

## PEMFC 고분자막의 화학적인 열화에 의한 두께 감소 보정이 성능 및 내구성에 미치는 영향

오소형 · 김유진 · 이승태 · 유동근 · 박권필<sup>†</sup>

순천대학교 화학공학과

57922 전남 순천시 매곡동 315

(2023년 8월 17일 접수, 2023년 12월 7일 수정본 접수, 2023년 12월 21일 채택)

## Effect of Compensation for Thickness Reduction by Chemical Degradation of PEMFC Membrane on Performance and Durability

Sohyeong Oh, Yoojin Kim, Seungtae Lee, Donggeun Yoo and Kwonpil Park<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922, Korea

(Received 17 August 2023; Received in revised form 7 December 2023; Accepted 21 December 2023)

### 요 약

상용차용 수소 전기 차량 수요가 증가하면서 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC) 내구성은 승용차용보다 5배 이상 증가해야 하므로 내구성 향상 연구개발이 시급한 상황이다. PEMFC 막전극접합체 (MEA)가 화학적 열화가 진행되면 MEA 두께가 감소하고 핀홀이 발생하기도 한다. 본 연구에서는 화학적 열화 가속 실험인 개회로전압 (OCV) holding 후에 단위전지의 체결압을 상승시키면서 MEA의 성능 및 내구성의 변화를 측정하였다. 체결압이 상승하면서 고분자 막의 저항과 막/전극 접촉저항이 감소하여 I-V 성능이 향상되었고, 수소투과도가 감소하였다. 수소투과도 감소에 따라 OCV는 증가하였다. 핀홀 부위를 제거하고 MEA 체결압을 증가시켰을 때 수소투과도가 급감하여 국부적인 열화가 전체 셀의 성능과 내구성에 미치는 영향이 큼을 확인하였다. 핀홀 부위 제거 후 재체결하고 OCV holding 평가를 하였을 때 막 저항과 수소투과도 감소에 따라 내구성이 향상됨을 확인하였다.

**Abstract** – As the demand for hydrogen electric vehicles for commercial vehicles increases, the durability of PEMFCs must increase more than five times that of passenger cars, so research and development to improve durability is urgent. When the PEMFC membrane electrode assembly (MEA) undergoes chemical degradation, the MEA thickness decreases and pinholes occur. In this study, changes in the performance and durability of the MEA were measured while increasing the clamping pressure of the unit cell after open circuit voltage (OCV) holding, an accelerated chemical degradation experiment. As the clamping pressure increased, the resistance of the polymer membrane and the membrane/electrode contact resistance decreased, improving the I-V performance and reducing the hydrogen permeability. As the hydrogen permeability decreased, the OCV increased. When the pinhole area was removed and the MEA clamping pressure was increased, the hydrogen permeability decreased sharply, confirming that the local degradation has a large effect on the performance and durability of the entire cell. When the pinhole was removed and re-clamping and OCV holding was evaluated, it was confirmed that the durability improved according to the decrease in membrane resistance and hydrogen permeability.

Key words: PEMFC, Membrane degradation, Thickness decrease, Clamping pressure, OCV holding

### 1. 서 론

최근에 국내외에서 수소에너지 시대를 맞이하여 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 실용화 및 시장 확대에 박차를 가하고 있다

[1-5]. PEMFC의 핵심 요소인 고분자 막은 이온전도체, 양쪽 전극의 가스 차단, 양쪽 전극 간 직접 전자이동 저지 등의 역할을 한다. PEMFC의 고분자막의 연구개발 동향은 고분자막의 두께를 얇게 하고 내구성을 향상시키는 방향으로 진행되고 있다. 상용차용 수소 전기 차량 수요가 증가하면서 PEMFC 내구성은 승용차용보다 5배 이상 증가해야 하므로 내구성 향상 연구개발이 시급한 상황이다[6].

전해질막의 열화는 화학적 열화, 기계적 열화로 크게 분류된다 [6]. 화학적 열화는 셀 내에서 발생한 라디칼/과산화수소가 고분자 막을 공격해 막이 열화되는 것을 말한다[7,8]. 그리고 가습/건조에

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: parkkp@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의해 막이 팽창/수축하면서 e-PTFE 지지체와 이오노머에 핀홀과 크랙이 발생하는 기계적 열화에 의해 수소투과도가 증가한다.

