

사고대비물질 누출 시 독성피해 영향범위 상관관계식 개발에 관한 연구

조가영¹, 이익모^{1*}, 황용우¹, 문진영²

¹인하대학교 환경공학과/안전융합대학원, ²인천재능대학교 환경보건과

A Study on the Simulation of Damage Distance for Toxic Substances Leakage

Ga-Young Jo¹, Ik-Mo Lee^{1*}, Yong-Woo Hwang¹, Jin-Young Moon²

¹Environment Technology and Safety Technology Convergence, INHA University

²Health and Environmental Engineering, JEI University

요약 본 논문은 2015년 화학물질관리법 시행에 따라 일정 수량 이상 화학물질을 취급함으로써 장외영향평가서와 위해관리계획서를 제출할 의무가 있는 영세 및 중소기업들을 대상으로 행정·경제적인 부담을 줄이고자 위험성 평가에 대한 실질적인 피해 영향범위를 판단한 것이다. 사고대비물질 중 액체상 물질인 질산, 메탄올, 아세트산에 대하여 독성 누출 시 피해 영향범위를 산정하였고, 저장 및 누출량에 따른 독성피해 영향범위를 판단할 수 있는 상관관계식을 도출하였다. 본 연구의 상관관계식으로 산정된 독성 누출 시 피해 영향범위 결과와 실제 사업장의 사고 시나리오에 따른 KORA(장외영향평가서, 위해관리계획서 작성 지원 범용프로그램) 결과를 비교하여 적용 및 검증은 실시하였다. 따라서 본 연구의 물질별 상관관계식은 도로 혹은 사업장에서 사고대비물질 누출사고가 발생했을 경우, 독성피해 영향범위를 빠르게 판단함으로써 비상조치계획의 수립과 비상상황에 신속하게 대응할 수 있을 것이다. 또한, 영세 및 중소기업 사업장은 화학물질관리법에 따른 장외영향평가와 위해관리계획서를 제출할 때 위험성평가 활용이 가능하며, 저장 및 누출량에 따라 예상되는 독성피해 영향범위를 간단하게 확인 및 평가할 수 있을 것이다.

Abstract Since 2015, small and medium domestic enterprises that treat more than a certain quantity of chemical substances in accordance with the Chemical Substance Control Act are obliged to submit an off-site impact assessment and risk management plan. In order to reduce the administrative and economic burden of the risk assessment, its impact was determined. Toxic leaks of nitric acid, methanol, and acetic acid were estimated and the correlations (between them?) were calculated. In addition, the correlations of this study were used to compare the KORA results according to the accident scenarios of the actual workplace and the extent of the damage as a function of distance in the case of toxic leaks. In this study, the correlation formula of the materials can be used to quickly determine the damage distance in the event of the accidental leakage of materials in the road or workplace, and to prepare emergency plans and respond to emergencies more quickly.

Keywords : Damage distance, KORA, Off-site risk assessment, Simplified correlation equation, Toxic substances leakage

1. 서론

장은 화학물질관리법에 따라 2015년부터 장외영향평가서와 위해관리계획서를 제출해야 하는 의무가 있다[1].

국내 유해화학물질을 일정 수량 이상 취급하는 사업
따라서 영세 및 중소기업들은 유해화학물질 관리기준 이
본 논문은 산업통상자원부 환경규제 및 안전전문 인력양성사업 과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ik-Mo Lee (Inha Univ.)

Tel: +82-32-860-7628 E-mail: imlee@inha.ac.kr

Received December 27, 2016

Revised (1st February 9, 2017, 2nd March 2, 2017)

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

행과 장외영향평가서 및 위해관리계획서 작성 측면에서 행정적, 경제적 부담이 발생한다. 장외영향평가서 및 위해관리계획서 작성시 위험성 평가 및 작성지원 프로그램인 피해영향범위 모델링은 전문적이며, 결과 도출시 오랜 시간이 소요되는 경우가 있다. 따라서 영세 및 중소기업들에게 직접적으로 도움을 제공할 수 있는 방안의 일환으로, 피해영향범위 산출을 포함한 위험성 평가에 대한 실질적인 연구가 필요하다.

