

채널 내장형 습도 센서를 이용한 고분자 전해질 연료전지의 습도분포 측정

이 용 택*†, 양 경 열*

* 한남대학교 기계공학과

Measurement of Humidity Distribution in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Channel Embedded Humidity Sensors

Yongtaek Lee*† and Gyung Yull Yang*

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received August 8, 2014 ; Revised March 10, 2015 ; Accepted March 15, 2015)

Key Words: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC 고분자전해질연료전지), Relative Humidity (상대습도), Diffusion (확산), Electro-osmotic Drag (전기삼투항력), Membrane(전해질막)

초록: 본 연구는 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)의 성능에 매우 중요한 영향을 미치는 물의 분포를 실험적으로 측정하였다. 내부에서 일어나는 활발한 화학반응과 물질전달 특성 때문에 PEMFC 내부에서 수분의 분포가 불균일하며 그 분포를 실험적으로 측정하기가 용이하지 않아 그 동안 간접적인 측정이 많이 이루어졌다. 본 연구에서는 초소형 온습도 센서를 연료전지의 채널에 직접 삽입하고 채널을 따라 흐르는 반응가스의 습도를 측정하였다. 수소극과 공기극 중 한곳만 가습하며, 가습하지 않은 곳에서 습도를 측정하여 멤브레인을 통한 물의 이동을 연구하였다. 가습기의 온도가 증가할수록 양극의 물농도 구배가 커져서 확산이 증가하나 높은 전류밀도에서는 전기삼투항력의 영향이 더욱 커졌다.

Abstract: In this study, water distribution inside a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) was measured experimentally. Water distribution is non-uniform because of vigorous chemical reaction and mass transport and has been difficult to measure experimentally. Therefore, much research relied on indirect measuring methods or numerical simulations. In this study, several mini temperature-humidity sensors were installed at the channel for measuring temperature and humidity of the flowing gas throughout the channel. Only one of two electrode channels was humidified externally, and the humidity distribution on the other side was measured, enabling the observation of water transport characteristics under various conditions. Diffusion through the membrane became more vigorous as the temperature of the humidifier rose, but at high current density, electro-osmotic drag became more effective than diffusion.

- 기호설명 -

J : 물 유속, molar flux ($\text{mol}/\text{cm}^2\text{-s}$)

M : 분자량

n : MEA 단위면적당 물의 몰 수 (mol/cm^2)

P : 압력 (kPa)

t : 시간 (s)

W : 습도비

ϕ : 상대습도 (%)

하첨자

An : 수소극

Ca : 공기극

$drag$: electro-osmotic drag

$diff$: 확산

gen : 생성

i : in

† Corresponding Author, neotrin@hnu.kr

- o : out
- s : 포화상태
- W : 물
- v : 수증기

1. 서론

고분자 전해질 연료전지(PEMFC)에 있어서 물은 필수적이면서도 그 양이 과하지 않도록 조절해야 하는 요소이다. PEMFC의 전해질로 사용되는 고분자막은 수화(hydration)되어야 H^+ 를 이동시킬 수 있기 때문에 충분히 수분이 공급되지 못하는 PEMFC는 성능의 감소가 불가피하다. 그러나 한편, 촉매층과 가스확산층(gas diffusion layer, GDL)에 과도한 물이 존재하게 되면 물로 형성된 막이 촉매층을 덮어 수소의 산화반응(HOR, hydrogen oxidation reaction)과 산소의 환원반응(ORR, oxygen reduction reaction)을 방해하기도 하고, GDL의 작은 기공들을 물로 채워 수소와 산소의 확산(diffusion)을 방해하기도 한다. 이러한 수분의 양은 반응가스의 흐름에 따라서 하나의 단위전지에서도 그 분포가 많은 차이를 보이며 적절하게 수화된 PEMFC와 그렇지 못한 PEMFC는 그 성능에 있어서 큰 차이를 보인다. 이처럼 PEMFC에 있어서 습도의 영향은 매우 중요한 연구 주제이며 지금까지 많은 연구들이 PEMFC와 가습의 연관성에 대해서 진행되어 왔다.

