KIGAS Vol. 27, No. 1, pp 13~22, 2023
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.1.13

수소연료전지선박의 탱크 내 누출시나리오에 따른 영향분석

임상진 · †이윤호*
목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과 석사과정, *목포해양대학교 해양경찰학부 교수
(2022년 10월 27일 접수, 2023년 2월 6일 수정, 2023년 2월 7일 채택)

The Impact Analysis of the Leakage Scenario in the Tank of Hydrogen Fuel Cell Vessel

Sang-Jin Lim · †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 October 27, 2022; Revised February 6, 2023; Accepted February 7, 2023)

요 약

현재 통용되고 있는 화석연료로부터 발생되는 환경오염에 대한 대안으로써 대기오염이 발생하지 않는 수소를 사용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 최근까지도 수소 누출에 의한 화재 및 폭발사고가 발생함에 따라 특수한 환경인 선박에서 수소를 상용화하기 위해 안전에 관한 연구가 더욱 필요하다. 따라서 본 연구에서는 수소저장탱크가 설비된 수소연료전지 추진선박이 울산 장생포항을 운항하던 중 누출사고가 발생할 경우의 계절별 대안 시나리오와 최악의 시나리오를 가정하였다. 또한, 환경변수를 고려하기 위하여 기상청 2021년도 연평균 기상자료와 통계청 지리정보 자료를 토대로 ALOHA와 프로빗 분석을 통해 피해영향 범위를 도출하였다. 복사열이 대안 시나리오와 최악의 시나리오 모두에서 과압과 화염의 피해 영향범위보다 넓은 피해범위가 나타났고 프로빗 분석 결과 가정한 모든 구역에서 99%의 사망률을 확인하였다.

Abstract - As an alternative to environmental pollution generated from fossil fuels currently in use, research is being actively conducted to use hydrogen that does not cause air pollution. As fire and explosion accidents caused by hydrogen leakage have occurred until recently, research on safety is needed to commercialize hydrogen on ships, which are special environments. In this study, a seasonal alternative scenario for each season and the worst scenario were assumed in the event of a leakage accident while a hydrogen fuel cell propulsion ship equipped with a hydrogen storage tank was navigating at JangSaengPo port in Ulsan. In order to consider environmental variables, the damage impact range was derived through ALOHA and probit analysis based on the annual average weather data for 2021 by the Korea Meteorological Administration and on geographic information data from the National Statistical Office. Radiation showed a wider damage range than that of Overpressure and Flame in both the alternative and worst-case scenarios, and as a result of probit analysis, a fatality rate of 99% was confirmed in all areas.

Key words : ALOHA, hydrogen, fuel cell vessel, probit analysis, radiation, overpressure, flame

†Corresponding author:yhlee@mmu.ac.kr
Copyright ⓒ 2023 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

환경오염에 대한 인식의 변화와 화석연료의 비용 상승에 따라 현재의 연료시스템을 대체할 필요성이 대두되었다. 또한, 해양에서의 강화된 대기오염 규제로 인하여 황산화물을 적게 배출하는 연료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 관심의 증가에 따라 황산화물 배출을 줄이는 Pollution free 연료를 사용하는 것이 미래 에너지로서 유력하다. 그중 수소의 상용화는 많은 나라에서 미래 전략으로 삼고 있는 주요 연구 목표이다[1]. 특히, 한국에서는 최초로 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률이 제정되며 일상 속에 안전하게 수소를 사용할 수 있는 제도적 장치가 마련되었다[2]. 하지만 여전히 고압가스 안전관리법에 따라 수소는 인화성 가스로 규정되어 선박이라는 특수한 환경에 상용되기 위해서는 잠재적 위험에 대한 고찰이 필요하다[3].

수소 누출에 따른 국내 피해사례를 살펴보면 2017년 5월 8일 오후 15시경 경남 창원시 서산구 소재의 업체에서 용접을 위한 분배기 교체 작업 중 누설·체류된 수소가스에 의해 정전기가 발생 및 폭발하여 작업자 2명이 부상당한 사고로서, 안전기준을 미준수하여 발생한 것으로 판명되었다. 마찬가지로 안전 기준 미 준수에 의한 사고로서, 2016년 2월 4일 14시경 경북 포항시 장흥동 소재의 업체에서 발생한 폭발 사건이 있다. 수소배관의 채결 상태 불량으로 생성된 잔류 수소가 용접 작업 중 폭발하여 작업자 2명이 부상당한 사고이다[4].

국외 수소 화재 피해사례는 1937년 5월 6일 미국 뉴저지 주 상공에서 수소를 채워 운행하던 비행선 Hindernburg호 사고가 있다. Hindernburg호는 16개의 수소 gas bag과 cell을 포함한 zeppelin이었다. 헬륨으로 운항하도록 설계되었지만, 당시 시대적인 상황에 의해 헬륨을 수입하지 못하여 수소를 채워 운항하던 중 화재가 발생하였다. 이 화재로 인하여 승객 13명, 승무원 22명, 육상에서 작업을 하던 1명의 작업자가 사망하였다[5]. 또한, 최근 사례로는 California Santa Clara와 Norway oslo 지역의 수소 화재 및 폭발사고가 있다. 2019년 6월 1일 California Santa Clara에 있는 hydrogen chemical plant의 액화수소 탱크 트럭에서 누출이 시작되어 화재와 폭발이 연쇄적으로 발생하였다. 이로 인하여 Northern Californian hydrogen station의 기능이 3개월간 마비되었다[6]. 이렇게 최근까지도 육상에서의 수소 누출과 화재 및 폭발 사고는 계속되어 이를 효과적으로 대응하기 위한 대처방안에 대해 연구가 활발히 이루어지고 있다.

