

< 논문 >

## 고분자 전해질 연료전지의 수소극 공급모드에 따른 성능특성

이용택\* · 박차식\* · 허재혁\* · 김용찬†  
(2006년 12월 11일 접수, 2007년 6월 7일 심사완료)

### Performance Characteristics of a Polymer Electrolyte Fuel Cell with the Anodic Supply Mode

Yongtaek Lee, Chasik Park, Jaehyeok Heo and Yongchan Kim

**Key Words :** PEFC(고분자 전해질 연료전지), Anodic Supply Mode(수소극 공급모드), Water Transport(물전달), Electro-Osmotic Drag(전기삼투항력), Back-Diffusion(역확산), External Humidification(외부가습)

#### Abstract

The water transport inside a polymer electrolyte fuel cell (PEFC) varied according to the anodic supply mode. The performance characteristics of a PEFC which can be affected by the water transport were observed with the anodic supply mode. In the flow-through and recirculation mode the performance showed no reduction with time because the flow in the anode was not stagnated. In the dead-end mode, without any discharged gas, the water remains inside of the anode, which caused the reduction of the performance with the lapse of time. However, even in the dead-end mode, little reduction of the performance with time was shown when only the anode was humidified externally. It means that the back-diffusion was the major factor to the accumulation of water in the anode rather than external humidification.

#### 기호설명

$I$  : 전류 (A)  
 $M$  : 분자량  
 $\dot{m}$  : 질량유량 (kg/h)  
 $p$  : 압력 (Pa)  
 $T$  : 온도 (K)  
 $W$  : 습도비  
 $\phi$  : 상대습도 (%)

$w$  : 물 (water)  
 $hum$  : 외부가습 (external humidification)  
 $gen$  : 발생 (generation)

#### 1. 서론

연료전지는 경쟁력 있는 대체 에너지원 중 하나이다. 특히 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte fuel cell, PEFC)는 자동차와 주택용 열병합 발전 시스템에 있어서 새로운 동력 공급원으로 부각되고 있다. 일반적으로 연료전지 시스템의 효율은 내연기관의 효율에 비해 높다. 연료전지는 연료의 화학적 에너지를 바로 전기적 에너지로 변환시키는 반면 내연기관은 연료를 열에너지로 변환한 후 그 열에너지로부터 동력을 얻는다. 이 과정에서 비가역성이 발생하고 이는 곧 효율감소의 원인이 된다. 이외에도 PEFC는 청정함과 저소음

#### 하첨자

$g$  : 건조상태 (dry state)  
 $s$  : 포화상태 (saturation state)

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
E-mail : yongckim@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3366 FAX : (02)921-5439

\* 고려대학교 기계공학과 대학원

이라는 장점이 있다. 하지만 아직 PEFC 시스템을 구성하고 운전하는데 많은 비용이 소요된다. 따라서 시스템을 구성하는 재료들의 가격 절감과 더불어 효율적인 시스템 운전 방안에 대한 연구가 요구되고 있다.

연료전지에 사용되는 화학적 에너지는 연료와 산화제의 형태로 공급되기 때문에 이들의 공급은 연료전지 시스템에 있어서 중요한 항목 중 하나이다. 일반적인 PEFC 시스템에서 산화제로 사용되는 산소는 공기의 형태로 블로어 혹은 압축기를 이용하여 공급되므로 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 수소는 지구상에 분자의 형태로 존재하지 않고 물이나 탄화수소와 같은 화합물의 형태로 존재하므로 수소는 그 자체로서의 에너지 자원이 아닌 인공적인 처리를 통해서만 얻을 수 있는 합성 연료이다.<sup>(1)</sup> 따라서 PEFC의 연료로 사용되는 수소의 공급방법과 그 영향에 대한 연구가 필요하다.

수소극 공급에는 일반적으로 3 가지 방법이 사용되며<sup>(1)</sup> 각 모드의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Dead-end 모드에서는 수소극의 출구가 막혀있기 때문에 수소는 산화반응에 의하여 소모되는 양 만큼만 추가로 공급된다. Flow-through 모드에서는 수소극의 출구가 열려있어서 연료전지 내부로 공급된 수소중 반응으로 소모되고 난 나머지는 외부로 방출된다. 이러한 과공급 수소는 연료의 낭비를 초래하지만 수소극 내에 존재하는 불순물과 물을 배출시킴으로써 성능의 향상에 도움이 된다. 세번째 모드는 수소 재순환(recirculation)을 사용한다. 수소극을 빠져나온 과공급 수소는 재순환 블로어 혹은 펌프에 의하여 수소극의 입구로 이송되며 수소 저장용기로부터 공급된 신기와 혼합되어 연료전지로 공급된다. 과공급 수소는 재순환되기 때문에 연료의 낭비를 방지할 수 있으며 수소의 흐름이 정체되지 않고 계속하여 유지되기 때문에 연료전지 내의 물의 배출효과도 동시에 나타낸다. 다만 재순환 펌프에 사용되는 부가적인 동력이 필요하다.

