

On/Off 제어에 의한 습도와 결로의 제어에 관한 연구

박대흠*, 김두희**, 김경훈***, 정영관***[†]

*현대엔지니어링, **한국에너지기술평가원 신재생에너지팀, ***금오공과대학교 기계공학과

A Study on The Control of Humidification and Dew Condensation by On/Off Control

DEAHEUM PARK*, DUHEE KIM**, KYOUNGHOON KIM***, YOUNGGUAN JUNG***[†]

*Hyundai Engineering Co. Ltd., Hyundai Dream Tower 923-14, Mok-dong, Yangcheon-gu, Seoul, 158-050, Korea

**Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning, New and Renewable Energy Team, 997-10 Daechi-dong, Gangnam-gu Seoul 135-280, Korea

***Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Tech, 1 Yangho-dong, Gumi, Gyeonbuk 730-701, Korea

ABSTRACT

The humidification is essential for performance enhancement of the electrolysis of PEMFC because proton conductivity depends on hydration of the proton exchange membrane. In this study, the humidification experiment did about On/Off control the humidification and dew condensation for PEMFC by using of the membrane humidifiers.

As the results, it was possible to approximation control of the humidity by using of the solenoid valve On/Off control on the membrane humidifier. Also the problem on the dew condensation was resolved by approximation humidity control through solenoid valve On/Off control and the removal of the dew condensation in the flow channel was verified through visualization experiment.

KEY WORDS : PEMFC(고분자 전해질형 연료 전지), Humidity(습도), Membrane humidifier(막가습기), Dew condensation(결로), On/Off control(On/Off 제어)

Nomenclature

PEMFC : proton exchange membrane fuel cell
MBOP : mechanical balance of plant
MFC : mass flow controller

MEA : membrane electrode assemble
RH : relative humidity

Subscripts

+, - : ion

[†]Corresponding author : jyg_kr@kumoh.ac.kr

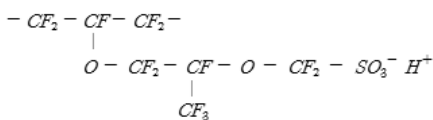
[접수일 : 2011.11.30 수정일 : 2011.12.14 게재확정일 : 2011.12.27]

1. 서 론

휴대용과 가정용 그리고 수송용으로 상용화를 위한 연구개발^{1,2)}이 활발하게 행해지고 있는 고체고분자전해질막 연료전지(PEMFC)는 낮은 작동온도와 높은 발전효율을 가지고 있다. PEMFC의 성능인자(performance factor)에는 작동온도 및 압력, 연료습도 등이 있고, 이들 성능인자들이 미치는 영향을 실험적으로 분석한 연구^{3,4)}가 이루어져 왔다. PEMFC의 최고성능을 위한 최적 조건을 찾는 연구로는 다구찌 방법을 적용한 연구⁵⁾가 수행되었다.

Fig. 1과 같이 현재 비교적 널리 사용되고 있는 양이온교환 전해질막은 친수성인 술폰산(sulfonic acid)기, SO₃⁻가 포함되어 있는 고분자 구조로, 수소 양이온의 효율적인 전달을 위하여 가습이 필요하다^{6,7)}. Fig. 2에서 알 수 있는 것과 같이, 전해질막의 함유수분이 부족할 경우에는 수소양이온의 전도도가 떨어지며, 막의 수축으로 인한 전극과 막 사이의 접촉 저항이 증가하여 성능이 감소된다. 이와는 반대로 수분이 과다할 경우에는 다공성 전극과 분리판(seperator)의 유로(flow channel)에 결로로 인한 홍수(flooding)현상이 발생하며, 이로 인해 반응기체의 공급이 어려워져 발전능력이 감소된다^{7,8)}. 따라서 PEMFC의 운전에는 반응가스의 가습을 통한 전해질막의 수분조절이 매우 중요한 것으로 알려져 있다^{9,10)}.

