

## 소면적 PEM연료전지 성능개선 연구

천광우<sup>†</sup>, 박창권\*, 이호열\*, 오병수\*

\*전남대학교 기계시스템공학부

## A Study on Performance Improvement in PEMFC

Kwang Wu Chon<sup>†</sup>, Chang Kwon Park\*, Ho Yeol Lee\*, Byeong Soo Oh\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University  
300 Yongbong-Dong, Bukgu, Gwangju 500-757, KOREA

### ABSTRACT

Performance of PEMFC is affected by many factors such as that of MEA, configuration of flow field, operating conditions, humidification, cooling and so on.

In this study, in order to improve the performance of fuel cell, a small area fuel cell stack was made and its performance was tested under various operating conditions. Stack consists of 3 single PEM fuel cells. Channel is serpentine type and the active area of the electrode is 50cm<sup>2</sup>. The test results show that the peak power is 60W at 70°C of stack temperature with humidification condition.

**주요기술용어** : PEMFC (고분자 전해질형 연료전지), Flow field (유동장), Cooling (냉각), Humidification (가습), Operation condition (작동조건), Eelectrode (전극)

### 1. 서 론

최근 에너지 시장에서 가장 큰 관심사는 환경 오염이다. 급속한 에너지 사용의 증가로 인한 화석연료의 사용은 인류의 삶을 편하게 했지만 과도한 에너지 사용으로 인해 야기된 문제는 인간

이 누려야할 삶의 질을 떨어뜨리는 결과를 초래했다. 세계의 환경오염과 기후의 변화가 심각해지면서 세계 각국은 환경오염 방지를 위한 다각

다각적인 활동을 하고 있다. 환경오염규제 기준을 강화하고, 대체 연료 차량 및 무공해 차량의 보유 비율을 의무화하고 있다. 저공해 및 무공해 차량의 개발에 대한 지원과 세제 감면 등으로 대기오염을 줄이고자 하는 노력을 하고 있다. 우리나라도 세계적인 환경오염의 규제에 대응하고 국내의 환경오염 방지를 위한 기준을 강화하는 한편 연료전지 자동차 개발에 총력을 기울이고 있다.

미래에너지원은 우선 환경에 영향을 미치지 않으면서 고갈의 문제로부터 자유로운 에너지원이

Corresponding author : parranmal@empal.com

어야 한다. 태양에너지, 수력 풍력 등의 에너지가 열, 전기 등의 유용한 에너지의 형태로 변환될 수 있으며 이를 이용하면 수소를 사용할 수 있다.

연료전지는 고효율 특성을 가지고 있으며 반응으로 수증기만 배출되므로 공해로부터 자유로울 수 있고 에너지 절약 및 공해 저감 요구에 부응할 수 있는 미래형 자동차 동력원이라고 할 수 있다<sup>1,2)</sup>. 특히, Green Round(기후변화협약)를 통한 CO<sub>2</sub>의 총량 규제, 저공해 자동차의 의무 판매를 통한 자동차 배기가스의 규제를 함으로 인해 각국의 자동차 회사들은 연료전지 자동차와 같은 무공해 자동차의 개발이 시급하게 되었다. 연료전지는 자동차의 출력에 맞게 크기를 다양하게 할 수 있어 각기 다른 크기의 차를 설계하는데 유연성이 있다. 연료사용 효율은 부하에 관계없이 일정하며 다양한 연료를 사용하므로써 에너지 절감에 기여할 수 있으며 환경오염을 최소화할 수 있다<sup>3,4)</sup>. 고성능의 연료전지를 제작하기 위해서는 유로의 형태 가습 정도 고성능 전극 등이 고려되어야만 한다. 현재 개발되어 있는 연료전지의 기술은 미래의 자동차에 적용될 수 있을 만큼 목표수준에 근접되어 있다. 하지만 여전히 스택에서 Bipolar plate 가 차지하는 부피가 크며, 전극판으로 쓰이는 Graphite는 재료의 특징상 얇게 가공하는데 어려운 점이 있다. 또한 성능에 큰 영향을 미치는 물 관리에 대해서는 미흡한 점이 있다. Nafion 112를 이용하여 소면적 연료전지의 스택을 제작하여 Nafion 112에 대한 특성과 연료전지의 성능을 파악하였다. 그리고 연료전지의 성능에 영향을 미치는 인자를 파악하고 제어 시스템 개발을 위한 기초실험을 실시하였다. 반응열의 효과적인 방출을 위하여 강제대류방식의 냉각핀을 설치하였다.

## 2. 연료전지 성능 변수

연료전지의 성능은 작동 온도, 반응가스의 압력, 가스조성, 반응물 이용률, 전류밀도 등의 작동 변수가 연료전지의 성능에 영향을 미친다. 가스의

반응률은 유로의 형상에 의해 영향을 받는다.

