

주석의 안정적 수급관리를 위한 물질흐름분석

오상현* · 강홍윤* · 황용우** · 김두환* · §신가영* · 김남석*

*인하대학교 순환경제환경시스템전공, **인하대학교 환경공학과

Material Flow Analysis for Stable Supply and Demand Management of Tin

Sang Hyun Oh*, Hong-Yoon Kang*, Yong Woo Hwang**, Doo Hwan Kim*,
§Kayoung Shin* and Nam Seok Kim*

*Program in Circular Economy Environmental System, Graduate School, Inha University

**Department of Environmental Engineering, Inha University

요 약

최근 희유금속자원 확보의 글로벌 경쟁 및 자원보유국의 자원무기화 정책에 따라, 금속 가격이 급격히 상승하였다. 일부 자원보유국은 보호무역주의로 수출 통제 및 과세를 강화하며, 이로 인해 광물의 공급 불안정성이 심화되고 있다. 또한 전 세계 주석 부존량과 채굴량은 각각 490만 ton, 460만 ton으로 가채연수는 15.3년이 남은 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 한정된 자원이며, 분쟁광물로 지정된 주석의 안정적 관리 및 자원생산성 향상을 위해 물질흐름분석을 기반으로 주석의 연도별 변동 현황과 관련 산업동향을 분석하였다. 물질흐름분석 결과, 주석은 낮은 용점과 내부식성의 특성으로 인해 뿔납, 주석도금강판, ITO 타겟 등 전기·전자산업, 디스플레이 산업, 철강 산업 등에 핵심소재로 쓰이고 있는 것으로 나타났다. 이 중 '21년 큰 변동 폭을 보인 품목은 인쇄회로기판, 금속제품, 가스 센서로 나타났으며, 특히 인쇄회로기판은 '18년 대비 '21년 약 55%로 큰 폭으로 증가하였다. 또한 1차 가공제품에서 중간제품의 흐름의 총 11,963 ton 중 인쇄회로기판의 흐름은 5,625 ton으로 약 47%를 차지하고 있다. 현재 인쇄회로기판은 전세계적으로 시장규모가 지속적으로 증가하고 있으며, 국내 수요 또한 증가하고 있다. 하지만 '21년 주석의 자원순환율, 재자원화율은 '21년 각각 4.3%, 27.5%로 '18년 5.1%, 29.6% 대비 소폭 감소한 것으로 산정되었다. 이는 주석의 자원순환율과 재자원화율 관점에서 인쇄회로기판 내 주석의 회수가 필요하다는 것을 시사한다. 이에 본 연구에서는 '18년, '21년 주석의 물질흐름 비교분석을 통해, 주요 시사점을 도출하고 주석의 자원순환율 및 재자원화율 향상방안을 제시하였다.

주제어 : 주석, 물질흐름분석, 자원순환율, 재자원화율, 인쇄회로기판

Abstract

There has been a rapid increase in metal prices in recent times, due to global competition to acquire rare metal resources, as well as the resource weaponization policies of resource-rich countries. Some resource-rich countries are strengthening export controls and taxation through protectionist trade policies, enhancing instability in the supply of minerals. Furthermore, the current global reserves and mining amounts of tin are 4.9 million tons and 4.6 million tons, respectively, with an estimated reserve life of 15.3 years. Considering these circumstances, this study conducted a material flow analysis to examine the fluctuation of tin on an annual basis and analyze relevant industry trends. Through this, we aim to achieve stable management of tin, which is a not only a limited resource but also designated as a conflict mineral. The results of the material flow analysis

· Received : May 30, 2023 · 1st Revised : June 23, 2023 · 2nd Revised : June 28, 2023 · Accepted : June 29, 2023

§ Corresponding Author : Kayoung Shin (E-mail : kayshin@inha.ac.kr)

Program in Circular Economy Environmental System, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, 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.

indicate that tin, due to its low melting point and corrosion resistance, is widely used as a key material in industries, such as electrical and electronics, display, and steel industries. Among these products, printed circuit boards, metal products, and gas sensors experienced significant fluctuations in 2021. In particular, printed circuit boards witnessed a 55% increase, as compared to 2018. Furthermore, printed circuit boards accounted for 47%, or 5,625 tons out of 11,963 tons, of the flow of intermediate products in primary processed goods. Currently, the global market size of printed circuit boards is growing consistently, and domestic demand is also increasing. However, in 2021, the resource circulation and recycling rates of tin declined slightly to 4.3% and 27.5%, respectively, compared to 5.1% and 29.6% in 2018. This suggests the need for the recovery of tin within printed circuit boards, from the perspective of resource circulation and recycling rates. Therefore, in this study, we conducted a comparative analysis of the material flow of tin in both, 2018 and 2021, to derive key implications and propose measures to improve the rate of its resource circulation and recycling.

Key words : Tin, Material flow analysis, Resource circulation rate, Recycling rate, Printed Circuit Board

1. 서 론

최근 금속자원에 대한 몇몇 국가의 편재 및 자원무기화, 새로운 기술 산업의 지속적인 등장, 사회·정치적 이슈 등에 따라 금속자원의 가격 변동폭이 커지고 있다. 이 중, 분쟁광물로 규정된 3TG(주석, 텅스텐, 탄탈륨, 금) 광물의 자원수급 불안정성은 더욱 심화되고 있다¹⁾. 또한, 수출 부진으로 어려움을 겪는 자국 기업을 우선적으로 보호하기 위해, 전 세계적으로 보호무역주의도 강화되는 추세이다.

3TG 광물 중 하나인 주석은 낮은 용점 및 내부식성의 특성을 가지며, 뿔납, 주석도금강판, 투명전극용 타겟 등 전기·전자산업, 금속산업 등의 핵심소재로 광범위하게 산업에 사용되고 있다²⁾. 하지만 주석 매장량은 상위 5개국(중국, 인도네시아, 미얀마, 호주, 브라질)에 70% 이상 편중되어있으며, 특히 국내의 경우 주석 광석 및 관련 제품 생산이 전무하여 전량 수입에 의존하고 있으며, 이로 인해 원자재난 등 해외 변수에 대한 대비가 매우 취약한 것이 현 상황이다³⁾.

그럼에도 코로나 19 발생 등으로 비대면 수요가 늘어나면서, 주석을 소재로 하는 태블릿 PC, 스마트폰 등과 같은 반도체 시장의 '21년 반도체 수출이 전년 992억 달러 대비 29% 증가한 1,280억 달러이었으며, 이는 이전 최고 기록이었던 '18년의 1,267억 달러를 넘어 역대 최고 반도체 수출실적을 기록한 것이다⁴⁾. 가스 센서 시장 또한 코로나 19로 인해 2020년, 2021년 생산량이 다소 감소하였으나, 2022년 이후 예전의 수준으로 회복될 전망이다⁵⁾.

이와 같이 주석 산업은 자동차, 반도체, 전자·전기 등 전략위적으로 산업 경쟁력 확보에 직결되는 핵심 산업으

로 지속적인 수요 증가가 예상된다. 또한 주석의 가격은 공급요인보다 수급요인에 의해 큰 폭으로 변동하기 때문에, 주석의 수급상황을 모니터링하여 중장기적으로 희유 금속을 관리하는 방안을 수립하는 것이 필요할 것으로 사료된다¹⁾.

