

국내 LNG TTS 벙커링 시 안전구역 기준에 관한 연구

박성인¹·노재승¹·박재희²·박경민³·신동규^{1,†}

한국조선해양(주)¹

현대중공업(주)²

현대삼호중공업(주)³

A Study on the Standard for the Safety Zone in the Domestic LNG TTS Bunkering

Sung-In Park¹·Jae Seung Roh¹·Jaehee Park²·Kyoungmin Park²·Dongkyu Shin^{1,†}

Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd.¹

Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.²

Hyundai Samho Heavy Industries Co., Ltd.³

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 paper suggests an example guideline of a safety zone layout for the domestic LNG Truck-To-Ship (TTS) bunkering. The safety zone is one of the controlled area in LNG bunkering and its layout is required as a fundamental safety barrier. While the international standard provides a layout methodology of the safety zone, its detail application is not user-friendly and only possible with a level of the process engineering. In the domestic case, the enforcement regulations are applied for LNG bunkering but the safety zone is not properly defined for TTS operation. Considerations are made for the intuitive approach of the safety zone layout and an example guideline is suggested for application in the domestic TTS bunkering. A technical background of the guideline is described and its applicability is demonstrated with regard to the characteristics of TTS bunkering. The findings of the study are summarized in association with a practical layout of the safety zone, contributing to the safety culture in the domestic LNG bunkering.

Keywords : Safety zone(안전구역), Liquefied Natural Gas(LNG, 액화천연가스), Bunkering(벙커링), Truck-To-Ship(TTS, 트럭-선박 간)

1. 서론

최근 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)를 주-연료로 활용하는 선박이 다수 건조됨에 따라 해당 선박으로의 LNG 공급, 즉 벙커링(bunkering) 수요 또한 증가하고 있다 (DNV, 2022a).

극저온의 LNG는 대기 누출 시 천연가스(natural gas, NG)로 급속히 기화, 높은 가연성을 지님에 따라 벙커링 중 예기치 않은 누출은 각종 중대 사고로 이어질 수 있다 (ISO, 2015). 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)는 벙커링 작업 사양에 대한 표준 및 위험도 평가에 대한 지침을 통해 벙커링 중 누출에 대비한 각종 안전수단 구비와 함께 일련의 관리구역(controlled zones)이 배치되어야 함을 설명한다 (ISO, 2021a, 2021b). 이는 선박 기본설계에 내재된 위험구역(hazardous zone 또는 dangerous zone)을 비롯해 안전구역(safety zone) 및 보안구역(monitored and security area)으로 구성되며(Fig. 1) 각 구역에 대한 정의는 다음과 같다 (ISO, 2021b):

- 위험구역: 선박 내 폭발성 (또는 가연성) 기체가 발생 가능하여 점화원 제어에 각별한 주의가 요구되는 공간 (IEC, 2020)
- 안전구역: 벙커링 중 LNG 누출에 의해 가연성 환경이 조성될 수 있는 공간으로 특정/필수 인원 출입 및 작업 수행만을 허용

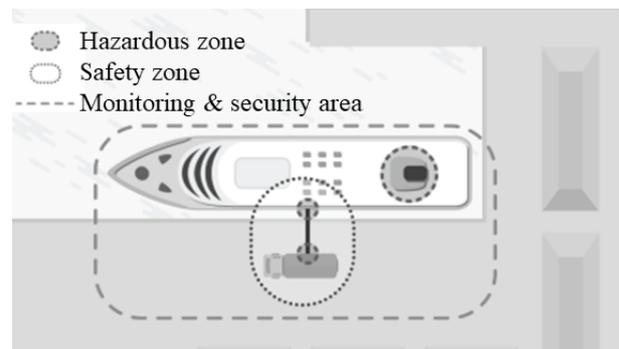


Fig. 1 Concept drawing of the LNG bunkering controlled zone (ISO, 2021b)

- 보안구역: 벙커링 작업에 대한 악영향을 최소화하기 위해 연료 공급설비 및 선박 주변 교통 및 일련의 행위가 제어되는 공간

이 중 안전구역은 위험구역을 포함함과 동시에 보안구역 내부에 존재하게 되며 그 배치 근거에 대해 벙커링 관련자 간 협의 및 관할당국 승인이 요구되는 등 벙커링 수행을 위한 필수 요건으로 간주될 수 있다 (EMSA, 2018; IACS, 2017). 현재 안전구역 배치와 관련된 국제산업표준 방법론 및 각종 단체들의 지침이 존재하나 (ISO, 2021b; DNV, 2021; SGMF, 2018) 이들의 경우 1) 실제 배치를 위한 상세 적용 방안 혹은 적용 예시가 제공되지 않음과 더불어; 2) 방법론 적용을 위해 일정 수준의 공정 설계 지식 및 누출 모사 기술이 요구됨에 따라 그 범용적 활용이 제한될 수 있을 것으로 판단된다. 한편 국내의 경우 LNG 벙커링에 관한 별도 표준이 존재하지 않으며 트럭 또는 선박 등 공급설비에 따라 기존 국내 법령에 근거, 상이한 안전기준이 적용되고 있다 (MOF, 2021; MOTIE, 2021). 각 기준의 경우 앞서 언급된 국제 벙커링 표준을 (ISO, 2021a, 2021b) 일부 차용하고 있으나 그 범위가 제한적이며 특히 국내 벙커링 수요 대다수를 차지하는 트럭-선박 간 (truck-to-ship, TTS) 작업의 경우 안전구역 개념의 명확한 정립 및 적용이 이뤄지지 못한 것으로 확인된다. 향후 증가될 국내 벙커링 수요 및 작업 위험성을 고려할 때 보다 범용적인 표준을 제정, 벙커링 절차 및 안전수칙 규범이 제공되어야 하며 그 첫 단계로 안전구역 개념 및 배치 기준 정립이 필요한 것으로 판단된다.

