ALOHA를 활용한 화학사고 비상대응계획 수립 개선방안:

대피계획 중심

Development of Emergency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan

유병태* · 문명환**

Yoo, Byungtae*, and Moon, Myonghwan**

Abstract

This study focuses on realistic evacuation plan due to the chemical accident such as the ammonia (30 kg) leakage. Using the scenario of ALOHA program, indoor and outdoor toxic concentration was evaluated at each 5 spot from leak point. First, It took only 4 minutes to reach the Level of Concern (LOC, 150 ppm) at 10m from leak point so it was possible to stay only 4 minutes indoor. Second, It took 23 minutes to reach the Level of Concern (LOC, 150 ppm) at 25m from leak point, recording 189 ppm (Max) indoor and 1,280 ppm (Max) outdoor. Third, at the 30m from leak point, it was measured below 150 ppm for 60 minutes and reached 131 ppm(Max). So it was possible indoor evacuation plans to be established rather than outdoors from more than 30 meters from the point of accident. Therefore, this study proposes not only the effective indoor and outdoor evacuation plan at chemical materials leakage accidents. but also a much more systematic emergency evacuation plan at plants handling hazardous chemical materials.

Key words : Chemical Accident, Emergency Response Plan, ALOHA, Ammonia, Evacuation

요 지

본 연구에서는 암모니아 30 kg 누출에 의한 화학사고 발생 시 현실적인 소산계획을 제시하고자 하였다. ALOHA 프로그램을 활용하여 시간에 따른 위치별(5개 지점) 실내·외 오염농도를 평가하였다. 먼저, 사고원점으로부터 10 m 떨어진 지점에서는 실내농도가 4분만에 관심농도(150 ppm)에 도달하여 4분 이내로만 실내대피가 가능하였다. 둘째, 25 m 지점에서는 실내농도 관심농도는 23분 이내이며, 실내농도는 최대 189 ppm, 실외 농도는 최대 1,280 ppm을 기록한다. 셋째, 30 m 지점은 60분 동안 실내농도가 150 ppm 미만 수준이며 최고 농도가 131 ppm이므로, 30 m 이상 떨어진 지점부터는 실외소산보다는 실내 대피만으로 비상대응계획을 수립할 수 있다. 이에 본 연구는 화학물질 누출사고 발생에 따른 효율적인 실내·외 소산계획을 수립할 수 있는 개선방안을 제시하였으며, 이는 화학물질 취급 사업장에서 보다 체계적인 대피계획을 수립하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 화학사고, 비상대응계획, 알로하, 암모니아, 대피

1. 서 론

2012년 구미 불산사고 이후 「화학물질관리법」 전면개정

을 통해 화학사고 발생 시 피해영향범위에 있는 근로자 및 지역주민의 안전을 확보하기 위해 화학물질 취급사업장의 비상대응계획을 포함한 위해관리계획서를 작성하여 이

*교신저자, 정회원, 환경부 화학물질안전원 사고예방심사과 공업연구관(Tel: +82-42-605-7041, Fax: +82-42-605-7065, E-mail: flyduck@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, National Institute of Chemical Safety

**광운대학교 화학공학과

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

행토록 규정하고 있다. 근로자 및 주민대피 부분은 유·누출 시간에 따른 근로자 또는 주민의 거리와 실내 혹은 실외 위치에 따라 오염농도 수준이 달라지기 때문에 이러한 사항들을 정확하게 분석하여 빠른 의사 결정을 통한 신속한 정보제공이 무엇보다 중요하다. 이러한 상황 속에서 화학 사고는 지속적으로 발생하고 있다.

과거 3년간('15~'17) 발생한 화학 사고를 분석해 보면 '15년은 4월, 7월, '16년은 3월, 4월, '17년은 5월, 7월로 주로 3월에서 7월 사이에 집중되고 8월 이후부터는 감소 추세를 보이고 있다(Fig. 1). 연도별 1월부터 7월 사이 화학 사고를 다시 분석해보면 '15년은 73건, '16년은 57건, '17년은 43건으로 전년대비 25%(14건) 감소한 것으로 나타난다(Table 1).

