Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 451~459
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.451

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

Pd 나노입자로 활성화된 PAN 섬유 표면에서 성장된 ZnO 나노프리즘의 제조 및 이를 이용한 H_2S 제거 특성

이재영[1] · 임형렬[1] · 문상진[1] · 이홍기[1,2†]

[1]우석대학교 수소연료전지 부품 및 응용기술 지역혁신센터, [2]우석대학교 수소에너지공학과

Preparation of ZnO Nanoprism Grown on the Pd-activated PAN Fiber Surface and Its H_2S Removal Characteristics

JAEYOUNG LEE[1], HYUNG-RYUL RIM[1], SANGJIN MOON[1], HONGKI LEE[1,2†]

[1]Hydrogen Fuel Cell Regional Innovation Center, Woosuk University, 151 Dunsan 1-ro, Bongdong-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55315, Korea
[2]Department of Hydrogen Energy Engineering, Woosuk University, 443 Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55338, Korea

†Corresponding author : hongkil@woosuk.ac.kr

Received 28 July, 2026
Revised 25 August, 2026
Accepted 25 August, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> Zinc oxide (ZnO) nanoprisms were grown on palladium (Pd) activated swollen polyacrylonitrile (PAN) fibers, where Pd activation was carried out by a wet process. First, the surface of PAN fiber was swollen in dimethylformamide (DMF)/water solution at 90℃ for 3 h, and Pd-activation was performed by maintaining the swollen PAN fiber in $Pd(acac)_2$/DMF/water solution at 90℃ for 30 min. Subsequently, ZnO nanoprisms were grown on the surface of Pd-activated PAN fibers. The morphology of Pd nanoparticles on the PAN surface was observed by a transmission electron microscopy and the morphology of hexagonal ZnO nanoprisms grown on PAN surface was observed by a field emission scanning electron microscopy. The elemental composition was confirmed by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). FE-SEM observation showed that the length and covering of nanoprisms had become longer and wider as the ZnO reaction time increased. H_2S removal performance of the ZnO nanoprism was 12.56 wt% of ZnO nanoprism/PAN fiber prepared at 80℃ for 120 min.

Key words : ZnO nanoprism(산화아연 나노프리즘), PAN fiber(PAN 섬유), H_2S removal (황화수소 제거), Pd activation(Pd 활성화), Wet proess(습식법)

1. 서 론

고분자 전해질막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 낮은 작동 온도에서 높은 출력 밀도를 생성하는 청정 에너지원으로 선호되는 기술이다[1-3]. 그러나 PEMFC의 내구성과 신뢰성

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

은 연료 순도 및 산화제 농도와 같은 조건에 의해 저해되고 있으며, 이러한 요인으로 인한 오염의 영향에 대한 수 많은 연구가 알려져 있다. 수소연료의 낮은 순도는 백금(Pt) 나노촉매를 심각하게 손상시켜서 막의 양이온 전도에 치명적인 악영향을 미치게 되고, 산화제 내 불순물은 전극과 막에 악영향을 미친다. 탄소 지지체에 분산된 Pt 나노촉매는 수소 산화 반응(Hydrogen Oxidation Reaction, HOR)과 산소 환원 반응(Oxygen Reduction Reaction, ORR) 모두에서 작용하는 이상적인 촉매이지만, 반응물 내 오염 물질에 의해 쉽게 손상된다[4-7]. 오염 물질에는 황 화합물(SO_2, 카르보닐 황화물(carbonyl sulfide, COS), H_2S), 일산화탄소(CO), 질소 산화물(NO_2, NO), 암모니아, 염화물 및 황산염이 포함된다. 이러한 화합물들은 PEMFC에 공급되기 전에 정제 기술을 사용하여 제거되어야 하며, 그중에서도 황 화합물은 연료전지 성능에 가장 치명적인 영향을 미친다[8-10]. 따라서 수소 연료의 황 농도를 4 ppb 이하로 유지하는 것이 필수적이다[11,12].

자연계에서 수소는 에너지로 사용가능한 형태로 존재하지 않고, 주로 물(H_2O), 암모니아(NH_3), 그리고 유기 화합물(메탄(CH_4), 에탄(C_2H_6), 천연가스 등의 탄화수소, 메탄올(CH_3OH), 에탄올(C_2H_5OH), 바이오가스 등)의 형태로 존재한다. 따라서 이러한 원료로부터 수소를 분리 및 활용하기 위한 다양한 연구가 현재 진행 중이다[13-15].

물 분자를 분해하여 수소를 생산하려면 이론적으로 242 kJ/mol의 에너지가 필요하며, 이 에너지는 전기, 빛 또는 열의 형태로 공급된다. 이 중 물 전기분해법이 가장 활발히 연구되고 있으며, 가장 미래가 기대되는 방법이다. 이 방법은 오염물질이 없는 순수한 수소와 산소만을 생산하기 때문에 매우 친환경적이다. 그러나 Pt, 루테늄(Ru), 이리듐(Ir)과 같은 고가의 전기화학 촉매가 필요하다는 단점이 있다[16-18].