EU에서는 전략원자재를 관리하기 위해, ‘핵심원자재법’을 통하여 3년 주기로 경제적 중요성 및 공급 위험도를 고려하여 관리하고 있다⁶⁾. ‘핵심원자재법’은 2030년까지 EU 중심의 공급망 구축을 위해, EU가 연간 전략원자재 수요 대비 역내 채굴 10%, 제련 및 정제 40%, 재활용 15% 까지 생산 역량을 확대하고, 특정 국가에 대한 전 밸류체 인별 수입 의존도를 65% 이하로 낮추는 것을 목표로 한다. 이는 전략적 중요성, 미래 수요 증가, 생산량 확대 난이도 등의 기준으로 선정한 16개의 전략 원자재와 경제적 중요성 및 공급 위험 등의 기준으로 선정한 34개 핵심 원자재를 구분하여, 자원순환을 통한 원자재의 지속가능성을 강화하고 있다⁷⁾. 일본은 2000년대 중반부터 희유금속 등 주요 광물자원에 대한 안정적인 공급 확보를 위해 공급망 단계별로 위험도 평가지표를 개발하여, 중요 광종별로 공급망 단계별 위험도를 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 전략을 수립하여 추진하고 있으며, 공급안정성 확보를 위해 해외 광물자원개발 사업 확대를 추진하고 있다⁸⁾.

이에 반해 우리나라는 타 선진국에 비해 자원 다소비, 폐기물 다배출 구조를 가지고 있으며, 상대적으로 자원의 존형이 높은 경제구조임에도 불구하고, 국가 전체 및 산업 분야의 자원효율 이용 및 관리 수준이 미흡한 실정이다⁹⁾.

이에 본 연구에서는 희유금속 및 분쟁광물로 지정된 주석을 안정적으로 관리할 수 있도록 2021년 물질흐름분석

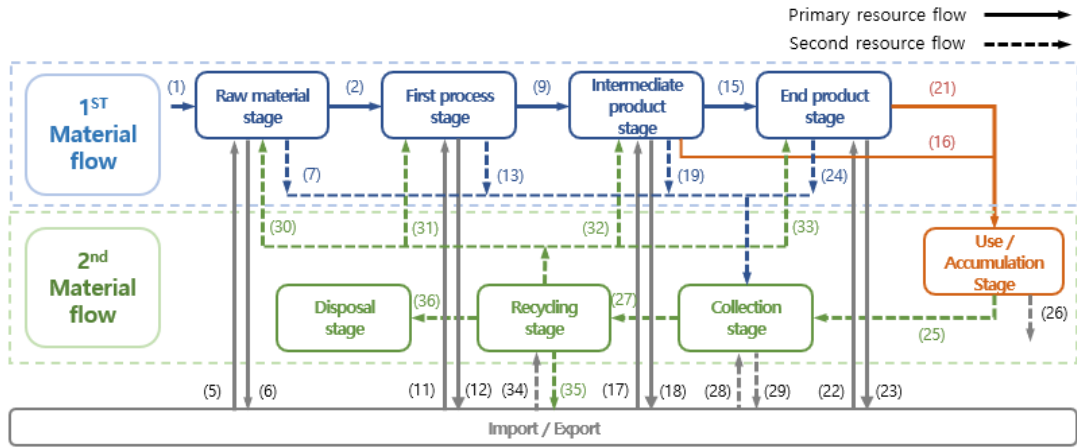


Fig. 1. Integrated material flow analysis diagram developed by the Center for Resources Information & Management(CRIM), KITECH.

을 수행하였고, 기 구축된 2018년 주석의 물질흐름을 바탕으로 2021년 국내 주석의 산업동향 및 수급량 변화를 분석하였다. 또한 분석된 주요 산업동향을 바탕으로 주석의 자원순환 및 재자원화율에 대한 향상방안을 제시하였다.

2. 연구방법 및 단계별 흐름분석

2.1. 물질흐름분석 통합방법론

물질흐름분석(Material Flow Analysis, MFA) 통합방법론은 크게 업체 및 관련 기관을 직접 조사하는 상향식(Bottom-up) 방법과, 산업연관분석 방법을 이용하여 단계간 흐름량을 추정하는 하향식(Top-down) 방법으로 구분한다. 상향식 방법으로 광물의 생산량 등을 조사 및 분석하는 것이 가장 적절하나, 현실적으로 데이터 확보 등의 어려움 때문에 상·하향식 방법의 단점을 극복한 한국생산기술연구원 자원순환기술지원센터(Center for Resources Information & Management; CRIM)에서 개발한 물질흐름분석 통합방법론을 사용하고 있다^(10,11). 본 연구에서도 CRIM의 물질흐름분석 통합방법론을 활용하여 주석의 물질흐름을 분석하였고, 분석 내용을 바탕으로 금속 자원의 재자원화율 및 자원순환율을 산정하였다. 물질흐름분석 통합방법론에서의 물질흐름단계는 Fig. 1과 같이 원료 및 기초소재, 1차 가공제품, 중간제품, 최종제품을 생산하는 단계인 1차 흐름(생산계)과 사용 후 제품이 축적, 수집, 재

자원화, 폐기되는 단계인 2차 흐름(순환계)으로 구분된다.

2.2. 연구범위 및 데이터 수집

일반적으로 사용되는 물질흐름분석 통합방법론은 정적 물질흐름분석으로, 특정기간 동안 공간적 경계 내 대상물질의 흐름을 분석하는 방법이며, 정적 물질흐름분석에서는 연구대상물질이 투입(Input), 배출(Output), 축적(Stock)되는 공간(국가, 지역 및 산업공정 등)으로 다양하게 설정할 수 있다⁽²⁾. 또한 대상 시스템에 의한 분류의 경우 Macro 수준, Meso 수준, Micro 수준으로 분류할 수 있다⁽³⁾. 본 연구에서는 주석의 국가단위를 공간적 범위로 설정하였으며, 시간적 범위는 가장 최근 연도인 2021년 한 해를 설정하고 이를 2018년과 비교분석 하였다.

데이터 수집의 경우 2021년을 기준으로 국내의 선행연구 조사 분석을 통해 주석의 특성 및 사용처 등을 파악하였고, 국내 주석을 취급하는 사업장의 수·출입량, 생산량, 재자원화량 등의 데이터를 직접 수집하여 물질흐름분석을 수행하였다. 전 과정 단계별 주요흐름 규명을 위해 원료 및 기초소재 단계부터 1차가공제품 단계까지는 1순위 국가통계(광업광산물통계, 무역통계), 2순위 협회 및 조합이 구축한 통계, 3순위로 국제통용통계(OECE, USGS, JOGMEC 등), 4순위 업체조사 및 전문가 인터뷰 순으로 데이터를 수집하였다. 중간제품 단계부터 최종제품 단계까지의 생산량에 관한 부분은 원료 및 기초소재 단계, 1차 가공제품 단계의 수집방법과 동일하게 적용하였고, 해당

제품과 산업의 수출입량을 HS code를 통해 특정할 수 없는 경우, 한국은행에서 발행한 2015년 산업연관표의 투입·산출표를 활용하여 수출입계수를 적용하여 산정하였다.

수집 단계와 2차 자원 재활용 단계의 수출입량에 대해서는 금속 회수 목적으로 수입되는 HS code를 활용하였고, 사용 후 배출량에 대한 EPR 통계 등을 적용하여 산정하였다. 폐기 단계의 경우 정확한 폐기량의 데이터 확보가 어려워 2차 자원 재활용 이후 미 재활용된 양을 폐기량으로 설정하였다.

