

## PEMFC 고분자막의 화학적 내구성 평가시간 단축

오소형 · 조원진 · 임대현 · 유동근 · 박권필<sup>†</sup>

순천대학교 화학공학과  
57922 전남 순천시 매곡동 315  
(2021년 5월 4일 접수, 2021년 5월 22일 수정본 접수, 2021년 5월 25일 채택)

## Reducing the Test Time for Chemical Durability of PEMFC Polymer Membrane

Sohyeong Oh, Wonjin Cho, Daehyeon Lim, Donggeun Yoo and Kwonpil Park<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam 57922, Korea  
(Received 4 May 2021; Received in revised 22 May 2021; Accepted 25 May 2021)

### 요 약

대형 상용차용 PEMFC 스택 내구성은 승용차용보다 5배 이상 되어야 한다. 승용차용 PEMFC 고분자막의 화학적 가속 내구성 평가(AST)를 대형 상용차용에 그대로 적용하면 AST 시간이 2,500시간 이상이 되는 문제점이 있다. DOE (Department of Energy)의 AST 시간을 단축시키기 위해 Cathode 가스로 공기대신 산소를 사용하여 고분자막의 화학적 내구성을 평가하였다. 본 연구에서는 Nafion XL을 고분자막으로 사용해 OCV, 90 °C, RH 30%, H<sub>2</sub> (Anode), 공기 또는 산소조건으로 가속 내구성을 평가하였다. DOE 내구 목표 기준 중 Short 저항 감소가 제일 빨리 나타났다. 공기 대신 산소를 사용함으로써 전극 열화의 영향을 적게 받으면서, 고분자막의 열화 속도를 가속화시켜 고분자막 내구성 평가시간을 절반 이하로 단축시켰다.

**Abstract** – The durability of the PEMFC stack for large commercial vehicles should be more than 5 times that for passenger vehicles. If the Chemical Accelerated Stress Test (AST) of PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cells) membrane for passenger cars is applied as it is for large commercial vehicles, there is a problem that the AST time becomes more than 2,500 hours. In order to shorten the AST time of DOE (Department of Energy), the chemical durability of the polymer membrane was evaluated using oxygen instead of air as a cathode gas. In this study, Nafion XL was used as a polymer membrane to evaluate accelerated durability under OCV, 90°, RH 30%, H<sub>2</sub>/(air or oxygen) conditions. Among the DOE membrane durability target criteria, the decrease rate of short resistance was the fastest. By using oxygen instead of air, the degradation rate of the polymer membrane was accelerated while being less affected by electrode deterioration, reducing the polymer membrane durability evaluation time to less than half.

Key words: PEMFC, Membrane, Durability, AST, Chemical degradation

### 1. 서 론

최근에 국내외에서 수소에너지 시대를 맞이하여 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 실용화 및 시장 확대에 박차를 가하고 있다 [1-5]. PEMFC 고분자 막의 연구개발 동향은 고분자 막의 두께를 얇게 하고 내구성을 향상시키는 방향으로 진행되고 있다. 승용차용 스택은 5,000시간, 정치용 스택은 40,000시간 이상의 수명이 필요한 PEMFC는 [6] 장시간 운전하는 동안 MEA (Membrane and Electrode Assembly)를 구성하는 요소들이 열화되어 이 같은 수명

목표를 충족시키지 못하고 있다 [7-12].

전해질막의 열화는 화학적(Chemical) 열화, 기계적(Mechanical) 열화로 크게 분류된다 [13]. 화학적 열화는 셀 내에서 발생한 라디칼 /과산화수소가 고분자막을 공격해 막이 열화되는 것을 말한다 [13,14]. 고분자막 내구평가 시간을 단축시키기 위해 가속열화평가 (AST, Acceleration Stress Test) 기법이 사용되는데, 전기화학적 AST는 라디칼이 많이 발생하는 OCV Holding 방법이, 기계적 AST는 고분자막을 수축/팽창시키는 Dry/Wet cycle 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 미국 DOE(Department of Energy)나 일본 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서는 승용차용 PEMFC MEA에 대해서 연구개발한 AST 프로토콜을 통하여 내구성을 평가하고 있다 [15,16].

미세먼지와 부족한 수소 충전소 인프라 때문에 승용차보다 버스나 트럭 등 대형 상용차 보급확대가 더 효과적이고 실현 가능하다고

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

E-mail: parkkp@sunchon.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.

