

폐휴대전화 유용 광물 재활용의 사회·경제적 효과 분석: 탄소를 중심으로[†]

최민기*·김진수**

요약 : 이 논문은 폐휴대전화의 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB) 재활용 공정에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)와 경제성 평가를 통해, 탄소의 사회적 편익 관점에서 재활용의 사회·경제적 효과를 정량화한다. 특히, 폐휴대전화의 PCB 재활용을 통한 금속 회수 공정과 전통적인 금속 채굴 및 제련 공정을 비교하고, 2018년과 2030년의 두 가지 발전 믹스를 적용하여 온실가스 배출량 변화를 분석하였다. 분석 결과, 금과 구리의 경우 전통적 채굴 및 제련 과정보다 PCB 재활용 과정에서 각각 6.86배, 3.69배 더 많은 온실가스가 발생한 것으로 나타났다. 그러나 2030년 발전 믹스를 적용할 경우, 재활용 공정에서 발생하는 온실가스 배출량은 구리와 금 회수에서 각각 44.72%, 44.65% 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 전기를 주 에너지원으로 사용하는 재활용 공정의 특성에 따른 결과이다. 이산화탄소의 사회적 비용을 고려한 비용편익분석 결과, B/C값이 1.95로 나타나 재활용의 경제적 타당성이 크다는 점이 확인되었다. 그러나 이 결과는 충분한 규모의 폐 PCB 확보 문제와 재활용 공정에서 배출되는 오염물질의 사회적 비용이 모두 고려되지 않았다는 한계가 있다. 본 연구의 결과를 바탕으로, 앞으로 폐 PCB 재활용뿐만 아니라 최근 주목받고 있는 순환경제 및 재활용 공정에 대한 전과정평가를 통한 온실가스 배출량 분석과 탄소의 사회적 비용을 반영한 비용편익분석이 활발히 이어지기를 기대한다.

주제어 : 폐휴대전화, 인쇄회로기판(PCB), 온실가스, 전과정평가, 비용편익분석

JEL 분류 : Q40, Q42, Q56

접수일(2024년 5월 22일), 수정일(2024년 9월 19일), 게재확정일(2024년 9월 20일)

[†] 이 논문은 한국자원경제학회 2023 제19회 대학(원)생 논문경진대회에 참가하여 수상한 논문을 수정·보완한 논문입니다. 유익한 심사 의견을 주신 심사위원들께 감사드립니다.

* 한양대학교 자원환경공학과 석박통합과정, 주저자(e-mail: tjsrhr136@hanyang.ac.kr)

** 한양대학교 자원환경공학과 교수, 교신저자(e-mail: jinsookim@hanyang.ac.kr)

Economic Analysis of the Valuable Minerals Recycling in a Mobile Phone: Focusing on the Social Cost of Carbon

Min Ki Choi* and Jinsoo Kim**

ABSTRACT : In this paper, we quantify the socio-economic impacts of recycling from a carbon social benefit perspective based on a life cycle assessment and economic evaluation of the printed circuit board (PCB) recycling process for waste mobile phones. In particular, we compare the metal recovery process through PCB recycling of waste mobile phones with the traditional metal mining and smelting process, and analyze the change in carbon dioxide emissions under two electricity generation mixes in 2018 and 2030. The analysis shows that for both gold and copper, PCB recycling generates 6.86 times and 3.69 times more carbon dioxide than traditional mining and smelting, respectively. However, when the 2030 electricity generation mix is applied, the amount of carbon dioxide emitted in the recycling process decreases by 44.72% and 44.65% for copper and gold recovery, respectively. This is due to the nature of the recycling process, which uses electricity as the main energy source. A cost-benefit analysis that includes the social cost of carbon dioxide shows a B/C of 1.95, indicating that recycling is economically feasible. However, this result does not take into account both the problem of securing a sufficient amount of waste PCBs and the social cost of the pollutants emitted by the recycling process. Based on the results of this study, it is expected that cost-benefit analyses reflecting the social cost of carbon and carbon dioxide emissions through life cycle assessment of the recycling process will continue to be actively conducted not only for PCB waste recycling, but also for the circular economy and recycling processes that have recently attracted attention.

Keywords : Wasted mobile phone, Printed Circuit Boards(PCB), Carbon Dioxide, Life Cycle Assessment(LCA), Cost-benefit analysis

Received: May 22, 2024. Revised: September 19, 2024. Accepted: September 20, 2024.

* Ph.D. Student, Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, First author (e-mail: tjshr136@hanyang.ac.kr)

** Professor, Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Corresponding author (e-mail: jinsookim@hanyang.ac.kr)

1. 서론

휴대전화는 전 세계적으로 약 50억 대가 사용되고 있다. 통계청의 이동전화 단말기 유형별 가입자 현황에 따르면, 국내 이동통신사 가입자는 약 5,500만 명이며, 이 중 약 5,400만 명이 스마트폰을 사용하고 있는 것으로 조사되었다(과학기술정보통신부, 2023). 또한, 스마트폰의 평균 사용 기간은 27.9개월(컨슈머인사이트, 2020.12)로, 다른 전기전자제품에 비해 사용 기간이 짧아 폐기되는 양이 많다. 2016년 기준으로는 국내에서 약 23,321,000대의 폐휴대전화 발생이 예상되었다(한정에 의원실, 2017.10.10).

폐휴대전화와 같은 전기·전자폐기물은 환경에 위협을 초래할 수 있지만, 동시에 회수할 수 있는 귀중한 자원도 포함하고 있다(Lee et al., 2024). 전기·전자폐기물에 포함된 광물자원은 전자제품에서 건설 및 운송에 이르기까지 다양한 제품과 응용 분야에서 중요한 원료로 활용되며, 이는 현대 사회에서 국가 발전과 경제 성장에 중요한 요소로 작용한다(김강호·김진수, 2023). 금속은 형태가 변하더라도 그 본질이 그대로 유지되기 때문에 이를 추출하고 재활용하려는 기술 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전기·전자폐기물은 경제적 가치뿐만 아니라 재활용을 통해 친환경 정책에도 기여하며, 전 세계적으로 주목받고 있다. 국내에서도 산업통상자원부가 탄소 중립을 위한 한국형(K)-순환 경제 이행계획을 수립하여 금속 재자원화 활성화를 발표하고, 폐자원 관세 인하 검토 등을 통해 탄소 저감을 목표로 하고 있다(산업통상자원부, 2021). 이처럼 폐 전기·전자제품의 재활용 중요성이 높아지면서 관련 온실가스 배출량 산정 연구도 활발히 이루어지고 있다.

그러나 재활용 공정에도 상당한 에너지가 사용되기 때문에, 재활용이 전통적인 공정에 비해 실제로 온실가스 감축에 기여할 수 있을지는 불확실하다. 또한, 재활용 과정에서의 온실가스 감축 효과에 관한 연구는 일부 해외에서만 이루어졌을 뿐, 국내에서는 부족하며, 기존 전통적 공정과 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 관점에서 비교한 연구는 거의 없다. 이에 본 연구에서는 폐휴대전화의 주요 자원인 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB) 재활용 공정과 금속의 전통적 채굴 및 제련 공정에서 발생하는 온실가스 배출량을 조사하고 비교한다. 아울러, PCB 재활용을 통한 유가금속 회수의 경제성 평가도 진행한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 국내외에서 수행된 폐휴대전화에 대한 온실가스 배출량 산정과 경제성 평가에 관한 선행 연구를 검토한다. III장에서는 폐휴대전화의 PCB 재활용 과정과 전통적 금속 채굴 및 제련 공정에서 발생하는 온실가스 배출량을 LCA로 비교한다. IV장에서는 PCB 재활용 공정에 대한 비용편익분석을 통해 경제적 타당성을 평가한다. 마지막 장에서는 폐휴대전화 PCB 재활용 공정과 전통적 금속 채굴 및 제련 공정의 온실가스 배출량 및 경제성 평가 결과를 요약하고, 그 시사점을 고찰한다.

II. 선행 연구

1. 해외 선행 연구

해외에서는 폐휴대전화의 수거 및 관련 정책에 관한 연구가 국내보다 활발히 진행되었다. Ongondo and Williams(2011)는 영국 내 폐휴대전화의 회수 과정을 분석하여, 영국에 약 100개의 폐휴대전화 수집 네트워크가 분산되어 있으며, 각 네트워크의 회수 체계도와 비율, 정책 등을 정리했다. 연구에서는 금전적 인센티브를 제공할 경우, 다른 체계보다 더 많은 폐휴대전화를 수거할 수 있으며, 회수된 폐휴대전화 대부분이 고장이 난 제품임을 밝혀냈다. 그러나 영국 내 폐휴대전화의 회수량, 수집 방법, 처리 방법 등에 관한 데이터 부족으로 인해, 폐휴대전화 수거 체계가 폐기물 예방 및 최소화애 얼마나 기여하고 있는지를 정량화하기 어렵다는 한계도 지적했다.

