

## 고분자 전해질 연료전지용 water-to-gas 막 가습기의 투과 특성

창 대 권 · 이 용 택<sup>†</sup>

경희대학교 공과대학 화학공학과  
(2010년 11월 2일 접수, 2010년 12월 9일 수정, 2010년 12월 22일 채택)

### Humidification Characterization of water-to-gas Membrane Humidifier for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

Dae-Kwon Chang and Yong Taek Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi-do 446-701, Korea  
(Received November 2, 2010, Revised December 9, 2010, Accepted December 22, 2010)

**요 약:** 본 연구에서는 고분자전해질 연료전지의 연료가습을 위하여 막 증발법을 적용한 막가습기를 제작하여 특징과 성능을 알아보았다. 막가습기 내부 물의 온도를 30~60°C, 연료기체의 유속을 300~3,000 mL/min, 막 가닥수를 10, 50, 100 가닥으로 변화 하였을 때 결과를 dew point로 나타내었다. 그 결과 60°C일 때 51.19°C, 900 mL/min일 때 54.22°C, 100 가닥일 때 60.03°C로 연료 가습성능이 가장 좋았다. 특히, 막 가습기 물질전달식의 모델링을 통해 연료전지에 적용할 때 막 가습기 공경 크기에 따른 반응기체의 가습량을 예측하는 것이 가능하였다. 100 W급 스택에 적용하였을 때, 전압과 출력값이 변화되지 않고 안정적으로 작동하였으며 제작한 막 가습기는 기존 기포가습기보다 부피는 훨씬 작으면서도 가습 성능은 우수한 것을 알 수 있었다.

**Abstract:** In this study, characterization and performance of membrane humidifier using membrane distillation was evaluated for moisture of fuel gas in the PEMFC. The data were expressed dew point. The best results show 51.19°C at 60°C of water temperature, 54.22°C at 900 mL/min and 60.03°C at 100 strands. The mass transfer modelling of membrane humidifier were able to predict humidification of fuel gases for operating PEMFC. When the membrane humidifier was applied to the 100 W stack, it showed stable voltage and power. The volume of membrane humidifier was small however, showed better performance than bubble humidifier.

**Keywords:** membrane humidification, Knudsen, Brownian, diffusion, membrane distillation, PEMFC

#### 1. 서 론

고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 수소이온교환 특성을 갖는 고분자막을 전해질로 사용함으로써 다른 형태의 연료전지에 비하여 작동온도가 낮고, 시스템 출력 효율이 높다. 또한 전류밀도 및 출력밀도가 크며, 시동 시간이 짧은 동시에 부하변화에 대한 응답이 빠른 특성이 있다[1]. PEMFC에 사용되는 고체 고분자막은 수소이온의 효과적인 전달을 위해 전해질에 일정량의 수분이 존재해야 한다[2-4]. 따라서 연료전지의 운전 중에

고분자막은 항상 수화되어 있어야 하며 수분이 부족하게 되면 수소이온전도도가 떨어지고, 막의 수축으로 인해 전극과 막 사이의 접촉 저항이 증가한다. 반대로 수분이 많이 존재하면 촉매 표면에 반응기체의 확산이 어려워져 전지 성능이 감소하게 되므로 연료전지 운전에서 수분관리(water management)는 매우 중요하다[5,6].

고분자막을 가습하는 방법에는 크게 외부가습과 내부가습으로 나눌 수 있다[7]. 현재 많이 사용하고 있는 외부가습장치는 반응기체에 적절한 습도를 유지하기 위해 물을 가열해야 된다. 이에 따라 에너지 효율이 낮아지게 되며 가습부와 냉각수 순환 시스템이 별도로 운영되기

<sup>†</sup>주저자(e-mail: yongtaek@khu.ac.kr)

때문에 전체 시스템이 복잡해지는 단점도 가지고 있다. 이런 문제점들을 보완하고자 최근에는 막을 이용한 가습 방법과 다공성양극판을 이용한 물의 공급, 섬유 심지 (fiber wick)를 이용하여 전해질에 물을 공급하는 방법 등이 시도되고 있다. 이중 막을 이용한 가습 방법은 캐나다의 Ballard Power Systems사에 의해 시도된 방법으로 고분자 전해질 연료전지 스택(stack)과 일체형으로 가습부를 제작할 수 있다. 또한 스택의 냉각시스템을 이용함으로써 가습에 들어가는 별도의 에너지를 절약할 수 있는 장점이 있다[7,8].

막 가습법에 사용되는 분리막의 종류에는 기공크기와 형태에 따라 여러 가지로 나누어진다. 그 중에서 0.1  $\mu\text{m}$ 에서 수  $\mu\text{m}$  범위의 기공크기를 가지는 정밀여과(microfiltration) 막을 사용하여 소수성 특성을 부여한다면 물은 투과시키지 않으면서도 상분리를 이용하여 기체의 분리가 가능하다[9]. 현재까지 연료전지용 막 가습기는 친수성 재질로 미세한 기공에 의한 모세관 현상을 응용한 방법을 사용하거나 치밀한 표면을 가지면서 친수성 작용기에 의한 물분자의 이동을 이용한 Nafion (Permapure LLC, USA) 막이 증공사막 형태로 상용화 되고 있다.

본 연구에서는 정밀여과막 수준의 기공크기를 가지는 소수성 폴리에틸렌(polyethylene) 재질의 증공사막을 이용하여 물은 통과시키지 않으면서 보다 넓은 표면기공에서 발생하는 증발열에 의한 수분의 증발로 막 증류법(membrane distillation)을 이용한 연료가스의 가습 효율을 높인 막 가습기를 제조 하였다. 이를 PEMFC 시스템에 적용하여 기존 사용되던 기포가습기와 가습특성을 비교하고 특성을 알아보았다.

