

선박용 120kW급 고분자 전해질 연료전지 스택 모델 개발

김종인¹ · 박상균[†]

(Received September 6, 2019 ; Revised September 23, 2019 ; Accepted September 24, 2019)

Development of a 120kW PEMFC stack model for a ship vessel

Jong-In Kim¹ · Sang-Kyun Park[†]

요약: 본 연구에서는 실제 선박에 탑재되어 운전 중인 120kW급 캐소드 공급가스로 산소를 사용하는 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell ; PEMFC) 스택의 실험값을 바탕으로 연료전지 스택의 시뮬레이션 모델을 개발하여 실험 결과와 비교 검토하였다. 또한, 개발된 시뮬레이션 모델을 활용하여 캐소드 공급가스로 산소를 대신하여 공기를 공급하여 운전한 경우의 연료전지 스택 출력 특성, 연료전지 스택의 운전 온도 및 운전 압력 변화 따른 성능 특성과 단 셀의 반응면적에 따른 스택의 출력 전압 특성에 대하여 검토하였다. 그 결과 본 연구의 실험 범위에서 부하에 따른 스택 출력 전압을 실험 결과와 비교한 결과 최대 약 1.9(%)정도 낮았고, 연료전지 스택의 주 운전 영역인 부하 530(A)에서는 거의 동일한 스택 출력 전압을 얻을 수 있었다. 캐소드 공급가스로 산소를 공급하여 운전한 경우, 스택의 운전 온도가 높은 경우, 스택의 운전 압력이 높은 경우 및 단 셀의 반응면적이 클 경우에 연료전지 스택의 출력 전압이 높음을 알 수 있었다.

주제어: 선박, 고분자 전해질 연료전지, 모델링, 성능

Abstract: In this study, a 120kW polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stack is developed as a simulation model based on experimental values, and the model values are then compared with experimental ones. The PEMFC is mounted on an actual vessel and uses oxygen as an operating cathodic gas. In addition, the power characteristics of the fuel cell stack when air is supplied on behalf of oxygen to the cathodic gas by utilizing the developed simulation model, performance characteristics of the fuel cell stack with varying operating temperature and pressure, and power voltage characteristics based on the single cell active area are also reviewed. As a result, the study stack output voltage range was as low as approximately 1.9%, and the comparison with the experimental results revealed that the stack output voltage obtained in the main operating load (530 A) of the fuel cell stack was almost identical. The output voltage of the fuel cell stack was high when the cathodic supply gas was oxygen, operating temperature was high, operation pressure was high, and active area of the single cell was large.

Keywords: Ship, Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), Modeling, Performance

1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization; IMO)는 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC)에 따라 국제해운 분야의 온실가스 감축을 위한 로드맵을 2016년에 마련하였지만 선진국에서 주장하는 IMO의 전통방식인 국적에 관계없이 모든 선박에 동일 규제의 적용(No More Favorable Treatment ; NMFT) 방안과 오염기여도에 따른 차별적 책임(Common But Differentiated Responsibilities; CBDR)을 주장하는 개도

국의 감축목표, 적용원칙 등에 대한 입장차이로 몇 년간의 논의 끝에 IMO 제 72차 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee; MEPC)에서 선박 온실가스의 연간 총 배출량을 2050년까지 2008년 대비 50% 감축하기로 결정하고 기술개발 가능성, 온실가스 배출량 추이 등을 반영하여 2023년에 최종 전략을 결정할 예정이다[1]. 이러한 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 선박 및 해운분야에 다양한 혁신 기술의 적용이 요구되며 중장기적으로는 기존의 연료를 대체할 수 있는 청정연료를 기반으

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9981-6250>); Professor, Division of Marine Information Technology, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: skpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

