Research Paper

A Study on the Application Characteristics of the Insoluble MMO (Mixed Metal Oxide) Electrode for Energy Reduction of Zinc Electrowinning Process

Mijung Park¹ · Taeksoon Lee^{2,*}

¹WESCO ELECTRODE Co., Ltd, R&D Center

²Department of Environmental Engineering, Changwon National University

(Received July 27, 2020; Revised September 2, 2020; Accepted September 4, 2020)

Objective : The zinc electrowinning industry is one of the high energy consumption industries where energy saving is required. In the zinc electrowinning process, electrode is a high energy consuming part. In order to reduce energy use in the electrolytic smelting industry, a comparative study was conducted on the current usage of Pb+Ag alloy electrode and insoluble composite metal oxide (MMO) electrode.

Methods : In this study, a comparative evaluation of energy consumption was conducted between the generally used Pb+Ag alloy electrode and an insoluble MMO electrode. Aluminum was used as a reducing electrode. The actual on-site zinc electrowinning solution and ZnSO₄ simulated solution were prepared to estimate the electrode potential, voltage, zinc deposition efficiency, and lifetime characteristics under the current density of 500 A/m².

Results and Discussion : The overvoltage of the insoluble MMO electrode was 28.9% lower and the voltage was 15.0% lower than that of Pb+Ag alloy electrode. The zinc deposition efficiency of the insoluble MMO electrode was higher 1.9% in the actual on-site zinc electrowinning solution and 6.3% in the simulated solution. Compared with the Pb+Ag alloy electrode in use, the insoluble composite metal oxide electrode exhibited low overvoltage, good voltage characteristics, and high current efficiency characteristics.

Conclusions : When the energy consumption of the Pb+Ag alloy and the insoluble MMO electrodes was compared, The insoluble MMO electrode showed 17.0% lower energy consumption in the actual on-site zinc electrowinning solution and 23.8% lower in the ZnSO₄ simulated solution than Pb+Ag alloy electrode.

Keywords : Energy Consumption, Pb+Ag Alloy Electrode, Insoluble Mixed Metal Oxide Electrode, Zinc Electrowinning, Simulated Solution

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

* Corresponding author E-mail: tslee@changwon.ac.kr Tel: 055-213-3741 Fax: 055-213-3749

연구논문

아연제련공정의 전력저감을 위한 불용성 MMO 전극 적용 특성에 관한 연구

박미정¹ · 이택순^{2,*}

¹(주)웨스코일렉트로드

²창원대학교 환경공학과

목적: 에너지 다소비 산업인 전해 제련 산업분야의 에너지 사용 절감을 위하여 현재 사용 중인 Pb+Ag합금 전극과 불용성 복합 금속산화물(MMO, Mixed Metal Oxide) 전극 전력 사용량을 비교 연구를 하였다.

방법: 실제 현장 아연 제련액과 ZnSO₄ 모사액을 제조하여 전류밀도 500 A/m² 조건에서 전극의 과전압, 전압, 아연석출 효율, 수명 특성을 연구 평가하였다.

결과 및 토의: 불용성 MMO 전극의 과전압은 28.9% 더 낮고 전압은 최소 12.5% 더 낮았다. 효율은 실제 현장 아연 제련액은 1.93% 정도 높았으며, 모사액은 6.3% 정도 높았다. 사용 중인 Pb+Ag합금 전극과 비교 시 불용성 MMO 전극이 과전압이 낮고 전압특성이 양호하며 높은 전류효율 특성을 나타내었다.

결론: Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 전력소비량을 비교·평가한 결과 불용성 MMO 전극 전력 소비량이 실제 현장 아연 제련액은 17%, ZnSO₄ 모사액은 23.8% 낮음을 알 수 있었다.

