

열처리에 의한 폐 인쇄회로기판의 물성변화

김보람 · 박승수 · 김병우 · §박재구

한양대학교 자원환경공학과

Physical Property Changes of Wasted Printed Circuit Board by Heat Treatment

Boram Kim, Seungsoo Park, Byeongwoo Kim and §Jaikoo Park

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

요 약

열처리 조건에 따른 폐 인쇄회로기판의 물성 변화에 대해 조사하였다. 열처리는 200°C부터 325°C까지 공기 및 질소분위기에서 시행하였다. 열중량 분석 결과 인쇄회로기판은 두 단계로 열분해되었으며, 공기 분위기와 질소 분위기 공히 300°C 전후에서 층분리로 인해 인쇄회로기판의 두께가 11~28% 팽창되었다. 기계적 강도는 열처리 유·무에 따라 338.4 MPa에서 20.3~40.2 MPa까지 감소하였다. 열처리한 인쇄회로기판을 파쇄 후 체분리하여 입도에 따른 밀도 분포 및 단계분리도를 측정하였다. 밀도측정 결과, 비금속 입자와 구리 입자가 각각 다른 입도구간에 집중되었다. 구리의 단계분리도는 열처리를 함으로써 1,400~2,000 µm 구간에서 9.3%에서 100%로 향상되었다.

주제어 : 인쇄회로기판, 열처리, 구리회수, 전처리, 단계분리

Abstract

Physical property changes of printed circuit board (PCB) according to heat treatment conditions were investigated. The heat treatment was carried out in air and nitrogen atmosphere at temperature range from 200°C to 325°C. Thermogravimetric analysis showed that the PCB was pyrolyzed in two steps. The thickness of PCB expanded by 11~28% at about 300°C in both air and nitrogen atmosphere as layer disintegration occurred. Mechanical strength of PCB decreased from 338.4 MPa to 20.3~40.2 MPa due to the delamination caused by the heat treatment. The heated printed circuit boards were crushed and sieved for analysis of density distribution and liberation degree of copper according to particle size. As a result of the density distribution measurement, non metallic particles and copper particles were concentrated into different size range, respectively. The liberation degree of copper was improved from 9.3% to 100% at size range of 1,400~2,000 µm by heat treatment.

Key words : Printed circuit board, Heat treatment, Recovery of copper, Preprocess, Liberation

1. 서 론

전기 및 전자 기기의 사용량이 늘어날수록 전자 폐기

물의 발생량 역시 증가하고 있다. 세계 전자 폐기물 발생량은 매년 약 4~5% 증가하고 있으며 2018년에는 49.8 백만 톤이 발생될 것으로 예측된다¹⁾. 따라서 폐

· Received : December 27, 2017 · Revised : January 10, 2018 · Accepted : January 19, 2018

§ Corresponding Author : Jaikoo Park (E-mail : jkpark@hanyang.ac.kr)

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-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.

인쇄회로기판의 발생량도 증가하며 이에 따른 처리의 중요성도 높아지고 있다. 폐 인쇄회로기판(PCB; Printed circuit board)은 금속, 유리섬유, 에폭시수지로 구성된 층상형태로 이루어져 있으며, 고품위의 구리와 유해물질을 함께 함유하고 있다^{2,3)}. 따라서 적절한 처리를 통해 폐 인쇄회로기판으로부터 유기금속 회수를 위한 친환경적인 기술 개발 연구가 진행되고 있다⁴⁻⁸⁾.

폐 인쇄회로기판으로부터 구리를 회수하기 위해서는 제련 공정 이전에 구리를 비금속물질로부터 단체분리하고, 구리입자를 물리적으로 선별하는 전처리공정이 시행되어야 한다. 선행 연구에 따르면 폐 인쇄회로기판으로부터 구리를 단체분리하기 위해서는 인쇄회로기판을 약 150 또는 74 μm 이하까지 분쇄해야 한다^{9,10)}. 하지만 단체분리를 위해 기판을 74 μm 이하로 분쇄 시 금속의 손실률이 70%에 달하며 물리적 선별의 효율도 떨어지므로 높은 입도 구간에서 구리의 단체분리가 이루어져야 한다¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 폐 인쇄회로기판 파·분쇄산물 중 구리의 단체분리를 향상시키기 위한 전처리 과정으로써 열처리 공정을 수행하였다. 이를 위해 열처리가 폐 인쇄회로기판의 물리적 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 열처리 조건에 따른 인쇄회로기판 파쇄산물의 특성 분석 및 화상해석을 통한 구리성분의 단체분리도 평가를 실시하였다.

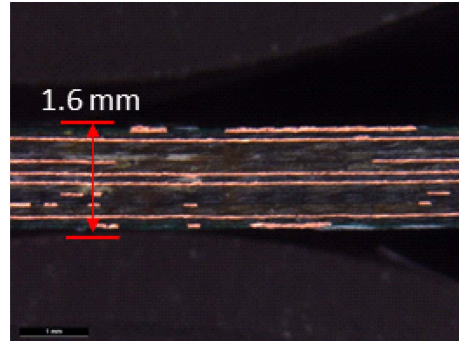


Fig. 1. Cross section of printed circuit board.