¹ M.S. Candidate, Department of Marine Engineering, Graduate School, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: darkkrow@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 하는 저탄소 선박 중심의 감축 수단의 확보가 필수임을 제시하고 있다[2]. 선박의 재질 경량화, 선형 개선, 마찰력 감소 및 폐열 회수 등의 기술적 수단들에 의한 온실가스 감축은 미비할 것으로 보고되고 있다. 선박 운항속도 감소, 선박 대형화 등의 운항적 수단에 의한 온실가스 감축은 어느 정도 가능하지만 온실가스 배출제로의 목표 달성에는 한계가 있을 것으로 분석하고 있다. 따라서 선박에서 배출되는 온실가스 배출제로의 목표를 달성하기 위해서는 수소, 암모니아 등과 같은 대체 연료/에너지 선박 도입을 강조하고 있다[2].

선박에서 배출되는 온실가스를 저감하기 위한 다양한 기술들 중에서 수소에너지를 선박에 활용하기 위한 수단 중의 하나로 연료전지(Fuel Cell)기술을 선박에 적용하기 위한 다양한 연구 개발이 진행되어지고 있다[3]-[8]. 다양한 연료전지 중에서 수소 연료전지 자동차에 적용되어 상용화 되고 있는 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell; PEMFC)가 현재의 기술적인 수준을 고려하였을 경우 선박에 적용하기에 가장 적합할 것이다 [9][10].

본 연구에서는 캐소드 공급 가스로 산소를 사용하는 고분자 전해질 연료전지 스택이 실험값을 바탕으로 120kW급 연료전지 스택의 시뮬레이션 모델을 개발하여 실험 결과와 비교 검토하였다. 또한, 개발된 시뮬레이션 모델을 활용하여 캐소드 공급가스로 산소를 대신하여 공기를 공급하여 운전한 경우의 연료전지 스택 출력 특성, 캐소드 공급 가스로 산소와 공기를 공급한 경우에 대하여 연료전지 스택의 운전 온도 및 운전 압력 변화 따른 성능 특성과 단 셀의 반응면적에 따른 스택의 출력 전압 특성에 대하여 검토하였다.

2. 해석 모델

2.1 해석 모델

본 연구에서는 Matlab/Simulink(R2014a) 및 Thermolib(Ver 5.3.2.7113)을 활용하여 PEMFC 스택 모델을 개발하였다. Table 1은 본 연구에서 사용되어진 연료전지 스택의 사양 및 운전조건을 나타내고 있다.

연료전지 단 셀의 전압 특성 방정식은 다음과 같이 정의된다[11].

$$V_c = E_c - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (1)$$

여기서, V_c 는 단 셀의 전압(V), E_c 는 개회로 전압(V), V_{act} 는 활성화 전압(V) 손실, V_{ohm} 는 저항 전압(V) 손실, V_{con} 는 농도 전압(V) 손실을 나타낸다.

개회로 전압은 다음과 같이 정의된다[12]-[14].

$$E_c = 1.229 - 0.85 \times 10^{-4} (T_s - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_s \left[\ln\left(\frac{p_{H_2}}{1.01325}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{p_{O_2}}{1.01325}\right) \right] \quad (2)$$

Table 1: Specifications of the stack

Parameters	Value
Number of cells	320
Active area	1600 (cm ²)
Membrane thickness	0.03 (cm)
Anode inlet pressure	253312 (Pa)
Cathode inlet pressure	253312 (Pa)
Operating temperature	353 (K)
Stoichiometric ratio of fuel	1.2
Stoichiometric ratio of oxidant	2
Anode inlet gas humidity	100 (%)
Cathode inlet gas humidity	100 (%)

$$p_{H_2} = \frac{(p_{inlet,anode} \times y_{H_2,inlet}) + (p_{outlet,anode} \times y_{H_2,outlet})}{2} \quad (3)$$

$$p_{O_2} = \frac{(p_{inlet,cathode} \times y_{O_2,inlet}) + (p_{outlet,cathode} \times y_{O_2,outlet})}{2} \quad (4)$$

여기서, T_s 는 스택 온도(K), p_{H_2} 는 수소 분압(Pa), p_{O_2} 는 산소 분압(Pa), y 는 몰분율(mol/mol)이다.

