Korean Chem. Eng. Res., 61(3), 341-347 (2023)
https://doi.org/10.9713/kcer.2023.61.3.341
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

PEMFC 전극촉매 Pt/C와 PtCo/C의 촉매 지지체 열화비교

오소형 · 한유한 · 정민철 · 유동근 · 박권필†

순천대학교 화학공학과
57922 전남 순천시 매곡동 315
(2023년 1월 31일 접수, 2023년 3월 8일 수정본 접수, 2023년 4월 11일 채택)

Comparison of Catalyst Support Degradation of PEMFC Electrocatalysts Pt/C and PtCo/C

Sohyeong Oh,Yoohan Han, Minchul Chung, Donggeun Yoo and Kwonpil Park†

Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922, Korea
(Received 31 January 2023; Received in revised from 8 March 2023; Accepted 11 April 2023)

요 약

PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cells)에서 PtCo/C 합금 촉매가 성능이나 내구성에서 우수하여 많이 사용되고 있다. 그러나 높은 전압에서(1.0~1.5 V) 평가되는 촉매 지지체 내구성에 관한 연구는 별로 보고 되지 않았다. 본 연구에서는 PtCo/C 촉매와 Pt/C 촉매에 촉매 지지체 가속 열화 프로토콜을 적용한 후 내구성을 비교하였다. 1.0↔1.5 V 전압 변화 사이클 반복 후에 촉매 비활성도(Mass activity)와 전기화학적 활성면적(ECSA), 전기이중층 용량(DLC), Pt 용해와 입자 성장 등을 분석하였다. 전압변화 2,000 사이클 후 PtCo/C 촉매는 Pt/C 촉매에 비해 0.9 V에서 촉매 무게당 전류밀도가 1.5배 이상 감소하였다. 이와 같은 결과는 PtCo/C 촉매의 카본지지체의 열화 속도가 Pt/C 촉매보다 높기 때문이었다. Pt/C 촉매는 PtCo/C 촉매보다 촉매층의 ECSA 감소가 1.5배 이상 높았지만 Pt/C 촉매의 카본 지지체 부식이 작아 I-V 성능 감소가 작았다. PtCo/C 촉매의 고전압 내구성 향상을 위해서는 카본 지지체 내구성 향상이 필수적임을 보였다.

Abstract – In PEMFC, PtCo/C alloy catalysts are widely used because of good performance and durability. However, few studies have been reported on the durability of carbon supports of PtCo/C evaluated at high voltages (1.0~1.5 V). In this study, the durability of PtCo/C catalysts and Pt/C catalysts were compared after applying the accelerated degradation protocol of catalyst support. After repeating the 1.0↔1.5V voltage change cycles, the mass activity, electrochemical surface area (ECSA), electric double layer capacitance (DLC), Pt dissolution and the particle growth were analyzed. After 2,000 cycles of voltage change, the current density per catalyst mass at 0.9V decreased by more than 1.5 times compared to the Pt/C catalyst. This result was because the degradation rate of the carbon support of the PtCo/C catalyst was higher than that of the Pt/C catalyst. The Pt/C catalyst showed more than 1.5 times higher ECSA reduction than the PtCo/C catalyst, but the corrosion of the carbon support of the Pt/C catalyst was small, resulting in a small decrease in I-V performance. In order to improve the high voltage durability of the PtCo/C catalyst, it was shown that improving the durability of the carbon support is essential.

Key words: PEMFC, Catalyst support, PtCo/C catalyst, Degradation, Durability test

1. 서 론

PEMFC는 차세대 무공해 전기자동차(Zero-emission Electric Vehicles (EV))에 제일 적합한 에너지 변환장치이다. 그러나 PEMFC의 상용화 시장을 확대하기 위해서는 비용 절감과 수명 연장이 필수적이다[1,2]. 최근에 PEMFC의 내구성이 더욱 강조되고 있는데, 이는 대형 트럭 EV로 관심이 집중되면서 요구되는 내구성 향상이 증가하였기 때문이다. 승용차와 경량 트럭 EV 등의 운전시간이 5,000~8,000 시간 요구되었는데, 대형 트럭 운전시간이 약 30,000 시간(약 백만 마일)이나 되기 때문이다[3]. 전체 MEA의 열화 중에 Cathode 촉매 층의 열화와 관련된 출력 감소가 많은 부분을 차지하므로[4] 촉매 층을 구성하는 각 요소의 열화 현상을 이해하고, 내구성을 향상시키기 위한 신소재의 개발이 요구되고 있다.

PEMFC 전극의 촉매 층은 촉매와 촉매 지지체 그리고 이오노머 바인더로 구성되어 있다. 촉매의 열화는 용해와 입자성장으로 촉매

†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.

