

Characteristics of Plasma Blacks Used as an Electrode of Direct Formic Acid Fuel Cell

Young Sook Park¹, Jong-Ho Choi², Jonghee Han², Tae-Hoon Lim²,
Youngsoon Beak³, Jeh-Beck Ju¹, Taewon Shon¹ and Joong Kee Lee[◆]

Eco-Nano Reach Center, Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

¹Dept. of Chemical Eng., Hongik University, Seoul 121-791, Korea

²Fuel Cell Research Center, KIST

³Korea Gas Corporation, 973, Dongchun-dong, Yeonsu-Ku, Incheon 406-130, Korea

◆e-mail: leejk@kist.re.kr

(Received January 26, 2005; Accepted March 14, 2005)

Abstract

Plasma carbon blacks of 20~30 nm diameter were synthesized by direct decomposition of natural gas using a hybrid plasma torch system with 50 kW direct current and 4 MHz of radio frequency. The insulating reactor which inside diameter of 400 mm and length of 1500 mm, respectively was kept at 300~400 °C during the preparation. The ultimate analysis of plasma carbon blacks reveals that the raw plasma carbon blacks contains a large quantity of volatile which is mainly consist of hydrogen. Therefore devolatilization of raw plasma carbon blacks were carried out at 900 °C for one hour under nitrogen atmosphere. The devolatilization leads to the decrease in electrical resistivity and surface oxygen functional groups of plasma carbon black significantly. In order to investigate the plasma carbon as a catalyst support, devolatilized plasma black at 900 °C (DPB) supported PtAu catalyst was synthesized by sodium borohydride reduction method. Electrochemical measurements and direct formic acid fuel cell test indicated that catalytic activity of DPB supported PtAu catalyst for formic acid oxidation was similar to that of Vulcan XC-72 of commercial carbon black supported one.

Keywords : Decomposition of natural gas, Plasma carbon black, Catalyst support, Direct formic acid fuel cell

1. 서 론

환경문제가 대두되면서 지구온실효과의 대부분을 차지하는 CO₂ 가스를 발생시키지 않으면서도 21세기 신에너지로 각광 받고 있는 수소를 대량으로 제조하는 방법으로 천연가스의 열 분해 공정이 최근 연구되고 있다. 이 중에서 플라즈마에 의한 천연가스 분해공정은 매우 단순하며, 부산물로 카본블랙이 제조되어지므로, 이를 활용하여 새로운 부가가치를 지닌 소재를 창출할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 천연가스의 플라즈마 분해 공정에 의해 부산물로 생성되어 지는 카본블랙에 대한 응용방안을 모색하고자 한다. 카본블랙의 도전성 및 넓은 표면적 등의 물리적 특성으로 인하여 2차전지 및 연료전지에의 응용이 가능하므로, 본 연구에서는 직접 개미산 연료전지(Direct Formic Acid Fuel Cell, DFAFC)용 전극 촉매층 지지체로 제작하였다[1-3].

개질기가 따로 필요 없고 시스템이 간단하여 소형화가 가능하다는 장점으로 인해 가장 많은 주목을 받고 있는 직접 메탄올 연료전지(Direct methanol fuel cell, DMFC)는 연료인 메탄올의 유해성과 cross-over 현상으로 인한 문제점을 갖고 있다. 이를 극복할 수 있는 연료로서 개미산(Formic acid)을 이용한

직접 개미산 연료전지에 대한 연구가 이루어지고 있다. 개미산은 수용액 상태에서 수소이온과 formate anion으로 해리되기 때문에 개미산 자체가 전해질로 사용될 수 있으며, formate anion과 전해질 막 표면에 존재하는 ion cluster 사이의 반발력 때문에 개미산의 cross-over는 매우 적다는 장점을 가지고 있다. 그러나 실제 연료전지에서는 열역학적 이론값에 비하여 훨씬 낮은 OCV(Open circuit voltage)를 나타내고 있다[1].

연료전지용 전극은 전극 촉매층과 이를 지지해 주는 지지체로 구성되어 있다. 지지체는 촉매층 지지 외에도 반응기체를 촉매층으로 확산시켜 주는 기체 확산층(gas diffusion layer)의 역할, 생성된 물이 촉매층 밖으로 유출되게 하는 통로 역할, 촉매층에서 발생한 전류를 분리판으로 이동시켜 주는 집전체(current collector)의 역할을 한다. 따라서 지지체는 반응기체가 잘 통과하도록 50~90%의 기공율을 가져야 하며 발생한 전류를 집전할 수 있도록 전기전도도가 높아야 한다[1-4].