활성화 전압 손실은 다음과 같이 정의된다[12][13].

$$V_{act} = v_0 + v_a (1 - e^{-10i}) \quad (5)$$

$$v_0 = 0.279 - 8.5 \times 10^{-4} (T_s - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_s \left[\ln\left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325}\right) \right] \quad (6)$$

$$v_a = (-1.618 \times 10^{-5} T_s + 1.618 \times 10^{-2}) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right)^2 + (1.8 \times 10^{-4} T_s - 0.166) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}\right) + (-5.8 \times 10^{-4} T_s + 0.5736) \quad (7)$$

여기서, i 는 전류밀도(A/cm²), p_{ca} 는 캐소드 압력(Pa), p_{sat} 는 물의 포화압력(Pa)이다.

저항 전압 손실은 다음과 같이 정의된다[12]-[14].

$$V_{ohm} = i \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (8)$$

$$\sigma_m = (0.005139 \lambda_m - 0.00326) \exp\left[350 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_s}\right)\right] \quad (9)$$

$$\lambda_m = \begin{cases} 0.043 + 17.8a_x - 39.85a_x^2 + 36.0a_x^3, & 0 < a_x \leq 1 \\ 14 + 1.4(a_x - 1), & 1 < a_x \leq 3 \end{cases} \quad (10)$$

$$a_x = \frac{\left(\frac{p_{v,anode}}{p_{sat,anode}}\right) + \left(\frac{p_{v,cathode}}{p_{sat,cathode}}\right)}{2} \quad (11)$$

$$p_{v,anode} = \frac{(p_{inlet,anode} \times y_{H_2O,inlet}) + (p_{outlet,anode} \times y_{H_2O,outlet})}{2} \quad (12)$$

$$p_{v,cathode} = \frac{(p_{inlet,cathode} \times y_{H_2O,inlet}) + (p_{outlet,cathode} \times y_{H_2O,outlet})}{2} \quad (13)$$

여기서, t_m 은 막의 두께(cm)를 나타내며, σ_m 은 막의 이온 전도율($1/\Omega \cdot cm$), λ_m 는 막의 함수율(-), a_x 는 가스의 활동도(-), p_v 는 수증기 분압(Pa)이다.

농도 전압 손실은 다음과 같이 정의된다[12][13].

$$V_{con} = i \left(c_1 \frac{i}{2.2} \right)^2 \quad (14)$$

$$c_1 = \begin{cases} (7.16 \times 10^{-4} T_s - 0.622) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3} T_s + 1.68) \\ \text{for} \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) < 2atm \\ (8.66 \times 10^{-5} T_s - 0.068) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.6 \times 10^{-4} T_s + 0.54) \\ \text{for} \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) \geq 2atm \end{cases} \quad (15)$$

스택의 전압은 단셀 전압과 셀 수의 곱으로 다음과 같이 정의 된다.

$$V_{stack} = n \times V_c \quad (16)$$

여기서 n 은 셀 수이다.

스택의 출력은 스택 전압과 전류의 곱으로 다음과 같이 정의 된다.

$$P_{stack} = V_{stack} \times I \quad (17)$$

여기서 I 는 전류(A)이다.

스택의 효율은 다음과 같이 정의 된다[11].

$$Eff_{stack} = \frac{V_c}{1.25} \times 100 \quad (18)$$

연료전지 스택의 에너지 보존은 다음과 같이 정의 된다 [14][15].

