

소형 선박용 연료전지 시스템 모델 개발

방은신* · 김영민** · 김명환*** · 박상균****†

* 한국해양대학교 대학원 박사과정, ** 대우조선해양 기전시스템연구 선임연구원,

*** 한국해양대학교 기관공학부 교수, **** 한국해양대학교 해사IT공학부 교수

Development of a Fuel Cell System Model for a Small Ship

Eun-Shin Bang* · Young-Min Kim** · Myoung-Hwan Kim*** · Sang-Kyun Park****†

* Ph.D. program, Graduate School, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

** Senior Researcher, Mechanical, Electric and Control System R&D Department, Naval & Energy Systems R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.,(DSME), Geoje 53302, Korea

*** Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

**** Professor, Division of Marine Information Technology, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

요약 : 본 연구에서는 선박 전원용 연료전지 시스템 모델을 개발하여 순수한 산소를 공급하여 진행된 실험 결과의 비교를 통하여 연료전지 시스템 모델을 검증하였다. 검증된 모델을 활용하여 공기 압축기를 사용하여 공기를 공급할 경우에 대하여 산소를 공급한 경우와의 연료전지 출력 특성을 비교 검토하였다. 또한, 연료전지 시스템의 열물성치 변화가 스택의 출력에 어떠한 영향을 미치는지에 관하여 검토하였다. 그 결과 본 연구의 실험 범위에서 캐소드 공급 가스로 순수한 산소를 공급한 경우의 모델링을 통한 계산 결과와 실험 결과는 전 부하 영역에서 거의 동일한 전압 및 출력을 얻을 수 있었다. 560 A의 일정한 부하에서 캐소드 공급용 산소를 대신하여 공기를 공급한 경우 각각의 스택 전압은 약 14 V, 스택 출력은 약 8 kW, 스택 효율은 약 3% 및 전체 시스템 효율은 8% 정도 낮아짐을 알 수 있었다. 본 연구에서 검토한 열물성치 중에서 스택에 대한 냉각수의 열전달 계수가 스택의 출력에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

핵심어 : 연료전지, 성능, 선박, 시스템 모델링, 제어

Abstract : In this study, a fuel cell system model for ship power was developed and verified by comparing the experimental results obtained by supplying pure oxygen. To verify the proposed model, the fuel cell output characteristics when oxygen was supplied were compared with those when air was supplied using an air compressor. In addition, the effect of the change in the thermal properties of the fuel cell system on the output of the stack was examined. Within the experimental range of this study, when pure oxygen was supplied as the cathode supply gas, the calculated and experimental voltages and outputs obtained through modeling were almost the same over the entire load range. When air was supplied instead of oxygen for the cathode supply at a constant load of 560 A, each stack voltage was approximately 14 V, the stack output was approximately 8 kW, and the stack efficiency was approximately 3%. It was confirmed that the overall system efficiency was reduced by approximately 8%. Among the thermal properties examined in this study, the heat transfer coefficient of the coolant to the stack was found to have the greatest effect on the output of the stack.

Key Words : Fuel Cell, Performance, Ship, System modeling, Control

1. 서론

연료전지(Fuel Cell) 기술은 수소를 직접적으로 연료로 사용할 수 있는 기술로 현재 친환경 자동차용 기술로 상용화가 진행되어 판매되고 있다. 선박에서 배출되는 대기 환경

오염 물질 중에서도 이산화탄소의 저감을 위하여 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 다양한 논의가 진행되고 있다(IMO, 2018). 최근 친환경 선박의 연료로 LNG가 주목받고 있으나 LNG를 연료로 사용하는 경우 IMO의 이산화탄소 환경 규제에 대하여 약 20% 정도의 이산화탄소만을 감축할 수 있을 것으로 예측된다. 때문에 전체 감축량의 80% 정도는 수소 또는 암모니아를 연료로 사용하는

* First Author : esbang@kmou.ac.kr, 051-410-4579

† Corresponding Author : skpark@kmou.ac.kr, 051-410-4579

선박으로 대체가 필요한 것으로 보고된다(OECD/ITF, 2018).