**작동 온도와 압력** : 작동 온도의 상승은 반응률의 증가, 물질 전달의 증가, 전해질의 이온 전도도 증가에 의한 cell 저항을 감소시킴으로써 연료전지의 성능이 향상된다. 더욱이 저온 연료전지에서 온도의 증가는 백금을 활성화해서 반응이 활발히 일어나고 또한 촉매에서 CO에 대한 내성이 증가하므로 공기의 사용 시 성능 저하의 문제는 적어진다. 부정적인 면으로는 부식에 대한 물질의 문제, 전극의 손상, 전기촉매의 소결과 재결정, 증발에 의한 전해질의 손실 등은 온도의 증가와 함께 더욱 빨라진다.

작동 압력의 증가는 반응물의 분압, 가스의 용해성, 물질 전달의 증가로 인해 연료전지의 성능에 긍정적 영향을 미친다. 더욱이 증발에 의한 전해질의 손실은 작동 압력이 고압으로 되면 감소한다. 압력의 상승은 시스템 효율을 향상시키는 경향이 있다. 그러나 파이프의 두께와 압축 등의 추가적인 부담을 고려하여 적절히 결정하여야 한다. 특히 부수적인 압축기를 사용한 공기 공급의 경우 압력상승으로 얻는 전압의 이익은 압축기를 가동하는데 소모되는 전기적 손실과 균형을 맞추어야 한다. 압력의 차이는 전해질과 밀폐 부분을 통한 반응 가스의 누출을 줄이기 위해 최소화되어야 한다<sup>5)</sup>.

**반응가스의 이용과 가스의 조성** : 반응 가스의 이용과 가스의 조성은 연료전지의 성능에 주요한 영향을 미친다. 연료와 산화제가 고농도일 때 고전압을 만들기 때문이다. 이용률(U)은 연료전지에 공급되는 전체적인 연료나 산화제에 대한 전기화학 반응물의 분율을 나타낸 것이다. 저온 연료전지에서 H<sub>2</sub>가 연료일 때 반응물만이 전기화학 반응에 관여하므로 연료 이용률은 직접적으로 계산이 가능하다.

$$U_f = \frac{H_{2,in} - H_{2,out}}{H_{2,in}} = \frac{H_{2,consumed}}{H_{2,in}}$$

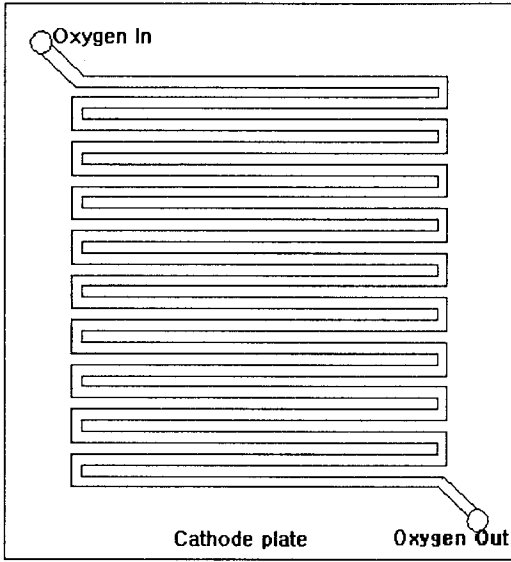


Fig. 1 Schematic diagram of oxygen channel plate.

여기서  $H_{2,in}$ 과  $H_{2,out}$ 는 연료전지의 입구와 출구에서 수소의 입·출입을 나타낸 것이다.

가습 : 고분자 전해질형 연료전지에서 물 조절은 스택의 제작에 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 물 조절은 고분자 전해질형 연료전지 성능과 효율에 영향을 미친다. 고분자 전해질 막의 특성상 이온 전도도는 전해질 막이 함유하고 있는 수분의 양에 따라 달라지는데 수분이 적으면 이온전도도가 낮아지고 많을 경우 물이 전도를 막는 악영향을 나타내기도 한다. 결국 적절한 수분을 유지하는 것은 매우 중요하다.

