

친환경연료 선박의 가스누출 피해저감을 위한 연구

류보림* · Duong Phan Anh** · † 강호근

*한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, **한국해양대학교 기관시스템공학과 박사후연구원, † 한국해양대학교 해양경찰학과 교수

A Study on Safety Assessment for Low-flashpoint and Eco-friendly Fueled Ship

Ryu Bo Rim* · Duong Phan Anh** · † Kang Ho Keun

*Ph.D. Candidate, Department of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University

**Postdoctoral Researcher, Department of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University

† Professor, Division of Coast Guard Studies, Korea Maritime and Ocean University

요 약 : 선박의 온실가스 감축을 위한 다양한 환경규제가 발효되었고, 이로 인해 액화 천연 가스(Liquid natural gas, LNG), 액화 석유 가스(Liquefied petroleum gas, LPG), 암모니아 그리고 바이오 연료 등 여러 대체 연료를 선박에 적용하고 있다. 대안 연료의 대부분이 액화 가스형태의 저인화점 연료가 많이 거론되고 있고 그 사용량은 지속적으로 늘어날 것으로 예상된다. 이에 따라, 이러한 저인화점 연료를 선박 연료로써 이용하기 위한 표준이나 지침서가 필요한데 아직까지 미비한 실정이다. LNG의 경우, 병커링과 관련하여 ISO 표준이 마련되었고 비영리민간기구(NGO)인 선박가스연료협회(Society for Gas as a Marine Fuel, SGMF)에서도 LNG 병커링에 대한 지침서를 마련하여 발간하였다. 이와 더불어, 선급에서도 안전한 병커링을 위해 병커링 방법과 절차에 따라 안전관리구역을 지정하도록 하고 있다. 따라서, 연료에 따른 안전관리구역을 설정하기 위한 절차를 마련하고 절차 수립을 위해 병커링 환경조건과 가스 누출 시나리오를 분석하고 이를 토대로 수치해석적 방법으로 검증이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 절차 수립을 위한 초기 연구로써, 산업계의 적용 현황과 표준을 살펴보고 선급 지침서와 기존 선행 연구를 분석 및 조사하였다. 이를 바탕으로 국내 항만에서 병커링을 위한 안전관리구역 설정을 위한 절차를 마련하고자 한다.

핵심용어 : 친환경 선박, 저인화점 연료, 병커링, 가스 누출, 안전관리구역, 사고영향평가

Abstract : To limit greenhouse gas emissions from ships, numerous environmental regulations and standards have been taken into effect. As a result, alternative fuels such as liquefied natural gas (LNG), liquefied petroleum gas (LPG), ammonia, and biofuels have been applied to ships. Most of these alternative fuels are low flashpoint fuels in the form of liquefied gas. Their use is predicted to continue to increase. Thus, management regulations for using low flash point fuel as a ship fuel are required. However, they are currently insufficient. In the case of LNG, ISO standards have been prepared in relation to bunkering. The Society for Gas as a Marine Fuel (SGMF), a non-governmental organization (NGO), has also prepared and published a guideline on LNG bunkering. The classification society also requires safety management areas to be designated according to bunkering methods and procedures for safe bunkering. Therefore, it is necessary to establish a procedure for setting a safety management area according to the type of fuel, environmental conditions, and leakage scenarios and verify it with a numerical method. In this study, as a feasibility study for establishing these procedures, application status and standards of the industry were reviewed. Classification guidelines and existing preceding studies were analyzed and investigated. Based on results of this study, a procedure for establishing a safety management area for bunkering in domestic ports of Korea can be prepared.

Key words : Eco-friendly ship, low flash point fuel, bunkering, gas leak, safety zone, consequence analysis

1. 서 론

산업혁명 이후 온실가스 배출이 지속적으로 증가하였고 폭염, 폭한, 홍수와 가뭄 등의 기후변화를 겪고 있다(Archer and Rahmstorf, 2010). 인류의 지속 가능성을 위해서는 친환경을 통한 발전 및 경제성장이 필수라는 인식이 확산되고 있고, 이에 따라 모든 산업 분야의 에너지원을 화석연료에서 친환경연료로 전환하는 것이 진행중이다.(Park et al, 2021)

해운 업계는 IMO 2050 전략에 따라 온실가스를 줄이기 위

해 에너지 전환을 하고 있다(IMO, 2018). 이에 따라, 업계에서는 선박 엔진 구동을 위해 기존의 중질유(HFO)에서 액화 천연가스(Liquefied natural gas, LNG)를 비롯한 대체 연료로 탈탄소화를 진행 중이다(GMF, 2021). 현재, LNG를 비롯한 다양한 저탄소 또는 무탄소 대체연료를 고려하고 있고 각 연료에 따라 Table 1과 같은 특징을 가지고 있어 이에 따른 특성을 고려하여 개발을 진행할 필요가 있다.

이러한 상황에 맞맞춰 정부는 2020년 12월에 탄소중립을 위한 친환경 선박 중장기 계획을 산업부·해수부 주관으로

† Corresponding author : 정희원, hkkang@kmou.ac.kr 051)410-4260

* 정희원, ruyborim@g.kmou.ac.kr

** 정희원, anhdp.qhqt@gmail.com

“제1차 친환경선박 개발·보급 기본계획(‘21~’30), Green ship-K 추진전략”을 발표하였다. Green Ship-k 추진전략에서

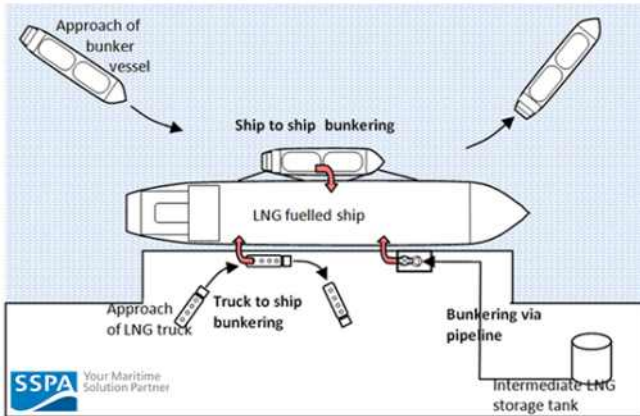


Fig. 1 LNG bunkering method (SSPA, 2017)

수소, 암모니아 등과 같은 무탄소 연료의 선박 기술과 혼합 연료 추진 등 저탄소 선박 핵심 기술 개발을 위한 “친환경 선박 전주기 혁신 기술개발 사업”을 진행하고, 한국형 실증 프로젝트 및 무탄소 연료공급을 위한 인프라 확충, 친환경 선박 보급 촉진 등 해양 산업 생태계 전반에 걸친 탈탄소화 및 친환경 선박 개발·보급 로드맵을 제시하였다.

