

어선용 복합 추진시스템 적용을 위한 연구

노정호^{*†}

* 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

A Study on the Application of Hybrid Propulsion System
for Fishing VesselsJung-Ho Noh^{*†}

* Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University

요 약 : 국제해사기구(IMO)를 필두로하여 국제적으로 선박에 대한 배출가스 규정을 강화하고 있으며, 대한민국 정부도 온실가스 감축을 위한 기본 로드맵을 설정하는 등 배출가스 저감을 위한 대책 마련이 절실한 상황이다. 또한, 국내 연안을 항해하는 선박에서 배출되는 온실가스 배출량 중 90.6%를 차지하고 있는 어선에 적용가능한 효율적이고 배출가스량이 감소가능한 새로운 추진시스템의 도입이 절실하다. 본 연구에서는 국내 연안어선에 적용가능한 전기복합 추진시스템을 제안하고, 전기복합 추진시스템이 적용가능한 대상선박을 선정하였다. 선정된 기존 대상어선에 탑재된 추진시스템과 비교하여 개발된 전기복합 추진시스템을 적용할 경우 발생할 수 있는 예상 연료소모량을 비교하기 위한 시뮬레이션 시스템을 Matlab/Simulink를 이용하여 구성하였다. 시뮬레이션을 통해 기계식 추진시스템, 전기복합 추진시스템(배터리 육상충전을 하지 않은 경우, 육상충전을 한 경우)간의 연료소모량 결과를 확인하였으며 전기복합 추진시스템을 적용하는 경우 약 13%, 16%의 연료소모량이 감소될 수 있는 것을 보여주는 결과를 확인하였다.

핵심용어 : 온실가스, 배출가스, 기계식 추진시스템, 전기복합 추진시스템, 연료소모량

Abstract : The International Maritime Organization is at the forefront of strengthening gas emission regulations for ships globally. The Korean government needs to apply measures to reduce emissions, such as setting a basic roadmap for greenhouse gas reduction. In addition, there is an urgent need to introduce a new efficient propulsion system that can reduce gas emissions. This includes applications to fishing vessels, which account for 90.6% of the greenhouse gas emissions from ships sailing along domestic coasts. In this study, an electric-combined propulsion system applicable to domestic coastal fishing vessels was developed. The target ship to which the electric-combined propulsion system could be applied was selected. A simulation system was constructed using MATLAB/Simulink to compare the expected fuel consumption when applying the developed complex electric propulsion system to the propulsion system mounted on the selected target fishing vessel. Through simulations, the differences in fuel consumption between the mechanical propulsion system and the electric hybrid propulsion system (both when charging and not charging the battery on land) were confirmed. The results show that fuel consumption can be decreased by approximately 13% and 16% when applying the electric-combined propulsion system.

Key Words : Greenhouse gas, Emission, Mechanical propulsion system, Hybrid electric propulsion system, Fuel consumption

† jhnoh@kmou.ac.kr, 051-410-4205

1. 서론

2018년 프랑스 파리에서 개최된 파리협정은 지구 대기 기온의 상승폭을 21세기 말까지 산업화 이전 기온 대비 2°C 이하로 또한 온실가스 감축을 통해서도 궁극적으로 1.5°C 이하로 상승폭 제한에 대한 내용을 목표로 설정하였으며, 2016년 11월 본격적으로 파리기후협정이 발효되었다(KEC, 2020). 현재 우리나라는 전 세계 국가 중 온실가스 배출량 7위로 매우 높은 수준을 유지하고 있으며(KDI, 2021) 2016년 발효된 파리협정에 의거하여 국내에서도 ‘2030 온실가스 감축 기본 로드맵’이 설정되었다. 설정된 온실가스 감축 기본 로드맵에서는 2030년 배출 전망 대비 온실가스 감축량을 약 37%(3억 1,500만톤)로 저감하는 것을 목표로 하고 있고(MOE, 2018), ‘저탄소 녹색 성장 기본법’의 시행령 제 25조에 따라 우리나라와 협약에 동참한 당사국 간의 협약을 조속히 이행하기 위한 대책 마련이 절실한 실정이다(KLIC, 2013).

