

고분자 전해질형 연료전지의 최적운전을 위한 전압-전류, 전류-전력 특성 연구

논문

59P-1-19

A Study on the I-V and I-P Characteristics for Optimized Operation of PEMFC

정 유 라* · 최 용 성[†] · 이 경 섭**

(You-Ra Jung · Young-Sung Choi · Kyung-Sup Lee)

Abstract - Fuel cell as a renewable energy source is clean and has a lot of advantages. The source can solve energy crisis and environmental problems such as greenhouse effect, air pollution and the ozone layer destruction. This paper introduces hybrid system(hydro-Genius Professional, heliocentris) of solar cell and fuel cell. Also, this paper shows the I-P, V-I characteristics of fuel cells which are connected in parallel and series. From these results, we also found the maximum power was transferred at $0.5[\Omega]$. The terminal voltage was also decreased according to the current because of the internal resistance. The power transfer in series was two times than that in parallel.

Key Words : Fuel Cel, I-V Characteristic, I-P Characteristic, Renewable Energy, Terminal Voltage, Internal Resistance

1. 서 론

전 세계적인 석탄연료의 고갈에 대한 위기 위식과 지구온난화에 대한 환경적인 관심과 이산화탄소의 배출을 감소시켜야 한다는 화석연료에 관한 경제성과 환경성의 우려들로 인하여 깨끗한 에너지의 연구개발과 보급정책이 추진되고 있다.[1]

연료전지는 이러한 조건에 맞는 새롭고 깨끗하며 안전하고 재생산이 가능한 에너지원이다. 연료전지는 전기 화학 에너지를 전해질 속에서 산소와 수소를 결합시켜 전기와 물 그리고 열을 발생시키는 장치이다. 이러한 깨끗하고 무해하며 많은 이점을 제공하는 연료전지는 환경오염과 에너지 위기 그리고 온실효과를 덜어주는 데 큰 역할을 할 것이다.[2],[3]

연료전지의 종류에는 작동온도와 전해질의 화학적 성질에 따라 알칼리형(AFC), 인산형(PAFC), 용융탄산염형(MCFC), 고체산화물형(SOFC), 고분자 전해질형 연료전지(PEMFC) 등으로 나뉜다.

이 중 고분자 전해질형 연료전지는 다른 연료전지에 비하여 시동성이 우수하고 내구성이 우수하기 때문에 수송용과 발전용으로 활발히 연구되고 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.[4]-[7]

연료전지의 성능은 전달계수인 Tafel 기울기, 교환전

류밀도, 수소 크로스오버와 내부 전류 손실, 내부저항, 조작 압력, 운전 온도, 그리고 공급되는 수소와 산소의 유량과 습도 등에 영향을 받기 때문에 최적의 운전 조건을 위한 BOP(balance of plant) 설계 기술이 요구되며, 연료전지의 효율을 높이기 위해 다양한 매개 변수들을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.[8]-[11]

따라서, 본 논문에서는 수소로부터 쉽게 전기에너지를 발생할 수 있고 전기적 성능과 운전효율을 높이기 위하여 고분자 전해질형 연료전지 시스템의 전력-전류, 전류-전압특성을 측정하여 최대전력전달조건을 구하였다.

서상현[12] 등은 교류 임피던스 측정법을 이용하여 연료전지의 성능을 분석하였으나, 본 논문에서는 연료전지가 직렬 및 병렬로 접속되어 있을 때의 전압강하의 원인 중 하나인 내부저항에 대하여 검토하여, 최대전력전달조건, 단자전압의 전압강하의 원인 등에 따른 최대전력전달을 검토하였다. 이를 통해 향후 좀 더 정확한 내부저항을 구하기 위한 임피던스 측정 실험과 과도현상연구를 위한 밑바탕이 되어 연료전지의 효율을 높이는 데에 일조할 것이다.