미국, 영국, 호주, 스페인 등 선진국의 경우 화학물질 누출에 따른 대피계획 분야에 많은 연구가 진행되고 있으며 특히, 미국과 호주에서는 정부차원의 가이드라인을 마련하여 비상대응계획 수립 시 활용할 수 있도록 제공하고 있다(Yoon, 2016). Glickman et al. (1990) 독성가스 누출 시 실내·외 소산방법에 대한 의사결정을 위한 방법론을 제시하였으며 U.S. DHS (2006)는 독성가스 누출 시 실내대피 방법에 대한 가이드라인을 마련하였다. Montoya (2010)은 독성가스 누출에 따른 영향평가와 대피소 환기율을 고려한 효율적 방안 및 주민 대피 방법에 대해 연구를 수행하였다. 호주 Victoria주 (Metropolitan Fire and Emergency Services Board of Australia, 2011)는 독성가스 누출 시 실내대피를 위한 실행방안에 대해 미국처럼 가이드라인을 마련하였다.

국내의 경우 관련분야 연구가 매우 부족한 실정이며 NICS

(2015)는 주민소산계획 작성안내서(가이드라인)를 마련하여 실내 및 실외 대피 요령을 제공하고 있으며 Jo and Park (2016)는 독성가스 누출 시 실내농도에 대한 환기율을 수학적 공식을 통해 산출하는 연구를 실시하였다. Yoo (2016)는 독성가스 누출 시 시간에 따른 실내 및 실외 오염농도 수준을 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 선별적 소산계획을 위한 매트릭스를 마련하여 제시하였다.

최근에 꾸준히 발생하고 있는 화학사고로 화학물질을 취급하는 사업장의 비상대응계획 중 근로자 및 지역주민에 대한 대피계획에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 외국의 경우 화학물질 사고에 따른 주민 근로자의 대피계획 분야에 대한 활발한 연구가 진행되었지만 국내의 경우 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다수의 유해화학물질 취급사업장에서 수립하고 있는 피해영향범위 밖으로의 확일적 대피계획에 대한 한계점을 제시하고 피해영향평가 프로그램인 ALOHA를 활용하여 실내·외 거리별 시간에 따른 오염농도를 모사하였다. 이를 바탕으로 화학사고 발생 시 보다 현실적인 대피계획을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

화학사고 예방 및 피해 최소화를 위한 비상대응계획 수립 시 근로자 및 지역 주민에 대한 소산계획이 사회적 관심이 높아지고 있다. 화학물질 누출 시 대피할 시간이 충분하지 않거나 안전거리가 확보되지 않은 상황에서 사업장의 조정실 또는 사무실 등 건물의 실내 오염농도를 예측하여 허용농도 이하일 경우 실내대피를 실시하고 사업장 밖의 경우도

Fig. 1. Chemical Accidents for 3 Years (csc.me.go.kr)

Table 1. Chemical Accidents for 3 Years (January to July) (csc.me.go.kr)

Duration	Chemical accident (number)	year on year
2015. 1~7	73	-
2016. 1~7	57	△ 22% (16)
2017. 1~7	43	△ 25% (14)

영향범위에 위치하고 있는 건물의 경우 실내·외 오염농도를 측정하여 실내거주가 가능하다면 원거리에 위치한 대피소로 소산하는 것 보다는 실내에 머무르고 외부 상황을 관찰하는 것이 사고 상황에 따라 안전할 수도 있다.

2015년에 개정·시행되고 있는「화학물질관리법」41조, 42조에 의거하여 일정규모 이상의 사고대비물질을 취급하고 있는 사업장에서는 다음과 같은 내용을 포함하여 위해관리계획서를 작성하여야 한다. ① 취급하는 유해화학물질의 유해성정보 및 화학사고 위험성 ② 화학사고 발생 시 대기·수질·지하수·토양·자연환경 등의 영향범위 ③ 화학사고 발생 작성 시 초기경보 전달방법, 주민대피 등 행동요령 및 지역사회 고지.

특히, 주민대피 등 행동요령을 마련하기 위해서는 피해영향평가를 실시하고 실내·외 거리별 시간에 따른 오염농도를 모사하여 비상대응계획을 수립해야한다. 현재, 사업장에서 무료로 활용할 수 있는 프로그램은 미국 ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)와 화학물질안전원 KORA (Korea Off-Site Risk Assessment Supporting Tool) 정도이다.

