

복합화력발전소 내 암모니아 누출 사고에 의한 피해영향 모델링

고은성¹ · 박경식² · 김동민³ · 노영태^{4*}

¹(주)한빛안전기술단 기업부설연구소 연구실장, ²(주)한빛안전기술단 기업부설연구소 수석연구원,
³(주)한빛안전기술단 기업부설연구소 연구소장, ⁴한국건설생활환경시험연구원 광주전남센터 센터장

Modeling of Damage Effects Caused by Ammonia Leakage Accidents in Combined Cycle Power Plant

Eun-Seong Go¹, Kyeong-Sik Park², Dong-Min Kim³, and Young-Tai Noh^{4*}

¹Research Director, Corporate Affiliated Research Institute, Hanbit Safety Technology Group

²Chief Researcher, Corporate Affiliated Research Institute, Hanbit Safety Technology Group

³CTO, Corporate Affiliated Research Institute, Hanbit Safety Technology Group

⁴Center Director, Gwangju Jeonnam Center, Korea Conformity Laboratories

요약

본 연구는 복합화력발전소 내 배연탈질 설비에서 원료 및 중간재로 많이 사용되는 암모니아의 연속 누출에 대한 유해 위험 거리 예측 및 정량적 평가를 위한 피해영향 모델링이다. 피해 예측은 사고 영향 평가와 확산모델을 기반으로 암모니아 저장탱크 누출사고의 최적 시나리오를 모델링 하기 위해 변수들의 조업조건을 표준조건으로 하였다. 대상지역인 한국서부발전 태안발전본부의 복합화력발전소는 온도, 습도, 풍속, 대기 안정도, 풍향 등의 계절적 요인에 따른 기상 조건과 지형적 조건을 설정하기에 최적의 조건이며, 시나리오에 따른 모델링 결과가 누출 사고에 대한 특성을 분석하기에 가장 적합하였다. 암모니아 가스는 Gaussian 확산모델을 기반으로 하여 확산에 따른 LOC 별 농도치를 도출하였다. 본 연구를 통한 ALOHA 모델링 결과는 대기 조건의 경우 온도가 높고 안정도가 표준수치 범위이며, 풍속이 낮을수록 암모니아 확산에 의한 인체 피해 영향 정도가 높아지는 것으로 분석되었다.

핵심용어: 암모니아 누출, ALOHA, 피해 영향 모델링, 복합화력발전소, 사고영향평가

ABSTRACT

This study focuses on modeling the impact of ammonia leakage from the storage tank in a combined cycle power plant's flue gas denitrification facility. It employs accident impact assessments and diffusion models to determine the optimal scenarios for ammonia storage tank leakage accidents. The study considers the operating conditions of variables as standard conditions for predicting the extent of damage. The Taean combined cycle power plant is chosen as the target area, taking into account seasonal factors such as temperature, humidity, wind speed, atmospheric stability, and wind direction. By utilizing a Gaussian diffusion model, the concentration of ammonia gas at various locations is estimated to assess the potential extent of external damage resulting from a leak. The study reveals that in conditions of high temperature and stable atmosphere within the specified range, lower wind speeds contribute to increased damage to the human body due to ammonia diffusion.

Keywords: Ammonia leakage, ALOHA, Damage effect modeling, Combined cycle power plants, Consequence analysis

*Corresponding author: Young-Tai Noh, laserno@kcl.re.kr ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-4479-7065>

Received: 21 June 2023, Revised: 5 September 2023, Accepted: 15 September 2023



1. 서론

지구온난화로 인한 환경 문제가 급속하게 심각해지면서 국제사회는 이를 해결하기 위한 긴밀한 협력과 조치가 필요한 상황에 직면하고 있다. 기후 변화의 영향은 세계적으로 널리 인식되어, 국내외 여러 국가들이 지구의 생태계와 인간의 삶에 미치는 영향을 최소화하려는 노력을 강화하고 있다. 이에 따라, 기후위기 대응을 위하여 EU, 미국, 캐나다 등 주요국들은 온실가스 감축 정책들이 점차적으로 실행되고 있으며 이러한 움직임은 글로벌 정치와 경제의 획기적인 변화를 불러오고 있다. EU를 비롯한 선진국을 중심으로, 지구온난화 문제에 대한 대응은 더 이상 미뤄질 수 없는 긴급한 과제로 인식되고 있다. 이러한 지구 전반에 걸친 노력은 더 이상 국경을 넘어선 문제로 진화하여, ‘30년 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contribution, NDC)’가 글로벌 이슈로 부상하게 되었다.

이와 같은 친환경 정책으로 인해 화력발전소도 대기오염물질 저감을 위해 발전 과정에서 배연탈질 설비를 도입하고 있다. 국내외 여러 복합화력발전소에서는 연소 시 암모니아 혼소 기동을 적용하여 질소산화물(NO_x) 배출을 최소화하고 발전 효율을 증대시키는 추세이다(NIER, 2022). 따라서 화력발전 분야도 온실가스 감축을 위한 친환경 정책이 늘어남에 따라 기존 암모니아 사용량보다 더 많은 수요가 발생할 것으로 판단된다. 암모니아 사용에 대한 수요가 늘어남에 따라 저장용량 및 저장탱크의 수도 증가하여 발전소 내 누출 사고 발생에 대한 대책의 필요성 또한 증대되고 있다. 국내외 암모니아 누출 사고 사례 중 국내 발전소 내 암모니아 저장탱크 누출 사례와 미국의 캘리포니아주 원자력발전소 내 암모니아 저장탱크 누출 사고 사례 등을 참고하여 누출 사고 시나리오를 선정하였다.

본 연구에서의 누출 사고 시나리오는 복합화력발전소 내 화학물질 누출 사고 중 배기 탈질 설비에 위치한 암모니아 저장탱크의 누출에 대한 피해 영향을 분석하여 사고 발생 시 심각한 영향 정도를 평가하고자 한다. 분석에 적용할 시나리오는 미국 EPA의 확산 모델 적용 지침과 ‘KOSHA Guide’, 「최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침」 등을 참고하여 사고 발생 시 현실적으로 발생 가능한 시나리오를 설정하였다. 평가 대상지역으로 태안 지역에 있는 화력발전소로 선정하였는데 이는 배연탈질 설비를 도입한 시설이 존재하고, 대상 지역 주변에는 인구밀집지역이 존재하기에 유해 물질 누출 시 피해 영향 정도에 대한 분석이 필요로 하다.

