

무전해도금법을 이용한 Pd 기반 전극 · 제조에 관한 연구

황인혁 · 이동윤* · 김성수*†

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, 경기대학교 환경에너지공학과*
(2018년 12월 10일 접수: 2018년 12월 24일 수정: 2018년 12월 25일 채택)

A Study on Pd-based Electrode prepared by using Electroless Plating Method

In Hyuck Hwang · Dong Yoon Lee · Sung Su Kim†

*Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University
94 San, Iui-dong, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi, 16227, Korea*

**Department of Environmental Energy Systems Engineering, Kyonggi University
94 San, Iui-dong, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi, 16227, Korea*

(Received December 10, 2018; Revised December 24, 2018; Accepted December 25, 2018)

요 약 : 본 연구에서는 무전해도금법을 이용한 Pd coating 기술을 활용하여 폐수처리를 위한 전기분해 공정에 anode로의 적용을 목적으로 Ti-mesh 기반 전극을 제조하였다. 제조된 Pd/Ti-mesh 전극은 염색염료인 RO16을 대표로 그 제거성능을 평가하였으며, 전극 제조조건을 다르게 하여 내구성 및 성능을 극대화한 결과 coating 조건은 성능에 크게 영향을 미치지 않았지만, Pd coating 후 열처리 공정의 경우 성능에 크게 영향을 미쳤으며, 내구성 역시 증진됨을 확인하였다. 또한 Ir, Ru, Ta를 복합화하여 성능 및 내구성을 극대화하고자 하였으나, coating법의 한계로 layer의 thickness가 증가함에 따라 저항이 커졌으며, 이에 따라 성능이 감소함을 확인하였다.

주제어 : 전극, 양극, 무전해도금, 팔라듐, RO16

Abstract : In this study, Ti-mesh based electrodes were fabricated for the application of anode to the electrolysis process for wastewater treatment using Pd electroless plating method. The removal performance of the prepared Pd / Ti-mesh electrode was evaluated as representative dye RO16, and the durability and performance were maximized by varying the electrode manufacturing conditions. As a result, it was confirmed that the coating condition had no significant effect on the performance, and that the heat treatment process greatly affected the performance and the durability was improved. In

†Corresponding author
(E-mail: sskim@kyonggi.ac.kr)

addition, we tried to maximize performance and durability by complexing Ir, Ru, and Ta. However, as the thickness of the layer increased due to the limitation of the coating method, the resistance increased and the performance decreased accordingly.

Keywords : Electrode, anode, electroless plating, Palladium, reactive oreage 16

1. 서론

산업이 발전함에 따라 폐수의 발생원이 다양해지고, 발생하는 폐수의 성상 역시 다양해졌다. 석유화학산업을 포함하여 몇몇 산업현장에서는 미량의 난분해성 물질과 독성물질을 포함한 폐수가 발생하고 있다. 이러한 난분해성물질, 독성물질은 미량으로도 생태계뿐만 아니라 인간에게도 영향을 미칠 수 있기 때문에 제거가 필수적이다 [1-3].

폐수의 처리 공법은 크게 물리적 처리, 화학적 처리, 생물학적 처리로 구분된다. 일반적인 수처리 공정에서는 활성슬러지법을 기본으로 한 생물학적 처리 공정과 일부 물리화학적 처리 공정이 혼합된 형태가 사용되고 있다. 생물학적 처리 공정은 유지관리가 저렴하여 가장 보편적인 폐수처리 기술로 적용되고 있으나, 처리 대상 폐수에 따라 난분해성물질을 포함하거나 독성을 나타내는 경우 생물학적 처리공정의 적용이 불가능한 단점이 있다 [4, 5].

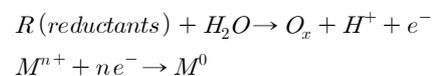
한편 전기화학적 처리방법은 타 폐수처리방법들에 비해 비교적 요구되는 반응기의 규격이 작고 추가적인 약품 투입이 요구되지 않아 경제적이며, 공정의 구성이 간단하고 운전이 간편하다 [6-8]. 또한 전극의 산화환원반응에 의해 색도, 유기물을 포함한 난분해성 물질의 동시 처리 가능하고, 그 속도가 비교적 빠르다. 또한, 전기분해 반응 후 생성되는 생성물은 CO₂, N₂ 등으로 매우 안정하고 무해한 저분자 유기화합물이므로, 대부분의 공정에서 슬러지가 거의 생성되지 않거나 소량 생성되기 때문에 추가적인 2차 처리를 필요로 하지 않는 장점도 있다 [9].