판단되어 국내외에서 연료전지가 에너지변환장치로 들어간 수소전기상용차의 개발 및 생산에 박차를 가하고 있다. 대형 상용차는 주행거리가 70~80만 km 이상이어서 PEMFC 스택 내구가 승용차용보다 5배 이상되어야 한다. 승용차용 PEMFC 고분자막의 화학적 AST시간은 DOE, NEDO 프로토콜 모두 500시간인데, 이 프로토콜을 그대로 대형 상용차용 PEMFC 고분자막에 적용하면 2,500시간 이상의 내구평가기간이 필요한 문제점이 있다. 그래서 수소전기상용차용 MEA AST 시간을 단축시키는 것이 MEA 내구성 향상연구에 중요하다. 이를 위해 Cathode의 산소 분압을 높여서 산소라디칼 발생속도를 증가시킴으로써 AST 시간을 단축시키는 방법이 간단한 방법 중에 하나일 수 있다. 본 연구에서는 DOE AST 프로토콜에서 Cathode에 공기대신 산소를 1 bar 압력으로 공급하여 AST 시간을 얼마나 단축시키며, 고분자막의 화학적 내구성을 평가하는데 문제가 없는지 검토하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험방법

본 실험에 사용된 고분자전해질 막은 Nafion XL이고, 막 양면에 데칼 방법에 의해 Pt/C 전극 입자를 코팅해 anode와 cathode 모두 Pt 함량  $0.4 \text{ mg/cm}^2$  MEA를 제조하였다. 전극면적이  $25 \text{ cm}^2$ 인 MEA와 GDL (Gas Diffusion Layer, SGL 10BC)을 셀에 80토크로 체결하였다. 셀을 구성하는 분리판(separator)의 유로 면적비가 기체의 막 투과도에 영향을 줄 수 있는데, 본 실험에서는 유로 면적이 66.7%인 분리판을 사용했다. 셀의 온도, 유량, 상대습도(RH) 등을 Station (CNL Energy Co, Korea)으로 제어하였다. MEA를 활성화시키고 일반적인 PEMFC 구동 조건( $70^\circ\text{C}$ , 100%RH, anode 1.5 stoi. cathode 2.0 stoi.)에서 I-V 성능 곡선을 측정하였다.

고분자막의 화학적 내구성 가속평가법(AST)은 DOE AST 프로토콜을 기준으로 하였는데, 평가 조건은 OCV,  $90^\circ\text{C}$ , RH 30%,  $\text{H}_2$  (Anode), Cathode 가스는 공기 또는 산소로 비교하였다. 72시간 OCV를 유지(OCV Holding) 후 활성화하고 LSV, CV, I-V, Impedance를 측정 후 다시 OCV Holding를 반복하였다. 평가시간은 DOE 고분자막 화학적 내구 목표 기준(OCV 20% 감소, 수소투과전류밀도  $> 15 \text{ mA/cm}^2$ , Short Resistance  $< 1.0 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$ )를 따랐다.

### 2-2. 특성 분석

수소투과전류밀도(HCCD)는 Potentiostat (Solatron, SI 1287)을 이용한 LSV(Linear sweep voltammetry) 방법으로 측정해 비교하였다. LSV는 anode와 cathode에 각각  $\text{H}_2$  ( $40 \text{ mL/min}$ )와  $\text{N}_2$  ( $200 \text{ mL/min}$ )를 공급하고, scan rate  $1 \text{ mV/sec}$ 로  $0 \sim 0.4 \text{ V}$  범위에서 전압을 변화시키면서 전류를 측정하였다[17]. 전극활성면적(ECSA)은 potentiostat을 이용한 CV(Cyclic voltammetry) 방법으로 측정하였다. CV는 LSV와 동일하게 가스를 주입하고, scan rate  $30 \text{ mV/sec}$ 로 전압을 변화시키면서 전류를 측정하는데, 14 cycle 후 측정값을 택했다.

