연구논문

폐PCB에 장착된 전기/전자부품의 분리 및 특성

김영진¹⁾ · 이정훈¹⁾ · 이재천²⁾ · 이재령^{1)*}

Disassembly of the Mounted Electric/Electronic Components on Wasted Printed Circuit Board and their Characterizations

Youngjin Kim, Junghoon Lee, Jae-chun Lee and Jaeryeong Lee*

Abstract : Disassembly of the mounted electric/electronic components (EECs) on WPCBs and their characterizations were surveyed for enhancing the reusing/recycling feasibility of WPCBs. Disassembling treatment was carried out by using the self-designed apparatus installed grinding attachment. The weight ratio of the detached EECs was used as the efficiency of disassembly, which was the average value of the result treated with 3 WPCBs in each condition. 95.2 wt% of the disassembling efficiency could be accomplished ultimately by 3 repetitive treatments at a grinder height of 1.5 mm, a grinder speed of 5500 rpm and the WPCB moving speed of 1 cm/s. After this treatment, WPCB could be categorized to three divisions such as disassembled EECs, dismantled board and abrasion powders. Total content of metal in WPCB was surveyed to 17.9 wt%, and 48.4 % of them (8.7 wt%) was contained in the division of EECs. 20 metal elements could be detected in WPCBs. Moreover, 4 major elements (Cu, Al, Fe, Pb Cu) in total metal content were comprised at 90.7 % and Pb/Ag existed mainly in abrasion powders.

Key words : Wasted printed circuit board, Grinding treatment, Disassembling, Metal content, Metal distribution

요 약 : 폐인쇄회로기판에 장착되어 있는 전기/전자 부품의 재사용/재활용 가능성을 향상시키기 위해 부품분리 실험 및 분리된 부품의 특성평가를 실시하였다. 부품 분리실험은 연삭방법을 채용한 부품분리기를 자체개발하여 수행하였으며, 연마석의 높이(0.5, 1.5 mm), 회전속도(2500, 5500 rpm), WPCB 이동속도(1~5 cm/sec), 연삭횟수 등을 변화시키면서 부품분리 효율을 평가하고 최적 처리조건을 도출하였다. 부품분리 효율은 장착된 부품의 전체무게에 대한 분리된 부품의 무게비로 평가하였으며, 각 처리조건에서 3개의 WPCB에 대해 평균값으로 계산하였다. 연마석 높이 1.5 mm, 회전속도 5500 rpm, 이동속도 1 cm/s 처리조건으로 3 회 처리 시, 95.2 %의 부품분리가 가능하였다. 처리 후 WPCB는, 부품, 부품이 탈거된 WPCB, 연삭분말로 분리되었으며, WPCB의 금속성분 함량은 17.9 wt%였으며, 이 중 48.4 % 금속성분(8.7 wt%)은 부품에 함유되어 있음을 확인하였다. WPCB에서 총 20개 금속원소가 검출되었으며, 이 중 Cu, Al, Fe, Pb가 전체 금속의 90.7 %를 차지하였고, Pb, Ag는 연삭분말에 농축되어 분포하였다.

주요어 : 폐인쇄회로기판, 연삭, 부품분리, 금속함량, 성분분포

서 론

전자, 정보통신 및 컴퓨터 등 첨단산업이 발전함에 따

라 다양한 전기/전자제품의 생산 및 소비가 꾸준히 증가하고 있으며, 소비자의 기능 및 디자인에 대한 기대수준이 높아짐에 따라 새로운 제품의 개발기간이 점차 단축되고, 이로 인하여 폐전기/전자제품의 발생량이 급격히 증가하고 있는 실정이다(Lee et al., 2000; Cui and Forssberg, 2003; Lee et al., 2007, Cui and Forssberg, 2007; Khetriwaal et al., 2009). 한편, 대표적인 전기/전자부품중의 하나인 인쇄회로기판(PCB, printed circuit board)은 저항기(resistor), 트랜지스터(transistor), 콘덴서(capacitor) 등과 같은 다양한 전기/전자부품(EECs, electric/electronic components)이 장착되어 각 부품을

2012년 8월 29일 접수, 2012년 11월 4일 심사완료
2012년 12월 13일 게재확정

1) 강원대학교 에너지·자원공학과

2) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

*Corresponding Author(이재령)

E-mail: jr-lee@kangwon.ac.kr

Address: Department of Energy & Resources Engineering,
Kangwon National University Chuncheon, Kangwon-do,
200-701

제어하는 역할을 하는 장치로서 대부분의 전자제품에 이용되고 있어, 폐전기/전자제품의 발생량 증가는 폐PCB(WPCB, wasted printed circuit board)의 발생량 증가로 연결되어 다양한 제품의 WPCB 발생이 증가할 것으로 예상되고 있다.

