

공급유량 및 스택온도의 변이에 따른 200W급 PEM형 연료전지의 전기적 성능특성

논문
58P-4-37

Electrical Performance Characteristics of 200W PEM-Type Fuel Cells with Variations on Mass Flow Rate and Stack Temperature

홍 경 진* · 박 세 준† · 최 용 성** · 이 경 섭**
(Kyung-Jin Hong · Se-Joon Park · Yong-Sung Choi · Kyung-Sup Lee)

Abstract - The polymer electrolyte membrane fuel cell(PEMFC) with the advantages of low-operating temperature, high current density, low cost and volume, fast start-up ability, and suitability for discontinuous operation becomes the most reasonable and attractive power system for transportation vehicle and micro-grid power plant in a household. 200W PEM-type FCs system was integrated by this study, then the electrical characteristics and diagnosis of the fuel cell were analyzed with variations on mass flow rate and stack temperature. The ranges of the variations are 1~8L/min on H₂ volume and 20~70°C on stack temperature.

Key Words : PEM-Type FCs, Mass Flow Rate, Stack Temperature, Micro-Grid Power Plant

1. 서 론

화석연료를 대체할 지속가능한 수많은 신재생에너지자원 중 수소경제(Hydrogen economy)는 전 세계에 걸쳐 특별한 관심을 받고 있으며, 수소를 기본으로 한 에너지 시스템은 실현가능하고, 그 응용에 있어 효율적이고 오염이 없으면서 안전하다는 점 등의 유리한 점이 많다고 할 수 있다[1]. 또한 수소는 전기를 생산하는데 있어 이상적인 보충물을 제공하며, 양질의 에너지 캐리어를 갖고 있다는 점과 탄소를 함유하고 있지 않다는 점, 그리고 그 사용에 있어 오염물질을 생산하지 않는다는 점 때문에 새로운 에너지로서 높게 평가 받고 있다[2].

수소를 에너지원으로 사용하는 여러 가지의 응용분야 중 연료전지는 전기화학 반응에 의해 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치로, 일반 배터리와는 달리 재충전이 필요 없어 연료가 공급되는 한 계속해서 전기를 만들어 낼 수 있고, 환경오염 물질을 발생시키지 않는 청정 에너지원으로 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료전지의 연료로는 수소, 메탄올, 천연가스, 가솔린 등이 될 수 있으나, 수소를 제외한 다른 연료는 개질을 통하여 수소를 생산하게 되므로 최종적으로 순수한 수소가 연료로써 가장 적합하다고 할 수 있다. 수소 이외의 연료는 분자식에 탄소가 있기 때문에 필연적으로 이산화탄소가 발생되지만 수소연료전지는 순수한 물만을 배출하므로 무공해 발전방식이다[3-6].

본 논문에서는 중·소규모 분산전원에 적용 가능한 200W급 고분자 전해질형(PEM; polymer electrolyte membrane)

연료전지시스템을 구현하였고 연료전지의 성능특성에 영향을 미치는 여러 인자 중 공급유량 및 스택온도의 변이에 따른 연료전지의 출력 특성과 성능을 평가하였다.

2. 이론적 고찰

연료전지의 구조는 전해질을 사이에 두고 두 전극이 샌드위치의 형태로 위치하며 두 전극을 통하여 수소이온과 산소이온이 지나가면서 전류를 발생시키고 부산물로서 열과 H₂O를 생성한다. 연료전지는 연료극(Anode)을 통하여 수소가 공급되고 산소극(Cathode)을 통하여 산소가 공급되면 연료극을 통해서 들어온 수소분자는 촉매(Catalyst)에 의해 양자와 전자로 나누어진다. 나누어진 양자와 전자는 서로 다른 경로를 통해 산소극에 도달하게 되는데, 양자는 연료전지의 중심에 있는 전해질(Electrolyte)을 통해 흘러가고, 전자는 외부회로를 통해 이동하면서 전류를 흐르게 하며 산소극에서는 다시 산소와 결합하여 최종적으로 H₂O가 된다.[7-9]

