

## OCV / 저가습 조건에서 고분자 전해질 막 열화

김태희 · 이정훈\*\* · 이 호 · 임태원\* · 박권필†

순천대학교 화학공학과  
540-742 전남 순천시 매곡동 315  
\*현대자동차 환경기술연구소  
446-912 경기도 용인시 기흥구 마북동 104  
\*\*한국에너지기술연구원  
305-343 대전시 유성구 장동 71-2  
(2007년 4월 5일 접수, 2007년 4월 12일 채택)

## Degradation of Polymer Electrolyte Membrane under OCV/Low Humidity Conditions

Taehee Kim, Junghun Lee\*\*, Ho Lee, Tae Won Lim\* and Kwonpil Park†

Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315, Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam 540-742, Korea

\*HMC Eco Technology Research Institute, 104, Mabuk-dong, Giheung-gu, Youngin, Gyeonggi 446-912, Korea

\*\*Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 5 April 2007; accepted 12 April 2007)

### 요 약

고분자 전해질 연료전지를 OCV(open circuit voltage)나 저가습 조건하에서 운전하면 고분자 전해질 막의 열화(degradation)가 가속화된다. 그런데 왜 이러한 조건에서 막 열화가 심하게 되는지 명확히 규명한 연구결과들이 없다. 본 연구에서는 OCV/저가습 조건에서 운전 중 막의 수소 투과도, I-V 분극곡선 변화를 측정하고 응축수 내 불소이온 방출 속도(FER)와 셀 내 생성된 과산화수소 농도를 측정하였다. 그리고 기존의 과산화수소와 라디칼에 의한 고분자막 열화 메커니즘이 실험결과를 설명할 수 있는지 비교 검토하였다. OCV/저가습 조건에서 고분자 막 열화가 잘 되는 것은 건조한 anode의 Pt 촉매 상에서 Pt와 수소원자가 결합된 상태 즉 [PtH]로의 반응이 잘 일어나고 이 [PtH]가 OCV 조건에서는  $\text{HO}_2\cdot$ 를 형성할 수 있는 조건을 만족하기 때문으로 보인다.

**Abstract** – During PEMFC operation, OCV(open circuit voltage) and low humidity conditions accelerate the degradation of perfluorosulfonic acid membrane. There have been no studies that clearly explain why these conditions accelerate the membrane degradation. In this study, the hydrogen permeability through the membrane, I-V polarization of MEA, fluoride emission rate(FER) and  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration in condensed water were measured during cell operation under OCV and low relative humidity(RH). The experimental results were evaluated with oxygen radical mechanism the most commonly known for membrane degradation. It seems that low RH of anode is a good condition for  $\text{H}\cdot$  radical formation on the Pt catalyst and the OCV condition accelerate the  $\text{H}\cdot$  to form  $\text{HO}_2\cdot$  radical attacking the polymer membrane.

Key words: PEMFC, Membrane Degradation, Radical, OCV, Low Relative Humidity

### 1. 서 론

고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 정치용이나 운송용으로 상용화단계에 근접해 있어 국내외 많은 회사들이 적극적으로 다양한 제품의 동력원으로써 개발하고 있다. PEMFC의 상용화단계에서 넘어야 할 장애물은 가격과 수소 저장 및 공급 그리고 내구성 등이다. 가격은 대량생산하면 하락할 것으로 예상할 수 있는데 Rittmar 등 [1]은 자동차용으로 100만대 일때 목표치인 \$50/kW에 도달할 수

있다고 하였다. 수소저장 및 공급도 많은 진척이 있어 국내에서는 2006년에 수소용 연료전지 모니터링사업이 시작돼 3년 내에 수소충전소를 10군데 설치하기로 하였다. PEMFC의 내구성에 대해서는 2000년 초까지는 연구결과들이 많이 보고되지 않았으나 근래에 상용화를 위한 연구단계에서 수명연장을 위한 연구가 활발해지고 있다[2-4].

PEMFC의 핵심요소인 전극과 고분자 막의 열화가 PEMFC 단수명의 주요 원인이다. 고분자 막 열화를 발생시키는 원인은 오염, 열, 전기화학적 열화, 압력 등을 들 수 있는데 다른 원인들은 그 메커니즘이 많이 밝혀졌으나 전기화학적 원인에 의해 고분자 사슬이 끊어지는 막 열화 현상에 대해서는 연구해야 할 것들이 아직 많이 남아 있다.

