

ALOHA & Bow-tie 기법을 이용한 메탄올 추진 선박에서의 메탄올 저장탱크 누출 시 위험도 평가

이정학* · 지재훈**†

* 국립목포해양대학교 대학원, ** 국립목포해양대학교 해양경찰학부 교수

A Study on Risk Assessment of Leaking Methanol Storage Tank on Methanol Fueled Ship Using ALOHA & Bow-tie Method

Jeonghak Lee* · Jaehoon Jee**†

* Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Professor, Division of Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요약 : 본 연구에서는 ALOHA와 Bow-tie를 활용하여 메탄올 추진 선박의 저장 탱크가 울산항에서의 누출 시나리오를 가정하여 위험도 평가하였다. ALOHA를 이용하여 대안 및 최악의 시나리오를 산정하여 피해 범위를 예측하였다. 독성 영향 범위의 결과(ERPG-2 기준)로는 대안(629m), 최악(817m)로 육상 탱크 터미널의 부두 시설 및 거주 지역까지 포함되는 것으로 확인되었다. 인화성 영향 범위(LEL 10% 기준)는 대안(126m), 최악(218m) 선박에서만 발생하였으며, 열복사 영향 범위(5.0kW/m² 기준)는 대안(56m), 최악(56m)로 선박에서만 영향을 미쳤다. 또한, 전문가 집단을 구성하여 Bow-tie 기법을 통하여 예방 대책과 완화 대책을 평가하였다. 대책 유형 분류에서는 Hardware와 Human으로 구분되었으며, 안전 유효성과 위험 심각성의 결과에서는 “Gas Freeing System”, “Ventilation System”, “Fire-Fighting System”이 가장 높은 평가를 받았다. 위의 평가를 토대로 위험도 평가를 도식화하였다.

핵심용어 : 메탄올, Bow-tie, ALOHA, 선박, 위험도평가, 국제해사기구

Abstract : In this study, the risks of the leakage of a methanol-fueled ship's storage tank at Ulsan Port are evaluated using ALOHA and Bow-tie methodologies. ALOHA is utilized to estimate the damage range by calculating both the worst and alternative scenarios. The results of the toxic area of the vapor cloud range (ERPG-2 standard) indicate that the alternative (629 m) and worst (817 m) scenarios include the pier facilities of the onshore tank terminal and residential areas. The flammable area of the vapor cloud range (LEL 10% standard) is observed only on the ship with the alternative (126 m) and worst (218 m) scenarios. The thermal radiation level of concern (5.0 kW/m² standard) affects only the ship in both the alternative (56 m) and worst (56 m) scenarios. Additionally, preventive and mitigation measures are evaluated by a panel of experts using the Bow-tie method. The measures are classified into “hardware” and “human” categories, with “gas-freeing system,” “ventilation system,” and “fire-fighting system” receiving the highest ratings for safety effectiveness and risk severity. Based on the evaluation above, a risk-assessment diagram is developed.

Key Words : Methanol, Bow-tie, ALOHA, Ship, Risk Assessment, International Maritime Organization

1. 서론

2023년 10월에 진행된 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 ‘IMO’라 칭함)의 해양환경보호위원회(Maritime Environment Protection Committee, 이하 ‘MEPC’라 칭함) 80차

회의에서는 기존보다 강화된 “2023 IMO Strategy of GHG Emissions from Ships” 감축 전략을 제시하였다.

2008년 배출량 대비 2030년까지 국제 해운으로부터의 연간 온실가스 배출량을 최소 20% 감축하고, 30%까지 감축하도록 노력하기로 하였다. 또한 2040년까지 연간 온실가스 배출량을 최소 70% 감축, 80%까지 감축하도록 권고하였다.

* First Author : jhlee43@mmu.ac.kr, 061-240-7491

† Corresponding Author : jhjee@mmu.ac.kr, 061-240-7208

Table 1. Emission Reduction Compared to Heavy Fuel Oil (source: MAN energy solutions, 2021)

Energy Storage Type/Chemical Structure	Emission Reduction Compared to HFO TierII [%]			
	SO _x	NO _x	CO ₂	PM
Methanol [CH ₃ OH] (65 °C)	90~97	30~50	11	90

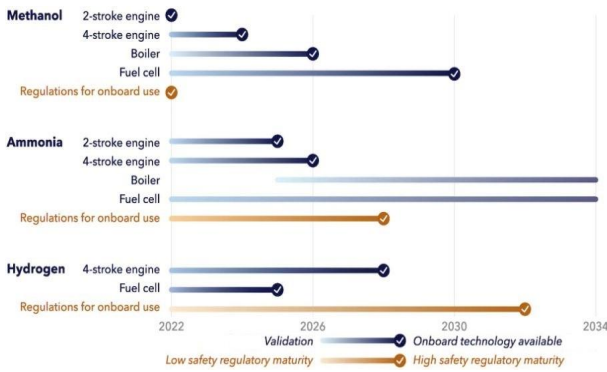


Fig. 1. Timeline for technology (source: DNVGL).

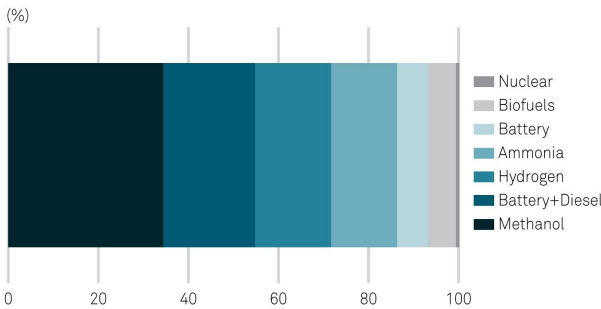


Fig. 2. Alternative shipping fuels outlook-2030 (source: S&P global commodity insights).

