

ORIGINAL ARTICLE

수처리용 Ti/IrO₂/SnO₂-Sb-Ni 전극의 전기화학적 특성평가

양소영*

경북대학교 물산업융합연구소

Electrochemical Properties of Ti/IrO₂/SnO₂-Sb-Ni Electrode for Water Treatment

So Young Yang*

Advanced institute of water industry, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract

In this work, we prepared a heterojunction anode with a surface layer of SnO₂-Sb-Ni (SSN) on a Ti/IrO₂ electrode by thermal decomposition to improve the electrochemical activity of the Ti/IrO₂ electrode. The Ti/IrO₂-SSN electrode showed significantly improved electrochemical activity compared with Ti/IrO₂. For the 0.1 M NaCl and 0.1 M Na₂SO₄ electrolytes, the onset potential of the Ti/IrO₂-SSN electrode shifted in the positive direction by 0.1 V_{SCE} and 0.4 V_{SCE}, respectively. In 2.0-2.5 V voltages, the concentration in Ti/IrO₂-SSN was 2.59-214.6 mg/L Cl₂, and Ti/IrO₂ was 0.55-49.21 mg/L Cl₂. Moreover, the generation of the reactive chlorine species and degradation of Eosin-Y increased by 3.79-7.60 times and 1.06-2.15 times compared with that of Ti/IrO₂. Among these voltages, the generation of the reactive chlorine species and degradation of Eosin-Y were the most improved at 2.25 V. Accordingly, in the Ti/IrO₂-SSN electrode, it can be assumed that the competitive reaction between chlorine ion oxidation and water oxidation is minimized at an applied voltage of 2.25V.

Key words : IrO₂, SnO₂-Sb, Water treatment, Free chlorine, Electrocatalyst

1. 서론

다양한 종류의 유해물질과 난분해성 물질이 포함된 산업폐수의 배출량이 증가되면서 이들을 처리하기 위한 다양한 수처리 기술이 개발되고 있다(Bauer and Fallmann, 1997; Gupta et al., 2012; Chaplin, 2014). 이중 전기화학적 고도산화공정(Electrochemical advanced oxidation processes)은 전극표면에서 일어나는 레독스 반응(redox reactions)에서 생성된 산화제(활성산소종/

활성염소종)에 의해 오염물질을 처리하는 기술로써 높은 처리효율, 운전 용이성, 간단한 설비 등의 장점을 가지고 있어 수처리 공정으로 활발한 연구가 진행되고 있다 (Panizza and Creisola, 2009; Yang et al., 2012). 특히, 오염물질의 처리효율은 양극 물질의 특성에 의존하고 있어 많은 연구자들은 전극의 개발 및 전극의 성능향상 연구에 초점을 맞추고 있다(Chen et al., 2001; Kim and Park, 2009).

수처리 전극인 불용성전극(Dimensionally Stable

Received 13 February, 2020; Revised 27 September, 2020;

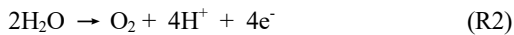
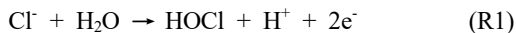
Accepted 27 September, 2020

*Corresponding author: So Young Yang, Advanced institute of water industry, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
Phone : +82-53-950-7896
E-mail : syyang7161@gmail.com

© The Korean Environmental Sciences Society. 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.

Anode, DSA)은 낮은 산소발생전위(Oxygen Evolution Potential, OEP)로 산소발생용 및 염소발생용 전극으로 알려져 있지만, 수처리 적용시 부식으로 인한 전극의 내구성 약화로 안정성에 문제점이 있어 이를 개선하기 위한 여러 방법들이 연구되고 있다(Comminellis and Vercesi, 1991). 그 중 Ti 기판에 Ir 산화층을 코팅하고 그 위에 여러 금속을 추가로 코팅한 Ti/IrO₂/SnO₂, Ti/IrO₂/Ta₂O₅/TiO₂, Ti/TiO₂/IrO₂/RuO₂, Ti/IrO_x-Sb₂O₅-SnO₂, Ti/IrO₂/TiO₂ 전극 등이 개발되었고, 이들 전극은 안정성 향상 및 산소발생/염소종발생에 효율적인 것으로 보고되었다(Chen et al., 2002; Kim and Park, 2009; Chaiyont et al., 2013; Wu et al., 2014; Rye and Hoffmann, 2016; Chun et al., 2018). 이처럼, DSA위에 추가적으로 코팅된 표면층은 보호층으로 전자전달을 촉진하고, DSA층의 용출을 방지하는 중요한 역할을 한다(Cho and Hoffmann, 2015; Lee and Park, 2020). 그러나, 표면층에는 활성염소종의 생성(R1)과 물의 산화(R2)가 경쟁반응이 일어나기 때문에 수처리 전극으로 적용하기 위해서는 염소이온의 산화에 높은 선택성(selectivity)을 가진 표면층을 개발하는 것이 필요하다.



