

소형 수소추진선박 기술 개발 및 실증

임재완¹ · 이세준¹ · 윤상진² · 임옥택^{3†}

¹울산대학교 차세대수소추진선박실증연구센터, ²남부대학교 자동차기계공학과, ³울산대학교 기계공학부

The Technology Development and Substantiation of Small Hydrogen Powered Vessel

JAEWAN LIM¹, SEJUN LEE¹, SANGJIN YOON², OCKTAECK LIM^{3†}

¹The Research Center for Next Generation Vessel with Hydrogen Fuel Cell, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

²Department of Automotive & Mechanical Engineering, Nambu University, 1 Nambudae-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62271, Korea

³Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

†Corresponding author :
otlim@ulsan.ac.kr

Received 10 November, 2023

Revised 4 December, 2023

Accepted 8 December, 2023

Abstract >> In this study, we proposed a standard model for the design, construction and demonstration of the technology development and substantiation of small hydrogen powered vessel in order to respond to the alternative fuel-using vessel market that requires the use of low-carbon/carbon-free fuel as a greenhouse gas reduction measure. The hydrogen fuel cell-based electric propulsion system developed through this is optimized through performance and durability tests on the land-based test site (LBTS), and the electric propulsion system applied to this result is mounted on a small hydrogen propulsion vessel and operated. Simultaneously, through the digital twin technology between the LBTS and the hydrogen-propelled vessel on the sea, the technology that can predict and diagnose the problems that can occur in the electric propulsion system of the vessel is applied to carry out the empirical study of the hydrogen-propelled vessel. In addition, we propose a commercialization model by analyzing the economic feasibility of the demonstration vessel.

Key words : Hydrogen fuel cell(수소연료전지), Electric propulsion system(전기 추진 시스템), Small vessel(소형 선박), Digital twin(디지털 트윈), Land-based test site(해상환경육상시험소),

1. 서론

선박은 통상적으로 병커유와 marine diesel oil을

사용하여 운항에 필요한 동력을 생성하거나 정박 중 필요한 전기를 생산한다¹⁾. 그러나 선박에 사용하는 연료는 연소 과정에서 많은 양의 황산화물, 이산화탄

소 등이 나오게 되며 이는 해양대기오염의 주요 원인이 된다. 또한 발암 물질에 노출되면 건강에 심각한 피해를 주기도 한다.

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 해양환경보호위원회(Maritime Environment Protection Committee, MEPC)에서는 2050년 해운 분야의 탄소 배출 감축 목표를 2008년 50%에서 2023년 100%로 상향하는 전략 개정을 가결하였다²⁾. 또한 온실가스 감축 전략 등 해운 분야 환경 규제 강화에 따라 친환경 선박으로 조신, 해운 시장의 패러다임의 전환이 시작되었다³⁾. 이러한 선박의 배출가스 규제에 대항하기 위한 친환경 선박의 개발의 필요성 확대에 따라 액화 천연가스(liquefied natural gas, LNG), 연료전지, 수소 및 암모니아 연료 추진 선박 및 관련 기자재 기술 개발이 활발히 진행되고 있다⁴⁾.

현재 논의되고 있는 대체연료 중 하나인 LNG의 경우 다른 화석연료보다 이산화탄소 발생량은 적지만 메탄이 연소되지 않고 배출되어 지구온난화를 촉진시킬 수 있는 문제가 있다⁵⁾. 그에 반해, 연료전지는 연료의 연소 반응 없이 에너지를 발생시키기 때문에 기존의 내연기관과 달리 공해 물질의 배출이 없고 이산화탄소 배출량도 획기적으로 줄일 수 있으며 소음도 거의 없다. 에너지 효율도 50%로 기존 내연기관의 30%보다 높다⁶⁾.