Geyer and Doctori Blass(2010)는 미국과 유럽 내 휴대전화 재활용과 재사용의 경제성을 평가하였다. 재활용 과정은 폐휴대전화를 통해 귀금속을 회수하는 공정을 의미하며, 재사용은 ‘Refurbishment’, ‘Remanufacturing’, ‘Reuse’의 단계로 구분된다. ‘Refurbishment’는 간단한 수리 및 청소 후 다시 사용하는 것을 의미하며, ‘Remanufacturing’은 제품을 분해한 후 일부 부품을 교체하는 과정을, ‘Reuse’는 재가공 수준이 낮거나 거의 없는 단계를 뜻한다. 연구에 따르면, 폐휴대전화 재활용은 회수 비용이 많이 들어, 재사용 과정과 비교했을 때 한 대당 평균 수익이 약 6달러 정도 차이가 난다고 주장했다.

Soo and Doolan(2014)는 개발도상국인 말레이시아와 선진국인 호주의 폐휴대전화 PCB 재활용에 대한 LCA를 비교 분석하였다. 이 연구는 환경 오염 처리시설을 갖춘 공

식적 처리시설과, 그렇지 못한 비공식적 시설을 구분하였으며, 공식 시설이 비공식 시설보다 환경에 미치는 영향이 낮음을 밝혔다. 또한, 말레이시아와 같은 개발도상국에서는 비공식 시설이 선진국보다 많아 전자폐기물 관리와 규제의 필요성을 강조했다.

Yao et al.(2018)은 중국 내에서 처리되는 폐휴대전화에 대해 LCA를 진행하였다. 연구에 따르면, 중국에서의 재활용 비율은 매우 낮으며, 불법 재활용 시설이 많다는 점이 드러났다. 연구는 폐휴대전화의 PCB, LCD, 배터리 등의 부품을 재활용, 소각, 매립의 3가지 시나리오로 나누어 LCA를 수행하였고, 재활용이 자원 절약과 환경 오염 감소에 큰 영향을 미친다고 결론지었다. 또한, 중국에서는 이를 위한 효과적인 정책과 시스템이 필요하다고 주장했다.

Bian et al.(2016)은 폐휴대전화의 분해 방법에 따른 시나리오를 바탕으로 LCA를 진행하였다. 연구는 수동 분해 방법, 인건비가 높은 선진국에서 사용되는 자동 분해 방법, 그리고 수동 분해와 모듈화를 혼합한 방법 등 세 가지 시나리오를 분석했다. 수동 분해는 배터리 재활용을 제외하고, 자동 분해는 배터리 분해 및 재활용을 포함하는 과정이다. 수동 분해와 모듈화를 혼합한 방법은 폐휴대전화를 PCB, 리튬 배터리, 액정 등으로 수동 분리한 후 각 부품을 개별적으로 처리하는 방식이다. 연구 결과, 수동 분해와 모듈화를 혼합한 공정이 환경 영향에 가장 이점이 큰 것으로 분석되었다.

2. 국내 선행 연구

김민철·장용철(2009)은 설문 조사를 통해 소비자들이 인식하는 폐휴대전화의 경제적 가치와 수출 및 국내 재활용을 통한 비용편익분석을 수행했다. 이 설문 조사는 지역적 특성과 연령별 특성을 고려하여 진행되었으며, 비용 편익 분석은 수거된 폐휴대전화를 적정 수리 후 수출할 때 발생하는 비용 및 편익, 그리고 폐휴대전화를 파쇄하여 물질로 재활용할 때 소요되는 비용 및 편익을 중심으로 이루어졌다. 연구에 따르면, 소비자들이 인식하는 폐휴대전화의 경제적 가치는 평균 41,930원으로, 실제 폐휴대전화의 매각 가치보다 4배에서 8배가량 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 폐휴대전화를 적절히 회수하기 위해서는 소비자들에게 적절한 경제적 보상(economic incentive)을 제공할 필요가 있음을 시사한다. 또한, 폐휴대전화 수출에서의 비용 편익 분석 결과, 연간 약 138억 원의 순 편익이 발생하며, 회수 기간은 약 8.7개월로 나타났다. 반면, 폐휴대전화를 물질

로 재활용하면 연간 약 3억 8천만 원의 순손실이 발생하며, 회수 기간은 15.7개월로 분석되었다.

허영채 외(2017)는 스마트폰의 제조 초기 단계부터 폐기 단계까지의 환경 영향을 LCA로 평가했다. 연구 대상은 통화, 인터넷, 동영상 촬영 등의 기능을 가진 5.1인치 스마트폰으로 선정되었으며, 폐기 단계에서는 재활용 없이 전량 폐기를 가정하여 분석이 진행되었다. 연구 결과, 온실가스 배출량을 평가하는 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)에서 부품 중 PCB의 영향이 가장 컸으며, 단계별로는 원자재 채취와 원료 물질 생산 등을 포함한 제조 전 단계에서 전체 배출량의 52.6%를 차지하여 가장 높은 영향을 미쳤다. 연구는 스마트폰의 소형화 및 경량화를 통해 자원 사용량을 줄이고, 자원 순환성을 높일 수 있는 친환경 소재를 사용하여 제조 전 단계의 환경 영향을 줄여야 한다고 제안했다.

국내외 선행 연구를 검토한 결과, 대부분의 연구는 폐휴대전화 수거 체계와 정책에 대한 평가에 집중하고 있었다. 해외에서는 폐휴대전화 재활용에 관한 LCA 연구가 활발하게 이루어졌으나, 대부분이 재활용 공정 자체에만 집중되어 있어, 온실가스 저감 효과를 확인하는 데에는 한계가 있었다. 국내에서는 폐휴대전화 재활용의 LCA 연구가 상대적으로 부족한 실정이었다. 본 연구에서는 폐휴대전화 재활용 공정에 대해 국내 LCI(Life Cycle Inventory, LCI) 데이터를 적용하여 LCA 분석을 수행하였으며, 비교 대상인 채굴 및 제련 공정에도 동일한 LCI 데이터를 적용하여 온실가스 배출량을 비교 분석하였다.

Ⅲ. 온실가스 배출량 산정: LCA를 통한 온실가스 배출량 분석

1. 방법론

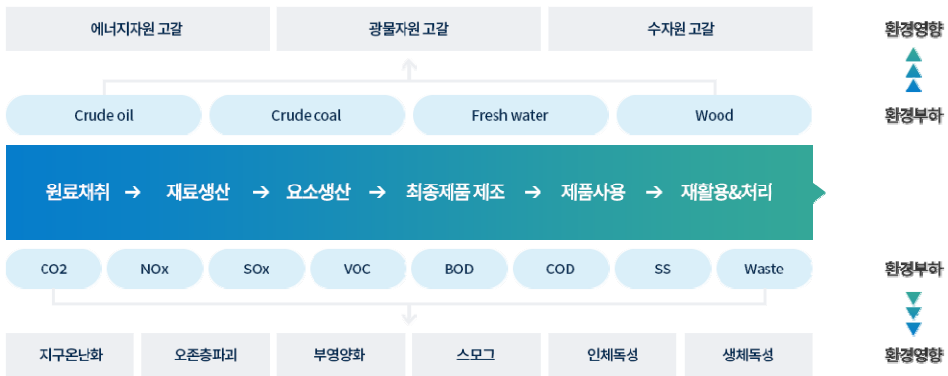
본 연구는 PCB 재활용 과정과 광산 채굴 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 비교 분석한다. 이를 위해, 제품의 모든 과정에서 에너지와 광물 자원의 사용이 대기, 수질, 토양 등에 미치는 환경적 영향을 평가할 수 있는 LCA 기법을 활용하였다. LCA는 <그림 1>에서와 같이 제품 및 서비스의 원료 채취부터 제조, 유통, 사용, 폐기에 이르기까지 전 과정에 걸친 환경 영향을 정량적으로 분석·평가하는 방법이다. 이 기법은 환경오염물 배출뿐만 아니라 자원 및 에너지 소비, 인체 독성, 생태 독성 등의 영향을 평가할 수 있어,

국내외 다양한 온실가스 배출량 산정 연구에 널리 활용되고 있다.

