

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.5.473

ISSN 1226-4881

이온교환막 연료전지용 원통형 막 가습기의 열 및 물질전달특성 기초 연구

배호준*, 안국영**, 이영덕**, 강상규**, 유상석***†

* 현대자동차, ** 한국기계연구원 *** 충남대학교

Basic Analysis of Heat and Mass Transfer Characteristics of Tubular Membrane Humidifier for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Hojune Bae*, Kook Young Ahn, Young Duk Lee, Sang Kyu Kang** and Sangseok Yu***†

* Hyundai Motors,

** Korea Institute of Machinery and Materials

*** Chung Nam National University

(Received November 8, 2010 ; Revised February 1, 2011 ; Accepted February 5, 2011)

Key Words: Tubular Membrane Humidifier(원통형 막가습기), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달), Steady State and Transient Experiment(정상 및 비정상 실험)

초록: 막 가습기는 다른 가습장치와는 달리, 기생 전력의 손실이 없고 가습 성능이 우수하여 이온교환막 연료전지의 외부 가습을 위해 적용되고 있다. 원통형 막 가습기는 특히 가습성능에 비해 요구 체적이 매우 작기 때문에, 수송용 및 가정용 이온교환막 연료전지에 적용된다. 막가습기의 최적 설계를 위한 열 및 물질 전달 특성에 대한 이해가 필요하지만, 아직 다양한 연구가 이루어지고 있지 않다. 본 연구에서는 원통형 막가습기의 열 및 물질 전달 특성을 이해하기 위한 특성 실험을 수행하였다. 기존의 습도 측정계는 비정상 가습 특성 실험에 한계가 있고, 정상 상태에서도 고온 다습한 환경에서는 오차가 크기 때문에 본 연구에서는 습증기 응축법을 이용하였다. 가습기의 정상상태 특성을 확인하기 위해 압력과 온도 변화에 대한 실험을 수행하였으며, 비정상 특성을 확인하기 위해 순간 유량 변화 시의 가습 성능을 측정하였다. 본 연구에서는 이상의 기초 실험을 통해서 막 가습기의 성능에 영향을 미치는 주요 인자를 확인하였으며, 원통형 막가습기의 기초적인 열 및 물질 전달 특성을 이해하였다.

Abstract: The proton exchange membrane (PEM) fuel cell system is critically dependent on the humidity, which should be properly maintained over the entire operating range. A membrane humidifier is used for the water management in the PEMFC because of the membrane humidifier's reliable performance and zero parasitic power loss. In the PEMFC system, the membrane humidifier is required to provide appropriate humidity for the design point of the fuel cell. Although the performance of the fuel cell depends on the performance of the humidifier, few studies have provided a systematic analysis of the humidifier. We carry out an experimental analysis of the membrane humidifier using a vapor condensation bottle. The dry air pressure, water flow temperature, and air flow rate were chosen as the operating parameters. The results show that the time constant for the dynamic response of the membrane humidifier is relatively short, but additional analysis should be carried out.

1. 서 론

전기 화학 반응을 통해 전기를 발생시키는 이온 교환막 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 수소이온교환 특성을 갖는 고분자 막을 전해질로 채용하며 그 양단에 연료극과 공기극 및 분리판을 가지고 있는 연료

전지이다. PEMFC가 적절한 성능을 내기 위해서는 전지 내부의 열관리와 물관리가 중요하며, 내부의 열 및 물관리는 외부 보조기기의 운전과 연결되어 있다.⁽¹⁻⁴⁾

이 중 물관리를 위해서는 외부 가습이 필요하며, 가습법은 크게 내부 가습과 외부 가습, 두 가지로 분류할 수 있다. 내부 가습은 연료전지 스택의 일부를 가습층으로 사용하고, 냉각수를 이용하여 수분을 공급하는 방법으로 가습 성능 측

† Corresponding Author, sangseok@cnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

면에서는 불리하지만, 일체형으로 제작이 가능하다는 장점이 있다. 이에 비해, 외부 가습은 별도의 가습 장치를 통해 수분을 공급하는 방법으로 액적 분무 방식, 엔탈피 휠 방식, 버블러 방식, 그리고 친수성 투과막을 이용한 막 가습 방식이 있다.