전극 촉매 열화는 전극 촉매 Pt의 입자 크기가 커져 활성면적이 감소하는 것이다. 촉매 입자의 크기 성장에 대한 메커니즘은 1) 작은 백금 입자가 이오노머 상에서 용해되어 큰 입자 위에 석출되어 입자가 성장한다는 Ostwald ripening 메커니즘[9], 2) 카본 지지체 상에서 random cluster-cluster 충돌에 의해 백금 입자의 덩어리(agglomeration)가 발생한다는 메커니즘[10], 3) Cluster의 Gibbs 자유 에너지를 최소화하기 위해 백금 입자가 성장한다는 메커니즘[11]이 있다. 전극 입자 성장은 상대습도가 높고 전압 변화(부하 변화)가 있는 조건에서 잘 일어난다. 촉매 지지체 열화는 카본이 고전압에서 수분과 반응하여 산화되어 CO<sub>2</sub>로 소실되는 메커니즘에 의한[12]. 이오노머 바인더의 열화는 고전압에서 라디칼에 의한 고분자막의 주사슬과 결사슬의 열화에 의한다고 알려져 있다[13,14].

고분자막이 화학적으로 열화되면 막 두께가 얇아지고 국부적으로 핀홀이 발생해 수소투과도가 증가한다. 전극층에서도 Pt 촉매와 카본 지지체가 열화되어 전극층의 두께가 감소해 전체 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)의 두께가 감소한다. 막의 두께가 얇아지는 현상이 대표적인 MEA 두께 감소의 원인이라고 할 수 있다. MEA 두께가 얇아지면 분리판은 처음 체결압에 의해 고정된 상태로 있게 되어 MEA에 가해지는 압력이 감소하게 된다. 즉 접촉저항이 커지게 되어 성능이 감소할 수 있다. 그래서 화학적으로 열화된 MEA에 체결압을 높이게 되면 접촉저항이 감소하고 막의 밀도가 증가해 수소투과도가 감소할 수 있다. 본 연구는 화학적으로 열화된 PEMFC 단위전지의 체결압을 향상시키면 성능과 내구성이 향상되는지 확인하는 연구를 진행하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 고분자막 화학적 가속 내구 평가 및 열화 MEA 보정

내구 평가에 사용한 고분자막은 Nafion 211로 두께가 25  $\mu\text{m}$ 인 단일막과 데칼 방법으로 제조한 전극층을 hot pressing 하여 전극면적이 25  $\text{cm}^2$ 인 MEA를 준비하였다. 이때 anode와 cathode 전극 촉매는 모두 Pt/C이며, Pt 함량은 양쪽 각각 0.4  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 였다. MEA와 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL)을 5채널 분리판 셀(CNL Energy, Korea)에 80 토크( $\text{kgf}\cdot\text{cm}$ )로 체결하였으며, 스테이션(CNL Energy, Korea)에서 온도와 습도, 가스 유량 등을 제어하여 MEA의 성능 및 내구 평가를 진행하였다.

고분자막의 전기화학적 내구 평가 방법인 개회로전압(Open Circuit Voltage, OCV) holding을 cell 온도 90  $^{\circ}\text{C}$ , anode 상대습도(Relative Humidity, RH) 10%, cathode RH 30% 조건에서 수소 829  $\text{mL}/\text{min}$ 과 산소 829  $\text{mL}/\text{min}$ 을 각각 anode와 cathode에 주입하여 가속 내구 평가를 진행하였다. OCV holding 진행 시 중간마다 활성화 후 I-V, 순환 전압-전류법(Cyclo-Voltammetry, CV), 선형 주사 전압-전류법(Linear sweep voltammetry, LSV)의 측정을 통해 MEA의 성능을 확인하고 OCV holding을 반복하였다. 또한 OCV holding 24시간마다 응축수를 채취하여 TISAB (Total Ionic Strength Adjuster Buffer) 용액과 1:1 비율로 혼합한 후 ISE Meter (Ion Selective Electrode Meter, PH-250L, ISTEK, Inc.)로 분석하여 불소유출속도(Fluorine Emission Rate, FER)도 측정하였다.

화학적 열화 후 감소된 막 두께를 보정하기 위해 토크 렌치로 단

위전지 체결압을 증가시키며 성능 및 막과 전극 특성 변화를 측정하였다. 열화가 심하게 진행되어 가스 입출구 부위에서 핀홀과 shorting이 발생해 전체 성능을 급감시키는데, 이 부위를 절단한 후 MEA를 재체결하여 성능과 내구성을 평가하는 실험도 하였다.

