

고분자연료전지의 화학적/기계적 내구성 평가 시간 단축

오소형* · 유동근* · 김명환** · 박지용** · 최영진** · 박권필*†

*순천대학교 화학공학과
57922 전남 순천시 매곡동 315
**친환경기술연구소, 한국자동차연구원2
31214 충청남도 천안시 동남구 풍세면 풍세로 303
(2023년 5월 22일 접수, 2023년 9월 11일 수정본 접수, 2023년 9월 13일 채택)

Reducing the Test Time for Chemical/Mechanical Durability of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells

Sohyeong Oh*, Donggeun Yoo*, Kim Myeonghwan**, Park Jiyong**, Choi Yeongjin** and Kwonpil Park†

Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922 Korea
303 Pungse-ro, Pungse-Myeon, Cheonan-Si, Chungnam, 31214 Korea

(Received 22 May 2023; Received in revised from 11 September 2023; Accepted 13 September 2023)

요 약

고분자전해질 연료전지 (PEMFC)에 공기와 수소를 공급하고 개회로전압 (OCV) 상태에서 가습/건조를 반복하는 고분자막의 화학적/기계적 내구성 평가법이 사용되고 있다. 이 프로토콜에서 가습/건조가 반복되면 전압 상승/감소가 반복되어 전극 열화도 발생한다. 막 내구성이 우수한 경우 전압 변화 횟수가 증가해, 전극 열화에 의해 평가가 종료되어 원래 목적인 막 내구성 평가를 할 수 없는 문제가 발생하기도 한다. 본 연구에서는 미국 에너지부 (DOE)와 동일한 프로토콜을 사용하되 cathode 가스로 공기대신 산소를 사용하고 가습/건조시간과 유량도 증가시켜 막의 화학적/기계적 열화 속도를 증가시켜서 고분자막 내구 평가 시간을 단축시킴으로서 이와 같은 문제를 개선하고자 하였다. Nafion 211 막전극접합체(MEA) 내구성 평가를 공기 대신 산소를 사용해서 가속화도를 2.6배 증가시켜 2,300 사이클만에 평가 종료하였다. 본 프로토콜에 의해 고분자막도 가속 열화되고, 전극 촉매도 가속 열화되어 고분자막과 전극의 내구성을 동시에 평가할 수 있는 이점도 있었다.

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, when wet/dry is repeated, voltage increase/decrease is repeated, resulting in electrode degradation. When the membrane durability is excellent, the number of voltage changes increases and the evaluation is terminated due to electrode degradation, which may cause a problem that the original purpose of membrane durability evaluation cannot be performed. In this study, the same protocol as the department of energy (DOE) was used, but oxygen was used instead of air as the cathode gas, and the wet/dry time and flow rate were also increased to increase the chemical/mechanical degradation rate of the membrane, thereby shortening the durability evaluation time of the membrane to improve these problems. The durability test of the Nafion 211 membrane electrode assembly (MEA) was completed after 2,300 cycles by increasing the acceleration by 2.6 times using oxygen instead of air. This protocol also accelerated degradation of the membrane and accelerated degradation of the electrode catalyst, which also had the advantage of simultaneously evaluating the durability of the membrane and the electrode.

Key words: PEMFC, Chemical/Mechanical durability, Pt dissolution/deposition, Radical, Membrane degradation

1. 서 론

고분자전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 차세대 무공해 전기자동차(Zero-emission Electric Vehicles, ZEV)에 제일 적합한 에너지 변환장치이다. 그러나 PEMFC의 상용화

† 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.

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 5,000~8,000 시간 요구되었는데, 대형 트럭 운전시간이 약 30,000시간(약 백만 마일)이나 되기 때문이다[3]. 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 분류된다[10]. 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 개회로전압(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 신에너지 산업기술 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 프로토콜을 발표하였다[14]. 이 AST는 고분자막의 화학적 내구성과 기계적 내구성을 동시에 평가할 수 있게 한 것이다. Anode와 cathode 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-폴리테트라플루오르에틸렌(Expanded polytetrafluoroethylene, e-PTFE) 지지체가 들어간 강화막은 400시간 이상의 장시간 평가 시간이 필요할 수 있다[15]. 이와 같이 장시간 전압 변화 횟수가 많아지면 고분자막 열화보다 전극 열화에 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 한다[16]. 그래서 고분자막 열화 속도를 가속화시켜 전극 열화의 영향을 감소시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 DOE와 동일한 프로토콜을 사용하되 cathode 가스로 공기 대신 산소를 사용하고 가습/건조시간과 유량도 증가시켜 막의 화학적 기계적 열화 속도를 증가시켜서 고분자막 내구 평가 시간을 단축시킴으로서 이와 같은 문제를 개선하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 실험방법

