J. Korean Soc. Hazard Mitig.
Vol. 21, No. 5 (Oct. 2021), pp.89~97
https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.5.89

ISSN 1738-2424(Print)
ISSN 2287-6723(Online)
www.kosham.or.kr

도시방재

# 황산 누출에 의한 위험지역 예측에 관한 연구

# A Study on the Prediction of Hazardous Areas of Sulfuric Acid Leakage

**황운용***
**Hwang, Woonyong***

## Abstract

Sulfuric acid is used for various purposes in industry, but research on sulfuric acid accidents is lacking. Thus, to prepare safety measures, it is necessary to analyze the risk distance for such accidents, particularly sulfuric acid leaks. As part of this study, 112 scenarios of varying wind speeds and leakage amounts were prepared and a risk-distance analysis was carried out at an industrial plant. The scenarios were then analyzed based on hazard concentrations. The analysis revealed that if the entire amount of sulfuric acid leaked from the industrial plant, it spread up to 9,978 m at a wind speed of 6 m/s. Residential areas were also included within the maximum diffusion distance, and it was confirmed that the leak also affected neighboring administrative districts. Therefore, it is necessary to prepare a plan to prevent and respond to sulfuric acid leakage accidents in industrial complexes.

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

## 요 지

황산은 산업에서 다양한 용도로 사용되고 있으나 황산 사고에 대한 연구가 부족한 상황이다. 따라서, 황산이 누출되는 것을 가정하여 위험거리를 분석하고 이를 통해 안전조치의 마련이 필요하다. 위험거리 분석을 위해 풍속과 누출량을 변화시켜 총 112개의 시나리오를 작성하였다. 작성된 시나리오를 위험농도기준에 의해 분석하였으며, 분석 결과 선정한 공장에서 황산이 전량누출되는 경우 6 m/s의 풍속에서 최대 9,978 m까지 확산되는 것으로 나타났다. 최대 확산거리 내에는 주거지역도 포함되었으며, 해당공장이 속한 행정구역 외 인근 행정구역까지 영향을 주는 것으로 확인되었다. 따라서, 산업단지에서 발생 가능한 황산 누출사고에 대해 사전에 누출을 방지하고 대응을 위한 방안을 마련하는 것이 필요하다.

**핵심용어 :** 화학물질누출, 누출량, 풍속, ALOHA

## 1. 서 론

화학물질이 취급 사용되는 공장의 경우 환경오염 및 주민들의 반대 등을 이유로 산업단지 내에 위치하고 있는 경우가 많다. 현재 국내에 많은 산업단지가 존재하고 있으며 이 중 시화국가산업단지와 반월국가산업단지의 경우 도심에 가까이 위치하고 있어 사고 시 큰 피해가 발생될 수 있다. 시화국가산업단지와 반월국가산업단지는 각각 1986년, 1978년부터 조성되기 시작하여 초기에 조성된 공장의 경우 최소 30년 이상이 경과되었으며, 오래 전에 조성된 산업단지의 경우 시설낙후 및 안전장치 미비 등으로 인하여 사고가 발생될 가능성이 높다. 현재까지 누출로 인한 사고가 매년 발생하고 있어 화학물질의 누출에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

이와 관련하여 선행연구로 Kim et al. (1996)은 유해물질 취급시설에서의 폭발 또는 누출로 인해 피해를 줄 수 있는 위험상황의 유형에 대해 분석하였으며, Ko (2013)는 불산가스 누출과 관련하여 시뮬레이션을 이용하여 AEGL-3의 결과를 분석하였으며, Jeong and Beak (2018)은 화학공장에서 염소가스 누출 사고 시 유해위험거리를 ALOHA를 이용하여

*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

분석하였으며, Hwang (2021)은 항만시설에서 과산화수소의 누출량을 변화시키며 확산거리를 분석하였다.

또한, 황산과 관련하여 Yoo and Kim (2019)은 누출궤적 평가모듈 개발을 통해 염산과 황산 저장탱크의 방류벽 높이 적정성을 검증하고 이격거리에 따른 방류벽 높이를 제시하였으며, Cho et al. (1998)은 황산저장탱크 바닥판에서 발생한 균열손상해석을 통해 용접시공관리의 중요성을 언급하였다. 정책적인 면에서 Moon and Kim (2014)는 국내 화학물질의 관리정책에 대한 고찰을 통해 화학물질 관리정책의 올바른 발전 방향을 제시하였다.

본 연구에서는 산업에서 많이 사용되고 있는 황산의 누출을 가정하여 누출량과 풍속 변화에 의한 확산거리를 확인하고, 황산 사용시설에 대한 누출대책을 수립하고자 하였다.

