

퍼지 TOPSIS 기법을 이용한 선박 대체 연료 선정의 우선순위 결정에 관한 연구

이정학* · 신주영** · 지재훈****

*, ** 국립목포해양대학교 기관시스템공학부 석사과정, *** 국립목포해양대학교 해양경찰학부 교수

Study on Priority Decision for Ship's Alternative Fuel Selection Using Fuzzy TOPSIS Method

Jeonghak Lee* · Juyeong Shin** · Jaehoon Jee****

*, ** PhD Candidate, Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

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

요약 : MEPC 80차 회의에서 IMO는 더욱 강화된 온실가스 감축 전략을 제시하였다. 기존의 72차 회의에서 제시하였던 초기전략보다 구체적이고 강화된 감축 전략이다. IMO는 2050년 무렵까지 국제 해운으로부터 온실가스 배출을 'Net Zero'에 도달하도록 전략을 세웠다. 이 논문에서는 대표적인 친환경 연료로 구분되는 LNG, 수소, 메탄올, 암모니아의 위험도 평가를 진행하였다. 전문가들의 설문조사를 통한 결과를 퍼지 기법을 적용하여 주관적인 모호성을 해결하였다. 또한 TOPSIS 기법을 통해서 퍼지의 긍정적인 해와 부정적인 해를 도출하였다. 이를 통해서 Vertex 방법을 이용하여 대체 연료의 근접계수 값을 최종적으로 구하여 결정하였다. 그 결과, 메탄올, LNG, 수소, 암모니아 순으로 선호하였다. 이 연구는 제안된 접근 방식이 대체 연료를 결정을 위한 집단 의사결정 방법으로 이용할 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 국제해사기구, 대체 연료, 위험도 평가, Fuzzy, TOPSIS

Abstract : At the 80th session of the MEPC, the IMO presented an enhanced GHG reduction strategy. The strategy is more specific and robust than the initial strategy presented at the 72nd session. The IMO aims to achieve 'Net Zero' GHG emissions from international shipping by 2050. In this study, a risk assessment was conducted for representative green fuels, namely, LNG, hydrogen, methanol, and ammonia. The fuzzy method was used to resolve the subjective ambiguity of results from the survey of the experts, and the positive and negative effects of the fuzziness were derived through the TOPSIS method. Finally, the closeness coefficients of the considered alternative fuels were determined using the Vertex method. As a result, methanol, LNG, hydrogen, and ammonia were preferred. This study suggests that the proposed approach can be used as a collective decision-making tool for selecting alternative fuels.

Key Words : International Maritime Organization, Alternative fuel, Risk assessment, Fuzzy, TOPSIS

1. 서론

2018년 72차 해양환경보호위원회(Maritime Environment Protection Committee, 이하 'MEPC'라 칭함)에서 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 'IMO'라 칭함)는 선박의 온실가스(Green House Gas, 이하 'GHG'라 칭함) 감축 전략을 제시하였다. IMO는 GHG의 초기 전략인 "INITIAL IMO

STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS (MEPC.304(72))을 채택하여 2050년에 2008년 대비 GHG 총배출량을 최소 50% 감축시키는 전략을 세웠다(IMO, 2018).

2023년 80차 MEPC에서는 기존의 GHG 감축 목표보다 더 강화된 감축 전략 "2023 IMO STRATEGY OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS(MEPC.377(80))"을 채택하였다.

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

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

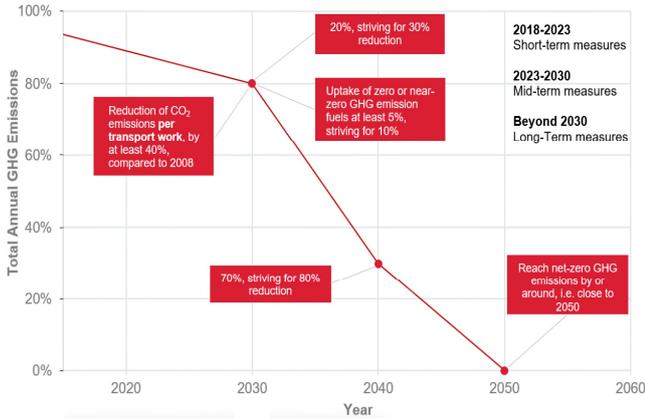


Fig. 1. IMO GHG Reduction Target (Source: ABS).

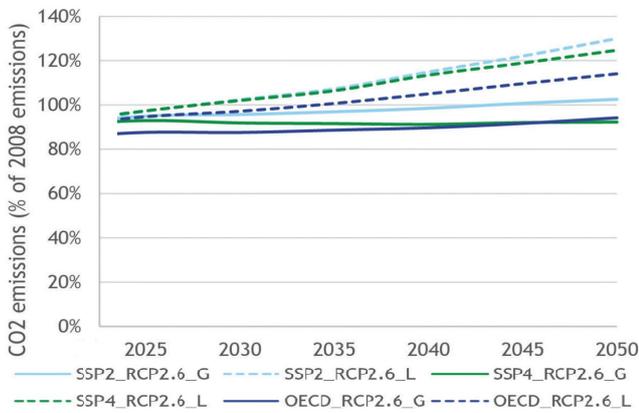


Fig. 2. Projections of Maritime Ship Emissions as a Percentage of 2008 Emissions (Source: IMO).

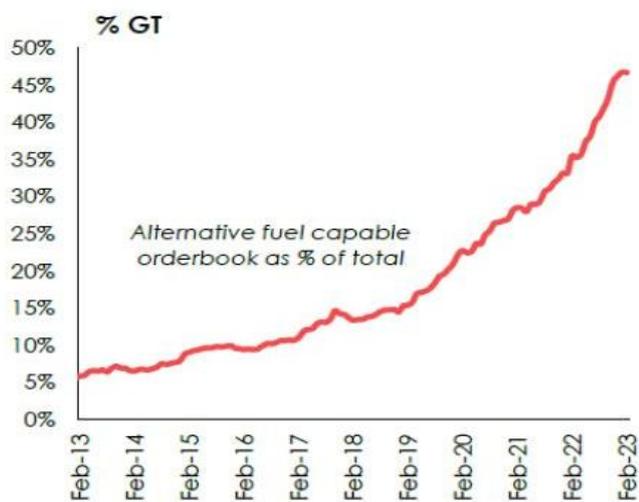


Fig. 3. Alternative Fuels Orderbook (Source: Clarksons Research).

