

습증기 투입 조건에 따른 가습용 중공사막 튜브 수분 투과 특성

채종민¹ · 유상석^{2,†}

¹충남대학교 대학원 기계공학부, ²충남대학교 기계공학부

Moisture Permeation Characteristics of Hollow Fiber Membrane Tube for Humidification According to Input Conditions of Wet Steam

JONGMIN CHAE¹, SANGSEOK YU^{2,†}

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

²School of Mechanical Engineering, Chungnam University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding author :
sangseok@cnu.ac.kr

Received 28 September, 2018

Revised 23 November, 2018

Accepted 30 December, 2018

Abstract >> Recently, fuel cell field is receiving much attention as an environmentally friendly energy in the world. Among the various types of fuel cells, in the case of PEMFC, ions move through the membrane in the middle of the unit cell. Therefore, proper moisture is required inside the PEMFC. In the case of membrane type humidifier, flat membrane or hollow fiber membrane is mainly used. Since various parameters can change the performance, the performance investigation has to be carried out with parameters. In this study, water transport of hollow fiber membrane was investigated in terms of principle operating conditions such as temperature and flow rate.

Key words : Proton exchange membrane fuel cell(양성자 교환막 연료전지), Hollow fiber membrane(중공사막), Humidity(습도), Humidifier(가습기), Water transport(수분 수송)

1. 서론

기후 변화의 영향으로 자동차 시장에서도 내연기관이 아닌 새로운 동력계를 포함한 자동차가 시장에 소개되고 있다. 수소 연료전지 자동차는 양성자 교환막 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)를 동력계로 수행하는 자동차이다. 수소 연료전지 자동차의 구성품 중 하나인 가습기는 공기 공급계 후단에 설치되어, 연료전지 공기극을 가습시

켜 주는 장치이다¹⁻⁶⁾.

다양한 종류의 가습 방법이 소개되었으며, 그중 막 가습기는 원통 다관형 또는 평판형 물질교환기의 형태로 개발되고 있다. 두 경우 모두 수분 투과막을 사용하고 있으며, 한쪽으로는 건조 공기가 유입되고, 다른 쪽으로 습공기가 유입된다. 원통 다관형 물질교환기는 수분 투과 성능을 확보하기 위하여 다발의 중공사관을 사용하고 있다. 이에 비하여, 평판형 가습기는 연료전지 스택과 동일한 방법으로 다수의 수

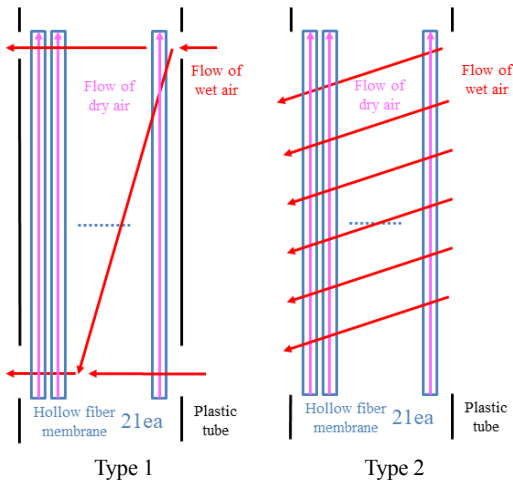


Fig. 1. Hollow fiber membrane tube

Table 1. Specifications of hollow fiber membrane tube

Diameter	Thickness	Dimension	Membrane diameter	Membrane thickness
10 mm	1.5 mm	157 mm	1.1 mm	0.1 mm

분 투과막을 적층시켜서 물질교환을 하고 있다.

원통 다관형 가습기가 상대적으로 단위부피당 물질 전달 면적이 유리하고, 또 열전달 측면에서도 유리해서, 차량용으로 개발되고 있다. 중공사형 수분 투과막에 대해서는 물리적 특성이 일부 보고되고 있는 하지만, 문헌 상에는 차량 운전과 연동되는 다

양한 가습 조건에 대하여 물질 교환 특성이 보고된 예가 매우 희박하다^{1,7)}.