Picot 등은 세 종류의 내부 가습 방법을 적용한 PEMFC를 통해 막이 건조해지는 것을 피하기 위한 최적의 물 대칭 요소가 존재한다는 것을 보여주었다.⁽⁵⁾ Staschewski 등에 따르면 내부 가습식 PEMFC의 가습기로 사용되고 있는 다공성 양극관은 카본 파이버로 제작되었으며 구동 시 매우 낮은 압력 강하만을 발생시켰다.⁽⁶⁾ Bush 등은 자가 가습 PEMFC를 디자인하고 테스트 해본 결과 0.6 볼트에서 얻어진 전류 밀도가 외부 가습을 이용한 것보다 20~40% 낮다는 것을 보여주었다.⁽⁷⁾

외부 가습기는 스택으로 들어가는 외기의 온도와 습도를 동시에 상승시켜 주는 방식으로, 능동식으로는 스프레이 노즐을 이용한 액적 분무 방식과 엔탈피 휠 방식이 있고, 수동식으로는 막 가습기와 버블러 방식이 있다. 이 중 버블러 방식과 분무 방식은 압력 손실이 크고, 또 무게와 가격, 장치의 복잡성, 기생 전력 등이 증가하게 된다.^(8,9) 한편, Emprise사의 엔탈피 휠 가습기는 회전하는 세라믹 휠을 이용하여 따뜻하고 습한 연료전지의 배기가스에서 연료전지에 들어가는 차갑고 건조한 공기로 열과 수분을 전달하는 방식으로 위의 두 경우보다 무게, 장치의 복잡성, 기생 전력 등을 더 줄일 수 있지만, 회전 부품에 의해 성능이 유지된다는 점과 가격 때문에 선호되어지지 않았다.⁽¹⁰⁾

이에 비해, 막 가습 방식은 친수성 투과막을 사이에 둔 두 유로에서의 가스의 습증기 농도 및 온도차를 이용해 수분 및 열을 이송하는 장치이다. 친수성 투과막으로는 Nafion[®] 등의 막에 친수성 처리를 하여 사용하고 있으며 다른 가습 방식에 비해 소요 동력이 필요 없고, 수분 공급 성능이 우수하며, 비정상시 응답성이 우수한 특징이 있다.⁽¹¹⁾ PEMFC의 성능에 가습장치가 중요하지만, 상대적으로 문헌상에 제시된 연구는 희박하며, 특히 막 가습기는 차량에 주로 적용이 되고 있음에도 불구하고 연구 보고가 매우 희박하다. 최근 막가습기의 정적 거동 및 동적 거동을 이해하기 위한 모델이 개발되었으나 시스템의 동

적 거동에 초점을 맞추기 위해 열전달 모델 및 막내의 습증기 수송 모델을 매우 단순화 하였고, 생성되는 습증기의 액화에 대한 설명이 부족하였다.^(8,11~17)

본 연구에서는 막 가습기의 성능 특성을 이해하기 위해 열 및 물질 전달 기초 성능 실험을 수행할 수 있는 실험장치와 실험기법을 개발하고자 한다. 개발된 장치를 통해 정상 상태 및 과도 상태에서의 출구 습도와 온도, 유량을 측정함으로써 가습기 성능 특성을 이해하고자 하였다. 이때 선택된 원통형 막 가습기는 Liquid-to-Gas 방식의 Shell-and-Tube형을 선택하였고, 가습기의 내구성을 고려하여 운전 조건을 선별하고 기초 성능 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에 사용한 막 가습기는 원통 모양 실린더 내부에 25 μ m 두께의 Nafion[®] 재질의 얇은 튜브 480개 관군을 가지고 있다. 가습기에 사용되는 Nafion[®] 막은 기존 연료전지용 막보다 함수성을 개선한 막이며 두께가 매우 얇기 때문에, 가습수 측에서 건공기 측으로의 확산이 용이하도록 설계되어 있다. Fig. 1은 막 가습기의 내부 구조와 수분 수송 현상에 대한 개략도로, Nafion[®] 막에서의 수분 수송은 막 양쪽의 농도 차에 의한 확산력과 압력 차에 의한 대류 수송력에 의해 이루어진다.

Fig. 2는 막가습기의 운전특성을 측정하기 위한 실험장치도를 보여주고 있다. 열 및 물질전달을 극대화 시킬 수 있는 대향류 방식을 선택하였고 두 유체의 입구와 출구에서의 압력과 온도를 압력 센서와 열전대를 이용하여 측정하였다. 공급되는 공기는 압축 공기를 이용하였고 필터를 사용하여 수분과 기타 입자상 물질 등을 제거하였

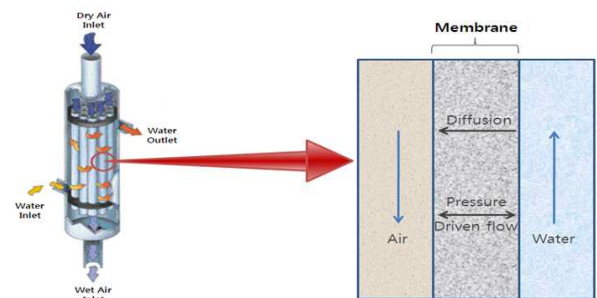


Fig. 1 Water transport phenomena in membrane humidifier

다. 가습수의 경우 별도의 히터를 통해 외부에서 가열한 후 가습기에 펌프를 이용해 공급하였으며, 출구단의 배압을 조절하여 가습기 운전압을 조절하였다.