2.1 기본 반응

연료전지는 전기화학적 에너지 변환 장치이다. 이 장치에서는 표 1과 같이 수소측(anode)과 산소측(cathode)에서 동시에 전기화학 반응이 진행된다. 이러한 반응은 이온 전도성 전해질과 전기전도성 전극 사이의 계면에서 일어난다. 연료

표 1 연료전지의 화학반응식

Table 1 Chemical reaction equation on fuel cell

Anode	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
Cathode	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Overall	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

† 교신저자, 정회원 : 동신대 공대 전기공학과 겸임교수 · 공박
E-mail: yschoi67@dsu.ac.kr

* 정 회원 : 광주대 공대 신재생에너지공학과 교수 · 공박

** 시니어회원 : 동신대 공대 전기공학과 교수 · 공박

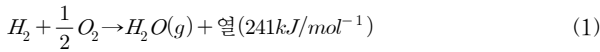
접수일자 : 2009년 11월 9일

최종완료 : 2009년 11월 16일

전지 전기화학 반응의 반응물은 기체이므로, 전극을 다공질로 만들어야 기체가 반응 부위에 도달하는 동시에 생성된 수분이 반응 부위에서 떠날 수 있다. 한편 위에 나타낸 반응들은 총괄 반응이며, 두 반응 모두 몇 단계의 중간 직렬 반응과 병렬 반응이 일어난다.[7-10]

2.2 운전온도의 영향

표 1에서 연료전지의 총괄 반응은 수소연소 반응과 같다. 수소연소는 발열 반응이므로 에너지가 방출하게 된다.



수소연소 반응의 엔탈피(286kJmol⁻¹)는 수소의 고위발열량이라 하며, 수소를 필요한 양 이상의 산소(또는 공기)로 연소시키고 25℃가 되도록 하면 생성된 H₂O는 미연소 산소와 함께 수증기의 형태로 존재하게 된다. 이때 발생하는 열이 241kJ로 적어지는데 이를 수소의 저위발열량이라 한다.

수소의 발열량은 연료전지에서 에너지 도입량의 척도가 되는데, 모든 에너지 도입량을 전기로 변환한다는 것은 불가능하다. 화학반응에서는 언제나 다소의 엔트로피가 생성되므로, 수소의 고위발열량 일부는 전기로 변환되지 못하기 때문이다. 연료전지에서 반응엔탈피(수소의 고위발열량)가 전기로 변환될 수 있는 양은 Gibbs 자유 에너지에 해당하며 다음 식 (2)와 같다.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

여기에서 ΔH는 반응 엔탈피의 변화, ΔS는 반응 엔트로피의 변화, T는 절대온도이다. 또한 연료전지의 이론 전위는

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (3)$$

이다. 여기에서 n은 전자의 수, F는 패러데이 상수(96487 C/mol)이고, E는 1.23V이다. 다시 식 (2)를 (3)에 대입하면

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) \quad (4)$$

가 된다. 전지의 이론 전위는 온도에 따라 감소하지만 일반적으로 운전 중의 연료전지에서는 그림 1과 같이 전지 온도

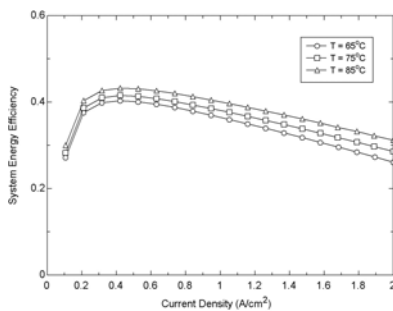


그림 1 연료전지 스택의 운전 온도에 따른 에너지 효율 변화[7]
Fig. 1 Variation of system energy efficiency at different operating temperatures of fuel cell stack[7]

가 높을수록 전지 전위가 높아지게 된다. 그 이유는 운전 중인 연료전지에서의 전압 손실은 온도에 따라 감소하여, 이 양이 이론 전위의 손실을 보상하는 양 이상이기 때문이다.[8]

