

항만저장물질의 누출에 따른 피해범위 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Damage Ranges by Leakages of Seaport-Stored Substances

황운용*

Hwang, Woonyong*

Abstract

In order to check the risk of hydrogen peroxide leakage from the seaport, the leakage amount was changed from 1.0 ton to 10.0 tons, with the maximum and minimum diffusion distances per month in 2020 being subsequently calculated. A total of 82 scenarios were created to confirm the change in the diffusion distance according to the amount of leakage. The scenario was analyzed based on the distance at which the risk concentration was maintained through the ALOHA Air Dispersion Models. As indicated by the analysis, when the amount of leakage is relatively large, the temperature is also high and the wind speed is fast - resulting in the maximum spread. However, when the amount of leakage was relatively minimal, the temperature was low and the wind speed remained fast - this kept diffusion to the minimum. Concerning characteristics of fast wind speeds, the dispersion length changed based on amounts of leakages where PAC-1 contains 2.0 tons, PAC-2 contains 4.0 tons, and PAC-3 contains 5.0 tons. In addition, when the amount of leakage equaled 10.0 tons, and the wind speed was high, the dispersion length reached up to 10 kms. In light of this, it was confirmed that even adjacent administrative districts were affected. Therefore, it is necessary to establish appropriate measures to prevent damage by utilizing the diffusion distance caused by chemical leakages.

Key words : Chemical Leakage Diffusion, Leakage Amount, Wind Speed, ALOHA

요 지

항만에서 과산화수소가 누출될 경우 위험성을 확인하기 위하여 누출량을 1 Ton~10 Ton까지 1 Ton씩 변화시키며 2020년 월별 최고확산거리와 최소확산거리를 산정하였다. 누출량에 따른 확산거리의 변화를 확인하기 위하여 총 82개의 시나리오를 작성하였다. 작성된 시나리오는 ALOHA 확산모델을 통해 위험농도가 유지되는 거리를 PAC 기준으로 분석하였다. 분석결과 누출량이 많은 경우 온도가 높고 풍속이 강한 경우 최대로 확산되었으며, 누출량이 작고 온도가 낮고 풍속이 강한 경우 최소로 확산되는 경향을 보였다. PAC-1은 누출량 2 Ton, PAC-2는 4 Ton, PAC-3는 5 Ton을 기점으로 풍속이 빠름으로 인하여 확산거리가 변화되는 특성을 가졌다. 또한, 누출량이 10 Ton 일 때 풍속이 빠른 경우 확산거리는 10 km까지 도달하여 인접한 행정구역까지도 영향을 주는 것으로 확인되었다. 따라서, 화학물질 누출에 따른 확산거리를 활용하여 적정한 피해방지대책의 수립이 필요하다.

핵심용어 : 화학물질누출확산, 누출량, 풍속, ALOHA

1. 서 론

매년 화학물질을 사용하는 장소에서 지속적인 사고가 발생되고 있다. 사고의 유형은 사업장내 유출, 운반차량사고, 폭발 등에 의한 유출 등이며 매년 100여건의 사고가 지속되고 있다. 특히 최근 국회에서 언급된 항만의 경우 많은 화학물

질을 보관하고 있으나 컨트론타워의 부재 등 관리에 대한 대책이 소홀하다고 지적되기도 하였다(Congressman Choi's Press Release, 2021).

화학물질이 누출되는 경우 독성에 의한 인명피해의 우려가 있으며, 국내의 경우 2012년 구미 불산가스 누출사고 이후 화학물질 누출에 대한 규제를 강화하고 있다. 이에

*교신저자, 정회원, 초당대학교 소방행정학과 조교수(Tel: +82-61-450-1273, Fax: +82-61-450-1592, E-mail: wyhwang@cdu.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Fire Service Administration, Chodang University

따라 화학물질의 누출에 대한 위험성을 분석하여 대책을 마련하기 위한 선행연구가 진행되었다.

선행연구로 Ko (2013)는 불산가스에 대해 수치해석과 ALOHA 확산모델을 이용하여 LC_{50} 과 AEGL-3의 결과를 비교 분석하였다. Jeong and Baik (2018)은 화학공장에서의 염소가스 누출 사고에 의한 유해위험거리를 ALOHA를 이용하여 분석하였으며, Jung et al. (2016)은 암모니아 수용액 누출과 관련하여 ALOHA를 이용하여 암모니아 수용액의 농도에 따른 영향거리와 액면의 크기의 관계를 구하여 별로 산정하여 분석 제시하였다. Yoo and Moon (2018)은 ALOHA를 통해 암모니아 누출 시 거리와 시간에 따른 실내외 오염농도를 평가하였다.