LNG를 비롯한 다양한 대체연료를 사용하는 선박이 등장함

에 따라 IMO에서는 ‘가스 또는 저인화점 연료를 사용하는 선박에 대한 국제 안전 규정’(International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels, IGF code)을 도입하여 선박의 안전성을 확보하고 있다. 선박에서 연료를 공급하는 과정을 병커링(Bunkering)이라고 하는데 가스 또는 액화가스 병커링의 경우, 누출 및 폭발의 가능성으로 기존 선박 연료유를 병커링하는 것보다 더 높은 위험을 가지고 있다. 이러한 이유로 대체연료의 병커링이 점점 활성화되고 그 시장규모도 커지고 있는 현 시점에서 병커링시 가스 누출 및 확산으로 인한 피해를 저감하기 위한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

LNG의 주성분인 메탄(methane)은 부피 기준으로 약 5~15% 범위, 암모니아는 약 15~33% 범위 그리고 수소는 약 4~75% 범위에서 폭발성을 가진다(Vilchez et al, 2013, Ciccarelli et al, 2006). 또한 LNG는 -163℃에서 수소는 -253℃의 극저온 상태에서 액체 상태를 유지하고, 일반적으로 선박 연료로 사용 시 단열 탱크에 저장한다.또한, 암모니아는 독성물질로써 사용상 제한이 따른다. 즉, 현재 사용되고 있고 사용을 고려하고 있는 대부분의 연료는 그 시스템을 구성하고 있는 일부분에서라도 누출이 발생하면 인명 피해, 선체 파손, 누출 가스로 인한 화재 및 폭발과 같은 여러 위험 상황이 발생할 수 있다.

Table 1 Characteristics of alternative fuels for ships

Type of fuel	Advantage	Disadvantage
Biofuel	<ul style="list-style-type: none"> Possible to use in existing engine and fuel tank Easy to storage and transport 	<ul style="list-style-type: none"> Lack of fuel supply infrastructure Biodiversity and sustainability concerned should be considered.
Liquefied Natural Gas (LNG)	<ul style="list-style-type: none"> Low greenhouse gas and air pollutant emissions compared to conventional fuels It has stable foundation on technology of generation and usage 	<ul style="list-style-type: none"> Methane slip should be considered Lack of bunkering infrastructure
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	<ul style="list-style-type: none"> Low greenhouse gas and air pollutant emissions compared to conventional fuels Currently applicable engines are being developed 	<ul style="list-style-type: none"> Lack of infrastructure for use as ship fuel
Hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> Clean exhaust and no greenhouse gas emission Green hydrogen can be produced from renewable energy 	<ul style="list-style-type: none"> Low temperature (-253℃) is required for liquefaction. Storage and transportation of liquefied hydrogen is costly
Ammonia	<ul style="list-style-type: none"> Very low greenhouse gas emissions and exhaust gas pollutions Can be store at relatively high temperature (-33.4℃) 	<ul style="list-style-type: none"> Toxicity and corrosiveness of ammonia should be considered
Methanol	<ul style="list-style-type: none"> Low greenhouse gas and air pollutant compared to conventional fuels Can be liquefied at room temperature 	<ul style="list-style-type: none"> Lack of supporting infrastructure
Nuclear Power	<ul style="list-style-type: none"> No greenhouse gas emissions and air pollutants High energy output 	<ul style="list-style-type: none"> Difficulties in disposing of nuclear waste Risks related to the use of radioactive materials

이러한 위험성을 고려하여 LNG병커링 시 가스 누출 및 확산에 관한 연구는 많이 수행이 되었고, 위험성 평가 수행도 활발히 진행되고 있지만, 여전히 안전관리구역에 관한 연구는 부족한 상황이다. 무엇보다 현재 고려되고 있는 수소, 암모니아 등의 LNG를 제외한 대체연료에 관한 병커링관련 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 아래와 같은 기존 산업계 적용 현황과 선행 연구를 조사하고 국내 항만에서 안전한 병커링을 위한 연구를 수행하고자 한다.

- ◆ 기존 산업계 적용 현황 및 표준 조사 및 분석
- ◆ 주요 선급 가이드라인 분석
- ◆ 선행 연구 조사 및 분석
- ◆ 주요 변수 정리 및 누출 시나리오 수립
- ◆ 각 시나리오 별 수치해석 수행
- ◆ 선박 대 선박 안전관리구역 절차 수립

2. 문헌 연구

2.1 병커링 일반 사항

일반적으로 병커링 과정은 Fig. 1과 같이 트럭을 이용하는

Truck-to-ship(TTS) 방식, 육상에서 직접 선박에 공급하는 Port-to-ship(PTS) 방식 그리고 LNG 병커링 선박을 통해 공급하는 Ship-to-ship(STS) 방식 세가지로 구분할 수 있다. 이는 선박의 크기, 연료 탱크의 종류, 항만의 크기, 환경조건 등 다양한 변수들을 고려하여 그 방법을 선택하여 운영하고 있다.

TTS 방식은 탱크로리에서 선박으로 연료를 공급하는 방식으로 전 세계적으로 많은 항구에서 상용화되어있는 방법으로 국내의 경우, 인천항만공사의 예코누리호가 한국가스공사를 통해 TTS방식으로 LNG병커링을 시행하였다. 이 방식은 탱크로리의 용량으로 인해 주로 소형선박에 적용되고 있다. 중대형 선박의 경우 다수의 탱크로리를 동시에 병커링을 하기 위한 공급시스템이 필요하고 이 경우 병커링 시간은 단축할 수 있는 장점이 있지만, 병커링 과정에 LNG 누출 및 폭발 가능성이 증가하므로 안전에 대한 적절한 대책 마련이 필요하다. 또한, 탱크로리 하역 설비, 중량 측정 시스템, 응급 방출 시스템(Emergency Release System, ERS) 등을 항만에 구축할 필요가 있다.

PTS 방식은 LNG 추진선박이 항만에 접안한 상태에서 육상으로부터 LNG를 공급받는 방법으로 육상의 LNG 저장탱크로부터 로딩암>Loading arm), 계량시스템을 통해 병커링을 수행한다. 이 방식은 항만의 병커링 시설을 효율적으로 활용하기 위한 항만 설계가 필요한데, 특히 LNG 추진선의 규모와

Table 2 Definition and purpose of each zone (SGMF, 2018; EMSA, 2018)

Zone	Definition	Purpose
Hazardous zone	<ul style="list-style-type: none"> ◆ A three-dimensional space in which a flammable or explosive atmosphere is expected to exist, requiring special precautions to control potential sources of ignition. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Eliminating sources of ignition in the classification area ◆ Minimize the number of people in the hazardous zone ◆ Electrical equipment is limited to certified explosion-proof equipment
Safety zone	<ul style="list-style-type: none"> ◆ A three-dimensional space in which most leaks occur and where, in exceptional circumstances, gas or LNG leaks are likely to result in damage to life or equipment or infrastructure. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Controlling leak and spill ◆ Ignition and fire/explosion protection ◆ Excluding non-essential personnel (to prevent further injury or death in the event of an accident) ◆ Protecting essential personnel by wearing personal safety equipment (minimizing the possibility of injury or death in the event of an accident)
Monitoring and security area	<ul style="list-style-type: none"> ◆ A three-dimensional space that identifies and monitors internal activities (including movement of people and vehicles) and does not affect the safety of bunkering operations, including safe zones for gas-powered ships, docks or wharfs, or gas-fueled vessels. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Prevent the influence of people who do not participate in the bunkering process ◆ Monitoring and security areas always include safety management areas.
Marine zone	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Areas for determining port rules based on studies of specific ports and vessels 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Protect bunkering vessels from other maritime traffic by defining minimum distances and speeds for passing vessels
External zone	<ul style="list-style-type: none"> ◆ The distance to a defined risk level required by some regulatory requirements. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Port rules may require training and certain precautions (eg wearing personal protective equipment or limited exposure time) for individuals visiting the vessel.

