

Bow-Tie 기법을 이용한 메탄올 연료 선박의 병커링에 대한 위험도 평가

이정학 · 신주영 · 지재훈[†]
목포해양대학교(학생) · [†]목포해양대학교(교수)

Risk Assessment of Bunkering for Methanol-Fueled Ship Using Bow-Tie Method

Jeong-Hak LEE · Ju-Young SHIN · Jae-Hoon JEE[†]
Mokpo National Maritime University(student) · [†]Mokpo National Maritime University(professor)

Abstract

The International Maritime Organization has declared its commitment to reducing greenhouse gas emissions in the maritime sector, leading to a notable surge in orders for low-carbon fueled ships as the industry seeks cleaner alternatives. Specially, Methanol, recognized for its environmental friendliness, has emerged as a viable option. Nonetheless, methanol handling and bunkering entail inherent risks, particularly the threat of leakage because it handles to liquid at ordinary temperature. So, A systematic approach is utilized to identify and evaluate potential causes and consequences of leakage incidents during methanol bunkering. The paper establishes scenarios, pinpointing six principal causes of leakage, a significant precursor to methanol fires, overflow, other harms. Each scenario undergoes meticulous analysis to comprehend various contributing factors to risk. Results from the risk assessments for each scenario are presented, providing valuable insights for establishing safety guidelines and procedures for the secure handling and bunkering of methanol. This study's objective is to perform a qualitative risk assessment of methanol bunkering on ships, employing the effective bow-tie method renowned for its risk management effectiveness.

Key words : Methanol, Bow-tie, Bunkering, GHG, Risk assessment

I. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 'IMO'라 칭함)는 해사 환경 보호 위원회(Marine Environment Protection Committee, 이하 'MEPC'라 칭함)의 72차 회의(2018)에서 온실가스

감축을 위한 전략 계획을 수립하였다. 2050년까지 2008년 대비 국제 해운 온실가스를 50% 감축하는 것을 목표로 하였다(IMO, 2018).

MEPC 80차 회의(2023)에서는 기존보다 더욱 강화된 전략을 수립하였다. 국제 해운의 평균 운송업무량 당 CO_2 배출량을 2008년 대비 2030년

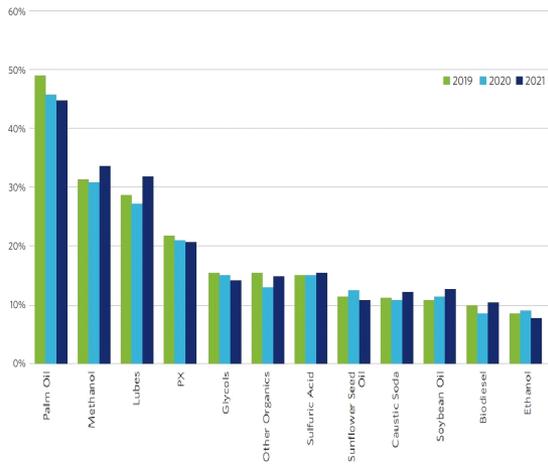
[†] Corresponding author : 061-240-7208, jhjee@mmu.ac.kr

* 이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.
(RS-2023-00256331, 선박배출온실가스(GHG) 통합관리기술개발)

* 이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.
(20220603, 안전기반 소형 수소추진선박 기술개발 및 실증을 위한 시스템 구축)

까지 40%를 저감하기로 하였다. 또한 온실가스 총배출량을 최소 20%로 설정하고, 30% 감축을 목표로 하는 감축 전략을 채택하였으며 2050년까지 ‘Net-Zero’를 목표로 하였다(IMO, 2023).

이에 따라 선박의 대표적인 친환경 연료인 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, 이하 “LNG”라 칭함), 메탄올, 암모니아, 수소 등의 연료가 주목받고 있다. 이 중에 메탄올은 LNG와 다르게 대기압 하에서 액체로 보관할 수 있으며 기존 연료 저장 탱크를 손쉽게 개조하여 사용할 수 있기에 경제적인 장점이 있다.



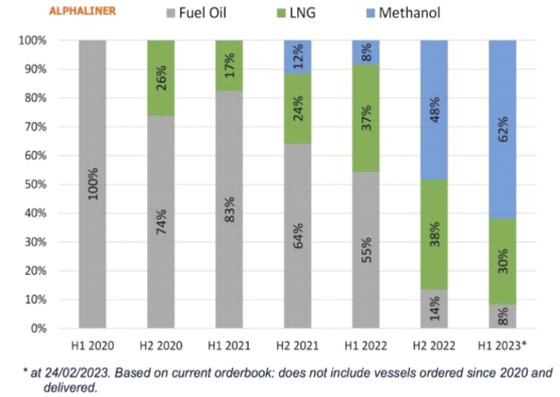
[Fig. 1] Most Globally Shipped Chemicals by Volume (Source: Methanol Institute).

[Fig. 1]에서 보는 바와 같이 메탄올은 산업 전반에 사용되고 있는 물질이다. Methanol Institute에 의하면 메탄올은 부피 기준으로 세계에서 2번째로 출하되는 화학 물질이다. 특히 메탄올 생산 및 공급 인프라는 전 세계적으로 잘 구축되어 있기 때문에 이용과 공급이 매우 용이하여 세계 주요 선사들에게 관심을 받고 있다.

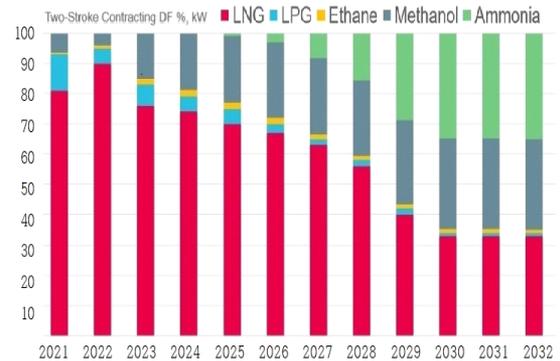
[Fig. 2]는 친환경 연료에 대한 선박 수주 추이를 보여주는 그래프이다. 메탄올 연료 선박의 수주가 2021년 하반기부터 증가하여 2022년 하반기 이후로 급증하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 메탄올 연료 선박은 컨테이너선으로 많이 발

주되고 있다.