EU, 일본 등은 정부 주도로 연료전지에 대한 연구를 활발히 진행하고 있으며, IMO에서도 international code of safety for ships using gases or other low-flash point fuels에 연료전지 설치와 이에 대한 안전 규정 항목을 추가하는 등 세계적으로 연료전지에 대해 주목하고 있는 상황이다⁷⁾. 2021년 TechNavio에서 발행한 global fuel cells for marine vessels market 보고서에 따르면 전 세계 선박용 연료전지 시장은 2020년 3억 9,053만 달러에서 연평균 성장률 6.40%로 증가하여 2025년에는 5억 3,267만 달러에 이를 것으로 전망된다⁸⁾. 특히 수소를 연료로 하는 고분자 전해질 연료전지(proton-exchange membrane fuel cell, PEMFC)는 비교적 저온에서 작동하고 콤팩트한 시스템으로 구성되어 있어 빠른 시동이 가능하고 반복적인 가동

과 정지에도 내구성이 좋아 모빌리티 분야에 적용하기 적합하다⁹⁾.

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 전기 및 하이브리드 선박 시장 규모는 2029년 124억 달러 규모에 달할 것으로 예상된다. 그중에서 수소선박은 배기가스 저감 등 환경적 측면뿐 아니라 상대적으로 단순한 구동 체계, 가격 하락 가능성 등 미래 트렌드 및 시장성 측면에서도 장점이 있어 차세대 선박 추진 체계로 적합하다. 또한 수소자동차는 이미 내구성 및 안전성 검증이 완료되는 등 기술 성숙도가 높고 상용화가 진행 중이다. 따라서 선박 분야에서도 기술 응용을 통해 신속하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다¹⁰⁾.

2. 기술 개발의 개요 및 범위

2.1 기술 개발 개요

온실가스 감축 조치로 저탄소, 무탄소 연료의 사용 확대를 요구하는 선박 시장에 대응하기 위해 소형 수소추진선박의 설계, 건조 및 실증에 따른 표준 모델을 Fig. 2의 같이 제시하였다.

본 기술 개발의 research and development (R&D) 1에서는 수소추진선박의 설계, 해석, 실증을 목표로 설정하였으며 R&D 2에서는 수소추진선박의 모의 단계 디지털 트윈 구축, R&D 3에서는 land-based test site (LBTS)를 활용한 연료전지 기반 전기 추진 시스템 기술 개발을 위하여 수소연료탱크, 연료 공급 시스템, 연료전지 시스템, 전기 추진 시스템, 수소연료전지 추진 시스템 구축, R&D 4에서는 수소추진선

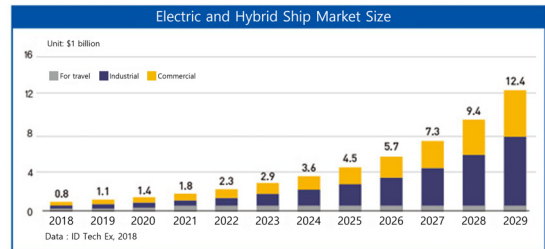


Fig. 1. Electric and hybrid ship market size¹¹⁾

박의 경제성 분석 및 평가, 네트워크 구축을 목표로 설정하였다.

2.2 기술 개발의 범위

2.2.1 40인승 350 kW급 수소추진선박의 설계, 해석, 건조 단계의 엔지니어링 및 실증 기술 개발

R&D 1에서는 수소추진선박의 설계, 건조, 실증 기술 개발을 목표로 진행 중이다. 현재 수소 추진에 필요한 구성품 각각은 상용화 단계에 있으나 선박 운항 시나리오에 맞는 시스템 구성의 부재로 대상 선박을 분석하여 운항 환경에 적합한 사양의 수소연료전지를 탑재한 선박의 개념 설계를 진행하고자 한다. 수소추진선박 탑재 장비(연료전지 계통, 수소탱크, 배터리 등)를 고려한 시스템 배치, 중량, 연료전지 계통, 전력 계통, 통풍 계통 등의 분석 및 설계를 실시하고자 한다. 또한 수소추진선박 선박의 운항 시나리오에 따른 최적의 수소 추진 시스템으로 구성하여 배터리 용량의 최소화하며 선체 경량화와 구조적 배치를 통한 운항 성능을 향상시키고자 한다. 연차별 기술 개발 내용으로는 Fig. 3과 같이 1차년도에는 수소추진선박 approval in principle (AIP) 획득 등 개념 설계, 2차년도는 선형 설계, 구조 해석 및 설계 등 기본 설계, 3차년도에는 누출 및 폭발, 화재 computational

fluid dynamics (CFD)에 대한 상세 설계, 4차년도에는 선체 건조, 주요 장비 탑재의 선박 건조 단계, 5차년도에는 실증 및 해석을 위한 장비 통합 시운전, 해상 시운전을 목표로 두고 있다.