2. 시료 및 실험방법

전자부품이 분리된 폐 컴퓨터의 메인보드를 시료로 사용하였다. 인쇄회로기판은 Fig. 1에 표시한 것과 같이 구리, 유리섬유, 에폭시수지가 혼재하는 층상구조로 이루어져 있으며, 두께는 약 1.6 mm이다. 연구에 사용된 인쇄회로기판의 구리 함유량은 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer)를 통해 약 25 wt.%로 확인되었다.

Fig. 2는 본 연구의 공정도이다. 열적특성변화 및 열처리 조건을 설정하기 위해 TGA(thermo-gravimetric analysis, TGA N-1000, Scinco)를 통해 인쇄회로기판의 열거동 분석을 실시하였다. 5°C/min의 승온율로 상

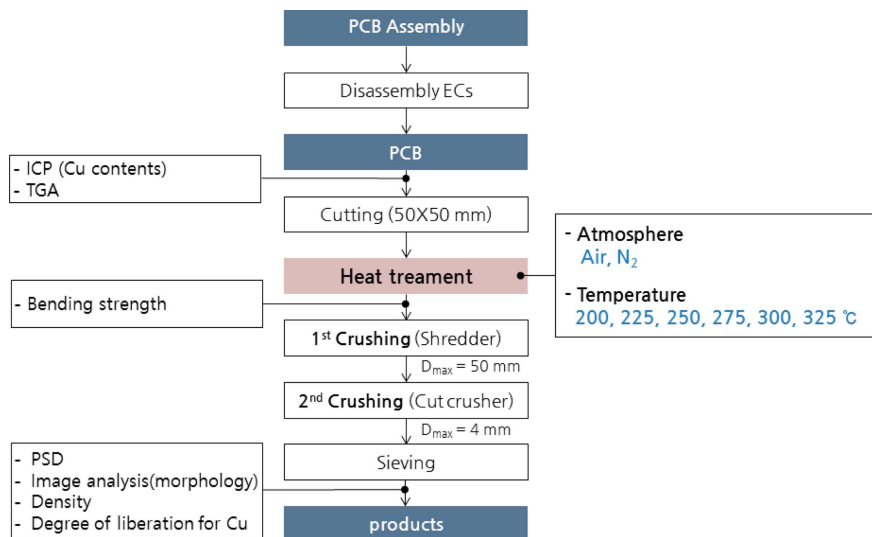


Fig. 2. Experimental flow chart of heat treatment and crushing process of printed circuit board.

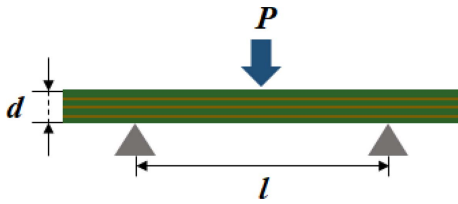


Fig. 3. Schematics diagram of the 3-point bending strength.

온에서 600°C까지 온도를 상승시켰으며, 공기와 질소분위기에서의 열중량 변화를 비교하였다. 질소 분위기 시 유량은 40 mL/min으로 하였다.

열처리 실험을 위하여 인쇄회로기판을 5 cm 크기의 정방형으로 절단하였다. 20개의 시료를 전기로에 투입하였고 열처리 조건은 공기와 질소분위기(1 L/min)에서 각각 5°C/min의 승온 속도로 200, 225, 250, 275, 300, 325°C로 하였다. 열처리 조건별 기판의 두께 변화를 광학현미경(Leica DVM2500, Leica VZ80)으로 측정하여 기판의 팽창성을 확인하였다.

열처리 전후 인쇄회로기판의 기계적 강도변화, 열처리한 기판 파쇄물의 입도분포 및 입자의 형상으로부터 열처리에 따른 기판의 물리적 특성변화를 확인하였다. 기계적 강도는 강도측정기(Tinius Olsen H25KS)를 사용하여 측정하였다. 강도 측정 시편은 50 mm×15 mm 크기로 준비하였다. Fig. 3과 같이 시편 중앙부에 하중을 가하여 파괴되는 순간의 하중 값으로부터 계산식 (1)을 통해 굽힘 강도 σ (MPa)를 구하였다.

$$\sigma = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad (1)$$

여기서, P 는 파괴 순간의 하중(M), l 은 support span 사이의 길이(m), b 는 시편의 폭(m), d 는 시편의 두께(m)를 나타낸다.

굽힘강도가 급감하는 온도 조건에서 기판을 열처리한 후 이를 대상으로 파쇄실험을 실시하였다. 파쇄 실험에는 Shredder와 Cut crusher를 이용하였으며 파쇄산물을 4,000 μ m 부터 250 μ m 이하까지 10개의 구간으로 체분리하여 입도분포를 평가하였다. 입도 분포는 GGS 모델(Gates-Gaudin-Schuhmann)에 적용하여 도시하였으며, 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$F(x) = \left(\frac{x}{\kappa}\right)^\alpha \quad (2)$$

여기서, x 는 입자의 크기(Particle size, μ m), $F(x)$ 는

누적입도분포함수(Cumulative wt. fraction undersize), α 는 분포지수(Distribution modulus), κ 는 크기지수(Size modulus, μ m)를 나타낸다.