연료전지 기술의 선박 적용은 유럽을 중심으로 다양한 실증 사업들이 활발하게 진행되고 있다(Fontell, 2011; Energy observer project, 2019; e4ship project, 2019; Choi et al., 2016; Kim, 2007; EMSA, 2017). 다양한 연료전지 중에서 자동차용으로 상용화된 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) 기술이 가장 빠르게 선박 전원용 연료전지 기술로 적용될 것으로 판단되며 현재 유람선용 연료전지 선박의 설계가 이루어지고 있다(Joseph and Leonard, 2016; Joseph and Leonard, 2018).

본 연구에서는 선박 전원용 연료전지 시스템 모델을 개발하고 순수한 산소를 공급하여 진행한 실험 결과와의 비교를 통하여 개발 모델의 검증에 진행하였다. 검증된 모델을 활용하여 공기 압축기를 사용해 공기를 공급하는 선박용 연료전지 시스템 모델을 개발하여 순수한 산소를 공급한 경우와의 연료전지 출력 특성을 비교 검토하였다. 또한, 연료전지 시스템의 열물성치 변화가 스택의 출력에 어떠한 영향을 미치는가에 관하여 검토하였다.

2. 시스템 모델

2.1 운전 조건 및 시스템

본 연구에서는 Matlab/Simulink(R2014a) 및 Thermolib(Ver 5.3)을 활용하여 연료전지 시스템 모델을 개발하였다(Larminie and Dicks, 2003; Pukrushpan, 2003; Kim and Park, 2019;

Pukrushpan et al., 2005; EUTECH, 2009; Frank et al., 2008). Table 1은 본 연구에서 사용된 연료전지 스택의 사양 및 시스템의 운전 조건을 나타내고 있다.

Table 1. Specifications of the fuel cell system

Parameters	Value
Stack supply temperature of O ₂ (Air)	343[K]
Stack supply pressure of O ₂ (Air)	253,313[Pa]
Stack supply humidity of O ₂ (Air)	100[%]
Stack supply temperature of H ₂	318[K]
Stack supply pressure of H ₂	253,313[Pa]
Stack supply humidity of H ₂	100[%]
Number of cells(Stack 1)	320
Number of cells(Stack 2)	320
Active area	0.16[m ²]
Membrane thickness	0.0003[m]
Target temperature of coolant	343[K]
Coolant flow rate	3.68[kg/s]
Outlet pressure of coolant pump	405,300[Pa]

Fig. 1은 선박용 연료전지 시스템의 개략도를 나타내고 있다. 캐소드 공급 가스는 실험 결과와 모델링을 통한 계산 결과의 비교를 위해서 산소 탱크에서 산소를 가습하여 연료전지 스택으로 공급하는 방법과 모델링 측면에서 추가적인 검