LCA의 기본 구성은 목적 및 범위 설정, 목록분석, 영향평가, 결과해석의 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계인 목적 및 범위 설정에서는 연구의 대상과 범위를 결정하고, 온실가스 배출량 산정의 기준물질을 설정한다. 목록분석 단계에서는 연구 범위 내에서 수행되는 공정과 투입되는 자원, 에너지, 화학물질 등의 자료를 수집하고, 배출되는 제품 및 부산물의 데이터를 수집한다. 영향평가 단계에서는 수집된 LCI를 바탕으로 환경 영향을 평가하며, 마지막 결과해석 단계에서는 목록분석과 영향평가의 결과를 종합적으로 해석한다. 이 과정에서는 단계별 해석도 가능하다(Curran, 2006).

본 연구에서는 금속의 채굴 및 제련 과정과 PCB 재활용 공정을 더 정확하게 비교하기 위해 국내 LCI데이터를 적용하였다. LCA 분석에는 환경부의 Total Ver 6.6.2 프로그램을 사용하였으며, LCI 데이터는 한국환경산업기술원이 개발한 국가 LCIDB(Ver 6.5)와 환경성적표지 탄소배출 계수를 활용하였다. 또한, 환경부와 한국환경공단에서 작성한 「국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인」¹⁾의 탄소 함량 및 배출 계수를 사용하였다.

〈그림 1〉 LCA 기본구조



출처: 한국탄소산업진흥원 탄소복합재 LCA 홈페이지, <https://www.kcarbon.or.kr/web/page.php?PCODE=HE>, 2024.8.30. 접속

1) 이 가이드라인은 2019년에 개선되어, 기존의 오래된 정보를 최신 정보로 갱신하고, 기존 지침을 상세화하며, 신규 배출·흡수원에 대한 지침을 추가한 것으로, 2006년 지침을 대체하지 않고 함께 사용되는 자료이다.

2. 연구 대상과 범위 정의

연구 대상은 박승수 외(2018)의 성분 분석 연구가 수행된 S사의 2016년 모델로 선정하였다.²⁾ 이 모델의 분석 결과, PCB의 함량은 14.6g이며, 그 구성 요소 중 구리(Cu)의 무게 비율이 38.1wt%로 가장 높았다. 또한, 가치 비율을 기준으로 할 때 금(Au)이 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 분석되었다.³⁾ 이에 따라 본 연구에서는 구리와 금을 PCB 재활용의 기준물질로 선정하여, LCA 기법을 통해 온실가스 배출량을 분석하였다. 본 연구에서 분석 대상이 된 S사의 2016년 모델의 PCB 구성 요소와 최종 정제 단계에서의 수율은 <표 1>에 제시하였다.

PCB 재활용 과정에 대한 목록분석은 Pokhrel et al.(2020)에서 선행 연구한 대만 공장의 재활용 공정을 바탕으로 진행하였다. 또한, 구리와 금의 채굴 및 제련 과정에 대한 목

<표 1> 분석 대상 휴대전화 PCB 구성요소 및 수율

PCB 구성요소	함량(wt%)	수율(%)
Cu	38.08	94.40
Others	35.72	-
Plastic	8.931	-
Ni	6.158	-
Sn	4.578	-
Al	1.907	-
Ta	0.2929	-
Ga	0.252	-
Ag	0.1014	-
Au	0.06233	98.39
Pt	0.006676	-

주: 선행 연구에서 구리(Cu)와 금(Au)의 수율만을 제시하고 있어 이를 대상으로 온실가스 배출량 변화와 경제성 평가를 수행함. 박승수 외(2018)에 따르면 PCB 구성요소 중 구리와 금의 가치가 전체의 83.6%로 핵심 재활용 대상임.

출처: 함량은 박승수 외(2018), 수율은 Pokhrel et al.(2020) 참조

- 2) 본 모델은 파생형 모델과 합산하여 국내 약 20만 대를 판매하였다. 글로벌 기준으로는 4,100만 대의 판매량을 기록했으며, 가장 최근에, 국내에서 성분 분석 연구가 진행된 모델로 본 연구 대상으로 선정하였다.
- 3) 박승수 외(2018) 연구에 따르면 금은 무게 비율이 0.06233 wt. % 만을 차지하나, 금의 가격이 다른 광물의 가격보다 압도적으로 높으므로 가치 비율은 75.9%를 차지하는 것으로 분석하였다.

록분석은 Hong et al.(2018)과 Chen et al.(2018)의 수행된 선행 연구를 참고하여, 에너지 사용량, 수송 과정, 주요 탄소 배출원 등을 고려하여 진행되었다.

3. 전 과정 목록분석

1) PCB 재활용 공정 분석

폐휴대전화는 수거된 후 선별과 해체 과정을 거쳐 파쇄 및 분쇄를 통해 플라스틱, 액정, PCB 등으로 분류된다. 이후 분류된 PCB는 절단 후 고온 용융 처리를 하는 건식제련법과, 분쇄 후 유기금속을 특정 용매에 침출하고, 용매 추출 및 이온교환 등을 이용하여 금속을 분리 및 농축하여 회수하는 습식제련법으로 처리할 수 있다(안혜란 외, 2017).⁴⁾ 본 연구에서는 선행 연구가 진행된 대만의 공장에서 활용되고 있는 습식제련법을 기준으로 온실가스 배출량 산정을 수행하였다. <그림 2>에서와 같이, 공정은 파쇄 및 분리 과정으로 진행되며, 주 에너지원으로는 전기에너지가 사용된다. 폐휴대전화에서 1톤의 PCB를 얻는 데 필요한 각 기계와 이들을 작동시키기 위한 전기소비량은 325.85kWh로 조사되었다.

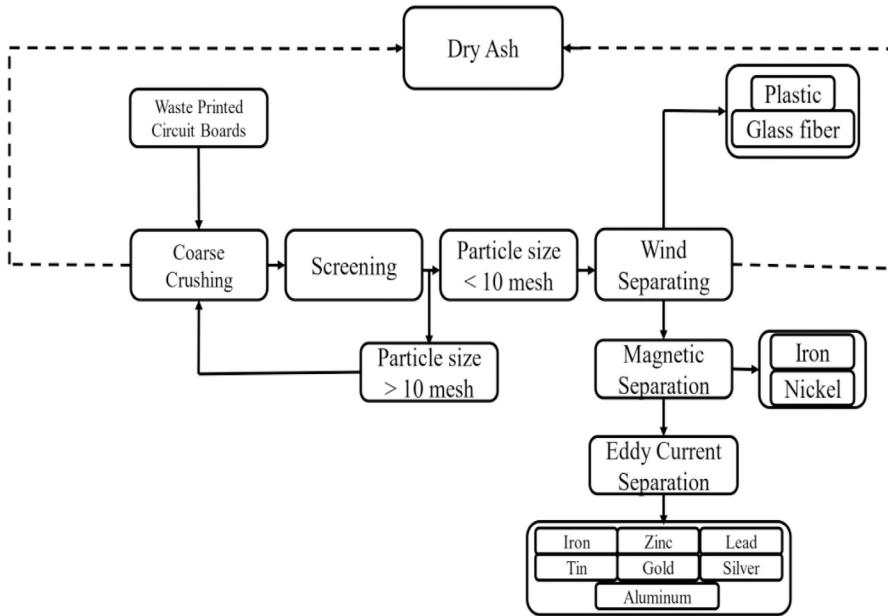
PCB 재활용을 통해 분리된 금속들은 각각의 공정을 거쳐 순도 높은 금속으로 정제된다. PCB에서 회수된 구리는 염소를 사용하여 염화구리로 변환한 후, 전기에너지를 이용한 전기분해 과정을 통해 순도 높은 구리를 얻을 수 있다. 금의 경우, 왕수 공정을 통해 고순도의 금을 추출할 수 있다. 본 연구에서는 폐휴대전화의 수거 및 선별과 해체 과정에서부터 정제 과정에 이르기까지의 범위를 기준으로 온실가스 배출량 산정을 진행하였다.

폐휴대전화로부터 PCB를 분해하는 과정에서는 국가 데이터베이스에 존재하는 ‘폐전기전자제품 재활용’ 데이터를 사용하였다. 분해 과정에서는 2018년과 2030년의 발전 믹스를 적용하기 위해, 배출되는 온실가스량을 기준으로 사용 전력을 역산하여 적용하였다.⁵⁾ 폐휴대전화로부터 1톤의 PCB를 얻는 데 필요한 전기량은 7,580.34kWh로 나타났다.

