

폐 정보통신기기(스마트폰, 노트북 PC)의 자원화 가치 분석

박승수 · 정민욱 · 김성민 · 한성수 · 정인상* · 박지환* · §박재구

한양대학교 자원환경공학과, *한국전자제품자원순환공제조합

Evaluation of Recycling Resources in Discarded Information and Communication Technology Devices (Smartphones, Laptop computers)

Seungsoo Park, Minuk Jung, Seongmin Kim, Seongsoo Han,
Insang Jung*, Jihwan Park* and §Jaikoo Park

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

**Korea Electronics Recycling Cooperative, Suwon, Korea*

요 약

본 연구에서는 대표적인 ICT 기기인 스마트폰과 노트북 PC 내 존재하는 금속 및 비금속의 함유량과 가치를 평가하였다. LG와 삼성에서 제조한 스마트폰과 노트북 PC를 인쇄회로기판, 배터리, 디스플레이, 케이스, 그 외 기타 부품 등 5개 파트로 분리하였다. 각 파트에 존재하는 금속 및 비금속의 함유량을 분석한 후 이에 2017년 평균 금속 거래 가격, 국내 재활용 시장에서의 플라스틱 및 유리의 거래 가격을 곱하여 각 파트의 자원화 가치를 산출하였다. 이로부터 각 파트 내 금속 및 비금속의 질량 비율과 가치 비율을 구하고 최종적으로 각 기기 내 금속 및 비금속의 질량 및 가치 비율을 산정하였다. 그 결과, LG의 스마트폰과 노트북 PC가 각각 4,449.6원(28,506원/kg), 6,830.2원(7,053원/kg), 삼성의 스마트폰과 노트북 PC가 1,849.3원(13,499원/kg), 6,667.5원(4,831원/kg)의 자원화 가치를 가지는 것으로 나타났다. 대부분의 가치는 배터리와 인쇄회로기판에 집중되어 있는 것으로 분석되었고 Co, Au, Cu 등이 주요 가치있는 자원인 것으로 확인되었다.

주제어 : ICT 기기, 자원화 가치 분석, 스마트폰, 노트북 PC, 인쇄회로기판, 배터리

Abstract

In this study, metal and nonmetal contents and their economic values in ICT devices such as smart phones and laptop computers were evaluated. The electronic devices made by LG and Samsung were disassembled into 5 parts, which are printed circuit board assembly, battery, display, case and other electronic components. Metal and nonmetal contents in these parts were analyzed, and their economic values were calculated via multiplying the materials' contents by metal price obtained from KOMIS or nonmetal exchange price acquired from Korean recycling markets. Finally, the materials' contents and values according to each electronic parts and electronic devices were calculated. The results showed that the value of the smartphones and laptop computers of LG are 4,449.6 KRW (28,506 KRW/kg) and 6,830.2 KRW (7,053 KRW/kg), and those of Samsung are 1,849.3 KRW (13,499 KRW/kg) and 6,667.5 KRW (4,831 KRW/kg), respectively. It was also found that most of the value was concentrated in batteries and printed circuit board assemblies. In addition, Co, Au and Cu were found to be the most valuable resources in the devices.

• Received : March 6, 2018 · 1st Revised : April 6, 2018 · 2nd Revised : April 26, 2018 · Accepted : May 28, 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.

Key words : ICT devices, Economic value evaluation, Smartphones, Laptop computers, PCBs, Batteries

1. 서 론

폐 가전제품의 발생량 증가와 이로 인해 발생할 환경 문제의 해결, 그리고 각종 순환자원의 확보 차원에서 폐 전기전자제품의 리사이클링이 필요하다는 것에 대한 공감대가 널리 형성되어 있다. 특히 천연 자원이 부족하고 전자제품 제조업이 국가 산업의 근간이 되는 우리나라는 자국에서 발생하는 폐 가전제품 내 자원의 재활용, 이들을 활용한 소재의 개발, 최종 제품의 생산으로 이어지는 선순환 구조를 완성하기 위하여 도시광산업의 활성화가 절실한 상황이다^{1,2)}.

전자제품군 중 ICT 기기(Information & communication technology)의 경우 많은 기능을 작은 기기 안에 집약시키기 위하여 제조 과정에서 매우 다양한 양의 금속이 사용된다^{3,4)}. 대표적인 ICT 기기인 스마트폰의 경우 제품의 고도화를 위하여 평균적으로 총 62종의 금속을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 노트북 PC의 경우 60종 이상의 금속이 인쇄회로기판에 존재하며 그 외 배터리 및 전동부에 각각 Co, Nd 등의 금속이 포함되어 있다⁶⁾. 또한 ICT 기기는 분리/해체/선별 등의 간단한 전처리를 통하여 특정 금속의 품위를 높일 수 있다⁷⁾. 이에 따라 인쇄회로기판, 배터리 등 특정 유가 금속의 품위가 높은 파트는 폐가전 수집 단계에서 우선적으로 선별된 후 나머지 부품류와 별도로 처리된다⁸⁾. 이처럼 ICT 기기는 함유되어 있는 금속의 종류가 다른 전자폐기물에 비해 매우 다양하며 일정 금속이 특정 파트에 밀집되어 존재하는 특징을 가지고 있다.

한편, ICT 기기의 구성성분 및 함량을 정량화 하고자 하는 시도는 수차례 있었지만 아직까지 해체 정도를 고려하여 부품별 분석 결과를 제시한 연구는 미비한 실정이다. 또한 주요 순환자원의 하나인 플라스틱의 경우 무게 기준으로 폐 ICT 기기 양의 약 20%, 부피 기준으로는 절반 이상을 차지하는 것으로 알려져 있는데⁹⁾, 그럼에도 불구하고 수집되는 기기 내 플라스틱의 구성 성분이나 함유량에 대한 정보가 부족하여 공정에서 산출되는 유가물에 대한 예측이 어려운 상황이다. 이러한 순환자원 구성 성분 및 경제적 가치에 대한 데이터의 확보는 리사이클링 공정을 설계하고 도시광산업을 운영하기 위하여 반드시 필요하다. 더 나아가서 폐 ICT 기기의 자원화 가치 분석을 통하여 신뢰성 있는 데이터 및

통계 자료를 확보할 경우 이를 기반으로 하여 구체적이고 현실적인 자원순환 정책을 수립하고 추진할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 ICT 기기인 스마트폰과 노트북 PC의 대표 모델을 선정하여 이들의 자원화 가치를 분석하였다. 기기를 구성하는 각 파트별 금속 및 비금속의 함유량을 평가하고 각 파트가 갖는 경제적 가치를 계산하였다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1. 분석 대상 모델 선정

가장 대표적인 ICT 기기인 스마트폰과 노트북 PC 중 국내 최대 가전제품 제조사인 LG전자와 삼성전자의 기기를 대상으로 하였다. 스마트폰의 경우 각 사의 대표 모델인 LG의 G4(모델명: F-500)와 삼성의 Galaxy S6(모델명: SM-G920)를, 노트북 PC의 경우 LG의 울트라 그램(모델명: 13ZD940-GX30K)과 삼성의 아티브(모델명: NT905S3G-K1WD)를 각각 분석 대상으로 선정하였다.