연료전지로 공급되는 반응가스 습도의 변화는 연료전지의 성능에 중요한 영향을 가져온다.⁽¹⁻³⁾ Lee 등⁽¹⁾은 가습방향과 가습의 양이 성능에 미치는 영향을 관찰하였고, Buchi 등⁽²⁾은 외부가습을 제거한 상태에서의 성능변화를 관찰하였다. 또한 Kim 등⁽³⁾은 10 셀로 이루어진 스택을 대상으로 온도와 입구 가습조건의 변동에 따른 각 셀별 성능변화를 관찰하였다. 반응가스의 가습을 조절하는 외부가습의 효과 이외에도 반응에 의하여 내부에서 발생하는 물에 의한 자체가습 효과와 이에 의한 연료전지의 동적 특성 또한 연구되었다.^(4,5) 반응가스의 흐름에 따른 연료전지 내부의 습도와 물분포 역시 매우 중요한 연구주제이기 때문에 이에 대한 연구도 다양하게 진행되었다.⁽⁶⁻¹⁴⁾ 셀의 결부분을 투명하게 제작하여 플러딩과 이상유동을 직접 가시화하는 연구도 다양하게 수행되었다.⁽⁶⁻⁹⁾ 혹은 투명셀 제작과정에서 발생하는 최적화 되지 못한 설계를 최소화 하기 위해서 중성자 조영법(neutron imaging)을 이용하여 내부에 존재하는 액체 상태의 물의 분포를 나타내기도 하였다.^(10,11)

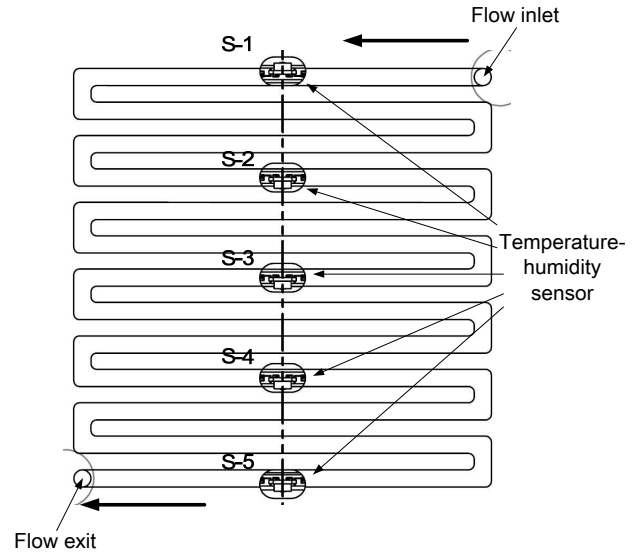


Fig. 1 Flow-field design employed in the experiment. Humidity sensors are located at five points on a flow path

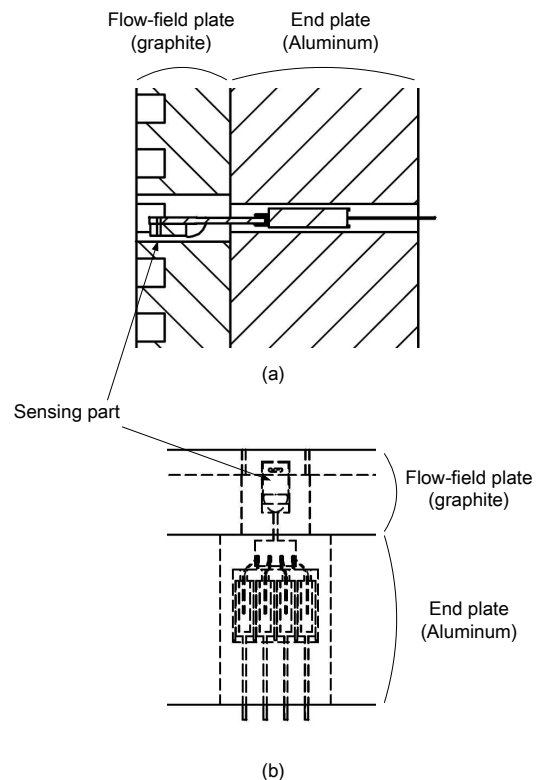


Fig. 2 Cross-section of the installed sensor from (a) side view and (b) frontal view. Space around the sensor is filled with sealant in order to prevent leakage of gas

그러나 이러한 방법은 수증기가 포화상태에 도달하여 액체로 응축되기 전까지는 습도의 분포를 알기 어렵다는 단점이 있다. 간접적인 방법으로는 전해질막의 수화도(hydration)에 따른 전기저항의