### 2-2. MEA 성능 및 특성 분석

본 실험에서 모든 성능 측정은 cell 70  $^{\circ}\text{C}$ , RH 100%에서 진행하였으며, I-V 성능 곡선은 anode 1.5 stoichiometry (stoi.), cathode 2.0 stoi. 조건으로 측정하였다. 전극활성면적(Electrochemical Surface Area, ECSA)은 potentiostat (Solatron, SI 1287)을 이용한 CV 방법으로 분석하였다. CV는 anode와 cathode에 각각 수소(40  $\text{mL}/\text{min}$ )와 질소(200  $\text{mL}/\text{min}$ )를 공급하고, scan rate는 30  $\text{mV}/\text{sec}$ 로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하는데, 14 cycles 후 측정된 값을 택했다. 수소투과전류밀도(Hydrogen Crossover Current Density, HCCD)와 단락 저항(Short resistance, SR)은 potentiostat을 이용하여 NEDO[15] LSV 방법으로 측정해 비교하였다. NEDO LSV는 anode와 cathode에 각각 수소 200  $\text{mL}/\text{min}$ 와 질소 200  $\text{mL}/\text{min}$ 를 공급하고, scan rate는 0.5  $\text{mV}/\text{sec}$ 로 0.2~0.5 V 범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다. SR은 NEDO LSV 그래프의 0.4~0.5 V 사이 직선 기울기의 역수로 산출하였다. 막 저항과 접촉저항을 나타내는 고주파 저항(High Frequency Resistance, HFR)은 impedance analyser(Solatron, SI 1287)를 이용해 측정하였다. 임피던스 측정은 anode와 cathode에 각각 수소(93  $\text{mL}/\text{min}$ )와 공기(296  $\text{mL}/\text{min}$ )를 공급하고, DC current 1 A, AC amplitude 100 mA, frequency 100,000~0.1 Hz 범위에서 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 고분자 막 열화 후 두께 보정에 의한 성능변화

MEA의 두께 감소를 발생시키기 위해 OCV holding을 산소 조건으로 실시한 과정에서 OCV 변화와 LSV 변화를 Fig. 1에 표시하였다. OCV 변화 곡선에서는 144시간까지 큰 변화가 없어 비가역적 열화가 거의 진행되지 않았음을 보이다가 144시간 이후 OCV 변화가 심해져 비가역적 열화가 진행됨을 알 수 있다[16]. 특히 216시간 이후 OCV가 급감해 수소투과도와 short 전류가 급상승했다. Fig. 1(b)의 LSV는 216시간까지 거의 변동이 없다가, OCV holding을 종료한 228시간에 4.3  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 급상승했고, LSV 기울기가 증가해 short 저항이 급감했음을 보이고 있다.

Fig. 2에 고분자막 화학적 가속 내구 평가 과정에서 I-V 성능 곡선 변화와 CV 변화를 나타냈다. I-V 성능 곡선에서 216시간 이후 성능이 급감한 것을 볼 수 있다. 전극의 활성을 나타내는 CV 상에서도 216시간 CV가 촉매 활성면적이 감소하고, SR이 감소한 기울어진 형태를 나타냈다. 고분자막의 화학적 열화 프로토콜이지만, 전극도 열화되어 전극층의 두께도 감소해서 이를 보정해주면 막과 전극의 계면에서 접촉저항도 감소해 성능개선에 도움이 될 것을 보인 것이다.

OCV holding 후 셀 체결압을 증가시키면서 OCV와 HFR 그리고 HCCD를 측정해 Fig. 3에 비교하였다. 체결압이 95토크로 증가함에 따라 OCV가 상승하였다. 수소투과도가 감소하면서 OCV가 감소하였다고 판단된다. 화학적 열화가 진행되면 막 내부에서 고분자 클러스터의 빈 공간이 발생되고 포화수증기가 채워질 수 있는 부피가