암모니아로부터 수소를 분리하는 과정은 일반적으로 400~600℃ 이상의 고온에서 가열하는 분해 단계를 필요로 하며, 이는 추가적인 에너지를 필요로 한다. 또한, 암모니아 자체는 독성이 있고 자극적인 냄새를 가지고 있어 누출 시 환경과 인체 건강에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 철저한 안전 관리와 장비가 필수적이다. 더불어 고순도 수소를 얻기 위해서는 잔류 암모니아 및 질소산화물(NOx)과 같은 오염 물질을 제거하는 정제 공정이 필요하다[19,20].

유기 화합물로부터 수소를 생산하는 대표적인 방법으로는 개질 공정과 열분해 공정이 있다[21-23]. 개질 공정에서는 700~1,000℃의 촉매 조건에서 유기 화합물과 수증기를 반응시켜 수소를 생산한다. 이 공정은 기술적으로 매우 성숙되어 있고 생산 비용이 낮기 때문에 현재 전 세계에서 생산되는 대부분의 수소가 이 방법을 통해 생산되고 있다. 그러나 이 공정은 필연적으로 온실가스인 이산화탄소(CO_2)를 다량 발생시키고, 촉매 독소로 작용하는 일산화탄소(CO)도 소량 생성된다. 열분해 공정에서는 유기 화합물을 1,000℃ 이상의 고온으로 가열하여 수소와 고체 탄소를 생성한다. 이 공정은 이산화탄소를 생성하지 않지만, 생성된 고체 탄소가 촉매 표면을 덮어 촉매 활성을 저하시키는 코킹 현상이 발생된다. 또한, 축적된 탄소는 반응기 내부나 배관을 막아 연속 공정을 방해할 수 있다. 특히, 이 두 가지 방법으로 생산된 수소에는 촉매 독소로 작용하는 황 화합물이 자연적으로 함유되어 있어, 수소의 황 함량 기준을 충족하기 위해서는 정제 공정을 통해 이러한 화합물을 제거해야 한다. 이는 대부분의 국가에서 천연가스의 황 함량을 30 ppm 이하, 휘발유와 경유는 10 ppm 이하로 규제하고 있기 때문이다. 또한, 바이오가스는 100 ppm에서 10,000 ppm에 이르는 황을 함유하고 있다. 이러한 황 함량은 연료전지용 수소(황 함량 4 ppb 이하)로 사용하기에는 여전히 매우 높은 수준이다[12,24-26].

최근 SARS (selective adsorption for removing sulfur, 선택적 흡착을 통한 황 제거) 기술은 개질 수소에서 미량의 황 화합물을 제거하는 데 사용되고 있다[27-31]. 개질 수소에 함유된 황 화합물은 활성탄, Fe-BEA 제올라이트 또는 ZnO 등으로 구성된 흡착층을 통과하면서 제거된다. 황 제거 성능을 향상시키기 위해서는 위의 고체 흡착제와 기체 상태의 황 화합물 사이의 접촉 면적을 증가시켜야 한다. 이를 위해 (1) 니켈(Ni), 코발트(Co), 몰리브덴(Mo) 등을 지

지체(알루미나 등)에 1～20 nm 크기로 미세 분산시켜 표면적을 최대화하거나[27], (2) 0.3～1 nm 크기의 미세 기공 구조를 갖는 흡착제(제올라이트, 활성탄 등)를 사용하여 기체 상태의 황 화합물을 선택적으로 흡착 및 제거하거나[28,29], (3) 나노 크기의 산화아연(ZnO)을 200～400°C에서 화학 흡착제로 사용하는 방법 등이 있다[30,31]. ZnO는 다음 메커니즘과 같이 H_2S와 반응하여 H_2O와 ZnS를 생성하면서 황 성분을 제거하게 된다[30].

$$H_2S\ (gas) + ZnO\ (solid) \rightarrow H_2O\ (gas) + ZnS\ (solid)$$

나노 크기의 ZnO는 취급 용이성을 위해 고분자 섬유 표면에 균일하게 코팅된 형태로 사용되는 것으로 알려져 있다. 고분자 섬유 표면을 ZnO로 코팅하기 위해서는 팔라듐(Pd) 시드로 표면을 활성화해야 하며, 가장 잘 알려진 활성화 방법으로는 $SnCl_2$ 용액과 $PdCl_2$ 용액을 HCl 용액과 함께 반응시키는 Sn 및 Pd 화학 공정의 조합법이 있다[32,33]. 우리의 이전 논문에서 환원제 사용 없이 180°C의 질소 분위기에서 승화성 palladium(II) bisacetylacetonate ($Pd(acac)_2$)를 polyacrylonitrile (PAN) 섬유 표면에서 자발적으로 환원시켜서 Pd 나노입자를 형성하는 건식 공정을 이용한 Pd 활성화 방법을 보고한 바 있다[34].

