

암모니아 누출사고 시 주민대피 및 알림 결정을 위한 피해영향거리 산정식 개발 연구

김현섭¹, 전병한^{2*}, 이명지³, 윤정현⁴, 이현승², 정응열⁵, 조정아¹
¹원주지방환경청, ²전북대학교 환경공학과, ³화학물질안전원, ⁴충북대학교 안전공학과, ⁵안산시청

A Study on Development of Damage Impact Distance Calculation Formula to Determine Evacuation and Notification of Residents in Case of Ammonia Release Accident

Hyun-Sub Kim¹, Byeong-Han Jeon^{2*}, Myeong-Ji Lee³, Jeong-Hyeon Yun⁴,
Hyun-Seung Lee², Woong-Yul Jung⁵, Jeong-A Jo¹

¹Wonju Regional Environmental Office

²Division of Environmental Engineering, Jeonbuk National University

³National Institute of Chemical Safety

⁴Division of Safety Engineering, Chungbuk National University

⁵Ansan City Hall

요약 본 연구에서는 암모니아 누출사고 발생 시 지방자치단체에서 신속하게 주민대피 및 알림을 결정할 수 있도록 화학물질사고대응정보시스템(CARIS)을 활용한 피해영향거리 산정식을 도출하고자 하였다. 암모니아는 화학물질관리법상 사고대비물질이자 화학물질안전원에서 정한 주민대피 대비물질 16종 중 하나이며, 2014년부터 2019년 기간 동안 화학사고가 58건으로 가장 빈번하게 발생한 화학물질이다. 연구에서는 미국환경보호국(EPA)에서 지정하고, 유아 및 어린이, 노인 등의 취약집단을 포함하며 일반 인구에 적용 가능한 급성노출기준인 AEGL을 기준으로 암모니아의 노출시간에 따른 피해영향거리 산정식을 도출하였다. AEGL-3 농도기준에 따른 위험지역 구분과 AEGL-2 농도기준에 따른 준위험지역을 구분할 수 있는 농도별, 노출시간별 산정식을 도출하였으며, 도출된 산정식으로 얻어진 피해영향거리 수치와 화학물질사고대응정보시스템의 피해영향거리 수치간의 상대표준편차를 비교한 결과 0~2% 범위의 것으로 조사되었다. 따라서 지방자치단체에서는 실제 사고 현장 상황을 고려하고 연구에서 도출된 적합한 피해영향거리 산정식을 적용하여 사고 원점 인근의 주민을 소산하거나 실내대피 알림 등의 보호조치에 활용될 수 있도록 하여야 한다.

Abstract This study attempted to derive an equation for calculating the damage impact distance using CARIS so that local governments can quickly determine evacuation and notification of residents in the event of an ammonia-release accident. Ammonia is an accident-causing substance and one of 16 substances to prepare for resident evacuation. It is the most frequently occurring chemical with 58 chemical accidents from 2014~2019. The study derives an equation for calculating the damage impact distance according to the exposure time of ammonia based on AEGL, an acute exposure standard applicable to the general population, which includes vulnerable groups such as infants, children and the elderly and designated by the EPA. The calculation formulas for each concentration and exposure time to classify the hazardous area according to AEGL-3 and the semi-dangerous area according to AEGL-2 were derived. A comparison of the relative standard deviation between the damage impact distance values of CARIS revealed that it was in the range of 0~2%. Local governments should consider the actual accident situation and apply the appropriate damage-affected distance calculation formula derived from the study to evacuate residents near the origin of the accident or use for protective measures such as indoor evacuation notification.

Keywords : Acute exposure standard, Ammonia, CARIS, Chemical accident, Resident evacuation

*Corresponding Author : Byeong-Han Jeon(Division of Environmental Engineering, Jeonbuk National University)
email: orange310624@hanmail.net

Received August 11, 2020

Revised September 8, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

화학사고는 시설의 교체 등 작업 시 작업자의 과실, 시설 결함·노후화, 자연재해, 운송사고 등으로 인하여 화학물질이 사람이나 환경에 유출·누출되어 발생하는 일체의 상황으로 화학물질관리법상에서 정의하고 있다[1]. 화학물질은 누출 시 확산성을 갖기 때문에 장거리 이동 및 매체 전이가 발생하고 비가시성으로 인해 오염 확인이 곤란한 특징을 갖고 있다. 또한 화학물질 종류에 따라 유해성, 발암성, 잔류성, 난분해성으로 인해 환경 및 국민에게 영향을 줄 수 있다. 따라서 국가에서는 화학물질에 의해 발생하는 사고로부터 국민을 보호하고자 재난 및 안전관리 기본법에서 사회재난으로 분류하고 있다[2].

