

## 충주의 주민대피 대비물질 누출사고 시 사고대응·예방을 위한 피해영향거리 산정식 개발 연구

전병한<sup>1</sup>, 김현섭<sup>2\*</sup>, 이명지<sup>2</sup>, 윤정현<sup>3</sup>, 정웅열<sup>4</sup>, 오승보<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 환경공학과, <sup>2</sup>환경부, <sup>3</sup>충북대학교 안전공학과, <sup>4</sup>안산시청

### A Study on Development of Damage Impact Distance Calculation Formula for Accident Response and Prevention in case of Leakage of Substances Prepared for Evacuation of Residents in Chungju

Byeong-Han Jeon<sup>1</sup>, Hyun-Sub Kim<sup>2\*</sup>, Myeong-Ji Lee<sup>2</sup>,  
Jeong-Hyeon Yun<sup>3</sup>, Woong-Yul Jung<sup>4</sup>, Seung-Bo Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Environmental Engineering, Jeonbuk National University, <sup>2</sup>Ministry of Environment

<sup>3</sup>Division of Safety Engineering, Chungbuk National University, <sup>4</sup>Ansan City Hall

**요약** 본 연구에서는 주민대피 대비물질 16종 중 급성노출기준 AEGL값이 존재하는 13종에 대하여 지방자치단체에서 주민대피 및 알람을 결정할 수 있도록 화학물질사고대응정보시스템을 활용한 피해영향거리 산정식을 도출하고자 하였다. 화학물질안전원에서는 2018년 사고대비물질 97종 중 물리·화학적 특성 및 독성, 발화성, 반응성, 사고발생 가능성 등을 고려하여 누출 시 사고 원점 인근의 주민에게 피해가 예상되는 물질 16종을 선정하여 주민대피 대비물질로 명명하였으며, 주민대피 대비물질의 화학사고 발생 시에는 실내대피 또는 주민소산 등의 가능성이 있으므로 지방자치단체는 긴급재난문자 등 주민알림에 대비하여야 한다. 충청북도 충주시를 중심으로 화학물질사고대응정보시스템을 사용하여 주민대피 대비물질 13종의 피해영향거리를 모델링 하였으며, 모델링 결과를 바탕으로 각각의 AEGL-2조건에서의 적합한 피해영향거리 산정식을 도출하였다. 모든 조건에서 결정계수  $R^2$ 은 0.99 이상이었으며 최소 0.9921~최대 0.9999의 범위를 나타내었다. 도출된 산정식으로 얻어진 피해영향거리와 화학물질사고대응정보시스템 모델링으로 얻어진 피해영향거리 수치간의 상대표준편차를 비교하였으며, 실제 화학사고 대응 상황을 고려하여 최소 이격거리를 보정한 결과 0.58 ~ 5.97 % 범위로 조사되었다. 주민대피 대비물질 13종에 의한 누출사고 발생 시 연구에서 도출된 산정식을 사용하여 현장에서는 피해영향거리를 산정할 수 있으며, 지방자치단체는 주민대피 및 알람 여부를 결정할 수 있다.

**Abstract** In this study, a formula was derived to calculate the damage impact distance using the Chemical Accident Response Information System (CARIS) so that local governments can decide on the evacuation and notification of 13 types of substances. The National Institute of Chemical Safety selected 16 out of 97 types of accident preparedness substances in 2018 and called them residents' evacuation preparedness substances. In a chemical accident, local governments should prepare for resident notification, such as emergency disaster texts. Using the CARIS in Chungju, this study modeled the damage-affected distances of 13 types of substances for the evacuation of residents. Under all conditions, the coefficient of determination  $R^2$  was 0.99 or higher, representing a range of at least 0.9921 to a maximum 0.9999. The relative standard deviation between the damage impact distance obtained using the calculation formula, and the CARIS result was compared. The minimum separation distance was corrected considering the actual chemical accident response situation, and the range was found to be between 0.58 and 5.97%. The damage impact distance can be calculated at the site using the calculation formula derived from the research, and local governments can determine whether to evacuate or notify residents.

**Keywords** : AEGL, CARIS, Chemical accident, Resident evacuation, Residents evacuation preparedness substances

\*Corresponding Author : Hyun-Sub Kim(Ministry of Environment)

email: sakao@korea.kr

Received August 21, 2020

Revised October 26, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

## 1. 서론

특정 화학물질의 의한 사고는 인명 및 환경 피해가 사고원점에만 국한되지 않고 사고원점 주변으로 확대되어 영향을 미칠 수 있다. 2020년 5월, 인도 남부 안드라프라데시주 비사카파트남에서 발생한 스티렌 가스 누출사고에서 나타났듯이 사업장에서 시설 결함, 노후화 또는 작업자의 과실 등의 원인에 의하여 저장중인 화학물질이 외부로 누출되면 아무런 보호조치가 되지 않은 인근 주민들은 화학물질에 노출될 수밖에 없으며, 노출 정도에 따라서 비가역적인 건강 상해를 입거나 심하면 목숨을 잃게 된다. 그리고 인명뿐만 아니라 주변의 동물 및 식물 피해, 토양 등의 오염도 동반하게 된다. 인도 스티렌 가스 누출사고에서는 소·돼지 등의 가축 34 마리가 폐사하였고, 인근 마을의 심토에서는 스티렌 농도가 안전기준 이상으로 나타나 인도 정부에서는 해당 지역의 농작물을 먹지 말 것을 권고하였다. 국내에서는 2012년 9월, 경상북도 구미시에서 발생한 불산 가스 누출사고로 인하여 가축 3,209 마리가 폐사되었고, 차량 1,138 대가 손상되었으며, 농작물 237.9 ha가 피해를 입어 생태계에 심각한 영향을 끼친 사례가 있다. 따라서 화학물질 중 상온에서 기체 상태로 존재하여 사고원점뿐만 아니라 주변지역으로도 이동할 수 있는 확산성과 인명 및 생태계에 위해를 가할 수 있는 유독성을 가지는 물질에 대해서는 누출 사고 시 피해를 최소화 시킬 수 있도록 관계부처가 미연에 대비를 할 필요가 있다.