본 실험에 사용된 고분자전해질 막은 Nafion 211이고, 막 양면에 테팔 방법에 의해 Pt/C 입자를 코팅해 anode, cathode 모두 Pt 함량 0.4 mg/cm² MEA를 제조하였다. 전극 면적이 25 cm²인 MEA와 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL)을 셀에 80토크로 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 stoi. (stoichiometric ratio), 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(100%RH, 45초)/건조(0%RH, 30초), 수소(1,000 mL/min), 공기(1,000 mL/min) 1.0 bar에서 내구성을 평가하는데, 순천대학교(Sunchon National University, SCNU) 프로토콜은 90°C, OCV, 가습(100%RH, 60초)/건조(0%RH, 60초), 수소(2,000 mL/min), 공기(2,000 mL/min) 1.0 bar에서 평가하였다. 평가 시간을 단축시키기 위해 SCNU 프로토콜에서 cathode 가스로 공기대신 산소를 사용한 것이 개선된 ISCNU(Improved SCNU) 프로토콜이다. 산소 사용시 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 LSV (Linear sweep voltammetry) 방법으로 측정해 비교하였다. LSV는 anode와 cathode에 각각 H₂ (40 mL/min)와 N₂ (200 mL/min)를 공급하고, scan rate 1 mV/sec로 0~0.4 V 범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다[14]. 전극활성면적(Electrochemical Surface Area, ECSA)은 potentiostat을 이용한 CV (Cyclic Voltammetry) 방법으로 측정하였다. CV는 LSV와 동일하게 가스를 주입하고, scan rate 30 mV/sec로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하는데, 14 cycle 후 측정값을 택했다.

막 저항(High Frequency Resistance, HFR) 및 부하전달저항(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. 열화에 의한 고분자 막과 전극의 두께 변화는 SEM (Scanning Electron Microscope, Hitachi S-4800)을 이용해 분석하였으며, beam 전위는 15 kV였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 가속내구평가 과정 중 OCV 변화

고분자막의 화학적 내구성과 기계적 내구성 평가를 결합한 기존의 SCNU 프로토콜(SCNU)과 개선된 프로토콜(ISCNU)에 의한 가습/건조에 따른 OCV 변화를 Fig. 1에 나타냈다. 건조하면 수소투과도가 감소하여 OCV가 증가하고 가습하면 OCV가 감소한다. 건조했을 때 위 끝점을 이은 선이 상한선(High Limit Line, HLL)이고 가습했을 때 아래 끝점을 이은 선이 하한선(Low Limit Line, LLL)이다. HLL과 LLL 사이 폭은 OCV 변화 폭(OCV Change Range, OCR)이라 한다[16]. 1,000 사이클마다 가습/건조를 중지하고 활성화 후 LSV, CV, 임피던스를 측정하고, 가습/건조를 다시 시작했을 때 OCV가 전체적으로 증가한 것은 활성화 효과라고 볼 수 있고, SCNU 프로토콜의 초기 OCR은 약 0.045 V, ISCNU 프로토콜은 0.022 V였으나 종료 시점에서는 SCNU 프로토콜은 약 2배 증가해 0.092 V, ISCNU 프로토콜은 약 6배 증가해 0.127 V가 되었다. 이렇게 OCR이 증가한