전기분해는 대상 물질의 제거 메커니즘에 따라 직접 산화반응과 간접 산화반응으로 구분된다. 직접 산화반응은 폐수중의 오염물질과 전극 계면 사이에서 전자 교환이 직접적으로 이루어져 산화환원되는 전기화학적 반응이고, 간접산화반응은 공급되는 전류에 의해 전극 표면에서 발생된

hydroxyl, hypochlorite, 오존, 과산화수소와 같은 산화제가 폐수 중의 오염물질과 2차 반응이 진행되는 반응이다 [6]. 간접산화는 일반적으로 Cl⁻ 이온을 포함하는데, 이 때 발생하는 HOCl은 반응성이 매우 높으며, 수중에서 OCl⁻ 또는 ClO₂⁻로 존재할 수 있다. 이러한 HOCl, OCl⁻, ClO₂⁻, Cl₂ 등의 산화제는 그 산화력이 매우 강해 오염물질의 산화에 매우 뛰어난 장점이 있다.

이러한 전기분해 공정은 수중에서의 산화환원을 위한 anode와 cathode로 구성되는데, 직접산화에서 대상물질의 분해는 anode에서 발생하며, 간접산화에서 오염물질을 분해하기 위한 산화제 역시 anode에서 발생되기에 anode에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 폐수처리에 사용되는 anode의 제조에는 Ir, Ru, Ta, Pd, Ru, Pt 등 대부분 금속, 귀금속 물질이 사용되었으며, 선행 연구에서 Chen 등 [10-12]은 Pt, Ru, Ir, Pd를 기반으로 하여 anode를 제조하여 산화 성능과 내구성을 확보하였다. 위와 같은 연구 결과에 따르면 금속, 귀금속 중에서도 특히 Pd계 귀금속이 우수한 성능을 나타내며, 전극 기판에 코팅되는 코팅층의 두께 및 균일도가 전극의 성능 및 내구성에 가장 직접적으로 영향을 미치는 인자라고 보고되고 있다.

한편 무전해도금은 일반적인 전해도금과는 다르게 전기를 사용하지 않고 환원제를 이용하여 액상의 금속 이온을 환원시켜 석출시키는 도금법이다. 무전해도금법의 기본적인 반응은 다음과 같다.



무전해도금은 전해도금과 달리 Direct Current (DC) power supply와 같은 장비 없이 plating solution 및 환원제만으로 도금이 가능하다. 무전해도금에 사용되는 plating solution은 다양한 크기와 종류의 비금속, 귀금속 및 반도체 금속으로

구성되며, 전극 기판에 무전해도금을 수행함으로써 pin-hole 또는 crack이 없는 밀도 높은 코팅층을 형성할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 우수한 성능과 내구성을 갖는 anode 전극을 확보하기 위하여 Pd 기반 무전해도금법을 이용하였으며, 제조된 전극은 상용 DSA전극과 비교하였다. 또한, 전극소재 제조 시 무전해도금법의 온도 조건 및 후처리 조건을 다르게 하여 전극의 성능을 극대화하고자 하였으며, Ir, Ru, Ta을 이용한 복합화를 수행하여 전극의 내구성 극대화를 시도하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 방법

2.1.1. 전극소재 제조

본 연구에서 제조한 전극소재는 Ti-mesh를 기판으로 사용하였다. 기판 표면의 Pd layer 형성은 무전해도금법을 이용하였다. 아래의 Fig. 1에 무전해도금법의 순서도를 나타내었으며, Table 1에 무전해도금법의 조건을 나타내었다. 제조된 전극의 성능 및 내구성 극대화를 위한 고온 후처리는 N₂ 분위기에서 400-900°C로 온도를 다르게 하여 수행하였다.



Fig. 1. Manufacturing step of palladium electroless plating.

Table 1. Conditions of palladium electroless plating.

