

중공사막 가슴에 따른 PEMFC의 성능 평가

이호열[†]*, 천광우*, 박창권*, 오병수**

*전남대학교 대학원, **전남대학교 기계시스템공학부

Performance Test of PEMFC with Hollow Fiber Membrane

Ho Yeol Lee[†]*, Kwang Wu Chon*, Chang Kwon Park*, Byeong Soo Oh*,

**Grad. School of Chonnam National University*

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

ABSTRACT

Polymer membrane needs to maintain appropriate moisture. Insufficient moisture causes low conduction of hydrogen ion because of increased contact resistance between electrode and membrane by shrinking membrane, and abundant moisture decreases fuel cell performance as difficulty of diffusion reacting gas. Therefore, water controlling system is very consequential for the polymer membrane fuel cell.

If hollow fiber membrane humidification is used between fuel and air lines, it is possible to supply heat to fuel and air by using thermal exchanger. It can supply appropriate humidity depending on operating temperature, and can recover heat from exhaust gas which contains water vapor and air. Because of simple structure of humidification system, this system can be easily applied in the PEMFC and cut down cost.

주요기술용어 : PEMFC(고분자전 전해질형 연료전지) MEA(전해질막과 전극의 접합체), UF Membrane(한외 여과막), Hollow Fiber Membrane(중공사막)

1. 서 론

국내에 사용하는 에너지의 97%가 수입에 의존

[†]Corresponding author : bysoh@chonnam.ac.kr

하고 있고, 화석에너지의 매장량의 한계와 에너지 소비량의 증가로 인해 환경오염과 규제 강화로 대체에너지의 개발이 시급한 상황에서 세계적으로 주목받고 있는 고효율, 청정에너지 기술인 PEM 연료전지에 많은 투자가 이루어지고 있다.

현재 배럴당 45달러가 넘는 고유가시대에 에너지 수급에 대한 불안감이 고조되면서 자연에서 얻을 수 있는 무한 가능한 에너지를 개발 중 이다. 수소에너지는 풍력, 태양력, 파력 등 자연으로부터 전기를 생산할 수 있고, 지구의 70%로 이루어진 물을 전기분해하여 수소를 제조하고 저장하여 효율이 높은 연료전지에 적용하는 것이 핵심적인 동력원으로 부각되고 있다.

2. PEM 연료전지의 특성

PEM 연료전지는 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키기 때문에 기존의 열기관이 갖는 카르노 사이클의 제한을 받지 않으며 다른 연료 전지들 보다 낮은 온도에서 작동하며 단위부피와 무게에 비해 에너지 효율이 높다. 현재 PEM 연료 전지는 수송용과 RPG로 개발이 이루어지고 있다.

2.1. 연료전지의 구성

PEM 연료전지는 이온전도성 고분자 전해질막과 다공성 가스 확산 전극인 Carbon Cloth나 Carbon Paper가 설치되어 있는 구조(MEA)로 이루어져 있으며 탄소판 또는 금속판은 H_2 나 Air가 흐르는 통로를 제공하며 전도성 물질로서 전해질막과 전극을 지지하고 전기적 회로를 구성하는 역할을 한다. 그리고 가스의 누출을 방지하기 위해 Gasket과 O-ring이 사용되고, 각 단위전지를 적층하여 결합시키면 스택이 이루어진다. Fig. 1은 PEM 연료전지의 스택을 나타낸 것이다.

2.2. PEM 연료전지의 작동원리

Anode로 공급된 H_2 는 전극의 Pt 촉매층에서 활성화되어 $2H^+$ 이온과 $2e^-$ 전자로 분리된다. 이온화된 H^+ 는 이온전도성 고분자 전해질막을 통과하여 Cathode로 이동하고, 고분자 전해질막을 통과하지 못하는 전자는 외부회로를 통과하면서 전기를 발생하게 된다. Cathode에서는 외부에서 공급된 공기중의 O_2 가 Anode에서 나온 $2H^+$ 이온 및

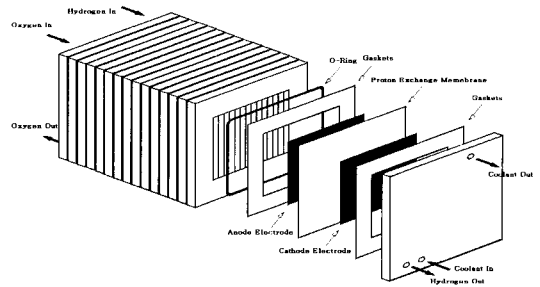


Fig. 1 Schematic diagram of stack.

$2e^-$ 전자와 반응하여 순수한 물만 생성되며 Cathode에서 외부로 방출한다.