따라서 본 실험에서는 메탄올을 플라즈마 열분해시켜 얻은 시료(Raw PB)와 이를 N₂ gas에서 900 °C로 1시간 동안 열처리한 시료(DPB: Devolatilized Plasma Black)의 물리화학적 특성을 조사하였다. 직접 개미산 연료전지에 전극층의 촉매 지지체로서 전극을 구성하여 전기화학적 특성을 조사하고, 상용화

된 카본블랙인 Vulcan XC-72와 비교하였다. 이러한 실험 결과를 토대로 메탄을 플라즈마 열분해시켜 얻은 시료 Raw PB와 이를 열처리하여 휘발분을 제거한 DPB의 물리적 특성이 전기화학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 분석 시료

메탄을 플라즈마 분해시켜 카본블랙을 제조하기 위해 DC-RF 플라즈마 발생장치를 이용하였다. 약 50 KW direct current와 4 MHz의 radio-frequency를 사용한다. 플라즈마 가스인 아르곤과 반응물인 천연가스를 MFC를 이용하여 분당 약 70 liter로 반응기에 인입시켜서 천연가스 분해반응으로부터 카본블랙을 제조한다. 제조된 카본블랙은 400~500 °C의 고온으로 50 °C로 냉각하기 위한 열교환기를 거쳐 필터에서 집진된다. 회수된 카본블랙을 원시료(Raw PB)로 취하고, 다시 10 °C/min의 속도로 900 °C까지 승온시켜 N₂ 분위기에서 1시간 동안 열처리한 시료(DPB)를 준비하였다. Table 1에는 제조된 카본블랙 및 열처리한 카본블랙의 기본적인 물성을 나타내었다.

2.2. 물리적 특성 조사

2.2.1. Infrared Spectrometry

Raw PB를 열처리하였을 때 배출되는 가스 중 포함된 성분을 조사하기 위해서 가스를 액체 질소로 액화시킨 후 IR 조사를 하였다. Nicolet사의 Magna-IR spectrometer 750을 사용하였으며, 400~4500 nm의 파장 범위에서 32회 자동 스캔하여 측정하였다. 0.3 g의 KBr 분말을 압축하여 지름 13 mm의 원형 pallet을 제작하고 여기에 휘발분이 액화된 성분을 적셔서 분석하였다.

2.2.2. Gas Chromatography/Mass Spectrometry(GC/MS)

Raw PB를 열처리하였을 때 배출되는 가스의 구체적인 성분을 조사하기 위해서 가스를 액체 질소로 액화시킨 후 GC/MS 조사를 하였다. GC 장치로는 Hewlett Packard사의 hp6890을 사용하였으며, mass selective detector(MSD)를 이용하여 검출하였다. column은 직경 0.25 mm, 길이 30 m인 hp-5MS를

사용하였다. carrier gas로는 99.999%의 He를 사용하였으며 furnace는 40 °C에서 5분간 홀딩한 후 10 °C/min의 속도로 300 °C까지 승온되었다.

2.2.3. 원소분석(Ultimate analysis)

플라즈마 블랙 내에 함유되어 있는 원소의 함량을 알기 위해서 원소분석기(FISIONS instrument Co., EA1108)을 사용하였다.

2.2.4. BET Surface 및 porosity

BET Surface 및 porosity를 분석하기 위해 측정장치로 ASAP 2010(Micrometrics international Co.)을 사용하였다. 분석시료는 수분을 제거하기 위하여 393.15 K에서 가열하였고, 1 mmHg까지 degasing하여 전처리하였다. 분석 가스로 질소(N₂)를 사용하였고, analysis bath의 온도는 77.35 K을 유지하였다. micropore의 pore size distribution을 조사하기 위해 Dubin-Astakhov equation을 사용하였다[9].

2.2.5. 열중량 분석

온도에 따른 화학적 안정성을 조사하기 위하여 열중량 분석기(TGA, Thermogravimetric analyzer, TA instrument Co.)을 이용하였다. 분석시료는 수분함량, 휘발분 등을 비교하기 위하여 N₂를 통과시키며 900 °C까지 10 °C/min의 승온속도로 분석하였다.

