 보는바와 같이 질산 화학사고 36건 중 2014년에는 전체 질산 화학사고 36건 대비 28%(10건)의 질산 화학사고가 발생하였다.

Table 1. Nitrate chemical accidents by Year
(unit : case/year)

Type	Number of chemical accidents		
	Total Accident(A)	Nitric acid Accident(B)	Ratio(B/A)
2014	105	10	9.5%
2015	113	7	6.2%
2016	78	7	9.0%
2017	87	8	9.2%
2018	66	4	6.1%
Total	449	36	8.0%

3.1.2 장소별 발생현황

질산 화학사고 발생장소를 살펴보면, 사업장사고가 50%(18건)로 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 각 장소별로 보면 운분 중 도로상에서 발생한 사고가 Fig. 2에서 22%(8건), 학교(실험실) 17%(6건), 연구소 18%(3건)병원에서 3%(1건)로 분석되었다. 실험실 및 사용 보관하는 사업장에서 사고 난 빈도수가 73.1%(19건)로 발생했고,

사업장 밖에서 발생한 사고는 26.7%(7건)로 조사되었다. 질산 화학사고는 상대적으로 실험실이나 보관창고·저장탱크에서 많은 사고가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 실험실사고가 두드러지게 많이 발생하였고, 실험실 사고 9건 중 학교실험실에서 6건 사업장 실험실 2건, 연구기관 1건으로 조사되었다.

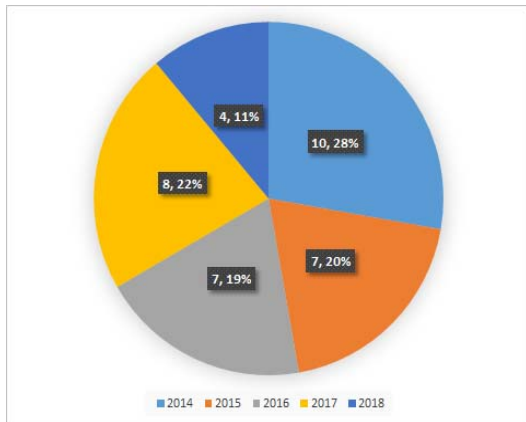


Fig. 1. Statistics for yearly Nitric acid chemical accidents.

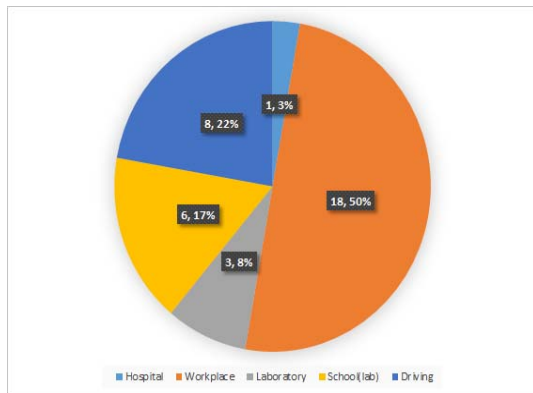


Fig. 2. Statistics for yearly Nitric acid chemical accidents.

3.1.3 원인별 현황

질산 화학사고 발생현황을 연도별 원인을 살펴보면 작업자부주의, 시설관리 미흡, 운송차량사고로 분류하였다. 원인분석 조사 분석방법은 환경부 화학물질안전원에서 화학사고 원인을 국가적인 통계자료로 활용하기 위해서 사용하는 방식이다. 작업자부주의의 사고를 살펴보면, 용기의 파손이나 낙하에 의한 사고가 가장 많이 발생하고 있다. 작업자들의 안전관리에 대한 의식부족으로 용기낙하 사고로 이어지고 있다. Table. 2에서 살펴보면 2014년 4

건, 2015년 4건, 2016년 5건, 2017년 1건, 2018년 2건의 작업자 부주의 화학사고가 발생하였고, 총 16건의 질산 화학사고가 작업자 부주의로 발생한 것으로 나타나 발생 원인별로 가장 높은 순으로 나타났다. 시설관리 미흡은 시설·장비의 부식이나 파손에 의해 화학사고 발생하고 있음을 보여주고 있다. 2014년부터 2018년까지 시설관리 미흡으로 발생한 사고가 총 12건으로 이중 파손에 의한 화학사고가 6건, 부식 6건으로 조사되었다. 운송차량사고는 적재불량으로 낙하사고가 발생하였고, 주행 중 밸브파손 및 저장탱크에 주입 중 조작미숙으로 화학사고가 발생한 것으로 분석되었다. 2014년부터 2018년까지 총 8건의 질산화학사고가 발생한 것으로 조사되었다.

