

貴金屬 含有 廢棄物로부터 아크로를 利用한 有價金屬 回收

潘奉贊* · 金昌旻* · 金英任** · *金東秀**

*順天大學校 金屬工學科, **梨花女子大學校 環境工學科

Recovery of Precious Metals from Waste PCB and Auto Catalyst Using Arc Furnace

Bong-Chan Ban*, Chang-Min Kim*, Young-Im Kim** and *Dong-Su Kim**

*Dept. of Materials Sci. & Metallurgical Eng., Sunchon National University

**Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

요 약

최근 전자산업의 발달로 인하여 폐 인쇄회로기판(PCB)의 발생량이 증대되고 있으며 이는 유해물질 및 유가금속을 함유하고 있어 환경오염의 방지 측면 및 유용자원의 회수 측면에 있어서 재활용이 시급하다. 또한, 자동차의 배출가스 내의 대기오염 물질의 저감을 위하여 장착된 자동차 촉매에 백금족 금속이 함유되어 있어 폐기되는 자동차 촉매에서의 유가금속 회수 또한 필요하다. 이러한 유가금속을 회수하기 위하여 본 연구에서는 건식방법의 일종으로 고온처리에 의하여 발생하는 유해물질이 적으며 공정이 매우 안정적이라고 알려진 아크 전기로를 이용한 회수 방안을 고찰하였다. 생석회, 전로슬래그, 동슬래그를 사용하여 용제의 종류에 따른 유가 금속의 회수율을 관찰하였으며 직류 및 교류에 의한 영향 그리고 전류의 방향에 따른 유가 금속의 회수율을 살펴보았다. 용제의 종류에 따른 회수율에 있어서 전로슬래그나 동슬래그를 용제로 사용하는 것이 생석회에 비해 용융회수에 더 유리함을 파악하였다. 폐 PCB에 존재하는 유가 금속의 회수에 있어서 직류 및 교류의 영향에 대한 결과는 전체적으로 직류 기저 (-)의 경우가 높은 회수율을 나타내었으며 이는 자동차 폐촉매의 경우에도 같은 양상이 관찰되었다. 폐기되는 PCB 및 자동차 촉매에서의 유가 금속 회수에 관한 본 연구에서 아크로처리에 의한 유가금속의 회수율은 평균적으로 95~97%정도로 상당히 높은 것으로 관찰되었다.

주제어 : 귀금속, 회수, 인쇄회로기판, 자동차 촉매, 아크로

ABSTRACT

Recently, waste printed circuit board (PCB) has significantly increased in its amount due to the rapid development of electronic industries. Since several kinds of noxious materials and also valuable metals are contained in it, the waste PCB is in an urgent need of recycling for the dual purposes for the prevention of environmental pollution and recovery of valuable resources. Also, the catalyst which equipped in the exhaust pipes of automobiles to reduce emission of air pollutants contains precious metals so that their recovery from the waste auto-catalysts is required. In this study, the recovery of valuable metals from waste PCB and auto-catalyst by arc furnace melting process has been investigated, which is known to be very stable and suitable for less production of pollutants due to its high operating temperature. The effect of the kind of flux on the recovery of precious metals was examined by using quicklime, converter slag, and copper slag as the flux. In addition, the influence of direct and alternating current and the applying direction of direct current has been investigated. It was observed that using converter or copper slag as a flux was more desirable for a higher efficiency in the precious metal recovery compared with quicklime. For the effect of current, application of direct current taking the bottom as a negative pole generally showed a better efficiency for the extraction of valuable metals from waste PCB, which was also observed for the case of waste auto-catalyst. The average recovery of precious metals from both wastes by arc furnace melting process was very high, which was up to in the range of 95~97%.

Key words : precious metals, recovery, PCB, auto-catalyst, arc furnace

* 2002년 7월 9일 접수, 2002년 9월 16일 수리

* E-mail: dongsu@mm.ewha.ac.kr

1. 서 론

최근 전자산업의 급격한 발달로 인한 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)의 수요 및 생산 증대에 따라 폐기되는 전자제품의 PCB 양 또한 증가하고 있다. 폐컴퓨터의 경우만 하더라도 2000년 배출잠재량은 138만대로 집계되고 있으며 올해는 11%의 증가율을 보일 것으로 예상되고 있다.¹⁾

폐컴퓨터의 발생은 컴퓨터 구성 부품품 내에 포함된 유해물질 및 유기금속의 다량 배출을 의미하여 환경의 오염 및 자원재활용의 측면에서 심각하게 고려할 사항이다. 그러나 현재 발생하는 폐 PCB는 전량 폐기되고 있으며 국내의 경우 전량 매립 내지는 저가에 수출되는 실정이다. 그러나 PCB는 금속 성분을 다량 함유하고 있어 매립처리시 금속의 침출로 인한 토양의 오염이 예상되며, 금속 성분 중 Ag, Au 등의 유기금속이 많이 함유되어 있으므로 유기금속의 회수 및 환경오염의 방지 측면에서 재활용이 시도되고 있다.^{2,3)}

또한 자동차로부터 배출되는 가스에 함유되어 있는 CO, HC 및 NO_x의 농도를 감소하기 위하여 자동차 촉매에는 백금족 금속이 사용되고 있다.^{4,5)} 자동차 촉매에 함유되어 있는 백금족 금속은 농도가 약 1000~2000 ppm으로 낮으며 큰 표면적을 가진 γ -Al₂O₃에 미립자로 분산되어 있기 때문에 추출하기 어렵다. 따라서 고도의 추출기술이 요구된다.

