

廢電子스크랩에서 *Thiobacillus ferrooxidans*를 이용한 Cu, Al, Zn, Ni, Co, Sn 및 Pb의 浸出

安在禹·金明云 · 鄭鎮己** · 李在天** · 金東鎮** · 安種寬**

大眞大學校 新素材工學科, *大眞大學校 環境工學科, ** 韓國地質資源研究院 資源活用素材硏究部

Biological Leaching of Cu, Al, Zn, Ni, Co, Sn and Pb from Waste Electronic Scrap using *Thiobacillus Ferrooxidans*.

Jae-Woo Ahn, Myeong-Woon Kim, Jin-Ki Jeong**,
Jae-Chun Lee**, Dong-Gin Kim** and Jong-Gwan Ahn**

Dept. of Advanced Materials Sci. & Eng., Daejin University

*Dept. of Environmental Eng., Daejin University

**Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약

폐전자스크랩으로부터 미생물 침출법에 의해 유기금속을 회수하기 위한 기초 연구로 *Thiobacillus ferrooxidans*를 이용하여 Cu, Zn, Al, Co, Ni, Sn 및 Pb의 침출 거동을 조사하였다. 예비실험으로 각 금속의 침출 거동을 조사하기 위해 먼저 폐전자스크랩 대신 각 금속분말을 이용하여 침출 실험을 실시하였는데, 금속분말의 양이 증가함에 따라 침출율을 감소하는 경향을 보였으며 각각의 금속분말의 농도가 5 g/L이하에서 Cu, Co 및 Zn의 경우 85%이상의 침출율을 나타내었다. 한편 폐전자스크랩을 이용한 침출실험 결과 고액농도가 100 g/L에서 Cu, Co의 경우는 90%이상의 침출율을 보이고 있으나 Al, Zn 및 Ni의 경우는 40%이하의 침출율을 나타내었다. Pb의 경우는 $PbSO_4$ 형태로 Sn의 경우는 SnO 형태로 침전되어 침출액중으로는 거의 용출되지 않았다.

주제어 : 미생물침출, 폐전자스크랩, *Thiobacillus ferrooxidans*, 박테리아 침출

Abstract

In order to recover valuable metals from the waste electronic scrap, bioleaching of Cu, Zn, Al, Co, Ni, Sn and Pb was carried out using *Thiobacillus ferrooxidans* as a leaching microorganism in a shaking flask. In a preliminary study, to obtain the data on the leaching of Cu, Zn, Al, Co and Ni, the metal leaching was accomplished using metal powders instead of electronic scrap. The leaching percentage of Cu, Zn, Co, Al and Ni powders was reduced with the increase of metal powder concentration in solution. Below the metal concentration of 5.0 g/L, more than 85% of Cu, Co and Zn powders was leached out. At the electronic scrap concentration of 100 g/L, *Thiobacillus ferrooxidans* were able to leach more than 90% of the available Cu and Co while Al, Zn and Ni were able to leach less than 40%. Pb and Sn were not detected in the leachate. Pb was precipitated as $PbSO_4$, whereas Sn precipitated probably as SnO.

Key words : Bioleaching, Electronic scrap, *Thiobacillus ferrooxidans*, Biohydrometallurgy

1. 서 론

최근 전자산업의 발달과 함께 폐전자스크랩(electronic

scrap)의 발생량이 급격히 증가하고 있어 이에 대한 처리방안을 해결되지 않을 경우, 향후 심각한 환경오염을 유발할 가능성이 있어 적절한 처리방안이 절실히 요구되고 있다. 또한 폐전자스크랩은 도시광석(urban ore)이라 불릴 정도로 Au, Ag 등의 귀금속 외에 Cu, Fe,

* 2004년 8월 9일 접수, 2004년 11월 15일 수리

*E-mail: jwahn@daejin.ac.kr

Ni, Al, Sn 등도 다량 함유하고 있어 이들 금속이 중요한 리사이클링 대상이 되고 있다. 전자산업이 일찍부터 발달한 외국에서는 폐전자스크랩의 리사이클링에 대한 연구를 오래 전부터 행하여 왔다. 그동안은 주로 금, 은 등의 귀금속을 회수대상으로 주목하였는데 최근에는 Cu, Zn, Sn, Ni 등의 일반 비철금속까지 리사이클링의 범위를 확대하고 있다. 이러한 폐전자스크랩의 처리법으로는 건식 및 습식법 그리고 전기화학법 등이 있는데 이들 각 공정마다 장단점^{1,2)}이 있고 또한 기존의 제련기술과 같이 또다른 환경문제를 유발할 가능성이 크고 경제성면에서도 고려를 해야하기 때문에 보다 경제적이며 환경친화적인 회수공정 개발이 요구되고 있다.