기존 선행연구의 경우 해당지역의 기상조건에 따른 화학물질의 유출에 따른 확산거리를 산정하고 있으나 기상조건 변화에 따른 확산거리의 변화를 예측하지는 못하고 있는 실정이다. 또한, 화학물질의 위험도 산정기준은 Emergency Response Planning Guideline (ERPG), Acute Exposure Guideline Level (AEGL) 등 다양한 조건이 적용되어 위험지역산정 기준이 상이하였다.

이와 관련하여 본 연구에서는 항만에서 공통으로 저장하고 있는 과산화수소의 누출을 가정하여 해당지역의 기상변화로 인한 확산거리의 변화를 확인하고자 하였다. 또한, 위험지역 산정기준에 있어 기존까지 다양한 산정방식이 있으나 공통적인 산정기준을 제시하고자 하였으며, ALOHA 확산모델을 통해 누출량에 따른 피해 예측범위를 산정하여 대책을 마련하고자 한다.

2. 항만의 선정배경 및 취급물질

2.1 항만 선정 배경

선정한 항구는 광양항으로 화학물질이 저장된 곳에서

약 1 km, 2 km, 3 km, 10 km 거리에 각각 여객터미널, 광양제철소, 광양시청 및 주거지역, 여수공항이 위치해 있다. 따라서, 확산에 의해 이웃한 행정지역까지 영향을 미칠 수 있으며, 특히 화학물질이 주거지역으로 확산되는 경우 더 큰 피해가 예상된다. 선정한 항구의 위치와 주변지역은 Fig. 1과 같다.

2.2 항만의 취급물질

해양수산부 및 국회의원 보도자료에 의하면 2020년 9월말 기준으로 항구별 저장된 위험물질의 양은 Table 1과 같다 (Congressman Choi's Press Release, 2021).

2.3 과산화수소의 물리적 특성

항구에서 공통적으로 보관하는 물질은 과산화수소이다. 따라서, 과산화수소에 대해 ILO의 International Chemical Safety Cards, 안전보건공단의 MSDS, Reid (1987), EPA의 CAMEO에 의한 물리적 특성을 정리하면 Table 2와 같다.



● : Selected Location ● : Passenger Terminal ● : City Hall
 ■ : Yeosu airport ■ : Residential Area ■ : Industrial Area(ironworks)

Location: 34°54'55"N 127°41'09"E

Fig. 1. Selected Location

Table 1. Hazardous Material Storage Status by Seaport at the End of September 2020

Seaport		Substance	Storage Amount at Seaport
Busan Seaport	North Seaport	Hydrogen Peroxide	1,197 Ton
		Ammonium Nitrate	459 Ton
	New Seaport	Hydrogen Peroxide	2,299 Ton
		Sodium Cyanide	3,236 Ton
		Ammonium Nitrate	455 Ton
Ulsan Seaport		Hydrogen Peroxide	60 Ton
Gwangyang Seaport		Hydrogen Peroxide	22 Ton

Table 2. Physical Properties of Hydrogen Peroxide

Formula	Melting Point	Boiling Point	Vapor Pressure	Specific Heat	Latent Heat	TLV-TWA
H_2O_2	-11 °C	141 °C	0.2 kPa (at 20 °C)	2.619 J/g · K	12.6×10^2 J/g	1 ppm

3. 시나리오 조건 및 피해예측

3.1 모델의 선정

과산화수소는 산화성물질로 자체적으로 화재가 발생하지 않는다. 또한 상온에서 액상으로 존재하므로 과압에 의한 폭발 등의 사고보다 누출에 의한 사고가 예상된다.

화학물질의 누출에 대한 모델링을 하기 위해서 미국 EPA와 NOAA에서 공동 개발한 ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres, v5.4.7) 모델을 적용하였다.

ALOHA 확산모델은 사고예방 대응에 활용할 수 있도록 개발되어 미국 환경청에 의해 공인되어 현재는 전 세계적으로 화학사고 예방과 대응 관련하여 널리 활용되고 있다(Yoo and Moon, 2018).

ALOHA 확산모델은 기상조건, 화학물질에 따른 확산에 의한 위험지역에 대한 해석을 수행 할 수 있다.

3.2 누출확산에 의한 피해예측

과산화수소는 액상으로 누출되는 경우 온도 및 비열과 잠열로 인하여 증기상태로 증발되어 확산된다. 누출된 과산화수소가 증기로 증발되는 비율은 Eq. (1)과 같이 계산된다(Jeong and Baik, 2018).

$$f_v = 1 - \exp\left[-\frac{C_{Pv}}{H_{Va}}(T_a - T_b)\right] \quad (1)$$

Eq. (1)에서 f_v 는 증기비율(Flash fraction), C_{Pv} 는 평균경압비열, H_{Va} 는 평균증발잠열, T_a 는 대기온도, T_b 는 대기압에서의 비점이다.