해외에서 사용되고 있는 유기금속의 회수기술은 이들을 분쇄한 후, 산이나 알칼리로 귀금속을 침출시키거나 하소공정을 통해 수지 등의 분해와 납 등의 휘발성 금속성분의 제거 후 이를 동체련 공정에 직접 투입하거나, 습식 침출 또는 이를 건식 방법에 의해 전기아크로나 플라즈마 용해방법을 이용하여 조금속으로 농축하는 방법 등이다.^{6,9)} 일본이나 미국의 경우 오래전부터 이에 대한 기술연구가 이미 실용화되고 있는 실정이다. 폐 PCB 1톤을 용융시킬 경우 금은 300~600 g이 포함되어 있고 은 또한 2500~9000 g이 들어있는 등 귀금속들이 다량 함유되어 있다. 백금족 원소는 부존자원이 빈약하여 가격이 고가일 뿐 아니라 매장량이 적어 백금족 자원이 전혀 없는 우리나라로서는 이들을 회수하여 사용하는 기술이 절실히 필요한 실정이다. 그러나 국내에서는 이들을 저가로 수출하거나, 조금속이나 배소물질은 대부분 이들 유기금속의 추출·정련기술의 미비로 조정련상태에서 해외로 판매되어 많은 경제적 손실을 보고 있다. 특히 기술적으로는 수질오염 등의 문제로 습

식법으로 직접 침출하는 기술은 세계적으로 점차 사양화되고 있으며, 이를 대신하여 플라즈마나 아크로에서 1차 조금속상태로 포집한 후 이를 소규모의 습식법으로 정련하는 공정을 채택하고 있는 실정이며 기술의 이전이 용이하지 않는 실정이다.¹⁰⁻¹¹⁾ 기존의 습식법에 의한 처리 기술에 비해 아크 전기로나 플라즈마를 이용 시에는 지금까지 사용되는 일반 소각시보다 고온에서 처리하므로 발생하는 유해물질이 적고 또 이를 재활용할 수 있어 훨씬 안정적이라고 알려지고 있다.^{7,12-13)}

본 연구에서는 건식법의 하나이며, 소규모의 공정으로 폐기물의 대량처리가 가능한 아크로 용융법을 사용하고자 한다. 특히 아크로 이용 시에 용융조건을 규명하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 분쇄

PCB나 자동차 촉매를 아크로에 직접 투입하게 되면 부피가 클 뿐 아니라 용융과정 자체가 지연되는 결과를 초래하므로 슈레더를 이용하여 분쇄 후 투입하였다. PCB는 사용 후 수명이 다하거나 폐기된 소자부착 PCB를 이용하였다. 자동차 촉매의 경우 국내 자동차 생산 회사 A, B, C사의 자동차 배기가스 정화통을 사용하여 이로부터 촉매를 분리하였으며 분리된 촉매는 슈레더를 사용하여 분말화 하였다. 다음 Table 1은 자동차 폐촉매의 구성 부분 각각의 중량 %를 나타낸다.

2.2. 용융실험

PCB 용융실험에서 용융로에 사용한 흑연전극은 구경 50 mm인 단전극을 사용하였으며, 1차적으로 노바닥에 흑연가무를 깔고 예열 시킨 후 준비된 기저금속을 투입하여 용융하였다. 용융된 기저금속의 양은 2 kg으로 일정량을 투입하였고 플럭스로 사용된 동슬래그와 전로슬래그, CaO 등은 분말 형태이며, 슈레더로 분쇄한 PCB 2 kg을 시료로 투입하였다. 이들이 완전 용융된 후 기저

Table 1. Weight percent of auto-catalyst parts

Parts Company	Metallic part	Fiber	Catalyst	Total
A	49.01	6.24	44.75	100
B	48.18	9.04	42.78	100
C	52.26	9.34	38.40	100

Table 2. Experimental condition of PCB melting

No.	Bottom electrode	Base metal	Flux
1	DC(-)	Fe	Cu slag
2	DC(-)	Cu	Cu slag
3	DC(-)		LD slag
4	DC(-)		CaO
5	DC(-)		Cu slag : LD slag (1 : 2)
6	DC(+)		
7	AC		Cu slag : LD slag (2 : 1)
8	DC(-)		
9	DC(+)		
10	AC		

금속 조성 변화 유무를 측정하기 위하여 silica tube를 사용하여 5분 간격으로 기저금속을 5회 채취하여 분쇄 후 분말 형태로 시료를 채취하였다. 극성은 직류 기저(-), 직류 기저(+), 교류를 번갈아 가면서 총 10회 실시하였고 시료 채취 후 출탕하여 기저금속과 슬래그를 수거하였다. Table 2는 총 10회 실시한 실험의 조건들을 나타낸다.

