

# 카본 나노파이버 위에 직접 성장된 SnO 나노구조물 복합체

김미리<sup>1</sup>, 김기출<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>목원대학교 지능정보융합학과, <sup>2</sup>목원대학교 신소재화학공학과

## SnO Nanostructure Composites Directly Grown on Carbon Nanofibers

Mee-Ree Kim<sup>1</sup>, Ki-Chul Kim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Intelligent Information Convergence, Mokwon University

<sup>2</sup>Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

**요약** 나노소재를 원하는 크기와 모양으로 설계하고 구현하는 것은 나노기술의 응용에 있어서 매우 중요하다. 1차원 구조의 카본 나노파이버(CNFs)는 매우 높은 비표면적 특성 및 좋은 전기전도도와 열전도 특성으로 인하여 촉매, 화학센서 및 리튬이온전지(LIBs), 슈퍼커패시터, 염료감응형 태양전지 등과 같은 에너지 저장과 변환소재로 응용된다. 나노구조의 SnO 반도체 소재는 LIBs의 음극소재 및 가스센서에 응용된다. 본 연구에서는 매우 높은 비표면적을 갖는 3D SnO@1D CNFs 다차원 나노복합체를 구현하기 위하여, 전기방사법으로 제작된 카본 나노파이버 위에 Thermal CVD를 이용하여 SnO 나노구조물을 성장하였다. SnO@CNFs 나노복합체의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경으로 분석하였고, 결정학적 특성을 라만분광법과 X선 회절법(XRD)으로 분석하였다. 연구결과 SnO 나노 플레이트들이 원형의 CNFs 위에 수직하게 성장되었다. 라만분광법과 XRD 분석결과, 3D SnO nanoplatelets는 tetragonal 구조를 가지고 있었다. 3D SnO@1D CNFs 나노복합체는 매우 높은 비표면적 특성을 갖기 때문에 높은 효율의 전기화학적 응용에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** Designing desired nanomaterials with controlled size and shape is a key factor for the nanotechnological application of these materials. One-dimensional carbon nanofibers (CNFs) have been widely used as functional materials in catalysis, chemical sensors, and energy storage/conversion applications such as lithium-ion batteries (LIBs), supercapacitors, and dye-sensitized solar cells due to the comprehensive properties such as ultra-high specific surface area, excellent electrical and thermal conductivity. Nanostructured SnO semiconductor has been used in anode materials of LIBs and gas sensors. This study aimed to realize multi-dimensional 3D SnO@1D CNFs nanocomposites with ultra-high specific surface area. SnO nanostructures were grown on CNFs fabricated by electrospinning using thermal CVD. The surface morphology of the SnO@CNFs nanocomposites was analyzed using a field emission scanning electron microscope. The crystallographic property of the SnO@CNFs was characterized by Raman spectroscopy and X-ray diffraction(XRD). The results show that SnO nanoplatelets were grown vertically on circular CNFs. According to Raman spectroscopy and XRD analysis, 3D SnO nanoplatelets exhibit a tetragonal structure. The 3D SnO@1D CNFs nanocomposites are expected to be used in high-efficiency electrochemical applications due to their ultra-high specific surface area.

**Keywords** : Carbon Nanofiber, SnO Nanostructure, Electrospinning, Thermal Chemical Vapor Deposition, VS Mechanism

\*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University)