2. LNG 벙커링 시 안전구역 배치 동향

2.1 안전구역 배치 방법론 관련 산업관행

ISO는 LNG 벙커링 위험성 평가 지침을 통해 안전구역 배치를 위한 2가지 방법론을 제공한다 (ISO, 2021b):

- 결과기반접근법(consequence-based approach): 특정 누출 시나리오에 관한 누출 및 확산 거동 분석을 통해 연소하한계(Lower Flammable Limit, LFL) 분포 범위를 예측, 이를 안전구역으로 설정
- 위험도기반접근법(risk-based approach): 다양한 누출 시나리오들을 고려, 해당 시나리오들의 위험도 수준에 따른 안전 거리, 즉 안전구역을 설정 (일련의 확률론적 위험도 평가 방법론에 해당함)

각 방법론의 상세 활용 예는 제공되지 않으며 결과기반접근법을 보다 범용적으로 간주하고 필요에 따라 위험도기반접근법이 활용될 수 있음을 설명한다. 선박의 LNG 연료 활용 관련 단체, SGMF(The Society for Gas as a Marine Fuel)는 벙커링 시 관리구역 배치에 대한 지침을 발간함과 동시에 ISO 결과기반접근법에 근거한 안전구역 배치 프로그램, BASIL을 개발, 상업적 서비스를 제공 중이다 (SGMF, 2018). 이는 ISO에 의해 결과기반접근법 활용 모범 사례로 소개되며 현재 국내외 LNG 벙커링 시의 안전구역 배치를 위해 해당 프로그램이 널리 활용되고 있음이 확인된다.

2.2 해외 LNG 벙커링 시 안전구역 배치 동향

국제선급협회(IACS)는 LNG 벙커링 지침 관련 권고사항을 발행 (IACS, 2017), 선박으로의 LNG 연료 공급 시 ISO 방법론에 근거한 안전구역이 설정되며 이에 대한 항만당국 승인이 필요함을 설명한다. 유럽해사안전청(EMSA)은 항만당국 및 항만관리자의 역할 수행을 위한 LNG 벙커링 지침을 발행 (EMSA, 2018), 이를 통해 유럽 내 항구에서의 벙커링 시 안전구역 배치 내역에 대한 검토 및 승인이 이뤄짐을 확인할 수 있다. 일부 유럽 항구의 경우 LNG 등 가연성 물질 벙커링 시 별도의 계산 과정을 생략하는 대신 20, 25 m 등의 안전구역 배치 기준을 제시하고 있음을 확인할 수 있다 (CCNR, 2021; Port of Gothenburg, 2022).

2.3 국내 LNG 벙커링 시 안전구역 배치 현황

국내의 경우 벙커링 공급설비 형태에 따라 특정 법령에 근거한 안전기준이 적용되며 안전구역 배치 관련 내용은 아래와 같다:

- 트럭을 통한 작업(Truck-To-Ship, TTS): 트럭을 이용한 벙커링에 해당하며 도시가스사업법에 근거한 안전기준이 적용된다 (MOTIE, 2021). 명확한 안전구역 개념은 존재하지 않으며 대신 일련의 안전거리 기준이 존재한다 (선박~자동차 간= 3 m 및 충전장소~화기 간= 8 m 이격). 각 수치에 대한 근거 및 해당 기준의 LNG 벙커링 안전구역으로서의 역할 수행 타당성은 확인된 바 없다. 대형 조선소의 경우 벙커링 자체안전관리계획서를 수립, 이때 ISO 결과기반접근법에 근거한 안전구역을 설정하며 이는 국내 법 기준을 크게 상회하는 것으로 확인된다.
- 선박을 통한 작업(Ship To Ship, STS): 연료공급선(Bunkering Vessel, BV)을 이용한 벙커링에 해당하며 선박입출항법에 근거한 안전기준이 적용된다 (MOF, 2021). 관할항만당국의 작업 승인 절차가 존재하며 이를 위해 안전구역 배치를 포함한 안전관리계획이 수립된다. 안전구역 배치 방법론은 제시되지 않으며 벙커링 수행자에 의해 도출된 내역에 대한 정부대행검사기관의 타당성 검토가 요구된다. 대형 조선소에서 LNG운반선에 대한 STS 작업이 몇 차례 수행된 바 있으며 이때 SGMF BASIL 또는 자체 계산절차 활용 등 ISO 결과기반접근법에 근거한 벙커링 안전구역 배치 및 이에 대한 항만당국 승인이 이뤄진 것으로 확인된다.