$$mc \frac{dT_s}{dt} = \sum \dot{H}_{inlet} - \sum \dot{H}_{outlet} - P_{stack} - Q_{cooling} \quad (19)$$

$$Q_{cooling} = \epsilon \times q_{max} \quad (20)$$

$$\epsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (21)$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (22)$$

$$C_{min} = \frac{\Delta \dot{H}}{\Delta T} = \frac{H_{cooling,inlet} - H_{cooling@stacktemperature}}{T_{cooling,inlet} - T_s} \quad (23)$$

$$q_{max} = H_{cooling,inlet} - H_{cooling@stacktemperature} \quad (24)$$

여기서, m 은 스택의 질량(kg), c 는 스택 재료 평균 비열(J/kg·K), \dot{H} 는 엔탈피(W), P_{stack} 는 스택 출력(W), $Q_{cooling}$ 는 냉각수가 스택에서 가지고나가는 열량(W), U 는 냉각수로의 열전달계수(W/m²·K), A 는 유효 열교환 면적(m²)이다.

3. 해석결과

Figure 1은 연료전지 스택의 냉각수 출구 온도 353(K), 애노드 및 캐소드 운전압력이 253312(Pa)인 경우 부하(Ampere) 변화에 따른 스택 전압의 실험 결과(Experiment)와 계산 결과(O₂_Calculation)를 비교한 값을 나타내고 있다. 계산 시간에 따른 부하의 값은 실험과 동일한 값을 입력하였다. 또한, 캐소드 공급가스로 산소가 아닌 공기를 공급한 경우의 계산 결과(Air_Calculation)도 함께 나타내었다. 부하에 따른 스택 출력 전압은 부하 280(A)에서 계산 결과 값이 실험값과 비교하여 최대 약 1.9(%)정도 낮지만 연료전지 스택의 주 운전 영역인 부하 530(A)에서는 거의 동일한 스택 출력 전압임을 알 수 있다. 캐소드 공급 가스로 공기를 공급하여 계산한 결과(Air_calculation)는 산소를 공급한 경우의 결과(O₂_calculation)보다 전 부하 영역에서 스택 전압이 낮음을 알 수 있다. 이는 **Figure 2**에서 알 수 있듯이 캐소드 공급 가스로 공기를 대신하여 산소를 사용하게 되면 촉매 부근의 반응물질인 산소의 농도가 증가되기 때문에 가역 개회로 전압(O₂_OCV)이 증가하고 활성화 과전압(O₂_Vact)이 감소하여 스택의 출력 전압이 증가하기 때문이다. 또한 본 연구의 전류밀도 범위에서는 캐소드 공급 가스로 공기인 경우와 산소인 경우에 대한 저항 과전압(Vohm)과 농도 과전압(Vcon)은 거의 동일한 값을 나타낼 수 있다.

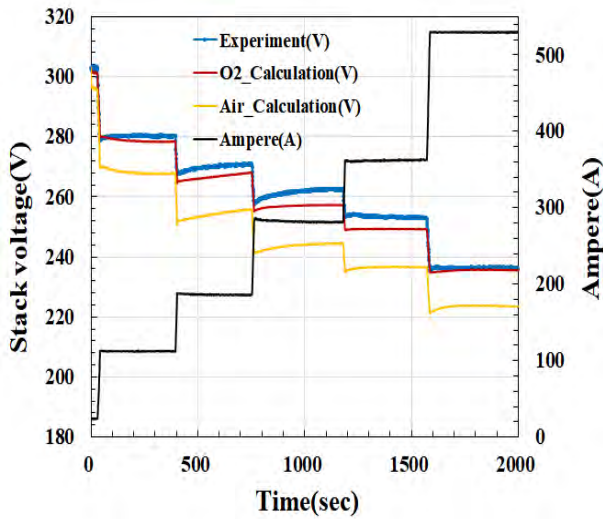


Figure 1: Comparison of the stack voltage between the experiments and the simulation