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received October 5, 2021

Revised December 7, 2021

Accepted February 4, 2022

Published February 28, 2022

## 1. 서론

나노소재의 크기와 모양을 제어하여 설계하고 구현하는 것은 나노기술의 응용에 있어서 매우 중요하다[1,2]. 특히 1차원 나노구조를 가지면서 우수한 전기전도 특성과 열전도 특성을 갖고 화학적으로 안정하고 질량대비 높은 강도를 갖는 카본 나노파이버(Carbon NanoFibers, CNFs)는 1차원의 카본 나노튜브(CNTs), 2차원의 그래핀 나노시트와 함께 다양한 분야에 응용되고 있는 중요한 기능성 나노소재이다[2,3]. 카본 나노튜브는 우수한 물리적 특성을 가지고 있지만, 합성 후 단일벽 CNTs와 다중벽 CNTs를 분리하는 공정이 용이하지 않고, 그래핀 나노시트는 원하는 곳에 고품질의 그래핀 나노시트를 적용하는 공정이 복잡하다. 반면에 카본 나노파이버는 polyacrylonitrile(PAN) 고분자를 전기방사(electrospinning)하고 산화안정 및 탄화과정을 거쳐 비교적 용이하게 1차원 나노구조 형태로 구현할 수 있다. 전기방사 공정 중 인가전압, PAN 용액의 농도, 시린지 팁(syringe tip)과 컬렉터(collector)의 거리 등을 조절하여 수 nm ~ 수  $\mu\text{m}$  직경을 갖는 CNFs를 손쉽게 대면적으로 생산할 수 있고, 전기방사 공정 중에 나노 무기소재를 혼합하면 다차원 유기 복합소재를 제작할 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 CNFs는 리튬이온전지(LIBs), 슈퍼커패시터, 염료감응형 태양전지 등과 같은 에너지 저장 및 변환 소재로 활용된다[2-4]. 또한 높은 비표면적을 갖는 특성을 이용하여 촉매, 가스센서, 바이오센서로 활용되고, 공기, 액체, 또는 연료의 여과(filtration)에도 응용된다[2-5].

나노구조의 금속 산화물 반도체 소재는 매우 다양한 분야에 응용되고 있다. 특히 산화주석( $\text{SnO}$  또는  $\text{SnO}_2$ )은 상용 리튬이온전지의 음극인 흑연(이론적 전기용량 372 mAh/g)과 비교하여 높은 이론적 전기용량( $\text{SnO}$  875 mAh/g,  $\text{SnO}_2$  790 mAh/g)을 갖고 있어서 차세대 LIBs의 음극소재로 주목을 받고 있다[4,6,7]. 또한 산화주석 나노소재는 높은 비표면적 특성과 반도체 특성으로 인하여 고감도 가스센서 소재로도 주목을 받고 있다[8,9].

$\text{SnO}$  나노구조물을 합성하는 방법은 수용액 기반의 수열합성(hydrothermal synthesis)[7,10], 펄스 레이저 증착법(PLD, Pulsed Laser Deposition)[11], 기상 증착법인 thermal CVD(Chemical Vapor Deposition) [1,12] 등 다양하지만, thermal CVD 방법으로 성장된  $\text{SnO}$  나노구조물은 고품질의  $\text{SnO}$  나노구조물 결정

(crystals)을 불순물 없이 균일하게 성장할 수 있다 [1,12].

본 연구에서는 전기화학적 특성을 극대화하기 위하여 우수한 전기전도 특성과 높은 비표면적 특성을 갖는 CNFs를 전기방사 공정으로 제작하고, thermal CVD 공정을 이용하여  $\text{SnO}$  나노구조물을 CNFs 위에 직접 성장시켜서  $\text{SnO}$  나노구조물의 비표면적을 극대화시켰다.  $\text{SnO}$  나노구조물의 성장 전후의 CNFs의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경으로 분석하였고, 결정학적 특성을 라만분광법 및 X선 회절법으로 분석하였다.

## 2. 실험방법

카본 나노파이버를 Fig. 1 (a)에 나타난 것과 같은 전기방사(electrospinning)법을 이용하여 제조하였다. PAN(Polyacrylonitrile,  $M_w=150,000$  g/mole, Sigma-Aldrich)을 Dimethylformamide(DMF, HPLC Grade, 99.9 %, Sigma-Aldrich) 용매에 12 wt%로 상온에서 12시간 동안 교반하여 분산하였고, 분산된 고분자 용액을 0.5 ml/h로 pumping하며 용액을 넣은 시린지 팁(21G, 직경 500  $\mu\text{m}$ )에는 15 kV의 고전압을 인가해주었다. PAN 나노섬유를 tip과 15 cm 떨어진 Al foil(ground)에 전기방사하였다. 이후 280  $^{\circ}\text{C}$ 에서 산화안정(5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  승온, 60 min 유지, 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  냉각) 후 800  $^{\circ}\text{C}$ 에서 탄화과정(5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  승온, 60 min 유지, 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  냉각)을 진행하여 CNFs를 제작하였다.

