

고분자 전해질 연료전지에서 박막의 화학적 내구성 평가

오소형* · 유동근* · 정성기** · 정지홍** · 박권필*,†

*순천대학교 화학공학과
57922 전남 순천시 매곡동 315
**㈜상아프론테크 연구개발부2
21629 인천광역시 남동구 남동대로 369번길 18
(2023년 5월 30일 접수, 2023년 7월 12일 수정본 접수, 2023년 7월 13일 채택)

Chemical Durability Test of Thin Membrane in Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Sohyeong Oh*, Donggeun Yoo*, Sunggi Jung**, Jihong Jeong** and Kwonpil Park*,†

*Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922, Korea
**SANG-A FRONTECH CO.Ltd, 369 Route 18, Namdong-ro, Namdong-gu, Incheon, 21629, Korea
(Received 30 May 2023; Received in revised form 12 July 2023; Accepted 13 July 2023)

요 약

최근 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)에서 고분자 막의 연구개발은 가격 저감과 성능 향상을 위해 박막화하는 방향으로 진행되고 있다. 그리고 상용차용 수소 전기 차량 수요가 증가하고 있는데, 승용차용보다 내구성이 5배 증가해야 한다. 막의 두께가 얇아짐에도 불구하고 내구성은 5배 증가해야 하므로, 막의 내구성 향상이 더 중요해진 상황이다. 가속 내구 평가 시간도 단축해야 하기 때문에 기존 프로토콜에서 공기 대신 산소를 사용한 프로토콜을 10 μm 박막에 적용해 내구성을 평가하였다. 가속 내구 평가(개회로 전압 유지)는 720시간에 종료하였다. 공기를 사용한 미국 에너지부(DOE) 프로토콜을 사용했다면 약 1,500시간의 내구성으로 운전시간 450,000 km 수명을 예상한다. 화학적 내구 평가 중에 전극의 활성 면적이 51% 감소해 촉매 열화가 막 내구성 약화에 영향을 준 것으로 판단되고, 촉매 열화 속도를 감소시키면 막 내구성이 증가할 것으로 예상된다.

Abstract – Recently, research and development of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) membranes are progressing in the direction of thinning to reduce prices and improve performance. Demand for hydrogen-powered vehicles for commercial vehicles is also increasing, and their durability should be five times greater than those for passenger vehicles. Despite the thinning of the membranes, the durability of the membranes must be increased five times, so the improvement of the durability of the membranes has become more important. Since the acceleration durability evaluation time also needs to be shortened, the protocol using oxygen instead of air in the existing protocol was applied to a 10 μm thin membrane to evaluate durability. The accelerated durability test (Open circuit voltage holding) was terminated at 720 hours. If the air-based department of energy (DOE) protocol was used, a lifespan of 450,000 km of driving hours would be expected, with a durability of about 1,500 hours. During the chemical durability evaluation, the active area of the electrode decreased by 51%, suggesting that catalyst degradation had an effect on membrane durability. Reducing the catalyst degradation rate is expected to increase membrane durability.

Key words: PEMFC, Thin membrane, OCV holding, Chemical durability, Membrane degradation

1. 서 론

최근 고분자 전해질 연료전지(Proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)에서 고분자 막의 연구개발은 가격을 저감시키고 성

능을 향상시키기 위해 박막화(Thinning)하는 방향으로 가고 있다. 미국의 에너지부(Department of energy, DOE)의 160 kW급 중형 수소 전기 트럭용 고분자 막의 2025년 막 두께 목표는 10 μm 이며, 막 가격은 196 \$/Stack (100,000대 생산시)이다[1]. 막 두께가 얇아지면 이온전도도가 증가하는 장점은 있지만, 수소투과도가 증가해 내구성이 감소하는 단점이 있다. 이와 같은 상황에서도 DOE의 중형 수소 전기 트럭의 목표 수명은 운전시간 25,000시간으로 수소 전기 승용차의 수명보다 5배 높다[1]. 이와 같이 높은 수명을 박막에서 달성하기 위해서는 수소 투과 저감제를 막에 첨가하여 수소투

† 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.