연료전지의 기계적인 주변장치(MBOP)인 가습기는 연료전지에 투입되는 수소와 산소(공기)의 가습을 통하여 전해질막의 수분을 조절해 주는 기능을 하며, 기포가습기와 막가습기가 널리 사용되고 있다. 가습은 반응기체의 습도 조절 및 결로로 인한 성능저하에 영향을 미치는 중요한 인자로, 막가습



chemical structure of membrane material: Nafion™ by Dupont

Fig. 1 Chemical formation of the electrolyte membrane¹¹⁾

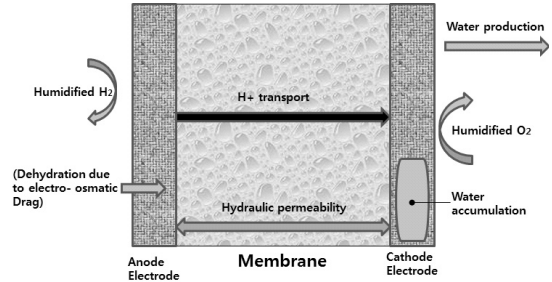


Fig. 2 Schematic drawing of the water transport⁷⁾

기를 이용하여 공급연료의 습도를 조절하는 다양한 연구¹²⁻¹⁴⁾가 수행되어 왔다. 하지만, 가습에 대한 중요성에도 불구하고 가습기의 정확한 습도제어에 관한 연구는 찾아보기 어려웠다.

본 연구에서는 반응기체 가습의 대표적인 가습장치인 막가습기의 정확한 습도제어를 목표로, 건조 반응기체와 습한 반응기체를 솔레노이드 밸브의 On/Off 제어로 적절히 혼합하여 반응기체습도를 조절하는 방법을 고안하였다. 막가습기의 기존 습도조절 방법인 유로길이와 온도변화에 따른 가습특성 및 이에 따른 PEMFC 출력 특성을 측정하여, On/Off 제어를 적용한 가습방법과 비교, 상대적인 정확성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 가습기 특성 평가

Fig. 3은 본 연구에 사용된 막가습기의 모식도를 나타내고 있다. 가습용 막에는 Dupont 사의 Nafion 117을 사용하였다.

Fig. 4는 본 연구에 사용된 막가습기의 가습특성을 실험하기 위한 평가장치의 구성도를 나타낸다. 평가장치의 반응기체 유량조절은 Sierra사의 질량 유량계를 이용하였으며, 평가를 위한 반응기체의 유량은 0.3L/min과 0.5L/min으로 설정하였다. 습도 센서는 Vaisala사의 HMP360를 수소측에 HMP230을 산소측에 사용하였으며, 측정범위는 0~100%RH, 오차범위는 ±1%RH이다. 온도의 측정은 열전대를

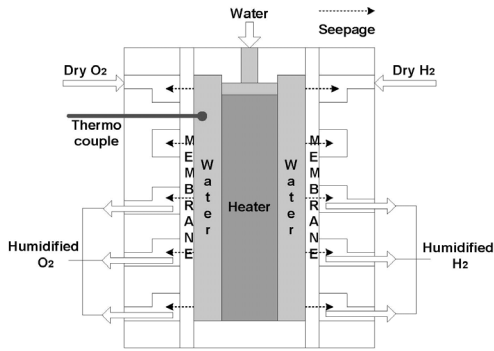


Fig. 3 Schematic drawing on the membrane humidifier⁶⁾

사용하였으며, 평가를 위한 제어와 측정은 NI사의 PXI 장비와 Labview 프로그램을 이용하였다.

막가습의 특성을 평가하기 위하여 가습온도와 유로길이 그리고 시간에 따른 상대습도의 변화를 살펴보았다.