1674년 레벤 혹에 의하여 번식력과 생존력이 우수한 미생물의 존재가 확인된 이래 온도, 습도 등 번식 환경만 맞으면 순식간에 수십 배로 늘어나는 미생물의 생물학적 대사작용을 이용하여 1950년대부터 황화물 광석, 광미 또는 폐기물로부터 유가금속을 회수하는 미생물 침출기술이 개발되어 상용화되기 시작하였다. 미생물 침출법은 미생물의 직·간접 반응기구에 의해 금속광석의 물리·화학적 성질을 변화시켜 금속을 이온상태로 침출시키는 공정으로 금속함량이 낮아 기존의 건식 및 습식공정으로 처리하기에 부적합한 저품위 광석이나 소량의 금속이 분산되어 있는 폐기물로부터 유가금속을 회수할 수 있는 경제적인 처리법으로 평가되고 있다. 또한 에너지 사용량이 낮고 SO₂ 가스 등이 방출되지 않기 때문에 환경오염을 방지할 수 있고, 초기 투자비가 적게 들고 공정이 간단하며 고도의 기술적 지식을 필요로 하지 않는 특징을 갖고 있다. 따라서 현재 저품위 황화광을 침출처리하거나 황철광계 금광석 또는 정광의 전처리에 박테리아를 이용하여 구리, 금, 우라늄 등의 회수를 위한 상업플랜트가 가동 중에 있다. 구리의 경우는 전체 생산량의 25% 이상이 미생물 침출법으로 회수되고 있고 이외에 아연, 니켈, 코발트, 그리고 몰리브덴 등을 황화물 또는 산화물로부터 일부 회수되고 있다.^{3,5)} 또한 미생물 침출법을 이용해 저품위 광물자원의 품위향상 및 철 등의 불순물 제거를 위한 기술이 개발중에 있으며, 최근에는 전자스크랩이나 소각재 등의 폐기물에서 유가금속을 회수하기 위한 연구가 시작되고 있다.⁶⁻⁸⁾

본 연구에서는 최근 다량 발생되고 있는 폐전자스크

랩으로 부터 미생물 침출법을 이용해 구리 등의 유가금속을 회수하기 위하여 그 기초연구 단계로 현재 미생물 침출에 많이 이용되고 있는 *Thiobacillus ferrooxidans*를 이용하여, 폐전자스크랩중에 함유되어 있는 Cu, Al, Zn, Ni, Co, Sn, Pb 등 금속의 생물학적 침출거동을 고찰하고자 하였다. 기초 연구단계로 먼저 금속 분말을 이용하여 각 금속의 침출거동을 고찰하였고 이어서 폐전자스크랩을 대상으로 각 금속의 침출율을 조사하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 균주 배양 및 배지

본 연구에서 사용한 균주는 *T. ferrooxidans*(KCTC 2677)로, 성장 배지로는 Silverman의 9K배지를 사용하였다. 9K 배지는 mineral salts[(NH₄)₂SO₄ 3.0 g/L, K₂HPO₄ 0.5 g/L, MgSO₄ · 7H₂O 0.5 g/L, KCl 0.1 g/L, Ca(NO₃)₂ 0.01 g/L]와 에너지원으로 45 g/L FeSO₄ · 7H₂O를 사용하였다. 배지의 pH는 1N H₂SO₄로 약 2.0으로 조절하였고 균주 배양은 28°C에서 Incubator에서 3~4일간 배양하여 얻은 배양액을 여과하여 침전물을 제거한 후, 8,000 rpm에서 20분간 원심분리기에서 고액분리하여 균체를 회수하였고, 회수한 균체는 MS배지에 현탁하여 균체 농축액을 준비하였다.

2.2 실험 방법

*T. ferrooxidans*에 의한 Cu, Ni, Zn, Al, Sn, Pb 그리고 Co 금속의 침출거동을 고찰하기 위해 먼저 각 금속분말(순도 : 99% 이상, -100 mesh)을 이용하여 침출실험을 실시하였다. 실험방법으로는 250 ml 삼각플라스크에 9K배지를 100 ml 첨가하고 배양시킨 균체농축액을 600 nm 흡광도에서 0.1값이 되도록 집중한 후 초기 pH를 2.0부근으로 조절한 후에 일정량의 금속분말을 각각 첨가하여 침출실험을 실시하였다. 침출은 shaking incubator에서 반응온도 30°C에서 180 rpm으로 반응시켰으며 일정시간 반응 후 침출액의 pH 및 ORP(mV)를 측정하고 시료를 채취하여 Fe²⁺ 및 Fe³⁺ 농도는 흡광도 510 nm에서 o-phenoltholine method⁹⁾를 이용하여 분석하였고, 기타 금속이온의 농도는 ICP-AES를 이용하여 측정하였다. 한편, 폐전자스크랩중의 각 금속의

Table 1. Concentration of elements in samples

(Unit : mg/kg)

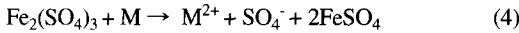
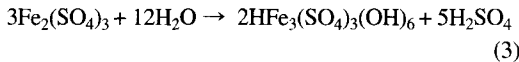
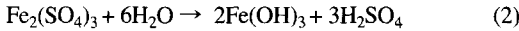
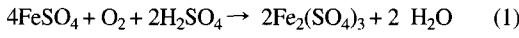
Element	Al	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
Conc.	41,143.8	72,177.4	2,151.5	2,230.5	68,280.3	16,240.7	21,908.5	734.4

침출거동을 고찰하기 위해사용된 시료로는 국내의 리튬(주)에서 전처리한 페프린터를 -35 mesh로 체질하여 사용하였고 시료의 분석은 ICP-AES를 이용하였는데 분석치는 Table 1과 같다. 침출방법은 단독 금속원소의 침출방법과 같은 방법으로 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. *T. ferrooxidans*에 의한 철(Fe^{2+})산화율의 영향

*T. ferrooxidans*를 이용한 금속 침출 반응은 배지에 첨가된 Fe^{2+} 가 균주에 의하여 Fe^{3+} 로 산화되고, Fe^{3+} 가 산화제로 작용하여 불용성의 금속을 가용성의 형태로 변환시키는 것이다. Wong 및 Henry¹⁰⁾에 의하면 $FeSO_4$ 가 첨가될 경우 다음과 같은 반응이 일어나는데 (1)반응에서 *T. ferrooxidans*가 존재할 경우 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로의 산화가 화학적인 산화보다 10^5 - 10^6 배 정도 빠르게 일어나며 또한 *T. ferrooxidans*에 의한 Fe^{2+} 의 산화반응으로 인하여 슬러지의 redox potential을 증가시킨다고 보고되고 있다.



