

[Research Paper]

## 화학공장의 염소 누출에 의한 피해 영향 모델링

정경삼 · 백은선<sup>\*†</sup>

GS 칼텍스(주), \*동신대학교 소방학과

### Damage Effects Modeling by Chlorine Leaks of Chemical Plants

Gyeong-Sam Jeong · Eun-Sun Baik<sup>\*†</sup>

GS Caltex Corporation, \*Depart. of Fire Science, Dongshin University

(Received February 21, 2018; Revised March 19, 2018; Accepted April 11, 2018)

#### 요 약

본 연구는 화학공장에서 원료 및 중간재로 많이 사용되는 Heavy Gas인 염소를 화학설비의 가압 염소포화액체 저장탱크에서 2상 흐름 연속누출에 대한 유해위험거리를 정량적으로 예측하기 위한 피해영향 모델링이다. 피해예측을 위한 평가방법과 사고영향평가모델들을 기준으로 액체염소 저장용기의 누출사고에서 사고결과에 미치는 최적의 변수를 나타내기 위해 조업조건을 표준조건으로 하였다. 장외영향평가의 위험성 평가에 사용되는 것으로 USEPA와 NOAA에서 공동 개발된 대기확산 모델인 ALOHA (V5.4.4) 모델을 사용하였다. 화학물질을 대량으로 제조 및 취급하고 있는 여수 국가산업단지를 연구 대상지역으로하여, 기상변수와 공정변수들을 설정하여 시나리오별로 모델링을 하여 누출사고에 대한 특성을 도출하였다. 가우시안 확산모델에 따른 관심지점의 농도 추정치를 산출하였고, ALOHA 모델링 결과 염소 확산에 의한 유해위험거리는 대기온도가 높고 풍속의 감소와 대기 안정도가 안정할수록 증가 하는 것으로 분석되었다.

#### ABSTRACT

This study describes the damage effects modeling for a quantitative prediction about the hazardous distances from pressurized chlorine saturated liquid tank, which has two-phase leakage. The heavy gas, chlorine is an accidental substance that is used as a raw material and intermediate in chemical plants. Based on the evaluation method for damage prediction and accident effects assessment models, the operating conditions were set as the standard conditions to reveal the optimal variables on an accident due to the leakage of a liquid chlorine storage vessel. A model of the atmospheric diffusion model, ALOHA (V5.4.4) developed by USEPA and NOAA, which is used for a risk assessment of Off-site Risk Assessment (ORA), was used. The Yeosu National Industrial Complex is designated as a model site, which manufactures and handles large quantities of chemical substances. Weather-related variables and process variables for each scenario need to be modelled to derive the characteristics of leakage accidents. The estimated levels of concern (LOC) were calculated based on the Gaussian diffusion model. As a result of ALOHA modeling, the hazardous distance due to chlorine diffusion increased with increasing air temperature and the wind speed decreased and the atmospheric stability was stabilized.

**Keywords :** Chlorine, ALOHA, Modeling, Off-site risk assessment (ORA)

### 1. 서 론

2012년 경북 구미의 불화수소 누출사고를 전환점으로 화학물질관리법 등 관련법이 강화되어 시행되고 있지만, 화학사고는 끊이지 않고 발생되어 이에 따른 화학물질 취급 및 사용에 대한 안전관리가 사회적 이슈로 대두되고 있다. 일반적으로 화학공장에서 발생하는 화학사고는 설비의

노후결합, 파손 등에 의하여 누출되며, 독성가스인 염소 (Chlorine)가스의 누출은 비가연성으로 화재, 폭발에 따른 누출위험이 없지만, 풍하방향에 따라 확산 피해범위가 달라져 누출원으로부터 풍하방향 인근 사업장 근로자 및 주민에게 누출될 경우에는 단시간내에 허용한계 이상의 흡입 및 피부 접촉으로 폐 이상, 사망 이외에 호흡기도 화상, 눈 화상, 피부 자극 등 인체에 큰 유해위험성을 가지고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [bes7009@hanmail.net](mailto:bes7009@hanmail.net), TEL: +82-61-330-3561, FAX: +82-61-330-3569

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

본 연구에서는 화학공장이 밀집되어 있는 산업단지 등에서 발생할 수 있는 화학물질 누출사고 중 인체에 치명적인 액체염소 누출에 대한 피해 영향을 분석하였다. 각 업체에서 취급되고 있는 액체염소 사용 시설에 대해 발생 가능한 사고 시나리오를 저장 조건, 미국 EPA의 모델 사용 지침<sup>(1)</sup>과 KOSHA Guide<sup>(2,3)</sup>, 사고시나리오 선정에 관한 기술지침<sup>(4)</sup> 등을 참고하여 누출사고 시나리오를 선정하였다. 피해영향 평가 결과로 누출사고 발생시 심각한 영향을 야기할 수 있는 풍하거리에 따른 유해 위험거리를 ALOHA 모델링을 통하여 유해가스 농도를 확인·분석하고, 그에 따른 사고발생 경로와 사고발생 확률을 예측하였다.

## 2. 염소(Cl<sub>2</sub>)의 선정배경 및 특성

### 2.1 염소(Cl<sub>2</sub>)의 선정 배경

본 연구에서 염소(Chlorine)를 선정한 배경은 누출사고의 주요 사고원인 물질로서 최근 국내·외에서 사고대비 물질 중 취급량(제조, 사용)이 많으며<sup>(5,6)</sup>, 미국의 EPA에 보고된 사고 원인물질에서도 Figure 1에서와 같이 암모니아(34%), 염소(12%), 불산(4%)이 상위 3개 물질로 보고되어 있다. 염소는 산업안전보건법 제49조의 2 공정안전보고서 대상물질에 포함되어 1일 최대로 규정수량 20,000 kg 이상을 제조·저장·취급하는 사업장은 공정안전보고서(공정안전자료, 공정위험성평가, 안전운전계획, 비상조치계획)를 제출해야 하며, 화학물질관리법에서는 사고대비물질을 지정수량 이상 취급하는 자는 위해관리계획서를 5년마다 작성하여 제출해야 한다. 유해화학물질 카테고리별 관리규정인 공정안전보고서, 안전성향상계획, 예방규정 대상의 경우 중복 항목에 대해서는 사본을 제출하면 된다. 현재 고압가스안전

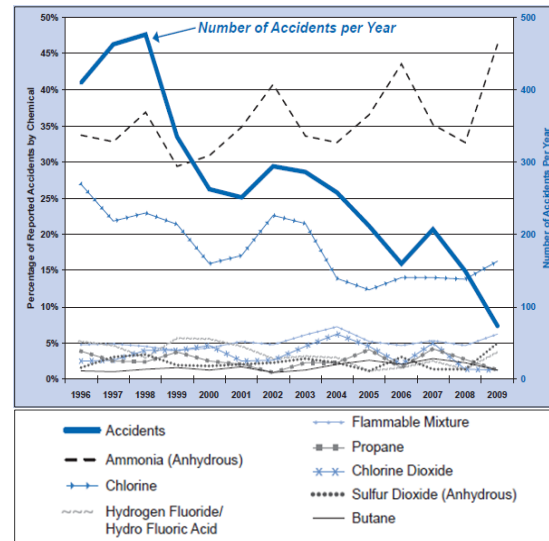


Figure 1. Accident rate by cause of substance reported to RMP<sup>(8)</sup>.

