

습식산화된 CVD 그래핀에서의 산화아연 나노막대 직접성장 방법에 관한 연구

최여진*, 안성진**

Selective Growth of ZnO Nanorods on Wet-Oxidized CVD Graphene

Yeo Jin Choi*, Sung Jin An**

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2022~2024)

요 약

이 연구에서는 그래핀의 표면 특성을 습식 산화 시간에 따라 분석하고, 산화된 그래핀 위에 시드층 없이 ZnO 나노막대의 성장을 조사하였다. 라만 분광법과 XPS 분석 결과, 산화 시간이 길어질수록 표면 결함과 산소 기능성 그룹(에폭시, 하이드록실, 카복실)이 증가하는 것을 확인했다. 특히 산화 시간 60분에서 산소 그룹이 크게 증가했으며, 이는 산화가 진행되었음을 나타낸다. 산화된 그래핀에서 ZnO 나노막대는 수열 합성법을 통해 성장했으며, 산화 시간이 길어질수록 ZnO 나노막대의 직경은 커지고 길이는 줄어드는 경향을 보인다. 이 연구를 통해 시드층 없이도 산화된 그래핀 표면에서 ZnO 나노막대가 성장할 수 있음을 보여주며, 그래핀 산화 조건과 ZnO 나노구조 성장 간의 관계를 설명한다.

Abstract

In this study, the surface properties of graphene based on wet oxidation duration and examined the formation of ZnO nanorods on oxidized graphene without a seed layer. Raman spectroscopy and XPS examination demonstrated that with prolonged oxidation time, there was a corresponding increase in surface defects and oxygen functional groups (epoxy, hydroxyl, and carboxyl). A substantial rise in oxygen functional groups was noted during 60 minutes of oxidation, signifying the advancement of oxidation. ZnO nanorods were synthesized on oxidized graphene using a hydrothermal technique, resulting in an increase in diameter and a drop in length as the oxidation duration extended. This study illustrates that ZnO nanorods can proliferate on oxidized graphene without a seed layer and elucidates the correlation between the conditions of graphene oxidation and the growth of ZnO nanostructures.

Keywords

graphene oxide, ZnO, nanorods, composite

* 국립금오공과대학교 신소재공학과

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2023-5722>

** 국립금오공과대학교 재료공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5114-1933>

• Received: Feb. 04, 2025, Revised: Feb. 28, 2025, Accepted: Mar. 03, 2025

• Corresponding Author: Sung Jin An

Dept. of Mater. Sci. and Eng., Kumoh National Institute of Technology, Korea

Tel.: +82-54-478-7747, Email: sungjinan@kumoh.ac.kr

I. 서 론

ZnO 나노구조체는 발광다이오드(LED, Light-Emitting Diode), 바이오센서(Biosensor), 태양전지(Solar cell), 자외선 발광소자, 압전나노 발전기 (PZG, Piezoelectric nano Generator) 등 다양한 응용 분야에서 널리 활용되고 있다. ZnO는 결정 구조상 c 축을 따라 O^{2-} 와 Zn^{2+} 이온이 번갈아 배열된 교대 평면으로 구성되어있으며, 각 원자는 4면체 구조로 배위되어 전하 중심이 4면체 중심에 위치한다. 이러한 구조는 중심대칭의 부재를 초래하며, 높은 전기기계적 결합 특성을 통해 강한 압전 반응을 보이는 특징이 있다[1]. 특히, ZnO 기반 압전나노 발전기는 기계적에너지를 전기에너지로 변환하는 데 사용되며, 변환기, 센서, 액추에이터와 같은 다양한 응용에서 중요한 역할을 한다[2]-[4].

ZnO는 나노막대, 나노와이어, 나노 벨트, 나노시트 등 다양한 형태로 합성될 수 있으며, 이를 위한 대표적인 합성 기술로는 졸-겔 공정(Sol-gel), 전기화학 성장법(Electrochemical growth), 화학기상증착법(CVD, Chemical Vapor Deposition), 그리고 수열 합성법(Hydrothermal method)이 있다. 이 중 수열 합성법은 저온에서 합성할 수 있고, 낮은 비용과 공정의 용이성, 유리 기판과 높은 호환성을 갖춘 기술로, 잘 정렬된 ZnO 나노구조체를 합성하는데 매력적인 방법으로 주목받고 있다[5][6].

한편, 그래핀 기반의 복합 1차원 나노구조체는 그래핀의 우수한 기계적 내구성과 낮은 면저항 덕분에 유연 전자소자와 같은 응용에서 많은 주목을 받고 있다. 특히, 그래핀은 높은 기계적 강도와 유연성을 지녀 인듐 주석 산화물(ITO, Indium Tin Oxide)보다 내구성이 우수하며, 파괴 강도가 약 10 배에 이르는 특성을 보인다. 이러한 특성은 유연성 및 내구성이 중요한 전자소자 응용에 있어서 그래핀을 전극 소재로 채택하면 많은 이점을 제공한다.