2.2 발전 성능 및 결로 가시화 실험

Fig. 5는 막가습기의 On/Off제어를 이용한 습도 및 결로의 제어, 결로관찰, 그리고 PEMFC의 출력을 측정하기 위한 실험장치의 구성도이다. 반응기체의 가습과 결로를 제어하기 위해 막가습기의 입구와 출구(연료전지 입구)에 각각 솔레노이드 밸브를 설치, On/Off 시간 제어를 통해 막가습기를 통과하여 가습된 습가스와 통과하지 않은 건가스를 적절히 혼합하여 PEMFC에 공급하였다.

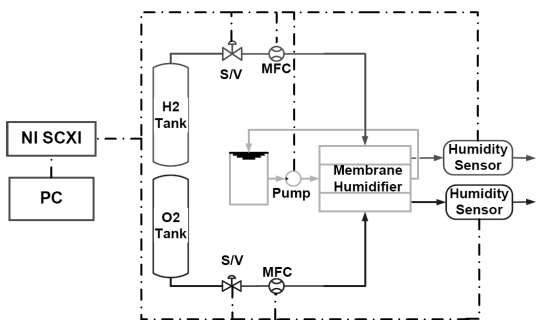


Fig. 4 Schematic diagram of the humidification experiment apparatus

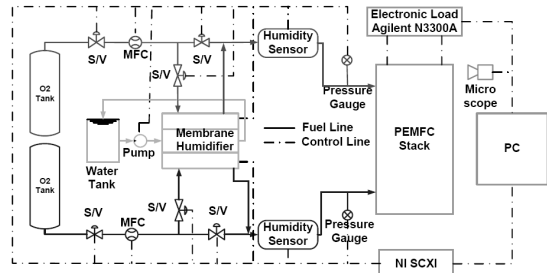


Fig. 5 Schematic diagram of the experiment apparatus for humidity and dew condensation control

PEMFC의 출력을 측정하기 위하여 최대출력150W, 최대전류 30A, 오차가 $\pm 0.1\%$ 인 Agilent Technologies사의 N3300A의 전자부하장치를 사용하였다. 전체적인 제어 및 측정은 NI사의 PXI 장비와 Labview 프로그램을 이용하였다.

Micro-int사의 발전소자(MEA)를 적용하고, 분리판의 유로관찰이 가능한 단셀 PEMFC 스택을 제작하여, 결로의 유무에 따른 PEMFC의 출력을 실제현미경을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과

Fig. 6은 0.3L/min으로 반응가스유량이 일정하고

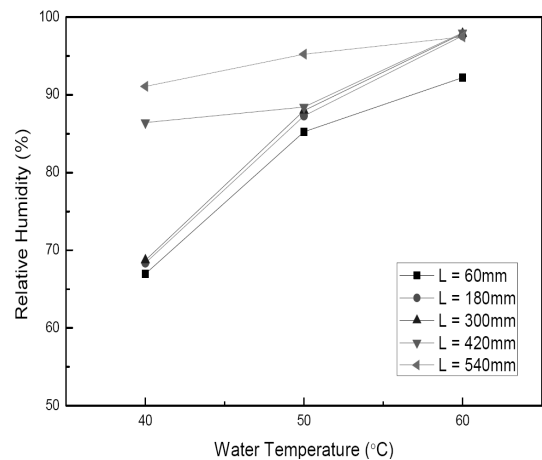


Fig. 6 Relation between water temperature and relative humidity according to flow rate 0.3L/min and channel lengths in the membrane humidifier

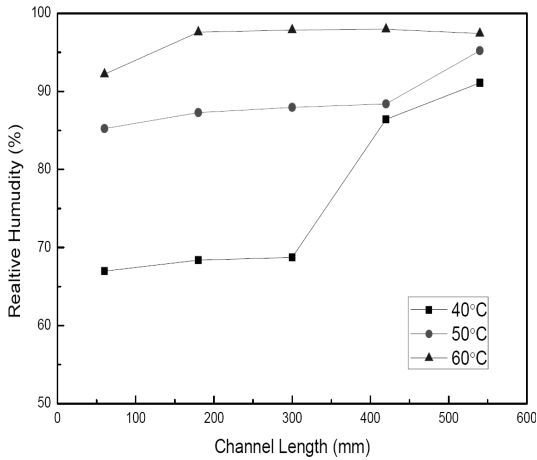


Fig. 7 Relation between channel lengths and relative humidity according to flow rate 0.3 L/min and water temperatures in the membrane humidifier

