

수정된 폴리올법으로 합성된 Pt/C를 이용한 산소환원반응성 및 고분자전해질 연료전지 성능 연구

양중원 · 추천호 · 권용재[†]

서울과학기술대학교 에너지환경대학원

(2014년 7월 31일 접수, 2014년 9월 5일 수정, 2014년 9월 10일 채택)

A Study on Catalytic Activity of Oxygen Reduction Reaction and Performance of PEMFC using Pt/C Synthesized by Modified Polyol

Jongwon Yang · Cheonho Chu · Yongchai Kwon[†]

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology,

(Received 31 July 2014, Revised 5 September 2014, Accepted 10 September 2014)

요약

해당 연구에서는 수정된 폴리올법을 이용하여 합성한 카본블랙 탄소지지체의 Pt촉매의 전기적, 전기화학적 특성을 평가하였다. 또한 Polyol_Pt/C 촉매는 고분자전해질연료전지의 공기극에 적용하여 산소환원반응성을 측정하였다. 산소환원반응성과 고분자전해질연료전지 성능평가를 통해 상용 Pt/C (JM_Pt/C)촉매와 비교하여 전기화학적인 촉매성능을 비교하였다. 촉매의 활성표면적을 구하기 위해 순환전압전류주사법을 이용하였고, 산소환원반응성을 측정하기 위해 회전원판전극으로 선형주사전류법을 이용하였다. 또한 고분자전해질연료전지 완전지 성능 측정을 진행하였다. 그 결과 Polyol_Pt/C 촉매의 활성표면적 ($196\text{m}^2\text{g}^{-1}$)은 JM_Pt/C 촉매의 그 값 ($183\text{m}^2\text{g}^{-1}$) 보다 우수하였다. 촉매들의 산소환원반응성에 경우에도 Polyol_Pt/C 촉매는 JM_Pt/C 촉매보다 우수한 반파장전위 및 한계전류밀도를 나타내었다. 또한 완전지 평가시, MEA 공기극을 위한 Polyol_Pt/C 촉매 담지량을 기존의 0.4에서 0.15로 줄였을 때, 성능저하가 적게 나타났고, 300시간의 장기간 성능 평가에서도 연료전지 성능이 거의 일정하게 유지되었다. 이를 토대로 수정된 폴리올법에 의해 합성된 Polyol_Pt/C 촉매는 경제적인 이용 및 우수한 내구성을 가지고 있음을 밝혀내었다.

주요어 : 수정된 폴리올법, 전기화학촉매, 고분자전해질연료전지, 산소환원반응성

Abstract - In this research, we investigate electrical performance and electrochemical properties of carbon supported Pt (Pt/C) that is synthesized by polyol method. With the Polyol_Pt/C that is adopted for oxygen reduction reaction (ORR) as cathode of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), their catalytic activity and ORR performance and electrical performance are estimated and compared with commercial Pt/C(Johnson Matthey) catalyst. Their electrochemically active surface (EAS) area are measured by cyclic voltammetry (CV), respectively. On the other hand, regarding ORR activity and electrical performance of the catalysts, (i) linear sweeping voltammetry by rotating disk electrode and (ii) PEMFC single cell tests are used. The CV measurement demonstrate EAS of Polyol_Pt/C is compared with commercial JM_Pt/C. In case of Polyol_Pt/C, its half-wave potential, kinetic current density are excellent. Based on data obtained by half-cell test, when PEMFC single cell tests are carried out, current density measured at 0.6V and maximum power density of the PEMFC single cell employing Polyol_Pt/C are better than those employing commercial Pt/C. Conclusively, Polyol_Pt/C synthesized by modified polyol process shows better ORR catalytic activity and PEMFC performance than other catalysts

[†]To whom corresponding should be addressed.