2.4 학술연구 현황

LNG 벙커링 안전구역 관련 각종 학술연구가 진행된 바 있다. Park et al. (2018)은 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통한 LNG 누출 모사 및 안전구역 배치 방안에 대해 검토한 바 있으며 Carboni et al. (2022)는 누출 모사 시 도구선택이 안전구역 배치 결과에 미치는 영향을 확인한 바 있다. Jeong et al. (2017, 2018, 2020)은 정량적 위험도 평가 방법론을 활용한 관

리구역 및 안전구역배치 방안을 소개한 바 있으며; Park et al. (2020) 및 Park and Paik (2022)은 혼합접근법을 활용한 안전구역 배치 방안을 검토한 바 있다. 이외에도 다양한 연구들이 수행되어 왔으나 산업계 내 주로 활용되는 결과기반접근법의 적용 방안 및 배치 사례에 관한 정보는 극히 제한적임을 확인할 수 있다.

3. 안전구역 배치 기준 정립 필요성

3.1 국내 LNG 벙커링 수요

국내의 경우 2013년 이후 일부 연안 선박 운항을 위한 TTS 벙커링이 수행되고 있으며 국내 조선소 LNG 연료추진선 건조량 증가와 함께 이들 선박의 가스시운전을 위한 TTS 벙커링 수요가 증가 추세에 있음이 확인된다. 또한 최근 조선소 신조 LNG 운반선 시운전을 위한 STS 벙커링 작업이 수행, 점차 그 수요가 확대될 수 있을 것으로 보인다 (Korea LNG Bunkering (KOLB), 2022).



Fig. 2 Example TTS & STS LNG bunkering (KOLB, 2022)

향후 국내 벙커링 수요 및 작업 형태는 다음과 같이 예측된다:

1) 연안 선박 운항을 위한 TTS 벙커링:

친환경선박법(MOF, 2020) 및 탄소중립 정책에 따라 LNG 연료를 활용한 연안 선박 증가가 예상되며 이들 운항을 위한 지속적인 TTS 벙커링 수요가 형성될 것으로 예상된다.

2) 조선소 신조 LNG 연료추진선 시운전을 위한 TTS 벙커링:

LNG 연료추진선 수요 증가에 따라 이들 선박 건조 경쟁력을 지닌 국내 조선소의 수주 및 건조량 증가가 예상된다. 해당 선박 건조 과정에서 가스시운전을 위해 연료 탱크 용량 대비 소량의 LNG 공급이 요구되며 이를 위한 조선소 TTS 벙커링 수요가 지속적으로 형성될 것으로 예상된다.

3) 조선소 신조 LNG 운반선 시운전을 위한 STS 벙커링:

신조 LNG 운반선의 경우 선박 인도 전 국내 터미널 이동 및 연료 수급을 통해 시운전 수행해 왔으나 근래 국내 조선소의 LNG 운반선 수주 증가에 따른 터미널 포화가 예상된다. 최근 대형 조선소를 중심으로 터미널 연료 수급에 대한 대안으로, STS 벙커링을 수행한 바 있으며 이는 향후 본격적인 국내 BV 운용과 함께 보다 활성화될 것으로 예상된다.

4) 외항선의 국내 항만에서의 STS 벙커링

국내 취항 외항선에 대한 연료공급 수요가 존재하며, 점차 많은 LNG 연료추진선 입항과 함께 해당 수요 역시 증가할 것으로

예상된다. 이들 선박의 경우 항구에서의 연료공급 및 화물 동시 선적(simultaneous operations, SIMOPS) 작업이 선호되며 이를 위한 STS 수요가 형성될 것으로 예상된다.

3.2 국내 TTS 벙커링 안전성 확보 필요성

앞선 동향 파악을 통해 현행 및 향후 국내 주요 벙커링 수요가 TTS 작업을 통해 형성될 수 있음을 알 수 있다. 해당 작업의 경우 대중적인 공급설비를 활용하며 비교적 간단한 작업 절차로 수행됨에 따라 연료공급업자 측에 낮은 사업 진입장벽을 형성할 수 있다. 국내 벙커링 수요 증가에 따라 일정 규모 이상의 공급자(예:한국가스공사) 혹은 수요자(조선소)를 통해 수행되던 TTS 작업이 다양한 규모의 공급/수요자를 대상으로 확장될 수 있음을 예상할 수 있다. 이때 벙커링 작업자의 경험, 기술 수준, 설비 상태 등에 따라 형성될 수 있는 상이한 작업 환경은 국내 벙커링 산업 안전 문화 조성에 큰 걸림돌로 작용할 수 있다. 따라서 벙커링 수행 주체와 무관하게 적용될 수 있는 범용적인 안전방벽이 강구되어야 하며 최우선적으로 명확한 안전구역 개념 및 기준 정립이 검토될 수 있다.