활성 면적이 감소하는 것이다. 촉매의 입자 성장은 1) 작은 백금 입자가 이오노머 상에서 용해되어 큰 입자 위에 석출되어 입자가 성장한다는 Ostwald ripening 메커니즘[5], 2) 카본 지지체 상에서 random cluster-cluster 충돌에 의해 백금 입자의 덩어리(agglomeration)가 발생하는 메커니즘[6], 3) cluster의 Gibbs 자유 에너지를 최소화하기 위해 백금 입자가 성장한다는 메커니즘[7]이 있다. 전극 입자 성장은 상대습도가 높고 전압 변화(부하 변화)가 있는 조건에서 잘 일어난다. 촉매 지지체 열화는 카본이 고전압에서 수분과 반응하여 산화되어 CO_2로 소실되는 메커니즘에 의한다[8]. 이오노머 바인더의 열화는 고전압에서 라디칼에 의한 고분자막의 주 사슬과 곁 사슬의 열화에 의한다고 알려져 있다[9,10]. 전극촉매 열화와 내구성에 관한 연구개발은 많이 되었지만 이에 비해 촉매 지지체의 내구성에 관한 연구는 부족한 편이다.

미국 DOE (Department of Energy)나 일본 NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서는 차량용 PEMFC MEA에 대해서 1.0~1.5 V범위에서 전압 변화를 반복하는 가속 내구성 평가(AST)를 통하여 촉매지지체의 내구성을 평가하고 있다[11,12].

촉매 지지체는 카본이 많이 사용되고 있는데 카본은 1.0 V 이상의 고전압에서 CO_2로 산화되어 소실되는 것으로 알려져 있다[8]. PEMFC에서 이와 같은 고전압은 시동/정지 과정에서 수소/산소 계면 형성 시, 그리고 Flooding, 연료 부족(Starvation)시 발생한다[13,14].

PtCo/C 합금 촉매는 성능과 내구성을 모두 만족해 도요타의 미라이 수소전기차에 사용되고 있다[15,16]. PtCo/C 촉매는 DOE의 고분자 막의 전기화학적 가속 내구 평가에서 Pt/C보다 2.8배 내구성이 높았다[17]. DOE 고분자 막의 전기화학적 가속 내구 평가 프로토콜은 0.9~0.97 V의 OCV 유지 방법이고 촉매 지지체 내구 평가 프로토콜은 1.0~1.5 V 전압 반복 사이클이다[11,12]. 본 연구에서는 PtCo/C 전극의 고전압 범위에서 전압 변화 반복에 의한 지지체 내구성을 평가해 PtCo/C 비교 분석하고, 그리고 촉매층의 주요 열화 원인이 촉매와 지지체, 이오노머 중에서 어떤 요소인지 파악하고자 하였다.

2. 실 험

2-1. 촉매 지지체 가속 내구 평가

촉매 지지체 가속 내구 평가에 사용된 MEA는 12 μm 두께의 강화막(Reinforced membrane)에 데칼 방법으로 제조한 전극 층을 hot pressing 하여 전극 면적이 25 cm^2인 MEA를 준비하였다. 전극 촉매는 anode는 Pt/C이며, cathode는 Pt/C와 PtCo/C로 2종류를 사용하였다. 이때 cathode Pt 로딩량은 0.4 mg/cm^2 이었다. MEA와 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL)을 9채널 분리판(미세 유로) 셀(CNL Energy, Korea)에 체결하였으며, 스테이션(CNL Energy, Korea)에서 온도와 습도, 가스 유량 등을 제어하여 MEA의 성능 및 내구 평가를 진행하였다.

촉매 지지체 열화는 80 ℃, 상대습도(Relative Humidity, RH) 100%에서 anode H_2, cathode N_2를 주입한 후 potentiostat (HCP803, Biologic, France)을 이용하여 1.0 V (1 sec) ↔ 1.5 V (1 sec)를 각각 5,000 사이클을 진행하는 중에, 촉매 지지체 내구 지표인 mass activity 및 CV를 측정하여 mass activity < 40% 또는 ECSA < 40% 감소일 때 내구 평가를 종료하고 성능을 비교하였다.

2-2. 촉매 지지체 열화 분석

촉매 지지체의 모든 성능 측정은 cell 80 ℃, RH 100%에서 진행하였다. Mass activity는 anode에 H_2, cathode N_2를 주입하고 절대압력 150 kPa에서 저전류 구간(0.09~0.8 A) I-V 성능을 측정하여 산출하였다. 전해질막에 의한 전압감소는 저 전류 구간의 임피던스를 측정하여 나온 HFR(High frequency Resistance)을 통해 전압을 보정하였고, 수소투과에 의한 전압감소는 수소투과전류밀도(Hydrogen Crossover Current Density, HCCD)로 보정하였다. 보정된 I-V 그래프로부터 0.9 V에서 전류밀도를 구한 후 촉매 로딩량으로 나누어서 mass activity를 계산하였다.

순환전압전류법(CV, Cyclic voltammetry)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 ECSA는 0.05~0.4 V의 면적으로 구하였으며, 전기이중층용량(Double Layer Capacitance, DLC)은 페러데이 반응이 일어나지 않는 0.4~0.6 V의 전압 구간에서 anode 전류와 cathode 전류의 폭을 통해 계산되었다.

2-3. 촉매 지지체 열화 원인 정량 분석

촉매 지지체 열화에 따른 전극 층의 열화 원인을 촉매(Pt의 용해 및 입자 성장), 촉매 지지체 및 바인더로 구분하여 정량화한 Sharma과 Andersen의 방법[18]으로 분석하였다.

