

저품위 금합금의 PbO와 CaO를 이용한 건식 정련 공정

송정호, 송오성*
서울시립대학교 신소재공학과

Pyrometallurgy Process for a Low Graded Gold Alloy with PbO and CaO

Jeongho Song, Ohsung Song*

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

요약 본 연구에서는 저품위인 35wt% 금합금에 대해 80.0wt% 이상의 Au를 얻기 위한 건식 정련 공정을 제안하였다. Au35wt%-Ag5wt%-Cu60wt%의 조성을 가진 금합금에 대해 PbO/(PbO+CaO)의 혼합비를 각각 0~1로 변화시키고 플럭스/금합금의 무게비는 1/2로 하여 1200°C-5시간의 열처리를 진행하였다. 이때 공정 전, 후 시료의 조성 변화는 energy dispersive X-ray spectroscopy(EDS)로 확인하고, 공정이 완료된 후 분리된 플럭스 금속 원소 성분은 time of flight secondary ion mass spectrometry(ToF-SIMS)로 확인하였다. EDS분석 결과 플럭스의 비율이 1(PbO 단일)인 경우 Au의 함량이 35.0wt%에서 86.7wt%로 가장 크게 향상되었고, 다른 플럭스 조성의 경우도 84wt% 이상으로 정련이 가능하였다. 또한 2/3 혼합비의 플럭스에서 Ag가 플럭스부로 빠져나가는 손실이 가장 적었다. 플럭스부의 ToF-SIMS 분석 결과 플럭스의 비율이 1, 0 일 때 Au⁺의 특성 피크의 강도가 각각 349, 37로 측정되었다. Au의 손실을 고려하였을 때 CaO 단일 플럭스의 사용이 더 유리할 수 있었으나, 이 정도의 신뢰강도는 무시할 수 있는 정도로 판단되었다. 따라서 혼합플럭스를 이용한 건식 열처리를 통해 효과적인 금의 정련이 가능하여 경제적인 습식제련의 전처리 공정으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract We proposed a pyrometallurgical process to achieve gold alloy with an Au content of more than 80wt% from low grade (<35wt%) gold alloys. We performed the heat treatment at a temperature of 1200°C for 5 hrs using Au35wt%-Ag5wt%-Cu60wt% gold alloys mixed with 1/2 weighed PbO and CaO flux by varying the ratio of PbO/(PbO+CaO) from 0 to 1. We investigated the change in content of the samples with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and time of flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS). The EDS results showed that the Au content increased from 35.0wt% in the PbO-only sample to 86.7wt% (in the PbO/(PbO+CaO) 1:1 sample), while the other samples achieved more than 84wt%. In addition, the 2/3 flux ratio sample showed the lowest Ag loss into the flux. In the ToF-SIMS results, the PbO only and CaO only fluxes had Au⁺ peak intensities of 349 and 37, respectively. Although the CaO-only flux might be more favorable considering the loss of Au into the flux, we concluded that the amount of Au lost into the flux could be ignored. Our results imply that the pyrometallurgical process using a mixed flux is an effective hydrometallurgical process.

Keywords : EDS, flux, gold alloy, pyrometallurgy, ToF-SIMS

1. 서론

금은 내식성이 매우 우수하고 전기 전도도가 높아 전

자패키징에 주로 사용되어 왔으며, 또한 색상이 미려하고 주조가 용이하여 인류가 사용한 가장 오래된 장신구 소재 중 하나이다[1,2]. 여러 가지 산업용도로 사용되는

본 성과물은 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학연협력 기술개발사업(C0261970)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Ohsung Song(Univ. of Seoul.)

Tel: +82-2-6490-5780 email: songos@uos.ac.kr

Received January 5, 2017

Revised (1st February 23, 2017, 2nd February 24, 2017)

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

금은 2016년 현재 평균 가격이 1256.9\$/oz로 2006년에 비해 약 2배 이상 급등하였다[3,4].

이러한 금시세의 지속적인 상승에 따라 수집된 고금으로부터 재사용을 위한 금의 회수 공정 연구가 활발하게 진행되고 있다. 고금은 주로 전자스크랩과 주얼리분야로부터 발생되며, 이러한 금의 정련공정은 건식과 습식으로 나뉜다[5].