2.3절을 통해 TTS 벙커링 관련 현행 국내 안전기준의 경우 대상설비 간 이격거리 및 화기 이격거리 기준을 제공, 작업 주체 및 작업장 환경과 무관한 범용적 활용이 이뤄짐을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 해당 수치의 타당성 혹은 안전성에 대한 근거는 확인된 바 없으며 해외 일부 항구에 적용되는 안전구역 권장 배치 기준(CCNr, 2021; Port of Gothenburg, 2022) 대비 제한적인 격리가 이뤄짐을 확인할 수 있다. 앞서 TTS 벙커링 주 수요처인 국내 대형 조선소의 경우 자체적인 안전구역 배치를 통해 작업장 안전을 확보하고 있음을 언급하였으나 이 경우 일정 수준의 전문 지식 및 특정 컴퓨터 소프트웨어가 요구될 수 있어 그 접근이 제한적이며 숙련도에 따라 부적절한 결과가 도출될 우려가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 벙커링 주체로 하여 직관적인 활용이 가능함과 동시에 보수적인 안전기준이 적용될 수 있도록 국내 TTS 벙커링 환경을 고려한 안전구역 배치 기준을 검토, 현행 국내 안전기준을 대체하는 방안을 제안하고자 한다. 한편 STS 벙커링의 경우 국제 벙커링 지침에 따른 안전구역 배치 및 이에 대한 항만당국 승인이 요구되고 있으며 일정 규모 이상의 연료공급 또는 수급주체에 의한 적절한 안전구역 배치 검토가 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다.

4. TTS 벙커링 안전구역 배치 기준 제안

4.1 안전구역 배치 방법론

국내 LNG TTS 벙커링 안전구역 배치기준 정립 과정에서의 직관성 확보 및 도출된 결과물의 범용성을 확보하고자 ISO 결과기반접근법의 활용이 고려되었다. 결과기반접근법을 활용한 적정 안전구역 배치안 도출을 위해 4단계 절차로 구성된 안전구역 배

치 흐름도 및 절차가 제시되며(Fig. 3) 절차 내 각 상세 단계별 고려되어야 할 주요 내용은 아래와 같다.

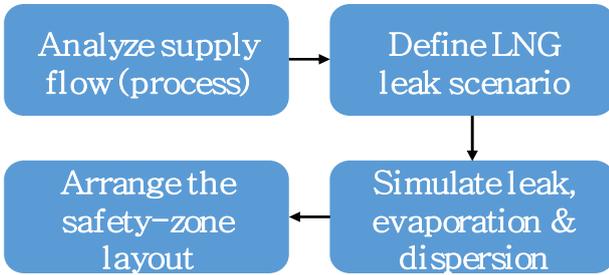


Fig. 3 Flow chart of the safety zone layout using the ISO consequence-based approach

- 1) 연료 공급흐름(공정) 분석 [Analyze supply flow (process)]
TTS 벙커링 시 다음과 같은 공급설비 특성 및 사양들을 파악, 수급선박으로의 연료공급 흐름을 분석한다:
 - 연료공급선 (배관, 호스 등) 직경
 - 최대 공급 압력 및 온도 (연료 탱크)
 - 최대 이송속도 및 유량
 - 차단밸브(shut-down valve) 작동 시 연료공급선 내 격리 및 체류되는 연료량
- 2) 누출 시나리오 선정
연료 공급 중 발생 가능한 누출 상황을 정의하며 각종 연료공급시스템에서의 (공급선, 각종 계기류, 밸브 및 해당 요소 간 연결부 등) 다양한 누출이 고려될 수 있다. 이때 주관적 관점에서 특정 적정 누출 크기를 정의하는 것은 큰 불확실성을 내포할 수 있으므로 누출 크기 선정에 대한 기술적 근거를 확보하는 것이 중요하다. 관련하여 SGMF는 자체적인 연구 및 실험 결과를 토대로 LNG 벙커링 중 연료공급관(배관 또는 호스) 직경 6 %에 해당하는 누출 크기 선정이 적정함을 설명한다. 누출 크기 선정 이후 수직 또는 수평 방향으로의 특정 누출 형성을 가정할 수 있으며 누출 시 연료공급관의 최대 설계 압력이 형성됨을 가정하여 보수적인 누출 영향이 검토될 수 있다. 누출 지점의 경우 연료공급관 전반에 걸쳐 형성될 수 있으며 작업장 주변 영향을 고려하여 특정될 수 있다.
- 3) 누출, 기화 및 가스 확산 모사
정의된 누출 시나리오에 따른 누출, 기화 및 가스 확산 모사가 수행되며 각종 수식 및 컴퓨터 소프트웨어 등의 도구가 활용될 수 있다. ISO (2021b) 지침은 결과기반접근법의 적정 모사 도구로 DNV PHAST (2022b), SGMF BASIL (2018) 등의 컴퓨터 프로그램 활용을 제안한다. 앞서 정의된 연료공급흐름 및 누출 시나리오 관련 변수들이 모사 도구에 입력되어 누출 이후 가연성 가스 확산 영향이 평가된다.
- 4) 안전구역 배치
모사 결과 식별된 가연성 가스 확산 범위, 즉 LFL 범위에 해당하는 안전구역 배치안이 도출된다. 배치 형상에 대한 명확한 지침은 존재하지 않으나 참조 문헌을 통해 (Carboni et

al., 2022; ISO, 2021b; Park and Paik, 2022) 누출 가능 지점으로부터의 잠재적 LFL 영향 범위 전체를 포함할 수 있는 배치가 이뤄질 수 있음을 확인할 수 있다. SGMF (2018) BASIL의 경우 연료공급선 양끝단 연결부, 즉 공급설비 및 수급선박 연결부에서의 누출로 인한 LFL 영향 범위를 모두 포함하는 형태의 안전구역 배치가 이뤄지는 것으로 확인된다 (ISO 2021b).