Index	Value
Pd-plating solution	4 g/L
	15 ml
Hydrazine	1 M
	6 drops
Reaction time	1 hr

또한 복합화를 위해 기판 표면에 Ir-Ru-Ta layer를 형성하기 위해, brush 코팅법을 수행하였다. 아래의 Fig. 2에 brush 코팅법의 순서도를 나타내었으며, Table 2에 Ir-Ru-Ta 코팅 용액의 제조 조건을 나타내었다. 제조된 전극의 성능 및 내구성 극대화를 위한 고온 후처리는 N₂ 분위기에서 400-900°C로 온도를 다르게 하여 수행하였다.



Fig. 2. Manufacturing step of Ir-Ru-Ta/Ti-mesh using brush coating.

Table 2. Conditions of Ir-Ru-Ta coating solution

Materials	Concentration, g/L
Ir solution	30
Ru solution	10
Ta solution	200

2.1.2. 전극소재의 성능평가

전기분해 실험을 위해 아크릴로 제작한 4.78 L 규모의 반응기를 사용하였으며, 전류 공급을 위하여 직류 전원공급기(Sewoon power tech, 20 A, 50 V)를 사용하였다. 전극의 성능평가는 상온에서 교반기를 이용하여 완전 혼합 조건에서 실험하였으며, 대상 물질은 대표적인 염색염료인 reactive orange 16 (RO16)을 사용하였으며, 전해질로는 Na_2SO_4 를 사용하였다. 대상 물질과 전해질의 농도는 각각 10 ppm, 0.07 mol/L로 하였고, 전극간의 거리는 55 mm, 전류밀도는 0.04 A/cm²로 하였다. 염료의 제거율을 측정하기 위하여 UV absorption analysis를 사용하였으며, 그 조건을 아래 Table 4에 나타내었다.

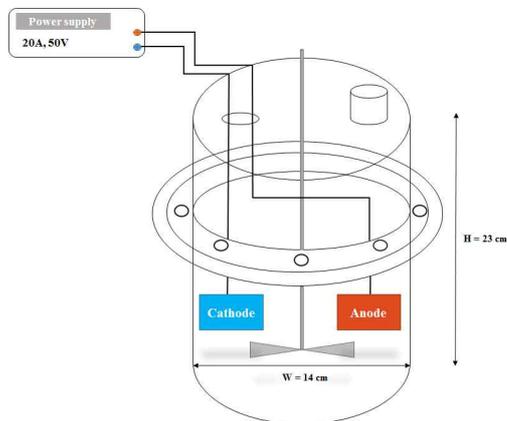


Fig. 3. Schematic diagram of electro-chemical reactor.

2.2. 소재의 물성 분석

제조한 전극소재는 FESEM (Scinco社, JSM-6500F) 분석을 통해 형성된 Pd grain의 분포 형태 및 크기를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 상용 DSA전극과 Pd 무전해도금 기반 전극

일반적으로 수 처리 공정에 사용되고 있는 전극은 불용성 전극인 DSA전극이다. 해당 전극은 Ti 기판 위에 Ir, Ru 등의 전이금속 산화물을 활성물질로 하여 열 분해법(thermal decomposition)을 이용하여 제조된다. DSA 전극은 열적, 화학적으로 안정하고 저항이 작은 특징을 갖으며, 간접 산화반응 메커니즘을 따라 산화제를 생성하는데 우수한 성능을 나타낸다고 알려져 있다. 이러한 DSA전극을 대조군으로 설정하여 본 연구에서 개발한 전극과의 성능을 비교/평가하고자 하였다. 대표적인 염색염료인 RO16을 대상으로 동일 조건에서의 성능을 평가한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 때, 보다 고전압을 걸어주어 극한의 조건에서 확실한 구배를 확인하고자 하였다. DSA의 경우 약 4회의 반복실험 결과 40%의 RO16 제거율을 나타내었으며, 회차를 거듭함에도 불구하고 거의 일정한 성능을 나타내었다. 반면, 무전해도금법을 이용하여 제조한 Pd/Ti-mesh 전극의 경우 초기에는 약 75%의 비교적 우수한 성능을 나타내었으나, 2회 반복 시 20% 이하로 성능이 저하됨을 확인하였다.