사용 후 폐기된 전자스크랩, 특히 PCB(printed circuit boards)의 경우 Au, Ag, Cu 등 다양한 유가금속이 포함되어 있기 때문에 이들을 수집하여 회수하는 연구가 활발하다[6]. 통상적인 전자부품 내 PCB기판에서 약 1000ppm의 Au가 포함되어 있으며, 이를 가격으로 환산할 경우 회수할 수 있는 전체 유가금속 중 87%를 차지한다[7,8]. 전자스크랩 분야에서는 각종 유가금속의 회수를 위해 전자폐기물 전체를 퍼니스에 모두 용해시키는 건식정련법을 주로 채택하고 있으며, Au는 비교적 소량 포함되어 금회수를 위한 시작물의 경우 저품위인 특징이 있다[7].

전자스크랩을 위한 Au의 건식정련법의 경우 Veldhuizen 등[9]은 전자폐기물 전체를 1250℃의 고온의 도가니에 투입하여 가열하고 해당 용탕의 후처리 작업을 통해 유가금속의 회수를 성공적으로 보고한 바 있다. 그러나 Jadhav 등[10]은 건식정련의 경우 고온으로의 가열이 필요하고 가열 시 발생하는 유해 가스 및 이를 처리하기 위한 중화시스템이 필요하여 습식제련에 비해 경제적으로 불리하다고 보고하였다.

한편 주얼리 산업의 경우 수집된 고금에 대해 소량으로 제련하므로 건식제련이 불리하여 주로 왕수법을 사용한 습식제련법을 이용한다.

왕수법은 금을 제련하기 위한 대표적인 습식제련 방법으로, 왕수 내 Au가 포함된 시작물을 투입하여 $Au + HNO_3 + 4HCl \rightarrow HAuCl_4 + NO + 2H_2O$ 의 반응식에 의해 Au를 이온화시키고 후처리를 통해 다시 Au를 환원 추출하는 방법으로 99.9%의 고품위 순금으로 회수하는 공정이다[11].

그러나 왕수법의 경우 Au 외에 Ag, Cu도 왕수에 의해 산화되면서 인체에 매우 유독한 NO_x 가스가 발생하는 문제점이 보고되고 있다[8]. 따라서 가급적 이러한 불순물의 상대적 함량이 적은 고품위 금합금에 대해 왕수에 의한 습식 정련이 유리하다.

그러나 주얼리 분야에서는 일반적으로 14, 18K 합금

이 사용되었으나, 최근 금값의 상승에 따라 이보다 순도가 낮은 5, 8K 함량의 제품도 많이 생산되는 상황이고, 이러한 저함량 금제품이 생산됨에 따라 Au35wt% 정도의 저함량 스크랩이 다수 발생한다[12].

이러한 저함량의 고금 회수 시 필연적으로 발생하는 NO_x 유해가스를 중화시키기 위한 비용의 절감과 친환경적인 정련을 위해서는 역시 저품위보다 고품위의 Au가 포함된 시작물을 기존의 습식제련 공정에 투입하는 것이 유리하다. 이에 따라 수집된 시작물에 대해 가격이 높은 Au와 Ag를 제외한 주 합금 원소인 Cu를 선택적으로 제거하는 전처리 공정이 필요하다.

Au의 함량 증가를 위해서는 회취법(cupellation method)을 응용한 건식제련이 사용될 수 있다. 회취법은 Au의 순도를 확인하는 방법 중 하나로 시료의 정확한 무게를 칭량하고 Au 이외의 불필요한 원소들은 산화납(PbO)을 이용하여 1100℃에서 열처리 하여 제거한 후, 잔류하는 은을 질산으로 선택적으로 제거하는 공정이다[13].

회취법은 1500℃ 이상에서 용융처리 하는 일반적인 건식정련에 비해서 1100℃로 비교적 저온영역의 용융처리와 상대적으로 짧은 산화시간을 가진 방법으로 경제적으로 저함량 시작물의 금의 함량 증가가 가능하다.

주얼리용 저함량 고금에서 주로 제거되어야 할 Cu 원소에 대해 1100℃ 정도에서 쉽게 용융될 수 있는 산화물은 PbO와 CaO가 가능하다. PbO-CaO 상태도에 의하면 확인해 볼 경우 구리의 용점인 1085℃에서 모두 액상형태로 존재하는 것을 알 수 있으며, CaO 경우 용융 상태의 구리와 효과적인 액상반응을 통하여 Cu의 효과적인 제거가 가능하다[14,15].