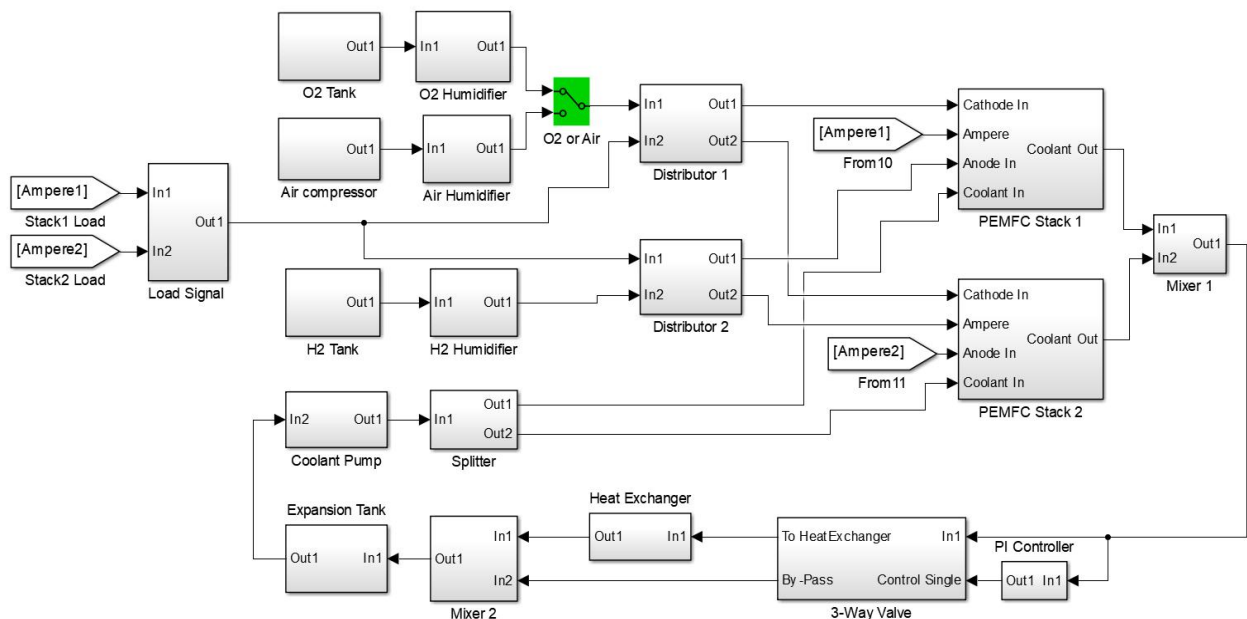


Fig. 1. Schematic diagram of fuel cell system.

토를 위하여 공기 압축기를 구동하여 가습된 공기를 공급할 수 있도록 구성되어 있다. 수소는 액체 수소 탱크에서 공급되며 가습기를 통과하여 연료전지 스택의 애노드 측으로 공급된다. 연료전지 스택은 1개의 모듈에서 120 kW급의 출력을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 2개의 연료전지 스택 모듈이 설치되어있고 연료전지 시스템에서 약 240 kW의 출력을 얻을 수 있다. 각각의 연료전지 스택에 대하여 운전의 입력 신호인 부하(Ampere)가 설정되면 부하에 따른 산소(공기)와 수소의 공급량이 계산되고 부하 신호부에서 스택 1과 스택 2의 부하에 따라 적정량의 산소(공기) 및 수소가 공급되게 된다. 연료전지 스택을 냉각하기 위한 냉각수는 냉각수 펌프로부터 공급되며 스택 1과 스택 2의 부하에 관계없이 동일한 유량으로 각각의 스택으로 공급된다. 연료전지 스택을 냉각하고 스택에서 배출된 냉각수는 혼합기(Mixer 1)에서 혼합되어 열교환기에서 냉각되어 다시 스택으로 공급된다. 연료전지 스택에서 배출되는 냉각수의 온도를 343(K)로 일정하게 유지하기 위하여 PI제어기가 설치되어있고 열교환기로 들어가는 스택 냉각수와 바이패스 되는 냉각수량을 제어한다. 열교환기는 대향류 흐름으로 설계되어 있으며 해수를 이용하여 스택 냉각수를 냉각한다.

연료전지의 스택효율[%]은 식(1)과 같다(Larminie and Dicks, 2003; Pukrushpan, 2003; Kim and Park, 2019; Pukrushpan et al., 2005; EUtech, 2009; Frank et al., 2008).

$$\eta_{stack} = \frac{V_c}{1.25} \times 100 \quad (1)$$

여기서, V_c 는 단일 셀의 전압[V]이다.

시스템 효율[%]은 식(2)와 같이 나타낸다.

$$\eta_{system} = \frac{P_{stack1} + P_{stack2} - (P_{pump} + P_{comp})}{m_{H_2} \times LHV} \times 100 \quad (2)$$

여기서, P_{stack} 은 스택출력[W], P_{pump} 는 펌프 소비동력[W], P_{comp} 는 압축기 소비동력[W], m_{H_2} 는 수소 공급유량[kg/h]을 그리고 LHV 는 수소 저위발열량[kJ/kg]을 나타낸다.

Table 2는 스택의 열 질량(Thermal mass), 스택에 대한 냉각수의 열전달 계수(Coefficient of heat transfer), 스택 냉각수 유량(Coolant mass flow rate) 및 열교환기의 총합 열전달 계수(Coefficient of overall heat transfer rate)에 따른 연료전지 스택의 출력 특성을 검토하기 위한 변수 값을 나타내고 있다. Table 3과 같이 Table 2의 변수를 조합하여 9가지 경우로 분류하였고 Case별로 계산을 수행할 때 하나의 변수만 변경하고 나머지 변수 값은 일정한 값으로 하여 검토하였다.