또한 상기 반응에 의해 Fe^{3+} 의 경우 황산염이나 철산화물 또는 자로사이트 등으로 침전되기 때문에 슬러지가 산성화 될 수 있다. 한편 (2)식과 (3)식에 의해 철화합물이 침전되면서 황산이 생성되며 이러한 황산이 침출제 역할을 하여 금속의 침출반응이 일어나게 되며 또한 일부 금속의 경우는 (4)식과 같이 Fe^{3+} 에 의해 직접 침출되기도 한다.

Fig. 1은 *T. ferrooxidans*를 접종한 후 배양온도 변화에 따른 Fe^{2+} 의 산화율을 조사하고자 9K 배지에서 40시간 배양하여 철산화율을 측정된 결과를 나타낸 것으로 20°C, 30°C, 40°C, 50°C에서 각각 85%, 99%, 58%, 23%가 산화되었다. 따라서 *T. ferrooxidans*는 적정 성장온도가 30~35°C임을 알 수 있었다. Fig. 2는 배양액의 초기 pH에 따라 균체의 성장 및 철산화율을 조사하기 위해 배양액의 pH를 조절한 다음 30°C, 180 rpm에서 30시간 배양한 결과를 나타낸것인데 그림으로부터 pH의 증가에 따라 산화율이 증가하고 pH 2.0부근에서 철산화율이 급격히 증가하였다. 따라서 초

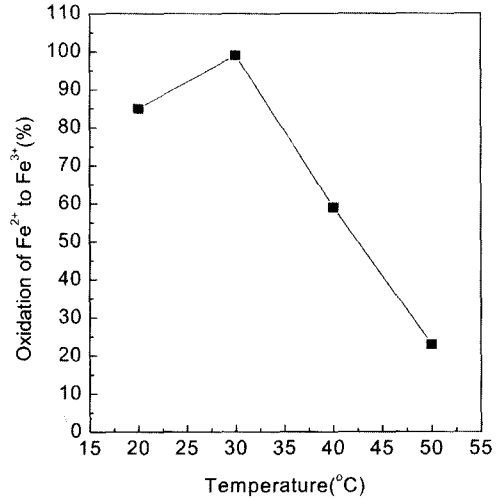


Fig. 1. Oxidation percentage of Fe^{2+} to Fe^{3+} with different temperature.

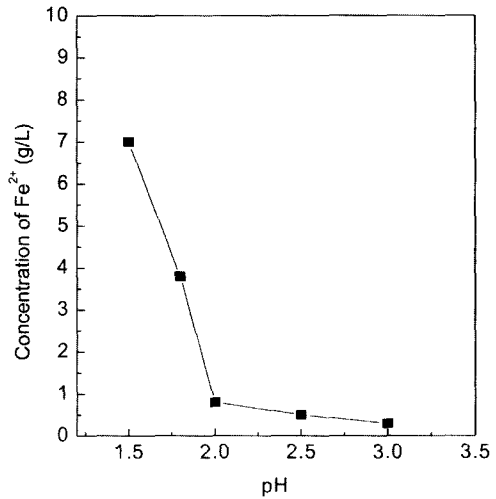
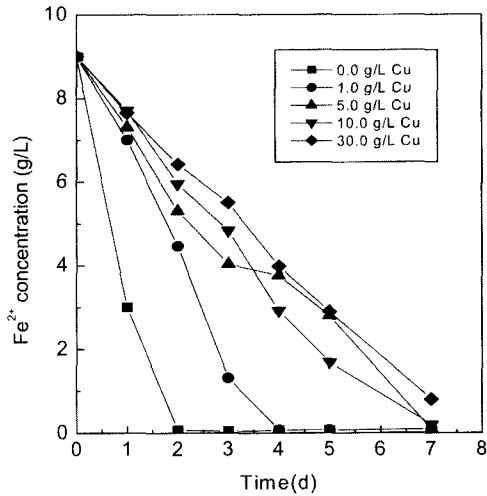


Fig. 2. Changes of Fe^{2+} to Fe^{3+} with initial pH of solution. a) Fe^{2+} concentration b) Extraction % of Cu

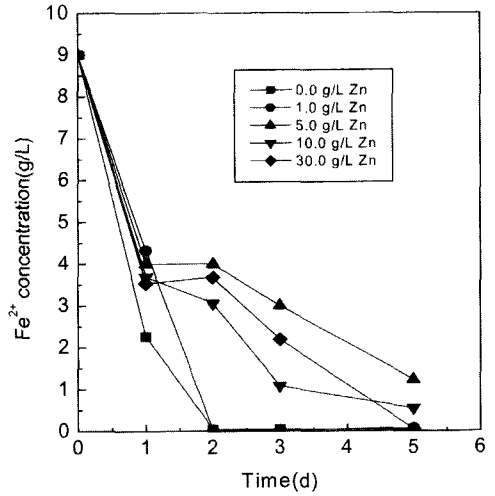
기 산도는 pH 2.0으로 유지하는 것이 바람직하다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 단독 금속분말을 이용한 미생물 침출 실험