관리법의 독성가스는 약 40여종이며, 2016년 가스통계에 의한 국내의 일반 독성가스 시설 중 염소를 제조하거나 사용하는 시설(판매 제외)은 438 개소에 달한다<sup>(7)</sup>.

### 2.2 염소의 물리적 특성 및 독성

염소(Cl<sub>2</sub>)는 공기에 비해 약 2.5배 무거운 가스로 누설이 되면 바닥에 체류하게 된다<sup>(9)</sup>. 상온·상압하에서 기체로 황록색을 나타내며 자극성냄새가 있는 독성 가스로 인체에 대해서 극히 유해한 가스로 용기는 옥외 또는 환기가 잘 되는 곳에 단단히 밀폐하여 저장하는 등 MSDS에 있는 주의사항을 충분히 이해하여 취급하지 않으면 안 된다. 물리적 특성은 Table 1, 인체에 대한 독성은 Table 2와 같다.

Table 1. Physical Properties of Chlorine<sup>(10,11)</sup> (CAS NO.7782-50-5)

Material	Molecular Formula	Molecular Weight	Specific Gravity	vapor Pressure	TLV-TWA	IDLH	Boiling Point
Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.91	1.424 @ 15 °C	5,830 mmHg @ 25 °C	0.5 ppm	10 ppm	-34.03 °C

Table 2. Human Influence on Chlorine Exposure Limits<sup>(11)</sup>

(Unit : ppm)

Atmospheric Exposure Levels	Degree of Influence on the Human Body
0.2 - 0.4	Nose Odor, Odor Limit (Odor Generation Recognition Decreases over Time)
1 - 3	Mild Mucosal Irritation, Allow up to 1 Hour
5 - 15	Slight Irritation to the Upper Respiratory Tract (Throat)
30	Acute Chest Pain, Vomiting, Difficulty Breathing, Coughing
40 - 60	Loss of Consciousness During Breathing, Life Risk after 30-60 min, Toxic Pneumonia and Pulmonary Edema
430	Death Within 30 min
1000	Death Within Few min

### 3. 누출 모델링 수행 및 피해예측

#### 3.1 모델의 선정

염소가스 누출사고 발생시 Heavy Gas 누출모델링이 가능한 프로그램으로 미국 EPA 및 NOAA에서 개발한 ALOHA (V5.4.4) 모델을 사용하였다. 유해독성물질의 누출에 대한 분산모델링에서 첫 단계인 누출원 모델링은 누출원에서 유해독성물질의 대기중으로 누출되는 누출속도를 평가하며, 누출물의 상태(기상, 액상, 2상) 및 조건(온도, 압력), 누출물의 물리·화학적 특성, 지형 및 기상조건에 따라 다양하게 수행될 수 있다<sup>(12)</sup>. 유해독성물질인 염소증기가 수평실린더형 저장탱크(horizontal cylindrical tank)로부터 2상 흐름(two-phase flow)으로 연속누출(최악의 사고 시나리오) 및 순간누출(대안의 사고 시나리오)되는 경우의 모델링을 수행하였다.

#### 3.2 확산모델 피해예측

##### 3.2.1 가우시안 모델(Gaussian Model)에 의한 확산이론<sup>(13,14)</sup>

대기에 배출된 오염물질은 바람, 난류확산, 반응 등에 의해 확산이 이루어지는데 이때 어느 한 지점(X,Y,Z)에서의 시간에 따른 농도 변화율은 (1) 식으로 표현하며 가우시안 플럼 모델의 적용 시에는 전제 조건이 필요하다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} - V \frac{\partial C}{\partial y} - W \frac{\partial C}{\partial z} + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - KC \quad (1)$$

여기서,  $C$  : 농도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $U, V, W$  : X, Y, Z 방향의 풍속(m/s)  
 $E_x, E_y, E_z$  : X, Y, Z 방향의 확산계수(m<sup>2</sup>/s)  
 $K$  : 반응속도계수(1/s)

가우스 확산모델 방정식에서는 지상 Hr높이의 누출원과 일정속도 U로 X방향으로 바람이 이동하는 플럼은 누출원을 점원으로 가정하고 지표의 반사를 고려하면 (2) 식으로 표시된다.

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H_r)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H_r)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2)$$

지상의 농도를 계산하기 위하여 z = 0으로 놓을 때 (3) 식으로 정리된다.

$$C(x,y,0) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{H_r^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (3)$$

여기서,  $C$  : 지상농도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $Q$  : 누출원 누출량(kg/s)  
 $y, z$  : Y, Z 방향의 누출원 농도분포에 대한 표준편차(m)  
 $U$  : 누출원 배출지점의 고도 H에서의 풍속(m/s)  
 $H_r$  : 오염물질 배출지점의 높이(m)  
 $X, Y, Z$  : 누출지점으로부터 X, Y, Z 방향의 거리

x축에 대한 최대의 지상농도 <C>max는 (4) 식과 같다.

$$\langle C \rangle_{\max} = \frac{2Qm}{\epsilon\pi U H r^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right) \quad (4)$$

여기서,  $C$  : 지상농도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $Qm$  : 일정한 지점의 물질 누출량(kg/s)  
 $u$  : 누출원 배출지점의 고도 H에서의 풍속(m/s)  
 $Hr$  : 오염물질 배출지점의 높이(m)

지상농도가 최대로 되는 풍하거리는 (5) 식에 의하여 구해진다.

$$\sigma_z = \frac{H_r}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

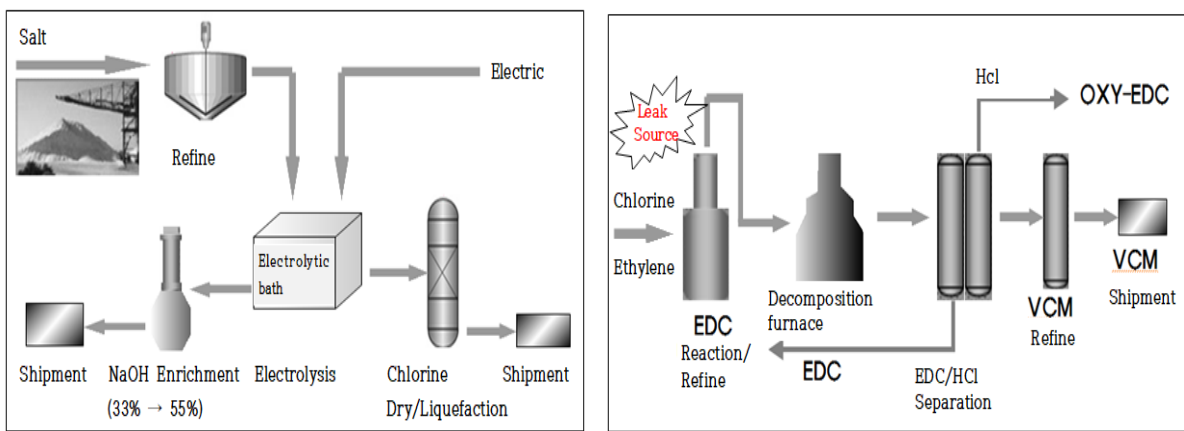
##### 3.2.2 피해예측(Effect Modeling)

