Trichlorosilane 누출사고 시 물 반응성을 고려한 피해영향범위 산정식 도출방안 연구

A Study on the Derivation Method of Damage Range to Determine Reaction in Trichlorosilane Leak Accidents

전병한* · 김현섭**

Jeon, Byeonghan*, and Kim, Hyunsu**

Abstract

In this study, we aimed to derive a formula for calculating the damage impact range using KORA, in the event of an accidental leakage of trichlorosilane (TCS), with simple information on the site to swiftly inform the decision to evacuate residents. TCS release rate, temperature, and dike height were selected as the variables, and an equation to calculate the damage impact range was derived through the regression analysis of the range using KORA. Based on the result it was seen that the damage range in the absence of dike has high correlation ($p < 0.05$) in the order of TCS release rate and temperature, with an explanatory power of about 97%. The damage impact range in the presence of dike was found to have high correlation ($p < 0.05$) to TCS release rate, dike height, and temperature, respectively, with an explanatory power of about 92~93%.

Key words : Chemical Accident, Damage Impact Range, KORA, Trichlorosilane

요 지

본 연구에서는 Trichlorosilane (TCS) 누출사고 발생 시 현장의 간단한 정보만으로 독성확산 피해영향범위를 산정하고 주민대피 결정을 판단할 수 있도록 KORA를 이용하여 피해영향범위 산정식을 도출하고자 하였다. TCS의 누출속도, 대기온도, 방류벽의 높이를 변수로 선정하였고, KORA를 이용한 피해영향범위 산출결과의 회귀분석을 통해 상황에 적합한 피해영향범위 산정식을 도출하였다. 회귀분석결과 방류벽이 존재하지 않는 장소에서의 피해영향범위는 원물질의 누출속도, 대기온도 순으로 높은 상관관계($p < 0.05$)와 약 97%의 설명력을 갖는 것으로 조사되었다. 방류벽이 존재하는 장소에서의 피해영향범위는 원물질의 누출속도, 방류벽의 높이, 대기온도 순으로 높은 상관관계($p < 0.05$)와 약 92~93%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 화학사고, 피해영향범위, KORA, Trichlorosilane

1. 서 론

화학물질 누출에 의한 화학사고는 2014년 105건, 2015년 113건, 2016년 78건, 2017년 87건, 2018년 66건, 2019년 57건이 발생하였으며 해마다 증감이 반복적으로 나타나는 경향을 보였지만 전체적인 흐름은 감소 추세에 있는 것으로 조사되고 있다(NICS, 2020). 2019년의 경우 가장 많은 화학

사고가 발생했던 2015년에 비해 절반 수준으로 나타나 화학 물질관리법 시행 이후 산업계 및 정부, 학계 등 다양한 분야에 걸친 화학 안전 관리의 노력이 효과적이고 발전적인 측면을 갖고 있다는 결과로 볼 수 있다. 하지만 1년 중 다른 계절에 비해 유독 여름철에 화학사고 발생률이 높다는 점은 앞으로 모두 함께 고심해 보아야 할 과제이다(Kim and Jeon, 2017; Lee, Lee, et al., 2019).

*정회원, 전북대학교 환경공학과 박사과정(E-mail: orange310624@hanmail.net)

Member, Ph.D. Candidate, Division of Environmental Engineering, Jeonbuk National University

**교신저자, 정회원, 원주지방환경청 화학물질관리과 연구사(Tel: +82-33-760-6446, Fax: +82-33-765-1325, E-mail: sakao@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher, Chemicals Management Division, Wonju Regional Environmental Office

화학물질관리법상에서 화학사고는 시설의 교체 등 작업 시 작업자의 과실, 시설 결함·노후화, 자연재해, 운송사고 등으로 인하여 화학물질이 사람이나 환경에 유출·누출되어 발생하는 모든 상황을 말하고 있다(ME, 2015). 대기 중 확산성이 높은 화학물질 누출에 의한 화학사고는 사고가 일어난 원점뿐만 아니라 인근 지역의 생태계 환경 및 인간의 건강에 심각한 피해를 줄 수 있으며, 일부 특정 화학물질들은 물과 반응하거나 연소할 때 2차적으로 반응생성물을 생성하여 누출된 원 물질과 함께 피해를 줄 수 있는 것으로 알려져 있다(Deputy Director General of Safety Environment in the Office for Government Policy Coordination, 2013; Lee and Yim, 2017; Lee, Park, et al., 2019). 따라서 화학사고에 의한 피해를 최소화시키고 효과적인 예방조치를 위해서 화학물질 취급시설 주변에 많은 장치 및 설비 등이 설치되고 있으며, 그 중 대표적인 것으로 방류벽을 들 수 있다(Shin and Park, 2016a). 방류벽은 누출 물질이 외부로 확산되지 않도록 방류벽 내에 억류하고 있다가 폐수처리장으로 유입시키거나 안전하게 폐기처리를 할 수 있는 시설이다(Shin and Park, 2016b).