Table 3. Conditions of electrolysis process

Index	Value
Processing capacity	1 L
Target material and concentration	RO16/1-10 ppm
Electrolyte type and concentration	Na_2SO_4 /0.08 mol/L
Electrode type and size	Commercial electrode/20 mm * 40 mm
The distance between the electrodes	55 mm
Current density	0.04115 A/cm ²
Reaction time	1 hr
Sampling time	10 min interval
Temperature	Room temperature

Table 4. RO16 UV absorption analysis conditions

Index	Value
Model	SP-2000UV
Spectral bandwidth	4 nm
Optical system	Single beam
Detector	Si photodiode
Light source	Tungsten & Deuterium
RO16, Reactive orange 16	C20H17N3Na2O11S3
Concentration	20 mg/L
Absorption	492 nm

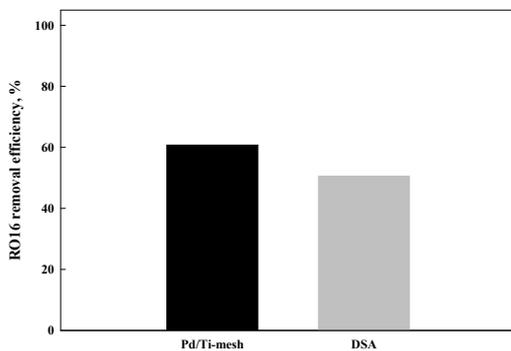


Fig. 4. RO16 removal performance of DSA and Pd/Ti electrodes, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na_2SO_4 0.07 mol/L, electrode size = 20×40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm^2 , reaction time = 1 h, temperature = $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

전극 성능의 저하는 다양한 요인에 의해 결정된다. 특히 전극 표면의 코팅층이 탈락되거나 훼손되며 성능저하가 발생할 수 있다. 위의 실험에

서 사용된 Pd/Ti-mesh 전극의 경우 Pd 무전해도금 이후 건조공정만을 수행하여 사용하였다. 때문에 고온 열처리공정을 수반하는 상용 DSA전극에 비해 표면의 내구성이 비교적 낮을 것으로 예상된다.

이를 검증하기 위하여 전기분해 공정을 수행한 이후 폐수의 ICP 분석을 수행하여 용액 내 용출된 귀금속의 이온 농도를 측정하였다. Table 5에서 확인할 수 있듯, 두 전극 모두 Ti를 전극 기판으로 사용하였기에 일부 Ti 이온이 검출되었으며, Pd/Ti-mesh 전극의 경우 약 0.0476 ppm의 Pd 이온이 검출됨을 확인하였다. 반면, 상용 DSA전극의 경우 표면에 코팅된 Ta, Ru, Ir이 거의 용출되지 않았다. 이와 같은 결과에 따라 무전해도금법을 이용하여 형성한 Pd layer의 내구성을 보다 향상시키기 위하여 제조 조건 및 후처리 조건을 조절하고자 하였다.

3.2. 무전해도금 조건에 따른 영향

무전해도금은 환원제가 투입되는 용액의 온도에 따라 형성되는 Pd의 형태 및 크기가 달라진다. 기존의 연구결과에 따르면 무전해도금 온도가 높을 때 grain의 크기가 커지며, 형성되는 속도 역시 빠르다고 알려져 있다[13-15]. 이러한 무전

Table 5. IC/ICP result of electrolyzed RO16 wastewater using DSA and Pd/Ti-mesh electrodes

	Ti	Ta	Pd	Ru	Ir
DSA	0.053	<0.013	<0.013	<0.008	<0.008
Pd/Ti-mesh	0.0552	<0.013	0.0476	<0.008	<0.008

Table 6. IC/ICP result of electrolyzed RO16 wastewater using DSA and Pd/Ti-mesh electrode in various plating temperature conditions

	Pd	Ir	Ru	Ta
T2	0.0890	-	-	-
T4	0.0523	-	-	-
T6	<0.013	-	-	-
DSA	-	<0.008	<0.008	<0.0421

해도금법의 특성이 전극 제조 시 미치는 영향을 평가하고자 상온, 55 °C, 85 °C의 조건으로 무전해도금 온도를 각각 다르게 하여 전극을 제조하였다. 앞선 실험과 동일한 조건에서 RO16 제거 성능을 Fig. 5에 나타내었다.

