KIGAS Vol. 26, No. 3, pp 10~20, 2022
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2022.26.3.10

어선-탱크로리 간의 NH3 이적 시 누출에 따른 정량적 피해영향분석

임상진 · 최부홍* · †이윤호*
목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과 석사과정, *목포해양대학교 해양경찰학부 교수
(2022년 3월 17일 접수, 2022년 4월 20일 수정, 2022년 5월 11일 채택)

Quantitative Analysis of Damage Impacts in case of Bunkering NH3 from Tank Lorry to Fishing Vessel

Sang-Jin Lim · Bu-Hong Choi* · †Yoon-Ho Lee*
Department of Marine System Engineering, Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea,
**Division of Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea*
(Received March 17, 2022; Revised April 20, 2022; Accepted May 11, 2022)

요 약

지난 10년간 국내 화학물질 사고의 약 21%가 운송 차량에 의해 발생하였으며 그중 암모니아는 국내 화학물질 관련 사고 672건 중 82건으로 가장 많은 사고가 발생한 화학물질이다. 따라서 본 연구에서는 어선과 운송 차량 간 암모니아 이적 작업 중 누출사고가 발생할 경우의 계절별 대안 시나리오와 최악의 시나리오를 가정하였고 인구밀도 자료와 기상 특성을 토대로 ALOHA와 프로빗 분석, Python의 Folium 모듈을 통해 피해범위와 그 영향을 해석하였다. 대안 시나리오에서 복사열의 경우 겨울철 2도 화상이 우려되는 범위가 41m, 최고 복사열이 5.01kW/m^{2}로 가장 높았으며 과압의 경우 피해 최저기준보다 낮은 6.56kPa를 보여 압력에 의한 영향이 적은 것을 파악하였다. 그리고 독성 피해의 경우 여름철 EPPG-2 끝점이 5.0km로 복사열과 과압의 피해 영향보다 넓은 범위를 보였고, 독성 사망률에 대한 프로빗 분석 결과 인구밀도가 높은 항만과 관광지역에서 95~100%의 사망률을 확인하였다.

Abstract - About 21% of domestic chemical accidents are caused by transport vehicles for the past 10 years in Korea. Also, ammonia is a chemical substance with the largest number of accidents, 82 out of 672. In this study, supposed seasonal alternative scenario and worst scenario in case of releasing ammonia during bunkering it from tank lorry to fishing vessel and interpreted seasonal impact and range through Python, ALOHA, Probit analysis. Radiation impact range of possibility for 2nd burn and for maximum radiation in winter scenario, which is one of the alternative scenarios, was the highest(range: 41m, radiation: 5.01kW/m^2) while overpressure impact was less than minimum standard of impact. And toxicity impact range(EPRG-2) of the summer scenario was the widest(5.0km) and took a very high death rate near accident area(port area, tourist area) according to Probit analysis. the wort scenario had a similar impact and range of summer scenario.

Key words : ALOHA, ammonia, overpressure, probit analysis, python, radiation, toxicity

†Corresponding author:yhlee@mmu.ac.kr
Copyright ⓒ 2022 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

암모니아는 일반적으로 선박, 냉동 시설, 저장 시설 등의 산업 분야에서 냉각계통의 냉매로서 사용되고 있으며, 최근 온실가스 저감을 위한 저탄소 친환경 연료로서 암모니아 사용의 다양성이 증가하는 추세이다[1]. 하지만 암모니아는 고압가스 안전관리법 상 가연성 가스, 독성가스로서 정의되며 급성독성, 폭발성이 강하여 화학물질관리법 상 황산 등과 같이 사고 대비 물질로 규정되어있다. 또한, 국내에서 지난 10년간 화학물질 사고 672건 중 82건을 차지하며 상대적으로 사고가 빈번하게 발생하였다[2].

암모니아 누출에 따른 피해사례를 살펴보면 2011년 9월 29일 오전 10시경 속초시 중앙동 소재의 수협 어판장 부두에 정박 중이던 어선(69톤, 채낚기)이 수리를 위해 암모니아 가스를 선박 현측으로 배출하는 과정에서 고무호스의 끝단이 갑판으로 떨어져 갑판상에 암모니아 가스가 누출되었고 이 사고로 인해 부상자 7명이 발생하였다. 이렇듯 선박은 노후화, 관리부주의 등의 이유로 사고가 발생할 수 있는 위험성을 항상 내재하고 있다[3].

또한, 탱크로리의 누출에 따른 피해사례로, 2014년 9월 13일 오전 00시경 여수시 해산동 도로에서 염산을 실은 22톤 탱크로리 차량이 전복되어 염산 5톤이 누출되었다. 이 사고로 인하여 운전자 1명은 사망하였으며 사고 당시 내린 비에 의해 발생한 염화수소를 흡입한 주민 6명은 병원으로 이송되었다. 이와 같이 탱크로리는 화학물질을 이송하기 때문에 교통사고 이외의 2차 피해 가능성이 상주한다[4].

지금까지 암모니아 누출사고의 피해영향에 관한 연구는 주로 냉동시설과 저장시설을 가정하여 다양하게 수행되고 있다. 관련된 연구를 살펴보면 Ryu.Y.J.(2016)은 암모니아 가스의 실내 누출을 가정하여 소프트웨어『FLACS』를 통해 시뮬레이션을 수행하였고 암모니아 가스가 실내에서 폭발 위험의 분위기를 쉽게 형성함을 확인하여 경보장치의 필요성에 대해 제시하였다[5]. 그리고 Kang.S.J.(2017)은 국내 냉동 제조시설의 암모니아 유형을 파악하여 사고 시나리오를 선정, 이를 소프트웨어『SAFETI』를 통해 사고 빈도와 위험도를 분석하였다[6]. Nikita (2020)는 암모니아 저장탱크에서의 사고 시나리오를 Fault Tree Analysis에 따라 선정하고 소프트웨어『ALOHA』를 통해 각 시나리오에 확산범위를 도출 및 Google Earth에 그 결과 값을 적용하여 위험성 저감 범위 제시하였다[7].

