

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.9.815>

ISSN 1226-4881

친수성 막을 통한 수분 전달 특성 연구

탁현우* · 김경택* · 한재영* · 임석연** · 유상석**

* 충남대학교 기계공학과, ** 특허청

Experimental Evaluation of Hydrophilic Membrane Humidifier with Isolation of Heat Transfer Effect

Hyun Woo Tak*, Kyoung Teck Kim*, Jae Young Han*, Seok Yeon Im** and Sang Seok Yu**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

** Korean Intellectual Property Office

(Received February 7, 2013 ; Revised April 4, 2013 ; Accepted June 3, 2013)

Key Words: PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Membrane Humidifier(막 가습기), Hydrophilic Membrane(친수성 막), Mass Transfer(물질전달), Water Transfer(수분전달)

초록: 고분자 전해질 연료전지(이하 PEMFC) 시스템의 효율과 수명은 유입되는 공기의 습도에 직접적인 영향을 받는다. 그러므로 공기는 정상 운전조건에서 적절한 습도를 유지시켜 주어야 한다. 하지만 가습 장치의 특성들에 대해서는 연구가 부족한 상태이다. 본 연구에서는 정상상태에서 다양한 입구조건에 따른 막 가습기의 수분전달 특성을 알아보기 위해 실험을 수행하였다. 실험에 이용할 평판형 막 가습기를 제작하였으며, 실험에 적합한 환경을 조성하였다. 우선 일정한 온도 조건하에서 막을 통과하는 수분 전달 능력을 실험하였고 이후 다양한 입구 조건에 따른 수분 전달 특성을 알아보았다. 본 실험에서 사용된 입구조건 변수는 건공기와 습공기의 유량, 작동온도, 작동압력 및 유동배열이 있으며 각각의 입구 조건이 가습기의 성능에 미치는 영향을 논의하였다.

Abstract: The efficiency and lifetime of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system is critically affected by the humidity of the incoming gas, which should be maintained properly under normal operating conditions. Typically, the incoming gas of a fuel cell is humidified by an external humidifier, but few studies have reported on the device characteristics. In this study, a laboratory-scale planar membrane humidifier is designed to investigate the characteristics of water transport through a hydrophilic membrane. The planar membrane humidifier is immersed in a constant temperature bath to isolate the humidifier from the effect of temperature variations. The mass transfer capability of the hydrophilic membrane is first examined under isothermal conditions. Then, the mass transfer capability is investigated under various conditions. The results show that water transport in the hydrophilic membrane is significantly affected by the flow rate, operating temperature, operating pressure, and flow arrangement.

- 기호설명 -

\dot{m} : 질량유량(kg/s)

P_a : 압력(Pa)

R_a : 공기 기체상수

T : 온도(°C, K)

T_{dp} : 이슬점 온도(°C, K)

\dot{V} : 체적유량(m³/s)

w : 절대습도

ϕ : 상대습도(%)

하첨자

a : 증기를 제외한 기체

v : 증기

1. 서론

† Corresponding Author, sangseok@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 수소이온교

환 특성을 갖는 고분자 막을 전해질로 사용하고 있으며 그 양단에 연료극과 공기극 및 분리판을 가지고 있는 연료전지이다. 전해질로는 친수성과 배수성을 동시에 지니는 Nafion[®]과 같은 재료가 사용되어지고 있으며 전해질에 원활한 수분 공급이 이루어지지 않으면 PEMFC의 성능과 직결되는 수소이온의 전도도가 떨어지고 국부적 과열로 인해 막 수명이 단축될 수 있다. PEMFC의 특성상 공기극 촉매층에서 반응에 의해 수분이 생성되므로 과도한 수분 공급은 공기극의 플러딩(flooding) 현상을 유발하여 전극이나 가스확산층에 존재하는 미세한 기공을 막아 산소의 공급력을 저하시켜 결국 반응을 저하에 의한 성능 저하를 일으킨다. 반대로 수분 공급이 부족하게 되면 드라잉(drying) 현상으로 전해질 막의 이온 전도율이 떨어져 성능 저하를 유발한다. 이러한 이유로 안정적인 연료전지의 성능을 확보하기 위해서는 연료전지로 공급되는 공기의 적절한 가습 조건을 유지시켜 주는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 연료전지 스택을 가습하기 위한 방법으로는 내부 가습과 외부 가습 두 가지로 분류할 수 있다. 내부 가습은 연료전지 스택의 일부를 가습층으로 사용하고, 냉각수를 이용하여 수분을 공급하는 방법이다.⁽¹⁻⁷⁾ 외부 가습은 별도의