지방자치단체 관내에서 취급하는 화학물질을 효율적으로 관리하고 화학물질로 발생하는 사고에 대비·대응하기 위하여 환경부에서는 2016년 화학물질관리법을 개정하여 화학물질의 관리에 관한 조례 제정 근거를 마련하였다. 지방자치단체에서는 화학물질 안전관리 및 화학사고 대비·대응을 위한 계획 또는 시책의 수립·시행, 화학물질 관리에 관한 중요사항을 심의하고 자문하기 위한 위원회 구성·운영, 화학물질 관련 정보의 제공, 화학물질의 안전관리에 필요한 행정 및 재정 지원, 사업장의 화학물질 배출저감계획 수립·이행의 확인 및 지원 등의 내용을 조례의 주요내용으로 포함하여 제정하여야 한다. 행정안전부의 조사에 따르면 2019년 11월 기준으로 광역지방자치단체는 13개소, 기초지방자치단체는 39개소에서 화학물질 관리 조례를 제정하였으며 그 밖의 다른 지방자치단체에서도 조례 제정을 추진하고 있다[3].

화학물질안전원에서는 Table 1의 화학물질을 주민대피 대비물질 16종으로 지정하고 있으며, 지방자치단체장은 주민대피 결정에 대한 권한을 갖고 있다[4]. 따라서 지방자치단체에서는 주민대피 대비물질의 화학사고 시 주민대피(실내대피 또는 주민소산) 가능성이 있으므로 주민알림에 대비하여야 한다. 이 때 주민대피를 결정하기 위해서는 대응현장에서 환경부의 현장 오염도 측정수치와 같은 근거가 필요하다. 환경부에서는 환경청(7개소) 및 화학재난합동방재센터(7개소)가 전국의 화학사고 대응을 담당하고 있으며, 불과 14개소가 권역별로 나누어 담당하다보니 1개소에서 많은 시·군을 담당해야하는 어려움이 존재하고 물리적 거리가 멀어 때에 따라서 출동시간이 2시간가량 소요되기도 한다. 2019년 발생한 전국의 화학사고 57건에 대하여 환경부가 사고현장에 도착하기까지 소요된 시간을 조사한 결과 평균 1시간가량

Table 1. 16 kinds of substances to prepare for evacuation of residents.

No.	Chemical substance	CAS No.
1	Ammonia	7664-41-7
2	Formaldehyde	50-00-0
3	Hydrogen chloride	7647-01-0
4	Hydrogen fluoride	7664-39-3
5	Chlorine	7782-50-5
6	Boron trichloride	10294-34-5
7	Ethylene oxide	75-21-8
8	Hydrogen sulfide	7783-06-4
9	Phosgene	75-44-5
10	Trimethylamine	75-50-3
11	Chlorine dioxide	10049-04-4
12	Hexafluoro-1,3-butadiene	685-63-2
13	Hydrogen cyanide	74-90-8
14	Methylamine	74-89-5
15	Trichlorosilane	10025-78-2
16	Fluorine	7782-41-4

소요된 것으로 나타났다. 이와 같이 실제 대응 현장에서는 환경청이나 화학재난합동방재센터 요원들이 도착하기 전까지 환경오염도 측정이 어렵다는 점 때문에 지방자치단체에서는 주민대피를 결정할 근거가 없어 신속하게 판단하기가 어려운 문제점을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 지방자치단체에서 화학사고 발생 시 주민대피를 위한 주민알림을 결정하기 위해서 현장에서 습득할 수 있는 간단한 정보만으로 대피거리를 산정할 수 있도록 화학물질 사고대응정보시스템(CheMical Accident Response Information System, CARIS)을 이용하여 주민대피 결정 산정식을 마련하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 유해화학물질 선정

