

PEMFC 고분자막의 화학적/기계적 가속 내구성 평가에서 온도의 영향

오소형¹ · 이미화¹ · 박권필^{2†}

¹국립순천대학교 신재생에너지평가센터, ²국립순천대학교 화학공학과

Effect of Temperature on Chemical/Mechanical Accelerated Durability Testing of PEMFC Polymer Membranes

SOHYEONG OH¹, MIHWA LEE¹, KWONPIL PARK^{2†}

¹Renewable Energy Evaluation Center, Suncheon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

²Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

†Corresponding author :
parkkp@scnu.ac.kr

Received 14 May, 2026

Revised 5 June, 2026

Accepted 8 June, 2026

Abstract >> A chemical/mechanical durability test of polymer membrane evaluation method is used in which air and hydrogen are supplied to the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and wet/dry is repeated in the open circuit voltage (OCV) state. In this protocol, repeated humidification and drying cycles cause repeated voltage fluctuations, which may accelerate electrode degradation. In cases where membrane durability is excellent, the number of voltage changes increases; consequently, the evaluation may terminate due to electrode degradation, making it impossible to perform the original objective of membrane durability test. In particular, if the same protocol as the U.S. Department of Energy (DOE) is used but oxygen is substituted for air as the cathode gas, the test is terminated earlier due to electrical shorting. In this study, oxygen was used instead of air, and the durability evaluation temperature was reduced from 90°C to 80°C, increasing the short-circuit resistance (SR) time from 3,000 cycles to 5,500 cycles, thereby increasing the polymer membrane durability evaluation time by 1.8 times.

Key words : PEMFC(고분자전해질연료전지), Polymer membrane(고분자막), Chemical/Mechanical(화학적/기계적), AST(가속 내구성 평가), Temperature effect (온도 영향)

1. 서 론

고분자전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 차세대 무공해 전기자동차(Zero-

emission Electric Vehicles, ZEV)에 제일 적합한 에너지 변환장치다. 그러나 PEMFC의 상용화 시장을 확대하기 위해서는 비용 절감과 수명연장이 필수적이다^{1,2)}. 최근에 PEMFC의 내구성이 더욱 강조되고

있는데, 이는 대형 트럭 ZEV로 관심이 집중되면서 요구되는 내구 기준이 증가하였기 때문이다. 승용차와 경량 트럭 ZEV 등의 운전시간이 5,000~8,000시간 요구되었는데, 대형 트럭 운전시간이 약 30,000시간(약 백만마일)이나 되기 때문이다³⁾. 이와 같이 장시간 운전하는 동안 PEMFC의 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)를 구성하는 요소들이 열화되어 이 같은 수명 목표를 충족시키지 못하고 있다^{4,9)}.

전해질막의 열화는 화학적(Chemical) 열화, 기계적(Mechanical) 열화로 크게 분류된다¹⁰⁾. 화학적 열화는 셀 내에서 발생한 라디칼/과산화수소가 고분자막을 공격해 막이 열화되는 것을 말한다^{10,11)}. 고분자막 내구 평가 시간을 단축시키기 위해 가속열화평가(Acceleration Stress Test, AST) 기법이 사용되는데, 전기화학적 AST는 라디칼이 많이 발생하는 개회로 전압(Open circuit Voltage, OCV) 유지(holding) 방법이, 기계적 AST는 고분자막을 수축/팽창시키는 Dry/Wet cycle 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)나 일본 신에너지산업기술 개발기구(New Energy Industry Technology Development Organization, NEDO)에서는 차량용 PEMFC MEA에 대해서 AST를 통하여 내구성을 평가하고 있다^{12,13)}.

PEMFC 내구성을 평가하는 AST는 계속 개선되고 있는데, DOE에서는 2016년에 새로운 고분자막 내구성 평가 프로토콜인 Chemical/Mechanical Combined AST를 발표하였다¹⁴⁾. 이 AST는 고분자막의 화학적 내구성과 기계적 내구성을 동시에 평가할 수 있게 한 것이다. Anode와 cathode의 유입가스로 각각 수소와 공기를 사용하면서 OCV 상태에서 가습/건조를 반복하는 방법이다. 가습과 건조를 각각 45초, 30초 반복하면 OCV 전압 변화가 발생하는데 이 전압 변화에 따른 전극 열화가 일어날 수 있다.