화학물질관리법상 화학물질 중에서 급성독성·폭발성 등이 강하여 화학사고의 발생 가능성이 높거나 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질을 사고대비물질로 지정하고 있으며 2017년을 기준으로 기존 69종에서 실란류 등이 추가되어 현재 97종에 달하고 있다. 2018년 화학물질안전원에서는 사고대비물질 중 확산성, 발화성, 건강 위해성이 높은 기체상 물질은 누출 시 주민소산 및 주민알림 등의 방법으로 주민을 실내·외 대피해야 할 필요가 있기 때문에 화학물질 16종을 선정하여 주민대피 대비물질로 명명하였다. 이러한 주민대피 대비물질은 지방자치단체에서 특별관리를 통해 관리되어야 한다. 지방자치단체 관내에서 취급하는 화학물질을 효율적으로 관리하고 화학물질로 발생하는 사고에 대비·대응하기 위하여 환경부에서는 2016년 화학물질관리법을 개정하여 화학물질의 관리에 관한 조례 제정 근거를 마련하였고 현재 많은 지방자치단체에서 조례를 지정하여 화학물질 안전관리 및 화학사고 대비·대

응에 힘쓰고 있다. 행정안전부에 따르면 2019년 11월 기준, 화학물질 관리 조례를 제정한 지역은 광역지방자치단체 13곳, 기초지방자치단체 39곳인 것으로 알려져 있다[1].

본 연구에서는 주민대피 대비물질에 의한 누출사고 발생 시 실제 현장에서 주민소산 및 알림 등을 포함하는 주민대피를 결정하기 위하여 손쉽게 사용할 수 있는 피해 영향거리 간이 산정식을 조사하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 주민대피 대비물질

화학사고 시 주민대피 사전정보 제공을 위한 필요성이 증대되고 있고 주민대피 결정을 가지고 있는 지방자치단체가 주민대피를 과학적으로 결정할 수 있는 체계를 지원하고자 화학물질안전원에서는 2018년 사고대비물질 97종 중 물리·화학적 특성 및 독성, 발화성, 반응성, 사고발생 가능성 등을 고려하여 누출 시 사고 원점 인근의 주민에게 피해가 예상되는 물질 16종을 선정하여 주민대피 대비물질로 명명하였다. 주민대피 대비물질 16종은 공통적으로 끓는점이 40 °C 이하, 증기밀도가 0.5 이상, 발화점이 60 °C 이상의 특징이 있어 누출 시 기체로 확산 가능성이 있으며, NFPA코드의 건강위험성이 3 이상이어서 매우 짧은 노출로도 일시적 또는 만성적으로 건강에 위해를 가할 수 있는 물질이다. 주민대피 대비물질의 화학사고 발생 시에는 실내대피 또는 주민소산 등의 가능성이 있으므로 지방자치단체는 긴급재난문자 등 주민알림에 대비하여야 한다. Table 1은 주민대피 대비물질 16종의 물질구분 및 물질별 2014년부터 2019년까지 발생한 화학사고 건수를 나타내고 있다[2].

### 2.2 사고시나리오 모델링 방법론

피해영향거리 산정 사고 시나리오는 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 대안의 사고시나리오 분석 조건을 적용하였다 [3-5]. 기술지침에 따라 대안의 사고시나리오에서 기상 조건은 연평균 기상을 적용하였으며, 끝점은 AEGL을 적용하였다.

Table 1. Number of chemical accidents and substances prepared for evacuation of residents.

Chemical substance	CAS No.	Characteristic				Number of chemical accident('14~'19)
		Boiling point (°C)	Vapor density	Ignition point (°C)	NFPA Health	
Ammonia	7664-41-7	-33.3	0.6	651	3	59
Formaldehyde	50-00-0	-19.5	1.07	430	3	18
Hydrogen chloride	7647-01-0	-85.1	1.27	-	3	59
Hydrogen fluoride	7664-39-3	19.5	1.27	-	4	10
Chlorine	7782-50-5	-34	2.48	-	4	14
Hydrogen sulfide	7783-06-4	-60.3	1.19	232	4	5
Ethylene oxide	75-21-8	10.7	1.49	429	3	1
Methylamine	74-89-5	-6.3	1.1	430	3	1
Phosgene	75-44-5	8.3	3.4	-	4	1
Trichlorosilane	10025-78-2	32	4.67	185	3	1
Trimethylamine	75-50-3	2.87	2	190	3	1
Fluorine	7782-41-4	-188.1	1.7	-	4	0
Hydrogen cyanide	74-90-8	25.6	0.94	538	4	0
Hexafluoro-1,3-butadiene	685-63-2	5.6	3	-	3	0
Chlorine dioxide	10049-04-4	11	2.3	-	3	0
Boron trichloride	10294-34-5	12.5	4.03	-	3	0