Trichlorosilane (TCS)은 2017년 사고대비물질이 기존 69종에서 97종으로 확대될 때 추가된 신규 사고대비물질이며, 2018년 주민대피 대비물질로 지정된 화학물질이다. 물과 반응 시에는 HCl을 생성하며, 연소 시에는 HCl 및 Cl₂, 포스젠을 생성하게 된다. TCS는 건조한 HCl과 규소를 이용하여 제조되는 물질로 규소의 반도체를 합성하는 원료 등 반도체 산업에서 수순도 실리콘의 주요 전구체이다. 수중에서는 실리콘 폴리머를 생산하기 위해 빠르게 분해되고 반응성과 광범위한 가용성으로 인해 실리콘 함유 유기화학물의 합성에 사용된다. HCl과 같은 자극적인 냄새가 나는 무색의 액체로 고농도의 물질을 흡입 시 중추신경계 기능저하 및 장애나 질식 유발, 발작, 심각한 후두와 기관지의 자극, 화학적 폐렴과 폐부종으로 인해 사망할 수 있다(NICS, 2020).

국내에서는 2020년 7월, 경상북도 구미시 한 업체에서 TCS 보관용기 교체 작업 중 용기가 넘어지면서 연결된 상부 배관 파손으로 인해 TCS 약 100 kg이 누출된 사고가 발생하였다. 당시 사고지역의 주민대피 및 알람 결정 권한을 갖고 있는 지방자치단체에서는 사고현장의 오염도 측정치 등과 같은 대피 결정을 내릴 근거가 부족하여 현장 상황과 상이한 주민대피 알람으로 사고대응에 혼선을 빚는 사례가 발생하였다. 현장오염도 측정은 주로 환경부에 의해 이루어지는데 전국을 불과 14개 거점에서 각각 담당하고 있어 사고 현장 도착까지 시간이 다소 소요되는 등 물리적 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 TCS 누출사고 발생장소의 간단한 현장 정보 습득만으로 독성확산 피해영향범위를 산정하고 주민대피 결정을 판단하거나 물 반응성을 고려한 방재활동에 활용할 수 있도록 장외영향평가서·위해관리계획서 작

성지원 프로그램(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool, KORA)을 이용한 피해영향범위 산정식을 마련하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 화학물질 선정

화학물질 중에서 급성독성·폭발성 등이 강하여 화학사고의 발생 가능성이 높거나 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질을 화학물질관리법에서는 사고대비물질로 지정하고 있다(ME, 2015). 법 시행 초기에는 69종의 화학물질을 사고대비물질로 지정하였으며, 2017년을 기준으로 브롬화합물 및 실란류 등이 추가되어 현재 97종에 달하고 있다. 사고대비물질 97종 중 물과 반응했을 경우 인명 및 환경에 위해를 줄 수 있는 화합물을 생성하는 물질은 26종이 있으며 Table 1과 같다. 26종의 물 반응성 물질 중 대부분은 HCl이나 HF의 반응물을 생성하는 것으로 조사되었다.

사고대비물질 중 확산성, 발화성, 건강 위해성이 높은 기체상 물질의 경우 누출사고 발생 시 주민소산 및 주민알림 등의 방법으로 주민을 실내·외 대피시킬 필요가 있기 때문에 2018년 화학물질안전원에서는 사고대비물질 16종을 선정하여 주민대피 대비물질로 명명하였다. 이러한 주민대피 대비물질은 지방자치단체를 통해 중점 관리 되고 있다. 연구에서는 사고대비물질 97종 및 주민대피 대비물질 16종에 해당되며, 물과 반응하여 2차 생성물로 HCl을 발생시키는 TCS를 대상으로 피해영향범위를 산정하고자 하였다. TCS는 염산 또는 매운냄새를 내는 무색 연기의 액체로 증기밀도 4.67, 증기압 594 mmHg, NFPA CODE (Hearth) 3, 발화점 185 °C의 물리화학적 특성을 갖고 있으며, 물과 반응 시 Eq. (1)과 같이 반응하여 HCl을 생성하게 된다. 피부에 접촉 시, 특히 피부에 물기가 있는 경우 화상을 줄 수 있으며, 흡입 시에는 심각한 후두와 기관지의 자극, 화학적 폐렴과 폐부종으로 인해 사망할 수 있다.

2.2 피해영향거리 산정 사고시나리오

KORA에서 확산에 의한 예측모델은 공기보다 가벼운 가스의 경우 가우시안 플룸 모델을 사용하고 공기보다 무거운 가스의 경우에는 SLAB모델을 사용한다. 사고시나리오는 화학물질안전원의 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침(제2018-5호)’ 및 ‘사고 영향범위 산정에 관한 기술지침(제2015-1호)’, 한국산업안전보건공단의 ‘최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE, P-107-2016)’에 따라 사고시나리오 조건을 적용하였다(NICS, 2015, 2016; KOSHA, 2016). 대안의 사고시나리오란 최악의 사고시나