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서도 선박으로부터 배출되는 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 온실가스(CO₂) 등의 배출 감축 목표를 설정하였으며, 새로 건조되는 선박의 경우 에너지효율설계지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index) 기준 에너지 효율 운영지수를 도입하였으며, 현존선에 대해서도 에너지효율지수(EEXI, Energy Efficiency Existing ship Index)를 신규 도입하였다. 이에 따라 원양해역을 항해하는 대형선박에서의 배출가스는 각종 규제 강화를 통해 배출 제한을 위한 여러 가지 방안이 마련되고 있는 실정이다(IMO, 2018).

2019년 대한민국 해양수산부 ‘해양수산 통계시스템’에 따르면 국내 연안 등록선박 75,718척 중 어선은 88.1%인 66,736척을 차지하고 있다. 또한, 국내 연안선박에서 배출되는 온실가스 배출량 54,168톤 중 90.6%에 해당하는 49,084톤이 어선에 의한 배출량으로 분석되었다(MOF, 2021). 이와 같은 통계결과를 분석해본 결과에 따라 어선에 적용된 노후화된 추진시스템의 영향이 큰 것으로 판단하고 있으며, 이러한 국내외적인 선박 배출가스를 줄이기 위해서는 대형선박 뿐만 아니라 연안에 많이 분포하고 있는 어선에 적용가능한 효율적이고 배출가스량이 감소가능한 새로운 추진시스템의 도입이 절실함을 알 수 있다.

또한, 어선에 지급되고 있는 어업용 면세유 제도는 환태평양 경제 동반자 협정(TPP, Trans-Pacific Strategic Economic Partnership) 체결에 따라 폐지 논의가 진행되고 있으며(Kim, 2014), 이러한 어선으로부터 배출되는 배출가스 감축 및 면세유 보조 금지에 대비하여 고효율 고연비의 추진시스템을 개발하여 도입하는 것이 상당히 시급하다.

따라서 본 연구에서는 국내 연안어선에 적용가능한 전기복합 추진시스템을 제안하고, 전기복합 추진시스템이 적용

가능한 대상선박을 선정하였다. 선정된 기존 대상어선에 탑재된 추진시스템과 비교하여 개발된 전기복합 추진시스템을 적용할 경우 발생할 수 있는 예상 연료소모량을 비교하기 위한 시뮬레이션 시스템을 Matlab/Simulink를 이용하여 구성하였으며, 그 결과를 이용하여 기존의 기계식 추진시스템과 개발 중인 전기복합 추진시스템을 비교하고 그 결과를 분석하였다.

2. 전기복합 추진시스템의 구성

2.1 선박의 추진시스템 개요

선박의 추진시스템은 Fig. 1과 같이 총 3가지 추진방식으로 구분하는 것이 가능하다(Kim and Jeon, 2022; Jeon et al., 2022). Fig. 1의 (a)와 같이 기존의 전통적인 방식으로 엔진을 선박에 탑재하여 추진 축계와 프로펠러에 연결하는 기계식 추진시스템과 (b)와 같은 추진전동기의 동력을 이용하여 프로펠러를 회전하고 선박을 추진하는 전기추진시스템, 마지막으로 (c)에서 처럼 엔진을 사용하는 기계식 추진시스템과 추진전동기를 사용하는 전기추진시스템을 동시에 적용하는 전기복합 추진시스템이 있다.

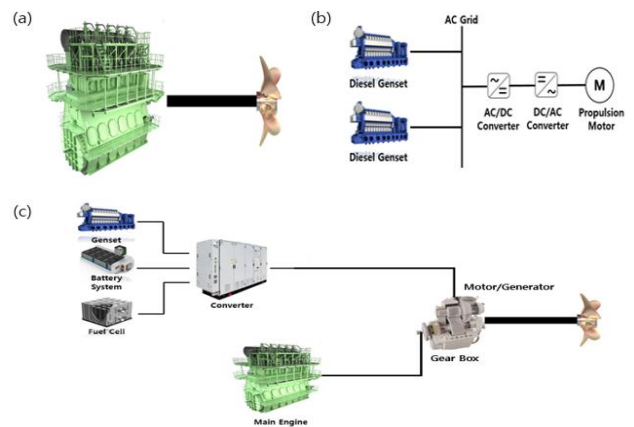


Fig. 1. Concept of Propulsion system for ships.

