

What-if 기법을 이용한 암모니아 연료 추진 선박에 대한 위험성 평가 연구

지 재 훈*

*목포해양대학교(교수)

A Study on Risk Assessment using What-If Method for Ammonia Fueled Ship

Jae-Hoon JEE*

*Mokpo National Maritime University(professor)

Abstract

In accordance with the Resolution Res.MEPC.304(72) of the Maritime Environmental Protection Committee of the International Maritime Organization April 2018, The 'IMO Greenhouse Gas Reduction Initial Strategy' report on greenhouse gas emission reduction was adopted, which is to support the Paris Agreement concluded in 2015, and shows IMO's strong will to reduce greenhouse gas emissions in the shipping sector. It is somewhat unreasonable to use ammonia fuel as fuel for ships right away. In order to use gas fuel in ships, the IGF Code should include the safety design regulations for the fuel, but the related regulations have not been included so far, and the risk of ammonia is higher than that of hydrogen, so careful analysis of risk factors is required. should be included A total of 28 risk factors could be identified for the 5 nodes, and among the 28 risk factors, 9 were rated as 'Acceptable' and 13 were rated as 'ALARP'. The 'number of unacceptable' risk levels was analyzed as 6. In general, it can be seen that design and equipment introduction have been made to reduce the risk for ammonia fuel-propelled ships, but it can be seen that unacceptable risk still exists.

Key words : Ammonia fuel, What-if analysis, Risk assessment, HAZID, FSA

I. 서론

2018년 4월 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 'IMO'로 칭함)의 환경 보호 위원회(Maritime Environmental Protection Committee, 이하 'MEPC'라 칭함)의 결의안 Res.MEPC.304(72)에 의해 선박에서 온실가스 배출 감소에 관한 'IMO 온실가스 감축 초기전략' 보고서를 채택하였으며, 이는 2015년에 체결된 파리협정을 지원하기 위한 것으로 해운 분야에서의 온실가스 감축을 위한 IMO의 강한 의지를 보여주고 있다

(IMO, 2018).

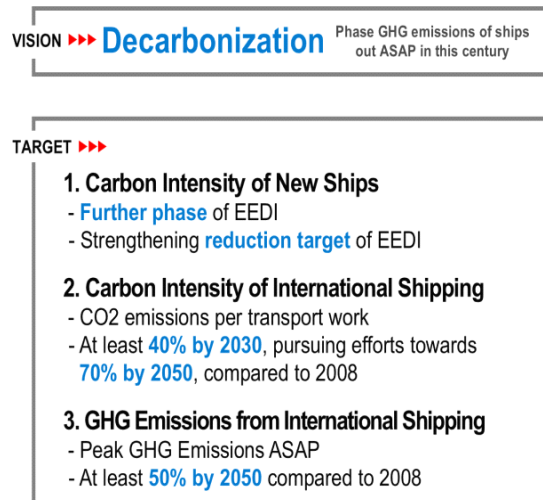
IMO에서는 선박 탈 탄소화 실현을 위한 감축 전략(IMO GHG Strategy) 채택 및 감축 목표 달성을 위한 탄소세 및 저/무탄소 연료 도입 등 고강도의 규제를 도입하기 위한 계획을 추진 중이다. 해운 탈 탄소화 실현을 위해 주요하게 3개로 분류된 감축 목표를 수립하고 있으며, 세부적 감축 목표의 추가 강화 여부에 대해 논의 중이다(IMO, 2018).

[Fig. 1]에서 알 수 있듯이 주요 3가지 논의 내용은 신조선 탄소집약도(Carbon Intensity Index,

* Corresponding author : 0,61-240-7208, jhjee@mmu.ac.kr/orcid.org/0000-0001-9484-4404

<Table 1> Key short/medium/long-term measures suggested in IMO initial strategy

candidate measures	Lists
	Early introduction of EEDI reduction targets for new shipbuilding energy efficiency improvement and setting of additional reduction targets
Shot-terms measures	Existing ship design energy efficiency(EEXI) regulation and operational efficiency rating system(CII) implemented from 2023 Adoption of life cycle evaluation guidelines for ship fuel (LCA Guideline)
Middle-terms measures	WtW-based ship fuel oil regulation (GFS) Market-based measures(MBM) such as emissions trading scheme/carbon tax
Long-terms measures	Promote the development and supply of carbon-free or non-fossil fuels Discovery of new innovative reduction measures



[Fig. 1] By 2023, initial strategy will be revised and it will strengthen the target level (source : KR).

이하 ‘CII’라 칭함) 개선을 위한 선박에너지효율 지수(Energy Efficiency Design Index, 이하 “EEDI”라 칭함) 추가 강화, 운항선 CII를 2008년 대비 2030년까지 40% 및 2050년까지 70% 감축, 가능한 빠른 시기 내에 선박 GHG 배출량 정점 도달 및 2008년 대비 2050년까지 50% 감축에 관한 것이다(KR, 2023).

이러한, 온실가스 감축 목표 달성을 위해, <Table 1>에서 알 수 있듯이, IMO 초기전략에서

제시된 주요 단/중/장기 조치(Candidate measures) 내용을 제시하고 있으며, 감축 전략 개정/채택을 통해 이행 시기가 포함된 추가조치가 포함될 예정이다(KR, 2023).

IMO 이외 유럽의 온실가스 감축 규제에 대하여 살펴보면, 유럽연합 집행위원회(EC, European commission)는 2021년 7월에 ‘EU Fit for 55’ 패키지 법안을 발표하였고, 2030년까지 기존 40%에서 55%로 상향 조정하였다(EC, 2021).