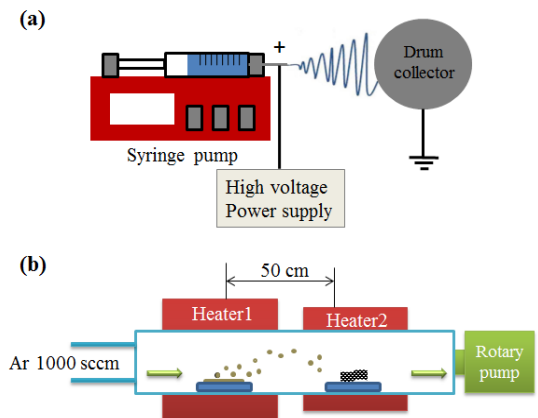


Fig. 1. Schematic diagram of (a) electrospinning process and (b) two-zone thermal CVD system

SnO 나노구조물의 합성은 Fig. 1 (b)에 나타난 것과 같은 two-zone thermal CVD 시스템을 사용하여 카본 나노파이버 위에 성장시켰다. thermal CVD 시스템은 2 인치 외경의 석영관(quartz tube)으로 chamber가 이루어져 있으며, powder 형태인 원료 물질을 기상화(vaporization) 시키는 heater 1과 기판의 온도를 독립적으로 제어할 수 있는 heater 2의 거리를 조절할 수 있다. SnO 나노구조물을 합성하기 위한 source는 SnO<sub>2</sub> 파우더(99.9% Trace Metals Basis, Sigma Aldrich)를 사용하였다. 원료물질을 알루미늄 나 도가니(alumina crucible) 안에 담아 석영관 안에 넣고 heater 1의 중심부에 위치시켰다. 카본 나노파이버를 quartz plate 위에 정렬시킨 뒤 일정한 온도로 제어되는 heater 2의 중심에 위치시켰다. MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 고순도 Ar(99.999%)을 이송가스로 사용하여 1000 sccm (Standard Cubic Centimeters per Minute)으로 흘려주는 상태에서 heater 1과 heater 2를 3시간동안 각각 1070 °C 및 424 °C로 가열하였다. 이때 gate valve를 조절하여 챔버의 압력을 545 Pa(4 Torr)이 되도록 하였고, CVD 챔버의 압력은 전기용량형 압력계(capacitance manometer)로 측정하였다. CVD 시스템에서 SnO 나노구조물이 성장되는 기판의 온도는 K-type thermocouple로 측정하였다.

카본 나노파이버 위에 성장된 SnO 나노구조물의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경 (JEOL, JSM-6500F, FE-SEM)을 이용하여 분석하였고, 성장된 SnO 나노구조물의 결정학적 특성은 Raman spectroscopy (NOST, FEX)와 X-Ray diffractometer (Rigaku, SmartLab)로 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

SnO 나노구조물의 성장 전후의 CNFs의 모습을 FE-SEM으로 분석하여 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 2 (a, b)는 전기방사 후 산화안정과 탄화과정을 거친 CNFs의 모습이다. SnO 나노구조물이 성장되기 전의 CNFs는 지름이 약 500 nm이고, 표면은 균일하고 매끈한 모습인 것을 확인할 수 있다. Fig. 2 (c, d)는 CNFs 위에 SnO 나노구조물이 성장된 후의 모습이다. SnO 나노구조물이 성장됨에 따라 전체적인 CNFs의 직경이 약간 굵어지고, 납작한 SnO 나노 플레이트(nano-platelets)들이 CNFs의 표면에 균일하면서 수직인 방향으로(vertical

direction)으로 촘촘하게 성장한 것을 확인할 수 있다. Fig. 2 (e, f)에는 SiO<sub>2</sub>/Si wafer 위에 성장된 SnO 나노구조물의 모습을 나타내었다. 동일한 실험 조건으로 SnO 나노구조물이 성장되었음에도 CNFs 위에 성장되었을 때와, SiO<sub>2</sub>/Si wafer 위에 성장되었을 때의 표면형상이 다른 것을 확인할 수 있다.