이와 같이 여러 가지 소프트웨어를 사용하여 암모니아 누출의 피해영향에 관련된 연구가 수행되어 왔으나, 아직까지 선박에서의 암모니아 누출사고에 대한 연구는 찾아보기 쉽지 않은 것이 실정이다. 따라서 본 연구에서는 피해영향 범위의 도출을 위하여 미국 EPA(환경보호청) 및 NOAA(해양대기국)가 공동 개발한 ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres, ver.5.4.7)를 Google Earth에 접목하여 해석하였으며 이 결과 값을 프로빗 분석에 적용하여 독성 사망률을 도출하였다.

본 연구에서는 선박에서의 누출 시나리오 설정을 위해 속초·강릉·동해 등의 강원도 지역 중 2021년 8월 통계청 인구 밀도 기준 자료를 토대로 779명/㎢로 가장 높은 인구밀도의 속초를 누출사고 지역으로 선정하였다[8]. 이러한 속초는 대형 냉동선의 입출항 지역으로, 부산에서 섭외한 탱크로리를 통해 냉매인 암모니아를 이적하는 작업이 주기적으로 이루어지는 지역이다.

또한, 최근 코로나19로 인해 중심도시에서 외곽지역으로의 휴일 인구이동이 늘어나는 추세이다. 통계청에 따르면 코로나 발생 후 4주 차(2020.2.29.~3.1)에 인구 이동량이 최대 -39.3% 감소 후 전반적으로 늘어나는 추세이며, 13주 차 연휴가 낀 주말(5.2~5.3)에 2.4%으로 대폭 증가하였다. 따라서 수도권 외곽 지역의 해양레저스포츠가 발달한 속초는 증가하는 관광객에 대한 사고 피해를 대비해야 할 지리적 위치에 있다[8].

본 연구에서는 이러한 속초 지역의 인구 특성에 맞게 피해 구역을 설정하기 위하여 프로그래밍 언어인 Python과 인구통계자료를 활용하여 밀도 특성에 따라 각 구역(항만구역, 관광구역, 거주지역)을 설정하였고 실제 사고 발생 시 데이터를 얻기 위하여 기상조건을 적용한 계절별 대안 시나리오와 최악의 시나리오를 설정하였다[9].

Ⅱ. 연구방법

본 연구에서는 Fig. 2.와 같이 누출에 관하여 2020년 기상청 자료를 토대로 계절별 대안 시나리오와『사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침』에 따른 최악의 시나리오를 통하여 정량적 피해 영향 범위를 파악하고자 하였다. 또한, 각 시나리오를 토대로 ALOHA를 통해 독성, 과압, 복사열 피해에 대한 범위를 도출하고 Python(ver.3.8.9)의 Folium(데이터 시각화 모듈)과 행정동 기준 인구밀도 자료를 활용하여 밀도 특성에 따라 구역을 설정하였으며 이를 Google Earth에 적용하여 피해영향을 파악하였다. 또한, 각 구역 별 독성 사망률에 대한 피해영향을 프로빗 분석을 통하여 도출하였다.

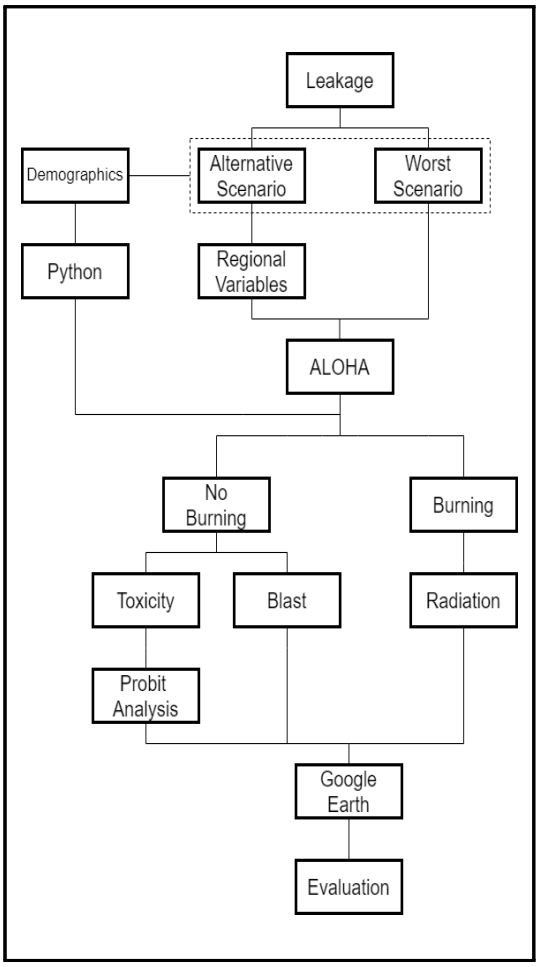


Fig. 2. Methodology for quantitative analysis.

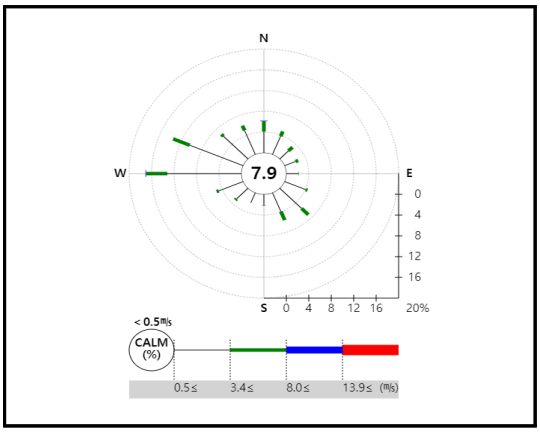


Fig. 3. Average wind rose in Sokcho(2020).

