# 루테늄 산화물 나노 섬유 지지체에 담지된 고 분산성 촉매의 전기화학적 거동

### 안건형<sup>a</sup> · <mark>안효진<sup>a,b,\*</sup></mark>

<sup>4</sup>서울과학기술대학교 의공학 바이오소재 융합 협동과정 신소재공학 프로그램 <sup>b</sup>서울과학기술대학교 신소재공학과

# Electrochemical Behavior of Well-dispersed Catalysts on Ruthenium Oxide Nanofiber Supports

# Geon-Hyoung An<sup>a</sup>, and Hyo-Jin Ahn<sup>a,b,\*</sup>

 <sup>a</sup>Program of Materials Science & Engineering, Convergence Institute of Biomedical Engineering and Biomaterials, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Republic of Korea
<sup>b</sup>Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Republic of Korea
(Received March 30, 2017; Revised April 15, 2017; Accepted April 17, 2017)

(Received March 30, 2017; Revised April 15, 2017; Accepted April 17, 2017)

**Abstract** Well-dispersed platinum catalysts on ruthenium oxide nanofiber supports are fabricated using electrospinning, post-calcination, and reduction methods. To obtain the well-dispersed platinum catalysts, the surface of the nanofiber supports is modified using post-calcination. The structures, morphologies, crystal structures, chemical bonding energies, and electrochemical performance of the catalysts are investigated. The optimized catalysts show well-dispersed platinum nanoparticles (1-2 nm) on the nanofiber supports as well as a uniform network structure. In particular, the well-dispersed platinum catalysts on the ruthenium oxide nanofiber supports display excellent catalytic activity for oxygen reduction reactions with a half-wave potential ( $E_{1/2}$ ) of 0.57 V and outstanding long-term stability after 2000 cycles, resulting in a lower  $E_{1/2}$  potential degradation of 19 mV. The enhanced electrochemical performance for oxygen reduction reactions results from the well-dispersed platinum catalysts and unique nanofiber supports.

Keywords: Oxygen-reduction reaction, Catalysts, Platinum, Nanofiber

# 1. 서 론

최근 석유 및 석탄 사용에 따른 환경 오염이 전 세계적 인 이슈이며, 이를 대체할 수 있는 신재생 에너지 기술에 대한 필요성이 점점 더 증가되고 있다. 신재생 에너지 분 야는 태양광, 풍력, 수력, 지열 및 전기화학 기반의 에너지 저장/변환 소자들을 포함한다. 특히 다양한 전기화학 기반 에너지 변환 소자들 중 연료전지는 전기자동차 및 에너지 저장/발전기 등에 이르는 대형 분야에서 랜턴 및 노트북과 같은 소형 분야까지 폭 넓게 이용이 가능하다[1-3]. 더욱 이 무해한 공정이 없는 친환경 연료전지는 높은 에너지 밀도와 높은 연료 전환 효율 때문에 최근 많은 주목을 받 고 있다. 다양한 종류의 연료전지 중, 대표적으로 널리 알려 진 고분자전해질형 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFCs) 는 음극, 양극, 전해질 및 이온 교환 막으로 구성 되어있다. 이중에서 양극 촉매에서 진행되는 산소환원반응은 전지의 성능 및 가격을 결정짓는 중요 기 술 중 하나이다[4, 5]. 이러한 이유는 양극에서 진행되는

<sup>\*</sup>Corresponding Author: Hyo-Jin Ahn, TEL: +82-02-970-6622, FAX: +82-2-973-6657, E-mail: hjahn@seoultech.ac.kr