2.3. PEM 연료전지의 가습의 특성

PEM 연료전지의 고분자 전해질막에서 H^+ 이온의 이동은 단독으로 이동하는 것이 아니고 수분을 포함한 H_3O^+ 의 형태로 이동된다. Anode에서 Cathode로 H^+ 이온이 이동함에 따라 수반되는 Electro Osmotic Drag와 Cathode에서 생성된 물의 농도차에 의한 Anode로 Back Diffusion이 있다. 고분자 전해질막에서 수분이 부족하면 이온전도도가 떨어지고 전극과 접촉저항이 증가하고 수분이 과잉하면 전극의 촉매층에 기체 확산이 어려워 성능이 하락하게 된다.

2.4. PEM 연료전지의 가습의 종류

PEM 연료전지에 사용되는 가습방법은 외부가습과 내부가습방식이 있다.

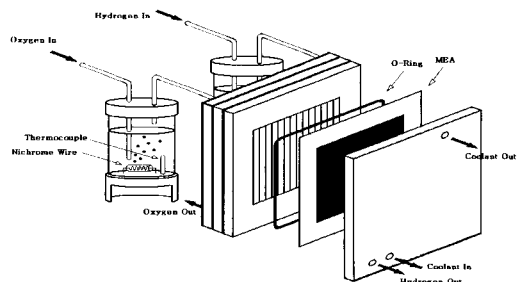


Fig. 2 Schematic diagram of bubble humidifier.

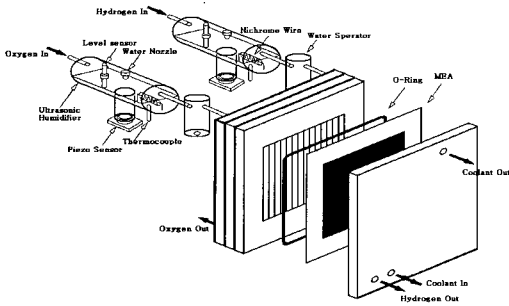


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic humidifier.

Fig. 2는 Bubble에 의한 방법으로 물이 채워진 압력용기에 공급기체를 통과함으로써 이슬점 조절이 용이한 장점이 있다. Fig. 3은 초음파센서를 이용한 방법으로 피에조센서를 이용하여 일반 가정용 가습기처럼 미립자 물분자를 발생시켜 공급하는 방법이며 물의 응축이 잘되고, Bubble방식과 공급기체에 많은 가습량을 포함하기 위해 물을 가열하기 때문에 에너지 손실이 많고, 제어하기 어려움이 많다. 직접 물 분사에 의한 방법은 공급기체 유로에 압력차를 이용하여 가습하는 방법이며 적절한 노즐 설계와 성능 조건에 따라 제어가 어려운 점이 많다. 그러나 Fig. 4는 중공사막에 의한 방법으로 막투과성 원리를 이용하며 공급기체의 유량, 압력, 온도에 따라 가습량이 자동으로 가습이 이루어지기 때문에 제어가 쉽고, 부피가 작고, 가격이 저렴하고 탈부착이 쉽기 때문에 수송용

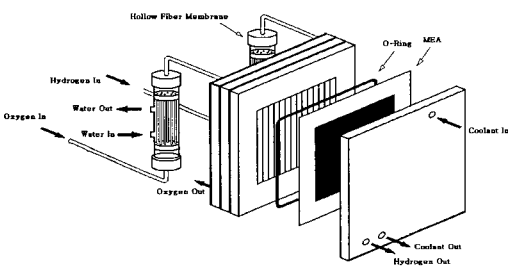


Fig. 4 Schematic diagram of hollow fiber membrane humidifier.

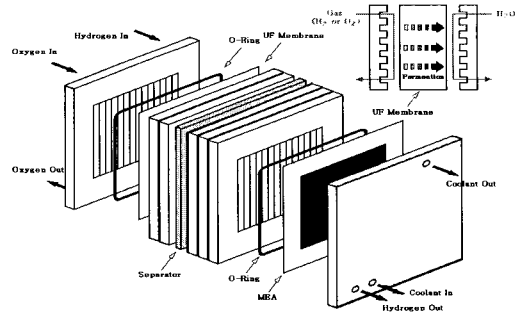


Fig. 5 Schematic diagram of porous membrane humidifier.

연료전지에 장착이 가능하다.

Fig. 5는 다공성막을 이용한 내부가습장치로 물이 투과될 수 있는 다공성막을 스택 내부에 사용하여 공급기체가 지나가고 다른 쪽은 물이 지나가게 설계하여 막을 통과하여 온 물이 가습되는 방법이다. 다공성막은 UF Membrane, Nafion 112 / 115 / 117을 이용하며 추가적인 온도조절을 할 필요가 없고, 가습되는 물의 기화열이 스택의 냉각에 직접 기여하여 냉각의 효과도 있다. 그러나 아직은 가격이 비싸다. 최근에는 공급되는 기체에 직접 미세하게 물 입자를 공급시키는 기술 개발이 이루어지고 있다.

