

연구보고서

전자제품 재활용 등 신공정 유해물질 현황 및 대책 연구

김형아 · 이채관 · 김민지 · 허윤 · 이현정

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “전자제품 재활용 등 신공정 유해물질 현황 및 대책 연구”의 최종 연구결과 보고서로 제출합니다.

2019 년 10 월

연구기관 : 가톨릭대학교 산학협력단

연구기간 : 2019.04.29 ~ 2019.10.31

연구책임자 : 김형아 (가톨릭대학교 예방의학교실)

공동연구원 : 이채관 (인제대학교 환경산업의학연구소)

연구보조원 : 김민지 (가톨릭대학교 보건대학원)

연구보조원 : 허 윤 (가톨릭대학교 예방의학교실)

보 조 원 : 이현정 (인제대학교 환경산업의학연구소)

요 약 문

연구기간

2019년 04월 ~ 2019년 10월

핵심단어

폐전기전자제품, 재활용, 희소금속, 희토류, 노동자, 안전보건

연구과제명

전자제품 재활용 등 신공정 유해물질 현황 및 대책 연구

1. 연구배경

2015년 중국의 주도로 ISO/TC 298(Rare Earth)은 희토류와 그 산화물, 화합물 및 합금 등과 관련된 사항들을 표준화하는 작업이 진행 중이며 우리나라는 WG2(원소 재활용) 실무작업반에서 활동하고 있다. 이는 원소의 재활용을 육성하기 위한 표준이지만 추후 안전보건 분야가 포함될 가능성이 있다. 전기전자제품, 전지 등 희토류를 포함한 희소금속 함유 제품의 재활용 공정에서 노출될 수 있는 유해·위험 요인을 파악하고 새로운 공정에 노출될 수 있는 노동자의 안전보건 환경 변화에 선제적인 대응을 위해 안전보건 기준 관련 국제표준(안) 제안이 필요하다.

2. 주요 연구내용

- 연구 결과

1. 국내 폐전기전자제품 재활용 현황과 재활용 공정을 고찰하고 금속이 회수되는 물리적(1차 처리) 단계와 화학적(2차 처리)단계에서 노출될 수 있는 유해·위험요인을 정리하였다.
2. 폐전기전자제품 재활용 사슬에 있는 수거·수집소, 1차 처리 사업장, 2차 처리 사업장 및 희토류를 함유한 영구자석 제조사업장을 방문하고 작업공정, 유해요인, 작업환경측정 결과 등을 검토하였다.
3. 폐전기전자제품 재활용 공정에서 노출될 수 있는 유해·위험요인의 관리

방안을 정리하였으며 영국, ILO, OSHA/NIOSH, 중국, 인도 등의 관리방안을 고찰하였다.

4. 안전보건 기준 관련 국제표준(안) 작성을 위한 ISO의 표준 제정절차와 작성원칙을 고찰하고 국제표준(안)을 지침(Guide)으로 제안하였으며 지침의 제목, 범위, 용어 등을 제시하였다.

- 시 사 점

국내 폐전기전자제품 재활용 사업장의 재활용 공정에서 노출 가능성이 있는 물리적(소음, 자기장, 고열, 기계 안전 등) 및 화학적(금속분진·흙, 산 등) 유해·위험요인을 파악하였고 새로운 화학물질을 사용하는 공정은 없는 것을 확인하였다. 폐전기전자제품 재활용 사업장 실태조사 결과 현재 국내에는 희토류에 노출된 작업자는 없다. 또한 중국이나 인도는 재활용 공정 작업자 안전보건 관리의 구체적인 방안은 제시하고 있지 않으며 다만 비제도권에서 제도권 내로의 전환에 초점이 맞춰져 있다. 따라서 중국이나 인도의 경우는 안전보건 관리수준이 참고할 수준에 미치지 못함을 확인하였다.

3. 연구 활용방안

- 폐전기전자제품 재활용 공정 작업자의 유해인자 노출 관리에 활용할 수 있으며 안전보건 관련 ISO/TC 298 WG2에서 요구될 수 있는 국제표준(안)의 작업 초안(working draft) 작성에 활용할 수 있다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 가톨릭대학교 예방의학교실 교수 김형아
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 유해성연구부 김현옥
- ☎ 042) 869. 0321
- E-mail : okhokim@kosha.or.kr

차 례

I. 서론	1
II. 연구 내용 및 방법	6
1. 연구 내용	6
2. 연구 방법	6
III. 연구 결과	9
1. 희소금속 현황 및 용도	9
2. 희소금속의 건강 영향	26
3. 폐전기전자제품의 발생 및 국내 재활용 현황	31
4. 폐전기전자제품 재활용 공정 및 공정별 노출 가능한 유해·위험요인	38
5. 폐전기전자제품 수집 및 재활용 사업장 조사	53
6. 국외 폐전기전자제품 재활용 작업자 안전보건 관리 및 관련 국제표준	72
7. 폐전기전자제품 재활용 공정 유해·위험요인 관리방안 및 국제표준(안)	85

IV. 고찰	92
V. 결론	97
참고문헌	98
Abstract	112

표 차례

<표 1> 전기·전자제품에 사용된 중요한 금속류	11
<표 2> 희토류의 이용 형태 및 용도	14
<표 3> 컴퓨터 하드디스크드라이브 영구자석의 화학조성, %	16
<표 4> 리튬-이온 전지 스크랩에 포함된 금속 함량 범위	25
<표 5> 폐전기전자제품에 함유된 유해물질과 건강 영향	27
<표 6> 폐인쇄회로기판의 금속 조성(%)	32
<표 7> 폐인쇄회로기판의 금속 함량 및 경제적 가치(톤당)	32
<표 8> 전자제품 및 수명을 다한 소비재에서 재활용 가능한 희토류 자원	38
<표 9> 희토류 재활용 가능성	39
<표 10> 일부 분야별 수명을 다한 제품 중 희소금속 재활용률	39
<표 11> 영구자석 스크랩($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 재활용 방법	50
<표 12> 폐전기전자제품 재활용 공정별 노출 가능한 유해·위험요인	51
<표 13> 리사이클링센터의 처리 공정(냉장고의 예)	59
<표 14> 1차 처리 사업장의 가스켓 처리 공정	62
<표 15> 금속제련 사업장의 전처리 공정	67
<표 16> 금속제련 사업장의 소성로 공정-구리 제조의 예	68
<표 17> 희토류 영구자석 제조 공정	71
<표 18> 정적 자기장의 ACGIH TLV(2015)	88

그림 차례

[그림 1] 도시광산자원 함유 제품 및 사용 후 제품 함유 금속	2
[그림 2] 희토류와 관련한 산업보건학적 이슈	5
[그림 3] 연구 방법 개요	7
[그림 4] 희소금속의 용도	10
[그림 5] 스마트폰에 사용되는 금속의 종류	12
[그림 6] 산업 분야별 희토류 주요 용도	15
[그림 7] 전기전자제품 중 네오디뮴 함량	15
[그림 8] 2016년 광물자원 매장량 등	17
[그림 9] 2018년 광종별 교역구조	18
[그림 10] 희토류의 독성학적 특성	28
[그림 11] CRT 처리 작업장에서 측정된 노출수준	30
[그림 12] 전처리+습식회수 공정흐름도	34
[그림 13] 분쇄+건식+습식회수 공정흐름도	35
[그림 14] 폐전기전자제품 재활용의 가치 사슬	40
[그림 15] 전기전자제품의 재활용 흐름도	53
[그림 16] 폐전자제품 배출 · 수거 · 운반 흐름도	55
[그림 17] 냉장고의 재활용 공정 개요	57
[그림 18] 폐전자 스크랩, 폐휴대폰 등 처리 공정도의 예	65
[그림 19] ISO/TC 298이 참조하는 관련 기술표준	78

I. 서론

폐기물은 “버려져야 하는 것”에서 “순환하여 재이용하는 것”으로의 자원순환 정책의 패러다임이 변화됨으로써 천연자원의 고갈 방지, 깨끗하고 건전한 환경 보전을 위한 자원생산성 제고, 효율적 생산·유통·소비, 물질의 재활용, 에너지 회수 및 처리 선진화 등을 추진하고 전기·전자제품 및 자동차 재활용 등을 통한 친환경 정책이 추진되고 있다.

지속가능한 순환경제 실현을 위한 제1차 자원순환기본계획(2018~2027)에 따르면 폐기물 정책의 목표는 '80년대 폐기물의 안전한 처리에서 '90년대~'00년 초에는 재활용으로, 이후 '00년 중반부터는 자원순환으로 발전하고 있다.

'07년 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률(약칭 전자제품등자원순환법)(이하 자원순환법)」과 '16년 「자원순환기본법」의 제정으로 폐기물 감량(reduce), 재사용(reuse), 재활용(recycle) 및 에너지 회수(recovery) 정책으로의 변화를 겪고 있다. 소비패턴의 변화로 전기·전자폐기물 발생이 증가하고 있으며 이를 관리하기 위해 재활용을 방해하는 물질 및 복합소재 사용의 규제 필요성이 대두되었다(관계부처합동, 2018).

전기전자제품(electrical and electronic equipment), 전지 등은 희소금속(rare elements)¹⁾을 포함한 도시광산 자원²⁾을 함유하고 있으며 [그림 1]과 같이 수명이 다한 제품(end-of-life)에는 희소금속뿐 아니라 구리(Cu), 철(Fe)과 금(Au), 은(Ag)과 같은 귀금속도 함유되어 있다.

1) 희소금속 또는 희유금속: 지각 내에 존재량이 적거나 추출이 어려운 금속자원 중 현재 산업적 수요가 있고 향후 수요 신장이 예상되는 금속원소로 극소수 국가에 매장·생산이 편재되어 있거나 특정국에서 대량 수입해 공급에 위험성이 있는 금속원소. 우리나라는 희토류를 포함한 35종임(알칼리/알칼리토금속 6종, 반금속 9종, 질족금속 2종, 보론그룹원소 5종, 고융점금속 11종, 백금족 1군, 희토류 1군)



[그림 1] 도시광산자원 함유 제품 및 사용 후 제품 함유 금속

(출처: 국가청정생산지원센터 <http://www.kncpc.or.kr>)

종류	원소
알칼리/알칼리토금속(6종)	Li(리튬), Mg(마그네슘), Cs(세슘), Be(베릴륨), Sr(스트론튬), Ba(바륨)
반금속 원소(9종)	Ge(게르마늄), P(인), As(비소), Sb(안티몬), Bi(비스무스), Se(셀레늄), Te(텔루륨), Sn(주석), Si(실리콘)
철족원소(2종)	Co(코발트), Ni(니켈)
보론그룹원소(5종)	B(붕소), Ga(갈륨), In(인듐), Tl(탈륨), Cd(카드뮴)
고융점금속(11종)	Ti(티타늄), Zr(지르코늄), Hf(하프늄), V(바나듐), Nb(니오븀), Ta(탄탈럼), Cr(크롬), Mo(몰리브덴), W(텅스텐), Mn(망간), Re(레늄)
희토류금속(1군)	REE(희토류원소): 17개
백금족 원소(1군)	Ru(루테튬), Rh(로듐), Os(오스뮴), Pd(팔라듐), Ir(이리듐), Pt(백금)

2) 도시광산(urban mining) : 산업원료인 금속자원이 제품 또는 폐기물 형태로 생활 주변에 소량으로 넓게 분포되어 양적으로 광산 규모를 가진 상태를 의미하며 일부 금속자원은 지하매장량보다 이미 채굴되어 제품이나 폐기물 형태로 우리 주변에 축적되어있는 양이 더 많음. 자동차, 전기전자 등 산업에 필수적인 금속자원으로서 철을 제외한 비철금속, 귀금속, 희소금속을 포괄함

전자업계는 소비자에게서 폐전기전자제품³⁾(WEEE, waste electrical and electronic equipment, 또는 e-waste)을 수거하는 시점부터 재활용센터에 운반되는 과정까지 폐전기전자제품의 물류흐름 관리로 환경으로의 유해물질 누출을 방지하고 재활용 과정의 친환경성을 확보하기 위해 노력하였다. 2014년 「자원순환법」 일부 개정으로 폐전자제품 회수 및 재활용 의무대상품목이 10개에서 27개로 확대되었으며 2020년부터는 23개 품목이 추가지정(총 50품목) 될 예정이다(한국전자제품자원순환공제조합, 2019a).

2015년 중국의 주도로 ISO/TC 298(Rare Earth)은 희토류와 그 산화물, 화합물 및 합금 등과 관련된 사항들을 표준화하고 있으며, 여기에는 소재뿐 아니라 생산 공정, 분석, 포장, 운송 등 산업 활동은 물론 이로 인한 환경, 안전 및 보건 등의 이슈도 포함되어 있다. 현재 국제표준 작성을 위한 4개의 실무작업반(WG, working group)이 활동 중이다. WG1은 용어 및 정의(Terms and Definition), WG2는 원소 재활용(Elements Recycling), WG3은 소급성, 포장 및 표시(Tracability, Packaging and Labelling) 그리고 WG4는 시험과 분석(Testing and Analysis)을 담당한다. 우리나라는 WG2에서 주도적으로 활동하고 있다. WG2는 원소의 재활용 육성과 관련한 표준의 실무작업반으로 추후 안전보건과 관련된 내용이 포함될 가능성이 있다.

최근 의료, 이동통신, 에너지 분야 등 산업용 제품 중 희소금속을 포함한 희토류 추출과 재사용 증가에 따라 이로 인한 인간 및 환경에서의 영향 또한 동반 증가하게 될 것으로 보인다.

3) 폐전기·전자제품이란 전기·전자제품이 『폐기물관리법』 제2조제1호에 따른 폐기물로 된 것을 말하며 재활용이란 폐전기·전자제품이나 폐자동차를 재사용·재생이용하거나 재사용·재생이용 할 수 있는 상태로 만드는 행위를 말한다.

새로운 오염물질(emerging contaminants, ECs)에 의한 건강영향이나 생태위해성에 관심이 집중되고 있지만, 생태독성학적 영향이 확인되지 않았을 뿐 아니라 민감하고 신뢰성 있는 정량분석방법이 부족하여 아직까지 규제가 되지 않고 있는 실정이다. 지금까지 ECs는 항생제내성균과 그 내성유전자 같은 생물학적 인자, 용제, 식품첨가제, 식용색소, 내염제(fire retardants), 약제 및 개인위생용품(pharmaceutical, personal care products) 같은 산업화학물질에 한정되어 있다. 회토류도 대부분의 ECs처럼 인체 또는 환경 중에서 규제되고 있지 않으며(Kulaksiz와 Bau, 2013), 환경 또는 공중보건 보호 프로그램으로 정기적으로 모니터링 되지 않고 있다.

작업공정 중 발생하는 유해물질 관리와 노동자 건강장해 예방을 위한 작업환경측정제도가 시작되고 각종 안전보건대책(산재예방 4개년계획, 중대재해예방대책 등) 시행으로 재해율 지표는 꾸준히 개선되는 추세이지만, 산업구조와 생산방식의 변화, 전기·전자제품 등 사용 후 제품처리와 같은 새로운 공정에 노출된 노동자의 안전보건 환경 변화에 선제적으로 대응할 필요성이 대두되고 있다.

회토류에 대한 산업보건학적 이슈는 [그림 2]와 같이 분진 노출로 인한 진폐증, 폐질환 등이 있으나 폐전기전자제품에서 회토류를 재활용하는 과정에서 유해성·위험성 평가를 위한 유해물질의 대부분은 검출한계가 매우 낮으며 현재까지 환경이나 인간에서의 독성기전이 거의 알려지지 않았고 관리체계도 미흡한 실정이다. 따라서 폐전기전자제품 재활용 공정에서 명확히 밝혀지지 않은 화학물질로 인한 건강장해 예방을 위한 국내 관리체계 보완과 이에 따른 안전보건 기준(안) 마련이 필요하다.

이에 본 연구에서는 회토류 등 희소금속을 포함한 첨단산업 제품의 재활용 공정에서 명확히 밝혀지지 않은 화학물질 노출로 인한 노동자 사망사고 등 산업재해를 효율적으로 예방하고 향후 국내외 재활용 산업의 활성화에 대비하여 노동자 건강보호에 선제적인 대응을 위해 안전보건 기준과 관련한 국제표준

(안)을 마련하고자 하였다.

Element (abbreviation)	CAS No.	Occupational health and safety issues
Scandium(Sc)	7440-20-2	Gases including Sc can be exposed to workers in the working environment.
Yttrium(Y)	7440-65-5	Y compounds can cause shortness of breath, coughing, chest pain, and cyanosis in workers(TWA [*] : 1 mg/m ³ , IDLH [†] : 500 mg/m ³ recommended by NIOSH [‡]). It could form flammable dust.
Lanthanum(La)	7439-91-0	Pneumoconiosis can be occurred among workers exposed to RE oxides and fluorides utilized in carbon arc light.
Cerium(Ce)	7440-45-1	Ce can cause itching, sensitivity to heat, and skin lesions in workers[TWA of CeO ₂ (1306-38-3): 5 mg/m ³]. Ce is a strong reducing agent, and ignites spontaneously in air at 65°C to 80°C. CeO ₂ is a powerful oxidizing agent at high temperatures, and react with combustible organic materials.
Neodymium(Nd)	7440-00-8	Inhalation of Nd dust can cause lung embolisms and liver damage. Biocompatibility issues have been reported for medical uses(magnetic braces and bone repair). Nd also may cause injuries due to strong magnetic force.
Promethium(Pm)	7440-12-2	Although Pm has no biological role, protective equipments should be used when dealing with this material. Pm-147 is dangerous unless it is well sealed.
Europium(Eu)	7440-53-1	Dust of its metal compounds has fire and explosion hazards.
Gadolinium(Gd)	7440-54-2	Gd has little information on its native biological roles, but its compounds are used as research tools(MRI contrast agents) in biomedical field.
Dysprosium(Dy)	7429-91-6	Dy powder may have an explosion hazard when reacted with air, water, and ignition source. Thin foils of this material can also be ignited by sparks or by static electricity. Dy fires cannot be put out by water.
Erbium(Er)	7440-52-0	Dust form of metallic Er has fire and explosion hazards.
Ytterbium(Yb)	7440-64-4	Yb should be stored in air-tight containers and in an inert atmosphere to protect the metal from air and moisture despite chemically stable property. Dust form of metallic Yb has fire and explosion hazards.
Lutetium(Lu)	7439-94-3	Although Lu has no known biological role, it is known that it is highly accumulated in the bone and slightly accumulated in the liver and kidneys. Lutetium nitrate[Lu(NO ₃) ₃] may explode and burn when heated.
Praseodymium(Pr)	7440-10-0	These compounds are controversial subjects with their biological roles. However, Ho and Tm compounds may be able to stimulate metabolism.
Samarium(Sm)	7440-19-9	
Terbium(Tb)	7440-27-9	
Holmium(Ho)	7440-60-0	
Thulium(Tm)	7440-30-4	

* TWA: time-weighted average; † IDLH: immediately dangerous to life or health concentrations; ‡ NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health.

The data were mainly sourced from the Rim's research(Rim et al., 2013).

[그림 2] 희토류와 관련한 산업보건학적 이슈(출처: 신 서호 등, 2016)

II. 연구 내용 및 방법

1. 연구 내용

본 연구에서는 국내 폐전기전자제품 재활용 현황과 전자제품 등 첨단산업제품 제조 시 사용되는 희토류 등 희소금속의 재활용 사업장의 실태를 조사하고, 희토류 등 희소금속 재활용 공정의 세부 유해공정, 유해 작업환경 및 유해요인을 조사하였다.

또한, 희토류 등 희소금속 재활용 공정의 외국사례, 외국 관련 기관의 안전보건 기준 등을 조사하고 이를 바탕으로 희토류 등 희소금속 재활용 공정 작업자의 건강보호를 위한 유해요인 관리방안을 마련하였다.

마지막으로 희토류를 포함한 희소금속 재활용 공정의 안전보건 기준과 관련한 국제표준(안)을 제안하였다.