본 연구에서는 유해물질에 의한 인명 피해에 지대한 영향을 야기할 수 있는 풍하거리에 따른 인체 피해영향평가를 수행하였다. ALOHA 기반의 사고 시나리오 모델링을 통하여 유해가스 농도를 확인·분석하였고 「사고피해영향 평가에 관한 기술지침」을 참고한 Probit 기법에 의해 사고에 따른 피해를 사고발생 경로와 사고발생 시 인명 피해 정도로 예측하였다.

2. 누출 시나리오 모델링

2.1 암모니아 누출 사고 사례

본 연구에서 복합화력발전소 내 여러 화학물질 중 암모니아(Ammonia)를 선정한 배경은 누출 사고가 많이 발생하는 국내외 주요 사고원인 물질 중 하나이기 때문이다. 최근 5년간 발생 횟수는 Table 1과 같으며, 주요 사고 원인으로는 시설 결함, 안전기준 미준수, 운송차량 순으로 발생빈도가 높은 것으로 Table 2와 같이 나타났다. 그중 시설 결함은 52건으로 가장 많은 원인으로 발생하였고, 그에 따른 사고 유형은 화재 1건, 폭발 2건, 누출 84건, 기타 1건 등으로 누출 사고가 가장 주된 사고 사례인 것을 알 수 있었다. Table 3을 보면 국내에서 발생한 ‘14년~’22년까지의 암모니아 누출 사고 사례를 살펴보면 총 88건이 사고가 발생하였다.

Table 1. Accidents related to ammonia in Korea

Year of occurrence ('18~'22)	Number of occurrences
2018	15
2019	9
2020	4
2021	12
2022	6
Total	46

Table 2. Accidents related to ammonia by cause

Cause of accident ('14~'22)	Number of occurrences
Transportation vehicle	3
Failure to comply with safety standards	33
Facility defect	52

Table 3. Accidents related to ammonia by type

Year of occurrence ('14~'22)	Number of occurrences
Fire	1
Explosion	2
Leakage	84
etc.	1

2.2 암모니아의 물리화학적 특성 및 독성

본 연구에서 암모니아의 물리화학적 특성 및 독성은 DIPPR(Design Institute for Physical Properties)과 「화학물질의 분류 및 표시 등에 관한 규정」의 정보를 활용하여 정의하였다(US EPA, 2022). 암모니아(NH₃)는 일반적으로 산업 분야에서 냉각계의 냉매로서 주로 사용이 되고 있으며, 최근에는 저탄소 친환경 연료 및 발전소에서는 탈질설비 내 촉매제로 활용되고 있다. 하지만 암모니아는 고압가스 안전관리법 상 가연성 가스, 독성가스로서 정의되며 급성독성, 폭발성이 강하여 화학물질 관리법상 사고 대비 물질로 규정되어 있다. 암모니아에 노출 시 인체가 입는 피해는 Table 4와 같이 정리되며, 극도의 자극성

Table 4. Toxicity exposure levels (ammonia)

Concentration (ppm)	Time (min)	Effect
10,000	-	Promptly lethal
5,000~10,000	-	Rapidly fatal
700~1,700	-	Incapacitation from tearing of the eyes and coughing
500	30	Upper respiratory tract irritation, tearing of the eyes
134	5	Tearing of the eyes, nasal irritation, eye · throat · chest irritation
140	120	Severe irritation, need to leave the exposure area
100	120	Nuisance eye and throat irritation
50~80	120	Perceptible eye and throat
20~50	-	Mild discomfort, depending on whether an individual is accustomed to smelling ammonia

으로 부식 성질을 가지고 고농도에 노출되면 기침, 후두염, 폐수종 등이 발생할 수 있는 것이 주요 특징이다. 따라서, 암모니아는 유독성 기체이기 때문에, 세계 대부분의 나라에서는 작업장이나 일상생활에서 허용될 수 있는 농도 기준을 정하여 관리하고 있다(KOSHA, 2012a; KOWEPO, 2022).

2.3 누출 및 피해예측 모델링 선정

2.3.1 ALOHA 모델 선정

본 연구에서 누출 및 피해 예측에 사용되는 ALOHA(v5.4.7) 프로그램은 Gaussian 모델을 주로 사용하고 무거운 가스의 경우 DEGADIS(Dense Gas Dispersion) 모델 등을 주로 사용하고 있다. ALOHA는 미국 EPA 및 NOAA에서 개발한 Gaussian 형태의 수동 확산과 증기 확산을 모사할 수 있는 모델이다. 유해 독성물질의 누출에 대한 분산 모델링 과정에서 첫 단계인 누출원 모델링은 누출원에서 유해 독성물질이 대기 중으로 누출되는 누출 속도를 평가하며, 누출 물질의 상태(기상, 액상, 2상 포화, 2상 과잉 등) 및 조건(온도, 압력), 누출 물질의 물리화학적 특성, 지형 및 기상 조건을 정의함에 따라 다양한 시나리오를 수행할 수 있다(Song, 1997).

본 연구의 누출 물질인 암모니아는 유해 독성물질로 수평 실린더형 저장탱크(Horizontal Cylindrical Tank)로부터 작업시 발생한 구멍을 통하여 액상 암모니아가 누출되어 웅덩이를 이루고 점차 기화되어 주변부로 퍼져나가는 시나리오를 가정하여 2상 흐름(Two-Phase Flow)의 연속 누출 상황을 모델링 하였다.

2.3.2 Gaussian 모델에 의한 확산이론(Oh, 1986; Crowl and Louvar, 1990)

대기확산(Dispersion) 모델은 가볍고 중성적인 부력 가스의 경우 Gaussian 모델을 주로 사용하고 고밀도인 무거운 가스의 분산은 다른 방정식들이 적용된다. Gaussian 모델을 통한 확산 결과에서 예상되는 농도는 시간평균 농도이므로, 순간적인 국부 농도의 예측과는 다른 결과를 얻을 수 있다. 대기에 배출된 오염물질은 바람, 난류확산, 반응 등에 의해 확산이 이루어지는데 이때 어느 한 지점(3-AXIS)의 시간에 따른 농도 변화율은 식 (1)로 표현하며 Gaussian 플럼 모델 적용 시에는 전제 조건이 필요하다.

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

여기서, C 는 농도(kg/m^3), U , V , W 는 X, Y, Z 방향의 풍속(m/s), E_x , E_y , E_z 는 X, Y, Z 방향의 확산계수($\text{m}^2/2$), K 는 반응 속도계수(1/s)을 의미한다.

Gaussian 확산모델 방정식에서는 지상 H_r 높이의 누출원과 일정속도 U 가 X 방향으로 바람이 이동하는 플럼의 누출원을 점원으로 가정하고 지표 반사를 고려하여 식 (2)로 표시된다.

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

지표면의 농도를 계산하기 위하여 $z = 0$ 으로 하면 식 (3)으로 정리된다.