화학물질의 누출에 따른 대기 중 확산을 산정하는 모델링은 방법은 매우 다양하다(Mannan and Lees, 2005). 이 중 과산화수소의 확산을 계산하는데 Gaussian 모델을 통해 해석가능하다(FEMA et al., 1990). 물질의 대기확산은 바람, 반응, 난류확산 등이 영향인자로 작용하며 임의의 지점(X,Y,Z)에서의 시간에 따른 농도 변화율은 Eq. (2)와 같이 계산된다(Mannan and Lees, 2005; Jones et al., 2013; Jeong and Baik, 2018).

$$\frac{dC}{dt} + U\frac{dC}{dx} + V\frac{dC}{dy} + W\frac{dC}{dz} = K_x\frac{d^2C}{dx^2} + K_y\frac{d^2C}{dy^2} + K_z\frac{d^2C}{dz^2} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 C는 농도, U, V, W는 X, Y, Z 방향의 풍속, K는 반응속도계수, K_x , K_y , K_z 는 X, Y, Z 방향의 확산계수이다.

가우스모델을 적용함에 있어 누출원의 높이에 의해 지상에서의 농도가 달라진다(Crowl and Louvar, 1990). 따라서 누출원을 점원으로 가정하고 X방향으로 U의 풍속으로 바람이 있을 경우 지표면의 반사를 고려하면 Eq. (2)는 Eq. (3)과

같이 표현된다(Jones et al., 2013).

$$(C)(x,y,z) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 Q_m 은 누출량, H_r 은 누출원 높이, X, Y, Z는 누출지점에서 X, Y, Z축 방향의 거리이다.

Eq. (3)에서 지상의 농도를 계산하기 위해서 $z = 0$ 으로 가정하면 Eq. (4)와 같이 정리된다. 또한 지상 중앙선에서의 농도 해석을 위해 Eq. (3)에서 $y, z = 0$ 으로 가정하면 Eq. (5)와 같이 단순화된 식을 얻을 수 있다(Jones et al., 2013).

$$(C)(x,y,0) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (4)$$

$$(C)(x,0,0) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (5)$$

이때, X축에 대한 지상농도 중 최대농도는 Eq. (6)과 같이 표현되며, 지상에서의 농도가 최대가 되는 풍하거리는 Eq. (7)과 같이 구해진다(Jones et al., 2013).

$$(C_{\max}) = \frac{2Q_m}{e\pi UH_r^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right) \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{H_r}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

3.3 기상데이터

기상데이터의 적용은 ALOHA를 통한 해당지역의 위험성을 확인하기 위한 입력변수가 된다. 기상청자료에 의해 선정한 항구지역의 2020년도 월별 기후조건을 정리하면 Table 3과 같다(Meteorological Agency's Weather Data Open Portal, 2021).

3.4 ALOHA 시뮬레이션 조건

화학물질 누출에 따른 위험도 해석을 위한 ALOHA 시뮬레이션 입력조건은 다음과 같다.

3.4.1 대기온도 및 상대습도

대기온도는 2020년 9월 중 온도에 의한 차이를 확인하고자 최고온도, 최저온도, 평균온도로 설정하였으며 습도는 해당 월의 평균습도를 적용하였다. 또한 1월부터 12월까지 최저온도와 최고온도의 조건을 같이 비교하였다.

Table 3. Weather Data in Gwangyang in 2020

Element \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average Temperature (°C)	5.4	6.3	10	12.6	18.7	23.2	22.9	27.5	21.7	16.6	11.5	3.7
Maximum Temperature (°C)	16.7	18.6	22.5	24	29.3	32.8	31.7	35.7	30.9	27.3	23.4	14.5
Minimum Temperature (°C)	-5.4	-6	-0.5	3.3	11.1	14.5	18	23.1	13.4	7.5	0.8	-7.3
Relative Humidity (%)	57	54	52	44	66	70	84	79	69	54	56	51
Average Cloud Cover	5.4	4.4	4	3.5	5.9	6.1	8	6.1	6.2	4.7	4.2	3.8
Wind Direction	WNW	WNW	WNW	WNW	ENE	ENE	ENE	WSW	NE	WNW	WNW	WNW
Wind Direction of Maximum Wind Speed	W	W	W	WNW	WNW	W	NE	ESE	NNE	NE	WNW	WNW
Average Wind Speed (m/s)	1.9	2	2.1	2.2	1.6	1.3	1.3	1.3	2	1.6	1.8	1.8
Maximum Wind Speed (m/s)	9.8	8.5	10.7	8.3	7.4	5.5	6.8	7.9	10.1	7	7.3	8.1

3.4.2 풍속 및 풍향

화학물질의 대기확산에 있어 확산의 방향은 풍향에 의해 결정된다. 따라서, 2020년 월별 평균풍속과 이때 최대풍향을 적용하였으며 최악의 조건을 확인하기 위하여 최대풍속 시 풍향을 같이 선정하여 비교하였다.

