

습식산화법을 이용한 제강분진 내 아연회수를 위한 최적조건 도출에 관한 연구(Part I; 침출공정)

문대현 · 안상우* · 김한래** · 김지태 · *장순웅

경기대학교 환경에너지공학과, *위즈이노텍(주), **아쿠아테크(주)

The Optimization of Hydrometallurgical Process for Recovery of Zinc from Electric Arc Furnace Dust (Part I : leaching process)

Dea-Hyun Moon, Sang-Woo Ahn*, Han-lae Kim**, Ji-Tae Kim and *Soon-Woong Chang

Department of Environmental & Energy Engineering, Kyonggi University

*Wizinotec Co

**Aquatech Co

요 약

제강분진(Electric Arc Furnace Dusts)은 유해폐기물로 지정되어있는 유해한 환경오염물질이다. 이 분진은 철강산업의 부산물로써 철, 아연, 니켈, 구리 등 많은 유가금속을 포함하고 있어 적절한 처리를 거치면 폐기물이 아닌 자원으로 재활용이 가능하다. 본 연구에서는 국내 전기로에서 발생하는 제강분진을 대상으로 가장 높은 함유량을 가진 아연의 회수를 위한 최적조건을 도출하기 위해 습식침출법을 적용하였다. 분진과 황산의 고액비, 침출시간, MnO_2 투입량 등의 조건을 종합하여 실험을 진행하여 최적 아연회수조건을 도출하였다. 황산농도 3 M, 고액비 1 : 2, 철 제거를 위한 폭기 1.8 L/min 강도로 2시간에서 95%의 아연 회수율이 관찰되었다. 그러나, 현장 적용의 현실성을 고려한 다른 최적의 조건은 저농도 황산과 MnO_2 3.5 g을 투입했을 경우 약 80 %의 아연 회수율을 나타내었다.

주제어 : 제강분진, 습식산화, 산성침출, 유가금속 회수, 아연회수

Abstract

EAFD (Electric Arc Furnace Dust) is considered as pernicious pollutant, assigned hazardous waste. Since this dust is a by-product of industry, it contains valuable metals such as Fe, Zn, Ni, Cu which can be turned into resources by recycling process. In this study, hydrometallurgical process was applied to recover Zn from Electric Arc Furnace Dusts. The result showed 95% Zn recovery at 3M H_2SO_4 , Solids/Liquid ratio 1 : 2 and aeration of 1.8L/min for 2hr. However there was 80% Zn recovery at lower H_2SO_4 concentration apply for pilot scale plant.

Key Words : EAFD, Hydrometallurgical recovery, acid leaching, Valuable metal recovery, Zinc recovery

· Received : February 16, 2015 · 1st Revised : March 17, 2015 · 2nd Revised : May 11, 2015 · Accepted : May 27, 2015

*Corresponding Author : Soon-Woong Chang (E-mail : swchang@kyonggi.ac.kr)

Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, 154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-760 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.