### 2.3 기상관측 자료 분석

CARIS(CheMical Accident Response Information System)은 GIS(Geographic Information System)를 기반으로 공간정보와 기상정보를 활용하여 화학사고 발생 시 소방, 경찰, 지자체, 환경청 등의 대응기관에 확산 피해정보 및 화학물질 정보, 취급업체 정보, 사고대응요령 등의 종합적인 화학물질대응정보를 제공하는 시스템이다. 사고 물질별로 폭발, 화구화재, 플화재, 독성확산 형태의 피해영향거리를 산정할 수 있으며 실시간 기상정보와 주변지형의 거칠기 등을 반영한다. CARIS를 사용하여 주민대피 대비물질별 피해영향거리를 산정하기 위한 지역은 충청북도 충주시로 선정하였으며, 모델링에 적용할 기상자료는 기상청 국가기후데이터센터(National Climate Data Service System, NCDSS) 2015년 1월부터 2019년 12월까지의 충주시(관측지점 No.127) 지상기상관측자료를 사용하였다[6]. Table 2는 충주시의 5년간 기온, 습도, 풍속을 나타내고 있으며, 기온은 5년 평균 12.37 °C, 습도는 5년 평균 64.70 %, 풍속은 5년 평

Table 2. Average weather for 5 years in Chungju.

Year	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind speed (m/s)
2015	12.67	63.25	1.55
2016	12.88	63.75	1.45
2017	12.03	63.25	1.47
2018	11.97	65.42	1.51
2019	12.30	67.83	1.32
Mean	12.37	64.70	1.46

균 1.26 m/s로 조사되었다.

### 2.4 끝점(End-point) 선정

화학물질 누출에 의한 피해영향거리 평가에서 끝점으로 사용될 수 있는 급성노출기준은 AEGL(Acute Exposure Guideline Levels), ERPG(Emergency Response Planning Guidelines), PAC(Protective Action Criteria) 등이 있다. AEGL은 미국환경보호국(EPA)에서 지정하는 일반 대중을 위한 임계 노출한계로써 10분, 30분, 60분, 4시간, 8시간 노출시간에 따라 적용할 수 있다. AEGL-1은 일반 인구 대상에 불쾌감 또는 자극을 주는 물질의 공기 중 농도이고, AEGL-2는 일반 인구 대상에 돌이킬 수 없는 심각한 건강의 악영향을 주는 물질의 공기 중 농도이며, AEGL-3은 일반 인구 대상에 생명을 위협하는 건강 영향 또는 사망이 발생할 수 있을 것으로 예측되는 물질의 공기 중 농도를 말한다[7]. ERPG는 미국 산업위생학회(AIHA)에서 지정하는 지역사회의 비상계획에 사용하기 위해 공기 중 물질의 잠재적 유출량에 대처하기 위한 가이드라인이며 AEGL의 개념과 동일하게 3가지 위험수준으로 구분된다. PAC(은 미국에너지부에서 지정하는 기준으로 비상 대응하는데 있어서 상황의 심각성 및 잠재적 경과를 식별하기 위해 사용되며 AEGL과 ERPG를 포함하는 database를 구성하고 있다. 연구에서는 ERPG, PAC에 비해 노출지속 시간에 따른 농도기준이 있고 어린이 및 노인 등의 취약집단에도 적용이 가능한 AEGL을 끝점으로 선정하였다. 그리고 주민대피 대비물질 16종 중 Hexafluoro-1,3-butadiene,