촉매 지지체 열화 원인을 정량화하기 위해서 촉매 지지체 열화 전후의 Pt 양 및 크기를 XRF (X-Ray Fluorescence Spectromete, XRF-1800, Shimadzu, Japan) 및 TEM (Transmission Electron Microscop, JEM-ARM 200F, JEOL, Japan)을 통해 분석하였으며, CV 측정을 통해 ECSA 및 DLC 값을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 저전류 구간에서 I-V 성능 비교

전극 활성 분극의 변화를 비교하기 위해, 저 전류 구간에서 막 저항에 의한 전압 감소와 수소 투과에 의한 전압 감소를 보완한 I-V 분극 곡선을 Fig. 1에 나타냈다. 임피던스를 측정해 HFR에 전류를 곱해 구한 전압을 보정하고, LSV로 측정한 수소투과도로 전압 손실을 환산해 I-V 곡선을 보정한 것이다. 1.0~1.5 V의 높은 전압 구간에서 부하 변동에 따른 MEA 내구성을 평가한 것인데, 이 I-V 곡선은 촉매와 촉매 지지체가 있는 촉매 층의 열화를 주로 나타낸 것이다. Pt/C 전극은 5,000 사이클을 평가하였는데, PtCo/C 전극의 2,000 사이클 평가 후보다 성능 감소가 1/2도 안되어 내구성이 PtCo/C 전극보다 4배 이상 높음을 보이고 있다.

Fig. 1의 I-V 곡선 중 0.9 V에서 전류밀도를 촉매 담지 무게로 나누어 구한 MA 변화를 Fig. 2에 비교하였다. Pt/C MEA는 5,000 사이클 후 MA가 35.6% 감소해 DOE의 내구 종료 기준(40%)에 미치지 않는 좋은 내구성을 보였다. 그러나 PtCo/C MEA의 경우 1,000 사이클 후 MA 감소가 40% 이상이 되어 1.0~1.5 V의 높은 전압에서 내구성이 약함을 나타냈다. 전압 범위가 0.9~0.97 V인 OCV 유지 방법에서 PtCo/C의 ECSA감소가 Pt/C의 35% 밖에 안되어서 PtCo/C MEA의 내구성이 높았던 것[17]과 반대의 경향이다.

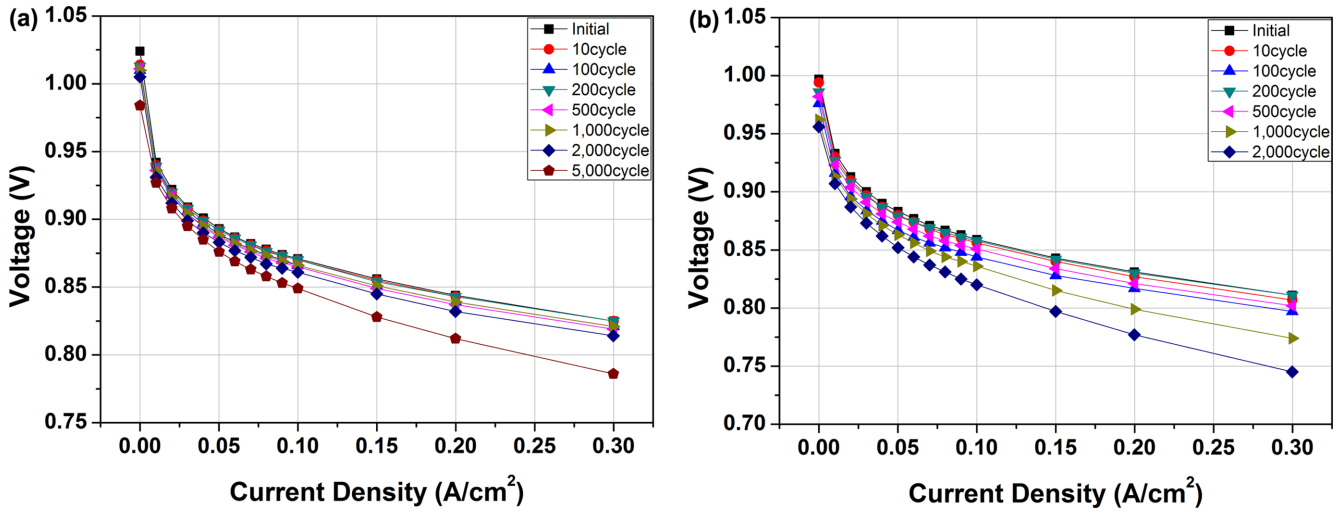

Fig. 1. Change of I-V curves reflected voltage decrease due to membrane resistance and hydrogen crossover (a) Pt/C MEA, (b) PtCo/C MEA.