본 연구에서는 습식 공정을 통해 팽윤된 PAN 섬유 표면에서 $Pd(acac)_2$의 자발적 환원을 이용하여 Pd 활성화를 수행하였고, 그 결과 Pd 나노입자 위에 ZnO 나노프리즘이 성장하는 것을 확인하였다. 그리고, 합성된 ZnO의 H_2S 흡착 능력을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 재료

$Pd(acac)_2$는 Johnson Matthey 사의 제품으로 사용하기 전에 50°C에서 아세톤으로 재결정화하여 불순물을 제거한 후 사용하였다. N,N-dimethylformamide (DMF)와 ethylene glycol (EG)는 덕산약품공업(주)의 제품을 구입하여 사용하였고, Zinc nitrate hexahydrate ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)와 dimethyl amine borane (DMAB, $(CH_3)_2NH \cdot BH_3$)은 FUJIFILM Wako Pure Chemical Co.(일본)에서 구입하여 사용했다. PAN 섬유는 Tai'an Pole Geosynthetics Co., Ltd.(중국)에서 공급받았으며, 직경은 13±1 μm이고 길이는 약 1 cm로 잘라서 사용하였다. 사용하기 전에 아세톤으로 세척하고 40°C의 진공 오븐에서 48시간 동안 건조하였다.

2.2 습식법에 의한 PAN 섬유 표면의 활성화

약 1 cm 길이의 PAN 섬유 표면은 다음과 같은 습식 공정을 통해 Pd 나노입자로 활성화되었다: 먼저, PAN 섬유(2 g)를 DMF/증류수(190 g/10 g) 혼합액에 넣고, 초음파 분산기를 사용하여 완전히 분산시킨 후, 90°C에서 3시간 동안 유지하여 팽윤시켰다. 이어서, $Pd(acac)_2$(0.03 g)를 넣어서 용해시키고, 90°C에서 각각 30분 동안 유지하였다. 이 과정에서 $Pd(acac)_2$ 전구체 분자가 팽윤된 PAN 섬유의 표면으로 침투하여 자발적으로 환원되어 Pd 금속 나노입자가 되면서 PAN 섬유 표면을 활성화시켰다. DMF와 증류수는 진공 여과 장치를 이용하여 제거하고, 미반응 $Pd(acac)_2$는 아세톤으로 세 번 세척하여 제거하였다. 세척된 Pd 활성화 PAN 섬유는 40°C의 진공 오븐에서 24시간 동안 건조시킨 후, 데시케이터에 보관하였다.

2.3 PAN 섬유 표면에서 ZnO 나노프리즘의 성장

Pd로 활성화된 PAN 섬유 표면에 ZnO 나노프리즘을 성장시키는 절차는 다음과 같다. 0.05 M $Zn(NO_3)_2$와 0.05 M DMAB를 EG/증류수(20 g/60 g) 혼합 용매에 용해시킨 후, Pd로 활성화된 PAN 섬유(0.5 g)를 이 용액에 넣었다. 그리고, 80°C에서 30, 60, 120분 동안 Pd로 활성화된 PAN 표면에 ZnO 나노프리즘을 성장시켰다. 마지막으로, ZnO가 성장된 PAN 섬유를 증류수로 세척하고 40°C 진공 오븐에서 24시간 동안 건조하여 데시케이터에 보관했다.

2.4 기기분석

PAN 섬유 표면을 활성화시킨 Pd 나노입자를 관찰하기 위해 200 kV의 가속 전압에서 투과 전자 현미경(TEM, Carl Zeiss Co., Germany)으로 관찰하였다. ZnO 나노프리즘의 형상은 전계 방출 주사 전자 현미경(FE-SEM, JMS-6701F, JEOL)으로 관찰하였고, 원소 분석은 에너지 분산 X선 분광기(EDS, JED-2300 에너지 분산 X선 분석기, JEOL)를 이용하여 수행하였다.

2.5 ZnO 나노프리즘/PAN 섬유의 H_2S 제거

ZnO 나노프리즘의 H_2S 흡착 성능은 열중량 분석기(TGA, 모델: SDT Q600 (TA Instruments, Inc., 미국))를 이용하여 측정하였다. 먼저, ZnO 나노프리즘이 성장된 PAN 섬유(10 mg)를 TGA 전기로에 넣고, 250°C의 질소 분위기(50 ml/min)에서 12시간 동안 건조시켰다. 그리고, 질소 69%, 수소 30%, H_2S 1%로 구성된 합성가스를 유속 20 ml/min으로 흘려보내면서 H_2S 흡착에 따른 무게 변화를 측정하였다.

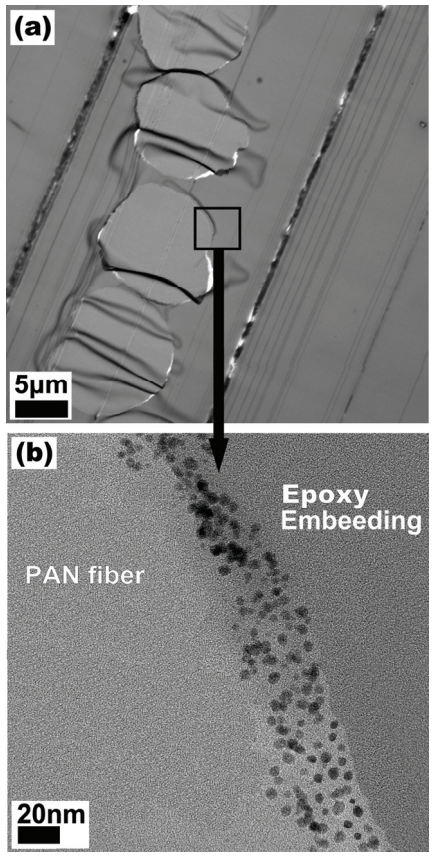


Fig. 1. TEM images for (a) PAN fiber embedded in epoxy resin and (b) Pd nanoparticles beneath the surface area of PAN fiber prepared by spontaneous reduction of $Pd(acac)_2$ at 90℃ for 30 min in wet process