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National
University of Science and Technology
Tel : 02-970-6805 E-mail : kwony@seoultech.ac.kr

Key words : Polyol process, Platinum, Electrocatalyst, Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), ORR activity

1. 서 론

일반적으로 알려진 연료전지는 에너지 절약과 환경 공해 문제 그리고 최근에 부각되고 있는 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위해 고효율, 저공해 동력장치이며 기존의 내연기관을 대체하기 위한 청정무공해 발전기로서 주목을 받고 있다. 연료전지는 연소반응 없이 화학적 에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 장치로서 연료전지 자동차 동력기관으로 적용할 경우 카르노사이클의 제한이 없고 현재 내연기관에 비해 효율이 저위 발열량 기준 40%로 높으며 조용하고 안정적이다. 연료전지 중에서 나피온을 이용하여 고분자막을 형성하는 것으로 고분자 전해질형과 직접메탄올형이 있으며, 이 두 형태의 연료전지는 작동온도가 저온(100°C이하)이고 소형화가 가능하여 현재 상용화 단계를 위한 연구개발 경쟁이 국내외적으로 본격화되고 있다[1-3].

PEMFC는 크게 수소의 산화반응 (Hydrogen Oxidation Reaction; HOR)이 발생하는 연료극 (Anode)과 산소의 환원반응 (Oxygen Reduction Reaction; ORR) 이 일어나는 공기극 (Cathode) 및 그 사이의 수소양이온이 통과하는 막으로 구성되어 있다. 연료전지 성능을 향상시키기 위해서는 산화 및 환원 반응의 반응속도를 증가시켜야 한다. 반응속도의 증가를 통한 PEMFC의 성능향상을 위해서는 특히 율속반응의 반응성을 향상시켜야 하며 이를 위해, 반응을 위한 활성화에너지를 낮춰야 한다. 그 동안의 연구결과, ORR이 율속반응임을 알게 되었다(HOR이 ORR 보다 약 5배 이상 빠른 것으로 보고되었다.)[3]. 이러한 ORR 활성화에너지를 낮추기 위해 그 동안은 고가의 백금(Pt) 촉매를 사용하였다. 하지만 백금촉매는 비싼 귀금속이어서 PEMFC 상업화에 큰 걸림돌이 되고 있다. PEMFC의 대표적인 응용처인 연료전지 자동차의 경우, 현재의 백금가격을 고려할 때, 2015년까지 사용량을 현재의 절반 이하 수준으로 줄여야 한다. 그러므로 이러한 고가의 귀금속 백금 촉매를 대체하는 신규 촉매가 필요하고, 백금 함유량은 낮추면서 활성과 내구성은 향상된 촉매가 적절한 대안으로 제시되고 있다[3-5].

이러한 목표에 입각해서, 촉매개발은 크게 금속촉매 및 담지체 물질을 조정하는 것과 촉매합성 방법을

개선하는 접근으로 분류할 수 있다. 촉매자체의 물질을 조정하는 방법으로는 백금 표면을 보조금속으로 합금시키는 방법과 담지체로 사용되는 탄소의 종류를 바꾸는 것이 가장 적절하다[6,7]. 또한 담지체로는 일반적으로 사용되는 카본블랙(Carbon Black) 뿐 아니라 탄소나노튜브 (CNT), 다공성 탄소 (Ordered mesoporous carbon; OMC) 및 그래핀(Graphene) 등이 이용되고 있다[8,9].

본 연구를 위해 촉매합성 방법으로는 기존에 가장 많이 이용되었던 함침법(impregnation)이 아닌 폴리올법 (Polyol) 이 이용되었다[3-9]. 이 합성법은 촉매입자 크기의 통제가 용이하고 표면활성제나 안정제 없이도 촉매 입자들의 배열을 일정하게 하는 장점이 있다. 이는 에틸렌글리콜의 연속환원 반응성 때문에 기인한다. 에틸렌글리콜의 적용에 의해 금속 전구체 내 이온은 금속 콜로이드형태로 환원되며 에틸렌글리콜은 글리콜산으로 산화된다. 글리콜산은 염기용매 하에서 글리콜 음이온으로 탈양성자화 되면서 금속 표면에 흡착되어 촉매 안정제 및 표면활성제로서의 역할을 한다. 이 때문에 금속입자 간격의 균일함이 유지되고 글리콜음이온 농도에 따라 금속입자 크기가 조절된다. 글리콜음이온 농도는 pH 증가에 의해 같이 증가하므로 pH 조절을 통해 촉매입자의 간격 및 크기를 조절할 수 있다[10].

