

Cathode 개방형 고분자연료전지 스택 내구성 평가

유동근 · 김현석 · 오소형 · 박권필[†]

순천대학교 화학공학과
57922 전남 순천시 매곡동 315
(2021년 8월 18일 접수, 2021년 10월 5일 수정본 접수, 2021년 10월 20일 채택)

Durability Evaluation of Cathode Open-type Proton Exchange Membrane Fuel Cells Stacks

Donggeun Yoo, Hyeonsuck Kim, Sohyeong Oh and Kwon-Pil Park[†]

Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922, Korea
(Received 18 August 2021; Received in revised form 5 October 2021; Accepted 20 October 2021)

요 약

소형 이송형 고분자전해질 연료전지 (PEMFC)에 많이 사용되는 cathode 개방형 PEMFC 스택은 내구성이 약한 문제점이 있다. 13개의 셀로 이루어진 PEMFC 스택의 가속 내구성 평가를 통해 스택의 열화 원인을 찾고 cathode 개방형 스택의 내구성 향상에 기여하고자 하였다. Cathode가 대기에 개방되어 있고, 기밀 유지가 어려운 cathode 개방형 스택의 구조적 문제점 때문에 시동/정지 (SU/SD)시 수소/공기 경계가 형성되어 cathode를 열화시킨다. 본 연구에서는 cathode 개방형 스택에 SU/SD 1,800회 반복 후 초기 성능의 54%가 감소하여 비교적 짧은 시간에 내구성을 평가할 수 있었다. 스택 해체 후 각 셀을 2등분하여 성능분석하였다. 전체적으로 공기 유입이 용이한 anode 출구부 MEA가 유입부 MEA보다 전극 열화가 더 심해서 SU/SD시 수소/공기 경계 형성이 주요 열화 원인을 확인했다.

Abstract – Cathode open-type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) stacks, which are widely used in small transport-type PEMFC, have a problem with poor durability. Through the accelerated durability test of the 13-cell PEMFC stack, we tried to find the cause of the degradation of the stack and to contribute to the improvement of the durability of the cathode open stack. A hydrogen/air boundary is formed during start-up/shut-down (SU/SD) due to the structural problem of the cathode open stack in which the cathode is open to the atmosphere and it is difficult to maintain airtightness, thereby deteriorating the cathode. In this study, it was possible to evaluate the durability in a relatively short time by reducing the 54% of the initial performance by repeating SU/SD 1,800 times on the cathode open stack. After dismantling the stack, each cell was divided into two and the performance was analyzed. Overall, the anode outlet MEA, which facilitates air inflow, showed more severe electrode deterioration than the inlet MEA, confirming that the hydrogen/air boundary formation during SU/SD is the main cause of degradation.

Key words: PEMFC, Cathode open-type stack, Durability, Start-up/shut-down, Hydrogen/air boundary

1. 서 론

친환경적이고 고효율의 장점을 갖는 연료전지의 또 하나의 장점은 다양한 종류와 다양한 용도를 갖는 점이다. 2차 전지는 회분식 반응기형태로 최대 100 kW(전기자동차) 정도가 가능하지만 연료전지는 연속 반응기형태로 밀리วัต 용량에서 메가와트 급의 발전소 용까지 가능하다[1]. 연료전지는 인산형(PAFC), 알칼리형(AFC), 고분자전해질형(PEMFC), 직접메탄올형(DMFC), 고체산화물형

(SOFC)등 다양한 종류가 있는데, 이 중에서 PEMFC가 비교적 저온에서 고체 고분자를 사용하면서도 성능이 높아 제일 다양한 용도로 연구 개발되고 있다[2]. PEMFC의 용도는 크게 이송용, 차량용, 가정용 및 건물용인 정지용(Stationary)으로 분류될 수 있다[2].

이송용 PEMFC는 약 1kW 내외의 소형 스택을 사용하므로 냉각이 수랭이 아닌 공랭으로 가능하다. 공랭식 스택을 cathode 개방형 (Cathode open type) 또는 passive type 스택이라고도 하는데, cathode가 대기에 개방되어 있고, cathode 측에 부착된 fan이 공기를 공급하기 때문이다. 대기에 개방된 cathode는 외부 공기로부터 쉽게 오염이 될 수 있다. 그리고 구조적으로 스택 체결을 강하게 할 수 없어서 완벽한 sealing이 어려운 단점으로 인해 Start-up/shut-down(SU/SD)시 anode 내부로 공기가 쉽게 유입될 수 있다. 유입된 공기는 anode 쪽에 수소/공기 계면을 형성하고, cathode 전위를 상

[†]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.

승시켜 전극과 전해질막 열화를 진행 시킬 수 있다[3].

Cathode 개방형 스택에 대한 연구가 많이 보고되지 않았고[4-7], 특히 내구성에 대해서 자세히 보고된 내용이 거의 없다고 할 수 있는 상황이다[8,9]. 소형 무인항공기나 드론에 적용이 많이 되는 cathode 개방형 스택의 내구성은 수냉식 스택보다 내구성이 약해서 내구성을 향상시키기 위한 내구성 평가가 선행되어야 한다. 수랭식 차량용 MEA(Membrane Electrode Assembly) 내구성 평가에 대해서는 미국의 DOE나 일본의 NEDO 프로토콜이 있으나 cathode 개방형 스택에 대해서는 없는 실정이다. 그래서 본 연구에서는 cathode 개방형 스택의 내구성을 짧은 시간에 평가할 수 있는 프로토콜을 만들기 위한 기초 연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 스택 및 단위전지 실험

본 실험에서 내구성 평가에 사용한 스택은 Fig. 1과 같이 13개의 셀로 이루어진 공랭식 스택(A사 20 W 스택)을 사용하였다. Anode에 수소기체를 유입시키면 스택에서 발생한 전력을 이용해 fan이 작동하여 cathode 쪽에 공기가 유입되는 구조이다. Anode에 펌프로부터 공급된 수소는 가슴을 시키지 않고 상온에서 셀에 유입된 후 남은 수소는 대기로 방출되었다.