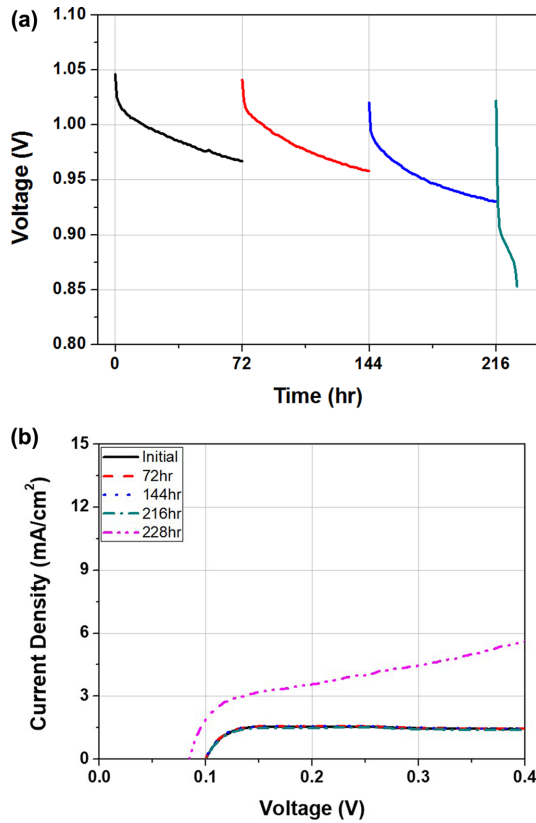


Fig. 1. Changes of a) OCV b) linear sweep voltametry (LSV) during OCV Holding.

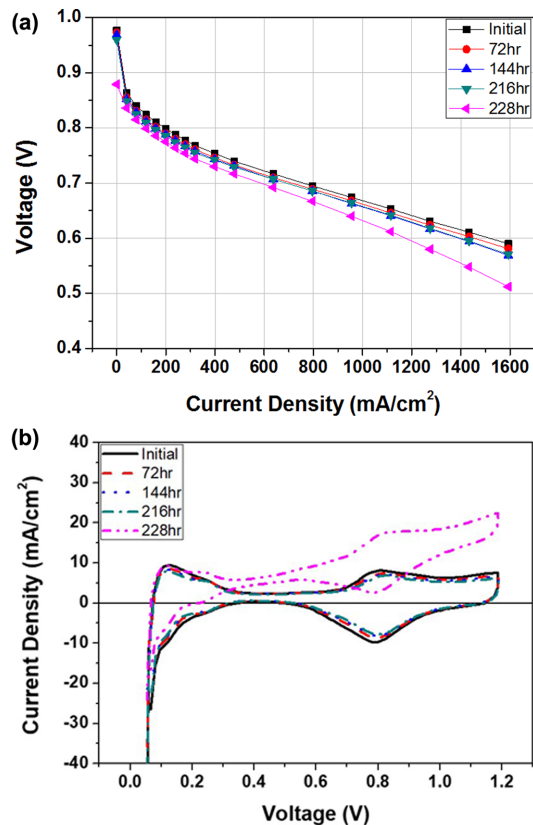


Fig. 2. Variation of a) I-V curves b) cyclo voltametry (CV) during OCV holding.