피해영향 범위한 화학사고로 인해 유해화학물질이 화재·폭발 또는 유출·누출되어 사고지점으로부터 사람이나 환경에 영향을 미칠 수 있는 구역을 말하며, 끝점은 사람이나 환경에 영향을 미칠 수 있는 독성농도, 과압, 복사열 등의 수치에 도달하는 지점을 말한다. 염소의 경우는 끝점농도 ERPG<sup>a)</sup>-2 (3 ppm, 8.7 mg/m<sup>3</sup>)에 도달하는 지점을 끝점으로 한다. 본 연구에서는 누출원으로 부터 누출사고 발생인 후 비상조치 계획 등에 의한 대피 조치에 필요한 시간은 허용노출기준인 ERPG를 기준하여 1시간 이내는 가능하다고 판단되어 노출 최소화를 위하여 Guide Line을 30분 이내는 위험지역에서 벗어나야 하는 IDLH<sup>b)</sup>를 기준으로 하였다. IDLH를 기준한 것은 인체에 영향을 미치는 농도(10 ppm)로 노출 즉시 30분 이내에 대피하여 ERPG-2의 경계지역 외부의 안전한 시설로 대피하여 비가역적인 건강 피해에서 벗어날 수 있기 때문이다. 대피지역은 끝점농도(ERPG-2)에 해당하는 유해위험지점 경계선 밖으로 1시간 이상 노출되지 않도록 인접주민을 최대한 빨리 안전한 대피장소로 대피토록 유도 하는 것으로 선정 하였다. 독성물질의 유해성은 계산 과정이 부정확하고, 각 개인별 특성에 따라 상이한 결과를 가져오기 때문에 정확한 피해정도를 계산하기가 어렵다<sup>(15)</sup>. 따라서 독성기준은 동물실험 결과를 바탕으로 폭로시간에 따라 사람에게 적용하며 가스상 물질은 ppm, 입자상 물질은 mg/m<sup>3</sup>으로 허용농도를 나타낸다.

- a) Emergency Response Planning Guideline for Air Containments (ERPG)  
 : 비상대응 계획 시 1시간 동안 노출될 수 있는 수준으로 ERPG-1/2/3가 설정됨
- b) Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH)  
 : 자기구조능력을 약화시키거나 비가역적인 건강상의 영향 없이 30분 이내에 사람이 노출될 수 있는 기준

**Table 3.** Average Meteorological in Yeosu in 2016

Element \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	12
Average Temperature (0.1 °C)	25	43	90	145	189	219	253	277	230	183	114	64
Highest Temperature (0.1 °C)	142	159	183	248	292	290	329	344	292	267	202	186
Minimum Temperature (0.1 °C)	-89	-41	-39	87	114	166	206	177	172	84	16	-29
Relative Humidity (%)	51	46	57	63	60	76	82	67	74	66	55	52
Average Wind Speed (0.1 m/s)	49	49	36	35	30	28	28	34	42	44	43	47
Synthetic Wind Direction	NNW	NNW	NNW	ESE	SW	SSE	SSW	E	E	ENE	NNE	NNW
Average Cloudiness (1/10)	48	40	45	60	54	72	62	27	68	68	38	36



**Figure 2.** Chlorine Production Process and Chlorine Injection Diagram of VCM Process.

### 4. 누출사고 분석 조건

#### 4.1 최악의 사고시나리오 선정

화학물질관리법 제23조, 동법 시행규칙 제19조에는 장외 영향평가서의 작성 제출 및 검토 등에 필요한 사항을 위해 장외영향평가서 작성 등에 관한 규정을 두고 있다. 이 규정에서 사고시나리오란 화재, 폭발 및 유출, 누출 사고로 인한 영향범위가 사업장 외부에 미치지거나 사업장 외부까지 영향은 미치지 않으나 근로자에게 심각한 영향을 줄 수 있는 사고를 말한다. 유해화학물질이 최대로 저장된 단일 저장용기 또는 배관 등에서 화재·폭발 및 유출·누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 사고시나리오를 선정한다.

#### 4.2 대안의 사고시나리오 선정

대안의 사고시나리오는 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향범위가 사업장 밖까지 미치는 경우에 한정하여 단위공장별로 각 독성물질에 대하여 최소 하나 이상, 인화성 물질은 화재·폭발사고를 대표할 수 있는 시나리오를 선정하여야 한다. 또한 해당지역의 최근 1년간 월별 평균 기온, 평균 습도, 주 풍향, 평균 풍속 등의 기상정보와 대기안정도, 지표면의 굴곡도 등을 사용하여

작성하도록 하고 있다.

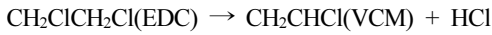
#### 4.3 기상 데이터

대안의 사고 각 시나리오의 대기조건은 기상청 기상연보 자료를 토대로 Table 3과 같이 여수 지역의 평균 기상을 추출하였다<sup>(16)</sup>. 대기안정도는 2011년의 경우 전국 주요도시의 안정도가 전반적으로 불안정조건(A~C등급)은 22.3%였고, 중립조건(D등급)은 45.3%로 가장 높았으며, 안정조건(E, F등급)이 32.4%를 나타내었다<sup>(17)</sup>. 여수의 경우 중립조건(D등급)은 60%를 나타내고 있으며, 본 연구에서도 ‘D’등급을 기준하였다<sup>(18)</sup>.

#### 4.4 누출원 모델링

대상물질은 여수 국가산업단지의 각 업체에서 취급 및 저장되어 있는 사고대비물질 중 염소(Chlorine)를 선정하였으며, 저장 탱크의 노후화 또는 작업중 근로자의 실수로 인한 누출, 주위의 화재나 폭발로 인한 사고발생 등에 의한 누출사고를 원인으로 가정하였다. 염소는 Figure 2와 같이 공업용 소금(NaCl)을 용수로 녹여 소금물을 제조한 후 배관으로 이송되어 전해조에서 전기분해하여 염소(Chlorine), 가성소다(NaOH), 수소(Hydrogen)가 생산된다. Vinyl Chloride

Monomer (VCM) 제조공정에 공급된 염소는 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)과 반응하여 경질물 제거, 수세척 및 수분제거 공정을 통해 ethylene dichloride (EDC)를 생산하고 다시 EDC 열분해공정을 통해 다음의 반응식과 같이 VCM과 HCl로 분해시키는 공정이다.



사고 예상 공정은 VCM 제조 공정이며, 기인물(起因物)은 염소 저장탱크의 연결 배관으로 하였다. 액체염소는 석유화학단지의 화학공정의 기초원료 또는 중간제 등으로 사용된다. VCM 원료로 사용되는 염소는 탱크로리에서 입고하여 15,935 kg 용량의 고압 상온 압력용기에 액상으로 저장되어 있다. 평상시 저장 압력은 8.67 기압이고, 압력용기는 축방향이 수평인 직경 2.0 m, 길이 3.6 m인 원통 모양이다. 염소는 증기압(6.8 기압)으로 인하여 압력용기 하단 밸브에 연결된 길이 1 m, 직경 1인치 관을 통하여 공급부 상단으로 공급된다. 압력용기에 11,385 kg의 염소가 액상으로 보관 중 용기 외벽으로부터 1 m, 지상으로부터 높이 2.5 m 지점에 배관 부식으로 파열되어 누출되는 것으로 가정한다. 액체 염소가 누출되면서 압력이 낮아지기 때문에 액체염소는 관 내부에서 순간적으로 단열 기화된다.