Table 2. Specifications of the fuel cell system

Parameter		1	2	3
Thermal mass of stack[J/K]	A	331,200	414,000	496,800
Coefficient of heat transfer to cooling media for stack[W/K]	B	4,800	6,000	7,200
Coolant mass flow rate[g/s]	C	2,945	3,681	4,417
Coefficient of overall heat transfer rate for heat exchanger[W/K]	D	10,000	12,500	15,000

Table 3. Specifications of the fuel cell system

Case	Input value
1	A2B2C2D2
2	A1B2C2D2
3	A3B2C2D2
4	A2B1C2D2
5	A2B3C2D2
6	A2B2C1D2
7	A2B2C3D2
8	A2B2C2D1
9	A2B2C2D3

3. 해석 결과

캐소드 공급 가스로 산소를 공급하여 연료전지 스택을 운전하여 얻은 실험 결과와 본 연구에서 개발한 모델에 의하여 계산된 값의 비교 및 시스템 특성에 관하여 검토하였다. Fig. 2는 스택 1과 스택 2의 부하(Ampere)를 시간에 따라 23A, 112 A, 185 A, 281 A, 361 A, 528 A로 실험에 사용한 값을 동일한 시간 간격으로 변경한 경우의 연료전지 스택 전압에 대한 계산 결과를 나타내고 있다. 스택 1과 스택 2의 계산 결과는 동일하였기에 스택 1의 결과만을 나타내었다. 부하가 증가할수록 스택 전압이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 부하가 증가하면 활성화 과전압(Activation overvoltage)과 저항 과전압(Ohmic overvoltage)이 증가하기 때문이다. 캐소드 공급 가스로 순수한 산소를 공급한 경우의 실험 결과(VoltageExO2)와 스택 1의 계산 결과(VoltageFCIO2)에서 알 수 있듯이 185 A의 부하영역에서 최대 약 4 V 정도 실험 결과가 계산 결과보다 높은 수치를 보이나 전 부하 영역에서 거의 동일한 전압을 나타냄을 알 수 있다. 캐소드 공급 가스로 순수한 산소를 이용한 경우를 모사할 수 있는 모델을 기반으로 하여 순수한 산소를 대신하여 대기 중의 공기를 공기 압축기를 통하여

공급한 경우의 계산 결과(VoltageFC1Air)는 순수한 산소를 공급할 경우와 비교하여 스택 전압이 낮음을 알 수 있다. 이는 순수한 산소를 대신하여 공기를 공급하면 가역 개회로 전압(Open circuit voltage)이 낮아지고 활성화 과전압(Activation overvoltage)이 증가하기 때문이다.

