

반응 온도에 따른 CoO/Co(OH)₂ 나노시트의 합성

이민정 · 윤가영 · 류경희[†]

경상국립대학교 나노·신소재공학부 세라믹공학전공

Synthesis of CoO/Co(OH)₂ Nanosheets Depending on Reaction Temperatures

Minjeong Lee, Gayoung Yoon, and Gyeong Hee Ryu[†]

School of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

(Received April 4, 2023 : Revised May 4, 2023 : Accepted May 15, 2023)

Abstract Transition metal oxides formed by a single or heterogeneous combination of transition metal ions and oxygen ions have various types of crystal structures, which can be classified as layered structures and non-layered structures. With non-layered structures, it is difficult to realize a two-dimensional structure using conventional synthesis methods. In this study, we report the synthesis of cobalt oxide into wafer-scale nanosheets using a surfactant-assisted method. A monolayer of ionized surfactant at the water-air interface acts as a flexible template for direct cobalt oxide crystallization below. The nanosheets synthesized on the water surface can be easily transferred to an arbitrary substrate. In addition, the synthesizing morphological and crystal structures of the nanosheets were analyzed according to the reaction temperatures. The electrochemical properties of the synthesized nanosheets were also measured at each temperature. The nanosheets synthesized at 70 °C exhibited higher catalytic properties for the oxygen evolution reaction than those synthesized at other temperatures. This work suggests the possibility of changing material performance by adjusting synthesis temperature when synthesizing 2D nanomaterials using a wide range of functional oxides, resulting in improved physical properties.

Key words cobalt oxides, nanosheets, surfactant-assisted method.

1. 서 론

나노 물질은 일반적으로 1~100 nm 크기를 가진 물질을 의미한다. 벌크 형태의 물질과는 달리 나노 물질은 넓은 표면적을 가지고 이에 기반한 표면에너지의 변화로 화학적 반응성 및 촉매 활성이 뛰어나다.¹⁾ 이로 인해서 최근 나노 물질 합성에 관한 연구²⁾ 및 벌크 형태의 물질을 나노 물질로 만들기 위한 연구³⁾가 활발하게 진행되고 있으며, band gap 2.2~2.4 eV를 가지는 CoO⁴⁾는 물리화학적 특성이 뛰어난 나노 물질 중 하나이다. 대표적인 전이금속산화물 중 하나인 cobalt oxide는 cobalt hydroxide, cobalt oxyhydroxide, cobalt monoxide, cobalt dioxide 등과 같은 다양한 화학양론 조성을 가지며,^{5,6)} 이에 따라 rocksalt, spinel, wurzite 등 다

양한 결정 구조를 가진다.⁷⁻⁹⁾ 내열성, 단열성, 광학적 특성, 물리화학적 특성이 우수한 cobalt oxide는 연료전지용 촉매,¹⁰⁾ 산화제¹¹⁾와 같은 화학 산업뿐만 아니라 압전 장치,¹²⁾ 가스 센서¹³⁾ 같은 장치를 만들기 위한 첨가제로 세라믹 산업에서도 유용하게 쓰인다. cobalt oxide는 nanorod,¹⁴⁾ nanowire,¹⁵⁾ nanofiber,¹⁶⁾ nanotube¹⁷⁾ 등 다양한 nanostructures로 구현되는데, 그 중 nanosheet로 형성될 경우 넓은 표면적에 기반한 짧은 전하 확산 거리와 넓은 표면 활성 부위로 인하여 높은 촉매 활성과 물리화학적 특성을 보인다.¹⁸⁾ 이러한 나노시트를 합성하기 위해서는 수열합성법,¹⁹⁾ 열분해법,²⁰⁾ 화학기상증착법²¹⁾ 등과 같은 방법이 존재하나, 이러한 방법들은 비용이 많이 들고, 입자의 형태 및 크기를 조절하기 어려우며 비 적층 결정구조²²⁾를 가지는 물질을

[†]Corresponding author

E-Mail : gh.ryu@gnu.ac.kr (G. H. Ryu, Gyeongsang Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

합성하기 어렵다는 한계가 있다. 하지만 surfactant-assistant method인 ionic layer epitaxy (ILE) 합성법²³⁻²⁵⁾을 활용하면 두께가 수 나노미터밖에 되지 않는 아주 얇은 비 적층 결정구조 물질을 합성할 수 있다.²⁶⁾ 우리는 본 연구에서 ILE 합성법을 이용하여 CoO/Co(OH)₂ 나노시트를 합성하였으며, 합성된 나노시트의 형상 및 성분에 대한 결과를 보고하고자 한다. 나노 물질은 입자의 크기와 두께 등과 같은 미세한 특징 변화에 따라 물리·전기화학적 특성이 크게 변하기 때문에 가장 높은 활성을 보이는 나노시트를 합성하기 위해서 합성 온도를 변경시켜 합성을 진행했다. 이를 통해 합성 온도가 어떠한 영향을 미치는지 분석하였으며, 두께와 물리·전기화학적 특성을 제어하여 가장 안정적이고 이상적인 CoO/Co(OH)₂ 나노시트를 합성하기 위한 조건을 규명하였다.