## 2. 이 론

### 2.1. 막 증류법(Membrane Distillation; MD)을 이용한 연료가습

수처리 분야에서 쓰이는 분리막은 막 표면기공 크기에 따라 정밀여과(microfiltration; MF)막, 한외여과(ultrafiltration; UF)막으로 나눌 수 있다. 소수성 MF막의 경우 구동력(driving force)이 압력이 아닌 열에너지를 이용하여 물을 상분리 시키면 증발된 수분은 막의 기공을 통과하면서 응축된다. 이때 공정수의 용존 입자는 어떤 크기가 되더라도 막 표면에서 잔여물로 남아 배출되는데 이러한 공정을 막 증류(membrane distillation; MD)라고 한다[10,11]. MD 공정에서 증기압차를 발생시키

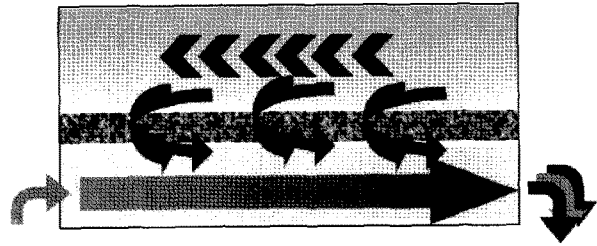


Fig. 1. A schematic diagram of sweep gas membrane distillation.

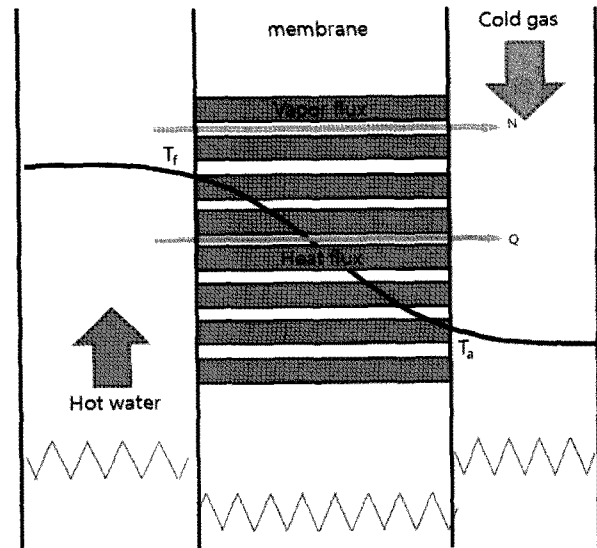


Fig. 2. Mass transfer in the membrane humidifier module[14].

는 방법에는 막 투과부의 구성 형태에 따라 4종류로 분류할 수 있다. DCMD (direct contact MD)는 장치가 덜 들고 조작이 간단한 형태로서 수용액의 탈염이나 농축에 적용할 수 있는 가장 간단한 공정이다. SGMD (sweep gas MD)나 VMD (vacuum MD)는 휘발성 유기물이나 용존 기체를 수용액으로부터 분리 할 때 적용된다[12]. AGMD (air gap MD)는 어느 경우에도 적용될 수 있는 범용 형태이다. 본 연구에서는 이러한 막 증류법 중 SGMD법을 이용하여 연료전지의 가습을 위한 새로운 MD 가습 시스템을 제작하였다. Fig. 1에 연료가스의 유속을 이용한 SGMD를 이용한 시스템을 나타내었다.

### 2.2. 막 가습장치의 물질전달식

막의 기공 내에서의 분자확산은 일반적으로 Knudsen 확산과 Brownian 확산으로 설명될 수 있으며 그 구조를 Fig. 2에 나타내었다. Knudsen 확산은 세공계의 유효 세공 반경이 거동 분자의 평균 자유 행로(mean free path

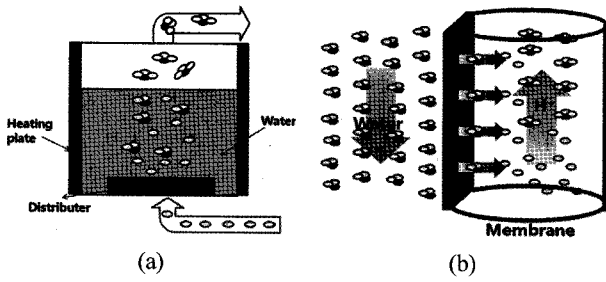


Fig. 3. Schematic diagram of (a) bubble humidifier and (b) membrane humidifier.

:  $\lambda$ )에 비하여 매우 작기 때문에 분자가 기공의 벽에 지속적으로 충돌하면서 확산되는 원리이다. Brownian 확산은 세공계의 유효 세공 반경이 거동 분자의  $\lambda$ 에 비하여 크기 때문에 분자가 기공의 벽에 닿기 전에 다른 분자와 다수의 상호간의 충돌을 일으키며 확산되는 원리이다[13,14]. 이러한 확산 원리를 이용해 본 연구에서 사용된 막의 투과특성을 식 (1)과 같이 예측하였다.

