



연근해 수소추진선박의 벙커링 안전구역 설정에 관한 연구

전성하·정석영·남동[†]
한국해양교통안전공단

A Study on the Establishment of Bunkering Safety Zone for Hydrogen Propulsion Ships in Coastal Area

Sungha Jeon · Sukyoung Jeong · Dong Nam[†]
Korea Maritime Transportation Safety Authority

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study aims to establish safety zones for bunkering operations of hydrogen propulsion ships in coastal areas through risk assessment and evaluate their validity. Using a 350 kW-class ferry operating in Busan Port as the subject of analysis, with quantitative risk assessment based on accident consequence and frequency analysis, along with a social risk assessment considering population density. The results of the risk assessment indicate that all scenarios were within acceptable risk criteria and ALARP region. The most critical accident scenarios involve complete hose rupture during bunkering, resulting in jet flames (Frequency: $2.76E-06$, Fatalities: 9.81) and vapor cloud explosions (Frequency: $1.33E-08$, Fatalities: 14.24). For the recommended safety zone criteria in the 6% hose cross-sectional area leakage scenario, It could be appropriate criteria considering overall risk level and safety zones criteria for hydrogen vehicle refueling stations. This research contributes to establishing safety zone for bunkering operations of hydrogen propulsion ships through risk assessment and provides valuable technical guidelines.

Keywords : Hydrogen propulsion ship(수소추진선박), Bunkering safety zone(벙커링 안전구역), Risk assessment(위험도평가)

1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 국제항해선박의 온실가스 배출량 저감을 위하여 2008년 대비 2030년까지 20%, 2040년까지 70% 감축, 2050년까지 순 배출량 제로화(net zero)를 달성 목표로 제시하였다(IMO, 2023). 우리나라 또한 국제사회의 탈탄소 규제강화에 선제적으로 대응하기 위해 「해양수산업 2050 탄소중립 로드맵」을 수립하여 친환경 선박 기술개발과 탄소중립 연료 추진 선박과 관련 인프라의 상용화 기반을 구축할 것을 발표하였다(MOF, 2021). 이와 같은 해운부문 온실가스 감축을 위한 국내외 정책 기조에 따라 궁극적인 탄소중립연료로 주목받고 있는 수소를 주 연료로 하여 운항할 수 있는 수소추진선박에 관한 연구과제와 시범사업들이 활발히 진행되고 있다(Lee et al, 2019).

수소추진선박은 연료전지로 공급되는 수소연료와 산화제(공기 중 산소)의 전기화학적 반응으로 전기를 생성하여 주 추진원으로 사용하는 선박이다. 수소추진선박은 수소연료 벙커링 설비와 저

장탱크, 연료공급설비, 연료전지, 배터리 및 전기추진 시스템 등의 주요 기자재로 구성된다. 수소연료는 기존의 디젤연료를 사용했을 경우와 비교하면 질소산화물, 황산화물, 미세먼지와 같은 대기오염 물질과 이산화탄소를 전혀 배출하지 않는다(Ahn et al., 2022). 특히 내수면과 연근해를 주로 운항하는 내항 여객선과 같은 선박은 수소연료 사용으로 인한 온실가스 배출 저감과 항만지역 대기질 개선에 큰 효과를 얻을 수 있다.

수소추진선박과 이와 관련된 주요 기자재가 개발됨에 따라 수소추진선박 운용을 위한 벙커링 설비와 같은 인프라 구축이 필요하다. 하지만 국내의 상업적으로 운영되는 선박용 수소 벙커링 설비는 아직 미비한 실정이다. 수소 벙커링 설비 인프라 구축을 위한 설비 및 설치비용, 부지확보 등과 같은 문제들을 고려하면 전국 주요 항만에 단시간에 도입하기에는 어려움이 있다. 따라서 수소추진선박 도입 초기에는 인프라 보급 활성화와 충전 작업의 편의성을 위하여 항만 유희부지에 수소트럭 트레일러와 이동형 충전설비로 수소 충전을 할 수 있는 TTS(Truck to Ship) 형태의 벙커링 설비가 필요하다. 벙커링 부지 선정과 인프라 구축, 벙커링 작업 시 외부 인원 통제와 이격거리 설정을 위하여 벙커링 안

전구역 설정 기준이 필요하지만 국내외적으로 선박용 수소 벙커링 안전구역 설정에 대한 기준이 아직 마련되어 있지 않다 (Yoon et al., 2022). 따라서 본 연구에서는 수소 벙커링 설비 중 TTS(Truck to Ship) 형태의 벙커링 설비를 평가 대상으로 설정하여 벙커링 안전구역 설정을 위한 정량적 위험도평가를 수행하며 그 타당성을 평가함으로써, 선박용 수소 벙커링 안전구역 기준 설정에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 연구 동향 및 방법

2.1 수소 벙커링 안전구역 기준 연구 동향

선박용 수소 벙커링 안전구역 설정에 대한 기준이 국내외적으로 아직 마련되어 있지 않으므로 수소와 유사한 저인화점 연료인 선박용 LNG 벙커링 안전구역에 대한 기준을 참고할 수 있다. 그리고 육상용 수소 취급설비와 수소자동차 충전소의 안전거리 기준과 위험도평가를 통한 안전구역 설정법과 관련된 선행 연구를 참고하여 선박용 수소 벙커링 설비 안전거리 설정을 위한 근거로 활용할 수 있다.