관련된 연구를 살펴보면 Giannissi.(2021)은 밀폐된 공간에서 낮은 레이놀즈 수 환경의 수소 확산 형태에 대하여 소프트웨어『ANSYS Fluent』를 통해 확인하였다[7]. 그리고 Inchard(2012)는『FLACS』를 활용하여 액화수소의 누출이 발생한 경우, 산소와 질소 환경 아래에서 수소 JET gas의 속도가 증가하는 것을 확인하였다[8]. 또한, Jang(2015)은 수소 JET Fire에 의한 파이프 손상에 대한 연구를『Kameleon FireEx』을 통해 수행하여 온도와 복사열에 의한 파이프 주변의 피해영향에 대한 결과로 연쇄적인 피해영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다[9].

이와 같이 다양한 소프트웨어를 사용하여 수소의 누출, 화재 등에 대한 피해영향 관련 연구가 수행되어 왔다. 하지만 선박에서의 수소 상용화가 진행 단계인 것을 감안하여도 선박 내 수소에 관한 연구는 찾아보기 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수소 누출에 따른 피해영향을 도출하기 위하여 US Environmental Protection Agency(미국 환경보호청) 및 National Oceanic and Atmospheric Administration(해양대기국)이 공동 개발한 Areal Location of Hazardous Atmospheres (ALOHA, ver.5.4.7.)를 Google Earth의 지리 정보와 함께 적용하여 해석하였으며 이때의 피해 영향은 프로빗 분석을 통하여 도출하였다.

본 연구에서는 선박에서의 수소 사고 시나리오를 설정하기 위하여 2019년 11월 규제 자유특구로 지정되었으며 국내 최초로 선박용 수소충전소를 구축한 울산의 장생포 지역을 선정하였다[10]. 이러한 울산의 지역 특성에 따라 추후 대형 수소연료 선박이 기항하는 상황을 가정하기 위하여 1,200kg의 액화수소를 싣도록 설계된 여객선 SF-BREEZE호를 선정하여 시나리오를 설정하였다[11].

본 연구에서는 이러한 장생포 지역의 인구 특성에 맞게 피해 구역을 설정하기 위하여 통계지리정보를 활용하여 지역특성에 따라 각 구역(운항구역, 취약구역, 산업구역)을 설정하였고 실제 사고 발생 시 데이터를 얻기 위하여 기상조건을 적용한 계절별 대안의 사고 시나리오와 최악의 사고 시나리오를 설정하였다.

Ⅱ. 연구방법

Fig. 1.는 수소 누출에 의한 피해영향을 도출해 내기 위한 본 연구의 연구 방법을 나타내고 있다. 계절별 대안 시나리오를 2021년 평균 기상정보를 기반으로 설정 하였으며, 최악의 시나리오를 통해 정량적 피해 영향에 대한 범위를 파악하고자 하였다. 각 대안 및 최악의 사고 시나리오에 대한 과압, 화염, 복사열에 의한 영향을 도출하였고, 장생포지역에 대한 통계청의 통계지리정보 데이터자료를 활용하여 지역

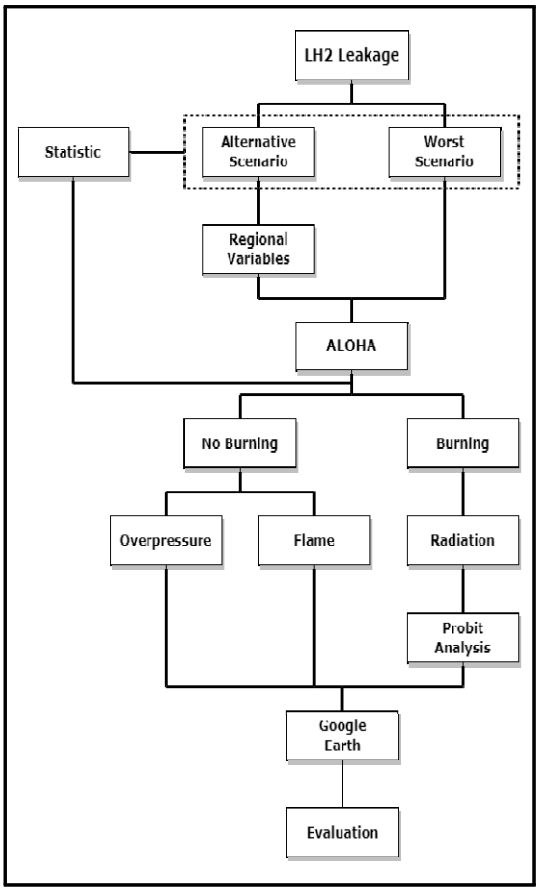


Fig. 1. Methodology.

특성에 따른 피해구역을 설정하였다. 최종적으로 이러한 정보를 Goolg Earth에 적용하여 피해영향을 파악하였으며, 각 구역 별 복사열 사망률에 대한 피해영향을 프로빗 분석을 통하여 도출하였다[12].