$$N = B \Delta P$$

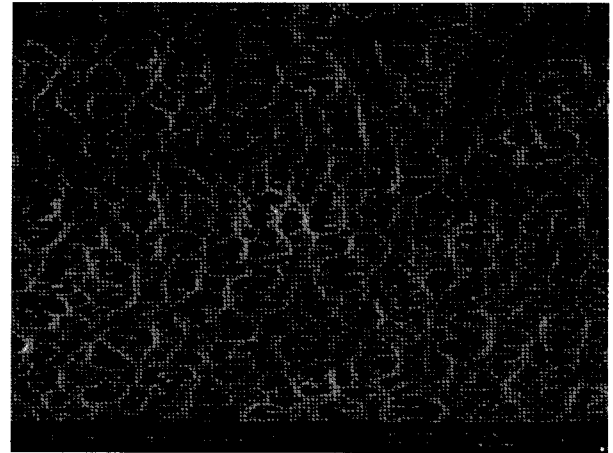
$$N = \frac{M}{RT} \left[ \frac{3\tau}{4\epsilon r} \left( \frac{\pi M}{2RT} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\tau P_a}{\epsilon P D} \right]^{-1} \frac{\Delta P_v}{\delta} \quad (1)$$

- N : permeate flux, B : net MD coefficient
- $\Delta P_v$  : transmembrane vapor pressure difference
- $\delta$  : membrane thickness
- M : water molecular mass
- R : gas constant
- $P_a$  : air pressure
- r : membrane pore size
- $\epsilon$  : fractional void volume of the membrane
- $\tau$  : diffusive tortuosity of membrane pores
- P : total pressure
- D : water diffusion coefficient

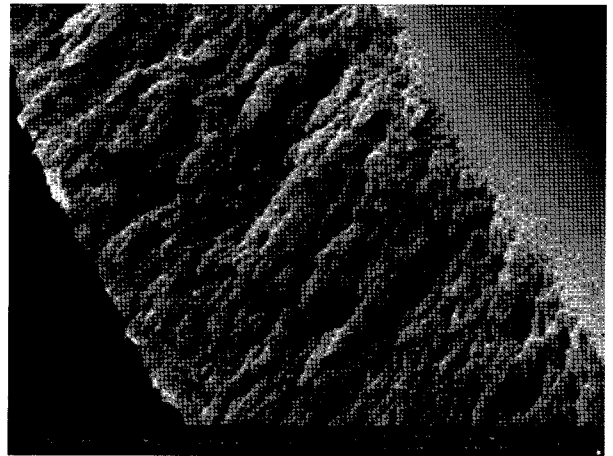
### 3. 실험

#### 3.1. 가습장치(Humidifier) 제작

Fig. 3(a)와 (b)에 기포가습장치와 막 가습장치를 비교하여 나타내었다. (a) 원통형의 기포가습기는 물의 내부용량을 관찰하기 위해 수위를 측정할 수 있는 관을 설치하였다. 물을 가열하기 위해 옆면에 가열판이 부착되어 있고, 가습기의 하단에 기포분산기(distributor)가



(a)



(b)

Fig. 4. SEM photographs of the hollow fiber membrane, (a) surface and (b) cross section.

있어, 공급되는 반응기체를 작은 기포형태로 분산시킨다. 재질은 stainless steel이고 직경은 8 cm, 높이는 10 cm으로 제작하였다.

(b)의 막 가습기는 내부의 거동을 관찰할 수 있는 아크릴 재질을 사용하였으며 직경 3 cm, 길이 5 cm, 10 cm, 20 cm로 제작하였다. 폴리에틸렌 재질로 기공크기는 0.4  $\mu\text{m}$ , 두께는 120  $\mu\text{m}$ 의 소수성 중공사막을 모듈에 넣어 양측 고정을 위해 에폭시를 이용하여 포팅(potting)하였다. Fig. 4(a), (b)에 사용한 중공사막의 표면과 단면을 SEM으로 나타내었다.

#### 3.2. 기포가습기의 성능실험

기포가습장치는 반응기체가 물과 얼마나 오래 접촉하느냐에 따라 성능이 변화한다. 건조한 공기는 중공사

**Table 1.** Operating Condition of 100 W PEMFC

Operating Condition	
MEA	Gore 25 cm <sup>2</sup> × 10 ea
H <sub>2</sub> flow rate	1~3 lpm
Air flow rate	3~7 lpm
Stack Temp.	60°C
Humidifier Temp.	20~60°C
Current	10 A
Voltage drop	0.55 V / 1 MEA

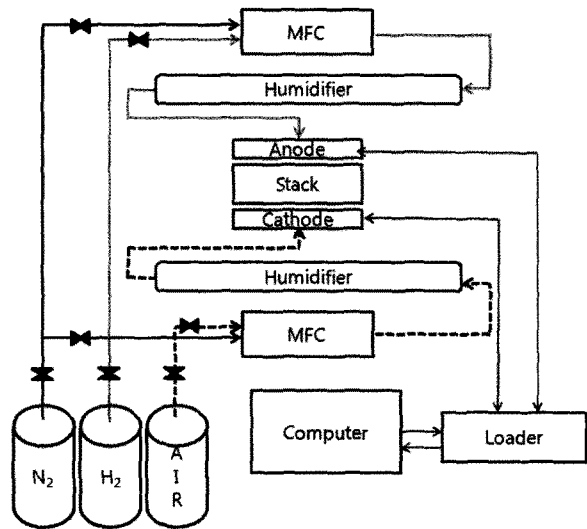
막 안쪽으로 유입되며 중공사막 외부에 물이 채워지며, 건조한 공기와 물의 흐름은 반대방향으로 공급된다. 본 실험에서는 기포가습기의 수위를 일정하게 유지시키면서 가습기를 통과하는 반응기체의 유속 및 가습기 내부의 물 온도에 따른 성능을 살펴보았다. 반응기체의 유속은 300~3,000 mL/min, 가습기 온도는 30~60°C까지 각각 변화시켰다.