3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)는 에폭시 수지에 임베딩된 Pd 활성화 PAN 섬유의 TEM 단면 이미지이고, Fig. 1(b)는 습식 공정에 따라 90°C에서 30분 동안 $Pd(acac)_2$를 자발적 환원시켜서 제조한 PAN 섬유 표면 근처에 형성된 Pd 나노입자의 TEM 사진이다. 모든 Pd 나노입자는 PAN 섬유 표면 바로 아래 부근에서 생성되었으며, 표면으로부터 최대 330 μm 깊이에서도 관찰되었고, 더 깊은 영역에는 Pd 나노입자가 생성되지 않았다. 이 깊이는 건식법으로 제조한 Pd 나노입자의 침투 깊이인 37 μm보다 약 8.9배 더 깊다[34]. PAN 섬유 표면 아래의 Pd 나노입자 합성 메커니즘은 다음과 같이 간략하게 설명할 수 있다. $Pd(acac)_2$ 분자가 팽윤된 PAN 사슬 내부로 확산되어 PAN 섬유의 친핵성 그룹인 C≡N기에 흡착된 후 자발적으로 환원되어 Pd 시드를 형성하고, 이 시드가 성장하여 Pd 나노입자를 생성한다. 또한, 건식 공정에서는 $Pd(acac)_2$ 분자가 고밀도 PAN 섬유 내부로 침투하기 어렵지만, 습식 공정에서는 팽윤된 PAN 섬유 내부로 비교적 쉽게 확산되어 더 깊은 영역에서 Pd 나노입자가 형성되게 된다. Pd 나노입자는 구형이며 크기는 2.4~5.8 μm이다. 이 Pd 나노입자들은 ZnO 나노프리즘 성장의 핵 역할을 할 수 있게 된다.

Fig. 2는 0.05 M $Zn(NO_3)_2$ 30 g, 0.05 M DMAB 30 g, EG 20 g 혼합 수용액에 Pd 활성화 PAN 섬유 0.5 g을 넣고, 80°C에서 120분 동안 무전해 반응시켜서 PAN 섬유 표면 위에 성장시킨 ZnO 나노프리즘의 SEM 사진이다. 그 배율은 (a) 140배, (b) 1,800배 및 (c) 6,500배이다. 모든 PAN 섬유의 표면이 ZnO

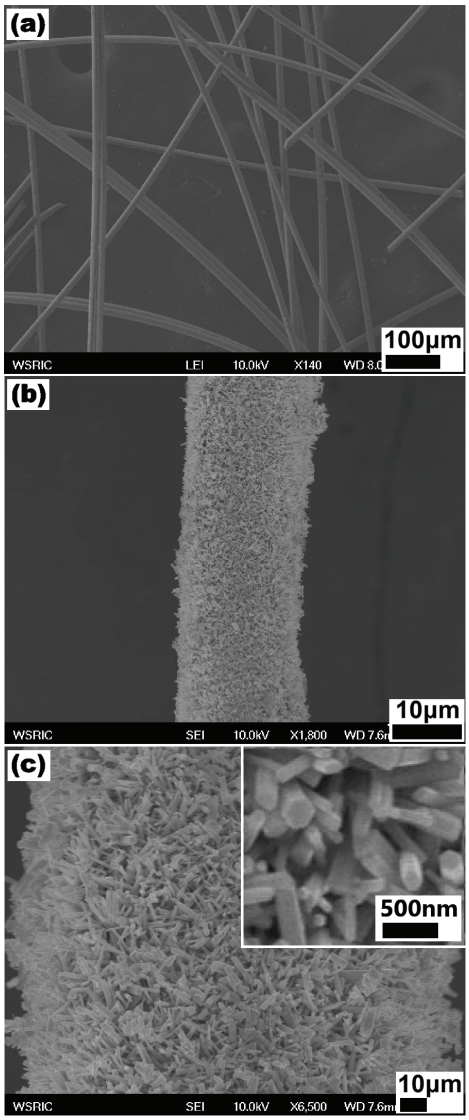


Fig. 2. SEM images of ZnO nanoprisms grown on Pd activated PAN fiber (activation time : 30 min) prepared in a electroless plating solution at 80℃ for 120 min: (a) 140x, (b) 1,800x and (c) 6,500x magnification

로 코팅되었으며(Fig. 2a), 크게 확대해서 살펴보면 모든 표면에서 ZnO가 균일하게 성장되어 있는 것을 볼 수 있고(Fig. 2b), 이것을 6,500배 정도로 더 확대해서 살펴보면, 얇고 긴 육각기둥 형태의 나노프리즘이 관찰되었다.