Table 1. Summary of MEPC.377(80)

Year	Description	
2030	GHG**	to reduce by at least 20%* to strive for 30%*
	CII***	to reduce by at least 40%*
2040	GHG	to reduce by at least 70%* to strive for 80%*
2050	GHG	to reach net-zero

* Compared to 2008, ** Green House Gas
*** Carbon Intensity Index

Table 2. Quantity for Fuel Ready Ships (Source: Clarksons Research)

Fuel	Quantity
LNG	371
Methanol	191
Ammonia	130
Hydrogen	9

Fig. 1(ABS, 2023)과 Table 1은 MEPC 80차의 전략을 보여주고 있다. IMO는 2008년 대비하여 2030년에는 GHG 총배출량을 최소 20% 감축하고, 30% 감축을 목표로 하였다. 또한 2040년에는 GHG 총배출량을 최소 70% 감축하고, 80% 감축을 전략을 세웠다. 늦어도 2050년에는 온실가스 배출량을 ‘0’으로 도달하는 것으로 목표로 하였다(IMO, 2023).

개정된 선박 온실가스 전략은 2018년의 초기전략보다 구체적이고 매우 강화된 수준으로 수정하였다. 2050년에 탈탄소화 목표를 제시하여 국제 해운의 탈탄소화에 대한 강력한 의지를 보여주고 있다.

일반적으로 GDP(Gross Domestic Product) 상승률과 선박 물동량은 비례해서 성장하기에 선박에서 배출되는 GHG 역시 상승한다(Stopford, 2013). Fig. 2는 온실가스 배출 전망치(Business as Usual, 이하 ‘BAU’라 칭함) 시나리오에 따른 장기 경제 및 에너지 시나리오에 따라 2008년 대비 해상 선박 배출량을 나타낸 것이다. 배출 전망치는 2008년과 비교하여 SSP-2 시나리오의 가정하에 예측하였다. CO₂ 배출은 1,000~1,500Mt 증가할 것으로 보이며, 약 90~130% 증가할 것으로 예상하고 있다(IMO, 2020).

위와 같이 CO₂ 배출량과 GHG 배출량을 규제하기 위한 해결책으로는 친환경 연료를 사용하는 것이 있으며, GHG의 감축을 하기 위해 친환경 연료 추진 선박의 수요와 관심이 증가하고 있다. Table 2와 Fig. 3은 Clarksons Research(2023)에

서 제공한 것으로 대체 연료 준비 선박(Ready Ship)을 포함한 전체 대체 연료 선박 수주량의 동향을 보여주고 있다. 2017년에 11%에 불과하던 수주량이 2023년에는 48%로 대체 연료 추진 선박을 수주하고 있다. 수주량에는 LNG 추진선 22%, 메탄올 추진선이 14%의 수주 점유율을 차지하고 있다.

선박에서 대표적인 저탄소 연료로는 LNG와 메탄올이 있다. 이 두 연료는 현재 상용화되어 운항하고 있는 선박들이 다수 있다. 또한, 무탄소 연료로는 암모니아와 수소를 들 수 있다. 상선 기준으로는 아직 개발 중에 있으며, 글로벌 선사와 대형 엔진회사들이 협업하고 있다.

본 논문에서는 선박 친환경 연료 사용 시의 사고 시나리오를 통해 선박에 대한 위험도 평가를 분석하였다. 이를 토대로 퍼지 TOPSIS 기법을 적용하여, 친환경 연료의 시나리오에 대한 우선순위를 정하고자 한다.

2. 선박 대체 연료 현황

Table 3. Status of Ship's Engine for Alternative Fuels

	LNG	METHANOL	NH3	H2
Diesel			□	
Dual Fuel	●	●	□	□
Spark Gas	●		□	□
Gas Diesel	●	●	□	
Liquid Gas		●	□	

● Using □ Developing

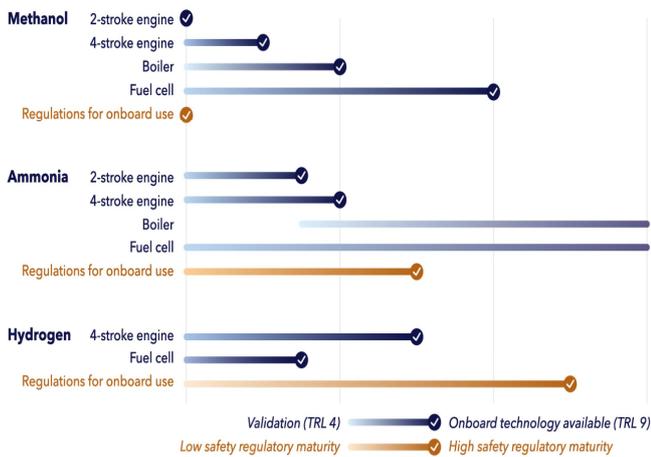


Fig. 4. Projected Maturation Timelines for Ship's Technologies (Source: DNV GL).

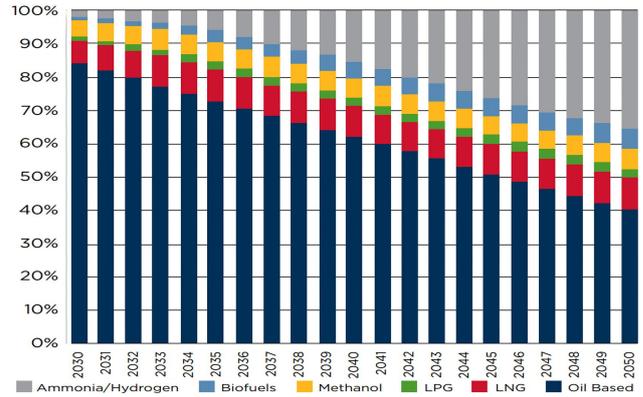


Fig. 5. Projected Marine Fuel used to 2050 (Source: ABS).

Table 3은 친환경 대체 연료별 선박용 엔진의 개발 상황을 보여주고 있다. LNG와 메탄올 전용 엔진의 경우에는 이미 상용화되어 있다. 또한 이중연료 엔진(Dual Fuel Engine, 이하 'DF 엔진'이라 칭함)뿐만 아니라 가스 엔진으로도 개발되어서 사용할 수 있다. 보통 LNG와 메탄올은 DF 엔진을 통하여 연료를 사용한다. 대표적인 LNG 전용 DF 엔진은 'M'사의 ME-GI 엔진과 'W'사의 X-DF 엔진이다. 마찬가지로 메탄올 전용 DF 엔진으로는 'M'사의 ME-LGIM 엔진과 'W'사의 X-DF Methanol 엔진이 있다. 수소와 암모니아의 DF 엔진의 경우에는 개발 단계에 있다.

