Resources Recycling
Vol. 30, No. 6, 2021, 61-67
https://doi.org/10.7844/kirr.2021.30.6.61
pISSN : 2765-3439 eISSN : 2765-3447

≫ 연구논문 ≪

이리듐 회수를 위한 시멘테이션 공정 중 초음파 조사의 영향

김승현* · 김영진** · 서준형** · 조진상** · 조계홍** · §이재령***

*강원대학교 신산업개발 T-EMS 융합학과, **한국석회석신소재연구소 연구개발실, ***강원대학교 에너지·자원공학과

Effect of Ultrasound Irradiation during Cementation Process for Recovery of Iridium

Seunghyun Kim*, Young-Jin Kim, Jun-Hyung Seo**, Jin-Sang Cho**, Kye-Hong Cho** and §Jaeryeong Lee*****

**Department of Integrated Energy and Infra system, Kangwon National University*
***Department of Research and Development, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials*
****Department of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University*

요 약

이리듐이 함유된 염산 침출액으로부터 시멘테이션법을 이용한 이리듐 회수 연구를 실시하였다. 환원제로는 아연을 사용하였으며, 환원제 투입량, 이리듐 초기 농도, 초기 pH, 반응 시간 변화 및 초음파 처리에 따른 이리듐 회수율 특성 실험을 실시하였다. 교반기만 사용한 조건에서는 아연 투입량 증가에 따라 이리듐의 회수율이 지속적으로 증가하였으나, 아연 당량이 40 조건에서 70% 수준의 이리듐 회수율을 나타냈다. 초음파 처리에 따른 시멘테이션 조건에서는 아연 투입량이 20 당량 이하 조건에서 이리듐의 회수율이 감소하였고, 40 당량 조건에서는 이리듐 회수율이 급격히 증가하는 특성을 나타났다. 이는 초음파 처리에 따른 아연의 이온화 및 이리듐 재용해되어 나타난 결과로 판단된다. 초음파 장치를 교반기와 함께 사용한 조건에서 교반기만 사용한 동일 조건에 비해 27% 이상 이리듐 회수율이 증가함을 확인하였고, 99%의 이리듐 회수가 가능하였다(아연 40 당량, 초기 pH 0.01, 100 ml, 이리듐 초기 농도 1770 ppm, 60 min.).

주제어 : 이리듐, 시멘테이션, 아연, 회수, 초음파

Abstract

This work investigated the cementation of iridium from iridium-containing hydrochloric acid leachate. Zinc powder was used as the reducing agent, and the effects of the stoichiometric ratio of Zn/Ir, initial Ir concentration, initial pH, reaction time, and ultrasound irradiation on iridium recovery were investigated. When only the stirrer was used for cementation, the iridium recovery increased with the addition amount of zinc, and the recovery of about 70% at 40 times the stoichiometric ratio of Zn/Ir. In contrast, when employing ultrasonic irradiation with stirring, the recovery of iridium decreased at 20 times or less the stoichiometric amount of zinc. The recovery of iridium increased at 40 times the stoichiometric ratio of Zn/Ir. This result may be due to the ionization of zinc and re-dissolution of iridium during the ultrasound irradiation treatment. When a combination of ultrasonic irradiation and stirring was used for cementation, the iridium recovery increased by more than 27% compared to that

· Received : December 2, 2021 · Revised : December 16, 2021 · Accepted : December 21, 2021
§ Corresponding Author : Jaeryeong Lee (E-mail : jr-lee@kangwon.ac.kr)
Department of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, Korea
ⓒThe Korean Institute of Resources Recycling. 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.

when using only the stirrer. It was possible to recover 99% of iridium under the following conditions: reaction time, 60 min; initial pH, 0.01; volume of leachate, 100 mL; 1770 ppm Ir, 40 times the stoichiometric ratio of Zn/Ir.