본 논문에서는 기존의 Pt 담지량에 따른 연료전지 공기극 및 PEMFC 성능 비교를 위해 촉매합성 방법을 개선하는 변화를 시도하였다. 기존의 백금 촉매 사용을 줄이기 연료극 및 공기극의 백금 로딩량을 조절하였고, 촉매 합성 방법 개선을 위해 기존의 폴리올법을 수정한 수정된 폴리올법을 이용하여 촉매합성을 진행하였다. 이렇게 합성된 공기극 촉매들의 촉매 활성 및 구조적인 특성들이 평가되었고 이 촉매들을 이용한 완전지 성능 평가도 실시하였다.

2. 실험방법

2-1. 촉매합성

카본블랙(Vulcan XC-72R)을 담지체로 이용하는 Pt/C 구조의 촉매가 폴리올법에 의해 제조되었다. 에틸렌글리콜에 카본블랙 0.13g을 섞고 초음파로 분산

시킨다. $PtCl_4$ 0.15g을 담지체가 있는 비이커에 각각 첨가하고 다시 15분간 sonication 시킨다. 그 이후, 0.1M NaOH를 넣고 다시 15분간 sonication 시키고, 160°C로 미리 예열된 Stirring Mantle에서 Reflux 시킨다. 이렇게 얻어진 용액을 비이커에 담고 0.5M 황산을 이용하여 pH2 까지 적정한다. 그 후에 증류수를 이용하여 여과 및 세척한 후 160°C에서 진공오븐에서 12시간 건조시킨다.

2.2. 촉매 환원반응성 측정

공기극 촉매의 환원반응 활성을 측정하기 위해 정전위기 (CHI 7200, CH Instrument, USA)를 이용하여 다양한 반전지 반응특성을 평가하였다. 주로 반복 주사 전압-전류법 (Cyclic Voltammetry, CV) 및 선형주사 전압-전류법 (Linear Sweep Voltammetry, LSV)를 이용하였는데 LSV 측정의 회전디스크형 (Rotating Disk Electrode, RDE)의 전극 조건하에서 실험을 실시하였다. 반전지 특성 측정을 위한 기준전극으로는 3M의 KCl에 담겨진 Ag/AgCl 전극이 상대전극으로는 백금 와이어가 사용되었다. 작업전극을 제작하기 위해 촉매입자들을 이소프로판올과 5wt% 나피온 (Solution Technology, Inc., 1100EW)용액에 용해시켜 초음파를 이용하여 10분간 섞어준다. 이렇게 제조한 촉매잉크를 유리탄소전극 (Glass Carbon Electrode, GCE)에 적정량을 로딩시킨다. 전해질로는 1M 황산을 이용하였다.

2.3. PEMFC 완전지 측정

공기극 촉매의 환원반응 활성 테스트 후에 그 촉매들이 PEMFC 성능에 미치는 영향을 측정하기 위해 완전지 테스트가 진행되었다. PEMFC 완전지 테스트를 위해 막전극 (Membrane Electrode Assembly, MEA) 제조가 필요하다. 제조된 막전극의 유효면적은 $5cm^2$ 이고 본 연구를 통해 만들어진 촉매들은 공기극에, 상용 Pt/C (Johnson Matthey Pt 40 wt%) 촉매는 연료극에 로딩된다. 또한 막전극용 막으로는 나피온 212 (Dupont사, 미국)가 이용되었다. 막전극의 촉매층을 만들기 위해 필요한 잉크는 금속입자, 5wt% 나피온, 증류수와 이소프로필알코올을 적당량 섞고 초음파로 분산한 후 공기 스프레이 방식으로 나피온 막 표면에 코팅되는 CCM (Catalyst Coated Membrane)법으로 제조되었다[11]. 공기극에 코팅되