† To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: parkkp@sunchon.ac.kr

1970년대 초 미국의 GE에서 발표한 PEMFC 운전조건에서 발생한 과산화수소가 금속이온들과 만나 라디칼을 형성하고 이 과산화수소와 라디칼에 의해 막이 열화 된다는 메카니즘이 지금까지 주로 받아들여져 왔으나[5] 이 메카니즘이 다 맞지는 않다는 연구결과들이 나오고 있다[6, 7]. 내구성 실험은 장시간이 요구돼 실제 짧은 시간 내 그 결과를 알아볼 수 있는 가속실험이 이용되었다. Ex situ 조건으로 Fenton 용액에서 실험하는 방법과 in situ 조건으로 막이 열화가 잘 되는 OCV와 저가속 조건에서 막 열화실험을 많이 하였다. 그러나 왜 OCV와 저가속 조건에서 막 훼손이 잘 되는지는 명확하게 설명되지 않고 있다.

본 연구에서는 OCV/저가속 조건에서 몇 가지 실험을 통해 나온 결과를 기존의 과산화수소와 라디칼에 의한 막 열화 메카니즘에 의해 설명할 수 있는지 검토해 보았다.

## 2. 실험

전극 크기  $25\text{ cm}^2$  셀에 MEA와 테플론 개스킷을 넣고 100 토크로 체결하였다. 셀은  $80^\circ\text{C}$ , anode와 cathode 가습수의 온도는  $70^\circ\text{C}$ 로 하고, cathode에는 공기( $292\text{ ml/min}$ )를 anode에는 수소( $92\text{ ml/min}$ )를 각각 상압에서 공급하였다. 일정전류에서 24시간 활성화시킨 후 I-V 성능 측정을 하였다. 고분자 막의 열화 정도는 수소투과도 측정과 응축수에서의 FER(fluor emission rate) 측정을 통해 확인하였다.

열화 막의 수소 투과도(permeability)는 전기화학적 방법으로 측정 가능하다. Anode와 cathode에 각각 수소와 질소를 공급하고, 수소 crossover에 의해 나타나는 전류 값을 측정하였다. Potentiostat(Solatron)로 전압을 걸어주면 crossover된 수소는 cathode 쪽에서 산화 반응하여 전자를 내놓게 되는데 이 전자의 양을 측정하면 막을 통과한 수소 양을 알 수 있다. 한계전류밀도가 나타나는 전압까지 전압을 증가시키면서 수소 crossover 전류값을 측정하여 정상적인 막과 열화 된 막을 비교하였다.

FER(fluoride emission rate)은 셀 운전 중 배출 되는 응축수를 각각 anode와 cathode로 구분하여 이 응축수 내에 존재하는, 고분자로부터 떨어져 나온 불소이온농도를 불소 ISE Meter(ion selective electrode meter, PH-250L, ISTEK, Inc.)를 이용해 측정하였다.

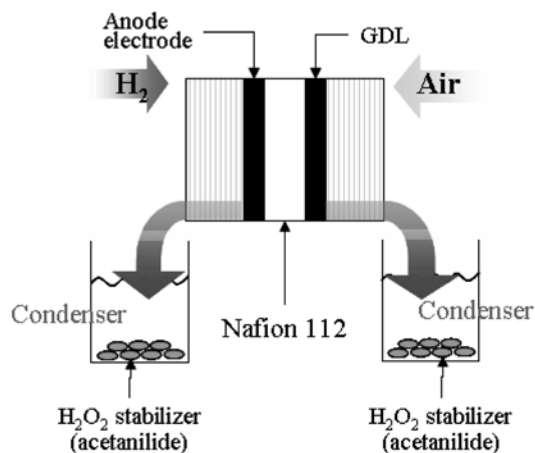


Fig. 1. Schematic of cell configuration for measuring concentration of  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

In situ 상태에서 CV(cyclic voltametry)를 이용해 발생하는 과산화수소의 측정이 가능하다[8]. 과산화수소의 전기화학적 거동을 이해하기 위해 먼저, 셀 내 전해질과 비슷한 환경 즉 강산 용액( $4\text{ N H}_2\text{SO}_4$ ) 내에 일정 농도의 과산화수소가 존재할 때 CV를 통한 산화/환원 거동을 측정하였고, OCV 조건에서 셀 운전 중 발생하는 과산화수소의 측정은 두 개의 전해질 막 사이에 Pt microelectrode를 설치해 측정하였다.