염소의 대기압에서 비점은 -34.03 °C로, 압력이 낮아지면 전체의 염소가 기화되는데 충분한 에너지를 얻을 수 없기 때문에 누출은 2상 흐름이 되고 염소는 완전히 발달된 2상 흐름 상태에서 수평적으로 누출된다.

#### 4.4.1 ALOHA 시뮬레이션 조건

액체염소의 누출 및 확산으로 인한 정교한 해석을 위해 대기온도, 풍속, 대기안정도에 변화에 따른 우려농도기준(Level of Concern, LOC)의 누출 경과시간(누출원으로 부터 관심지점까지 도달하는 시간)을 ALOHA의 Heavy Gas Model을 적용하여 분석하였다.

##### (1) 대기온도

대기온도는 20 °C를 기준하였고, 8월 최고 온도 35 °C와 1월 최저 온도 -9 °C로 비교하였다.

##### (2) 풍속

풍속은 4.0 m/s를 기준하여 3.0 m/s, 5.0 m/s에 대하여 비교하였다.

##### (3) 대기안정도

대기안정도는 D(중립)등급을 기준하였으며, A, B, C, E, F등급과 비교하였다.

#### 4.4.2 기상 조건

누출로 인한 피해를 최악의 상황을 고려하여 확산이 잘

되는 조건으로 하기 위하여 대기안정도를 D(중립)등급으로 하고, Table 3의 여수지역 5월 기상자료를 참고하여 사고 예상시간은 피해가 클 것으로 예상되는 13~14시를 선정하였다. 누출 당시 10 m 높이에서 측정된 기상조건은 풍속 4.0 m/s, 기온 20 °C, 상대습도 60%이며 주변 지역은 공장지역으로 지표면의 상태는 도시조건으로 하였고, 건물유형은 Single stored, 건물주변은 주위에 장애물이 없는 Unsheltered Surroundings을 선택하였다.

### 4.5 사고 피해예측 결과 및 분석

#### 4.5.1 누출량 추정

가압 액체염소의 2상 유체의 누출은 액체가 누출되면서 압력차에 의하여 액체가 증기 상태로 Flash되어 일어난다. 연구 사례의 경우는 2상 유체의 누출로 포화 액체(Saturated liquid)의 경우 평형누출(Equilibrium : 누출되는 지점이 화학설비 외부로부터 0.1 m 이상인 경우)에 해당된다. 포화액체인 경우 2상의 액체-증기의 누출로 (6) 식을 적용하여 누출량을 추정할 수 있다.

$$Q = F \left[ \frac{A \Delta H_V}{\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1}} \right] \left[ \frac{K g_c}{T_1 C_{P_L}} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{L_P}{D} \left[ \frac{A \Delta H_V}{\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1}} \right] \left[ \frac{K g_c}{T_1 C_{P_L}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

여기서,  $F$  : 유량감소계수( $L_P/D=1.0/0.0254 = 39.37$ 일 때 0.93으로 유추함)

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.0254)^2}{4} = 5.06 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (D = 1인치, 25.4 mm)}$$

$\Delta H_V$  (운전온도에서의 증발잠열, 20 °C) : 61.224 kcal/kg

$\rho_G$  (운전온도에서의 증기 밀도) : 21.6 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_L$  (운전온도에서의 액체 밀도) : 1,412 kg/m<sup>3</sup>

$K$  (상수) : 427 m·kgf/kcal

$C_{P_L}$  (평균 액체의 비열) : 0.24 kcal/kg·K

$g_c$  : 9.8 kg·m/kgf·sec<sup>2</sup>

$T_1$  : 20 °C = 293 K

$$Q = 0.93 \times \left[ \frac{(5.06 \times 10^{-4})(61.224)}{(21.6)^{-1} - (1,412)^{-1}} \right] \left[ \frac{427 \times 9.8}{293 \times 0.24} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.93 \times 0.680 \times 7.714 = 4.878 \text{ kg/s}$$

따라서 위의 식을 기준하여 10분간 누출시 총 누출량은 2,927 kg으로 산출되었다.

#### 4.5.2 증발량 추정

누출량 추정 결과 액화염소의 누출량 4.878 kg/s을 기준하여 2상 유체의 누출시에 생성되는 증기의 비율(Flash fraction)은 (7) 식을 적용하여 계산한다.

$$f_v = 1 - e^{-\frac{C_{PL}}{\Delta H_V}(T_1 - T_b)} \quad (7)$$

여기서,  $f_v$  : 생성되는 증기 비율(Flash fraction)

$C_{PL}$  : 액체의 평균 정압 비열(kcal/kg-K, Btu/lb-R), 0.24 kcal/kg-K

$T_b$  : 대기압하에서의 액체의 비점(K, R)

$\Delta H_V$  : 평균 증발 잠열(kcal/kg, Btu/lb), 62.672 kcal/kg

T1(293), Tb(239)에서 얻은 각 값(61.224, 64.12)의 평균 잠열

$$\begin{aligned} \therefore f_v &= 1 - e^{-\frac{0.24 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K}}{62.672 \text{ kcal/kg}}(293 - 239 \text{ K})} \\ &= 1 - e^{-0.20679} = 0.187 \end{aligned}$$

따라서 증발율은  $f_v = 0.187$ 로 누출과정에서 약 18.7%의 염소가 기체로 증발하게 되며, 나머지 81.3%는 에어로졸의 형태로 누출되어져 액화 응덩이가 형성되어 증발 및 분산된다.

#### 4.5.3 확산에 따른 관심지점 농도 추정

연구사례의 기상조건은 풍속 4.0 m/s, 기온 20 °C, 상대습도 60%, 대기안정도 D(중립)등급이며, 용기 외벽으로부터 1 m, 지상으로부터 높이 2.5 m 지점의 배관 부식으로 파열에 따른 풍하 100 m 지점의 관심지점 평균 농도를 추정하였다.

(1) 지상 2.5 m 높이로 가정한 누출원과 4.0 m/s의 풍속, 100 m 방향으로 이동하는 가우스 플럼 방정식인 (3) 식을 적용하면 다음과 같다.