가습기 출구부의 후단에는 연속적인 시료 채취를 위한 9개의 솔레노이드 밸브와 8개의 워터 트랩을 연결하였다. 워터 트랩은 가습기를 거쳐 습해진 공기 속의 수분을 응축시키기 위해 설치하였고, 착탈이 가능하도록 고안하여 실험에 의해 트랩의 물이 증가한 양을 정밀저울을 이용해 측정하였다. 하지만, 1회 실험으로 측정할 수 있는 시료의 양이 매우 작은데 시료 채취를 위한 트랩이 크기 때문에 정밀 저울로 1회 채취량을 재는데는 한계가 있다. 그러므로, 재현성이 있는 연속 실험을 수행하여 수분의 양을 측정하였다. 이러한 연속실험시 뜨거운 습공기로 인한 워터 트랩의 온도 변화를 방지하기 위해 항온조를 이용하여 워터 트랩의 온도를 일정하게 유지시켰다. 검출된 신호를 처리하기 위해 National Instrument사의 Compact Field Point[®]를 이용하여 데이터를 검출하고 처리하였으며, RT Labview를 통해 제어패널을 구축하고, 제어로직을 이식하여 전체 실험 과정을 제어 하였다.

2.2 정상 상태 실험 조건

막 가습기의 기초 특성 평가 실험을 위해서 가습수의 온도, 건공기의 압력, 건공기의 유량을 변화시켜 가면서 건공기 출구에서의 상대습도를 측정하였다. 이슬점은 일정한 압력 하에서 수증기가 포화되는 순간의 온도이므로, 주어진 온도와 압력 조건하에서는 막을 통과한 수증기의 이송량을 정량적으로 비교하기에 적합하다.

이슬점 계산에 있어서는 가습기를 거쳐 배출된 습공기에 함유된 수분의 질량을 이용하였다. 실험장치도에서는 가습기를 거친 습공기는 워터 트랩을 거치며 워터 트랩 내에 물을 응축시키고 밖으로 배출된다. 본 연구에서는 이 습공기의 상대습도를 100%로 가정하였으며, 가습기 후단에서 습공기가 함유하고 있는 습증기의 총질량은 워터 트랩 내에 응축된 수분의 질량과 워터트랩을 통해 상대 습도 100%로 배출된 공기 중에 포함된 습증기 유량이 된다. 이때 항온조의 크기를 충분히 크게 하였기 때문에 워터 트랩의 온도와 워터 트랩을 통해 배출되는 가스의 온도는 항온조의

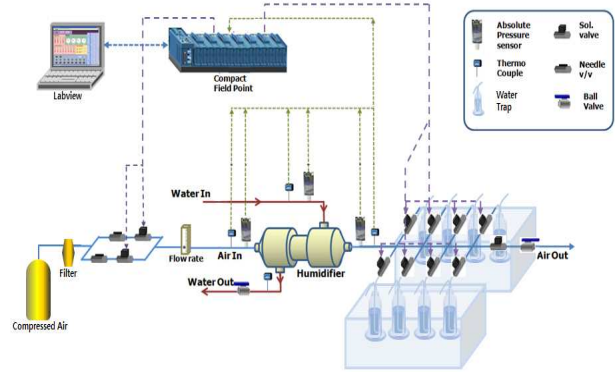


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

온도와 같다고 가정하였다. 항온조로부터 배출되는 건공기의 질량은 가습기 입구단의 유량계로부터 결정되므로, 건공기 압력과 온도를 측정한 후 다음과 같이 공기의 질량 유량을 구하였다.

$$\dot{m}_a = \frac{P_{a,i} \dot{V}_{a,i} M_a}{R_u T_{a,i}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_a 는 건공기의 질량 유량 [g/s], $P_{a,i}$ 는 가습기 입구에서의 건공기 압력[Pa], $\dot{V}_{a,i}$ 은 가습기 입구에서의 건공기 부피 유량[m³/s], M_a 는 건공기의 분자량[g/mole], R_u 는 이상기체상수 [J/K·mole], $T_{a,i}$ 는 가습기 입구에서의 건공기 온도[K]이다. 가습기를 거치면 온도가 상승하며 부피 유량도 증가하지만 질량 유량은 변하지 않기 때문에 이후의 계산에서 가습기 후단의 이슬점 계산에 가습기 전단에서의 질량 유량으로 계산해도 무관하다.