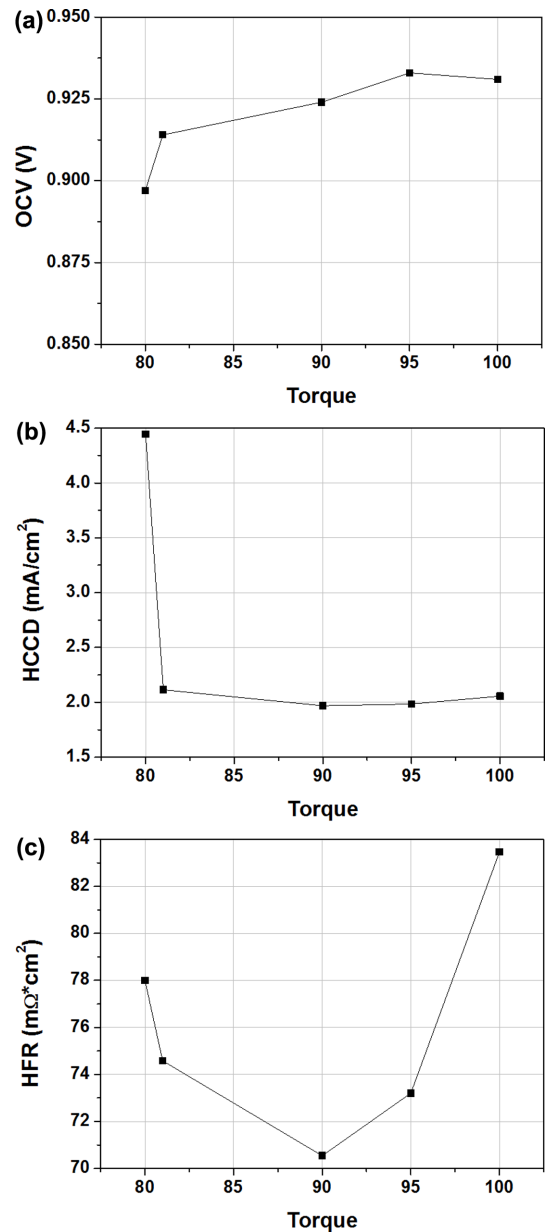


Fig. 3. Variation of a) OCV b) hydrogen crossover current density (HCCD) c) high frequency resistance(HFR) as a function of clamping pressure after OCV Holding.

커져 수소투과도가 증가하였다고 본다. 수소투과도는 수소의 용해도와 수소의 확산계수의 곱인데 수소의 용해된 양이 증가해서 수소투과도가 증가한 것이다[17]. 그런데 체결압이 증가하면 포화수증기가 들어갈 공간이 작아지면서 수소투과도가 감소한 것이다. 체결압이 90토크까지 증가하면서 HFR 값은 감소하였다. 체결압이 증가하면서 막 두께도 감소하고 전극과 막간의 접촉저항도 감소하였기 때문이다. 그런데 체결압이 90토크 이상에서는 체결압이 증가하면서 HFR이 증가하였다. 이와 같은 현상은 체결압이 높아지면서 전극과 전극 사이가 가까워지면서 SR이 감소한 효과라고 판단된다. SR이 감소하여 short 전류가 커지면 임피던스 분석 시 부하전달저항(Charge Transfer resistance, CTR)이 감소하고 HFR이 증가하는 현상 등이 나타나는 경우라고 본다[18].

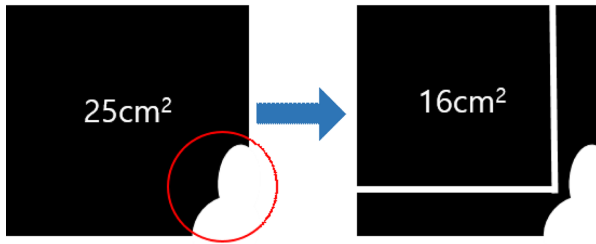


Fig. 4. Schematic diagram of MEA cut off after OCV Holding.

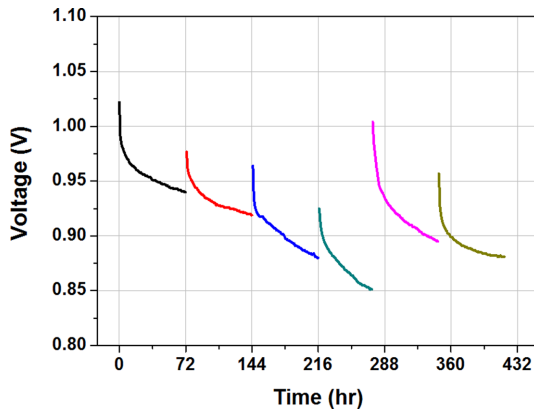


Fig. 5. Changes of OCV during OCV Holding with MEA cut off and increase of clamping pressure.

### 3-2. 열화 부위 제거/체결압 증가 후 성능 및 내구성

OCV holding 270시간 후에 열화가 심하게 발생한 부위를 제거하고 MEA를 재체결하였다(Fig. 4). 이 때 체결압은 90토크로 하였고 OCV holding을 다시 실시했을 때 전후 전압변화를 Fig. 5에 나타냈다. 재체결하기 전까지 비가역 열화가 누적되어 OCV가 0.85 V까지 감소하였다. 이 상태에서 아무 조치 없이 OCV holding 계속 진행하였으면 shorting에 의해 MEA가 연소됐을 것으로 예상된다. 열화 집중 부위를 절단하고 90토크로 체결하고 OCV holding을 시작했을 때 초기 전압이 1.0 V 이상으로 회복되었다. 체결압 상승에 의한 수소 투과도의 감소와 short 저항이 작은 부위의 제거가 OCV를 증가시켰다고 본다. 재체결 후 72시간 OCV holding 했을 때 OCV가 0.9 V 이하로 감소하지 않았고 성능 측정과 활성화 후 OCV가 0.95 V 이상으로 회복되었다. 열화가 심한 부위가 전체의 성능을 좌우함을 보였고, 나머지 부분도 체결압을 높이므로써 두께 감소에 의한 성능 감소를 보완할 수 있었다.