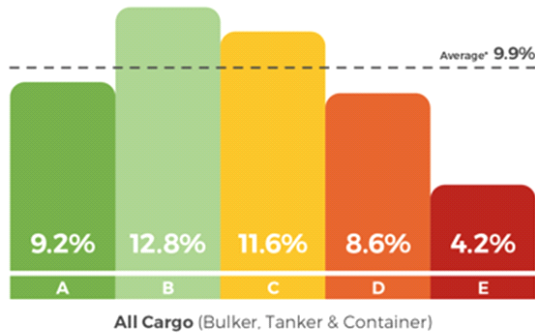
또한, 국제해운과 직접적으로 관련이 있는 유럽연합 배출권거래제(ETS, Emissions trading scheme, 이하 ‘ETS’로 칭함)는 온실가스 배출에 대한 권리를 배출권으로 사고팔 수 있는 제도로, EU의 육상산업에서 2005년부터 도입되어 운영되었고, 2024년부터 EU 운항 선박으로 확대 적용하는 제안이 포함되어 있다(EC, 2021).

FuelEU Maritime은 EU 해역 내에서 운항하는 선박에서 저탄소 연료 사용을 촉구하기 위한 규제 2025년부터 시행될 예정이며, 이는 선박의 온실가스 집약도 제한 기준을 2050년까지 점진적으로 강화하겠다는 의지를 보여준다. 이때 온실가스 집약도는 WtT(Well-to-Tank)와 TtW(Tank-to-Wake) 모두 포함하는 연료의 전 과정 배출량(WtW, Well-to-Wake) 기준으로 산정하였다(EC, 2023).

시장기반 온실가스 감축 조치사항으로 탄소집

약도 등급(CII Rating) 규제가 대표적이다. 선박의 실제 연간 연료소모량 및 운항 거리 등을 기반으로 CII 값을 계산하고, 해당 기간 선박에 요구되는 CII 허용값과 비교해 A(높은 등급)부터 E(낮은 등급)까지 등급을 부여하는 제도이다.

선박의 CII 등급이 3년 연속 D 또는 단일 연도 E에 해당되는 경우, CII 허용값 달성을 위한 시정조치 계획을 수립하여 SEEMP Part-III에 포함하여야 하는 것으로, 사실상 폐선 조치를 의미한다.

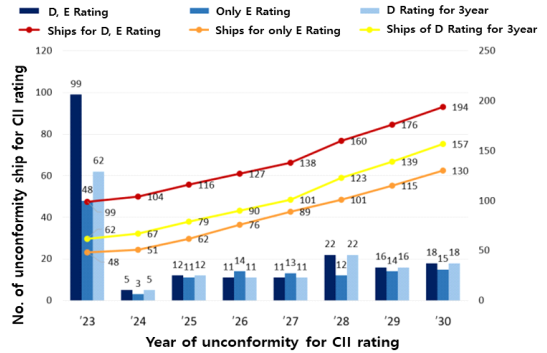


[Fig. 2] Fleet sold by estimated CII rating and ship type(%) (source: S&P Global).

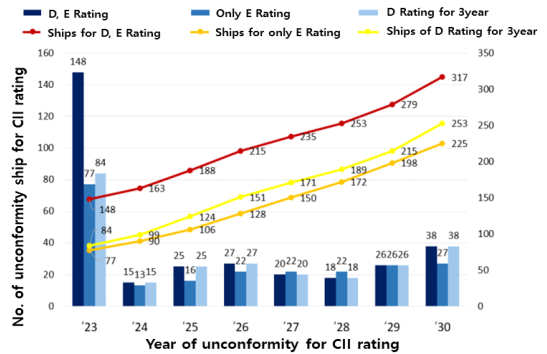
[Fig. 2]는 S&P Global의 2022년도 전 세계 선대를 대상으로 벌커, 탱커 및 컨테이너 운송 선박 중 거래된 선박들의 비율을 보여주고 있는 것으로, 선박 에너지 효율 관리 계획서(Ship Energy Efficiency Management Plan, 이하 'SEEMP'로 칭함) 개정이 필요한 D와 E 등급 선박은 낮게 거래되고 있음을 알 수 있으며, 특히 E 등급 선박들이 매우 적게 거래되었음을 알 수 있다(S&P Global, 2022).

또한, [Fig. 3] 및 [Fig. 4]에서 알 수 있듯이 대한민국 국적 해운사 선박 769척(국적선 및 BBCHP)의 CII 달성 값을 분석한 결과, D 또는 E 등급에 해당하는 선박은 2023년 기준 32%(247척), 2026년 기준 44%(342척) 및 2030년 기준

66%(511척)로 분석되어 세계시장에서 국적선사들은 퇴출 위기에 처해있음을 알 수 있다(KMI 2022).



[Fig. 3] Analysis of CII rating of ships flagged Korea (source: KMI).



[Fig. 4] Analysis of CII rating of BBCHP ships (source: KMI).

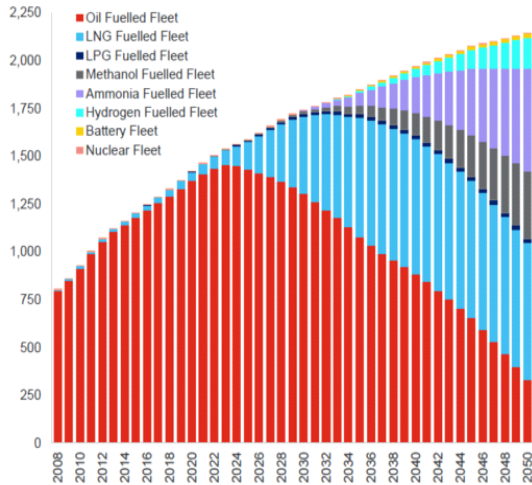
이러한 추세로 보면 향후 국적선들은 온실가스 감축 규제에 따라 추가적인 벌금을 부과받는 경제적 규제로 변모하고, 대표적인 배출권거래제에 따라 EU 기항 선대(137척)는 2026년부터 매년 1,158억 이상의 ETS 비용이 유럽으로 유출될 것으로 전망된다(KMI 2022).