Key words : Iridium, cementation, zinc, recovery, ultrasound

1. 서 론

산업의 발전과 함께 기능성 소재 및 첨단소재 등의 연구개발이 다양한 분야에서 진행되고 있다. 전자부품, 촉매, 배터리 및 센서 등에 사용되는 나노 입자와 소량 첨가만으로도 재료의 물리・화학적 특성을 높일 수 있는 금속 성분들의 활용이 확대되고 있다. 이러한 금속으로는 루테늄(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 오스뮴(Os), 이리듐(Ir), 백금(Pt)을 포함하는 백금족 금속이 있다[1]. 대부분의 백금족 금속은 화학약품이나 화학반응 등에 뛰어난 내성 및 전기적 성질을 가지고 있기 때문에 산업원료로서 중요 물질로 알려져 있다. 이 중 이리듐(Iridium)은 고강도 및 강한 내화학성을 가지고 있는 금속으로 점화 플러그, 고온반도체 접점재료, 내마모성 부품 등의 특수부품으로 사용하고 있는 물질로 알려져 있다. 하지만, 매장량이 매우 적고 생산량과 수요량이 극히 제한적일 뿐만 아니라 재활용 공정비용이 너무 높아 폐 이리듐의 회수가 거의 불가능한 실정이다. 이리듐을 전량 수입하는 국내와 마찬가지로 국제적으로도 이리듐 재활용 공정에 대한 연구가 거의 없고, 수요가 증가함에 따라 가격상승 및 불안정한 시장가격을 형성하고 있다. 이러한 이유로 이리듐은 산업적으로 우수한 특성에도 불구하고 내마모성 부품, 고온반도체 접점제 및 점화 spark plug 등의 특수부품에만 쓰이고 있는 실정이다[1-3].

현재 국내에서 발생되는 백금 스크랩을 다시 원료 소재로 사용하기 위해서는 정제기술이 필요하지만, 자체 정제기술이 확립되지 않아 대부분 미국, 일본 등으로 백금 스크랩을 보내 정련하고 있다. 국내에서 주로 적용하는 침출 기술은 끓는 왕수를 이용한 백금과 팔라듐의 화학적 침출이며, 다양한 백금족 함유 스크랩에 대한 재활용 시도가 이루어지고 있으나 고순도 정제로의 기술은 부족한 실정이다. 독일 및 일본의 관련 업체 들은 스크랩에서 백금족 금속을 회수할 수 있는 상용화 기술을 보유하고 있으나, 관련 주요 기술에 관한 자세한 공정은 확인이 어려운 실정이다[3,4].

국내의 경우 이리듐 회수를 위한 연구가 매우 부족하기 때문에 저자는 알칼리용융법을 이용한 이리듐 침출 연구를 수행하였으며[5], 이를 통해 17700 ppm의 이리듐 용액을 제조하였다. 이리듐 회수 연구는 침출 연구를 통해 회수된 용액을 모액으로 실험하였으며, 액 중 금속 성분 회수 방법 중 공정이 비교적 간단한 시멘테이션법을 이용해 실시하였다. 시멘테이션(cementation)은 외부의 전원공급 없이 두 금속 사이의 전극전위차를 이용하여 수용액 중에 용해된 전기 화학적으로 귀한금속(M : noble metal)을 비한금속(N : base metal)으로 치환하여 귀한금속을 석출, 회수 하는 방법으로 반응식은 식 (1)과 같다[6-8]. 여기서 M^{m+}는 귀한금속의 이온, N^{n+}는 비한금속의 이온을 나타낸다. 이 방법은 시료 투입 이외의 공정비용 발생이 없고, 전기화학반응으로 반응이 빠르게 진행하는 특성이 있으나, 이와 관련된 연구가 부족한 실정이다.

$$nM^{n+} + mN \rightarrow nM + mN^{n+} \quad (1)$$

아연을 이용하여 이리듐을 함유한 용액의 시멘테이션 반응은 이리듐과 아연의 전위차로 이리듐 이온이 금속상태로 환원되고, 아연 분말은 이온화 된다. 이리듐과 아연에 대한 반응은 식 (2)와 식 (3)으로 표시할 수 있으며, 이리듐과 아연은 각각 1.15 V 및 –0.763 V의 표준 환원 전위로 확인되었고, 이에 따른 이리듐 환원이 가능하다.

$$Ir^{3+} + 3e^- = Ir \ (E^0 = +1.15\ V) \quad (2)$$

$$Zn^{2+} + 2e^- = Zn \ (E^0 = -0.763\ V) \quad (3)$$

이에 본 연구에서는 침출 실험을 통해 얻은 17700 ppm의 이리듐 용액을 이용하고, 환원제로 아연(zinc)을 사용하여, 환원제의 투입량, 이리듐의 초기 농도, 반응 시간, 초기 pH 및 교반시 초음파(ultrasound) 효과에 따른 이리듐 회수 특성에 관해 연구하였다.