[Fig. 3]은 선박 엔진 제조회사 ‘M’사의 이중연료 엔진(Dual Fuel Engine, 이하 “DF 엔진”)이라



[Fig. 2] Ship's Order for Low Carbon Fuels (Source: Alphaliner).



[Fig. 3] Dual-Fuel Fuel-Mix in New Building Contracting (Source: Man Energy Solutions).

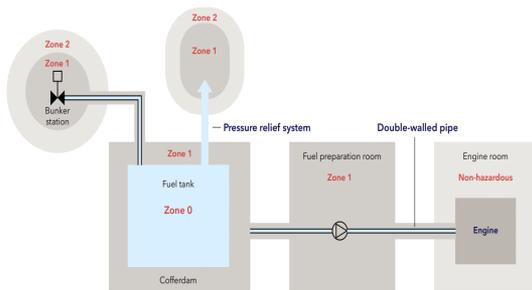
칭함)에 대한 계약 현황과 2021년부터 2032년까지 선박에 공급될 연료 사용 비중에 대한 전망치를 보여주고 있다. 메탄올은 암모니아에 비해 디젤 연료와 유사한 특징을 가지고 있다. 그렇기에 엔진 제조사들은 저장과 취급이 용이한 메탄올을 현재 더 선호하고 있으며, DF 엔진 개발도 마친 상태이다. 메탄올 DF 엔진의 수주량은 2023년 기준으로 약 15%를 차지하며, 10년 이내에 신조선 DF 엔진 중 30%를 점유할 것으로 예상하고 있다 (Man Energy Solutions, 2021).

<Table 1> NFPA 704 Standard for Methanol(Source: NFPA)

Hazard	Rating	Description
Health	1	Exposure could cause irritation but only minor residual injury
Flammability	3	Liquids and solids that can be ignited under almost all ambient conditions.
Reactivity	0	Normally stable, even under fire exposure, and are not reactive with water.
Special	-	-

<Table 2> Risk Level in Methanol Handling on Board(Source: DNV GL)

Risk Level	Description
Zone 0	Explosive Gas/Atmosphere Continuously or Long Periods
Zone 1	Explosive Gas/Atmosphere Likely to Occur in Normal Operation
Zone 2	Explosive Gas/Atmosphere Not Likely to Occur and for a Short Period Only



[Fig. 4] Methanol Handling on Board a Container Ship(Source: DNV GL).

메탄올 전용 엔진 사용을 위해서는 메탄올 전용 연료 수급관, 메탄올 전용 저장 탱크와 연료 이송관, 메탄올 서비스 탱크에서 주기관까지 가는 관 등을 취급해야 해야 한다. 그러나 메탄올은 상온 상태로 이송하므로 위험성이 존재한다. <Table 1>은 미국 화재 예방협회에서 제공한 메탄올의 위험성을 NFPA 704 규격에 따라 나타낸 것이며, 0에서 4단계까지 총 5개로 위험성을 구분하였다. 메탄올의 건강 위험성은 1단계이며 노출 시 자극을 유발할 수 있고, 진료를 받지 않아도 경미한 작은 상해 정도만 입는다. 또한, 반응

위험성에서는 가장 낮은 0단계이며, 물과 반응하지 않는다. 그러나 연소 위험성은 3단계로 상온에서도 발화할 수 있는 물질이므로 취급에 유의하여야 한다.

또한 DNV GL에 따르면 <Table 2>와 [Fig. 4]와 같이 연료 계통의 구역을 병커 스테이션, 연료 저장 탱크, 연료 준비 계통, 엔진룸으로 구성하였다. 폭발성가스/대기의 노출 시간에 따라 ‘Zone 0’, ‘Zone 1’, ‘Zone 2’로 지정하였다.

병커 스테이션은 ‘Zone 1’로 메탄올 연료 수급 시에 폭발성가스가 발생할 수 있는 구역이다. 병커 스테이션의 안전 설정 구역은 ‘Zone 2’로 식별되었으며 폭발성가스 발생 가능성이 작거나 단기간만 발생한다(DNV GL, 2022).

메탄올 저장탱크는 연료가 비어 있는 공간의 경우 질소 가스와 같이 이너트 가스 불활성화하여 폭발 위험을 줄여야 하며, 선박에 불활성 시스템을 설치해야 한다.

이처럼 상기 내용을 통해 메탄올 연료 선박의 병커링 과정에서 다양한 위험성이 존재한다는 걸 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보우타이 리스크 평가 기법(Bow-Tie Risk Assessment Method, 이하 ‘Bow-Tie 기법’이라 칭함)을 활용하여 메탄올 병커링의 위험도 평가를 진행하였다.

II. 연구 방법

1. Bow-Tie 기법

가. Bow-Tie 기법의 특징

Bow-Tie 기법은 결함수 분석(Fault Tree Analysis,

이하 ‘FTA’)과 사건수 분석(Event Tree Analysis, 이하 ‘ETA’)를 결합한 방법이다. 사건의 원인부터 결과에 이르는 과정과 방지 대책, 완화 대책을 명확하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

Bow-Tie 기법은 Butterfly Diagram이라고도 불리며, 문헌상으로는 1970년대에 호주 퀸스랜드 대학교의 ICI Hazan Course Notes에서 처음으로 사용하였다. 1990년대에 이르러 정유회사인 Royal Dutch Shell(이하 ‘Shell’이라 칭함)에서 이 기법을 적용하고 연구하여 현재에는 다양한 분야에서 적용되고 있다(CGE, 2019).

Kim et al.(2022)는 항만물류 분야에서의 하역업, 창고업, 운수업에 대한 위험도 평가를 통계를 기반으로 진행하였다. 또한 하역업, 운수업, 창고업에 대한 시나리오를 Bow-Tie 기법을 효과적으로 적용하여 각 분야에서의 예방 대책, 완화 대책을 제시하였다.

Sam et al.(2022)는 Bow-Tie 기법을 활용하여 해양 구조물에 대한 위험도 평가를 활용하였다. 태풍, 심한 파도, 부양성 저하와 같은 사고 원인을 기준으로 하여 각각의 Bow-Tie 선도를 제시하여 위험도 시나리오를 작성하였다. 이를 통해 시나리오마다의 위험도 평가를 진행하여 효과적인 위험 관리와 활용을 제시하였다.

Hsu et al.(2023)는 대만에서의 선박 충돌 사고를 Bow-Tie 기법을 통해 위험도 평가를 이용하였다. 선박 충돌의 원인과 예방 조치를 직관적으로 파악할 수 있었으며, 여러 위험 요소를 동시에 관리하고 사고의 원인, 예방 및 완화대책을 포함하여 명확하게 시각화하였다.