2.2.6. TPD(Temperature programed desorption) 분석

Oxygen trap(MnO/SiO₂)과 Moisture trap(zeolite)을 설치하여 실험 시 외부로부터 산소와 수분의 유입이 전혀 없는 상태에서 carrier gas가 카본블랙 시료가 장입된 관내를 흘러 gas chromatography(Shimadzu, GC-8A) 분석장치에 도달하도록 하였다. carrier gas로는 99.999%의 He를 사용하였으며 실험 중 유속 30 cc/min, 온도 120 °C를 일정하게 유지하도록 조절하였다. 카본블랙 시료 0.05 g을 충전한 내경 4 mm quartz tube 반응기를 장착하고 He gas를 연결하여 약 2시간 동안 purging한 후 반응기 온도를 10 °C/min의 속도로 1000 °C까지 온도조절기(RKC, REX-P1000)를 이용하여 정확히 조절하였다. 50 °C 상승 시 마다 sample gas를 injection하여 GC로 분석하였으며 시료 내의 수분을 제거하기 위하여 120 °C에서 20분간 유지하였다. GC의 column은 Porapak Q이고 column의 온도는 100 °C로 유지되었으며 열전도도 검출기(TCD)를 이용하였다. 각 온도에서 얻은 GC peak에 의한 sample gas의 정량, 정성 분석을 통하여 카본블랙의 surface oxygen functional group을 예측하였다.

2.2.7. 플라즈마 블랙의 충전층 저항

카본블랙의 전기전도도를 측정하기 위하여 전기충방전 장치를 사용하여 측정하였다. 4-probe method를 이용하기 위하여 제작된 resistivity measurement tool을 전기충방전 장치(Won

Table 1. Properties of carbon black samples

Carbon black Properties		Raw PB	DPB
Ultimate analysis	C	95.4	96.2
	H	2.6	1.1
	N	0.6	0.6
H/C ratio		0.0273	0.0114
Mean Particle size (nm)		22.58	29
BET surface area (m ² /g)		53.28	100.5
Heating loss (wt.%)		57	47

A Tech, WBCS 3000)에 연결하여 두 탐침 사이에 전류를 흘려서 나머지 두 탐침 사이의 전압강하를 구하여 저항을 측정하였다. 전기저항을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{A}{l} \times R \quad (1)$$

- ρ : resistivity [Ω -cm]
- l : average thickness of the specimen [cm]
- A : effective area of the electrode [cm^2]
- R : resistance [Ω]

2.3. 전극 제조 및 전지 조립

직접 개미산 연료전지 촉매 담지체로의 가능성을 평가하기 위하여 전기전도도가 높은 DPB와 이미 상용화되어 사용되고 있는 Vulcan XC-72를 사용하여 촉매를 합성하였다. 우선 일정량의 백금염($\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)과 금염($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)을 증류수에 충분히 녹이고 담지체인 DPB와 Vulcan XC-72에 각각을 첨가하였다. 충분한 교반 후 환원제(NaBH_4)를 이용하여 환원 침전시키고, 세척과 건조과정을 거쳐서 DPB와 Vulcan XC-72에 담지된 백금-금 촉매를 얻을 수 있었다.

두 종류의 백금-금 담지 촉매를 애노드 촉매로 사용하고 Johnson Matthey 사의 백금 블랙을 캐소드 촉매로 사용하여 단위전지를 구성하였다. 애노드와 캐소드는 스프레이법으로 3 mg/cm^2 을 담지시켜 사용하였고 전해질은 Nafion®115를 사용하여 hot-press법으로 막-전극 접합체(MEA)를 제조하여 단위전지 성능을 측정하였다.

순환전류전압법(Cyclic voltammetry, CV) 측정을 위해서 연료극에는 증류수나 개미산을 5 cc/min 으로 공급하였고, 공기극에는 기준전극을 유지하기 위해 가습된 수소를 250 cc/min 을 공급하였다. 또한 단위전지 성능 측정을 위해서 6 M 개미산과 가습된 산소를 흘려주었고 electric loader를 이용하여 단위전지의 전압과 전류를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 카본블랙의 물성분석

플라즈마 공정으로 인하여 생성된 원시료인 Raw PB의 화학적 조성을 조사하기 위하여 원시료를 열처리하였을 때 생성되는 기체를 응축시켜 IR spectrum을 측정하고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 3000 cm^{-1} 부근에서 O-H peak, 1200 cm^{-1} 부근에서 C-O peak, 1800 cm^{-1} 부근에서 C=O의 특성 peak가 나타났다. 이로써 carboxyl 및 ester group이 포함되어 있음을 알 수 있으며, 1600 cm^{-1} 부근에서 방향족 그룹(C=C)의 peak를 볼 수 있다. 또한 C와 N의 결합도 관찰할 수 있는데, Table 1에 나타내었듯이 열처리 전후 과정에서 질소량이 차이가 없었으므로 천연가스를 이용한 플라즈마 시스템 공정에서 원료인 천연가스에 질소가 일부 포함되어 있어 카본 블랙 생산 공