일반적으로 WPCB에 함유된 금속성분으로는 알루미늄(Al), 구리(Cu), 철(Fe) 등의 주성분과 금(Au), 은(Ag), 팔라듐(Pd)과 같은 귀금속도 미량 함유되어 있는 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd) 등과 같은 유해 원소의 함유 가능성도 높아 처리되지 않은 상태로 방치할 경우 환경오염을 발생하고 다양한 생물의 생명활동에도 나쁜 영향을 줄 수 있다고 보고되고 있다(Li et al., 2007; Huang et al., 2009).

현재 일반적인 WPCB처리공정에서는 Cu, Al과 같은 주 금속성분과 고가의 귀금속만을 회수할 목적으로 전기/전자부품이 장착된 상태의 WPCB를 바로 shredder 및 stamp mill 등과 같은 파/분쇄 장치를 이용해 분쇄하고, 이로부터 회수대상 금속성분을 습식 혹은 건식 제련방식으로 처리하고 있다(Lee et al., 2002; Eswaraiah et al., 2008; Wu et al., 2008; Das et al., 2009; Duan et al., 2009; Yoo et al., 2009; Guo et al., 2011). 하지만 이러한 처리공정은 WPCB에 함유된 미량의 금속성분과 유해 중금속의 처리에는 부적절하며, 또한 금속 회수공정 후 다량의 공정부산물물이 발생되는 단점을 가지고 있다(Kinoshita et al., 2003; Cui and Zhang, 2008; Zuou and Qiu, 2010; Long et al., 2010; Kim et al., 2011; Jha et al., 2012; Yang et al., 2011).

이러한 이유에서 최근 WPCB로부터 부품을 열처리 혹은 화학적 처리에 의해 우선적으로 분리하는 연구가 진행되고 있다. 하지만, 열적처리 방식은 부품장착 방식 및 WPCB유기물 종류에 따라 제한적이며, 화학적 처리 방식은 WPCB의 구조 및 층수에 따라 사용이 제한적이라 할 수 있다(Li et al., 2006; Wu and Zhang, 2010; Duan et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 다양한 형태 및 구조의 WPCB에 적용 가능한 연삭방식의 부품분리 장치를 제작하여, 다층구조와 비교적 많은 부품이 장착되어 있는 폐비디오(WVCR, wasted video cassette recorder) WPCB를 대상으로 부품분리 효율 및 분리 후 산물에 대한 금속성분, 함량 등의 특성평가를 실시하였다.

실험방법

실험장치

본 연구에 사용된 기기는 WPCB에 장착된 EECs를 분

Fig. 1. The pictures of the experimental apparatus for this experiment.

리하기 위해 본 연구실에서 제작한 연삭처리 장치로서 Fig. 1과 같이 기계적 연삭처리를 실시하여 WPCB 윗면에 장착된 EECs의 분리가 가능하도록 하였다. 기기의 구성은 WPCB 후면을 연삭처리하기 위해 연마석 4개(ϕ : 75 mm, 금성연마공업(주))를 설치하였으며, 연마석의 회전속도(grinder speed : 0~5500 rpm), 연마석 높이(height of grinder : 0~1.5 mm)의 조절이 가능하도록 제작하였다. 또한 유압식 실린더(TCDMB20-100, air cylinder) 9개를 하나의 모듈(가로) 300 mm × (세로) 350 mm × (높이) 65 mm)로 구성하여 연삭처리 시 WPCB를 상부에서 눌러 고정할 수 있도록 하였으며, 연삭처리 장치까지 이동(moving speed : 0~5 cm/s) 가능하도록 롤러를 설치하였다. 이외에 WPCB로부터 분리된 EECs를 회수하기 위한 부품 회수장치 및 연삭처리 시, WPCB 후면에서 발생하는 연삭분말을 처리하기 위한 집진장치(vacuum air cleaner, CR-401T, cleon)를 설치하였다.