이온막 내의 물의 함량은 연료극에서 공기극으로  $H$ 가 이동함에 따라 수반되는 물의 이동 (water drag)과 음극에서 생성된 물의 농도 차에 의한 양극 방향의 확산(back diffusion)이 있다. Water drag는 전류 밀도에 비례하여 증가하나 back diffusion은 거의 일정하다. 그래서 높은 전류 밀도에서는 연료극 막이 건조하고 낮은 전류 밀도에서는 공기극이 건조하게 된다. 그러므로 연

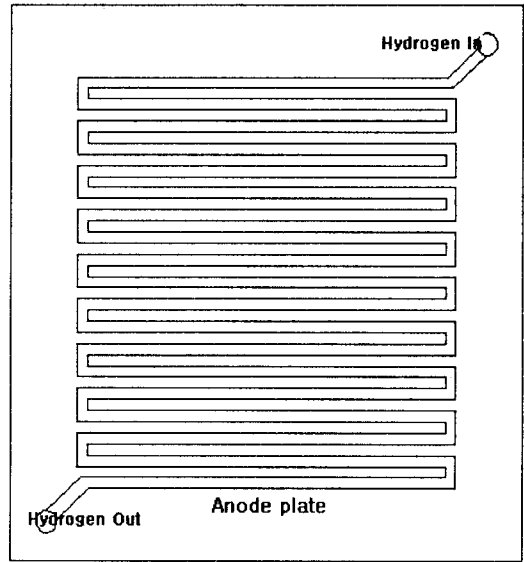


Fig. 2 Schematic diagram of hydrogen channel plate.

료전지에서는 반응 가스의 공급 시 가습기를 통하여 수분을 공급한다. 공급 가스의 압력을 높이면 적은 양의 수분을 공급하여 전극에서의 물 조절이 가능하며, 공급가스 중의 산소 농도를 높일 수 있어 농도 과전압을 줄일 수 있다.

### 3. 실험장치 및 실험 방법

#### 3.1 연료전지 시스템 구성

##### 1) MEA

소면적 단위전지스택 실험에 사용된 MEA는 Nafion-112를 사용하였고 전극 활성 면적은  $7.1 \times 7.1 \text{cm}^2$  이다. 백금 로딩량은 Cathode의 경우  $0.4 \text{mg pt/cm}^2$  이고, Anode 는  $0.2 \text{mg pt/cm}^2$  이다

##### 2) Gasket 제조

스택 제작 시 가장 큰 문제가 바로 gasket 제조이다. 높은 전압을 얻기 위해 셀을 적층할 경우 셀 간의 압력차가 생기게 되며 고압가스를 사용할 경우 가스의 누출이 문제가 된다. 본 실험은 3개의 셀을 적층하여

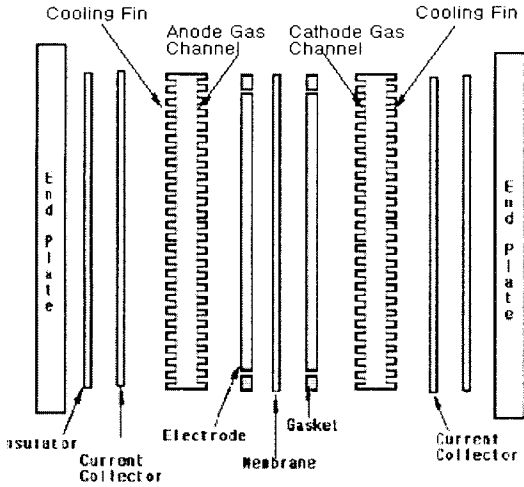


Fig. 3 Configuration of single PEMFC

셀 간의 압력차는 심하지 않고 누출의 위험도 적어 일반적인 Sheet Gasket을 사용하였다.

### 3) Bipolar Plate 제작

Bipolar plate로 가장 많이 사용되어지는 graphite는 전기전도성이 좋고 내식성이 강하나, 값이 비싸고 취성이 크다는 단점을 가지고 있다. Fig. 1 및 Fig. 2는 실험에 사용된 Bipolar plate를 보여주고 있다. 유로의 형태는 수소극과 공기극이 같다. 냉각을 위해 냉각셀을 별도로 만들지 않고 Fin을 붙여 공기 냉각을 할 수 있도록 했다.

산소의 이동은 PEM연료전지 성능의 주요한

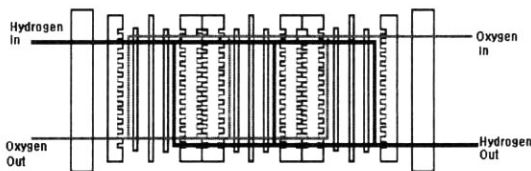


Fig. 4 Schematic diagram of stack fluid flow

과제이다. 고전류밀도에서 공급된 기체의 소모량은 유로를 따라 균일하지 않으며 유로의 먼 곳은 전체적인 전류의 생성에 기여하는 바가 매우 적다. 유로를 따라 산소를 공급하는 것이 cell의 전체적인 성능의 향상에 중요한 과제이다. 유로의 길이를 감소시키면 한계 전류밀도를 높일 수 있고, 전체 전류밀도 범위에서 cell의 성능을 높일 수 있다. 또 전압 손실을 줄일 수 있다. 물리적으로는 짧은 길이의 유로에서 산소의 농도가 보다 균일하고 전극 면적 전체에서 cell의 성능이 올라간다.