Table 1. Water-reactive Materials Among Accident Preparation Materials

No.	Chemical	CAS No.	Molecular formula	Phase (@25 °C)	Reaction product (water)			
					HCl	HF	etc.	
1	Acryloyl chloride	814-68-6	C3H3ClO	liquid	✓			
2	Arsine	7784-42-1	AsH3	gas			✓	As
3	Boron trichloride	10294-34-5	BCl3	gas	✓		✓	Boric acid
4	Trifluoroborane	7637-07-2	BF3	gas		✓		
5	Bromine	7726-95-6	Br2	liquid			✓	HBr
6	Bromine pentafluoride	7789-30-2	BrF5	liquid		✓	✓	Br2
7	Chlorosulfonic acid	7790-94-5	HSO3Cl	liquid	✓		✓	H2SO4
8	Cyanogen chloride	506-77-4	CNCl	gas			✓	HCN
9	Dichlorosilane	4109-96-0	SiH2Cl2	gas	✓			
10	Fluorine	7782-41-4	F2	gas		✓	✓	OF2
11	Methyldichlorosilane	75-54-7	CH4Cl2Si	gas/liquid	✓			
12	Methyltrichlorosilane	75-79-6	CH3Cl3Si	liquid	✓			
13	Phosgene	75-44-5	COCl2	gas/liquid	✓			
14	Phosphorus oxychloride	10025-87-3	POCl3	liquid	✓		✓	H3PO4
15	Phosphorus trichloride	7719-12-2	PCl3	liquid	✓			
16	Sarin	107-44-8	C4H10FO2P	liquid		✓	✓	phosphorus oxide
17	Silcon Tetrachloride	10026-04-7	SiCl4	liquid	✓			
18	Silicon tetrafluoride	7783-61-1	SiF4	gas		✓		
19	Sodium	7440-23-5	Na	solid			✓	H2
20	Sodium cyanide	143-33-9	NaCN	solid			✓	HCN
21	Sulfuric acid	7664-93-9	H2SO4	liquid			✓	H2S
22	Thionyl chloride	7719-09-7	SOCl2	liquid	✓		✓	SO2
23	Titanium tetrachloride	7550-45-0	TiCl4	liquid	✓			
24	Trichlorosilane	10025-78-2	SiHCl3	liquid	✓			
25	Trichlorovinylsilane	75-94-5	C2H3Cl3Si	liquid	✓			
26	Zinc phosphide	1314-84-7	Zn3P2	solid			✓	PH3

리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높은 사고 시나리오 중 사람이나 환경에 미치는 영향범위가 최대인 경우의 시나리오를 말한다. KORA에서 급성독성 분석이 가능한 TCS는 확산방지 조치가 되지 않는 경우 저장된 물질이 누출과 동시에 액체층을 1 cm 깊이로 형성되는 것을 가정한다. 반면 적절한 확산방지 조치가 되어 있는 경우 대기 중으로 확산되는 속도는 액체층의 표면적에서 증발되는 속도로 가정한다. 액체층의 표면적과 증발속도 계산은 다음의 Eqs. (2), (3)을 따른다.

$$A = 0.1 \times \frac{Q_r}{\rho} \quad (2)$$

A : 액체층 표면적(m²)
 Q_r : 누출량(kg)
 ρ : 밀도(g/cm³)

$$R_E = \frac{1.4 \times U^{0.78} \times M_w^{2/3} \times A \times P_v}{82.05 \times T} \quad (3)$$

R_E : 증발속도(kg/min)
 U : 풍속(m/sec)
 M_w : 분자량
 A : 액체층 표면적(m²)
 P_v : 증기압(mmHg)
 T : 온도(K)

물 반응성 물질인 HCl은 누출된 TCS가 액체층 표면으로부터 증발되어 모두 반응생성물로 전환되는 것으로 가정하였다. 대기온도는 피해영향범위와의 상관관계를 분석하기 위해 독립변수로 설정하였으며, 그 외의 기상조건은 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’에 따라 3 m/sec의 풍속과 대기안정도 D, 대기습도 50%를 적용하였다. Table 2는 적용된 사고시나리오 조건을 나타내고 있다.

Table 2. Accident Scenario Conditions

Classification	Contents
Wind speed	3.0 m/s
Temperature	-40 ~ 40 °C
humidity	50%
Stability	D
Release time	10 m
End-point	ERPG-2

2.3 끝점(End-point) 선정

화학물질 누출에 의한 피해영향범위 분석에서 끝점은 Emergency Response Planning Guidelines (ERPG), Acute Exposure Guideline Levels (AEGL), Protective Action Criteria (PAC), Immediately Dangerous to Life of Health concentration value (IDLH)의 10% 순으로 적용하도록 지정하고 있다 (NICS, 2016). ERPG는 미국산업위생학회(AIHA)에서 발표하는 지역사회 의 비상계획에 사용하기 위해 공기 중 물질의 잠재적 유출량에 대처하기 위한 가이드라인이며 3가지 위험 수준으로 구분된다. ERPG-1은 사람들이 1시간 동안 누출물질에 노출되었을 때 불쾌감 또는 일시적 자극을 느끼는 정도의 공기 중 물질 농도, ERPG-2는 누출물질에 노출되어 돌이킬 수 없는 심각한 건강 악영향 발생이 예측되는 물질의 공기 중 농도, ERPG-3는 누출물질에 노출 시 생명을 위협이 예측되는 물질의 공기 중 농도를 의미한다(NICS, 2019). 연구에서는 주민대피를 결정하기 위한 근거자료로 사용될 수 있는 ERPG-2 수치를 적용하였다.