입도에 따른 밀도분포와 구리의 단체분리도 측정을 통해 파쇄산물의 단체분리 특성변화를 확인하였다. 파쇄산물 입도에 따른 밀도를 측정하기 위해 Gas pycnometer(Accupyc1340, Micromeritics)를 사용하였다. 파쇄산물 중 구리의 단체분리도는 화상해석을 통하여 측정하였다. 구리의 단체분리도(D_L ; Degree of liberation)는 전체 구리 함량에 대한 단독입자로 존재하는 구리 함량의 비율로 정의되며, 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_L(\%) = \frac{\text{Total amount of valuable matter as free particle}}{\text{Total amount of valuable matter}} \times 100 \quad (3)$$

인쇄회로기판 파쇄물을 체분리하여 2,800~4,000 μ m, 1,400~2,000 μ m, 710~1,000 μ m, 355~500 μ m 구간의 입자를 샘플링 후 콜드마운팅 법으로 연마편을 제작하였다. 연마시편의 단면을 촬영후 각 입자 내 구리의 함유량을 분석하였으며 식 (3)을 통하여 열처리 조건에 따른 구리의 단체분리도를 평가하였다^{12,13}.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 열적 특성 변화

3.1.1. 열중량 분석

Fig. 4는 공기분위기와 질소분위기에서 600°C까지 5°C/min의 속도로 온도를 증가시키면서 온도에 따른 인쇄회로기판의 질량변화를 분석한 결과이다. 공기분위기, 질소분위기 공히 약 200°C에서 310°C까지 substrate

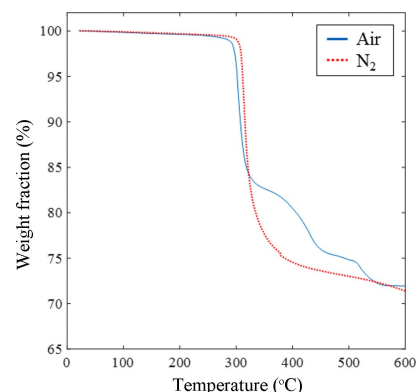


Fig. 4. TGA curves of waste PCB. (Air, N₂)

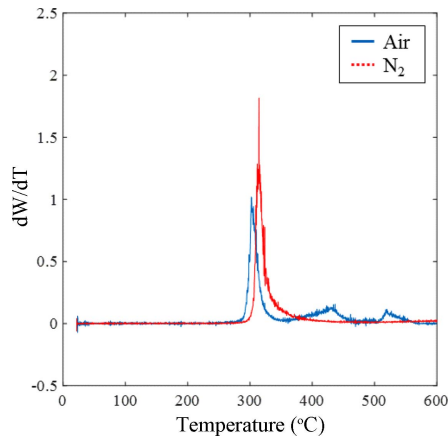


Fig. 5. DTG curves of waste PCB. (Air, N₂)

내부의 수분으로 인해 수증기 및 CO₂가 발생하면서 미량의 질량감소가 일어나는 첫 번째 단계와, 310°C 이상의 온도에서 epoxy resin의 분해 및 탄화로 인해 질량이 급격히 감소하는 두 번째 단계로 열분해가 진행되었다¹⁴⁾. Fig. 5는 인쇄회로기판의 DTG 결과이다. 질량감소가 최대로 발생하는 온도(T_m)는 공기분위기에서는 302°C(T_{m,air}), 질소분위기에서는 314°C(T_{m,N2})로 확인되었다. 600°C 이상에서는 유기물질이 완전히 분해되어 질량 변화가 나타나지 않았다. 반응 종료 후 시료의 질량은 초기 투입량 대비 약 70% 내외로 나타났다.

본 연구의 열처리 목적은 기판 내 유기물의 배출을 최소화하며 동시에 구리의 단체분리도를 높이는 데에 있다. 325°C 이상으로 열처리 할 경우 유해 가스 발생