산소환원반응은 음극에서 진행되는 연료 분해반응보다 더 복잡하고 느린 반응이기 때문이다[4, 5]. 일반적으로 양극 에 사용되는 촉매는 산소환원반응이 우수하며 높은 전기 전도도를 보유하는 백금이 주로 사용된다. 하지만, 백금 촉매의 경우 높은 가격 및 쉽게 응집되는 성질 등의 치명 적인 단점을 보유하고 있다[6, 7]. 따라서, 이러한 단점을 극복하기 위하여 백금 촉매용 담지체에 대한 연구가 활발 히 진행되고 있다. 담지체는 백금 사용량을 감소시켜주고, 백금의 분산성을 향상시켜 응집을 억제하여 보다 효율적 으로 백금을 이용 할 수 있도록 도와준다[2-4]. 지금까지 탄소기반의 담지체(그래핀, 탄소나노튜브, 탄소나노섬유 등), 고분자 담지체, 금속산화물 담지체 등이 연구되어왔 다[2-4]. 본 연구에서는 금속산화물인 루테늄 산화물을 이 용했다. 이는 높은 전기전도도 뿐만 아니라 전기화학적 안 정성 또한 우수하기 때문에 백금 촉매용 담지체 후보군으 로 적합하다. 게다가, 담지체의 형상 또한 촉매능력을 향상 시키기 위하여 중요하게 고려해야 할 사항 중 하나이다. 1 차원 구조의 나노 섬유 네트워크 구조를 담지체로 이용 할 경우 효율적인 전자이동 및 빠른 전해질 확산 효과를 기대 할 수 있다[8-13].

따라서, 본 논문에서는 전기방사법, 표면제어 및 환원법 을 이용하여 루테늄 산화물 나노 섬유 지지체에 담지된 고 분산성 백금 촉매를 성공적으로 제조하였다. 이때, 고 분산성 백금 촉매를 얻기 위하여 나노 섬유의 표면을 열 처리를 통해 제어하였다. 제조된 촉매들은 산소환원반응 을 위한 촉매로 이용하였고, 촉매의 활성도 및 전기화학적 안정성을 평가하였다.

#### 2. 실험 방법

산소환원반응용 촉매로 이용하기 위하여 루테늄 산화물 나노섬유 지지체에 담지된 고 분산성 백금 촉매를 전기방 사법, 표면제어 및 환원법을 이용하여 다음과 같이 제조하 였다. 전기방사법은 나노섬유 지지체를 합성하기 위해 가장 널리 사용되는 공정방법 중 하나이며 가격이 저렴하고 대 면적화에 용이하며, multi-tip 및 연속생산 공정을 통한 대량 생산화에도 많은 연구들이 진행되고 있다[2, 3]. 먼저, 탄소 전구체인 polyacrylonitrile(PAN, Mw = 150,000 g/mol와 루테 늄 전구체인 ruthenium(III) chloride hydrate (RuCl<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O)을 용매인 N,N-Dimethylformamide(DMF)와 함께 5 시간 동 안 교반 하였다. 그리고 나서 준비된 용액을 주사기에 옮 겨 담은 후 23 게이지의 직경을 지니는 스테인레스 바늘 을 장착했다. 주사기를 공급기에 장착하고 주사기와 나노 섬유 포집판 사이의 거리를 15 cm로 고정하였다. 공급기 의 주입 속도는 0.03 mL/h로 유지 하였고, 전원공급기를 이용하여 13 kV 전압을 유지하면서 전기방사를 실시하였 다. 얻어지는 나노섬유들은 안정화를 위하여 230℃에서 2 시간 동안 공기중에서 열처리 하였고, 그 후 800°C에서 2 시간 동안 고순도 질소 분위기에서 탄화 시켰다. 그 다음, 나노섬유의 표면을 제어하기 위하여 열처리를 공기중에서 한번 더 진행하였고, 온도는 300, 400 및 500℃로 각각 진 행하였다. 이렇게 얻어진 루테늄 산화물 나노섬유 지지체 를 증류수에서 0.56 mM Pt전구체(H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>·xH<sub>2</sub>O)와 함께 분산시켰다. 그 다음, 환원제로써 100 mg mL-1의 NaBH4 를 첨가한 후 30분 동안 교반 시켰다. 이렇게 얻어진 촉매 를 증류수로 세척한 후 -60°C에서 동결 건조하여 20 wt% 의 백금 촉매가 담지된 샘플을 합성하였다. 이때 나노섬유 지지체의 표면 제어를 위해 수행한 열처리에서 서로 다른 온도(300, 400 및 500°C)를 변수로 설정하였으며 이에 따 라 샘플을 각각 Pt/RuO<sub>2</sub>-300, Pt/RuO<sub>2</sub>-400, Pt/RuO<sub>2</sub>-500 으로 표기하였다. 또한, 비교를 위해서 표면 제어를 수행 하지 않은 담지체에도 백금 촉매를 동일하게 합성하였고. 이는 Pt/CNF로 표기하였다.