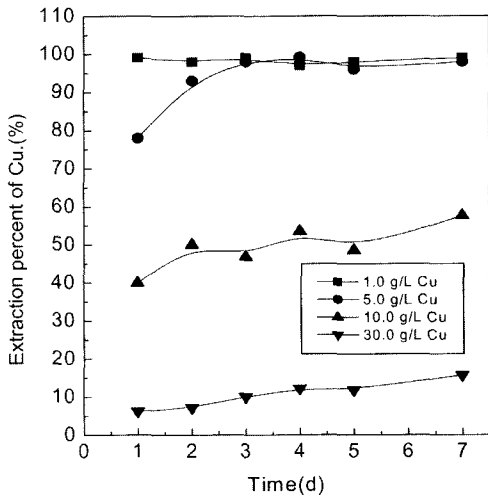
Cu, Al, Zn, Ni, Co, Sn-Pb alloy등의 금속분말을 단독으로 사용하여 *T. ferrooxidans*를 이용한 미생물 침출 실험을 실시하였다. Fig. 3은 구리분말의 농도를 30 g/L까지 변화시키면서 침출한 실험 결과로 Fe^{2+} 의 산화율과 구리의 침출율을 나타낸 그림이다. 구리농도가



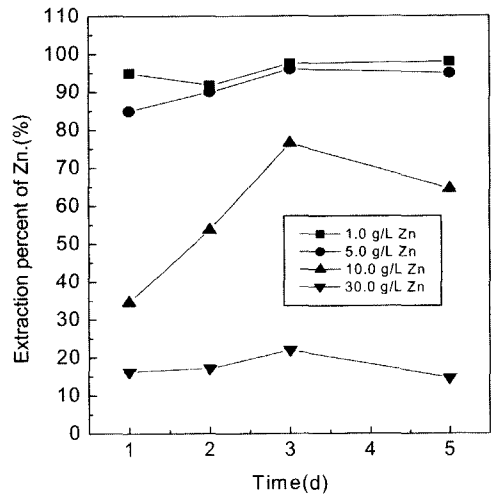
a) Fe²⁺ concentration



a) Fe²⁺ concentration



b) Extraction % of Cu



b) Extraction % of Zn

Fig. 3. Changes of Fe²⁺ concentration and extraction % of Cu with time at various initial copper concentrations.

a) Fe²⁺ concentration b) Extraction % of Zn

Fig. 4. Changes of Fe²⁺ concentration and extraction % Zn with time at various initial zinc concentrations.

a) Fe²⁺ concentration b) Extraction % of Al

1.0 g/L이하인 경우 Fe²⁺의 산화가 비교적 빠르게 일어나나 5.0 g/L이상인 경우에는 거의 비슷한 산화율을 보이고 있다. 한편, 구리의 침출율의 경우 5 g/L이하에서는 95%이상의 침출율을 보이고 있으나 10 g/L인 경우에는 50-55%, 30 g/L인 경우에는 침출율이 10%내외로 비교적 낮은값을 보이고 있어 구리분말의 농도에 큰 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 Zn 분말을 침출거동을 나타낸 그림이다. Zn분말의 농도가 1 g/L이하인 경우 Fe²⁺의 산화율이 비

교적 빠르나 10 g/L에서는 오히려 산화율이 낮게 나타났다. 이것은 초기 균주와 아연분말을 첨가한 용액의 pH가 2.3을 나타내었으나 아연분말의 양을 증가시키에 따라 pH는 증가하여 5.0 g/L 경우 2.37, 10 g/L인 경우 2.51, 30 g/L인 경우에는 4.51까지 증가하여 10 g/L와 30 g/L인 경우에 pH 값을 2.0으로 보정 후 실험을 실시하여 오히려 철산화율이 5.0 g/L에서 낮게 나타난 것으로 생각된다. 한편, Zn의 침출율의 경우 5 g/L이하일 경우에는 거의 90%이상의 침출율을 보이고 있고,