3.4.3 누출원 입력조건

화학물질의 대기확산과 관련하여 누출되는 홀의 위치와 크기, 누출되는 시간이 확산과 관련된 주요변수로 작용된다. 금회 입력한 누출원에 대한 정보를 정리하면 Table 4와 같다 (EPA and NOAA, 2007; NICS, 2015).

Table 4. Input Data of Source

Source	Input Data
Type	Direct
Release Type	Instantaneous
Amount	1~10 Ton
Height	0 m

3.5 사고시나리오 및 평가조건

3.5.1 저장물질의 양

선정한 광양항은 과산화수소를 보관하고 있다. 과산화수소가 누출될 경우 누출된 양에 의한 확산거리변화를 확인하기 위해 과산화수소의 누출량은 1 Ton부터 10 Ton까지 변화시켜 위험도를 확인하였다.

3.5.2 사고시나리오

사고 시 기상조건에 따른 피해범위 변화를 확인하기 위해 물질 저장데이터 기준인 9월을 기준으로 최저기온, 평균기온, 최대기온과 온도조건에 따른 최대풍속, 풍향을 적용하여 60개의 시나리오를 구성하였다. 또한, 2020년의 월별 최소 최대피해규모를 산정하기 위하여 9월을 제외한 1~12월까지

22개의 시나리오를 추가로 구성하였다. 시나리오를 정리하면 각각 Tables 5 and 6과 같다.

3.6 피해범위 산정기준

유해가스에 노출될 경우 물질의 농도, 노출시간이 생리적 반응에 영향을 주는 변수임을 F. Habor의 법칙을 통해 알 수 있다. 따라서, 독성에 대한 인간의 생리적 반응을 고려하기 위해서는 독성농도와 노출시간에 대해 동시에 고려하여야 한다.

독성농도와 관련하여 생리적 반응과 물질노출에 따른 대응 등을 고려하여 ERPG, AEGL, Temporary Emergency Exposure Limits (TEEL), Immediately Dangerous to Life and Health (IDLH), Emergency Exposure Indices (EEI), Dangerous Toxic Load (DTL) 등 다양한 기준이 제시되고 있다. 이로 인하여 화학물질 누출 시 적용기준에 대한 혼란과 오해의 우려가 있어 DOE (U.S. Department of Energy)에서는 ERPG, AEGL, TEEL을 적절하게 사용하도록 Protective Action Criteria (PAC)를 제시하고 있으며, PAC는 AEGL,

Table 5. The Condition of Each Scenario at September in 2020 Year

Scenario No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Leakage Amount (Ton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ambient Temperature (°C)	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
Wind Speed (m/s)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind Direction	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Ambient Humidity (%)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Cloud Cover	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Scenario No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Leakage Amount (Ton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ambient Temperature (°C)	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
Wind Speed (m/s)	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
Wind Direction	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
Ambient Humidity (%)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Cloud Cover	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Scenario No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Leakage Amount (Ton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ambient Temperature (°C)	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
Wind Speed (m/s)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind Direction	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Ambient Humidity (%)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Cloud Cover	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Scenario No.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Leakage Amount (Ton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ambient Temperature (°C)	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
Wind Speed (m/s)	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
Wind Direction	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
Ambient Humidity (%)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Cloud Cover	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Scenario No.	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Leakage Amount (Ton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ambient Temperature (°C)	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Wind Speed (m/s)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind Direction	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
Ambient Humidity (%)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Cloud Cover	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Scenario No.	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Leakage Amount (Ton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ambient Temperature (°C)	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Wind Speed (m/s)	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
Wind Direction	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
Ambient Humidity (%)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Cloud Cover	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2