PEFC는 전해질막 전극 집합체(membrane electrode assembly, MEA)와 가스확산층(gas diffusion layer, GDL), 그리고 가스 플로우 채널 형상이 가공되어진 두 개의 평판으로 구성된다. 수소극 채널을 따라 흐르는 수소는 전기화학적으로 산화되고 여기서 생성된 H<sup>+</sup>는 전해질막을 통해서 전도된다. 공기극에서는 공기중에 존재하는 산소가 전도된 H<sup>+</sup>와 반응하여 환원된다. 전자는 산화과정에서 생성되며 물은 환원과정에서 생성된다. Fig. 2는 PEFC내에서의 물의 전달현상을 나타낸다.

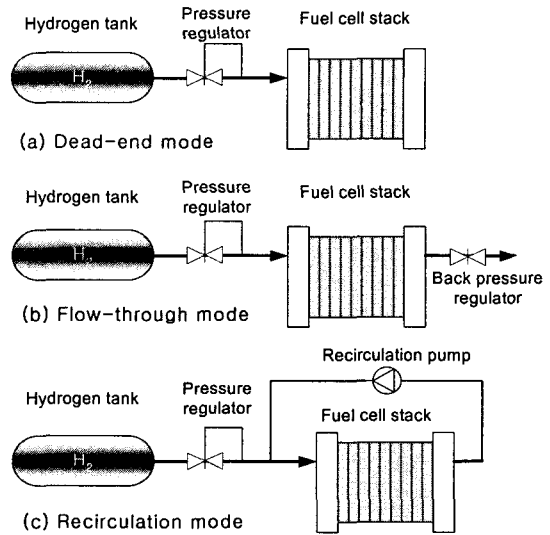


Fig. 1 Schematic of anodic supply modes

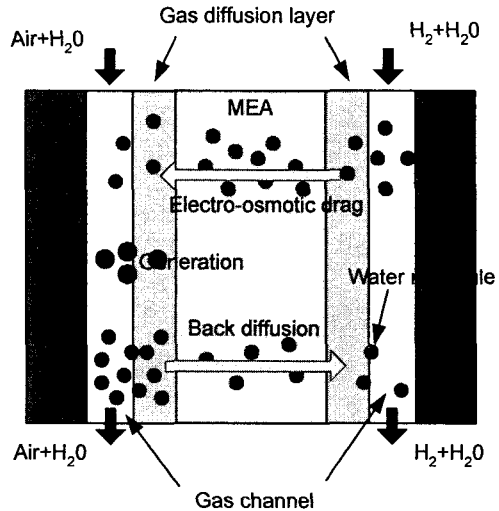


Fig. 2 Water transport in a PEFC

H<sup>+</sup>가 물을 포함하고 있는 전해질막을 통과할 때 물의 일부는 H<sup>+</sup>에 이끌려서 수소극에서 공기극으로 이동한다. 이것을 전기삼투항력(electro-osmotic drag)이라고 한다. 또한 공기극에서 산소는 전해질막을 통과하여 전도된 H<sup>+</sup> 및 전자와 결합하여 물을 생성한다. 전기삼투항력과 물의 생성으로 인하여 공기극과 수소극간에는 물의 농도차이가 발생하게 되고 이 차이에 의해서 물의 일부가 공기극으로부터 수소극으로 이동하는 현상이 나타난다. 이것을 역확산(back-diffusion)이라고 한다.<sup>(2-4)</sup>

PEFC에서의 물 전달현상은 PEFC 연구에 있어

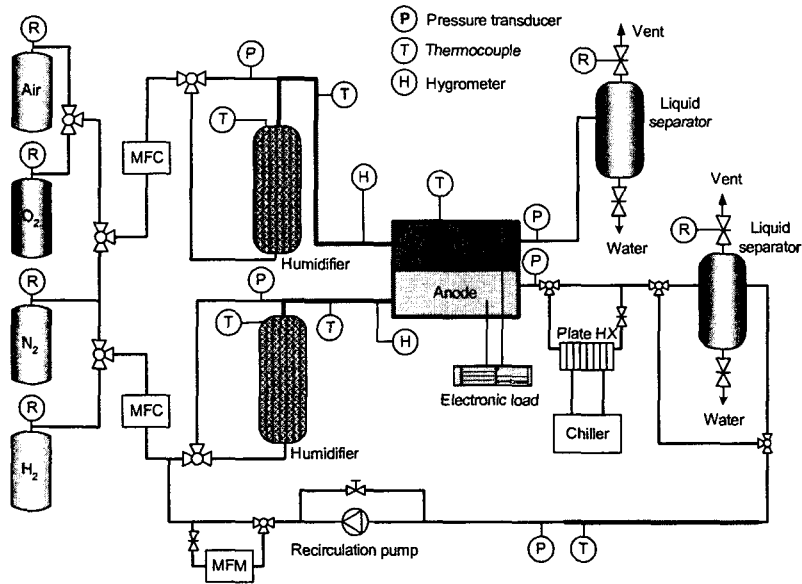


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup.