특히 그래핀은 ZnO, GaAs, InAs와 같은 황화아연 계열 물질과 그래핀을 결합한 헤테로구조가 나노소자의 성능 향상을 위해 활발히 연구되고 있다 [7][8]. 하지만 그래핀은 화학적으로 안정적이고 발수성이 강해 수열 합성을 통한 ZnO 나노구조체의 직접 성장이 어렵다는 한계가 있다. 이를 해결하기

위해 일반적으로 시드 층을 코팅한 후 300°C 이상의 열처리를 통해 ZnO를 성장시키는 방식을 채택하지만, 이러한 방식은 공정이 복잡하고 재현성이 낮은 문제를 초래한다. 특히, 전구체 용액의 반복적인 첨가 및 pH 조절이 필요하다는 점에서 추가적인 공정과 시간이 요구된다[9].

본 연구에서는 산화 그래핀(OG, Oxidized Graphene)을 활용하여 앞서 언급한 문제를 해결하고자 한다. 기존 선행 연구에서는 부분적으로 산화된 그래핀 위에 시드층 없이 전기화학 성장법으로 성장한 ZnO 나노막대 분석은 ZnO 나노막대의 성장에 필요한 전류, ZnO 프리커서의 농도에 따라 ZnO 나노막대를 평가하였다[10]. 하지만 산화 그래핀 표면의 산소 작용기(에폭시, 하이드록실, 카복실기 등)는 Zn^{2+} 이온의 흡착을 증가시키고, 이를 통해 시드층 없이도 ZnO 나노막대의 균일한 성장을 가능하게 한다.

따라서 산화도에 따라 달라지는 산화 그래핀의 표면 산소 작용기 차이에 따른 성장 차이를 분석하고자 한다. 산화 시간에 따른 산화 그래핀의 표면 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 ZnO 나노구조체를 시드층 없이 성장시키는 방법을 제시한다. 나아가, 산화 조건이 ZnO 나노구조체의 형상과 특성에 미치는 영향을 체계적으로 규명함으로써, 그래핀 기반 나노소자의 제작 공정을 단순화하고 비용을 절감할 가능성을 제시하고자 한다.

II. 습식 산화 그래핀과 표면 특성 분석

2.1 그래핀 성장

그래핀은 화학기상증착법(CVD)을 통해 구리 포일 위에서 합성되었다. 1,000°C에서 Ar 가스 10 sccm을 1시간 동안 온도를 올리고, 1,030°C에서 Ar 10 sccm/H₂ 10 sccm 환경에서 40분간 어닐링 하였다. 이후 1,030°C에서 Ar 10 sccm/H₂ 10 sccm/CH₄ 2 sccm에서 10분 동안 그래핀을 성장시켰다. 그림 1과 같이 SiO₂/Si 웨이퍼로 그래핀을 옮기기 위해, 구리 포일 반대면에 성장된 그래핀은 O₂ 플라즈마(SPI supplies, Plasma Prep III, 100W, 60초)를 사용해 먼저 제거되었다.

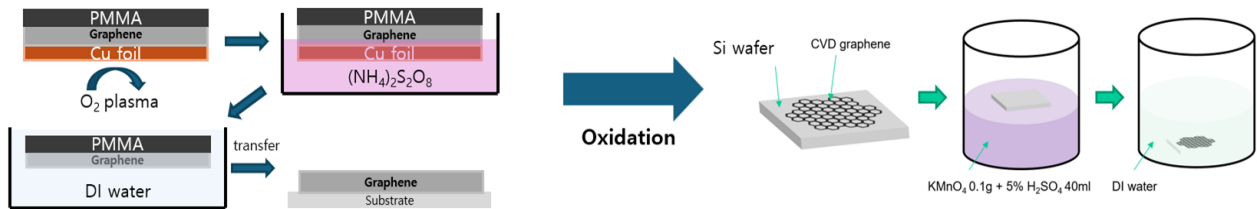


그림 1. 그래핀 전사 및 산화 과정
Fig. 1. Graphene transfer, oxidation process

이후 그래핀/구리 포일 샘플에 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA, Polymethyl Methacrylate)를 코팅하였다. 구리 포일은 0.5 M 과황산암모늄(Ammonium persulfate) 용액으로 에칭하였고, PMMA/그래핀 샘플은 이후 증류수에 띄웠다. PMMA/그래핀 샘플을 SiO₂ /Si 웨이퍼 위에 배치한 후, 아세톤에 1시간 동안 담가 PMMA를 제거하였다.

2.2 화학용액을 이용한 CVD-그래핀 산화

그래핀의 표면 산화는 5% 묽은 H₂SO₄ 40 ml 혼합액에 0.1 g의 KMnO₄를 사용하여 진행되었다. SiO₂/Si 웨이퍼 위의 그래핀은 KMnO₄/묽은 H₂SO₄ 용액에 상온(25°C)에서 시간에 따라 H₂SO₄로 산화된 그래핀은 OG-n으로 명명되며, n은 H₂ SO₄ 산화 용액에서의 산화 시간을 나타낸다. SiO₂/Si 웨이퍼 위의 그래핀은 이후 증류수에 1분간 담근 뒤 질소 가스를 사용해 건조하였다.