Fig. 4는 DNV GL에서 제공한 암모니아, 수소의 개발 동향을 타임라인으로 보여주고 있다. 암모니아 연료를 사용하는 DF 엔진은 2024년 이후로 상용화될 것으로 전망하고 있다. 또한 규제와 제도 역시 2020년 중·후반대에 구체적으로 제시될 예정이다. 수소의 경우에는 배터리는 2025년, 4행정 엔진은 2020년 후반대에 개발될 것으로 전망하고, 규제 및 제도는 2030년이 넘어서 상세히 명시될 예정이다.

ABS(2020)에 따르면 Fig. 5에서 알 수 있듯이 2040년 이후에는 석유 기반의 연료는 MGO(Marine Gas Oil) 또는 MDO(Marine Diesel Oil)가 유일하게 사용할 것으로 보고 있다. 또한 LNG의 사용은 인프라 확대, 무역량 증가, 탄화수소 기반 연료보다 낮은 탄소 집약도를 바탕으로 2035년까지 증가할 것이다. 그러나 LNG의 채택은 장기적인 IMO 목표를 달성하기에 충분하지 않으므로 그 수요는 암모니아나 수소로 대체될 것이다.

메탄올의 경우에는 'M'사의 ME-LGIM 엔진과 같은 전용 추진 시스템의 개발로 수요는 유지될 것이다. 특히 화물로 운송하는 유조선은 추진 및 발전용 연료로 계속 사용할 것으로 보인다. 암모니아는 탄소 함량이 제로이고 수소와 비교하여 유통, 저장 및 병커링이 용이하며 추진 및 발전용 기존 기술 및 신기술과의 적합성으로 인해 연료로서의 사용이 증가할 것으로 예상된다(ABS, 2021).

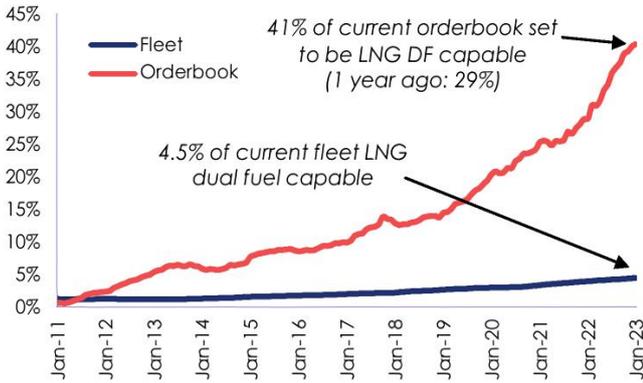


Fig. 6. LNG Capable Fleet & Orderbook (Source: Clarksons Research).

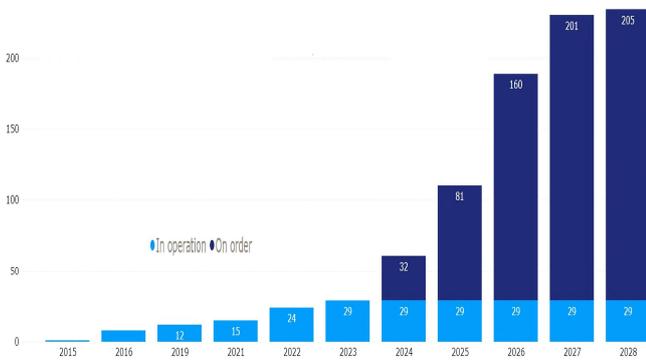


Fig. 7. Order for Methanol Fueled Ship (Source: DNV AFI).

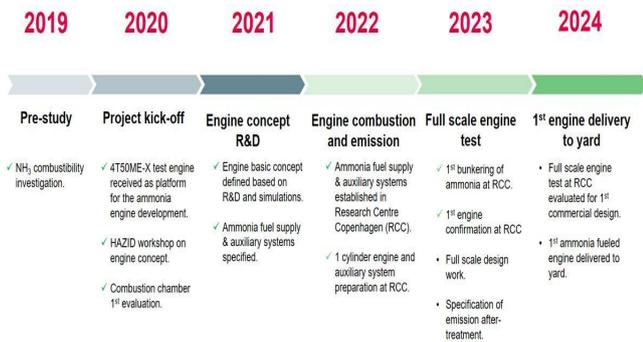


Fig. 8. Two-stroke Ammonia Engine Development Schedule (Source : MAN Energy Solutions).

2.1 LNG

LNG 연료는 대표적 저탄소 연료로써, 세계적으로 저변의 공급인프라는 타 친환경연료에 비해 상대적으로 다수 갖추어져 있다. 특히 LNG는 탄화수소 기반 연료에서 무탄소 연료로 전환되기 위한 가교 역할을 할 수 있는 저탄소 연료로 주목받고 있다(KRS, 2023). 또한 Mikolajková et al.(2018)은

LNG는 가용성이 높은 연료이며, 탄소 배출을 제로를 만드는 과정에서 석탄과 석유를 일시적으로 대체할 수 있는 “Briding Fuels(교량 연료)”로 평가하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, 2022년도 기준 29%의 수주율을 보이고 있으나, 2023년도에는 41%의 높은 수주율을 차지하고 있다. 또한 Table 2에서 알 수 있듯이 친환경 대체연료 중 LNG가 가장 높은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

2.2 메탄올

메탄올 연료도 LNG 연료와 마찬가지로 무탄소 연료가 상용화될 때까지 사용 가능한 연료로 평가받고 있다(DNV GL, 2022).

메탄올 추진 엔진은 개발되어 있고, 상온에서 액체 상태로 보관이 가능하다. 또한 기존 공급 인프라를 이용하여 효율적으로 엔진과 선박을 개조할 수 있는 장점이 있다. 기존 선박의 연료유, 평형수 또는 슬롭 탱크를 액체 메탄올 연료 탱크로 개조하는 것은 LNG 탱크를 설치하는 것보다 경제적이며, 가스 보다 액체를 관리하는 것이 월등히 효율적인 측면이 있다(ABS, 2021).

Fig. 7에 따르면 메탄올 추진 선박 수주량의 약 80%는 컨테이너 선박이며, Fig. 5와 같이 2050년까지 메탄올 추진 선박은 전체 선박의 약 8%를 차지할 것으로 전망하고 있다(DNV AFI, 2023).