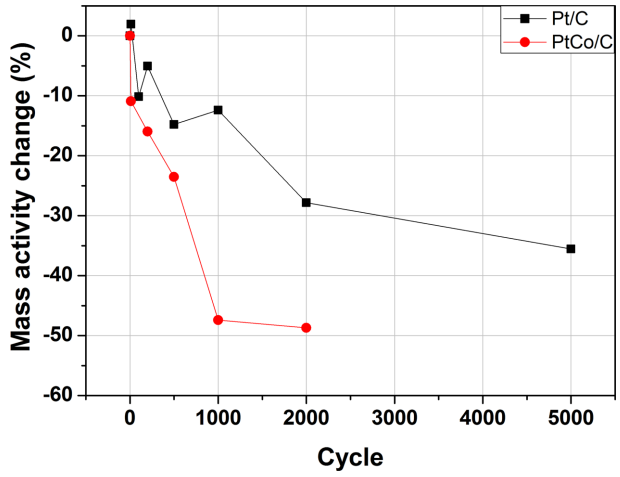

Fig. 2. Comparison of mass activity of Pt/C and PtCo/C during AST of catalyst support.

3-2. CV 변화 비교

촉매 지지체 가속 열화 과정에서 촉매 층의 변화를 확인하기 위해 CV 분석한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 촉매의 활성을 나타내는 0.1~0.25 V 범위에서 Pt/C 전극의 CV 변화폭이 PtCo/C 전극 변화폭보다 크다. 높은 전압 1.0~1.5 V에서도 Pt의 열화 속도가 합금 촉매인 PtCo 촉매보다 높음을 보인 것이다. 이오노머와 촉매/지지체의 계면을 나타내는 DLC를 계산하는 중앙 수평 부분의 변화는 PtCo/C 전극이 더 큼을 보이고 있다. 즉 촉매/지지체와 이오노머의 계면을 나타내는 DLC 변화는 PtCo/C에서 많이 나타나서 카본 지지체 열화는 PtCo/C 전극이 Pt/C 전극보다 더 큼을 알 수 있다.

CV로부터 산출한 ECSA 변화를 Fig. 4에 비교하였다. 같은 2,000 사이클 후 Pt/C는 48% 감소한 반면 PtCo/C는 31% 감소해 높은 전압에서 PtCo 촉매의 내구성이 높음을 보였다. 전극 촉매 가속 내구평가(0.6~0.95 V)에서 30,000 사이클에 ECSA 40% 감소가 기준인데 Pt/C 촉매는 1.0~1.5 V 전압 범위에서는 1,000 사이클 만에 40% 이상이 감소해서 높은 전압에서 Pt/C 촉매의 내구성이 약함을 볼 수 있다. 그리고 PtCo/C 촉매는 10, 100 사이클 초기에는 ECSA가 오히려 증가하는 현상을 보이는데 이는 초기에 Co가 용해되어 Pt 주위에 빈 공간이 형성되어 Pt의 비표면적이 향상된 현상[19]때문이라고 판단된다.

이온 전도성인 이오노머 바인더와 전자 전도성인 Pt 그리고 카본의 계면은 전기 이중층을 형성하고, DLC를 측정하면 이오노머와 접하고 있는 Pt와 카본의 양을 알 수 있다. CV 측정에 의해 DLC를 산출할 수 있어서 DLC 변화로부터 이오노머와 접하고 있는 카본의 양의 변화를 알 수 있다. 이오노머와 접하고 있는 카본의 양이 Pt보다 많기 때문이다. Fig. 5에서 PtCo/C 촉매의 DLC 감소가 커서 카본 지지체의 열화가 심함을 볼 수 있다. 동일한 2,000 사이클 후 Pt/C의 DLC 감소가 5%가 안되는 반면 PtCo/C 촉매의 DLC는 15% 이상 감소해 3배 이상 카본 지지체의 열화가 발생했다. DLC 감소 즉 탄소 지지체 열화는 전체 I-V 성능에 미치는 영향이 촉매 열화보다 큼을 나타낸 것이다. 탄소 지지체 열화가 많이 된 PtCo/C MEA의 MA 감소가 Pt/C MEA 보다 컸고 PtCo/C의 ECSA 감소는 2,000 사이클 후 20%가 안되었지만 MA는 약 50% 감소하였다. 반면에 Pt/C의 ECSA는 5,000 사이클 후 60% 감소했지만 MA는 36%밖에 감소하지 않은 것을 보더라도 촉매보다 촉매 지지체의 열화가 전체 성능에 미치는 영향이 더 큼을 알 수 있다.

3-3. 촉매 입자크기 변화 비교

촉매 지지체 가속 열화 전후의 전극 촉매의 크기를 TEM으로 분석하여 비교하였다(Fig. 6, 7). 촉매 지지체 열화 후 전극의 입자 크기 증가는 Pt/C에서는 2.6 nm(약 93%), PtCo/C에서는 1.3 nm(약 27%)로 나타나 Pt/C 전극 촉매의 입자가 큰 폭으로 성장함을 확인하였다. Pt/C의 큰 ECSA 감소는 Pt 입자 크기 성장에 의한 비표면적 감소에 의한 것이다. PEMFC 촉매 열화 메커니즘은 서론에서 언급한 것처럼 백금 용해, Ostwald ripening, Agglomeration 으로 설명되는데 촉매층에서 Pt 촉매의 입자 크기 증가는 Ostwald ripening과 agglomeration에 의해 주로 발생한다[20]. Agglomeration은 탄소 지지체 열화가 동반되어야 가능한 메커니즘인데, Pt/C는 PtCo/C보다 탄소 지지체 열화가 작아서 Pt/C 촉매의 입자 성장은 Ostwald ripening에 의한 것이라고 본다.