2.2.2 LBTS 및 수소추진선박의 모의 단계 및 디지털 트윈 개발

R&D 2에서는 LBTS 및 수소추진선박의 모의 단계 및 디지털 트윈 개발을 진행하고자 한다. Fig. 4와 같이 수소추진선박 및 핵심 장비의 운항 성능, 상태 분석, 예측 진단, 운항 적합도 등에 대한 시뮬레이션 기반의 검증, 평가, 반영이 가능한 디지털 트윈 기반 선박 통합 제어 및 감시 운용을 위한 통합 시스템 개발을 핵심 목표로 두었다.

디지털 트윈은 실제 수소추진선박의 핵심 장비 및 시스템을 가상의 공간에 재현한 디지털 사본으로 정의할 수 있다. 디지털 트윈을 통해 선박 건조 이전뿐만 아니라 선박의 수명 주기 전반에 걸쳐 시스템의 안전성과 성능 등 선박의 모든 측면을 평가할 수 있는 가상의 테스트 벤치를 구축하고자 한다. 선박의 수명 주기 전반에 걸쳐 선박에서 사용 가능한 모든 정보와 선박의 모델을 결합하고, 시스템 설계, 효율적인 보증 및 검증 서비스, 시뮬레이터 기반 테스트 및 가상 시스템 통합, 심층 통찰력 및 예측 생성 등

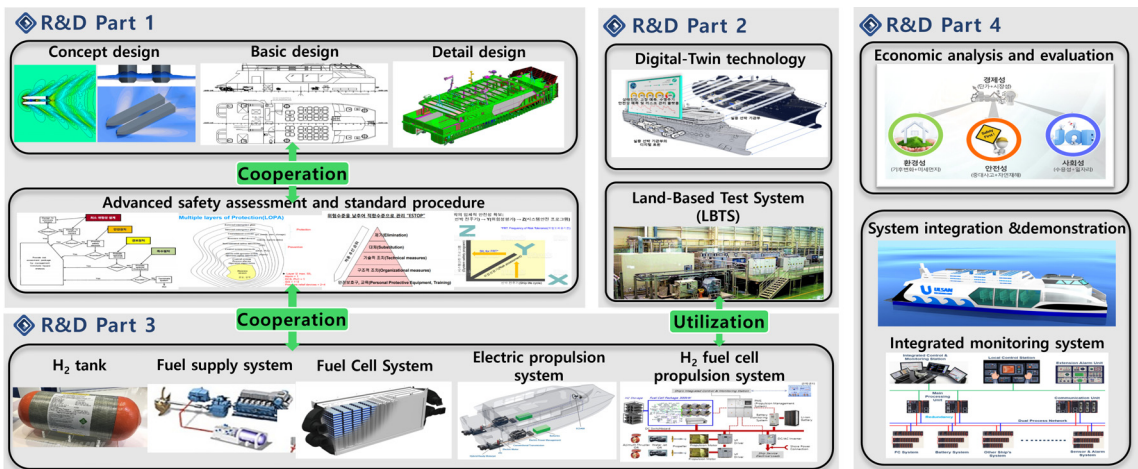


Fig. 2. The technology development and substantiation of small hydrogen powered vessel's concept

다양한 작업을 수행할 수 있다. 디지털 트윈에는 다양한 디지털 모델과 선박에 관련된 정보 및 선박 3D 모델, 동적 시뮬레이션 모델, 핵심 장비들에 대한 제

어 시스템 및 통신 네트워크, 분석 모델, 데이터 모델, 센서 데이터 등을 디지털 정보 방식으로 생성하여 제공하고자 한다.