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

여기서, C 는 지상농도(kg/m^3), Q 는 누출원 누출량(kg/s), y, z 는 Y, Z 방향의 누출원 농도 분포에 대한 표준편차(m), U 는 누출원 배출지점의 고도 H에서의 풍속(m/s), H_r 은 오염물질 배출지점의 높이(m)을 의미한다.

x축에 대한 최대의 지상농도 $\langle C \rangle_{\max}$ 는 식 (4)와 같다.

$$\langle C \rangle_{\max} = \frac{2Q_m}{e\pi u H_r^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right) \quad (4)$$

여기서, C 는 지상농도(kg/m^3), Q_m 은 일정한 지점에서의 물질 누출량(kg/s), u 는 누출원 배출지점의 고도 H에서의 풍속(m/s), H_r 은 오염물질 배출지점의 높이(m)이 된다.

따라서, 지상농도가 최대로 되는 풍하거리는 식 (5)에 의하여 도출된다.

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

2.3.3 피해영향 범위 및 기준

피해영향 범위는 화학사고로 인한 유해화학물질이 화재·폭발 또는 누출로 인하여 사고 지점으로부터 사람이나 환경에 영향을 미칠 수 있는 범위를 말하며, 끝점은 사람이나 환경에 영향을 미칠 수 있는 독성농도, 복사열, 과압 등의 수치에 도달하는 지점을 말한다. 끝점농도는 2016년도 독성 우려농도 기준인 ERPG-2 150 ppm으로 평가 기준으로 정의하였다. 본 연구에서 ERPG-2는 경계지역 외부의 안전한 시설로 설정되어 비가역적 건강 피해 범위에서 벗어날 수 있기 때문에 허용 노출기준인 ERPG를 경계 기준으로 하였다. 대피지역은 끝점농도(ERPG-2)에 해당하는 인접주민을 최대한 빨리 안전한 대피장소로 유도하도록 선정하였으며, 각 개인별 특성에 따라 상이한 피난 결과를 불러오기에 정확한 피해 정도를 판단하기가 어렵다 (Lee, 2000).

3. 누출 및 피해예측 모델링 선정

3.1 사고 시나리오 조건 정의

본 연구에서 누출 사고의 발생 행태는 Fig. 1과 같이 연속적인 누출로서 기존 사고 사례를 참고하였다. 복합화력발전소는 대기배출방지 시설 중 하나인 탈질공정 시 기화기 내 안전밸브 이상이나 액체암모니아 저장탱크에서의 누출공으로 인한 외부 토출 사고가 있다. 이렇게 누출된 암모니아는 주변으로 확산되어 광범위한 지역에 독성으로 인한 피해를 줄 수 있다. 그렇기에, 사고 발생 시 영향범위를 사전에 예측하여 주변영향을 대비하고 사고 발생 시 일어날 수 있는 경우를 사전에 대비할 수 있는 방안을 수립할 필요가 있다. 특히 탈질공정은 액화가스 암모니아를 대용량으로 저장하여 사용하므로 누출 시 광범위로 확산이 가능하다.

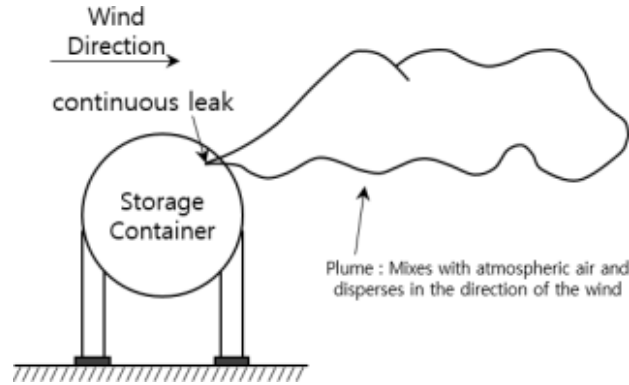


Fig. 1. A specific plume formed due to the continuous leakage of material

본 연구의 사고 시나리오는 탈질공정을 위한 액화암모니아 저장 탱크에서의 누출 사고로 선정하였고, 시나리오 수행을 위한 조건을 정의하였다. 암모니아는 상온 대기 중 노출 시 기체 상태의 가연성 가스지만 쉽게 점화가 발생하지는 않는다. 하지만 고농도로 노출 시 독성으로 인한 인적 피해가 발생할 수 있기 때문에 주의가 필요한 공정이다. 누출 사고에 대한 시나리오는 기상, 대기, 지형 등의 특성에 따라 피해 범위가 서로 상이한 결과를 나타내기에 보다 정확한 시뮬레이션 결과를 위해서는 대상 지역에 대한 기상 조건, 환경 조건, 지형지물 조건 등을 조사하여 적용하여야 한다(KOSHA, 2020).

3.1.1 최악의 사고 시나리오 선정

본 연구에서의 누출 사고 시나리오는 피해영향평가를 위해 「사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침」을 규정하고 있으며, 장외 영향평가서 작성 등에 관련된 규정은 화학물질관리법 제23조, 동법 시행규칙 제19조 등이 있다. 해당 규정에서 기술되어 있는 사고 시나리오란 화재, 폭발 및 유출, 누출 사고로 인한 영향범위가 사업장 외부에 미치거나 사업장 외부까지 영향은 미치지 않더라도 근로자 등에게 심각한 영향을 줄 수 있는 사고를 칭한다. 따라서, 관련 기술지침 및 규정에 따라서 유해화학물질이 최대로 저장된 단일 저장용기 또는 배관 등에서 화재·폭발 및 누출로 인해 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 ‘최악의 사고 시나리오’를 선정한다.

3.1.2 대안의 사고 시나리오 선정

「사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침」에 기술되어 있는 사고 시나리오는 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향범위가 사업장 밖까지 미치는 경우에 한정하였다. 조건은 유해독성물질이 최소 하나 이상 존재하여야 하며, 인화성 물질은 화재·폭발사고를 대표할 수 있는 시나리오를 선정해야 한다. 또한, 해당 지역의 최근 1년간 월별 평균 기온, 평균 습도, 최다 풍향, 평균 풍속 등의 기상정보와 대기안정도, 지표면의 굴곡도 등을 사용하여 작성하도록 되어

Table 5. Seasonal average data in Taean (2021)

Element	Season			
	Spring	Summer	Fall	Winter
Average temperature (°C)	12	24.6	15	-0.5
Relative humidity (%)	71	84	78	72
Stability class	E	E	E	E
Wind speed (m/s)	2.2	1.8	1.7	2
Wind direction	SW	SSW	ENE	NE

있다. 본 연구에서는 대상 지역(태안)의 '21년 기상청 자료를 토대로 Table 5와 같이 계절별 기상 정보를 적절히 반영하여 관련 기술지침 및 규정에 따른 적합한 사고 시나리오를 선정하였다(KMA, 2021).