는 촉매량은 각각 $0.4 mg/cm^2$, $0.2 mg/cm^2$, $0.15 mg/cm^2$ 으로 촉매량을 조절하면서 가스확산층 (GDL E-Tek)과 가스켓을 이용하여 MEA 조립을 완료하였다. PEMFC 완전지 성능 측정을 위해 단위전지 조립을 마친 후, 그 전지는 연료전지 테스트스테이션 (Fuel Cell Control System, CNL Inc.)에 연결한다. 단위전지 온도는 65°C, 1atm조건하에서 운전한다. 연료극 및 공기극 연료인 수소 및 산소가스는 상대습도 100%하에서 운전하였다[12].

3. 결과 및 토론

3-1. 폴리올법으로 합성된 Pt 촉매의 촉매활성평가

해당 연구를 위해 준비한 촉매들인 상용 백금-카본블랙 (JM_Pt/C) 및 폴리올 백금-카본블랙 (Polyol_Pt/C) 촉매들의 전기화학적 활성 표면적 (Electrochemically Active Surface Area, EAS)을 측정하기 위해서 CV 테스트를 실시하였다. CV 테스트는 질소가스 조건에서 실시되었고 전해질로는 1M 황산 수용액이 이용되었다. 주사속도는 $10 mVs^{-1}$ 였다. 2가지 다른 종류의 촉매들 (JM_Pt/C 및 Polyol_Pt/C)의 CV 커브는 Figure 1.에 나타내었다.

모든 촉매들의 EAS는 CV 커브와 다음 식에 의해 얻어졌다.

$$EAS = Q/mq \quad (1)$$

여기서 Q는 촉매 입자내에 흡착된 수소의 전하량이고 q는 Pt 표면에 흡착된 수소층의 형성을 위해 필

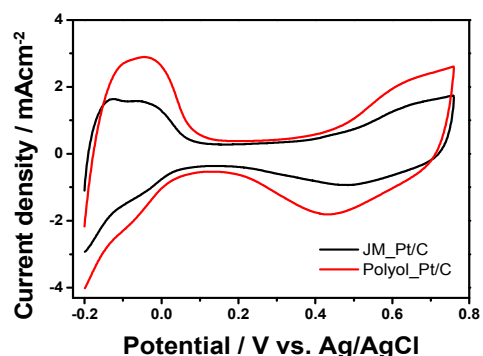


Fig. 1. CVs of JM_Pt/C and Polyol_Pt/C catalysts that were recorded in N_2 saturated state. 1M H_2SO_4 was used as an electrolyte and the all CVs were implemented at room temperature with scan rate of 50mV/s.

요한 전하량이며, m 은 금속촉매의 로딩량이다. 수소의 단일층이 Pt 표면위에 흡착된다는 가정하에, q 는 $210 \mu\text{Ccm}^{-2}$ 이다. 이러한 방식으로 계산된 JM_Pt/C 및 Polyol_Pt/C 촉매들의 EAS는 각각 $183\text{m}^2\text{g}^{-1}$ 및 $196\text{m}^2\text{g}^{-1}$ 이다. 이를 통해 Polyol_Pt/C촉매의 활성표면적이 높은 것을 확인할 수 있다.

Pt/C 촉매들의 활성 및 ORR 반응성을 측정하기 위해 회전원판전극(RDE) 및 회전 고리-원판 전극 (Rotating Ring Disk Electrode, RRDE)을 이용한 LSV를 측정하였다. Figure 2.는 촉매들의 RDE를 이용한 LSV 커브 결과를 보여준다. 각 촉매들의 한계전류밀도 (Limiting current density)와 반파장 전위차 (Half-wave potential)에 대한 결과는 Table 1.에 요약하였다.

반파장 전위차의 경우, Polyol_Pt/C가 가장 좋은 값 (0.56V)을 보여줬고, JM_Pt/C촉매가 가장 낮은 (0.53V)를 나타내었다. Polyol_Pt/C의 경우 반파장 전위차가 가장 좋은 값을 나타내는데 이는 ORR 반응에서 발생하는 과전압 (overpotential)이 적기 때문이다.