또한, 선박 탈탄소화 실현을 위한 대응방안으로 무탄소 대체연료가 부과됨에 따라 기존 선박의 연료 사용단계(Tank-to-Wake)에서 배출량을 산정하는 규제에서 연료의 생산단계(Well-to-Tank)

배출량까지 모두 포함하는 연료 전과정 (Well-to-Wake) 기준의 배출량 산정 규제로 확대 될 예정이다. 대표적 규제로 시행 예정인 IMO의 GFS(GHG Fuel Standard) 및 EU의 FuelEU Maritime이 있으며, FuelEU Maritime 기준으로 국적 해운사는 ‘25년부터 연간 약 300억에서 ’50년 6,600억 수준으로 대응비용이 발생 될 것으로 전망된다(KMI 2022).

Clarkson research에 따르면 사용되는 연료 전망에 대한 시나리오를 분석하였으며, [Fig. 5]에서 알 수 있듯이, IMO GHG 감축 목표에 따른 2050년까지 선박 연료 수요전망으로 기존 화석연료 15%, LNG 연료 34%, 무탄소 연료 34%를 차지하는 것으로 예상하였다. 특히 무탄소 연료 범위에서 암모니아 연료 사용량은 지속해서 증가할 것으로 분석하였다(Clarkson research, 2022).

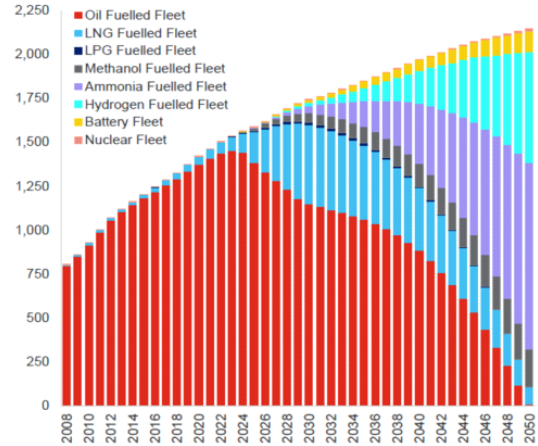
Fleet Development, Average Year, m. GT



[Fig. 5] Expected rate of ship’s fuel in use by 2050 according to IMO GHG reduction plan(source:clarkson research).

또한, [Fig. 6]에서 알 수 있듯이, Net-zero 목표에 따른 2050년까지 선박 연료 전망에 대하여 기존 화석연료 0%, LNG 연료 5%를 차지하며, 무탄소 연료 85%를 차지하는 것으로 분석하였으며,

Fleet Development, Average Year, m. GT



[Fig. 6] Expected rate of ship’s fuel in use by 2050 according to net-zero carbon plan (source:clarkson research).

특히 암모니아 연료 사용량은 지속해서 증가하고 있음을 알 수 있다.

선박에 적용될 수 있는 무탄소 연료 종류는 수소와 암모니아 연료가 대표적이다. 이 중에서 암모니아 연료 사용 비중이 확대될 것으로 판단되는 2가지의 근거를 제시할 수 있다.

우선 수명주기 관점에서 보면 수소는 사용 시점(Tank-to-wake)에서 보면 ‘Zero-carbon’이지만, 재생 가능한 자원이 아닌 에너지를 사용하는 프로세스를 통해 재생 불가능한 공급원료(천연가스)에서 생산되는 경우에는 ‘Well-to-Tank’ 관점에서는 상당한 탄소 배출량이 발생한다.

그러나 암모니아의 경우에는 일반적으로 질소와 수소를 결합하여 생성하는 것으로 천연가스 연료 등 공정과정에서 발생하는 수소와 질소의 부산물을 합성하여 암모니아를 생산하는 것이므로 수명주기 관점에서 탄소 배출량의 일부로 고려될 수 있다.

연료의 이송 관점에서 수소는 질량 당 높은 에너지 함량, 높은 확산성 및 높은 화염 속도 특성들을 가지고 있으나, 극저온 저장(-253℃)과 전용의 연료 공급 시스템이 필요하고, 체적 기준에

너지 함량이 낮고 선박설계에 상당한 영향을 미친다.

반면 암모니아는 LPG 연료와 성상이 비슷하고, 체적 기준에서 보면 에너지 밀도가 높고 액화 온도로 상압에서는 -33℃로 낮은 온도에서 저장이 쉬운 측면이 있다.

그러나 암모니아 연료를 당장 선박의 연료로 사용하기에는 다소 무리가 있다. 가스연료를 선박에 사용하기 위해서는 IGF code에 해당 연료의 안전 설계 규정을 포함하고 있어야 하나, 현재까지 관련 규정이 포함되어 있지 않은 점과 암모니아의 위험성은 수소에 비해 높은 편으로 위험요소의 면밀한 분석이 포함되어야 한다.