라디칼 제거제와 확장형-폴리테트라 플루오르에틸렌(Expanded polytetra fluoroethylene, e-PTFE) 지지체가 들어간 강화막은 400시간 이상의 장시간 평가 시간이 필요할 수 있다¹⁵⁾. 이와 같이 장시간 전압 변화 횟수가 많아지면 고분자막 열화보다 전극 열화

에 의한 MEA 성능 감소가 발생해서 내구 평가가 종료될 수 있다. 막 내구성이 우수한 경우 전압 변화 횟수가 증가해 전극 열화에 의해 평가가 종료되어 막 내구성 평가를 할 수 없는 문제가 발생하기도 한다¹⁶⁾. 그래서 고분자막 열화속도를 가속화시켜 전극 열화의 영향을 감소시키기 위해 공기대신 산소를 사용하도록 했는데, 산소를 사용하면 shorting에 의해 평가가 종료되는 문제점이 있었다¹⁷⁾.

막 열화 AST의 온도 조건은 OCV hold의 경우 90°C, Wet/Dry 사이클은 80°C이며, DOE combined AST는 90°C에서 진행된다. 또한 전극 열화 AST는 80°C 조건에서 수행된다. 일반적으로 온도가 높을수록 막 열화와 촉매 열화 속도가 모두 증가하지만, 상대적으로 낮은 온도인 80°C에서 시험을 진행할 경우 전극 촉매의 열화 속도가 감소하게 된다. 이에 따라 촉매 열화 감소가 단락(shorting)에 의한 내구평가 종료 시간에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2. 실험

2.1 내구성 평가 방법

본 실험에서 MEA (VFPA4A25-G00, VINATech Co., Korea)를 사용했는데 이 MEA는 18 μm 두께의 e-PTFE 강화막(SANG-A FRONTec Co., Korea) 양면에 데칼 방법에 의해 Pt/C 입자를 anode, cathode 각각 0.12, 0.48 mg/cm^2 전극층을 접합한 것이다. 전극 면적이 25 cm^2 인 MEA와 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL)을 셀에 80 N·m의 토크로 체결하였다. 셀의 온도, 유량, 상대습도(RH) 등을 연료전지 평가 스테이션(CNL Energy Co., Korea)으로 제어하였다. MEA를 활성화시키고 일반적인 PEMFC 구동 조건인 70°C, 100% relative humidity (RH), anode 1.5 stoichiometric ratio (stoi.), cathode 2.0 stoi.에서 I-V 성능 곡선을 측정하였다.

고분자막의 화학적 열화와 기계적 열화를 결합한 2016년 DOE 프로토콜(Membrane Chemical/Mechanical Cycle and Metrics)을 개선하였다. DOE 방법은 90°C,

OCV, 가습(Wet, 100%RH, 45 s)/건조(Dry, 0%RH, 30 s), H₂ (1,000 mL/min), air (1,000 mL/min) 1.0 bar에서 내구성을 평가하는데, 본 연구에서는 90°C와 80°C, OCV, Wet (100%RH, 60 s)/Dry (0%RH, 60 s), H₂ (2,000 mL/min), O₂ (2,000 mL/min) 1.0 bar에서 평가하였다. DOE 프로토콜과 본 연구에서 적용한 평가 조건을 Table 1에 정리하였다. 또한 평가 시간을 단축시키기 위해 cathode 가스로 공기대신 산소를 사용하였고, 산소 사용 시 급격한 열화에 의해 단락 및 핀홀 발생을 방지하기 위해 일정 전압 이하가 되면 평가를 멈추게 하였다.

2.2 특성 분석

수소투과전류밀도(Hydrogen Crossover Current Density, HCCD)는 potentiostat (Solatron, SI 1287)을 이용한 linear sweep voltammetry (LSV) 방법으로 측정해 비교하였다. LSV는 anode와 cathode에 각각 H₂ (40 mL/min)와 N₂ (200 mL/min)를 공급하고, scan rate 1 mV/s로 0~0.4 V 범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다¹⁴⁾. 단락저항(Short-circuit Resistance, SR)은 NEDO LSV 방법으로 potentiostat를 이용해 측정하였다. NEDO LSV는 anode H₂ 200 mL/min, cathode N₂ 200 mL/min를 공급한 상태에서 scan rate 0.5 mV/s로 0.2-0.5 V의 전압 범위에서 전류를 측정하였다. 전극활성면적(Electrochemical Surface Area, ECSA)은 potentiostat을 이용한 cyclic voltammetry (CV) 방법으로 측정하였다. CV는 LSV와 동일하게 가스를 주입하고, scan rate 30 mV/s로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하는데, 14 cycle 후 측정값을 택했다. 막 저항(High Frequency Resistance, HFR) 및 부하전

달저항(Charge Transfer Resistance, CTR)은 임피던스 분석기(Solatron, SI 1287)를 이용해 측정하였다. 임피던스 측정은 anode와 cathode에 각각 H₂ (93 mL/min)와 air (296 mL/min)를 공급하고, DC current 1 A, AC amplitude 100 mA, 100,000~0.01 Hz 범위에서 측정하였다.