막 저항 및 부하전달 저항은 Impedance analyser (Solatron, SI 1287)를 이용해 측정하였다. 임피던스 측정은 anode와 cathode에 각각  $\text{H}_2$  ( $93 \text{ mL/min}$ )와 air ( $296 \text{ mL/min}$ )를 공급하고, DC current  $1 \text{ A}$ , AC amplitude  $100 \text{ mA}$ , frequency  $100,000 \sim 0.1 \text{ Hz}$  범위에서 측정하였다. 열화된 고분자막의 수소투과에 따른 연소반응 또는 Shorting에 의한 MEA 온도 상승을 측정하기 위해, 플랜지에 시편 MEA를 체결하고 플랜지 하부에서 수소를 유입하고 상부는 공기에 노출한 상태에서 적외선 카메라(FLIR A300, FLIR Systems Inc. Sweden)로 상부 전극 표면의 온도분포를 측정했다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. OCV 감소 및 회복

72시간 동안 저가습조건에서 OCV Holding 후 활성화하며 성능을 측정하고 다시 OCV Holding 하는 과정을 반복하면서 측정한 OCV를 Fig. 1에 나타냈다. MEA의 가역적 열화와 비가역적 열화가 진행되면서 1cycle 내에서 OCV가 감소하고 전체적으로도 각 cycle의 전압이 감소함을 볼 수 있다. 가역적 열화는 활성화 과정에 의해 회복되는 열화이고 비가역적 열화는 회복되지 않은 열화인데, 공기 사용시 216시간에 나타난 비가역 열화가 산소 사용시에는 72~144시간대에 나타나 열화 속도가 2배 이상임을 볼 수 있다. 산소 사용시는 OCV가  $1,025 \text{ mV}$ 까지 상승해서 Cathode overlap 됐을 때 전압상승에 의한 막 열화 속도 증가와 같은 현상을 예측할 수 있다[17]. 동일한 시간에 144시간 동안에 공기 조건과 비교해 큰 차

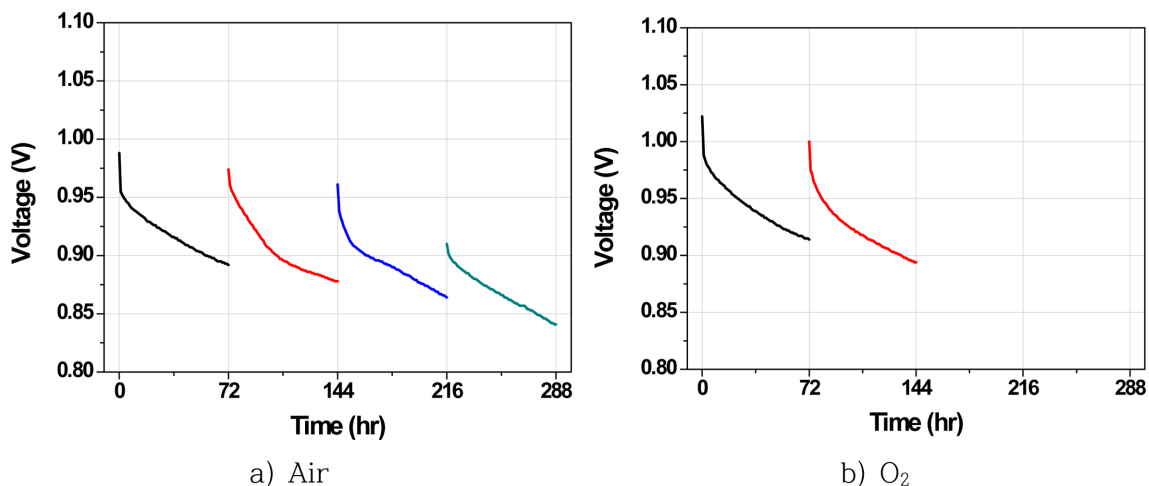


Fig. 1. Variation of OCV during ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode-O<sub>2</sub>.

이가 없지만 OCV 감소 폭이 약 5% 높고 비가역 열화도 더 진행되었음을 볼 수 있다. 산소조건에서 144시간 이후 OCV Holding을 중단한 것은 OCV 감소를 보고서 결정했기 아니라 144시간 이후 활성화하고 성능과 물성을 측정했을 때 Short 저항이 DOE 기준인  $1.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 보다 낮은  $0.15 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 나타나 중단했다(Table 1).