2. 실험방법

2.1. 합성

CoO/Co(OH)₂ 나노시트는 ILE 방법으로 합성되었다. 일반적인 합성 과정에서 Co nitrate 3 mM을 Di water 30 mL와 섞고 HMTA (hexamethylenetetramine) 12 mM을 Co nitrate와 마찬가지로 Di water 30 mL와 섞어준 후 이 두 수용액을 섞어 총 60 mL 수용액을 유리용기에 제조 하였다. 이어서, sodium hexadecyl sulfate 0.028 g가 포함된 chloroform 10 mL와 Oleylamine 0.0024 g 섞은 계면활성제 40 μ L를 수용액 표면에 분산시킨다. 그런 다음 수용액을 대기 중에 30분 동안 노출시킨다. 그 후 각각 60 °C, 70 °C, 80 °C로 설정된 convection oven에 넣어 3시간 동안 열처리 하였으며, 유리용기를 oven에서 꺼낸 다음 일반적으로 SiO₂로 코팅된 Si wafer를 사용하여 물-공기 계면에 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트를 scoop 하였다.

2.2. 형상 및 구조 분석

나노시트의 형태와 미세구조는 전계방사 주사전자현미경(FE-SEM, JEOL JSM-7610F, Japan), 투과전자현미경(TEM, FEI Titan3 G2)을 사용하여 조사하였다. 주사전자현미경(SEM, EM-30N)을 사용하여 표면의 미세 구조를 관찰하였다. 나노시트 두께의 지형적 특성은 원자간력현미경(AFM, Veeco Multimode V)으로 특성화 되었다. 나노시트의 결합 분석은 Al-Ka X-rays, 1,486.6 eV를 사용하는 X선 광전자 분광계(XPS, Thermofisher Scientific K-Alpha+)에서 수행되었다. 광학현미경(OM, BX53MRF-S)을 이용하여 표면의 시트 형성을 1차적으로 관찰하였다.

2.3. 전기화학적 물성 분석

Potentiostat (ZIVE SP1)에 연결된 3전극 시스템을 이용해 나노시트의 촉매 특성을 측정하였다. Pt 와이어 및 Hg/HgO 전극을 각각 상대전극, 기준전극으로 사용하였으며 Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) 유리 기판에 CoO/Co(OH)₂ 나노시트를 로딩하여 작업전극으로 사용하였다. 모든 FTO 유리 기판의 면적은 1 cm × 3 cm로 고정하였으며, FTO 유리 기판에 전사된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트는 안정성 확보를 위해서 500 °C air 분위기에서, 3시간 동안 baking treatment를 진행하였다. Linear Sweep Voltammetry (LSV)는 1.0 M의 KOH 전해질 및 reversible hydrogen electrode (RHE) scale에서 scan rate 10 mV s⁻¹로 측정되었고, Chronopotentiometric (CP) 또한 scan rate 10 mV s⁻¹로 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트들의 합성되는 개략도와 SEM 이미지를 보여준다. Fig. 1(a)에 개략적으로 도시된 바와 같이, Co nitrate 수용액과 HMTA 수용액을 섞은 수용액에 계면활성제를 떨어뜨리면 계면활성제에 녹아있는 sodium hexadecyl sulfate가 물에 녹아들려는 성질을 가지는데 이때 chloroform이 물에 녹지 못하도록 물 계면에서 잡아주는 역할을 하고 Oleylamine은 합성이 진행되는 동안 나노 입자의 형성에 영향을 미친다. chloroform을 30분간 날려준 후에는 공기가 chloroform의 역할을 대신하며 물-공기 계면에 sodium hexadecyl sulfate (SO₃⁻) 음이온과 수용액 속에 녹아 있던 Co²⁺ 금속 양이온이 붙어 ionic layer를 형성하게 된다. 이후 convection oven에서 열처리를 하게 되면 CoO/Co(OH)₂ 나노시트들이 합성된다. 생성된 나노시트들을 SiO₂로 코팅된 Si wafer 위에 옮겨 우선적으로 OM을 통해 관찰하였고, 합성된 나노시트의 형상을 더 자세히 확인하기 위해 SEM을 이용해 분석을 진행하였다. Fig. 1(b-d)는 각각 60 °C, 70 °C, 80 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)₂ 나노시트들의 동일한 배율에서의 OM 이미지를 나타낸다. Fig. 1(b)를 통해 60 °C에서 합성했을 때 가장 높은 빈도의 삼각형 island를 형성한 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 1(c)를 통해 70 °C에서 합성을 했을 때 합성된 sheet 위에 island가 깔려 중첩된 것을 확인할 수 있었다. 60 °C에도 중첩된 부분은 있었으나 70 °C에 비해서 빈도가 낮게 나타났다. Fig. 1(d)에서 80 °C에서 합성된 나노시트들이 sheet와 island가 중첩된 부분의 빈도가 가장 높게 나타났으나 삼각형 모양의 island는 확실하게 관찰할 수 없었다. Fig. 1(e-g)는 각각 60 °C, 70 °C, 80 °C에서 합성