자동차 촉매 용융실험의 경우 예열단계까지 PCB 용융실험과 동일하며, 기저금속을 Cu로 고정하여 투입하여 용융하였다. 용융된 기저금속 Cu의 양은 1kg으로 일정량 투입하였고 플럭스로 사용된 동슬래그는 분말형태이며, 슈레더로 분쇄한 자동차촉매는 자동차 3개 회사 별로 1kg씩 시료 6개를 만들어 투입하였다. 이들이 완전 용융된 후 기저금속 조성 변화 유무를 측정하기 위하여 silica tube를 사용하여 5분 간격으로 기저금속을 5회 채취하여 분쇄하였다. 자세한 실험의 조건들은 Table 3에 나타내었다.

2.3. 분석

시료는 분말형태로 채취되므로 전저리를 거쳐 용액으

Table 3. Experimental conditions for auto-catalyst melting

No.	Catalyst (company)	Bottom electrode	Base metal	Flux
11	A	-	Cu	Cu slag
12		+		
13	B	-		
14		+		
15	C	-		
16		+		

로 준비하여 원자흡광도법(Atomic Absorption Spectroscopy, Perkin Elmer Co. LTD, AANALYST 10)을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PCB, 자동차 촉매의 물성 분석

PCB의 경우 폐 PCB의 종류가 다양한 관계로 실험을 위한 대표적 시료를 제조하기 위하여 여러 종류의 PCB를 분쇄 후 일정하게 혼합한 후 이를 분석하였다. Table 4는 PCB내에 존재하는 대표적인 금속들의 함량을 나타내었다. Table 4에 나타난 바와 같이 폐 PCB에는 Cu, Fe 순으로 가장 높은 함량을 나타내고 있으며 Au, Ag 등의 유가금속 또한 일부 함유되어 있다. 또한 3사의 자동차 촉매를 회수하여 Pt, Pd, Rh에 대한 함량을 조사하여 함께 나타내었다. 자동차 폐촉매의 경우 Pt, Pd, Rh의 백금족 원소를 선택하여 함량을 살펴보았을 때, 각 회사의 함량에는 차이가 있으나 평균적으로 Pt, Pd, Rh의 순으로 그 양이 많은 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 용융실험 결과

3.2.1. PCB로부터 유가금속 회수

Table 5는 각각의 실험 상황에서 PCB 용융시 전류

Table 4. Chemical compositions contained in the PCB and contents of Pt, Pd, Rh in auto-catalyst

Compositions	Cu	Fe	Sn	Al	Ni	Pb	Zn	Au	Ag
PCB(%)	20.5	2.2	4.4	2.4	2.5	2	1.1	0.13	0.21
Companys	A			B			C		
Compositions	Pt	Pd	Rh	Pt	Pd	Rh	Pt	Pd	Rh
Auto catalyst (ppm)	1024.50	214.00	14.90	966.00	180.00	108.00	794.00	316.50	63.70

Table 5. Current change of PCB melting

Flux	Cu slag		LD slag	CaO	Cu slag : LD slag (1 : 2)		Cu slag : LD slag (2 : 1)	
Base metal	Fe	Cu	Cu					
Bottom electrode	-	-	-	-	-	+	-	+
Time (min)	Current (A)							
0	700	600	600	600	700	700	400	500
10	700	700	640	700	600	600	450	450
20	600	550	500	650	550	500	500	500
30	450	500	500	600	600	450	450	400
40	550	550	400	550	300	500	500	400
50	500	500	300	550	350	450	350	450
60	510	400	350	500	350	400	250	400
70	400	400	300	480	200	450	100	400
80	350	350	250	450	250	400	200	350
90	350	310	200	500	250	-	-	300
100	-	-	-	400	-	-	-	-
110	-	-	-	300	-	-	-	-
120	-	-	-	250	-	-	-	-

