

전력공급장치를 이용한 선박용 연료전지 시뮬레이터의 구현

박도영¹ · 오진석[†]

(원고접수일 : 2012년 9월 6일, 원고수정일 : 2012년 10월 31일, 심사완료일 : 2012년 11월 12일)

Implementation of Fuel Cell Simulator for Ship Using the Programmable Power Supply

Do-Young Park¹ · Jin-Seok Oh[†]

요약 : 연료전지를 선박에 적용하는 연구를 위해서는 연료전지 특성을 고려한 전력 시스템 설계 및 부하 제어에 대한 연구가 필요하다. 하지만 연료전지를 직접 실험하기 위해서는 여러 보조기기들과 복잡한 제어 기술이 필요하다. 이러한 이유로 연료전지 시뮬레이터가 필요하며, 이를 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문에서는 자동차, 소형 선박 등에 적용되고 있는 PEMFC에 관하여 LabVIEW를 기반으로 시뮬레이션 하였다. 또한 이러한 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 프로그램이 가능한 전력공급장치를 이용하여 시뮬레이터를 제작하여 연료전지의 특성을 구현하였다. 이를 통해 연료전지의 분극화 곡선과 변수에 따른 I-V특성을 확인할 수 있었다.

주제어 : PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), 전력공급장치, 분극화 곡선, 연료전지 시뮬레이터

Abstract: In order to study to apply the fuel cell, the study about the power system design and the load control is needed. However, to experiment the fuel cell need the auxiliary device and the complex control technology. For this reason the simulator is needed and such study is in progress actively. In this paper, the PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) that is applied the vehicle, the small sized ship was simulated based on LabVIEW. The characteristic of fuel cell simulator was implemented based on a simulation data using the programmable power supply. The I-V characteristic according to various factors and the polarization curve of fuel cell were analysed.

Key words: PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell), Programmable Power Supply, Polarization Curve, Fuel Cell Simulator

1. 서 론

최근 고유가와 환경문제로 인하여 태양광, 풍력, 파력, 연료전지 등의 신재생에너지 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 연료전지는 전기화학적 에너지 변환장치로서 연료의 화학에너지를 다른 연소 과정 없이 직류전기로 변환하기 때문에 내연기관에 비해 효율이 높고, 배기가스가 없어 환경적이다. 또한 긴 수명, 모듈화의 특성 등의 여러 장점

을 가지기 때문에 대체에너지원으로 기대되고 있어 그에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 종류의 연료전지 중에 PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)의 경우 소형 분산 발전용 및 휴대용 동력원으로 많이 사용되어, 가정용 분산 발전기, 스쿠터 및 자동차, 소형 레저 선박 등에 적용되고 있다. 소형 레저 선박은 유럽의 경우 ZEM Ship Project를 통해 연료전지 시스템 및 제어 시스

[†] 교신저자(한국해양대학교 기관공학부, E-mail: ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4283)

¹ 한국해양대학교 메카트로닉스공학과, E-mail: park_dy@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4866

템을 개발 후 상용화하여 현재 운행 시험 중이며, 국내에서는 국가 과제의 형태로 연료전지를 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 하지만 연료전지는 부하 변화에 대해 느린 응답 특성을 가지고 있기 때문에 환경이 불규칙적으로 변하는 해상 환경에 맞게 추진용으로 전력을 공급하려면 추가 보상 전원과 그에 맞는 제어 알고리즘 연구가 필요한데, 연료전지 시스템을 구동하기 위해서는 수소, 산소 공급과 더불어 BOP(Balance of Plant)인 송풍기, 냉각펌프 등 설비들의 복잡한 제어가 필요하므로 연료전지를 적용한 시스템의 다양한 실험과 연구를 진행하기에 어려움이 있다. 따라서 이러한 연구를 위한 시뮬레이터가 필요하고, 이를 위한 다양한 방법의 연구가 진행되고 있다[1]. 하지만, 대부분의 연구는 하나의 고정된 I-V 특성 곡선만을 시뮬레이션 하였으며, 온도, 연료량, 압력 등의 다양한 환경 요인에 따라 변화하지 않는다.