4.2 안전구역 배치 예시

국내 TTS 벙커링 환경을 고려, 4.1절의 절차를 적용한 안전구역 배치안이 도출되었다. 기상의 항구에서 트럭을 활용한 중소형 선박으로의 LNG 벙커링 작업이 가정되었으며 각 Fig. 4 및 5는 수급대상 선박 및 공급설비 트럭을 나타낸다. 안전구역 배치 절차 및 흐름도에 따른 상세 도출 과정은 아래와 같다:

Target ship	Eco-nuri
Gross tonnage	260 ton
Length overall	38 m
Width	8 m

Fig. 4 Receiving ship for TTS LNG bunkering (IPA, 2022)

Type	LNG tank lorry
Capacity	34,200 ~ 37,000 liter
Car weight	15,250 ~ 15,890 kg
Total weight	29,255 ~ 30,950 kg

Fig. 5 Supplying truck for TTS LNG bunkering (CVI, 2022)

- 1) 연료 공급흐름(공정) 분석
트럭으로부터의 연료 공급흐름은 다음과 같이 정의된다:
 - 최대 공급 압력 및 온도: 6 barg 및 -163 deg.C
 - 최대 이송속도 및 유량: 최대 10 m/s 및 150 m³/h
 트럭/선박 간 3 inch 직경의 유연호스가 연결되며 양측의 연료 탱크 간 초기 압력차 및 트럭에 설치된 기화설비를 통해 연료 공급흐름이 형성된다. 비상 시 차단밸브 작동으로 인해 10 m 길이의 유연호스 내 약 81 kg의 LNG가 잔존하며 이송속도 및 유량의 경우 현행 도시가스사업법에 따른 허용 값을 나타낸다.
- 2) 누출 시나리오 선정
SGMF (2018) 지침을 토대로 호스 직경의 6 %, 즉 4.5 mm 크기 누출이 정의된다 (Table 1). 보수적 누출 효과 도출을 위해 누출 시 호스 내 최대 공급 압력(6 barg)이 형성됨을 가정하며 트럭 쪽 연결부에서의 수평 방향 누출이 고려된다. 이는 벙커링 작업장 내 수직 방향 가연성 가스 형성에 대한 위험 요소가 없음을 간주함과 동시에 수평 방향 가연성 가스 형성에 대한 항구 내 인명 피해를 주요하게 검토하기 위함이다.

Table 1 Leak hole size recommendation (SGMF, 2018)

Hose Dia.	2 inch	3 inch	4 inch	...	10 inch
Leak size	3 mm	4.5 mm	6 mm	...	15 mm

3) 누출, 기화 및 가스 확산 모사

각종 공정 사고 모사를 위해 널리 활용되는 DNV PHAST를 활용, 누출량 변화 및 이에 따른 기화, 가스 확산 등의 모사가 수행되었다 (DNV, 2022b). 앞서 정의된 연료 공급흐름 및 누출 시나리오 정보들이 PHAST에 입력되며 누출 시 안정적인 기화 및 가스 확산 영향 도출을 위해 낮은 풍속 (1 m/s) 및 안정적 대기 조건이 고려되었다. Fig. 6은 PHAST 모사 결과 도출된, 약 11 m의 수평 방향 가연성 가스 확산 거리를 나타낸다 (100 % LFL 농도 기준).

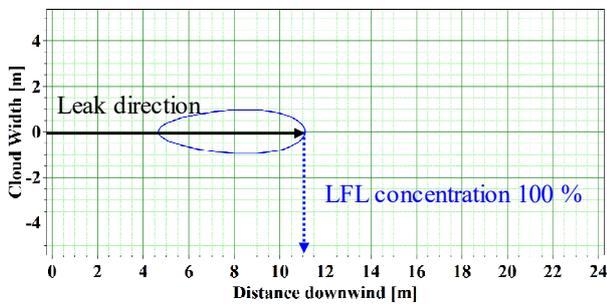


Fig. 6 Simulation result: Maximum distance of flammable gas dispersion following the leak direction (LFL 100 %)

4) 안전구역 배치

Fig. 7은 앞서 도출된 가연성 가스 확산 거리를 기준으로 TTS 벙커링 작업장에 배치된 안전구역 범위를 나타낸다. 누출 지점인 트럭 연결부를 중심으로 반경 11.5 m 규모의 원형 안전구역이 생성되었으며 이는 트럭 전체 및 수급선박의 매니폴드 구역을 포함하게 된다.