과도를 감소시켜 개회로 전압(Open circuit voltage, OCV)을 향상시키고[2], 라디칼 발생 속도를 감소시켜야 한다[3,4]. 그리고 라디칼 제거제(Scavenger)의 기능 향상과 확장형-폴리테트라플루오르에틸렌(expanded-Polytetrafluoroethylene, e-PTFE) 지지체의 내구성도 향상시켜야 한다[5-9].

수명이 5배가 되면 내구성 평가 시간도 5배가 되어야 하므로 기존의 승용차용 프로토콜에 의해 고분자 막의 전기화학적 내구성을 평가하기 위해서는 평가 시간이 2,500시간 약 5개월의 장시간이 소요되는 문제점이 있다. 그래서 목표 수명이 증가한 만큼 가속 내구 평가 프로토콜의 가속화도를 높인 프로토콜이 개발되어야 한다. 고분자 막의 전기화학적 열화는 고전압, 고온, 고가스압, 저가습 조건에서 열화 속도가 증가한다[8]. DOE의 고분자 막 전기화학적 내구성 가속 평가법은 OCV, 90 °C, 상대습도(Relative humidity, RH) 30%, 가스압 1.5 bar이다[10]. 전압과 온도는 PEMFC 운전 조건에서 가능한 최고 한계 값에 근접해 더 이상 높일 수 없는 조건이고, 가스압과 상대습도는 조절할 수 있다. 고가스압이 막 열화 속도가 증가하는 이유는 산소와 수소가 촉매 상에서 라디칼을 발생시키므로 가스압이 높아야 고분자 막을 열화시키는 속도가 증가하기 때문이다. 산소가 수소보다 막 내부에서 가스 투과도가 낮기 때문에 산소 가스압을 상승시키는 것이 더 효과적이다[11]. 저 가습 조건에서 고분자 막이 라디칼의 공격을 받아 열화되기 좋은 조건이어서[12] 상대습도를 DOE의 30%에서 본 연구 프로토콜은 10%로 감소시켰다.

본 연구에서는 개발 중인 10 μm 박막에 공기 대신 산소를 공급하고 상대습도를 10%로 감소시킨 고분자 막의 전기화학적 가속 내구 프로토콜을 적용해 박막의 내구성을 1,000시간 이내에 평가하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 고분자 막 전기화학적 가속 내구 평가

내구 평가에 사용한 고분자막은 이오노머 사이에 e-PTFE 지지체가 들어간 강화막(Reinforced membrane)으로 두께가 10 μm 박막(SANG-A FRON TEC, Co., Ltd)이다. 박막에 데칼 방법으로 제조한 전극 층을 hot pressing 하여 전극 면적이 25 cm^2 인 막전극집합체(Membrane and electrode assembly, MEA)를 준비하였다. 이때 anode와 cathode 전극 촉매는 모두 Pt/C이며, Pt 함량은 양쪽 각각 0.4 mg/cm^2 였다. MEA와 가스확산층(Gas diffusion layer, GDL)을 9채널 분리판(미세 유로) 셀(CNL Energy, Korea)에 50토크로 체결하였으며, 스테이션(CNL Energy, Co., Ltd)에서 온도와 습도, 가스 유량 등을 제어하여 MEA의 성능 및 내구 평가를 진행하였다.

고분자 막의 전기화학적 내구 평가 방법인 개회로 전압 유지(OCV holding)법으로, cell 90 °C, anode RH 10%, cathode RH 30% 조건에서 수소 347 mL/min과 산소 829 mL/min을 각각 anode와 cathode에 주입하여 가속 내구 평가를 진행하였다. OCV holding 진행 시 중간마다 활성화 후 I-V, 순환전압전류법(Cyclic voltammetry, CV), 선형전압전류법(Linear sweep voltammetry, LSV)의 측정을 통해 MEA의 성능을 확인하고 OCV holding을 반복하였다. 또한 OCV holding 24시간마다 응축수를 채취하여 불소 유출 속도(Fluorine Emission Rate, FER)도 측정하였다.