2.3 수소

수소 연료는 화석연료의 에너지 밀도와 동등수준으로 충족하기 위해 초고압 용기에 저장되거나 대기압에서 극저온 액체로 저장되어야 한다. 수소 연료를 선박에 적용하기 위한 국제 협약이나 규정은 존재하지 않은 측면과 수소연료용 선박엔진의 미개발 측면을 고려하면 선박의 수소추진시스템은 신중한 접근이 필요하다(IMO, 2022).

다만, 2023년 IMO “화물·컨테이너 운송 전문위원회(CCC)” 9차 회의에서 수소·암모니아 등의 대체 연료를 사용하기 위한 잠정지침서 마련을 논의하였으며, 2024년 12월 해사안전위원회(MSC) 109차 회의에서 잠정지침서를 승인할 것으로 전망된다(IMO, 2023).

2.4 암모니아

암모니아 연료의 시장 진입을 위해서는 생산과 공급인프라가 확충되어야 하며, 추진용 연료 탱크, 연료 공급 시스템, 엔진 기술 등의 개발은 필수적이다(KRS, 2023).

2023년 7월에 엔진 시운전을 시작으로 암모니아 연소에 필요한 파일럿 연료의 양, 엔진의 출력 데이터 및 추가적인 안전 시스템에 대해 분석하였다(MAN Energy Solutions, 2023).

특히, Man에서 제시한 암모니아 엔진 개발 및 공급 계획에 따르면 Fig. 8과 같이 2024년 이후 부터 암모니아 연료 엔진이 선박에 본격적으로 설치될 것으로 전망된다.

3. 연구 방법

3.1 연구개요

본 논문에서의 의사결정기준은 선박에서 발생할 수 있는 Table 5, Table 6와 같이 사고 시나리오 관점에서 6개의 평가항목을 적용하였다. 사고 시나리오의 구성은 대표적인 저탄소 및 무탄소 연료인 LNG, 수소, 암모니아, 메탄올을 대상으로 하여 6개의 의사결정 시나리오를 Together in Safety(2022)에서 발행한 “Future Fuels Risk Assessment”의 자료를 참조하였다.

본 연구에서는 대학교수, 선박 기관장, 조선소 임원, 선박 엔진 엔지니어, 그 외 해운·조선업 관련 종사자로 전문가집단을 편성하였으며, SWIFT(Structured What If Technique) 기법과 Checklist 기법을 활용하여 선박에서 실제로 발생할 수 있는 시나리오를 정성적인 방법을 통하여 구성하였다.

국제표준화기구(International Organization for Standardization, 이하 ‘ISO’라 칭함)에서 제공한 ISO 31000와 IEC 31010에 의거하여 시나리오를 만들었다. Table 4와 같이 ISO 31000과 IEC 31010은 위험도 평가를 관리하고 방법론을 규정한 기준이다. SWIFT 기법의 경우 독립적으로 고위험도를 평가할 수

있는 위험도평가 방법 중에 하나이며, 하위 시스템에 적용에 많이 사용하기 때문에 HAZID(Hazard Identification) 단계에서 많이 사용하는 기법이다(ISO, 2019). Checklist 기법은 위험 평가 시 맥락을 이해하고, 식별 인자를 확인하며, 다양한 목적에 따라 위험을 그룹화 하는 등 다양한 방식으로 사용이 가능하며, 통제 및 처리 방법을 분류 및 위험 관리에 사용이 된다(ISO, 2019).

따라서 HAZID 단계에서의 시나리오 구성의 경우에 SWIFT 기법과 Checklist 기법이 유리하여 채택하였다. 또한 시나리오 구성에 따른 결과를 다기준 의사결정기법의 위험도 평가 중에 하나인 퍼지 TOPSIS 기법을 적용하여 정성적으로 평가한 위험도 평가를 정량적으로 구체화하였다.

Fig. 9와 같이 전문가들은 4개의 친환경 연료를 6개의 사고 시나리오를 통하여 선박 대체 연료의 순위를 결정하였다.

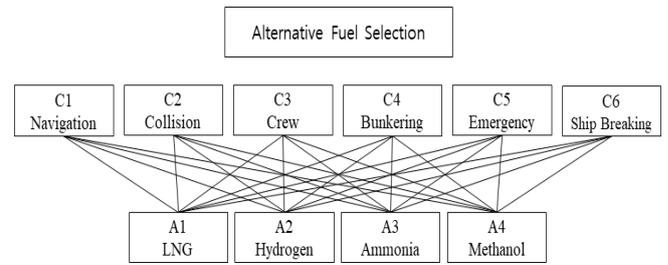


Fig. 9. Hierarchical Structure of Decision Problem.

Table 4. ISO Standard for Risk Assessment (Source: ISO)

Standard	Category	Description
ISO 31000:2018	Risk Management - Guideline	Comprehensive approach to identifying, analyzing, evaluating, treating, monitoring and communicating risks across an organization.
IEC 31010:2019	Risk Management - Risk Assessment Techniques	Enhance details on the technique usage, Expand application scope, and Eliminate redundancy with ISO 31000 concepts.

Table 5. Risk Assessment for an Incident Scenario (Source: Together in Safety)

Node	Description
Navigation(C_1)	Loss of navigation and airworthiness at sea, Excessive movement at sea, power outage at sea, Excessive trim at sea or in port, Damage to fuel tanks or systems.
External events(C_2)	Collision of a fuel oil tank with a vessel, Possible ignition from the collision
Ship operations other than bunkering(C_3)	Crew shifts, Crew training, Fuel and Cargo operations
Bunkering(C_4)	Disarrangement bunker station, Excessive movement, Loss of control, Leakage during bunkering
Fuel preparation, use and monitoring(C_5)	Power outages, Ship system failures and sensor failures
End of life(C_6)	Scrapping of old ships, Ship breaking

Table 6. Components for What-if Risk Assessment (Source: Together in Safety)

Node	Description
Navigation	What if there is loss of manoeuvrability at sea?
	What if there are excessive motions at sea?
	What if an excessive trim/list develops at sea or in port?
	What if there is a requirement for tug support/3rd party vessel attendance at sea or in port?
	What if there is a ship grounding in way of the future fuel tanks and system?
	What if the vessel needs to be abandoned?
External events	What if there is a ship collision in way of the fuel tanks?
	What if there is a potential of ignition?
Ship operations other than bunkering	What if cargo operations are required in way of the future fuel tanks and system components?
	What if there is a crew change?
	What if there is a completely new crew after vessel hand-over?
	What if onboard access is required by personnel not managed by the ship's operator?
Bunkering	What if there is a misalignment of the bunkering station?
	What if there are excessive motions?
	What if there is a loss of control?
	What if there is a leak/loss of containment?
Fuel preparation, use and monitoring	What if there is a loss of control?
End of life	What if the vessel is scrapped?

