

통합 열관리 시스템의 제어를 위한 수소-전기 하이브리드 기반 고정밀 소형 선박 시뮬레이터 모델 개발

안민우¹ · 현대일² · 한재영^{3,4†}

¹국립공주대학교 기계공학과, ²국립공주대학교 미래융합공학과, ³국립공주대학교 미래자동차공학과, ⁴국립공주대학교 그린카기술연구소

Development of a High-precision Small Ship Simulator Model Based on Hydrogen-electric Hybrid to Control an Integrated Thermal Management System

MINWOO AN¹, DAEIL HYUN², JAEYOUNG HAN^{3,4†}

¹Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

²Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

³Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

⁴Institute of Green Car Technology, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

†Corresponding author :
hjyt11@kongju.ac.kr

Received 6 March, 2024

Revised 25 March, 2024

Accepted 23 April, 2024

Abstract >> Efforts are being made to replace ship diesel engines with electric propulsion motors in response to emission regulations. In particular, in the case of short-range small ships, research is being conducted to replace polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) with power sources. However, PEMFC has problems such as slow dynamic response characteristics and reduced durability at high temperatures. To solve this problem, a high-precision ship model was developed with power distribution and thermal management strategies applied, and through this, the required power, heat, and power characteristics of the propulsion system according to the ship's speed profile were analyzed.

Key words : Fuel cell(연료전지), Battery(배터리), Power distribute strategy(전력 분배 전략), Thermal management system(통합 열관리 시스템), Hybrid(하이브리드)

1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 연안 지역의 오염을 줄이기 위해 선박

배기가스 배출 규제를 강화하고 있으며 이로 인해 친환경 동력원 개발 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 국내에서는 소형 연안 어선이 전체 선박 중 40%를 차지하고 있으며 이는 대부분 해안 지역에서 대량의

배기가스 배출로 연결되어 지역적인 환경오염의 주요 원인으로 지목되고 있다²⁾. 특히 소형 선박들은 주로 짧은 거리를 항해하기 때문에 해안 수역이나 내륙 수로에서 운항되는 특성이 있어 환경 친화적인 대체 동력 개발에 대한 수요가 높아지고 있다^{3,4)}. 많은 대체 동력원 중 고분자 전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 높은 에너지 효율과 밀도 그리고 저소음 특성 등을 제공하여 소형 선박에 적합한 대체 에너지 솔루션으로 주목받고 있다⁵⁾. 하지만 연료전지 단독 운전만으로는 급격한 해상 환경 변화에 따른 운전 부하를 신속하게 충족시키기 어려워 보통 응답성이 상대적으로 좋은 배터리와 통합을 통한 하이브리드 시스템이 사용된다^{6,8)}. 하이브리드 시스템은 다양한 전력원을 결합함으로써 서로의 단점을 상호 보완하고 안정적인 전력을 제공할 수 있다. 특히 소형 선박에서는 이러한 하이브리드 시스템이 에너지를 효율적으로 활용하는 데 큰 장점을 가지고 있다. 하지만 하이브리드 시스템은 각각의 부품에서 상당한 양의 폐열을 발생시키며 이로 인해 전체 시스템의 에너지 효율을 감소시킨다. 따라서 각 부품의 내구성 저하를 방지하고 선박의 성능 및 효율성을 향상시키기 위해서는 발생한 열을 효과적으로 방열해야 한다⁹⁾.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 수년간 해양 분야에서는 하이브리드 연료전지 추진 시스템의 동력원 효율을 높이기 위한 다양한 방법들이 제안되었다.

Bassam 등¹⁰⁾은 세계 최초의 연료전지 여객선 FCS Alsterwasser를 고려한 하이브리드 추진 시스템을 모델링하여 에너지 소모율, 수소 소비량, 총 운전비용 및 스트레스의 4가지 관점에서 에너지 관리 전략의 성능을 분석하였다. Yang¹¹⁾은 연료전지를 동력원으로 사용하는 선박 추진 시스템을 구성하였다. 이를 통해 부하 변화에 따른 하이브리드 구조의 안정성을 확인하였다. Cavo 등¹²⁾은 이탈리아 최초의 무공해 선박 ZEUS의 PEMFC 모듈 냉각 시스템과 금속 수소화물의 결합에 관련된 주요 구성 요소를 통합한 추진 시스템의 열관리 시스템을 모델링하였고 PEMFC와 수소 저장용 금속 수소화물 사이의 열 통합을 분

석하였다. Xing 등¹³⁾은 연료전지/배터리 하이브리드 시스템용 PEMFC 스택의 성능을 분석하기 위한 통합 열관리 시스템을 개발하여 냉각 시스템 성능에 대한 냉각수의 유량 및 스택 입구 냉각수 온도의 변화가 미치는 영향을 분석하였다.