서 중요한 주제 중 하나이다. 이러한 물 전달현상은 연료의 공급과 같은 운전모드의 변화에 의해서 PEFC의 성능에 영향을 미친다. Zawodzinski 등<sup>(5)</sup>과 Motupally 등<sup>(6)</sup>은 Nafion 전해질막에서의 물 전달현상을 연구하였고, 물 함유량에 따른 확산계수를 제시하였다. 또한 Um 등<sup>(7)</sup>과 Zhou 등<sup>(8)</sup>은 전산 해석을 통하여 물의 전달현상과 물의 영향에 대하여 예측하기도 하였다. 연료전지 내부의 물의 전달현상을 직접 가시화하는 실험들도 진행되었다.<sup>(9-11)</sup>

본 연구에서는 이러한 연료전지 내부의 물의 거동이 수소극의 연료공급 모드에 의하여 어떻게 변화하는지 예측하고 그로 인한 연료전지 성능의 변화를 관찰하였다. 또 수소극의 출구가 막혀있는 dead-end 모드에서 외부가습조건의 변화로 인한 물의 전달과 성능의 변화를 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 3은 연료전지의 성능을 측정하기 위해 사용한 실험장치의 개략도이다. 본 실험장치는 수소극에는 순수 수소를, 공기극에는 공기 혹은 산소를 사용할 수 있도록 제작하였으며, 본 실험에서는 공기를 산화제로 사용하였다. 각 저장용기로부터 공급된 가스는 압력조절기 (pressure regulator)에서

원하는 압력으로 조정되며, 유량은 유량제어기 (mass flow controller)에 의하여 조절된다. 각 가스는 살포형 (sparging type) 가습기를 통하여 가습되어 연료전지로 공급된다. 연료전지의 공기극의 출구에는 액분리기 (liquid separator)를 부착하여 응축된 물을 제거한 후 외기로 배출한다. 수소극의 출구에는 밸브를 설치하여 수소공급의 3가지 모드별 전환이 가능하도록 하였다. 연료전지의 출구라인에는 역압력조절기(back pressure regulator)를 장착하여 시스템 내부의 압력을 일정하게 유지한 상태에서 flow-through모드운전이 가능하게 하였다. 재순환모드에서는 재순환 펌프를 사용하여 연료전지에서 빠져나온 과공급 수소를 입구로 재순환하였다.

본 연구에서 사용된 연료전지는 111 cm<sup>2</sup>의 유효면적을 가지는 단위전지로서 분리판에는 5채널의 사형 (serpentine)유로가 가공되었다. 본 연료전지에는 Gore<sup>TM</sup>사의 40 μm 두께를 가지는 MEA를 사용하였다. 연료전지의 작동온도는 양쪽 끝판(end plate)내부에 삽입된 카트리지 히터와 공기 냉각 팬으로 조절하였다. 연료전지의 부하는 전자부하기 (electronic load)를 사용하여 조절하였다. 연료전지의 전위차 및 각종 계측기의 아날로그 신호는 데이터 로거를 사용하여 측정하였다.