본 연구에서는 원통다관형 물질 교환기에 사용되는 중공사막 튜브 다발에 의한 수분 전달 특성을 실험적으로 측정하고, 물질 전달 특성을 이해하고자 한다. 기초 실험을 위한 장치를 구성하고 작동온도와 유량에서 막 외부의 습공기로부터 막 내부의 건공기로의 수분 수송에 관하여 실험을 진행하고자 하며, 이를 통하여 수분 투과량과 실험변수 간 상관관계를 조사하였다.

2. 중공사막 수분 투과 특성 실험

2.1 중공사막 튜브 다발 지지체

중공사막의 수분 투과 특성을 확인하기 위해서는 정확한 단위 중공사막의 수분 투과 특성을 확인할 수 있는 실험이 필요하지만 일반적인 실험 장치의 분해능에 의하여 실험에 적용할 한계치가 결정된다. 본 연구에서는 실험 장치의 분해능을 고려하여 21개의 튜브 개수를 선정하였으며, Fig. 1과 Table 1에는 중공사막 튜브의 형상 정보를 표시하였다.

중공사막의 수분 투과 특성을 확인하기 위해서는 튜브 지지를 위한 지그를 제작해야 한다. 두 가지 방법을 이용하여 수분 투과 정도를 확인하였는데, 그중 하나는 Fig. 1의 좌측과 같이 중공사막 튜브를 고정하는 외관 튜브를 이용하여 내부에 21개의 중공사막 튜브를 인입한 경우이다. 외부에 습공기를 일정 방향으로 유도할 수 있도록 제작하여 특성을 확인하였다. 또 다른 방법은 외부에 습공기가 자유롭게 흐를 수 있도록 중공사막 튜브 지지 부분만 외관 튜브를 사용한 경우로 Fig. 1의 오른쪽이다. 튜브 제작 방법에 따라 왼쪽을 type 1, 오른쪽을 type 2로 지칭하였다.

2.2 습증기 투과 실험용 지그 및 평가 장치

앞장에서 말한 튜브를 장착하여 습증기 전달 특성을 확인할 수 있도록 Fig. 2와 같이 실험 테스트 지그

를 제작하였다. 습증기 투과 평가용 지그는 양쪽 끝단의 건공기 공급실과 중간의 습공기 공급실 사이에 공기의 흐름이 생기지 않도록 각 부분에 오링을 삽입 할 수 있는 홈을 두어 밀봉을 하였다. 또한 습공기 측 격실 속에 튜브 다발이 왜곡이나 변형 없이 장착 될 수 있도록 하였으며, 막 외부의 습공기로부터 막 내부의 건공기로의 수분 투과만 발생하도록 유동을 유도할 수 있도록 유로를 설계하였다. Table 2는 습증기 투과 평가용 지그의 주요 제원을 보여 주고 있다.

습증기 투과 특성을 평가하기 위해서는 건공기 공급부와 습공기 공급부, 측정부가 필요하며 Fig. 3에는 전체 평가 장치의 개략도를 보여주고 있다. 압축

기를 통하여 공급되는 공기를 두 개의 분지관을 통하여 양단으로 공급할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 건공기의 건조 유지를 위하여 압축기 후단에 제습장치를 설치하였으며, 습공기 측은 별도의 버블러 형 가슴 장치를 거쳐 습도를 제어한 후 평가 지그로 유체를 공급한다. 유량의 정밀한 제어를 위하여 양단에 MFC를 설치하였으며, 양쪽 MFC의 최대 유량은 15 L/min이며, 라인테크사 제품을 사용하였다.

버블러 타입 가슴기는 초순수를 공급하였으며, 공기 인입관이 가슴기 하단부까지 분사될 수 있도록 장치를 구성하였다. 버블러 타입 가슴기 내부에는 열원 장치를 설치하였으며, 내부 온도를 측정하기 위한 열전쌍과 외부에서 온도 제어를 위한 제어기를 두어 가슴기의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 테스트 지그 전단에서 양단의 온도와 습도를 측정할 수 있도록 온습도 센서를 설치하였으며, 지그 양쪽 출구에도 습도 측정이 가능하도록 온습도 센서를 설치하였다.