과산화수소는 백금 촉매 상에서 쉽게 분해되기 때문에 anode 한쪽만 Pt/C 전극이 있고 한쪽은 GDL 만 있는 Fig. 1과 같은 형태의 셀[7]에서 실험하였다. 응축기로부터 나온 응축수내의 과산화수소 농도를 UV-Visible Spectrophotometer(UV-1650PC, SHIMADZU)로 측정하였다. 과산화수소의 안정화를 위해 acetanilide를 응축기에 미리 첨가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 과산화수소 측정

지금까지 PEMFC 고분자막을 열화 시키는 것으로 잘 알려진 산소라디칼은 수명이 수 나노초에 불과해 측정이 어렵고 과산화수소도 안정적이지 못해  $\text{H}_2\text{O}_2$ /라디칼 메카니즘을 규명하기가 쉽지 않다. Endoh 등[9]은 저가속 조건에서 비교적 안정적인 탄소 라디칼을 측정을 통해 산소라디칼의 발생을 간접적으로 분석해보이기도 했다.

Fig. 2는 반쪽전지에서 황산용액에 여러 농도의 과산화수소를 넣고 공기를 유입하면서 CV를 측정한 결과이다.  $1.17\text{ V}$ 에서 과산화수소의 피크를 확인할 수 있다. 이 그래프를 기준으로 운전 중에 셀 내 과산화수소 발생을 CV로 측정하려 했으나 안정적인 데이터를 얻지 못하였다. 그래서 calorimetric 방법으로 응축수 중의 과산화수소를 측정했다. 촉매에 의한 과산화수소의 분해를 막기 위해 한쪽 전극만으로 구성된 cell을 이용해 OCV/저가속 조건에서 실험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 a와 b는 각각 anode와 cathode를 의미하고 상대습도 변화에 따라 셀 내 생성된 과산화수소 농도를 측정하여 응축수 채취시간( $10\sim 20\text{ h}$ )과 전극면적( $5\text{ cm}^2$ )으로 나누어

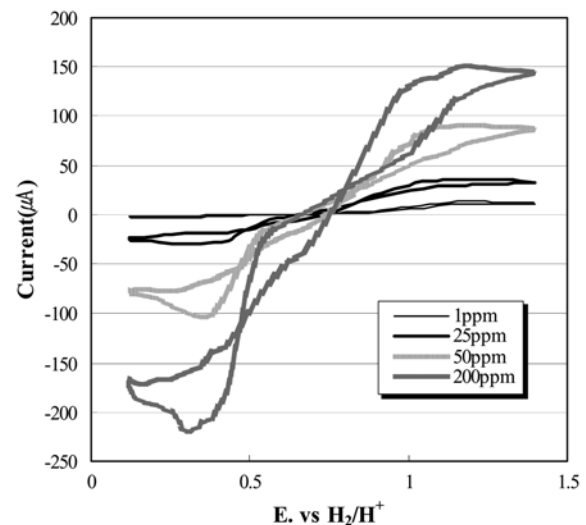


Fig. 2. Cyclic voltammetry scans of various  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration in acid saturated with air.

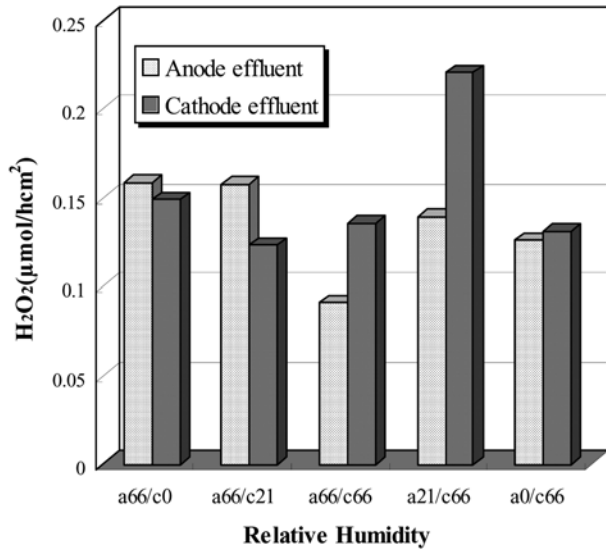


Fig. 3. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (μmol/hcm<sup>2</sup>) in effluent water from the cell configured with one electrode.