2. 연구 방법

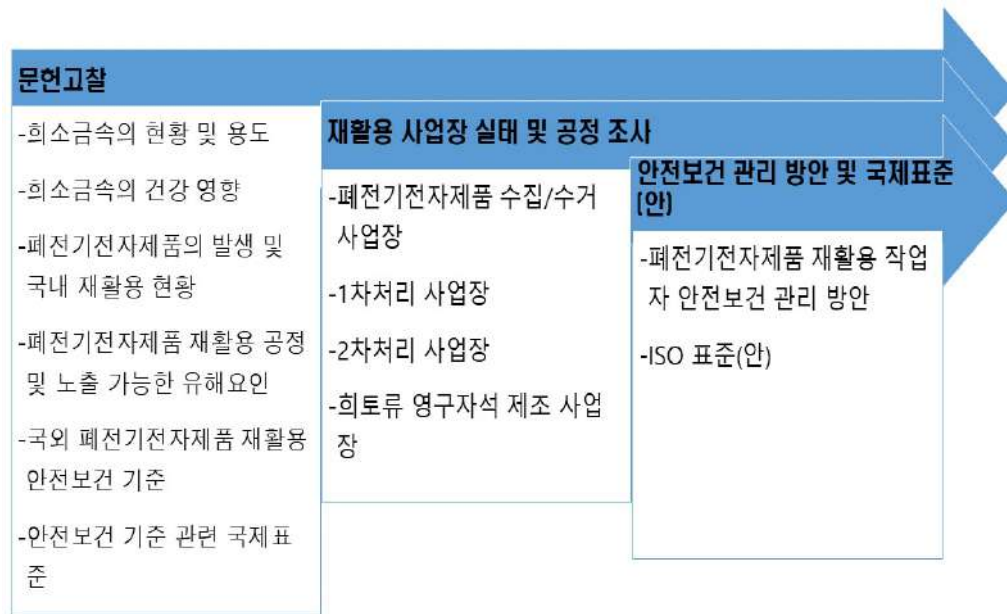
연구 방법의 개요는 [그림 3]과 같다.

문헌고찰을 통해 희소금속의 현황 및 용도, 희소금속의 건강 영향, 폐전기전자제품 발생 현황 및 국내 재활용 현황, 폐전기전자제품 재활용 공정의 외국사례 및 노출 가능한 유해요인, 국외 폐전기전자제품 재활용 작업자 안전보건 기준 및 관련 국제표준 등을 조사하였다.

문헌고찰을 위한 중심어는 폐전기전자제품, 희소금속, 희토류, 재활용, 노동자, 안전보건 등으로 PubMed, Web of Science, Google 등에서 검색하였다.

외국의 희토류 등 희소금속 재활용 공정에서 발생하는 유해물질의 관리현황, 노출 규제수준, 안전보건 정책, 인프라 구축, 연구개발 현황 및 안전보건기준

등은 OSHA/NIOSH, USEPA, JNIOH, JOGMEC, HSE, ILO 홈페이지 등을 검색하였다.



[그림 3] 연구 방법 개요

사업장 실태조사 전 폐전기전자제품 재활용을 위한 주요 품목은 「자원순환법 시행령(2018년 1월 1일 시행)」 및 같은 법 「시행규칙」에 따라 회수·재활용 의무이행 대상 전기·전자제품을 조사하였다.

재활용 주요공정을 수행하는 사업장을 대상으로 본 연구의 취지에 동의하고 방문을 허락한 사업장을 방문하여 조사하였다. 재활용 주요공정별 세부작업절차 또는 작업조사, 작업조건별 발생가능 유해요인은 「작업환경측정 및 지정측정기관 평가 등에 관한 고시(고용노동부 고시 제2017-27호)」⁴⁾에 따라 조사하였다. 작업환경측정 결과가 있는 경우 최근 3년간의 자료를 검토하였다.

4) 제39조(작업환경측정결과 등의 보고)제1항 관련 산업안전보건법 시행규칙 별지 제21호 서식의 작업환경측정결과표'

문헌고찰과 사업장 방문 결과를 바탕으로 폐전기전자제품 재활용 공정에서 발생할 수 있는 유해요인 관리방안을 제시하였다. ILO의 표준 제정절차 및 작성방법에 따라 안전보건 기준과 관련한 국제표준(안)을 제안하였다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 희소금속 현황 및 용도

자원이 부족한 우리나라의 광물자원 자급률은 매우 낮은 수준이며 소재기술 수준, 경제성 부족, 채굴로 인한 환경오염 등의 이유로 수요량은 중간화합물 또는 자석 완성품 형태 등 금속이나 화합물 형태로 수입에 의존하고 있으며 국내 생산량은 전무한 실정이다. 일부 금속[인듐(In), 카드뮴(Cd), 비스무트(Bi), 셀레늄(Se), 백금(Pt) 등]은 아연(Zn) 제련 시 부산물로 소량 생산되고 있다(한국생산기술연구원, 2017).

희소금속은 철강, 비철, 전자, 에너지, 화학 등의 산업 분야에서 다양한 용도로 사용된다[그림 4]. 전기·전자산업에서 투명디스플레이에 사용되는 인듐과 형광체, 연마제, 영구자석 등에 사용되는 희토류 금속은 핵심소재로서 전방산업⁵⁾인 액정디스플레이(LCD, liquid crystal display), 모터 산업의 급성장으로 연평균 15% 이상의 성장률이 예상된다(한국생산기술연구원, 2017).

전기전자제품에 사용되는 주요 금속류는 <표 1>과 같다. 일반적으로 철족 금속, 비철 금속, 유리, 플라스틱 및 기타 물질로 분류되며 전기전자제품(무게 기준)에 철(Fe)과 강철이 가장 많아서 폐전기전자제품의 약 50%를 차지한다. 매년 전 세계 인듐(In)의 100%, 루테튬(Ru)의 72%, 주석(Sn)의 50%, 구리(Cu)의 44%, 은(Ag)의 34%, 수은(Hg)의 22%가 전기전자 산업에서 사용되고 있다(Reuter 등, 2013; Bladé 등, 2017).

5) 전방산업(upstream, 자본재산업): 고유기술이나 특허가 있는 산업으로 세계적으로 독과점화되어 있어서 안정적인 부가가치획득이 가능함(출처: 과학기술정책연구원 혁신정책연구센터(STEPI), 2005년 7월 22일 통권 제3호. 한국산업, downstream에서 upstream으로 도약해야 - 조립가공에서 부품·소재·장비로-)

스마트폰에는 [그림 5]와 같이 화면, 전지, 전자부품 및 케이스에 다양한 금속[은(Ag), 알루미늄(Al), 금(Au), 비소(As), 베릴륨(Be), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 철(Fe), 수은(Hg), 니켈(Ni), 납(Pb), 백금(Pt)], 안티몬(Sb), 셀레늄(Se), 팔라듐(Pd) 및 아연(Zn) 등]이 사용된다.



[그림 4] 희소금속의 용도(출처: 한국지질자원연구원, 2019)

<표 1> 전기·전자제품에 사용된 중요한 금속류

금속	1차 생산량 (t/y)	부산물 발생원	EEE 요구량 (t/y)	요구량 생산 (%)	주요 용도
은(Ag)	20,000	Pb, Zn	6,000	30	접점, 스위치, 납땀기
금(Au)	2,500	Cu	300	12	전선 결합, 접점, 집적회로
팔라듐(Pd)	230	백금족	33	14	나충 콘덴서, 연결기
백금(Pt)	210	백금족	13	6	하드디스크, 열전대(thermocouple), 연료 셀
루테튬(Ru)	32	백금족	27	84	하드디스크, 플라즈마 디스플레이
구리(Cu)	15,000,000		4,500,000	30	케이블, 전선, 연결기
주석(Sn)	275,000		90,000	33	납땀기
안티몬(Sb)	130,000		65,000	50	내염재, 음극선관(CRT) 유리
코발트(Co)	58,000	Ni, Cu	11,000	19	충전용-전지
비스무트(Bi)	5,600	Pb, W, Zn	900	16	납땀기, 콘덴서, 히트 싱크(heat sink)
셀레늄(Se)	1,400	Cu	240	17	전기-광학기, 복사기, 태양전지
인듐(In)	480	Zn, Pb	380	79	LCD 유리, 납땀기, 반도체
총계			4,670,000		

Ref. Schlup 등, 2009.

ELEMENTS OF A SMARTPHONE



[그림 5] 스마트폰에 사용되는 금속의 종류

(출처: www.compoundchem.com)

희토류(또는 희토금속, rare earth elements)는 주기율표(periodic table)의 란탄족(lanthanide)에 속하는 원자번호 57~71까지 15종의 금속[란타넘(La), 세륨(Ce), 프라세오디뮴(Pr), 네오디뮴(Nd), 프로메튬(Pm), 사마륨(Sm), 유로퓸(Eu), 가돌리늄(Gd), 터븀(Tb), 디스프로슘(Dy), 홀뮴(Ho), 에르븀(Er), 툴륨(Tm), 이터븀(Yb), 루테튬(Lu)]과 스칸듐(Sc), 이트륨(Y) 등 총 17종의 금속원소를 말한다.

2014년 연간 전세계 희토류 생산량은 산화물 형태로 약 130,000 메트릭톤이지만 란타넘과 세륨은 과잉 생산되고 있으며 반면 네오디뮴과 디스프로슘은 수요가 많다(Binnemans와 Jones, 2015; Elshkaki와 Graedel, 2014). 전체 희토류

매장량은 중국이 38%, 브라질과 베트남이 각각 19%, 러시아가 10%로 전체의 약 86%를 차지하고 있으며 그 외 미국 1%, 오스트레일리아 3%, 인도 6%, 기타 4% 정도이다(USGS, 2019a).

희토류는 일반적으로 자성(magnetic), 형광성(luminescence), 강도(strength characteristics), 높은 연성, 상대적으로 높은 내식성을 가지고 있으며 열전도 특성도 우수하고 화학적으로도 매우 안정된 원소이다.

희토류는 <표 2>와 같이 안정화된 산화물의 분말형태로 공급되며 주요 용도는 인광물질, 합금 원소, 촉매와 같은 첨단 조명, 평판 디스플레이(LCD, liquid crystal display; LED, light emitting diode; PDP, plasma display panel 등), 고효율 발광체(인광체, $\text{Sr}_3\text{SiO}_4\text{:Eu}^{2+}$) 등 정보기술(information technology) 관련 제품뿐 아니라 세라믹, 콘덴서, 필터, 센서, 희토류 영구자석(NdFeB), 수소흡장합금(hydrogen absorbing alloy) 전지, 자동차 배기가스 촉매 또는 유리 연마재(CeO_2), 자동차 유리 자외선 흡수제, 브라운관 유리 색재, 레이저 등의 생산을 위한 필수 소재로 사용되고 있다.

2020년까지 평균소비량은 약 5% 증가할 것으로 예상되며(USGS, 2019a, 2019b) 희토류의 수요량과 사용량은 희토류 응용산업과 전기자동차, 신재생에너지, 사물인터넷 등 4차산업혁명 관련 첨단산업의 발달로 계속 증가할 것으로 예상된다.

국내에서 희토류의 가장 큰 수요처는 영구자석 분야로 친환경 자동차(전기, 하이브리드 등) 산업의 급격한 성장과 관련이 있다(국가기술표준원, 2017)[그림 6]. 영구자석은 네오디뮴 자석, 사마륨-코발트계 및 사마륨-철-질소계 자석을 통칭하지만, 이중 네오디뮴 자석의 시장규모가 전체의 50% 이상을 차지하므로 통상 희토류 자석은 네오디뮴 자석(디스프로슘 포함)을 말한다.

<표 2> 희토류의 이용 형태 및 용도

원소	형태	용도
란타넘(La)	La_2O_3	광학유리/섬유, 세라믹, 전지, 촉매제, 페인트
세륨(Ce)	Ce_2O_3	유리(탈색제, 연마제), 자동차(배기가스촉매제), 인광체, 세라믹, 자석
프라세오디뮴(Pr)	Pr_6O_{11}	영구자석, 레이저, 페인트
네오디뮴(Nd)	Nd_2O_3	영구자석, 레이저, 콘덴서, 광학유리/섬유, 세라믹
프로메튬(Pm)	Pm_2O_3	광학유리, 세라믹
사마륨(Sm)	Sm_2O_3	영구자석
유로퓸(Eu)	Eu_2O_3	형광체(칼라텔레비전, 컴퓨터 모니터, 형광램프), 원자로 제어제
가돌리늄(Gd)	Gd_2O_3	형광체 분말, 핵반응제, 자석, 전자제품 유리
터븀(Tb)	Tb_4O_7	형광체(칼라텔레비전, 컴퓨터 모니터, 형광램프), 자기영상물질 소재
디스프로슘(Dy)	Dy_2O_3	영구자석, 자기영상물질 소재
홀뮴(Ho)	Ho_2O_3	크리스탈 제조, 레이저
에르븀(Er)	Er_2O_3	광학유리/섬유, 크리스탈 제조
툴륨(Tm)	Tm_2O_3	크리스탈 제조, 레이저
이터븀(Yb)	Yb_2O_3	형광물질 활성화제, 세라믹, 자기머플, 레이저, 광학유리
루테튬(Lu)	Lu_2O_3	크리스탈 제조, 레이저
스칸듐(Sc)	Sc_2O_3	크리스탈 제조, 레이저, 세라믹
이트륨(Y)	Y_2O_3	형광체(칼라텔레비전, 컴퓨터 모니터, 형광램프), 세라믹 기능소재, 초전도체

산업 분야	주요 용도 (사용 원소)
금속 합금	철강(Y, Yb, Gd, La), 알루미늄 합금(Sc, La), 마그네슘 합금(Pr, Ce, La), 몰리브데넘 합금(La)
촉매	유체분해용촉매(Lu, Nd, Sm), 자동차 촉매(Ce)
영구자석	Nd 자석(Nd, Dy, Pr, Tb), Sm-Co자석(Sm)
유리	유리 연마(Ce), 착색(Ho, Nd, Pr, Er)
형광체	브라운관(Eu), LCD 및 LED(Eu, Gd, Ce, Tm, Tb)
레이저	레이저 매질(Nd, Er, Yb, Y)
기타	인공치아 및 모조다이아몬드(Y)

[그림 6] 산업 분야별 희토류 주요 용도(출처: 국가기술표준원, 2017)

Device	Neodymium per device [mg]
PC	5.030
Hard disk drive (HDD)	2.441 (1.104-9.076)
CD-ROM	771 (319 -3.236)
Loudspeaker	310
Laptop ¹	4.447
Hard disk drive	1121 (851-1391)
CD-ROM	621 (447-794)
Loudspeaker	626 (550 – 703)
Tablet Computer	347
Mobilephone ¹	46.4 (14,3 – 115)
Smartphone ²	120
Earphones	260 (38,9-955)
LCD-television	3650 (0,8– 7, 4)



[그림 7] 전기전자제품 중 네오디뮴 함량(출처: Menad와 Seron, 2017)

Menad와 Seron(2017)은 형태가 각기 다른 자석을 포함하고 있는 스피커 (loudspeaker)와 전자 모터(electronic motors)를 엑스선회절분석기(X-ray diffraction)와 주사전자현미경(scanning electron microscopy)으로 분석한 결과, 모든 시료가 NdFeB 영구자석을 갖고 있지는 않았고 철-자석(ferrite magnet)도 있는 것을 확인하였다. 네오디뮴은 전기전자제품에 가장 많은 금속 중 하나로 개인용 컴퓨터의 하드디스크드라이브(HDD), 스피커, LCD 텔레비전 등에

각기 다른 농도로 발견된다[그림 7]. 약 500개의 컴퓨터·노트북 HDD를 수작업으로 해체한 후 자석은 300℃에서 15~20분간 가열하여 탈자시킨 후(철-자석의 경우, 500℃ 필요) HDD의 구성비를 분석하였다. 그 결과 무게비로 자석 약 3%, 알루미늄 80%, 인쇄회로기판(printed circuit boards, PCBs)⁶⁾ 7%, 플라스틱 1%, 철 8%, 기타(세라믹 등) 1%이었다. NdFeB 영구자석의 중량비는 컴퓨터의 경우 평균 3%(1~6%), 노트북의 경우 평균 2.5%(1~4%)이었다. 디스프로슘과 프라세오디뮴으로 도핑된 컴퓨터 HDD의 NdFeB 영구자석의 화학조성은 <표 3>과 같았다.

<표 3> 컴퓨터 하드디스크드라이브 영구자석의 화학조성, %

Nd ₂ Fe ₁₄ B 자석	철	네오디뮴	디스프로슘	프라세오디뮴	니켈	붕소	합계
EDS* 분석	64.4	24.1	1.4	4.0	1.0	1.1	96.0
계산값	72.0	27.0	ND	ND	ND	1.0	100.0

* 에너지분산스펙트럼(energy dispersive spectroscopy)

출처: Menad와 Seron, 2016.

2016년 현재 우리나라 희토류 산화물(rare earth oxide, R₂O₃ 기준, 품위 2.1%) 광산은 1개로 매장량은 25,972 천톤, 가채광량은 20,181 천톤이다[그림 8](국가광물자원지리정보망, 2019). 광종별 희소금속 수입과 수출은 수요 특성에 따라 다양한 양상을 보여 망간(Mn), 몰리브덴(Mo), 마그네슘(Mg) 등은 정광⁷⁾ 중심으로, 팔라듐(Pd), 인듐(In), 주석(Sn), 실리카(Si), 니켈(Ni) 등은 금속

6) 전자부품 탑재 시 전자회로를 구성하여 작동하며 페놀/에폭시 등의 절연관 위에 구리 등의 동박(copper foil)을 부착시킨 다음 회로 매선에 따라 에칭하여 필요한 회로를 구성하고 회로간 연결 및 부품 탑재를 위한 구멍(hole)을 형성하여 만든 회로기판으로 소형 가전제품에서 첨단 이동통신 기기에 이르기까지 모든 전자기기에 사용되는 핵심 부품임

7) 채굴된 원광석에서 불순물을 제거하여 제련원료 또는 공업원료로 직접 사용할 수 있을 정도로 품위를 높인 것으로 선광작업을 통해 맥석 등이 제거되어 정광이 만들어짐

중심으로, 크롬(Cr), 니오븀(Nb)은 합금 중심으로, 리튬(Li), 희토류, 스트론튬(Sr), 텅스텐(W) 등은 화합물 중심으로, 백금(Pt)은 스크랩 중심으로 수입되고 있다[그림 9].

국내 희토류 영구자석 제조는 1980년대에 S사, L사, SS사 등 대기업에서 사업화를 진행하였으나 핵심물질과 공정에 대한 특허 문제를 해결하지 못해 포기하였고 이후 2014년 핵심특허 만료에 따라 J전자, S산업과 같은 중견기업에서 내수시장을 중심으로 사업을 진행되고 있다(김 수민 등, 2018).