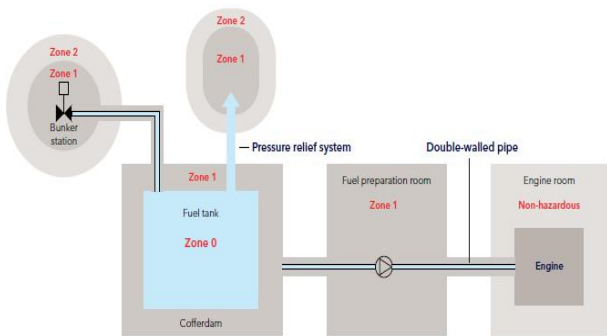


Fig. 3. Dual-fuel methanol ships on the water (source: DNVGL).

특히 2050년까지 국제해운산업 영역에서 온실가스 순 배출량을 “Net-Zero”에 도달하는 계획을 수립하였다. 이에 따라 무탄소 연료인 수소와 암모니아, 저탄소 연료인 메탄올,

LNG 등이 크게 주목을 받고 있다.

메탄올 추진 선박의 경우에는 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 2행정 기관은 이미 개발이 완료되어 선박 엔진으로 사용 중이다. 또한 IMO의 “Interim Guidelines for The Safety of Ships using Methyl/Ethyl Alcohol as Fuel”, Lloyd’s Register의 “Rules for the Classification of Methanol Fueled Ships”와 같이 국제기관에서 이미 규정을 마련하였다.

따라서 메탄올 연료 추진 선박은 LNG 선박과 마찬가지로 현재 운용할 수 있는 친환경 선박 중의 하나이다. Fig. 2의 S&P Global(2023)에서는 2030년까지 약 30% 이상 메탄올 연료로 대체될 것으로 전망하고 있다. 현재 수주되고 있는 선종은 컨테이너 선박이 약 60%로 과반수를 차지하고 있고, 탱커 선박이 25%를 차지하고 있으며, 최근 5년 이내에 상당 부분 인도되어 운항할 것으로 전망하고 있다(Lloyd’s Register, 2024).

특히 메탄올은 상온의 환경 조건에서 액체상태로 보관할 수 있으므로 기존 연료 탱크에 저장할 수 있는 장점이 있어 LNG 또는 암모니아 연료보다 상대적으로 취급이 쉬우며 (ABS, 2021), Table 1과 같이 메탄올은 기존 선박 연료유(중유)보다 SO_x 및 PM은 90% 이상, NO_x는 최대 50%, CO₂는 약 10%의 감축된다. 그러나 메탄올의 독성과 낮은 인화점으로 취급 시 유의사항이 있다.

DNVGL(2023)에서 제공한 Fig. 3은 메탄올 추진 선박에서의 메탄올 연료 계통에 대한 위험도를 보여주고 있으며, Zone “0”부터 Zone “2”까지 구분하고 있다. 메탄올 연료가 직접 저장되는 탱크와 이송 배관은 가장 위험성이 높은 수준, 즉 폭발 분위기 조성이 가장 쉽고, 화재의 위험성이 가장 높은 곳으로 Zone“0”영역이며, 메탄올 저장탱크를 둘러싸고 있는 빈공간, 평형수 탱크 및 공기관은 폭발 가능성이 농후한 곳으로 Zone“1”영역, 마지막으로 저장탱크 공기관으로부터 1.5m를 초과, 3m 이내의 영역은 폭발가능성이 어느 정도 있는 곳으로 Zone“2”영역으로 설정한다.

따라서 이러한 위험성을 고려하여 본 연구에서는 메탄올 저장 탱크의 누출 시나리오를 메탄올 추진 선박의 충돌 사고로 가정하여 피해 예측 프로그램인 ALOHA를 통하여 위험 범위를 산정하고, Bow-tie 기법을 활용하여 전문가 집단으로부터 위험 인자를 식별하여 위험성 평가 결과를 도식화하고자 한다.

ALOHA & Bow-tie 기법을 이용한 메탄을 추진 선박에서의 메탄을 저장탱크 누출 시 위험도 평가

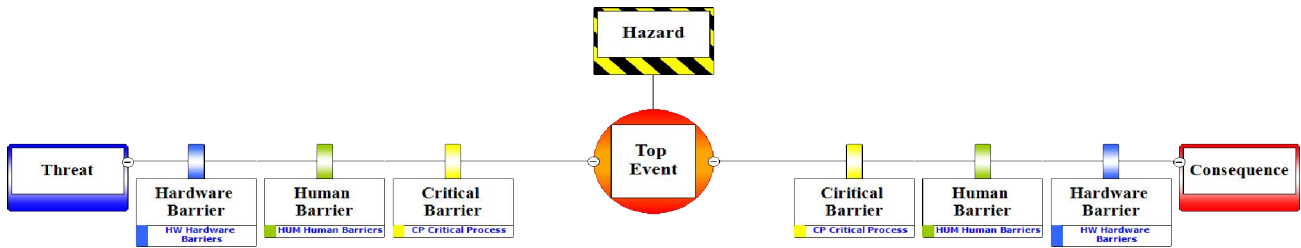


Fig. 4. Flowchart of General Bow-tie Diagram.