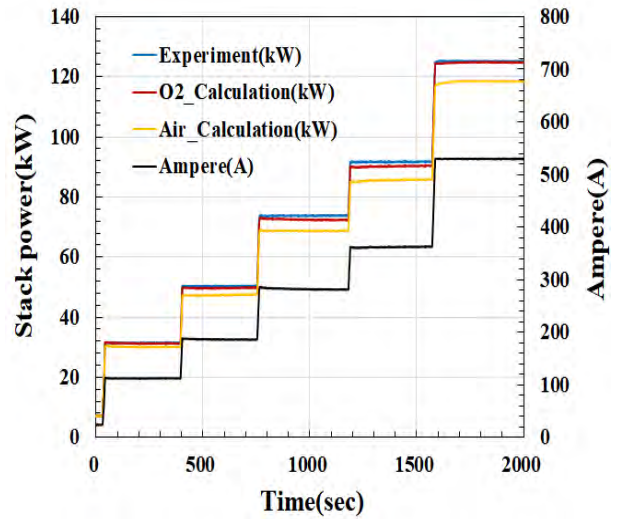


Figure 3: Comparison of the stack power between the experiments and the simulation

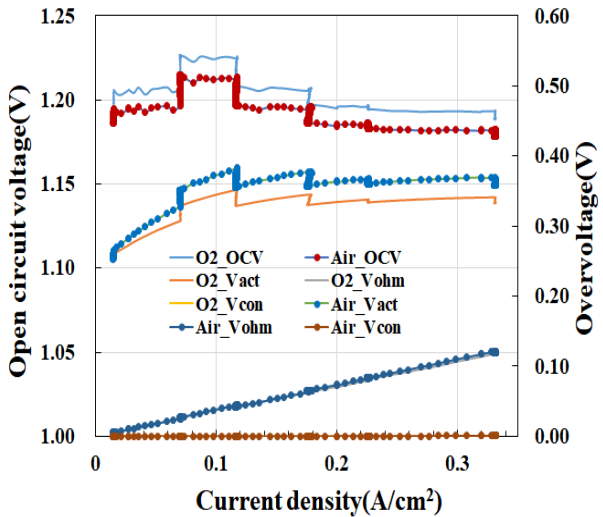


Figure 2: Characteristics of the open circuit voltage and overvoltage for the sing cell

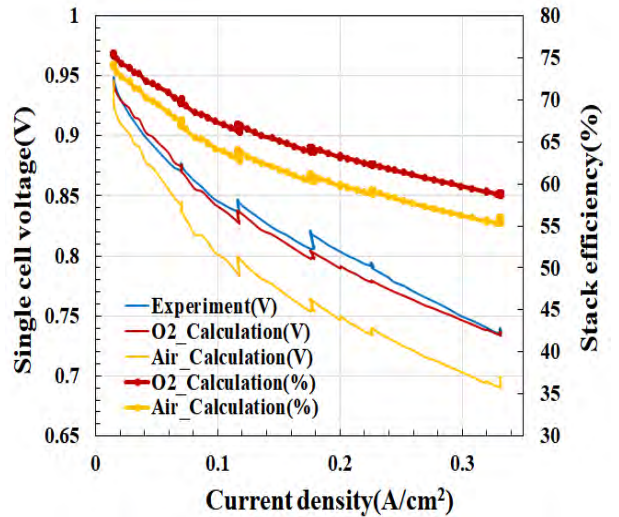


Figure 4: I-V characteristics of the cell

Figure 3은 Figure 1과 동일한 조건에서의 스택 출력값을 보여주고 있다. 전 부하 영역에서 실험 결과와 계산 결과 값이 비슷함을 알 수 있다. 부하 530(A)에서 스택 출력은 약 125(kW)임을 알 수 있다. 캐소드 공급가스로 공기를 공급한 경우에는 전 부하 영역에서 스택 출력이 산소로 공급한 경우 보다 낮으며 부하 530(A)에서의 스택 출력은 약 118(kW)임을 알 수 있다.

Figure 4는 Figure 1과 동일한 조건에서의 평균 단 셀 전압(V)과 스택 효율(%)을 보여주고 있다. 평균 단 셀 전압은 전 부하 영역에서 실험 결과(Experiment)와 계산 결과(O2_Calculation)가 비슷한 경향임을 알 수 있다.