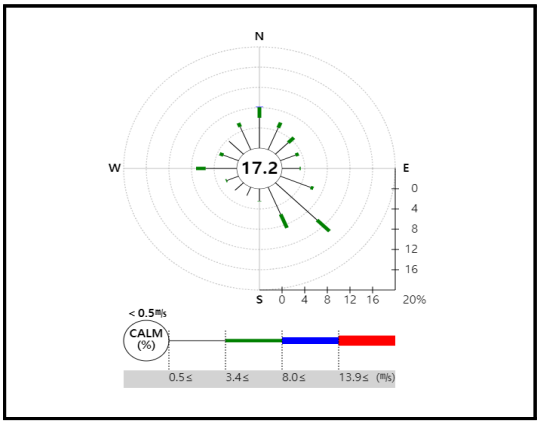


Fig. 4. Average wind rose in Sokcho(Summner, 2020).

2.1. 가정조건

2.1.1. 시나리오

속초지역의 피해영향 범위 산출을 위하여 계절별 대안 시나리오와 이를 비교하기 위한 최악의 시나리오를 가정하여 연구를 수행하였다. 대안 시나리오는 2020년 기상청 자료를 토대로 계절별 평균기온, 평균습도, 평균풍속, 평균풍향을 적용하였다[10]. 또한, 최악의 시나리오는 『사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침』에 따라 기온 25℃, 습도 50%, 풍속 1.5m/s으로 가정하였다[9].

연 평균 풍향, 풍속의 경우 Fig. 3.와 같이 서풍이 강하게 작용하였으며 이를 바람의 빈도 비율로 보았을 때, Table 2. 와 같이 서풍(서남서풍, 서풍, 서북서풍)의 비율이 가장 높은 35.7%, 풍속의 빈도 비율은

Table 1. Seasonal average data in Sokcho(2020)

	Spring (3~5)	Summer (6~8)	Fall (9~11)	Winter (12~2)
Temperature.(℃)	12	23	15	3
Humidity(%)	59	80	60	47
Wind Velocity(m/s)	2	2	2	2
Stability Class(-)	E	E	E	E
Wind Direction(-)	W	SE	W	W

Table 2. Frequency ratio of wind direction and wind velocity

Wind Velocity (m/s)	Wind Direction					Total
	-	ENE ~ ESE	WSW ~ WNW	SE ~ SW	NW ~ NE	
~0.4	7.9	-	-	-	-	7.9
0.5~3.3	-	8.3	28.2	16.5	21.2	74.2
3.4~7.9	-	0.9	7.4	3.9	5.5	17.7
8.0~13.8	-	-	0.1	-	0.1	0.2
Total	7.9	9.2	35.7	20.4	26.8	100

Table 3. Detailed hole size standard

Release Scenario	Standard Range (inch)	Standard Range (mm)	Representative value (mm)
Small	0 - 1/4	0 - 6.35	6.35
Medium	1/4 - 2	6.35 - 50.8	25.4
Large	2 - 6	50.8 - 152.4	101.6
Rupture	6<	152.4<	Full Bore

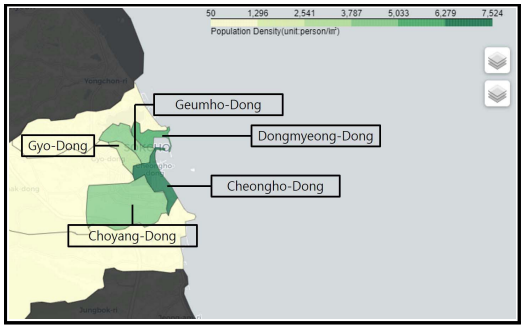
0.5~3.3m/s 구간에서 74.2%로 작용하는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 4.와 같이 여름철은 예외적으로 남동풍의 평균풍향, 풍속이 우세하였다[10].

2.1.2. 누출공의 크기

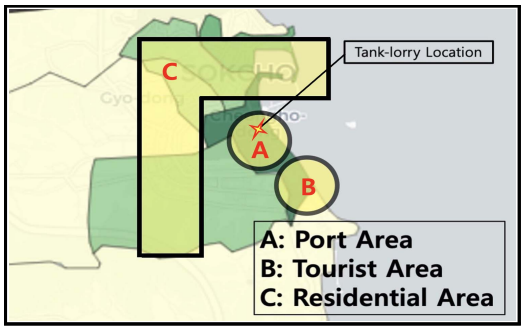
누출공의 크기는 API(American Petroleum Institute,2008)의 기준에 따라 분류하였으며, 탱크 표면의 다량 누출을 가정하기 위하여 배관 파공 기준의 Large size(지름 101.6mm)의 원형(Hole) 파공을 가정하였다[11].

2.1.3. 인구분포

속초시 행정동 기준 인구밀도에 관한 2019년 통계청 open data를 Python에 적용하여 Fig. 5.와 같이 나타내었다. 이를 토대로 본 연구에서는 가장 인구 밀도가



(a)



(b)

Fig. 5. Population density using Python(2019).