2.3. 선행연구분석

현재까지 국내에서는 유로폼, 인듐과 같은 희토류 및 희소금속의 물질흐름분석 및 산업동향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며^{14,15)}, 코발트, 팔라듐 등에 대한 폐금속자원의 흐름분석에 대한 연구도 진행되고 있다¹⁶⁾. 하지만 주석의 경우, 당해 연도 물질흐름과 특허분석을 통한 주석스크랩에 대한 재활용 기술동향을 개괄적인 수준에서만 연구하고 있으며²⁾, 주석의 재자원화에 대한 선행 연구는 주석함유 폐기물에서 고순도 주석 회수, 주석함유 폐자원의 공정부산물 전처리 기술 등^{17,18)} 폐기물 내 주석을 재자원화하기 위한 기술적 관점에서의 연구만이 주로 이루고 있다.

반면, 해외의 주석 관련 선행연구들은 주석의 글로벌 흐름을 추적하여 자국 내 주석의 지속가능성을 확보하는 방안에 관한 연구로 수 차례 이루어지고 있다^{19,20)}. 이는 주석이 전량 수입에 의존하는 희유금속임에도 불구하고, 국가 단위의 물질흐름 관리가 제대로 이루어지고 있지 않음을 의미하며, 이는 곧 한 국가 내에서의 자원 흐름을 정량적으로 산출하는 전략적 관리방안이 필요함을 시사한다. 따라서 본 연구에서는 주석의 안정적 관리를 위해 2018년, 2021년 주석의 물질흐름 비교분석하였고, 산업동향을 정량적으로 분석하였다.

2.4. 국내 주석 물질흐름분석

연구 대상은 국내 주석의 물질흐름이며, 연구 목적은 2018년과 2021년의 물질흐름 및 산업동향의 정량적 비교 분석을 통해 주석 사용량의 수요를 예측하여, 국내 주석의 안정적 관리를 위한 것이다. 2021년 작성된 주석의 물질흐름도는 Fig. 2에 나타내었으며²¹⁾, 국가통합자원관리 시스템에서 확인할 수 있다.

2.4.1. 원료 및 기초소재 단계

국내 주석의 원료 및 기초소재 단계는 주석 광, 주석 피의 형태로 2018년과 동일하게 전량 수입에 의존하고 있으며, 주석광의 약 1 ton 수입을 제외하고 대부분 주석 피의 형태로 14,831 ton의 수입과 740 ton의 수출이 이루어지고 있다. 이 중 14,236 ton의 주석 피가 1차 가공제품 단계(주석합금, 주석불, 주석도금강판, 주석화합물)로 재가공되어 투입되었다.

2.4.2. 1차 가공제품 단계

국내 주석의 1차 가공제품 단계는 원료 및 기초소재 단계에서 투입된 주석 피가 주석 합금(Sn alloy), 주석 불, 주석도금강판, 주석화합물, 솔더, ITO타겟으로 재가공된다. Fig. 3은 2018년과 2021년 간의 1차 가공제품 단계에서의 국내 수급 상황을 비교한 것이다. 2021년 1차 가공제품 단계에서 주석의 주요 흐름은 주석 합금으로 원료 및 기초소재 단계에서 투입된 주석 14,831 ton 중 11,040 ton(약 78%)이 주석합금으로 투입되었으며, 주석합금 투입량 중 58%인 6,414 ton은 솔더로 제조되었다. 제조된 솔더는 중간제품 단계인 인쇄회로기판으로 투입되며, 이 공정 중 558 ton(약 9%)은 공정부산물로 발생되어 수집되었다. 솔더 제조공정을 제외한 3,747 ton 중 1,758 ton은 베어링, 기어로, 1,989 ton은 금속제품 등에 도금형태로 투입되었다.

이를 기반으로 분석한 2021년 1차 가공제품 중 품목별 국내 주석 수급량(해당품목 수출량과 해당품목의 타 단계로의 배출량, 축적량 및 공정부산물의 합)은 주석 합금 21,710 ton, 주석도금강판 3,018 ton, 주석화합물 384 ton, 솔더 7,346 ton, ITO 타겟 53 ton으로 산정되었다. 2018년 수급량은 주석 합금 11,365 ton, 주석도금강판 2,598 ton, 주석화합물 512 ton, 솔더 7,066 ton, ITO 타겟 67 ton으로 산정되었다. 이는 2018년 대비 2021년 주석 합금은 약 92%, 주석도금강판은 약 16%, 솔더는 약 4% 증가하였고, 주석화합물은 약 25%, ITO 타겟은 약 21% 감소한 것으로 나타났다(Fig. 3.).

2.4.3. 중간제품 단계

주석이 투입된 제품들은 매우 다양한 형태로 가공되기 때문에, 상세한 용도를 확인하기 어렵다. 따라서 물질흐름분석 통합방법론에서 각종 통계 자료를 이용하는 방법