Bow-Tie 기법은 주로 발생 빈도가 빈번하고 결과의 심각성이 높은 사고의 원인과 결과 및 이에 대한 대책을 도식적으로 표시하면서 그 대책의 적정성을 검토할 때 유용하여 위험도 평가시 유용하게 사용할 수 있다(KOSHA, 2011).

나. Bow-Tie 기법의 구성 요소(Lim, 2020)

- (1) Hazard : 위험을 초래하는 행동이나 상태

- (2) Top Event : Hazard에 대한 위험 통제 기능이 상실된 시점
- (3) Threat : Top Event를 일으키는 원인
- (4) Consequence : Top Event의 부정적 결과
- (5) Preventive Safeguard : Top Event가 발생하지 않도록 하는 예방대책
- (6) Mitigative Safeguard : Top Event 발생 시 완화하는 완화대책
- (7) Escalation Factor : Barrier의 효과를 방해하거나 감소시킴으로써 위험을 증가시킴
- (8) Escalation Control : Escalation Factor에 대한 예방/완화대책

<Table 3>과 같이 Bow-Tie 기법은 총 11단계로 이루어진 절차를 따라 진행되며, 진행 순서는 우선 위험인자를 식별하는 것으로부터 시작된다. 그 후, 원인과 결과를 식별하는 과정을 통해 원인에 대한 예방대책과 완화대책을 파악한다. 마지막으로 수행업무 관리, 주기적인 관리 순으로 진행된다.

[Fig. 5]는 Bow-Tie 선도를 나타내는 그림이다. Top Event를 기준으로 하여 좌측으로는 원인과 예방대책, 우측으로는 완화대책과 결과로 구성되어 있다.

2. 메탄올 연료 선박의 벙커링

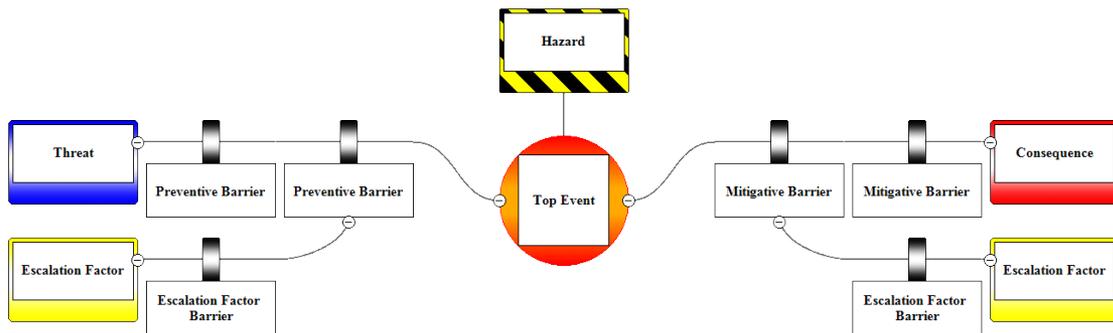
가. 메탄올 연료 특징

메탄올은 알코올 기반 연료로서, 기존의 전통적인 연료에 대한 대안으로 해운 산업에서 주목받고 있다. 메탄올은 단순한 알코올 구조로 되어 있어, 전통적인 탄화수소 기반 연료들과 차별화된다.

메탄올은 액체 연료 중에서 탄소 함량이 가장 낮고, 수소 함량이 가장 높다. <Table 4>와 같이 발열량은 약 15.7MJ/kg로, 기존 연료의 발열량인 39.3MJ/kg에 비해 상당히 낮다. 이는 메탄올이 동일한 에너지 출력을 얻기 위해 약 2.5배 더 큰 연료 탱크가 필요함을 의미한다(ABS, 2020).

<Table 3> Procedure for Bow-tie Method

No.	Procedure	Action
1	Identify Hazard	Check Risk Factors
2	Identify Top Event	Check the Occurrence Pattern of a Specific Situation
3	Identify Threat	Check All Causes that Lead to an Accident
4	Identify Consequence	Check All Outcomes Resulting from the Evolution of an Accident
5	Identify Preventive Safeguard	Check Each Causes Separately for Prevention
6	Identify Mitigative Safeguard	Check Each Causes Separately for Mitigation
7	Identify Escalation Factor	Check Factors for Worsen Prevention/Mitigation Measures
8	Identify Escalation Factor Barrier	Check Preventive Measures for Factors that Worsen Prevention/Mitigation Measures
9	Identify Task	Check Job Duties, Review Procedures, Guidelines
10	Evaluate Risk	Verify the Adequacy of the Evaluation
11	Review	Periodically Verify Completion Status



[Fig. 5] Bow-tie Method Diagram.

<Table 4> Properties of Methanol(Source: ABS, 2020)

Chemical Composition	Unit	Methanol
Lower Heat Value	<i>MJ/kg</i>	201
Energy Density	<i>MJ/L</i>	15.7
Heat of Vaporization	<i>kJ/kg</i>	1,089
Auto-ignition Temperature	°C	450
Liquid Density	<i>kg/m³</i>	798
Cetane Number	-	<5
Octane Number	-	109
Flash Point	°C	12
Stoichiometric air/fuel ratio	-	6.5
Adiabatic Flame Temperature at 1Bar	°C	1,980

<Table 5> Emission Reduction Compared to HFO(Source: MAN Energy Solutions, 2021)

Energy Storage Type/Chemical Structure	Emission Reduction Compared to HFO TierII [%]			
	<i>SO_x</i>	<i>NO_x</i>	<i>CO₂</i>	PM
Methanol [<i>CH₃OH</i>] (65 °C)	90~97	30~50	11	90

기존 선박의 화석연료인 증유에 비해 메탄올은 <Table 5>와 같이 황산화물의 배출을 약 90~97%, 질소산화물을 30~50%, 이산화탄소를 약 11%, 미립자를 약 90% 감소시킨다(MAN Energy Solutions, 2021).