3.2 기상 조건

태안지역의 피해영향범위 산출을 위하여 계절별 대안 시나리오와 이를 비교하기 위한 최악의 시나리오를 가정하여 연구를 수행하였다. 대안 시나리오는 계절별 평균 기온, 습도, 풍속, 풍향을 적용하였고 최악의 사고 시나리오는 기온 25도, 습도 50%, 풍속 1.5 m/s로 가정하였다. 연평균 풍향, 풍속의 경우 Fig. 2와 같이 북동풍이 강하게 작용하였으며 빈도 비율로 보았을 때, 북풍(북풍, 북동풍, 동북동풍)의 비율이 가장 높은 30.7%, 풍속의 빈도 비율은 0.5~3.3 m/s 구간에서 65.5%로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 여름철에는 계절적 영향으로 인해 남서풍의 평균풍향, 풍속이 우세하게 나오는 것을 확인할 수 있다.

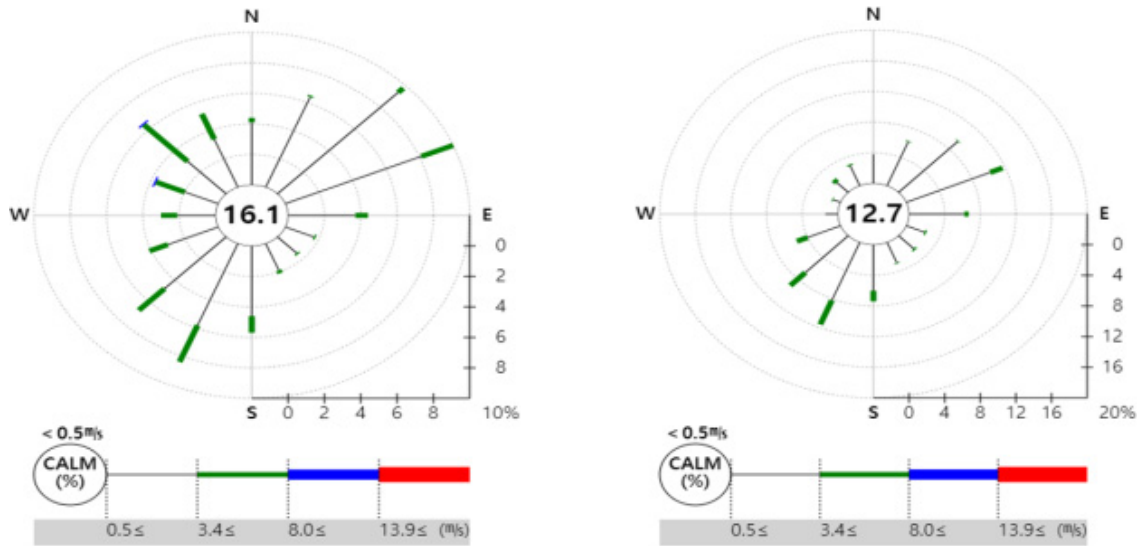


Fig. 2. Average wind rose in Taeon (2021) (left), Summer (right)

3.3 ALOHA 시뮬레이션 조건

본 연구에서의 사고 시나리오는 액체 암모니아 저장탱크에서의 누출로 인한 사고이기에 액체암모니아의 누출 및 확산으로 인한 정교한 해석을 위해 대기온도, 풍속, 대기안정도 변화에 따른 우려농도기준(Level of Concern, LOC)의 누출 경과시간(누출원으로부터 관심지점까지 도달하는 시간)을 ALOHA의 Gaussain Gas Model을 적용하여 분석하였다. 이와 같은 조건 입력을 통해 최악의 사고 및 대안의 사고 시나리오별로 적용하여 각 시나리오별 확산범위를 도출한다.

3.3.1 대기온도

대기온도는 25도를 기준으로 하였고, 여름철 평균 온도와 겨울철 평균 온도로 비교하였다.

3.3.2 풍속

풍속은 4 m/s를 기준하여 3 m/s, 5 m/s에 대하여 비교하였다.

3.3.3 대기안정도

대기안정도는 Table 6과 같이 D(중립)등급을 기준으로 하여 A, B, C, E, F등급과 비교하였다. 최악의 사고 시나리오 분석인 경우에는 지상 10 m 높이에서 초당 1.5 m의 풍속으로 하고 대기안정도는 F등급을 사용하고, 대안의 사고 시나리오 분석인 경우에는 풍속은 과거 1년 이상 그 지역의 평균 기상조건 및 대기안정도를 사용한다. 단, 확인불가 시에는 풍속은 지상 10 m 높이에서 초당 3 m로 하고, 대기안정도는 D등급을 사용한다.

Table 6. Atmospheric stability classes

A	B	C	D	E	F
Very unstable	Moderately unstable	Slightly unstable	Neutral	Slightly stable	Stable

3.4 누출공의 크기 선정

본 연구에서의 누출공은 암모니아 저장탱크에서 실외로 연결되며, Table 7과 같이 수평 실린더 형태의 직경 2 m, 너비 4 m 이고 저장 질량은 7 t으로 암모니아 적재량이 80%인 상태로 가정하였다. 최악의 사고시나리오 누출공은 배관 결작 실패 시를 가정하여 저장탱크에 결속된 가장 큰 배관의 외경인 80 mm로 선정하였으며, 대안의 사고시나리오는 최대 직경의 20%로 하여 약 16 mm로 하였다. 또한, 누출공의 위치는 저장 탱크 하부로부터 25 cm에 위치하게 하였다. Fig. 3과 같이 작업자의 평균 키를 기준으로 하여 작업자의 눈높이인 175 cm인 하부 12.5% 지점 표면에서 작업실 수로 인해 머리 높이에서 파공이 발생하였다는 것을 가정하여 선정하였다.

