

노트북 인쇄회로기판 전자부품으로부터 탄탈럼의 분리

권석제 · 박승수 · 김성민 · 조아람 · 송유진* · 박종원* · †박재구

한양대학교 자원환경공학과, *(주)지알엠

Separation of Tantalum from Electronic Components on Laptop Printed Circuit Board Assembly

Seokje Kwon, Seungsoo Park, Seongmin Kim, Aram Joe, Youjin Song*,
Poongwon Park* and †Jaikoo Park

Department of earth resources and environmental engineering, Hanyang University, Korea

*Global Resources & Materials Co., Ltd.

요 약

노트북 실장인쇄회로기판(Printed Circuit Board Assembly, PCBA)으로부터 탄탈럼을 회수하기 위한 선별실험을 실시하였다. 우선 노트북 실장인쇄회로기판에 실장된 전자부품(Electronic Components, ECs)을 자체개발한 실험장치를 이용하여 기판으로부터 분리하였다. 분리된 전자부품을 체분리하여 -6.35+2.80 mm구간에서 전체 탄탈럼 캐퍼시터의 약 93.2 wt.%를 회수할 수 있었다. 회수된 탄탈럼 캐퍼시터를 해머밀로 분쇄 후, 자력선별기를 통해 자력세기 300 가우스에서 분쇄물 중의 전극을 제거하였다. 전극이 제거된 자력선별 산물을 대상으로 넬슨 선별기(Knelson concentrator)를 이용한 선별 실험 결과 Bowl의 회전수 200 rpm, 유동층수 유량 7 L/min에서 76.9%의 최대 선별효율을 보였으며, 이때 품위 및 회수율은 각각 약 81.1%, 약 78.8%를 나타내었다.

주제어 : 탄탈럼 캐퍼시터, 인쇄회로기판, 전자부품, 부품분리, 비중선별

Abstract

The study to obtain tantalum concentration from electronic components (ECs) on Printed circuit board assembly (PCBA) of laptop was conducted. Electronic components on laptop PCBA were detached from boards by using self-developed experimental apparatus. The detached electronic components were sieved and 93.2 wt.% of tantalum capacitors were concentrated from the size interval from 2.80 mm to 6.35 mm. The tantalum capacitors were pulverized by hammer mill and electrodes (anode and cathode) were removed from the grinding products by using magnetic separators under the magnetic force of 300 Gauss. Finally, tantalum concentrate was concentrated from the magnetic separator products by using Knelson concentrator, and the maximum efficiency of 76.9% was achieved under the operating condition of bowl rotating speed of 200 rpm, and fluidizing water flowrate of 7 L/min. The grade and recovery of Ta concentrate under the condition were 81.1% and 78.8%, respectively.

Key words : Tantalum capacitor, Printed circuit board, Electronic components, Electronic components disassembly, Gravity concentration

· Received : December 28, 2015 · Revised : January 28, 2016 · Accepted : February 11, 2016

†Corresponding Author : Jai Koo Park (E-mail : jkpark@hanyang.ac.kr)

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimri-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Korea

©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.

1. 서 론

최근 IT기술이 빠르게 발전하고 소비자들의 전자제품 교환주기가 점차 짧아짐에 따라 전자 폐기물(e-waste)의 발생량이 급증하고 있다¹⁻³. 모든 전기전자제품 내부에는 Au, Ag, Cu 등의 유가금속이 다량 함유된 실장인쇄회로기판(Printed circuit board assembly, PCBA)이 있다. 실장인쇄회로기판은 구리와 수지로 이루어진 인쇄회로기판(Printed Circuit Boards, PCBs)에 탄탈륨 캐퍼시터, MLCC 등의 전자부품(Electronic Components, ECs)이 실장되어 있는 것을 말한다. 현재는 건식제련공정을 통해 금, 은 구리 등이 대부분 회수되고 있으나^{4,5} 탄탈륨을 비롯한 희유금속은 활용 가치가 매우 높음에도 불구하고 그 양이 매우 적어 회수되지 못하고 있다.