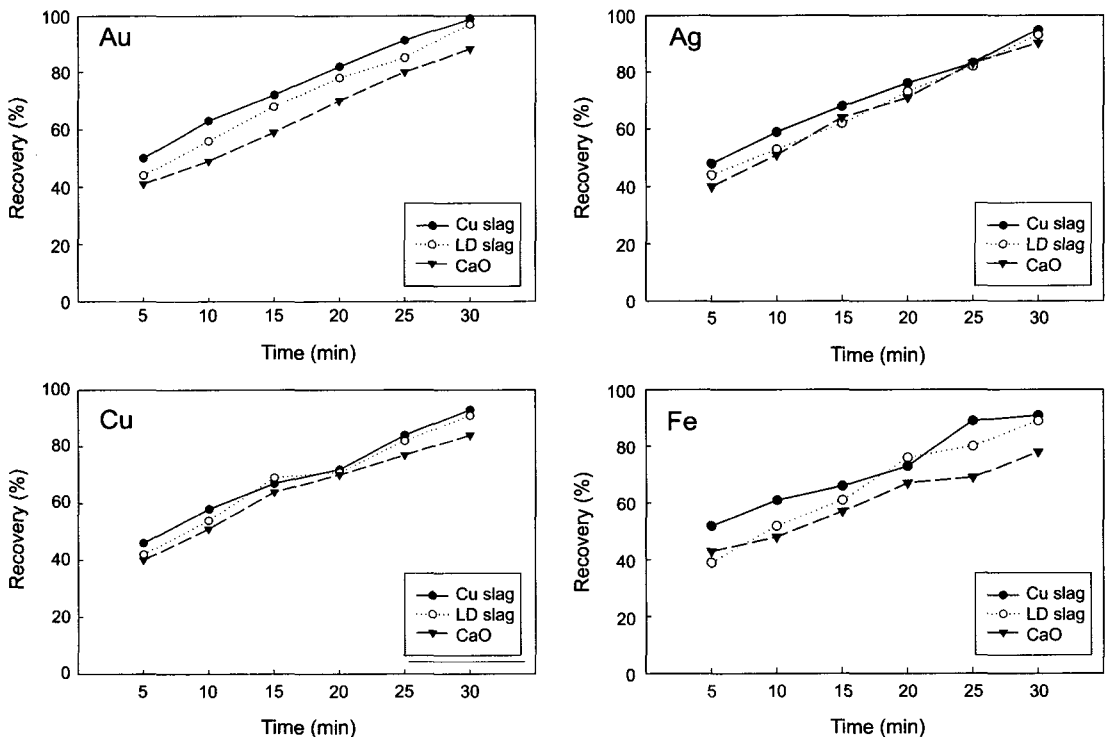


Fig. 1. Metal recovery of PCB melting by flux change for bottom(-) when Cu was used as the base metal.

의 변화를 정리한 것이며 음영 및 기울임 표시는 melt down을 나타낸다. Table 5에 나타난 바와 같이 melt down은 각 실험조건에서 대부분 50~60분 경과 후 시작되는 것으로 관찰되었으며 melt down 이후 전류의 변화 상태는 비교적 안정하였다.

슬래그는 모든 금속 제련과정에서 중요한 역할을 하고 슬래그의 조성은 생산되는 금속의 조성을 좌우하며 금속제련공정에서 용탕의 오염방지, 용탕내 유해불순물 흡수, 용탕의 온도 유지 등의 역할을 한다.¹⁴⁾ 이러한 역할을 가능하게 하기 위해 용융점이 낮아야 하며 점성이 낮아야 하고, 용탕에 비해 밀도가 작고 용탕에 혼합되지 않아야 한다. 본 연구에 사용한 동제련 슬래그는 동제련 과정에서 발생하는 것으로 정광 용융 후 마트용해 후나 부분 배소 후 용융상 용해로부터, 또는 배소 반응 후 동의 직접 용융시에 발생하는 슬래그이다. 그리고 제강슬래그는 일반적으로 전로, 평로, 전기로 등에 의하여 생산되는 것으로 그 처리과정에 따라 각 성분이 다른 제강슬래그가 배출된다. 본 연구에서는 용제의 종류에 따른 유가금속의 회수율에 대하여 알아보기 위한 실험을 수행하였으며 일반적으로 사용되는 생석회와 이

미 용제화 되어있는 제강슬래그, 동제련시에 폐기되며 귀금속 함유능이 가장 낮은 동제련슬래그를 이용하였다. 전류는 직류 기저(-)로 고정하여 귀금속 회수율을 조사하였다.

Fig. 1은 용제의 종류에 따른 금속 회수율에 대한 그래프이며 전체적으로 melt-down 이후 30분이 경과한 때에 80~90%의 회수율을 나타내고 있다. CaO의 경우 동슬래그와 전로슬래그에 비해 금속의 회수율이 3~5% 낮은 것으로 관찰되었다. 동슬래그는 전로슬래그에 비해 1~2%정도 높은 회수율을 나타내며 금속 회수에 있어 좋은 효율을 나타내었다. 그러나 동슬래그 사용시 용융하는 과정에서 염기도가 낮아져 조업상 많은 문제점을 나타내고 있다. 이를 개선하기 위하여 동슬래그에 일부 전로슬래그를 첨가하여 사용하는 것이 염기도의 유지 및 금속의 회수에 있어 유리하다고 사료된다.

일반적으로 아크로에 사용되는 전류는 직류, 교류 등이 있으며 본 실험에서는 직류의 극성변화와 전류 종류에 따른 유가금속 회수율을 조사하기 위하여 직류의 기저전극을 (-), (+)로 변화시켰으며 그 결과를 교류 이용 결과와 비교하였다. 앞서 실험한 용제 종류에 따른 실