2.2 전기복합 추진시스템의 구성

전기복합 추진시스템은 앞서 언급한 바와 같이 기계식 추진시스템과 전기추진시스템을 동시에 적용한 추진시스템을 말한다(Jeon and Kim, 2019). 전기복합 추진시스템은 배출가스 규제가 적용되는 항내에서의 입출항과 저부하 사용 등의 조건에서는 배터리에 충전된 전력을 이용하여 추진전동기를 구동함으로써 배출가스량을 저감할 수 있고, 중부하 시에는 엔진의 가장 효율적인 범위인 70~80% 부하에서 운전하면서 PTO(Power Take Out) 기능을 통해 배터리에 충전함으로써 엔진의 효율을 향상시키는 것이 가능하다. 마지막으로 황천 항

하나 더 높은 출력을 요구하는 경우가 발생할 때 부스트 모드를 통해 엔진과 추진전동기의 출력을 동시에 사용할 수 있는 여러가지 모드로 운전하는 것이 가능하다(Kim et al., 2017; Jeon et al., 2018). Fig. 2는 본 연구에서 진행한 전기복합 시스템의 기본 개념이며, 기존 엔진을 사용하는 기계식 추진시스템과 배터리를 발전원으로 하는 추진전동기가 적용된 전기추진시스템을 동시에 적용하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

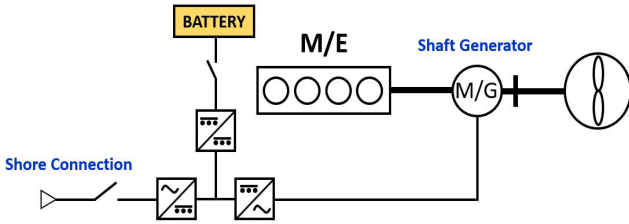


Fig. 2. Concept of Hybrid propulsion system.

3. 시뮬레이션 시스템 구성

기존 어선에 설치된 기계식 추진시스템을 대체하여 전기복합 추진시스템을 적용하는 경우 대상 어선의 로드 프로파일 특성에 맞는 배터리와 추진전동기의 용량을 설계하는 것이 중요하며, 부하 시나리오에 따라 요구되는 엔진과 추진전동기의 출력 및 연료소모량과 배출가스량의 계산이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 시간의 변화에 따라 지속적으로 변화하는 선박 부하를 적용하는 경우 엔진과 추진전동기의 연료소모량을 Fig. 3에 제시된 시뮬레이션 모델링을 통해 검증하였으며, 엔진 제조사에서 제공하는 데이터를 바탕으로 연료소모량 및 그에 따른 이산화탄소 배출량이 계산가능한 시뮬레이션 시스템을 구성하였다.

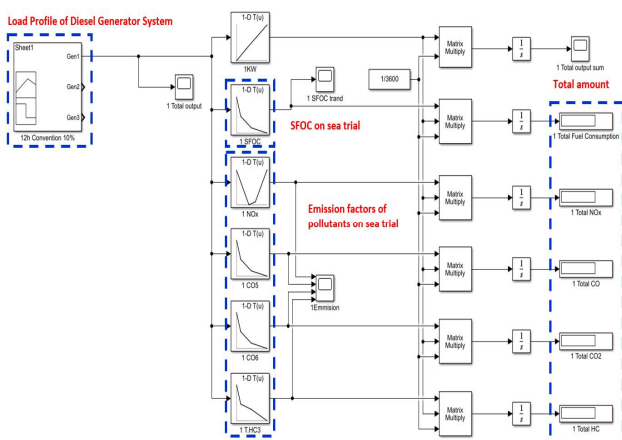


Fig. 3. Simulation configuration of hybrid propulsion system.

엔진과 추진전동기의 출력량의 경우 식(1)과 같이 각각 매 초당 입력되는 로드 프로파일에 따른 부하 시나리오에 대한 퍼센트[%] 출력 대비 실 엔진 출력[kW]을 나타내는 록업테이블을 이용하고 이를 적분하여 총 출력량을 계산한다. 이를 통해 엔진의 최대출력 및 추진전동기에서 요구되는 배터리 용량과 엔진과 모터의 통합사용을 통한 최대출력을 산정할 수 있다.

$$Total\ output\ [kWh] = \int_0^t \left(\frac{1}{3600} Output[\%_{t_n}] * \frac{Output[kW]}{Output[\%]} \right) \quad (1)$$