3.2 우선순위 결정

3.2.1 퍼지 TOPSIS 기법

Chen(2000)은 각 기준에 대한 대안을 간단한 수학적 형태를 제공하기 위하여 처음으로 두 퍼지 수의 거리를 유클리드 거리(Euclidean Distance)로 계산하는 확장된 퍼지 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 방법을 제시하였다. 여기서 의사결정 기준들의 중요성을 측정하여 가중치를 두었고, 의사결정기준 관점에서 대체안들을 언어적 변수로 평가하여 정량화하여 평가하였다. 퍼지 TOPSIS 기법은 언어적 변수를 정량화하는 과정을 거치기 때문에 우선순위를 선정하는 데 유용하게 활용하고 있다.

Sahin et al.(2020)은 유엔무역개발회의에 제시된 통계 데이터 세트 기반으로 6척의 벌크선을 선정하여 우선순위를 평가하였다. 전문가들은 6개의 평가 요소(선박 가격, 선박 재원, 연료 소모량, 엔진 마력, 선령, 화물창 및 하역설비 상태)를 7개의 언어적 변수(매우 좋음~매우 안 좋음)를 통하여 평가를 진행하였다. 각각의 요소를 퍼지 TOPSIS 기법을 이용하여 우선순위를 선정하였다. 선박 가격과 엔진 마력을 순위가 높았으며, 연료 소모량과 선박 재원의 평가가 낮았으며, 이러한 우선순위를 통하여 최적의 벌크선을 선정하였다.

또한, Chrysafis et al.(2022)은 퍼지 TOPSIS 기법을 채택하여 대형선박의 벙커링 계약 선정 기준을 분석하였다. 벙커링의 이해 관계에 있는 해운회사, 정유회사, 브로커 등으로 집단

을 구성하여 중요 항목을 검토하였다. 연료유 가격, 가용성, 분쟁 해결 능력, 계약할 수 있는 항구 등 총 10개의 기준을 제시하여 5개의 업체에 대한 우선 순위를 선정하였다.

퍼지 TOPSIS 방법을 적용시키는 7단계 별 적용 절차는 (1)항에서 (7)항까지이며, 관련 단계별 분석을 참조한다(Kim, 2017). 또한 퍼지 TOPSIS 기법을 이용하기 위해 사용되는 식의 심볼은 Table 7을 참조한다.

퍼지 논리의 관점에 따르면, 전체집합 내의 퍼지 집합은 X 라는 집합의 각 원소 x 가 구간 $[0, 1]$ 내의 어떤 실수와 연관된 소속 함수로 나타낼 수 있다. 이 함수 값 $\mu_{\tilde{M}}(x)$ 퍼지 집합 내 \tilde{M} 의 원소가 해당 퍼지 집합에 속하는 정도를 나타낸다. 또한, X 내의 $\exists x_i \in X, \mu_{\tilde{M}} = 1$ 라면, 이를 정규화된 퍼지 집합이라고 표현한다.

이 연구에서는 일반적으로 삼각형 모양의 퍼지 집합을 가정하며, Fig. 10과 같이 삼각형 퍼지 집합 \tilde{M} 을 (l, m, u) 로 정의한다. 어떠한 삼각형 퍼지 수 \tilde{M} 은 식(1)과 같다(Zimmermann, 2011).

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{(x-l)}{(m-l)}, & l \leq x \leq m \\ \frac{(u-x)}{(u-m)}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases} \quad (1)$$

Table 7. Symbols and Descriptions

Symbol	Description
d	Distance for Fuzzy Ideal Solution
(l, m, u)	Triangular Fuzzy Set
\tilde{M}	Triangular Fuzzy Number
$\mu_{\tilde{M}}(x)$	Function Value
w_j	Fuzzy Weight
A	Alternative Fuel
C	Incident Scenario
D	Expert
R	Normalized Matrix
V	Normalized Decision Matrix
X	Fuzzy Set

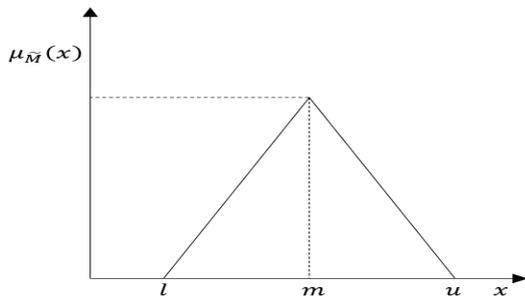


Fig. 10. Triangular Fuzzy Number.

(1) 1단계 분석

6개의 언어적 변수를 이용하여 Table 8처럼 “매우 높음 (VL), 상당히 높음(FH), 약간 높음(SH), 약간 낮음(SL), 상당히 낮음(FL), 아주 낮음(SH)”으로 구분하여 평가하였다(Rouhani, 2012). 7명의 전문가($D_1 \sim D_7$)가 6개의 사고 시나리오($C_1 \sim C_6$)에 대하여 Table 8의 언어적 변수를 사용하여 평가한 결과가 Table 9이며, 사고 시나리오의 산술 평균 \tilde{x}_{ij} 를 통하여 계산한 결과가 Table 10이다.

Table 8. Linguistic Values and Fuzzy Numbers

Description	Fuzzy Number
Very Low (VL)	(0.0, 0.0, 0.2)
Frequently Low (FL)	(0.0, 0.2, 0.4)
Slightly Low (SL)	(0.2, 0.4, 0.6)
Slightly High (SH)	(0.4, 0.6, 0.8)
Frequently High (FH)	(0.6, 0.8, 1.0)
Very High (VH)	(0.8, 1.0, 1.0)

또한, 평가 기준의 가중치를 평가하려면 BNP(Best Non-fuzzy Performance) 값을 두어야 하며, 식(2)와 같이 COA(Center of Area) 방법을 이용한다(Zhao and Govind, 1991).

$$BNP_w = [(u_w - l_w) + (m_w - l_w)]/3 + l_w \quad (2)$$

전문가들은 연료 수급(C_4) > 선박 운용(C_1) > 선박 충돌(C_2) > 비상 상황(C_5) > 선원(C_3) > 폐선(C_6)의 순으로 사고 시나리오의 중요도를 평가하였다.