국제표준화기구(International Organization for Standardication, ISO)에서는 ISO/TS 18683 (ISO, 2021)에서 위험도평가에 기반한 선박용 LNG 벙커링 안전구역 설정 방법을 제시하고 있다. 이는 최악의 사고 시나리오에 기반하여 결정론적(deterministic) 또는 확률론적(probabilistic) 위험도평가 방식을 사용하여 LNG 벙커링 안전구역을 설정할 것을 권고하며, 안전구역 내 필수 작업자 외 인원의 출입을 제한하여 사고발생 시 인명 손실을 최소화할 것을 제안한다. Jeong et al. (2020) 은 LNG 벙커링 안전구역 설정에 대한 정량적 위험도평가 방법론을 제시하며 CFD Simulation을 통한 LNG 누출사고 시나리오 분석과 벙커링 안전구역 설정에 대한 타당성 평가 결과를 제시하였다. Park et al. (2022)는 국내외 선박 연료유 벙커링 안전구역 배치 기준에 대한 분석과 LNG 연료 추진선박의 벙커링 활성화와 안전성 검증하기 위한 연구를 수행하여 LNG TTS 벙커링 안전구역 설정에 대한 기준을 제안하였고, LNG 벙커링 대상 선박을 선정하여 안전구역 배치의 예시를 제시하였다.

국내 고압가스법 하의 수소자동차 충전소 기술기준 (MOTIE, 2012)에서는 제 2종 보호시설에 대해서는 12m, 화기와의 거리는 8m 이상의 이격거리를 유지하도록 규정하고 있다. 이는 저장용량, 사용압력, 충전유량과 같은 개별 설비의 특성을 고려하지 않은 일관적인 안전거리 설정 기준이므로 피해분석이나 위험도 평가등을 통하여 타당성 검증이 필요하다. Sandia National Laboratories (2009)에서는 수소 취급설비의 안전거리 설정을 위한 국제 규정과 표준을 소개하며, 위험도에 기반한 안전거리 설정을 위한 정량적 위험도평가 방법론과 이를 수행하기 위한 빈도수 데이터를 제시하였다. Kwon et al. (2020)은 Hy-KoRam,

PHAST, SAFETI와 같은 정량적 위험도평가 프로그램을 사용하여 차량용 수소충전소에 대한 개인적, 사회적 위험도평가를 수행하여 그 결과를 비교분석 하였다. Kim et al. (2020)은 수소충전소 인프라 확장을 위하여 수소 차량 충전용으로 개발된 이동형 수소 충전설비에 대한 정량적 위험도평가를 수행하여 실증 대상 충전 부지에 대한 위험도 분석 및 입지 타당성평가에 대한 연구를 수행하였다.

2.2 연구 방법

본 연구에서는 위험도평가에 기반한 수소추진선박 벙커링 안전구역 설정을 위하여, 다음 Fig. 1의 업무 흐름도에 따라 정량적 위험도평가를 수행하였다. 먼저 LNG 벙커링, 수소 취급설비, 수소자동차 충전소에 대한 안전구역 설정 기준과 위험도평가 방법, 선행 연구자료들을 참고하여 선박용 수소 벙커링 설비의 위험도평가 수행을 위한 근거자료를 수집하였다. 위험도 평가를 위한 기초 자료가 수집되면 평가 대상 선박과 벙커링 설비 및 입지 조건 설정, 사고 빈도수를 설정한다. 이러한 취합된 정보를 기반으로 Event Tree Analysis를 수행하여 사고 시나리오를 작성하며 누출, 화재, 폭발과 같은 사고에 대한 피해영향 분석(consequence analysis)을 실시한다. 설비 조건에 대한 누출 빈도수와 감지 및 차단, 점화 확률을 event tree에 대입하여 빈도 분석(frequency analysis)에 대한 결과를 얻을 수 있다. 이와 같은 피해영향 분석과 빈도 분석을 통해 도출된 결과를 조합하여 정량적 위험도를 평가할 수 있다. 추가적으로 벙커링 부지의 구역별 인구밀도 데이터에 기반한 위험도평가 방법(Population Dependent Analysis, Jeong et al, 2021)을 적용하여 F-N Curve 작성을 통해 사회적 위험도에 대한 평가 결과를 도출하였고, 선박용 수소 벙커링설비의 안전구역 설정과 그에 대한 타당성을 평가할 수 있다.