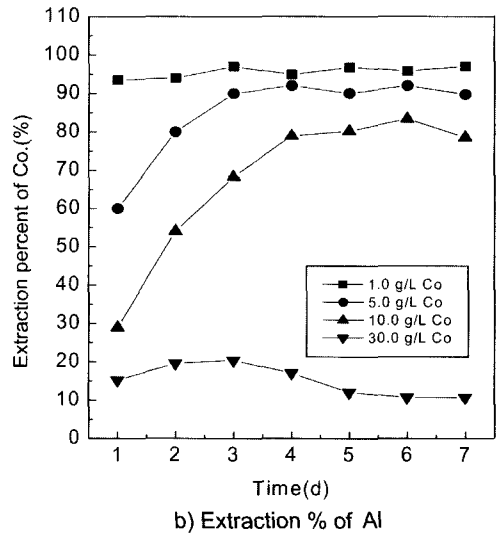
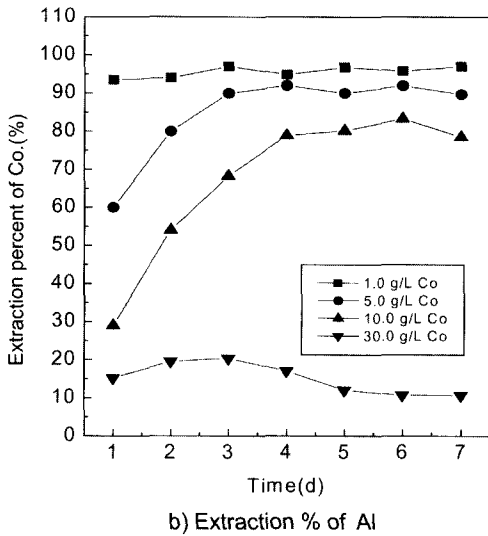
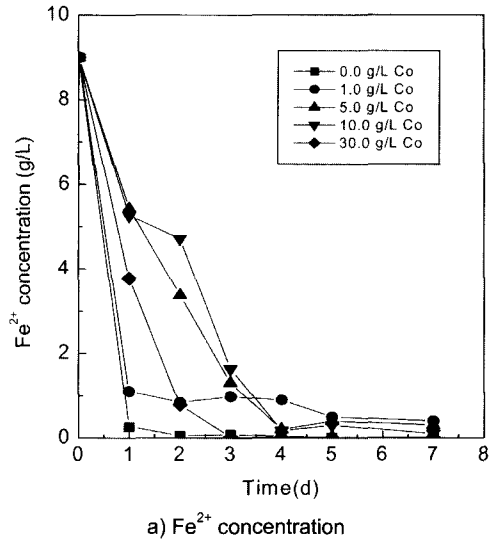
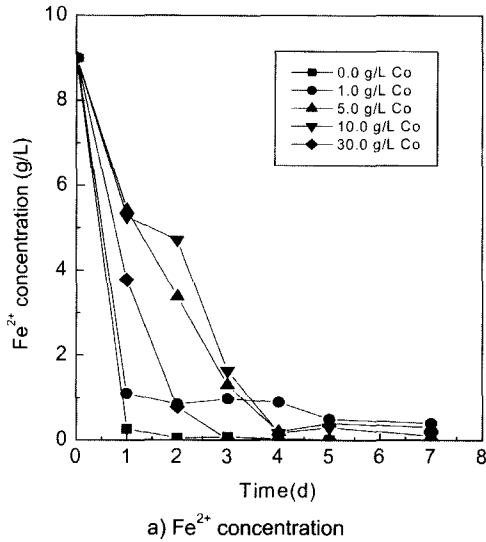
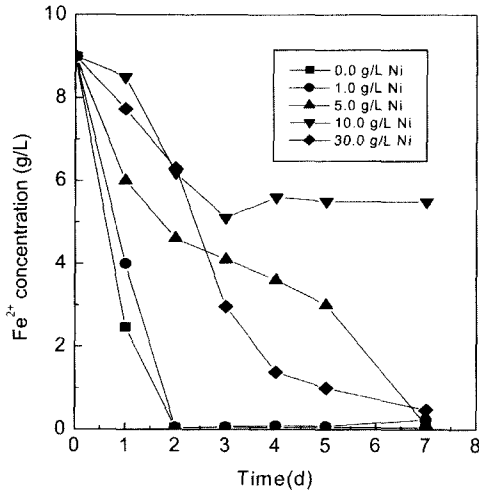


Fig. 5. Changes of Fe²⁺ concentration and extraction % of Al with time at various initial Al concentrations. a) Fe²⁺ concentration b) Extraction % of Al

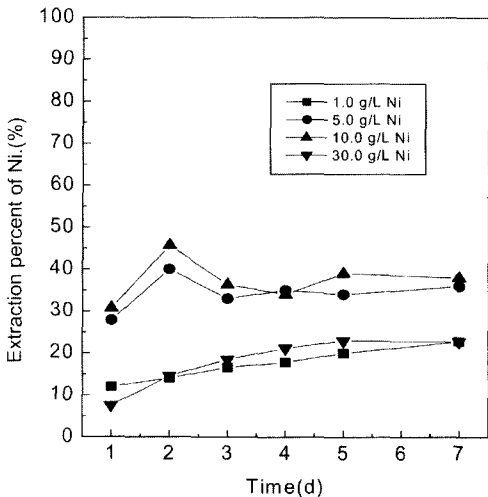
Fig. 6. Changes of Fe²⁺ concentration and extraction % of Co with time at various initial Co concentrations. a) Fe²⁺ concentration b) Extraction % of Ni

30 g/L인 경우에는 침출율이 20% 이내로 비교적 낮은 값을 보이고 있다. Fig. 5는 Al 분말을 침출거동을 나타낸 그림이다. Al 분말의 농도가 증가하여도 Fe²⁺의 산화율은 비교적 높아 3일 후에는 거의 99%이상 산화가 진행되는 것을 알 수 있다. Al의 침출율의 경우 5 g/L 이하일 경우에는 5일 후 거의 95% 이상의 침출율을 보이고 있다. 그러나 10 g/L인 경우에는 침출율이 50% 이고, 30 g/L인 경우에는 10%이하의 비교적 낮은 값을 보이고 있다.

Fig. 6은 Co 분말의 침출거동을 나타낸 그림이다. Co분말의 농도가 증가함에 따라 Fe²⁺의 산화율은 감소하는 경향을 보이고 있고 5일 후에는 95%이상 산화가 진행되는 것을 알 수 있다. Co의 침출율의 경우도 5 g/L이하일 경우에는 5일 후 90% 이상의 침출율을 보이고 있다. 그러나 10 g/L인 경우에는 침출율이 80% 이고, 30 g/L인 경우에는 10%이하의 비교적 낮은 값을 나타내었다. Fig. 7은 Ni분말의 침출거동을 나타낸 그림이다. Ni분말의 농도가 1.0 g/L인 경우에는 Fe²⁺의 산화



a) Fe²⁺ concentration



b) Extraction % of Ni

Fig. 7. Changes of Fe²⁺ concentration and extraction % of Ni with time at various initial Ni concentrations.

