

廢銅슬래그를 活用한 廢電氣電子 스크랩으로부터 有價金屬 高溫鎔融抽出 工程 開發†

†金炳洙* · 李在天* · 李光鎬**

*韓國地質資源研究院 資源活用素材研究部, **LS-Nikko 동제련(주) 生産技術課

A Novel Process for Extracting Valuable Metals from Waste Electric and Electronic Scrap Using Waste Copper Slag by a High Temperature Melting Method†

†Byung-Su Kim*, Jae-chun Lee* and Kwang-Ho Lee**

*Minerals & Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea 305-350

**Production & Technology Team, LS-Nikko Copper Inc., Ulsan, Korea 689-892

요 약

구리, 주석 등의 유가금속을 다량 함유하고 있는 폐전기전자 스크랩으로부터 유가금속을 회수하는 것은 자원 재활용 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 폐동슬래그를 슬래그 형성제로 활용하여 폐전기전자 스크랩으로부터 유가금속을 추출하기 위한 새로운 공정이 제시되었다. 제안된 공정은 슬래그 형성제로 동 제련소에서 배출되는 폐동슬래그를 재활용한다는 장점이 있다. 각 실험에서는 일정한 비율로 혼합된 폐전기전자 스크랩과 폐동슬래그의 혼합시료를 보조 슬래그 형성제인 CaO와 함께 고온 용융되었다. 실험 결과 폐전기전자 스크랩에 함유된 구리와 주석이 Cu-Fe-Sn 합금상으로 각각 95% 이상, 85% 이상 추출되었다.

주제어 : 폐전기전자 스크랩, 폐동슬래그, 구리, 주석, 재활용

Abstract

It is very important in the view point of resource recycling to recover valuable metals such as copper and tin from waste electric and electronic scrap. The waste electric and electronic scrap contains significant amounts of copper, tin, and so on. In this study, a new process for extracting copper and tin contained in the waste electric and electronic scrap using waste copper slag which is generated from the melting furnace of copper smelter was presented. Advantage of the proposed process is to reuse waste copper slag instead of new fluxes as slag formatives. In each experiment, the waste electric and electronic scrap and waste copper slag were melted inputting suitable amount of CaO as an additional flux. Up to 95 % of copper and 85 % of tin in the raw material were extracted in a Cu-Fe-Sn alloy phase.

Key words : Waste electric and electronic scrap, Waste copper slag, Copper, Tin, Recycling.

1. 서 론

일반적으로 폐전기전자 스크랩이란 각종 전기전자 제품의 제조과정에서 발생하는 전기전자부품의 불량품과 일반 가정 등에서 사용 후 버려지는 컴퓨터, 텔레비전,

세탁기, 냉장고, 비디오, 오디오, 휴대폰 등 각종 폐전기 전자 제품의 해체 과정에서 발생하는 폐전기전자 기기 부품을 총칭한다. 따라서 폐전기전자 스크랩은 여러 종류의 금속과 합금뿐만 아니라 내화 산화물과 플라스틱 성분 등으로 구성된 복합물질로 잘 알려져 있다. 현재 폐전기전자 스크랩은 납, 카드뮴, 폴리비닐 클로라이드, 브롬 등 환경 유해물질들을 다량 함유하고 있어 산업폐

† 2007년 3월 15일 접수, 2007년 4월 27일 수리

* E-mail: bskim@kigam.re.kr

기물로 지정되어 엄격히 관리되고 있다. 그럼에도 불구하고 폐전기전자 스크랩은 금, 은, 파라듐, 구리, 주석, 니켈, 아연 및 철 등의 유가 금속을 상당량 함유하고 있어 이미 오래 전부터 도시 광석(urban ore)이라 불리고 있다. 특히 폐전기전자 스크랩의 발생원과 제조시기에 따라서 약간의 차이는 있지만 폐전기전자 스크랩에는 구리가 약 15-20% 이상으로 가장 많이 함유되어 있는 것으로 보고되고 있다¹⁴⁾.