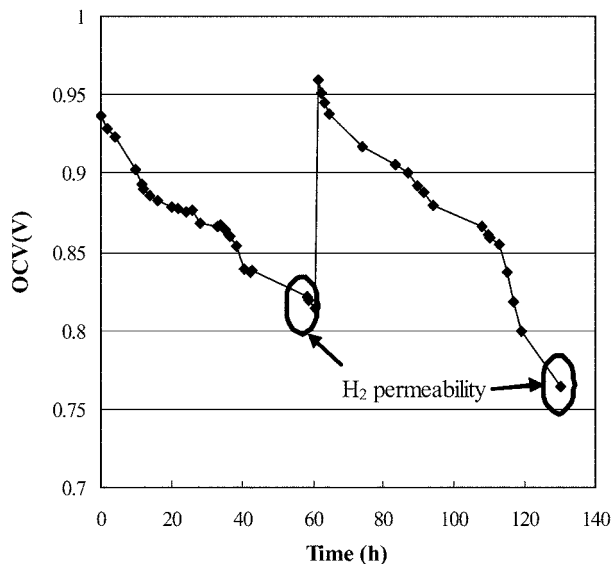


Fig. 4. OCV changes during cell operation under dry condition at anode.

계산하였다. Mittal 등[6]이 보고한 것처럼 과산화수소 측정은 가능하였으나 일관성 있는 경향을 찾지 못해 고분자막 열화 메커니즘 규명을 위한 데이터로 이용할 수 없었다.

### 3-2. OCV/anode 무가습 운전

OCV나 저가습 조건 중 어느 한 조건하에서만 막 열화를 실험하면 열화 속도가 느려 500시간 이상의 장시간이 요구되므로 OCV 상태에서 anode는 무가습으로 하고 cathode는 가습 조건하에서 열화 실험하였다. 정상적인 조건하에서 활성화 시킨 후 I-V 분극곡선을 측정하고 cathode에 3시간동안 질소를 공급한 후 수소 투과도를 측정하였다. 수소투과도 측정이 끝나면 다시 cathode에 공기를 공급하여 정상적인 가습 조건하에서 3시간 운전한 후 anode를 무가습으로 하고 부하를 걸지 않은 상태로 시간에 따른 OCV 변화를 측정하였

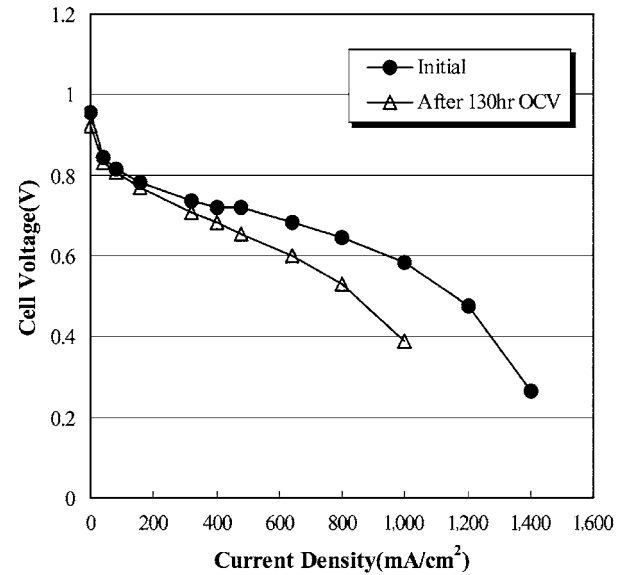


Fig. 5. I-V curves before and after 130 hours operation under OCV and dry condition at anode.

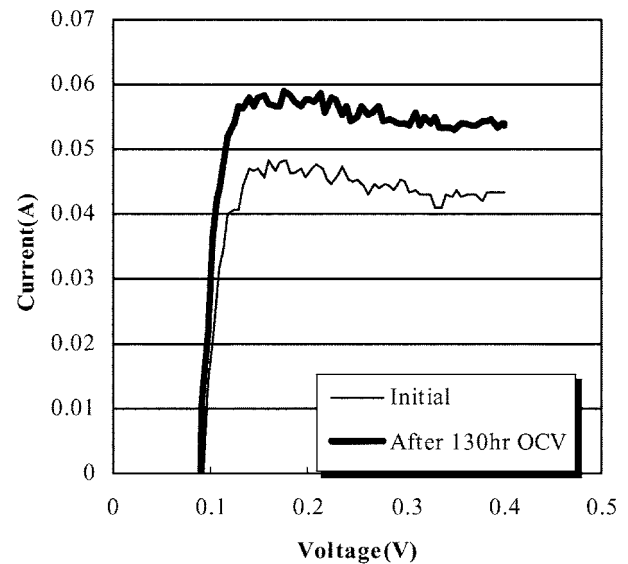


Fig. 6. Hydrogen crossover before and after 130 hours operation under OCV and dry condition at anode.