화학물질종합정보시스템의 통계자료에 따르면 2014년 1월부터 2019년 12월까지 발생한 506건의 화학사고 중 암모니아에 의한 사고는 58건으로 가장 빈번하게 사고가 발생하는 물질로 조사되었다[5]. 암모니아는 주민대피 대비물질 16종의 하나로 화학물질관리법상 유독물질 및 사고대비물질로 지정하고 있으며 산업현장에서는 주로 냉동시설의 냉매가스 용도로 사용되고 있다. 고압 암모니아는 고압가스 안전관리법의 적용을 받아 관리하고, 저압 암모니아는 사고대비물질로 연간 100 kg 이상 취

급 시 화학물질관리법에 따라 유해화학물질 인·허가 대상으로 관리하고 있다[1, 6]. 암모니아는 공기보다 가볍고 확산속도가 빨라서 외부로 누출 시 취급사업장뿐만 아니라 인근의 일반 집단 주민들에게도 영향을 미칠 수가 있다. 따라서 영향범위를 미리 예측하여 사고 피해의 최소화를 위한 안전 관리방안을 마련할 필요가 있다.

2.2 급성노출기준 선정

AEGL(Acute Exposure Guideline Levels)은 미국 환경보호국(EPA)에서 지정하는 일반 대중을 위한 일계 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]. AEGL은 다양한 노출상황에 대해 사용되고 있는 급성노출기준으로 비상 피폭 기간에 따라 적용할 수 있으며 유아와 어린이 등의 취약집단을 포함하는 일반 인구에 적용이 가능하다. 암모니아의 AEGL은 Table 2와 같다.

Table 2. Summary of AEGL Values for Ammonia.

exposure standards	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
10 m	30 ppm	220 ppm	2,700 ppm
30 m	30 ppm	220 ppm	1,600 ppm
60 m	30 ppm	160 ppm	1,100 ppm
4 h	30 ppm	110 ppm	550 ppm
8 h	30 ppm	110 ppm	390 ppm

2.3 사고시나리오 선정

사고시나리오에서 준위험지역은 AEGL-2, 위험지역은 AEGL-3 농도에 해당하는 거리를 끝점으로 설정하여 암모니아의 누출로 인한 독성확산평가를 하였다. 피해영향거리 산정 프로그램(CARIS)에서 암모니아 누출량에 따른 시나리오별 끝점을 비교분석하기 위하여 설정한 조건은 한국산업안전보건공단의 '최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE, P-107-2016)' 대안의 사고시나리오 분석에 따르며 Table 3에 나타내었다[8].

Table 3. Accident Scenario conditions.

Classification	Contents
Chemical	Ammonia
Wind speed	3 m/s
Temperature	25 ℃
humidity	50 %
Stability	D
Release time	10m, 30m, 60, 4h, 8h
End-point	AEGL-2 or AEGL-3

2.4 피해영향거리 프로그램 선정

화학물질사고대응정보시스템(CARIS)는 GIS를 기반으로 공간정보와 영향평가정보를 함께 관리할 수 있도록 구현되어 있으며 현재 화학물질안전원에서 유관기관에 배포하여 화학사고 대응에 활용하고 있다. CARIS는 Gaussian과 SLAB 모델을 기반으로 하며, Gaussian은 가벼운 가스 확산에 적용하고 SLAB은 무거운 가스 확산에 적용된다. 실시간 기상정보를 바탕으로 화재, 폭발, 독성확산 형태의 피해영향거리 확산평가를 구동할 수 있으며 화학물질의 물리·화학적 특성, 독성 및 인체유해성, 취급업체정보, 방재정보 등을 포함하고 있다. 실제 사고 현장에서는 피해영향거리 확산평가 정보를 주민알림 및 대피 등을 결정하는데 활용하고 있다[9, 10].

3. 연구결과

3.1 급성노출기준에 따른 피해영향거리 산정

암모니아의 급성노출기준 중 생명을 위협할 수 있는 농도인 AEGL-3에 따라 결정되는 위험지역과 건강상 비가역적인 영향을 줄 수 있는 농도인 AEGL-2에 따라 결정되는 준위험지역에 대해 CARIS를 이용하여 피해영향거리를 산정하였다. 각각의 AEGL은 10분, 30분, 60분, 4시간, 8시간에 해당하는 농도(ppm)를 적용하여 위험지역과 준위험지역을 결정하는 끝점으로 하였으며, 암모니아 누출량은 10~10,000 kg 범위의 28개의 조건에서 피해영향거리를 산정하였다.