습증기 투과 평가용 지그 전단과 후단에는 응축 방지 실을 두어 응축을 방지하였으며 응축 방지 실에서 습도와 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 각 부분에는 히팅 밴드를 이용하여, 온도가 유지될 수 있도록 하여 관 중간의 응축을 방지하였다. 또 이를 위하여 다수의 온도 제어 장치(Yokogawa, UT32A)를 개별 라인마다 설치하여, 중간 응축을 최대한 방지할 수 있도록 하였다. 온도 제어용 PID 제어기는 $\pm 1\%$ 의 정도를 가지며 solid state relay (SSR)를 이용해

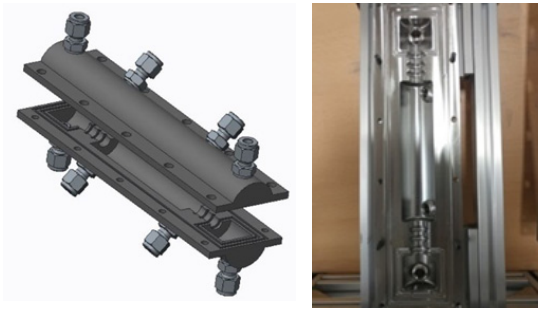


Fig. 2. Test jig design and shape

Table 2. Test jig specifications

Outside dimension	Outside diameter	Inside dimension	Inside diameter	Material
226.6 mm	35 mm	156.6 mm	10 mm	AISI304

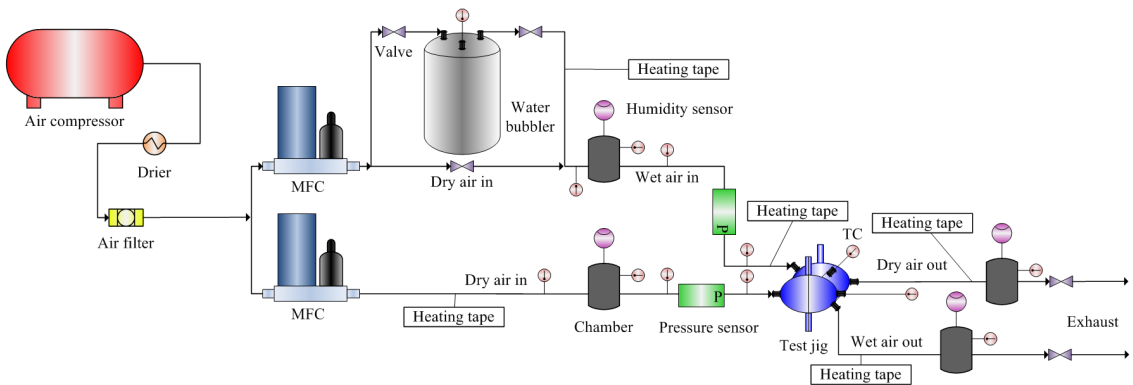


Fig. 3. Schematics of hollow fiber water transport evaluation system

Table 3. Operating parameters of water transport experiment

Parameters	
Tube shape	Type 1, type 2
Temperature	40°C, 60°C, 80°C
Flow rate	5 L/min, 10 L/min, 15 L/min
Pressure	0 bar _g

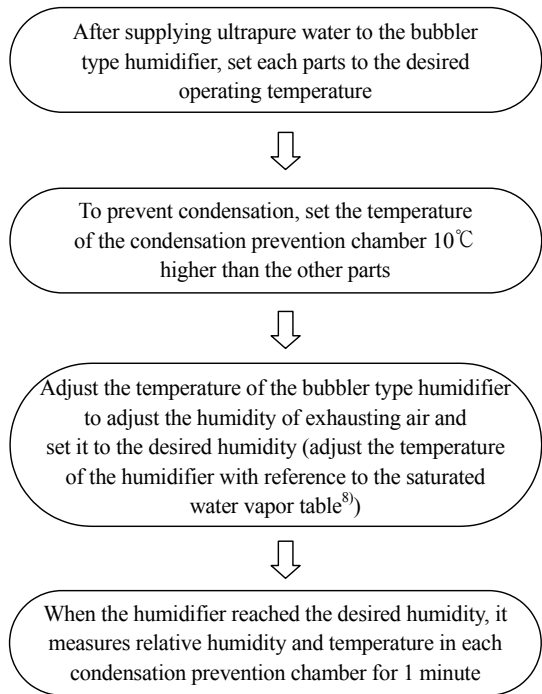


Fig. 4. Experimental procedures of water transport through hollow fiber tube

전력량을 조절하였다. 그리고 K타입 열전대를 유량관에 다수 설치하여 중간 응축을 확인하고 또 동시에 작동 유체의 온도를 측정하는데 사용하였다. 실험에서 채용한 실험변수는 Table 3과 같으며, 두 가지 중공사막 튜브 다발 지지체의 특성 비교도 수행하였다. 실험 진행 중에는 습공기 습도를 변수로 하였으며 주어진 파라미터에 따라 2회 이상 반복 실험을 수행하였다.