Fig. 6은 자가 가습을 이용한 가습장치로 고분자 전해질막 내부에 Pt/Pt-SiO₂/Pt-ZrP-Nafion 촉매를 함침시켜 막 내부로 Crossover되는 수소 기체와 산소기체를 반응시켜 물을 생성시키고 공

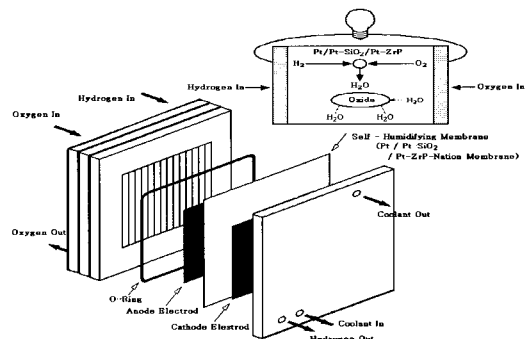


Fig. 6 Schematic diagram of self-humidifier.

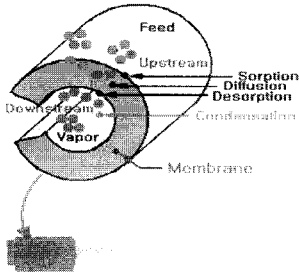


Fig. 7 Schematic diagram of pervaporation.

기극에서 전극반응에 의해 생성되는 물의 Back Diffusion 효과로 고분자 전해질막의 수분 함유를 유지하는 것이다. 자가 가슴에 의한 방식은 현재 대용량 연료전지보다는 휴대용으로 사용되는 목적으로 많은 기술개발이 이루어지고 있다.

2.5. 중공사막의 특성

막(Membrane)은 분자크기에 따라 물질을 분리하는 것이며 투과증발법이 이용된다. 투과증발법이란 투과와 증발의 합성어로 막을 통하여 물질의 이동이 일어날 때에는 공급측의 막계면에 대한 용해과정, 막 중의 확산, 투과측의 막계면에 대한 증발과정으로 3단계로 이루어진다. Fig. 7은 투과증발법을 나타낸 것이다.

3. 연료전지 시스템 구성 및 실험방법

3.1. MEA 제조

시판용 Nafion막은 보관을 목적으로 Na^+ 의 형태로 공급되기 때문에 H^+ 이온을 갖는 SO_3H 의 형태로 변환하기 위해서는 Nafion의 전처리가 필요하다. 고분자 전해질막의 불순물을 처리하지 않으면 잔존해 있는 유기물 및 금속 불순물들이 H^+ 이온의 이동을 방해하기 때문에 저항 과전압 영역에서 PEM 연료전지의 성능은 저하된다. 고분자 전해질은 Du Pont社의 Nafion 117이며 크기는 $22\text{cm} \times 26\text{cm}$ 이다. 전극은 Electro Chemistry社의 면적 $17\text{cm} \times 17\text{cm}$ 이며 Pt Loading량은 $1\text{mg}/\text{cm}^2$

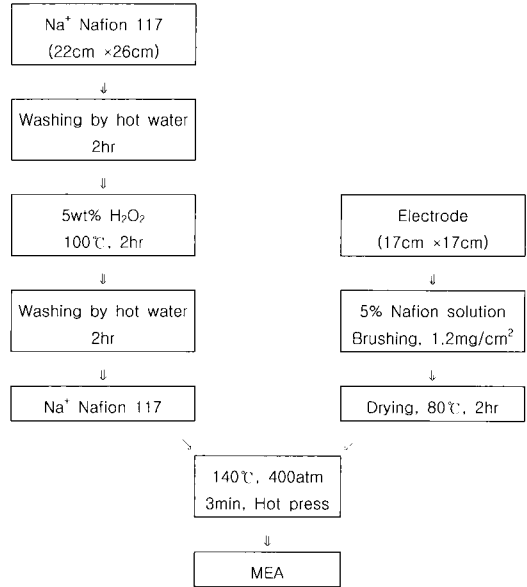


Fig. 8 Process of Nafion pretreatment.

이고, Vulcan XC-72 카본에 20wt% Pt가 담지 되어 있다. Fig. 8은 전처리 과정을 나타낸 것이다.

3.2 PEM 연료전지 Stack 구성

Stack은 10 Cell로 구성되어 있으며 전기전도성과 내부식성이 우수한 Graphite를 Bipolar Plate로 사용하였다. Anode는 수소이온화의 운동역학은 훨씬 좋기 때문에 입구와 출구의 압력차를 위하여 유로의 길이를 길게 하였다. Cathode는 촉매층에서 유용한 산소의 양에 의해 결정되고 물리적으로는 짧은 길이의 유로에서 산소의 농도가 보다 균일하기 때문에 Cathode의 유로는 Anode에 비하여 짧게 하였다. 냉각셀은 각 단위셀에 하였고, 집전판은 구리판을 사용하였다. Stack에서 gas와 냉각수의 누설을 방지하기 위해 O-ring과 Silicon를 사용하였고, Stack을 고정하기 위한 End Plate는 알루미늄판과 볼트를 사용하였다. 각 Cell의 온도 측정을 위해 Cathode 측면에 유로의 형상과 기공을 고려하여 1cm 깊이의 구멍을 중앙에 뚫어 Thermocouple을 장착할 수 있게 하였다. Fig. 9는 Bipolar Plate를 나타낸 것이다.