누출량 추정 결과 액화염소의 누출량 4.878 kg/s을 기준하여

$$C(100,0,0) = \frac{4.878 \text{ kg/s}}{(3.14)(4.0 \text{ m/s})(15.7 \text{ m})(13.8 \text{ m})} \exp[-0.5(\frac{2.5 \text{ m}}{13.8 \text{ m}})^2] = 0.001792 \times \exp -0.0164 = 0.00176 \text{ kg/m}^3$$

분산계수를 적용한 도시조건, 대기안정도 D의 계산식을 적용

$$\begin{aligned} \sigma_y &= 0.16x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}} = 0.16(100)[1 + (0.0004)(100)]^{-\frac{1}{2}} = 15.7 \text{ m} \\ \sigma_z &= 0.14x(1 + 0.0003x)^{-\frac{1}{2}} = 0.14(100)[1 + (0.0003)(100)]^{-\frac{1}{2}} = 13.8 \text{ m} \end{aligned}$$

<C>는 0.00176 kg/m<sup>3</sup>를 ppm으로 변환하면

$$\begin{aligned} \langle c \rangle_{ppm} &= \frac{22.4}{M} (\frac{T}{273}) (\frac{1}{P}) (mg/m^3) = 0.08205 (\frac{T}{PM}) (mg/m^3) \text{에서} \\ &= 0.08205 (\frac{293}{71}) [(0.00176)(10^6)] = 596 \end{aligned}$$

(2) 풍하 100 m 지점의 확산방정식에 따른 관심지점 농도 추정치 596 ppm은 염소 끝점농도 ERPG-2(3 ppm, 8.7 mg/m<sup>3</sup>) 기준으로 위험수준의 과도한 노출농도이며 누출원으로 부터 순풍하방향 100 m 지점의 작업자 및 인근 주민에게 폭로될 위험성이 높다.

(3) 바람부는 방향에서의 최대의 지상농도<C>max는 (4) 식을 적용하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle_{\max} &= \frac{2Qm}{\epsilon\pi u H r^2} (\frac{\sigma_z}{\sigma_y}) \\ &= \frac{2 \times 4.878}{2.72 \times 3.14 \times 4.0 \times 2.5^2} \times (\frac{1.77}{2.50}) = 0.0323 \text{ kg/m}^3 \\ &= 10,937 \text{ ppm} \end{aligned}$$

지상농도가 최대로 되는 풍하거리는 다음에 의하여 구해진다.

$$\sigma_z = \frac{H_r}{\sqrt{2}} = \frac{2.5}{\sqrt{2}} = 1.77$$

$$\sigma_y = 0.16x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}} = 0.16(15.7)(1 + 0.0004(15.7))^{-\frac{1}{2}} = 2.50$$

#### 4.5.4 최악의 시나리오 선정 및 분석

사고 예상 공정 운전상황을 기준하여 Table 4의 최악의 사고시나리오 입력 매개변수를 누출원 조건으로 하여 확산에 따른 영향 범위와 최악의 관심거리에 따른 피해범위를 산출 하였다.

(1) 확산에 따른 영향 범위(Model Run: Heavy Gas)

우려농도 기준(Levels of Concern; LOC)의 유해 위험거리로 Figure 3에서와 같이 Red : 3.9 km (20 ppm = ERPG-3), Orange : 5.2 km (10 ppm = IDLH), 염소 끝점 농도로 Yellow : 8.5 km (3 ppm = ERPG-2)를 나타내며, 누출 후 관심거리의 경과시간에 따른 최대 노출농도를 분석해 본 결과 관심거리 1.5 km 지점에서는 28분경과 후, 2.5 km 지점에서는 43분경과 후에 노출영향이 나타나기 시작하여 최대 노출농도 188/50 ppm을 나타내고 있고, 2.5 km 지점의 노출영향은 1시간 이후에 최대 노출농도로 확산되지만 정보가 제공되지 않았다. 누출속도는 최대 누출량이 811 kg/min으로 15분간 진행되었다.

(2) 최악의 관심거리에 따른 피해범위 산출

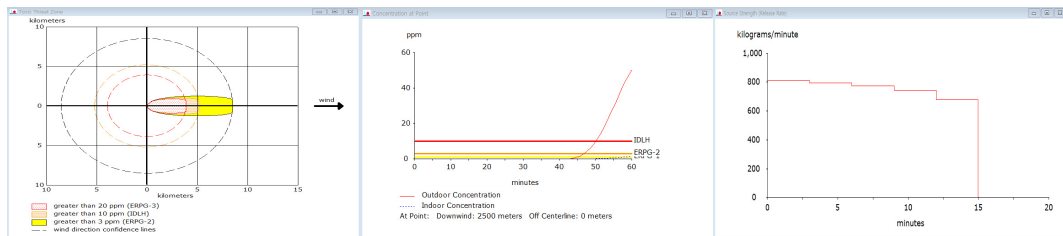
최악의 사고 시나리오의 경우 피해영향으로 관심거리 1.5 km 지점에서 누출 30분 경과 후 최대농도는 188 ppm이며, Probit 결과 4.47로 사망가능성이 30%에 달한다. 이는 IDLH 기준보다 수십 배 농도의 폭로로 인근업체 근로자 및 주변 마을 주민에게 직접적인 인명피해 발생이 예상되므로 위험지역 내에서 벗어나 신속하게 긴급대피를 해야 한다. Figure 4에서와 같이 유해 위험거리인 Red : 3.9 km (20 ppm = ERPG-3), Orange : 5.2 km (10 ppm = IDLH), 염소 끝점 농도 Yellow: 8.5 km (3 ppm = ERPG-2) 모두 노출경과시간이 1시간 이상 지나서 영향범위에 들게되어 위험지역으로 벗어 날 시간을 가지고 있지만, 피해 범위 내에 있는 주민 대피에 보수적인 대응이 필요해 보인다.

#### 4.5.5 대안의 사고시나리오 분석

누출원 모델링 결과와 정교한 해석을 위해 가압 액체염

**Table 4.** Worst Accident Scenarios Input Parameters

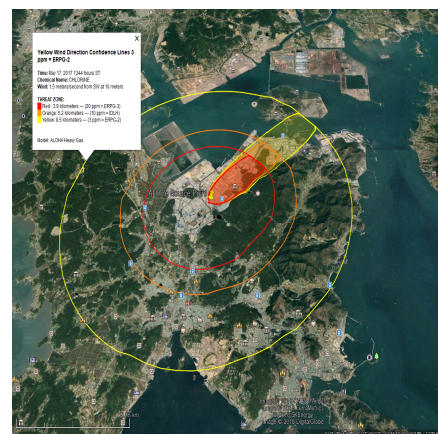
SITE DATA:	
Location: YOSU, SOUTH KOREA	Time: May 17, 2017 1344 hours ST
Building Air Exchanges Per Hour	0.26 (Unsheltered Single Storied)
CHEMICAL DATA:	
Chemical Name: CHLORINE	Molecular Weight: 70.91 g/mol
ERPG-1 (60 min): 1 ppm ERPG-2 (60 min): 3 ppm ERPG-3 (60 min): 20 ppm IDLH: 10 ppm	
Ambient Boiling Point	-34.0 °C
Vapor Pressure at Ambient Temperature	Greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration	1,000,000 ppm or 100.0%
ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)	
Wind	1.5 m/s from SW at 10 m
Ground Roughness	Urban or forest
Cloud Cover	5 tenths
Air Temperature	25 °C
Stability Class	F (user override)
Relative Humidity	50%
SOURCE STRENGTH : Leak from Hole in Horizontal Cylindrical Tank	
Tank Diameter / Length	2.0 / 3.6 meters
Tank Volume	11,310 liters / Tank contains liquid
Opening is 0 Meters from Tank Bottom	
Internal Temperature	25 °C
Chemical Mass in Tank	11,385 kg / Tank is 72% full
Circular Opening Diameter	1.0 inches
Model Run	Heavy Gas



**Figure 3.** Diffusion result of worst case scenario.

소에 사용된 분산모델은 연속누출인 플럼 모델로 고밀도가스인 Heavy Gas를 적용하였다. Table 5의 대안의 사고시나리오 입력 매개변수를 바탕으로 각각 풍속과 대기온도에 따른 염소의 끝점인 ERPG-2 (3 ppm)와 IDLH (10 ppm), ERPG-3 (20 ppm) 기준의 유해위험거리와 농도분포, 대기안정도를 기준한 농도에 대해 분석하였다.