2. 원리 및 실험

2.1 연료전지의 원리

연료전지는 전기화학적 에너지 변환장치로 순수한 물만을 배출하는 무공해 연료이다. 그림 1은 연료전지 단위셀의 구조로서, 고분자 전해질을 중심으로 양쪽에 전기화학 반응을 위한 촉매층과 반응물의 확산을 위한 기체 확산층이 있고, 반응물의 공급과 생성된 전자의 집전 역할을 하는 분리판이 있음을 나타내고 있다.

그림 2는 이극 구조의 연료전지로 연료전지의 스택을 나타내고 있다. 스택은 다수의 단위 셀을 쌓은 것으로, 한 셀의 캐소드는 인접셀의 애노드와 전기적으로 연결된다. 그림 1을 여러겹으로 붙였다고 생각하면 쉬울 것이다. 전류는 비교적

[†] 교신저자, 시니어회원 : 동신대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr

* 준 회원 : 동신대학교 대학원 석사과정

** 시니어회원 : 동신대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 12월 15일

최종완료 : 2009년 12월 28일

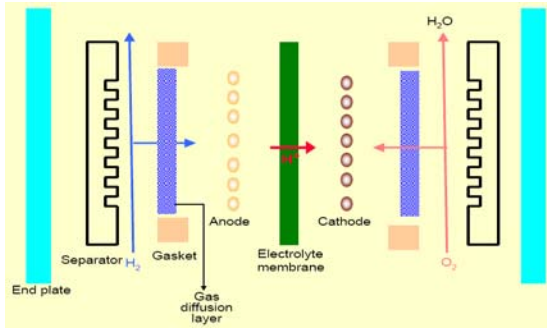


그림 1 PEMFC 단위셀의 구조
Fig. 1 Structure of a PEMFC unit cell

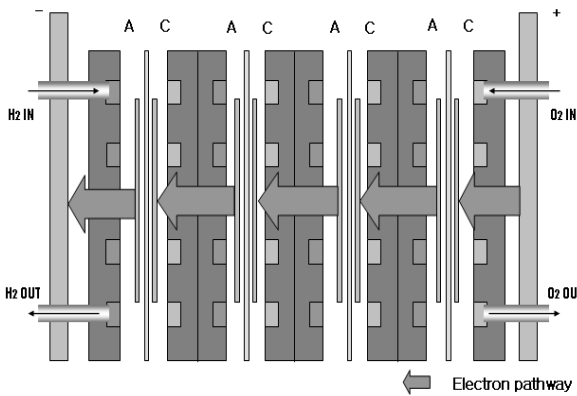


그림 2 연료전지의 이극 구조
Fig. 2 Bipolar configuration of fuel cell

얇은 전도성 판을 통해 전도되고, 큰 면적을 통해 아주 짧은 거리를 이동하기 때문에 흑연과 같은 비교적 우수한 전기 저항체를 사용할 경우에도 전기 저항 손실을 최소화할 수 있다. 스택을 설계하려면 반응물을 각 셀과 그 내부에 균등하게 공급·분배해야 하고 적정온도를 유지하고 저항손실을 최소화하려면 반응기체의 누설이 없는 구조로 하여야 한다.

그림 3은 전형적인 연료전지의 단자전압 감소 특성을 나타낸 결과이다. 그림 3에서 전류밀도가 증가할수록 단자전압이 감소함을 알 수 있다. 저항에 의한 손실이 생기는 이유는 전해질 중의 이온흐름에 대한 저항, 전기 전도성 연료 전지 부품을 통한 전자흐름에 대한 저항 때문이다.