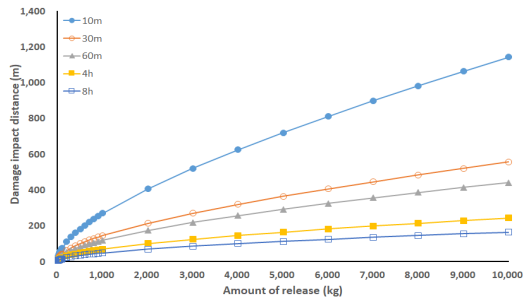


Fig. 1. Damage impact distance according to the amount of ammonia leakage(AEGL-2).

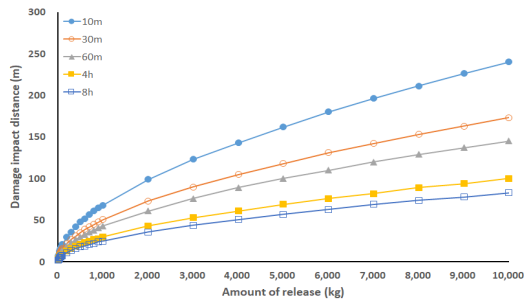


Fig. 2. Damage impact distance according to the amount of ammonia leakage(AEGL-3).

3.2 피해영향거리 상관관계식 도출

급성노출기준 AEGL-2, AEGL-3에 따른 암모니아 누출 시 피해영향거리의 산정 결과를 바탕으로 적합한 회귀분석 모델을 도출하였다. 통계프로그램 R을 사용하여 회귀 분석한 결과 AEGL-2 및 AEGL-3의 모든 조건에 대하여 Table 4와 같은 다양한 회귀분석 모델의 F통계량 p-value는 0.05보다 작은 것으로 조사되었다. 분석 결과를 통해 모든 회귀모델은 유의하다고 볼 수 있다.

Table 4은 다양한 회귀분석 모델에서 결정계수(R^2)를 비교한 결과이며 로그함수 모델을 제외하고 0.95이상의 값을 나타내어 1차~3차 함수 모델 및 거듭제곱함수 모델에서 누출량이 피해영향거리를 설명하는 설명력은 95% 이상의 비교적 높은 수치를 갖는 것으로 조사되었다. 1~3차 함수 및 거듭제곱함수 모두 정규분포를 따르나 1~3차 함수모델에서는 잔차가 비교적 크게 나타나 추세선을 벗어나는 값이 존재하였으며, 데이터에 음수가 존재하지 않고 특정 비율에 따라 증가하는 측정값을 가지므로 거듭제곱 함수 모델을 최종 적용하였다. 독립변수인 누출량의 유의성은 AEGL-2 및 AEGL-3의 모든 조건에서 t통계량 p-value가 0.001보다 작은 것으로 나타나 종속변수 피해영향거리에 대한 독립변수 누출량의 관계는 통계적으로 유의한 것으로 조사되었다. 그리고 회귀분석을 통해 얻은 지수에 해당하는 상수의 부호가 '+'이므로 누출량과 피해영향거리는 양의 상관관계에 있는 것을 알 수 있었다. 회귀분석을 통해 각각의 조건에서 도출한 상관관계식은 Table 5와 같다.

Table 5. Damage impact distance correlation.

Exposure standards	Exposure time	Trend line	
		Power function	
AEGL-2	10 m	$y = 5.6902x^{0.5664}$	
	30 m	$y = 3.568x^{0.5419}$	
	60 m	$y = 3.0202x^{0.5356}$	
	4 h	$y = 1.9109x^{0.5222}$	
	8 h	$y = 1.3872x^{0.5153}$	
AEGL-3	10 m	$y = 1.9094x^{0.5209}$	
	30 m	$y = 1.4549x^{0.5159}$	
	60 m	$y = 1.2142x^{0.5178}$	
	4 h	$y = 0.8884x^{0.5106}$	
	8 h	$y = 0.7012x^{0.5188}$	

Table 4. Regression Analysis Model Results.