내구 평가 후 스택을 해체하고 셀별 성능평가는 Fig. 2와 같이 MEA를 각각 유입구 및 유출구 MEA로 나눠 전극면적 2.36 cm²크기로 MEA를 채결하여 진행하였다. 성능 및 전기화학적 특성은 스테이션(CNL Energy, Korea)에서 셀 온도, 습도, 유량을 제어하여 70 °C, 상대습도(RH) 100%에서 측정하였다.

2-2. 내구성 평가

스택 초기성능의 안정화를 위해 정전류 평가를 먼저 진행하였다. 정전류 평가 조건은 상온, anode - H₂ 300 mL/min, 정전류 1.5 A에서 진행하였다. 정전류 평가 과정에서 I-V 및 임피던스를 측정하여 안정화된 후 내구성 평가로 SU/SD를 반복하였다.

SU/SD 평가 조건은 상온, anode - H₂ 300 mL/min이고, 평가방

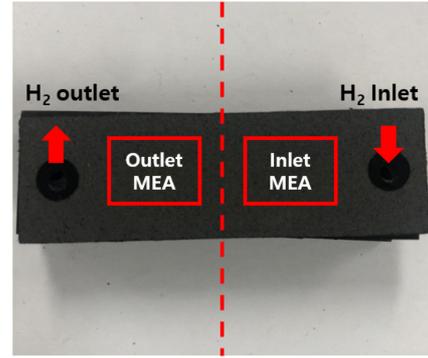


Fig. 2. Split MEA into inlet and outlet MEA after durability test (SU/SD cycles) of cathode-open stack.

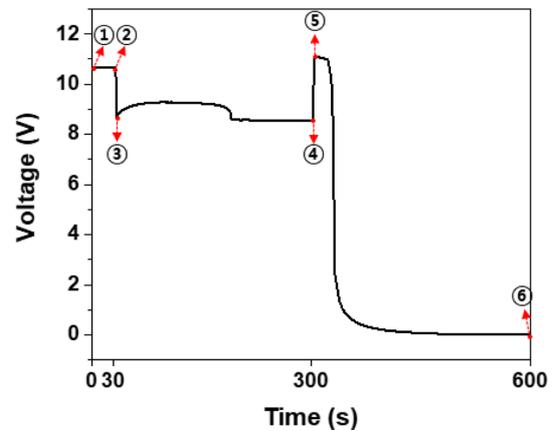


Fig. 3. One cycle voltage change during durability test (SU/SD cycles) of cathode-open stack.

법은 Fig. 3과 같다. SU/SD는 시동, 정전류 구동, 정지 총 3단계로 구분하였다. 시동은 수소 유입구로 수소가 들어가고 개회로전압 (Open Circuit Voltage, OCV)이 형성되는 단계(①~②), 정전류 구동은 부하가 걸리며 전기에너지를 생성하는 단계(③~④), 정지 단계는 부하차단 및 수소공급 차단 후 내부에 남은 수소가스로 인해 OCV 및 수소/공기 계면이 형성되는 단계(⑤~⑥)이다. SU/SD 평가는 200 cycle 간격으로 진행하였고, 200 cycle 마다 성능변화를 측정하였다. 내구 평가는 I-V curve 상에서 7.8 V에서의 전류밀도가 초기 성능 대비 50% 정도 감소할 때 종료하였다.

2-3. 특성 분석

본 실험에서는 스택상태에서 SU/SD 방법으로 내구 평가를 진행한 뒤 스택을 분해하여 각 셀별 성능을 측정하였다. 스택상태에서의 내구평가 과정에서는 I-V, 임피던스를 측정하여 성능변화를 관찰하였고, 각 셀별 성능평가에서는 I-V, 임피던스, CV(Cyclic Voltammetry), LSV(Linear Sweep Voltammetry)를 측정하여 성능 및 열화 정도를 비교하였다. 이후 MEA의 단면을 SEM-EDS 분석을 통해 전극 및 막 두께를 확인하여 셀별 MEA 열화를 비교하였다.

I-V 곡선은 고정유량으로 측정하였다. 스택의 경우는 anode에 H₂ - 400 mL/min을 공급하여 측정하였고, 스택 해체 후 단위전지는 anode H₂ - 93 mL/min, cathode air - 296 mL/min 유량 공급하여 측정하였다.

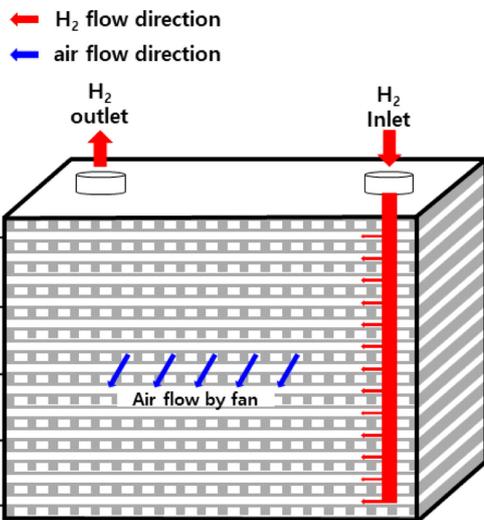


Fig. 1. Schematic diagram of cathode-open stack.

전해질 저항 및 전하전달 저항은 임피던스 측정을 통해 확인하였다. 임피던스는 Impedance analyser(Solatron, SI 1260)를 이용해 측정하였다. 스택에서의 측정은 anode에 H₂ 300 mL/min를 공급하고, DC current -0.2 A, AC amplitude 20 mA, frequency 100,000~0.01 Hz 범위에서 측정하였다. 스택 해체 후 단위전지의 임피던스 측정은 anode, cathode에 각각 H₂ 93 mL/min, air 296 mL/min를 공급하고, DC current -1 A, AC amplitude 100 mA, frequency 100,000~0.01 Hz 범위에서 측정하였다.