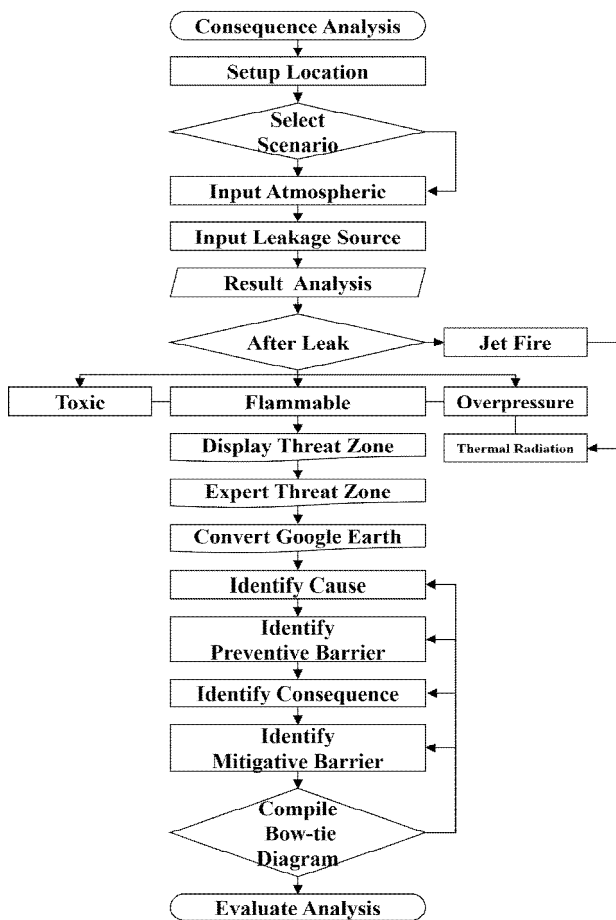


Fig. 5. Flowchart for sequence of ALOHA & bow-tie.

2. 연구 방법

2.1 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmosphere)

ALOHA는 미국 해양대기국(NOAA)와 미국 환경보호청(EPA)에서 공동 개발한 피해예측 프로그램으로 산업 분야에서의 잠재적 위험에 대응하기 위해 고안되었다.

이 프로그램은 독성물질 누출, 화재/폭발과 같은 사고 발생 시 대처하기 위해 사고 영향 범위를 예측하고, 풍속, 풍

향, 대기안정도 등의 기상 조건을 고려하여 사고 영향의 전과 경로를 파악할 수 있다. 또한 액면(Pool), 용기(Vessel), 배관(Pipe), 탱크(Tank)에서의 사고 유형을 평가할 수 있기에 적절한 대응 조치를 취할 수 있어서 유용한 프로그램으로 활용되고 있다.

관련 연구 사례를 살펴 보면, Jeong et al.(2023)은 복합화력 발전소 친환경 연료 적용을 위하여 수소 및 암모니아에 대한 정량적 평가를 수행하였다. ALOHA를 통해서 위험도 평가를 수행하였으며, 최악의 시나리오 및 대안의 사고 시나리오의 위험 결과를 각각 비교 및 분석하였다.

또한, Jeong and Baik(2018)에 따르면 여수 공단에서 화학공장의 염소 누출에 의한 피해 영향 모델링을 ALOHA를 통해서 대기 예측을 진행하였다. 가압 염소포화액체 저장탱크에서 염소를 2상 흐름 연속 누출로부터 유해위험거리를 정량적으로 모델링하였으며, 그 결과를 Google Earth를 통해서 시각화하였다.

Jeon et al.(2024)는 머스킹업 발전소 수소 폭발 사고와 K테크노 파크 수소 폭발 사고 사례를 Bow-tie 위험성 평가를 정성적 방법으로 진행하여 사고 원인을 식별하였고, ALOHA를 통해서 정량적으로 위험 범위를 산정하였다.

2.2 Bow-tie 기법

Bow-tie 기법은 위험도를 도식화하여 평가하는 방법론이다. 이 위험도 평가는 호주 대학의 위험도 분석 수업에서 처음 제안되었다. Bow-tie 기법은 나비 넥타이 그림의 가운데 부분이 탑 이벤트(Top Event)이다.

Fig. 4의 오른쪽은 사건수 분석(Event Tree Analysis)이며, 왼쪽은 결함수 분석(Fault Tree Analysis)을 의미한다. Bow-tie 도면은 위험 요소, 발생 프로세스, 사고 통제 조치를 시각적으로 보여줄 뿐만 아니라 위험 평가, 분석 및 통제 조치에 대한 데이터베이스를 구축할 수 있다.

따라서 Bow-tie 방법은 산업 재해의 안전 분석 및 위험 관리에 널리 사용되고 있으며, 특히 정유회사인 Royal Dutch Shell에서 이 기법을 꾸준히 차용 중이며, 지속해서 연구하고 있다.

본 연구에서는 메탄을 추진 선박이 울산항에 정박하고 있는 것으로 가정하여 Fig. 5처럼 대상 선박의 메탄을 저장 탱크 누출 시의 독성, 인화성, 복사열에 대한 피해 예측 범위를 산정하고 Google Earth를 통해 울산항에서의 위험 범위를 분석하고자 한다. 또한 Bow-tie 기법을 통하여 시나리오로 구성하여 Hardware, Human, Process로 구분하고, 안전 유효성 및 위험 심각성을 평가하여 완화/예방 대책을 제시하고자 한다.

3. 사고 시나리오 설정

3.1 장소 설정

울산항만공사(이하 “UPA”라 칭함)에 따르면, 울산항은 국내 최대 메탄을 수입, 취급 항만으로서 연간 수입량의 약 120만 톤(약 61%)을 처리하고 있으며, 상업용 탱크 터미널 3개社에서 약 15만 kl의 저장 인프라를 보유하고 있다(UPA, 2023).