## 2. 공장의 선정배경 및 취급물질

### 2.1 공장 선정 배경

선정한 공장은 반월국가산업단지 내에 위치하고 있는 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)을 제작하는 공장이다. 선정한 공장의 경우 약 2 km 거리에 초등학교와 주거지역이 있으며, 약 2.2 km 거리에는 지하철역이 존재하고 있다. 반경 3 km 거리 내에 바다와 2개의 지하철역이 존재하고 있다. 선정한 공장의 위치 및 주변은 Fig. 1과 같다.

### 2.2 공장의 취급물질

선정한 공장은 PCB를 제조하기 위하여 여러 단계의 공정을 거치게 되며 이러한 과정에서 매우 다양한 화학물질이 활용된다. 제조를 위해 저장 취급하는 물질 중 위험물에 해당하는 물질의 종류와 량은 Table 1과 같다.

선정공장에서 가장 많이 보관 사용되는 황산의 경우 PCB의 제조를 위해 동도금 후 회로 외의 불필요한 구리부분을 제거하는 과정 등에서 사용되어 진다. PCB를 제조하는 과정 중 동도금 공정을 간략히 나타내면 Fig. 2와 같다(Park et al., 2018).

**Table 1.** Hazardous Material Storage Status by Factory

| Substance | Storage Amount |
|---|---|
| Dimethyl Ketone | 1.5 L |
| Methanol | 20 L |
| Butyl Cellosolve | 120 L |
| ISO VG-46 | 1,000 L |
| Hydrochloric Acid | 640 kg |
| Sulfuric Acid | 2,560 kg |

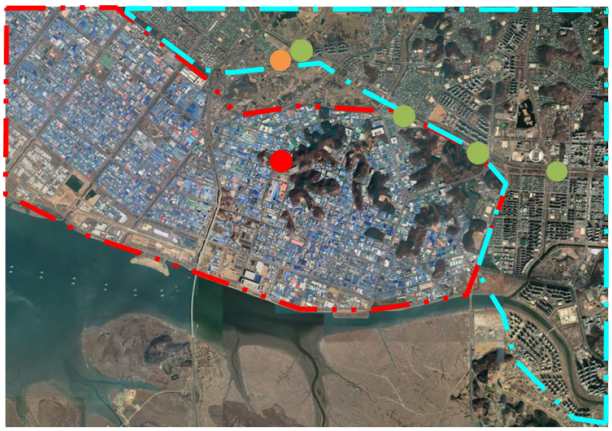
### 2.3 황산의 물리적 특성

황산에 대한 물리적 특성은 안전보건공단의 MSDS, NIST의 Chemistry WebBook, ILO의 International Chemical Safety Cards 등에서 확인할 수 있다. 해당 자료에서 물리적 특징을 정리하면 Table 2와 같다(ILO, 2021; KOSHA, 2021; NIST, 2021).

## 3. 시나리오 조건 및 피해예측

### 3.1 위험요소 및 모델의 선정

황산은 Normal Temperature and Pressure (NTP)에서 산화성액체로 화재, 폭발에 의한 사고가 발생되지 않는다. 따라서 황산에 의한 사고는 누출에 의한 증발로 인한 사고가 예상된다. 황산의 누출에 의한 피해범위를 예측하기 위해서 전 세계적으로 화학사고 예방 및 대응에 대해 활용되고 있는 Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA, v5.4.7)




Location : 37°31'91"N 126°76'45"E

**Fig. 1.** Selected Location

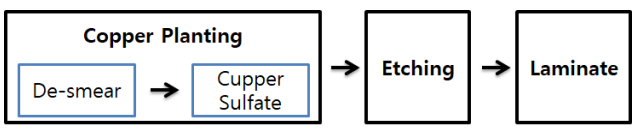



**Fig. 2.** PCB Plating Process

**Table 2.** Physical Properties of Sulfuric Acid

| Formula | Molecular Weight | Melting Point | Boiling Point | Vapor Pressure | Vapor Density | Heat Capacity |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $H_2SO_4$ | 98.08 g/mol | 10 ℃ | 337 ℃ | 6 hPa (at 20 ℃) | 1.81 kg/L | 83.68 J/mol・K |

확산모델을 적용하였다. ALOHA 확산모델은 물질의 물리적 특성과 기상조건 등에 의해 확산범위에 대한 해석수행이 가능하다.

### 3.2 누출확산에 의한 피해예측

황산이 누출되는 경우 위험물저장소에 의해 풀(pool)을 형성하게 된다. 풀이 형성하게 되면 증발에 의해 증기운이 형성되어 확산되는 과정을 거친다. 풀에서 물질이 증발되는 속도는 Eq. (1)과 같이 계산된다(KOSHA, 2020).

$$R_E = \frac{1.4U^{0.78} \cdot M_W^{2/3} \cdot A \cdot P_v}{82.05T} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 $R_E$은 증발속도(kg/min), $U$은 풍속(m/sec), $M_W$는 분자량, $A$는 풀의 면적($m^2$), $P_v$는 증기압(mmHg), $T$는 풀의 온도(K)이다.