최근 연구 동향에 따르면 선박에 연료전지/배터리 하이브리드 시스템을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 이러한 시스템은 효율적인 전력 공급과 안정적인 성능을 제공할 수 있다는 잠재력을 강조하고 있다. 그러나 전력 변환 시스템과 열관리 시스템 등이 통합된 선박의 전체 시스템에 대한 개발 및 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 소형 연료전지 선박의 통합 열관리를 분석하기 위해 고정밀 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이 모델은 선박의 요소 부품, 전력 관리 시스템, 열관리 시스템, 다이내믹 모델을 포함하며 Matlab/Simulink[®] (MathWorks, Natick, MA, USA)와 Matlab/Simscape[™] (MathWorks) 소프트웨어를 활용하여 구축되었다. 요소 부품 모델은 수학적 기반으로 설계되었으며 열관리 유로의 유동적 변경이 가능하고 PI 제어를 도입하여 시스템을 효과적으로 제어한다. 이 개발된 모델은 운항 프로파일에 따른 동적 성능을 분석하며 부하 프로파일을 고려한다.

2. 선박 시스템 모델링

소형선박용 연료전지/배터리 하이브리드 시스템은 25 kW 출력의 연료전지, 9.6 kWh 용량의 고전압 배터리, direct current (DC)-DC 컨버터, 인버터, 20 kW 출력의 구동 모터, 프로펠러, 셸 앤 튜브 열교환기, 펌프 및 유로 제어 밸브 등으로 구성된다. 이는 연료전지와 배터리를 전력원으로 활용하는 선박의 기본 구조로 생성된 DC 전력은 컨버터를 통해 승압된 후 인버터를 이용하여 모터를 구동하여 선박을 추진한다. 또한 전력 생산 과정에서 발생하는 열은 하나의 유로로 구성된 열관리 시스템을 통해 해수로 방출된다. Fig. 1은 본 연구에서 설계한 전체 선박 시스템의 개략도를 나타낸다.

2.1 연료전지 모델

25 kW급 연료전지를 설계하기 위해 PEMFC를 선정하였으며 전기 화학 반응 모델 식을 사용하여 스택 모델을 개발하였다.

연료전지의 셀 전압은 일반적으로 Nernst 방정식을 사용하며 활성화 손실(V_{act}), 저항 손실(V_{ohm}) 그리고 농도 손실(V_{con}) 고려하여 계산하였다.

$$P_{fc} = V_{cell} \times I_{fc} \times N_{cell} \quad (1)$$

$$V_{cell} = E_{nernst} - V_{ohm} - V_{act} - V_{con} \quad (2)$$

스택의 온도는 스택으로 유입되는 비가역적 발열 ($\Delta \dot{H}_{fc}$), 자연대류(\dot{Q}_{nat}) 그리고 냉각수에 의한 냉각 열(\dot{Q}_{cool})을 이용하여 계산하였다.

$$mC_{fc} \frac{dT_{fc}}{dt} = \Delta \dot{H}_{fc} - \dot{Q}_{nat} - \dot{Q}_{cool} \quad (3)$$

본 연구에서 모델링한 연료전지 스택의 성능을 검증하기 위해 같은 용량의 PEMFC 타입의 스택 실험을 통해 얻어진 성능 곡선과 비교하여 검증하였으며 오차 막대 값 2% 내에서 일치함을 확인하였다¹⁴⁾.

연료전지의 사양은 Table 1에서 제시하였으며 그

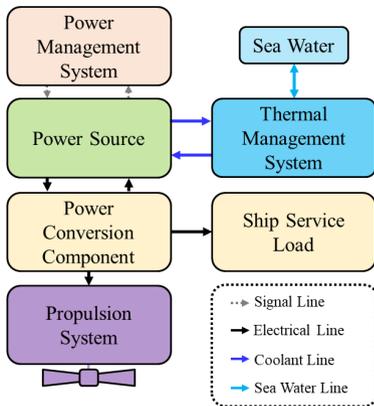


Fig. 1. Schematic of fuel cell - battery hybrid ship and sub-systems

결과는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 또한 연료전지의 허용 출력 상승률은 비출력을 고려하여 35 W/s로 설정하여 그 이상의 출력이 필요할 경우 배터리가 출력을 분담하도록 하였다.