thermal CVD 공정으로 나노구조물을 성장시킬 때, 성장 메커니즘은 VLS (Vapor-Liquid-Solid) 공정과 VS (Vapor-Solid) 공정으로 구분할 수 있다. VLS 공정은 증기화된 원료물질이 촉매금속(self-catalyst 포함) 표면에 흡착, 확산, 촉매 표면으로 다시 석출(supersaturated)되어 촉매금속 하단에서 결정화 되는 과정이다. 때문에 VLS의 경우 촉매입자의 크기 및 종류에 따라 나노구조물의 크기가 결정된다. 반면에 VS 공정은 증기화된 원료물질이 기판 표면에 흡착되는 기작이 촉매금속 내부로의 원료물질의 흡수가 아니라 기판 표면의 surface defect 혹은 dislocation 등과 같은 작용기, 그리고 self organization(SnO의 경우 Sn) 등에 의해 응축(condensation)되어 성장하는 과정이다.

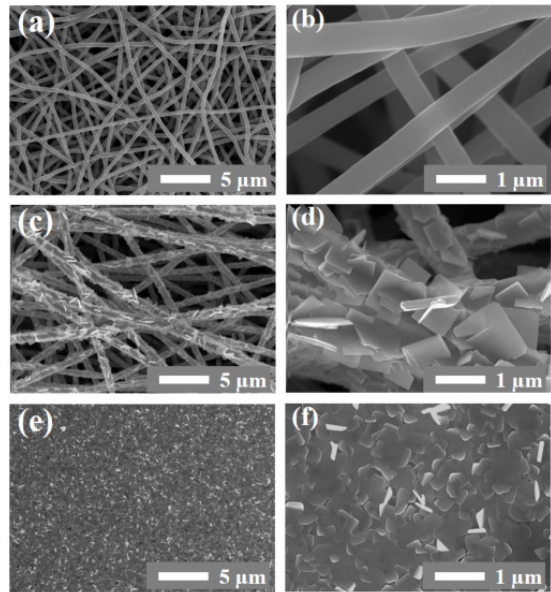


Fig. 2. FE-SEM images of (a, b) Carbon NanoFibers (CNFs) before SnO Nanostructures(NSs) growth and (c, d) after SnO NSs growth on CNFs, (e, f) after SnO NSs growth on SiO<sub>2</sub>/Si wafer. Left images are low magnification of 10,000 times, and right images are high magnification of 50,000 times

FE-SEM 분석결과, CNFs 표면에 존재하는 surface defect 및 dislocation 등에 의해 핵형성이 시작되어 SnO 나노구조물이 성장되는 VS 성장 메커니즘으로 성장되었다. CNFs 및 SiO<sub>2</sub>/Si wafer 등 성장 기판에 따라 성장된 SnO 나노구조물의 표면형상이 다른 것은 SiO<sub>2</sub>/Si wafer 보다는 CNFs 표면에 더 많은 surface defect와 dislocation 등이 형성되어 있음으로 인해서 상대적으로 핵형성 site가 다양하고, 따라서 SnO 나노구조물이 CNFs의 표면에 수직인 방향으로 촘촘하게 성장된 것이[12].

thermal CVD 공정으로 성장된 산화물 주석의 결정상을 분석하기 위하여 Raman 분석을 수행하였다. SnO 나노구조물이 성장되기 전의 CNFs, SnO 나노구조물이 성장된 SnO/CNFs, SnO/SiO<sub>2</sub>/Si wafer 시료에 대하여 Raman 분광법으로 분석한 결과를 Fig. 3에서 나타내었다.