양쪽 극 출구 온도를 0°C로 제어해 포집한 응축수를 ion selective electrode meter (ISE Meter, PH-250L, ISTEK, Inc.)를 이용해 배출수의 불소 이온 농도를 측정했다. 검량 곡선 작성을 위해 sodium fluoride를 이용하여 1,000 ppm, 100 ppm 표준용액을 제조하였다. Total Ionic strength adjuster buffer (TISAB) 용액을 제조하여 표준 용액과 1:1 비율로 섞어서 측정하였다. TISAB 용액은 용액의 pH를 맞추고 착물화된 불소를 다시 이온화시킬 뿐만 아니라 이온 세기를 일정하게 하는데 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 OCV 변화와 불소 유출량 변화

병행 AST 과정에서 OCV 변화를 Fig. 1에 나타냈는데, 시작과 끝을 비교하면 온도가 높을 때 OCV가 더 낮아 실험결과가 열역학적 이론과 잘 맞았다¹⁰⁾. Dry- Wet- Dry로 변환할 때 OCV가 급상승해 최고점을 찍고 이후 서서히 감소해 최저점을 찍었다. 최고점을 잇는 선을 HOL (High OCV Line)이라 하고 최저점을 잇는 선을 LOL (Low OCV Line)이라 명칭하면, 열화가 진행되면서 HOL과 LOL 모두 낮아지고 있고, 시간이 경과하면서 HOL과 LOL 간의 사이 폭이 커지고 있다. 가역적 열화에 의해서 회복이 많이 되지만 열화가 진행되면서 비가역적 열화가 병행되어 HOL과 LOL 모두 낮아지고 사이 폭이 커졌다. 온도가 높은 90°C에서 80°C보다 HOL과 LOL 모두 더 낮아지고 사이 폭이 더 커졌다. 즉 90°C에서 80°C보다 열화속도가 더 높은 것인데, 온도가 높아지면 열화 반응속도(라디칼에 반응, 촉매 용해/석출 반응)가 더 높아지기 때문이다.

Table 1. Comparison of accelerated stress test (AST) conditions between the DOE protocol and this protocol

Parameter	DOE protocol	This protocol
Temperature	90°C	90/80°C
Wet/Dry	45/30 sec	60/60 sec
Flow rate	H ₂ /Air 1,000 mL/min	H ₂ /O ₂ 2,000 mL/min