또한 메탄올은 대기압에서 액체 상태로 존재하며, 인화점은 약 12℃로 상대적으로 낮다. 이러한 특성으로 인하여 메탄올은 추가적인 장비 없이 취급 및 사용할 수 있으며, 기존 선박의 연료 탱크를 개조하여 사용할 수 있어 저장 비용이 절감될 수 있다. 그러나 인화점이 낮아 화재 발생 가능성이 높아 특별한 취급 절차와 주의가 필요하다. 또한, 메탄올 불꽃은 육안으로 확인이 힘들어 화재를 일찍 발견하기 어려운 측면이 있다. 이는 선박과 같은 좁은 공간에서 큰 위험 요소로 작용한다.

나. 메탄올 병커링 방식

메탄올은 대기압 상온 상태에서 액체 상태이기 때문에 취급이 간편하며 LNG와 달리 별도의 냉각장치가 필요 없으며, 기존 연료탱크를 개조하여 이용할 수 있어서 기존의 화석연료와 같은 방식으로 병커링을 진행할 수 있다.

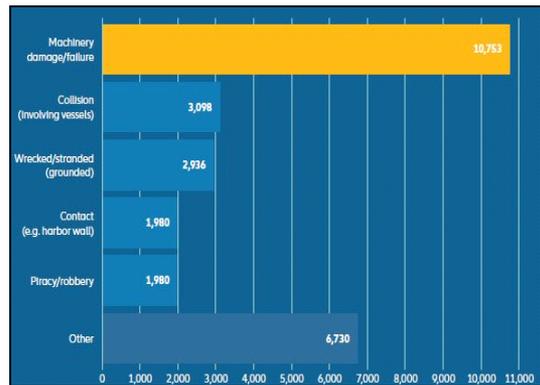
병커링 방식에는 탱크로리를 이용한 Truck to Ship(이하 ‘TTS’라 칭함), 바지선을 이용하는 Ship to Ship(이하 ‘STS’라 칭함), 육상 탱크를 이용한 Port to Ship(이하 ‘PTS’라 칭함) 등이 있다(Lim et al, 2021).

TTS 방식은 육상에서 탱크로리에 고정된 탱크를 통하여 본선으로 메탄올을 공급하는 방식이며, PTS 방식은 항만에 설치된 메탄올 저장 탱크에서 호스 및 로딩암을 이용하여 본선에 공급하는 방식이다. 또한 STS 방식은 메탄올 바지선이 본선에 호스를 통해 공급하는 방식이다.

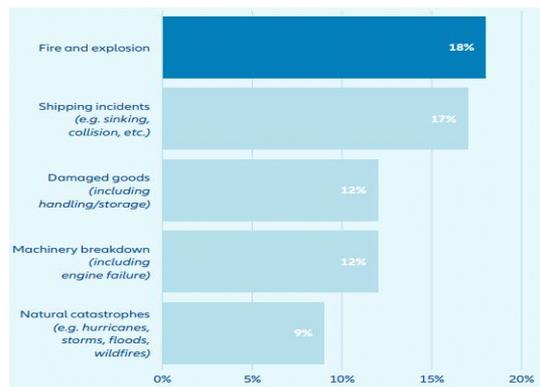
대부분의 메탄올 병커링은 PTS 방식으로 병커링을 채택하고 있다. 미국 휴스턴 항, 한국 울산 항, 중국 타이창 항 등이 메탄올 병커링 인프라를 갖추고 있다(METHANEX, 2022). 그러나 2021

년 5월 네덜란드 로테르담에서 STS를 이용하여 운항 중인 바지선을 통해 기존의 유사한 절차를 이용하여 약 300톤을 처음으로 수급한 사례가 있다. 이를 통해 선적, 저장, 취급 및 병커링에 대해 안전하다는 것을 증명은 했으나, 아직 상업적으로 널리 채택되지 않았다(FASTWATER, 2022).

다. 메탄올 병커링의 사고 원인 정의



[Fig. 6] Top Cause of Incidents Vessels over 100GT within 10 years(Source: AGCS).



[Fig. 7] Top Causes of Loss by value of Claims in Marine (Source: AGCS).

[Fig. 6]은 최근 10년 동안의 총톤수 100톤 이상의 선박에서의 사고량을 나타낸 그래프이다. 총 선박 사고 중 27,444건 중에서 기관 관련된 사고가 약 40%로 가장 높은 유형으로 나타났으며, 충돌과 좌초가 각각 약 10%를 넘겼다.

<Table 6> Cause Categories During Methanol Bunkering (Source: EMSA)

No.	Cause	Description
1	Collision	A Collision With a Ship or Other Floating and Fixed Objects/Structures (e.g. Port Facilities)
2	External Impact	A Drop Object (e.g. from a Crane) or an Impact During Cargo Operations (e.g. Container, Automobile Loading, etc.)
3	External Fire	Flame Impingement and Heat Radiation Caused by Fire from Methanol Storage Tanks and Equipment, External or Port Facilities.
4	Mechanical Failure	Failure of Equipment due to Wear, Corrosion, Fatigue, Stress, etc. Caused by Vibration, Cyclic Loading and Heat.
5	Control Failure	Failure of Instrumentation and Process Control that Results in Operation Outside the Design Intent.
6	Utilities Failure	Loss of Power Supply, Heating, Lighting, and Other Auxiliary Equipment Services

[Fig. 7]은 보험 회사인 ALLIANZ에서 제공한 해상 사고로 인한 보험금 청구의 주요 원인을 나타내고 있다. 화재 폭발로 인한 사고가 피해 규모 큰 걸로 나타나 가장 높은 비율로 보험금 청구가 되었다. 뒤를 이어서 선박 충돌사고, 화물 사고로 이어졌다.

따라서 본 논문에서는 사고 시나리오를 사고 빈도수와 피해 규모를 고려하였다. 선박과 선박/항만시설 등의 충돌사고, 화물 작업 또는 그 외 낙하물로 인한 충격, 본선과 외부에서의 화재 폭발 시나리오로 구성하였다. 또한 기관 관련된 사고는 기계적 결함, 제어 계통의 결함, 유틸리티의 결함 3가지로 구분하였다. 총 6개의 사고 시나리오를 병커링에서의 메탄올 누설의 원인으로 구성하였다.