변화를 측정하여 전해질막의 물 함유량을 예측하는 HFR(high frequency resistance) 분석이나, EIS(electrochemical impedance spectroscopy) 분석을 통해서 플러딩의 정도를 예측하는 연구방법이 사용된다.^(4,12)

실험적인 방법으로는 습도 분포의 직접적인 측정이 어렵기 때문에 전산해석을 통하여 연료전지 내부의 수분분포, 물의 이동을 예측하는 방법이 연구되기도 하였다.^(13,14)

본 연구에서는 초소형 습도센서를 연료전지의 채널에 직접 삽입하여 반응가스의 흐름에 따라 애노드와 캐소드에서 습도의 변화를 직접적으로, 실시간으로 측정할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 보편적으로 사용되고 있는 연료전지 스테이션의 가습조절 방법의 신뢰성을 검증하였고 가스의 이동경로를 따라서 멤브레인을 통한 물의 이동이 전류밀도와 가습기 온도, 그리고 가습방향의 변화에 의하여 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 본 연구의 결과를 통하여 채널의 흐름을 따라 수소극과 공기극 사이를 이동하는 물의 분포를 국부적으로 확인할 수 있게 되었다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 유효면적이 50 cm²이며 단일사형채널을 가진 단위 PEMFC 를 사용하였다. 애노드와 캐소드에는 각각 5 개의 습도센서가 채널 내에 삽입되어 있어 가스의 흐름에 따른 습도의 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 채널의 폭과 깊이는 습도센서의 삽입이 용이하도록 3 mm X 3 mm 로 하였다. 전체적인 연료전지의 형상을 Fig. 1 에 나타내었고 습도센서의 설치부는 Fig. 2 에 다이어그램으로 자세하게 나타내었다. 온습도 센서는 엔드플레이트와 분리판을 관통하여 설치되어 신호를 외부로 보낼 수 있도록 되어 있으며 센서와의 사이 공간은 밀봉되어 가스의 누출을 방지하였다. 센서가 삽입된 곳의 밀봉제는 채널의 깊이와 거의 동일한 수준이 유지되도록 주입되었으며 응축된 물의 액적이 센서가 설치된 곳에 정체되지 않도록 하였다. 수소와 공기는 모두 상부에서 유입되어 하부로 흐르게 되며 수소극과 공기극의 입출구는 서로 마주볼 수 있도록 설계되어 두 기체는 멤브레인을 사이에 두고 완전히 같은 흐름을 갖는다. 온습도 센서의 번호는 기체의 흐름에 맞추어 증가하는 방향으로 설정되었다.

본 연구에서 사용된 온습도센서는 SENSIRION 사의 SHT75 모델이며 이 센서에서 발생하는 디지털 신호

Table 1 Specification of the humidity and temperature sensor provided by manufacturer

Parameter	Value (Hum./Temp.)
Resolution	0.05%RH / 0.01 °C
Accuracy	±1.8%RH / ±0.3 °C
Repeatability	±0.1%RH / ±0.1 °C
Response time	8 s / 5-30 s
Range	0-100% / -40-123.8 °C

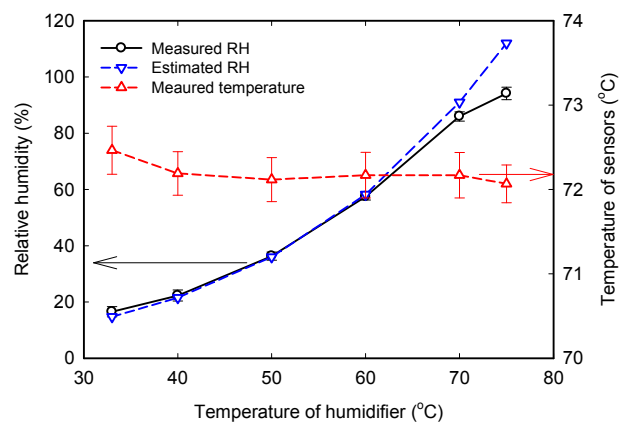


Fig. 3 Temperature and humidity measured by the sensors according to the variation of temperature of humidifier of test station

를 National Instrument 사의 DAQ 로 수집하고 LabVIEW™ 를 이용하여 프로그램을 제작하여 데이터의 모니터링과 저장이 가능하도록 하였다. 온습도센서의 주요 제원은 Table 1 에 나타내었다.