주제어: 전력소비량, Pb+Ag합금 전극, 불용성 MMO 전극, 아연 전해제련, 모사액

1. 서론

에너지생산 활동이 온실가스를 배출하고 환경문제를 악화시키는 요인이 되면서 지구환경문제의 개선을 위한 노력의 일환으로 온실가스 배출량이 적은 청정에너지 생산 방식의 개발과 동시에 에너지다소비 산업의 에너지사용량을 줄이는 기술 개발에 대한 관심이 절실하게 필요한 실정이다. 특히, 비철금속산업은 제련 및 정련과정에서 다량의 전기를 소모하며 전력원을 화력발전에 의존하고 있으며 생산비 중 에너지비용이 차지하는 비중이 높다.¹⁾

전해제련 공정은 전해조에 설치한 전극에 일정한 전류를 가하여 수용액속의 이온을 금속으로 석출하는 공정으로, 세계적으로 아연생산의 80%를 차지하고 있는 습식 전해제련은 제조경비 중 전력비 비중이 높은 대표적인 에너지 다소비 산업이다. 세계 최대의 아연 제련소를 보유하는 우리나라의 경우 아연생산량은 20만 ton/year 정도이며, 아연 생산량당 차지하는 전력량은 3,200~3,500 kwh/ton 정도이며 이는 전체 소요되는 에너지의 약 60%를 차지한다. 그리고 제조원가에서 차지하는 비율은 약 40% 이상이라고 한다.^{2,3)} 따라서 에너지 다소비 산업인 전해제련의 사용전력을 저감시키는 방법으로 산화전극

을 과전압이 낮은 전극으로 대체하여 사용전력량을 감소시킴으로써, 비용 절감은 물론 온실가스 감축을 위한 환경 문제 해결에도 도움이 된다.

전해제련 공정은 적정농도를 맞춘 전해액에서 Pb+Ag합금 산화전극과 Al 환원전극을 사용하여 전해 채취한다. 납은 연성이 크며 가공하기가 쉽고 미량의 다른 금속과 합금을 만들면 단단해지며 특성이 크게 변화한다. 따라서 아연 전해제련의 산화전극으로 단단하고 전도성을 높인 Pb+Ag합금 전극을 주로 사용하고 있다.

상기 식과 같이 평형상태의 전해전압은 0.76 V+1.23 V = 1.99 V이다.⁴⁾ 그러나 실제 전해 전압은 이론 전압보다 전극 과전압(Potential)이 0.84 V 더 높게 발생하고, 전기저항에 의한 과전압도 0.54 V 더 발생한다.⁵⁾

그러나 Iridium 기반의 불용성 MMO 전극은 O₂ 발생에 대해 매우 낮은 과전압을 가지고 있으며, 낮은 과전압으로

인해 에너지 절감에 유리하며 친환경적이다.

본 연구는 아연 전해제련 공정에서 사용되고 있는 Ag+Pb 합금 전극과 이를 대체할 불용성 MMO 전극을 대상으로 과전압 특성과 전압특성 및 아연 석출 효율을 비교·평가하였으며 이 결과값을 바탕으로 전력소비량을 비교·평가하였다. 또한 불용성 MMO 전극의 수명 예측평가도 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험대상으로 Pb+Ag합금 전극은 실제 아연 제련에서 사용하는 산화전극과 같은 조건으로 용해시킨 Pb에 Ag를 첨가하여 제작된 Pb+Ag합금 전극을 절단 가공하여 사용하였다. 비교 산화전극으로 불용성 MMO 전극을 제작하였으며 환원전극으로 알루미늄 Plate를 Fig. 1과 같이 준비 제작하였다. 불용성 MMO 전극을 제작하기 위하여 촉매물질을 Iridium을 기본으로 하고, 혼합 금속은 Palladium, Tin, Tantalum 등 3종류의 금속으로 선정하였다. 그 이유는 Iridium은 낮은 pH 전해질에서 가장 안정된 촉매제이며, SnO₂은 뛰어난 안정도와 전기전도도를 가진 물질이며 Palladium은 전류효율 특성이 우수한 촉매 물질이며 Tantalum 낮은 pH 전해질의 안정된 바인더 물질이기 때문이다.⁶⁾