### 3-2. Short 저항 및 수소투과도 변화

NEDO 방법에 의해 LSV를 측정하고 LSV 기울기로부터 구한 Short 저항(SR) 변화를 Fig. 2와 Table 1에 나타냈다. 산소 사용시 SR이 공기 사용시보다 낮게 시작하였으나 SR의 감소속도가 초기보다 급하게 진행되었다. 산소 사용시 OCV가 전체적으로  $1,000 \text{ mV}$  이상이지만 전극 끝부분에서 cathode가 anode보다 더 튀어나오면 전압은 더 상승해 이 부분에서 막 열화가 급속하게 진행되는 cathode overlap 현상이 발생할 수 있다[17]. 그러면 이 부분이 막이 얇아지고 핀홀이 발생하는 등 국부적인 열화가 진행되고 전극과 전극의 거리가 가까워지면서 SR이 감소해서 shorting이 발생할 수 있어 위

험하다[18]. 그래서 DOE 프로토콜에서는 SR이  $1.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  이하이면 막의 수명이 다한 것으로 판명하도록 정하였다. 공기 사용시에도 216시간까지 SR이  $1.60 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 이었으나 288시간에  $0.45 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로  $1.0 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  이하가 되어 평가를 종료하였다. 산소와 공기를 사용한 두 경우 모두 HCCD는  $15 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 이하여서 수소투과도의 기준에 도달한 것이 아니라 SR기준에 의해 평가 종료하였다. 즉 이 MEA는 shorting 현상 발생 가능성이 문제이고 산소 사용시 평가시간을 1/2로 단축시킬 수 있었다.

DOE 방법에 의한 LSV를 측정하고 LSV로 구한 HCCD를 Fig. 3에 나타냈다. 산소 사용시 HCCD가 144시간에  $8.42 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 로 급하게 증가하였다. 공기 사용시에는 144시간에  $1.22 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 로 HCCD 증가속도가 미미함을 보이고 있다. 두 경우 모두 마지막 72시간에서 HCCD가 급하게 상승하여 SR이 급감한 것과 연관이 있는 것으로 보인다. 산소와 공기 사용시 평가종료시점의 HCCD는 각각  $8.42$ ,  $12.26 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 으로 DOE 기준  $15 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 에 근접해 수소투과도에 서도 막의 내구성이 거의 다 되었음을 알 수 있다.

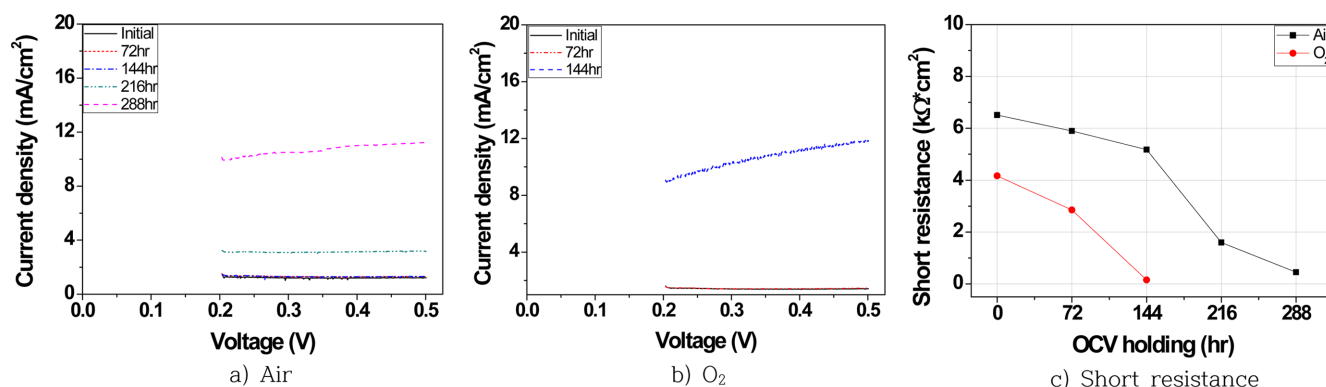


Fig. 2. Change of NEDO LSV during ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode- $\text{O}_2$  and c) Comparison of short resistance.