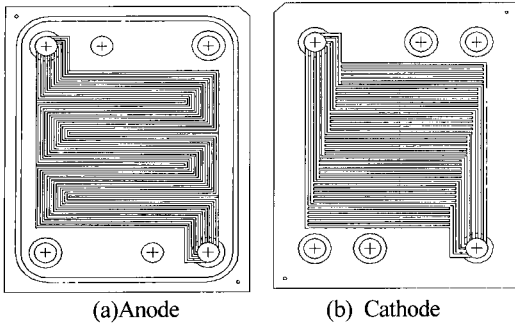


Fig. 9 Schematic diagram of bipolar plate.

3.3. 중공사막 및 물 관리 시스템 구성

3.3.1. 중공사막 가습기

Chemicore社의 HiSep 중공사막은 단위부피당 유효 막면적이 넓기 때문에 시스템이 콤팩트하고 높은 투과성능을 나타낸다. 투과층을 통해 역세적이 가능하므로 투과성능의 회복이 빠르고 수명이 긴 특징이 있다. 공급기체와 물은 병행류로 흐르게 하였다.

3.3.2 기체 공급 시스템 및 측정 장치

Fig. 10은 Bubble와 중공사막 가습기의 특성을 파악하기 위한 시스템을 나타낸 것이다. Stack에서 발생한 폐열을 냉각수가 회수되는 과정에서 열교환기를 거쳐 공급기체를 예열하였고, 산소 출구에 기액분리기를 설치하여 반응하여 나오는 물을 중공사막에 공급하게 하였다. MFC를 이용하여 유량의 측정과 제어를 하였고, 가습의 효과를 살펴보기 위해 3-Way Solenoid Valve를 설치하여 공급기체가 가습기를 통과하게 하거나 가습없이 직접 연료전지에 공급될 수 있게 하였다. 공급기체의 입구에는 온도와 습도센서를 출구에는 온도와 압력센서를 설치하였다. 연료전지의 작동 후 내부에 남아 있는 수소와 물을 제거하기 위해 질소로 Fuzzy시킬 수 있도록 시스템을 구성하였다.

시스템의 출력 실험을 하기 위해 Unicorn社의

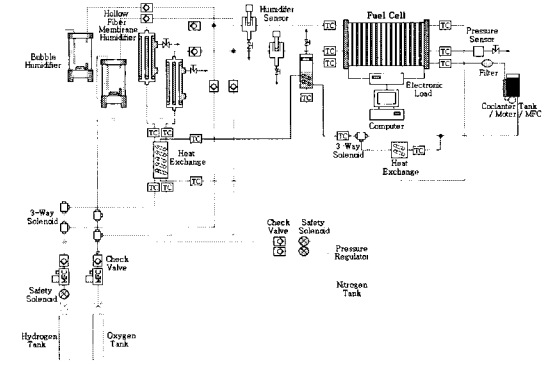


Fig. 10 Schematic diagram of PEMFC system.

Electronic Load Model UEL-1000A를 사용하였고, 습도의 측정은 정전용량형 습도센서를 사용하였다. MFC 신호의 입력과 출력 제어는 Omega社의 OM900 Series AD-DA 변환기를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 열교환기와 상대습도 평가

Fig. 11과 Fig. 12는 냉각수의 유량이 0.5 l/min과 1.1 l/min일 때 공급기체의 유량에 따른 열교환기의 성능과 상대습도를 나타낸 것이다. 공급기

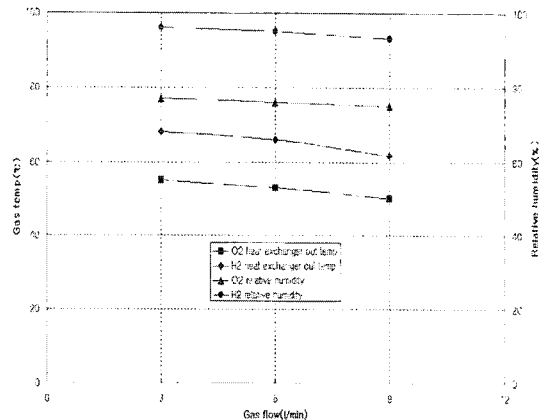


Fig. 11 Gas temp relative humidity vs. gas flow (P_{H_2} and $O_2 = 2atm$, $T_{Stack} = 70^\circ C$, $T_{Heat H_2}$ and $O_2 in} = 25^\circ C$, $T_{Coolant in} = 70^\circ C$, $T_{Coolant out} = 52^\circ C$, $T_{Hollow fiber membranc} = 52^\circ C$, $Q_{Coolant} = 0.5 l/min$)