2. 실험방법

이리듐 용액은 17700 ppm의 침출액에 증류수를 투입하여 이리듐의 초기농도가 1770, 3540 ppm인 용액을 제조하였다. 시멘테이션 실험을 위해 100 ml씩 사용하였으며, 액 중 이온화 상태의 이리듐을 치환하기 위해 아연 분말(Purity : 90.5 %, Kanto)을 반응물질로 사용하고 pH 조절제로는 HCl을 사용하였다.

시멘테이션 실험은 교반속도(300 rpm)를 고정하고 반응온도(30, 50 ℃), 반응시간(5, 10, 30, 60 min.), 초기 pH (0.01, 0.1, 1), 교반방법(stirrer, stirrer + ultrasound irradiation) 및 아연 분말은 2, 5, 10, 20, 30, 40 당량비로 변화시켜 실험하였다. 고/액 분리를 위해 멤브레인 필터(cellelose acetate, pore size : 0.2 μm, adventec MFS inc., Japan)를 이용 하였으며, 액 중 이리듐의 농도는 ICP(Inductively Coupled Plasma Spectrometer, OPTIMA 7300 DV, Perkinelmer, USA)로 확인하여 초기용액 중 함유된 농도와 시멘테이션 실험 후 이리듐 농도 차이로부터 이리듐의 회수율을 계산하였다.

초음파 처리에 따른 시멘테이션 효과 확인을 위해 일반적으로 실험실에서 세척용으로 사용하는 초음파 세척기(2510E-DHT, Branson, USA)를 사용하였다(Fig. 1). Bath type의 이 장치는 밑면에 Output 130 W, Frequency 40 kHz인 2조의 초음파 발생장치가 장착되어 액 중 초음파를 발생시킨다. Bath 내부는 물로 채우고, 아연 분말을 500 ml 비이커에 투입하였다. 비이커와 초음파 발생장치인 밑면과의 거리는 2 cm로 고정하였고, 동일한 실험 조건을 위해 교반기만 사용하는 실험에서도 비이커를 실험온도가 설정된 초음파 장치에 넣고 초음파 처리 없이 실험을 진행하였다.

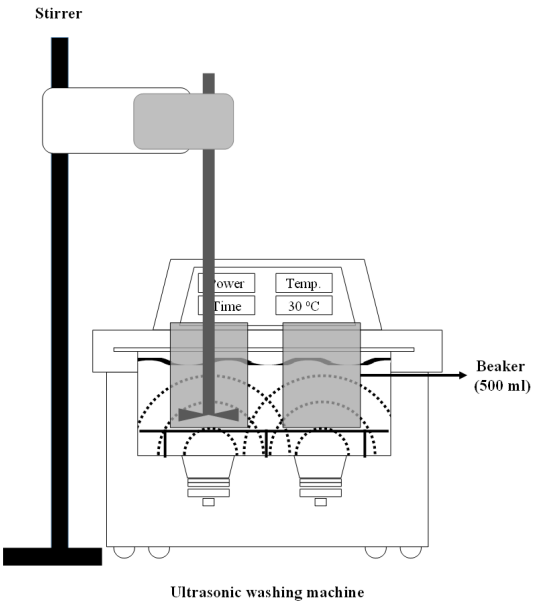

Fig. 1. The schematic of the experimental apparatus.