Eq. (1)에서 풀의 면적 $A$는 방유제가 있을시 방유제의 넓이 또는 확산면적으로 산정하나, 방유제가 없는 경우 풀은 깊이는 1 cm로 산정하도록 되어있다(KOSHA, 2020). 해당 공장의 경우 별도의 방유제가 없으므로 풀은 깊이는 1 cm로 산정하였다.

ALOHA에서 가스확산은 Gaussian 모델과 DEGADIS 모델(DENSE GAS DISPERSION MODEL)로 계산된다. 이 중 공기보다 무거운 가스의 확산은 DEGADIS 모델을 기반으로 계산한다. ALOHA에서 확산모델을 선정하는 기준은 임계 Richardson number이다. Richardson number는 Eq. (2)와 같이 계산된다(Jones et al., 2013).

$$Ri_c = \frac{H \times \hat{g}}{U_*^2} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 $Ri_c$는 임계 Richardson number, $H$는 누출물의 특성에 따른 치수(m), $\hat{g}$는 감소된 중력($m/sec^2$), $U_*$ 은 바람의 속도(m/sec)에 의한 마찰이다.

Eq. (2)에 의해 계산된 임계 Richardson number가 1보다 큰 경우 ALOHA 확산모델은 DEGADIS 모델에 의해 계산된다. DEGADIS 모델에서 오염물질의 확산부분에 대한 농도는 Eqs. (3), (4)와 같이 계산된다(Havens and Spicer, 1985; Spicer and Havens, 1986; Jones et al., 2013).

$$C(x,y,z) = C_c(x)\exp\left(-\frac{|y|-b(x)}{S_y(x)}\right)^2 - \left(\frac{z}{S_z}\right)^{1+n} \quad |y| > b(x) \quad (3)$$

$$C(x,y,z) = C_c(x)\exp\left(-\left(\frac{z}{S_z}\right)^{1+n}\right) \quad |y| \le b(x) \quad (4)$$

Eqs. (3), (4)에서 $x$는 확산방향의 거리(m), $y$는 확산방향에 따른 수평거리(m), $z$는 확산높이(m), $b(x)$는 확산방향으로 $x$만큼 이동한 곳에서 중심축부터 $y$축 방향으로 농도감소가 없는 부분에 대한 거리(m), $C_c(x)$는 $x$방향 중심선 지면에서의 물질농도(ppm), $S_y(x)$는 측면분산 매개변수(m), $S_z$는 수직분산 매개변수(m)이다.

Eqs. (3), (4)에 의해 계산되어진 확산부분의 농도를 통해 물질이 $x$방향에서 $y$만큼 확산된 범위는 Eq. (5)와 같이 계산된다(Jones et al., 2013).

$$B_{ef}(x) = b(x) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} S_y(x) \quad (5)$$

Eq. (5)에서 $B_{ef}$는 물질확산 거리에서의 유효폭(m)이다.

### 3.3 기상데이터

기상데이터는 물질확산의 변수로 작용한다. ALOHA 확산모델에 해당지역의 기상데이터를 적용하기 위해서 기상청의 자료를 이용하였다. 2020년도 월별 기후조건을 정리한 내용은 Table 3과 같다(Meteorological Agency's Weather Data Open Portal, 2021).

### 3.4 ALOHA 시뮬레이션 조건

ALOHA 확산모델을 수행하기 위해서는 기상데이터 및

**Table 3.** Weather Data in Ansan in 2020

| Element | Month | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Average Temperature (℃) | 0.6 | 1.7 | 6.2 | 9.7 | 16.4 | 21.7 | 22.7 | 25.7 | 19.8 | 11.9 | 6.5 | -1.2 |
| Average Relative Humidity (%) | 76 | 75 | 65 | 64 | 79 | 81 | 86 | 91 | 82 | 76 | 74 | 67 |
| Average Wind Speed (m/s) | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 1.3 | 1 | 1 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| Wind Direction | NW | NW | NW | NW | SW | SW | ESE | SSW | ENE | NW | NW | NW |
| Maximum Wind Speed (m/s) | 9.3 | 10 | 12.6 | 12.6 | 10.2 | 8.8 | 11.5 | 13.9 | 12.9 | 10.6 | 10.6 | 10.4 |
| Wind Direction of Maximum Wind Speed | SW | WNW | NNW | SW | SSW | NE | ENE | SSW | NW | NW | NW | NNW |

화학물질의 특성, 누출원의 위치, 크기 등에 대한 입력이 필요하다. 위험범위 산정을 위한 입력조건은 다음과 같다.

