

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO계 슬래그 중 Cu의 용해도

한보람 · 김응진 · \*손호상

경북대학교 금속신소재공학과

### Copper Solubility in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO Slag

Bo-Ram Han, Eung-Jin Kim and \*Ho-Sang Sohn

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 폐 PCB의 주성분인 Cu와 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO계 슬래그의 평형실험에 의해 Cu의 용해도에 대하여 조사하였다. 1673 K ~ 1825 K 범위에서 일정한 비율로 미리 용융된 4원계 슬래그와 Cu를 흑연 도가니에 각각 20 g 장입한 후, 10시간동안 평형을 유지하였다. 분위기 중의 산소분압은 CO가스와 Ar가스의 비율을 조절하여 10<sup>-17.23</sup> ~ 10<sup>-15.83</sup> atm 범위로 제어하였다. 평형산소분압과 염기도 및 MgO 농도가 증가할수록 슬래그 중 Cu의 농도는 증가하였다. 그리고 반응 온도가 높을수록 슬래그 중의 Cu의 농도는 감소하였다. 슬래그 중으로 용해되는 Cu의 반응은 발열반응이다.

주제어 : 구리, 슬래그, 염기도, 용해도, 인쇄회로기판

#### Abstract

In this study, the solubility of Cu, which is a main metal component of wasted PCB, in CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO slag system was investigated. Each 20 grams of Cu chips and the quaternary slag manufactured was placed in a carbon crucible and melted for 10 hours in the temperature between 1673 K and 1825 K to confirm the equilibrium state. The oxygen partial pressure was controlled by the ratio of CO and Ar gas in the range of 10<sup>-17.23</sup> to 10<sup>-15.83</sup> atm. The concentration of Cu in the slag increased with increasing oxygen partial pressure, slag basicity, and MgO content in the slag. The concentration of Cu in the slag decreased with increasing temperature. The Cu dissolution reaction in the slag is an exothermic reaction.

Key words : Copper, Slag, Basicity, Solubility, PCB

#### 1. 서론

21세기 지식정보화 사회를 맞이하여 전기전자산업에  
도 많은 변화를 가져왔다. 제품의 무게는 가벼워지고 다

양한 기능을 가진 제품의 수요가 증가하여 전기전자부  
품에 사용되는 귀금속을 비롯한 유가금속들의 사용량이  
증가하였다. 나날이 새로운 전기전자기기가 출시되면서  
이러한 기기들의 교체주기가 짧아져서 폐전기전자기기

\* Received : October 11, 2013 · Revised : November 11, 2013 · Accepted : January 7, 2014

\*Corresponding Author : Ho-Sang Sohn (E-mail : sohn@knu.ac.kr)

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Dagegu, 702-701, Korea

Tel : +82-53-950-5560 / Fax : +82-53-950-6559

©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.

의 발생량이 기하급수적으로 증가하게 되었다.

폐전기전자기기(WEEE, waste electrical and electronic equipment) 스크랩이란 전기전자제품 제조과정에서 발생하는 부품의 불량품과 일반가정이나 사무실에서 사용 후 폐기되는 컴퓨터, 텔레비전, 세탁기, 냉장고, 비디오, 오디오, 휴대폰 등의 폐전기전자 제품의 해체과정에서 발생하는 부품을 총칭한다.<sup>1)</sup> 이러한 스크랩 중에서 인쇄회로기판(PCB, printed circuit board)에는 세라믹성분과 플라스틱성분이 각각 약 30% 정도이며, 나머지 약 40%가 금속성분이다. 금속성분에는 Cu가 19.2%로 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 다음으로 Al, Ni, Pb, Sn순으로 높은 함량을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 이러한 PCB를 포함한 폐전기전자 스크랩으로부터 유기금속을 회수하기 위하여 습식처리와<sup>3,4)</sup> 건식처리에<sup>5-8)</sup> 대하여 많은 연구들을 수행되어 왔다.