일반적으로 안정성이 우수한 TiO₂나 SnO₂층을 표면층으로 많이 사용하며, 이들에 새로운 금속층을 혼합하여 전기화학적 활성이 우수한 표면층을 개발하는 시도가 현재 진행 중에 있다. 그 중 Sb-SnO₂은 산소발생(Oxygen Evolution Reaction, OER)의 높은 과전압으로 인해 DSA전극(IrO₂ 또는 RuO₂)보다 염소이온(Cl⁻)의 산화에 선택성이 높아 오염물질을 효과적으로 분해하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2019). 또한, Sb-SnO₂의 성능을 더 향상시키기 위해 다른 금속(co-dopant : Fe, Co, Ni 등)을 첨가하는 연구가 진행되었으며, Sb-SnO₂에 비해 Fe-Sb-SnO₂와 Ni-Sb-SnO₂ 촉매는 페놀화합물의 분해능이 3배와 6배 이상 증가하였다(He and Mho, 2004; Yang et al., 2014). 6종 금속촉매(Fe, Co, Ni, Ce, Ru, Ce)를 추가하여 Sb-SnO₂ 촉매의 전기화학적 특성 및 오염물질 분해능을 비교한 결과에서는 1% Ni이 추가된 Ti/SnO₂-Sb-Ni 촉매가 다른 전기촉

매에 비해 높은 전기활성을 갖는 것으로 보고되었다(Yang et al., 2012).

따라서, 본 연구에서는 Ti/IrO₂ 위에 전기촉매로써 성능이 우수한 것으로 알려진 SnO₂-Sb-Ni (SSN) 촉매를 전극의 표면층으로 적용해 보았다. 이를 통해 1) NaCl 전해질과 Na₂SO₄ 전해질에서 Ti/IrO₂ 전극과 Ti/IrO₂/SSN 전극의 전기화학적 특성을 분석하고, 2) 활성염소종의 생성량과 에오신-Y(Eosin-Y)의 분해능을 조사하였다. 3) Ti/IrO₂ 전극을 기준으로 Ti/IrO₂/SSN 전극의 활성염소종의 생성량과 에오신-Y의 분해능을 비교하여 활성염소종의 생성에 높은 선택성을 가진 최적전압을 알아보았다. 더불어 4) 비염소계 Na₂SO₄ 전해질에서 전압별 RNO (N,N-dimethyl-p-nitrosoaniline) 분해능을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용한 Ti/IrO₂ 전극은 Ti mesh(20 mm × 40 mm)로 졸겔법(pechini sol-gel method)에 의해 제작하였다(Terezo and Pereira, 2000). Ti/IrO₂ 전극위에 SnO₂-Sb-Ni 전기촉매를 테이블탑 딥코터(dip coater, 이플릭스, EF-4100)를 이용하여 제작하였다. 1 M SnCl₄·5H₂O (98%, Aldrich), 1 M SbCl₃ (99%, Aldrich), 1 M NiCl₂·6H₂O (reagent grade, Aldrich) 용액을 제조하고 95 : 5 : 1 부피비율로 혼합하여 SnO₂-Sb-Ni 용액을 제조하였다. 제조된 수용액에 Ti/IrO₂ 전극을 초당 100 μm로 5차례 담지하고 담지된 전극을 45 °C, 10분 동안 열처리하였다. 이 순서를 5번 반복하여 진행하였으며, 마지막에는 1시간 동안 열처리하였다. 이때, 만들어진 전극을 Ti/IrO₂와 Ti/IrO₂/SnO₂-Sb-Ni (Ti/IrO₂-SSN)로 나타내었다.