2.1. 가정조건

2.1.1. 사고 시나리오

수소 누출 및 화재의 피해영향 범위를 산출하기 위하여 울산의 수소 선박 실증 장소인 장생포항을 사고지점으로 선정하였고 계절에 따른 대안의 사고 시나리오와 최악의 사고 시나리오를 가정하여 연구를 수행하였다.

대안의 사고 시나리오는 2021년 기상청 통계 자료에 따라서 평균풍향, 평균풍속, 평균습도, 평균기온을 계절별로 나누어 설정하였다[기상청]. 또한 최악의 시나리오는 사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술 지침에 따라 풍속 1.5m/s, 습도 50%, 기온 25℃로 가정하였다[13].

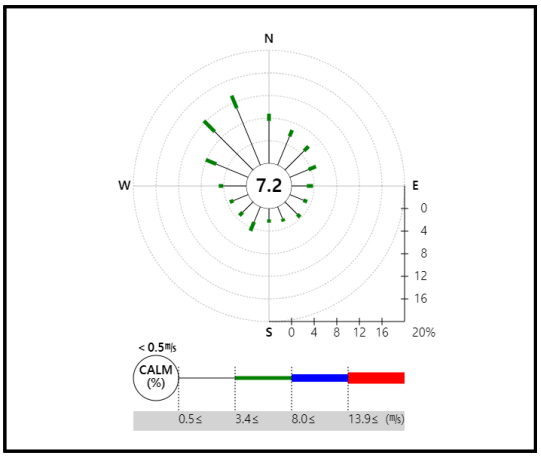


Fig. 2. Average wind rose in Ulsan(2011~2020).

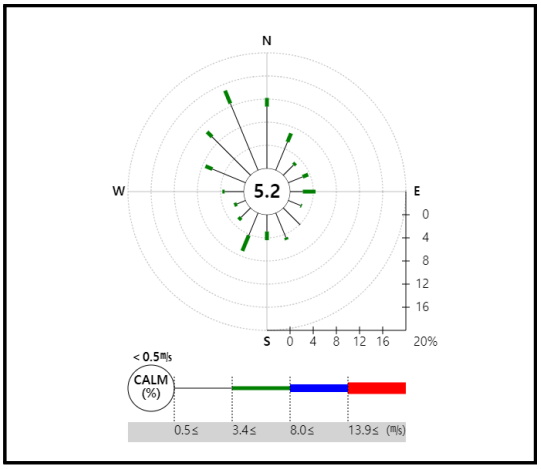


Fig. 3. Average wind rose in Ulsan(Spring, 2021).

Fig. 2.는 10년간 울산의 연평균 풍향과 풍속이 북서풍으로 강하게 작용하고 있는 것을 나타내고 있다. 또한 Table 2.는 2021년의 바람의 빈도 비율로 나타낸 것으로 북풍(북동, 북서)의 비율이 47%로 가장 높았으며, 풍속의 빈도 비율은 0.5~3.3m/s 범위에서 73%로 집계되었다[14].

2014년 5월에서 2022년 5월까지 울산의 화학물질 사고 현황을 살펴보면 총 59건으로, 봄 23건, 여름 18건, 가을 5건, 겨울 13건으로 집계되어 본 연구에서는 가장 사고가 많이 발생하는 봄인 3월-5월 기간 동안의 풍향을 최악의 시나리오에 적용하였다[4].

Table 1. Seasonal average data in Ulsan(2021)

	Spring (3~5)	Summer (6~8)	Fall (9~11)	Winter (12~2)
Temperature.(℃)	13.7	24.6	16.3	3.6
Humidity(%)	60.4	78.9	70.2	51
Wind Velocity(m/s)	2.3	2.1	2.1	2.4
Stability Class(-)	C	C	C	C
Wind Direction(-)	NNW	NW	NNW	NNW

Table 2. Frequency ratio of wind direction and wind velocity in Ulsan(2021)

Wind Velocity (m/s)	Wind Direction					Total
	-	ENE ~ ESE	WSW ~ WNW	SE ~ SW	NW ~ NE	
~0.4	7.2	-	-	-	-	7.2
0.5~ 3.3	-	8.9	13	12.8	38.3	73
3.4~ 7.9	-	3.2	3.5	4.2	8.7	19.6
Total	7.2	12.1	16.5	17	47	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

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)
	Flammable Area	LEL	60% LEL	10% LEL

2.1.2. 누출공의 크기와 누출시간

수소 누출에 의한 최대 피해를 가정하기 위하여 American Petroleum Institute(API,2008)에 따라 Large size 표준 지름 101.6mm의 원형 파공으로 설정하였다[15]. 대안의 사고 시나리오는 폭로 시간을 복사열의 피해 영향 기준인 60초로 설정하여 계산하였고, 최악의 시나리오는 사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침에 따라 10분을 가정하였다[13].

2.1.3. 피해영향 및 기준

수소 누출이 발생한 경우, 화재의 복사열으로 인한 피해가 발생할 수 있으며, 화재가 일어나지 않고 과압과 화염에 의한 피해가 일어날 수 있다. 본 연구에서는 피해 영향 범위를 판단하기 위하여 Table 4. 와 같이 기준을 정하였다[16,17].

복사열에 의한 피해 영향의 1단계는 60초의 시간 안에 고통을 느끼는 정도인 2.0kW/㎡, 2단계는 같은 시간에 2도 화상을 입는 정도 5.0kW/㎡, 3단계는 60초 안에 사망할 수 있는 가능성이 있는 정도인 10.0kW/㎡로 정의 된다[16].