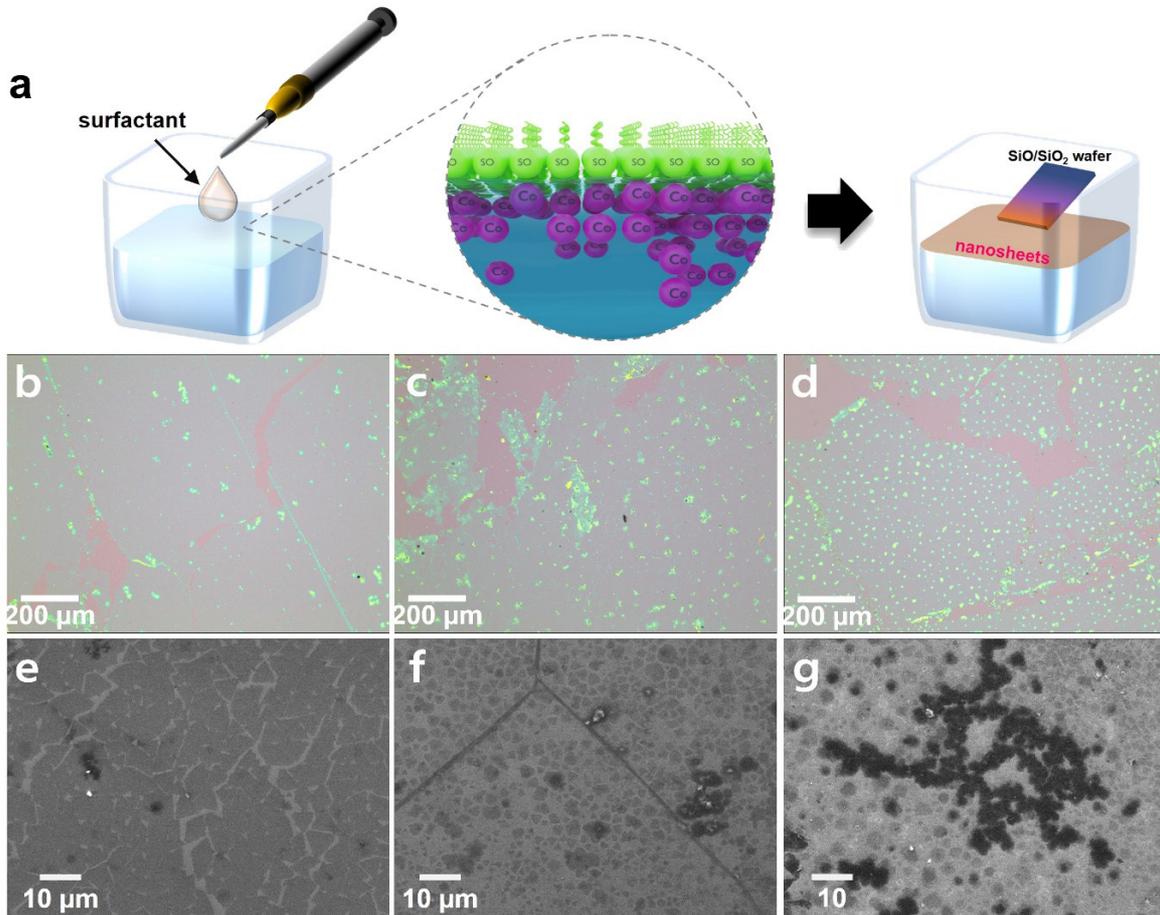


Fig. 1. Synthesis of CoO/Co(OH)_2 nanosheets. (a) Schematic illustration of the ILE synthesis of CoO/Co(OH)_2 nanosheets. (b-d) OM images of the nanosheets synthesized at 60 °C, 70 °C and 80 °C and (e-g) SEM images of the nanosheets synthesized at 60 °C, 70 °C and 80 °C respectively.