#### 3.4.1 대기온도 및 상대습도

대기온도 및 상대습도는 2020년의 월별 측정치의 전체 평균으로 산정한 온도와 습도를 적용하였다.

#### 3.4.2 풍속 및 풍향

Table 3에서 2020년 순간최대풍속은 13.9 m/s이었다. 화학물질의 누출 시 해당지역의 최악의 조건을 확인하기 위하여 2 m/s씩 늘리며 최대 14 m/s까지 적용하였으며, 풍향은 최다풍향을 적용하였다.

#### 3.4.3 기타 기상조건

ALOHA 확산모델을 수행하는데 있어 온도, 습도, 풍속, 풍향 외에 구름량, 대기안정도 등의 데이터도 필요하다. 그러나, 해당지역의 경우 기상청의 종간기상관측이 이루어지지 않고 있는 지역으로 방재기상관측만 측정되고 있다. 방재기상관측이 이루어지는 지역의 경우 구름량 및 대기안정도에 대한 데이터가 존재하지 않는다. KOSHA Guide에서는 대안사고에서 기상조건을 확인이 불가능한 경우 대기안정도는 D등급을 적용하도록 하고 있다(KOSHA, 2020). 또한 구름량에 대한 정보는 확인되지 않으므로 중간값을 적용하였다.

#### 3.4.4 화학물질의 양 및 누출원 입력조건

해당공장에서 최악의 누출은 보관하고 있는 물질 전체가 누출되는 것이다. 따라서 누출되는 황산을 160 kg씩 증가시키며 최대량인 2,560 kg까지 누출되는 것으로 가정하였다. 또한, 화학물질은 순간 누출되는 것으로 하였으며 누출높이는 최악의 조건으로 선정하기 위하여 0 m로 하였다. ALOHA 확산모델을 위해 입력한 누출원에 대한 정보를 정리하면 Table 4와 같다.

### 3.5 시나리오 및 평가조건

#### 3.5.1 시나리오

화학물질 누출 시 누출량과 바람에 의한 피해범위를 예측하기 위해 앞서 언급한 것과 같이 누출량 16개 기준, 풍속 7개 기준을 적용하여 총 112개의 시나리오를 구성하였다.

**Table 4.** Input Data of Source

| Source | Input Data |
|---|---|
| Type | Direct |
| Release Type | Instantaneous |
| Amount | 160~2,560 kg |
| Height | 0 m |

112개의 시나리오는 풍향 NW, 대기온도 11.8 ℃, 상대습도 76%는 동일하다. 이 중 시나리오에 따라 달라지는 누출량과 풍속을 정리하면 Table 5와 같다.

#### 3.5.2 평가조건

독성물질이 인체에 미치는 영향은 농도와 노출시간에 따라 달라진다(Hwang, 2021). 독성농도와 관련하여 Emergency Response Planning Guideline (ERPG), Acute Exposure Guideline Level (AEGL), Temporary Emergency Exposure Limits (TEEL) 등 다양한 기준이 존재하고 있다. 따라서, 독성물질의 농도적용에 있어 혼동의 우려가 있으므로 AEGL, ERPG, TEEL 순으로 우선 적용하도록 DOE (U.S. Department of Energy)에서는 Protective Action Criteria (PAC)를 제시하고 있다. 따라서 금회 연구에서는 PAC에서 제시한 것과 같이 AEGL 기준을 적용하였으며 환산의 PAC에 의한 기준을 요약하면 Table 6과 같다(FEMA et al., 1990; EPA and NOAA, 2007; NICS, 2016; Hwang, 2021).

## 4. 시나리오의 사고피해예측 및 결과분석

### 4.1 시나리오 별 사고피해예측

시나리오 조건에 따른 피해범위를 예측하기 위해 ALOHA 확산모델을 구동하였다. 시나리오에 따른 PAC 기준에 의한 확산거리를 정리하면 Table 7과 같다.

### 4.2 결과분석

#### 4.2.1 개별 시나리오 분석

개별 시나리오에 의한 결과를 분석한 결과 풍속일 동일한 경우 누출량이 많을수록 확산거리도 증가됨을 보여주었다. 최대누출량 2,560 kg에서 PAC-3는 풍속 14 m/s 조건에서 599 m, PAC-2는 풍속 8~14 m/s 조건에서 2,253 m, PAC-1은 풍속 6 m/s 조건에서 9,978 m까지 확산되었다. PAC-1이 최대로 확산되는 풍속 6 m/s에서의 확산범위를 표현하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 누출원위치는 해당 공장의 황산 저장위치이며 PAC-3, PAC-2, PAC-1은 각각 적색, 주황색, 황색으로 표현하였다. 확산된 부분을 보면 공장지역으로 확산됨을 알 수 있다. 또한, 이 경우에도 PAC-1은 이웃한 행정지역인 화성시의 주거지역에도 영향을 줄 수 있음을 보여주고 있다.