MEA(membrane electrode assembly)는 (주) CNL Energy 에서 제작하였으며 Nafion 211 를 막으로 사용하고 수소극과 공기극 모두 0.4 mg/cm²의 로딩으로 제작되었다. GDL 은 미세다공층(microporous)이 있는 Sigracet® 의 GDL 35 를 사용하였다. PEMFC 은 정전류방식으로 운전되며 수소극과 공기극의 Stoichiometry 는 각각 1.2 와 2 로 설정하여 유량을 조절하였다. 전류밀도가 작은 영역에서는 유량의 미세조절 실패로 인한 연료부족현상을 방지하기 위하여 전류밀도가 0.44 A/cm² 이하의 조건에서는 전류에 따라 유량을 변경하지 않고 전류밀도 0.44 A/cm²에 해당하는 유량을 유지하였다.

3. 결과 및 토의

연료전지에 삽입된 온습도 센서간의 편차를 측정하여 Fig. 3 에 나타내었다. 연료전지에 공급되는 가스는 질소를 사용하였으며 수소극과 공기극에

동일하게 0.2 slpm 의 유량으로 공급하였다. 연료전지의 대표온도는 공기극 분리판의 중심부에 위치한 열전대의 온도를 기준으로 70 °C로 유지하면서 스테이션의 가습기 온도를 33 °C ~ 75 °C까지 변화시켜 셀에 공급되는 질소의 상대습도를 변화시켰다. 가습기를 지나 셀까지 도달하는 가스라인에는 히터를 장착하여 중간에 온도하강으로 인한 응축을 방지하였으며 가스라인의 온도를 연료전지와 동일한 온도인 70 °C로 유지하였다. 수소극과 공기극의 각 5 개, 총 10 개의 센서에서 측정된 온도와 습도의 평균값과 표준편차를 Fig. 3 에 표현하였으며 내장된 센서에 의하여 측정된 온도는 열전대의 온도인 70 °C보다 다소 높은 72 °C정도에서 유지되고 있음을 알 수 있으며 가습기 온도가 낮은 조건에서 보다 높게 나타나고 있다. 온도 측정에 있어서 표준편차는 0.21~0.27 °C로 측정되었다. 상대습도는 가습기의 온도 증가와 함께 증가하며 10 개의 센서가 측정한 습도의 표준편차는 가습기 온도별로 1.17~2.09 %로 측정되었다.

스테이션에서 사용한 가습기는 버블형 가습기이며 가스가 본 가습기를 통과한 후 단열포화 상태로 가정하고 대기압 상태로 가정하면 질소에 포함되는 수증기의 절대습도는 식(1)로 구할 수 있다. 그리고 포화된 수증기가 셀까지 도달하는 과정에서 응축이 발생하지 않는다면 중간에 배관 및 셀에 의하여 가열된 후의 상대습도는 식(2)에 의하여 예측된다. 식 (2)의 계산에서 포화수증기압 P_s 는 센서들이 측정한 온도의 평균값인 72.2 °C에 해당하는 수치를 사용하였다.

$$W = \frac{M_v P_s}{M_{N_2} P_{N_2}} = 0.6431 \frac{P_s}{P_{N_2}} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{M_{N_2} P_{N_2}}{M_v P_s} W \quad (2)$$

단열포화 가습기로 가정한 상태에서 예측된 상대습도를 Fig. 3 에 온습도센서에 의해서 실측된 습도와 함께 비교하여 나타내었다. 가습기의 온도가 65 °C 보다 작은 영역에서는 예측치와 실측치의 일치도가 매우 큰 것을 볼 수 있으나 그 이상의 영역에서는 점차 편차가 두드러지고 있음을 볼 수 있다. 이는 가습기로부터 포화상태로 배출된 가스가 배관을 거쳐서 셀에 도달하는 동안 응축이 발생하여 수증기의 일부가 제거되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 4 와 Fig. 5 는 실제로 운전하고 있는 PEMFC 에서의 수소극과 공기극의 습도 분포를 나타낸다. PEMFC 의 성능은 정전류방식으로 측정하였으며