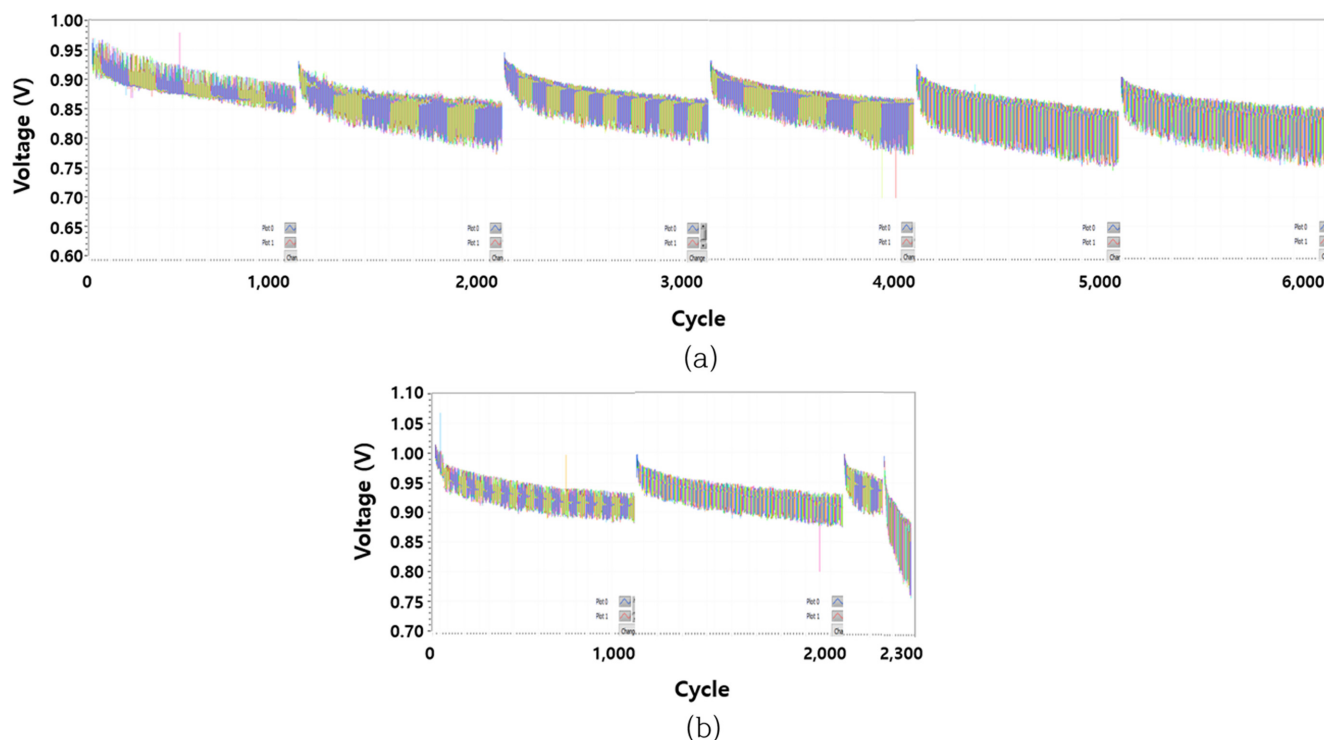


Fig. 1. Variation of OCV during AST cycles using (a) SCNU Protocol (b) ISCNU Protocol.

것은 고분자막이 열화되어 수소투과도가 증가해 즉 LLL이 감소했기 때문이다.

공기 대신 산소를 cathode에 유입한 Fig. 1(b)는 HLL과 LLL의 감소 속도가 2,000 사이클 이후 증가해 고분자막 열화 속도가 높았음을 보인다. OCR 증가속도도 커져 2,200 사이클에 중단하고 성능 평가하였다. HCCD가 6.0 mA/cm^2 로 증가하였지만 DOE의 기준인 15 mA/cm^2 에 미치지 못해 열화를 더 진행하였다. 2,300 사이클 후 LLL이 0.78 V가 되어 SCNU의 LLL과 같아져서 종료하였다. 개선된 ISCNU 프로토콜이 기존의 SCNU 프로토콜보다 화학적/기계적 열화 병행 AST 시간을 62% 감소시켜 가속화도를 2.6배 증가시켰다.