2.2. 분석 파트 선정

스마트폰과 노트북 PC를 인쇄회로기판, 배터리, 디스플레이, 케이스, 기타 부품 등 다섯 부분으로 분리하여 각 파트에 대한 성분 분석을 진행하였다. 인쇄회로기판(Printed Circuit Board Assemblies, PCBAs)은 플라스틱과 금속으로 이루어진 인쇄회로기판에 부품들이 실장된 형태이다¹⁰⁾. 배터리는 폴리머와 금속으로 구성되어 있다는 점에서 인쇄회로기판과 유사한 면이 있으나, 함유 금속의 종류 및 질량비가 다르므로 따로 구분하였다. 디스플레이는 액정 패널(Liquid crystal panel) 혹은 유기 발광 소자 패널(Organic light emitting diode panel)이 주요 부품으로, 유리나 접착제 성분의 구성비가 높고, 패널 종류별 함유 금속이 상이할 것으로 예상되었다. 케이스는 플라스틱이나 금속류가 사용되나 경량화 경향에 맞춰 복합 소재가 사용되는 경우도 있어 해체 및 성분 분석 시 주의하였다. 전자 부품은 스피커(Speaker), 카메라(Camera) 등의 부품을 포함하며 인쇄회로기판과 함유 금속의 종류는 비슷하지만, 스피커, 진동자 등이 포함되어 있다는 점에서 자석 성분의 비율이

높고, 구성 플라스틱의 종류에 차이가 있을 것으로 예상되었다.

2.3. 성분 분석 방법

2.3.1. 분석 절차

성분 분석은 다음과 같은 과정을 따라 진행되었다. 선정된 스마트폰, 노트북 PC를 구매 후 부품별로 해체하고, LG전자와 삼성전자에서 제공하는 부품별 성분 항목과 부품에 표기되어 있는 정보를 활용하여 성분을 확인할 수 있는 것은 따로 분석하지 않고 무게만을 측정하였다. 성분 분석이 필요한 부품일 경우 무게를 측정한 후, 복합 재질이면 부품 전체를 $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 크기 이하로 절단한 후 마이크로밀을 이용하여 분쇄하여 분석 시료를 제조하였고, 단일 재질이면 일정 부분을 샘플링하여 마이크로밀로 분쇄하였다. 단, 단일 재질의 플라스틱인 경우 마이크로밀로 분쇄가 어렵고, 분석 시 미세하게 분쇄할 필요가 없으므로 작게 절단하여 시료를 준비하였다.

2.3.2. 분석 대상 성분 선정

성분 분석을 수행하기 위해 선행 연구 조사를 통하여 각 부품별 분석 대상 성분을 선정하였다. 각 제품별 부품 구성 성분의 질량비는 차이가 있으나 종류는 크게 다르지 않다는 가정 하에 인쇄회로기판, 배터리, 디스플레이, 케이스, 전자부품에 포함된 금속의 종류를 조사하였다. 플라스틱의 경우 부품 내 기재사항 및 제조업체가 제공한 정보 및 FT-IR을 통해서 조성을 조사하였다. 각 파트별 분석 대상 성분을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

2.3.3. 분석 방법

귀금속과 금속, 유리 성분의 경우 회취법, AAS, 그리고 ICP-MS 분석 방법을 이용하여 정량적으로 성분 분석을 수행하였다. 플라스틱의 경우 단일 재질이 아닌 복합 재질인 경우가 많고, 정량 분석을 할 수 있는 방법이 어려워 FT-IR 분석을 통하여 주요 플라스틱 성분을 파악하는 정성적인 방법을 사용하였다. 성분 분석 결과 정리 시에 가장 성분 비율이 높은 5가지 플라스틱인 ABS(아크릴로니트릴부타디엔스티렌), PC(폴리카보네이트), PMMA(폴리메타크릴산메틸), PET(폴리에틸렌테레프탈레이트), PS(폴리스티렌)과 그 복합물(ABS+PC, ABS+PMMA)을 주요 플라스틱으로, 그 이외의 플라스틱은 기타 플라스틱으로 항목을 구분하여 정리하였다.

Table 1. Object metals of analysis according to ICT device parts

Metals		Parts				
		PCB	Battery	Display	Case	Electronic components
Precious metals	Pd	O				
	Ag	O				O
	Pt	O				
	Au	O				O
Metals	Li		O		O	
	Mg			O	O	
	Al	O	O	O	O	O
	Ca			O		
	Ti	O			O	
	Cr				O	
	Mn	O	O			O
	Fe	O	O	O	O	O
	Co		O			O
	Ni	O	O			O
	Cu	O	O		O	O
	Zn	O				
	Ga	O		O		
	In			O		
	Sn	O		O		O
	Ba	O				
	Nd					O
	Dy					O
	Ta	O				
	Pb	O				O

2.4. 가치 분석 방법

자원화 가치 계산 시 재활용 비용을 고려하지 않은 각 성분의 순수 가치만을 분석하였으며, 이는 각 성분의 무게(g)와 무게에 해당하는 가격(원/g)을 곱하여 산출하였다.

2.4.1. 비철금속 가격

대부분 비철금속의 가격은 한국광물자원공사의 한국자원정보서비스(KOMIS)에 공시되는 자료를 참고하였고 회토류인 Nd의 가격은 mineralprices.com에서 제공

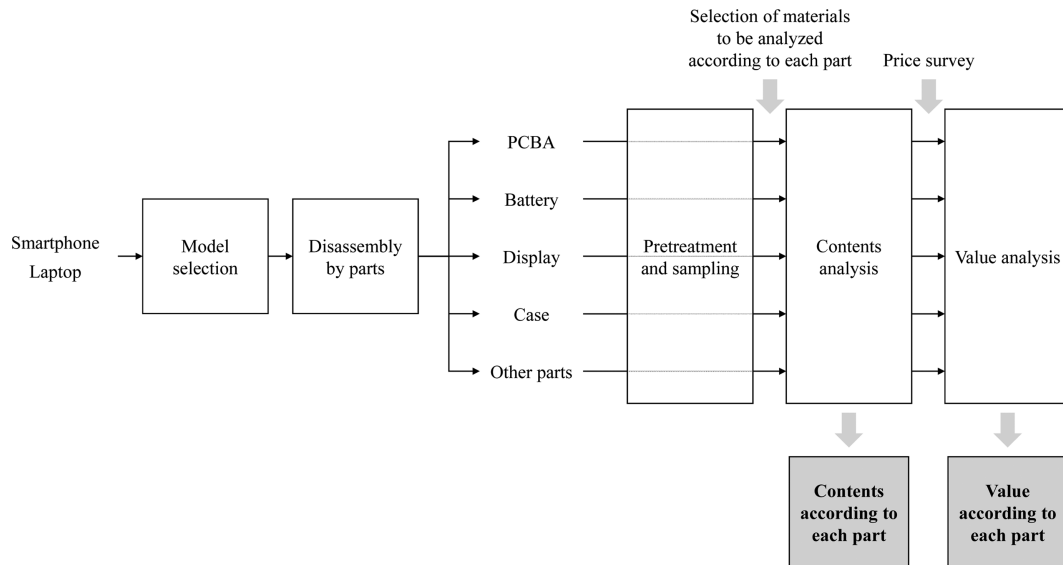


Fig. 1. Flowchart of analysis process.

되는 자료를 참고하였다¹¹⁾. 각 금속의 2017년 평균 가격을 산출하여 사용하였고 USD 등 외환으로 공시된 가격은 KEB 하나은행의 2017년 최종일 평균 매매기준율을 참고하여 원화로 환산하였다. 금속으로 거래되지 않아 공시 가격이 없고 제품에도 미량 포함되어 가치 분석에 영향을 끼치지 않는 Ca, Ba, Dy은 성분 분석 결과에 포함되나 가치 산정 시에는 포함시키지 않았다.