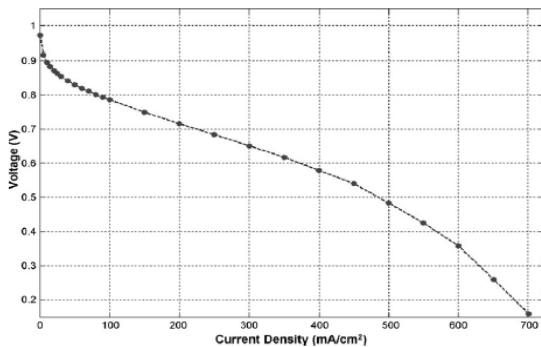


그림 3 전형적인 연료전지의 단자전압 감소 특성
Fig. 3 Terminal voltage characteristic of typical PEM fuel cell

2.2 실험

본 실험 장치는 표 1과 같이 태양광 모듈 (solar module), 전해질(electrolyser), 두 개의 연료전지, 부하모듈 그리고 할로겐램프 등으로 구성되어 있다. 태양광 모듈 (heliocentrics Energiesysteme)의 크기는 200[mm]×297[mm] ×100[mm] (width×height×depth)이고, 단자 전압은 2.2[V]이며, 단락회로 전류는 1,200[mA]이다. 또한, 태양전지가 작동하는 최대전압은 1.8[V]이고, 전류는 1,000[mA]이며, 이때의 전력은 1.8[W]이다. 전해질 구조의 크기는 200[mm]×310[mm]× 110[mm]이고, membrane의 표면적은 25[cm²]이다. 연속조작에서 표준전압은 1.4-1.8 [V]이고, 전류는 0-4000[mA]이며, 수소생성량은 분당 최대 28[ml]이다. 연료전지의 크기는 200[mm] × 297[mm] ×90 [mm]이고, membrane 표면적은 2×10[cm²]이다. 2개의 연료전지가 서로 병렬로 연결될 때 전압은 0.4-1.0[V]이고, 전류는 최대 800[mA]이다. 또한 2개의 연료전지가 서로 직렬로 연결될 때 전압은 0.8-2.0[V]이고, 전류는 400[mA]이다.

표 1 Technical Data
Table 1 기술적인 데이터

태양광장치	
크기(너비×높이×깊이)	200mm×297mm×100mm
단자전압	2.2[V]
단락전류	1200[mA]
전해질장치	
크기(너비×높이×깊이)	200mm×310mm×110mm
표면적	25 [cm ²]
정격전압	1.4-1.8[V]
정격전류	0-4000[mA]
두개의 연료전지	
크기(너비×높이×깊이)	200mm×297mm×90mm
표면적	2×10 [cm ²]
병렬전압	0.4-1.0[V]
직렬전압	0.38-2.0[V]
가변저항장치	
크기(너비×높이×깊이)	100mm×297mm×100mm
가변저항 수치	0.3/0.5/1/2/3/5/10/20/50/100[Ω]

그림 4와 그림 5는 두 개의 연료전지가 직렬로 연결되었을 때와 병렬로 연결되었을 때의 등가회로를 나타내고 있다. 전압계(Magna Electric co. Ltd)는 가변코일형의 0.5급 직류

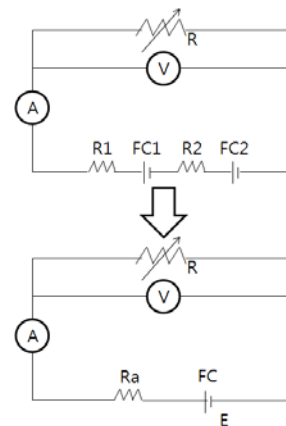


그림 4 직렬로 연결된 두 개의 연료전지 회로도
Fig. 4 Circuit diagram with 2 fuel cells in series.