수소투과전류밀도(Hydrogen Crossover Current Density, HCCD)와 단락저항(Short Resistance, SR)은 Potentiostat(Solatron, SI 1287)을 이용해 LSV를 측정하여 산출하였다. 측정방법은 anode와 cathode에 각각 H₂ - 40 mL/min, Ar - 200 mL/min을 공급하고 scan rate 1 mV/s로 0~0.5 V 범위에서 전압을 상승시켜 전류를 측정하였다. HCCD는 anode에서 cathode로 투과된 수소가 cathode에서 산화될 때 생기는 산화전류이고, 0.3~0.35 V 범위에서 한계전류밀도에 도달한다[10]. 따라서 HCCD 값은 0.3 V의 전류밀도 값을 택하였다. SR은 한계전류밀도 구간 이후의 0.4~0.5 V 구간에서 옴의 법칙을 이용해 계산하였다.

전기화학적 표면적(Electrochemical Surface Area, ECSA)는 Potentiostat(Solatron, SI 1287)을 이용해 CV를 측정하여 구하였다. 측정방법은 anode와 cathode에 각각 H₂ - 40 mL/min, Ar - 200 mL/min을 공급하고 scan rate 30 mV/s로 0.05~1.2 V 범위에서 전압을 순환시켜 15 cycle 측정하였다. ESCA는 15번째 사이클의 0~0.4 V 수소탈착 영역의 전류밀도를 0.4~0.6 V 전기이중층 영역의 추세선 위 면적으로 계산하였다.

수소 입구 및 출구 MEA 단면의 전극두께 및 성분분석은 SEM-EDS(Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, JSM-7100F, JEOL)를 통해 관찰하였다. Au 코팅으로 15 mA에서 120초 진행하였으며, beam 전위는 5~15 kV 범위에서 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 내구성 평가 과정에서 스택 전압 변화

시동(SU)시 수소를 anode에 공급하고 스택을 OCV 상태로 30초간 유지하려고 하였으나, 시스템에서 수소가 유입되면 cathode에

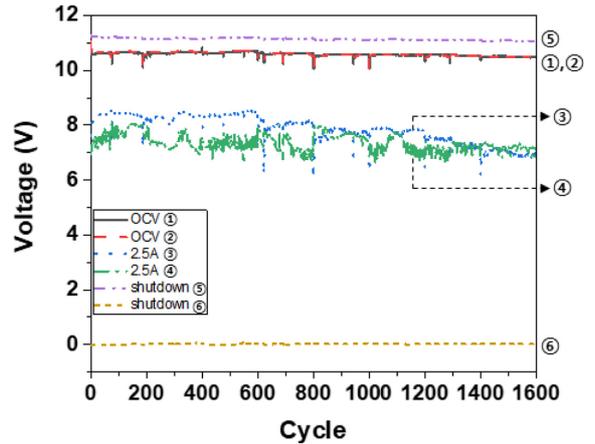


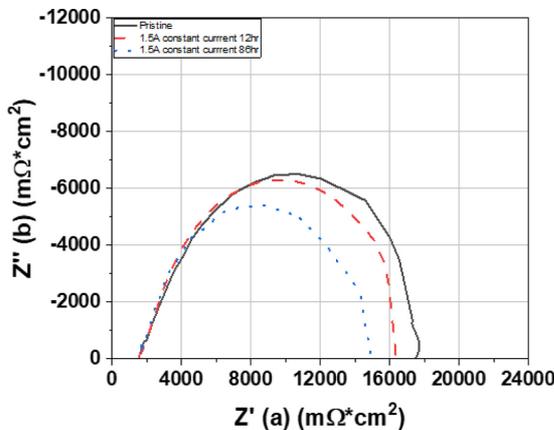
Fig. 4. Voltage change for each section during total start-up/shutdown cycles.

공기 공급하는 팬이 작동하면서 스택의 전력을 사용하는 구조로 되어 있어서 스택 전류가 흘러 OCV를 유지할 수 없었다(Fig. 3). SU에서 이론적으로 셀당 1.4 V 이상의 전압이 되나[11] 본 실험의 스택은 SU시 셀당 전압이 0.9 V 이하의 낮은 전압이 되었다. 스택 전류를 2.5 A 정전류로 유지했을 때 전압이 Fig. 3의 ③과 같이 약 8.5 V로 감소했다. SD 시에도 수소유입은 중단되었지만 잔류 수소 때문에 팬이 작동하면서 스택 전류가 흘러 Fig. 3의 ⑤와 같이 OCV가 아닌 전압이 형성되었다. 잔류 수소가 소모되면서 스택 전력이 약해지고 팬이 돌지 않으면서 전압이 급감했다.

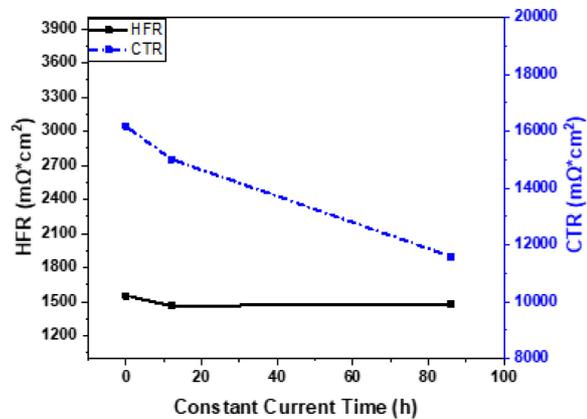
이와 같은 cycle 반복을 1,800회 했을 때 각 전압 변화를 Fig. 4에 나타냈다. SU/SD 시 스택전압(①과 ⑤)은 1,800 cycle까지 거의 변하지 않았다. SD 이후 전압 ⑥는 0 V로 감소해 anode의 수소가 최종 1,800 cycle까지 잔류하지 않음을 나타냈다. 2.5 A에서 전압 변화(③와 ④)는 불규칙적이긴 하나 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 처음 8.5 V에서 최종 약 7.0 V로 감소해 약 18% 감소했다. 이와 같은 성능감소는 SU/SD 1,800회 반복과정에서 전압상승과 전압감소에 따른 전극 열화가 주요 원인이라고 판단된다.