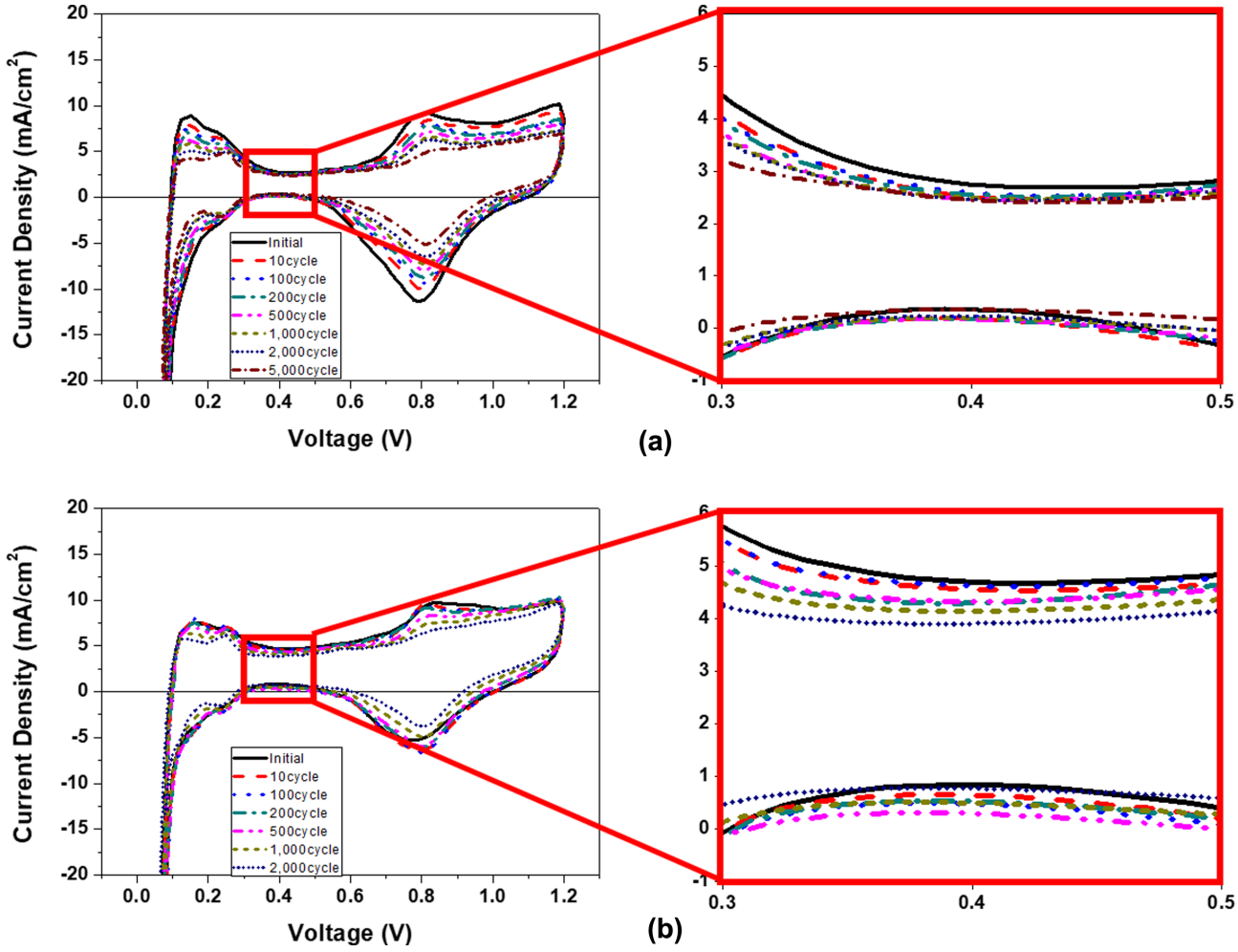

Fig. 3. Change of CV curves during AST of catalyst support a) Pt/C MEA b) PtCo/C MEA.

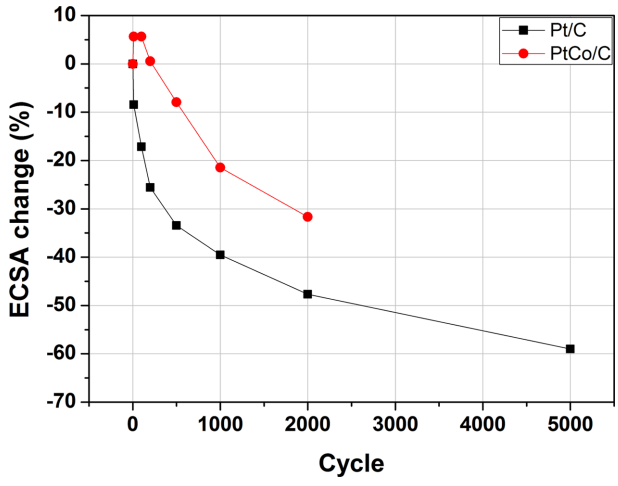

Fig. 4. Comparison of Electro Chemical Surface Area of Pt/C and PtCo/C during AST of catalyst support.