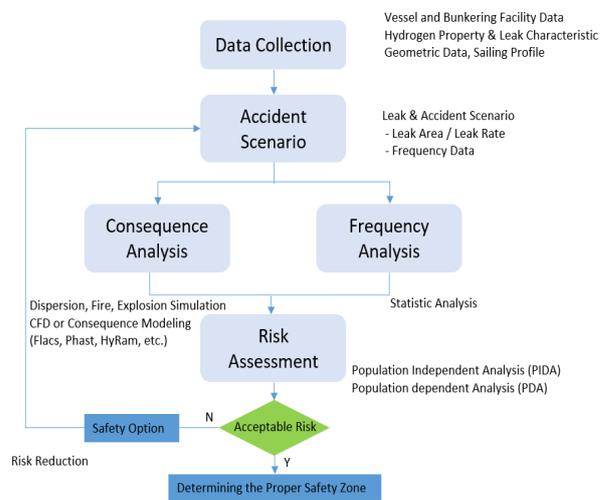


Fig. 1 Process of risk assessment for determining hydrogen bunkering safety zone

3. 위험도평가 설정

3.1 평가 대상 선정

본 연구에서는 일정한 항로를 통해 운항하므로 수소 충전 접근성 및 활용도가 높으며, 주요 항만의 내항 여객선으로 주로 사용되는 350kw 급 연근해용 여객선을 평가 대상 선박으로 선정하였다. 대상 선박의 주요 제원과 예상 출력 및 연료량, 충전 속도에 대한 예상값을 아래 표에 표기하였다(Table 1).

Table 1 Specification of hydrogen fuel cell propulsion ship

Item	Description
Vessel type	Passengers ferry
Motor power	175kW x 2sets
FC capacity	75kW x 4sets
ESS capacity	100kwh
Hydrogen tank capacity	175liter x 10ea
Hydrogen tank refueling capacity	50kg (612Nm³)
Hydrogen tank pressure	350bar



Fig. 2 Expected sailing route of hydrogen propulsion ship

대상 선박은 부산항(북항) 재개발 사업 계획과 부산지역 해안선 부근의 관광자원 활용을 통한 수소추진선박의 지속적인 운영을 위하여 다음과 같은 왕복 항로로 운항하는 것으로 기획하였으며, 부산항 제 1부두의 연안여객선 터미널을 선박의 주 정박지로 설정하여 수소 벙커링 대상 장소로 선정하였다(Fig. 2).

연근해용 선박의 특수성과 부족한 수소 공급 인프라를 고려할 때, 모든 항만에 고정형 수소 충전설비를 설치하기란 현실적으로 어려우므로 수소자동차 충전용으로 개발된 이동형 수소충전설비를 활용하여 TTS(Tank to Ship) 형태의 수소연료 벙커링 조건을 고려하였다. 벙커링 설비의 주요 제원은 아래와 같으며 (Table

Table 2 Specification of mobile hydrogen bunkering station

Item		Description
Compressor	bar	500
Refueling pressure	bar	350
Flowrate	Nm3/h	1200
Hose diameter	inch (mm)	9/16 (ID 7.92mm)
Expected bunkering time	hour	0.5 ~ 1.0

2) 벙커링 설비 내 압축기의 500bar의 공급압력으로 수소저장 용기에 350bar의 압력까지 충전할 수 있다.

이 설비를 활용하여 벙커링 작업을 수행하면 소형 수소보트의 경우 약 15kg의 충전용량에 대해서 15~30분, 연근해 여객선 대상 선박의 50kg의 충전용량 연료탱크를 30분~1시간 내외의 시간으로 충전할 수 있다.

3.2 사고 시나리오 설정

사고 시나리오 설정을 위하여 Event Tree를 작성하여 Fig. 3 와 같이 그 결과를 도출하였다. 본 연구에서는 가압식 수소연료 탱크를 설치한 수소연료전지 추진선박을 연구 대상으로 고려하였으므로 액화 수소 누출에 따른 액면화재(pool fire)와 질식과 독성 영향에 대한 피해영향은 고려하지 않고 가스 누출로 인한 사고 시나리오를 작성하였다.

가연성 가스 누출의 경우는 점화의 시기에 따라 사고 형태가 달라진다. 누출되고 있는 수소가스(제트 plume)에 즉시 점화가 되면 제트화염의 형태로 화재가 발생한다. 누출된 수소가스가 즉시 점화가 되지 않고 감지와 차단 실패에 따른 축적된 수소가스가 폭발한계농도 범위 내에서 지연 점화가 되면 증기운 폭발(vapor cloud explosion)의 사고가 발생한다.

수소가 누출되더라도 폭발한계 가스 농도 내에서 점화가 되지 않으면 화재나 폭발과 같은 사고가 일어나지 않으며, 누출에 대한 감지와 차단이 정상적으로 작동되어 폭발한계농도 이하로 주변으로 확산되면 폭발 사고로 이어지지 않는다.

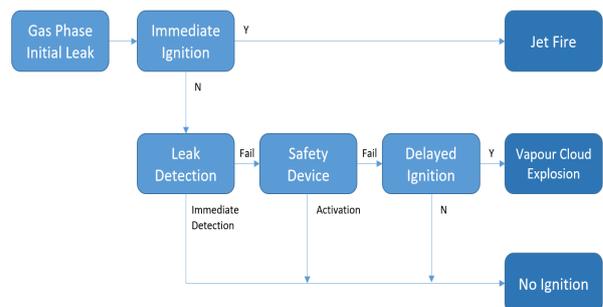


Fig. 3 Event tree for accident scenario analysis

3.3 누출 모델 설정

1) 누출 면적 설정

사고 시나리오 선정 시 누출 면적의 크기는 누출량에 따른 사고 영향 결과(consequence analysis)와 직접적인 관련성이 있으며, 누출 면적에 따라 누출 빈도(leak frequency)가 달라지므로 빈도수 분석(frequency analysis) 및 위험도 판정 결과에도 크게 영향을 미친다. 따라서 어떤 기준으로 누출 모델을 선정할 것인지 기술적인 근거가 가장 중요하다. 본 연구에서는 아래의 각 국제표준 및 단체의 지침에 따라 각각 누출 모델을 작성하였다.