ALOHA에 적용된 DEGADIS 확산모델은 미국정부에서 많은 예산을 들여 사고예방 및 대응에 활용할 수 있도록 개발한 모델이며 미국 환경청에 의해 공인된 모델로서 현재, 미국 산업시설의 장외영향평가 및 비상대응계획뿐만 아니라 전 세계적으로 화학사고 예방 및 대응분야에 범용적으로 널리 활용되고 있다. ALOHA의 경우 장외영향평가서·위

해관리계획서 작성지원프로그램인 KORA와 달리 시간에 따른 거리별 실내·외 오염농도 모사가 가능하다.

2.1 실내대피의 필요성

실제 외국의 경우 화학물질 누출 시 실내대피의 경우 피해가 없는 반면, 실외소산을 하는 과정에서 독성가스에 노출되어 피해를 입은 경우가 발생하였다. 화학물질 사고의 경우 사고 환경에 따라 다를 수 있지만 확실적 실외소산보다는 실내대피가 오히려 안전할 수 있음을 보여주는 사례이다 (Table 2).

독성가스가 바람에 따라 이동하면서 해당지역 내에 위치하고 있는 사무실 또는 주택 내부로 외부 독성가스가 실내로 유입되어 일정시간 이후에는 실외보다 실내가 더 위험할 수 있다. 이러한 시간에 따른 오염농도 변화를 인지하고 그에 맞는 대피계획을 수립하는 것이 무엇보다 중요한 요소이다(Fig. 2).

2.2 국내 대피체계의 한계점

외국의 사례에서도 알 수 있듯이 사고 시나리오별 상황에 맞는 실내·외를 구분한 구체적인 소산계획이 필요하다. 화학물질안전원에서 운영하고 있는 위해관리계획 주민고지 (http://icis.me.go.kr/rmp_notice/)를 통한 사업장의 비상대응계획 분야 중 대피분야를 살펴보면 피해영향 범위 내에 있는 상당수의 근로자 및 주민들을 주로 피해영향 범위 밖으로 소산시키는 계획을 수립하고 있다. 외국의 사례처럼

Table 2. Effectiveness of Shelter-In-Place: Examples from across the Country (NICS, 2005)

Planquemin, LA in 1987	A Dow Chemical Company accident released chlorine. All of the employees who stayed in buildings were unaffected. Two employees who tried to evacuate from the cafeteria suffered respiratory problems from inhaling the chlorine.
Henderson, NV on May 6, 1991	Corrosion in a steel piping system caused a failure that released 70 tons of chlorine gas. Two hundred people were hospitalized. Investigators from the U.S. Fire Administration concluded that people who evacuated were exposed to greater risk than those who stayed indoors
Ludington, MI on February 7, 1993	Michigan State Police reported that a pipe fitting failed releasing bromine gas. Shelter in place was utilized successfully for 3 hours with no injuries. Michigan State Police concluded that in this incident, sheltering in place was an effective protective action and that it was preferred to risking exposure during an evacuation.
Richmond, CA on July 26, 1993	A tank car carrying oleum overheated and ruptured sending a cloud of sulfur trioxide into the air. The Contra Costa County Health Services Department reported that 22,000 people in the community sought medical attention, 22 were hospitalized. Employees of a nearby plant, in the direct path of the plume, sheltered in place and were not injured.
Nitro, WV on December 5, 1995	A process vessel at an FMC chemical plant overpressurized and released a phosphorus chloride compound into the diked area around the vessel. In the rain, a hydrochloric acid cloud was formed which drifted offsite into an adjacent office and commercial area. More than 800 employees of a neighboring chemical plant and several offices sheltered in place while the plume passed over the area. No injuries were reported.
Pittsburg, CA in 1998	At a refinery, an accident released 900 pounds of chlorine. About 7,000 people in the immediate community were alerted to shelter in place. One employee was injured in the incident, but no injuries were reported from offsite.