3. 초음파 효과

초음파는 음향 캐비테이션(acoustic cavitation)현상으로서 액상 내에서 발현하며, 기포 핵 생성(nucleation), 기포 핵의 성장(bubble growth) 및 불안정한 상태에서의 기포 붕괴(collapse)가 연속적으로 진행한다고 알려져 있다. 초음파가 액 중에 전달될 때 부압(negative pressure)이 발생하는 지점에서 공동(cavity)이 생성되고, 성장 후 붕괴단계에서 내부는 약 3000 ℃, 100 atm, 계면에서는 약 2000 ℃ 정도의 고온과 강한 충격파가 반복적으로 생성되고 이를 반응에 사용하게 된다[9]. 이러한 초음파 효과를 실험에 적용하기 위한 연구는 초음파의 주파수, 파워, 반응 용액의 온도, 압력 및 pH 등의 조건을 변화시킨 연구가 발표되었으며, 유기용매의 분해 및 토양중 중금속 침출 등에도 적용되었다. 초음파 효과를 향상시키기 위해 초음파의 조사거리나 초음파 발생 장치가 2개 이상의 다중 주파수를 갖는 조합 등의 연구도 있다[10,11]. 본 연구에서는 초음파 영향에 따른 시멘테이션 반응 특성 확인 및 평가하기 위해 단일 주파수를 갖는 초음파 세척기를 이용해 기초연구를 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 아연 분말 투입량 영향

Fig. 2는 아연 분말의 당량비 변화에 따른 이리듐 회수 특성을 나타낸 것으로, 이리듐 용액의 농도를 1770 ppm, 100 ml, pH 0.01, 교반속도 300 rpm, 반응온도 30 ℃, 반응 시간 60 min.로 고정하고, 아연을 2, 5, 10, 20, 30 및 40 당량으로 변화시켜 투입 실험한 결과이다. 아연의 투입량이 증가함에 따라 이리듐의 회수율이 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 40 당량 조건에서 70 %의 이리듐 회수가 가능하였다. 이러한 결과는 아연 당량비 증가

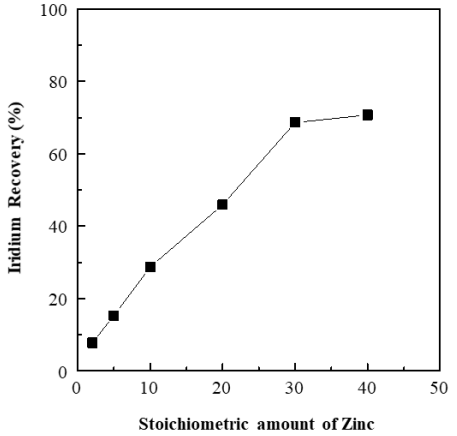

Fig. 2. Effect of the stoichiometric ratio of Zn/Ir on the cementation of Iridium at 30 ℃ (initial pH 0.01, 100 ml, 1770 ppm Ir, 60 min. and 300 rpm).

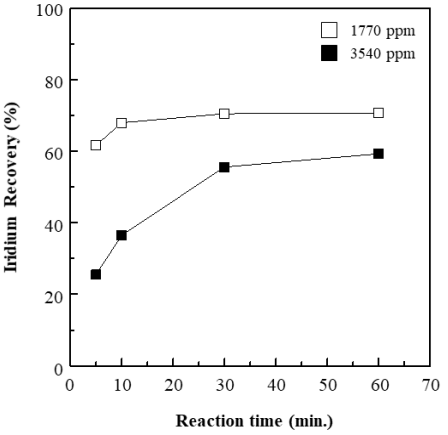

Fig. 3. Effect of initial iridium concentration on the cementation (stoichiometric ratio of Zn/Ir 40, initial pH 0.01, 100 ml, 30 ℃ and 300 rpm).

에 따라 액 중 이리듐 이온과 반응할 수 있는 아연의 표면적이 증가되어 나타난 결과로 판단된다[12-14]. 기존의 시멘테이션 연구 결과와 같이 환원제 투입량 증가에 따른 목적 금속의 회수율은 증가하였으나, 아연의 당량이 40인 조건에서도 이리듐의 회수율이 낮은 특성을 보였다. 이러한 이유는 아연이 이리듐 이온과 반응하기 전에 용액의 유리산(free acid)에 의해 소모되고, 액 중의 이리듐이 $IrCl_6^{2-}$, $IrCl_6^{3-}$등과 같은 복합적인 이온형태로 존재하여 이론적 당량 비에 비해 훨씬 더 많은 양의 아연 소모된 것으로 생각된다[14-16].