율은 급격히 증가하나 5.0 g/L 이후에는 산화율이 비교적 타 금속에 비해 느리게 진행되는 것으로 나타났다. 따라서 Ni의 침출율은 5 g/L 이하일 경우에도 5일 후 35-40%의 낮은 침출율을 보이고 있고, 10 g/L 이상에서는 20% 이내의 비교적 낮은 침출율을 보이고 있다.

Fig. 8은 Pb 및 Sn의 침출거동을 조사하기 위해 실험한 결과로 Pb-Sn solder 분말의 양이 5 g/L인 경우 철산화물이 급격히 증가하나 10 g/L 이상에서는 비교적 느리게 나타나고 있다. 한편, Sn 및 Pb의 경우는 침출

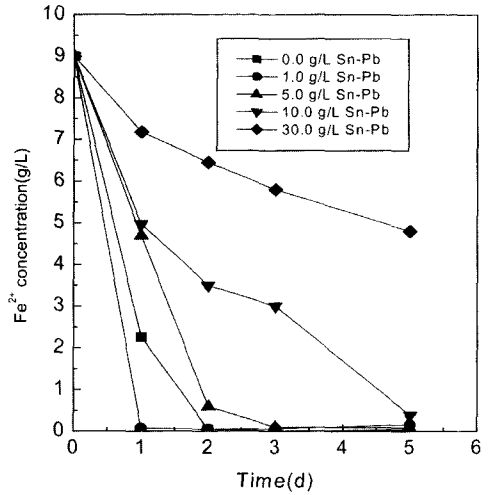


Fig. 8. Changes of Fe²⁺ concentration at various initial Pb-Sn concentrations.

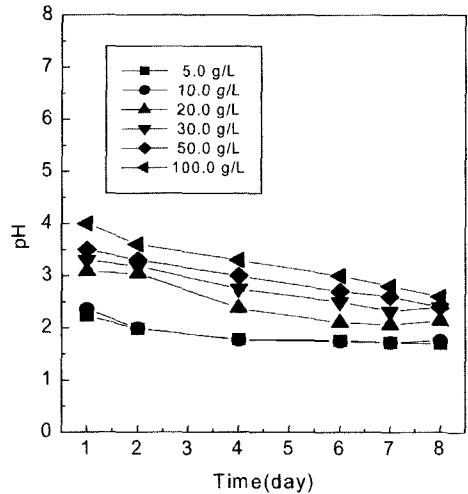


Fig. 9. Variation of pH with time at different pulp density.

액중에 1%이하의 적은 양이 검출 되었는데 Pb의 경우는 PbSO₄ 형태로 Sn의 경우는 SnO의 형태로 침전물 중에 존재하기 때문인 것으로 생각되는데 이러한 결과는 H.Branl의 연구에서도 보고되어 있다.¹¹⁾

3.3. 폐전자스크랩을 이용한 미생물 침출 실험

*T. ferrooxidans*에 의한 폐전자스크랩중의 각 금속의 침출 거동을 관찰하고자 폐기물농도(고액농도: pulp density)의 변화에 따라 pH 및 ORP 그리고 철산화물과 각 금속의 침출율을 조사하였다.

Fig. 9는 침출액중의 고액농도(Pulp density)의 변화에 따른 침출액의 산도(pH) 및 산화환원전위(ORP) 값을 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 고액농도가 증가할 수록 pH값은 증가하는 경향을 보이고 있고 10 g/L이하에서는 비슷한 값을 나타내고 있다. 또한 침출반응이 진행됨에 따라 pH값이 감소하며 고액 농도가 10 g/L이하인 경우는 4일 이후, 고액농도가 20 g/L 이상에서는 7일 이후에 pH 값이 거의 일정한 값을 보이고 있어 침출시간은 10 g/L이하의 경우 4일, 20 g/L이상인 경우는 7일 정도가 적당하다고 생각된다. Fig. 10은 고액농도 변화에 따른 ORP값의 변화 추이를 관찰한 내용이다. 그림에서 알 수 있듯이 고액농도가 증가할 수록 ORP값은 감소하고 10 g/L 이하의 경우는 비슷한 값을 나타내며 4일 이후에는 일정한 값을 보이고 있다. 그러나 고액농도가 20 g/L 이상으로 증가할 경우 ORP값은 크게 낮아지고 시간이 경과함에 따라 ORP값은 꾸준히 증가 현상을 보이고 있다. 따라서 Fig. 9 및 Fig. 10으로부터 침출액의 pH값의 감소 와 ORP 값의 증가 현상으로 금속의 침출반응이 효과적으로 진행되고 있다는 표시가 될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Du⁽¹²⁾ 등의 연구결과에서도 보고되고 있다.

Fig. 11은 폐기물의 양에 따라 철산화율의 변화를 나타낸 것으로, 폐기물을 10.0 g/L을 첨가할 경우에는 철산화율이 급격히 증가하는 현상을 볼 수 있다. 그러나 30.0 g/L 이상 첨가할 경우에는 철산화율이 감소하는 현상을 보이고 있다. 이에 대한 원인으로서는 pH값이 3.0이상으로 증가하여 균주의 활성이 떨어지고, 또한 폐

기물양이 증가할 경우 용액중에서 폐기물에 의한 산소 등의 물질전달을 방해하기 때문인 것으로 생각된다. 이와 유사한 결과로 *T. ferrooxidans*를 이용하여 광석에서 금속을 침출할 경우와 점토광물에서 철성분의 제거 그리고 석탄 탈황시에도 보고되고 있다.⁽¹³⁾

Fig. 12는 고액농도 변화에 따른 구리성분의 침출 거동을 도시하여 나타낸 그림이다. 그림으로부터 고액농도가 증가함에 따라 구리의 침출량은 증가하고 있으며 고액농도가 100 g/L인 경우 침출액중의 구리 농도는 약 6.0 g/L정도로 나타났다. 한편, Fig. 13은 폐기물의 고액

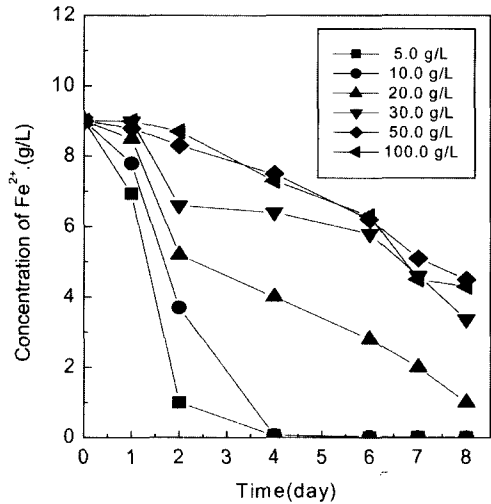


Fig. 11. Variation of Fe²⁺ to Fe³⁺ with time at different pulp density.

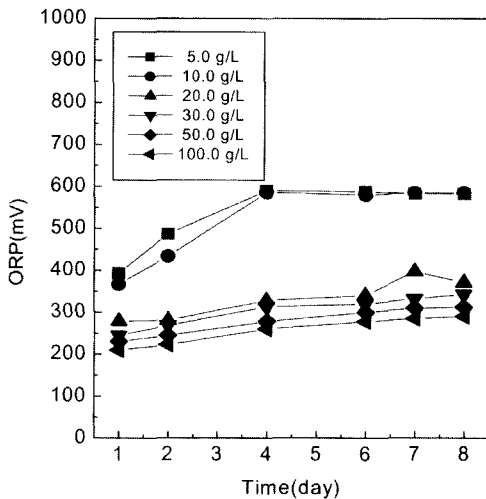


Fig. 10. Variation of ORP with time at different pulp density.

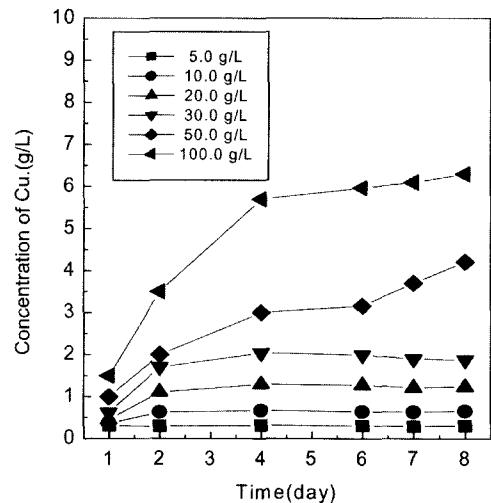


Fig. 12. Variation of Cu²⁺ with time at different pulp density.

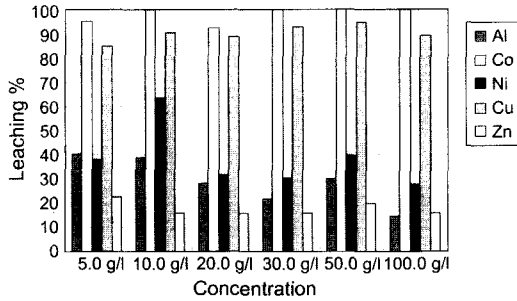


Fig. 13. Leaching of Al, Cu, Zn, Co, Ni from different concentrations of waste electronic scrap at 30°C for 7 days.

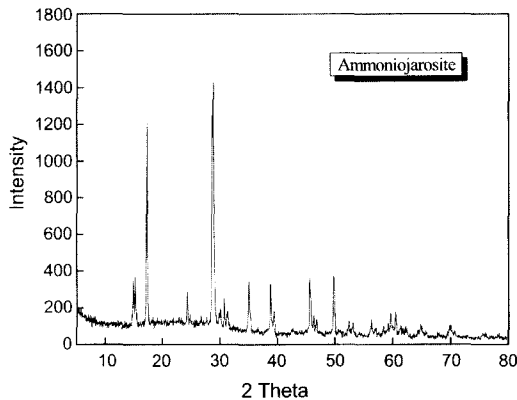


Fig. 14. X-ray diffraction pattern of leaching residues of electronic scrap.

농도변화에 따라 7일간 침출반응후의 각 금속성분들의 침출율을 나타낸 것이다. 그림으로부터 코발트의 추출율이 가장 높아 95% 이상을 보이고 있고 다음으로는 구리가 90% 내외의 높은 침출율을 보이고 있으며 Al, Ni, Zn의 경우는 40% 이하의 비교적 낮은 침출율을 보이고 있다. 주석 및 납의 경우는 거의 침출액에 존재하지 않아 나타내지 않았다. 한편 고액농도의 증가에 따라 코발트, 구리, 아연, 니켈의 경우는 침출율은 비슷한 값을 나타내는 경향을 보이고 있으나 알루미늄의 경우는 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.4. 침출잔사 분석

*T. ferrooxidans*에 의해 배지에 첨가된 Fe^{2+} 가 Fe^{3+} 로 산화됨에 따라 Fe^{3+} 가 침출액에 존재하는 다른 성분들과 같이 반응하여 자로사이트(jarosite)형태의 침전물을 형성하는 것으로 알려져 있으며 이에 대해서는 이미 3.1절에서 언급하였다. Fig. 14는 침출반응 후 침전물의 형