1. 서 론

‘지속 가능한 발전’에 대한 전 세계적인 요구는 각 산업계에 꾸준한 관심을 일으키고 있는 실정이다. 공업의 발전에 따라 폐기물의 발생량은 점차 증가하는 추세에 있으며, 일부 폐기물은 그 자체로도 환경오염의 물질이 되기도 한다. 이와 같은 대표적인 폐기물중 하나인 제강분진(EAFD: Electric Arc Furnace Dust) 고철의 용해과정에서 발생하며, 유해폐기물로 분류되어 있어 대부분 매립 처리되거나 아스팔트의 아스콘 채움재로 사용되고 있는 실정이다.¹⁾ 이 분진에는 약 30~40%의 아연을 함유하고 있어 적절한 처리방식을 거치면 폐기물이 아닌 자원이 되므로 그 처리방법에 대해 활발한 연구가 진행 중이다. 제강분진에 포함되어 있는 아연은 철제품의 산화를 막기 위한 코팅, 기계, 의약품, 동물사료, 페인트 등의 핵심원료로 널리 사용되고 있는 중요한 자원이다²⁾. 이와 같이 제강분진 내 다량 함유되어 있는 아연을 경제적이고 효율적인 처리방법으로 회수하여 아연금속 또는 산화아연으로 활용한다면 자원재활용과 환경오염원의 억제측면에서 바람직하다고 볼 수 있다.^{3,4)} 2014년 7월 아연의 LME 시세는 톤당 2,393 \$로 높은 시세를 유지하고 있으며, 이를 고순도 아연을 생산할 시 도시광산을 통한 폐자원 그린순환시스템으로 환경적 트렌드를 충족할 것으로 판단된다^{5,7)}. 세계적으로 분진 내 유기금속 회수에 관한 공적으로는 크게 건식처리법과 습식처리법으로 분류된다. 건식처리법은 전기로 분진의 용융점 부근에서 Zn, Pb, Cd 등 금속성분을 휘발시켜 이를 응축·회수함과 동시에 잔사로부터 Fe를 회수하는 기술로서, Waelz Kiln를 이용하여 금속아연을 생산하는 공법과 Plasma법이 있다.^{8,9)} Waelz법은 분진을 코크스와 혼합하여 Rotary Kiln로 내에서 환원하여 조산화아연(ZnO)을 회수한 후, 낮은 농도로 함유된 Zn과 Pb의 산화물을 Imperial Smelting Process (ISP) 공정을 이용하여 금속상태의 Zn과 Pb를 회수하는 방법으로 알려져 있다⁹⁾. Plasma 법은 용융·환원되어 생성된 금속아연을 직접 회수할 수 있는 장점이 있지만 전력소모량이 크고 아연의 순도가 낮은 단점이 있다. 습식처리법의 전해법에는 알칼리성 침출용액을 이용하는 방법과 산성 침출용액을 이용하는 방법이 있다.¹⁰⁾ 알칼리성 침출용액을 이용하는 방법은 염화암모늄 용액을 이용하여 고순도 아연 회수가 가능하지만 아연회수율이 50% 전후로 낮은 단점이 있다고 알려져 있다.¹¹⁾ 또한

Havlik 등의 연구결과에 의하면, 희석된 황산을 사용하여 고액비 조건별로 약 70~80%의 회수율을 나타내었다⁶⁾. Hwang 등에 의하면 유화형 액막법에 의하여 Zn 성분의 선택적 추출 및 고순도 ZnO 분말을 합성하는 연구결과가 알려져 있다⁷⁾. 따라서, 본 연구에서는 제강분진 내 함유되어 있는 유기금속들을 효율적으로 회수하기 위해 황산의 농도, 분진과 황산의 고액비, 침출시간, 불순물의 제거를 위한 폭기 조건, MnO₂ 투입량 등의 조건을 종합하여 최적조건을 도출하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 분진은 인천소재 A 제강사에서 공급받아 사용하였다. 분진의 성분분석은 X-선 형광분석법(X-Ray Fluorescence Analysis)과 X-선 회절분석법(X-Ray Diffraction)을 사용하였으며, 용출된 시료의 분석은 Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP)로 분석하였고, 침출용 시약은 산성 처리법으로 H₂SO₄ (98%, Kanto)를 사용하였다. 또한 Cementation용으로 Zinc Oxide (99%, Sigma Aldrich)를 사용하였다. 실험방법으로는 분진을 Na₂CO₃ 1 M로 세척 및 건조하여 체에 걸러 밀도를 일정하게 설정한 뒤,^{12,13)} 농도별 황산과 반응시켜 원심분리 후 상등액으로 회수율을 측정하였다. 황산농도는 0.5 M~3 M, 고액비는 1:1~1:5까지 조절해주었고, 침출시간은 60분부터 300분까지 조절해주었으며, 철 제거를 위한 폭기는 RESUN사의 Air2000을 사용하여 분당 1.8 L의 공기를 공급해주었다. 또한, 회수율 향상을 위한 산화망간(Sigma Aldrich, 99%) 주입량은 0.5 g부터 3.5 g까지 조절하여 진행하였다. 전체적인 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental conditions