한 CoO/Co(OH)_2 나노시트들의 동일한 배율에서의 SEM 이미지를 나타낸다. 온도가 증가할수록 삼각형 island의 빈도가 높아지진 않으나 sheet 위에 island가 중첩된 형태의 빈도는 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 1(e)에서는 60 °C에서는 완벽한 삼각형 모양의 island 위주로 보이고, Fig. 1(f)에서는 70 °C에서 합성한 나노시트들은 OM 이미지와 동일하게 sheet 위에 island가 중첩된 것처럼 보인다. 또한 sheet가 접힌 듯한 모습을 보인다. Fig. 1(g)에서는 80 °C에서 합성된 나노시트들은 island의 삼각형 모양이 확실하게 관찰할 수 없었지만 시트들이 중첩된 부분을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 온도별로 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트의 두께 측정 결과를 보여 준다. Fig. 2(a-c)는 AFM을 통해 분석되었으며, 대략적인 Topography와 두께를 파악할 수 있었다. Fig. 2(d-f)는 Nanoscope를 이용해 이미지 프로세싱을 했으며, 이를 통해 얻은 데이터를 Origin을 이용해 시각화 하였다. Fig. 2(a)에서 60 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)_2 나

노시트는 작은 삼각형의 형태로 변이 매끄럽지 않고 시트 위에 작은 불순물들이 올라가 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(b)를 통해서 70 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트는 60 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트보다 큰 시트들이 접힌 형태로 형성되었음을 알 수 있고, 마지막으로 80 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트[Fig. 2(c)]는 60 °C 나노시트보다 큰 시트 위에 커다란 불순물들과 약간의 crack이 있는 것을 확인할 수 있다. Origin을 통해서 시각화한 그래프 Fig. 2(d-f)는 Si/SiO₂ wafer와 CoO/Co(OH)_2 나노시트 사이의 두께 차이를 보여 주고 있다. 온도별로 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트의 두께를 측정해본 결과 60 °C에서 1.6 nm, 70 °C, 80 °C에서 각각 3.8 nm, 3.4 nm로 나왔으며, 70 °C에서 가장 두껍다는 것을 알 수 있다. 80 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트는 60 °C에서 합성한 CoO/Co(OH)_2 나노시트보다 두꺼웠지만 80 °C CoO/Co(OH)_2 나노시트를 이미지 프로세싱 했을 때 유기물의 양이 많아서 그래프의 peak가 많이 튀었기 때문에 60 °C보

다 결과가 좋다고 할 수 없다.

Fig. 3은 온도별로 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트의 XPS O1s와 Co 2p 결과를 보여준다. O1s 스펙트럼에서 529.6 eV, 530.1 eV, 531.1 eV 및 532.1 eV의 결합 에너지 peak은 각각 Co₃O₄, Co-O, Co-OH, C=O peak으로 할당된다.²⁷⁾ 온도별로 합성을 한 CoO/Co(OH)₂ 나노시트의 O1s peak [Fig. 3(a)]를 기준으로 비교해보면 70 °C에서 열처리를 가하면 Co-O peak과 Co₃O₄ peak의 intensity가 높아지고 Co-OH peak의 intensity가 낮아지는 것을 볼 수 있고, 80 °C에서 열처리를 가하면 Co-O peak과 Co₃O₄ peak, Co-OH peak의 intensity가 60 °C 보다 더 낮아지고, C=O peak의 intensity가 높게 올라가는 것을 알 수 있다. XPS O1s 결과만 본다면

70 °C가 Co-O peak의 intensity가 높고 Co-OH peak의 intensity가 가진다. XPS Co 2p의 결과[Fig. 3(b)]를 보면 60 °C에서 열처리를 가했을 때의 Co₃O₄ peak이 70 °C에서 열처리를 가했을 때보다 intensity가 더 높게 나타나나 Co₃O₄ peak은 70 °C에서 가장 높은 intensity를 나타낸다. 그리고 80 °C에서 열처리를 한 것은 Co-O peak과 Co₃O₄ peak의 intensity가 60 °C 보다 낮고 Co-OH peak 또한 낮게 나타났다. 60 °C와 80 °C를 비교해보면 80 °C가 60 °C 보다 Co-OH peak이 더 높게 나타나지만 C=O peak의 intensity가 높은 것으로 보아, 합성된 나노시트에 많은 양의 불순물들이 함께 잔류함을 파악할 수 있다. O1s와 Co 2p의 결과를 종합하면 단순히 합성 온도가 높아질수록 화학적 결합 상태