가습기 출구단의 절대 습도는 앞서 구한 공기의 질량 유량과 가습기 후단의 공기가 함유하고 있는 물의 질량 유량을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega = \frac{\dot{m}_{v,o}}{\dot{m}_a} \quad (2)$$

여기서 ω 는 절대 습도, $\dot{m}_{v,o}$ 는 가습기 출구에서 공기가 함유하고 있는 물의 질량 유량[g/s]이다. 실제 측정 가능한 물리량은 상대습도로, 절대 습도, 포화 수증기압, 공기 압력을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Phi = \frac{\omega P_a}{0.622 P_{sat}} \quad (3)$$

$$\log_{10} P_{sat} = [\zeta_1 + \zeta_2 T_{a,o} + \zeta_3 T_{a,o}^2 + \zeta_4 T_{a,o}^3] \quad (4)$$

$$\zeta_1 = 2.8206$$

$$\zeta_2 = 0.02953$$

$$\zeta_3 = -9.1837 \times 10^{-5}$$

$$\zeta_4 = 1.4454 \times 10^{-7}$$

여기서 Φ 는 상대 습도[%], P_{sat} 은 포화 수증기 압[Pa], $T_{a,o}$ 는 가습기 후단의 온도[°C]이며 포화 수증기압을 경험식을 이용하였다.⁽¹⁸⁾ 출구단에서의 이슬점은 출구 공기 온도와 상대습도를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$T_{dp} = \frac{b\gamma}{a-\gamma} \quad (5)$$

여기서, $\gamma = \frac{17.271 T_{a,o}}{237.7 + T_{a,o}} + \ln\left(\frac{\Phi}{100}\right)$

이 식은 August-Roche-Magnus approximation에서 유도되어진 것으로 이슬점을 상대습도와 공기의 온도에 대한 함수로 표현하였다.⁽¹⁹⁾ T_{dp} 는 이슬점 [°C]을 뜻하고 $T_{a,o}$ 는 가습기 후단에서 습증기의 온도[°C]이다. 실험에 사용된 변수 및 그 범위는 Table 1에 나타내었으며, 유량은 가습기 정격 유량과 내구한도를 고려하여 선정하고 압력과 운전 온도는 가습기의 내구한도를 고려하여 선정하였다.

2.3 공기 유량의 비정상 입력 모사 기법

본 연구에서는 비정상 상태에서의 막을 통한 습증기 수송 특성을 이해하기 위해 건공기의 유량을 매우 짧은 시간에 급격히 변화시키고 막을 통한 습증기 수송 특성을 확인하였다. 건공기 유량이 급격히 변화하는 것을 모사하기 위해 필터를 거친 압축 공기 후단을 두 개로 나눠 각각 솔레노이드 밸브를 연결하고 각각의 밸브가 열렸을 때 흐르는 유량은 이들 밸브를 이용하여 조절하였으며 유량을 확인하기 위해 유량계를 설치하였다. 순간적인 유량의 변화를 보다 정확히 확인하

Table 1 Parameters of experiment analysis

Examined Variables	Experimental Range
Water Temperature (°C)	50, 60
Air Flow Rate (lpm)	25, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250
Air Pressure (bar)	1.3, 2.0, 2.5

기 위해 가습기 전단의 압력 변화를 측정하였으며, 시간에 따른 유량의 변화 양상을 예측하였다.

2.4 비정상 데이터 획득 기법

수초 미만의 응답특성을 갖는 막가습기의 과도 응답 특성은 상용으로 판매되는 습도센서를 이용해 측정할 경우 신뢰도가 매우 낮은 결과를 보인다. 본 연구에서는 과도상태에서의 습도 변화를 측정하기 위해 가습기 출구단의 수분을 응축시켜 그 질량을 측정하고 그 질량을 이용하여 습도를 계산하였다. 과도 응답구간을 8개 구간으로 나누어 솔레노이드 밸브 제어를 통해 8번에 걸쳐 측정을 하여 각각의 워터트랩의 질량 변화를 이용해 습공기 질량을 계산하였다. 하지만, 1회 측정을 통해 변하는 습공기 질량은 매우 소량이므로, 과도응답을 연속적으로 반복 재현하여 매회 응축된 습공기의 누적 질량을 측정하는 방법을 사용하였다. 각각의 워터트랩으로 유입되는 유량은 정상상태 실험을 먼저 수행하여 재현성이 있음을 확인하였다.