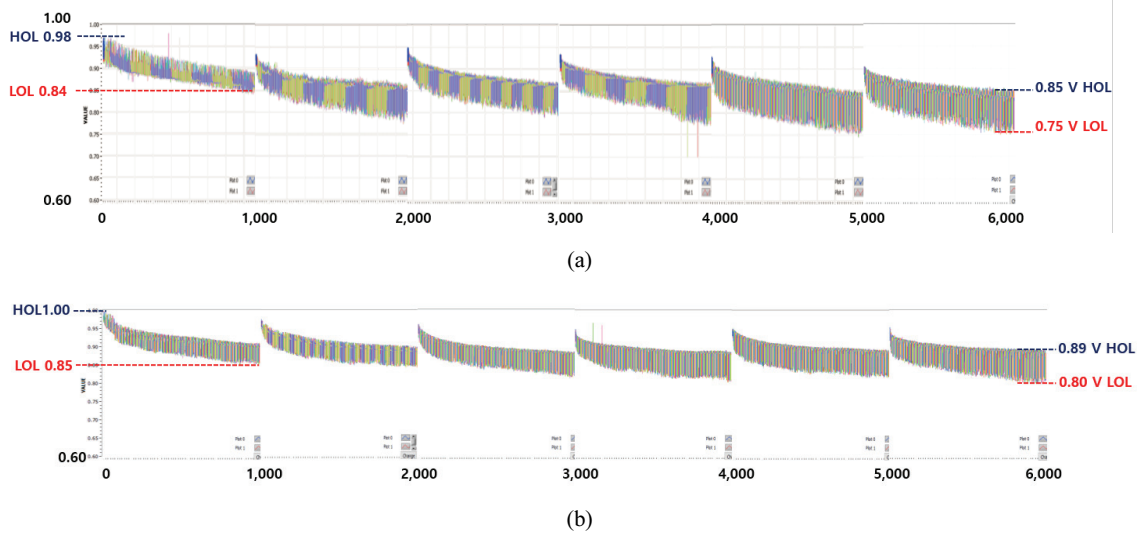


Fig. 1. Variation of OCV during AST cycles at (a) 90°C (b) 80°C

병행 AST 과정에서 OCV 변화를 처음과 중간, 끝 부근에서 한 사이클들을 Fig. 2에 나타냈다. Dry 상태에서 막의 낮은 수소투과도에 의한 높은 OCV를 유지하다 촉매층의 binder 이오노머의 전기화학적 Activity가 감소해서 OCV 감소하다 Wet 상태로 변화하면서 이오노머의 Activity가 증가해서 OCV가 급증하고¹⁸⁾, 이후 수소투과도 증가와 Pt의 산화에 따른 OCV 감소와 상쇄되어 일정한 OCV가 유지되는 사이클이 반복되고 있다(Fig. 2). 온도가 더 높은 90°C에서 Dry 상태에서 바인더 건조속도가 더 빨라 바인더의 수소이온 Activity 감소속도가 빨라 전압감소 폭이 80°C보다 더 크다. Dry 상태에서 OCV가 90°C에서 더 낮게 유지되어서 막 열화속도는 더 낮을 수 있다. 전압변화 폭이 크면 전극 촉매 열화 AST에서 전압변화 폭이 큰 것과 같은 효과를 가져 전극 촉매 열화가 80°C보다 더 될 가능성이 높다.

6,000사이클 종료 시 90°C에서 누적 불소 유출량이 80°C에 비해 약 2배 높다(Fig. 3). Dry 시 OCV 전압은 낮아서 라디칼 생성속도가 작을 수 있지만 생성된 라디칼에 의한 고분자 분해 속도는 반응온도가 높은 90°C에서 더 높을 수 있다¹⁹⁾. 그리고 막 내부에 석출된 Pt 입자가 90°C에서 더 많고 가스 투과도도 더 높기 때문에 막 내부에서 라디칼 생성속도가 80°C보

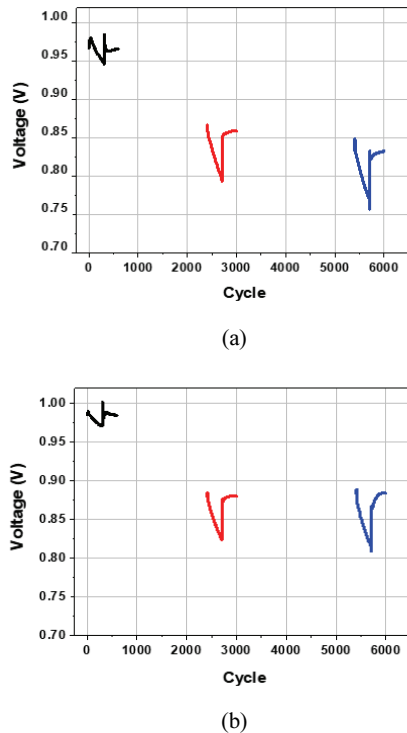
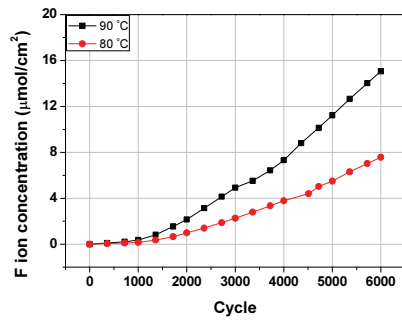
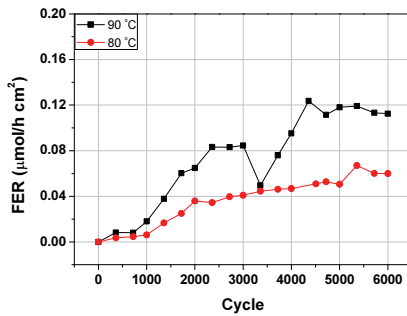


Fig. 2. Variation of OCV during AST 1st, 3,000, 6,000 cycles at (a) 90°C (b) 80°C

다 더 높을 수 있다. Wet/Dry 사이클 횟수가 증가하면서 FER이 증가하는 것도 막 내부 Pt 입자 증가와



(a)



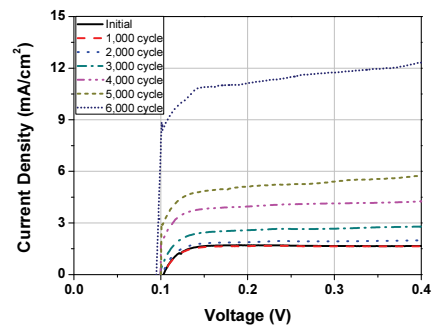
(b)