수요를 예측하여 병커링 시설을 구축 해야할 필요가 있다. 이 때 병커링을 위한 집안 시스템, 선박-항만 통신시스템 그리고 병커링 터미널의 저장 탱크의 용량 및 배치가 중요하다.

STS 방식은 항만이나 묘박중인 LNG 추진선박에 LNG 병커링 선박을 집안하여 LNG를 공급하는 방법으로 대용량 병커링 용도로 사용되며 LNG 추진선이 정박한 해상 또는 항만에서 병커링을 수행하며 다양한 선종의 선박에 LNG 병커링이 가능한 장점이 있다. 이 방식을 적용하기 위해서는 화물용 장비(펌프, 압축기, 열교환기, 극저온 밸브 등), 가스 누출로

인한 선체보호장비(Water spray curtain, Drip tray), 로딩암, Hose handling, ERS(Emergency Release System), ESD (Emergency Shutdown) 등의 전용 설비 및 기술이 필요하다.

2.2 산업 적용 현황

일반적으로 LNG를 연료로 사용하는 선박에 병커링을 수행할 때 현장 작업자의 안전을 보장하기 위해 ISO/TS 18683(Guidelines for systems and installations for supply of LNG as fuel to ships)에서는 병커링에 필요하지 않는 모든

Table 3 Restrictions and limitations regulated by Classification Societies

Association	Restrictions and limitations
IACS (2016)	<ul style="list-style-type: none"> Smoking is not allowed. Naked lights, cell phones and other non-certified necessary electrical equipment are strictly prohibited Cranes and other lifting devices not necessary to the bunkering procedures are not to be operated Only tank truck should present in the safety zone No ship or craft should operate in the safety zone, except if duly authorised by the Port Authorities Ignition sources should be carefully checked and eliminated The safety zone is restricted access and only authorised staff which provided with personal protective equipment (PPE) with anti-static properties and portable gas detector are permitted.
SMTF (2010)	<ul style="list-style-type: none"> Unauthorised persons is not permitted to access open deck areas directly above the bunker area Warning signal should be published around the area Access doors must be locked and only be opened by authorised and educated personnel No overhead crane lifting in this area during bunkering No maintenance and un-necessary work in the area during bunkering No manoeuvring of ship machinery in the area during bunkering Ventilation inlets in the area to be closed during bunkering
DNVGL (2014; 2015)	<ul style="list-style-type: none"> Only authorize personnel for the bunkering operations and have received appropriate education shall be present in the safety zone during process of bunkering. All equipment and machinery used within the safety zone area shall be rated based on relevant standards. Unnecessary electrical equipment is not permitted for bunkering operations within the safety zone shall be eliminated. The safety zone shall be adequately marked by fences, warnings signs or other physical barriers to prohibit the entry of unauthorized personnel. Only trained and authorized personnel can access to the bunkering station/area during bunkering operations. Maintenance or other work in the safety zone area are not allowed during bunkering. Ventilation requirements in the area should be performed in the approved operational procedures. The safety zone should be secured against mechanical impact which can cause damage to the operators, bunkering system and equipment. Passenger operations, including the embarking and disembarking of passengers, adjacent to the safety zone during the bunkering operations require a quantitative risk assessment (QRA). SIMOPS, such as the loading and unloading of cargo, provisions and other goods, passing traffic on nearby waterways, or activities on the terminal adjacent to the safety zone during the bunkering operations, shall be addressed in a QRA.
BV (2014)	<ul style="list-style-type: none"> Access to the safety zone is restricted to the authorized staff, provided they are fitted with personal protective equipment (PPE) with anti-static properties and portable gas detector. No Smoking. Naked lights, mobile phones, cameras and other non-certified portable electrical equipment are strictly prohibited. No operating cranes and other lifting appliances. Only the tank truck is present in the safety zone. No ship or craft can be entered the safety zone, except if duly authorized by the Port Authorities

인원의 접근을 엄격하게 제한하는 안전 관리 구역을 지정할 것을 권고하고 있다. 하지만, ISO 표준에는 일반전인 사항에 대한 정보를 제공하고 있지만, 정량화된 지침은 마련되어 있지 않아 보다 구체적인 지침이 필요하다.

LNG를 선박 연료로써 본격적으로 사용하게 됨에 따라 병커링관련 규정의 마련이 필요함을 인식하고, 이를 안전하게 사용하기 위해서 2013년 영국에서 비영리민간기구(NGO)인 선박가스연료협회(Society for Gas as a Marine Fuel, SGMF)가 설립되었다. SGMF는 영국 선급 협회(Lloyd's Register, LR), DNVGL, 노르웨이 해사청(Norwegian Maritime Authority), Shell, MOL등과 함께 선박 연료로써 LNG 사용에 관한 안전 지침서를 개발하고 주요 모범 사례를 발굴하여 발간하였다.

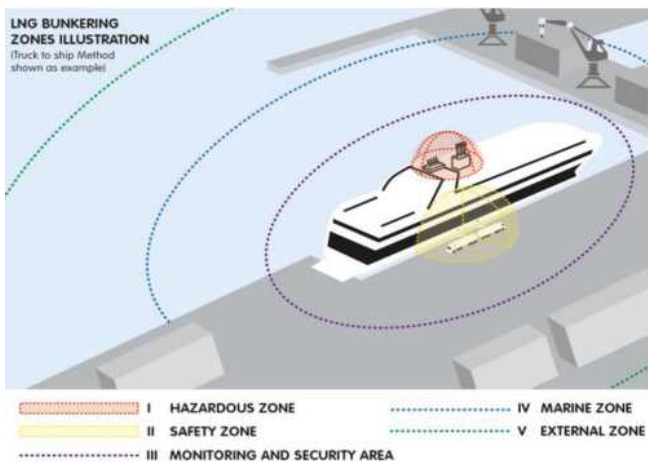


Fig. 2 Major controlled zone during LNG bunkering (SGMF, 2018; EMSA, 2018)

이 지침서에서는 위험평가 및 관리를 Fig. 2와 같이 위험구역(Hazardous zone), 안전관리구역(Safety zone), 모니터링 및

보안구역(Monitoring and security area), 해상차단구역(Marine zone) 그리고 외부구역(External zone)으로 총 5가지 구역을 설정하고 각 구역의 정의와 목적은 Table 2과 같이 설명하고 있다.