- (1) 풍속 및 대기온도 변화에 따른 결과분석
  - (a) 우려농도기준(LOC, Levels of Concern)의 유해위험거리  
대기안정도 D등급에서 풍속 및 대기온도를 변화시켜 우려농도 기준의 ERPG-2/3, IDLH 해당하는 유해위험거리 및 확산에 미치는 경과시간을 산출하였다.



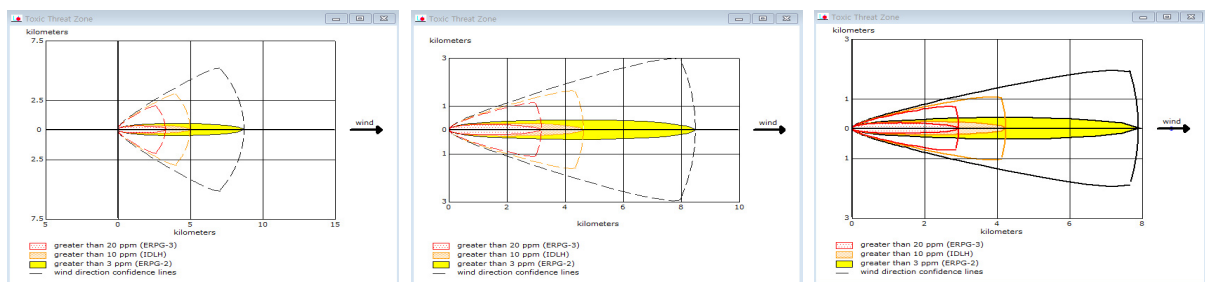
**Figure 4.** Hazard distance according to the worst case scenario.

**Table 5.** Alternative Accident Scenarios Input Parameters

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)	
Wind	4.0 (3.0, 5.0) m/s from SW at 10 m
Ground Roughness	Urban or Forest
Cloud Cover	5 tenths
Air Temperature	-9, 20, 35 °C
Stability Class	D(A.B.C.E.F)
Relative Humidity	60%
SOURCE STRENGTH : Leak from Short Pipe or Valve in Horizontal Cylindrical Tank	
Tank Diameter/Length	2.0/3.6 meters
Tank Bottom Height from the Ground Level	0 m
Tank Volume	11,310 Liters/Tank Contains Liquid
Internal Temperature	Ambient Temp, -20 °C
Chemical Mass in Tank	11,385 kg
Circular Opening Diameter	1.0 inches
Model Run	Heavy Gas

**Table 6.** LOC Distance According to Wind Speed and Air Temperature Change (LOC, km)

Air Temp	LOC	Wind (m/s) vs LOC (km), Elapsed Time (min)					
		3.0 m/s		4.0 m/s		5.0 m/s	
		Hazard Distance	Elapsed Time	Hazard Distance	Elapsed Time	Hazard Distance	Elapsed Time
-9 °C	ERPG-3	2.5	25	2.3	17	2.1	11
	IDLH	3.7	30	3.4	24	3.1	15
	ERPG-2	7.1	53	6.4	36	5.8	28
20 °C	ERPG-3	3.3	28	3.2	20	2.9	13
	IDLH	5.0	39	4.6	24	4.2	15
	ERPG-2	8.8	55	8.5	38	7.9	28
35 °C	ERPG-3	3.6	30	3.6	20	3.3	14
	IDLH	5.3	38	5.2	26	4.8	17
	ERPG-2	9.1	55	9.3	39	8.8	28



**Figure 5.** Hazard distance of LOC 3.0/4.0/5.0 m/s, 20 °C.

Table 6은 Figure 5에서 나타난 풍속 및 대기온도변화에 따른 우려농도의 유해위험거리에 대한 경과시간이다. ALOHA의 점선으로 둘러싸인 ERPG-2 경계선은 1시간 이내 허용선이며, ERPG-3의 점선분포도 안에서는 생명에 극히 위험하므로 신속히 대피하여야 하는 Guideline 이다.

우려농도기준(LOC)의 유해위험거리는

- ① 풍속변화에 대한 LOC별 유해 위험거리는 대기온도의 변화에 따라 풍속이 증가할수록 유해 위험거리는

줄어드는 경향을 보였다.

- ② 대기온도가 증가할수록 누출량은 증가되며, 유해위험거리도 증가되는 경향으로 나타났다.
  - ③ 각 풍속에서 확산에 미치는 경과시간은 대기온도가 상승할수록 증가한다.
  - ④ 각 대기온도에서 확산에 미치는 경과시간은 풍속이 증가할수록 감소한다.
- 위와 같은 결과로 액체 염소의 누출은 풍속이 증가할수



**Table 7.** Release Duration and Hazard Distance According to Changes in Air Temperature

Air Temp (°C)	3.0, 4.0, 5.0 m/s		Storage Tank Temp (°C)	Hazard Distance EPRG-2 (3 ppm), km
	Release Duration (min)	Max Average Sustained Release Rate		
-9	28	437 kg/min	Amb. Temp	7.1
20	16	754 kg/min	Amb. Temp	8.8
35	13	926 kg/min	Amb. Temp	9.1
-9,20,35	39	317 kg/min	-20 °C	6.1/6.4/6.6

**Table 8.** Due to Changes in Ambient Stability of Hazard Distance by LOC (km)

LOC Division	Atomospheric Stability Class (Air Temp 20 °C, Wind Speed 3.0 m/s)					
	A	B	C	D	E	F
ERPG-2	5.0	6.1	7.3	3.3	10 ↑	10 ↑
IDLH	2.8	3.4	4.2	5.0	5.4	6.1
ERPG-3	1.9	2.4	2.9	8.8	3.6	4.2

**Table 9.** Scope of Damage According to LOC of Alternative

LOC	Damage Scop (km)	Applicable Facilities Within the Scope of Damage (Population)
ERPG-2 (3 ppm)	8.5	Public facilities and roads: Dopco, Yeosu National Industrial Complex Road Myododong (1288), GSC (1300), LG SM (100), Sannam (254), Part of Samil Dong (100)
IDLH (10 ppm)	4.6	Yeosu Power (170), Uhan Technology (84), Hye In company (9), Wiscom (77), Yukil c&s (6), BK Chemical (3), Daeshin Plant (48), Chemical Rescue, Jewon Industry, Yongho Machine etc.
ERPG-3 (20 ppm)	3.2	Public Facilities and Roads: Yeosu National Industrial Complex Road Hanwha Chemical (856), YNCC (889), Lotte Chemical (772), Keumho Petroleum (216), Dow Chemical (31), Daelim Industry(361), Polymirae (149), LG Chemical (NCC, 553), LG MMA (132), Changshin Chemical (15), Hoil Plant (27), Jaepyeong Plant (14), Ewha Industry (3), SPG

록 대기 중으로 빠르게 분산·희석되고 있음을 알 수 있다. 대기온도 및 저장탱크 온도의 상승에 따라 누출량은 빨라져 유해위험거리와 확산에 미치는 경과시간은 다소 증가하거나 유사한 경향으로 대기온도보다는 풍속의 증감에 따라 위험성이 더 크게 작용한다.