Fig. 3. Comparison of (a) F ion concentration and (b) FER according to temperature variation during AST cycles

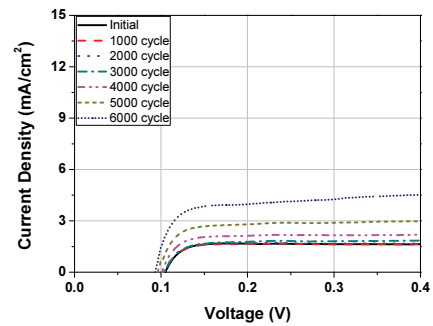
막 열화에 의한 가스투과도 증가에 따른 것으로 온도가 10°C 더 높은 90°C에서 불소 유출이 더 많다.

3.2 수소투과도와 단락 저항 변화

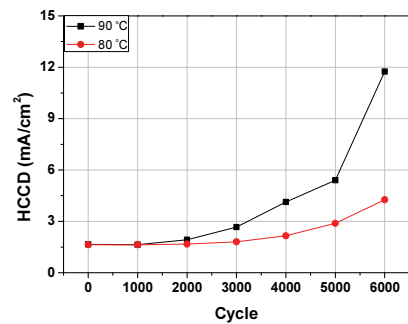
90°C에서 HCCD는 3,000사이클 이후 급증하여 6,000사이클 후 80°C보다 약 3배 정도 높았다(Fig. 4). 2,000사이클까지 거의 같은 HCCD를 보이다 이후 차이가 커졌다. 90°C에서 불소 유출량은 약 2배 증가한 것에 비해 HCCD는 3배 증가하였는데, 이것은 5,000사이클 이후 HCCD가 급증한 결과다. HCCD가 급증할 경우에는 막 내부에 Pt 촉매가 많이 석출되어 electrical shorting 현상이 발생하면서 상승작용에 의해 국부적으로 막 열화가 심하게 발생하게 된다¹⁸⁾. 이런 국부적인 막 열화에 의한 불소 유출은 전체 유출량에 미치는 영향이 작기 때문에 electrical shorting이 발생했지만 전체 불소 유출량 증가는 크지 않았다.



(a)



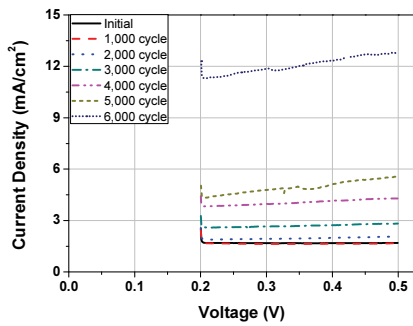
(b)



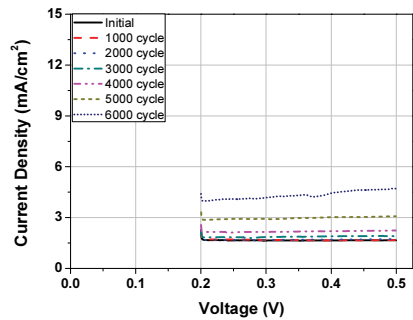
(c)

Fig. 4. Variation of LSV at (a) 90°C, (b) 80°C and (c) comparison of HCCD during AST cycles

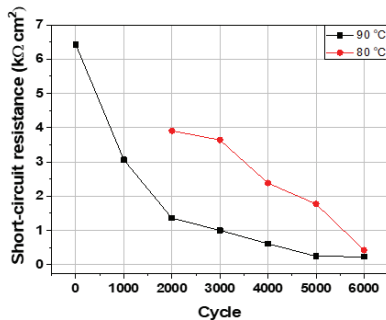
Short 저항을 측정하기 좋은 NEDO 방법에 의해 LSV를 측정하고 SR 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 90°C에서는 3,000사이클 SR이 1.0 kΩ·cm² 이하로 감소했지만 80°C에서는 약 5,500사이클 이후 1.0 kΩ·cm² 이하로 감소하였다. DOE AST에서는 SR이 1.0 kΩ·cm²이 되면 AST를 종료해야 한다. DOE의 Target인 OCV: 20% 감소, HCCD: 15 mA/cm², SR: 1.0 kΩ·cm² 중에 SR이 target에 제일 먼저 도달해 SR이 수명을 결정지었다.