API 581, Risk Based Inspection (API, 2016)과 산업안전보건공단의 누출원 모델링에 관한 기술지침 (KOSHA, 2012)에서는 2inch 이하의 배관에서는 그 배관의 단면적, 2inch 이상 4inch 미만의 배관에서는 2inch 배관의 단면적, 4inch 이상에서는 해당 배관 면적의 20%의 크기에 해당하는 단면적을 기준으로 누출량을 산정하는 것을 제시하고 있다. 이를 통해 각 사업장 설비의 최악의 사고 시나리오와 대안의 사고 시나리오를 선정하여 장외 영향평가를 수행하여 피해영향 거리 산출 및 정량적인 사고 피해 결과를 분석하는 것을 제시하고 있다.

IEC-60079-10-1 (IEC, 2020)과 한국가스안전공사의 GC101 (KGS, 2018)에서는 가스취급시설의 폭발위험장소 구분 및 범위 산정 기준을 정의하고 있다. 정상상태에서의 소규모 누출은 1차 누출등급으로, 비정상상태에서의 대규모 누출은 2차 누출등급으로 분류하고 있다. 수소연료 벙커링 작업 시 발생한 누출의 경우는 비정상상태 누출 및 2차 누출등급으로 구분할 수 있으며, 수소 선박 벙커링 호스 규격 범위에 해당하는 50mm 이하 소구경 배관 연결부에서의 누출구 면적은 0.025mm²로 정의할 수 있다. 해당 누출 모델링으로 도출된 방출 특성과 환기조건을 고려하여 폭발위험장소의 구분과 범위를 설정할 수 있다.

Society for Gas as a Marine Fuel의 LNG 벙커링 구역 설정에 대한 보고서 (SGMF, 2018)에 따르면 벙커링 호스 면적의 6%에 해당하는 누출공에 대한 누출 시나리오를 통해 피해영향 거리를 평가하여 벙커링 안전구역 설정하는 것을 제안하고 있다. 이와 같은 LNG 벙커링 작업에 관한 기준을 참고하여 수소연료에 대한 벙커링 작업 안전구역 설정 및 위험도평가를 수행하여 이 기준에 대한 타당성을 평가할 수 있다.

2) 수소 누출량 계산

가압 탱크나 배관에서의 가스 누출의 경우의 대부분 임계흐름의 형태를 보이며, 임계흐름 상태일 때의 수소 가스의 누출량은 아래의 공식에 따라 계산할 수 있다 (AIChE, 2000).

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M_w}{RT_1} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (1)$$

식 (1)에 따르면 임계흐름인 경우의 누출량은 누출 면적과 운전압력에 비례하는 것을 알 수 있다. 임계압력 이상의 운전압력

Table 3 Leak modeling scenario of hydrogen bunkering facility. (Based on 9/16 inch Hose)

No	Leak hole	Leak hole area ratio	Leak frequency
1	0.005mm ²	0.01%	1.10 E-03
2	0.025mm ²	0.05%	6.00 E-04
3	0.049mm ²	0.1%	1.80 E-04
4	0.49mm ²	1%	1.50 E-04
5	2.96mm ²	6%	1.42 E-04
6	4.93mm ²	10%	1.40 E-04
7	49.3mm ²	100%	5.20 E-05

에서 가스가 누출되어 누출지점에서 누출 유속이 음속에 도달하게 되면 더이상 유속과 부피 유량이 증가하지 않는다. 단, 운전압력에 따른 가스 밀도의 변화로 인하여 운전압력에 비례하여 질량유량이 증가하게 된다.

3.4 빈도수 설정

1) 누출 빈도수 설정

Sandia National Laboratories (2009)에서 발간한 수소충전소 안전거리 설정에 대한 연구자료에 따르면 기존의 해양, 석유화학 플랜트에서 축적된 누출데이터와 frequency analysis 자료를 기준으로 베이시안 통계법을 적용하여 수소자동차용 충전설비에 대한 각 설비 및 배관의 누출 빈도를 제시하였다.

본 연구에서는 Sandia lab에서 제시한 누출 빈도수 데이터를 활용하여 선박용 수소 벙커링 설비의 위험성 평가에 적용하도록 하며, 3.3절의 누출 모델에서 선정된 누출공의 크기와 그 크기에 따른 누출 빈도를 아래 Table 3에 나타내었다. 누출구 면적이 커질수록 누출 빈도는 낮아지는 경향성을 가진다.