본 논문에서는 PEMFC를 온도, 압력, 연료량 등의 다양한 환경요인에 따른 함수로 모델링 하였으며, 이상에서 Programmable Power Supply에 의해 I-V 특성을 시뮬레이터로 구현하였다. 구현된 연료전지 시뮬레이터는 LabVIEW를 통하여 프로그래밍 되었으며, NI사의 Compact RIO를 이용하여 전압, 전류 측정 및 Power Supply, PC와의 통신한다. 또한, PC측 GUI(Graphic User Interface) 모니터링 프로그램을 이용하여 시뮬레이터의 상태를 사용자가 확인할 수 있다.

2. 연료전지의 특성

2.1 PEMFC 동작 원리

연료전지는 전기화학적 에너지 변환장치이므로 애노드와 캐소드 두 전극의 전기화학 반응에 의해서 전위차를 발생시킨다. 이러한 전기화학 반응은 전해질과 막 사이의 계면에 있는 촉매 표면에서 일어난다. 막 한쪽에서 공급되는 수소는 두 기본 성분인 수소이온과 전자로 분할된다. 수소이온은 막을 통해 이동하고, 전자는 전기전도성 전극, 집전 장치, 외부 회로를 통해 이동한다. 이 전자는 막과 다른 전극 사이의 촉매에서 막을 통과한 수소이온, 그 막에서 공급한 산소와 만난다. 이러한

반응으로 생성되는 물은 과잉 산소 흐름에 의해 전지로부터 밀려나간다. 이러한 반응의 결과 직류 전류가 흐르게 된다. 하나의 연료전지 셀에서 이론적으로 1.2V 정도를 발생하므로 실용적 전압을 발생하려면 몇 개의 셀을 직렬, 병렬 연결을 통해 출력전압을 조절할 수 있다.

2.2 PEMFC 전기적 특성 및 분극화 곡선

연료전지의 전기적 특성은 다음 그림의 활성화 분극 곡선과 같이 전류가 증가함에 따라서 전압이 감소하며, 공급되는 연료, 송풍에 의해 공급되는 공기의 량, 압력, 동작 온도 등에 따라서 I-V 특성은 변화한다. 안정적으로 전력을 공급하기 위해서는 이러한 변수들을 고정시켜 운전할 수 있도록 하는데, 연료전지에 부하에 맞는 공급 공기 및 연료량이 조절되지 않으면 실제 동작점은 이 I-V 특성 곡선을 벗어나게 된다. 또한 공기 및 연료유량 제어 응답 속도는 전지내의 전기 화학 반응 속도보다 매우 느리므로 연료전지가 부하에 반응하는 응답 속도도 느려지게 된다. 그로 인해 연료전지는 급격한 부하 변화에 대한 응답 속도가 느려지게 되어, 이를 보완하기 위한 기타 전원 장치가 필요하게 된다[2].

연료전지가 개회로 상태에서의 전지 전위는 이론전지 전위와 같거나 이에 가까울 것으로 예상할 수 있으나, 사실은 이 개회로 상태의 전위는 이론 전위 값을 내지 못한다. 이는 연료전지에서 외부 전류가 발생하지 않더라도 손실이 생김을 의미한다. 연료전지의 전압 손실 요인은 다음과 같다.

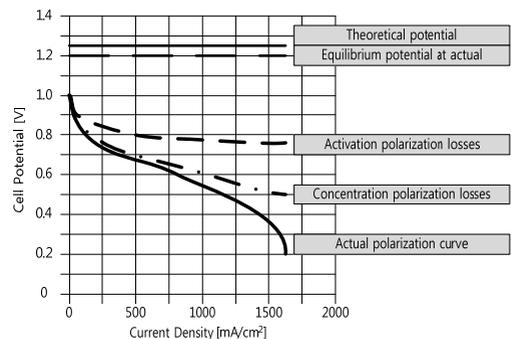


Figure 1: Polarization Curve of Fuel Cell.

- 전기화학 반응 속도
- 내부 전기 저항과 이온 저항
- 반응물이 반응 부위에 도달하는 용이도
- 내부 전류(미주 전류, Stray Current)
- 반응물의 크로스오버(Cross Over)

위와 같은 손실로 인하여 **Figure 1**번과 같이 이론 전위에서 ‘실제 분극 곡선’의 형태로 나타나게 된다.