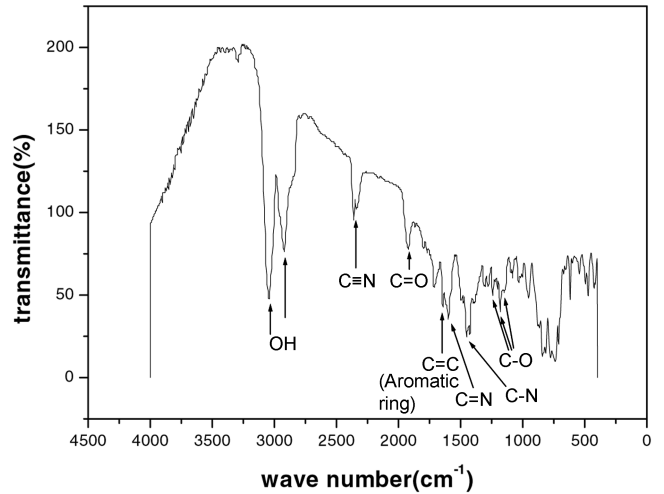


Fig. 1. Infrared spectroscopy of liquified volatile of plasma carbon black.

Table 2. The components of liquidized gas during heat treatment for Raw PB under the nitrogen gas by GC/MS analysis

No. substance	No. substance
1 phenylacetylene	9 4h-cyclopenta[def]penanthrene
2 styrene	10 pyrene
3 1h-indene	11 1-methyl pyrene
4 azulene	12 cyclopenta[cd]pyrene
5 biphenylene	13 3,4-dihydrocyclopenta[cd]pyrene
6 acenaphthene	14 2,2'-binaphthalene
7 9h-flourene	15 benzo[ghi]perylene
8 phenanthrene	16 coronene

정 중 생성된 물질로 보인다. 휘발분 중 포함되어 있는 유기 화합물의 성분을 분석하기 위하여 GC/MS 분석을 행한 결과 101가지의 성분이 검출되었으며, 상대적으로 양이 많은 대표적인 16가지 성분을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2에 Raw PB, DPB에 대해서 Dubin-Astakhov equation을 사용하여 구한 pore size distributions를 나타내었다. Raw PB와 DPB는 대부분 20 nm 이하의 pore diameter를 갖는 mesoporous한 구조이며, 두 샘플 모두 3~8 nm의 pore를 많이 갖고 있다. mesoporous한 구조가 많은 DPB가 더 넓은 BET surface area를 갖는 것을 Table 1에서 확인할 수 있다. 이는 열처리에 의해 Raw PB의 pore를 막고 있던 수분 및 휘발분 등의 불순물이 제거되면서 pore가 열려 mesopore가 생성된 것으로 보인다[10]. 비표면적 및 mesopore의 증가는 연료전지용 촉매층 제조시 실제 반응이 일어나는 지점인 삼상계면에서의 활성 catalyst particles을 증가시켜 연료전지 성능을 향상시키게 된다[16].

Fig. 3에 Raw PB와 DPB에 대해 N_2 분위기에서 0°C 부터 900°C 까지 10°C/min 의 속도로 승온하였을 때 질량변화를 도 시하였다. Raw PB의 경우 대략 100°C 부터 200°C 까지 질량

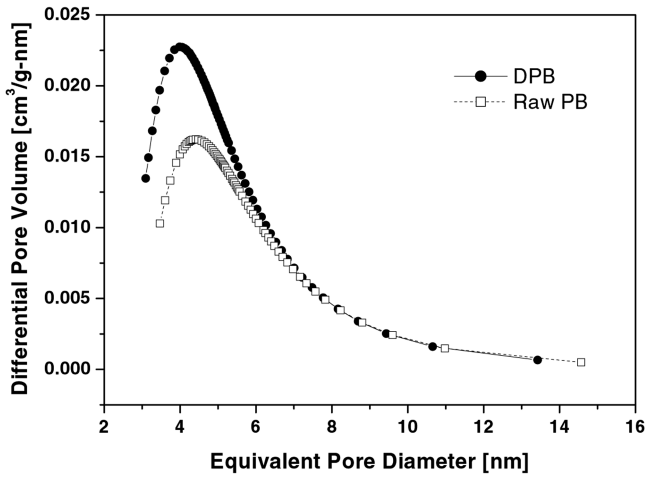


Fig. 2. Pore size distributions of Raw PB and DPB by the Dubinin-Astakhov method.