Table 7. Scenario source strength in ALOHA simulator

Tank			Chemical contains			Opening
Diameter	Length	Volume	Contains	Internal temperature	Storage capacity	Diameter
2 m	4 m	12,566 L	liquid	20°C	84%	8 cm

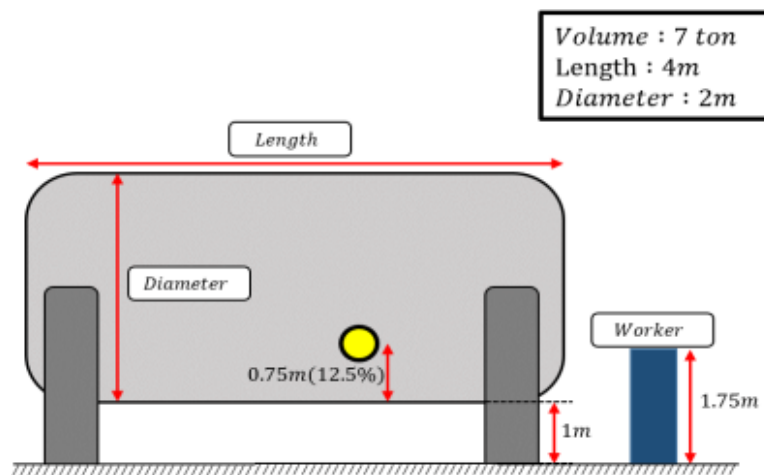


Fig. 3. Horizontal cylinder storage tank scenario

4. 시나리오 결과 및 분석

4.1 사고 시나리오의 피해영향 범위 및 기준

본 사고 시나리오는 암모니아 누출 사고 시, 화재 없이 독성과 과압에 의한 피해가 발생할 수 있으며, 화재가 발생하는 경우에는 복사열로 인한 피해가 발생할 수 있다. 이러한 피해에 대한 연구를 수행하기 위하여 본 연구에서는 암모니아 누출 시 발생 가능한 피해 영향 범위의 위험 기준을 Table 8와 같이 정리되며, Level 3은 Red Zone, Level 2는 Orange Zone, Level 1은 Yellow Zone으로 설정하였다(Lee, 2020).

Table 8. Key hazardous levels of ammonia leakage

Classification	Accidental consequence	Level 3	Level 2	Level 1
Burning	Radiation area	Potentially lethal within 60 s (10 kW/m ²)	2nd Degree burn with 60 s (5 kW/m ²)	Pain within 60 s (2 kW/m ²)
	Blast area	Destruction of building (55.16 kPa)	Serious injury likely (24.13 kPa)	Shatter glass (6.89 kPa)
No burning	Toxic area	ERPG-3 (1,500 ppm)	ERPG-2 (150 ppm)	ERPG-1 (25 ppm)

독성 확산에 의해 발생할 수 있는 피해영향 지표 중 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)의 기준은 ERPG-1~3으로 분류된다. ERPG-1은 대부분의 사람이 1시간가량 노출되어도 일시적인 건강 부작용이나 불쾌한 냄새로 인한 영향을 받지 않는 최고 농도이다. ERPG-2는 대부분의 사람이 1시간의 노출에도 보호조치를 취하는 능력을 손실할 수 있는 경험, 회복 불능 상태로의 발전 등 기타 심각한 건강에 대한 영향이나 징후가 나타나지 않는 최고 농도이며 ERPG-3는 생명을 위협하는 영향을 경험하지 않고 거의 모든 사람들이 최고 1시간까지 노출될 수 있는 최고 농도이다(Park and Jung, 2016).

과압의 피해영향은 각 단계별로 유리가 깨지는 정도인 6.89 kPa, 심각한 부상을 입는 정도인 24.13 kPa, 건물이 붕괴될 정도인 55.16 kPa의 압력으로 나뉘고, 복사열의 피해영향은 60초 안에 고통을 느끼는 정도, 60초 안에 2도 화상을 입는 정도, 60초 안에 사망할 수 있는 잠재적 가능성이 있는 정도로 구분된다(KOSHA, 2021).

4.2 프로빗 분석(Probit analysis)

본 연구는 ALOHA를 통해 도출해낸 결과에서 피해 유형인 독성, 과압, 복사열에 대한 피해범위 중 가장 넓은 확산 범위를 가지는 독성에 의한 사망률에 관하여 프로빗 분석을 수행하였다. 프로빗 분석은 독성의 영향에 대하여 가장 많이 사용되고 있는 확률론적 분석방법을 이용한 프로빗 분석이다. Table 9의 암모니아에 대한 프로빗 분석 속성을 보면 상수 A, B, n을 식 (6)에 대입하고, 폭로 시간 t와 각 시나리오에서의 폭로 시간 동안 최고 농도인 C를 대입하여 계산할 수 있다. 또한, 이렇게 계산된 Fig. 4와 같이 프로빗 값은 백분율 표현이 가능하다(KOSHA, 2012b, 2012c).

$$P = A + B \ln(C^n t) \quad (6)$$

여기서, P는 독성 사망률(%), t는 노출 시간(min), C는 독성 농도(ppm), A, B, n은 상수를 나타낸다.

Table 9. Constants in the probit for formula for NH₃

	A (ppm)	B (ppm)	n (-)
Ammonia	-35.9	1.85	2

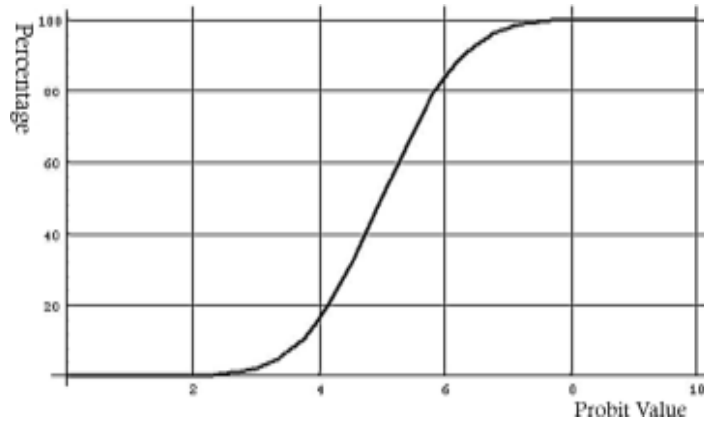


Fig. 4. Correlation of probit value and percentage

4.2.1 폭발 시 과압에 의한 피해영향 산정

폭발사고는 비산물 등에 의한 직접적인 피해와 폭풍 과압의 영향에 의한 간접적인 피해를 야기하며, 과압 또는 임펄스 (Impulse)의 함수인 프로비트 계산식(TNO)을 이용하여 산정한다. 폭발 시 인체 피해 영향 평가는 다음과 같이 계산된다.