**3.3. 막 가습기 성능실험**

막 가습기를 통과하여 나오는 반응기체의 온도와 상대습도를 측정하기 위하여 습도계(testo 625, testo社, Germany)를 사용하였다. 막가습기에 주입되는 반응기체는 유량 조절계(mass flow controller; MFC)를 통해 조절하였다. 또한 중공사막의 외부에 채워지는 물의 온도를 유지하기 위하여 항온수조를 사용하였고 펌프를 이용하여 물을 순환시켰다. 막 가습기의 길이에 따라 내부의 물의 온도와 반응기체의 유속을 변화시키면서 상대습도를 측정하였다. 막 가습기 내부의 물의 온도에 따른 영향을 살펴보기 위해 기포가습기와 같은 조건인 30~60°C, 기체의 유속을 300~3,000 mL/min까지 변화시키며 상대습도를 측정하였다. 가습량의 절대량을 표현하기 위하여 dew point로 환산하여 결과를 나타내었다[15].

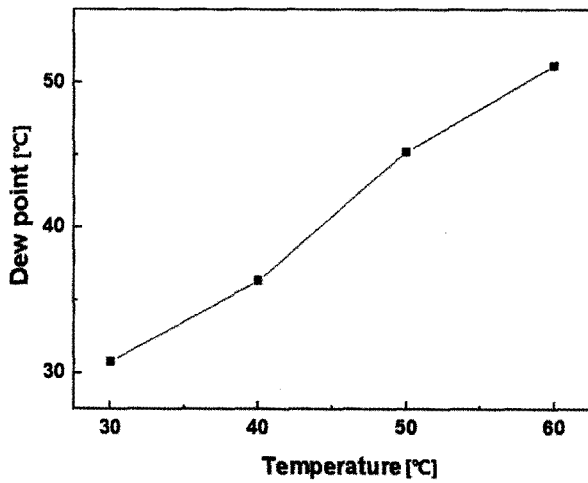
**3.4. 가습기 종류별 PEMFC의 성능실험**

제작한 막 가습기를 100 W급 PEMFC 시스템에 적용하여 다양한 조건에서 기포가습기와 성능을 비교하였으며 Fig. 5에 시스템의 구성도와 스택 사진을 나타내었다. 연료가스는 수소와 공기를 사용하였으며 양론비 2.5 : 1의 값으로 자동 조절하여 유량을 제어한 뒤 막 가습기 모듈로 반응가스를 보내고, 가습된 가스는 제작한 스택 내부로 유입되게 세팅하였다. Table 1에

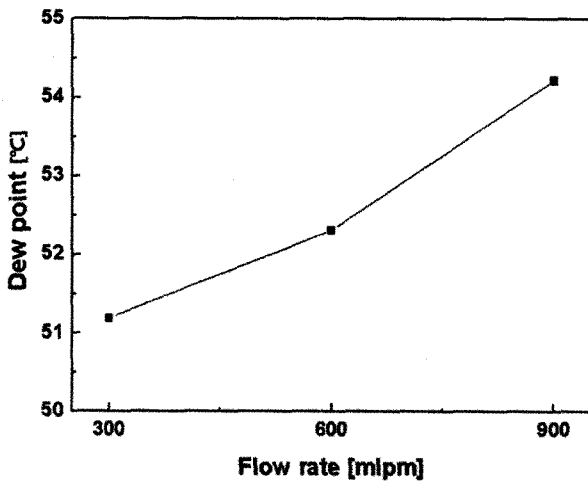


**Fig. 5.** Schematic diagram and photograph of PEMFC station.

가습온도와 운전조건에 따른 연료전지 성능변화를 나타내었으며 electronic loader (ESL-300Z, ELPTEK. Co. Ltd, Korea)를 이용하여 측정하였다. 스택 내의 MEA (Gore, USA)는 25 cm<sup>2</sup>의 10장을 적층하여 제작하였고, 운전온도는 일반적으로 안정적인 성능을 보이는 60~65°C에서 고정하였다. 발열하는 스택의 온도를 제어하기 위해 일정량의 냉각수를 스택 내부로 순환시키는 방법으로 온도를 유지시켰다. 스택의 성능평가는 일정한 전류(current) 값을 주었을 때 발생하는 전압(voltage)을 측정하였다. 또한 스택을 구성하는 각각의 단위 셀(unit cell)의 전압을 측정하여 편차범위를 10% 이내로 들게 하였으며 0.5 V 이하로 떨어지지 않게 하였다.



(a)



(b)

Fig. 6. Dew point at various the water temperature and the flow rate in bubble humidifier; (a) water temperature (flow rate = 300 mL/min, air) and (b) air flow rate (water temperature = 60°C)

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 기포가습기의 가습 특성

기포가습기는 가습기 내부 물의 양이 충분할 때 안정적인 가습이 이뤄지고 물이 부족하였을 경우 가습성능의 변동 폭이 심하다. 또한 기포가습기는 반응기체의 가습기 내 체류시간에 따라서 가습성능이 달라진다. 이에 따라 안정적인 가습이 이뤄질 수 있도록 250 mL 이상의 물을 가습기 내에 공급하였으며 물의 양이 일정하게 유지될 수 있도록 주기적으로 수위를 확인하였다. Fig. 6(a), (b)에 물의 온도변화와 반응기의 유속에 따른