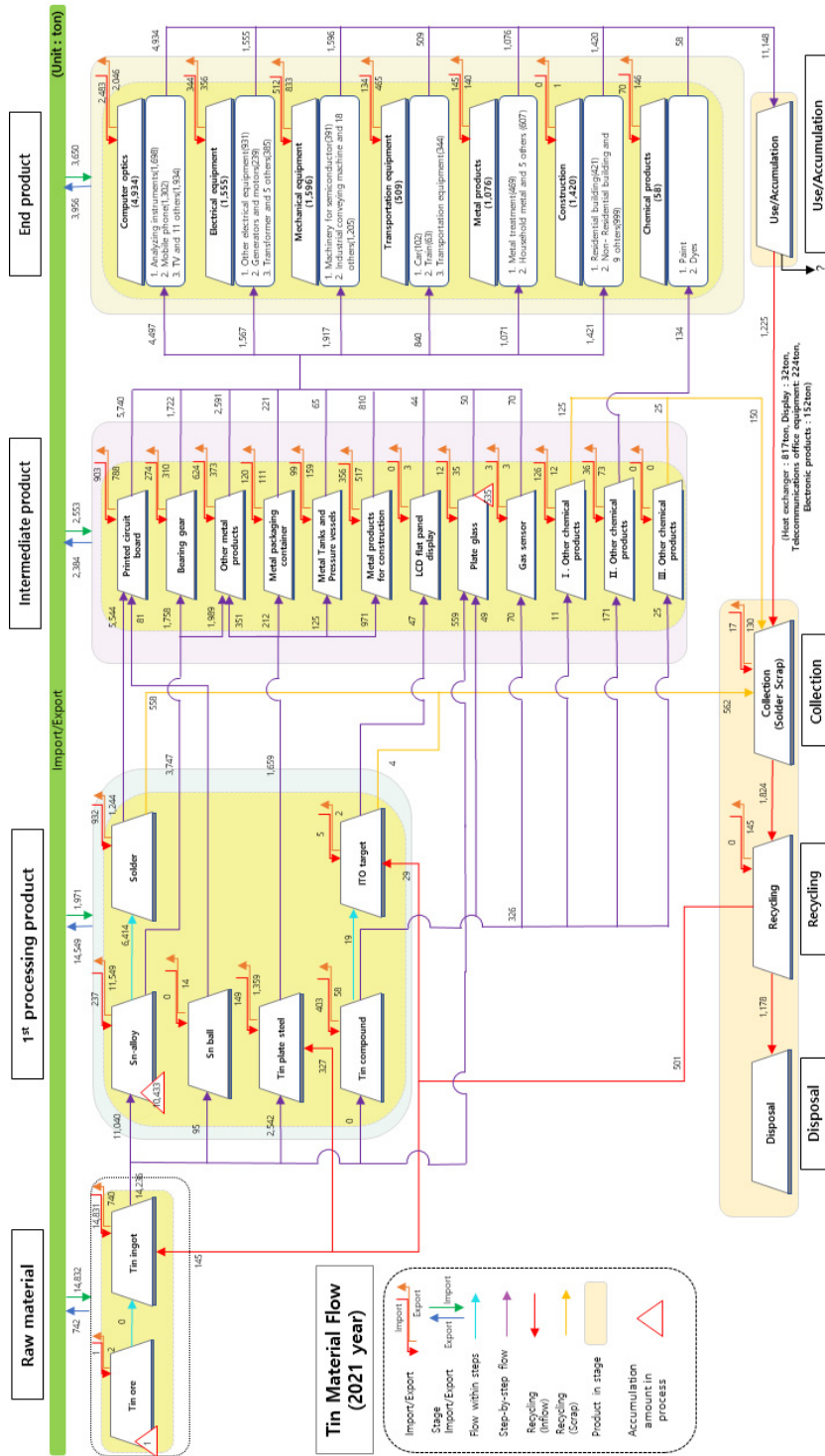


Fig. 2. Domestic material flow of Tin in 2021²¹⁾.

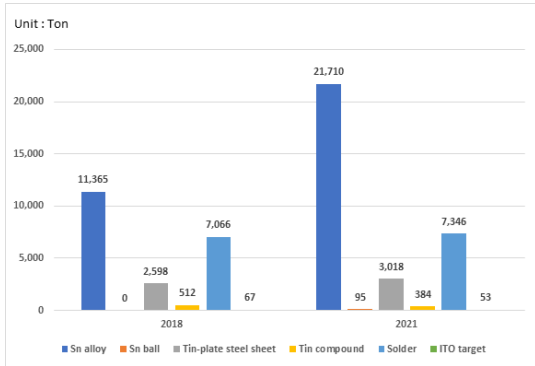


Fig. 3. Comparative analysis of domestic supply and demand ratio of Primary Processed Products stage in 2018 and 2021.

을 활용하여 중간제품 단계에서의 사용 영역을 조사하였다. 또한 1차 가공제품이 중간제품의 각 부분에 분배되는 영역을알아보기 위해, 한국은행에서 발표한 통계자료인 산업연관표의 2015년도 투입 산출표를 기준으로 주석이 포함된 제품에 대한 투입계수를 재산정하였다. 중간제품 단계에서 2018년 대비 2021년 주석 수급량이 증가한 품목은 인쇄회로기판 55.7%, 금속도금제품 19.9%, 건축용 금속제품 74.1%, LCD 패널 27.4%로 나타났다.

이는 COVID-19로 인해 비대면 수요가 증가함에 따라 인쇄회로기판, 금속도금제품이 수급량이 증가하였으며, 토목 및 건축 민간수주가 전년 동월 대비 약 39.6% 증가함에 따라 건축용금속제품 또한 증가한 것으로 나타났다. 베어링 기어 12.1%, 기타 금속제품 33.2%, 가스센서 68.2% 등은 감소하였는데, 이 또한 COVID-19의 영향으로 산업침체가 주요 원인으로 분석되었다. Fig. 4은 2018년과 2021년 간의 중간제품 단계에서의 국내 수급 상황을 비교한 것이다.

2.4.4. 최종제품 단계

최종제품 단계에서 주석의 수급은 ① 컴퓨터, 전자 및 광학기기, ② 전기 장비, ③ 기계 및 장비, ④ 운송장비, ⑤ 금속가공제품, ⑥ 건설, ⑦화학제품 산업의 총 7개 산업군에 투입된다. 이 중 ① 컴퓨터, 전자 및 광학기기로 등은 중간제품 단계에서 투입된 11,447 ton 중 4,497 ton(약 39%)으로 가장 많은 양이며, 이는 반도체 산업의 팹납과 부품도금 등에 주석 활용도가 높기 때문이다. 최종제품

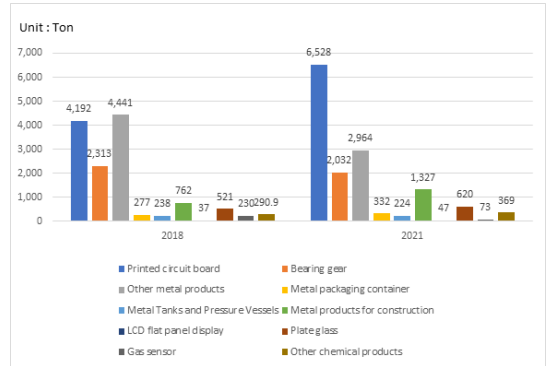


Fig. 4. Comparative analysis of domestic supply and demand ratio of intermediate products in 2018 and 2021.

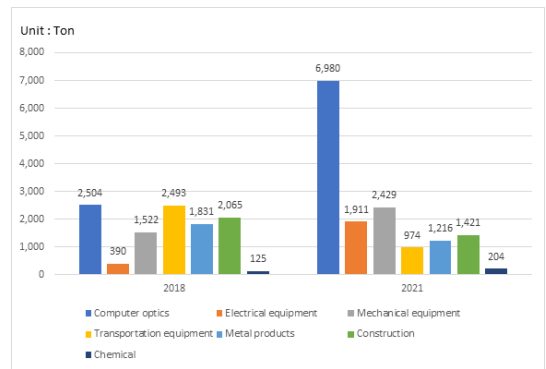


Fig. 5. Comparative analysis of domestic supply and demand ratio of end product stage in 2018 and 2021.

단계에서 2018년에 대비 2021년의 수급 상황은 ① 컴퓨터, 전자 및 광학기기(4,476.5 ton, 179%↑), ② 전기 장비(1,521.5 ton, 391%↑), ③ 기계 및 장비(907.4 ton, 60%↑), ⑦ 화학제품(79.5 ton, 64%↑)의 국내 수급량이 증가하였으며, ④ 운송장비(-1,519.3 ton, 61%↓), ⑤ 금속가공제품(-614.8 ton, 34%↓), ⑥ 건설(-643.9 ton, 31%↓)의 경우에는 감소하였다(Fig. 5).

2.4.5. 사용·축적 단계 및 수집 단계

사용·축적 단계에서 주석 흐름량은 2021년 기준 사용·축적량만을 고려하고 있다. 최종제품의 수급량 11,148 ton은 사용·축적단계로 전량 투입되는 것으로 가정하며, 배출량은 수집단계로의 배출량중 2021년 전자제품 회수 실적을 제외한 값인 1,225 ton으로 나타났다.

수집 단계에서는 국내 2021년 자원순환공제조합에서

제공한 온도교환기 204,300 ton, 디스플레이기기 32,147 ton, 통신 사무기기 22,379 ton, 일반전기·전자제품 151,681 ton의 회수실적 중 주석의 순분량을 각각 0.4%, 0.1%, 0.1%, 1%로 고려하여, 각각 817 ton, 321 ton, 224 ton, 152 ton으로 총합 1,225 ton이 수집단계로의 투입량으로 나타났다. 그 외 제품은 ITO 타겟 4 ton, 솔더 전체 생산 공정 중 558 ton(약 8.8%)이 스크랩으로 발생되어 수집 단계로 보내졌으며, 잉크, 연마재 등은 별도의 공정을 거치지 않고 화합물의 형태로 150 ton이 수집 단계로 투입되었다.