2.3 그래핀 산화 시간별 표면특성

SiO₂/Si 웨이퍼에 전사된 그래핀 및 산화 시간별 그래핀의 산화 시간별 표면 Defect 변화와 분자구조 변화를 확인하기 위해, Raman(Micro Raman spectroscopy, System 1000, Renishaw, British) 1,200~3,800 cm⁻¹ 범위의 Raman 스펙트럼을 측정하였다. 라만 분광 분석 결과를 그림 2(a)에 나타내었다. 측정 결과 G-band와 2D-band의 피크가 뚜렷하게 확인되었으나 D-band의 피크는 강도가 매우 낮게 나타났으며 이는 결함이나 탄소 구조의 불규칙성에 의해 나타나는 피크로 결함이 작을수록 강도가 낮아진다. 각각의 위치는 D-band(1,349 cm⁻¹),

G-band(1,585 cm⁻¹), 2D-band(2,678 cm⁻¹)에서 나타났으며, G-band와 2D-band의 강도 비 IG/2D를 계산한 결과는 그림 3(b)에 나타나 있으며 그래핀은 0.24, 산화 정도에 따라 각각 1.02, 1.49, 1.54로 나타났다. 모든 산화 시간에 따른 그래핀은 결함과 관련되어 있는 D-band가 분명하게 확인되었으며, 그림 3(a)에 따르면 OG-30에 비해 OG-60의 G-band FWHM이 31.44 cm⁻¹에서 59.24 cm⁻¹로 급격히 증가한 것을 확인할 수 있다. 2D-band의 강도 또한 급격하게 감소하였는데, 이를 통해 표면에 존재하는 결함이 OG-60에서 급격하게 증가했음을 알 수 있다.

그림 3(c)을 통해 D-band와 G-band의 강도 비 ID/IG를 보게 되면 0.95에서 1.03까지 증가한 것으로 보아 산화 시간이 증가함에 따라 산소 작용기에 의한 defect가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 산화가 진행될수록 2D-band의 강도가 감소하여 그래핀의 구조가 점점 파괴되고 있다는 것을 알 수 있으며, 이는 그림 2(b)에서와 같이 그래핀의 산화가 진행되면서 G-band의 강도가 감소하면서 D'-band의 강도가 증가하고 두 band 사이의 거리로 C/O ratio를 파악할 수 있다[11]. 따라서, 산화 시간이 증가할수록 두 피크 위치의 차이가 감소해 산화가 단계적으로 진행된다는 것을 알 수 있으며 OG-60에서 좀 더 큰 폭으로 감소하는 것으로 보아 급격히 증가한 defect는 산소 작용기라는 것을 알 수 있다.

산화 시간에 따라 그래핀의 표면에 형성되는 에폭시, 하이드록실, 카복실 등 산소 작용기의 분을 변화를 확인하고자 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, Versaprobe III, ULVAC-PHI, Japan) 분석을 진행하였으며, 산화 그래핀의 C1s 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다.

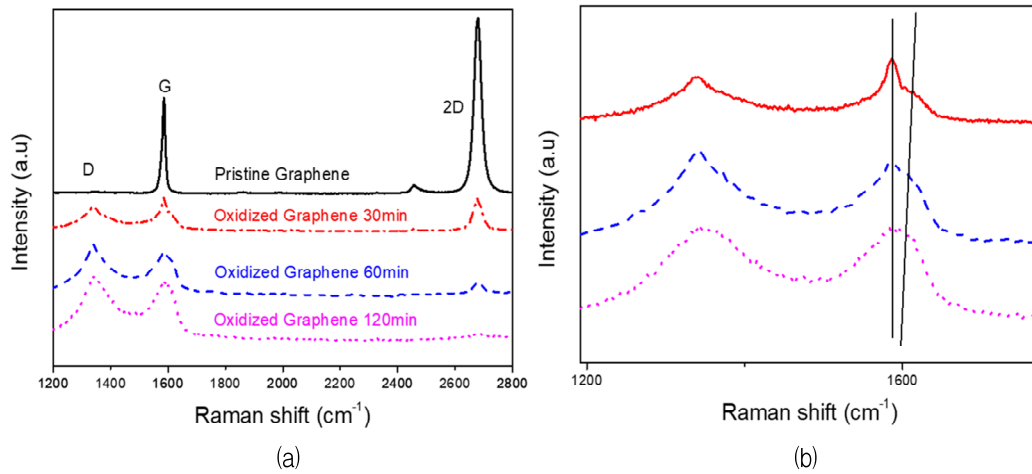


그림 2. 산화시간에 따른 라만 분광 분석

(a) 그래핀(검은색 실선), OG-30(빨간색 일점쇄선), OG-60(파란색 쇄선), OG-120(분홍색 점선)의 라만 분광 분석

(b) 산화 시간에 따른 샘플의 G-밴드 및 D'-밴드 위치

Fig. 2. Raman spectroscopy as a function of oxidation time

(a) Raman spectroscopy of graphene (Black line), OG-30 (Red dash dot), OG-60(Blue dash), OG-120(Pink dot),