1) 폐출혈로 인한 사망의 경우(식 (7)),

$$P_r = 5.0 - 5.74 \ln \left(\frac{4.2}{P_h} + \frac{1.3}{I_q} \right) \tag{7}$$

2) 고막파열로 인한 부상이 발생할 경우(식 (8)),

$$P_r = -12.6 + 1.524 \ln P_s \tag{8}$$

3) 머리 충격으로 인한 부상이 발생할 경우(식 (9)),

$$P_r = 5.0 - 8.49 \ln \left(\frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s I_s} \right) \tag{9}$$

4.3 대안의 사고 시나리오 결과

4.3.1 과압에 따른 피해

과압 위험 끝점 기준인 누출 사고 시 압력에 의해 심각한 부상이 발생할 정도의 압력은 24.13 kPa이다(KOSHA, 2021). 하지만 시나리오 조건 하에서 폭발 최대 절대 압력과 대기압의 관계에 의해 최대 압력은 6.02 kPa로 낮은 압력을 보였다.

4.3.2 복사열에 의한 영향

복사열의 영향은 계절별 대안 시나리오 중 봄철에 가장 넓은 확산범위를 보였으며, 기존 Level 2(2도 화상의 위험이 있는 수준)의 겨울철 끝점 거리는 46 m, 이 지점에서 복사열의 영향이 완전히 사라지는 데 약 2분이 경과하는 것으로 도출되었다. 하지만 계절별 대안 시나리오의 값을 Fig. 5와 같이 모두 유사한 결과를 나타내며, 확산 범위가 겨울에 가장 넓고 여름에 가장 좁은 양상을 나타내었다. 이러한 이유는 스테판-볼츠만 공식에 의해 주변 온도가 낮을수록 큰 값의 단위 면적당 방사되는 복사 에너지를 얻을 수 있기 때문이다.

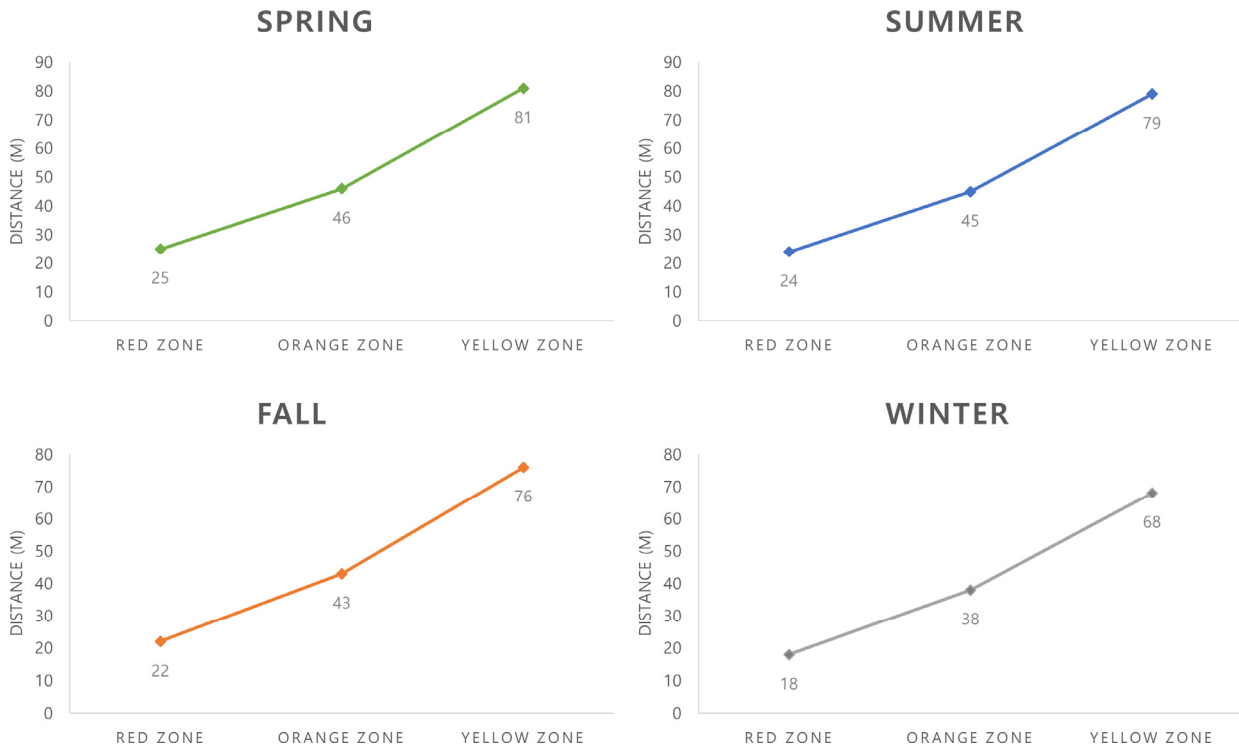


Fig. 5. Range of radiation impact (alternative scenario)

4.3.3 독성에 따른 피해

암모니아 누출사고의 독성 피해영향 범위는 대안 시나리오의 여름에 가장 큰 확산 범위를 나타냈다. ERPG-2(1시간의 노출에도 심각한 건강에 대한 영향이 나타나지 않는 최고 농도)에 도달하는 최대 끝점 거리는 1.26 km로 나타나며, 사고 지점과 가장 가까운 A 구역까지 도달하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 끝점 거리 안에서의 최대 독성 농도는 실내(41.9 ppm)과 실외(1,330 ppm) 수치에 도달한다.

4.4 최악의 사고 시나리오 결과

4.4.1 과압에 따른 피해

대안 시나리오의 과압 피해영향 분석 시, 끝점 피해 기준 Level 2에 해당하는 압력에 의해 심각한 부상을 입는 정도 압력 24.13 kPa 보다 낮은 6.02 kPa가 도출되었는데, 최악의 사고 시나리오의 경우에도 마찬가지로 사고 지점에서의 압력이 6.02 kPa로 도출되며 과압에 의한 영향은 적다고 판단할 수 있다.

4.4.2 복사열에 의한 영향

대안 사고 시나리오와 마찬가지로 복사열에 의한 피해 영향은 대안 시나리오와 마찬가지로 복사열에 의한 피해영향은 사고 지점 부근인 A 구역 안에서 발생하였으며, 기준 Level-2(2도 화상의 위험이 있는 수준)의 끝점 거리는 45 m로 대안 시나리오 중 가정 조건이 유사한 여름철 확산 범위와 가장 근접한 경향을 보였다. Level-2 끝점에서의 최대 복사열은 5.06 kW/m²로 도출되었으며, 대안 시나리오와 같이 복사열의 영향을 벗어나는데 약 1분이 경과하였다.

