

연료전지 선박 설계를 위한 기술 안내서

Technical Information Handbook:
Fuel Cell Systems in Maritime Applications

2025
04





CONTENTS

서문	02
FC-Sail 플랫폼소개	04

CHAPTER 1 연료전지 선박의 개요

1.1	환경규제와 연료전지 선박	06
1.2	연료전지 선박의 개요	08
1.3	연료전지 선박의 시장 전망	08

CHAPTER 2 연료전지 선박의 구성 요소

2.1	연료전지	12
2.2	리튬배터리	18
2.3	연료공급시스템 및 개질기/크랙커	24
2.4	연료저장탱크	26

CHAPTER 3 연료전지 선박 설계 시 고려사항

3.1	발전시스템 조합의 선택	30
3.2	연료소모량 및 부피/무게의 계산	34
3.3	FGSS 수소 유량의 계산	39
3.4	수소 확산해석 시 고려사항	40

CHAPTER 4 연료전지 선박 환경성 분석

4.1	일반사항	44
4.2	환경규제	44
4.3	온실가스 수식 및 적용 기준	46

CHAPTER 5 연료전지 선박 관련 규정

5.1	일반사항	50
5.2	국내 기준	50
5.3	IMO 규정	51
5.4	IEC 규격	53
5.5	KR 지침	54

[부록] 연료전지 선박 설계 사례(4종)	55
400톤급 차도선 1,000TEU 컨테이너선	
170ton 청항선 4.5k 일반화물선	

참고문헌	87
------	----



Providing the Best Service, Creating a Better World

서문

국제해사기구(IMO)는 제80차 해양환경보호위원회에서 2050년까지 국제해운 부문의 탄소중립 실현을 목표로 하는 ‘2023 온실가스 감축 전략’을 채택했습니다. 이 전략은 2030년까지 2008년 대비 온실가스 총 배출량을 20~30% 감축하고, 2040년까지는 70%~80% 감축, 최종적으로 2050년에는 순 배출량을 ‘제로’로 만드는 것을 목표로 하고 있습니다. 또한, 유럽연합을 중심으로 시행 중인 ETS 제도 및 FuelEU Maritime 제도는 해운업에서 지속 가능한 청정 에너지원 기술의 도입을 촉진하고 있습니다.

이처럼 강화되는 국제 해운 분야의 환경규제에 대응하기 위한 하나의 대안으로, 온실가스를 전혀 배출하지 않는 수소에너지를 선박에 적용하는 기술의 필요성이 커지고 있습니다. 그 중 연료전지는 아직 선박의 엔진이나 발전기와 비교해 경쟁력을 갖추기 위해 해결해야 할 과제가 남아 있지만, 내구성 향상과 제조 원가 절감 등의 기술 발전 가능성이 높을 것으로 전망됩니다. 따라서 탄소중립(Net-Zero)을 목표로 하는 해운업에서 연료전지는 중요한 역할을 할 것으로 기대됩니다.

그러나 해외 선진국과의 핵심기술 격차 및 기술정보의 부족으로 인해, 국내 중소형 업체들은 연료전지 선박의 초기 설계 단계에서부터 많은 어려움을 겪고 있습니다. 이러한 시장 상황에서 국내 연료전지 선박 시장 활성화에 기여하고 기술 종사자들에게 가이드를 제공하기 위해 ‘연료전지 선박 가이드스 플랫폼(FC-Sail)’을 개발했습니다. 본 기술안내서는 해당 플랫폼에 적용된 기술적 배경을 설명하고 있습니다.

이 플랫폼이 연료전지 선박의 초기 설계 단계에서 기술가이드를 제공하여, 관련 분야의 트랙 레코드(Track Record) 확보와 함께 국내 기업들의 해외 시장 진출을 위한 발판이 되기를 기대합니다.

* 부록의 사례 연구(Case Study)는 선박의 운항조건 및 선주의 요구사항에 따라 결과값이 달라질 수 있으므로, 단순 참고용으로만 활용하시기 바랍니다.

연료전지선박 설계 가이드스 플랫폼 (FC SHIP Assistant Leader: FC SAIL)

<https://fcsail.krs.co.kr/>

연료전지선박 설계를 위한 웹 기반 가이드스 플랫폼 FC SAIL은 설계사들이 선주의 요구사항을 가지고 연료 전지선박을 설계하려고 할 때 연료, 공급체계, 추진체계를 연계하여 연료전지 선박의 기본설계를 검증할 수 있도록 돕는 동시에, 시장에서 판매되고 있는 실제 동력원 제품을 적용해볼 수 있는 서비스를 제공합니다.

[설계사 사용자단 주요 서비스]

서비스 종류	서비스 내용
FC선박 설계가이드(조합)	선주요구사항을 입력하고 연료 및 발전조합/비율을 입력하면 부피/무게 분석, 환경성 분석 등의 설계결과를 산출하는 서비스
FC선박 설계가이드(실제품 적용)	FC 선박 설계가이드 결과를 기반으로 사용자가 선택한 실제품의 스펙을 반영한 설계결과를 산출하는 서비스
FC선박 규정가이드	FC선박 설계에 필요한 규정과 지침을 조회하고 관리하는 서비스

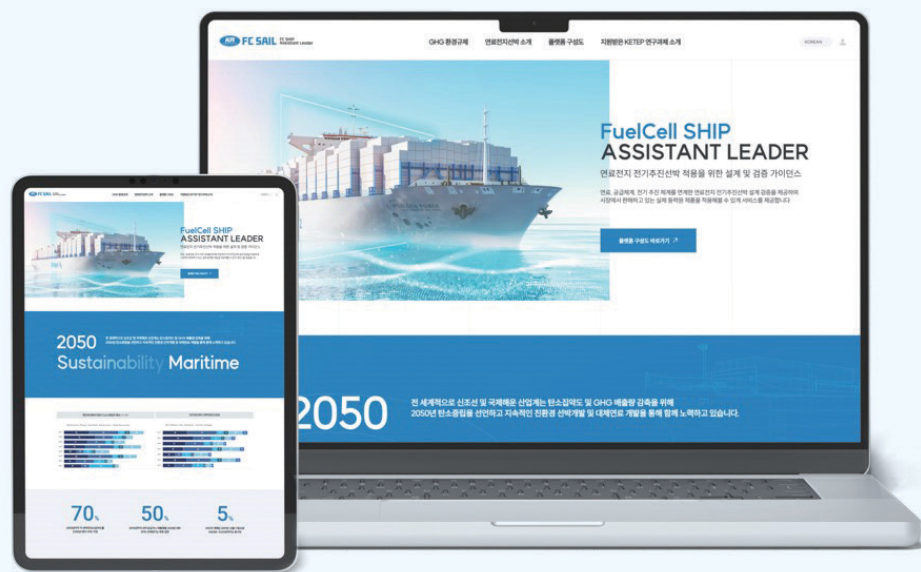
[기자재 업체 사용자단 주요 서비스]

서비스 종류	서비스 내용
제품 정보 관리	FC선박에 관련된 기자재 제품(Genset, Fuel cell, Battery, FGSS, Cracker/Reformer)을 등록할 수 있는 서비스. 등록 된 제품은 선박설계사가 선박 설계 가이드 진행시 해당 기자재 제품을 조회하여 스펙을 확인할 수 있음.
FC선박 규정가이드	FC선박 설계나 기자재 개발에 필요한 규정과 지침을 조회하고 관리할 수 있음.

CHAPTER

1

연료전지 선박의 개요



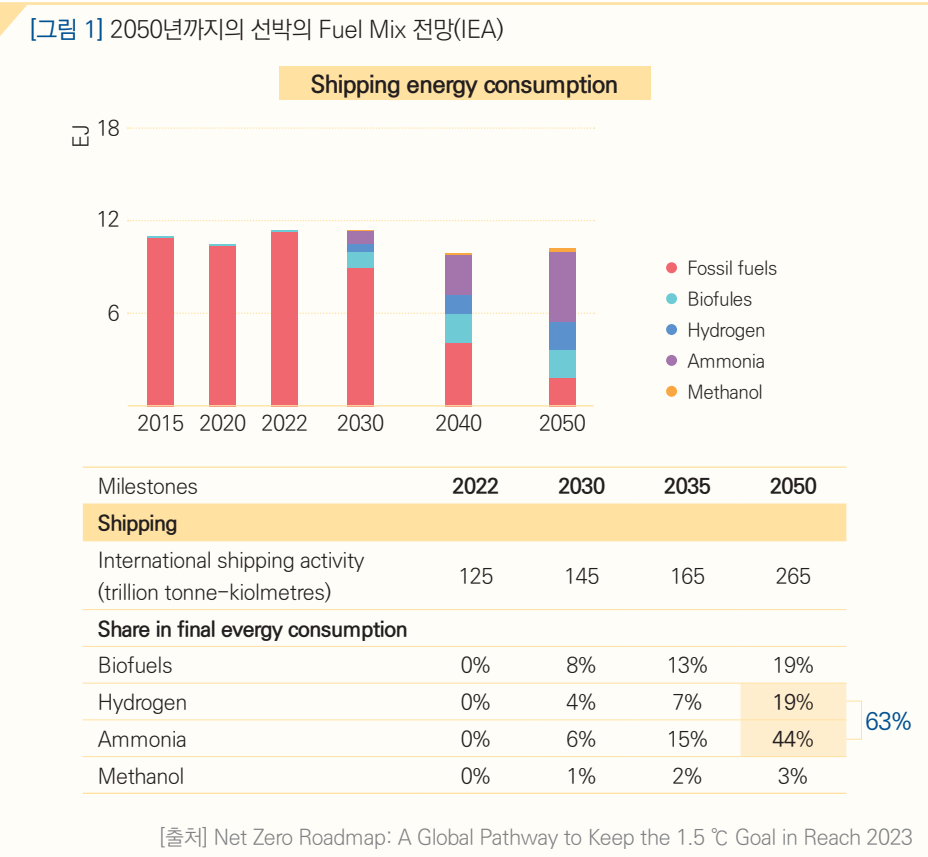
1.1
환경 규제와
연료전지 선박

1.1.1 해외

국제해사기구(IMO)의 제4차 온실가스(GHG) 연구에 따르면, 2012년 국제해운의 이산화탄소(CO2) 배출량은 7억 100만 톤에서 2018년 7억 4000만 톤으로 약 5.6% 증가했으며, 이 기간 동안 전 세계 CO2 배출량의 약 2~3%를 차지한 것으로 나타났다. 국제해운의 온실가스 배출량은 기후변화협약(UNFCCC)에서 요구하는 국가별 배출 통계와 감축 규제에 포함되지 않으며, 교토의정서 제2조2항에 따라 IMO가 온실가스 감축을 위한 논의를 주도하고 있다.

IMO는 선박의 온실가스 감축을 위한 기술적 및 운항적 조치를 지속적으로 논의 중이다. 2018년 4월, IMO는 MEPC 72차 회의에서 선박 온실가스 감축을 위한 초기전략(Initial IMO GHG Strategy)을 채택했으며, 2023년 7월 MEPC 80차 회의에서는 중간 목표를 설정했다. 즉, 2030년까지 국제해운에서 사용하는 에너지 중 최소 5%를 온실가스 배출이 거의 없는 기술, 연료 또는 에너지원으로 대체한다는 목표와, 2030년 및 2040년 중간점검을 통해 2050년까지 국제해운의 온실가스 배출량을 순배출 제로(net-zero)로 만들겠다는 계획이다.

이 목표들은 IMO의 지속적인 논의와 규제 강화의 결과물로, 해운 업계의 탈탄소화를 촉진하고 있다. 이러한 규제 강화로 인해 기존의 화석연료를 대체할 저탄소 또는 무탄소 연료가 고려되고 있으며, 관련 기술수요도 증가하고 있다. IEA의 2023년 보고서에 따르면, 현재 해운에서 소비되는 선박 연료 중 1% 미만인 수소와 암모니아가 2030년에는 22%, 2050년에는 63%로 크게 증가할 것으로 전망된다[그림 1]. 이와 함께 수소 및 암모니아를 사용하는 연료전지 선박의 수요도 크게 증가할 것으로 예상된다.



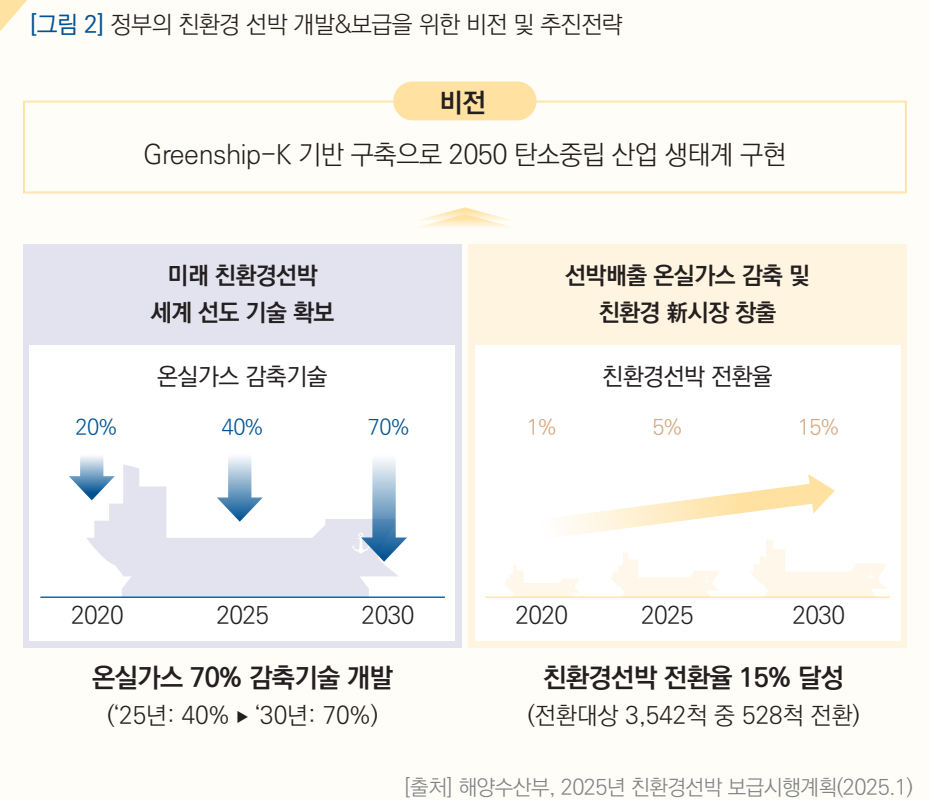
1.1.2 국내

정부는 2019년 1월, 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표하며 수소경제 선도 국가로 도약하기 위한 계획을 제시했다. 이 로드맵에는 수소 연료전지 선박을 조선업의 미래 유망 품목으로 육성하려는 계획도 포함되어 있다. 연안선박의 경우, 2022년까지 선박용 연료전지시스템 검증을 완료하고, 2025년부터 실증을 통해 사업화를 시작할 계획이다. 대양선박은 기술 개발과 인프라 구축을 병행하여 2030년에 적용하는 것을 목표로 하고 있다.

2020년 1월부터 시행된 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」(친환경선박법)은 조선해운산업의 지속적인 발전과 깨끗한 해양환경 조성을 통해 국가경제에 기여하는 것을 목적으로 한다. 이 법에 따른 환경친화적 선박에는 액화천연가스(LNG), 전기에너지를 사용하는 선박, 그리고 수소를 동력으로 하는 연료전지 추진 선박 등이 포함된다.

2020년 12월, 해양수산부와 산업통상자원부가 공동으로 발표한 「제1차 친환경선박 개발·보급촉진 기본계획」에는 수소·암모니아 연료전지 등 핵심기술과 연료 저장탱크, 연료 공급·추진 시스템 개발을 통해 무탄소 선박 기술을 조기에 확보하겠다는 전략이 담겨 있다. 해양수산부는 이 기본계획의 연도별 이행을 위해 매년 「친환경 선박 보급 시행계획」을 수립하고 추진하고 있다[그림 2].

또한, 정부는 국내 친환경 선박 기술의 상용화와 해외 진출을 위해 「국가 친환경 선박 인증 제도」를 마련하고, 국내 기업의 세계 시장 진출을 지원하고 있다. 특히 연료전지 선박 기술은 국내에서 아직 초기 단계에 있으며, 사용하는 연료와 연료전지 종류에 따라 시스템 구성이 달라지므로 선박별 특성 및 운항조건에 적합한 설계가 필요하다.



1.2
연료전지 선박의
개요

연료전지 선박이란 연료전지에 수소와 공기(산소)를 공급해 전기를 생산하고, 이를 선박의 추진력이나 발전원으로 사용하는 선박을 말한다. 이때, 수소는 전기화학반응으로 전기를 생산하기 때문에 온실가스나 배출가스를 발생시키지 않아 친환경 선박 연료로 주목받고 있다.

이 중 연료전지가 추진원으로 사용될 경우에는 크게 세 가지 주요 시스템으로 구분할 수 있다. 즉, 수소를 저장하고 연료전지시스템에 공급하는 (1)연료저장&공급시스템과 수소를 연료로 전력을 생산하는 (2)연료전지시스템, 그리고 생산된 전력을 선박의 추진 동력으로 전환하는 (3)전기추진시스템이다.

특히 연료전지 선박에서는 ESS가 함께 사용된다. 선박이 출항 및 운항 중 갑작스럽게 높은 출력을 요구하는 상황에서 급격한 부하 변동은 연료전지의 성능 저하(degradation)를 초래할 수 있기 때문에 출력 반응 속도가 상대적으로 빠른 ESS를 통해 변화에 먼저 대응하여 연료전지를 보호하는 것이다. 따라서 이러한 하이브리드(Hybrid) 시스템 조합은 연료전지 선박의 고성능을 실현하고 수명을 연장하는 데 중요한 역할을 한다.

1.3
연료전지 선박의
시장 전망

• PEMFC(고분자 전해질 연료 전지) 및 SOFC(고체산화물 연료 전지)에 대한 자세한 내용은 2.1절 참조

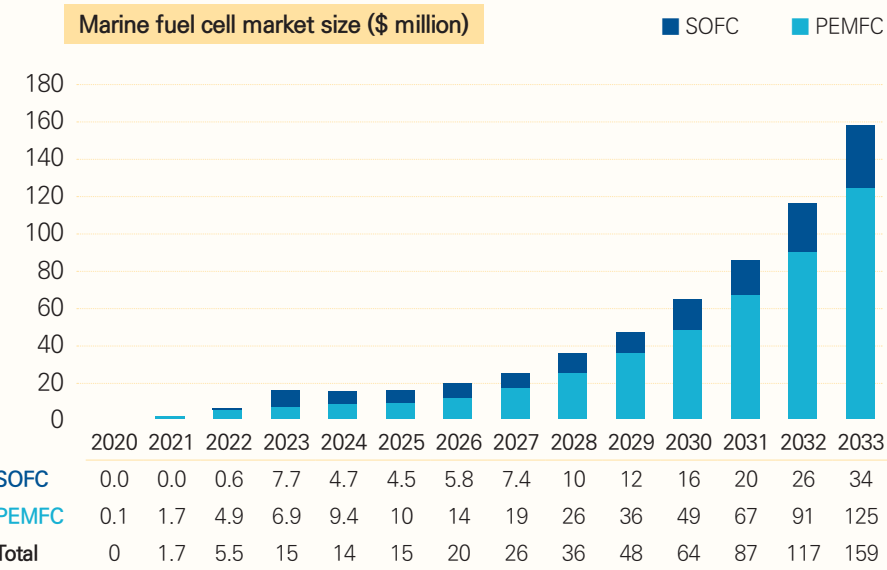
현재 해운분야에서 탈탄소 규제에 대응하기 위한 방안으로 '연료전지'를 적용한 선박은 아직 실적이 많지 않은 실정이다. 그러나 이미 상업화 단계에 접어든 육상 모빌리티용 'PEMFC'와 발전용 'SOFC'의 기술개발을 기반으로, 선박용 PEMFC 및 SOFC* 시장 또한 빠르게 성장할 것으로 기대된다.

즉, 현재(23) 약 15백만 달러(한화 약 200억 원) 규모의 선박용 연료전지 시장은 2033년 약 159백만 달러(한화 약 2,100억원)로 성장할 것으로 전망되며[그림 3], 이는 선박에 공급되는 연료전지 누적용량으로 보면 약 1,000 MW 규모이다[그림 4].

선박/해상용으로 사업을 확장하는 육상 연료전지 업체 수가 증가하고, 선박용 제품으로 형식승인을 받은 제품이 늘어남에 따라, 선박용 연료전지 가격도 꾸준히 하락하여 PEMFC 기준으로 2023년 \$ 1,130/kW 수준에서 2033년에는 \$ 390/kW까지 하락할 것으로 전망된다[그림 5].

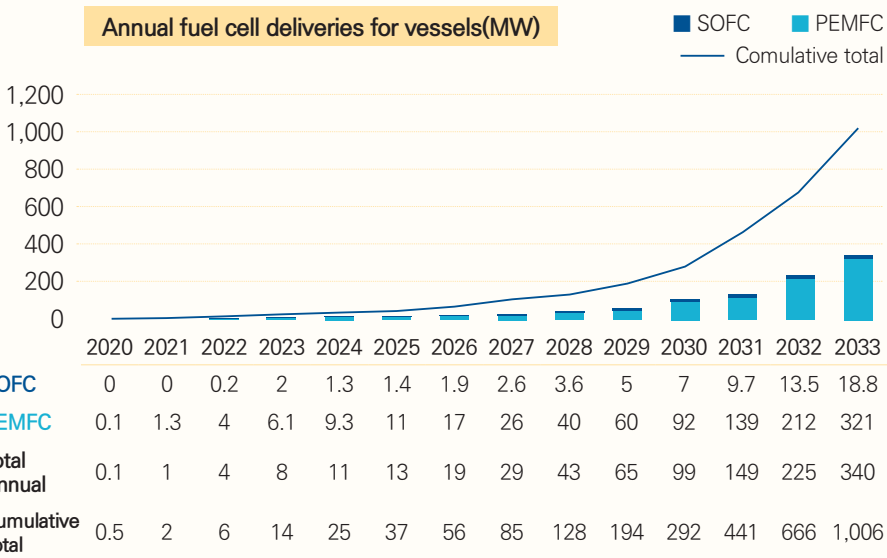
또한, 연료전지는 ① Offshore support, ② Tug, ③ Cruise 선종에 주로 공급이 되고 있으며, 용량은 1~2MW급이 가장 많은 것으로 조사되었다[그림 6]. 하지만, 향후 실적선이 증가함에 따라 보다 다양한 선종에 적용될 가능성이 높다.

[그림 3] 선박용 연료전지 시장 전망 (2020-2033)



[출처] IDTechEX 보고서, 2022

[그림 4] 선박에 설치되는 연간 연료전지 용량 전망

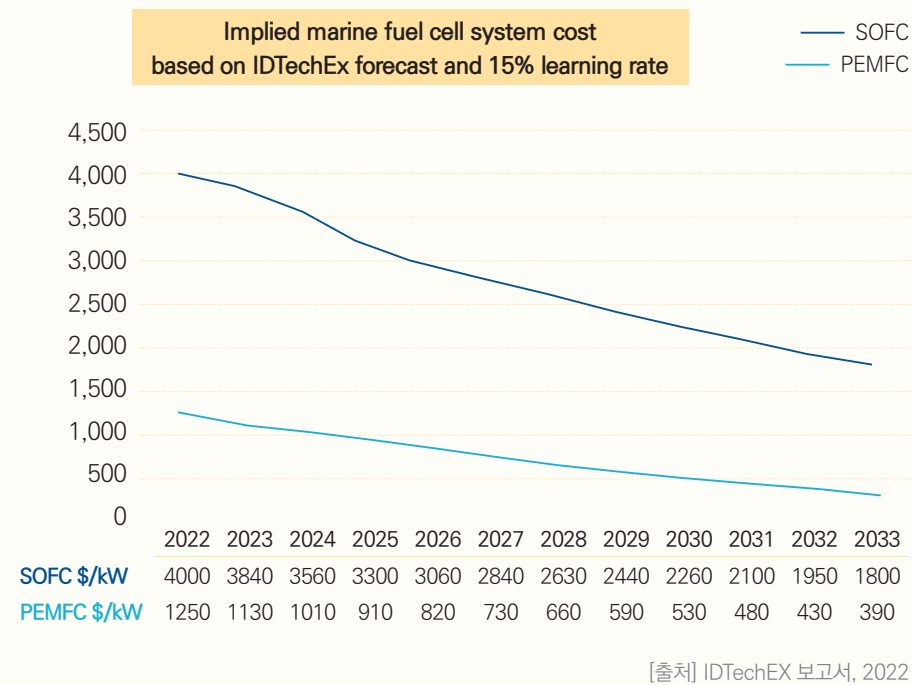


[출처] IDTechEX 보고서, 2022

CHAPTER 2

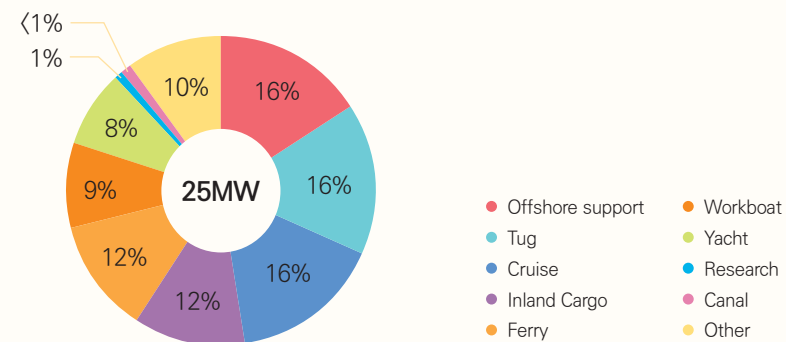
연료전지 선박의 구성 요소

[그림 5] 선박용 연료전지(PEMFC, SOFC) 가격 전망 (2022~2033)

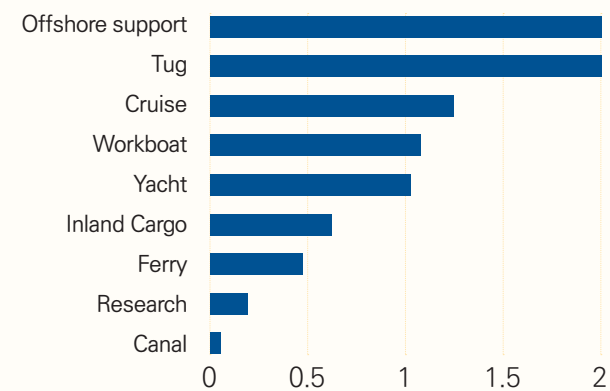


[그림 6] 연료전지가 설치(예정)된 선박의 선종별 비중 (2019~2024)

Current and expected fuel cell system deliveries by vessel type 2019 - 2024



Average system size by vessel (MW)



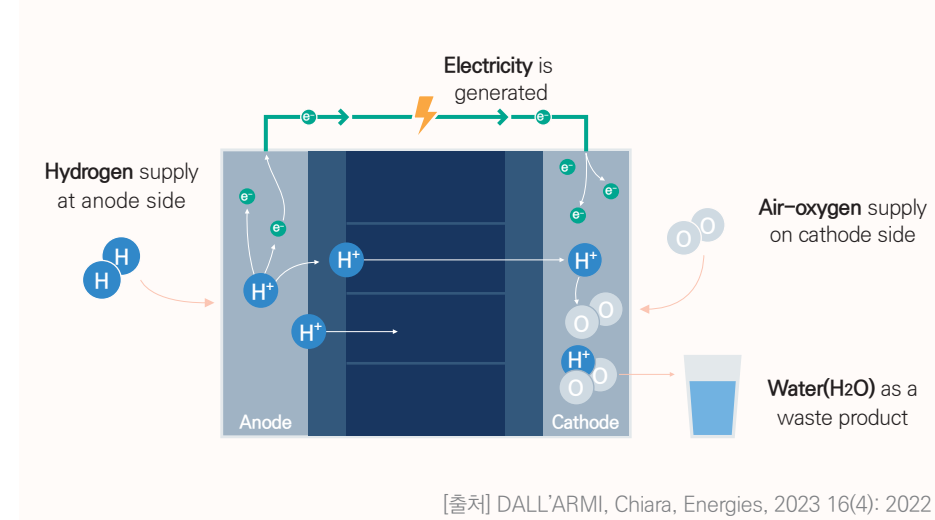
[출처] IDTechEX 보고서, 2022

2.1 연료전지

2.1.1 일반사항

연료전지는 수소 또는 수소를 포함한 연료와 공기 중 산소가 전기화학 반응을 통해 화학 에너지를 전기에너지로 변환하는 장치로[그림 7], 전기와 열을 동시에 생산하는 친환경시스템이다. 가장 작은 구성단위인 연료전지 셀은 연료극, 공기극, 전해질부로 구성되며, 단일 셀의 전압이 매우 낮아 여러 셀을 직렬로 연결해 '스택(stack)'을 형성해 가용 전압을 높인다. 스택은 막전극접합체(MEA), 가스확산층, 분리판, 가스켓 등으로 이루어지며, 전해질의 종류에 따라 연료전지의 성능과 특성이 달라진다.

