

## 전기 화학적 방법을 이용한 안티몬-탄소 전극 최적화로써 카드뮴 검출능 향상 방안

김진엽\* · 김진경\* · 한지훈\*\* · 김준협\*<sup>†</sup>

\*부산대학교 나노메카트로닉스공학과  
46241 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2  
\*\*인하대학교 수소기반 차세대 기계시스템 KIURI 연구단  
21999 인천 연수구 갯벌로 36 항공우주융합캠퍼스 인천산학융합원  
(2024년 11월 15일 접수, 2025년 1월 10일 수정본 접수, 2025년 1월 22일 채택)

## Electrochemical Optimization of Antimony Nanoparticle-decorated Carbon Electrode for Improved Cadmium Detection

Jinyeoung Kim\*, Jinkyong Kim\*, Jihoon Han\*\* and Joonhyub Kim\*<sup>†</sup>

*\*Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University,  
2, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 44413, Korea*

*\*\*Incheon Industrial Science and Technology Convergence Campus, 36 Mudflat-ro, Yeonsugu, Incheon, 21999, Korea*  
(Received 15 November 2024; Received in revised from 10 January 2025; Accepted 22 January 2025)

### 요 약

본 연구에서는 중금속 모니터링을 위한 3전극 시스템 내에서 전통적인 탄소 기반 작업 전극의 감도 한계를 해결하기 위해 탄소 전극을 안티몬으로 개질했다. 안티몬의 최적 농도를 확인하기 위해 농도가 0, 1, 3, 5, 7 wt/wt%인 전구체 용액을 탄소 페이스트와 꼼꼼히 혼합한 후, 다양한 안티몬 농도로 개질된 전극에서 카드뮴 검출 효능에 대한 비교 분석을 수행하여 안티몬 로딩이 전기화학적 감도에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 작업 전극에 안티몬 입자의 과도한 적재는 카드뮴 이온과의 반응에 부정적인 영향을 주어서 5 wt/wt% 안티몬을 포함한 카본 전극이 최적의 감도를 보여 주었고, 이 전극은 카본 전극에 비해 2.18배 높은 감도를 달성하였다.

**Abstract** – In the present study, to address the limitations in sensitivity of traditional carbon-based working electrodes within a three-electrode system for heavy metal monitoring, the carbon electrode was modified with antimony. To ascertain the optimal concentration of antimony, precursor solutions with concentrations of 0, 1, 3, 5, and 7 wt/wt% were meticulously blended with carbon paste. Subsequently, comparative analyses of cadmium detection efficacy were conducted across electrodes modified with varying antimony concentrations, elucidating the effects of antimony loading on electrochemical sensitivity. Excessive deposition of antimony particles onto the working electrode was found to negatively impact the reactivity with cadmium ions. Consequently, the carbon electrode modified with 5 wt/wt% antimony exhibited optimal electrochemical sensitivity. This optimized electrode configuration yielded a 2.18-fold enhancement in sensitivity relative to the unmodified carbon electrode.

Key words: Heavy metals, Three-electrode system, Antimony modification, Cadmium detection

### 1. 서 론

금속은 광택, 높은 연성, 열 및 전기 전도도가 뛰어나다는 특징을 가지며, 그 중에서도 중금속은 비중이 4.0 이상인 금속을 말한다.

중금속은 환경으로 방출되는 경우 생물권을 순환하며 먹이사슬을 따라 인체에 유입되고, 인체 내에 축적되며 종류에 따라 장기간에 걸쳐 축적되기도 한다. 자연계에는 약 40여종의 금속원소가 존재하며, 그 중 아연, 철, 구리, 코발트 등의 필수금속은 인체의 정상적인 생리기능을 유지하기 위해 체내에 일정 농도를 필요로 한다. 반면 비소, 수은, 납 그리고 카드뮴 등은 인체의 정상적인 신진대사에 전혀 불필요한 독성 영향을 미치게 되어 유해 중금속(독성 및 비필수 금속)으로 분류된다[1]. 유해 중금속은 쉽게 배출되지 않기 때문에 미량이라도 체내에 쌓이면 부작용을 일으키게 된다. 일반적으로 중

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kim4539@pusan.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.

금속 중독은 중금속의 양과 노출 기간에 따라 급성 중독과 만성 중독으로 구분된다. 급성 중독은 단시간에 많은 양에 노출되어 발생하며 구토, 복통, 설사, 호흡 곤란, 마비 등 소화기 및 신경계에 큰 영향을 미친다. 소량의 중금속에 장기간 노출되어 발생하는 만성 중독은 운동실조, 뒷다리 마비, 생식 기능 장애, 성장 저하, 면역 기능 저하 등의 증상을 유발한다[2]. 이렇듯 중금속은 인체에 미치는 부정적인 영향이 매우 크기 때문에 엄격한 관리가 필요하다. 일단 중금속이 환경에 노출되면, 분해나 자정작용을 받지 않고 먹이연쇄에 따라 생물권을 순환하면서 사람에게까지 빠른 속도로 이동한다. 잘 배설되지 않는 특징 때문에, 중금속 미량이라도 체내에 들어오면 축적되어서 단백질과의 결합으로 단백질 변성 및 기능을 마비시키게 된다. 이런 위험성으로 인해, 경제협력개발기구(Organisation for Economic Co-operation and Development; OECD) 주도하에 중금속의 유출 경로를 실시간으로 모니터링을 위한 장비 및 소자 개발 연구가 해외 우수 연구팀에 의해 활발히 진행되고 있다.

중금속 물질을 검출하기 위해 전통적으로 사용된 방법은 원자 흡수 분광법[4,5], 유도결합 플라즈마 질량 분석법[6,7], 표면 플라즈몬 공명 분석법[8-10], 형광법[11,12] 등이 있다. 이런 방법들은 감도와 검출 한도 면에서 장점을 보이고 있으나, 입자의 크기, 모양, 종류에 따라서 결과가 다양하게 나타나기 때문에 재현성 있는 결과를 얻기 어려우며, 정량적 분석과 재사용의 어려움이 있었다. 또한, 검사 과정과 판독에 숙련된 전문 인력이 필요하며, 다양한 원자에 대한 다중 분석이 어렵고, 빠른 결과를 얻기 쉽지 않은 단점이 있다. 특히, 원자 흡수 분광법은 측정범위가 매우 한정적이라 치명적인 단점을 가지고 있어 실질적으로 적용하기에 어려움이 있다. 이러한 단점으로 인해 현장에서 중금속에 대한 정량적 측정은 어려움이 있을 뿐만 아니라, 그나마 현재 현장에서 사용되는 형광법은 분해능이 굉장히 좋지 않다. 더 나아가 한 번의 측정으로 멀티 분석(수은, 납, 비소, 카드뮴)이 가능한 측정 키트는 거의 전무한 상태이다. 따라서 현장에서 사용이 용이하고 휴대가 가능하며, 소형이며 저렴한 멀티 분석용 중금속 측정 소자의 개발은 매우 중요하다. 반면, 전기화학적 중금속 측정의 경우 저가이면서도 측정방법이 간단하여 누구나 쉽게 측정할 수 있으며, 작은 전극을 사용하고 측정이 빠르고 정확성과 재현성이 뛰어나다는 등의 장점이 있다. 따라서 현장 모니터링에 적합한 측정 방법이다[13]. 전기화학적 분석법은 작동전극과 상대전극 사이에 공급되는 전압에 따른 전류값을 측정하는 방법이다. 이때 전압전류법 중 하나인 ASV(Anodic Stripping Voltammetry)는 농축 단계를 통해 분석 민감도를 향상시키는 장점이 있으며, 이를 통해 최대 수 ppb 수준의 극미량 중금속 농도를 정확히 측정할 수 있다. 이러한 고감도 특성은 환경 및 생물학적 샘플 분석에서 매우 중요한 요건으로, ASV는 특히 물 시료 내 중금속 검출에 효과적인 방법임이 여러 연구를 통해 입증되어 활발한 연구가 이루어지고 있다. ASV 기법의 주요 원리는 전기화학적 농축 단계에서 금속 이온이 작업 전극 표면에 환원되어 석출된 후, 다시 양극에서 용출되는 동안 발생하는 전류 신호를 측정함으로써 금속 이온의 농도를 정량화하는 것이다. 이 과정은 간단하면서도 높은 재현성과 정확성을 제공하여, 현장 측정에 적합한 기술로 주목받고 있다.

본 연구에서는 중금속 검출을 위해 3개의 전극을 사용하는 전기화학 시스템을 도입하였다. 이 시스템은 기준 전극, 작업 전극, 상대 전극으로 구성된다. 기준 전극은 전기화학 반응에서 기준 전위를 제공하며, 상대 전극은 전기 회로를 완성하여 전류를 흐르게 한다.

작업 전극은 분석 대상 물질과 직접적으로 반응하여 전기화학 신호를 생성하는 핵심 구성 요소로, 주로 탄소 기반 재료가 사용된다.

탄소 기반 작업 전극으로는 유리상 탄소(Glassy Carbon), 탄소 섬유(Carbon Fiber), 탄소 페이스트(Carbon Paste), 그리고 그래파이트(Graphite) 등이 주로 사용된다[14]. 이러한 탄소 전극은 수용액 상태에서 물의 산화 및 환원 반응 범위를 넓게 설정할 수 있어 다양한 전압 조건에서 물질 간 반응 간섭을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 금과 백금과 같은 고급 금속 전극에 비해 감도가 낮고, 전기 전도성이 부족하며, 측정 가능한 물질의 종류가 제한적인 단점이 있다. 또한 탄소 전극은 강도가 약하고, 사용할 수 있는 pH 범위가 제한적이며, 반복 측정 시 재현성이 떨어지는 문제가 있다. 이러한 한계로 인해, 탄소 전극은 특정 조건에서만 제한적으로 사용되며, 고성능 대안을 모색하는 연구가 지속되고 있다.

이와 대조적으로, 안티몬(Sb)을 기반으로 한 전극은 전기 전도성이 우수하고, 열역학적으로 안정적이며, 다양한 전해질 환경에서도 반응하지 않는 장점을 가진다. 안티몬 전극은 또한 제조 비용이 저렴하고 환경적으로 안전하며, 카드뮴(Cd)에 대한 민감도가 매우 높아 극미량의 카드뮴 검출에 적합하다[15]. 이러한 특성 덕분에 안티몬 전극은 ASV 분석법에서 사용될 때 매우 높은 스트리핑 성능과 우수한 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio)를 제공하여, 중금속 검출을 위한 전극 재료로 주목받고 있다[16].

그러나 순수한 안티몬은 전기 전도도가 낮고 강도가 약하여 쉽게 부서지는 단점이 있어, 단독으로 전극을 제작하는 데 한계가 있다. 이를 극복하기 위해, 일반적으로 탄소 재료에 안티몬을 개질하여 사용하는 방법이 널리 연구되고 있다. 개질된 안티몬 전극은 안티몬의 우수한 전기화학적 특성과 탄소 전극의 물리적 안정성을 결합하여 성능을 극대화할 수 있다. 특히, 개질 과정에서 안티몬의 농도 및 분포를 최적화하면, 전극의 민감도와 선택성을 동시에 향상시킬 수 있다.

하지만 현재까지 개질된 안티몬 전극에 대한 연구는 주로 기본적인 특성 분석에 집중되어 있으며, 안티몬 농도의 최적화를 위한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 이러한 다양한 농도의 안티몬을 탄소 전극에 개질한 후, 최적의 농도를 소개한다.

## 2. 실험

### 2-1. 사용 재료 및 장치

타겟 중금속(Cd), 안티몬 전구체( $Sb_2O_3$ ), 염화칼륨(KCl), 페리시안화칼륨  $K_3[Fe(CN)_6]$  및 30 wt% 염산(HCl) Sigma-Aldrich에서 구입했고, 기관으로 사용된 Polyethylene terephthalate(PET) 필름은 (주)베스트윈(대한민국)에서 구입하였다. KCl과  $K_3[Fe(CN)_6]$ 는 5 mM  $K_3[Fe(CN)_6]$ 을 함유한 0.1 M KCl 용액으로 제작되어 제한한 전극의 가역성 평가를 위해 사용되었고, 30 wt% HCl은 중금속 검출을 위한 전해질로 사용되었다. Carbon(일련번호: C2030519P4)과 Ag/AgCl 페이스트(일련번호: C2000218P5)는 스크린 인쇄법(Gwent Electronic Materials Ltd., UK)을 이용하여 3전극 시스템을 제작하기 위해 준비되었다.  $Sb_2O_3$ 가 고르게 분산된 탄소 작업 전극의 형태는 주사전자현미경(Scanning Electron microscope; SEM, S-4300, Hitachi Ltd., Japan)을 이용하여 조사하였고, 전기화학적 분석은 Potentiostat(CompactStat, Ivium Technologies Ltd., 네덜란드)을 이용하여 수행하였다. 전기화학적 측정을 기록하기 위해 다음 기기

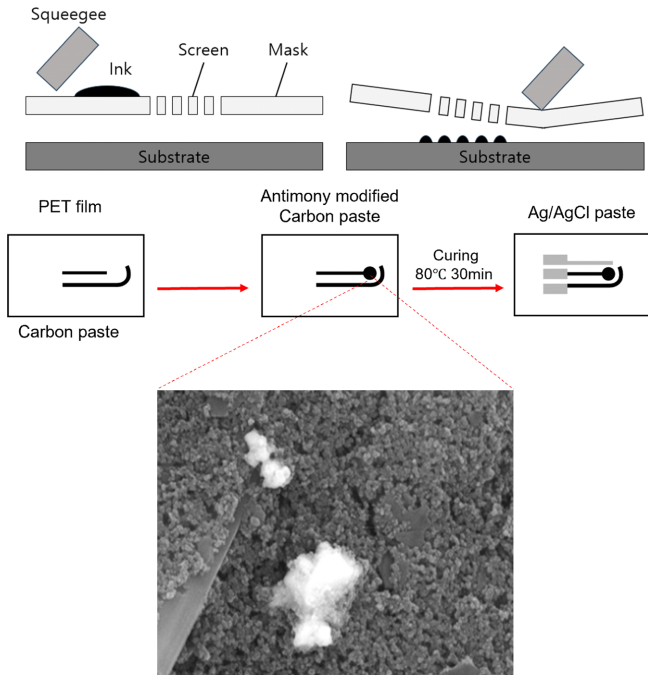


Fig. 1. Schematic of screen printing on PET film and SEM image of antimony-modified carbon electrode.

매개변수가 사용되었다. 순환 전압전류법(스캔 속도 = 100 mV/s), Anodic Stripping Voltammetry(ASV)(전위 단계 = 4 mV, 주파수 = 25 Hz, 전위 진폭 = 50 mV, 증착 시간 = 300 s, 증착 전위 = -1.3 V).

### 2-2. $Sb_2O_3$ 로 개질된 탄소 기반의 3전극 시스템 제작

Fig. 1은 카드뮴 검출을 위한 종이 기반의 3전극 시스템 제작에 대해서 보여준다. 식 1과 같이 안티몬 전구체( $Sb_2O_3$ )가 물과 접촉하여 하이드록실기가 생성되고 이는 식 2와 같이 카드뮴과 화합물을 형성한다. 이후에 전압을 인가하면 식 3과 같이 전극 표면에 카드뮴의 증착을 증가시키고 그에 따라 탄소와 안티몬 전구체가 혼합된 전극은 탄소 전극보다 더 높은 감도를 보장한다. 탄소 전극을  $Sb_2O_3$ 로 개질하는 방법에는 *in-situ*와 *ex-situ* 방법이 있다. *In-situ* 방법은 전농도 단계에서 전해질에 첨가되는 안티몬의 농도가 목표 중금속 농도의 10배 이상이어야 하기 때문에 고농도 중금속 측정에는 적합하지 않다. 따라서 카드뮴 검출용 전극을 *ex-situ* 방법으로 제

작하였다. 여러 농도의 안티몬과 탄소 페이스트는 2시간 동안 혼합기에서 섞은 다음 스크린 프린트 방법을 통해 작업 전극 형성에 사용되었다. 같은 방법으로 탄소 페이스트는 상대 전극, Ag/AgCl 페이스트는 기준 전극 및 패드 형성에 사용되었다. 또한, 각각의 스크린 프린팅 후에는 제작된 전극은 80 °C에서 30분 동안 경화되었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 탄소전극 표면에  $Sb_2O_3$ 가 잘 분산되어 있음을 알 수 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 결과 및 고찰

본 연구에서는 카드뮴에 대한 민감도가 낮은 탄소 전극을 안티몬 전구체로 다양하게 개질하여 각각의 전극의 성능을 평가하고 최적의 농도를 찾기 위한 실험을 수행하였다. 카드뮴에 대한 민감도가 낮은 탄소 전극에서 높은 민감도를 얻으려면 안티몬을 첨가해야 한다. 최적의 안티몬 함량을 확인하기 위해 안티몬 전구체의 0, 1, 3, 5, 7 wt/wt%를 카본 페이스트와 혼합하여, 다양한 안티몬 농도에서의 실험 결과를 통해 각 전극의 카드뮴 감지 능력을 비교하였다. 이전의 논문에서 1 wt/wt% 이하의 안티몬 전구체가 포함된 경우, 전극의 표면에 안티몬이 충분히 적재되지 않아서 카드뮴 이온과의 상호작용이 제한적이라, 안티몬이 전극의 전기화학적 활성화에 필요한 충분한 양으로 존재해야 한다는 점을 보여주었다[17]. 이에 따라, 이번 연구에서는 1 wt/wt% 이상의 농도부터 실험 조건을 잡았다.

0, 1, 3, 5, 7 wt/wt%의 안티몬과 탄소 페이스트는 2시간 동안 혼합기에서 섞은 다음 스크린 프린트 방법을 통해 작업 전극 형성한 전극은 200  $\mu$ g/L 카드뮴이 포함된 0.01 M HCl 전해질에서 사각파 벗김 전압전류법(Square-Wave ASV; SWASV) 방법을 통해 평가되었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 안티몬 함량이 5 wt/wt%인 전극에서 가장 높은 감도를 나타내었다. 안티몬 함량이 5 wt/wt%를 초과하는 전극에서는 Cd-Sb 화합물이 생성될 수 있지만, 안티몬 입자의 과도한 적재로 인해 전극 표면의 구조가 지나치게 변형되어 카드뮴 이온과의 효율적인 상호작용에 제한하였으며, 전극에서 지나친 안티몬 구성으로 전극 전도성이 낮아지게 된다. 이로 인해, 5 wt/wt%를 초과하는 전극에서는 감도가 낮아지게 된다. 또한 최적의 조건으로 안티몬으로 개질된 전극은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 탄소전극에 비해 2.18배 높은 감도를 나타내었으며, wt%가 증가할수록 수소 과전압이 감소하여 안정적인 암전류를 나타내었다.

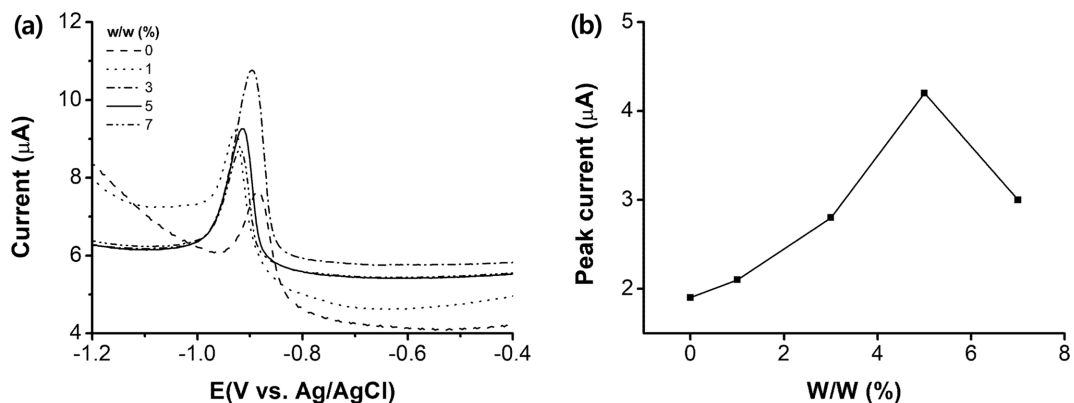


Fig. 2. (a) SWASV measurements at increasing antimony concentrations of antimony modified carbon electrode. (b) Peak current of SWASV measurements.

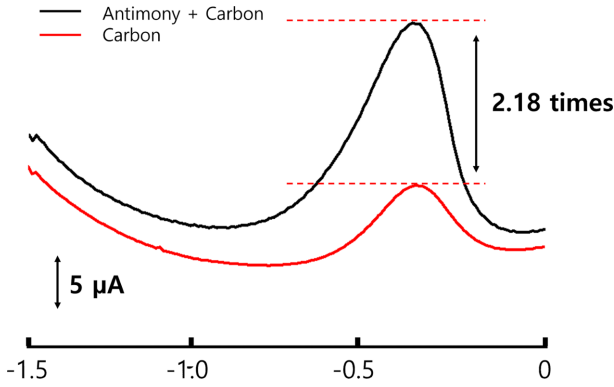


Fig. 3. Measurement of antimony + carbon and carbon working electrode 200 µg/L cadmium.

Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 PET 필름 위에 5 wt/wt% 안티몬과 탄소 페이스트가 혼합된 작업 전극으로 구성된 3전극 시스템의 가역성은 5 mM  $K_3[Fe(CN)_6]$ 을 포함하는 0.1 M KCl 전해질 용액에서 순환 전압전류법(Cyclic voltammetry; CV)을 통해 평가되었다. 네른스트 방정식(Nernst equation)에 기반하여, 산화/환원 피크전류가 발생하는 전위차( $\Delta E_p$ )가 59 mV 이하, 상온에서  $\Delta E_p$ 는 80 mV 이하를 보이면 가역성을 가진 시스템으로 간주할 수 있다[18]. Scan rate가 50 mV/s에서 제안된 전극의  $\Delta E_p$ 는 70 mV를 보여주기 때문에, 제작된 전극은 가역적인 반응을 보였다. 빠른 전자 이동을

갖는 가역적 반응에서는 스캔 속도가 증가함에 따라 피크 전류가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 느린 스캔 속도에서는 빠른 스캔 속도에 비해 전극 표면으로부터 확산층의 두께가 증가하므로 벌크 용액에서 전극 표면으로의 반응종 유입이 감소한다. 반응성 종의 유입 감소는 이를 통해 흐르는 전류의 감소를 의미한다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, 다양한 스캔 속도에서 피크 전류는 스캔 속도의 제곱근에 비해 선형적으로 증가했다. Fig. 4(b) Randles-Sevcik 방정식에 따르면 이는 전해질 내  $Fe(CN)_6^{3-}$ 의 확산에 의한 산화/환원 반응을 의미하며, 전극 표면에 고정된 반응물로 인한 전류 변화는 아니다[19].

Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이, 최적 조건 5 wt/wt% 안티몬으로 개질된 탄소 작업전극의 카드뮴 농도에 대한 반응은 SWASV 방법을 통해 평가되었다. SWASV의 세부 조건은 전위 단계 = 4 mV, 주파수 = 25 Hz, 전위 진폭 = 50 mV, 증착 시간 = 300 s, 증착 전위 = -1.3 V이다. SWASV를 통한 중금속 측정에는 타겟 물질을 증착하는 사전 증착 공정(pre-deposition)과 증착된 물질을 벗겨내는 박리(stripping) 공정으로 구성된다. 최적 조건으로 개질된 전극은 20~2000 µg/L의 카드뮴이 포함된 0.01 M HCl buffer solution 노출되어 작업 전극 위에 카드뮴을 전증착(pre-deposition)시킨다. 전증착 공정은 시간이 짧으면 타겟 물질이 전극에 반응하기에 충분한 시간을 확보해 주지 못하므로, 감도적으로 부정적인 결과를 도출하며, 시간이 길면 측정 시간의 비효율성을 야기한다. 본 연구에서는 전증착 시간을 300 s로 고정하여 카드뮴의 반응 시간을 확보하였다. 작업 전극에 반응한 카드뮴은 박리 공정을 통해, 전자를 공급하고 탈착하게 된

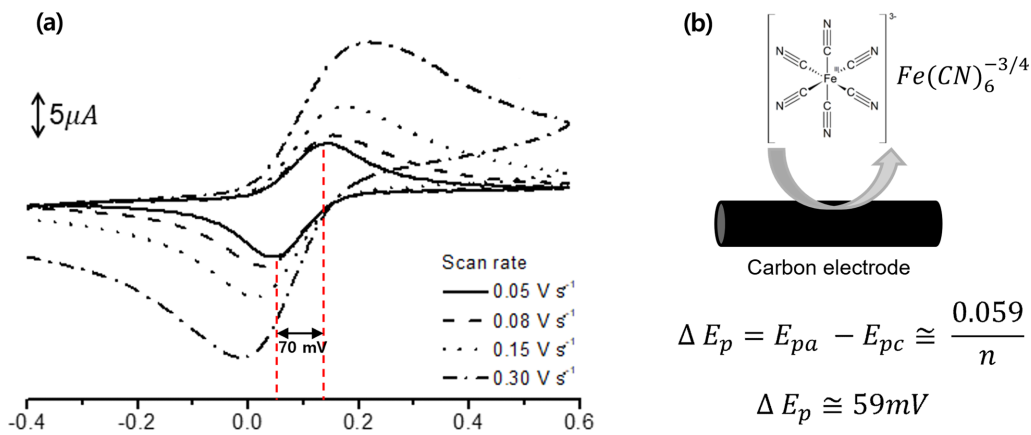


Fig. 4. (a) Cyclic voltammograms of 5.0 mM ferricyanide with 0.1 M KCl at various scan rate; 50, 80, 150, and 300 mV/s. (b) Schematic of reversible electrochemical reactions.

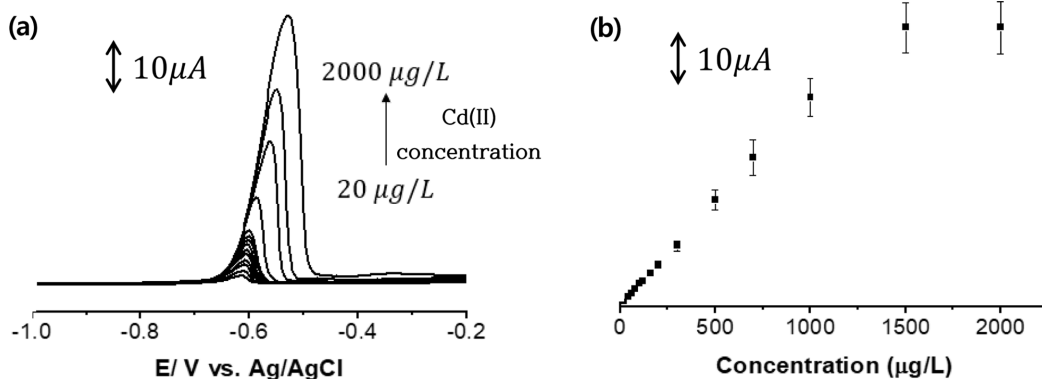


Fig. 5. (a) SWASV measurements and (b) peak current at increasing concentrations of Cd(II) from 0 to 2000 µg/L.

다. 전증착과정에서 카드뮴의 농도가 높은 환경에 노출된 전극은 박리 과정에서 많은 카드뮴이 벗겨지게 되고, 이에 따라 많은 전자를 공급받게 되므로, 측정 환경에서 카드뮴의 농도가 높을수록 박리 과정에서 높은 전류를 보여주게 된다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이, 퇴적된 카드뮴의 양이 많을수록 전류의 크기가 더 커지는 것으로 관찰되었다. 한국의 카드뮴 수질 기준인 0.005 mg/L의 100배인 최대 500 µg/L의 카드뮴 농도에서 제안된 센서의 선형계수는 9.88를 가짐과 함께 민감도는 0.0365 uA/µg/L<sup>-1</sup>를 보여주었다[20].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 카드뮴 검출을 위한 최적의 안티몬 전구체의 농도에 대해 살펴보았다. 일반적으로 사용되는 탄소 작업 전극에 비해 제안된 전극은 넓은 span과 선형 범위를 가졌으며, 그래핀 산화물, 탄소 나노튜브 또는 나피온-그래핀-폴리아닐린 나노복합체와 같은 특수 재료를 사용하지 않고도 안티몬의 사용만으로도 증금속 측정 범위를 충분히 만족함으로 보여주었다. 카본 작동전극에 안티몬 5 wt/wt%를 사용하여 감도를 2.18배 향상시켰으며, PET 필름을 사용하여 전극 가격을 낮춰 일회용 센서에 적합하게 디자인할 수 있음을 제안하였다. 제안된 장치는 현장 감지에 적합하며 납, 아연, 구리, 니켈 등의 증금속 감지 시스템에 확대하여 적용할 수 있기에, 개발된 증금속 센서를 활용한 현장 진단 및 기타 증금속 검출을 목표로 연구를 계속하고자 한다.