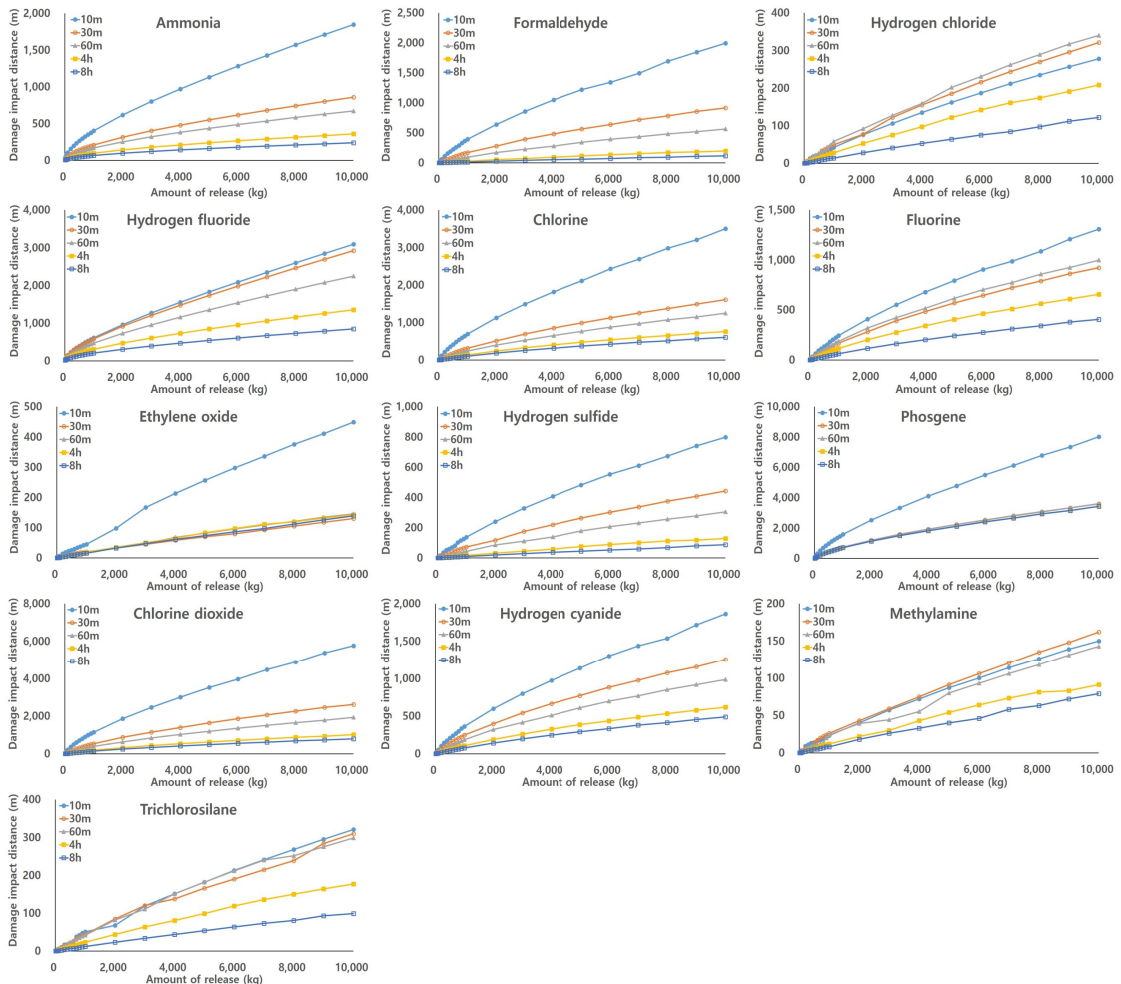


Fig. 1. Damage impact distance according to the amount of leakage.

Trimethylamine, Boron trichloride을 제외한 급성노출기준 AEGL값이 존재하는 13종에 대하여 피해영향거리를 산정하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 주민대피 대비물질 피해영향거리 산정

AEGL 급성노출기준이 존재하는 주민대피 대비물질 13종(Ammonia, Formaldehyde, Hydrogen chloride, Hydrogen fluoride, Chlorine, Fluorine, Ethylene oxide, Hydrogen sulfide, Phosgene, Chlorine dioxide, Hydrogen cyanide, Methylamine, Trichlorosilane)에 대하여 노출시간 10분, 30분, 60분, 4시간, 8시간에

해당하는 AEGL-2농도를 끝점으로 삼아 누출량 10 kg~10 ton 범위의 조건에서 CARIS를 사용하여 피해영향거리를 산정하였다. Fig. 1은 주민대피 대비물질 13종의 피해영향거리 결과 그래프이다. 각각의 피해영향거리는 Ammonia 7~1,848 m, Formaldehyde 0~1,996 m, Hydrogen chloride 0~340 m, Hydrogen fluoride 18~3,093 m, Chlorine 1~3,501 m, Fluorine 1~1,309 m, Ethylene oxide 0~449 m, Hydrogen sulfide 0~799 m, Phosgene 15~8,020 m, Chlorine dioxide 2~5,764 m, Hydrogen cyanide 1~1,865 m, Methylamine 0~162 m, Trichlorosilane 0~321 m의 범위를 나타냈다. 물질별 AEGL-2는 일반인구 대상 건강상 비가역적인 위해를 주는 농도이므로 실제 화학사고 대응 시에는 이를 바탕으로 1차적으로는 주민 알림

Table 3. Regression function and coefficient of determination by substance.

Chemical	Time	Function	R <sup>2</sup>	Chemical	Time	Function	R <sup>2</sup>	Chemical	Time	Function	R <sup>2</sup>
Ammonia	10	power	0.9983	Formaldehyde	10	power	0.9962	Hydrogen chloride	10	power	0.9953
	30	power	0.9992		30	power	0.9954		30	power	0.9957
	60	power	0.9993		60	power	0.9959		60	power	0.9959
	4	power	0.9994		4	2nd	0.9998		4	2nd	0.9997
	8	power	0.9992		8	2nd	0.9995		8	2nd	0.9992
Hydrogen fluoride	10	power	0.9968	Chlorine	10	power	0.9965	Fluorine	10	power	0.9967
	30	power	0.9967		30	power	0.9960		30	power	0.9955
	60	power	0.9973		60	power	0.9947		60	power	0.9966
	4	power	0.9982		4	power	0.9963		4	power	0.9945
	8	power	0.9989		8	power	0.9953		8	power	0.9959
Ethylene oxide	10	power	0.9950	Hydrogen sulfide	10	power	0.9979	Phosgene	10	power	0.9984
	30	2nd	0.9972		30	power	0.9978		30	power	0.9962
	60	2nd	0.9995		60	power	0.9968		60	power	0.9962
	4	2nd	0.9996		4	2nd	0.9990		4	power	0.9959
	8	2nd	0.9994		8	2nd	0.9986		8	power	0.9959
Chlorine dioxide	10	power	0.9976	Hydrogen cyanide	10	power	0.9960	Methylamine	10	power	0.9921
	30	power	0.9956		30	power	0.9958		30	2nd	0.9982
	60	power	0.9947		60	power	0.9941		60	3rd	0.9963
	4	power	0.9963		4	power	0.9955		4	3rd	0.9989
	8	power	0.9968		8	power	0.9979		8	2nd	0.9990
Trichloro silane	10	power	0.9947								
	30	power	0.9960								
	60	power	0.9931								
	4	2nd	0.9999								
	8	2nd	0.9997								

및 실내 대피가 이루어져야하며, 최악의 경우 주민소산을 결정짓는 중요한 요소이다.