4) 안혜란 외(2017) 연구에 따르면 건식제련법은 대기오염 및 슬래그의 발생 및 금속의 회수율이 낮은 단점이 존재한다. 습식제련법의 경우 전처리 공정 등 공정 과정이 복잡하지만, 운영이 간단하고, 주요 성분의 분리 횟수가 가능하여 상용화될 가능성이 큰 기술이라 분석하였다.

5) 폐전기전자제품 재활용의 LCI 데이터는 전력량이 고정적으로 들어가 있어 발전 믹스에 따른 온실가스 배출량을 비교하기에는 어렵다.

〈그림 2〉 습식제련법을 이용한 PCB 재활용 공정



출처: Pokhrel et al.(2020). p.3

주: 재활용 공정에서 사용하는 에너지는 대부분 전기이며 상세한 LCI는 부록을 통해 표기

2) 구리광 공정 분석

본 연구에서는 Hong et al.(2018)이 선행 연구한 중국의 구리광산 사례를 바탕으로 연구를 진행하였다. 구리의 채굴 과정부터 순도 99.99%의 구리를 얻기까지의 전체 과정을 연구 범위로 설정하였다.

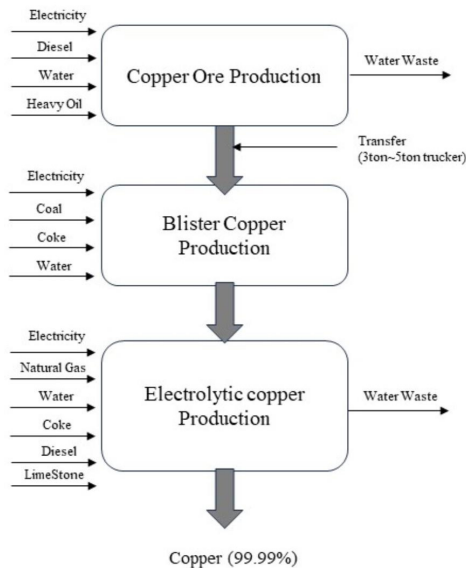
구리 채굴 과정은 <그림 3>과 같이 구리광을 채굴한 후, 운송 과정을 거쳐 분해한 뒤 전기분해를 통해 순도 99.99%의 구리를 얻는 과정을 기준으로 하였다. 이 과정에서는 에너지 사용, 운송, 주요 탄소 배출원만을 고려하여 온실가스 배출량 산정을 수행하였다. 광업에서 발생하는 폐기물 처리와 매립 과정 등 온실가스 배출에 큰 영향을 미치지 않는 공정은 이번 온실가스 배출량 산정에서 제외하였다. 공정에서 발생하는 주요 탄소 배출원은 <표 2>에 정리하였다.

〈표 2〉 구리 채굴 및 제련 공정에서의 주요 탄소 배출원 목록분석

Group	Material	Volume	Unit (/Cu _{99.9%} ton)	Emissions (kgCO ₂ eq./unit)	Sources for Emissions
Energy	Electricity	1196.59	kWh	(2018) 6.44×10 ⁻¹ (2030) 3.57×10 ⁻¹	2018, 2030년도 발전량 LCI (저자 작성)
Chemical	Light Oil	7.17	kg	3.18	환경성적표지 탄소배출 계수
	Heavy Oil	35.4	kg	2.99	
	Natural Gas	38.864	kg	2.67	
	Coke	264.44	kg	3.02	
	Hard Coal	80	kg	2.46	
	Limestone	110	kg	1.36	
Water	Water	94.61	m ³	6.13	국가 데이터베이스
Transport	Land route (3~5 tons trucker)	50	km	-	

출처: Hong et al.(2018). p.3

〈그림 3〉 구리 채굴 및 제련 공정 및 주요 탄소 배출원



출처: Hong et al.(2018)을 토대로 저자 작성

3) 금 채광 공정 분석

금은 주로 단단한 암석 광산에서 채굴되며, 갱내 채굴과 노천 채광 방법을 통해 채굴할 수 있다. 이후 제련 과정을 거쳐 순도 높은 금이 생산된다. <그림 4>는 금의 일반적인 채굴 및 제련 공정을 나타낸다. 본 연구는 Chen et al.(2018)이 선행 연구한 중국 칭하이성에 있는 금 생산 회사의 자료를 바탕으로 진행되었다.

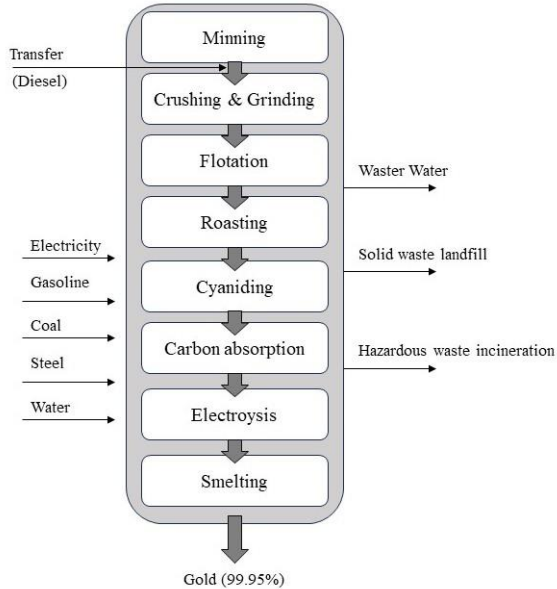
금의 생산 및 제련 과정에서는 에너지 소비, 운송, 주요 탄소 배출원뿐만 아니라 폐기물매립, 소각, 폐수처리 등의 단계를 고려하여 온실가스 배출량 산정을 실시하였다. 반면, 토양 오염 등 온실가스 배출에 미치는 영향이 적은 요소들은 본 연구에서 제외하였다. <표 3>에는 중국 내 광산에서 순도 99.95%의 금 1kg을 생산하는 데 필요한 주요 탄소 배출원들을 정리하였다.

<표 3> 금 채굴 및 제련 공정에서의 주요 탄소 배출원 목록분석

Group	Material	Volume	Unit (/Cu _{99.9%} ton)	Emissions (kgCO ₂ eq./unit)	Sources for Emissions
Energy	Electricity	3.01×10 ⁴	kWh	(2018) 6.44×10 ⁻¹ (2030) 3.57×10 ⁻¹	2018, 2030년도 발전량 LCI (저자 작성)
Chemical	Gasoline	33.58	kg	2.09	환경성적표지 탄소배출 계수
	Coal	1.04	t	2.46	
	Steel	344.09	kg	1.6	
	Limestone	1.66	t	1.36	
Water	Water	226.48	m ³	1.17×10 ⁻³	국가 데이터베이스
Transport	Diesel	161.66	kg	3.19	환경성적표지 탄소배출 계수
Waste	Landfill	38.03	kg	7.81×10 ⁻²	국가 데이터베이스
	Incineration	9.51	kg	1.78×10 ⁻¹	

출처: 배출량 외 자료는 Chen et al.(2018), p. 2., 배출량은 출처 별도 표기

〈그림 4〉 일반적인 금 채굴 및 제련 공정 및 주요 탄소 배출원



출처: Chen et al.(2018)을 토대로 저자 작성

4) 국내 발전 믹스

PCB 재활용 공정과 자원 채굴 과정에서 전기에너지는 주요 에너지원으로 사용된다. 본 연구에서는 국내 LCI 최신화를 위해, 2018년 국내 발전 믹스를 기준으로 전기 생산에서의 탄소배출 LCI를 재작성하였다. 또한, 신재생에너지 발전 비중이 증가할 것으로 예상되는 2030년 발전 믹스와의 비교를 위해 ‘제10차 전력수급기본계획’을 바탕으로 2030년 전기 발전에서의 탄소배출 LCI 데이터를 새롭게 작성하였다. <표 4>에는 연도별 발전 비중이 나타나 있다.