본 논문에서는 이러한 암모니아 연료 추진 선박에 대한 위험인자 및 위험도를 측정하기 위해 대표적인 위험인자 식별(HAZID) 방법인 ‘What-If’ 기법을 이용하고자 하며, 분석결과를 본 논문의 결과에서 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 암모니아 위험성 분석

암모니아 물질의 물리적 특성을 살펴보면, 암모니아는 질소와 수소의 화합물로 대기압과 상온에서 특유의 매운 냄새가 나는 무색 기체이다. 대기압보다 높은 압력에서 암모니아는 액체가 되어 운반 및 저장이 더 쉬워진다. 암모니아의 발열량은 일반적으로 메탄올과 유사한 특징이 있다. 연료유보다 에너지 밀도가 낮아 같은 에너지 함량을 생산하려면 석유 기반(탄소 기반) 연료보다 약 2.4배 더 많은 저장 부피가 필요하다(ABS, 2020).

암모니아의 물리적 특성은 <Table 2>에서 나열하고 있다. 암모니아 연료는 다른 대체연료에 비해 상대적으로 가연성 범위가 좁고 독성이 있고 반응성이 매우 높다.

따라서 IGC Code는 암모니아를 포함하는 데

<Table 2> Physical property of ammonia (source:ABS)

Ammonia Property	Value
Energy density(MJ/L)	12.7
Latent heat of vaporization(MJ/kg)	188
Heat of vaporization(kJ/kg)	1,371
Autoignition temperature(°C)	651
Min. ignition energy(mJ)	680
Liquid density(kg/m ³)	600
Melting point(°C)	-77.7
Boiling point at 1bar(°C)	-33.6
Flammable range in dry air(%)	15.15~ 27.35
Critical temperature(°C)	132.25
Critical pressure(bar)	113

사용할 수 있는 재료와 선원이 암모니아 중독에 노출될 위험을 최소화하기 위해 설계 기능에 대한 엄격한 요구 사항을 제시하여야 한다. 또한, 연료를 안전하게 관리하는데 필요한 모든 개인 보호 장비를 갖추어야 한다.

암모니아 독성 위험성에 대하여 살펴보면, 암모니아에 대한 냄새 식별 수치(역치)는 0.037에서 1.0ppm 범위로 매우 낮다. 이는 낮은 농도에서도 대부분 사람이 감지할 수 있음을 의미한다. 암모니아는 인간에게 유독한 물질이며, 암모니아에 대한 노출은 선박에서 종사하는 선원의 안전을 위해 허용 가능한 한도로 제한되어야 한다.

미국의 유해물질 노출 한계를 결정하기 위한 연방 자문위원회에서 권고하고 있는 암모니아의 인체 허용 노출 한계를 <Table 3>에서 예시로 보여주고 있다(ABS, 2020).

낮은 농도의 암모니아는 눈, 폐, 피부를 자극할 수 있으며 높은 농도 또는 직접적인 접촉을 통해 즉시 생명을 위협할 수 있다. 증상으로는 호흡 곤란, 흉통, 기관지 경련, 최악의 경우 체액이 폐를 채우고 호흡 부전을 유발할 수 있는 폐부종이 있다. 특히 고농도의 무수 암모니아와 피부 접촉

<Table 3> Ammonia acute exposure guideline levels-standards and guidelines (source:ABS)

Guideline	10min	30min	1hour	4hour	8hour
AEGL-1	30ppm	30ppm	30ppm	30ppm	30ppm
AEGL-2	220ppm	220ppm	160ppm	110ppm	110ppm
AEGL-3	2,700ppm	1,600ppm	1,100ppm	550ppm	390ppm

AEGL-1 : it is predicted that the general population including susceptible individuals could experience notable discomfort irritation or certain asymptomatic non-sensory effects.

AEGL-2 : it is predicted that the general population including susceptible individuals could experience irreversible or other serious long-lasting adverse health effects or an impaired ability to escape

AEGL-3 : it is predicted that the general population including susceptible individuals could experience life-threatening health effects or death

<Table 4> Process of what-if analysis

Process item	What if?	Answer	Likelihood	Severity	Recommendations
Analysis	What could go wrong?	What would happen if it did?	How likely?	Consequences	What will we do about them again-prevent and monitor

시 심각한 화학적 화상을 입을 수 있다. 눈에 노출되면 각막 손상 외에도 통증과 과도한 눈물이 발생할 수 있으며, 액체 형태의 무수 암모니아에 급속히 노출되면 발작, 부기, 피부 궤양 및 동상을 유발할 수 있다. 눈에 들어가면 통증, 발작, 결막 부종, 홍채 및 각막 손상, 녹내장, 백내장을 유발할 수 있다(ABS, 2020).

암모니아 화재 위험성에 대하여 살펴보면, 암모니아는 가연성 범위가 좁은 가연성 가스다. 건조한 공기에서 가연성 범위는 <Table 2>에서 알 수 있듯이 15.15%에서 27.35% 범위를 가진다. 자동 점화 온도는 651℃이며, 암모니아 화재의 위험은 좁은 가연성 범위, 상대적으로 높은 점화 에너지 및 낮은 증 연소율로 인해 다른 대체연료에 비해 낮은 실정이나, 폭발 조건에서 암모니아는 화재 발생 가능성이 상시 존재하며, 안전 수칙에 따라 모든 발화 원에서 암모니아를 격리하

여야 한다(Kim et al, 2022).

순수한 암모니아 연소에 추가하여 다른 연료 및 윤활유와 혼합될 때 암모니아의 화재 위험성에 관한 연구가 필요해 보이지만, 그러한 연료 혼합물은 넓은 범위의 폭발 가능성을 가진다(KR, 2021).