2) 누출 감지 및 차단 빈도

누출가스 감지 및 차단장치 비정상 작동에 대한 빈도수 설정은 Failure Frequency Guidance (DNV, 2013)의 누출 시나리오 작성에 대한 빈도수 데이터를 참고하여 설정할 수 있다. 본 연구에서는 일반적인 감지 및 차단장치의 비정상 작동 빈도수를 고려하여 수소가스의 누출 감지 실패 확률을 10%, 긴급차단장치의 비정상 작동 확률을 10%로 설정하여 사고 빈도수 평가에 적용하였다.

3) 수소가스 점화 빈도

누출된 수소 가스에 대한 점화 확률을 아래(Table 4)와 같이 적용할 수 있으며, 점화 형태에 따라 즉시 점화와 지연 점화에 대한 확률을 구분하고 있다. 수소는 낮은 점화 에너지로 인해 제트 plume 방출 시 발생하는 정전기에 의하여 자연 발화하기 쉬

Table 4 Hydrogen ignition probabilities (Canadian Hydrogen Safety Program, 2006)

Hydrogen release rate (Kg/s)	Immediate ignition probability	Delayed ignition probability
< 0.125	0.008	0.004
0.125 - 6.25	0.053	0.027
> 6.25	0.23	0.12

운 특성이 있으며, 누출되는 수소의 유량이 증가하면 점화 확률이 단계별로 증가하는 경향을 보인다.

4. 위험도평가 수행

4.1 사고 빈도 분석

Event Tree Analysis를 통한 각 사고 시나리오와 각 단계별 빈도수 데이터를 기준으로 사고 빈도 분석을 수행하여 도출된 결과를 아래 테이블(Table 5)에 나타내었다. 가장 발생 빈도수가 높은 사고 시나리오로는 미소 누출(0.005mm², 0.01%)에 대한 제트화염(8.80 E-06)이며, VCE 사고의 발생빈도는 지연 점화에 대한 단계가 추가됨에 따라 제트화염 사고의 발생빈도보다 전반적으로 낮은 것으로 확인할 수 있다.

Table 5 Accident frequency of hydrogen bunkering facility.

No	Leak Hole	Consequence	Accident Frequency
1-1	0.005 mm ²	Jet fire	8.80 E-06
1-2		VCE	4.36 E-08
2-1	0.025 mm ²	Jet fire	4.80 E-06
2-2		VCE	2.38 E-08
3-1	0.049 mm ²	Jet fire	1.44 E-06
3-2		VCE	7.14 E-09
4-1	0.49 mm ²	Jet fire	1.20 E-06
4-2		VCE	5.95 E-09
5-1	2.96 mm ²	Jet fire	1.14 E-06
5-2		VCE	5.63 E-09
6-1	4.93 mm ²	Jet fire	1.12 E-06
6-2		VCE	5.56 E-09
7-1	49.3 mm ²	Jet fire	2.27 E-06
7-2		VCE	1.33 E-08

4.2 피해영향 분석

제트화재(jet fire)나 액면화재(pool fire)와 같은 화염 복사열에 대한 피해영향은 화염의 규모, 이격 거리에 따른 복사열의 세기와 노출 시간을 고려하여 판단할 수 있다. 복사열 4kW/m² 구간부터

Table 6 Fatality of accident type and effect

Accident type	Probability of fatality		
	10%	50%	99%
Jet fire (Heat radiation)	4 kW/m ²	25 kW/m ²	37.5 kW/m ²
Vapor cloud explosion (Over pressure)	2kpa	7kpa	15kpa

인체에 대한 상해 발생 우려가 있으며, 복사열이 증가함에 따라 사망자 발생에 대한 가능성이 증가하여 25kW/m² 이상의 복사열 영향을 받는 구역 내에서는 즉시 사망 발생 구역으로 설정할 수 있다 (AIChE, 2000).

증기운 폭발(VCE)과 같은 폭발사고 발생 시 폭발압력에 따른 안전거리는 0.02kgf/cm², (2kpa)의 폭발압력의 영향이 도달하는 거리로 설정할 수 있으며, 0.07kgf/cm², (7kpa)의 폭발압력의 영향이 있는 지점 내에서는 중상과 일부 구조물에 대한 붕괴가 우려되며, 0.15kgf/cm², (15kpa) 부터는 중상, 사망자 발생과 주요 구조물이 붕괴 우려가 발생하며 추가적인 방호대책이 필요한 구역으로 정의 할 수 있다 (AIChE, 2000).

화재복사열과 폭발압에 따른 신체적 피해 영향을 정리하여 다음과 같이 각 사고 유형과 피해 정도에 따른 치명률을 설정하였다(Table 6).

본 연구에서는 Sandia Lab에서 개발한 정량적 위험도평가 프로그램인 HyRam을 활용하여 가스 누출 및 화재, 폭발 모델에 따라 plume 확산거리, 제트화염 도달 길이, 제트화염 복사열, 폭발 압력에 대한 피해 영향 거리를 분석하였다. 다음 표(Table 7)와 같이 각 사고 시나리오에서의 피해 영향에 대한 분석 결과를 도출하였다.