습식처리공정은 폐전기전자 스크랩을 적당한 용액으로 처리하여 유기금속들을 용액 중으로 침출시킨 후 용매추출 등의 방법에 의해 분리하거나 정제하여 금속이나 화합물로 제조하는 방법이다. 그러나 폐전기전자 스크랩 중에는 세라믹 성분과 플라스틱 성분도 함유되어 있기 때문에 유기금속 함유량이 낮은 다량의 미침출 잔사가 발생하여 또 다른 환경오염의 주범이 될 수 있다. 한편, 건식처리공정은 스크랩을 적절한 용제와 함께 용융하여 유기금속과 불순물을 금속상과 슬래그상으로 분리시켜 유기금속을 회수하는 공정이다. 따라서 이러한 건식처리공정에서도 유기금속 함유량이 낮은 슬래그가

다량으로 발생하는 문제점을 가지고 있다. 그러나 고온에서 용융된 슬래그는 PCB 중에 함유되어 있는  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  등의 산화물이 주요 구성성분이기 때문에 별도의 기술개발을 통해 내화물, 도로포장재 등으로 재활용할 수 있어 습식처리공정과 유기금속 회수공정의 융합에 의해 효과적으로 유기금속을 회수하고 부산물을 처리할 수 있을 것이다.

Kwon 등은<sup>5)</sup> PCB스크랩으로부터 유기금속회수를 위한 기초실험으로 슬래그의 점도에 대하여 검토하였으며, Shin 등은<sup>7)</sup> PCB스크랩 중의 유기금속 회수를 위하여 건식용융실험을 실시하여 슬래그의 저점도화와 용체의 교반이 금속회수율을 높이는데 유리한 것으로 보고하였다. Park 등은<sup>8)</sup> 슬래그의 용점과 점도를 낮추어주는  $CaF_2$ 를 첨가한 슬래그를 이용하여 유기금속의 회수거동에 대하여 조사하였다. 이와 같이 폐전기전자 스크랩으로부터 건식공정에 의해 유기금속을 회수하기 위하여 많은 연구들이 수행되었으나, 대부분이 슬래그의 유동성이나 점도에 관한 것이다.

따라서 본 연구에서는 선행 연구자들에 의해서 유기금속 회수에 가장 적합한 것으로 알려진  $Al_2O_3$ - $CaO$ - $SiO_2$ - $MgO$ 의 4원계 슬래그에서 PCB 구성 금속성분 중 Cu의 용해도에 대하여 열역학적으로 검토하였다.

## 2. 실험방법

Fig. 1에 실험장치의 모식도를 나타내었다. 시료의 가

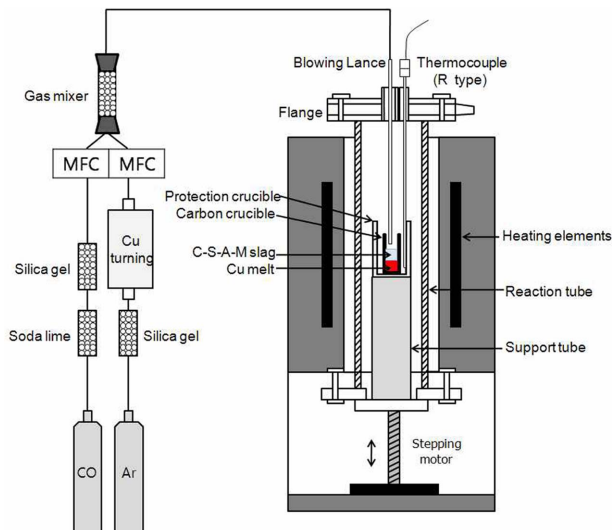
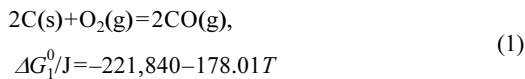


Fig. 1. Experiment apparatus.

열은 LaCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 발열체로 사용하는 수직관상 전기로 (10 kW, 220 V)를 사용하였으며, 로 내에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 반응관(외경 = 90 mm, 내경 = 80 mm, 길이 = 1000 mm)을 설치하고, 반응관 상·하부에는 플랜지를 설치하여 로 내 분위기를 조절할 수 있도록 하였다. 로 내 온도조절을 위하여 열전대(R-type)를 Fig. 1에 나타난 바와 같이 반응관 내부의 시료 도가니 벽면에 붙여서 삽입하였으며, PID(proportional integral differential) 제어장치로 ±2 K의 범위에서 반응온도를 제어하였다. 시료의 가열 중에는 반응관 하부로부터 Ar가스를 불어넣어 불활성 분위기를 유지하였으며, 상부 플랜지에는 일정 비율의 CO + Ar 혼합가스를 취입할 수 있는 랜스 투입구 등을 설치하였다.

슬래그는 99.9% 이상의 고순도 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO, CaCO<sub>3</sub> 시약을 이용하여 제조하였다. CaCO<sub>3</sub>는 1273 K에서 10시간 동안 하소하여 CaO로 만들어 사용하였다. 각각의 시약을 조성에 맞게 혼합하여 1873 K의 흑연도가니 중에서 미리 용해하여 준비하였다.

미리 용해한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO의 4원계 슬래그 20 g과 전기동(> 99.99%) 20 g을 흑연 도가니(내경 25 mm, 길이 60 mm)에 장입하여 일정한 비율의 CO + Ar 혼합가스를 도가니의 1 cm 상부에서 불어 넣어 분위기 중의 산소분압을 식(1)에 의해 제어하였다.



식 (1)의 평형상수로부터 산소분압  $P_{O_2}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{O_2} = P_{CO}^2 / K_{(1)} \quad (2)$$

따라서 순 CO 가스 분위기의 1773 K에서 산소분압은  $1.46 \times 10^{-16}$  atm이 된다. 따라서 CO가스와 Ar가스의 혼합비율을 조절하여 산소분압을 제어하였다. 그리고 CO가스는 soda lime과 NaOH를 통과시켜 CO<sub>2</sub>와 수분을 제거하였으며, Ar가스는 NaOH층과 Cu칩이 들어있는 탈산로를 통과시켜 수분과 산소를 제거하였다. 가스 유량은 MFC(Mass Flow Controller: MKS type 247)를 이용하여 제어하였다. 반응이 완료된 후 Ar 분위기에서 물에 급랭한 후 슬래그를 파쇄하여 Cu 농도를 유도결합플라즈마 원자방출 분광광도계(ICP

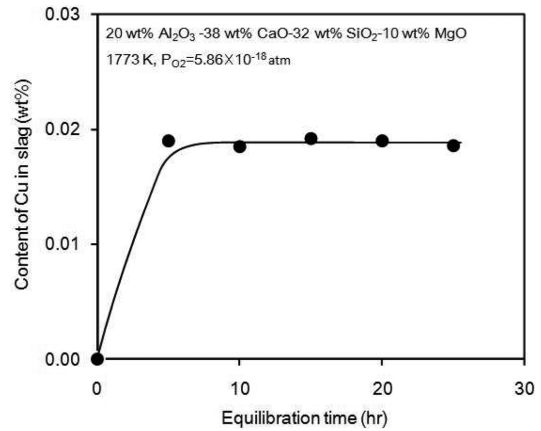


Fig. 2. Change of Cu contents in 20 wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-38 wt%CaO-32 wt%SiO<sub>2</sub>-10 wt%MgO slag system with equilibrium time at 1773 K under  $5.86 \times 10^{-18}$  atm of  $P_{O_2}$ .

spectrophotometer, Perkin Elmer, Optima 7300DV)로 분석하였다.

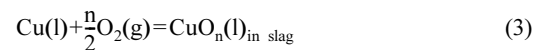
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 평형 시간의 결정

Fig. 2에는 1773 K에서 20 wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-38wt%CaO-32wt%SiO<sub>2</sub>-10wt%MgO의 4원계 슬래그 중 반응시간에 따른 Cu의 농도 변화를 나타내었다. 분위기 중의  $P_{CO}$ 를 0.2 atm으로 유지하였으므로, 식 (2)로부터 분위기 중의  $P_{O_2}$ 는  $5.86 \times 10^{-18}$  atm이다. 5시간 이후부터 슬래그 중 Cu농도는 약 0.02 wt% 수준으로 일정한 값을 나타내었다. 그러나 충분히 평형에 도달할 수 있도록 이후의 실험에서는 10 시간동안 평형을 유지하여 Cu의 용해도를 조사하였다.

#### 3.2. 산소분압의 영향

Matsuzaki 등에<sup>9)</sup> 따르면 Cu와 슬래그 사이의 평형반응은 식(3)과 같이 나타낼 수 있고, 평형상수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.



$$K_{(3)} = \frac{\alpha_{CuO_n} \cdot (wt\%CuO_n)}{a_{Cu} \cdot P_{O_2}^{n/2}} = \frac{f_{CuO_n} \cdot (wt\%CuO_n)}{a_{Cu} \cdot P_{O_2}^{n/2}} \quad (4)$$

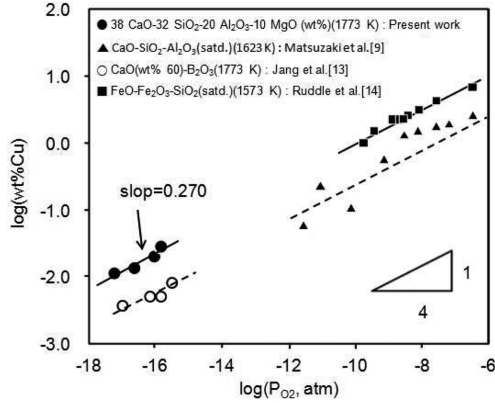


Fig. 3. Dependence of Cu solubility on oxygen partial pressure for the 20 wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-38 wt%CaO-32 wt%SiO<sub>2</sub>-10 wt%MgO slag system at 1773 K.

여기서  $n$ ,  $P_{O_2}$ ,  $a_b$ ,  $f_i$ 는 각각 화학양론계수, 산소분압,  $i$  성분의 활동도와 활동도계수를 나타낸다. 식 (4)에서 금속 상은 순수한 Cu로  $a_{Cu} = 1$ 이므로, 식(4)를 (wt%Cu<sub>n</sub>)에 대하여 정리하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\log(\text{wt}\% \text{Cu}_n) = \frac{n}{2} \log P_{O_2} - \log f_{\text{Cu}_n} + \log K_{(3)} \quad (5)$$

식 (5)에서 평형상수  $K$ 는 온도만의 함수이고, 슬래그 조성이 일정할 경우 활동도 계수인  $f_{\text{Cu}_n}$ 은 일정한 것으로 가정할 수 있기 때문에 슬래그 중의 Cu 용해도는 일정한 온도와 슬래그 조성에서 산소분압( $P_{O_2}$ )과 선형적인 관계를 가질 것이다.

Fig. 3에는 1773 K에서 20 wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-38wt%CaO-32wt%SiO<sub>2</sub>-10wt%MgO 슬래그 중으로의 Cu 용해도에 미치는 산소분압의 영향을 이전 연구결과<sup>9,13,14</sup>)와 함께 나타내었다. 산소분압이 높아짐에 따라 슬래그 중으로 용해되는 Cu의 농도는 선형관계를 나타내며 증가하였다. 본 연구에서의 기울기는 0.27로 Cu가 CuO<sub>0.5</sub> 형태로 용해될 때의 기울기인 0.25와 유사한 값을 나타내었다. 이러한 결과는 그림에 함께 나타낸 이전 연구결과와도 유사한 값이며, 이것으로부터 화학양론계수  $n$ 은 0.5이다. 따라서 Cu가 슬래그 중으로 용해되는 반응은 식(3)으로부터 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

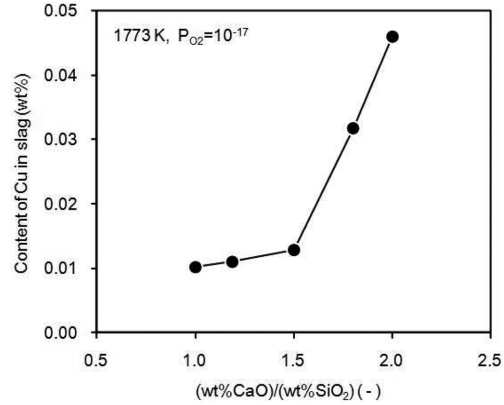
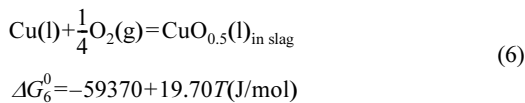


Fig. 4. Effect of slag basicity on Cu solubility in slag at 1773 K under 10<sup>-17</sup> atm of P<sub>O<sub>2</sub></sub>.

따라서 Cu는 식(6)과 같이 1가 이온의 상태로 슬래그 중에 용해되는 것으로 생각된다.

### 3.3. 슬래그 조성의 영향

Fig. 4에는 1773 K,  $P_{O_2} = 10^{-17}$  atm, 10 시간의 평형 시간 조건에서 슬래그 중 (wt%CaO)와 (wt%SiO<sub>2</sub>)의 비율(염기도) 변화에 따른 슬래그 중의 Cu의 농도변화를 나타내었다. (wt%CaO)/(wt%SiO<sub>2</sub>)의 비율이 증가함에 따라 슬래그 중으로 용해되는 Cu 농도는 증가하였다. 특히, (wt%CaO)/(wt%SiO<sub>2</sub>)가 1.5 이상이 되었을 때 Cu의 농도는 급격하게 증가하였다. CaO의 비율이 증가하면 식 (7)과 같이 슬래그 중에서 CaO로부터 해리되어 나오는 자유산소이온이 증가하게 되며, 염기성 영역에서는 자유산소이온과 결합하는 Cu의 양이 급격하게 증가하기 때문에<sup>11)</sup> 슬래그 중의 Cu 용해도가 증가하는 것으로 생각된다.



Fig. 5에는 1773 K,  $P_{O_2} = 10^{-17}$  atm의 조건에서 (wt%CaO)/(wt%SiO<sub>2</sub>) 비율이 1.18일 때 MgO의 농도 변화에 따른 슬래그 중 Cu의 농도변화를 나타내었다. MgO의 농도가 10 wt%까지는 슬래그 중으로 용해되는 Cu의 농도는 0.01 wt% 수준의 유사한 농도를 나타내었지만, 그 이상에서는 MgO의 농도가 증가함에 따라 Cu의 용해도가 증가하는 경향을 나타내었다. Nakasaki 등에<sup>11)</sup> 따르면 염기성 영역에 있는 슬래그에서 MgO나 CaO와 같은 염기성 산화물을 첨가함에 따라 자유산소

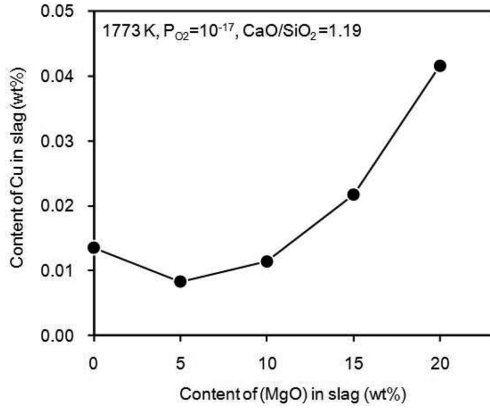


Fig. 5. Effect of (MgO) content in slag on Cu solubility in slag at 1773 K under 10<sup>-17</sup> atm of P<sub>O<sub>2</sub></sub>.

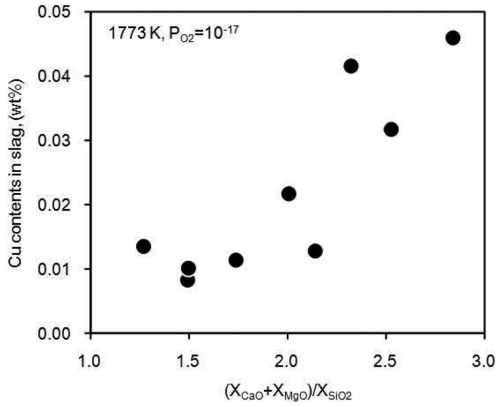


Fig. 6. Cu solubility in slag as a function of  $(X_{CaO} + X_{MgO})/(X_{SiO_2})$  at 1773 K under 10<sup>-17</sup> atm of P<sub>O<sub>2</sub></sub>.

이온의 활동도가 증가하는 것으로 보고하였다. 따라서 MgO 농도가 10 wt% 이상으로 증가할 경우 슬래그 중으로 용해되는 Cu의 농도가 증가하는 것은 Fig. 4의 염기도의 영향과 마찬가지로 자유산소이온과 결합하는 Cu의 양이 증가하였기 때문으로 생각된다.

Fig. 6에는 Fig. 4, 5에 나타낸 결과를 종합하여 1773 K, P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 10<sup>-17</sup> atm의 조건에서 슬래그의 염기성 산화물(CaO, MgO)과 산성 산화물(SiO<sub>2</sub>)의 몰 비율(x<sub>i</sub>)에 따른 슬래그 중 Cu의 농도 변화를 나타내었다.  $(X_{CaO} + X_{MgO})/(X_{SiO_2})$ 가 증가함에 따라 슬래그 중 Cu의 농도는 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 Fig. 4, 5에서 설명한 바와 같이, 염기성 산화물인 CaO와 MgO의 농도가 증가함에 따라 슬래그 중으로 해리되어 나오는 자유산소이온이 증가하고, 염기성이 강해

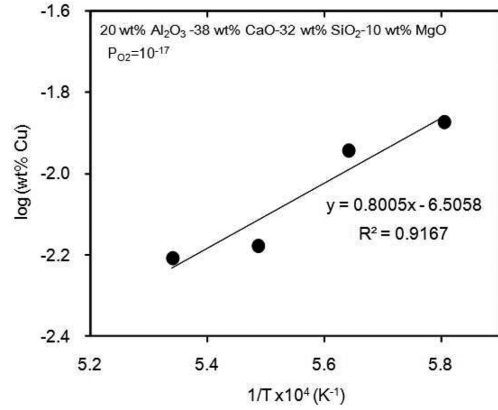


Fig. 7. Effect of temperature on the Cu solubility in slag under 10<sup>-17</sup> atm of P<sub>O<sub>2</sub></sub>.