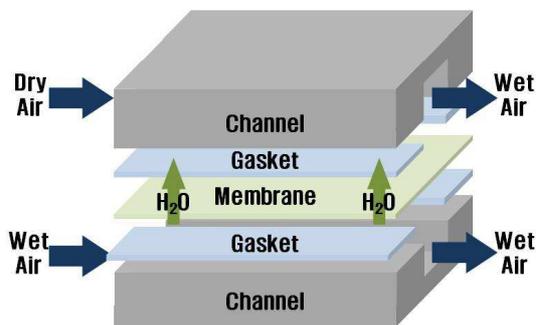


Fig. 1 Schematic drawing of internal humidifier



Fig. 2 Prototype of planar membrane humidifier

가습 장치를 통해 수분을 공급하는 방법으로 액적 분무 방식, 버블러 방식, 엔탈피 휠 방식, 그리고 친수성 투과막을 이용한 막 가습 방식이 있다. 액적 분무 방식, 버블러 방식, 엔탈피 휠 방식의 경우에는 압력 강하, 크기, 가격 등의 이유로 인해 연료전지에는 선호되어지지 않는다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

막 가습 방식은 친수성 투과막을 이용하는 것으로 두 유로에서 가스의 습증기 농도차와 온도차를 이용해 수분 및 열을 이송하는 장치이다. 친수성 투과막으로는 Nafion[®]이 많이 사용되어지고 있으며 막 가습기는 소요 동력이 필요 없고, 수분 공급 성능이 우수하며, 비정상시 응답성이 우수하여 연료전지 스택의 가습 요구사항을 만족시키기에 충분하다.⁽¹¹⁾ 가습기의 경우 연료전지 스택의 물 관리와 매우 밀접한 관련이 있으므로 반드시 이에 대한 성능의 이해가 필요하다. 하지만 연료전지의 운전 조건에 따른 가습기의 성능에 대한 다양하고 구체적인 결과는 제작사의 데이터 이외에는 문헌상에 찾기 어렵다.

본 연구에서는 정상상태에서 막 가습기로 유입되는 건공기와 습공기의 유량, 운전온도, 운전압력 그리고 유동배열에 따른 다양한 조건하에서 물질전달 특성을 이해하기 위한 실험을 수행하고 이를 통해 물질전달 현상의 체계적 분석을 진행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에서 사용한 막 가습기에는 채널이 새겨진 아크릴 관과 관 사이에 Nafion[®] 막이 설치되어 있다. 본 연구에서는 가습기에 적용되는 친수성 막으로 Nafion[®] 115를 사용하였다. 향후 물질전달 특성을 막의 두께 변화에 대해 관찰하기 위해, Nafion[®] 117과 Nafion[®] 112 사이에 있는 Nafion[®] 115 막을 적용함으로써 기준조건에서의 특성을 파악하고자 하였다. 평판형의 Gas-to-Gas 방식을 이용한 막 가습기를 설계하여 실험하였다. 대다수의 연료전지 시스템은 Gas-to-Gas 막 가습기를 채택하고 있다. 이는 우수한 열 및 물질전달 성능을 보여주며, 추가의 구성품이 요구되거나 전력 손실이 발생하지 않는 Gas-to-Gas 막 가습기의 장점 때문이다.^(4,12)

Fig. 1의 그림은 본 실험을 위해 설계한 평판형

막 가습기의 내부 구조도이다. 채널의 형상은 폭 1mm, 깊이 1mm에 길이 200mm 이고 이러한 채널이 10개 제작되어 있다. Fig. 2의 사진은 실험에서 사용한 막 가습기의 실제 사진을 보여주고 있으며 사진에서 검은색 부분은 막과 아크릴 채널 사이에서 발생할 수 있는 누수를 방지하기 위해 설치한 가스킷이다.