CNFs의 경우 SnO 성장 전후 모두 탄소 나노구조물에서 관찰되는 D band와 G band가 각각 파수 1328 cm<sup>-1</sup>과 1582 cm<sup>-1</sup>에서 관찰되었다. G 피크는 C-C bond의 stretching에 기인하며, sp<sup>2</sup> 카본의 특징적인 피크이다[5]. D 피크는 defect에 의해 활성화되며, D 피크의 intensity는 disorder의 양을 의미한다[5]. 즉 전기방사 공정으로 제작된 CNFs의 표면에 상당한 양의 surface defect, dislocation 등의 disorder가 존재하는 것을 알 수 있고, 이러한 disorder가 SnO 나노구조물의 VS 성장을 촉진하여 CNFs 표면에 SnO 나노구조물이 촘촘하게 성장한 것이다.

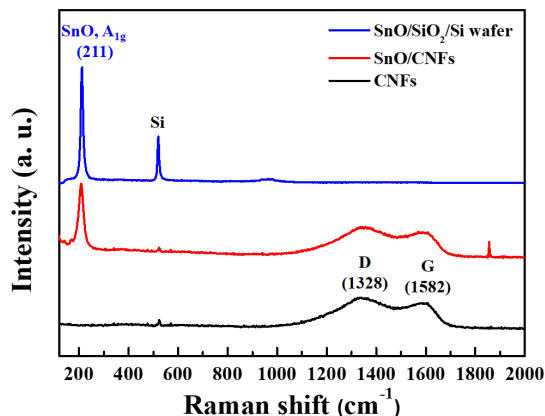


Fig. 3. Raman spectra of SnO NSs on SiO<sub>2</sub>/Si wafer (blue line), CNFs (red line) and bare CNFs (black line)

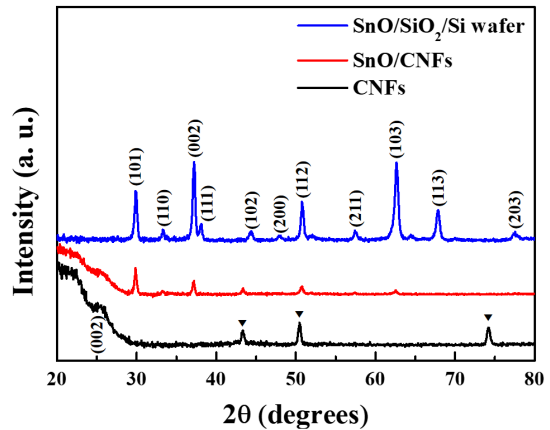


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of SnO NSs on SiO<sub>2</sub>/Si wafer (blue line), CNFs (red line) and bare CNFs (black line). The symbol of ▼ denotes Cu element

SnO 나노구조물의 성장 기판과 무관하게 파수 211 cm<sup>-1</sup>에서 관찰되는 피크는 SnO의 A<sub>1g</sub> 진동모드로 알려져 있으며, SnO 나노구조물의 결정구조가 tetragonal 구조를 보유하고 있음을 의미한다[1]. SiO<sub>2</sub>/Si wafer 위에 성장된 SnO 시료에서는 파수 211 cm<sup>-1</sup>에서 SnO의 A<sub>1g</sub> 진동모드와 파수 517 cm<sup>-1</sup>에서 Si의 피크가 관찰되었다.