3.2 선박 설정

Methanex의 자회사인 Waterfront Shipping은 메탄올과 청정 석유 제품을 운송하는 글로벌 해상 운송 전문 기업이며, 메탄올 전용 선박과 메탄올 추진 선박을 다수 관리하고 있다. Table 2과 Table 3에서 확인할 수 있듯이 LEIKANGER의 경우 국내 조선소에서 건조한 세계 최초 메탄올 추진 선박이다. 2016년에 건조한 이 선박은 12개의 화물 탱크가 있으며, 약 50,661MT(Metric Ton, 이하 “MT”라 칭함)를 선적할 수 있다(Waterfront Shipping, 2024).

3.3 사고 유형 설정

Fig. 6과 Fig. 7은 보험 회사인 AGCS(2023)에서 제공한 선박 사고 통계를 보여주고 있다. 2022년 기준으로 총톤수 100톤 이상 선박에서 발생한 사고는 총 3,032건이며, 충돌과 좌초 및 접촉으로 인한 사고는 644건으로 약 21%를 차지하였다. 또한, 최근 10년간 선박의 충돌, 좌초 및 접촉의 사고 수는 27,477건 중에서 8,014건으로 약 29%의 선박 사고 비율을 보여주고 있다.

3.4 시나리오 기준

한국산업공단에서 제공한 “최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 지침”(KOSHA, 2020), “사고피해예측 기법에 관한 기술지침”(KOSHA, 2023)을 참조하여 Table 5과 같은 사고 시나리오를 구성하였다. 또한, 독성의 영향, 인화성의 영향, 복사열의 영향을 Table 6~Table 8에 따라 피해 범위의 기준으로 하였다. Table 6은 미국산업위생학회(AIHA)에서 발표한 메탄올의 Emergency Response Planning Guideline(이하 “ERPG”라 칭함)이며, 화학물질 누출에 따른 지역, 사회의 사고 대처

에 대한 지침이다.

Table 7는 증기운의 인화성 영향 범위 기준이다. ALOHA에서는 Lower Explosion Limit(이하 “LEL”로 칭함)의 10%, LEL의 60% 기준으로 산정하고 있다. 일부 연구에서 평균 농도가 LEL 60% 이상인 곳에서 “Flame Pockets”이 발생할 수 있으므로 이 기준으로 하고 있다. 또한 LEL의 10%는 미국 구조대에서 하는 일반적 위험 기준으로 인화성 Level of Concern(이하 “LOC”로 칭함)으로 사용하고 있다.

Table 8은 복사열의 피해 범위를 나타낸 것이며, ALOHA의 자체 기준을 따랐다. ALOHA에서 표시되는 위험 구역은 열 복사량 수준을 나타내며, 해당 열 복사량 수준에 노출된 사람들에게 미치는 영향을 나타내지만, 항만 주변 작업자가 1분 이내에 피난처를 찾을 수 있는 상황을 가정한다.

3.4.1 대기 환경

정확한 위험 범위를 산정하기 위해서는 해당 지역의 대기 환경 조건을 반영하여야 한다. Table 4는 최근 3년간의 울산 지역 기상 조건을 적용하였다.

3.4.2 화물 온도

메탄올 보관은 18~25℃이고, 규정에 따라 보관하는 것을 권고하고 있다(Agilent, 2024). 본 연구에서는 대상 선박의 화물 탱크에 저장된 메탄올은 권고 온도의 중간값인 21.5℃로 선정하였다.

3.4.3 누출공 크기

Table 3에서 보는 바와 같이 Framo(2023) 제조사에서 제시한 600m³/h 펌프 용량에 대한 타입은 SD200과 SD250이며, 이 모델에 대한 Cargo Flange는 8in와 10in이다. API 581에 따라 누출공의 크기는 최악의 시나리오와 대안 시나리오에서 10in로 선정하였다.

3.5 시나리오 가정

i) 울산항에서의 선박 대 선박 또는 부두 시설의 충돌로 인한 대상 선박의 메탄올 저장 탱크의 파공으로 인한 누설하는 것으로 가정하였다.

ii) Slop Tank를 제외한 12개의 화물 탱크는 50,661.2MT를 선적할 수 있고, 화물 탱크당 약 4,221.75MT가 선적되어 있으며, 이 중 하나의 화물 탱크에서 누설하는 것으로 가정하였다.

iii) Max./Min. Draft인 12.1m 또는 7.2m에서 누설하는 것으로 가정하였다.

iv) 기타 사항은 3.4. 항을 참조한다.

ALOHA & Bow-tie 기법을 이용한 메탄올 추진 선박에서의 메탄올 저장탱크 누출 시 위험도 평가

Table 2. Ship's Particular for M/T LEIKANGER

Item	Description
Dead Weight Tonnage [MT]	49,999
Year Built	2016
Length Over All [m]	186.06
Gross Tonnage [MT]	30,945
Class	DNVGL

Table 3. Capacity plan for LEIKANGER

Item	Description
Number of Tanks over 3,000m ³	12
Cubic Capacity (at 98%) [MT]	50,661.2
Cargo Pumps Specification [m ³ /h]	600

Table 4. Weather Condition in Ulsan for Past 3 Years

Category	Result
Average Temperature [°C]	19.5
Average Humidity [%]	65
Average Wind Speed [m/s]	2.1

Table 5. Options for Accident Scenarios

Title	Scenario Option	
	Worst	Alternative
Wind Speed [m/s]	1.5	2.1
Air Temperature [°C]	25	19.5
Cargo Temperature [°C]	21.5	
Stability	F	D
Humidity [%]	50	65
Leakage Hole Size [in]	10	
Height [m]	7.2	12.1
Cargo Volume [MT]	4,221.75	

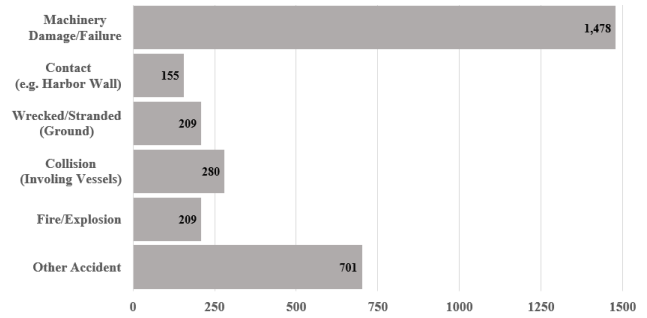


Fig. 6. Top cause of incidents for vessels during 2022.