2.3 주요 선급 가이드라인

LNG를 선박 연료로 사용하고 LNG추진 선박에 대해 병커링을 하기 위해서는 선급 및 주관청의 승인이 필요하다. 이에 따라 주요 선급과 기관에서는 병커링 절차와 안전 관련 항목과 관련하여 지침서를 발간하였다. 이 지침서에는 앞서 언급한 각각의 병커링 방법에 대해 설명하고, 그 방법에 따른 절차를 상세히 안내하고 있다. 또한, 병커링 과정에서 발생할 수 있는 위험 요소를 분류하고 위험도 평가를 통해 승인 과정을 진행하고 있다. 이 위험도 평가에서는 다양한 가스 누출 시나리오를 구성하여 진행하고, 그 내용을 간략하게 정리하면 Fig. 3과 같다.

선급의 가이드라인은 ISO 표준과 SGMF 지침서를 기반으로 구성되어 있고, 결정론적 접근법(Deterministic approach)과 위험도 기반 접근법(Risk-based approach)을 적용하여 안전관리구역을 설정하고 있다. 주요 선급과 국제기구에서 나타내고 있는 안전관리구역에 대한 제한사항을 정리하면 Table 3과 같다.

2.4 선행 연구

LNG의 주성분은 메탄(methane)으로 폭발성 또한 메탄의 폭발 특성을 따른다. 메탄은 대기 중에서 부피 기준으로 최저 폭발 한계(Lower flammable limit, LFL) 5%에서 최고 폭발 한계(Upper flammable limit, UFL) 15% 범위 안에서 폭발성이 나타난다. 일반적으로 선박에서 LNG를 연료로 사용할 시에는 최저 폭발 한계(LFL)를 적용하고 있다. 이러한 폭발성을

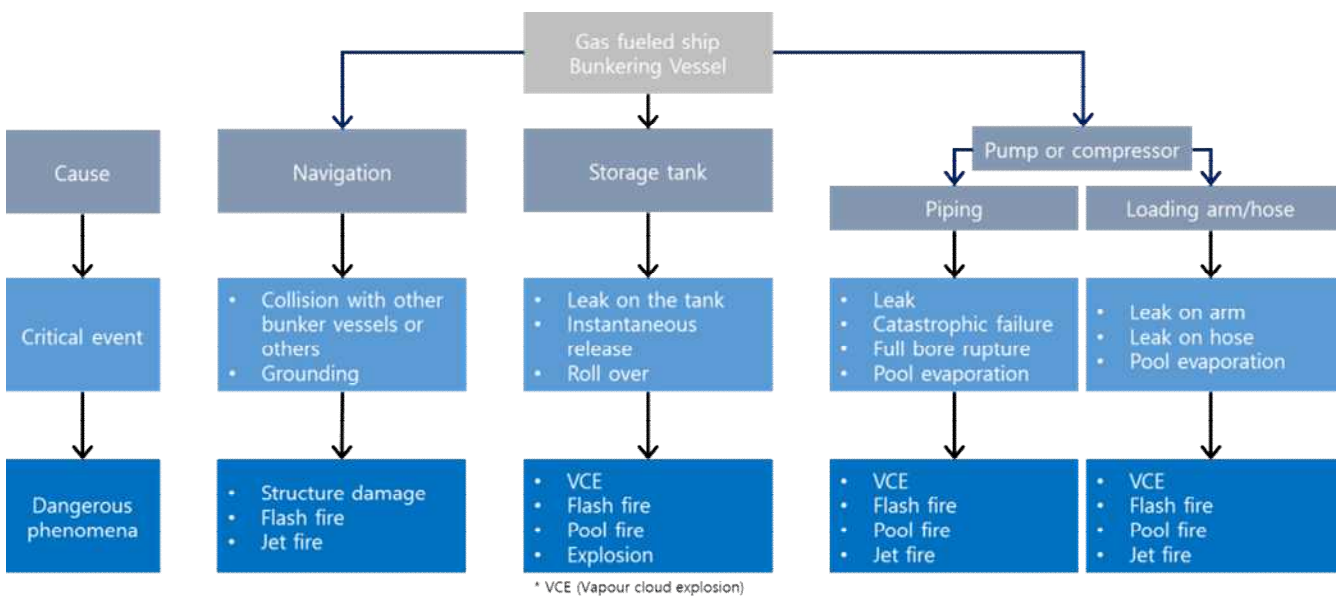


Fig. 3 LNG bunkering leaks scenarios

고려한 LNG의 누출과 그 특성에 관한 다양한 연구가 있다. Guo et al.(2019)은 LNG 저장 탱크에서의 누출 상태를 CFD(computational fluid dynamics) 소프트웨어인 Fluidyn-PANACHE로 해석을 수행하였다. 대기 상태를 stable, neutral 그리고 unstable로 구분하여 세 가지 다른 풍속 수직분포 곡선에 따른 LNG 증기 확산 특성을 분석하고, 실험 결과와 비교하였다. Xie et al.(2021)은 LNG 누출 위치, 누출 온도와 압력 그리고 외기 온도에 따라 수평 방향 누출 특성을 ANASYS FLUENT로 시뮬레이션하였다. 각 해석조건을 LNG 누출 위치와 지면과의 상관관계로 분석하여 지면효과(ground effect)를 검증하였다.

Table 4는 LNG 병커링 과정에서 발생할 수 있는 누출 시나리오를 분석하여 수치해석적 방법으로 해석하고 각 조건에 따른 안전관리구역을 설정한 연구를 비교하였다. Park et al.(2018)은 LNG 추진 대형 컨테이너선과 VLCC에 대한 선박 대 선박 LNG 병커링 과정을 구현하였다. 여기서는 선박의 적재상태와 다양한 누출 시나리오를 비교 검토하였다. Park et al.(2020)은 부유식 LNG 발전설비에서의 LNG 병커링 과정에서 가스 누출이 발생 가능한 장비와 배관을 분석하고 각각의

최대 누출량을 산정하여 해석을 수행하였다. Jeong et al.(2020)은 세계 최초로 건조된 LNG연료 추진 산적화물선에 대해 트럭 대 선박 조건의 LNG 병커링 과정을 시뮬레이션하고 100% 최저 폭발 한계와 50% 최저 폭발 한계 기준으로 안전관리구역을 검토하였다.

3. 안전관리구역 설정 절차

3.1 일반 사항

앞서 살펴본 바와 같이 LNG를 연료로 사용하는 선박에 LNG를 공급하기 위해서는 육상에서든 해상에서든 선급이나 주관청의 병커링 공급 절차를 지켜야 한다. 병커링 과정에서 안전관리구역의 설정은 가스 누출, 화재, 폭발 등 기타 위험 상황에 대처하기 위해서 꼭 필요하다.