3-2. 내구성 평가 과정에서 스택 임피던스 변화

스택 전체의 임피던스를 측정할 수 있어서, 초기에 정전류 실험



(a)



(b)

Fig. 5. Change of (a) impedance (b) HFR and CTR during constant current operation of cathode-open stack.

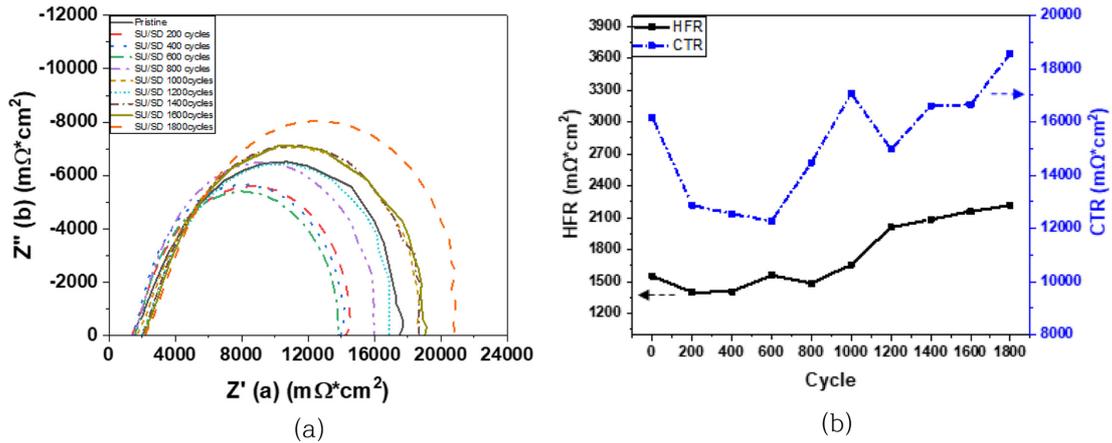


Fig. 6. Change of (a) impedance (b) HFR and CTR during durability test (SU/SD cycles) of cathode-open stack.

과정에서 임피던스를 분석하였다(Fig. 5). 막저항(HFR)과 부하전달 저항(CTR)이 모두 감소해 장시간 보관 중에 감소된 성능이 정전류 구동과정과 분석과정에서 활성화됨을 보였다.

SU/SD과정 중간 중간에 스택 MEA 열화 원인을 임피던스로 파악하였다. Fig. 6의 임피던스 데이터에서 전체적으로 HFR과 CTR

이 증가해 전극과 막이 열화된 것을 볼 수 있으나 전극의 CTR 변화폭이 더 커서 전극열화가 스택 열화에 더 많은 영향을 미침을 알 수 있다. HFR의 증가는 고분자막의 오염에 의한 이온전도도의 감소라고 생각한다. 필터 없이 공기 중에 개방된 cathode 때문에 공기 중 불순물이 전해질 막까지 침투해 슬론산기에 이온교환되어 수소

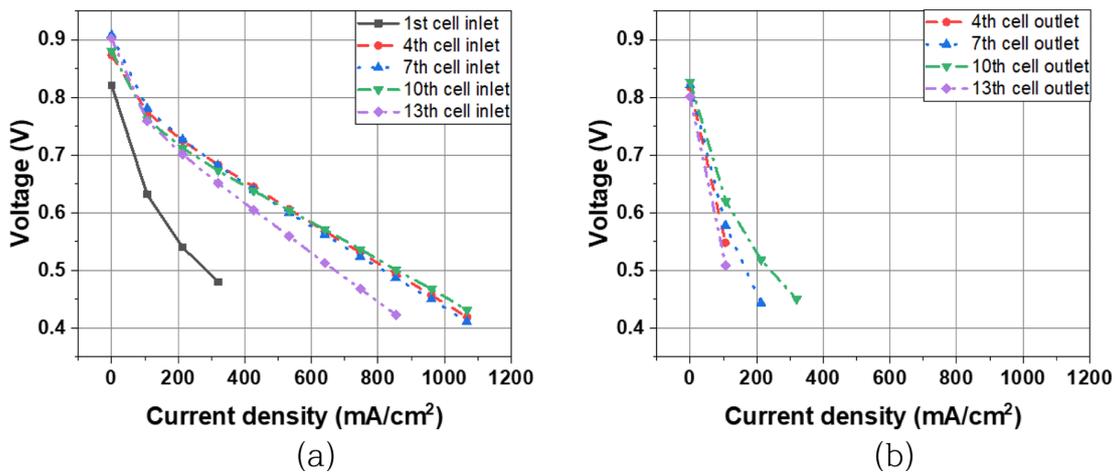


Fig. 7. Comparison of I-V polarization curves of each cell after stack dismantling (a) inlet MEA (b) outlet MEA.