#### 4.2.2 시나리오에 의한 영향분석

확산범위는 화학물질 누출량에 의해 결정되나 같은 누출량이더라도 풍속에 의한 확산거리의 변화를 보여준다. 특히, 풍속이 2 m/s에서는 누출량에 따라 확산거리가 지속적으로 증가됨을 보여준다. 누출량과 풍속에 의한 PAC-3, PAC-2, PAC-1의 거리를 표현하면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 PAC-3의 경우 풍속이 증가될수록 확산거리가

**Table 5.** Differences Among the Conditions of the Scenario

| Scenario No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Scenario No. | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Scenario No. | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Scenario No. | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Scenario No. | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Scenario No. | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Scenario No. | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Scenario No. | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Scenario No. | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Scenario No. | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Scenario No. | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 |
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Scenario No. | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Scenario No. | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
| Leakage Amount (kg) | 160 | 320 | 480 | 640 | 800 | 960 | 1,120 | 1,280 |
| Wind Speed (m/s) | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Scenario No. | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 |
| Leakage Amount (kg) | 1,440 | 1,600 | 1,760 | 1,920 | 2,080 | 2,240 | 2,400 | 2,560 |
| Wind Speed (m/s) | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |

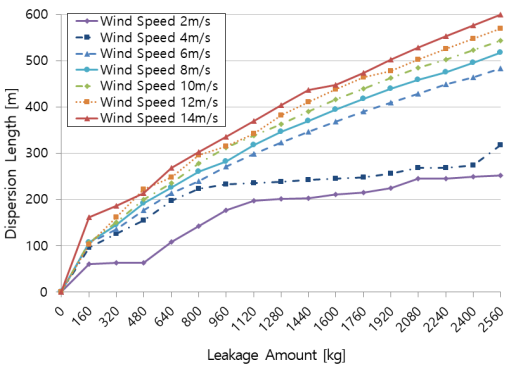
**Table 6.** PAC Level of Sulfuric Acid

| Level | Exposure Time | Concentrations |
|---|---|---|
| PAC-3 | 60 min | 160 ($mg/m^3$) |
| PAC-2 | 60 min | 8.7 ($mg/m^3$) |
| PAC-1 | 60 min | 0.2 ($mg/m^3$) |