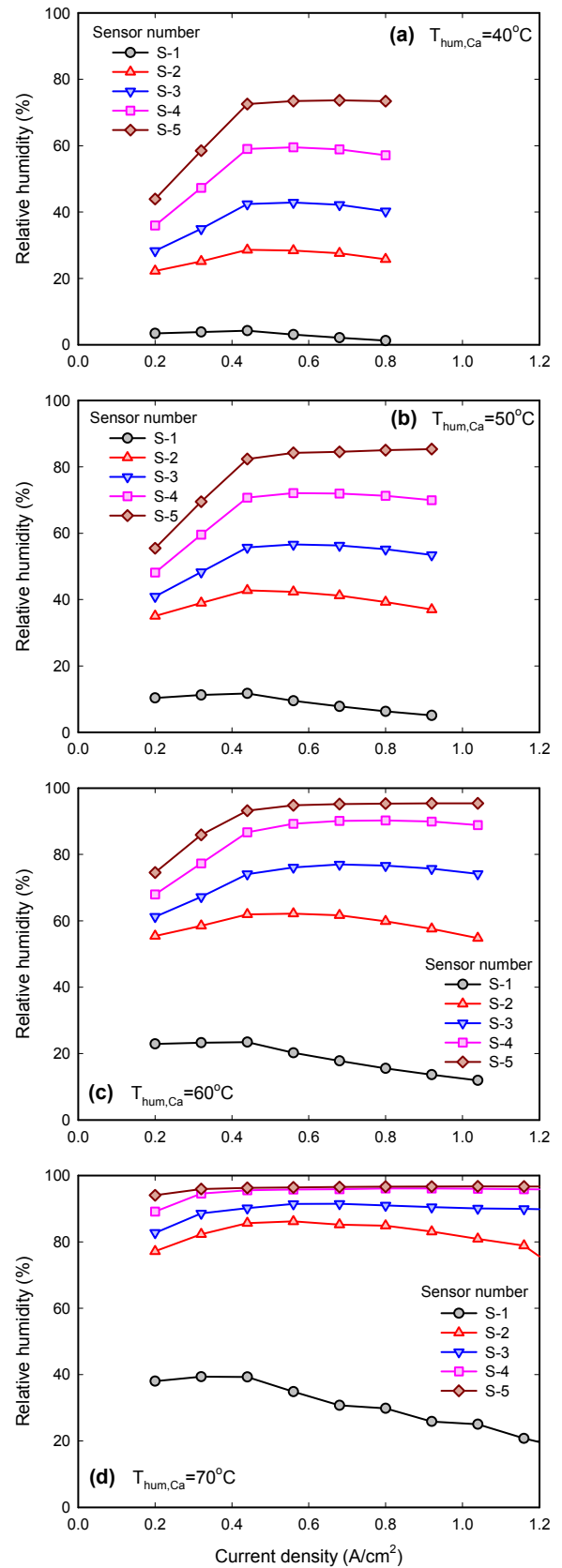


Fig. 4 Humidity distribution at the anode of a PEMFC externally humidified only on the cathode side

전압이 0.4 V 근방이 될 때까지 전류를 3 A 씩 증가시켰다. 가습기의 온도에 따라 다소 차이는 있지만 최대 전류밀도는 1.3 A/cm²로 보편적으로 알려져 있는 PEMFC의 성능에는 다소 못 미치는 수준이다. 그 원인은 본 실험에서 온습도 센서를 채널의 중간에 삽입하기 위하여 채널의 폭과 깊이, 그리고 채널사이의 리브의 폭을 각각 3 mm 가 되도록 설계하였기 때문인 것으로 파악된다. 이전 연구에서 사용하였던 깊이와 폭이 각각 1 mm 이고 3 채널이 병렬로 진행되던 사형채널과 비교하면 Re의 값이 동일하기 때문에 유동적인 측면에서 큰 차이가 있을 것으로 예측되지는 않는다. 다만 채널이 깊기 때문에 GDL로 확산되지 못하고 출구로 바이패스되는 수소와 공기가 상당할 것으로 예상되며, 리브의 폭이 크기 때문에 리브의 아래쪽에 해당하는 촉매층까지 반응가스가 확산되지 못하여 실질적인 유효면적이 상당히 감소하였을 가능성이 매우 높다.