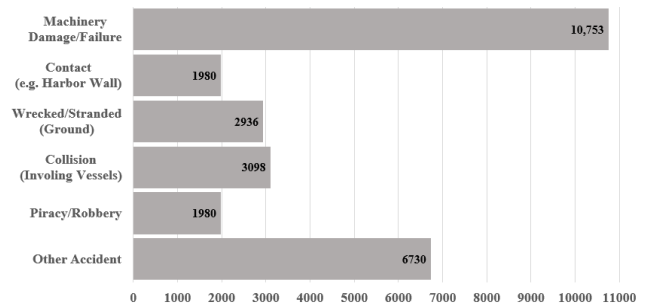


Fig. 7. Top cause of incidents for vessels over 100GT over from 2013 to 2022.

4. 사고 시나리오 결과

4.1 누출 증기운의 독성영향 범위

증기운의 독성 영향 구역은 200ppm, 1,000ppm, 5,000ppm으로 나타내었다. Table 6은 미국산업위생학회(AIHA)에서 발표한 메탄올의 ERPG 기준 범위이다. Table 9, Table 10와 같이 노란색 범위는 200ppm의 영향 범위이며, 주황색 범위는 1,000ppm의 범위, 빨간색은 5,000ppm의 독성 영향 범위이다. 5,000ppm의 독성영향 구역은 부두 시설까지 포함되는 것으로 나타났으며, 1,000ppm의 범위는 대안 시나리오에서 629m, 최악 시나리오에서 817m로 육상 터미널의 상당 부분이 영향이 미치는 것으로 나타났다.

4.2 누출 증기운의 인화성 영향 범위

증기운의 인화성 영향 범위는 메탄올의 LEL의 10%, LEL의 60%로 나타낸다. 대안 시나리오, 최악 시나리오에서는 LEL의 60%의 범위를 초과하는 영역은 나타나지 않았다. 또한 LEL의 10%에서는 두 개의 시나리오의 값이 각각 217m, 126m였으며, 모두 선박 내에서만 증기운의 인화성 영향 범위에 포함되었으나 육상 부두 시설과 터미널 시설까지 영향을 미치지 않았다.

Table 6. Effect of Toxic Area of Vapour Cloud

Rank	Color	Value	Description
ERPG-1	Yellow	200ppm	Maximum airborne concentration without life-threatening effects
ERPG-2	Orange	1,000ppm	Maximum airborne concentration without irreversible or serious health effects
ERPG-3	Red	5,000ppm	Maximum airborne concentration without more than mild, transient adverse health effects or objectionable odor perception

Table 7. Effect of Flammable Area of Vapour Cloud

Rank	Color	Description
LEL 10%	Yellow	Common Threat Level
LEL 60%	Red	Flame Pockets

Table 8. Effect of Thermal Radiation Level

Rank	Color	Description
2.0kW/m ²	Yellow	The degree to which one feels pain within 60 second
5.0kW/m ²	Orange	Second-degree burns within 60 seconds
10.0kW/m ²	Red	Likelihood of dying within 60 seconds

Table 9. Results for Worst and Alternative Scenario by ALOHA

	Worst Scenario	Alternative Scenario
Toxic Area of Vapor Cloud	ERPG-1	2.2km
	ERPG-2	817m
	ERPG-3	288m
Flammable Area of Vapor Cloud	LEL 10%	217m
	LEL 60%	LOC* was never exceeds
Thermal Radiation Level of Concern	2.0kW/m ²	82m
	5.0kW/m ²	56m
	10.0kW/m ²	42m

*LOC = Level of Concern

4.3 열복사 영향 범위

열복사로 인한 피해 영향 범위는 Table 8과 같다. 2.0kW/m²은 노란색, 5.0kW/m²은 주황색, 10.0kW/m²은 빨간색으로 표시하였다. Table 9, Table 10에서 확인할 수 있듯이 최악 시나리오와 대안 시나리오에 대한 피해 구간의 범위가 일치

하는 것으로 나왔다. 증기운의 인화성 범위보다 좁게 나타났다. 선박 일부에서만 피해 영향이 미쳤으며, 육상 시설은 포함되지 않았다. 2.0kW/m²일 때는 82m, 5.0kW/m²는 56m, 10.0kW/m²일 때에는 42m로 범위가 도출되었다.