#### 감 사

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

#### References

- Park, J. D., "Heavy Metal Poisoning," *Hanyang Med. Rev.*, **30**(4), 319-325(2010).
- Kazantzis, G., "The Acute and Chronic Effects of Heavy Metal Poisoning," In: Vale, J. A., Meredith, T. J. (eds), *Poisoning Diagnosis and Treatment*, 171-175(1981).
- Bungau, S. G., Endres, L., Negru, P. A., Bungau, A. F., Pasca, B., Radu, A.-F., Tarce, A. G., Bogdan, M. A., Behl, T., Nechifor, A. C., Hassan, S. S. U. and Tit, D. M., "Characterization of the Toxicological Impact of Heavy Metals on Human Health in Conjunction with Modern Analytical Methods," *Toxics* **10**, 716(2022).
- Sobia, A., Rahila, N., Ghazala, H. R. and Syed, A. A., "Determination of Heavy Metal Contents by Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) in Some Medicinal Plants from Pakistani and Malaysian Origin," *Pak. J. Pharm. Sci.*, **28**(5), 1781-1787(2015).
- Bak, J., Jensen, J., Larsen, M. M., Pritzl, G. and Scott-Fordsmand, J., "A Heavy Metal Monitoring-programme in Denmark," *Sci. Total Environ.*, **207**, 179-186(1997).
- Dulama, I. D., Radulescu, C., Chelarescu, E. D., Bucurica, I. A., Teodorescu, S., Stirbescu, R. M. and Stirbescu, N. M., "Determination of Heavy Metal Contents in Surface Water by Inductively Coupled Plasma—Mass Spectrometry: A Case Study of Ialomita River," *Romania. Rom. J. Phys.*, **62**(5-6), 807-815(2017).
- Buzica, D., Gerboles, M., Borowiak, A., Trincerini, P., Passarella, R. and Pedroni, V., "Comparison of Voltammetry and Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry for the Determination of Heavy Metals in PM10 Airborne Particulate Matter," *Atmos. Environ.*, **40**(25), 4703-4710(2006).
- Sandhya, B. D. B., Tanujjal, B., Sunandan, B. and Joydeep, D., "Heavy Metal Ion Sensing in Water Using Surface Plasmon Resonance of Metallic Nanostructures," *J. Sustain. Dev.*, **1**(1), 1-11(2015).
- Fen, Y. W. and Yunus, W. M. M., "Surface Plasmon Resonance Spectroscopy as An Alternative for Sensing Heavy Metal Ions: a Review," *Sens. Rev.*, **33**(4), 305-314(2013).
- Dhara, P., Kumar, R., Binetti, L., Nguyen, H. T., Alwis, L. S., Sun, T. and Grattan, K. T. V., "Optical Fiber-Based Heavy Metal Detection Using the Localized Surface Plasmon Resonance Technique," *IEEE Sens. J.*, **19**(19), 8720-8726(2019).
- McComb, J. Q., Rogers, C., Han, F. X. and Tchounwou, P. B., "Rapid Screening of Heavy Metals and Trace Elements in Environmental Samples Using Portable X-Ray Fluorescence Spectrometer, A Comparative Study," *Wat. Air and Soil Poll.*, **225**, 2169(2014).
- De Acha, N., Elosúa, C., Corres, J. M. and Arregui, F. J., "Fluorescent Sensors for the Detection of Heavy Metal Ions in Aqueous Media," *Sensors*, **19**(3), 599(2019).
- Gumpu, M. B., Sethuraman, S., Krishnan, U. M. and Rayappan, J. B. B., "A Review on Detection of Heavy Metal Ions in Water – An Electrochemical Approach," *Sensor Actuat B-chem*, **213**, 515-533(2015).
- Toghill, K. E., Xiao, L., Wildgoose, G. G. and Compton, R. G., "Electroanalytical Determination of Cadmium(II) and Lead(II) Using Antimony Nanoparticle Modified Boron-Doped Diamond Electrode," *Electroanalysis*, **21**(10), 1113-1118(2009).
- Chen, S., Zheng, Z. Y., Fang, Y. M., Zheng, L. Q. and Sun, J. J., "High Sensitive Detection of Cd(II) and Pb(II) Based on Antimony Film Covered Pencil core Electrodes," *J. Electrochem.*, **20**(4), 370-376(2014).
- Svobodova-Tesarova, E., Baldrianova, L., Stoces, M., Svancara, I., Vytras, K., Hocevar, S. B. and Ogorevc, B., "Antimony Powder-modified Carbon Paste Electrodes for Electrochemical Stripping Determination of Trace Heavy Metals," *Electrochim. Acta*, **56**(19), 6673-6677(2011).
- Slavec, M., Hocevar, S. B., Baldrianova, L., Tesarova, E., Svancara, I., Ogorevc, B. and Vytras, K., "Antimony Film Microelectrode for Anodic Stripping Measurement of Cadmium(II), Lead(II) and Copper(II)," **22**(14), 1619-1622(2010).
- Vidal-Iglesias, F. J., Solla-Gullon, J., Rodes, A., Herrero, E. and Aldaz, A., "Understanding the Nernst Equation and Other Electrochemical Concepts: An Easy Experimental Approach for Students," *J. Chem. Educ.*, **89**(7), 936-939(2012).
- Kim, J. K., Han, J. H. and Kim, J. H., "A Study on the O<sub>2</sub> Plasma Etching Method of Spray-Formed SWCNT Films and Their Utilization as Electrodes for Electrochemical Sensors," *Sens.*, **23**, 7812(2023).
- Yoon, S. M., Kim, S. S., Chea, S. H. and Park, N. S., "An Experimental Study on the Determination of Minimum Response Concentration of Inorganic Pollutants in Tap Water," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(4), 208-213(2017).

**Authors**

**Jinyeoup Kim:** MS, Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan, 44413, Republic of Korea; wlsduq4015@naver.com

**Jinkyong Kim:** PhD, Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan, 44413, Republic of Korea; dqawd@naver.com

**Jihoon Han:** PhD, Incheon Industrial Science and Technology Convergence Campus, Incheon, 21999, Republic of Korea; dafory@inha.ac.kr

**Joonhyub Kim:** Professor, Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan, 44413, Republic of Korea; kim4539@pusan.ac.kr