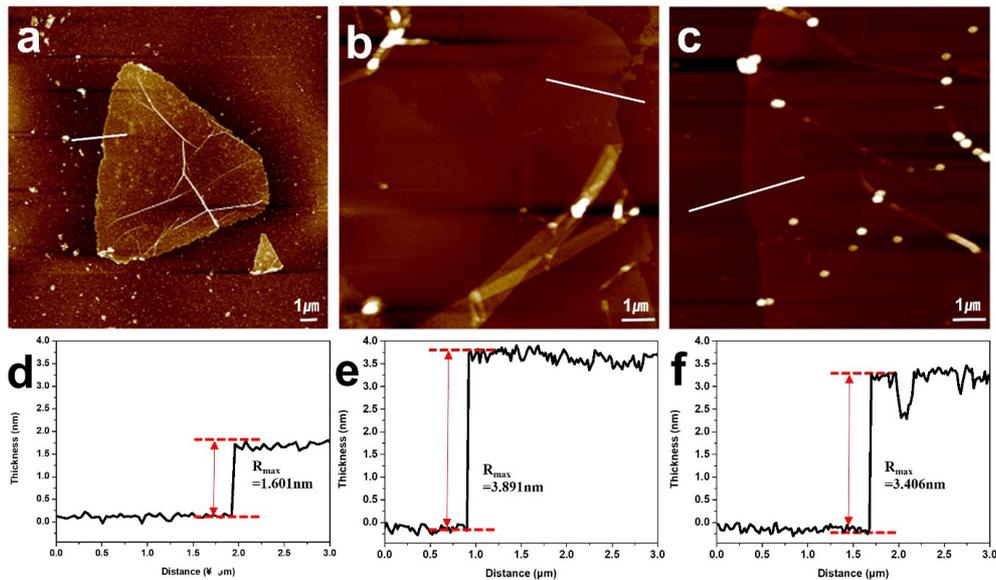


Fig. 2. Typical 2D AFM images of CoO/Co(OH)₂ nanosheets synthesized at (a) 60 °C, (b) 70 °C and (c) 80 °C. (d-f) Line profiles taken along the white line shown in (a), (b) and (c).

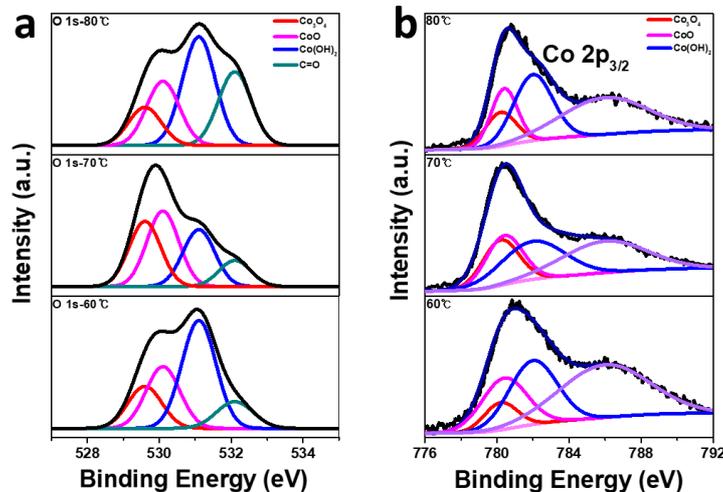


Fig. 3. (a, b) XPS spectra showing O 1s and Co 2p of the CoO/Co(OH)₂ nanosheets synthesized at 60 °C, 70 °C, and 80 °C respectively.

가 점진적으로 향상되는 것이 아니라, 70 °C 이상에서 합성된 나노시트의 경우, Co-OH peak보다 CoO peak들의 intensity가 현저히 높아지지만, 특정 온도 이상에서는 surfactant를 구성하던 유기물이 나노시트의 합성과정에 기여되면서 C=O peak의 intensity가 증가하게 된다.

온도별로 합성된 나노시트의 형상에 기반한 결정성과 결정의 방향성을 확인하기 위하여, TEM 분석을 진행하였다. Fig. 4는 온도별로 합성된 CoO/Co(OH)₂의 TEM 이미지들을 나타낸다. Fig. 1에서 OM 이미지와 SEM 이미지로 언급된 것과 같이, 합성된 나노시트가 TEM 그리드에 전체적으로 고르게 전사된 것을 파악할 수 있다. 전사가 균일하게 된 나노시트 영역에서는 selected area electron diffraction (SAED) pattern을 측정하였으며, 이는 온도별로 합성된 나노시트의 결정도를 파악할 수 있다. Fig. 4(a)는 60 °C에서 합성된 나노시트를 보여주며, 전사되는 과정에서 나노시트가 일부 구겨진 부분이 존재하지만, 전체적으로 나노시트의 양상을 유지하고 있으며, TEM 이미지의 contrast가 균일한 것으로 확인되었다. Fig. 4(b, c)는 각각 70 °C와 80 °C에서 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트들을 보여준다. 이들은 Fig. 4(a)와 달리, 나노시트 자체에 부분적

으로 contrast 차이가 나는 부분들이 존재하였고, 80 °C에서 합성된 나노시트의 TEM 이미지에서 더 뚜렷한 contrast 차이를 확인할 수 있었다. 이는, 합성온도가 높아짐에 따라, 나노시트의 두께 편차가 있음을 시사한다. 각 온도에서 합성된 나노시트가 SAED pattern의 양상을 비교하면, 전체적으로 균일한 contrast를 가지는 60 °C에서 합성된 나노시트 보다, 70 °C와 80 °C에서 합성된 나노시트들의 SAED pattern이 또렷한 spot 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 합성온도가 증가함에 따라, 결정성이 좋아짐을 시사한다. 그러나 70 °C와 80 °C의 SAED pattern의 spot의 형태가 차이가 나지 않는 것으로 보아, 70 °C 이상에서 합성된 나노시트의 결정성이 충분히 확보되는 것을 파악할 수 있고, Fig. 3에서 도출된 XPS 결과를 함께 적용하면, 합성을 시도한 온도조건 중 70 °C 이상에서는 결정성이 확보되지만, 80 °C의 경우에는, 비교적 Co(OH)₂의 형성비율이 높고, surfactant의 동일 함량 대비 합성 온도에 따른 불순물의 기여도가 높음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 온도별로 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트의 oxygen evolution reaction (OER) 특성을 전기화학적 분석을 통해 얻은 결과이다. 이는 온도별로 합성된 CoO/Co(OH)₂