화학물질안전원 통계에 따르면 2003년부터 2016년 5월까지 기준으로 사고대비물질 중 국내 사고 발생 건수는 질산 44건, 염화수소 40건, 황산 39건, 암모니아 36건, 과산화수소 16건, 플루오르화수소 15건, 톨루엔 15건 등 이다[2]. 특히 주목할만한 국내 유해화학물질 사고로는 2012년의 불산 누출 사고가 있었다. 20톤 탱크로리에서 공장 내 저장탱크로 불산을 옮겨 담는 중에 작업자의 실수로 인하여 불산이 넘치면서 누출·확산되었고, 공장 인근 농작물의 고사 및 가축 폐사 등의 주변지역 피해가 발생하였다[3]. 또한, 알루미늄을 가공하여 휴대폰 버튼을 만드는 업체에서 발생한 메탄올 누출로 인한 실명 사고도 있다. 근로자들은 보호구 착용 없이 급성 독성 물질인 메탄올에 직접 노출이 되어서 시신경이 파괴되고 시력 손상을 받았다[4]. 이처럼 화학물질 사고가 양적으로 증가할 뿐만 아니라, 질적으로 환경과 안전을 위협하는 추세이다.

유해화학물질 사고유형은 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 유해화학물질로 인하여 직접적으로 발생하는 화재사고, 두 번째로 유해화학물질에서 발생한 가스의 급격한 비등팽창으로 인한 폭발사고, 세 번째로는 유해화학물질 누출로 인한 피해이다. 2003년부터 2015년 12월 31일까지 전국에서 발생한 434 건의 화학사고 중에서 약 73%에 해당하는 319건이 유해화학물질의 누출로 인한 사고로 조사되었으며, 그 외에 폭발사고 59건(14%), 화재사고 27건(6%), 기타사고 29건(7%) 순으로 조사되었다[3].

유해화학물질 사고 중에서 사회적으로 큰 파장을 유발시키는 원인을 제공하는 사고유형은 누출사고이다. 유해화학물질 누출 시 발생된 가스나 증기운이 누출지역 일대로 확산되어 피부 또는 호흡기를 통해 체내에 침투되기 때문에 지역주민과 근로자에게 치명적인 손상을 입히게 된다.

기존의 연구들 중 가스상 유해화학물질들의 피해영향

범위 및 산정식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [5-8]. 또한, 국내 환경부 산하 화학물질안전원은 염산과 암모니아수에 대한 피해 영향범위 간이표를 제공한 바가 있으나[9], 이 외의 액체상 유해화학물질에 대한 피해영향범위 관련 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 3종의 사고대비물질을 선정하여 액체상 물질의 독성 누출 시나리오에 따른 피해영향범위에 대해 검토하였으며, 영세 및 중소기업 등에서 정량적 위험성 평가를 쉽고 빠르게 활용 및 판단할 수 있도록 저장 및 누출량에 따른 독성피해 영향범위의 상관관계식을 도출하는 것을 목적으로 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상 물질선정

본 연구에서는 대상 물질로서 산화성 액체인 질산, 인화성 액체인 메탄올 및 아크릴산 등 3종의 액상 유해화학물질을 선정하였으며, 그 물질의 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Physical and chemical properties of selected chemicals

Properties	Nitric acid	Methanol	Acrylic acid
Molecular weight (g/mol)	63.01	32.04	72.07
Melting point(°C)	-41.6°C	-97°C	13°C
Boliling point (°C)	83°C	64.6°C	141°C
Density (g/cm ³)	1.55	0.79	1.05

연구대상 물질의 선정 사유는 다음과 같다. 질산은 액체상 사고대비물질로서 최근 10년간 국내 사고발생빈도가 44건으로 가장 높은 산화성 액체이며, 최근 메탄올 접촉으로 인한 시력 이상 증상의 급성중독사고가 발생하고 있다[4]. 또한 23종의 기체상 물질을 제외한 액상 사고대비물질의 급성 경구, 피부, 흡입 지수와 NEPA 건강보전, 화재, 반응 지수 등 물리화학적 특성과 사고발생건수와 함께 고려하여 인화성 액체 아크릴산을 선정하였다 [10].

2.2 사고시나리오 선정

독성피해 영향범위 산출을 위한 사고 시나리오는 화학물질안전원이 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’에서 제시한 최악의 사고 시나리오를 선택하였다[11]. 최악의 사고 시나리오란 유해화학물질을 최대량 보유한 저장용기 또는 배관 등에서 화재·폭발 및 유출·누출이 발생되어 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 경우를 말한다.

본 연구에서 최악의 시나리오를 선정한 이유는 화학물질을 취급하는 영세 및 중소기업들은 장외영향평가 및 위해관리계획서를 제출해야하는 의무가 있으며, 화학물질의 사고 발생 시 빠르게 본 연구에서 선정된 상관관계식을 통해 비상 대책 및 주민 대피 소산계획을 세울 수 있기 때문에 피해영향 범위가 최대인 최악의 시나리오를 선정하였다.