(b) Positions of the G-band and D'-band of samples according to oxidation time

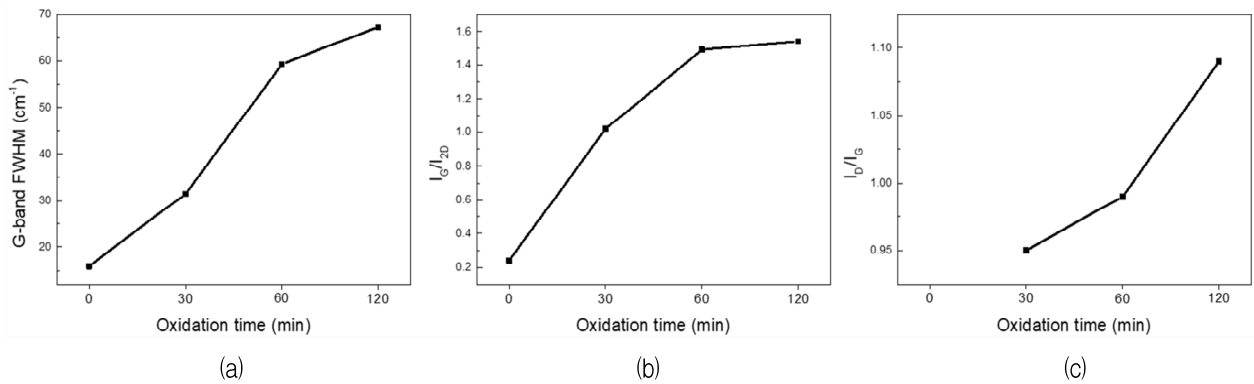


그림 3. 산화시간에 따른 산화그래핀의

(a) G-밴드의 반가폭 (Full Width at Half Maximum, FWHM) (b) I_G/I_{2D} 비율, (c) I_D/I_G 비율

Fig. 3. Effects of oxidation time on graphene oxide

(a) G-band FWHM, (b) I_G/I_{2D} , and (c) I_D/I_G

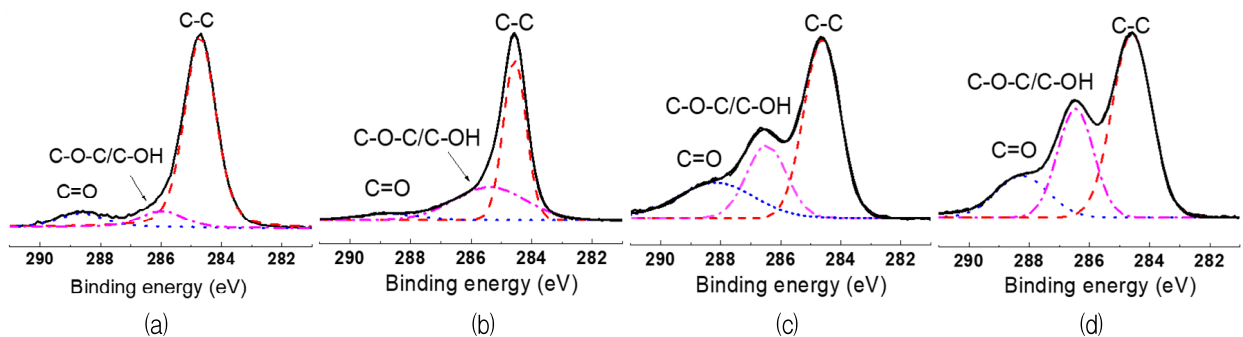


그림 4. 서로 다른 산화 시간에 따른 산화 그래핀의 XPS C1s 스펙트럼

(a) 그래핀(graphene), (b) OG-30, (c) OG-60, (d) OG-120

Fig. 4. XPS C1s spectra of oxidized graphene at different oxidation time

(a) Pristine graphene, (b) OG-30, (c) OG-60, (d) OG-120

그래핀의 경우 높은 강도의 C-C 결합과 낮은 강도의 에폭시(C-O-C)/하이드록실(C-OH) 그룹이 확인되었으며, 그보다 낮은 강도의 카복실(C=O) 그룹이 확인되었다. 각각의 위치는 284.6eV, 285.4eV, 288.7eV에서 나타났다. 그래핀의 산화 시간이 증가함에 따라 산소 작용기(에폭시, 하이드록실, 카복실기)의 양을 확인하기 위해 Graphitic carbon(C-C)과 Oxidized carbon의 atomic % 비율을 표1에 나타내었다. OG-30에 비해 OG-60의 산소 작용기 강도가 눈에 띄게 증가한 것으로 보아 라만 분광 분석과 유사한 결과가 나온 것을 확인하였다. 이를 통해 산화 시간이 증가할수록 그래핀의 표면에 더 많은 산소 작용기가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 그래핀의 I_G/I_{2D} 비율, I_D/I_G 비율, G-밴드 및 D'-밴드 위치, 그리고 그래피틱 탄소/산화된 탄소 원자 비율