Fig. 4에는 X선 회절분석 결과를 나타내었다. 시료는 SnO 나노구조물이 성장되기 전의 CNFs, CNFs 위에 SnO 나노구조물이 성장된 SnO/CNFs, 그리고 Si 기판 위에 SnO 나노구조물이 성장된 SnO/SiO<sub>2</sub>/Si wafer이었다. X선 회절분석 실험에서 주요 피크의 해석은 SnO(ICDD, 01-072-1020)와 Cu(ICDD, 01-080-0075)를 참고하였다. 이때 카본 나노파이버의 XRD 데이터에서 Cu원소의 피크가 나온 이유는 CNFs의 기계적 특성이 취약하여 취성을 갖기 때문에 XRD 분석을 위해서 Cu plate에 지지하여 X선 회절 분석을 진행하였기 때문이다. CNFs의 경우 PAN fiber를 고온에서 탄화시킨 후에 관찰되는 (002) 면의 피크가 25°에서 관찰되며[5], SnO 나노구조물이 성장된 후에도 미약하게 관찰됨을 알 수 있다. SnO 나노구조물이 성장된 시료에서는 기판에 관계없이 tetragonal phase의 SnO의 특성 피크가 관찰되었다[1,12]. 하지만 기판에 따라 SiO<sub>2</sub>/Si wafer의 경우 (101), (002), 그리고 (103) 면의 피크가 강하게 나타나지만, CNFs의 경우 피크의 강도가 두드러지게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 기판의 방향성과 그에 따른 SnO 나노구조물 결정의 배향성에 따른 것이다.

즉 CNFs 위에 성장된 시료는 SnO 나노구조물이 원형의 CNFs 표면에 수직인 방향으로 성장되었기 때문에 c축이 다수 존재하고, 이러한 형상학적 특성에 의해 SnO의 c 축 배향성이 다소 떨어지는 것처럼 분석된 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 에너지 저장소재 및 가스센서 등 다양한 전기화학적 응용분야에 적용되고 있는 SnO 나노구조물을 높은 비표면적을 갖도록 카본 나노파이버 위에 직접 성장시켰다. 카본 나노파이버는 전기방사 공정으로 PAN 고분자를 이용하여 나노파이버로 제조하였고, 산화 안정 및 탄화과정을 통하여 카본 나노파이버로 제조하였다. SnO 나노구조물은 thermal CVD 공정으로 CNFs 기판 또는 SiO<sub>2</sub>/Si wafer 기판 위에 성장시켰고, 연구결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 전기방사 공정으로 제조된 카본 나노파이버는 지름 500 nm의 균일한 굵기와 매끈한 표면을 가지고 있었다.

둘째, SnO 나노구조물을 thermal CVD 공정으로 CNFs의 위에 직접 성장시켰을 경우, CNFs의 직경은 약간 증가하였으며, CNFs의 표면에 수직인 방향으로 SnO 나노구조물 결정이 촘촘하게 성장되었다.

셋째, 동일한 공정으로 SnO 나노구조물을 성장시켰음에도 SnO 나노구조물의 표면형상은 기판에 따라 상이하였다. 즉 Raman 분광학 분석결과, CNFs의 표면에는 defect와 dislocation 등 disorder가 다수 존재하였고, CNFs 위에 성장된 SnO 나노구조물은 원형의 CNFs 위에 수직인 방향으로 촘촘하게 성장되었으며, tetragonal 구조의 SnO 나노 플레이트 결정으로 확인되었다. 반면에 SiO<sub>2</sub>/Si wafer 위에 성장된 SnO 나노구조물은 기판에 비스듬한 방향으로 기울어져 성장되었다.

카본 나노파이버는 우수한 전기전도도 특성을 갖고 있으면서 1차원 나노구조의 특성으로 인하여 높은 비표면적을 갖는다. 또한 thermal CVD 공정으로 CNFs 위에 성장된 SnO 나노구조물은 CNFs의 표면에 수직인 방향으로 촘촘하게 나노 플레이트 결정이 성장하여 비표면적이 더욱 증가하였다. 따라서 SnO/CNFs의 나노구조물 복합체는 비표면적이 극대화되어 매우 우수한 전기화학적 특성을 나타낼 것으로 예상되며, 이러한 복합체를 리튬이온전지의 음극활물질로 활용한다면 높은 전기용량이 가능할 것으로 기대된다. 또한 이러한 나노구조물 복합

체는 높은 비표면적 특성으로 인하여 매우 우수한 고감도 가스센서의 제작이 가능할 것으로 기대된다.