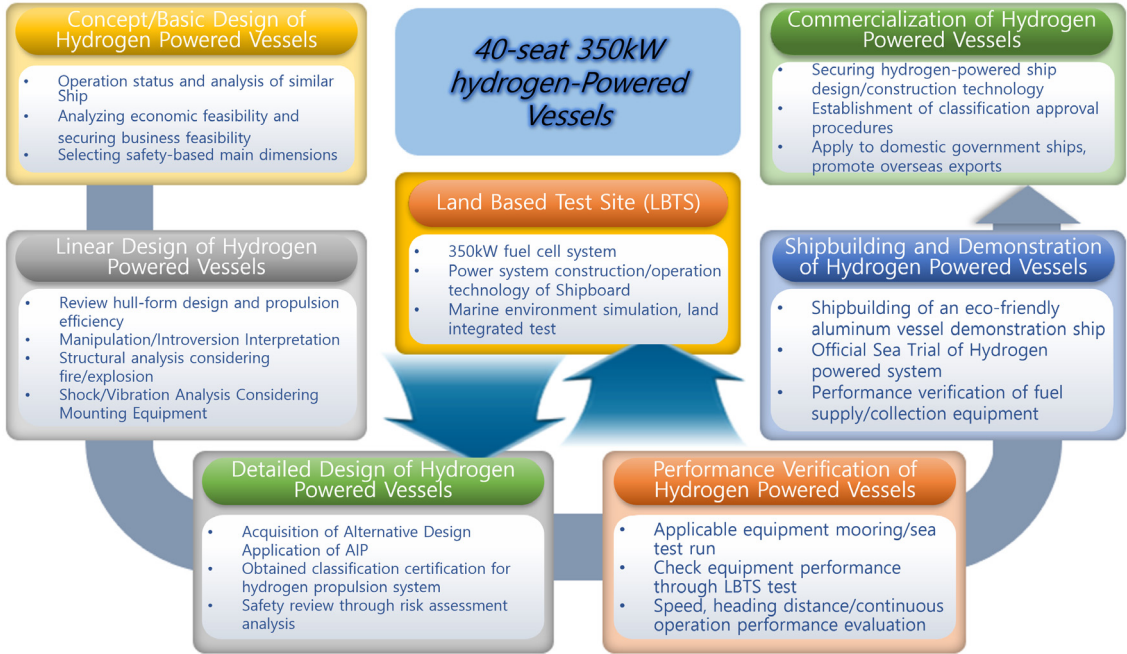


Fig. 3. The technology development and substantiation of mall hydrogen powered vessel's design, dry engineering, substantiation



Fig. 4. Digital twin-based integrated control, control, analysis prediction

2.2.3 LBTS를 활용한 연료전지 기반의 전기 추진 시스템에 대한 기술 개발

본 기술 개발은 해상 환경 모사가 가능한 LBTS 구축, 수소선박에 적용될 연료전지 기반 추진 시스템 개발 및 실증을 목표로 두고 있다.

LBTS 구축을 하고자 하는 목적은 추진 체계 주요 장비의 통합 성능 평가 및 수소추진선박을 건조하기 전에 수소연료전지 기반 추진 시스템을 검증함으로써 기술적 위험 요소를 사전에 식별하여 선박 탑재 전 보완 및 고장 및 비상 상황에 대한 시험을 수행하여 추진 체계 성능에 대한 위험 요소를 최소화하기 위함이다.

LBTS를 활용한 연료전지 기반의 전기 추진 시스템에 대한 기술은 Fig. 5와 같이 수소연료전지 기반의 전력 및 추진 시스템 개발을 통하여 LBTS 및 선박에 적용하고자 한다.

주요 기술 개발 내용으로는 수소연료전지의 성능, 안전성 및 내구성 확보를 위한 테스트 셀을 구축하고 350 kW급 수소연료전지 기반 추진 시스템에 대한 최적 balance of plant (BOP) 구성 및 운전 조건을 개발하는 것이다. 이를 통해 수소연료전지 기반 추진 시스템 안전성 및 내구성 확보를 위한 LBTS 구축 및

실증을 하고자 한다. 즉, 선박 환경을 고려한 전력 시스템의 해석 모델 개발을 통한 연료전지, 배터리, 수소저장탱크, BOP의 용량 선정 및 최적 제어 로직을 검증하여 연료전지-배터리 하이브리드 전력 시스템 해석 모델 개발을 하고자 한다.