Table 9. Linguistic Ratings Evaluated by Decision-makers

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
C_1	FH	FH	FH	VH	VH	VH	VH
C_2	FH	FH	FH	FH	FH	VH	VH
C_3	SL	SL	SH	FH	FH	FH	FH
C_4	SH	SH	FH	FH	FH	FH	FH
C_5	SH	SH	SH	FH	FH	FH	FH
C_6	FL	SL	SL	SH	SH	FH	VH

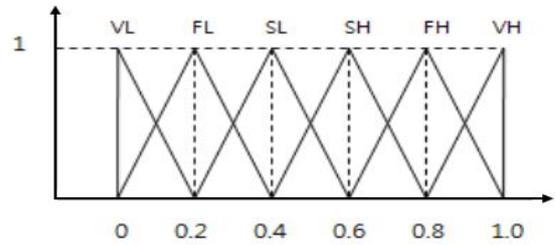


Fig. 11. Fuzzy Function for Linguistic Value and Criteria.

Table 10. BNP Value of Fuzzy Number

	Fuzzy Weight(w_j)(u_w, m_w, l_w)	BNP Number	Rank
C_1	(0.71, 0.91, 1.00)	0.88	2
C_2	(0.66, 0.86, 1.00)	0.84	3
C_3	(0.46, 0.66, 0.86)	0.66	5
C_4	(0.74, 0.94, 1.00)	0.90	1
C_5	(0.83, 0.86, 0.91)	0.79	4
C_6	(0.37, 0.57, 0.74)	0.56	6

(2) 2단계 분석

시나리오에 대하여 전문가들의 퍼지 의사결정행렬을 나타내기 위해서는 Fig. 11과 같은 삼각형 퍼지 수로 측정하는 것으로 가정하였다.

4개의 선박 대체 연료인 LNG(A_1), 암모니아(A_2), 수소(A_3), 메탄올(A_4)에 대하여 Table 8의 6개의 언어적 변수로 평가를 진행하였으며, 전문가 그룹($D_1 \sim D_7$)으로부터 4개의 선박 대체 연료($A_1 \sim A_4$)에 대하여 Table 6에서 제시된 6개의 위험도 평가 시나리오($C_1 \sim C_6$)에 대하여 각각 평가하고, 그 결과는 Table 11, Table 12, Table 13, Table 14, Table 15 및

Table 16에서 보여주고 있다. 결과 값의 산술 평균 값 \tilde{x}_{ij} 을 도출하기 위해 아래 식(3)을 이용하였고, 결과는 Table 17에서 보여주고 있다.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^K] \quad (3)$$

Table 11. “Navigation Scenario” for Linguistic Rating

C_1	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
A_1	SL	SH	SH	SH	SH	FH	FH
A_2	SL	SL	SH	SH	SH	FH	FH
A_3	SL	SL	SH	SH	SH	SH	FH
A_4	SH	SH	SH	FH	FH	FH	VH

Table 12. “External Events Scenario” for Linguistic Rating

C_2	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
A_1	VL	SH	SH	SH	SH	FH	FH
A_2	SL	SL	SH	SH	SH	SH	FH
A_3	SL	SL	SL	SH	SH	SH	FH
A_4	SL	SH	SH	SH	FH	FH	FH

Table 13. “Ship operations other than bunkering” Scenario for Linguistic Rating

C_3	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
A_1	SL	SH	SH	SH	SH	SH	FH
A_2	SL	SH	SH	SH	SH	SH	SH
A_3	SL	SL	SL	SL	SH	SH	FH
A_4	SH	SH	SH	SH	SH	SH	FH

Table 14. “Bunkering” Scenario for Linguistic Rating

C_4	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
A_1	SH	SH	SH	SH	SH	SH	VH
A_2	SH	SH	SH	SH	SH	SH	FH
A_3	SL	SL	SL	SL	SL	SH	SH
A_4	SH	SH	SH	SH	FH	FH	VH

Table 15. “Fuel preparation, use and monitoring” Scenario for Linguistic Rating

C_5	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
A_1	SH	SH	SH	SH	SH	SH	FH
A_2	SH	SH	SH	SH	SH	SH	FH
A_3	SH	SH	SH	SH	SH	SH	FH
A_4	SH	SH	SH	SH	FH	FH	FH

Table 16. “End of life” Scenario for Linguistic Rating

C_6	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
A_1	SL	SL	SL	SH	SH	SH	SH
A_2	SL	SL	SL	SL	SH	SH	SH
A_3	SL	SL	SL	SH	SH	SH	SH
A_4	SL	SL	SL	SH	SH	SH	SH

(3) 3단계 분석

3단계에서는 2단계에서 도출된 전문가들의 서로 다른 척도로 평가된 측정값들의 의사 결정 문제를 정규화할 필요가 있으며, 이를 선형척도변환 방법을 통해 서로 다른 의사 기준의 정도를 비교하여야 한다(Chen, 2000).

이러한 정규화 과정 및 비교를 위해 아래 식(4), (5) 및 (6)을 이용하였으며, 그 결과는 Table 18에서 보여주고 있다.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{\tilde{l}_{ij}}{c_j^*}, \frac{\tilde{m}_{ij}}{c_j^*}, \frac{\tilde{u}_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B, \quad (5)$$

$$c_j^* = \max_{i \in B} c_j, \bar{c}_j = \min_{i \in C} c_j \quad (6)$$

여기서 B는 이득 기준, C는 비용 기준의 집합이다. 이득 기준은 측정값이 클수록 선호되고, 비용 기준은 측정값들이 낮을수록 선호된다. 본 논문에서는 이득 기준으로 시나리오를 구성하였다.

(4) 4단계 분석

3단계에서 산출된 의사결정 측정값에서 서로 다른 가중치가 할당된 정규화 퍼지 의사결정 행렬 \tilde{V} 를 계산하기 위해 아래 식(8)을 이용하였다(Chen, 2000).