2-2. MEA 열화 분석

본 실험에서 모든 성능 측정은 cell 70 °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 mL/min)와 질소(200 mL/min)를 공급하고, scan rate는 30 mV/sec로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하는데, 14 cycles 후 측정된 값을 택했다. 수소투과전류밀도(Hydrogen crossover current density, HCCD)는 potentiostat을 이용하여 DOE LSV 방법으로 측정해 비교하였다. DOE LSV는 anode와 cathode에 각각 수소 40 mL/min과 질소 200 mL/min을 공급하고, scan rate는 1.0 mV/sec로 0.05~0.4 V 범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다. 단락 저항(Short resistance, SR)은 potentiostat을 이용하여 일본의 신에너지 산업기술 개발기구(New energy and industrial technology development organization, NEDO)[13] LSV 방법으로 측정해 비교하였다. NEDO LSV는 anode와 cathode에 각각 수소 200 mL/min과 질소 200 mL/min을 공급하고, scan rate는 0.5 mV/sec로 0.2~0.5 V 범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다. SR은 NEDO LSV 그래프의 0.4~0.5 V 사이 직선의 기울기 역수로 산출하였다.

화학적 내구 평가 전후 MEA의 단면을 Au 코팅하여 SEM(Scanning electron microscope, JSM-7610F plus, JEOL, Japan)으로 고분자 막과 전극층의 두께를 비교하였으며, beam 전위는 5 kV였다. e-PTFE 지지체의 화학적인 구조를 비교하기 위해 이소프로필 알코올(Isopropyl alcohol, IPA)을 이용하여 열화된 MEA의 전극층과 이오노머를 제거한 후 ATR(Attenuated Total Reflection)이 부착된 FT-IR(Fourier transform-infrared spectrometry, Nicolet iS 5, Thermo Scientific, MA, USA)으로 e-PTFE 지지체를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. OCV holding 과정에서 수소투과도와 short 저항 변화

OCV holding에 따른 박막의 HCCD는 720시간에 10.9 mA/cm^2 로 증가하여 막의 내구 평가를 종료하였다(Fig. 1). DOE 기준인 500시간을 초과하였다. OCV holding에서 사용한 cathode 가스는 공기가 아닌 산소를 사용해서 가속화도가 DOE 프로토콜보다 2배 이상되는 조건으로[14], DOE 프로토콜을 적용했으면 약 1,500시간을 달성했을 것으로 판단된다. 운전 거리로 환산하면 약 450,000 km이다.

내구성 평가에 기존의 DOE 프로토콜을 사용하지 않은 이유는 박막의 내구성이 높아 1,000시간 이상의 평가 시간이 소요될 것으로 예상되었기 때문이다. LSV 측정에 DOE와 NEDO 방법 모두를 사용한 이유는 막 내구성 평가과정에서 두 방법의 장단점이 있기 때문이다[10,13]. DOE 방법은 HCCD 측정에 적합하고 NEDO 방법은 SR 측정에 적합하다. DOE 방법에 의한 SR 측정은 양쪽 전극에 모두 질소를 유입 후 전압을 상승시키면서 short 전류를 발생시켜 전압-전류 직선 기울기로부터 구하는 방법으로 LSV 그래프로부터 구할 수 없다. 그러나 NEDO 방법은 LSV 그래프의 0.4~0.5 V 사이 직선의 기울기로부터 SR을 구할 수 있어 편리한 장점이 있다. 그렇지만 OCV holding 과정에서 NEDO 방법으로 HCCD를 구하는 것은 어려운 때가 많은데, 고분자 막이 열화가 심해지면 LSV 선이 변화가 심해 0.4~0.5 V 사이의 직선의 절편으로부터 HCCD를 구하기가 어