3. 연구결과

3.1 KORA를 이용한 피해영향범위 산정

KORA를 사용하여 TCS의 급성노출기준 ERPG-2에 해당하는 농도를 끝점으로 하는 피해영향범위를 산정하였다. TCS의 누출속도는 최소 0.001 kg/sec에서 최대 10 kg/sec까지 범위의 37개 구간을 선정하여 피해영향범위를 산정하였다. 방류벽이 없는 경우에는 대기온도가 -40 °C, -20 °C, 0 °C, 20 °C, 40 °C인 조건에서 피해영향범위를 산정하였으며, 방류벽이 있는 경우에는 동일한 온도 조건과 함께 방류벽의 높이를 0.5 m, 1 m, 1.5 m로 변화시키며 피해영향범위를 결과를 조사하였다. Table 3은 방류벽이 없을 때 TCS의 누출속도 및 대기온도에 따른 TCS와 물 반응생성물인 HCl의 KORA 구동결과이다. TCS는 누출속도에 따라 대기온도 -40 °C 조건에서 5.2~1,248.9 m, 대기온도 -20 °C 조건에서 5.2~1,310.7 m, 대기온도 0 °C 조건에서 5.2~1,375.4 m, 대기온도 20 °C 조건에서 5.2~1,447.5 m, 대기온도 40 °C 조건에서 5.2~1,510.2 m 범위의 피해영향범위를 갖는 것으로 나타났다. HCl의 경우는 누출속도에 따라 대기온도 -40 °C 조건에서

0~739.6 m, 대기온도 -20 °C 조건에서 0~775.1 m, 대기온도 0 °C 조건에서 0~819.7 m, 대기온도 20 °C 조건에서 0~860.7 m, 대기온도 40 °C 조건에서 0~896.6 m 범위의 피해영향범위를 갖는 것으로 나타났다. Table 4는 방류벽이 설치되어 있는 경우 TCS의 누출속도 및 대기온도, 방류벽의 높이 변화에 따른 KORA의 피해영향범위 결과이다. TCS의 누출속도에 따라 대기온도 -40 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서는 5.0~117.8 m, 대기온도 -20 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서는 5.0~124.3 m, 대기온도 0 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서는 5.0~131.5 m, 대기온도 20 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서는 5.0~139.3 m, 대기온도 40 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서는 5.0~146.1 m 범위의 피해영향범위를 갖는 것으로 조사되었다. Table 5는 방류벽이 설치되어 있는 경우 TCS의 누출속도 및 대기온도, 방류벽의 높이에 따른 HCl의 KORA에 의한 피해영향범위 결과이다. TCS의 누출속도에 따라 HCl의 피해영향범위는 대기온도 -40 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서 0~63.0 m, 대기온도 -20 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서 0~66.8 m, 대기온도 0 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서 0~71.8 m, 대기온도 20 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서 0~76.1 m, 대기온도 40 °C 및 방류벽 높이 0.5~1.5 m 범위의 조건에서 0~79.8 m의 피해영향범위를 갖는 것으로 조사되었다.

3.2 피해영향범위 산정식 도출

KORA를 이용한 피해영향범위 결과를 바탕으로 각각의 조건에 만족하는 산정식을 도출하기 위해 통계프로그램 R을 사용하여 회귀분석을 진행하였다. Table 6은 방류벽이 없는 상황에서 독립변수인 TCS의 누출속도 및 대기온도와 피해영향범위에 대한 다중선형회귀분석 결과이다. 회귀분석 결과 F통계량의 p-value는 0.05보다 작은 것으로 나타나 독립변수가 종속변수에 영향을 주고 있으며 회귀분석모델은 유의미한 것으로 볼 수 있었다. 누출속도와 대기온도의 t통계량 p-value도 각각 0.05보다 작은 것으로 조사되어 독립변수는 종속변수인 피해영향범위에 유의미한 변수라는 것을 확인할 수 있었다. 회귀분석모델의 설명력을 판단할 수 있는 결정계수 R²은 0.9670의 수치로 조사되어 누출속도 및 대기온도의 상관관계가 피해영향범위의 약 97 %를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 비표준화 회귀계수를 통해 피해영향범위와 독립변수 사이의 상관관계를 조사한 결과 누출속도가 1 kg/s씩 증가할 때 피해영향범위는 146.07 m 만큼 증가하고 대기온도가 1 °C씩 증가할 때는 0.72 m만큼 증가하는 것으로 나타났다.