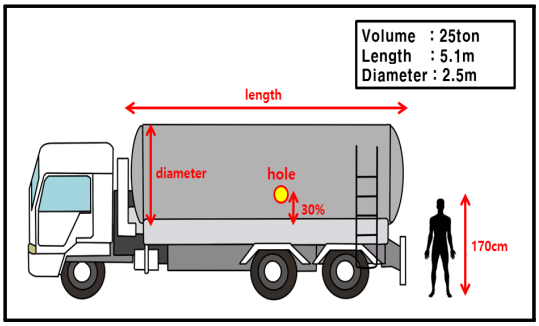


Fig. 6. Tank lorry scenario.

높은 청호동(7,524.2명/㎢)의 항만지역을 A구역(사고지점~300m), 관광지역을 B구역(300~600m)으로 설정하였으며, 상대적으로 인구밀도가 낮은 주거지역인 동명동(5154.4명/㎢), 조양동(4573.5명/㎢), 금호동(4507.6명/㎢), 교동(3,655.6명/㎢)을 C구역(600m~1.5km)으로 분류하였다[8].

2.1.4. 탱크로리

일반적으로 사용되는 25ton 탱크로리를 기준으로

Table 4. Key hazardous levels of ammonia leakage

Classification	Accidental consequence	Level-3	Level-2	Level-1
Burning	Radiation Area	Potentially lethal within 60s (10kW/㎡)	2nd degree burn with 60s (5.0kW/㎡)	Pain within 60s (2.0kW/㎡)
No burning	Blast Area	Destruction of building (55.16kPa)	Serious injury likely (24.13kPa)	Shatter glass (6.89kPa)
	Toxic Area	ERPG-3 (1500ppm)	ERPG-2 (150ppm)	ERPG-1 (25ppm)

삼았으며[12], 암모니아 적재량이 95%인 상태에서 작업자의 눈높이(성인 남성 평균 약 170cm)인 하부 30% 지점 표면에 파공이 발생한 것으로 가정하였다.

2.1.5. 피해영향 및 기준

암모니아 누출 사고 시, 화재 없이 독성과 과압에 의한 피해가 발생할 수 있으며, 화재가 발생하는 경우 복사열의 피해가 있을 수 있다. 이때 피해에 대한 연구를 수행하기 위하여 본 연구에서는 피해 영향 범위의 위험 기준을 Table 4.와 같이 정리하였으며 Level-3은 Red Zone, Level-2은 Orange Zone, Level-1은 Yellow Zone으로 설정하였다[13].

독성 확산에 의해 발생할 수 있는 피해영향 지표인 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)의 기준은 각 단계별로, ERPG-1은 거의 모든 사람이 1시간 가량 노출되어도 일시적인 가벼운 건강 부작용이나 분명하게 정의된 불쾌한 냄새로 인한 영향을 받지 않는 최고 농도이다. ERPG-2는 거의 모든 사람들이 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[14].

과압의 피해영향은 각 단계별로 유리가 깨지는 정도(6.89kPa), 심각한 부상을 입는 정도(24.13kPa), 건물이 붕괴될 정도(55.16kPa)의 압력으로 나눠진다. 그리고 복사열의 피해영향은 60초 안에 고통을 느끼는 정도(2.0kW/㎡), 60초 안에 2도 화상을 입는 정도(5.0kW/㎡), 60초 안에 사망할 수 있는 잠재적 가능성이 있는 정도(10kW/㎡)로 구분된다[13].

암모니아에 대한 위험 기준은 각 상황의 Level-2단계를 기준으로 피해영향 범위를 산출하여 복사열의 경우 2도 화상을 입는 정도(5.0kW/㎡), 과압의 경우 심각한 부상을 입는 정도(24.13kPa), 독성의 경우

ERPG-2의 끝점에 나타나는 결과로 위험 정도를 판단하였다[14].

2.2. 수학적 모델(Mathematical model)

2.2.1. 확산 모델(Dispersion model)

누출원으로부터 피해영향을 산출하기 위하여 식(1)을 이용해 누출지점으로부터 암모니아 누출 시 시간에 따른 농도변화를 산출하였다.

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi U\sigma_y\sigma_z} [\exp-(\frac{y^2}{2\sigma_y^2})]\left\{\begin{array}{l}\exp[-\frac{(z-H_r)^2}{2\sigma_z^2}] \\ +\exp[-\frac{(z+Hr)^2}{2\sigma^{2}_{z}}]\end{array}\right\} \quad (1)$$

여기서,

C : Concentration downwind at location(kg/㎥)
Q : Release rate(kg/s)
U : Wind speed(m/s)
H_r : Height of source release(m)
X, Y, Z: Distance(m)
σ_y, σ_z : Dispersion coefficient(m)

2.2.2. 영향 모델(Effect model)

가연성 물질을 운반하는 탱크로리 파공에 의한 누출 사고가 발생한 경우, 복사열에 의한 피해를 산출하기 위해 모든 지점의 열유속을 식(2)과 같이 구할 수 있으며, 누출 지점으로부터 특정 거리에 있는 지점의 복사열의 유속은 식(3)으로 구할 수 있다. 이와 같은 결과에 따라 식(4)을 통해 총 열유속은 모든 지점에서의 복사열의 합과 같다는 것을 계산할 수 있다[13].

$$E = \frac{fQH_c}{n} \quad (2)$$

$$q = \frac{X_p E}{(4\pi x_i^2)} \quad (3)$$

$$q = \sum_{i=1}^{n} q_i \quad (4)$$

여기서,
Q : Leakage amount(kg)
E : Energy of explosion or combustion(J)
H_c : Heat of combustion(J/㎥)
f : Combustion efficiency factor(-)
q : Total thermal radiation flux(kW/㎡)
q_i : Thermal radiation flux of point i(kW/㎡)
X_p : Transmissivity(-)
x_i : Distance from the source(m)