ALOHA & Bow-tie 기법을 이용한 메탄올 추진 선박에서의 메탄올 저장탱크 누출 시 위험도 평가

Table 10. Result for Worst/Alternative Scenario by ALOHA

	Worst Scenario	Alternative Scenario
Toxic Area of Vapor Cloud		
Flammable Area of Vapor Cloud		
Thermal Radiation Level of Concern		

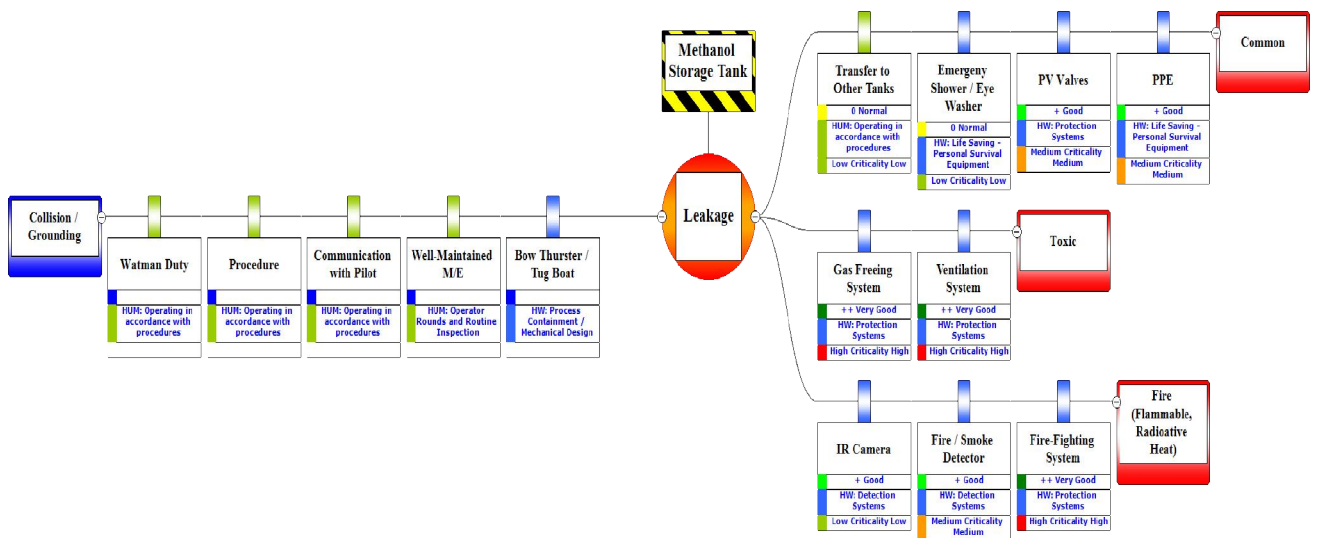


Fig. 8. Bow-tie Analysis for "Leakage" Risk Scenario.

Table 11. Evaluation List for Using Bow-tie

Evaluation Items	Level
Categorization for Preventive and Mitigative Barriers	Hardware(HW)
	Human(HUM)
	Critical Process(CP)
Preventive and Mitigative Effects	--(Very Poor)
	-(Poor)
	0(Normal)
	+(Good)
Criticality without Equipped Barriers	++(Very Good)
	Low
	Medium
	High

Table 12. Parameter List Regarding Methanol Storage Tank (source: IMO)

Parameter	Alarm	Automatic Shutdown of tank valve
High-Level Fuel Tank	○	X
High-High-Level Fuel Tank	○	X
Fire Detection at Tank Connection Space or Fuel Preparation Rooms	○	○
Vapour Detection in Cofferdams Surrounding Fuel tanks (One detector giving 20% of LEL*)	○	X
Vapour Detection in cofferdams Surrounding fuel tanks (Two detectors giving 40% of LEL*)	○	○
Liquid Leakage Detection in Protective Cofferdams Surrounding Fuel Tanks	○	X

*LEL = Lower Explosive Limit

5. Bow-tie를 이용한 위험도 평가

앞서 4장에서 시나리오 결과를 바탕으로 독성, 인화성, 복사열에 대한 위험 범위를 최악/대안 시나리오로 구분하였고, 이는 대상 선박에 포함되어 있었다. 다만, 육상 터미널의 경우 최악 시나리오에서 부두 시설과 거주지역이 일부 포함되었다.

따라서 메탄올 저장 탱크의 누출 시의 시나리오의 위험도 평가는 IMO(2020)의 “INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL”와 EMSA(2015) “Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping”의 자료를 참조하여 평가하였다.

Bow-tie 위험도 평가는 Table 11과 같이 진행하였다. 예방 대책과 완화 대책을 HW(Hardware), HUM(Human), CP(Critical

Process) 3개로 구성하여 분류하였다.

또한, Barrier의 안전 유효성을 평가하기 위하여 5단계 (Very Poor, Poor, Normal, Good, Very Good)로 구분하였다. Very Good에 근접할수록 해당 대책의 예방, 완화 효과가 높은 것으로 판단할 수 있다. 마찬가지로, 위험 심각성을 3단계(Low, Medium, High)로 구분하였으며, High에 근접할수록 해당 대책 요소의 미구비에 따른 사고의 피해 규모가 커질 수 있다(Jeon et al., 2024).

Fig. 8은 Bow-tie를 이용한 위험도 평가 결과를 보여주고 있다. 총 14개의 예방/완화 대책을 제시하였으며, 이 중에서 “HW” 부분이 9개, “HUM”이 5개로 분류되었다. 예방 대책에서는 “HUM”이 대부분을 차지하였으며, 완화 대책으로는 “HW”가 9개 중의 8개를 차지하였다.

안전 유효성에 관한 결과로는 독성에 의한 피해를 완화시키는 방법으로 “Gas Freeing System”, “Ventilation System”, 화

ALOHA & Bow-tie 기법을 이용한 메탄올 추진 선박에서의 메탄올 저장탱크 누출 시 위험도 평가

재의 경우에는 “Fire-Fighting System”을 예방 효과가 가장 큰 등급인 ++(Very Good)로 평가되었다. 개인 보호 장비(PPE)가 공통 피해에 의한 완화 대책으로 다른 대책보다 높게 평가되었다.