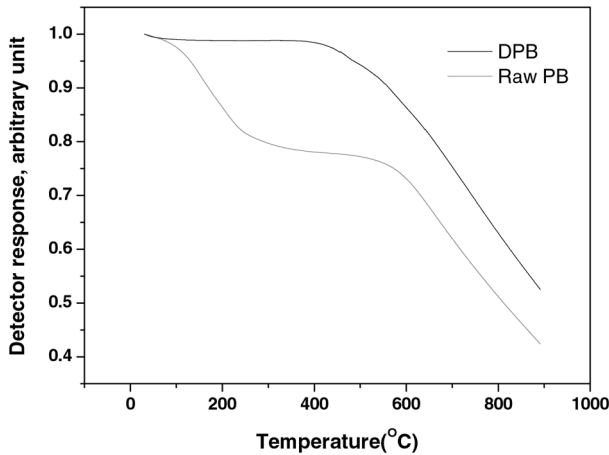
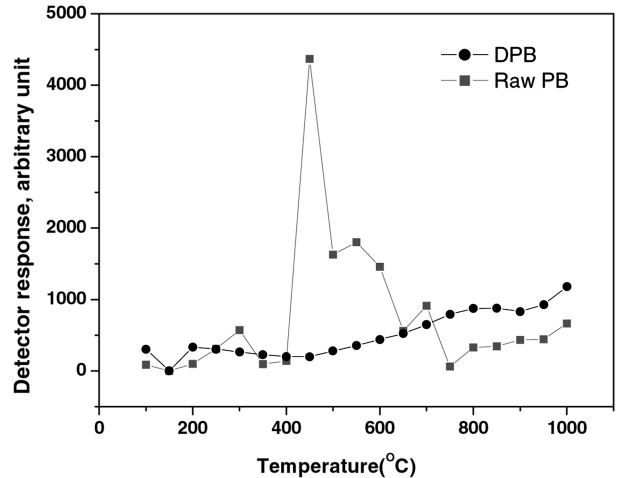


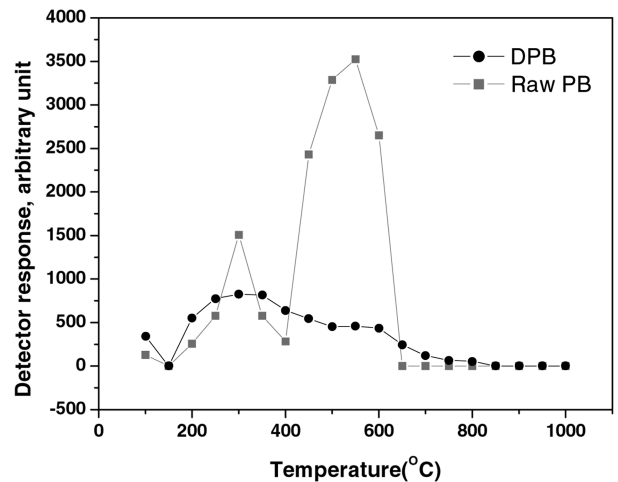
Fig. 3. Thermogravimetric curves for Raw PB and DPB. Heating rate of 10 °C/min under nitrogen atmosphere.

변화가 나타나기 시작한다. 이는 시료 중의 수분이 분해되기 시작하여 휘발분 등 non-carbon content의 분해가 이어지기 때문으로 보인다. 이후 400 °C 이후로 Raw PB와 DPB의 질량 감소가 나타나는 것은 열안정성이 떨어진 카본블랙 구조가 분해되면서 생긴 결과라고 볼 수 있다. 전체 질량 감소비율은 DPB의 질량 감소비율이 Raw PB의 경우보다 적어 Table 1에 나타낸 H/C ratio가 낮을수록 열안정성이 더욱 좋다는 것을 알 수 있다[10-12].

카본블랙 표면위에 존재하는 surface oxygen functional groups의 양을 조사하기 위해 TPD(Temperature programed desorption) 분석을 행하였다. 일반적으로 2개의 산소원자를 포함하고 있는 carboxyl, lactone groups은 CO₂를 방출시키고, 1개의 산소원자를 포함하고 있는 phenol, quinone, carbonyl groups은 CO를 방출한다고 알려져 있다. 따라서 이로부터 카본블랙 시료 표면에 존재하는 surface oxygen functional groups의 상대적인 양과 종류를 예측할 수 있다[5-7].



a) CO response



b) CO₂ response

Fig. 4. Surface oxygen functional groups of Raw PB and DPB evolved as CO and CO₂ by temperature programed desorption (TPD). Heating rate of 10 °C/min under helium gas atmosphere.