전극의 촉매 물질의 밀착력을 향상시키는 방법으로 기판표면에 대한 표면 거칠기를 부여하기 위하여 샌드 블라스팅(Sand blasting)처리를 하였다.⁷⁾ 샌드 블라스팅 처리 후 산 세정(Etching) 방법을 이용하여 기판을 세정하였으며, 추가적인 수명 특성을 향상시키기 위하여 중간층을 형성하였다. 중간층은 습식 방식으로 탄탈륨 산화물(Ta₂O₅)을 코팅하는 방법으로 형성하였다.⁸⁾ 촉매물질은 브러시 코팅방법으로 코팅을 하여 두께는 10 g/m²으로, 500~600℃에서 열분해법으로 제작하고, 형태는 농도저항을 최소화하기 위하여 mesh형태로 제작하여 이를 대상으로 실험을 하였다. 아연 제련 시 황산 전해액을 사용하여 전극 표면에서의 반응을 이용하기 때문에 불용성 전극은 코팅물질의 균일성과 치밀도를 높여 지지체로서의 산소침투를 최소화하는 기술을 확보하는 것이 중요하다.

SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy)를 이용하여 제작된 불용성 MMO 전극 및 Pb+Ag합금 전극과 환원전극인

알루미늄(Al)의 표면 촉매 산화층의 상태를 관찰하였다. 그 결과는 Fig. 2에서 나타나듯이 각각의 전극 표면형상 특성을 알 수 있다.

환원전극은 실제 현장에서 알루미늄 Plate를 이용하고 있으며 그 이유는 습식 아연제련은 ZnSO₄ 용액에서 전해제련에 의해 금속 Zn을 석출 회수하므로 아연은 수소보다 이온화 경향이 크며 알루미늄 전극 표면에서 수소과전압이 높기 때문에 전해제련을 통한 아연 석출이 가능해진다. 일반적으로는 전해 시 기본금속은 석출되고 수소가 우선적으로 생성된다. 그러나 아연의 경우에는 전형적인 비철금속으로 수소생성을 위한 아연 촉매의 활성이 크기 때문에 특이하게 과전압이 매우 높다.⁹⁾ 그러므로 아연금속은 선택적으로 알루미늄 전극에 석출될 수 있다. 즉, 활성화 환원전극을 이용한 일반적인 전해의 경우 H₂ 생성이 일어나며 Zn 석출이 일어나지 않는다. Zn 석출을 가능하게 하기 위해서는, 높은 H₂ 생성 과전압을 가지며 아연 석출 과전압이 매우 낮은 특성을 지녀야 하는데 이 특성을 가진 환원전극 재료가 Al이다. 그리고 알루미늄은 가볍고 단단하며 가격도 저렴하며 매끈한 표면이 특징이며 사용 시 표면을 연마처리해서 사용하며 연마 처리된 알루미늄의 매끈한 표면 특성 때문에 아연의 탈거가 쉽다. 그리고 환원전극으로 전기적 특성인 과전압 특성이 0.06 V로 무시할 정도이다.

대상 전해제련용 전해액은 실제 현장 아연 제련액과 모사액을 제조하여 준비하였다. 모사액 제조 시 아연 농도는 아연 석출 효율을 높이고 전압특성에 유리한 전해액을 제조하기 위하여 문헌 연구¹⁰⁾와 예비실험을 통하여 제조하였다. 즉 일정 이상의 아연 농도의 유지가 필요하므로 전기전도도, 전압의 상관관계를 예비 실험을 통하여 얻은 결과와 실제 현장에서도 H₂SO₄ 용액에 아연광을 용해시켜 사용하고 있는 사실을 참고하여 아연 모사액은 ZnO + H₂SO₄ → ZnSO₄ + H₂O와 같은 반응식에 의하여 ZnO를 H₂SO₄ 용액에 용해시켜 아연농도 100 g/L의 ZnSO₄ 모사액을 제조하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 과전압 특성 비교

Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 과전압 특성을

Fig. 1. Photographs of electrodes for experiments.

Fig. 2. SEM images of electrode surface.

Fig. 3. A basic diagram of a potentiostat.