Fig. 3은 Fig. 2에서 제조된 ZnO/PAN 섬유의 EDS 분석 결과를 보여준다. ZnO가 표면에 성장된 PAN

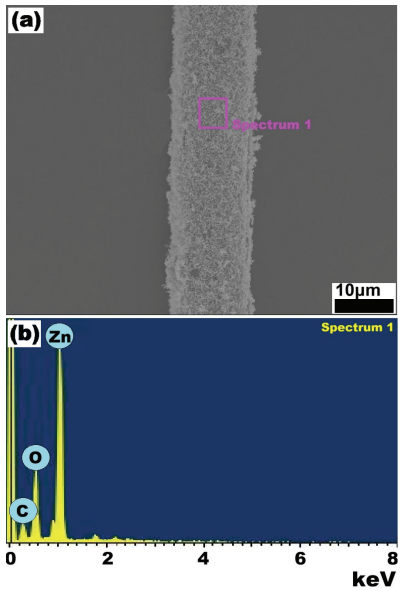


Fig. 3. (a) SEM image of ZnO nanoprisms grown on Pd activated PAN fiber (activation time : 30 min) prepared in an electroless plating solution at 80℃ for 120 min and (b) EDS spectrum

섬유의 형상을 SEM에 의해 관찰하였고(Fig. 3a), EDS 분석을 통해서 구한 조성 원소 스펙트럼을 Fig. 3b에 나타내었다. 구성 원소는 아연(Zn)과 산소(O)만 나타났고, PAN 섬유에서 기인하는 소량의 탄소(C) 이외에는 어떤 원소도 검출되지 않았다. Zn : O의 원소 조성비를 구한 결과 49.2 : 50.8 원자 %로서, 이것은 거의 모든 Zn 원자가 ZnO 구조로 존재한다는 것을 보여준다.

Fig. 4는 Pd 나노입자로 활성화된 PAN 섬유 표면에서 무전해 반응 시간이 증가함에 따라 ZnO 나노프리즘의 성장을 보여주는 SEM 이미지이다. 여기서 Pd 활성화는 90°C의 습식 공정에서 30분 동안 $Pd(acac)_2$의 자발적 환원을 통해 이루어졌고, ZnO 나노프리즘은 0.05 M $Zn(NO_3)_2$ 30 g, 0.05 M DMAB 30 g, EG 20 g 혼합 수용액에서 이루어졌다. 무전해 합성 온도는 80°C이고, 합성 시간은 (a) 0분, (b) 30분, (c) 60분, (d) 120분이었다. Fig. 4a는 ZnO 합성 전의 Pd 활성화 PAN 섬유를 보여주고 있으며, 합성 시간이 증가함에 따라 ZnO 나노프리즘에 의한 PAN 섬유 표면의 피복률이 증가하고 나노프리즘의 길이도 길어

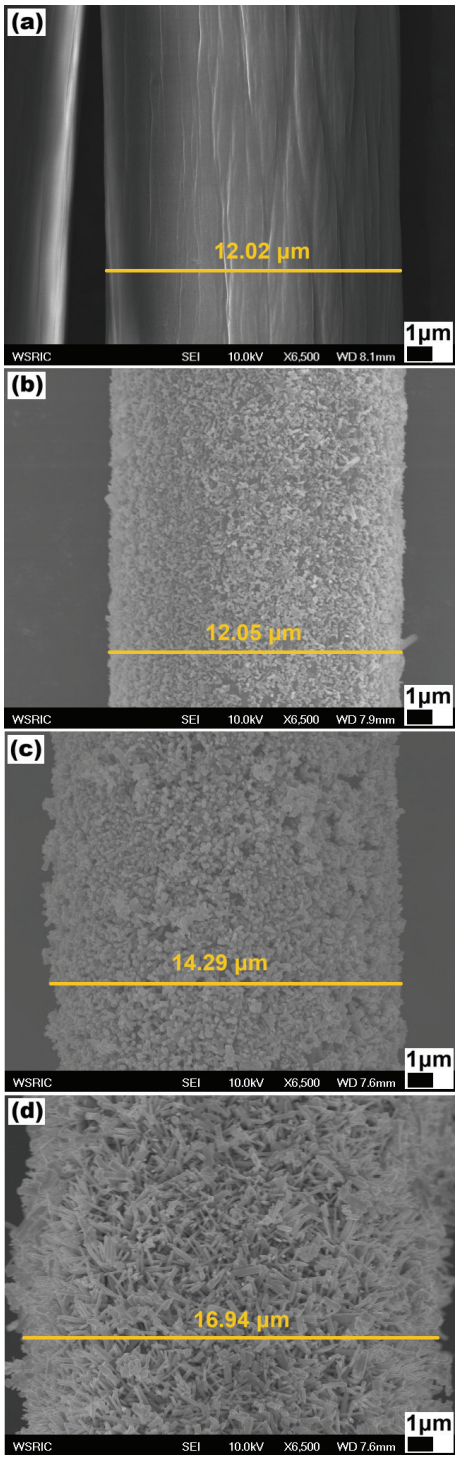


Fig. 4. SEM images of ZnO nanoprisms grown on Pd activated PAN fiber (activation time : 30 min) prepared in an electroless plating solution at 80℃ for various time: (a) 0 min, (b) 30 min, (c) 60 min and (d) 120 min, respectively.