[그림 7] 연료전지의 일반적인 구성도



[출처] DALL'ARMI, Chiara, Energies, 2023 16(4): 2022

연료전지시스템은 이러한 연료전지 스택과 함께 수소 공급장치, 공기 공급장치, 열 관리 장치로 구성된다. 이러한 주변장비를 통칭하여 'BOP(Balance of Plant)'라고 하며, 자세한 내용은 2.3절을 참고할 수 있다.

연료전지는 전해질의 종류에 따라 고분자 전해질 연료전지(PEMFC), 인산형 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC), 알칼리 연료전지(AFC), 직접 메탄올 연료전지(DMFC) 등으로 구분된다. 일반적으로 선박에 가장 많이 적용되고 있는 종류는 PEMFC와 SOFC 두 종류이다.

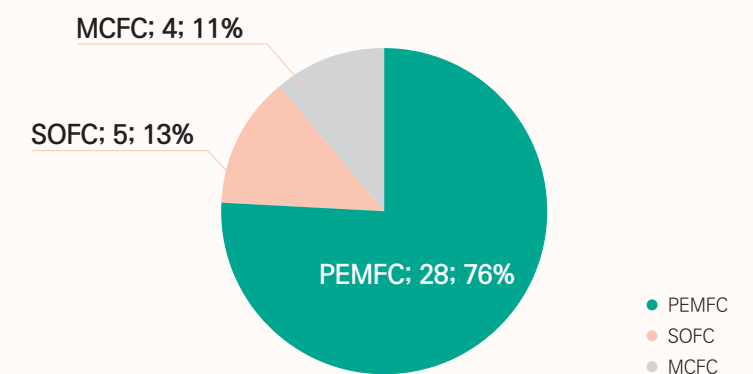
2.1.2 선박용 연료전지

선박용 연료전지는 발생된 전기로 모터를 구동하여 선박의 추진 동력으로 사용될 수 있다. 또한, 추진 동력원이 아닌 선내 보조전원으로도 활용 가능하다.

현재 중소형 연안선박은 수소 충전이 대형선박에 비해 용이하고, 운항시간이 길지 않기 때문에 시동 및 정지가 편리한 PEMFC 타입이 주로 추진 동력으로 적용되고 있으며, 실제 다수의 실증선도 건조되었다. 그러나, 일정한 기저부하를 가지는 대형선박의 경우에는 부하 추종성은 낮지만 효율이 높은 SOFC를 적용하여 선박의 보조전원으로 사용하는 기술이 활발히 검토되고 있다.

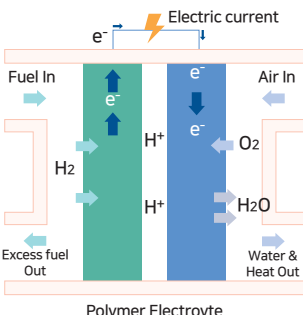
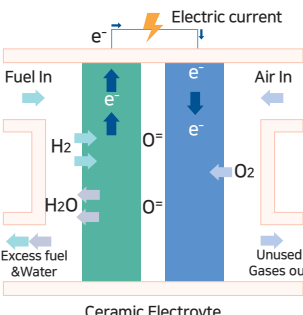
선박용도 일반 산업용과 마찬가지로, 연료전지의 종류 중 PEMFC와 SOFC를 적용한 사례가 대다수를 차지하고 있다[그림 8]. 본 플랫폼에서도 기술 성숙도, 효율, 비용 등에서 선박 적용 가능성이 상대적으로 높은 PEMFC와 SOFC만 고려하였으며, 두 연료전지 타입별 성능 비교는 표 1과 그림 9에 제시되어 있다.

[그림 8] 연료전지 종류별 선박 프로젝트 적용 현황 (프로젝트 건수; 퍼센트)



[출처] DALL'ARMI, Chiara, Energies, 2023 16(4): 2022

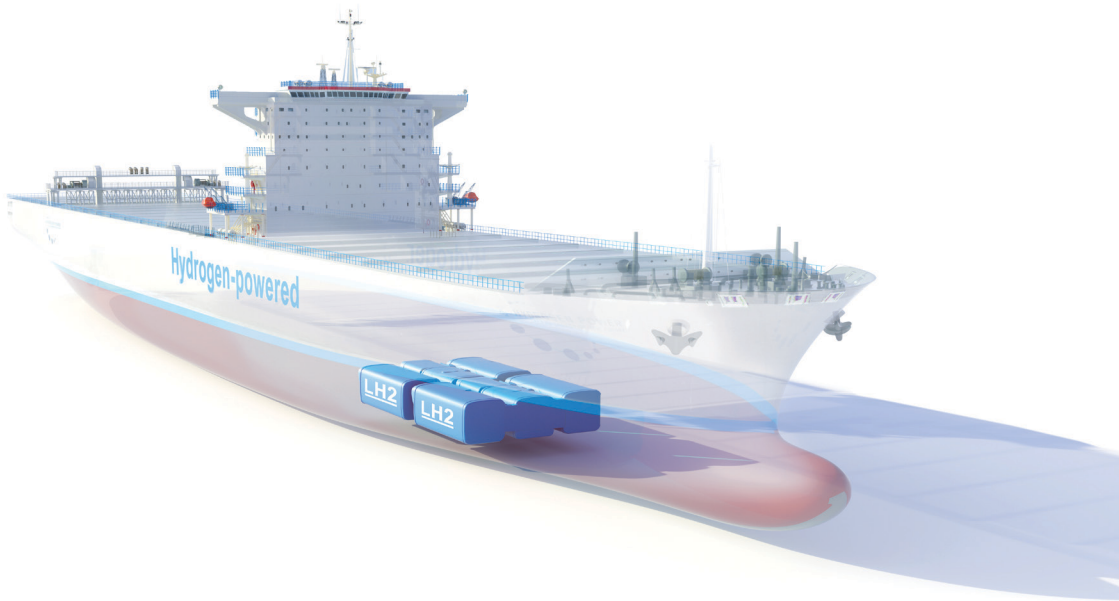
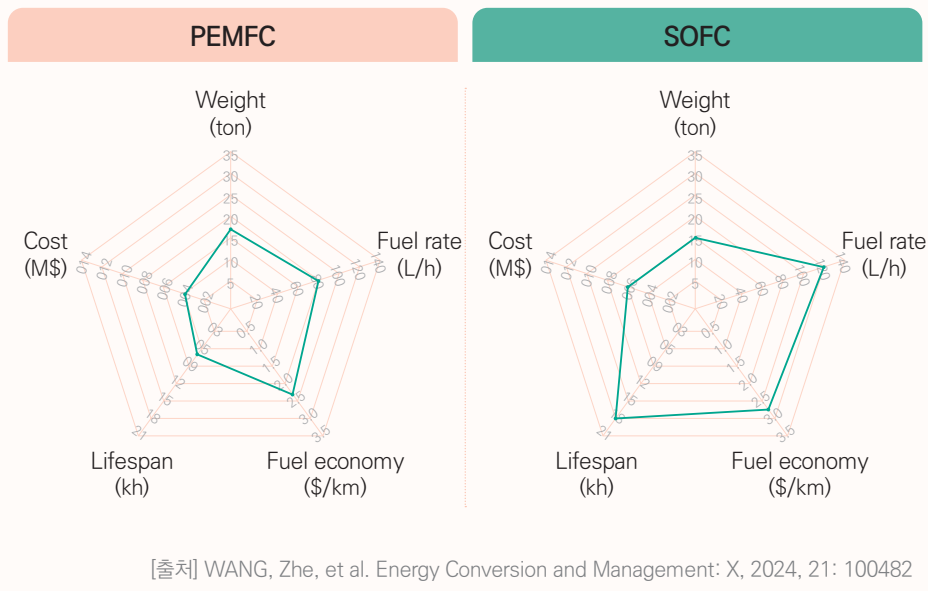
▷ [표 1] 저온형 연료전지(PEMFC)와 고온형 연료전지(SOFC)의 일반적인 구조 및 성능 비교

Items	PEMFC	SOFC
구조		
Electrolyte (전해질)	Water-based polymer membrane (프로톤 교환막)	Porous ceramic material (다공성 세라믹 재료)
Electrode (전극)	(cathode) Pt/C (anode) Pt/C	(cathode) Sr/LaMnO ₃ (anode) Ni/YSZ
Temperature (°C)	60–80	500–1000
Typical fuel	H ₂	H ₂ , Methanol, hydrocarbons
Electrical Efficiency (%)	50.75	56.23
Lifetime (h)	20,000–30,000	–
Volumetric power density (m ³ /kW)	0.045	0.254
Mass-specific powerdensity (kg/kWh)	20.84	105.11

[출처] ELKAFAS, Ahmed G., Processes, 2022, 11(1), 97

연료전지시스템 DB의 평균값 (24.10)으로, 향후 값이 변경될 수 있음

[그림 9] PEMFC와 SOFC의 주요 특성별 비교



2.1.3 연료전지의 종류

(1) PEMFC

저온형 연료전지로 구분되는 PEMFC는 약 80℃ 정도에서 구동하며 시동 시간이 짧고 시동/정지가 용이하며 부하 추종성이 뛰어나다. 그러나, 고가의 백금기반 촉매를 사용하고, 스택의 냉각을 위한 별도의 냉각시스템을 구비해야 하며, 고온형의 SOFC에 비해 효율이 낮은 단점을 가지고 있다.

PEMFC는 고순도 수소(대략 99.97% 이상의 순도)를 연료로 사용하므로, 다른 연료를 사용하려면 개질기나 크랙커와 같은 추가 장치가 필요하다. 한편, 수소 공급 인프라가 이미 구축된 지역에서는 PEMFC를 적용한 자동차, 버스, 트럭 등이 상용화 단계에 도달했으며, 이러한 기술을 토대로 소형 선박 시장으로의 확장이 기대된다.

(2) SOFC

SOFC는 매우 얇은 세라믹층을 고체 전해질로 사용하는 연료전지로, 500~1,000℃의 높은 온도에서 전기화학적으로 활성화된다. 이 온도는 가솔린, 디젤, 메탄, 바이오 연료, 수소, 심지어 석탄 gas와 같은 거의 모든 연료를 산화시킬 수 있도록 하며, 폐열회수시스템(WHR, Waste Heat Recovery)과 결합하여 시스템 전체 효율을 향상시킨다. 그러나 시동 및 정지 시간이 길고 열충격에 취약하다는 단점이 있다.

SOFC는 연료 유연성을 갖춘 연료전지 중에서도 가장 효율적인 종류 중 하나로, 열병합의 경우 80% 이상의 고효율을 달성할 수 있다. 또한 암모니아를 비롯한 다양한 대체연료의 적용 사례가 점점 증가하고 있다.

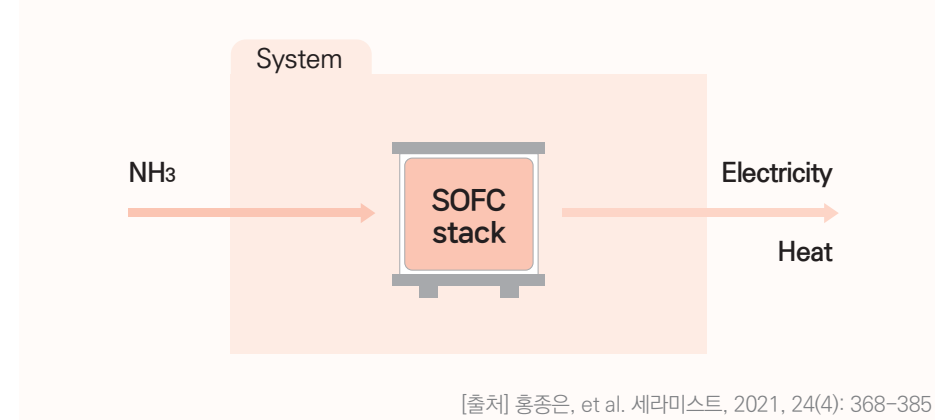
(3) 차세대 연료전지

저온형 연료전지의 경우, 시스템 가격에서 가장 비싼 요소인 백금 등의 촉매를 다른 소재로 대체하거나, 기존보다 효율을 더 높이기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

그리고 고온형 연료전지의 경우, 값비싼 백금 촉매를 사용하는 대신 저렴한 세라믹 물질로 제작이 가능하지만, 높은 작동온도(600℃ 이상)로 인한 열화현상으로 성능 저하가 문제되고 있다. 이러한 고온형 SOFC를 대체할 기술 중 하나인, 프로톤 세라믹 연료전지(Protonic Ceramic Fuel Cell, PCFC)는 산소 대신 가장 가벼운 이온인 수소 이온을 전도하는 세라믹 막으로 구성된 연료전지로서, 중저온(400~600℃)에서 작동할 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 높은 효율성과 신뢰성을 제공함으로써, SOFC의 활용 범위를 더욱 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 암모니아 연료를 분해장치를 거치지 않고, 직접 연료극에 공급하여 작동하는 직접 암모니아 연료용 SOFC(Direct Ammonia fueled-SOFC, DA-SOFC) 연구도 활발히 진행 중이다. DA-SOFC 기술은 암모니아를 직접 연료로 사용하여 연료극에 적용된 촉매에서 암모니아가 분해되고, 생성된 수소가 전기화학적으로 산화되어 전기를 생산하기 때문에 시스템 단순화의 장점을 가지고 있다[그림 10].

[그림 10] DA-SOFC 방식의 일반적인 도식도



In Depth

암모니아 엔진 vs 연료전지 기술의 비교

선박용 암모니아 내연기관(ICE)에 대한 기술개발이 활발히 진행 중이며, 상업화 단계에 곧 진입할 것으로 예상된다. 이러한 내연기관 기술은 암모니아 연료를 사용하는 SOFC에 비해 선박 및 해운 분야로의 도입 속도가 더 빠르다고 평가된다. 그러나 암모니아 연소 기술과 SOFC가 제공할 수 있는 중장기적인 기술적 이점에는 중요한 차이점이 존재한다.

- **효율성**: SOFC는 50~65%의 효율을 달성할 수 있으며, 이는 암모니아 내연기관보다 최대 10% 가까이 높은 수준이다.
- **안전성**: SOFC는 연소과정을 포함하지 않고 전기화학 반응을 사용하기 때문에, 내연기관(ICE)과 비교하여 암모니아와 관련된 안전 위험을 일부 완화할 수 있다. 특히, 엔진과 달리, SOFC는 높은 공급 압력을 필요로 하지 않으므로 암모니아 누출 위험이 상대적으로 낮다.
- **배출가스**: 암모니아 연료를 사용하는 ICE 시스템에서는 NOx 및 N₂O 배출과 관련된 문제가 있으며, 이는 향후 개발 과정에서 지속적인 모니터링이 필요하다. 반면, SOFC는 이러한 배출 문제에서 상대적으로 자유롭다.

[출처] MMMC report



2.2 리튬배터리

2.2.1 일반사항

배터리는 일반적으로 크게 4가지 구성 요소인 ① 음극(anode), ② 양극(cathode), ③ 전해질(Electrolyte), ④ 분리막(separator)으로 구성되며, 전기화학 반응을 통해 에너지를 저장하거나 방출한다. '배터리셀(cell)'은 에너지를 축적하는 가장 작은 단위이며, 셀의 전압과 용량이 제한적이기 때문에 여러 개의 셀을 조합하여 '모듈(module)'을 형성한다. 배터리 모듈은 셀 단위의 효율적 운영과 관리를 위해 설계되며, 모듈 단위에서 다시 여러 개를 직렬 또는 병렬로 연결해 '배터리팩(pack)'으로 구성한다. 배터리팩은 특정 용도나 환경에서 요구되는 전압과 용량을 제공하며, 대규모 배터리시스템의 경우 더욱 큰 단위로 조합되어 '배터리랙(rack)'으로 구성되기도 한다. 이러한 배터리시스템은 배터리관리시스템(BMS: Battery Management System)을 통해 온도, 전압, 전류를 모니터링하고 충/방전 제어와 시스템 내 셀 간 밸런싱, 보호회로 관리 등의 역할을 수행한다.

배터리는 사용되는 전극 물질과 전해질의 종류에 따라 배터리의 성능, 에너지 밀도, 충방전 특성이 달라지며, 일반적으로 리튬이온배터리(Li-ion), 리튬폴리머배터리(LiPo), 납배터리(Lead-Acid), 니켈-카드뮴 배터리(Ni-Cd), 니켈-수소 배터리(NiMH), 전고체 배터리(All-Solid-State Battery) 등으로 구분된다. 그 중에서 리튬이온배터리와 리튬폴리머배터리는 에너지 밀도가 높고 충전 속도가 빨라 가장 널리 사용되고 있다. 또한 전고체 배터리의 경우 낮은 화재 위험성과 수명이 길다는 특징으로 인해 차세대 배터리로 주목받고 있다.

2.2.2 선박용 배터리시스템

선박용 배터리시스템은 앞서 연료전지시스템과 마찬가지로, 추진모터를 구동하여 선박의 추진 동력으로 사용되거나, (추진 동력원이 아닌) 선내 보조전원으로 활용될 수 있다. 특히, 중소형 연안선박의 경우 충전이 용이하고 운항시간이 길지 않아 리튬배터리를 추진 동력원으로 적용하기 적합하며, 이미 다수의 실적 선박이 운용되고 있다.

하지만 대형선박의 경우 리튬배터리가 주추진원으로 사용되기보다는 주로 보조전원용으로 사용되고 있다. 특히 연료전지시스템과 하이브리드로 설치되는 경우, Cold-up Start 시 필요한 전력을 공급하거나 부하급변 시 연료전지를 대신하여 작동함으로써 연료전지의 수명을 연장시키는 역할을 한다. 다만, 고온형 연료전지의 경우, 부하변동을 배터리가 담당하기 위해서는 선박의 운항특성에 따라 상당한 용량의 배터리가 요구될 수도 있다.

현재 선박용으로는 배터리 종류 중 니켈-망간-코발트(NMC) 배터리와 리튬인산철(LFP) 배터리가 가장 많이 사용되고 있으며, 수명이 길고 안정성이 높은 리튬 타이타네이트(LTO) 배터리의 적용 사례도 증가하고 있다. 본 플랫폼에서도 기술 성숙도, 에너지 밀도, 효율, 시장성 등을 종합적으로 고려하여 선박 적용 가능성이 높은 NMC, LFP, LTO 배터리만 고려하였다. 각각에 대한 성능 비교는 표 2와 그림 11에 제시되어 있다.



2.2.3 배터리시스템의 종류

(1) NMC

니켈-망간-코발트(NMC) 배터리는 양극에 니켈, 망간, 코발트를 사용하는 리튬이온배터리 유형으로, 니켈 성분에 따른 높은 에너지 밀도를 가지는 것이 특징이며, 망간 및 코발트 성분을 포함하여 배터리 내부 구조적 안정성과 수명이 길다는 특징을 가진다. NMC 배터리는 성능 균형이 우수하여 전기차 및 중대형 에너지저장장치에 널리 사용된다. 특히 에너지 밀도와 출력 밀도 간의 균형이 우수하고 높은 전압에서도 안정적으로 작동하지만, 높은 전압 상태에서 배터리 운용 시 발열에 따른 성능 감소로 이어질 수 있어 적절한 전압 유지가 필수적으로 고려된다.

이러한 특성으로 인해, NMC 배터리는 중소형 선박이나 고출력이 요구되는 선박에서 널리 활용될 수 있다. NMC 배터리 주요 이점 중 높은 에너지 밀도는 선박의 공간 제약을 극복하는 데 유리하며, 긴 수명은 운용 환경에서의 유지보수 비용을 줄이는 데 기여한다. 따라서 현재 NMC 배터리는 선박 분야에서 가장 많은 실적 사례를 보유하고 있으며, 특히 연안 운항 선박 시스템에 탑재되어 성능과 신뢰성을 입증하고 있다.

(2) LFP

리튬인산철(LFP) 배터리는 양극 재료로 리튬인산철을 사용하는 리튬이온배터리 유형으로, 리튬인산철 구조의 고유한 특성과 강인한 내부 화학적 결합으로 인해 안정성이 매우 뛰어나고, 과충전 및 과열, 충격에 대한 저항성이 높은 특징이 존재한다. 다만 배터리 구성 물질 차이로 인해 에너지 밀도는 NMC 배터리보다 다소 낮지만, 내구성이 보다 우수하여 중장기적인 유지·보수 비용은 절감될 수 있다. LFP 배터리 또한 중소형 연안선박을 중심으로 많은 실적 사례를 보유하고 있으며, 대형선박의 보조전원으로도 일부 사용되고 있다.

(3) LTO

리튬타이타네이트(LTO) 배터리는 음극 재료로 리튬타이타네이트를 사용하는 배터리로, 매우 빠른 충전 속도와 우수한 수명, 그리고 극도로 낮은 온도뿐만 아니라 높은 온도에서도 안정적인 성능을 발휘하는 특징이 있다. 일반적인 리튬배터리보다 출력이 높고 안전성이 뛰어나지만, 에너지 밀도는 상대적으로 낮아 큰 공간이 필요하고 초기 비용이 상대적으로 높다. 하지만 빠른 충전과 긴 수명, 그리고 높은 안정성 덕분에 짧은 운항시간과 빠른 재충전이 필요한 중소형 연안선박에 특히 유용하다. 또한, LTO 배터리는 빠른 반응속도와 높은 출력이 요구되는 DP(Dynamic Positioning) 선박에도 유리한 것으로 알려져 있다.

▷ [표 2] 리튬배터리의 종류(NMC, LFP, LTO)에 따른 구조 및 성능 비교

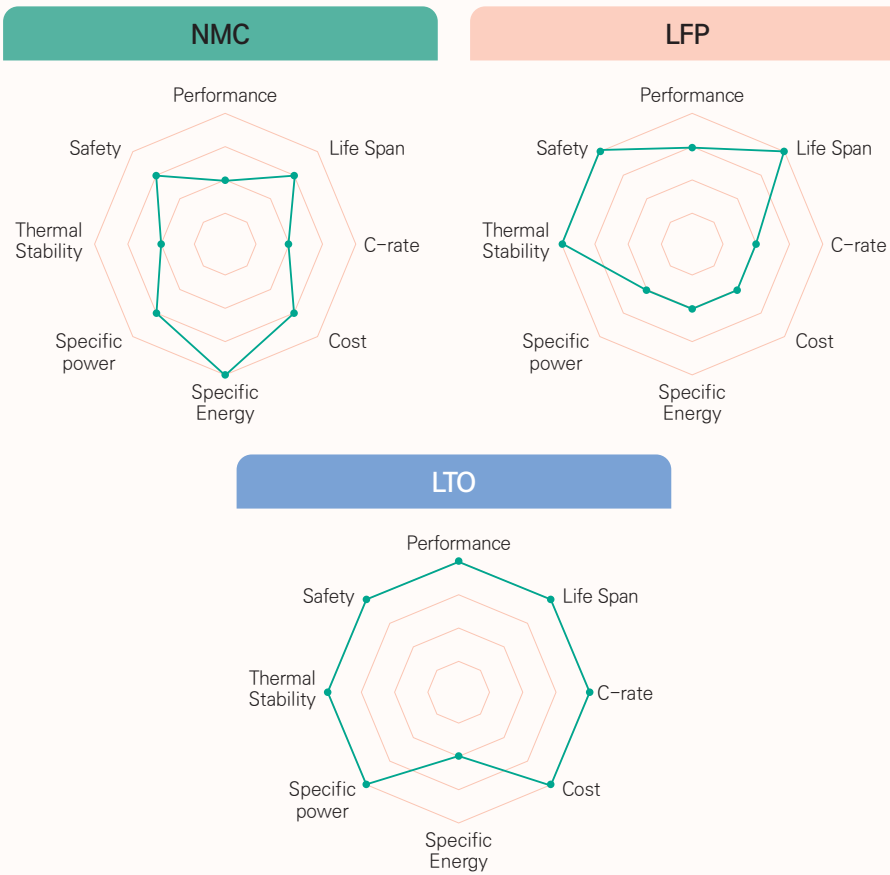
Items	NMC	LFP	LTO
Active Material	Nickel Manganese Cobalt NMC(양극) + Graphite(음극)	Iron Phosphorous LFP(양극) + Graphite(음극)	Titanium Oxygen NMC or LMO(양극) + LTO(음극)
Cell voltage (V)	3.7	3.3~3.4	2.6 (w/LMO)*
Max. C-rate	~6C (discharge)	~1C (discharge)	~20C (charge/discharge)
Lifetime**	7,929	4,571	22,857
Pack-level volumetric energy density (m³/kWh)**	0.009	0.010	0.109
Mass-specific energy density (kg/kWh)**	9.210	9.917	25.119

[출처] Lucà Trombetta, et al. (2024), Battery University (2023), 전문가 의견

* ‘LTO 배터리’는 LTO 음극재를 사용하는 셀을 지칭하며, 보통 LMO나 NMC와 조합된 전지로 구성됨. LTO는 특이한 음극재로서 배터리 특성을 대표하는 명칭으로 사용됨

** 배터리시스템 DB의 평균 값(2024.10)으로, 값이 변경될 수 있음

[그림 11] 리튬배터리의 종류(NMC, LFP, LTO)에 따른 주요 특성별 비교



[출처] LIPU, et al. Batteries, 2022, 8(9), 119

(4) 차세대 배터리시스템

선박용 배터리시스템의 에너지 저장, 효율성, 안전성 개선을 위해 기존 리튬배터리를 대체 혹은 보완한 차세대 배터리시스템에 대한 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 배터리 시스템은 다양한 신소재와 혁신적인 설계를 통해 에너지 밀도, 수명, 안정성 및 비용 측면에서 한계성을 극복하여 향후 선박용으로의 활용을 기대하고 있다.