누출 면적에 따른 피해영향 거리는 Fig. 4와 같은 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 폭발압 피해범위가 화재영향 범위보다 넓게 영향을 미치는 것으로 나타난다. 가장 먼 거리까지 영향을 미치는 사고 시나리오는 병커링 호스 완전 파단의 폭발사고에 해당되며 2kpa의 폭발압력이 61m 거리까지 영향을 미친다.

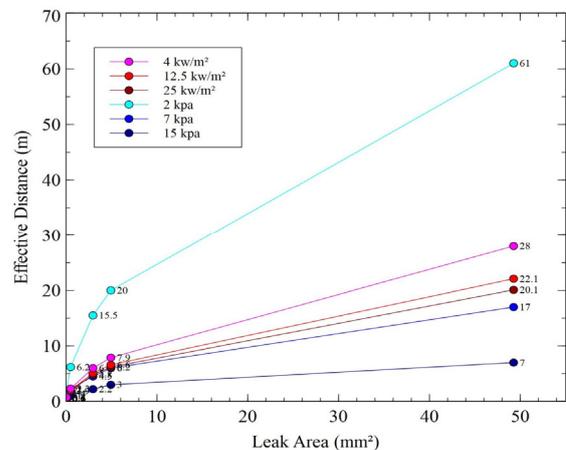


Fig. 4 Effective distance per leak area (Based on 9/16 nch (ID 7.92mm) Hose, 500bar)

Table 7 Effective distance per leak area (Based on 9/16 inch bunkering hose, 500 bar)

No	Leak hole	Leak flowrate (kg/s)	Plume dispersion distance (LEL100%,m)	Jet flame length (m)	Distance affected by heat radiation (m)			Distance affected by overpressure (m)		
					4kw/m ²	12.5kw/m ²	25kw/m ²	2kpa	7kpa	15kpa
1	0.005mm ²	1.22 E-04	0.35	0.19	0.2	0.2	0.2	0.7	0.2	0.1
2	0.025mm ²	6.21 E-04	0.80	0.43	0.5	0.4	0.4	1.4	0.4	0.2
3	0.049mm ²	1.22 E-03	1.20	0.60	0.7	0.6	0.6	2.0	0.6	0.3
4	0.49mm ²	1.25 E-02	3.70	1.91	2.3	2.0	1.9	6.2	2.3	1.0
5	2.96mm ²	7.34 E-02	8.80	4.65	6.0	5.1	4.7	15.5	4.5	2.2
6	4.93mm ²	1.22 E-01	11.30	5.97	7.9	6.6	6.0	20.0	6.0	3.0
7	49.3mm ²	1.25 E+00	37.00	19.12	28.0	22.1	19.2	61.0	17.0	7.0

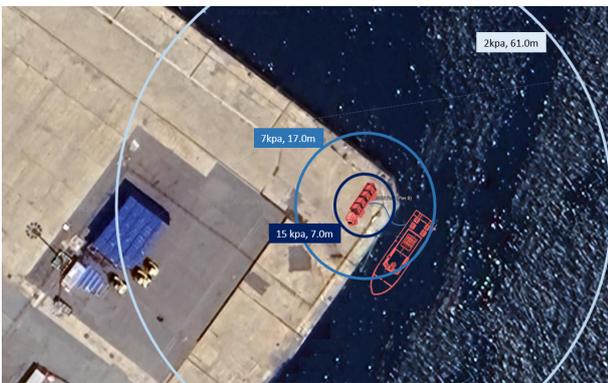


Fig. 5 Effective heat radiation distance in case of 100% rupture of hose diameter (2.76 E-06)



Fig. 7 Effective distance in case of 0.025mm² and 6% rupture of hose cross sectional area

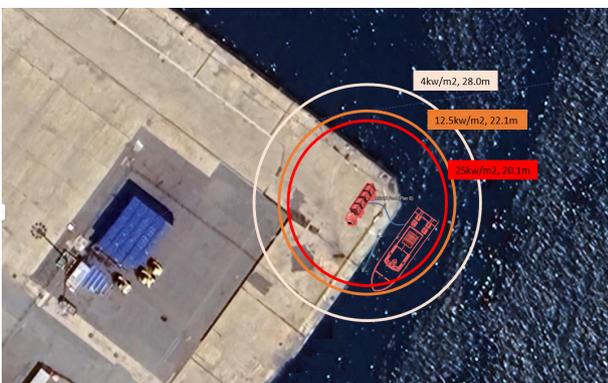


Fig. 6 Effective overpressure distance in case of 100% rupture of hose diameter (1.33 E-08)

본 연구 위험도평가 대상 지역인 부산항 여객선터미널 근처 부지에 대하여 피해영향 범위가 가장 넓게 나타나며, 최악의 사고 시나리오에 해당되는 벙커링 호스 완전 파단 사고에 대한 제트화염 복사열 피해범위(Fig. 5)와 폭발압력 피해범위(Fig. 6)를 다음과 같이 지도상에 각각 표기하였다.