본포도 보기

(단위 : 천톤, 사금 kg)

2016 년도

광종	품위	매장량	가채광량	광산수
연.아연	Pb 2.5 %, Zn 2.7 %	17,070.30	11,316.40	30
금	Au 7.5 g/t	5,973.40	4,608.70	95
은	Ag 194.3 g/t	8,048.60	6,319.90	13
동	Cu 2.7 %	2,307.40	1,669.20	27
철(티탄철)	Fe 39.9 %	45,082.80	34,330.40	31
텅스텐	WO ₃ 0.5 %	15,373.10	11,903.80	17
몰리브덴	MoS ₂ 0.3 %	6,277.50	4,874.40	5
망간	Mn 19.6 %	360.00	252.00	2
안티몬	Sb 2.1 %	22.00	17.40	1
주석	Sn 1.9 %	436.00	307.50	2
사금	Au 0.9 g/t	2,857.20	2,000.00	9
희토류	R ₂ O ₃ 2.1 %	25,972.00	20,181.20	1
소계		129,780.30	97,780.90	233

1. 광석량 기준

2. 매장량은 확정 광량과 추정 광량의 합계

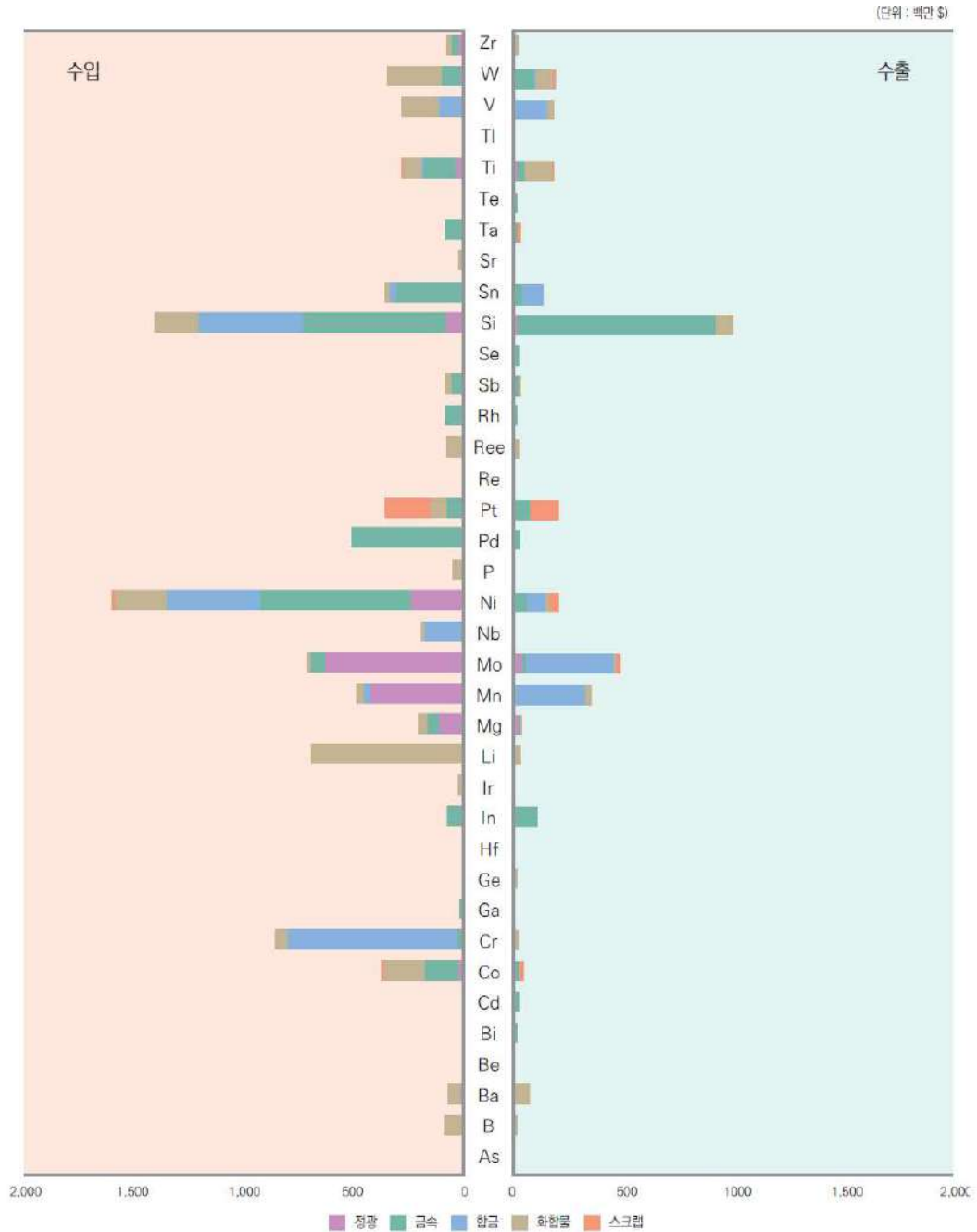
3. 가채광량은 한국광물자원공사의 광산평가규정에 의해 산출

4. 금, 은이 중복된 광산은 금 광산으로 집계

5. 철광은 티탄철 포함

자료원 : 한국광물자원공사, 광물자원매장량현황, 2016.

[그림 8] 2016년 광물자원 매장량 등(출처: 국가광물자원정보지리망, 2019)



[그림 9] 2018년 광종별 교역구조(출처: 한국지질자원연구원, 2019)

귀금속과 희토류를 포함한 각 희소금속의 주요 용도는 다음과 같다.

1) 귀금속(precious metals)

귀금속은 은, 금과 6종의 백금족[이리듐(Ir), 오스뮴(Os), 팔라듐(Pd), 백금(Pt), 로듐(Rh), 루테튬(Ru)]으로 이들 금속은 경제적 가치가 매우 높다. 높은 융점, 낮은 증기압, 높은 전기저항 온도지수(temperature coefficient of electrical resistivity), 낮은 열팽창 지수(coefficient of thermal expansion) 등 화학적 및 물리적 성질이 비슷하며 촉매작용이 매우 강하다. 주요 용도는 다음과 같다.

촉매제 : 백금, 팔라듐 및 로듐은 대기오염 감축을 위한 자동차 촉매변환기, 디젤 입자 여과기에 사용된다. 백금족은 또한 화학 산업과 석유정제의 촉매제로 사용된다. 은은 메탄올로부터 포름알데히드 제조를 위한 산화반응 촉매제로 사용된다. 2010년, 이 용도로 사용된 귀금속 분포는 팔라듐>71%, 백금>31%, 로듐 69%로 추산된다.

전자/전자제품 : 컴퓨터 하드 디스크(백금, 루테튬), 적층세라믹콘덴서(팔라듐) 또는 하이브리드 집적회로 등 다양한 장치에 사용된다. 이리듐(Ir) 도가니(crucible)는 텔레비전 및 기타 전자장치 배면광 발광다이오드 디스플레이 생산 시 단결정형 사파이어를 포함한 고-순도 단결정을 증식시키기 위해 전자산업에 사용된다. 은과 금은 전도성이 매우 높아 전기전자 기기에 중요한 요소이다. 2012년, 이 용도로 사용된 귀금속의 분포는 은 32%, 금 5%, 팔라듐>16%, 백금<23%, 루테튬 62%, 이리듐 55%로 추산된다.

동전/보석/은 식기 : 2011년, 금의 66%, 은의 30%, 기타 귀금속의 20% 정도가 비-산업적으로 장식용으로 사용된 것으로 추정된다.

사진/거울/유리 산업 : 은은 귀금속 중 광학반사율이 가장 높아서 사진 및 거울에 사용된다. 그러나 1990년대 후반 디지털카메라 출현으로 사진기에서의 은의 수요는 점차 줄어들고 있다. 백금 장비는 높은 융점 및 부식에 대한 저항

성 때문에 유리 제조 산업에 사용되고 팔라듐은 평면 유리에 사용된다. 2012년, 이 용도로 사용된 귀금속 분포는 은>10%, 백금 7%, 로듐 9% 정도로 추산된다.

기타 용도 : 치과 합금, 태양광 패널, 수질 처리, 전지, RFID(radio-frequency identification) 태그 및 투자 수단으로도 사용된다.

2) 희토류(REEs)

희토류의 주요 용도는 다음과 같다.

촉매제 : 란타넘은 정유 산업의 접촉분해(catalytic cracking)에 사용되며 세륨은 자동차의 촉매변환기에 필요하다.

자석 : 네오디뮴-철-붕소 자석은 가장 강한 영구자석으로 알려져 있으며 전기자동차, 풍력발전기에 사용된다. 유사한 장비에 사용되는 다른 희토류로는 디스프로슘, 사마륨, 터븀, 프라세오디뮴이 있다.

광택제 및 유리 : 산화세륨은 광택제로 가장 널리 사용된다.

전지 : 란타넘을 함유한 니켈-금속-하이드라이드(NiMH)는 이동식 기기에 최초로 사용되었고 하이브리드 자동차에 광범위하게 사용된다.

야금 : 세륨, 란타넘, 네오디뮴은 합금강의 기계적 특성을 개선하고 탈황 및 스테인리스 스틸에서 미량 원소를 결합시키는데 사용된다. 마그네슘과 알루미늄 합금에도 적은 양이 사용된다.

기타 용도 : 인광체, 색소, 콘덴서 및 세라믹에 사용되며 최근 부상하는 기술도 희토류의 특성이 좌우한다. 고체연료전지의 양극은 스칸듐 또는 이트륨이 사용되며, 양극은 고온-초전도체에도 필요하고 레이저에도 사용된다.

(1) 란탄족

란탄족의 REE-to-REO(rare earth oxide) 비는 약 1:0.85로 전세계 소비량의 약 59%가 기존 시장(촉매제, 유리 제조, 전구 및 야금; 란타넘과 세륨이 사용

된 희토류의 약 80%를 차지)에서 사용되고 있다. 나머지 41%는 신규로 급성장(디스프로슘, 네오디뮴 및 프라세오디뮴이 약 85%를 차지)하는 전지 합금, 세라믹, 영구자석 분야에서 소비되고 있다.

현재까지 희토류의 재활용 이슈는 아주 드물게 취급되며 대부분은 소량의 소비자 사용 전 NdFeB-영구자석 스크랩(US Geological Survey, 2013)과 소비자 사용 후 NiMH 전지 및 인광체 스크랩(Umicore, 2013)에 집중되어 있다. 사용 후 수명을 다한 제품의 실제 보고된 재활용률 통계는 1% 이하로 평균재활용률이 1%에서 10% 사이(란타넘, 세륨, 프라세오디뮴, 네오디뮴, 가돌리늄, 디스프로슘), 1% 미만(사마륨, 유로퓸, 터븀, 홀뮴, 에르븀, 툴륨, 이터븀, 루테튬), 또는 자료가 없는 것(프로메튬(Pm))도 있다(UNEP, 2011).

소비자 사용 전 영구자석 스크랩(스와프⁸⁾와 잔여물)은 제조된 개시합금(starting alloy)의 20-30%로 추산되며 해당 Nd₂Fe₁₄B 자석은 대부분 65-70%의 철, 1%의 붕소, 30%의 네오디뮴/프라세오디뮴 혼합물, <3%의 디스프로슘 및 약간의 터븀으로 구성된다.

(2) 스칸듐(Sc)

스칸듐은 항공우주산업 분야와 스포츠 장비(야구 및 소프트볼 방망이)용 알루미늄 합금으로 사용된다. 다른 용도는 분석표준, 전기공학, 고강도 금속할로겐 등(lamp), 레이저, 금속야금 연구 및 유정 추적 장비 등이다.

(3) 이트륨(Y)

이트륨은 주로 인광체를 위한 고순도 산화물 형태로 소비된다. 세라믹, 전자 기기, 레이저 및 금속 야금에도 소량 사용된다. 주로 칼라 텔레비전, 컴퓨터 모니터의 인광체, 온도 센서, 삼파장 형광등 및 X-선-증강 스크린에 사용된다. 산화이트륨으로 안정화된 지르코늄산화물은 알루미늄산화물-지르코늄산화물

8) 금속 등의 절삭 부스러기 또는 토막, 지스러기

연마재, 베어링과 밀폐재, 연속-캐스팅 노즐용 고온 난연재, 제트엔진 코팅재, 자동차 엔진의 산소 센서, 보석 모조품, 내마모성 및 고주파 신호 제어를 위한 부식-마이크로파 레이더에 사용된다. 이트륨은 치과 및 외과 기술, 디지털 통신, 거리 및 온도 센싱, 산업용 절단 및 용접, 비선형 광학, 광화학 및 광 루미네선스(photoluminescence)에 사용되는 이트륨-알루미늄-가넷(Y-Al-garnet)⁹⁾ 레이저 결정에 중요한 구성성분이다. 2012년 최종 용도로의 사용은 인광체 44%, 금속 야금 13%, 기타 43% 정도로 추산된다(US Geological Survey, 2013).

3) 전자금속(electronic metals)

갈륨(Ga), 인듐(In), 텔루륨(Te)을 편의상 전자금속으로 칭하지만, 공식적으로 정의된 것은 아니다. 수많은 전자 기기에서 주요 금속으로 사용되고 있다.

(1) 갈륨(Ga)

갈륨 점유율의 99% 이상이 광전자기기(레이저 다이오드, LEDs, 광검출기, 태양전지)와 집적회로(국방용, 고성능 컴퓨터, 통신장비)에 비소와의 혼합물(GaAs)로 사용되거나 광전자 기기에 질소와 결합한 형태(GaN)로 사용된다.

(2) 인듐(In)

인듐-주석산화물(indium tin oxide)은 주로 평면패널 디스플레이 장비(74%), 건축용 유리(10%)에 사용되며, 화재-제어 시스템의 온도 지시계 뿔납(10%), 광학 렌즈, 비금속 재질 사이의 결합재용 합금 및 치과용 화이트 골드¹⁰⁾(3%), 기타 반도체로 사용되는 금속간 화합물, 레이저 다이오드 등에 사용된다. 전 세계 인듐 생산량은 지난 20년간 5배 증가하였다.

9) YAG: 산화이트륨(Y_2O_3)과 산화알루미늄(Al_2O_3)의 복산화물($Y_2Al_5O_{12}$)

10) 금과 니켈에 때로는 아연, 주석 또는 구리 등을 섞은 백금 대용의 합금

(3) 텔루륨(Te)

텔루륨은 카드뮴-텔루륨-based 태양전지(40%), 반도체에 텔루르화비스무스로 냉각기기(열전기, 30%), 그리고 금속야금(15%)에 사용되었다. 쾌삭스테인레스강¹¹⁾에 첨가제로 사용된 텔루륨은 구리가 전도성이 감소하지 않도록 절삭성/가공성(machinability) 개선, 납의 진동 및 피로현상에 대한 저항 개선, 카바이드 안정제로서 주철과 가단성 있는 철의 냉각 금형 깊이 조절 등에 사용된다. 고무제제(5%)로서 텔루륨은 가황제(vulcanizing agent), 가속화제로 사용된다. 기타 약 10%는 합성섬유 생산 촉매제, 발파용 뇌관, 세라믹이나 유리에 청색 또는 갈색을 만드는 색소로 사용된다.

4) 내화성 금속(refractory metals, Fe-합금, 특수금속)

내화성 금속은 용점이 높으며 고밀도, 비활성, 내부식성 및 내산성 같은 물리·화학적 특성이 있다. 전자빔 로(furnace)에 사용되는 금속 잉곳(ingot)이나 압착 또는 소결(sintered) 같이 분말금속야금 처리를 위한 원료물질로 사용되는 금속 분말로 생산된다. 이 군에 속하는 금속은 4족부터 7족까지의 전이금속(11종)으로 2군으로 다시 나눌 수 있다.

- 철합금 금속(철 생산을 위한 표준물질): 크롬(Cr), 망간(Mn), 몰리브덴(Mo), 니오븀(Nb), 바나듐(V)
- 특수 금속(특수 용도를 위한 표준물질): 하프늄(Hf), 탄탈럼(Ta), 티타늄(Ti), 레늄(Re), 텅스텐(W), 지르코늄(Zr)

철-합금 : 합금하려는 원소를 강철 용융재로 들어가게 하는데 가장 경제적인 방법이기 때문에 철, 주물 및 강철 산업에서 모합금(master alloy)으로 사용된다. 이 밖에도, 알루미늄 합금 생산과 화학 특수반응의 개시물질로 특수 철합금이 필요하다. 강철 생산 첨가제로서, 철합금은 강철의 특성, 특히 인장 강도, 내

11) free-machining stainless steels: 스테인레스강에 망간, 황, 납, 세레늄 등을 첨가한 특수강으로 강도를 너무 떨어뜨리지 않고 절삭하기 쉽도록 개량한 강

마모성 및 내부식성을 향상시킨다. 2012년 생산된 크롬, 망간, 몰리브덴 및 바나듐의 90% 이상과 니오븀의 80% 이상이 이 용도로 사용되었다.

초합금 및 특수합금 : 2012년 레늄(Rc)의 약 70%는 터빈엔진의 칼날, 열전대(thermocouple) 같은 고온용 초합금과 전기 아크를 견디는 전기 접촉면의 중요 성분으로 사용되었다.

경(硬, hard)금속 도구를 만들기 위해 분말야금으로 더 처리되는 경금속과 금속탄화물 분말은 50% 정도가 텅스텐 응용 분야이다.

촉매제 : 레늄의 25% 정도가 무연가솔린을 생산하는 석유-리피밍 백금/레늄 촉매제로 사용된다.

항공우주 분야 : 2012년 티타늄의 72%가 고성능 항공기 엔진 및 기체(airframe) 제작에 사용된 것으로 추산된다.

색소 : 티타늄의 주요 용도(60%)는 독성이 없는 이산화물 형태로 화장품, 식품산업 및 페인트같이 다양한 분야에 백색염료로 사용되었다.

변압기 : 탄탈럼 소비의 약 60%는 금속 분말 형태로 정보기술 및 통신장비(모바일, 노트북, 디지털 카메라)의 기본 구성요소인 전해콘덴서에 사용되었다.

세라믹 및 내화재 : 지르코늄의 주요 사용처는 세라믹과 내열재이다.

핵에너지 및 화학공정 산업 : 핵에너지 및 화학공정 산업에서는 하프늄이 주로 사용된다.

5) 기타 금속(other metals)

(1) 리튬(Li)

리튬은 전지(22~33%), 유리/세라믹 산업(26~30%), 윤활유(11~14%), 공기처리(4~5%), 연속-주물 공정 첨가제(4%), 1차 알루미늄생산 시 용융-염 전기분해(2~4%), 기타 용도(9~13%)로 사용된다. 항공기 제조에 알루미늄-리튬 합금이 사용되며 리튬은 의료용으로 우울증 치료에 사용된다. <표 4>는 리튬-이온 전지 스크랩에 포함된 금속의 종류를 나타낸 것으로 구리, 알루미늄이 상당

량 포함되어 있음을 알 수 있다.

<표 4> 리튬-이온 전지 스크랩에 포함된 금속 함량 범위

리튬-이온 시스템(wt%)	리튬	니켈	코발트	망간	구리	알루미늄	철	탄소
전지 셀	~1	7-21*			~16	~40	<0.5	~14
전기자동차 (Electronic vehicle) 전지	<0.5	0-4	0-4	0-4	~11	~25	~21	~9

* 니켈, 코발트, 망간의 합

(2) 안티몬(Sb)

대부분의 안티몬은 삼산화물(Sb_2O_3) 형태로 플라스틱, 고무, 섬유 및 기타 연소물질의 내염성(flame-retardant) 개선(72~75%), 유리 및 세라믹 제조 시 탈색 및 정제 시약(9%), 납-산 전지의 그리드 금속 합금 원소(19%)로 사용된다. 납-안티몬의 기타 용도는 무기, 마찰 감소 베어링, 케이블 덮개, 내부식성 펌프와 파이프, 지붕(sheet) 접합 및 탱크 라이닝(tank lining)에 사용된다. 전 세계적으로 내염재로서의 용도는 유지될 것으로 기대되지만 전지 분야에서는 새로운 기술의 등장으로 그 중요성이 점차 사라질 것으로 예측된다(Carlin, 2012).

2. 희소금속의 건강 영향

폐전기전자제품은 희소금속과 유해물질을 포함하고 있으며 대표적 유해물질은 납(Pb), 수은(Hg), 크롬(Cr), 바륨(Ba), 카드뮴(Cd), 비소(As), 아메리슘(Am)¹²⁾, 안티몬(Sb), 염화불화탄화수소(CFCs, chlorofluorocarbons 또는 난연재, flame retardants), 폴리염화비페닐, 폴리브롬화디페닐 에테르(PBDEs), 폴리브롬화 비페닐(PBBs) 등이 알려져 있으며 이들의 건강 영향은 <표 5>와 같다.

희토류는 피부로 흡수되지 않고 호흡계 및 위장관계로 흡수되어 간 및 골격에 축적되며 대부분은 독성이 낮거나 중간 정도로 알려져 있으며 독성학적 특성은 [그림 10]과 같다.