### 3.2 물질별 상관관계식 도출

주민대피 대비물질 13종의 CARIS를 이용한 피해영향거리 산정 결과를 바탕으로 적합한 회귀분석 모델을 도출하였다. 회귀분석 모델은 결정계수(R<sup>2</sup>)를 비교하여 각각의 조건에서 최소 0.99 이상인 모델을 선정하고자 하였으며, 데이터에 음수가 존재하지 않고 특정비율에 따라 증가하는 측정값을 가지므로 거듭제곱 함수 모델을 우선 적용하였다. CAIRS를 사용한 피해영향거리 산정 데이터에 따라서 거듭제곱 함수 모델 적용이 어려운 경우에는 1차~3차 함수 모델을 적용하여 상관관계식을 도출하였다. 13종의 주민대피 대비물질 및 시간에 따른 AEG-2 농도별 조건에서 선정된 회귀분석 모델과 결정계수는 Table 3과 같다. 모든 조건에서 결정계수 R<sup>2</sup>은 0.99 이상이었으며 최소 0.9921~최대 0.9999의 범위를 나타내

었다.

선정된 회귀분석 모델에서 거듭제곱함수 모델의 경우는 식(1)과 같은 형태로 상수 A와 B를 도출할 수 있다. 2차 함수 모델의 경우에는 식(2)와 상수 A, B, C를 도출할 수 있고, 3차 함수 모델의 경우 식(3)과 상수 A, B, C, D를 도출할 수 있었다. 충주지역에서의 연평균 기상조건을 적용한 13종 주민대피 대비물질의 각각의 조건에서 도출된 상관관계식의 상수는 Table 4와 같다.

$$y = Ax^B \tag{1}$$

$$y = Ax^2 + Bx + C \tag{2}$$

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \tag{3}$$

y : 피해영향거리 (m)

x : 시간에 따른 누출량 (kg/s)

A, B, C, D : 상수

Table 4. Formula and constants for calculating damage impact distance by substance.

Chemical	Time	Equation	A	B	C	D	Chemical	Time	Equation	A	B	C	D
Ammonia	10	$y = Ax^B$	7.4792	0.5866	-	-	Formaldehyde	10	$y = Ax^B$	1.4264	0.7990	-	-
	30	$y = Ax^B$	4.8187	0.5547	-	-		30	$y = Ax^B$	0.4019	0.8579	-	-
	60	$y = Ax^B$	4.0290	0.5490	-	-		60	$y = Ax^B$	0.1692	0.8989	-	-
	4	$y = Ax^B$	2.5905	0.5313	-	-		4	$y = Ax^2 + Bx + C$	-7E-07	0.0267	0.2696	-
	8	$y = Ax^B$	1.9064	0.5215	-	-		8	$y = Ax^2 + Bx + C$	-1E-07	0.0131	0.2334	-
Hydrogen chloride	10	$y = Ax^B$	0.1245	0.8428	-	-	Hydrogen fluoride	10	$y = Ax^B$	9.6181	0.6129	-	-
	30	$y = Ax^B$	0.0927	0.8936	-	-		30	$y = Ax^B$	9.4046	0.6095	-	-
	60	$y = Ax^B$	0.0935	0.9012	-	-		60	$y = Ax^B$	8.2170	0.5968	-	-
	4	$y = Ax^2 + Bx + C$	-7E-07	0.0275	0.5011	-		4	$y = Ax^B$	6.2480	0.5742	-	-
	8	$y = Ax^2 + Bx + C$	-1E-07	0.0134	0.3721	-		8	$y = Ax^B$	4.6681	0.5568	-	-
Chlorine	10	$y = Ax^B$	3.1922	0.7699	-	-	Fluorine	10	$y = Ax^B$	0.7215	0.8280	-	-
	30	$y = Ax^B$	0.9676	0.8211	-	-		30	$y = Ax^B$	0.3966	0.8603	-	-
	60	$y = Ax^B$	0.6195	0.8442	-	-		60	$y = Ax^B$	0.4745	0.8475	-	-
	4	$y = Ax^B$	0.2823	0.8769	-	-		4	$y = Ax^B$	0.2001	0.9004	-	-
	8	$y = Ax^B$	0.1754	0.9049	-	-		8	$y = Ax^B$	0.0954	0.9225	-	-
Ethylene oxide	10	$y = Ax^B$	0.0960	0.9169	-	-	Hydrogen sulfide	10	$y = Ax^B$	0.3460	0.8533	-	-
	30	$y = Ax^2 + Bx + C$	-2E-07	0.0150	2.1300	-		30	$y = Ax^B$	0.1408	0.8867	-	-
	60	$y = Ax^2 + Bx + C$	-3E-07	0.0177	0.7232	-		60	$y = Ax^B$	0.0907	0.8867	-	-
	4	$y = Ax^2 + Bx + C$	-4E-07	0.0184	0.1931	-		4	$y = Ax^2 + Bx + C$	-4E-07	0.0169	0.0336	-
	8	$y = Ax^2 + Bx + C$	-2E-07	0.0156	0.5001	-		8	$y = Ax^2 + Bx + C$	-5E-08	0.0091	0.4043	-
Phosgene	10	$y = Ax^B$	10.676	0.7214	-	-	Chlorine dioxide	10	$y = Ax^B$	6.8655	0.7373	-	-
	30	$y = Ax^B$	3.7230	0.7576	-	-		30	$y = Ax^B$	2.2344	0.7817	-	-
	60	$y = Ax^B$	3.7324	0.7576	-	-		60	$y = Ax^B$	1.3383	0.8060	-	-
	4	$y = Ax^B$	3.4775	0.7601	-	-		4	$y = Ax^B$	0.4719	0.8507	-	-
	8	$y = Ax^B$	3.4776	0.7601	-	-		8	$y = Ax^B$	0.3106	0.8696	-	-
Hydrogen cyanide	10	$y = Ax^B$	1.2571	0.8060	-	-	Methylamine	10	$y = Ax^B$	0.1231	0.7663	-	-
	30	$y = Ax^B$	0.6908	0.8318	-	-		30	$y = Ax^2 + Bx + C$	-5E-07	0.0204	1.9279	-
	60	$y = Ax^B$	0.4232	0.8619	-	-		60	$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$	2E-11	-5E-07	0.0173	1.0143
	4	$y = Ax^B$	0.1945	0.8958	-	-		4	$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$	-4E-11	2E-07	0.0105	0.3589
	8	$y = Ax^B$	0.1381	0.9026	-	-		8	$y = Ax^2 + Bx + C$	-5E-08	0.0083	0.2397	-
Trichloro silane	10	$y = Ax^B$	0.0966	0.8849	-	-							
	30	$y = Ax^B$	0.0896	0.8865	-	-							
	60	$y = Ax^B$	0.0692	0.9209	-	-							
	4	$y = Ax^2 + Bx + C$	-5E-07	0.0225	0.2281	-							
	8	$y = Ax^2 + Bx + C$	-2E-07	0.0117	0.1209	-							