암모니아 부식 위험성에 대하여 살펴보면, 암모니아는 습기와 같은 수분과 잘 결합하는 친수성 물질이며, 구리, 황동, 아연 및 다양한 합금 재질과 반응하여 부식을 발생시키고 표면을 녹색/청색으로 변화시킨다. 암모니아는 알칼리 환원제이며 산, 할로겐 및 산화제와 반응한다. 암모니아를 연료로 사용하는 선박에서 암모니아와 접촉될 수 있는 설비들의 재료는 신중하게 선택해야 한다. 암모니아에 내성이 있는 철, 강철 및 특정 비철 합금은 암모니아가 사용되는 탱크, 파이프라인 및 구조 부품에 사용되어야 한다.

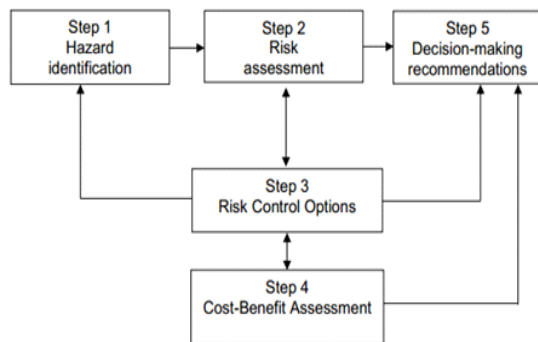
2. What-If 위험도 평가 분석

우선, 위험성 평가에서 정의를 살펴보면, 유해·위험요인을 파악하고 해당 유해·위험요인에 의한 부상 또는 질병의 발생 가능성(빈도)과 중대성(강도)을 추정·결정하고 감소 대책을 수립하여 실행하는 일련의 과정을 의미한다.

IMO에서는 위험성 평가를 위험도 해석(risk analysis) 결과에 대해 사회적, 경제적, 환경적 측면의 위험도 허용 기준(risk acceptance criteria)에 기초한 판단을 내리는 과정으로 정의하고 있다.

또한, 공식안전성평가(Formal Safety Assessment, 이하 'FSA'라 칭함)란 IMO가 원자력 발전소를 비롯한 육상산업 분야에서 사용하던 위험분석(risk analysis)을 해사 산업 분야에 적용할 때 도입한 이름으로 해상에서의 인명의 안전과 해양환경을 보호하기 위하여 위험성 평가, 비용-이익 평가 등을 사용하는 조직적이고 체계적인 안전평가 체제로 위험성 평가 보다 포괄적인 개념이다.

FSA의 목적은 사양, 설계, 운영 및 검사 등의 모든 측면을 효과적으로 만들고 해상에서의 안전을 포괄적이고 합리적인 방향으로 향상하기 위함이며, [Fig. 7]에서 알 수 있듯이 FSA는 5가지 단계로 구분한다(IMO, 2018).



[Fig. 7] Flowchart of the FSA methodology (source:IMO).

위험도 평가를 수행하기 위해서는 [Fig. 7]에서 보여주고 있는 FSA 5단계에서 Step 1에 해당하는

Hazard identification이 수행되어야 한다. 위험인자를 식별하기 위해 사용되는 방법은 ‘결함 고리 분석(Fault tree analysis)’, ‘사건 고리 분석(Event tree analysis)’, ‘고장 모드 및 영향분석(Failure mode and effect analysis)’ 및 ‘What-if 분석(What-if analysis)’가 있다(Jee, 2018).

본 논문에서는 암모니아 연료 추진 선박에 대한 위험도 평가를 수행하기 위해 위험인자 식별 방법을 What-if 기법을 이용하여 위험인자를 식별하고자 한다. What-if 기법은 관련 분야의 다양한 전문가들로 구성되어 브레인스토밍 방법으로 위험인자를 식별할 수 있기에 결과로 제시되는 항목 및 위험인자는 신뢰성이 높고, 짧은 기간에 수행할 수 있는 장점이 있다.

What-if 기법을 이용한 위험인자 분석과정은 <Table 4>에서 보여주는 프로세스로 진행하였다. What-if 기법을 이용한 위험인자 식별 연구는 다음 출처의 지침에 대한 경험을 바탕으로 구조화된 ‘What-if?(SWIFT)’와 체크리스트 기법을 따랐다(TIS, 2022).

- BS ISO 31000: 2009, risk management - Principles and Guidelines
- BS ISO 31010: 2010, risk management - risk assessment techniques

체크리스트 가이드 워드(Check list guide word)를 적용하여 가능한 위험을 식별했다. 신뢰할 수 있는 잠재적 사건이 확인되었을 때 전문가들은 사건 발생 가능한 원인에 대하여 고려하였다.

각 원인의 결과는 참가 전문가들에 의해 분석되었고 잠재적인 결과에 관한 토론을 진행하였고, 그 결과에 대하여 제시하였다.

안전장치 및 설계 권장 사항 평가 측면에서 보면 일관된 설계 권장 사항 목록을 얻기 위해 참가 전문가들은 규칙 및 규정에서 요구하는 안전장치와 업계에서 일반적으로 적용되는 효과적인 설계 선택 조치를 구분했다. 후자는 설계 권장

<Table 5> Risk acceptance criteria

			Consequence					
			C1	C2	C3	C4	C5	
			Minor Injury	Minor Injury	One fatality or multiple major inure	2-10 Fatalities	11+ Fatalities	
Likelihood	L7	Extremely Likely	≤100 to 10-1					
	L6	Very Likely	≤10-1 to 10-2					
	L5	Likely	≤10-2 to 10-3					
	L4	Unlikely	≤10-3 to 10-4					
	L3	Very Unlikely	≤10-4 to 10-5					
	L2	Extremely Unlikely	≤10-5 to 10-6					
	L1	Remote	≤10-6					

사항에 포함되었으며 위험순위 지정에서 구현되는 것으로 가정했다.