12) 원자번호 95. 플루토늄의 부산물로 합성하기 쉬워서 보통 연기감지기(알파선이 복사되고 있어서 연기가 들어가면 알파선이 차단되어 연기가 감지됨)에 사용됨

<표 5> 폐전기전자제품에 함유된 유해물질과 건강 영향

물질	사용	건강 영향
납(Pb)	CRT 스크린, 전지, 인쇄회로기판	구토, 설사, 경련, 혼수 또는 사망, 식욕 상실, 복통, 변비, 피로, 불면, 홍분 및 두통
수은(Hg)	형광 등, 알칼리전지, 스위치	뇌 및 간 손상
6가크롬(Cr ⁶⁺)	자료저장 테이프, 플로피-디스크	눈, 피부 및 점막, DNA 자극
바륨(Ba)	CRT 게터 ¹³⁾	뇌 부종, 근육 위축, 심장, 간 및 체장 손상
카드뮴(Cd)	니켈카드뮴전지, 형광 등 (CRT 스크린), 프린터 잉크 및 토너	중독 증상(쇠약, 열, 두통, 오한, 땀, 근육통), 폐암 및 신장 손상
비소(As)	LED의 갈륨비소	피부질환, 신경전달속도 감소, 폐암
아메리슘(Am)	연기감지기	방사성 원소
안티몬(Sb)	플라스틱의 난연제	발암가능성
염화불화탄화수소	냉각제, 발포단연제	오존층 파괴, 피부암 발생률 증가 및 유전적 손상
폴리염화비페닐	콘덴서, 변압기	암, 면역계, 생식계, 신경계, 내분비계 및 기타 건강 영향
PBDEs, PBBs*	플라스틱의 난연제	호르몬 효과, 열처리 과정에서 다이옥신과 퓨란 생성 가능

* PBDEs: polybrominateddiphenyl ethers; PBB: polybrominated biphenyls

출처: Kaya, 2016

13) getter: 진구, 진공관 내의 잔류 가스를 흡수시키는 물질

Element (abbreviation)	CAS No.	Toxicological information
Scandium(Sc)	7440-20-2	Sc is considered non-toxic, but little toxicological information is available. LD ₅₀ * of ScCl ₃ : 4 mg/kg(i.p), 755 mg/kg(p.o) in rats.
Yttrium(Y)	7440-65-5	Water soluble forms of Y compounds are considered mildly toxic, while insoluble forms are non-toxic. In experiments on rats, inhalation of yttrium citrate(C ₆ H ₅ O ₇ Y) caused pulmonary edema and dyspnea, and inhalation of yttrium chloride(YCl ₃) caused liver edema, pleural effusions, and pulmonary hyperemia. Exposure to Y compounds in humans may cause lung disease.
Lanthanum(La)	7439-91-0	In vivo experiments, the injection of La solutions caused hyperglycemia, low blood pressure, and degeneration of the spleen and hepatic alterations. LD ₅₀ of La ₂ O ₃ : > 8,500 mg/kg(p.o) in rats, 530 mg/kg(i.p) in mice.
Cerium(Ce)	7440-45-1	Fumes from Ce fires are toxic. Animals died due to cardiovascular collapse when injected with large doses of Ce. LD ₅₀ of CeO ₂ : 5,000 mg/kg(p.o), 1,000-2,000 mg/kg(dermal), 5.05 mg/L(inhalation dust) in rats.
Neodymium(Nd)	7440-00-8	Although Nd compounds are of low to moderate toxicity, its toxicological information is limited. Nd dust and salts are irritating to the eyes and mucous membranes(highly), and skin(moderately). Nd ₂ O ₃ was investigated as a mutagen. LD ₅₀ of Nd ₂ O ₃ : > 5,000 mg/kg(p.o) in rats, 86 mg/kg(i.p) in mice.
Promethium(Pm)	7440-12-2	Pm may have an affect on the bone tissue in human. All of the known isotopes of promethium are radioactive.
Samarium(Sm)	7440-19-9	Insoluble salts of Sm are non-toxic, while the soluble ones are slightly toxic. When ingested, most of Sm salts is excreted, and only about 0.05% is absorbed into the bloodstream. From the blood, about 90% moves to the liver(45%) and bone surface(45%), where it remains for about 10 years, and remainder(10%) is excreted.
Europium(Eu)	7440-53-1	Europium has no significant biological role and is relatively non-toxic compared to other heavy metals. LD ₅₀ of Europium chloride(EuCl ₃): 387 mg/kg(i.p), 3,527 mg/kg(p.o) in mice, 28-day oral NOEL [†] of EuCl ₃ · 6H ₂ O: 200 mg/kg/day in rats, LD ₅₀ of Europium nitrate[Eu(NO ₃) ₃]: 320 mg/kg(i.p) in mice, > 5,000 mg/kg(p.o) in rats.
Gadolinium(Gd)	7440-54-2	Free ion form of Gd is highly toxic. The toxicity depends on the strength of the chelating agent. Anaphylactoid reactions are rare(about 0.03-0.1%).
Dysprosium(Dy)	7429-91-6	Although soluble Dy salts, such as Dy chloride(DyCl ₃) and Dy nitrate[Dy(NO ₃) ₃], are mildly toxic when ingested, the insoluble ones are non-toxic. DyCl ₃ ingestion of 500 g or more could be fatal to a human considering the results of animal(mice) toxicity study.
Thulium(Tm)	7440-30-4	Although soluble Tm salts are considered to be slightly toxic when ingested in large amounts, the insoluble ones are non-toxic.
Ytterbium(Yb)	7440-64-4	All compounds of Yb are considered to be highly toxic because they have irritation to the skin and eye, and some of them might be teratogenic.
Lutetium(Lu)	7439-94-3	Lu has low toxicity. Lu fluoride(LuF ₃) inhalation is dangerous and has irritation to the skin. Lu oxide(Lu ₂ O ₃) powder is also toxic when inhaled or ingested. Soluble Lu salts are mildly toxic, but insoluble ones are not.
Praseodymium(Pr)	7440-10-0	Although toxicity of these compounds has not been investigated in detail, they are considered to be of low or moderate toxicity.
Terbium(Tb)	7440-27-9	
Holmium(Ho)	7440-60-0	
Erbium(Er)	7440-52-0	

* LD₅₀: half lethal dose levels; † NOEL: no-observed-effect level.

The data were mainly sourced from the Rim's research(Rim et al., 2013).

[그림 10] 희토류의 독성학적 특성(출처: 신 서호 등, 2016)

희토류에 직업적으로 노출된 노동자를 대상으로 한 환자-대조군 또는 코호트 연구는 거의 없으며(Pagano 등, 2015) 또한 대부분의 연구는 다종의 희토류 노출로 인한 건강영향을 보고한 것으로 개개 희토류의 독성 영향이나 기전을 설명하기가 어렵다.

희토류 노출로 인한 건강영향은 가돌리늄-CA(Gd-based contrast agent)에 있는 가돌리늄과 관련한 신장계 섬유화(Broome, 2008; Marckmann, 2008; Marckmann 등, 2008; Prince 등, 2008; Thomsen, 2006)에 관한 연구가 주를 이루며 그 외 란타넘 노출로 인한 어린이의 지능지수(intelligence quotient) 같은 기능적 신경학적 장애(Zhu 등, 1996), 세륨-진폐증(Porru 등, 2000), 기타 여러 가지 희토류에 의한 뼈 변형, 유전독성 및 섬유조직 손상(Chen과 Zhu, 2008; Jenkins 등, 2011), 고환에 대한(anti-testicular) 영향과 남성 불임(Chen 등, 2015a, 2015b; Marzec-Wróblewska 등, 2015)에 관한 연구가 있다.

프랑스에서 형광등 재활용산업 노동자 노출 연구에서 전처리, 본 처리 및 산출물 저장 공정으로 구분하여 작업자의 흡입성 분진, 수은, 납 및 이트륨 노출 농도 등을 측정한 연구(Zimmermann 등, 2014)에서 노동자의 평균 노출농도는 각각 $4.4\text{mg}/\text{m}^3$, $15.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, $14.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, $247.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보고하였다.

Lecler 등(2015)도 프랑스에서 텔레비전이나 컴퓨터 스크린에 사용된 CRT(적절하게 처리되지 않으면 납, 수은, 바륨, 형광체 분말 같은 유해물질이 방출될 수 있음) 재활용 공정에서 노동자의 평균 흡입성 분진, 바륨, 카드뮴, 납 및 이트륨 농도를 각각 $8.8\text{mg}/\text{m}^3$, $1504.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, $434.9\mu\text{g}/\text{m}^3$, $576.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 $2894.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하였다[그림 11]. 모든 재활용 처리공정은 최소한 전체 환기 장치를 갖추어야 하며 작업장에서 집으로 오염물질이 이동되지 않도록 교육 훈련할 직원이 필요하다고 제안하였다.

Exposure levels measured in a CRT treatment workshop.

PS/AS (number of samples)		Inhalable dust (mg m^{-3})	Barium ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Cadmium ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Lead ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Yttrium ($\mu\text{g m}^{-3}$)
OELs France		10	500	50	100	1000
USA (Niosh)		-	500	20	50	1000
Dismantling	Personal	0.6-8.1 ^a	<0.1-24.3	<0.1-41.1	<0.1-96.7	<0.1-37.8
	(75)	2.5 ^b (1.7) ^c	5.5 (3.9)	2.9 (0.5)	33.5 (28.6)	5.8 (2.0)
	Ambient	<0.3-3.4	<0.1-21.2	<0.1-33.3	<0.1-60	<0.1-36.1
	(82)	1.1 (1.0)	4.2 (3.0)	1.7 (0.5)	19.8 (19.1)	2.9 (0.6)
Tube preparation	Personal	0.8-29	<0.1-1504.3	<0.1-307.7	2.4-445.8	0.1-825.6
	(41)	5.1 (2.3)	88.5 (17.8)	26.2 (3.0)	112.4 (59.0)	66.0 (10.1)
	Ambient	0.5-8.7	<0.1-323.3	<0.1-39.7	4-210.6	0.1-135.7
	(28)	2.8 (2.1)	34.7 (17.8)	5.5 (2.2)	73.1 (61.0)	25.2 (9.1)
Decontamination	Personal	1.2-29	<0.1-173.9	<0.1-434.9	2.4-576.3	0.1-2894.3
	(36)	8.8 (4.7)	46.6 (34.8)	52.4 (3.2)	166.8 (85.3)	445.9 (25.2)
	Ambient	<0.3-39	<0.1-848.2	<0.1-698.4	4.0-549.3	<0.1-3437.9
	(42)	4.7 (1.4)	44.1 (16.4)	36.7 (0.7)	69.0 (42.7)	210.5 (5.7)

PS: personal air sampling.

AS: ambient air sampling.

^a Range.^b Arithmetic mean.^c Median.**[그림 11] CRT 처리 작업장에서 측정된 노출수준(출처: Lecler 등, 2015)**

Ceballos와 Dong(2016)은 공적인(formal sector) 재활용 산업에서 직업 및 환경보건 연구에 관한 체계적 문헌고찰을 통해 폐전기전자제품 재활용 산업에 종사하는 노동자의 금속류 노출은 대부분 노출지침값(occupational guidelines)을 초과하였으며 특히 노동자 호기와 생물학적 시료 중 브롬화 난연제 농도는 대조군에 비해 높았고 그 외 공기, 분진 및 토양 내 금속, 브롬화 난연제, 다이옥신, 퓨란, 다환방향족탄화수소 또는 폴리염화비페닐 등도 대조지역보다 높았다고 보고하였다.

3. 폐전기전자제품의 발생 및 국내 재활용 현황

1) 폐전기전자제품의 발생

선진국의 경우 폐전기전자제품은 전체 고체폐기물의 1% 정도이고 EU에서는 5년마다 16~28% 정도 증가하며 이는 도시 폐기물 발생량의 약 3배 수준이다 (Schlucp 등, 2009).

전 세계인구의 절반 정도는 인터넷과 이동통신 및 그 서비스를 사용하고 있으며 이를 위해 1종 이상의 정보통신(Information & Communication Technology)기기를 보유하고 있다(Bladé 등, 2017). 이동전화단말기나 컴퓨터 등의 교체 주기도 매우 빠른 추세로 폐전기전자제품의 배출량은 증가하고 있다. 2016년에는 연간 44.7백만 톤이 발생된 것으로 추산되며 이중 약 1.7백만 톤은 그대로 버려지고 약 20%(8.9백만 톤)가 수거되고 재활용되는 것으로 추산된다(Bladé 등, 2017).

전자기기의 핵심 부품인 인쇄회로기판은 전기산업의 혁명을 가져왔다.

인쇄회로기판은 단면, 양면 및 다층 구조로 되어 있는데 구리가 가장 많이 사용되며 약 40%의 금속, 30%의 세라믹 및 30%의 플라스틱으로 구성되어 있다. 폐인쇄회로기판에서 확인된 금속류의 조성은 <표 6>과 같으며 이중 경제적으로 가치가 있는 금속류는 <표 7>과 같다.

<표 6> 폐인쇄회로기판의 금속 조성(%)

원소	Sn	Pb	Cu	Fe	Al	Sb	Zn	Ni	Cr	Cd (g/t)	Au (g/t)	Ag (g/t)
PCBs	10.12	3.20	21.62	0.21	1.36	0.001	0.056	0.036	0.027	0.53	-	194.91
ECs*	3.20	0.68	13.80	19.49	6.91	6.11	5.66	0.65	0.53	14.45	40.76	112.68
합계	6.0	1.7	16.9	11.8	4.7	3.7	3.4	0.4	0.3	8.9	24.4	145.7

* 전자부품(Electronic components)

출처: Yang 등, 2017.

<표 7> 폐인쇄회로기판의 금속 함량 및 경제적 가치(톤당)

금속	함량(%) ^a	가격(\$/kg) ^b	잠재 가치(\$)	가치 비(%)
Cu	9.7	3.6	349.2	4.8
Al	5.8	1.7	98.6	1.35
Fe	9.2	0.4	36.8	0.51
Ni	0.69	10.5	72.5	0.99
Pb	2.24	1.2	27	0.37
Sn	2.15	13	279.5	3.84
Ag	0.06	315	189	2.6
Au	0.023	24,434	5620	77.17
Pd	0.01	6100	610	8.38
합계	29.87	-	7282	-

a: Chris 등, 2007.

b: London Metal Exchange, Nov. 2008.

인쇄회로기판의 가치와 환경 및 인간 건강에 대한 위험성 때문에 폐인쇄회로기판은 환경적으로 안전한 방법으로 재활용되어야 하지만 제조 과정과 마찬가지로 구성성분, 재료의 복잡성과 다양성 때문에 재활용은 큰 도전이 된다(Li 등, 2015).

폐전기전자제품으로부터 회소금속을 회수하는 것은 매우 제한적이다. 최종생산품에 함유된 회토류의 양은 적게는 <mg에서 수 kg 정도(Binnemans 등, 2013)로 이는 재활용을 어렵게 하는 요인이 되어 재활용되는 양은 1% 미만이다(Eggert 등, 2016). 재활용 과정에서 따로 처리해야 할 폐전기전자제품의 양

이 많아야 하므로 대다수의 최종생산품에 소량으로 포함된 희토류는 수거, 추출 및 회수가 어렵다(Li 등, 2017; Kumari 등, 2018). 예를 들면, 120g의 이동전화단말기에 함유된 금은 6.8mg으로 1kg의 금을 회수하려면 약 18톤의 폐이동전화단말기가 필요하다.

재활용되지 않는 폐전기전자제품의 소각이나 매립 등으로 인한 부적절하고 안전하지 않은 처리 및 폐기로 인한 환경 및 인간 건강에의 위험성 또한 증가하고 있다.

2) 국내 재활용 현황

국내에서는 희토류 원광을 수입하여 제련·정련¹⁴⁾을 통해 소재를 공급하는 기술과 인프라가 부족하여 대부분 화합물, 금속 반제품 또는 완제품으로 수입되어 사용되고 있다(한국산업기술평가관리원, 2018).

도시광산 사업을 하는 대부분의 사업체는 기술개발이나 연구투자 역량이 부족한 영세업체가 많으며 추출과정에서 발생하는 부산물 처리문제가 발생할 수 있다. 도시광산에서 희토류를 포함한 희소금속을 회수하는 것은 단순히 폐기물을 처리하는 수준을 넘어 고난도의 제련기술이 요구되는 기술집약적 사업이다.

2009년 특허청 보도자료¹⁵⁾에 따르면 도시광산에서 희소금속을 자원화하는 기술은 지난 10년간 96건이 특허출원 되었으며 백금, 팔라듐과 같은 백금족과 코발트, 텅스텐, 니켈, 몰리브덴과 같은 고융점 금속이 전체 출원건 중 각각 40% 및 39%를 차지하였으며 인듐, 카드뮴을 포함한 보론그룹 금속이 10%, 리튬, 비소, 주석 등 기타 금속이 11%를 정도를 차지하였다. 대부분의 특허출원은 제련 또는 정련 과정에서 발생하는 부산물, 슬러지, 폐촉매 등을 자원화하는

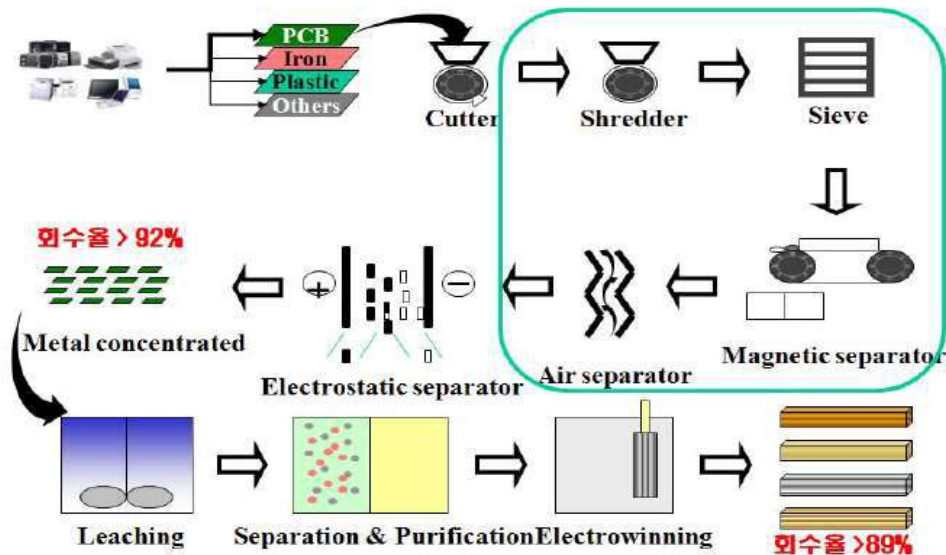
14) 제련(용련, smelting)은 광석 속에 있는 목적금속의 농도는 높아졌지만, 여전히 불순물을 충분히 제거하지 못한 단계로 이 단계에서 금속은 단일체가 아닌 화합물의 형태로 존재한다. 정련(refining)은 목적금속의 순도를 높이는 과정

15) 2009년 6월 19일, 산업쓰레기 속에 숨어있는 희유금속을 찾아서. -친환경 희유금속 자원화기술 특허동향-

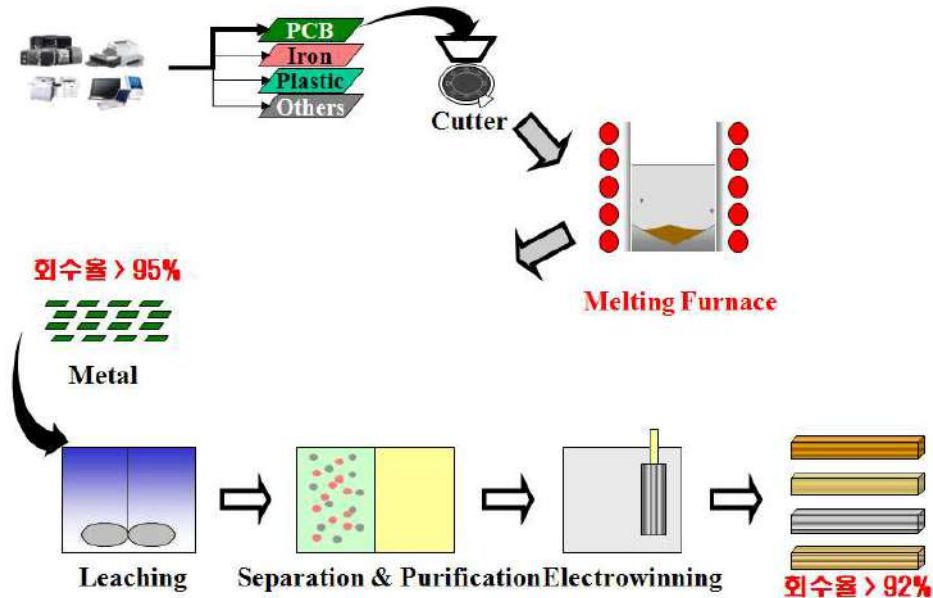
것이고 약 20% 정도만이 폐전기전자제품에서 나오는 인쇄회로기판이나 리튬이온전지에서 희소금속을 자원화하는 것이다.