4.2. 침출액 이리듐 초기 농도 영향

Fig. 3은 이리듐 용액의 pH를 0.01, 온도 30 ℃, 교반방식 stirrer 및 아연을 40 당량으로 고정하고, 반응 시간(10 ~ 60 min.) 및 이리듐 초기 농도(1770, 3540 ppm)를 변화시켜 실험을 실시한 결과이다. 이리듐의 초기 농도가 3540 ppm의 조건에서는 시간이 증가함에 따라 회수율도 점차 증가하여 반응시간 60 min.에서 약 59 %의 이리듐 회수가 가능하였다. 1770 ppm 조건에서는 반응 시간 10 min. 이내에 68%의 이리듐 회수가 가능하였으나 10 min. 이후, 반응시간이 증가해도 회수율이 증가하는 폭이 매우 낮았다. 이러한 결과는 반응 초기 침출액에 포함된 이리듐과 아연의 반응이 빠르게 진행하지만, 상대적으로 고농도인 3540 ppm의 이리듐 침출액은 동일한 실험 조건에서 시멘테이션 반응 하는 아연의 량이 같기 때문에 반응 초기 회수율이 낮고 서서히 증가하는 것으로 판단된다. 이 후 실험에서는 이리듐 회수율을 향상을 목적으로 시멘테이션 반응 시 교반 방법을 교반기만 사용한 방법과 동일한 교반방식에 초음파를 함께 처리한 방법을 비교하여 실험을 진행하였다.

4.3. 교반 방법 영향

시멘테이션을 통한 이리듐 회수율 향상을 위해 교반방법을 변화시켜 실험을 실시하였다(Fig. 4). 고정 조건으로 이리듐 용액의 농도를 1770 ppm, 100 ml, pH 0.01, 교반속도 300 rpm, 온도 30 ℃로 하였고, 반응시간(5, 10, 30, 60 min.) 및 아연 투입량(10, 20, 30, 40 당량) 변화에 따른 결과를 확인하였다. Fig. 4(a)는 교반기만 이용한 교방 방식이며, Fig. 4(b)는 교반기와 초음파를 함께 이용한 교반방식으로 초음파 처리에 따른 시멘테이션 특성을 확인하였다. 두 조건 모두 아연 당량비 증가에 따른 이리듐 회수율이 증가하는 특성을 보였으나, 시료의 투입량이 동일한 조건에서 반응 시간 증가에 따라 이리듐 회수율 경향은 다르게 나타났다. 교반기만 사용할 경우, 반응 시간 증가에 따른 이리듐의 회수율 차이가 매우 낮게 나타났으며, 이는 아연 투입에 따른 이리듐 시멘테이션은 초기에 대부분의 반응이 진행되고, 이후 평형 pH가 일어나 지속적인 반응이 발생되지 않기 때문으로 생각된다. 초음파 장비와 교반기를 함께 실험한 조건의 경우 30 당량 이하의 아연 투입량 조건에서는 반응시간이 늘어날수록 이리듐의 회