위험순위 측면에서 보면 특정 위험과 관련된 위험 수준을 쉽게 이해하기 위해 결과 및 가능성이 할당되고 <Table 5>의 위험 매트릭스와 비교하였다.

선택한 위험 허용 기준은 FSA에서 사용되고 있는 기준으로 제시하였고, 매트릭스는 세 가지 위험 영역을 식별하였다.

‘High risk(unacceptable)’ 이 수준의 위험은 허용될 수 없는 수준으로 반드시 위험을 제거하거나 통제되어야 하는 영역이다.

‘Medium risk(tolerable)’이 수준의 위험은 ALARP (As low as is reasonably practicable)으로 입증된 경우에만 허용 가능하며, 위험 완화를 위한 조치가 적절히 구현되어야 하는 영역이다.

‘Low risk(acceptable)’이 수준의 위험은 ALARP 를 입증할 필요는 없지만 가능한 한 위험요소를

추가로 줄이려는 조치를 권고하는 영역이다(Jee, 2016).

Ⅲ. 연구 결과

What-if 방식의 위험인자 분석을 위한 전문가 회의에서 선박에서 발생할 수 있는 다음 시나리오를 결정하였다. 이러한 시나리오는 가스를 연료로 하는 선박에 대한 잠재적 위험성에 대한 포괄적 내용을 담고 있으며, 그러한 선박에서 발생할 수 있는 일반적 상황을 고려하였다.

<Table 6>의 시나리오는 안전 관리 시스템에서 다룰 것으로 예상하는 유지 보수와 같은 일상적인 작업은 다루지 않았으며, 위험인자 분석결과 는 일반적인 선박 운항 측면의 고려 사항 및 일반적인 선박 절차를 기반으로 하였다.

<Table 6> Risk scenarios of ammonia fueled ship

No.	Scenario lists
1	Risk of loss of ship seaworthiness at sea
2	Risk of danger of excessive moment of ship at sea
3	Risk of danger of loss of power at sea
4	Risk of excessive trim and list effects at sea and in ports
5	Risk of dangers of being assisted by tugboats at sea or in port
6	Risk of ship grounding during operation, which can affect the ship's fuel tanks and related systems
7	Hazards of vessel collisions that may affect the vessel's fuel tanks
8	Risk of vessel operation management due to improperly trained crew turnover
9	Risk of ship operation management from new crew members with low familiarity after delivery
10	Risk of vessel collisions that may affect the vessel's fuel tanks
11	Risk of vessel operation management due to improperly trained crew turnover
12	Risk of ship operation management from new crew members with low familiarity after delivery
13	Risk that an employee not managed by the ship operating company(authorized employee) can board and operate the ship
14	Risk of inadequate facilities, equipment, layout, etc. at bunkering stations
15	Risk of excessive moment in the supply vessel and the supply vessel in the process of receiving fuel

<Table 7> Indicative comparison of HAZID risk rankings for 'navigation' node as ammonia fueled ship

Node	What if questions	Causes	Consequence and effect	Risk matrix		
				'C' level	'L' level	R
Navigation	Loss of maneuverability at sea	Propulsion Power Failure	Grounding	C1	L4	
			Collision	C1	L4	
			Excess motions	C1	L5	
	Ship's Black out at sea	Engines failure	building-up in tank pressure	C3	L2	
			gas pocket formation	C3	L2	
	Excessive trim/list develops at sea or in port	Ballasting status error	grounding	C5	L3	
			liquid fuel coming from vent mast	C5	L3	
			collision	C5	L3	
	Requirement for tug support attendance at sea or in port	fuel supply up lift	ignition	C1	L1	
			damage pipe	C1	L2	
			exposure toxic fumes	C3	L2	
	Vessel needs to be abandoned	loss of fuel tank pressure	tank pressure build up	C1	L1	

우선, 암모니아 연료 추진 선박의 What-if 기법에 따른 위험인자 분석을 위해 분석구간을 5가지로 구분하였다. 분석구간을 노드라 하고, 노드를 설정한 이유는 위험인자 분석의 효율과 정확도를 높이기 위함이며, 5가지 노드에 대한 위험인자 분석결과는 <Table 7>에서 <Table 11>까지 보여주고 있다.

<Table 7>은 암모니아 연료 추진 선박의 항해 관점에서 분석한 ‘Navigation’ 노드로 구분하였고, <Table 8>은 연료 수급 이외의 선박 운항 관점에서 분석한 ‘ship operations other than bunkering’

노드로 구분하였다. <Table 9>는 선내 이외의 외부적 환경 관점에서 분석한 ‘External event’ 노드로 구분하였고, <Table 10>은 암모니아 연료를 수급받는 선박과 암모니아 연료를 공급하는 선박 사이의 관점에서 분석 ‘Bunkering’ 노드로 구분하였으며, 마지막으로 <Table 11>은 암모니아 연료를 선내 엔진으로 공급하기 위한 연료 준비, 공급 및 감시체계의 관점에서 분석한 ‘Fuel preparation, supply and monitoring’ 노드로 구분하였다.