### 3.3 물질별 피해영향거리 산정식 검증

주민대피 대비물질별 및 AEGL-2의 시간에 따른 급성 노출기준별로 도출된 상관관계식을 CARIS를 이용한 피해영향거리 산정결과와 비교 검증하였다. 화학물질의 누출량과 누출시간이 동일한 조건일 때의 산정결과를 대상으로 피해영향거리 수치 간 상대표준편차(RSD) 계산하였으며 Table 5에 나타내었다.

Ammonia의 경우 시간에 따라 2.54, 1.80, 1.48, 1.05, 0.97의 RSD 평균 수치를 나타냈고, Formaldehyde의 경우 시간에 따라 4.25, 4.81, 5.03, 3.52, 4.39의 RSD 평균 수치를 나타냈다. Hydrogen chloride의 경우 시간에 따라 3.59, 4.36, 4.09, 4.59, 5.18의 RSD 평균 수치를 나타냈고, Hydrogen fluoride의 경우 시간에 따라

3.02, 3.00, 2.67, 3.10, 1.62의 RSD 평균 수치를 나타냈다. Chlorine의 경우 시간에 따라 3.87, 4.54, 5.25, 4.56, 5.10의 RSD 평균 수치를 나타냈고, Fluorine의 경우 시간에 따라 4.07, 4.79, 4.46, 5.22, 4.68의 RSD 평균 수치를 나타냈다. Ethylene oxide의 경우 시간에 따라 4.98, 16.01, 5.71, 3.58, 4.84의 RSD 평균 수치를 나타냈고, Hydrogen sulfide,의 경우 시간에 따라 3.15, 3.44, 3.13, 5.09, 3.20의 RSD 평균 수치를 나타냈다. Phosgene의 경우 시간에 따라 2.23, 3.93, 3.95, 4.22, 4.22의 RSD 평균 수치를 나타냈고, Chlorine dioxide의 경우 시간에 따라 2.90, 4.48, 4.95, 4.63, 4.33의 RSD 평균 수치를 나타냈다. Hydrogen cyanide의 경우 시간에 따라 4.27, 4.84, 5.52, 4.60, 3.67의 RSD 평균

Table 5. Mean and range of relative standard deviation(RSD) by substance.

Chemical	Time	Mean	Range	Chemical	Time	Mean	Range	Chemical	Time	Mean	Range
Ammonia	10	2.54	0.10~6.67	Formaldehyde	10	4.25	0.12~12.39	Hydrogen chloride	10	3.59	0.01~21.72
	30	1.80	0.03~4.73		30	4.81	0.71~18.33		30	4.36	0.15~15.90
	60	1.48	0.08~3.16		60	5.03	0.01~14.55		60	4.09	0.07~16.35
	4	1.05	0.09~2.18		4	3.52	0.13~23.16		4	4.59	0.08~30.42
	8	0.97	0.04~4.99		8	4.39	0.03~21.33		8	5.18	0.34~26.23
Hydrogen fluoride	10	3.02	0.00~7.67	Chlorine	10	3.87	0.09~14.62	Fluorine	10	4.07	0.49~10.37
	30	3.00	0.10~8.08		30	4.54	0.16~12.35		30	4.79	0.66~17.95
	60	2.67	0.05~6.52		60	5.25	0.46~18.12		60	4.46	0.37~9.17
	4	3.10	0.01~5.18		4	4.56	0.05~13.10		4	5.22	0.09~22.81
	8	1.62	0.09~3.57		8	5.10	0.38~16.98		8	4.68	0.58~20.40
Ethylene oxide	10	4.98	0.27~19.90	Hydrogen sulfide	10	3.15	0.05~10.48	Phosgene	10	2.23	0.06~11.08
	30	16.01	0.37~52.14		30	3.44	0.01~10.56		30	3.93	0.08~14.22
	60	5.71	0.06~28.16		60	3.13	0.03~17.74		60	3.95	0.21~14.35
	4	3.58	0.40~19.33		4	5.09	0.15~29.85		4	4.22	0.62~14.32
	8	4.84	0.22~27.19		8	3.20	0.39~13.56		8	4.22	0.62~14.33
Chlorine dioxide	10	2.90	0.20~12.78	Hydrogen cyanide	10	4.27	0.05~14.54	Methylamine	10	5.22	0.13~16.37
	30	4.48	0.14~14.95		30	4.84	0.27~8.78		30	12.81	0.09~49.32
	60	4.95	0.40~17.59		60	5.52	0.38~21.25		60	9.02	0.08~34.44
	4	4.63	0.57~9.37		4	4.60	0.15~20.95		4	4.79	0.00~17.04
	8	4.33	0.11~8.93		8	3.67	0.12~8.23		8	3.30	0.21~15.11
Trichloro silane	10	4.90	0.01~15.56								
	30	4.07	0.02~18.35								
	60	4.81	0.06~26.84								
	4	4.00	0.18~22.37								
	8	4.47	0.05~25.90								