Exposure standards	Exposure time	Trend line coefficient of determination R^2				
		1st	2nd	3rd	log	power
AEGL-2	10 m	0.9781	0.9935	0.9975	0.8026	0.9983
	30 m	0.9692	0.9909	0.9965	0.8222	0.9992
	60 m	0.9665	0.9902	0.9962	0.8274	0.9993
	4 h	0.9606	0.9883	0.9955	0.8381	0.9994
	8 h	0.9558	0.9869	0.9950	0.8454	0.9992
AEGL-3	10 m	0.9601	0.9881	0.9955	0.8389	0.9994
	30 m	0.9566	0.9873	0.9952	0.8443	0.9996
	60 m	0.9549	0.9868	0.9947	0.8472	0.9998
	4 h	0.9534	0.9860	0.9948	0.8493	0.9995
	8 h	0.9520	0.9851	0.9938	0.8530	0.9979

3.3 현장상황을 고려한 피해영향거리 산정식 도출

피해영향거리 산정식을 도출하기 위해 한국산업안전보건공단의 ‘누출원 모델링에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE, P-92-2012)’의 누출량 산정식을 적용하였으며, 이때의 누출원 면적은 이송 또는 압축설비를 제외한 화학설비의 파손에 의해 취급·저장하는 물질이 AEGL의 노출시간 기준인 10분, 30분, 60분, 4시간, 8시간 동안 모두 누출될 수 있는 면적을 가정한다[11]. 식(1)의 임계 흐름압력비 산정에서 누출속도가 음속 이상인 경우와 음속 미만인 경우로 나누어 피해영향거리 산정식을 도출하였다.

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

여기서 P_{CF} 는 임계흐름압력(kgf/cm²), P_1 은 설비의 운전압력(kgf/cm²), γ 는 비열계수이다. 누출속도가 음속 이상($P_a/P_1 \leq P_{CF}/P_1$)인 경우 식(2)를 적용하였으며, 누출속도가 음속 미만인 경우 식(3)을 적용하여 시간에 경과에 따른 누출량(Q)를 산정하였다.

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M_w}{R T_1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2)$$

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{2 g_c M_w}{R T_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_a}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (3)$$

C_D 는 누출계수로 누출지점의 형태에 따라 Table 6의 값을 적용하며, A는 누출원의 면적(m²), g_c 는 중력상수(9.8 kg·m/kgf·sec²), M_w 는 분자량(kg/kg-mole), T_1 은 설비의 운전온도(K), R 은 가스상수(847 m·kgf/kg-mole·K)이다. Table 7은 누출속도가 음속 이상인 경우 및 음속 미만인 경우의 누출량 산정식을 적용하여 급성노출기준 AEGL-2의 시간 기준에 따른 피해영향거리 산정식을 나타내고 있다. Table 8은 누출속도가 음속 이상인 경우 및 음속 미만인 경우의 누출량 산정식을 적용한 급성노출기준 AEGL-3의 시간 기준에 따른 피해영향거리 산정식을 나타내고 있다.

Table 6. Release coefficient.

Leak point type	State of flow	Release coefficient
Ventimeter / Nozzle	-	0.05~0.99
	Below the sound velocity	0.61~0.67
Orifice / hole	Above the sound velocity, $P_a/P_1 \approx P_{CF}/P_1$	0.75
	Above the sound velocity, $P_1 > P_a$	0.84

※ If C_D is uncertain, assume $C_D = 1$.

Table 7. Correlation equation for damage impact distance applied with leakage amount (AEGL-2).

Above the sound velocity	
Exposure time	Trend line Power function
10 m	$y = 107.1398(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5664}$
30 m	$y = 107.3141(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5419}$
60 m	$y = 126.5665(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5356}$
4 h	$y = 150.4265(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5222}$
8 h	$y = 147.3305(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5153}$
Below the sound velocity	
Exposure time	Trend line Power function
10 m	$y = 245.7990(C_D A P_1 \sqrt{\left[\left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.52} - \left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.76} \right]})^{0.5664}$
30 m	$y = 237.5127(C_D A P_1 \sqrt{\left[\left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.52} - \left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.76} \right]})^{0.5419}$
60 m	$y = 277.5445(C_D A P_1 \sqrt{\left[\left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.52} - \left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.76} \right]})^{0.5356}$
4 h	$y = 323.4533(C_D A P_1 \sqrt{\left[\left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.52} - \left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.76} \right]})^{0.5222}$
8 h	$y = 313.6076(C_D A P_1 \sqrt{\left[\left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.52} - \left(\frac{1.033}{P_1} \right)^{1.76} \right]})^{0.5153}$

Table 8. Correlation equation for damage impact distance applied with leakage amount (AEGL-3).