2.2 배터리 시스템

배터리는 9.6 kWh의 전기 에너지를 저장하도록 설계하였으며 방전률에 따라 state of charge (SOC)가 감소한다. 배터리는 SOC에 따라 전력 분배 모델로 제어되어 선박의 주된 동력원으로 사용된다. 배터리의 SOC가 높을 경우에는 요구 전력에 맞추기 위해 배터리 전력을 우선 소모한다. SOC가 낮은 경우에는 연료전지의 출력 전력을 활용하며 연료전지의 반응이 다소 느려 전력 분배 모델에서 스택의 출력을 제한해도 여분의 전력이 더 생성되어 배터리를 충전한다¹⁵⁾. 배터리의 셀, 팩 용량 및 정격 전압은 Table 2에 나타내었다.

배터리의 전압은 개방 회로 전압(V_{ocv})과 내부 저항(R_{bat})을 사용하여 표현되며 식 (4)와 같다.

Table 1. Specifications of a PEMFC

Parameters	Value	Unit
Number of cell	146	EA
Cell area	450	m ²
Membrane thickness	125	um

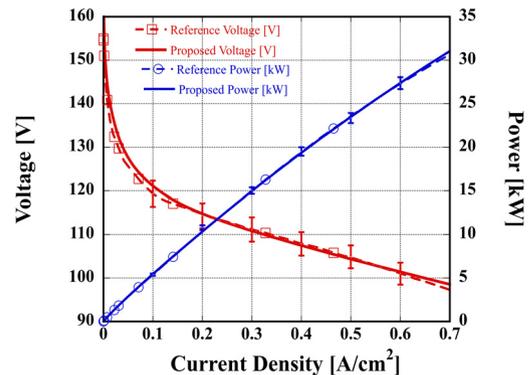


Fig. 2. PEMFC I-V curve verification

$$V_{bat} = V_{ocv} - R_{bat} \times I_{bat} \quad (4)$$

배터리의 SOC는 Peukert 상수(k_1, k_2) 및 배터리의 용량(Ah_{bat})으로 표현되며 식 (5)와 같다.

$$SOC = SOC_{ini} - \frac{\int I_{bat}^{k_1} dt}{Ah_{bat} \times k_2} \quad (5)$$

배터리의 온도는 발열량(\dot{Q}) 및 비열로 표현되며 식 (6)과 같다.

$$T_{bat} = \int \frac{\dot{Q}_{hg} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{cond}}{\dot{m} C_{pbat}} \quad (6)$$

2.3 구동 모터

선체를 구동하기 위해 20 kW의 출력을 갖는 영구 자석 동기 모터(permanent magnet synchronous motor, PMSM)를 선정하여 설계하였다. 선박의 구동 메커니즘은 모터가 생성하는 토크와 회전력을 활용하여 프로펠러축을 통해 선박의 저항을 이기고 전진시킨다. 모터는 연료전지와 배터리에서 제공되는 전력을 소비하여 동작하며 선박의 운항 프로파일에 맞게 PI 제어를 활용하여 모터의 속도를 조절한다. Fig. 3은 모터의 정격 전압인 380 V를 인가하였을 때 최대 출력과 350 N·M의 최대 토크를 나타내는 모터의 성능 곡선이다.

Table 2. Specifications of a battery

Parameters	Value	Unit
Cell capacity	11.1	Ah
Pack capacity	3.2	kWh
Number of packs	3	ea
Nominal voltage	290	V
Peukert (k_1, k_2)	1.018, 1.0091	-

2.4 열교환기

셀 앤 튜브 열교환기와 용골 냉각기는 선박에서 주로 사용되는 열 교환을 담당하는 열교환기 중 하나로 해수와의 열 교환을 통해 냉각수의 온도를 조절하여 선박에 적용된 연료전지 스택의 온도를 제어하는 역할을 담당한다. 본 연구에서는 열교환기의 출구 온도를 예측하기 위해 effectiveness-number of transfer unit (ϵ -NTU)을 방법을 적용하여 셀 앤 튜브 열교환기를 설계하였다. 그리고 셀 앤 튜브 형상과 용골 냉각기 형상을 기반으로 ϵ -NTU 방법을 활용하여 해수의 온도와 선박의 속도에 따라 해수 측 유량과 온도를 결정하였다^{16,17}. 본 연구에서 적용된 열교환기의 사양은 Tables 3, 4에 나타내었다.