다(Fig. 4). 시간이 경과하면서 OCV 값이 감소함을 보이는데 이는 anode가 건조되면서 나타난 결과로 anode 무가습에 의해 막내 pinhole이 발생하고 이를 통해 가스가 crossover 돼 분압이 감소된 결과로 보인다.

130시간 경과 후 I-V 성능을 초기 성능과 비교해 Fig. 5에 나타내었다. 전압 0.6 V에서 전류가 처음보다 약 30% 감소해 급격한 성능감소를 보였다. 수송용 PEMFC의 운전목표시간은 5,000시간, 정치용 PEMFC의 운전목표시간이 400,000시간이란 점을 생각하면 본 운전조건이 가혹한 조건이란 것을 알 수 있다. OCV 전압의 감소는 gas crossover의 영향으로 보이고 중간영역에서 약간의 기울기 증가 즉 막 전도도 감소에 의한 성능감소도 있었음을 나타내고 있다.

Fig. 6에 gas crossover 측정결과를 나타냈다. 막 열화에 의해 수소 투과도가 증가했다. 이는 Fig. 5의 I-V 성능 감소가 막의 열화에

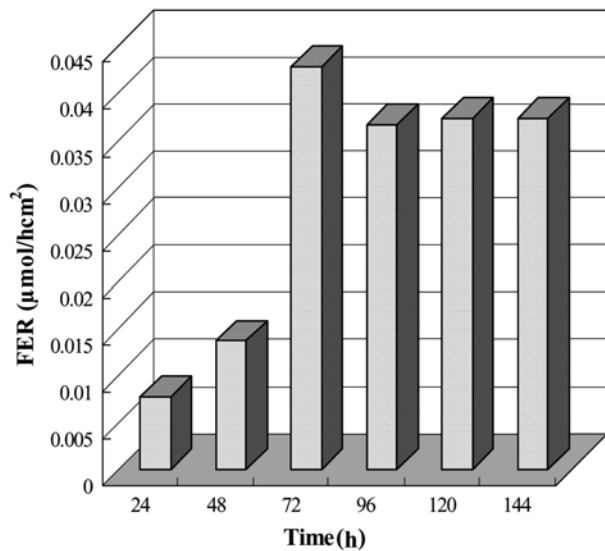


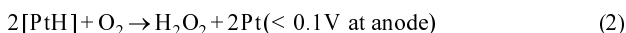
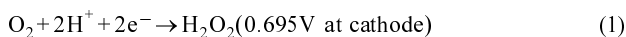
Fig. 7. Fluoride emission rate during 144 hours operation under OCV and dry condition at anode.

의한 영향이 큼을 보인 것이다. MEA 성능 감소 원인은 전극과 막을 들 수 있는데 전극의 백금층은 상대습도가 높은 조건에서 입자성장이 있어 성능을 감소시킬 수 있지만[10] 저가습 조건에서는 별 문제가 없어 전극에 의한 영향은 미미하다 할 수 있다.

고분자 막 사슬에서 끊겨져 나온 불소이온의 농도를 cathode condenser의 응축수에서 분석하였다(Fig. 7). 시간이 경과함에 따라 불소이온 농도가 증가 즉 막 열화속도가 가속화됨을 보인다. 따라서 gas crossover의 증가는 고분자 사슬이 끊어지면서 생긴 공간(pin hole) 때문이라고 생각할 수 있다. 위 세 결과를 종합해보면 OCV/저가습 조건에서 고분자 사슬이 끊겨 gas crossover가 발생하고 이로 인해 MEA 성능이 감소했다. 그러면 왜 OCV, 저가습 조건에서 막 열화가 잘 되는지 잘 알려진 고분자 막의 열화 메커니즘 즉 과산화수소/라디칼에 의한 막 열화 메커니즘을 토대로 검토해보고자 한다.