Above the sound velocity	
Exposure time	Trend line Power function
10 m	$y = 28.3995(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5209}$
30 m	$y = 37.1655(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5159}$
60 m	$y = 44.9421(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5178}$
4 h	$y = 63.4711(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5106}$
8 h	$y = 76.8701(C_D A P_1 \sqrt{\frac{1}{T}})^{0.5188}$
Below the sound velocity	
Exposure time	Trend line Power function
10 m	$y = 60.9495 (C_D A P_1 \sqrt{[(\frac{1.033}{P_1})^{1.52} - (\frac{1.033}{P_1})^{1.76}]})^{0.5209}$
30 m	$y = 79.1801(C_D A P_1 \sqrt{[(\frac{1.033}{P_1})^{1.52} - (\frac{1.033}{P_1})^{1.76}]})^{0.5159}$
60 m	$y = 96.0151(C_D A P_1 \sqrt{[(\frac{1.033}{P_1})^{1.52} - (\frac{1.033}{P_1})^{1.76}]})^{0.5178}$
4 h	$y = 134.1767(C_D A P_1 \sqrt{[(\frac{1.033}{P_1})^{1.52} - (\frac{1.033}{P_1})^{1.76}]})^{0.5106}$
8 h	$y = 164.4674(C_D A P_1 \sqrt{[(\frac{1.033}{P_1})^{1.52} - (\frac{1.033}{P_1})^{1.76}]})^{0.5188}$

도출된 피해영향거리 산정식의 검증을 위해 누출속도, 설비운전압력, 누출계수, 누출공의 크기 등을 설정하여 산정식을 이용한 피해영향거리와 CARIS를 이용한 피해영향거리의 상대표준편차를 비교분석하였다. 누출속도가 음속보다 큰 조건에서는 설비운전압력(P₁) 5~8 atm, 누출계수(C_D) 0.84~1.0, 누출공의 크기(D) 10~30 mm, 운전온도 298 K로 설정하였으며, 누출속도가 음속 미만인 조건에서는 설비운전압력 1.5 atm, 누출계수 0.61~1.0, 누출공의 크기 10~30 mm, 운전온도 298 K로 설정하였다.

AEGL-2를 끝점으로 하였을 때 상대표준편차는 Table 9와 같다. 누출속도가 음속보다 크고 설비압력 5 atm 조건에서는 누출계수와 누출공 크기에 따라 평균 0.94~1.99의 범위를 나타내었으며, 누출속도가 음속보다 크고 설비압력 8 atm 조건에서는 누출계수와 누출공 크기에 따라 평균 0.85~2.32의 범위를 나타내었다. 누출속도가 음속 미만이고 설비압력이 1.5 atm일 때는 누출계수와 누출공의 크기에 따라 평균 0.72~1.69의 범위를 나타내었다. 누출속도가 음속보다 큰 경우에는 누출공의 크기가 증가하고 누출시간이 길어질수록 상대표준편차 수치가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 누출속도가 음속보다 작은 경우에는 누출공의 크기가 작고 누출시간이 작을수록 큰 상대표준편차 수치를 나타냈다.

Table 9. Comparison of relative standard deviation of damage impact distance(AEGL-2).

AEGL-2	P ₁	Above the sound velocity									Below the sound velocity								
		5			8			1.5			1.0			0.61					
		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30			
	C _D	0.84			1.0				0.84			1.0			0.61			1.0	
	D	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1/2	10 m	1.46	1.46	2.53	0.87	1.69	2.74	0.21	2.21	2.81	0.36	2.26	2.81	4.34	0.78	0.91	3.14	0.13	1.53
	30 m	0.61	1.84	1.91	0.98	1.84	1.90	1.28	2.00	1.61	0.92	1.85	1.40	0.84	1.03	1.72	0.25	1.07	1.74
	60 m	1.02	1.60	1.22	1.09	1.42	1.07	1.68	1.57	0.55	1.31	1.44	0.23	0.58	1.29	1.60	0.12	1.68	1.59
	4 h	1.14	0.36	1.21	1.15	0.13	1.46	0.85	0.31	2.35	0.69	0.77	2.86	1.38	0.76	0.50	1.40	0.71	0.18
	8 h	0.66	0.60	2.44	0.61	1.15	2.76	0.21	1.43	3.75	0.01	1.95	4.32	1.31	0.21	0.33	1.15	0.01	0.82
	Average	0.98	1.17	1.86	0.94	1.25	1.99	0.85	1.50	2.21	0.66	1.65	2.32	1.69	0.81	1.01	1.21	0.72	1.17