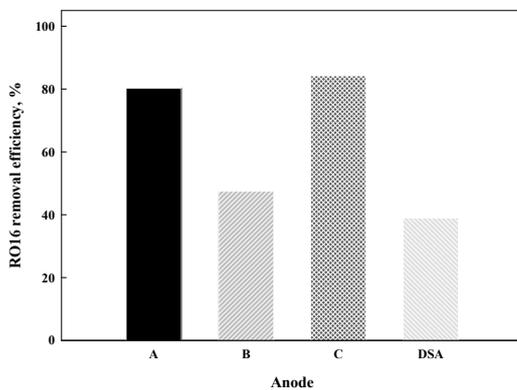


Fig. 5. Effect of temperature in Pd-plating conditions on performance of RO16 removal using Pd/Ti-mesh electrodes, A: 25 °C, B: 55 °C, C: 85 °C, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na₂SO₄ 0.07 mol/L, electrode size = 20 × 40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm², reaction time = 1 h, temperature = 21 °C.

상용 DSA전극과 비교하였을 때 무전해도금 온도를 다르게 하여 제조한 모든 Pd/Ti-mesh 전극이 우수한 RO16 제거 성능을 나타내었으나, 무전해도금 온도와 제거성능과의 상관성은 나타나지 않았다. 하지만 Table 6에서 볼 수 있듯, 전기

분해 이후 폐수의 ICP분석을 수행한 결과 무전해도금 온도가 높을수록 Pd 이온이 적게 존재함을 확인하였다. 이에 따라 고온에서 형성된 Pd grain이 보다 강하게 Ti-mesh 표면과 결합되어있음을 추측할 수 있다.

3.3. 후처리 조건에 따른 영향

앞선 결과에 따라 Ti-mesh 표면에 형성되어있는 Pd layer와 Ti-mesh와의 부착 세기가 내구성에 영향을 미침을 확인할 수 있었기에 부착 세기를 극대화하기 위한 고온 후처리공정을 수행하고자 하였다. 가장 우수한 성능을 나타낸 80 °C에서 환원한 전극을 대상으로 N₂ 분위기, 600 °C에서 열처리를 수행한 결과 Fig. 6와 같이 성능이 약 20% point 가량 증가하였으며, ICP 분석 결과 Pd 용출량 역시 매우 미미한 수준으로 측정되었다. 이러한 결과에 따라 고온 후처리 공정이 전극소재의 내구성뿐만 아니라 성능에도 영향을 미칠 것으로 판단되어 후처리 온도에 따른 영향을 평가한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 때 무전해도금 공정은 상온에서 수행되었다.

가장 우수한 제거 성능을 나타낸 전극은 600 °C에서 열처리된 전극으로, 약 95%에 가까운 RO16 제거 성능을 나타내었으며, 이보다 높은 온도조건에서 열처리된 전극의 경우 점차 제거율이 감소하여 800 °C에서 열처리한 전극은 60%의 제거율까지 감소하였다. 이러한 현상은 온도가 높아짐에 따라 Pd가 응집되며 전극 표면의 물성이 달라졌기 때문에 판단된다. Pd의 경우 약 640 °C가 tamman temperature로써 분자가 진동하여 서로 응집되기 시작한다. 이러한 현상은 촉매 분야에서 언급되는데, 이러한 응집에 의한 입자 크기의 증가 및 표면 활성점 감소로 촉매반응의 효율이 낮아진다는 연구 결과가 다수 발표되었다 [16-18]. 본 연구에서 역시 이러한 물성 변화에

의해 전극의 전기분해 효율이 영향을 받았을 것으로 추측된다.

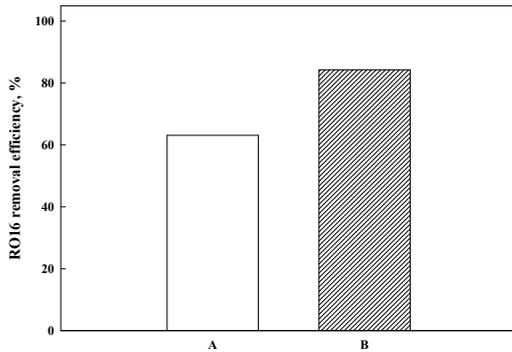


Fig. 6. Effect of heat treatment on performance of RO16 removal using Pd/Ti-mesh electrodes, A: before heat treatment, B: after heat treatment, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na₂SO₄ 0.07 mol/L, electrode size = 20 × 40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm², reaction time = 1 h, temperature = 21 °C.