방류벽이 없는 조건에서 물 반응생성물인 HCl에 대한 다중선형회귀분석 결과 회귀분석모델의 F통계량 p-value와 독립변수의 t통계량 p-value는 모두 0.05보다 작은 것으로

Table 3. Damage Impact Range When there is No Dike Using KORA

Material		TCS					HCl				
Temp. (°C)		-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40
Release rate (kg/s)	0.001	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.002	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.003	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.004	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.005	5.3	5.3	5.3	5.3	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
	0.006	5.3	5.3	5.3	5.3	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
	0.007	5.8	6.3	6.7	7.3	7.8	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4
	0.008	5.8	6.3	6.7	7.3	7.8	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4
	0.009	5.8	6.3	6.7	7.3	7.8	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4
	0.010	5.8	6.3	6.7	7.3	7.8	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4
	0.020	13.0	13.9	15.2	16.3	17.2	5.8	6.3	6.8	7.3	7.9
	0.030	18.3	19.5	21.2	22.7	24.0	8.3	9.0	9.7	10.5	11.2
	0.040	24.1	25.8	27.8	29.8	31.6	11.1	12.1	13.0	13.9	14.9
	0.050	29.5	32.0	34.1	36.1	38.6	13.8	15.0	16.2	17.3	18.4
	0.060	33.9	36.2	39.0	41.6	43.9	16.0	17.4	18.5	20.0	21.3
	0.070	38.7	42.0	44.9	47.4	50.3	18.6	20.1	21.8	23.2	24.5
	0.080	44.1	47.2	50.0	53.6	56.8	21.2	23.0	24.6	26.3	28.1
	0.090	48.2	51.2	55.2	58.7	61.6	23.5	25.3	27.1	29.1	30.9
	0.100	52.4	56.7	60.5	63.8	67.1	25.9	28.0	30.1	32.0	33.8
	0.200	91.6	97.0	103.7	109.4	114.4	47.6	51.0	54.8	58.0	60.9
	0.300	124.1	131.0	139.6	147.1	153.6	66.7	71.6	76.4	80.5	84.2
	0.400	152.3	161.1	168.6	178.5	187.4	83.8	88.7	94.6	100.2	105.1
	0.500	175.9	187.7	198.3	207.5	215.4	99.0	105.8	111.6	116.8	123.6
	0.600	201.1	212.2	221.6	232.5	244.3	113.5	119.7	127.3	134.5	140.7
	0.700	221.2	231.5	245.5	258.2	269.1	125.9	134.9	142.7	149.4	156.1
	0.800	239.7	255.4	268.9	280.6	290.7	139.6	148.1	155.3	163.7	172.4
	0.900	261.3	276.0	288.7	300.3	316.1	151.5	159.6	169.1	178.5	186.6
	1.000	279.0	293.1	305.9	323.1	338.1	162.3	172.4	182.4	191.0	198.5
	2.000	430.7	456.9	479.1	498.5	519.6	259.9	273.0	285.8	301.4	316.6
	3.000	583.2	615.3	642.8	673.0	706.5	343.5	360.9	380.0	400.6	418.4
	4.000	695.3	738.7	776.0	808.3	841.7	413.9	437.5	457.7	479.5	503.6
	5.000	806.5	844.2	891.4	936.7	975.9	475.5	503.0	531.1	555.4	576.9
	6.000	901.1	955.1	1,001.7	1,042.0	1,091.4	536.5	566.5	592.1	621.4	651.8
	7.000	998.1	1,047.2	1,099.4	1,157.6	1,208.1	590.6	619.2	656.4	688.3	716.2
	8.000	1,077.5	1,141.4	1,203.2	1,256.4	1,302.5	639.5	679.5	713.9	743.6	777.5
	9.000	1,166.7	1,233.0	1,290.0	1,346.0	1,413.7	693.2	730.9	763.0	803.5	841.6
	10.000	1,248.9	1,310.7	1,375.4	1,447.5	1,510.2	739.6	775.1	819.7	860.7	896.6