탄탈륨(Tantalum)은 르완다, 콩고, 중국, 호주 등 매우 한정된 지역에서만 생산되며, 특히 호주의 Perth 지역에서 전세계 생산량의 약 75 %가 생산되며 국내의 경우 생산이 전무한 실정이다⁶. 하지만 산업분야에서는 그 용도가 매우 다양해 인공 뼈, 나사, 화학공업, 철삭공구, 전자부품의 필수재료로써 사용되고 있는데 이 중 캐퍼시터의 용도로 전체 탄탈륨 생산량의 약 40 %가 소비되고 있는 것으로 알려져 있다. 향후 전자제품의 소형화와 그 성능의 증대를 위해 알루미늄 캐퍼시터보다 안정적이고 용량이 큰 탄탈륨 캐퍼시터를 선호하는 흐름에 따라 탄탈륨의 사용량은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다^{7,8}. 그럼에도 불구하고 탄탈륨 타겟 스크랩, 폐 탄탈륨 콘덴서 등이 전량 유출되는 것으로 알려져 있어⁹ 리사이클링을 통한 탄탈륨 회수기술의 개발은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 폐 실장인쇄회로기판으로부터 탄탈륨 캐퍼시터를 분리하여 파분쇄 및 자력선별을 통해 수지 성분과 자성체가 제거된 탄탈륨 1차 정광을 얻었다. 이후 1차 정광을 대상으로 벨슨 선별기를 이용하여 탄탈륨 2차 정광을 회수하였으며 선별기의 Bowl 회전수, 유동층수 유량에 따른 정광의 품위, 회수율 및 선별효율에 대해 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료

노트북 실장인쇄회로기판에는 약 50 wt.%의 전자부품이 포함되어 있다. 본 연구에서는 자체 개발한 전자부품 분리장치(특허등록 10-1367307)를 이용하여 실장된 대

부분의 전자부품을 분리하였다(Fig. 1 참조)¹⁰. 분리된 전자부품은 +6.5 mm/+2.38 mm -6.35 mm/-2.38 mm의 3 입도구간으로 체분리하였다. +2.38 mm -6.35 mm 구간에서 회수된 부품으로부터 수선별(Hand picking)을 통해 약 93.2 wt.%의 탄탈륨 캐퍼시터를 회수하여 해머밀의 시료로 하였다.

한편, 탄탈륨 캐퍼시터는 Fig. 2와 같이 크게 내화성 수지(Fireproof Resin), 탄탈륨, 전극 등 세 부분으로 구분된다. Table 1은 시료의 ICP 분석결과를 나타낸 것이다. 탄탈륨이 약 44% 정도로 가장 함량이 높고, 그 외 Mn, Si, Ag 등으로 이루어져 있는 것으로 확인되었다.

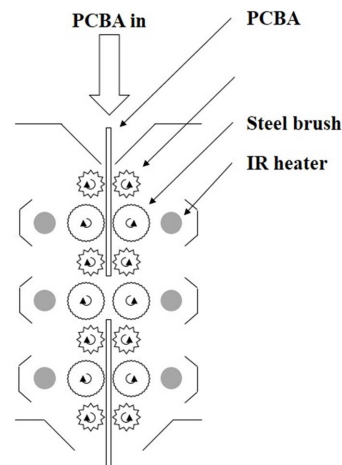


Fig. 1. Schematic of Self-developed disassembly electronic components device.

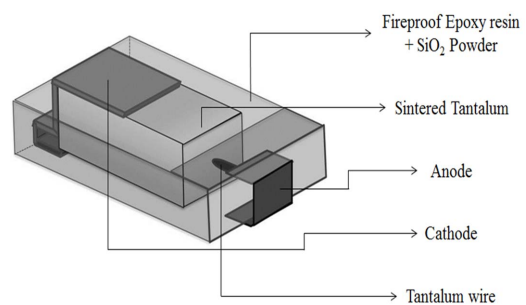


Fig. 2. Schematic illustration of SMD (Surface mounted device) type Tantalum capacitor.