Fig. 2. Indoor Concentration of Toxics Releases Accident (Brown, 1998)

대규모 화학사고 발생 시 피해영향 범위에 많은 근로자 또는 지역주민이 포함될 경우 대피과정 중에 화학물질에 노출·오염되어 피해가 가중될 수 있는 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 한계점을 개선하기 위해서는 실내대피 및 실외소산에 대한 거리별 시간을 고려한 오염농도를 정량적으로 구현할 수 있어야 하는데 이러한 가이드라인 또는 체계가 부족한 실정이다.

연평균 기상조건을 기반으로 피해영향범위를 산정하여 사업장 밖으로 피해규모 확산될 가능성이 있는 경우에 한정하여 사전에 근로자 및 지역주민에게 취급물질, 유해성 등 해당물질정보 및 위험범위, 대피장소 등에 대해 주민고지를 실시하고 있지만 실제 누출량, 기상조건 등에 따라 달라질 수 있기 때문에 이러한 사항들은 지속적인 화학물질 사고예방 훈련을 통해 관계자들이 참여를 통해 현실에 맞게 개선이 필요한 부분이다.

특히, 대피인원이 많은 경우 지자체 및 유관기관의 협력체계가 무엇보다 중요한데 이러한 부분도 다소 미흡한 실정이다. 유독물질 인허가 등 관리업무가 2015년 1월 1일부터 지자체에서 환경부로 이관되면서 유독물질에 대한 사고예방 및 대응기능에 대한 지자체의 기능과 역할 그리고 유관기관들과의 협력체계가 약화되어 있는 실정이다.

화학사고 발생 시 관할지역 주민에게 사고관련 정보를 신속히 제공하고 필요시 주민대피를 실시해야 하는 의무가 지방자치단체장에게 있기 때문에 해당지역에서 발생할 수 있는 화학사고에 대한 관리체계 및 전담인력 배치, 대응훈련 등이 필요하지만 현실은 그렇지 못한 실정이다.

최근 이러한 환경 속에서 전국 17개 광역자치단체와 223개 기초자치단체 중 14곳(광역자치단체 7곳, 기초자치단체 7곳)에서 화학물질 안전관리를 위한 조례를 제정하였다. 조례의 주요사항들은 화학물질 안전관리계획, 화학물질 현황조사 및 정보공개, 화학사고관리위원회 설치, 지역사회

정부·지자체·산업계·지역주민 참여 협의체 구성, 화학사고 주민고지 등이 있다. 이를 통해 화학물질의 체계적인 관리와 지역 주민건강 및 환경을 보호하고 지역 주민의 알권리를 개선함과 동시에 중앙정부 중심의 화학사고 예방 및 대응체계에서 지방정부차원의 예방·대응체계가 마련되어 상호협력 및 민관 협력체계를 강화할 수 있는 계기가 마련되었다(Table 3).

Table 3. Chemical Accidents for 3 Years (Ministry of Environment, 2016)

Province	Enacted date
Gyeonggi	2013.03
Chungbuk	2014.12
Incheon	2015.05
Chungnam	2015.05
Chungbuk	2015.10
Busan	2015.11
Gwangju	2016.02
Gunsan	2015.11
Yangsan	2015.12
Suwon	2016.03
Gwangsan	2016.07
Pyeongtaek	2016.09
Yeosu	2016.09
Yeongju	2016.10

3. 사고 시나리오 선정

최근 4년간 발생한 화학사고에 대한 연도별 사고 물질을 분석해보면 2014년은 암모니아 13건, 염산 12건, 질산이

10건 발생하였으며, 2015년은 질산 7건, 암모니아 6건, 톨루엔 5건 2016년은 염산 8건, 황산 7건, 질산 7건 그리고 2017년 7월 현재 염산 13건, 암모니아 5건, 황산 4건 순으로 발생하였다. 전반적으로 암모니아, 질산, 염산, 황산 물질이 주로 발생하고 사고로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 발생빈도가 높고 위험성이 큰 암모니아를 대상 물질로 선정하였다 (Table 4).

3.1 암모니아 누출 사고현황

암모니아 누출사고는 매년 지속적으로 발생하고 있다, 최근에 발생한 10건의 암모니아 유·누출 사고 원인을 분석해보면, 주로 냉동기 압력상승 및 노후 배관, 탈질공정 기화기 후단의 안전밸브 작동 시 대기방지시설의 설비 결함으로 인한 대기방출 등의 사고가 발생했다(Table 5).