2.3 실험 절차 및 방법

중공사막 튜브의 습증기 투과 특성 실험 절차는

Fig. 4와 같다. 측정된 온도 정보, 압력 및 상대습도를 이용하여 양단의 수분량을 환산하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다. 주어진 조건에서의 상대습도 식은 다음과 같다⁸⁾.

$$RH(\%) = \frac{P_{vapor}(kpa)}{P_{saturation}(kpa)} \times 100(\%) \quad (3)$$

$P_{saturation}$ 은 포화수증기압이며 이는 각 온도에서의 상태량으로 알려져 있다⁸⁾. P_{vapor} 는 증기의 압력이다. 조건에서는 응축에 의하여 습도 센서의 측정 정밀도가 낮아지기 때문에, 온도를 높이고 상대습도를 낮추어 측정하였으며, 이 경우 측정된 상대습도를 작동온도에서의 상대습도로 환산하는 식은 다음과 같다.

$$RH_{c,T}(\%) = \frac{P_{sat,m} \times \phi_m(kpa)}{P_{sat,c}(kpa)} \times 100(\%) \quad (4)$$

$RH_{c,T}$ 는 작동온도에의 상대습도, ϕ_m 는 측정된 상대습도, $P_{sat,m}$ 는 측정된 포화수증기압, $P_{sat,c}$ 는 작동온도에서의 포화수증기압을 나타낸다. 환산된 상대습도를 절대습도로 환산하는 식은 다음과 같다⁸⁾.

$$w = 0.622 \frac{P_{vapor}(kpa)}{P - P_{vapor}(kpa)} \quad (5)$$

P 는 측정된 지점의 총 압력이며 w 는 절대습도이다. 절대습도와 질량유량을 이용하여 수분 수송량의 계산식은 다음과 같다.

$$m_{water\ transport} = m_{dry\ air} \times (w_{dry,out} - w_{dry,in})(g/s) \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 튜브 형상에 따른 습증기 투과 특성

각 실험은 유효성 확보를 위한 반복 실험을 진행하였으며 X축은 습공기의 상대습도이며 Y축은 습공

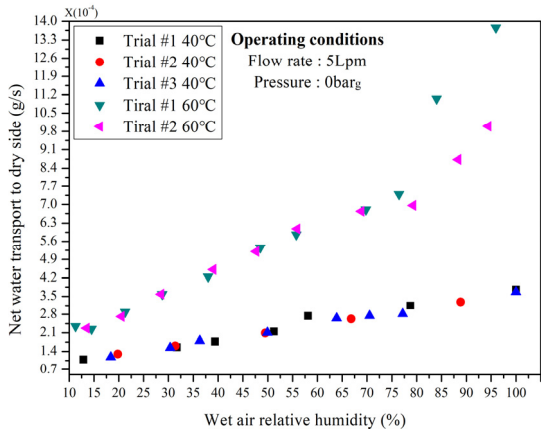


Fig. 5. Water transport in two different temperatures (type 1)

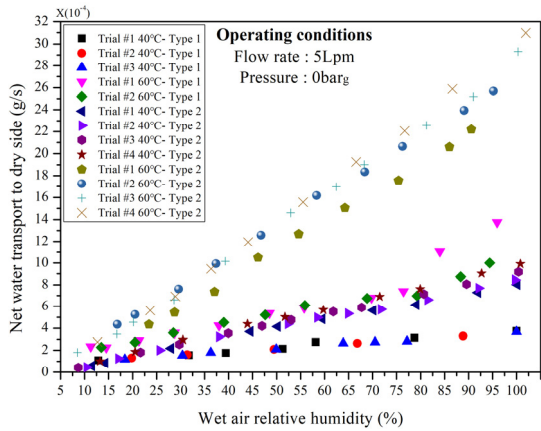


Fig. 6. Water transport by two different atmospheric conditions

기로부터 건공기로의 수분 수송량이다.