Table 1. Composition of Tantalum Capacitor from ICP-AES (Unit: wt.%)

Ta	Mn	SiO2	Ag	Sn	etc.
44.20	17.50	16.23	3.30	0.30	18.47

2.2. 전처리

Fig. 3에 본 연구의 전체 실험 과정을 나타내었다. 우선 탄탈럼 캐퍼시터 구성물의 단체분리를 위하여 충격식 분쇄장치인 해머밀을 이용해 1mm 이하로 분쇄하였다. Fig. 4는 이들 분쇄산물 중 $-1,000\ \mu\text{m} + 710\ \mu\text{m} / -710\ \mu\text{m} + 500\ \mu\text{m} / -500\ \mu\text{m} + 355\ \mu\text{m}$ 구간의 시료를 샘플링 후 콜드 마운팅하여 전자현미경으로 관찰한 것이다. 그 결과 $1,000\ \mu\text{m}$ 이하의 모든 입도구간에서 탄탈럼, 전극, 수지의 단체분리가 일어났음을 전자현미경을 통하여 알 수 있었다. 연성이 있는 금속성분의 전극은 대부분이 $710\ \mu\text{m}$ 이상의 큰 입도에서만 관찰되는 것을 확인하였다.

단체분리된 분쇄물은 체분리를 하여 $+125\ \mu\text{m}$ 구간에서는 Cross belt type의 건식 자력선별기를, $-125\ \mu\text{m}$ 구간에서는 Drum type의 습식 자력선별기를 각각 이용하여 300 Gauss의 동일한 자력에서 선별 실험을 실시

하였다¹¹⁾. 그 결과 약 8 wt.%의 전극을 제거하여 선별된 탄탈럼 1차정광을 넬슨 선별실험의 시료로 사용하였다.

2.3. 선별실험

자력선별 과정에서 회수한 탄탈럼 1차정광에는 밀도가 서로 다른 내화성 수지 성분과 탄탈럼이 혼재되어 있다. 이에 따라 미립자 선별에서 분리효율이 우수한 것으로 알려진 Fig. 5의 넬슨 선별기를^{12,13)} 이용하여 탄탈럼 2차정광을 회수하였다. 넬슨 선별기의 조작변수는 Bowl의 회전수를 200 - 1,100 rpm, 유동층수의 유량을 2-9 L/min으로 각각 하였으며, 이들 범위 내에서 품위, 회수율 및 선별효율(Newton efficiency)¹⁴⁾을 평가하였다. 한편 급광, 정광, 광미의 품위는 Sodium Polytungstate용액(S.G. 2.70)을 이용한 중액선별을 통해 측정하였다.