Table 4. Major Chemical Accident Substances for 4years

(Number of accidents)

Ranking	Year			
	2014	2015	2016	2017
1	Ammonia (13)	Nitric acid (7)	Hydrochloric acid (8)	Hydrochloric acid (13)
2	Hydrochloric acid (12)	Ammonia (6)	Sulfuric acid (7)	Ammonia (5)
3	Nitric acid (10)	Toluene(5)	Nitric acid (7)	Sulfuric acid (4)
4	Sulfuric acid (8)	Hydrochloric acid (4)	Ammonia (7)	Sodium hypochlorite (4)
5	Hydrogen fluoride (3)	Formaldehyde(4)	Formaldehyde (3)	Chlorine(4)
6	Sodium hydroxide (3)	Sodium hydroxide (3)	Toluene(2)	Hydrogen (2)

※ Source: csc.me.go.kr

Table 5. Resent Ammonia Accidents List

Date	Region	Accident Substance
'17.8.17	Damyang, Jeonnam	Ammonia
'17.7.17	Siheung, Gyeonggi	Aqueous Ammonia (28%)
'17.3.20	Jeju	Ammonia
'17.3.02	Anseong, Gyeonggi	Ammonia
'17.02.14	Gwangsan, Gwangju	Ammonia
'16.11.05	Osan, Gyeonggi	Ammonia
'16.08.22	Taeon, Chungnam	Ammonia
'16.08.09	Sasang, Pusan	Ammonia
'16.07.15	Osan, Gyeonggi	Ammonia
'16.07.13	Saha, Pusan	Ammonia

※ Source: csc.me.go.kr

Table 6. Chemical Datasheet of Ammonia (Anhydrous)

Chemical Name	Ammonia
Chemical Formula	NH ₃
CAS Number	7664-41-7
Molecular Weight	17.03 g/mol
Lower Explosive Limit (LEL)	16 % (U.S. EPA, 1998)
Upper Explosive Limit (UEL)	25 % (U.S. EPA, 1998)
Vapor Pressure	400 mm Hg at -49.72 ° F (U.S. EPA, 1998)
Boiling Point:	-28.03 ° F at 760 mm Hg (U.S. EPA, 1998)

3.2 암모니아 물질 특성

암모니아는 상온에서 기체 상태로 개방된 공간에서 누출될 경우 공기보다 가벼워 빠르게 확산되며 독성가스이면서 폭발가능성이 있는 물질이다. NFPA Code에 의하면 건강 3, 화재 1, 반응 0의 값을 갖고 있다(Table 6, Fig. 3).

Diamond	Hazard	Value	Description
	Health	3	Can cause serious or permanent injury.
	Flammability	1	Must be preheated before ignition can occur.
	Instability	0	Normally stable, even under fire conditions.
	Special		

Fig. 3. NFPA(National Fire Protection Association) 704 for Ammonia(Anhydrous)

3.3 독성 영향 기준

화학물질 사고로 인한 유·누출 시 적용할 수 있는 독성영향기준으로 ERPG (AIHA, US), AEGL (EPA, US), TEEL (DOE, US), IDLH (NIOSH, US), EEI (ECETOC, EU), DTL (HSE, UK)이 있으며 본 연구에서는 일반적으로 지역사회의 비상대응 및 사고 예방의 적절성을 평가하기 위해 많이 사용하고 있으며 ALOHA에 적용되고 있는 ERPG 기준을 적용하였다. ERPG (Emergency Response Planning Guidel)는 미국 산업위생학회에서 정한 화학물질 누출로 인한 지역사회의 사고대응에 대한 가이드라인으로 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3로 구분되는데 그 정의는 다음과 같다(Yoon, 2016).