중공사막 가슴에 따른 PEMFC의 성능 평가

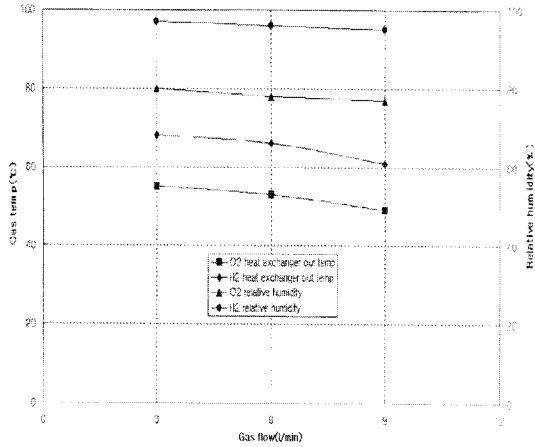


Fig. 12 Gas temp relative humidity vs. gas flow ($Q_{coolant} = 1.1 \text{ l/min}$)

체와 냉각수의 유량이 적을수록 열전달이 높아 공급기체의 예열이 잘되었다. 예열된 공급기체가 중공사막을 지나 수분을 포함한 상대습도는 공급기체의 온도가 높을수록 유량이 적을수록 높게 나왔다. 수소에 비하여 산소의 상대습도와 열교환기에서 배출되는 온도가 낮은 이유는 열교환기 설계시 냉각수 출구에 산소라인이 장착되어 있고, 수소에 비하여 접촉 면적이 작기 때문이다.

4.2. 유량에 따른 성능 변화

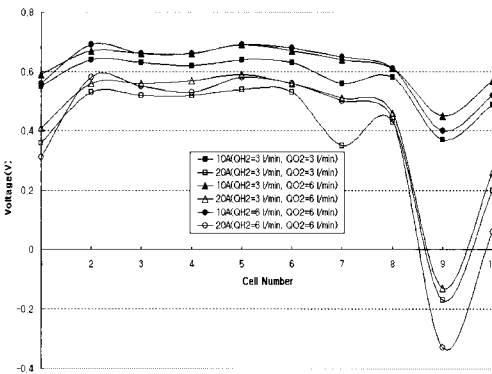


Fig. 13 Stack voltage and stack power vs. stack current ($T_{stack} = 40^\circ\text{C}$, No coolant circulation).

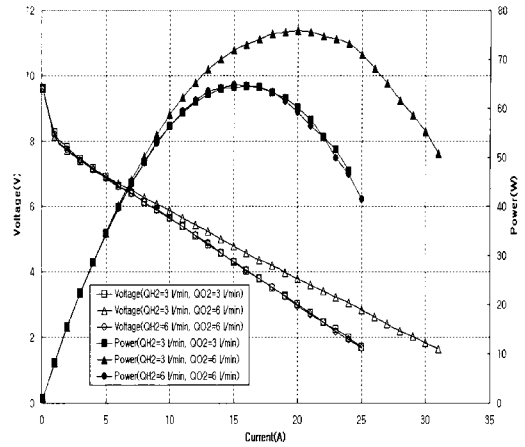


Fig. 14 Cell voltage distribution of stack.

Fig. 13과 Fig. 14는 연료전지 스택의 온도를 40°C 일 때 수소와 산소의 유량을 변화 시키면서 연료전지의 성능과 각 Cell의 전압 분포를 나타낸 것이다.

수소와 산소의 유량이 3 l/min , 6 l/min 일 때 75.8 W 로 가장 좋은 성능을 보였다. 수소와 산소의 유량이 3 l/min , 3 l/min 일 때는 중공사막에서 많은 양의 수분을 포함하여 연료전지에 공급되고, 20 A 의 일정 전류에서 반응하여 생성된 물

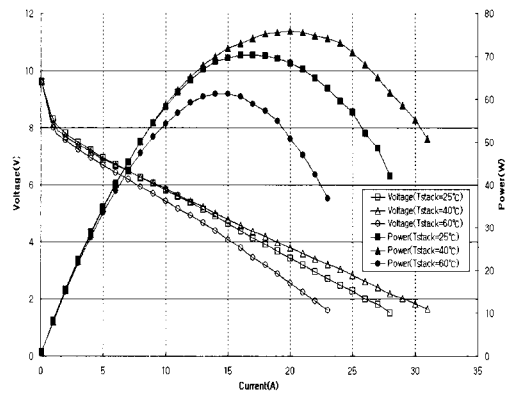


Fig. 15. Stack voltage and stack power vs. stack current ($Q_{H_2} = 3 \text{ l/min}$, $Q_{O_2} = 6 \text{ l/min}$, No coolant circulation).

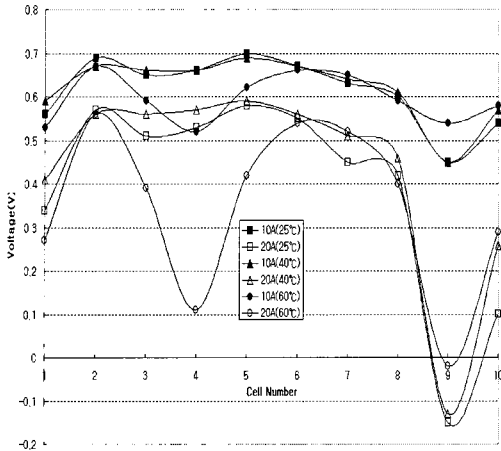


Fig. 16. Cell voltage distribution of stack.