나노 섬유 지지체에 담지된 고 분산성 백금 촉매의 형태 학적 특성을 분석하기 위하여 주사 전자 현미경(fieldemission scanning electron microscopy, FESEM; Hitachi S-4800) 및 투과 전자 현미경(transmission electron microscopy, TEM; Tecnai G<sup>2</sup>, KBSI Gwangju Center)을 이용하였다. 또 한, 결정구조 및 표면에서의 화학적 결합상태를 분석하기 위하여 X-선 회절분석(X-ray diffraction, XRD; Rigaku D/ Max 2500 V)과 X-선 광전자 주사법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS; ESCALAB 250)을 이용하였다. 나노 섬유 지지체에 담지된 고 분산성 백금 촉매의 전기화학적 거동의 분석을 위하여 삼 전극 시스템과 함께 potentiostat/ galvanostat(Eco chemie Autolab, PGSTAT302N)를 이용하였 다. 삼 전극 시스템은 작업전극(0.07 cm2, a glassy carbon electrode), 상대전극(Pt wire) 및 기준전극(Ag/AgCl, saturated KCl) 으로 구성하였다. 전해질은 0.1 M HClO<sub>4</sub>용액을 사용 하였다. 촉매와 Nafion를 무게비로 8:2의 비율로 잉크를 제조하였고, 이를 고르게 분산 시켰다. 작업 전극 위에 제 조된 촉매 잉크를 고르게 코팅 한 후 80°C에서 건조하였 다. 산소환원반응을 분석하기 위하여 선형 이동 전압 곡선 (linear sweep voltammograms, LSV)을 산소가 충분히 공 급된 전해질내에서 서로 다른 전극 회전속도(100, 400, 900, 1600, 2500 rpm)를 이용하여 0.0-1.0 V의 전압범위에 서 측정하였다. 또한, 제조된 촉매들의 전기화학적 안정성 을 평가하기 위하여 2,000회의 순환전압전류법(cyclic voltammetry, CV)을 진행한 뒤에 선형 이동 전압 곡선 측

정하여 초기 대비 전기화학적 안정성을 평가하였다.

#### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 (a) Pt/CNF, (b) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (c) Pt/RuO<sub>2</sub>-400 및 (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-500의 주사 전자 현미경 이미지를 나타낸 다. 그림 1에서 나타나는 것과 같이, 모든 샘플들은 1차원 구조를 지니며 서로 연결된 네트워크 구조로 합성 되었으 며 이는 산소환원반응 중 효율적인 전자 이동을 제공할 수 있다. Pt/CNF의 평균 직경은 약 215~237 nm를 나타냈 다. 하지만 나노섬유의 표면이 제어된 Pt/RuO2-300, Pt/ RuO2-400 및 Pt/RuO2-500의 경우 평균 직경이 각각 209±8 nm, 200±8 nm 및 190±9 nm로 Pt/CNF 보다 직경이 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 나노섬유의 표면 제어를 위 해 실시한 열처리에서 탄소가 소실되었기 때문이다. Pt/ CNF의 경우 백금입자가 표면에 응집 되어있는 것을 관찰 하였다. 이는 탄소 표면에서의 안정한 carbon-carbon boding이 백금 촉매의 분산을 저해 시키기 때문이다[14, 15]. 따라서, 고분산성 백금 촉매를 얻기 위하여 열처리를 통한 나노섬유의 표면제어를 실시하였다. Pt/RuO<sub>2</sub>-300의 경우 백금 촉매가 표면에 10~21 nm 정도의 크기를 가지 며 응집된 것을 볼 수 있었다. 이는 백금 촉매의 분산을 위한 면적이 충분히 제공되지 못했기 때문으로 볼 수 있 다. Pt/RuO2-400의 경우 표면에 응집된 백금 촉매가 존재 하지 않는 것을 나타낸다. 이는 백금 촉매가 나노섬유 표 면에 고르게 분산 되어있음을 의미한다. 하지만, Pt/RuO<sub>2</sub>-