LNG 누출 과정은 크게 네 가지 단계로 구분할 수 있다 (Dong, 2020; Basha, 2014). 첫째, LNG 저장 탱크 또는 배관, 호스 등에서의 누출이 발생하는 단계이다. 이때 LNG는 공기

Table 4 Comparison of typical studies on LNG safety zone

Parameters		Unit	Park et al.(2018)	Park et al.(2020)	Jeong et al.(2020)	
Ship	Ship type	-	Container ship, VLCC	Floating LNG-Fueled power plant	Bulk carrier	
	RV	Ship size	LxBxDxd [m]	399x58.6x33.2x16.0 336x60.0x30.5x20.8	70x30x9.0x3.5	190.6x32.0x7.4
		Loading condition	-	Full load condition, Ballast condition	-	-
		Tank type	-	Type C	Type C	Type C
	BV	Ship size	m ³	5,100	-	Truck-to-ship
	Tank type	-	Type C	-		
Bunkering		Distance between BV & RV	m	3.3	-	-
		Leak hole size	mm	50,150,250	5,10,20	50,150
		Leakage rate	kg/s	18,7,168,466	90	19,44,174,96
		Leakage duration	s	90	30	90
Environment		Ambient temperature	°C	15	-	20
		Wind speed	m/s	2,4,6	-	7
		Wind direction	-	East,West,South	-	East,West,South,North
Analysis		Software	-	FLACS	DNVGL Phast	FLACS
		Analysis duration	s	110	-	110
Safety zone		Maximum	m	691(Container ship) 853(VLCC)	106.7	213.3(full-LFL) 541.8(half-LFL)
		Minimum	m	75(Container ship) 175(VLCC)	18.7	28.8(full-LFL) 34.9(half-LFL)

와 접촉하고, 저온 상태의 LNG는 공기보다 무거우므로 저온 풀(pool)을 형성하게 된다(Hovert, 2018). 두 번째 단계에서 지면이나 수면상에서의 저온 풀에 모인 LNG가 넓게 펼쳐지게 된다. 세 번째, 일반적으로 대기 온도는 LNG의 끓는점보다 높으므로 주위의 열에 의해 증발을 하게 된다. 이로 인해, 넓게 퍼진 저온의 증기구름이 형성된다(Saleem, 2018). 마지막으로 바람에 의해 확산이 되는 과정을 거치게 된다(Gopalaswami, 2017). 이 과정은 액화 가스의 종류마다 증발 시간과 확산 속도가 다르겠지만 유사한 경향을 나타내고 있다(Klebanoff et al, 2016; Tofalos et al, 2020).

LNG 누출 및 확산 과정을 도식화하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있고, 각 과정의 단계마다 누출된 LNG의 상태와 누출량과 확산의 정도가 차이가 발생한다. 또한, LNG가 누출되고 열을 흡수하여 증발 및 확산이 되기까지 시간이 소요되므로 누출 시간과 CFD 해석 시간이 LNG 누출로 인한 안전관리구역 설정에서 중요한 요소 중 하나이다.

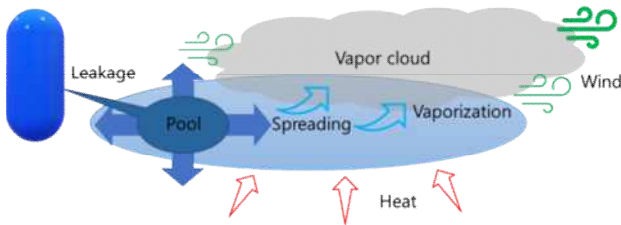


Fig. 4 LNG leakage and dispersion process

하지만, 안전관리구역과 관련하여 수행된 선행 연구에서는 Table 4에서 나타나듯이 누출 시간과 해석 시간의 차이가 크지 않다. 이로 인해 LNG 누출 과정에서 발생하는 다양한 변화가 포함되기는 어려울 수도 있다. 본 선행 연구 이후, 안전관리구역 설정을 위한 본격적인 해석 수행 시 해석 시간에 따른 누출 경향과 최저 폭발 한계 범위를 분석하고 안전관리구역 범위 지정에 반영할 예정이다.

본 연구는 국내 주요 항만에서 선박 대 선박 LNG 병커링 시 안전관리구역 설정을 위한 연구로써, 안전관리구역 설정에 영향을 미치는 요소를 산업표준, 선급 규칙 그리고 선행 연구 등을 검토하여 Fig. 5와 같이 정리하였다. LNG 병커링 선박과 LNG 인수 선박이 결정되면 각 선박의 크기에 따라 선박 간의 거리, 선박의 흘수에 따른 높이 차 그리고 병커링 스테이션의 위치 등이 정해진다. 이러한 변수를 정리하고 각 변수들을 제한하면서 해석을 수행하여 각 변수들의 영향을 분석하고 주요 항만에 따른 병커링 특성을 정리할 수 있다. 우선, 여기서는 주요 환경조건인 풍속과 누출량을 결정하는 누출원 크기의 영향을 분석하기 위해 가스 누출 해석에 많이 사용되는 FLACS를 사용하여 CFD를 수행하려고 한다.



Fig. 5 Key parameters of leakage and dispersion analysis

이렇게 기본적인 해석조건이 결정되면, 해석을 통해 최저 폭발 한계를 기준으로 안전관리구역을 설정하게 된다. 지금까지의 연구에서는 이 안전관리구역 2차원 평면으로만 설정하였다. 하지만, 안전관리구역의 정의는 3차원 범위로 명시하고 있다. 또한 선급 규칙과 산업계의 요구사항에서도 3차원 범위로 안전관리구역으로 설정할 것을 요구하고 있다. 따라서, 본 연구에는 Fig. 6과 같은 절차로 해석을 수행 후 3차원 범위로 최저 폭발 한계를 검토하고 3차원 범위의 안전관리구역을 설정하고자 한다.

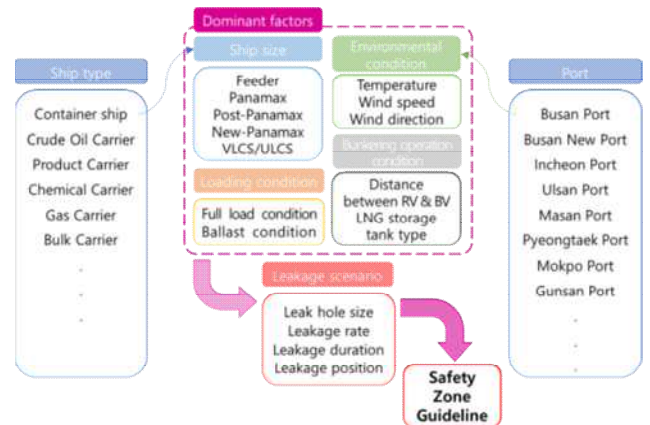


Fig. 6 Flow chart on establishing Safety zone guideline

3.2 수학적 모델

본 연구에서는 FLACS-CFD를 사용하여 선박 대 선박간의 병커링에 대해서 병커링 호스의 누출 사례를 시뮬레이션하고, 여기에 사용된 주요 수학적 모델은 아래 수식 (1)~(5)를 따른다. 질량 보존 방정식(Gexcon AS, 2019; Park et al, 2018) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = \frac{\dot{m}}{V} \quad (1)$$

여기서, β 는 공극률, μ 는 속도 벡터, m 는 질량유량, ρ 는 밀도 그리고 V 는 부피이다.