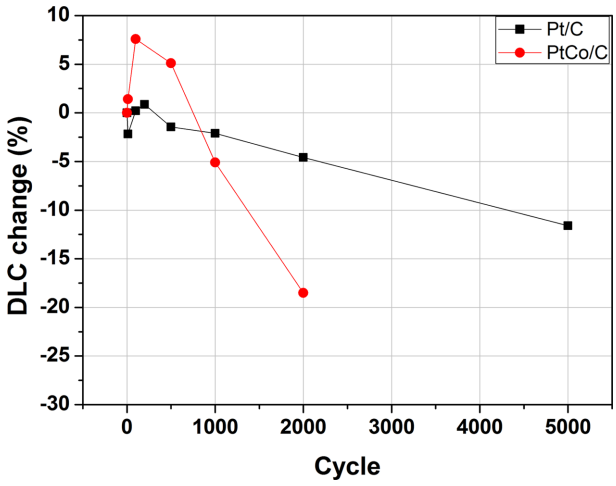

Fig. 5. Comparison of Double Layer Capacity Pt/C and PtCo/C during AST of catalyst support.

3-4. 이오노머 바인더 열화 비교

ECSA 변화는 촉매뿐만 아니라 탄소 지지체, 이오노머 바인더의 영향을 받기 때문에 이들의 영향을 정량적으로 구분하면 각 요소의 내구성 향상을 통한 전체 촉매 층의 내구성 향상에 기여할 수 있다. 전극층의 ECSA 손실 원인을 1) 촉매 입자 성장, 2) 촉매 용해, 3) 탄소 부식, 4) 바인더 열화로 분류할 수 있고 이들의 관계식은 (1) 식과 같다[18].

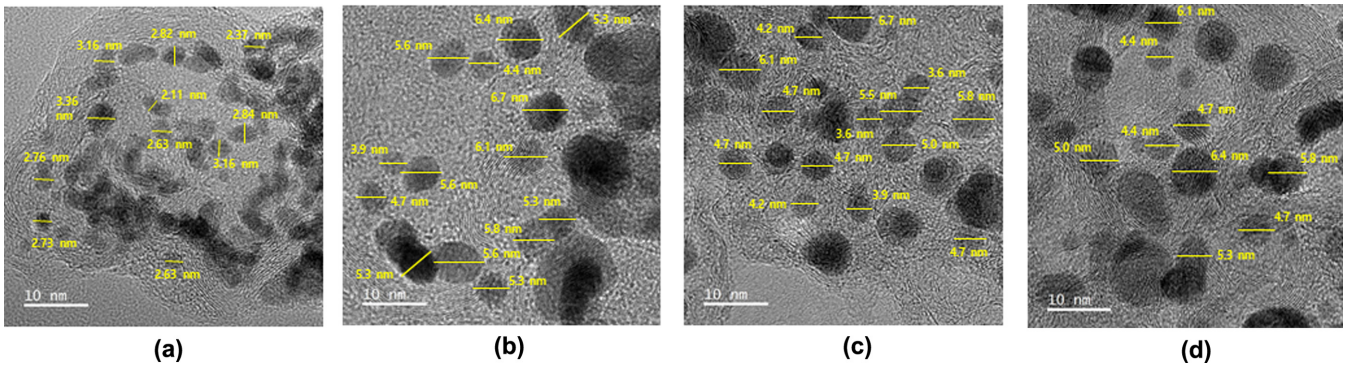

Fig. 6. Comparison of TEM image of Pt/C and PtCo/C before and after AST of catalyst support a) initial Pt/C b) Pt/C after AST c) initial PtCo/C d) PtCo/C after AST.

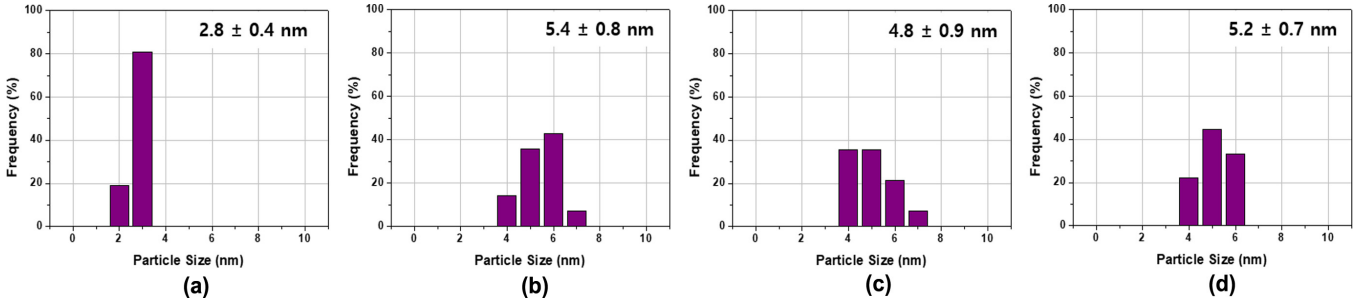

Fig. 7. Comparison of catalyst size of Pt/C and PtCo/C before and after AST of catalyst support a) initial Pt/C b) Pt/C after AST c) initial PtCo/C d) PtCo/C after AST.