Table 2. Type of causes of Nitric acid chemical accidents (unit : case/year)

Year	Total	Causes of the accident		
		Poor facility management	Transportation Vehicle Accident	Carelessness
2014	10	3	3	4
2015	7	3	0	4
2016	7	0	2	5
2017	8	4	3	1
2018	4	2	0	2
Total	36	12	8	16

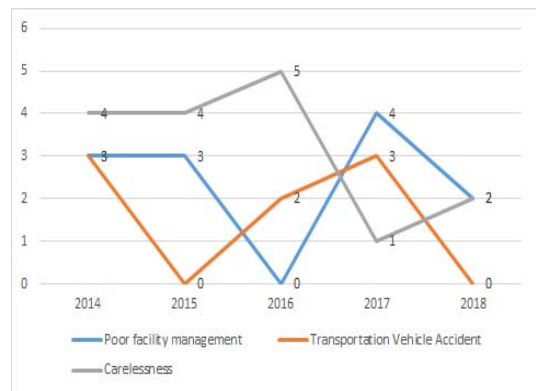


Fig. 3. Statistics for type of yearly Nitric acid chemical accidents.

3.1.4. 사고유형별 발생현황

사고유형별로는 유누출은 24건, 이상반응 2건으로 나타나고 있으며, 화재와 같은 사고는 발생하지 않았다. Table. 3과 같이 유누출 사고를 살펴보면 밸브파손과 저장용기 및 보관용기 적재불량으로 이동 중 낙하사고가

발생한 것으로 조사되었다. Fig. 4에서 보는바와 같이 2013년 유누출 5건, 2014년 유누출 8건 2015년 유누출 7건, 2016년 6월까지 유누출 5건으로 매년 5건 이상의 유누출사고가 발생하고 있다. 또한 실험 중 희석배율을 잘못 조절하여 이상반응이 발생하여 폭발하여 부상자가 발생하는 사고가 발생한 것으로 나타났다.

Table 3. Type of Nitric acid chemical accidents
(unit : case/year)

Year	Type of chemical accidents				p-Value
	Total	Spill/Leakage	Abnormal reaction	explosion	
2014	10	9	0	1	〈0.05
2015	7	6	0	1	
2016	7	7	0	0	
2017	8	8	0	0	
2018	4	2	1	0	
Total	36	32	1	2	

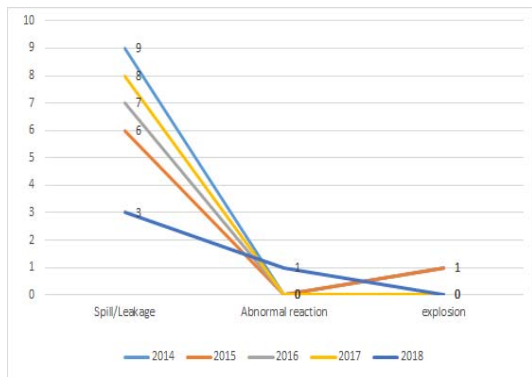


Fig. 4. Statistics for type of forms of yearly Nitric acid chemical accidents.

3.2 피해 영향범위 분석프로그램 입력인자

대기에 유해화학물질의 농도가 지정이상 수준으로 누출되어 유해성 거리를 최대 확산거리로 계산하는 대기이동 및 확산을 모사하는 모델은 화학물질관리법에 따른 장기영향평가서 작성에 필요한 DNV GL사 PHAST (PHAge Search Tool), ALOHA(Areal Location Of Hazardous Atmospheres)[8] 및 범용프로그램인 KORA (Korea Off-site Risk Assessment supportingtool), CARIS(Chemical Accident Response Information System, 화학물질 사고대응 정보시스템) 등이 있다[13]. ALOHA는 미국의 해양대기국(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S.