Table 1은 본 실험에서의 실험 조건이다. 실험

Table 1 Parameters used in the experiment

Parameter	Size	Unit
Channel width	1	mm
Channel depth	1	mm
Length of channel	200	mm
Number of channel	10	EA
Effective area of membrane	2000	mm ²
Operating pressure	1.0, 1.5, 2.0	bar
Operating temperature	40, 60	°C
Type of membrane	Nafion® 115	
Thickness of membrane	0.127	mm

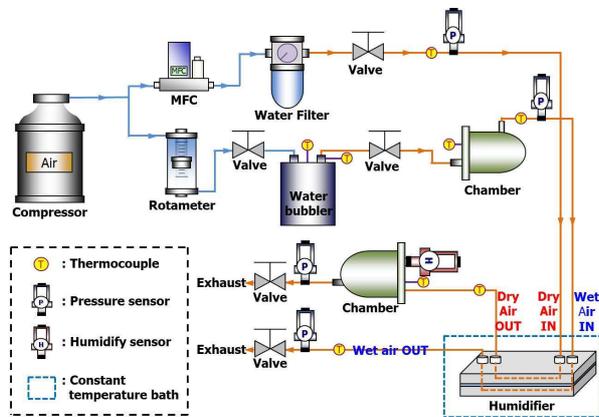


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

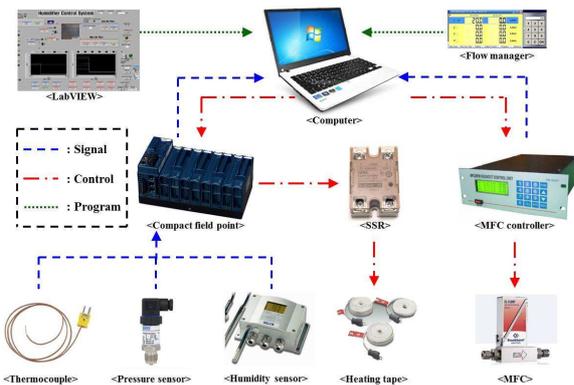


Fig. 4 Schematic diagram data acquisition and control

에서 사용된 변수뿐만 아니라 물질 교환이 이루어지는 면적 등의 실험 환경을 보여주고 있다.

Fig. 3은 실험장치의 개략도이다. 두 유체 입구에서 유량을 조절할 수 있도록 MFC와 유량계를 설치하였고 건공기 구간에는 필터를 이용하여 압축기에서 나온 공기의 수분을 제거하였다. 습공기는 압축기에서 나온 공기가 버블러를 통과하며 상대습도 100%로 가습이 되어 만들어진다.

습공기 구간과 가습기를 통과한 건공기 구간에서 수분이 응축되지 않도록 열선을 이용하여 온도를 제어하였다. 수분의 확산현상이 일어나는 가습기에서도 응축 방지 및 습공기와 건공기에서의 열전달이 일어나지 않도록 항온조를 사용하여 일정 온도를 유지할 수 있게 하였다.

Fig. 4는 본 실험에서의 데이터 습득 및 제어를 나타낸 개략도이다. 압력계는 Wika 사의 S-10을 사용하였고, 습도계는 Vaisala 사의 HMT337을 사용하였으며, 열전대는 K-type을 이용하였다. 이러한 센서들로 부터 측정된 데이터는 National Instruments™사의 Compact Field Point®를 이용하여 수집하였다. LabVIEW™를 통해 실험 장치들이 운전온도로 유지되도록 제어하였고 또한 측정된 데이터 값들을 보고 저장할 수 있도록 프로그램을 구축하였다. MFC 컨트롤러와 컴퓨터를 연결하여 MFC의 유량 제어 및 현재의 유량상태에 대해서 확인할 수 있도록 설정하였다.