또한, 국내에서 발생한 화학물질 관련 사고사례는 화학물질안전원에서 제공하는 통계에 따르면, 화학물질 사고는 유출 및 누출, 화재, 폭발 등의 복합적이고 다양하게 나타나고 있다. 그 중 유출 및 누출에서 각각 41.0% 및 32.3%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 10분 동안에 최대 저장량이 모두 누출되는 것으로 설계하였다.

상온에서 저장 및 취급하는 액체상태의 급성 독성물질이 누출된 경우, 저장 및 취급된 누출량이 순간적으로 누출되어 액체층을 형성하게 되며, 방류벽 등과 같은 확산방지 조치가 되어 있지 않은 경우에는 누출량과 밀도만을 고려하여 액체층의 표면적을 산정한다[11]. 본 연구에서는 물질별로 주어진 밀도를 고려하여, 최악의 시나리오로 10분 동안 설계된 저장량(kg)이 설계된 누출속도(kg/s)로 누출되었을 때의 독성피해 영향범위를 분석하였다. 따라서 최악의 사고시나리오의 누출 속도는 (1) 식과 같으며 저장량에 비례한다.

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

여기서, R_w = 누출속도(kg/s)

Q_R = 최대 저장량(kg) 이다.

2.3 피해 영향범위 분석프로그램 입력인자

대기에 유해화학물질의 농도가 지정된 폭로 수준을 초과하는 유해성 거리를 최대 확산거리로 계산하는 대기 이동 및 확산을 모사하는 모델은 화학물질관리법에 따른 장외영향평가서 작성에 필요한 DNV GL사 PHAST(PHAge Search Tool), ALOHA(Areal Location Of Hazardous Atmospheres) 및 범용프로그램인 KORA(Korea Off-site Risk Assessment supporting tool) 등이 있다[6].

ALOHA는 미국의 해양대기국(NOAA)과 환경보호청(EPA)이 공동으로 개발하여 무료로 배포한 피해예측 프로그램이며, 기상과 액상이 혼합된 물질의 실시간 모델링이 가능하다는 장점이 있다. 단점은 매우 안정한 대기 층과 느린 바람 속도, 대기 중 화학반응 모사 불가 및 지형조건을 고려하지 않는다.

노르웨이-독일 합자회사인 DNV-GL에서 개발한 PHAST는 다양한 모델을 바탕으로 화재, 폭발, 누출 현상을 효과적으로 모사할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 유료로 이용 가능하여 가격이 매우 비싼 편이다.

마지막으로 KORA는 환경부 화학물질안전원에서 개발하여 무료로 활용할 수 있는 프로그램이다. 2015년부터 시행된 화학물질관리법에 따라 화학물질을 취급하는 사업장은 장외영향평가 및 위해관리계획서를 제출해야하는 의무가 있기 때문에 KORA 프로그램을 사용하여 업체의 비용과 부담을 절감할 수 있다. KORA의 장점은 위험성 평가부터 피해범위 예측과 위험도 산정까지 자동으로 장외영향평가서와 위해관리계획서를 완성할 수 있다.

대부분의 프로그램 자체가 구동하기 복잡하거나 전문성이 요구된다. 따라서 영세 및 중소기업 등의 사업장 피해영향 범위를 판단하기 위해서 KORA 프로그램이 가장 적합하다고 판단하였다. 본 연구에서는 화학물질안전원에서 개발한 피해범위 예측과 위험도를 산정하는 범용 프로그램인 KORA 사고예측 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다[12].

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

Table 2. 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℃
Atmospheric humidity	50%

KORA 프로그램 실행 시 지면 위 이격거리, 누출 배관 직경, 저장량과 누출속도, 대기 온도, 운전 압력 및 방류벽 면적을 변화되는 인자로 설정하여 분석하였다. 최악의 사고시나리오에서는 수동적 완화장치(방벽, 방호벽, 방류벽, 배수시설 및 저류조 등)만을 고려하며, 능동적 완화장치(중화설비, 소화설비, 수막설비, 과류방지밸브, 플레어시스템 및 긴급차단시스템 등)는 고려하지 않는다[12].

2.4 상관관계식의 개발 및 검증 방법

KORA를 활용하여 산출된 액상 질산, 메탄올 및 아크릴산 등 독성물질의 피해영향거리 모델링 결과를 토대로, 영향범위 상관관계식을 도출하였다. 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[6].