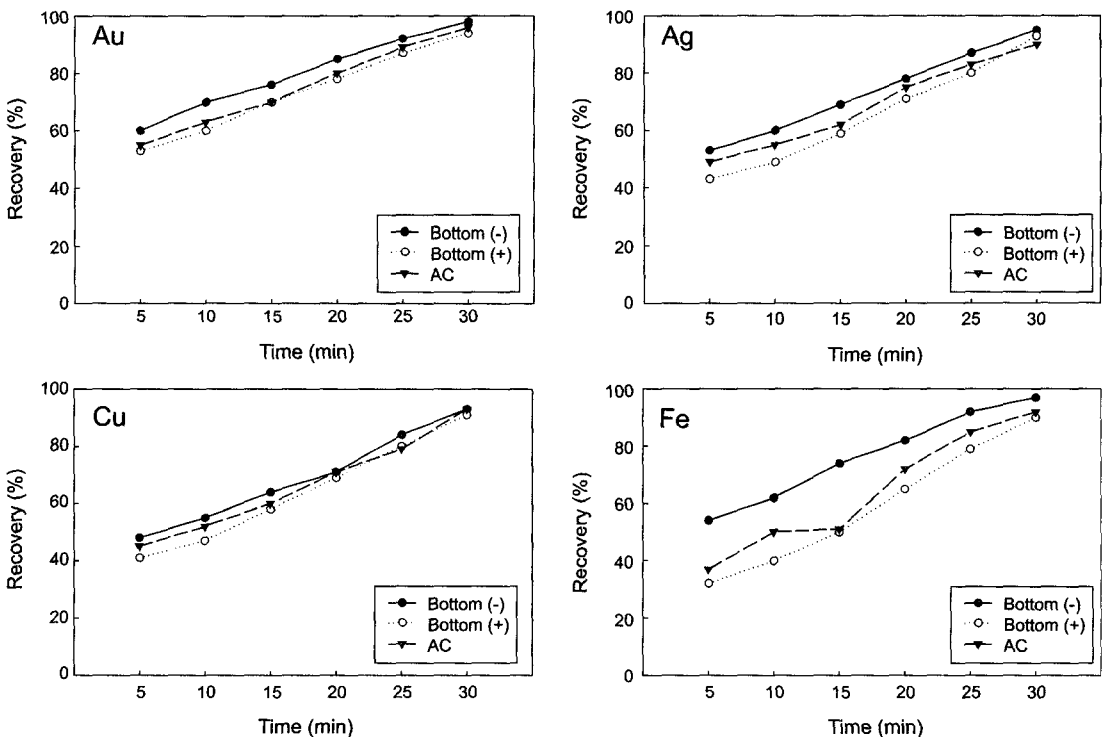


Fig. 2. Metal recovery of PCB melting by current and polarity change (Cu slag : LD slag = 2 : 1).

험으로 용제는 동슬래그와 전로슬래그를 1:2 혹은 2:1로 혼합하여 사용하였으며 이에 대한 결과 역시 비교 검토하였다. Fig. 2 는 동슬래그와 전로슬래그가 2:1

의 비율로 혼합된 용제를 사용한 결과를 나타낸다. 각 금속의 경우 직류 기저(-)인 경우가 교류 및 직류 기저(+)인 경우와 비교시 유기금속 회수율이 높게 나타나는

Table 6. Metal recovery of PCB melting by current and polarity change (Cu slag: LD slag=1 : 2)

Time (min)	Recovery (%)											
	Au			Ag			Cu			Fe		
	Bottom (-)	Bottom (+)	AC	Bottom (-)	Bottom (+)	AC	Bottom (-)	Bottom (+)	AC	Bottom (-)	Bottom (+)	AC
5	48	27	40	41	43	29	40	36	38	43	39	40
10	63	44	56	57	51	46	55	49	51	53	50	50
15	74	62	69	66	61	58	66	62	64	66	62	60
20	82	73	80	73	71	71	76	66	71	74	71	71
25	91	85	87	85	79	85	81	77	77	85	80	80
30	98	93	95	96	91	92	94	88	86	90	88	92

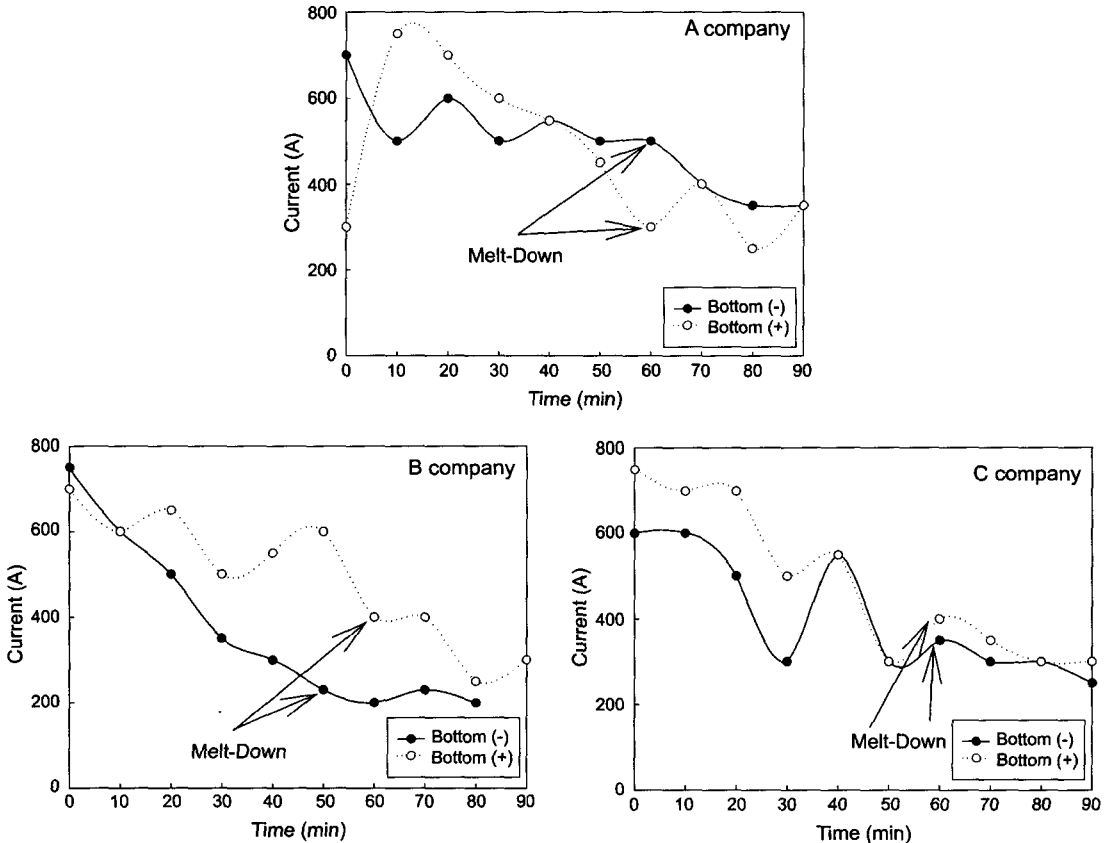


Fig. 3. Current change for auto-catalyst melting.

것으로 관찰되었다. 또한 용제의 혼합비율에 따른 결과 비교를 위하여 동슬래그와 전로슬래그가 1:2의 비율로 혼합된 결과를 Table 6에 나타내었다. Fig. 2와 Table 6을 비교시 동슬래그와 전로슬래그의 비율이 1:2인 경우보다 2:1인 경우가 높은 회수율을 보였다. 동슬래그와 전로슬래그의 비율이 1:2인 경우 역시 전류의 영향에 있어서 직류 기저(-)가 직류 기저(+)와 교류보다 높은 회수율이 관찰되었다.

3.2.2. 자동차 폐촉매로부터 유기금속 회수

자동차 폐촉매 용융시 전류의 변화를 Fig. 3에 나타내었으며, PCB 용융에 비해 용융시간에 따른 불안정한 전류변화가 관찰되었다. 전류가 불안정하므로 용탕이 안정되지 못하여 슬래그가 부풀어오르고, 비산되는 현상을 나타내었으며, 노 벽에 슬래그가 응집하는 현상이 관찰되었다.

자동차 폐촉매에 대하여도 전류의 극성변화에 따른

유기금속의 회수율을 조사하였으며 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 전류의 극성이 달라질 때 각각의 금속의 회수율에 대하여 3개의 회사별로 나타내었다. 전체적으로 비슷한 양상을 나타내나 상호 약간씩 다른 회수율을 보이는 것은 회사별 유기 금속의 함유량의 차이 및 실험 과정 중의 오차를 감안하면 미소한 차이인 것으로 간주된다. 자동차 폐촉매의 경우에도 직류 기저(-)가 직류 기저(+)보다 높은 회수율을 보임을 관찰하였다.

4. 결 론

현재 단순 매립되고 있는 PCB와 자동차 폐촉매로부터 귀금속을 회수하는 것은 환경 보호 및 폐기물의 재활용 측면에서 필요한 기술이며, 그에 대한 효과적 방법의 하나로 건식방법의 일종인 이크로를 이용한 유기금속의 회수방법에 대해 고찰하였다. 본 연구에서는 아

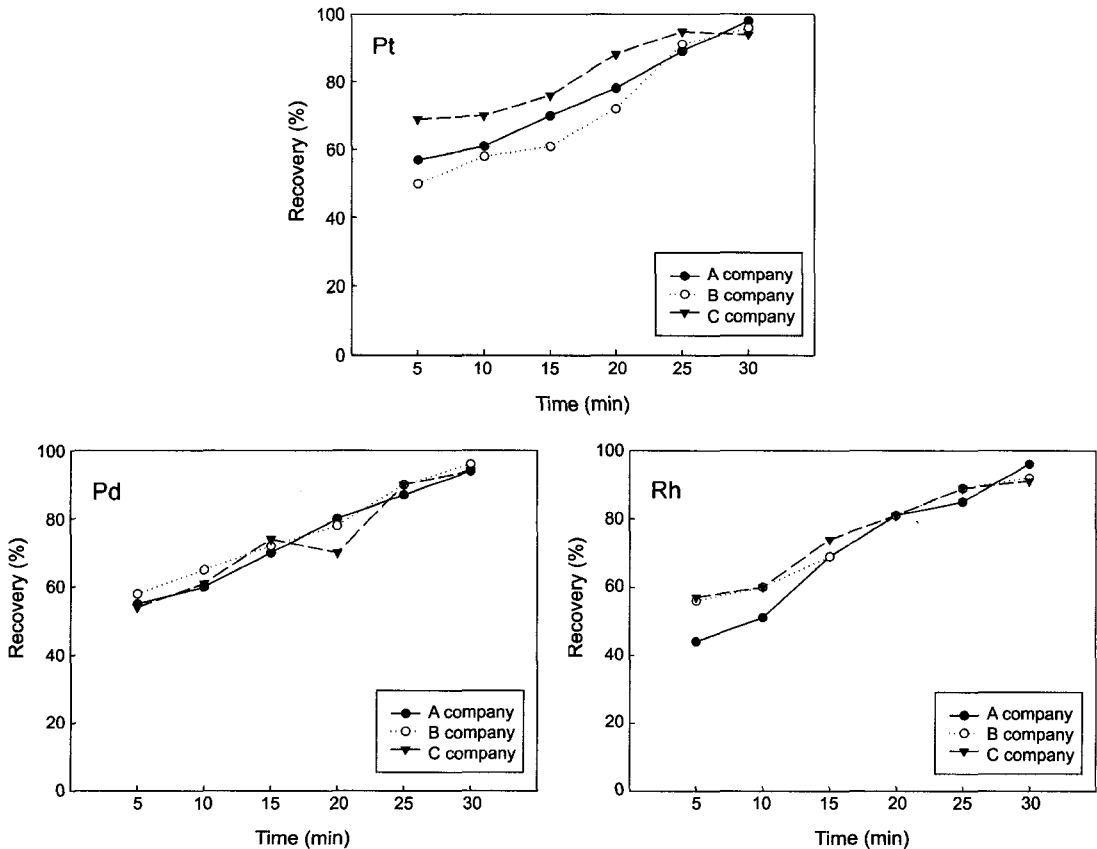


Fig. 4. Metal recovery of auto-catalyst melting for different kind catalyst for bottom (-).

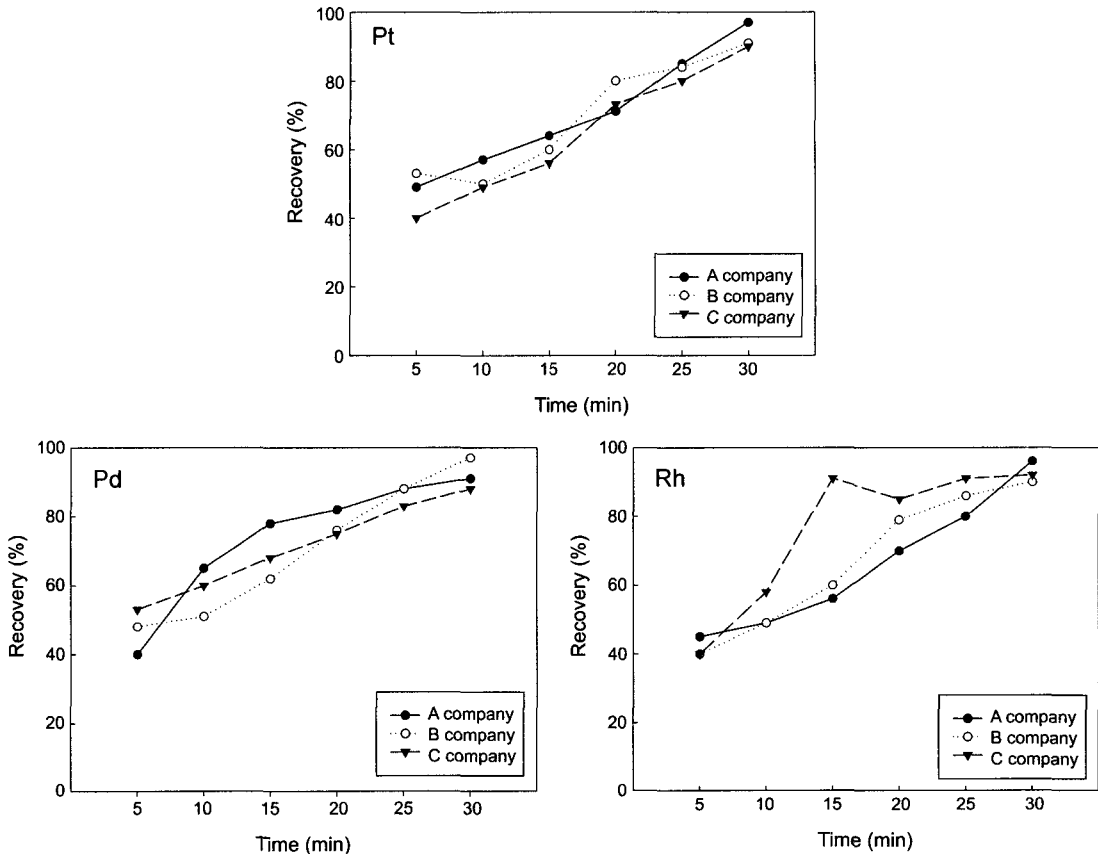


Fig. 5. Metal recovery of auto-catalyst melting for different kind catalyst for bottom (+).

크로에서의 유기금속 회수를 위한 조업 조건인 전류의 종류, 극성, 용제의 종류와 양을 결정하기 위한 용융 실험을 한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 폐 PCB 및 자동차 촉매의 물성 분석 결과 폐 PCB 내에 존재하는 금속 함량 중 Cu, Fe 가 높은 함량을 나타내었으며, 자동차 폐 촉매의 경우 Pt, Pd, Rh의 백금족 원소를 선택하여 함량조사를 하였을 때 Pt, Pd, Rh 순으로 높은 함량을 나타내었다.
2. 용제의 경우 생석회를 사용하는 것보다 기존에 용제화 된 전로슬래그나 동슬래그를 사용하는 것이 용융에 유리하였다. 또한 전로슬래그 및 동슬래그를 단독으로 사용하는 것보다 두가지 슬래그를 혼합하여 사용하는 경우가 조업 조건이 더 유리하며, 동슬래그의 양이 전로슬래그의 양에 비하여 많은 것이 상대적으로 높은 유기금속 회수율을 나타내었다.

3. 폐PCB 내에서 유기 금속을 회수함에 있어 아크로 사용시 직류 기저(-)가 직류 기저(+) 및 교류를 사용하는 것에 비하여 유기금속 회수율이 약 5% 높은 것으로 관찰되었다.
4. 자동차 촉매의 경우 또한 최종 회수율에 대하여 전류의 종류에 따른 회수율의 차이는 미미하였으나 직류 기저(-)가 직류 기저(+) 및 교류를 사용하는 것에 비하여 2~3% 가량 높은 효율을 나타내었다.
5. PCB 및 자동차 폐촉매의 경우 아크로 용융법에 의한 유기금속 회수율은 각 금속에 따라 약간의 차이는 있으나 평균적으로 95~97%의 회수율을 나타내었다.

참고문헌

1. 한국자원재생공사 : 폐컴퓨터 발생·처리 및 재활용에 관

한 조사연구, p. 12, 한국자원재생공사 (1997).

2. 한국자원리사이클링학회 : 리사이클링 백서, 문지사 (1999).
3. Z. Mei and A. Eslambolchi : "Evaluation of Ni/Pd/Au as an alternative metal finish on PCB", Circuit World, 25(2), pp. 18-26 (1999).
4. S. Artelt, H. Kock, H. P. Konig, K. Levsen and G. Rosner : "Engine dynamometer experiments: platinum emissions from differently aged three-way catalytic converters", Atmospheric Environment, 33, pp. 3559-3567 (1999).
5. M. Benson, C. R. Bennett, J. E. Harry, M. K. Patel and M. Cross : "The recovery mechanism of platinum group metals from catalytic converters in spent automotive exhaust systems", Resources, Conservation and Recycling, 31, pp. 1-7 (2000).
6. N. Leclerc, E. Meux and J. M. Lecuire : "Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritotriacetate anion and hexahydrated ferric chloride", J. of Hazardous Materials, B91, pp. 257-270 (2002).
7. K. Katou, T. Asou, Y. Kurauchi and R. Sameshima : "Melting municipal solid waste incineration residue by plasma melting furnace with a graphite electrode", Thin Solid Films, 386, pp. 183-188 (2001).
8. C. J. Chang and J. C. Liu : "Feasibility of copper leaching from an industrial sludge using ammonia solutions", J. of

- Hazardous Materials, 58, pp. 121-132 (1998).
9. S. M. Saldo, S. A. Said and M. S. El-Shahawi : "Extraction and recovery of Au, Sb and Sn from electrorefined solid waste", Analytica Chimica Acta, 436, pp. 69-77 (2001).
10. C. Jarupisithorn, T. Pimpong and G. Lothongkum : "Investigation of kinetics of zinc leaching from electric arc furnace dust by sodium hydroxide", Materials Chemistry and Physics, 9432, pp. 1-5 (2002).
11. C. W. Lu, S. J. Huang and C. L. Huang : "Flicker characteristic estimation of an AC electric arc furnace", Electric Power Systems Research, 54, pp. 121-130 (2000).
12. D. Neuschuz : "Plasma processing of dust and residues", Pure Appl. Chem., 28, pp. 1159-1165 (1996).
13. S. A. Mitra, G. H. Acosta, J. Khan and R. L. Smith : "Extraction of oxide from electric arc furnace dust. Solubilities of zinc chloride and zinc oxide in aqueous ammonium chloride solutions from 303-363 K", J. Environ. Sci. Health, A32, pp. 497-515 (1997).
14. 반봉찬, 이창희 : 최신 금속공학 입문, 반도출판사 (1992).

반 봉 찬

- 현재 순천대학교 금속공학과 교수
 - 본 학회지 제8권 5호 참조
-

김 동 수

- 현재 이화여자대학교 환경공학과 교수
 - 본 학회지 제8권 5호 참조
-

김 영 임

- 현재 이화여자대학교 환경공학과 석사
 - 본 학회지 제11권 2호 참조
-