2.2 실험 방법

친수성 막을 통한 수분 전달 특성 연구를 위해 건공기와 습공기의 유량, 운전온도, 운전압력, 유동배열을 변화시키면서 건공기 출구에서의 상대습도를 측정하여 이슬점 온도를 구하였다. 이슬점 온도는 일정한 압력에서 수증기가 포화되는 순간의 온도이므로, 주어진 온도와 압력 조건하에서는 막을 통과한 수분의 이송량을 정량적으로 비교하기에 적합하다.

August-Roche-Magnus approximation에서 유도된 식으로 상대습도와 온도를 이용하여 이슬점 온도를 계산하였다.⁽¹³⁾

$$\gamma = \frac{17.271 T}{237.7 + T} + \ln\left(\frac{\Phi}{100}\right)$$

$$T_{dp} = \frac{237.7\gamma}{17.271 - \gamma} \tag{1}$$

여기서 ϕ 는 가습기 후단 챔버의 상대습도(%), T 는 가습기 후단 챔버의 온도($^{\circ}\text{C}$)이며 T_{dp} 는 이슬점 온도($^{\circ}\text{C}$)이다.

본 실험을 통해 구한 이슬점 온도를 분석하는 과정에서 이용되는 수분확산력이란 습공기와 건공기의 수분 농도차에 의해 발생하는 이송력으로 Motupally 등에 의해 측정되었다.⁽¹⁴⁾

Fig. 5는 버블러를 통과한 습공기의 이슬점 온도를 식 (1)을 통해 구한 결과이다. 버블러를 통과한 습공기는 상대습도 100%가 되며 이것은 이슬점 온도가 운전온도인 40°C , 60°C 와 유사한 온도인 것을 의미한다.

실험에서 사용된 변수는 건공기와 습공기의 유량, 운전온도, 운전압력, 유동배열이다. 이때 가습기로 유입되는 건공기와 습공기의 온도, 압력, 유량은 같도록 제어하였다.

유량은 건공기와 습공기의 온도를 40°C 로 일정하게 유지한 상태에서 10lpm, 20lpm, 30lpm, 40lpm의 경우를 측정하였으며, 이때의 유동배열은 대향 유동으로 실험하였다.

운전온도는 40°C 와 60°C 의 경우로 유동배열은 평행 유동, 운전압력은 1.5bar에서 유량은 10lpm과 20lpm으로 실험하였다. 본 연구에서는 실험장치의 오차 범위와 flooding에 의한 물질전달 복잡성을 배제 할 수 있는 온도 범위인 40°C 와 60°C 를 물질전달 현상을 계측하기 위한 온도로 선정하였다. 또, 유동 강도에 의한 영향을 확인하기 위해 건공기 측과 습공기 측의 유동은 층류 운전구간부터 난류까지 변화시키면서 확인하였다.

운전압력은 1.0bar, 1.5bar, 2.0bar 세 가지 경우

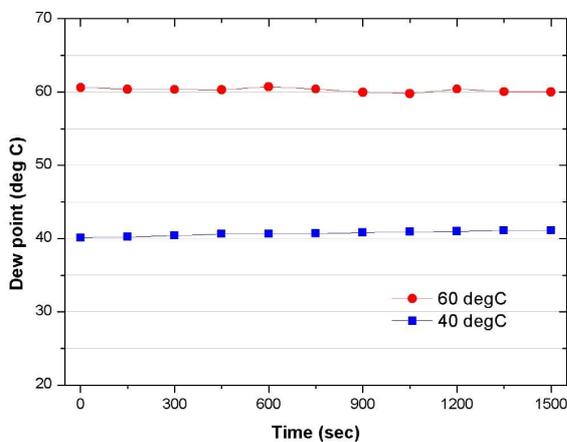


Fig. 5 Dew point temperature of wet air through water bubbler

로 유동배열은 평행 유동으로 각 압력 상태에서 유량을 변경하며 실험을 수행하였다.