2.3 선박용 PEMFC 시스템 구성

연료전지를 선박에 적용하기 위해선 염분에 대한 대책을 마련해야한다. 염분 성분인 염화나트륨은 대기 중에 포함되어있는 불순물 중 하나이며 지역과 기온에 의해 크게 좌우된다. 해상 환경일 경우 미립자 형태의 염분이 많은 것으로 보고되고 있어 탈염시설이 반드시 필요하다. 연료전지는 염분 농도가 있는 곳에서는 장기간의 시간을 걸쳐 전압강하가 일어나며, 이는 염분이 전해질 막 내에 침투하여 전해질 막의 이온전도도를 감소시켜 나타난 결과로 보이며, 나트륨 이온이 침투하는 경우 수소이온 자리에 나트륨 이온 형태로 자리 잡게 되면 이온 전도도를 감소시킬 수 있다[3]. 이 외에도 열 교환기나 냉각기의 염분 부식 처리와 스택 내부의 공급되는 물의 고도 정수처리 시설이 추가적으로 필요하다. **Figure 2**는 선박용 연료전지 시스템 구성도이다.

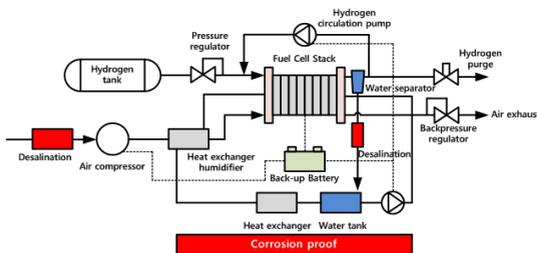


Figure 2: Applied fuel cell system for ship on ocean.

탈염 장치와 부식 장비와 더불어 선체의 동요에 따른 연료전지 특성 분석 연구가 필요하며, 소형 선박에 적용할 경우 경량화 연구도 같이 필요하다. 본 논문에서는 염분에 대한 변수를 탈염 장치가

설치되었다고 가정하고 진행하였다.

3. 연료전지 모델링

3.1 PEMFC의 분극 곡선

연료전지는 전기가 생성되는데 모든 에너지가 전기로 변환되는 것은 아니다. 화학 반응에서는 다소의 엔트로피가 생성되므로, 수소의 고발열량 일부는 전기로 변화되지 못한다. 연료전지에서 반응 엔탈피가 전기로 변환될 수 있는 양은 Gibbs 자유 에너지에 해당하며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

여기서 ΔH 는 생성물과 반응물의 생성열 차이이고, T 는 온도, ΔS 는 생성물과 반응물의 엔트로피 차이이다. 이 Gibbs 자유 에너지를 사용하여 온도와 압력 함수의 이상적 전지 전위를 나타내면 식 (2)와 같다.

$$E_{T,P} = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) + \frac{RT}{nF} \ln\left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right] \quad (2)$$

F : Faraday constant (96,485 C/mol)

R : Gas constant (8.314 J/molK)

100°C 미만에서는 온도에 따른 ΔH 와 ΔS 의 오차가 아주 적기 때문에 이 값은 무시하고, 반응물은 대기압 기체, 생성물이 물인 경우로 하여 식 (2)를 계산하면 다음 식 (3)과 같다.

$$E_{T,P} = 1.482 - 0.000845 \times T + 0.0000431 \times T \times \ln(1 \times 0.21^{0.5}) \quad (3)$$

연료전지 성능에서 가장 중요한 특성은 분극 곡선이다. 연료전지의 이론 전위에서 손실을 반영한 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$E = E_{T,P} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i + i_{lo}}{i_c}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) - iR_i \quad (4)$$

α : Transfer coefficient

i_{lo} : Current losses

i_c : Exchange current density

i_L : Limiting current density

R_i : Internal resistance

여기서 교환전류밀도는 전기화학 반응을 진행시키

기 위한 전극의 준비상태(readiness)의 척도이다. 교환전류밀도가 크면 전극 표면이 활성화적이게 되는데 이는 전하가 전해질로부터 전극 표면으로 또는 그 반대로 이동하면서 극복해야 하는 에너지 장벽이 낮아지기 때문이다. 그래서 교환전류밀도가 클수록, 과전위에 관계없이, 더 많은 전류가 발생된다. 교환전류밀도는 반응물의 농도와 동작 온도, 작동기체의 분압에 따라서 변화하게 되는데 이는 식 5로 나타낼 수 있다.

$$i_c = i_{ref} a_c L_c \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^\gamma \exp\left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}}\right)\right] \quad (5)$$

a_c : Catalyst surface area
 L_c : The amount of catalyst

기준압력 P_{ref} 는 대기압, 기준온도 T_{ref} 는 25℃ (298.15K)이다[4].