2.4.2. 철, 플라스틱 및 유리 가격

철, 플라스틱, 유리의 가격은 한국환경공단 자원순환정보시스템에서 제공하는 ‘재활용 가능자원 가격조사’ 자료를 참고하였다¹²⁾. 철은 폐 금속류로 구분되는 철 스크랩의 가격(2017년 전국 평균 가격)을 기준으로 산정하였고 플라스틱은 정량적인 성분 분석이 어렵다는 점을 고려하여 평균 폐 플라스틱 가격(플레이크 형태 ABS, PS, PP의 2017년 전국 평균 가격)을 사용하였다. 유리의 가격은 백색 폐 유리의 가격(2017년 전국 평균 가격)을 기준으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

기기 내 파트별 금속의 성분 및 가치 비율을 분산형 그래프로 나타내었다. X축을 질량 비율, Y축을 가치 비율로 하였고 각 축을 log-log scale로 변환하여 미소분

율에 대한 정보를 확대하여 표현하였다. 단일 성분의 가치가 0.1% 이하인 물질들에 대해서는 질량, 가치를 모두 합산하여 Others로 나타내었다. 기기 내 파트별 금속의 성분 및 가치 비율을 계산한 후 최종적으로 기기 내 금속의 성분 및 가치 비율, 기기 내 파트의 성분 및 가치 비율을 산출하였다.

3.1. 각 부품 내 금속/비금속의 성분 및 가치

3.1.1. 인쇄회로기판

각 기기의 인쇄회로기판의 구성 성분 및 가치를 분석하여 Fig. 2에 나타내었다. 각 사의 스마트폰 인쇄회로기판의 무게는 약 16.3 g, 14.6 g이며 자원화 가치는 약 2,911원, 551원으로 나타났다. 가치 비율의 경우 Au이 다른 금속에 비해 압도적으로 높은 것으로 확인되었다(LG: 93.2%, 삼성: 75.9%). 뒤이어 LG 기기의 경우 Ag와 Cu, 삼성 기기의 경우 Cu와 Pt 순으로 가치가 높은 것으로 나타났다. 두 기기 모두 회로를 구성하는 Cu의 무게 비율이 가장 높았다(LG: 38.5 wt.%, 삼성: 38.1 wt.%). Sn과 Ni이 뒤를 이었으며 삼성 기기의 경우 플라스틱 종류가 많이 관찰되었다. 한편 인쇄회로기판에서만 존재하는 희소금속인 Ta의 함유량 및 가치는 크게 높지 않은 것으로 나타났다. 각 사의 노트북 PC 인쇄회로기판의 무게는 약 111 g, 92.9 g으로 나타났으며 자원화 가치는 약 1,496원, 1,383원인 것으로 분석되었다. 전체적인 금속의 조성 비율은 양 사 제품이 큰

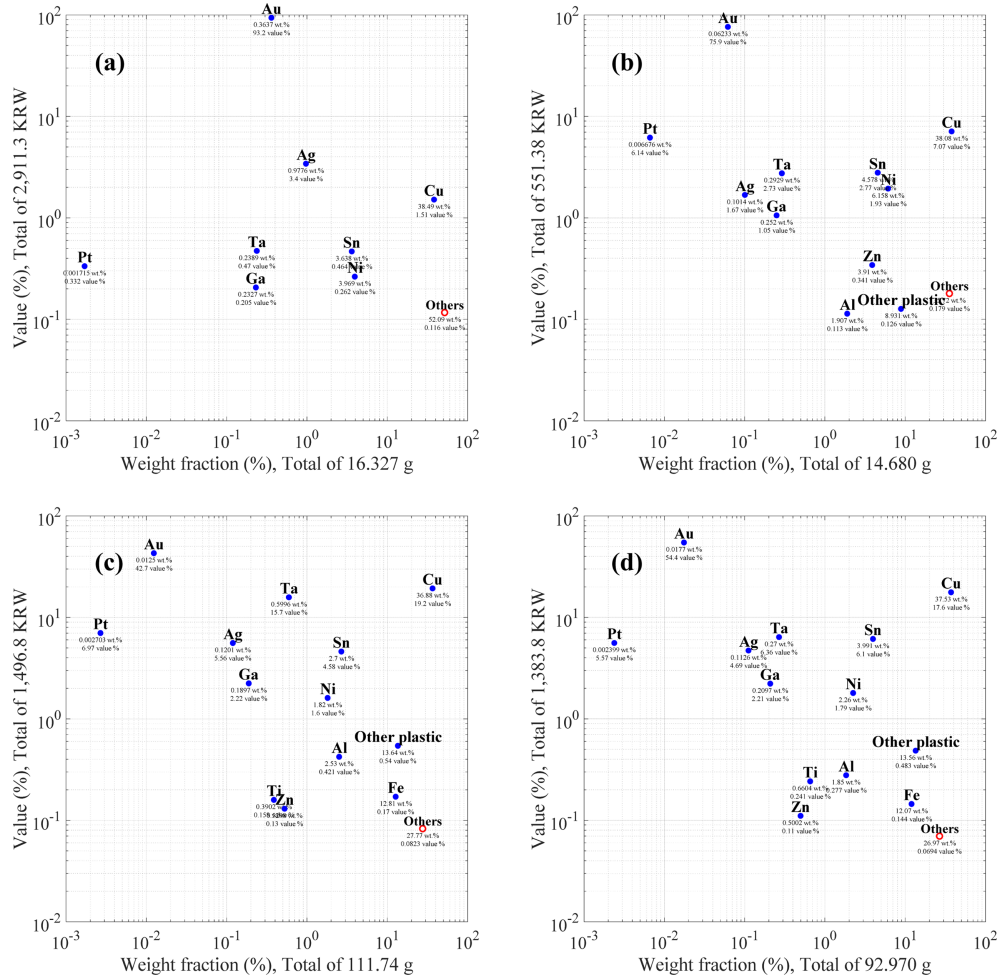


Fig. 2. Weight and value fraction of the components in PCBAs: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

차이를 보이지 않는 것으로 확인되었다. 스마트폰의 인쇄회로기판의 경우와 마찬가지로 Cu의 무게 비율이 가장 높고(LG: 36.9 wt%, 삼성: 37.5 wt.%) Au의 가치 비율이 가장 높은 것으로 나타났다(LG: 42.7%, 삼성: 54.4%). 한편 Ta의 함유량 및 가치 비율은 휴대폰의 경우에 비해 높은 것으로 확인되었다.

3.1.2. 배터리

각 기기의 배터리의 구성 성분 및 가치를 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. 각 사의 스마트폰 배터리의 무게는 약 46.6 g, 38.4 g이며 자원화 가치는 약 1,318원, 1,097원으로 나타났다. 특히 양극 활물질로써 필수적인

Co의 가치가 두 기기에서 모두 절대적으로 높게 분석되었다(LG: 91.4%, 삼성 92.1%). 그 외의 활물질에 쓰이는 Li와 배터리 내 전극에 사용되는 Cu, Al의 가치 비율이 높은 것으로 확인되었지만 LG 기기의 배터리 내 Li를 제외하고는 전체 배터리 가치의 5%를 넘지 못하는 것으로 나타났다. 양극재인 Ni의 경우는 LG 기기에서는 0.02%, 삼성 기기에서는 0.38%의 가치를 차지하는 것으로 나타났다. 각 사의 노트북 PC 배터리의 무게는 약 151.56 g, 152.22 g이며 자원화 가치는 약 4,197원, 4,174원으로 분석되었다. 스마트폰 배터리와 마찬가지로 Co의 가치가 양 사 제품에서 공히 90% 이상으로 높게 나타났으며 Li, Cu, Al이 그 뒤를 이었