2.2. 실험 및 분석방법

본 연구는 20 mm × 40 mm 크기(활성면적 20 mm × 20 mm)의 Ti/IrO₂와 Ti/IrO₂-SSN(작동전극), 동일크기의 스테인레스 스틸(stainless steel)(상대전극)을 사용하였고, 전극 간의 거리는 2 mm, 반응기의 부피는 100 ml 조건에서 수행하였다. 전기화학적 특성은 정전위(Ivium electrochemical analyser, Netherlands)를 사용하여 선형주사전위법(Linar Sweep Voltammetry, LSV)

으로 3전극(작동전극, 상대전극, 기준전극)으로 측정하였고, 기준전극은 포화 칼로멜 전극(Saturated Calomel Electrode, SCE)를 사용하였다.

활성염소종의 생성과 에오신-Y(Eosin Y)의 분해능은 정전기위를 사용하여 2전극(작동전극, 상대전극)으로 2.0 V, 2.25 V, 2.375 V, 2.5 V 전압을 공급하여 0.1 M NaCl과 0.1 M Na₂SO₄ 전해질에서 3번 실험을 반복하여 수행하였으며, 평균농도로 나타내었다. 활성염소종은 HACH DR300 pocket colorimeter를 이용하여 DPD (Hach methods 10102, 0.09-5.00 mg/L Cl₂)법으로 측정하였고, 측정된 활성염소종은 HOCl, OCl⁻ 등 유리염소종이다. 초기 RNO (N,N-dimethyl-p- nitrosoaniline)와 에오신-Y의 농도는 각각 50 μM, 100 μM 이며, 이들 농도는 UV-VIS spectrophotometer(Lambda 950, Perkin Elmer)를 사용하여 440 nm와 517 nm를 측정하고 검량선을 사용하여 농도로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기화학적 특성 평가

선형주사전위법(LSV)은 일정하게 전위를 가해 물질의 산화전위를 측정하는 방법이다. 염소이온과 물의 전기화학적 산화반응을 알아보기 위해 Ti/IrO₂ 전극과 Ti/IrO₂-SSN 전극을 0.1 M NaCl 염소계 전해질과 0.1 M Na₂SO₄ 비염소계 전해질 조건에서 10 mV/s의 주사속도로 전극의 LSV를 측정하였다(Fig. 1). Ti/IrO₂ 전극은 시작전위(onset potential)가 약 1.0 V_{SCE}로 전해질 간에는 차이가 없었다. 이것으로 전극의 표면에서 염소이온의 산화와 물의 산화가 경쟁반응을 한다는 것을 알 수 있다. 반면에, Ti/IrO₂-SSN 전극은 Ti/IrO₂ 전극에 비해 NaCl 전해질에서는 시작전위가 약 0.1 V_{SCE}, Na₂SO₄ 전해질에서는 시작전위가 약 0.4 V_{SCE} 양의 방향으로 이동하였다. 이는 SnO₂-Sb-Ni 촉매에 의해 표면층의 산소 발생전위가 높아진 것으로 사료된다. 염소이온의 산화와 물산화의 발생전위가 차이가 나므로 경쟁반응은 감소하게 된다. Lee and Park(2020)은 염소계 전해질과 비염소계 전해질에서 시작전위의 차이가 크면 염소이온의 산화에 대한 선택성이 증가한다고 보고하였다. Ti/IrO₂-SSN 전극은 두 전해질 간 0.3 V_{SCE} 차이가 나므로 Ti/IrO₂ 전극에 비해 활성산소종이 많이 발생할 것으로

판단하였다.

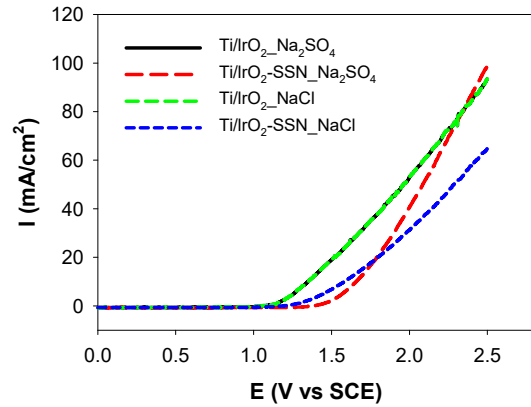


Fig 1. Linear Sweep Voltammetry (LSV) of Ti/IrO₂ and Ti/IrO₂-SSN electrodes in 0.1 M NaCl and 0.1 M Na₂SO₄ at a scan rate 10 mV/s.