운동량 방정식(Gexcon, 2019; Park et al, 2018) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{ij}) + F_{o,i} + F_{w,i} + \beta_v(\rho - \rho_0)g_i \quad (2)$$

여기서, p 는 압력, σ 는 스트레스 텐서, F 는 저항력 그리고 g 는 중력가속도 이다.

에너지 보존 방정식 (Kim and Choi, 2017) :

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \nabla(\rho u h_s) = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \tilde{q} + \tau \nabla u \quad (3)$$

여기서, h_s 는 엔탈피, \tilde{q} 는 열유속이다.

난류 모델은 k-ε모델을 사용하고, 아래 수식과 같다.

$$-\rho \tilde{u_i u_j} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker 델타 함수이다.

누출량(Zhu et al, 2020; Zhu, 2014) :

$$Q = CA\rho_L \sqrt{\frac{2(P_T - P_{atm})}{\rho_L} + 2gH} \quad (5)$$

여기서, C는 누출계수, A는 누출 위치에서의 단면적, ρ_L 는 누출되는 유체의 밀도, P_T 는 배관내 압력, H는 누출지점과 설비내의 액체 높이 차이이다.

3.3 시뮬레이션 모델

본 시뮬레이션에서는 X, Y 그리고 Z방향으로 각 370m, 180m, 90m의 크기로 3D 시뮬레이션 영역을 구성하였다. 시뮬레이션 영역은 총 116,100개의 그리드 셀로 이루어졌으며, 누출원에서 각 방향에 따라 점차 확대되는 형상으로 형성되어있다. 병커링선박은 병커링 표준선형을 인수선박은 LNG추진 어업지도선을 기반으로 모델링을 수행하였다. 일반적으로 병커링 시, 안전한 운전을 위해 선박사이에 펜더를 설치하지만 본 해석에 사용된 병커링선박은 선박에 안전확보를 위한 펜더가 설치되어있다.

환경조건에서 기온은 상온 20℃를 기준으로 하고, 현재 LNG터미널을 구축 예정인 부산신항의 일년평균풍속 3.6m/s를 기준으로 기준풍속의 2배, 3배 조건을 검토하였다. 풍속이 빨라지면 누출된 가스가 빠르게 확산되고 기화가 일어나 위험구역이 줄어들지만, 선박 간 병커링 조건에서는 선박과 선박 사이의 공간에 누출된 액화가스가 풀(pool)을 형성하면서 넓게 퍼지는 양상을 보이므로 최대 확산거리에 이르는 풍속을 확인할 필요가 있다. 또한, 누출원의 크기를 달리하여 누출량에 따라 그 경향을 분석하고자 하였다. 정리하자면, Table 5와 같은 조건으로 Fig. 7과 같이 선박 및 누출원을 모델링하였으며, 세가지의 풍속과 세가지 누출원 크기에서의 누출 및 확산 해석을 LNG와 NH₃를 비교하고 각 연료별 특성을 분석하였다.

Table 5 Input parameters of LNG bunkering system

Parameters	Unit	Value	
Bunkering vessel (length x breadth x depth x draft)	m	48.5x12.4x4.5x2.5	
Receiving vessel (length x breadth x depth x draft)	m	106.5x16.8x8.6x5.3	
Fender (length x width x height)	m	two fenders, 0.75x1.2x2.0	
Piping diameter	mm	200	
Piping pressure	bar	4.01	
Ambient Temperature	℃	20	
Wind speed	m/s	3.6, 7.7, 11.3	
Pasquill calss	-	D	
Leak hole size	mm	50, 100, 150	
Leak duration	s	30	
Liquid storage temperature	LNG	℃	-162
	NH ₃	℃	-34
Flammability limits	LNG	vol % in air	5 ~ 15
	NH ₃	vol % in air	14.8 ~ 33.4
Ammonia exposure limit for humans	ppm	25	

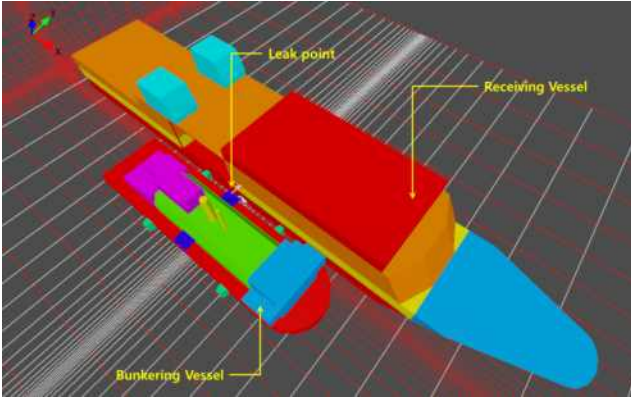


Fig. 7 Modelling of bunkering process

3.4 결과 및 분석

본 시뮬레이션을 통해 주요 환경변수인 풍속과 누출량을 결정하는 누출원 크기에 따른 LNG와 암모니아의 확산경향을 분석하였다. 저인화점 연료의 최대 확산 거리를 분석하는 기준은 일반적으로 최저 폭발 한계(LFL, Lower Flammability Limit)를 기준으로 하지만, 암모니아의 경우 최저 폭발 한계 범위보다 인체 독성 한계치가 더 낮다. 따라서, 본 해석에서는 LNG의 경우 최저 폭발 한계인 5%를 기준으로 확산 범위를 계산하였고, 암모니아의 경우 인체 독성 한계인 25ppm 즉, 0.0025%를 기준으로 확산 범위를 계산하였다. 이는 IMO를 비롯한 모든 선급에서 제시하고 있는 가스탐지기, 알람, 경고등의 안전기준과 동일하다.

LNG는 암모니아보다 밀도와 끓는점이 낮아, 공기중에서 보다 빠르게 기화가 되어 넓게 퍼진다. 하지만, 풍속과 누출원 크기에 따른 확산해석 결과를 정리한 Table 6과 7을 보면 최대 확산 범위는 암모니아가 더 넓은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한대로 암모니아의 확산 범위 기준은 폭발 한계 범위 (14.8%~33.4%)가 아닌 독성(0.0025%)을 기준으로 하기 때문이다.

누출된 액화 가스는 주위 공기 또는 해수의 열을 흡수하면서 증기운을 형성한다. 이때, 증기운의 확산은 대기 흐름에 따라 퍼지게 된다. 선박 대 선박간의 병커링에서는 팬더로 인해 선박 사이의 간격이 발생하고 그 사이에서 대기 흐름이 빨라지게 된다. 해석 결과를 비교해 보면, LNG는 공기와 빠르게 희석되면서 길이 방향으로 퍼지는 형상을 나타내고 암모니아의 경우 공기와의 희석 속도가 느리고 LNG에 비해 구형에 가까운 확산 형상을 보여준다.