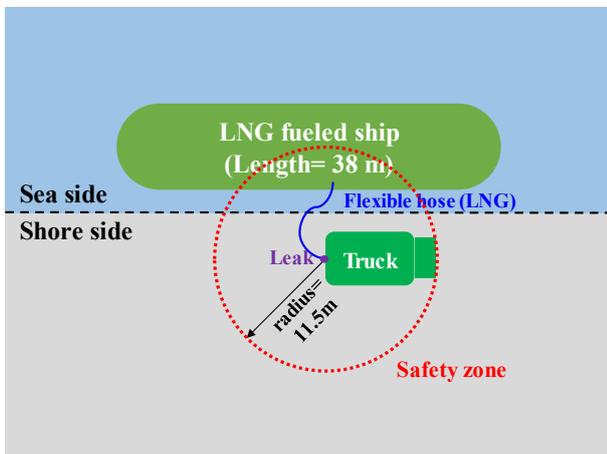


Fig. 7 Resulted safety zone layout for the imaginary LNG TTS bunkering

4.3 안전구역 배치 결과 고찰 및 국내 기준 제안

4.2절을 통해 도출된 TTS 벙커링 안전구역 배치 기준의 경우 현행 국내 법제도 상의 설비 간 (3 m) 및 화기 이격 (8 m) 기준거리들을 상회함을 확인할 수 있다. 해당 결과 도출과정에서 고려된 특정 조건 또는 일부 가정들에 대한 근거는 다음과 같다:

- 연료공급흐름 일반화: 안전구역 배치 방법론, 특히 결과기반접근법의 경우 선정된 누출 시나리오에 따라 안전구역 배치 내역이 크게 달라질 수 있으며 누출 시나리오의 핵심 요소는 연료 공급설비 사양 및 연료공급흐름에 근거한다. 현재 국내의 경우 TTS 벙커링 시 활용되는 공급설비를 Fig. 5의 상용 트럭으로 특정할 수 있으며 따라서 수급대상 선박과 무관하게 연료공급흐름의 일반화가 가능한 것으로 판단된다 (최대 연료공급흐름).
- 확정론적 누출크기 선정: 결과기반접근법을 활용한 안전구역 배치 시 대표 누출 시나리오에 따른 누출 영향이 평가되게 되며 이때 누출 크기 선정을 그 핵심 요소로 볼 수 있다. 현재 LNG 벙커링 시 적정 누출 크기 선정 관련 참고 자료는 극히 제한적인 한편 SGMF 지침 - 연료공급선 6 %의 경우 산업계 전반적으로 통용되며 해외 각종 LNG 벙커링 작업 시 활용되고 있다. 확정적 누출 크기 선정에 관한 별도 대안이 존재하지 않는 상황에서 해당 방안이 최선으로 판단된다.
- 수평 누출 방향 선정: 안전구역 배치 절차의 “누출, 기화 및 가스 확산 모사” 단계에서 단일 수평 방향 누출 및 이에 따른 가연성 가스 최대 확산 거리가 식별되었으나 “안전구역 배치” 단계에서는 해당 거리를 반경으로 지나는 원형 안전구역이 생성되었다. 실제 누출 시 모든 수평 방향 누출 가능성을 고려하기 위함이며 이를 통해 누출 현상의 불확실성을 해소할 수 있을 것으로 판단된다. 결과기반접근법의 경우 SIMOPS 상황을 배제함에 따라 수직 방향에 존재할 수 있는 크레인 작업 등으로 인한 점화원을 배제, 별도 수직 방향 누출은 고려되지 않았다.
- 트럭 측 누출 지점 선정: 트럭 연료공급선 연결부를 누출 지점으로 간주, 해당 지점으로부터의 누출 및 가연성 가스 확산에 의한 안전구역 배치안이 도출되었다. 이는 항구, 터미널 등의 벙커링 작업장소 근접 타 작업 인원 및 외부 상업, 거주구역 인원을 고려, 누출 사고 시 해당 인원들의 비상 대응 및 안전 확보가 미흡할 수 있음을 고려하기 위함이다. 선박의 경우 필수 인원 출입 및 작업 제한 등 벙커링 작업 조치에 따른 안전이 확보됨과 더불어 보안구역 등 기타 벙커링 관리구역 적용을 통해 가연성 가스 확산 시 해상 방향의 영향이 제한적일 것으로 간주, 선박 연료공급선 연결부에서의 누출 영향이 배제되었다. 참고로 선박 측 연결부에서의 누출 영향이 고려될 경우의 안전구역 배치안은 Fig. 8과 같이 도출될 수 있다.
- 모사 도구: 누출 ~ 확산 모사에 활용된 PHAST의 경우 각종 CFD 도구 활용 시에 비해 보수적인 가스 확산 결과를 도출할 수 있음이 확인된다 (Carboni et al., 2022; Gerbec et al., 2021). 이는 국내 TTS 벙커링 시 벙커링 작업 주체로 하여금 직관적인 안전구역 배치를 지원함과 동시에 보수적인 안전환경을 조성하기 위한 본 연구의 목적에 부합할 수 있다.