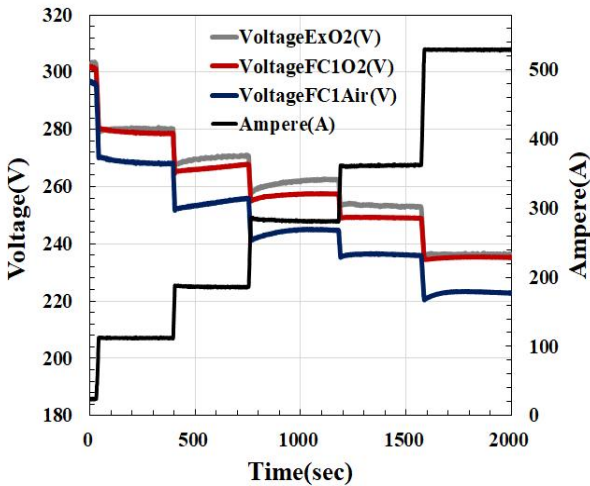


Fig. 2. Comparison of the stack voltage.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서의 부하 변동에 따른 스택 출력의 실험 결과(PowerExO2)와 계산 결과(PowerFC1O2), 공기 압축기를 이용하여 캐소드 공급 가스로 공기를 공급한 경우의 계산 결과(PowerFC1Air) 및 공기 압축기 소비 전력(AirCompPower)에 대한 계산 결과를 나타내고 있다. 산소를 공급한 경우의 실험 결과와 계산 결과는 거의 동일한 출력을 보여주고 있다. 부하가 증가함에 따라 캐소드 공급 가스를 산소를 사용한 경우와 비교하여 공기를 사용한 경우의 출력 감소폭이 증가함을 알 수 있다. 이는 부하가 증가할수록 전술한 가역 개회로 전압이 낮아지고 활성화 과전압이 증가하여 스택의 전압이 낮아지기 때문이다. 또한, 부하가 증가함에 따라 공기를 공급하기 위한 공기 압축기의 소비 동력이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2와 동일한 조건에서의 부하 변동에 따른 스택 효율(Stack Efficiency) 및 시스템 효율(System Efficiency)에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 부하가 증가함에 따라 스택 효율 및 시스템 효율이 감소함을 알 수 있다. 캐소드 공급 가스로 산소로 운전한 경우가 공기로 운전한 경우보다 스택 효율 및 시스템 효율이 높다. 정격 출력 부하인 528 A에서 산소로 운전한 경우의 스택 효율(Stack EfficiencyFC1O2)은 약 59%이다. 스택 1과 스택 2의 합계 출력에서 냉각수 펌프의 구동을 위하여 사용한 소비 전력을 뺀 시스템 효율(System EfficiencyO2)은 약 53%이다. 또한, 공기압축기를 이

용하여 공급한 공기로 운전한 경우의 스택 효율은 약 56%이고 시스템 효율(System EfficiencyAir)은 약 46%이다. 공기로 운전한 경우의 시스템 효율이 낮은 것은 연료전지에서 발생한 전력을 사용하여 공기 압축기를 운전하기 위한 소비 전력으로 사용하였기 때문이다. 스택 냉각수 펌프와 공기 압축기를 구동하기 위한 전력으로 스택 1과 스택 2의 출력 합인 약 250 kW의 약 10% 정도가 소비됨을 알 수 있다.

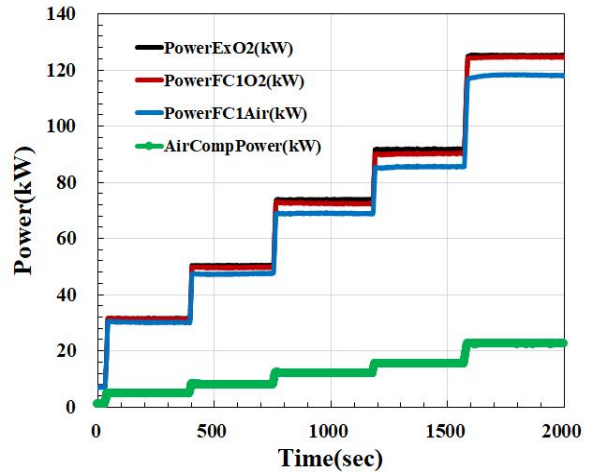


Fig. 3. Comparison of the stack power.

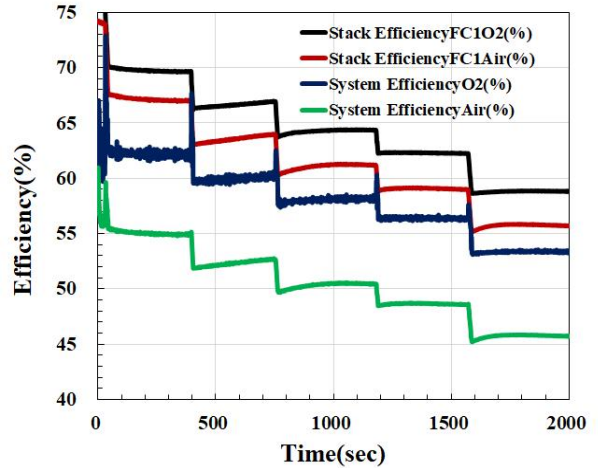


Fig. 4. Comparison of the stack and system efficiency.