지면서 자유산소이온과 결합하는 Cu가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.4. 온도의 영향

Fig. 7에는 산소분압 10<sup>-17</sup> atm의 20wt%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-38wt%CaO-32wt%SiO<sub>2</sub>-10wt%MgO 슬래그 계에서 온도변화에 따른 슬래그 중 Cu의 용해도를 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 Cu의 용해도는 감소하였다. Shin 등<sup>7)</sup>은 PCB 스크램을 슬래그와 혼합하여 용융시켰을 때 온도가 상승할수록 Cu의 회수율이 높아지며, 이것은 온도 상승에 따른 슬래그 유동성 개선에 의한 것으로 보고하였다. 한편 식(6)의 평형상수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log K_6 = \frac{3100}{T} - 1.03 = \log \left( \frac{a_{CuO_{0.5}}}{a_{Cu} \cdot P_{O_2}^{1/4}} \right) \quad (8)$$

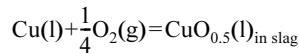
식 (8)에서 a<sub>Cu</sub> = 1이므로 온도가 일정하다면 평형상수값도 일정하기 때문에 산소분압이 감소하면 슬래그 중 Cu의 용해도가 감소할 것이다. Fig. 7은 산소분압이 일정한 조건이며, 식 (8)의 평형상수는 온도가 증가할수록 감소한다. 따라서 온도가 증가함에 따라 Cu의 용해도가 감소하는 것은 식 (8)의 평형상수 감소에 의한 것으로 생각된다. 그리고 Fig. 7의 기울기로부터 식 (9)의 Van't Hoff식에 의해 슬래그 중 Cu의 용해반응에 대한 엔탈피 변화는 -153.28 kJ/mol로 계산되었다. 따라서 슬래그 중 Cu의 용해반응은 발열반응이다.

$$\left( \frac{d(\log K)}{d(1/T)} \right)_P = \frac{\Delta H_r^0}{2.303R} \quad (9)$$

#### 4. 결 론

본 연구는 폐 PCB로부터 건식법에 의해 유가금속 회수를 위한 기초연구로서, 폐 PCB의 주성분인 Cu와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO 4원계 슬래그의 평형실험에 의해 슬래그 중 Cu 용해도에 대하여 조사하였으며, 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 산소분압이 높을수록 슬래그 중의 Cu의 용해도는 증가하였으며, 이러한 산소분압의 영향으로부터 슬래그 중으로 용해되는 Cu의 반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



2) 염기성 산화물과 산성 산화물의 몰 비율인 (X<sub>CaO</sub>+X<sub>MgO</sub>)/(X<sub>SiO<sub>2</sub></sub>)가 증가함에 따라 슬래그 중 Cu의 농도는 증가하였으며, 이것은 염기성 산화물의 농도 증가에 따라 슬래그 중으로 해리되어 나오는 자유산소이온의 증가에 의한 것으로 생각된다. 따라서 슬래그 중으로의 Cu 손실을 저감하기 위해서는 염기성 산화물의 농도를 적절한 수준까지 저감하는 것이 필요하다.

3) 온도가 증가함에 따라 슬래그 중 Cu의 용해도는 감소하였으며, 이것은 슬래그 중으로의 Cu 용해반응의 평형상수가 감소하였기 때문이다. 그리고 Van't Hoff식으로부터 슬래그 중으로의 Cu 용해 반응열은 -153.28 kJ/mol로 계산되어 발열반응인 것을 알 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐 금속유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: GT-11-C-01-010-0).