먼저 OCV 조건에서 막 열화가 잘되는 이유를 검토해 보았다. OCV 조건에서는 수소와 산소가 사용되지 않기 때문에 높은 수소와 산소 분압에 의한 가스의 막 투과가 유리하다. 막을 통과해 수소와 산소가 촉매상에서 만나야 라디칼이나 과산화수소가 생성되므로 두 기체의 막 투과가 중요한데 기체의 막 투과도는 기체의 분압에 비례하므로 OCV 상태가 전류가 흐를 때보다  $H_2O_2$ /라디칼 생성에 유리하다. 실제로 Wang 등[11]의 실험에 의하면 전극이 접합되지 않은, 막과 가스켓이 접착된 부분에서 막 열화가 많이 일어난 경우가 있다고 보고되었는데 이 부분이 전극이 없어 반응이 일어나지 않아 OCV 상태와 같지 않았나 보고 있다.

PEMFC 운전 중 과산화수소의 발생 반응은 다음과 같다.



OCV 상태가 보통 0.95 V 이상이므로 전압으로 보았을 때 (1)의 반응이 잘 진행될 수 있다. 그러나 anode에서 수소 산화 반응이 일

어나지 않으므로 막을 통해 오는 수소이온이 없고 외부회로에서 전자가 공급되지 않기 때문에 이 반응은 잘 일어나지 않는다. (2)의 반응은 OCV에서 anode의 전압이 0 V 이므로 전압조건이 맞고, 백금과 결합한 수소가 막을 통해 넘어온 산소와 반응해 과산화수소의 생성이 가능하다. OCV 상태이므로 산소 분압이 높아 산소가 막을 잘 투과할 수 있고 백금과 결합한 수소는 산화 반응( $[PtH] \rightarrow H^+ + e^-$ )으로 가지 않으므로 (2) 반응은 잘 진행될 수 있다. 잘 알려진 막의 열화 메커니즘에서는 Fenton 반응식에 의해 과산화수소 형성 후 라디칼로 간다고 알려져 있으나  $[PtH] + O_2 \rightarrow HO_2 \cdot$  처럼 직접 라디칼로 반응이 진행돼 과산화수소 보다 강력한 라디칼에 의해 막 열화가 심하게 일어날 수 있다. 이렇게 생성된 라디칼은  $HO_2 \cdot + H^+ + e^- \rightarrow H_2O_2$  처럼 수소이온과 만나 과산화수소로 갈 수 있으나 OCV 조건에서는 프로톤 생성이 안 되므로 라디칼이 막 열화에 약한 과산화수소로 가지 않고 막을 직접 공격할 가능성이 높다.

이상을 종합해 보면 OCV 조건에서는 수소와 산소의 분압이 높아 가스의 crossover가 증가하고,  $[PtH]$ 가 산소라디칼을 형성하기 유리하며 이 산소라디칼이 과산화수소로 가지 않고 직접 막을 공격할 수 있는 조건이 되어 막 열화가 잘된다고 볼 수 있다.

다음으로 무가습/저가습에서  $H_2O_2$ /radical 발생이 유리한 점을 검토해보았다. 무가습/저가습 조건에서는 높은 수소 및 산소 분압에 의해 가스 투과가 유리하다. 수소와 공기가 가습기를 통과하지 않으면 cell 유입 가스 중 수소와 산소 농도(분압)가 높아지고 따라서 이들 가스의 막 투과도가 높아져  $H_2O_2$ /radical 형성이 잘 되게 된다. 예를 들어 70 °C(수증기압 : 31.16 kPa) 가습기를 통과한 수소의 분압은 70.17 kPa이지만 무가습으로 cell에 직접 유입될 경우 101.33 kPa 이어서 31.16 kPa 만큼 분압이 증가하게 된다. 그러나 막이 건조하게 되면 실제 가스 투과도는 감소한다[12]. Sakai 등에 의하면 물을 50 wt% 함유한 막에 비해 물이 완전히 없는 막의 산소 투과도가 약 10배 낮은 정도로 막 건조 정도가 가스 투과도에 미치는 영향은 크다. 따라서 위 두 가지 영향을 모두 고려할 때 무가습/저가습 조건에서 실제 가스 투과도는 감소했으리라 생각된다. 상대습도의 변화에 의해 촉매표면 상태가 변하고  $H_2O_2$ /radical 발생 속도 변화가능성이 있다. Fenton 등은 Pt/C 촉매와 PtCo/C 촉매의 FER을 30% RH와 100% RH에서 비교하였다[7]. 30% RH에서 PtCo/C 촉매의 FER 값이 Pt/C에 비해 약 1/2 이었다. 이것은 막의 열화가 RH에 따른 막의 성질 변화에 의한 것 보다 촉매의 영향이라는 것을 보여준 것이다. 그리고 RH에 따른 촉매 표면성질의 변화는 촉매형태에 더 많이 의존하는 것으로 잘 알려져 있다[13].