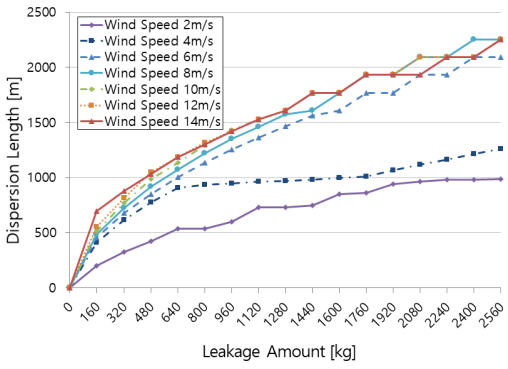
**Table 7.** Results of Each Scenario

| Scenario No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PAC-3 (m) | 60 | 63 | 63 | 108 | 143 | 176 | 198 | 201 |
| PAC-2 (m) | 202 | 326 | 420 | 534 | 537 | 602 | 728 | 731 |
| PAC-1 (m) | 1,234 | 2,253 | 2,897 | 3,058 | 3,219 | 3,541 | 3,701 | 3,862 |
| Scenario No. | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| PAC-3 (m) | 202 | 210 | 215 | 224 | 245 | 245 | 250 | 251 |
| PAC-2 (m) | 745 | 852 | 860 | 944 | 967 | 979 | 980 | 988 |
| PAC-1 (m) | 4,184 | 4,184 | 4,506 | 4,667 | 4,667 | 4,828 | 4,989 | 4,989 |
| Scenario No. | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| PAC-3 (m) | 96 | 125 | 155 | 197 | 223 | 232 | 236 | 239 |
| PAC-2 (m) | 412 | 615 | 774 | 909 | 937 | 948 | 961 | 968 |
| PAC-1 (m) | 2,897 | 4,184 | 4,989 | 5,633 | 5,794 | 5,955 | 5,955 | 6,116 |
| Scenario No. | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| PAC-3 (m) | 242 | 245 | 248 | 256 | 268 | 269 | 274 | 317 |
| PAC-2 (m) | 980 | 996 | 1,012 | 1,065 | 1,116 | 1,165 | 1,217 | 1,262 |
| PAC-1 (m) | 6,116 | 6,276 | 6,276 | 6,437 | 6,598 | 6,598 | 6,920 | 7,081 |
| Scenario No. | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| PAC-3 (m) | 105 | 135 | 176 | 213 | 240 | 272 | 299 | 323 |
| PAC-2 (m) | 454 | 678 | 851 | 1,002 | 1,137 | 1,254 | 1,365 | 1,467 |
| PAC-1 (m) | 2,897 | 4,023 | 4,828 | 5,472 | 5,955 | 6,598 | 6,920 | 7,403 |
| Scenario No. | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| PAC-3 (m) | 346 | 369 | 390 | 409 | 429 | 449 | 465 | 484 |
| PAC-2 (m) | 1,563 | 1,609 | 1,770 | 1,770 | 1,931 | 1,931 | 2,092 | 2,092 |
| PAC-1 (m) | 7,725 | 8,208 | 8,530 | 8,81 | 8,851 | 9,334 | 9,656 | 9,978 |
| Scenario No. | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |
| PAC-3 (m) | 107 | 144 | 191 | 226 | 261 | 282 | 317 | 346 |
| PAC-2 (m) | 486 | 727 | 921 | 1,074 | 1,221 | 1,351 | 1,462 | 1,575 |
| PAC-1 (m) | 2,897 | 4,023 | 4,828 | 5,311 | 5,955 | 6,437 | 6,920 | 7,242 |
| Scenario No. | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 |
| PAC-3 (m) | 369 | 394 | 417 | 440 | 459 | 475 | 496 | 518 |
| PAC-2 (m) | 1,609 | 1,770 | 1,931 | 1,931 | 2,092 | 2,092 | 2,253 | 2,253 |
| PAC-1 (m) | 7,564 | 8,047 | 8,208 | 8,530 | 8,851 | 9,173 | 9,495 | 9,656 |
| Scenario No. | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |
| PAC-3 (m) | 107 | 150 | 199 | 236 | 278 | 312 | 337 | 363 |
| PAC-2 (m) | 516 | 770 | 984 | 1,138 | 1,296 | 1,429 | 1,527 | 1,609 |
| PAC-1 (m) | 2,897 | 3,862 | 4,667 | 5,311 | 5,794 | 6,276 | 6,598 | 7,081 |
| Scenario No. | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| PAC-3 (m) | 390 | 416 | 440 | 463 | 463 | 503 | 523 | 543 |
| PAC-2 (m) | 1,770 | 1770 | 1,931 | 1,931 | 1,931 | 2,092 | 2,092 | 2,253 |
| PAC-1 (m) | 7,403 | 7,725 | 8,047 | 8,047 | 8,369 | 9,012 | 9,173 | 9,495 |
| Scenario No. | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 |
| PAC-3 (m) | 102 | 162 | 221 | 248 | 295 | 315 | 342 | 381 |
| PAC-2 (m) | 555 | 817 | 1,050 | 1,184 | 1,319 | 1,422 | 1,527 | 1,609 |
| PAC-1 (m) | 2,897 | 3,862 | 4,667 | 5,150 | 5,794 | 6,116 | 6,598 | 6,920 |
| Scenario No. | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |
| PAC-3 (m) | 411 | 438 | 464 | 478 | 503 | 526 | 548 | 569 |
| PAC-2 (m) | 1,770 | 1,770 | 1,931 | 1,931 | 2,092 | 2,092 | 2,092 | 2,253 |
| PAC-1 (m) | 7,242 | 7,564 | 7,886 | 8,208 | 8,530 | 8,851 | 9,012 | 9,334 |
| Scenario No. | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
| PAC-3 (m) | 162 | 186 | 214 | 269 | 303 | 335 | 369 | 404 |
| PAC-2 (m) | 695 | 878 | 1,034 | 1,188 | 1,299 | 1,420 | 1,529 | 1,609 |
| PAC-1 (m) | 2,897 | 3,862 | 4,506 | 5,150 | 5,633 | 6,116 | 6,437 | 6,920 |
| Scenario No. | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 |
| PAC-3 (m) | 437 | 447 | 474 | 502 | 528 | 552 | 576 | 599 |
| PAC-2 (m) | 1,770 | 1,770 | 1,931 | 1,931 | 1,931 | 2,092 | 2,092 | 2,253 |
| PAC-1 (m) | 7,242 | 7,564 | 7,886 | 8,047 | 8,369 | 8,690 | 8,851 | 9,173 |