Table 1. Graphene's I_G/I_{2D} , I_D/I_G , G-band, D'-band positions, and graphitic carbon/oxidized carbon atomic ratio

	I_G/I_{2D}	I_D/I_G	G-band	D'-band	At% ratio
Graphene	0.24	-	1587	-	0.20
OG-30	1.02	0.95	1587	1612	0.25
OG-60	1.49	0.99	1587	1603	0.60
OG-120	1.54	1.03	1587	1601	0.84

III. 시드층 없는 ZnO 나노막대 성장방법

3.1 ZnO 나노막대 수열합성법

그림 5와 같이 ZnO 나노막대는 수열 합성 공정을 통해 제조되었다. 25 mM 질산아연 헥사하이드레이트 (ZNH, Zinc Nitrate Hexahydrate) 50 ml와 25 mM 헥사메틸렌테트라민(HMTA, Hexamethylenetetramine) 50 ml를 동일 비율로 혼합하여 반응 용액을 제조하였다.

크기가 1.5 cm × 1.5 cm인 PET 기판은 세척 후 균일하게 반응 용액에 노출되도록 지지대 위에 배치되었다. 합성은 200ml 용기에 담아 100°C로 유지된 건조 오븐에서 4시간 동안 진행되었으며, 이 과정에서 ZnO 나노막대는 상향식(Bottom-up)으로 성장이 이루어졌다. 반응 후 기판은 증류수로 세척 후 질소 건조하였다.

3.2 산화 그래핀에 성장한 ZnO 나노막대 평가

산화 그래핀 위에 성장한 ZnO 나노막대의 그래핀 산화 시간별 성장 차이를 확인하고자 FE-SEM (Field-emission scanning electron microscopy, FE-SEM, MIRA, TESCAN, Czech)을 활용하여 표면 특성을 관찰하였다. 그림 6은 SiO₂/Si 웨이퍼에 전사 후 4시간의 수열합성을 통해 산화 그래핀에 성장한 ZnO의 SEM 이미지이며 ZnO 나노막대가 밀도 있게 성장한 것을 볼 수 있다. 표 2에 나타난 것처럼 OG-30에 성장한 ZnO 나노막대는 평균 541 nm 직경과 4.55 μ m의 길이를 갖고 있으며, OG-60에 성장한 ZnO 나노막대의 경우 직경은 약 581 nm이며, 길이는 약 4.36 μ m로 직경은 증가하고 길이는 감소한 것을 확인하였다.

표 2. 산화 시간별 그래핀 위에 성장한 ZnO 나노막대의 평균 직경, 평균 길이

Table 2. average diameter, average length of hydrothermally grown ZnO nanorods on graphene at different oxidation times

	Avg. diameter (nm)	Avg. Length (μ m)
OG-30	541	4.55
OG-60	581	4.36
OG-120	604	3.66