Table 4. Damage Impact Range of Raw Material (TCS) when there is Dike Using KORA

Temp. (°C)		-40			-20			0			20			40		
Dike height (m)		0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
Release rate (kg/s)	0.001	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	0.002	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.003	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.004	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.005	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.006	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.007	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.008	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.009	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.010	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.020	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	0.030	5.2	5.2	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	5.2	5.1
	0.040	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	0.050	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	0.060	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	0.070	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	0.080	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	0.090	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2
	0.100	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2
	0.200	5.6	5.3	5.3	6.1	5.3	5.3	6.5	5.3	5.3	7.1	5.4	5.3	7.6	5.7	5.3
	0.300	7.8	5.8	5.3	8.5	6.3	5.5	9.2	6.7	6.0	9.8	7.3	6.4	10.5	7.8	6.9
	0.400	9.9	7.2	6.3	10.8	7.9	6.8	11.7	8.5	7.4	12.4	9.1	8.0	13.2	9.7	8.5
	0.500	12.0	8.6	7.4	12.9	9.3	8.2	13.8	10.0	8.8	15.0	10.9	9.3	15.9	11.6	10.1
	0.600	13.8	9.9	8.6	15.0	10.8	9.3	16.2	11.7	10.0	17.3	12.4	10.8	18.3	13.2	11.5
	0.700	15.7	11.2	9.6	17.0	12.2	10.4	18.2	13.0	11.3	19.5	14.0	12.1	20.9	15.0	12.8
	0.800	17.6	12.5	10.6	18.8	13.4	11.6	20.3	14.5	12.5	21.8	15.6	13.2	23.1	16.5	14.3
	0.900	19.2	13.6	11.7	20.8	14.7	12.6	22.4	15.9	13.5	23.9	17.0	14.6	25.2	17.9	15.6
	1.000	20.9	14.6	12.6	22.7	16.0	13.6	24.3	17.2	14.7	25.8	18.2	15.8	27.6	19.6	16.8
	2.000	36.3	25.2	21.1	39.0	26.9	22.9	42.0	29.1	24.5	44.6	31.1	26.0	46.8	32.8	27.9
	3.000	49.6	34.2	28.3	53.1	36.5	30.8	57.0	39.3	33.0	60.4	42.0	34.8	63.3	44.3	37.2
	4.000	61.8	42.3	35.2	65.8	45.5	37.5	69.7	48.2	40.6	74.4	51.3	43.2	78.5	54.6	45.4
	5.000	71.8	49.6	41.3	77.6	53.1	44.5	82.5	57.0	47.2	86.7	60.4	50.0	90.9	63.3	53.3
	6.000	82.9	56.6	47.1	88.1	60.9	50.1	92.6	64.5	53.7	98.7	68.0	57.3	104.0	72.3	60.3
	7.000	91.9	63.4	51.9	97.5	67.3	56.1	104.1	71.7	59.9	109.9	76.4	63.2	114.8	80.4	66.4
	8.000	100.5	69.1	57.5	107.7	74.0	61.6	114.0	79.0	65.2	119.3	83.4	69.0	125.2	87.2	73.3
	9.000	109.7	75.1	62.5	116.6	80.6	66.4	122.4	85.4	70.5	129.2	89.6	75.2	136.2	94.7	79.3
	10.000	117.8	81.2	66.9	124.3	86.5	71.0	131.5	91.0	76.2	139.3	96.6	80.7	146.1	102.0	84.5

Table 5. Damage Impact Range of Water-Reactive Material (HCl) when there is Dike Using KORA

Temp. (°C)		-40			-20			0			20			40		
Dike height (m)		0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
Release rate (kg/s)	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.020	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.030	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.040	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.050	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.070	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.080	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.090	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.200	2.4	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	3.1	2.3	0.0	3.3	2.4	0.0
	0.300	3.4	2.5	0.0	3.7	2.7	2.4	4.0	2.9	2.5	4.3	3.2	2.8	4.6	3.4	3.0
	0.400	4.4	3.1	2.7	4.8	3.4	3.0	5.1	3.7	3.2	5.6	4.0	3.4	5.9	4.3	3.7
	0.500	5.3	3.7	3.2	5.8	4.1	3.5	6.2	4.4	3.8	6.7	4.8	4.2	7.2	10.9	4.4
	0.600	6.2	4.4	3.7	6.7	4.8	4.1	7.3	5.1	4.4	7.9	5.6	4.7	8.4	5.9	5.1
	0.700	7.0	4.9	4.2	7.7	5.4	4.6	8.3	5.9	5.0	8.9	6.3	5.4	9.5	6.7	5.8
	0.800	7.9	5.5	4.7	8.6	6.0	5.1	9.3	6.5	5.6	10.0	7.0	6.0	10.7	7.5	6.4
	0.900	8.8	6.1	5.1	9.5	6.6	5.6	10.3	7.1	6.1	11.1	7.7	6.5	11.8	8.2	7.0
	1.000	9.6	6.6	5.6	10.4	7.2	6.1	11.3	7.8	6.6	12.1	8.4	7.1	12.8	8.9	7.6
	2.000	17.3	11.7	9.7	18.7	12.7	10.5	20.1	13.5	11.4	21.6	14.6	12.2	22.9	15.6	12.9
	3.000	24.3	16.2	13.3	26.0	17.5	14.4	28.1	18.7	15.6	30.1	20.2	16.7	31.8	21.5	17.6
	4.000	30.8	20.2	16.7	33.1	22.1	18.0	35.2	23.6	19.3	37.8	25.0	20.9	40.2	26.9	22.2
	5.000	36.5	24.3	19.7	39.6	26.0	21.5	42.4	28.2	23.1	44.9	30.1	24.5	47.5	31.8	26.2
	6.000	42.6	27.8	22.9	45.7	30.3	24.6	48.4	32.4	26.3	51.9	34.2	28.3	54.9	36.7	30.1
	7.000	47.9	31.7	25.6	51.3	34.0	27.6	55.0	36.3	29.8	58.3	38.9	31.7	61.1	41.2	33.4
	8.000	53.0	35.0	28.3	57.1	37.6	30.8	60.7	40.5	32.8	63.9	43.0	34.8	68.0	45.2	37.2
	9.000	58.3	38.1	31.2	62.3	41.4	33.5	65.8	44.1	35.6	70.4	46.5	38.3	74.3	49.7	40.6
	10.000	63.0	41.6	33.7	66.8	44.7	36.0	71.8	47.4	38.8	76.1	50.7	41.4	79.8	53.8	43.6