$$\left(1-\frac{ECSA_f}{ECSA_i}\right)\times 100 = \left\{1-[1-(l_d+l_e+l_{H^+})]\frac{R_i}{R_f}\right\}\times 100 \quad (1)$$

$$l_{H^+} = 1-\left(\frac{ECSA_f}{ECSA_i}/\frac{R_i}{R_f}\right)-(l_d+l_{e^-}) \quad (2)$$

$ECSA_i$: Initial electrochemical surface area
$ECSA_f$: After AST electrochemical surface area
l_d : Fractional losses due to dissolution
l_{e-} : Fractional losses due to e^- connectivity loss
l_{H^+} : Fractional losses due to H^+ connectivity loss
R_i : Initial particle (averaged)
R_f : After AST particle (averaged)

XRF, CV, TEM 분석을 통해 구한 물성 값은 Table 1과 2에 나타냈으며, 식 (2)으로부터 구한 바인더 열화를 정리해 Fig. 8에 비교하였다. Pt/C 촉매 층의 전체 ECSA 감소는 59% 인데 이 중에 38%가 촉매 입자 성장에 의한 것으로 분석되었다. PtCo/C는 ECSA 31.6% 감소 중에 지지체 카본 부식이 18.8%로 제일 많은 영향을 줬다. 양 전극 층 모두 촉매 용해와 바인더 열화는 입자 성장과 카본 부식에 비해 그 영향이 작았다. 같은 카본 지지체이지만 촉매 종류에 따라 즉 단일 Pt 촉매와 합금 PtCo 촉매에 따라 카본 지지체의 열화가 크게 차이가 남을 확인했다.

전압이 1.0~1.5 V의 높은 전압을 발생시킬 수 있는 공기/수소계면 형성이나 flooding, starvation이 발생하는 PEMFC 스택의 경우 탄소 지지체의 내구성을 향상시키는 것이 스택의 내구성 향상에 매우 중요함을 본 논문을 통해 제시하였다.

4. 결 론

PEMFC 촉매 지지체 가속 열화 프로토콜을 Pt/C와 PtCo/C MEA에 적용해서 전극 촉매 층의 열화를 분석하고 비교하였다.

DOE의 촉매 지지체 가속내구 평가법을 적용했는데 Pt/C 전극은 0.9 V에서 촉매 Mass Activity가 2,000 사이클 후에도 28% 밖에 감소하지 않았는데, PtCo/C 전극은 48% 이상 감소해서 두 전극 간에

Table 1. Quantitative analysis of Pt/C catalyst layer after catalyst support degradation

Catalyst layer	ECSA (m^2/g)	DLC F/g	Amount of Pt (μg/cm^2)	Particle size (nm)
Pristine	34.4	86.7	785.3	2.8
After Degradation	14.1	81.1	759.6	5.4

Table 2. Quantitative analysis of PtCo/C catalyst layer after catalyst support degradation.

Catalyst layer	ECSA (m^2/g)	DLC F/g	Amount of Pt (μg/cm^2)	Particle size (nm)
Pristine	17.7	148.2	405.4	4.8
After Degradation	12.1	108.5	385.0	6.1

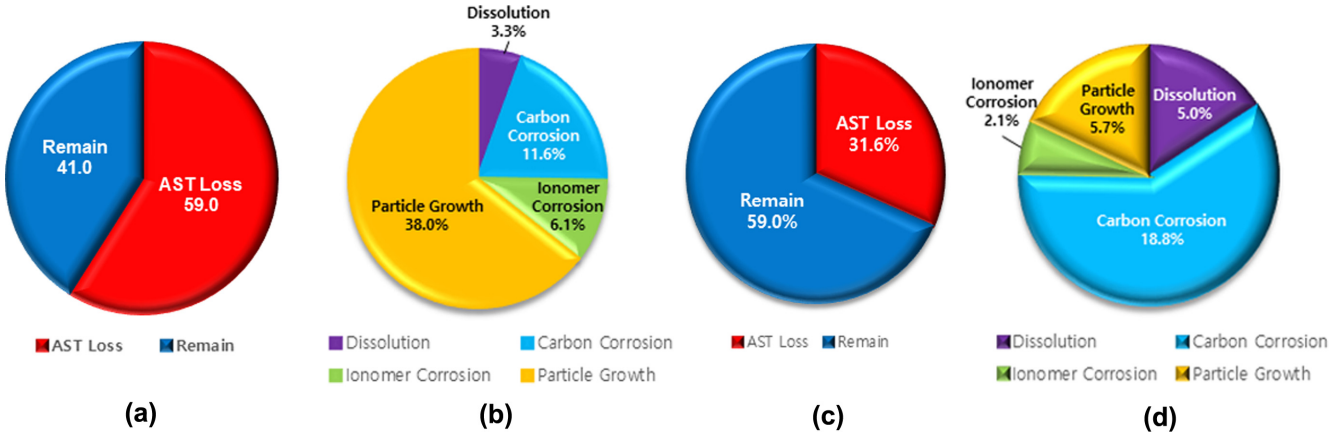

Fig. 8. Comparison of catalyst layer degradation of Pt/C and PtCo/C after AST of catalyst support a) total ECSA loss of Pt/C b) quantification analysis of Pt/C layer degradation c) total ECSA loss of PtCo/C d) quantification analysis of PtCo/C layer degradation.