3-2. AST 과정 중 수소투과도와 단락 저항 변화

DOE의 LSV 측정 방법에 의해 AST 과정 중에 수소투과도 변화를 Fig. 2에 비교했다. 두 프로토콜 모두 DOE의 기준인 15 mA/cm^2 에 도달 전에 평가 종료한 이유는 DOE AST 내구성 평가 목표(Target) 중에 하나인 단락 저항(Short Resistance, SR)이 너무 낮아져 더 이상 진행하기 어렵게 되어서 중단한 것이다. 산소 사용 ISCNU 프로토콜 AST는 2,300 사이클에 종료되어 SCNU 프로토콜보다 2.6배 열화 속도를 가속화시켰다. 이와 같은 결과는 Fig. 1의 OCV 변화 속도와 연관성이 있다고 할 수 있는데, 산소를 사용하면 라디칼 발생 속도가 상승해 화학적 열화 속도가 급증한 결과라고 본다. SR 측정이 용이한 NEDO LSV 방법에 의한 측정법에서도 마찬가지로 HCCD 기준으로 산소 사용 프로토콜이 고분자막 열화 속도가 더 빠름을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 산소 사용 ISCNU AST는 2,300 사이클만에 $0.079 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 급감해, 경성 단락(Hard Short)에 의한 shorting에 의해 열화 속도가 급증하고, 수소투과도도 SR과 상승작용으로 급상승했다고 본다[17]. 고분자막 열화과정에서 고분자막의 두께 감소에 따른 전극 간 거리가 가까워지고 금속 촉매가 막내부에

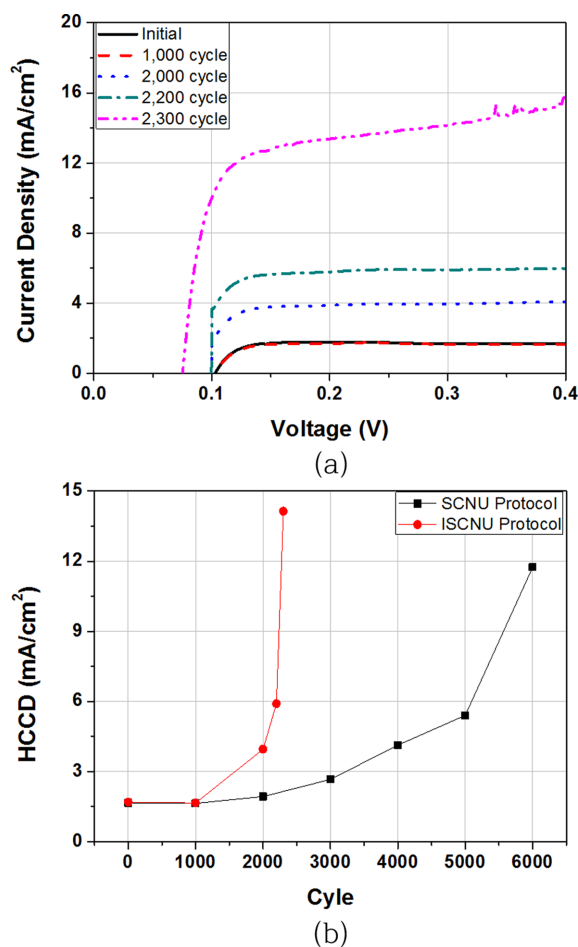


Fig. 2. Variation of LSV and HCCD during AST cycles (a) LSV using ISCNU Protocol (b) comparison of HCCD.