수치를 나타냈고, Methylamine의 경우 시간에 따라 5.22, 12.81, 9.02, 4.79, 3.30의 RSD 평균 수치를 나타냈다. Trichlorosilane의 경우 시간에 따라 4.90, 4.07, 4.81, 4.00, 4.47의 RSD 평균 수치를 나타냈다.

그러나 실제 화학사고 현장 대응 관점에서 볼 때 아무런 확산 방지 저감시설이 없는 상황에서 30 m미만의 이격거리 수치는 의미 있는 값이 아니라고 할 수 있다. 유해물질 비상대응 핸드북(EMERGENCY RESPONSE GUIDEBOOK, 2016)에 따르면 특정 유해화학물질이 소규모의 형태로 누출이 일어나고 있는 상황일 때 적용할 수 있는 최소한의 초기이격거리 수치는 30 m로 지정하고 있다[8]. 따라서 CARIS 및 산정식을 이용하여 얻은 피해영향거리가 30 m 미만으로 산정된 수치는 모두 30 m의 최소 이격거리를 갖도록 보정하였고 이를 반영한 수정된 상대표준편차를 Table 6에 나타내었다.

### 3.4 주민대피 및 알림에서의 활용

급성노출기준 AEGL값이 존재하는 주민대피 대비물질 13종에 의한 누출사고 발생 시 연구에서 도출된 산정식을 사용하여 현장에서 피해영향거리를 산정할 수 있으며, 산정결과 수치를 바탕으로 지방자치단체는 주민대피 및 알림 여부를 결정할 수 있다.

현장 활용에는 다음과 같은 사항을 고려하여 적용하여야 한다. 현장에서는 누출된 화학물질에 대한 정확한 확인이 선행되어야 하며 이후 적합한 산정식을 적용한다. 사고시점으로부터 경과한 시간을 고려하여 산정식을 적용하며, 경과시간이 AEGL 시간별 기준의 사이 값에 해당되는 경우 피해영향거리를 보수적으로 적용하고자 해당 시점보다 짧은 시간의 AEGL기준을 적용한다. 누출량에 따른 산정식에서 누출량이 사이 값에 해당되는 경우에는 보다 더 많은 누출량 기준을 적용한다. 각 누출량에 따른 조건별 RSD값을 최종 결과값에 보정해준다. 단, 누출량이 10 ton을 초과하는 경우에는 해당 조건에서의 RSD 평균값을 보정값으로 사용할 것 제한한다.

Table 6. Mean and range of modified relative standard deviation(RSD) by substance.

Chemical	Time	Mean	Range	Chemical	Time	Mean	Range	Chemical	Time	Mean	Range
Ammonia	10	2.38	0.10~5.34	Formaldehyde	10	3.81	0.12~7.49	Hydrogen chloride	10	0.78	0.04~2.57
	30	1.64	0.03~3.77		30	5.27	0.71~8.37		30	3.39	0.51~7.12
	60	1.38	0.08~3.16		60	4.99	0.01~8.18		60	2.96	0.07~10.21
	4	1.16	0.09~2.18		4	0.58	0.13~2.12		4	0.63	0.08~1.12
	8	0.92	0.04~1.82		8	1.51	0.03~2.89		8	1.36	0.39~3.04
Hydrogen fluoride	10	3.02	0.00~7.67	Chlorine	10	3.47	0.09~6.74	Fluorine	10	4.15	0.49~7.34
	30	3.00	0.10~8.08		30	4.44	0.21~7.30		30	5.35	0.66~8.49
	60	2.67	0.05~6.52		60	5.61	0.46~8.38		60	5.22	0.37~7.66
	4	1.98	0.01~4.57		4	5.41	0.72~8.96		4	5.89	0.84~9.79
	8	1.52	0.09~3.57		8	5.43	0.44~9.23		8	4.16	0.58~7.01
Ethylene oxide	10	4.45	0.27~9.16	Hydrogen sulfide	10	3.44	0.14~7.26	Phosgene	10	2.23	0.06~11.08
	30	1.62	0.37~2.99		30	3.84	0.01~6.91		30	3.55	0.08~7.49
	60	0.85	0.06~4.20		60	1.47	0.03~5.73		60	3.56	0.21~7.62
	4	0.87	0.42~1.81		4	1.32	0.36~3.44		4	3.84	0.62~7.79
	8	1.11	0.22~3.29		8	1.22	0.39~2.20		8	3.84	0.62~7.79
Chlorine dioxide	10	2.90	0.20~12.78	Hydrogen cyanide	10	3.97	0.05~7.86	Methylamine	10	1.76	0.13~2.60
	30	3.96	0.14~6.77		30	5.29	0.27~7.81		30	0.83	0.09~2.71
	60	4.47	0.40~7.42		60	5.97	0.38~9.16		60	2.62	0.08~7.18
	4	5.44	1.00~8.21		4	5.23	0.28~9.39		4	1.95	0.00~4.12
	8	5.14	0.75~8.26		8	4.29	0.55~7.15		8	1.00	0.35~2.38
Trichloro silane	10	3.81	0.01~8.86								
	30	3.26	0.51~5.84								
	60	2.73	0.10~5.52								
	4	0.70	0.50~1.03								
	8	0.73	0.05~2.07								