3.2. 인가전압에 따른 염소계 산화제 생성

0.1 M NaCl 전해질에서 Ti/IrO₂와 Ti/IrO₂-SSN 전극을 이용하여 인가전압(2.0-2.5 V)에 따라 활성염소종(유리염소종)의 생성량을 조사하였다(Fig. 2). 전기분해의 시간이 증가함에 따라 활성염소종은 거의 선형적으로 증가하였다. 활성염소종은 2.0 V, 2.25 V 전압에서는 두 전극 모두 미량이 생성되지만, 2.375 V와 2.5 V에서는 Ti/IrO₂-SSN 전극은 60.6 mg/L Cl₂, 214.6 mg/L Cl₂로 Ti/IrO₂ 전극에 비해 활성염소종의 생성량이 약 3.79배와 4.36배 증가하였다. 50 mM NaCl 전해질 조건에서 Ti/IrO₂/Ta₂O₅/TiO₂ 전극은 1.38-2.5 V_{NHE}에 따라 유리염소종이 0.11-3.82 mol/h·m²가 생성되었고, 40 mM NaCl 전해질 조건에서 Ti/IrO₂/TiO₂ 전극은 Ti/IrO₂ 전극에 비해 유리염소종의 발생량이 28% 증가되었다고 보고되었다(Ryu and Hoffmann, 2016; Chun et al., 2018).

Hong and Cho(2018)는 이중접합 산화전극에서 중간층은 전자전달층으로 전압을 인가하면 옴 접촉(ohmic contact)의 역할을 하고 표면층은 산소 및 활성염소종의 경쟁적 발생반응을 결정하는 역할을 한다고 보고하였다. 이를 토대로 Comminellis(1994)의 산소발생 및 유기물 산화반응과 Feng et al.(2016)의 활성산소종 생성반응으로 유추해 볼 수 있다. SnO₂-Sb-Ni 표면(MO_x)에서 물(H₂O)의 분해에 의해 수산화라디칼(hydroxyl radical)이

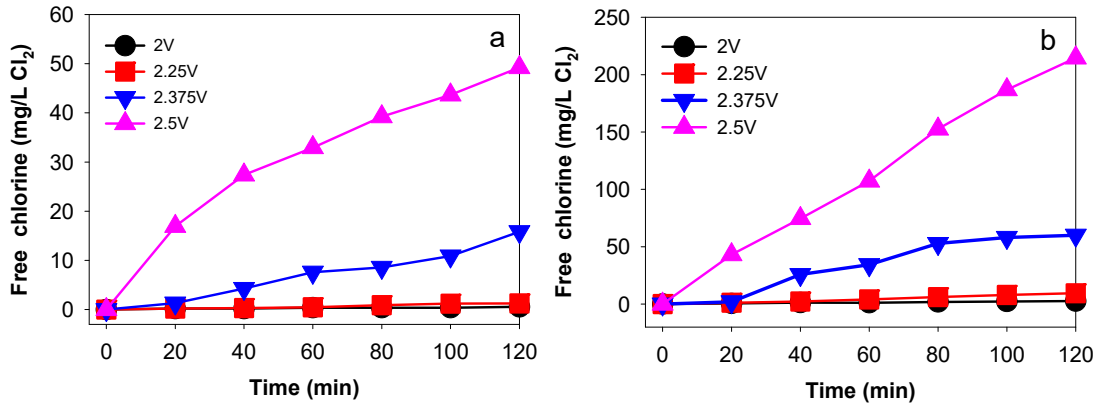


Fig. 2. Time-profiled concentration changes of free chlorine at (a) Ti/IrO₂ and (b) Ti/IrO₂-SSN electrodes in 0.1 M NaCl according to applied voltages.