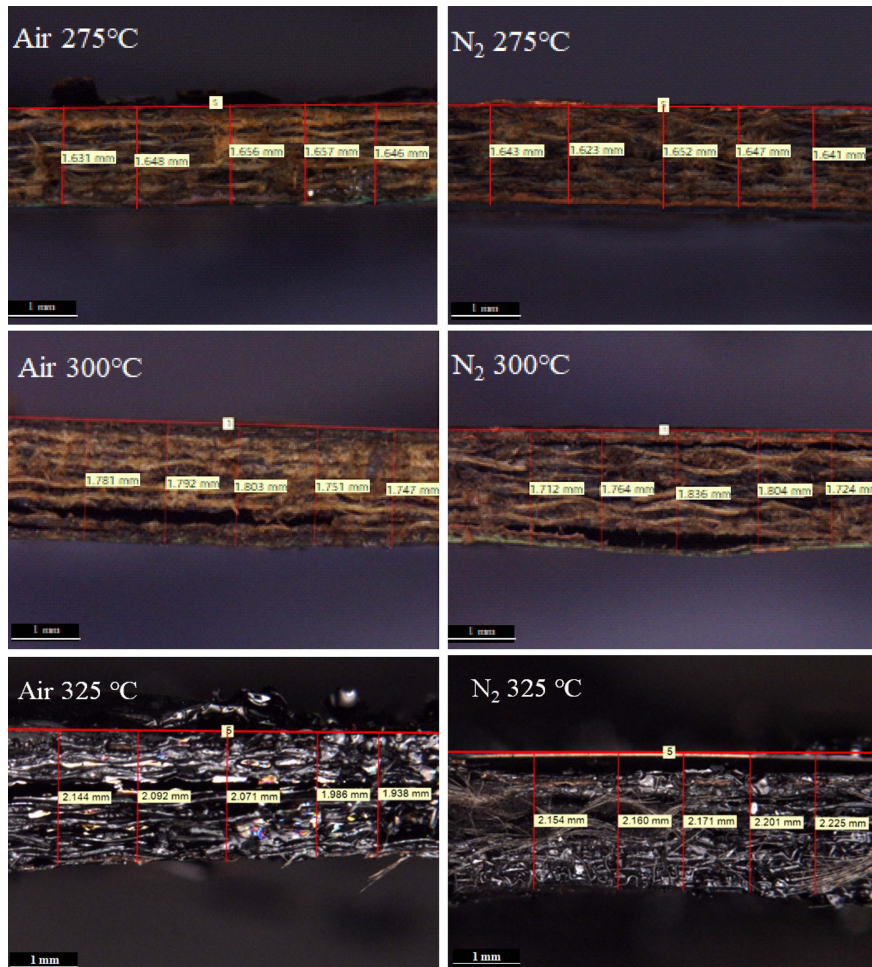


Fig. 6. Cross section of PCB with thermal shock under different conditions.

량 증가 및 구리의 산화가 진행될 것으로 예상하여 325°C를 열처리의 상한 온도로 설정하였다^{15,16}.

3.1.2. 인쇄회로기판의 팽창

200°C에서 325°C까지 25°C 간격으로 인쇄회로기판을 열처리한 후 그 단면을 광학현미경으로 관찰하였다. 실험 결과 중 275, 300, 325°C로 열처리한 기판의 단면을 Fig. 6에 나타내었다. 열처리 분위기에 따른 차이점은 육안으로 크게 관찰되지 않았다. 200°C부터 275°C까지는 기판의 팽창으로 인한 두께 변화가 거의 발생하지 않았다. 300°C 조건에서는 공기분위기와 질소분위기에서 모두 약 11%(1.6 → 1.77 mm, 1.76 mm) 정도 기판이 팽창되었으며, 325°C조건에서는 약 28%(1.6 → 2.04 mm, 2.18 mm) 두께가 증가하였다. 이러한 부피팽창은 열처리에 의해 에폭시수지가 분해되어 수지성분과 함께 고정되어있던 유리섬유가 풀어짐으로써 발생한 것으로 판단된다. 이렇게 층분리된 시료는 내부에 구조적 결함이 발생하여 기계적 강도가 감소될 것으로 예상되어 열처리 조건에 따른 기판의 굽힘 강도를 측정하였다.

3.2. 물리적 특성 변화

3.2.1. 굽힘 강도 변화

기판을 각 조건에 따라 열처리 한 후 굽힘 강도를 측정하였다. 조건 별 10개 시료의 강도를 측정하여 평균값과 표준편차값을 구한 결과는 Fig. 7과 같다. 열처리를 하지 않은 기판의 평균 굽힘 강도는 338.36 MPa이었으며 열처리 온도가 증가함에 따라 굽힘 강도의 평균값이 감소하였다. 공기분위기에서 열처리한 시료의 평균 굽힘 강도는 300°C와 325°C의 온도조건에서 각각 70.75 MPa, 40.15 MPa로 나타났다. 질소분위기에서 열처리한 시료는 300°C까지 평균 굽힘 강도가 완만하게 감소하는 경향을 나타냈으며, 325°C 조건에서 25.26 MPa로 급감하였다. 전반적으로 열처리 온도가 증가할수록 강도의 표준편차가 감소하며 일정 값에 수렴하였다.

열처리 분위기 별 강도가 급감하는 온도는 앞서 DTG 분석 결과로부터 구한 T_m (최대질량변화 발생온도)과 유사성을 보였다. 공기분위기에서는 $T_{m,air}$ 인 302°C 부근(300°C)에서, 질소분위기에서는 T_{m,N_2} 인 314°C 부근(325°C)에서 강도가 급감하였다. 이러한 굽힘 강도의 변화는 인쇄회로기판을 이루는 층상구조의 기계적 결합에 의해서 설명된다. 인쇄회로기판은 적층구조의 형태로 구리, 유리섬유, 에폭시수지로 구성되어 있으며, 각

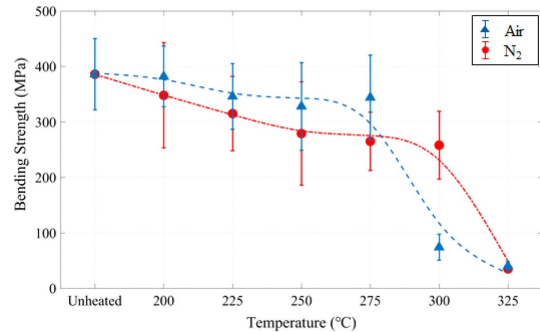


Fig. 7. Bending strength of PCB according to heat treatment condition.

물질은 서로 다른 열팽창계수(CTE: Coefficient of Thermal Expansion)를 갖는다. 구리의 선형열팽창계수는 16.7 ppm/°C이며, 유리섬유, 에폭시수지의 선형열팽창계수는 각각 약 15~100 ppm/°C, 54 ppm/°C이다. 인쇄회로기판에 열을 가하면, 구성물질 간의 열팽창률 차로 인해 기판 내에 내부 응력이 발생한다. 내부 응력이 기판 구성성분간의 결합강도 이상으로 증가하게 되면 기판 내부에서 층분리가 일어나 기계적 강도가 감소되는 것으로 생각된다.

3.2.2. 파쇄산물 형태

질소분위기, 공기분위기에서 각각 300, 325°C로 열처리한 인쇄회로기판 시료 20개와 열처리를 하지 않은 시료 20개를 Shredder, Cut crusher를 사용하여 2단계로 파쇄하였다. Fig. 8은 열처리를 하지 않은 시료의 파쇄산물이며, Fig. 9는 질소분위기에서 325°C로 열처리한 시료의 파쇄산물이다. 열처리를 하지 않은 기판의 파쇄 산물은 2차 파쇄 이후에도 물질간의 적층구조를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 반면 질소분위기에서 325°C로 열처리된 기판의 경우, 1차 파쇄되었을 시 이미 구리 및 유리섬유 등 구성물 일부가 분리되었으며, 2차 파쇄 시에는 구리 입자가 단체분리된 형태로 산출되는 것이 관찰되었다. 공기분위기에서 열처리한 시료에서도 이와 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

3.2.3. 입도분포 및 입자 형상

파쇄산물을 4,000 μm부터 250 μm 이하까지 총 10개의 구간으로 체분리하여 입도분포를 구하고, 이를 GGS 모델에 적용하였다(Fig. 10). 열처리 온도가 올라갈수록 분위기와 관계없이 분포지수인 α 값은 감소하였으며, 크기 지수인 κ 값은 증가하였다. 이는 열처리된

시료가 그렇지 않은 시료에 비해 높은 입도에서 단체분리되었기 때문에 판단된다. 단체분리된 비금속 성분이 취성(Brittleness)으로 인해 빠른 속도로 파쇄되어 250 μm 이하 구간에 집중됨에 따라 α 값이 감소

하였다. 한편 분쇄 과정 중 단체분리된 구리 박판은 연성(延性; ductility)으로 인해 큰 입도 구간에서 산출되고 이에 따라 κ 값은 증가하였다. 또한 열처리한 시료의 경우 풀어진 유리섬유가 발생하였으며, 이는 체분리

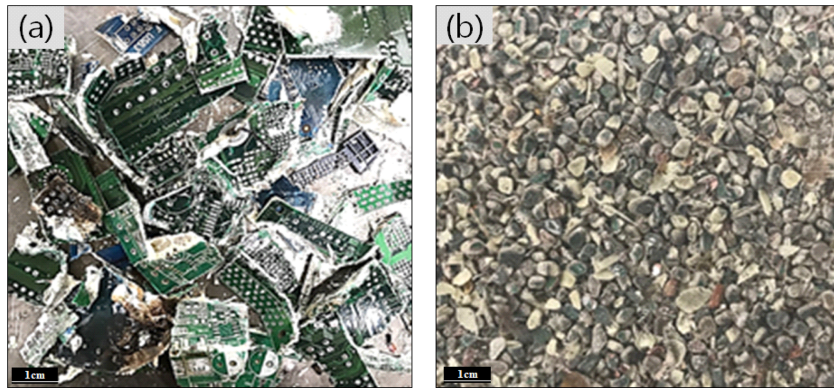


Fig. 8. Crushed product of unheated PCBs: (a) Shredder, (b) Cut crusher.

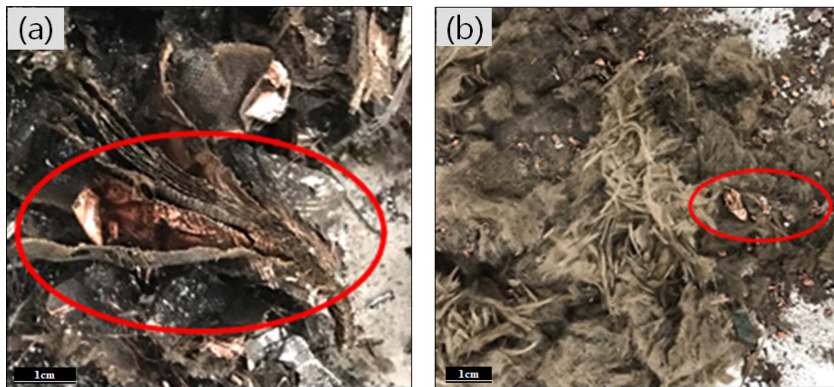


Fig. 9. Crushed product of heat treated PCBs (N₂ 325°C): (a) Shredder, (b) Cut crusher.

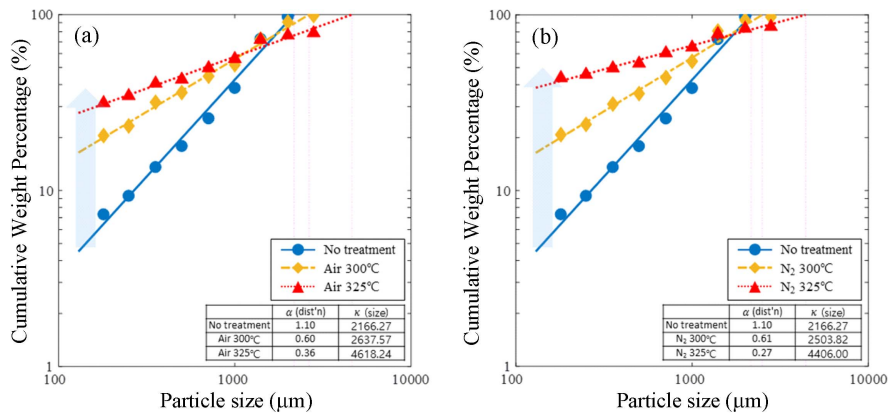


Fig. 10. Particle size distribution of PCBs: (a) Air, (b) N₂ atmosphere.

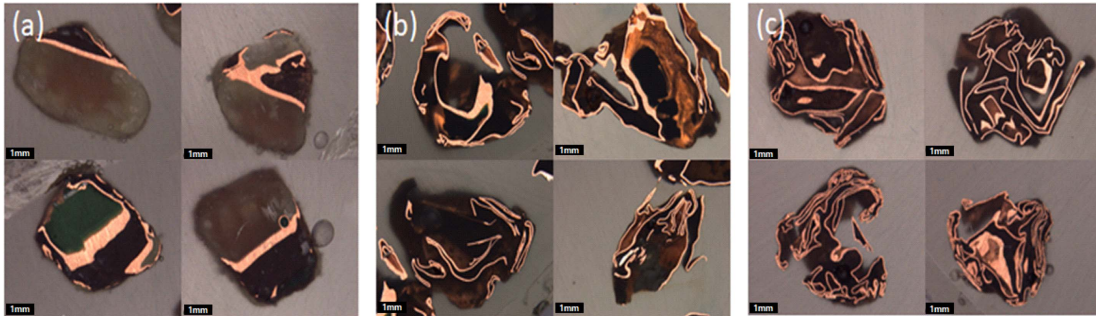


Fig. 11. Particle shape in a range of 2,800~4,000 μm : (a) No treated, (b) Air 325°C, (c) N_2 325°C.

과정 중에 뭉쳐져 4,000 μm 이상 입도 구간에 집중되었다. 이로 인해 최대 입도 사이즈도 증가하였다.

열처리 하지 않은 시료와 325°C로 공기 및 질소분위기에서 열처리한 시료의 파쇄 산물 중 2,800~4,000 μm 구간의 시료를 시편으로 제작하여 전자현미경을 통해 구리 입자의 단체분리 여부를 확인하였다. 관찰한 입자의 형상은 Fig. 11에 나타났다. 열처리를 하지 않은 인쇄회로기판의 파쇄산물 중 구리는 유리섬유 및 에폭시수지와 함께 층상구조 형태가 유지된 상태로 관찰된다. 반면, 열처리한 기판의 파쇄산물 중 구리는 2,800~4,000 μm 구간에서도 독립 입자로 존재하며, 그 형태가 복잡한 형상으로 관찰되었다. 이는 구리 입자가 파쇄기 내에서 충격에 의해 구겨졌기 때문이며 이로부터 물질간의 분리가 일어났음을 확인할 수 있다.

3.3. 단체분리도 특성 변화

3.3.1. 입도에 따른 밀도분포

물질에 따른 선택적 분쇄를 정량적으로 확인하고자, 열처리 조건에 따른 파쇄산물의 입도구간별 밀도를 측

정하였다(Fig. 12). 열처리 하지 않은 시료의 최대 밀도 값은 500~710 μm 구간에서 3.3 g/cm^3 이며, 공기분위기에서 325°C로 열처리한 시료의 최대 밀도 값은 1,000~1,400 μm 구간에서 4.3 g/cm^3 로 나타났다. 질소분위기에서 325°C로 열처리한 시료의 최대 밀도 값은 2,000~2,800 μm 구간에서 4.7 g/cm^3 로 같은 온도로 열처리 시 공기분위기보다 큰 입도구간에 구리입자가 집중됐다. 전반적으로 열처리 온도가 올라갈수록 최대 밀도 값의 입도구간이 상승하였다. 또한 250 μm 이하 구간의 열처리 하지 않은 시료와 325°C에서 공기분위기, 질소분위기에서 열처리된 시료의 밀도는 각각 2.39 g/cm^3 , 1.23 g/cm^3 , 1.15 g/cm^3 로 나타났다. 이를 통해 인쇄회로기판을 열처리함으로써 파쇄산물의 큰 입도구간에는 구리 입자가 집중되며, 250 μm 이하 구간에 비금속이 밀집되는 것을 정량적으로 확인하였다. 이는 금속물질과 비금속물질이 선택적 분쇄에 의해 서로 다른 입도구간에서 각각 산출되었음을 의미한다¹⁷⁾. 따라서 열처리 조건에 따른 밀도편차 값이 증가할수록, 구리입자가 비금속물질들로부터 단체분리되었음을 간접적으로 확인할

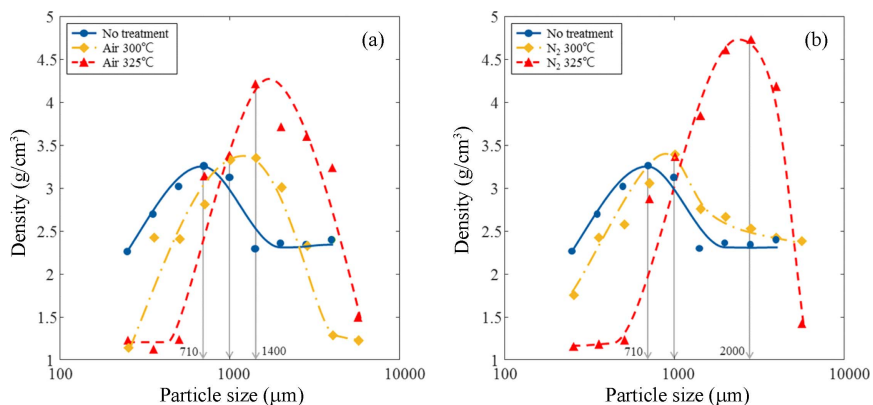


Fig. 12. Density distribution according to the size of PCB fragments: (a) Air, (b) N_2 atmosphere.

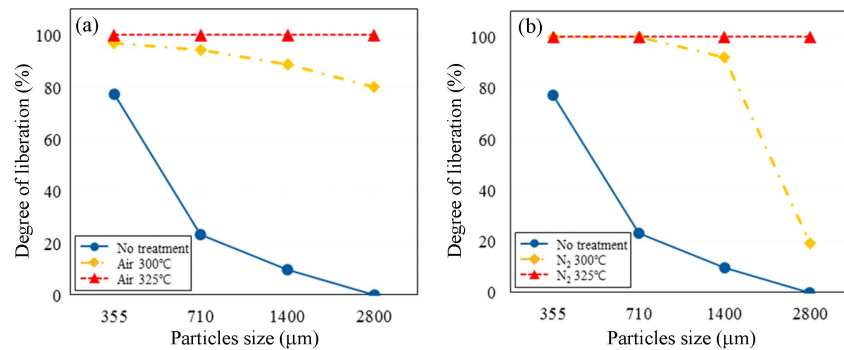


Fig. 13. Comparison of Cu liberation degree according to heat treatment conditions: (a) Air, (b) N₂ atmosphere.

수 있었다.

3.3.2. 구리의 단체분리도

디지털 현미경을 통해 355~500 μm, 710~1,000 μm, 1,400~2,000 μm, 2,800~4,000 μm 구간의 인쇄회로기판 파쇄물을 디지털 촬영 후 구리의 단체분리도를 평가하였으며 이를 Fig. 13에 나타냈다. 열처리를 거치지 않은 기판의 구리의 단체분리도는 2,800~4,000 μm 구간에서 0%이었으며, 355~500 μm 구간에서도 80%에 못 미치는 것을 확인하였다. 반면 열처리를 거친 기판의 경우 구리의 단체분리도가 대폭 향상되었다. 300°C로 열처리 시, 분위기에 따라 차이가 나타났다. 2,800 μm 이상의 구간에서 공기분위기에서는 80.10%, 질소분위기에서는 19.27%이었다. 이는 분위기에 따른 T_m의 차이로 인한 것으로 사료된다. 325°C로 열처리한 시료의 경우 단체분리도의 향상이 현저하게 나타났는데, 열처리 분위기에 관계없이 100% 구리입자가 비금속물질로부터 분리되어 free particle로 존재함을 정량적으로 확인하였다. 이상의 결과로부터 열처리함으로써 충분리가 발생하며, 이는 구리의 단체분리도 향상으로 이어짐을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

폐 인쇄회로기판 파-분쇄 공정의 전처리를 목적으로 열처리 실험을 진행하였다. 인쇄회로기판의 물리적 특성에 미치는 열처리 조건을 확인하였고, 실험의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 인쇄회로기판 열처리 시 200~275°C까지는 기판이 팽창되지 않았으며, 300°C부터 충분리가 발생하기 시작하여 325°C에서는 28% 팽창되었다. 굽힘 강도는

T_m(최대질량변화 발생 온도) 이상에서 급감하는 것을 확인할 수 있었다.

2) Shredder와 Cut crusher로 파쇄 시, 열처리 하지 않은 파쇄산물은 적층구조가 유지되는 반면, 열처리한 파쇄산물은 물질간의 충분리가 확인되었으며 구리가 독립입자로 산출되었다.

3) 열처리 온도가 올라갈수록 입도 구간에 따른 밀도의 편차가 커지고 높은 입도 구간에 구리 입자가 집중되었다. 이로부터 선택적 분쇄에 의해 금속물질과 비금속물질이 각각 다른 입도구간에 집중됨을 확인하였다. 화상해석을 통해 구리의 단체분리도를 평가한 결과, 열처리를 함으로써 1,400~2,000 μm 구간에서 구리의 단체분리도가 9.28%에서 100%로 향상되었다.

이상의 결과로부터 325°C 이하의 저온 열처리 공정은 인쇄회로기판 내 구리의 단체분리 입도를 크게 증가시키는 것으로 확인되었다. 열처리 공정이 포함된 구리 회수 공정을 도입함으로써 금속물질의 미립자 생성 억제에 의한 선별 효율 향상 뿐 아니라 분쇄에너지 절감의 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20165020101200).

References

- Baldé, C. et al., 2015 : The Global E-Waste Monitor-2014, pp.22-25, United Nations University, IAS-SCYCLE, Bonn, Germany.
- Lee, J., Kim, Y., and Lee, J. C., 2012 : *Disassembly and*

- physical separation of electric/electronic components layered in printed circuit boards (PCB)*, Journal of hazardous materials, 241, pp.387-394.
3. Cui, J., and Zhang, L., 2008 : *Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review*, Journal of hazardous materials, 158(2), pp.228-256.
 4. Li, J., Duan, H., Yu, K., and Wang, S., 2010 : *Interfacial and mechanical property analysis of waste printed circuit boards subject to thermal shock*, Journal of the Air & Waste Management Association, 60(2), pp.229-236.
 5. Cui, J., and Forssberg, E., 2003 : *Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review*, Journal of hazardous materials, 99(3), pp.243-263.
 6. Chiang, H. L., et al., 2007 : *Pyrolysis characteristics of integrated circuit boards at various particle sizes and temperatures*, Journal of Hazardous Materials, 149(1), pp.151-159.
 7. Park, S., Kim, S., Han, Y., and Park, J., 2015 : *Apparatus for electronic component disassembly from printed circuit board assembly in e-wastes*, International Journal of Mineral Processing, 144, pp.11-15.
 8. Kwon, S., et al., 2016 : *Separation of tantalum from electronic components on laptop printed circuit board assembly*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 25(1), pp.24-30.
 9. Zhao, Y., Wen, X., Li, B., and Tao, D., 2004 : *Recovery of copper from waste printed circuit boards*, Minerals & Metallurgical Processing, 21(2), pp.99-102.
 10. Jie, G., Ying-Shun, L., and Mai-Xi, L., 2008 : *Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 83(2), pp.185-189.
 11. Duan, C. L., Diao, Z. J., Zhao, Y. M., and Huang, W., 2015 : *Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses*, Minerals Engineering, 70, pp.170-177.
 12. Park, S., and Park, J., 2016 : *Semi-automated image analysis for measuring degree of liberation of printed circuit board*, Digests of the 2016 fall meeting and 47th conference, p.72, The Korean Institute of Resources Recycling, Pukyong National University, 10-11 November 2016, Hanrimwon, Printed in Korea.
 13. Park, J. K., 1988 : *A study of comminution and mineral liberation*, Doctoral dissertation, Thesis, University of Tokyo.
 14. Li, J., et al., 2010 : *Characteristic of low-temperature pyrolysis of printed circuit boards subjected to various atmosphere*, Resources, Conservation and Recycling, 54(11), pp.810-815.
 15. Chiang, H. L., Lo, C. C., and Ma, S. Y., 2010 : *Characteristics of exhaust gas, liquid products, and residues of printed circuit boards using the pyrolysis process*, Environmental Science and Pollution Research, 17(3), pp.624-633.
 16. Barontini, F., Marsanich, K., Petarca, L., and Cozzani, V., 2005 : *Thermal degradation and decomposition products of electronic boards containing BFRs*, Industrial & engineering chemistry research, 44(12), pp.4186-4199.
 17. Koyanaka, S., Endoh, S., and Ohya, H., 2006 : *Effect of impact velocity control on selective grinding of waste printed circuit boards*, Advanced powder technology, 17(1), pp.113-126.



김 보 람

- 대전대학교 신소재공학과 공학사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정



박 승 수

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



김 병 우

- 대전대학교 신소재공학과 공학사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정



박 재 구

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