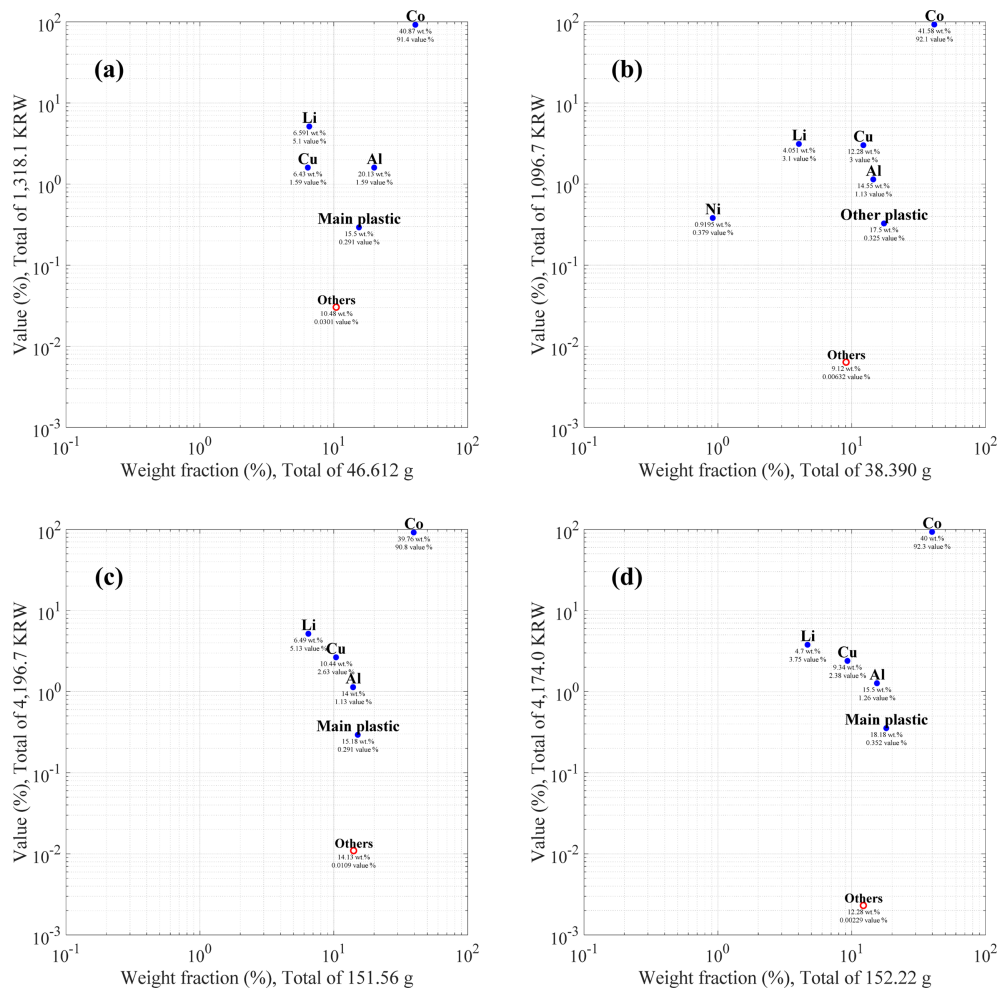


Fig. 3. Weight and value fraction of the components in batteries: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

다. 주요 플라스틱으로는 PC가 사용된 것으로 확인되었다.

3.1.3. 디스플레이

각 기기의 디스플레이의 구성 성분 및 가치를 분석하여 Fig. 4에 나타내었다. 각 사 스마트폰 디스플레이의 무게는 약 13.4 g, 5.59 g이며 자원화 가치는 약 8.98원, 5.23원인 것으로 확인되었다. LG와 삼성이 IPS와 OLED로 각각 다른 디스플레이 패널을 사용하기 때문에 무게와 가치 측면에서 차이가 있는 것으로 확인되었다. 특히 LG 기기의 경우 PET, PMMA, PE, EVA 등 플라스틱의 가치가 디스플레이 부품의 55% 이상 차

지하는 것으로 나타났으며 무게 비율도 60 wt.% 이상인 것으로 확인되었다. 삼성 기기의 디스플레이에서는 EVA만이 약 11%의 무게 비율로 발견되었다. 그 외 디스플레이의 핵심 금속인 In과 Ga이 두 기기에서 각각 약 30%, 60%의 가치가 있는 것으로 분석되었다. 전체적으로 LG 기기에서 PET, PMMA, PE가 발견된 것을 제외하고 두 디스플레이 성분의 구성비가 매우 유사한 것으로 확인되었다. 각 사의 노트북 PC 디스플레이의 무게는 약 194.05 g, 222.64 g이고 자원화 가치는 약 121.04원, 166.62원인 것으로 확인되었다. 양 사 기기에서 모두 PET, PMMA, PS의 성분이 40 wt.% 대로 높게 나타났으며 스마트폰 디스플레이와 마찬가지로 In,

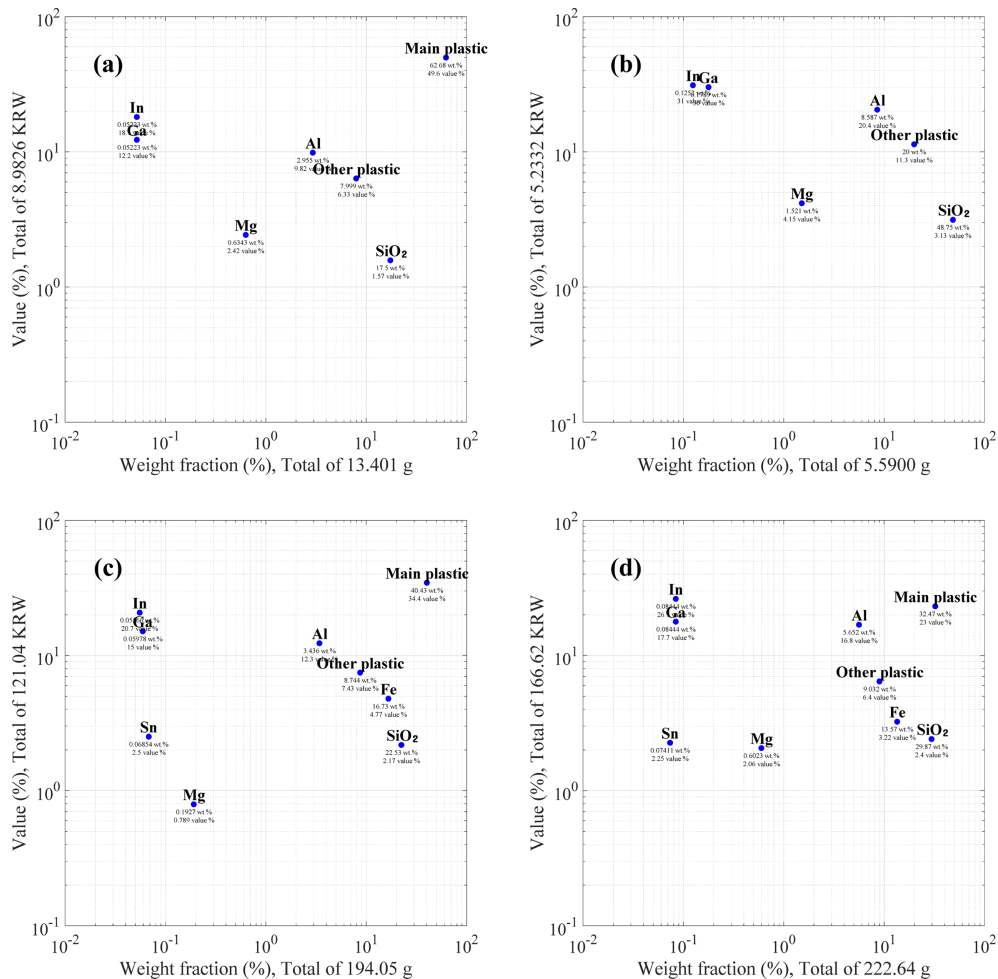


Fig. 4. Weight and value fraction of the components in display: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