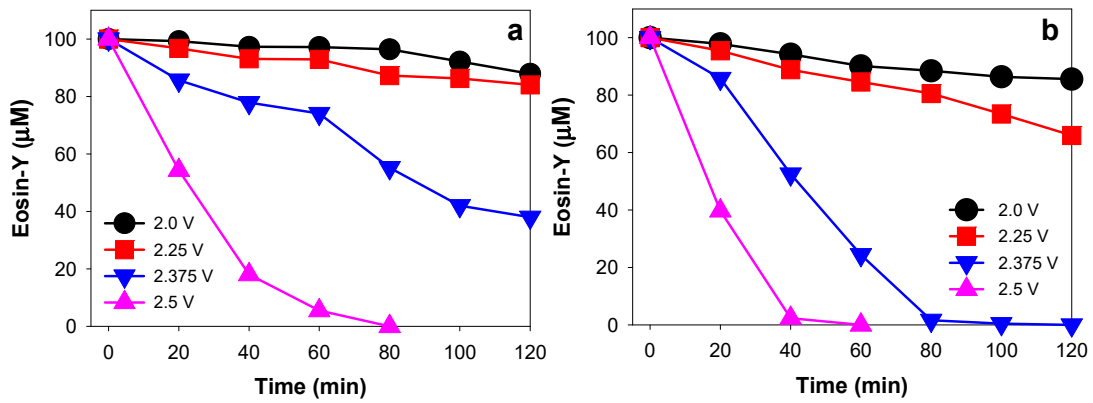
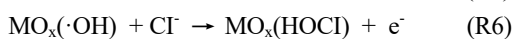
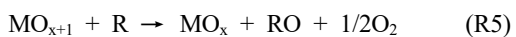
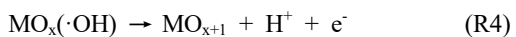
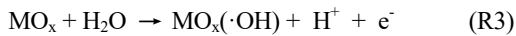


Fig. 3. Time-profiled concentration changes of Eosin-Y(100 μM) at (a) Ti/IrO₂ and (b) Ti/IrO₂-SSN electrodes in 0.1 M NaCl.

흡착되고(R3), 이어서 산화되어 전극으로부터 산소가 발생된다. 이때 흡착된 MO_x(·OH)가 MO_{x+1}로 전환이 지연되어 산소발생(R5)보다 염소이온 산화(R6)를 촉진시켜 활성염소종의 발생량이 증가한 것으로 보인다.



3.3. NaCl 전해질 조건에서 에오신-Y의 분해능

0.1 M NaCl 전해질에서 전압에 따라 100 μM 에오

신-Y(Eosin Y)의 분해능을 조사하였다(Fig. 3). 두 전극 모두 전압이 높아질수록 이오신-Y의 분해가 증가하였다. 전기분해 2시간 후 Ti/IrO₂과 Ti/IrO₂-SSN 전극은 에오신-Y(Eosin Y)의 분해능이 2.0 V에서는 12.2%와 14.5%, 2.25 V에서는 15.9%와 34.2%가 감소하였다.

2.5 V에서는 Ti/IrO₂ 전극은 80분에, Ti/IrO₂-SSN 전극은 60분 후에 100% 제거되었다. NaCl 전해질에서는 염소이온의 산화반응에 의해 활성염소종이 생성되며(R1), 생성된 활성염소종은 에오신-Y를 산화시켜 분해가 일어난다. 그러나 전압에 따라 에오신-Y의 분해능은 활성염소종 외에 활성산소종, 염료 중간체 등 영향을

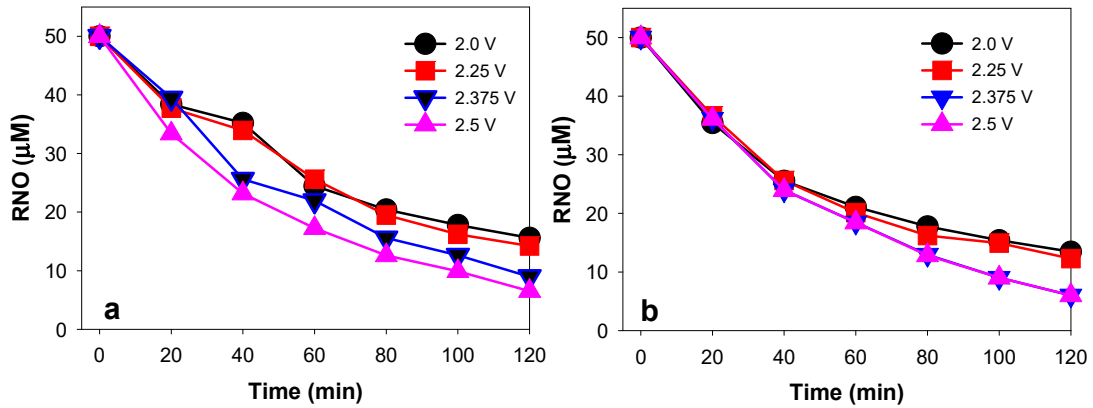


Fig. 4. Time-profiled concentration changes of RNO(50 μM) at (a) Ti/IrO₂ and (b) Ti/IrO₂-SSN electrodes in 0.1 M Na₂SO₄ according to applied voltages.