또한 앞서 기술한 바와 같이 전력 추진 시스템 신뢰성 검증을 위한 LBTS 개발을 통하여 다양한 해상 및 선박 환경 구현 가능한 LBTS 개발을 통해 전력 및 전기 추진 시스템의 내구성을 검증하고자 한다.

2.2.4 40인승 수소추진선박의 경제성 분석 및 네트워크 강화

본 기술 개발은 수소추진선박 관련 경제성 분석 및 산학연 네트워크 구축을 통한 수소경제 활성화 구현을 목적으로 진행하고자 한다.

세부 추진 내용으로는 수소추진선박 경제성 분석과 네트워크 구축 및 강화로 나눌 수 있다. 수소추진선박 경제성 분석은 수소추진선박 운영에 필요한 경제적 요인들의 변동성, 통계 분석을 통한 불확실성의 영향을 추정하고 비용/편익 분석을 수행하고자 한다. 또한 수소추진선박의 경제적 타당성과 더불어 연안 해안 중심 기반 운영 단가를 분석하고자 한다. 그리

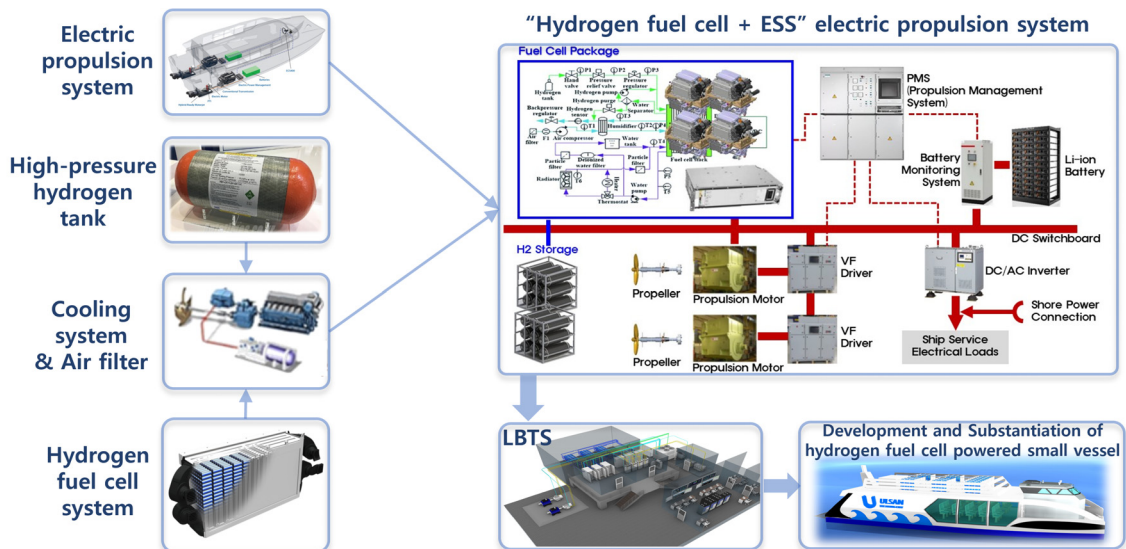


Fig. 5. The technology development on fuel cell electric propulsion system using land based test site

고 네트워크 구축 및 강화를 통해 수소추진선박 관련 국제 네트워크 구축 기반 마련과 국제 협업 네트워크 구성 및 활성화와 더불어 수소추진선박 관련 정책 제안을 하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기술 개발 활용 방안

기술 개발된 수소추진선박은 국내 연안 수소추진선박의 표준 모델로 활용하고 수소추진선박 설계 및 건조과 정에서 확보된 원천 기술을 통해 중대형 수소추진선박 개발로 확대가 가능할 것으로 판단된다. 따라서 이를 국내 조선사 및 기자재 업체의 수소추진선박 관련 핵심 제품 개발에 활용하고자 한다. 저소음, zero-emission으로 기존 내연 기관 추진 시스템의 대체가 가능하여 소형 선박의 환경오염 발생 가능성에 직접 대응이 가능할 것으로 예상된다.