아래 식(7)에서 보여주는 바와 같이 의사결정자 정규화 행렬(\tilde{r}_{ij})과 퍼지 가중치(w_j)를 이용하였으며, 식(8)과 같이 행렬로 도출하였으며, 결과는 Table 19에서 보여주고 있다.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \otimes w_j \quad (7)$$

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (8)$$

Table 17. Fuzzy Group Decision Matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	(0.43,0.63,0.83)	(0.43,0.63,0.83)	(0.40,0.60,0.80)	(0.46,0.66,0.83)	(0.43,0.63,0.83)	(0.31,0.51,0.71)
A_2	(0.40,0.60,0.80)	(0.37,0.57,0.77)	(0.37,0.57,0.77)	(0.43,0.63,0.83)	(0.43,0.63,0.83)	(0.29,0.49,0.69)
A_3	(0.37,0.57,0.77)	(0.34,0.54,0.77)	(0.31,0.51,0.74)	(0.26,0.46,0.66)	(0.43,0.63,0.83)	(0.31,0.51,0.71)
A_4	(0.54,0.74,0.91)	(0.46,0.66,0.86)	(0.43,0.63,0.83)	(0.51,0.71,0.89)	(0.49,0.69,0.89)	(0.31,0.51,0.71)
w_j	(0.71,0.91,1.00)	(0.66,0.86,1.00)	(0.46,0.66,0.86)	(0.74,0.94,1.00)	(0.83,0.86,0.91)	(0.37,0.57,0.74)

Table 18. Normalized Group Decision Matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	(0.47,0.61,0.91)	(0.50,0.73,0.97)	(0.48,0.72,0.96)	(0.48,0.74,0.93)	(0.48,0.71,0.93)	(0.44,0.72,1.00)
A_2	(0.44,0.66,0.88)	(0.43,0.66,0.90)	(0.45,0.69,0.93)	(0.48,0.71,0.93)	(0.48,0.71,0.93)	(0.41,0.69,0.97)
A_3	(0.41,0.63,0.85)	(0.40,0.63,0.90)	(0.37,0.61,0.89)	(0.29,0.52,0.74)	(0.48,0.71,0.93)	(0.44,0.72,1.00)
A_4	(0.59,0.81,1.00)	(0.53,0.77,1.00)	(0.52,0.76,1.00)	(0.57,0.80,1.00)	(0.55,0.78,1.00)	(0.44,0.72,1.00)

Table 19. Weighted Normalized Group Decision Matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	(0.41,0.61,0.80)	(0.42,0.61,0.81)	(0.32,0.48,0.63)	(0.47,0.67,0.84)	(0.38,0.56,0.73)	(0.25,0.40,0.56)
A_2	(0.39,0.58,0.77)	(0.36,0.55,0.75)	(0.30,0.46,0.61)	(0.43,0.64,0.84)	(0.38,0.56,0.73)	(0.23,0.39,0.54)
A_3	(0.36,0.55,0.75)	(0.34,0.53,0.75)	(0.24,0.40,0.59)	(0.26,0.47,0.67)	(0.38,0.56,0.73)	(0.25,0.40,0.56)
A_4	(0.52,0.71,0.88)	(0.47,0.65,0.84)	(0.34,0.50,0.66)	(0.51,0.72,0.90)	(0.43,0.62,0.79)	(0.25,0.40,0.56)

(5) 5단계 분석

“퍼지 긍정적 해(Fuzzy Positive Ideal Solution, 이하 ‘FPIS’라 칭함.)”와 “퍼지 부정적 해(Fuzzy Negative Ideal Solution, 이하 ‘FNIS’라 칭함.)”는 양의 삼각형 퍼지 수 $[0, 1]$ 내에 존재하고, Table 19에서 보여주는 행렬 값의 최댓값(\tilde{v}_n^*) 및 최솟값(\tilde{v}_n^-)에 대하여 아래 식(9)을 통해 표현하였다(Chen, 2000). 참고로, A^* 는 최댓값의 집합, A^- 는 최솟값의 집합을 의미한다.

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*), \quad (9)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-)$$

$$A^* = [(0.88,0.88,0.88), (0.84,0.84,0.84), (0.66,0.66,0.66), (0.84,0.84,0.84), (0.79,0.79,0.79), (0.56,0.56,0.56)]$$

$$A^- = [(0.36,0.36,0.36), (0.34,0.34,0.34), (0.24,0.24,0.24), (0.26,0.26,0.26), (0.38,0.38,0.38), (0.25,0.25,0.25)]$$

(6) 6단계 분석

각 선박 대체 연료의 FPIS(d_i^*)와 FNIS(d_i^-) 거리는 아래와 같이 n 차원의 유클리디안 거리식(10)을 이용하여 구하였다.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*), \quad d_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (10)$$

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \left(\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

여기서 $d_v(m, n)$ 는 두 퍼지 값 간의 거리이며, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 이다.

d_i^* 는 FPIS(A^*)에서의 각 대체 연료(A_i) 거리를 말하며, d_i^- 는 FNIS(A^-)에서의 각 대체 연료(A_i) 거리를 의미한다. 또한 두 개의 삼각형 퍼지 값 $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$ 와 $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$ 간의 거리는 식 (11)과 같이 “Degree of Vertex” 방법으로 계산하였다(Dubois and Prade, 1980).

Table 20에서는 상기 식(11)을 통해 도출된 FPIS에서의 각

대체 연료의 거리($d(A_i, A^*)$) 값을 보여주고 있으며, Table 21에서도 마찬가지로 FNIS에서의 각 대체 연료의 거리($d(A_i, A^-)$)에 대하여 동일 식(11)을 통해 도출된 값을 보여주고 있다.

Table 20. Distance between A_i and A^*

$d(A_i, A^*)$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
$d(A_1, A^*)$	0.316	0.277	0.223	0.235	0.274	0.201
$d(A_2, A^*)$	0.338	0.328	0.240	0.263	0.274	0.215
$d(A_3, A^*)$	0.363	0.344	0.288	0.409	0.274	0.201
$d(A_4, A^*)$	0.230	0.240	0.207	0.206	0.230	0.201

Table 21. Distance between A_i and A^-

$d(A_i, A^-)$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
$d(A_1, A^-)$	0.294	0.316	0.268	0.428	0.227	0.199
$d(A_2, A^-)$	0.269	0.266	0.251	0.412	0.227	0.186
$d(A_3, A^-)$	0.250	0.261	0.222	0.266	0.227	0.199
$d(A_4, A^-)$	0.373	0.348	0.291	0.477	0.276	0.199

(7) 7단계 분석

선박 대체 연료의 상대적 “근접도 계수(Closeness Coefficient, 이하 ‘ CC_i ’라 칭함.)”의 크기에 따라서 실현 가능한 대체 연료의 우선순위를 결정하였다(Yeo, 2023).

$$CC_i = d_i^- / (d_i^* + d_i^-) \tag{12}$$

CC_i 값이 1에 근접할수록 FPIS(A^*)에 가까워지는 동시에 FNIS(A^-)로 부터 멀어진다.

상기 식(12)을 이용하여 각 연료에 대한 FPIS(A^*)와 FNIS(A^-)부터의 거리 d_i^* 와 d_i^- 을 계산하고, 상대적 근접도 계수를 도출한 결과는 Table 22에서 보여주고 있으며, CC_i 값에 대한 우선순위는 메탄올(A_4) > LNG(A_1) > 암모니아(A_2) > 수소(A_3)순으로 결정되었다.