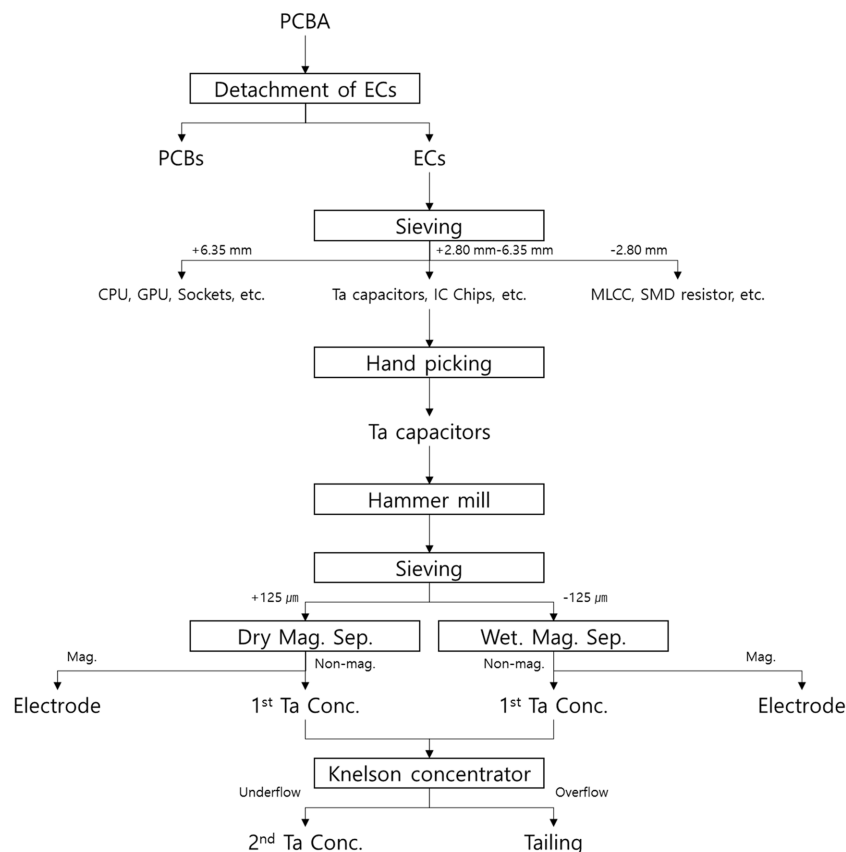


Fig. 3. Flowchart of Tantalum concentration process for laptop LCBA.

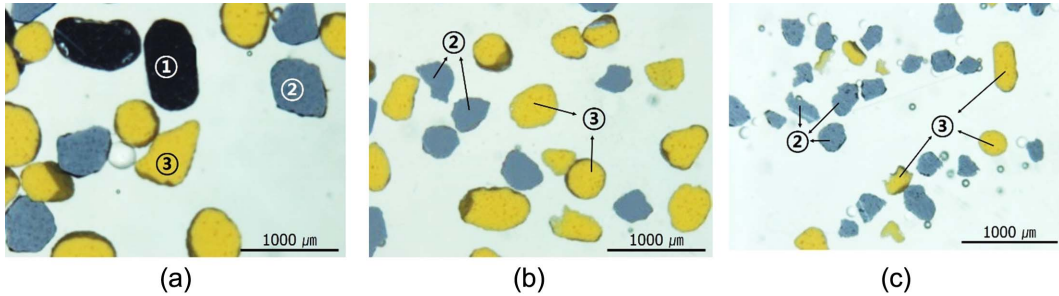


Fig. 4. Microphotographs of ground Tantalum capacitors: (a) -1,000+710 μm, (b) -710+500 μm, (c) -500+355 μm (① Electrode, ② Sintered Tantalum, ③ Fireproof resin).

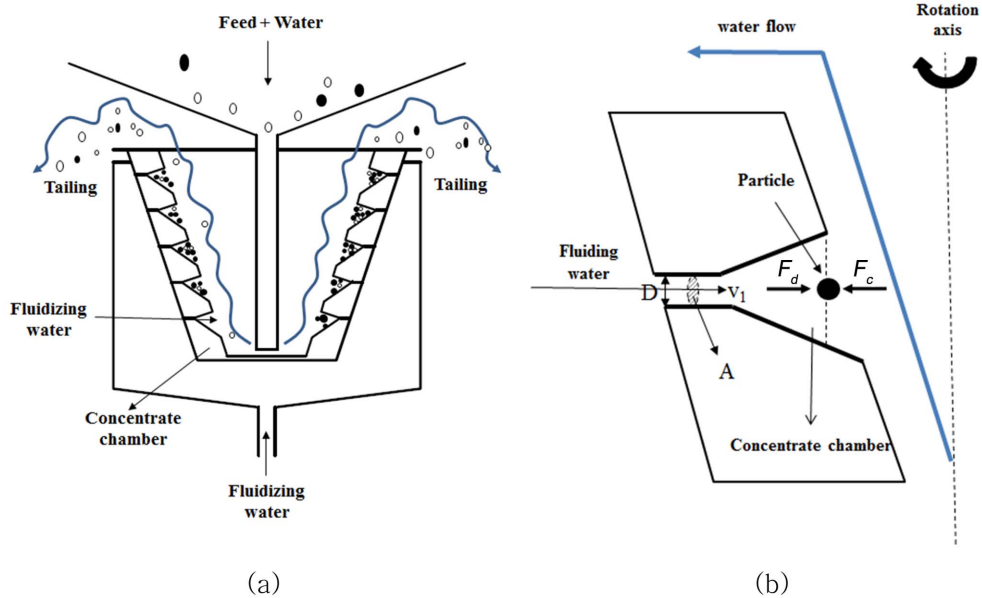


Fig. 5. Schematic diagrams of Knelson concentrator: (a) Conceptual graphic, (b) Two dominant forces in the concentration chamber.

3. 실험결과

3.1. 정광의 품위

넬슨 선별기 유동층수의 유량과 Bowl의 회전수에 따른 정광 중 탄탈럼의 품위를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6으로부터 Bowl의 회전수가 낮을수록, 유동층수의 유량이 높을수록 정광의 품위가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 선별기 내의 Bowl의 회전에 의해 발생하는 원심력 F_c 와 Concentration chamber 내부로 유입되는 유동층수에 따라 생기는 유체항력 F_d 의 차이로 발생하는 결과로 생각된다. 원심력 F_c 그리고 유체항력 F_d 와 주요 실험 변수들간의 관계를 식(1)과 식(2)에 각각 나타내었다.

$$F_c(\text{Centrifugal force}) \propto \frac{N^2 D^3 \rho}{R^2} \quad (1)$$

$$F_d(\text{Drag force}) \propto \rho_f v^2 D^2 \quad (2)$$

여기서 N 은 입자의 회전수, D 는 입자의 크기, ρ 는 입자의 밀도, R 은 입자의 회전반경, ρ_f 는 유체의 밀도, v 는 유동층수의 유속이다.

식 (2)에 의하면 유체항력 F_d 는 유속 v 의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다. 즉 유량이 증가함에 따라 밀도가 낮은 수지성분입자($\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$)와 밀도가 높지만 크기가 작은 탄탈럼($\rho = 16.65 \text{ g/cm}^3$) 입자가 항력의 영

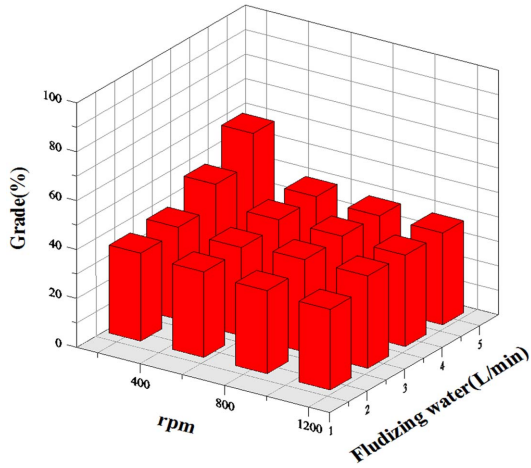


Fig. 6. Grade distribution under different bowl rotating number and fluidizing water flowrate.

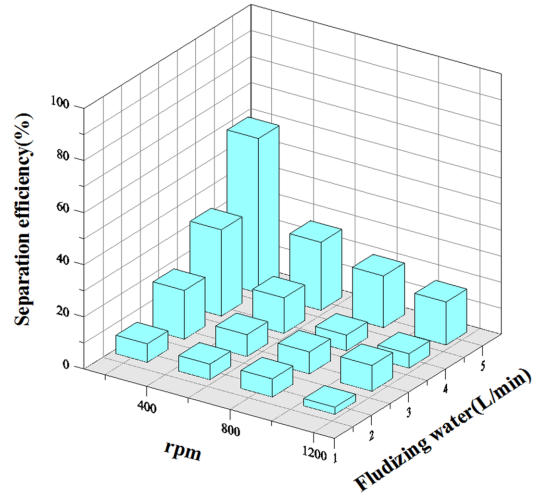


Fig. 7. Separation efficiency under different bowl rotating number and fluidizing water flowrate.

향으로 Concentration chamber 밖으로 배출되는 양이 증가하게 된다. 따라서 유동층수의 유량이 증가함에 따라 입경이 크고 밀도가 높은 탄탈럼 입자가 Concentration chamber 내부에 상대적으로 많이 잔류하게 되어 정광의 품위가 높아지게 된다.

3.2. 선별효율

Fig. 7은 각 실험조건에서의 선별효율(Newton efficiency)을 나타낸 것이다. 선별효율은 정광에서의 유용성분의 회수율과 무용성분의 회수율 차로 표현된다. Fig. 7로부터 Bowl의 회전수가 낮을수록(1200 → 200 rpm) 그리고 유동층수의 유량이 높을수록(1 → 5 L/min) 선별효율이 높아지는 것을 확인하였고, 이는 정광에서 무용성분의 회수율이 상대적으로 낮아졌기 때문으로 생각된다.

다음으로 선별의 최적조건의 도출을 위하여 Bowl의 회전수를 200 rpm으로 고정하고, 유동층수의 유량을 6-9 L/min 구간까지 확대하여 유량에 따른 회수율과 품위를 Fig. 8에 나타내었다. 유량이 증가함에 따라 탄탈럼의 품위는 점차 높아지지만 회수율은 감소하는 경향을 나타낸다. 즉 품위 증가의 경우에는 유동층수 유량이 증가함에 따라서 Concentration chamber 내의 수지성분의 입자 제거가 원활하기 때문으로 생각되며, 회수율의 감소는 유동층수의 유속이 증가함에 따라 Chamber에 갇혀야 하는 탄탈럼 입자가 감소하기 때문으로 보인다. Fig. 9는 유동층수 유량에 따른 선별효율을 나타낸 것이다. 선별효율은 유동층수 유량에 따라 점차 증가하여

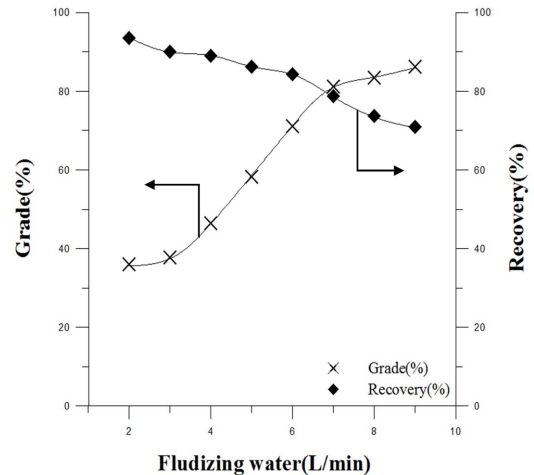


Fig. 8. Grade and Recovery vs. fluidizing water flowrate (N = 200 rpm).

7 L/min에서 약 76.9%의 최대선별효율을 보이며 이후 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 7-9 L/min 영역에서는 유량이 증가함에 따라 수지성분 뿐만 아니라 Chamber 외부로 배출되는 탄탈럼 입자가 상대적으로 증가하기 때문으로 생각된다. 결과적으로 넬슨 선별기를 이용한 본 실험에서는 Bowl의 회전속도 200 rpm, 유입유량 7 L/min으로 했을 때 최대선별효율을 보였으며, 이때 탄탈럼의 품위와 회수율은 각각 약 81.1%, 78.8%이었다.

Table 2. Yield of magnetic separation for pulverized Tantalum capacitor at 300 Gauss

Ta capacitor	Sieving		Magnetic separation		
100 wt.%	-1,000 +125 μm	73.46 wt.%	(Cross-belt type)	Magnetic:	7.46 wt.%
				Non-magnetic:	66.00 wt.%
	-125 μm	26.54 wt.%	(Drum type)	Magnetic:	0.49 wt.%
				Non-magnetic:	26.05 wt.%

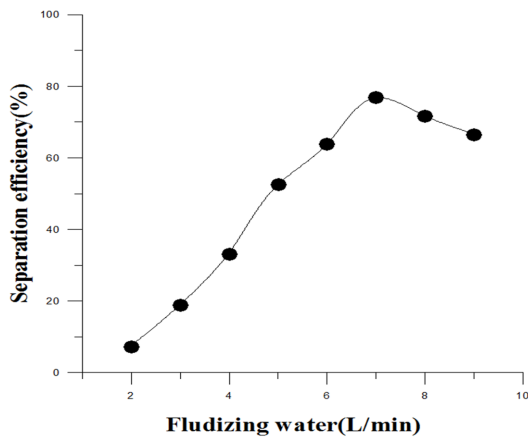


Fig. 9. Separation efficiency vs. fluidizing water flowrate (N = 200 rpm).

4. 결 론

노트북 인쇄회로기판에 부착된 전자부품으로부터 탄탈럼 캐퍼시터를 분리한 후, 과분쇄 선별과정을 거쳐 희유금속 탄탈럼 정광을 얻었다. 이하 본 실험연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 폐 노트북 인쇄회로기판으로부터 자체 개발한 부품 분리장치를 이용하여 전자부품을 분리 후, 체분리를 통해 -6.35 + 2.80 mm 구간에서 탄탈럼 캐퍼시터를 수집하였다.
2. 탄탈럼 캐퍼시터는 해머밀을 통해 1 mm 이하로 분쇄하여 구성성분들을 단체분리 할 수 있었으며, 이들 중 전극성분은 습식과 건식의 자력선별을 통해 제거할 수 있었다.
3. 자력선별을 통해 얻은 탄탈럼 1차정광을 대상으로 벨슨 선별기를 이용하여 선별실험을 실시하였다. 실험 결과 최대선별효율을 나타내는 조건은 Bowl의 회전수 200 rpm, 유동층수 유량 7 L/min으로 확인하였다. 이때의 품위와 회수율, 선별효율은 각각 81.1%, 78.8%, 76.9%로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20145010100780).

References

1. Zeng, X., et al., 2012: *Current status and future perspective of waste printed circuit boards recycling*, Procedia Environmental Sciences, 16(590-597).
2. Zhou, Y., K. Qiu, 2010: *A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards*, Journal of Hazardous Materials, 175(1), pp. 823-828.
3. Jeong, J.-K., J.-C. Lee, J.-c. Choi, 2015: *Characterization of Metal Composition in Spent Printed Circuit Boards of Mobile Phones*, Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 24(3), pp. 5.
4. Duan, H., et al., 2015: *Systematic characterization of generation and management of e-waste in China*, Environmental Science and Pollution Research, 1-15.
5. Cui, J., L. Zhang, 2008: *Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review*, Journal of hazardous materials, 158(2), pp. 228-256.
6. Kabangu, M., P. Crouse, 2012: *Separation of niobium and tantalum from Mozambican tantalite by ammonium bifluoride digestion and octanol solvent extraction*, Hydrometallurgy, 129(151-155).
7. Lee, J.H., I.J. Kim, Y.D. Kim, 2005: *The Apdong Nb-Ta ore deposit, North Korea*, Springer,
8. Spitzok von Brisinski, L., D. Goldmann, F. Endres, 2014: *Recovery of Metals from Tantalum Capacitors with Ionic Liquids*, Chemie Ingenieur Technik, 86(1?2), pp. 196-199.
9. Choi, G.-S., J.-W. Lim, 2008: *Production and Applications of Niobium and Tantalum* the Korea Institute of Metals and Materials, 21(5), pp. 8.
10. Park, S., et al., 2015: *Apparatus for electronic component disassembly from printed circuit board assembly in e-wastes*, International Journal of Mineral Processing,

144(11-15).

11. Wills, B.A., 2011: *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Butterworth-Heinemann,
12. Coulter, T., G. Subasinghe, 2005: *A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators*, Minerals Engineering, 18(1), pp. 9-17.
13. Go, B.-H., et al., 2015: *Separation of Heavy Metals From Contaminated Sediments Using Knelson Concentrator*, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 52(6), pp. 5.
14. Aravamudhan, S., et al., 1984: *Separation based on shape Part II: Newton's separation efficiency*, Powder technology, 39(1), pp. 93-98.

권 석 제

- 세명대학교 바이오환경공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사

박 승 수

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 박사과정

김 성 민

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 석박사 통합과정

조 아 람

- 아산서남대학교 환경화학공학과 공학사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정

송 유 진

- 수원대학교 환경공학과 공학사
- 현재 (주)지알엠 품질관리팀 팀장

박 풍 원

- 우석대학교 화학공학 학사
- 현재 (주)지알엠 원료담당 전무

박 재 구

- 일본 東京大学 자원공학과 공학석사
- 일본 東京大学 자원공학과 공학박사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 교수