본 연구에서는 화학물질관리법에 따라 장외영향평가서와 위해관리계획서를 제출해야 하는 의무가 있는 영세 및 중소기업을 대상으로 제한사항을 두었기 때문에 저장 및 누출량에 따른 피해영향범위를 빠르고 쉽게 판단할 수 있는 선형 상관관계식을 도출하였다.

대신에 누출량에 따라 산정된 영향범위의 분포를 바탕으로 회귀 분석결과 회귀식의 적합도가 높은 것으로 평가할 수 있는 기준이 되는 상관계수 값(R^2)이 1에 가

까운 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 질산, 메탄올, 아크릴산의 독성 피해 영향범위에 대한 상관관계를 1차, 2차 및 3차식으로 산정하였고, 선형회귀분석을 통하여 상관계수가 0.99 이상인 최적의 상관관계식을 도출하였다.

장외영향평가서 및 위해관리계획서를 제출하는 두 개의 사업장(A, B)에 대하여 KORA를 이용한 독성피해 영향범위와 본 연구의 상관관계식을 이용한 독성피해 영향범위를 비교하여 신뢰도를 검증하였다. S시에 위치한 사업장 A는 graphite와 각 화학물질들을 반응기에 순차적으로 투입하여 산화/환원반응을 통한 반제품 및 산화그래핀 제품을 제조하는 화학제품 제조업체이다. H시에 위치한 사업장 B는 접착제 및 젤라틴 제조업체로서 일 반응 도료 및 관련 제품 등을 제조한다.

3. 독성피해 영향범위 상관관계식 산정 및 검증

3.1 질산에 의한 피해 영향범위

질산은 저장량 6~12,000 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. 1에 나타내었다.

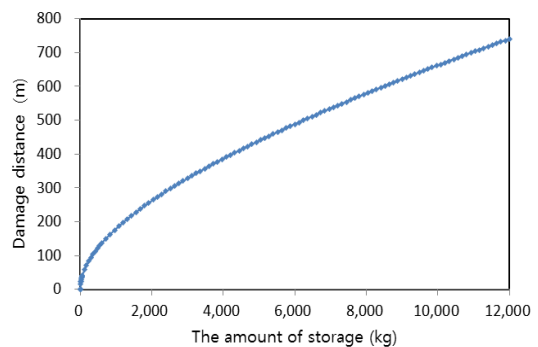


Fig. 1. Damage distance of nitric acid

Fig. 1의 피해영향거리를 식으로 전환한 1~3차 영향 범위 산정식 및 상관계수를 Table 3에 나타내었다. 선형회귀분석을 통해 분석한 결과, 1차식은 $y = 0.0582x + 103.470$ 로 선형화되었으며, 이 때의 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 3. Damage distance equations of nitric acid

Order	Equation	Correlation coefficient (R ²)
1st	$y = 0.0582x + 103.470$	0.9611
2nd	$y = -3E-06x^2 + 0.0933x + 55.807$	0.9905
3rd	$y = 5E-10x^3 - 1E-05x^2 + 0.1271x + 37.451$	0.9963

where, x = storage [kg],
y = damage distance by toxic leakage [m]

산정된 질산에 의한 피해영향거리 상관관계식의 검증 을 위하여 A, B 사업장 각각의 사고 시나리오를 적용해 보았다.

A 사업장의 사고 시나리오는 탱크로리에서 저장탱크로 유입시 질산이 누출·확산되는 영향모델로 설정하였으며, 해당 설비의 설계 용량은 10 m³, 직경은 2.35 m, 높이는 2.31 m이다. 질산의 밀도와 80% 운전용량은 80%로 하여, 저장량을 12,400 kg으로 계산하였다. 사고 시나리오에 대한 실제 KORA 프로그램을 분석한 결과 영향범위는 755.3 m로 나타났다. 본 연구의 1차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과는 각각 825.2 m, 751.5 m, 1029.2 m로 나타났으며, 이에 대한 결과를 Table 4에 나타내었다. 결과적으로 2차 상관관계식에서 오차율 0.51%로 실제 영향범위 값과 가장 흡사한 결과가 도출되었다.

B 사업장에서의 질산 사고 시나리오는 설비의 설계 용량은 2.5 m³이고 설비의 직경은 1.4 m, 높이는 1.62 m이며, 독성을 영향모델로 설정하였다. 질산의 밀도와 운전 최대 용량을 80%로 고려하여, 저장량을 3,100 kg으로 계산하였다. 사고 시나리오에 대한 실제 KORA 프로그램을 분석한 결과 영향범위는 333.9 m로 나타났다. 본 연구의 1차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과는 283.9 m, 316.2 m,

350.3 m로 나타났다. 1차 상관관계식에서 오차율 15%, 2차 상관관계식에서 오차율 5.29%, 3차 상관관계식에서 오차율 4.9%의 결과값이 도출되었다.