(b) 누출시간(Strength, Total Release Time)

누출량 및 누출지속시간은 풍속과는 상관없이 일정하였으며, Table 7에서와 같이 대기온도 변화에 따라 상온의 저장 탱크의 온도도 변하게 되어 누출량의 변화 결과를 보여 주었다. 대기온도가 상승할수록 누출량이 증가하며, 누출지속시간이 짧게 나타났다. 이같이 액화염소의 저장 탱크로부터 누출이 일어날 때 누출시간을 결정하는 인자는 저장 탱크 및 주위의 온도의 영향이 가장 크고, 풍속과는 무관함을 알 수가 있다. 또한, 저장탱크 온도를 액화저장 온도(-20 °C)로 하였을 때는 대기온도 및 풍속 변화에 관계없이 누출량이 일정함을 나타내었다.

(2) 대기안정도 변화에 따른 결과분석

Pasquill-Gifford의 대기안정도 분류 기준에 따라 대기안정도 등급 A ~ F를 예측 할 수 있는 풍속기준은 2~3 m/s

로 풍속 3.0 m/s를 설정 하였다. 기온 20 °C, 누출량 등 모든 조건을 동일하게 주고, 대기 안정도 등급 A. B. C. D. E. F 등급으로 변화시키며 관심농도인 ERPG-2/3, IDLH에 해당하는 확산거리에 대해 분석하였다. LOC별 유해위험거리는 Table 8의 대기안정도 등급의 구분에 따라 가장 안정한 F 등급에서 끝점농도인 ERPG-2 기준 10 km 이상으로(greater than 10 km) 최대의 확산거리를 나타냈다.

(3) 대안의 관심거리에 따른 피해범위 산출

(a) 대안의 사고 시나리오 기준의 대기온도 20 °C, 풍속 4.0 m/s, 대기안정도 D등급에서 피해 영향은 우려농도 기준으로 Table 9 및 Figure 6과 같이 각 ERPG-2 (20 ppm)은 3.2 km 지점에서 누출 20분경과 후 약 3,800 여명이 노출 예상되고, IDLH (10 ppm)은 4.6 km 지점에서 누출 24분경과 후 약 4,200 여명이 노출 예상되며, ERPG-3 (3 ppm)은 8.5 km 지점에서 누출 38분경과 후 약 7,200 여명의 노출 예상 및 노출농도가 검출되었으며 확산 진행속도가 매우 빠르게 진행되었다.

(b) 우려농도 기준 노출영향으로 누출시간(16분)을 포함하여 30분 동안 폭로되었다고 가정할 경우 Table 10에서와 같이 Probit 결과 사망가능성은 나타나지 않았다.



Figure 6. Hazard distance according to alternative accident scenarios.

(c) 인근업체가 존재하는 관심거리 1 km 지점에서의 노출영향으로 최대 노출농도는 124 ppm으로 Probit값 3.71(사망가능성 10%)가 나타나 누출에 따른 인근업체 근로자는 피해범위 내에서 즉시 대피해야 한다.

(d) 누출원으로 부터 풍속의 영향으로 확산속도가 빨라 우려농도 기준의 피해범위 내 주민에 대한 직접적인 피해영향은 적더라도 장시간 폭로될 경우 인체에 2차 피해가 발생되므로 신속한 대응조치와 그에 따른 대피를 해야 한다.

4.5.6 피해영향 평가

(1) Probit 모델 분석

독성물질 누출로 인한 피해영향을 계산하기 위해 사용되는 Probit 모델 분석식을 이용하여 염소가스 누출사고 시 풍하거리 1 km 지점에서 ALOHA 모델링의 최대노출농도

로 폭로될 경우 (8), (9) 식을적용하여 Table 11과 같이 피해영향을 도출하였다.

$$\text{Toxic Load} = \int_0^{T_e} [C(t)]^n dt \tag{8}$$

C(t) = 시간의 함수로서 독성물질의 농도 [ppm]

n = 특정한 독성물질의 함수인 지수

te = 총 폭로(노출) 시간 [min]

$$\text{Pr} = \text{At} + \text{Bt} \ln(\text{Cnte}) = -8.29 + (0.92) \ln[(\text{C}2 * \text{te})] \tag{9}$$

A/B/n : Chlorine 상수, C : 폭로시간(te)동안 독성물질농도(ppm)

대안의 사고 시나리오 조건인 대기온도 20 °C, 대기안정도 D등급에서는 풍속이 감소할수록 사망가능성이 높아졌으며, 풍속 3.0 m/s에서 대기안정도를 달리 하였을 때에는 매우 안정적인 F등급에서 사망가능성이 44%로 높게 나타났다.

(2) 대기온도 및 풍속 변화에 따른 영향 범위

대기온도 및 풍속 변화에 따른 우려농도기준(LOC)의 유해위험거리는 대기온도가 높을수록 증가하였으며, 풍속변화는 대기온도가 증가할수록 유사하거나, 풍속이 증가할수록 유해위험거리는 줄어드는 경향을 보였다. 풍속 4.0 m/s의 사례에서 대기온도가 증가할수록 우려농도 기준의 유해위험거리는 누출 후 경과시간이 증가 또는 유사한 경향을 보여주고 있다. 점차적으로 확산 거리는 늘어나며, 확산속도가 느리게 진행됨을 알 수가 있다. IDLH 기준 유해위험거리는 -9 °C: 3.4 km, 20 °C: 4.6 km, 35 °C: 5.2 km 지점에서 각각 24/24/26분 경과 후 노출 영향이 나타났다.

각 풍속별 우려농도기준 IDLH (10 ppm)의 유해위험 거

Table 10. Probit Value by LOC (30 min Exposure)

LOC Division	Probit Value	Possibility of Death
ERPG-2 (20 ppm)	0.35	none
IDLH (10 ppm)	- 0.94	none
ERPG-3 (3 ppm)	- 3.13	none

Table 11. Probit Value of the Point of Interest According to the Change of Wind Speed and Atmosphere Stability, Ambient Temp 20 °C

Wind Speed	Stability	Max Concentration	Exposure Time	Probit Value	Possibility of death
3.0 m/s	D	132	30	3.82	12%
4.0 m/s	D	124	30	3.71	10%
5.0 m/s	D	120	30	3.65	9%
3.0 m/s	A	72.7	30	2.73	1.5%
3.0 m/s	B	105	30	3.40	5.5%
3.0 m/s	C	120	30	3.65	9%
3.0 m/s	E	156	30	4.13	19%
3.0 m/s	F	231	30	4.85	44%

**Table 12.** IDLH Hazardous Distance Due to Changes in Atmospheric Stability (km)

Atmospheric Stability Class (Air Temp 20 °C, Wind Speed 3.0 m/s)						
Division	A	B	C	D	E	F
Hazard Distance	2.8	3.4	4.2	5.0	5.4	6.1
Elapsed Time	23	25	33	40	43	57

리는 각 풍속 3.0/4.0/5.0 m/s의 5.0/4.6/4.2 km 지점에서 39/24/15분경과 후 노출영향이 나타났다.