- ① ERPG-1: 아주 가벼운 가역적 증상 이상을 겪지 않거나 심한 냄새를 인지하지 않고 노출될 수 있는 1시간의 최고 농도
- ② ERPG-2: 자기 구조능력을 손상시킬 만한 비가역적 또는 심각한 건강손상이나 증상을 경험하지 않고 노출될 수 있는 1시간의 최고 농도
- ③ ERPG-3: 생명에 위협을 주는 건강손상을 겪지 않고 노출될 수 있는 1시간의 최고 농도

암모니아에 대한 급성독성 노출기준은 각각 1500 ppm, 150 ppm, 25 ppm (ERPG-3, ERPG-2, ERPG-1)이다.

4. 누출 시나리오 및 피해영향 결과

4.1 누출 시나리오 및 기상조건

암모니아에 따른 피해 영향 범위와 사고지점으로부터 특정위치까지의 시간에 따른 실내·외 오염농도 수준을 분석하기 위해서 미국 EPA의 범용 프로그램인 ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres, Ver5.4.6)를 사용하였으며 건물유형은 ALOHA에서 기본적으로 제공하는 유형 중 Single storied building(air change is 0.25 per hour)을 적용하였다.

2017년 10월 전북 김제시 OO공장에서 암모니아 가스 30 kg이 누출되는 사고가 발생하였다(Jeollailbo, 2017). 다행

히 인명피해이나 농작물 피해는 없었지만 실제 발생사고 규모의 가능성을 고려하여 본 연구의 시나리오로 선정하였다.

따라서 암모니아 저장용기에서 1.0 (kg/ min)으로 설정하여 30분간 총 30 kg이 누출되는 사고 시나리오를 선정하며 기상조건은 Table 7과 같이 풍속은 2.0 m/s로 하고 대기안정도는 D, 대기온도는 20℃, 구름 50%, 대기습도 50%를 적용하였다(Table 7).

암모니아는 공기보다 가벼운 가스로 ALOHA의 Gaussian Plume모형을 적용하였으며 누출량은 시간당 연속적으로 발생하는 연속누출을 가정하였으며 누출율 또한 이들 누출 시간 동안 변하지 않는다고 가정하였다.

Table 7. Weather Conditions for the Scenario

Wind speed	2.0 m/s
Cloud Cover	50%
Air Temperature	20℃
Stability Class	D

4.2 피해영향 평가 결과

누출 시나리오에 따른 피해영향 범위는 최대 214 m (ERPG-1), 관심농도인 ERPG-2 끝점은 83 m이며 ERPG-3 값은 26m까지 확산되었다. 관심농도인 150 ppm을 기준으로 누출지점으로부터 10 m, 20 m, 25 m, 28 m, 30 m 떨어진 지점에서의 실내 오염농도와 각각의 위치에서의 실내·외 최대 오염농도 값을 산출하였다. 근거리 일수록 빠르게 실내 오염이 진행되는 것을 확인할 수 있으며 특히, 누출지점으로부터 10 m 지점의 경우 ERPG-2값의 150 ppm을 초과하는데 불과 4분밖에 걸리지 않는 것을 알 수 있었다. 최대농도는 실내의 경우 1,160 ppm 실외의 경우 9,910 ppm까지 나타났으며 30 m 떨어진 지점에서는 실내 최대농도가 131 ppm으로 ERPG-2값 이하로 유지되고 있음을 알 수 있다 (Table 8, Fig. 4). 또한 Fig. 4(f)처럼 ALOHA의 피해영향범위를 Google Earth와 연동하여 해당위치에서 주변 환경을 함께 확인할 수 있도록 표출하였다.

Table 8. Result of Indoor and Outdoor Concentration Each Downwind Site

Downwind (m)	Time (min)		Max Concentration (ppm)	
	Indoor Concentration		Indoor	Outdoor
	Under 150 ppm	Over 150 ppm		
10	4	5-60	1,160	9,910
20	15	16-60	293	2,500
25	23	24-60	189	1,600
28	28	29-43	151	1,280
30	60	-	131	1,120

(a) 10m Downwind Result

(b) 20m Downwind Result

(c) 25m Downwind Result

(d) 28m Downwind Result

(e) 30m Downwind Result

(f) ALOHA Result with Google Earth

Fig. 4. Result of Indoor and Outdoor Concentration with ALOHA

4.3 암모니아 누출에 따른 비상행동계획 제시

암모니아 누출로 인한 피해영향범위평가 결과분석을 통해 누출 지점별 비상행동계획(Emergency Action Plan)을 마련하였다(Table 9).