과압에 의한 피해 영향은 유리가 깨지는 압력 6.89kPa, 심각한 부상을 입는 24.13kPa, 건물이 붕괴될 수 있는 압력 55.16kPa으로 표현된다[16].

화염은 폭발하한계(Lower Explosive Limit, LEL)의 정도에 따라 위험지역과 비위험지역으로 나뉘는데, 수소 폭발하한계의 10%를 위험 1단계, 폭발하한계의 60%인 범위를 2단계, 가장 위험도가 높은 폭발하한계에 달하는 범위를 3단계로 나타낼 수 있다[17].

2.1.4. 수소연료탱크

액화수소 Pool 화재의 시뮬레이션을 위하여 수소 여객선 선박 SF-BREEZE호의 최대 액화수소 저장 용량인 1200kg를 기준으로 삼았다[11]. 이때, 탱크 내부 온도가 -253℃, 수소 적재량 95% 중 하부 30% 지점에서 파공이 발생한 것으로 가정하였다[12].

2.1.5. 인구분포

울산시 통계지리정보에 관한 2019년 통계청 open data를 사용하여 장생포항이 총 1,809개의 사업체가 위치한 장생포동 안에서 피해영향이 있을 수 있는 지역 중 가장 산업체가 많은 것으로 나타났다. 장생포 초등학교를 중심으로 363개의 산업체가 있으며 이에 따라 선박이 항행하는 구간(사고지점~20m), 초등학교를 포함한 구간(20m~100m) 그리고 산업체가 주로 분포하는 구간(100m~300m)으로 가정하여 각 구간의 피해영향을 도출하였다[18].

2.2. 수학적 모델(Mathematical model)

2.2.1. 영향 모델(Effect model)

수소 저장 탱크에서 누출이 발생한 경우의 복사열에 대한 피해 영향을 도출하기 위한 방법으로, ALOHA에서는 Combustion efficiency factor를 0.2로 설정하고 모든 지점의 열유속을 산출 한 뒤, 누출 지점으로부터 지정 거리에 있는 곳의 복사열 유속을 식(2)으로 구한다. 이렇게 도출해 낸 식(3)에 따라 총 열 유속은 모든 지점에서의 복사열 합과 같다는 것이 계산 가능하다[16].

$$E = \frac{fQH_c}{n} \tag{1}$$

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

$$q = \sum_{i=1}^{n} q_i \tag{3}$$

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)

또한, TNO 폭발 모델을 이용하여 과압의 피해영향 범위를 산출하였다. 식(4)를 통해 총 증기운 에너지를 산출할 수 있고 위상이 지속되는 기간을 식(5), 피해거리는 식(6). 피해 영향범위는 식(7)을 통하여 산출이 가능하다[16].

$$E = V_0 H_c \tag{4}$$

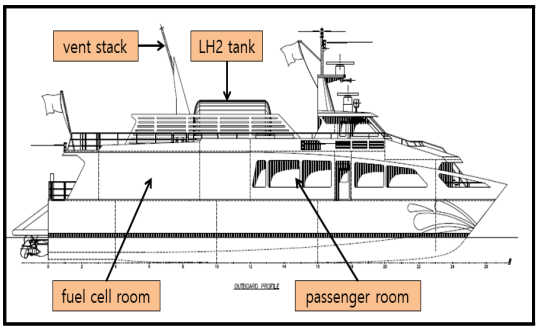


Fig. 4. Hydrogen fuel cell ship(SF-BREEZE).

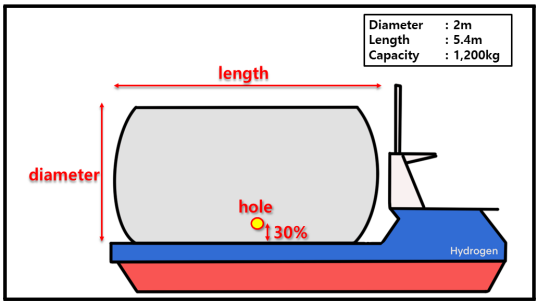


Fig. 5. Hydrogen Storage Tank.

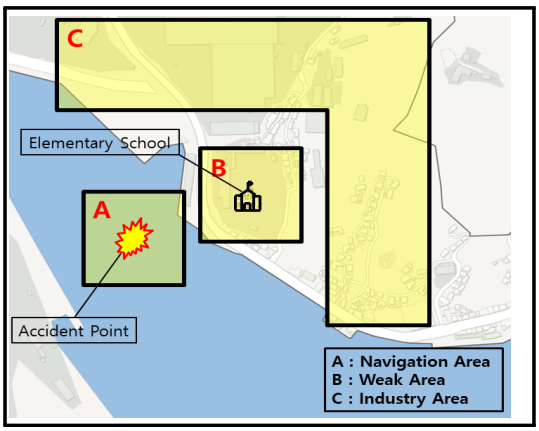


Fig. 6. Population density In Ulsan(2019).

$$\overline{t_p} = t_p c_a (P_a/E)^{1/3} \tag{5}$$

$$\overline{R} = R(P_a/E)^{1/3} \tag{6}$$

$$\overline{P_0} = (P_0 - P_a)/P_a \tag{7}$$

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)
c_a = Ambient velocity of sound(m/s)
t_p = Positive phase duration(s)
R = Fuel-air charge radius(m)
$\overline{R}$ = Scaled distance(-)