Fig. 6은 OCV holding 과정에서 FER 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 anode 쪽 유출수 중 불소의 농도가 cathode 쪽보다 더 높은 것은 cathode의 RH가 더 높아서 고분자막에서 유리된 불소 이온이 anode로 확산되기 때문이라고 판단한다. FER이 증가하다 성능 분석과 활성화 후 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 막 내부에 석출된 Pt 입자들이 라디칼을 생성하는 분포에서 라디칼을 제거하는 분포로 변했기 때문이라고 본다. Pt 입자가 가까이 모이는 분포가 되면 Pt 상에서 생성된 라디칼이 고분자를 공격하기 전에 바로 옆의 Pt 입자에 의해서 제거된다고 하였다[19]. 열화된 부위를 제외시키고 90토크로 체결 후 FER이 급감했는데 편환이 발생하고 short 저항이 1.0 kΩ cm² 이하로 낮은 부위에서 수소투과도도 높고 온도도 상승하여 라디칼 발생속도가 급상승했을 것으로 보고, 이 부

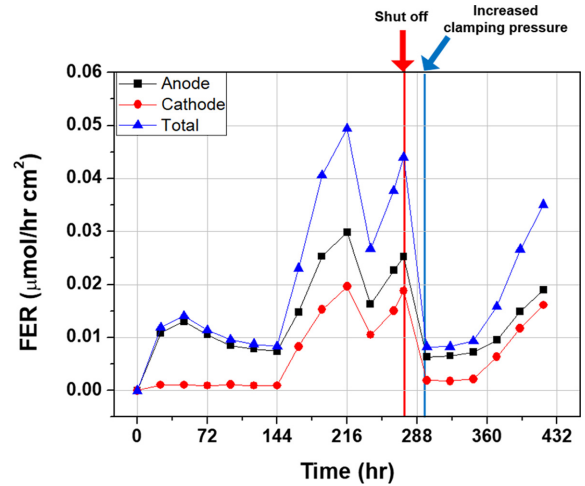


Fig. 6. Changes of fluorine emission rate (FER) during OCV Holding with MEA cut off and increase of clamping pressure.

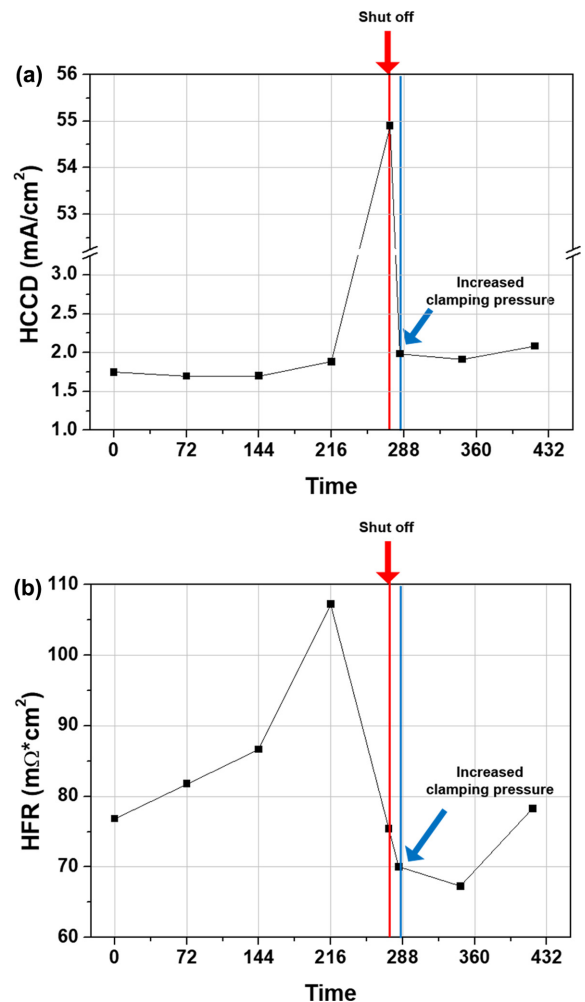


Fig. 7. Changes of a) HCCD b) HFR during OCV Holding with MEA cut off and increase of clamping pressure.