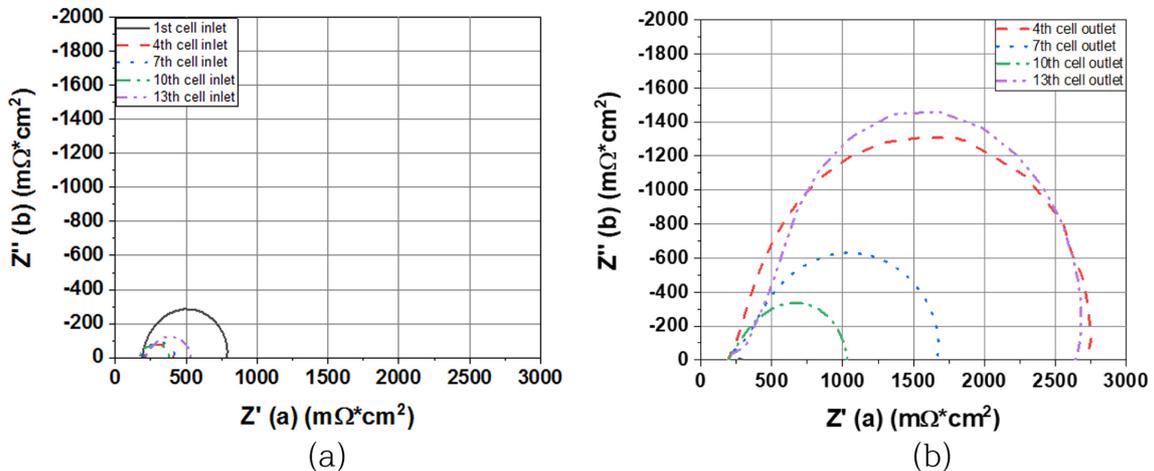


Fig. 8. Comparison of impedance curves of each cell after stack dismantling (a) inlet MEA (b) outlet MEA.

이온전도도를 감소시킨 것으로 판단한다. CTR의 증가는 SU/SD 반복에 따른 전극 Pt 촉매의 용해/석출/성장 에 따른 활성면적 감소 때문이라고 본다.

3-3. 스택 해체 후 각 셀 I-V, 임피던스 분석

스택에서 셀을 분리하여 I-V 성능 분석한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 실험에서 언급했듯이 MEA를 2등분하여 수소 입구 MEA와 수소 출구 MEA를 각각 측정했다. 전체적으로 유입 MEA보다 유출 MEA의 열화가 더 되어 성능감소가 더 심함을 볼 수 있다. 유출 부위가 SD 후 anode로 공기가 유입되어 공기/수소 경계를 형성하기 때문이다[3]. 1번 셀이 스택 메니폴드에서 제일 끝부분에 있어서 수소입구 부분이고 반대쪽 MEA는 수소출구로서 공기와 제일 먼저

접촉할 수 있는 MEA다. 13번 셀은 수소 유입의 마지막 부분이고 7번 셀이 스택 중앙에 위치한 셀이다. 13번 셀의 성능감소는 수소 유입의 마지막 부분이어서 연료 결핍(Fuel starvation)으로 인한 열화 결과라고 판단된다. 유출 MEA의 OCV가 0.83 V 이하로 낮은 것은 고분자 막 열화보다는 전극열화에 의한 것으로 생각한다. 이와 같은 결과는 각 셀의 임피던스를 측정된 Fig. 8에서도 알 수 있다. 같은 13번 셀에서 비교해도 유출 MEA의 CTR이 유입 MEA보다 약 5배 커서 전극열화가 유출 MEA에서 심하게 발생한 것을 알 수 있다. 1번 셀 유출 MEA의 임피던스는 열화가 심해서 분석되지 않았다. 막 열화를 나타내는 HFR은 유입/유출 MEA가 전체적으로 비슷해 공기/수소 경계와 연료 결핍이 고분자 막 열화에 미치는 영향이 전극보다 작음을 알 수 있다.

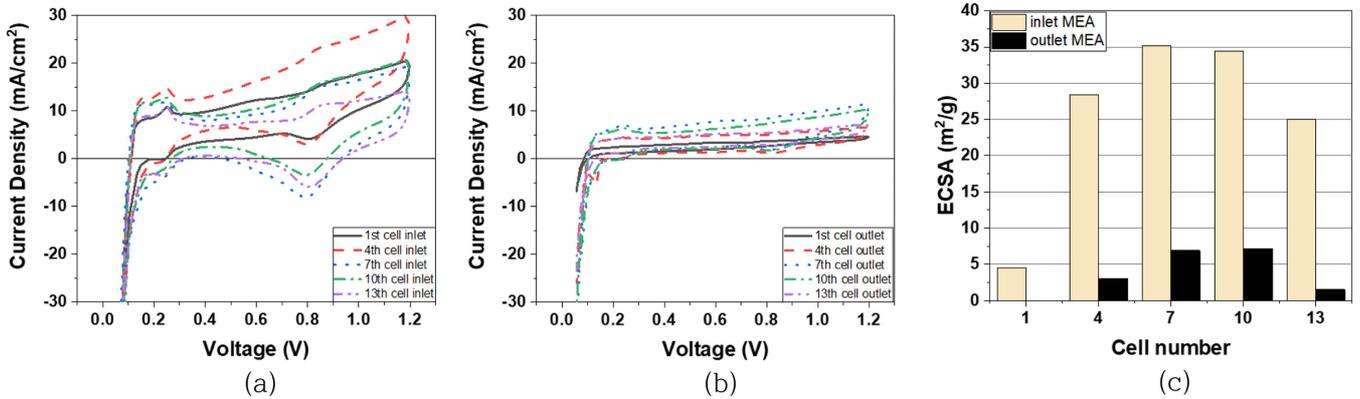


Fig. 9. Comparison of cyclic voltammetry curves of each cell after stack dismantling (a) inlet MEA (b) outlet MEA (c) ECSA.