Table 7. IC/ICP result of electrolyzed RO16 wastewater using Pd/Ti-mesh electrode in various heat treatment temperature conditions

Temperature	Pd
300	0.0931
400	0.1427
500	0.1114
600	0.1373
700	0.4237
800	0.5358

해당 전극들을 이용하여 RO16 제거성능 평가 후 용출된 Pd 농도를 분석한 결과를 Table 7에 나타내었다. 80 °C에서 무전해도금을 수행하고

열처리를 수행하지 않은 앞선 전극의 경우 Pd 용출량이 극미량으로 거의 검출되지 않은 반면 고온 후처리를 수행한 후에는 오히려 미량의 Pd가 검출되었다. 또한 700 °C 이상의 온도에서 처리한 전극의 경우 전기분해 후 Pd 용출량이 급격히 증가하여 최대 0.5358 ppm의 Pd가 용출되었다. 이는 앞서 언급한 열처리에 의한 표면 물성의 변화와 관련이 있을 것으로 보이며, 열 충격에 의한 영향이 있는 것으로 생각되어 내구성 확보에는 다소 한계가 존재할 것으로 생각된다.

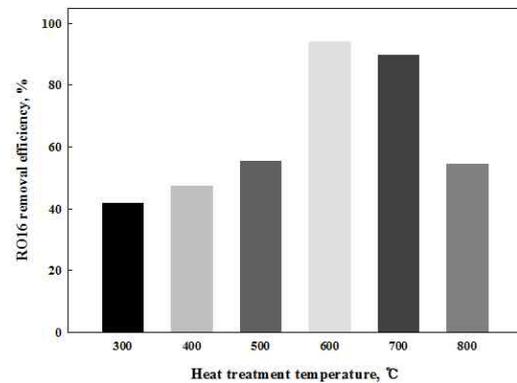


Fig. 7. Effect of temperature in heat treatment conditions on performance of RO16 removal using Pd/Ti-mesh electrodes, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na₂SO₄ 0.07 mol/L, electrode size = 20 × 40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm², reaction time = 1 h, temperature = 21 °C.

3.4. Pd 무전해도금 기반 전극소재의 복합화

현재 상용화 되어있는 DSA 전극의 표면은 Ir, Ru, Ta와 같은 전이금속으로 구성된다. 이러한 전이금속은 간접산화에 요구되는 산화제 생성에 우수한 특성을 보임과 동시에, 반응에 대해 우수한 내구성을 갖는 것으로 알려져 있다[19]. 본 연구에서는 이러한 전이금속을 이용하여 내구성을 확보하기 위하여 Pd layer와 함께 Ir-Ru-Ta의 복합 코팅층을 형성하였다. Ir-Ru-Ta 코팅은 brush 코팅법을 이용하였으며, 코팅층과 기판과의 접착을 위해 열처리를 수행하였다.

전기분해 반응에서는 전극에 의한 저항, 표면 금속의 반응에 대한 활성도 등이 반응에 매우 중요한 인자로 작용한다. 때문에 전극의 bulk와 표면의 구성 물질, 형태 등에 따라 전극의 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 형성하고자 하는 Pd layer와 Ir-Ru-Ta layer의 복합화 순서를 다르게 하여 그 영향을 평가하였다. 복합화 이전에 Ir-Ru-Ta layer에 의한 RO16 산화성능을 평가한 결과 Fig. 8와 같이 약 20%의 제거 효율을 나타내며 Pd layer보다 현저히 낮은 성능을 보였다. 또한 복합화를 수행한 이후에도 Fig. 9에서 볼 수 있듯, Ir-Ru-Ta layer가 최 외곽에 형성될 경우 낮은 성능을 보였으며, Pd layer가 최 외곽에 형성될 경우에만 일부 성능이 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과는 전극 표면에서의 Pd와 염료의 직접산화반응이 보다 우수한 활성을 나타냄을 의미한다.

· 최종적으로 Pd 및 Ir-Ru-Ta 코팅을 복합화한 전극의 장시간 평가를 진행하였다(Fig. 10). 10시간 평가한 결과, 지속적으로 RO16을 제거하는 것으로 나타났다.