Table 10. Comparison of relative standard deviation of damage impact distance(AEGL-3).

AEGL-3	P ₁	Above the sound velocity									Below the sound velocity								
		5			8			1.5			1.0			0.61					
		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30			
	C _D	0.84			1.0				0.84			1.0			0.61			1.0	
	D	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1/3	10 m	0.81	0.21	0.40	1.35	0.91	1.14	1.34	1.70	0.96	0.17	1.62	1.50	2.77	1.32	0.47	2.46	1.01	1.72
	30 m	0.28	1.38	0.99	1.74	1.40	0.63	1.24	1.11	0.55	0.98	0.96	0.50	1.19	0.08	0.56	1.53	0.41	0.34
	60 m	1.03	0.97	0.42	0.54	0.60	0.93	0.52	0.71	0.12	0.14	0.46	0.28	1.99	0.75	0.03	1.25	0.01	0.71
	4 h	1.31	0.22	0.52	0.49	0.42	0.52	0.33	0.34	1.28	0.67	0.53	1.56	0.77	0.13	0.24	1.57	0.26	0.17
	8 h	0.18	0.74	0.27	0.36	0.29	0.28	0.32	0.44	0.32	0.29	0.01	0.80	0.09	0.02	0.33	0.65	0.88	0.59
	Average	0.72	0.70	0.52	0.90	0.72	0.70	0.75	0.86	0.65	0.45	0.72	0.93	1.36	0.46	0.33	1.49	0.51	0.71

AEGL-3을 끝점으로 하였을 때 상대표준편차는 Table 10과 같다. 누출속도가 음속보다 크고 설비압력 5 atm 조건에서는 누출계수와 누출공 크기에 따라 평균 0.52~0.90의 범위를 나타내었으며, 누출속도가 음속보다 크고 설비압력 8 atm 조건에서는 누출계수와 누출공 크기에 따라 평균 0.45~0.93의 범위를 나타내었다. 누출속도가 음속 미만이고 설비압력이 1.5 atm일 때는 누출계수와 누출공의 크기에 따라 평균 0.33~1.49의 범위를 나타내었다. 누출속도가 음속보다 큰 경우에는 상대표준편차가 큰 차이를 나타내지 않았으나 누출속도가 음속보다 작은 경우에는 AEGL-2의 조건과 유사하게 누출공의 크기가 작고 누출시간이 짧을수록 상대표준편차가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 이 때의 피해영향거리를 비교하였을 때는 불과 1~2m의 차이밖에 없는 것으로 조사되었다.

3.4 산정식을 활용한 주민대피 및 알림 결정

암모니아 누출사고 발생 시 사고지역의 주민대피 및 알림 결정권을 갖고 있는 지방자치단체에서는 다음과 같이 피해영향거리 산정식을 적용하여 주민대피 및 알림 여부를 결정할 수 있다.

암모니아 농도가 생명의 위협을 줄 수 있는 경우에 해당하는 주민에 대해서는 위험지역으로부터 벗어날 수 있도록 하기 위하여 Table 8의 AEGL-3에 해당하는 산정식을 적용하여 피해영향거리를 구하고 이를 바탕으로 주민을 소산시킬 수 있다. 암모니아 농도가 생명에 영향을 주지는 않으나 비가역적 위해를 줄 수 있는 경우에 해당하는 지역의 주민에 대해서는 Table 7의 AEGL-2에 해당하는 산정식을 적용하여 피해영향거리를 구하고 이를 바탕으로 실내대피 알림 또는 주민소산을 실시할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 주민대피 대비물질 16종에 해당하며, 최근 5년간 가장 빈번하게 발생한 화학사고 원인 물질인 암모니아를 대상으로 누출 시 지방자치단체에서 주민대피 및 알림 결정을 할 수 있도록 피해영향거리 산정식을 도출하였다.