Fig. 5는 튜브형상 type 1의 유량 5 L/min, 압력 0 bar_g에서 작동온도 40°C, 60°C에서의 습증기 측으로부터의 수분 수송 결과를 보여주고 있다. 온도를 고정하고 습증기의 상대습도를 증가시키면 습증기의 절대 습도가 증가하게 된다. 건공기 측은 상대습도 0에 근접하도록 유지하고 있으므로, Fig. 5는 순수하게 습증기 측 습증기의 농도 증가에 따른 수분 수송량 증가를 보여준다. 주어진 온도에 따른 수분 수송량은 상대습도 증가에 선형적으로 거동함을 알 수 있다. 또한 작동온도가 증가함에 따라 동일 습증기의 상대습도에서 작동온도 40°C보다 60°C에서 약 5×10^4 g/s 수분 수송량이 증가하는 것을 보여준다.

상대습도는 포화수증기압과 증기의 분압으로 표현되며 포화 수증기압은 각 온도에서의 상태량으로 알려져 있다. 온도, 유량, 압력을 유지한 상태에서 상대습도를 증가시키면 포화수증기압은 변하지 않고 공급되어지는 습증기의 증기의 분압이 증가하여 습증기의 절대습도가 증가하게 된다. 또한 유량, 압력을 유지한 상태에서 온도를 증가시키면 포화 수증기압이 증가하게 된다. 이로 인하여 온도를 증가시키면 저온에서와 동일 상대습도를 유지하기 위해서 더 높은 증기의 분압이 요구되어 공급되어지는 습증기의 절대습도를 증가시킨다. 즉 공급되어지는 습증기의 상대습도와 작동온도를 증가시키는 것은 건공기의 절대습도는 유지되고 있는 상태에서 습증기의 절대습도가 증가시키므로 건공기와 습증기의 농도차가 더욱 커지게 되어 수분 투과량이 증가하는 것으로 보인다.

Fig. 6은 type 1과 type 2의 유량 5 L/min, 압력 0 bar_g에서 작동온도 40°C, 60°C의 실험 결과를 비교한 것이다. Fig. 6은 동일 습증기의 상대습도에서 튜브의 형상이 type 1보다 type 2일 때 수분 수송량이 작동온도 40°C에서는 약 5×10^4 g/s 증가하며 작동온도 60°C에서는 약 12×10^4 g/s 증가하는 것을 보여준다.

Type 1의 튜브 형상보다 type 2의 형상이 막 외부로 흐르는 습증기의 흐름이 더 자유롭다. 이로 인하여 수분이 투과할 수 있는 막의 면적이 type 1보다 type 2의 면적이 크다. 또한 type 2보다 type 1의 튜브 내부의 압력이 높을 것으로 예상되며 압력의 증가는 수분 투과량의 감소를 야기할 수 있다. 즉 흐름이 자유롭고 수분 투과면적이 큰 type 2가 더 높은 수분 투과량을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 파라미터별 습증기 투과 특성

각 실험은 신뢰성 확보를 위한 반복 실험을 진행하였으며 X축은 습증기의 상대습도이며 Y축은 습증기로부터 건공기로의 수분 수송량이다. Fig. 7은 튜브형상 type 2의 유량 5 L/min, 압력 0 bar_g에서 작동온도 40°C, 60°C, 80°C의 실험 결과이다. Fig. 7은 습

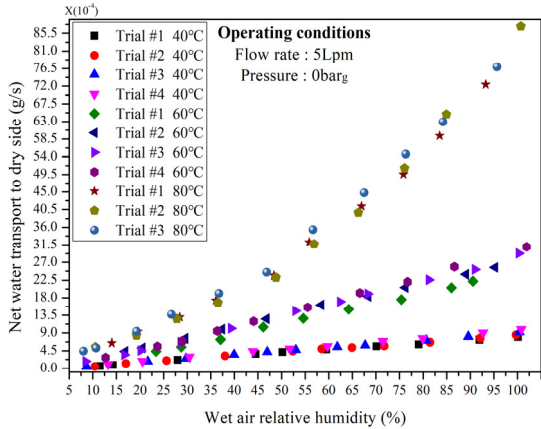


Fig. 7. Water transport in three different temperatures (type 2)