3-2. 촉매의 PEMFC 성능 평가

공기극 촉매의 환원반응 활성 테스트 후에 그 촉매들이 PEMFC 성능에 미치는 영향을 측정하기 위해 Polyol_Pt/C 촉매의 PEMFC 성능을 평가하였고 그 결과는 Figure 3.에 나타내었다.

PEMFC 완전지 테스트를 위해 상용 Pt/C 촉매는 공통적으로 연료극 촉매로 이용하였고, 본 논문에서 고려하는 Polyol_Pt/C 촉매는 공기극에 사용되었으며, 각각 로딩량을 변화시키며 (0.4mgcm^{-2} , 0.2mgcm^{-2} ,

Table 1. LSV data

Catalyst	Half wave potential (V)	Limiting current density (mAcm^{-2})
JM_Pt/C	0.53	5.88
Polyol_Pt/C	0.56	6.67

0.15mgcm^{-2}) 측정되었다. 평가결과 즉, 세가지 로딩량을 이용했을 때, 0.6V 에서의 전류밀도는 각각 900mAcm^{-2} (0.4mgcm^{-2}), 850mAcm^{-2} (0.2mgcm^{-2}) 및 800mAcm^{-2} (0.15mgcm^{-2}) 였고, 최대 PEMFC 출력밀도 (Maximum power density)는 각각 0.58Wcm^{-2} (0.4mgcm^{-2}), 0.56Wcm^{-2} (0.2mgcm^{-2}) 및 0.56Wcm^{-2} (0.15mgcm^{-2}) 였다.

PEMFC성능 측정 결과로부터 공기극의 촉매로딩량을 조절하였을 때 Pt량에 따라 성능이 감소하는 경향을 보였으나, Pt촉매의 감소량인 37.5% ($0.4\text{mgcm}^{-2} \rightarrow 0.15\text{mgcm}^{-2}$)에 비해 성능저하는 11.2% ($900\text{mAcm}^{-2} \rightarrow 800\text{mAcm}^{-2}$)에 불과한 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 Pt촉매량 대비 성능감소폭이 적음을 알 수 있었고, Pt촉매 로딩량이 감소함에도 PEMFC 성능감소가 적어 Pt 촉매량을 줄이면서 성능은 유지할 수 있었다.

3-3. PEMFC 장시간 평가.

위에서 평가한 Polyol_Pt/C 촉매를 이용하여 연료극은 JM_Pt/C (0.4mgcm^{-2}), 공기극은 Polyol_Pt/C (0.15mgcm^{-2})을 로딩하여 PEMFC의 장시간 성능평가를 실시하였다. 총 300시간 운전하였고, OCV, 0.7V 및 0.6V 에서 각각 전류밀도를 측정하여 비교하였다. 측정 결과는 Table 2.에 요약하였다.

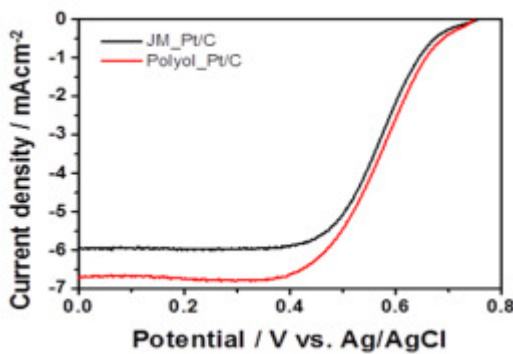


Fig. 2. LSV curves using RDE of JM_Pt/C and Polyol_Pt/C catalysts that were recorded in O₂-saturated state. 1M H₂SO₄ was used as an electrolyte and the all tests were implemented at room temperature and rotating speed for the tests was 1600rpm.