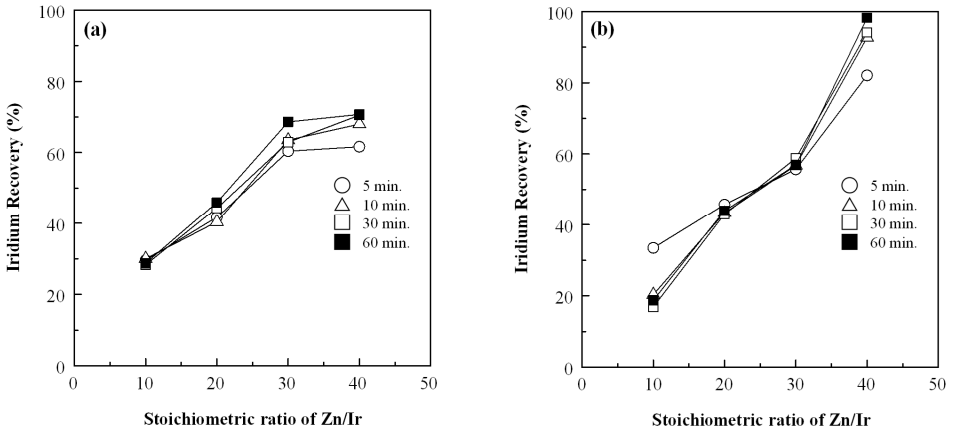

Fig. 4. Recovery of Ir with different stoichiometric ratio of Zn/Ir and agitation method ((a) stirring, (b) stirring + ultrasound irradiation, initial pH 0.01, 100 ml, 1770 ppm Ir and 30 ℃).

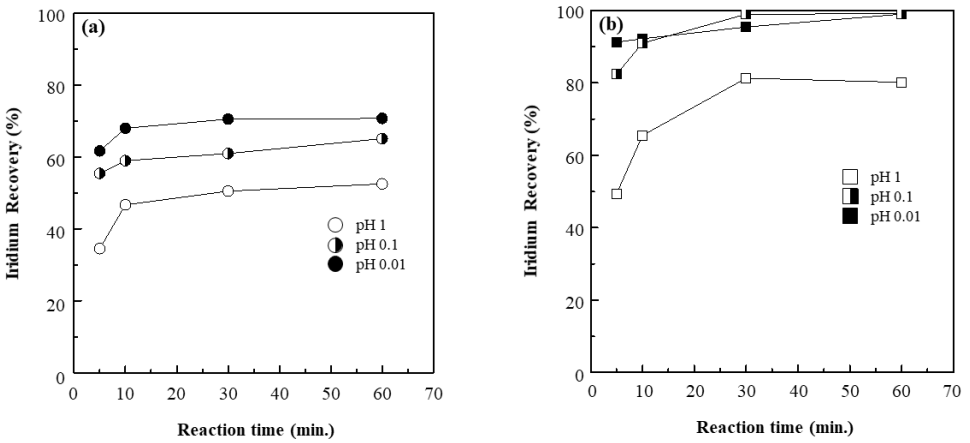

Fig. 5. Recovery of Ir with change of initial pH and agitation method ((a) stirring, (b) stirring + ultrasound irradiation, stoichiometric ratio of Zn/Ir 40, 100 ml, 1770 ppm Ir and 30 ℃).

수율이 감소하였고, 40 당량 이상 투입 조건에서는 반응 시간이 증가와 함께 이리듐의 회수율이 급격히 증가하는 특성을 보였다[17]. 이러한 결과는 초음파 처리에 따른 반응성 향상이 가능함을 나타낸 것으로, 초음파에 의해 아연 분말이 액 중 이온화가 빠르게 진행되고, 반응 시간이 늘어날수록 환원된 이리듐이 재용해 되지만, 아연 당량비 40 조건에서는 이온화된 이리듐이 재환원하기 충분한 투입량이기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 초음파 조사를 교반기와 함께 사용한 조건에서는 반응시간 10 min. 이내에 92 % 이상의 이리듐 회수 및 반응시간 60 min.에서는 99 %의 이리듐 회수가 가능함을 확인하였다.

4.4. 침출액 pH 영향

Fig. 5는 이리듐 용액의 초기 농도를 1770 ppm, 100 ml, 온도 30 ℃, 아연 투입 40 당량으로 고정하고, 용액의 초기 pH 및 교반방법을 변화시켜 실험한 결과이다. 교반방법과 관계없이 pH가 낮아질수록 이리듐의 회수율이 증가하였으나, 반응시간 변화에 따른 경향은 다르게 확인되었다. 교반기만 사용한 조건에서는 반응시간 10 min. 이후 이리듐 회수율의 차이가 나타나지 않았으나, 초음파를 함께 사용한 조건에서는 반응시간 10 min. 이후 에도 추가 반응이 진행하는 특성을 나타내었다. 용액의 초기 pH 0.01 및 0.1의 경우에는 초기 5 분을 제외하고는 거의 비