엔진의 연료소모량의 경우 식(2)와 같이 매 초당 입력되는 로드프로파일에 따른 부하 시나리오에 대한 퍼센트[%] 출력 대비 SFOC(Specific Fuel Oil Consumption [g/kWh])를 록업테이블로 환산하여 시간에 따라 적분한 값을 총 연료소모량으로 계산할 수 있다.

$$Total\ fuel\ oil\ consumption\ [g] = \int_0^t \left(\frac{1}{3600} Output[\%_{t_n}] * \frac{SFOC[g/kWh]}{Output[\%]} \right) \quad (2)$$

4. 시뮬레이션 결과분석

3장에서 연료소모량을 예상하기 위해 구성한 시뮬레이션 모델링을 활용하여 기존 기계식 추진시스템이 탑재된 어선과 전기복합 추진시스템을 적용한 어선에 동일한 로드 프로파일을 적용한 경우 발생하는 연료소모량 결과를 도출하였다. 시뮬레이션을 위해 적용한 로드 프로파일은 실제 운항 중인 총톤수 9.77톤 어선에서 실 측정된 데이터를 기반으로 적용하였으며, 대상어선의 운항 계획에 따른 변화, 조업 중 날씨 및 조업 어종 등 다양한 환경에 따라 로드 프로파일은 변경될 수 있지만 실제 측정 수치를 기반으로 최대한 대상어선의 로드 프로파일이 정확하게 적용되어 시뮬레이션 결과의 정확성이 높아질 수 있도록 하였다.

기존 어선에 탑재된 기계식 추진시스템과 새롭게 적용하기 위한 전기복합 추진시스템 간 연료소모량 시뮬레이션 결과는 기존 엔진을 적용한 기계식 추진시스템과 전기복합 추진시스템의 배터리시스템을 육상 충전을 하지 않은 경우, 마지막으로 육상에서 배터리시스템을 완전충전하여 출항하는 총 3가지 경우로 구분하였으며, 각각의 결과를 확인하였다.

전기복합 추진시스템의 구성요소별 기본 사양은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Basic configuration of the target fishing vessel

No	Content	Description
1	Gross tonnage	9.77[ton]
2	Engine capacity	463[kW] * 1 set
3	Engine rpm	1800[rpm]
4	Motor capacity	105[kW]
5	Battery capacity	105[kWh]
6	Gear ratio	1/3.5

4.1 모드 1 : 기존 기계식 추진시스템 시뮬레이션

기존 어선의 기계식 추진시스템에서는 Fig. 4와 같이 출항시점부터 조업지 1까지 이동하는 구간, 조업지 1에서 조업을 하는 구간, 조업지 1에서 조업지 2까지 이동하는 구간, 조업지 2에서 조업 하는 구간, 조업지 2에서 입항하는 구간, 입항으로 총 7가지의 구간으로 구분할 수 있으며, 시뮬레이션 시스템을 통해 도출된 엔진의 총 연료소모량은 780.4kg으로 출력됨을 확인할 수 있었다.

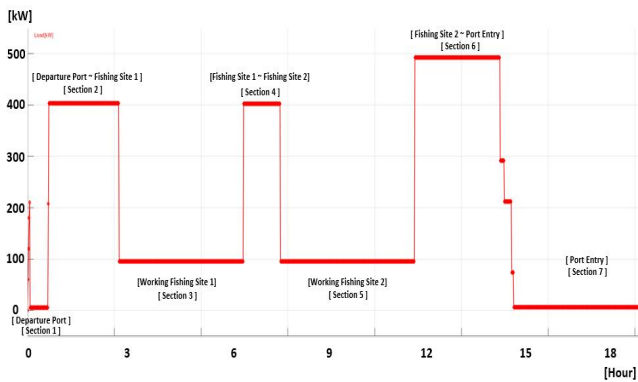


Fig. 4. Simulation result of existing propulsion system.

