

## *p*-아미노페놀 산화 반응의 전자 전달 매개체로서 오스뮴(II/III) 착물의 전기촉매 활성

김나영<sup>1†</sup> · 김은중<sup>2†</sup> · 강충무<sup>3</sup> · 한동훈<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>가톨릭대학교 화학과, 경기도 부천시, 14662, 대한민국

<sup>2</sup>차세대융합기술연구원, 경기도 수원시, 16229, 대한민국

<sup>3</sup>(주)캠벳, 경기도 수원시, 16229, 대한민국

(2025년 9월 25일 접수 : 2025년 10월 11일 수정 : 2025년 10월 18일 채택)

## Electrocatalytic Activity of an Os(II/III) Complex as an Electron-Transfer Mediator in *p*-Aminophenol Oxidation

Nayoung Kim<sup>1†</sup>, Eun Joong Kim<sup>2†</sup>, Chung Mu Kang<sup>3</sup>, and Donghoon Han<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry, The Catholic University of Korea, Bucheon, Gyeonggi-do 14662, Republic of Korea

<sup>2</sup>Advanced Institute of Convergence Technology, Suwon, Gyeonggi-do 16229, Republic of Korea

<sup>3</sup>Chembud Co., Ltd., Suwon, Gyeonggi-do 16229, Republic of Korea

(Received September 25, 2025 : Revised October 11, 2025 : Accepted October 18, 2025)

### 초 록

본 연구에서는 인듐 주석 산화물 (ITO) 전극에서 오스뮴 기반 화합물([Os(4-4'-dimethoxy-2-2'-bipyridine)<sub>2</sub>(pyridine-NH<sub>2</sub>)PF<sub>6</sub>]; Os-1)의 전기화학적 거동을 분석하고, *p*-아미노페놀 (*p*-AP) 산화 반응에서 전자 전달 매개체로서의 가능성을 평가하였다. Os-1은 ITO전극에서 가역적이고 안정적인 산화-환원 특성을 나타내었으며, *p*-AP와의 반응에서는 단독 조건과 비교했을 때 산화 피크 전위가 Os-1의 산화 전위로 이동하고, 전류가 현저히 증가하였다. 이러한 결과는 Os-1이 *p*-AP 산화 과정에서 전자 전달 매개체로 작용하여 촉매 활성에 크게 기여했음을 시사한다.

**Abstract :** In this work, we studied the electrochemical behavior of an osmium-based compound ([Os(4-4'-dimethoxy-2-2'-bipyridine)<sub>2</sub>(pyridine-NH<sub>2</sub>)PF<sub>6</sub>]; Os-1) on an indium tin oxide (ITO) electrode and evaluated its role as an electron-transfer mediator in the oxidation of *p*-aminophenol (*p*-AP). Os-1 exhibited reversible and stable redox characteristics on the ITO electrode. In the presence of *p*-AP, compared to the mediator-free condition, the oxidation peak potential shifted to that of Os-1, accompanied by a significant increase in current. These results demonstrate that Os-1 functions as an effective electron-transfer mediator in the oxidation of *p*-AP, thereby enhancing the catalytic activity.

**Keywords :** Electron transfer mediator, Osmium complex, *p*-Aminophenol, Electrocatalysis

<sup>†</sup>These authors contributed equally to this work

\*E-mail: dhan@catholic.ac.kr

## 1. 서 론

바이오센서는 분석 물질의 농도에 비례하는 전기적 신호를 생성하여 특정 생물학적 또는 화학적 반응을 측정하는 장치이다.<sup>1)</sup> 이러한 센서는 의료 진단<sup>2)</sup>, 질병 모니터링<sup>3)</sup>, 환경 오염물질 검출<sup>4)</sup>과 같은 다양한 응용 분야에 활용되고 있다. 특히 바이오센서 연구에서는 높은 감도와 선택적 검출 능력의 확보가 핵심 과제로 자리 잡고 있다.<sup>5)</sup> 단일 분자 수준까지 분석할 수 있는 낮은 검출 한계의 확보와 더불어, 생체 신호를 효율적으로 포착하여 이를 전기화학적, 광학적 신호로 변환하는 능력의 향상은 실용화를 위해 필수적이다.<sup>6)</sup>

바이오센서의 신호 변환 과정에서 가장 널리 사용되는 방식은 생체 신호를 직접 전기적 신호로 변환하는 것이다. 대표적인 예로 혈당 센서는 글루코스를 산화시키는 효소를 전극에 고정화하여, 효소의 활성 중심에서 발생하는 전자 전달 반응을 전기적 신호로 변환한다.<sup>7)</sup> 그러나 효소의 활성 중심이 전극 표면과 충분히 근접하지 않아 직접적인 전자 전달이 원활히 이루어지지 못해 검출 효율이 저하되는 문제가 발생한다.<sup>8)</sup> 이러한 한계를 극복하기 위해 효소와 전극 간 전자 전달을 매개할 수 있는 산화-환원 매개체의 도입이 제안되었으며, 이는 바이오센서 성능 향상을 위한 중요한 연구 방향으로 자리잡았다.<sup>9)</sup>