Fig. 5는 Fig. 2와 동일한 부하 조건으로 연료전지 스택을 운전한 경우에 대하여 캐소드 공급 가스로 산소 탱크에서 산소를 공급한 경우의 산소 탱크의 잔량(O2Tank)과 공기 압축기를 이용하여 공기를 공급한 경우에 대한 공급 공기 유량(AirCompFlow)에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 산소와 공기의 공급이 부하의 변화에 따라 적절하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

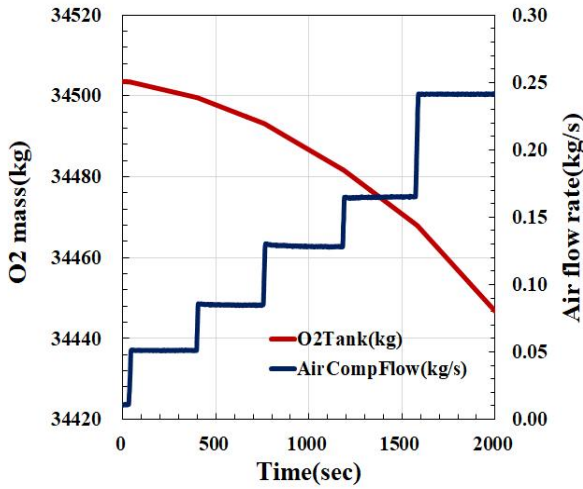


Fig. 5. Characteristics of O₂ consumption and air flow rate.

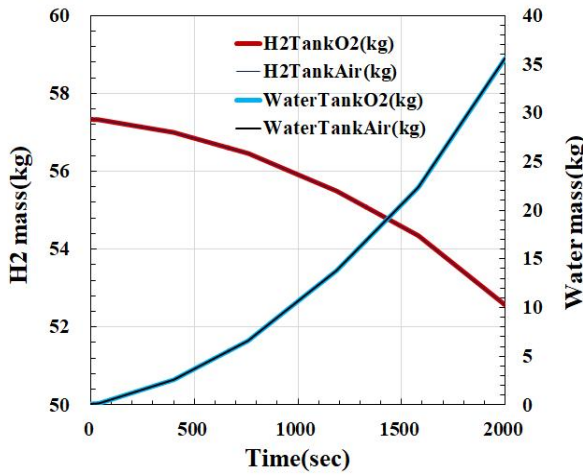


Fig. 6. Characteristics of H₂ consumption and air flow rate.

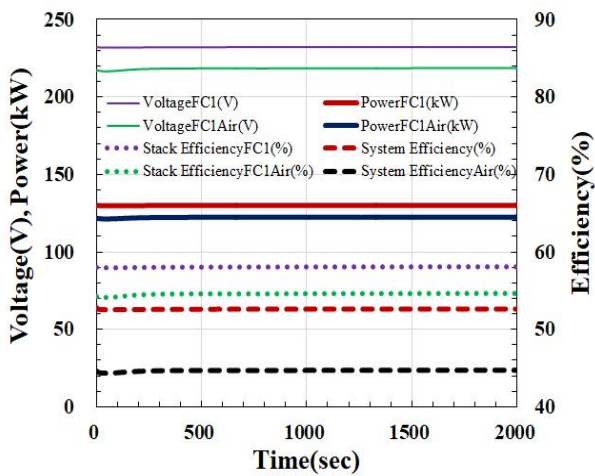


Fig. 7. Characteristics of voltage, power and efficiency.

Fig. 6은 Fig. 5의 운전 조건과 동일한 상태에서 연료전지 스택을 운전하기 위하여 캐소드 공급 가스로 산소를 공급한 경우의 시간 변화에 따른 수소 탱크의 잔량(H2TankO2)과 캐소드 공급 가스로 공기를 공급한 경우의 수소 탱크의 잔량(H2TankAir) 및 산소를 공급한 경우 생성되는 물의 양(WaterTankO2)과 공기를 공급한 경우 생성되는 물의 양(WaterTankAir) 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 부하의 변화에 따른 수소의 소비와 연료전지 스택 내부에서의 화학반응에 의해서 발생하는 생성수의 양은 캐소드 공급 가스로 산소를 사용한 경우와 공기를 사용한 경우 동일한 값을 얻을 수 있었고 부하의 변화에 따라 적절하게 계산됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 Table 3의 Case 1의 조건으로 연료전지 스택 1과 스택 2의 부하 560 A로 일정하게 유지한 경우 산소를 공급한 경우의 스택 전압(VoltageFC1), 스택 출력(PowerFC1), 스택 효율(Stack EfficiencyFC1), 시스템 효율(System Efficiency) 및 공기압축기를 사용하여 공기를 공급한 경우의 스택 전압(VoltageFC1Air), 스택 출력(PowerFC1Air), 스택 효율(Stack EfficiencyFC1Air), 시스템 효율(System EfficiencyAir)에 대한 계산 결과를 나타내고 있다. 스택 1과 스택 2의 계산 결과 값이 동일하기 때문에 스택 1의 값만을 그래프에 나타내었다. 캐소드 공급 가스로 산소를 이용한 경우의 스택 전압 232 V, 스택 출력 130 kW, 스택 효율 58%, 시스템 효율 53%로 계산되었다. 공기 압축기를 사용하여 캐소드 공급 가스로 공기를 사용한 경우의 스택 전압 218 V, 스택 출력 122 kW, 스택 효율 55%, 시스템 효율 45%로 계산되었다.