지는 것을 볼 수 있다. Fig. 4b에서와 같이 합성 시간이 30분일 때 PAN 섬유 표면은 거의 대부분 ZnO로 피복되었지만, 짧은 길이의 육각형 ZnO 나노프리즘이 형성되고 있다. 합성 시간이 60분일 때(Fig. 4c), PAN 섬유 표면의 거의 모든 부분이 상당한 크기의 육각형 ZnO 나노프리즘으로 덮여 있다. 반응 시간이 120분일 때, Fig. 4d에서와 같이 얇고 긴 육각기둥 형태의 ZnO 나노프리즘이 명확하게 나타났다. 30분, 60분 및 120분 동안 합성된 ZnO 나노프리즘의 길이는 각각 0.02 μm, 1.14 μm 및 2.46 μm이다.

PAN 섬유 표면에서 성장되는 ZnO 나노프리즘의 부착량을 평가하기 위해서 열중량 분석기를 사용하여 700℃의 공기 분위기에서 PAN 섬유를 연소시켜서 제거하면서 중량변화를 측정하였고, ZnO 성장 시간에 따른 ZnO 부착량을 Table 1에 나타내었다. 무전해 합성 시간이 증가함에 따라 ZnO 나노프리즘의 부착량이 크게 증가하는 것을 확인하였다.

Table 1. ZnO growth weight according to electroless reaction time

Electroless reaction time (min)	ZnO growth weight (wt%)
30	7.8
60	69.2
120	81.5

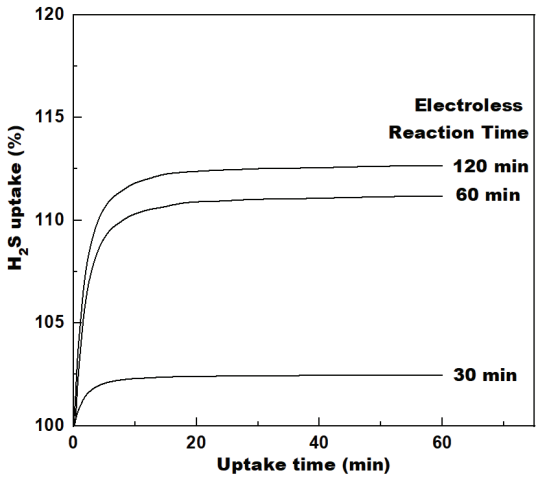


Fig. 5. TGA curves for H_2S uptake by ZnO nanoprisms grown on PAN fiber prepared at 80℃ for various time. Pd activation time was 30 min at 90℃ in wet process

Pd 활성화 PAN 섬유 표면에 80°C에서 30, 60, 120분 동안 ZnO 나노프리즘을 성장시킨 시료의 H_2S 제거 성능을 평가하기 위해서 열중량 분석기를 사용하였다. 250°C에서 H_2S 혼합 가스를 흘려보내면서 중량변화를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 초기 단계에서 H_2S 제거 속도는 매우 빠르게 진행되며, 5분 정도 후에는 그 증가 속도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 무전해 도금 시간이 30, 60, 120분 동안 제조된 ZnO 나노프리즘의 포화 H_2S 제거량은 ZnO/PAN 섬유의 2.47, 11.17, 12.56 wt%이다. 본 연구에서 제조된 ZnO 나노프리즘은 부취제 등에 의해 기인하는 개질 수소 중의 황 화합물 제거를 위한 흡착제로 사용될 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

개질 수소의 H_2S 화합물 제거를 위한 흡착제로 사용될 수 있는 ZnO 나노프리즘/PAN 섬유를 제조하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) PAN 섬유를 90°C의 습식 공정에서 팽윤시킨 후, $Pd(acac)_2$ 분자들을 PAN 섬유 표면에서 30분 동안 자발적 환원반응시켜 Pd 나노입자로 활성화된 PAN 섬유를 제조하였다.
2) Pd 활성화된 PAN 섬유 표면 영역을 TEM으로 관찰한 결과 구형의 모든 Pd 나노입자가 PAN 섬유의 표면으로부터 330 μm 깊이 영역에서 생성되었으며, Pd 나노입자의 크기는 2.4~5.8 μm이었다.
3) ZnO가 성장된 PAN을 SEM으로 관찰한 결과, 얇고 긴 육각 기둥 형태의 ZnO 나노프리즘이 관찰되었고, EDS 스펙트럼 결과 Zn : O의 원소 조성비가 49.2 : 50.8%이었다. 이 결과는 일반적인 ZnO 결정과 잘 일치하는 구조이다.
4) ZnO 무전해 합성 시간이 증가함에 따라 ZnO 나노프리즘에 의한 PAN 섬유 표면의 피복률이 증가하고 육각기둥 형태의 나노프리즘의 길이도 길어졌다. 합성 시간이 30분, 60분 및 120분인 경우의 ZnO 나노프리즘의 길이는 각각 0.02 μm, 1.14 μm 및 2.46 μm이었다.
5) 80°C에서의 합성 시간이 120분인 ZnO/PAN 섬유의 포화 H_2S 제거량은 ZnO/PAN 섬유의 12.56 wt%이며, ZnO 나노프리즘은 개질 수소 중의 H_2S 화합물 제거를 위한 흡착제로 사용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 : 20229A10100070, 과제명 : 고분자 전해질(PEM) 전지로부터 저탄소 백금 촉매 원료화 기술개발)이다.