위를 제거한 효과가 큰 것으로 판단한다. 그리고 열화된 막에 압력이 가해지면서 막 내의 Pt 입자의 밀도가 높아져 Pt가 라디칼 제거제의 역할을 했기 때문이라고 본다.

OCV holding 중 HCCD와 HFR 변화를 Fig. 7에 나타냈다. OCV holding이 진행되면서 270시간까지 HCCD가 증가해서  $50 \text{ mA/cm}^2$  이상이 되었고 HFR이  $100 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  이상으로 증가함을 보이고 있다. HCCD는 핀홀 부위를 절단하고 재체결했을 때 약  $2 \text{ mA/cm}^2$ 로 감소했다. 수소투과도가 급증한 것은 핀홀이 발생한 부분에서 주로 가스 투과가 높은 것이라고 볼 수 있고, 나머지 부분에서도 수소투과도가 높아졌는데 체결압을 90토크로 높여서 수소투과도가 Fig. 3 b)처럼 되었다고 본다. 이후 OCV holding을 420시간까지 진행했을 때 HCCD가 약간 증가해서 재체결하여 내구성이 향상된 것을 확인하였다. OCV holding이 진행되면서 216시간까지 HFR이 증가함을 보이고 있는데, 라디칼 공격에 의해 슬론산기가 감소되고 전극과 막간의 계면 저항도 증가해 HFR이 증가했다고 판단된다. 열화 후 절단하고 90토크로 체결하고 OCV holding 하였을 때 HFR은 초기보다 더 감소했는데 이것은 막 열화에 의해 막 두께가 감소한 효과가 반영되었기 때문이다. 화학적 열화에 의해 슬론산기 양은 줄어들었지만 압력을 가해 부피가 줄어들면서 슬론산기의 밀도는 증가해 HFR이 감소한 측면과 가압에 의해 전극과 막의 접촉저항이 감소해 전체적으로 HFR이 초기보다 감소하였다고 판단한다. 이후 150시간 이상 OCV holding하여도 초기보다 HFR이 더 증가하지 않아 열화 후 MEA 가압에 의한 효과가 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

화학적 가속 내구성 평가과정인 OCV holding 후 열화된 PEMFC 단위전지의 체결압을 향상시키면 성능과 내구성이 향상되는지 연구한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

OCV holding 228시간 후에 HCCD가  $4.3 \text{ mA/cm}^2$ 로 열화된 MEA에 셀 체결압을 증가시키며 특성 변화를 측정하였다. 체결압이 증가하면서 OCV가 상승하고 수소투과도는 감소하였고, HFR도 감소하는 경향을 보였다. 열화에 의해 고분자 막의 밀도가 낮아진 상태에서 체결압을 높이면 막의 밀도가 상승해 수소투과도가 감소하였고, 수소투과도 감소에 따라 OCV는 증가하였다. 체결압이 증가하면서 막과 전극간 접촉저항 감소에 의해 HFR이 감소하였다.

OCV holding 후 shorting이 발생한 부위를 제외시키고 MEA를 재체결하여 OCV holding을 다시 시작한 실험에서 MEA의 일부 부위 열화가 전체 수명을 좌우함을 확인하였다. Shorting 발생 부위를 절단하고 90토크로 재체결했을 때 두께 감소 효과에 의해 HFR이 34.7% 이하로 감소하였다. HCCD가  $50 \text{ mA/cm}^2$  이상이었던 고분자막이 90토크로 재체결하였을 때  $2.0 \text{ mA/cm}^2$ 이 되었고, 다시 OCV holding 가속열화에서도 HCCD가 급증하는 현상없이 내구성이 향상됨을 보였다.

#### 감 사

본 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(20011633).