(a)



(b)



(c)

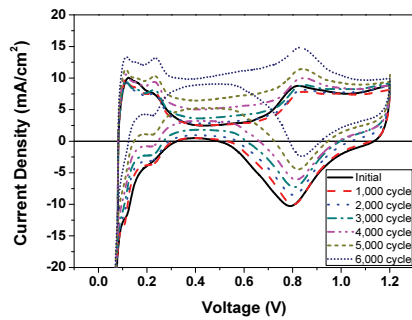
Fig. 5. Variation of LSV by NEDO method at (a) 90°C, (b) 80°C and (c) comparison of HCCD during AST cycles

90°C에서 3,000사이클부터 HCCD가 급증했는데, SR이 $1.0 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이하가 되는 시점과 동일하다. 막 열화에 의한 두께 감소와 Pt 입자의 막 내부 석출이 HCCD와 SR에 모두 영향을 주어 상승작용을 한 것이라 판단된다. 석출된 Pt 양이 많아지면서 양전극 사이에서 전자전달 역할이 원활해질 뿐만 아니라, Pt 상에서 수소와 산소가 만나 라디칼 생성반응 속도가 증가해 막 열화속도가 증가한 것이다.

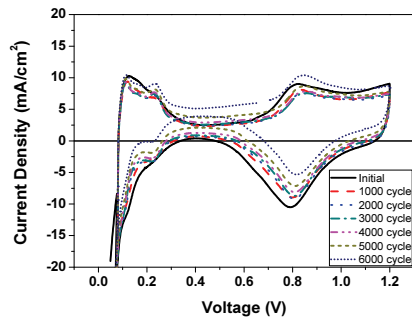
3.3 전극활성면적과 전하전달저항 변화

HCCD가 증가해 CV 그래프가 위로 상승했고, SR이 감소하면서 CV가 수평에서 위로 약간 기울어진 것을 Fig. 6에서 보이고 있다.

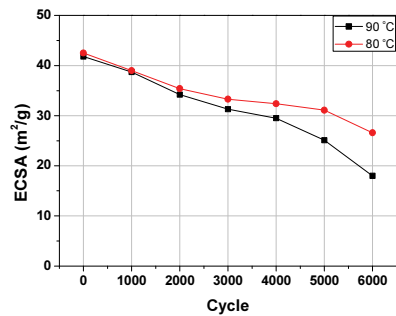
전극 촉매 AST는 전압 변화 사이클을 반복하면서 Pt가 용해/석출되면서 ECSA가 감소한다. 본 combined AST도 Fig. 1에 보인 것처럼 전압변화가 반복



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Variation of CV at (a) 90°C, (b) 80°C and (c) comparison of ECSA during AST cycles

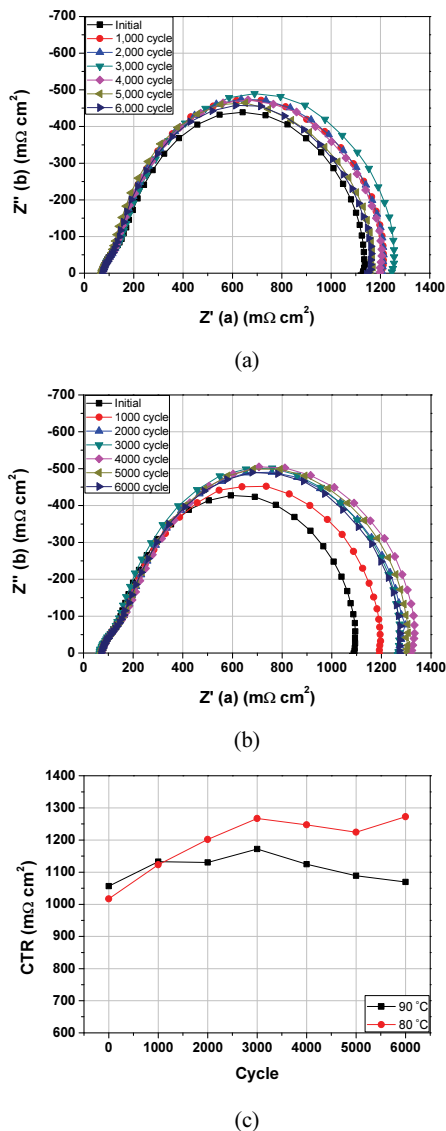


Fig. 7. Variation of impedance at (a) 90°C, (b) 80°C and (c) comparison of CTR during AST cycles