과도 응답을 반복하게 되면 반복 횟수가 증가할수록 오차가 감소하여 정확한 데이터를 얻을 수 있겠지만 그만큼 시간이 더 많이 걸리므로 적당한 반복 횟수를 정하는 것이 중요하다. Fig. 3에는 건공기의 유량이 35 lpm, 이슬점이 45 °C 일 때 계산한 이슬점 온도를 습도센서 결과와 비교한 것으로 측정 오차가 반복횟수를 증가시킴에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 그래프에서는 500번의 반복 실험 시 오차는 약 0.2 °C을 나타내고 있다. 그러므로 본 연구에서는 500회를 1회 과도 응답 측정을 위한 반복 횟수로 정하였다.

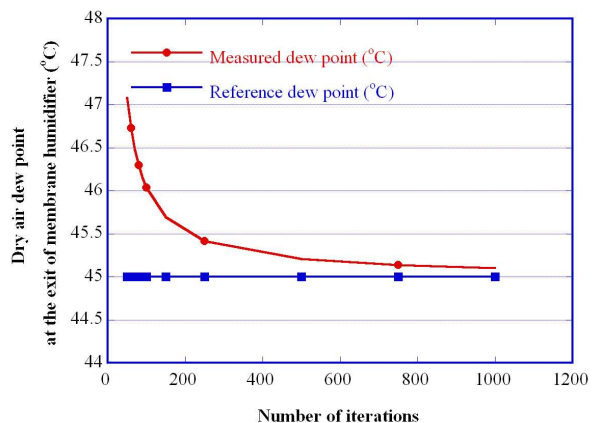


Fig. 3 Error estimation of measured dew point versus reference in terms of number of iterations

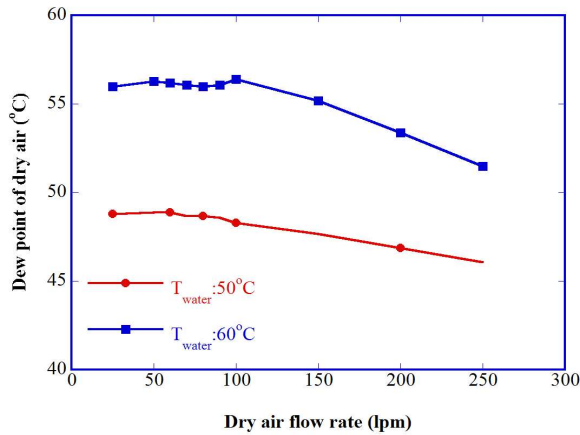


Fig. 4 Measured dew point vs. dry air flow rate regarding selected operating temperature

반복 실험에 의해 워터 트랩의 온도가 상승하는 것을 막기 위해 항온조를 설치하는 것 외에도 반복실험 사이의 간격도 조절할 필요가 있다. 1회 반복이 8개의 시료를 채취하는데 여기에 소요되는 시간을 40초 이상으로 하게 되면 워터트랩의 온도변화가 없음을 관찰하였으며, 40초를 1회 반복 시간으로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상 상태 습증기 수송 특성

3.1.1 온도 변화에 따른 가습 성능

Fig. 4에는 가습수의 온도를 50°C와 60°C로 했을 때 건공기의 유량에 따른 이슬점 변화를 보여주고 있다. 건공기 압력은 1.3bar_a로 고정하였고, 유량은 25 lpm부터 250 lpm까지 변화시켰다.

막 가습기에서 수분이 막을 통해 수송되는 현상은 양단의 농도차에 의한 확산력에 의해 발생한다. 막에서 가습수 측의 습증기 농도는 건공기 유량이 변해도 일정하게 유지되고 건공기의 입구 상대 습도도 필터를 거쳐서 유입되기 때문에 무시할 만한 정도로 떨어져 있으며 일정하다고 볼 수 있다. 즉, 농도차 확산에 의해 수송될 수 있는 수증기 농도차는 항상 최대값을 유지하도록 하였다. 이러한 조건하에서 건공기 유량이 증가할 때 습증기의 수송에 영향을 주는 다른 변수는 양단에서의 열전달량이다. 가습수로부터 건공기로 전달되는 열량은 건공기 유량과 두 유체의 입구에서의 온도 차에 의해서 결정된다.