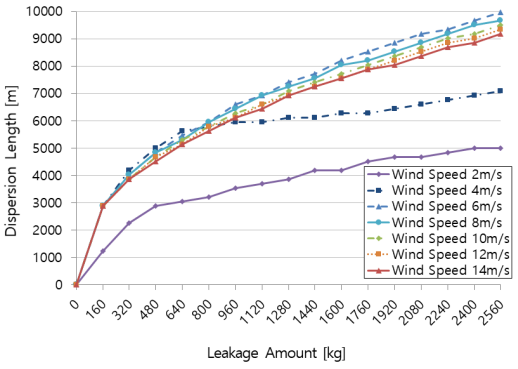
**Fig. 3.** Maximum Dispersion Range in ALOHA Air Dispersion Model




(a) PAC-3




(b) PAC-2




(c) PAC-1

**Fig. 4.** Dispersion Length According to Leakage Amount and Wind Speed

증가되는 모습을 보여주었다. 그러나, PAC-2의 경우 누출량 800 kg 이상에서는 풍속 10 m/s 이상은 거의 비슷한 확산거리를 보여주었으며, 누출량이 1,600 kg이 넘는 경우에 풍속 8 m/s 이상인 상태에서는 확산거리에 큰 차이를 보여주지 않는다. PAC-1의 경우 풍속이 2 m/s, 4 m/s에서는 누설량에 따라 확산거리가 증가되는 것을 보여준다, 특히, 풍속이 2 m/s와 4 m/s는 확산거리에서 다른 풍속과 달리 명확한 차이를 보여주었다.

풍속이 4 m/s 이상인 경우 누출량 960 kg까지는 전반적으로 비슷한 확산거리를 보여주나 그 이후에서는 풍속 4 m/s와 그 이상의 풍속은 확산거리의 차이를 확실하게 보여주고 있다. 또한 6 m/s 이상의 풍속에서는 누출량에 따라 조금씩의 차이를 보이나 전반적으로 비슷한 확산거리를 보여준다. 특이한 점은 PAC-3, PAC-2에서는 풍속이 가장 빠른 14 m/s에서 최대 확산을 보이나 PAC-1은 6 m/s에서 최대 확산거리를 가진다. 6 m/s에서 최대확산이 발생한 이유는 PAC-1의 경우 빠른 풍속이 확산보다는 물질농도 희석에 더 영향을 미치기 때문인 것으로 분석된다. 즉 PAC-1의 경우는 PAC의 기준농도 중 가장 낮은 농도조건이므로 바람이 빠를수록 농도희석이 발생되며, 풍속이 너무 느린 경우 물질의 확산에 제한을 주기 때문인 것으로 분석된다.

또한, 사람들이 대피능력을 상실하는 농도인 PAC-2의 경우 최대 2,253 m까지 확산되므로 해당지역에서 물질이 노출될 경우 근처의 초등학교와 주거지역 및 지하철역까지도 영향을 줄 수 있으므로 누출 및 확산방지를 위한 대책마련이 필요하다.

## 5. 결 론

산업단지에 위치한 공장에서의 황산이 누출될 경우를 가정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 황산의 누출 시 누출량이 많을수록 확산거리도 증가된다. 다만 동일한 양이 누출되더라도 풍속에 의해 확산거리는 달라지는 경향을 보였다. 이러한 것은 풍속이 빠를수록 화학물질을 확산시키기는 동시에 희석시키기 때문인 것으로 분석되었다.

(2) 개별 시라니오에 의한 분석결과 최대 확산거리는 누출량이 최대인 2,560 kg에서 발생되었다. 다만, PAC-3, PAC-2, PAC-1의 최대 확산거리는 풍속에 의해 달라졌으며, PAC-3는 풍속 14 m/s 조건, PAC-2는 풍속 8~14 m/s 조건, PAC-1는 풍속 6 m/s 조건에서 최대로 확산되었다. 이 경우 최대 확산거리는 각각 599 m, 2,253 m, 9,978 m였다. 최대 확산조건에서 PAC-2의 농도가 유지되는 거리에 초등학교와 지하철역이 위치해 있다. 따라서, 최악의 경우 해당지역은 사람의 자립적인 피난이 어려울 수 있어 반드시 대책을 마련하여야 한다. 또한, PAC-1의 경우 약 10 km까지 확산될 수 있으므로

해당공장이 위치한 안산시에 국한되지 않고 인근에 위치한 시흥시 및 인천시까지도 영향을 줄 수 있으므로 도차원의 대책마련이 필요하다.

(3) 시나리오에 의한 분석결과 확산거리는 누출량과 풍속에 의존됨을 보여주었다. 풍속의 경우 2 m/s와 4 m/s의 조건에서는 확산거리는 분명한 차이를 보여주었다. PAC-3는 풍속이 증가될수록 확산거리가 길어지는 경향을 보였으며, PAC-2의 경우 6 m/s 이상의 경우 확산거리에 큰 차이를 보여주지 않았다. PAC-1은 누출량이 960 kg까지 4 m/s 이상의 풍속에서는 확산거리의 차이가 크지 않으나 그 이상의 누출량에서는 6 m/s 이상의 풍속에서는 확산거리가 비슷하였다.