Table 4. Comparison of damage distance by equations and KORA in case of nitric acid leakage

Order	A factory (m)		B factory (m)	
	by equation	by KORA	by equation	by KORA
1st	825.2	755.3	283.9	333.9
2nd	751.5		316.2	
3rd	1,029.2		350.3	

3.2 메탄올에 의한 피해 영향범위

메탄올의 밀도를 고려하여, 최악의 시나리오는 KORA를 이용하여 저장량 60~9,480 kg인 저장탱크에서 0.1~15.8 kg/s의 누출속도로 10분간 누출되는 피해 영향범위를 산출하였다. 끝점거리 ERPG-2를 10 ppm으로 설정한 뒤 저장량을 변화시키면서 독성피해 영향범위를 분석하였으며, 결과는 Fig. 2에 나타내었다.

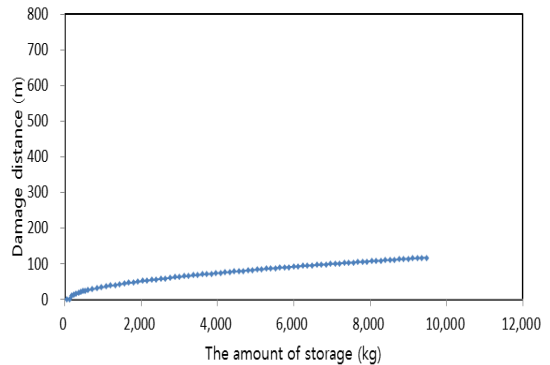


Fig. 2. Damage distance of methanol

Fig. 2의 피해영향거리를 식으로 전환한 1~3차 영향 범위 산정식 및 상관계수를 Table 5에 나타내었다. 선형회귀분석을 통해 분석한 결과, 1차식은 $y = 0.0107x + 25.448$ 로 선형화되었으며, 이 때의 상관계수는 0.9513이었다. 2차식은 $y = -8E-07x^2 + 0.0185x + 14.477$ 이고 상관계수는 0.9877, 3차식은 $y = 2E-10x^3 - 3E-06x^2 + 0.0263x + 9.1558$ 이고 상관계수는 0.9963으로 나타났다.

Table 5. Damage distance equations of methanol

Order	Equation	Correlation coefficient (R ²)
1st	$y = 0.0107x + 25.448$	0.9513
2nd	$y = -8E-07x^2 + 0.0185x + 14.477$	0.9877
3rd	$y = 2E-10x^3 - 3E-06x^2 + 0.0263x + 9.1558$	0.9946

where, x = storage [kg],
y = damage distance by toxic leakage [m]

개발된 메탄올 상관관계식을 A 사업장의 사고 시나리오와 검증해보았다. 독성을 영향모델로 설정하고, 저장탱크 용량은 10 m³로 메탄올의 밀도와 80% 운전용량을 고려하여 저장량을 6,320 kg으로 계산하였다. 사고 시나리오에 대한 실제 KORA 프로그램을 분석한 결과 영향범위는 94.9 m로 나타났다. 연구결과의 검증에 위해 본 연구의 1차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과는 각각 93.1 m, 99.4 m, 106.0 m로 나타났으며, 이에 대한 결과를 Table 6에 나타내었다. 1차 상관관계식에서 오차율 1.93%, 2차 상관관계식에서 오차율 4.79%, 3차 상관관계식에서 오차율 11.7%의 결과값이 도출되었다.

개발된 메탄올 상관관계식을 B 사업장의 메탄올 사고 시나리오와 검증해보았다. 독성을 영향모델로 설정하고, 저장탱크 용량은 20 m³로 메탄올의 밀도와 80% 운전용량을 고려하여 저장량을 12,640 kg으로 계산하였다. 사고 시나리오에 대한 실제 KORA 프로그램을 분석한 결과 영향범위는 127.3 m로 나타났다. 연구결과의 검증에 위해 본 연구의 1차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과는 160.7 m, 120.5 m, 266.2 m로 나타났다. 결과적으로 1차 상관관계식에서 오차율 26.23%, 2차 상관관계식에서 오차율 5.34%의 결과값이 도출되었다.