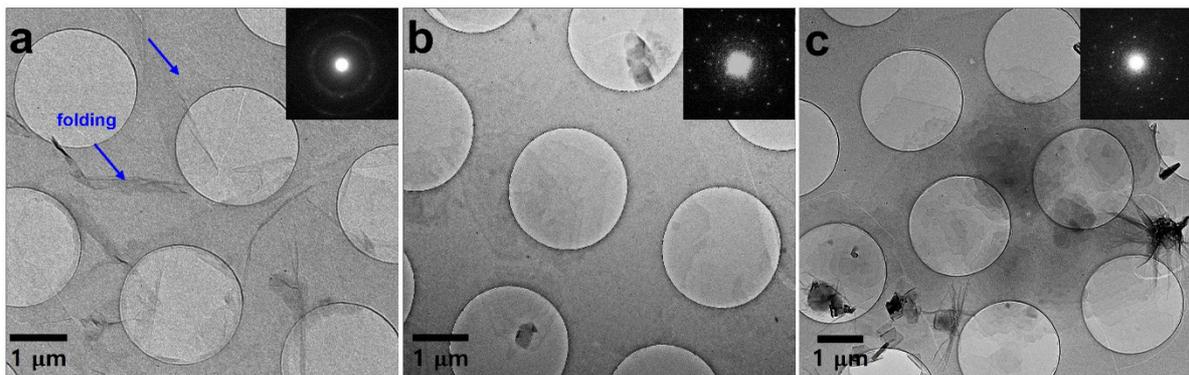


Fig. 4. TEM images of CoO/Co(OH)₂ nanosheets synthesized at (a) 60 °C, (b) 70 °C, and (c) 80 °C with its corresponding SAED pattern.

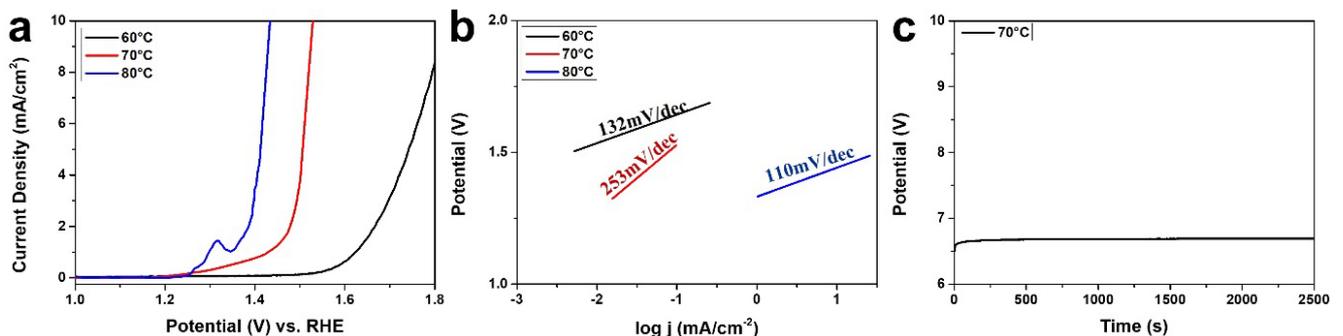


Fig. 5. (a) Polarization curves of CoO/Co(OH)₂ nanosheets and (b) Tafel slopes according to (a). (c) Chronopotentiometric consequence (responding potential generating current density vs operation time) of 70 °C.

나노시트의 SEM, AFM, XPS, TEM 분석 결과를 뒷받침하기 위해 진행되었으며, 전기화학적 분석을 진행하기 전 CoO/Co(OH)₂ 나노시트에 500 °C air 분위기에서, 3시간 동안 baking treatment를 통해 hydroxyl기의 영향을 줄여 나노시트의 안정성을 확보하였다. Fig. 5(a)는 post-treatment를 마친 FTO glass에 전사된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트를 작업전극으로 1.0 M의 KOH 전해질 및 reversible hydrogen electrode (RHE) scale에서 scan rate 10 mV s⁻¹로 측정된 선형 주사 전압-전류 분극 곡선(linear sweep voltammetry)이다. 그래프는 80 °C, 70 °C, 60 °C 순서대로 반응이 일어나는 것을 보여 주는데, 80 °C에서 합성된 나노시트의 곡선은 peak가 비정상적으로 튀어 있는 것을 확인할 수 있다.²⁸⁾ 이에 따라 다른 분석 결과를 적용했을 때, 80 °C에서 합성된 나노시트는 결정성은 우수하지만 불순물의 기여도가 높기에 70 °C, 60 °C에서 합성된 나노시트보다 전기화학적 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 과전압에 대한 전기화학 반응 속도를 나타내는 Tafel slope이며, 다음 식 (1)을 통해서 계산된다.²⁹⁾