### 4) 단위전지 구성

Fig. 3은 단위전지의 구성도이다. 단위전지의 채널이 가스의 이동 통로이면서 냉각핀에 의한 냉각역할을 한다. 전류 집전판으로는 0.3mm의 구리판을 사용하였다. 가스의 입구와 출구의 위치는 반응에 의한 수분이 쉽게 배출될 수 있도록 출구를 낮은 곳에 두었다. 셀 내의 가스 누출을 방지하기 위해 절연고무를 두고 End Plate를 볼트로 체결하였다.

### 5) 스택의 구성

Fig. 4는 간략한 스택의 구성도이며, Fig. 5는 실제 제작한 연료전지 스택의 사진이다. 스택은 단위전지 3개를 적층한 구조이다. 각 전지의 양 옆이 냉각을 위한 Fin을 가지며 Fin을 통해 대기와 열 교환을 한다. 냉각 효율을 높이기 위해 냉각 팬을 설치하였다. 사용된 냉각 팬은 12V, 0.05A, 0.6W급 냉각 팬이다. 스택의 온도를 측정하기 위해서 K-type Thermocouple을 셀의 위쪽과 아래쪽에 부착하였다.

## 3.2 연료전지 시스템의 구성

연료인 수소를 공급하는 시스템과 산소를 공급하는 시스템으로 구성되어있다. 연료전지의 효율적인 작동을 위한 수소와 산소를 버블식 가습기를 이용하여 가습하는 시스템 등으로 구성된다.

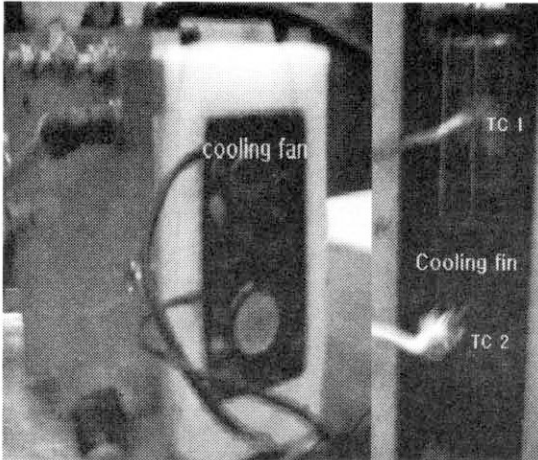


Fig. 5 Fuel cell stack

1) 가습기 시스템

연료전지의 성능을 향상시키는 전형적인 방법은 양극극에서 생성된 물을 조절, 제거하는 것이다. 물이 응축되어 다공성 전극을 통한 산소의 이동을 억제시키고 촉매 위치로 물이 흘러 들어가서 물질이동을 제한시킨다. 물이 전극이나 가스 유동채널 내에 과량으로 존재하면 전극 활성부와 스택 내의 cell들 사이에서 가스분산이 불균일하게 될 수 있다. 이로 인해 cell의 성능이 낮아질 뿐만 아니라 스택내의 cell과 cell 사이의 전위차가 발생하게 된다.

상대습도가 낮아지면 고분자 전해질의 탈수가 일어나서 막의 이온저항이 높아져 성능이 하락한다. 물 조절의 방법으로는 다공성막을 사용하는 막 가습 방법, 분사 방법과 Bubble type이 있다. 수소의 가습은 Bubble type를 사용하였다.

2) 가스 공급 시스템

Fig. 6 은 소면적 연료전지 스택의 시스템을 나타낸 것이다. 수소의 출구에 압력 조절기를 설치하여 수소 탱크에서 나오는 압력을 사용압력으로 조절하였으며 안전을 위해 수소센서를 실험실 상부와 연료전지 스택에 설치하여 수소의 누설을 감지하고 Safety solenoid valve를 작동하게 하였

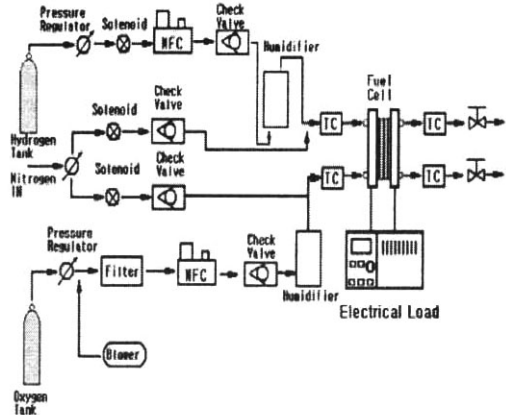


Fig. 6. Schematic diagram of fuel cell stack system.