화염의 영향은 폭발하한계(LEL)로 나타낼 수 있다. 식(8) 또는 식(9)와 같이 폭발하한계는 온도에 영향을 받기 때문에 기상조건에 따라 피해 범위가 달라진다[13].

$$L_T = L_{25} - (0.8L_{25} \times 10^{-3})(T-25) \quad (8)$$

$$L_T = L_{25}(1 - 0.75 \times \frac{(T-25)}{\triangle H_c}) \quad (9)$$

L_T = Low explosion limit at T℃
L_{25} = Low explosion limit at 25℃
$\triangle H_c$ = Heat of combustion(kcal/mol)
T = Temperature(℃)

2.2.2. 확산 모델(Dispersion model)

각 지역을 지역특성에 따라 설정한 뒤, 피해 지점의 농도와 시간에 따른 농도의 변화를 Gaussian model에 의하여 도출했다[16].

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \quad (10)$$
$$[\exp-(\frac{y^2}{2\sigma_y^2})]\left\{\begin{array}{l}\exp[-\frac{(z-H_r)^2}{2\sigma_z^2}] \\ +\exp[-\frac{(z+Hr)^2}{2\sigma^{2}_{z}}]\end{array}\right\}$$

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

2.2.3. 프로빗 분석(Probit analysis)

과압, 화염, 복사열 중 가장 피해 거리가 넓은 화재에 의한 복사열의 피해 영향을 판단하기 위하여 프로빗 분석을 수행하였다.

복사열의 피해영향에 대하여 주로 사용되고 있는 확률론적 분석 방법인 식(11) - 식(13)를 이용하였다. 식(11)는 1도 화상을 입을 확률, 식(12)는 2도 화상을 입을 확률이며, 식(13)는 화재에 의하여 사망하는 확률을 나타낸다[19].

$$P_r = -39.83 + 3.0186\ln(tQ^{4/3}) \quad (11)$$

$$P_r = -43.14 + 3.0186\ln(tQ^{4/3}) \quad (12)$$

$$P_r = -36.38 + 2.56\ln(tQ^{4/3}) \quad (13)$$

P_r : Probit(%)
t : Exposure time(s)
Q : Radiation(W/㎡)

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 대안의 사고 시나리오

3.1.1. 과압에 의한 영향

환경 변수를 감안한 대안의 사고 시나리오에서의 과압 피해영향은 선박 운항지역인 풍하 방향 20m 근방에서 건물이 붕괴할 수 있는 기준인 Level-3의 수준을 훨씬 상회하는 1,800kPa이상의 압력을 보이며 계절에 관계없이 사고 선박 주위를 항해하는 선박들에게 큰 피해를 줄 것으로 나타났다. 또한 대부분의 대안의 사고 시나리오에서 취약지역인 100m 지점에서 낮은 위험도를 보였으나 겨울의 경우에만 취약지역에 167.5kPa로 Level-2 이상의 위험도를 갖는 압력을 보였다. 그리고 피해 영향의 범위는 각 threat zone별 Red zone이 9,222㎡, Orange zone이 23,229㎡, Yellow zone이 142,608㎡로 나타났다.

3.1.2. 화염에 의한 영향

화염의 영향 범위는 식(8)-식(9)에 따라서 온도의 영향을 받는 것을 알 수 있다. Fig. 8. 는 계절별 피해영

Table 5. Pressure according to distance

		Alternative Scenario			
		Spring	Summer	Fall	Winter
press-ure (kPa)	20m	1,903	1,813	1,903	1,903
	100m	14	14	14	167.5
	300m	3.4	3.4	3.4	6.2

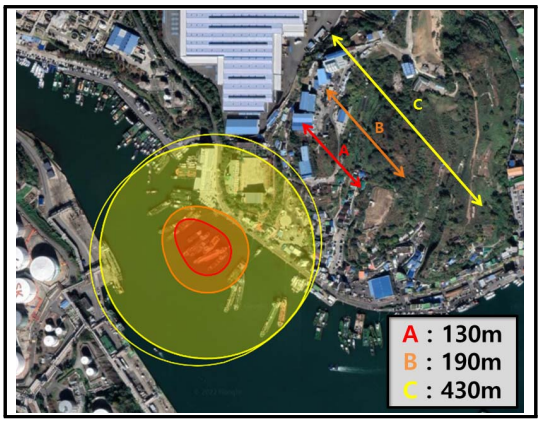


Fig. 7. ALOHA overpressure threat zone result Earth(winter scenario).

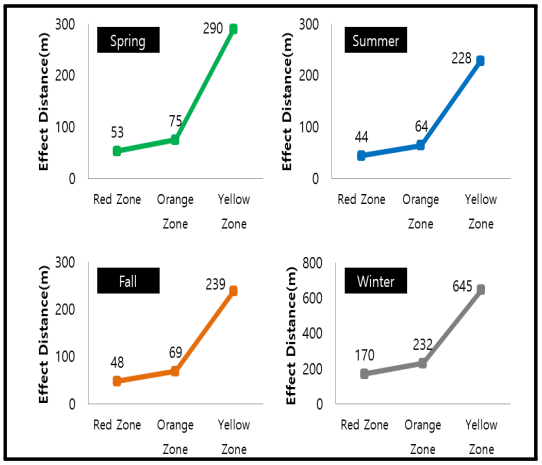


Fig. 8. Range of flame impact(alternative scenario).