스택 효율은 전류밀도가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 캐소드 공급가스로 산소를 공급하여 운전한 경우의 효율

(O2_Calculation(%))이 공기를 공급하여 운전한 경우 (Air_Calculation(%))보다 전 부하 영역에서 높음을 알 수 있다. 연료전지 스택이 주 운전 영역인 전류밀도가 0.33(A/cm²)에서 스택 효율이 산소를 공급하여 운전한 경우 약 59%, 공기를 공급한 경우는 약 55%임을 알 수 있다.

Figure 5는 연료전지 애노드 및 캐소드 운전압력을 253312(Pa)로 일정하게 하고 캐소드 공급 가스로 산소와 공기를 공급한 경우에 대하여 냉각수 출구온도에 따른 각각의 부하에서의 스택 전압을 계산한 결과를 나타내고 있다. 각각의 냉각수 출구온도에서 산소로 운전한 경우가 공기로 운전한 경우보다 스택 전압이 높음을 알 수 있다. 또한, 스택 전압은 산소로 운전한 경우 보다 공기로 운전한 경우가 냉각수 출구온도의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 이는

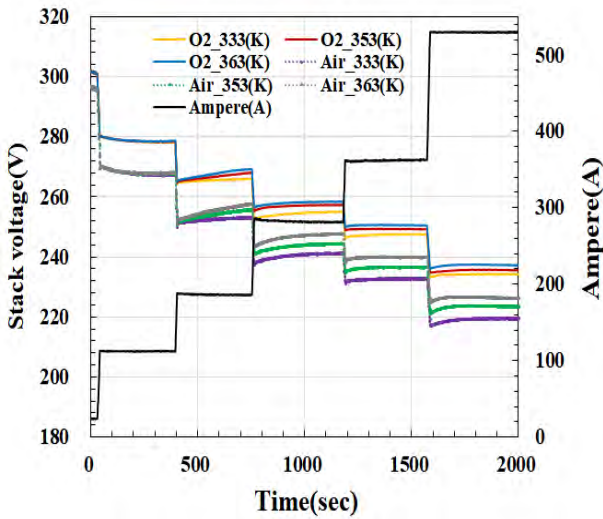


Figure 5: Effect of stack operation temperature

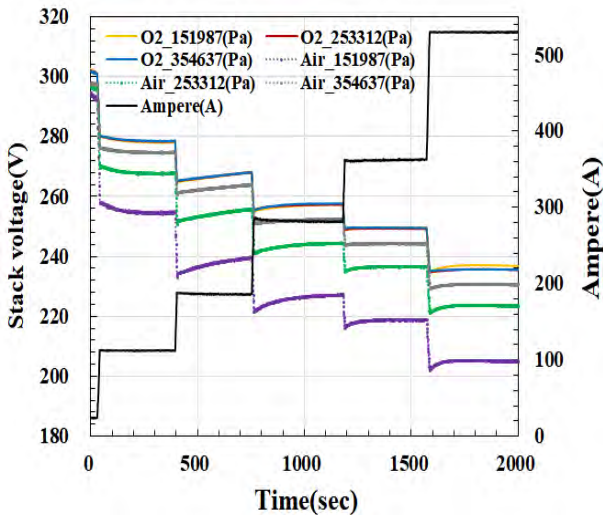


Figure 6: Effect of stack operation pressure

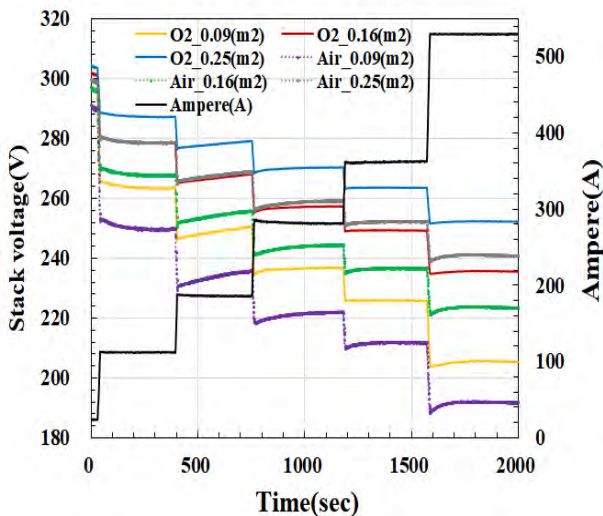


Figure 7: Effect of active area of one cell

Figure 2에서 설명한 가역 개회로 전압과 활성화 과전압의 영향 때문이다. 캐소드 공급 가스로 산소와 공기를 공급한 경우 각각에 대하여 냉각수 출구 온도가 높을수록 스택 전압이 높음을 알 수 있다. 부하가 112(A)에서는 냉각수 출구 온도에 따른 스택 전압의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 낮은 전류에서의 스택 전압손실은 활성화 과전압이 대부분을 차지하기 때문이다. 