2.4.6. 재자원화 및 폐기 단계

주석의 전체 흐름 중 2021년 재자원화량은 501 ton으로 2018년 대비 24 ton 감소한 수치이다. 각각의 투입량은 주석 피 145 ton, 주석도금강판 327 ton, ITO 타겟 29 ton 이며, 이는 ITO 타겟은 생산량의 2018년 10%에서 2021년 60%까지 재자원화량이 증가하였지만, 주석도금강판의 경우 폐철캔이 알루미늄캔으로 대체되면서 재자원화량이 감소한 것으로 보여진다.

3. 주석의 재자원화율과 자원순환율 분석 및 향상 방안

국가통합자원관리시스템에서 정의한 재자원화율이란 공정부산물 및 사용 후 제품이 재자원화 또는 폐기되기 위해 수집되는 양 대비 재자원화된 비율을 의미하며, 자원순환율이란 1차 흐름(산업,생산계)에서 2차 흐름으로 배출된 자원의 양 대비 재자원화된 비율로 정의한다. 다시 말하면, 자원순환율은 당해 연도 생산량(부산물 포함) 대비 재자원화된 양의 비율을 의미한다²¹⁾. 수집된 폐자원을 대상으로 산정하는 재자원화율만을 관리하게 되면 실제 당해연도 생산량 또는 배출량 대비 재자원화할 수 있는 국

가 차원의 포텐셜이 어느 정도인지 파악하기 어렵기 때문에 증장기적 자원관리 측면에서 이렇게 2 가지 지표로써 관리하는 것이 바람직하다고 판단된다. Fig. 1은 물질흐름단계 구성으로 각 단계별 투입량 (1), (2), (9), (15), (21), (25), (27), (36)과 1차 흐름에서의 수집량 (7), (13), (19), (24), 2차 흐름에서 1차 흐름으로 투입되는 재자원화량 (30), (31), (32), (33), 각 단계별 수입, 수출량 (5), (6), (11), (12), (17), (18), (22), (23), (28), (29), (34), (35)를 나타내었다. 이를 활용하여 재자원화율은 식 (1), 자원순환율은 식 (2)로 산정하였다.

$$\text{재자원화율} = \frac{\text{재자원화량}[(30) + (31) + (32) + (33) + (35)]}{\text{수집량}[(7) + (13) + (19) + (24) + (25) + (28) - (29)]} \quad (1)$$

$$\text{자원순환율} = \frac{\text{재자원화량}[(30) + (31) + (32) + (33) + (35)]}{\text{1차에서 2차로의 흐름량}[(7) + (13) + (19) + (24) + (16) + (21) + (28) - (29)]} \quad (2)$$

3.1. 주석의 품목별 변동률 분석

Table 1은 2018년과 2021년 주석의 단계별 흐름량을 나타내었으며, 재자원화율과 자원순환율을 비교하였다. 2021년 기준 주석의 국내 자원순환율은 4.3%(‘18년 5.1%), 재자원화율은 27.5%(‘18년 29.6%) 수준으로 각각 0.8%, 2.1% 감소하였다. 이는 솔더(1차 가공 제품) 생산 공정에서 발생하는 수집량과 ITO 타겟의 재자원화량이 2018년 대비 증가하였지만, 2021년 ITO타겟의 생산량 감소, 사용·축적량의 증가, 주석 스크랩 취급업체 감소 등의 영향으로 약간 낮아진 것으로 판단된다.

또한, 2018년 대비 2021년의 흐름 단계별 주요 품목 변동률을 살펴보면, 원료 및 기초소재 단계에서의 국내 수급량은 2021년 기준 14,976 ton으로, 2018년 14,404 ton 대비 약 4% 증가한 것으로 나타났다. 1차 가공제품 단계

Table 1. Comparison of recycling rate and resource circulation rate in 2018 and 2021

Year	Recycling quantity (ton) (a)	The amount of collection(ton)				Production → Accumulation (ton) (f)	Recycling rate (%) (a/(b+c+d-e))	Resource circulation rate (%) (a/(b+d+f-e))
		Production → collection (b)	Accumulation → collection (c)	Import (d)	Export (e)			
'21	501	712	1,225	17	130	11,148	27.5	4.3
'18	525.5	593.2	951	437.8	209.5	9,411.7	29.6	5.1

Table 2. Changes in demand for major items in 2018 and 2021

Raw materials and basic materials				1 st Processed Products			
Type	Domestic demand(ton)		The rate of change(%)	Type	Domestic demand(ton)		The rate of change(%)
	'21year	'18year			'21 year	'18 year	
Tin ingot	14,976	14,404	3.97	Sn alloy	21,710	11,365	91.02
				Tin-plate steel sheet	3,018	2,598	16.2
				Tin compound	403	512	-21
				Solder	7,346	7,066	3.9
				ITO target	53	67	-20.9
Intermediate product				End product			
Type	Domestic demand(ton)		The rate of change(%)	Type	Domestic demand(ton)		The rate of change(%)
	'21 year	'18 year			'21 year	'18 year	
Printed circuit board	6,528	4,192	55.7	Computer optics	6,980	2,504	178.8
Bearing gear	2,032	2,313	-12.1	Electrical equipment	1,911	390	390
Other metal products	2,964	4,441	-33.2	Mechanical equipment	2,429	1,522	59.6
Construction metal	1,327	762	74.1	Transportation equipment	974	2,493	-61
Gas sensor	73	230	-68.2	Metal products	1,216	1,831	-33.6

에서는 주석-합금이 2021년 기준 21,710 ton으로, 2018년 11,365 ton 대비 약 91% 증가한 것으로 나타났다. 특히, 중간제품군에서 큰 변동폭을 보인 제품은 인쇄회로기판, 베어링 기어, 기타 금속제품, 건축용금속제품, 가스센서(기타전자 표시장치)이다. 이 중에서 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, 이하 PCB)의 경우 2018년 4,192 ton 대비 2021년에는 6,528 ton으로 약 55% 가량 투입량이 증가하였으며 이는 PCB 산업의 성장과 큰 연관성이 있는 것으로 사료된다.

최종제품(산업)군에서의 가장 큰 변동폭을 보인 품목 또한 컴퓨터, 전자 및 광학기기와, 전기장비로 2018년 대비 약 179%, 390% 증가하였으며, 이는 중간제품군에서의 변동과 유사하다(Table 2). 이와 같이 품목 변동을 통계를 살펴보았을 때, 주석의 재자원화를 및 자원순환율을 향상시키기 위해서는 주석의 투입량이 가장 많은 인쇄회로기판 및 실장기판(PCB 품목)에 집중한 재자원화 전략이 필요함을 알 수 있다.

3.2. PCB 현황분석 및 주석 재자원화 기술 동향

시장조사기관인 Technavio 자료에 따르면, 2019년 국내 PCB 시장의 규모는 약 7조 3,168억 원이며, 향후 연평균 3.24% 증가하여 2024년에는 8조 5,815억 원에 달할 전망이다²²⁾. PCB 시장이 증가함에 따라 전자부품스캐럽 또한 증가하고 있으며, 다양한 유기금속과 구리(Cu), 철(Fe), 주석(Sn) 등 회수 가능한 금속의 가치는 약 15조 원으로 추정된다²³⁾. PCB는 기판재와 기판에 장착된 전자부품으로 구성되어 있으며, 플라스틱 30%, 난용성 산화물(세라믹) 40%, 금속 30%로 구성되어 있다²⁴⁾.