<표 4>에서 볼 수 있듯이, 2030년 기준으로 석탄 발전의 비율이 크게 감소하고, 원자력 발전, 수소 발전, 그리고 신재생에너지 발전 비율이 높아진 것을 확인할 수 있다. 수소 발전을 포함하여 매립가스 발전, 부생가스 발전, IGCC(석탄가스화복합발전) 발전에 대한 국내 LCI 데이터 및 탄소 배출량이 존재하지 않아서 2018년과 2030년 발전 LCI 데이터를 작성하는 과정에서 이들 항목을 제외하였다. 그러나 이들이 차지하는 발전 비중이 매우 적기 때문에, 연구 결과에 큰 영향을 미치지 않으리라고 예상된다. 본 연구에서는

2018년과 2030년 발전에 대한 탄소배출 LCI를 자체적으로 생성하였으며, 이를 PCB 재활용 공정과 구리 및 금 채굴 공정에 적용하여 비교분석을 진행하였다.

〈표 4〉 국내 연도별 발전 비율 (단위: %)

발전 방식	2018 발전 믹스	2030 발전 믹스
석탄 발전	41.9	19.7
LNG 발전	26.8	22.9
수소 발전	-	2.1
원자력 발전	23.4	32.4
기타 발전	1.7	1.3
신재생에너지 발전	6.2	21.6
계	100	100
태양광 발전	1.4	8.4
풍력 발전	0.4	6.9
바이오 발전	1	2.3
수력 발전	0.6	0.6
해양 발전	0.08	0.08
연료전지	0.3	2.8
기타	2.42	0.5
신재생에너지 발전 계	6.2	21.6

주: 신재생에너지의 ‘기타’에는 매립가스 발전, 부생가스 발전, IGCC 등이 포함된 값임. 자료: 한국전력공사 「한국전력통계 제88호(2019)」, 산업통상자원부 「제10차 전력수급기본계획(2022~2036)」, 「제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2020)」을 종합하여 정리

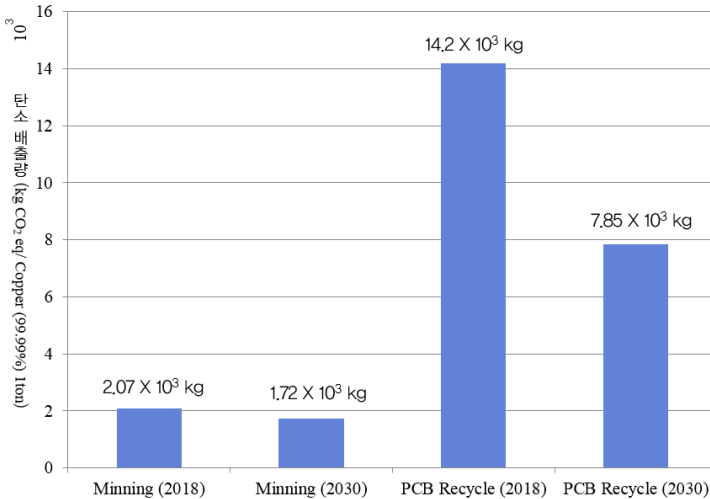
4. 온실가스 배출량 분석

1) 구리 생성 과정에서의 온실가스 배출량

<그림 5>에서는 정제된 구리 1톤을 기준으로 채굴 과정과 PCB 재활용 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 비교하고 있다. 여기서 “Mining”은 구리 채굴 과정을, “PCB Recycle”은 PCB 재활용 과정을 나타낸다. “(2018)”과 “(2030)” 표시는 각각 <표 4>에서 제시한 “2018 발전 믹스”와 “2030 발전 믹스”를 기준으로 전기 발전 과정에서 발생한 온실가스 배출량을 의미한다.

분석 결과, PCB 재활용 공정에서 발생하는 온실가스량이 구리 채굴 과정보다 더 많은 것으로 나타났다. 2018년 발전 믹스를 기준으로 PCB 재활용 공정에서는 채굴 과정보다 6.86배 더 많은 온실가스가 배출되는 것으로 나타났으며, 2030년 발전 믹스를 기준으로 4.56배 더 많은 온실가스가 배출되었다. 구리 채굴 과정의 경우, 전기에너지 투입량이 비교적 적어, 2018년 대비 2030년에 온실가스 배출량이 16.91% 감소하는 것으로 나타났다. 반면, PCB 재활용 공정은 전기소비량이 많으므로, 신재생에너지 비중이 확대된 2030년에는 2018년보다 온실가스 배출량이 44.72% 감소하는 것으로 확인되었다.

<그림 5> 구리 생성 과정에서의 온실가스 배출량(kg CO₂ eq./Copper(99.99%) 1 ton)



2) 금 생성 과정에서의 온실가스 배출량

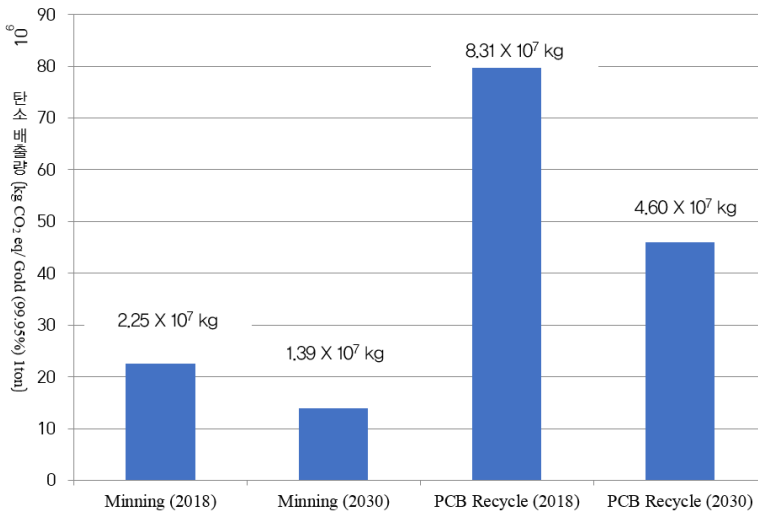
<그림 6>에서는 순도 99.95%의 금 1kg을 기준으로, 금의 채굴 과정(Mining)과 PCB 재활용 과정(PCB Recycle)에서 발생하는 온실가스 배출량을 비교하고 있다. <그림 5>와 마찬가지로, “Mining”은 금의 채굴 과정을, “PCB Recycle”은 PCB 재활용 과정을 나타낸다. “(2018)”과 “(2030)” 표시는 각각 <표 4>에서 제시된 “2018 발전 믹스”와 “2030 발전 믹스”를 기준으로 전력 생산 과정에서 발생한 온실가스 배출량을 의미한다.

분석 결과, 금 1kg을 얻기 위해서는 구리 1kg을 얻는 채굴 과정이나 PCB 재활용 과정

보다 더 많은 온실가스가 발생하는 것으로 나타났다. 특히, PCB Recycle 과정에서는 PCB 내 금 함량이 매우 적기 때문에, 금 1kg을 얻기 위해 약 166톤의 PCB가 필요한 것으로 분석되었다.

2018년 발전 믹스를 기준으로, PCB Recycle 공정에서는 금 채굴 과정보다 3.69배 더 많은 온실가스가 발생하는 것으로 나타났으며, 2030년 발전 믹스를 기준으로는 3.31배 더 많은 온실가스가 배출되었다. 금 채굴 과정의 경우, 2030년 전력 에너지 믹스를 적용하면 2018년 대비 온실가스 배출량이 38.22% 감소하는 것으로 나타났다. 전기에너지 투입이 많은 PCB Recycle 과정에서도 2030년에는 2018년 대비 온실가스 배출량이 44.65% 감소하는 것으로 확인되었다.

<그림 6> 금 생성 과정에서의 온실가스 배출량



3) PCB 재활용 과정에서의 온실가스 배출량

PCB 재활용 과정에서는 구리와 금 같은 유가금속을 동시에 회수할 수 있다. 이러한 이유로, 금 1kg과 구리 1kg을 얻기 위해 <그림 5>와 <그림 6>에서 나타난 PCB 재활용 공정의 온실가스 배출량을 단순히 합산할 경우, 온실가스 배출량이 중복 계산될 위험이 있다. 이러한 중복 계산 문제는 PCB 재활용 공정에서의 정확한 온실가스 배출량을 비교

하는 데 어려움을 초래할 수 있다. 따라서 구리와 금을 동시에 회수하는 과정에서 발생하는 온실가스 배출량은 개별적으로 합산하기보다는 전체 공정에서의 총 배출량을 고려할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 PCB 1톤에서 얻어지는 구리와 금을 기준물질로 하여 온실가스 배출량을 비교하였다. <표 5>에는 PCB 1톤에서 얻어지는 구리와 금을 기준으로 배출되는 온실가스량이 나타나 있다. PCB 1톤당 약 360kg의 99.99% 순도의 구리를 얻을 수 있었으며, 정제된 금(99.95%)은 0.0061kg을 얻을 수 있었다. 이 데이터를 바탕으로 PCB 1톤에서 얻어진 구리와 금을 기준으로 금과 구리의 채굴 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 계산하였다.