비교·평가하였으며 과전압 측정에는 전류·전압법에 있어 정전해 전해 시 전위를 측정하는 장비인 Potentiostat를 이용하였으며 기준 전극으로 AgCl 전극을 이용하여 비교·평가하였다. Working electrode, Reference electrode, Counter electrode과 Potentiostat로 구성되는 Diagram을 Fig. 3에 나타내었으며, Working electrode과 Reference electrode 사이에 입력하는 전류에 따라 전위 측정이 가능하다.¹¹⁾

2.2.2. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 전압특성 비교

전압특성을 비교·평가하기 위하여 산화전극으로 Pb+Ag 합금 전극과 불용성 MMO 전극, 환원전극으로 알루미늄 전극을 준비하였다. 준비된 산화전극과 환원전극을 이용하여 실제 현장의 아연 제련액과 ZnO를 H₂SO₄ 용액에 용해시켜 제조된 ZnSO₄ 모사액을 대상으로 실제 현장의 아연 제련에서 인가되는 전류밀도인 500 A/m² 조건에서 Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 전압을 측정하여 비교·평가하였다.

2.2.3. Pb+Ag합금 전극 및 불용성 MMO 전극의 효율특성 비교

준비된 2종류의 전극에 대하여 아연 석출 효율 평가를 실시하였다. 실제 현장에서 전해제련 시 사용하고 석출되는 아연양과 비례하여 고농도의 전해액을 주입하여 일정 아연 농도를 유지시켜주고 늘어나는 전해액 양만큼 Over flow 시키는 방법으로 Mass balance를 유지하여 운전하고 있다. 따라서 실험용 전해조를 Fig. 4와 같이 제작하여 같은 방식으로 석출되는 일정 아연양과 비례하여 아연을 추가해주는 방법으로 농도를 맞추고 Over flow 시키는 방법으로 실험하였다.

전해질은 실제 현장 아연 제련액과 ZnSO₄ 모사액을 대상으로 하였으며 실제 현장 사용 전류 밀도인 500 A/m²를 인가하고 극의 간격은 40 mm로 하였으며 온도는 40℃ 항온을 유지하였다. 아연 석출 효율은 아연 전해를 실시하여 아연 석출 후 석출 아연의 무게를 비교하여 평가하였다.

2.2.4. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 수명특성 비교

Pb+Ag합금 전극의 수명은 실제 현장에서 6개월 정도 사용한다. Pb금속이 가용성인 금속이므로 Pb+Ag합금으로 전극을 만들어도 자체 용성의 성질을 극복하지 못하며, 이 성

Fig. 4. Schematic of experiment set-up used for efficiency test.

질 때문에 가속 테스트는 Pb의 용출현상으로 불가능하기 때문이다. 따라서 불용성 MMO 전극만 높은 전류 밀도를 인가하여 가속 테스트를 거친 결과를 바탕으로 Pb+Ag합금 전극과의 실제 수명을 비교·평가하였다.

불용성 전극의 수명은 사용 환경에 따라 수년에 이르기 때문에 일반적으로 수명 예측 평가 방법으로 가속한 운전조건에서 가속 수명 테스트(Accelerated life test)법을 사용하여 수명을 예측한다. 선행연구에 따르면 불용성 전극에 대한 가속수명평가는 H₂SO₄ 전해질 용액에 전극을 설치하고 전류를 인가하여 초기 전압보다 운전 전압이 5~10 V 상승하면 전극의 수명이 다한 것으로 평가하는 방안이 제시되어 있다.¹²⁾

본 연구에서는 초기전압에 비하여 운전전압이 15% 상승하였을 때 전극의 수명이 종료하는 것으로 하였다. 불용성 전극의 수명을 전압상승을 기준으로 평가하는 이유는 전해공정이 진행됨에 따라 촉매 전극층의 부식이 진행되기 시작하고, 모재인 티타늄의 산화가 진행되면서 전극이 점차 부동태화 됨으로써 전압이 상승하고 전해효율이 크게 감소하는 현상을 보이기 때문이다. 모재에 촉매제의 두께 10 g/m² 코팅된 복합 산화물 전극을 제작하여 실제 사용하고 있는 1 M H₂SO₄ 용액에서 현장의 전류밀도 대비 50배로 가속된 전류밀도 25,000 A/m²의 전류를 인가하여 수명장치를 이용하여 수명평가를 실시하였으며 실제 현장에서 많이 사용되고 있는 Pb+Ag합금 전극의 수명과 비교·평가를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 과전압 특성