Table 6. The Condition of Each Scenario in 2020 Year

Scenario No.	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Leakage Amount (Ton)	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1
Ambient Temperature (°C)	-5.4	16.7	-6.0	18.6	-0.5	22.5	3.3	24	11.1	29.3	14.5
Wind Speed (m/s)	9.8	9.8	8.5	8.5	10.7	10.7	8.3	8.3	7.4	7.4	5.5
Wind Direction	W	W	W	W	W	W	WNW	WNW	WNW	WNW	W
Ambient Humidity (%)	57	57	54	54	52	52	44	44	69	69	70
Cloud Cover	5.4	5.4	4.4	4.4	4.0	4.0	3.5	3.5	5.9	5.9	6.1
Scenario No.	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
Leakage Amount (Ton)	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
Ambient Temperature (°C)	32.8	18	31.7	23.1	35.7	7.5	27.3	0.8	23.4	-7.3	14.5
Wind Speed (m/s)	5.5	6.8	6.8	7.9	7.9	7	7	7.3	7.3	8.1	8.1
Wind Direction	W	NE	NE	ESE	ESE	NE	NE	WNW	WNW	WNW	WNW
Ambient Humidity (%)	70	84	84	79	79	54	54	56	56	51	51
Cloud Cover	6.1	8.0	8.0	6.1	6.1	4.7	4.7	4.2	4.2	3.8	3.8

ERPG, TEEL 순으로 우선 적용하도록 하고 있다. 따라서 금회연구에서 화학물질 누출에 의한 피해범위의 산정기준은 PAC에 의해 ERPG기준을 적용하였으며 이를 정리하면

Table 7. PAC Level of Hydrogen Peroxide

Level	Exposure Time	Concentrations
PAC-3	60 min	100 ppm
PAC-2	60 min	50 ppm
PAC-1	60 min	10 ppm

Table 7과 같다(FEMA et al., 1990; EPA and NOAA, 2007; Yoon, 2016).

4. 시나리오의 사고피해예측 및 결과분석

4.1 시나리오 별 사고피해예측

시나리오 별 사고피해를 예측하기 위해 ALOHA 확산모델을 구동하였으며 시나리오 별 구동에 따른 PAC 결과를 요약하면 Tables 8 and 9와 같다.

Table 8. Results of Each Scenario at September in 2020 Year

Scenario No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PAC-3 (km)	1.7	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4
PAC-2 (km)	2.3	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.2	4.3	4.4	4.6
PAC-1 (km)	4.1	5.2	5.9	6.5	7.1	7.4	8.0	8.1	8.4	8.7
Scenario No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PAC-3 (km)	1.2	1.7	2.1	2.5	2.8	3	3.3	3.5	3.6	3.8
PAC-2 (km)	1.7	2.5	3.0	3.5	3.8	4.2	4.5	4.7	5.0	5.2
PAC-1 (km)	3.8	5.2	6.1	6.9	7.5	8.1	8.6	9.0	9.4	9.7
Scenario No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PAC-3 (km)	1.7	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.1	3.2	3.3	3.5
PAC-2 (km)	2.3	2.9	3.3	3.5	3.8	4.0	4.1	4.3	4.4	4.6
PAC-1 (km)	4.1	5.3	6.0	6.6	7.1	7.6	7.8	8.1	8.5	8.9
Scenario No.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
PAC-3 (km)	1.2	1.8	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9
PAC-2 (km)	1.8	2.5	3.1	3.5	3.9	4.2	4.5	4.8	5.0	5.2
PAC-1 (km)	3.9	5.3	6.2	7.0	7.6	8.2	8.7	9.1	9.5	9.8
Scenario No.	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
PAC-3 (km)	1.8	2.2	2.4	2.7	2.8	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5
PAC-2 (km)	2.3	2.9	3.3	3.6	3.9	4.0	4.1	4.3	4.5	4.6
PAC-1 (km)	4.2	5.3	6	6.7	7.2	7.6	7.9	8.2	8.6	8.9
Scenario No.	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
PAC-3 (km)	1.3	1.8	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.7	3.9
PAC-2 (km)	1.8	2.6	3.1	3.6	3.9	4.3	4.6	4.9	5.1	5.3
PAC-1 (km)	3.9	5.3	6.3	7.1	7.7	8.3	8.8	9.2	9.6	9.9

Table 9. Results of Each Scenario in 2020 Year

Scenario No.	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
PAC-3 (km)	1.2	3.9	1.3	4.0	1.2	3.8	1.3	4.1	1.4	4.2	1.6
PAC-2 (km)	1.7	5.2	1.8	5.4	1.7	5.2	1.9	5.4	2.0	5.5	2.2
PAC-1 (km)	3.8	9.8	3.9	9.9	3.7	9.8	4.0	9.9	4.1	10.0	4.3
Scenario No.	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
PAC-3 (km)	4.3	1.5	4.2	1.4	4.2	1.4	4.2	1.4	4.1	1.3	4.0
PAC-2 (km)	5.6	2.1	5.6	2.0	5.5	2.0	5.5	2.0	5.5	1.9	5.4
PAC-1 (km)	10.0	4.2	10.0	4.1	10.0	4.1	10.0	4.0	10.0	3.9	9.8