의 영향으로 전체적인 Cell 전압의 하락과 Cell 7번과 9번의 수분의 범람으로 산소의 전극으로 이동하는 것을 방해하여 성능이 하락하였고, 수소와 산소의 유량이 6 l/min, 6 l/min일 때는 중공사막에서 많은 양의 수분을 포함하지 못해 연료전지의 수분 부족으로 20A의 일정 전류에서 특히 Cell 9번이 수소이온의 전도도가 떨어져 전압분포가 불균일해 성능이 하락하였다.

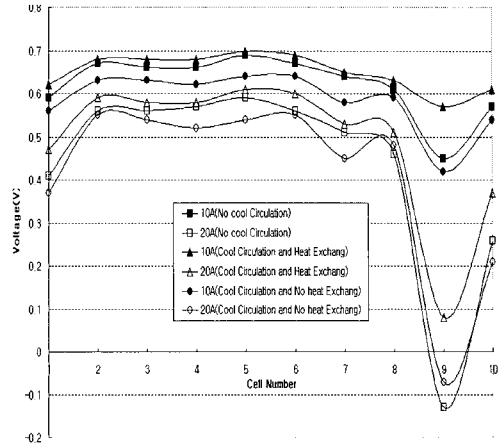


Fig. 18. Cell voltage distribution of stack.

4.3. 스택 온도에 따른 성능 변화

Fig. 15와 Fig. 16은 연료전지 스택에 공급되는 수소와 산소의 유량을 3 l/min, 6 l/min일 때 스택의 온도를 25, 40, 60°C로 변화 시키면서 연료전지의 성능과 각 Cell의 전압 분포를 나타낸 것이다. 스택의 온도가 40°C일 때 75.8W로 가장 좋은 성능을 보였다. PEM 연료전지는 온도가 증가함에 따라 가역전위는 감소하지만 실제적인 전위는

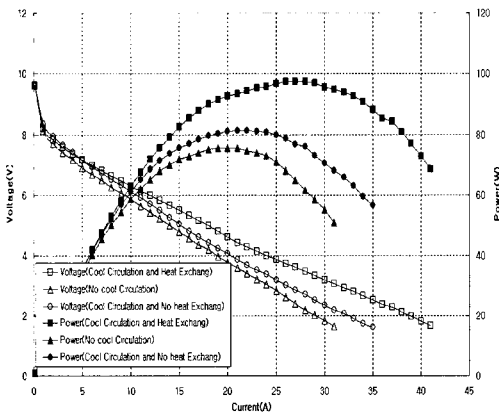


Fig. 17. Stack voltage and stack power vs. stack current ($H_U = 0.7$, $O_U = 0.35$, $Q_{H_2} = 3 \text{ l/min}$, $Q_{O_2} = 6 \text{ l/min}$, $T_{\text{Stack}} = 40^\circ\text{C}$).

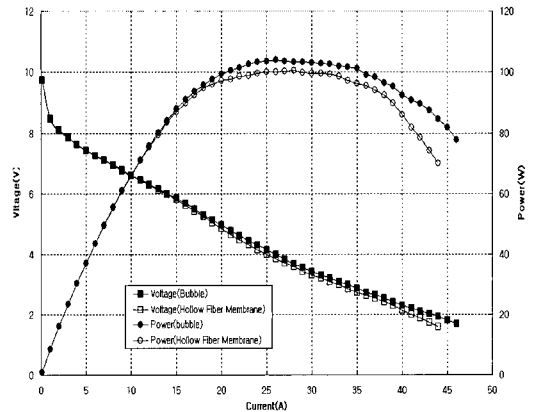


Fig. 19. Stack voltage and stack power vs. stack current ($H_U = 0.7$, $O_U = 0.35$, $Q_{H_2} = 3 \text{ l/min}$, $Q_{O_2} = 6 \text{ l/min}$, $T_{\text{Stack}} = 40^\circ\text{C}$, Coolant circulation).

중공사막 가습에 따른 PEMFC의 성능 평가

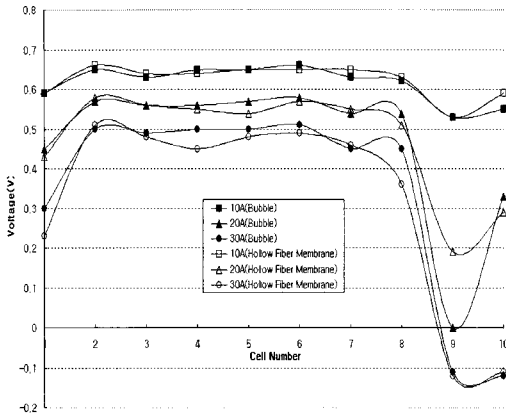


Fig. 20. Cell voltage distribution of stack.