분석 결과, PCB 재활용 과정에서 구리와 금을 얻는 것이 채굴 과정에 비해 4.21×10^3 kg의 온실가스가 더 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 신재생에너지 비율이 높아진 2030년 발전 믹스를 적용하더라도, PCB 재활용 과정에서 여전히 2.13×10^3 kg의 온실가스가 더 배출되는 것으로 조사되었다.

<표 5> PCB 1톤당 수득 금속 및 공정별 온실가스 배출량

Metal	Mass	Recycle (2018)	Recycle (2030)	Mining (2018)	Mining (2030)
	Unit	kg CO ₂ eq			
	kg				
Cu (99.99%)	360	5.08×10^3	2.82×10^3	7.45×10^2	6.10×10^2
Au (99.95%)	0.0061			1.37×10^2	8.47×10^2
Total		5.08×10^3	2.82×10^3	8.66×10^2	6.94×10^2

IV. 경제성 분석

1. 비용편익분석

본 연구에서는 폐휴대전화의 PCB 재활용 과정에 대한 비용편익분석을 수행하였다. PCB 재활용 공정에 대한 분석은 Pokhrel et al.(2020)이 선행 연구한 대만의 한 공장을 기준으로 하여, 국내 데이터를 적용하였다. 선행 연구에서는 5명의 작업자가 하루 8시간 근무하며 시간당 700kg의 PCB를 처리할 수 있는 시설을 기반으로 연구가 진행되었다.

비용 측면에서는 초기 투자비로 고정 투자되는 기계 비용을 고려하였으며, 이 초기 기계 비용에 대해 1년간 10%의 감가상각률을 적용하였다. 부동산 비용은 대한민국 충청북도 진천에 위치한 태양광 모듈 재활용센터의 공시지가를 참고하였다. 연간 운영비에는 PCB 구매 비용, 전기료, 연간 유지 보수 비용, 정제첨가물 비용이 포함되었다. 전기료는 한국 전력의 계약 종별 전기요금 중 ‘사업자 을’ 요금을 적용하였다. 또한, 본 연구에서 분석된 PCB 재활용 공정에서 추가로 발생하는 온실가스에 대해 탄소 배출권 구매 비용도 포함하였다. 변동 운영비에는 인건비가 포함되었으며, 인건비는 2022년 엔지니어링협회가 발간한 ‘엔지니어링 업체 임금실태조사 보고서’를 기준으로 설정되었다. 인력 구성은 초급 기술자 3명, 중급 기술자 1명, 고급 기술자 1명으로 하였으며, 연간 임금 상승률 5%를 적용하였다(한국엔지니어링협회, 2022). <표 6>에는 각 항목별 지출 금액이 정리되어 있다.

<표 6> PCB 재활용 비용 분석

비용의 성질	지출 항목	필요 수량	단가	지출 금액 (천 원)	비고
고정 투자비	기계 비용		40,667달러	52,867	1년 기계 감가상각률: 10%
	부동산 비용	15,847m ²	101,200원	1,656,868	진천 재활용센터 공시지가 참고
연간 운영비	PCB 구매 비용	1,400ton	9,000,000원/ton	12,600,000	국내 R업체 매입 표 기준
	전기료	196kWh/ton		2,315,250	한국전력 계약 종별전기요금 계산기 이용(사업자 을)
	온실가스 배출	5,600ton	7,700원/ton	43,120	2022년 가격 기준
	정제첨가물		365.00달러	474	
	유지 보수 비용		1,533달러/year	2,003	
변동 운영비	인건비	5명		259,215	2022년 엔지니어링업체 임금실태조사 보고서 참고
	기계 감가상각		4,066.70달러	5,287	1년차 때부터 감가상각 적용, 복리 적용

주: 환율은 2023년 평균 환율인 1,307원으로 가정
출처: Pokhrel et al.(2020)을 토대로 저자 작성

수입 측면에서는 LCA 평가 대상이었던 금과 구리만을 주요 수입원으로 설정하였다. 공장에서 1년에 1,400톤의 PCB를 재활용하였을 때 얻어지는 금과 구리를 수익으로 계산하였다. 폐휴대폰 PCB만을 분리하여 공장을 가동하는 것은 현실적이지 않으므로, 폐노트북을 포함한 A급 PCB의 재활용을 기준으로 연구를 진행하였다. PCB에서의 금과 구리 수율은 박승수 외(2018)를 참고하여 폐휴대전화 2종과 폐노트북 2종의 평균값을 적용하였다. 금과 구리의 가격은 KITCO Jintuo metal market⁶⁾의 2023년 기준 5년 평균 가격으로 설정되었으며, 이를 고정값으로 분석에 사용하였다. 1년에 1,400톤의 PCB를 재활용하면 구리 502.6톤과 금 0.588톤을 얻을 수 있으며, 이는 1년 수입으로 45,095백만 원에 해당한다. 사회적 할인율은 4.5%를 적용하였으며, 분석 기간은 20년으로 설정하였다. 비용편익분석 결과, B/C값이 1.95로 나타나 경제적 타당성을 확보한 것으로 분석되었다.

2. 민감도 분석

비용편익분석 단계에서는 재활용되는 PCB의 양을 1,400톤으로 가정하여 분석을 진행하였다. 본 절에서는 재활용되는 PCB 양과 가격 그리고 금 가격에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 사업에 영향을 미치는 요소들이 해당 사업에 어떤 영향을 미치는지를 평가하기 위해 실시한다(임재준·김진수, 2024).

기준이 되는 비용과 편익은 <표 6>에서 사용된 값과 동일하게 적용하였다. 민감도 분석 결과는 <표 7>과 <그림 7>에 제시되어 있다. 분석 결과, PCB 가격 변화가 B/C값에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. PCB 가격이 50% 증가할 때(13,500천 원/톤), B/C값은 3.99로 증가하였다. 반대로 PCB 가격이 50% 감소할 때(4,500천 원/톤), B/C값은 2.00으로 감소한다. 이는 PCB 가격에 따른 B/C값이 로그 함수적인 변화를 보이는 것을 의미한다. 또한, PCB 수급에 따라 공장 가동률이 50% 감소하더라도 B/C값이 1을 넘는 것으로 나타났지만, 수입액이 많이 감소하여 사업의 수익성을 기대하기 어렵다고 판단되었다. 금 가격이 기준 가격의 50% 감소했을 때 B/C값이 1 미만으로 떨어졌으며, 반대로 50% 상승할 때 기준 B/C값 대비 2배 이상의 수익을 기대할 수 있는 것으로 연구되었다.

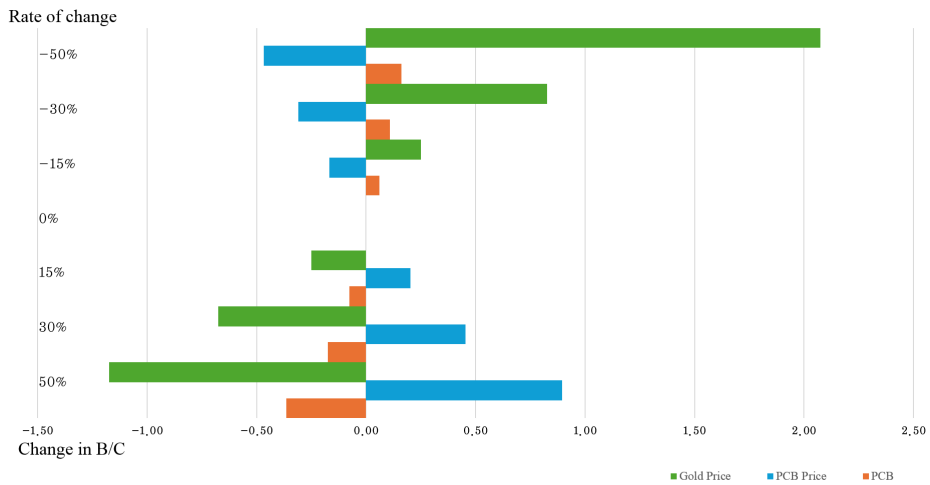
6) KITCO Jintuo precious metal market은 온라인 소매업체이며 전 세계 주요 귀금속 폴서비스 업체 중 하나로 평가받고 있다.