이때 누출된 복사열과 시간과의 관계는 식(5)와 같이 표현되며 2도화상에 도달하는데 걸리는 시간을 열유속 관계식으로 표현하면 식(6)로 나타낼 수 있으며 n은 일반적으로 상해 정도와 관계없이 1.3의 값을 갖는다[15].

$$tI^n = Const \tag{5}$$

$$t_{2b} = 260(q)^{-1.56} \tag{6}$$

여기서,
I : Heat flux of thermal radiation(W/㎡)
t : Exposure time(s)
t_{2b} : Time of 2nd degree burn(s)
n : Index of radiation(-)

또한, 복사열과 온도의 관계는 식(7)의 스테판-볼츠만 공식에 의해 정의되어진다[16].

$$P = \sigma \epsilon_s (T_s^4 - T_a^4) \tag{7}$$

여기서,
P : Heat flux of thermal radiation(W/㎡)
σ : Constant of Stefan-Boltzmann(W/㎡K^4)
ϵ : Material emissivity radiation factor(-)
T_s : Material temperature(K)
T_a : Ambient temperature(K)

과압의 피해영향 범위를 산출하기 위해 TNO 폭발 모델을 사용하였다. 총 증기운의 에너지를 식(8)으로 산출하고 위상이 지속되는 기간을 식(9)을 이용하여 피해 거리를 식(10), 과압의 영향범위를 식(11), 폭발최대압력을 식(12)를 통하여 산출해 낼 수 있다[17].

Table 5. Ammonia probit constant

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

$$E = V_0 H_c \tag{8}$$

$$\overline{t_p} = t_p c_a (P_a/E)^{1/3} \tag{9}$$

$$\overline{R} = R(P_a/E)^{1/3} \tag{10}$$

$$\overline{P} = (P_0 - P_a)/P_a \tag{11}$$

$$P_s = P_a(\overline{P} + 1) \tag{12}$$

여기서,
V_0 : Volume of a flammable gas(㎥)
P_0 : Side-on absolute blast overpressure(kPa)
$\overline{P}$: Scaled blast overpressure(-)
P_a : Ambient pressure(kPa)
P_s : Peak overpressure(kPa)
c_a : Ambient velocity of sound(m/s)
t_p : Positive phase duration(s)
R : Fuel-air charge radius(m)
$\overline{R}$: Scaled distance(-)

2.2.3. 프로빗 분석(Probit analysis)

ALOHA를 통해 도출해낸 결과(독성, 과압, 복사열의 피해범위) 중 가장 확산 범위가 넓은 독성에 의한 사망률에 관하여 프로빗 분석을 수행하였다.

독성의 영향에 대하여 가장 많이 사용되고 있는 확률론적 분석방법은 식(13)을 이용한 프로빗 분석이다. Table 5.의 독성물질(암모니아) 상수 A, B, n을 식(13)에 대입하고, 폭로 시간 t와 각 시나리오에서의 폭로시간 동안 최고 농도를 C에 대입하여 계산할 수 있다. 또한, 이렇게 계산된 프로빗 값은 백분율로 쉽게 표현 가능하다[18].

$$P = A + B\ln(C^n t) \tag{13}$$

여기서,
P : Toxicity mortality(%)
t : Exposure time(min)
C : Toxicity concentration(ppm)
A, B, n : Constant

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 대안 시나리오

3.1.1. 과압에 따른 피해

과압 위험 끝점 기준인 누출 사고 시 압력에 의해 심각한 부상을 입는 정도 압력은 24.13kPa이다. 하지만 시나리오 조건하에서 폭발최대 절대압력과 대기압의 관계인 식(11)과 식(12)에 의해 최대압력은 6.56kPa로 낮은 압력을 보였다.

3.1.2. 복사열에 의한 영향

복사열의 영향은 4계절 대안 시나리오 중 겨울철에 가장 넓은 확산범위를 보였으며, 기준 Level-2(2도 화상의 위험이 있는 수준)의 겨울철 끝점 거리는 41m, 이 지점에서 복사열의 영향이 완전히 사라지는 데 식 (5)에 의하여 약 3분이 경과하는 것으로 도출되었다. 하지만 4계절 대안 시나리오의 값은 Fig. 7.과 같이 모두 유사한 결과를 나타내었으며 모두 A

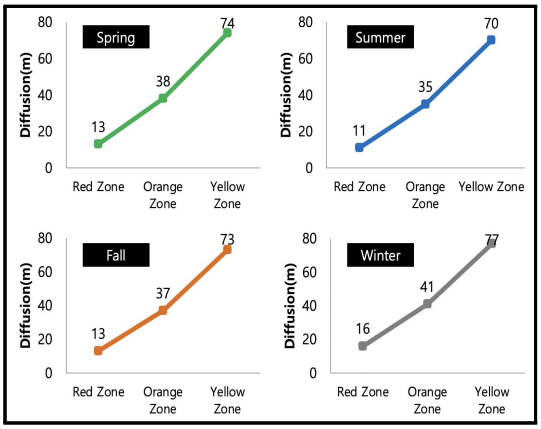


Fig. 7. Range of radiation impact(alternative scenario).

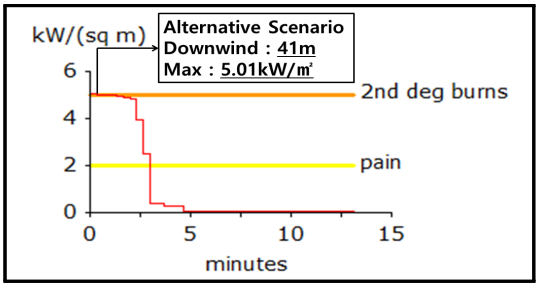


Fig. 8. Radiation change with time at 41m.