위험 심각성의 결과는 안전 유효성과 비슷하게 평가되었다. 공통 피해에 대해서는 High 등급으로 평가받은 항목은 존재하지 않았다. 그러나 독성에 의한 피해에서는 “Gas Freeing System”과 “Ventilation System” 모두 High 등급으로 평가받았으며, 화재 피해에서도 “Fire Fighting System”이 가장 높은 등급인 High로 평가되었다.

5.1 예방 대책

KMST(2023)에 따르면, 해기사의 경계소홀 및 항행법규 위반 등 인적과실로 인한 사고가 전체 선박 충돌사고의 98% 이상 차지하는 것으로 나타났다. 선박에서는 당직근무 준수, 법규 준수와 같이 절차대로 근무하는 것이 중요하다. 또한, 선박과 선원에 대한 개별적 조치도 중요하지만, 관련 절차가 시스템화 되어야 한다. 안전관리자 선임, 비상 절차, 선원의 배승 및 교육 등을 체계적으로 시스템적으로 검증하여야 한다. 또한, 하드웨어적으로는 선박에 설치되어 있는 Bow Thruster의 사용과 Tug Boat의 예선을 통해 부두 시설과의 충돌을 예방할 수 있다.

5.2 완화 대책

Top Event(Leakage)를 우측이 완화 대책을 의미하며, 하드웨어가 대부분 차지하였다. 일반적으로 좌초, 충돌로 인하여 누출 시 피해를 최소화할 수 있는 수단으로는 감지기(Detection System)와 보호장치(Protection System)와 같은 Hardware가 대다수 차지하였다.

또한 Table 12에서 보여주는 바와 같이 저인화점 연료를 사용하는 선박에 대한 선박 설계 완화 대책을 보여주고 있다. IMO(2020)에서는 메탄올 추진선박에서 연료 탱크로부터 누출이 발생해도 선박, 선원(탑승자) 및 해양에 대하여 위험에 노출되지 않도록 설계하여야 함을 권고하고 있다. Table 12는 메탄올 저장 탱크와 관련된 파라미터 목록을 보여주고 있다. 탱크 고수위 알람(High Level, High-High Level)을 통하여 넘침(Overflow)을 예방할 수 있으며, 연료 탱크 주위에 공소(Cofferdam)가 설치되어 있고, 내부에 증기감지기(Vapour Detector)를 통해 연료 탱크의 누설을 확인할 수 있다.

5.2.1 소화장치

내알코올(Alcohol-Resistant) 타입의 소화 시스템은 연료 유출이 예상되는 연료 탱크 구역을 덮어 화재를 최소화할 수

있다. 메탄올 연료 시스템이 포함된 모든 구역에는 화재 안전 시스템 코드(FSS Code)를 준수하는 고정식 화재 감지 및 화재 경보 시스템이 제공되어야 한다.

Fire Detector(화재 감지기)는 Table 12와 같이 연료 저장 탱크 구역에 설치되어야 하며, 화재탐지장치는 항해선교, 항상 사람이 있는 중앙제어장소, 안전 센터, 및 병커링 구역과 병커링 제어장소에서 가시, 가청 경보가 발할 수 있도록 설치하여야 한다(KR, 2020). Smoke Detector(연기 감지기)의 경우에는 자체 모니터링 유형이며, 독성과 인화성에 모두 적합해야 한다. 또한, 선박에는 국제 표준을 충족하고 독성에 적합한 휴대용 가스 감지기가 최소 2조 이상 보유하여야 한다(ABS, 2024).

5.2.2 가스감지장치

가스 감지 시스템에서는 탱크 내의 공기 흐름을 고려하여 결정하여 감지기 배치를 해야 한다. Table 11에 따르면, LEL의 20%에서는 음성 및 시각 알람만 작동되어야 한다. Shutdown System은 2개의 감지기에서 LEL의 40%에서 활성화되어야 한다. 미국 국립 직업안전위생연구소(NIOSH)에서는 메탄올의 즉시 생명과 건강에 위험한 농도(IDLH)를 6,000ppm으로 정의하였으며, 이는 메탄올의 LEL의 약 10%에 해당되므로 독성 감지 범위에 적합할 수 있다(ABS, 2024).

5.2.3 환기장치

환기 장치(Ventilation System)는 시간당 최소 6회의 공기 순환이 가능한 독립적인 기계식 환기 시스템을 갖추어야 하며, 저산소 경보(Low Oxygen Alarm) 및 가스감지경보(Gas Detection Alarm)를 설치해야 한다. 또한 화염 방지기(Flame Arrestor)가 설치된 경우 연료 탱크에 과압을 가하지 않고 설계 비율의 125%에서 충전할 수 있어야 한다(ABS, 2024)

5.2.4 가스프리장치

환기 시스템은 환기 목적으로만 사용하기 때문에 연료 탱크와 펌프실 환기 사이의 연결이 되어 있지 않다. 연료 탱크 내의 인화성 가스를 제거하기 위해 가스프리장치(Gas Freeing System), 불활성가스공급시스템(Inert Gas System)을 사용하며, 불활성 가스로 연료 탱크 내의 인화성 가스 함량이 2% 이하로 될 때까지 퍼지하는 방식이다. 최소 30m/s 또는 20m/s의 수직 유출 속도로 데크 레벨에서 최소 3m 위에 있는 배출구를 통해 배출된다(DNVGL, 2020).

5.2.5 기타

메탄올 화재는 불꽃이 보이거나, 화색이 나타나지 않는 등

육안의 확인이 어려운 부분이 있다. 따라서 주변의 온도를 통해 화재를 감지하여야 함에 따라 적외선 카메라(Infrared Camera)를 통해 열을 감지하여야 하므로 이 카메라의 사용은 필수적인 것이다. 메탄올 화재의 초기 단계에서 불꽃이나 열을 감지하여 조기 경보를 제공할 수 있기에 빠른 소화에 도움을 줄 수 있다.