실험 원료 및 공정

처리대상 WPCB는 다층구조, 단층 금속시트, 비교적

많은 EECs이 장착되어 있는 조건을 만족하는 WVCB에 장착된 WPCB로 선정하였다. WPCB는 가전제품을 수집/해체하는 국내업체로부터 구입한 것으로 1996년에서 2005년 사이에 생산된 WVCB에 포함된 WPCB를 사용하였으며, 제조업체에 따라 WPCB의 크기 및 장착된 EECs의 특성(종류, 개수, 장착위치)이 약간의 차이는 있으나, 일반적인 형태와 구조는 Fig. 2의 상단우측에 나타난 것과 동일하다.

Fig. 2는 본 연구의 실험 공정도로 연삭처리 전, WPCB에 장착된 독립적 형태의 부품을 수선 분리하였다. 독립적 부품은 WPCB로부터 분리가 용이하기 때문에 본 실험에서는 부품분리를 고려하지 않았다. 따라서 본 실험에서는 독립적 형태의 부품을 우선 분리 한 뒤, WPCB에 대한 연삭처리 실험을 진행하였다.

부품분리 실험은 WPCB의 다양성에 근거한 처리결과와 오차를 최소화하기 위해, 동일한 조건에서 3개의 WPCB에 대해 실험한 결과를 평균으로 계산하였다. EECs 분리효율 및 최적조건을 도출하기 위해 연마석의 회전속도(2500, 5500 rpm), 연마석의 높이(0.5, 1.5 mm), WPCB 이동속도(1, 3, 5 cm/s), 처리횟수(1, 2, 3 회)를 변화시키면서 실험하였다. EECs 분리효율(E_{weight})은 식 (1)에 의해 계산하였으며 WPCB에 장착된 전체 EECs의 무게($W_{total \text{ weight of EECs in WPCB}}$)를 100%로 설정하고, 분리되는 EECs를 매 연삭처리 시 회수하여 무게($W_{total \text{ weight of EECs detached by treatment}}$)를 측정하여 계산하였다.

Fig. 2. Flow sheet of disassembly process for this experiments.

$$E_{weight} = \frac{W_{total \text{ weight of EECs detached by treatment}}}{W_{total \text{ weight of EECs in PCB}}} \times 100 \quad (1)$$

WPCB로부터 EECs가 분리된 산물에 대한 특성을 조사하기 위해 EECs 분리 최적 조건으로 WPCB 10개를 처리한 후, 각 산물에 대한 성분 및 함량을 조사하였다. EECs 분리처리 후 산물로는, 연삭처리 된 WPCB (dismantled board), 연삭분말(Abrasion powder), EECs로 구분할 수 있었으며, 각 산물에 대한 금속원소의 종류 및 함량을 확인하기 위해 Chemical Digestion을 이용하여 완전 용해시킨 뒤, 유도결합플라즈마(ICP, Optima 7300 DV, PerkinElmer, USA)를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

Fig. 3(a and b)은 연마석의 회전속도를 2500 rpm로 고정하고, 연마석의 높이(0.5, 1.5 mm), WPCB의 이동속도(1, 3, 5 cm/s)를 조절하면서 EECs분리를 실험한 결과이다. 전반적으로 WPCB의 이동속도가 빠를수록, 1차 처리보다는 2차 처리과정에서 분리효율이 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 연삭 처리되는 WPCB 후면에 부착된 일부 EECs 주변에서는 거의 처리되지 않은 상태로 WPCB가 이동된 결과로 판단된다. 따라서 1차 처리효율이 높을수록 3회 처리 후의 전체 EECs분리 효율이 높게 나타남을 알 수 있었다. WPCB 이동속도 감소(5 → 1 cm/s)에 따른 EECs의 분리효율 증가율(10% 이상)이 전체적으로 높은 경향을 나타냈었다. 이러한 결과는 WPCB의 이동속도 감소에 따라 단위 면적당 처리시간이 증가되어 EECs의 분리효율이 높아진 것으로 판단된다. 한편 연마석의 높이 변화는 2500 rpm의 연삭속도 조건에서는 큰 영향이 나타나지 않았다. 이는 2500 rpm의 연마석 회전속도가 WPCB 후면의 EECs 및 솔더링 부분의 연마에는 충분하지 않아서 발생한 결과로 판단된다. 이에 회전속도를 5500 rpm으로 증가시켜 연삭실험을 진행하였다(Fig. 3(c) and (d)). 이 조건에서도 마찬가지로 1차 처리 효율이 높을수록 전체 EECs분리 효율이 높게 나타나는 경향을 나타내었다. 한편, 저속 연삭조건(2500 rpm)에서와는 달리 WPCB이동속도의 감소에도 큰 영향이 없었으며, 반대로 연마석의 높이 변화에 따라 처리효율이 크게 달라지는 경향을 나타내었다. WPCB 이동속도에 대한 영향성은, 연마속도가 증가함에 따라 WPCB 단위면적당 요구되는 처리시간이 단축된 결과로 판단된다. 또한 연마석 회전속도 5500 rpm, 연마석의 높이 1.5 mm 조건에서 1차 처리 효율이 가장 높게 조사되었