2.3 반응물 유량

표 1의 반응식으로부터 하나의 산소에 대해 4개의 전자가 이동하며 수소의 경우 2개의 전자가 생긴다는 것을 유추할 수 있다. 따라서 산소와 수소의 사용량은 각각

$$O_2 \text{ 사용량} = \frac{In}{4F} = \frac{P_e}{4 \times V_c \times F} [mol/s] = \frac{32 \times 10^{-3} \times P_e}{4 \times V_c \times F} [kg/s] \quad (5)$$

$$H_2 \text{ 사용량} = \frac{In}{2F} = \frac{P_e}{2 \times V_c \times F} [mol/s] = \frac{2.02 \times 10^{-3} \times P_e}{2 \times V_c \times F} [kg/s] \quad (6)$$

이 된다. 여기에서 P_e는 전력, V_c는 셀 전압, n은 셀의 수이다. 그러나 산소는 보통 공기로부터 얻기 때문에 식 (5)를 공기사용량에 맞출 필요가 있다. 공기 중 산소의 몰 비는 0.21이고 공기의 분자량은 28.97×10⁻³kg/mol 이다. 따라서 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\text{공기사용량} = \frac{28.97 \times 10^{-3} \times P_e}{0.21 \times 4 \times V_c \times F} = 3.57 \times 10^{-7} \times \frac{P_e}{V_c} \quad (7)$$

일반적으로 유량이 클수록 연료전지 성능이 좋아진다. 순수 수소는 테드엔드 모드(S≈1)로 공급하거나 양론비(Stoichiometric ratio)를 1보다 약간 크게(1.1~1.2) 하지만, 기체 혼합물(연료 처리장치에서 배출되는 기체) 중의 수소는 양론비를 1이상(1.1~1.5)으로 공급해야 한다. 정확한 유량은 사실상 설계변수 중의 하나이다. 유량이 너무 크면 수소의 폐기로 인해 효율이 낮아지고, 반대로 유량이 너무 작으면 연료전지의 성능이 저하된다. 순수 산소의 경우도 마찬가지로 양론비 요건은 1.2~1.5이지만 공기를 사용할 경우에는 전형적으로 양론비를 2 이상으로 한다.[8-9]

3. 실험장치

3.1 200W 연료전지 스택 제조

연료전지 전기화학 반응에 의한 이론전위는 1.23V지만, 실제 운전 전위는 1V이하이다. 200W의 전력을 생산하는 단일 전지가 필요하다면 200A 이상의 전류를 발생해야 한다. 이러한 전류를 발생하려면 활성 면적(active area)이 커야하며(200cm² 이상), 저항 손실을 최소화하려면 연료전지와 부하(load)사이의 케이블이 아주 굵어야 한다. 한층 실질적인 해결책은 전기적으로 직렬한 다중 셀을 사용하는 것이다. 직렬한 셀의 수에 따라 셀 활성면적과 연결 케이블의 단면적이 감소하게 된다.

실험을 위해 제작된 200W급 PEM형 연료전지 스택의 단위 전지(30직렬, 7W, 0.7V, 10A)는 흑연 재질의 분리판(10×10cm)과 Nafion 112와 탄소천을 hot press를 이용하여 접합한 것과 3M에서 제작한 MEA, End plate, 실리콘 개스킷 등으로 구성되어 있다. 분리판의 유로형태는 사행형이고 전극의 활성면적은 7.1×7.1cm이며, 백금 로딩량은 cathode의 경우 0.4mg Pt/cm²이며, anode는 0.2mg Pt/cm²이다. 3M사의 경우는 anode와 cathode쪽 모두 0.4mg Pt/cm²이다. 또한 스택 양쪽에 0.3mm의

구리판을 이용하여 전류 집진판으로 사용하였으며 SUS 재질의 end plates, 그리고 K-type 열전대(Thermo-couple)를 사용하여 연료전지 스택의 온도를 측정 할 수 있도록 하였다. 그림 2는 분리판의 유로형태와 단위 전지 30개를 적층하여 제작한 200W PEM형 연료전지의 스택을 보여준다.