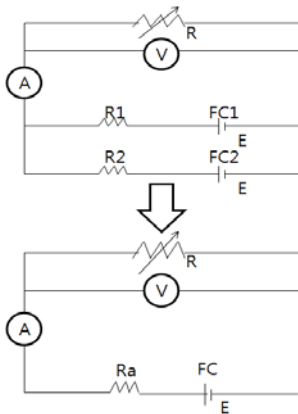


그림 5 병렬로 연결된 두 개의 연료전지 회로도
Fig. 5 Circuit diagram with 2 fuel cells in parallel

전압계이며, 전류계(Hwashin Instruments co. Ltd)는 가변 코일형의 0.5급 직류전류계를 사용하였다. 부하는 100[Ω]에서 0.1[Ω]의 가변저항을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 병렬로 연결된 연료전지의 전기적 특성

그림 6은 연료전지 2개가 그림 5와 같이 병렬로 연결되어 있을 때의 이론적 및 실측 전류-전력 특성을 나타내고 있다. 실측한 전류-전력 특성인 그림 6 (a)에서 전류가 0.002[A]에서 0.808[A]까지 증가함에 따라 전력은 0.0004[W]에서 0.23805[W]까지 직선적으로 증가하다가 그 이후에는 0.08281[W]로 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러므로 이 연료전지를 병렬로 연결했을 때 MPP (Maximum Power Point)는 전류가 0.690 [A]일 때 0.23805[W]의 전력이 발생하는 지점이다. 이 때 부하저항은 0.5[Ω]이므로, 연료전지의 내부저항은 0.5[Ω]임을 알 수 있다.[13] 한편, 내부저항을 0.5[Ω]으로 산정하고, 연료전지의 전원측 개방전압(Voc)을 0.85[V]로 산정하여 계산한 이론적인 전류-전력 특성을 그림 6 (b)에 나타내었다. 그림6 (b)에서 최대전력은 부하저항이

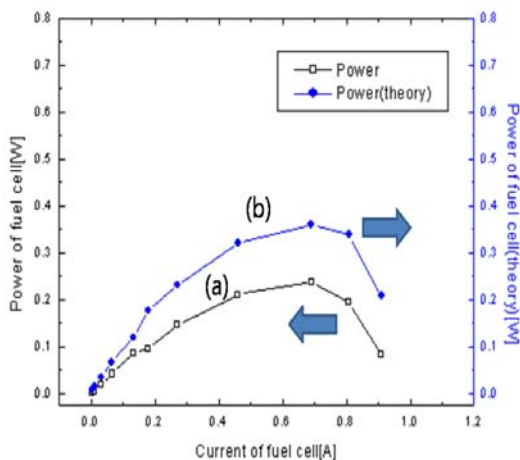


그림 6 병렬로 연결된 연료전지의 P-I 특성
Fig. 6 P-I characteristics of fuel cell in parallel

0.5[Ω]에서 전달되며, 그림 6 (a)의 결과와 일치한다. 그러나, 이론적으로 전달되는 최대전력은 약 0.35 [W]로서 그림 6 (a)의 0.23805[W]와는 다소 차이가 나타났다. 이 원인은 전압계, 전류계 등의 단자에서 접속저항, 내부저항 등에 의한 것으로 사료된다. 또한, 이론적 최대전력 0.35[W]와 실측 최대전력 0.23805[W]를 합하면 0.588[W]인데, 이 전력은 연료전지로부터의 입력전력 0.5865[W]와 일치한다.

그림 7은 연료전지 2개가 그림 5와 같이 병렬로 연결되어 있을 때의 이론적 및 실측 전류-전압 특성을 나타내고 있다. 그림 7에서 전류가 0.002[A]에서 0.910[A]까지 증가함에 따라 실측 단자전압은 0.82[V]에서 0.28[V]까지 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 연료전지의 전원측 개방전압(Voc)을 0.85[V]로 산정하여 계산한 이론적인 전류-전압 특성을 그림 7 (b)에 나타내었다. 이론적 단자전압 V [V]는 식 (1)과 같이

$$E = IR_a + V \tag{1}$$

된다. 여기서, E [V]는 연료전지의 개방전압 (Voc)이며, I [A]는 부하에 흐르는 전류이고, Ra [Ω]는 내부저항을 나타낸다. 여기서 단자전압 V는 식 (2)와 같이 된다.

$$V = E - IR_a \tag{2}$$

식 (2)에 의하여 이론적 단자전압은 그림 7 (b)에서 전류가 0.002[A]에서 0.910[A]까지 증가함에 따라 0.849[V]에서 0.395[V]까지 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그러나, 이론적으로 측정된 단자전압은 실측 단자전압과 다소 차이가 있는데 이는 전압계, 전류계 등의 단자에서 접속저항, 내부저항 등에 의한 전압강하로 사료된다.