4.4.3 독성에 따른 피해

ERPG-2(1시간의 노출에도 심각한 건강에 대한 영향이 나타나지 않는 최고 농도)에 도달하는 최대 끝점 거리는 1.32 km로 나타나며, 사고 지점과 가장 가까운 A 구역까지는 도달하지 않는 것을 확인하였다. 끝점 거리 내 실내외 최고 농도는 실내(57.5 ppm), 실외(1,310 ppm)으로 확인이 되었으며, 모든 지점에서의 독성 농도가 약 5~7분 이내에 최고 지점에 도달한 후 공기 중에 희석되어 낮아지는데 30분 이후에는 검출되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

4.5 사고 시나리오 결과 분석

대안 시나리오의 피해 영향을 살펴본 결과, 과압의 경우 압력이 가장 높은 사고 지점에서도 피해를 주는 위험 최저 기준 이하의 수치가 도출되며 대안 시나리오 조건 하에서 압력의 피해영향이 적은 것을 확인했다. 그리고 Table 10과 같이 복사열의 경우 4계절 중 겨울철의 피해영향 범위(Red Zone: 16 m, Orange Zone: 41 m, Yellow Zone: 77 m)가 가장 넓어 기온이 낮은 환경일수록 영향 범위가 넓다는 것을 알 수 있었다. 반면에 독성 확산의 경우 복사열과 과압의 영향에 비하여 넓은 피해영향 범위를 확인하였으며, 그중 여름철 확산의 범위가 가장 넓어 독성 확산은 기온이 높은 환경일수록 영향을 받는 것을 확인하였다. 프로빗 분석을 통하여 10분 동안 최고농도에 노출된 경우 A 구역과 B 구역의 사망률이 95~100%에 달하였으며 시간에 따른 농도 변화를 확인한 결과, 사고 발생 초기 2~3분 동안 최고농도를 유지한 뒤 약 10분 이내에 대부분 공기 중에 희석되는 것을 확인할 수 있었다.

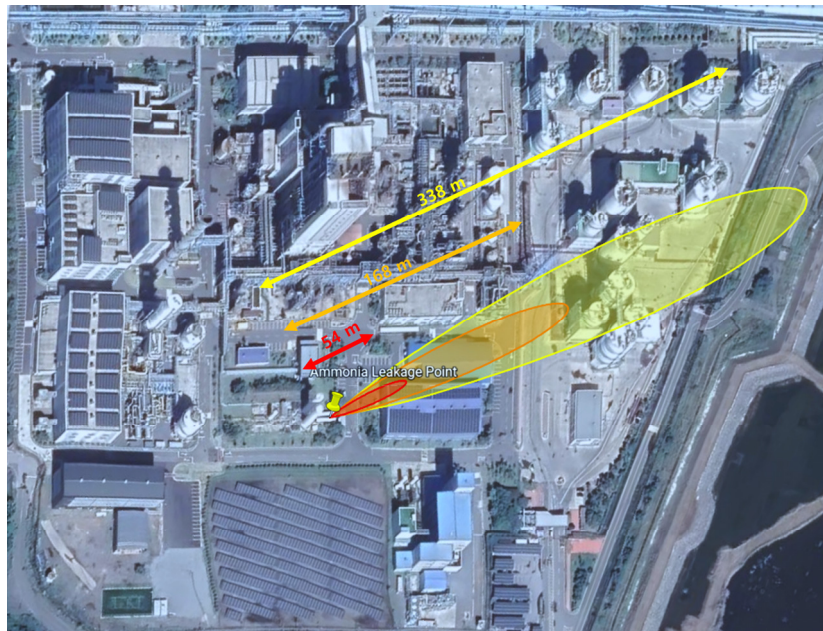
Table 10. Constants in the probit for formula for NH₃

		Alternative scenario			
		Spring	Summer	Fall	Winter
Max concentration (ppm)	Outdoor	1,610	1,330	1,010	1,810
	Indoor	24.1	41.9	31.1	84.8

최악의 시나리오 피해영향을 살펴본 결과, 과압의 경우에는 Table 11과 같이 피해 최저 기준 이하의 수치가 도출되며 최악의 조건 하에서도 암모니아 누출사고에서의 압력으로 인한 피해가 적은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 복사열의 경우 피해영향의 범위(Red Zone: 11 m, Orange Zone: 35 m, Yellow Zone: 71 m)가 대안 시나리오 중 가장 좁은 영향 범위를 갖는 여름철(Red Zone: 11 m, Orange Zone: 35 m, Yellow Zone: 70 m)과 유사한 결과를 보였다. 하지만, 독성 확산의 경우 대안 시나리오와 유사하게 사고 발생 초기 최고농도에 10분간 폭로 시, Red Zone과 Orange Zone의 사망률이 100%인 것을 확인할 수 있었으나 시간에 따라 ERPG-3을 넘는 독성 농도는 5분가량 유지한 뒤 약 30분 이후에는 대부분 희석되는 것으로 파악되었다(Fig. 6).

Table 11. Constants in the probit for formula for NH_3

Scenario		Alternative				Worst
		Spring	Summer	Fall	Winter	-
Radiation (m)	R	25	24	22	18	25
	O	46	45	43	38	46
	Y	81	79	76	68	81
Overpressure (m)	R	234	308	297	264	359
	O	281	347	336	305	394
	Y	486	546	535	512	590
Toxicity (km)	R	0.895	1.3	1.2	1.2	1.5
	O	2.0	3.2	3.1	3.0	3.7
	Y	3.8	6.7	6.6	6.4	8.0

**Fig. 6.** Range of toxicity impact

5. 결론

본 연구에서 누출 사고 시나리오를 가정하여 액체 암모니아 저장탱크에서의 파공으로 인한 누출이 발생한 상황에서 활용할 수 있는 피해 영향 정보를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 과압의 경우, 대안 및 최악의 사고 시나리오의 설정 구역에서 모두 과압으로 인한 피해 끝점 기준으로 24.13 kPa보다 낮은 압력인 6.02 kPa이 나타난 것으로 확인하였다.
- (2) 복사열의 경우, 대안 시나리오 중 기온이 가장 낮은 겨울(-0.5°C)에서 끝점 확산범위가 41 m로 나타나며, 최고 복사열은 4.98 kW/m^2 로 도출되었다. 그리고 최악의 시나리오에서는 Fig. 7과 같이 확산범위 끝점이 45.9 m, 복사열 5.06 kW/m^2 로 여름철(45 m, 5.06 kW/m^2)과 큰 차이가 없음을 확인되었고, 이는 스테판-볼츠만 법칙에 의하여 주변 온도가 낮은 겨울철에 복사열의 영향이 큰 것으로 사료된다.