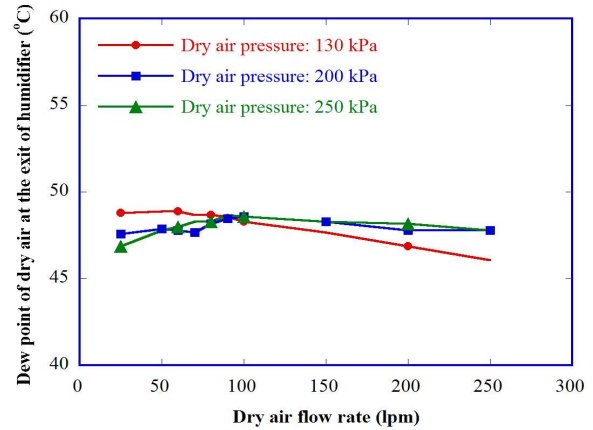


Fig. 5 Variation of dew point at the exit of dry air in terms of operating pressures at $T_{water} = 50^{\circ}C$

그러므로 건공기 유량을 증가시키면 건공기 출구 온도가 감소한다. 건공기 출구 온도는 열전달 특성에 의해 제한되기 때문에, 최대 이슬점 온도도 연동해서 제한받게 된다. Fig. 4에서 보면 건공기 유량이 작은 영역에서는 습증기 수송 특성은 농도차 확산력에 의해 영향을 받게 되지만, 유량을 증가시키게 되면, 주어진 온도에서의 최대 이슬점 자체가 제한되기 때문에 습증기 수송량이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

가습수의 온도가 증가하게 되면 건공기 출구 온도 또한 증가하기 때문에, 주어진 건공기의 최대 이슬점도 상향되게 된다. Fig. 4를 보면 50°C에서의 건공기 출구 이슬점 보다 60°C에서의 건공기 출구 이슬점이 높은 것을 확인 할 수 있다. 그리고 Fig. 4에서는 50°C일 때보다 60°C일 때 유량 증가에 따라 이슬점이 더 빠르게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 가습기로 유입되는 건공기의 온도와 물의 작동 온도의 차이가 60°C일 때 더 크므로 유량이 증가해도 같은 온도차를 유지하기 위해선 물과 공기간의 열전달이 더 많이 일어나야 하는데 유량이 증가할수록 유속이 빨라져서 충분한 열전달이 이루어지지 못하기 때문이다. 그리고 가습수의 온도가 50°C일 때의 이슬점은 50°C 가까이 나타났지만 60°C일 때의 이슬점은 그렇지 못한 것을 볼 수 있다. 이는 유량이 증가할 때와 같이 50°C일 때보다 60°C일 때 더 많은 양의 열전달이 이루어져야 하지만 이러한 일련의 물리적 현상이 용이하지 못하기 때문이다.

3.1.2 압력 변화에 따른 가습 성능

가습성능의 변화를 확산력에만 의존하는 경우

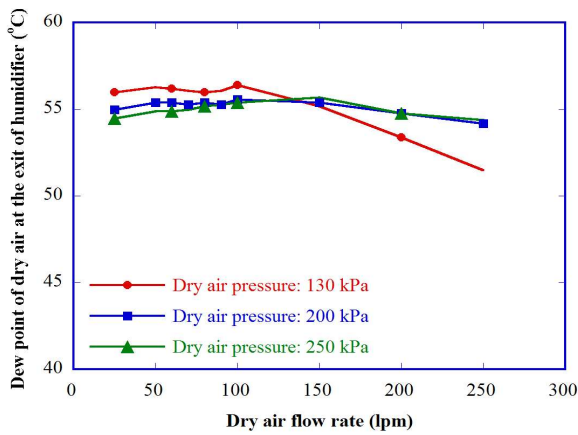


Fig. 6 Variation of dew point at the exit of dry air in terms of operating pressures at $T_{water}=60^{\circ}C$

에는 양단 압력을 동일하게 유지해가면서 압력에 의한 영향을 확인해야 하지만, 가습수의 압력만을 변화시켜 가면서 건공기 출구단의 이슬점 변화를 관측해 본 결과 큰 영향이 없었다. 이에 비해 가습수의 압력을 1.3 bar로 고정하고 건공기의 작동 압력을 증가시킨 경우에는 수분을 수송하는 확산력에 대한 저항력이 생길 것이 예상된다. 즉, 양단의 압력이 동일할 경우에는 수분을 수송하는 구동력은 순방향(가습수→건공기)으로 작용하는 양단의 수분의 농도차가 되지만, 역방향 압력 변화가 발생하게 되면 전체 수송력은 감소하게 된다. 본 논문에서는 이러한 역방향 압력 변화에 따른 이슬점 변화를 조사하였으며, 가습수의 작동온도가 50°C인 경우와 60°C인 경우에 대해 압력 변화에 따른 결과를 Fig. 5과 Fig. 6에 각각 나타내었다. 두 경우에서 가습수의 압력은 1.3bar로 유지하였으며, 50°C, 1.3 bar와 60°C, 1.3 bar의 결과에서는 양단의 압력이 동일한 경우이고, 2.0 bar 와 2.5 bar의 경우에는 건공기 압력만 증가시킨 경우이다.