또한 EMSA(European Maritime Safety Agency, 2017)에서 제공한 ‘Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping’의 자료를 참조하였다. 사고 시나리오에 관한 내용은 <Table 6>과 같다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 공식 안정성 평가

본 논문에서는 IMO에서 제공한 공식 안전성 평가(Formal Safety Assessment, 이하 ‘FSA’라 칭함) 방법론을 활용하여 메탄올 연료 선박의 병커링 과정 중 발생할 수 있는 위험 요소들을 사전에 분석하고, 이를 바탕으로 인명과 선박 안전에 미치는 위험도를 평가하였다. 또한 정량적 평가 방법을 채택하여 위험의 발생 빈도와 결과의 심각성을 종합적으로 고려하였다. 이를 통해 위험 요소들을 <Table 7>과 같은 빈도와 <Table 8>에 의한 피해 정도를 측정하고, 이들을 합산하여 <Table 9>에 표현된 바와 같이 ‘Low’, ‘Medium’, ‘High’의 세 가지 등급으로 분류하였다.

‘Low’는 위험이 상대적으로 낮은 수준으로 판단될 때 적용되는 범주이다. 이 경우 추가적인 대책을 취하는 것이 As Low As Reasonably Practicable 원칙(이하 ‘ALARP 원칙’이라 칭함)에 따라 불필요하다.

‘Medium’은 위험 정도가 중간 수준인 경우에 해당되며, 이 범주에서는 ALARP 원칙이 중요한 역할을 한다. ALARP 원칙은 위험을 합리적으로 줄이는 데 필요한 노력과 비용이 상응하는 수준으로 적용되어야 한다. 빈도를 줄이거나 피해 정도를 감소시켜 위험 정도를 ‘Low’로 낮춰야 한다.

<Table 7> Level of Likelihood(“L”)

Level	Definition
1	Remote - 1 in a Million or Less per Year
2	Extremely Unlikely - Between 1 in a Million and 1 in 100,000 per Year
3	Very Unlikely - Between 1 in 100,000 in 10,000 per Year
4	Unlikely - Between 1 in 10,000 and 1,000 per Year
5	Likely - Between 1 in 1,000 and 1 in 100 per Year

<Table 8> Level of Consequence(“C”)

Level	Definition
A	Major Injury - Long-Term Disability / Health Effect
B	Single Fatality or Multiple Major Injuries - One Death or Multiple Individuals
C	Multiple fatalities - Two or More Death

<Table 9> Risk Matrix

		Likelihood				
		Remote	Extremely Unlikely	Very Unlikely	Unlikely	Likely
Consequence		1	2	3	4	5
Multiple Fatalities	C	C1	C2	C3	C4	C5
Single Fatality or Multiple Major Injuries	B	B1	B2	B3	B4	B5
Major Injury	A	A1	A2	A3	A4	A5

‘High’는 위험 정도가 매우 높아 허용될 수 없는 수준으로 간주되는 경우에 해당된다. 이 경우, 즉각적인 조치가 필요하며 가능한 한 빠르게 위험 요소를 제거하거나 통제하여 위험을 감소시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 앞 장에서 설명한 메탄올 병커링의 사고 원인 6가지를 구분하여 진행하였다. 위험도 평가 연구는 아래의 절차에 따라 수행하였다(Jee, 2017).

- 1) 메탄올 병커링 사고 시나리오에 따라 ‘Node’ 구분
- 2) 원인은 ‘Threats’로 명시
- 3) 결과 및 결과에 대한 안전대책 및 완화대책

제시

- 4) 원인과 결과에 대한 정량화

2. Bow-Tie 기법

<Table 11>과 [Fig. 8]은 Shell에서 제공한 ‘Global Bow-tie Guidance’에 따라 예방 및 완화 대책을 분류하여 Bow-Tie 기법으로 나타낸 것이다. Shell에서는 효과적인 Bow-Tie 기법을 사용하기 위해 상세하게 Barrier를 구분하였다.

Hardware Barriers(이하 ‘HW’라 칭함)는 설비 및 장비의 물리적인 측면을 다루며, 설비의 구조 및 안전장치를 통해 시스템의 안전을 강화시키는 요소이다.

<Table 10> Risk Ranking for Methanol Bunkering

No.	Threats	Consequence	Risk Matrix			Safeguards(Preventive Barriers)	
			C	L	R		
1	Collision	Overflow	B	3	B3	1. Bunkering Procedure 2. Watchman Duty 3. Emergency Stop 4. Connect to Hose Independently 5. Select Low Traffic Port 6. Emergency Response Training	
		Fire	B	3	B3		
		Harm	B	3	B3		
2	External Impact	Overflow	B	3	B3		1. Crane Procedures 2. Terminal Procedures 3. Permit to Work 4. Work Training
		Fire	B	3	B3		
		Harm	B	1	B1		
3	External Fire	Overflow	B	1	B1	1. Watchman Duty 2. Fire Fighting Drill 3. Camera with IR Function 4. CCTV with IR Function 5. Inert Gas System	
		Fire	B	1	B1		
		Harm	B	1	B1		
4	Mechanical Failure	Overflow	B	3	B3		1. Inspection, Maintenance, Evaluation, Repair 2. Machinery Design
		Fire	B	1	B1		
		Harm	B	1	B1		
5	Control Failure	Overflow	B	3	B3	1. Inspection, Maintenance, Evaluation, Repair 2. Control Line Design	
6	Utilities Failure	Overflow	B	3	B3	1. Inspection, Maintenance, Evaluation, Repair 2. Emergency Generator 3. UPS Battery 4. Aux. Machinery Design	

Human Barriers(이하 ‘HUM’라 칭함.)는 인간 요소에 초점을 맞춘다. 담당 관리자의 교육, 규정 및 절차 준수, 정기 점검은 인간의 실수나 부주의로 인한 재해를 방지하고, 시스템의 안전성을 보장하였다.

Critical Processes(이하 ‘CP’라 칭함.)는 회사 조직의 모든 과정과 절차를 나타내며, 변경 관리, 비상 대응, 역량 관리, 설계 및 운영 무결성 등의 측면을 관리하는 요소이다.

메탄올 연료 선박의 벙커링 진행 시의 Top Event는 메탄올의 누설이다. 누설의 원인으로는 [Fig. 9]처럼 Collision, External Impact, External Fire, Mechanical Failure, Control Failure, Utilities Failure이다. 메탄올 누설로 인한 결과는 [Fig. 10]

과 같이 Overflow, Fire, Harm으로 식별되었다.