<Table 8> Indicative comparison of HAZID risk rankings for ‘ship operations other than bunkering’ node as ammonia fueled ship

Node	What if Questions	Causes	Consequence and effect	Risk matrix		
				‘C’ level	‘L’ level	R
ship operations other than bunkering	cargo operations required in fuel tanks	operational requirements	damage equipment and vent mast	C3	L5	
	crew change	operational requirement	informed crew taking over	C1	L1	
	completely new crew after vessel hand-over	crew unfamiliar	informed crew taking over	C2	L5	
	personnel not managed by the ship’s operator	inadvertently electric equipment managed	potential ignition source	C2	L4	

<Table 9> Indicative comparison of HAZID risk rankings for ‘external events’ node as ammonia fueled ship

Node	What if questions	Causes	Consequence and effect	Risk matrix		
				‘C’ level	‘L’ level	R
External events	ship collision in fuel tanks	hull damaged	loss containment	C5	L1	
			tank pressure	C1	L2	
			ignition source	C3	L2	

<Table 10> Indicative comparison of HAZID risk rankings for ‘bunkering’ node as ammonia fueled ship

Node	What if Questions	Causes	Consequence and effect	Risk matrix			
				‘C’ level	‘L’ level	R	
Bunkering	Misalignment of the bunkering stations	mooring line tension	hoses and coupling tension	C2	L4	[Cross-hatched]	
	excessive motions	weather	hoses and coupling tension	C2	L4		
	loss of control at sea	incorrect level readings		leakage/overflow	C5	L3	[White]
		BOG management		venting	C3	L2	[Cross-hatched]
		overflow		loss of containment	C5	L3	[White]
	leakage/loss of containment	coupling leakages		loss of containment	C3	L3	[Cross-hatched]
		incompatible flange type		damaged equipment/vent mast	C3	L3	[Cross-hatched]

<Table 11> Indicative comparison of HAZID risk rankings for ‘fuel preparation, supply and monitoring’ node as ammonia fueled ship

Node	What if questions	Causes	Consequence and effect	Risk matrix		
				‘C’ level	‘L’ level	R
Fuel preparation, supply and monitoring	loss of control	power shut-down	automated shut-down	C1	L4	[White]
		sensor failure	automated shut-down	C1	L4	[White]

IV. 결론

앞서 III장의 연구 결과에서는 암모니아 연료 추진 선박에 대한 위험인자 분석을 위해 What-If 기법을 이용하여 위험인자 식별 및 위험 인자별 위험도를 도출할 수 있었다. 5가지 노드에 대하여 각각의 위험인자 및 위험도를 측정된 결과는 [Fig. 8]에서 [Fig. 12]까지 보여주고 있다.

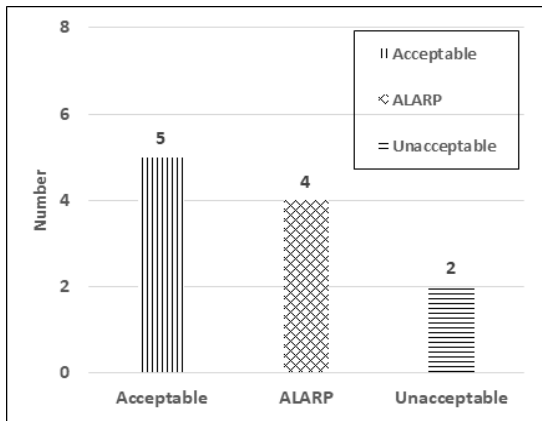
5가지 노드에 대하여 총 28개의 위험인자를 식별할 수 있었고, 28개의 위험인자 중에서 ‘Acceptable’ 위험등급으로 판정된 수는 9개이며,

‘ALARP’ 위험등급으로 판정된 수는 13개이며, ‘Unacceptable’ 위험등급으로 판정된 수는 6개로 분석되었다. 대체로 암모니아 연료 추진 선박에 대하여 위험성을 낮추기 위한 설계 및 장비 도입은 이루어졌음을 알 수 있으나, 허용될 수 없는 위험성이 여전히 존재함을 알 수 있다.

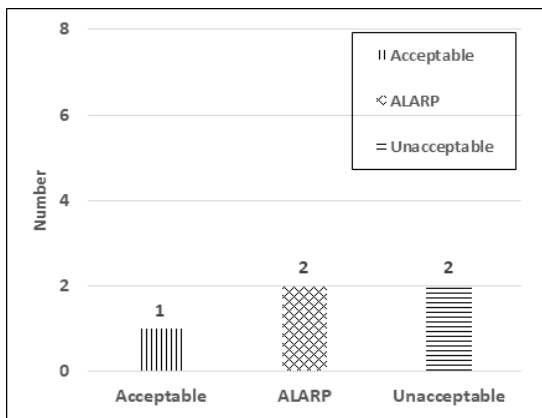
이러한 허용될 수 없는 위험인자 ‘Unacceptable’의 6개 항목에 대하여 위험도를 낮추기 위한 개선 사항이 도출되어야 하고, 개선 사항은 선박 설계에 반영하여 최종 선박건조에 대한 설계가 완성된다. 아래의 6가지 항목은 설계 개선의

Recommendation 사항을 보여주고 있다.

- 1) 가스포켓 형성 방지를 위한 Trim/Heeling 경보 장치 설치
- 2) 가스포켓 형성 최소화를 위한 Trim/Heeling 대응 비상 교육
- 3) 비상상황 시 저장된 액체 암모니아 방출 방법에 대한 설계 지침 개발
- 4) 위험구역 내 요구되는 방폭 등급 장비 교육
- 5) 연료 시스템 손상 대응 방법에 대한 교육

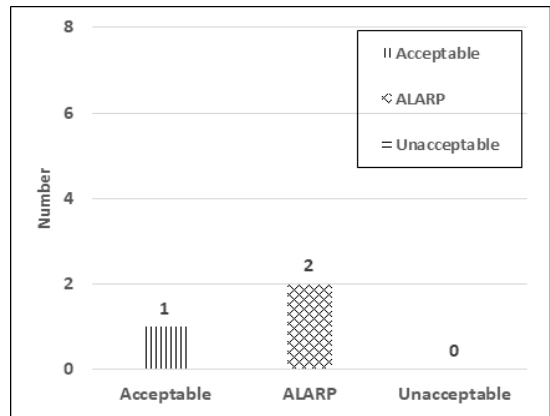


[Fig. 8] Result of HAZID(what-if analysis) for ammonia fueled ship on “navigation” node.