Table 1. Change of HCCD, Short resistance and ECSA during ASTs

Time (hr)	HCCD ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )		Short resistance ( $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ )		ECSA ( $\text{m}^2/\text{g}$ )		HFR ( $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	
	Air	$\text{O}_2$	Air	$\text{O}_2$	Air	$\text{O}_2$	Air	$\text{O}_2$
0	1.03	1.02	6.52	4.17	48.8	44.7	84.7	82.3
72	1.24	1.42	5.90	2.85	43.0	41.2	87.2	84.8
144	1.22	8.42	5.18	0.15	40.6	28.9	91.6	106.5
216	2.77	-	1.60	-	35.3	-	94.6	-
288	12.26	-	0.45	-	17.3	-	100.4	-

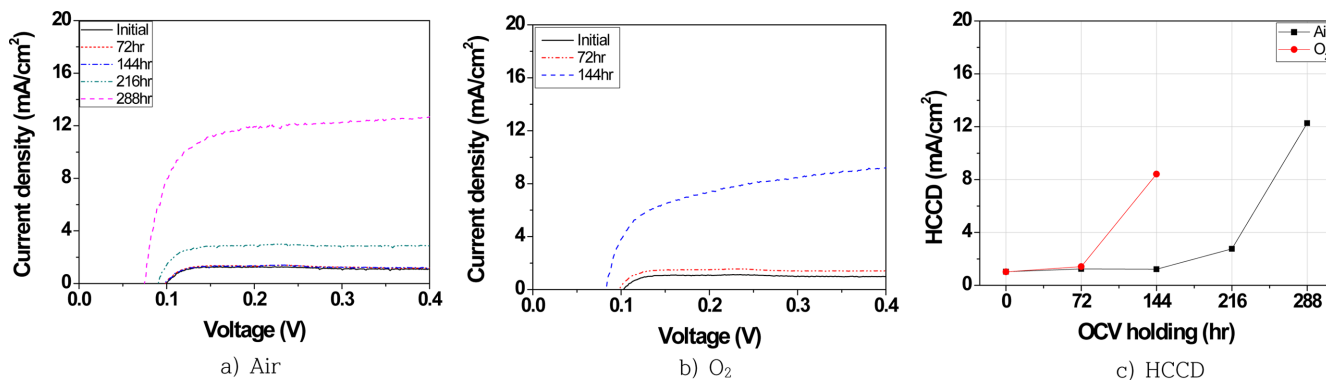


Fig. 3. Variation of DOE LSV during ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode- $\text{O}_2$  and c) Comparison of hydrogen cross over current density.

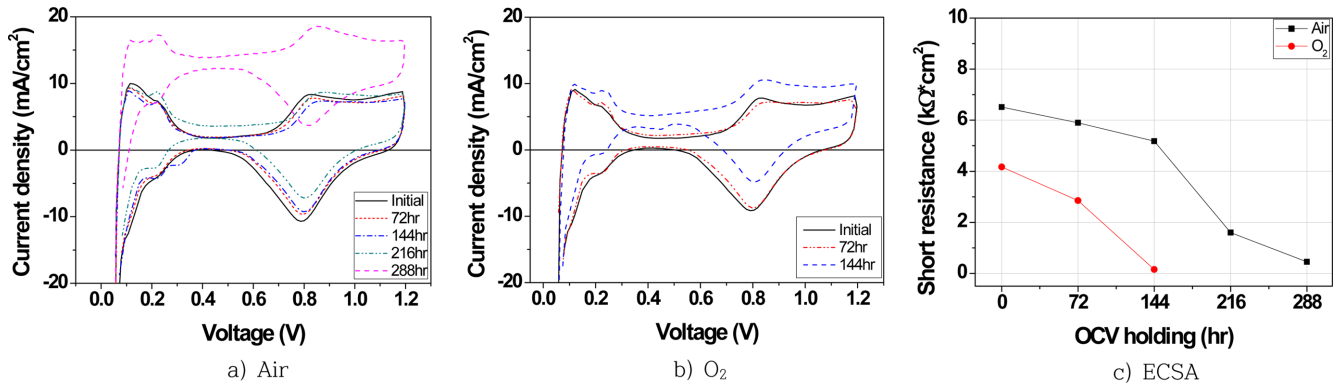


Fig. 4. Variation of Cyclo-Voltammetry during ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode-O<sub>2</sub> and c) Comparison of Electro Chemical Surface Area (ECSA).