이와 같은 이유로 오래전부터 선진국에서는 폐전기전자 스크랩으로부터 귀금속과 유기금속을 회수하면서 금속 자원의 재활용뿐만 아니라 환경오염 문제 등을 해결하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 현재 전 세계적으로 폐전기전자 스크랩으로부터 금, 은, 파라듐 및 구리 등을 추출하기 위한 상업적인 플랜트의 대부분은 기존 연 및 구리 등의 비철제련공정을 활용한 고온용융 공법으로 이루어지고 있다. 고온용융 공법이 폐전기전자 스크랩으로부터 귀금속 및 유기금속을 추출하기 위하여 주로 사용되는 중요한 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 발생원과 제조시기에 따라서 구성성분이 달라지는 폐전기전자 스크랩을 추가적으로 선별공정 없이 처리가 가능하며 또한 대량처리가 가능하기 때문이다.

가장 널리 잘 알려진 폐전기전자 스크랩으로부터 금, 은, 구리, 주석과 같은 귀금속과 유기금속의 추출 공정인 고온용융 공법은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 1) 구리, 납 등의 기존 비철 제련로를 활용하여 처리하는 방법
- 2) 폐전기전자 스크랩 전용로를 이용하여 처리하는 방법

여기서 1) 방법에 의해서 얻어진 제련 중간산물은 후속 분리정제공정을 거쳐 구리와 귀금속으로 정제 회수되고, 2) 방법에 의해서 얻어진 합금상은 2차 분리정제공정을 거쳐 구리, 주석 및 귀금속으로 정제 회수된다.

1) 방법은 초기 투자비용을 들이지 않고 기존 설비를 활용하여 폐전기전자 스크랩으로부터 귀금속과 유기금속을 추출할 수 있다는 장점은 있으나 노내에 폐전기전자 스크랩 장입량이 증대됨에 따라서 배기가스 발생량의 증가로 기존 비철제련공정의 중요한 공정 중의 하나인 황산 제조 공정에서 많은 문제점을 야기하는 단점이 있다. 따라서 현재 폐전기전자 스크랩의 투입량을 광석 투입량 대비 0.5% 미만으로 하는 경우 1) 방법만으로는 국내에서 발생하는 폐전기전자 스크랩을 진량 처리할 수 없는 실정이다⁵⁻⁶⁾. 방법 2)는 폐전기전자 스크랩

전용로를 이용하여 폐전기전자 스크랩을 슬래그 형성제와 혼합 용융하여 폐전기전자 스크랩으로부터 귀금속과 유기금속을 합금상으로 추출하는 방법으로 현재 많은 연구가 진행되고 있다⁷⁻¹¹⁾. 2) 방법은 1) 방법과 비교하여 초기 투자비용이 많이 들고 배출 가스의 재처리를 해야 하는 등의 단점이 있으나, 1) 방법과는 달리 다량의 폐전기전자 스크랩을 처리할 수 있을 뿐만 아니라 폐전기전자 스크랩으로부터 귀금속과 유기금속의 추출율이 비교적 높고 전체 공정시간이 짧다는 장점이 있다. 그러나 2) 방법에 의한 폐전기전자 스크랩으로부터 유기금속을 합금상에 효율적으로 농축 추출하기 위해서는 슬래그 조성을 조절하기 위한 다른 슬래그 형성제의 사용이 반드시 요구된다.

그러므로 본 연구에서는 동 제련소에서 발생하는 폐동슬래그를 슬래그 형성제로 사용하여 슬래그 조성을 조절함으로써 폐전기전자 스크랩을 고온 용융하여 폐전기전자 스크랩에 함유된 구리, 주석 같은 유기금속을 합금상으로 농축 추출하기 위한 새로운 공법의 가능성을 실험적으로 조사하였다. 이 공법은 슬래그 형성제로 동 제련소에서 배출되는 폐동슬래그를 재활용하기 때문에 슬래그 조성을 조절하기 위하여 첨가되는 다른 슬래그 형성제의 양을 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

2. 실험방법

2.1. 슬래그계 선정

고온용융 공법에 의해 폐전기전자 스크랩으로부터 금, 은, 백금 등의 귀금속과 구리, 주석 등의 유기금속을 합금상으로 추출하기 위해서는 적절한 슬래그계의 선택이 매우 중요하다. 일반적으로 적절한 슬래그가 갖추어야 할 사항은 크게 용융점과 점도가 낮고, 귀금속과 유기금속의 용해도가 낮으며, 노벽의 침식성이 적어야 한다는 것이다.

B. S. Kim 등은 폐전기전자 스크랩에는 슬래그 성분으로 Al_2O_3 와 CaO 그리고 SiO_2 가 가장 많이 함유되어 있는 것으로 보고하고 있으며, 이로 인하여 폐전기전자 스크랩의 용점이 $1400^\circ C$ 이상으로 매우 높은 것으로 보고하고 있다^{10,11)}. 이것은 고온용융 공법에 의한 폐전기전자 스크랩으로부터 귀금속과 유기금속을 합금상으로 추출하기 위해서는 많은 용융에너지가 요구된다는 것을 의미한다. 따라서 용융에너지를 줄이기 위해서는 다량의 슬래그 형성제가 용융로에 폐전기전자 스크랩과 함께 첨가되어야만 한다. 하지만 부가적으로 첨가

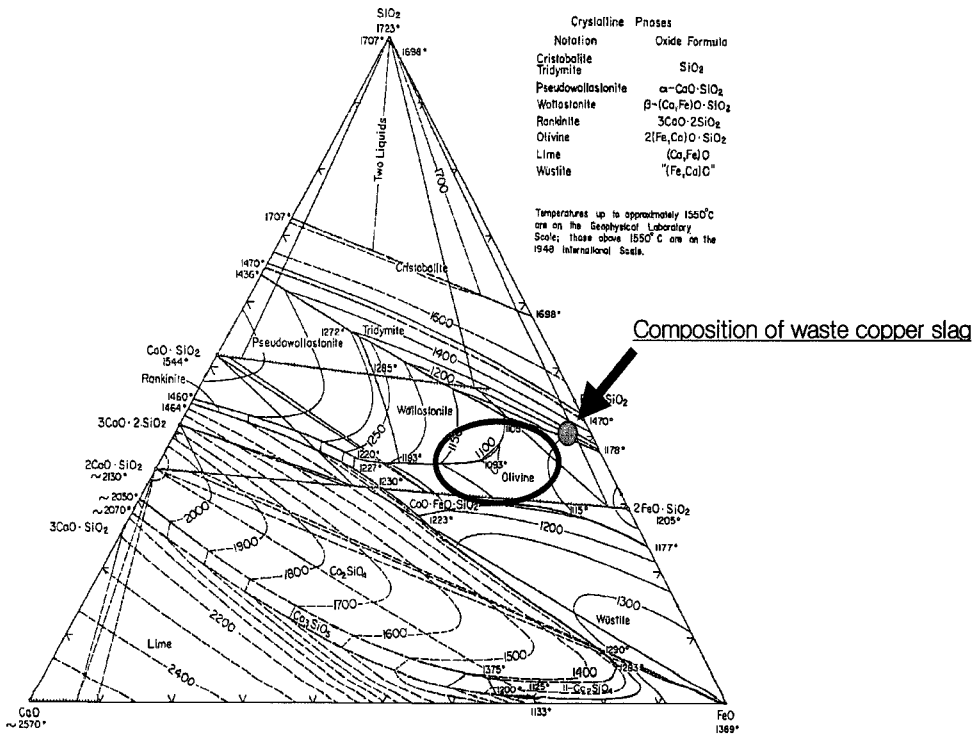


Fig. 1. Isothermal lines of FeO-CaO-SiO₂ slag system (wt%)¹²⁾.

(Circle represents the target composition range that will be used to calculate the input ratio of waste electric and electronic scrap, waste copper slag and CaO.)

되는 슬래그 형성체의 첨가량이 증가할수록 발생하는 슬래그의 양과 부 원료비용 등이 증가하는 문제점이 발생하기 때문에 슬래그 형성체의 첨가량 최소화가 반드시 요구된다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 동 제련소에서 발생하는 폐동슬래그를 슬래그 형성체로 재활용하여 부 원료비용을 절감하고자 미량 Al₂O₃를 함유한 FeO-CaO-SiO₂계로 구성된 폐동슬래그를 적절한 슬래그계로 선택하였다. Fig. 1은 FeO-CaO-SiO₂계의 등온상태도와 폐동슬래그 조성 및 적절한 슬래그 조성 범위를 나타낸 것이다¹²⁾. 현재 연 제련에서 기준으로 하고 있는 슬래그 조성은 CaO 10-15%, FeO 30-35%, Al₂O₃ 2-4%, 그리고 SiO₂ 15-20% 이고, 동 제련의 매트제련에서는 FeO 46-52%, SiO₂ 31-35% 그리고 CaO와 Al₂O₃ 각각 4% 정도이며, 또한 동 제련의 전로 슬래그 조성은 FeO 49-53%, CaO 16% 정도인 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서는 최적의 슬래그 조성으로 CaO 15%, FeO 50%, SiO₂ 35%를 기준으로 하여 슬래그 조성을 조절하였다. 선택된 슬래그 조성은 문헌조사를

통하여 점성이 1400°C에서 대략 1-4 poise정도¹³⁾로 폐전기전자 스크랩으로부터 합금상으로 구리와 주석을 효과적으로 농축 추출할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 슬래그 형성체로 폐동슬래그와 보조 슬래그 형성체로 소량의 CaO를 첨가하여 슬래그 조성을 조절함으로써 슬래그의 용점을 낮추고 유동성을 개선시켜 폐전기전자 스크랩으로부터 합금상으로 구리와 주석을 효과적으로 농축 추출하고자 하는 새로운 공정을 개발하고자 하였다.

2.2. 실험 방법

폐전기전자 스크랩에 함유된 구리, 주석 같은 유가금속을 합금상으로 추출하기 위한 고온용융 실험은 고온용융로(Box Type)를 이용하여 수행되었다. 실험 장치는 크게 온도 조절부, 가열부, 용융부의 세 부분으로 구성되었다. 용융온도는 용탕 직상에서 측정되었으며, R-Type(Pt-13Rh/Pt) 열전대와 PID 온도제어장치를 이용하여 ±3 K의 범위 내에서 제어되었다. 발열체로는 SiC 발열체가 사용되었고, 용융부는 알루미늄이나 도가니가 사

Table 1. Average composition of waste electric and electronic scrap (WEES) and waste copper slag (WCS) used in the study(%)

	Cu	Sn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
WEES	18.2±2.4	1.9±0.6	0.07±0.01	20.9±2.5	14.3±3.7	5.7±0.8	2.0±0.8
WCS	0.7±0.4	-	39.5±1.6	34.5±1.3	4.1±0.6	3.4±0.7	1.2±0.4

용되었다. 폐전기전자 스크랩은 국내에서 발생된 폐컴퓨터를 해체하여 얻어진 부품으로 1.5cm×1.5cm(가로×세로) 정도 이하로 절단되어 도가니에 장입되었다. 또한 국내의 A사에서 배출된 폐동슬래그를 슬래그 형성제로 사용하였고, 슬래그성분 조절용으로는 일본 Junsei Chemical Co. 제품의 시약급 CaO을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 폐동슬래그는 국내의 A사의 미쯔비시 공법의 슬래그매트상 분리단계(CL로)에서 배출되는 폐동슬래그로 Cu의 함유량이 1% 미만으로(Table 1 참조) 주로 FeO와 SiO₂ 및 일부 CaO와 Al₂O₃로 구성된 슬래그이다. Table 1은 본 연구에서 사용된 폐전기전자 스크랩과 폐동슬래그의 평균 화학조성을 나타낸 것이다. 실험은 앞에서 설명한 최적 슬래그 조성을 기준으로 절단된 폐전기전자 스크랩(50 g)과 폐동슬래그(50 g) 그리고 보조 슬래그 형성제인 CaO(4.9 g)를 칭량하여 혼합한 뒤 알루미늄 도가니에 장입하고 1300°C로 가열하여 대기 중에서 30분 동안 용융하면서 실험실 규모로 수행되었다. 여기서 용융시간 30분은 예비실험을 통하여 적당한 것으로 확인되었다. 또한 보조 슬래그 형성제인 CaO의 첨가량은 최적 슬래그 조성과 Table 1의 폐전기전자 스크랩과 폐동슬래그의 평균 화학조성을 기준으로 계산되었다. 반응 전, 후의 시료의 성분분석은 ICP(Jobin-Yvon Equipment Co., JY-38 plus)와 AA(Varian Techtron Pty Limited, SpectrAA-400)을 사용하여 분석하였으며, 슬래그상에서 Fe²⁺와 Fe³⁺는 습식법을 이용하여 분석하였다.

한편, 폐전기전자 스크랩에 함유된 유가금속 M이 합금상으로 농축된 추출율은 아래 식(1)로 계산되었다.

$$R_M = \frac{A_M}{W_M} \times 100 \quad (1)$$

여기서 R_M은 유가금속 M의 추출율(%), A_M은 합금상으로 농축된 유가금속 M의 양(g) 그리고 W_M은 장입된 폐전기전자 스크랩에 함유된 유가금속 M의 양(g)을 각각 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

폐전기전자 스크랩의 고온용융 실험에서 장입물은 대

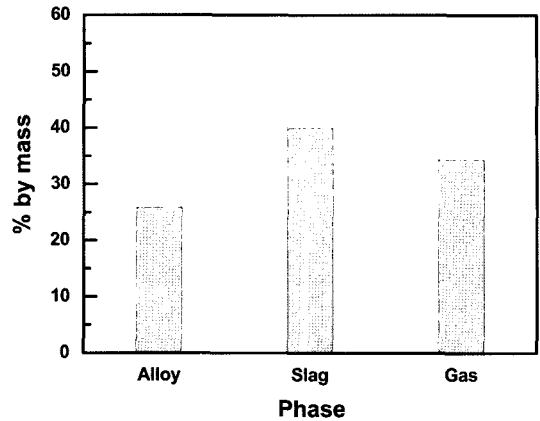


Fig. 2. Average mass distribution of the charge materials among three product phases (alloy, slag, and gas phases). (The initial input amount of waste electric and electronic waste: 50 g)

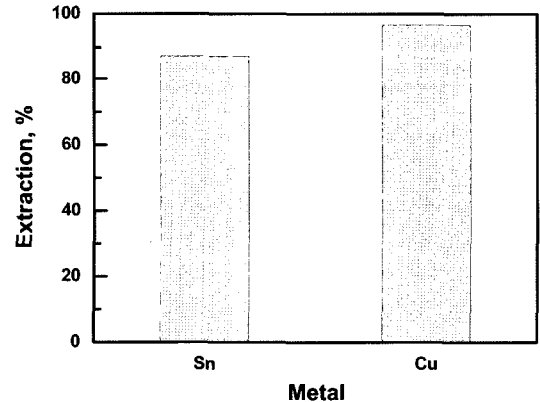


Fig. 3. Average extraction ratio of copper and tin from the charge materials.

략 1250°C 부근에서 완전히 용융되었다. 일반적으로 폐전기전자 스크랩은 고온용융되는 경우 합금상과 슬래그상 그리고 기상으로 분리된다. Fig. 2는 제안된 공정에 의한 폐전기전자 스크랩의 고온용융 처리시 물질수지를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 장입된 폐전기전자 스크랩의 25.8%는 합금상으로, 39.9%는 슬래그상으로 그리고 나머지 34.3%는 가스상으로 분배되는 것으로 나타났다. 이것은 Table 1에 나타난 바와

Table 2. Average chemical composition of alloys obtained from the charge materials(%)

Cu	Sn	Fe	Ni	Pb	Zn
67.7 ± 1.5	7.56 ± 0.4	10.2 ± 0.2	0.38 ± 0.03	1.99 ± 0.05	0.99 ± 0.07

*The balance consists of small amount of other metals and entrained oxides.

Table 3. Average chemical composition of slags obtained from the charge materials(%)

CaO	SiO ₂	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Al ₂ O ₃	MgO
14.1 ± 2.6	28.9 ± 4.3	17.8 ± 2.7	6.2 ± 0.1	11.2 ± 1.2	1.5 ± 0.2

*The balance consists of small amount of other oxides and unoxidized metals.

같이 폐전기전자 스크랩에 함유된 구리, 주석 등의 유기 금속들이 합금상으로 농축되는 반면에 나머지 금속산화물들은 슬래그상을 구성하기 때문이다. 또한 A. Bernardes 등이 보고한 것처럼 증기압이 높은 아연, 납 등의 금속들 일부와 대부분의 플라스틱 성분 같은 유기 화합물 등이 기상으로 휘발하기 때문에 판단된다⁸⁾. Table 2는 얻어진 합금상의 평균 화학조성을 나타낸 것이다. Table 2에 보여 지는 바와 같이 합금상은 구리, 주석, 철로 대부분 구성되어 있는 것으로 나타났다. 여기서 합금상에 철이 상당량 함유된 것은 아마도 폐동슬래그에 함유된 산화철이 일부 환원되었기 때문으로 사료된다. 이것은 폐전기전자 스크랩에 함유된 상당량의 플라스틱성분이 환원제역할을 하기 때문으로 판단된다. 합금상은 타원형태의 덩어리로 회수되었으며, 회수된 합금상의 평균무게는 12.9 g이었다. 또한, Table 3은 얻어진 슬래그상의 평균 화학조성을 나타낸 것이다. Table 3은 슬래그상이 Al₂O₃, CaO, FeO, Fe₂O₃, SiO₂ 로 주로 구성되어 있다는 것을 보여준다. 따라서 본 연구에서 제안된 공정을 통해 폐전기전자 스크랩을 처리할 경우 발생하는 슬래그에는 납, 아연, 크롬 등의 중금속 함유량이 매우 적어 무해한 것으로 사료된다. 하지만 본 연구에서는 발생한 슬래그의 무해화를 확인하기 위한 용출실험이 수행되지 않았다. 또한 폐전기전자 스크랩의 고온용융 동안 발생하는 가스의 포집은 본 실험장치 특성상 이루어지지 않았기 때문에 향후 이에 대한 더 많은 연구를 통하여 가스상으로의 금속의 물질분배에 대한 고찰이 요구 된다.

Fig. 3은 제안된 공정에 의한 폐전기전자 스크랩으로부터 구리와 주석의 합금상으로의 추출율을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 구리의 농축 추출율이 주석의 농축 추출율보다 좋은 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 구리보다는 주석이 산소와의 친화력이 우수하기 때문으로 판단된다. Fig.

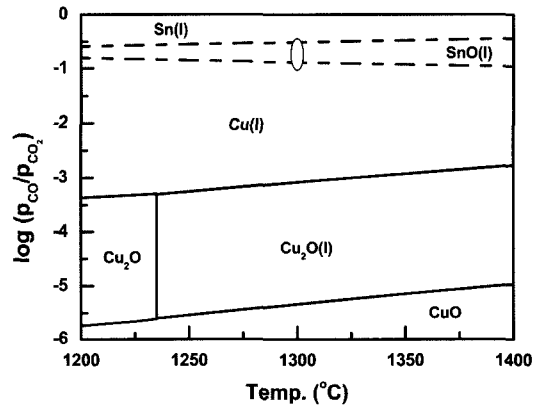
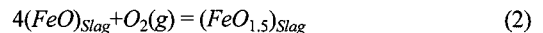


Fig. 4. Predominance phase diagram of Cu-Sn-O system (dash line: Sn-O system and solid line: Cu-O system). (Circle represents the experimental condition range of the high temperature melting process.)

4는 노내의 산소포텐셜과 함께 구리와 주석의 안정영역을 나타낸 것이다. 온도에 따른 구리와 주석의 안정영역 그림은 Gibbs free energy minimization 방법에 의하여 만들어진 화학프로그램인 HSC Chemistry 5.1 (A. Roine, Outokumpu, 2002)을 이용하여 그려졌다. 노내의 산소포텐셜은 일반적으로 비철제련공정에서 잘 알려져 있는 슬래그상에 있는 Fe²⁺ 이온과 Fe³⁺ 이온의 화학분석을 통하여 식(4)을 이용하여 계산되었다¹⁴⁾. 식(4)는 다음과 같이 얻어질 수 있다. 반응식 (2)는 슬래그상에 있는 FeO와 FeO_{1.5} 사이의 화학평형반응식을 표현한 것이다. 식(3)은 반응식 (2)에 대한 온도에 따른 표준자유에너지를 나타낸 것이다¹⁵⁾.



$$\begin{aligned} \Delta G_{FeO-FeO_{1.5}}^0 &= -507,300 + 212.0T \text{ (J/mol)} \\ &= RT \ln \left(\frac{\alpha_{FeO_{1.5}}^4}{\alpha_{FeO}^4 P_{O_2}} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

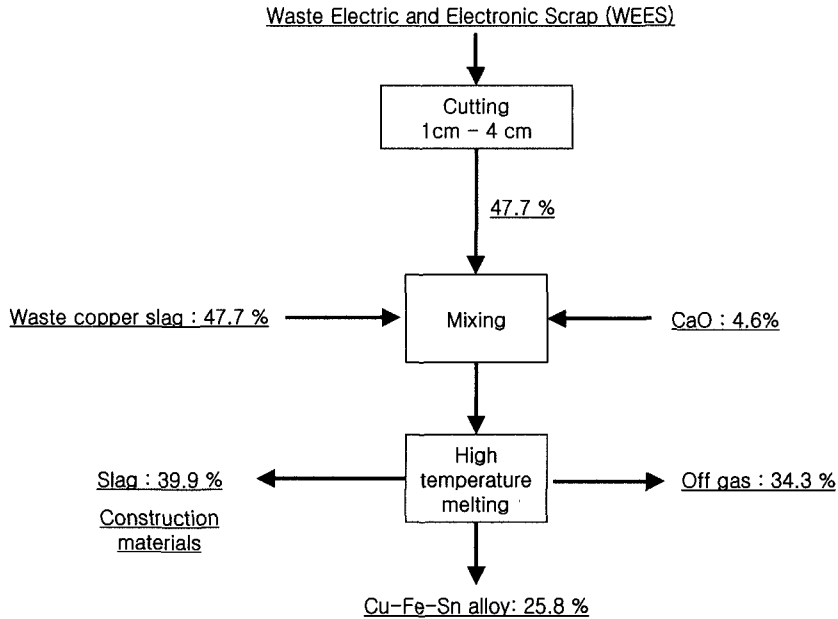


Fig. 5. Flow sheet of a novel process for extracting Cu and Sn from waste electric and electronic scrap proposed in the study.

여기서 $\Delta G_{FeO-FeO_{1.5}}^{\circ}$ 는 반응식 (2)의 표준자유에너지이고, α_{FeO} 와 $\alpha_{FeO_{1.5}}$ 는 슬래그상에 있는 FeO와 FeO_{1.5}의 활동도이며, 본 연구에서는 각각의 활동도계수를 1로 가정하였다. 따라서 식(3)를 다시 산소포텐셜에 관하여 정리하면 식(4)이 얻어진다.

$$\ln p_{O_2} = \frac{\Delta G_{(FeO-FeO_{1.5})}^{\circ}}{RT} + 4 \ln \left(\frac{wt\% \text{ of } Fe^{3+} \text{ in slag}}{wt\% \text{ of } Fe^{2+} \text{ in slag}} \right) \quad (4)$$

식(4)을 이용하여 계산된 노내의 환원분위기 $\ln(p_{CO}/p_{CO_2})$ 가 Fig. 4에 원으로 표시되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 원으로 표시된 노내의 환원분위기 $\ln(p_{CO}/p_{CO_2})$ 는 구리에 대해서는 금속 구리의 안정영역에 위치한 반면에 주석에 대해서는 금속 주석과 산화주석(SnO)의 안정영역의 경계 부근에 위치하는 것으로 조사되었다. 따라서 Fig. 3에 나타난 바와 같이 구리의 합금상으로서의 추출율이 주석의 추출율보다 우수한 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서는 슬래그상과 합금상의 분리는 폐전기전자 스크랩을 고온용융 후 시료를 상온으로 냉각하여 파쇄 함으로써 슬래그는 유리질의 균일한 상으로 합금상으로부터 양호하게 분리되었다.

이와 같은 연구결과를 바탕으로 본 연구에서 개발된 폐동슬래그를 슬래그 형성제로 재활용하여 폐전기전자 스크랩으로부터 구리, 주석 같은 유가금속을 농축 추출

할 수 있는 공정도를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에 나타난바와 같이 제안된 공정은 폐동슬래그와 폐전기전자 스크랩 그리고 보조 슬래그 형성제인 CaO를 혼합한 후 고온 용융로에 장입하여 용융함으로써 폐전기전자 스크랩에 함유된 유가금속인 구리와 주석을 Cu-Fe-Sn 합금상으로 농축 추출하는 공정이다. 뿐만 아니라 이 공정으로부터 발생된 슬래그는 건축자재 부원료로 재활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이에 관한 보다 더 많은 자세한 연구는 본 연구에서 수행되지 못했다.

5. 결 론

본 연구에서는 폐전기전자 스크랩으로부터 구리, 주석 같은 유가금속을 합금상으로 추출 분리회수하기 위한 새로운 고온용융 공정이 개발되었다. 제안된 공정은 슬래그 형성제로 동 제련소에서 배출되는 폐동슬래그를 재활용하기 때문에 부 원료비를 절감할 수 있다는 장점이 있다. 실험 결과 폐전기전자 스크랩 50g과 폐동슬래그 50g 그리고 첨가제로 CaO 4.9g를 혼합하여 알루미늄 도가니에 장입한 후 대기 중 1300°C에서 30분 동안 고온 용융함으로써 폐전기전자 스크랩에 함유된 구리와 주석을 Cu-Fe-Sn 합금상으로 각각 95% 이상, 85% 이상 추출할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/환경부의 21C 프론티어연구개발사업인 자원재활용기술개발사업단으로부터 연구비를 지원받아 수행된 “폐전기·전자기기의 토탈 리사이클링 실용화 기술개발”에서 얻어진 연구결과의 일부입니다. 연구비를 지원해 주신 관계자에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 자료 조사와 분석에 도움을 주신 한국지질자원연구원 유재민 박사와 과학기술연합대학원대학교 박사과정 김은영님께도 깊은 감사를 드립니다.

참고논문

1. UNEP report, 2004: E-waste, the hidden side of IT equipment manufacture and use, http://www.grid.unep.ch/product/publication/download/ew_ewaste.en.pdf
2. Jae-chun Lee, Jin-ki Jeong, Jung-il Yang, Hun-Sang Chung, 1998: Technology for Recovering Valuable Metals from Printed Circuit Boards (PCBs) of the Used Personal Computer, J of Korean Inst. of Resources Recycling, 7(3), pp.58-66.
3. Elaine. Y. L. Sun, 1991: The Recovery of Metals from Electric Scrap, JOM, 43(4), pp.53-61.
4. J. E. Hoffmann, 1992: Recovering Precious Metals from Electric Scrap, JOM, 44(7), pp.43-48.
5. Private communication Korea-Zinc Incorporation, Ulsan-gun, Ulsan, Korea, August, 2005.
6. Private communication LS-Nikko Copper Incorporation, Ulsin-gun, Ulsan, Korea, September, 2006.
7. R. G Reddy, and R. K. Mishra, 1987: Recovery of Precious Metals by Pyrometallurgical Processing of Electronic Scrap, Precious Metals 1987, Proceedings of 10th IPMI Conference”, Brussels, Belgium, pp.135-145.

8. A. Bernardes *et al.*, 1997: Recycling of Printed Circuit Boards by Melting with Oxidising/Reducing Top Blowing Process, EPD Congress, Brajendra Mishra(Ed.), TMS, Warrendale, PA, pp.363.
9. B. C. Ban, C. M. Kim, Y. I. Kim, and D. S. Kim, 2002: Recovery of Precious Metals from Waste PCB and Auto Catalyst Using Arc Furnace, J of Korean Inst. of Resources Recycling, 11(6), pp.3-11.
10. Byung-Su Kim, Jae-Chun Lee, and Seung-Pil Seo, 2003: Recovery of Precious Metals from Obsolete Printed Circuit Boards by Smelting Reduction, The Korea Society for Geosystem Engineering, 40(3), pp.184-190.
11. Byung-Su Kim *et al.* 2004: A Process for Extracting Precious Metals from Spent Printed Circuit Boards and Automobile Catalysts, JOM, 56(12), pp.55-58.
12. Verein Deutscher Eisenhttenleute(Ed.), 1981: Schlackenatlas, p. 68, Verlag Stahleisen m.b.H., Dusseldorf, Germany.
13. Verein Deutscher Eisenhttenleute(Ed.), 1995: Slag Atlas 2nd Edition, p. 370, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, Germany.
14. Kemori N., Shibata Y. and Tomono M., 1986: Measurements of Oxygen Pressure in a Copper Flash Smelting Furnace by an Emf Method, Metall. Trans. B, 17B, pp. 111-117.
15. George R. St. Pierre(Ed), 1961: Physical Chemistry of Process Metallurgy, Part 1, Pittsburgh, PA, pp. 175.

金 炳 洙

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 선임연구원
- 당 학회지 제13권 1호 참조

李 光 鎬



- 1993년 부산대학교 금속공학과 졸업
- 현재 LS-Nikko 동제련(주) 생산기술팀 차장

李 在 天

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 책임연구원
- 당 학회지 제10권 6호 참조