Ga, Al의 가치 비율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 그 외 미량의 Sn이 발견되었으며 LG 기기와 삼성 기기의 구성 성분 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

3.1.4. 케이스

각 기기의 케이스의 구성 성분 및 가치를 분석하여 Fig. 5에 나타내었다. 각 사 스마트폰 케이스의 무게는 약 72.3 g, 70.3 g이고 자원화 가치는 53.7원, 80.1원인 것으로 나타났다. LG 제품의 경우 Mg이 60% 이상의 가치를 차지했으며 삼성 제품의 경우 Al, Cu가 각각 57.4%, 23.0%의 가치를 차지하였다. 무게 비율로는 LG 제품은 플라스틱(27.4 wt.%, PC, PC+ABS 복합물,

PA)과 SiO₂(26.7 wt.%)가, 삼성 제품은 Al(29.4 wt.%)과 SiO₂(34.3 wt.%)가 많은 양을 차지하는 것으로 분석되었다. 한편 각 사 노트북 PC 케이스의 무게는 474 g, 853 g이고 자원화 가치는 937원, 842원인 것으로 확인되었다. LG 제품은 스마트폰과 마찬가지로 Mg의 가치가 52%를 차지해 가장 높았고 Cu가 27%로 뒤를 이었다. 삼성 제품은 플라스틱이 35%를 차지해 가장 가치가 높은 것으로 나타났다.

3.1.5. 기타 부품

각 기기의 기타 부품들에 대한 구성 성분 및 가치를 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 각 사 스마트폰 기타

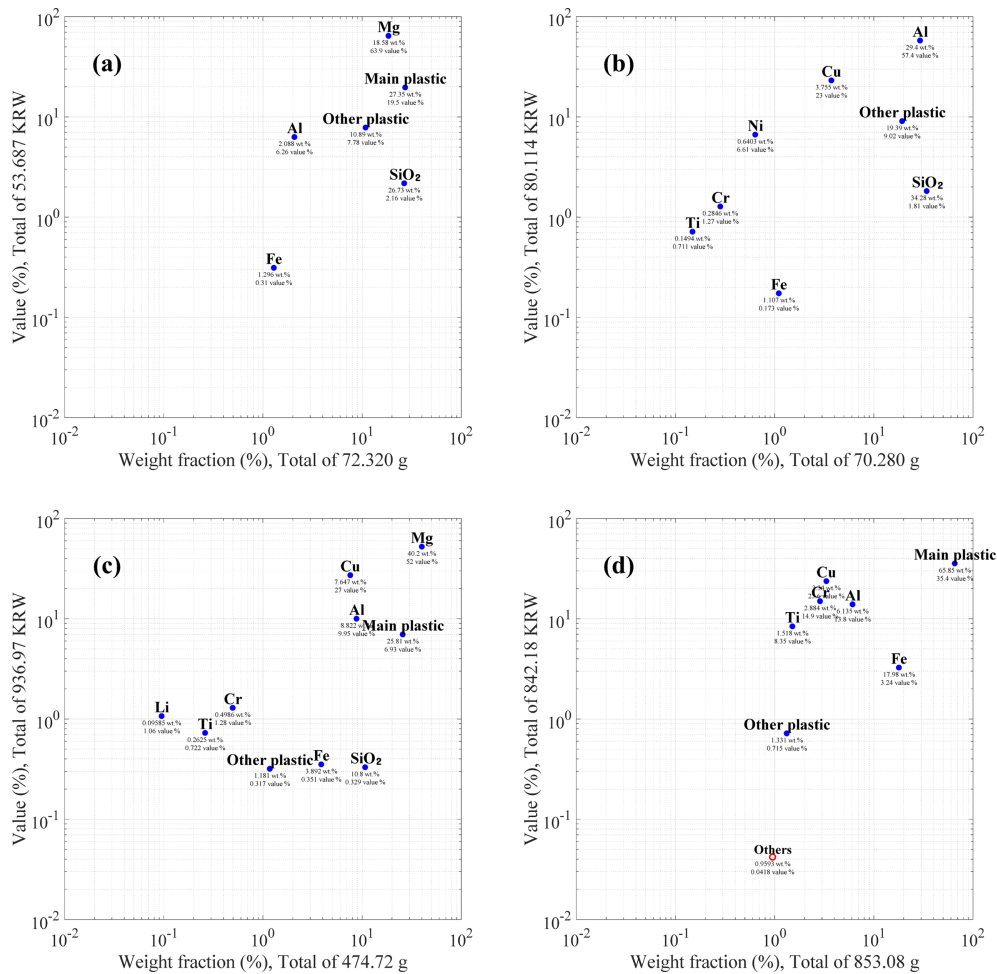


Fig. 5. Weight and value fraction of the components in cases: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

부품의 무게는 7.43 g, 8.05 g이며 가치는 158원, 116원인 것으로 확인되었다. 양사 제품 모두 Au의 가치가 각각 80%, 71%를 차지하여 가장 높았다. 스마트폰의 진동자에 사용된 Nd는 10.5%, 13.9%를 차지하였다. 한편 무게는 내부 프레임을 구성하는 Fe이 60% 내외로 가장 많은 비율을 차지하였다. 그 외 Cu, Ni, Ag, Co 등이 발견되었으며 기타 구성 성분의 비율에 큰 차이를 보이지 않았다. 각 사 노트북 PC의 기타 부품의 무게는 36.3 g, 59.2 g으로 측정되었고 자원화 가치는 78.7원, 101원으로 산출되었다. LG 사의 제품은 Cu (43.2%), Ag (15.3%), Sn (10.9%)의 순으로, 삼성 사의 제품은 Ag (24.9%), Nd (24.3%), Cu (24.2%)의 순으로 가치가 높은 것으로 확인되었다. 스마트폰과 마

찬가지로 내부 프레임을 구성하는 Fe의 무게 비율이 매우 높은 것으로 나타났고 PE가 그 뒤를 이었다.

3.2. 전체 기기 내 금속/비금속의 성분 및 가치

각 기기 내 구성 성분 및 가치를 분석하여 Fig. 7에 나타내었다. 각 사의 스마트폰의 무게는 156 g, 137 g이며 자원화 가치는 4,450원, 1,850원인 것으로 나타났다. LG사의 제품의 경우 Au이 전체 가치의 63.8%를 차지했고 Co가 27.1%를 차지하였다. 이 두 금속을 제외한 나머지 성분의 가치는 10% 미만이었다. 삼성 사의 제품의 경우 Co의 가치가 54.7%로 가장 높았으며 Au이 27.1%로 뒤를 이었다. 그 외 Cu (5.20%), Al (3.28%) 순이었으며 Pt의 가치가 1.83%로 0.217%인 LG 제품

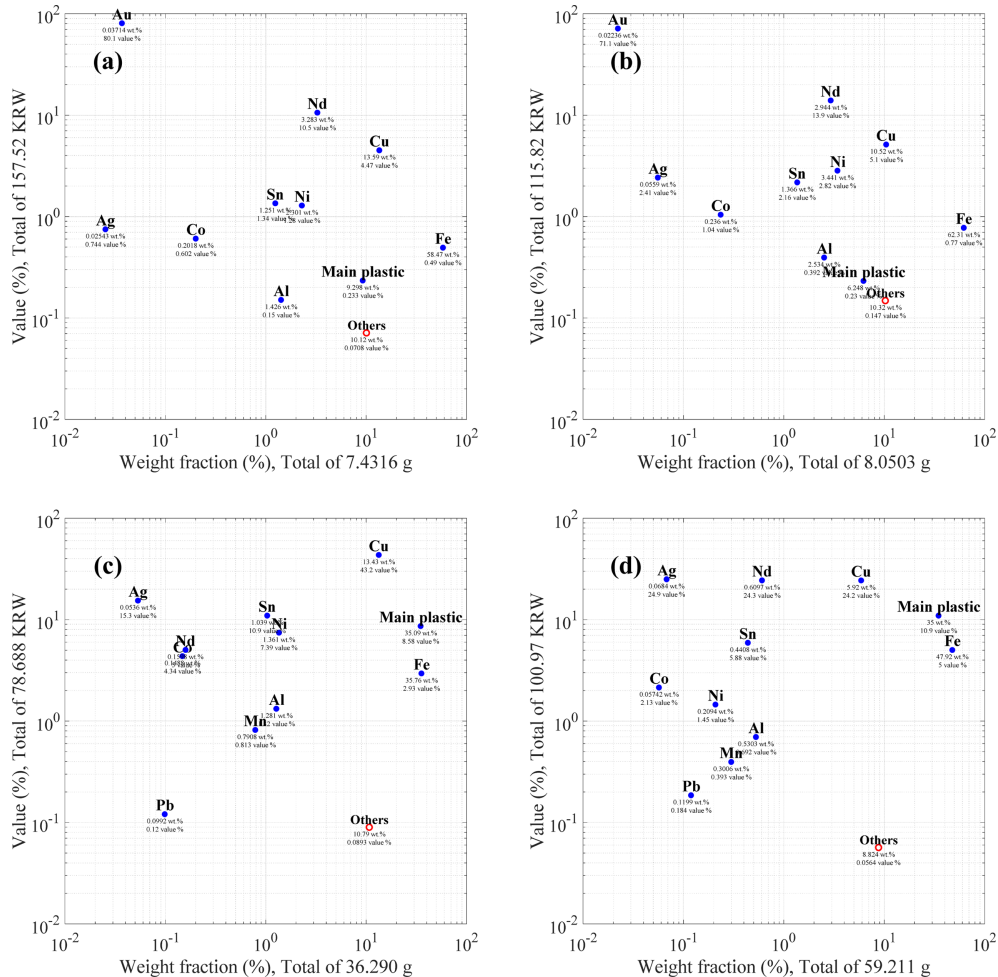


Fig. 6. Weight and value fraction of the components in other parts of the devices: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 각 사의 노트북 PC의 무게는 968 g, 1,380 g이며 자원화 가치는 6,830 원, 6,668원인 것으로 확인되었다. 양사 제품 모두 Co의 가치가 가장 높았으며(LG: 55.8%, 삼성 57.8%) Au의 가치(LG: 9.35%, 삼성 11.3%)와 Cu의 가치(LG: 10.00%, 삼성 8.48%)가 그 뒤를 이었다.

Table 2는 기존에 발표되었던 휴대폰 및 노트북 PC 내 금속함량 평가 분석 자료를 요약하고 2017년도 가격을 기준으로 가치를 산정한 결과이다¹³⁻¹⁵⁾. 시기적으로 Mobile phone 1이 가장 오래된 휴대폰이고 Mobile phone 2가 그 이후에 출시된 휴대폰이며 본 연구의 대상이었던 휴대폰이 가장 최신의 스마트폰이다.

Table 2에서 확인할 수 있듯 Mobile phone 1에서도 Au이 전체 가치 중 가장 높은 비율을 차지했지만, 귀금속 중 Pd의 가치도 상당히 높음을 알 수 있다. 하지만 Mobile phone 2에서는 Pd 금속의 가치 비율이 굉장히 낮아졌고, 이번 연구 결과에서는 휴대폰에서 Pd이 검출되지 않았다. 이는 전자 제품 제조 시 Pd 등의 귀금속이 다른 금속으로 대체되고 있는 경향을 반영한 것으로 보인다. Co의 경우 Mobile phone 1에는 검출되지 않았으나, Mobile phone 2와 본 연구 대상이었던 스마트폰 내에서는 일반 금속 중에서 가장 가치가 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 이전에 비해 배터리의 전력 용량의 상승이 요구됨에 따라 Co의 사용량이 점점 증가하

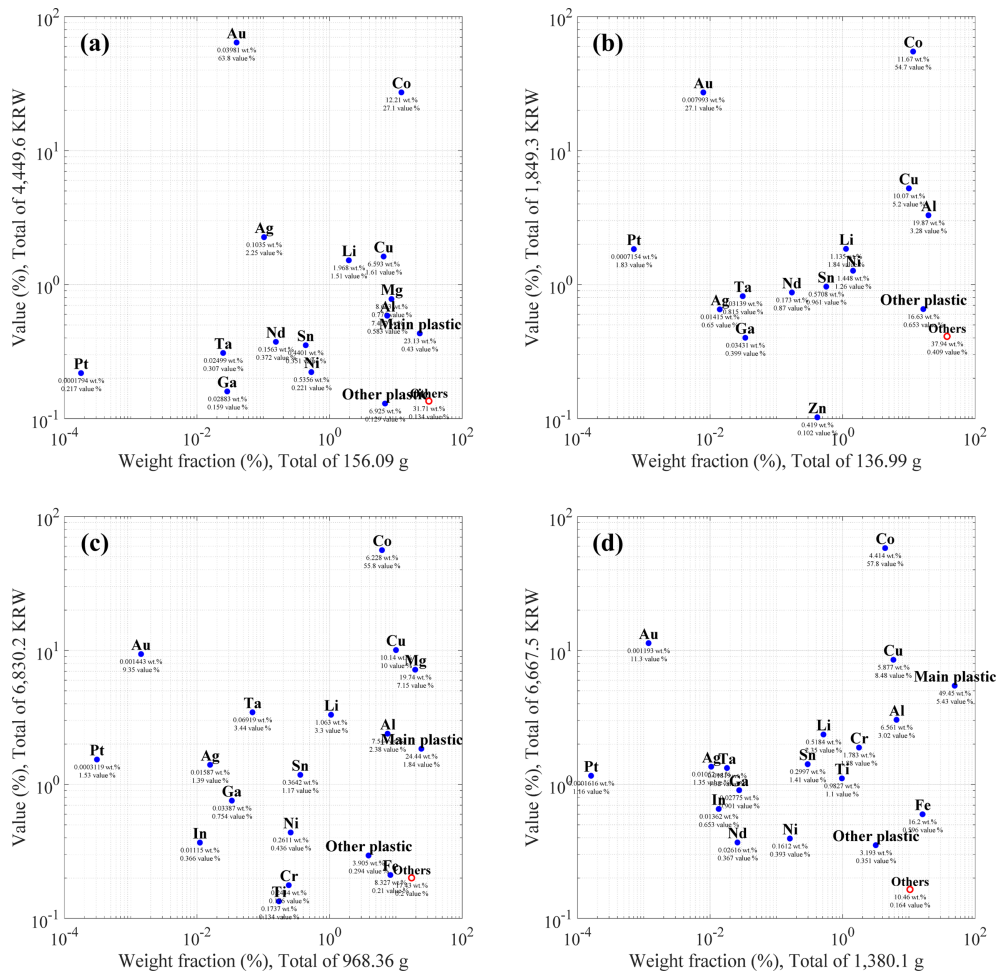


Fig. 7. Weight and value fraction of the components in whole devices: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 제자원화에서 중요하게 생각되는 Cu의 비율은 점점 줄어들고 있으나, 전반적인 귀금속 사용이 줄어들어 가치 비율은 비슷한 것으로 판단된다.