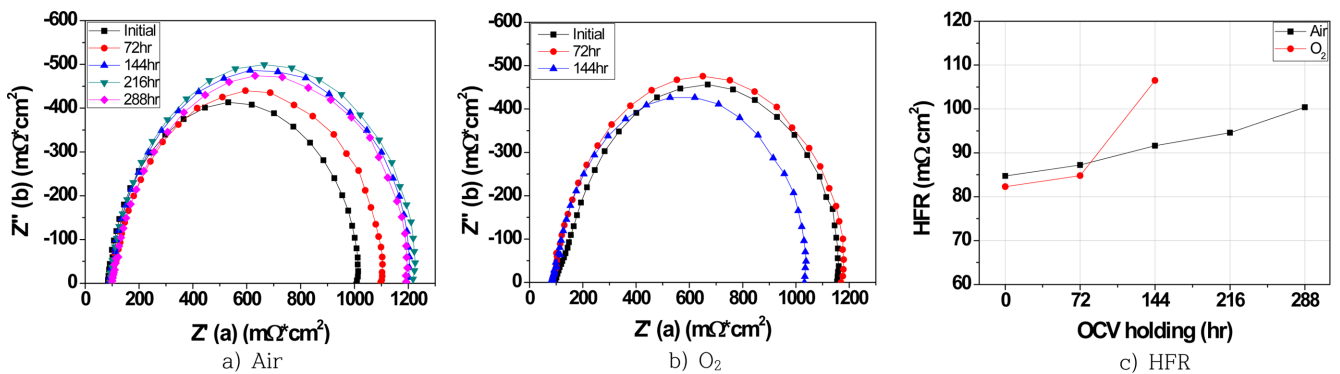


Fig. 5. Variation of Impedance during ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode-O<sub>2</sub> and c) Comparison of High Frequency Resistance (HFR).

### 3-3. 전극활성면적 및 막 저항 변화

CV 측정법에 의해 AST 과정 중에 CV와 전극활성면적(ECSA) 변화를 Fig. 4에 비교했다. 고분자막의 내구성 평가 AST이므로 고분자막이 주로 열화되어야 하나 평가종료 72시간에 전극 열화도 많이 진행되었음을 보인다. 산소 사용시 72시간까지는 ECSA가 7.8% 감소했으나 144시간에는 35.3% 감소해 DOE의 ECSA 감소기준 40%에 근접했다. 공기 사용시는 216시간까지는 ECSA가 27.7% 감소했으나 288시간에는 64.5%까지 감소해 DOE ECSA 감소기준을 넘었다. 즉 전극 열화에 의해서도 MEA의 내구성이 다한 것이다. 산소 사용시 공기 사용시보다 종료시점 전극 열화의 영향을 덜 받은 것으로 나타났다. 이와 같은 ECSA 급감은 후반부의 SR 감소와 연관이 있는 것으로 보인다.

임피던스에 의해 고분자막의 열화를 Fig. 5에 비교했다. HFR은 AST 후 산소 사용시 29.4% 공기 사용시 18.5% 증가했다. 산소 사용시 고분자막의 열화가 더 진행되어 공기 사용시보다 종료시점에서 비교했을 때 전극 열화의 영향을 적게 받으며 고분자막 AST로써 더 효과적임을 알 수 있다.

### 3-4. I-V 성능 변화 및 Short 전류에 의한 온도 상승

AST 과정에서 I-V 성능 변화를 Fig. 6에 비교했다. 산소와 공기 사용시 종료시점에서 OCV 감소는 각각 2.9%, 4.0%다. OCV 변화는 수소투과도의 영향을 많이 받으므로 종료시점에 수소투과도 변화가 더 큰 공기AST의 OCV 감소가 산소AST보다 큼을 볼 수 있다. 종료시점의 0.6V에서 전류밀도(CD@0.6V)는 산소와 공기AST

각각 20.9%, 28.6%다. 공기 사용시 CD@0.6V 감소가 더 큰 것은 고분자막 열화보다 전극 열화가 I-V 성능에 더 영향을 주었기 때문이라고 본다. 산소를 사용함으로써 I-V 성능 감소에 미치는 전극 열화 영향을 줄이고 평가시간을 단축시키는 장점이 있음을 확인했다.

AST 종료 후 MEA를 플랜지에 고정시키고 수소를 밑에서 유입시키고 위의 공기와 접하는 전극층에서 온도분포를 적외선 카메라로 측정한 결과를 Fig. 7에 나타냈다[19]. 국부적으로 높은 온도가 있는 부분이 열화가 많이 된 부분으로, 수소가 통과해 산소와 Pt 촉매상에서 연소반응결과 온도가 상승했을 수 있고, 또는 short 전류가 흘러 shorting 현상에 의한 온도 상승일 수도 있다. 산소와 공기 AST 후 제일 높은 온도가 각각 85.8, 67.6 °C로 산소 AST의 MEA가 더 높은 온도를 나타냈다. 셀에서 cathode 입구 쪽 전극 끝부분으로 cathode overlap의 가능성이 높고, 이로 인해 막이 얇아지고 편축이 형성되어 short 전류에 의한 발열이라고 판단된다[20]. 수소 투과도는 공기 AST의 경우가 더 높지만 공기 AST의 MEA 온도가 더 낮으므로 shorting의 영향이 더 크다고 본다.

