Korean Chem. Eng. Res., 63(4), 105130 (2025)
https://doi.org/10.9713/kcer.2025.63.4.105130
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

고분자전해질 연료전지(PEMFC)에서 열화된 막의 성능 저하 방지를 위한 전압 범위 연구

이혜리 · 나일채 · 오소형* · 이미화* · 정성기** · 이준섭** · 박권필*,†

㈜CNL Energy
02465 서울특별시 동대문구 회기로2길 4
*국립순천대학교 화학공학과 / 연료전지평가센터
57922 전라남도 순천시 중앙로 255
**㈜상아프론테크
21629 인천광역시 남동구 남동대로 369번길 18
(2025년 3월 31일 접수, 2025년 6월 24일 수정본 접수, 2025년 7월 18일 채택)

Study on Voltage Range to Prevent Performance Degradation of Degraded Membranes in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)

Hyeri Lee, Ilchai Na, Sohyeong Oh*, Mihwa Lee*, Sunggi Jung, Junsub Lee** and Kwonpil Park*,†**

CNL Energy co., ltd. 4, Hoegi-ro 2-gil, Dongdaemun-gu, Seoul, 02465, Korea
**Fuel Cell Test and Evaluation Center, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 255 Jungang-ro, Sunchon-si, Jeollanam-do, 57922, Korea*
***SANG-A FRONTEC CO. Ltd, 369 Route 18, Namdong-ro, Namdong-gu, Incheon, 21629, Korea*
(Received 31 March 2025; Received in revised from 24 June 2025; Accepted 18 July 2025)

요 약

고분자전해질 연료전지의 내구성 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구동 과정 중 고분자막의 수명을 연장시키기 위해서는 막의 열화 속도를 감소시키는 연구가 필요하다. 따라서 초기에 전해질막을 가속 열화시킨 후 전압을 변화시키면서 막의 열화 속도를 측정해 열화된 막의 열화 속도를 감소시키는 방법을 전압 제어를 통해 연구하고자 하였다. 동일한 MEA 3개를 216시간까지 개회로전압(OCV) hold로 가속 열화시켰을 때 고분자막과 전극이 열화되었다. 이 세 MEA를 0.80 V, 0.87 V, OCV 전압으로 구동하면서 성능변화를 측정하였다. OCV 상태를 그대로 유지했을 때 전극과 막의 열화에 72시간에 수명이 다했지만, 0.8~0.87 V 유지한 경우 144시간 이상의 수명으로 내구성이 향상되었다. 전극과 막이 열화된 상태에서 OCV와 같은 높은 전압을 유지하는 것은 열화속도를 가속화시키므로 0.9 V 이하의 낮은 전압에서 연료전지를 구동하는 것이 수명을 연장시킬 수 있음을 확인했다.

Abstract - Research on improving the durability of polymer electrolyte fuel cells is actively being conducted. To extend the lifespan of the polymer membrane during operation, it is necessary to study methods to reduce its degradation rate. Therefore, this study aimed to investigate voltage control as a method to slow down the degradation rate of an already degraded electrolyte membrane. Initially, three identical MEAs were subjected to accelerated degradation for 216 hours under open circuit voltage(OCV) hold, leading to the degradation of both the polymer membrane and the electrode. The performance of these degraded MEAs was then evaluated while operating at 0.80 V, 0.87 V, and OCV voltage. When the OCV condition was maintained, the membrane and electrode completely degraded within 72 hours. However, when operated at 0.80~0.87 V, the durability improved, with a lifespan extending beyond 144 hours. Maintaining a high voltage, such as OCV, in a degraded state accelerated the degradation process. Therefore, it was confirmed that operating the fuel cell at a lower voltage, below 0.9 V, can help extend its lifespan.

Key words: PEMFC, Performance, Chemical degradation, Voltage range, OCV hold

1. 서 론

고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC)는 저온에서 높은 에너지 변환 효율을 유지하면서도 환경 친화적이다[1-3]. 광범위한 출력을 생성할 수 있기 때문에 응용

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: parkkp@scnu.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.

분야가 다양하다. 그러나 높은 가격과 짧은 수명으로 인해 시장 확장이 지연되고 있다[4,5]. PEMFC는 응용 분야에 따라 5,000~40,000 h의 내구성이 필요하나, 장시간 작동으로 인해 막 전극 어셈블리(Membrane Electrode Assembly, MEA)가 열화되어 이 목표를 달성하지 못하는 경우가 많다[6]. 고분자 막의 열화는 크게 전기화학적 열화와 기계적 열화로 분류된다[7]. 전기화학적 열화는 MEA 내부에서 생성된 HOO•, HO•와 같은 라디칼이 고분자 막을 공격하여 막의 두께가 얇아지고 핀홀이나 균열이 형성되어 고분자 막의 열화가 발생한다. 전압이 높으면 라디칼 발생속도가 높아 고분자막의 화학적 열화속도가 높아지고, 전극은 높은 전압에서 Pt 용해속도가 높아지므로 개회로전위와 같은 높은 전위에서 MEA열화속도가 높다. Cathode에서 용해된 Pt이온이 막 내부에서 수소와 만나 Pt 입자로 석출된 상태에서 라디칼을 생성하는 반응과 라디칼이 고분자막을 열화시키는 반응에 의해 고분자막의 열화는 진행된다. 기계적 열화는 PEMFC 가습/건조과정에서 고분자막이 수축/팽창에 의해 열화가 발생한다. PEMFC 전극의 촉매층은 촉매와 촉매 지지체 그리고 이오노머 바인더로 구성되어 있다. Cathode 촉매의 열화는 용해와 입자 성장으로 촉매 활성 면적이 감소하는 것이다. Cathode 촉매의 입자 성장은 1) 작은 백금 입자가 용해되어 큰 입자 위에 석출되어 입자가 성장한다는 Ostwald ripening 메커니즘[8], 2) 부식된 카본 지지체 상에서 Random cluster-cluster 충돌에 의해 백금 입자의 덩어리(Agglomeration)가 발생하는 메커니즘[9], 3) Cluster의 Gibbs 자유 에너지를 최소화하기 위해 백금 입자가 성장한다는 메커니즘[10]이 있다. 이와 같은 촉매 입자 성장은 상대습도가 높고 전압 변화(부하 변화)가 있는 조건에서 잘 일어난다. 고분자막의 전기화학적 열화 속도가 높은 조건은 고전압, 고온, 저가습, 고 가스압 조건으로 알려져 있다. 이와 같은 열화 조건은 열화가 진행되지 않은 막을 가속 열화시키기 위한 조건들이다.

실차 조건에서 구동 시간이 경과되면서 막의 열화 속도는 일정한 것이 아니라 초기의 열화 속도와 다르게 변하는 것으로 알려져 있다. 전극 열화 조건도 고전압에서 촉매 Pt가 용해되므로 고분자막과 전극 모두 전기화학적으로 고전압에서 열화 속도가 높다[11]. 그래서 MEA의 내구성 향상을 위해서는 고전압을 피하는 것이 필요할 것이고, 이를 확인하는 실험을 짧은 시간에 진행하고자 하였다. PEMFC 구동 과정 중 고분자막의 수명을 연장시키기 위해서는 막의 열화 속도를 감소시키는 연구가 필요하다. 따라서 초기에 고분자막을 가속 열화시킨 후 전압을 변화시키면서 막의 열화 속도를 측정해 열화된 막의 열화 속도를 감소시키는 방법을 전압 제어를 통해 연구하고자 하였다.

2. 실 험

2-1. 고분자막의 열화 가속화 및 전압 제어 방법

본 실험에 사용된 막은 Nafion 211이며, Pt/C 전극을 hot press하여 MEA를 제조한 후 25 cm^2 셀에 체결하여 사용하였다. 전극촉매는 anode와 cathode 모두 Pt/C이며, 로딩량은 0.4 mg/cm^2로 동일하게 담지되었다. MEA와 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL)을 5 channels 셀(CNL Energy, Korea)에 체결하여 스테이션(CNL Energy, Korea)에서 온도와 습도, 가스 유량 등을 제어하여 MEA의 성능 및 내구평가를 진행하였다. 막의 열화를 가속화시키기 위해 개회로전압(Open Circuit Voltage, OCV) 유지(holding)를 90 ℃, anode RH 10%, cathode RH 30%, H_2/O_2를 공급하여 진행하였으며, 72 h 간격으로 성능을 측정하였다. 이때 고전압 조건인 OCV에서 막의 열화를 진행한 결과, 152 h 만에 전압이 0.85 V까지 급격하게 감소하여 막의 내구 지표인 수소투과전류밀도(Hydrogen Crossover Current Density, HCCD)가 23.8 mA/cm^2로 증가하여 평가를 종료하였다. 이를 통해 막의 열화 속도를 조절하기 위해 144 h 이후 cathode에 air를 공급하여 HCCD가 초기 대비 30% 이상 증가하였을 때 0.8~0.9 V 전압을 주어 막의 열화 속도를 비교하였다.

2-2. 특성 분석

성능 측정은 cell 70 ℃, RH 100%에서 진행하였으며, I-V 성능곡선은 anode 1.5 stoichiometry (stoi.), cathode 2.0 stoi. 조건으로 측정하였다. 내구평가 과정에서 MEA 열화 정도 및 비가역적 열화 분석을 위해 내구평가 중간마다 활성화 후 Potentiostat(Solatron, SI 1287)을 이용해 선형주사전압전류법(Linear sweep voltammetry, LSV)을 측정하여 수소투과 전류밀도(HCCD)를 산출하였다. 측정 방법은 anode와 cathode에 각각 수소(40 mL/min), 질소(200 mL/min)을 공급하고 scan rate 1 mV/s로 0~0.5 V 범위에서 전압을 상승시켜 전류를 측정하였다. HCCD는 anode에서 cathode로 투과된 수소가 cathode에서 산화될 때 생기는 산화 전류이고, 0.3~0.35 V 범위에서 한계 전류밀도에 도달한다[9]. 따라서 HCCD 값은 0.3 V의 전류밀도 값을 택하였다.

순환전압전류법(Cyclic Voltammetry, CV)는 anode와 cathode에 각각 수소(40 mL/min)와 질소(200 mL/min)를 공급하고, scan rate는 30 mV/sec로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하여 14 cycles 후 측정한 값을 택했다. CV 그래프로부터 전극활성면적(Electrochemical Surface Area, ECSA)는 0.05~0.4 V의 면적으로 구하였다.

막 저항(High Frequency Resistance, HFR) 및 부하 전달 저항(Charge Transfer Resistance, CTR)은 임피던스 분석기(Solatron, SI 1287)를 이용해 측정하였다. 임피던스 측정은 anode와 cathode에 각각 수소(93 mL/min)와 공기(296 mL/min)를 공급하고, DC current 1 A, AC amplitude 100 mA, 100,000~0.1 Hz 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. OCV Hold 과정에서 성능 변화

고분자막의 화학적 가속열화를 위해 OCV 상태에서 H_2/O_2를 공급하면서 OCV 변화와 수소투과도 측정한 결과를 Fig. 1에 나타냈다. 72 h OCV hold 후 활성화와 MEA 특성들을 측정하였다. 특성 측정 후 OCV hold를 다시 시작할 때 OCV가 일부 회복되었지만 72 h 전의 OCV로 회복되지 않아 비가역적 열화가 처음부터 진행되었음을 보였다. 수소 투과도와 short 저항을 측정하기 위해 DOE와 NEDO LSV를 Fig. 1의 (b), (c)에 나타냈다. 막의 내구 지표인 HCCD가 6.4 mA/cm^2로 short 저항이 0.063 $k\Omega \cdot cm^2$로 급감했다. DOE의 HCCD와 short 저항 AST 종료기준(Target)은 각각 15 mA/cm^2, 1.0 $k\Omega \cdot cm^2$ 이하이다. 수소투과도 보다는 short 저항 감소에 의해 평가를 종료했다. Short 저항 감소는 고분자막의 열화 영향도 있지만 전극 촉매 열화도 영향을 주기 때문에 고분자막의 화학적 가속열화를 목표로 했지만 전극 열화도 발생했음을 알 수 있다.

OCV hold 과정에서 I-V 성능변화와 임피던스 변화와 CV 변화를 Fig. 2에 나타냈다. 274 h 후 OCV가 10.5% 감소했고 0.6 V에서 전

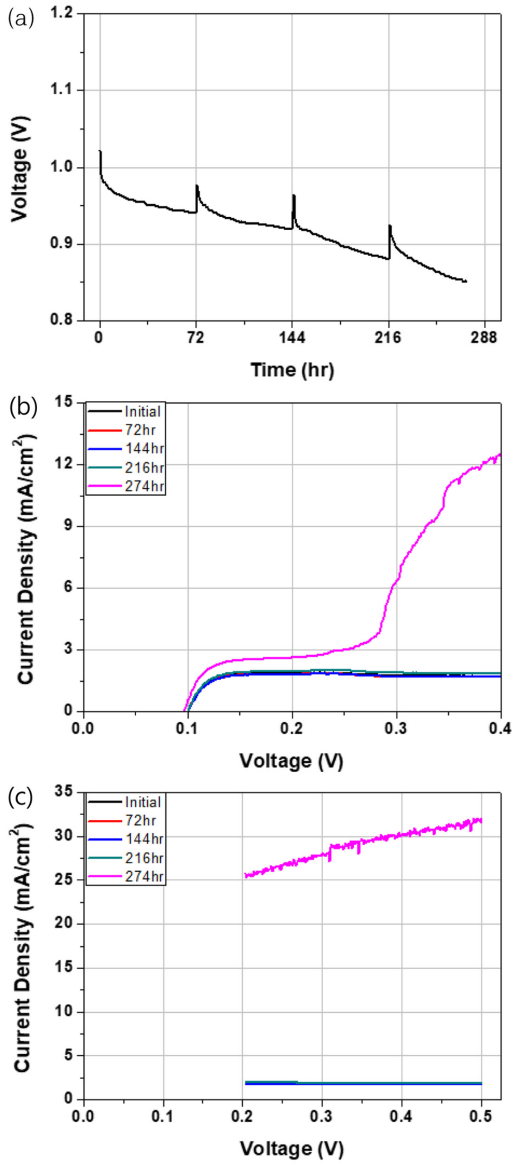

Fig. 1. Voltage change (a) and comparison of DOE LSV (b) and NEDO LSV (c) during OCV holding.

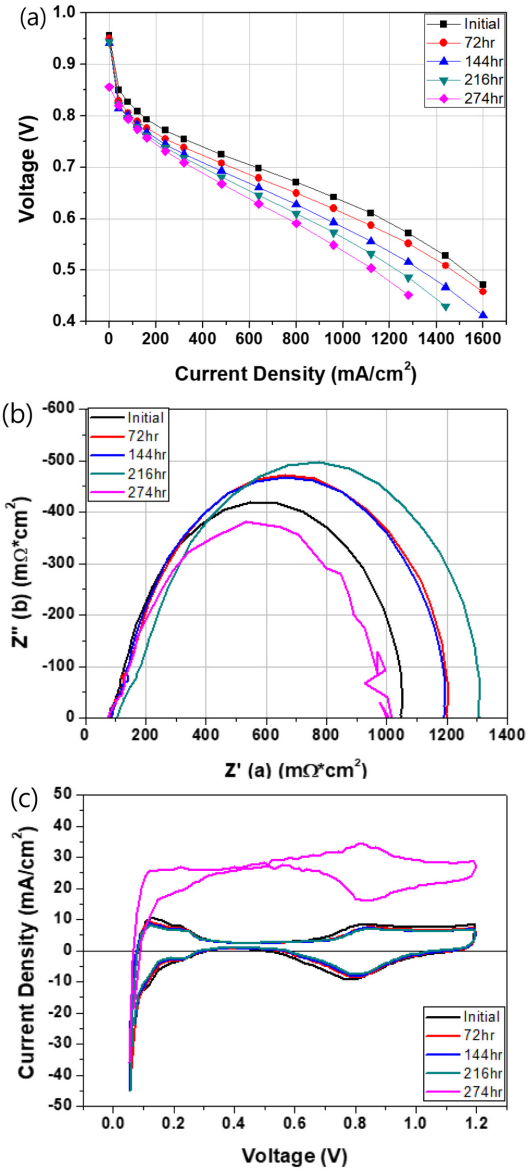

Fig. 2. During OCV holding (a) I-V performance change, (b) Impedance change, (c) CV change.

류밀도가 1,200 mA/cm^{2}에서 800 mA/cm^{2}로 감소했다. OCV 감소는 고분자막의 열화 원인도 있지만 전극 촉매의 열화도 영향을 주기 때문에 OCV 감소가 비교적 큰 것도 전극 촉매가 열화되었음을 보여주고 있다. 저전류 구간에서는 촉매의 활성화 과전압(Activation over voltage)에 의해 I-V 성능이 감소하는데 이와 같은 현상을 I-V 곡선에서 볼 수 있다. 전극 촉매 특성 평가를 위해 임피던스(Fig. 2(b))를 측정해 CTR를 분석했다. CTR이 216 h에 24.2%까지 증가하다가 274시간 후에는 감소했다(Table 1). CTR 증가는 전극 촉매 열화를 나타낸 것이고, 초기부터 비가역적 열화가 진행된 것은 활성화 후에도 Pt 촉매가 처음 상태로 회복되지 않았음을 나타내고 있다. 전극 촉매 열화가 누적되어 274 h 후에는 막 내부에 Pt 함량이 증가해, short 전류가 상승하면서 전자의 전하 전달(Charge transfer) 역할이 이온보다 커지면서 CTR이 감소했다[6].

전극 촉매 열화 정도를 측정하기 위해 CV(Fig. 2(c))를 측정하고

Table 1. Change of characteristics of MEA during OCV hold

Time (h)	HCCD (mA/cm^2)	SR (kΩ/cm^2)	OCV of change (%)	CTR of change (%)	ECSA of change (%)
0	1.746	4.819	0.0	0.0	0.0
72	1.697	12.626	-0.6	14.9	-16.1
144	1.700	11.364	-1.5	12.9	-23.9
216	1.882	5.345	-1.4	24.2	-30.3
274	6.387	0.063	-10.5	-4.3	-94.5

ECSA를 산출해 Table 1에 정리했다. ECSA가 40% 이하로 감소해 DOE의 촉매 열화 AST target보다 더 열화되었음을 볼 수 있다. 고분자막 가속 열화 과정에서 이와 같은 결과는 72 h마다 활성화와 MEA 특성 평가과정에서 전압변화 cycle을 반복하여 Pt 촉매 가속 열화 과정과 같은 결과를 초래한 것이다. 고분자막 화학적 가속 열화평가(Accelerated Stress Test, AST)에서 잦은 활성화 및 특성평가는 촉매 열화를 촉진하므로 고분자막만의 내구성 평가를 위해서는 바람직하지 않다. 마지막 274 h 후 CV가 위로 상승하고 기울어진 것은 수소투과도 증가와 short 저항의 감소 때문에 나타난 현상이다. CV도 LSV와 같이 전위를 일정속도로 상승시키는 구간이 있어서 이 구간에서 수소투과도가 증가하면 CV그래프도 전체적으로 상승한다. CV가 위로 상승한 것은 한계전류밀도 이상의 전위에서 전류가 상승한, 즉 short 전류 증가에 의한 것이고, Ohm의 법칙에 의해 구한 저항(short 저항)이 감소하면 즉 기울기가 커진다. 이상의 결과를 정리하면 OCV hold를 진행했지만 고분자막 화학적 열화와 전극 촉매 열화가 동시에 발생해 실제 운전한 스택과 같은 MEA와 유사하다고 할 수 있다. 따라서 144 h OCV 가속 열화한 MEA를 준비하여 전압이 MEA 열화 속도에 미치는 영향을 빠른 시간에 파악할 수 있게 하였다.

3-2. OCV Hold 216시간 후 일정 전압 유지과정에서 성능 변화 비교

세 개의 MEA를 셀에 각각 체결해 144 h까지는 H_2/O_2 조건에서 OCV hold, 144~216 h까지는 H_2/Air 조건에서 OCV hold, 216~360 h에서는 0.87 V, 0.80 V 정전압 구동을 하여 전압과 전류변화를 Fig. 3에 나타냈다. 144~216 h OCV hold에서는 산소 대신 공기로 cathode 가스를 교체해서 OCV 감소를 Fig. 1(a)와 같이 볼 수 있다. 216~360 h에서 정전압 시 전류변화 곡선은 활성화 후 전류가 상승했다 감소하는 것을 216 h과 288 h에 각각 볼 수 있다. 100 mA/cm^2 이하의 저전류에서는 전해질막의 영향보다 촉매의 활성에 의한 영향이 더 크기 때문에 활성화에 의해 전류밀도가 높아졌다가 정전압 구동이 시작되면서 Pt가 PtO 등으로 산화되면서 활성 과전압이 커져 전류밀도가 감소하였다. 288 h에 다시 활성화와 특성 평가 후에 전류밀도가 회복되기는 했지만 216 h의 전류밀도보다 낮다. 활성화 과정에서 PtO등이 Pt로 환원되어 가역적인 열화가 대부분이었지만, Pt가 용해되어 막과 출구로 유출되고 촉매층의 이오노머와 카본 지지체도 고전위에서 열화되어 비가역적인 열화가 진행되었기 때문이다. 그러나 비가역적 열화는 크지 않아 OCV hold 과정보다 열화 속도가 감소했음을 확인할 수 있다.

OCV hold와 정전압 과정에서 LSV를 측정하고 LSV로부터 계산한 HCCD 변화를 Fig. 4에 비교하였다. 216 h까지 HCCD가 거의 같다. 이후 차이가 발생했다. OCV 상태를 계속 유지한 MEA는 58 h 후(274 h) OCV가 급증해서 3배 이상 수소투과도가 증가했다. 216 h에 0.87 V 정전압을 유지한 MEA는 HCCD가 약간 증가했으나, 0.80 V 정전압을 유지한 MEA는 HCCD가 거의 증가하지 않았다. 전압이 높을수록 라디칼 발생 속도가 높아 막의 열화 속도가 증가하고 이에 따라 막의 두께가 얇아지면서 수소투과도가 증가한 것이다. 그리고 높은 전압에서는 전극 촉매 열화 속도(Pt 용해)도 높아져 막 내부로 Pt 이온이 더 많이 유입되어 Pt 입자로 석출됨으로써 라디칼 발생속도가 높아지는 영향도 있다. 열화된 MEA를 OCV 유지 및 0.87 V 이상의 높은 전압으로 구동하는 것은 막 내구성에는

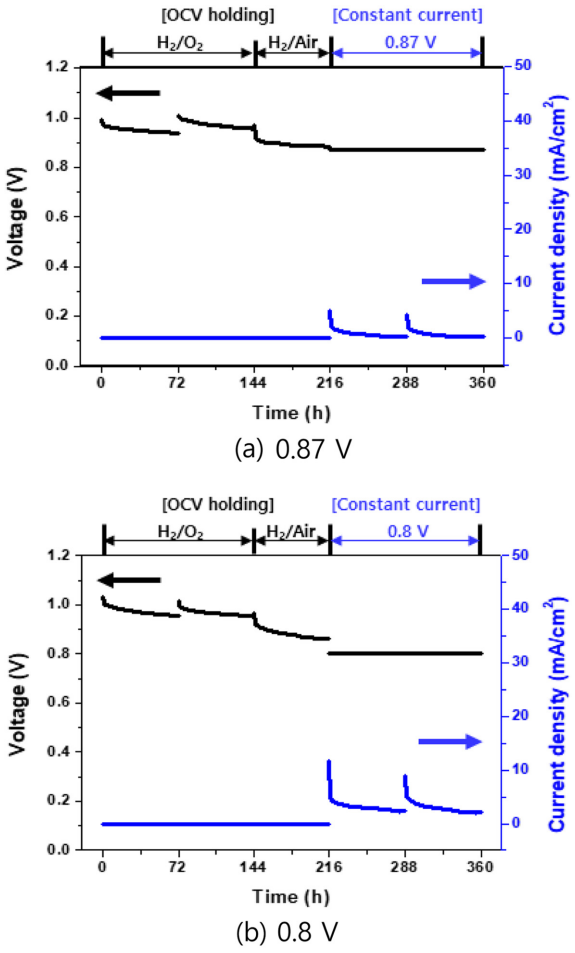

Fig. 3. Current density changes under constant voltage conditions (a) 0.87 V, (b) 0.80 V, after OCV holding.

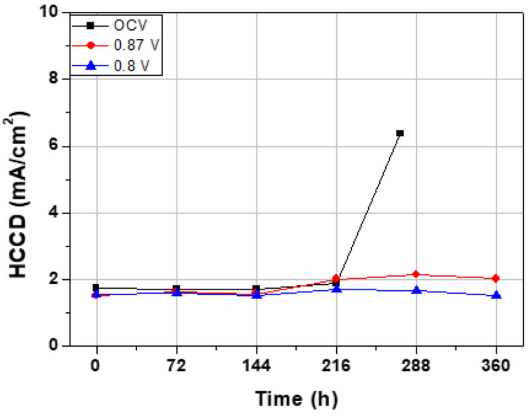

Fig. 4. HCCD changes during maintained voltage conditions after OCV holding.

좋지 않음을 확인하였다.

Fig. 5 각 과정에서 OCV 변화율을 비교하였다. MEA 1(전구간 OCV)이 216 h까지 OCV 감소가 2%도 안 되어 제일 좋은 상태에서 시작했지만 288 h에는 OCV가 10% 이상 감소해 제일 열화 속도가 높았다. MEA 2(OCV+0.87 V)는 216 h까지 OCV 감소가 3%가 안 되었지만 216 h부터 0.87 V 정전압을 유지하면서 OCV 감소가 있어서, 216 h 이후 OCV 감소가 없는 MEA 3(OCV+0.80 V)과 288 h에

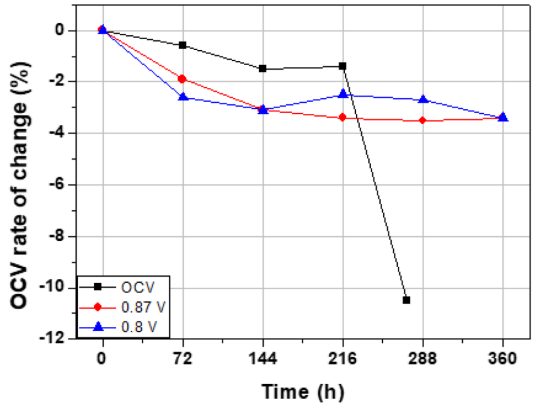

Fig. 5. OCV changes during maintained voltage conditions after OCV holding.

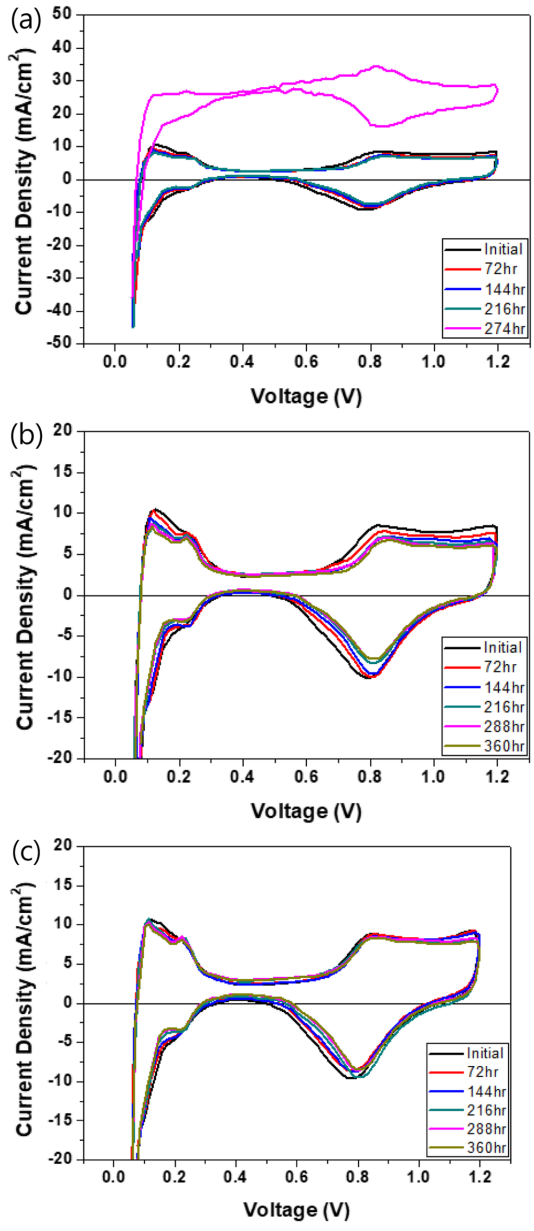

Fig. 6. CV changes during maintained voltage conditions after OCV holding Comparison of (a) MEA 1(OCV + OCV), (b) MEA 2(OCV + 0.87 V), and (c) MEA 3(OCV + 0.80 V).

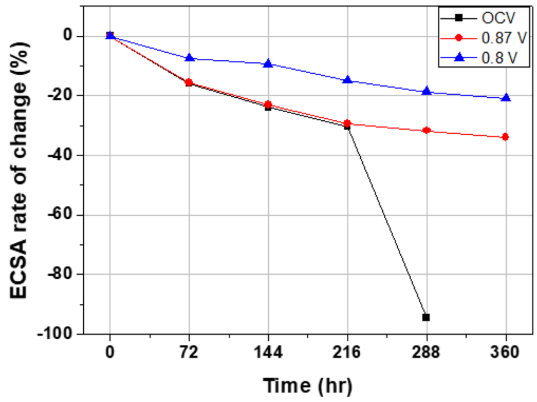

Fig. 7. ECSA changes during maintained voltage conditions after OCV holding.

는 OCV 감소율이 같아졌다. 전압이 높을수록 OCV 감소 속도가 컸다. OCV 감소는 고분자막뿐만 아니라 전극 열화에 의해서도 발생하므로, 전극 열화를 확인하기 위해 CV를 측정하고 ECSA를 산출하여 비교하였다(Fig. 6, 7).

Fig. 6(a)의 MEA 1 CV는 274 h 만에 면적 감소가 많고 수소투과도 증가하여 전체 그래프가 위로 상승했다. Fig. 6(b)의 MEA 2 CV는 360 h 구동 후 CV 0.1~0.3 V 범위의 면적 변화가 274 h 후의 MEA 1보다 작다. Fig. 6(c)의 MEA 3 CV 면적 감소가 제일 작아 전압이 낮을수록 촉매 열화 속도가 감소함을 보였다. Cathode의 열화 순서가 OCV 감소 순서와 동일해 cathode 전극 열화가 OCV 감소에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다(Fig. 5). 전압이 높을수록 촉매층에서 전극 열화 속도가 높아 OCV 감소가 더 큰 것으로 판단된다. 촉매층의 열화는 촉매 Pt, 카본 지지체, 바인더 이오노머로 구성되어 있는데 이들 모두 전압이 높을수록 열화 속도가 높다[11,12]. 그리고 Fig. 7의 ECSA 감소는 Pt 활성면적 감소에 의해 일어난다고 하지만, 촉매 활성은 촉매 지지체와 바인더의 영향을 받기 때문에 이들의 열화도 고려해야 한다. 바인더 이오노머는 고분자막의 이오노머와 같은 불소계 고분자로 거의 비슷하기 때문에 열화도 비슷하게 발생할 수 있다고 본다. 고분자막에서 이오노머의 가속 열화 조건은 고전압, 고온, 고가스압, 저가습 조건인데 고전압일수록 Pt 용해 속도가 높아져 막 내부에 Pt 함량이 높아 막 열화 속도가 증가한 것이다[13-16].

4. 결 론

216 h까지 OCV hold 후 전압을 0.8 V, 0.87 V, OCV로 유지하면서 MEA 열화 속도를 비교하였다.

216 h OCV hold 후 HCCD는 약 8% 증가했으나, ECSA는 18~30% 감소해서 전극 촉매 열화가 더 진행되었다. 이와 같은 결과는 72 h마다 활성화와 CV 측정등의 과정에서 전압변화 사이클을 반복해 Pt 촉매가 용해되어 손실된 결과다. 용해된 Pt 이온은 막 내부에서 백금입자로 석출되어 막 내부에서 라디칼을 발생시켜 막 열화 속도를 증가시켰다. 216 h 후 유지 전압이 높을수록 전극 촉매 열화 속도가 높아져 ECSA 감소속도가 증가했고, 그 결과 막 내 Pt 입자 농도가 높아져 라디칼 발생속도가 증가해 응축수의 불소이온농도가 높아져 막의 열화속도가 증가했다. 전압이 높을수록 막의 열화속도가 증가해 막의 두께 감소에 의해 수소투과도가 증가하고

이에 따라 OCV도 감소했다. MEA가 열화된 상태에서 OCV 상태를 그대로 유지했을 때 전극과 막의 열화에 의해 Shorting이 발생해 72 h에 수명이 다했지만, 0.8~0.87 V 유지한 경우 144 h 구동 후에도 막과 전극의 열화정도가 DOE의 수명 기준(Taget)에 도달하지 않았다. 전극과 막이 열화된 상태에서 OCV와 같은 높은 전압을 유지하는 것은 열화속도를 가속화시키므로 0.9 V 이하의 낮은 전압에서 연료전지를 구동하는 것이 수명을 연장시킬 수 있음을 확인했다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 진행되었습니다(과제번호: 141518266(20012133), 20017400).

Reference

1. Wu, W., Yang, J., Zhan, H., Yan, X. K. and Zuo, X., "The Effects of Under-ribs Convection on Enhanced Drainage Parallel Flow Field for Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Korean J. Chem. Eng.*, **39**, 2055-2068(2022).
2. Woo, S., Kim, S., Woo, S., Park, S., Kang, Y., Jung, N. and Yim, S., "Investigating the Effect of Solvent Composition on Ink Structure and Crack Formation in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Catalyst Layers," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(10), 2455-2462(2023).
3. Yang, G., Wang, H., Su, F., Li, S., Zhang, G., Sun, J., Shen, Q., Jiang, Z., Liao, J. and Chen, P., "Effect of Porosity Gradient in Cathode Gas Diffusion Layer on Electrochemical Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(7), 1598-1605(2023).
4. Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C. and Adroher, X. C., "A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research," *Applied Energy*, **88**(4), 981-1007(2011).
5. Park, S., Choi, D., Lee, D., Choi, B. and Yoo, S., "Current Progress of Electrocatalysts for Anion Exchange Membrane Fuel Cells," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(7), 1549-1562(2023).
6. Oh, S., Lim, D. and Park, K., "Durability Evaluation of PEMFC Electrode Using Oxygen as Cathode Gas," *Korean Chem. Eng.* Res., **59**(1), 11-15(2021).
7. Venkatesan, S., Lim, C., Holdcroft, S. and Kjeang, E., "Progression in the Morphology of Fuel Cell Membranes upon Conjoint Chemical and Mechanical Degradation," *Kjeang, J. Electrochem. Soc.* **163**(7), F637(2016).
8. 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).
9. 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 elctrode-Assembly," *J. Power Sources*, **159**(1), 461-467(2006).
10. Zhai, Y., Zhang, H., Xing, D. and Shao, Z., "The Stability of Pt/C Catalyst in H_3PO_4/PBI PEMFC During High Temperature Life Test," *J. Power Sources*, **164**(1), 126-133(2006).
11. Oh, S., Han, Y., Yoo, D., Kim, M., Choi, Y. and Park, K., "Effects of Changes in Accelerated Degradation Conditions for Catalyst Supports in Polymer Electrolyte Fuel Cell," *Korean Chem. Eng. Res.*, **62**(1), 7-12(2024).
12. Oh, S., Han, Y., Chung, M. and Park, K., "Comparison of Catalyst Support Degradation of PEMFC Electrocatalysts Pt/C and PtCo/C," *Korean Chem. Eng. Res.*, **61**(3), 341-347(2023).
13. Serhiy, C., Nadiia, K., Karl, J. and Mayrhofer, J., "Durability of Platinum-based Fuel Cell Electrocatalysts: Dissolution of Bulk and Nanoscale Platinum," *Nano Energy*, **29**, 275-298(2016).
14. U.S. DOE Fuel Cell Technologies Office, Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan, Section 3.4 Fuel Cells, p. 1(2016).
15. Daido University, Ritsumeikian Univ., Tokyo Institute of Tech nology, Japan Automobile Research Ins., "Cell Evaluation and Analysis Protocol Guidline," NEDO, Development of PEFC Technologies for Commercial Promotion-PEFC Evaluation Proj ect, January 30(2014).
16. Yoo, D., Oh, S., Jung, S., Jeong, J. and Park, K., "Effect of Voltage Range and Number of Activation Cycles in the Activation Process of a Polymer Electrolyte Fuel," *Korean Chem. Eng. Res.*, **61**(1), 58-61(2023).

Authors

Hyeri Lee: Manager, CNL Energy Co., 4, Hoegi-ro 2-gil, Dongdaemun-gu, Seoul, 02465, Korea: darin@cnl.co.kr

Il-Chai Na: CEO(Chief Executive Officer), CNL Energy Co., 4, Hoegi-ro 2-gil, Dongdaemun-gu, Seoul, 02465, Korea; la3840@cnl.co.kr

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

Mihwa Lee: Researcher, Fuel Cell Test and Evaluation Center, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; buksulee2@naver.com

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

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

Kwonpil Park: Professor, Fuel Cell Test and Evaluation Center, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; parkkp@scnu.ac.kr