유동배열은 평행 유동과 대향 유동의 경우로 운전온도는 40°C , 운전압력은 1.5bar로 일정하게 유지한 상태에서 네 가지 유량별로 유동배열을 변경하며 실험하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 결과

Fig. 6은 동일한 운전온도, 운전압력에서 유량 변화에 따른 이슬점 온도를 측정한 결과이다. 건공기와 습공기의 온도는 40°C , 압력은 1.5bar, 유동배열은 대향 유동인 상태에서 건공기와 습공기의 유량을 함께 10lpm에서 40lpm까지 10lpm씩 증가시키며 가습기를 통과한 건공기의 이슬점 온도

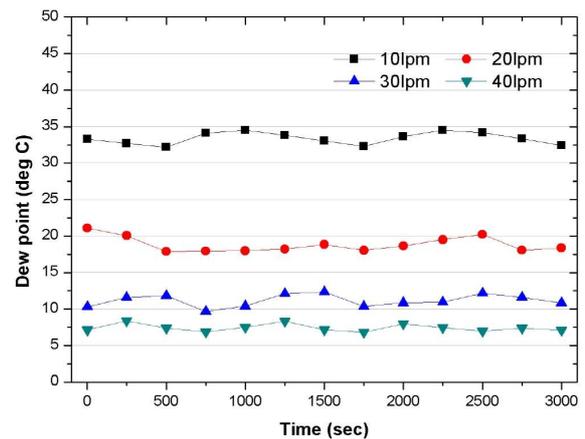


Fig. 6 Dew point temperature of exit dry air in terms of dry air and wet air flow rate ($T=40^{\circ}\text{C}$, $P=1.5\text{bar}$)

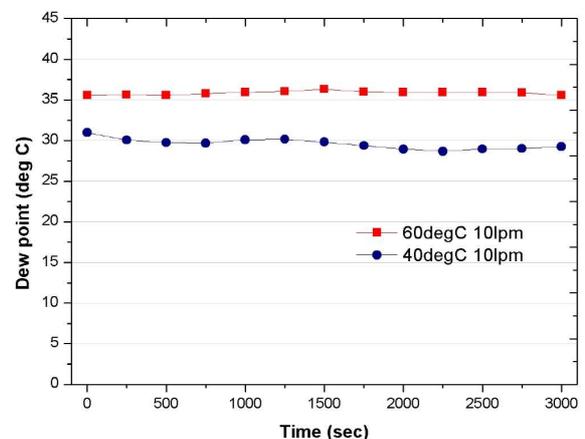


Fig. 7 Dew point temperature of exit dry air over selected operating temperature ($P=1.5\text{bar}$, Flow rate 10lpm)⁽¹⁵⁾

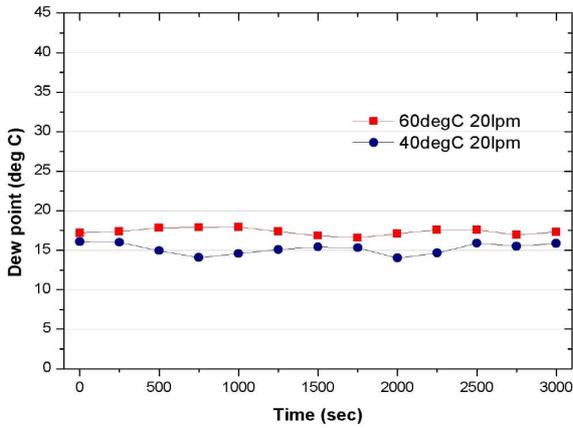


Fig. 8 Dew point temperature of exit dry air over selected operating temperature (P=1.5bar, Flow rate 20lpm)

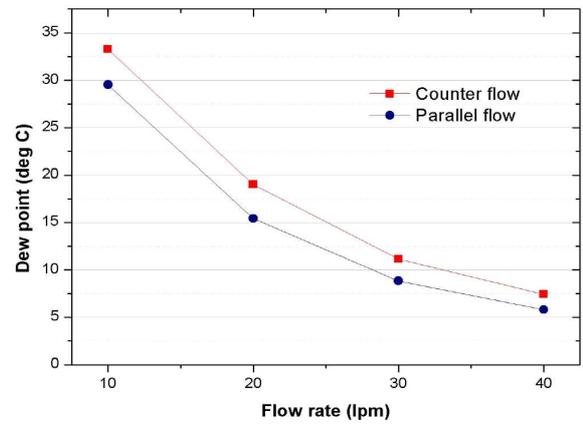


Fig. 10 Comparison of exit dry air dew point between counter flow and parallel flow (T=40°C, P=1.5bar)