증가한다. 이는 온도가 증가함에 따라 반응율의 증가, 물질전달의 증가, 전해질막의 이온 전도도가 증가에 기인한 것이다. 스택의 온도가 25°C일 때는 반응율과 물질전달이 늦기 때문에 전체적인 Cell 전압의 하락과 특히 Cell 9번 때문이고, 스택의 온도가 60°C일 때 성능이 감소하는 것은 가습의 온도가 스택의 온도에 비하여 낮기 때문에 Cell 3번에서 5번과 9번에 충분한 양의 수분이 공급하지 못해 전해질막에서 수분 부족 현상이 발생하기 때문이다.

4.4. 냉각수 순환에 따른 성능 변화

Fig. 17과 Fig. 18은 수소와 산소의 유량을 3 l/min, 6 l/min이고 스택의 온도가 40°C일 때 냉각수의 순환 여부와 순환할 때 열교환기를 통해 순환 여부에 따른 성능 변화와 각 Cell의 전압 분포를 나타낸 것이다.

냉각수가 순환할 때 열교환기를 통해 예열 가습할 때 97.5W로 가장 좋은 성능을 보였다. 스택에서 발생한 폐열이 공급가스에 온도를 증가하면서 중공사막에서 더 많은 양의 수분이 포함하기 때문에 높은 성능을 보였다. 그러나 냉각수가 순환하지 않는 경우는 스택의 온도가 균일하지 못해 성능이 낮게 나타났다.

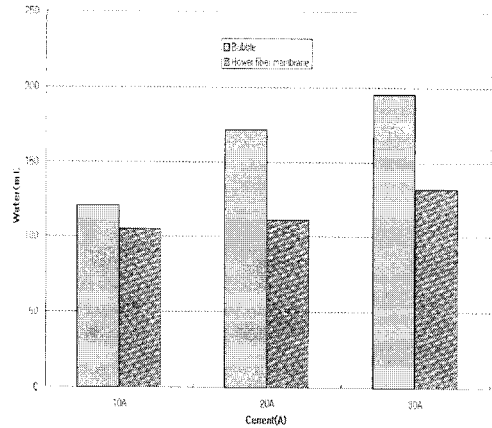


Fig. 21. Generated water constant current (30min).

4.5. Bubble과 중공사막 가습의 비교

Fig. 19와 Fig. 20은 수소와 산소의 유량을 3 l/min, 6 l/min이고 스택의 온도가 60°C, 냉각수가 순환할 때 Bubble과 중공사막 가습기의 성능과 각 Cell의 전압 분포를 비교한 것이다. Bubble은 수소 가습의 온도를 75°C, 산소의 가습의 온도를 70°C로 하였고, 중공사막은 열교환기를 통해 예열 가습하였다.

Bubble은 104W, 중공사막은 100.52W로 비슷한 출력이 나왔다. Fig. 21은 일정 전류에서 30분 가동 후 배출되는 물의 양을 나타낸 것이다. Bubble에서 10A일 때 120ml, 20A일 때 171ml, 30A일 때 195ml이며 중공사막에서는 10A일 때 105ml, 20A일 때 111ml, 30A일 때 132ml가 배출되어 중공사막 보다 Bubble 가습기에서 배출되는 물의 양이 많았다.

각 Cell에서 전압분포를 보면 스택 전 영역에서 가습장치가 장착된 입구 1번 Cell의 전압이 낮은 이유는 가습된 수분의 응축으로 인한 전극의 범람현상 때문에 전압이 낮게 나타나며 9번 Cell은 반응하고 난 후 생성된 물이 공급가스의 확산을 방해하기 때문에 성능이 하락하였고, 가스 출구 10번 Cell의 전압이 낮은 이유는 수소의 출구로 공급가스의 농도에 의한 영향과 스택의 전류를 외부로 공급하는 집적판과 연결되어 있어 전압의

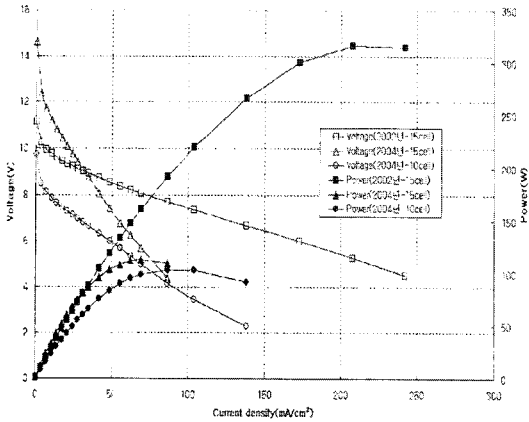


Fig. 22. Stack voltage and stack power vs. stack current ($H_{U} = 0.7$, $O_{U} = 0.35$, $T_{H_2 Humi} = 75^{\circ}C$, $T_{O_2 Humi} = 70^{\circ}C$, $T_{Stack} = 60^{\circ}C$, $Q_{H_2} = 3 \text{ l/min}$, $Q_{O_2} = 6 \text{ l/min}$, $T_{Stack} = 60^{\circ}C$, Coolant circulation).