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

Order	A factory (m)		B factory (m)	
	by equation	by KORA	by equation	by KORA
1st	93.1	94.9	160.7	127.3
2nd	99.4		120.5	
3rd	106.0		266.2	

3.3 아크릴산에 의한 피해 영향범위

아크릴산은 저장량 60~12,000 kg인 저장탱크에서 0.1~20 kg/s의 누출속도로 10분간 아크릴산이 누출되었을 경우의 피해영향범위를 산출하였다. 끝점거리 ERPG-2를 10 ppm으로 설정한 뒤 저장량을 변화시키면서 독성피해 영향범위를 분석하였으며, 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

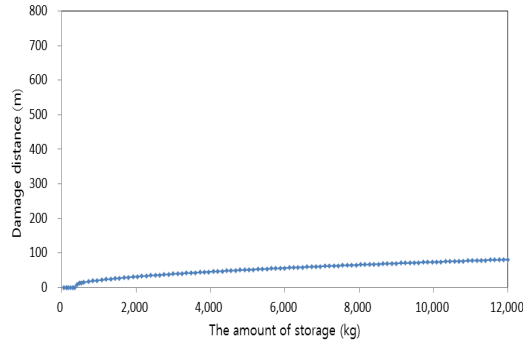


Fig. 3. Damage distance of acrylic acid

Fig. 3의 피해영향거리를 식으로 전환한 1~3차 영향범위 산정식 및 상관계수를 Table 7에 나타내었다. 선형 회귀분석을 통해 분석한 결과, 1차식은 $y = 0.006x + 16.053$ 이고 상관계수는 0.9346, 2차식은 $y = -4E-07x^2 + 0.011x + 6.9842$ 이고 상관계수는 0.9811, 3차식은 $y = 7E-11x^3 - 2E-06x^2 + 0.0165x + 2.2008$ 이고 상관계수는 0.9918으로 나타났다.

Table 7. Damage distance equations of acrylic acid

Order	Equation	Correlation coefficient (R ²)
1st	$y = 0.006x + 16.053$	0.9346
2nd	$y = -4E-07x^2 + 0.011x + 6.9842$	0.9811
3rd	$y = 7E-11x^3 - 2E-06x^2 + 0.0165x + 2.2008$	0.9918

where, x = storage [kg],
y = damage distance by toxic leakage [m]

개발된 아크릴산 상관관계식을 A 사업장의 사고 시나리오와 검증해보았다. 저장탱크의 용량은 10 m³로 아크릴산의 밀도와 80% 운전용량을 고려하여 저장량을 8,400 kg으로 계산하였다. 사고 시나리오에 대한 실제

KORA 프로그램을 분석한 결과 영향범위는 55.6 m로 나타났다. 본 연구의 1차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과 66.5 m, 71.2 m, 41.2 m로 나타났으며, 결과를 Table 8에 나타내었다. 1차 상관관계식에서 오차를 19.5%, 3차 상관관계식에서 오차를 25.95%의 결과값이 도출되었다.

개발된 아크릴산 상관관계식을 B 사업장의 사고 시나리오와 검증해보았다. 독성을 영향모델로 설정하고, 저장탱크의 용량은 20 m³로 아크릴산의 밀도와 80% 운전용량을 고려하여 저장량을 16,800 kg으로 계산하였다. 사고 시나리오에 대한 실제 KORA 프로그램을 분석한 결과 영향범위는 80.0 m로 나타났다. 본 연구의 1차, 2차, 3차 상관관계식에 저장량을 대입하여 독성피해 영향범위를 계산한 결과 116.9 m, 78.9 m, 46.8 m로 나타났다. 결과적으로 2차 상관관계식에서 오차를 1.39%의 결과값이 도출되었다.

Table 8. Comparison of damage distance by equations and KORA in case of acrylic acid leakage

Order	A factory		B factory	
	by equation	by KORA	by equation	by KORA
1st	66.5	55.6	116.9	80.0
2nd	71.2		78.9	
3rd	41.2		46.8	

3.4 선정된 물질들의 종합적인 평가

3.4.1 물질별 데이터의 차별성

물질별 데이터를 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 비교 분석해보았다. 질산은 누출속도 0.02 kg/s인 누출량 12 kg부터 피해영향 범위 값이 나타났으며, 질산의 독성피해 영향범위의 최대값은 740.1 m로 분석하였다.

메탄올은 누출속도 0.3 kg/s인 누출량 180 kg부터 피해영향 범위 값이 나타났으며, 초반 lag 구간이 나타났다. 또한, 메탄올의 밀도를 고려하였을 때 질산과 아크릴산과는 다르게 누출속도 15.8 kg/s일 때 누출량 9,480 kg까지만 피해영향범위가 나타났다. 그 때의 피해영향 범위는 117.7 m로 최대값을 나타내었다.