미치는 인자가 많아 선형적 증가를 나타내는 활성염소종과는 일치하지는 않았다.

3.4. Na₂SO₄ 전해질 조건에서 RNO 분해능

전압에 따라 Na₂SO₄ 전해질에서 50 μM RNO의 분해능을 조사하였다(Fig. 4). 염소이온이 없는 Na₂SO₄ 전해질에서는 Ti/IrO₂ 전극에 비해 Ti/IrO₂-SSN 전극의 RNO 분해능이 조금 증가할 뿐 크게 차이가 나지 않았다.

이는 본 연구의 인가전압이 2.0-2.5 V로 높은 산화전위를 가진 OH· 전위($E^\circ = 2.8 \text{ V}$)와 차이가 있어 RNO 분해에 크게 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. NaCl 전해질은 전극표면에서 염소활성종을 생성하지만, Na₂SO₄ 전해질은 전극표면에서 산화제의 생성에 직접 관여하지 않는 비활성전해질로 알려져 있어 오염물질의 분해는 직접 산화가 우세한 반응으로 진행된다(Rajkumar et al., 2005).

3.5 인가전압에 따른 Ti/IrO₂-SSN 전극의 성능향상

Fig. 2와 Fig. 3에서 본 바와 같이 전압이 상승함에 따라 활성염소종의 생성량과 에오신-Y의 분해능은 증가하였다. Ti/IrO₂ 전극을 기준($M_{\text{Ti/IrO}_2}$)으로 활성염소종의 생성(M)과 에오신-Y의 분해능(M)을 Ti/IrO₂-SSN 전극($M_{\text{Ti/IrO}_2\text{-SSN}}$)으로 나누어 전기화학적 활성을 비교하였다(Fig. 5). 이는 Ti/IrO₂ 전극대비 Ti/IrO₂-SSN 전극의 전기화학적 활성의 변화를 의미한다. 또한, 염소이온의 산

화반응에 높은 선택성을 가진 최적전압을 알아보려고 한다. 인가전압은 이중접합층의 음 접촉, 전극과 전해질 사이의 전자전달, 전해질의 특성 등 여러 요소에 영향을 주며, 이로 인해 활성염소종 생성, 물산화 반응, 오염물질 분해 등이 영향을 받게 된다. Ti/IrO₂ 전극대비 Ti/IrO₂-SSN 전극은 2.0 V, 2.25 V, 2.375 V, 2.5 V 전압에서 염소발생량은 4.71, 7.60, 3.79, 4.36배로, 에오신-Y는 1.18, 2.15, 1.61, 1.06배로 모든 전압에서 SSN 도핑에 의해 전기화학적 활성이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다.

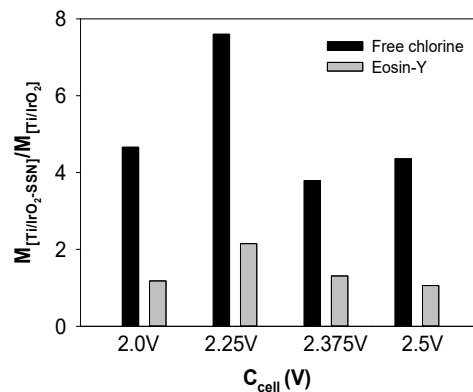


Fig. 5. Ti/IrO₂-SSN electrode with respect to Ti/IrO₂ electrode. [M] is concentration of free chlorine or Eosin-Y.