#### Reference

1. Wang, G., Yu, Y., Liu, H., Gong, C., Wen, S., Wang, X. and Tu, Z., "Progress on Design and Development of Polymer Electro-

- lyte Membrane Fuel Cell Systems for Vehicle Applications: A Review," *Fuel Processing Technology*, **179**, 203-228(2018).
2. Department of Energy, <https://www.energy.gov/>(2016).
3. New Energy and Industrial Technology Development Organization, <http://www.nedo.go.jp/english/index.html>(2016).
4. Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform in the European Union, [www.HFP.europe.org](http://www.HFP.europe.org)(2016).
5. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, <http://www.most.gov.vcn/eng>(2016).
6. Marcinkoski, J., Vijayagopal, R., Adams, J., James, B., Kopasz, J., Kopasz and Ahluwalia, R., DOE Advanced Truck Technologies, Subsection of the Electrified Powertrain Roadmap, [https://hydrogen.energy.gov/pdfs/19006\\_hydrogen\\_class8\\_long\\_haul\\_truck\\_targets.pdf](https://hydrogen.energy.gov/pdfs/19006_hydrogen_class8_long_haul_truck_targets.pdf).
7. Wilkinson, D. P. and St-Pierre, J., in: W. Vielstich, H. A. Gasteiger, A. Lamm (Eds.). *Handbook of Fuel Cell: Fundamentals Technology and Applications*, Vol. 3, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 611-612(2003).
8. Collier, A., Wang, H., Yaun, X., Zhang, J. and Wilison, D. P., "Degradation of Polymer Electrolyte Membranes," *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**(13), 1838-1854(2006).
9. Watanabe, M., Tsurumi, K., Mizukami, T., Nakamura, T. and Stonehart, P., "Activity and Stability of Ordered and Disordered Co-Pt Alloys for Phosphoric Acid Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **141**(10), 2659-2668(1994).
10. Akita, T., Taniguchi, A., Maekawa, J., Siroma, Z., Tanaka, K., Kohyama, M. and Yasuda, K., "Analytical TEM Study of Pt Particle Deposition in the Proton-exchange Membrane of a Membrane electrode-Assembly," *J. Power Sources*, **159**(1), 461-467(2006).
11. Zhai, Y., Zhang, H., Xing, D. and Shao, Z., "The Stability of Pt/C Catalyst in  $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{PBI}$  PEMFC During High Temperature Life Test," *J. Power Sources*, **164**(1), 126-133(2006).
12. Sharma, R. and Andersen, S. M., "An Opinion on Catalyst Degradation Mechanisms During Catalyst Support Focused Accelerated Stress Test (AST) for Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs)," *Applied Catalysis B: Environmental*, **239**, 636-643(2018).
13. Kaddouri, A. E., Flandin, L. and Bas, C., "Chemical Degradation of PFSA Ionomer Binder in PEMFC's Catalyst Layer," *Int. J. Hydrogen Energy*, **43**, 15386-15397(2018).
14. Morawietz, T., Handl, M., Oldani, C., Gazdzicki, P., Hunger, J., Wilhelm, F., Blake, J., Friedrich, K. A. and Hiesgen, R., "High-Resolution Analysis of Ionomer Loss in Catalytic Layers after Operation," *J. of Electrochem. Soc.*, **165**(6), F3139-F3147(2018).
15. Daido University, Ritsumeikan Univ., Tokyo Institute of Technology, Japan Automobile Research Ins., "Cell Evaluation and Analysis Protocol Guideline," NEDO, Development of PEFC Technologies for Commercial Promotion-PEFC Evaluation Project, January 30(2014).
16. Yoo, D. G., Hwang, B. C., Oh, S. H. and Park, K. P., "Acceleration of Electrolyte Membrane Degradation by Frequent Activation in PEMFC Electrochemical Durability Evaluation," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(8), 2004-2009(2023).
17. Barbir, F., "PEM Fuel Cells: Theory and Practice," Elsevier Academic Press, San Diego, 2005.
18. Oh, S. H., Gwon, J. H., Lim, D. H. and Park, K. P., "Study on the Short Resistance and Shorting of Membrane of PEMFC,"

*Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(1), 6-10(2021).

19. Ohma, A., Suga, S., Yamamoto, S., Shinohara., "Membrane Degradation Behavior during Open-Circuit Voltage Hold Test," *J. Electrochem. Soc.*, **154**(8), B757-B760(2007).

#### Authors

**Sohyeong Oh:** Researcher, Fuel Cell Test and Evaluation Center, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; ohso45@naver.com

**Yoojin Kim:** Bachelor's, Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; yuzin1127@naver.com

**Seungtae Lee:** Researcher, Fuel Cell Test and Evaluation Center, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; tmdxo33@gmail.com

**Donggeun Yoo:** Doctor's course, Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; ehdrms6832@gmail.com

**Kwonpil Park:** Professor, Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; parkkp@snu.ac.kr