#### 참고문헌

- Kim, B. S., Lee, J. C. and Jeong, J. K., 2009: *Current Status on the Pyrometallurgical Process for Recovering Precious and Valuable Metals from Waste Electrical and Electronic Equipment(WEEE) Scrap*, J. Korean Inst. Resources Recycling, **18**(4), pp. 14-23.
- Yoo, J. M. et al., 2007: *Recovery of Metal Concentrates from Waste Printed Circuit Boards by Mechanical Separation Processes*, J. Korea Solid Wastes Eng. Soc., **24**(6), pp.523-531.
- Ahn, J. W. et al., 2005: *Biological Leaching of Cu, Al, Zn, Ni, Co, Sn and Pb from Waste Electronic Scrap using Thiobacillus Ferrooxidans*, J. Korean Inst. Resources Recycling, **14**(1), pp. 17-25.
- Ahn, J. W. and Seo, J. S., 2009: *Nitric acid leaching of electronic scraps and the removal of free nitric acid from the leaching solution for the recovery of copper and tin*, J. Korean Inst. Resources Recycling, **18**(5), pp. 44-51.
- Kwon, E. H. et al., 2005: *Melting of PCB scrap for the Extraction of Metallic Components*, Korean J. Materials Research, **15**(1), pp. 31-36.
- Kim, B. S., Lee, J. C. and Lee, K. H., 2007: *A Novel Process for Extracting Valuable Metals from Waste Electric and Electronic Scrap Using Waste Copper Slag by a High Temperature Melting Method*, J. Korean Inst. Resources Recycling, **16**(3), pp. 27-33.
- Shin, D. Y. et al., 2008: *Pyro-metallurgical Treatment of used OA Parts for the Recovery of Valuable Metals*, J. Korean Inst. Resources Recycling, **17**(2), pp. 46-54.
- Park, J. H., 2011: *Recovery of Au, Ag, and Ni from PCB Wastes by CaF<sub>2</sub>-Containing Slag*, J. Korean Inst. Resources Recycling, **20**(4), pp. 58-64.
- Matsuzaki, K. et al., 2000: *Distribution Equilibria of Pb and Cu between CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Melts and Liquid Copper*, Metall.Trans. B, **31B**, pp 1261-1266.
- J. Palacios and D.R. Gaskell 1993: *The solubility of copper in lime-saturated and calcium ferrite-saturated liquid iron oxide*, Metall. Trans. B, **24B**, pp. 265-69.
- Nakasaki, M., Hasegawa, M., and Iwase, M., 2006: *Variation of Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup> Equilibrium with Basicity of Oxide Melts*, Metall. Trans. B, **37B**, pp 949-957.
- Kim, H. G. and Sohn, H. Y., 1998: *Effects of CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and MgO Additions on the Copper Solubility, Ferric/Ferrous Ratio, and Minor-Element Behavior of Iron-Silicate Slags*, Metall.Trans. B, **29B**, pp. 583-590.
- Jang, D. Y. and Min, D. J., 2011: *The Thermodynamic Behavior of Copper in the CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Slag System*, Metall. Mater. Trans. B, **42B**, pp. 1144-1149.
- Ruddle, R. W., Taylor, B., and Bates, A. P., 1966: *The solubility of copper in iron silicate slags*, Trans. Inst. Min. Metall., **75**, pp. C1-12.



### 한 보 람

- 영남대학교 재료공학부 학사
- 경북대학교 대학원 금속신소재공학과 석사
- 현재 대구텍 기술연구소



### 김 응 진

- 경북대학교 금속신소재공학과 학사
- 경북대학교 대학원 금속신소재공학과 석사
- 현재 (주)풍산 기술연구소

### 손 호 상

- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 교수
- 당 학회지 제11권 6호 참조

**《광 고》** 본學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- \* EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원  
(The 2th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- \* 학회지 합본집 I-X 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)  
(I: 통권 제1호~제10호, II: 통권 제11호~제20호, III: 통권 제21호~제30호, IV: 통권 제31~제40호, V: 통권 제41호~제50호, VI: 통권 제51호~제62호, VII: 통권 제63호~제74호, VIII: 통권 제75호~제86호 IX: 통권 제87호~제98호, X: 통권 제99호~제110호)
- \* 한·일자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- \* 한·미자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- \* 자원리사이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- \* '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價格 : 15,000원
- \* 日本의 리사이클링 産業(1998년 1월) 395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
- \* EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價格 : 100,000원  
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 오재현의 자동차 리사이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價格 : 15,000원, 발행처-文知社
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2004년) 578쪽, 價格 : 27,000원, 발행처-淸文閣
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2009년) 592쪽, 價格 : 30,000원, 발행처-淸文閣
- \* EARTH 2009 Proceeding (2009) 911쪽, 價格 : 100,000원  
(The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)