표준 환원 전위의 값이 작을수록 반응성이 크기 때문에 아연 석출에 유리하다. 이 특성을 이용하여 Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 과전압특성을 알아보기 위하여 기준전극 AgCl 전극을 사용하여 Table 1의 조건으로 과전압특성을 비교·평가하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 불용성 MMO 전극의 과전압이 1.28 V로 Pb+Ag합금 전극의 과전압 1.8 V보다 28.9% 낮았다. 이 결과를 바탕으로 불용성 MMO 전극이 아연 석출에 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Conditions for potential test.

Current density	1,000 A/m ²
Anode	Pb+Ag electrode MMO electrode
Cathode	Ti plate
Standard electrode	AgCl
Electrolyte	3% NaCl
Anode-cathode distance	3 mm

Table 2. Potential values of Pb+Ag electrode and MMO electrode.

	Pb+Ag electrode	MMO electrode
Potential (V)	1.80	1.28

Table 3. Conditions for voltage test.

Current density	500 A/m ²
Anode	Pb+Ag electrode MMO electrode
Cathode	Al plate
Electrolyte	Zinc electrowinning solution Simulated solution
Anode-cathode distance	40 mm

Fig. 5. Comparison of voltage values for Pb+Ag electrode and MMO electrode in electrolyte.

3.2. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 전압특성 비교

실제 현장 아연 제련액과 ZnSO₄ 모사액을 대상으로 **Table 3**의 조건으로 Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 전압 특성을 비교·평가하였다.

그 결과 **Fig. 5**에 나타난 것과 같이 현장에서 사용하고 있는 아연 전해 제련액에서 Pb+Ag합금 전극의 전압(V)은 3.3 V로 관찰되었으며 불용성 MMO 전극의 전압은 2.8 V로 관찰되었다. ZnSO₄ 모사액에서 Pb+Ag합금 전극의 전압(V)은 3.2 V로 관찰되었으며 복합 금속산화물 전극의 전압은 2.7 V로 관찰되었다. 이 결과를 종합해보면 불용성 MMO 전극의 전극 특성으로 전압 차이를 보이며 불순물이 없는 모사액에서 조금 더 낮은 전압 특성을 나타내는 것으로 보아 전해질의 순도 또한 전압에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로

Table 4. Test conditions for zinc deposition current efficiency.

Current density	500 A/m ²
Anode	Pb+Ag electrode MMO electrode
Cathode	Al plate
Electrolyte	Zinc electrowinning solution Simulated solution
Anode-cathode distance	40 mm
Temperature	40°C

Fig. 6. Comparison of zinc deposition current efficiency.

불용성 MMO 전극의 전압 특성이 Pb+Ag합금 전극의 전압 특성보다 상대적으로 15.0%가 낮음을 알 수 있다.

3.3. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 효율특성 비교

실제 현장 아연 제련액과 ZnSO₄ 모사액을 대상으로 **Table 4**의 조건으로 Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극을 24시간 동안 전해하여 아연석출 특성을 비교·평가하였다.

실험결과는 **Fig. 6**에 나타내었으며 이 결과를 종합해보면 실제 아연 제련액에서의 불용성 MMO 전극의 아연 석출 효율은 Pb+Ag합금 전극의 아연 석출 효율보다 1.9% 높았으며 ZnSO₄ 모사액에서 6.3%가 높았다. 실제 아연 제련액에는 여러 종류의 금속 불순물이 존재한다. 금속 불순물이 아연 전착에 유해한 영향을 미치며, 침전물의 순도, 형태 및 공정의 동역학에 영향을 미친다는 문헌연구¹³⁾에서 시사하는 바와 같이 아연 석출 효율이 낮게 나타났다. 이온전도도는 이론적으로 이온의 농도, 전하량, 전하의 이동도에 비례하여 증가하게 된다. 하지만 일정 농도 이상의 염이 존재하게 되면 이동도는 감소하게 되는데 실제 아연 제련액에는 금속이온 농도가 높아 전도도를 떨어뜨리는 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. 그래서 불용성 MMO 전극 적용 전해 제련 시 전해액의 순도가 좋아질수록 상대적으로 아연 석출 효율을 더 높일 수 있음을 알 수 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾

3.4. Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 수명특성 비교

불용성 MMO 전극의 수명 특성을 알아보기 위하여 **Table 5**의 조건으로 가속 수명장치를 이용하여 수명 예측 평가를

Table 5. Conditions of accelerated lived test.

Current density	25,000 A/m ²
Anode	MMO electrode
Cathode	Ti mesh plate
Electrolyte	1 M H ₂ SO ₄ (circulation)
Anode-cathode distance	3 mm

실시하였다.

본 연구에서는 현장의 전류밀도 500 A/m² 대비 50배 가속된 전류밀도 25,000 A/m²에서 3차례 가속실험을 실시하였으며 초기전압에 비하여 운전전압이 15% 상승 시점에서 전극의 수명이 종료하는 것으로 하였다.

그 결과 **Fig. 7**과 같이 평균 152.7시간으로 현장 운전 조건과 비교하여 환산해보면 수명은 약 2년 이상 확보되는 것으로 예상되며 수명 예측 평가에 대한 선행연구 결과와 일치하는 것이다.^{14,17)}

3.5. 에너지 소비량

지금까지의 실험 결과를 바탕으로 실제 아연 제련액에서의 Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 전력소비량을 다음 식에 의거하여 산출하였다.

$$\cdot \text{이론 아연 석출량(ton)} = \frac{I(\text{전류}) \times \alpha(\text{원자량}) \times t(\text{시간})}{n(\text{전자수}) \times F(\text{페러데이상수})} \quad (3)$$

$$\cdot \text{효율(\%)} = \frac{\text{실제 아연 석출량}}{\text{이론 아연 석출량}} \times 100 \quad (4)$$

$$\cdot \text{전력소비량(kWh/ton-Zn)} = \frac{\text{전력사용량(kWh)}}{\text{아연생산량(ton-Zn)}} \quad (5)$$

실제 아연 제련액에서의 Pb+Ag합금 전극의 전력 소비량은 3,184.6 kWh/ton-Zn이며 불용성 MMO 전극의 전력 소비량은 2,641.5 kWh/ton-Zn으로 나타났다. 그리고 ZnSO₄ 모사액에서의 불용성 MMO 전극 적용 전해제련 시 전력소비량은 2,427 kWh/ton-Zn으로 실제 아연 제련액에서 전력 소비량보다 17.0% 감소되며, ZnSO₄ 모사액에서 전력 절감량은 23.8% 감소됨을 알 수 있으며 전해제련 시 전해액의 순도가 좋아질수록 상대적으로 전압 특성과 아연 석출 효율 특성이 우수해져 전력 절감량이 더 증가하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

아연전해제련 공정에서 에너지 효율 향상을 위한 Pb+Ag 합금 전극을 대체할 전력절감용 불용성 MMO 전극을 제조하여 Pb+Ag합금 전극과 아연전해 시 전압 및 효율 특성을

Fig. 7. Comparison of Life time for MMO electrode.

연구하여 소비전력량을 비교·평가하고, 추가적으로 불용성 MMO 전극의 수명 예측 평가를 하였다. 이 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Pb+Ag합금 전극과 불용성 MMO 전극의 과전압을 비교한 결과 MMO 전극의 과전압이 28.9% 낮으며 아연 석출에 유리하다는 것을 알 수 있었다.

2) 전압도 실제 아연 제련액과 ZnSO₄ 모사액 모두 불용성 MMO 전극의 전압이 15.0% 낮았다.

3) 아연 석출 효율은 불용성 MMO 전극이 실제 아연 제련액에서 1.9% 높았으며 ZnSO₄ 모사액에서 6.3% 높았다.

4) 불용성 MMO 전극을 사용할 경우 실제 아연 제련액에서 전력 사용량을 17.0% 정도 감소시킬 수 있으며 ZnSO₄ 모사액에서 23.8% 정도 감소시킬 수 있었다.