Fig. 1. FESEM images of (a) Pt/CNF, (b) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (c)  $Pt/RuO_2$ -400, and (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-500.

500의 경우 나노섬유 표면에 응접된 백금 촉매가 존재함 을 보여준다. 이러한 이유는 표면제어를 위한 500°C의 고 온 열처리에서 나노섬유를 구성하는 입자의 입도가 증가 하여 백금 촉매의 분산을 위한 면적이 줄어 들었기 때문 이다. 따라서, 500°C이상의 열처리 공정이 필요한 기존의 폴리비닐피로리돈(Polyvinylpyrrolidone)을 이용하여 산소 에서 열처리하는 일반적인 공정으로는 백금 촉매의 분산 을 위한 면적을 얻기가 어려움으로, 본 연구에서 제시한 접근방법이 더 의미 있음을 나타낸다.

나노섬유 표면에 담지된 백금 촉매의 구조분석을 위해 투과 전자 현미경 분석을 실시하였다. 그림 2은 (a) Pt/CNF, (b) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (c) Pt/RuO<sub>2</sub>-400 및 (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-500의 투과 전자 현미경 이미지를 나타낸다. Pt/CNF의 경우 평평한 표 면을 나타내며 내부에 1~2 nm의 크기를 갖는 루테늄 나노 입자를 확인 할 수 있다. Pt/RuO<sub>2</sub>-300의 경우 굴곡이 진 표면을 나타낸다. 이러한 결과는 표면제어를 위한 열처리 중에 내부에 존재하던 루테늄 입자들끼리 성장하고, 탄소 는 산소와 반응하여 소실되었기 때문이다. 하지만, 표면에 잔여 탄소들이 남아있음을 확인 할 수 있다. 이러한 잔여 탄소는 백금 촉매의 분산성을 저해 시키는 역할을 한다. Pt/RuO2-400의 경우 백금 촉매가 2~3 nm의 크기로 고르게 분산 되어있는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 나 노섬유 표면에 잔여 탄소가 존재하지 않고. 백금 촉매가 분산 할 수 있는 충분한 면적을 제공했기 때문이다. 이렇 게 고르게 분산된 백금 촉매는 산소환원반응시에 전해질



Fig. 2. High-resolution TEM images of (a) Pt/CNF, (b) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (c) Pt/RuO<sub>2</sub>-400, and (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-500.



Fig. 3. (a) XRD patterns of Pt/CNF, Pt/RuO<sub>2</sub>-300, Pt/RuO<sub>2</sub>-400, and Pt/RuO<sub>2</sub>-500. (b) XPS spectra from the Pt  $4f_{7/2}$  and Pt  $4f_{5/2}$  photoelectrons of Pt/RuO<sub>2</sub>-400.

및 산소와의 접촉면적이 증가하여 우수한 전기화학적 성 능을 나타낼 수 있다. 하지만, Pt/RuO<sub>2</sub>-500의 경우 백금 촉매들이 3~5 nm의 크기로 빽빽하게 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 나노섬유를 구성하는 입자들이 입도가 증가 하여 백금 촉매를 위한 면적이 줄어들었기 때문이다.