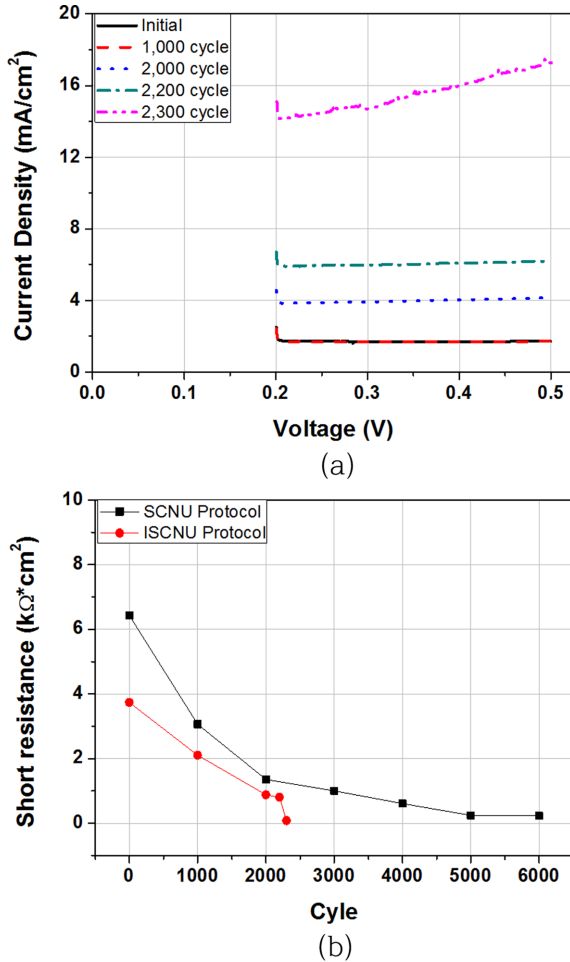


Fig. 3. Variation of NEDO LSV and Short resistance during AST cycles (a) NEDO LSV using ISCNU Protocol (b) comparison of Short resistance.

용해/석출되어 Short 전류가 증가한 결과라고 판단된다. 공기 사용 SCNU AST는 5,000 사이클에 SR이 0.242 kΩ·cm²로 막 열화에 SR의 감소가 많은 영향을 주었음을 알 수 있다.

3-3. I-V 성능과 OCV 변화

DOE의 고분자막 화학적 가속 내구성 평가지표(Target)는 HCCD와 SR 그리고 OCV이다. HFR과 FER도 측정하지만 참고지표로 이용할 뿐이다. Fig. 4에 가속 내구성 평가 중 I-V 성능 변화와 OCV 변화를 비교하였다. DOE에서 평가지표로 명시한 OCV는 연속적인 OCV (Continuous OCV)로 HLL이고, Fig. 4(b)는 I-V 성능상의 OCV다. Fig. 1에서 두 프로토콜의 초기 HLL은 각각 0.97 V, 1.01 V 이고 종료 시점 HLL은 각각 0.85 V, 0.88 V로 두 프로토콜 모두 13% 정도 감소하였다. OCV 감소는 cathode에서 형성된 혼합전위 (Mixed potential)와 HCCD 그리고 short 전류의 영향을 받는다. DOE의 OCV에 의한 종료 기준은 20%로 이 기준에 미치지 못해 OCV 감소가 SR 감소를 다 반영하지 못함을 나타내고 있다(SR에 의해 평가 종료되었지만 OCV 기준으로는 종료 시점에 도달하지 못함). I-V 상의 OCV는 약 7% 감소해서 활성화 후 측정한 효과로 인해 OCV 감소가 HLL 감소보다 작다. OCV 감소가 ISCNU와 SCNU 각각 2,000 사이클, 4,000 사이클에 급감하였는데, 이와 같은

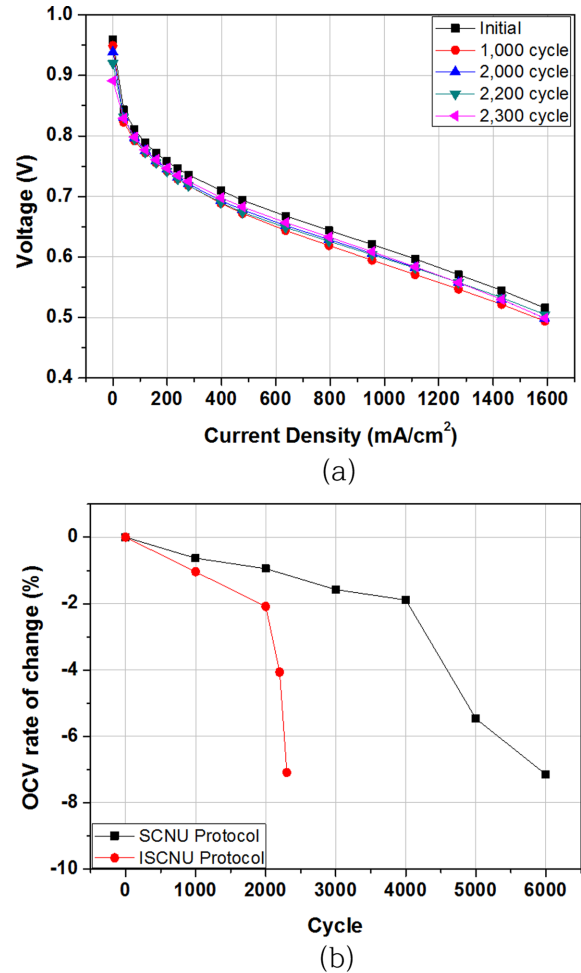


Fig. 4. Variation of I-V curves and OCV during AST cycles (a) I-V curves using ISCNU Protocol (b) comparison of OCV.