또한, P/V Valve(High Velocity Pressure/Vacuum Valve)는 메탄올 저장 탱크 내의 압력 또는 진공을 제한하기 위해 각 연료 탱크에 설치되어 있다. 화재를 예방하기 위해 설치된 것은 아니지만, 연료 탱크 내부의 압력을 제어할 수 있으므로 독성과 화재의 영향을 완화할 수 있다.

6. 결론

ALOHA 피해 예측 프로그램을 통하여 메탄올 추진선박이 울산항에 입항했을 때의 충돌 시나리오를 구성하여 위험 영향 범위를 산정하였으며, Bow-tie 기법을 통하여 도식화하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. ALOHA를 이용하여 Toxic Area of Vapour Cloud, Flammable Area of Vapour Cloud, Thermal Radiative Level of Concern의 영향 범위를 산정하였다. Flammable Area of Vapour Cloud, Thermal Radiative Level of Concern에서 Leikanger 선박에서만 위험 영향 범위가 도출되었다. Toxic Area of Vapour Cloud는 최악 시나리오, 대안 시나리오에서 일부 육상 탱크 터미널의 부두 시설에서 ERPG-2 범위가 포함되었으며, ERPG-1 범위에서는 민간 거주 지역까지 영향 범위가 포함되었다.

2. Bow-tie 기법을 이용하여 충돌/좌초로 인한 메탄올 저장 탱크의 누출 시에 대한 위험도 평가를 하였다. 충돌 또는 좌초를 원인으로 하여 메탄올 저장탱크에서의 누출 시의 결과로 공통, 독성, 화재(인화성, 복사열)에 의한 피해로 구성하였다.

Bow-tie 기법을 통해서 해당 대책에 대한 분류를 진행하였으며, 예방 효과, 심각성에 대한 위험도를 평가하였다. 분류에 의한 결과로는 총 14의 대책 중 Hardware가 9개, Human이 5개로 평가되었으며, Hardware는 완화 대책을 대부분 구성하였으며, Human이 예방 대책을 구성하였다. 예방 효과에서는 “Gas Freeing System”, “Ventilation System”, “Fire-Fighting System”이 가장 높게 평가되었다. 심각성 평가에서도 예방 효과와 같이 3개의 Barrier가 가장 높게 평가되었다.

3. 본 연구는 ALOHA를 통하여 메탄올 추진 선박의 저장 탱크 누출 시의 시나리오를 가정하여 정량적으로 피해 범위를 산정하여 정량적으로 표현하였다. 독성, 인화성, 복사열

의 피해 범위에 선박이 모두 포함되어 있었으며, 위험도 평가를 Bow-tie 기법을 통하여 반정성적으로 진행하여 도식화할 수 있었다.

Reference

- [1] ABS(2021), METHANOL AS MARINE FUEL. pp. 1-28.
- [2] ABS(2024), Methanol and Ethanol Fueled Vessels. pp. 1-81.
- [3] AGCS(2023), Safety and Shipping Review 2023. pp. 1-44.
- [4] Agilent(2024), SFC Caffeine in Methanol Standards. pp. 1-41.
- [5] DNVGL(2020), RULES FOR CLASSIFICATION Ships Part 6 Additional class notations Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. pp. 1-377.
- [6] DNVGL(2023), Maritime Forecast to 2050. pp. 1-84.
- [7] EMSA(2015), Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. pp. 1-183.
- [8] FRAMO(2023), CARGO PUMPING SYSTEM., pp. 1-17.
- [9] IMO(2020), INTERLIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL. pp. 1-83.
- [10] Jeon, M. J., D. J. Jang, and M. C. Lee(2024), A Study on the Risk Assessment and Improvement Methods Based on Hydrogen Explosion Accidents of a Power Plant and Water Electrolysis System. Journal of Hydrogen and New Energy, 35(1), pp. 66-74.
- [11] Jeong, G. S. and E. S. Baik(2018), Damage Effects Modeling by Chlorine Leaks of Chemical Plants. FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, 32(3), pp. 76-87.
- [12] Jeong, S. Y., H. K. Park, and M. C. Lee(2023), Accident Impact Assessment Using the ALOHA Program for the Application of Hydrogen and Ammonia as Fuels of a Combined Cycle Power Plant. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, 47(12), pp. 647-661.
- [13] KMST(2023), Marine Accident Statistics Report 2023, pp. 1-196.
- [14] KOSHA(2020), KOSHA GUIDE P-107-2020, pp. 1-16.
- [15] KOSHA(2023), KOSHA GUIDE P-102-2021, pp. 1-103.
- [16] KR(2020), Guidance for Low Flashpoint Fuel Ships (LPG & Methyl/Ethyl Alcohol), pp. 1-82.
- [17] Lloyd's Register(2024), FUEL FOR THOUGHT Methanol, pp. 1-58.
- [18] MAN Energy Solutions(2021), The Methanol-fuelled MAN B&W LGIM, pp 1-24.

ALOHA & Bow-tie 기법을 이용한 메탄올 추진 선박에서의 메탄올 저장탱크 누출 시 위험도 평가

- [19] Methanex(2023), 2023 SUSTAINABILTY REPORT, pp. 1-103.
[20] UPA(2023), Retrieved from <https://www.upa.or.kr/> on May 2.
[21] Waterfront shipping(2024), LEIKANGER. Retrieved from <https://waterfront-shipping.com/leikanger/> on May 1.

Received : 2024. 06. 12.

Revised : 2024. 07. 29.

Accepted : 2024. 08. 29.