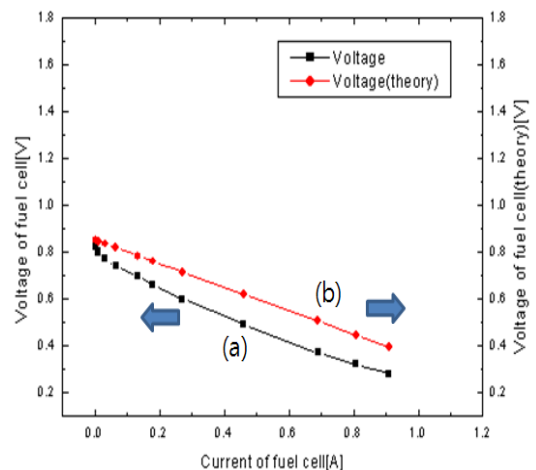


그림 7 병렬로 연결된 연료전지의 V-I 특성
Fig. 7 I-V characteristic of fuel cell in parallel

3.2 직렬로 연결된 연료전지의 전기적 특성

그림 8은 연료전지 2개가 그림 4와 같이 직렬로 연결되어 있을 때의 이론적 및 실측 전류-전력 특성을 나타내고 있다. 실측한 전류-전력 특성인 그림 8 (a)에서 전류가 0.013[A]에서 1.1[A]까지 증가함에 따라 전력은 0.0169[W]에서

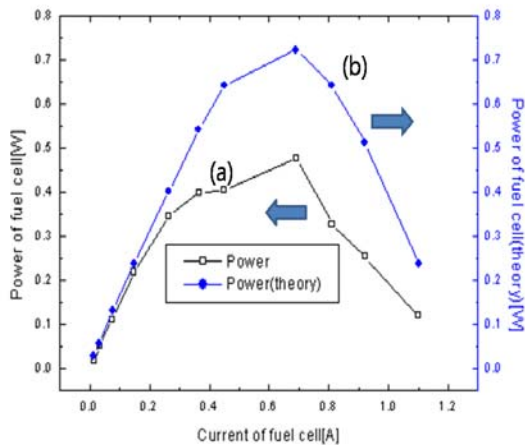


그림 8 직렬로 연결된 연료전지의 P-I 특성
Fig. 8 P-I characteristic of fuel cell in series

0.4761[W]까지 직선적으로 증가하다가 그 이후에는 0.121[W]로 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 그러므로 이 연료전지를 직렬로 연결했을 때 MPP(Maximum Power Point)는 전류가 0.690[A]일 때 0.4761[W]의 전력이 발생하는 지점이다. 이 때 부하저항은 1[Ω]이므로 내부저항은 0.5[Ω]임을 알 수 있으며, 그림 8에서 얻은 결과와 일치하다. 한편, 내부저항을 0.5[Ω]으로 산정하고, 연료전지의 전원측 개방전압(Voc)을 1.7[V]로 산정하여 계산한 이론적인 전류-전력 특성을 그림 8 (b)에 나타내었다. 그림 8 (b)에서 최대전력은 부하저항이 0.5[Ω]에서 전달되며, 그림 8 (a)의 결과와 일치한다. 그러나, 최대전력은 약 0.72 [W]로서 그림 8 (a)의 0.4761[W]와는 다소 차이가 나타났다. 이 원인으로서는 전압계, 전류계, 등의 단자에서 접속저항, 내부저항 등에 의한 것으로 사료된다.

또한, 이론적 최대전력 0.72[W]와 실측 최대전력 0.4761[W]를 합하면 1.1961[W]인데, 이 전력은 연료전지로부터의 입력전력 1.173[W]와 거의 일치한다.

한편, 그림 6 (a)에서 부하저항에 전달되는 최대전력은 0.23805[W]이며, 그림 8 (a)에서 부하저항에 전달되는 최대전력은 0.4761[W]로서 2배의 전력이 부하저항에 전달되고 있다. 이는 그림 7과 그림 9에서 알 수 있듯이 연료전지가 직렬로 연결되어 0.69[A]의 동일 전류에서 연료전지의 전원 전압이 병렬보다 직렬이 2배가 더 크기 때문에 부하에 전달되는 전력도 2배가 되는 것이다.

그림 9는 연료전지 2개가 그림 4와 같이 직렬로 연결되어 있을 때의 이론적 및 실측 전류-전압 특성을 나타내고 있다. 그림 9에서 전류가 0.013[A]에서 1.1[A]까지 증가함에 따라 실측 단자전압은 1.64[V]에서 0.41[V]까지 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 연료전지의 전원측 개방전압(Voc)을 0.85[V]로 산정하여 계산한 이론적인 전류-전압 특성을 그림 9 (b)에 나타내었다. 그림 9 (b)에서 전류가 0.013[A]에서 1.1[A]까지 증가함에 따라 단자전압은 1.687[V]에서 0.6[V]까지 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그러나, 이론적으로 측정된 단자전압은 실측 단자전압과 다소 차이가 있는데 이는 전압계, 전류계 등의 단자에서 접속저항, 내부저항 등에 의한 전압강화로 사료된다.

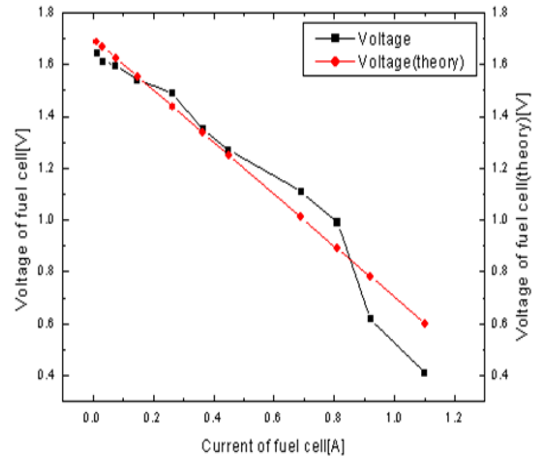


그림 9 직렬로 연결된 연료전지의 V-I 특성
Fig. 9 V-I characteristic of fuel cell in series

4. 결 론

본 논문은 수소 연료전지의 최대전력전달조건을 구하기 위한 연구로서 PEM연료전지 시스템의 전압-전류 및 전류-전력 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료전지는 직렬 및 병렬로 접속될 때 모두 단자전압이 감소하였는데 이는 연료전지의 내부저항에 의한 것임을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.
2. 연료전지를 병렬로 접속한 경우, 0.23805[W]의 최대전력이 전달되었으며, 이 때 연료전지의 내부저항은 0.5 [Ω]임을 알 수 있다. 한편, 이론적인 최대전력과의 차이를 나타낸 이유는 전압계, 전류계 등의 단자에서 접속저항, 내부저항 등에 의한 것으로 사료된다.
3. 연료전지를 직렬로 접속한 경우, 0.4761[W]의 최대전력이 전달되었으며, 이 때 내부저항은 0.5[Ω]로서 병렬로 접속한 경우와 일치한 결과를 얻었다.
4. 한편, 연료전지를 병렬로 접속한 경우의 부하저항에 전달되는 최대전력은 0.23805[W]이며, 연료전지를 직렬로 접속한 경우의 부하저항에 전달되는 최대전력은 0.4761[W]로서 병렬보다 2배의 전력이 부하저항에 전달되고 있다.
5. 연료전지의 전원 전압이 병렬연결보다 직렬연결인 경우 2배가 되므로 최대전력도 직렬연결의 경우가 병렬 연결한 경우보다 2배가 되었다.