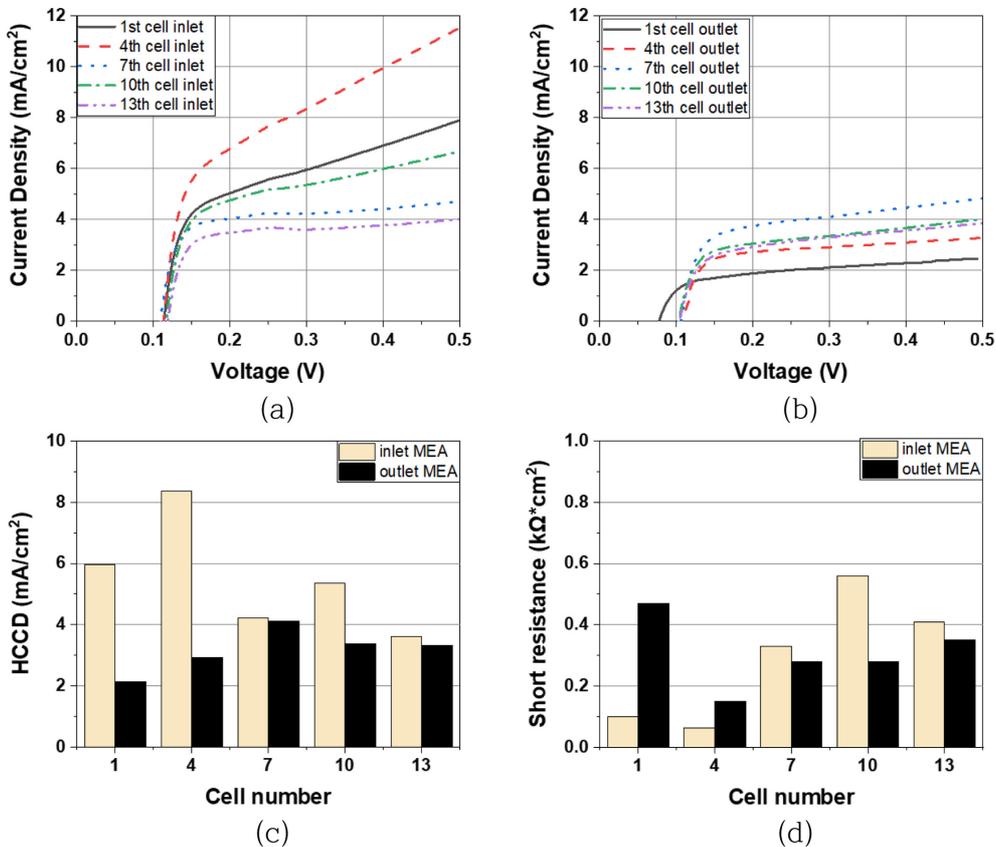


Fig. 10. Comparison of linear sweep voltammetry curves of each cell after stack dismantling (a) inlet MEA (b) outlet MEA and (c) HCCD of inlet MEA (d) short resistance of outlet MEA.

3-4. 스택 해체 후 각 셀 CV, LSV, SEM 분석

입구 MEA보다 출구 MEA의 전극열화 정도가 더 심함을 Fig. 9의 CV에서 알 수 있다. 1번 셀 출구 MEA의 ECSA는 측정할 수 없을 정도로 작고 중앙부위의 7번과 10번 MEA를 비교하여도 출구가 입구보다 ECSA가 1/5이하로 작음을 볼 수 있다. Anode 출구에서 공기/수소 경계에 의한 열화가 심하게 발생했음을 직접 확인한 것이다. 출구 MEA에서 13번 셀의 ECSA가 $1.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 낮은 것은 연료 결핍에 따른 전극열화에 의한 것임을 임피던스와 같이 확인할 수 있다.

막 열화를 나타내는 HCCD가 출구보다 입구 MEA가 더 큰 것을

Fig. 10에서 알 수 있다. 전극열화와 다르게 막 열화가 입구에서 많이 발생한 것은 입구 쪽이 수소 농도가 더 높아서 더 높은 전압을 유지할 수 있었기 때문이다[12]. SU/SD시나 SD 후 정지시에도 더 높은 전압은 라디칼 발생속도를 증가시켜 막 두께를 감소시킴으로써 수소투과도가 높아진 것이다. 4번 MEA에서 수소투과도가 유독 높은 것은 short 저항 값이 $0.063 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 낮기 때문으로, short 전류와 높은 수소투과도에 의한 cathode에서 카본연소에 따른 전극과 막의 열화가 상승작용으로 높아졌기 때문이라고 판단된다.

SU/SD 후 각 MEA의 단면을 SEM 분석하여 Fig. 11에 나타냈다. 제일 아래 층이 cathode고 중앙이 지지체가 있는 고분자 막이다.