IEC-60079-10-1(IEC, 2020)에서 정의하는 2차 누출등급에 해당하는 누출구 면적(0.025mm²)에서 누출되는 plume(LEL 100%)의 확산거리는 0.8m의 거리까지 나타난다. SMGF에서 제안하는 벙커링 안전구역 설정 기준인 (SGMF, 2018) 호스 단면적 6%의 누출구 면적에서 누출되는 사고 시나리오에서의 제트화

재의 피해거리는 6.0m, 폭발압력 피해거리는 15.5m이며, 다음과 Fig. 7과 같이 해당 피해범위를 지도상에 표기하였다.

4.3 위험도평가 결과

각 사고 시나리오별로 분석한 피해 영향거리와 피해 정도, 각 구역별 인구밀도를 고려한 예상 사망자 수의 데이터를 활용하여 F-N Curve를 작성하여 사회적 위험도를 평가할 수 있다.

사회적 위험도평가를 위한 인구밀도 데이터는 기준 거리별로 벙커링 구역 예상 작업자 수와 항만 및 사무실 근로자 수를 기준으로 작성하였고, 100m 이상의 지점부터는 2021년 부산 인구 통계자료의 평균 인구밀도 자료를 바탕으로 설정하였다 (Table 8).

Table 8 Population density of hydrogen bunkering and port area

Area	People	Radius (m)	Population density (People/m ²)
Bunkering area	6	< 10	0.0191
Port area	20	< 50	0.0025
Office & working area	200	< 100	0.0064
Residence area	Note 1	> 100	0.0043

Note 1 : Average population density of Busan (KSIS, 2021)

Table 9 The number of fatalities of accident scenarios

No	Leak hole	Consequence	Number of fatalities
1-1	0.005mm ²	Jet fire	0.00
1-2		VCE	0.00
2-1	0.025mm ²	Jet fire	0.01
2-2		VCE	0.02
3-1	0.049mm ²	Jet fire	0.02
3-2		VCE	0.04
4-1	0.49mm ²	Jet fire	0.02
4-2		VCE	0.39
5-1	2.96mm ²	Jet fire	1.53
5-2		VCE	1.42
6-1	4.93mm ²	Jet fire	2.57
6-2		VCE	2.05
7-1	49.3mm ²	Jet fire	9.81
7-2		VCE	14.24

각 사고 시나리오에서의 이격거리에 따른 피해영향과 각 피해영향 구역내의 치명률, 구역에 따른 인구밀도를 고려하여 Table 9와 같이 각 사고에 대한 예상 사망자 수에 대한 결과를 도출하였다.

Table 5의 사고 빈도수 분석 데이터와 Table 9의 사고에 따른 예상 사망자 수를 조합하면 Fig. 8과 같이 사회적 위험도 평가를 위한 F-N Curve를 작성할 수 있다. 이 그래프의 결과를 확인하면 모든 사고의 결과는 조건부 허용구간인 ALARP 영역 (UK HSE, 2023) 내와 허용가능한 위험도 기준 이하로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 가장 큰 위험도를 나타내는 사고 결과로는 벙커링 호스의 완전파단에 대한 제트화염에 대한 사고 위험도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이 결과는 ALARP 영역 내에 위치하는 것으로 확인할 수 있으며, 방호벽이나 긴급차단장치 설치, 외부 인원 통제 및 작업자 안전보호구 착용과 같은 추가적인 안전조치를 통해 위험도를 경감시킬 수 있다.

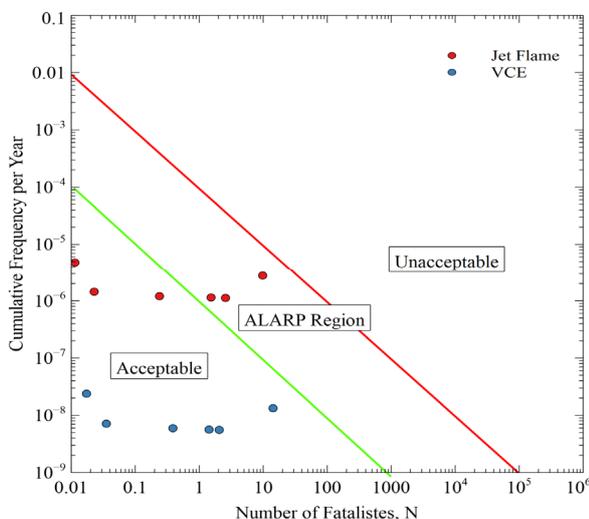


Fig. 8 Social risk analysis result with F-N curve

5. 결론

본 연구에서는 연근해용 수소추진선박 벙커링 안전구역 설정을 위하여 부산 여객선 터미널 주변 유희지를 예상 벙커링 부지로 설정한 후 이동형 수소 충전설비에 대한 정량적 위험도평가를 수행하였다. 수행된 사고 시나리오 결과 분석에 대해서 F-N Curve상에 허용가능한 위험도 수준과 ALARP 영역 내에 위치하는 것으로 확인하였다.

SGMF에서 제안하는 벙커링 호스 단면적 6% 면적 누출에 대한 벙커링 안전구역 설정 기준을 참고하여 선박용 수소충전소 안전구역 설정을 위한 기준으로 분석을 수행한 결과로는 위험도 수준과 수소자동차 충전소 기술기준의 이격거리 기준(제 2종 보호 시설 : 12m, 화기와와의 거리 : 8m)을 고려하면 적절한 수준의 안전구역 설정방법임을 알 수 있다.