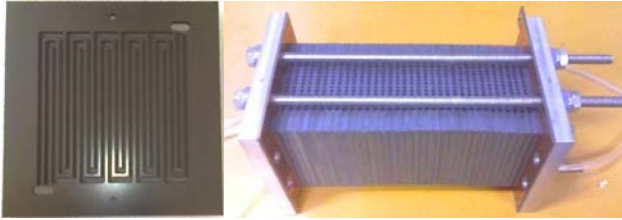


그림 2 분리판의 유로형태와 200W 연료전지 스택
Fig. 2 Channel shape of separator and 200W fuel cell stack

3.2 시스템 구성

본 연구에서는 실험을 위하여 200W PEMFC 시스템을 그림 3과 같이 구성하였다. 연료전지의 성능은 운전 온도, 운전 압력, 가습 온도 그리고 반응 가스의 유량과 같은 많은 파라미터들에 의해 결정된다. 조건에 의한 각각의 파라미터들은 반응하는 데에 다양한 효과를 나타내기 때문에 PEMFC의 동작 실험이나 특성 분석 시에는 이러한 파라미터의 효과를 양적으로 결정하는 것이 필요하다.

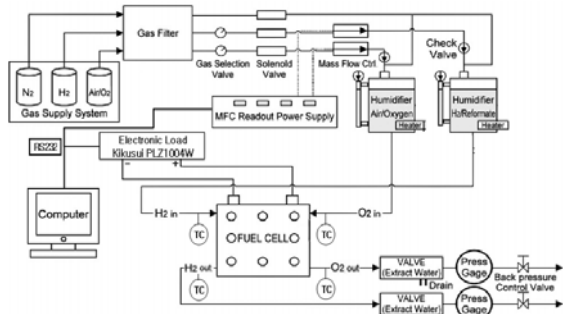


그림 3 PEMFC 시스템 구성도
Fig. 3 Schematic configuration of PEMFC system

본 시스템의 구성은 그림 수소탱크와 공기공급용 컴프레서 및 퍼지를 위한 질소탱크, 공급 가스의 압력조절을 위한 각각의 레귤레이터와 수분 및 유분을 걸러주는 필터, 3-way 솔레노이드 밸브, 가스유량컨트롤러인 MFC, 연료의 역류를 방지함으로써 MFC를 보호하는 체크밸브, 가습장치, Stack, 가스 배출구의 압력 조절을 위한 Back pressure 레귤레이터, 온도를 측정하기 위한 TC, 전자 DC 부하기, 부하의 조절과 MFC를 제어함과 동시에 발전현황과 온도 등을 모니터링 할 수 있는 모니터링 설비 등으로 구성하였다.

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 연료전지 스택의 최대 전력점

본 연구에 의해 구현된 200W급 고분자 전해질형 연료전지 시스템의 성능 평가는 최적 운전 조건에서 그림 4와 같은 전

압/전류/전력 특성을 보였다. 전류를 1A부터 11A까지 1A간격으로 전자부하를 동작(C.C모드)시켰다. 부하기 동작에 의해 11A의 전류가 흐를 때 급격한 전압강하가 보였으며, 그에 따른 연료전지의 출력 또한 급격히 감소하였다. 본 연료전지 스택의 최대출력점은 22V, 10A일때 220W를 나타내었으며 200mA/cm²의 전류밀도를 갖는 것으로 확인하였다.