Department of Commerce)과 환경보호청 (EPA: United States Environmental Protection Agency)이 공동으로 개발하여 무료로 배포한 피해예측 프로그램이며, 기상과 액상이 혼합된 물질의 실시간 모델링이 가능하다는 장점이 있다. 단점은 매우 안정한 대기층과 느린 바람 속도, 대기 중 화학반응 불가 및 지형조건을 고려하지 않는다.

화학물질 사고대응 정보시스템(CARIS)은 환경부 국립환경과학원에서 개발하여 유관기관에 배포중이며, 2012년 버전이후 화학물질안전원에서 개발하여 2018버전이 유관기관에 배포중이다[15]. 또한 KORA프로그램은 무료로 활용할 수 있는 프로그램이다. 2015년부터 시행된 화학물질관리법에 따라 화학물질을 취급하는 사업장은 장기영향평가 및 위해관리계획서를 제출해야하는 의무가 있기 때문에 KORA 프로그램을 사용하여 업체의 비용과 부담을 절감할 수 있다. KORA의 장점은 위험성 평가부터 피해범위 예측과 위험도 산정까지 자동으로 장기영향평가서와 위해관리계획서를 완성할 수 있다.

3.2.1 사고시나리오 선정

최악의 사고 시나리오란 유해화학물질을 최대량 보유한 저장용기 또는 배관 등 화재·폭발 및 유출·누출이 발생되어 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 경우를 말한다.

본 연구에서 최악의 시나리오를 선정한 이유는 화학물질의 사고 발생 시 빠르게 확산되는 유해화학물질 독성의 상관관계식을 통해 비상 대책 및 주민 대피 소산계획을 세울 수 있기 때문에 피해영향 범위가 최대인 최악의 시나리오를 선정하였다. 화학물질 사고는 누출, 이상반응, 폭발 등의 복합적이고 다양하게 나타나고 있다. 그 중 유출 및 누출에서 각각 89%로 가장 높은 비율로 사고가 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 독성 누출을 사고 시나리오로 선정하였다. 본 연구에서의 누출량은 단일 용기에 저장되는 최대량으로 정의하였으며, 사고발생 20분 동안에 최대 저장량이 모두 누출되는 것으로 설계하였다. 상온에서 저장 및 취급하는 액체상태의 급성 독성물질이 누출된 경우, 저장 및 취급된 누출량이 순간적으로 누출되어 액체 층을 형성하게 되며, 방류벽 등과 같은 확산방지 조치가 되어 있지 않은 경우에는 누출량과 밀도만을 고려하여 액체 층의 표면적을 산정한다[15]. 본 연구에서는 물질별로 주어진 밀도를 고려하여, 최악의 시나리오로 20분 동안 설계된 저장량(kg)이 설계된 누출속도(kg/s)로 누출되었을 때의 독성피해 영향

범위를 분석하였다. 따라서 최악의 사고시나리오의 누출 속도는 (1)식과 같으며 저장량에 비례한다.

$$R_w = \frac{Q_R}{600} \quad (1)$$

여기서, w = 누출속도(kg/s)

QR = 최대 저장량(kg) 이다.

Table. 5에 독성 누출 시 사고 시나리오 분석 인자들의 조건을 나타내었다. 대기안정도는 F, 끝점거리는 ERPG-2, 풍속은 1.5 m/s, 대기온도는 25°C, 그리고 습도는 50%로 설정하였다. 액상 물질의 저장탱크는 최대용량 기준으로 직경 1.75 m, 높이 5 m, 용량 약 12 m³인 수직 실린더 형태로 설정하였다.

Table 4. Conditions of accident scenarios

Parameter	Condition
Risk factors	Toxicity
Damage effects model	Toxic
Equipment shape	Vertical cylinder
Storage conditions	Liquid
Equipment diameter	1.75 m
Equipment height	5 m
Leak height	0 m
Operation pressure	1 atm
Solidarity pipe diameter	2 inch
Atmospheric stability	F
Toxicity levels	ERPG-2
Wind speed	1.5 m/s
Atmospheric temperature	25°C
Atmospheric humidity	50%

프로그램 실행 시 지면 위 떨어진 거리, 누출 배관 직경, 저장량과 누출속도, 대기 온도, 운전 압력 및 방류면적을 변화되는 인자로 설정하여 분석하였다. 최악의 사고시나리오에서는 수동적 완화장치(방벽, 방호벽, 방류벽, 배수시설 및 저류조 등)만을 고려하며, 능동적 완화장치(중화설비, 소화설비, 수막설비, 과류방지밸브, 플레어 시스템 및 긴급차단시스템 등)는 고려하지 않는다[11].