아크릴산은 초반 lag 구간이 가장 길었으며, 누출속도 0.7 kg/s인 누출량 420 kg부터 피해영향 범위가 나타났다. 아크릴산의 독성피해 영향범위의 최대값은 81.3 m로 분석하였다.

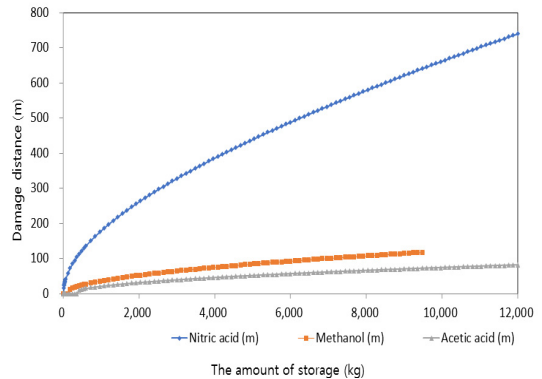


Fig. 4. Damage distance of acrylic acid

3.4.2 물질별 상관관계식의 특성

누출량에 따라 선정된 영향범위의 분포를 바탕으로 분석결과 상관식의 적합도가 높은 것으로 평가할 수 있는 기준이 되는 상관계수 값(R^2)이 1에 가까운 식을 도출하고자 했다. 그 결과 물질별 0.96 ~ 0.99로 높은 결정계수 값을 갖는 선형함수 형태의 회귀분석 모델을 적용하였다.

질산의 상관계수 값은 2차식이 0.9905, 3차식이 0.9963으로 나타났으며, 산정식을 A, B 사업장 시나리오에 대입하여 검증해보았다. A 사업장은 2차 상관관계식에서 오차를 0.51%로 실제 영향범위 값과 가장 흡사한 결과가 도출되었고 B 사업장은 2차 상관관계식에서 오차를 5.29%, 3차 상관관계식에서 오차를 4.9%의 결과값이 도출되었다. 따라서 질산은 2차 상관관계식이 가장 적합하다고 판단하였다.

메탄올의 상관계수 값은 1차식 0.9513, 2차식 0.9877, 3차식 0.9963으로 나타났다. 개발된 메탄올 상관관계식을 A, B 사업장의 사고 시나리오와 검증해보았다. A 사업장은 1차 상관관계식에서 오차를 1.93%, 2차 상관관계식에서 오차를 4.79%의 결과값이 도출되었다. 또한, B 사업장은 2차 상관관계식에서 오차를 5.34%의 결과값이 도출되었다. 따라서 메탄올은 2차 상관관계식이 가장 적합하다고 판단하였다.

아크릴산의 상관계수 값은 1차식 0.9346, 2차식 0.9811, 3차식 0.9918으로 나타났다. 개발된 아크릴산 상관관계식을 A, B 사업장의 사고 시나리오에 검증해보았다. A 사업장은 1차 상관관계식에서 오차를 19.5%의 결과값이 도출되었으며, B 사업장은 2차 상관관계식에서 오차를 1.39%의 결과값이 도출되었다.

4. 결론

사고대비물질 중 질산, 메탄을 및 아크릴산을 선정하여, 사고로 인한 누출 시 독성피해 영향범위와 상관관계식을 산정하였고, 개발된 상관관계식을 실제 사업장 사고 시나리오에 적용하여 신뢰도를 검증한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 질산 누출에 따른 최악의 시나리오 적용하여 두 사업장의 KORA 실제 영향범위 결과와 본 연구의 상관관계식 비교 결과, A 사업장은 2차 상관관계식에 대해 오차율 0.51%를 나타내었고 B 사업장은 2차 상관관계식에 대해 오차율 5.29%, 3차 상관관계식에 대해 오차율 4.90%의 결과가 도출되었다. 따라서 질산은 본 연구의 2차 상관관계식인 $y = -3E-06x^2 + 0.0933x + 55.807$ 이 가장 적합한 식으로 판단된다.
- 메탄을 누출에 따른 최악의 시나리오 적용하여 두 사업장의 KORA 실제 영향범위 결과와 본 연구의 상관관계식 비교 결과, A 사업장은 1차 상관관계식에서 오차율 1.93%, 2차 상관관계식에서 오차율 4.79%을 보였으며, B 사업장은 2차 상관관계식에서 오차율 5.34%의 결과가 도출되었다. 따라서 메탄올은 본 연구의 2차 상관관계식인 $y = -8E-07x^2 + 0.0185x + 14.477$ 이 가장 적합한 식으로 판단된다.
- 아크릴산 누출에 따른 최악의 시나리오 적용하여 두 사업장의 KORA 실제 영향범위 결과와 본 연구의 상관관계식 비교 결과, A 사업장은 1차 산정식에 대해 오차율 19.50%을 보였으며, B 사업장은 2차 산정식에 대해 오차율 1.39%를 나타냈다. 따라서 아크릴산은 저장량이 클수록 본 연구의 2차 상관관계식인 $y = -4E-07x^2 + 0.011x + 6.9842$ 이 적합할 것으로 사료된다.
- 개발된 세 가지 사고대비물질들의 피해영향거리 상관관계식을 활용하여 현장 또는 사업장에서 누출사고가 발생하였을 경우 피해영향범위를 빠르게 판정할 수 있으므로, 사전 비상조치계획의 수립이나 사고시 비상상황에 신속하게 대응할 수 있는 것으로 판단된다.