손실 때문이다.

4.6. PEM 연료전지의 수명 평가

Fig. 22는 연료전지 수명을 나타낸 것으로 2002년에 제작한 연료전지는 15Cell로 Current density가 207.61 mA/cm^2 이며 최고 출력은 $316.8 \text{ W} (5.28 \text{ V} \times 60 \text{ A})$ 가 나왔다. 2004년에는 15Cell일 때 Current density가 69.2 mA/cm^2 이며 최고 출력은 $113.4 \text{ W} (5.67 \text{ V} \times 20 \text{ A})$ 로 2002년 기준으로 Current density가 66.67% 하락하였다. 15Cell중 성능이 현저하게 낮은 5Cell을 분리하고 10Cell로 성능 실험한 것은 Current density가 86.51 mA/cm^2 이며 최고 출력은 $103.5 \text{ W} (4.14 \text{ V} \times 26 \text{ A})$ 로 2002년을 기준으로 Current density가 58.33% 하락하여 15Cell보다는 높은 Current density를 보였다. 성능의 하락의 원인은 MEA 자체의 성능 하락과 Membrane과 전극의 분리로 접촉 저항의 증가와 전처리시 잔존한 황산의 영향으로 Membrane의 오염 때문이다.

5. 결론

1) 열교환기의 성능은 공급기체의 유량과 냉각수

유량이 적을수록 열전달이 높아 공급기체의 예열이 잘되었고, 예열된 공급기체가 중공사막을 지나 수분을 포함한 상대습도는 공급기체의 온도가 높을수록 유량이 적을수록 상대습도가 높게 나왔다.

- 2) 연료전지의 스택의 온도를 $40^{\circ}C$ 일 때 수소와 산소의 유량을 변화 시키면서 연료전지의 성능은 수소와 산소의 유량이 3 l/min , 6 l/min 일 때 75.8 W 로 가장 좋은 성능을 보였다.
- 3) 연료전지의 스택에 공급되는 수소와 산소의 유량을 3 l/min , 6 l/min 일 때 스택의 온도를 $25, 40, 60^{\circ}C$ 로 변화 시키면서 연료전지의 성능은 스택의 온도가 $40^{\circ}C$ 일 때 75.8 W 로 가장 좋은 성능을 보였다.
- 4) 수소와 산소의 유량을 3 l/min , 6 l/min 이고 스택의 온도가 $40^{\circ}C$ 일 때 냉각수의 순환 여부와 순환할 때 열교환기를 통해 순환 여부에 따른 성능은 냉각수가 순환할 때 열교환기를 통해 예열 가습할 때 97.5 W 로 가장 좋은 성능을 보였다.
- 5) 수소와 산소의 유량을 3 l/min , 6 l/min 이고 스택의 온도가 $60^{\circ}C$, 냉각수가 순환할 때 Bubble은 수소 가습의 온도를 $75^{\circ}C$, 산소의 가습의 온도를 $70^{\circ}C$ 로 하였고, 중공사막은 열교환기를 통해 예열 가습하면 Bubble은 104 W , 중공사막은 100.52 W 로 비슷한 출력이 나왔다. 일정 전류에서 30분 가동 후 배출되는 물의 양은 Bubble에서 10A일 때 120 ml , 20A일 때 171 ml , 30A일 때 195 ml 이며 중공사막에서는 10A일 때 105 ml , 20A일 때 111 ml , 30A일 때 132 ml 로 Bubble이 중공사막 가습기 보다 더 많은 물을 배출되었다.
- 6) 2002년 15Cell일 때 Current density가 $207.61 \text{ mA/cm}^2 (P_{max} = 316.8 \text{ W})$ 로 2004년 15Cell일 때 $69.2 \text{ mA/cm}^2 (P_{max} = 113.5 \text{ W})$ 로 66.67% 하락하였고, 10Cell일 때 $86.51 \text{ mA/cm}^2 (P_{max} = 103.5 \text{ W})$ 로 58.33% 하락하였다. 성능의 하락의 원인은 MEA에서 Membrane과 전극의 분리로 접촉저항의 증

가와 전처리시 잔존한 황산의 영향으로 Membrane이 오염 때문이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) 현덕수, 고분자 전해질 연료전지의 가습 조건에 대한 연구, 울산대학교, 2000.
- 2) 박세규, 고분자 전해질 연료전지용 막가습기의 가습 특성에 관한 연구, 연세대학교, 2002.
- 3) 안성진, 평행함침환원법에 의한 Pt-membrane이 자기가습형 PEMFC 성능에 미치는 영향, 연세대학교, 2000.
- 4) 정귀성, PEMFC시스템의 성능 및 연료전지 하이브리드 자동차 구동에 관한 연구, 전남대학교, 2003