기포가습기의 가습성능을 반응기체(air)의 dew point로 측정하였다. 공기의 유량은 300 mL/min로 일정하게 흘러주었고 (a) 가습기의 온도를 30, 40, 50, 60°C로 증가시킨 결과 dew point는 30.76, 36.36, 45.25, 51.19°C로 증가하였다. 이것은 물의 온도가 증가할수록 가습기 내부 에너지가 증가하게 되므로 물의 증발이 쉽게 일어난다고 판단된다. 각각의 온도에서 dew point는 단위전지가 물의 온도와 같은 온도로 작동할 때 막의 충분한 수화가 가능한 습도임을 나타낸다. 기포가습기의 온도는 60°C를 유지시키고 (b) 반응기체의 유량을 300, 600, 900 mL/min으로 변화시키면서 출구에서 나오는 공기의 dew point를 측정하였다. 그 결과 유속이 300 mL/min일 때 51.19°C이며 900 mL/min일 때 54.22°C로 유속이 증가함에 따라 dew point가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 가습기 내에 장착된 분산기에 의해 유속이 빠를수록 기포가 작게 쪼개지고 공기와 물의 접촉면적이 커져 물질전달이 좀 더 활발히 일어난다고 판단된다.

##### 4.2. 막 가습기의 가습특성

###### 4.2.1. 막 가습기의 비표면적 증가에 따른 영향

막 가습기의 기본적인 가습특성을 알아보기 위하여 모듈 내 물의 온도를 일정 하게 하고 중공사막의 길이와 막의 가닥수를 변화시킴에 따라 막 가습기 출구 반응기체의 dew point 변화를 Fig. 7(a), (b)에 나타내었다. 물과 반응기체는 상압의 항류흐름으로 가습기에 공급하여 물 온도 60°C에서 (a) 막 가습기 길이 5, 10, 20 cm로 증가 할 때 dew point는 64.52, 69.29, 71.38°C로 증가하였다.

5와 10 cm의 경우를 비교하면, 막의 길이가 짧아 도입부와 출구의 막 차압(pressure drop, ΔP)의 영향이 크지 않고, 비표면적이 2배가 증가되었기 때문에 막 가습기의 가습량은 크게 향상되었다. 그러나 20 cm의 경우 막 길이가 길어짐에 따라 도입부와 출구에 미치는 막 차압이 커져 출구 부분으로 갈수록 물의 압력이 줄어들게 되어 출구에서 가습이 이뤄지지 않았기 때문에 가습량의 증가 폭이 작아지는 결과를 가져왔다고 판단된다.

(b) 막 가닥수를 10, 50 100 가닥으로 증가 하였을 때 가습성능을 dew point로 나타내었다. 그 결과 물 온도 60°C일 때 각각 50.95, 59.58, 60.03°C로 나타났으며 100 가닥일 때 가습성능이 가장 높았다. 10가닥에서 50가닥으로 증가시켰을 때에는 막 가습기의 가닥수가 늘

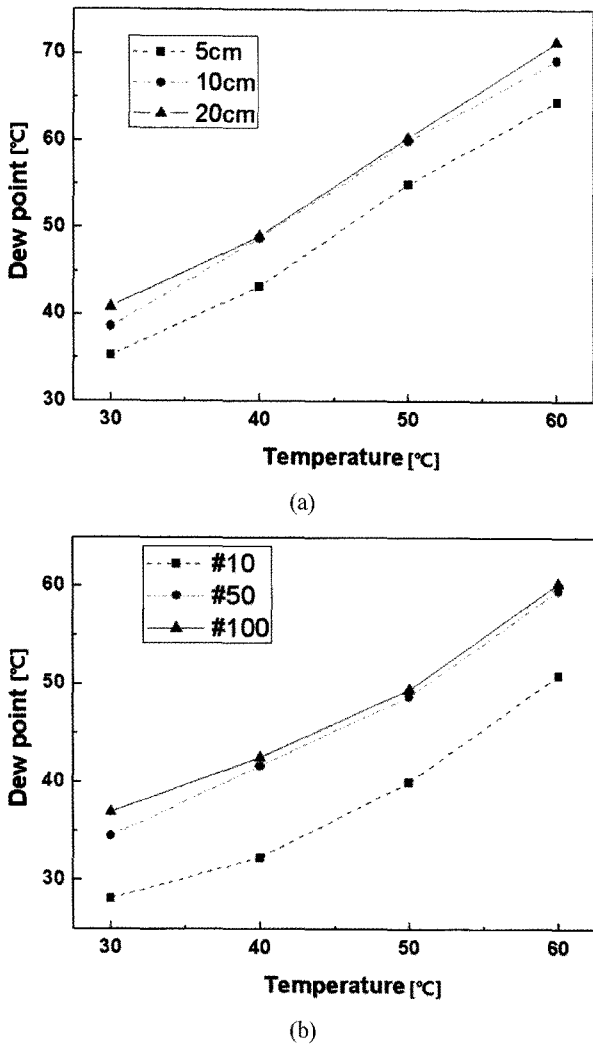


Fig. 7. Dew point at various the length and the number of hollow fiber membrane in membrane humidifier (flow rate; 1,000 mL/min, air); (a) membrane length and (b) number of membrane.

어날수록 그 표면적이 증가하므로 가습량은 증가한다. 그러나 100가닥으로 증가시켰을 때에는 50가닥에 비하여 가습량의 상승폭이 작은 결과를 나타내었다. 그 이유는 연료가스가 막 가습기로 유입될 때 증공사막 각각에 걸리는 가스의 유량이 분산되어 물질전달 계수의 감소로 인해 가습능력이 줄어든 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 특정 유량에서 특정 가닥수 이상일 경우 가습능수에 영향을 미치지 못하는 것을 확인하였다[16].