네오디뮴과 디스프로슘의 폐자원흐름에 대한 분석 연구에서 희토류 자석은 원하는 모양으로 주문하여 성형을 마친 상태로 수입되어 모터 등에 조립되므로 연삭분말이나 공정 스크랩은 거의 없으며 또한 완성품에서 희토류 자석 자원회수를 전문으로 하거나 회수된 희토류를 제품생산에 활용하는 업체는 현재 국내에 없는 것으로 확인된 바 있다(조 지혜 등, 2013).

국내에서 인쇄회로기판 10톤/일(3,000톤/년)의 설계용량으로 유가금속을 회수하는 2가지 공정(1. 전처리+습식회수와 2. 분쇄+건식+습식회수)을 대상(각각 [그림 12] 및 [그림 13])으로 투자비, 처리비 등을 계산한 연구에서 공정1의 경우 투자비 22억원, 처리비 20억원(인쇄회로기판 1톤 처리비는 66만원), 공정2의 경우 투자비 26억, 처리비 10억원(인쇄회로기판 1톤 처리비는 34만원)으로 추정된 바 있다(정진기 등, 2012).



[그림 12] 전처리+습식회수 공정흐름도(정 진기 등, 2012)



[그림 13] 분쇄+건식+습식회수 공정흐름도(정 진기 등, 2012)

한국전자제품자원순환공제조합(이하 조합)은 국내 전기전자제품 의무생산자의 회수·재활용 의무를 대행하고 있으며 매년 회수·재활용 목표량(제도권)의 약 90% 이상을 달성하고 있으나 대형기기 중심의 실적이 전체의 약 70%를 차지하고 있어 중형, 소형 또는 통신·사무기기의 회수 인프라는 상대적으로 열악한 실정으로 이들 제품의 회수 노력 및 회수체계 구축은 앞으로의 중요한 과제라고 하였다. 현재 국내 폐전기전자제품 재활용 기술과 공정의 수준은 광학선별을 통한 플라스틱이나 비철금속의 선별, 우레탄 등 가연성폐기물을 연료화하기 위한 고형연료 제조설비의 채택 정도이다(한국전자제품자원순환공제조합, 2019).

희소금속이 포함된 폐전기전자제품의 재활용은 1차적으로 재활용센터를 통해 진행되며 자원순환과정을 거치면서 세분화된다. 희소금속을 포함한 대부분의 폐전기전자제품은 궁극적으로는 소각, 매립 등의 과정을 거쳐 폐기 되고 있다. 인쇄회로기판 등에 포함된 희소금속의 경우는 금속 제련업체에서 회수하고

있다. 그러나 이것은 재생산의 의미보다는 구리, 납, 아연과 같은 기본금속의 제련 과정에 편승하는 것으로 인쇄회로기판 등 폐전기전자제품으로부터의 생산하는 기본금속의 양은 전체 기본금속 생산량의 1%에도 미치지 않는 수준이며 회소금속의 경우는 그 비율이 더 낮다.

우리나라에서 회소금속이 재활용되지 못하는 이유는 다음과 같다.

첫째 재활용 과정에서 발생하는 환경오염물질의 처리에 대한 부담이 크다.

폐전기전자제품 등에 포함된 회소금속의 재활용 과정에서도 광산에서 채굴한 회소금속의 정제 과정과 같이 정광 및 분리과정에서 염산 등이 포함된 산화물 슬러지와 같은 환경오염물질이 다량 발생한다. 회수한 회소금속은 카본류(탄소-based)와의 산화-환원반응, 연소 등의 공정을 거치면서 대기오염물질(가스류로 방출) 또한 다량 발생한다. 이러한 환경오염물질 처리에 대한 부담은 중국으로부터의 수입을 선택하는 중요한 이유 중의 하나가 된다.

둘째 현재 회수한 회소금속을 활용하는 산업시스템의 부재이다.

희토류를 포함한 제품들은 대부분 1차 제조 과정을 거친 중간재 형태로 수입되며 국내 기업들은 이들을 사용하고 있다. 희토류를 포함한 영구자석의 경우 필요한 자석의 크기와 모양을 재단하기에 용이한 중간제품의 형태로 중국에서 생산한 제품을 수입하여 사용하고 있는데 국내에서 희토류를 회수·재생산한다고 해도 이들을 활용하여 필요한 중간제품을 생산할 수 있는 산업시스템이 없다면 희토류를 재생산할 이유가 없을 것이다. 다시 말해 중간재를 생산하는 산업시스템이 없는 우리나라에서는 희토류를 회수하더라도 활용할 방법이 없는 것이다.

셋째 희토류를 포함한 회소금속 회수를 위한 사업의 채산성 문제이다.

이미 언급한 바와 같이 희토류를 포함한 회소금속 회수 과정에는 많은 종류의 환경오염물질이 다량 발생하므로 환경오염방지를 위하여 상당한 비용을 부담해야 한다. 또한, 폐전기전자제품에서 회소금속을 포함한 희토류를 재생산하기 위한 폐기물의 수거, 해체 등의 과정을 거쳐 회소금속의 회수가 가능한 업

체에 전달되는 과정에서 발생하는 비용이 많아 회소금속을 회수·재생산하더라도 중국에서 생산하는 제품과 비교하여 가격경쟁력이 없는 것이 현실이다. 더욱이 희토류를 포함한 회소금속의 국제가격 변동이 채산성에 영향을 미친다.

국내에서 희토류는 대량으로 재활용되지 않지만, 희토류를 포함한 회소금속의 회수·재생산을 활성화하기 위해서는 회소금속 회수업체와 국내에서 필요한 중간제품 생산업체를 연계한 희토류 회수 산업시스템 구축이 필요할 것이다. 그리고 폐전기전자제품에서 회소금속 회수를 위한 원재료 수거 시스템 합리화와 회수 기술개발, 회수된 회소금속의 재사용산업 활성화 등 채산성 확보를 위한 노력이 뒷받침되어야 할 것이다.

4. 폐전기전자제품 재활용 공정 및 공정별 노출 가능한 유해·위험요인

재활용되는 회토류는 <표 8>과 같이 주로 형광등/인광체, 영구자석, 전지에 사용된 것과 일부 석유정제산업 등 화학공장에서 촉매제로 사용된 것으로 (Rombach와 Friedrich, 2014) <표 9>와 같이 인광체, 자석류, NiMH 전지로부터 재활용될 수 있는 양은 상당할 것으로 추정된다. 그러나 전자기기에서 회소 금속 재활용률은 0~15% 정도에 불과하다<표 10>.

<표 8> 전자제품 및 수명을 다한 소비재에서 재활용 가능한 회토류 자원

재활용 자원	목표 회토류	1차 재활용 기전
형광물질(인광체 분말, 형광등 등)	란타넘, 세륨, 터븀, 이트륨	건식야금-굽기, 석회 소성 습식야금-침출, 용매추출, 선택적 침전 기체상 추출
자석류	네오디뮴, 디스프로슘, 기타 회토류	습식야금-침출, 용매추출, 선택적 침전
전지류	란타넘, 세륨, 프라세오디뮴, 네오디뮴	습식 또는 건식야금 회수 단계

<표 9> 희토류 재활용 가능성

희토류 자원	희토류 재고량 (톤)	예측 평균수 명(년)	희토류 스크랩 (톤)	비관적 시나리오에 의한 재활용(톤)	낙관적 시나리오에 의한 재활용(톤)
자석류	300,000	15	20,000	3,300	6,600
인광체 등(lamp)	25,000	6	4,167	1,333	2,333
Ni-metal-hydride 전지	50,000	10	5,000	1,000	1,750
합계	375,000	-	29,167	5,633	10,683

출처: Binnemans 등, 2013(희토류 재고량, 희토류 스크랩은 2020년 추정치임)

<표 10> 일부 분야별 수명을 다한 제품 중 희소금속 재활용률(UNEP, 2012)

90-100%	보석·동전·은 식기: 금, 은, 팔라듐, 백금
80-90%	산업용(공정 촉매제, 전기화학, 유리, 거울, 전지 포함): 팔라듐, 백금, 로듐
30-60%	자동차(자동차 촉매, 스파크 플러그, 자동차 전기장치를 제외한 은-페이스트): 팔라듐, 백금, 로듐 산업용(공정 촉매제, 전기화학, 유리, 거울, 전지 포함): 은, 이리듐 기타 용도(장식, 의료용-센서, 도자기, 사진, 광전지 포함): 은, 로듐
0-15%	전자기기: 금, 은, 이리듐, 오스뮴, 팔라듐, 백금, 로듐, 루테튬

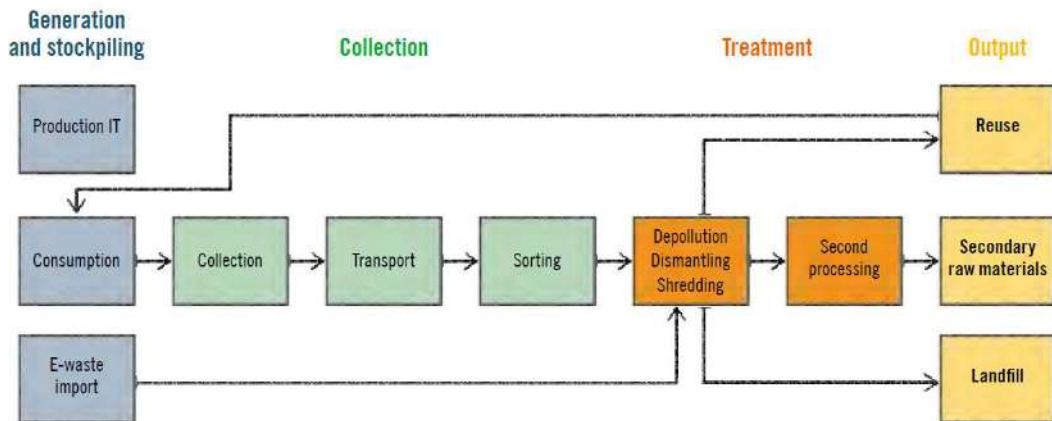
국제 희토류 생애주기(Life Cycle) 연구(Du와 Gracdel, 2011)에 의하면 영구 자석 제조 시 산업 스크랩이 재활용되고 있으며 최종 폐기제품으로부터 희토류를 재활용한 사례는 없다.

폐전기전자제품의 종류에 따라 재활용에 적용되는 처리방법도 매우 다양하다. 대규모 분쇄기로 처리하는 사업장이 있는 반면, 단순히 해체만 하는 공정은 수동, 자동 또는 이들을 혼용하여 사용하기도 한다. 이 과정에서 비소 같은 희소금속뿐만 아니라 납, 수은, 냉매제 등의 금속, 분진, 화학물질 방출과 소음이

발생할 수 있다.

폐전기전자제품의 재활용 각 단계는 [그림 14]와 같이 발생(generation) → 수거(collection) → 1차 및 2차 처리(treatment) → 최종산물 생산(output) 순으로 진행된다(ILO, 2014).

1차 처리 단계는 오염물질 제거(depollution)·해체·분쇄 공정 등으로 독성 물질 및 유가물이 분리된다. 2차 처리(secondary processing)는 야금학적 방법을 적용하여 목적금속을 추출하고 농축 과정을 거쳐 금속을 회수하는 제련·정련 단계이다.



[그림 14] 폐전기전자제품 재활용의 가치 사슬(출처: ILO, 2014)

1) 물리적 재활용 공정

(1) 수거(collection) 및 분류(sorting)

덤프트럭, 지게차, 기중기, 사다리 등이 사용되지만 중량물작업으로 인한 손/발 등의 끼임, 요통, 근골격계질환(MSDs, musculoskeletal disorders)이 발생할 가능성이 있다. 또한, 불량 조명, 노면 작업 등으로 인한 시야 제한 등의 안전 문제가 발생할 수 있다.

분류 작업은 기중기, 호이스트 등을 이용하여 품목별로 분류된다. 이 과정에

서는 기계 작동과 관련한 안전문제가 발생할 수 있다.

폐전기전자제품에서 전지의 분리는 수작업으로 이루어져 비용이 많이 들지만, 재활용 단계에서 이 과정을 무시할 수는 없다. 일본의 경우, 소형 폐전기전자제품, 특히 이동전화단말기에서 전지는 소비자가 직접 분리하도록 하고 있다 (Terazono 등, 2015).

(2) 해체(또는 분해, dismantling/disassembling)

대부분 수작업으로 진행되며 다양한 크기의 제품, 성분 형상, 동종 제품의 양 부족/적음, 분해가 어려운 제품 구조 등 균일하지 않은 특성이 자동화를 저해하는 요인으로 꼽힌다.

해체나 분해를 위해서는 해머, 칼/끌, 절단 토치, 천공기(drilling machines), 동력 프레스(power press), 회전톱(circular saw) 등이 사용된다. 이들 공정에서는 기계·장비에 의한 신체 손상이나 단순반복작업으로 인한 근골격계질환 발생 가능성이 있다. LCDs의 경우, 서유럽에서는 패널의 해체작업이 자동화로 진행되기도 하지만 수은을 함유한 백라이트는 자동화의 저해 요인이 된다. 아직까지 상업적으로 수은을 함유한 LCD의 해체를 위한 자동화 해결방법은 없다 (Cryan 등, 2010). Regulation 2037/2000/EC는 오존층파괴물질을 함유한 냉장고, 에어컨, 온열 펌프(heat pump) 장비를 해체하기 전 반드시 가스류와 오일을 먼저 제거/회수하도록 규정하고 있다. 유리, 케이블, 수은 스위치, 콘텐서도 제거해야 한다. 이 공정에서는 냉매, 오일류 등의 화학물질에 노출될 가능성이 있다.

(3) 파·분쇄(crushing·pulverizing)

각기 다른 입자크기로 만드는 공정으로 일반적으로 1차 파쇄기에서 상대적으로 큰 입자로 파쇄한 후 2차 분쇄기를 거친다. 1차 파쇄기는 주로 2축 전단형 또는 2축 유압식 파쇄기가 사용되고 2차 분쇄기는 1축 분쇄기 또는 관성타

력 분쇄기가 사용된다. 이 공정에서는 소음과 분진이 발생할 수 있다. 이 공정은 수동, 자동, 반자동 또는 이들을 혼용하기도 한다. 분진으로 인한 오염을 방지하기 위해 3단계 집진장치(사이클론, 집진기 및 공기청정기)가 사용된다.

(4) 선별·분리(separation)

파·분쇄품은 여러 가지 선별기에 의해 분리된다. 선별 방법은 크기, 중력/비중, 자력, 정전기, 광학(근적외선, near infrared ray) 등이 이용된다.

크기 선별은 체(sieve)가 사용되며 금속의 입자크기와 모양은 플라스틱이나 세라믹과는 다르기 때문에 금속 회수를 위해서는 먼저 회전 스크린이나 삼중망(trammel)이 사용된다.

중력 선별로는 각기 다른 비중을 가진 물질이 분리되는데 입자에 작용하는 외력으로 물이나 바람을 이용하기도 하며 일부 흐르는 유체의 비중 차이를 이용하여 침강시키는 습식선별도 이용된다.

자력선별은 자성 여부를 이용하여 정적 자기장(static magnetic field, 이하 자기장) 내에서 자성을 띄는 광물 입자와 비자성 물질을 분리한다. 1차 파쇄된 후 컨베이어 벨트로 이송될 때 자력 선별기를 통과하면 철, 강철, 니켈 등 자성 물질과 비자성 물질인 구리, 유리, 알루미늄, 우레탄, 플라스틱 등이 분리된다. Veit 등(2005)은 6,000~6,500가우스¹⁶⁾로 철, 니켈 같은 철자석(평균 함유량: 철 43%, 니켈 15.2%) 원소를 분리하는 과정에서 자석 분획에 상당한 양의 구리가 불순물로 있는 것을 확인하였다. 이 공정에서 작업자는 자기장에 노출될 가능성이 있으나 폐전기전자제품 재활용 분리 공정에서 자기장을 측정할 사례가 보고된 것은 없다. 작업자의 자기장 노출과 관련한 연구는 대부분 MRI(magnetic resonance imaging) 사용과 관련한 것이나(Delmas 등, 2017; Delmas 등, 2018; Sannino 등, 2017; Stuart 등, 2007).

정전기 선별은 전도성(또는 전기저항성) 물질과 비전도성 물질을 분리하는

16) Gauss, G: 자기장의 CGS 단위로 국제단위계(SI)로는 테슬라(T)를 쓰며 $1\text{G}=10^{-4}\text{T}$ 임

것으로 와전류(Eddy current) 선별이 대표적이다. 와전류 선별은 자성체가 아닌 비철금속에 와전류를 유도하여 이때 발생한 자기장으로 혼합물 속에 섞여 있는 비철금속이 선별된다. 근적외선 선별은 주로 플라스틱¹⁷⁾을 분리하는데 유용하다.

(5) 포장(packaging)

분리품은 각각 포장되어 철, 비철금속, 플라스틱 등 재생산에 필요한 원료로 제공되거나 사용 가치가 없는 분리품은 소각 또는 매립되는 등 최종 폐기처리된다. 이 공정에서도 소음과 분진이 발생할 수 있으며 오염방지를 위해 분진제거장치(사이클론, 집진기 및 공기청정기 등)가 사용된다.

2) 화학적 재활용 공정

화학적 재활용은 화학반응을 통해 폐기물인 중합체를 그 단량체나 다른 유용한 화학물질로 만드는 것이다. 대표적인 화학적 재활용 기술은 열분해(pyrolysis), 가스화(gasification), 초임계 액체(supercritical fluids)를 사용한 탈중합화(depolymerization), 수소 용해성 분해(hydrogenolytic degradation)로 유기물과 금속류를 분리할 수 있다.

실험실 수준에서 인쇄회로기판을 대상으로 한 실험에서 고순도의 금속을 얻기 위해 열분해 과정(산소 없이 가열)을 적용하였으나 불확실성과 오염 문제 때문에 현장적용은 못했다(Zeng 등, 2012).

화학적 재활용 공정의 주요 목적은 중합체를 화학반응의 원료나 연료로 바꾸는 것으로 브롬화 난연재를 단량체로 변환시키며 잔류물에 남은 금속을 빼

17) 분리가능한 플라스틱의 종류: PET, polyethylene terephthalate; PS, polystyrene; PP, polypropylene; PVC, polyvinyl chloride; ABS, acrylonitrile butadiene styrene; PA, polyamide; PC, polycarbonate; PBT, polybutylene terephthalate; PU, polyurethane

낼 수 있는 장점이 있다. 비금속 분획의 화학적 재활용은 모든 유가 원소를 최대로 활용할 수 있으며 비금속 분획에 함유된 모든 유해·독성성분을 제거하는데 가장 효과적인 방법이다. 열분해 과정에서 유기물은 연료로 사용할 수 있는 저분자량 산물이나 가스 등으로 분해되며 주로 금속류나 유리섬유 같은 무기 성분들은 변하지 않고 고체 잔류물에 남으며 이 금속 분획은 전통적인 제련공정이나 금속 야금을 거쳐 회수된다.

야금 공정에서 금속은 열(건식야금, pyrometallurgical process)에 의해 용융되거나 액체(습식야금, hydrometallurgical process)에 의해 용해되어 화학적 또는 금속학적 특성에 따라 분리된다.

제련으로 알려진 건식야금은 폐전기전자제품에서 금속을 회수하는 전통적인 방법으로 사용되었다. 습식야금의 주요 단계는 고체 물질을 산, 시안(cyanides) 또는 부식성 침출물로 만들고 이 용액으로부터 금속이 분리되고 농축된다. 침출 용액은 황산-과염소산, 왕수, 티오우레아(thiourea), 시안, 질산, 수산화나트륨(NaOH), 염산 등이 사용된다.

(1) 건식(열) 처리

건식/열 방법은 폐전기전자제품에서 금속을 회수하는 전통적인 방법으로 고비용의 에너지 집약적 공정이다(Sun과 Nan, 2007; Gourishankar 등, 2012). 이 공정은 주로 비철금속을 회수하기 위해 선택적 가스의 존재 하에 회화(incineration), 플라즈마 아크 로, 용광로, 고온 소성이 포함된다. 건식야금 처리의 주요 장점은 어떤 형태의 스크랩이라도 사용할 수 있으며 전자 스크랩을 원료의 일부로 사용할 수 있다는 것이다. 단점은 많은 양의 슬래그가 발생되고 귀금속은 소실되며 알루미늄과 철은 회수하기가 어렵다. 건식야금은 금속 흡(특히 용점이 낮은 금속인 수은, 납, 카드뮴)을 발생시킬 수 있다.