3.2 분극 곡선 모델링



Figure 3: Polarization Curve Simulation.

연료전지 분극 곡선을 LabVIEW를 통해 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 프로그램에서는 연료전지 분극 곡선에 영향을 미치는 온도, 작동기체의 분압, 한계전류밀도 등을 변수로 두고 GUI를 통해 이를 사용자가 확인할 수 있도록 하였다. Figure 3은 시뮬레이션을 통해 구현된 분극 곡선 그래프이다. 전원공급장치로 구현하기 위해서 셀 단위에서 확장하여 Table 1과 같은 용량으로 시뮬레이션 하였다. 0.5~70[A] 범위의 Ballard NEXA(1.2[kW]) 연료전지를 10배 축소하여 0~7[A] 용량으로 구현하였다[5].

3.1절에서 언급한 변수들의 변화에 따라 연료전지 시뮬레이션의 I-V 곡선이 변화하는지 확인하였다. Figure 4는 동작 온도를 변화시켰을 때의 셀 전위의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과 온도 증가에 따라 전위가 높아짐을 알 수 있다. 하지만 Gibbs의 자유에너지 식에서 보면 온도가 증가함에 따라 전위가 손실되게 된다. 그럼에도 불구하고 전위가 높아지는 이유는 온도의 증가에 따라 교환전류밀도가 지수적으로 증가하고, 물질전달 특성이 현저하게 개선되기 때문에 전압 이득이 생겨 Figure 4과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 1: Specification of PEMFC Simulator.

Programmable Power Supply	1[kW], 0~50[V], 10[A]
Fuel Cell Simulator Voltage Range	20~40[V]
Fuel Cell Simulator Current Range	0~7[A]

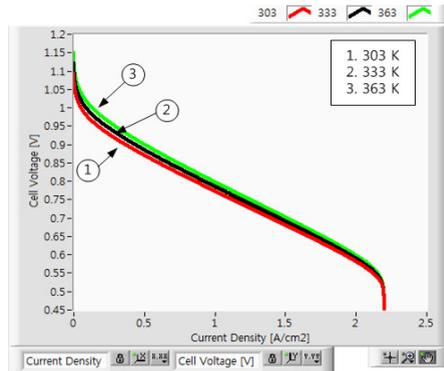


Figure 4: I-V Curve(Temperature)

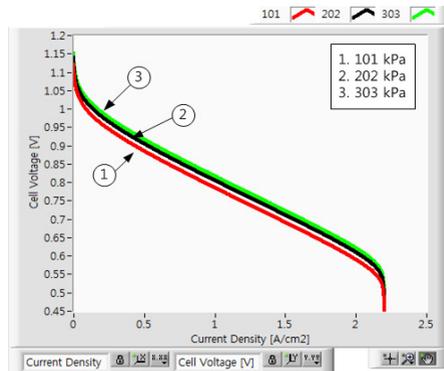


Figure 5: I-V Curve(Pressure of a Reactant)

또한 반응물의 분압도 증가하면 셀 전위가 높아진다. Figure 5는 분압에 따른 셀 전위의 시뮬레이션 결과이다. 이는 전극에서의 반응 기체 농도 증가로 인한 교환전류밀도가 증가하기 때문이다. 교환전류밀도는 표면 농도에 비례하며 표면 농도는 압력에 정비례한다. 또한, 촉매 표면에서 반응물 농도는 전류밀도에 따라 변화하는데, 전류 밀도가 높아지면 표면 농도는 감소하게 된다. 여기서 반응물이 표면에 도달하는 속도보다 빠르게 소비된다면, 표면 농도는 0이 되므로 연료전지는 출력을 낼 수 없게 된다. 이러한 상태가 되는 전류밀도를 한계전류밀도라 하며 이 값에 따라 연료전지의 분극 곡선은 큰 차이를 보인다. 다음 Figure 6은 한계전류밀도에 따른 셀 전위의 시뮬레이션 결과이다. 한계전류밀도가 증가함에 따라 연료전지 셀이 낼 수 있는 전류 한계가 높아짐을 알 수 있다.