구역의 범위 안에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이렇듯 확산 범위가 겨울에 가장 넓고 여름에 가장 좁은 이유는 식(7)에 의해 주변 온도가 낮을수록 큰 값의 단위 면적당 방사되는 복사에너지를 얻을 수 있기 때문이다.

3.1.3. 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 5.0km로 나타났으며 사고지점과 가장 가까운 A구역의 최고 농도는 157,000ppm, 관광객 분포가 높은 B구역의 최고 농도는 34,200 ppm, 거주 구역으로 분류되는 C구역의 최고 농도는 8,180ppm으로 도출되었다.

각 지점의 농도는 시간이 지남에 따라 변화하는데 사고 발생 초기 모든 지점에서 약 2~3분 사이에 최고농도에 도달하나 이후 공기 중에 희석되어 농도가 낮아지는데 약 10분 가량 소요되는 것을 알 수 있다.

다른 피해영향(복사열, 과압)에 비해 그 영향의

Table 6. Concentration according to distance

		Alternative Scenario			
		Spring	Summer	Fall	Winter
concent-ration (ppm)	A	148,000	157,000	152,000	142,000
	B	32,600	34,200	33,000	31,300
	C	7,850	8,180	7,930	7,590

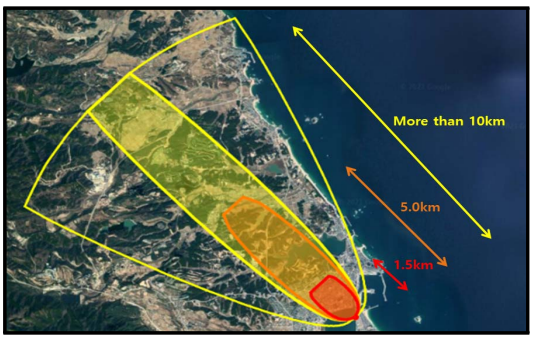
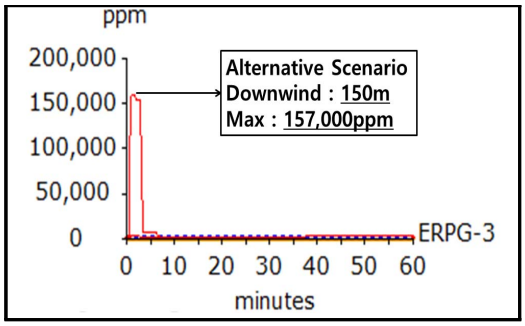
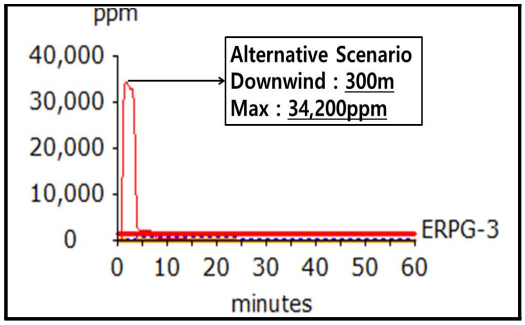


Fig. 9. ALOHA toxicity threat zone result with Google Earth(summer scenario).

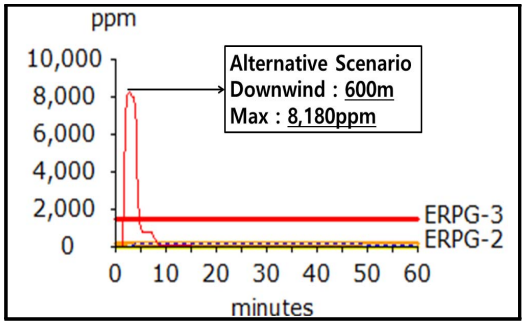
범위가 넓은 여름철 독성에 의한 사망률에 관하여 프로빗 분석을 실시하였다. 식(13)에 물질 상수 A, B, n을 Table 5.에 따라 암모니아 상수를 대입하고 Table 6.의 각 지점별 최고농도를 적용하였으며 폭로시간은 Fig. 10.에 나타나는 독성 영향이 존재하는 시간인 10분으로 설정하여 독성에 의한 사망률을 계산하였다. 계절에 관계없이 A구역의 독성에 의한 사망률이 100%로 확인되었으며 B구역은 상대적으로 낮은 95~98% 사망률을 도출해 내었으나 거리가 가장 먼 C구역은 0%의 사망률을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Concentration change with time at each point; (a) 150m, (b) 300m, (c) 600m.

3.2. 최악 시나리오

3.2.1. 과압에 따른 피해

대안 시나리오의 과압 피해영향 분석 시, 끝점 피해 기준 Level-2에 해당하는 압력에 의해 심각한 부상을 입는 정도 압력 24.13kPa 보다 낮은 6.56kPa이 도출되었는데, 최악의 시나리오의 경우도 마찬가지로 사고 지점에서의 압력이 6.56kPa로 도출되며 그 영향이 적은 것을 알 수 있었다.

3.2.2. 복사열에 따른 피해

대안 시나리오와 마찬가지로 복사열에 의한 피해영향은 사고 지점 부근인 A구역 안에서 발생하였으며, 기준 Level-2(2도 화상의 위험이 있는 수준)의 끝점 거리는 35m로 대안 시나리오 중 가정 조건이 유사한 여름철 확산 범위와 가장 근접한 경향을 보였다. Level-2 끝점에서의 최대 복사열은 4.93kW/㎡로 도출되었으며, 대안 시나리오와 같이 복사열의 영향을 벗어나는데 약 1분이 경과하였다.