3.2.2 상관관계식의 개발 및 검증 방법

본 연구에서는 상관관계분석은 변수 간 관계의 밀접한 정도를 분석하는 통계적 분석 방법을 말하며, 선형회귀분석은 종속 및 독립 변수 간의 관계를 예측하는 것으로서 계수를 조정하여 회귀 수식을 구한다. 화학물질 누출사고가 발생하면 저장량 및 누출량에 따른 피해영향범위를 빠르고 쉽게 판단할 수 있는 선형 상관관계식을 도출하

였다. 대신에 누출량에 따라 산정된 영향범위의 분포를 바탕으로 회귀 분석결과 회귀식의 적합도가 높은 것으로 평가할 수 있는 기준이 되는 상관계수 값(R²)이 1에 가까운 회귀분석 모델을 도출하고자 했으며, 그 결과 0.96 ~ 0.99로 높은 결정계수 값을 갖는 선형함수 형태의 회귀분석 모델을 적용하였다. 이를 통하여 해당 상관관계는 통계적 유의성이 있음을 확인할 수 있다. 선형 회귀분석을 통해 질산의 독성피해 영향범위에 대한 상관관계를 1차, 2차 및 3차식으로 산정하였고, 선형회귀분석을 통하여 상관계수가 0.99이상인 최적의 상관관계식을 도출하였다. 화학물질누출사고 발생 시 CARIS를 이용한 독성피해 영향범위와 본 연구의 상관관계식을 이용한 독성피해 영향범위를 비교하여 신뢰도를 검증하였다.

3.2.3 질산 피해 영향범위 및 상관관계식

질산 화학사고 사례를 살펴보면 실험실, 사업장, 학교, 운송(탱크로리, 소량 탈출 운송 등)을 하면서 사고가 발생하였다. 저장량이 작게는 500 g, 1 kg, 25 kg, IBC 탱크 1 ton, 저장탱크는 최대 12 ton으로 구분하였다. Fig 6.에서 사고사례를 살펴보면 5 kg이하일때 많은 사고가 발생했지만, 5 kg이상에서도 다량은 화학사고가 발생하였다. 화학물질관리법에서는 5 kg, 5 L이상 누출에 대해서 즉시신고 기준을 마련하여, 15분 이내 신고하게 법을 재정보정하였다. 이처럼 소량에 사고에 대해서도 많은 사고가 발생하고 있다. 화학사고 대응은 소량누출에도 대응하고 있지만, 건강상에 위험성과 누출시 주민대피에 대해서 영향을 줄 수 있는 저장량 5~12,000 kg인 저장탱크에서 0.01~20 kg/s의 누출속도로 10분간 누출되었을 경우의 피해영향범위를 산출하였다. 피해영향모델을 독성으로, 끝점거리 ERPG-2를 10 ppm으로 설정한 뒤 저장량을 변화시키면서 독성피해 영향범위를 분석하였으며, 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