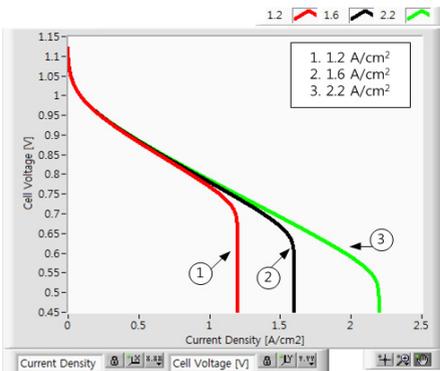


Figure 6: I-V Curve(Limiting Current Density)

4. PEMFC 시뮬레이터

4.1 연료전지 시뮬레이터 하드웨어

연료전지 시뮬레이터는 전원공급장치, Compact RIO, 모니터링 컴퓨터로 구성된다. LabVIEW를 통해 시뮬레이션 된 연료전지 분극 곡선을 프로그램이 가능한 전원공급장치를 이용하여 그 특성을 구현하였다. 전원공급장치는 OPM-5010D 모델로 1kW 출력범위와 RS-232C 통신 포트를 가지고 있다. 이 통신 포트를 통해 SCPI(Standard Commands for Programmable Instruments) 명령어를 사용하여 출력을 제어할 수 있다. 연료전지 시뮬레이션을 결과에 따라 전원공급장치는 전압 명령을 받아 그

값에 맞는 전압을 출력한다. 이러한 통신과 시뮬레이션이 프로그래밍 되어 있는 중앙제어기기로는 National Instrument사의 Compact RIO로 연료전지 시뮬레이션, 전원공급장치와의 통신, 제어를 위한 전압, 전류의 측정 그리고 모니터링 컴퓨터와의 통신 역할을 수행한다. Figure 7은 연료전지 시뮬레이터의 구성도이다. 출력되는 전압은 부하의 변화에 따른 사용 전류를 측정하여 그 전류에 맞는 전압을 출력하도록 제어된다. 본 논문에서는 Figure 7의 점선 부분인 시뮬레이터만 구현하였으며, DC-DC Converter는 구축되지 않았다.

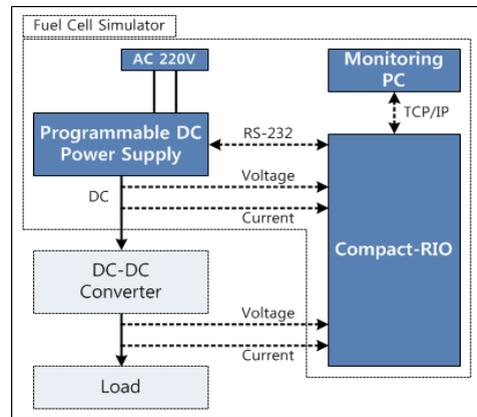


Figure 7: Configuration of the Fuel Cell Simulator.

4.2 연료전지 시뮬레이터의 I-V 특성

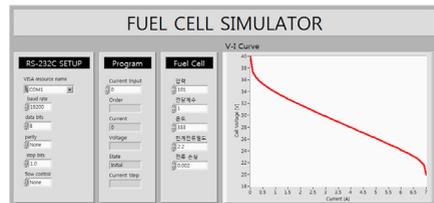


Figure 8: Fuel Cell Simulator Front Panel.

Figure 8은 연료전지 시뮬레이터 메인 화면이다. 전원공급장치와의 통신 설정과 분압 및 작동온도 등의 연료전지 변수를 설정할 수 있으며, 그 변화 추이를 그래프를 통해 확인할 수 있다. 시뮬레이터가 동작 중에 연료전지의 변수를 변화시킬 수 있기 때문에 여러 환경 변수를 적용하여 선박용 연료전지 전력 시스템 설계와 실험에 활용될 수 있을 것이다.