이에 따라 본 연구에서는 Au35wt%-Ag5wt%-Cu60wt%의 저품위 금합금을 가정하여 습식제련의 전처리 공정으로 PbO, CaO 플럭스의 조성을 달리하며 Au의 함량을 80%까지 증가시킬 수 있는 가능성과 이 때 Au, Ag의 손실(loss) 정도를 정량적으로 확인하였다.

2. 실험방법

Au35wt%-Ag5wt%-Cu60wt%의 조성을 가진 금합금재를 제조하기 위해 각 합금원소를 비율에 맞게 칭량하고 마그네시아 도가니 내에서 LPG-산소 토치를 이용하

여 합금을 진행하였다.

그림 1은 플럭스와 시편의 준비 방법에 대한 모식도 및 열처리 후 실제 모습을 나타낸 것이다. (a)에 나타난 합금시료(alloy sample)는 진술한 바와 같이 0.5g의 Au35wt%-Ag5wt%-Cu60wt% 시료를 준비하여 1ml 용량의 알루미늄 도가니에 위치시키고, 그 상부에 0.25g의 PbO와 CaO 혼합 분말 플럭스를 상부에 투입하였다. 이때 PbO/(PbO+CaO)의 혼합비가 각각 0, 1/3, 1/2, 2/3, 1이 되도록 하였다.

준비된 플럭스-금합금재를 수퍼칸탈 발열체가 탑재된 대기열처리로(써모텍 사, SK1700-B30 모델)를 이용하여 승온속도 10°C/min로 승온시키고 이후 1200°C에서 5시간 유지하여 열처리를 진행하여 용융된 금속시료와 산화물 플럭스가 반응하도록 하였다.

열처리 이후에는 확산과 비중차에 의해 (b)와 같이 Cu가 다량 고용된 플럭스부와 Au의 함량이 증가된 금속부로 나누어지게 된다. 이 때 (c)와 같이 금속은 용융되어 응고 시 표면장력을 줄이기 위해 구형으로 응고되고 그 상부에는 비중차로 인해 가벼운 플럭스가 층상으로 존재하며, 이들은 서로 고용도가 없어서 물리적 충격으로 분리가 가능하였다.

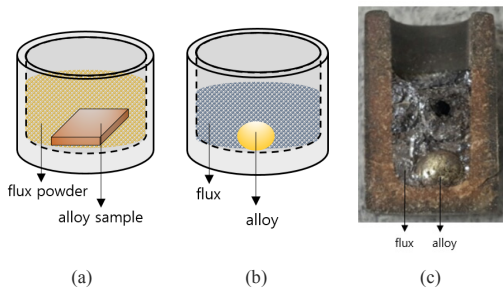


Fig. 1. (a), (b) Schematic diagram of pyrometallurgy process, and (c) macro image of after process

열처리 후 플럭스의 조성에 따른 금속시료 원소들의 변화를 정량적으로 확인하기 위해 energy dispersive X-ray spectroscopy(EDS; JEOL사, JSM6010-LA모델)를 이용하여 금속원소의 조성을 확인하였다. 열처리 완료 후 도가니를 파괴하여 열처리 중 비중차로 나누어진 금속재 부분과 산화물 플럭스 부분에 대해 가속전압 10kV, spot size 76의 조건으로 500배율에서 각 원소의 맵핑(mapping) 분석을 진행하였다.

열처리 후 산화물 플럭스부에 고용된 금속 원소의 정량적 확인을 위해 time of flight secondary ion mass spectrometry(ToF-SIMS; Munster사 ToF.SIMS5모델) 기기를 이용하여 분석을 진행하였다. 분석조건은 spectrum 모드, positive 이온에 대해 Bi³⁺건을 이용하였으며, 25keV, 0.5pA의 current, 20×20µm의 raster size 조건으로 Ca, Cu, Ag, Au, Pb에 대해 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EDS 분석 결과

진술한 용해공정으로 제작된 Au35wt%-Ag5wt%-Cu60wt% 기준시료의 조성은 EDS 분석결과 Au35.16wt%-Ag4.98wt%-Cu59.86wt%로 나타나어 오차범위 내에서 목적인 조성에 따라 성공적으로 제조된 것을 확인하였다.

Table 1. EDS results after pyrometallurgy process with flux

elements PbO/ (PbO+CaO)		[wt%]				
		Au	Ag	Cu	Pb	Ca
0	metal	84.4	6.7	8.92	-	-
	flux	-	-	88.16	-	11.84
1/3	metal	84.61	7.12	8.27	-	-
	flux	-	-	78.15	8.35	13.50
1/2	metal	85.51	7.43	7.06	-	-
	flux	-	-	76.26	12.78	10.96
2/3	metal	85.71	8.23	6.06	-	-
	flux	-	-	64.68	24.80	10.53
1	metal	86.70	6.78	6.52	-	-
	flux	-	-	51.09	48.91	-

표 1은 플럭스의 혼합비에 따라 준비된 시료에 대해 열처리 후 비중차에 의해 나누어진 금속부와 플럭스부의 EDS 분석결과를 나타낸 것이다.

플럭스 혼합비가 0인 단일 CaO 플럭스로써 투입한 시료의 경우, 금속부의 원소 함량이 Au84.40wt%-Ag6.70wt%-Cu8.92wt%로 나타났다. 특히 Cu 원소의 경우 기준시료 대비 함량이 50.94wt% 감소된 8.92wt%를 나타내었으며, 상대적으로 Au, Ag의 함량이 증가하

여 목적인 바와 같이 플럭스와 함께 열처리함에 따라 Au 원소의 함량증가가 가능함을 확인하였다. 또한 플럭스부의 함량 분석 결과 Cu, Ca가 각각 88.16wt%, 11.84wt%로 측정되어 CaO만으로도 열처리를 통해 선택적으로 Cu를 제거할 수 있었다.

플럭스의 혼합비가 1/3인 시료의 경우, 금속부의 원소 함량 분석 결과 Au84.61wt%-Ag7.12wt%-Cu8.27wt%로 나타났으며, 플럭스부에서는 Cu78.15wt%-Pb8.35wt%-Ca13.50wt%의 함량을 나타내었다. Au 함량의 경우 진술한 CaO 단일 플럭스를 사용한 시료보다 0.21wt% 더 높게 측정되어 상대적으로 플럭스부의 Cu 고용이 더 많이 일어난 것을 알 수 있었다. 한편 CaO 단일 플럭스 사용 시료와 마찬가지로 플럭스부에서는 귀금속인 Au와 Ag의 고용은 확인할 수 없었다.

플럭스의 혼합비를 1/2로 투입한 시료의 금속부의 함량 분석 결과 Au85.51wt%-Ag7.43wt%-Cu7.06wt%로 확인되었으며, 플럭스부의 경우 Cu76.26wt%-Pb12.78wt%-Ca10.96wt%의 함량을 나타내었다. 해당 시료의 경우 PbO, CaO 플럭스의 혼합 비율은 동일하지만 Pb와 Ca의 원자량 차이로 인해 Pb의 무게비가 높게 측정된 것으로 판단되었다. 또한 Au의 함량이 이전 시료보다 0.90wt% 높아져 상대적으로 플럭스부의 Cu 고용이 더 많음을 알 수 있었다. 이에 따라 PbO 플럭스의 혼합 비율이 높아질수록 Cu의 고용량이 더 커질 수 있을 것으로 판단되었다.

2/3 비율의 플럭스를 투입한 시료의 경우, 금속부는 Au85.71wt%-Ag8.23wt%-Cu6.06wt%, 플럭스부는 Cu64.68wt%-Pb24.80wt%-Ca10.53wt%의 함량을 나타내었다. 1/2 시료 대비 PbO의 투입량이 더 많은 본 시료의 경우 Au의 함량이 0.20wt% 더 높게 측정 되었으며, 1/3, 1/2 시료를 비교해 본 결과 플럭스의 PbO 비율이 높아질수록 플럭스부로 Cu의 고용이 더 커짐을 확인하였다. 한편 금속부의 Ag 함량은 8.23wt%로 측정되어 타 시료 대비 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 Ag의 함량이 높게 측정됨에 따라 타 시료 대비 Ag의 손실(loss)이 가장 적음을 확인하였다.

PbO단일 플럭스로 사용한 시료의 금속부의 원소 함량을 분석한 결과 Au86.70wt%-Ag6.78wt%-Cu6.52wt%로 함량이 변화한 것을 확인하였다. 이는 앞선 전체 시료보다 Au의 함량이 많아 플럭스부의 Cu 고용 능력이 더 큰 것을 알 수 있었다. 또한 플럭스부의 함량 분석 결과

Cu51.09wt%-Pb48.91wt%를 확인하였다. 앞서 보인 CaO 단일 플럭스로 사용한 시료 내 Cu 원소의 함유량(88.16wt%)과 비교해 봤을 때 37.07wt%의 월등한 함량 차이를 보였다. 반면 금속부 내 Cu의 함유량은 2.4wt%로 그 차이가 적으나 플럭스부 내 Cu의 함량 차이가 큰 것은 Pb와 Ca의 원자량이 달라 발생한 결과로 판단하였다. Pb, Ca, O의 원자량은 각각 207, 40, 16g/mol로 동일한 0.25g의 PbO와 CaO를 투입하였을 때 각각의 플럭스 내에 포함된 순수한 Pb의 질량은 0.232g이며, Cu의 질량은 0.178g으로 Pb의 질량이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 플럭스부의 원소 함량을 무게비로 측정하였을 때 PbO 단일시료의 경우 Cu의 함량이 더 낮게 나오는 것으로 판단하였다.

따라서, 플럭스 투입 열처리 후 금속 및 플럭스부의 원소비율의 변화량을 확인 결과 모든 시료에서 84wt% 이상의 고품위 Au를 얻을 수 있었다. PbO의 혼합비가 높아질수록 플럭스부의 Cu 고용이 증가하여 Au의 함량이 높아져 PbO를 단일 시료로 사용할 경우 86.7wt%의 가장 높은 Au 함량 증가를 확인할 수 있었다. 또한 2/3 시료의 경우 플럭스부로 혼입되는 Ag의 손실이 가장 적어 실제 Ag까지 고려한 귀금속의 손실률을 고려하였을 때 경제성면에서 유리할 수 있음을 확인하였다.

3.2 ToF-SIMS 분석 결과

표 2는 CaO, PbO 단일 플럭스 사용 시 플럭스부의 Au, Ag 원소에 대한 ToF-SIMS 분석결과를 나타낸 것이다.

플럭스의 혼합비가 0, 1일 때 Au⁺의 경우 신호의 강도값이 전체 counts 대비 각각 37, 349 정도로 매우 작아 분해능을 고려할 때 거의 무시해도 좋을 만큼, 즉 열처리 도중에 플럭스로 유입되지 않았다고 판단할 수 있는 정도이며, 플럭스 혼합비가 1(PbO 단일)인 경우 상대적으로 많을 수 있는 정도로 판단되었다.

Table 2. ToF-SIMS results of Au⁺ and Ag⁺ intensity in flux part

elements PbO/ (PbO+CaO)	Au ⁺	Ag ⁺	Total Counts
0	37	5802	1142501
1	349	254	126370

이와 반대로 Ag^+ 의 경우 CaO 단일 플럭스가 20배 정도 더 강한 신호가 나왔으므로 정성적으로 Ag 원소가 플럭스를 통해 손실되는 양이 상대적으로 더 많다고 판단할 수 있었다. ToF-SIMS의 분석 특성 상 intensity의 비율이 절대적으로 함량을 나타내는 것은 아니지만 정성적으로 양이 더 많을 수 있는 것으로 판단되었다[16].

그러나 다른 성분을 고려한 전체 피크의 총 값을 고려하면 Au와 Ag의 열처리 중 플럭스에서의 고용손실은 매우 작은 것으로 판단되며 앞선 EDS 분석 결과에서는 검출되지 않을 정도의 극소량으로, 결국 플럭스에 고용되는 Au와 Ag는 경제적으로 무시할 수 있을 정도라고 판단되었다.