노트북 PC의 성분 및 가치를 Table 2와 비교해 본 결과, 이전에는 Au이 가장 가치있는 금속 종류였지만, 휴대폰의 경우와 마찬가지로 배터리의 중요성이 증가함에 따라서 Co의 사용량이 상당히 증가했음을 확인할 수 있었다. Cu 성분은 비율상 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

3.3. 전체 기기 내 부품의 성분 및 가치

기기 내 부품별 성분 및 가치를 Fig. 8에 나타내었

다. 스마트폰은 LG 사의 경우 인쇄회로기판과 배터리가 기기 가치의 65.4%, 29.6%를, 삼성 사의 경우 인쇄회로기판과 배터리가 기기 가치의 29.8%, 59.3%를 각각 차지하였다. 노트북 PC는 LG 사의 경우 인쇄회로기판과 배터리가 스마트폰 가치의 21.9%, 61.4%를, 삼성 사의 경우 인쇄회로기판과 배터리가 스마트폰 가치의 20.8%, 62.6%를 각각 차지하였다. 스마트폰의 경우 기타 부품, 케이스, 디스플레이 순으로 가치가 높았으며 노트북 PC의 경우 케이스, 디스플레이, 기타 부품 순으로 가치가 높은 것으로 나타났다.

마지막으로 각 부품별 무게당 평균적인 자원화 가치를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 인쇄회로기판과 배터리가 무게당 가치 비율이 다른 부품들에 비해 높게 나

Table 2. Material composition and value of mobile phone and laptop computer

Materials		ICT devices					
		Mobile phone 1 ¹³⁾		Mobile phone 2 ¹⁴⁾		Laptop ¹⁵⁾	
		Contents (%)	Value (%)	Contents (%)	Value (%)	Contents (%)	Value (%)
Precious metal	Pd	0.16%	41.88%	0.01%	12.04%	-	-
	Ag	1.74%	10.02%	0.19%	7.96%	0.01%	2.05%
	Au	0.10%	43.14%	0.02%	56.78%	0.00%	45.62%
Metals	Mg	-	-	3.46%	0.59%	0.00%	0.00%
	Al	15.05%	0.31%	13.86%	2.04%	16.43%	17.85%
	Cr	1.59%	0.07%	-	-	-	-
	Fe	16.08%	0.03%	0.55%	0.01%	12.42%	1.08%
	Co	-	-	3.36%	14.09%	0.01%	0.24%
	Ni	5.94%	0.65%	-	-	0.10%	0.57%
	Cu	51.73%	3.34%	9.45%	4.37%	4.33%	14.72%
	Zn	2.05%	0.06%	-	-	0.07%	0.11%
	Ga	-	-	0.00%	0.00%	-	-
	In	-	-	0.01%	0.10%	-	-
	Sn	2.12%	0.45%	0.76%	1.14%	0.40%	4.48%
	Nd	-	-	0.03%	0.14%	-	-
	Ta	-	-	0.01%	0.29%	-	-
	Pb	1.86%	0.05%	-	-	0.53%	0.67%
Ceramics	SiO ₂	-	-	62.05%	0.25%	19.02%	0.56%
Plastic		-	-	5.96%	0.21%	46.59%	12.05%
etc.		1.59%	0.00%	0.28%	0.00%	0.10%	0.00%

타났으며 디스플레이와 케이스의 경우 그 가치가 상대적으로 매우 낮게 나타났다. 배터리의 경우 휴대폰이나 노트북 PC 등 전자제품의 종류와 무관하게 일정한 가치를 갖는 것으로 확인되었다. 한편 휴대폰의 경우 기타 부품의 가치가 노트북 PC에 비해서 약 10배 가까이 높게 나타나는 것을 확인하였다. 최종적으로 전자기기의 무게별 자원화 가치는 LG의 경우 스마트폰과 노트북 PC가 각각 28,506원/kg, 7,053원/kg, 삼성의 스마트폰과 노트북 PC는 각각 13,499원/kg, 4,831원/kg인 것으로 나타났다.

4. 결 론

휴대폰과 노트북 PC 등 ICT 기기에 함유된 금속 및 비금속의 함유량을 평가하고 이로부터 기기의 자원화

가치를 분석하였다. 각 파트별 함유량 및 가치가 높은 물질을 분석하였고 최종적으로 각 기기 내 함유된 파트별 질량 및 가치 비율을 조사하였다. LG와 삼성의 스마트폰과 노트북 PC를 대상으로 진행된 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

각 파트별 성분을 분석한 결과 인쇄회로기판은 Au의 가치가 모든 기기에 대해서 가장 높았으며 그 외 Cu의 가치가 높은 것으로 확인되었다. 노트북 PC의 경우 Ta의 가치가 스마트폰에서 보다 높은 것으로 분석되었다. 배터리의 경우 Co의 가치가 90% 이상으로 압도적으로 높았다. 디스플레이는 In, Ga의 가치가 높게 나타났다. 케이스의 경우 기기별로 구성성분이 상이하였고 플라스틱의 가치가 상대적으로 높았다. 기타 부품의 경우 Au와 Cu의 가치가 높게 나타났고 스마트폰의 경우에 노트북 PC에 비해 Nd의 가치가 높은 것이 확인되었다.

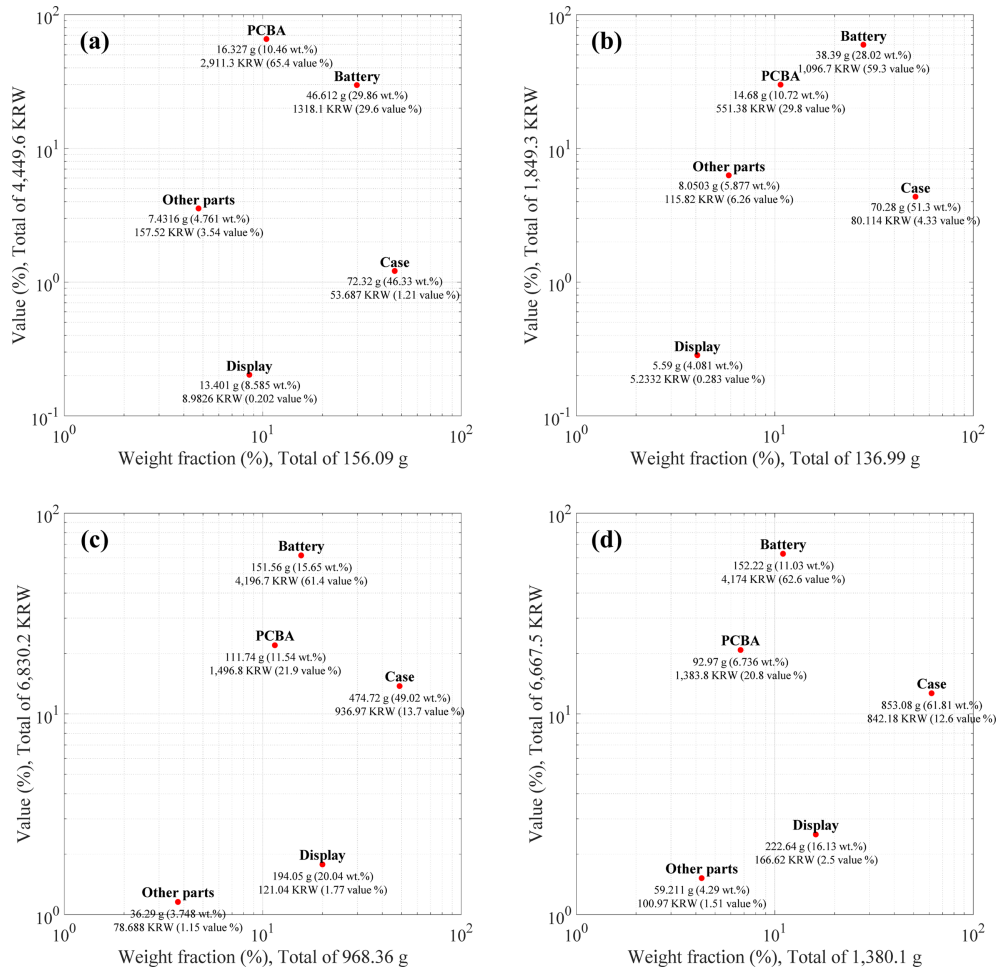


Fig. 8. Weight and value fraction of the electronic parts in the devices: (a) LG smartphone, (b) Samsung smartphone, (c) LG laptop computer, (d) Samsung laptop computer.