References

- [1] Ministry of environment, *Chemicals management act Article 23* : Prepare and submit a chemical accident off-site impact assessment report, *Article 41* : Preparation and submission of risk management plan, 2015.
- [2] Gyeong-gi province disaster safety headquarters, *A study on the analysis of hazardous material accident types and improvement of safety management system*, 2016.
- [3] Chang-won fire department, *A study on optimal utilization of chemical protective suit using 3E : Technique analysis of problems of chemical protective clothing through experiments and focus on practical application*, The 26th national safety 119 fire policy conference, pp. 5-18, Oct. 2014.
- [4] Occupational health and safety office, *Methanol acute poisoning alert*, KOSHA ALERT 2016-1, Korea occupational safety & health agency, 2016.
- [5] Jinwook Choi, Longnan Li, Chul-Woo Park, Seong Hyuk Lee, Daejoong Kim, *Dispersion Characteristics of Hydrogen Gas by the Effect of Leakage Hole Size in Enclosure Space*, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 17, no. 5 pp. 26-35, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.26>
- [6] Won Kyung Ko, *A study on the analysis of the simulation model for damage distance by toxic gases*, 2015.
- [7] Myoung Ho-Lee, Su-Kyung Lee, *A study on the extent of damage from fire accident caused by unloading of LPG bulk lorry*, Journal of the Korean Institute of GAS(KIGAS), vol. 19, no. 2, pp. 1-4, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7842/kigas.2015.19.2.1>
- [8] Young-Do Jo, *Hazard Distance from Hydrogen Accidents*, KIGAS, vol. 16, no. 1, Feb. 2012.
- [9] National institute of chemical safety, *Hydrochloric acid · Ammonia water effect range table and how to use*, 2015
- [10] Ministry of environment, KISChem : Korea Information System for Chemical safety management, Available From: <http://kischem.nier.go.kr/>
- [11] National institute of chemical safety, *Technical guidelines for selection of accident scenario*, 2014.
- [12] National institute of chemical safety, *Off-site impact assessment evaluation guide*, 2015.

조 가 영(Ga-Young Jo)

[준회원]



- 2015년 2월 : 인하대학교 환경공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 인하대학교 대학원 환경, 안전 융합 전공 (공학석사)

<관심분야>
환경공학, 산업 안전, 보건

문 진 영(Jin-Young Moon)

[정회원]



- 2011년 8월 인하대학교 대학원 환경공학과 (공학박사)
- 2011년 9월 ~ 2013년 8월 : 인하대학교 환경연구소 박사후 연구원
- 2013년 9월 ~ 2016년 9월 : 인하대학교 대학원 환경안전융합전공 교수
- 2016년 10월 ~ 현재 : 인천재능대학교 환경보건과 교수

<관심분야>
환경공학, 보건

이 익 모(Ik-Mo Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 대학원 공업화학과 무기화학 전공 (공학석사)
- 1989년 2월 : Ohio State University 화학과 무기화학(유기금속화학) 전공 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 화학과 교수

- 2012년 8월 ~ 현재 : 인하대학교 자연대학장

<관심분야>
연구실 안전, 유기금속화학, 촉매개발

황 용 우(Yong-Woo Hwang)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 대학원 도시공학과 (공학석사)
- 1992년 9월 : 동경(東京)대학교 대학원 도시공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 환경공학과 교수
- 2014년 3월 ~ 현재 : 산업통상자원부 환경규제 및 안전전문 인력양성 사업단장

<관심분야>
하수처리, 전과정평가