벙커링 호스의 완전 파단 사고 시나리오의 경우 60m 이상의 폭발압력 피해 범위가 나타나며, 이를 그대로 안전거리로 설정하기에는 충전부지 확보 및 설치 비용에 대한 현실성이 떨어지므로 이를 감시 및 보안구역 설정을 통해 외부인, 차량의 진입 통제 및 사고 발생 시 대피 시나리오 작성에 활용할 수 있다.

본 연구에서는 연근해용 중소형 수소추진선박을 대상으로 벙커링 안전구역 설정에 대한 위험도평가를 수행하였지만, 앞으로의 수소추진선박 개발과 보급에 따른 중대형 선박의 수소충전에 적용에 대해서는 벙커링 호스의 직경과 길이, 충전유량이 증가함에 따라 누출사고에 대한 피해영향 범위와 위험도가 증가할 것이라 예상된다. 따라서 중대형 선박용 수소충전설비 안전구역 설정이나 고정형 충전설비 부지 선정 시 이와 같은 정량적 위험도평가를 실시하여 인근지역의 사고 피해영향 분석과 추가적인 안전거리 확보를 통한 벙커링부지 설정이 필요하다. 또한 벙커링 호스의 연결, 해체의 작업을 동반하는 벙커링 작업 특성을 감안하여 안전무결도(SIL) 적용을 통한 신뢰성 높은 가스누출 감지 및 차단 설비 구축, 긴급차단용 shutdown valve 적용, 방호벽 설치와 같은 조치를 고려하여야 하며, 벙커링 안전 작업 절차서 마련과 점화원, 외부인 통제와 같은 현장에서의 추가적인 안전조치를 통한 벙커링 작업이 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20220603, 안전기반 소형 수소추진선박 기술개발 및 실증)

References

- Ahn, C., Lee, S., Kim, Y. and Park, J., 2022. Analysis of components and cases of hydrogen fuel cell applied ships. *Journal of Power Electronics*, 27(6), pp.43-51.

- American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Center for Chemical Process Safety, 2000. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis.
- American Petroleum Institute (API), 2016. *Risk based inspection methodology*. API RP 581.
- Canadian Hydrogen Safety Program, 2006, *Quantitative risk comparison of hydrogen and CNG refueling options*.
- Det Norske Veritas (DNV) AS, 2013, Failure frequency guidance.
- Health and Safety Executive in United Kingdom (UK HSE), 2023, Guidance on ALARP decisions in COMAH. URL : https://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/permissions/spc_perm_37/ [Accessed 28 Nov 2023]
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2020. *Explosive atmospheres-Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres*. IEC 60079-10-1.
- International Maritime Organization (IMO), 2023. *2023 IMO strategy on reduction of GHG emission from ships*. MEPC.377(80).
- International Organization for Standardization (ISO), 2021. ISO/TS 18683:2021 Guidelines for safety and risk assessment of LNG fuel bunkering operations.
- Lee, J., Kim, J., Kim, S. and Kim, T., 2019. Overview of hydrogen fuel cell ships and introduction of technology development trends. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(1), pp.3-9.
- Jeong, B., Park, S., Ha, S. and Lee, J., 2020. Safety evaluation on LNG bunkering: To enhance practical establishment of safety zone. *Ocean Engineering*, 216.
- Kim, D., Lee, S., Joe, C., Kang, S. and Huh, Y., 2020. A study on the quantitative risk assessment of mobile hydrogen refueling station. *Journal of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 31(6), pp.605-613.
- Korea Gas Safety Corporation (KGS), 2018. *Classification code for explosive hazardous area on gas facility*. KGS GC 101.
- Korea Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2021. *2050 Carbon neutral roadmap for maritime and fisheries*. URL : <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=1065&bbsSeq=84&docSeq=44586>. [Accessed 28 Nov 2023]
- Korea Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), 2012. Special standard for hydrogen vehicle charging station facility and technical standards. URL : <https://law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2000000074766>. [Accessed 28 Nov 2023]
- Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), 2012. Technical guidance for the leak source modeling. KOSHA Guide P-92-2012.
- Korea Statistical Information Service (KSIS), 2021. Population Statistics of Busan, URL : <https://kosis.kr/search/search.do> [Accessed 28 Nov 2023]
- Kwon, D., Choi, S., Kang, S. and Yu, C., 2020. The analysis on quantitative risk assessment of the package type H2 station using Hy-KoRAM and PHAST/SAFETI. *Journal of the Energy Engineering*, 29(4), pp.15-16.
- Park, S., Roh, J., Park, J., Park, K. and Shin D., 2022. A study on the standard for the safety zone in the domestic LNG TTS bunkering. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(5), pp.323-329.
- Sandia National Laboratories, 2009. *Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards*. SAND2009-0874.
- Society for Gas as a Marine Fuel (SGMF), 2018. Recommendation of controlled zones during LNG bunkering. FP02-01.
- Yoon, D., Lee, S. and Park, C., 2022. Legal issues on hydrogen bunkering through domestic law. *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 33(2), pp.142-147.