(4) 따라서 황산의 누출에 의한 피해를 경감시키기 위해서는 방유제, 방지턱, 트렌치를 설치하고, 바닥에 에폭시 코팅 등을 하여 스며들지 않도록 조치하여야 한다. 또한, 증기 발생에 따른 증기운 축적을 방지하기 위한 국소배기 시스템을 설치하고 배출부위는 스크래버를 통해 배출되도록 하여 황산의 증기운이 형성되지 않도록 하여야 한다. 저장은 1개의 대형탱크가 아닌 소분하여 저장시킬 경우 누출량을 감소시켜 위험을 줄일 수 있다. 누출에 따른 방재대책을 위해서는 누출을 자동으로 감지하는 시스템이 필요하며, 누출 시 대응을 위한 석회석 등을 사용하기 쉬운 장소에 비치하여야 한다.

해당공장은 사고 시 황산 외에도 다양한 화학물질을 항시 가지고 있으므로 사고가 발생될 경우 더 큰 피해가 발생될 수 있다. 따라서 사고에 대비하여 주기적인 관리가 필요하며, 다양한 대책을 마련하여 최악의 사고를 예방하여야 한다.

## References


Cho, Y.J., Cho, J.C., Lee, B.Y., Lee, J.H., Kim, S.E., and Cho, K.S. (1998). A Study on the Failure Analysis of Bottom Plate in Sulfuric Acid Storage Tank. *Journal of the Korean Welding Society Summary of Special lectures and Spring Academic Presentations*, Vol. 1, pp. 65-68.

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.

Havens, J.A., and Spicer, T.O. (1985). Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier-Than-Air Gas Mixtures vol.1. *U.S. Department of Transportation United States Coast Guard*, pp. 53-77.

Hwang, W.Y. (2021). A Study on the Prediction of Damage Ranges by Leakages of Seaport-Stored Substances. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.,* Vol. 21, No. 2, pp. 23-31.

International Labour Organization (ILO). (2021). *International Chemical Safety Cards.* Retrieved July 14, 2021, from https://www.ilo.org

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 NOS OR&R 43,* pp. 35-57.

Kim, K.H., Oh, Y.S., Chang, T.S., and Yoon, E.S. (1996). A Consequence Estimation of Release of Hazardous Materials to Surrounding Area. *Search Theories and Applications of Chemical Engineering*, Vol. 2, No. 2, p. 3067.

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.

Korea Occupational Safety Health Agency (KOSHA). (2020). *KOSHA GUIDE P-107-2020*. Technical guidance on the selection of worst-case and alternative accident scenarios.

Korea Occupational Safety Health Agency (KOSHA). (2021). *Material Safety Data Sheet.* Retrieved June 26, 2021, from http://msds.kosha.or.kr

Meteorological Agency's Weather Data Open Portal. (2021). *Weather information.* Retrieved July 8, 2021, from https://data.kma.go.kr

Moon, S.G., and Kim, K.W. (2014). Regulatory policies of toxic chemical substances in Korea: Examining toxic substances registration and evaluation act. *Ewha Law Journal*, Vol. 19, No. 2, pp. 249-278.

National Institute of Chemical Safety (NICS). (2016). *Key Info Guide for Accident Preparedness Substance.* National Institute of Chemical Safety, p. 136.

National Institute of Standards and Technology (NIST). (2021). *Chemistry WebBook.* Retrieved May 25, 2021, from https://webbook.nist.gov

Park, C.H., Kim, H.S., Jeon, B.H., and Kim, D.H. (2018). Study on safety management plan through chemical accident investigation in PCB manufacturing facility etching process. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,* Vol. 19, No. 4, pp. 132-137.

Spicer, T.O., and Havens, J.A. (1986). Development of vapor dispersion models for nonneutrally buoyant gas mixtures-analysis of TFI/NH3 test data. *Air Force Engineering & Services Center,* pp. 16-30.

United States Environmental Protection Agency (EPA), and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2007). *Aloha User'S Manual*. EPA, NOAA.

Yoo, B.T., and Kim, H.G. (2019). Appropriateness assessment of dike height of a chemical plant through development of a hazardous chemical leakage trajectory evaluation module. *Journal of Fire Science and Engineering,* Vol. 33, No. 4, pp. 7121-129.

| | |
|---|---|
| ***Received*** | August 27, 2021 |
| ***Revised*** | August 30, 2021 |
| ***Accepted*** | September 13, 2021 |