### 2.2 실험방법 및 조건

본 연구에서는 수소의 공급모드에 따른 PEFC 시스템의 성능특성을 관찰하였다. 공기는 flow-through

모드로 공급되었으며 수소는 각각 dead-end 모드, flow-through 모드, 그리고 재순환모드로 공급되었다. Flow-through 모드에서 수소는 연료전지 내부의 채널을 통해서 흐르며 반응하지 않고 남은 수소는 대기중으로 방출되었다. 반면 dead-end 모드와 재순환 모드에서는 수소극의 출구가 대기와 연결되어 있지 않으므로 외부로 배출되지 않았다. 다만 재순환 모드에서는 수소극을 빠져나온 가스가 재순환되어 다시 연료전지의 입구로 공급되었다. 공기극의 압력은 대기압으로 유지하였다. 수소극은 dead-end 모드에서도 연료전지의 채널 끝부분까지 수소를 공급하기 위해서 가압운전을 실시하였으며 연료전지 입구 기준으로 20 kPa로 유지하였다. 각 운전모드별로 연료전지를 통과하는 유량에 차이가 있으므로 이로 인한 입출구의 압력강하의 정도가 성능에 미치는 영향을 검토하였으나 모든 경우에 0.5 kPa 미만의 압력강하를 나타냈으며 운전모드별 특정 경향성을 나타내지 않아서 본 연구에서 압력강하량 및 측정부위에 의한 영향은 무시하였다. Dead-end 모드와 Recirculation 모드에서의 수소의 연료전지가 소비하는 양에 해당하는 유량이 공급되었으며 Flow-through 모드에서는 전류밀도와 상관없이 일정하게 0.75 slpm을 공급하였다. 또한 공기는 모든 조건에서 1.75 slpm으로 일정하게 공급하였다. 각 가스는 실험조건에 따라서 가습상태와 무가습상태로 공급되었으며 무가습 조건에서 완전 제습된 상태를 만들기 위해서 본 실험에서는 수소뿐만 아니라 공기 역시 불순물과 수분이 제거된 상태의 저장탱크로부터 공급하였다. 가습조건에서는 가습량을 조절하기 위하여 가습기 내부의 물의 온도를 조절하였다. 완전가습 조건에서는 연료전지의 작동온도와 동일한 60 °C로 유지하였고 비 포화조건에서는 물의 온도를 20 °C로 유지하여 습도를 11.7 %로 조절하였다. 가습기를 거친 가스는 외부에 히터가 장착되어 동일한 온도로 유지되어 있는 연결배관을 거쳐서 수증기가 응축되지 않은 상태로 연료전지에 공급될 수 있도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

PEFC 시스템의 운전모드에 따른 성능변화를 실험적으로 고찰하였다. 우선 시간의 흐름과 연관된 특성을 각 운전모드별로 관찰하였다. 또한 dead-end 모드에서 각 기체의 가습조건에 따른 수소극에서의 물 전달특성을 살펴보았다.

3.1 수소 공급모드별 시간에 따른 성능변화  
시간의 흐름에 의한 성능의 변화를 Fig. 4 에 나타

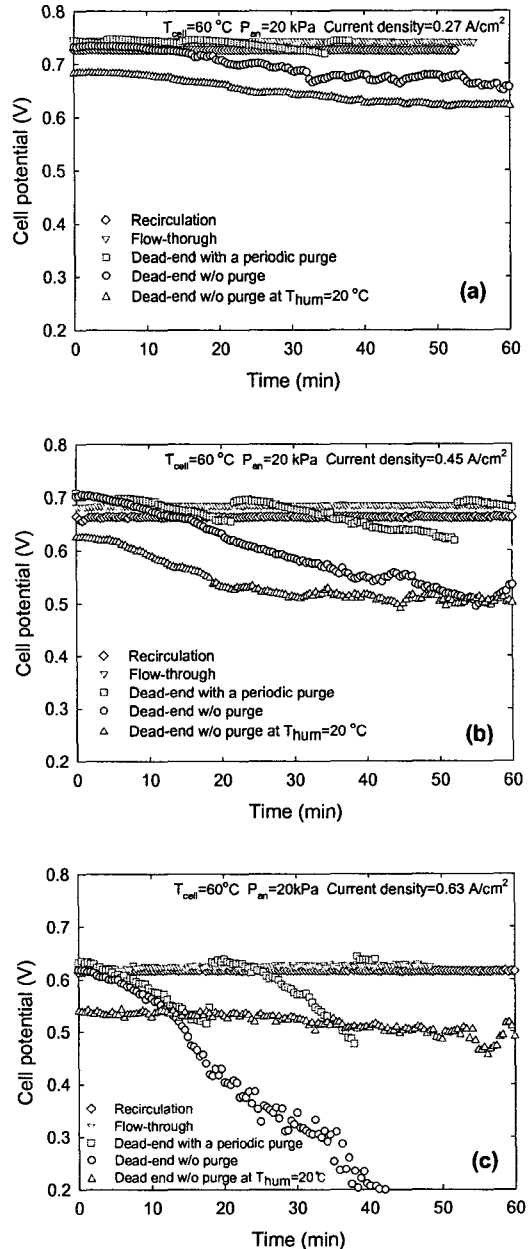


Fig. 4 Variation of cell potential according to the anodic supply mode with the lapse of time. Current density ; (a) 0.27 A/cm<sup>2</sup>, (b) 0.45 A/cm<sup>2</sup>, (c) 0.63 A/cm<sup>2</sup>

내었다. 연료전지에 걸리는 부하는 정전류(constant current)모드로 조절하였다. 전류는 각각 30 A, 50 A, 70 A로 유지되었으며 유효면적이 111 cm<sup>2</sup>이므로 각각의 경우의 전류밀도는 0.27 A/cm<sup>2</sup>, 0.45 A/cm<sup>2</sup>, 0.63 A/cm<sup>2</sup>이다. 수소와 공기는 각각 포화상태로 가습되어 공급되었다.