2021년 국내의 PCB 총 생산량은 약 23.7억 개이며, PCB 총 무게는 약 134,437 ton으로 추정된다. 여기서 주석의 순분량(약 4%)을 적용하면 2021년 국내에서 PCB 생산에 투입된 주석의 양은 5,377 ton으로 산정되며, 이는 2021년 주석의 물질흐름분석 결과 국내 PCB 생산 주석 수급량인 5,544 ton과 약 3%의 오차를 가진다. PCB는 용도에 따라 크게 경성PCB, 연성PCB, 반도체 기판의 3개 형태로 구분되는데, 형태 구분 없이 PCB의 평균가격과

Table 3. World mine production and reserves(Unit : ton)

Country	Mine production		Reserves
	2021	2022	
Indonesia	70,000	74,000	800,000
China	90,000	95,000	720,000
Burma	36,900	31,000	700,000
Brazil	15,517	18,000	420,000
Bolivia	19,628	18,000	400,000
Etc	72,955	74,000	1,560,000
World total (rounded)	305,000	310,000	4,600,000

평균무게는 대략 각각 4,500 원(약 \$4), 57 g으로 가정하였다²⁵⁾.

전 세계로 분석범위를 확장할 경우, 2021년 전 세계에서 생산된 PCB는 약 195억 개이며, PCB 총 무게는 약 110만 ton으로 추정된다. 여기서 주석의 순분량(약 4%)을 적용하면 2021년 전 세계적으로 PCB 생산에 투입된 주석의 양은 44,226 ton으로 산정된다. 이는 국내 PCB 내 주석 공급량이 6,528 ton 인 점을 감안할 때 전 세계 공급량의 약 14.7%로 결코 적은 수치가 아니며, 폐 PCB로부터 주석을 회수하는 전략이 필요함을 시사한다.

국내 상용화된 PCB 재자원화 기술은 크게 건식제련법과 습식제련법을 통해 회수되고 있으며, 경제적 이익이 낮은 이유로 주석은 회수되지 못하고 고순도 구리, 귀금속과 일부 부품만이 회수되고 있는 실정이다. 국내에서 ‘발연공정’이라 불리는 주석회수공정은 용광로에 고온의 화학변화 휘발주석을 투입하는 공정으로 회수율이 50%에 그치는데, 이는 주석 회수비용이 6,000달러/ton으로 경제적 가치가 낮기 때문이다. 이를 위해 약 98%의 주석 회수율을 가지며 회수 비용은 700달러/ton 공정인 멤브레인 전착공정을 통해 주석을 회수하는 연구가 진행된 바 있다²⁶⁾. 해외에서도 폐 PCB 에서의 침출 및 전기정제를 사용한 정제용액에서의 고순도 주석 회수, 염산과 질산수용액을 통한 주석회수 등 고순도 주석을 폐 PCB에서 회수하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다^{27,28)}.

3.3. 부존량을 고려한 주석의 가치 변동 예측

미국 지질조사국(United States Geological Survey, 이하 USGS)은 전세계 주요 광물 통계 보고서인 ‘Mineral Commodity Summaries 2022’에 2020년과 2021년 전 세계의 주석 채굴량을 각각 약 26.4만 ton, 약 30만 ton인 것으로, 부존량은 490만 ton인 것으로 추정하였다. 다음 해 보고서인 ‘Mineral Commodity Summaries 2023’에서는 2021년과 2022년 전 세계의 주석 채굴량을 각각 약 30.5만 ton, 약 31만 ton인 것으로, 부존량은 460만 ton인 것으로 추정하였다(Table 3)²⁹⁾. 이와 같은 주석의 채굴량 및 부존량을 미루어 볼 때, 전 세계적으로 주석의 가채연수는 현 상황을 유지할 경우 약 15.3년이 남은 것으로 추정되며, 이마저도 부존량이 감소할수록 채산성이 악화되는 광물자원의 특성상 주석의 고갈은 예상보다 더 빠르게 다가올 가능성이 높다.

2021년 주석의 물질흐름분석에서 확인할 수 있는 우리나라의 주석 피 공급량은 14,976 ton으로, 전세계 채굴량의 약 5%를 차지한다. 이 중, PCB 생산에 투입되는 주석의 양은 5,544 ton으로, 국내 전체 주석 공급량의 37%에 해당하는 수치이며, 이는 전 세계 채굴량의 약 2%를 차지한다. 즉, 부존량과 가채연수를 고려하였을 때, 주석의 희소성은 점차 커질 것이며 이는 자연스럽게 주석의 가격 상승 요인으로 작용할 가능성이 높다. 또한 PCB 수요의 꾸준한 증가와 함께 PCB 산업 성장이 예상되는 만큼, 주석의 가격은 꾸준히 높아질 것으로 예상할 수 있는데, 주석 가격이 사상 최고치를 경신한 2022년 1분기의 경우 톤당 43,391달러까지 치솟았다(Table 4). 이는 공급요인보다 수요요인에 의해 가격이 큰 폭으로 결정되는 급속인 만큼 향후 주석가격이 국제 정세에 의해 변동되었을 때를 대비하여 국내 유입된 주석의 효율적 관리가 절실히 필요함을 시사한다.

3.4. 주석의 재자원화를 및 자원순환을 향상 방안

현재 국가통합자원관리시스템에서 보여주고 있는 2021년 주석 물질흐름분석에 따르면 1차 가공제품에서 중간제품으로의 흐름 11,963 ton 중 PCB로의 흐름이 5,625 ton

Table 4. Quarterly Tin price(Unit : USD/ton)

Quarter	'17	'18	'19	'20	'21.1	'21.2	'21.3	'21.4	'22.1	'22.2	'22.3	'22.4
Tin Price	20,105	20,153	18,643	17,135	25,189	31,236	34,828	38,956	43,391	36,948	23,647	24,700