보통 가소(calcining)¹⁸⁾, 배소(roasting)¹⁹⁾, 제련, 정련 등을 하나 또는 그 이

상으로 범주화된다. 가소는 shaft furnace, rotary kilns, fluidized bed reactors 등의 로에서 수행된다. 배소는 산화, 환원, 염소화, 황화 및 열-가수분해(pyrohydrolysis) 반응 등을 포함하는 열 가스-고체 반응으로 금속황화물 광석의 산화에 가장 보편적으로 적용된다.

제련은 적어도 1가지의 산물이 용융 상(molten phase)인 열 반응을 수반한다. 이때 금속산화물은 탄소를 형성하는 환원제(코크 또는 석탄)로 가열되어 정련된 금속을 남기고 산소는 이산화탄소로 배출된다. 최근 이산화탄소 배출이 온실효과 때문에 문제가 되고 있다. 제련은 보통 금속의 융점 이상의 온도에서 진행되지만, 함유된 광석과 다른 물질에도 상당히 영향을 받는다. 정련은 열처리를 통해 불순물을 제거하는 공정이다. 이 과정에서 화합물의 분해, 환원 또는 기화 등 여러 가지 반응이 일어난다. 폐전지에서는 주로 수은, 아연 또는 카드뮴을 기화시키기 위한 단계이다.

일본 스미토모 금속광업(Sumitomo Metal Mining Co., LTD)은 회수된 폐기물을 이용하여 잉곳을 얻는 재활용 기술을 독자적으로 개발하였으며 건식 산화 환원법을 활용하였다(Jakobsson 등, 2016).

니켈-카드뮴전지의 재활용은 카드뮴의 증류(distillation)에 기반을 둔 전형적인 건식방법이 사용되며 환원제(보통 탄소-기반)가 사용되기도 하고 일반적으로 900℃, 진공에서 수행된다. NiMH 전지에도 이 방법이 적용되지만, 이때는 니켈만 회수되고 이 전지에 함유된 희토류는 잃게 된다.

인광체의 경우, 주요공정은 할로젠화로 이 과정에서 가스상 배출물로 염소가 방출될 수 있어 현재로서는 제한적이다. 폐형광등에는 천연광물에서보다 더 많은 희토류가 함유되어 있고 유로퓸, 터븀, 이트륨 생산량의 70% 이상이 인광체에 사용되므로 폐형광등으로부터 희토류를 회수하는 것은 잠재력이 매우 크지만,

18) 광석 원료 등을 고온으로 가열해서 화학적으로 결합해 있는 수분이나 유기물질(이산화탄소 등)과 같이 휘발성 또는 가열성 물질을 분해·제거하는 것

19) 광석을 쉽게 환원처리하기 위해 금속을 그 녹는점 이하의 고온으로 가열하여 물리·화학적 성질을 변화시키는 것

현재는 유리, 알루미늄 캡, 수은만이 재활용되고 있을 뿐 인광체 잔류물은 매립되거나 저장 처리된다.

소형 전기전자제품은 구리, 아연뿐 아니라 금, 탄탈럼, 코발트 등을 함유하고 있으며 일본 JOGMEC(Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)에서는 이들 폐기물로부터 금속류를 회수하기 위한 시험을 수행하여 2012년에는 탄탈럼과 코발트를 회수하는 기술을 개발하였다(JOGMEC, 2019). 2013년 3월, 후쿠오카 현은 산학연 협동으로 폐기된 형광등으로부터 희토류를 추출하여 새 형광등에 재사용하기 위한 희토류 회수시설을 설치하고 이 프로젝트 개선을 위해 형광등에 사용되는 5종의 형광체 중 가장 높은 비율을 차지하는 산화이트륨을 먼저 추출한 바 있으며 히타치, 파나소닉, 도와 등 기업들도 희토류가 포함된 자석, 전지 등으로부터 재활용하기 위한 연구개발을 진행한 바 있다(JFS, 2019).

자성체 제조에 투입된 희토류의 약 20~30%는 스크랩 형태로 제조 공정에서 회수되지만, 혼다자동차는 2012년 4월 하이브리드 자동차에서 NiMH 전지에 사용된 제품으로부터 희토류를 재활용하기 시작했으며 이는 희토류에 대한 최초의 재활용 시도가 될 것이며 약 80%의 높은 회수율로 추출이 가능하며 순도도 유지된다고 하였다(JFS, 2019).

(2) 습식(침출) 처리

저비용의 습식방법은 수익성 있는 금속을 추출할 때 금속성 철(metallic ferrous) 분획 재활용에 주로 적용된다. 화학적 물리적 성질이 비슷한 원소를 분리하는데 효과적이며 상대적으로 소규모일 때 적용된다. 초기에는 금, 은, 알루미늄의 제련에 적용되었으나 20세기 중반 이래 비약적으로 발전하여 우라늄, 텅스텐, 니켈, 아연 등에도 널리 적용된다. 보통 건식방법에 비해 더 복잡하고 거쳐야 하는 단계가 많지만, 효율, 융통성, 금속 선택성, 에너지 절약 등의 측면에서 선호되는 방법이다. 정광에서 개별 산화희토류를 추출하는데 습식방법이

사용된다(National Risk Management Research Laboratory, 2012).

추출야금(extractive metallurgy) 분야의 기술로 원광, 정광, 재활용 재료 또는 잔류물질로부터 금속 또는 금속화합물을 얻는 기법으로 물, 수용액 또는 유기용매와 반응시켜 화학적 또는 전기화학적 방법을 사용한다. 습식방법은 용매의 비등점보다 크게 넘지 않는 온도 범위에서 용매에 침출시켜 이온 형태로 만든 후 환원하여 금속을 얻는다. 이 경우 연료 사용은 거의 없으나 침출용액을 만들 때 특수약품이 필요하다. 전기-산화 반응(electro-oxidation)을 사용하면 산의 소모량을 줄일 수 있으며 손실 없이 유가금속을 회수할 수 있다. 액체 화학물질로 추출하기 때문에 많은 양의 액체폐기물과 슬러지가 발생하므로 처리하는데 주의해야 하며 이로 인한 환경파괴를 예방하기 위해서 상당한 비용이 요구된다(Potysz 등, 2018).

습식방법은 3단계로 진행된다. 침출 → 용액 농축 및 정제 → 금속 또는 금속화합물 회수이다.

침출 단계에서는 용액 내로 금속을 분리하는 것으로 pH, 산화-환원 전위차, 킬레이트제 존재 여부, 온도 등이 영향을 미친다. 침출 후 침출액에서 금속 이온을 농축하고 원하지 않는 금속 이온은 제거하여야 한다. 이를 위해서는 침출, 시멘트화, 용매 추출, 이온교환, 가스 환원, 전해 채취 등을 사용한다. 니켈 침출액을 정제하는 방법으로 구리는 황화물로 침전된다. 시멘트화는 산화-환원반응으로 금속 이온이 금속으로 전환되는 과정이다. 전통적으로 구리 이온 용액에 철 스크랩을 더하면 철은 용해되고 금속 구리가 쌓인다. 귀금속 분리에 고가의 전기분해(electrolysis)를 적용하면 전해 채취는 특히 선택적이며 용액으로부터 전기도금으로 금을 얻을 수 있다. 마지막으로 금속 회수의 전통적인 방법은 전기분해, 가스 환원, 침전 등이 적용된다.

최근 코발트와 리튬-이온 전지 침출을 위한 산 시약으로 환경친화적인 구연산과 말린산(H_2O_2 존재하에)이 사용되었다(Li 등, 2013).

인광체에서 희토류를 회수하는 연구에서, 황산을 사용하였을 때 침출물은 이

트륨과 유로퓸이 각각 92% 및 98%이었으나 란타넘, 세륨, 터븀은 약간만 침출되었다고 보고하였다(Takahashi 등, 2001). De Michelis 등(2011)은 이트륨을 회수하기 위해 염산, 황산, 질산 및 암모니아를 사용하여 실험한 결과, 질산은 독성가스인 NO, NO₂ 및 N₂O를 발생시켜 제외하였으며 암모니아는 약 10%의 낮은 침출률을 보여 역시 제외하였다. CO₂를 이용한 초임계추출법으로는 란타넘, 세륨, 터븀의 침출률이 7% 미만으로(이트륨, 유로퓸은 99% 이상) 상업적으로 적절하지 않은 것으로 결론지었다(Shimizu 등, 2005). 황산과 질산의 혼합액을 사용한 가압 침출법으로 이트륨과 유로퓸을 분리할 수 있으나(Rabah, 2008) 이 방법 역시 산업적으로 적용되기에는 더 연구가 필요하다.

현재까지 폐형광등 재활용과 처리, 수은 회수에 사용되는 수많은 기법과 장비가 있지만 열 증류(heating distillation)가 가장 일반적으로 사용된다(Jang 등, 2005).

폐형광등에서 회토류의 재활용 공정은 여전히 실험실 수준으로 효과적이고 실용적인 방법이 부족하며 상업적 규모의 재활용 시설은 아직 없어 폐인광체는 주로 매립이나 저장 처리되고 있다(Schüler 등, 2011; Tunsu 등, 2011).

네오디뮴 자석(디스프로슘 포함)의 재활용 기술은 제련공정 등을 이용한 원소 형태로의 추출재생, 자석합금 원료로 재사용 및 회수된 금속을 다른 용도로 재사용하는 방법 등이 있으며 산화물이나 불화물로부터 전통적인 용융-염 전기분해(molten-salt electrolysis)나 열 환원(thermal reduction) 공정에 의해 회수된다. 그러나 폐전기전자제품에서 회수한 자석은 강산을 사용한 습식방법으로 용해하기 때문에 다량의 폐액이 발생하여 환경 문제를 일으킬 가능성이 매우 높다. 또한 탈자(demagnetise)를 위해서는 보통 300~350℃로 가열하며 고온이 유지되는 경우 자석 주변의 결합제(bonders)나 접착제들이 녹아 증기를 포함한 탄화수소 가스류가 배출될 수 있다. 니켈- 또는 알루미늄-크롬산염 도금은 고체 스크랩에서 생산된 NiFeB 소결자석의 자석특성에 문제를 일으키기 때문에 먼저 습식 또는 기계적 공정으로 제거하여야 한다. 그러나 현재 이 공

정은 경제적이지 않고, 따라서 거의 응용되지 않는다. 현재 개발 중인 다른 재활용 방법은 <표 11>과 같다. 이 외에 수많은 재활용 방법은 전 세계적으로 소비자 사용 후 영구자석에 대해 아직 상용화되어 있지 않다(Schüler 등, 2011; Tanaka 등, 2013).

이외 금속 회수공정은 연구가 진행되고 있는 생물학적 습식처리(biohydrometallurgical leaching process) 공정이 있다. 금속을 추출하기 위해 미생물을 이용하는 미생물용출(biolcaching)로 이 방법은 유기 약산(weak organic acids)을 생성함으로써 현재 사용되는 용출액인 무기 강산(strong inorganic acids)의 사용량을 줄일 수 있으며 환경 부담이나 폐액 처리 등에도 도움이 될 수 있다. 그러나 이 방법은 저등급의 원광이나 정광에서 구리와 금을 회수하는 대안 방법으로 정립되었으며 현재 금속을 함유한 다른 폐기물 처리에도 적용할 수 있는지에 대한 연구가 진행 중이다. 인쇄회로기판 스크랩을 미생물용출하는 동안 미생물 성장에 필요한 성분으로 인한 독성 영향과 느린 반응 속도가 단점으로 제기되었다(Cui와 Zhang, 2008).

폐전기전자제품 재활용을 위한 수거 및 1차 처리인 물리적 단계와 2차 처리인 화학적 단계(제련·정련)의 각 공정에서 노출 가능한 유해·위험요인을 정리하면 <표 12>와 같다.

<표 11> 영구자석 스크랩($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 재활용 방법

재활용 방법	공정 특성	비고
수소 탈산(HD, Hydrogen decrepitation)	HD, 제트 밀링, 정렬 및 압착, 진공 소결, 자석 재제조(1%의 새로운 네오디뮴 첨가)(Zakotnik 등, 2009)	디스크 드라이버의 자석용 시험 공장 (Zakotnik 등, 2009); 오염된 스크랩은 제련 단계가 더 필요함
전체 침출	산 침출 및 철-염소, 네오디뮴-산화물 및 붕소-산 생성(더 자세한 정보 없음)	독일 Loser Chemie GmbH 시험 공장
선택적 배소-침출	산화적 배소, 황산 또는 염산을 사용한 네오디뮴산 침출, 침전 $[\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3]$ 또는 네오디뮴 용매 추출(Tanaka 등, 2013) 염화암모늄으로 염화($T=350^\circ\text{C}$), 물에서 NdCl_3 선택적 용해(Itoh 등, 2009)	실험실 수준
용융상(molten phases)에서의 선택적 추출	용융 염: 염화마그네슘($T=1000^\circ\text{C}$) (Shirayama 등, 2008) 용융 금속: 마그네슘(Xu 등, 2000; Okabe 등, 2003); 은 (Takeda 등, 2004) 슬래그(산화물); $\text{LiF}-(\text{REE})\text{F}_3$ -플럭스 (Takeda 등, 2009)	실험실 수준

<표 12> 폐전기전자제품 재활용 공정별 노출 가능한 유해·위험요인

처리 단계	공정	내용	사용 기기 또는 물질	노출 가능한 유해요인
물리적 단계	수거 및 분류	품목별 야적	덤프트럭, 사다리, 기중기 등	-중량물 작업으로 인한 근골격계질환
		-대형기기: 텔레비전, 냉장고 ²⁰⁾ , 세탁기 등 -통신·사무기기: 개인용컴퓨터, 프린터, 이동전화단말기 등 -중형기기: 전기정수기, 전기오븐 등	수작업 또는 덤프트럭, 사다리, 기중기, 지게차 등	-단순반복작업으로 인한 근골격계질환
	해체/분해	-케이스, 패널, 기판, 냉매 포집, 컴프레서, 팬, 모터 등 각 제품을 구성하고 있는 부품	해머, 칼/끌, 절단 도치, 천공기(drilling machines), 동력 프레스(power press), 회전톱(circular saw),	-기계에 의한 신체 상해 -LCD의 백라이트에 함유된 수은, CRT에 함유된 납 -냉장고에 함유된 냉매, 오일 등 화학물질
	파·분쇄	-1차, 2차 파쇄 및 분쇄	분쇄기(crusher/pulverizer)	-분진 및 소음
	선별	-1차 자력 선별기(철)과 비철(구리, 알루미늄, 우레탄, 플라스틱 등)	공기분급기 ²¹⁾ , 자력 선별기, 정전기 선별기, 체 등	-분진 및 소음 -전자기장

<표 12> 폐전기전자제품 재활용 공정별 노출 가능한 유해·위험요인 - 계속

처리 단계	공정	내용	사용 기기 또는 물질	노출 가능한 유해요인
화학적 단계 (제련·정련)	습식 침출	산 침출/용해	염산, 황산, 질산	산·알칼리
	제련	알칼리 침출	알칼리(Na_2CO_3 in H_2O_2),	
	건식 용해 제련	2000℃ 이상의 고온에서 슬래그로 용융	소성로, 교체-가스 반응 전기아크 로(electric arc furnace)	고열, 금속 흡

20) 냉매회수(전처리) 과정을 거쳐 냉매는 별도로 분리/회수됨

21) air classifier: 공기 중 교체 입자의 비중 차로 생기는 침강속도 차이를 이용하여 침강입자(굵은 입자)와 상부로 날아가는 작은 입자로 분리하는 기계

5. 폐전기전자제품 수집 및 재활용 사업장 조사

1) 폐전기전자제품 수집 및 재활용 사업장 실태

전기전자제품은 생산자가 회소금속 정보, 제품인증 등을 받은 후 소비자에게 판매하고 사용 후 수명을 다한 제품은 수거되어 재활용 단계를 거친다[그림 15].



[그림 15] 전기전자제품의 재활용 흐름도

(출처: 김 범성, 2018)

「자원순환법 시행령」에서 회수·인계·재활용의무 대상이 되는 전기·전자제품 등²²⁾의 제품군은 대형기기, 통신·사무기기, 중형기기, 소형기기로 구분되어 있다. 각 제품군의 대상 제품은 모두 27종으로 다음과 같다.

- 1) 대형기기 5종 : 텔레비전, 냉장고, 세탁기, 에어컨디셔너, 자동판매기
- 2) 통신·사무기기 5종 : 개인용 컴퓨터, 프린터, 복사기, 팩시밀리, 이동전화 단말기

22) 제14조 본문 및 제15조의4 본문 관련 [별표 3]

- 3) 중형기기 5종 : 전기정수기, 전기오븐, 전자레인지, 음식물처리기, 식기건조기
- 4) 소형기기 12종 : 전기비데, 공기청정기, 전기히터, 오디오, 전기밥솥, 연수기, 가습기, 전기다리미, 선풍기, 믹서, 청소기, 비디오플레이어

「자원순환법 시행령」에 따라 설립된 조합은 공제회원과 사업회원으로 구분되는데 공제회원은 수입·판매업자와 제조자 등을 말한다. 조합은 환경부의 허가를 받아 분담금을 내고 이 분담금을 활용하여 조합을 운영하며 사업회원을 지원한다. 사업회원은 폐전기전자제품의 1차 처리를 담당한다.

시행령 제16조(재활용 및 회수의무이행계획서의 제출 등)에 따라 판매업자가 회수실적으로 인정받을 수 있도록 폐전기전자제품을 인계해야 하는 사업회원은 약 50개²³⁾(2019년 1월 기준)의 재활용사업자(recycler)를 의미하며 이들 회원사는 총 27종의 폐전기전자제품을 수거·처리하고 있다. 각 사업장은 연간 처리능력(예: 약 30,000톤), 월별 처리능력(예: 약 2,500톤), 일별 처리능력(예: 약 100톤)과 주요 재활용 대상품목을 명시하고 있다.

폐전기전자제품의 수집 경로는 크게 3가지로 방문수거, 판매자의 직접 회수를 통한 역회수와 비제도권 수거로 구분할 수 있으나, 현재 비제도권 수거는 상황 파악이 불가능하다[그림 16]. 방문수거 또는 역회수를 통해 가정 및 소비자가 배출하는 전기전자제품은 물류센터·수집소·지자체 집하장 또는 선별장을 거쳐 전문운반업체를 통해 각 지역 재활용센터로 입고된다.

23) 환경정보장제도(EcoAS, 전기전자제품 및 자동차재활용시스템, Eco-Assurance System of Electrical and Electronic Equipment and Vehicles)에 의한 재활용사업자로 추정



[그림 16] 폐전자제품 배출·수거·운반 흐름도
(출처: 한국전자제품자원순환공제조합, 2019b)

현재 전국적으로 12개의 권역별 재활용센터(recycling center)가 있으며 조합이 직영하는 재활용센터는 2개소로 나머지는 민간이 운영하고 있다. 재활용센터에서는 인쇄회로기판, 전지, 모터 등과 유가물(철, 구리, 알루미늄, 우레탄, ABS, 플라스틱 등), 폐기물 등으로 분류한 파·분쇄품을 1차 처리 업체로 공급한다.

1차 처리 업체는 재활용센터에서 선별된 부품별(수지, 철, 구리, 알루미늄, 플라스틱 등)로 재활용하거나 파·분쇄 후 이를 활용하는 2차 처리 업체에 납품한다. 재활용 가치가 없는 분리품은 폐기물로서 소각 또는 매립을 위해 다른 업체로 보낸다.

1차 처리된 부품을 활용하여 제련·정련 과정을 거쳐 금속 회수 능력이 있는 2차 처리 사업장은 국내 2개소로 확인되었다.

그 외 회토류 영구자석 제조사는 J전자, S산업과 같은 중견기업이 있다.

2) 수집소(재활용센터) 방문조사

(1) 사업장 현황

당 재활용센터는 조합이 직영하는 곳 중 하나로 경기도에 소재하고 있으며 노동자 40명, 업종은 ‘금속류 원료 재생업’, 주요생산품은 ‘재생재료가공처리’이다.

수도권에서 수거된 대형 품목(냉장고, 세탁기, 텔레비전, 에어컨 등)이 입고되며, 핸드폰, 컴퓨터 모니터 등과 같은 소형품목 일부가 입고되기도 한다. 처리량은 냉장고 또는 세탁기를 기준으로 하루 약 300~500대가 물류센터로부터 입고된 후 각 품목별로 적재된다.

(2) 작업공정

공정 : 집게크레인 등을 이용한 수거·상차·적재 → 하차 → 분류·입고 → 투입 → 전처리 → 파·분쇄 → 선별·분리·압축 → 분리품별 보관·저장 순으로 공정이 진행된다. 공정의 개요는 [그림 17]과 같으며 <표 13>과 같은 순서로 작업이 진행된다.



[그림 17] 냉장고의 재활용 공정 개요
(한국전자제품자원순환공제조합 소개 자료)

수거·상차·적재, 하차, 분류·입고, 투입공정은 주로 수작업으로 진행되며 투입된 폐전기전자제품에서 전선, 고무, 플라스틱, 모터, 기관 등이 부품별로 해체되고 이후 과정은 컨베이어를 통한 자동화로 진행된다.

적재된 폐전기전자제품은 컨베이어 벨트를 통해 이동하며 전처리 과정(냉매, 오일 등 별도 회수 처리)을 거친 후 부품별로 파·분쇄기에서 1차 및 2차 처리된다. 1차 파쇄는 입자크기가 상대적으로 크며 이를 2차 분쇄하여 목적하는 크기의 입자를 얻는다. 이 과정에서 소음 및 분진이 발생하며, 화학물질은 사용되지 않는다. 파쇄된 폐전기전자제품은 각종 선별기에 의해 철, 스테인리스, 비철 금속(구리, 알루미늄)과 우레탄 고형연료, 플라스틱(PP/PS, ABS 등)으로 분리되어 포장한 후 1차 및 2차 처리업체 등으로 출하된다.

중소형 전자제품의 경우는 재질이 매우 다양하고 색상 또는 크기가 달라 재활용공정의 자동화가 어려워 대부분 수작업으로 진행되고 있다. 선별 부품은 철·알루미늄(자력에 의해 분리), 구리 등으로 이 단계에서도 화학물질은 사용되

지 않는다.

(3) 작업환경측정결과

2018년 상반기 작업환경측정결과에 의하면 5개의 공정에서 소음[측정최고치 89dB(A)]과 2개 공정에서 기타분진(유리규산 1% 이하)이 측정($0.0027\text{mg}/\text{m}^3$)되었으며 화학물질은 사용하지 않는 것으로 확인되었다.

최근 2년간 전 공정 측정결과, 2회 연속 노출기준 미만이었으며 최근 1년간 작업장 또는 작업공정의 신규가동이나 변경은 없었다.

<표 13> 리사이클링센터의 처리 공정(냉장고의 예)

공정	입고	적재·분류	전처리/선별	1차, 2차 파·분쇄	분리	포장, 출하
사진						
노출 가능 유해인자	중량물 작업	중량물 작업	MSDs, 소음	소음, 분진	소음, 분진	중량물 작업
비고	300~500대/일 (냉장고 또는 세탁기 기준)	냉장고, 세탁기 등 품목별 적재	냉매(별도 회수) 컴프레서, 가스켓, 선반, 전선, 기판 등	1차 파쇄, 2차 세분, 자력 선별	철, 구리, 알루미늄, 우레탄, 플라스틱(ABS, PS, PP) 등	

3) 1차 처리 사업장 방문조사

(1) 사업장 현황

충청남도에 소재한 당 사업장은 노동자 13명, 업종 ‘혼성 및 재생 플라스틱 소재물질 제조업’으로 주요생산품은 ‘재생플라스틱’이다. 5~6곳의 대형 재활용 센터로부터 분리된 냉장고용 가스켓을 공급받아(재활용센터 당 약 20~30톤 입고/월) 처리하고 있다. 가스켓 투입공정과 포장 작업에 작업자가 있으며 파·분쇄, 세척, 분리 공정은 기계에 의한 자동화로 진행된다.

(2) 작업공정

공정 : 가스켓 입고 → 투입 → 파·분쇄 → 세척 → 고무자석과 PVC 분리 → 포장(단위 2톤) 및 출하 과정을 거친다<표 14>.

투입된 가스켓은 파·분쇄 과정과 세척과정을 거쳐 물리적으로 고무 자석과 PVC를 분리한다. 분리·포장(약 2톤씩)된 PVC와 고무 자석은 2차 재활용업체에 납품된다.

가스켓의 고무 자석과 PVC 분리를 수작업으로 하면 완벽하게 되지만 소요 시간, 노동력, 2차 재활용 가능성 등 경제성을 고려할 때 현실적으로 불가능하여 기계 작업(특히 출원)으로 전환하여 진행하고 있었다. 분리된 고무 자석은 잔여물로 붙어 있는 PVC 때문에 더 이상의 재활용공정은 없으며 최종폐기물로서 매립 또는 소각을 위해 폐기물처리업체로 보내지는 것으로 확인되었다.

투입, 파·분쇄과정에서 분진과 소음이 발생하며 화학물질은 사용하지 않는 것으로 확인되었다.

(3) 작업환경측정결과

2018년 상반기 작업환경측정결과에 의하면 3개 공정에서 소음만 측정되었고 [측정최고치 102.2dB(A)] 화학물질은 사용하지 않는 것으로 확인되었다.

최근 2년간 전 공정 측정결과, 2회 연속 노출기준을 초과하였으며 최근 1년간 작업장 또는 작업공정의 신규가동이나 변경은 없었다.

<표 14> 1차 처리 사업장의 가스켓 처리 공정

공정	적재	입고	투입	과/분쇄- 세척-탈수-건조	분리	포장, 출하
사진						
노출 가능 유해인자	중량물 작업	-	소음, 분진	소음, 분진	소음, 분진	중량물 작업
비고	수집소에서 분리된 냉장고 가스켓	투입전 가스켓			고무자석과 PVC	2톤 단위 포장, 고무자석은 조각 또는 배립처리 폐기물업체로 보냄

4) 2차 처리 사업장 방문조사

(1) 사업장 현황

인쇄회로기관 등 폐전기전자제품 부품에서 회소금속을 회수할 수 있는 능력을 갖춘 사업장으로 울산에 소재하며 노동자 1,200명, 업종은 '금속재료·철강·요업'이다. 주요생산품은 기본금속(구리, 납, 아연), 귀금속(금, 은), 회소금속(인듐, 니켈, 비스무트, 팔라듐, 안티몬, 셀레늄, 백금, 카드뮴, 텔루륨, 코발트) 및 기타 액체 알곤, 수은, 황산, 발연황산(olcum) 등이다.

폐전기전자제품 약 30~40톤/일, 원광 약 22,000톤/일을 투입하여 기본금속을 제련·정련하며 투입재 중 폐전기전자제품이 차지하는 비율은 0.2% 미만이다.

(2) 작업공정

작업공정은 크게 전처리 공정과 제련공정으로 이루어진다[그림 18]. 각 처리 공정 중 발생 되는 분진은 방진설비 및 집진장치를 거쳐 원료로 재투입된다.

해체·투입 공정은 공장 외부에서 굴삭기를 이용하여 먼저 폐전기·전자부품을 부순 후 공장 내부의 자동라인으로 투입한다. 이후 전처리 공정은 자동화로 진행된다.

전처리 공장: 입고된 재료 및 원료는 적재 → 해체·투입 → 파·분쇄(crusher) → 파·분쇄품 배출 → 이송 → 입자 크기별 분리(rotary screen: 10mm<, 10-30mm, >30mm) 등의 과정(>30mm 입자는 재투입)을 거치며 자력 선별기로 철 분리, 와전류 분리기로 알루미늄을 분리하며 이 과정에서 기타 고철류, 플라스틱류 등이 분리된다<표 15>.

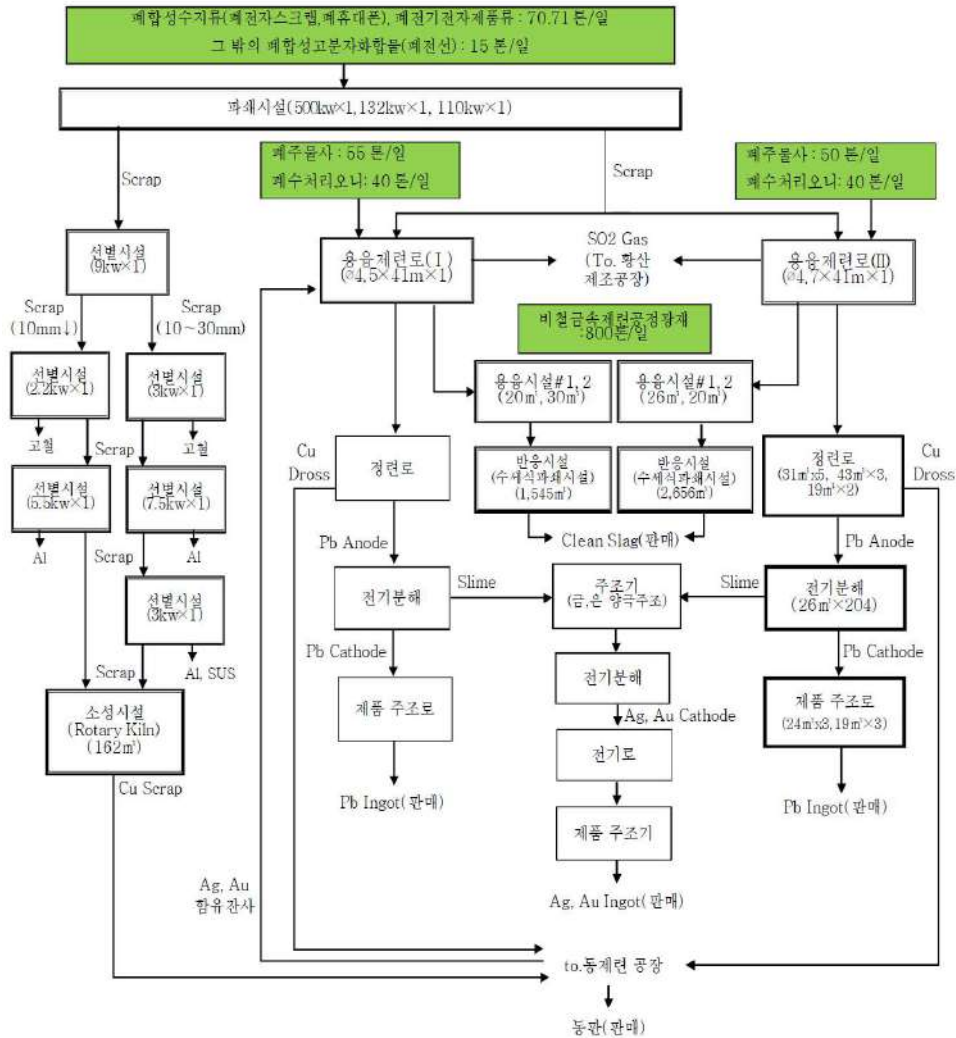
소성로 공장: 분쇄된 고온 입자는 원광과 함께 소성로 → 2차 연소로 → 소성품(quencher, (<200℃)) → 적치(speiss 생성) 과정을 거친다<표 16>.

소성로를 거친 입자(소성품)에는 금속류가 다수 함유되고 있으나 인쇄회로기

판 스크랩에서 희소금속만을 회수하기 위한 별도의 재활용공정은 없다. 수작업으로 진행되는 공정은 없으며 기계에 의한 자동화로 진행되고 있다. 다만 각 공정에서 문제가 발생하거나 관리 차원에서 가끔 작업자가 점검을 위해 현장을 돌아다닌다.

소성품에서 추출하고자 하는 금속의 종류에 따라 반응시키는 화학물질(산 또는 알칼리 등의 첨가량 또는 비율 등)이나 공정이 달라지지만(이는 기업비밀에 속함) 금속류 제련공정의 전체적인 흐름은 유사하다. 기본금속의 정련 과정을 거치면서 생성되는 중간부산물을 쌓아두었다가 필요에 따라 희소금속 추출은 연 1회 수행하거나 수년간 수행하지 않는 경우도 있다. 즉 폐전기전자제품에서 희소금속의 추출, 정련 공정은 일상적으로 수행되지 않는다.

구리의 경우, 황산을 사용하여 황산구리를 만든 후 전기분해를 거쳐 동판으로 얻는 것으로 확인되었다.



[그림 18] 폐전자 스크랩, 폐휴대폰 등 처리 공정도의 예

(3) 작업환경측정결과

공정별 작업자의 소음, 분진 또는 화학물질(금속류, 산·알칼리 등) 노출 등에 관한 작업환경측정결과는 확인할 수 없었다. 다만 ‘납 특수건강진단 대상자’는 약 700명으로 특히 납 노출 노동자는 수시로 모니터링을 통해 작업관리가 수행된다고 하였다.

현장 조사를 통해 구리 제조 공정에서 다량의 황산이 사용되는 것을 확인하였으나 작업자는 없었으며 귀금속 공정의 경우, 침출용액으로 알칼리를 사용하는 것으로 알려졌지만 알칼리의 종류는 확인되지 않았다(현재 외주로 수행 중인 공정으로 사용하는 화학물질의 종류, 양 등은 기업 비밀에 해당한다고 함).

<표 15> 금속제련 사업장의 전처리 공정

공정	적재	해체·투입	파·분쇄	파·분쇄품 분리 배출		적치·보관
사진						
노출 가능 유해인자	중량물 작업	-	분진, 소음	분진, 소음		분진
비고	폐전자제품 약 30~40톤/일 (원광 투입량의 0.2%의 미만)	해체된 재료는 외부 컨베이어 벨트를 통해 투입	자동화(기계)에 의한 1차, 2차 분쇄	입자크기별 분리(>30mm 재투입) 자력선별기, Eddy current 분리기: Fe, Al		금속회수를 위한 소성로 공정 투입전 보관

<표 16> 금속제련 사업장의 소성로 공정 - 구리 제조의 예

공정	소성로·2차 연소로	소성품 적치		금속 제련·정련 공정투입	반응조	세척·출하
사진						
노출 가능 유해인자	고열, 분진	분진		분진	황산	중량물작업
비고	투입된 분쇄입자는 약 800℃에서 3시간 정도 소성된 후 2차 연소로로 진행	금속제련 공정에 투입되기 전 소성품		소성품과 기타 슬래그 등 혼합물 투입	5~6개의 황산 반응조에서 반응, 전기분해 등	반응이 끝난 동판 완성품(약 1500kg/묶음)

5) 희토류 영구자석 제조사업장 방문조사

(1) 사업장 현황

대구에 소재한 당 사업장은 노동자 70명으로 이 중 생산직은 3명이다. 업종은 ‘그 외 기타 전기장비제조업’으로 주요생산품은 영구자석 및 하드디스크드라이브용 VCM(voice coil motor)이다.

(2) 작업공정

영구자석을 만들기 위해서는 채광 → 정광 → 산 침출 → 첨가제 투입 → 금속화 → 분쇄 → 성형 → 소결 → 가공·표면처리 → 착자 → 완성품 단계를 거친다.

채광된 상태에서는 희토류의 분리가 어렵기 때문에 정광 과정을 거친다. 즉 흙을 제거한 철과 희토류가 농축된다. 산 침출(황산, 염산 등 사용)을 통해 17종의 희토류가 분리되면 첨가제를 추가하여 단일희토가 만들어진다. 산화물, 탄화물 형태의 단일희토는 금속화 과정을 거쳐 단일금속이 된다.

단일금속과 철 등을 조합하여 합금이 만들어지면 분쇄기(입자크기 약 $3\mu\text{m}$)에서 분쇄된다. 이후 진공상태에서 좌·우에서 약 2테슬라²⁴⁾의 자장을 걸어주면 입자가 일렬로 정렬된 상태의 소결품이 얻어진다. 현재 이 단계까지는 모두 중국에서 진행되며 국내에서는 소결품을 수입하여 영구자석을 생산하는 단계만 수행하고 있다<표 17>.

공정: 소결품 → 가공·표면처리 → 착자 → 완성품이 된다.

소결품은 필요한 크기로 절단, 랩핑한 후 표면처리(코팅)를 한다. 절단, 랩핑 공정에서는 절삭유가 사용되며 코팅은 니켈 도금이다. 5~10g의 자석에 다시 약 3테슬라(최소 2테슬라)의 자력을 입히면(20msec 소요) 완성품이 된다.

24) 테슬라(T): $1\text{ m}^2\text{당 } 1\text{ Wb(weber)}$ 의 자속밀도로 $1\text{ T}=\text{Wb}/\text{m}^2=10^4\text{ G(Gauss)}$ 이다.

소결품은 주로 네오디뮴을 기반으로 한 영구자석이다. 이를 고온에서 사용하기 위해서는 디스프로슘을 첨가(5~6%)하기도 하지만 디스프로슘 자원이 부족하고 가격은 네오디뮴의 약 4배이다.

(3) 작업환경측정결과

당 사업장은 연구와 개발부서 근무자가 대부분으로 생산직 노동자는 3명에 불과하였으며 작업환경측정결과는 확인할 수 없었다.

슬러지를 재활용하는 자회사(노동자 6명)에서는 습식공정으로 회토류를 회수하는 것으로 알려졌다.

<표 17> 희토류 영구자석 제조 공정

공정	소결품	가공	표면처리	착자	완성품
사진					
노출 가능 유해인자	-	절삭유	니켈		-
비고	5×3cm 정도로 포장된 소결품 (영구자석 재료)	소결품은 각 용도에 맞는 크기로 절단, 랩핑	니켈 도금(코팅)함	약 3테슬라(최소 2테슬라)의 자장을 걸어줌(약 20밀리초 소요)	5~10g의 영구자석

6. 국외 폐전기전자제품 재활용 작업자 안전보건 관리 및 관련 국제표준

1) 영국

안전보건위원회는 폐기물 재활용 업종과 관련한 유해·위험 요인을 제시하고 재해예방지침을 발표하였다. 해체 공정을 위한 처리시설은 DEFRA²⁵⁾의 최소한의 요구조건에 따르도록 규정하고 있다. 이 규정에 의한 유해인자를 정리하면 다음과 같다(HSE, 2006).

(1) 액체류

냉장고, 냉동고(냉매 순환방식) 및 유압식(oil-filled) 냉각장치 같은 장비에서 발견되는 액체류는 분쇄 또는 파쇄 공정 전에 반드시 안전하게 제거되어야 한다. 이 과정에서 CFCs, HCFCs(hydrochlorofluorocarbons) 같은 오존층 파괴물질이 발생할 수 있으며 오래된 냉장고 또는 냉동고는 암모니아를 함유할 수도 있어 적절한 용기에 처리하여야 한다. 암모니아는 화재 또는 폭발의 위험이 있을 뿐 아니라 건강에도 영향을 미칠 수 있다.

(2) 스위치 또는 백라이트(back-light)같이 수은을 함유한 장치

수은은 형광등, 의료 장비, 자료 전송, 통신기기 및 이동전화기에 사용되었으며 최근 전기 및 전자장비에서의 사용은 크게 줄었고, 2006년부터는 일부 사용을 제외하고 금지되었다. 전지를 제외하고 수은을 함유한 부품은 인쇄회로기판이 있다. 따라서 인쇄회로기판을 제거하면 스위치에 함유된 수은 대부분을 제거할 수 있다.

LCD, 노트북 및 데스크탑 모니터, 플라즈마 스크린 같은 비-CRT 평면패널

25) Department for Environment, Food & Rural Affairs

스크린 폐기물이 증가하며 이들 처리에 전문적 기술이 요구된다.

수명이 다한 평면패널 처리와 재활용을 둘러싼 주요 이슈는 형광 백라이트에 포함된 수은이다. 제조사는 백라이트 당 평균 3.7mg의 수은이 함유되어 있고 37" 텔레비전에는 평균 18개의 램프가 있다고 하였다. 현재는 수은 제거를 위해 수동으로 해체하는 것이 주요 선택방법이지만 이 때문에 노동비용과 안전보건에 대해 높은 비용이 필요할 수 있다.

(3) 토너 카트리지, 액체 및 페이스트 컬러 토너

일반적으로 프린터, 팩스기 및 복사기에 있으며 토너의 비산을 막기 위해서는 전체로서 완전하게 제거해야 한다.