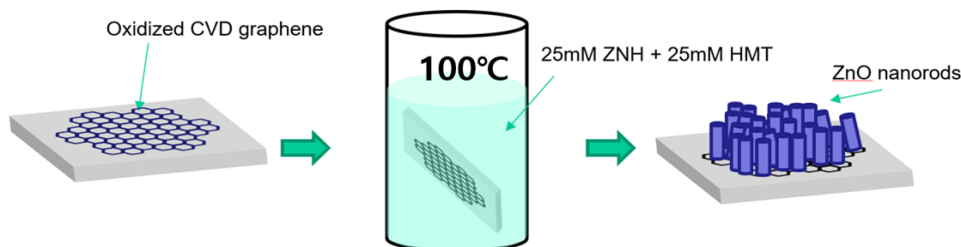


그림 5. ZnO 나노막대 수열합성 과정

Fig. 5. ZnO nanorods hydrothermal method process

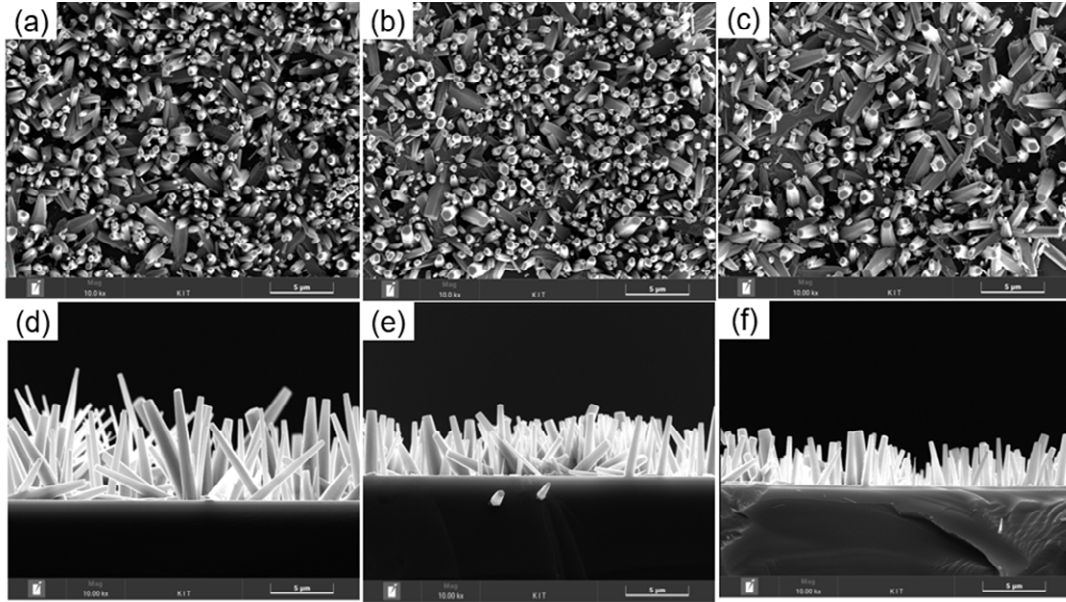


그림 6. FE-SEM 이미지: ZnO 나노막대가 성장한 (a, d) 산화 그래핀 30분(OG-30), (b, e) 산화 그래핀 60분(OG-60), (c, f) 산화 그래핀 120분(OG-120)

Fig. 6. FE-SEM images of ZnO nanorods grown on (a,d) oxidized graphene 30(OG-30), (b,e) oxidized graphene 60min(OG-60), (c,f) oxidized graphene 120min(OG-120)

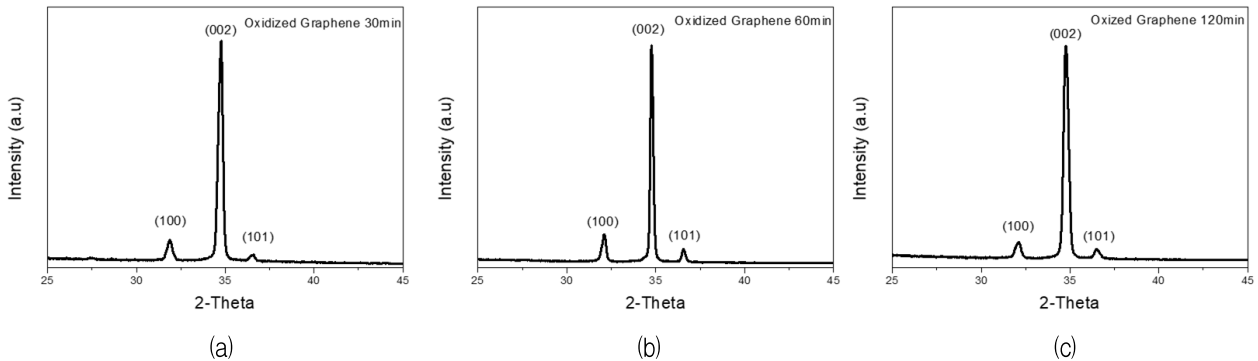


그림 7. 산화 그래핀 위에 성장한 ZnO 나노막대의 XRD (a) 30분, (b) 60분, (c) 120분

Fig. 7. XRD spectrum of ZnO nanorods grown on oxidized graphene (a) 30min, (b) 60min, and (c) 120min

OG-120에서 성장한 ZnO 나노막대는 직경 604 nm, 길이 3.66 μm 로 직경이 더욱 증가하고 길이는 감소하였다. 또한, 성장한 ZnO의 배향성을 확인하고 wurtzite 구조의 ZnO가 제작되었는지 확인하고자 XRD(X-ray diffraction, XRD, MiniFlex 600, Rigaku, Japan)를 활용하여 20°~80° 범위에서 측정하였다. 그림 7 XRD 결과를 통해 모든 샘플에서 (100), (002), (101) peak이 확인되었으면 이를 통해 wurtzite 구조를 갖는 ZnO가 형성되었음을 확인할 수 있었으며, (0002)면의 배향성이 우수한 wurtzite 구조의 ZnO 나노막대가 형성되었다. 산화된 그래핀은 표면이나 가

장자리에 다량의 산소 작용기를 포함하고, 결함도 그래핀에 비해 많이 존재한다.

따라서 이러한 산소 작용기들은 ZnO의 핵생성 자리(Nucleation site)로 작용할 수 있기 때문에 그래핀에 비해 산화 그래핀 표면에서 ZnO 나노막대가 더 많이 성장 될 수 있다. 산화된 그래핀의 표면에 존재하는 산소 작용기는 (-) charge를 띄고, 수열 합성에 사용되는 용액에 존재하는 Zn^{2+} 이온은 (+) charge를 띄기 때문에 그래핀에 비해 더 많은 Zn^{2+} 이온이 흡착되어 더 많은 ZnO 나노막대가 성장할 수 있다.