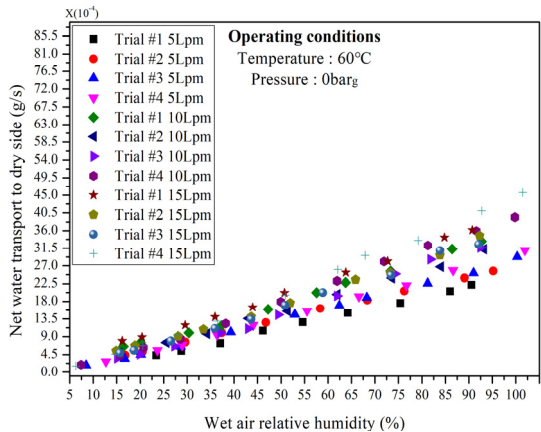


Fig. 8. Water transport in terms of flow rates (type 2)

공기의 상대습도가 증가함에 따라 습공기에서 건공기로의 수분 수송량이 증가하는 것을 보여준다. 또한 작동온도가 증가함에 따라 동일 습공기의 상대습도에서 작동온도 40°C보다 60°C에서 약 18×10^{-4} g/s, 80°C에서는 약 69×10^{-4} g/s 수분 수송량이 증가하는 것을 보여준다.

Fig. 8은 튜브형상 type 2의 온도 60°C, 압력 0 bar_g에서 작동유량 5 L/min, 10 L/min, 15 L/min의 실험 결과이다. Fig. 8은 이전 실험과 동일하게 습공기의 상대습도가 증가함에 따라 수분 수송량이 증가하는 것을 보여주며 작동유량이 증가함에 따라 동일 습공기의 상대습도에서 작동유량 5 L/min보다 10 L/min에서 약 6×10^{-4} g/s, 15 L/min에서는 약 10×10^{-4} g/s

수분 수송량의 증가를 보여준다.

4. 결론

1) 중공사막 외부의 습공기의 상대습도가 증가함에 따라 외부의 습공기로부터 내부의 건공기로의 수분 수송량이 증가한다.

2) 중공사막의 막의 노출 형태는 type 1보다 type 2가 막 외부의 습공기의 흐름이 자유롭고 투과 면적이 더 크므로 수분 수송량 측면에서 유리하다고 판단된다.

3) 수분 수송량 측면에서 작동 조건은 습공기의 상대습도를 높일수록 작동유체의 작동온도, 작동유량을 높일수록 유리하다고 판단된다.

4) 반복 실험 결과 각 실험 결과값에는 비슷한 경향을 가지는 것을 파악하였으며 각 값들의 약간의 차이는 측정값이 매우 작은 값이며 센서의 민감도 및 튜브의 제작 한계로 인한 완전 동일치 못한 튜브의 형상으로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 ‘수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업’(과제번호:R0006467), 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구 결과이다(10084611).

References

1. T. Ha, H. S. Kim, and K. Min, “Experimental and Modeling Study of Humidification Performance of Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell”, The Korean Society of Automotive Engineers, 2006, pp. 1766-1771.
2. D. Chen and H. Peng, “A thermodynamic Model of Membrane Humidifiers for PEM Fuel Cell Humidification Control”, Transactions of the ASME, Vol. 127, No. 3, 2005, pp. 424-432.
3. S. K. Park, S. Y. Choe, and S. H. Choi, “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, Vol. 33, No. 9, 2008, pp. 2273-2282.
4. D. Chen, W. Li, and H. Peng, “An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control”, Journal of Power Sources, Vol. 180, No. 1, 2008, pp. 461-467.
 5. S. Park and I. H. Oh, “An analytic model of Nafion™ membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells”, Journal of Power Sources, Vol. 188, No. 2, 2009, pp. 498-501.
 6. S. Kang, K. Min, and S. Yu, “Two dimensional dynamic modeling of a shell-and-tube water-to-gas membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 4, 2010, pp. 1727-1741.
 7. M. Lee, K. Kim, Y. Shin, and D. Kim, “Structural Optimization of Gas-to-gas Membrane Humidifier for Fuel Cell Vehicle”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No. 2, 2010, pp. 111-116.
 8. C. Borgnakke and R. E. Sonntag, “Fundamentals of Thermodynamics, Seventh Edition”, Text Books, Korea, 2010, pp. 740-747.