〈표 7〉 재활용 PCB 양에 따른 민감도 분석 결과 PCB (ton)

Rate of change \ Change of B/C	PCB	PCB Price	Gold Price
-50%	-0.37	3.99	-1.27
-30%	-0.18	1.66	-0.73
-15%	-0.08	0.50	-0.27
0%	0.00	0.00	0.00
15%	0.06	-0.40	0.27
30%	0.11	-1.10	0.90
50%	0.16	-2.00	2.25

주: <표 7>에서의 PCB는 PCB 양을 의미하며, PCB Price와 Gold Price는 PCB의 매입 가격과 금의 판매 가격을 의미함. 각 수치의 기준값은 <표 6>을 바탕으로 설정함. Rate of Change는 각 기준이 되는 값의 변화를 의미하며, Change of B/C는 조사되었던 B/C값에서 변화된 값을 의미함.

〈그림 7〉 민감도 분석에 따른 B/C 변화



V. 요약 및 시사점

본 연구에서 사용된 구리와 금 채굴 및 제련 공정, 그리고 PCB 재활용 공정은 해외 선행 연구를 인용하여 분석되었다. LCA 평가를 위해서는 각 공정에 투입되는 자원과 배출

되는 산출물의 정보가 필요하지만, 많은 선행 연구에서는 이러한 정보를 제공하지 않고 있다. 이에 따라, 공정의 Input과 Output 정보를 제공하는 Hong et al.(2018), Chen et al. (2018), 그리고 Pokhrel et al.(2020)의 연구에서 기술된 공정을 본 연구의 대표 공정으로 설정하였다.

본 연구는 PCB 재활용 공정과 전통적인 금속 채굴 및 제련 과정에서의 온실가스 배출량을 비교·분석하기 위해 대한민국의 LCI 데이터를 동일하게 적용하였다. 또한, 대한민국의 2030년 발전 믹스를 반영한 LCI 데이터를 추가로 작성하여, 각 공정에서의 온실가스 배출량 변화를 살펴보았다. 연구 결과, 신재생에너지 비중이 늘어난 2030년 발전 믹스를 적용하더라도, PCB 재활용 과정에서의 온실가스 배출량이 전통적인 채굴 및 제련 방식보다 더 많다는 것을 확인할 수 있었다. 2018년을 기준으로 PCB 1톤을 재활용할 때, 재활용 공정에서 $4.21 \times 10^3 \text{kg}$ 의 온실가스가 추가로 발생하였으며, 2030년을 기준으로 $2.13 \times 10^3 \text{kg}$ 의 온실가스가 추가로 배출되는 것으로 분석되었다. 다만, 재활용 공정을 2018년과 2030년간 비교했을 때, 2030년에는 2018년 대비 44.48%의 온실가스 배출이 감소하는 것으로 나타났다.

이 연구는 폐휴대전화 및 폐 전기·전자 제품의 재활용 공정이 온실가스 감축에 기여하지 못할 수 있으며, 오히려 추가적인 온실가스 배출을 초래할 수 있다는 결과를 제시한다. 이러한 결과는 저탄소 정책 수립 시 LCA 관점에서 재활용 공정에서의 온실가스 배출량 산정 연구가 추가로 이루어져야 함을 의미한다. 즉, 재활용 공정에서의 사용하는 높은 수준의 전력이 오히려 채굴에 비해 온실가스 배출량이 더 많을 수 있다. 이러한 결과는 RE100 등 발전원 구성이 청정에너지 중심으로 변화하더라도 일정 부분 유효하며, 이는 LCA 관점에서 재생에너지 설비 제조, 설치 및 운영 과정에서 온실가스가 발생하기 때문이다. 따라서 재활용 공정에서의 온실가스 배출을 주의 깊게 분석할 필요가 있다. 물론, 재활용 공정의 개선을 통해 에너지 효율이 높아진다면, 온실가스 배출량을 상당히 줄일 수 있을 것이다. 아울러 PCB 재활용 공정에서 발생하는 온실가스는 주로 전환 부문에서 발생하기 때문에, 재활용 공정 자체에 탄소 포집 및 저장 기술(CCS, Carbon Capture Storage)을 적용하기는 어려울 것으로 보인다.

LCA 관점에서 재활용 공정을 분석하는 연구는 폐 전기·전자 제품뿐만 아니라 플라스틱, 연료 등의 재활용 공정으로 확대되어야 한다. 국내의 경우, 저탄소 녹색성장 사업

중 바이오매스와 가축 분뇨 등을 통한 자원 재활용 확대 정책이 포함되어 있으며(관계부처 합동, 2022), 이에 관한 온실가스 배출량 산정 연구를 통해 온실가스 감축 효과의 타당성을 평가할 필요가 있다. 다만, 본 연구에서는 회수된 폐휴대전화를 전량 재활용하는 것을 가정하여 전통적인 금속 채굴 및 제련 방식과의 온실가스 배출량을 비교·분석하였다. 이 과정에서 폐휴대전화 및 기타 전기·전자 제품에 대한 매립과 소각 등의 폐기를 고려하지 않았다. 추후 연구에서는 폐 전기·전자 제품의 매립 및 소각량과 이로 인한 온실가스 배출량 산정을 추가로 조사하여, 재활용 공정과의 비교가 필요할 것이다.

또한, 폐 전기·전자 제품의 재활용 공정을 통한 유용 광물 회수는 온실가스 저감 관점이 아닌, 자원 비축 관점에서 정책과 제도가 개선되어야 할 것이다. 대한민국은 OECD 국가 중 자원 소비량이 매우 높은 국가이며, 이에 비해 수입 의존도가 매우 높다. 그러나 금속 재활용률은 미국과 일본에 비해 매우 낮은 것으로 조사된다(정은미, 2010). 따라서 자원 안보를 위한 유용 광물 재활용 기술의 증진과 재활용 대상 물질 회수 등의 제도 개선에 관한 심층적인 연구가 필요하다.

PCB 재활용 공정의 경제성 평가는 비용편익분석을 통해 B/C값이 1.95로 높게 나타났다. 이는 폐 전기·전자폐기물 재활용 공정이 경제성을 확보할 수 있음을 보여준다. Cucchiella et al.(2015)의 연구에서도 폐 전기·전자폐기물 재활용 공정의 경제성을 확인하였고, 이후 Cucchiella et al.(2016)은 자동차 폐 PCB 재활용의 경제성에 대해서도 유사한 결론을 도출했다. 그러나 이러한 연구 결과와 달리, 국내에서는 폐 전기·전자폐기물 산업에 대한 민간 투자가 미비하며, 주로 정부 주도로 운영되고 있다.

선행 연구에서는 아마도 혼합 PCB의 단가를 기준으로 폐 PCB 구매 비용을 설정한 것으로 생각된다. 폐 PCB는 고물상 거래 시 금 함량에 따라 A급, B급, 혼합 등으로 분류되며, 혼합된 PCB일수록 매입 단가는 낮아지지만, 유용 광물의 함량도 크게 줄어든다. 선행 연구들은 이러한 점을 충분히 고려하지 않아 높은 사업성을 나타낸 것으로 보인다. 실제로, 본 연구에서도 혼합 PCB의 매입 단가를 1kg당 1,000원으로 설정하면 B/C값이 12.9로 매우 높게 나타났다.

민감도 분석에서는 재활용되는 PCB의 양, PCB 가격, 그리고 금 가격의 변화에 따른 B/C값을 분석하였다. 분석 결과, PCB 매입 가격이 B/C값에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. A급 PCB 가격이 50% 감소하면 B/C값이 8.35로 크게 상승하였다. PCB 가격 변

화에 따른 B/C값 변화는 로그함수 그래프를 따르며, PCB 가격이 많이 감소할수록 B/C값이 많이 증가하는 것으로 연구되었다. 또한, 금 가격은 PCB 재활용 공정에서 중요한 비중을 차지하며, 금 가격의 하락은 사업성에 큰 영향을 미친다. 그러나 A급 PCB의 매입 가격이 금 가격에 비례하여 상승하는 점을 고려해야 한다.

