

螢石 含有 슬래그 處理를 통한 PCB 스크랩으로부터 Au, Ag, Ni의 회수에 관한 研究†

*朴 柱 炫

蔚山大學校 尖端素材工學部

Recovery of Au, Ag, and Ni from PCB Wastes by CaF₂-containing Slag†

*Joo Hyun Park

School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

요 약

고온에서 PCB 처리를 통한 Au, Ag와 같은 귀금속뿐 아니라 Ni과 같은 주요 희유금속을 회수하기 위한 기초연구로서 CaO-Al₂O₃(-SiO₂) 및 CaO-SiO₂-CaF₂ 슬래그를 이용하여 Au, Ag, Ni의 회수거동을 관찰하였다. 슬래그 투입 없이 PCB만으로 용융실험을 수행한 결과 PCB는 거의 용융되지 않았으며, 이로부터 유도전류를 이용한 용융을 촉진할 뿐 아니라 유가금속의 회수를 위해서는 Cu와 같은 적절한 base metal이 필요함을 확인하였다. 본 연구결과, PCB/Cu ratio는 1 이하가 바람직할 것으로 생각된다. CaO-Al₂O₃(-SiO₂) 및 CaO-SiO₂-CaF₂ 슬래그를 투입한 결과, CaF₂를 함유하는 fluorosilicate계 슬래그가 calcium aluminate계 슬래그보다 용점과 점도가 낮게 제어되었으며, 이로부터 Au, Ag, Ni의 높은 분배비를 얻을 수 있었다. 점도가 낮은 CaF₂ 함유 슬래그 적용 시 높은 유가금속 회수율은 슬래그 내에서 각 금속입자의 등속침강속도가 상승하기 때문인 것으로 평가되었다.

주제어 : 금속회수, 인쇄회로기판, 슬래그, 점도, 등속침강속도

Abstract

Recovery of novel metals such as Au, Ag and Ni from wastes PCB was investigated by slag treatments. The CaO-Al₂O₃(-SiO₂) and CaO-SiO₂-CaF₂ slags were employed in the present study. The PCB/Cu ratio is recommended to be lower than unity. The use of CaO-SiO₂-CaF₂ slag provided the more higher yield of Au, Ag and Ni than the CaO-Al₂O₃(-SiO₂) slag did, which was mainly due to the lower melting point and the viscosity of CaF₂-containing slag. The terminal descending velocity of metal droplets in the slag phase increased with decreasing slag viscosity.

Key words : Metal recovery, PCB (Printed circuit board), Slag, Viscosity, Terminal velocity

1. 서 론

우리나라의 IT 산업은 급속히 발전하고 있으며, 특히 mobile 기능 및 복합적 기능을 보유한 휴대기기의 수요는 지속적으로 증가하고 있으나, 휴대기기에 존재하는 희유/유가금속의 재자원화 기술은 그 요구 수준에 비해 매우 미진한 상황이다. 소재 생산기술 기반이 취약한 우

리나라는 대부분의 소재를 수입에 의존하고 있다. 소재 생산기술은 화학공학, 금속재료, 물리, 화학 및 설비기술의 복합 산업으로 이와 가장 밀접한 산업은 금속의 제련 및 정련기술에 기반을 둔다고 볼 수 있다. Mobile 기기의 수요는 향후 지속 증가할 추세에 있으며, 재생 기술 및 소재화를 통한 CO₂ 발생 저감 등이 필요하다.

전자스크랩 중 인쇄회로기판은 (printed circuit board, 이하 PCB) Cu, Fe, Ni, Al 등의 유가금속 뿐 아니라 Au, Ag, Pd 등 귀금속 성분 또한 다량 함유하고 있으므로 효율적인 회수방안이 검토되어왔으며 이에

† 2011년 6월 16일 접수, 2011년 7월 11일 1차수정

2011년 7월 18일 수리

*E-mail: basicity@mail.ulsan.ac.kr

관한 연구가 꾸준히 보고되고 있다.¹⁻⁶⁾ PCB로부터 유가 금속/귀금속 회수를 위한 방법으로는 건식 및 습식제련 기술과 전기화학적 방법이 제안되고 있으나, 최근에는 이들 세부기술의 혼합공정 설계를 통해 금속 회수를 향상과 동시에 환경 친화적인 프로세스 구축이 가능할 것으로 인식되고 있다.^{2,3)}