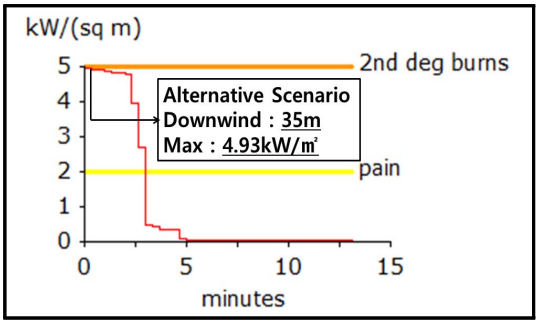


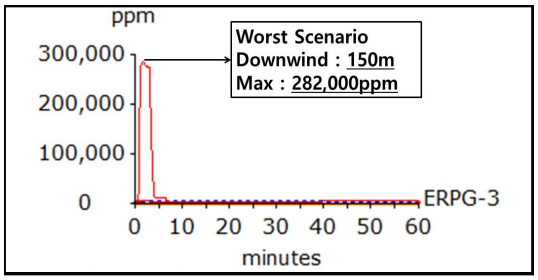
Fig. 11. Radiation change with time at 35m.

Fig. 12. Range of radiation impact(worst scenario)

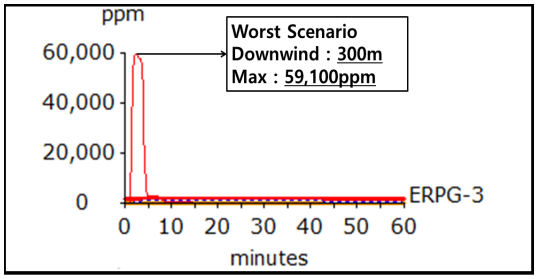
3.2.3. 독성에 따른 피해

ERPG-2(1시간의 노출에도 심각한 건강에 대한 영향이 나타나지 않는 최고 농도)의 끝점 거리는 4.8km로 대안 시나리오와 유사했으며 각 지점별 농도는 사고지점으로부터 150m 지점의 A구역은 282,000ppm, 관광객 분포가 높은 B구역은 최고 농도 59,100ppm, 거주구역인 C구역은 최고 농도 12,300 ppm으로도출되었다.

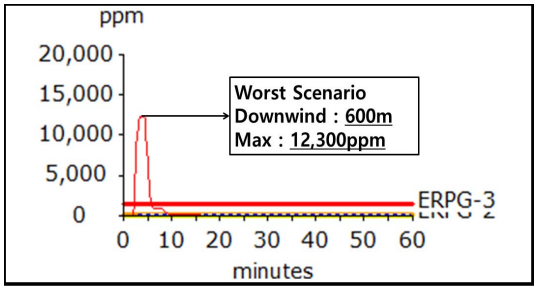
독성 사망률은 A구역 100%, B구역이 100%인 반면 C구역의 사망률은 0%로 분석되었고, 모든 지점의 농도가 약 2~5분 이내에 최고 지점에 도달한 후 공기 중에 희석되어 낮아지는데 약 10분 가량 소요되는 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. Concentration change with time at each point; (a) 150m, (b) 300m, (c) 600m.

3.3. 분석결과

대안 시나리오의 피해 영향을 살펴본 결과, 과압의 경우 압력이 가장 높은 사고지점에서도 피해를 주는 위험 최저 기준 이하의 수치가 도출되며 대안 시나리오 조건 하에서 압력의 피해영향이 적은 것을 확인했다. 그리고 복사열의 경우 4계절 중 겨울철의 피해영향 범위(Red Zone : 16m, Orange Zone : 41m, Yellow Zone : 77m)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, 그 중 여름철 확산의 범위가 가장 넓어 독성 확산은 기온이 높은 환경일수록 영향을 받는 것을 확인하였다. 프로빗 분석을 통하여 10분 동안 최고농도에 노출된 경우 A구역과 B구역의 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 희석 되는 것을 확인할 수 있었다.

최악의 시나리오 피해영향을 살펴본 결과, 과압의 경우, 마찬가지로 피해 최저 기준 이하의 수치가 도출되며 최악의 조건 하에서도 암모니아 누출사고에서의 압력으로 인한 피해가 적은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 복사열의 경우 피해 영향의 범위(Red Zone : 11m, Orange Zone : 35m, Yellow Zone : 71m)가 대안 시나리오 중 가장 좁은 영향 범위를 갖는 여름철(Red Zone : 11m, Orange Zone : 35m, Yellow Zone : 70m)과 유사한 결과를 보였다.

하지만 독성 확산의 경우 대안 시나리오와 유사하게 사고 발생 초기 최고농도에 10분간 폭로 시, A구역과 B구역의 사망률이 100%인 것을 확인할 수 있었으나 시간에 따라 최고 농도는 2~5분가량 유지한 뒤 약 10분 이내 대부분 희석되는 것으로 파악되었다.

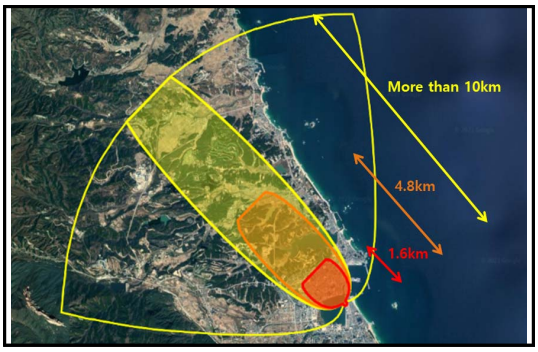


Fig. 14. Range of toxicity impact(worst scenario).