Fig. 5에서 보면 가습수 측과 건공기 측의 압력이 동일한 경우에는 건공기 유량이 증가함에 따라 이슬점이 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 건공기 압력을 상승시키게 되면 습증기 수송이 확산력에 의해 지배가 되는 저 유량 영역에서는 확산저항이 증가하게 되어 오히려 습증기 수송을 방해하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 운전 압력이 증가함에 따라 건공기 질량유량이 증가하기 때문에 부피유량이 매우 큰 영역에서는 유량 증가에 대한 건공기로의 열전달 특성이 개선되게

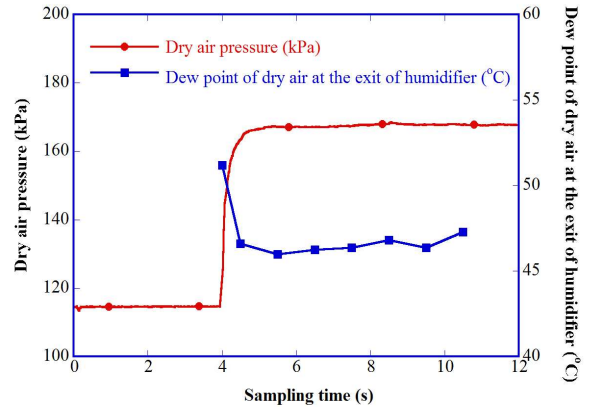


Fig. 7 Measured dew point and pressure according to the increase of flow rate

된다. 그러므로 부피유량이 큰 영역에서는 운전 압력의 증가가 습증기 수송에 긍정적인 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

가습수의 온도를 증가시키게 되면 압력 상승을 통한 질량 유량의 증가에 따라 열전달 특성이 더 강화되는 것을 볼 수 있다. 하지만, 가습수의 온도가 높아지게 되면 이러한 압력 상승의 영향은 2 bar를 넘어가게 되면 포화 상태에 이르는 것을 관측할 수 있다.

3.2 비정상 상태 습증기 수송 특성

3.2.1 유량 증가 시 막 가습기의 과도 응답

이온 교환막 연료전지의 내구성엔 특히 막전해질의 열화와 직접적인 관련이 있으며, 막의 열화는 막 표면의 수분 분포 불균형에 의해 영향을 받는다. 특히, 연료전지의 비정상 운전시에 가습기가 적절한 수분을 공급해 주지 못하게 되면, 막의 열화현상이 심화될 수 있다. 그러므로, 연료전지의 비정상 운전에 따른 가습기의 응답 특성에 대한 이해가 매우 중요하며, 본 연구에서는 이러한 가습기의 비정상 응답 특성을 확인하기 위해 공기 유량을 순간 변화 시키면서 물질 전달 특성을 확인하였다. Fig. 7에는 건공기 유량을 20 lpm에서 35 lpm으로 증가시켰을 때 시간에 따른 이슬점의 변화를 보여주고 있다. 가습수 유량은 3 lpm, 압력은 1.6 bar, 온도는 50°C로 유지하였고, 4초가 되는 순간 건공기의 유량을 증가시켰으며 그 때 압력은 115 kPa에서 168 kPa로 증가하였다. 건공기 유량의 계단형 입력에 대한 가습기의 응답은 유량이 변화한 후 1초 이내에 정상

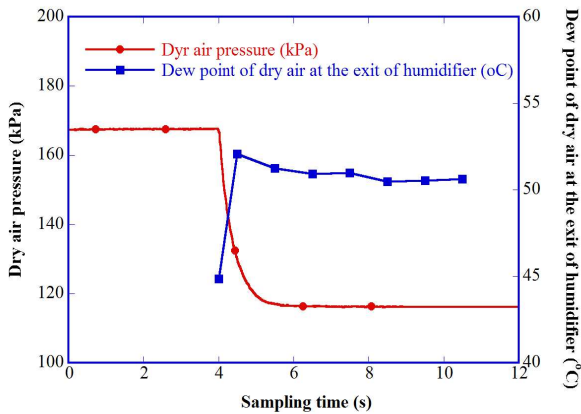


Fig. 8 Measured dew point and pressure according to the decrease of flow rate

상태로 변화 하였다.