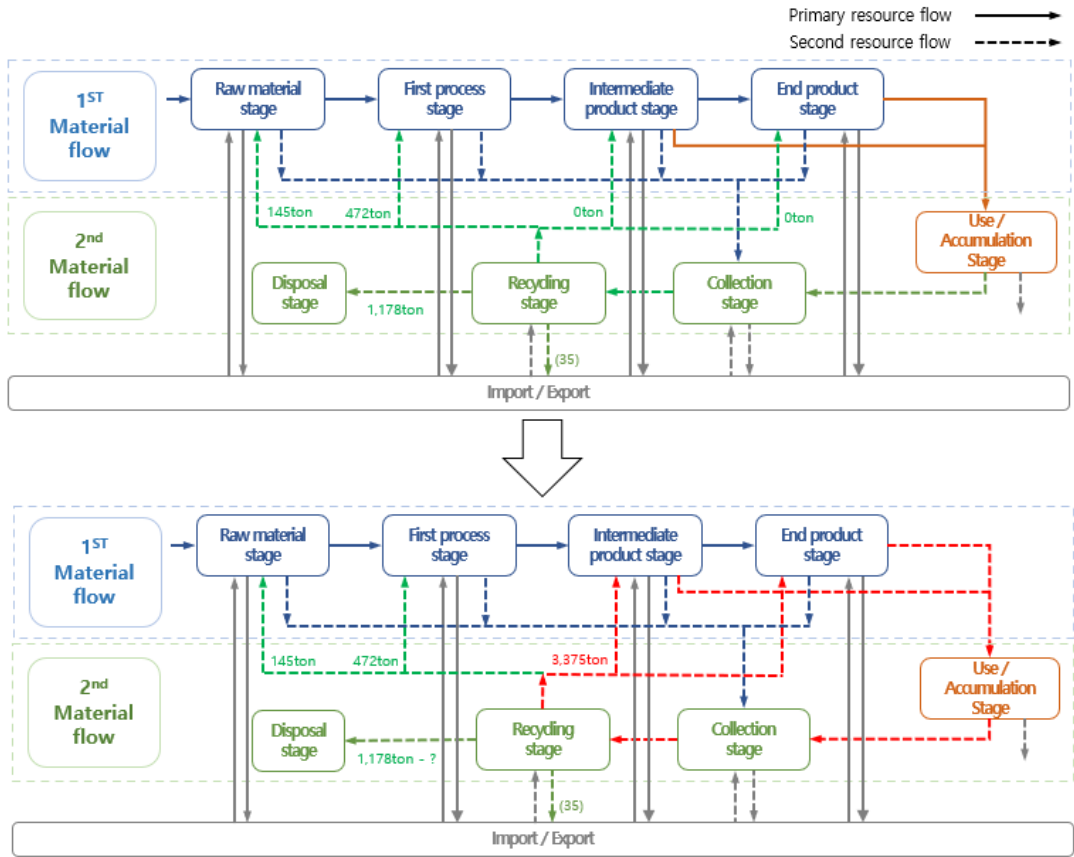


Fig. 6. Diagrams of current flow and new flow assuming tin extracting from PCB waste.

으로 47%를 차지하고 있다. 이는 2018년 대비 2021년 감소한 주석의 재자원화율과 자원순환율을 향상시키기 위한 방안으로 PCB 내 주석의 회수가 매우 중요하다는 것을 시사해 준다. 2021년 주석의 물질흐름분석에 따르면 수집된 1,824 ton 중 주석괴, 주석도금강판, ITO 타겟으로의 재자원화 흐름 501 ton과 주석스크랩 수출량 145 ton을 제외한 나머지 양은 폐기되는 것으로 파악되었다.

폐PCB 내 주석이 회수되지 않는 이유는 땀납 형태로 투입되기 때문에 금속함유율이 낮아 대규모로 처리하지 않으면 수익이 발생되지 않는다. 하지만 PCB의 수요가 지속적으로 증가하고 있는 상황에서 축적량이 증가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 폐기되고 있는 폐PCB 재자원화를 통해 향후 자원순환율 및 재자원화율을 향상시킬 수 있는 시나리오를 도출하였다.

현재 국내 상황을 ① 2021년 생산된 PCB는 사용 후 폐

기의 기간을 달리하나 전량 재활용되며, ② 폐PCB의 60%는 국내에서 재활용되고, 40%는 수출되는 것의 2개 가정 사항 등으로 하였다²³⁾. 이 경우 Fig. 6과 같이 폐PCB로부터 재자원화되는 주석의 흐름량(5,625 ton 중 3,375 ton)이 추가될 경우, 기존 폐기되던 주석의 양이 재자원화량 및 수출량으로 전환됨을 의미한다. 이는 곧 폐PCB로부터의 주석 회수가 주석의 재자원화율과 자원순환율의 상승과 직접적으로 연관성이 있음을 시사한다. 더불어, 앞서 기술한 바와 같이 PCB 생산에 투입되는 주석의 양이 전체 흐름에서 상당한 비중을 차지하고 있는 만큼, 폐PCB에서의 주석 재자원화는 주석의 재자원화율과 자원순환율 상승에 크게 기여할 것으로 판단된다.

이를 기반으로 주석의 재자원화율과 자원순환율 향상 방안을 다음과 같이 제시하고자 한다. 우선, 재자원화율을 향상시키기 위해서는 ① 재자원화 기술개발 ② 재활용

시장 확대, 즉 수요 및 수요처를 확대시켜야 하며, ③ 생산 단계의 폐기단계를 고려한 환경 친화적 제품설계 등을 들 수 있다. Uni-소재화 하는 것도 하나의 방법일 수 있다. 반면, 자원순환율을 향상시키기 위한 방법으로는 기본적으로 재자원화율을 향상시키기 위한 방법들을 그대로 활용하고, 이와 함께 배출되어 수거(수집)되지 않은 폐기물(사용후제품)을 최대한 수거할 수 있는 시스템을 구축하는 것이라고 할 수 있다. 이는 분모를 크게 할 수도 있지만 결국 재자원화량을 확대할 수 있는 요인이 되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 주석의 물질흐름분석을 위해 국가통계 자료인 한국무역협회, 한국광해광업공단, 관세청 등의 자료를 조사·분석하였다. 통계자료의 신뢰성 제고를 위해 원료 및 기초소재, 1차 가공제품을 생산하는 국내 업체를 대상으로 직접 조사(Bottom-up)를 실시하였고 산업의 수출입량을 HS code를 통해 특정할 수 없는 경우, 한국은행에서 발행한 2015년 산업연관표의 투입·산출표를 활용하여 수출입계수를 적용하여 산정하였다. 이를 기반으로 2018년, 2021년 주석의 품목별 주요 산업동향 비교, 재자원화율 및 자원순환율을 분석하였고 향상방안을 제시하였다.

2021년 기준 주석의 국내 재자원화율은 27.5%(‘18년 29.6%) 자원순환율은 4.3%(‘18년 5.1%), 수준으로 각각 2.1%, 0.8% 감소한 것으로 나타났다. 이는 솔더(1차 가공 제품) 생산 공정에서 발생하는 수집량과 ITO 타겟의 재자원화량이 2018년 대비 증가하였지만, 2021년 ITO타겟의 생산량 감소, 사용·축적량의 증가, 주석 스크랩 취급업체 감소 등의 영향으로 약간 낮아진 것으로 판단된다.

물질흐름분석결과 가장 큰 변동품목은 1차가공단계의 주석합금과 중간제품단계의 PCB, 최종제품단계의 컴퓨터 및 광학기기로 나타났다. 주석합금의 경우 구리-주석합금과 납-주석 합금으로 구분되며, 납-주석합금은 납 규제로 인해 재고량과 더불어 무연 솔더의 수요량도 증가시켰다. 또한 고성능 전자제품 수요의 지속적인 증가가 예상됨에 따라 주석-은 합금 폐 솔더의 배출량도 증가할 전망이다. 이는 주석-은 합금 폐솔더 내 주석과 은의 분리 정제 및 재자원화 기술 개발과 기존 사용되어지던 납-주석합금의 재고를 소진할 대책 마련에 대한 필요성을 시사한다.

PCB의 경우 1차 가공제품에서 중간제품 총 11,963 ton 중 PCB로의 흐름이 5,625 ton으로 47%의 비율을 차지한다. 전자제품의 필수소재인 PCB는 지속적으로 수급량이 증가하고 있고, 특히 전자제품 고성능화에 따른 수명주기가 3~5년으로 감소함에 따라, 2021년 생산된 PCB는 2026년 즈음 재활용의 대상이 된다. 따라서 국내 주석의 재자원화율과 자원순환율을 향상시키기 위해 폐 PCB 재자원화가 반드시 필요하다.