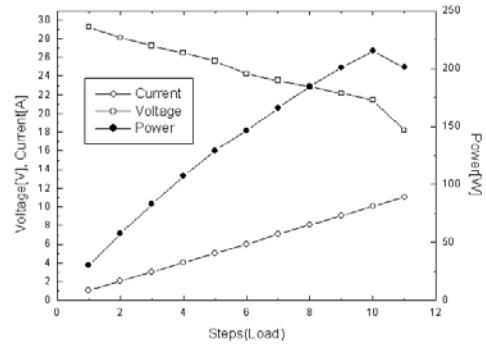


그림 4 200W PEM형 연료전지의 성능 특성
Fig. 4 Performance characteristic of 200W PEMFC

4.2 스택의 동작온도에 따른 성능특성

그림 5와 6에 동작온도에 따른 연료전지 스택의 전압-전류 및 전력-전류 특성을 나타내었다. 스택에 수소와 공기가스를 주입하여 초기 구동을 시킨 후, 20℃부터 10℃씩 간격을 주어 70℃까지의 출력 데이터를 저장하여 분석하였다. 초기 구동 후 40℃까지 출력 전압-전류가 빠르게 증가하다 40℃~70℃ 사이에서는 증가율이 크게 나타나지 않았다. 이에 따른 전력은 20℃에서 약 200W를 출력하여 점차적으로 증가하였고 70℃에서는 230W 가까이 출력하였으며, 저온에서의 증가폭보다 고온에서의 증가폭이 상대적으로 낮게 나타났다. 20℃와 30℃ 구간에서는 최대 출력이 각각 198.7(W)와 205.5(W)로 6.8(W)의 차이를 보였고, 60℃와 70℃에서는 224.8(W)와 226.8(W)로 2(W) 가량의 차이를 나타내었다. 온도에 따른 최대 출력 증가율의 기울기는 그림 7에서 나타낸 바와 같이 30℃에서 40℃ 사이에 가장 컸으며, 그 이후에서는 점차적으로 기울기가 감소하였다. 스택의 운전온도가 증가하면 교환전류밀도가 지속적으로 증가하며, 물질전달 특성이 현저하게 개선되어 출력 특성이 향상되는데 약 40℃까지 물질전달 특성이 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

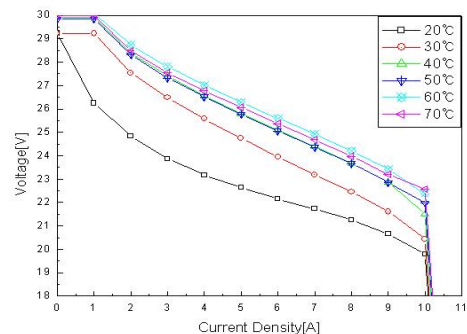


그림 5 스택온도 변이에 따른 전압-전류 특성
Fig. 5 I-V characteristics with variation on stack temperature

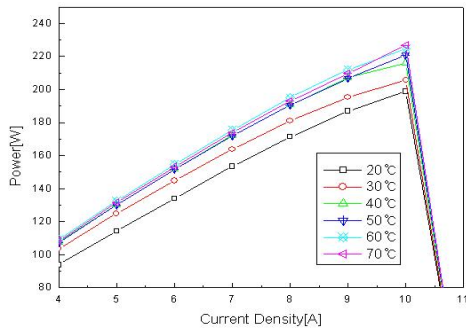


그림 6 스택온도 변이에 따른 전력-전류 특성
Fig. 6 P-I characteristics with variation on stack temperature

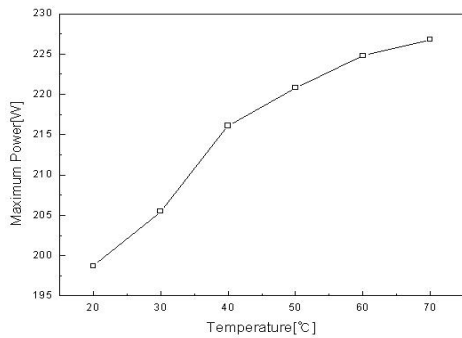


그림 7 스택온도의 변이에 따른 최대 출력 특성
Fig. 7 Maximum power characteristics with variation on stack temperature