3.2.2 유량 감소 시 막 가습기의 과도 응답

Fig. 8에는 가습수의 유량을 35 lpm에서 20 lpm으로 감소시켰을 때 시간에 따른 이슬점의 변화를 보여주고 있다. 이 때 가습수의 유량은 건공기 유량 증가시와 동일한 3 lpm, 압력은 1.6 bar, 온도는 50°C로 유지시켰고, 4초가 되는 순간 공기의 유량을 감소시켰으며 그 때 압력은 168 kPa에서 115 kPa로 감소하였다. 건공기 유량 변화에 걸린 시간은 0.7초이며 기타 조건은 유량 증가 시와 동일하다. 건공기 유량의 계단형 감소에 따른 이슬점 변화 특성은 유량 증가와 비슷하지만, 유량 감소 직후 잠시 이슬점이 높아졌다가 안정화 된다는 점이 다르다. 이는 유량이 감소함에 따라 막의 표면에서 공기 측으로의 수분 전달량은 감소하지만 막 반대편 가습수 측에서 막으로의 수분 전달량은 그에 맞춰 바로 감소되지 않아 짧은 시간 동안 정상 상태에서보다 더 많은 양의 수분이 전달된 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 막 가습기의 열 및 물질 전달 특성을 실험적으로 확인하기 위해 가습수의 온도, 공기의 압력 및 유량을 변수로 하여 실험하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정상상태 막의 습증기 수송 특성 중 운전압력을 1.3bar로 유지한 경우 건공기 유량이 적을 때는 습증기 수송은 습증기 확산력에 의해 결정된다. 건공기 유량이 증가함에 따라 이러한 습증

기 확산력은 열전달 특성에 종속되는 경향을 보인다.

(2) 운전압 증가를 통해 습증기 질량유량을 증가시키게 되면, 열전달 특성을 개선시킬 수 있기 때문에 건공기 유량이 큰 경우에도 이슬점이 급격하게 감소하는 것을 어느정도 보상할 수 있다. 하지만, 운전압이 2.0bar를 넘어가게 되면 이러한 이슬점 보상도 수렴하는 경향을 보인다.

(3) 건공기 유량을 급격히 증가시키고 감소시킬 때의 막의 습증기 수송 특성을 관찰한 결과, 유량을 급격히 감소시킬때에만 습증기의 2차적인 수송 지연이 관측되었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021304).

참고문헌

- (1) Laménie, J. and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons Ltd.
- (2) Springer, T. F., Zawodzinski, T. A. and Gonesfeld, S., 1991, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," *J. Electrochem. Soc.*, 138, No. 8, pp. 2334~2342.
- (3) Ceraolo, M., Miulli, C. and Pozio, A., 2003, "Modeling Static and Dynamic Behavior of Proton Exchange Membrane Fuel Cell on the Basis of Electrochemical Description," *J. Power Sources*, 113, pp. 131~144
- (4) Pukrushpan, J. T., Peng, H. and Stefanopoulou, A., 2002, "Simulation and Analysis of Transient Fuel Cell System Performance Based on a Dynamic Reactant Flow Model," *Proceeding of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, New Orleans, Louisiana.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (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*, 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," *J. of KSAE*, pp. 1766~1771.
- (12) Cave, P. and Merida, W., 2008, "Water Flux in Membrane Fuel Cell Humidifier: Flow Rate and Channel Location Effects," *Journal of Power Sources* 175, pp. 408~418.
- (13) Park, S. K., Choe, S. Y. and Choi, S. H., 2008, "Dynamic Modeling and Analysis of a Shell-and-Tube Type Gas-to-Gas Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, pp. 2273~2282.
- (14) Chen, D., Li, W. and Peng, H., 2008, "An Experimental Study and Model Validation of a Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Humidification Control," 180, pp. 61~467.
- (15) Park, S. and Oh, I.-H., 2009, "An Analytic Model of Nafion™ Membrane Humidifier for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," 188, pp. 498~501.
- (16) Kang, S., Min, K. and Yu, S., 2010, "Two Dimensional Dynamic Modeling of a Shell-and-Tube Water-to-Gas Membrane Humidifier for Proton Exchange Membrane Fuel Cell," 35, pp. 1727~1741.
- (17) Yu, S., Lee, Y., Bae, H., Hwang, J. and Ahn, K., 2009, "Mass and Heat Transfer Analysis of Membrane Humidifier with a Simple Lumped Mass Model," *Trans. of the KSME, B*, Vol. 33, No. 8, pp. 596~603.
- (18) Lide, D. R., 1981, *Handbook of Chemistry and Physics*, 62nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL.
- (19) Barenbrug, A.W.T., 1974, "Psychrometry and Psychrometric Charts," 3rd Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd.