

2종의 금속 산화물 나노구조체를 이용한 샤프심 전극 기반의 비효소적 H₂O₂ 센서

송민정*

서경대학교 나노융합공학과
02713 서울시 성북구 서경로 124
(2025년 2월 13일 접수, 2025년 2월 20일 수정본 접수, 2025년 6월 13일 채택)

Non-enzymatic H₂O₂ Electrochemical Sensor Based on Pencil Graphite Electrode Using Two Types of Metal Oxides Nanostructures

Min-Jung Song*

Department of Nano Convergence Engineering, Seokyeong University, 124 Seokyeong-ro, Sungbuk-gu, Seoul, 02713, Korea
(Received 13 February 2025; Received in revised from 20 February 2025; Accepted 13 June 2025)

요 약

본 연구에서는 다양한 분야에서 광범위하게 사용할 수 있는 저가의 일회용 전기화학센서 개발을 위해 샤프심 전극(PGE)을 기반으로 2종의 금속 산화물 CuO와 NiO 나노구조체를 도입하여 PGE/CuO/NiO 전극을 제작하고, 비효소적 H₂O₂ 검출용 전기화학센서에 적용하였다. PGE/CuO/NiO 전극은 PGE의 전처리 공정과 CuO 및 NiO 나노구조체의 전기화학적 합성 공정을 통해 제작되었으며, 시간대전류법(CA)과 순환전압 전류법(CV), 전기화학 임피던스(EIS) 분석법을 이용하여 분석되었다. PGE 전극에 2종의 금속 산화물의 접목은 전극과 산화-환원 화학종 간의 직접적이고 효율적인 전자전달과 전극의 전도도 및 유효면적 증가 등 전기화학적 특성 향상을 가져왔다. 이는 NiO와 CuO의 접목을 통해 NiO에서의 Ni³⁺ 이온 생성 증가와 함께 전하 캐리어 농도 증가에 기인한 것으로, 결과적으로 NiO NPs와 CuO NPs의 시너지 효과 덕분에 전기화학적 센싱 성능도 향상되었다. 본 연구의 결과를 기반으로 다양한 나노구조체 도입 및 표면 개질을 통해 저가의 고성능 일회용 전극 소재 및 센서 개발에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – We developed the PGE/CuO/NiO electrode as low-cost, disposable electrode material and it was applied to non-enzymatic electrochemical sensor for H₂O₂ detection. The PGE/CuO/NiO electrode was based on pencil lead using CuO and NiO nanostructures. This electrode was fabricated through the pretreatment processes of PGE and electrochemical deposition of CuO and NiO nanostructures. And it was analyzed using chronoamperometry (CA), cyclic voltammetry (CV), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques. The integration of two metal oxides onto the PGE electrode improved its electrochemical properties, including direct and efficient electron transfer between the electrode and redox species, as well as enhanced conductivity and effective surface area of the electrode. It is attributed to the increased generation of Ni³⁺ in NiO and the resulting increase in charge carrier concentration through the integration of NiO and CuO. As a result, its electrochemical sensing performance was enhanced due to the synergistic effect of NiO NPs and CuO NPs. Based on the results of this study, it is expected that it can be applied to the development of low-cost, high-performance disposable electrode materials and electrochemical sensors through the introduction of various nanomaterials and surface modification.

Keywords: Pencil graphite electrode, Copper oxide, Nickel oxide, Non-enzymatic sensor, Hydrogen peroxide

1. 서 론

과산화수소(H₂O₂)는 임상 및 생물학 연구, 환경 모니터링, 식품 또는 섬유 제조 산업 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 최근에는 비효소적 전기화학 센서를 이용한 검출이 주로 이용되고 있다. 특히, 임상에서는 당뇨 및 신장 질환, 암 및 노화 등 여러 질병의 진단을

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mjsong@skuniv.ac.kr

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.

위한 전신 산화 스트레스의 지표로 상용화되고 있어 빠르고 정확한 분석이 무엇보다 중요하다. 또한, 대부분의 의료 현장에서는 감염 문제 등의 우려로 인해 한 번 사용하고 폐기할 수 있는 일회용 센서를 선호하기 때문에 [1,2] 고감도의 H_2O_2 검출용 일회용 전기화학 센서 개발이 필요하다.

전기화학센서의 성능은 전극 재료에 의해 크게 영향을 받는데, 일반적으로 전기화학적 검출 과정에서 H_2O_2 의 느린 산화-환원 속도와 높은 과전압은 전극 재료의 성능을 저하시킬 수 있기 때문에 빠르고 정확한 H_2O_2 검출을 위한 전기화학 센서 개발에 있어 전기적 촉매는 중요한 구성 요소이다 [1]. 탄소는 낮은 가격, 계층적 다공성 구조, 넓은 전압 범위, 화학적 안정성, 우수한 상용성, 높은 표면적, 우수한 전도성 등의 특징들 덕분에 전기화학 분석에 널리 이용되고 있다 [3]. 또한, 탄소 기반 물질들은 다른 물질과 강력한 공유 결합을 형성할 수 있어 다양한 하이브리드 물질로 활용 가능하며, 금속이나 금속 산화물 및 전도성 고분자 등과 같은 전기적 촉매 재료에 대한 지지체로도 사용되고 있다. 탄소 기반 소재들 중 Pencil graphite electrode (PGE)는 높은 전기화학적 반응성, 변형 용이성, 상업적 이용 가능성, 우수한 기계적 강성, 일회용성 및 저렴한 가격 등의 이유로 최근 각광받고 있다 [4,5].

Copper oxide (CuO)는 좁은 밴드갭(1.2 eV)을 갖는 p-type 금속 산화물 반도체로, 알칼리 조건에서 Cu(II)/Cu(III)의 산화-환원 반응을 크게 촉진시키고 전자 전달이 우수하여 높은 감도와 좋은 catalytic activity, 높은 비표면적과 화학적 안정성, 낮은 생산 비용 등 우수한 특징을 보인다 [6]. 그러나, 높은 작동 전압과 열악한 안정성 등의 문제로 사용이 제한적이라는 한계가 있지만, 이 문제는 다른 나노구조체의 접목을 통해 기존 촉매의 제약과 단점을 보완하고 나노구조체들 간의 시너지 효과와 전자 효과에 의해 안정성과 감도를 향상시킴으로써 해결할 수 있다 [7]. 또 다른 p-type 반도체 물질인 Nickel oxide (NiO)은 구조적 안정성과 우수한 전도성, 낮은 비용, 친환경적 특성 등의 우수한 특징들 덕분에 많은 분야에서 활용되고 있으며, 특히 전기화학적 안정성, 촉매 활성, 생체 적합성 등이 우수하여 비효소적 바이오센서 분야에도 널리 사용되고 있다 [1,7-10].

본 연구에서는 PGE 전극 위에 이중의 금속 산화물인 CuO와 NiO를 전기적 촉매 물질로 접목하여 전극을 제작하고, 이 전극에 대한 전기화학적 특성과 이를 활용한 비효소적 H_2O_2 센서의 성능을 조사하였다.

2. 실험

2-1. 실험 재료

Hydrogen peroxide (H_2O_2 , 30%)와 potassium ferricyanide ($K_3Fe(CN)_6$), potassium ferrocyanide ($K_4Fe(CN)_6$), sodium hydroxide (NaOH), copper (II) nitrate trihydrate ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$), nickel (II) sulfate hexahydrate ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$), potassium nitrate (KNO_3)은 삼진순약(Samchun Chemical, Gyeonggi-do, Korea)으로부터 공급받았으며, 본 연구에서는 작업 전극 물질로 B 샤프심(0.7 mm diameter and 60.0 mm length, Jedo plus, Korea)을 구매하여 샤프심의 끝부분 10 mm만 노출시켜 전기화학 실험에 사용하였다.

2-2. 실험 방법

Fig. 1은 PGE/CuO/NiO 전극의 제작 과정과 이 전극에서의 H_2O_2 검출 메커니즘에 대한 모식도를 보여준다. 시판된 샤프심은 400 °C의 전기로(furnace)에서 20분 동안 열처리를 통해 샤프심에 함유된 clay 및 binder 물질들을 제거하고 전기화학적 전처리 방법으로 전극 표면을 활성화시킨 후 사용되었다. 전기화학적 전처리는 순환전압전류법(cyclic voltammetry; CV)을 이용하여 0.1 M NaOH 수용액에서 -0.4 V ~ +1.0 V의 전압을 가하여 50 mV/s의 주사 속도(scan rate) 하에서 7 cycles 수행되었고 증류수로 세척 후 상온에서 건조되었다 [11,12]. CuO NPs와 NiO NPs는 각각 두 단계의 금속 나노입자 합성과 산화물로의 산화 공정을 통해 다음의 조건 하에서 순환전압전류법을 이용한 전기화학적 증착(electrochemical deposition)으로 전처리된 PGE 표면 위에 순차적으로 합성되었다 [8,12-13].

1) CuO NPs 합성

1-1) Cu NPs 합성: 0.01 M $Cu(NO_3)_2$ 와 0.1 M KNO_3 의 혼합 용액에서 -0.7 V ~ +0.8 V의 전압 범위 내 25 mV/s의 주사 속도로 40 cycles

1-2) CuO로의 산화: 0.05 M NaOH 용액에서 0.0 V ~ +0.8의 전압 범위 내 100 mV/s의 주사 속도로 40 cycles

2) NiO NPs 합성

2-1) Ni NPs 합성: 0.01 M $NiSO_4$ 와 0.1 M KNO_3 의 혼합 용액에서 -1.5 V ~ +0.5 V의 전압 범위 내 25 mV/s의 주사 속도로 40 cycles

2-2) NiO로의 산화: 0.05 M NaOH 용액에서 0.0 V ~ +0.8의 전압 범위 내 100 mV/s의 주사 속도로 40 cycles

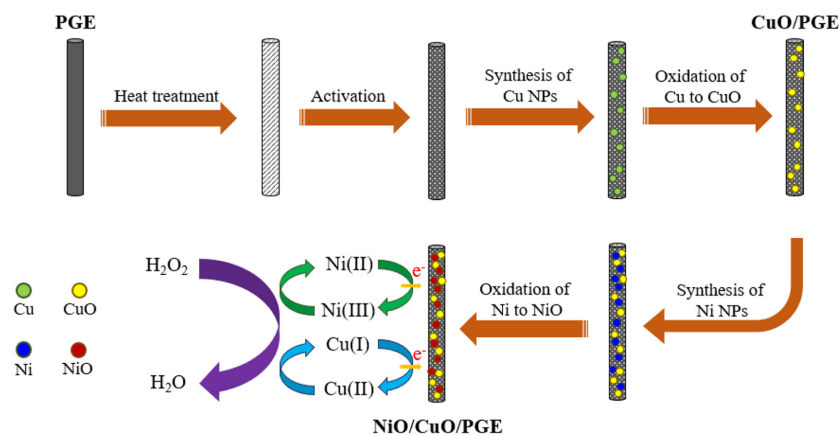
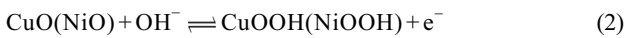
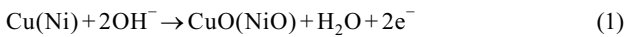


Fig. 1. Schematic illustration for preparation of the PGE/CuO/NiO and the electrocatalytic mechanism of CuO and NiO nanostructures for the reduction of H_2O_2 .

본 연구에서의 모든 전기화학 실험은 Ag/AgCl 기준전극과 Pt wire 상대전극, PGE/CuO/NiO 작업전극으로 구성된 전기화학적 3 전극 셀 시스템을 이용하였으며, 전기화학적 분석은 시간대전류법 (chronoamperometry; CA)과 순환전압전류법, 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)을 통해 수행되었다. 전극 표면의 morphology와 화학적 조성은 FE-SEM과 EDS (Hitachi S-4800, Tokyo, Japan)에 의해 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

CuO NPs과 NiO NPs의 전기화학적 합성 메커니즘은 식 (1)과 (2)와 같다[8,13].



CuO NPs과 NiO NPs는 이 반응들에 의한 전기화학적 증착을 통해 PGE 전극 표면 위에 합성되었으며, 이는 SEM과 EDS 분석으로 확인하였다(Fig. 2). Fig. 2(a)에서 전기화학적으로 증착된 금속 산화물 나노입자들이 PGE 전극 표면에 전체적으로 고르게 합성된 것을 볼 수 있으며, Fig. 2(b)의 EDS mapping scanning 결과로부터 Cu와 Ni 원소가 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는

CuO와 NiO의 금속 산화물 나노입자들이 PGE 전극 표면에 잘 합성되었음을 의미한다[14].

PGE/CuO/NiO 전극에 대한 전기화학적 특성 분석을 위해 5 mM Fe(CN)₆^{3-/4-}를 포함한 0.1 M KCl 수용액에서 CV와 EIS를 측정하였다(Fig. 3). Fig. 3(a)는 -0.7 V~0.8 V의 전압 구간과 50 mV/s의 주사속도 조건 하에서 측정된 bare PGE 전극과 PGE/CuO/NiO 전극의 CV diagrams이다. Bare PGE 전극과 달리 PGE/CuO/NiO 전극은 $E_{pa} = 0.50$ V와 $E_{pc} = 0.11$ V에서 뚜렷하고 높은 한 쌍의 준가역 산화-환원 피크(quasi-reversible redox peaks)를 가지며, 약 0.39 V의 작은 ΔE_p 값을 보인다. ΔE_p 는 전기화학 반응에서의 가역 정도를 내포하는 것으로, 이 값이 작을수록 전극과 산화-환원 화학종 간의 직접적이고 효율적인 전자전달이 이루어지고 있음을 의미한다[15]. 또한, PGE/CuO/NiO 전극의 electrochemical response는 크게 증가하였으며, 각각 $i_{pa} = 0.995$ mA와 $i_{pc} = -0.988$ mA의 산화-환원 피크 전류값을 갖는다. 일반적으로 피크 전류의 증가는 전극의 전도도 향상을 내포하며, 거의 1.0에 근접한 산화-환원 피크 전류 간의 비($i_{pd}/i_{pa} \approx 1.01$)는 전극에서 다른 복잡한 부반응이 없는 Fe(CN)₆^{3-/4-} 산화-환원 반응이 준가역 반응이라는 것을 나타낸다[15].

전극 계면에서의 전기화학적 특성은 EIS 분석을 통해 조사하였다. 이 실험은 0.305 V의 formal potential과 5 mV의 applied amplitude, 0.05~10⁴ Hz의 주파수 범위에서 수행되어 Fig. 3(b)의 Nyquist plot을 얻었다. 높은 주파수 구간인 반원(semi-circle)은 전극 계면에서의

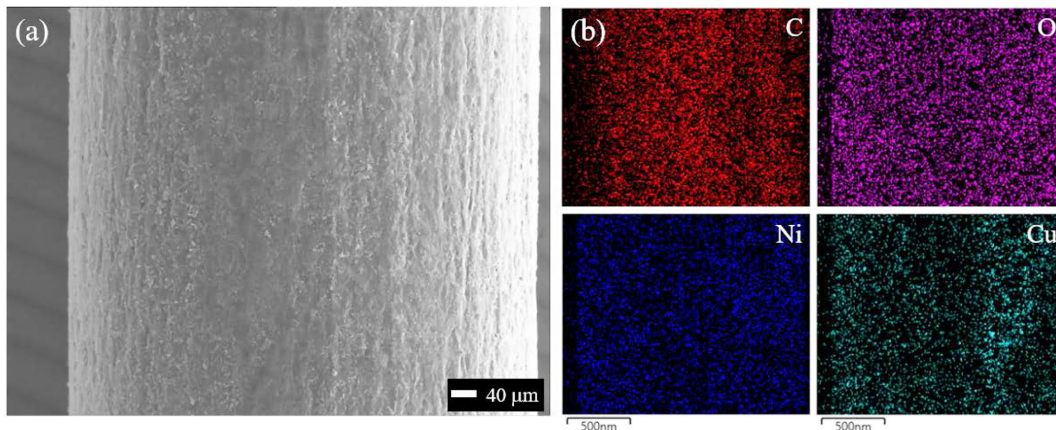


Fig. 2. (a) SEM image and (b) EDS elemental mapping of the PGE/CuO/NiO electrode.

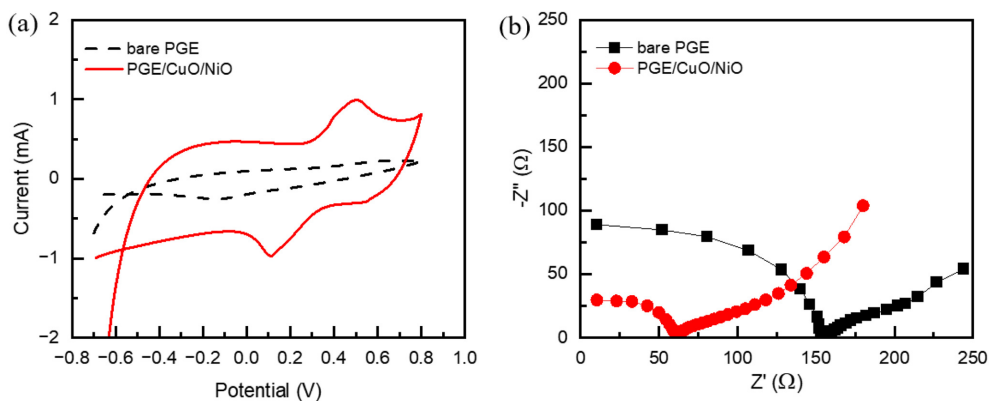


Fig. 3. (a) Cyclic voltammograms of the modified PGE electrodes in a 3 M KCl solution containing 5 mM Fe(CN)₆^{3-/4-} at a scan rate of 50 mV/s. (b) Nyquist plot of the EIS for the modified PEG electrodes in a 0.1 M KCl solution including 5 mM Fe(CN)₆^{3-/4-} at a formal potential of 0.3 V.

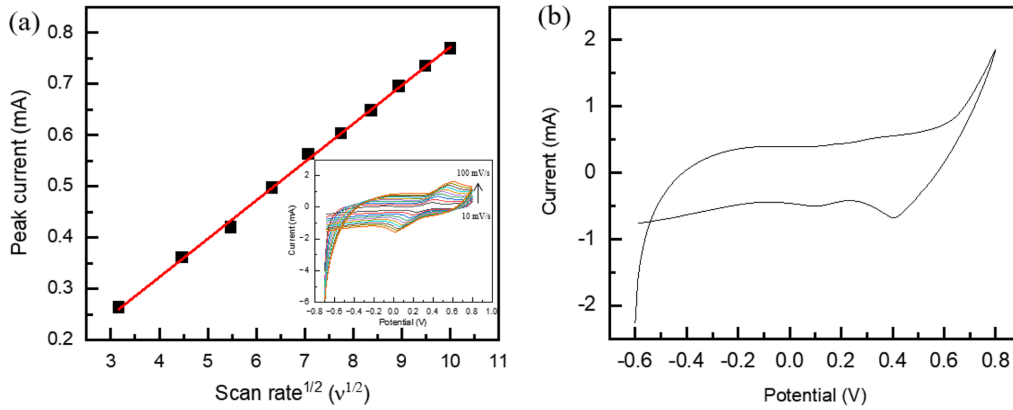


Fig. 4. (a) Peak currents as a function of scan rate for the PGE/CuO/NiO electrode. Inset: Its CV diagrams in a 3 M KCl solution containing 10 mM $K_3Fe(CN)_6$ at various scan rates. (b) CV diagram for the PGE/CuO/NiO electrode in a 0.1 M NaOH solution at scan rate of 50 mV/s.

$Fe(CN)_6^{3-/4}$ 산화-환원 반응에 의한 electron-transfer kinetics에 관여하고, 이 반원의 지름(diameter)은 electron transfer resistance (R_{et}) 값을 나타낸다. R_{et} 값이 작을수록 전극의 electrochemical activity는 향상되고 더 효율적인 electron transfer가 이루어진다[16]. PGE/CuO/NiO 전극의 R_{et} 는 bare PGE(약 60 Ω 정도)에 비해 작은 값을 보임에 따라 CuO NPs와 NiO NPs의 도입을 통해 PGE 전극의 전기화학적 특성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4(a)는 다양한 주사속도에서 PGE/CuO/NiO 전극의 피크 전류값을 plot한 것이다. 이 실험은 10 mM $K_3Fe(CN)_6$ 를 함유한 3 M KCl 수용액에 PGE/CuO/NiO 전극을 담지하여 주사속도를 변화시키면서 CV를 측정함으로써 수행되었다. PGE/CuO/NiO 전극의 피크 전류는 주사속도의 제곱근($v^{1/2}$)에 선형적으로 비례하는 결과를 보이며($I_{pa} = 0.0232 + 0.07488 \times v^{1/2}$; $R^2 = 0.99868$), 주로 전극의 표면 확산에 의해 물질 전달이 이루어지고 있음을 알 수 있다[17]. 이 그래프에서의 기울기($I_p/v^{1/2}$)는 약 0.07488($R^2 = 0.99851$)이고, Randles-Seveik equation[18]에 의해 전극의 유효 표면적(A)은 대략 2.4135 cm^2 정도로 계산된다. 이는 실험에 사용된 샤프침의 겉보기 면적(geometric area; 0.2199 cm^2)과 비교하여 약 11배 정도의 면적 증가 효과를 보였다.

Fig. 4(b)는 0.1 M NaOH 용액에서 50 mV/s의 주사속도에서의 PGE/CuO/NiO 전극에 대한 CV diagram이다. 알칼리 조건에서 보이는 한 쌍의 산화-환원 피크는 Ni^{2+}/Ni^{3+} 와/또는 Cu^+/Cu^{2+} 에 대한 것으로, PGE 전극 표면 위에 CuO-NiO 층이 형성되었음을 나타낸다[7].

H_2O_2 에 대한 CuO-NiO의 전기촉매 반응 메커니즘은 식 (3)와 같이 제안되며, Fig. 1에서 모식적으로 보여준다[7,19].

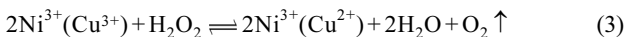


Fig. 5는 PGE/CuO/NiO 전극에서의 H_2O_2 농도에 대한 calibration curve이다. 이 실험은 다양한 농도의 H_2O_2 용액에서 +0.4 V의 일정한 전압을 가하여 amperometric current response를 측정하였다. PGE/CuO/NiO 전극은 저농도 구간(0.07~0.5 mM)에서 $I[\mu A] = 3.49562 + 1.74514 \times C_{H_2O_2}[mM]$ ($R^2 = 0.99364$)와 고농도 구간(0.5~37.5 mM)에서 $I[\mu A] = 4.12549 + 0.34544 \times C_{H_2O_2}[mM]$ ($R^2 = 0.99508$)의 선형 관계를 보인다. PGE/CuO/NiO 전극의 비효소적 H_2O_2 센싱 성능 비교를 위해 기존 문헌에 보고된 일부의 탄소 기반 전극들에 대한

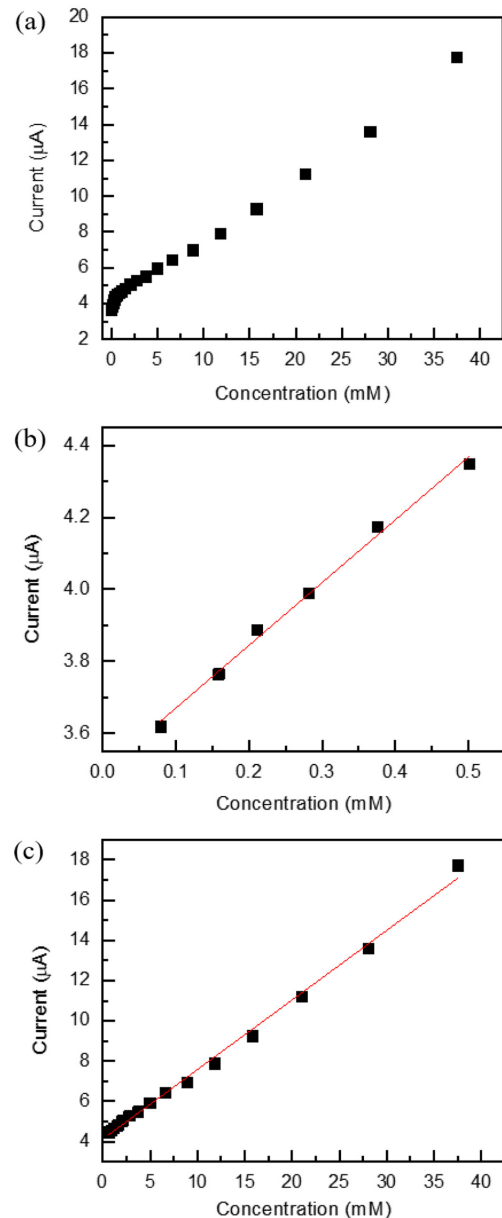


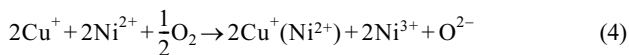
Fig. 5. (a) Amperometric current response of the PGE/CuO/NiO electrode at low concentrations and (c) at high concentrations.

Table 1. H₂O₂ Sensing performances to various carbon electrodes

Electrode	Linear range [mM]	Sensitivity [μ A/mM]	Detection limit [μ M]	Ref.
CuO NPs/PANI/CNT fiber	0.033 ~ 0.528	5.76123	0.52	[2]
	2.11 ~ 15.82	0.7713		
NiO/ α -Fe ₂ O ₃ /Nafion/GCE	0.5 ~ 4	9.595 $\times 10^{-5}$	0.29	[19]
CuO NPs/carbon ionic liquid	0.001 ~ 2.5	11.33	0.5	[20]
RuO ₂ nanorod/carbon fiber	0.5 ~ 10	0.042	2.3	[21]
PGE/CuO/NiO	0.07 ~ 0.5	1.74514	3.3	This work
	0.5 ~ 37.5	0.34577		

성능을 Table 1에 정리하였다. PGE/CuO/NiO 전극은 높은 감도와 기존 다른 탄소 전극들보다 더 넓은 선형 농도 구간 등 향상된 센싱 성능을 보인다.

일반적으로, lattice defect으로 간주되는 Ni³⁺는 전기 전도도에 기여하고, 고체 NiO는 전기화학반응 전에 일부의 Ni³⁺를 함유하고 있다고 알려져 있다. 그러나, 전극 표면에서 자동적으로 형성되는 Ni³⁺의 양은 매우 제한적이기 때문에[8,22] 전극의 전기 전도도를 높이기 위해서는 Ni³⁺의 농도를 높여야만 한다. Ni³⁺의 농도는 낮은 원자가 양이온의 도핑을 통해 증가시킬 수 있으며, CuO 도핑을 통해 NiO에서 Ni³⁺의 농도가 증가되었다는 연구결과가 보고되고 있다[23].



NiO에 소량의 Cu⁺를 첨가하여 Ni³⁺의 농도를 증가시키는 과정은 식 (4)에 의해 정리될 수 있다[8,24]. 본 연구에서 NiO와 CuO의 접목을 통해 NiO에서 생성된 Ni³⁺는 전하 캐리어 농도를 증가시키고 결과적으로 전기 전도도의 증가 등 NiO NPs와 CuO NPs의 시너지 효과로 인해 전기화학적 센싱 성능이 향상되었다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 주변에서 저렴한 가격으로 쉽게 구할 수 있는 샤프심을 전극 물질로 선택하여 2종의 금속산화물 CuO와 NiO가 접목된 PGE 전극을 제작하고 이를 H₂O₂ 검출용 센서에 적용하여 전기화학적 성능을 평가하였다. CuO NPs와 NiO NPs는 전기화학적 증착법에 의해 PGE 전극 표면 위에 균일하게 합성되었으며, 제작된 PGE/CuO/NiO 전극은 증가된 electrochemical response와 감소된 R_{et}를 보이면서 conductivity의 향상과 효율적인 electron transfer 등 전기화학적 특성이 개선되었다. 또한, 이를 기반으로 개발된 비효소적 H₂O₂ 센서 역시 향상된 전기화학적 센싱 성능을 보였으며, 이는 CuO가 NiO에서의 Ni³⁺의 농도를 높임으로써 전기 전도도 개선과 비표면적 증가 등 NiO NPs와 CuO NPs의 접목에 의한 시너지 효과에 기인한 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구를 기반으로 다양한 나노 구조체들의 접목을 통해 고성능 PGE 전극 기반의 전극 소재들을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 2024년도 서경대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌다.

참고문헌

- Liu, M., An, M., Xu, J., Liu, T., Wang, L., Liu, Y. and Zhang, J., "Three-dimensional Carbon Foam Supported NiO Nanosheets as Non-enzymatic Electrochemical H₂O₂ Sensor," *Appl. Surf. Sci.*, **542**, 148699(2021).
- Song, M. J., "A Non-enzymatic Hydrogen Peroxide Sensor Based on CuO Nanoparticles/polyaniline on Flexible CNT Fiber Electrode," *Korean Chem. Eng. Res.*, **61**, 196-201(2023).
- Gibi, C., Liu, C. H., Barton, S., Anandan, S. and Wu, J. J., "Carbon Materials for Electrochemical Sensing Application – A Mini Review," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **154**, 105071(2024).
- Pourbeyram, S. and Mehdizadeh, K., "Nonenzymatic Glucose Sensor Based on Disposable Pencil Graphite Electrode Modified by Copper Nanoparticles," *J. Food. Drug. Anal.*, **24**, 894-902(2016).
- Özcan, A., Gürbüz, M. and Özcan, A. A., "Preparation of a Disposable and Low-cost Electrochemical Sensor for Propham Detection Based on Over-oxidized Poly(Thiophene) Modified Pencil Graphite Electrode," *Talanta*, **187**, 125-132(2018).
- Sreekumar, A., Navaneeth, P., Suneesh, P. V., Nair B. G. and Babu, T. G. S., "A Graphite Pencil Electrode with Electrodeposited Pt-CuO for Nonenzymatic Amperometric Sensing of Glucose Over a Wide Linear Response Range," *Microchim. Acta*, **187**, 113(2020).
- Xu, Y., Ding, Y., Zhang, L. and Zhang, X., "Highly Sensitive Enzyme-free Glucose Sensor Based on CuO-NiO Nanocomposites by Electrospinning," *Compos. Commun.*, **25**, 100687(2021).
- Ghanbari, K. and Babaei, Z., "Fabrication and Characterization of Non-enzymatic Glucose Sensor Based on Ternary NiO/CuO/Polyaniline Nanocomposite," *Anal. Biochem.*, **498**, 37-46(2016).
- Zhang, H. and Liu, S., "Nanoparticles-assembled NiO Nanosheets Templated by Graphene Oxide Film for Highly Sensitive Non-enzymatic Glucose Sensing," *Sens. Actuators B*, **238**, 788-794(2017).
- Fernández, I., Carinelli, S., González-Mora, J. L., Villalonga, R. and Salazar-Carballo, P. A., "Nickel Oxide Nanoparticles/carbon Nanotubes Nanocomposite for Non-enzymatic Determination of Hydrogen Peroxide," *Electroanal.*, **35**, 2200192(2023).
- Heydari, H., Gholivand, M. B. and Abdolmaleki, A., "Cyclic Voltammetry Deposition of Copper Nanostructure on MWCNTs Modified Pencil Graphite Electrode: An Ultra-sensitive Hydrazine Sensor," *Mater. Sci. Eng. C*, **66**, 16-24(2016).
- Song, M. J., "Electrochemical Characteristics of Pencil Graphite Electrode Through Surface Modification and Its Application of Non-enzymatic Glucose Sensor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **62**, 147-152(2024).
- Fang, L., Cai, Y., Huang, B., Cao, Q., Zhu, Q., Tu, T., Ye, X. and Liang, B., "A Highly Sensitive Nonenzymatic Glucose Sensor Based on Cu/Cu₂O Composite Nanoparticles Decorated Single Carbon

- Fiber," *J. Electroanal. Chem.*, **880**, 114888(2021).
14. Chang, T., Li, Zijiong, Yun, G., Jia Y. and Yang, H., "Enhanced Photocatalytic Activity of ZnO/CuO Nanocomposites Synthesized by Hydrothermal Method," *Nano-Micro Lett.*, **5**, 163-168 (2013).
 15. Torz-Piotrowska, R., Wrzyszczyński, A., Paprocki, K., Szreiber, M., Uniszkievicz, C. and Staryga, E., "The Application of CVD Diamond Films in Cyclic Voltammetry," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, **37**, 486-491(2009).
 16. Upadhyay, S., Rao, G. R., Sharma, M. K., Bhattacharya, B. K., Rao, V. K. and Vijayaraghavan, R., "Immobilization of Acetylcholinesterase-choline Oxidase on a Gold-platinum Bimetallic Nanoparticles Modified Glassy Carbon Electrode for the Sensitive Detection of Organophosphate Pesticides, Carbamates and Nerve Agents," *Biosens. Bioelectron.*, **25**, 832-838(2009).
 17. Felix, S., Chakkavarthy, B. P., Jeong, S. K. and Grace, A. N., "Synthesis of Pt Decorated Copper Oxide Nanoleaves and Its Electrochemical Detection of Glucose," *J. Electrochem. Soc.*, **162**, H392-H396(2015).
 18. Bard, A. J. and Faulkner, L. R., *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York (1980).
 19. Achari, D. S., Santhosh, C., Deivasegamani, R., Nivetha, R., Bhatnagar, A., Jeong, S. K. and Grace, A. N., "A non-enzymatic Sensor for Hydrogen Peroxide Based on the Use of α -Fe₂O₃ Nanoparticles Deposited on the Surface of NiO Nanosheets," *Microchim. Acta*, **184**, 3223-3229(2017).
 20. Ping, J., Ru, S., Fan, K., Wu, J. and Ying, Y., "Copper Oxide Nanoparticles and Ionic Liquid Modified Carbon Electrode for the Non-enzymatic Electrochemical Sensing of Hydrogen Peroxide," *Microchim. Acta*, **171**, 117-123(2010).
 21. Kang, M., Lee, Y., Jung, H., Shim, J. H., Lee, N. S., Baik, J. M., Lee, S. C., Lee, C. and Kim, M. H., "Single Carbon Fiber Decorated with RuO₂ Nanorods as a Highly Electrocatalytic Sensing Element," *Anal. Chem.*, **84**, 9485-9491(2012).
 22. Mu, Y., Jia, D., He, Y., Miao, Y. and Wu, H. L., "Nano Nickel Oxide Modified Nonenzymatic Glucose Sensors with Enhanced Sensitivity Through an Electrochemical Process Strategy at High Potential," *Biosens. Bioelectron.*, **26**, 2948-2952(2011).
 23. Turky, A. M., "Electrical Surface and Catalytic Properties of NiO as Influenced by Doping with CuO and Ag₂O," *Appl. Catal. A*, **247**, 83-93(2003).
 24. Reitz, T. L., Lee, P. L., Czaplewski, K. F., Lang, J. C., Popp, K. E. and Kung, H. H., "Time-resolved XANES Investigation of CuO/ZnO in the Oxidation Methanol Reforming Reaction," *J. Catal.*, **199**, 193-201(2001).

Authors

Min-Jung Song: Associate Professor, Department of Nano Convergence Engineering, Seokyeong University, Seoul 02713, Korea; mjsong@skuniv.ac.kr