## 4. 결 론

PEMFC 고분자막의 전기화학적 내구성을 평가하는 OCV Holding 과정에서 cathode 가스로 공기대신 산소를 사용했을 때 결과들을 정리하면 다음과 같다.

본 연구에서 사용한 Nafion XL이 DOE 내구 목표 기준인 OCV 감소, 수소투과도 증가, SR 감소 중에서 SR의 감소가 제일 빨리 나

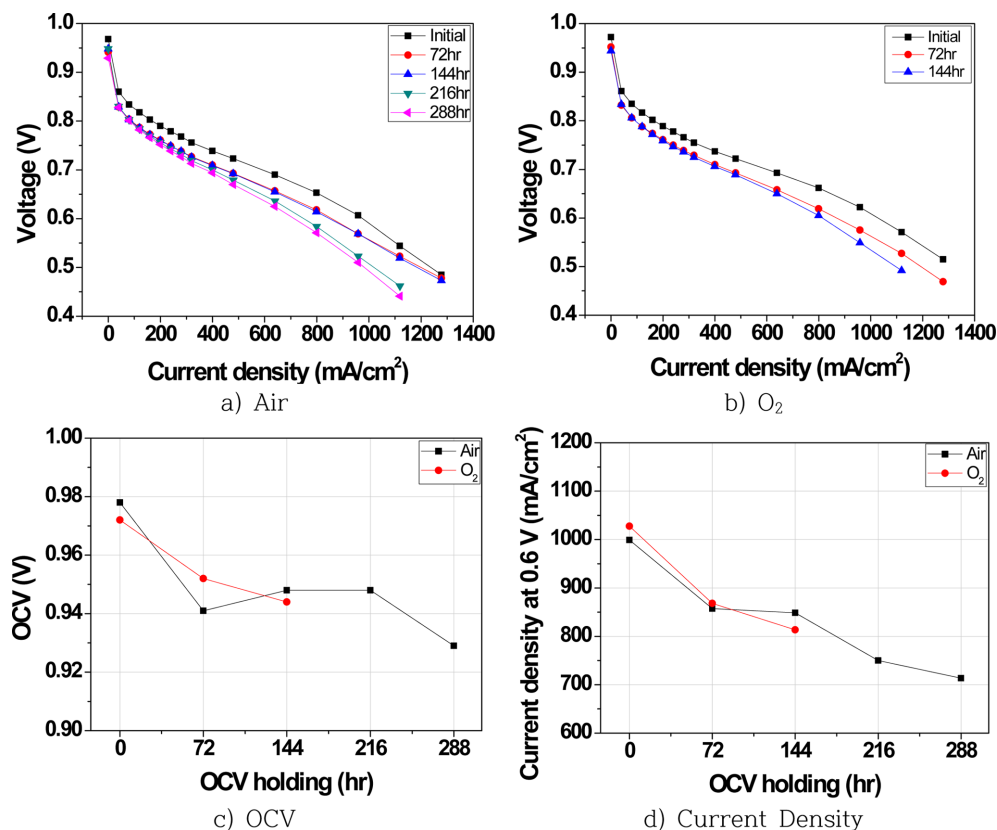


Fig. 6. Change of I-V performance during ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode-O<sub>2</sub> and c) Comparison of OCV, d) Comparison of current density at 0.6 V.