Fig. 8은 캐소드 공급 가스로 공기를 공급하고 560 A 일정한 부하로 운전한 경우에 대하여 스택의 열 질량, 스택에 대한 냉각수의 열전달 계수, 스택 냉각수 유량 및 열교환기의 총합 열전달 계수를 변경하여 Table 3의 Case에 따른 스택 전압(Voltage)과 출력(Power)에 대한 2000s에서의 계산 결과를 나타내고 있다. 스택의 전압과 출력은 스택의 열 질량(Case 2, Case 3)의 영향은 거의 받지 않고, 스택에 대한 냉각수의 열전달 계수(Case 4, Case 5), 스택 냉각수 유량(Case 6, Case 7), 열교환기의 총합 열전달 계수(Case 8, Case 9)의 영향을 받을 수 있다. 특히, 본 연구의 계산 범위에서는 스택에 대한 냉각수의 열전달 계수가 가장 낮은 경우(Case 4)가 동일한 냉각수 유량에서 스택에서 냉각수로 전달되는 열량이 감소하여 스택 온도가 높아지기 때문에 이온 전도도가 증가하고 막으로의 기체 확산성이 증가하여 저항 과전압이 감소하여 스택의 전압과 출력이 가장 높고, 열전달 계수가 가장 높은 경우(Case 5)가 스택의 전압과 출력이 가장 낮음을 알 수 있다.

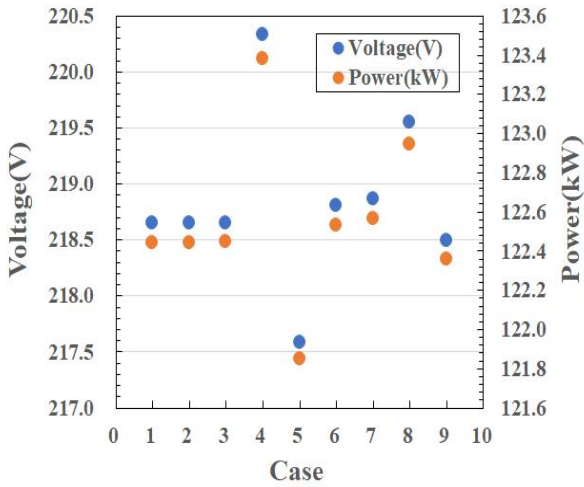


Fig. 8. Characteristics of voltage and power.

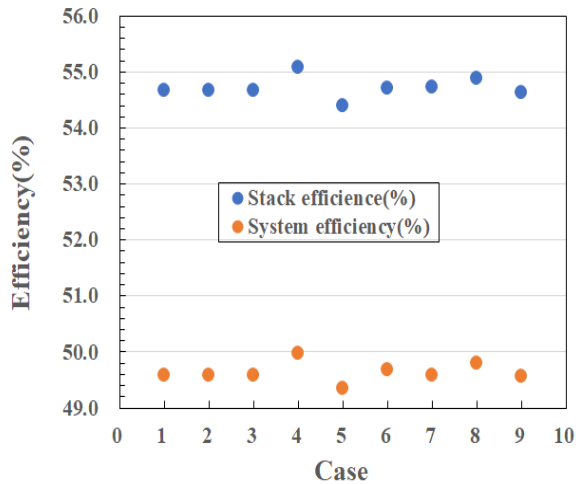


Fig. 9. Characteristics of efficiency.