Table 6. Multiple Regression Analysis in the Absence of Dike

Material	TCS		HCl	
Variable	Release velocity	Temp.	Release velocity	Temp.
B	146.07	0.72	87.24	0.44
t-stat.	72.94	3.64	72.81	3.71
p-value (t)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
F-stat.	2667		2657	
p-value (F)	< 0.05		< 0.05	
Intercept	63.00		33.95	
R ²	0.9670		0.9669	

Table 7. Multiple Regression Analysis in the Presence of Dike

Material	TCS			HCl		
Variable	Release velocity	Temp.	Height	Release velocity	Temp.	Height
B	9.83	0.13	-22.61	5.24	0.07	-12.55
t-stat.	55.16	6.13	-15.85	51.95	6.08	-15.54
p-value (t)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
F-stat.	1092			975.4		
p-value (F)	< 0.05			< 0.05		
Intercept	30.50			15.45		
R ²	0.9272			0.9193		

조사되어 회귀분석모델과 독립변수의 유의미성을 확인할 수 있었으며, 결정계수 R₂은 0.9669의 범위를 나타내 약 97% 설명력을 갖는 것으로 조사되었다. HCl에 의한 피해영향범위는 TCS의 누출속도가 1 kg/s 증가할 때마다 87.24 m만큼 증가하고, 대기온도가 1 °C만큼 증가할 때마다 0.44 m 증가하는 것으로 나타났다.

방류벽이 존재하는 경우에는 독립변수인 누출속도, 대기 온도, 방류벽 높이와 피해영향범위간의 상관관계를 파악하고 피해영향범위 산정식을 도출하기 위하여 다중선형회귀 분석을 진행하였고 분석결과를 Table 7에 나타내었다. TCS의 회귀분석 결과 F통계량의 p-value는 0.05보다 작아 회귀분석모델이 유의미하다는 것을 확인하였으며, 독립변수인 누출속도, 대기온도, 방류벽 높이의 t통계량 p-value도 각각 0.05보다 작은 것으로 나타나 세 독립변수와 피해영향범위간의 상관관계가 유의미한 것으로 조사되었다. 비표준화 회귀계수 B를 통해 TCS의 누출속도가 1 kg/s 증가할 때 피해영향범위는 9.83 m만큼 증가하고, 대기온도가 1 °C 증가할 경우에 피해영향범위는 0.13 m만큼 증가하였다. 하지만 독립변수 방류벽 높이와 종속변수 피해영향범위와의 관계는 방류벽의 높이가 0.5 m씩 증가할 때마다 피해영향범위가 22.61 m만큼 감소하는 것으로 나타났다.

물 반응생성물인 HCl의 다중선형회귀분석 결과 F통계량의 p-value와 t통계량의 p-value가 0.05보다 낮은 것으로

조사되어 회귀분석모델과 각각의 독립변수들은 유의미한 것으로 나타났다. 비표준화 회귀계수 B를 통해 TCS의 누출속도가 1 kg/s 증가하면 HCl에 의한 피해영향범위는 5.24 m 만큼 증가하고 대기온도가 1 °C 증가하면 피해영향범위는 0.07 m만큼 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 방류벽의 높이가 0.5 m씩 증가할 때마다 피해영향범위는 12.55 m 만큼 감소하는 것으로 나타났다. 방류벽이 존재할 때 TCS의 피해영향범위와 HCl의 피해영향범위는 모두 TCS의 누출속도, 방류벽의 높이, 대기온도 순으로 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다. 다중선형회귀분석 결과로부터 도출된 피해영향범위 산정식은 Eqs. (4)~(7)과 같다.

$$y = 146.07x_1 + 0.72x_2 + 63.0 \quad (4)$$

$$y = 87.24x_1 + 0.44x_2 + 33.95 \quad (5)$$

$$y = 9.83x_1 + 0.13x_2 - 22.61x_3 + 30.5 \quad (6)$$

$$y = 5.24x_1 + 0.07x_2 - 12.55x_3 + 15.45 \quad (7)$$

y: 피해영향거리(m)

x₁: 원물질 누출 속도(kg/s)

x₂: 대기온도(°C)

x₃: 방류벽 높이(m)

Table 8은 산정식을 이용한 피해영향범위와 KORA를 이용

한 피해영향범위의 비교를 위한 상대표준편차(RSD) 결과이다. 유해물질 비상대응 핸드북(EMERGENCY RESPONSE GUIDEBOOK)에 따라 특정 화학물질의 누출이 일어나고 있을 때 적용할 수 있는 최소한의 초기이격거리 수치인 30 m 미만의 값을 제외하고 RSD를 구한 결과, 방류벽이 없을 때 TCS의 RSD 평균은 14.46, HCl의 RSD 평균은 12.46을 나타냈다. 방류벽이 있을 때는 TCS의 경우 5.7, HCl의 경우 7.3의 수치를 나타냈다. 공통적으로 누출속도가 작을 때 피해영향범위의 차이가 크게 나타나 RSD의 수치도 크게 나타났다.