활성화 과전압에 영향을 미치는 인자로는 반응물질의 농도, 전극 표면의 거칠기, 공급가스의 압력, 적절한 촉매의 사용 및 스택의 운전 온도 등이 있다. 본 계산에서는 냉각수 출구 온도를 변경하여 스택의 운전 온도만을 변경하였다. 냉각수 출구 온도의 증가하면 스택의 운전 온도가 증가하여 활성화 과전압을 저감할 수 있지만 낮은 부하에서는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

부하가 186(A)이상에서는 부하가 증가함에 따라 냉각수 출구 온도가 증가하면 스택 전압이 높아짐을 알 수 있다. 본 연구의 계산 범위에서는 막의 가슴이 적정하게 유지되어 스택의 운전 온도가 높을수록 이온 전도도가 증가하고 막으로의 기체 확산성이 좋아지기 때문에 저항 과전압이 감소하여 스택 전압이 높아지게 된다.

Figure 6은 연료전지 스택의 냉각수 출구 온도를 353(K)로 일정하게 하고 캐소드 공급 가스로 산소와 공기를 공급한 경우에 대하여 동일한 애노드 및 캐소드 운전압력에 따른 각각의 부하에서의 스택 전압을 계산한 결과를 나타내고 있다.

각각의 동일한 애노드 및 캐소드 운전 압력에서 산소로 운전한 경우가 공기로 운전한 경우보다 스택 전압이 높음을 알 수 있다. 이는 Figure 2에서 설명한 가역 개회로 전압의 증가와 활성화 과전압의 감소의 영향 때문이다.

캐소드 공급 가스를 산소로 공급한 경우 동일하게 애노드 및 캐소드 운전 압력이 증가하여도 스택 전압은 거의 변화가 없지만 캐소드 공급 가스를 공기로 공급한 경우에는 동일하게 애노드 및 캐소드 운전 압력이 증가하면 각각의 부하에서 스택 전압도 증가함을 알 수 있다. 압력의 증가는 촉매 부근의 영역에서의 반응물질을 증가시키기 때문에 활성화 과전압이 감소되기 때문이다.

Figure 7은 연료전지 스택의 냉각수 출구 온도 353(K), 애노드 및 캐소드 운전 압력이 253312(Pa)로 일정하게 하고 캐소드 공급 가스로 산소와 공기를 공급한 경우에 대하여 단일 반응면적에 따른 각각의 부하에서의 스택 전압을 계산한 결과를 나타내고 있다.