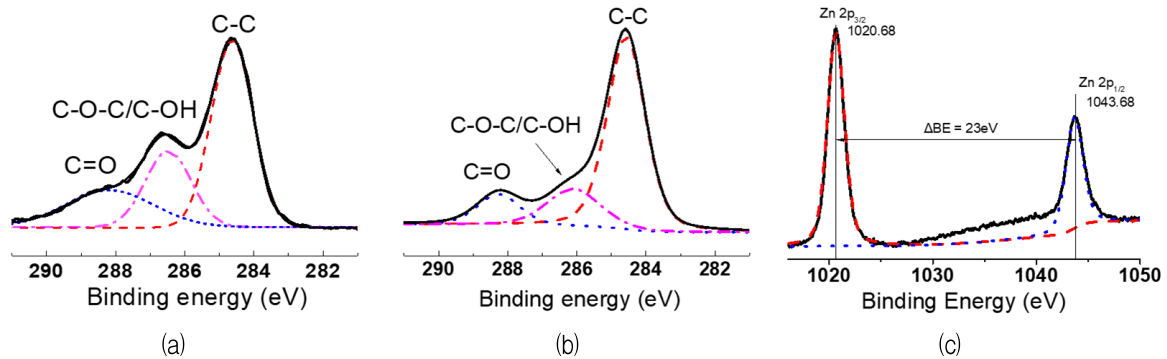


그림 8. OG-60에 성장된 ZnO 나노막대의 XPS 스펙트럼

(a) OG-60 C1s 스펙트럼, (b) ZnO/OG-60의 C1s 스펙트럼, (c) ZnO/OG-60의 Zn2p 스펙트럼

Fig. 8. XPS spectra (a) C1s spectrum of OG-60, (b) C1s spectrum of ZnO/OG-60, (c) Zn2p spectrum of ZnO/OG-60

이때 Zn^{2+} 이온은 에폭시(C-O-C), 카복실(C=O), 하이드록시기(C-OH) 순으로 흡착에너지가 높다[12]. 산화 그래핀의 XPS 분석 결과에 따르면 산화가 진행될수록 그래핀의 표면에는 에폭시기와 카복실기가 증가하기 때문에 Zn^{2+} 이온이 더 많이 흡착되어 직경은 증가하고 길이는 감소하게 된다.

4시간의 수열 합성을 통해 표면에 ZnO 나노막대가 성장한 OG-60의 XPS C1s, Zn2p 스펙트럼을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(c)에서 Zn2p 스펙트럼에서 $\text{Zn}2p_{3/2}$ (1020.68eV)와 $\text{Zn}2p_{1/2}$ (1043.68eV) peak의 결합에너지 차이가 23eV인 것으로 보아 Zn이 Zn^{2+} 형태로 결합하여 있음을 확인할 수 있다[13]. 또한 ZnO 나노막대의 성장 전 그림 8(a)에서 후의 C1s 스펙트럼을 비교하면 그림 8(b)에서 에폭시 산소 작용기 피크의 강도가 낮아진 것으로 보아 Zn^{2+} 이온이 산소 작용기에 흡착되어 강도가 낮아졌을 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 그래핀의 습식 산화 시간에 따른 그래핀의 표면 특성을 분석하고, 시드층 없이 ZnO 나노막대를 산화된 그래핀 위에 성장시켰다. 그래핀의 산화 시간에 따라 라만 그래프에서 그래핀의 결합 D-band가 순수그래핀의 0.24로부터 1.02, 1.49, 1.54까지 증가하였다. 이는 그래핀의 결합 밀도가 증가하거나 산화에 의한 구조적 손상이 증가했다고 판단 할 수 있으며, 추가로 XPS 분석을 통해 얻은 Graphitic Carbon과 Oxidized Carbon의 atomic % 는

OG-60에서 Oxidized Carbon 0.60으로 눈에 띄게 증가한 것을 확인하였다.

이를 통해 산화 시간별 산화 정도를 구분할 수 있었고, 산화 시간이 증가할수록 표면 결합 및 산소 작용기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 모든 산화 그래핀에서 ZnO 나노막대가 성장한 것을 XPS 분석을 통해 Zn이 결정 내에서 Zn^{2+} 상태로 존재하는 것을 확인했으며, 이는 ZnO 수열 합성 후 Oxidized Carbon의 감소 및 XRD 결과를 토대로 산화 그래핀의 산소 작용기에 Zn^{2+} 이온이 흡착되어 시드층 없이 산화 그래핀 위에 ZnO 나노막대가 성장한 것으로 보인다. 산화도가 증가함에 따라 산화 그래핀에 붙어있는 산소 작용기가 증가하고 이러한 결과는 ZnO 나노막대의 직경은 OG-120에서 OG-30에 비해 약 60 nm 증가하고, 길이는 0.9 μm 감소하는 경향을 보여준다.