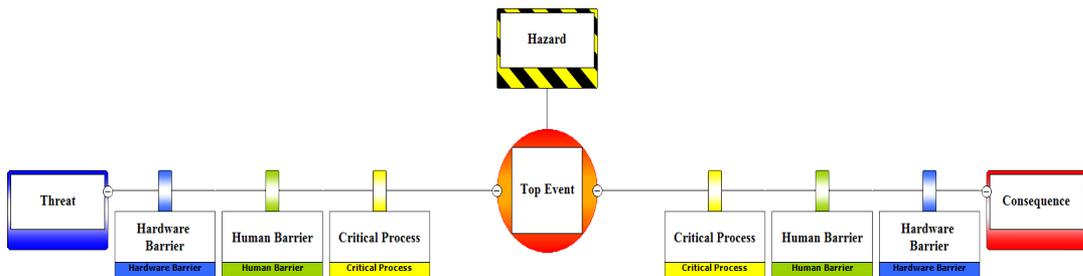
[Fig. 11]처럼 Collision, External Impact, External Fire, Mechanical Failure의 결과로는 Overflow, Fire, Harm이 평가되었다. 마찬가지로, [Fig. 12]는 Control Failure와 Utilities Failure의 Bow-Tie를 나타내는 것이며, Overflow만 식별되었기 때문에 시나리오를 별도로 작성하여 세부적으로 제시하였다.

가. Overflow

[Fig. 11]과 [Fig. 12]와 같이 Overflow의 원인으로는 6가지 시나리오가 모두 식별되었다. External Fire에서의 Overflow는 “B3”로 위험도가 Middle이었으며, 그 외 5개의 시나리오에서는 ‘B1’으로 평가되어 Low이다.

<Table 11> List for Barriers Using Bow-tie Method(Source: Shell Global)

Hardware Barriers (HW)	Human Barriers (HUM)	Critical Processes (CP)
<ul style="list-style-type: none"> • Structural Integrity • Process Containment • Mechanical Design • Ignition Control • Detection Systems • Protection Systems • Shutdown Systems • Emergency Response • Life Saving - Personal Survival Equipment 	<ul style="list-style-type: none"> • Operating in accordance with Procedures • Surveillance, Operator Rounds and Routine Inspection • Authorisation of Temporary and Mobile Equipment • Acceptance of Hand-over or Restart of Facilities or Equipment • Response to Process Alarm and Upset Conditions • Response to Emergencies 	<ul style="list-style-type: none"> • Management of Change • Permit to Work • Emergency Response • Emergency Management • Competency Management • Contractor Management • Design Integrity • Operating Integrity • Equipment Isolation • Technical Integrity • Wells Integrity • Security Management • HSE Compliance • Integrity Leadership • Contracting and Procurement • Assurance • Project Execution • Incident Investigation • Learning's • Management Systems • Health • Environment



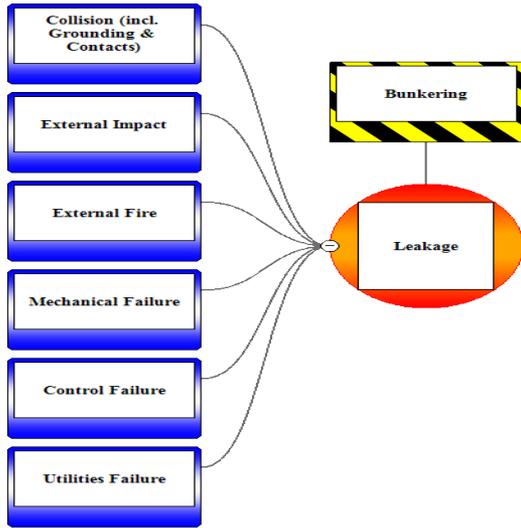
[Fig. 8] Bow-tie Diagram Using Shell Guide.

시나리오마다 예방 대책은 모두 다르게 식별되었지만, 완화 대책은 공통적인 것을 확인할 수 있다. 따라서, 예방 대책은 <Table 10>에서의 Safeguard에 관한 내용이며, [Fig. 11] 및 [Fig. 12]의 Top Event인 Leakage를 기준으로 좌측으로 구성된 부분이상 동일함을 알 수 있다. 완화 대책으로는 Vapor External Management, Drip Tray, Link ESD with QCDC, High-High Level Alarm, Liquid Bilge Well and Bilge Holding Tank,

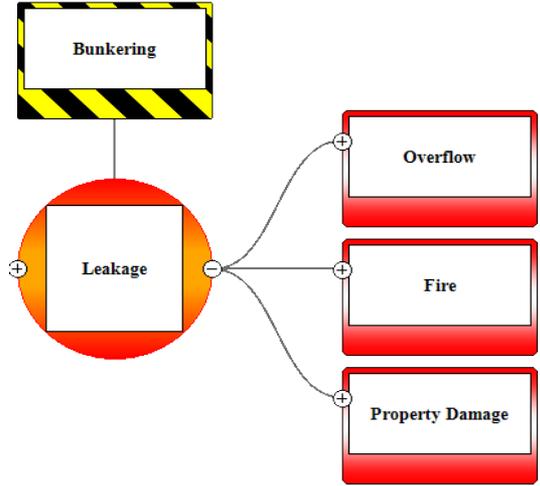
Emergency Shutdown System으로 평가되었다.

Overflow의 경우에는 탱크의 수위와 관계가 있다. 그렇기에 탱크의 고수위 알람을 통하여 위험성을 인식하는 것이 중요하였으며, 탱크에 양이 증가하지 않도록 메탄올을 Bilge Well이나 Bilge Holding Tank로 이송하거나 최악의 경우 바다로 직접 배출하는 것이 완화 대책으로 나타났다 (CEN, 2020).