① 원점으로부터 10 m 떨어진 지점: 실내농도가 관심농도(150 ppm, ERPG-2값) 미만의 수준은 4분 이내이며, 이후 실내·실외 농도는 150 ppm 이상 지속된다. 따라서 4분까지는 실내대피가 가능하며 이후에는 2차 구조작업이 필요하다.

② 원점으로부터 25 m 떨어진 지점: 실내농도가 관심농도(150 ppm, ERPG-2값) 미만의 경우 23분 이내이며, 이후 실내·실외 농도는 150 ppm 이상 지속된다. 따라서 23분까지는 실내대피가 가능하며 이후에는 2차 구조작업이

필요하다.

③ 원점으로부터 30 m 떨어진 지점: 60분 동안 실내농도가 관심농도(150 ppm, ERPG-2값) 미만이며, 최고 농도가 131 ppm으로 실외 소산보다는 실내 대피가 우선 요구된다.

이러한 체계를 활용하여 화학물질 유·누출 사고를 위한 비상대응계획 수립 시 근로자 및 주민소산계획 측면에서 확실적인 실외소산 보다는 실내·외 확산평가를 실시하여 효율적인 방법을 선택할 수 있으며, 실내대피의 경우 어느 시점에 관심농도 이상 되는지 지속적으로 머물러도 되는지 혹은 일정시간 이전에 실외로 벗어나야 하는지 등 구체적인 정량적 결과를 산출하여 대피 계획을 마련하는 것이 보다 효율적이며 중요할 것으로 판단된다.

Table 9. Emergency Action for Each Downwind Site

Downwind (m)	Time (min)		Max Concentration (ppm)		Emergency Action Plan
	Indoor Concentration		Indoor	Outdoor	
	Under 150 ppm	Over 150 ppm			
10	4	5-60	1,160	9,910	1st: Stay Indoor until 4 min 2nd: Need to rescue
20	15	16-60	293	2,500	1st: Stay Indoor until 15 min 2nd: Need to rescue
25	23	24-60	189	1,600	1st: Stay Indoor until 23 min 2nd: Need to rescue
28	28	29-43	151	1,280	1st: Stay Indoor until 28 min 2nd: Need to rescue
30	60	-	131	1,120	1st: Stay Indoors

5. 결 론

본 연구에서는 미국 환경보건청(EPA)에서 개발하여 무료로 배포하고 있는 ALOHA (Version 5.4.6) 프로그램을 활용하여 최근에 많은 사고가 발생하고 있는 암모니아 가스에 대해 사고시나리오를 작성하여 실내·외 피해확산 범위를 평가하였다. 또한, 비상대응계획 중 근로자 및 인근 주민 소산계획을 효율적으로 수립할 수 있는 실·내외 소산계획을 제시하였다.

암모니아 30 kg 누출사고에 대한 확산평가를 통해 실내대피 또는 실외소산을 위한 비상대응계획을 다음과 같이 수립할 수 있었다. 암모니아 누출 시 ① 원점으로부터 10 m 떨어진 지점에서는 실내농도가 관심농도(150 ppm) 수준의 경우 4분 이내로 이후 실내·실외 농도는 150 ppm 이상 지속된다. 따라서 4분까지 실내대피가 가능하다. ② 원점으로부터 25 m 떨어진 지점에서는 실내농도가 관심농도(150 ppm) 미만 수준인 23분 이내이며 이후 실내·실외 농도는 150 ppm 이상 지속된다. 실내의 경우 최대 189 ppm이며 실외의 경우 최대 1,280 ppm을 기록한다. 따라서 23분까지는 실내대피가 가능하며 이후에는 구조작업이 필요하다. ③ 원점으로부터 30 m 떨어진 지점의 경우 60분 동안 실내농도가 관심농도(150 ppm) 미만 수준으로 최대 농도가 131 ppm으로 30 m 이상 떨어진 지점부터는 실외소산보다는 실내대피만으로 비상대응계획을 수립할 수 있다.