활성염소종의 증가비율은 전압에 따라 증가해야 되지만, 본 연구에서는 2.25 V까지 증가하다가 다시 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 LSV의 시작전위의 차이와 관련이 있다. 낮은 전압(2.0 V, 2.25 V)에서는 물산화와 활성염소발생의 경쟁반응에서 물산화 반응이 제한되었기 때문이다(Fig. 6). 반면에 높은 전압(2.375 V, 2.5 V)에서는 활성염소종의 증가비율이 낮아지는데, 이는 산화반응에서 활성염소종 외에 다른 산화전위를 가진 다양한 생성물(활성산소종 : OOH^\cdot , O_2^\cdot , H_2O_2 등)이 생성되어 활성염소종의 선택성이 낮아진 것으로 보인다. 이 중 2.25 V에서 Ti/IrO_2 전극 대비 7.6배가 증가하여 활성염소종에 대한 선택성이 가장 높은 것으로 판단된다.

에오신-Y의 분해능은 활성염소종의 발생과 유사한 경향은 아니지만, 2.25 V에서 에오신-Y의 분해능이 2.15배로 가장 높았다. 이로써, Ti/IrO_2 -SSN 전극은 인가전압 2.25 V일 때 염소이온산화와 물산화의 경쟁반응이 최소화되는 전위로 볼 수 있다.

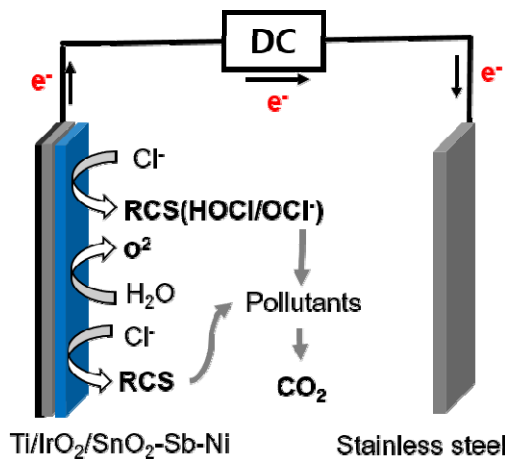


Fig. 6. Schematic illustration of the electrocatalytic reaction mechanism.

4. 결론

이 연구는 Ti/IrO_2 전극의 전기화학적 활성을 향상시키기 위해 Ti/IrO_2 전극 상에 SnO_2 - Sb - Ni (NSS)의 표면층을 갖는 이중접합 양극을 열분해에 의해 제조하였다. 전압(2.0-2.5 V)에 따라 NaCl 과 Na_2SO_4 전해질에서 LSV, 활성염소종(reactive chlorine species) 생성, 에오

신-Y 분해능, 그리고 염소이온산화와 물산화의 경쟁반응을 최소화시키는 최적전압을 알아보았다. 결과는 다음과 같다.

1) NaCl 과 Na_2SO_4 전해질에서 Ti/IrO_2 -SSN 전극은 Ti/IrO_2 전극에 비해 시작전위(onset potential)가 0.1 V_{SCE} , 0.4 V_{SCE} 정도 양의 방향으로 이동하였다.

2) Ti/IrO_2 전극과 Ti/IrO_2 -SSN 전극에서 활성염소종은 0.55-49.21 mg/L Cl_2 , 2.59-214.6 mg/L Cl_2 가 생성되었다.

3) Ti/IrO_2 전극을 기준으로 Ti/IrO_2 -SSN 전극의 활성염소종의 발생량과 에오신-Y 분해능을 비교한 결과 3.79-7.60배와 1.06-2.15배 증가하였다. 전압별로는 2.25 V 일 때 가장 높았으며, 염소이온의 산화반응에 높은 선택성을 가진 전압임을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 경북대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Bauer, R., Fallmann, H., 1997, The photo-fenton oxidation—a cheap and efficient wastewater treatment method, Res. chem. intermed., 23, 4, 341-354.
- Chaoyont, R., Badoe, C., Ponce de León, C., Nava, J. L., Recio, F. J., Sirés, I., Herrasti, P., Walsh, F. C., 2013, Decolorization of methyl orange dye at IrO_2 - SnO_2 - Sb_2O_5 coated titanium anodes, Chem. Eng. & Technol., 36, 1, 123-129.
- Chaplin, B. P., 2014, Critical review of electrochemical advanced oxidation processes for water treatment applications, Environ. Sci. Process Impacts, 16, 1182-1203.
- Chen, G., Chen, X., Yue, P. L., 2002, Electrochemical behavior of novel Ti/IrOx - Sb_2O_5 - SnO_2 anodes, J. Phys. Chem. B, 106, 4364-4369.
- Chen, X., Chen, G., Yue, P. L., 2001, Stable Ti/IrOx - Sb_2O_5 - SnO_2 anode for O_2 evolution with low Ir content, J. Phys. Chem. B, 105, 20, 4623-4628.
- Chun, D., Lim, C., Lee, H., Yoon, W., Lee, T., Kim, D. K., 2018, Electrochemical treatment of urine by using $\text{Ti}/\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ electrode, J. Water Process. Eng., 26, 1-9.