고온 건식제련 기술의 접목을 위해서는 기존에 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO (CMAS) 슬래그와 CaO-FeO-SiO₂ (CFS) 슬래그가 검토되었다.^{2,3,5)} 전자의 경우 환원성 분위기에서 PCB 용융 및 유가금속 회수반응을 촉진할 수 있는 반면, 후자의 경우 FeO의 함유로 인해 비교적 산화성 분위기에서 반응이 진행하게 된다. 따라서, 귀금속 농축 및 금속/슬래그 분리성은 CMAS 슬래그가 더 우수한 것으로 보고된 바 있다. 또한, CMAS 슬래그를 이용하여 PCB 용해실험을 수행한 결과, 슬래그의 점성이 낮을수록 금속회수율이 높아짐을 보고하였다. 또한 일정 수준의 교반력이 가해지면 금속 회수율이 증가되는 현상도 보고된 바 있다.^{2,3,5)}

전술한 바와 같이 건식제련기술의 도입을 통한 PCB 처리공정을 위해서는 용점 및 점성이 낮은 슬래그의 설계가 필요하며 특히 산화성 슬래그보다는 환원성 슬래그를 이용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 그러나, 전술한 기존의 연구에서는 CMAS계 슬래그를 사용하였으므로 저점도 슬래그 설계에 제한이 있을 것으로 생각되며, 본 연구에서는 용점 및 점도 강하에 효과적인 형석 (CaF₂) 함유 CaO-SiO₂-CaF₂ 슬래그를 이용하여 PCB 용해 및 유가금속 회수거동을 살펴보고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 적정 PCB 처리조건 및 유가금속 회수조건을 도출하기 위해 총 3차례에 걸쳐 용융 및 금속 회수 실험을 진행하였다.

2.1. 1차 용융실험

1차 용융실험에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 폐 휴대폰으로부터 분리된 PCB를 10~20 mm 크기로 파쇄한 후 고순도 (99.99%) Cu와 각각 130 g, 45 g의 비울로 alumina 도가니에 장입하여 1500°C, Ar 분위기에서 2시간 동안 용융실험을 진행하였다. 용융실험을 위해서 Fig. 2에 보인 고주파 정밀유도용해로를 이용하였으며, Ar 가스는 불순물로 존재하는 산소를 제거하게 위해 Mg scrap과 450°C에서 반응시킨 후 석영 chamber 내



Fig. 1. Shredded PCB chips.

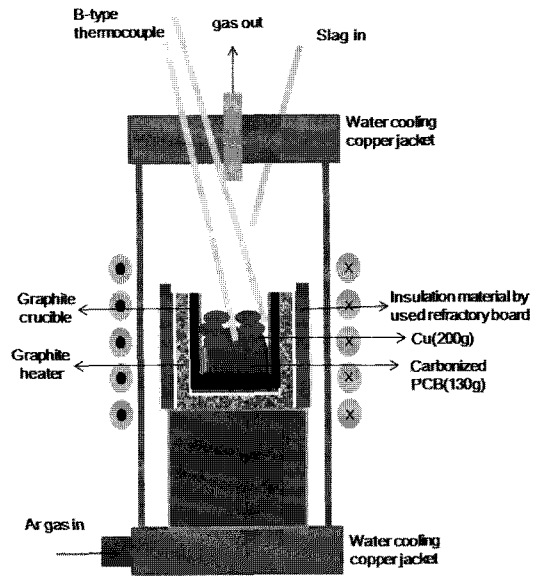


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

부로 공급하였다. 1500°C에서 2시간 동안 용융 후 유도로 전원을 차단하여 로냉하였으며, 포집금속으로 사용한 Cu 내에 잔류한 Au, Ag, Ni의 함량을 유도결합 플라즈마 (ICP-AES) 분석법으로 정량하였다.

2.2. 2차 용융실험

2차 용융실험에서는 1차 실험 대비 슬래그 첨가의 효과를 검증하기 위해 CaO-Al₂O₃ (wt%CaO/wt%Al₂O₃ = 1.0) flux를 1600°C에서 백금도가니를 이용하여 제조하였다. 또한, PCB/Cu ratio를 130/45(= 2.9)에서 130/200(= 0.7)로 변경하여 PCB 용해 후 유가금속 회수를 위한 포집금속의 양을 충분히 제공하였다. 실험은 1차 실험에서와 동일한 유도도와 alumina 도가니를 활용하여 진행하였다. 1500°C에서 PCB와 Cu의 용융을 진행하고, 1시간 경과 후 미리 제조해 둔 CaO-Al₂O₃ flux 12 g

을 투입하였다. Flux 투입 후 1시간을 추가적으로 유지한 후 1차 실험에서와 동일한 방법으로 냉각, 시편채취, 성분분석 과정을 반복하였다. 실험 후 슬래그 조성은 X선 형광 (XRF) 분석법으로 분석하였다.