Fig. 4를 통해서 알 수 있듯이 flow-through모드와 재순환 모드에서는 1시간 정도 경과했을 때 시간의 흐름에 따른 전압의 변화가 거의 없었다. 반면 dead-end모드에서는 시간이 흐르자 전압이 점차 감소되었다. Dead-end모드는 연료전지의 수소극 출구가 막혀있기 때문에 수소는 물론 물의 배출도 불가능하다. 이와 같이 수소극내에 축적된 물은 채널을 막아 하부로 수소가 이송되는 것을 방해하며 가스확산층의 미세 기공에 분포하여 촉매층으로의 수소 전달을 어렵게 하여 성능의 감소를 야기하였다.<sup>(4)</sup> Flow-through모드에서는 잉여 수소가 수증기를 포함한 채로 대기중으로 빠져나가며 그 흐름에 의하여 액체상태로 존재하는 물을 외부로 배출시키므로 수소극 내에는 항상 일정한 양의 물만 존재하여 시간흐름과 성능변화는 무관하게 된다. 또 재순환 모드에서는 잉여수소와 응축된 물이 외부로 배출되지는 않으나 재순환 펌프에 의하여 수소극 내부의 흐름이 정체되지 않는다. 따라서 산화되지 않은 수소는 응축된 물과 함께 연료전지의 외부로 방출된 후 액분리기(liquid separator)에서 응축수가 제거된 후 다시 연료전지로 흡입된다. 이러한 과정에 의하여 재순환 모드에서도 성능의 감소는 나타나지 않았다. 이러한 현상은 dead-end모드 운전중에 배기(purge)를 함으로써도 확인할 수 있었다. Dead-end모드의 성능은 배기와 함께 초기상태로 복귀하였는데 이는 배기와 함께 수소극 내부에 축적된 물이 외부로 배출되면서 성능이 회복되었음을 나타낸다.

위에서 설명한 내용은 수소와 공기가 포화상태로 가습되어 공급되는 조건에서 얻어진 결과들이며, 이와 비교하기 위하여 수소와 공기의 습도를 낮추어 dead-end 모드에서 살펴보았다. Fig. 4의 “△” 기호는 이 조건에서의 결과를 나타내고 있다. 이 경우 가습기 내부의 물의 온도는 20 °C로 유지하였으므로 연료전지에 공급되는 기체의 상대습도는 11.7%였다. 외부가습에 의한 전해질막의 수분함유량이 적어서 초기상태에서의 전압은 포화조건에 비해서 작았다. 이 경우 역시 수소극의 출구가 막혀있기 때문에 물의 축적에 의한 성능의 감소는 불가피 하였다. 다만 그 기울기가 포화상태의 경우에 비해서 상대적으로 작음을 알 수 있다.

Fig. 4의 (a)-(c)에 나타난 바와 같이 Flow-through모드와 재순환모드는 전류밀도가 증가한 경우에도 시간에 따른 성능의 감소를 보이지 않았다. 반면 dead-end모드의 성능감소는 전류밀도의 증가와 더불어 더욱 가속화되었다. 이는 dead-end

모드의 성능감소의 원인인 물의 양이 증가하였기 때문으로 볼 수 있는데 전류밀도가 증가함에 따라서 공기극에서의 물의 발생이 많아지고 또 수소극에 공급되는 수소의 양도 증가하면서 함께 공급되는 수증기의 양도 많아졌기 때문이다.

이상의 결과로부터 flow-through 모드와 재순환모드에서는 수소극의 흐름이 정체되어 있지 않기 때문에 물의 축적이 발생하지 않아 성능의 감소가 없으나 dead-end 모드에서는 물의 축적이 성능의 감소를 야기하였다는 결론을 얻을 수 있었다. 다만 수소극에 물의 축적을 가져올 수 있는 경로를 외부 가습에 의한 물의 공급과 공기극으로부터의 전해질막을 통한 역확산으로 나누어 볼 때 각 경로가 dead-end 모드에서의 수소극 물의 축적에 미치는 영향의 차이를 규명하기는 어렵다. 따라서 외부가습의 조건에 변화를 가하여 그 영향을 살펴 보았다.