4.3 공급유량에 따른 성능특성

본 실험에서는 공급유량에 따른 연료전지 스택의 출력 특성을 분석하였다. 본 연료전지 스택이 200W급이라는 점을 감안하여 식 (6)과 (7)에 대입하면 수소의 공급은 약 3L/min, 공기의 경우 8L/min를 주입해야 한다. 공기의 공급량을 8L/min으로 고정시킨 후 수소의 공급을 1~8L/min을 공급하여 그 출력 특성을 분석하였다. 그림 8과 9의 전압-전류 및 전력-전류의 출력 특성실험 결과와 같이 1L/min의 수소를 공급하였을 경우 약 23V, 3A, 70W를, 2L/min를 공급하였을 경우 약 20V, 7A, 140W의 출력 특성을 나타내었으며 정확히 2배의 출력 특성을 갖는 것으로 확인하였다. 그러나

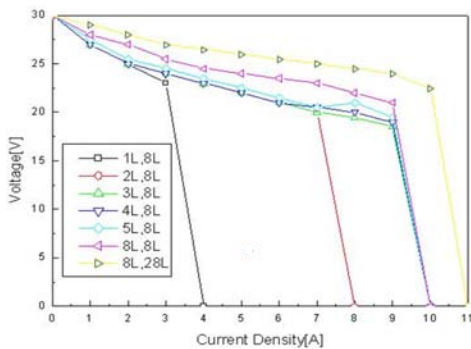


그림 8 공급유량 변이에 따른 전압-전류 특성
Fig. 8 I-V characteristics with variation on mass flow rate

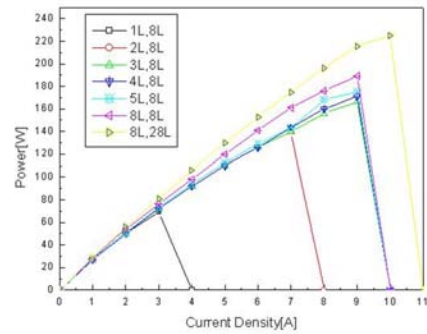


그림 9 공급유량 변이에 따른 전력-전류 특성
Fig. 9 P-I characteristics with variation on mass flow rate

3L/min를 공급하였을 경우 165W를 출력한 이후에는 8L/min(수소)까지 출력의 증가폭이 크게 줄어들었다. 이는 수소의 공급 유량이 이미 포화되었을 의미한다.

본 시스템에서 공급할 수 있는 최대의 유량을 공급하여 그 출력 특성을 분석하였다. 공급할 수 있는 최대 유량은 수소 8L/min, 공기 28L/min이다. 그림 8과 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 수소 8L/min, 공기 8L/min의 유량을 공급하였을 때와 비교하여 더 큰 출력을 나타내었는데, 공기의 반응물이 높아지면서 출력이 증가한 것으로 사료된다. 따라서 공급되는 수소의 유량은 그림 10과 같이 수소의 공급 유량이 3L/min 이상일 때, 즉 수소가 포화된 이후로는 연료전지의 성능에 크게 영향을 미치지 않으며 공기의 유량을 크게 하여 공기의 반응물을 높임으로써 연료전지의 성능을 높일 수 있다.

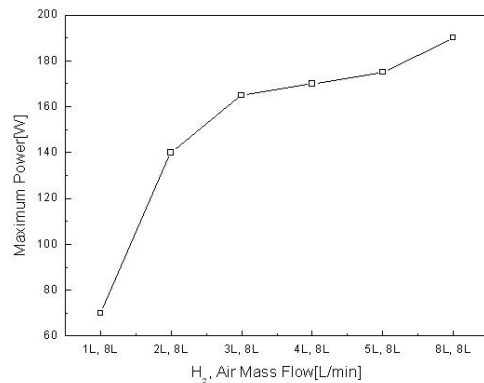


그림 10 공급유량 변이에 따른 최대 출력 특성
Fig. 10 Maximum power characteristics with variation on mass flow rate

5. 결 론

연료전지시스템을 구축함에 있어 성능에 영향을 미치는 여러 가지 성능인자가 존재하는데, 스택의 온도, 반응물 유량, 습도, 압력, 그리고 연료의 수소 농도비 등이 존재한다. 본 논문에서는 연료전지의 성능에 영향을 미치는 운전조건 중 공급 유량과 스택 동작온도에 의한 출력 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 연료전지시스템 구축시 운전조건에 의한 각각의 파라미터