4.2 결과분석

4.2.1 개별 시나리오 분석

Table 8에서 누출된 물질의 양이 동일한 경우 PAC Level에 따른 농도가 유지되는 끝점의 거리가 가장 긴 경우는 기온 높고 풍속이 빠른 시나리오 60번이었다. 또한 동일 누출량에서 PAC Level에 따른 농도가 유지되는 끝점의 거리가 가장 짧은 경우는 기온 낮고 풍속이 빠른 시나리오 11번이었다.

9월 중 확산에 의한 최대위험범위를 나타낸 60번 시나리오와 최소위험범위를 나타낸 11번 시나리오는 각각 PAC-1 기준 9.9 km, 3.8 km, PAC-2 기준 5.3 km, 1.7 km, PAC-3 기준 3.9 km, 1.2 km로 산정되며 이를 표현하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 노란색, 주황색, 적색으로 표현된 부분이 각각 PAC-1, PAC-2, PAC-3을 의미한다.

또한, 풍향은 화학물질의 확산방향을 결정하는 요소로 작용하는 모습을 보이며 풍향이 주거지역 및 인구밀집지역으로 향할 경우 매우 큰 피해를 보일 것으로 예상되어 진다. 2020년 9월의 경우 풍향으로 인하여 과산화수소의 확산방향은 바다방향으로 인구밀집지역으로의 확산은 없으나 MSDS에서는 과산화수소가 물과 반응한다고 명시하고 있어 반응

에 의한 2차적인 피해도 발생할 수 있다, 또한 해당지역에서 2020년 기준 풍향에 의한 주거지역 및 공업지역으로 발생 가능한 최대피해를 발생시키는 것은 각각 76번, 72번 시나리오였다. 이를 표현하면 Fig. 3과 같다.

Figs. 2 and 3을 살펴보면 2020년 9월의 경우 풍향에 의해 인구밀집지역 내지 상주지역으로의 확산은 없었으나, 6월의 경우 공단지역으로 확산됨이 확인되며, 최대확산에 의한 거리는 PAC-1기준 10 km, PAC-2 기준 5.6 km, PAC-3 기준 4.3 km로 산정되어 누출량이 10 Ton 이상인 경우 해당지역 부근의 공단은 전부 PAC-1기준 이상의 농도가 유지됨을 보여준다.

또한, 8월의 경우 최고풍속에 의한 풍향이 동남동 방향이 되면서 항구주변의 주거지역까지 영향을 줄 수 있음이 확인되어 대책의 마련이 필요한 것으로 확인되었다.

4.2.2 시나리오에 따른 영향 분석

2020년도 9월 기준의 시나리오 결과를 동일한 기상조건에서 누출화학물질의 양에 의한 확산거리를 표현하면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 화학물질의 확산에 있어 기온이 높을수록 확산이 더 많이 이루어지나 기온보다 누출된 화학물질의 량과 바람세기가 확산에 더 많은 영향이 주는 것으로 확인된다.

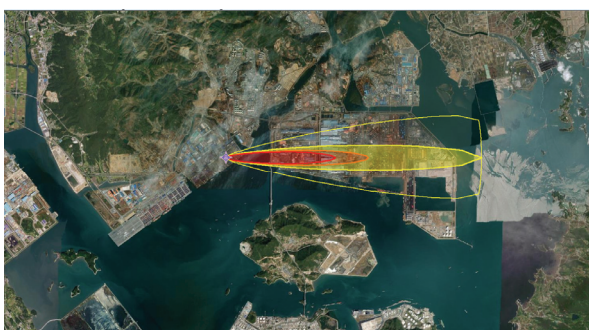


(a) Minimum Dispersion Area



(b) Maximum Dispersion Area

Fig. 2. ALOHA Air Dispersion Models at September

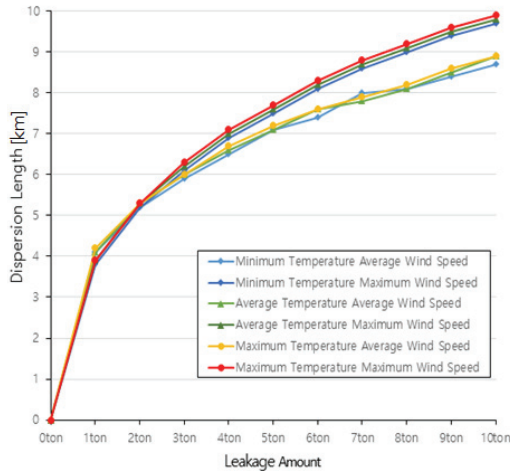


(a) Maximum Dispersion Area at June
(Wind Direction: W)