4.2.2. 막 가습기의 온도에 따른 영향

막 가습기의 온도를 변화시키기에 따라 변화하는 반응기체의 dew point를 기포가습기와 비교하여 알아보았

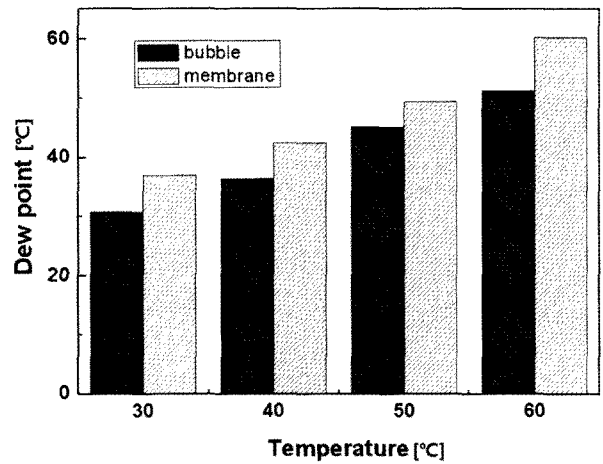


Fig. 8. Comparison with dew point of bubble and membrane humidifier at various temperature.

다. 막 가습기와 기포가습기의 온도는 30, 40, 50, 60°C로 변화시켰으며 수압 및 반응기체 모두 상압으로 가습기에 공급되었다. Fig. 8은 반응기체를 공기로 사용했을 때의 각각의 가습기 온도에 따른 dew point변화를 나타내었다. 그 결과 전 온도 범위에서 약 20%정도의 가습 성능이 높은 것을 확인하였고 특히 PEMFC 작동 온도인 60°C에서 기포가습기의 dew point는 51.19°C, 막 가습기는 60.03°C를 나타내었으며 그 차이는 11.07°C이다. MD 공정에서 막 가습기의 구동력은 열에너지를 이용하여 물의 온도가 높아질수록 막 표면에서의 물이 기화되는 양이 많아지게 된다. 이로 인해 온도차이가 높아질수록 플럭스는 증가하는 경향을 보인다. 또한 막 가습기는 전체 온도범위에서 세팅온도보다 높은 dew point를 유지하였으므로 전해질의 수화에 충분히 사용될 수 있다고 판단된다.

4.2.3. 반응기체의 유속에 따른 영향

물과 반응기체를 상압으로 공급하면서 막가습기를 통과하는 물의 온도와 공기의 유속에 따른 dew point를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 물의 온도는 30~60°C까지 10°C씩 변화를 주었고 각각의 온도에서 유속을 300, 600, 900, 1,000, 3,000 mL/min까지 변화시켰다. 그 결과 물 온도 60°C에서 유량을 증가시켰더니 가습량이 꾸준히 증가하였다. 이는 물의 온도가 증가할수록 막 표면에서의 가습량은 증가되며 반응기체 속도의 증가는 유체상태에 따른 막에서의 물질전달계수가 증가한다[16,17]. 이를 통해서 물의 온도가 높을수록, 반응기체의 유량이 커질수록 막의 확산계수가 증가한다는

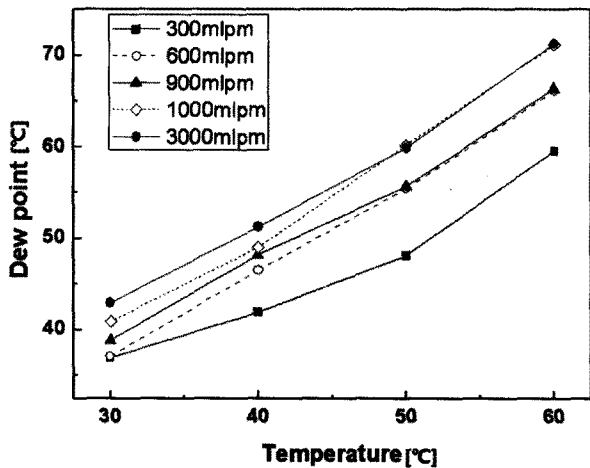


Fig. 9. Dew point at various temperature and Air flow rate for membrane humidifier.

Table 2. Compare with Water Flux of Theoretical and Experimental Data Using Membrane Humidifier

Temperature (°C)	Water flux (kg/m <sup>2</sup> h)	
	Theoretical data	Experimental data
40	0.269	0.148
50	0.350	0.226
60	0.411	0.366

것을 확인 할 수 있었다.

그러나 유속 1,000~3,000 mL/min의 전체 온도 범위에서 dew point는 0.4~2.0°C 상승하는데 그쳐, 일정 면적에서 유속이 증가하였을 때 한계점 이상에서는 유량이 증가하여도 dew point는 크게 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이는 중공사막 내부로 흐르는 기체의 압력이 물이 막 내부로 향하는 증기압과 같아지는 시점에 도달하는 것으로 물질전달의 평형이 이뤄지는 시점인 것으로 판단된다.

4.3. 모델식을 통한 막 가습기의 가습성능 예측

막 가습기의 가습성능을 공경 크기에 따라 어떻게 변화하는지를 식 (1)의 물질전달식에 대입하여 살펴보았다. 일정 시간을 두고 가습하여 나온 기체를 응축시킨 양을 측정하여 실험치와 식에 대입하여 계산한 값과 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. 그 결과 40°C에서는 계산한 값과 실험값이 0.269, 0.148 kg/m<sup>2</sup>h로 약간의 차이를 보이고 있으나 60°C에서는 0.411, 0.366 kg/m<sup>2</sup>h로 비슷한 값을 보였다.