다. MFC를 이용하여 유량의 측정과 제어를 하였다. 공급 가스의 입구에는 온도 센서를 출구에는 온도와 압력 센서를 설치하였다. 연료전지의 작동 후 연료전지 내부에 남아 있는 수소와 산소를 제거하기 위해 질소로 퍼지 시킬 수 있도록 시스템을 구성하였다.

3.3 연료전지 측정 시스템의 구성

연료전지의 단위셀과 스택의 출력을 실험하기 위해 DAE GIL 사의 DC-electronic load model EL-500P를 사용하였다. 최대 출력은 500W, 최대전류 50A이며 일정전류, 일정전압, 일정저항 실험이 가능하다. 후면의 BCN 단자를 통하여 Load 전류 조절이 가능하다. Accuracy는 ±0.1% 이다.

온도는 K-type thermocouple를 사용하였다. MFC신호의 입·출력 제어는 Omega 사의 OM900 series AD-DA 변환기를 사용하였다.

3.4. 실험 방법

연료전지에 공급되는 가스의 가습 조건 및 온도 조건의 변화에 따른 성능의 변화를 측정하기 위해 가습기에서 나온 가스의 온도가 일정하게 될 때까지 bypass시켰다.

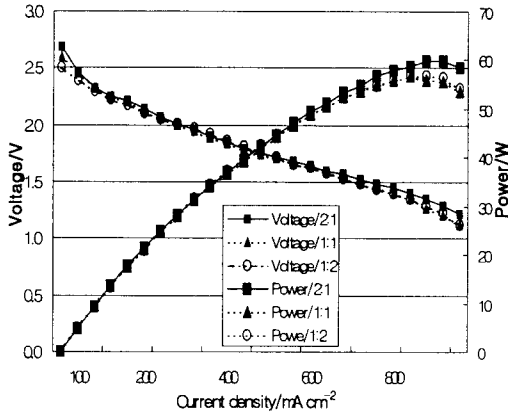


Fig. 7 Performance of stack with different oxygen flow rate (no humidification)

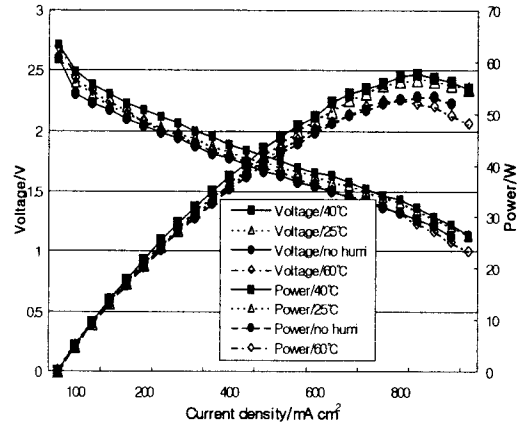


Fig. 8 Performance of stack with various hydrogen humidifying condition

가습 조건에 따른 성능 변화를 보기 위해 무가습 조건에서 성능변화를 살펴본 뒤 공기극의 일정 가습조건에서 수소의 가습조건을 변화시켜 가며 성능을 관찰하였고, 수소극의 일정 가습조건에서 공기극의 가습조건을 변화시키면서 반응을 관찰하였다. 연료전지의 성능은 측정 전의 작동 조건에 영향을 받는다. 특히 Membrane과 전극의 수분 변화가 주요한 요인이다. 스택의 가습조건 변화 실험은 연료전지 작동 정지 12시간 후에 재가동하여 실험하였다. 반응열에 의한 성능을 보기 위해 냉각 팬의 가동 여부에 따른 성능변화를 보았다. 온도 조건에 따른 성능 변화를 관찰하기 위해서 성능이 가장 좋은 가습조건을 가지고 일정 온도조건에서 실험을 하였다. 저전류 영역에서는 스택의 온도를 높이기 위해 가열기를 사용하였고 고전류 영역에서는 냉각을 위해 많은 양의 공기를 불어 넣어 주었다. 연료전지의 내구성 및 성능 곡선을 얻기 위해서 일정 전류 하에 장시간 운전 실험을 실시하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 연료전지 스택 성능 분석

고분자 연료전지의 성능 향상과 안정된 출력을

얻기 위해서는 연료전지의 성능에 영향을 미치는 인자들을 제어해야 한다. 수소와 산소의 유량, 작동 온도, 가습정도에 따른 연료전지의 성능을 파악한 후 제어 대상으로 선정 후 적절한 조건을 찾았다.

#### 4.1.1 가습에 따른 성능 변화

산소와 수소를 가습하지 않은 조건에서 자가 가습의 성능을 파악하기 위해 수소의 공급량을 일정하게 둔 상태에서 산소의 공급 유량을 바꾸어 실험 하였다.