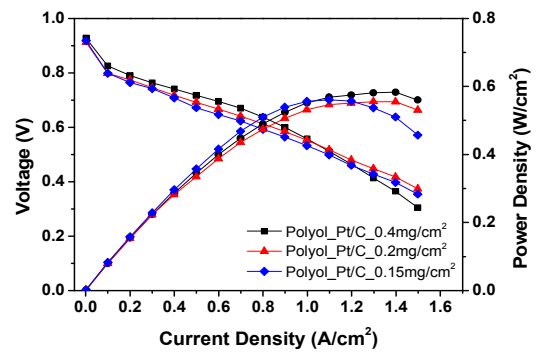


Fig. 3. Polarization curves of PEMFC single cells using Polyol_Pt/C as cathode catalysts. For the tests, CCM method was used for making MEA. As catalyst for anode, 0.4mgcm^{-2} JM_Pt/C (Pt 40 wt%) was loaded, while as catalyst for cathode, three different Polyol_Pt/Cs (Pt 40 wt%) were loaded.

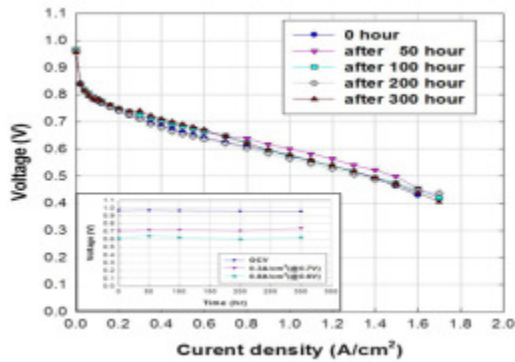


Fig. 4. PEMFC long term test using polarization curves of PEMFC single cells. For the test, CCM method was used for making MEA. As catalyst for anode, 0.4mgcm^{-2} JM_Pt/C (Pt 40 wt%) was loaded, while as catalyst for cathode, 0.15mgcm^{-2} Polyol_Pt/C (Pt 40 wt%) was loaded.

Table 2. Long term test of PEMFC

Time	Voltage (V)		
	OCV	@ 0.3mAcm^{-2}	@ 0.8mAcm^{-2}
0h	0.96	0.71	0.61
300h	0.95	0.73	0.60

PEMFC 장시간 성능평가 결과 MEA 성능감소는 거의 없었다. 이는 기존 논문의 JM_Pt/C 촉매의 내구성 성능감소와 비교하여 우수한 촉매내구성을 가짐을 알 수 있었다[13].

4. 결 론

본 논문에서는 폴리올법에 의해 합성된 Pt/C 촉매의 연료전지 성능 및 ORR에 대한 특성평가를 진행하였다. 합성된 촉매는 PEMFC의 공기극 촉매로 사용되었으며 그 촉매들의 측정된 ORR의 반응특성 및 연료전지의 전기적 성능과 특징들을 평가하였다. 성능 및 특성비교를 위해 CV를 통해 EAS값을 측정하였고, ORR 반응특성을 비교하기 위해 RDE를 이용한 LSV 및 완전지 테스트를 통해 평가되었다. ORR의 반응특성의 경우 상용촉매인 JM_Pt/C에 비해 우수한 반과장전위, 속도론적 전류밀도를 나타내었다. 촉매의 구조적 특성 및 산소환원반응성에 입각해서 합성한 촉매의 완전지 성능을 평가하였고, 그 평가대상으로는 공기극 촉매의 로딩량을 조절하여 각각 0.4mgcm^{-2} , 0.2mgcm^{-2} 및 0.15mgcm^{-2} 로 변화시켜가며 측정하였다. 0.6V에서의 전류밀도는 각각