각각의 단 셀 반응면적에서 산소로 운전한 경우가 공기로 운전한 경우보다 스택 전압이 높음을 알 수 있다. 이는 Figure 2에서 설명한 가역 개회로 전압과 활성화 과전압의 영향 때문이다. 단 셀의 반응면적이 증가함에 따라 출력 전압이 높아짐을 알 수 있다. 이는 전류는 스택내부에 반응할 수 있는 수소량에 비례하기 때문에 전류의 변화는 없지만 반응면적이 증가함에 따라 전류밀도가 낮아지게 된다. 식 (5)와 식 (8)에서 알 수 있듯이 전류밀도가 낮아지면 활성화

전압 손실과 저항 전압 손실이 감소하게 되고 출력 전압은 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 120kW급 캐소드 공급가스로 산소를 공급하여 운전하는 고분자 전해질 연료전지의 스택 모델을 개발하여 실험 결과와 비교 검증하였으며 본 연구의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부하에 따른 스택 출력 전압을 실험 결과와 비교한 결과 부하 280(A)에서 계산 결과 값이 최대 약 1.9(%)정도 낮았고, 연료전지 스택의 주 운전 영역인 부하 530(A)에서는 거의 동일한 스택 출력 전압으로 실험 결과를 모사할 수 있었다.
- (2) 캐소드 공급 가스로 산소를 공급하여 운전한 경우의 스택 출력 전압이 공기를 공급하여 운전한 경우보다 전 부하 영역에서 높음을 알 수 있다.
- (3) 스택의 운전 온도가 높을수록 이온 전도도가 증가하고 막으로의 기체 확산성이 좋아지고 저항 과전압이 감소하기 때문에 냉각수 출구 온도가 증가하면 스택 전압이 높아짐을 알 수 있다.
- (4) 각각의 동일한 애노드 및 캐소드 운전 압력에서 산소로 운전한 경우가 공기로 운전한 경우보다 스택 전압이 높고, 산소를 공급한 경우 운전 압력이 증가하여도 스택 전압은 거의 변화가 없지만 공기를 공급한 경우에는 운전 압력이 증가하면 각각의 부하에서 스택 전압도 증가함을 알 수 있다.
- (5) 단 셀의 반응면적이 증가함에 따라 활성화 전압 손실과 저항 전압 손실이 감소하게 되어 스택 출력 전압이 높아짐을 알 수 있다.

후 기

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

Author Contributions

Conceptualization, J. I. Kim and S. K. Park; Methodology, J. I. Kim; Software, J. I. Kim; Validation, J. I. Kim and S. K. Park; Formal Analysis, J. I. Kim; Investigation, J. I. Kim; Writing—Original Draft Preparation, J. I. Kim; Writing—Review & Editing, S. K. Park;

References

- [1] International Maritime Organization (IMO), Report of the Marine Environment Protection Committee on its 72nd Session, 2018.
- [2] Decarbonising Maritime Transport, Pathways to

zero-carbon shipping by 2035, Case-Specific Policy Analysis, OECD/ITF, 2018.

- [3] E. Fontell, “Wärtsilä Fuel Cell Development Program,” The 8th annual Green Ship Technology Conference, 2011.
- [4] Energy observer project, www.energy-observer.org, Accessed September 2, 2019.
- [5] e4ship project, www.e4ships.de, Accessed September 2, 2019.
- [6] C. H. Choi, 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, “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, 2016.
- [7] M. H. Kim, “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, 2007 (in Korean).
- [8] EMSA European Maritime Safety Agency, Study on the use of fuel cells in shipping, DNV GL, 2017.
- [9] W. P. Joseph and E. K. Leonard, “Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High-Speed Passenger Ferry,” SANDIA REPORT, 2016.
- [10] W. P. Joseph and E. K. Leonard, “Optimization of Zero Emission Hydrogen Fuel Cell Ferry Design, With Comparisons to the SF-BREEZE,” SANDIA REPORT, 2018.
- [11] J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [12] J. T. Pukrushpan, Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors, Ph.D. Dissertation, Mechanical Engineering, University of Michigan, USA, 2003.
- [13] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou and H. Peng, Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design, Springer, 2005.
- [14] EUTech Scientific Engineering, Simulation Toolbox for the Design and Development of Thermodynamic System in MATLAB/Simulink, 2009.
- [15] P. I. Frank, P. D. David, L. B. Theodore and S. L. Adrienne, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc. 2008.