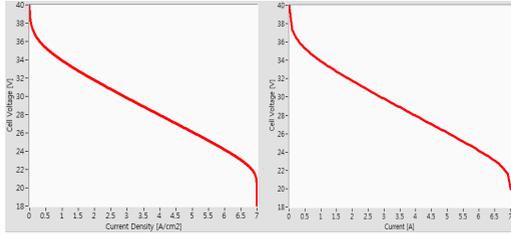


Figure 9: I-V Curve of Fuel Cell Simulator.

Figure 9는 전원공급장치를 통해 출력된 I-V 곡선이다. 시뮬레이터가 시뮬레이션 한 결과와 같은 지 검증하기 위하여 Table 1과 같은 전압 범위 20~40[V], 전류 범위 0~7[A]에 맞게 출력하였다. 좌측의 그림이 시뮬레이션 된 I-V 곡선이고, 우측이 전력공급장치를 통해서 출력된 I-V 곡선이다. 그 결과값을 식 (6)의 상관계수 공식을 이용하여 비교하였다.

$$CC = \frac{\sum_{t=0}^T (D_s \times D_m)}{\sum_{t=0}^T (D_s^2 \times D_m^2)} \quad (6)$$

CC: Correlation Coefficient
 D_s : Simulation data
 D_m : Monitoring data

상관관계 공식은 두 변량 사이의 상관관계를 숫자로 표현한 수식으로 값이 1일 경우는 완전한 적극적 상관관계가 있으며, 값이 -1일 경우는 완전한 소극적 상관관계이고, 값이 0일 경우는 하등의 관계가 없다는 것을 의미한다. 이러한 식을 이용하여 시뮬레이터에서 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 1 값을 얻을 수 있었으므로 시뮬레이터가 시뮬레이션 결과를 만족함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 PEMFC의 기본적인 분극 곡선을 분석하여 LabVIEW를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이 시뮬레이션을 통해 작동 온도, 반응물의 작동 압력, 농도와 관계된 한계전류밀도 등의 환경요인을 변화시켜 연료전지의 특성을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과 작동 온도와 분압이 높아짐에 따라 셀 전위는 증가함을 알 수 있었으며, 한계전

류밀도가 높아짐에 따라 출력할 수 있는 전류가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 시뮬레이션을 바탕으로 프로그램이 가능한 전원공급장치를 이용하여 시뮬레이터를 구성하였으며, 연료전지 I-V 특성을 구현하였다. 그리고 출력된 I-V 특성을 시뮬레이션 값과 비교하였으며, 그 값이 비슷하게 출력됨을 확인하였다. 기존의 고정된 I-V 특성을 가진 시뮬레이터에 비해 다양한 환경조건에서의 연료전지 특성을 확인할 수 있었고, 여러 환경 변수가 변경 가능하기 때문에 환경 변수에 따른 연료전지 전력 시스템 실험과 DC/DC 컨버터와 연계한 연료전지 전력 시스템 설계 연구에 도움이 될 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2012년도 대외경쟁력 강화를 위한 연구 강화 지원사업의 지원과 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구 결과입니다.

참고문헌

- [1] Prabha Acharya, Prasad Enjeti, "An advanced fuel cell simulator" IEEE Applied Power Electronic Conf.(APEC) Proc., vol. 3, pp. 362-366, 2004.
- [2] Hak-Geun Jeong, Su-Bin Han, Bong-Man Jung, Suk-In Park, Seung-Weon Yu and Ku-Deok Kim, "A study on fuel cell powertrain system design", Korea Institute of Power Electronics, Journal of The Korean Society of Marine Engineering, pp. 682-684, 2000 (in Korean).
- [3] Development of the Fuel Cell Ship and Fuel Cell for the Ship", The Korea Shipbuilders Association 1st Report, 2008
- [4] Frano Barbir, "PEM fuel cells - theory and practice-" Elsevier Inc., 2005.
- [5] Jun-Hyun Oum, Young-Cheol Lim and Young-Gook Jung, "Implementation of a DSP based fuel cell Hardware simulator" Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 23, no. 1, pp. 59-68, 2009 (in Korean).