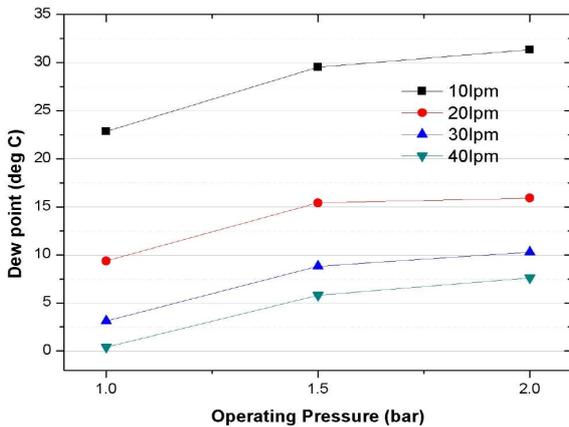


Fig. 9 Comparison of exit dry air dew point among 1.5bar, 1.75bar and 2.0bar

를 측정하였다. 건공기와 습공기의 유량이 10lpm 일 때 이슬점 온도는 평균 33.4°C로 측정구간 중 가장 높은 값을 보여주고 있으며, 유량 증가와 함께 이슬점 온도가 감소하였다. 10lpm에서의 이슬점 온도 평균과 20lpm에서의 이슬점 온도 평균의 차이는 14.4°C였고, 20lpm에서의 이슬점 온도 평균과 30lpm에서의 이슬점 온도 평균의 차이는 7.9°C를 보였으며 30lpm에서의 이슬점 온도 평균과 40lpm에서의 이슬점 온도 평균은 3.7°C의 차이를 보였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 평행유동 상태에서 운전온도에 따른 이슬점 온도의 차이를 보여주고 있다. 가습기의 운전온도가 60°C의 경우 40°C에 비해 가습기를 통과한 건공기의 이슬점 온도가 평균적으로 10lpm에서는 6.3°C, 20lpm에서는 2.7°C 증가한 것으로 측정되었다.

Fig. 9는 운전온도 40°C에서의 운전압력에 따른 물질전달 결과를 보여주고 있다. 3000초 동안 연속적으로 측정된 이슬점 온도 데이터들은 조화평균(Ensemble average) 값을 계산하여 나타내었다.

$$H(x_1 : x_n) = \frac{n}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \dots + \frac{1}{z_n}} \quad (2)$$

대체적으로 운전압력이 증가할수록 이슬점 온도가 증가하는 것을 보여주었다. 1.5bar에서의 이슬점 온도 평균은 1.0bar에 비해 약 5.9°C 높았으며 2.0bar에서의 이슬점 온도 평균은 1.5bar에 비해 약 1.4°C 높았다. 압력이 높아질수록 그 영향이 감소하는 것을 알 수 있었다. 유량별로 1.5bar와 2.0bar를 비교한 결과 10lpm에서는 1.8°C의 차이가 났으며, 20lpm에서는 0.5°C, 30lpm에서는 1.5°C, 40lpm에서는 1.8°C의 차이를 보였다.

Fig. 10은 운전온도 40°C 운전압력 1.5bar에서 유동배열에 따른 이슬점 온도를 나타낸 결과이다. 이슬점 온도는 조화평균을 이용하여 값을 나타내었으며 앞의 실험과 같이 3000초 동안 연속적으로 얻어진 온도 데이터를 사용하였다. 평행유동(Parallel flow)에 비해 대향유동(Counter flow)에서의 이슬점 온도 평균이 약 2.9°C 높게 나왔다. 10lpm에서는 약 3.8°C로 가장 큰 차이를 보였으며, 유량이 증가할수록 이슬점 온도 차이는 감소하였고, 40lpm에서는 약 1.6°C로 가장 적은 차이를 보였다.