References

1. G. U. Alpaydin, Y. Devrim, and C. O. Colpan, “Performance of an HT-PEMFC having a catalyst with graphene and multiwalled carbon nanotube support”, International Journal of Energy Research, Vol. 43, 2019, pp. 3578-3589, doi: https://doi.org/10.1002/er.4504.
2. Y. Zhou, W. Guo, L. Xing, J. Li, N. Wang, L. Meng, S. Y. Ye, X. H. Yang, H. Chen, and L. Du, “Stability/durability challenges of cathode catalysts for PEM fuel cells: experiments, mechanisms, and perspectives beyond three-electrode systems”, Energy & Environmental Science, Vol. 18, No. 20, 2025, pp. 9054-9092, doi: https://doi.org/10.1039/D5EE03461B.
3. I. Laghryb, M. Malki, N. Y. Steiner, C. D. Barrett, and H. E. Kadiri, “Catalyst degradation in proton exchange membrane fuel cells: mechanisms, investigation techniques, and predictive modelling”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 145, 2025, pp. 496-507, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.06.052.
4. A. Gremminger, P. Lott, M. Merts, M. Casapu, J. D. Grunwaldt, and O. Deutschmann, “Sulfur poisoning and regeneration of bimetallic Pd-Pt methane oxidation catalysts”, Applied Catalysis B: Environmental, Vol. 218, 2017, pp. 833-843, doi: https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.048.
5. S. Rohde, A. Cowley, R. Hasso, M. Kircher, M. Heidinger, V. Hacker, and B. Gollas, “Influence of the electrode fabrication method on the resistance of PEM fuel cells to H_2S contamination”, Journal of Power Sources, Vol. 662, 2026, pp. 238698, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238698.

6. Y. Liu, L. Du, F. Kong, G. Han, Y. Gao, C. Du, P. Zuo, and G. Yin, "Sulfur dioxide-tolerant bimetallic PtRu catalyst toward oxygen electroreduction", ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol. 8, No. 2, 2020, pp. 1295-1301, doi: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06785.
7. T. Morooka, T. Shishido, T. Nakanishi, and T. Masuda, "Modification of platinum surfaces with cerium species for promoting oxidative desorption of adsorbed sulfur", Electrochemistry Communications, Vol. 180, 2025, pp. 108050, doi: https://doi.org/10.1016/j.elecom.2025.108050.
8. F. S. M. Ali, L. Daniel, N. Heikkinen, J. Ihonen, and M. Rautanen, "Influence of contaminants on PEMFC performance: a multisinglecell approach", Next Research, Vol. 2, No. 2, 2025, pp. 100209, doi: https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100209.
9. H. Chen, J. Zhang, H. Zhang, Z. Li, M. Chen, and H. Wang, "Effect of cation contamination of gas diffusion layer on water management and performance of PEMFCs", Carbon Energy, Vol. 7, No. 8, 2025, pp. e70038, doi: https://doi.org/10.1002/cey2.70038.
10. S. Li, J. Zhu, G. Yang, and Q. Shen, "A review on impact of the marine salt spray environment on the performance of proton exchange membrane fuel cells", Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 13, No. 1, 2025, pp. 172, doi: https://doi.org/10.3390/jmse13010172.
11. Y. Yang, Y. H. Wang, F. Y. Gao, X. L. Zhang, P. C. Yu, S. J. Liu, L. Zhu, H. K. Yan, S. P. Sun, Z. Z. Wu, X. P. Yang, C. C. Hang, Y. D. Su, and M. R. Gao, "An efficient H_2S-tolerant hydrogen oxidation electrocatalyst enabled by a Lewis acid modifier for fuel cells", Nano Letters, Vol. 25, No. 9, 2025, pp. 3620-3629, doi: https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c06621.
12. International Organization for Standardization, "Hydrogen fuel quality: product specification (ISO 14687:2025)", 2025, Retrieved from https://www.iso.org/standard/82660.html?utm.
13. S. K. Dash, S. Chakraborty, and D. Elangovan, "A brief review of hydrogen production methods and their challenges", Energies, Vol. 16, No. 3, 2023, pp. 1141, doi: https://doi.org/10.3390/en16031141.
14. R. Li and H. Kawanami, "A recent review of primary hydrogen carriers, hydrogen production methods, and applications", Catalysts, Vol. 13, No. 3, 2023, pp. 562, doi: https://doi.org/10.3390/catal13030562.
15. R. S. Kadam and G. D. Yadav, "Life cycle analysis of ammonia and methane production using green hydrogen and carbon dioxide", Journal of Cleaner Production, Vol. 449, 2024, pp. 141620, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141620.
16. M. Bonanno, K. Müller, B. Bensmann, R. Hanke-Rauschenbach, D. Aili, T. Franken, A. Chromik, R. Peach, A. T. S. Freiberg, and S. Thiele, "Review and prospects of PEM water electrolysis at elevated temperature operation", Advanced Materials Technologies, Vol. 9, No. 2, 2024, pp. 2300281, doi: https://doi.org/10.1002/admt.202300281.
17. T. Wang, X. Cao, and L. Jiao, "PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects", Carbon Neutrality, Vol. 1, 2022, pp. 21, doi: https://doi.org/10.1007/s43979-022-00022-8.
18. H. Groenemans, G. Saur, C. Mittelsteadt, J. Lattimer, and H. Xu, "Techno-economic analysis of offshore wind PEM water electrolysis for H_2 production", Current Opinion in Chemical Engineering, Vol. 37, 2022, pp. 100828, doi: https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100828.
19. H. A. Y. Rizi and D. Shin, "Green hydrogen production technologies from ammonia cracking", Energies, Vol. 15, No. 21, 2022, pp. 8246, doi: https://doi.org/10.3390/en15218246.
20. S. Devkota, J. Y. Cha, B. J. Shin, J. H. Mun, H. C. Yoon, S. A. Mazari, and J. H. Moon, "Techno-economic and environmental assessment of hydrogen production through ammonia decomposition", Applied Energy, Vol. 358, 2024, pp. 122605, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122605.
21. W. Noh and I. Lee, "Synergizing autothermal reforming hydrogen production and carbon dioxide electrolysis: enhancing the competitiveness of blue hydrogen in sustainable energy systems", Chemical Engineering Journal, Vol. 499, 2024, pp. 156688, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156688.
22. S. Hong, J. Lee, H. Cho, M. Kim, I. Moon, and J. Kim, "Multi-objective optimization of CO_2 emission and thermal efficiency for on-site steam methane reforming hydrogen production process using machine learning", Journal of Cleaner Production, Vol. 359, 2022, pp. 132133, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132133.
23. S. Liu, P. Du, H. Jia, Q. Zhang, and L. Hao, "Study on the impact of methanol steam reforming reactor channel structure on hydrogen production performance", Renewable Energy, Vol. 228, 2024, pp. 120612, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120612.
24. Y. H. Cha, S. Mun, and K. B. Lee, "Development of modified zeolite for adsorption of mixed sulfur compounds in natural gas by combination of ion exchange and impregnation", Applied Surface Science, Vol. 619, 2023, pp. 156634, doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156634.
25. Z. Qiao, Z. Chen, H. Gong, X. Guo, H. Yu, and L. Chen, "Enhancement of anaerobic digestion by adding elemental sulfur", Bioresource Technology, Vol. 416, 2025, pp. 131820, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131820.
26. X. Ma, L. Sun, and C. Song, "A new approach to deep desulfurization of gasoline, diesel fuel and jet fuel by selective adsorption for ultra-clean fuels and for fuel cell applications", Catalysis Today, Vol. 77, No. 1-2, 2002, pp. 107-116, doi: https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00237-7.