Table 22. Result of d_i^* , d_i^- , CC_i

	d_i^*	d_i^-	CC_i	Rank
A_1	1.526	1.732	0.532	2
A_2	1.658	1.611	0.493	3
A_3	1.879	1.425	0.431	4
A_4	1.314	1.964	0.599	1

4. 결론

본 연구에서 전문가들은 가중치를 선정하기 위하여 각 사고 시나리오마다 평가를 진행하였다. 연료 관리, 선박 사고시의 화재 가능성과 같이 연료 특성과 관련된 시나리오가 높게 평가받았으며, 연료 수급(C_4), 선박 운용(C_1), 선박 충격(C_2) 순이었다.

메탄올(A_4)은 대부분의 전문가들로부터 좋은 평가를 받았기 때문에 FPIS에서 최저점, FNIS는 최고점이었고, CC_i 에서 최고점으로 평가되었다. 또한, 메탄올은 모든 시나리오에서 FPIS는 최저점을 받았으며, FNIS는 최고점을 받았다. 특히, 가중치가 높은 연료 수급(C_4), 선박 운용(C_1) 시나리오에서 다른 연료보다 높은 점수를 받았다.

반대로, 수소(A_3)는 모든 시나리오에서 FPIS이 최고점이고 FNIS가 최저점이었다. 또한 가중치가 높은 연료 수급(C_4) 시나리오에서 다른 연료에 비해 높은 점수를 받았다. 따라서 모든 시나리오에서 평가가 좋지 않아 CC_i 가 낮기 때문에 우선순위가 낮게 평가되었다.

LNG와 암모니아의 경우에는 비상 상황(C_5) 시나리오는 제외하고는 LNG의 평가가 좋아 우선순위가 높았으며 선박 운용(C_1), 선박충돌(C_2) 시나리오에서 LNG를 암모니아보다 높게 점수를 주어 차이가 났다.

본 연구는 해상에서 일어날 수 있는 사고 시나리오를 토대로 대표적인 친환경 대체 연료인 LNG, 수소, 암모니아, 메탄올을 대상으로 하여 퍼지 TOPSIS 기법을 통하여 선박 대체 연료의 우선순위를 결정하였다. 6가지의 언어적 척도를 삼각형 퍼지집합 이론을 적용하여 사고 시나리오별 대체 연료를 평가하는 방법으로 진행하였다. 본 논문의 의의는 전문가들의 주관적 판단을 객관화시키기 위하여 퍼지 TOPSIS 기법을 적용하여 수학적으로 변환시킨 것이다. 또한 FPIS와 FNIS를 동시에 적용하여 효과적으로 우선순위를 결정할 수 있었다.

사 사

본 연구는 2023년도 한국해양수산개발원이 후원한 「해양수산 미래연구 논문공모전」 수상작임.

Reference

[1] ABS(2020), Pathways to Sustainable Shipping. pp. 1-107.
 [2] ABS(2021), METHANOL AS MARINE FUEL pp. 1-28.
 [3] ABS(2023), NEWS BRIEF: MEPC 80. pp. 1-25.

- [4] Chen, C.-T.(2000), Extension of the TOPSIS for Group Decision-making Under Fuzzy Environment, *Fuzzy Sets and Systems*, 114, pp. 1-9.
- [5] Clarksons Research(2023), Green Technology Tracker: January 2023. Retrieved from <https://insights.clarksons.net/> on September 1.
- [6] DNV AFI(2023), Alternative Fuels Insight. Retrieved from <https://afi.dnv.com/> on September 15.
- [7] DNV GL(2022), Alternative Fuels for Container Ships, pp. 1-66.
- [8] Dubois, D. and H. Prade(1980), *Fuzzy Sets and Systems Theory and Applications*, New York: Academic Press Inc.
- [9] ISO(2019), 31010:2019 pp. 1-264.
- [10] IMO(2018), RESOLUTION MEPC.304(72). pp. 1-13.
- [11] IMO(2020), Fourth IMO GHG Study 2020. pp. 1-46.
- [12] IMO(2022), Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers (CCC 8), 8th session. pp. 1-131.
- [13] IMO(2023), Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers (CCC 9), 9th session. Retrieved from <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/CCC-9th-session.aspx> on January 5.
- [14] IMO(2023), RESOLUTION MEPC.377(80). pp. 1-18.
- [15] Chrysafis, K. A., I. N. Theotokas, and I. N. Lagoudis(2022), Managing fuel price variability for ship operations through contracts using fuzzy TOPSIS, *Research in Transportation Business & Management*, 43, 100778.
- [16] Kim, K.-Y.(2017), Priority Decision for Energy Selection Using Fuzzy TOPSIS, *New Renew. Energy*, 3, pp. 73-84.
- [17] KRS(2023), AMMONIA AS MARINE FUEL. pp. 1-66.
- [18] Mikolajková, M., H. Saxén, and F. Pettersson(2018), Linearization of an MINLP model and its application to gas distribution optimization, *Energy*, Vol. 146, pp. 156-168.
- [19] MAN ENERGY SOLUTIONS(2023), Groundbreaking First Ammonia Engine Test Completed. pp. 1-3.
- [20] Rouhani, S., M. Ghazanfari, and M. Jafari(2012), Evaluation Model of Business Intelligence for Enterprise Systems Using Fuzzy TOPSIS, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3, pp. 3764-3771.
- [21] Sahin, B., T. L. Yip, P.-H. Tseng, M. Kabak, and A. Soylu (2020), An Application of a Fuzzy TOPSIS Multi-Criteria Decision Analysis Algorithm for Dry Bulk Carrier Selection, *Information*, 11(5), 251.
- [22] Yeo, S. J.(2023), Risk Assessment of Marine LPG Engine Using Fuzzy Multicriteria HAZOP Technique, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 29, No. 2, pp. 238-247.
- [23] Stopford, M.(2013), *Maritime Economics*. 3rd edition. Publishing House, Routledge, New York.
- [24] Together in Safety(2022), *Future Fuels Risk Assessment*. pp. 1-18.
- [25] Zhao, R. and R. Govind(1991), Algebraic Characteristics of Extended Fuzzy number, *Information Science*, 54, pp. 103-130.
- [26] Zimmermann, H. J.(2011), *Fuzzy Set Theory - And Its Applications*, Springer Science & Business Media.

Received : 2024. 01. 19.

Revised : 2024. 02. 22.

Accepted : 2024. 02. 23.