- 들은 수소와 산소가 연료전지 내에서 반응할 때 다양한 영향을 미치기 때문에 PEMFC의 동작 실험이나 특성 분석 시에는 이러한 파라미터의 효과를 고려해야 한다.
- 2) 스택의 운전온도가 증가하면 교환전류밀도가 지수적으로 증가하며, 물질전달 특성이 현저하게 개선되어 출력 특성이 향상되는데 약 40℃까지 물질전달 특성이 크게 개선됨을 실험을 통해 확인할 수 있었다.
 - 3) 공급되는 수소의 유량이 포화된 이후로는 연료전지의 성능에 크게 영향을 미치지 않으며 공기의 유량을 크게 하여 수소에 대한 공기의 반응률을 높임으로써 연료전지의 성능을 향상시킬 수 있다.
 - 4) 연료전지의 운전온도와 유량의 변화에 따른 특성을 비교함으로써 각각의 다른 운전환경에서의 운전비용을 예측하고 그에 따른 최적의 BOP(Balance of plant) 설계 및 구축을 실현할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] Paolo Agnolucci, "Hydrogen infrastructure for the transport sector", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 15, pp 3526-3544, 2007.
- [2] L. Barreto et al., "The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, No. 3, pp. 267-284, 2003.
- [3] Joan M. Ogden et al., "A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development", Journal of Power Sources, Vol. 79, No. 2, pp. 143-168, 1999.
- [4] W.G. Colella et al., "Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases", Journal of Power Sources, Vol. 150, No. 4, pp. 150-181, 2005.
- [5] H. J. Plass Jr et al., "Economics of hydrogen as a fuel for surface transportation", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 9, pp. 663-668, 1990.
- [6] Joan M. Ogden, "Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 24, No. 8, pp. 709-730, 1999.
- [7] Frano Barbir, PEM Fuel Cells-Theory and Practice, Elsevier Inc., pp. 35-71, 2005.
- [8] M.G. Santarelli, M.F. Torchio, P. Cochis, "Parameters estimation of a PEM fuel cell polarization curve and analysis of their behavior with temperature", Journal

- of Power Sources, Vol. 159, No. 2, pp. 824-835, 2006.
- [9] James Larminie, Andrew Dicks, Fuel Cell System Explained, WILEY, pp. 10-58, 2003.
 - [10] 김종수 외 3인, "PCS 최적설계를 위한 고분자 전해질 연료전지의 동특성 모델링", 전기학회논문지, Vol. 57, No. 9, pp. 1563-1571, 2008.

저 자 소 개



홍 경 진 (洪京鎭)

1967년 01월 15일생. 1989년 전남대학교 전기공학과 졸업(학사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2000~현재 광주대학교 신재생에너지공학과 교수.

Tel : 062-670-2523

Fax : 062-670-2191

E-mail : tronickj@gwangju.ac.kr



박 세 준 (朴世竣)

1980년 10월 10일생. 2002년 동신대학교 전기전자공학과 졸업(학사). 2004년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박). 현재 (주)세화테크 기술연구소 선임연구원.

Tel : 061-330-3218

Fax : 061-330-3105

E-mail : ssejoo@nate.com



최 용 성 (崔龍成)

1967년 11월 14일생. 1991년 동아대학교 전기공학과 졸업 (학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박). 2006년~현재 동신대학교 전기공학과 교수.

Tel : 061-330-3204

Fax : 061-330-3105

E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr



이 경 섭 (李炘燮)

1956년 11월 09일생. 1983년 조선대학교 전기공학과 졸업(학사). 1986 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~현재 동신대학교 전기공학과 교수. 2006년~현재 전력산업인력양성사업단 단장.

Tel : 061-330-3203

Fax : 061-330-3105

E-mail : kslee@dsu.ac.kr