3.2 토의

Fig. 6의 결과는 유량이 증가할수록 이슬점 온

도가 감소되고 있는 것을 보여준다. 유량의 증가는 막 가습기로 유입되는 기체의 속도가 증가하는 것을 의미한다. 속도가 증가하게 되면 두 기체가 유로 내에서 머무는 시간이 감소하게 되며 이로 인해 물질전달 시간이 부족하여 위와 같은 결과가 발생한 것으로 사료된다.

Nafion[®] 막의 수분투과성은 수분함유량에 많은 영향을 받으며 운전온도의 증가는 막의 수분함유량을 증가시키고 그 결과 수분투과성이 높아지게 된다.⁽¹⁶⁻¹⁹⁾ 또한 운전온도가 40°C에 비해 60°C의 경우 건공기의 이슬점 온도가 높다. 즉 건공기에 포화될 수 있는 수분의 양이 많다는 것을 의미하며, 이는 습공기와 농도차이가 크다는 것이다. 수분이 막을 통해 수송되는 현상은 농도차에 의한 확산력에 의해 발생한다고 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 농도차이가 더 큰 60°C일 때 수분확산력이 커서 Fig. 7과 Fig. 8의 결과가 발생한 것으로 판단된다.

운전압력이 높아질수록 가습기를 통과한 건공기의 이슬점 온도가 높아지는 것은 이상기체 방정식과 절대습도를 이용하여 설명할 수 있다. 운전압력이 증가하는 것은 식 (3)의 이상기체 방정식에서 P_a 가 증가하는 것을 의미하며, 유량은 일정하게 유지되고 있으므로 \dot{V} 는 변화가 없다. 즉, 식의 좌변 항이 증가한다는 것을 알 수 있다. 우변 항의 경우 운전온도는 40°C로 유지되고 있는 상태이므로 T 는 일정하고 또한 R_a 값 역시 기체 상수로 일정한 값을 가지고 있으므로 \dot{m}_a 의 값이 증가하게 되는 것이다.

$$P_a \dot{V} = \dot{m}_a R_a T \quad (3)$$

식 (4)에서 절대습도 w 는 일정하다. 그러므로 \dot{m}_a 가 증가하는 것은 \dot{m}_v 의 증가를 의미한다.

$$w = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \quad (4)$$

압력이 증가할수록 \dot{m}_a 가 증가하게 되므로 동일한 유량에서 이동되는 수분의 양이 많다는 것을 알 수 있다. 그래서 Fig. 9의 그래프와 같은 결과가 발생한 것으로 보인다.

대향유동의 경우 건공기가 가습기를 통과하는 동안 습공기와 수분함유량 차이가 유지되므로 수분전달이 지속적으로 활발히 이루어진다. 하지

만 평행유동은 유로를 지나는 동안 양단에서의 수분함유량 차이가 감소하게 되므로 습공기에서 건공기로 이동되는 수분량이 점차 감소되어 Fig. 10의 결과가 나오는 것으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 평판형 막 가습기의 운전온도는 40°C, 운전압력은 1.5bar, 유동배열은 대향유동에서 유량을 10lpm에서 40lpm까지 증가시킨 경우에 가습기를 통과한 건공기의 이슬점 온도는 33.4°C에서 7.4°C까지 낮아졌다.

(2) 운전압력은 1.5bar, 유동배열은 평행유동에서 운전온도를 40°C에서 60°C로 증가시킨 결과 건공기의 이슬점 온도가 최대 6.4°C 증가하였다.

(3) 운전온도는 40°C, 유동배열은 평행유동에서 운전압력을 1.0bar에서 2.0bar까지 증가시킨 결과 건공기의 이슬점 온도가 동일 유량에서 최대 8.5°C 증가하였다.

(4) 운전온도는 40°C, 운전압력은 1.5bar에서 유동배열에 따른 수분 전달을 실험한 결과 대향유동의 경우가 평행유동에 비해 가습기를 통과한 건공기의 이슬점 온도가 평균 2.9°C 높았다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업과(2011-0026580) 지역혁신인력양성사업의(201206A0106312010100) 지원을 받아 수행된 것임.