### (3) 대기안정도 변화에 따른 영향 범위

대기안정도 변화에 따른 IDLH의 유해위험거리 및 확산에 따른 경과시간은 Table 12와 같이 대기안정도 각 등급에서 산출한 모델링의 우려농도기준 IDLH (10 ppm)의 유해위험 거리가 가장 큰 경우는 F 등급으로 누출 57분 경과 후에 누출영향이 나타났다. 대기안정도가 안정할수록 누출 후 확산 진행속도는 A > B > C > D > E > F 순으로 점차 느려지는 경향을 나타내고 있다. 독성영향 평가 결과 풍속이 감소하거나, 대기안정도 등급이 안정할수록 확산에 따른 노출영향이 오랫동안 지속되어 IDLH 기준(10 ppm)의 경계선 내에서 노출되는 경우에는 Table 11의 Probit 값에서 나타난 결과와 같이 생명에 위험을 줄 것으로 판단되므로<(2) 대기온도 및 풍속 변화에 따른 영향범위>와 Table 12의 유해위험거리의 지역에서는 최대 30분 이내로 작업자 및 인근 주민이 대피할 수 있도록 비상조치 계획이 수립되어야 한다.

## 4.6 연구결과 및 고찰

액체연소 취급시설에서 발생하는 가압연소탱크 및 배관에서 연소 누출시 예측분석 결과에 따른 피해범위에 대한 영향을 최소화할 수 있는 대책을 다음과 같이 도출하였다.

(1) 풍속 및 대기온도 변화에 따른 IDLH (10 ppm) 기준 유해위험거리를 산출한 영향 거리는 최악의 누출 시나리오에서는 여수 국가산업단지 OO화학에서 발생한 누출원으로 부터 풍하 방향 5.2 km, 대안의 시나리오에서는 4.6 km 떨어진 지점까지 확산되었다. 유해 위험거리 반경내의 근로자 및 주민 피해 최소화를 위한 광범위한 관점에서 비상 대응이 필요하다.

(2) 연소의 확산은 풍속 및 대기안정도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 풍속이 낮거나 대기온도가 높을수록 우려농도기준의 유해위험거리가 멀리 확산되어 피해영향이 더 커지는 것으로 분석 되었다. 풍속이 낮거나 대기온도가 높은 시간대에 액체 연소 작업시에는 누출에 대한 위험성이 확대되므로 제독장구 착용이 꼭 필요하겠다.

(3) 풍속이 빠를 경우 난류혼합으로 확산이 빨리 진행되

어 우려기준농도가 짧은 거리에 나타남을 알 수가 있다. 액체연소를 배관 이송, 탱크로리로 수송 등 취급 작업 시에는 풍속이 빠른 기상조건에서 위험 노출 가능성이 상대적으로 감소된다.

(4) 여러 기상인자 중 대기안정도 F등급의 매우 안정한 상태에서 최대 유해 위험거리로 산출되었다. 대기 안정도 등급이 안정할수록 확산 유해위험거리는 더 증가되므로 대기안정도가 불안정한 상태의 기상조건인 낮 시간대에 작업하는 것이 사고발생시 피해위험거리가 짧아 위험성이 감소될 수 있다. 따라서 대기안정도가 안정된 등급으로 분포되어 있는 시간대에는 액체연소 취급을 제한해야 하는 작업 수칙이 필요해 보인다.

(5) 액체연소의 누출사고 발생 시에는 운전변수 및 기상 조건에 따라 누출원으로 부터 매우 짧은 시간 내에 확산이 진행되므로 신속한 대응이 필요하며, 시설물의 주기적인 점검과 개선 등 안전관리 강화 등의 사전예방이 반드시 필요하다. 피해 최소화를 위한 최악의 사고시나리오에 따른 비상대처 매뉴얼의 작성 보완과 주민·인근업체·유관기관간의 비상계획에 따른 비상연락망이 확보되고, 대피구역별 대피방향, 집결지 선정 등의 계획된 합동훈련이 필요하다. 또한 유해화학물질 누출사고 발생 시 피해반경이 주거 지역에 있을 때에는 대규모 피해가 발생할 가능성이 높기 때문에 인접구역 내 주거인원에 대한 주민소산계획 등 안전 관리대책이 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 액체 연소 취급사업장에서 발생할 수 있는 누출사고에 대한 피해예측을 위해 ALOHA 모델링을 수행하였으며, 정교한 해석을 위해 매개변수(누출조건, 기상 조건)의 여러 조합에 의한 결과를 도출하였고, 피해범위 및 Probit 분석을 통한 독성영향을 산출하였다. 이를 바탕으로 피해영향 최소화 대책을 도출하였으며, 본 연구 결과가 유해화학물질 취급사업장의 비상대응 수립에 적용할 수 있는 위해성 평가 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## References

1. US EPA, NOAA, NSC, "ALOHATM User's Manual",

- Washington DC, USA (1995).
2. Korea Occupational Safety & Health Agency, "Guidance on Modeling Leakage Sources", KOSHA Guide P-92-2012 (2012).
  3. Korea Occupational Safety & Health Agency, "Technical Guidelines for Establishing Measure to Minimize Damage to Chemical Plant", KOSHA Guide P-110-2012 (2012).
  4. Chemical Safety Agency, "Technical Guidelines for Selection of Accidental Scenario", No 2014-1 (2014).
  5. Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, "Hazardous Chemical Accident Prevention and Management Technology Development Project", p. 64 (2014).
  6. D. L. Ji and G. D. Park, "A Status of Safety Management of Toxic Gases by the High Pressure Gas Safety Control Act, and the Trend of Policy", Korea Institute of Hazardous Materials (2013).
  7. Korea Gas Safety Copr., "Gas Statistics for 2016" (2017).
  8. US EPA. "Fiscal Year(FY) 2009 Annual Report", p. 6 (2009).
  9. Korea Gas Safety Copr., "Liquid Chlorine Use Facility Safety Management Manual", KGS 2009-179, p. 9 (2009).
  10. Chemical Safety Agency, "Key Info Guide For Accident Preparedness Substances", Ministry of Environment, p. 40 (2014).
  11. The Chlorine Institute, Inc., "Pamphlet 1: Chlorine Basics (7th ed)", New York, p. 29 (2008).
  12. D. M. Song, "Dispersion Modeling Methodology for Hazardous/Toxic Gas Releases from Chemical Plant Facilities" (1997).
  13. D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", PRT Prentice Hall, pp. 121-192 (1990).
  14. D. G. Oh, "A Study on the Scope and Countermeasures for Accidental Gas Leakage Accident", Environmental Preservation Association (1986).
  15. M. H. Lee, "Prediction of Hazard Distance for Release from the Pressurized Chlorine Liquid Storage Tank", Master's Thesis, Hanyang University (2000).
  16. Korea Meteorological Administration, "Weather Annual Report 2016", p. 136 (2016).
  17. Ministry of Environment "Atmospheric Environment Annual Report 2011", p. 434 (2012).
  18. G. S. Jeong, "Modeling of Liquid Chlorine Leaks in Petrochemical Complexes", Doctoral Thesis, Dongshin University (2015).