이러한 결과를 바탕으로 정밀여과막의 공경 크기를

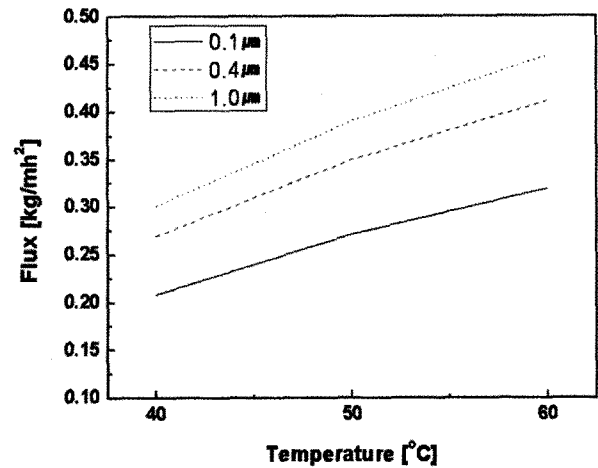


Fig. 10. Theoretical curve for MF membrane flux at various pore size.

0.1 μm에서 1.0 μm까지 변화시켜 가습량을 예측한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그 결과 물 온도 60°C, 공경 0.1, 0.4, 1.0 μm에서 응축량은 각각 0.32, 0.41, 0.46 kg/m<sup>2</sup>h로 공경이 커질수록 가습이 잘 되는 것을 확인하였다. 중공사막의 표면에서는 증기-액체 계면의 압력차를 유발하며 증발된 기체가 막을 통과하게 된다. 그러나 막 내부의 분압차보다 전체 분압차가 크면 액체가 막의 공경을 침투하여 증기-액체 계면을 형성하기 때문에 막의 젖음 현상이 발생하게 된다. 공경이 클수록 막 젖음 현상은 작은 분압차에서도 발생하며, 이 때 물의 액적이 기공을 범람하게 되어 액체가 반응가스와 함께 스택 내부로 공급되면 전해질막 표면의 촉매 피독 현상으로 인해 연료전지의 성능이 저하되므로 가습량을 조절하여야 한다.

4.4. 가습기 종류별 PEMFC의 성능비교

Fig. 11은 가습 온도별로 기포가습기와 막 가습기를 적용한 연료전지 스택을 사용하여 10 A의 일정한 전류 (current) 값을 주었을 때 시간에 따라 발생하는 전압 (voltage) 값을 측정하여 나타낸 결과이다. 100 W급이지만 스택의 보호를 위하여 10 A만을 주었을 때 전체적으로 65~75 W의 성능을 나타내도록 하였다. 전체적으로 가습온도가 높아질수록 스택의 파워는 향상되는 것을 알 수 있다. 기포가습기만을 사용한 결과 온도가 증가할수록 연료전지의 성능차가 매우 커지는 반면 막 가습기는 60°C의 고온에서는 차이가 나지만 저온 부근부터 40°C까지는 성능차가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 이는 막 가습기가 저온 시 기포가습기보다 우

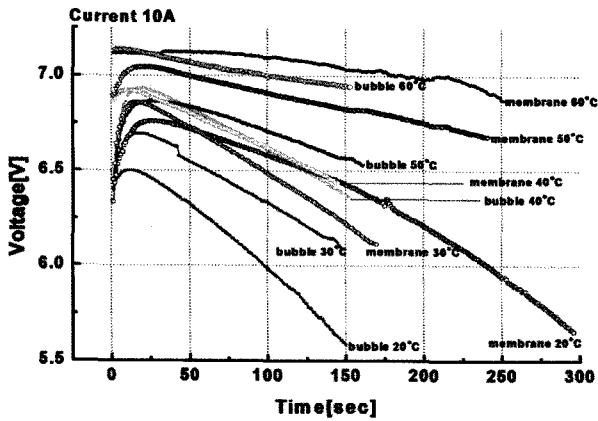


Fig. 11. Performance of 100 W PEMFC (Flow rate : Auto flow, Cell temp max. : 65°C); Voltage curve using membrane or bubble humidifier (Current : 10 A).

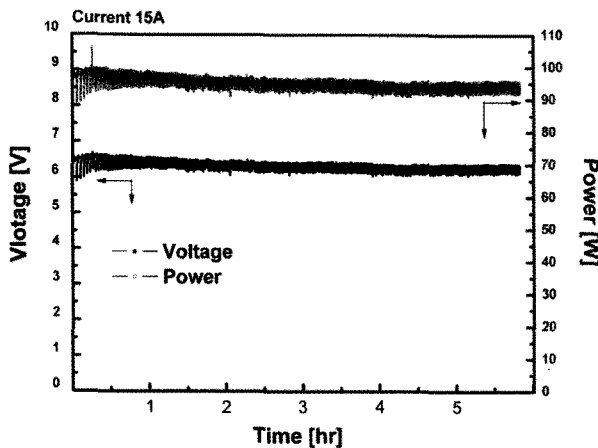


Fig. 12. Stack performance of PEMFC for membrane humidifier at long-term (100 W, Flow rate : Auto flow, Cell temp max. : 65°C, Current : 15 A).