차세대 배터리시스템의 종류는 상이한 내부 화학적 구성에 따라 다양하게 존재하는데, 대표적으로 ① 리튬-황, ② 전고체, ③ 그 외(나트륨 이온, 레독스 플로우) 등이 있다. 따라서 다양한 유형 중 선박의 규모 및 용도에 따라서 적용하고자 하는 배터리를 선정하는 것이 중요하다.

■ 리튬-황 배터리

리튬-황 배터리는 양극 재료로 황(Sulfur)을 사용하는 차세대 에너지저장기술로, 리튬-황 화학 반응을 기반으로 작동하며, 선박 분야에서 높은 에너지 밀도와 친환경적 특성으로 주목받고 있다. 리튬-황 배터리의 주요 장점 중 하나는 시스템 구축 시 비용 절감이 가능하다는 점이다. 황은 풍부하고 저렴한 자원으로, 비교적 가격이 높은 니켈과 코발트를 사용하지 않아 제조 비용이 절감되어 경제성을 높일 수 있다. 또한, 리튬-황 배터리는 기존 리튬이온 배터리보다 약 3~5배 높은 에너지 밀도를 제공해 전기추진선박의 운항거리를 연장하고, 연료 소비를 줄여 탄소 배출량을 감소시키는 데 기여할 수 있다. 다만, 리튬-황 배터리는 높은 자가 방전율과 낮은 수명 특성을 가지고 있다.

■ 전고체 배터리

전고체 배터리의 경우, 기존 리튬이온 배터리의 단점을 보완하기 위해 액체 전해질 대신 고체 전해질을 사용하는 차세대 배터리 기술이다. 이 배터리는 고체 전해질을 통해 높은 안정성과 에너지 밀도를 제공하며, 선박을 포함한 다양한 분야에서 차세대 에너지 저장 시스템으로 주목받고 있다. 특히 전고체 배터리 내 고체 전해질은 불연성 소재로 화재 및 폭발 위험을 줄이며, 리튬 덴드라이트 형성을 억제해 안정적인 작동을 보장한다. 또한, 리튬 금속 음극의 사용으로 기존 리튬이온 배터리에 비해 에너지 밀도가 2배 이상 증가할 가능성이 있다. 더불어, 화학적 분해와 전해질 누출 문제가 없어 수명이 길고, 극한의 온도에서도 안정적으로 작동할 수 있는 특징을 지닌다. 또한, 높은 에너지 밀도는 전기추진선박의 운항거리를 연장하고 전력 효율성을 향상시키는 데 기여할 수 있다[표 3].

▷ [표 3] 기존 리튬이온 배터리와 전고체 배터리 특성 비교

종류	리튬이온 배터리	전고체 배터리
화학적 구조	액체 전해질	고체 전해질
전해질	액체	고체
에너지 밀도	높음	매우 높음
수명	긴 수명 특성	매우 긴 수명 특성
안정성	높음	높음
비용	중간	높음

■기타

차세대 리튬배터리뿐만 아니라 리튬이온을 다른 화학 소재로 대체하여 배터리 성능을 보다 향상시키는 기술이 활발히 진행되고 있다. 선박용 배터리시스템으로 적합한 배터리에는 나트륨 이온 배터리, 레독스 플로우 배터리 등이 존재한다.

나트륨 이온 배터리는 리튬보다 자원이 풍부하고 비용이 저렴해서 경제성이 요구되는 소형 선박이나 단거리 운항 선박에 적합하다. 에너지 밀도와 용량은 리튬 기반 배터리에 비해 낮지만, 원재료의 가격 안정성과 환경 친화적 특성 덕분에 선박 내 보조 전력 시스템으로 활용될 가능성이 크다.

레독스 플로우 배터리는 대규모 에너지 저장 및 고출력이 요구되는 선박에 적합하다. 전해질을 외부 탱크에 저장하는 설계 덕분에 용량 확장이 용이하며, 긴 수명과 높은 안정성을 제공한다. 다만, 부피가 크고 초기 설치 비용이 높기 때문에 실제 적용을 위해서는 상당한 기술적 보완이 요구된다.

결론적으로, 차세대 배터리시스템의 선택은 선박의 규모, 용도, 운항거리, 비용, 효율성 및 안전성 등을 종합적으로 고려하여 이루어져야 한다.

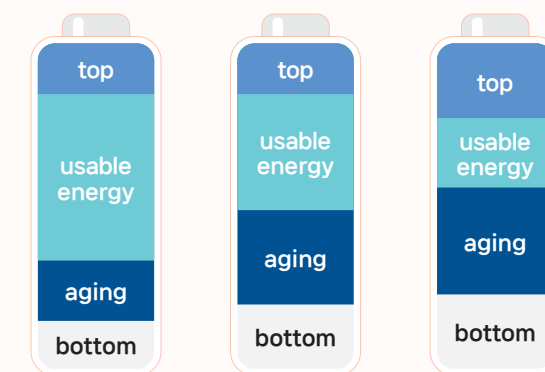
In Depth

리튬배터리시스템의 SoH와 DoD의 이해

[SoH(State of Health)]

배터리의 실제 사용 가능한 에너지는 배터리의 SoH와 밀접하게 연관되며, SoH가 낮아지면 배터리의 성능 저하가 가속화 된다. 즉, 배터리시스템은 통상 SoH가 80% 또는 70% 이하로 저하될 경우, 내부 저항이 급격히 증가하는 문제가 발생 하고, 나아가 발열 증가, 출력 저하, 화재 위험성 등 심각한 문제로 이어질 수 있다. 따라서, 일반적으로 배터리 제조사의 경우 대략 SoH 80~70%를 End of Life로 인식하고, 배터리 교체를 권고한다. 리튬배터리의 노화(aging)를 고려한 실제 사용 가능한 에너지(usable energy)에 대한 이해는 그림 12를 참고할 수 있다.

[그림 12] 리튬배터리의 용량에서 사용 가능 에너지(usable energy)의 범위 (예시)

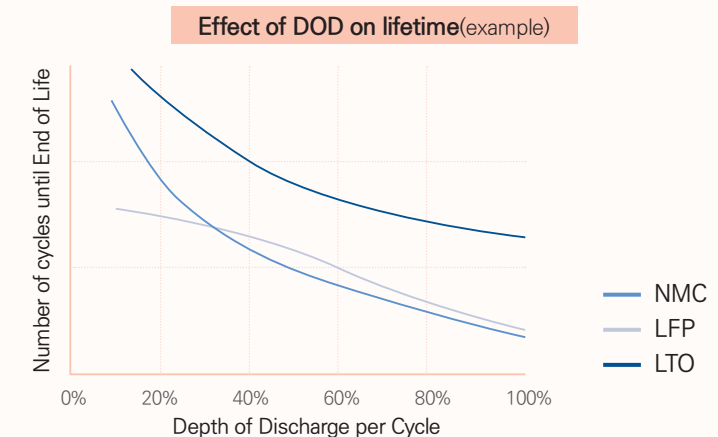


[출처] Maritime Battery Forum

[DoD(Depth of Discharge)]

배터리시스템의 수명은 다양한 환경적 및 운영 조건에 따라 영향을 받으며, 특히 DoD와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 DoD가 작을수록 배터리 수명은 증가하며, 내구성과 안전성도 향상된다. 따라서 배터리 운용 시 DoD를 80% 이하로 유지하는 것이 권장된다. 다만, 제조사별 사양과 운용시스템 조건에 따라 허용 가능한 DoD 조건이 달라질 수 있으므로, 적용 시 배터리시스템의 효율성과 성능 저하를 고려하여 적절한 DoD를 설정하는 것이 중요하다. 또한, 리튬배터리의 종류에 따라 DoD와 수명 간의 관계가 다를 수 있으므로, 배터리 선택 시 이러한 요소를 함께 고려해야 한다. [그림 13]

[그림 13] 리튬배터리의 종류별 DoD와 수명 사이의 관계



[출처] Maritime Battery Forum



2.3
연료공급시스템 및
개질기/크랙커

2.3.1 연료공급시스템(Fuel Gas Supply System)

연료공급시스템은 상압 극저온 액체상태의 수소를 기화하거나 고압 상태의 수소를 연료 전지시스템으로 전달하는 일련의 과정을 담당하는 시스템을 지칭한다. 이 시스템은 연료전지 수소 공급조건(통상 10 bar 이하, 상온)을 만족시키기 위한 다양한 구성 요소(펌프, 기화기, 열교환기 등)로 이루어져 있으며, 연료공급, 공기공급, 냉각회로 등 여러 하위시스템으로 구성된다[그림 14].

(1) Fuel Processing System (연료처리시스템)

연료전지에 필요한 수소나 LNG와 같은 연료를 공급하고, 이를 적절한 조건으로 변환하여 연료전지로 전달하는 역할을 하며, 연료는 저장 탱크에서 압력 조절 및 열교환을 통해 연료전지 작동에 적합한 상태로 가공되며, 이때 수소의 순도가 중요한 변수로 작용한다.

| 주요 구성요소: 연료저장탱크(수소, LNG 등), 압력조절장치(압력 레귤레이터), 연료열교환기(온도 제어), 연료필터(불순물 제거) 등

(2) Air Processing System (공기처리시스템)

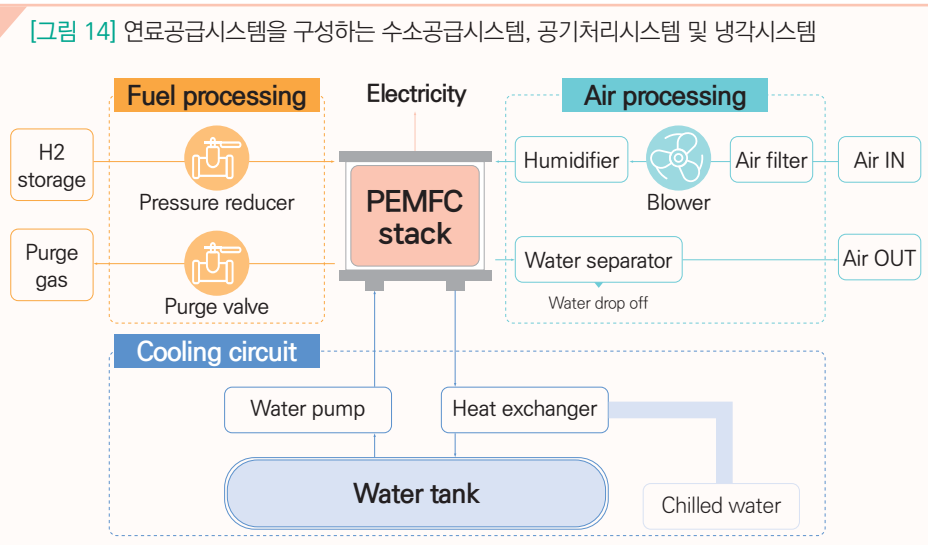
연료전지가 제대로 작동하기 위해서는 산소가 필요하며, 이를 위해 공기처리시스템은 외부 공기를 적절히 공급하고, 공기의 유속과 압력을 제어하는 역할을 한다. 즉, 공기 압축기를 통해 외부 공기를 연료전지에 공급하고, 공기 필터로 불순물을 제거하며, 가습기로 적절한 수분을 유지하여 연료전지의 효율성을 높인다.

| 주요 구성요소: 공기압축기(Air Compressor), 공기필터(Air Filter), 공기가습기 (Humidifier) 등

(3) Cooling System (냉각시스템)

연료전지가 작동하는 동안 발생하는 열을 효과적으로 관리하여 시스템이 적정 온도를 유지하도록 하는 것은 매우 중요하다. 즉, 과열을 방지하는 것은 연료전지의 안정성과 효율을 유지하는 핵심 요소이다. 이를 위해 냉각수 펌프를 이용해 열교환기와 라디에이터를 순환하는 냉각수가 연료전지시스템에서 발생한 열을 외부로 방출한다. 이때, 적절한 냉각이 이루어지지 않는다면, 시스템이 과열되어 성능 저하나 손상이 발생할 수도 있다.

| 주요 구성요소: 냉각수 펌프, 냉각수 탱크, 열교환기, 라디에이터 등

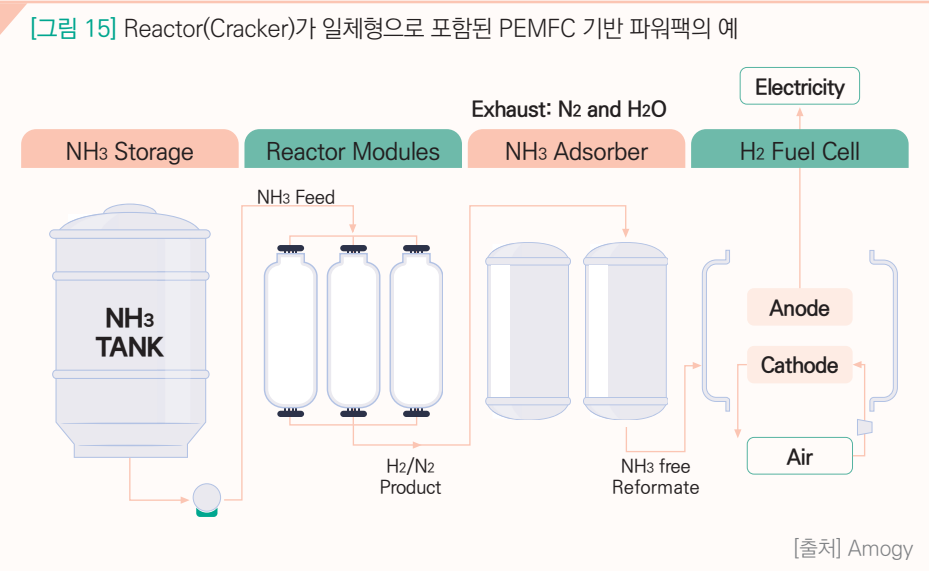


2.3.2 개질기(Reformer) & 크랙커(Cracker)

개질기는 다른 연료로부터 수소를 생산할 수 있도록 해주는 장치를 말하며, 특히 개질기와 저온형 PEMFC를 결합하면 메탄올(CH₃OH)이나 메탄(CH₄)도 연료전지의 연료원으로 사용할 수 있다. 다만, 개질과정 자체에서 상당한 열(약 400~800°C)이 필요하며, 이러한 열은 PEMFC에서 직접 생성할 수 없기 때문에 에너지 효율이 낮아지는 한계가 있다. 예를 들면, 효율이 약 75%인 개질기와 약 60%의 효율성을 가진 PEMFC를 결합하면 전체 효율은 45% (즉, 75%×60%=45%)로, 내연기관시스템 수준으로 떨어지게 된다.¹

개질기와 유사하게, 암모니아 연료의 경우 크랙커(cracker, 또는 앞서 언급한 개질기로도 불림)를 통해 수소를 생산하여 PEMFC에 공급될 수 있다. 이렇게 암모니아를 사용하게 되면, 수소 저장과 관련된 공간적 문제를 완화할 수 있다. 하지만, 암모니아를 수소로 분해하는 과정에서 열에너지를 필요로 하며, 이 과정에서 질소산화물(NO_x)이 생성될 수 있다. 또한, 개질기와 마찬가지로 이러한 추가적인 열 기반 분해 과정은 연료전지시스템의 전체적인 효율을 저하시킨다.

최근에는 암모니아 크랙커와 수소연료전지를 하나의 시스템으로 결합하여, 일명 하나의 파워팩으로 공급되기도 하며, 이러한 시스템을 DAFC(Direct Ammonia Fuel Cell)이라고 부른다 [그림 15]. 이 시스템에서는 암모니아 분해 과정에서 나온 질소를 별도로 모아 배출시킨다. 이러한 DAFC 시스템은 앞서 소개된 DA-SOFC와는 다른 유형으로, PEMFC 기반으로 설계된 시스템을 말한다.



¹ MMMC(Mærsk Mc-Kinney Møller Center), Fuel Cell Technologies and Applications for Deep-Sea Shipping (2024.05)

2.4 연료저장탱크

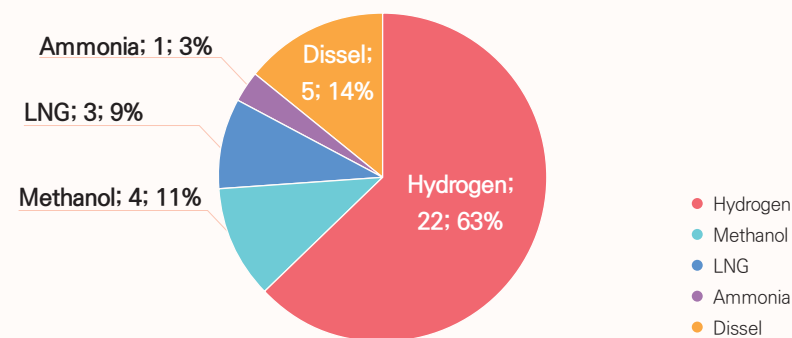
2.4.1 일반사항

연료전지의 연료는 현재 수소(압축/액체)가 주로 사용되고 있으며, 대체연료의 다변화에 따라 LNG, 암모니아, 메탄올 등의 연료도 고려되고 있다[그림 16]. LNG는 기존 인프라를 활용할 수 있고 부피 에너지밀도가 높다는 장점이 있지만, 개질 과정에서 다량의 이산화탄소가 발생하는 문제를 피할 수 없으며, 개질시스템의 부피와 가격 등을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 암모니아는 크래킹을 통해 수소를 생산하여 연료전지에 공급하거나, SOFC에서 직접 개질하여 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 크래킹 기술과 암모니아 SOFC(DA-SOFC)의 기술 개발 수준이 아직 낮고, 특히 암모니아는 독성을 가지고 있다는 단점이 있다.

따라서, 현재 가장 널리 사용되는 방식은 고압수소 저장방식으로, 이 방식의 경우 액화수소를 기화시키는 추가 설비가 필요하지 않아 상대적으로 시스템이 덜 복잡하다. 또한, 30~70 MPa의 고압 수소를 밸브를 활용해 상압 수준으로 조절할 수 있어 선박의 건조 비용을 절감할 수 있다. 그러나 저장 가능한 수소의 양이 제한적이기 때문에 단거리 운항을 하는 소형 연안선박에 적합하다.

중대형 상선의 경우, 장기간 및 장거리 항해를 수행하기 위해 상당히 많은 연료가 필요하다. 이를 충족하기 위해 수소를 영하 253℃ 이하로 액화시켜 동일 부피와 동일 무게 대비 최대량의 수소를 저장할 수 있는 방식이 선호될 수 있다.

[그림 16] 연료전지 선박에 적용된 연료원별 비중(프로젝트 건수; 퍼센트)



[출처] ELKAFAS, Ahmed G., Processes, 2022, 11(1), 97

2.4.2 압축수소와 액체수소

(1) 압축수소

압축수소의 밀도는 다른 저장 방법에 비해 상대적으로 낮은 밀도를 가진다[표 4 참조]. 고압으로 압축할수록 더 높은 밀도를 가지게 되지만 압축을 위한 에너지 손실 및 탱크의 경제성 또한 고려하여야 한다. 또한, 저장용기가 통상 실린더 형상이기 때문에, 선박과 같이 대량의 수소를 필요한 경우에는 다수의 실린더를 배치하여야 하며, 이때 실린더 사이의 이격거리까지 추가적으로 고려해야 한다. 따라서, 압축수소의 형태로 대용량의 수소를 선박에 저장하는 것은 적합하지 않기 때문에, 소형 연안선박에 주로 적용되고 있다.

(2) 액체수소

육상에서 액체수소는 다중벽을 가지는 구형 탱크 또는 압력용기에 저장된다. 극저온액체의 특성상 상온으로부터 큰 열유입이 예상되며, 이러한 열유입으로 인해 발생하는 증발가스(BOG 혹은 BOH)의 발생을 최소화하기 위해 적절한 단열시스템 설계가 필수적이다. 이를 위해 이중벽 구조를 가진 액체수소 탱크가 선박용으로 주로 적용되고 있다. 또한, 체적 에너지 밀도를 높이기 위해 액체수소 멤브레인 탱크에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

액체수소는 압축 수소 대비 더 높은 체적 에너지 밀도를 가지고 있어, 중소형 선박보다는 대형 선박에 더 적합하다. 하지만 -253℃의 극저온 환경하에서 운전해야 하기 때문에, 이에 따른 각종 기자재의 가격 상승, 증발가스 발생 문제, 병커링 인프라 부족 등 여러 단점이 존재한다.



CHAPTER

3

연료전지 선박 설계 시 고려사항

• 본 장의 내용은 FC-Sail 플랫폼 사용자의 이해를 돕기 위해 작성되었습니다.

3.1 발전시스템 조합의 선택

4가지의 연료조합 및 4가지의 발전조합을 통해 적용 가능한 발전시스템은 총 7가지(아래 참조)이며, M/E 추진 방식일 경우와 전기추진방식일 경우로 구분하면 총 14가지의 경우의 수가 발생할 수 있다. 각각에 대한 시스템 조합도는 그림 17을 참조할 수 있다.

- ①번과 ②번 시스템은 수소연료를 직접 공급받는 PEMFC를 주발전원, ESS를 보조 발전원으로 한 경우이다. 이때, 암모니아를 개질해서 사용할 경우에는 ③번 시스템을 적용할 수 있다.
- 그리고 암모니아를 개질 없이 바로 공급하는 경우에는 SOFC와 ESS 하이브리드시스템인 ④번을 적용할 수 있다. 마찬가지로 LNG 연료를 개질 없이 직접 공급할 경우에는 ⑤번 시스템을 적용할 수 있다.
- 만약, 연료전지와 함께 LNG 발전기도 함께 사용될 경우에는 ⑥번과 ⑦번을 적용할 수 있다. 그리고 각각에 대해서는 주추진 유형별(M/E or 전기추진)로 다시 구분된다.

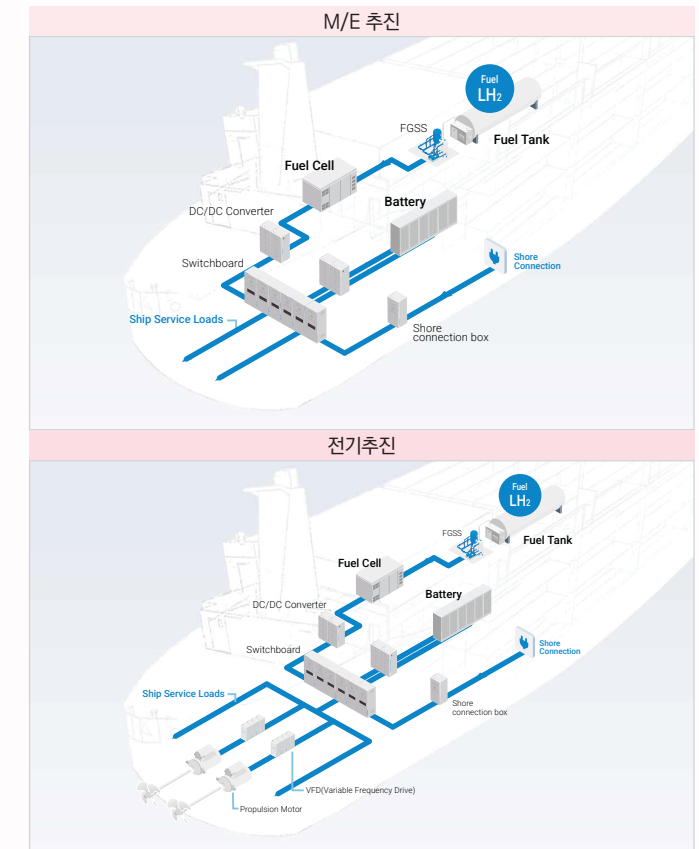
- ① [CH₂] PEMFC + ESS
- ② [LH₂] PEMFC + ESS
- ③ [NH₃] PEMFC + ESS
- ④ [NH₃] SOFC + ESS
- ⑤ [LNG] SOFC + ESS
- ⑥ [LNG] GEN + PEMFC + ESS
- ⑦ [LNG] GEN + SOFC + ESS



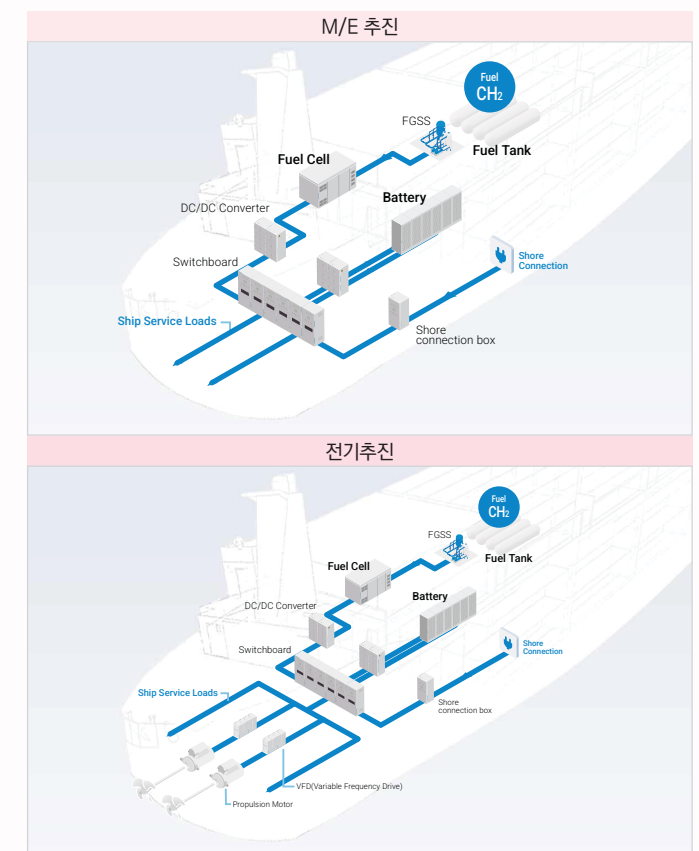
• AMP: Alternative Maritime Power의 약어로, Onshore Power Supply (OPS), Shore Power로도 불림

[그림 17] FC-Sail 플랫폼에서 적용 가능한 발전시스템 조합 도식도 (AMP* 사용 시)

① LH₂ + PEMFC + ESS

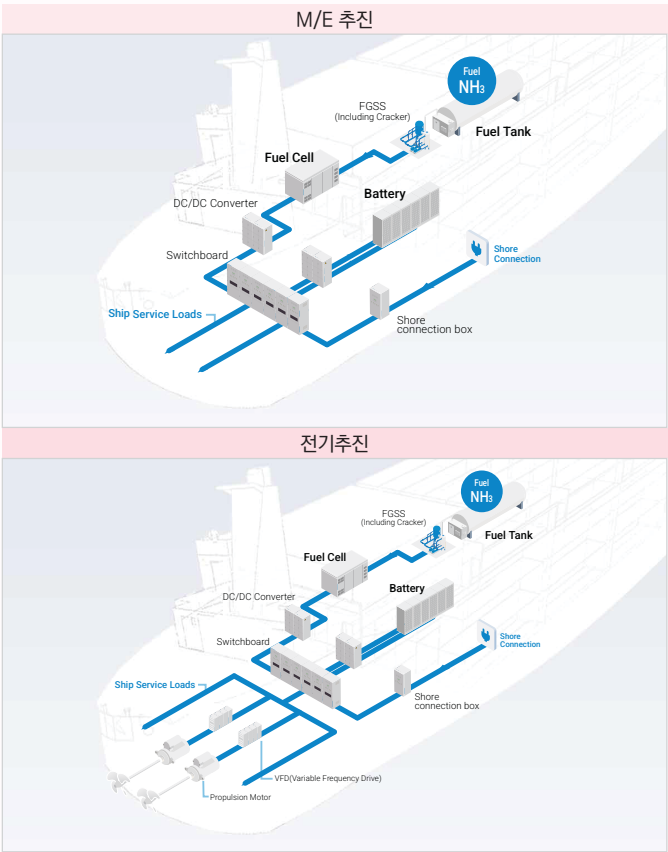


② CH₂ + PEMFC + ESS

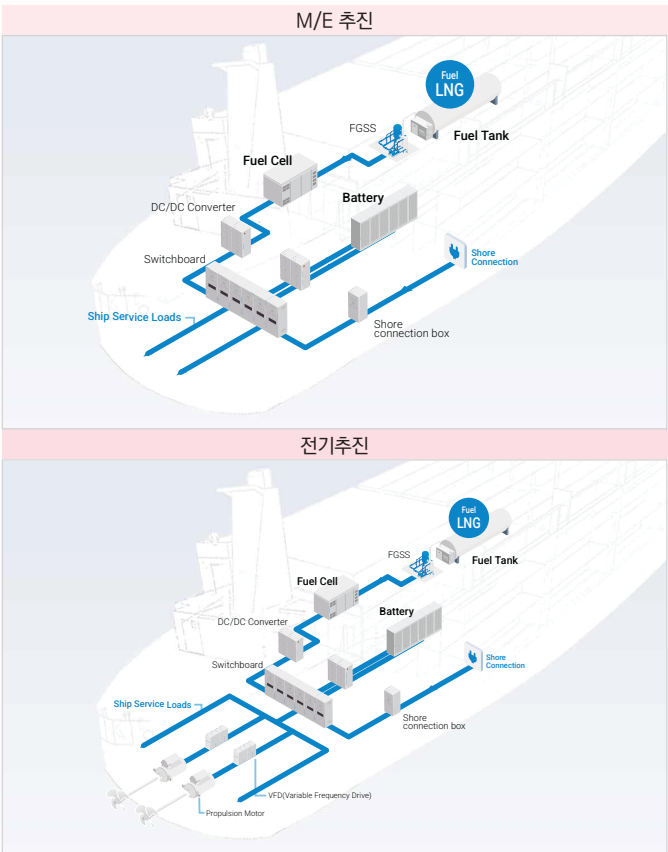


• PEMFC의 경우, 개질기/ Reformer가 PEMFC와 결합하여 일체형으로 공급되기도 함

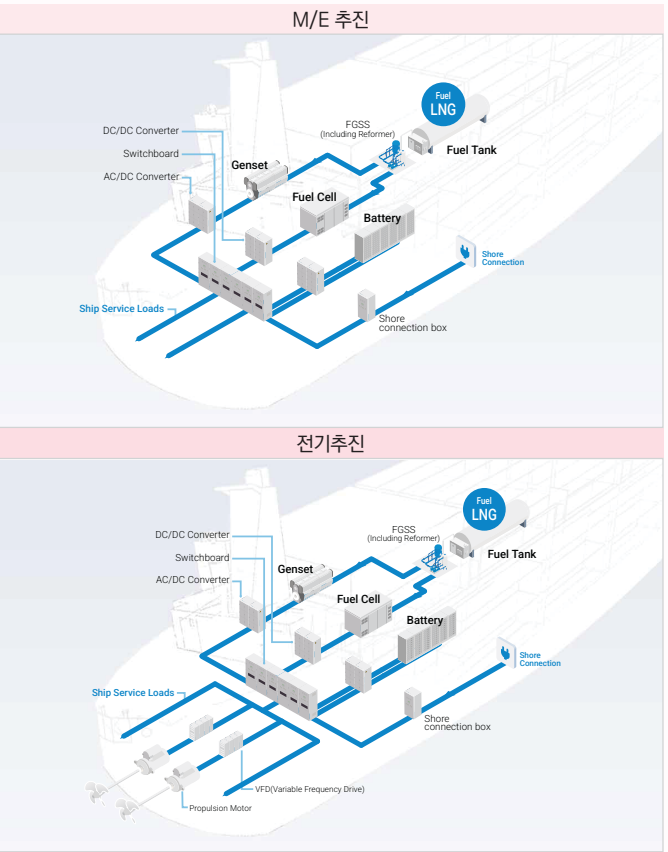
③ NH₃ + PEMFC + ESS / ④ NH₃ + SOFC + ESS



⑤ LNG + SOFC + ESS



⑥ LNG & GEN + FEMFC + ESS / ⑦ LNG & GEN + SOFC + ESS



3.2

연료소모량 및 부피/무게의 계산

• 압축수소의 적용은 ‘소형 선박’을 대상으로 활발히 적용되고 있으며, 향후에도 이러한 시장경향성이 유지될 것으로 가정하였음

• 특히, LNG Density는 LNG Composition이나 온도에 따라 크게 좌우되므로, 필요 시 사용자 수기 입력이 가능하도록 구현함

3.2.1 연료원의 제원

연료의 제원의 경우, 기본 데이터를 사용자로부터 입력받아 사용된다. 연료원의 종류는 크게 3가지(수소, 암모니아, LNG)이나, 수소의 경우 ① CH₂(압축수소, 700bar)와 ② LH₂(액체수소)로 구분되어 사용자는 총 4개의 연료 Type에서 1개를 선택할 수 있다.

또한, 사용자가 압축수소(CH₂)를 선택할 경우*, 부가적으로 필요한 연료탱크의 개수를 산정할 수 있으며, 이때의 설계 Data는 이미 상용화된 자동차용 압축수소탱크의 정보를 활용하였다.

1회 병커링으로 운항 가능한 항차수는 탱크의 사이즈 결정에 중요한 변수로, 사용자 입력을 기본 전제로 설정한다. 그리고 연료의 부피당 에너지 밀도는 연료 종류별 Default 값(표 4)을 제공하나, 사용자가 직접 값을 입력*하여 수정할 수도 있다.

▷ [표 4] 연료종류별 부피당 에너지밀도(kg/m³)

연료종류	고정값	단위	조건		파라미터
			압력(bar)	온도(°C)	
LNG	450	kg/m ³	1	-162	Default
CH ₂	42	kg/m ³	700	20	Default
LH ₂	71	kg/m ³	1	-253	Default
NH ₃	682	kg/m ³	1	-33	Default

또한, 연료전지 스택의 성능은 시간이 지남에 따라 저하되므로 초기수명(BOL: Beginning of Life) 효율성과 말기수명(EOL: End of Life) 효율성이 달라지므로, 이에 대한 검토가 설계단계에서 고려되어야 한다.

3.2.2 발전원의 제원

발전원의 제원은 기본 데이터를 사용자로부터 입력받아 활용한다. 이때, 기본적으로 모든 발전원별 부피밀도와 무게밀도는 DB에 구축된 기자재 Spec.의 평균값이 적용된다.

발전기의 경우, 기본적으로 LNG 연료만 플랫폼에서 적용 가능하며, 발전기의 SFC(Specific Fuel Consumption) 값은 156g/kWh로 설정되어 있다. 그러나, 제품별로 해당 값의 편차가 큰 점을 고려하여, 사용자가 필요에 따라 직접 입력하여 수정할 수 있도록 설계되었다.

연료전지의 경우, 수명(hours), 효율, 무게/부피밀도값이 DB에 구축된 기자재 Spec.의 평균값으로 제시된다. 하지만, 사용자가 필요에 따라 직접 수동입력도 가능하다. 다만, (연료 변환효율이 아닌) 전기적 관점에서 전력변환장치의 효율을 98%로 설정하였다.

ESS의 경우, 기본적으로 가장 상업적으로 많이 사용되는 리튬배터리 타입 세 가지만을 선택하도록 하였으며, 리튬배터리 타입의 종류에 따라 DB에서 구축한 Spec.의 평균값(수명, 부피 밀도, 무게밀도)이 연동되어 달라지도록 설정하였다. 또한, SoH(State of Health)는 기본적으로 70%, DoD(Depth of Discharge)는 80%로 설정하였으나, 사용자 수동입력도 가능하다.

그리고 모든 조합에서 ESS의 충전 방식은 연료원의 종류에 따라 아래 옵션 중에서 선택할 수 있도록 되어 있다.

- ① [CH₂] 선택 시, AMP충전 or 연료전지 충전
- ② [LH₂] 선택 시, AMP충전 or 연료전지 충전
- ③ [NH₃] 선택 시, AMP충전 or 연료전지 충전
- ④ [LNG] 선택 시, AMP충전 or 연료전지 충전 or 발전기 충전

3.2.3 연료소모량 및 부피/무게의 계산

기본적으로 운항프로파일을 바탕으로, 아래의 수식에 따라 각 발전원별 정격용량을 확인할 수 있다. 이때, 발전기와 연료전지의 경우 설계 margin을 10%로 설정하였으며, 각 발전원의 전기적인 효율은 98%로 가정하였다.

$$G_{rated} = [\max.\{M1_P \times (1+SM/100) + M1_S\} \times M1_{G_PC}/100, M2_G, M3_G, \dots] / 0.9/0.98/(\eta_P/100)$$

$$F_{rated} = [\max.\{M1_P \times (1+SM/100) + M1_S\} \times M1_{F_PC}/100, M2_F, M3_F, \dots] / 0.9/0.98/(\eta_P/100)$$

$$B_{rated} = W_B / (DoD/100) / (SOH/100) / 0.98 / (\eta_P/100) / Cr$$

또한, 각 발전원별 부피/무게에 대한 정보 및 연료의 부피/무게에 대한 정보를 제공하여 설계 시 참고자료로 활용될 수 있도록 하였다. 각 발전원별 전력량과 표 5의 값을 사용하여 각 연료별 연료소모량을 계산하면 아래와 같다.

$$F_{LNG} = \{(W_G / 0.98 / (\eta_P / 100)) \times SFC / 10^6\} + \{(W_F / (\eta_F / 100)) / (\eta_P / 100) / 13.7 / 10^3\}$$

$$F_{H_2} = (W_F / (\eta_F / 100)) / (\eta_P / 100) / 33.33 / 10^3$$

$$F_{NH_3} = (W_F / (\eta_F / 100)) / (\eta_P / 100) / 5.17 / 10^3$$

▷ [표 5] 연료 종류별 에너지밀도(g/kWh)

연료	고정값	단위	파라미터
LNG	13.70	g/kWh	Default
H ₂	33.33	g/kWh	Default(CH ₂ , LH ₂ 동일)
NH ₃	5.17	g/kWh	Default

따라서 선박에 탑재될 연료의 총 무게는 아래와 같으며, 이때, 탱크 자체의 무게는 고려되지 않았다.

$$M_{fuel} = (F_{LNG} + F_{H_2} + F_{NH_3}) \times N$$

또한, 표 4의 '부피당 에너지밀도' 정보를 사용하여 각 연료별 요구되는 부피는 아래와 같이 계산된다.

$$V_{LNG} = (F_{LNG} \times 1000) / FD_{LNG}$$

$$V_{LH_2} = (F_{H_2} \times 1000) / FD_{LH_2}$$

$$V_{CH_2} = (F_{H_2} \times 1000) / FD_{CH_2}$$

$$V_{NH_3} = (F_{NH_3} \times 1000) / FD_{NH_3}$$

그리고 이를 합산하여 선박에 탑재될 연료의 총부피는 아래와 같이 계산된다. 즉, 1회 병커링 후 N차 운항시 필요한 총연료에 대한 부피량이다.

$$V_{fuel} = (V_{LNG} + V_{LH_2} + V_{CH_2} + V_{NH_3}) \times N$$

수소연료의 경우, 선박용으로 특화된 상용화된 탱크가 부재하여 초기에는 소형선박을 중심으로 자동차용(승용차/화물차용) 압축수소 탱크를 적용할 가능성이 높다. 따라서 압축수소를 선택할 경우, 자동차용 탱크의 스펙 정보를 바탕으로 필요한 수소 탱크의 개수를 제시하였다.

만약, 연료원의 종류를 CH₂를 선택하였을 경우, 수소연료전지 승용차/화물차에 적용되는 탱크 스펙을 기준으로, 연료전지 선박에 필요한 압축수소 탱크 개수를 구하면 아래와 같다. 이때, K1는 승용차에 사용되는 소형 압축수소 탱크, K2는 화물차/버스에 적용되는 대형 탱크의 대표값으로 현 단계에서는 DB 확보가 어려운 점을 감안하여 아래값을 Default값으로 설정하였다. (Default 값은 예시 값으로, 제품군이 보다 많아질 경우 변경될 수 있다.)

$$T_{CH_2} = (F_{H_2} \times 1,000 \times N) / (K1 \text{ or } K2)$$

(여기서, K1: 2.3 kg·H₂/개, K2: 6.83 kg·H₂/개)



[참고] 3.2.3 수식의 Symbol에 대한 설명

〈운항모드 및 부하〉

- **M1_p**: 운항모드 중 normal seagoing 모드에서의 Propulsion Load (kW)
- **M1_s**: 운항모드 중 normal seagoing 모드에서의 Ship Service Load (kW)
- **M2_G, M3_G, ...**: 나머지 운항모드에서 발전기로 공급 받는 부하전력 (kW)
- **M2_F, M3_F, ...**: 나머지 운항모드에서의 연료전지로 공급 받는 부하전력 (kW)
- **M1_{G_PC}, M1_{F_PC}**: Normal seagoing 모드에서 발전기/연료전지의 발전비율 (%)
- **W_G**: 발전기로 공급하는 총 전력량 (kWh)
- **W_F**: 연료전지로 공급하는 총 전력량 (kWh)
- **W_B**: 배터리로 공급하는 총 전력량 (kWh)
- **SM**: Sea Margin (%)
- **N**: 1회 연료 충전(bunkering)으로 운항가능한 운항 횟수 (회)

〈효율 및 성능〉

- **η_F**: 연료전지시스템 효율 (%)
Note. 기본적으로 50%로 설정되어 있음
- **η_p**: 추진시스템 효율 (%)
Note. 연료전지시스템이 선내발전용으로만 사용시 98%, 전기추진용으로도 사용 시 92%가 기본값으로 설정되어 있음 (추진모터 및 드라이브 등의 효율이 고려됨)

〈배터리〉

- **DoD**(Depth of Discharge): 배터리의 방전심도 (%)
- **SoH**(State of Health): 배터리의 기대 수명 (%)
- **Cr**: 배터리의 C-rate (-)

〈연료소모량, 부피, 밀도〉

- **F_{LNG}**: 예상되는 LNG 연료의 소모량 (ton/voyage)
- **F_{H2}**: 예상되는 H2 연료의 소모량 (ton/voyage)
- **F_{NH3}**: 예상되는 NH3 연료의 소모량 (ton/voyage)
- **M_{fuel}**: 예상되는 연료의 총 무게 (ton/voyage)
- **V_{fuel}**: 예상되는 연료의 총 부피 (m³/voyage)
- **V_{LNG}**: 예상되는 LNG 연료의 부피 (m³/voyage)
- **V_{LH2}**: 예상되는 LH2 연료의 부피 (m³/voyage)
- **V_{CH2}**: 예상되는 CH2 연료의 부피 (m³/voyage)
- **V_{NH3}**: 예상되는 NH3 연료의 부피 (m³/voyage)
- **SFC**(Specific Fuel Consumption): 발전기 연료 소모량 (g/kWh)
- **FD_{LNG}**: LNG 연료의 부피당 에너지밀도 (kg/m³)
- **FD_{LH2}**: LH2 연료의 부피당 에너지밀도 (kg/m³)
- **FD_{CH2}**: CH2 연료의 부피당 에너지밀도 (kg/m³)
- **FD_{NH3}**: NH3 연료의 부피당 에너지밀도 (kg/m³)

〈압축수소 탱크〉

- **T_{CH2}**: 필요한 압축수소(700bar) 탱크의 개수 (CH2 연료 선택 시) (개)
- **K₁**: 소형 CH2 탱크의 수소저장용량 (kg/개)
- **K₂**: 대형 CH2 탱크의 수소저장용량 (kg/개)



3.3

FGSS 수소 유량의 계산

일반적으로 연료전지시스템에 공급되는 수소 유량은 아래와 같은 수식에 따라 계산된다.

$$Mass\ flow\ [kg/h] = \frac{Power\ [kW]}{LHV_{fuel}\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{\eta_{fuelcell}} \times 3,600[kJ/kWh]$$

or

$$Mass\ flow\ [kg/h] = \frac{Power\ [kW]}{LHV_{fuel}\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{\eta_{fuelcell}} \times 3,600[kJ/kWh]$$

이때, 연료전지의 효율은 50%로 가정하고, 표 6의 에너지밀도 값을 적용하게 되면, Normal seagoing시의 연료전지시스템에 공급되는 수소 유량은 아래와 같이 계산된다. 이때, 수소가 아닌 LNG, NH3 연료를 선택할 경우, 개질기의 효율(80%)도 함께 고려되었다.

$$Mass\ flow\ [kg/h] = \frac{Power\ [kW]}{LHV_{fuel}\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{\eta_{fuelcell}} \times 3,600[kJ/kWh]$$
$$= \frac{Power\ [kW]}{30.00\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{0.5} = Power \times 0.0667\ (\text{수소 연료})$$
$$= \frac{Power\ [kW]}{72.99\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{0.5} \times \frac{1}{0.8} = Power \times 0.0343\ (\text{LNG 연료})$$
$$= \frac{Power\ [kW]}{193.42\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{0.5} \times \frac{1}{0.8} = Power \times 0.0129\ (\text{NH}_3\ \text{연료})$$

그리고 LNG 연료를 사용하는 발전기의 효율을 98%로 가정하면, 발전기에 공급되는 LNG 유량값도 아래와 같이 계산된다.

$$Mass\ flow\ [kg/h] = \frac{Power\ [kW]}{72.99\ [kJ/kg]} \times \frac{1}{0.98} = Power \times 0.0140\ (\text{LNG 연료})$$

▷ [표 6] 연료 종류별 유량 계산에 사용된 Default 값

연료	고정값	단위	고정값	단위	파라미터
LNG	0.01370	kg/kWh	72.99	kWh/kg	Default
H2	0.03333	kg/kWh	30.00	kWh/kg	Default(CH2, LH2 동일)
NH3	0.00517	kg/kWh	193.42	kWh/kg	Default

3.4 수소 확산해석 시 고려사항

• 최저폭발한계(LEL)라 함은 폭발이 일어나는 가스 농도의 하한계(lower explosive limit)를 말함. '선박용 연료전지 시스템 지침'에서는 인화성 범위 하한치(lower flammable limit)와 동일하게 간주되며 수소의 경우 4.0% 부피율을 가짐

• 폐위구역에서는 구역 내 장비 배치 등으로 혼잡도가 높을 수록, 수소 누출지점과 공기 흡입구가 멀어질수록 배출 시간이 길어지는 경향이 있으며, 천장형상이 경사진 경우 수소 배출에 도움이 될 수 있는 것으로 밝혀져 있음

3.4.1 수소 확산 관련 규정

수소연료를 공급받는 연료전지시스템의 경우, 가스 확산을 방지하기 위한 적절한 가스 추출 및 탐지 수단이 갖추어져야 한다. 선급 규칙에 따라, 연료전지 구역의 환기율은 기술적인 고장으로 인해 발생할 수 있는 모든 최대 누출 시나리오에서 가스/증기 평균 농도를 최저폭발한계(LEL)¹의 25% 아래로 희석하기에 충분해야 한다.

가스 또는 증기 농도가 최저폭발한계(LEL)의 20%를 초과하는 연료전지 구역에서 가스/증기의 탐지 시에는 경보를 발하여야 한다. 또한, 가스 또는 증기 농도가 최저폭발한계(LEL)의 40%를 초과하는 연료전지 구역에서 가스/증기 탐지 시에는 영향을 받는 연료전지 전력 시스템을 정지하고 점화원을 차단해야 하며 누출을 격리하는 데 필요한 모든 밸브를 자동으로 닫아야 한다. 보다 자세한 수소 연료전지의 수소 누출에 따른 경보 및 안전조치 요건은 관련 선급 규칙에 따른다.

3.4.2 누출조건 및 환경조건¹

수소 누출 확산해석에 있어 가장 중요한 조건이라고 할 수 있는 누출원에 대한 사항은 선박 설계 및 건조 과정에서 수행되는 위험성 평가의 누출 시나리오를 통해 결정할 수 있다. 이때, 주요 장비와 밸브 및 배관 등의 누출빈도를 확인하여 사고 발생 가능성을 검토한다.

환경조건의 경우, 폐위구역과 실외구역으로 구분될 수 있는데, 폐위구역² 내에서 확산해석을 수행하기 위해서는 폐위구역의 크기, 환기구 위치 및 용량, 장비 배치에 따른 혼잡도와 폐위 구역 내부 구조를 검토할 필요가 있다. 환기용량은 앞서 언급한 선급 규칙을 만족하는 용량 이어야 하며, 환기구 위치가 중요한 변수가 될 수 있다. 특히, 수소는 공기보다 가벼워 빠르게 상승하는 경향이 있으므로 폐위구역 천장에 구조 배치를 최소화하거나, 또는 천장 형상을 변경하여 수소의 배출을 향상시킬 수 있다.

반면, 실외구역은 기상 조건에 의한 영향이 크다. 특히, 풍향, 풍속에 의한 영향뿐만 아니라, 태양 복사열에 의한 대기안정도 영향도 무시할 수 없으며, 일반적으로 풍속이 커질수록 대기 안정도가 높을수록 수소 확산 범위는 넓어지는 것으로 알려져 있다.

- 누출조건: 누출위치, 누출공의 크기, 누출량 등
- 환경조건
 - | 폐위구역: 배기구의 위치, 환기량, 내부배치 및 구조형상 등
 - | 실외구역: 대기온도, 대기압, 풍향, 풍속, 대기안정도 등

3.4.3 수소 확산해석 방법 및 절차

상기의 누출조건 및 환경조건을 결정한 후, 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics, CFD) 격자 민감도를 수행하여 적절한 격자 크기로 해석을 수행할 수 있다. 해석을 수행하면 각각의 조건들을 변경하면서 매개변수 분석을 수행하고, 이와 더불어 결과 분석을 통해 각 상황별 누출예방 및 피해저감에 대한 연구를 수행할 수 있다.

일반적으로 수소 누출은 밸브, 배관 또는 저장용기에서 결함이나 균열 등을 통해 발생한다. 특히, 액화수소는 공기보다 가벼워 누출량이 작을 경우, 기화가 되면서 상승하지만 누출량이 많을 경우 풀(pool)을 형성한 후 주변열을 흡수하면서 기화가 되고 공기 중으로 확산될 수 있다.



¹ Ryu, B.R. et al., J. Mar. Sci. Eng., 2023, 11, 1639., Ryu, B.R.Thesis, KMOU, 2024

CHAPTER

4

연료전지 선박
환경성 분석

4.1
일반사항

- EEDI(Energy Efficiency Design Index): 신조선의 에너지효율설계지수
- EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index): 현존선의 에너지효율지수

플랫폼의 결괏값으로 도출한 연료소모량을 사용하여, 환경성 분석을 수행할 수 있다. 선박의 신조에 있어 가장 중요한 환경규제 중 하나가, CO₂ 규제인 EEDI*로 이미 2013년 이후 건조되는 신조선에 적용하고 있으며 3단계 단축목표 달성을 추진하고 있다. 하지만, 2013년 이전에 건조 계약된 선박인 ‘현존선’의 탄소배출량 감축에 대한 필요성도 높아짐에 따라 EEXI** 규제가 추가적으로 도입이 되었다.

하지만, 상기 규제는 LNG선 및 크루즈선을 제외한 전기추진선박에는 적용할 수 없는 한계가 있다. (즉, 발전원으로 연료전지와 배터리를 사용하게 되었을 경우 EEDI/EEXI 기준을 적용할 수 없음.) 또한, EEDI/EEXI의 경우, 온실가스를 구성하는 다양한 배출물질 중 오로지 CO₂만 기준으로 하기 때문에, CH₄ 및 N₂O 등이 포함된 종합적인 온실가스 배출량에 대한 규제의 필요성이 제기되어 왔다.

따라서 본 플랫폼에서는 예상되는 온실가스 배출량값을 제시함으로써 관련 규제의 만족 여부를 확인할 수 있도록 결과리포트에 제시하였다.

4.2
환경규제

우선, 온실가스 배출량값은 유럽 그린딜의 후속 조치인 ‘Fit for 55’ 입법 패키지 중 해상분야에 해당하는 제도(EU ETS, FuelEU Maritime) 및 IMO 규제에 활용될 수 있으며, 각각에 대한 비교는 표 7을 참조할 수 있다.

4.2.1 EU ETS (European Union Emissions Trading System)

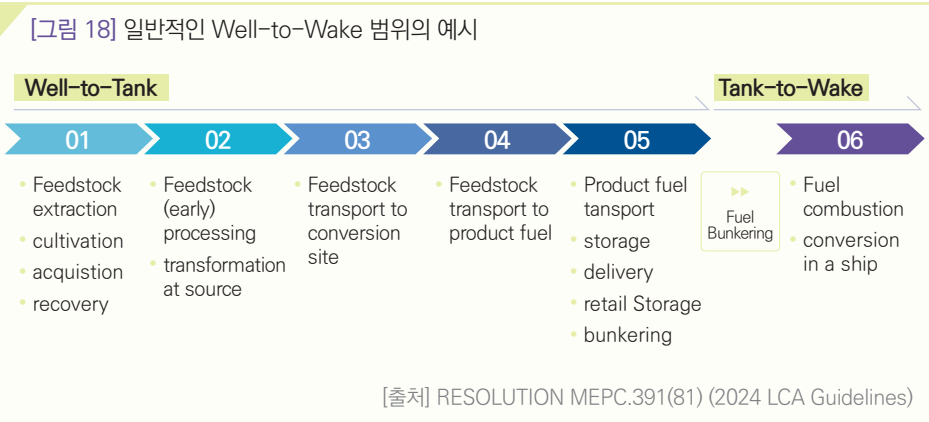
온실가스 배출자는 보다 경제적이고 효율적인 감축 대안을 통해 배출량을 줄이고, 필요 시 다른 기업으로부터 배출권을 구매하여 전체 배출량의 균형을 유지하는 제도이다. EU는 이 제도를 해운 부문으로 확대하여, 역내 항만에 기항하거나 항만에서 출항하는 모든 국적의 5,000 GT 이상의 선박에 대해 2023년부터 EU ETS 준수를 의무화하였다.

4.2.2 FuelEU Maritime

선박의 연료 사용으로 발생하는 온실가스 집약도(GHG Intensity)를 제한함으로써 유럽 지역의 기후변화 방지 노력에 기여하기 위한 입법안이다. FuelEU Maritime에서는 온실가스 집약도 저감을 위해 운항 중 배출되는 온실가스뿐만 아니라, 연료의 생산과 유통과정에서 발생하는 배출량까지 포함하는 Well-to-Wake 기준의 저감을 요구하고 있다. 이는 연료의 전체 수명 주기에서 발생하는 배출량을 고려하여 보다 포괄적인 감축 목표를 달성하기 위한 조치이다.

4.2.3 IMO

MEPC를 중심으로, 해양연료의 전과정 온실가스 집약도에 대한 지침(LCA* 지침서)을 마련하였고, 81차(2024. 3) 회의 때 채택하였다. 이때, 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 3종의 온실가스를 고려하여 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)를 계산하도록 하였다.



▷ [표 7] EU와 IMO의 온실가스 규제 별 비교표

항목	EU ETS	FuelEU Maritime	IMO LCA 관점
GHG 계산 항목	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 모두 포함	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 모두 포함	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 모두 포함(예정)
적용 시점	2024년부터 단계적 적용	2025년부터 단계적 적용 (FuelEU Maritime Initiative)	2023년부터 단계적 적용
적용 대상	유럽연합(EU) 항구에 출입하는 모든 선박 (5000 GT 이상)		모든 국제항해 선박
규제 방법	배출량에 따른 탄소배출권 할당 및 거래	선박 연료의 탄소집약도 기준 준수 요구 LCA 관점에서 연료의 GHG 배출 감소 목표 설정	선박 에너지 효율 설계지수 및 탄소집약도 (CI)를 통한 규제 지속 가능한 연료 사용 및 기술적 개선을 통한 탄소 배출 감소 목표
LCA 관점	TtW	WtW	WtW(예정)
규정 문서명	Directive 2003/87/EC, Directive (EU) 2018/410	FuelEU Maritime: Regulation (EU) 2023/1805	Regulation MEPC.391(81)
기타 특징	EU 내에서의 항공 및 해운 부문을 대상으로 하는 배출권 거래 시스템 배출권 가격 상승과 관련 산업의 대응 전략 중요	LCA 기반으로, 연료 생산부터 사용까지 전과정에 걸친 GHG 배출을 고려 저탄소 연료 사용 촉진	국제적으로 합의된 규제 기준을 통해 IMO 회원국 전체에 적용 각국의 규제 이행 상황 및 조정 필요

4.3 온실가스 수식 및 적용 기준

• IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부 간 협의체)는 1988년 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 국제 기구임

4.3.1 IMO의 온실가스 계산식

RESOLUTION MEPC.391(81) ‘Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA guidelines)’ 에 따른 지구에 20년 동안 영향을 미치는 지구온난화지수인 GWP20과, 100년 동안의 GWP100 수식은 아래와 같다. 본 지침서에서는 전세계 공통으로 사용되는 GWP100을 사용하였다. 이때, IPCC* 제5차의 지구온난화지수를 적용하였다.

(1) GWP100

$$g_{CO_2eq(100y)} = GWP_{CO_2(100y)} \times g_{CO_2} + GWP_{CH_4(100y)} \times g_{CH_4} + GWP_{N_2O(100y)} \times g_{N_2O}$$
$$g_{CO_2eq(100y)} = 1 \times g_{CO_2} + 28 \times g_{CH_4} + 265 \times g_{N_2O}$$

(2) GWP20

$$g_{CO_2eq(20y)} = GWP_{CO_2(20y)} \times g_{CO_2} + GWP_{CH_4(20y)} \times g_{CH_4} + GWP_{N_2O(20y)} \times g_{N_2O}$$
$$g_{CO_2eq(20y)} = 1 \times g_{CO_2} + 84 \times g_{CH_4} + 264 \times g_{N_2O}$$

4.3.2 EU의 온실가스 계산식

EU MRV에서는 IPCC의 5차 평가보고서에 따른 지구온난화지수의 적용을 요구(European Commission, 2020)하고 있으며 European Parliament and Council(2018)도 이를 반영하여 개정될 계획을 고려하여, 본 연구에서는 (IMO와 동일하게) CO2에 대해 1, CH4에 대해 28 및 N2O에 대해 265를 지구온난화지수로 적용하였다.

FuelEU Maritime의 Annex II는 WtW 온실가스 집약도를 계산하기 위한 각 연료 종류에 대한 저위발열량(LCV, Lower Calorific Value), WtT 온실가스 배출계수 및 TtW 온실가스 배출 계수에 대한 기본계수를 제시하고 있다. 또한, 육상전원 충전 사용에 따라 발생하는 온실가스 배출량도 고려하도록 되어있다. 이때, 국가별 OPS 계수가 상이함을 고려하여, 본 플랫폼에서는 표 8의 값을 Default 값으로 사용하였다.

본 플랫폼에서는 연료의 생산 방식에 따라 배출계수의 범위가 광범위하기 때문에 표준화된 비교값을 설정하고자 기본적으로 EU에서 제시하는 온실가스 계출 계수를 사용하되, 일부 연료에 대해서는 문헌조사를 통해 Default 값을 적용하였다. 본 플랫폼에 적용한 환경성 분석의 범위와 Default 값은 그림 19에 제시되어 있다.

• 플랫폼상의 수식 계산을 위한 가정값으로, 상황에 따라 변동될 수 있음

[그림 19] FC-Sail 플랫폼에 적용한 환경성 분석의 가정값*

Fyel Type		CO2eqWtT (gCO2eq/MJ)	LCV (MJ/g)
LNG	Fossil LNG	18.5	0.0491
	Bio LNG	-41	0.0491
	e-LNG	26.6	0.0491
H2	Fossil H2	132	0.12
	e-H2	3.6	0.12
NH3	Fossil NH3	121	0.0186
	e-NH3	N/A	0.0186

Fuel Type	GWP 배출계수 (g/gFuel)		
LNG	CO2	CH4	N2O
	2.75	0	0.00011
H2	0	0	0
NH3	0	0	0.00037

- [NOTE]
- 풍력추진에 대한 보상계수(f_{wind}) 및 e-fuel로 표현되는 비생물학적 기원의 재생에너지 연료 (RFNBO)의 보상계수 2(RWD)도 고려되어야 함
 - LNG의 경우, 발전기엔진의 종류에 따라 emission factor 값이 달라지며, 본 플랫폼에서는 발전기엔진으로 사용되는 아래의 2개만 고려하였음
| IMO 가이드라인에 따라, LNG Otto (dual fuel medium speed): C_{slip} = 3.5, LBSI(Lean-Burn Spark-Ignited): C_{slip} = 2.6 적용
(* 단, EU 기준에서는 LNG Otto 값이 3.1임)

[출처] IMO Resolution MEPC.391(81), EU Resolution 2023/1805, 김진형, and 최재혁, 대한조선학회 논문집, 61.2 (2024)

▷ [표 8] FC-Sail 플랫폼에 적용한 국가별 육상전원(OPS)의 온실가스 배출 계수

국가	기호	GWP 계수 (gCO _{2eq} /kWh)
한국	KR	411.3
중국	CN	557.2
싱가포르	SG	408.0
홍콩	HK	680.0
네덜란드	NL	640.9
인도네시아	ID	784.8
아랍에미리트	AE	417.9
벨기에	BE	138.8
대만	TW	557.5
독일	DE	449.1
베트남	VN	377.9
파키스탄	PK	327.4
호주	AU	770.0
인도네시아	IN	713.2
미국	US	407.1
유럽(EU-27)	EU	265.0

[출처] <https://www.carbonfootprint.com/international-electricity-factors.html>(2023.7 기준)
(* 단, 유럽연합의 경우 EEA(European Environment Agency) EU-27 기준(2020) 적용)

CHAPTER
5

연료전지 선박
관련 규정



5.1
일반사항

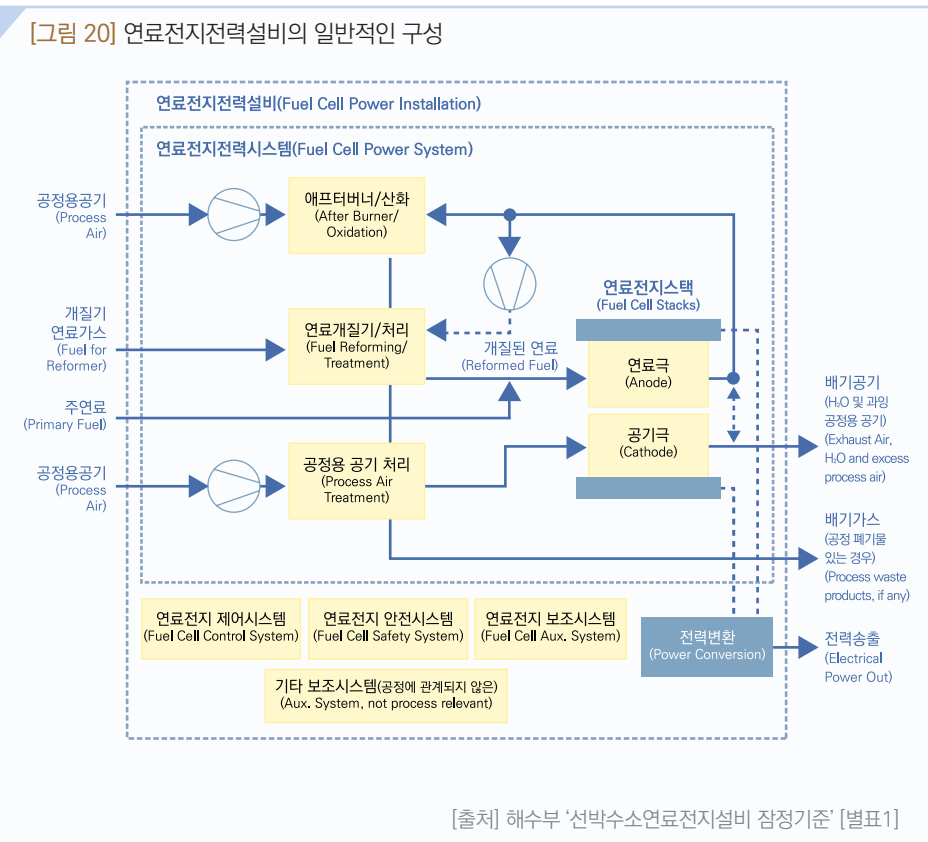
국내법뿐만 아니라, IMO, 선급, IEC 등에서 선박용 연료전지에 대한 규정을 제/개정함에 따라 선박용 연료전지에 대한 제도적 기반이 마련되고 있다. 즉, 기존의 육상 연료전지 기반의 기준에서 벗어나 선박에 특화된 기준이 개발되고 있다.

선박용 연료전지 시장은 육상 모빌리티 및 발전 분야에서의 시장 확대에 힘입어 지속 성장할 것으로 전망되며, 향후 국/내외 ‘선박용 연료전지’에 특화된 규정이 정립되면, 연료전지 선박 시장 활성화에 기여할 것으로 예상된다.

5.2
국내 기준

• 「새로운 형식의 선박시설에 대한 잠정기준 마련에 관한 규정」 (해양수산부예규 제 112호)

해양수산부는 신기술 적용 선박에 대한 기준을 마련하고자 제정 근거가 되는 규정* 및 국제 해사기구(IMO)의 임시 지침을 바탕으로, 2023년 4월 「선박수소연료전지설비 잠정기준」을 제정하였다[그림 20]. 해양수산부는 잠정기준을 지속적으로 보완하여 2025년까지 정식 기술 기준을 마련할 예정이다.



5.3
IMO 규정

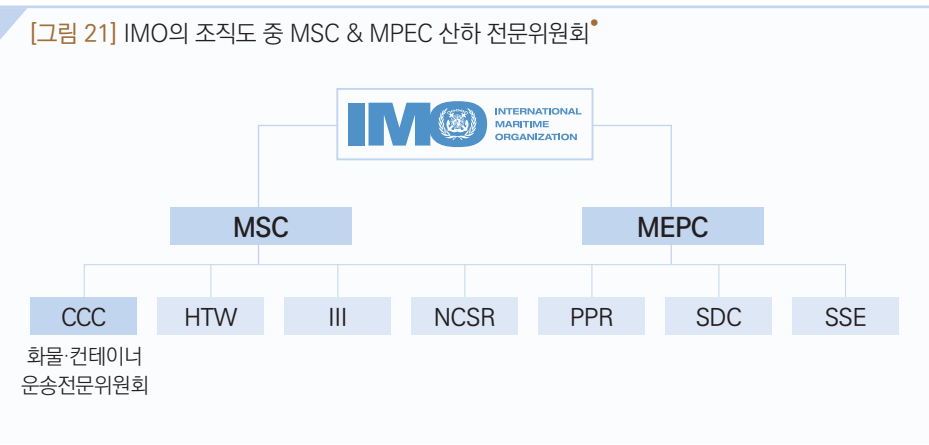
• MSC.1/Circ.1647 on Interim guidelines for the safety of ships using fuel cell power installation

• 국제해사기구(IMO)의 주요 하위 위원회로는 해사안전 위원회(MSC)와 해양환경보호위원회(MEPC)가 있으며, 그 외에도 CCC(화물), HTW(선원 훈련), PPR(오염 대응) 등 다양한 기술 전문위원회가 존재함

IMO MSC.1/Circ.1647(15 June 2022)인 「연료전지 전력 설비를 사용하는 선박의 안전을 위한 잠정기준」* 이 MSC 105차 회의에서 승인되어 정식 발행되었다. 이를 통해, 연료전지 선박 설계/건조에 대한 통일된 기준이 마련되었고, 각 선급에서도 이 기준을 바탕으로 규칙을 제/개정하였다. 단, 각 선급별로 세부 요건은 일부 상이할 수 있다.

동 임시지침은 연료전지를 사용하는 선박들을 위한 국제적 기준을 제공하기 위해 개발되었다. 해당 지침의 목표는 기름 연료를 활용한 종래의 주/보조 기관과 적어도 동일한 수준의 안전 및 안정성을 보장할 수 있도록 연료전지 종류에 관계없이 연료전지 추진의 배치 및 설치 요건들을 제공하는 것이다. 단, 사용되는 연료에 따라 동 임시지침에 추가하여 타 협약 규정(예: IGF Code Part A 등)들도 적용될 수 있다.

그리고 제9차 IMO 화물·컨테이너 운송 전문위원회(CCC: Sub-Committee on the Carriage of Cargoes and Containers)[그림 21]에서는 안전상의 영향과 잠재적 위험을 고려하여 대체연료와 관련 기술에 대한 규정 개발에 중요한 역할을 하고 있으며, 수소 연료 및 암모니아 연료 선박의 임시안전지침을 개발 중에 있다. 이미 개발된 임시 안전 가이드라인으로는 메틸/에틸 알코올 추진선, 연료전지 추진선, LPG 추진선 관련 규정을 들 수 있다.



5.3.1 수소연료선박의 임시안전지침 개발

CCC 회의를 통해 선박에서 수소를 연료로 사용하는 임시지침 초안 개발에 대해 논의가 이루어지고 있다. 이 지침은 목표기반(goal-based)으로 설계되어 선박, 승무원, 환경에 미치는 위험을 최소화하는 데 중점을 둔 지침이고, IGF 코드와 함께 사용될 예정이다. 특히 SOLAS 제III-1장 55규칙에 따른 대체 설계 및 배치 관련하여 적용될 것으로 보인다. 주요 규정들에는 수소 관련 시스템의 배치, 설치, 제어 및 모니터링이 포함되며, CCC 제10차 회의(2024. 9)에서는 액체와 기체 수소의 특성이 다르기 때문에 각각의 안전 규정을 구분하여 개발하기로 합의하였다. 수소 연료 공급과 관련된 일부 사항은 이미 개발되었으나, 추가 작업은 회기 간 작업반 및 논의를 통해 이어질 예정이며, 2025년까지 초안을 완료하고 2026년 승인받는 것을 목표로 하고 있다.

5.3.2 암모니아를 연료로 사용하는 선박의 안전을 위한 잠정 지침

암모니아 연료를 사용하는 선박의 안전 지침 개발은 CCC 제9차 회의에서 시작되었으며, 최근 제10차 CCC 회의에서는 암모니아 독성에 대한 안전 조치를 포함한 임시지침이 최종 확정되었다. 또한, 회원국들은 암모니아 오염수 처리 지침의 필요성에도 동의했다. 주요 논의 사항으로는 암모니아의 독성 기준, 가스 확산 분석의 필요성, 비상 대피 구역 제공, 노출 한도 및 감지 기준 설정 등이 있었다.

해당 지침의 주요 원칙으로는 IGC 코드가 적용되는 선박을 지침에서 제외하는 것, 가스 확산 분석을 통해 독성 구역을 설정하는 것, 암모니아 노출 시 비상대피 구역을 정의하는 것이 포함되었다. 또한, 암모니아 저감 장치를 거친 배출 기준은 110 ppm 이하로 설정되었으며, 암모니아 연료 선박에 대한 추가 데이터가 확보되면 해당 지침은 다시 논의 및 수정될 예정이다.

▷ [표 9] IMO 대체연료 안전지침 개발을 위한 작업 계획 (2024. 9 기준)

회의체	작업계획	목표
MSC 109 (24.12.)	• 암모니아 연료 선박의 안전을 위한 임시 지침 승인	2024
ISWG-AF2 CCC 11 (25.9.1~5)	• 수소 연료 선박을 위한 임시 지침 추가 개발 및 최종화 • 시간이 허락할 경우, 저인화점 연료유 관련 지침 추가 개발 및 최종화 • 메틸/알코올 연료 선박 임시 지침 개정 고려 및 메틸/에틸 알코올에 대한 강제규정 개발 목표 • 연료전지에 대한 강제규정 개발 논의 시작	2025
MSC 111 (26.5)	• 수소 연료 선박을 위한 임시 지침 승인	2026
CCC 12 (26.9)	• 메틸/알코올 연료 선박 임시 지침 개정 및 메틸/에틸 알코올 강제규정 개발 목표 • 저인화점 연료유 관련 지침 추가 개발 및 최종화 • 시간이 허락하면 연료전지 관련 의무적 도구 개발 논의 • LNG 관련 IGF 코드 개정 논의 • 시간이 허락할 경우 암모니아 연료선박 안전 임시 지침 개정 고려	2026
CCC 13 (27.9)	• 암모니아 연료 선박 안전 임시 지침 개정 논의 • 메틸/알코올 연료 선박 임시 지침 최종화 및 메틸/에틸 알코올 강제규정 개발 목표 • MSC.1/Circ.1622/Rev.1 지침 개정 고려: 액화가스 대량 운송 선박 및 저인화점 연료 • 사용 선박의 극저온 대체 금속 재료 수용 지침	2027

[출처] KR, Briefings of IMO Meeting CCC 10

5.4 IEC 규격

현재까지는 선박에 특화된 연료전지/배터리 IEC 규격이 부재하여, 일반 산업용 규격을 적용해 왔으나, 선박용 국제 규격의 필요성이 증가함에 따라 아래와 같이 관련 규격이 제정 중에 있다[그림 22].

5.4.1 IEC의 선박용 연료전지 규격

IEC 산하 TC 105에서 개발 중인 IEC 62282-4-401*은 선박과 해양 장비에서 사용할 연료전지 기술을 표준화하기 위해 여러 위원회가 협력하고 있다. 이 논의의 주요 목적은 선박용 연료전지 기술의 안전한 도입을 위해 명확한 가이드라인을 마련하고, 연료전지시스템의 시험 및 인증 절차를 국제 표준으로 설정하는 것이다.

[주요 내용] 선박에 적용 가능한 연료전지시스템의 안전성과 성능 기준을 다루고 있으며, 특히, 연료전지시스템의 해양환경에서의 안전성 확보, 고효율 및 저탄소 배출의 기술적 요건, 연료 공급 및 배기시스템 관련 안전 규정 등이 포함된다.

5.4.2 IEC의 선박용 배터리 규격

IEC 산하 TC 18에서 개발 중인 IEC 63462-1*은 해상 환경에서 사용되는 리튬이온배터리 시스템의 안전성을 보장하기 위해 만들어졌다. 선박과 같은 해상용 기기에서 리튬 이온 배터리를 안전하게 사용할 수 있도록 요구사항을 제시하고 있다.

[주요 내용] 이 표준은 해상 환경에서 사용되는 리튬 이온 배터리를 다루고 있다. 특히, 리튬 이온 배터리의 사용 중 발생할 수 있는 위험(예: 과열, 전기적 문제, 기계적 충격 등)을 줄이기 위한 안전 요구사항을 규정한다. 또한, 배터리의 설계, 제작, 그리고 테스트 과정에서 안전성을 확보하기 위한 여러 요구사항이 포함되어 있다. 배터리관리 시스템(BMS), 과충전 방지, 단락 보호 등 배터리 고장이나 위험 상황을 예방하기 위한 조건들이 명시되어 있다.

[그림 22] IEC에서 논의 중인 선박용 배터리 & 연료전지 규정



TC 105 Fuel Cell Technologies

IEC 62282-4-401 Ed.1

Fuel Cell Technologies

Part 4-401: Fuel cell power systems for propulsion and auxiliary power units –Maritime sector–Safety of PEMFC–Systems

• 해당 IEC 규격은 2027년 11월 발행 예정임(2025년 3월 기준)

TC 18 Electrical installations of ships of mobile and fixed offshore units

IEC 63462-1 Ed.1

Maritime Battery System

Part 1: Secondary Lithium Cells and Batteries

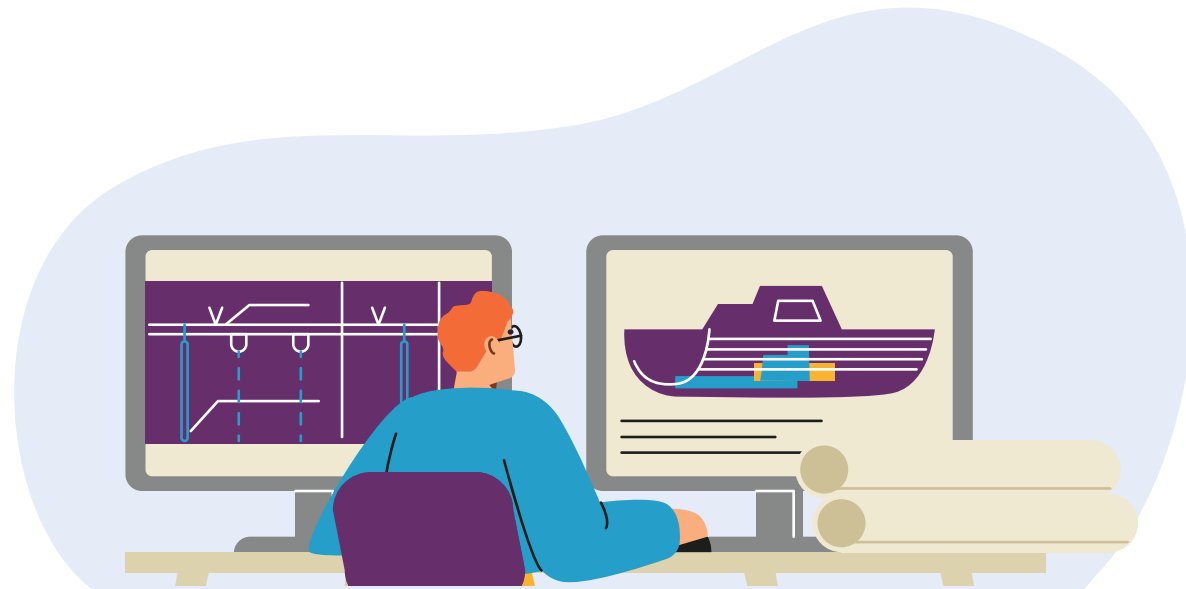
Safety Requirements

• 해당 IEC 규격은 2026년 12월 발행 예정임(2025년 3월 기준)

5.5 KR 지침

한국선급은 연료전지시스템, 배터리시스템에 대한 지침을 별도로 제정하였으며, 기술개발 향상 및 국제규정 제/개정 사항을 반영하여 지속 업데이트하고 있다. 또한, 이러한 직류전원을 적용한 선박에서 주로 적용되는 '직류배전시스템(DC-grid, DC-distribution)' 관련 요건에 대해서도 별도의 지침을 제공하고 있다.

특히, 연료전지시스템을 설치하는 선박은 사용용도에 따라 적용 규정이 달라지며, 크게 추진 또는 중요용도 전원의 공급에 사용되는 경우(부호: FC-PWR)와 그렇지 않은 경우(부호: FC)로 구분된다. 만약 추진 또는 중요용도 전원의 공급에 사용되는 경우에는 관련된 '이중화 요건'을 만족하여야 한다. (선박용 연료전지시스템 지침 제2장 제1절 101항 참조)



IMO CCC 홈페이지



IEC 선박용 배터리 진행상황
(IEC 63462-1)



IEC 선박용 연료전지 진행상황
(IEC 62282-4-401)



KR 선급기술규칙 열람

부록 A

연료전지 선박 설계 사례1 (400톤급 차도선)

A.1 대상 선박 소개



(1) 선박의 주요 제원

길이(LOA)	abt. 65.9 m	추진방식	M/E ☐	Motor ☒
총톤수(GT)	400 Ton	추진용량	900 [kW] × 2 ea	
연료 종류	LH2	발전원종류	PEMFC + ESS	
탱크 용량	approx. 16 m ³	육상전원(AMP) 여부	사용 ☐	미사용 ☒
탱크 종류	C-type	발전원별 용량&수량	발전기 ☐	
재화중량(DWT)	approx. 140 MT		연료전지 ☒	320 kWh × 12 Sets
선폭(Beam)	abt 52.0 m		배터리 ☒	500 kWh × 1 Set

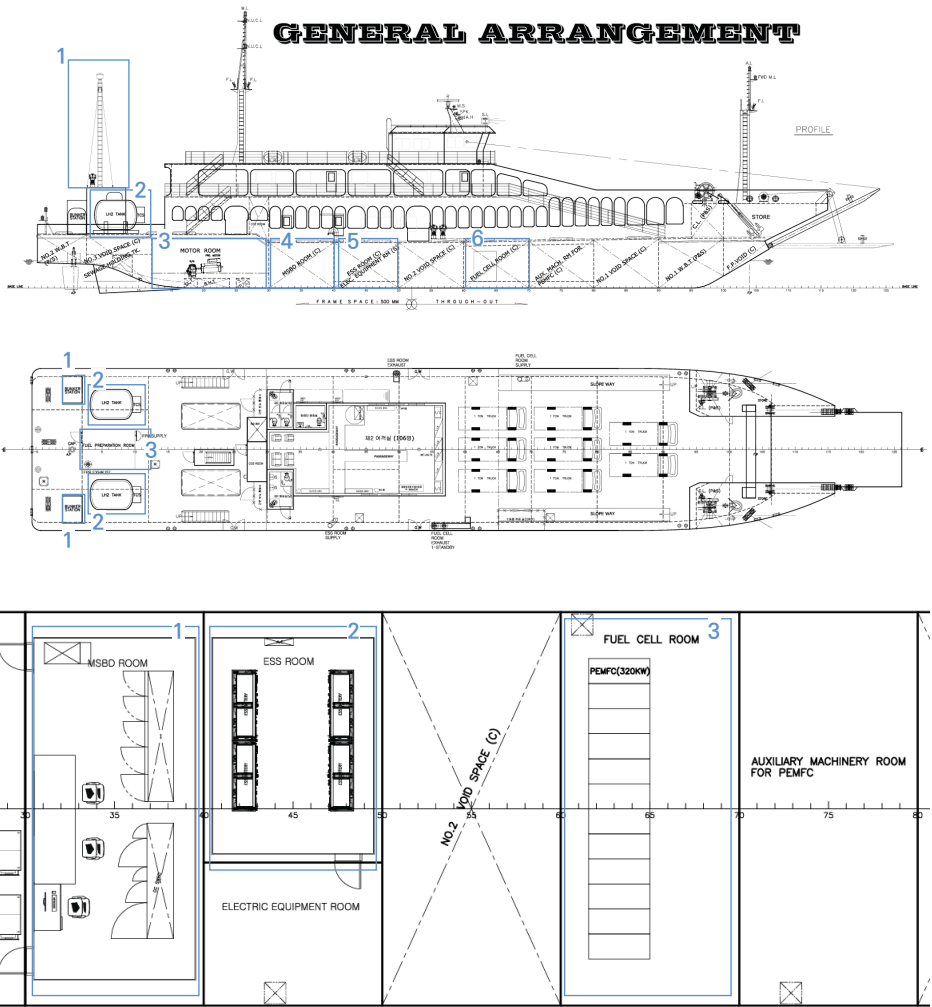
- 본 선박은 국내 항해를 주목적으로 하는 연안 선박으로, 경사가 있는 선수와 트랜섬 선미 그리고 선수 램프가 있는 하나의 개방형 연속 갑판으로 구성된 차도선이다. 2개의 독립된 모터로 추진을 하며, 조타실은 최대한의 가시성을 제공하도록 배치되어 있고, 조타실의 상단에는 항해 장비가 탑재된 Stern Mast가 장착되어 있다. 승객 구역과 조타실은 선박 뒤흘쪽에 위치하며, 이 구역에는 수하물 선반, 화장실 및 기타 편의 시설이 제공된다. 주갑판 하부의 공간의 선수는 Void Space, Fuel Cell Room, Battery Room, MSBD Room, Motor Room 등으로 구성되며, 선미는 Vent Mast와 LH2 Tank, Bunkering Station, Fuel Preparation Room으로 구성되어 있으며, 여기서 LH2를 기화하여 Fuel Cell Room 까지 공급하기 위한 파이프가 Open Deck를 통해 연결되어 있다.
- PEMFC는 작고 가벼우며, 낮은 온도에서 작동하고 시동 시간이 짧아 연안 선박에 적용하는 것이 더 적합하여 본 선박의 발전 방식으로 선택했다. 또한, 해당 선박에 배치된 ESS Battery는 비상용으로 사용하기 위해 배치하였다.

(2) 운항 조건

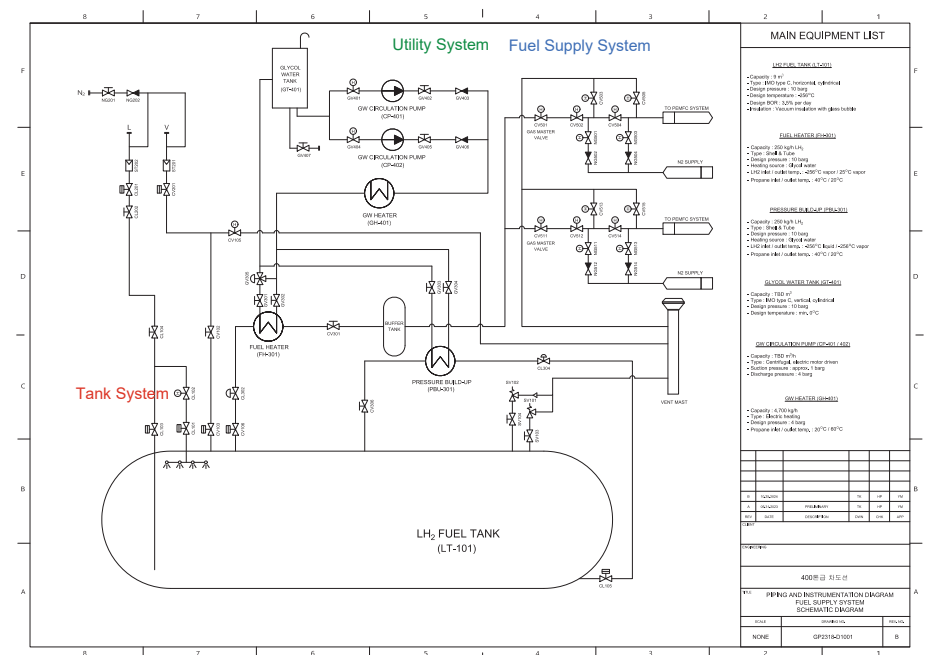
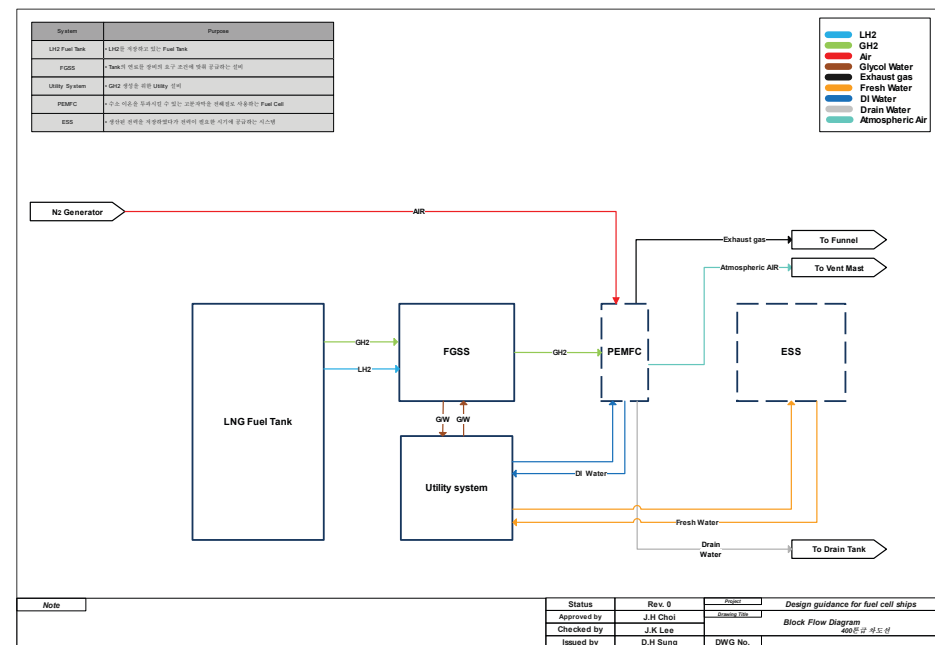
운항거리	abt. 65.9 m	최대선속	15 knots
운항범위	연안용 ☒ 대양용 ☐	평균선속	11 knots
운항횟수	200 회 / 1년	운항시간	17 시간 / trip
운항모드별 전력부하 조건	Port In & Port Out	700 [kW]	1 [h]
	Normal Seagoing	1,890 [kW]	3 [h]
	At Working	150 [kW]	1 [h]
	At Port	120 [kW]	12 [h]

A.2 선박 주요 도면

(1) 선박 G/A



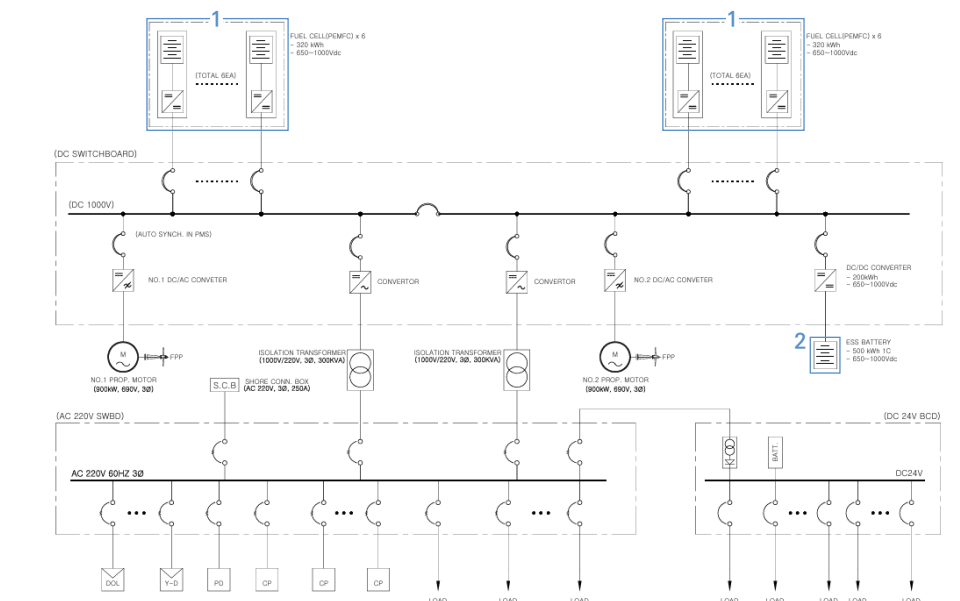
- LH2 Tank의 안정성 확보를 위해 Tank를 Deck 위로 배치하였으며, 연료의 기화 및 연료 공급과 관련 있는 Vent Mast와 Bunkering Station을 Tank 주변으로 설치하였다. 차와 사람을 운반하는 선박의 특성상 Deck 위의 공간이 넉넉하지 않아 갑판 하부 공간을 활용하여 Motor, MSBD, ESS, Fuel Cell을 배치하였다.



Ship	System	In			Out		
		온도[℃]	압력[bar]	유량[kg/h]	온도[℃]	압력[bar]	유량[kg/h]
차도선	Tank	-246.6	10	223.1	-246.6	10	223.1
	FGSS	-246.6	10	223.1	25	9.5	223.1
	Utility	20	5	4,700	60	5	4,700
	PEMFC	25	4	223.1	-	-	-

- 400톤급 차도선의 시스템은 액화수소를 저장하는 탱크 시스템, 저장된 연료를 PEMFC에 공급하는 연료 공급 시스템, 그리고 연료 공급 시스템에서 기화되는 수소 연료에 열에너지를 공급하는 유틸리티 시스템으로 구성되어 있다.
- 400톤급 차도선에 설치되는 Pressure Build-Up Unit의 설계는 탱크 압력 상승 및 LH₂의 기화를 수행함으로써 수소 연료를 PEMFC에 공급하는 방식을 적용하여 수행되었다.
- 연료 공급 시스템은 기화된 GH₂를 PEMFC의 요구 조건에 맞게 공급하기 위해 GH₂ Heater를 배치하여 구성하였다.
- 유틸리티 시스템은 Pressure Build-Up 및 GH₂ Heater의 열매체로써 글리콜 워터를 사용하였으며, 장비에서 발생하는 압력 강하를 보완하기 위해 글리콜 워터 펌프를 설치하였다. 또한, Pressure Build-Up 및 GH₂ Heater의 요구 온도를 충족하기 위해 Electric Heater를 추가하여 구성하였다.

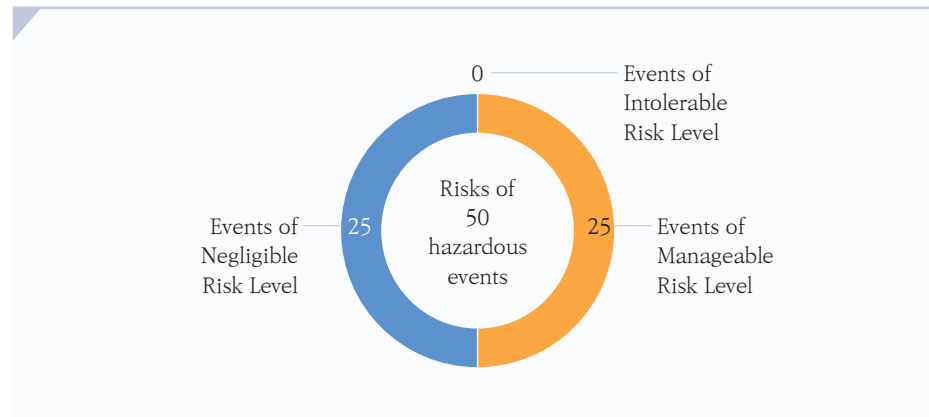
(3) 전력단선도



A.3 위험성 평가 결과

• HAZID(Hazard Identification)는 시스템, 공정, 또는 설비에서 발생할 수 있는 잠재적 위험을 사전에 식별하는 기법임

(1) 선박설계: HAZID* 결과 요약 & 설계 개선사항

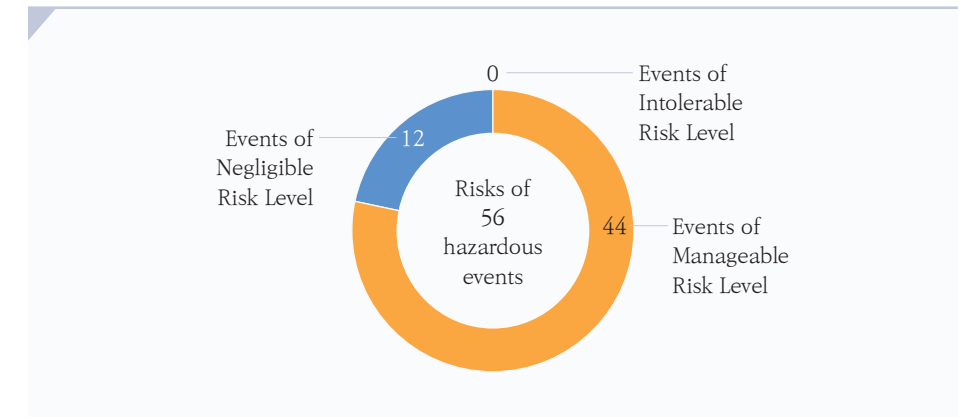


- 본 HAZID 분석을 통해 최종적으로 총 50개의 위험 시나리오가 식별되었고, 인명 위험도 측면에서 15개, 재산 위험도 측면에서 38개, 환경 위험도 측면에서 1개가 도출되었다. (중복 시나리오 존재) 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 없었으며, 관리 가능 위험도 수준은 25개, 무시 가능 위험도 수준이 25개가 도출되었다.
- 관리 가능 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계 개선을 검토하였다. 검토 하였던 방안으로는
 - | Fuel Cell Room 내부가 화재/폭발 위험이 없는 안전 구역임을 증명하는 증빙자료 제출
 - | Fuel Cell 구역에 출입 주의 표지판 설치 검토
 - | Battery Room 내 가스 탐지기 위치 검토하여 설치
 등이 있으며, 이외에 HAZID 결과에 언급되었던 추가 검토 방안들을 검토하여 추후 설계에 반영할 예정이다.

• HAZOP(Hazard and Operability Study)는 공정이나 시스템의 설계 및 운영 중 예상치 못한 이상 상황과 그로 인한 위험을 분석하는 기법임

** ALARP(As Low As Reasonably Practicable)는 위험을 기술적, 경제적, 법적 한계 내에서 합리적으로 실행 가능한 최소 수준까지 줄이는 원칙을 의미함

(2) FGSS: HAZOP* 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZOP 분석을 통해 최종적으로 56개의 위험 시나리오가 식별되었고, 벙커링 스테이션 시스템에서 20개, 탱크 시스템에서 3개, 연료 공급 시스템에서 16개, 유틸리티 시스템에서 17개로 도출되었다. 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 없었으며, ALARP** 위험도 수준은 44개, 무시 가능 위험도 수준은 12개가 도출되었다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 탱크의 차단밸브와 탱크 사이에 존재하던 샘플링 밸브를 삭제하여 탱크 압력 저하와 수소의 누출을 막는 설계를 진행하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 탱크 내부 압력 상승 시, 압력을 해소하는 방안 부족 문제에 대해 안전밸브를 추가 설치하여 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 수정하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 Pressure Build-Up에서 누출된 수소를 감지하는 방안 부족 문제를 해소하기 위해 Pressure Build-Up 하부에 드립 트레이 및 온도 센서를 설치하여 수소의 누출을 감지할 수 있게 설계하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 열교환기의 Leak 발생 시 유틸리티 시스템으로 유입되는 수소를 감지하는 방안 부족 문제를 해소하기 위해 글리콜 워터 탱크에 가스 감지기를 설치하여 수소의 유입을 감지할 수 있게 설계하였다.
- 위의 개선 사항과 같이 HAZOP을 통해 ALARP 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 개선하였다.

부록

B

연료전지 선박
설계 사례2
(1,000TEU 컨테이너선)

B.1 대상 선박 소개



(1) 선박의 주요 제원

길이(LOA)	abt. 147.2 m	추진방식	M/E ☒	Motor ☐
Container Storage	915 TEU	추진용량	6,300 [kW] × 1 ea	
연료 종류	LNG	발전원종류	Generator + SOFC + ESS	
탱크 용량	abt. 550 m³	육상전원(AMP) 여부	사용 ☐	미사용 ☒
탱크 종류	C-type	발전원별 용량&수량	발전기 ☐	
재화중량(DWT)	abt. 12,100 MT		연료전지 ☒	320 kWh × 12 Sets
선평(Beam)	abt 139.0 m		배터리 ☒	500 kWh × 1 Set

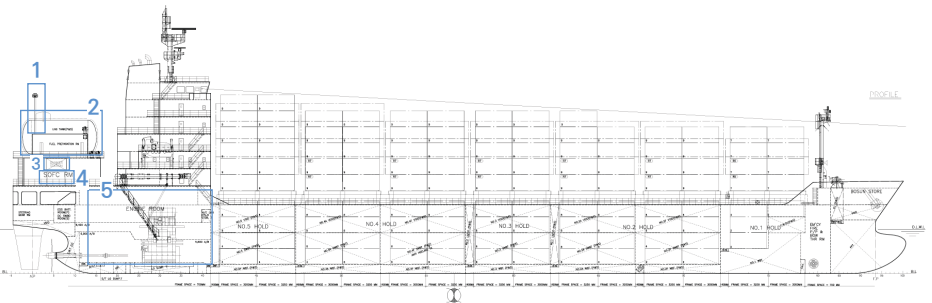
- 본 선박은 국외 항해를 주목적으로 하는 대양 선박으로, 선수루 및 선루 갑판을 갖춘 단일 주갑판과 구상 선수, 트랜섬 선미, 개방형 선미 프레임, 단일 방향타 및 LNG 이중 연료 엔진으로 구동되는 단일 스크류 프로펠러로 구성되어 있다. 조타실은 최대한의 가시성을 제공하도록 배치되어 있으며, 조타실 상단에는 항해 장비가 탑재된 Stern Mast가 장착되어 있다. 거주 구역과 조타실은 후방에 위치하며, LNG 연료탱크 2개와 FGSS, SOFC는 가장 뒤쪽에 위치되어 있다. 주갑판의 하부 공간은 선수 Peak Tank, Bow Thruster Room, 5개의 화물창 구역, 평형수 탱크, Fuel Oil Tank, Engine Room, Steering Gear Room, Void space 등으로 구성되어 있다,
- SOFC는 매우 높은 온도에서 작동하며 촉매나 외부 장치 없이 LNG를 연료로 사용 가능하다. 이에 더해 시동 시간이 긴 편이기 때문에 연안 선박보다는 대양 선박에 적용하는 것이 더 적합하여 본 선박의 발전 방식으로 선택했다. 또한, 해당 선박에 배치된 ESS Battery는 Peak load shaving 용도로 사용하기 위해 배치하였다.

(2) 운항 조건

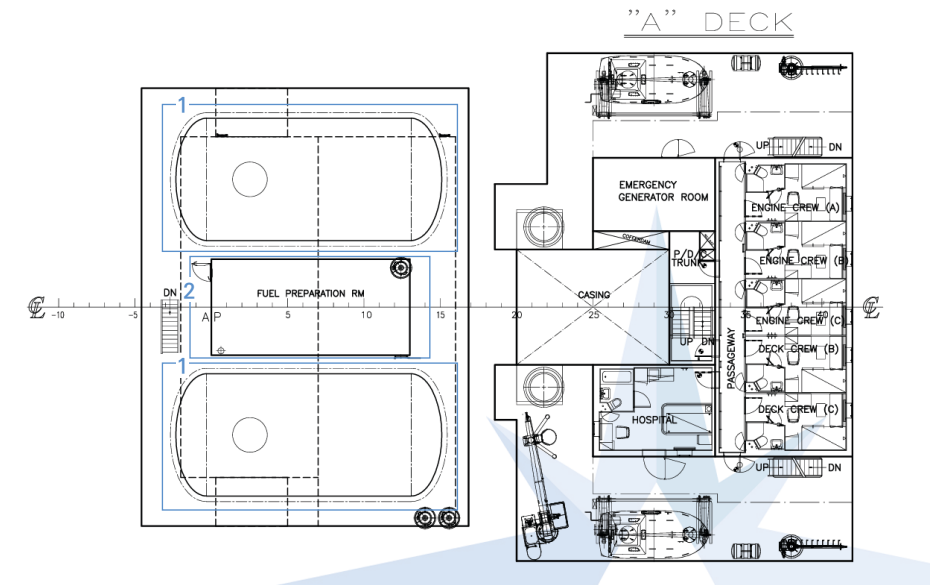
운항거리	2,188 km		최대선속	15 knots
운항범위	연안용 ☐	대양용 ☒	평균선속	11 knots
운항횟수	15 회 / 1년		운항시간	166 시간 / trip
운항모드별 전력부하 조건	Port In & Port Out		2,590 [kW]	4 [h]
	Normal Seagoing		4,795 [kW]	144 [h]
	At Working		1,135 [kW]	8 [h]
	At Port		400 [kW]	12 [h]

B.2 선박 주요 도면

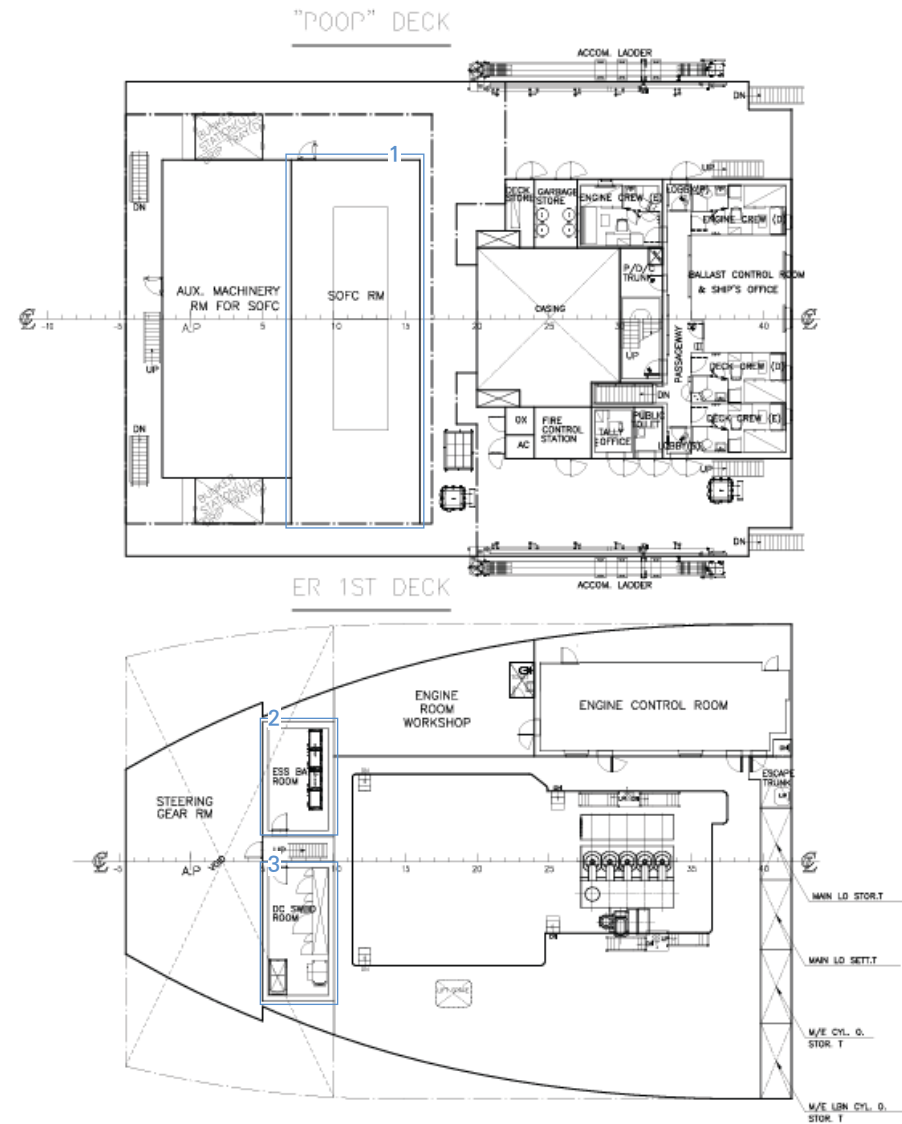
(1) 선박 G/A



1. Vent Mast
2. LNG Tank
3. Bunkering Station
4. SOFC Room
5. Engine Room



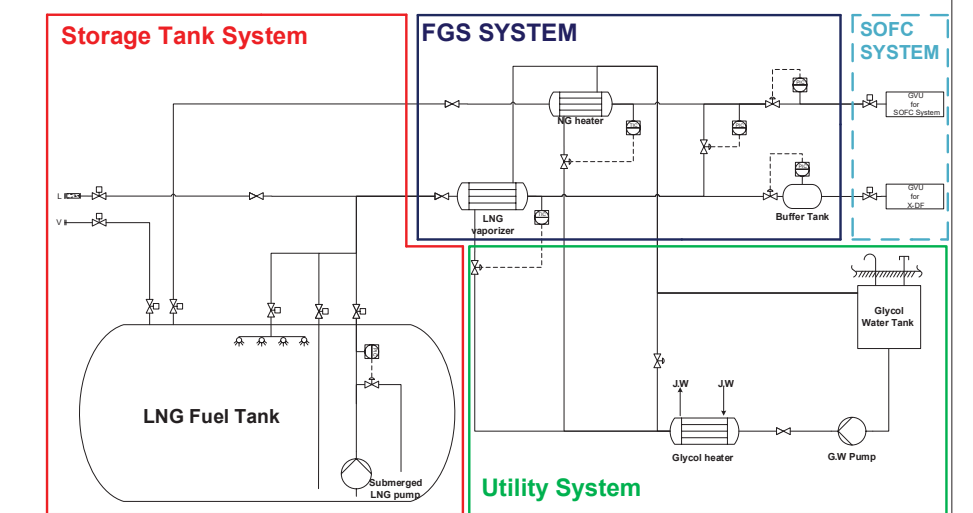
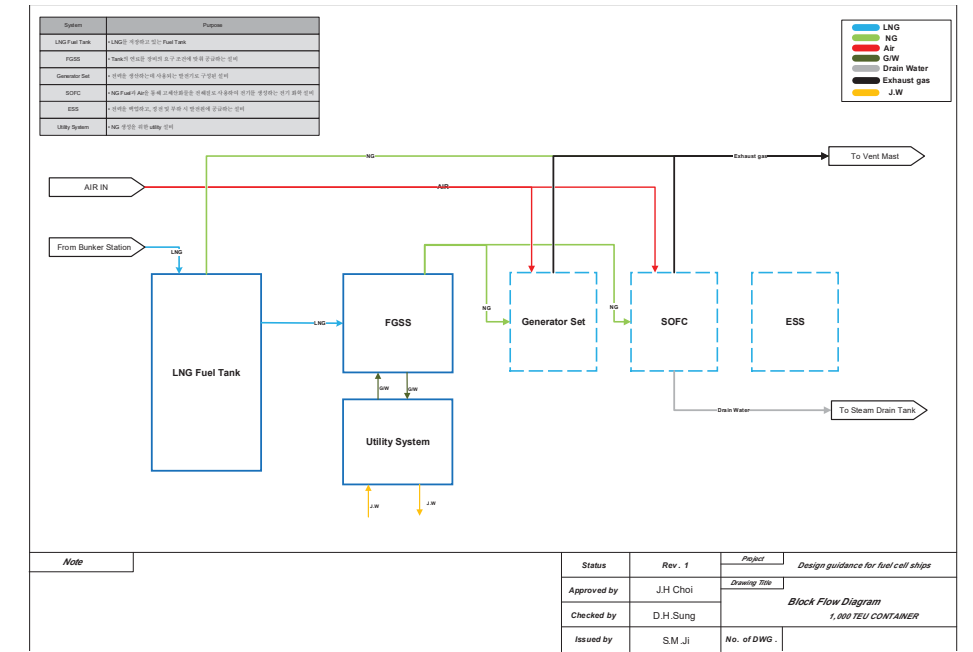
1. LNG Tank
2. Fuel Preparation Room



- 1. SOFC Room
- 2. ESS Battery Room
- 3. DC SWBD Room

• Container를 운반하는 선박의 적재량 loss를 최소화하기 위해 선박 가장 후미에 LNG Tank를 배치하였으며, 연료 공급과 관련 있는 Vent Mast와 Bunkering Station을 Tank 주변으로 배치하였다. 또한, SOFC, ESS, DC Switchboard 역시 선박의 Cargo loss를 최소화하기 위한 방향으로 배치하였다.

(2) BFD(Block Flow Diagram) & PFD(Process Flow Diagram) 도면

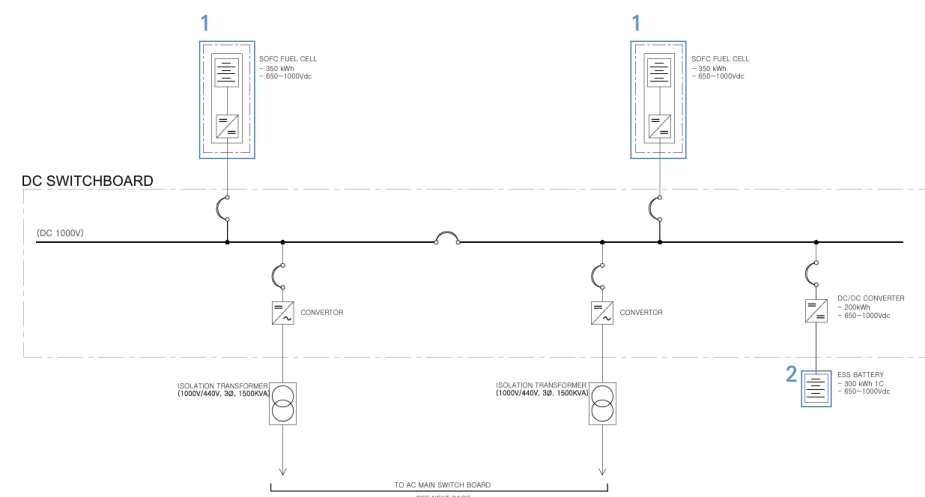


Status	Rev. 1	Project	Design guidance for fuel cell ships
Approved by	J.H. Choi	Designing firm	Overall PFD
Checked by	D.H. Sung		
Issued by	S.M. Ji	No. of DWG.	

Ship	System	In			Out		
		온도[°C]	압력[bar]	유량[kg/h]	온도[°C]	압력[bar]	유량[kg/h]
컨테이너선	Tank	-145	10	677.7	-145	17	677.7
	FGSS	-145	16.9	677.7	20	16	677.7
	Utility	25	1.7	9,582	45	1.7	9,582
	SOFC	20	3	220.8	-	-	-

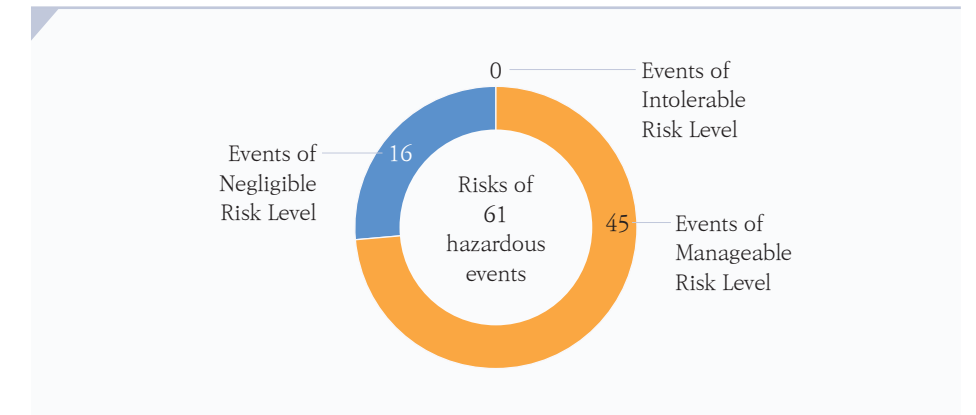
- 1,000teu 컨테이너선의 시스템은 LNG를 저장하는 탱크 시스템, 저장된 연료를 SOFC와 X-DF 엔진에 공급하는 연료 공급 시스템, 그리고 연료 공급 시스템에서 기화되는 NG와 탱크에서 증발한 NG에 열에너지를 공급하는 유틸리티 시스템으로 구성되어 있다.
- 1,000teu 컨테이너선에 설치되는 Pump의 설계는 X-DF 요구 조건에 맞게 공급하기 위해 배치하였다. Vaporizer의 설계는 LNG의 기화를 수행함으로써 NG 연료를 SOFC와 X-DF 엔진에 공급하는 방식을 적용하여 수행되었다.
- 연료 공급 시스템은 기화된 NG를 SOFC의 요구 조건에 맞게 공급하기 위해 NG Heater를 배치하여 구성하였다. 또한 안정적인 연료 공급과 효율적인 에너지 사용을 지원하기 위한 Buffer Tank를 배치하였다.
- 유틸리티 시스템은 Vaporizer 및 NG Heater의 열매체로써 글리콜 워터를 사용하였으며, 장비에서 발생하는 압력 강하를 보완하기 위해 글리콜 워터 펌프를 설치하였다. 또한, Vaporizer 및 NG Heater의 요구 온도를 충족하기 위해 Heater를 추가하여 구성하였다.

(3) 전력단선도



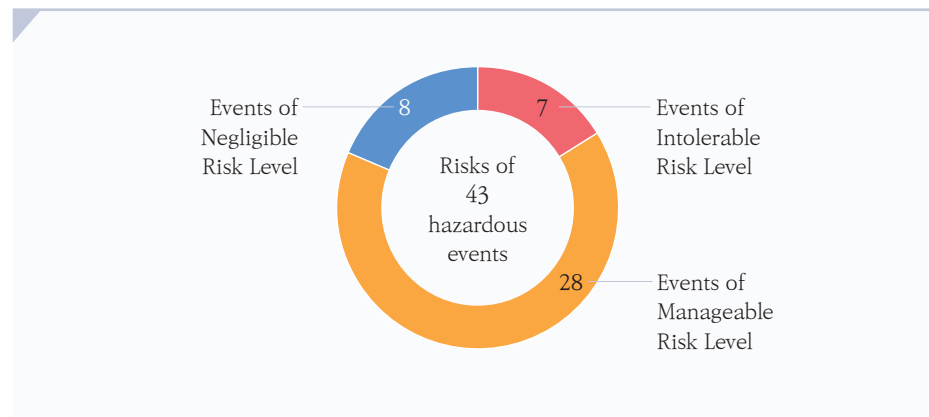
B.3 위험성 평가 결과

(1) 선박설계: HAZID 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZID 분석을 통해 최종적으로 총 61개의 위험 시나리오가 식별되었고, 인명 위험도 측면에서 32개, 재산 위험도 측면에서 51개, 환경 위험도 측면에서 2개가 도출되었다. (중복 시나리오 존재) 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 없었으며, 관리 가능 위험도 수준은 45개, 무시 가능 위험도 수준이 16개가 도출되었다.
- 관리 가능 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계 개선을 검토하였다. 검토 하였던 방안으로는
 - | 벙커링 작업 시, 안전 구역과 위험구역을 규정에 따라 통제할 수 있는 관련 절차 검토
 - | 벙커링 스테이션 내 유지보수 작업이 용이하도록 하는 공간 설계 검토
 - | 외부에서 LNG/NG 누출 상황을 인지할 수 있는 가시/가청 경보 설치 검토
 등이 있으며, 이외에 HAZID 결과에 언급되었던 추가 검토 방안들을 검토하여 추후 설계에 반영할 예정이다.

(2) FGSS: HAZOP 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZOP 분석을 통해 최종적으로 43개의 위험 시나리오가 식별되었고, LNG Bunkering Lines에서 18개, LNG Fuel Supply Lines에서 19개, Glycol Water Circulation Lines에서 6개가 도출되었다. 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 7개, ALARP 위험도 수준은 28개, 무시 가능 위험도 수준은 8개가 도출되었다.
- 허용 불가 위험도 수준에 해당하는 밸브, 배관, 탱크 연결부 등에서 손상으로 누출된 LNG를 감지하는 방안 부족 문제를 해소하기 위해 탱크 상부에 드립 트레이 및 온도 센서를 설치하여 LNG의 누출을 감지할 수 있게 설계하였다.
- 허용 불가 위험도 수준에 해당하는 밸브, 배관, 탱크 연결부 등에서 손상으로 X-DF 엔진 및 SOFC로 NG의 공급이 불가 문제를 해소하기 위해 LNG 탱크를 2대로 설치하여 디젤 모드 변경이 가능하도록 설계하였다.
- 위의 개선 사항과 같이 HAZOP을 통해 허용 불가 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 개선하였다.

부록

C

연료전지 선박 설계 사례3 (170ton 청항선)

C.1 대상 선박 소개



(1) 선박의 주요 제원

길이(LOA)	abt. 39.0 m	추진방식	M/E ☐	Motor ☒
총톤수(GT)	170 Ton	추진용량	600 [kW] × 2 ea	
연료 종류	CH2	발전원종류	PEMFC + ESS	
탱크 용량	approx. 5.62 m³	육상전원(AMP) 여부	사용 ☐	미사용 ☒
탱크 종류	C-type(700bar)	발전원별 용량&수량	발전기 ☐	
재화중량(DWT)	approx. 31 MT		연료전지 ☒	320 kWh × 8 Sets
선평(Beam)	abt 36.0 m		배터리 ☒	250 kWh × 1 Set

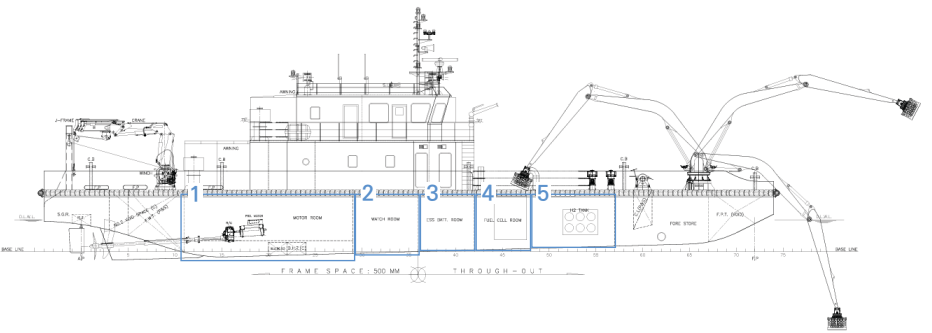
- 본 선박은 국내 항해를 주목적으로 하는 연안 선박으로, 경사가 있는 선수와 트랜섬 선미가 있는 하나의 개방형 연속 갑판으로 구성된 청항선이다. 2개의 독립된 모터로 추진하며, 선수 상갑판에는 수중 폐기물 및 해양 쓰레기 수거를 위한 오렌지 그랩(Orange Grab) 너클붐(Knuckle Boom) 크레인이 설치되어 있고, 선미부에는 Telescopic Knuckle Boom 타입의 다목적 크레인이 설치되어 있다. 갑판 하부의 공간은 압축 수소 탱크와 탱크 연결부, 연료공급시스템을 포함하는 연료저장창구역과 Fuel Cell Room, 연료전지를 구동하기 위한 기타 보기실, 그리고 부하 변동을 대비한 배터리실, MSBD Room, 추진을 위한 Motor Room 및 조타실로 구분되어 있다.
- PEMFC는 작고 가벼우며 낮은 온도에서 작동이 가능하고 시동 시간이 짧아 연안 선박에 적용하는 것이 더 적합하여 발전 방식으로 선택했다. 또한, 해당 선박에 배치된 ESS Battery는 비상용 및 Peak load shaving 용도로 사용하기 위해 배치하였다.

(2) 운항 조건

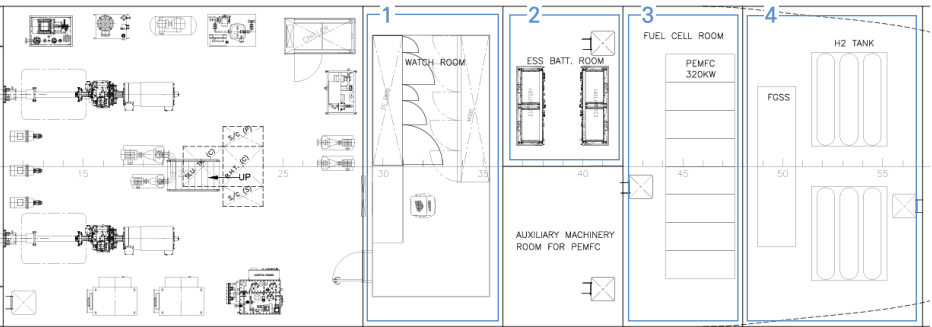
운항거리	33 km	최대선속	13 knots
운항범위	연안용 ☒ 대양용 ☐	평균선속	10 knots
운항횟수	200 회 / 1년	운항시간	19 시간 / trip
운항모드별 전력부하 조건	Port In & Port Out	200 [kW]	1 [h]
	Normal Seagoing	1,170 [kW]	2 [h]
	At Working	150 [kW]	4 [h]
	At Port	90 [kW]	12 [h]

C.2 선박 주요 도면

(1) 선박 G/A



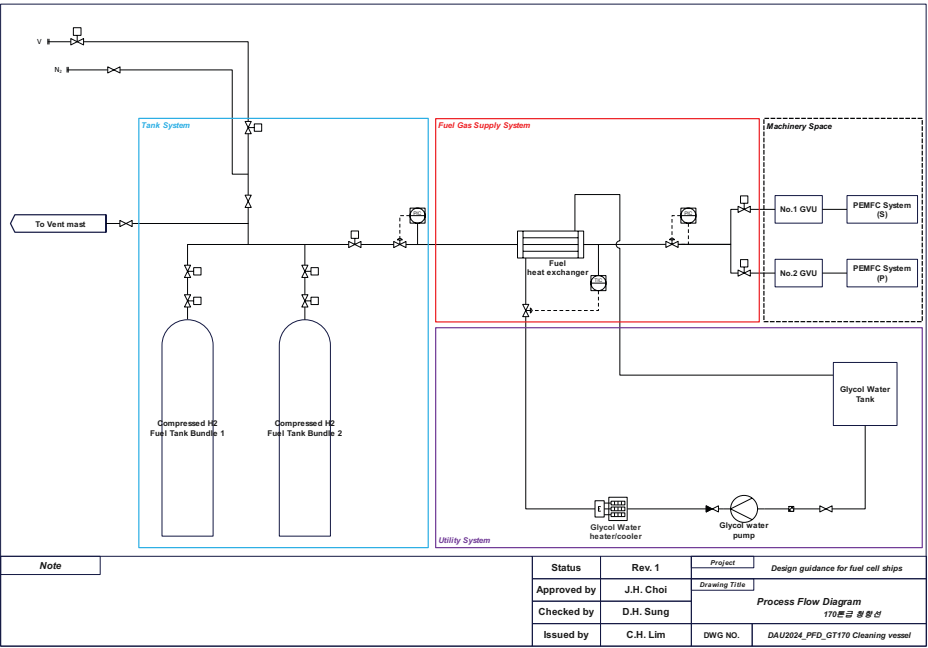
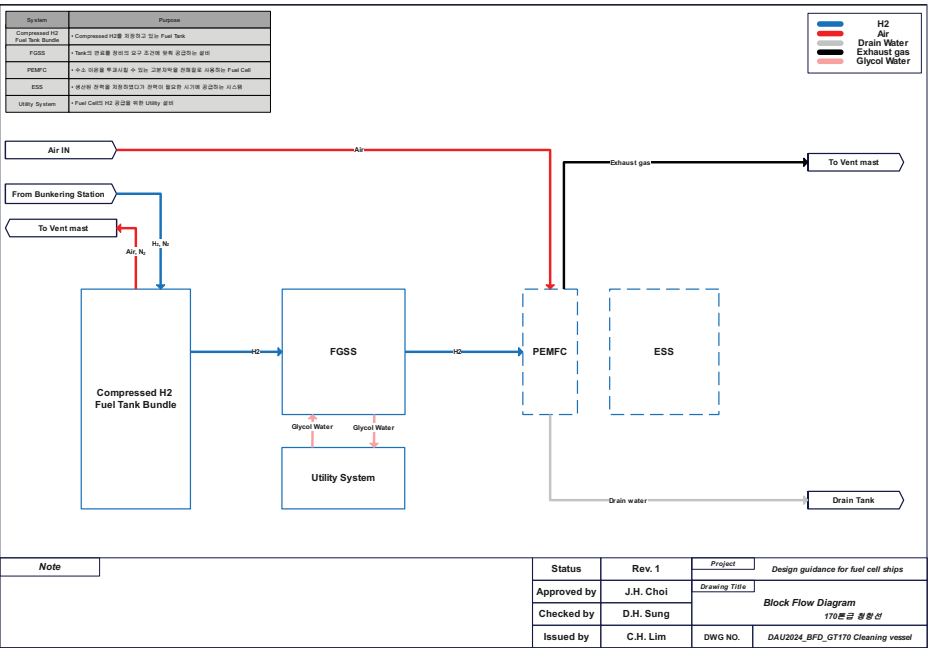
- 1. Motor Room
- 2. SWBD Room
- 3. ESS Battery Room
- 4. Fuel Cell Room
- 5. Fuel Storage Hold Space [incl. FGSS]



- 1. SWBD Room
- 2. ESS Battery Room
- 3. Fuel Cell Room
- 4. Fuel Storage Hold Space [incl. FGSS]

- 항만 정화 작업을 하는 선박의 특성상 Deck 위의 크레인과 적재될 화물로 인해 Deck 위의 공간이 넉넉하지 않고, 크레인으로 인한 위험성을 고려하여, 갑판 하부 공간을 활용하여 Motor, SWBD, ESS, Fuel Cell, Fuel Storage Hold Space를 배치하였다.

(2) BFD(Block Flow Diagram) & PFD(Process Flow Diagram) 도면

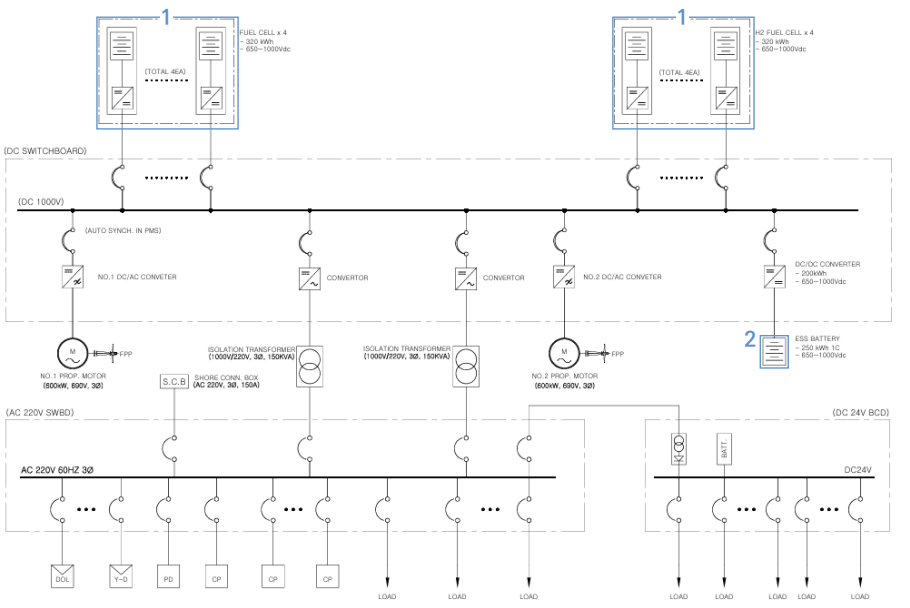


Ship	System	In			Out		
		온도[°C]	압력[bar]	유량[kg/h]	온도[°C]	압력[bar]	유량[kg/h]
청항선	Tank	-35	400	77.3	20	9	77.3
	FGSS	30	8	77.3	30	6.5	77.3
	Utility	25	1.8	2,230	25	2.4	2,230
	PEMFC	25	6.5	77.3	-	-	-

- 170톤급 청항선의 시스템은 CH₂를 저장하는 탱크 시스템, 저장된 연료를 PEMFC에 공급하는 연료 공급 시스템, 그리고 연료 공급 시스템에서 공급되는 수소 연료에 열에너지를 공급하는 유틸리티 시스템으로 구성되어 있다.
- 170톤급 청항선은 고압으로 저장된 수소를 감압시켜 PEMFC의 요구 조건에 맞추어 공급하는 방식을 적용하여 수행되었다.
- 연료 공급 시스템은 감압 밸브를 통해 압력이 감소한 GH₂를 PEMFC의 요구 조건에 맞게 공급하기 위해 GH₂ Heater/Cooler를 배치하여 구성하였다.
- 유틸리티 시스템은 GH₂ Heater/Cooler의 열매체로서 글리콜 워터를 사용하였으며, 장비에서 발생하는 압력 강하를 보완하기 위해 글리콜 워터 펌프를 설치하였다. 또한, GH₂ Heater의 요구 온도를 충족하기 위해 Electric Heater/Cooler를 추가하여 구성하였다.

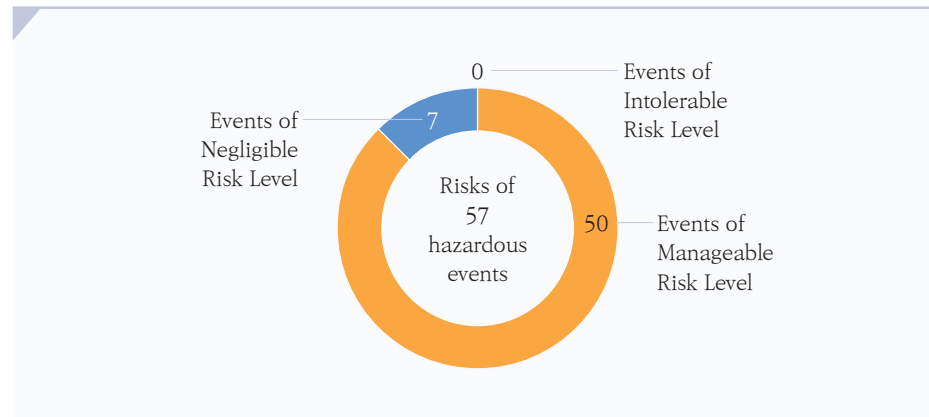
(3) 전력단선도

1. Fuel Cell
2. Battery



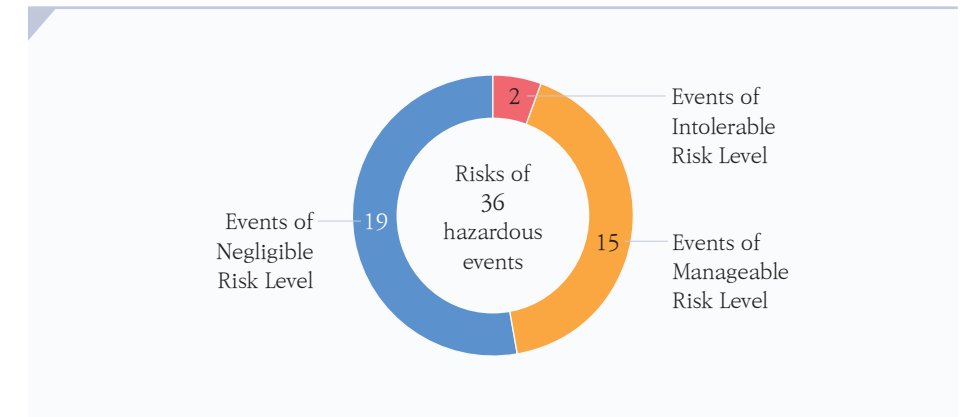
C.3 위험성 평가 결과

(1) 선박설계: HAZID 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZID 분석을 통해 최종적으로 총 57개의 위험 시나리오가 식별되었고, 인명 위험도 측면에서 20개, 재산 위험도 측면에서 52개, 환경 위험도 측면에서 0개가 도출되었다. (중복 시나리오 존재) 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 없었으며, 관리 가능 위험도 수준은 50개, 무시 가능 위험도 수준이 7개가 도출되었다.
- 관리 가능 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계 개선을 검토하였다. 검토 하였던 방안으로는
 - | 수소 화재 감지에 적합한 장비 사용 검토
 - | 벙커링 작업 모니터링을 위한 적절한 안전 장소 마련 검토
 - | 벙커링 매니폴드 보호 구조물 설치 검토
 - | 벙커링 작업을 관리하기 위한 Safety Zone 확보 검토
 등이 있으며, 이외에 HAZID 결과에 언급되었던 추가 검토 방안들을 검토하여 추후 설계에 반영할 예정이다.