2.3. 3차 용융실험

3차 용융실험에서는 슬래그 점도를 최대한 낮게 유지하기 위해 $\text{CaO-SiO}_2\text{-}20\text{wt}\%\text{CaF}_2$ ($\text{wt}\%\text{CaO}/\text{wt}\%\text{SiO}_2 = 1.0$) flux를 사용하였으며, 용융 과정이 진행되는 동안 환원성 분위기를 유지함과 동시에 슬래그 조성의 변동을 최소화하기 위해 graphite 도가니를 사용하였다. 이 때 $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ flux는 백금 도가니를 이용하여 사전에 용융하여 제작하였다. 또한, PCB의 전처리 효과를 검증하기 위해 PCB를 500°C에서 무산소 소각 처리한 후 용융 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PCB 용융거동

1차 용융 실험에서는 PCB/Cu 중량비를 2.9로 하여 유가금속 포집을 위한 포집금속인 Cu의 비율이 매우 낮을 때 PCB 용융거동을 관찰하였다. 그림 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1500°C에서 실험하였음에도 불구하고 PCB의 용융 현상은 일어나지 않고 조각된 형태로 잔존함을 확인하였다. 초기에 장입한 Cu를 포함한 Cu melt만 도가니 바닥에 소량 잔류하였으며, 이는 PCB/Cu 비가 상대적으로 높아 유도가열 효율이 비교적 낮았기 때문으로 판단된다.

따라서, PCB의 건식처리를 위해서는 PCB/Cu 비가

일정수준 이하로 낮아야 하며, PCB를 구성하는 금속 성분의 산화에 의해 발생하는 산화물 성분과 함께 슬래그 용점을 낮게 유지할 수 있는 flux의 투입이 필수적임을 확인할 수 있다.

3.2. PCB 용융 및 금속회수에 미치는 PCB/Cu 비와 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ flux 투입의 영향

2차 용융 실험에서는 PCB/Cu 중량비를 0.7로 하여 유가금속 포집을 위한 Cu를 증량하였으며, 이는 도가니 크기 및 용융 구리의 밀도를 고려하여 충분한 (20 mm liquid pool height) 용융 포집금속 형성 조건에 해당한다. 또한, 용점이 1450°C 정도로 비교적 낮은 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ ($C/A = 1.0$) flux를 투입하여 용융 슬래그 형성에 의한 용융 및 금속회수 효율을 평가하였다. Fig. 4에 보인 바와 같이 PCB/Cu 비를 저감한 결과, PCB 용융은 효율적으로 이루어졌으나 슬래그 내부에 여전히 많은 metal droplet들이 분산되어 있는 것이 관찰되었다.

슬래그 중에 분산되어 있는 metal droplet을 분리한 후 슬래그 성분 분석 결과, alumina 도가니를 사용하였음에도 불구하고 Fig. 5에 보인 바와 같이 많은 양의 silica가 생성되었음이 확인되었다. 이는 기존의 연구에서 PCB 용융 시 금속 Si의 산화에 의한 silica 성분 증가 경향과 양호한 일치치를 보이는 결과라 할 수 있다.^{2,3,5)} 이 때 슬래그의 점도는 약 10 poise에서 30 poise까지 증가하며,⁷⁾ 이로 인해 슬래그 내의 metal droplet의 침강에 대한 마찰저항력이 증가하였음을 시사한다. 이에 관한 정량적인 논의를 3.4절에서 하고자 한다.

Fig. 6에 Cu 포집금속, 슬래그, 슬래그 중 metal droplet내에 포함되어 있는 Ag, Au, Ni의 농도를 나타



Fig. 3. Morphology of reacted PCB chips without slag treatment.



Fig. 4. Morphology of Cu metal after PCB melting experiment with $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ flux.

내었다. Cu 포집금속 중 Ag, Au, Ni의 농도는 각각 510, 220, 6090 ppm이며 슬래그 내에도 유사한 수준으로 분배되어 있다. 그러나 슬래그 중 metal droplet에는

각각 490, 2000, 28000 ppm으로서 대부분의 Ni은 metal droplet에 농축되어 있으며 1500°C에서 flux 투입 후 1시간 동안 반응하는 중에도 미처 Cu 포집금속 쪽으로 침강하지 못한 것으로 판단된다. 이는 Au, Ag, Ni 순으로 비중이 감소하기 때문인 것으로 생각되며, 이에 관한 정량적인 논의를 3.4절에서 하고자 한다.

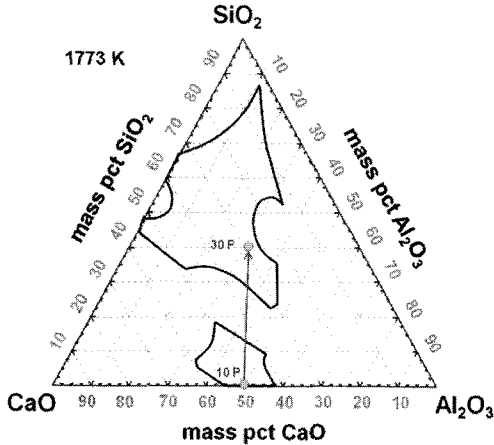


Fig. 5. Change of composition and viscosity of CaO-Al₂O₃ (-SiO₂) slag at 1773 K.

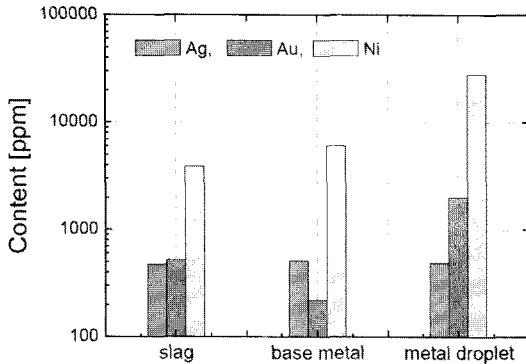


Fig. 6. Content of Ag, Au, Ni in slag, base Cu and dispersed metal droplets in the second PCB melting experiment.

3.3. PCB 용융 및 금속회수에 미치는 CaO-SiO₂-CaF₂ flux의 영향

3차 용융실험에서는 슬래그의 유동성을 극대화할 목적으로 1500°C에서 점성을 1 poise이하로 제어할 수 있는 CaF₂ 함유 flux를 투입하여 금속 회수거동을 평가하였다. Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 저용점, 저점도에 의한 유리질의 균일 슬래그상이 형성되었음에도 불구하고 1500°C에서 2시간 용융 후 도가니 내부에는 미용해 잔류물이 슬래그 층 위에 부유하고 있음이 확인되었다. Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 이 미용해 잔류물은 주로 비금속 함유상으로 보이며, 정량적인 성상 분석을 위해서는 PCB의 구성요소에 관한 정량적인 원료분석이 요구된다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 CaO-SiO₂-20wt%CaF₂ (C/S = 1.0) 슬래그의 점성은 약 0.5 poise로서 기존에 PCB 처리용 flux로 제안된 CaO-SiO₂, CaO-Al₂O₃, CaO-SiO₂-Al₂O₃, CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ flux 대비 매우 낮은 점도를 유지할 수 있음을 알 수 있다.⁸⁾ Fig. 9에 CaO-Al₂O₃(-SiO₂) flux와 CaO-SiO₂-CaF₂ flux를 사용하였을 때 Cu metal과 슬래그간의 Au, Ag, Ni의 분배비를 나타내었다. 이 때 metal/slag간 주요 원소의 분배비, L_i 는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$L_i = \frac{[wt\%i]_{Cu\ alloy}}{[wt\%i]_{slag}} \quad (i = Ag, Au, Ni) \quad (1)$$

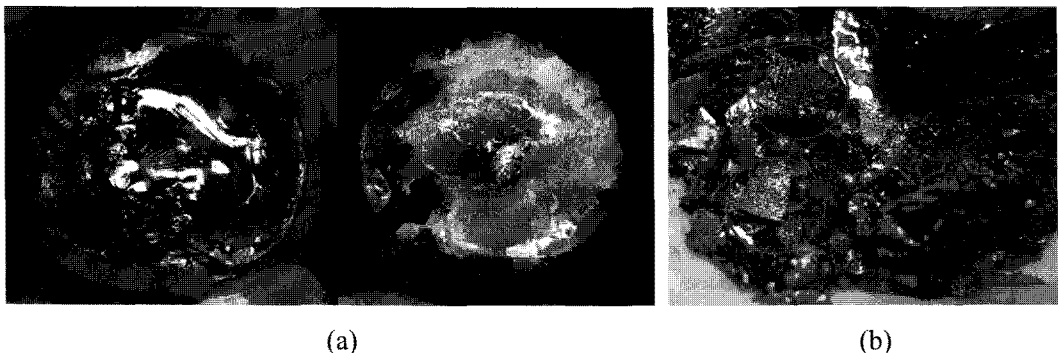


Fig. 7. Morphology of glassy slag and base Cu metal (a) and floated residue (b) in the third PCB melting experiment.

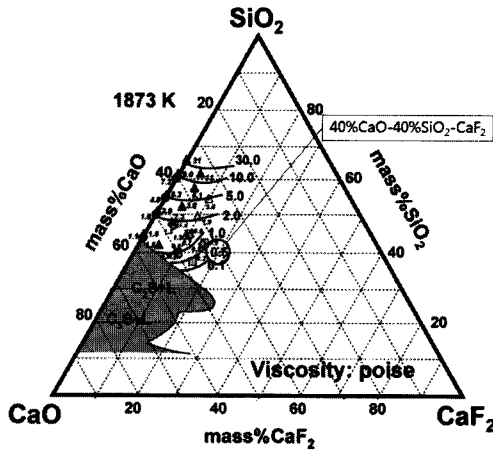


Fig. 8. Phase diagram of CaO-SiO₂-CaF₂ slag and iso-viscosity contours at 1773 K.

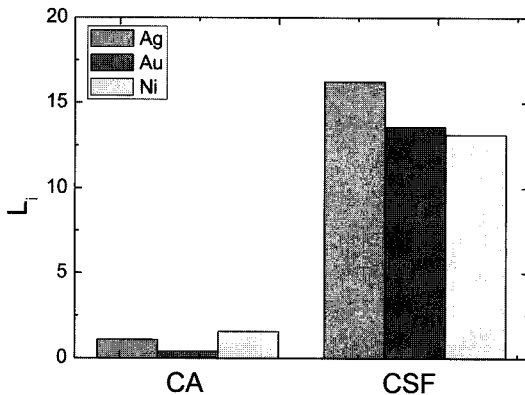


Fig. 9. Distribution ratio of Ag, Au, Ni between slag and metal phase at 1773 K.

Fig. 9에서 보듯이 CaO-Al₂O₃-(SiO₂) flux를 사용하였을 때 각 원소의 분배비는 2 이하의 낮은 값을 보이고 있으나 CaO-SiO₂-CaF₂ flux를 사용하였을 때 13 이상의 높은 값을 보이고 있다. 따라서 PCB의 용융 처리공정에서 금속 회수율을 극대화하기 위해서는 저용점, 저점도 슬래그 형성이 필수적이며, 이를 위해 CaF₂를 소량 함유하는 flux 설계가 필요할 것으로 생각된다.

3.4. 슬래그 중 metal droplet의 침강속도에 관한 Stokes' analysis

전술한 실험결과로부터 PCB의 용융처리 공정에서 슬래그 중 metal droplet의 침강을 효율적으로 유도하는 것이 매우 중요한 조업인자가 될 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 슬래그 중 metal droplet의

등속침강속도 (terminal velocity) 계산을 수행하였다. 이 때 슬래그 내의 metal droplet은 구형이라 가정하고, 입자에 작용하는 중력, 부력, 마찰저항력 간의 균형관계가 존재하며, 슬래그 용체에 작용하는 교반력이 적어 Stokes regime 가정 시 등속침강속도는 식 (2)와 같이 정리된다.⁹⁾

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{r^2(\rho_m - \rho_s)g}{\eta} \tag{2}$$

여기서 v_t : terminal velocity, r : metal droplet 반지름, ρ_m : metal droplet의 밀도, ρ_s : 슬래그의 밀도, g : 중력 가속도 (9.8 m/s²), η : 슬래그의 점도를 의미한다. 식 (2)로부터 슬래그 중 metal droplet의 등속침강속도는 입자의 크기 및 슬래그와 금속의 밀도차에 비례하고, 슬래그의 점도에 반비례함을 알 수 있다.

본 연구에서는 1500°C에서 metal droplet의 밀도를 보다 정량적으로 평가하기 위해 각 금속원소의 밀도를 식 (3)으로부터 계산하였다.¹⁰⁾

$$\rho = \rho_m + \Lambda(T - T_m), \quad \Lambda = \frac{(\rho_m - \rho_b)}{(T_m - T_b)} \tag{3}$$

여기서 T_m , ρ_m 은 각각 용점 및 용점에서 순금속의 밀도를 나타내며, T_b , ρ_b 는 각각 끓는점 및 끓는점에서 순금속의 밀도를 나타낸다. 이렇게 얻어진 각 metal의 밀도를 Table 1에 나타내었다.

따라서, CaO-Al₂O₃-(SiO₂)와 CaO-SiO₂-CaF₂ 슬래그 중 각 순금속 용융 입자의 크기에 따른 등속침강속도를 계산할 수 있으며, 이를 Fig. 10에 나타내었다. 이 때 본 연구에서 육안으로 관찰된 금속입자 크기는 최대 1 mm 이하였으므로, 이를 반영하여 계산결과를 비교하였다. Fig. 10(a)에서 보듯이 calcium aluminate계 슬래그 중 각 금속 입자의 침강속도는 최대 1.0 mm 일 때 Au가 약 7 mm/s의 속도를 가지며, Ag, Ni, Cu 입자는 3~4 mm/s의 속도로 침강함을 알 수 있다. 반면, Fig. 10(b)에서 보듯이 fluorosilicate계 슬래그 중 각 금속 입자의 침강속도는 1.0 mm 기준으로 Au가 약 30 cm/s 이상, Ag, Ni, Cu 입자는 15 cm/s 수준으로 슬래그 중에 거의 잔류하지 않음을 확인할 수 있다.

결론적으로, PCB의 용융처리 공정개발을 위해서는 metal droplet의 침강을 효율적으로 유도해야하며, 이를 위해서는 저용점, 저점도 슬래그의 설계가 필수적임을 알 수 있다. 따라서 기존에 보고된 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO계 슬래그 뿐 아니라 CaO-SiO₂-CaF₂계 슬래그가

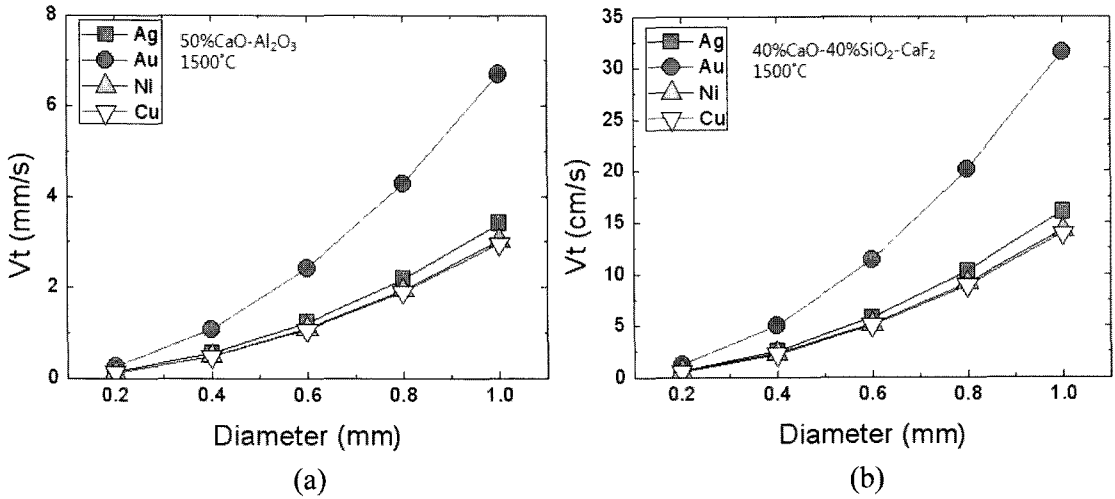


Fig. 10. Calculated terminal velocity of pure metal droplets in CaO-Al₂O₃ (a) and CaO-SiO₂-CaF₂ (b) slag systems at 1773 K.