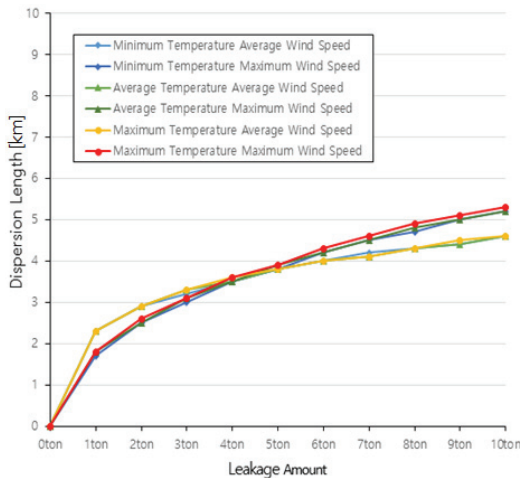


(b) Maximum Dispersion Area at August
(Wind Direction: ESE)

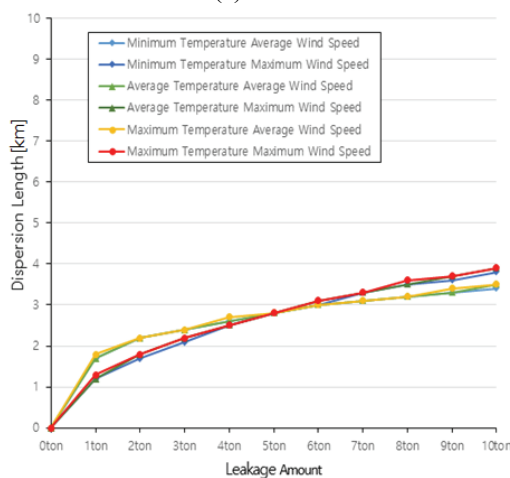
Fig. 3. ALOHA Air Dispersion Models by Wind Direction



(a) PAC-1



(b) PAC-2



(c) PAC-3

Fig. 4. Dispersion Length by Leakage Amount

또한, 풍속에 의해 크게 2개의 그룹으로 분류 가능하다. 분류된 그룹 간 누출된 화학물질의 양에 의한 위험도별 확산거리를 비교하면 PAC-1은 약 2 Ton, PAC-2는 약 4 Ton, PAC-3는 약 5 Ton이 되는 부분에서 최대풍속과 평균풍

속에 의한 위험도 범위가 역전되는 현상을 보인다. 즉 누출화학물질이 적은 경우 풍속이 강한 경우는 바람에 의해 농도가 희석되어 위험물질이 멀리 확산되었음에도 PAC-1, PAC-2, PAC-3에 해당하는 농도를 유지하지 못하기 때문으로 해석되며 반대로 누출화학물질이 많은 경우는 바람의 세기가 강할수록 희석이 되더라도 누출량에 의해 일정농도가 유지가 되어 위험범위가 먼 거리까지 유지되는 것으로 분석된다.

5. 결론

항만지역에 보관중인 과산화수소의 누출에 따른 피해를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 과산화수소의 누출에 따른 최고확산거리는 누출량이 많고, 온도 높으며 풍속이 빠른 환경에서 발생되었다. 과산화수소가 10 Ton이 누출될 경우 최고확산거리는 2020년 9월 기준 PAC-1 9.9 km, PAC-2 5.3 km, PAC-3 3.9 km로 산정되었다. 누출에 따른 최소 확산기준은 1 Ton이 누출될 경우 PAC-1 3.8 km, PAC-2 1.7 km, PAC-3 1.2 km까지 확산되는 것으로 확인되었다.
- (2) 누출에 따른 최소 확산조건은 온도가 낮고, 풍속이 빠른 조건에서 발생되었다. 바람은 물질은 대기 중에 확산시키기도 하지만 반대로 물질의 농도를 희석시킨다. 따라서 화학물질의 누출량이 적은 경우 바람이 확산보다는 희석을 시킴으로 인해서 위험범위가 줄어드는 것을 보였으며, PAC 등급에 따라 PAC-1은 누출량이 2 Ton, PAC-2는 누출량이 4 Ton, PAC-3는 누출량이 5 Ton이 되기 전까지는 바람에 의한 확산보다 농도 희석에 의해 위험범위가 줄어드는 경향을 보인다.
- (3) 화학물질의 대기확산에 의한 위험도 산정에 있어 풍향은 화학물질의 확산 경로를 결정하는 요소이다. 선정 지역의 경우 2020년 9월의 풍향은 바다가 있는 방향으로 되어 9월 중 누출사고 시 바다가 있는 곳으로 확산이 되어 누출에 의한 인체의 노출위험이 비교적 적으나 풍향이 서풍인 1월~3월, 6월의 경우 인근의 공단으로 확산되며, 특히 10 Ton이 누출될 경우 최대확산을 보인 6월의 경우 PAC-1은 10 km, PAC-2는 5.6 km, PAC-3는 4.3 km로 산정되어 공단지역 전체의 작업자의 안전성에 영향을 줄 수 있는 것으로 분석되었다.