수한 가습효율을 보이기 때문이다. 특히, 상온 20°C에서는 막 가습기와 기포가습기와의 성능차이가 나타나지만 60°C 부근에서는 격차가 많이 줄어드는 경향을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 막 가습기가 기존 기포가습기보다 부피는 훨씬 줄이면서도 연료 가습의 효율성을 높일 수 있다고 판단되어 진다. Fig. 12에는 막 가습기만을 사용하여 스택에 15 A의 전류를 주었을 때 전압 값을 측정하여 장기 내구성 평가 결과를 나타내었다. 가동 후 6시간 동안 연료전지 파워는 90~95 W를 일정하게 나타냄을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 막 가습기는 직접적인 물의 누수는 없으면서 막 증류법을 이용한 연료 가습이 가능하며 고온에서 뿐만 아니라 저온에서도 안정적인 가습으로 매우 우수한 성능을 보

임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)에 사용되는 막 가습기를 막 증류법(membrane distillation)을 이용하여 제작하고, 기존의 기포가습기와 가습특성을 비교하고 PEMFC에 적용하여 전지의 성능을 알아보았다. 또한 막 가습기의 물질전달식의 모델링을 통해 연료전지 반응 기체의 상대습도를 예측하였다. 위와 같은 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 제작한 막 가습기는 본 연구의 실험범위 내에서 가습기의 온도 및 반응기체 유속 변화에도 dew point는 설정온도까지 상승함으로써 전해질에서의 상대습도가 80% 이상으로 유지되었다.

2) 막 가습기에 사용한 폴리에틸렌 중공사 정밀여과막은 기포가습기보다 동일 온도 범위에서 우수한 가습 성능을 보였으며 부피 감소효과가 크다. 따라서 기존에 연구되었던 Nafion과 모세관 현상을 이용한 한외여과막과 더불어 연료전지용 막 가습기의 소재로서 활용될 수 있음을 확인하였다.

3) 막 가습기의 가습량을 물질전달식을 사용하여 예측이 가능하였다. 중공사막의 공경(pore size), 막의 뒤틀림(membrane tortuosity), 막의 두께(membrane thickness), 공극률(fractional void volume of the membrane)을 고려하여 가습량을 예측하였으며, 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

4) 막 가습기의 모듈화를 통하여 100 W급 스택에 약 5시간 적용하였을 때, 전압과 출력값이 변화되지 않고 안정적으로 작동하였으며 제작한 막 가습기는 기존 기포가습기보다 부피는 훨씬 작으면서 성능은 우수한 것을 알 수 있었다.

### 감 사

본 연구는 2009년도 하반기 중소기업기술혁신개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 지원해주신 (주)CNL Energy와 분리막을 제공해주신 (주)KMS에 감사드립니다.



## 참 고 문 헌

1. M. Appleyard, "Electric vehicle derive systems", *J. of Power Source*, **37**, 189 (1992).
2. L. Zhang, M. Pan, and S. Quan, "Model predictive control of water management in PEMFC", *J. of Power Source*, **180**, 322 (2008).
3. J. O'M Bockris and S. Srinivasan, "Fuel Cells: Their electrode chemistry", McGraw-Hill, N.Y. (1969).
4. T. V. Nguyen and R. E. White "A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells", *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 2178 (1993).
5. G. Vasu, A. K. Tangirala, B. Viswanathan, and K. S. Dhathathreyan, "Continuous bubble humidification and control of relative humidity of H<sub>2</sub> for a PEMFC system", *Int. J. of Hydrogen Energy*, **33**, 4640 (2008).
6. B. Sunden and M. Faghri, "Transport phenomena in fuel cells", WIT Press (2005).
7. L. James and D. Andrew, "Fuel cell systems explained", John Wiley & Sons, Inc., New York (2000).
8. D. Staschewski, "Internal humidifying of PEM fuel cells", *Int. J. Hydorgen Energy*, **21**, 381 (1996).
9. L. Wu, J. Sun, and Q. Wang, "Poly(vinylidene fluoride)/polyethersulfone blend membranes : Effect of solvent sort, polyethersulfone and polyvinylpyrrolidone concentration on their properties and morphology", *J. Membr. Sci.*, **285**, 290 (2006).
10. H. W. Cho and W. C. Shin, "The prospect of membrane distillation", *Membrane Journal*, **7**, 57 (1997).
11. K. Y. Chung, "Membrane distillation of the aqueous glucose solution", *Membrane Journal*, **10(4)**, 230 (2000).
12. M. Khayet, M. P. Godino, and J. I. Mengual, "Theoretical and experimental studies on desalination using the sweeping gas membrane distillation method", *Desalination*, **157**, 297 (2003).
13. S. H. Suh, W. K. Min, and S. C. Kim, "Molecular simulation studies for Knudsen diffusion in the overlapping sphere pore model", *J. of the Korean Ins. of Chem. Eng.*, **37**, 557 (1999).
14. M. S. Chun and H. W. Kwak, "Study on hindered diffusion of single polyelectrolyte chain in micro-pores by employing Brownian dynamics simulations", *Membrane Journal*, **12**, 207 (2002).
15. G. Hinds, M. Stevens, J. Wilkinson, M. de Podesta, and S. Bell, "Novel in situ measurements of relative humidity in a polymer electrolyte membrane fuel cell", *J. Power Sources*, **186**, 52 (2009).
16. K. W. Lawson and D. R. Lloyd, "Membrane distillation", *J. Membr. Sci.*, **124**, 1 (1997).
17. C. H. Lee and W. H. Hong, "Effect of operating variables on the flux and selectivity in sweep gas membrane distillation for dilute aqueous isopropanol", *J. Membr. Sci.*, **188**, 79 (2001).
18. M. Khayet, P. Godino, and J. I. Mengual, "Theory and experiments on sweeping gas membrane distillation", *J. Membr. Sci.*, **165**, 261 (2000).