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 계산 조건에서의 스택 효율(Stack efficiency)과 시스템 효율(System efficiency)에 대한 계산 결과를 나타내고 있다. 본 연구의 계산 범위에서 연료전지 스택 효율과 전체 시스템 효율은 Case 4의 경우 가장 높음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 120 kW급 모듈로 구성된 연료전지 스택 2기를 조합한 선박 전원용 연료전지 시스템의 개발 모델을 순수한 산소 공급으로 얻어진 실험 결과와 비교하여 개발한 연료전지 시스템 모델을 검증하였다. 검증된 모델을 활용하여 공기 압축기로 공기를 공급하는 경우와 순수한 산소를 공급한 경우를 비교하고 이를 기반으로 연료전지 출력 특성

을 비교 검토하였다. 또한, 연료전지 시스템의 열물성치 변화가 스택의 출력에 어떠한 영향을 미치는가에 관해 검토하여 본 연구의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 캐소드 공급 가스로 순수한 산소를 공급한 경우의 모델링을 통한 계산 결과는 전 부하 영역에서 실험 결과와 거의 동일한 전압 및 출력을 얻을 수 있었다.

(2) 560 A의 일정한 부하에서 캐소드 공급용 산소를 순수한 산소를 대신하여 공기압축기를 사용하여 공기를 공급한 경우 각각의 스택 전압은 약 14 V, 스택 출력은 약 8 kW, 스택 효율은 약 3% 및 전체 시스템 효율은 약 8% 정도 낮아짐을 알 수 있었다.

(3) 생성수의 양은 캐소드 공급 가스로 산소를 사용한 경우와 공기를 사용한 경우 동일한 양이 발생함을 알 수 있었다.

(4) 스택에 대한 냉각수의 열전달 계수가 스택의 출력에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 대우조선해양주식회사의 “선박 에너지 효율 향상” 연구개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] Choi, C. H., S. Yu, I. S. Han, B. K. Kho, D. G. Kang, H. Y. Lee, M. S. Seo, J. W. Kong, G. Kim, J. W. Ahn, S. K. Park, D. W. Jang, J. H. Lee, and M. Kim(2016), Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 5, pp. 3591-3599.
- [2] Decarbonising Maritime Transport(2018), Pathways to zero-carbon shipping by 2035, Case-Specific Policy Analysis, OECD/ITF
- [3] e4ship project(2019), www.e4ships.de, Accessed September 02, 2019.
- [4] EMSA European Maritime Safety Agency(2017), Study on the use of fuel cells in shipping, DNV GL.
- [5] Energy observer project(2019), www.energy-observer.org, Accessed September 02, 2019.
- [6] EUtech Scientific Engineering(2009), Simulation toolbox for the design and development of thermodynamic system in MATLAB/Simulink.
- [7] Fontell, E.(2011), Wärtsilä Fuel Cell Development Program, The 8th annual Green Ship Technology Conference.

- [8] Frank, P. I., P. D. David, L. B. Theodore, and S. L. Adrienne(2008), Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [9] IMO(2018), International Maritime Organization, Report of the Marine Environment Protection Committee on its 72nd Session
- [10] Joseph, W. P. and E. K. Leonard(2016), Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry, SANDIA REPORT.
- [11] Joseph, W. P. and E. K. Leonard(2018), Optimization of Zero Emission Hydrogen Fuel Cell Ferry Design, With Comparisons to the SF-BREEZE, SANDIA REPORT.
- [12] Kim J. I. and S. K. Park(2019), Development of a 120kW PEMFC stack model for a ship vessel, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 43, No. 7, pp. 492-497.
- [13] Kim, M. H.(2007), Analysis on the technology R&D of the fuel cell systems for power generation in ships, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 8, pp. 924-931.
- [14] Larminie, J. and A. Dicks(2003), Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons Ltd.
- [15] Pukrushpan, J. T.(2003), Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors, Ph.D. Dissertation, Mechanical Engineering, University of Michigan, USA.
- [16] Pukrushpan, J. T., A. G. Stefanopoulou, and H. Peng(2005), Control of Fuel Cell Power System: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design, Springer.

Received : 2020. 06. 12.

Revised : 2020. 07. 17.

Accepted : 2020. 08. 28.