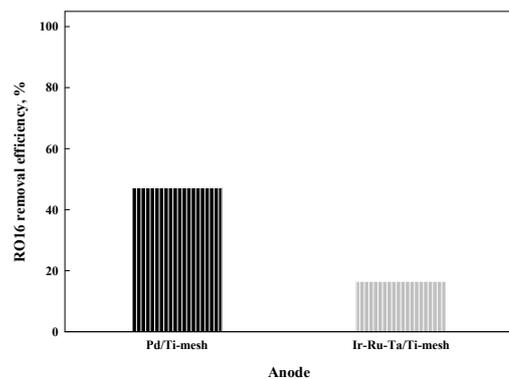


Fig. 8. Effect of Pd and Ir-Ru-Ta layer of RO16 removal, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na_2SO_4 0.07 mol/L, electrode size = 20×40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm^2 , reaction time = 1 h, temperature = 21°C .

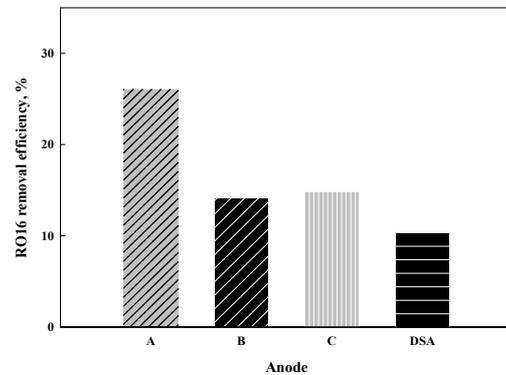


Fig. 9. Effect of layer in coating conditions on performance of RO16 removal using A, B, C, and DSA electrodes, A: Pd/Ir-Ru-Ta/Ti-mesh, B: Ir-Ru-Ta/Pd/Ti-mesh, C: Ir-Ru-Ta/Pd/Ir-Ru-Ta/Ti-mesh, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na_2SO_4 0.07 mol/L, electrode size = 20×40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm^2 , reaction time = 1 h, temperature = 21°C .

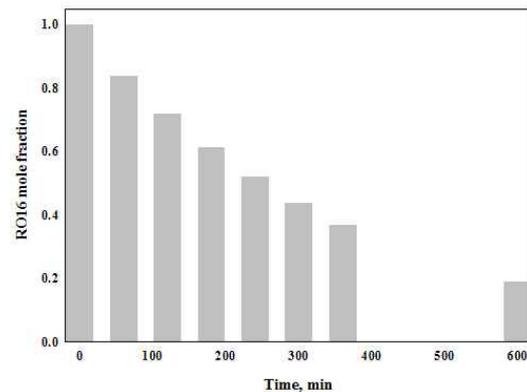


Fig. 10. Longevity test of Pd/Ir-Ru-Ta/Ti anode, capacity = 1 L, RO16 concentration = 10 ppm, electrolyte type and concentration = Na_2SO_4 0.07 mol/L, electrode size = 20×40 mm, distance between the electrodes = 55 mm, current density = 0.04 A/cm^2 , reaction time = 10 h, temperature = 21°C .

4. 결론

Ti-mesh 지지체에 Pd 기반 무전해도금법과 Ir-Ru-Ta brush 코팅법을 적용한 anode 전극의 무전해도금 조건과 후처리 조건에 따른 영향을 확인하였다. 또한 제조된 전극과 상용 DSA 전극과의 비교를 통해 anode 전극 기술로써의 Pd 및 Ir-Ru-Ta 코팅법의 가능성을 확인하였고, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 무전해도금한 Pd/Ti-mesh 전극은 상용 DSA 전극과 비교했을 때, RO16을 보다 효과적으로 제거하는 것으로 나타났다. 또한 고온에서 형성된 Pd grain이 보다 강하게 Ti-mesh 표면과 결합된 것을 추측할 수 있었으나, 무전해도금 온도와 제거성능과의 상관성은 나타나지 않았다.
2. Ti-mesh 표면에 형성된 Pd layer와 Ti-mesh와의 부착 세기를 극대화하기 위한 고온 후처리공정을 수행한 결과, 600 °C 열처리했을 때의 전극이 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.
3. 복합화에 따른 전극 표면의 Pd layer와 Ir-Ru-Ta layer 각각이 염료의 직접산화반응에 미치는 영향을 확인한 결과, Pd layer가 전극 성능에 주요 역할을 하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경산업선진화기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2016000140004).