### 3.2 가습조건 변화에 따른 dead-end 모드 성능변화

Dead-end 모드에서 가습조건을 변화시키면서 성능의 변화를 관찰하였다. 가습조건은 수소극과 공기극 동시 가습, 공기극만 가습, 수소극만 가습으로 구분하였다. 각 경우 가습되는 기체는 포화상태로 공급되었다. 시간에 따른 각 경우의 성능변화를 Fig. 5에 나타내었다. 각 그래프는 전류밀도에 의해서 구분된다. 전류밀도가 0.27 A/cm<sup>2</sup>의 경우 세가지의 가습조건은 유사한 기울기(-0.8~ -1.4 mV/min)를 가지며 성능이 감소됨을 알 수 있다. 전류밀도가 0.45 A/cm<sup>2</sup>로 증가하면 양극 가습(수소극과 공기극)과 공기극 가습의 경우는 성능감소가 두드러졌다. 전류밀도가 0.63 A/cm<sup>2</sup>로 증가하면 양면 가습과 공기극 가습의 성능감소가 더욱 가속화되어 40분만에 0.2 V이하로 떨어져서 더 이상 실험을 지속할 수 없게 되었다. 반면 수소극 가습은 전류밀도가 증가하여도 성능감소의 기울기가 증가하지 않고 오히려 다소 감소하는 경향을 보이며 시간의 흐름에 크게 영향을 받지 않는 특성을 보였다.

PEFC의 수소극에 공급되는 물의 경로는 두가지이다. 첫째는 외부가습에 의한 물의 공급이고 둘째는 공기극과의 물의 농도차이에 기인한 역확산에 의한 물의 공급이다. 위의 실험결과들은 물의 공급경로의 차이에 의한 수소극 내의 물의 축적도 변화에 의한 것으로 판단된다. 우선 외부가습에 의한 물의 공급량을 수증기가 혼합되어 있는 수소의 유량과의 비로 표현하면 식 (1)과 같다.<sup>(12)</sup>

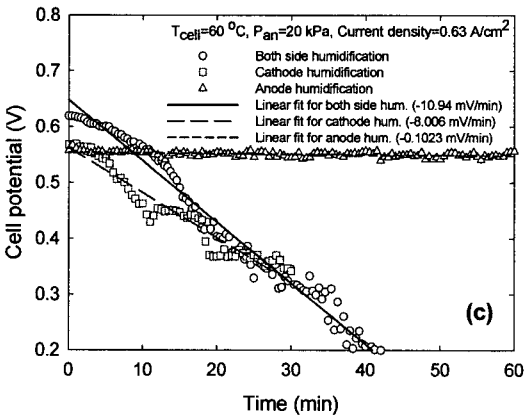
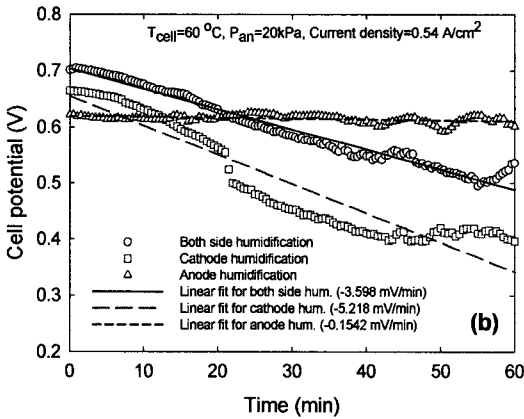
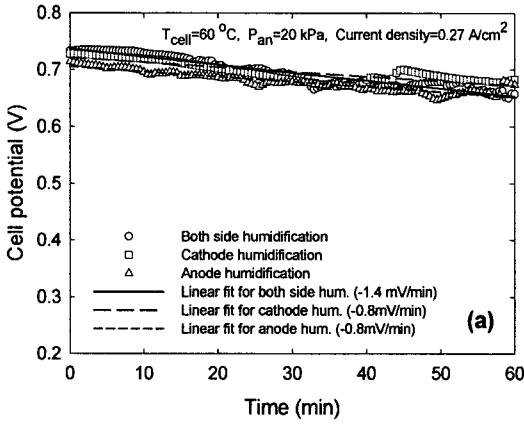


Fig. 5 Variation of cell potential according to the external humidification condition with the lapse of time in dead-end mode. Current density ; (a) 0.27 A/cm<sup>2</sup>, (b) 0.45 A/cm<sup>2</sup>, (c) 0.63 A/cm<sup>2</sup>

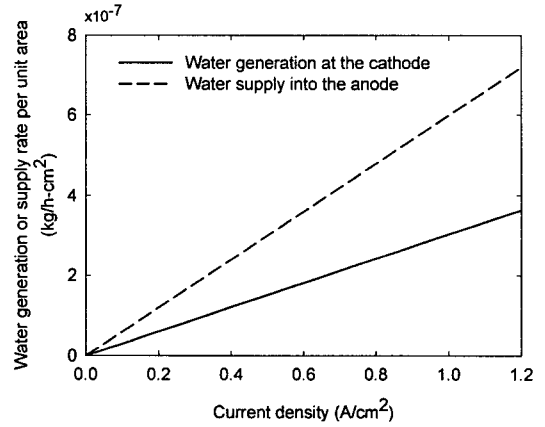


Fig. 6 Water generation or supply rate per unit area of MEA when the anode was humidified in saturation state

$$W = \frac{M_w p_s \phi}{M_{H_2} p_g} = 8.936 \frac{p_s \phi}{p - p_s} \quad (1)$$