Fig. 7 은 무가습 상태의 성능 곡선을 나타낸 것이다. 반응시작부터 정상상태에 도달까지 약 2~3분정도가 소요되었다. 반응에서 나오는 물의 Back diffusion 에 의해 가습이 되므로 정상상태에 도달하는데 시간이 소요된다. 산소의 유량이 많은 경우 생성된 수분이 미반응 산소와 함께 연료전지 밖으로 배출되어 막의 건조를 초래하여 오히려 성능을 저하시키는 요인으로 작용한다. Fig. 8 는 공기극의 버블식 가습기의 온도를 25°C 로 일정하게 유지시킨 후 수소극의 가습 조건을 바꾸어 가며 실험한 것이다. 수소극의 가습 온도가 40°C 일 때 가장 좋은 성능을 보였으며 25°C 조건에서도 거의 같은 성능을 보였다. 25°C 가습

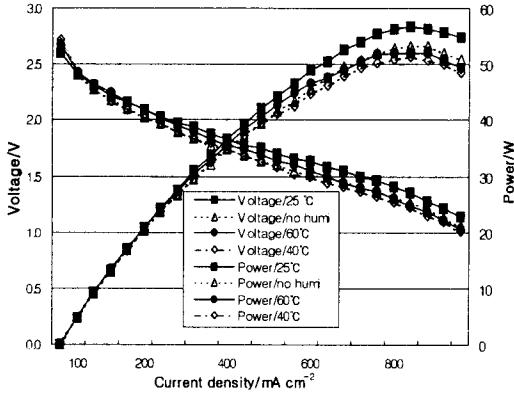


Fig. 9. Performance of stack with various oxygen humidifying condition

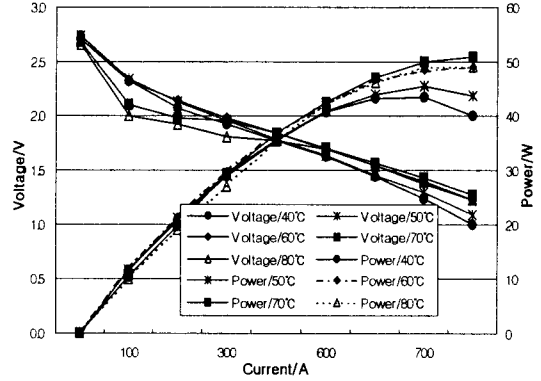


Fig. 11. Performance of stack with various temperature condition

조건에서의 상대습도는 80~85% 이며 40°C 이상의 온도에서의 상대습도는 100% 이다.

Fig. 9 는 수소극의 가습온도를 25°C 로 일정하게 유지한 후 공기극의 가습온도에 따른 변화를 보인 것이다. 공기극의 가습온도가 25°C 일 때 가장 좋은 성능을 보였다. Fig. 10은 다양한 조건에 따른 성능이다. 공기극과 연료극이 25°C로 가습될 때 가장 좋은 성능 곡선을 보였다.

#### 4.1.2 온도에 따른 성능 변화

고분자 전해질형 연료전지의 성능은 전극에 의

해서 영향을 받는다. 전극의 성능에 영향을 미치는 인자로는 저항 과전압, 활성화 과전압, 농도 과전압 등이 있다. 활성화 과전압을 줄이는 방법으로는 전지의 온도를 상승시키거나 좋은 촉매를 사용하여 전극의 반응속도를 빠르게 해주는 방법 등이 있다.

Fig. 11 은 일정 온도 조건에서 성능을 나타낸 것이다. 일정 온도 조건에서는 스택의 온도가 70°C 일 때 가장 좋은 성능을 보였다. 70°C와 80°C의 스택온도에서 성능 곡선을 살펴보면 저전류 영역에서 낮은 성능을 보인다. 가습을 하지 않은