수소추진선박의 실증화를 통해 얻은 빅데이터를 활용하여 전동기, 배터리, 수소저장탱크, 선박 모니터링 시스템 등 수소추진선박 관련 고부가 핵심 부품 기술의 고도화 방안 마련이 가능할 것으로 보인다. 더불어 체계적으로 구성된 수소추진선박 기술 개발 로드맵을 통해 신재생 발전 및 충전 시스템의 새로운 영역을 제공하여 연관 산업기술 분야의 응용 및 신시장 주도를 위한 새로운 가이드라인 제공이 가능할 것이라 판단된다. 또한 국내외 수소추진선박 관련 연구 개발에 참여하고 있는 산학연 기관 및 주요 연구 주제별 연결 관계를 분석 가능하도록 하여 글로벌 네트워크 구축에 도움이 되고자 한다. 아울러 국내 수소추진선박 관련 산업의 균형적인 발전을 위한 지원 정책 수립의 기초 정보로 활용 및 경제성 연구를 위한 자료로 쓰일 수 있을 것이다.

3.2 기술 개발 기대 효과

본 기술 개발의 기대 효과는 총 세 가지이다.

첫째, 과학기술적 측면으로는 수소연료전지 기반

추진 선박의 신기술을 주도하고 핵심 기자재의 국산화 및 시스템의 안전성 확보이다. 연료전지 부문 국내외 기업과의 협업을 통한 최고 수준의 기술력 확보와 더불어 핵심 요소 기술의 내구성 및 신뢰성 검증을 통한 조속한 상용화를 연계하고자 한다.

둘째, 경제적 기대 효과로는 수소 활용을 통한 미세먼지 저감으로 사회적 비용을 절감하고 친환경선박과 에너지 신사업 증가로 인한 인력 수요 증가, 그린뉴딜 및 신사업의 글로벌 시장 선점을 들 수 있다.

셋째, 경제·사회적 기대 효과로는 온실가스, 미세먼지 저감으로 청정사회 진화에 기여하고 수소 적용 가능성 확보로 인한 국민 인식 및 주민 수용성을 제고하며 강화되는 환경 규제에 대한 적극적인 대응책이 될 것이라 예측된다.

4. 결론

1) 수소추진선박의 실증 운항이 기진행된 유럽에 비해 한국은 후발 주자로 평가된다. 따라서 시장 진입 및 확대를 위하여 지속적인 정부의 지원 및 기술 개발이 필요하다.

2) 선박 건조 분야에서는 글로벌 경쟁 우위에 있으나 핵심 기술에서의 높은 해외 의존도로 인해 친환경, 스마트 등 선박 패러다임의 변화에 따른 국내 기술 수준은 해외 대비 미흡하고, 선도국 대비 기술 개발 진행 단계와 추진 속도에서 열위에 있다.

3) 수소는 재생에너지와의 상호 보완, 가벼운 무게, 빠른 충전 속도, 오랜 저장 기간 등의 장점으로 해양 분야에서의 활용성이 높다. 소형보다는 대형, 단거리보다는 장거리 이동 수단에 더 적절하기에 선박이나 항만 장비 등에 적합하다. 따라서 수소추진선박의 기술 개발이 더욱 필수적으로 요구된다.

4) 수소추진선박의 설계, 해석, 건조, 실증 기술 개발을 통하여 연안 선박용 수소추진선박의 표준 모델을 제시하고, 이를 통해 국내 연안 관광선 적용과 보급 확산, 대형 수소추진선박까지의 기술 적용성을 확대하고자 한다.