27. K. G. Knudsen, B. H. Cooper, and H. Topsøe, “Catalyst and process technologies for ultra low sulfur diesel”, Applied Catalysis A: General, Vol. 189, No. 2, 1999, pp. 205-215, doi: https://doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00277-X.
28. N. Zhou, X. Huang, Y. Zhang, J. He, and X. Zhang, “High performances of mesoporous g-C_3N_4 for adsorptive desulfurization in model gasoline (iso-octane) solutions”, Applied Surface Science, Vol. 448, 2018, pp. 636-641, doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.084.
29. H. Jafarabadi, M. Mansouri, M. Shayanmehr, and A. Ghaemi, “Mechanisms, challenges, and future perspectives of adsorptive desulfurization using zeolite-based adsorbents: a review”, Environmental Science and Pollution Research, Vol. 32, 2025, pp. 11350-11402, doi: https://doi.org/10.1007/s11356-025-36333-3.
30. L. Ling, R. Zhang, P. Han, and B. Wang, “DFT study on the sulfurization mechanism during the desulfurization of H_2S on the ZnO desulfurizer”, Fuel Processing Technology, Vol. 106, 2013, pp. 222-230, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.08.001.
31. H. Sun, C. Chen, R. Zhang, Y. Li, S. Ge, and P. Cui, “Advances in gasoline hydrodesulfurization catalysts: the role of structure-activity relationships and machine learning approaches”, ACS Omega, Vol. 10, No. 29, 2025, pp. 31262-31273, doi: https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02980.
32. S. Vijay and Ch. S. Rao, “Optimization of nickel deposition on boron carbide particles using design of experiments”, Materials Today: Proceedings, Vol. 18, 2019, pp. 4421-4430, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.411.
33. Z. Sun and J. Huang, “Fabrication of nickel coating on polyethylene terephthalate substrate modified with primer: effect of surface roughness on structural properties of plated coating”, Journal of Electronic Materials, Vol. 48, 2019, pp. 6298-6305, doi: https://doi.org/10.1007/s11664-019-07291-7.
34. J. Y. Lee and H. K. Lee, “Preparation and characterization of ZnO nanorods grown on Pd-activated polyacrylonitrile (PAN) fiber”, Materials Science and Engineering B, Vol. 263, 2021, pp. 114821, doi: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114821.