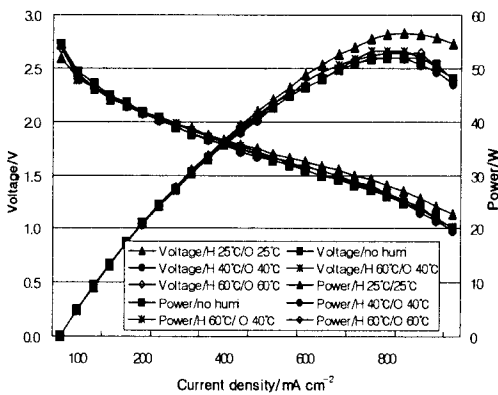


Fig. 10 Performance of stack with various gas humidifying condition

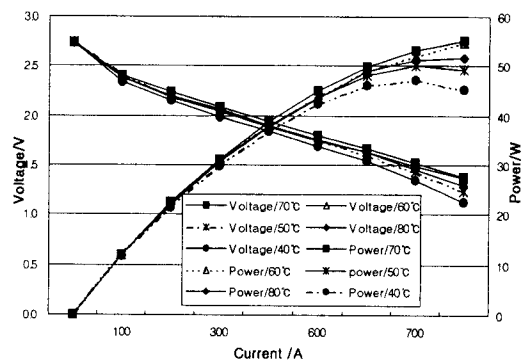


Fig. 12 Performance of stack with various temperature condition

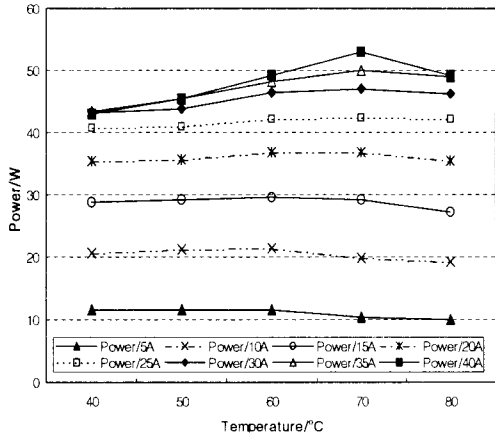


Fig. 13 Performance of stack with various current at humidification condition(hydrogen humidification temp:25°C, oxygehumidification temp:25°C)

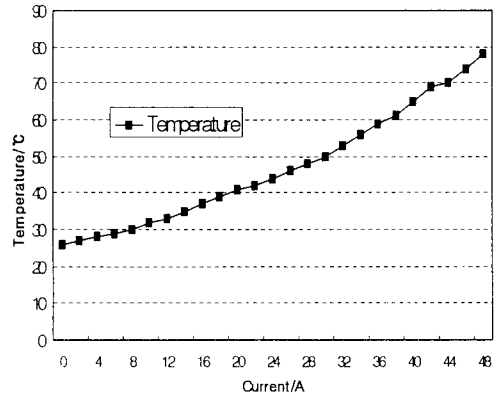


Fig. 14 Stack temperature and current

상태에서 높은 스택온도의 영향으로 고분자 막의 탈수의 영향이다. 반응이 진행되면서 성능이 회복된다.

Fig. 12는 가습한 상태에서 일정 온도 조건으로 실험한 결과이다. 가습을 한 상태에서는 가습하지 않은 경우 나타났던 저전류 범위에서의 성능감소는 나타나지 않았다. 70°C에서 가장 좋은 성능을 나타냈다.

Fig. 13은 일전 전류에서 온도 변화에 따른 성능 곡선을 나타낸 것이다. 5A에서15A까지 저전류 영역에서는 온도에 따른 변화가 없으나 고전류 범위에서는 온도에 의한 출력 변화가 심하다. 일정 전류영역에 대한 적정 온도가 존재하며 일정출력을 유지하기 위해서는 온도 조절이 필요하다. 40A에서는 70°C가 가장 큰 출력을 보인다.

### 4.1.3 냉각에 따른 성능변화

연료전지의 내부 반응은 발열반응이다. 효율이 50%인 연료전지를 통해 생산되는 에너지의 50%는 열로 방출된다. 고전류 영역에서는 전지 자체 발열에 의해 스택온도가 적정 온도인 70°C 이상

으로 상승하므로 연료전지의 성능에 악영향을 미치게 된다. 냉각 팬을 가동함으로써 스택의 온도를 적정 수준으로 유지할 수 있고 스택의 온도분포를 고르게 유지할 수 있어 연료전지의 전류 전압분포를 일정하게 유지시킬 수 있게 된다.

Fig. 14는 스택 운전 시 전류에 따른 온도를 나타낸 것이다. 전류가 높아질수록 온도가 비례적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 온도 측정은 일정전류를 1분간 유지시킨 후 측정된 결과이다.

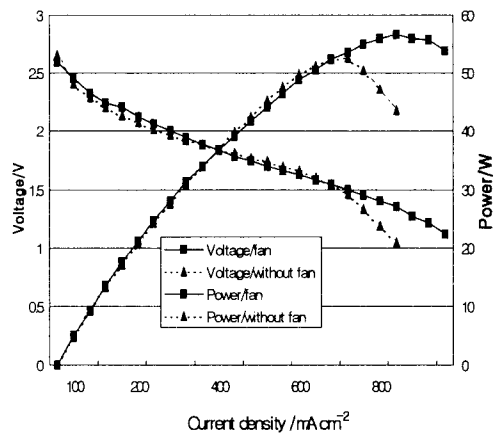


Fig. 15. Influence of cooling fan (no humidification)