포화상태로 가습되는 경우  $\phi$  는 1 의 값을 가지게 된다. 그리고 수소의 유량은 <sup>(13)</sup>

$$\dot{m}_{H_2} = 3.78 \times 10^{-5} I \text{ kg/h} \quad (2)$$

이므로 외부가습에 의해 포화상태로 수소극에 전달되는 수증기의 양은 식 (3)으로 표현된다.

$$\dot{m}_{water, hum} = 3.38 \times 10^{-4} \frac{p_s}{p - p_s} I \text{ kg/h} \quad (3)$$

여기서 포화수증기압( $p_s$ )은 온도에 의한 함수로서 식 (4)와 같이 표현되며 각 계수의 값은 Table 1에 나타내었다. <sup>(14,15)</sup>

$$\ln p_s = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T \quad (4)$$

또한 공기극에서 생성되는 물의 양은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. <sup>(13)</sup>

$$\dot{m}_{water, gen} = 3.362 \times 10^{-4} I \text{ kg/h} \quad (5)$$

위의 식 (3)과 식 (5)를 이용하여 단위면적의 MEA (1 cm<sup>2</sup>)에 대해서 dead-end모드로 운전되고 있는 PEFC의 수소극으로 공급되는 물의 양과 공

Table 1 The coefficients of Eq. (4) derived from the Hyland-Wexler equation<sup>(15)</sup>

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
-5800.22	1.39150	-0.048642	0.417648e-4	-0.144521e-7	6.54597

기극에서 생성되는 물의 양을 Fig. 6에 나타내었다. 전류밀도가 증가함에 따라서 공기극에서의 물의 생성량도 비례하여 증가하며 수소의 소모량도 증가하기 때문에 수소극으로 공급되는 수소의 양도 증가한다. 수소는 포화가습 상태로 공급되기 때문에 수소극으로 공급되는 물의 양도 더불어 증가하게 된다. 다만 그 양에 있어서는 수소극으로의 공급량이 공기극에서의 생성량보다 그 증가폭이 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 수소극과 공기극의 양쪽을 가습하는 경우에는 수소극의 물은 전기삼투항력에 의하여  $H^+$ 이온과 함께 공기극으로 이동하며 공기극에서는 공기의 가습에 의한 물과  $H^+$ 의 환원반응에 의한 물의 생성에 의하여 물의 농도가 커지게 된다. 다만 공기는 flow-through모드로 공급되기 때문에 공기극에서의 물의 축적은 일어나지 않고 일정량의 물이 가스확산층의 공극 및 채널의 일부분에 존재하는 상태로 유지된다. 수소극에서는 역확산에 의하여 수소극으로 넘어오는 물이 점차 가스확산층 및 채널에 축적되어 시간이 지날수록 성능의 감소를 야기한다. 공기극만 가습하는 경우에는 수소의 가습이 없기 때문에 초기에는 수소극 내에 존재하는 물의 양이 적으나 공기극과의 물의 농도차이가 매우 커지기 때문에 많은 양의 물이 역확산되고 수소극에 축적되기 때문에 성능감소의 원인이 된다. 반면 수소극만 가습하는 경우에는 공급된 물은 전기삼투항력에 의해서 공기극으로 이동하고 공기극은 가습이 없으므로 상대적으로 건조하여 역확산되는 물의 양이 적다. 따라서 수소극 가습의 경우에는 시간의 흐름에 의한 성능의 감소가 매우 미미하였다. 초기상태에서는 양극 가습과 공기극 가습이 수소극 가습보다는 우수한 성능을 나타내고 있으나 시간에 따른 급격한 성능감소로 인하여 결국 수소극 가습이 가장 우수한 성능을 보였다. 즉, dead-end조건에서는 공급기체의 가습량 변화보다는 수소극에서의 물의 축적이 성능에 미치는 영향이 훨씬 지배적이었다.

#### 4. 결론

고분자 전해질 연료전지(PEFC)의 수소극 공급

모드를 dead-end, flow-through, 그리고 재순환모드로 변화시키면서 시간의 흐름과 관련된 성능특성을 살펴보았다. 또 dead-end 모드에서 수소극 및 공기극의 가습여부에 의한 성능특성의 변화를 관찰하였으며 그 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) Dead-end 모드에서는 시간의 흐름에 따라서 성능의 감소가 나타났다. 전류밀도가 높은 조건에서 감소폭이 증가하였으며 수소극의 출구를 배기하면 성능이 초기상태로 복귀하였다. Dead-end 모드에서는 수소극의 출구가 막혀있기 때문에 수소극 내로 공급되는 물이 외부로 배출되지 못하고 내부에 축적되어 수소의 확산을 방해하며 이로 인하여 성능의 감소가 나타났다. 또한 공급기체의 가습량을 11.7%로 낮추어 공급하였을 때 성능감소의 기울기가 완만해짐을 통하여 수소극내의 물의 축적이 성능감소의 원인임을 판단할 수 있다.