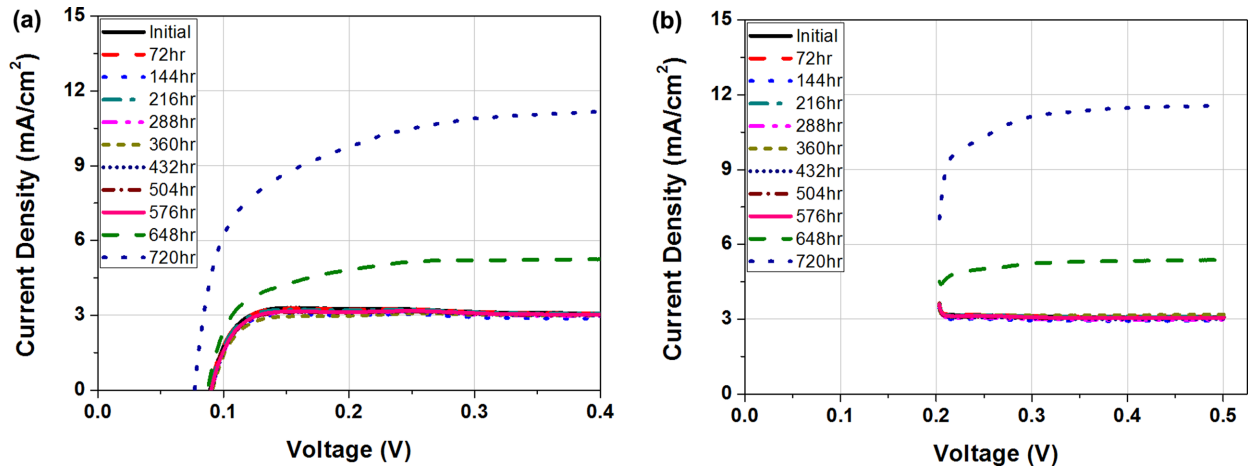


Fig. 1. Changes of linear sweep voltammetry by a) DOE method b) NEDO method, during OCV holding.

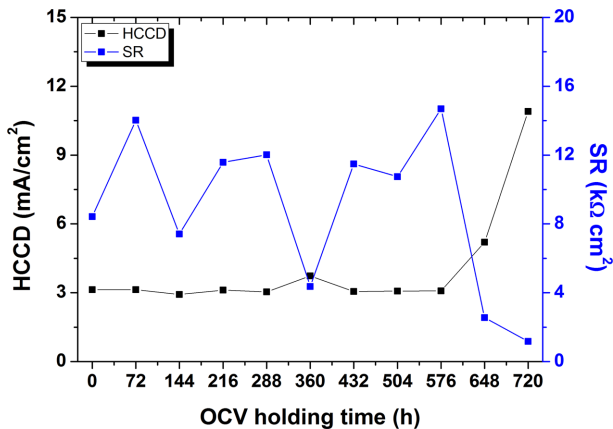


Fig. 2. Variation of hydrogen crossover current density and short resistance during OCV holding.

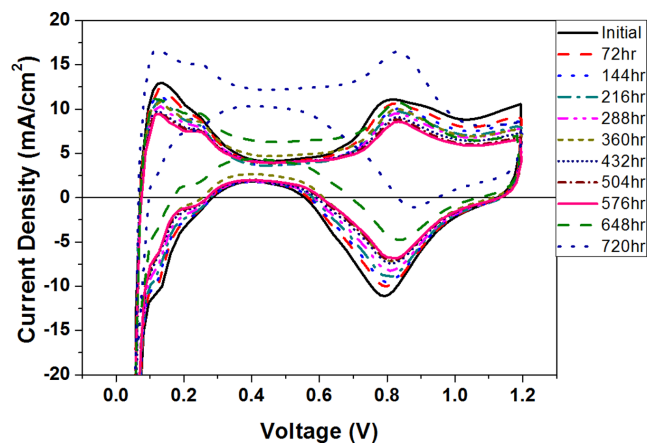


Fig. 3. Variation of cyclic voltammetry during OCV holding.

렵기 때문이다[15]. Fig. 2에 나타난 막막 SR은 초기 $8.42 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 에서 $1.17 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 감소되어 shorting 보다는 막의 두께 감소에 의해 열화됨을 알 수 있다. 막막이 되면서 전극 간의 거리가 가까워져 shorting이 발생할 가능성이 높아져 SR 감소에 주의하여야 한다[16]. $10 \mu\text{m}$ 의 막막에서 720시간까지 SR이 $1.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 이하가 되지 않은 것은 막막이 고내구성 막으로 갈 수 있는 가능성을 보여준 것이다. 특히 산소 조건에서 shorting이 잘 발생하는데 막막을 산소 조건에서 720시간 전자전달을 차단한 지지체와 이오노머의 결합이 좋은 결과라고 판단된다.