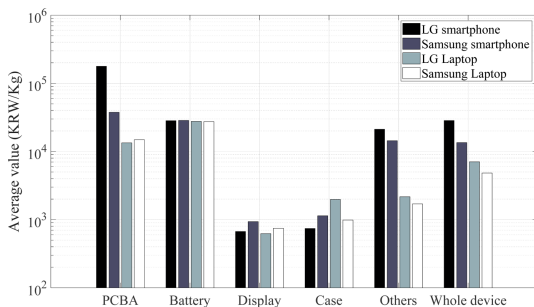


Fig. 9. Average value of each part of ICT devices.

기기 전체에서 금속의 가치를 비교한 결과 Co의 가치가 전체 기기 가치의 50% 이상으로 가장 높게 나타

났고 Au의 가치는 약 10~30% 범위를 갖는 것으로 나타났다. LG 스마트폰의 경우 Au의 가치가 전체 가치의 63.8%로 가장 높았고 Co의 가치가 27.1%로 분석되었다. Cu의 가치는 모든 기기에 걸쳐 1~10% 범위를 가졌고 그 외 성분은 기기별로 상이하였다.

기기 내 파트별 가치는 LG 스마트폰을 제외하고 배터리의 가치가 60% 내외로 가장 높게 나타났고 PCBA가 20~30% 범위의 가치를 갖는 것이 확인되었다. LG 스마트폰은 PCBA가 65.4%, 배터리가 약 30%의 가치를 차지하였다. 그 외 파트는 스마트폰은 기타 부품, 케이스, 디스플레이 순으로, 노트북 PC는 케이스, 디스플레이, 기타 부품 순으로 가치가 높았다.

감사의 글

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

References

1. Jung, I., et al., 2015 : *Overview and Recent Development of Recycling Small Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 24(4), pp.38-49.
2. Lee, I.-S. and H.-Y. Kang, 2015 : *Promoting Resources Efficiency in the Life-cycle of Resource for Sustainable Resource Management*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 24(2), pp.69-78.
3. Böni, H., M. Schluep, and R. Widmer, 2015 : *Recycling of ICT Equipment in Industrialized and Developing Countries*, L.M. Hilty and B. Aebischer, Cham, Springer International Publishing.
4. Chancerel, P., et al., 2015 : *Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment*, Resources, Conservation and Recycling, 98, pp.9-18.
5. Rohrig, B., 2015 : *Smartphones*, ChemMatters, pp11.
6. Lu, Y., Z. Xu, 2016 : *Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective*, Resources, Conservation and Recycling, 113, pp.28-39.
7. Izatt, R. M. and C. Hagelüken, 2016 : *Recycling and Sustainable Utilization of Precious and Specialty Metals*, Metal Sustainability: Global Challenges, Consequences, and Prospects, pp.1.
8. Chancerel, P. and S. Rotter, 2009 : *Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment*, Waste Management, 29(8), pp.2336-2352.
9. Baxter, J., et al., 2015 : *Plastic value chains: Case: WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)*, Nordic Council of Ministers.
10. Duan, H., et al., 2011 : *Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns*, Journal of environmental management, 92(3), pp.392-399.
11. Korea Mineral Resource Information Service, Available from: <https://www.kores.net/komis/main/userMain/main.do>.
12. Korea Resource Recirculation Information System, Available from: <https://www.recycling-info.or.kr/rts/stat/envStatList.do?menuNo=M13020301>.
13. Geyer, R. and V. Doctori Blass, 2010 : *The economics of cell phone reuse and recycling*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 47(5), pp.515-525.
14. Buchert, M., et al., 2012 : *Recycling critical raw materials from waste electronic equipment*, Freiburg: Öko-Institut eV, 49(0), pp.30-40.
15. Puneet, S., et al., 2005 : *Evaluating obsolete electronic products for disassembly; material recovery and environmental impact through a decision support system*, 16-19 May 2005.

박 승 수

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
- 한양대학교 자원환경공학과 박사수료

정 민 욱

- 한양대학교 자원환경공학과 공학사
- 현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정

김 성 민

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 연구원

한 성 수

- 한양대학교 자원환경공학과 공학사
- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
- 한양대학교 자원환경공학과 박사수료

정 인 상

- 한양대학교 자원환경공학과 석사
- 현재 한국전자제품자원순환공제조합 주임

박 지 환

- 광주과학기술원 환경공학부 석사
- 고려대학교 과학기술학 박사과정
- 현재 한국전자제품자원순환공제조합 대리

박 재 구

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

공 지 사 항

- 항상 본 학회에 관심을 가지고 참여해주셔서 감사합니다. 그간 한국자원리사이클링학회는 회원 여러분의 참여와 활동으로 많은 발전을 하였습니다.
- 당 학회에서는 국문학회지 “資源리사이클링”에 게재되는 원고에 대해 20부의 별채를 제작하여 우편으로 보내드렸습니다. 그러나 ‘온라인투고시스템’ 및 출판환경의 변화로 별채가 필요하지 않은 상황이 되었으며, 모든 원고는 pdf 파일로 관리가 가능한 시스템이 갖춰졌습니다.
- 이에 당 학회에서는 편집위원회와 이사회의 논의를 거쳐 ‘별채 20부’의 인쇄물을 저자분들께 제공하지 않는 것으로 결정하였습니다. 학회지 제27권 1호(2018년 2월 발간)에 게재되는 원고부터는 별채를 제공하지 않고, pdf 파일로 보내드릴 예정입니다. 다만, 저자의 요청이 있을 경우 제작이 가능합니다.
- 별채 인쇄는 학회지가 발행되는 짝수월(2,4,6,8,10,12월) 20일 전까지 요청하시면 인쇄가 가능합니다.
- 별채 인쇄비는 기본 20부/20,000원, 추가 10부당/10,000원씩 추가되며 원고게재료와 함께 청구합니다.
- 당 학회에서 발간하는 국문학회지 “資源리사이클링”은 한국연구재단의 등재학술지로 1992년 창간호를 시작으로 25년이 넘는 학회의 역사와 함께한 학회지입니다. 회원여러분의 많은 관심과 투고를 부탁드립니다.
- 원고의 투고는 당 학회의 홈페이지 <http://www.kirr.or.kr> 또는 <https://kirr.jams.or.kr> 에 회원가입을 하시고 투고하여 주시면 됩니다.
- 연락처 : 한국자원리사이클링학회 사무국
전화 02-3453-3541~2, 팩스 3453-3540, E-mail : kirr@kirr.or.kr, <http://www.kirr.or.kr>