5) 국내 수소추진선박 연구 개발은 선진국보다 약

10년 정도 늦었지만, 세계 1, 2위를 다투는 탄탄한 조선업을 기반으로 갖추고 있으며, 영하 163°C가 요구되는 LNG 선박 관련 세계 최고 수준의 극저온 기술과 상당한 수준의 자동차용 수소연료전지 기술을 보유하고 있어 조기 추적이 가능할 뿐 아니라 향후 수소추진선박 시장의 선도 역시 기대할 수 있다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘지역혁신클러스터육성(R&D)’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다(과제명: 전력구동 모빌리티용 전지 및 에너지 생산·저장 융복합산업 개방형 혁신사업[P0025406]). 본 과제(결과물)는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력 기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-003). 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. RS-2023-00217778). 이 연구는 산업통상자원부가 지원한 ‘안전기반 소형수소추진선박 기술개발 및 실증사업’으로 지원을 받아 수행된 결과입니다(과제명: [3세부] LBTS를 활용한 연료전지 기반 전기 추진시스템 기술개발, 과제번호: RS-2022-00142947).

References

1. J. M. Lee, J. H. Kim, S. G. Kim, T. W. Kim, and M. S. Kim, “A study on the hydrogen fuel cell vessel overview and technology development trends”, BSNAC, Vol. 56, No. 1, 2019, pp. 3-9. Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO201913458200342&dbt=JAKO&koi=KISTI1.1003%2FJNL.JAKO201913458200342>.
2. C. H. Yang, “Meaning of IMO MEPC 80th meeting”, Hyundai Haiyang, 2023. Retrieved from <http://www.hdhy.co.kr/news/articleView.html?idxno=18921>.
3. S. J. Park, S. Y. Lee, J. H. Kim, J. G. Ahn, J. S. Yang, J. S. Lee, K. A. Kim, K. H. Doh, and J. Y. Jung, “Employment impact of mid to long-term planning of eco-friendly ships”, Korea Labor Institute, 2022. Retrieved from https://www.kli.re.kr/eia/asmntRsltView.es?rslt_no=277&mid=a30301000000&nPage=3&sch_asmnt_yr=&sch_rel_mnstr=&sch_rschr=&sch_ttl=&sch_keyword=.
4. D. G. Song, “Increase in eco-friendly vessel market due to IMO regulations”, Korea Investor Relations Service, 2021. Retrieved from https://www.kirs.or.kr/information/tech2020_2.html?mode=search&area=subject&keyword=%EC%B9%9C%ED%99%98%EA%B2%BD%20%EC%84%A0%EB%B0%95&no=160.
5. Y. S. Gawk, “Development of Alfa Laval, LNG methane slip reduction system”, MaritimePress, 2021. Retrieved from <http://www.maritimepress.co.kr/news/articleView.html?idxno=305240>.
6. Korea Institute of Fusion Energy, “Find a new energy source”, Naver Encyclopedia of Knowledge, 2012. Retrieved from <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=3343347&cid=58167&categoryId=58167>.
7. H. Oh, O. T. Lim, E. P. Jung, H. C. Park, J. C. Park, J. H. Park, N. T. Jung, B. K. Lee, H. S. Seo, S. H. Yoon, D. W. You, J. H. Kim, and Y. S. Park, “Next generation hydrogen-propelled vessel safety and environment integrated platform technology development joint planning research report: development and demonstration of hydrogen-propelled ship based on safety integrity (SIL)”, Ministry of Science and ICT, 2020. Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202100006191>.
8. C. H. Lee, “Samsung Heavy Industries develops liquefied hydrogen fuel cell system for ships”, Economist, 2022. Retrieved from <https://economist.co.kr/article/view/ecn202211090053>.
9. C. Y. Lee, “A study on the development trends of polymer electrolyte membrane fuel cells and application to ships”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 28, No. 4, 2022, pp. 657-666, doi: <https://doi.org/10.7837/kosomes.2022.28.4.657>.
10. Y. S. Park, “Necessity of hydrogen ship introduction and development status check”, KDB Future Strategy Institute, 2019. Retrieved from <https://eiec.kdi.re.kr/policy/domesticView.do?ac=0000149204>.
11. H. P. Lee, “Here comes Tesla on the ocean... anchored ‘eco-friendly smart ship’”, Magazine Hankyung, 2020. Retrieved from <https://magazine.hankyung.com/business/article/202009099324b>.