감사의 글

이 논문은 2009년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단)

참 고 문 헌

- [1] 박세준, “고분자 전해질형 연료전지시스템의 운전조건에 따른 성능 특성 연구”, 동신대학교 박사학위논문, pp.1~4 (2009).

- [2] Frano Barbir, "PEM Fuel Cell", 1st Edition, Elsevier, pp.iii~v (2007).
- [3] 에너지경제연구원, "에너지 수요전망", 제10권 1호 (2008).
- [4] Joan M. Ogden, "Developing an infrastructure for hydrogen vehicles : a Southern California case study", International Journal of Hydrogen Energy 24, pp. 709-730 (1999).
- [5] Barbir, F. J. Braun, and J. Neutzler, Properties of Molded Graphite Bi-Polar Plates for PEM Fuel Cells", International Journal on New Materials for Electrochemical Systems, No. 2, pp. 197-200 (1999).
- [6] Frano Barbir, "PEM Fuel Cells-Theory and Practice", Elsevier Inc., ISBN:9780120781423, pp. 35-71 (2005).
- [7] Birbir, F., Progress in PEM Fuel Cell Systems Development, in Hydrogen Energy System, in Y. Yurum(editors), Utilization of Hydrogen and Future Aspects, NATO ASI Series E-295(Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands), pp. 203-214 (1995).
- [8] Ledjeff, K. and R. Nolte, New SPFC-Technology with Plastics, in O.Savadogo, P. R. Roberge, and T. N. Veziroglu(editors), New Materials for Fuel Cell Systems(Editions de l'Ecole Polytechnique de Montreal, Montreal), pp. 128-134 (1995).
- [9] Cisar, A. D. Weng, and O. J. Murphy, Nonopolar Fuel Cells for Nearly Passive Operation, in Proc. 1998 Fuel Cell Seminar(Palm Springs, CA), pp. 376-378 (1998).
- [10] ASHRAE Handbook, 1981 Fundamentals (ASHRAE, Atlanta, GA, 1982).
- [11] Karl Kordesch, Gunter Simader, "Fuel Cells and Their Applications", VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69451 Weinheim, 1996, pp. 23-50 Y. W. Rho and S. Srinivasan, J. Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 8, p. 2089 (1994).
- [12] 서상현, 이창식, "교류 임피던스 측정법을 이용한 고분자 전해질 연료전지의 성능특성 분석", 한국수소 및 신에너지 학회 논문집 제20권 제4호, pp.283-290. (2009).
- [13] 정유라, 최용성, 황종선, 이경섭, "PEM 연료전지의 전력-전류, 전압-전류 특성에 관한 연구", 전기학회논문지 P, Vol.58P, No.4, pp.557-562 (2009).

저 자 소 개



정 유 라 (鄭 誘 羅)

1985년 11월 2일생. 2008년 동신대학교 졸업(학사). 현재 동신대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정.

Tel : 061-330-3218

Fax : 061-330-3105

E-mail : dbfk3305@naver.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). 1999년~2001년 JAIST Post-Doc.. 2001년~2003년 Osaka Univ. Post-Doc.. 2002년~2005년 원광대학교 연구교수. 2006년~현재 동신대학교 전기공학과 교수. 2006년~현재 전력산업인력양성사업단 기획운영부장.

Tel : 061-330-3204

Fax : 061-330-3105

E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr



이 경 섭 (李 晷 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. 1994년~1995년 동경공업대학 객원연구원. 2006년~현재 전력산업인력양성사업단 단장.

Tel : 061-330-3203

Fax : 061-330-3105

E-mail : kslee@dsu.ac.kr