암모니아의 경우, 최대 확산 거리는 누출원 크기가 150mm 일 때 나타났다. 이는 세 가지 조건 중 가장 큰 크기인데, 누출원 크기가 증가하면 확산 거리 또한 증가하는 경향이 있습니다. 이에 반해 LNG는 누출원의 크기가 100mm일 때 가장 큰 값을 나타냈다. 이는 암모니아의 밀도가 높아 LNG에 비해 누출량이 많고, 누출량의 증가가 누출 가스와 주변 온도 사이의 열 전달에 영향을 미쳐 풀 면적도 증가하는 것을 의미한다.

액화가스가 지반으로 누출되는 초기 단계에서는 누출 가스

와 지반의 온도차이가 커서 둘 사이의 열교환은 강제대류에 가깝고, LNG와 암모니아는 빠르게 끓고 증발하여 지면과 누출 가스사이에서 연속적인 증기막을 형성한다. 그 후, 가스와 지면 사이의 열전달이 안정화되고 액화 가스의 비등이 발생하면서 분산이 된다. 이 과정에서 누출물이 증가하면 더 많은 증기운이 지반을 덮게 되어 열유속이 제한되어 상대적으로 안정된 비등물을 형성하는 데 더 많은 시간이 소요된다.

Table 6 Dispersion distance depending on wind conditions

Fuel	Wind speed [m/s]	Vapor cloud dispersion [m]		
		X	Y	Z
LNG	3.6	15.4	3.6	7.2
	7.7	40.5	4.4	5.6
	11.3	40.1	6.8	8.4
NH ₃	3.6	32.0	9.6	7.2
	7.7	43.0	7.0	11.2
	11.3	40.0	6.2	8.4

Table 7 Dispersion distance depending on leak size

Fuel	Leak hole size [mm]	Vapor cloud dispersion [m]		
		X	Y	Z
LNG	50	15.4	2.8	7.2
	100	50.8	2.6	6.7
	150	34.5	5.6	10.8
NH ₃	50	32.0	9.6	7.3
	100	42.0	11.6	11.9
	150	73.5	11.7	12.8

4. 결론 및 향후 과제

글로벌 환경규제로 인해 대체연료의 사용량이 증가하고 있다. 각 선급 및 주관청에서 LNG 병커링과 관련하여 안전관리 구역에 대한 지침서를 발행하였지만, 그 내용이 개념적인 설명이 주를 이루고 있고 개별 선박에 적용하는 것은 어려운 측면이 있을 뿐만 아니라 다양한 대체연료에 대한 연료별 특성에 따른 병커링 가이드라인은 제시하지 못하고 있는 상황이다. 따라서, 국내 항만에서 병커링을 활성화하고 관련 산업을 촉진시키기 위해서는 안전관리구역 설정에 관한 구체적인 절차 마련이 시급하다.

이에 따라, 본 연구에서는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 병커링 안전관리구역 설정시, 암모니아의 독성을 고려하여

설정해야 한다. 동일한 작업 조건에서 암모니아의 증기운은 LNG의 그것보다 넓게 나타난다.

- 2) LNG와 암모니아의 확산은 대기와 지면과의 지속적인 열교환을 통해 풀을 형성 후 증기운으로 증발하는 모습을 보인다. 즉, 누출원 근처에서 높은 가스 밀도를 나타내고 그 주변에서 대기와 희석된다. 따라서, 누출 발생 가능성이 높은 구역에서의 누출 탐지 및 경보 등을 중요하다.
- 3) 누출 방향 및 누출 구역도 중요한 요인인데, 선박 대 선박 병커링 시에는 선박사이에서 공간이 발생하게 되는데 이는 누출 가스가 정체되는 것을 의미하고 이는 대기흐름과 열교환 속도를 줄여 증발 및 확산을 지연할 수 있다.

또한, 보다 효율적이고 적절한 안전관리구역 설정을 위해서는 다음과 같은 추가 연구가 필요하다.

- 1) 국내 주요 항만 중에서 병커링 가능성이 높은 항만을 선정하고, 그 항만의 풍속, 풍향 그리고 온도와 같은 환경조건의 자료를 수집하고 항만의 주요 선박을 확인하여 각 조건을 검토한다.
- 2) 병커링 선박과 대체연료 추진선 간의 병커링 조건에 따른 누출량, 누출 빈도 등을 고려하여 다양한 가스 누출 시나리오 수립하고 CFD 소프트웨어를 이용하여 각 시나리오의 결과를 분석한다.
- 3) 누출 시나리오의 결과는 각 선급 규칙, 지침서 그리고 선행 연구 결과 등과 비교 검토하여 결과의 정확성을 높이고, 시나리오에 대한 타당성을 다시 한번 확인하여 누출 시나리오의 적합성을 검토한다.
- 4) 각 과정의 적합성이 확인되면, 국내 항만에 적용하기 위한 선박 대 선박 병커링 안전관리구역 설정을 위한 절차를 수

립할 수 있고, 최종적으로 Fig. 8과 같은 형태의 안전관리 구역을 설정한다.

이와 같은 연구를 통하여 안전한 병커링 절차를 수립하고 수행가능하다.

후 기

이 논문은 2020년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20200520, 수소선박 안전기준개발사업).

이 논문은 2022년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2022-00144116, 2022년 친환경선박전주기핵심기술개발사업)

이 논문은 2022학년도 한국해양대학교 연구진흥사업 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

본 논문은 부산광역시 및 (재)부산인재평생교육진흥원의 BB21플러스 사업으로 지원된 연구임.

본 논문은 한국해양수산개발원이 후원한 해양수산 미래 리스크 논문 공모전 수상작임을 밝힙니다.

References

- [1] Basha, O., Olewski, T., Véchet, L., Castier, M. and Mannan, S.(2014), Modeling of pool spreading of LNG on land, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 30, pp. 307-314.