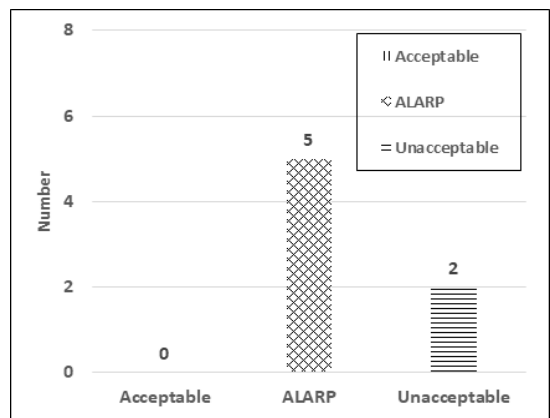


[Fig. 9] Result of HAZID(what-if analysis) for ammonia fueled ship on “ship operations other than bunkering” node.

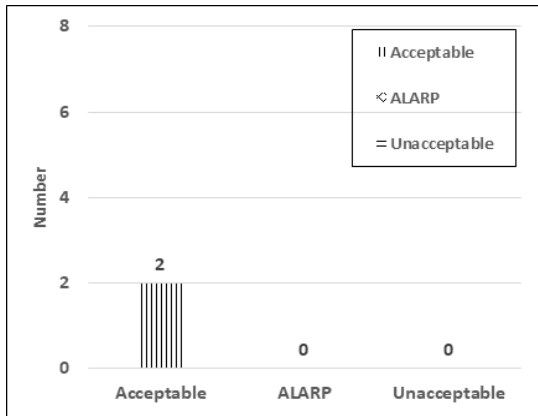
- 6) 선박 작업 시 연료 시스템 보호 설계
- 이러한 허용될 수 없는 위험인자에 대하여는 추후 선박의 안전성을 높이기 위해 선박 설계 고도화가 이루어져야 하며, 위험성을 방지하기 위한 장비 도입이 이루어질 필요가 있다. 또한, 암모니아 연료 사용을 위해서는 IGF code 개정이 필요하고, 본 논문에서 도출된 분석결과를 참고할 필요가 있다.



[Fig. 10] Result of HAZID(what-if analysis) for ammonia fueled ship on “external events” node



[Fig. 11] Result of HAZID(what-if analysis) for ammonia fueled ship on “external events” node.



[Fig. 12] Result of HAZID(what-if analysis) for ammonia fueled ship on “fuel preparation, supply and monitoring” node.

References

- ABS(2020). Ammonia as Marine Fuel.
<https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/sustainability-whitepaper-ammonia-as-marine-fuel>
- Clarkson Research(2022). Fuelling Transition : Tracking the Economic Impact of Emission Reduction & Fuel Changes.
<https://www.clarksons.com/home/news-and-insights/2022/fuelling-transition-tracking-progress/>
- European Commission(2021). Regulation of the European Parliament and of the Council.
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10327-2021-INIT/en/pdf>
- European Council(2023). FuelEU Maritime initiative : Provisional agreement to decarbonise the maritime sector.
<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/23/fueleu-maritime-initiative-provisional-agreement-to-decarbonise-the-maritime-sector/>
- IMO(2018). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment(FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process.
[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MS-C-MEPC.2-Circ.12-Rev.2-20-20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MS-C-MEPC.2-Circ.12-Rev.2-20-20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf)
- IMO(2018). Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf)
- Jee JH(2016). Risk Assessment for Retrofitting a Ballast Water Treatment System on an Existing Vessel. JFMSE, 28(6):1602~1613.
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.6.1602>
- Jee JH(2018). Research of Risk Assessment for Retrofitting an Ozone Treatment Type Ballast Water Treatment System on an Existing Vessel. JFMSE, 30(3), 923~934.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.06.30.3.923>
- KR(2021). Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels.
https://www.krs.co.kr/kor/BBS/BF_View.aspx
- Kim IS, Jung BG, Song MK and Nam D(2022). Determination of bunkering safety zones for ammonia-fueled ship. KOSME, 46(2), 261~269.
<https://doi.org/10.5916/jamet.2022.46.5.261>
- KMI(2020). A Study on Policy Directions for Responding IMO's Regulation on GHG Emission.
<https://www.kmi.re.kr/web/board/download.do?rbsIdx=113&idx=37078&fid=1>
- KMI(2022). The Impact of IMO Market-based Measures on Korean Shipping Companies.
<https://www.kmi.re.kr/web/main/download.do?rbsIdx=280&idx=60&fid=1>
- KR(2023). GHG Regulations News.
<https://gears.krs.co.kr/KR%20GHG%20Regulations%20News%202023.pdf>
- S&P Global(2022). Global Trade Activity.
<https://www.spglobal.com/en/research-insights/topics/global-trade-activity>
- TIS(2022). Future Fuels Risk Assessment.
<https://togetherinsafety.info/wp-content/uploads/2022/06/Future-Fuels-Report.pdf>

- Received : 07 June, 2023
- Revised : 20 July, 2023
- Accepted : 10 August, 2023