Fig. 4는 He분위기에서 0 °C부터 1000 °C까지 10 °C/min의 속도로 온도를 올리면서 5분마다 시료가스를 취하여 GC로 분석한 결과이다. CO response를 Fig. 4(a)에 CO₂ response를 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 Raw PB의 경우 400~800 °C 사이에서 response가 나타나고 다시 800 °C 이후부터 증가하는 response는 TG 분석결과와 비교해볼 때 카본블랙의 열안정성이 떨어지면서 나타난 결과이기 때문에 surface oxygen functional groups에 의한 CO의 방출이라고 볼 수 없다. Raw PB의 경우 나타났던 400~800 °C 부근의 response가 DPB에서는 거의 나타나지 않았으며, 500 °C 이후로 점차 CO response가 나타나 phenol, quinone, carbonyl groups이 분해됨을 알 수 있다. 이는 DPB가 열처리로 인하여 유기물이 거의 분해되었기 때문이라고 생각된다. 각각의 카본블랙의 전체 CO 방출량을 살펴보면 phenol, quinone, carbonyl groups의 양이 Raw PB가 DPB 보다 많음을 알 수 있다.

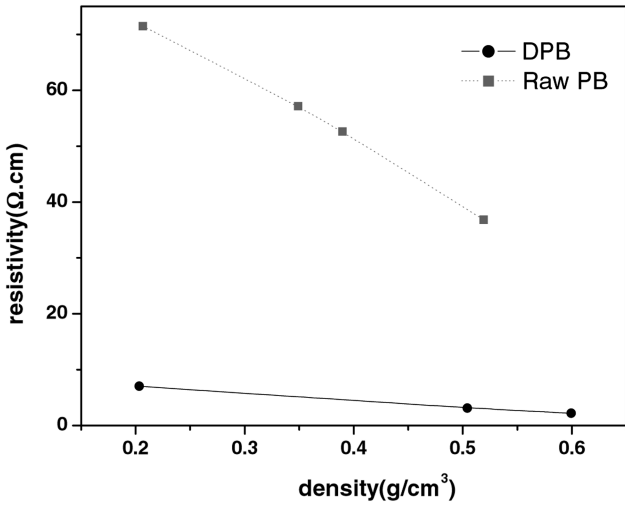


Fig. 5. Comparison of the volumetric electrical resistivity between raw PB and DPB powders.

Fig. 4(b)에서 Raw PB의 경우 300 °C 부근과 500 °C에서 CO₂ response가 관찰되었으며 DPB의 carboxyl 및 lactone groups은 700 °C를 전후하여 분해가 완료되었다. Raw PB에서 나타난 2 개의 CO₂ peak은 lactone groups이 carboxyl group보다 더 낮은 온도에서 분해가 시작되므로 각각의 response의 양이 곧 lactone 및 carboxyl groups의 양을 나타냄을 알 수 있다 [14]. DPB의 경우 200 °C를 전후로 분해가 시작되어 800 °C 이전에 모두 분해가 완료되었다. 각각의 카본블랙의 CO₂ 방출량은 Raw PB가 DPB보다 많아 CO₂ gas를 방출하는 carboxyl 및 lactone group의 양이 많음을 알 수 있다.

카본블랙의 edge 또는 defect site에 형성된 functional group은 카본블랙의 wettability, electrochemical reactivity 등의 특성에 관여하여 π 전자를 잡아두어 conductivity를 저하시키게 된다[6-8, 15]. 따라서 functional group의 양이 적은 DPB의 resistivity가 감소할 것으로 예상되며 이는 Fig. 5의 실험결과와도 잘 일치한다.

직접 개미산 연료전지의 전극 지지체로 사용되려면 전기전도도가 매우 높아야 한다. 전기전도도가 높을수록 지지체 위에 입혀진 촉매층이 전해질 막과 잘 접촉되어 접촉저항이 최소화되며 발생한 전류를 잘 집전하여 촉매층에서 발생한 전류를 분리판으로 이동시켜 주어 전극성능을 향상시킬 것으로 기대된다. Fig. 5에 resistivity measurement tool에 Raw PB, DPB의 파우더를 충전하여 전기저항을 구한 결과를 도시하였다. 충전된 카본블랙 파우더의 전기저항은 인가된 압력에 따라 달라지므로 일정부피 내에 충전된 카본블랙 파우더의 밀도를 여러 번 측정하여 평균치를 택해 변수로 하였다. 카본블랙 시료 모두가 충전밀도가 증가할수록 전기전도도는 더욱 향상되었으며, 일정 압력에서 비교하였을 때 DPB의 Resistivity는 Raw PB의 경우보다 감소하였다. 이러한 결과는 열처리 과정동안 수분 및 휘발분 등 non-carbon content가 제거되었기 때문으로