1. 화학사고 피해영향거리 산정 프로그램인 화학물질 사고대응정보시스템(CARIS)를 이용하여 급성노출 기준 AEGL 및 누출량에 따른 피해영향거리를 산

정하고 상관관계식을 도출하기 위해 회귀분석한 결과 거듭제곱함수 모델에서 F통계량 p-value <0.05, t통계량 p-value <0.001 수준으로 유의미한 수치를 나타냈으며, 결정계수(R^2)는 0.95이상으로 종속변수에 대해 95%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다.

2. 실제 현장의 상황에 적합한 피해영향거리 산정식을 적용하기 위하여 누출속도가 음속과 같거나 이상인 경우와 음속 미만인 경우로 나누어 산정식을 도출하였다. 도출된 산정식을 이용한 피해영향거리 수치와 CARIS를 이용한 피해영향거리 수치를 비교한 결과 회귀분석을 위해 적용했던 암모니아 누출량의 최대값인 10,000 kg를 넘는 경우를 제외하면 0~2 %범위의 상대표준편차를 나타냈다.
3. 지방자치단체에서 주민대피 및 알림 결정을 하기 위한 자료로서 암모니아 누출 시 위험지역의 주민을 소산시킬 필요가 있는 경우 AEGL-3에 따른 피해영향거리 산정식을 적용하고, 준위험지역의 주민을 소산시키거나 실내대피 알림을 하기 위해서는 AEGL-2에 따른 피해영향거리 산정식을 적용할 것을 제안한다.

References

- [1] Ministry of Environment, "Chemicals Control Act", 2015. Available From : <http://www.law.go.kr> (accessed July. 25, 2020)
- [2] Ministry of the Interior and Safety, "Misfortune and the safety supervision basic law", 2004. Available From : <http://www.law.go.kr> (accessed July. 25, 2020)
- [3] Ministry of the Interior and Safety, "Local government chemical accident countermeasures", Ministry of the Interior and Safety, 2019, pp.138.
- [4] National Institute of Chemical Safety, "Local government resident notification in the early stages of a chemical accident • evacuation decision support system", National Institute of Chemical Safety, 2018, pp.46.
- [5] National Institute of Chemical Safety, Chemical integrated Information system, Available From : <https://icis.me.go.kr> (accessed July. 30, 2020)
- [6] Ministry of Trade Industry and Energy, "High-Pressure Gas Safety Control Act", 1979. Available From : <http://www.law.go.kr> (accessed July. 25, 2020)
- [7] National Institute of Chemical Safety, "Key Info Guide for Accident Preparedness Substances", National

Institute of Chemical Safety, 2019, pp.253.

- [8] 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.
- [9] H. S. Lee, T. H. Lee, K. S. Park, J. K. Kim, "A Study on the Evaluation of Effects of Chemical Accident Toxicity Using CARIS & ALOHA", *J. of the Korean Society for Environmental Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 8-15, 2019.
- [10] H. S. Lee, C. H. Shin, "A study on the case analysis of Nitric acid chemical accident and establishment of preventive measures", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, vol. 21, no. 3, pp. 488-496, 2020.
- [11] Korea Occupational Safety & Health Agency, "Technical guidelines for modeling leak sources", Korea Occupational Safety & Health Agency, 2012, pp.37.

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

전 병 한(Byeong-Han Jeon)

[정회원]



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

<관심분야>

환경공학, 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

이 현 승(Hyun-Seung Lee)

[정회원]



- 2018년 2월 : 전북대학교 환경공학과 (석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 환경공학과 (박사과정)
- 2015년 5월 ~ 2020년 7월 : 화학물질안전원 화학안전관리위원
- 2020년 7월 ~ 현재 : 영산강유역환경청 전문위원

<관심분야>

환경공학, 화학공학, 안전공학

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

조 정 아(Jeong-A Jo)

[준회원]



- 2014년 8월 : 충북대학교 환경공학과 (공학사)
- 2016년 11월 ~ 2020년 8월 : 괴산군청 지방환경서기
- 2020년 8월 ~ 현재 : 원주지방환경청 환경서기보

<관심분야>

환경공학, 화학공학