Condition	Values
Cementation	Zinc Oxide (99%, Sigma Aldrich)
H ₂ SO ₄	0.5 ~ 3 M
Solid/Liquid Ratio	1:1 ~ 5
Aeration	Air2000 (RESUN), 1.8 L/min
Leaching Time	60 ~ 300 min
MnO ₂	0 ~ 3.5 g

3. 결과 및 고찰

3.1 제강분진 성상분석

전기로 제강분진의 주성분은 Zn과 Fe이며, 일반적으로 그 함량은 제강사별, 장입고철별, 조업조건별로 큰 차이를 나타내고 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서 사용된 제강분진은 인천소재 A 제강사에서 제공받았으며, 실험에 앞서 분진의 성상분석을 실시하였다. Fig. 1은 제강분진을 XRD를 이용하여 분석한 결과이며, Table 2는 XRF로 분석한 결과이다. ZnO와 Fe의 peak가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 광물형태로는 Fe₃O₄의 형태가 나타났다. Fe₂O₃ 24%, Na₂O 8%, Cl 5%, PbO 2.7% 등 아연과 철 외 많은 금속들이 존재하였으며, 또한 Jeong의 연구에 의하면 타 제강사의 제강분진은 아

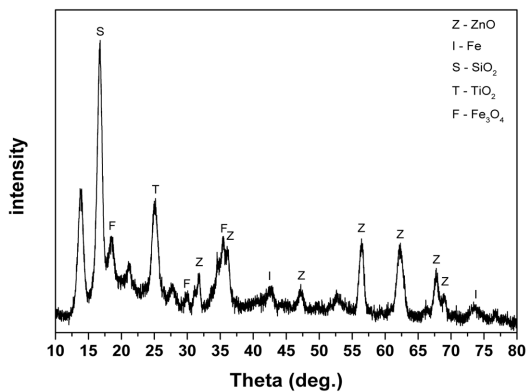


Fig. 1. The XRD pattern of EAFD used in this study.

Table 2. Chemical composition of the EAFD samples

Formula	Conc. (%)	Formula	Conc. (%)
ZnO	41.24	Al ₂ O ₃	0.807
Fe ₂ O ₃	23.99	P ₂ O ₅	0.688
Na ₂ O	8.18	Cr ₂ O ₃	0.349
Cl	5.14	Br	0.319
K ₂ O	3.935	CuO	0.234
CaO	3.66	TiO ₂	0.115
SiO ₂	3.56	CdO	0.0889
PbO	2.774	Sb ₂ O ₃	0.022
SO ₃	1.83	NiO	0.018
MnO	1.743	SrO	0.009
MgO	1.3		

연함유량이 약 13~32%인 반면, 본 연구에서 사용된 분진은 Zn을 상대적으로 더 많이 함유하고 있어 아연을 회수하기 적절한 분진으로 판단된다.^{15,16)} 하지만 중금속 및 기타 구성성분이 약 42%정도 존재하였는데, 이는 분진 내 아연회수 시에 아연 외 불필요한 전이금속들도 침출될 수 있다는 결과로 판단되며, 원활한 아연회수를 위해서는 기타 중금속, 특히 Fe 계열의 전처리가 필요할 것으로 사료된다. 기타 중금속의 침출은 금속의 반응성에 따라 침출되는 양이 아연과 철에 비해 미량이므로 본 연구에서 다루지 않았다.

3.2 침출시간 최적화 실험

분진 내 아연회수를 위한 조건으로는 침출 시간, 교액비, 침출액의 농도 등 많은 변수가 존재한다. 그중 침출시간은 아연회수의 효율을 높이기 위한 공정의 중요한 변수이므로 침출시간의 최적조건을 알아보기 위하여 실험을 진행하였다. 1L 반응조에 분진과 황산을 300분까지 반응시켜 주었으며 황산농도는 2M, 온도는 25°C로 고정시켰다. 또한, 실험결과를 비선형회귀 분석(Nonlinear Regression - Dynamic Fitting)으로 Fig. 2에 나타내어 실험의 신뢰도를 확보하였으며, 약 98.9%의 높은 신뢰도를 갖는 식을 도출하여 아래 Eq (1)에 나타내었다.

$$f = 67.8503 \times (1 - \exp^{-0.0203 \times x}) \quad (1)$$

실험결과 120분에 피크를 나타내었으며, 그 이후로는 회수율이 증가하지 않고 침출액 내 아연의 농도가 미세

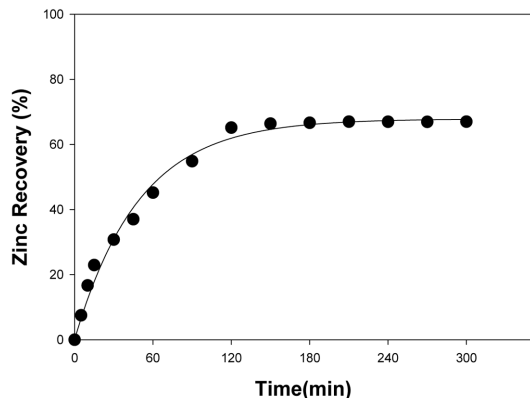


Fig. 2. Leaching result of Non linear Regression - Dynamic Fitting.

하게 감소하는 재용출효과도 발생하였다. 이는 황산 내 수소이온과 분진 내 아연이온이 결합하여 $ZnSO_4$ 의 형태로 결합되어 평형상태를 이루었기 때문으로 사료된다.¹⁶⁾ 또한, Dvorak 등,¹⁷⁾ Ahmed 등¹⁸⁾ 연구결과에 의하면 30분에 분진 내 대부분의 아연이 용출된다고 보고된바 있지만, 10%의 고농도 황산을 사용하였고, 분진 내 아연함량이 국내 제강분진에 비해 약 2~3배 가량 높아 나타난 결과로 사료된다. 또한 Jeong의 연구에 의하면 본 연구에서 사용한 분진과 비슷한 성상을 가진 분진을 대상으로 침출한 결과 약 120분에서 가장 높은 침출농도를 나타낸바 있다.¹⁵⁾ 따라서, 국내 제강분진 특성에 맞는 침출시간은 약 120분 정도로 판단된다.

3.3. 고액비에 따른 회수율 산정

고액비 또한 침출시간과 더불어 중요한 변수중 하나이다. 고액비의 최적조건 도출을 위해 1L 반응조에 분진 100g과 2M 황산의 비를 1:1~1:5까지 설정하였다. 또한, 침출시간 120분, 온도는 25°C로 고정시켜 실험을 진행하였다. 실험결과, 1:2조건이 가장 높은 회수율을 나타내었으며, 고액비가 높아질수록 회수율이 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 회수율 측정 시, 실제 침출된 아연의 양(침출액 내 아연의 농도*초기 침출액의 부피)/전체 제강분진 내 아연의 양으로 산정을 하여 나타난 결과로 판단된다. 분진 내 아연의 양은 한정되어 있으나 황산의 부피가 증가하게 되면 아연이 침출될 수 있는 용매의 양 또한 증가하여 상대적으로 높은 고액비 조건의 회수율이 낮아지게 된다. 하지만 Ailiang 등,¹⁾ Liang 등⁸⁾은 1:5 조건, 1:8 조건에서 가장 높은 회수율이 나타났다고 보고된 바 있으나 이는 국내 분진과 외국 분진의 아연함량이 다르기 때문으로 판단된다. 또한, Jeong 등에 의한 국내 연구사례에 의하면 고액비를 1.23, 1.52, 1.83, 2.05, 2.63으로 조절한 결과, 1.83인 경우가 85~90%의 회수율을 나타내었고, 2.63일 때, 회수율이 64~69%로 감소하는 경향을 나타냈다고 보고된 바 있다¹⁴⁾. 이와 비교해볼 때, 20~40%의 아연 함유율을 가지는 국내 분진의 특성 상 1:2 조건이 가장 적합할 것으로 판단된다(Fig. 3).

3.4. 산성침출 결과

황산액을 사용한 제강분진 침출 실험 시 황산용액 농도는 0.5, 1M, 2M, 3M로 진행하였으며, 각각의 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 황산의 세기가 강할수록 높은 회수율이 나타났으며, 3M기준 95% 정도의

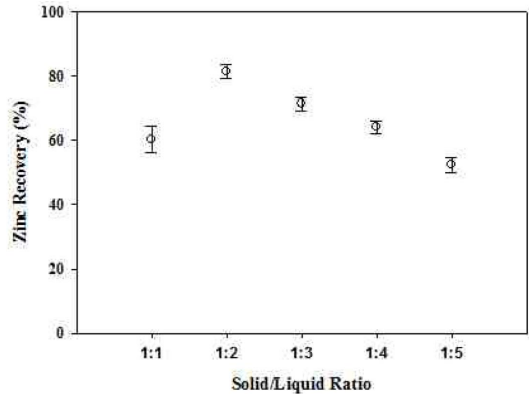


Fig. 3. Effect of the Solids to Liquid ratio on the sulfuric acid extent of zinc (2hr, 2M sulfuric acid, 25°C).

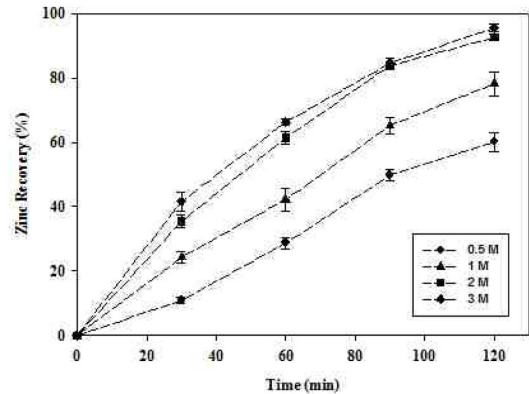
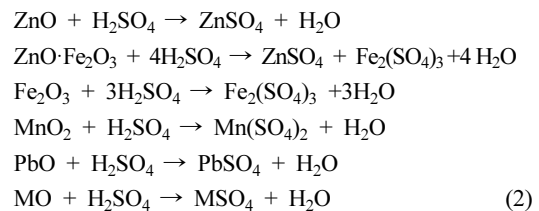


Fig. 4. Result of sulfuric acid concentration.

효율을 보였다. 또한 1M은 약 70%, 2M과 3M은 90~95% 정도로 유사한 결과를 나타내었으며, 0.5M은 약 60%의 회수율을 나타냈다. 이는 고농도 황산 내 유기금속과 반응할 수 있는 H^+ 이온이 많아 나타난 결과로 판단되며, H^+ 이온이 많이 존재할수록 분진 내 금속과 더 쉽게 반응하여 황산금속염을 생성하게 된다⁴⁾. 아래 Eq (2)에 분진 내 유기금속과 황산의 반응식을 나타내었다.



3.5. 철 제거 효과

고순도의 아연회수를 위해서는 불순물을 제거하는 공정이 필요하다. Tahir 등의 연구와 같이 제강분진 내 철을 회수하는 연구사례도 있지만, 국내 분진의 특성상 철보다는 아연이 적합하다고 판단되어진다.⁹⁾ 본 연구에서 가장 큰 불순물은 아연 다음으로 많은 양을 차지하고 있는 철로써, 분진 내 약 24%정도를 포함하고 있다. 철을 제거하는 공정없이 실험을 진행하였을 경우, 약 3,000 ppm까지 용출되었으며(Fig. 5(a)) 이는 아연의 순도에 많은 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 철의 제거는 Na₂CO₃ 1 M로 pH를 6~7 정도로 조절시켜준 뒤, 폭기시켜 줌으로써 비교적 간단히 제거할 수 있으며, 이를 Eq (3)에 나타내었다.

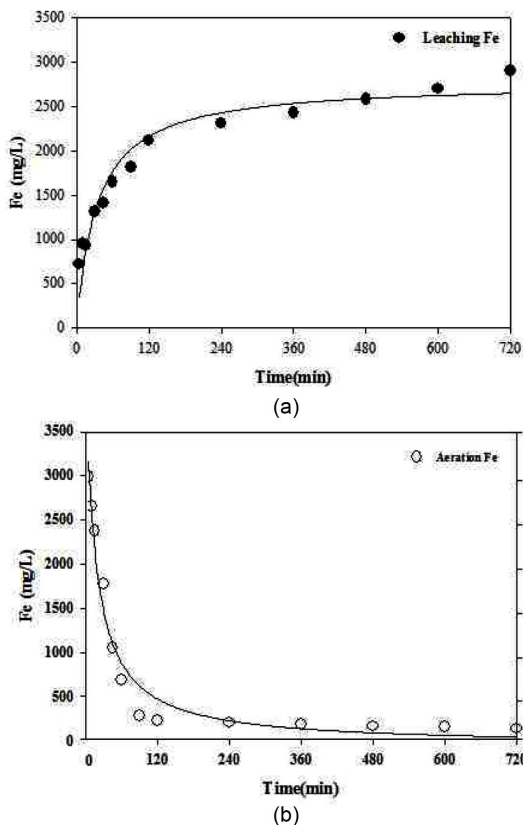
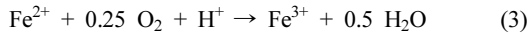


Fig. 5. Effect of (a) leaching Fe (b) Aeration on extent of Fe removal.

식 (3)에서 알 수 있듯이 분자계산식으로 1 mg/L의 O₂로는 약 6.98mg/L의 Fe²⁺를 산화시킬 수 있다. 실험 결과 60분에 250 ppm이하로 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 720분까지 진행하였을 때, 약 100 ppm으로 나타나 약 99% 제거되는 경향을 보였다. 하지만 Fig. 5에서 나타났듯이, 적절한 폭기시간은 90분 내지는 120분으로 판단된다.

3.6. 산화망간 투입량에 따른 효율 평가

낮은 pH로 침출을 진행하여 실제 공정에 적용했을 때, 관 및 공정설비의 부식으로 인한 문제점이 발생하므로, 공정의 현장적용을 위해 pH를 낮추고 MnO₂를 추가로 투입하여 분진 내 아연의 회수율을 측정하였다. 일반적으로 망간은 반응성이 크고 25개의 전자를 가지고 있어, 산성용액에 용해되어 강력한 산화력으로 분진 내 금속의 침출을 수월하게 한다고 알려져 있다¹⁹⁾. 실험조건은 기존의 0.5~3 M조건이었던 황산의 세기를 pH 기준 1~3으로 조절하였고, 고액비 1:2, 침출시간 120분, 온도는 25°C로 고정시켜 진행하였다. pH 조건별로 0.5~3.5 g까지 투입하여 회수율을 측정하였다(Fig. 6). 실험 결과, 60~95%에 이르던 회수율이 25~60%로 급격히 감소하였으며, 이는 황산의 양의 감소에 따른 전해질 내 H⁺이온의 감소로 나타난 결과로 판단되어진다. 또한, MnO₂를 투입함에 따라 40~80%까지 회수율이 증가하는 결과로 나타났다. pH는 낮을수록, MnO₂ 투입량은 증가할수록 회수율이 증가하는 것으로 나타났으며, pH 1, MnO₂ 3.5 g의 조건에서 가장 높은 회수율을 보였다. 이는 충분한 산성조건과 MnO₂의 강력한 산화력으로 나타난 결과로 판단되며, pH와 MnO₂ 투입량의 증가에 따라 분진 내 아연의 회수율이 일정하게 증가함을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 제강분진 내 아연회수를 위한 최적조건을 도출하고자 침출시간, 고액비, 산의 세기, 폭기시간, 산화망간 투입량 등 조건별 회수율을 비교 측정하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 침출시간의 경우 300분까지 연속침출을 진행하였으나, 대부분의 아연이 약 120분에 침출되었고, 이후에는 재용출되는 현상이 나타났다. 이는, 분진 내 아연과 황산의 H⁺이온의 평형상태를 이루어 나타난 결과로 판단된다.

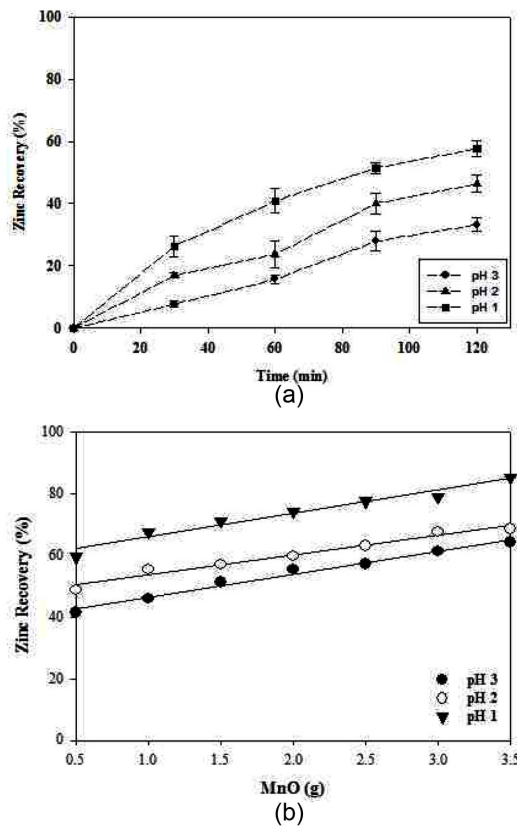


Fig. 6. Effect of adding MnO₂ on the Zinc.

(2) 고액비의 경우 1:1 조건부터 1:5 조건까지 실험을 진행한 결과, 1:2 조건의 회수율이 가장 높게 나타났다. 또한 철의 제거를 위한 폭기조건에서는 1.8 L/min의 유량으로 약 90~120분에 약 250 mg/L으로 약 90%의 철 제거가 관찰되었다.

(3) 황산의 농도가 진할수록 회수율이 높아지는 추세를 보였으나, 실제 공정 적용을 위해 0.5~3 M로 진행하였던 황산의 농도를 pH 기준 1~3까지 조절하여 실험을 수행하였다. 실험결과, pH 3, 산화망간 3.5 g 투입 기준 약 80%의 회수율을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임 (과제번호::GT-14-B-01-004-0).

References

1. Ailiang Chen, Zhong wei Zhao, Xijun Jia, Shuang Long, Guangsheng Huo, Xingyu Chen, 2009 : *Alkaline leaching Zn and its concomitant metals from refractory hemimorphite zinc oxide ore*, Hydrometallurgy, **97**, pp. 228-232.
2. A. J. B. Dutra, P. R. P. Paiva, L.M. Tavares, 2006 : *Alkaline leaching of from electric arc furnace steel dust*, Minerals Engineering, **19**, pp. 478-485.
3. Yue Hou, Ahalapitiya H. Jayatissa, 2014 : *Enhancement of gas sensor response of nanocrystalline zinc oxide for ammonia by plasma treatment*, Applied Surface Science, **309**, pp. 46-53.
4. M. K. Jha, V. Kumar, R. J. Singh, 2001 : *Review of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes*, Resources Conservation & Recycling, **33**, pp. 1-22.
5. Fenglian Fu, Qi Wang, 2001 : *Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review*, Journal of Environmental Management, **92**, pp. 407-418.
6. Tomas Havlik, Bruna Vidor e Souza, Andrea Moura Bernardes, Ivo Andre Homorich Schneider, Anrea Miskufova, 2006 : *Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust*, Journal of Hazardous Materials, **135**, pp. 311-318.
7. J. H. Hwang, C. H. Oh, C. T. Lee, 2000 : *Selective extraction of Zn component from leachate of waste EAF dust using liquid membrane process*, Journal of Korea Solid wastes Engineering society, **17**(5), pp. 619-627.
8. Yan Jie Liang, Li Yuan Chai, Hui Liu, Xiao Bo Min, Qaisar Mahmood, Hai Jing Zhang, Yong Ke, 2012 : *Hydrothermal sulfidation of zinc-containing neutralization sludge for zinc recovery and stabilization*, Minerals Engineering, **25**, pp. 14-19.
9. Tahir Sofilic, Alenka Rastovcan Mioc, Stefica Cerjan Stefanovic, Vjera Novosel Radovic, Monika Jenko, 2004 : *Characterization of steel mill electric-arc furnace dust*, Journal of Hazardous Materials, **109**, pp. 59-70.
10. J. M. An et al, 2010 : *A study of Fe removal efficiency of acid mine drainage by physico-chemical treatment*, Journal of Korean Society Mineral and Energy Resource Engineers, **47**(4), pp.530-538.
11. J. K. Yoo et al, 1995 : *Chlorination of Zinc sulfide with Ammonium Chloride*, J. Ind. Eng. Chem, **6**(2), pp.250-259.
12. C. S. Ju et al, 1998 : *Selective Leaching of Zinc from zinc oxide waste and preparation of zinc oxide*, Journal of Environmental Science International, **7**(3), pp.401-407.
13. C. H. Yoon, 2013 : *Reduction process technology research for the recovery crude ZnO from the EAF-dust*, Changwon

National University.

14. R. Y. Jeong, Jin Hui Lee, 2011 : *A study on the manufacture of the ZnO by the wet method from the EAF dust*, Journal of the Korean Oil Chemists, **28**(2), pp251-257.
15. R. Y. Jeong, 2010 : *The study on the recovery process of zinc metal from EAF Dust by chemical treatment*, Seoul national university of science and technology.
16. M. S. Lee, Eung Cho Lee, 2000 : *A Thermodynamic Model on the solvent extraction of Zinc with D2EHPA from sulfuric Acid solutions*, Korean Journal of Metals and Materials, **38**(7), pp. 946-950.
17. P. Dvorak, J. Jandova, 2005 : *Hydrometallurgical recovery of zinc from hot dip galvanizing ash*, Hydrometallurgy, **77**, pp. 29-33.
18. I. M. Ahmed, A. A. Nayl, J. A. Daoud, 2012 : *Leaching and recovery of zinc and copper from brass slag by sulfuric acid*, Journal of Saudi Chemical Society.
19. A. Hernandez et al., 2003 : *Study of the presence of flourine in the recycled fractions during carbothermal treatment of EAF dust*, Waste Management, **23**, 483-491



문 대 현

- 경기대학교 토목환경공학 학사
- 경기대학교 환경에너지공학 석사



안 상 우

- 경기대학교 환경공학과 학사
- 경기대학교 토목공학과 석사
- 한양대학교 건설환경공학과 박사수료



김 한 래

- 경희대학교 환경공학 학사
- 아주대학교 환경공학 석사
- 경기대학교 환경공학 박사
- 아쿠아테크 이사



김 지 태

- 한양대학교 기계공학과 학사
- 한양대학교 환경공학과 석사
- 한양대학교 화학공학과 박사
- 경기대학교 환경에너지공학과 교수



장 순 응

- 경기대학교 환경공학과 학사
- 오리곤 주립대학교 환경공학과 석사
- 오리곤 주립대학교 환경공학과 박사
- 경기대학교 환경에너지공학과 교수