전자제품자원순환공제조합의 2021년 연감에 따르면, 폐휴대전화의 회수량은 53톤이며, 이 중 PCB의 양은 약 6톤으로 추정된다. 이는 폐 PCB를 연간 1,400톤을 처리하는 분석과 비교했을 때 매우 부족하다. 폐 PCB의 수입 없이 국내에서 발생하는 PCB만을 재활용할 경우, 총수입은 약 1억 6천만 원에 불과하다. 또한, B/C값은 0.04로 나타나 경제성이 부족하다. 본 연구에서는 연간 약 300톤의 PCB를 재활용해야 B/C값이 1 이상으로 나타났으며, 이때의 연간 수입은 약 80억 원으로 추정되었다. 또한, PCB 재활용 공정에서 발생하는 납 등 중금속 처리와 같은 인간 독성, 수질 및 토양 오염에 대한 사회적·환경적 비용과 PCB 재활용을 통한 자원 회수 및 비축을 편익으로 포함한다면, 비용편익 분석 값이 변화할 가능성이 있다.

이상의 결과를 종합하면 두 가지 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 재활용을 통한 저탄소 정책에 대한 재검토가 필요하다. 본 연구에서는 전기를 주 에너지원으로 사용하는 PCB 재활용 공정이 전통적인 금속 채굴 및 제련 공정보다 더 많은 온실가스를 배출할 가능성이 있다는 점을 확인했다. 따라서 재활용과 자원순환 정책은 당장은 자원 안보와 원료 절감 측면에서 접근할 필요가 있으며, 온실가스 배출 저감을 위해서는 저탄소 발전인 재생에너지와 원자력을 중심으로 전력믹스를 개선하고, 재활용 과정의 효율성을 높이는 연구가 병행되어야 한다.

둘째, 높은 광물 가격과 그 변동성을 고려할 때, 재활용이 경제적일 수 있다는 것이다. 본 연구의 비용편익분석 결과, 일정 규모 이상이 되면 PCB 재활용이 경제성을 확보할 수 있음을 보여준다. 또한, 전력 믹스 개선과 함께 탄소의 사회적 비용과 같은 환경 가치를 내부화한다면, 재활용의 경제적 타당성이 더욱 높아질 것이다. 따라서 효과적인 PCB 수집 등 재활용 가치사슬을 성공적으로 구축한다면, 경제적으로 지속 가능한 재활용 사업을 추진할 수 있을 것이다.

[References]

- 과학기술정보통신부, 「ICT주요품목동향조사」, 이동전화 휴대폰단말기 유형별 회선 수, 2023.
관계부처 합동, “탄소중립 녹색성장 추진전략”, 2022.
- 김강호·김진수, “국제 광물가격 변화가 KOSPI 시가총액에 미치는 영향 분석”, 「한국자원공학회」, 제60권 제2호, 2023, pp. 88~98.
- 김민철·장용철, “폐휴대폰의 경제적 가치 추정 및 비용-편익분석에 관한 연구”, 「한국폐기물 자원순환학회지」, 제26권 제6호, 2009, pp. 580~585.
- 박승수·정민욱·김성민·한성수·정인상·박지환·박재구, “폐 정보통신기기(스마트폰, 노트북 PC)의 자원화 가치 분석”, 「자원리사이클링」, 제27권 제3호, 2018, pp. 16~29.
- 산업통상자원부, “제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획”, 2020.
- 산업통상자원부, “제10차 전력수급기본계획(2022~2036)”, 2023.
- 산업통상자원부, “탄소 중립을 위한 한국형(K)-순환경제 이행계획 수립”, 2021, p. 16.
- 안혜란·강이승·이찬기, “국내 인쇄회로기판의 재활용 상용화 기술 및 연구동향 분석”, 「자원리사이클링」, 제26권 제4호, 2017, pp. 9~18.
- 임재준·김진수, “탄소의 사회적 비용에 따른 수상 태양광 사업의 경제성 변화”, 「신·재생에너지」, 제20권 제1호, 2024, pp. 41~50.
- 정은미, “도시광산사업의 효율적 추진과 정책과제”, 「KIET 산업경제」, 2010년 5월호, pp. 15~26.
- 정진기·이재천·최준철, “폐휴대폰 내의 인쇄회로기판에 함유된 금속 성분의 변화”, 「자원리사이클링」, 제24권 제3호, 2015, pp. 76~80.
- 컨슈머인사이트, “스마트폰, 두 배 올랐고 닉 달 더 쓴다”, 2020.12, p. 2.
- 한국전력공사, “한국전력통계 제88호”, 2018.
- 한국전자제품자원순환공제조합, “한국전자제품자원순환공제조합 2021년도 연감”, 2021, p. 16.
- 한국엔지니어링협회, “2022년도 엔지니어링업체 임금실태조사 보고서”, 2022, p. 3.
- 한국탄소산업진흥원 탄소복합재 LCA 홈페이지, <https://www.kcarbon.or.kr/web/page.php?pcode=HE>, 2024.8.30. 접속.
- 한정애 의원실, “환경부, 폐휴대전화 재활용률 낮아, 환경오염우려”, 한정애 의원실 보도자료, 2017.10.10.
- 환경부, 환경관리공단, “국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인”, 2009.
- 허영채·배대식·오치영·서영진·이건모, “LCA 기법을 활용한 스마트폰의 잠재적 환경영향

- 평가”, 『대한환경공학회지』, 제39권 제9호, 2017, pp. 527~533.
- Bian, J., H. Bai, W. Li, J. Yin, and H. Xu, “Comparative environmental life cycle assessment of waste mobile phone recycling in China,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 131, 2016, pp. 209~218.
- Chen, W., Y. Geng, J. Hong, H. Dong, X. Cui, M. Sun, and Q. Zhang, “Life cycle assessment of gold production in China,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 179, 2018, pp. 143~150.
- Cucchiella, F., I. D’Adamo, P. Rosa, and S. Terzi, “Automotive printed circuit boards recycling: an economic analysis,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 121, 2016, pp. 130~141.
- Cucchiella, F., I. D’Adamo, S. L. Koh, and P. Rosa, “Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, 2015, pp. 263~272.
- Curran, M. A., *Life Cycle Assessment: Principle and Practice*, Scientific Applications International Corporation, 2006.
- Geyer, R. and V. Doctori Blass, “The economics of cell phone reuse and recycling,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47, 2010, pp. 515~525.
- Hong, J., Y. Chen, J. Liu, X. Ma, C. Qi, and L. Ye, “Life cycle assessment of copper production: a case study in China,” *Int J Life Cycle Assess*, Vol. 23, 2018, pp. 1814~1824.
- Lee, J., H. Choi, and J. Kim, “Environmental and economic impacts of e-waste recycling: A systematic review,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 494, 2024, 152917.
- Ongondo, F. O., and I. D. Williams, “Mobile phone collection, reuse and recycling in the UK,” *Waste Management*, Vol. 31, Issue 6, 2011, pp. 1307~1315.
- Pokhrel, P., S. L. Lin, and C. T. Tsai, “Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment,” *Journal of Environmental Management*, Vol. 276, 2020.
- Soo, V. K., and M. Doolan, “Recycling Mobile Phone Impact on Life Cycle Assessment,” *Procedia CIRP*, Vol. 15, 2014, pp. 263~271.
- Yao, L., T. Liu, X. Chen, M. Mahdi, and J. Ni, “An integrated method of life-cycle assessment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 187, 2018, pp. 852~862.

[부록]

〈부록 표 1〉 PCB 재활용 과정에서 사용된 에너지의 LCI

PCB Recycling				
	Materials/fuels	Amount	Unit	Source
Process	Recycling Waste Electrical and Electronic Products	9,383.592	kg	국가 데이터베이스
Production	Electricity	325.8464	kWh	2018, 2030년도 발전량 LCI (저자 작성)

〈부록 표 2〉 LCI상 대한민국 2018년 발전 믹스

2018년 발전 믹스				
	Materials/fuels	Amount	Unit	Source
Generation	Anthracite Coal	0.0038	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Bituminous Coal	0.4152	kWh	국가 데이터베이스
Generation	LNG	0.234	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Nuclear	0.234	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Others	0.024	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Photovoltaic	0.014	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Wind	0.004	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Fuel Cell	0.003	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Hydroelectric	0.006	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Marine	-		
Generation	Biomass	-		
Generation	Renewable Others	-		

〈부록 표 3〉 LCI상 대한민국 2030년 발전 믹스

2030년 발전 믹스				
	Materials/fuels	Amount	Unit	Source
Generation	Coal	0.197	kWh	국가 데이터베이스
Generation	LNG	0.229	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Hydrogen	0.021	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Nuclear	0.324	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Photovoltaic	0.084	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Wind	0.069	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Biomass	0.023	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Hydroelectric	0.006	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Marine	0.0008	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Fuel Cell	0.028	kWh	국가 데이터베이스
Generation	Others	-		
Generation	Renewable Others	-		