3-2. OCV holding 과정에서 전극 활성 면적 변화

OCV holding 과정에서 전극의 활성 변화를 볼 수 있는 CV와 ECSA 변화를 Fig. 3, 4에 나타냈다. CV 그래프에서 0.3 V 이하의 수소 탈착 피크 면적이 전체적으로 감소하고 HCCD가 증가하기 시작한 576시간 이후 CV 그래프가 위로 상승했으나 SR이 높아져 수평을 유지하고 있다. ECSA는 OCV holding이 진행되면서 일정 속도로 감소해서 720시간에 51%까지 감소했다. 이와같이 높은 ECSA 감소는 DOE의 전극 촉매 내구성 평가 기준 40%를 초과한 것으로, 막 내구성 평가에서 전극이 먼저 열화되어 내구성 평가를 종료해야 하는 문제점이 있다. 즉 DOE 프로토콜의 막 내구성 종료는

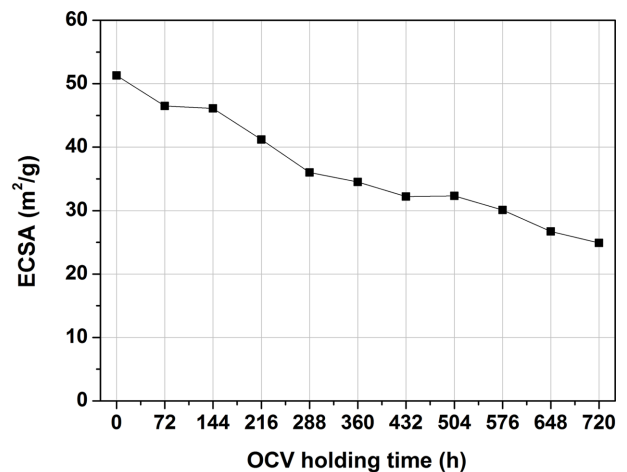


Fig. 4. Decrease of electro chemical surface area according to OCV holding.

HCCD 15 mA/cm^2 이상일 때인데 720시간에 10.9 mA/cm^2 이어서 촉매 열화 때문에(ECSA 감소 $>40\%$) 평가를 종료하였다. 막 내구성 평가 과정 중간 중간에 열화 정도를 확인하기 위해 활성화와 CV 측정 과정에서 전압변화 사이클을 반복한 것이 전극 촉매를 열화

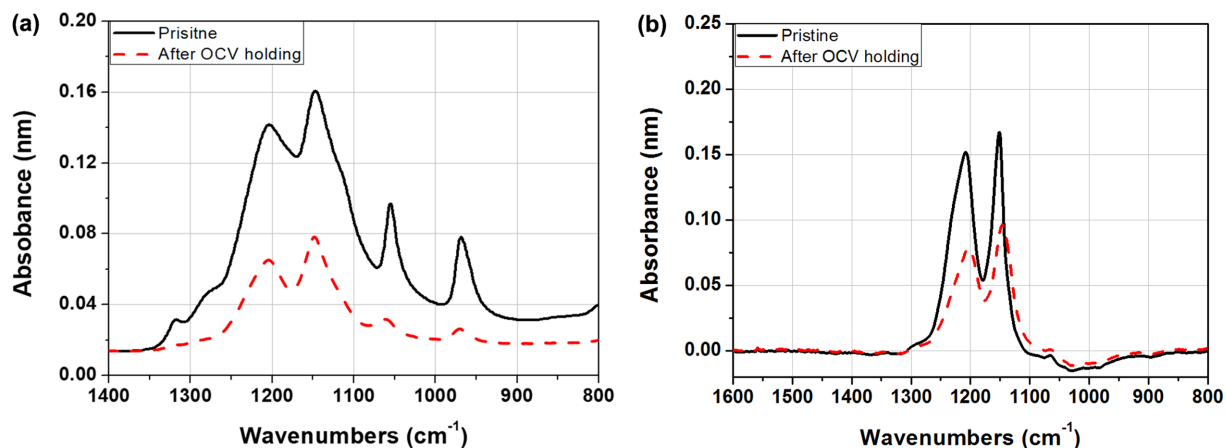


Fig. 5. Comparison of FT-IR before and after OCV holding a) surface of membrane b) e-PTFE support.