900mAcm^{-2} (0.4mgcm^{-2}), 850mAcm^{-2} (0.2mgcm^{-2}) 및 800mAcm^{-2} (0.15mgcm^{-2}) 였고, 최대 PEMFC 출력밀도 (Maximum power density)는 각각 0.58Wcm^{-2} (0.4mgcm^{-2}), 0.56Wcm^{-2} (0.2mgcm^{-2}) 및 0.56Wcm^{-2} (0.15mgcm^{-2})였다. 결론적으로 폴리올법에 의해 합성된 Polyol_Pt/C 촉매는 우수한 산소환원반응성 및 PEMFC 완전지 성능을 가짐을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 2014년 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. T. Toda, H. Igarashi, H. Uchida, and M. Watanabe, "Enhancement of the Electroreduction of Oxygen on Pt Alloys with Fe, Ni, and Co", Journal of The Electrochemical Society, 1999, 146, 3750-3756.
2. T.-Y. Jeon, S. J. Yoo, Y.-H. Cho, K.-S. Lee, S. H. Kang, and Y.-E. Sung, "Influence of Oxide on the Oxygen Reduction Reaction of Carbon-Supported Pt-Ni Alloy Nanoparticles", The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113, 19732-19739.
3. S. Yoo, S. Hwang, and S.-K. Lim, "Current status of electrocatalyst for PEMFC", News & Information for Chemical Engineers, 2012, 30, 422.
4. T.-Y. Jeon, N. Pinna, S. J. Yoo, S.-H. Yu, S.-K. Kim, S. Lim, D. Peck, D.-H. Jung and Y.-E. Sung, "Enhanced Activity of Pt-Based Electrocatalysts for Oxygen Reduction via a Selective Pt Deposition Process", Journal of Electroanalytical Chemistry, 2011, 662, 70-79.
5. K. Hyun, J.H. Lee, C.W. Yoon and Y. Kwon, "The effect of platinum based bimetallic electrocatalysts on oxygen reduction reaction of proton exchange membrane fuel cells", International Journal of Electrochemical Science, 2013, 8, 11752-11767.

6. Y.-H. Cho, T.-Y. Jeon, J. W. Lim, Y.-H. Cho, M. Ahnb, N. Jung, S. J. Yoo, W.-S. Yoon, and Y.-E. Sung, "Performance and Stability Characteristics of MEAs with Carbon-Supported Pt and PtNi Nanoparticles as Cathode Catalysts in PEMFuel Cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36, 4394-4399.
7. S. J. Yoo, S.-K.Kim, T.-Y. Jeon, S. J. Hwang, J.-G. Lee, S.-C. Lee, K.-S. Lee, Y.-H. Cho, Y.-E. Sung, and T.-H. Kim, "Enhanced Stability and Activity of Pt-Y Alloy Catalysts for Electrocatalytic Oxygen Reduction", *Chemical Communications*, 2011, 47, 11414-11416.
8. K. Hyun, J.H. Lee, C.W. Yoon, Y.-H. Cho, L.-H. Kim and Y. Kwon, "Development of oxygen reduction catalyst consisting of carbon nanotube, polypyrrole and PtNi alloy for the use in proton exchange membrane fuel cells", *Synthetic Metals*, 2014, 190, 48-55.
9. R. I. Jafri, N. Rajalakshmi, S. Ramaprabhu, "Nitrogen doped graphene nanoplatelets as catalyst support for oxygen reduction reaction in proton exchange membrane fuel cell", *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20, 7114-7117.
10. H.-S. Oh, J.-G. Oh, and H. Kim, "Modification of Polyol Process for Synthesis of Highly Platinum Loaded Platinum-Carbon Catalysts for Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, 2008, 183, 600-603.
11. Y.-H. Cho, B. Choi, Y.-H. Cho, H.-S. Park, and Y.-E. Sung, "Pd-Based PdPt(19:1)/G Electrocatalyst as an Electrode in PEM Fuel Cell", *Electrochemistry Communications*, 2007, 9, 378-381.
12. Y.-H. Cho, H.-S. Park, Y.-H. Cho, D.-S. Jung, H.-Y. Park, and Y.-E. Sung, "Effect of Platinum Amount in Carbon Supported Platinum Catalyst on Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, 2007, 172, 89-93.
13. R. L. Borup, R. Mukundan, "PEM Fuel Cell Degradation", *The Electrochemical Society*, 2010, 33(1), 17-26.