본 연구 결과를 바탕으로 유연한 기관으로 산화 그래핀을 전사 후, ZnO 나노막대를 성장시켜 ZnO 나노막대가 가진 고유한 압전효과(Piezotronic effect)를 이용한 압전센서를 제작해 볼 예정이다.

References

- [1] Ü. Özgür and Y. I. Alivov, "A comprehensive review of ZnO materials and devices", Journal of Applied Physics, Vol. 98, No. 4, pp. 041301, Aug. 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>.
- [2] C. Dagdeviren, S.-H. Hwang, Y. Su, S. Kim, H. Cheng, O. Gur, R. Haney, F. G. Omenetto, Y.

- Huang, and J. A. Rogers, "Transient, biocompatible electronics and energy harvesters based on ZnO", *Small*, Vol. 9, No. 20, pp. 3398-3404, Oct. 2013. <https://doi.org/10.1002/sml.201300146>.
- [3] M. S. Al-Ruqeishi, Y. H. Al-Hadeethi, M. N. Al-Hamri, H. Al-Mawali, and A. J. Al-Hashmi, "Piezoelectric nanogenerator based on ZnO nanorods", *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 12, No. 8, pp. 5173-5179, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.12.010>.
- [4] L. Zhu, Y. Xiang, Y. Liu, K. Geng, R. Yao, and B. Li, "Comparison of piezoelectric responses of flexible tactile sensors based on hydrothermally-grown ZnO nanorods on ZnO seed layers with different thicknesses", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 341, pp. 113552, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113552>.
- [5] C. Lee, X. D. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science*, Vol. 321, No. 5887 pp. 385-388, Jul. 2008. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>.
- [6] H. J. Tan, Z. Zainal, N. A. Yusof, and W. J. Basirun, "Synthesis of high quality hydrothermally grown ZnO nanorods for photoelectrochemical cell electrode", *Ceramics International*, Vol. 8, No. 10, pp. 14194-14207, May 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.005>.
- [7] L. F. Chou, C. H. Lin, Y. T. Chen, and H. H. Hsieh, "Control of the size and density of ZnO-nanorods grown onto graphene nanoplatelets in aqueous suspensions", *Royal Society of Chemistry*, Vol. 6, pp. 83217-83225, Aug. 2016. <https://doi.org/10.1039/C6RA18317D>.
- [8] F. Hossein-Babaei and M. Akbari-Saatlu, "Growth of ZnO nanorods on the surface and edges of a multilayer graphene sheet", *Scripta Materialia*, Vol. 139, pp. 77-82, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.06.003>.
- [9] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, and P. D. Yang, "Nanowire dye-sensitized solar cells," *Nature Materials*, Vol. 4, pp. 455-459, May 2005. <https://doi.org/10.1038/nmat1387>.
- [10] C. Xu, J.-H. Lee, J.-C. Lee, B.-S. Kim, S. W. Hwang, and D. Whang, "Electrochemical growth of vertically aligned ZnO nanorod arrays on oxidized bi-layer graphene electrode", *CrystEngComm*, Vol. 13, No. 2011, pp. 6036-6039, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1039/C1CE05695F>.
- [11] A. A. K. King, B. R. Davies, N. Noorbehesht, P. Newman, T. L. Church, A. T. Harris, J. M. Razal, and A. I. Minett, "A new Raman metric for the characterisation of graphene oxide and its derivatives", *Scientific Reports*, Vol. 6, No. 19491, pp. 1-6, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1038/srep19491>.
- [12] Q. Kong, S. Preis, L. Li, P. Luo, C. Wei, Z. Li, Y. Hu, and C. Wei, "Efficient removal of heavy metal ions with an EDTA functionalized chitosan/graphene oxide composite", *Separation and Purification Technology*, Vol. 232, No. 1, pp. 115956-115964, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115956>.
- [13] M. Claros, M. Setka, Y. P. Jimenez, and S. Vallejos, "Metal oxide nanostructures and their applications in gas sensors", *Nanomaterials*, Vol. 10, No. 1, pp. 127-139, Jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10010127>.

저자소개

최 여 진 (Yeo Jin Choi)



20019년 2월 : 금오공과대학교
신소재공학과(공학사)
2021년 2월 : 금오공과대학교
신소재공학과(공학석사)
2022년 3월 ~ 현재 :
금오공과대학교 신소재공학과
박사과정

관심분야 : 나노소자, 화합물 반도체

안 성 진 (Sung Jin An)



20003년 2월 : 연세대학교
신소재공학과(공학사)
2008년 8월 : 포항공과대학교
신소재공학과(공학박사)
2010년 9월 ~ 현재 :
금오공과대학교 신소재공학과
교수

관심분야 : 나노소자, 화합물 반도체