5) 추가적으로 불용성 MMO 전극의 수명 예측 평가를 해본 결과 제작된 불용성 MMO 전극의 수명이 현장 운전 조건과 비교하여 환산해보면 약 2년 이상 확보되는 것으로 예상되므로 전극 가격의 경제성 비교는 4배 더 긴 전극사용 수명으로 극복 가능한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부의 폐자원에너지화 재활용 전문인력 양성 사업으로부터 지원을 받았습니다(YL-WE-19-001).

References

1. Y. N. Song, Climate change, ecosystem crisis and energy issues, 7(2), 5-7(2010).
2. C. P. Pauli, S. Trasatti, Composite materials for electrocatalysis of O₂ evolution : IrO₂ + SnO₂ in acid solution, J. Electroanal. Chem., 538-539, 145-151(2002).
3. G. S. Yoon, Development of Energy Saving Process in Zinc Electrowinning, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 13-14(1988).
4. M. S. Lee, K. J. Lee, Temperature effect on the ionic equilibria of sulfuric acid leaching solutions of zinc calcine, Korean J. Met. Mater., 41(4), 267-273(2003).
5. A. A. Baba, F. A. Adekola, Beneficiation of a nigerian

- sphalerite mineral : solvent extraction of zinc by Cyanex®272 in hydrochloric acid, *Hydrometallurgy*, 109(3-4), 187-193 (2011).
6. M. J. Park, T. S. Lee, M. A. Kang, Characteristics of chlorine-based oxidant production on insoluble electrode, *KSWST Jour. Wat. Treat.*, 25(6), 27-34(2017).
7. H. W. Kim, Influence of surface roughness on the adhesive force for a deposition of TiN(I), *Chungju National University, Collection of dissertations*, 39(1), 18-20(2004).
8. M. J. Park, T. S. Lee, M. A. Gang, C. B. Han, The effect of pre-treatment methods for the life time of the insoluble electrodes, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(6), 291-298 (2016).
9. J. Zhua, Y. Wua, J. Zuob, D. F. Khanc, C. Jiangb, Effect of Iridium(IV) ions on the electrowinning of zinc from acidic electrolytes, *Hydrometallurgy*, 174, 248-252(2017).
10. G. W. Barton, A. C. Scott, A validated mathematical model for a zinc electrowinning cell, *J. Appl. Electrochem.*, 22, 104-115(1992).
11. A. J. Bard, L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, New York, USA, pp. 43-86(2000).
12. D. S. Kim, Y. S. Park, Effect of disinfection process combination on E. coli deactivation and oxidants generation, *J. Environ. Sci. Int.*, 20(7), 891-898(2011).
13. D. Majuste, E. L. C. Martins, A. D. Souza, M. J. Nicol, V. S. T. Ciminelli, Role of organic reagents and impurity in zinc electrowinning, *Hydrometallurgy*, 152, 190-198(2015).
14. C. Rerolle, R. Wiat, Kinetics of oxygen evolution on Pb and Pb-Ag anodes during zinc electrowinning, *Electrochim. Acta*, 41(7-8), 1063-1069(1996).
15. Y. Park, J. Lee, Y. S. Park, D. Kim, A study on accelerated life test of insoluble electrode, in *Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society Environmental Engineers, KSEE*, pp. 260(2013).
16. A. C. Scott, R. M. Pitblado, G. W. Barton, A. R. Ault, Experimental determination of the factors affecting zinc electrowinning efficiency, *J. Appl. Electrochem.*, 18, 120-127(1988).
17. K. W. Kim, E. H. Lee, J. S. Kim, K. H. Shin, K. H. Kim, Electro-activity and life time properties of Ru-Sn-Ti ternary mixed oxide/Ti electrode(II), *Korean Chem. Eng. Res.*, 39(2), 138-143(2001).

Authors

Mijung Park

WESCO ELECTRODE Co., Ltd, R&D Center, Research Director,
ORCID® 0000-0002-4369-4263

Taeksoon Lee

Department of Environmental Engineering, Changwon National University, Professor, ORCID® 0000-0002-8453-7934