(2) FGSS: HAZOP 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZOP 분석을 통해 최종적으로 36개의 위험 시나리오가 식별되었고, Bunkering Lines에서 18개, Fuel Supply Lines에서 19개, Sea Water (HAZOP 이후 글리콜 워터로 변경) Circulation Lines에서 6개 도출되었다. 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 2개, ALARP 위험도 수준은 15개, 무시 가능 위험도 수준은 19개가 도출되었다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 안전밸브의 설치 위치는 탱크별로 탱크와 차단밸브 사이에 안전밸브를 설치하여 탱크 내부 온도, 압력 상승과 탱크 파손을 대비한 설계를 진행하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 탱크 내부 온도 상승 시, 온도를 감지하는 방안 부족 문제에 대해 온도 계기를 추가 설치하여 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 수정하였다.
- 허용 불가 위험도 수준에 해당하는 감압 밸브의 오동작으로 고압 수소 누출에 의한 장비 손상 및 수소 누출 문제를 해소하기 위해 감압 밸브 후단에 안전밸브를 설치하여 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 수정하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 GH₂ Heater/Cooler의 재질과 해수의 접촉으로 인한 내부 손상 문제와 해수의 변화하는 온도 문제를 해소하기 위해 열교환 매체를 해수에서 글리콜 워터로 변경하여 GH₂ Heater/Cooler에 글리콜 워터를 일정한 온도로 공급하도록 설계를 수정하였다.
- 위의 개선 사항과 같이 HAZOP을 통해 허용 불가 위험도와 ALARP 수준의 시나리오를 확인하여 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 개선하였다.

부록

D

연료전지 선박
설계 사례4
(4.5k 일반화물선)

D.1 대상 선박 소개



(1) 선박의 주요 제원

길이(LOA)	abt. 86.25 m	추진방식	M/E ☒ Motor ☐
Cargo Hold	abt. 4,050 m ³	추진용량	2,170 [kW] × 1 ea
연료 종류	LNG	발전원종류	SOFC + ESS
탱크 용량	abt. 550 m ³	육상전원(AMP) 여부	사용 ☐ 미사용 ☒
탱크 종류	C-type	발전원별 용량&수량	발전기 ☐
재화중량(DWT)	abt. 3,950 MT		연료전지 ☒ 300 kWh × 3 Sets
선폭(Beam)	abt 81.50 m		배터리 ☒ 300 kWh × 1 Set

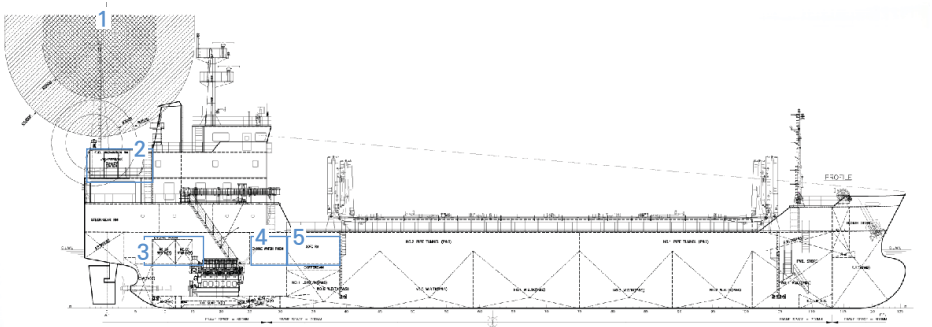
- 본 선박은 국외 항해를 주목적으로 하는 대양 선박으로, 선수루 및 선루 갑판을 갖춘 단일 주갑판과 구상 선수, 트랜섬 선미, 개방형 선미 프레임, 단일 방향타 및 LNG 이중 연료 엔진으로 구동되는 단일 스크류 프로펠러로 구성되어 있다. 거주 구역과 항해 선교는 선미에 위치하며, 최대한의 가시성을 제공하도록 배치되어 있다. 조타실 상단에는 항해 장비가 탑재된 Stern Mast가 장착되어 있다. 그 뒤로는 LNG Tank 2개, Fuel Preparation Room, Bunkering Station, Vent Mast 등이 위치되어 있다. 주갑판 하부의 공간은 Cargo Hold, 평형수 탱크, SOFC Room, ESS Room, Fuel Oil Tank 등이 있으며, 그 뒤로는 Engine Room으로 구성되어 있다.
- SOFC는 매우 높은 온도에서 작동하며 촉매나 외부 장치 없이 LNG를 연료로 사용 가능하고, 시동 시간이 긴 편이라 자주 차단해야 하는 용도로는 부적합하다. 이 때문에 연안 선박 보다는 대양 선박에 적용하는 것이 더 적합하여 본 선박의 발전 방식으로 선택했다. 또한, 해당 선박에 배치된 ESS Battery는 Peak load shaving 용도로 사용하기 위해 배치하였다.

(2) 운항 조건

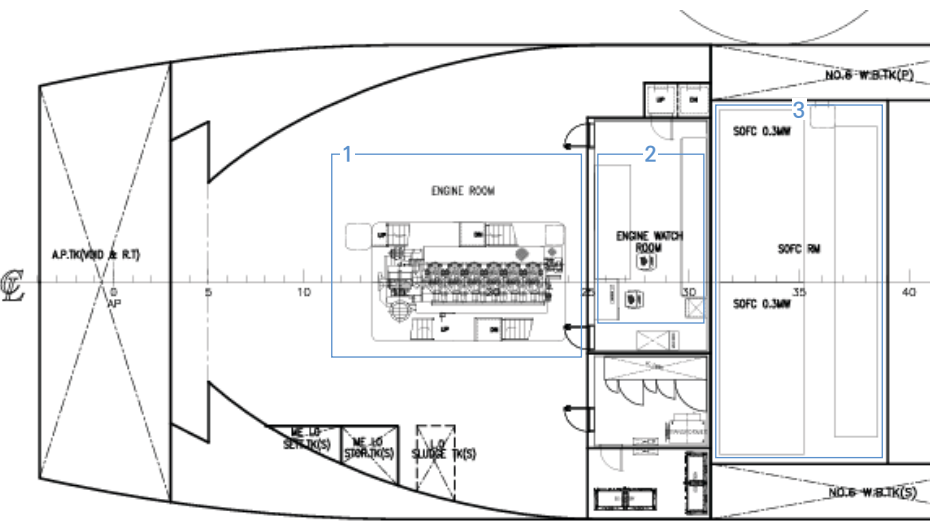
운항거리	316 km	최대선속	12 knots
운항범위	연안용 ☐ 대양용 ☒	평균선속	9.5 knots
운항횟수	15 회 / 1년	운항시간	64 시간 / trip
운항모드별 전력부하 조건	Port In & Port Out	980 [kW]	4 [h]
	Normal Seagoing	2,332.5 [kW]	24 [h]
	At Working	180 [kW]	12 [h]
	At Port	160 [kW]	24 [h]

D.2 선박 주요 도면

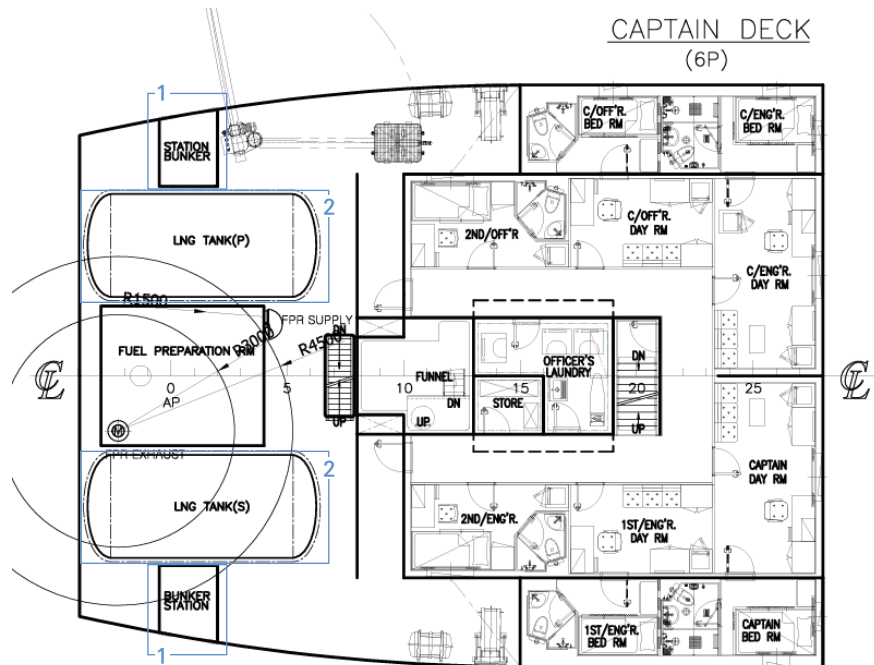
(1) 선박 G/A



1. Vent Mast
2. LNG Tank, Bunkering Station
3. Engine Room
4. SWBD Room
5. SOFC Room



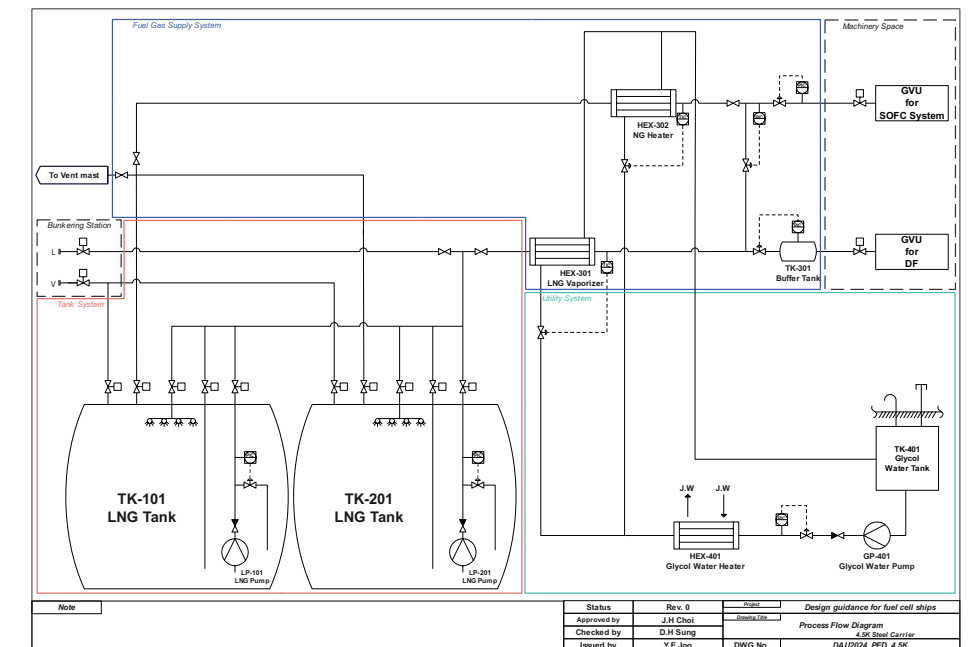
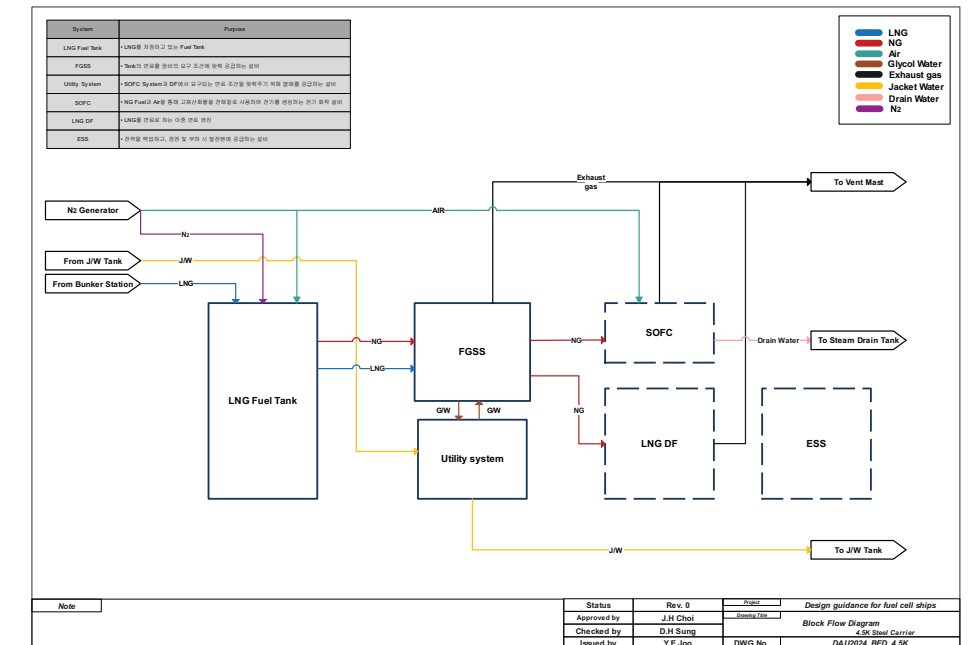
1. Engine Room
2. SWBD Room
3. SOFC Room



1. Bunkering Station
2. LNG Tank

- Cargo를 운반하는 선박의 적재량 loss를 최소화하기 위해 선박 후미에 LNG Tank를 배치하였으며, 연료 공급과 관련 있는 Vent Mast와 Bunkering Station을 Tank 주변으로 배치하였다. 또한, SOFC, ESS, Switchboard 역시 선박의 Cargo loss를 최소화하는 방향으로 배치하였다.

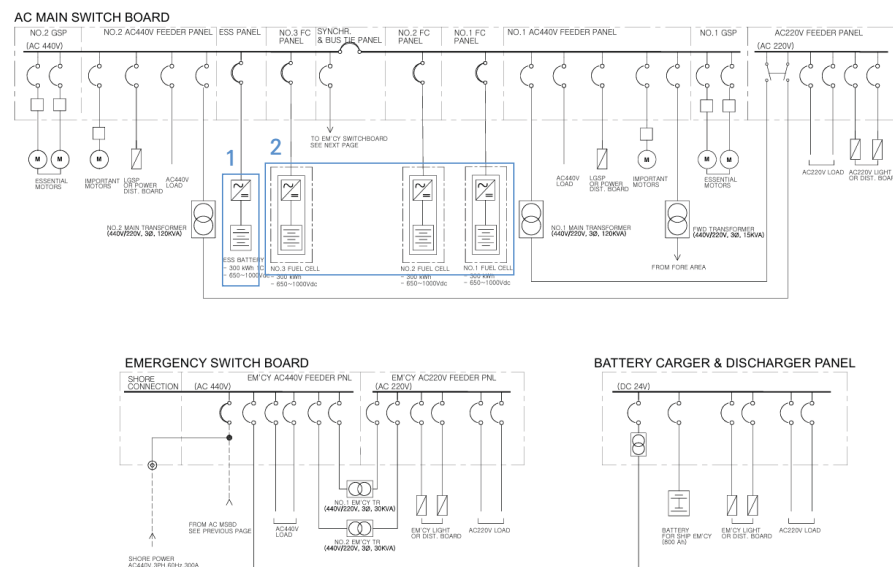
(2) BFD(Block Flow Diagram) & PFD(Process Flow Diagram) 도면



Ship	System	In			Out		
		온도[℃]	압력[bar]	유량[kg/h]	온도[℃]	압력[bar]	유량[kg/h]
일반화물선	Tank	-146	9	320	-146	17	320
	FGSS	-145	16.9	320	25	16	320
	Utility	25	2	4,500	45	2	4,500
	SOFC	25	3	38.8	-	-	-

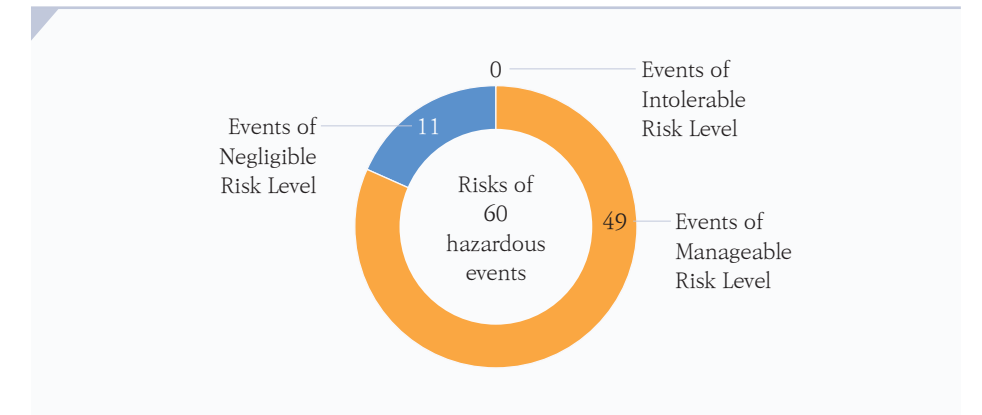
- 4.5K 일반화물선의 시스템은 LNG를 저장하는 탱크 시스템, 저장된 연료를 SOFC와 DF 엔진에 공급하는 연료 공급 시스템, 그리고 연료 공급 시스템에서 기화되는 NG와 탱크에서 증발한 NG에 열에너지를 공급하는 유틸리티 시스템으로 구성되어 있다.
- 4.5K 일반화물선에 설치되는 Pump의 설계는 DF 엔진 요구조건에 맞게 공급하기 위해 배치하였다. Vaporizer의 설계는 LNG의 기화를 수행함으로써 NG 연료를 SOFC와 DF 엔진에 공급하는 방식을 적용하여 수행되었다.
- 연료 공급 시스템은 기화된 NG를 SOFC의 요구 조건에 맞게 공급하기 위해 NG Heater를 배치하여 구성하였다. 또한 안정적인 연료 공급과 효율적인 에너지 사용을 지원하기 위한 Buffer Tank를 배치하였다.
- 유틸리티 시스템은 Vaporizer 및 NG Heater의 열매체로써 글리콜 워터를 사용하였으며, 장비에서 발생하는 압력 강하를 보완하기 위해 글리콜 워터 펌프를 설치하였다. 또한, Vaporizer 및 NG Heater의 요구 온도를 충족하기 위해 Heater를 추가하여 구성하였다.

(3) 전력단선도



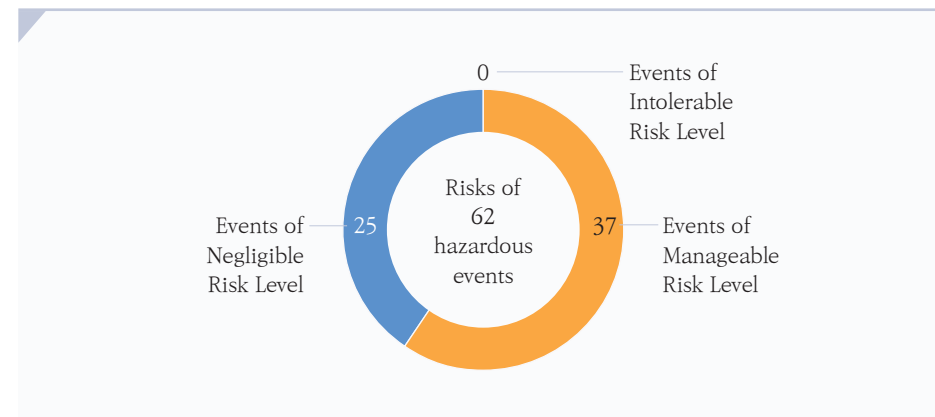
D.3 위험성 평가 결과

(1) 선박설계: HAZID 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZID 분석을 통해 최종적으로 총 60개의 위험 시나리오가 식별되었고, 인명 위험도 측면에서 31개, 재산 위험도 측면에서 52개, 환경 위험도 측면에서 0개가 도출되었다. (중복 시나리오 존재) 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 없었으며, 관리 가능 위험도 수준은 49개, 무시 가능 위험도 수준이 11개가 도출되었다.
- 관리 가능 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계 개선을 검토하였다. 검토 하였던 방안으로는
 - | 기관 구역, 벙커링 스테이션 등에 CCTV 설치 검토
 - | 가스 감지기 추가 설치 검토
 - | 외부에서 LNG/NG 누출 상황을 인지할 수 있는 가시/가청 경보 설치 검토
 - | FGSS Room, Fuel Cell Room의 입구에 출입 주의 표지판 설치 검토
 등이 있으며, 이외에 HAZID 결과에 언급되었던 추가 검토 방안들을 검토하여 추후 설계에 반영할 예정이다.

(2) FGSS: HAZOP 결과 요약 & 설계 개선사항



- 본 HAZOP 분석을 통해 최종적으로 62개의 위험 시나리오가 식별되었고, Bunkering System에서 23개, Fuel Gas Supply System에서 26개, Glycol Water System에서 13개 도출되었다. 이 위험 시나리오 중 허용 불가 위험도 수준은 0개, ALARP 위험도 수준은 37개, 무시 가능 위험도 수준은 25개가 도출되었다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 밸브의 차단으로 LNG가 Trap 될 수 있는 구간 내 과압 문제를 해소하기 위해 안전밸브를 설치하여 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 수정하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 밸브 및 배관, 탱크 연결부 등의 손상으로 인한 LNG의 누출 문제를 해소하기 위해 Vaporizer 하부에 드립 트레이 및 온도 센서를 설치하여 LNG의 누출을 감지할 수 있게 설계하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 LNG Vaporizer 손상으로 인해 글리콜 순환 라인으로 LNG가 유입될 수 있는 문제를 해소하기 위해 체크 밸브를 설치하여 LNG의 유입을 차단하는 방향으로 설계하였다.
- ALARP 위험도 수준에 해당하는 글리콜 워터 Heater의 성능 저하 또는 기능 상실로 인해 발생할 수 있는 LNG의 기화 및 NG Heating의 성능 저하, DF 및 SOFC에 저온 가스 공급 등의 문제를 해소하기 위해 글리콜 워터 Heater 후단에 온도 센서를 설치하여 글리콜 워터의 온도를 감지하도록 설계하였다. 추가로 글리콜 워터의 적절한 온도 유지를 위해 Bypass 라인을 설치하여 안정적인 공급이 가능하도록 설계하였다.
- 위의 개선 사항과 같이 HAZOP을 통해 ALARP 위험도 수준의 시나리오를 확인하여, 관련한 안전장치를 추가로 설치하고, 안전에 관한 운영 매뉴얼을 보완하여, 위험도를 낮추는 방향으로 설계를 개선하였다.

참고문헌

- IEA (International Energy Agency)(2023). Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach.
- Elkafas, A. G., Rivarolo, M., Gadducci, E., Magistri, L., & Massardo, A. F.(2023). Fuel cell systems for maritime: A review of research development, commercial products, applications, and perspectives. Processes, 11(1), 97. <https://doi.org/10.3390/pr11010097>
- Wang, Z., Dong, B., Wang, Y., Li, M., Li u, H., & Han, F.(2024). Analysis and evaluation of fuel cell technologies for sustainable ship power: Energy efficiency and environmental impact. Energy Conversion and Management: X, 21, 100482.
- Lipu, M. S. H., Mamun, A. A., Ansari, S., Miah, M. S., Hasan, K., Meraj, S. T., & Tan, N. M.(2022). Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals. Batteries, 8(9), 119.
- 홍종은 등.(2021). 암모니아 연료용 고체산화물연료전지 개발. Ceramist, 24(4), 368-385. <https://doi.org/10.31613/ceramist.2021.24.4.08>
- Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping(2024). Fuel Cell Technologies and Applications for Deep-Sea Shipping.
- Lucà Trombetta, G., Leonardi, S. G., Aloisio, D., Andaloro, L., & Sergi, F.(2024). Lithium-ion batteries on board: A review on their integration for enabling the energy transition in shipping industry. Energies, 17(5), 1019.
- Maritime Battery Forum(2024). Which battery for your ship? A simplified guide to help you decide.(Published on 26 June 2024).
- IMO (International Maritime Organization)(2024). RESOLUTION MEPC.391(81) (adopted on 22 March 2024): 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (2024 LCA Guidelines).
- Ryu, B.R.; Duong, P.A.; Kim, J.-B.; Choi, S.-Y.; Shin, J.W.; Jung, J.; Kang, H.(2023). The Effect of Ventilation on the Hazards of Hydrogen Release in Enclosed Areas of Hydrogen-Fueled Ship.J. Mar. Sci. Eng., 11, 1639. doi: 10.3390/jmse11091639
- Ryu, Bo Rim.(2024).Evaluation on ventilation for gas dispersion within enclosed area of a hydrogen-powered vessel.Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (in Engineering), Department of Marine System Engineering, Graduate School, National Korea Maritime & Ocean University.
- Gear, Luke.(2022).Fuel Cell Boats & Ships 2023-2033: PEMFC, SOFC, Hydrogen, Ammonia, LNG.IDTechEx.
- 김진형, & 최재혁. (2024). FuelEU Maritime 규제 적용에 따른 해양 연료의 영향분석및 대응방안 연구. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 61(2), 88-97.
- Battery University. (2023). BU-205: Types of Lithium-ion, https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion#google_vignette

한국선급 홈페이지
<https://www.krs.co.kr/kor/>



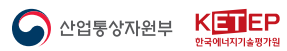
FC-Sail 플랫폼
<https://fcsail.krs.co.kr/>



연료전지 선박 설계를 위한 기술 안내서

Technical Information Handbook:
Fuel Cell Systems in Maritime Applications

R&D Project



연료전지선박의 평가 및 설계를 위한 웹기반가이던스플랫폼 기술 개발

Development of web-based guidance platform technology
for evaluation & design of fuel cell ships

주관기관

한국선급 

공동연구기관

(주)한국선박기술 

동아대학교  동아대학교
DONG-A UNIVERSITY

(주)마린소프트 

본 보고서의 내용을 인용하실 때에는 출처를 밝혀주시기 바랍니다.
저작권 보호를 위해 무단복제 및 배포를 삼가주시기 바랍니다.



KOREAN REGISTER

36, Myeongji Oceancity 9-ro, Gangseo-gu, Busan, Republic of Korea, 46762
www.krs.co.kr

©2025 Korean Register. All rights reserved.

KR-RND-DECB-INF-011