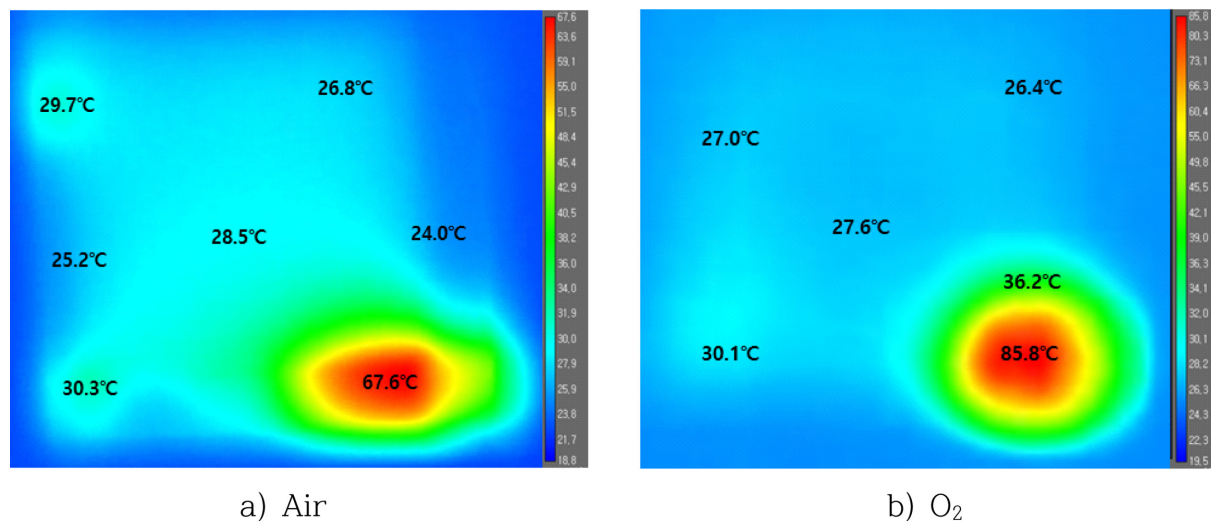


Fig. 7. Infrared camera image of MEA flange experiment with hydrogen supply after ASTs of a) Cathode-Air b) Cathode-O<sub>2</sub>.

타나 SR 감소 기준으로 내구성(AST 시간)을 평가하였다. SR 감소에 따른 hard short에 의해 AST 말기에 산소 사용 MEA의 성능이 급감한 것을 MEA의 온도 상승을 측정함으로써 확인하였다. 공기 대신 산소를 사용했을 때 내구성 평가시간을 1/2로 단축시킬 수 있었다.

막 내구성 평가과정 중에 전극도 열화되어 활성면적이 감소하였는데, 산소 사용시에 공기 사용시보다 전극활성면적 감소가 절반 이하로 감소해 막 내구 평가에 미치는 전극 열화의 영향이 산소경

우가 더 작음을 보였다.

AST 과정에서 수소투과도가 증가해 OCV가 감소하였고, 수소투과도 증가속도도 산소 사용시에 공기 사용시보다 높아 막 열화에 따른 수소투과도에 의해 내구성(AST 시간)이 결정될 경우에도 산소 사용에 의해서 AST 시간을 단축시킬 수 있음을 보였다.

공기대신 산소를 사용함으로써 전극 열화의 영향을 적게 받으면서, 고분자막의 열화 속도를 가속화시켜 고분자막 내구성 평가시간을 절반 이하로 단축시키는 장점이 있음을 확인하였다.



## 감 사

이 논문은 2020년 순천대학교 학술연구비(과제번호 : 2020-0194) 공모과제로 연구되었음.

## References

1. Wang, G., Yu, Y., Liu, H., Gong, C., Wen, S., Wang, X. and Tu, Z., "Progress on Design and Development of Polymer Electrolyte 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.nedog.jp/english/index.html>(2016).
4. Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform in the European Union, [www.HFPeurope.org](http://www.HFPeurope.org)(2016).
5. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, <http://www.most.gov.cn/eng>(2016).
6. U. S. DOE Fuel Cell Technologies Office, Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan, Section 3.4 Fuel Cells, p. 1(2016).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. 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).
15. [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/component\\_durability\\_profile.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/component_durability_profile.pdf), "Doe Cell Component Accelerated Stress Test Protocols For Pem Fuel Cells."
16. 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).
17. Sompalli, B., Brian, A., Wenbin, G. and Hubert, A. G., "Membrane Degradation of Catalyst Layer Edges in PEMFC MEAs," *J. Electrochem. Soc.*, **154**(12), B1349-B1357(2007).
18. Mench, M. M., Emin, C. K. and Veziroglu, T. N., *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*, Academic Press, Oxford, Waltham, MA, 64-77(2012).
19. 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.*, **51**(1), 68-72(2013).
20. 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).