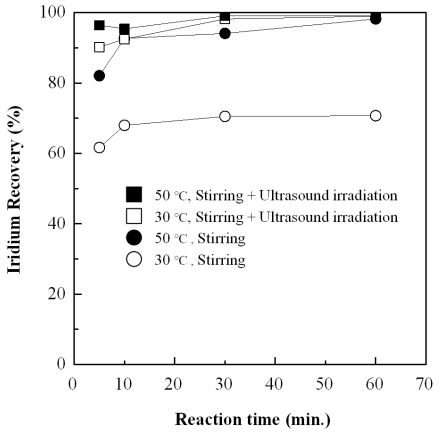

Fig. 6. Recovery of Ir with change of temperature and agitation method (stoichiometric ratio of Zn/Ir 40, initial pH 0.01, 100 ml, 1770 ppm).

숫한 회수율을 보였고 pH 1에서 이리듐 회수율이 점차 증가하는 결과를 보였다. 이는 반응 초기 아연의 용해속도 차이에 따라 발생한 것으로 생각된다[18].

4.5. 온도변화에 따른 영향

교반방법이 다른 조건에서 반응 온도의 영향을 확인하기 위한 시멘테이션 실험을 실시하였다(Fig. 6). 교반기만 사용한 조건에서는 온도 변화에 따른 이리듐의 회수율이 최대 28 %(반응시간 60 min.)까지 차이를 확인하였다. 교반기와 초음파 장치를 함께 사용한 조건에서는 반응시간 5 min. 이내에는 약 6 % 이내의 차이를 나타내었으나, 10 min. 이후의 반응에서는 거의 유사한 회수율을 나타내었고 반응시간 60 min.에서는 두 조건 모두 99 % 정도의 이리듐 회수가 가능함을 확인하였다. 이러한 결과로부터 시멘테이션 반응 시 교반기와 초음파 처리를 함께 사용할 경우 일정 온도 이하에서도 반응성이 크게 향상됨을 확인하였고, 초음파 처리 효과를 향상하기 위해서는 적절한 환원제의 투입, pH 조절 및 반응 시간 등에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

5. 결 론

알칼리용융 후 염산 침출을 통해 제조한 침출액으로부터 이리듐을 회수하기 위해 초음파를 활용한 시멘테이션 실험을 실시하였다. 환원제로는 아연분말을 사용하였으며, 환원제 투입량, 이리듐 초기 농도, 초기 pH, 반응 시간 변화 및 시멘테이션 효율 향상을 위해 초음파 세척 장치를 활용하여 초음파 처리에 따른 회수율 특성을 평가하였다. 교반기만 사용한 실험에서 아연 당량비 증가에 따라 이리듐의 회수율이 지속적으로 증가하는 특성을 보였으나, 아연 투입 당량 40 조건에서 70 % 수준의 낮은 이리듐 회수율을 나타냈다. 교반기와 초음파 처리를 함께 진행한 시멘테이션 실험에서는 아연 투입 당량 20 이하 조건에서는 이리듐의 회수율이 감소하였으나, 40 당량 조건에서는 이리듐 회수율이 급격히 증가하여 반응시간 10 min. 이내에 92 %의 이리듐 회수가 가능하였다. 초음파 처리에 따른 시멘테이션 반응 중 환원제의 당량비(2 ~ 40) 및 용액의 초기 pH(0.01, 0.1, 1) 영향은 증가하였으며, 온도(30, 50 ℃) 변화에 따른 영향은 감소하는 특성을 보였다. 이러한 초음파 영향은 시멘테이션 반응에서 발생할 수 있는 과량의 환원제 투입, 열원 공급 및 낮은 pH 조절 등의 문제를 해결 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20217510100080, 저품위 고상 복합자원의 자원순환 오픈 플랫폼 구축을 위한 희소금속 농축회수(처리량 200 kg/일) 원천기술개발).