Table 8. Relative Standard Deviation

	RSD	TCS	HCl
Absence of dike	Aver.	14.46	12.46
	Range	0.26 ~ 43.94	0.20 ~ 31.56
Presence of dike	Aver.	5.7	7.3
	Range	0.00 ~ 14.60	0.20 ~ 15.70

3.3 피해영향범위 산정식의 활용

TCS 누출사고 발생 시 현장에서는 사고가 발생한 장소와 현지 대기온도, 방류벽의 유무에 따라 도출된 식을 적용하여 원물질인 TCS와 물 반응생성물인 HCl의 피해영향범위를 계산할 수 있다. 사고 지점이 사업장 이외의 곳이거나 사업장 내이지만 방류벽이 존재하지 않는 곳에서 사고 발생 시 Eq. (4)를 사용하여 원물질의 피해영향범위를, Eq. (5)를 사용하여 물 반응생성물의 피해영향범위를 산정할 수 있다. 사업장 내에서 방류벽의 존재 하에 누출사고 발생 시에는 Eq. (6)을 통해 원물질의 피해영향범위를 구하고, Eq. (7)은 물 반응생성물의 피해영향범위를 추정하는데 활용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 사고대비물질이자 주민대피 대비물질인 TCS의 누출사고 발생 시 주민대피를 결정하기 위하여 현장에서 적용 가능한 피해영향범위 산정식을 도출하고자 하였다.

- (1) 회귀분석 결과 방류벽이 존재하지 않는 장소에서의 피해영향범위는 원물질의 누출속도, 대기온도 순으로 높은 상관관계를 보였으며($p < 0.05$), 약 97%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다. 방류벽이 존재하는 장소에서의 피해영향범위는 원물질의 누출속도, 방류벽의 높이, 대기온도 순으로 높은 상관관계를 보였으며($p < 0.05$), 약 92-93%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다.
- (2) 방류벽이 존재하지 않는 경우 누출속도와 대기온도가 1 단위씩 증가할 경우 TCS 피해영향범위는 각각

146.07 m와 0.72 m만큼 증가하였고, HCl 피해영향범위는 각각 87.24 m, 0.44 m만큼 증가하였다.

- (3) 방류벽이 존재하는 경우에 누출속도와 대기온도, 방류벽 높이가 1 단위씩 증가하면 TCS 피해영향범위는 각각 9.83 m, 0.13 m만큼 증가 및 22.61 m만큼 감소하였고, HCl 피해영향범위는 각각 5.24 m, 0.07 m만큼 증가 및 12.55 m만큼 감소하였다.
- (4) 도출된 피해영향범위 산정식은 주민대피 결정을 하기 위한 근거 자료로 활용될 수 있으며, 사고 대응 측면에서는 물 반응성에 의해 생성되는 HCl의 영향범위를 사전에 예측하며 사고원점으로 진입하거나 안전한 방재활동을 수행하는데 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- Deputy Director General of Safety Environment in the Office for Government Policy Coordination. (2013). *Accidents of harmful substance's crisis management and direction of policy*.
- Kim, H.S., and Jeon, B.H. (2017). Development plan of accident scenario modeling based on seasonal weather conditions -Focus on chlorine leakage accident-. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 10, pp. 733-738.
- Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA). (2016). *Technical guidance on the selection of worst-case and alternative leak scenarios*.
- Lee, H.S., and Yim, J.P. (2017). A study on prevention measure establishment through cause analysis of chemical-accidents. *Journal of the Korean Society Safety*, Vol. 32, No. 3, pp. 21-27.
- Lee, H.S., Lee, T.H., Park, K.S., and Kim, J.G. (2019). A study on the evaluation of effects of chemical accident toxicity using CARIS & ALOHA. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 8-15.
- Lee, T.H., Park, C.H., Park, H.H., and Kwak, D.H. (2019). A study on accident prediction models for chemical accidents using the logistic regression analysis model. *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 72-79.
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Toxic chemicals control act*.
- National Institute of Chemical Safety (NICS). (2015). *Technical guidelines for calculating the scope of accident*.

National Institute of Chemical Safety (NICS). (2016). *Technical guidelines for the selection of accident scenarios*.

National Institute of Chemical Safety (NICS). (2019). *Key info guide for accident preparedness substances*.

National Institute of Chemical Safety (NICS). (2020). *Chemical integrated information system*.

Shin, C.H., and Park, J.H. (2016a). An evaluation of the off-site risk of spill from a storage tank of nitric

acid. *Crisisonomy*, Vol. 12, No. 3, pp. 187-200.

Shin, C.H., and Park, J.H. (2016b). Improvement in the risk reduction of dikes of storage tanks handling hazardous chemicals. *Crisisonomy*, Vol. 12, No. 1, pp. 83-93.

<i>Received</i>	November 3, 2020
<i>Revised</i>	November 5, 2020
<i>Accepted</i>	December 4, 2020