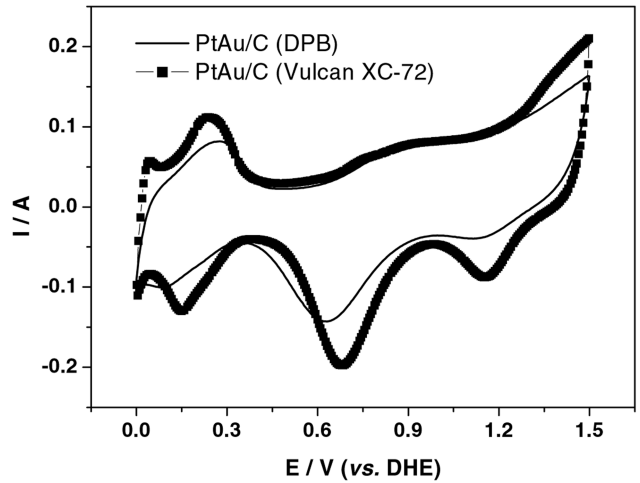


Fig. 6. Cyclic Voltammograms (CV) of DPB and Vulcan XC-72 supported PtAu catalysts in single cell.

판단된다[10].

3.2. 전기화학적 특성분석

연료전지용 전극 촉매층은 일반적으로 백금이 첨가된 탄소분말이 사용되며 이 탄소분말은 반응면적을 높이는 역할을 한다. 이 때에 탄소분말은 전기전도도가 높은 것을 사용해 전극 내의 접촉저항을 최소화할 수 있다. 본 실험에서는 전기전도도가 더욱 높은 DPB를 사용하여 Vulcan XC-72와 성능을 비교하였다.

Fig. 6은 DPB과 Vulcan XC-72에 담지된 백금-금 합금 촉매의 전기화학적 활성을 평가한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 백금에 의한 수소 흡탈착 피크와 산화 피크의 생성과 환원이 뚜렷이 보임으로 백금을 기본으로 하는 백금-금 합금 촉매의 형성을 확인할 수 있고 전기화학적 활성 면적과 관계있는 수소 탈착 피크를 비교했을 때 반응에 참여한 백금-금 촉매의 양은 서로 다른 담지체가 사용했음에도 불구하고

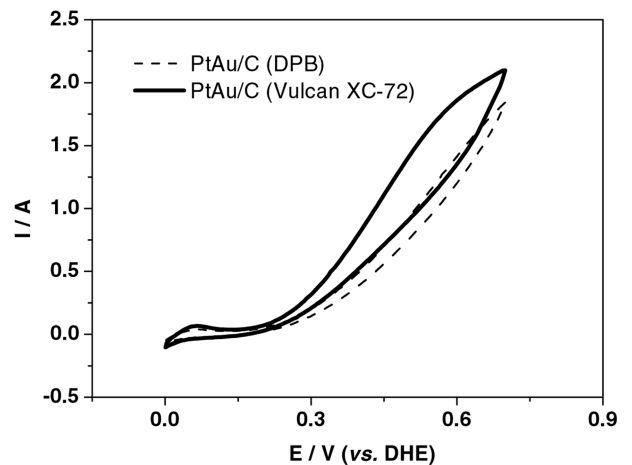


Fig. 7. Formic acid oxidation on single cell fixture.

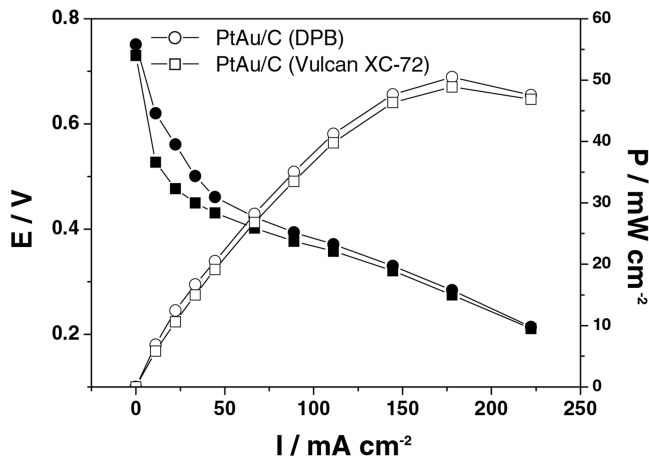


Fig. 8. Single cell performance of carbon supported Pt-Au alloy catalyst of direct formic acid fuel cell. IR [cm²]=0.487 (DPB), 0.654 (Vulcan XC-72)

하고 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 개미산 산화 반응에 따른 산화 전류밀도를 비교한 그림이다. 개미산 산화 반응에 대한 활성을 평가하는 척도인 개시전압(on-set potential)과 일정 전압 하에서의 산화 전류밀도를 비교해 보면, 개시전압은 거의 차이가 없었고 산화 전류밀도의 경우 비슷하거나 오히려 DPB에 담지된 촉매가 약간 더 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 Fig. 8에 나타난 직접 개미산 연료전지 단위전지 성능에서도 동일한 경향을 보였다. 상온에서 6 M 개미산을 사용했을 때 개방회로 전압(open circuit voltage)은 0.72~74 V를 나타내었고 최대 전력 밀도는 47~52 mW/cm²를 보였다. 실험결과를 통하여 DPB는 이미 상용화된 카본블랙인 Vulcan XC-72를 촉매층 지지체로 사용했을 때와 유사한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 메탄의 플라즈마 열분해에 의해 제조된 플라즈마 블랙과 이를 N₂ 분위기 하에서 900 °C로 1시간 동안 열처리하여 물리화학적 특성이 다른 시료를 준비하고 각각의 물리화학적 특성을 비교하였다.