(2) Flow-through 모드와 재순환모드에서는 시간의 흐름에 따른 성능의 감소가 나타나지 않았다. 이는 수소극내에서 수소의 흐름이 정체되지 않아 물의 축적을 방해하였기 때문이다.

(3) Dead-end 모드에서 공기극과 수소극을 모두 외부가습하는 경우와 공기극만을 외부가습하는 경우에는 시간에 따른 성능의 감소를 보였다. 이 역시 전류밀도가 높은 경우에 더 큰 감소폭을 나타내었다. 전류밀도가  $0.27 \text{ A/cm}^2$ 의 경우에 대비하여  $0.63 \text{ A/cm}^2$ 의 경우 성능감소의 기울기는 약 7.8배 증가함을 보였다.

(4) 수소극만을 가습하는 경우에는 dead-end 모드에서도 성능의 감소가 거의 나타나지 않았다. 전류밀도가 증가하여도 성능감소폭이 증가하지 않았다.

(5) Dead-end 모드에서 양측을 가습하는 경우와 공기극을 가습하는 경우에는 공기극과 수소극의 물의 농도차이에 의한 역확산이 발생하여 수소극 내부에 물의 축적이 발생하나 수소극만을 가습하는 경우에는 공기극이 상대적으로 건조하여 역확산이 발생하지 않기 때문에 물의 축적이 발생하지 않아 성능이 감소가 나타나지 않았다.

(6) Dead-end 모드에서 성능의 감소를 야기하는 수소극내의 물의 축적은 외부가습 보다는 공기극으로부터의 역확산이 보다 주요한 원인이 된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11014-0)지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Barbir, F., 2005, PEM fuel Cells -Theory and Practice, Elsevier, pp. 275~278.
- (2) Li, X., 2006, "Principles of Fuel Cells," Taylor & Francis Group, pp. 303~306.
- (3) Lee, Y., Kim, Y., Kim, J. C. and Chung, J. T., 2006, "Effects of Humidity on the Performance of a PEFC," *The Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning*, Vol. 2, pp. 705~708.
- (4) Lee, Y., Jang, Y. H., Jung, T., Chung, J. T. and Kim, Y., 2006, "Performance Characteristics of a Polymer Electrolyte Fuel Cell with the Anodic Supply Mode," *ECS Transactions*, Vol. 3, No. 1, pp. 871~878.
- (5) Zawodzinski, T. A., Neeman, M., Sillerud, O. and Gottesfeld, S., 1991, "Determination of Water Diffusion Coefficients in Perfluorosulfonate Ionomeric Membranes," *J. Phys. Chem.*, 95, pp.6040~6044.
- (6) Motupally, S., Becker, A. J. and Weidner, J. W., 2000, "Diffusion of Water in Nafion 115 Membranes," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 9, pp. 3171~3177.
- (7) Um, S. and Wang, C. Y., 2006, "Computational Study of Water Transport in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 156, pp. 211~223.
- (8) Zhou, B., Huang, W., Zong, Y. and Sobiesiak, A., 2006, "Water and Pressure Effects on a Single PEM Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 155, pp. 190~202.
- (9) Nishikawa, H., Kurihara, R., Sukemori, S., Sugawara, T., Kobayasi, H., Abe, S., Aoki, T., Ogami, Y. and Matsunaga, A., 2006, "Measurements of Humidity and Current Distribution in a PEFC," *Journal of Power Sources*, Vol. 155, pp. 213~218.
- (10) Tueber, 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.
- (11) Hakenjos, A., Muentzer, H., Wittstadt, U. and Hebling, C., 2004, "A PEM Fuel Cell for Combined Measurement of Current and Temperature Distribution, and Flow Field Flooding," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 213~216.
- (12) McQuiston, F. C. and Parker, J. D., 1994, Heating, Ventilating, and Air conditioning, John Wiley & Sons, Inc., pp. 55~57.
- (13) Larminie, J., 2000, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, Ltd., pp.297~302.
- (14) ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2005, pp. 6.2.
- (15) Hyland, R. W. and Wexler, A., 1983, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H<sub>2</sub>O from 173.15K to 473.15K." *ASHRAE Transactions*, Vol. 89, No. 2A, pp. 500~519.