Table 1. Calculated density of pure metals at 1773 K

Density at 1773K (kg/m ³)			
ρ_{Ag}	ρ_{Au}	ρ_{Ni}	ρ_{Cu}
8840.4	17369.2	7846.5	7668.0

유기금속 회수에 매우 효과적임을 검증할 수 있었다.

4. 결 론

고온에서 PCB 처리를 통한 Au, Ag와 같은 귀금속 뿐 아니라 Ni과 같은 주요 회유금속을 회수하기 위한 기초연구로서 CaO-Al₂O₃(-SiO₂) 슬래그 및 상대적으로 점도가 낮은 CaO-SiO₂-CaF₂ 슬래그를 이용하여 Au, Ag, Ni의 회수거동을 살펴보았으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) PCB의 고온 용융처리를 위해 슬래그 투입 없이 PCB만으로 용융실험을 수행한 결과 PCB는 거의 용융되지 않았으며, 이로부터 유도전류를 이용한 용융을 촉진할 뿐 아니라 유기금속의 포집을 위해서는 Cu와 같은 적절한 포집금속이 필요함을 확인하였다. 또한, PCB/Cu ratio는 1 이하가 적절하였다.

2) PCB의 용융 촉진을 위해 CaO-Al₂O₃(-SiO₂) 및 CaO-SiO₂-CaF₂ 슬래그를 투입한 결과, CaF₂를 함유하는 fluorosilicate계 슬래그가 calcium aluminate계 슬래그보다 용점과 점도가 낮게 제어되었으며, 이로부터 Au,

Ag, Ni의 높은 분배비를 얻을 수 있었다.

3) 점도가 낮은 CaF₂ 함유 슬래그 적용 시 높은 유기금속 회수율은 슬래그 내에서 각 금속입자의 등속침강속도가 상승하기 때문인 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 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. Kor. Inst. Resources Recycling 11(6), pp. 3-11.
2. B.S. Kim, J.C. Lee, S.P. Seo, Y.K. Park and H.Y. Sohn, 2004: A process for extracting precious metals from spent printed circuit boards and automobile catalysts, JOM 56(12), pp. 55-58.
3. B.S. Kim, 2005: Process development for recycling valuable metals from obsolete electric and electronic scrap, Trends in Met. & Mater. Eng. 18(4), pp. 21-29.
4. B.C. Ban, J.Y. Song, J.Y. Lim, S.K. Wang, K.G. An and D.S. Kim, 2005: Studies on the reuse of waste printed circuit board as an additive for cement mortar, J. Environ. Sci. Health, Part A 40(3), 645-656.
5. D.Y. Shin, S.D. Lee, H.B. Jeong, B.D. You, J.H. Han and J.K. Jung, 2008: Pyro-metallurgical treatment of used OA parts for the recovery of valuable metals, J. Kor. Inst. Resources Recycling 17(2), pp. 46-54.
6. J.H. Oh, J.S. Kim, S.M. Moon, J.W. Min, 2010: Urban mine resources and metals recycling industries in Japan, J. Kor. Inst. Resources Recycling 19(6), pp. 11-26.

7. K.C. Mills, 1995: Viscosity of molten slags, Slag Atlas, 2nd edition, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, Germany, pp. 349-402.
8. J.H. Park and D.J. Min, 2007: Discussion on "The estimation of the iso-viscosity lines in molten $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$ system", ISIJ Int. **47(9)**, pp. 1368-1369.
9. D.R. Poirier and G.H. Geiger, 1994: Laminar flow and momentum equation, Transport Phenomena in Materials Processing, TMS, Warrendale, PA, pp. 39-75.
10. T. Iida and R.I.L. Guthrie, 1993: Density, The Physical Properties of Liquid Metals, Oxford University Press, Oxford, pp. 47-77.



朴 柱 炫

- 1997년 연세대학교 금속공학과 공학사
- 1999년 연세대학교 금속공학과 공학석사
- 2002년 연세대학교 금속공학과 공학박사
- 2008년 포스코 기술연구원 책임연구원
- 현재 울산대학교 첨단소재공학부 교수

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

- | | |
|---|-----------------------------|
| * EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽,
(The 2th International Symposium on East Asian Recycling Technology) | 價 格 : 20,000원 |
| * 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, | 價 格 : 15,000원 |
| * 학회지 합본집 I~VIII
(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) | 價 格 : 40,000원, 50,000원(비회원) |
| * 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,
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology) | 價 格 : 100,000원 |
| * 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 |