이상을 종합해 해보면 무가습/저가습에서 막 열화가 잘 되는 이유는, 상대습도가 낮으면 촉매 표면 상태가 산소라디칼을 많이 발생시킬 수 있는 조건이 된다고 라디칼 메커니즘으로 설명할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 막 내에 생성된 라디칼 농도가 막이 가습되었을 때와 비교해 상대적으로 높아질 수 있다.

### 3-3. OCV/cathode 무가습 운전

Fig. 8은 Fig. 6과 반대로 cathode를 무가습하고 anode는 가습 조건으로 실험한 결과다. Anode 무가습 실험에 비해 성능감소가 거의 무시할 만하다.

Fig. 9는 cathode 무가습 조건에서 수소 투과도를 측정한 것인데 수소 투과도 역시 처음과 큰 차이 없음을 보였다. Anode 무가습이 cathode 무가습에 비해 열화가 잘 된다는 것은 건조한 조건에서

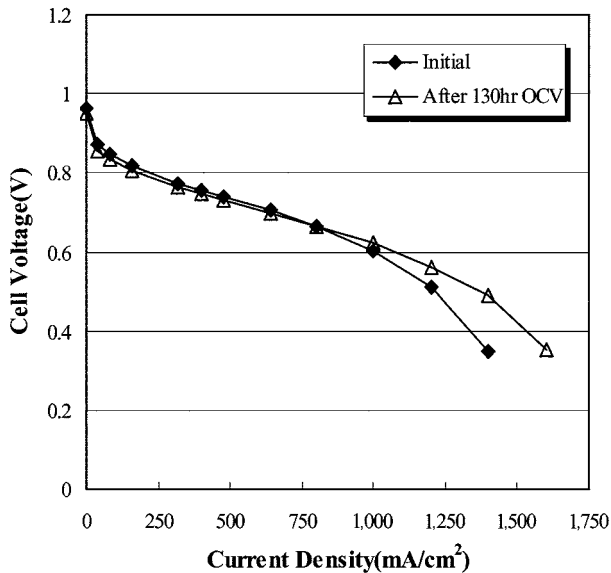


Fig. 8. I-V curves before and after 130 hours operation under OCV and dry condition at cathode.

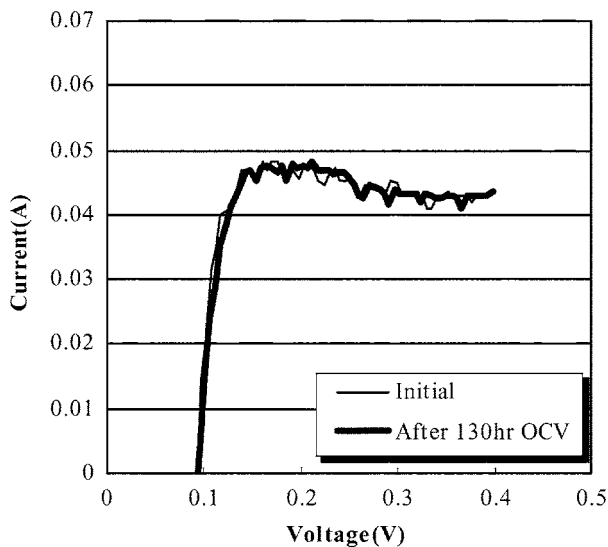


Fig. 9. Hydrogen crossover before and after 130 hours operation under OCV and dry condition at cathode.

anode의 백금 표면 변화에 의한 것과 수소 막 투과 영향을 들 수 있다. 무가습에 의한 분압 상승은 약 30~40% 정도이지만 무가습으로 인해 막이 건조되기 때문에 수소 투과가 유리하다고 할 수 없다. 그래서 anode의 백금표면에서 변화가 있어 백금과 수소원자가 결합하는 단계가 쉽게 이뤄졌기 때문이라고 생각할 수 있다. 그렇게 생각하면 anode에서 산소 라디칼이 직접 생성되는 아래의 반응에서



(3)번 단계가 전체 속도를 결정하는 율속단계(rate determining step)라고 보아지고 산소의 막 투과 속도나 산소와 [PtH]의 반응은

[PtH] 형성에 비해 빠르게 진행되는 것으로 생각된다. 그래서 산소 라디칼에 의한 막 열화 메카니즘이 맞다면, [PtH] 형성이 산소라디칼 형성반응의 율속단계(rate controlling step)라 할 수 있고 anode 무가습이 [PtH] 형성에 호조건이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