참고문헌

- (1) Picot, D., Metkemeijer, R., Beziau, J. J. and Rouveyre, L., 1998, "Impact of the Water Symmetry Factor on Humidification and Cooling Strategies for PEM Fuel Cell Stacks," *Journal of Power Sources*, Vol. 75, pp. 251~260.
- (2) Staschewski, D. and Mao, Z. Q., 1999, "PEMFC Operation with Extraordinarily Low Gas Pressures and Internal Humidification - Conception and Experimental Prototype Stack," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, pp. 543~548.
- (3) Buchi, F. N. and Srinivasan, S., 1997, "Operating Proton Exchange Membrane Fuel Cells without External Humidification of the

- Reactant Gases-Fundamental Aspects,” *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 144, No. 8, pp. 2767~2772.
- (4) Miachon, S. and Aldebert, P., 1995, “Internal Hydration H₂/O₂ 100cm² Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell,” *Journal of Power Sources*, Vol. 56, pp. 31~36.
- (5) Choi, K. H., Park, D. J., Rho, Y. W., Kho, Y. T. and Lee, T. H., 1998, “A Study of the Internal Humidification of an Integrated PEMFC Stack,” *Journal of Power Sources*, Vol. 74, pp. 146~150.
- (6) Yang, T. H., Yoon, Y. G., Kim, C. S., Kwak, S. H. and Yoon, K. H., 2002, “A Novel Preparation Method of a Self-humidifying Polymer Electrolyte Membrane,” *Journal of Power Source*, Vol. 106, pp. 328~332.
- (7) Staschewski, D., 1996, “Internal Humidifying of PEM Fuel Cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 21, No. 5, pp. 381~385.
- (8) Chen, D. and Peng, H., 2005, “A Thermodynamic Model of Membrane Humidifiers for PEM Fuel Cell Humidification Control,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement*, Vol. 127, pp. 424~432.
- (9) Chu, D., Jiang, R. and Walker, C., 1999, “Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Stacks Part 1. Evaluation and Simulation of an Air-Breathing PEMFC Stack,” *Journal of Power Sources*, Vol. 83, pp. 128~133.
- (10) Dubose, R. A., 2002, “Enthalpy Wheel Humidifiers,” *Proceeding of 2002 Fuel Cell Seminar*.
- (11) Ha, T. H., Kim, H. S. and Min, K. D., 2006, “Experimental and Modeling Study of Humidification Performance of Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell,” *Journal of KSAE*, pp. 1766~1771.
- (12) Choi, K. H., Park, D. J., Rho, Y. W., Kho, Y. T. and Lee, T. H., 1998, “A Study of the Internal Humidification of An Integrated PEMFC Stack,” *Journal Power Sources*, Vol. 74, pp. 146~150.
- (13) Barenbrug A.W.T., 1974, “Psychrometry and Psychrometric Charts,” 3rd Edition, 3rd Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd..
- (14) Motupally, S., Becker, A. J. and Weidner, J. W., 2000, “Diffusion of Water in Nafion 115 Membranes,” *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 147, No. 9, pp. 3171~3177.
- (15) Tak, H. W., Kim, K. T., Im, S. Y., and Yu, S. S., 2012, “Steady State Vavpor Transfort Characteristic of Nafion Membrane over Various Operating Conditions,” *Trans. of the KHNES*, Vol. 23, No. 1, pp. 19~25.
- (16) Springer, T. F., Zatwodzinski, T. A. and Gonesfeld, S., 1991, “Polymer Electrolyte Fuel Cell Model,” *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, No. 8, pp. 2234~2342.
- (17) Shan, Y., Choe, S. Y., 2005, “A High Dynamic PEM Fuel Cell Model with Temperature Effects,” *Journal of Power Source*, Vol. 145, pp. 30~39.
- (18) Nguyen, T. V., White, R. E., 1993, “A Water and Heat Management Model for Proton - Exchange - Membrane Fuel Cells,” *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 140, No. 8, pp. 2178~2186.
- (19) Chen, D., Li, W. and Peng, H., 2008, “An Experimental Study and Model Validation of a Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Humidification Control,” *Journal of Power Source*, Vol. 180, pp. 461~467.