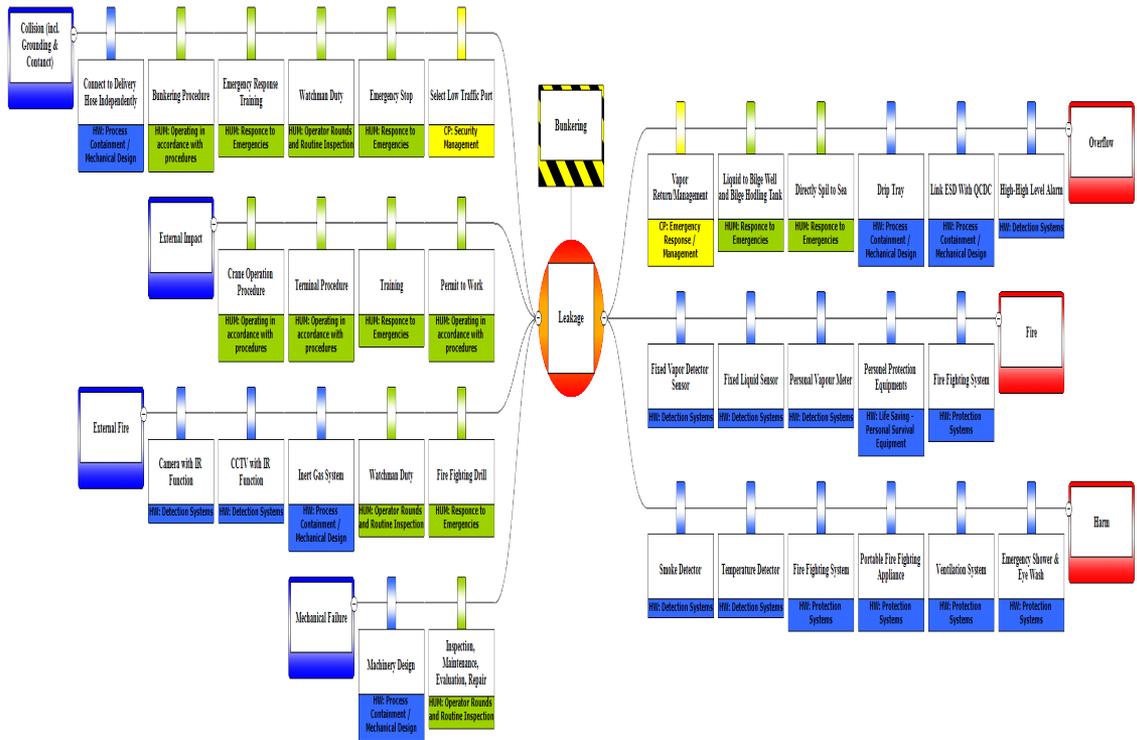
Bow-Tie 기법을 이용한 메탄올 연료 선박의 벙커링에 대한 위험도 평가



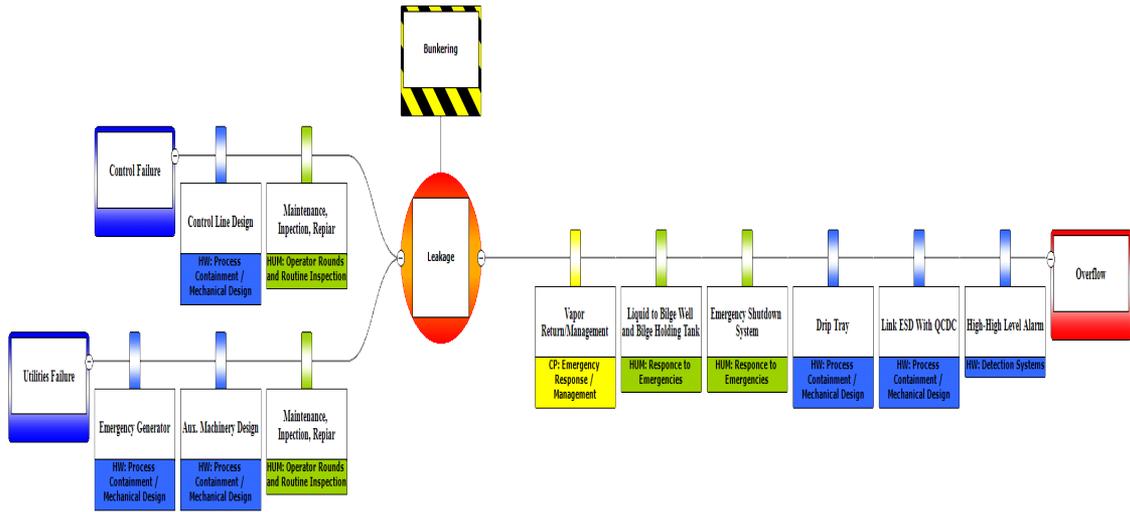
[Fig. 9] Bow-tie Diagram for 'Methanol Bunkering' with Threats.



[Fig. 10] Bow-tie Diagram for 'Methanol Bunkering' with Consequences.



[Fig. 11] Bow-tie Diagram for Methanol Bunkering with Collision, External Impact, External Fire & Mechanical Failure.



[Fig. 12] Bow-tie Diagram for Methanol Bunkering with Control Failure & Utilities Failure.

나. Fire

화재에 대한 위험도 평가에서 4가지 주요 시나리오가 도출되었다. Collision과 External Impact에서 ‘B3’로 Middle 평가되었고, External Fire와 Mechanical Failure의 시나리오에서는 ‘B1’의 위험도가 있었다. 이 중 Control Failure 및 Utilities Failure 시나리오에서는 안전성 문제가 화재로 전이되지 않았으며, 이러한 시나리오들은 선박의 보조 기기이기 때문에 문제가 발생할 경우에도 화재로 확장되지 않을 것으로 평가되었다.

화재 대응을 위한 완화 대책으로 화재 설비를 효과적으로 활용하는 것이다. 선박 내에는 다양한 화재 대응 시스템이 구비되어 있다. 위험도 평가 결과에 따르면 HW를 이용하는 것이 피해를 최소화할 수 있었으며, 완화 대책이 모두 HW로 분류되었다.

다. Harm

화재와 같은 4가지 시나리오가 원인이고, Collision에서 ‘B3’의 Middle, 그 외의 3개의 시나리오에서 ‘B1’으로 Low가 식별되었다.

이 시나리오들은 인명피해와 재산 피해를 최소화하기 위한 중요한 고려 사항으로 분석되었다.

감지기를 통해 선원들이 화재를 신속히 감지하고 대응할 수 있도록 하는 것이 인명피해와 재산 피해를 최소화하는데 효과적인 방법임이 확인되었다. 인명피해를 방지하기 위해서는 연기 감지기나 온도 감지기와 같은 초기 경보 시스템을 통해 위험을 조기에 감지하고 적절한 대응 조치를 취하는 것이 중요하며, Emergency Shower Station에 설치되어 있는 비상 샤워 장치나 아이 워셔를 이용하여 완화할 수 있다. 또한, 재산 피해를 최소화하기 위해서는 화재 대응 설비를 적극 활용하는 것이 필수적이다.