(용해/석출/성장)시킨 영향도 크다고 판단된다[17]. DOE 프로토콜에서는 24시간마다 성능을 측정하게 되어있지만, 이와같이 전극 열화를 발생시키므로 72시간마다 성능 측정해 총 11회 진행했는데도 ECSA 감소가 648시간에 40%를 초과했다. ECSA 감소는 막 내부에 석출된 Pt의 증가 → 라디칼 발생 속도 증가 → 막 열화 속도 증가로 이어져서 촉매 내구성이 더 좋았으면 박막의 내구성이 더 높을 수 있었음을 말하고 있다.

3-3. OCV holding 과정에서 이오노머와 지지체의 화학적 열화

OCV holding 720시간 종료 후 고분자 막의 이오노머와 e-PTFE 지지체의 화학적 변화를 FT-IR 분석해 Fig. 5에 나타냈다. 이오노머의 CF_2 피크와 SO_3 피크에서 모두 면적 감소가 크게 발생해서 이오노머의 주사슬과 결사슬에서 라디칼의 공격에 의해 열화가 발생했음을 확인했다(Fig. 5a). 지지체를 분리해 FT-IR을 분석한 결과에서도 이오노머와 비슷한 정도로 e-PTFE 지지체도 화학적 열화가 발생했음을 알 수 있다. 주사슬이 PTFE 구조인 이오노머와 e-PTFE 지지체 모두 AST 후 CF_2 피크($1,210\text{ cm}^{-1}$: stretching asymmetric, $1,148\text{ cm}^{-1}$: stretching symmetric) 감소가 많았다. 지지체를 이오노머와 분리시

키는 과정에서 지지체에 약간 묻어서 남은 이오노머 때문에 e-PTFE에 SO 피크($1,057\text{ cm}^{-1}$: stretching symmetric)가 약간 나타났으나 미미해서 그 영향을 무시할 만하다. PEMFC 고분자 막 열화 메커니즘 연구 초기에는 말단기 SO_3 에서 열화가 주로 발생하는 것으로 판단하였고[12], 그래서 SO_3 가 없는 지지체의 화학적 열화는 간과하였다고 할 수 있다. 이와같이 OCV holding 과정에서 기계적 내구성을 향상시키는 지지체가 화학적으로 열화되므로 화학적 열화와 기계적 열화를 병행시키는 가속 내구 평가 프로토콜에서 두 형태의 열화가 이오노머와 지지체에 모두 발생해 상승 효과에 의해서 가속 화도가 높아질 수 있음을 알 수 있다.

3-3. OCV holding 후 고분자 막과 cathode 두께 감소

OCV holding 720시간 종료 후 MEA 단면을 SEM 분석하여 Fig. 6에 비교하였다. 고분자 막의 두께가 초기 $10.3\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $7.82\text{ }\mu\text{m}$ 로 24.1% 감소하여 전기화학적 열화를 확인하였다. 중앙부에 위치한 e-PTFE 지지체 두께도 같은 비율로 감소하였음을 보인다. 이와 같은 고분자 막 두께 감소가 수소 투과도를 향상시켰고, 고분자 막 두께 감소는 고분자 막 내부에서 라디칼에 의한 막 열화를 직접 확인할