- Cho, K., Hoffmann, M. R., 2015, BixTi_{1-x}O_z functionalized heterojunction anode with an enhanced reactive chlorine generation efficiency in dilute aqueous solutions, *Chem. Mater.*, 27, 2224-2233.
- Cominellis, C., 1994, Electrocatalysis in the electro-chemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment, *Electrochimica Acta*, 39, 1857-1862.
- Cominellis, Ch., Vercesi, G. P., 1991, Characterization of DSA®-type oxygen evolving electrodes: Choice of a coating, *J. Appl. Electrochem.*, 21, 335-345.
- Feng, Y., Yang, L., Liu, J., Logan, B. E., 2016, Electrochemical technologies for wastewater treatment and resource reclamation, *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 2, 800-831.
- Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., Agarwal, S., 2012, Chemical treatment technologies for waste-water recycling-an overview, *RSC Adv.*, 2, 6380-6388.
- He, D., Mho, S. I., 2004, Electrocatalytic reactions of phenolic compounds at ferric ion co-doped SnO₂:Sb⁵⁺ electrodes, *J. Electroanal. Chem.*, 568, 19-27.
- Hong, S., Cho, K., 2018, A Study on reactive chlorine species generation enhanced by heterojunction structures on surface of IrO₂-based anodes for water treatment, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 32, 4, 349-355.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2009, A Study on the preparation of the Dimensionally Stable Anode (DSA) with high generation rate of oxidants(I), *J. Environ. Sci.*, 18, 1, 49-60.
- Kim, J., Oh, S., Kang, W., Yoo, H. Y., Lee, J., Kim, D., 2019, Superior anodic oxidation in tailored Sb-doped SnO₂/RuO₂ composite nanofibers for electrochemical water treatment, *J. Catal.*, 374, 118-126.
- Lee, Y., Park, Y., 2020, Ultrathin multilayer Sb-SnO₂/IrTaOx/TiO₂ nanotube arrays as anodes for the selective oxidation of chloride ions, *J. Alloys and Compounds*, 840, 155622-155629.
- Panizza, M., Cerisola, G., 2009, Direct and mediated anodic oxidation of organic pollutants, *Chem. Rev.*, 109, 6541-6569.
- Rajkumar, D., Kim, J. K., Palanivelu, K., 2005, Indirect electrochemical oxidation of phenol in the presence of chloride for wastewater treatment, *Chem. Eng. Technol.*, 28, 98-105.
- Ryu, S. Y., Hoffmann, M. R., 2016, Mixed-metal semiconductor anodes for electrochemical water splitting and reactive chlorine species generation: implications for electrochemical wastewater treatment, *Catalysts*, 6, 59-74.
- Terezo, A. J., Pereira, E. C., 2000, Fractional factorial design applied to investigation properties of Ti/IrO₂-Nb₂O₅ electrodes, *Electrochim. Acta*, 45, 4351-4358.
- Wu, W., Huang, Z. H., Lim, T. T., 2014, Recent development of mixed metal oxide anodes for electrochemical oxidation of organic pollutants in water, *Appl. Catal. A: Gen.*, 480, 58-78.
- Yang, S. Y., Choo, Y. S., Kim, S., Lim, S. K., Lee, J., Park, H., 2012, Boosting the electrocatalytic activities of SnO₂ electrodes for remediation of aqueous pollutants by doping with various metals, *Appl. Catal. B: Environ.*, 111-112, 317-325.
- Yang, S. Y., Kim, D., Park, H., 2014, Shift of the reactive species in the Sb-SnO₂-electrocatalyzed inactivation of *E. coli* and degradation of phenol: effects of nickel doping and electrolytes, *Environ. Sci. Technol.*, 48, 5, 2877-2884.

• Researcher. So-Young Yang
Advanced institute of water industry, Kyungpook National University
syyang7161@gamil.com