References

1. I. T. Yeom, "Study on appropriate treatment & management of the public sewage treatment works entering the industrial wastewater", *National institute of Environmental*, (2011).
2. S. H. Lee, J. H. Kim, "The study of mutagenicity and organic pollutant in Nakdong river water basin", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol.19, No.6 pp. 785-798, (1997).
3. M. C. Lee, H. Y. Lee, J. J. Lim, D. A. Ryu, "Minimization of specific water pollutants and improvement of management system", *Proceedings of Korea Society For Regulatory Studies*, (2015).
4. M. Luan, G. Jing, Y. Piao, D. Liu, L. Jin, "Treatment of refractory organic pollutants in industrial wastewater by wet air oxidation", *Arabian J. Chem.*, Vol.10, No.1, pp. 769-776, (2017).
5. J. Levec, A. Pinter, "Catalytic wet-air oxidation processes: A review", *Catal. Today*, Vol.124 No.3-4, pp. 172-184, (2007).
6. G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment", *Sep. Purif. Technol.*, Vol.38, No.1, pp. 11-41, (2004).
7. M. Zhou, Q. Dai, L. Lei, C. Ma, D. Wang, "Long Life Modified Lead Dioxide Anode for Organic Wastewater Treatment: Electrochemical Characteristics and Degradation Mechanism", *Environ. Sci. Technol.*, Vol.39 No.1, pp. 363-370, (2005).
8. C. Feng, N. Sugiure, S. Shimada, T. Maekawa, "Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system", *J. Hazard. Mater.*, Vol.103, No.1-2, pp. 65-78, (2003).
9. A. M. Polcaro, S. Palmas, "Electrochemical oxidation of chlorophenols", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.36, pp. 1791-1798, (1997).
10. G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment", *Sep. Purif. Technol.*, Vol.38, pp. 11-41, (2004).
11. M. Panizza, A. Barbucci, R. Ricotti, G. Cerisola, "Electrochemical degradation of methylene blue", *Sep. Purif. Technol.*, Vol.54, pp. 382-387, (2007).
12. S. H. Park, I. S. Kim, "Disinfection of harmful organisms for sea water using

- electrolytic treatment system”, *Kor. Inst. Navig. Port Res.*, Vol.28, No.10, pp. 995-960, (2004).
13. B. I. Choi, W. K. Yeo, J. S. Lee, “Influences of plating conditions on magnetic properties of Co-P thin films by electroless plating”, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, Vol.9, No.1, pp.3-12, (1986).
 14. S. H. M. Anijdan, M. Sabzi, M. R. Zadeh, M. Farzam, “The effect of electroless bath parameters and heat treatment on the properties of Ni-P and Ni-P-Cu composite coatings”, *Mater. Res.*, Vol.21, No.2, pp. 1-9, (2018).
 15. X. Shu, Y. Wang, X. Lu, C. Liu, W. Gao, “Parameter optimization for electroless Ni-W-P coating”, *Surf. Coat. Technol.*, Vol.276, pp. 195-201, (2015).
 16. R. J. Liu, P. A. Crozier, C. M. Smith, D. A. Hucul, J. Blackson, G. Salaita, “Metal sintering mechanisms and regeneration of palladium/alumina hydrogenation catalysts”, *Appl. Catal. A*, Vol.282, No.1-2, pp. 111-121, (2005).
 17. N. I. Baklanova, V. V. Lozanov, N. B. Morozova, A. T. Titov, “The effect of heat treatment on the tensile strength of the iridium-coated carbon fiber”, *Thin Solid Films*, Vol.578, pp. 148-155, (2015).
 18. D. H. Moon, S. M. Lee, J. Y. Ahn, D. D. Nguyen, S. S. Kim, S. W. Chang, “New Ni-based quaternary disk-shaped catalysts for low-temperature CO₂ methanation: Fabrication, characterization, and performance”, *J. Environ. Manage.*, Vol.218, pp. 88-94, (2018).
 19. C. M. Choi, Development of Tantalum Doped SnO₂ Anodes for Electrochemical Water Treatment, *Kyungpook national university*, Daegu (2016).