$$\text{Tafel equation : } \eta = a + b \log(j) \quad (1)$$

여기서, η 는 과전압을 나타내고, j 는 전류 밀도, b 는 Tafel 기울기를 나타낸다. Tafel 기울기의 값이 낮을수록 더 낮은 과전압 값이 필요하단 걸 의미하므로 반응속도가 더 빨라져 우수한 전기화학적 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)에서 80 °C, 60 °C, 70 °C 순서로 Tafel 기울기의 값이 낮게 나타났는데, 80 °C에서 합성된 나노시트의 기울기 값이 가장 낮았지만 선형 주사 전압-전류 분극 곡선[Fig. 5(a)] 결과와 함께 보았을 때 80 °C는 유기물의 영향과 합성된 나노시트에 잔재하는 hydroxyl기의 영향이 크기 때문에 우수한 활성을 보인다고 할 수 없다.³⁰⁾ Fig. 5(c)는 주어진 시간 동안 과전압 변화를 측정하는 시간대 전위차법(chronopotentiometry) 그래프이다. 60 °C, 70 °C, 80 °C 순서대로 측정을 진행했을 때 주어진 시간 동안 일정하게 과전압 값을 유지하였으며, 가장 높은 과전압 값을 보인 것은 70 °C에서 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트였다. 전기화학적 분석을 통해 얻은 OER 결과를 종합해 보면 선형 주사 전압-전류 분극 곡선과 시간대전위차법에서는 70 °C에서 합성된 CoO/Co(OH)₂가 나노시트가 가장 우수한 전기화학적 성능을 나타냈지만 Tafel slope에서는 가장 낮은 활성을 보여 주었다. 하지만 Figs. 3 and 4를 통해서 도출된 결과를 적용하면 가장 우수한 결정성과 성분 분석 결과를 보인 것이 70 °C 나노시트였고, Tafel slope를 제외한 모든 전기화학적 성능 평가에서 가장 높은 활성을 보인 것

또한 70 °C였기 때문에 70 °C에서 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트가 가장 우수하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 surfactant-assisted method를 이용하여 온도별로 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트를 형상 및 성분 분석을 진행하였다. 온도는 60 °C, 70 °C, 80 °C로 조절되었으며, CoO/Co(OH)₂ 나노시트의 형상을 OM 및 SEM으로 관찰한 결과, 80 °C에서 가장 높은 빈도의 sheets와 삼각형 형상의 islands가 형성되는 것을 확인하였다. AFM으로 합성된 나노시트의 topography와 두께를 측정했을 때, 70 °C에서 3.8 nm으로 가장 두꺼운 CoO/Co(OH)₂ 나노시트가 합성되는 것을 확인하였다. XPS 분석을 통해서 온도별로 합성된 CoO/Co(OH)₂ 나노시트의 성분 분석을 진행하였고, 70 °C에서 합성된 나노시트가 다른 온도에서 합성된 나노시트보다 Co-O peak의 intensity가 높지만 hydroxyl기의 영향이 작은 것을 확인하였다. 나노시트의 형상에 기반한 결정성을 확인하기 위해 TEM으로 관찰한 결과, 합성 온도가 높아질수록 결정성이 좋아졌지만 80 °C 나노시트에서 불순물의 기여도가 높은 것을 확인했다. 마지막으로 OER 특성을 전기화학적 분석을 통해 확인하였으며, 전기화학적 성능 평가에서 70 °C 나노시트가 가장 우수한 활성을 보이는 것을 확인하였다. 80 °C에서 가장 높은 빈도의 sheets와 islands가 합성되었고 결정성도 높았지만 hydroxyl기의 영향에 따른 불순물의 기여도가 높아서 전기화학적 성능이 좋지 않았기에 이상적인 결과라고 할 수 없으며, 이에 따라 CoO/Co(OH)₂ 나노시트가 합성되기 위한 가장 이상적인 조건은 70 °C임을 확인하였다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1F1A1068161) and Regional Innovation Strategy (RIS) through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2021RIS-003).