4.2 모드 2 : 전기복합 추진시스템 시뮬레이션(배터리 충전 없음)

기존 엔진을 적용한 기계식 추진시스템과 전기복합 추진시스템에 설치된 배터리에 육상 충전을 하지 않고 출항하는 경우에서의 운전 구간은 앞선 4.1에서와 같이 총 7개의 구간으로 구분할 수 있다. 이와같은 경우는 초기 출항에서 조업지까지는 동일하게 엔진 출력을 사용하며, 조업지 1과 조업지 2에서의 조업구간 중 낮은 엔진 출력 상태에서 배터리를 충전하게 되고, 충전된 배터리를 조업기간 중과 조업지에서 조업지로 이동할 때 사용하는 부스트 모드로 사용하도록 운전모드를 설정하였다. 그 결과 배터리를 육상에서 충전하지 않고 출항하는 경우의 동일 로드 프로파일 적용 시 연료소모량은 677.6kg으로 기존의 엔진을 적용한 기계식 추진시스

템과 비교하였을 때 약 13% 정도 연료소모량이 저감됨을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 조업구간별 운전 모드를 나타낸다.

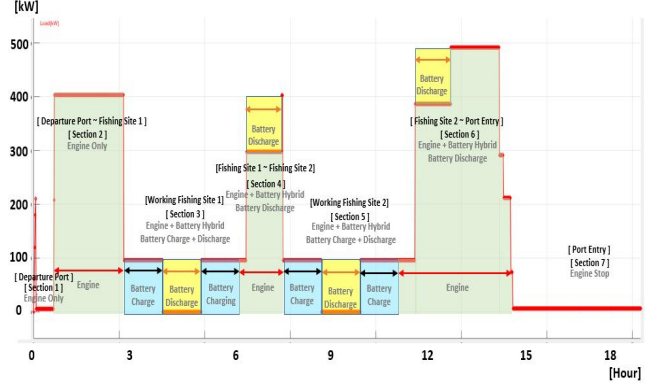


Fig. 5. Simulation result of hybrid propulsion system (without battery charging in shore).

4.3 모드 3 : 전기복합 추진시스템 시뮬레이션(육상 배터리 충전)

마지막으로 기존 엔진을 적용한 기계식 추진시스템과 전기복합 추진시스템에 설치된 배터리에 육상 충전을 하고 출항하는 경우에는 초기 출항지점에서 조업지 1까지 이동하는 구간 중 엔진과 추진전동기의 출력을 동시에 사용하고 나머지 구간에서는 앞선 경우와 동일한 조건으로 로드 프로파일을 적용하였다. 그 결과 배터리를 육상에서 충전하고 출항하는 경우 연료소모량은 654.4kg으로 기존의 엔진을 적용한 기계식 추진시스템과 비교하였을 때 약 16% 정도 연료소모량이 저감됨을 확인할 수 있었으며, 육상 충전을 하지 않는 경우와 비교한 결과 약 23kg 정도의 연료소모량이 감소됨을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 조업 구간별 운전 모드를 나타낸다.

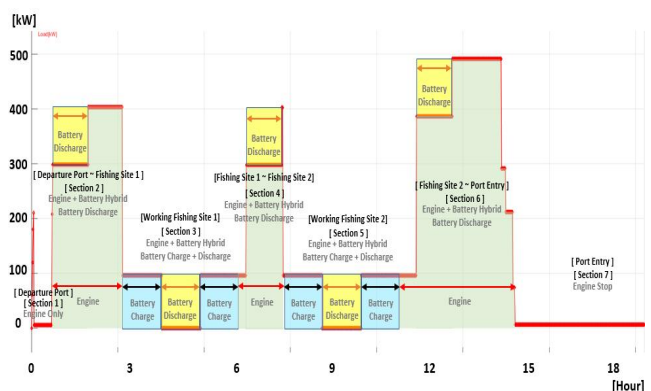


Fig. 6. Simulation result of hybrid propulsion system (with battery charging in shore).

각 운전상황에 따른 연료소모량을 정리하면 다음 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Basic configuration of the target fishing vessel

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Total Fuel consumption	780.4[kg]	677.6[kg]	654.4[kg]
Variation	-	▼102.8[kg] (13%)	▼126[kg] (16%)

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 국내외적인 환경 규정 강화 및 먼세유 보조금 금지에 대비하여 효율적이고 환경성이 개선된 어선의 추진시스템을 제안하기 위한 연구를 진행하였다. 기존 어선의 엔진을 사용하는 기계식 추진시스템과 본 연구에서 제안하는 전기복합 추진시스템의 기본적인 구성에 대해서 소개하고, 동일한 로드 프로파일을 적용하는 경우 두 시스템에서 출력되는 연료소모량 결과를 분석하기 위한 시뮬레이션 시스템을 구성하였다. 시뮬레이션 시스템은 엔진과 추진전 동기의 특성을 반영하고 엔진의 SFOC 선도를 이용하여 로드 프로파일의 변화에 따른 총 연료소모량 결과를 출력할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 총 연료소모량을 통해 이산화탄소배출량의 계산과 연료비의 산정 연료저장탱크의 용적을 산정할 수 있으며 이는 어선의 설계에 있어 매우 중요한 요소가 된다.