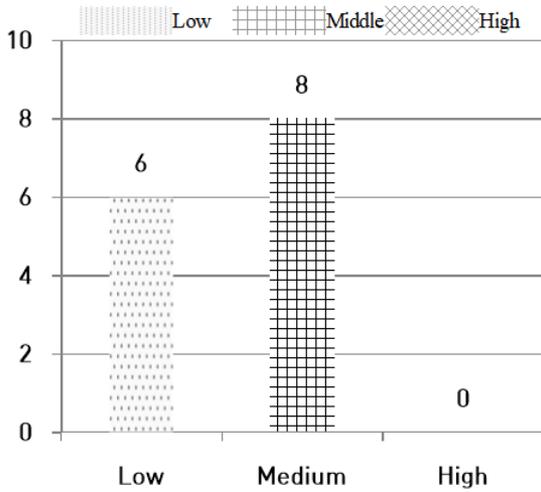
IV. 결론

본 연구에서는 메탄올 연료 선박의 병커링 과정에 대하여 Bow-tie 기법을 이용하여 위험도 평가를 수행하였으며, 위험도 평가를 통해 식별된 결과를 아래와 같이 정리하였다.

1) 메탄올 병커링 과정에서 위험성의 Top Event는 메탄올 누출이며, 누출의 원인으로는 Collision, External Impact, External Fire, Mechanical Failure, Control Failure, Utilities Failure

로 평가되었음을 알 수 있다.

2) Collision, External Impact, External Fire, Mechanical Failure로 인한 결과로 Overflow, Fire, Harm으로 식별되었고 Control Failure, Utilities Failure의 결과로는 Fire만 식별되었음을 알 수 있었다.

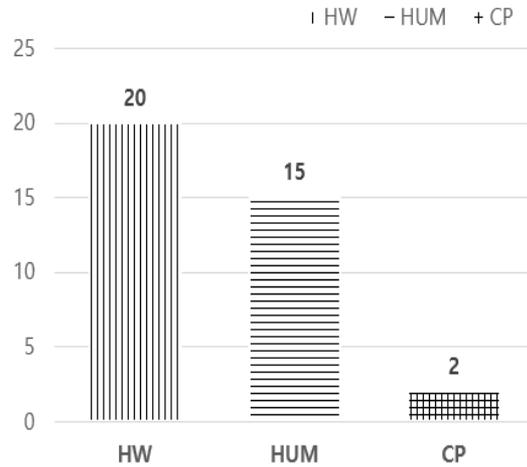


[Fig. 13] Result of Methanol Bunkering.

3) [Fig. 13]은 메탄올 병커링 과정에서 식별된 위험도는 ‘Low’에서 6개, ‘Medium’ 범위에 8개, 그리고 ‘High’ 영역에서는 식별되지 않았음을 알 수 있었다.

<Table 7>와 <Table 8>에 제시된 위험 빈도와 위험 정도를 바탕으로 위험도를 정량화하였으며, 이를 <Table 9>의 Risk Matrix를 활용하여 ‘Low’, ‘Medium’, ‘High’의 세 가지 범위로 위험성을 분류하였다.

4) [Fig. 14]는 Bow-Tie 기법의 결과인 [Fig. 11]과 [Fig. 12]를 통하여 예방 대책과 완화 대책을 분류한 결과이다. HW 부분에서는 20개, HUM에서는 15개, CP에서는 2개의 대책이 식별되었음을 알 수 있었다. 따라서 메탄올 병커링 시의 대책 방법으로는 HW 부분이 다수 차지하는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 14] Result of Methanol Bunkering with Barriers.

Reference

- ABS(2020). Pathways to Sustainable Shipping, 1-107.
- AGCS(2023). Safety and Shipping Review 2023, 1-44.
- Alpha Liner(2023). Current orderbook: propulsion method by capacity/order date. Retrieved from <https://public.alphaliner.com> on August 30.
- CEN(2020). CWA on Methanol Bunkering Process, 1-32.
- CGE(2019). Bowtie Software User Manual, 1-286.
- DNV GL(2022). Alternative Fuels for Container Ships, 1-66.
- EMSA(2017). Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping, 1-183.
- FASTRACK(2022). Report on methanol supply bunkering guidelines, and infrastructure, 1-34.
- Hsu S-H, Lee M-T, Chang Y-C(2023). Application of Rough Set Theory and Bow-Tie Analysis to Maritime Safety Analysis Management: A Case Study of Taiwan Ship Collision Incidents. Applied Sciences, 13(7), 4239. <https://doi.org/10.3390/app13074239>
- IMO(2018). RESOLUTION MEPC.304(72), 1-13.
- IMO(2023). RESOLUTION MEPC.377(80), 1-18.
- Jee JH(2017). Risk Assessment for Retrofitting an Electrolysis Type Ballast Water Treatment System

- on an Exiting Vessel. *Journal OF Fisheris and Marine Sciences Education*, 29(3), 665~676.
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2017.29.3.665>
- Kim DY, Seop SM, Lee JM, and Shin GR(2022). A Study on the Improvement of Safety Management by Port Logistics Industry Using Bow-Tie Analysis. *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 46(1), 57~72
<https://doi.org/10.5394/KINPR.2022.46.1.57>.
- KOSHA(2011). GUIDE X-39-2011, 1~24.
- KOSHA(2011). GUIDE X-40-2011, 1~42.
- Lim DH(2020). Case Study of Risk Control Applying Bow-tie Methodology. *Korean Journal of Hazardous Materials*, 8(1), 65~72.
- Lim JS, Choi YJ, Kwon DH and Yu CH(2021). The Analysis on Quantitative Risk Assessment of the PTS(Pipe to Ship)-type LNG Bunkering Facility Using Phast/Safeti Program. *Journal of Energy Engineering*, 30(4), 128~137.
<https://10.5855/ENERGY.2021.30.4.128>.
- MAN Energy Solutions(2021). The Methanol-fuelled MAN B&W LGIM, 1~24.
- METHANEX(2022). 2022 Sustainability Report, 1~99.
- Methanol Institute(2023). MARINE METHANOL Future-Proof Shipping Fuel, 1~61.
- Sam Slatnick, D. Angevine, J. Cranefield, C. Maddox, M. Overstake, L. Palmer and A. Younan (2022). Bow-ties use for high-consequence marine risks of offshore structures. *Process Safety and Environmental Protection*, 165, 396~407.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.026>.
- SHELL(2015). Global Bowtie Guidance, 1~36.
-
- Received : 06 September, 2023
 - Revised : 28 November, 2023
 - Accepted : 01 December, 2023