그림 3(a)은 Pt/CNF, Pt/RuO<sub>2</sub>-300, Pt/RuO<sub>2</sub>-400 및 Pt/ RuO<sub>2</sub>-500의 X-선 회절분석 결과를 나타낸다. Pt/CNF 는 회절 피크가 39.7° 및 46.2°에서 관찰되었고, 이는 면심입 방구조(face-centered structure)의 (111) 및 (200) plan (space group *Fm*3*m* [225])과 일치함으로 백금 상이 형성 됨을 확인 할 수 있다. 반면에, Pt/RuO<sub>2</sub>-300, Pt/RuO<sub>2</sub>-400 및 Pt/RuO<sub>2</sub>-500의 경우 루테늄 산화물과 루테늄이 혼합된 상을 보유하는 것을 알 수있다. 루테늄 산화물의 경우 28.0°, 35.1°, 40.1° 및 54.3°에서 회절 피크가 관찰되었고 이는 (110), (101), (200) 및 (211) plane에 상응한다. 루테 늄의 경우 44.0°에서 회절 피크가 관찰되었고 이는 (101) plane에 상응한다. 표면제어를 위한 열처리 온도가 상승 할수록 탄소나노섬유 내부에 존재하던 루테늄 상은 루테 늄 산화물로 더 많은 상변화가 진행됨을 분석 할 수 있었 다. 또한, 표면제어를 위한 열처리가 진행된 샘플의 경우 백금 상이 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 백금 촉매의 양이 적고 나노 크기로 존재하기 때문이다.



Fig. 4. (a) The polarization curves of commercial Pt/C, Pt/CNF, Pt/RuO<sub>2</sub>-300, Pt/RuO<sub>2</sub>-400, and Pt/RuO<sub>2</sub>-500 in an O<sub>2</sub>-saturated 0.1 M HClO<sub>4</sub> electrolyte at a sweep rate of 5 mV s<sup>-1</sup> at rotational speeds of 1600 rpm. The polarization curves of (b) commercial Pt/C, (c) Pt/CNF, (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (e) Pt/RuO<sub>2</sub>-400, and (f) Pt/RuO<sub>2</sub>-500 at various rotational speeds in range from 100, 400, 900, 1,600, and 2500 rpm.

Journal of Korean Powder Metallurgy Institute (J. Korean Powder Metall. Inst.)

Pt/RuO<sub>2</sub>-400의 화학적 결합상태를 분석하기 위하여 X-선 광전자 주사법을 실시하였다. 스펙트럼은 C 1s의 284.5 eV를 기준으로 보정하여 진행하였다. 그림 3(b)는 Pt/RuO<sub>2</sub>-400의 4f<sub>7/2</sub> 및 Pt 4f<sub>5/2</sub>에 대한 광전자 피크들을 나타낸다. 대부분을 이루는 71.3 eV 및 74.7 eV 스펙트럼 은 백금 상을 나타내며, 성공적인 백금 촉매 합성을 의미 한다. 또한, 72.3 eV 및 75.4 eV에서 일부 확인되는 스펙트 럼은 백금 산화물 상을 의미한다. 이는, 공기중의 산소 및 수증기에 의해서 백금의 일부분이 산화되었기 때문이다.