수소와 공기가 공급되며 전류를 생산하고 있는 PEMFC의 수소극과 공기극에 존재하는 물의 양은 외부가습으로 수소극과 공기극에 각각 공급되는 양과 배출가스와 함께 빠져나가는 양, 또한 전기삼투현상과 확산현상에 의해서 멤브레인을 통해서 양극간에 이동하는 양에 의하여 결정되며 수소극과 공기극에 존재하는 물의 몰량 변화율은 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$\frac{\Delta n_{W,An}}{\Delta t} = J_{W,An,i} - J_{W,An,o} - J_{W,drag} + J_{W,diff} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta n_{W,Ca}}{\Delta t} = J_{W,Ca,i} - J_{W,Ca,o} + J_{W,drag} - J_{W,diff} + J_{W,gen} \quad (4)$$

본 실험에서는 채널흐름에 따라 수소극과 공기극에서 각각 측정된 5 곳의 습도를 바탕으로 각 성분의 증감을 예측할 수 있었다.

Fig. 4는 공기극만을 가습한 채 수소극은 건조한 수소를 공급하면서 전류밀도에 따른 습도 분포를 측정된 결과이다. 공기극에 공급되는 공기의 가습량은 가습기의 온도를 40, 50, 60, 70 °C로 변경하여 조절하였다. 각 조건에서의 상대습도는 각각 50.2%, 57.6%, 64.9%, 100%이다. 이후의 모든 조건에서 가스공급배관의 온도는 70 °C, 연료전지의 온도 역시 70 °C로 유지되었다.

센서의 위치에 따른 상대습도의 변화를 관찰하였다. 모든 조건에서 센서번호의 증가와 더불어 상대습도가 상승한 것을 확인할 수 있다. 수소극에는 가습기를 거치지 않은 건조한 수소가 공급되

었고 전기삼투현상이 수소극에서 공기극 방향으로 일어난다는 것을 감안하면 채널을 따라서 공기극 측의 물의 농도가 확연히 증가하여 상당수의 물이 확산에 의하여 수소극으로 이동한다는 것을 알 수 있다. 첫 번째 센서, S-1은 입구로부터의 거리가 짧지만(3.5 cm) 가습기 온도가 70 °C인 조건에서는 40%까지 상승하였다.

공기극의 가습온도의 상승이 수소극 습도의 변화에 미치는 영향을 관찰하였다. 공기극의 외부가습 온도가 증가하면서 전반적으로 수소극의 상대습도가 증가하였다. 공기극에 공급되는 물의 양이 증가하여 이로 인한 수소극과의 물농도차이 증가가 수소극으로의 확산 증가로 이어진 것으로 판단된다. 낮은 가습온도에서는 센서번호의 증가에 따른 수소극 상대습도의 변화가 두드러졌으나 상대적으로 높은 가습온도 조건에서는 수소극 채널의 중후반부에 이미 충분히 높은 습도를 갖고 있기에 채널을 따라 습도가 증가하는 폭이 점차 감소함을 알 수 있다.

전류밀도 역시 수소극 상대습도의 변화에 있어서 중요한 요인이다. 전류밀도의 증가는 공기극에 생성되는 물의 양을 증가시켜서 수소극과 공기극의 물 농도 차이를 크게 만들고 이로 인한 역확산을 활성화 시키는 동시에, H⁺의 이동에 따른 전기삼투현상을 증가시켜서 수소극의 물이 공기극으로 이동하는 것을 증가시킨다. Fig. 4(a)~(d)에 나타냈듯이 전류밀도가 0.44 A/cm²에도달하기 전까지는 전류밀도의 증가에 따라서 수소극 상대습도가 함께 증가하였다. 그러나 이후부터는 유지되거나 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 0.44 A/cm²을 기준으로 바뀌는 반응가스 공급방식의 영향을 받는다. 전류밀도가 작은 경우 MFC가 유량을 제어하는 과정에서 과도하게 밸브가 잠기게 되어 연료 및 산소부족현상이 발생할 수 있기에 본 실험에서는 j=0.44 A/cm²에서의 유량을 기준으로 그 이하의 전류밀도 범위에서 모두 적용하였다. 전류밀도가 증가하여도 유량이 증가하지 않기 때문에 채널의 후반부로 갈수록 공기극의 물 농도가 증가하게 되고 이로 인한 수소극으로의 역 확산 역시 증가하였다. 다만 전류밀도와 유량이 함께 증가하는 j=0.44 A/cm² 이상의 조건에서는 많은 수분을 머금고 셀을 빠져나가는 배출가스의 양도 함께 증가하기 때문에 전류밀도의 증가로 인한 공기극 물 농도의 증가를 상쇄시키는 것으로 추측된다.