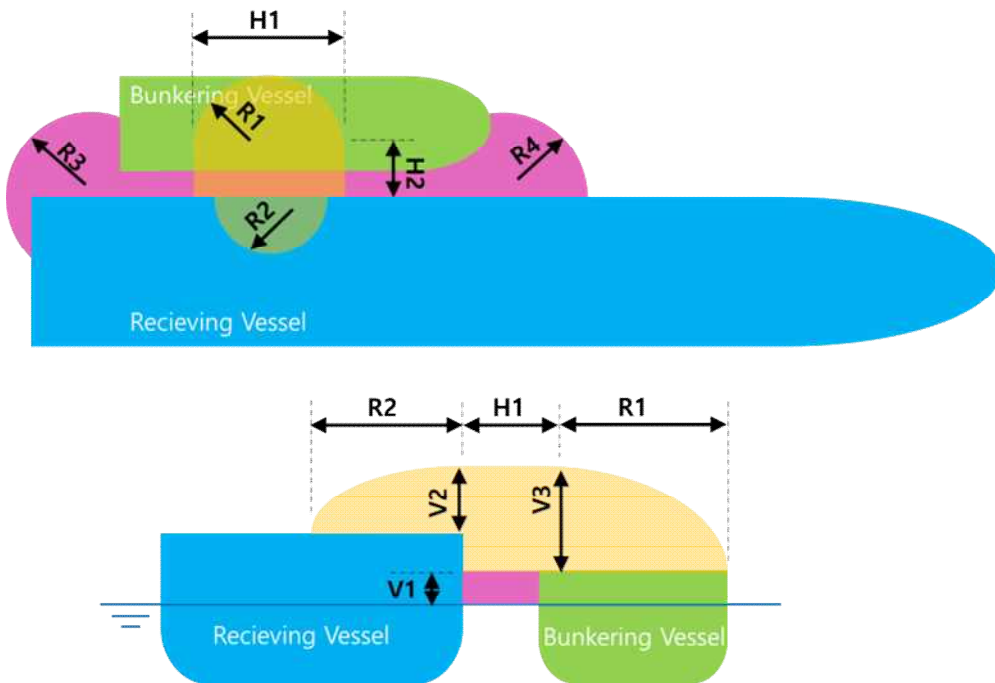


Fig. 8 Example on safety zone during LNG bunkering process

- [2] Bureau Veritas(BV)(2014), Guidelines on LNG Bunkering, Guidance Note NI 618 DT R00 E.
- [3] D. Archer, S Rahmstorf, The climate crisis: An introductory guide to climate change.
- [4] DNVGL(2014), Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study, DNVGL - Report No. PP087423-4, Rev. 3.
- [5] DNVGL(2015), Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities, DNVGL-RP-G105.
- [6] Dong, S., He, Y., Dong, J., Peng, Z. and Fu, G.(2020), A Review of Leakage and Dispersion of LNG on the Ground, *Energy Engineering*, Vol. 118, No. 1, pp. 103-118.
- [7] European Maritime Safety Agency(EMSA)(2018), EMSA Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations.
- [8] Zhu, G., Guo, X., Yi, Y., Tan, W. and Ji, C.(2020), "Experiment and simulation research of evolution process for LNG leakage and diffusion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 64, No. January, p. 104041, doi: 10.1016/j.jlp.2019.104041.
- [9] Ciccarelli, G., Jackson, D. and Verreault, J.(2006), "Flammability limits of NH₃-H₂-N₂-air mixtures at elevated initial temperatures," *Combust. Flame*, Vol. 144, No. 1-2, pp. 53-63, doi: 10.1016/j.combustflame.2005.06.010.
- [10] Gexcon AS, 2019, FLACS v10.9 User's Manual.
- [11] Gopaldaswami, N., Kakosimos, K., Zhang, B., Liu, Y. and Mentzer, R.(2017), Experimental and numerical study of liquefied natural gas (LNG) pool spreading and vaporization on water, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 334, No. 15, pp. 244-255.
- [12] Global Maritime Forum(GMF)(2021), Five percent zero emission fuels by 2030 needed for Paris-aligned shipping decarbonization. Getting to Zero Coalition Insight Series. Available at : <https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/03/Getting-to-ZeroCoalition-Five-percent-zero-emission-fuelsby-2030.pdf>.
- [13] Guo, D., Zhao, P., Wang, R., Yao, R. and Hu, J.(2019), Numerical simulation studies of the effect of atmospheric stratification on the dispersion of LNG vapor released from the top of a storage tank, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 61, pp. 275-286.
- [14] Horvat, A.(2018), CFD methodology for simulation of LNG spills and rapid phase transition (RPT), *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 120, pp. 358-369.
- [15] IMO - International Maritime Organization(2018) UN body adopts climate change strategy for shipping. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>
- [16] International Association of Classification Societies (IACS)(2016), LNG Bunkering guidelines.
- [17] ISO/TS 18683(Guidelines for systems and installations for supply of LNG as fuel to ships).
- [18] Jeong, B. U., Park, S. Y., Ha, S. M. and Lee, J. U.(2020), Safety evaluation on LNG bunkering: To enhance practical establishment of safety zone, *Ocean Engineering*, Vol. 216, Article, 107804.
- [19] Kim, C. M. and Choi, B. C.(2017), Dispersion analysis of the unignited flare gas in an LNG-FPSO vessel, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 41, No. 8, pp. 753-759.
- [20] Klebanoff, L. E., Pratt, J. W. and LaFleur, C. B., Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, Issue. 1, pp. 757-774.
- [21] M. Yarandi, M. Mahdinia, J. Barazandeh, and A. Soltanzadeh(2021), "Evaluation of the toxic effects of ammonia dispersion: Consequence analysis of ammonia leakage in an industrial slaughterhouse," *Med. Gas Res.*, Vol. 11, No. 1, pp. 24-29, doi: 10.4103/2045 - 9912.310056.
- [22] Park, S. I., Kim, S. K. and Paik, J. K.(2020), Safety-zone layout design for a floating LNG-Fueled power plant in bunkering process, *Ocean Engineering*, Vol. 196, Article, 106774.
- [23] Park, S. Y., Jeong, B. U., Yoon, J. Y. and Paik, J. K. (2018), A Study on Factors Affecting the Safety Zone in Ship-to-Ship LNG Bunkering, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 13, Issue. 1, pp. 312-321.
- [24] Saleem, A., Farooq, S., Karimi, I. A. and Banerjee, R. (2018), A CFD simulation study of boiling mechanism and BOG generation in a full-scale LNG storage tank, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 115, pp. 112-120.
- [25] Society for Gas as a Marine Fuel(SGMF)(2018), Recommendation of Controlled Zones during LNG Bunkering, SGMF.
- [26] Swedish Marine Technology Forum(SMTF)(2010), LNG ship to ship bunkering procedure.
- [27] Tofalos, C., Jeong, B. and Jang, H., Safety comparison analysis between LNG/LH₂ for bunkering operation,

JOURNAL OF INTERNATIONAL MARITIME SAFETY,
ENVIRONMENTAL AFFAIRS, AND SHIPPING, Vol.
4, No. 4, pp. 135-150.

- [28] Vilchez, J. A., Villafane, D. and Casal, J.(2013), A dispersion safety factor for LNG vapor clouds. Journal of Hazardous Materials, Vol. 246, No. 247, pp. 181-188.
- [29] Xie, Q., Lu, Q., Yuan, Y., Zhang, J. and Zhou, F.(2021), Numerical study on the horizontal stretching effect of ground on high-pressure vapor jets of LNG tank leakage, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 72, Article. 104526.
- [30] Zhu, D. Z.(2014), "Example of simulating analysis on LNG leakage and dispersion," Procedia Eng., Vol. 71, pp. 220-229, doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.032.

Received 10 November 2022

Revised 20 February 2023

Accepted 20 February 2023