이러한 결과를 활용하여 화학물질 유·누출 사고를 위한 비상대응계획 수립 시 근로자 및 주민소산계획 측면에서 현재의 확실적인 실외소산 계획을 수립하는 것보다 실내·외 정량적 확산평가를 실시하여 누출시간에 따른 주변 환경조건을 고려하여 효율적인 방법을 마련하는 것이 보다 중요할 것으로 판단된다. 화학물질 유·누출 시 사고지점으로부터 떨어진 특정지점에서의 최초 독성가스 도달시간, 건물 내부의 시간별 오염농도 수준 등을 빠르게 확인하여 적용하는 것이 중요하다.

실제 암모니아를 취급하는 사업장 중 사용량이 30 kg 정도 되는 사업장은 해당 결과를 적용·활용할 수 있을 것으로 판단되며, 사용량 또는 건물 형태 및 위치에 따라 해당 연구결과 및 방법을 적용하면 기존의 획일적 실외대피 중심의 비상대응계획 및 소산계획을 현장 조건에 맞춰 변경할 수 있을 것이다.

또한, 환경부 화학물질안전원에서 무료로 배포하고 있는 장외영향평가서·위해관리계획서 작성지원 프로그램(KORA)에서도 이러한 기능을 구현할 수 있도록 기능을 추가한다면 현재 KORA를 활용하고 있는 국내의 많은 화학물질 취급 사업장에서 보다 과학적이고 체계적인 비상대응계획을 수립하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

외국의 경우 화학물질 유·누출에 따른 독성가스 노출을 방지하기 위하여 실내대피 및 실외소산 계획에 대해 많은 연구가 진행되고 있는 반면에 국내에서는 해당 분야에 대한 연구가 상당히 부족한 실정이다. 향후 보다 많은 관심과 연구를 통해 화학사고 피해예방 및 대응을 통해 선제적 화학사고 대응체계 마련이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Brown, M.J. (1998) *Emergency Responders' "Rules-of-Thumb" for Air Toxics Releases in Urban Environments*. Los Alamos National Laboratories Report LA-UR-98-4539.
- Glickman, T.S., and Ujihara, A.M. (1990) Deciding Between In-place Protection and Evacuation in Toxic Vapor Cloud Emergencies. *Journal of Hazardous Materials*, Vol 23, pp. 57-72.
- Jeollailbo (Oct.25, 2017) from <http://www.jeollailbo.com/news/articleView.html?idxno=523210>
- Jo, Y.D., and Park, K.D. (2016) Emergency Response Plane of Toxic Gas Releases with Considering Ventilation

- Ratio and Meteorological Conditions. International Journal of Safety and Security Engineers, Vol. 6, No. 2, pp. 229-237.
- Metropolitan Fire and Emergency Services Board of Australia (2011) *A Best Practice Approach to Shelter-in-Place for Victoria*.
- Ministry of Environment (2016) *Pilot Project for Establishing Local Emergency Response System for Chemical Accidents*.
- Montoya, M.I. (2010) *Contribution to the Assessment of Shelter in Place Effectiveness as a Community Protection Measure in the Event of a Toxic Gas Release*. Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya.
- NICS (2015) *Guideline for Establishment Public Evacuation Plan*.
- NICS (2005) *Effectiveness of Shelter-In-Place: Examples from Across the Country*.
- NICS Retrieved from http://icis.me.go.kr/rmp_notice/
- NICS Retrieved from <http://csc.me.go.kr/>
- NOAA Retrieved (Oct.27, 2017) from <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/4860>
- U.S. DHS (U.S. Department of Homeland Security) (2006) *Shelter-in- Place Protective Action Guide*.
- U.S EPA (1998) *Risk Management Process Guidance for Off-site Consequence Analysis: Appendix D Technical Background*.
- Yoo, B.T. (2016) *Development of a Support System for Evacuation Plans for Toxic Gas Leakage and Dispersion from Chemical Plants*, Ph.D. dissertation, Kwangwoon University.
- Yoon, C.S. (2016) *Hazardous Emergency (Leakage, Accident) Guideline*. Korean Industrial Health Association, July, pp. 22-31.

Received	November 7, 2017
Revised	November 10, 2017
Accepted	December 6, 2017