채널의 전반부에 위치한 센서의 경우 전류밀도의 증가에 따라 습도가 다소 감소하는 경향이 관

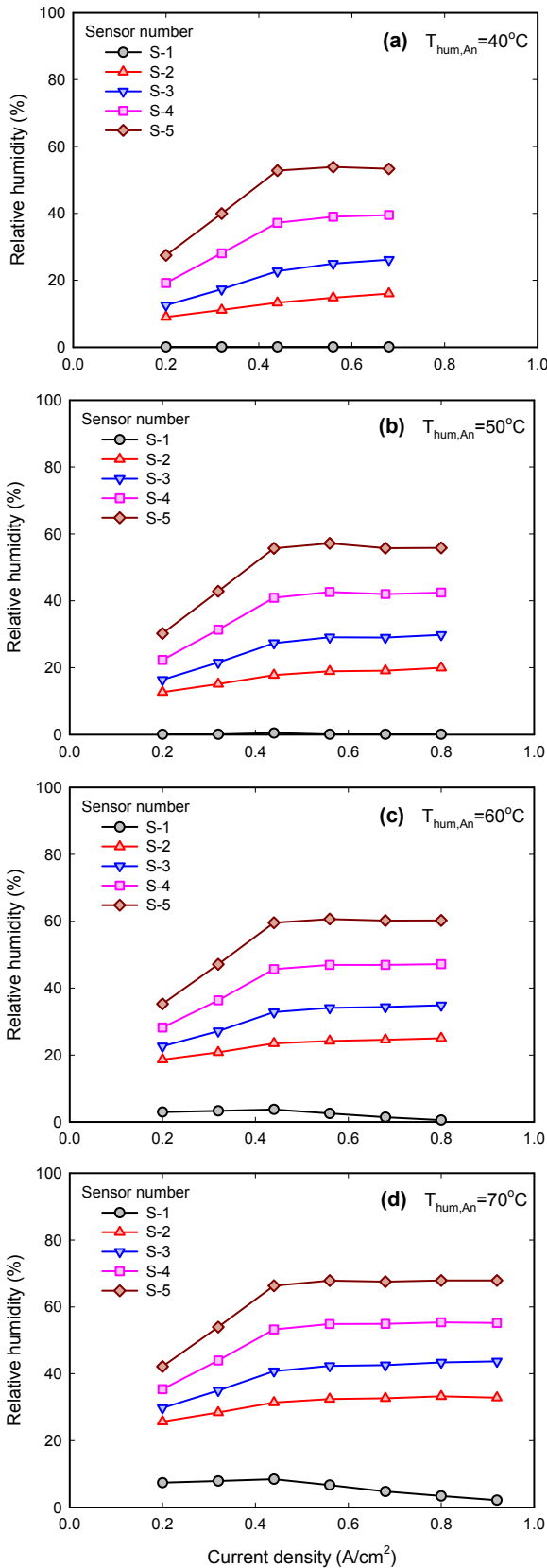


Fig. 5 Humidity distribution at the cathode of a PEMFC externally humidified only on the anode side

찰된다. 채널의 후반부에 비하여 역 확산은 상대적으로 적으나 전기삼투현상에 의한 공기극으로의 이동은 적절한 멤브레인의 수화에 의하여 오히려 활발하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 현상은 센서번호가 증가할수록 감소하였다.

Fig. 5 는 수소극만을 가습한 채 공기극에는 건조한 공기를 공급하면서 전류밀도에 따른 습도분포를 측정 한 결과이다. 수소극의 가습기 온도도 마찬가지로 40, 50, 60, 70 °C로 변경하였다. 전반적으로 Fig. 4 의 그래프와 비교할 때 낮은 습도를 보이고 있다. 가습기의 온도가 40 °C인 경우 최대 54% 정도이며 가습기 온도가 70 °C인 조건에서 최대 68%의 습도를 나타낸다. 가습기의 온도가 40 °C에서 70 °C로 크게 증가함에도 동일한 전류밀도에서 비슷한 습도를 나타낸다는 것은 수소극 외부가습량의 증가의 영향보다는 반응에 의하여 생성되는 물의 양의 영향이 더욱 크다는 것을 의미한다. 이는 수소극의 유량이 공기극에 비해 25% 수준이므로 외부가습으로 공급되는 물의 양 자체가 작기 때문이다. 멤브레인을 통한 확산이 수소극에서 공기극 방향으로 일어나며 전기삼투항력에 의해서도 공기극 방향으로 물의 이동이 발생하지만 애초에 공급된 양이 작기 때문에 공기극의 습도 증가가 확연히 나타나진 않았다.