경향은 HCCD 변화와 비슷한 경향이어서 OCV가 HCCD에 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

3-4. 전극 활성면적과 전하전달 저항 변화

CV 측정 방법에 의해 AST 과정 중에 CV와 ECSA 변화를 Fig. 5에 비교했다. 고분자막의 내구성 평가 AST이므로 고분자막이 주로 열화되어야 하나 전압 변화 사이클에 의한 전극 열화도 많이 발생했다. 기존 SCNU 프로토콜은 6,000 사이클 후 58.0%, 개선된 ISCNU 프로토콜은 2,300 사이클 후 ECSA가 64.6% 감소해서 DOE 전극 촉매 내구 기준 40%를 초과하였다. Pt 촉매는 0.85 V 이상의 전압에서 PtO가 형성되고 낮은 전압으로 변화를 주면 이온으로 용해되는데, 가습/건조 과정이 이와 같은 전압 변화 과정이어서 전극 활성면적이 감소한 것이다[18]. 그래서 이 프로토콜은 막 내구성뿐만 아니라 전극 촉매 내구성도 평가하는 프로토콜이라고 할 수 있다. 또한 O₂를 공급한 ISCNU 프로토콜은 상대적으로 높은 전압을 형성하고, H₂O에 의해 PtO가 주로 형성되지만 산소도 PtO 형성에 기여하기 때문에 산소분압이 약 5배 높은 ISCNU Protocol에서 전극 열화가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. ECSA 변화 경향은 Fig. 3의 SR 변화 경향과 비슷해서, 전극층에서 용해된 Pt가 고분자막 내부에서 금속으로 석출되어 두 전극 사이에서 전자 이동 경로가 되어

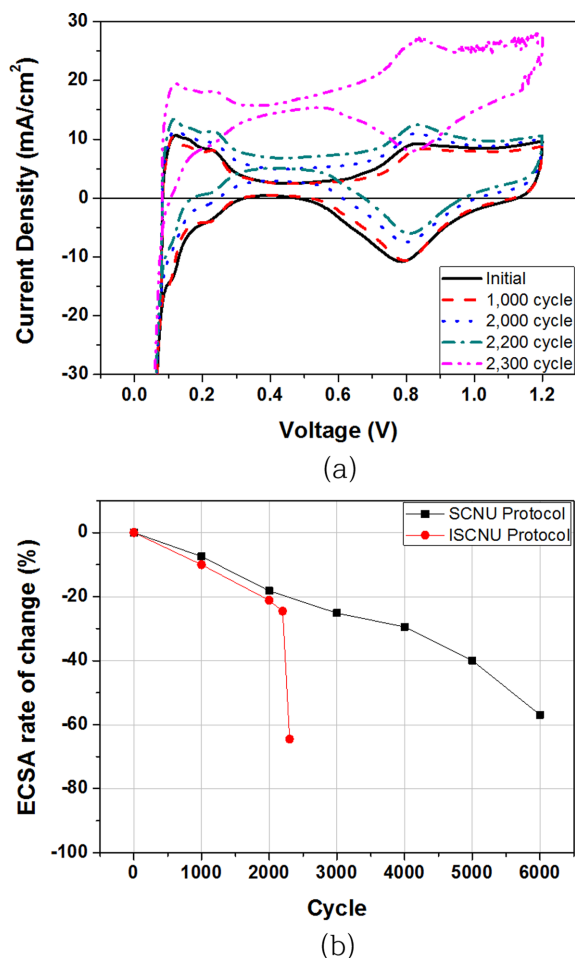


Fig. 5. Variation of CV and ECSA during AST cycles (a) CV using ISCNU Protocol (b) comparison of ECSA.

SR를 감소시킨 것을 확인한 것이다.