References

1. Kim, S.K. and Sohn, J.S., 2008 : Application of rhodium and iridium, Trend in Metals & Materials Engineering, 21(6), pp.37-45.
2. Son, I.J. and Sohn, H.S., 2021 : Smelting of platinum group metals and recycling of spent catalyst, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 30(3), pp.18-29.
3. Yakoumis, I., Panou, M., Moschovi, A.M., et al., 2021 : Recovery of platinum group metals spent automotive catalysts: a review, Cleaner Engineering and Technology, 3(100112), pp.1-11.
4. Umeda, H., Sasaki, A., Takahashi, K., et al., 2011 : Recovery and concentration of precious metals from strong acidic wastewater, Materials Transactions, 52(7), pp.1462-1470.
5. Lee, J.R. and Kim, Y.J., 2011 : Chemical dissolution of iridium powder using alkali fusion followed by high-temperature leaching, Materials Transactions, 52(11), pp.

2067-2070.
6. Choi, S.H., Nguyen, T.T., Yoo, K.K., 2018 : Ni cementation followed by magnetic separation for recovery of unreacted Zn from by-products of Zn smelting process, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng., 55(2), pp.121-126.
7. Ahn, J.W., Ahn, J.G., Park. K.H., 2000 : A study of cementation of Cu, Ni, Co ions with Mn powders in chloride solution, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 9(3), pp.3-12.
8. Ahmed, I.M., El-Nadi, Y.A., Daud, J.A., 2011 : Cementation of copper from spent copper-pickle sulfate solution by zinc ash, Hydrometallurgy, 110, pp. 62-66.
9. Kim, D.H., Kim, Y.J., Lee, J.R., 2010 : Decomposition of ethylene vinyl acetate by using ultrasonic treatment, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng., 47(5), pp.647-652.
10. Lee, M.J. and Oh, J.I., 2009 : Sonolysis of Trichloroethlene in the multi ultrasound irradiation reactor, J. Korean Soc. Environ. Eng., 31(10), pp.873-882.
11. Kim, E.K., Son, Y.G., Cui, M.C., et al., 2012 : The effect of irradiation distance/volume on sonochemical oxidation of arsenic, J. Korean Soc. Environ. Eng., 31(10), pp.873-882.
12. Aktas, S., 2008 : Silver recovery from silver-rich photographic processing solutions by copper, Canadian Metallurgical Quarterly., 47, pp.37-44.
13. Farahmand, F., Moradkhani, D., Safarzadeh, M.S., et al., 2009 : Optimization and kinetics of the cementation of lead with aluminum powder, Hydrometallugy, 98, pp.81-85.
14. Aktas, S., 2012 : Cementation of rhodium from waste chloride solutions using copper powder, International Journal of Mineral Processing, 114-117, pp.100-105.
15. Aktas, S., 2011 : Rhodium recovery from rhodium-containing waste rinsing water via cementation using zinc powder, Hydrometallurgy, 106, pp.71-75.
16. Papaiconomou, N,. Billard, I., Chainet, E., 2014 : Extraction of iridium(IV) from aqueous solutions using hydrophilic/hydrophobic ionic liquids, Royal Society of Chemistry, 4, pp.48260-48266.
17. Aurousseau, M., Pham, N. T., Ozil, P., 2004 : Effect of ultrasound on the electrochemical cementation of cadmium by zinc powder, Ultrasonic Sonochemistry, 11, pp.23-26.
18. Wang, Z., Chen, D., Chen, L., 2007 : Application of fluoride to enhance aluminum cementation of gold from acidic thiocyanate solution, Hydrometallurgy, 89, pp.196-206.

김 승 현

- 강원대학교 자원에너지시스템공학과 석사
- 현재 강원대학교 신사업개발 T-EMS 융합학과 박사과정
- 당 학회지 제29권 5호 참조

김 영 진

- 강원대학교 에너지자원공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 연구원
- 당 학회지 제29권 6호 참조

서 준 형

- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
- 광운대학교 화학공학과 박사수료
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 선임연구원
- 당 학회지 제29권 6호 참조

조 진 상

- 강원대학교 지역기반공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 책임연구원
- 당 학회지 제29권 6호 참조

조 계 홍

- 광운대학교 대학원 화학공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 소장
- 당 학회지 제29권 6호 참조

이 재 령

- 일본 동북대학 재료공학과 공학박사
- 현재 강원대학교 에너지자원공학과 교수
- 당 학회지 제29권 5호 참조