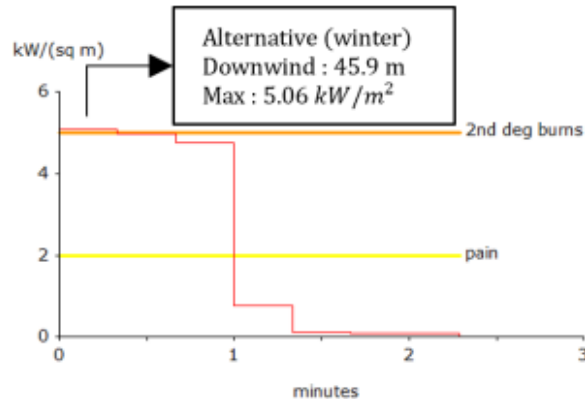


Fig. 7. Radiation change with time at 45.9 m (winter)

(3) 독성의 경우 대안 시나리오 중 여름에 ERPG-2 끝점의 확산범위가 3.2 km로 가장 넓었으며 최악의 시나리오에서 ERPG-2의 끝점은 3.7 km로 나타났다. 범위 내 초기 25분 동안 최고 농도를 보였으나 약 30분 후 공기 중에 희석되어 농도가 0 ppm에 수렴한 것을 확인하였다. 따라서, 초기 사고 대응을 위해서는 암모니아 관련 작업 전, 팬(fan) 설치, 대피 안전 구역 확보, 피난 행동 매뉴얼 등의 대책이 필요할 것으로 여겨진다.

(4) 프로빗 분석, 최대 피해 범위가 가장 넓었던 독성의 경우 최고 농도에서 10분간 노출 시 프로빗 분석을 통하여 항만과 관광지역 내 사망률이 95~100%로 나타내었다.

최악의 시나리오에서도 과압의 경우 상대적으로 피해가 적었으며, 대기 온도가 낮을수록 복사열의 영향 범위가 넓고, 풍속이 높을수록 독성 확산의 영향이 커짐을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 암모니아 누출 사고에 대한 대응 및 대피 계획을 수립할 때, 계절별 환경 조건을 고려하여 사고 대응 및 대피 계획을 조정해야 한다.

본 연구 결과는 복합화력발전소 내 암모니아 누출 사고 발생 시 초동대응에 대한 방안 모색에 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 태안 발전소뿐만 아니라 전국 화력발전소에서의 기상변화를 감안한 다양한 유해화학물질 누출에 따른 피해정도 연구를 수행한다면 대처방안 및 정책 수립 등에 도움이 될 것으로 사료된다.

Acknowledgments

This research is a research project carried out with support from the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) (No. 20206610100060).

References

- Crowl, D. A. and J. F. Louvar. (1990). Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. PRT Prentice Hall. 121-192.
- Korea Meteorological Administration. (2021). <https://www.weather.go.kr/>. Daejeon: KMA.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. (2012a). Guidance on Modeling Leakage Sources. KOSHA Guide P-92-2012. Seoul: KOSHA.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. (2012b). Technical Guidelines on Accident Damage Impact Assessment. KOSHA Guide P-88-2012. Seoul: KOSHA.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. (2012c). Technical Guidelines on Accident Damage Prediction Techniques. KOSHA Guide P-102-2012. Seoul: KOSHA.

- Korea Occupational Safety and Health Agency. (2020). Technical Guidelines for Selection of Worst and Alternative Accident Scenarios. KOSHA Guide P-107-2020. Seoul: KOSHA.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. (2021). Technical Guidelines for Accident Damage Prediction Techniques. KOSHA Guide P-102-2021. Seoul: KOSHA.
- Korea Western Power Co., Ltd. (2022). <https://www.iwest.co.kr/iwest/632/subview.do>. Taean: KOWEPO.
- Lee, Min-Ho (2000). Prediction of Hazard Distance for Release from the Pressurized Chlorine Liquid Storage Tank. Master's Thesis. Hanyang University.
- Lee, Yoon-Ho. (2020). A Study on the Damage Range According to Leakage Scenarios in Natural Gas Pipeline of LNG Fueled Ship. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Research Paper. 26(4): 317-326.
- National Institute of Environmental Research. (2022). National Institute of Environmental Research Notice No. 2022-81. Incheon: NIER.
- Oh, Dong-Gyu. (1986). A Study on the Scope and Countermeasures for Accidental Gas Leakage Accident. Bulletin of Korea Environmental Preservation Association. 8(9): 23-30.
- Park, Sangwook and Seungho Jung. (2016). Recommended Evacuation Distance for Offsite Risk Assessment of Ammonia Release Scenarios. Journal of the Korean Society of Safety. 31(3): 156-161.
- Song, Duk-Man. (1997). Dispersion Modeling Methodology for Hazardous/Toxic Gas Releases from Chemical Plant Facilities. Journal of the Korean Institute of Gas. 1(1): 73-80.
- United States Environmental Protection Agency. (2022). Fiscal Year (FY) 2022 - Annual Report. 6. Washington, D.C.: US EPA.

Korean References Translated from the English

- 국립환경과학원. (2022). 국립환경과학원 고시 제2022-81호. 인천: 국립환경과학원.
- 기상청. (2021). <https://www.weather.go.kr/>. 대전: 기상청.
- 박상욱, 정승호. (2016). 냉동, 냉장 시스템에서 NH₃ 누출 사고 시 장외영향평가를 위한 피해범위 및 대피거리 산정에 관한 연구. 한국안전학회지. 31(3): 156-161.
- 송덕만. (1997). 화학장치설비의 유해독성가스 누출에 대한 분산모델링 방법론. 한국가스학회지. 1(1): 73-80.
- 오동규. (1986). 유독가스 누출사고 발생시 피해범위 및 대책에 관한 연구. 환경보전. 8(9): 23-30.
- 이민호. (2000). 가압 염소 액체 저장탱크의 누출에 대한 유해 위험거리 예측. 석사학위논문. 한양대학교.
- 이윤호. (2020). LNG 추진선의 천연가스 배관에서 누출 시나리오에 따른 피해범위에 관한 연구. 해양환경안전학회지. 26(4): 317-326.
- 한국산업안전보건공단. (2012a). 누출원 모델링에 관한 기술지침. KOSHA Guide P-92-2012. 서울: 한국산업안전보건공단.
- 한국산업안전보건공단. (2012b). 사고피해영향 평가에 관한 기술지침. KOSHA Guide P-88-2012. 서울: 한국산업안전보건공단.
- 한국산업안전보건공단. (2012c). 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침. KOSHA Guide P-102-2012. 서울: 한국산업안전보건공단.
- 한국산업안전보건공단. (2020). 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침. KOSHA Guide P-107-2020. 서울: 한국산업안전보건공단.
- 한국산업안전보건공단. (2021). 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침. KOSHA Guide P-102-2021. 서울: 한국산업안전보건공단.
- 한국서부발전(주). (2022). <https://www.iwest.co.kr/iwest/632/subview.do>. 태안: 한국서부발전(주).