그림 4은 선형 이동 전압 곡선을 나타낸 것이다. 선형 이동 전압 곡선을 이용하여 촉매의 산소환원반응을 평가 할 수 있다. 더불어, 상용 촉매(20 wt% Pt on Vulcan XC-72R, Pt/C)를 구매하여 제조된 촉매들과 비교하였다. 그림 4(a)은 1600 rpm의 전극 회전속도에서 측정한 선형 이동 전압 곡선이다. 전류 값은 낮은 전압으로 측정이 진행될수 록 값이 떨어지게 되는데 이는 산소환원반응이 일어남을 의미한다. 일반적으로, 촉매의 산소환원반응 활성도를 표 현하는 방법으로는 반파 전위(half-wave potential) 값을 이 용하며, 선형 이동 전압 곡선에서 전류 값이 하강이 시작 되는 지점과 종료되는 지점에서 중간 지점의 전압 값으로 표현하며 전압 값이 높을수록 우수한 산소환원 능력을 나 타낸다. 반파 전위 값은 상용 촉매(0.52 V), Pt/CNF (0.47 V), Pt/RuO<sub>2</sub>-300 (0.55 V), Pt/RuO<sub>2</sub>-400 (0.57 V) 및 Pt/RuO<sub>2</sub>-500 (0.53 V)로 각각 나타났다. Pt/CNF의 경우 제 일 낮은 반파 전위 값을 나타냈는데, 이는 백금 촉매의 응 집으로 인한 촉매 반응 면적이 줄어 들었기 때문이다. 반

면에, 나노 섬유의 표면이 제어된 샘플들의 경우 상용 촉 매 보다 높은 반파 전위 값을 나타냈다. 이러한 결과는 나 노 섬유의 표면제어를 통한 백금 촉매의 분산이 산소환원 반응에 많은 영향을 미친다는 것을 의미한다. 특히, Pt/ RuO<sub>2</sub>-400의 경우 가장 우수한 산소환원 반응 능력을 나타 냈다. 이는 나노 섬유 표면에 나노 크기의 백금 촉매들이 고르게 분산되었기 때문이다. 고르게 분산된 촉매들은 전 해질과의 접촉면적 및 산소와의 반응 면적이 증가함에 따 라 산소환원 반응 능력이 향상 된다. 또한 백금 촉매 담지 체로 이용된 나노 섬유가 전기전도도가 우수한 루테늄 산 화물로 구성되어 산소환원 반응에 의해 생성된 전자를 효 율적으로 전달하였기 때문으로 판단된다. 그림 4(b)-(f)은 상용 촉매, Pt/CNF, Pt/RuO<sub>2</sub>-300, Pt/RuO<sub>2</sub>-400 및 Pt/ RuO2-500의 선형 이동 전압 곡선을 전극 회전속도(100-1600 rpm)에 따라 측정한 그래프를 각각 나타낸다. 이때, 전극 회전속도가 증가할수록 환원전류의 증가가 보이는데, 이는 회전속도의 증가가 전극과 산소와의 반응 활성을 증가 시키기 때문이다. 따라서 측정된 모든 촉매가 올바르게 산 소 환원 반응이 진행 된 것을 확인 할 수 있다.

제조한 촉매들의 전기화학적 안정성을 평가하기 위하여 2,000회의 순환전압전류법을 0.4-0.9 V의 전압범위에서 50 mV s<sup>-1</sup> 주사속도로 수행 한 뒤에 다시 선형 이동 전압 곡선 측정하여 초기 대비 안정성을 평가하였다. 그림 5는 (a) 상용 촉매, (b) Pt/CNF, (c) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-400 및 (e) Pt/RuO<sub>2</sub>-500의 안정성 평가에 따른 선형 이동 전압 곡선을 나타낸 것이다. 안정성 평가 후 반파 전위 감



Fig. 5. The long-term stability tests of (a) commercial Pt/C, (b) Pt/CNF, (c) Pt/RuO<sub>2</sub>-300, (d) Pt/RuO<sub>2</sub>-400, and (e) Pt/RuO<sub>2</sub>-500 were conducted using CVs up to 2000 cycles in the range of 0.4-0.9 V at a scan rate of 50 mV s<sup>-1</sup> in an O<sub>2</sub>-saturated electrolyte.