4. 결론

- 1) 습식 정련의 효율성을 높이기 위한 전처리 공정으로써 저품위 금합금(Au-35wt%)에 대해 PbO, CaO 플럭스의 혼합비를 각각 0, 1/3, 1/2, 2/3, 1로 달리 하여 1200℃-5시간 열처리를 통해 Cu를 선택적으로 제거하는 건식 정련 공정을 제안하였다
- 2) EDS 분석 결과 플럭스의 비율에 상관없이 모든 시료에서 84wt% 이상의 고품위 Au를 얻었으며, 2/3 혼합비의 플럭스를 사용할 시 Ag의 손실이 가장 적었다.
- 3) ToF-SIMS 분석 결과 플럭스의 비율이 1, 0 일 때 Au^+ 의 특성 피크의 강도(intensity)가 각각 349, 37로 측정되었다. 이는 Au의 손실을 고려하였을 때 CaO 단일 플럭스를 사용하는 것이 더 유리할 수 있었으나, 이는 무시할 정도의 매우 적은 양이므로 공정의 경제성에서는 큰 차이가 없을 것으로 판단되었다.
- 4) 따라서 PbO, CaO의 혼합플럭스를 사용하여 건식 열처리를 진행할 경우 효과적으로 84wt% 이상의 고품위 금의 정련이 가능하여 이후 왕수법을 이용한 습식 정련에 적합한 전처리 공정임을 확인하였다.

References

- [1] F. H. Reid, "Gold Plating in the Electronics Industry", *Gold Bull.*, vol. 6, no. 3, pp. 77-81, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03215011>
- [2] X. J. Zhang, K. K. Tong, R. Chan, M. Tan, "Gold Jewellery Casting: Technology Design and Defects Elimination" *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 48, pp. 603-609, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01699-2](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01699-2)
- [3] kitco.com
- [4] L. Ming, S. Yang, C. Cheng, "The double nature of the price of gold-A quantitative analysis based on Ensemble Empirical Mode Decomposition", *Resour. Policy*, vol. 47, pp. 125-131, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.01.006>
- [5] C. HAGELÜKEN, "Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling", *Proceedings of the 2006 IEEE Int. Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 218-223, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.010>
- [6] J. C. Lee, H. T. Song, J. M. Yoo, "Present Status of the Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment in Korea", *Resour. conserv. Recy.*, vol. 50, pp. 380-397, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.010>
- [7] E. Y. L. Sum, "The Recovery of Metals from Electronic scrap", *JOM-J. Min. Met. Mat. S.*, vol. 43, no. 4, pp. 53-61, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03220549>
- [8] J. Cui, L. Zhang, "Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review", *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, pp. 228-256, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>
- [9] H. Veldhuizen, B. Sippel, "Mining discarded electronics", *Ind. Environ.*, vol. 17, no. 3, pp. 7-11, 1994.
- [10] U. Jadhav, H. Hocheng, "Hydrometallurgical Recovery of Metals from Large Printed Circuit Board Pieces", *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1-9, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep14574>
- [11] F. Jing, H. Tong, L. Kong, C. Wang, "Electroless Gold Deposition on Silicon(100) Wafer Based on a Seed Layer of Silver", *Appl. Phys. A*, Vol80, pp. 597-600, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-003-2236-z>
- [12] C. Cristian, E. V. D. Lingen, "Coloured gold alloys", *Gold Bull.*, vol. 32, no. 4, pp. 115-126, 1999.
- [13] J. O. Nriagu, "Cupellation: The Oldest Quantitative Chemical Process", *J. Chem. Educ.*, vol. 62, no. 8, pp. 668-674, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed062p668>
- [14] H. Kitaguchi, J. Takada, K. Oda, Y. Miura, "Equilibrium phase diagram for the system PbO-CaO-CuO", *J. Mater. Res.*, vol. 5, no. 5, pp. 929-931, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1990.0929>
- [15] J. Liang, Z. Chen, F. Wu, S. Xie, "Phase Diagram of SrO-CaO-CuO Ternary System", *Solid State Commun.*, vol. 75, no. 3, pp. 247-252, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(90\)90279-K](https://doi.org/10.1016/0038-1098(90)90279-K)

- [16] Y. Kasuga, H. Masudome, K. Yonemitsu, "The Features of ToF-SIMS and Its Application to the Field of Packaging", *The Journal of Japan Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*, vol. 14, no. 1, pp. 69-71, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5104/jiep.14.69>

송 정 호(Jeongho Song)

[정회원]



- 2014년 8월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 박사수료

<관심분야>

금속재료, 주얼리소재, 세라믹재료

송 오 성(Ohsung Song)

[종신회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

금속재료, 주얼리소재, 유기태양전지