시뮬레이션을 통해 도출된 결과에 따르면 동일한 로드 프로파일 적용 시 기존의 기계식 추진시스템은 780.4 kg의 연료를 소모한 결과를 확인하였고, 전기복합 추진시스템의 경우에는 탑재된 배터리시스템의 육상 충전을 하지 않은 경우와 육상에서 완충을 하고 출항한 경우에 대한 결과를 도출하였으며, 그 결과 각각 677.6 kg, 654.4 kg의 총 연료소모량 결과를 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있었다. 이는 비록 시뮬레이션을 통해 도출된 결과이지만 기존의 기계식 추진시스템 대비 전기복합 추진시스템을 적용하는 경우 약 13%, 16%의 연료소모량이 감소될 수 있는 것을 보여주는 유의미한 결과를 확인할 수 있었다.

다만 본 연구에서는 실제 대상어선에서 측정한 로드 프로파일을 적용하였으나 개발 중인 전기복합 추진시스템의 실제 어선 무게, 저항, 어창공간, 기관구역, 출력 특성에 따라 선박의 배수량이 달라지므로 시뮬레이션 결과를 통해 도출된 총 연료소모량과는 차이가 발생할 수 있으므로 실제 실증어선의 건조 후 해상실증 과정에서 추가적인 비교분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 에너지 및 배출가스 절감 측

면에서 객관적인 검증이 어려운 측면이 있으므로 추후 이러한 부분에 대한 연구를 진행하여 검증을 진행할 예정이다.

사 사

이 논문은 2019학년도 한국해양대학교 학술연구지원사업 신진교수정착연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] IMO(2018), IMO's work to cut GHG emissions from ships, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx> (accessed 2022.06.05.)
- [2] Jeon, H. M., J. J. Hur, J. Y. Chun, and J. S. Kim(2022), A study on the development of job training curriculum for operation of electric propulsion ships, *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, Vol. 6, No. 1.
- [3] Jeon, H. M. and J. S. Kim(2019), Large scale electric propulsion systems in ships using an active front end rectifier, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 7, No. 6.
- [4] Jeon, H. M., S. W. Kim, and J. S. Kim(2018), A study on application of electric propulsion system using AFE rectifier for small coastal vessels, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 24, No. 3, pp. 373-380.
- [5] Korea Development Institute(KDI)(2021), Carbon neutrality is an economic survival strategy, <https://bit.ly/3YMXJLd> (accessed 2022.06.17.)
- [6] Korea Environment Corporation(KEC)(2020), A study on the norms of the new climate system based on the analysis of the Paris Agreement Implementation Rules, <https://www.gihoo.or.kr/portal/kr/community/> (accessed 2022.08.14.)
- [7] Korean Law Information Center(KLIC)(2013), Basic Law on Low Carbon Green Growth, <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=142380#0000> (accessed 2022.07.10.)
- [8] Kim, S. W. and H. M. Jeon(2022), Comparative analysis on AC and DC distribution systems for electric propulsion ship, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 10, No. 5.
- [9] Kim, J. S., H. M. Jeon, and D. K. Kim(2017), A study on characteristics of each operation mode for hybrid electric propulsion ship by operation circumstances, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 41, No. 3. pp. 245-250.
- [10] Ministry of Oceans and Fisheries(MOF)(2021), Maritime and

Fisheries statistical system, <https://www.mof.go.kr/statPortal/main/portalMain.do> (accessed 2022.05.19.)

- [11] Ministry of Environment(MOE)(2018), Revision of the 2030 GHG Reduction Roadmap and Confirmation of the 2018-2020 Emission Permit Allocation Plan, <http://www.me.go.kr/home/web/board/> (accessed 2022.09.10.)

Received : 2022. 10. 26.

Revised : 2022. 12. 26.

Accepted : 2022. 12. 28.