향의 최대 범위를 나타내며 연평균 온도가 24.3℃로 가장 높은 여름철에 Orange Zone 피해영향 최대 거리는 64m로 최저 수치를 나타내었으며, 가장 낮은 3.3℃의 연평균 온도인 겨울철에 Orange Zone 피해영향 최대 거리는 232m로 가장 넓게 나타났다.

3.1.3. 복사열에 의한 영향

복사열에 의한 피해영향은 화염과 마찬가지로 겨울철에 가장 크게 나타났다. Table 6. 은 계절과 무관하게 피해영향이 선박 운항 구역인 20m 부근과 취약시설인 초등학교가 있는 100m구역 그리고 산업체가 많은 300m구역까지 모두 60초 동안 노출될 경우 2도 화상을 입는 경우인 5.0kW/㎡ 이상인 것을 알 수 있다.

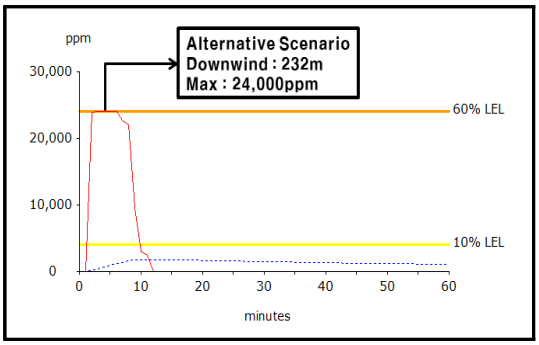


Fig. 9. Radiation change with time at 232m(winter scenario).

Table 6. Radiation according to distance

		Alternative Scenario			
		Spring	Summer	Fall	Winter
Radiation (kW/㎡)	20m	164	152	160	178
	100m	53.3	49.3	52.1	58.3
	300m	6	5.2	5.8	6.6

특히, 연평균 기온이 가장 낮은 겨울철에는 20m 구역이 160kW/㎡, 100m 구역이 52.1kW/㎡ 그리고 300m 구역이 5.8kW/㎡로 4계절 중 가장 높은 복사열 값을 보였다.

겨울철 가장 피해영향의 정도가 높고 반대로 여름에 가장 적은 이유는 스테판-볼츠만 법칙 식(14)에 따라 주변 온도 Ta가 낮을수록 단위면적당 방사되는 복사에너지가 커지기 때문이다[20].

$$P = \sigma \epsilon_s (T_s^4 - T_a^4) \quad (14)$$

P = Energy of thermal radiation(W/㎡)
σ = Constant of Stefan-Boltzmann(W/㎡K4)
ϵ = Material emissivity radiation factor(-)
T_s = Material temperature(K)
T_a = Ambient temperature(K)

복사열에 의한 사망률은 프로빗 분석 식(13)를 통해 겨울철 기준, 운항구역인 20m 지점이 99%, 취약구역인 100m 지점이 99% 그리고 300m 지점인 산업구역 역시 99%로 도출되었다.

3.2. 최악의 사고 시나리오

3.2.1. 과압에 의한 영향

최악의 시나리오에서의 과압 피해영향은 대안의 사고 시나리오와 마찬가지로 선박 운항구역인 20m 지점에서 1,903kPa로 건물이 붕괴되는 정도의 큰 피해를 보였으며, 취약구역인 100m 지점에서 46.9kPa로 Level-2 위험 정도인 심각한 부상을 입을 수 있는 정도 이상의 피해영향을 도출하며 그 피해면적 또한 대안의 사고 시나리오와 유사하였다.

3.2.2. 화염에 의한 영향

화염의 Orange Zone 피해 영향 최대 끝점 거리는 82m로, 선박 운항구역인 20m 지점이 위험 범위 안에 속한다. 하지만 취약구역인 100m 지점과 산업구역인 300m 지점은 Fig.11.에서 보이는 바와 같이 폭발하한계 10% 내외로 상대적으로 안전한 것으로 나타났다.

3.2.3. 복사열에 의한 영향

최악의 시나리오에서 복사열에 의한 피해영향은 대안의 사고 시나리오의 겨울철 피해영향과 가장 유사하게 나타났다. 최대 영향 끝점인 Orange Zone 내에 선박 운항구역, 취약구역, 산업구역이 포함되며 복사열의 경우 과압과 화염의 피해영향과 다르게 설정한 모든 구역이 위험구역으로 도출되었다. 운항구역은 256kW/㎡, 취약구역 51.5kW/㎡, 산업구역 5.7kW/㎡로 가장 낮은 복사열을 나타내는 산업구역도 피해영향 끝점 기준 Level-2 위험 정도인 5.0kW/㎡ 보다 높은 것으로 나타났으며 프로빗 분석 결과 세 구역 모두 99%의 사망률을 보였다.

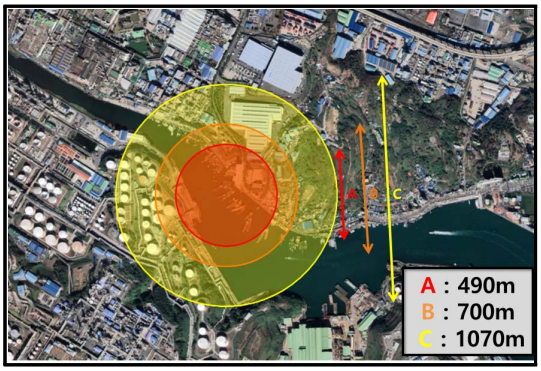


Fig. 10. ALOHA Radiation threat zone result (winter scenario).