되고 있어 Pt가 열화되어 ECSA가 감소하였다(Fig. 6). Wet 상태 높은 전압에서 Pt가 용해되고 전압이 낮아지면서 수소와 만나 Pt 입자로 막 내부에 석출된다. 저가습의 Dry 사이클에서 Pt 입자상에서 라디칼 발생에 의한 막 열화가 가속화된¹⁹⁾. 전압 변화폭이 큰 90°C에서 ECSA가 80°C보다 더 감소했다. 90°C에서 3,000사이클 이후 ECSA 감소가 커졌는데, HCCD 급증과 SR 1.0 $k\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이하가 된 것과 관련이 있다. 즉,

석출된 Pt가 누적되면서 라디칼에 의한 막 열화속도가 증가해 막 두께가 얇아지고 그 결과 HCCD가 증가했다. 또한 Pt 입자가 많아지면서 양전극 간에 전자를 전달하는 길을 만들어줘 short 전류가 커지고 막 두께가 얇아져 SR이 감소한 것이다.²⁰⁾

병행 AST 과정에서 HFR은 거의 변하지 않고, CTR은 변화가 크다(Fig. 7). 3,000사이클까지는 CTR이 증가하는 추세지만, 3,000사이클 이후 80°C는 CTR이 일정해진 경향을 90°C는 감소하는 경향을 보인다. SR이 1.0 근처에서 낮아질 때(Hard Short) CTR이 감소하는 경향이 있다²¹⁾. Short 전류가 증가하면서 막 내부에 전하 이동이 이온뿐만 아니라 전자도 합류해서 저항이 작아진 것으로 판단한다. 90°C에서 3,000사이클 이후 SR이 1.0 이하가 되었고 ECSA 급감한 것과, HCCD 급증이 SR 1.0 $k\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이하가 된 것과 관련이 있다.

4. 결론

기존의 고분자막 화학적/기계적 내구성 평가 프로토콜에서 cathode 가스를 공기 대신 산소로 사용하여 가속 내구 평가를 수행할 경우, 막 자체의 열화보다 electrical shorting에 의해 수명이 결정되는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 완화하고 막 열화를 보다 장시간 평가하기 위해 시험 온도를 90°C에서 80°C로 낮춘 combined AST를 수행하였다.

Wet/Dry 사이클 동안 90°C 조건에서는 80°C에 비해 OCV 전압 변화폭이 크고 ECSA 감소가 더욱 크게 나타났다. 특히 3,000사이클 이후 HCCD가 급격히 증가하고 SR이 빠르게 감소하였으며, 이는 Pt의 용해-석출이 촉진되어 막 내부 Pt가 증가하고, 이에 따른 라디칼 생성 및 electrical shorting이 가속되었기 때문으로 판단된다.

90°C에서는 약 3,000사이클에서 SR이 1.0 $k\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이하로 감소한 반면, 80°C에서는 약 5,500사이클 이후 동일 수준에 도달하였다. 또한 90°C에서 FER, HCCD 증가 및 ECSA 감소가 더욱 크게 나타나 Pt 축적과 이에 따른 shorting 현상이 더 빠르게 진행됨

을 확인하였다.