#### References

- [1] Z. Zhang, J. Wang, Z. Yu, F. Qu, X. Wu, "Assembling SnO Nanosheets into Microhydrangeas: Gas Phase Synthesis and Their Optical Property", *Nano-Micro Letters*, Vol. 4, No. 4, pp. 215-219, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.3786/nml.v4i4.p215-219>
- [2] L. Zhang, A. Aboagye, A. Kelkar, C. Lai, H. Fong, "A review: carbon nanofibers from electrospun polyacrylonitrile and their applications", *Journal of Materials Science*, Vol. 49, pp. 463-480, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7705-y>
- [3] S. K. Nataraj, K. S. Yang, T. M. Aminabhavi, "Polyacrylonitrile-based nanofibers-A state-of-the-art review", *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, pp. 487-513, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001>
- [4] J. Wang, W-L. Song, Z. Wang, L-Z. Fan, Y. Zhang, "Facile Fabrication of Binder-free Metallic Tin Nanoparticle/Carbon Nanofiber Hybrid Electrodes for Lithium-ion Batteries", *Electrochimica Acta*, Vol. 153, pp. 468-475, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2014.12.026>
- [5] M. A. do Amaral Junior, J. T. Matsushima, M. C. Rezende, E. S. Goncalves, J. S. Marcuzzo, M. R. Baldan, "Production and Characterization of Activated Carbon Fiber from Textile PAN Fiber", *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 9, No. 4, pp. 423-430, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5028/jatm.v9i4.831>
- [6] C. Kim, M. Noh, M. Choi, J. Cho, B. Park, "Critical Size of Nano SnO<sub>2</sub> Electrode for Li-Secondary Battery", *Chemistry Materials*, Vol. 17, pp. 3297-3301, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm048003o>
- [7] J. Ning, T. Jiang, K. Men, Q. Dai, D. Li, Y. Wei, B. Liu, G. Chen, B. Zou, G. Zou, "Synthesis, Characterization, and Applications in Lithium Ion Batteries of Hierarchical SnO Nanocrystals", *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 113, pp. 14140-14144, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp905668p>
- [8] A. Kolmakov, D. O. Klenov, Y. Lilach, S. Stemmer, M. Moskovits, "Enhanced Gas Sensing by Individual SnO<sub>2</sub> Nanowires and Nanobelts Functionalized with Pd Catalyst Particles", *Nano Letters*, Vol. 5, No. 4, pp. 667-673, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl050082y>
- [9] Y. Wang, X. Jiang, Y. Xia, "A Solution-Phase, Precursor Route to Polycrystalline SnO<sub>2</sub> Nanowires That Can Be Used for Gas Sensing under Ambient Conditions", *Journal of American Chemical Society*,

Vol. 125, pp. 16176-16177, 2003.

DOI: <https://doi.org/10.1021/ja037743f>

- [10] K. Sakaushi, Y. Oaki, H. Uchiyama, E. Hosono, H. Zhou, H. Imai, "Aqueous solution synthesis of SnO nanostructures with tuned optical absorption behavior and photoelectrochemical properties through morphological evolution", *Nanoscale*, Vol. 2, pp. 2424-2430, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1039/c0nr00370k>
- [11] Y. Ogo, H. Hiramatsu, K. Nomura, H. Yanagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, "p-channel thin-film transistor using p-type oxide semiconductor, SnO", *Applied Physics Letters*, Vol. 93, No. 032113, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2964197>
- [12] M-R. Kim, I. Lee, K. S. Kim, K-C. Kim, "Growth of free-standing SnO nanostructures on single layer graphene", *Materials Letters*, Vol. 236, pp. 324-328, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.127>

---

김 미 리(Mee-Ree Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 충남대학교 신소재 공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능정보융합학과 (박사 과정)

<관심분야>

에너지관련 소재, 기능성 소재, 그래핀, 가스센서

---

김 기 출(Ki-Chul Kim)

[중신회원]



- 1993년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학사)
- 1996년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학석사)
- 2002년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학박사)
- 2002년 4월 ~ 2006년 3월 : 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 신소재화학공학과 교수

<관심분야>

에너지 저장소재, 가스센서, 에너지 하베스팅 소재