Fig. 3. Disassembly efficiencies of EECs with a change of treatment conditions.

는데, 이는 연삭처리 대상면에 부착된 EECs에 대한 연삭결과라고 판단된다. Fig. 3(d)에서 보논바와 같이 연삭속도 5500 rpm, 연마석 높이 1.5 mm, WPCB 이동속도 1 cm/s 조건으로 3 회 연삭처리에서 가장 높은 EECs 분리효율 (95.2%)을 나타냄을 확인할 수 있었다.

WPCB로부터 분리된 EECs 특성에 대한 실험은 최대 EECs 분리 조건으로 10개의 WPCBs를 처리한 후, 각각의 산물에 대해 분석하였다. 처리과정 중 WPCB의 변화는 Fig. 4에 나타내었다.

임의로 선택한 WPCBs 10개의 총 무게는 3742.2 g (100 wt%)이었으며, EECs분리 효율이 가장 높은 최적 조건(연마석의 회전속도 : 5500 rpm, 연마석의 높이 : 1.5 mm, WPCB 이동속도 : 1 cm/s)으로 처리한 결과, Fig. 5와 같이 연삭처리 된 WPCB(2164.1 g), 연삭분말 (439.2 g), EECs(560.5 g)의 3가지 산물이 발생하였으며, 독립적 형태의 부품은 약 545.2 g(14.6 wt%), 연삭처리 시 발생한 손실량은 33.2 g(0.9 wt%)으로 확인되었다.

WPCB 연삭처리로부터 발생한 산물의 대한 특성평가

Fig. 4. The images of WPCB treated in the optimum conditions (5500 rpm, 1.5 mm, 1 cm/s) by using the apparatus shown in Fig. 1.

Fig. 5. The weights and proportions of the three products after disassembling by using the apparatus shown in Fig. 1.

는 독립적 형태의 부품과 손실된 무게를 제외하고, 연삭 처리된 WPCB, 연삭분말, EECs의 총 무게(3163.8 g)를 100 wt%로 환산하여 실시하였다(Fig. 5).

Fig. 6에서, WPCB, 연삭처리 후 발생한 각 산물에 포함된 금속 및 비금속 성분의 무게(g)와 함량(wt%)을 나타내었다. 10개의 WPCBs에 함유된 금속의 함량은 17.9 wt%로 확인되었다. 연삭처리 후 각 산물에 대한 무게는, 연삭처리된 WPCB 68.4 wt%(2164.1 g), EECs 17.7 wt%(560.5 g), 연삭분말이 13.9 wt%(439.2 g)순으로 조사되었다. 처리 후, EECs가 탈거된 WPCB가 대부분의

무게를 차지하고 있었으나, 전체 금속성분(567.5 g)의 48.4%(274.5 g)는 분리된 EECs에 함유되어 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 WPCB에 부착되어 있는 EECs를 분리하는 것이 WPCB의 재활용을 향상은 물론 효과적인 금속성분 회수에 필수적인 공정이라고 판단된다.

WPCB에 함유된 금속성분을 분석한 결과, 총 20개의 금속원소가 검출되었으며 각 원소에 대해 연삭처리 산물별 함량을 Table 1에 정리하였다. WPCB 함유금속 중 4개 원소(Cu, Al, Fe, Pb)가 전체금속성분의 90.7%를 차

지하고 있었으며, Au, Bi, Mn Sn 성분은 분리된 부품에서만 검출되었다. 연삭처리 된 WPCB에 존재하는 금속

성분의 대부분은 Cu(67.6%)이었으며, 연삭분말에는 전체 Pb의 57.3%가 분포하고 있었다.

Fig. 6. The weights and their ratios for metal and non-metal ingredient in each product.

결론

WPCB에 대한 재활용율은 물론 부착된 EECs에 대한 재사용/재활용율을 향상시키기 위해서는 1차적으로 WPCB로부터 EECs 분리공정이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 다양한 형태의 WPCB에 적용 가능한 연삭방식의 EECs분리기를 제작하여, WPCR에 장착된 WPCB를 대상으로 EECs분리 실험을 실시하였고, EECs분리 후 산물에 대한 특성을 금속원소를 기준으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연삭방식에 의한 EECs 분리는 거의 모든 조건에서 1차 처리 효율이 2차 처리 효율보다 낮게 나타났으며, 이는 연삭처리 대상의 WPCB 후면에 부착되어 있는 일부 EECs에 의해 1차 처리과정에서 연삭면적이 제한된 결과라고 판단된다. 또한 모든 조건에서 1차 처리 효율

Table 1. The content of metal elements in each disassembling product (ppm)

Elements	Dismantled board	Abrasion powder	EECs	Total
Ag	37.5	64.2	47.7	149.4
Al	1,932.2	4,062.7	23,871.5	29,866.4
Au	N.D	N.D	5.5	5.5
Ba	291.0	96.6	81.5	469.1
Bi	N.D	N.D	65.2	65.2
Ca	69.7	49.0	1,318.3	1,437
Co	4.7	N.D	30.6	35.3
Cr	39.2	17.8	48.1	105.1
Cu	34,651.0	27,803.4	35,572.1	98,026.5
Fe	8,677.4	2,224.0	12,546.4	23,447.8
Mg	11.7	N.D	40.4	52.1
Mn	N.D	N.D	414.6	414.6
Ni	649.3	223.2	1,297.7	2,170.2
Pb	2,811.1	6,523.3	2,045.0	11,379.4
Sb	35.7	N.D	230.7	266.4
Si	82.0	7.6	3,573.3	3,662.9
Sn	N.D	N.D	1,100.4	1,100.4
Sr	N.D	18.4	179.9	198.3
Ti	449.1	N.D	423.4	872.5
Zn	1,507.1	268.3	3,856.7	5,632.1
Total	51,248.7	41,358.5	86,749.0	179,356.2

이 높을수록 3 회 반복처리 후, EECs 분리효율이 높게 나타남을 알 수 있었다.

2) 연마석 회전속도 2500 rpm 조건에서는 WPCB 이동속도를 감소할수록 처리 효율이 높게 나타났으며, 반면에 5500 rpm 조건에서는 이동속도에 거의 영향을 받지 않았다. 연마석의 높이 또한 2500 rpm 조건보다는 5500 rpm 조건에서 크게 영향을 주는 것으로 조사되었으며, 연마석의 회전속도 5500 rpm, 연마석의 높이 1.5 mm, WPCB의 이동속도 1 cm/s 조건에서 95.2%의 EECs분리가 가능함을 알 수 있었다.

3) WPCB에 함유된 총 금속성분은 17.9 wt%로 조사되었으며, 연삭처리에 의해 발생된 산물은 연삭처리 된 WPCB, 연삭분말, EECs로 구분할 수 있었다. 이 중 연삭처리 된 WPCB가 전체무게의 68.4 wt%를 차지하고 있었으나, 금속성분의 48.4%는 EECs에 분포하고 있었다. WPCB 함유금속 중 4개 원소(Cu, Al, Fe, Pb)가 전체금속성분의 90.7%를 차지하고 있었으며, Au, Bi, Mn Sn 성분은 분리된 EECs에서만 검출되었고, 연삭처리 된 WPCB에 존재하는 금속성분의 대부분은 Cu(67.6%)이었으며, 연삭분말에는 전체 Pb의 57.3%가 분포함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20105010006B)

참고문헌

- Cui, J.R. and Forssberg, E., 2003, "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B99, pp. 243-263.
- Cui, J.R. and Forssberg, E., 2007, "Characterization of shredded television scrap and implications materials recovery," *Waste Management*, Vol. 27, pp. 415-424.
- Cui, J.R. and Zhang, L., 2008, "Metallurgical recovery of metals from electronic waste : A review," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 158, pp. 228-256.
- Das, A., Vidyadhar, A. and Mehrotra, S.P., 2009, "A noble flowsheet for the recovery of metal value from waste printed circuit boards," *Resources, Conservation and recycling*, Vol. 53, pp. 464-469.
- Duan et al., 2009, "Recovery of metals from waste printed circuit boards by mechanical method using a water medium," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, pp. 478-482.
- Duan, H.b., Hou, K., Li, J.H. and Zhu, X.D., 2011, "Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns," *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, pp. 392-399.
- Eswaraiah, C., Kavitha, T., Vidyasagar, S. and Narayanan, S.S., 2008, "Classification of metals and plastics from printed circuit board (PCB) using air classifier," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 47, pp. 565-576.
- Guo et al., 2011, "Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB)," *Waste Management*, Vol. 31, pp. 2161-2166.
- Huang, K., Guo, J. and Xu, Z.M., 2009, "Recycling of waste printed circuit boards : review of current technologies and treatment status in china," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 164, pp. 399-408.
- Jha et al., 2012, "Leaching of lead from solder material of waste printed circuit boards (PCBs)," *Hydrometallurgy*, Vol. 121-124, pp. 28-34.
- Khatri, D.S., Krauchi, P.L. and Widmer, R., 2009, "Producer responsibility for e-waste management : key issues for consideration-learning from swiss experience," *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 153-165.
- Kim et al., 2011, "Leaching kinetics of copper from waste circuit boards by electro-generated chlorine in HCl solution," *Hydrometallurgy*, Vol. 107, pp. 124-132.
- Kinoshita et al., 2003, "Metal recovery from non-mounted wiring boards via hydrometallurgical processing," *Hydrometallurgy*, Vol. 69, pp. 73-79.
- Lee, C.H., Chang, S.L., Wang, K.M. and Wen, L.C., 2000, "Management of scrap computer recycling in Taiwan," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. A73, pp. 209-220.
- Lee, J.C., Kill, D.S., Nam, C.W. and Choi, J.C., 2002, "The grinding characteristics of the metal components in printed circuit boards (PCBs) scrap by the swing-hammer type impact mill," *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, Vol. 11, No. 2, pp. 28-35.
- Lee, J.C., Song, H.T. and Yoo, J.M., 2007, "Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea," *Resources, Conservation and recycling*, Vol. 50, pp. 380-397.
- Li et al., 2006, "Status quo of e-waste management in mainland China," *Journal of Mater cycles Waste Management*, Vol. 8, No. 1, pp. 13-20.
- Li et al., 2007, "Recycling technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards," *Environmental Science and Technology*, Vol. 41, No. 1,

- pp. 1995-2000.
- Long et al., 2010, "Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 177, pp. 626-632.
- Wu, G.Q. and Zhang, Z.K., 2010, "Recycling of waste printed circuit boards," *Circuit world*, Vol. 36, No. 4, pp. 35-39.
- Wu, J., Li, J. and Xu, Z.M., 2008, "Electrostatics separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separation," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 159, pp. 230-234.
- Yang, H.Y., Liu, J.G. and Yang, J.K., 2011, "Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 187, pp. 393-400.
- Yoo et al., 2009, "Enrichment of the metallic component from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using stamp mill," *Waste Management*, Vol. 29, pp. 1132-1137.
- Zuou, Y. and Qiu, K., 2010, "A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 175, pp. 823-828.

김 영 진

2009년 강원대학교 지구시스템공학과
공학사

2011년 강원대학교 지구시스템공학과
공학석사

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 박사과정
(E-mail; yjcokr@kangwon.ac.kr)

이 정 훈

2013년 강원대학교 에너지·자원공학과
공학사 (졸업예정)

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 학사과정
(E-mail; meju1032@nate.com)

이 재 천

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(本學會誌 第49卷 第1号 参照)

이 재 령

1996년 한양대학교 자원공학과 공학사
1998년 한양대학교 자원공학과 공학석사
2002년 Tohoku University 재료공학과
공학박사

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 조교수
(E-mail; jr-lee@kangwon.ac.kr)