References

1. W. S. Kang, J. Korean Inst. Surf. Eng., **49**, 382 (2016).
2. M. Ramrakhiani, Recent Res. Sci. Technol., **4**, 14 (2012).
3. F. Neuberger, J. Baranyai, T. Schmidt, T. Cottre, B. Kaiser,

- W. Jaegermann and R. Schäfer, *Z. Phys. Chem.*, **234**, 847 (2020).
4. R. Shokrani-Havigh and Y. Azizian-Kalandaragh, *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **19**, 283 (2017).
 5. M. S. Burke, M. G. Kast, L. Trotochaud, A. M. Smith and S. W. Boettcher, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 3638 (2015).
 6. K. Cysewska, M. Zając, M. Łapiński, J. Karczewski, M. K. Rybarczyk, B. Kamecki and S. Molin, *Energy Technol.*, **9**, 2100688 (2021).
 7. K. Y. Jang, S. J. Ahn, J. H. Kwon, K. M. Nam and Y. H. Kim, *J. Phys. Chem. C*, **123**, 10689 (2019).
 8. J. Chen, X. Wu and A. Selloni, *Phys. Rev. B*, **83**, 245204 (2011).
 9. L. J. Cardenas-Flechas, J. J. Barba-Ortega and M. R. Joya, *Cerâmica*, **68**, 52 (2022).
 10. Y. Zhou, C. K. Dong, L. L. Han, J. Yang and X. W. Du, *ACS Catal.*, **6**, 6699 (2016).
 11. H. Feizi, R. Bagheri, Z. Song, J. R. Shen, S. I. Allakhverdiev and M. M. Najafpour, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **7**, 6093 (2019).
 12. S. Ojha, S. Paria, S. K. Karan, S. K. Si, A. Maitra, A. K. Das, L. Halder, A. Bera, A. De and B. B. Khatua, *Nanoscale*, **11**, 22989 (2019).
 13. D. H. Kim, H. Kang, N.-J. Choi, K. H. Park and H. K. Lee, *Sens. Actuators, B*, **248**, 987 (2017).
 14. D. Han, Y. Ji, F. Gu and Z. Wang, *J. Colloid Interface Sci.*, **531**, 320 (2018).
 15. C. C. Li, Q. H. Li, L. B. Chen and T. H. Wang, *J. Mater. Chem.*, **21**, 11867 (2011).
 16. M. Diab, M. Volokh, B. Moshofsky, I. Jen-La Plante, K. Flomin, E. Chockler and T. Mokari, *Isr. J. Chem.*, **52**, 1081 (2012).
 17. F. Piri, N. Shakour, M. Zandi and R. Karimian, *J. Nanostruct.*, **1**, 39 (2011).
 18. R. Hinterding and A. Feldhoff, *Z. Phys. Chem.*, **233**, 117 (2018).
 19. S. N. F. Moridon, M. N. I. Salehmin, K. Arifin, L. J. Minggu and M. B. Kassim, *Appl. Sci.*, **11**, 3031 (2011).
 20. Y. H. Jin, H. W. Shim and D. W. Kim, *J. Korean Ceram. Soc.*, **48**, 636 (2011).
 21. T. Maruyama and T. Nakai, *Sol. Energy Mater.*, **23**, 25 (1991).
 22. Y. Wang, Z. Zhang, Y. Mao and X. Wang, *Energy Environ. Sci.*, **13**, 3993 (2020).
 23. F. Wang, Y. Yu, X. Yin, P. Tiam and X. Wang, *J. Mater. Chem.*, **5**, 9060 (2017).
 24. G. H. Jeong, D. H. Nam and G. H. Ryu, *Korean J. Mater. Res.*, **32**, 153 (2022).
 25. X. Yin, Q. Chen, P. Tian, P. Zhang, Z. Zhang, P. M. Voyles and X. Wang, *Chem. Mater.*, **30**, 3308 (2018).
 26. Y. Wang, Y. Shi, Z. Zhang, C. Carlos, C. Zhang, K. Bhawnani, J. Li, J. Wang, P. M. Voyles, I. Szlufarska and X. Wang, *Chem. Mater.*, **31**, 9040 (2019).
 27. X.-C. Li, F.-S. She, D. Shen, C.-P. Liu, L.-H. Chen, Y. Li, Z. Deng, Z.-H. Chen and H.-E. Wang, *RSC Adv.*, **8**, 28623 (2018).
 28. F. Dionigi, J. Zhu, Z. Zeng, T. Merzdorf, H. Sarodnik, M. Glielich L. Pan, W. X. Li, J. Greeley and P. Strasser, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **60**, 14446 (2021).
 29. S. M. Park, M. J. Jang, Y. S. Park, J. Lee, J.-Y. Jeong, J. Jung, M.-K. Choi, Y.-S. Noh, M.-H. Seo, H. J. Kim, J. Yang, Y. D. Kim and S. M. Choi, *Korean J. Met. Mater.*, **58**, 49 (2019).
 30. R. Farhat, J. Dhainy and L. I. Halaoui, *ACS Catal.*, **10**, 20 (2019).

<저자소개>

이민정

경상국립대학교 나노·신소재공학부 세라믹공학전공 학부생

윤가영

경상국립대학교 나노·신소재공학부 세라믹공학전공 학부생

류경희

경상국립대학교 나노·신소재공학부 세라믹공학전공 조교수