이를 바탕으로 주석의 재자원화율, 자원순환율의 향상 방안을 제시하였다. 재자원화율의 경우 ① PCB 내 주석 회수 시나리오와 같이 재자원화 기술개발을 통해 향상시킬 수 있다. 하지만 폐PCB 내 주석은 함유율이 낮아 대규모로 처리되지 않으면 경제성이 나오지 않으므로 경제성을 고려한 재자원화 기술개발이 동반되어야 할 것이다. ② 재활용 시장 확대를 통해 수요 및 수요처를 확대시켜야 한다. 주석의 경우 희유금속으로 고부가가치가 높은 금속으로 재자원화 기술을 기반으로 재활용 시장을 확대시켜야 할 것이다. ③ 마지막으로 생산단계에서부터 폐기 단계를 고려한 환경 친화적 제품 설계이다. PCB에서의 주석 회수가 어려운 이유 중 하나는 여러 유기금속들과 플라스틱, 난용성 산화물 등이 섞여 있어 납땀에 사용되는 주석만을 회수하는 공정은 비용이 많이 든다. 따라서 생산단계에서부터 폐기단계의 유기금속 및 여러 부품들을 쉽게 회수할 수 있게 설계를 한다면 회수비용이 줄어들어 재자원화량은 증가할 것이다. 자원순환율을 향상시키기 위해서는 재자원화율 향상 방안들을 그대로 활용하고, 수집되지 않은 사용 후 제품을 최대한 수거할 수 있는 시스템을 구축하여야 할 것이다.

본 연구의 결과는 향후 국가차원의 희유금속 재자원화율 및 자원순환율 향상을 위한 제도개선에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0008421, 2023년 산업전문인력역량강화사업)과 산업통상자원부 “자원생산성 기반 구축사업”의 지원으로 수행된 연구임.

References

1. H. S. Lee, J. M. Lee, S. R. Yi, 2018 : Resource Circulation Plan using Material Flow Analysis of Waste Metals of Cobalt and Palladium, *J. of Kor. Inst. of Resource Recycling*, 27(1), pp.14-21.
2. Y. H. Kim, S. H. Son, H. S. Choi, et al., 2014 : Trend on Recycling Technologies of Tin Scrap by Material Flows and Patent Analysis, *J. of Kor. Inst. of Resource Recycling*, 23(3), pp.61-70.
3. T. H. Kim, J. M. Park, 2021 : Analysis of strategies for securing core minerals in major countries, pp.53-59, Korea Energy Economics Institute.
4. M. H. Lee, 2022 : ISSUE REPORT Semiconductor industry export outlook in 2022, pp.1-10, Korea Eximbank.
5. Y. S. Heo, 2022 : Gas sensor, pp.4-5, ASTI MARKET INSIGHT, Korea Institute of Science and Technology Information.
6. EU Commission, Commission announces actions to make Europe's raw materials supply more secure and sustainable, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542, April 20, 2023.
7. Korea International Trade Association Brussels Branch, 2023 : Main contents of the EU Critical Raw Materials Act, pp.1-6, Avenue Louise 66, 1050 Brussels, Belgium.
8. T. H. Kim, J. M. Park, 2021 : Analysis of strategies for securing core minerals in major countries, pp.44-46, Korea Energy Economics Institute.
9. Ministry of Environment, 2018 : The 1st Resource Circulation Basic Plan (2018~2027), pp.2-10.
10. J. G. Kim, 2013 : Material flow and industrial demand for palladium in Korea, *Resources, Conservation and Recycling*, 77, pp.24-28.
11. I. S. Lee, J. G. Kim, 2014 : Industrial demand and integrated material flow of terbium in Korea, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1, pp.145-152.
12. J. W. Kim, J. Y. Moon, Y. W. Hwang, et al, 2016 : Chemical flow analysis of butadiene chemical material industry in Korea, *J. of Korea Society of Waste Management*, 33(7), pp.645-653.
13. J. C. Park, Y. W. Hwang, J. B. Kim, et al., 2020 : Material Flow Analysis of Trichloroethylene in Korea, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 42(4), pp.188-196.
14. H. J. Ko, J. G. Kim, I. S. Lee, et al., 2013 : Investigation of material flow and industrial trend of domestic europium, *J. Kor. Powd. Inst.*, 20(5), pp.382-387.
15. J. G. Kim, 2011 : Investigation on material flow in indium demand industry, *J. Kor. Powd. Inst.*, 18(4), pp.313-321.
16. H. S. Lee, J. M. Lee, S. R. Yi, 2018 : Resource Circulation plan using material flow analysis of waste metals of cobalt and palladium, *J. of Kor. Inst. of Resource Recycling*, 27(1), pp.14-21.
17. S. R. Lee, M. S. Lee, H. Y. Kim, 2015 : Recovery of high purity Sn by Multi-step reduction of Sn-containing industrial wastes, *J. of Kor. Inst. of Resource Recycling*, 24(3), pp.11-15.
18. Y. H. Jin, D. H. Jang, H. C. Jung, et al., 2014 : Development of Pre-treatment for Tin recovery from waste resources, *J. Kor. Powd. Inst.*, 21(2), pp.142-146.
19. H. D. Li, W. Q. Qin, J. H. Li, et al., 2021 : Tracing the global tin flow network : highly concentrated production and consumption, *Resources, Conservation & Recycling*, 169, 105495.
20. C. R. Yang, Q. Y. Tan, X. L. Zeng, et al., 2018 : Measuring the sustainability of tin in china, *Science of the Total Environment*, 635, pp.1351-1359.
21. Korea-Material Flow Analysis, <http://k-mfa.kr/>, April 1, 2023.
22. J. Y. Shin., 2022 : Hyunwoo industrial(IT parts), pp.4-11, Korea IR Council.
23. H. L. An, L. S. Kang, C. G. Lee, 2017 : Analysis of commercial recycling technology and research trend of printed circuit boards in Korea, *J. of Kor. Inst. of Resource Recycling*, 26(4), pp.9-18.
24. J. K. Jeong, J. C. Lee, J. C. Choi, 2015 : Characterization of metal composition in spent printed circuit boards of mobile phones, *J. of Kor. Inst. of Resource Recycling*, 24(3), pp.76-80.
25. THEELEC, <https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=12852>, Jun 22, 2023.
26. J. Q. BoardsYang, J. Lei, S. Y. Peng, et al., 2016 : Membrane electrodeposition process for tin recovery from waste PCB, *J. of Hazardous Materials*, 304, pp.409-416.
27. L. A. Castro, A. H. Martins, 2009 : Recovery of tin and copper by recycling of printed circuit boards from obsolete computers, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(4), pp.649-657.
28. T. Z. Yang, P. C. Zhu, W. F. Liu, et al., 2017 : Recovery of tin from metal powders of waste printed circuit boards, *Waste Management*, 68, pp.449-457.
29. U.S. Geological Survey, 2023 : Mineral commodity summaries 2023, pp.182-183, United States Government Printing Office, USA.

오 상 현

- 인하대학교 글로벌산업 환경융합학과 공학석사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-

강 홍 윤

- The University Queensland 토목환경공학 박사
 - 현재 인하대학교 대학원 순환경제환경시스템전공 교수
 - 당 학회지 제32권 3호 참조
-

황 용 우

- 일본 동경대학 도시공학 박사
 - 현재 인하대학교 환경공학과 교수
 - 당 학회지 제32권 3호 참조
-

김 두 환

- 인하대학교 물리학과 박사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 교수
 - 당 학회지 제32권 3호 참조
-

신 가 영

- London Hotel School College, UK 전문학사
 - 경희대학교 국제대학원 국제개발협력 석사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-

김 남 석

- 인하대학교 정치외교학과 학사
 - 인하대학교 글로벌산업 환경융합학과 공학석사
 - 현재 인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정
-