따라서 80°C 조건에서 평가 지속 시간이 증가한 것은 막 자체의 화학적·기계적 열화가 감소하였다고 보다는 Pt 용해·석출 및 전극 열화가 완화된 electrical shorting 발생 시점이 지연된 결과로 해석된다. 결과적으로 시험 온도를 90°C에서 80°C로 낮춤으로써 SR 기준 도달 시점이 약 3,000사이클에서 5,500 사이클로 연장되었으며, 고분자막 내구성 평가 지속 시간을 약 1.8배 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2025학년도 국립순천대학교 글로벌대학 사업비의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. R. L. Borup, A. Kusoglu, K. C. Neyerlin, R. Mukundan, R. K. Ahluwalia, D. A. Cullen, K. L. More, A. Z. Weber, and D. J. Myers, "Recent developments in catalyst-related PEM fuel cell durability", *Current Opinion in Electrochemistry*, Vol. 21, 2020, pp. 192-200, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.02.007>.
2. C. S. Gittleman, A. Kongkanand, D. Masten, and W. Gu, "Materials research and development focus areas for low cost automotive proton-exchange membrane fuel cells", *Current Opinion in Electrochemistry*, Vol. 18, 2019, pp. 81-89, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.10.009>.
3. J. Marcinkoski, R. Vijayagopal, J. Adams, B. James, J. Kopasz, and R. Ahluwalia, "DOE advanced truck technologies. Subsection of the Electrified Powertrain Roadmap. Technical targets for hydrogen-fueled long-haul tractor-trailer trucks", 2019, pp. 1-31, Retrieved from https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19006_hydrogen_class8_long_haul_truck_targets.pdf.
4. S. D. Knights, K. M. Colbow, J. St-Pierre, and D. P. Wilkinson, "Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC", *Journal of Power Sources*, Vol. 127, No. 1-2, 2004, pp. 127-134, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.033>.
5. M. S. Wilson, F. H. Garzon, K. E. Sickafus, and S. Gottesfeld, "Surface area loss of supported platinum in polymer electrolyte fuel cells", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 10, 1993, pp. 2872-2877, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2220925>.
6. J. Xie, D. L. Wood III, D. N. Wayne, T. A. Zawodzinski, P. Atanassov, and R. L. Borup, "Durability of PEFCs at high humidity conditions", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 152, No. 1, 2005, pp. A104-A113, doi: <https://doi.org/10.1149/1.1830355>.
7. D. E. Curtin, R. D. Lousenberg, T. J. Henry, P. C. Tangeman, and M. E. Tisack, "Advanced materials for improved PEMFC performance and life", *Journal of Power Sources*, Vol. 131, No. 1-2, 2004, pp. 41-48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.01.023>.
8. Z. Luo, D. Li, H. Tang, M. Pan, and R. Ruan, "Degradation behavior of membrane-electrode-assembly materials in 10-cell PEMFC stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 13, 2006, pp. 1831-1837, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.02.029>.
9. A. Pozio, R. F. Silva, M. De Francesco, and L. Giorgi, "Nafion degradation in PEFCs from end plate iron contamination", *Electrochimica Acta*, Vol. 48, No. 11, 2003, pp. 1543-1549, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00026-4).
10. D. P. Wilkinson, J. St-Pierre, W. Vielstich, H. Gasteiger and A. Lamm (Eds.). *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals Technology and Applications*, Vol. 3, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 2003, pp. 611-612.
11. A. Collier, H. Wang, X. Yuan, J. Zhang, and D. P. Wilkinson, "Degradation of polymer electrolyte membranes", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 13, 2006, pp. 1838-1854, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.006>.
12. U.S. Department of Energy (DOE), "DOE Cell Component Accelerated Stress Test Protocols for PEM fuel cells", 2007, Retrieved from http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/component_durability_profile.pdf.
13. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) PEFC evaluation project, "Cell evaluation and analysis protocol guideline", edited by Daido University, Ritsumeikan University, Tokyo Institute of Technology, and Japan Automobile Research Institute, January 30th, 2014, Retrieved from <https://www.nedo.go.jp/content/100537904.pdf>.
14. R. Mukundan, "Fuel cell - performance and durability FC 139: modeling, evaluation, characterization", 2016 DOE Fuel Cell Technologies Office Annual Merit Review, June 8, 2016, Retrieved from https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review16/fc139_borup_2016_o.pdf.
15. R. Mukundan, A. M. Baker, A. Kusoglu, P. Beattie, S. Knights, A. Z. Weber, and R. L. Borup, "Membrane accelerated stress test development for polymer electrolyte fuel cell durability validated using field and drive cycle testing", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 165, No. 6, 2018, pp. F3085-F3093, doi: <https://doi.org/10.1149/2.0101806jes>.
16. D. Lim, S. Oh, S. Jung, J. H. Jeong, and K. Park, "Durability test of membrane by the combination of chemical/mechanical degradation", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 59, No. 3, 2021, pp. 339-344, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2021.59.3.339>.

17. S. Oh, D. Yoo, M. Kim, J. Park, Y. Choi, and K. P. Park, "Reducing the test time for chemical/mechanical durability of polymer electrolyte membrane fuel cells", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 61, No. 4, 2023, pp. 517-522, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2023.61.4.517>.
18. A. J. Bard and L. R. Faulkner, "Electrochemical methods: fundamentals and applications", John Wiley & Sons, New York, 2000.
19. H. Jeong, S. Ham, S. D. Yim, and M. Kim, "Review of degradation and performance recovery methods for polymer electrolyte membrane fuel cells in hydrogen mobility applications", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 458-476, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.458>.
20. S. Oh, J. Gwon, D. Lim, and K. Park, "Study on the Short Resistance and Shorting of Membrane of PEMFC", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 59, No. 1, 2021, pp. 6-10, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2021.59.1.6>.
21. S. Oh, D. Yoo, S. Jung, J. Jeong, and K. Park, "Chemical durability test of thin membrane in proton exchange membrane fuel cells", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 61, No. 3, 2023, pp. 362-367, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2023.61.3.362>.