태를 조사하기 위해 침출잔사를 X-ray 회절 실험을 실시한 결과를 나타낸 그림이다. 시료는 폐기물의 고액농도 100 g/L에서 30°C로 7일간 침출실험을 실시한 후, 침출잔사를 침출용액과 여과·분리하여 침전물을 60°C에서 건조시켜 얻어진 시료를 사용하였다. 그림으로부터 침전물은 대부분 Ammonium jarosite[(NH₄)Fe₃(SO₄)₂(OH)₆] 형태로 침전되어 있음을 알 수 있었다. 이것은 배지로 첨가한 mineral salts중 (NH₄)₂SO₄ 농도가 3.0 g/L로 가장 높기 때문에 Fe^{3+} 가 주로 NH₄⁺와 결합하여 자로사이트 침전물을 형성하기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

폐전자스크랩으로부터 미생물 침출법을 이용해 구리 등의 유가금속을 회수하기 위하여 *Thiobacillus ferrooxidans*를 이용하여, 폐전자스크랩중에 함유되어 있는 Cu, Al, Zn, Ni, Co, Sn, Pb 등 금속의 침출거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) *Thiobacillus ferrooxidans*의 철(Fe^{2+})산화율의 영향 조사에서 배양온도 및 pH 변화에 따른 철(Fe^{2+})산화율을 측정된 결과 30°C, pH 2.0 부근에서 철산화율이 99%정도로 가장 높았다.
- 2) 단독 금속원소별 미생물 침출 거동을 고찰한 결과 고형물질농도(pulp density)에 따라 침출율이 큰 차이를 보이고 있으며 Cu, Co, Zn의 경우 비교적 높은 침출율을 보이고 있으나 Ni 및 Al의 침출율은 다소 낮았으며 Sn 및 Pb의 경우 침출율이 1% 미만으로 나타났다.
- 3) *Thiobacillus ferrooxidans* 폐전자스크랩을 침출시 Pb 및 Sn의 경우는 침출되지 않고 침출잔사에 존재하기 때문에 Cu, Ni, Zn, Al과 분리 침출이 가능하다.
- 4) 폐전자스크랩의 미생물 침출시 Co의 추출율이 가장 높아 95% 이상 추출되고 다음으로는 Cu가 90% 내외의 높은 침출율을 보이고 있으며 Al, Ni, Zn의 경우는 40% 이하의 비교적 낮은 침출율을 보이고 있다.
- 5) 폐전자스크랩의 미생물 침출 반응후의 침출잔사는 주로 Ammonium jarosite[(NH₄)Fe₃(SO₄)₂(OH)₆] 형태로 존재함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어사업인 산업폐기물재활용 기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sum, E. Y. L., 1991: The recovery of metal from electronic scrap, JOM, **43**(4), pp.53-61.
2. Hoffman, J. E., 1992: The recovery of metal from electronic scrap, JOM, **44**(7), pp.43-48.
3. Rawlings, D.E., 1998: Industrial practice and the biology of leaching of metals from ores, J. Ind. Microbiol. Biotechnol. **20**, pp.168-274.
4. Brierley, J. A. and Brierley, C. L., 2001: Present and future commercial applications of biohydrometallurgy, Hydrometallurgy, **59**, pp.233-239.
5. Corale, L. B., 1999: Thermophilic microorganism in extraction of metals from ores, J. of Industrial microbiology & Biotechnology, **22**, pp.349-360.
6. Hiroshi Nakazawa, Wu Shouming and Yasuo Kudo, 2002: Bioleaching of waste printed board using Thiobacillus ferrooxidans, Recycling and waste treatment in mineral and metal processing: Technical and economic aspects, Lulea, Sweden pp.387-392.
7. Solisio, C., Lodi, A. and Veglio, F., 2002: Bioleaching of zinc and aluminum from industrial waste sludges by means of Thiobacillus ferrooxidans, Waste Management **22**, pp. 667-675.
8. Brombacher, C., Bachofen, R. and Brandl, H., 1998: Development of a laboratory-scale leaching plant for metal extraction from fly ash by Thiobacillus strains, Appl. Environ. Microbiol. **64**, pp.1237-1241.
9. Furman, N. H., 1975: Standard methodes of chemical analysis, R.E. Krieger Publishing Co., New York.
10. Wong, J.K. and Henry, J.G., 1988: Bacterial leaching of heavy metals from anaerobically digested sludge. CRC press, pp.125-169.
11. Brandl, H., Bosshard, R. and Wegmann, M., 2001: Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi, Hydrometallurgy **59**, pp.319-326.
12. Du, Y. G., Tyagi, R. D. and Sreekrishnam, T. R., 1995: Operational strategy for metal bioleaching based on pH measurements, J. Environ. Eng. **121**, pp.527-535.
13. Bosecker, K., 1997: Bioleaching : Metal solubilization by microorganisms, FEME Microbiol. Rew., **20**, pp.591-604.

安 在 禹

- 현재 대전대학교 신소재공학과 교수
- 본 학회지 제11권 제6호 참조

金 明 云

- 현재 대전대학교 환경공학과 부교수

鄭 鎮 己

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 금속회수연구실 실장
- 본 학회지 제 10권 제6호 참조

李 在 天

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 부장 (책임연구원)
- 본 학회지 제11권 제2호 참조

金 東 鎮

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 책임연구원

安 種 寬

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 선임연구원
- 본 학회지 제9권 제2호 참조