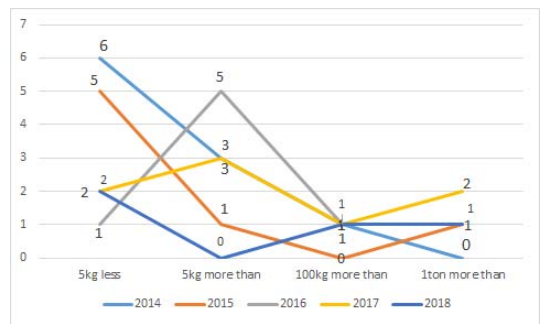


Fig. 6. Nitric Acid Leakage

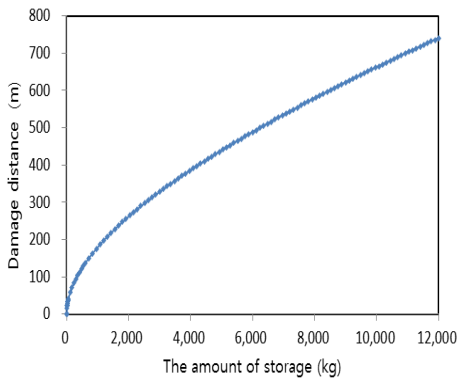


Fig. 7. Damage distance of nitric acid

Fig. 7의 피해영향거리를 식으로 전환한 1~3차 영향 범위 산정식 및 상관계수를 Table 6.에 나타내었다. 선형회귀분석을 통해 분석한 결과, 1차식은 $y = 0.0582x + 103.470$ 로 선형화되었으며, 이때의 상관계수는 0.9611이었다. 2차식은 $y = -3E-06x^2 + 0.0933x + 55.807$ 이고 상관계수는 0.9905, 3차식은 $y = 5E-10x^3 - 1E-05x^2 + 0.1271x + 37.451$ 이고 상관계수는 0.9963으로 나타났다.

Table 5. Damage distance equations of nitric acid

Order	Equations	Corelation coefficient (R2)
1sr	$y=0.058x+103.470$	0.9611
2nd	$y=3E-06x^2+0.0933x+55.807$	0.9905
3rd	$y=5E-10x^3+0.1271x+37.451$	0.9963

where, x = storage(kg)
y = damage distance by leakage(m)

산정된 질산에 의한 피해영향거리 상관관계식의 검증 을 위하여 A, B 사업장 각각의 사고 시나리오를 적용해 보았다. A 사업장의 사고 시나리오는 탱크로리에서 저장 탱크로 유입 시 질산이 누출·확산되는 영향모델로 설정 하였으며, 해당 설비의 설계 용량은 6 m³, 직경은 2.2 m, 높이는 1.6 m이다. 질산의 밀도와 80% 운전용량은 50% 로 하여, 저장량을 3,000 kg으로 계산하였다. 사고 시나 리오에 대한 실제 CARIS 프로그램을 분석한 결과 영향 범위는 290 m로 나타났다. 본 연구의 1차, 2차, 3차 상 관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계 산한 결과는 Table 7.로 각각 378.1 m, 308.7 m, 342.3 m로 나타났으며, 이에 대한 결과를 Table. 7에 나타내었다. 결과적으로 2차 상관관계식에서 오차율

6.4%로 실제 영향범위 값과 흡사한 결과가 도출되었다. B 사업장에서의 질산 사고 시나리오는 설비의 설계용량 은 2 m³이고 설비의 직경은 2.4 m, 높이는 1.8 m이며, 독성을 영향모델로 설정하였다. 질산의 밀도와 운전 최대 용량을 50%로 고려하여, 저장량을 1000 kg으로 계산하 였다. 사고 시나리오에 대한 실제 CARIS 프로그램을 분 석한 결과 영향범위는 148 m로 나타났다. 본연구의 1 차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과는 161.7 m, 146.1 m, 155.1 m로 나타났다. 1차 상관관계식에서 오차율 9.3%, 2차 상관관계식에서 오차율 -1.3%, 3차 상관관계식에서 오 차율 4.8%의 결과 값이 도출되었다.

Table 6. Comparison of damage distance by equations and KORA in case of nitric acid leakage

Order	A factory(m)		B factory(m)	
	by equation	by CARIS	by equation	by CARIS
1st	378.1		161.7	
2nd	308.7	290	146.1	148
3rd	342.3		155.1	



Fig. 8. CARIS nitrate toxicity range

누출 량에 따라 산정된 영향범위의 분포를 바탕으로 분석결과 상관식의 적합도가 높은 것으로 평가할 수 있는 기준이 되는 상관계수 값(R2)이 1에 가까운 식을 도 출하고자 했다. 그 결과 물질별 0.96 ~ 0.99로 높은 결 정계수 값을 갖는 선형함수 형태의 회귀분석 모델을 적 용하였다.