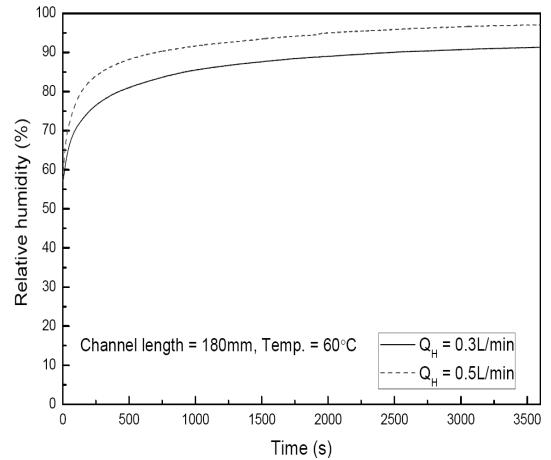


Fig. 8 Relation between time and relative humidity according to flow rates, channel length 180 mm, and water temperature in the membrane humidifier

막가습기의 유로길이가 증가할 경우에 가습온도의 변화에 대한 상대습도와와의 관계를 보여주고 있다. 가습온도가 40°C로 낮을 경우에는 유로길이의 증가에 따른 상대습도의 증가가 비교적 명확한 것을 알 수 있으나, 가습온도가 60°C로 높아질수록 유로길이에 따른 상대습도의 증가가 불명확한 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 0.3L/min으로 반응가스유량이 일정하고, 가습온도가 변화하는 경우에 대한 막가습기의 유로길이의 상대습도와와의 관계를 나타내고 있다. 가습온도가 낮을 경우에는 유로길이의 증가에 따라 비교적 큰 상대습도차를 나타내고 있으나, 온도가 높아질수록 유로의 길이에 따른 상대습도차가 줄어든다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 막가습기의 유로길이가 180mm, 가습온도가 60°C인 경우에 0.3L/min, 0.5L/min의 반응가스 유량에 대한 시간의 변화와 상대습도의 변화를 보여주고 있다. 막가습기의 유로길이의 가습온도가 일정한 경우 시간의 증가에 따른 상대습도가 지속적으로 변화를 하며, 상대습도 값이 일정한 정상상태에 도달하는데 많은 시간이 필요하다는 것을 알 수가 있다.

이상의 결과들로 부터 가습온도와 유로길이의

조절만으로 반응기체의 상대습도를 균일하게 제어하는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 또, 부정확한 습도제어가 PEMFC의 다공성 전극과 분리판의 유로 결로를 유발시켜 발전성능을 저하시킬 수 있음 추정할 수 있다.

이와 같은 불균일한 막가습기의 가습특성은 막가습기를 통과하여 가습된 습가스와 통과하지 않은 건가스의 공급량제어를 통하여 비교적 균일하게 제어할 수 있다. 그 방법으로 막가습기의 입구와 출구에 설치한 솔레노이드 밸브의 On/Off 시간 제어를 이용하여 반응기체의 가습을 제어하였다.

Fig. 9는 막가습기의 입구와 출구에 설치한 솔레노이드 밸브의 On/Off 시간 제어를 이용하여, 습가스와 건가스의 공급량 조절을 이용한 반응가스의 상대습도 변화를 나타낸다. Fig. 9에서와 같이 습도를 95RH%에서 80RH%로 설정한 경우, 반응가스의 습도를 80%RH로 낮추기 위해, 솔레노이드 밸브는 Fig. 9와 같이 175초에서 205초에 걸쳐 막가습기 입구의 솔레노이드 밸브를 Off로 하였다. 그 결과 Fig. 9의 상대습도 값이 설정습도 80%RH에 근사하게 도달하였으며, 습도가 설정 값보다 작아질 경우 막가습기 입구의 솔레노이드 밸브를 On으로 그리고 습도가 설정 값보다 커질 경우 막가습기 입구의

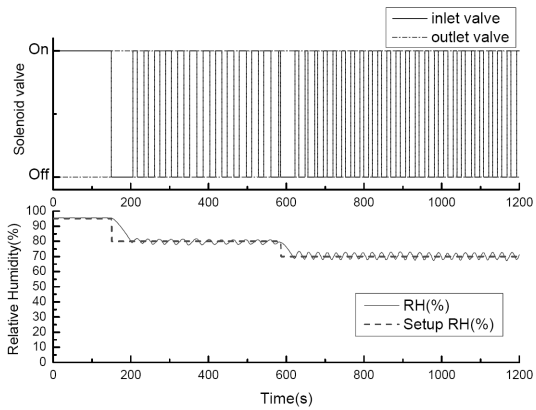
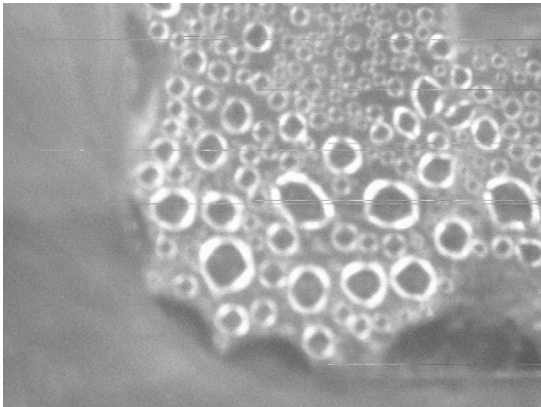
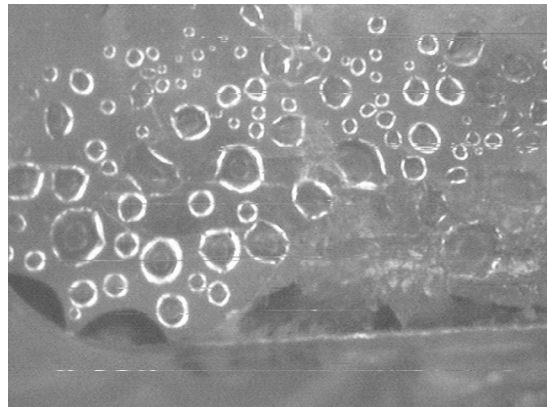


Fig. 9 Relation between the solenoid valve On/Off time and relative humidity

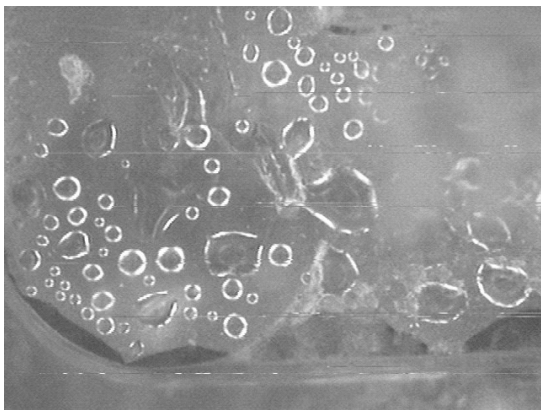
솔레노이드 밸브를 Off로 하여 습도를 제어하였다. 설정습도가 70%RH인 경우, Fig. 9와 같이 590초에서 615초에 걸쳐 막가습기 입구의 솔레노이드 밸브를 Off로 하여 습도를 낮춘 후, 막가습기 입구에 위치한 솔레노이드 밸브의 On과 Off 시간을 짧게 반복하여 Fig. 9와 같이 설정습도 70%RH에 근사하도록 제어하였다. 설정습도가 큰 경우에는 막가습기 입구에 위치한 솔레노이드 밸브의 On인 시간이 길어지며, 설정습도가 작을 경우에는 솔레노이드 밸브의 Off인 시간을 길게하여 습도를 제어할 수 있다. 반응가스의 상대습도는 막가습기 입구에 솔레노이드 밸브를 설치하고, 이의 On/Off를 조절하는 것으로 비교적 근사하게 제어가 가능함 알 수 있



(a) Initial



(b) After 1 minute



(c) After 5 minutes



(d) After 10 minutes

Fig. 10 Changes of the dew condensation as time progresses in flow channel after supplying 70%RH wet gas

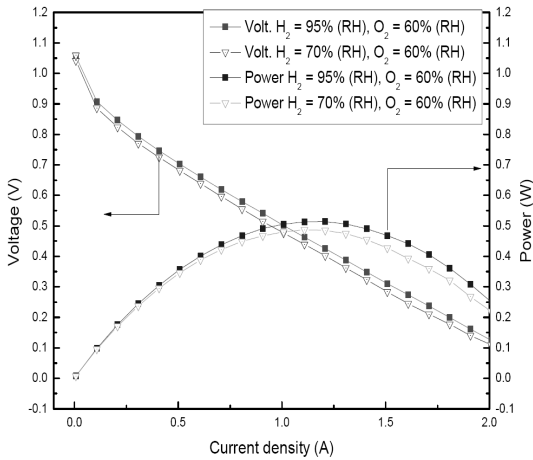


Fig. 11 Polarization curves and power curves of the PEMFC stack after dew condensation has occurred and removed

다. 이는 막가습기의 온도와 유로길이를 상대습도를 제어하는 경우와 비교하여 보다 정확한 습도제어가 가능하다는 것을 알 수 있다.

기존 방법인 막가습기의 온도와 유로길이를 이용한 습도제어는 가습의 부정확성으로 인해 홍수현상이 발생하여, 미세 다공성 전극과 유로에 결로를 유발시킨다. 하지만, 막가습기에 솔레노이드 밸브를 설치하고 On/Off시간 제어를 적용한 방법은 PEMFC 스택의 공급연료 가습량을 정확히 제어할 수 있기 때문에 결로도 제어할 수 있다고 생각할 수 있다. Fig. 10(a)는, Fig. 9에서 설정습도 95%RH로 반응가스를 과다하게 가습했을 때, 단셀 PEMFC 스택의 유로에서 발생한 결로를 관찰한 결과이다. Fig. 10(a)의 결로가 발생한 후, 막가습기의 On/Off 시간 제어를 통하여 습도를 70%RH로 낮춘 반응가스를 PEMFC 스택에 공급하여, 유로에서 결로가 제거되는 과정을 10분동안 관찰한 결과를 Fig. 10(b), 10(c), 10(d)는 나타내고 있다. PEMFC 스택에서 발생하는 결로는 밸브 On/Off 시간 제어를 이용하여 습도를 낮춘 반응가스 또는 무가습의 반응가스를 이용하여 해결할 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10(a)와 같이 결로가 발생된 PEMFC에서의 발전성과 Fig. 10(d)와 같이 습도를 낮춘 반응가스를 공급하여 결로가 제거된 직후의 PEMFC 발전성을 측정 한 결과이다. Fig. 10(a)와 같이 연료 가습이 95%RH인 경우 PEMFC 스택 유로에 결로가 발생하였다. 이는 연료가 공급되고 있는 다공성 전극에도 영향을 주어 반응가스의 공급이 원활하지 않아 Fig. 11에서와 같이 발전 성능이 저하된다. 또한 Fig. 11의 결과로부터 결로가 제거되지 않은 경우(Fig. 10(a))보다 솔레노이드 밸브의 On/Off제어를 통하여 결로가 제거 된 경우(Fig. 10(d))가 보다 높은 출력 특성을 보임 알 수 있다.