원시료인 Raw PB의 성분을 파악하기 위하여 열처리 중 생성된 휘발분의 IR 및 GC/MS를 조사한 결과 원 시료는 방향족을 함유하고 있었으며 질소와 결합한 화합물도 관찰 할 수 있었다.

열처리 과정을 거친 DPB에서 BET 표면적, 공극률의 변화가 관찰되었으며 불순물이 제거되어 순도가 증가하였다. 또한 휘발분 및 표면화학그룹이 제거되면서 전기전도도가 증가하였다. 본 연구의 결과를 고찰해 보면 입자의 크기, 비표면적, 순도, surface oxygen functional groups의 양 등의 물리화학적 특

성이 복합적으로 전도도에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

열처리 과정을 거쳐서 기공도와 전기전도도의 향상을 보인 DPB를 백금-금 촉매의 담지체로 이용하여 촉매를 합성하고 직접 개미산 연료전지에 적용하여 그 활성을 평가해 보았다. DPB에 담지된 촉매의 경우 Vulcan XC-72에 담지된 촉매와 비교한 결과 전기화학적 활성 면적, 개미산 산화 반응의 개시 전압과 산화 전류 밀도, 최대 전력밀도 모두 유사한 결과를 나타내었다. 이를 통해 제조공정이 간단하고 많은 양의 카본을 한꺼번에 생산할 수 있는 플라즈마 열분해법으로 제조된 카본블랙이 연료전지의 담지체로 많이 사용되고 있는 Vulcan XC-72를 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 안계혁, *물리학과 첨단기술* **2003**, 12(3), 25.
- [2] Besenhard, J. O. *Handbook of battery materials*; Ed., Wiley-VCH, Weinheim, 1999; p 234.
- [3] Suh, D. J.; Park, T. J.; Ihm, S. K. *Carbon* **1993**, 31, 427.
- [4] BalBerg, I. *Carbon* **2002**, 40, 139.
- [5] Donnet, J. B.; Voet, A. *Carbon Black: Physics, Chemistry and Elastomer Reinforcement*; Marcel Dekker, New York, 1976; p 111.
- [6] Donnet, J. B.; Bansal, R. C.; Wang, M. J. *Carbon Black, Science and Technology*; Marcel Dekker, New York, 1993; p 171.
- [7] Kinoshita, K. *Carbon: Electrochemical and Physicochemical Properties*; Jhon Wiley, New York, **1987**, 86, 390.
- [8] Pantea, D.; Darmstadt, H.; Kaliaguine, S.; Summchen, L.; Roy, C. *Carbon* **2001**, 39, 1147.
- [9] Gauden, P. A.; Terzyk, A. P.; Rychlicki, G.; Kowalczyk, P.; Cwiertnia M. S.; Garbacz, J. K. *Journal of Colloid and Interface Science* **2004**, 273, 39.
- [10] Yoon, S. R.; Lee, J. K.; Ju, J. B.; Cho, B. W.; Park, D. K., *Carbon Science* **2002**, 3, 17.
- [11] Holliday, A. K.; Hughes, G.; Walker, S. M. *The Chemistry of Carbon*; Pergamon Press, Oxford, 1973; p 1265.
- [12] Rychlicki, G.; Terzyk, A. P.; Majchrzycki, W. *Chem. Technol. Biotechnol* **1999**, 74, 329.
- [13] Rice, C.; Masel, R. I.; Waszczuk, P.; Wieckowski, A.; Barnard, T. J. *Power Sources* **2002**, 111, 83.
- [14] Peric-Grujic, A. A.; Neskovic, O. M.; Veljkovic, M. V.; Lausevic, M. D.; Lausevic, Z. V.; J. Z. V.; Serb, Z. V., *Chem. Soc.* **2002**, 67, 761.
- [15] E. K. Sichel, *Carbon black-Polymer Composites: The Physics of Electrically Conducting Composites*; Marcel Dekker, New York and Basel, 1982; p 7.
- [16] Thompson, S. D.; Jordan, L. R.; Forsyth, M. *Electrochimica Acta* **2001**, 46, 1657.