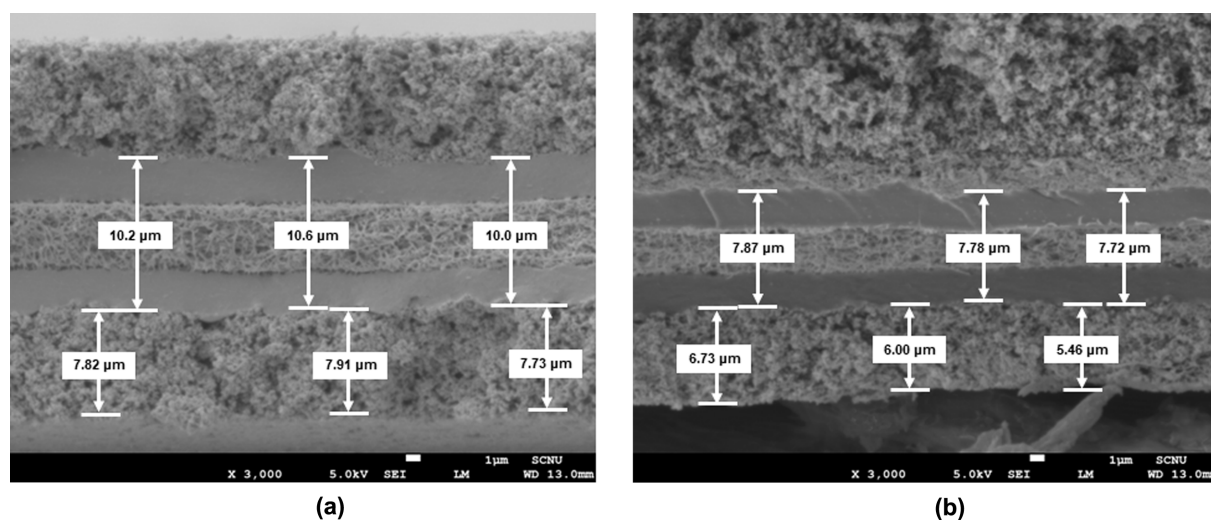


Fig. 6. Image of MEA cross-section a) before OCV holding b) after OCV holding.

수 있는 결과물이다.

Cathode 전극의 두께도 7.82 μm 에서 6.06 μm 로 22.5% 감소하여 고분자 막과 비슷한 정도로 cathode의 두께 감소가 있었다. 저가습 조건이지만 cathode의 높은 전압과 90 $^{\circ}\text{C}$ 의 고온은 Pt가 충분히 용해될 수 있는 조건이어서 Pt가 용해되어 고분자 막 안이나 셀 밖으로 배출되어 두께 감소가 있고 ECSA가 감소하였다고 판단된다. 막 안으로 들어가 석출된 Pt 입자는 라디칼을 발생시켜 막의 화학적 내구성을 약화시키므로 cathode Pt 촉매 열화가 덜 되었다면(즉 cathode 두께 감소가 더 작았다면) 박막의 내구성도 더 좋아졌을 것으로 예상된다.

4. 결 론

두께가 10 μm 인 PEMFC 박막에 공기 대신 산소를 공급하고 상대습도를 10% 감소시킨 고분자 막의 전기화학적 가속 내구 프로토콜(OCV holding)을 적용해 박막의 내구성을 평가하였다.

OCV holding에 따른 박막의 HCCD는 720시간에 10.9 mA/cm^2 로 증가하고 ECSA가 51% 감소하여 내구 평가를 종료하였다. OCV holding에서 사용한 cathode 가스는 공기가 아닌 산소를 사용해서 가속화도가 DOE 프로토콜보다 2배 이상되는 조건으로, DOE 프로토콜을 적용했으면 내구 평가 종료 시간 약 1,500시간을 달성했을 것으로 판단된다. 특히 산소 조건에서 shorting이 잘 발생하는데 박막을 10 μm 의 박막에서 720시간까지 SR이 1.0 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 이하가 되지 않은 것은 박막이 고내구성 막으로 갈 수 있는 가능성을 보여준 것이다. OCV holding 과정에서 기계적 내구성을 향상시키는 지지체가 화학적으로 열화되는 것도 확인하였고, 고분자 막의 두께가 전체적으로 24.1% 감소하여 수소투과도가 증가함을 확인하였다.

OCV holding이 진행되면서 백금 촉매가 열화되어 cathode 전극의 두께가 22.5% 감소해서 ECSA가 DOE 촉매 내구 종료 기준보다 더 감소하였다. 막 내구성 평가에서 전극이 막보다 더 열화되어 내구성 평가를 종료했다. 막 안으로 들어가 석출된 Pt 입자는 라디칼을 발생시켜 막의 화학적 내구성을 약화시키므로 cathode Pt 촉매의 내구성을 개선하면 박막의 내구성이 향상될 것을 예측할 수 있다.