OCV/저가습 조건에서 고분자막 열화실험을 수행하고 그 결과를 산소라디칼/과산화수소 막 열화 메카니즘에 의해 검토하였다. 130 시간 anode 무가습/OCV 조건에서 운전한 결과 0.6 V에서 전류가 처음보다 약 30% 감소함을 보였다. 수소투과도도 증가하고 FER 값도 증가하여 성능 감소의 주요원인은 고분자 막의 열화에 의한 것으로 나타났다. Anode 무가습 조건이 cathode 무가습 조건보다 고분자막 열화가 잘 됨을 보였다. OCV/저가습 조건에서 고분자 막 열화가 잘 되는 것은 건조한 anode에서 Pt 촉매에 수소원자가 결합된 상태 즉 [PtH]로의 반응이 잘 일어나고 이 [PtH]가 OCV 조건에서  $\text{H}^+$ 로 가지 않고 과산화수소와 산소라디칼로 특히 산소라디칼로 갈 수 있는 조건이 되기 때문으로 사료된다.

#### 감 사

본 연구는 산업자원부의 수소연료전지 사업단 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Rittmar, V. H. and Eberle, U., "Fuel Cell Vehicles: Status 2007," *J. Power Sources*, **165**, 833-843(2007).
2. Cleghorn, S. J. C., Mayfield, D. A., Moore, J. C., Moore, D. A., Rusch, G., Sherman, T. W., Sisofo, N. T. and Beuscher, U., "A Polymer Electrolyte Fuel Cell Life Test: 3years of Continuous Operation," *J. Power Sources*, **158**(1), 446-454(2006).
3. Qiao, J., Saito, M., Hayamizu, K. and Okada, T., "Degradation of Perfluorinated Ionomer Membranes for PEM Fuel Cells during Processing with  $\text{H}_2\text{O}_2$ ," *J. Electrochem. Soc.*, **153**(6), A967-A974 (2006).
4. Zhang, L. and Mukerjee, S., "Investigation of Durability Issues of Selected Nonfluorinated Proton Exchange Membrane for Fuel Cell Application," *J. Electrochem. Soc.*, **153**(6), A1062-A1072(2006).
5. Laconti, A. B., Hamdan, M. and McDonald, R. C. (Eds.), "Ch.49 Mechanism of Membrane Degradation," *Handbook of Fuel Cells vol.3*, John Wiley & Sons, New York, 647-662(2003).
6. Mittal, V., Kunz, H. R. and Fenton, J. M., "Is  $\text{H}_2\text{O}_2$  Involved in the Membrane Degradation Mechanism," *Electrochem. and Solid-State Letters*, **9**(6), A299-A302(2006).
7. Mittal, V., Kunz, H. R. and Fenton, J. M., "Effect of Catalyst Properties on Membrane Degradation Rate and Underlying Degradation Mechanism in PEMFCs," *J. Electrochem. Soc.*, **153**(9), A1755-A1759(2006).
8. Liu, W. and Zuckerbrod, "In Situ Detection of Hydrogen Peroxide in PEM Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **152**(6), A1165-A1170(2005).
9. Endoh, E., Terazono, S., Widjaja, H. and Takimoto, "Degradation

- tion Study of MEA for PEMFCs under Low Humidity Conditions," *Electrochem. and Solid-State Letters*, **7**(7), A209-A211(2004).
10. Xie, J., Wood III, D. L., Wayne, D. M., Zawodzinski, T. A., Atanassov and Borup, R. L., "Durability of PEFCs at High Humidity Conditions," *J. Electrochem. Soc.*, **152**(1), A104-A113(2005).
  11. Wang, H. and Capuano, G. A., "Behavior of Raipore Radiation-Grafted Polymer Membranes in  $H_2/O_2$  Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **145**(3), 780-784(1998).
  12. Sakai, T., Takenaka, H., Wakabyashi, N., Kawami, Y. and Torikai, E., "Gas Permeation Properties of Solid Polymer Electrolyte(SPE) Membranes," *J. Electrochem. Soc.*, **132**(6), 1328-1332 (1985).
  13. Murthi, V. S., Urian R. C. and Mukerjee, S., "Oxygen Reduction Kinetics in Low and Medium Temperature Acid Environment: Correlation of Water Activation and Surface Properties in Supported Pt and Pt Alloy Electrocatalysts," *J. Phys. Chem. B*, **108**, 11011-11023(2004).