질산의 상관계수 값은 2차식이 0.9905, 3차식이 0.9963으로 나타났으며, 산정식을 A, B 사업장 시나리오 에 대입하여 검증해보았다. A 사업장은 2차 상관관계식 에서 오차율 0.5%로 실제 영향범위 값과 가장 흡사한 결 과가 도출되었고 B 사업장은 2차 상관관계식에서 오차율 1% 결과 값이 도출되었다. 따라서 질산은 2차 상관관계 식이 가장적합하다고 판단하였다.

4. 결론

본 연구는 2014년부터 2018년까지 발생한 국내 화학사고를 분석하여 예방관리 측면과 사고대응 측면에서 보 완점을 도출하였다. 2014년부터 2018년까지 발생한 국 내 화학사고의 총 449건 중 질산 화학사고는 36건 (8.0%)으로 사고 원인물질로는 세 번째로 발생 빈도가 높은 것으로 나타났으며, 매 년 지속적으로 발생하여 현 수준의 안전관리 예방제도로는 사고를 완전히 차단하기 는 어려운 실정이다.

사고사례를 통해 시사점을 도출하기 위해 고유형, 사 고원인, 발생시절로 구분하여 분석하고, 또한 이를 바탕 으로 최악에 시나리오 조건을 적용하여 질산으로 인한 독성 피해 영향범위를 산정하여 주민대피 거리를 선정하 기 위한 기초자료를 상관관계식으로 제시하였다. 이를 사 업장 사고 시나리오에 적용하여 신뢰도를 검증하여, 다음 과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 질산화학사고의 조사한 결과 사고 장소를 보면, 실험실 사고가 많이 발생하였으며, 「연구실 안전 환경 조 성에 관한법률」을 활용하여 사고예방·대응 대책 마련과 안전교육과 비상조치계획을 수립하고, 실험실 또한 관련 법규를 개정하여, 소규모 장외영향평가서를 작성하여, 피 해영향범위를 줄일 수 있는 계획이 필요한 것으로 판단 된다.

둘째, 사고예방 측면에서 살펴볼 때, 사고의 유형이 가 장 높게 나온 작업자 부주의 사고를 분석할 필요가 있다. 작업자 부주의로 사고가 16건이었고, 이를 줄이기 위해 서는 많은 대책이 필요할 수 있지만 우선 안전관리 문화 를 형성하는 것이 중요한 것으로 판단된다. 안전교육매뉴얼을 소책자를 만들어 배포하고, 사업장 곳곳에 질산에 대한 물질특성 및 화학사고 초기방재요령 등 주위사항을 표지판을 설치하고, 현장에 맞는 맞춤형 전문교육이 필요 하다. 또한 주기적인 최악시나리오훈련을 통해서 사고대 응에 대한 위험성을 전달하고, 사업장뿐만 아니라 인근사 업장과 주민대피가 신속하게 전달할 수 있는 매뉴얼을 만들고, 주민이 참여하는 훈련을 강화시켜 분기별로 주민 들과 누출훈련과 주민고지 등에 관한 개선점을 도출하여, 보다 신속하고, 안전한 대피방법을 찾아야 할 것으로 판 단된다.

셋째, 사고대응 측면에서는 화학사고 대응기관과 초기 대응 협력시스템을 만들어 초기대응능력을 강화하고 비 상연락망을 통한 물질정보 및 방재정보를 공유하는 시스

템 마련하여, 관계기관에 사고전파가 신속하게 이루어지 고, 자체 소방대 및 공단에 입지한 자율소방대를 활용하 여, 방재 및 방재물품이 신속하게 이루어질 수 있는 공단 자율소방대를 조직하여, 독일에서 시행하고 있는 공단 내 소방대를 활용하는 방안을 계획할 필요가 있을 것으로 판단된다.