1.0~1.5 V 전압 cycle에서 내구성 차이가 1.5배 이상 발생했다. 그런데 전기화학적 표면적(ECSA)은 2,000 사이클 후 Pt/C가 약 48% PtCo/C가 약 32% 감소해 Pt/C가 반대로 약 1.5배 더 감소했다. ECSA 감소는 촉매뿐만 아니라 촉매지지체와 이오노머 바인더의 영향을 받기 때문에 각 요소의 열화를 분리해 분석하였다. 촉매의 열화는 XRF와 TEM 분석으로 촉매 지지체 열화는 CV를 통한 DLC 분석으로 그리고 이오노머 바인더 열화는 촉매와 지지체 열화 측정값과 식에 의해 산출하였다. Pt/C 전극의 ECSA는 촉매 입자 성장이 주 원인이었고 PtCo/C 전극의 ECSA감소는 카본 지지체 열화가 주 원인이었다. Pt/C 전극에서 촉매입자 성장에 의해 ECSA가 38% 감소한 것 보다 PtCo/C 전극에서 카본 지지체 열화에 의해 ECSA가 18.8% 감소한 것이 I-V 성능 감소를 4배 이상 크게 했다. 1.0~1.5 V의 높은 전압 범위에서 전압 변화가 발생하는 경우에는 카본 지지체의 내구성 향상이 PEMFC 스택 내구성 향상을 위해서 매우 중요함을 확인했다.

감 사

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

Reference

1. 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).
2. 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).
3. 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.
4. Borup, R. et al., "Scientific Aspects of Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability and Degradation," *Chem. Rev.*, **107**, 3904(2007).
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. Sharma, R. and Andersen, S. M.,"An Opinion on Catalyst Degradation Mechanisms During Catalyst Support Focused Accelerated Stress Test (AST) for Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs)," *Applied Catalysis B*: *Environmental*, **239**, 636-643 (2018).
9. Kaddouri, A. E., Flandin, L. and Bas, C., "Chemical Degradation of PFSA Ionomer Binder in PEMFC's Catalyst Layer," *Int. J. Hydrogen Energy*, **43**, 15386-15397(2018).
10. Morawietz, T., Handl, M., Oldani, C., Gazdzicki, P., Hunger, J., Wilhelm, F., Blake, J., Friedrich, K. A. and Hiesgen, R., "High-Resolution Analysis of Ionomer Loss in Catalytic Layers after Operation," *J. Electrochem. Soc.*, **165**(6) F3139-F3147(2018).
11. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/component_durability_profile.pdf, "Doe Cell Component Accelerated Stress Test Protocols for Pem Fuel Cells."
12. Daido University, Ritsumeikian Univ., Tokyo Institute of Technology, Japan Automobile Research Ins., "Cell Evaluation and Analysis Protocol Guidline," NEDO, Development of PEFC Technologies for Commercial Promotion-PEFC Evaluation Project, January 30(2014).
13. Kim, M., Jung, N., Eom, K. S., Yoo, S. J., Kim, J. Y., Jang, J. H., Kim, H. J., Hong, B. K. and Cho, E. A.,"Effects of Anode Flooding on the Performance Degradation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *J. Power Sources*, **266**, 332-340(2014).
14. Yoo, D. G., Kim, H. S., Oh, S. H. and Park, K. P., "Durability Evaluation of Cathode Open-type Proton Exchange Membrane Fuel Cells Stacks," *Korean Chem. Eng. Res.*, **61**(1), in print(2023).

15. Yumiya, H., Kizaki, M. and Asai, H., "Toyota Fuel Cell System (TFCS)," *World Electric Vehicle Journal*, **7**, 85(2015).
16. Banham, D. and Ye, S., "Current Status and Future Development of Catalyst Materials and Catalyst Layers for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: An Industrial Perspective," *ACS Energy Lett*., **2**, 629(2017).
17. Oh, S. H., Yoo, D. G., Kim, M. H., Park, J. Y. and Park, K. P., "Effect of Pt-Co/C Cathode Catalyst on Electrochemical Durability of Membrane in PEMFC," *Korean Chem. Eng. Res.*, **61**(1), in print(2023).
18. Sharma, R. and Andersen, S. M., "Membrane Fuel Cell Catalyst Layers during an Accelerated Stress," *ACS Catal*, **8**, 3424-3434 (2018).
19. Ahluwalia, R. K., Papadias, D. D., Kariuki, N. N., Peng, J.-K., Wang, X., Tsai, Y., Graczyk, D. G. and Myers, D. J., "Potential Dependence of Pt and Co Dissolution from Platinum-cobalt Alloy PEFC Catalysts Using Time-resolved Measurements," *J. Electrochem. Soc*., **165**, F3024(2018).
20. Kim, T., Lee, H., Sim, W., Lee, J., Kim, S., Lim, T. and Park, K., "Degradation of Proton Exchange Membrane by Pt Dissolved/deposited in Fuel Cells," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**(5), 1265-1271(2009).

Authors

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

Yoohan Han: Bachelor's, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; dbgks9574@naver.com

Minchul Chung: Professor, Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea; mchung@scnu.ac.kr

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

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