임피던스에 의해 MEA 열화를 Fig. 6에 비교하였다. HFR은 AST 후 거의 변화가 없었다. CTR은 산소와 공기 사용 시 모두 처음에 증가하다 열화가 심해지면서 오히려 감소하였다. 감소하는 시점이 SR이 1.0 kΩ·cm² 이하가 되는 시점과 같아서 촉매층에서 용해/석출된 Pt가 많아지면서 CTR 감소의 원인이라고 생각할 수 있다. ECSA는 초기보다 60% 이상 감소하였지만 I-V 성능은 약 10% 밖에 감소하지 않은 것을 보더라도 촉매층에 석출된 Pt가 ORR (산소환원반응)에 기여한 것이고, CV로 측정된 수소의 산화/환원을 나타내는 ECSA는 감소한 것이라고 본다.

4. 결 론

기존의 고분자막 화학적/기계적 내구성 평가 프로토콜의 평가 시간을 단축하기 위해 cathode 가스를 공기 대신 산소를 사용해 가속 내구 평가한 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

산소 사용 ISCNU 프로토콜이 기존의 SCNU 프로토콜보다 화학적/기계적 열화 병행 AST 시간을 62% 감소시켜 가속화도를 2.6배 증가시켰다. 산소를 사용하면 라디칼 발생 속도가 상승해 화학적 열화 속도가 급증한 결과라고 본다. 산소 사용 ISCNU AST는 2,300 사이클만에 막 내부에 석출된 백금 때문에 SR이 0.079

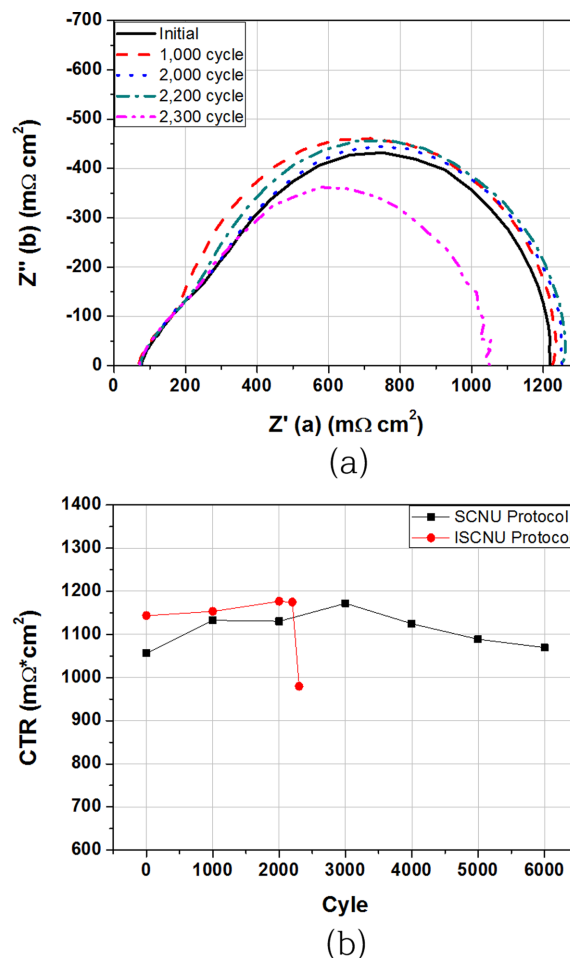


Fig. 6. Variation of Impedance and CTR during AST cycles (a) Impedance using ISCNU Protocol (b) comparison of CTR.

kΩ·cm²로 급감해서, 경성 단락(Hard Short)에 의한 shorting에 의해 열화 속도가 급증하고, 수소투과도도 SR과 상승작용으로 급상승했다.

고분자막의 내구성 평가 AST 이므로 고분자막이 주로 열화되어야 하나 가습/건조에 따른 전압 변화 사이클에 의한 전극 열화도 많이 발생했다. 기존 SCNU 프로토콜은 6,000 사이클 후 58.0%, ISCNU 프로토콜은 2,300 사이클 후 ECSA가 64.6% 감소해서 DOE 전극 촉매 내구 기준 40%를 초과하였다. Pt 촉매는 0.85 V 이상의 전압에서 PtO가 형성되고 낮은 전압이 되면 이온으로 용해되는데 가습/건조 과정이 이와 같은 전압 변화 과정이어서 전극활성면적이 감소한 것이다. 그래서 이 프로토콜은 막 내구성뿐만 아니라 전극 촉매 내구성도 평가하는 프로토콜이라고 할 수 있다. 그리고 실제 PEMFC 구동과정에서 고분자막과 전극이 동시에 열화되므로 이 가속 열화 프로토콜은 실제 구동조건과 유사한 조건에서 내구성을 평가하는 장점이 있다.