열교환기의 열교환량은 최대로 방열할 수 있는 최대 방열량에 열전달 유효도를 고려하여 도출할 수 있다. 열교환기에서 방출하는 방열량은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q} = \epsilon \times Q_{max} \quad (7)$$

여기서 최대 열전달률은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{max} = \frac{C_{min}}{(T_{coolant_{hot}} - T_{coolant_{cool}})} \quad (8)$$

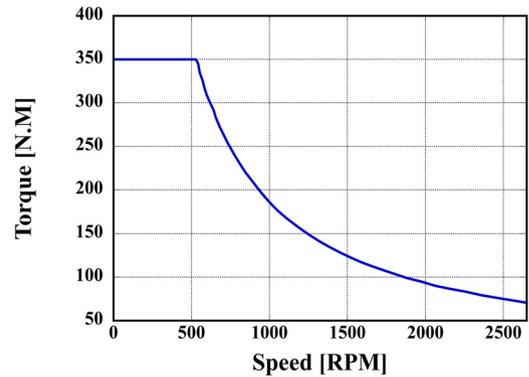


Fig. 3. Maximum torque of PMSM Motor with various motor speed

열전달 유효도는 NTU의 향으로 이루어지며 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - C \times \exp[-NTU(1-c)]} \quad (9)$$

여기서 전달 단위 수는 다음과 같이 계산된다.

$$NTU = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{shell}A_{shell}}\right) + R_{th} + \left(\frac{1}{h_{tube}A_{tube}}\right)} \quad (10)$$

2.5 선박 동역학 모델

선박 추진 시스템은 모터에서 전달된 토크와 회전력을 사용하여 프로펠러를 통해 선박을 추진하게 된다. 선박의 추진에 제한을 주는 선박저항은 크게 마찰저항과 압력저항으로 나뉘며 본 연구에서는 압력저항과 마찰저항을 고려하여 모델링하였다. 압력저

항은 선박이 물에 떠 있는 동안 선박의 선박체 부분과 물 사이에서 발생하는 저항이다. 마찰저항은 선박이 수면과 직접 접촉하여 발생하는 저항으로 주로 선박의 표면과 수면 간의 마찰로 인해 발생하며 이들은 선박의 운동 형태와 속도에 크게 영향을 미친다^{18,19)}.

선박의 마찰저항은 선박의 형상과 속도를 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$R_{ship} = \frac{1}{2} \times C \times \rho_{water} \times V_{ship}^2 \times S \quad (11)$$

여기서 V_{ship} 는 선박의 속도, S 는 선체의 침수 표면적이다.

C 는 선박의 마찰계수이며 다음과 같이 계산된다.

$$C = \frac{0.075}{\left(\log\left(\frac{V_{ship} \times L_{ship}}{v}\right) - 2\right)^2} \quad (12)$$

여기서 v 는 물의 동점성계수이며 $1.188 \times 10^{-6} m^2/s$ 이다.

선박의 압력저항은 선박의 침수 표면적과 맞닿는 해수의 힘으로 계산되며 수평 방향의 전체 힘은 다음과 같이 계산된다. 여기서 β 는 트림각이다.

$$R_p = P \Delta s (\cos\beta + \sin\beta) - W \Delta s \tan\beta \quad (13)$$

ds' 는 선박의 정면 방향의 해수의 힘이며 다음과 같이 계산된다.

$$Pds' = Pds \times \sin\beta \quad (14)$$

W 는 수직 방향의 힘이며 다음과 같이 계산된다.

$$R_v = P \Delta \sin\beta + P \Delta v \cos\beta = W(-B) \quad (15)$$

Table 3. Specifications of shell & tube heat exchanger

Parameters	Value	Unit
Pitch size	0.03	m
Tube outlet diameter	0.02	m
Tube inlet diameter	0.005	m
Baffle spacing	0.2	m
Shell internal diameter	0.4	m
Number of tubes	120	ea
Number of passes	2	ea
Thermal conductivity	237	W/m.K

Table 4. Specifications of keel cooler

Parameters	Value	Unit
Tube outlet diameter	0.04	m
Tube inlet diameter	0.03	m
Tube length	3	m
Number of tubes	10	m
Thermal conductivity	398	W/m.K

선박의 압력저항과 마찰저항은 Fig. 4의 개략도를 통해 확인할 수 있다. 선박의 구동에 필요한 프로펠러의 크기, 중량, 길이는 Table 5에 나타내었다.

2.6 통합 모델 개발

개발된 요소 부품이 연계되어 통합되기 위해서는 전력 분배 시스템과 열관리 시스템이 필요하다. 전력 관리 시스템의 경우 모터에 선박 운항 프로파일을 입력하면 토크 값과 요구 전력이 출력된다. 제어 전략 모델을 통해 요구 전력을 연료전지와 배터리로 분배한다. 전력원을 통해 나오는 DC 전력은 DC-DC 컨버터를 통하여 승압되어 모터에서 소모된다.

전력 관리 시스템의 개략도는 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다.

열관리 시스템의 경우 하나의 펌프에서 순환되는 냉각수는 연료전지와 배터리에서 발생한 열을 흡수하여 셸 앤 튜브 열교환기를 통해 용골 냉각기의 냉각수로 전달된다. 용골 냉각기의 냉각수로 이동된 열은 다시 용골 냉각기를 통해 해수로 방출된다. 해수

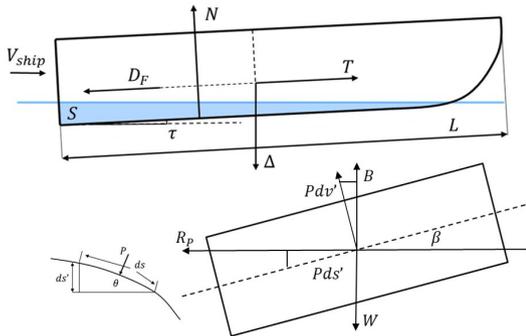


Fig. 4. Ship resistance schematics

Table 5. Setting for simulation

Parameters	Value	Unit
Ship length	20	m
Ship weight	30000	kg
Propeller diameter	0.55	m
Ambient sea temperature	25	°C

와 연료전지/배터리 측 냉각수는 부식 및 해양 생물로 인한 손상이 빈번하게 발생하여 직접적인 열 교환이 방지되고 추가적인 냉각수 라인을 통해 열 교환이 이루어진다. 펌프와 밸브의 경우 연료전지의 온도와 Fig. 6에 제시된 목표 온도 유지를 위해 PI 제어를 통해 작동된다. 관리 시스템의 개략도는 Fig. 6을 통해 확인할 수 있으며 적용된 열관리 시스템 냉각 제어 전략은 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

2.7 전력 분배 전략

본 연구에서 제안된 시스템에선 선박 프로파일이 입력되어 모터와 프로펠러가 작동되며 요구 전력을 산출한다. 산출된 요구 전력은 Table 6과 Fig. 8의 설정에 기초하여 제어 전략을 통해 분배되어 연료전지

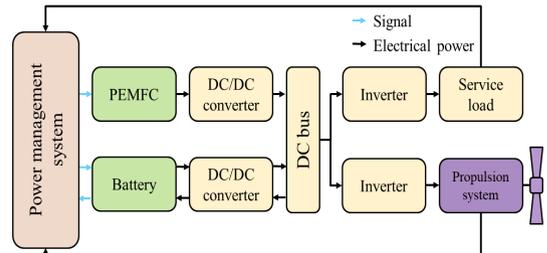


Fig. 5. Schematic of power management system model

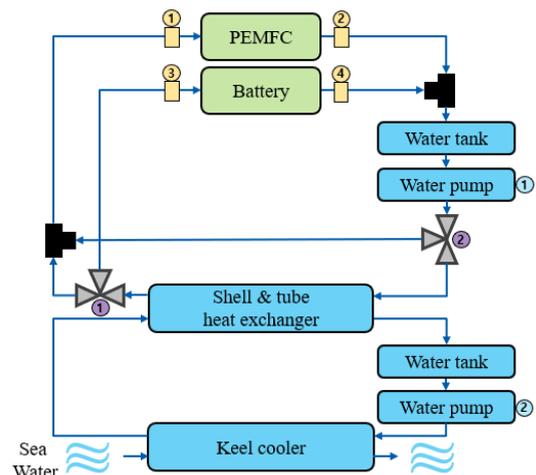


Fig. 6. Schematic of thermal management system model

와 배터리 측으로 지령 값으로 전달한다. 이때 제어 전략은 선박의 운항 프로파일에 따라 연료전지만을 활용하거나 배터리를 활용할 수 있으므로 운항 상황을 고려하여 설계되었다. 여기서 $Ship_{run}$ 은 선박의 운항 상태를 나타내며 운행 시 1, 정박 시 0이다.

P_{base} 는 전력 분배 전략의 기준 출력값을 나타낸다. SOC_{high} , SOC_{low} 는 각각 배터리의 상한 및 하한 충전 상태 기준값을 나타내며 P_l 은 시스템의 부하 전력이고 ΔSOC 는 배터리의 충전 및 방전 상태를 나타

내는 값이다. ΔSOC 가 양의 값일 경우 충전 상태이며 음의 값일 경우 방전 상태이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시뮬레이션 운전 조건

시스템의 가동에 필요한 속도 프로파일은 Fig. 9 와 같이 가정하였으며 선박의 구동에 필요한 프로펠러의 크기, 중량, 길이는 Table 5 에 나타내었다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 10 은 Fig. 9 에서 설명한 속도 프로파일을 충족하기 위해 모터를 통해 프로펠러가 회전하며 발생

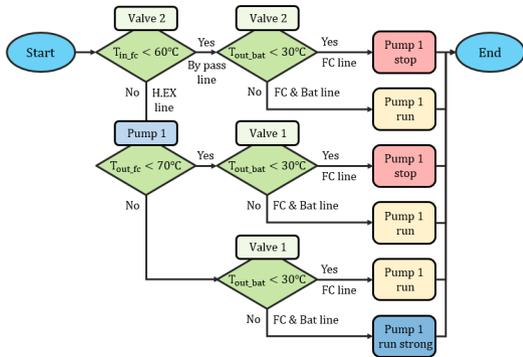


Fig. 7. Operating strategy of the thermal management system

Table 6. Power distribution strategy setting

Parameters	Value	Unit
Initial SOC	0.5	-
High SOC	0.5	-
Low SOC	0.4	-
PEMFC maximum output power	25	kW

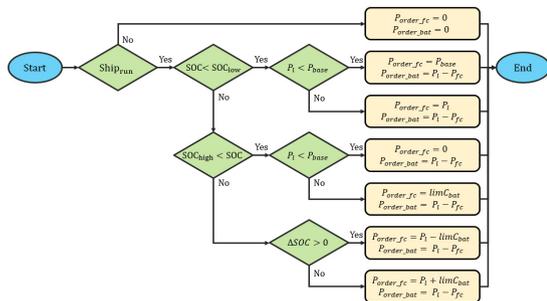


Fig. 8. Control strategies of power management system

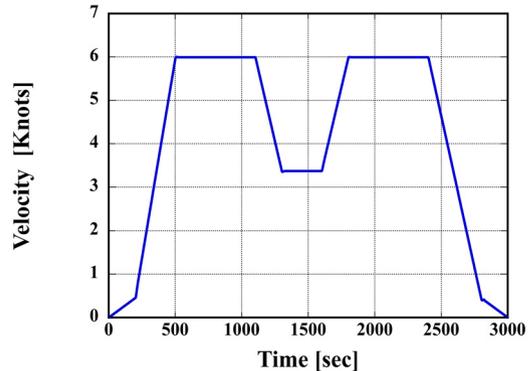


Fig. 9. Speed profile used in simulation model

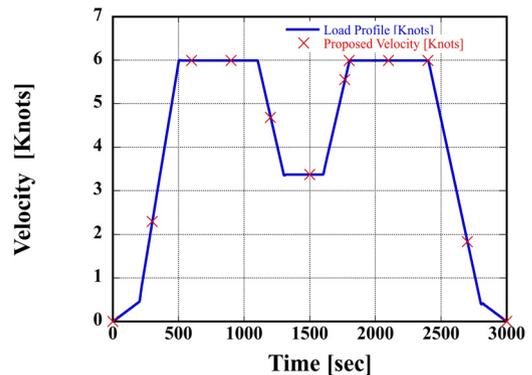


Fig. 10. Speed follow graph of the simulation model

하는 선박의 속도와 요구 전력을 나타낸다. 이때 선박 다이내믹스에 따른 모터의 요구 출력 변화를 확인하기 위하여 정상적인 저항과 최소 저항 시나리오에서의 요구 출력 차이를 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 이는 선박 다이내믹스에 의해 영향을 받는 모터 출력의 변화를 나타낸다. 모터에서 필요한 출력 및 서비스 로드 부하에 대한 전력 분배 전략에서 연료전지와 배터리의 입력값이 계산되어 연료전지/배터리의 출력 생성을 조절하는 것을 Fig. 12에서 확인할 수 있다.

Fig. 9처럼 선박이 추진되면 전력 분배 전략에 따라 연료전지와 배터리에서 부하를 분담하게 된다. 0-750초 동안에는 배터리의 SOC가 충전 하한값보다 높고 초반 연료전지의 늦은 응답 특성으로 인하여 요구 전력을 바로 생성하지 못하여 배터리에서 대부분의 출력을 부담하는 것을 확인할 수 있다. 약 750초 이후 연료전지는 서서히 출력이 증가하여 시스템의 요구 전력을 초과하는 양의 전력을 생성하여 배터리를 충전하게 된다. 약 1,200초에 다시 충전된 배터리에서 대부분의 요구 전력을 부담하게 되어 연료전지의 출력이 감소하게 된다. 약 1,800초에 다시 배터리의 SOC가 감소하면 앞선 750초와 같은 경향으로 연료전지가 요구 전력과 배터리 충전을 위한 전력을 생성한다. 마지막 운항 프로파일이 종료되면 연료전지에서 전력 생성을 중지하고 이에 따라 배터리의 충전도 종료되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 동력

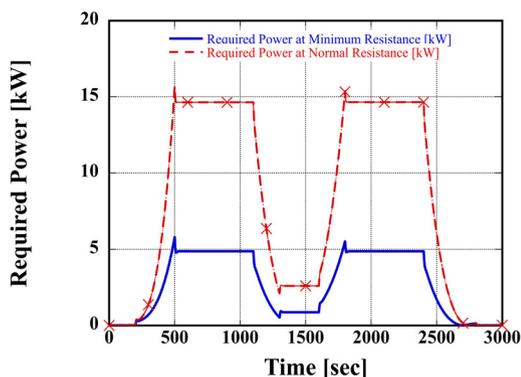


Fig. 11. Comparison of required output according to resistance

원의 전력 생성은 Fig. 8과 Table 6에서 정의된 전력 분배 전략에 의해 나타났으며 Table 6에서 설정된 배터리의 충전 상한값 및 하한값을 잘 준수하는 것을 확인하였다.

연료전지와 배터리 작동 시 열이 발생하기 시작하는데 이 열은 연료전지와 배터리 각각의 적정 온도를 유지해야 한다. 연료전지의 경우 온도가 60°C 에서 80°C 사이를 넘지 않도록 유지하는 것이 권장된다. 앞서 제안된 열관리 시스템의 바이패스 유로를 통해 발생한 열이 외부로 방출되지 않고 다시 연료전지로 유입되어 Fig. 13(a)와 같이 연료전지의 작동 온도를 안정화하는 것을 확인할 수 있다. 냉각 유로는 연료전지와 배터리가 한 유로로 구성되어 있으며 삼방 밸브의 개도율 제어를 통해 동시에 냉각이 이루어져 Fig. 13(b)와 같이 배터리 또한 온도가 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

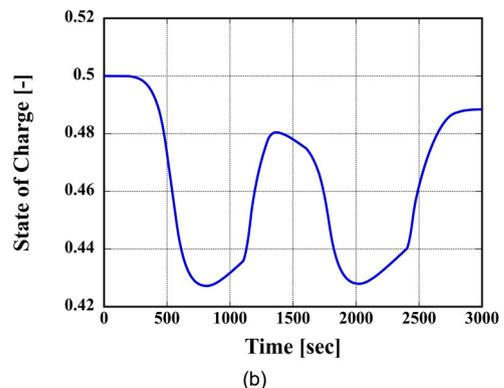
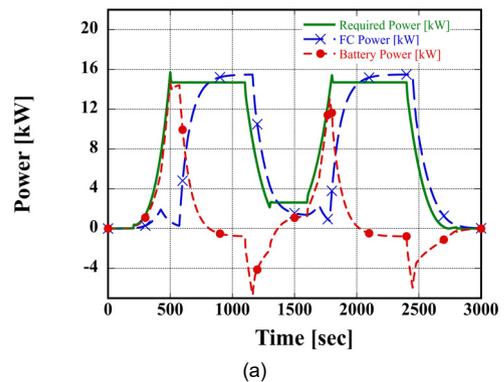


Fig. 12. (a) Responses of the load power, battery power, and fuel cell power with load profile. (b) Response of the state of charge in the battery system model

4. 결론

본 연구에서는 소형 선박에 초점을 두어 선박의 운항 프로파일에 따른 동적 특성을 확인하기 위해 연료전지와 배터리를 결합한 하이브리드 시스템 모델을 개발하고 전력 분배 제어 전략과 열관리 시스템을 결합하여 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 소형 선박 연료전지/배터리 하이브리드 시스템 모델을 개발하기 위해 요소 부품을 선정하여 실험 및 문헌을 통해 검증하였다. 각 요소 부품을 통합하여 운항 프로파일을 적용하여 시뮬레이션 모델의 동적 특성을 분석하였다.

2) 개발된 전력 분배 제어 전략에 따라 요구 전력이 연료전지와 배터리의 각 동력원에 분배되어 작동

됨을 확인하였다. 그리고 이를 통해 동력원 간 충전 및 방전을 확인하였다.

3) 연료전지와 배터리를 한 냉각 유로로 통합하여 three way-valve 제어를 통해 동력원이 작동할 때 발생하는 열을 외부로 배출하지 않고 다시 동력원에 유입하여 적정 운전 온도를 유지하였다.

후 기

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과임(2021RIS-004).

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(0014 4016).

References

1. International Maritime Organization (IMO), "Nitrogen oxides (NO_x) - regulation 13", IMO, 2016. Retrieved from [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx).
2. S. Y. Kang, W. Ryu, C. W. Bae, and J. K. Kim, "Analysis and the standardization plan of the terms used by seafarers on small vessel", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 25, No. 7, 2019, pp. 867-873, doi: <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.7.867>.
3. M. N. Boukoberine, Z. Zhou, and M. Benbouzid, "A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: solutions, strategies, and prospects", Applied Energy, Vol. 255, 2019, pp. 113823, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113823>.
4. S. Cho, M. Kim, Y. Son, and T. Yang, "Research trend and analysis of altitude and endurance for fuel cell unmanned aerial vehicles", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 25, No. 4, 2014, pp. 393-404, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.4.393>.
5. M. Kim and C. Oh, "How long will the golden age of the diesel engine last for propulsion and power generation in ships", Journal of the Korean Marine Engineering Society's academic conference, 2006, pp. 273-274. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00803449>.
6. B. Lee, S. Kwon, P. Park, and K. Kim, "Active power manage-

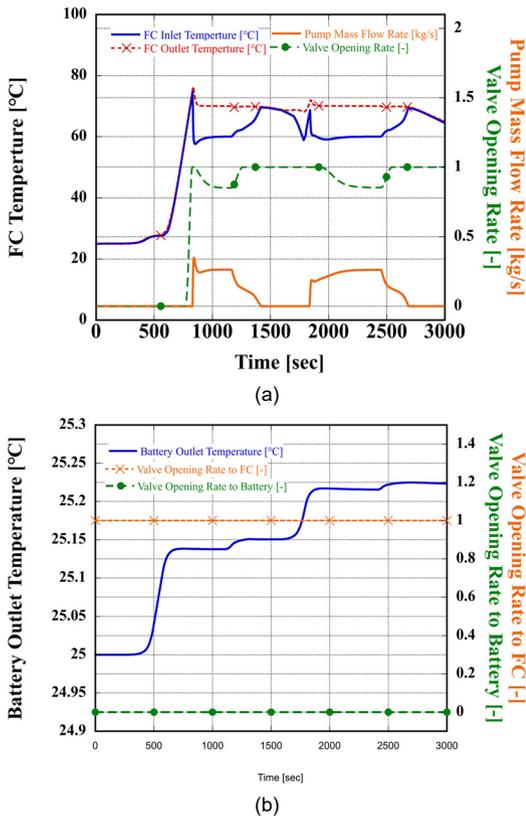


Fig. 13. (a) Thermal response of the fuel cell stack. (b) Thermal response of the battery

- ment system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 50, No. 4, 2014, pp. 3167-3177, doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130468>.
7. B. G. Gang, H. Kim, and S. Kwon, “Ground simulation of a hybrid power strategy using fuel cells and solar cells for high-endurance unmanned aerial vehicles”, *Energy*, Vol. 141, 2017, pp. 1547-1554, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.104>.
 8. A. Payman, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar, “Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 6, 2008, pp. 1637-1644, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.012>.
 9. S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, “Comparative study of different fuel cell technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 981-989, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>.
 10. A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, and P. A. Wilson, “Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 1, 2017, pp. 623-635, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.209>.
 11. H. K. Yang, “A study on the fuel cell based small ship propulsion system [Doctoral dissertation]”, Busan: Korea Maritime & Ocean University; 2016.
 12. M. Cavo, M. Rivarolo, L. Gini, and L. Magistri, “An advanced control method for fuel cells - metal hydrides thermal management on the first Italian hydrogen propulsion ship”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 54, 2023, pp. 20923-20934, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.223>.
 13. L. Xing, W. Xiang, R. Zhu, and Z. Tu, “Modeling and thermal management of proton exchange membrane fuel cell for fuel cell/battery hybrid automotive vehicle”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 3, 2022, pp. 1888-1900, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.146>.
 14. I. S. Han, J. Jeong, B. K. Kho, C. H. Choi, S. Yu, and H. K. Shin, “Development of a 25 kW-class PEM fuel cell system for the propulsion of a leisure boat”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 25, No. 3, 2014, pp. 271-279, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.3.271>.
 15. M. Daowd, N. Omar, B. Verbrugge, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, “Battery, hybrid and fuel cell electric vehicle symposium & exhibition battery models parameter estimation based on Matlab/Simulink®”, *Proceedings of the 25th Electric Vehicle Symposium*, 2010. Retrieved from https://www.academia.edu/2672707/Battery_Models_Parameter_Estimation_based_on_MATLAB_Simulink_.
 16. R. K. Shah and D. P. Sekulic, “Fundamentals of heat exchanger design”, John Wiley & Sons, USA, 2003.
 17. Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, “Heat and mass transfer: fundamentals & applications”, 6th ed, McGraw-Hill Education, USA, 2020.
 18. K. Kurata and K. Oda, “Ship waves in shallow water and their effects on moored small vessel”, *Coastal Engineering*, 1984, doi: <https://doi.org/10.1061/9780872624382.219>.
 19. A. F. Mollanf, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, “Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power”, 2nd ed, Cambridge University Press, UK, 2017.