#### 4. 결론

본 연구에서는 주민대피 대비물질 16종 중 노출지속 시간에 따른 농도기준이 있고, 어린이 및 노인 등의 취약 집단에도 적용이 가능한 AEGL 값을 갖는 13종에 대하여 충주지역에서의 누출 사고 시 지역사회의 주민대피 및 알람 결정을 위한 물질별 피해영향거리 산정식을 도출하였다. 산정식 도출에 활용한 사고시나리오 및 기상조건은 기술지침에 따라 현실적으로 발생 가능성이 높으며, 사업장 밖까지 미치는 영향범위가 최대인 경우의 시나리오인 대안의 시나리오와 해당지역의 연평균 기온을 고려하여 적용하였다.

1. CARIS를 이용한 피해영향거리 산정 결과를 바탕으로 적합한 회귀분석 모델을 적용한 결과 화학물질 종류와 노출시간에 따라서 거דם제공 함수 모델 및 2~3차 함수 모델을 적용할 수 있었다. 모든 조건에

서 결정계수  $R^2$ 은 0.99 이상이었으며 최소 0.9921 ~ 최대 0.9999의 범위를 나타내었다.

2. 주민대피 대비물질 및 급성노출기준별로 도출된 상관관계식을 CARIS를 이용한 피해영향거리 산정결과와 상대표준편차를 비교 검증하였다. 화학사고 발생 시 원점으로부터 이격거리를 최소한 30 m 이상을 갖도록 하여 조정된 상대표준편차를 조사한 결과 0.58~5.97 % 범위로 나타났으며, 각각의 조건에서 조사된 상대표준편차는 피해영향거리 산정 결과에 보정값으로 사용될 수 있다.
3. 물질별로 도출된 산정식은 충주지역에서 주민대피 대비물질에 의한 누출사고 발생 시 지방자치단체가 준위험지역의 주민을 소산시키거나 실내대피 알람을 결정하기 위한 자료로서 실제 사고 현장에서 AEGL-2에 따른 피해영향거리 산정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.



## References

- [1] Ministry of the Interior and Safety, "Local government chemical accident countermeasures", Ministry of the Interior and Safety, 2019, pp.138.
- [2] National Institute of Chemical Safety, Chemical integrated Information system, Available From : <https://icis.me.go.kr> (accessed August. 12, 2020)
- [3] National Institute of Chemical Safety, "Technical Guidelines for the Selection of Accident Scenarios", National Institute of Chemical Safety, 2016.
- [4] Korea Occupational Safety & Health Agency, "Technical Guidelines for Leakage Source Modeling(KOSHA GUIDE P-92-2012)", Korea Occupational Safety & Health Agency, 2012
- [5] Korea Occupational Safety & Health Agency, "Technical guidance on the selection of worst-case and alternative leak scenarios", Korea Occupational Safety & Health Agency, 2016, pp.14
- [6] Korea Meteorological Administration, National Climate Data Service System, Available From : <https://data.kma.go.kr> (accessed August. 15, 2020)
- [7] National Institute of Chemical Safety, "Key Info Guide for Accident Preparedness Substances", National Institute of Chemical Safety, 2019, pp.253.
- [8] National Institute of Chemical Safety, "2016 Emergency Response Guidebook", National Institute of Chemical Safety, 2016, pp.560.

### 전 병 한(Byeong-Han Jeon)

[정회원]



- 2016년 2월 : 아주대학교 환경공학 (석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 환경공학과 (박사과정)
- 2017년 12월 ~ 현재 : 화학물질안전원 화학안전관리위원

<관심분야>

환경공학, 안전공학

### 김 현 섭(Hyun-Sub Kim)

[정회원]



- 2016년 8월 : 아주대학교 환경안전공학과 (석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국산업기술대학교 생명화학공학과 (박사과정)
- 2016년 1월 ~ 2018년 8월 : 한강유역환경청 화학안전관리위원
- 2018년 9월 ~ 현재 : 원주지방환경청 공업연구사

<관심분야>

환경공학, 화학공학, 안전공학

### 이 명 지(Myeong-Ji Lee)

[정회원]



- 2014년 8월 : 명지대학교 환경공학과 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 환경공학과 (석사과정)
- 2017년 10월 ~ 현재 : 화학물질안전원 화학안전관리위원

<관심분야>

환경공학, 안전공학

### 윤 정 현(Jeong-Hyeon Yun)

[정회원]



- 2019년 8월 : 충북대학교 안전공학과 (석사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 충북대학교 안전공학과 (박사과정)
- 2017년 5월 ~ 현재 : 화학물질안전원 전문경력관(나)

<관심분야>

안전공학, 화학공학

정 응 열(Woong-Yul Jung)

[준회원]



- 2005년 2월 ~ 2012년 4월 : 환경부 환경서기
- 2012년 4월 ~ 2016년 10월 : 안산시청 지방환경주사보
- 2016년 10월 ~ 2019년 10월 : 시흥화학재난합동방재센터 (파견)
- 2019년 10월 ~ 현재 : 안산시청 지방환경주사보

<관심분야>

환경보건, 재난대응, 환경정책

---

오 승 보(Seung-Bo Oh)

[정회원]



- 2015년 2월 : 한국산업기술대학교 생명화학공학과 (공학사)
- 2016년 1월 ~ 현재 : 환경부 화학안전과 화학안전관리위원

<관심분야>

화학공학, 안전공학