감 사

본 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(20015756).

References

- Gittleman, C. S., Kongkanand, A., Masten, D., and Gu, W., "Materials Research and Development Focus Areas for Low Cost Automotive Proton-exchange Membrane Fuel Cells," *Curr. Opin. Electrochem.*, **18**, 81(2019).
- Borup, R. L., Kusoglu, A., Neyerlin, K. C., Mukundan, R., Ahluwalia, R. K., Cullen, D. A., More, K. L., Weber, A. Z. and Myers, D. J., "Recent Developments in Catalyst-related PEM Fuel Cell Durability," *Curr. Opin. Electrochem.*, **21**, 192(2020).
- Marcinkoski, J., Vijayagopal, R., Adams, J., James, B., Kopasz, J., and Ahluwalia, R., Hydrogen Class 8 Long Haul Truck Targets. Subsection of the Electrified Powertrain Roadmap. Technical Targets for Hydrogen-Fueled Long-Haul Tractor-Trailer Trucks. https://hydrogen.energy.gov/pdfs/19006_hydrogen_class8_long_haul_truck_targets.pdf.
- Wilson, M. S., Garzon, F. H., Sickafus, K. E. and Gottesfeld, S., "Surface Area Loss of Supported Platinum in Polymer Electrolyte Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **140**(10), 2872-2877(1993).
- Knights, S. D., Colbow, K. M., St-Pierre, J. and Wilkinson, D. P., "Aging Mechanism and Lifetime of PEFC and DMFC," *J. Power Sources*, **127**(1-2), 127-134(2004).
- Luo, Z., Li, D., Tang, H., Pan, M. and Ruan, R., "Degradation Behavior of Membrane-electrode-assembly Materials in 10-cell PEMFC Stack," *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**(13), 1838-1854(2006).
- Pozio, A., Silva, R. F., Francesco, M. D. and Giorgi, L., "Nafion Degradation in PEFCs from End Plate Iron Contamination," *Electrochim. Acta*, **48**(11), 1543-1548(2003).
- Xie, J., Wood III, D. L., Wayne, D. N., Zawodinski, T. A., Atanassov, P. and Borup, R. L., "Durability of PEFCs at High Humidity Conditions," *J. Electrochem. Soc.*, **152**(1), A104-A113(2005).
- Curtin, D. E., Lousenberg, R. D., Henry, T. J., Tangeman, P. C. and Tisack, M. E., "Advanced Materials of Improved PEMFC Performance and Life," *J. Power Sources*, **131**(1-2), 41-48(2004).
- 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).
- Collier, A., Wang, H., Yaun, X., Zhang, J. and Wilson, D. P., "Degradation of Polymer Electrolyte Membranes," *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**(13), 1838-1854(2006).
- https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/component_durability_profile.pdf, "DOE Cell Component Accelerated Stress Test Protocols For Pem Fuel Cells."
- 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).
- Mukundan, R., "Fuel Cell – Performance and Durability FC139 – Modeling, Evaluation, Characterization," 2016 DOE Fuel Cell Technologies Office Annual Merit Review, June 8th(2016).
- Mukundan, R., Baker, A. M., Kusoglu, A., Beattie, P., Knights, S., Weber, A. S. and Borup, R. L., "Membrane Accelerated Stress Test Development for Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability Validated Using Field and Drive Cycle Testing," *J. Electrochem. Soc.*, **165**(6), F3085-F3093(2018).
- Lim, D. H., Oh, S. H., Jung, S. G., Jeong, J. H. and Park, K. P., "Durability Test of PEMFC Membrane by the Combination of Chemical/Mechanical degradation," *Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(1), 16-20(2021).
- Mench, M. M., Emin, C. K. and Veziroglu, T. N., *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*, Academic Press, Oxford, Waltham, MA, 64-77(2012).
- 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

Myounghwan Kim: Vice President, KATECH, 303, Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31214, Korea; kimmh@katech.re.kr

Jiyoung Park: Lab Leader, KATECH, 303, Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31214, Korea; jypark1@katech.re.kr

Choi Yeongjin: Senior Researcher, KATECH, 303, Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31214, Korea; yjchoi@katech.re.kr

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