4. 결론

PEMFC 내부의 습도 변화를 초소형 온습도 센서를 통하여 관찰하였다. 공기극 분리판 중심부에서 측정하는 일반적인 PEMFC 대표온도에 비하여 채널 내부의 온도는 약 2 °C 높으며 가습기 온도를 기준으로 계산된 습도는 실제 측정된 습도와 거의 일치하였다. 다만 가습기의 온도가 연료전지의 온도에 근접하는 조건에서는 다소 차이를 보였다. 운전중인 PEMFC 의 공기극을 가습하며 수소극에서 측정된 습도분포는 가습기의 온도와 함께 증가하며 채널의 후반부로 갈수록 증가하였다. 다만 전류밀도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 반면 수소극을 가습하며 공기극에서 측정된 결과는 전류밀도의 증가와 더불어 공기극의 습도도 함께 증가하였다. 이는 멤브레인을 통한 전기삼투항력이 수소극에서 공기극 방향으로만 발생하기 때문이다.

후 기

이 논문은 2014 학년도 한남대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

(1) Lee, Y., Kim, Y., Jang, Y. and Choi, J.M., 2007, "Effects

- of External Humidification on the Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 2188~2195.
- (2) Buchi, F.N. and Srinivasan S., 1997, “Operating Proton Exchange Membrane Fuel Cells without External Humidification of the Reactant Gases,” *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 144, pp. 2767~2772.
- (3) Kim, S. and Hong, I., 2008, “Effects of Humidity and Temperature on a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Stack,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 14, pp. 357~364.
- (4) Lee, Y., Kim, B. and Kim, Y., 2009, “Effects of Self-Humidification on the Dynamic Behavior of Polymer Electrolyte Fuel Cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 1999~2007.
- (6) Liu, X., Guo, H. and Ma, C., 2006, “Water Flooding and Two-Phase Flow in Cathode Channels of Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Journal of Power Sources*, Vol. 156, pp. 267~280.
- (7) Tuber, K., Pocza, D. and Hebling, C., 2003, “Visualization of Water Buildup in the Cathode of a Transparent PEM Fuel Cell,” *Journal of Power Sources*, Vol. 124, pp. 403~414.
- (8) Lee, Y., Kim, B. and Kim, Y., 2009, “An Experimental Study on Water Transport through the Membrane of a PEFC Operating in the Dead-end Mode,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 7768~7779.
- (9) Lee, D. and Bae, J., 2012, “Visualization of Flooding in a Single Cell and Stacks by Using a Newly-designed Transparent PEMFC,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 422~435.
- (10) Park, J., Li, X., Tran, D., Abdel-Baset, T., Hussey, D.S., Jacobson, D.L. and Arif, M., 2008, “Neutron Imaging Investigation of Liquid Water Distribution in and the Performance of a PEM Fuel Cell,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 3373~3384.
- (11) Ludlow, D.J., Calebrese, C.M., Yu, S.H., Dannehy, C.S., Jacobson, D.L., Hussey, D.S., Arif, M., Jensen, M.K. and Eisman, G.A., 2006, “PEM Fuel Cell Membrane Hydration Measurement by Neutron Imaging,” *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 271~278.
- (12) Yuan, X., Wang, H., Sun, J.C. and Zhang, J., 2007, “AC Impedance Technique in PEM Fuel Cell Diagnosis—A Review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 4365~4380.
- (13) Guvelioglu, G. and Stenger, H.G., 2007, “Flow Rate and Humidification Effects on a PEM Fuel Cell Performance and Operation,” *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp. 882~891.
- (14) Gorgun, H., Arcak M. and Barbir F., 2006, “An Algorithm for Estimation of Membrane Water Content in PEM Fuel Cells,” *Journal of Power Sources*, Vol. 157, pp. 389~394.
- (15) Lee, Y., 2009, “Effects of Water Transport and Freezing on the Performance Characteristics of Polymer Electrolyte Fuel Cells,” Ph. D. Thesis.