넷째, 사고 피해 영향범위를 사전에 파악하여 단순한 떨어진 거리를 선정하는 것 보다 사업장 취급정보를 파 악하여 영향범위를 예측하여 정량화된 자료를 파악하여 야 주민대피 선정이 수월해진다. 질산 누출에 따른 최악 의 시나리오 적용하여 두 사업장의 CARIS 실제 영향범 위 결과와 본 연구의 상관관계식 비교 결과, A 사업장은 2차 상관관계식에 대해 오차율 0.51%를 나타내었고 B 사업장은 2차상관관계식에 대해 오차율 5.29%, 3차 상 관관계식에 대해 오차율 4.90%의 결과가 도출되었다. 따 라서 질산은 본 연구의 2차 상관관계식인 $y = -3E-06x^2 + 0.0933x + 55.807$ 이 가장 적합한 식으로 판단된다. 이를 활용해서 피해영향범위를 미리 산정하여 활용한다 면, 보다 빠른 주민대피를 함으로서 인명피해를 줄이고, 차후 대피범위를 설정하는데 도움이 될 것이다.

References

- [1] Lee, T. H., J. D. Park, S. J. Lee, B. S. Bang, K. P. Kim, M. S. Kim, and J. S. Park, "Characteristics of chemical substance accident in Korea", Korea Journal of Hazardous Materials, Vol. 3, No. 1, pp. 35-39. June 2015.
<https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE06527100>
- [2] Lee, T. H, D. J. Lee, J. D. Park, and C. H. Shin, "Study of the Charateristics Analsys of Laboratory Chemical Accidents", Korean Institute of Fire Science & Engineering, vol. 30, No. 3, pp. 110-116. June 2016.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiOrteView.kci?sereArticleSearchBean.artid=AR T002122948>
- [3] Lee, J. S, M. S. Jung, M. S. Cho, Y. S. Ahn, K. J. Kim, Y. S. Yoon, J. H. Yoon, K. S. Seok, "Review on Detection Analysis and Environmental Impacts for Nitric Spill Response", Korea Journal of Hazardous Materials, Vol. 2, No. 1, pp. 25-30. Dec. 2013.
<https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE02270605>
- [4] Shin, C. H, H. S. Lee, T. H. Kim, and J. H. Park, "Analysis on Chemical Accident Characteristics of Facilities Handling Hydrochloric acid", Korean Institute of Fire Science & Engineering, vol. 30, No. 6, pp. 14-22. Nov.

2016.

<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiOrteView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002185300>

- [5] Ministry of Environment, Investigation of Distributed Quantity of Chemicals, 2013.
- [6] National Institute of Environmental Research, Impacts Assessment and Management Plan after Chemical Accidents, 2006
- [7] Enviro Technical Information for Problem Spills, Environmental Canada, 1984.
https://openlibrary.org/books/OL20870301M/Environmental_and_technical_information_for_problem_spills.
- [8] National institute of chemical safety, Key-Info Guideline(2014)
- [9] National institute of chemical safety, Technical guidelines for selection of accident scenario, 2014.
<http://nics.me.go.kr/front/main/main.do>
- [10] Korea Occupational Safety Health Agency, Fire explosion effect andThinking Model Analysis(II), 2017
- [11] National institute of chemical safety, Off-site impact assessment evaluation guide, 2015.
<http://nics.me.go.kr/front/main/main.do>
- [12] National institute of chemical safety, DOI: <https://icis.me.go.kr/pageLink.do>
- [13] National institute of chemical safety, 2016 Emorgency Response Guidebook, 2017.
<http://nics.me.go.kr/front/main/main.do>
- [14] National institute of chemical safety, CARIS(Cheical Accident Response Information System).
<http://nics.me.go.kr/front/main/main.do>
- [15] Jo. G. Y, Lee. I. M, Hwang. Y. W, Moon. J. Y. "A Study on the Simulation of Damage Distance for Toxic Substances Leakage". The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 4, PP. 599-607. 2017
<http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201718155359710.page>

이 현 승(Hyun-Seung Lee)

[정회원]



- 2018년 2월 : 전북대학교 일반대학원 환경공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 일반대학원 환경공학과 (박사과정)
- 2015년 5월 ~ 현재 : 환경부 화학물질안전원 사고총괄훈련과

<관심분야>

환경공학, 안전공학, 화학공학

신 창 현(Chang-Hyun Shin)

[정회원]



- 2000년 2월 : 고려대학교 공과대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 : 충북대학교 공과대학원 안전공학과 (공학박사)
- 2014년 1월 ~ 현재 : 화학물질안전원 공업연구관

<관심분야>

취급시설, 위험성, 위해관리계획