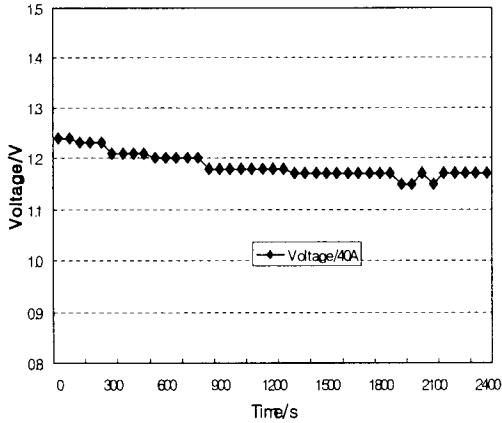


Fig. 16 Stack voltage at constant current with time (hydrogen humi temp : 25°C, oxygen humi temp : 25°C)

Fig. 15 는 냉각 팬 가동 유무에 따른 성능 변화를 나타낸 것이다. 냉각 팬을 가동 하지 않은 경우 700mA/cm<sup>2</sup> 전류에서 급격한 전압 감소를 보인다. 이는 스택의 온도가 적정 온도 이상 올라가면서 막의 건조를 유발하여 생긴 결과이다.

Fig. 16 은 40A 70°C에서의 시간에 따른 성능 변화를 나타낸 것이다. 초기 가동상태에서 시간이 경과함에 따라 약간의 성능 감소는 있었으나 일정한 성능을 유지하였다.

### 5. 결 론

Nafion-112를 이용한 소면적 연료전지 스택의 가습조건과 온도 조건 등에 의해 실험한 결과 25°C에서 수소와 산소를 가습한 경우 가장 좋은 성능을 보였다.

고분자막의 수화를 위해 연료전지 작동온도보다 10°C 정도 높은 온도에서 가습을 하지만 본 실험에서는 25°C에서 가습한 경우 가장 좋은 성능을 보였다. 수소와 산소의 공급유량 비를 2:1 로 했을 때 가장 좋은 성능을 보였다.

연료전지의 작동온도는 대개 80°C가 적당하나 본 실험에서 작동온도는 70°C에서 가장 좋은 성능을 보였고 80°C에서는 오히려 감소하는 현상을

보였다. 80°C 이상에서는 막의 건조에 의해 성능이 떨어지며 고온일수록 뚜렷하다.

냉각 팬 가동은 스택의 온도를 일정하게 유지시켜 줄뿐 아니라 발열반응에 의해 생기는 열의 분포를 일정하게 해 줌으로써 연료전지 성능 향상에 도움이 된다. 발생 전류에 따른 적정 온도가 존재하며 적정 온도를 유지하기 위해서는 냉각 팬의 가변이 필요하다. 본 실험에 사용된 냉각 팬은 고전류 영역에서 작동할 때 생기는 열을 충분히 방출시키지 못했다. 적절한 냉각 팬의 선정이 필요하다.

### 후 기

본 연구는 2003년 Brain Korea 21 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- 1) Kwi Seong Jeong, Byeong Soo Oh : "Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle", Journal of Power Sources 105, 2002, pp. 5865.
- 2) A. J. Appleby, Issues in fuel cell commercialization, Journal of Power Sources 69, 1996, pp. 53176.
- 3) Young-Gab Chun, Chang-Su Kim, Dong-Hyun Peck, Dong Ryul Shin : "Performance of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Thin Film Catalyst Electrodes"; Journal of power Source, Vol. 71, 1998, pp. 174-178.
- 4) J.H Lee, T.R Lalk; "Modeling Fuel Cell Stack Systems"; Journal of power Source, Vol. 73, 1998, pp. 229-241.
- 5) 연료전지 침투 시나리오, ETIS 기술 분석지, 2003
- 6) 한국에너지 기술연구소; "연료전지 자동차 개념 및 설계 및 개발 타당성 연구", 1996.

- 7) 김창수; "5kW급 고체 고분자 연료전지 시스템 개발", 통상산업부, 1997.
- 8) 한국에너지 기술연구소; "PEM형 연료전지 스택 시스템의 제어 기술 개발", proceeding of 7th Next Generation Vehicle Workshop, 1999, pp. 579-584.
- 9) James Larminie, Andrew Dicks, Fuel Cell Systems Explained; Wiley.19
- 10) 장현탁, 강이석; "PEM 연료전지 자동차의 급기 시스템의 모델링 및 분석"; 한국수소 및 신에너지 학회논문집, Vol. 14. No. 3, 2003, pp. 236-246
- 11) EG & Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, "Fuel Cell Handbook", 5th U.S Department of Energy Office.
- 12) John D. Anderson, Jr; "computational Fluid Dynamics" McGraw-Hill, Inc.