감 사

본 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(20017400).

References

- James, B. D., Strategic Analysis Inc., "2021 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review Presentation : Fuel Cell Systems Analysis," June 9(2021).
- Watanabe, M., Uchida, H. and Emori, M., "Analyses of Self-Humidification and Suppression of Gas Crossover in Pt-Dispersed Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **145**, 1137(1998).
- Wang, L., Advani, S. G. and Prasad, A. K., "Degradation Reduction of Polymer Electrolyte Membranes Using CeO_2 as a Free-

- radical Scavenger in Catalyst Layer," *Electrochimica Acta*, **109**, 775-780(2013).
- Zhao, D., Yi, B. L., Zhang, H. M., Yu, H. M., Wang, L., Ma, Y. W. and Xing, D. M., "Cesium Substituted 12-tungstophosphoric ($\text{Cs}_x\text{H}_{3-x}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$) Loaded on Ceria-degradation Mitigation in Polymer Electrolyte Membrane," *J. Power Sources*, **190**, 301-306 (2009).
- Lai, Y. H., Mittelsteadt, C. K., Gittleman, C. S. and Dillard, D. A., "Viscoelastic Stress Analysis of Constrained Proton Exchange Membranes Under Humidity Cycling," *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, **6**(2), 13(2009).
- Spernjak, D., Mukherjee, P. P., Mukundan, R., Davey, J., Hussey, D. S., Jacobson, D. and Borup, R. L., "Measurement of Water Content in Polymer Electrolyte Membranes Using High Resolution Neutron Imaging," *ECS Trans.*, **33**(1), 1451-1456(2010).
- MacKinnon, S. M., Fuller, C. M., Schoeneweiss, M. R., Gittleman, C. S., Lai, Y., Jiang, H. R. and Brenner, A. M., "Fuel Cells-Proton Exchange Membrane Fuel Cells | Membranes: Design and Characterization," *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier, Amsterdam, 741-754(2009).
- Craig, S., Gittleman, C. S., Coms, F. D. and Lai, Y. H., "Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation-Chapter 2 - Membrane Durability: Physical and Chemical Degradation," Academic Press, Boston, 2012, Pages 15-88.
- Crum, M. and Liu, W., "Effective Testing Matrix for Studying Membrane Durability in PEM Fuel Cells: Part 2. Mechanical Durability and Combined Mechanical and Chemical Durability," *ECS Trans.*, **3**(1), 541-550(2006).
- https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/component_durability_profile.pdf, "DOE Cell Component Accelerated Stress Test Protocols for PEM Fuel Cells."
- Jeong, J. J., Jeong, J. H., Kim, S. H., Ahn, B. K., Ko, J. J. and Park, K. P., "Measurement of Hydrogen Crossover during PEMFC Operation," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(4), 412-416(2015).
- Endoh, E., Terazono, S., Widjaja, H. and Takimoto, Y., "Degradation Study of MEA for PEMFCs under Low Humidity Conditions," *Electrochem. Solid-State Lett.*, **7**, 145-161(2004).
- 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).
- Oh, S. H., Cho, W. J., Lim, D. H., Yoo, D. K. and Park, K. P., "Reducing the Test Time for Chemical Durability of PEMFC Polymer Membrane," *Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(3), 333-338 (2021).
- Oh, S. H., Yun, J. W., Lee, D. W. and Park, K. P., "Comparison of Measurement Method of Hydrogen Permeability in Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(4), 507-511(2019).
- 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).
- Lee, H., Kim, T. H., Sim, W. J., Kim, S. H., Ahn, B. K., Lim, T. W. and Park, K. P., "Pinhole Formation in PEMFC Membrane After Electrochemical Degradation and Wet/dry Cycling Test," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(2), 487-491(2011).

Authors

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

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

Sunggi Jung: Principal Researcher, SANG-A FRONTEC CO. Ltd, Incheon 21629, Korea; gimi3036@sftc.co.kr

Jihong Jeong: Managing Director, SANG-A FRONTEC CO. Ltd, Incheon 21629, Korea; jihong@sftc.co.kr

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