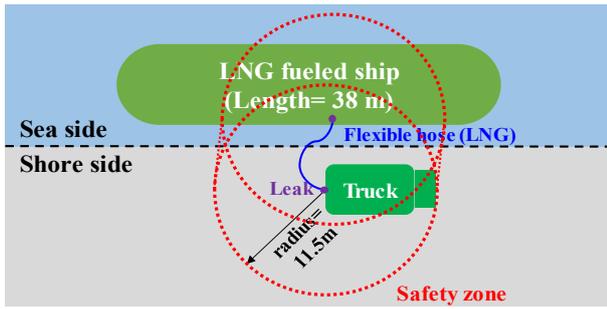


Fig. 8 Safety zone layout with consideration of leakage at the connection point of the receiving ship

연료공급흐름의 일반화 및 누출 시나리오 선정 시 일련의 표준화를 거쳐 도출된 11.5 m 반경의 원형 안전구역 배치 기준은 국내 TTS 벙커링 환경에 범용적으로 활용될 수 있으며 향후 공급설비, 즉 트럭의 신규 사양이 도입될 시 해당 공급 특성을 고려한 배치 기준이 추가될 수 있을 것으로 판단된다. 참고로 현재 선박으로의 다수 트럭을 활용한 동시 LNG 연료공급 작업 환경 조성을 위한 법제도 개정이 검토되고 있으며 트럭 및 선박 간 연료공급선 연결이 4 inch 연결부의 매니폴드(manifold, 집합설비)를 통해 이뤄질 것으로 예상된다. 이때 4.1절의 절차 적용을 통한 안전구역 배치 기준은 약 23 m 반경으로 도출될 수 있으며 이는 다수 트럭 공급이 수행되고 있는 해외의 일부 항구에서 제시하는 안전구역 기준과 (20 ~ 25 m) 유사한 수준임을 확인할 수 있다 (CCNR, 2021; Port of Gothenburg, 2022). 아래 Fig. 8과 9는 다수 트럭 공급 시의 누출 영향 및 안전구역 배치안을 나타내며 Table 2는 본 연구를 통해 제안되는, 국내 TTS 벙커링 시 공급설비 조건에 따른 안전구역 배치기준을 나타낸다.

Table 2 Recommended standard of the safety zone layout for the domestic LNG TTS bunkering

Supplying facility	Only truck	With manifold
Maximum pressure	6 barg	
Hose diameter	3 inch	4 inch
Leak hole size	4.5 mm	6 mm
Layout radius	11.5 m	23 m

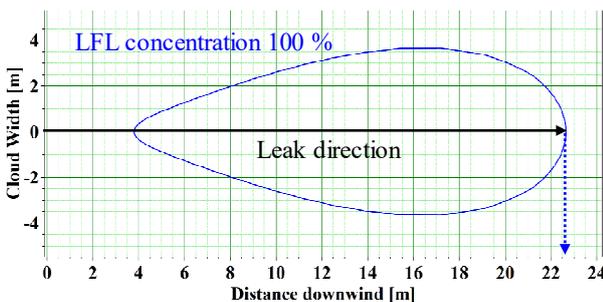


Fig. 9 Maximum distance of flammable gas dispersion in case of multiple truck transfer with the manifold system

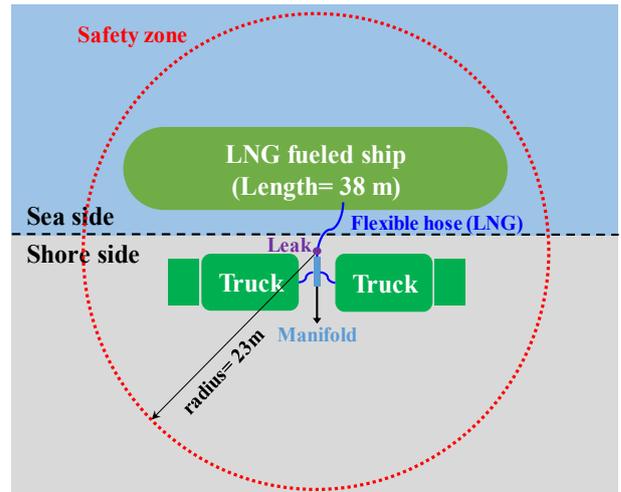


Fig. 10 Example safety zone layout in case of multiple truck transfer with the manifold system

5. 결론

본 연구에서는 LNG 벙커링 시 안전구역 개념 및 배치 현황에 대해 살펴보았으며 국내 TTS 벙커링 환경을 고려한 안전구역 배치 기준이 제안되었다. 본 연구 결과는 다음과 같이 요약된다:

- LNG 벙커링 시 안전구역 배치를 통한 안전방벽 구축이 필수적이나 국내의 경우 TTS 벙커링을 위한 안전기준 내 명확한 안전구역 개념 및 배치 기준이 정립되어 있지 못한 상황이다.
- 점차 증가될 국내 TTS 벙커링 수요에 대비, 다양한 작업장 환경에 공통적으로 적용될 수 있는 안전구역 배치 기준이 검토, 제안되었다:
 - ISO 결과기반접근법에 근거, 해당 방법론의 직관적 활용을 위한 절차가 개발되었으며 국내 TTS 벙커링 환경을 고려한 안전구역 배치안이 도출되었다.
 - 벙커링 공급설비의 일반화 및 이에 따른 일련의 안전구역 배치 절차 표준화를 통해 도출된 안전구역 배치안의 범용적 활용이 제안되었다.
- 제안된 안전구역 배치 기준의 경우 일부 가정 및 현행 국내 TTS 벙커링 환경의 특정 조건을 고려하여 도출되었으며 실제 법제도 상의 안전기준으로 활용되기 위해 이들 근거 적정성에 대한 지속적인 논의/검토 필요성이 존재한다. 본 연구에서 표준 공급설비로 고려된 트럭 외 상이한 사양의 트럭 도입 및 운용이 예상될 경우 해당 조건에 따른 별도 안전구역 배치기준이 추가될 수 있다.

본 연구에서 제안된 LNG 벙커링 안전구역 배치기준의 경우 벙커링 작업 주제로 하여금 보다 직관적인 동시에 보수적인 안전거리를 확보하도록 하며 이는 국내 TTS 벙커링 작업장의 근본적인 안전방벽 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Carboni, M., Pio, G., Mocellin, P., Vianello, C., Maschio, G. and Salzano, E., 2022. Accidental release in the bunkering of LNG: Phenomenological aspects and safety zone. *Ocean Engineering*, 252(2022), 111163.
- CCNR, 2021. *Standard for a LNG bunker checklist – Bunker station to ship*. Strasbourg: Central commission for the Navigation of the Rhine (CCNR).
- CVI, 2022. *Specification of LNG Tank-lorry Truck* [Online] Available at: <http://etrucks.co.kr/> [Accessed 30 July 2022].
- DNV, 2021. RP-G105: *Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities*, Oslo: Det Norske Veritas (DNV).
- DNV, 2022a. *Alternative Fuels Insight Platforms: LNG Statistics* [Online] Available at: <http://afi.dnv.com/> [Accessed 30 July 2022].
- DNV, 2022b. *User Manual – Process hazard analysis software (PHAST)*, Oslo: Det Norske Veritas (DNV).
- EMSA, 2018. *Guidance on LNG bunkering to port authorities and administrations*. Lisboa: European Maritime Safety Agency (EMSA).
- Gerbec, M., Vidmar, P., Pio, G. and Salzano, E., 2021. A comparison of dispersion models for the LNG dispersion at port of Koper, Slovenia. *Safety Science*, 144(2021), 105467.
- IACS, 2017. *Rec.142: LNG bunkering guidelines*, London: International Association of Classification Societies (IACS).
- IPA, 2022. *LNG fueled ship: Eco-nuri*. Incheon Port Authority.
- IEC, 2020. IEC 60079-10-1: *Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres*, Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC).
- ISO, 2015. *ISO 16903: Petroleum and natural gas industries – characteristics of LNG, influencing the design, and material selection*, Geneva: International Organization for Standardization (ISO).
- ISO, 2021a. *ISO 20519: Ships and marine technology – specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels*, Geneva: International Organization for Standardization (ISO).
- ISO, 2021b. *ISO/TS 18683: Guidelines for safety and risk assessment of LNG fuel bunkering operations*, Geneva: International Organization for Standardization (ISO).
- Korea LNG Bunkering (KOLB), 2022. *KOLB business introduction* [Online] Available at: <http://kolb.co.kr> [Accessed 30 July 2022].
- Jeong, B., Lee, B.S., Zhou, P. and Ha, S.M., 2017. Evaluation of safety exclusion zone for LNG bunkering station on LNG-fuelled ships. *Journal of Marine Technology*, 16(3), pp.121–144.
- Jeong, B., Lee, B.S., Zhou, P. and Ha, S.M., 2018. Determination of safety exclusion zone for LNG bunkering at fuel-supplying point. *Ocean Engineering*, 152, pp.113–129.
- 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, 107804.
- MOF, 2020. *Act on the promotion of development and distribution of environment-friendly ships*, Republic of Korea: Ministry of Ocean and Fisheries.
- MOF, 2021. *Act on the arrival and departure of ships*, Republic of Korea: Ministry of Ocean and Fisheries.
- MOTIE, 2021. *Urban Gas Business Act*, Republic of Korea: Ministry of Trade, Industry and Energy.
- Park, S., Jeong, B., 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*, 13(sup1), pp.312–321.
- Park, S., Kim, S. and Paik, J.K., 2020. Safety-zone layout design for a floating LNG-fueled power plant in bunkering process. *Ocean Engineering*, 196(2020), 106774.
- Park, S. and Paik, J.K., 2022. A Hybrid Method for the Safety Zone Design in Truck-to-Ship LNG Bunkering. *Ocean Engineering*, 243(2022), 110200.
- Port of Gothenburg, 2022. *Methanol bunker operating regulations*, Gothenburg: Port of Gothenburg.
- SGMF, 2018. *FP02-01: Recommendation of Controlled Zones during LNG bunkering*, London: Society for Gas as a Marine Fuel (SGMF).