이러한 매개체는 분석 물질의 산화 과정에서 발생한 전자를 받아 전극으로 전달하고, 전극은 매개체의 산화-환원 신호를 간접적으로 검출한다.<sup>10)</sup> 이와 같은 과정은 전자 전달 경로와 속도를 개선하여 분석 물질과 전극 간 직접적인 전자 전달의 한계를 보완하고, 결과적으로 바이오센서의 감도와 신뢰도를 크게 향상시킨다. 따라서 적절한 매개체의 선택은 바이오센서 성능을 좌우하는 핵심 요소이다. 매개체가 갖추어야 할 조건은 다음과 같다: 첫째, 전기화학적 응답 속도; 둘째, 전극과의 전자 전달 효율; 셋째, 화학적 안정성이다.<sup>11-13)</sup>

기존에는 페로센 유도체와 같은 금속 화합물, polypyrrole 등의 전도성 고분자,<sup>14)</sup> tetrathiafulvalene 같은 전도성 염<sup>15)</sup> 등이 매개체로 널리 연구되었다. 최근에는 이러한 매개체들과는 다른 특성을 갖는 대안적 후보군으로 8족 금속, 특히 오스뮴 기반 화합물이 주목받고 있다. 오스뮴 기반 화합물은 II/III 산화 상태를 안정적으로 유지하면서 6배위 구조를 형성하고,<sup>16)</sup> 피리딘(pyridine) 및 이미다졸(imidazole) 고리의 질소와 우수한 배위 능력을 보인다.<sup>17)</sup> 특히 2,2'-bipyridine 구조를 갖는 리간드와 결합하여 형성된 배위화합물은 화학적으로 안정한 산화-환원 쌍을 이루며, 전기적으로도 뛰어난 가역성을 보여 전자 전달 매개체로의 활용

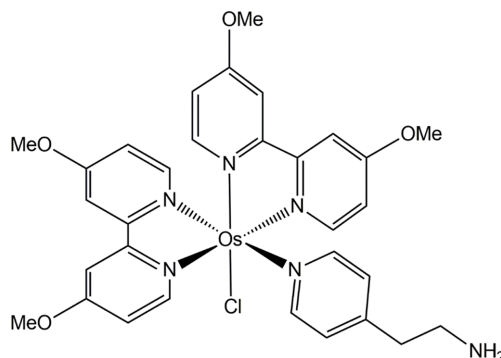


Fig. 1. Chemical structure of Os-1, [Os(4,4'-dimethoxy-2,2'-bipyridine)<sub>2</sub>(pyridine-NH<sub>2</sub>)PF<sub>6</sub>].

가능성을 시사한다.<sup>18)</sup>

본 연구에서는 인듐 주석 산화물(ITO) 전극을 기반으로 오스뮴 기반 화합물인 ([Os(4,4'-dimethoxy-2,2'-bipyridine)<sub>2</sub>(pyridine-NH<sub>2</sub>)PF<sub>6</sub>]; Os-1) (Fig. 1)의 전기화학적 특성을 규명하고, 이를 전자 전달 매개체로 활용할 수 있는 가능성을 보고한다. 전기화학적 측정을 통해 Os-1의 산화-환원 거동과 안정성을 관찰하였으며, *p*-아미노페놀(*p*-AP)의 산화 반응에서 Os-1이 전기촉매 활성을 나타냄을 확인하였다. 본 결과는 Os-1이 차세대 고성능 바이오센서 매개체로 응용될 수 있는 가능성을 제시한다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 시료

실험에 사용된 [Os(4,4'-dimethoxy-2,2'-bipyridine)<sub>2</sub>(pyridine-NH<sub>2</sub>)PF<sub>6</sub>] (Os-1)는 캄벳 (수원, 대한민국)에서 구매하였다. *p*-아미노페놀 (*p*-AP, 98%)은 TCI Chemicals (도쿄, 일본)에서, Tris(hydroxymethyl)aminomethane (Tris, ≥99.8%)은 Sigma-Aldrich (세인트루이스, 미국)에서 구매하였다. Magnesium chloride anhydrous (MgCl<sub>2</sub>, 98.0%), 아세트나이트릴 (99.7%), 염산, 수산화나트륨은 대정화금 (시흥, 대한민국)에서 구매하였다. 모든 시약은 추가 정제 없이 사용하였다. 전해질로는 10 mM MgCl<sub>2</sub>를 포함한 50 mM Tris 완충 용액 (pH 9.0)을 사용하였고, 1.0 M 염산을 첨가하여 pH를 조절하였다. 분석 물질인 Os-1은 아세트나이트릴에 용해하여 5.6 mM의 저장용액으로 제조하였고, 실험 전 Tris 완충 용액으로 희석하여 사용하였다. *p*-AP는 3차 증류수에 각각 1, 2, 5, 10 mM의 농도로 용해하여 저장용액으로 제조하였고, 실험 시에는 이를 Tris 완충 용액으로 희석하여 사용하였다. 모든 실험에 사용된 용액은 영인크로매스(안양, 대한민국)의 Aquapuri

541 series로 정제한 3차 증류수(저항 18.2 M $\Omega$ ·cm)를 이용하여 준비하였다.

## 2.2. ITO 전극 제작

전기화학 측정 면적을 일정하게 유지하기 위하여, 지름 3 mm의 금속봉을 이용해 구멍을 낸 절연 테이프를 ITO로 코팅된 유리 슬라이드 기판(30 mm × 10 mm, 두께 1.1 mm, Sigma-Aldrich, 미국)의 전도성 면에 부착하였다. 기판의 끝부분에 테이프를 전도성 면이 위쪽을 향하도록 밀착하여 부착하였으며, 반대편에는 일정 길이의 전도성 테이프를 붙여 전기화학 측정 시 작업 전극과 연결할 수 있도록 하였다. ITO 전극은 별도의 전처리 과정 없이 사용하였다.

## 2.3. 기기 및 측정

모든 전기화학 측정은 Pine Research (더럼, 미국)사의 Wavedriver 200 일정전위기(potentiostat)를 통해 수행하였다. 실험은 ITO 작업전극, Ag/AgCl 기준전극(3 M NaCl, RE-1B, BAS, 일본), 백금 선(wire) 상대전극으로 구성된 3전극 시스템을 통해 진행하였다. 모든 전위는 상온에서 Ag/AgCl 기준전극 대비 인가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 ITO 전극에서의 Os-1 전기화학적 특성 분석

Os-1의 전자 전달 매개체로서의 활용 가능성을 평가하기 위해, 먼저 기본적인 3전극 시스템을 이용하여 ITO 전극에서 전기화학적 거동을 확인하였다. 이를 위해 -0.8 ~ +1.0 V (vs. Ag/AgCl) 사이의 전위를 50 mV/s의 주사 속도로 인가하였다. Fig. 2는 50 mM Tris 완충 용액 (pH 9.0), 10 mM MgCl<sub>2</sub>, 그리고 0.5 mM Os-1을 포함한 용액에서 측정된 순환 전압-전류 곡선을 보여준다. MgCl<sub>2</sub>는 용액의 이온 전도도를 향상시키고 전극 계면에서의 전자 이동을 안정화하기 위해 첨가하였다. Fig. 2(A)에 나타난 바와 같이, 0 ~ +0.1 V (vs. Ag/AgCl) 부근에서 Os-1의 산화-환원에 해당하는 가역적인 피크가 관찰되었으며, 이는 Os-1이 ITO 전극 표면에서 수월한 전자 이동이 가능하다는 점을 시사한다. 또한, 전류는 주사 속도 (10 ~ 200 mV/s)의 제곱근에 선형적으로 비례하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 Os-1의 산화-환원 반응이 확산 지배적 과정임을 의미한다(Fig. 2(B)). 추가적으로, Fig. 2(C)는 동일한 전기화학적 조건에서 Os-1

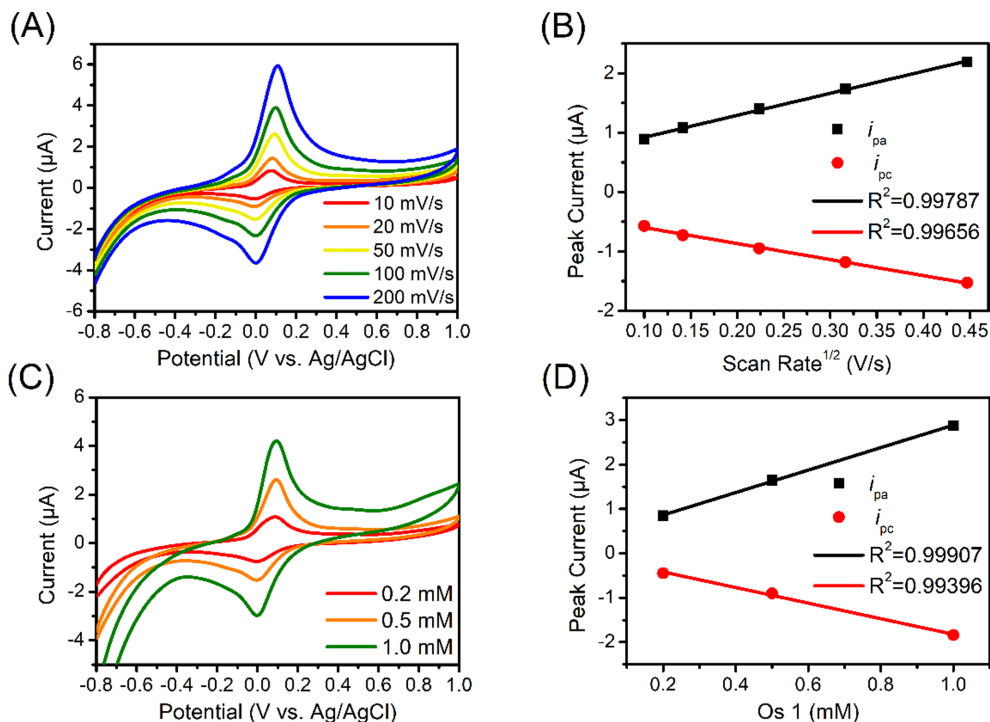


Fig. 2. (A) Cyclic voltammograms of Os-1 on the ITO electrode in 50 mM Tris buffer (pH 9.0) containing 10 mM MgCl<sub>2</sub> at various scan rates. (B) Dependence of anodic and cathodic peak currents on the square root of the scan rate. (C) Cyclic voltammograms of Os-1 on the ITO electrode in the same buffer with different concentrations of Os-1. Scan rate was 50 mV/s. (D) Dependence of anodic and cathodic peak currents on the concentration of Os-1.

의 농도(0.1 ~ 1.0 mM)에 따른 전류를 측정된 순환 전압-전류 곡선을 나타내며, 농도가 증가함에 따라 전류가 선형적으로 증가하는 양상을 확인하였다. 이러한 결과를 Fig. 2(D)에 도시하였다.

### 3.2. Os-1 매개체에 의한 *p*-AP 전기촉매 반응

*p*-아미노페놀(*p*-AP)은 페놀계 유도체로, 센서 분야를 비롯한 다양한 전기화학적 응용에 활용되는 대표적인 전기활성 물질이다.<sup>19)</sup> *p*-AP는 여러 전극에서 산화-환원 반응을 보이지만, ITO 전극에서는 전자 이동이 느리게 나타나는 것으로 보고되었다.<sup>20)</sup> 이를 확인하기 위해, 본 연구에서는 Tris 완충 용액에 0.5 mM *p*-AP가 포함된 용액의 순환 전압-전류 곡선을 측정하였다(Fig. 3). Fig. 3(A)에서는 주사 속도(10 ~ 200 mV/s)가 증가함에 따라, Fig. 3(B)에서는 *p*-AP의 농도(0.1 ~ 1.0 mM)가 증가함에 따라 전류가 증가하는 경

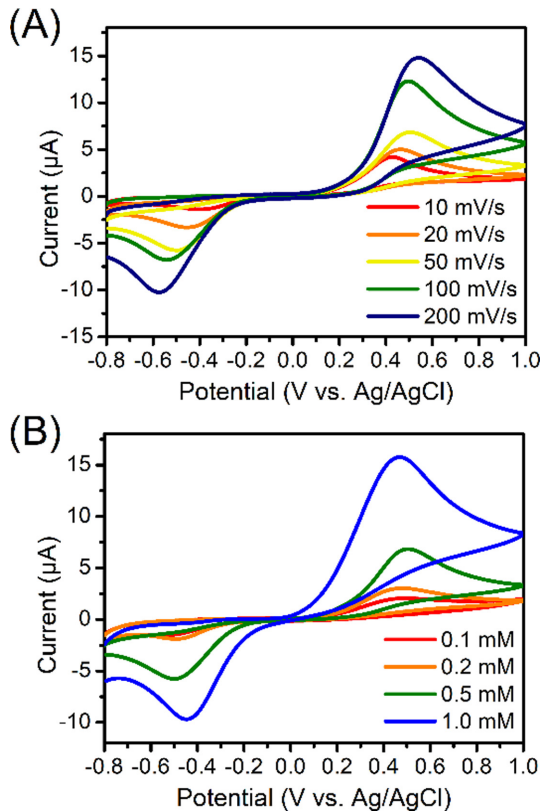


Fig. 3. (A) Cyclic voltammograms of *p*-AP on the ITO electrode in 50 mM Tris buffer (pH 9.0) containing 10 mM MgCl<sub>2</sub> at various scan rates. (B) Cyclic voltammograms of *p*-AP on the ITO electrode in the same buffer with different concentrations of *p*-AP. Scan rate was 50 mV/s.

향을 확인하였다. 그러나 이러한 전압-전류 곡선은 Fig. 2에서 나타난 Os-1의 가역적 거동과 달리 비가역적 특성을 보였다. 이는 *p*-AP가 산화되는 과정에서 생성된

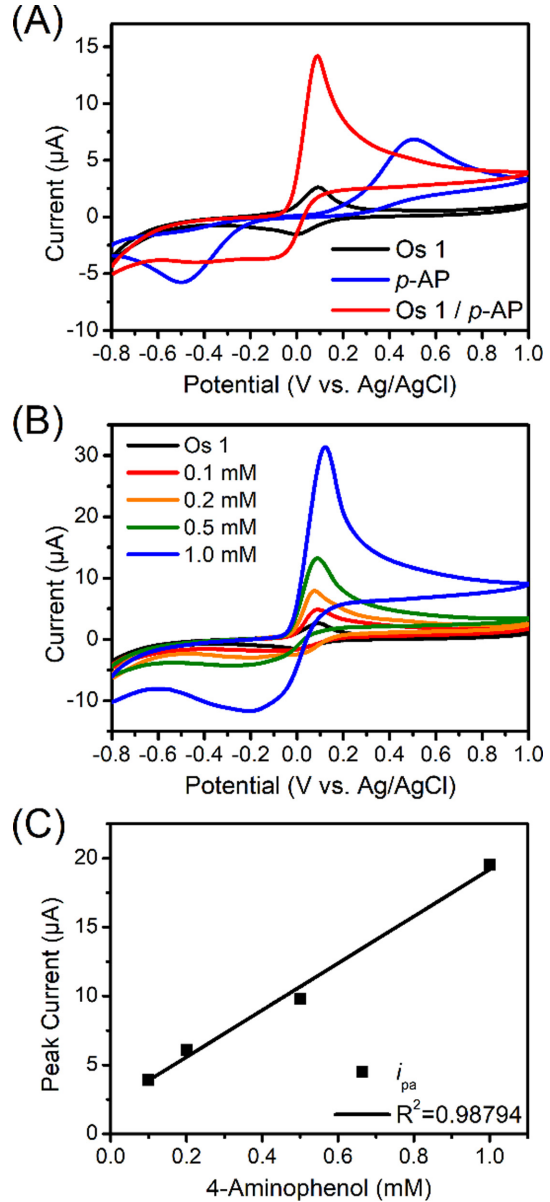
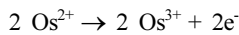


Fig. 4. (A) Cyclic voltammograms of Os-1, *p*-AP, and Os-1/*p*-AP on the ITO electrode in 50 mM Tris buffer (pH 9.0) containing 10 mM MgCl<sub>2</sub>. Scan rate was 50 mV/s. (B) Cyclic voltammograms of Os-1 (black) and Os-1/*p*-AP (0.1-1.0 mM, colored traces) on the ITO electrode in the same buffer with different concentrations of *p*-AP. Scan rate was 50 mV/s. (C) Dependence of anodic peak current on the concentration of *p*-AP.

전자가 ITO 전극에 효과적으로 전달되지 못하여 전기화학적 산화 반응이 제한적으로 진행됨을 의미한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 전자 전달 매개체로서 Os-1을 도입하여 전기화학적 분석을 수행하였다.

Os-1의 전기촉매 효과를 검증하기 위해, 0.5 mM *p*-AP가 포함된 Os-1 용액의 전압-전류 거동을 분석하였다(Fig. 4(A)). Os-1 단독 조건(Fig. 4(A), 검정선)과 비교했을 때, *p*-AP 존재 하에서의 Os-1 (Fig. 4(A), 빨간선)은 산화 전류가 현저히 증가하였으며, 이는 Os-1에 의한 촉매 효과에 기인한 것으로 해석된다. 특히 *p*-AP 단독 조건(Fig. 4(A), 파란선)과의 대조에서는, 산화 피크 전위가 *p*-AP 자체의 산화 전위(+0.5 V vs. Ag/AgCl)에서 Os-1의 산화 전위(+0.1 V vs. Ag/AgCl)로 이동하는 것이 확인되었다. 이는 다음과 같은 메커니즘으로 설명할 수 있다.



여기서, quinone imine은 *p*-AP가 2개의 전자를 잃고 산화된 분자를 의미한다.<sup>21)</sup> 즉, Os-1 산화 전위로의 피크 이동은 *p*-AP의 산화가 Os-1을 매개로 한 제안된 산화-환원 반응을 통해 진행되었음을 나타낸다. 앞서 *p*-AP가 ITO 전극에서 비가역적 거동을 나타낸다는 실험 결과는 Os-1을 통한 매개 산화가 열역학적으로 더 유리한 경로임을 뒷받침한다. 전류 증폭 현상은  $\text{Os}^{2+}/\text{Os}^{3+}$ 의 반복적인 산화-환원 반응에 기인한 촉매 전류의 결과로 설명된다. 이는 *p*-AP의 전기화학적 산화가 Os-1에 의해 촉진되었음을 보여주며, Os-1이 전자 전달 매개체로서 *p*-AP 산화 과정에서 생성된 전자를 전극으로 효과적으로 전달함을 분명히 시사한다.

Fig. 4(B)는 동일한 전기화학적 조건에서 *p*-AP의 농도(0.1 ~ 1.0 mM)에 따른 순환 전압-전류 곡선을 나타내며, 이때 Os-1의 농도는 0.5 mM으로 고정하였다. 분석 결과, *p*-AP 농도가 증가함에 따라 전류가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 관계를 Fig. 4(C)에 도시하였으며, 정량적 분석 지표를 Table 1에 제시하였다. *p*-AP 농도의 증가에 따라 Os-1/*p*-AP 조건의 전류는 Os-1 단독 조건(1.97  $\mu\text{A}$ ) 대비 뚜렷하게 증가하였으며, 1.0 mM *p*-AP 조건에서는 약 10배 가까이 증가하였다. 이는 *p*-AP의 농도가 증가함에 따라 산화 과정에서 더 많은 전자가 발생하고, Os-1이 이를 전극으로 전달함으로써 전류가 증폭된 결과로 해석된다. 따라서 Os-1의 전기촉매 효과가 *p*-AP 농도 변화에 의존함을 정량적으로 확인하였다.

또한 Os-1의 전기촉매 효과가 Os-1 자체의 농도에 의존하는지 확인하기 위해, Tris 완충 용액 조건에서 서로 다른 농도의 Os-1 (0.2, 0.5, 1.0 mM)을 포함한 Os-1/*p*-AP 혼합 용액의 전기화학적 거동을 분석하였으며, 이때 *p*-AP의 농도는 0.5 mM으로 고정하였다(Fig. 5). Os-1 단독 조건(검정선)과 비교했을 때, 모든 농도 조건에서 Os-1/*p*-AP (빨간선)의 전류가 크게 증가하여 촉매 전류의 발생이 확인되었다. 이는 Os-1이 *p*-AP 산화 과정에서 안정적인 전자 전달 매개체로 기능함을 의미한다. Table 2에는 Os-1 단독 및 Os-1/*p*-AP 조건에서의 전류와 상대 증가 값을 정리하였다. Os-1 농도가 낮은 조건(0.2 mM)에서는 약 14.09 배의 증가를 보였으나, 농도가 높아짐에 따라 상대 증가 값은 점차 감소하는 경향을 보여 1.0 mM에서는 약 3.57배에 그쳤다. 측정된 산화 전류는 농도 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 Os-1의 농도가 증가하더라도 *p*-AP의 농도가 제한적이기 때문에 전달 가능한 전자의 양 또한 제한되어 촉매 전

**Table 1. Comparison of anodic peak currents of Os-1 and Os-1/*p*-AP at different concentrations of *p*-AP, together with the calculated enhancement factor (defined as the ratio of anodic peak currents of Os-1/*p*-AP to Os-1).**

	Peak Current of Os-1	Peak Current of Os-1/ <i>p</i> -AP	Enhancement Factor
0.1 mM <i>p</i> -AP	1.97 $\mu\text{A}$	3.89 $\mu\text{A}$	1.97
0.2 mM <i>p</i> -AP		6.10 $\mu\text{A}$	3.10
0.5 mM <i>p</i> -AP		9.80 $\mu\text{A}$	4.97
1.0 mM <i>p</i> -AP		19.51 $\mu\text{A}$	9.90

**Table 2. Comparison of anodic peak currents of Os-1 and Os-1/*p*-AP at different concentrations of Os-1, and the corresponding enhancement factor (defined as the ratio of anodic peak currents of Os-1/*p*-AP to Os-1).**

	Peak Current of Os-1	Peak Current of Os-1/ <i>p</i> -AP	Enhancement Factor
0.2 mM Os 1	0.85 $\mu\text{A}$	12.80 $\mu\text{A}$	15.06
0.5 mM Os 1	1.65 $\mu\text{A}$	12.92 $\mu\text{A}$	7.83
1.0 mM Os 1	2.88 $\mu\text{A}$	13.16 $\mu\text{A}$	4.57

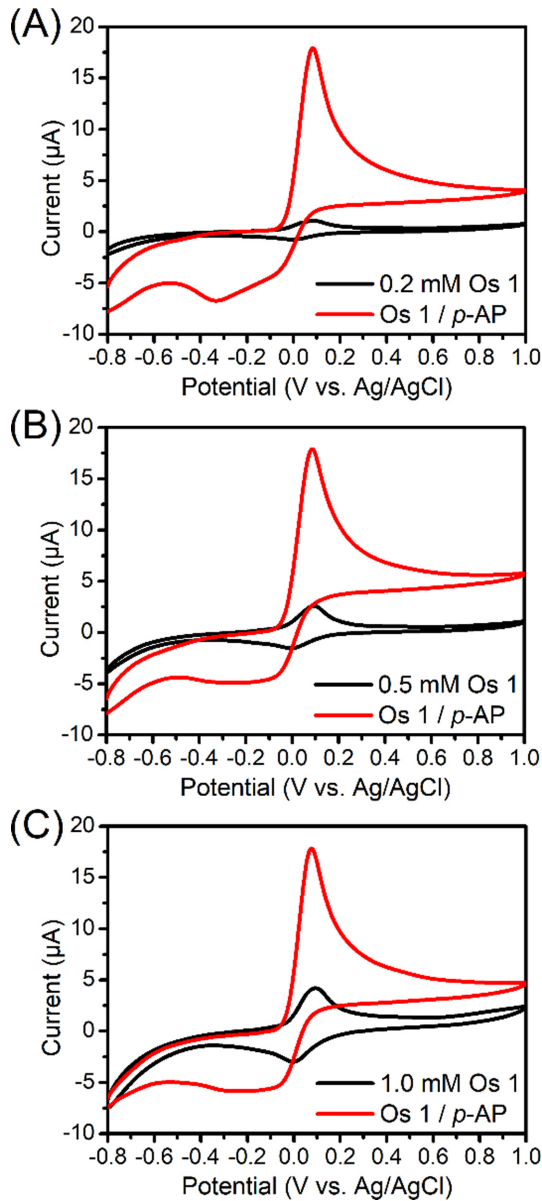


Fig. 5. Cyclic voltammograms of Os-1 and Os-1/*p*-AP on the ITO electrode in 50 mM Tris buffer (pH 9.0) containing 10 mM MgCl<sub>2</sub> with different concentrations of Os-1: (A) 0.2 mM, (B) 0.5 mM, and (C) 1.0 mM. Scan rate was 50 mV/s. The Os-1/*p*-AP current was not significantly affected by changes in concentration of Os-1.

류의 세기가 일정하게 유지된 결과로 해석된다. 따라서 Os-1의 전기촉매 효과는 Os-1 자체의 농도 변화보다 *p*-AP 농도에 상대적으로 더 크게 의존함을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 인듐 주석 산화물(ITO) 전극에서 오스뮴 기반 착물([Os(4,4'-dimethoxy-2,2'-bipyridine)<sub>2</sub>(pyridine-NH<sub>2</sub>)]PF<sub>6</sub>; Os-1)의 전기화학적 특성과 *p*-아미노페놀(*p*-AP) 산화 반응에서의 전자 전달 매개체 역할을 종합적으로 규명하였다. Os-1은 ITO 전극에서 안정적이고 가역적인 산화-환원 특성을 나타냈으며, 이는 장기적 전기화학적 활용 가능성을 뒷받침한다. 특히 *p*-AP 단독 조건에서 관찰된 비가역적 산화 거동과 낮은 전자 이동 효율은 Os-1이 도입됨으로써 극복되었으며, *p*-AP의 산화 피크 전위가 Os-1의 산화 전위로 이동하고 전류가 현저히 증가하는 전기촉매 효과를 확인하였다. 이러한 결과는 Os(II/III) 전환 과정이 전자 전달을 매개하여 *p*-AP 산화를 열역학적으로 더 유리하고 촉진된 경로로 진행시킴을 보여준다. 또한 *p*-AP 농도의 증가에 따라 전류가 선형적으로 증대됨을 통해, Os-1의 촉매 활성은 주로 기질 농도에 의존함을 규명하였다. 종합하면, Os-1이 ITO 전극에서 안정적이고 효율적인 전자 전달 매개체로 작용하여 *p*-AP의 산화 반응을 효과적으로 촉진할 수 있음을 입증하였다. 이는 오스뮴 착물이 기존 매개체(예: 페로센 유도체)의 한계를 보완하거나 대체할 수 있는 차세대 전자 전달 매개체 후보임을 시사하며, 향후 다양한 전기활성 물질의 분석 및 고성능 바이오센서 개발에 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사 사

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2025-00553280, RS-2025-24683517)임을 밝힙니다.

#### 참고문헌

1. N. Bhalla, P. Jolly, N. Formisano, and P. Estrela, Introduction to biosensors, *Essays Biochem.*, **60**(1), 1–8 (2016).
2. K. Hu, W. Yin, Y. Bai, J. Zhang, J. Yin, Q. Zhu, and Y. Mu, CRISPR-based biosensors for medical diagnosis: readout from detector-dependence detection toward naked eye detection, *Biosensors*, **14**(8), 367 (2024).
3. D.-K. Vo and K. T. L. Trinh, Advances in wearable biosensors for healthcare: current trends, applications, and future perspectives, *Biosensors*, **14**(11), 560 (2024).
4. C.-W. Huang, C. Lin, M. K. Nguyen, A. Hussain, X.-T. Bui, and H. H. Ngo, A review of biosensor for environmental monitoring: principle, application, and corresponding achievement of sustainable development

- goals, *Bioengineered*, **14**(1), 58–80 (2023).
5. S. Damiati, C. Haslam, S. Sjøstad, M. Peacock, T. Whitley, P. Davey, and S. A. Awan, Sensitivity comparison of macro- and micro-electrochemical biosensors for human chorionic gonadotropin (hCG) biomarker detection, *IEEE Access*, **7**, 94048–94058 (2019).
  6. V. Naresh and N. Lee, A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors, *Sensors*, **21**(4), 1109 (2021).
  7. M. Ghosh and V. R. Bora, Evolution in blood glucose monitoring: a comprehensive review of invasive to non-invasive devices and sensors, *Discov. Med.*, **2**(1), 74 (2025).
  8. S. A. Pullano, M. Greco, M. G. Bianco, D. Foti, A. Brunetti, and A. S. Fiorillo, Glucose biosensors in clinical practice: principles, limits and perspectives of currently used devices, *Theranostics*, **12**(2), 493–511 (2022).
  9. P. Bollella and E. Katz, Enzyme-based biosensors: tackling electron transfer issues, *Sensors*, **20**(12), 3517 (2020).
  10. H. Lee, S. S. Reginald, J. S. Srajan, M. Lee, and I. S. Chang, Advanced strategies for enzyme–electrode interfacing in bioelectrocatalytic systems, *Trends Biotechnol.*, **43**(6), 1328–1355 (2025).
  11. M. S. Sumitha and T. S. Xavier, Recent advances in electrochemical biosensors – A brief review, *Hybrid Adv.*, **2**, 100023 (2023).
  12. C. Quan, Y. Zhang, Y. Liu, L. Wen, H. Yang, X. Huang, M. Yang, and B. Xu, Electrochemical glucose sensor based on dual redox mediators, *Biosensors*, **15**(1), 9 (2025).
  13. L. Mtemeri and D. P. Hickey, Model-driven design of redox mediators: quantifying the impact of quinone structure on bioelectrocatalytic activity with glucose oxidase, *J. Phys. Chem. B*, **127**(36), 7685–7693 (2023).
  14. J. M. Dicks, S. Hattori, I. Karube, A. P. Turner, and T. Yokozawa, Ferrocene modified polypyrrole with immobilised glucose oxidase and its application in amperometric glucose microbiosensors, *Ann. Biol. Clin. (Paris)*, **47**(10), 607–619 (1989).
  15. H. Gunasingham and C.-H. Tan, Mediated enzyme/wall-jet amperometric electrode in flow-injection monitoring of glucose, *Electroanalysis*, **1**(5), 423–429 (1989).
  16. A. M. Bond and M. Haga, Spectrophotometric and voltammetric characterization of complexes of bis(2,2'-bipyridine)(2,2'-bibenzimidazole)ruthenium and -osmium in oxidation states II, III, and IV in acetonitrile/water mixtures, *Inorg. Chem.*, **25**(25), 4507–4514 (1986).
  17. K. Yamamoto, H. Zeng, Y. Shen, M. M. Ahmed, and T. Kato, Evaluation of an amperometric glucose biosensor based on a ruthenium complex mediator of low redox potential, *Talanta*, **66**(5), 1175–1180 (2005).
  18. S. Jasimuddin, G. Mostafa, and C. Sinha, Mixed ligand complexes of osmium(II)-2,2'-bipyridine: synthesis, spectral characterization and electrochemical properties of bis-chelated-arylazoimidazole-bipyridine-osmium(II) and X-ray crystal structure of [(2,2'-bipyridine)-bis-{1-methyl-2-(p-tolylazo)imidazole}osmium(II) hexafluorophosphate, *Inorg. Chim. Acta*, **357**(7), 1975–1984 (2004).
  19. G. Buckley, O. E. Owens, A. W. Gabriel, C. M. Downing, M. C. Calhoun, and D. E. Cliffel, Adsorption and electropolymerization of *p*-Aminophenol reduces reproducibility of electrochemical immunoassays, *Molecules*, **27**(18), 6046 (2022).
  20. Md. A. Azia and H. Yang, Electrochemical immunosensor using the modification of an amine-functionalized indium tin oxide electrode with carboxylated single-walled carbon nanotubes, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **28**(7), 1171–1174 (2007).
  21. M. Park, Y. Song, K. J. Kim, S. J. Oh, J. K. Ahn, H. Park, H.-B. Shin, and S. J. Kwon, Electrochemical immunosensor for human IgE using ferrocene self-assembled monolayers modified ITO electrode, *Biosensors*, **10**(4), 38 (2020).