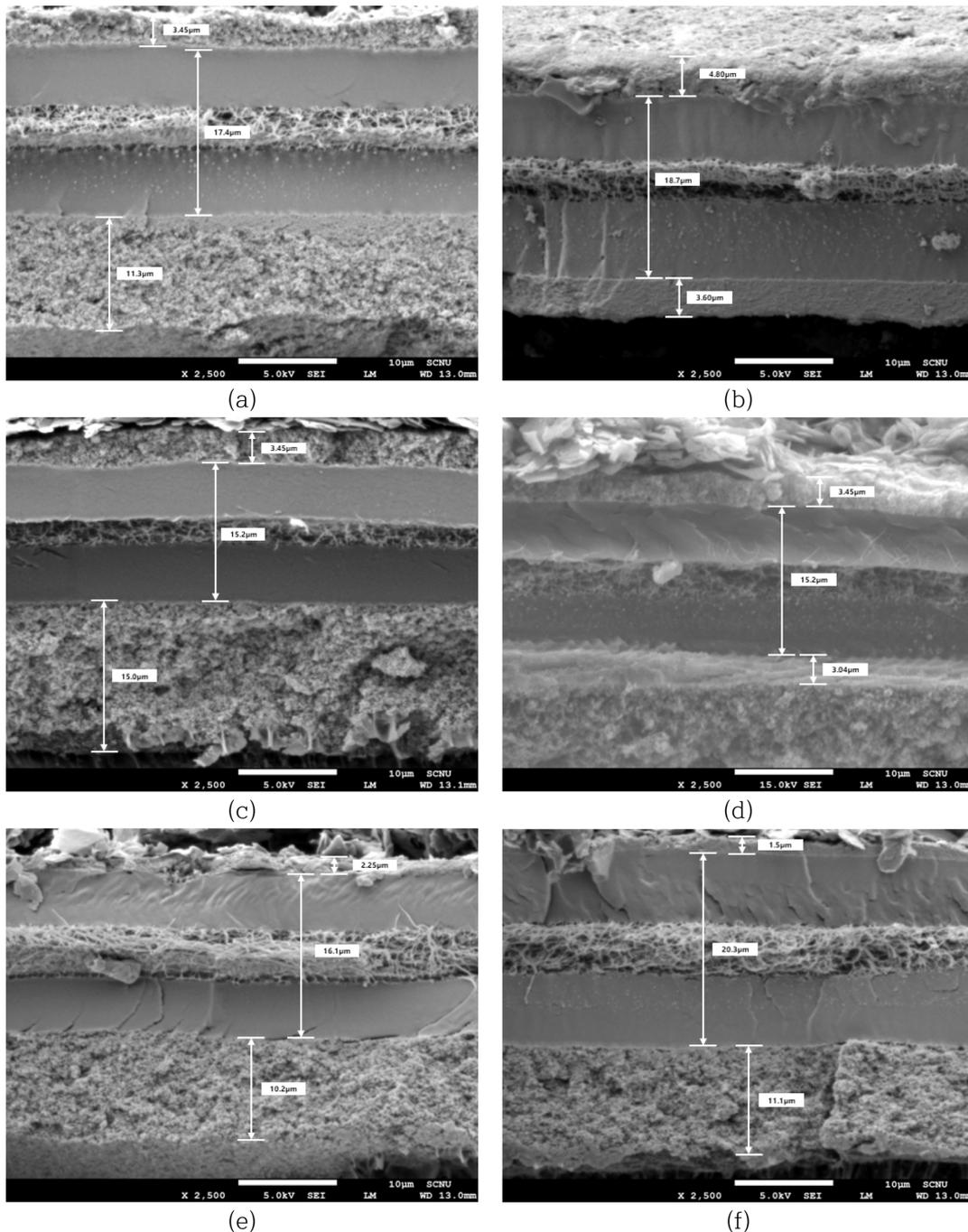


Fig. 11. SEM image of cross-section of inlet and outlet MEA after SU/SD cycles (a) 1st cell inlet MEA (b) 1st cell outlet MEA (c) 7th cell inlet MEA (d) 7th cell outlet MEA (e) 13th cell inlet MEA (f) 13th cell outlet MEA.

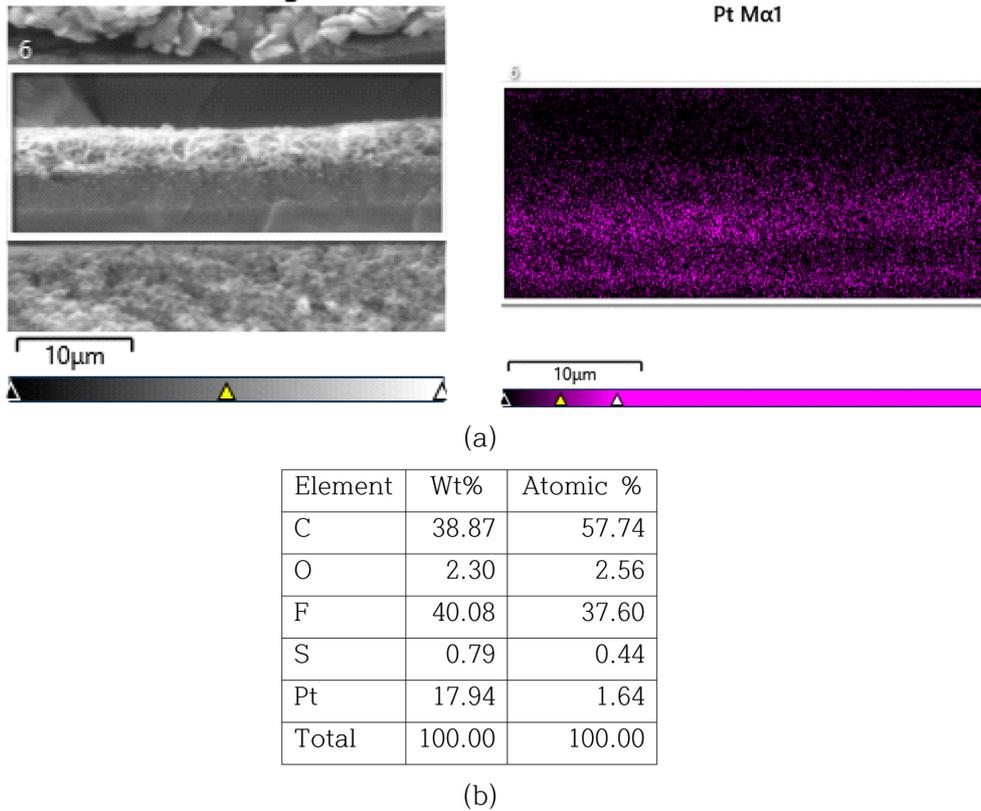


Fig. 12. SEM-EDS of cross-section of outlet MEA after durability test (SU/SD cycles) of cathode-open stack (a) EDS (b) concentration of element.