풍향이 동남동향인 8월의 경우 인근의 마을로 확산되는 모습을 보이며 10 Ton이 누출될 경우 PAC-1은 10 km, PAC-2는 5.5 km, PAC-3는 4.2 km로 산정되었다.

화학물질의 대기확산에 있어 절대적인 것은 화학물질의 양이었으며 확산방향을 결정하는 것은 풍향이었다. 2020년 9월의 풍향이 바다가 있는 곳으로 향하지만 이는 가장 많은 풍향으로 항상 같은 방향으로 풍향이 유지되지 않는다.

이로 인하여 풍향이 근처의 주거지역으로 향할 경우 최대 9.9 km까지 PAC-1의 농도가 유지되는 위험성이 있을 수 있다. 또한, MSDS에 의하면 과산화수소는 물과 반응성이 있다고 명시하고 있어 바다 쪽으로 확산되더라도 바닷물과 반응 시 어떠한 위험한 상황이 발생할지 모른다.

특히, 과산화수소가 10 Ton 이상 누출될 경우 확산거리가 10 km 이상이 되어 해당항구가 속해 있는 행정구역을 비롯한 인접한 행정구역까지 확산이 되므로 대량확산에 대해 행정 구역 차원이 아닌 도차원의 대책마련이 필요하다.

따라서, 항만시설에 보관된 과산화수소의 누출에 따른 피해확산을 감소시키기 위해서는 최대한 적은 량으로 소분하여 보관하고 누출을 방지하기 위한 2중의 안전장치 및 누출 시 즉각적인 감지 및 통보를 통한 화학물질의 회색작업이 이루어 질수 있도록 조치하는 방안의 강구가 필요하다.

Reference

- Congressman Choi's Press Release. (2021). National Assembly member press release, Retrieved from <https://blog.naver.com/cih1966>
- Crowl, D.A., and Louvar, J.F. (1990). *Chemical process safety: Fundamentals with applications, 3th Ed.* PRT Prentice Hall, pp. 189-235.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2007). *Aloha User'S Manual*. EPA, NOAA
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), United States Department of Transportation (DOT), and United States Environmental Protection Agency (EPA). (1990). *Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures*. pp. 3-12-6-18.
- Jeong, G.S., and Baik, E.S. (2018). Damage effects modeling by chlorine leaks of chemical plants. *Fire Science and Engineering Journal*, Vol. 32, No. 3, pp. 76-87.
- Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty D., and Reynolds, R.M. (2013). *ALOHA Technical Documentation*, NOAA Technical Memorandum, pp. 35-57.
- Jung, Y.K., Heo, J.H., Yoo, B.T., Yoon, Y., Yoon, J.H., and Ma, B.C. (2016). A study on the simplified estimating method of off-site consequence analysis for aqueous ammonia. *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 20, No. 2, pp. 49-57.
- Ko, J.S. (2013). Study on the consequence effect analysis & process hazard review at gas release from hydrogen fluoride storage tank. *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 9, No. 4, pp. 449-461.
- Mannan, S., and Lees, F.P. (2005). *Lees' loss prevention in the process industries*, 3rd Edition, Elsevier, pp. 15/100-15/266.
- Meteorological Agency's Weather Data Open Portal. (2021). Weather information. Retrieved from <https://data.kma.go.kr>
- NICS. (2015). *ALOHA user guide*. National Institute of Chemical Safety, ver 1.1.
- Reid, R.C. (1987). *The properties of gases and liquids*, 4th Ed., New York, McGraw-Hill pp. 546.
- Yoo, B.T., and Moon, M.H. (2018). Development of emergency response plan for chemical accident using ALOHA program: Focusing on evacuation plan. *Journal of Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 311-319.
- Yoon, C.S. (2016). *Standard for emergency (leakage, accident) of chemical substances*. Korean Industrial Health Association. pp. 22-31.

Received	March 15, 2021
Revised	March 17, 2021
Accepted	March 31, 2021