Table 7. Threat zone of ALOHA

		Alternative Scenario				
		Spring	Summer	Fall	Winter	Worst
Radiation (m)	Red	13	11	13	16	11
	Orange	38	35	37	41	35
	Yellow	74	70	73	77	71
Toxicity (km)	Red	1.4	1.5	1.4	1.4	1.6
	Orange	4.9	5	4.9	4.8	4.8
	Yellow	10<	10<	10<	10<	10<

Table 8. Result of probit analysis according to toxicity impact

		Alternative Scenario				
		Spring	Summer	Fall	Winter	Worst
Death possibility (%)	A	100	100	100	100	100
	B	97	98	97	95	100
	C	-	-	-	-	-

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 시나리오를 가정하여 탱크로리와 어선 간의 암모니아 이적 중 누출이 발생한 상황에서 활용할 수 있는 피해영향 정보를 파악하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 탱크 누출 시 과압에 의한 영향을 살펴본 결과, 대안·최악 시나리오의 설정 구역에서 모두 피해 끝점 기준 24.13kPa 보다 낮은 압력인 6.56kPa이 나타난 것을 확인하였다.

(2) 복사열의 경우 대안 시나리오 중 기온이 가장 낮은 겨울에 끝점 확산범위가 41m로 나타났으며, 최고 복사열은 5.01kW/㎡ 로 도출되었다. 그리고 최악의 시나리오는 확산범위 끝점 35m, 복사열 4.93kW/㎡로 여름철(35m, 4.94kW/㎡)과 큰 차이가 없음을 확인하였으며, 시나리오의 기상 조건 범위 내에서 1℃ 감소할 때마다 확산 범위가 약 0.3m 증가하였는데 이는 스테판-볼츠만 법칙에 의하여 주변 온도가 낮은 겨울철에 복사열의 영향이 큰 것으로 사료된다.

(3) 독성의 경우 대안 시나리오 중 여름에 ERPG-2 끝점의 확산범위가 5.0km로 가장 넓었으며 최악의 시나리오에서 ERPG-2의 끝점은 4.8km로 나타났다. 범위 내 초기 2~3분 동안 최고 농도를 보였으나 약 10분 후 공기 중에 희석되어 농도가 0ppm에 수렴한 것을 확인하였다. 따라서초기 사고 대응을 위해서는 암모니아 관련 작업 전, 팬(fan) 설치 등의 대책이 필요할 것으로여겨진다.

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

본 연구 결과는 암모니아 누출 사고의 초동대응에 대한 방안 모색에 활용할 수 있을 것으로 판단되며,추후 강원도뿐만 아니라 전국 해안 지역의 기상변화를 감안한 유해화학물질 누출에 따른 피해정도 연구를 수행한다면 대처방안 및 정책 수립 등에 도움이 될 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] Jeong, Y.S., Woo, I.S., Lim, J.W., "Risk Management for Ammonia Unloading and Storage Tank Facility", *Journal of the Korean Institute of Gas,* 21(5), 95-103, (2017)

[2] National Institute of Chemical Safety, https://icis.me.go.kr/main.do;jsessionid=rzyfQm-kJq4ccC3fcH9+jqvw.icis_ipotal21

[3] KBS news, https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=2364113, (2011)

[4] KBS news, https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=2929202, (2014)

[5] Ryu, Y.J., Lee, M.K., Lee, S.K., "Measures to Prevent Recurrence through the Analysis of an Explosion Case at Ammonia Refrigeration Facilities", *Journal of the Korean Institute of Gas, 20(3),* 38-45, (2016)

[6] Kang, S.J., Lee, J. M., Moon, J. Y., Chon, Y. W., "Risk Analysis of Ammonia Leak in the Refrigeration Manufacturing", *Journal of the Korean Institute of Gas,* 21(1), 43-51, (2017)

[7] Nikita, Haryono Budi Santosa, Fadli Kasim, Enggar Tudha Prasetyo, Muhammad Yahya Ayash, "Mitigating accidental ammonia (NH3) release from storage tank based on risk distribution using ALOHA and fault tree analysis in PT. Sarihusada

Generasi Mahardhika 2 Klaten", *International Energy Conference ASTECHNOVA*, (2019)

[8] Statistics Korea, http://kostat.go.kr/portal/korea/index.action, (2019-2020)

[9] "KOSHA GUIDE P-107-2020", Korea Occupational Safety and Health Agency, (2020)

[10] Korea Meteorological Administration, https://www.weather.go.kr/, (2020)

[11] Xuemei Wang, Yufei Tan, Tiantian Zhang*, Jindong Zhang, Kecheng Yu, "Diffusion process simulation and ventilation strategy for small-hole natural gas leakage in utility tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology,* (2020)

[12] Jeon, B.H., Kim H.S., Lim S.M., Lee. C.J., Lee, G.S., "A Study on the Development of Calculation Tables and Formulas for Determining Separation Distance in Case of Cl2 · HF Tank-lorry Leakage", Journal of the Korea Academia-Industrial, 22(4), 212-219, (2021)

[13] Lee., Y.H., "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*, 26(4), 317-326, (2020)

[14] Park, S.W., Jung, S.H., "Recommended Evacuation Distance for Offsite Risk Assessment of Ammonia Release Scenarios", *The Korean Society of Safety*, 31(3), 156-161, (2016)

[15] Hwang, W.Y., "A Study on the impact of Damage Caused by an Explosion Accident at a Downtown Gas Station: Focusing on Radiant Heat", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(4), 103-111, (2020)

[16] Kim, S.S., Park, J.H., Shin, Y.S.,"The Risk Assessment of a T-beam Girder Bridge on Fire", *Korean Society of Civil Engineers,* 1434-1437, (2012)

[17] "KOSHA GUIDE P-102-2013", Korea Occupational Safety and Health Agency, (2012)

[18] Jeong, G. S., "Liquid chlorine leak damage modeling of Petrochemical Complex", *Department of Fire Service Administration Graduate School of Dongshin University*, (2015)