이상과 같은 결과들로부터 막가습기의 입구와 출구에 설치한 솔레노이드 밸브의 On/Off 시간 제어를 이용하는 방법이, 가습온도와 유로길이 등을 이용하여 습도제어를 하는 방법과 비교하여, PEMFC 스택에 보다 적합한 습도제어와 결로 제어가 가능하다는 것을 알 수가 있다.

4. 결 론

균일한 습도제어가 어려운 막가습기에 On/Off 시간 제어를 적용하여 PEMFC에서의 반응가스 습도와 결로 제어에 관한 실험 연구를 하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 막가습기는 정상상태에 도달하는 시간이 길며, 막가습기의 온도와 유로길이를 이용한 습도 제어가 어렵다.
- 2) 습도제어가 어려운 막가습기에 솔레노이드 밸브의 On/Off 시간 제어를 이용하여 근사한 습도 제어가 가능하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 막가습기의 On/Off제어를 이용하여 상대습도가 낮은 반응기체를 공급하는 것으로, 다공성 전극 및 유로의 결로를 제거 할 수 있었다.

후 기

본 논문은 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 김종필, “수소산소연료전지”, 수소에너지연구총서, 2001, pp. 154-156.
- 2) Jinalu Zhang, Zhong Xie, JiuJun Zhang, “High temperature PEM fuel cells”, Journal of Power Source, Vol. 160, 2006, pp. 872-891.
- 3) M. G. Santarelli, M. F. Torchio, “Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC”, Energy Conversion and Management, Vol. 48, 2007, pp. 40-51.
- 4) Mehdi Amirinejad, Soosan Rowshanzamir, Mohammad h. Eikani, “Effects of operating parameters on performance of a proton exchange membrane fuel cell”, Journal of Power Source, Vol. 161, 2006, pp. 872-875.
- 5) K. Suleyman, A. Levent, “Optimization of parametric performance of PEMFC”, Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, 2007, pp. 4418-4423.
- 6) 임영돈, 서동완, 이현철, 진현미, 후세인, 정인석, 김환기, “PEMFC용 고분자 전해질 막을 위한 BFBN을 포함한 sulfonated poly(ether sulfone)s의 합성 및 특성”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 5, 2011, pp. 579-584
- 7) F. Bauer, S. Denneller, M. Willert-porada, “Influence of Temperature and Humidity on the Mechanical Properties of Nafion 117 Polymer Electrolyte membrane”, Journal of Polymer Science, Vol. 43, 2005, pp. 786-795.
- 8) Toshiaki Murahashi, Masao Naiki, Enju Nishiyama, “Water transport in the proton exchange-membrane fuel cell: Comparison of model computation and measurements of effective drag”, Journal of Power Source, Vol. 162, 2006, pp. 1130-1136
- 9) P. Sridhar, Ramkumar Perumal, N. Rajalakshmi, M. Raja, K.S. Dhathathreyan, “Humidification studies on polymer electrolyte membrane fuel cell”, Journal of Power Source, Vol. 101, 2001, pp. 72-78.
- 10) X Hyun Duksu, Kim Junbom, “Study of external humidification method in proton exchange membrane fuel cell”, Journal of Power Sources, Vol. 126, 2004, pp. 98-103.
- 11) H.B. Park, Y.M. Lee, “Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cell”, Journal Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 13, 2002, pp. 1-11.
- 12) K.H. Choi, D.J. Park, Y.W. Rho, Y. T. Kho, T. H. Lee, “A study of the internal humidification of an integrated PEMFC stack”, Journal of Power Source, Vol. 74, 1998, pp. 146-150.
- 13) Dongmei Chen, Wei Li, Huei Peng, “An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control”, Journal of Power Source, Vol. 180, 2008, pp. 461-467.
- 14) 이무석, 김경주, 신용철, 김동현, 서상훈, 김현유, “수송용 연료전지 시스템 적용을 위한 기체-기체 막가습기 구조 최적화”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No.2, 2010, pp. 111-116.