SU/SD 후 전체 고분자 막 두께는 입구 MEA가 출구 MEA보다 고분자 막 열화에 의해 더 얇아졌음을 볼 수 있다. cathode 전극 두께는 출구 쪽이 입구 쪽보다 더 얇아졌다. Pt와 탄소 지지체가 열화되어 전극 두께가 얇아진 것이다. 13번 셀의 경우는 다른 셀들에 비교하여 anode 쪽 전극 두께가 감소함이 확인되었는데, 이는 연료부족현상으로 인해 anode 쪽 전극 열화가 진행되어 나타난 결과다[13,14]. Pt의 열화는 용해/석출/성장 에 의한 것인데 Pt가 열화되어 막 내부에 분포되어 있는 것을 SEM-EDS로 확인되었다(Fig. 12). Pt 입자 크기가 약 0.1 μm 정도로 성장해서 TEM 분석이 아니라 SEM으로도 분석된 것이다. Pt는 cathode에서 용해되어 anode로 이동하는데 Pt가 지지체를 넘지 못하고 cathode 쪽에 많이 있어서 Pt 열화가 cathode에서 많이 진행되었음을 알 수 있다[15].

4. 결 론

Cathode 개방형 스택의 내구성을 평가한 실험결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

SU/SD 과정 중간 중간에 스택 전체의 임피던스를 측정해서 스택 MEA 열화 원인을 분석한 결과 전극과 막이 열화된 것을 볼 수 있었고, 전극의 열화가 더 심한 것을 확인하였다. SU/SD 1,800회 반복 후 출력이 54% 감소해 평가를 중단했고, 약 300시간의 짧은 시간에 내구성을 평가할 수 있는 가속 내구성 평가법으로 SU/SD가 적합함을 보였다.

스택 해체 후 MEA를 2등분해서 I-V 성능 측정했을 때 전체적으로 유입부 MEA보다 유출부 MEA의 열화가 더 심함을 볼 수 있었다.

SD 후 공기가 anode 유출 부위로 유입되어 공기/수소 경계를 형성하기 때문이다. 공기/수소 경계를 제일 형성하기 쉬운 1번 셀 출구부 MEA의 ECSA는 측정할 수 없을 정도로 작아 전극 열화가 제일 심하게 된 것을 확인했다. Pt와 탄소지지체가 열화되어 cathode 전극 두께는 출구 쪽이 입구 쪽보다 더 얇아졌다. 그리고 수소유입량이 제일 낮은 13번 셀의 ECSA가 1.5 m^2/g 로 낮은 것은 연료결핍에 따른 전극열화에 의한 것임을 임피던스, SEM 분석으로 확인할 수 있었다.

막 열화를 나타내는 HCCD가 출구부보다 입구부 MEA가 더 큰 것을 보였다. SEM 분석에 의해서도 고분자막 두께는 입구부 MEA가 출구부 MEA 보다 막 열화에 의해 더 얇아진 것을 확인하였다.

감 사

본 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원(KIAT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(P0014905).

References

1. Laconti, A. B., Mamdan, M. and McDonald, R. C., in: W. Vielstich, H. A. Gasteiger, A. Lamm (Eds.). Handbook of Fuel Cells: Fundamentals Technology and Applications, Vol. 3, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 611-612(2003).
2. Peighambaroust, S. J., Rowshanzamir, S. and Amjadi, M., "Review of the Proton Exchange Membranes for Fuel Cell Applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**(17), 9349-9384(2010).

3. Ren, P., Pei, P., Li, Y., Wu, Z., Chen, D. and Huang, S., "Degradation Mechanisms of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Under Typical Automotive Operating Conditions," *Progress in Energy and Combustion Science*, **80**, 100859(2020).
4. Chen, C. Y., Huang, K. P., Yan, W. M., Lai, L. P. and Yang, C. C., "Development and Performance Diagnosis of a High Power Air-cooled PEMFC Stack," *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **41**(27), 11784-11793(2016).
5. Kim, B., Lee, Y., Woo, A. and Kim, Y., "Effects of Cathode Channel Size and Operating Conditions on the Performance of Air-blowing PEMFCs," *Applied Energy*, **111**, 441-448(2013).
6. Zeng, Tao., Zhang, C., Huang, Z., Li, M., Chan, S. H., Li, Q. and Wu, X., "Experimental Investigation on the Mechanism of Variable Fan Speed Control in Open Cathode PEM Fuel Cell," *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **44**, 24017-24027(2019).
7. Strahl, S. and Costa-Castelló, R., "Model-based Analysis for the Thermal Management of Open-cathode Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems Concerning Efficiency and Stability," *Journal of Process Control*, **47**, 201-212(2016).
8. Strahl, S., Gasamans, N., Llorca, J. and Husar, A., "Experimental Analysis of a Degraded Open-cathode PEM Fuel Cell Stack," *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **39**, 5378-5387(2014).
9. Silva, R. A., Hashimoto, T., Thompson, G. E. and Rangel, C. M., "Characterization of MEA Degradation for an Open Air Cathode PEM Fuel Cell," *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **37**, 7299-7308(2012).
10. Inaba, M., Kinumoto, T., Kiriake, M., Umebayashi, R., Tasaka, A. and Ogumi, Z., "Gas Crossover and Membrane Degradation In Polymer Electrolyte Fuel Cells," *Electrochimica Acta*, **51**, 5746-5753(2006).
11. Yu, Yi., Li, H., Wang, H., Yuan, X. Z., Wang, G. and Pan, M., "A Review on Performance Degradation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells During Startup and Shutdown Processes: Causes, Consequencese, and Mitigation Strategies," *J. of Power Sources*, **205**, 10-23(2012).
12. 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).
13. Akira, T. T., Akita, K. and Miyazak, Y. Y., "Analysis of Electrocatalyst Degradation in PEMFC Causedby Cell Reversal During Fuel Starvation," *J. of Power Sources*, **130**, 42-49(2004).
14. Lim, K. H., Lee, W. H., Jeong, Y. J. and Kim, H. S., "Analysis of Carbon Corrosion in Anode under Fuel Starvation Using On-Line Mass Spectrometry in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *J. of Electrochem. Soc.*, **164**(14), F1580-F1586(2017).
15. 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

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

Hyeonsuck Kim: Senior, Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; hsk980328@naver.com

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

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