소 값은 상용 촉매(64 mV), Pt/CNF(121 mV), Pt/RuO<sub>2</sub>-300 (32 mV), Pt/RuO<sub>2</sub>-400(19 mV) 및 Pt/RuO<sub>2</sub>-500(50 mV)로 각각 나타났다. 특히, Pt/RuO<sub>2</sub>-400는 가장 낮은 반파 전위 감소 값을 나타냈으며, 상용 촉매 보다도 우수한 전기화학 적 안정성을 보유함을 확인 할 수 있었다. 이렇게 전기화 학적 안정성이 향상된 이유는 나노 크기의 백금 촉매가 고르게 분산 되어있고, 루테늄 산화물 나노 섬유 지지체가 전기화학적으로 안정하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 산소환원반응용 촉매로 이용하기 위하여 전기방사법, 표면제어 및 환원법을 이용하여 루테늄 산화 물 나노섬유 지지체에 담지된 고 분산성 백금 촉매를 성 공적으로 제조하였다. 이때, 고 분산성 백금 촉매를 얻기 위하여 나노섬유의 표면을 제어하였다. 표면 제어된 나노 섬유는 전기전도도와 전기화학적 안정성이 우수한 루테늄 산화물로 구성 되어있고, 나노 입자로 구성된 거친 표면을 보유하였다. 최적화된 촉매는 표면 제어를 위해 실시한 열 처리가 400°C에서 진행된 촉매로써, 나노섬유 표면에 1-2 nm 크기의 백금 촉매가 고르게 담지 되었다. 이는 0.57 V 의 우수한 반파 전위 값을 보유하였으며, 또한 2,000회의 순환전압전류법을 진행 한 뒤에 다시 선형 이동 전압 곡 선 측정하여 초기 대비 전기화학적 안정성을 평가하였을 때 반파 전위의 감소 값이 19 mV로 매우 적은 감소 량을 나타내어 우수한 전기화학적 안정성을 나타냈다. 이렇게 전기화학적 촉매 성능이 향상된 이유는, 나노 크기의 백금 촉매가 고르게 분산되었고, 또한 담지체로 사용한 나노섬 유의 우수한 전기화학적 안정성 때문으로 판단된다. 따라 서, 루테늄 산화물 나노섬유 지지체에 담지된 고 분산성 백금 촉매는 고성능 산소환원반응 촉매로 유망할 것으로 예측 된다.

#### 감사의 글

This study was financially supported by the Research Program funded by the Seoul National University of Science and Technology.

#### References

- M. Lefèvre, E. Proietti, F. Jaouen and J. P. Dodelet: Science, 324 (2009) 71.
- [2] G. H. An, E. H. Lee and H. J. Ahn: J. Korean Powder Metall. Inst., 23 (2016) 420.
- [3] G. H. An and H. J. Ahn: Kor. J. Mater. Res., 22 (2012) 421.
- [4] M. K. Jeon, C. H. Lee, G. I. Park and K. H. Kang: J. Power Sources, 216 (2012) 400.
- [5] K. Gong, F. Du, Z. Xia, M. Durstock and L. Dai: Science, 323 (2009) 760.
- [6] G. H. An and H. J. Ahn: J. Electroanal. Chem., 707 (2013) 74.
- [7] G. H. An, E. H. Lee and H. J. Ahn: J. Alloys Compd., 682 (2016) 746.
- [8] G. H. An, E. H. Lee and H. J. Ahn: Phys. Chem. Chem. Phys., 18 (2016) 14859.
- [9] G. H. An and H. J. Ahn: Kor. J. Mater. Res., 23 (2013) 143.
- [10] D. Y. Sin G. H. An and H. J. Ahn: J. Korean Powder Metall. Inst., 22 (2015) 350.
- [11] B. R. Koo, G. H. An and H. J. Ahn: J. Korean Powder Metall. Inst., 21 (2014) 108.
- [12] D. Y. Sin, G. H. An and H. J. Ahn: Kor. J. Mater. Res., 25 (2015) 113.
- [13] H. R. An, G. H. An and H. J. Ahn: Kor. J. Mater. Res., 26 (2016) 250.
- [14] G. H. An and H. J. Ahn: J. Electroanal. Chem., 707 (2013) 74.
- [15] G. H. An and H. J. Ahn: J. Electroanal. Chem., 744 (2015) 32.