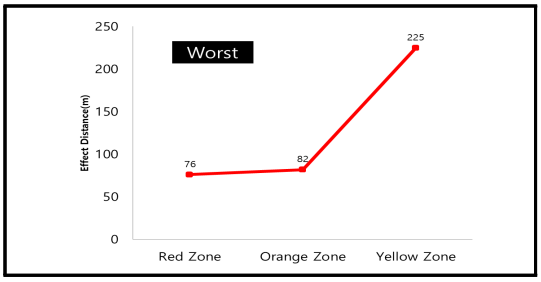
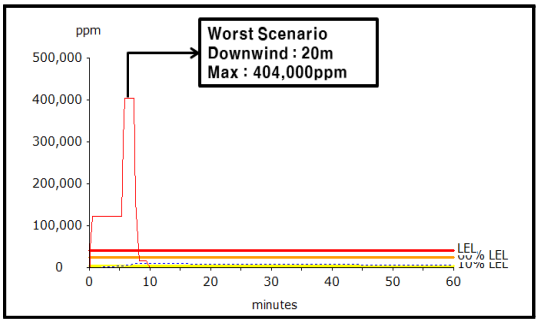
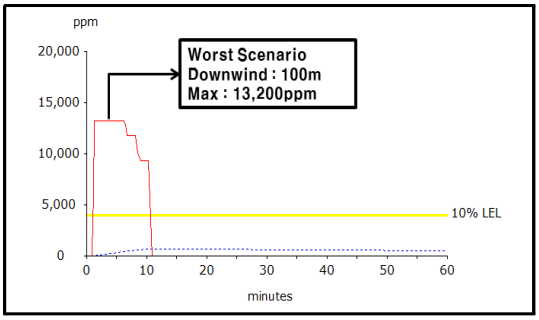


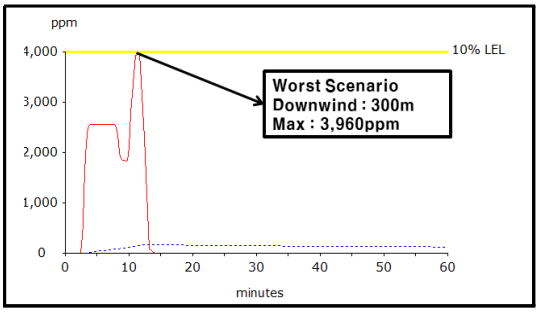
Fig. 11. Range of flame impact(worst scenario).



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Concentration change with time at each point; (a) 20m, (b) 100m, (c) 300m.

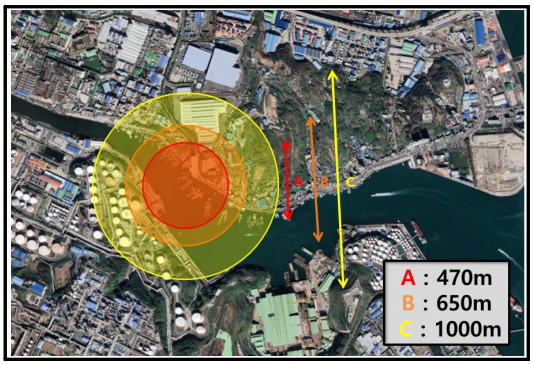


Fig. 13. ALOHA Radiation threat zone result (worst scenario).

3.3. 분석결과

대안 시나리오의 피해 영향의 경우, 과압에 의한 피해는 20m 지점의 선박 운항구역만 끝점 이상의 유효한 피해 영향이 도출되었다. 해당 조건 하에서는 겨울철의 경우 운항구역과 취약구역에서 유효한 피해영향이 도출되었으며, 겨울철을 제외한 시나리오에서 취약구역과 산업구역은 과압의 피해영향이 적은 것을 확인했다.

또한, 화염에 의한 피해영향의 경우, 4계절 중 겨울철의 피해영향 범위가 Red Zone: 170m, Orange Zone: 232m, Yellow Zone: 77m로 가장 넓어 기온이 낮은 환경일수록 피해영향의 범위가 넓다는 것을 도출하였다.

마찬가지로 복사열의 피해영향도 연평균 기온이 낮은 시나리오일수록 피해영향 범위가 넓은 것을 도출해 내었으며, 복사열의 경우 과압 및 화염의 피해영향과는 다르게 20m, 100m, 300m 모두 끝점 분석의 기준이 되는 Level-2의 피해영향보다 높게 측정되었다.

이에 따라, 가장 큰 영향이 있는 복사열의 경우 프로빗 분석을 수행하였으며 운항구역, 취약구역, 산업구역 모두 99%의 사망률을 도출할 수 있었다.

최악의 시나리오 피해영향의 경우, 과압 피해영향은 운항구역과 취약구역에서 끝점 분석 최대 피해영향 기준 이상의 압력을 보였으며, 화염의 경우 운항구역에서 폭발하한계 60% 이상으로 위험구역에 속하나, 취약구역과 산업구역은 폭발하한계 10% 내외로 비교적 안전한 지역으로 도출되었다.

복사열의 경우, 최악의 시나리오는 대안 시나리오의 겨울과 마찬가지로 가정한 세 구역 모두 5.0kW/㎡ 이상을 나타내며 60초 이상 사고에 노출 시 2도 화상을 입을 수 있다는 것을 도출하였으며, 프로빗 분석 결과 Table 7. 과 같이 모든 결과에서 99% 사망률을 확인하였다.

Table 7. Result of probit analysis according to radiation impact

		Alternative Scenario				
		Spring	Summer	Fall	Winter	Worst
Death possibility (%)	20m	99	99	99	99	99
	100m	99	99	99	99	99
	300m	99	99	99	99	99

Table 8. Threat zone of ALOHA

		Alternative Scenario				Worst
		Spring	Summer	Fall	Winter	
Overpressure (m)	Red	48	47	48	120	94
	Orange	73	73	74	155	133
	Yellow	165	168	165	288	278
Flame (m)	Red	53	44	48	170	76
	Orange	75	64	69	230	82
	Yellow	290	228	239	645	225
Radiation (m)	Red	230	225	229	250	227
	Orange	330	316	320	340	324
	Yellow	510	489	500	530	498

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 대안 시나리오와 최악의 시나리오를 가정하여 수소연료 추진 선박이 항해 중 수소 누출이 발생한 상황에서 활용 가능한 피해영향 정보를 파악하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 수소 저장탱크 누출 시 과압의 영향은 대부분의 시나리오에서 선박 운항구역 내에서 유효한 피해 정도가 도출되었으며 연평균 기온이 매우 낮은 겨울철에는 사고 원으로부터 약 100m 떨어진 지역에서도 167.5kPa의 높은 압력으로 인한 피해를 입을 수 있다는 것을 확인하였다. 하지만, 300m 떨어진 지점인 산업구역에서는 모든 시나리오에서 상대적으로 안전한 압력을 나타냈다.

(2) 화염의 경우 대안 시나리오 조건 하에서 기온이

가장 낮은 겨울철의 끝점 피해영향 범위가 232m인 것을 확인하였고 운항구역 내에서 폭발하한계 60% 이상으로 나타났지만, 100m 지점인 취약구역과 300m 지점인 산업구역은 Level-2 이하의 상대적으로 안전한 수치를 보였다.

(3) 복사열의 경우 모든 대안 시나리오와 최악의 시나리오에서 가정한 세 구역(선박 운항구역, 취약구역, 산업구역)의 피해영향이 모두 피해 최대 끝점 범위 안에 포함되며 높은 정도의 피해가 예상되었다. 따라서 최고 복사열에서 10분간 노출된 경우의 프로빗 분석을 통하여 모든 시나리오에서 99%의 사망률을 도출하였다.

본 연구 결과는 수소 누출사고의 초동대응에 대한 방안을 모색하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 울산뿐만 아니라 전국 해안의 수소 선박이 운용되어지는 항만지역의 기상 변화를 감안한 누출 피해 정도 연구를 수행한다면 대처방안 및 정책 수립 등에 도움이 될 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] Gu, X., Zhang, J., Pan, Y., Ni, Y., Ma, C., Zhou, W., Wang, Y., “Hazard analysis on tunnel hydrogen jet fire based on CFD simulation oftemperature field and concentration field”, *Journal of Safety Science*, 122, 104532, (2020)

[2] 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률

[3] 고압가스안전관리법 시행규칙 제2조(정의), (2023)

[4] National Institute of Chemical Safety, https://icis.me.go.kr/main.do;jsessionid=rzyfQmkJq4ccC3fcH9+jqvw.icis_ipotal21

[5] Crowl, D. A., Jo,Y.D., “The hazards and risks of hydrogen”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(2), 158–164, (2007)

[6] Genovese, M., Blekhman, D., Dray, M., and Fragiacomo, P., “Hydrogen losses in fueling station operation,” *Journal of Cleaner Production*, 248, (2020)

[7] Giannissi, S. G., et al., “On the CFD modelling of hydrogen dispersion at low-Reynolds number release in closed facility,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29745–29761, (2021)

[8] Ichard, M., Hansen, O. R., Middha, P., and Willoughby, D., “CFD computations of liquid hydrogen releases”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22), 17380–17389, (2012)

[9] Jang, C. B., Choi, S. W., and Baek, J. B., “CFD modeling and fire damage analysis of jet fire on hydrogen pipeline in a pipe rack structure”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(45), 15760–15772, (2015)

[10] Ulsan metroplitan city,https://www.ulsan.go.kr/u/rep/bbs/view.do?bbsId=BBS_0000000000000027&mId=001004003001000000&dataId=138418

[11] Pratt J. W., and Klebanoff, L. E., “Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry”, [Online]. Available: http://www.ntis.gov/search

[12] Lim, S.J., Choi, B.H., Lee, Y.H., ″Quantitative Analysis of Damage Impacts in case of Bunkering NH3 from Tank Lorry to Fishing Vessel″, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 26(3), 10-20, (2022)

[13] “KOSHA GUIDE P-107-2020”, Korea Occupational Safety and Health Agency, (2020)

[14] Korea Meteorological Administration, https://www.weather.go.kr/, (2021)

[15] 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)

[16] Lee, Y.H., “A Study on the Damage RangeAccording 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)

[17] ALOHA technical document, (2013)

[18] Statistics Korea, https://sgis.kostat.go.kr/view/index

[19] “KOSHA GUIDE P-102-2013”, Korea Occupational Safety and Health Agency, (2012)

[20] 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)