(4) 석면을 함유한 석면 폐기물

석면은 오래된 전기커피포트, 토스터 및 다리미 같은 가정용품에 사용되었다. 현재는 사용이 금지되었으나 20년 넘은 제품은 석면이 있을 가능성이 있으므로 주의해서 처리하여야 한다.

(5) CRTs에 함유된 납, 오염화인(phosphorus pentachloride)

형광 코팅된 유리를 제거할 때 납과 오염화인이 방출될 수 있다.

(6) 내화세라믹 섬유(RCFs, refractory ceramic fibers)를 함유한 부품

로/히터/가마 등의 라이닝에 사용되며 호흡성 RCFs는 Category 2 발암물질로 분류된다. 특히 가정용 전기제품의 단열재로는 RCFs 보다는 광물성 울이 함유되어 있다. 그러나 RCFs가 함유되어 있을 가능성이 있으면 사전에 확인하고 적절하게 처리하여야 한다.

2) 바젤협약 관련 조항

폐전기전자제품의 국가 간 이동에 관한 기술지침서(국립환경과학원, 2013)는 전자폐기물의 수집, 취급 및 처리와 같이 전자폐기물의 친환경적 관리에 대해서는 다루지 않고 있다.

그러나 “B. 전자폐기물(e-waste)에 대하여”의 8은 “(중략) 이러한 유해물질은 제대로 폐기되지 못하거나 재활용되는 경우 인체와 환경에 위험을 미칠 수 있기 때문에 이들의 친환경적 폐기물 관리를 위해 특별한 주의가 요구된다. (중략) 그러나 이 과정에서 회로판이나 케이블을 소각하고 기기를 유해 산성 물질에 세척하여 금과 같은 귀금속을 추출하는 작업에 여성과 아동의 노동을 착취하고 있으며(Schmidt, 2006), 그 결과 노동자 및 지역사회의 보건과 환경에 악영향을 미치는 분명한 증거가 확인되었다.”고 언급하고 있다. 즉 보건과 환경에 관심을 가져야 함을 언급하고 있지만, 바젤협약 자체는 재활용 공정이나 재활용 관리 등에 관한 지침서는 아니다.

3) OSHA/NIOSH

2012년 NIOSH는 전자제품 재활용 산업에서 납과 카드뮴의 직접 노출과 가정에서의 노출 가능성을 알게 되었다. 전자산업 관계자와 이러한 노출에 대해 논의하였으며 전자산업계는 NIOSH가 작업장 유해성 조사를 하도록 정보를 제공하였다. 2개 시설에서 재-판매를 위해 전자제품을 개조하거나 재사용 또는 재판매를 위해 전자부품을 제거하고 폐기물 관리를 위해 전자제품 재활용을 하였다. A시설 작업자는 재활용된 자재를 손으로 분해하거나 산업용 파쇄기로 파쇄 하였으며 B시설 작업자는 비슷한 작업을 했으나 전자부품 파쇄는 하지 않았다.

NIOSH는 2015년과 2017년에 두 시설(A시설은 15명 중 15명 참가, B시설은 12명 중 8명 참가)에서 혈중 납, 혈중 카드뮴, 공기 중 납, 공기 중 카드뮴 농

도 등을 측정하였다. A시설에서만 혈중 납 농도가 CDC 참고치($5\mu\text{g}/\text{dl}$)를 초과한 측정치가 있었으며(25%), 공기 중 카드뮴 농도는 측정치의 2%가 NIOSH-권고 OEL(occupational exposure limit, $5\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다. B시설에서는 초과한 사례가 없었다. 분쇄 작업을 하는 시설이 그렇지 않은 시설보다 금속 노출이 더 많은 것을 확인하였다.

이를 바탕으로 전자제품 재활용 사업주는 작업자의 유해 금속 노출을 평가하고 감소시키는 문서화된 예방프로그램을 유지할 것, 금속 노출을 감소시키기 위해 집에까지 금속을 가져가지 않도록 손을 철저히 씻을 것, 청결 유지 및 금속의 재분산을 막기 위해 마른 빗자루질을 하지 않도록 할 것, 분쇄 또는 해체 및 분쇄 작업 시 장갑을 끼도록 할 것, 절단 방지 장갑이나 천으로 된 장갑을 재-사용할 경우 깨끗한 내측 장갑을 제공할 것을 제안하였다(CDC, 2019).

Lundgren(2012)가 지적했듯이, 미국 EPA는 정부의 엄격한 규제와 법률 하에서 같은 양의 폐전기전자제품을 처리하는 것보다 아시아에 수출하는 것이 10배 더 싸다고 계산한 바 있다.

4) ILO

대부분의 개발도상국에서 폐전기전자제품 수거와 재활용 관련된 활동은 주로 비-공식적이며 불법적인 공간에서 수행된다. 우려되는 것은 폐전기전자제품 처리공정이 인간의 건강과 환경에 유해하며 더욱이 비공식적으로 이런 작업에 종사하는 사람들은 보통 환경친화적 관리, 산업안전보건 및 작업표준 등에 대해 전혀 알지 못하거나 훈련을 받지 못한다는 것이다.

금속이나 독성 물질에 노출되어 피부, 위장, 호흡기계 및 기타 장기에 여러 가지 질환이 보고된 바 있다(Chaturvedi와 Bhardwak, 2013; Kuchr와 Magalini, 2013). 이들은 산을 맨손으로 사용하며 적절한 기술이 없거나 안전보건 규칙을 따르지 않는다. 보호구는 거의 착용하지 않으며 분진에 대한 호흡기 보호 같은 기본적인 안전장치 조차 없다(ILO, 2014).

금속 회수를 위한 최종공정은 제련·정련 공장에서 수행되며 이를 위해서는 대규모 투자, 기반시설, 혁신적 기술과 상대적으로 숙련된 노동력이 필요하며 엄격한 관리기준 준수가 요구된다. 최근 개발도상국의 비공식 부문에서 이 공정이 수행되었으나 매우 원시적인 수준으로 작업자 건강과 환경에 위험을 초래하는 심각한 오염 사례가 인도와 중국에서 보고되었다(Wang 등, 2012).

5) 중국

중국은 전체 인쇄회로기판 시장의 약 50%를 차지하고 있으며 생산량이 가장 많은 국가이다. 자국 내에서 발생되거나 불법적으로 수입되는 총 폐전기전자제품 약 500,000톤 이상이 연간 처리되어야 하는 것으로 추정하며 전기전자제품의 평균수명이 짧아짐에 따라 이 양은 더 늘어날 전망이다. 또한, 전 세계 폐전기전자제품의 약 70%를 처리하는 것으로 추산되며 전 세계에서 가장 큰 처리장이다(Chi 등, 2011).

폐전자제품 친환경 회수율²⁶⁾은 2015년 약 60.29%로 조사되었고 이는 2014년과 기본적으로 동일한 수준이며 2013년 대비 두 배 증가한 수치이다. 폐전자제품의 친환경 반환률²⁷⁾은 19.59%로 2014년에 비해 다소 하락한 수치이다. 전자제품 품목별 친환경 회수율의 차이가 심화되고 있으며 1차 회수채널은 개인 회수자 중심(약 85% 이상)인 것이 또한 특성이다. 2016년 재활용 처리 업계 규모는 103개(처리업체)로 2017년에도 크게 변하지 않아 안정화되고 있으며 텔레비전 처리 비율은 61.4%, 냉장고, 세탁기, 룸 에어컨, 컴퓨터 등의 처리 비율은 각각 8.0%, 16.8%, 3.3%, 10.5%로 조사되었다.

폐전기전자제품의 자원으로서의 가치가 중요하기도 하지만 환경유해성으로 인해 이른바 비제도권 영역에서 수행되고 있는 회토류의 회수 등 폐전기전자제

26) 자격을 갖춘 처리기업의 실제 분해·처리량

27) 자격을 갖춘 처리기업의 실제 분해·처리량과 당해년도 판매량 비율

품 처리 대처 방안 마련이 정부의 고민인 실정이다. 2007년부터 「전자정보제품 오염방지관리법」 시행으로 EU RoSH와 WEEE 지침에 대응하고 있다. 주요 내용은 6대 유해물질 사용 통제, 환경오염 통제 및 최소화 방안으로 유해물질 관리 방안이나 작업자 건강보호 방안 등은 구체적으로 제시되어 있지 않다.

6) 국제표준

국제표준화기구는 ISO, IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기위원회), ITU(International Telecommunication Union, 국제전기통신연합)가 있다.

우리나라는 과학기술정보통신부 국립전파연구원이 ITU 표준개발을 담당하고 있으며 산업통상자원부 국가기술표준원이 ISO, IEC 표준개발을 담당하고 있다. 2012년과 2014년에 각각 ITU-T L.1100(Procedure for recycling rate metals information and communication technology goods) 및 ITU-T L.1101(Measurement methods to characterize rare metals in information and communication technology goods)의 제정을 주도하였으며(이 미혜 등, 2016), MPEG(moving picture experts group), 청소로봇, 인쇄전자, 스파크그리드, 그림표지, 교통카드시스템, 한의학, 인체치수, 온돌, 콘돔 등에 대한 국제표준화를 추진하여 성공한 사례가 있다(한국표준협회, 2019).

희토류기술위원회(ISO/TC 298)가 참조하는 기술표준은 [그림 19]와 같이 광업(ISO/TC 82), 자석합금 및 철(IEC/TC 68) 등이 있다.

ISO/IEC의 국제표준 제정절차는 일반적으로 제안단계부터 발행단계까지 6단계로 진행된다. 그전 예비단계(PWI, preliminary work item, 예비작업항목)가 있다.

(0) 예비단계

새로이 부상하는 기술 분야로 국제표준절차를 밟지 않은 예비작업항목을 기

술위원회, 분과위원회의 단순 과반수 찬성으로 승인한다. 모든 국제표준이 반드시 거쳐야 하는 의무단계는 아니다.

Liaison Committees to ISO/TC 298		
The committees below can access the documents of ISO/TC 298:		
Reference	Title	ISO/IEC
ISO/TC 82	Mining	ISO
Liaison Committees from ISO/TC 298		
ISO/TC 298 can access the documents of the committees below:		
Reference	Title	ISO/IEC
IEC/TC 68	Magnetic alloys and steels	IEC
IEC/TC 111	Environmental standardization for electrical and electronic products and systems	IEC
ISO/TC 37	Language and terminology	ISO
ISO/TC 79	Light metals and their alloys	ISO
ISO/TC 82	Mining	ISO
ISO/TC 132	Ferroalloys	ISO
ISO/TC 207	Environmental management	ISO
ISO/TC 207/SC 5	Life cycle assessment	ISO

[그림 19] ISO/TC 298이 참조하는 관련 기술표준

(1) 제안단계(NWIP/NP, new work item proposal/new proposal, 신규작업항목/새로운 제안)

관련 기술위원회나 분과위원회에서 회의를 통해, 또는 3개월간 서면투표를 통해 승인하는 단계로 해당 위원회의 투표에 참여한 P회원²⁸⁾ 과반수이상이 찬

28) ISO 정회원(member body)은 각국의 표준화 분야 대표적 국가표준기관으로 2008년 12월 106개국인 정회원(우리나라는 기술표준원이 정회원으로 활동)이며 P(primary, 투표권 있음) 또는 O(observer, 투표권 없음) 회원의 지위 중 하나를 선택하여 ISO 표준제정 투표권을 가짐. 그 외 투표권은 없으며 일부 문서만 받아 볼 수 있는 통신

성하고 4개국 또는 5개국 이상이 표준개발에 적극적인 참여의사를 밝혀야 신규 작업항목이 승인된다. 항목이 승인되면 중앙사무국에서 표준의 고유번호를 부여한다.

(2) 준비단계(WD, working draft, 작업초안)

ISO/IEC Directives Part 2-Rules for the structure and drafting of international standards에 따라 국제표준의 작업초안을 작성하는 단계이다. 작업초안은 주로 해당 위원회 산하 각 실무그룹을 구성하여 프로젝트 리더 또는 프로젝트 에디터가 주관하여 작성하고, 실무그룹 또는 해당 위원회 내에서 회람을 거쳐 의견을 수렴한다.

(3) 위원회단계(CD, committee draft, 위원회 초안)

위원회 초안에 대한 해당 위원회 회원 간의 합의가 이루어져야 하는 단계이다. 합의에 도달할 때까지 위원회 초안은 의견수렴을 위한 회람이나 투표를 한다. 위원회 초안에 대한 최종합의의 판단은 해당 위원회 의장과 간사가 프로젝트 리더 및 중앙사무국과 협의하여 결정한다. 합의 판단이 어려운 경우는 위원회 회원 2/3 이상이 찬성하면 합의한 것으로 판단한다. ISO는 신속한 표준제정을 위해 기술위원회 내에서 이 단계를 자율적으로 생략이 가능하도록 권고하고 있다.

(4) 질의단계(ISO는 DIS²⁹⁾ 국제표준안; IEC는 CDV 투표용 위원회안)

위원회단계를 거쳐 작성된 DIS에 대해 중앙사무국 책임 하에 투표를 하는

회원(correspondent member, 2018년 12월 현재 40개국)과 일정기간 내에 통신회원으로서 회원자격을 전환하지 않는 경우 회원자격이 박탈되는 간행물 구독회원(subscriber member, 2018년 12월 현재 11개국)이 있음

29) DIS: draft international standard; CDV: committee draft for vote

단계이다. ISO는 투표 기간이 3개월이다. 2/3 이상이 찬성하고 반대표가 1/4 이하면 투표결과가 통과된 것으로 간주한다.

(5) 승인단계(FDIS, final draft international standard, 최종국제표준안)

FDIS를 가지고 중앙사무국에서 2개월의 투표 회람을 하는 단계이다. 투표승인 기준은 질의단계와 같다. FDIS 투표 시 접수된 기술적 의견(comments)은 IS 발간 시에는 반영하지 않고 추후 국제표준의 개정 등을 위해 해당 위원회에 전달된다.

(6) 출판단계(IS, international standard, 국제표준)

최종 감수를 거쳐 국제표준을 출판하는 단계이다. 국제표준은 영어판, 프랑스어판 또는 러시아어판을 발간할 수 있지만, 최근에는 주로 영어판만을 발간한다. 지역적인 영향력이 큰 국제표준인 경우는 스페인어판이나 아랍어판을 출판하기도 한다.

현재 ISO/TC 298(Rare earth)에서 승인된 표준은 1건도 없으며 개발 중인 표준은 11건이 있다. 이중 원소 재활용(elements recycling)에 관한 것은 3건으로 다음과 같다. ISO/DIS 22450은 “DIS registered” 단계이며, ISO/WD TS³⁰⁾ 22451과 ISO/WD 22453은 “WD(working draft)”인 단계이다.

(1) ISO/DIS 22450 Elements recycling-Communication formats for providing recycling information on rare earth elements in industrial waste and end of life products

(2) ISO/WD TS 22451 Rare earth - Elements recycling-Measurement

30) ISO/IEC의 기타 표준물

method of rare earth elements in by-products and industrial wastes

(3) ISO/WD 22453 Rare earth-Elements recycling-Method for the exchange of information of rare earth elements in by-products and industrial waste

준비단계인 작업초안 작성은 다음의 원칙에 따라 작성되어야 한다.

일반 목적은 ISO에서 발행하는 표준 문서의 목적은 국제무역 및 의사소통을 원활하게 하기 위하여 분명하고 명료한 조항을 규정하여야 한다. 이를 달성하기 위해 문서는 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

- 적용 범위에 의하여 규정된 범위 내에서 요구되는 정도로 완벽하여야 한다.
- 일관성 있고 분명하며 정확하여야 한다.
- 최첨단 기술을 최대한 고려하여야 한다.
- 향후 기술개발의 토대를 제공하여야 한다.
- 준비 과정에 참여하지 않은 자격 있는 자(qualified persons)가 이해할 수 있어야 한다.
- 문서 작성 원칙을 고려하여야 한다.

요구사항은 설계나 해설적 특성보다는 가능한 한 성능 중심으로 표현하여야 하고 개별 문서 및 관련 문서 내에서 구조(structure), 문체(style), 용어(terminology)는 통일성이 유지되어야 한다. 관련 문서 간의 구조, 절의 번호 부여방식, 유사한 규정의 표현을 위한 유사한 단어의 선택, 동일한 용어의 사용, 이미 정의된 개념에 대한 대체(유사)용어 사용 지양 등으로 통일성을 유지하여야 한다.

보건·안전 관련 요구사항들은 정부 규제를 만들거나 표준을 강제조항으로 만들 수 있으므로 표준 작성 시 우선순위에 두어야 한다. 전기전자 분야는 예외적인 경우이지만, 환경 요구사항은 통상적으로 ISO나 IEC보다는 정부 규제가

표준을 대신한다. 보건·안전 분야 요구사항을 참조하여야 할 ISO/IEC 표준은 다음과 같은 것이 있다.

1. ISO/ICE Guide 51:2014 Safety aspects-Guidelines for their inclusion in standards
2. IEC Guide 104:2010³²⁾-The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications

폐전기전자제품 재활용공정 작업자의 안전보건 관련 국제표준(안)을 제안하기 위해서는 먼저 예비단계를 거칠 필요가 있다(반드시 필요한 단계는 아님). 이후 제안단계를 거쳐 WD는 ISO/IEC Directives, Part 2-Principles and rules for the structure and drafting of ISO and IEC documents(2018)에 따라 작성되어야 하며 다음의 순서로 작성되어야 한다.

1. 제목(Title)

가능한 한 명확하고 모호하지 않게 표현해야 하며 불필요한 세부사항까지 감안 할 필요는 없다. 해당 주제가 다른 표준과 구분되어야 한다.

2. 특허권(Copyright)

해당 사항이 있는 경우, 요구사항을 작성하여 기입하여야 한다.

3. 차례(Table of contents)

필수로 요구되는 사항은 아니며 표준의 내용을 쉽게 이해하고 검색을 쉽게 하기 위해 가급적 작성한다.

차례는 절, 세부 절, 제목, 부속서, 참고문헌, 색인, 그림, 표 등의 순으로 작

32) IEC Guide 104:2010은 Withdrawn IEC Guide 104:2019

성한다.

4. 서문(Foreword)

ISO 중앙사무국이 작성하는 일반부는 책임기관, 해당 표준의 초안을 작성한 위원회의 지정과 명칭, 표준 승인 관련 정보, ISO 기술작업지침서 Part 2의 참조를 포함하여 사용된 초안 작성 회의와 관련한 정보 등이 포함된다.

해당 위원회의 간사가 작성하는 특별부는 표준의 이전 판본으로부터의 중요한 기술적 변동사항에 대한 해설을 제공하며 가능한 경우, 표준의 작성에 기여한 기타 국제기구에 대한 표시, 해당 표준이 다른 표준의 전체 또는 부분적으로 폐지 및 대체된 것에 관한 해설, 해당 표준과 기타 표준과의 관계 등의 사항이 포함된다.

요구사항이나 권고사항, 그림, 표 등이 포함되어서는 안 된다.

5. 안내문(Introduction)

선택사항이며 필요 시 특정 정보, 해당 표준의 기술적 내용에 대한 논평, 표준 작성에 대한 근거 사유 및 배경을 제공한다.

6. 범위(Scope)

표준의 주제와 관련 측면들을 명확하게 정의하여 적용 한도에 대하여 간결하게 명시하여야 한다.

7. 인용표준(Normative reference)

표준 적용을 필수적으로 만드는 방법으로 해당 표준에 인용된 참조가 된 표준의 목록을 제공한다. 원칙적으로 참고한 표준은 ISO 표준이어야 하지만, 다른 기구에서 발간된 표준도 참고가 될 수 있다.

8. 용어 및 정의(Terms and definitions)

표준에서 사용되는 특정 용어의 이해에 필요한 정의를 제공한다. 다른 표준에 이미 같은 용어가 정의되어 있는 경우, 가능하면 중복정의를 피하고 기존 표준의 정의를 활용해야 한다.

9. 기호 및 약어(Symbols and abbreviated terms)

해당 표준을 이해하는 데 필요한 기호 및 약어의 목록을 제공한다.

10. 본문(Technical text)

기술적인 내용을 작성한다.

11. 부속서(Annex)

규범적(normative) 부속서는 표준의 본문에 추가할 규정을 제공하며 정보성(informative) 부속서는 표준의 이해 또는 사용을 돕기 위한 추가 정보를 제공한다.

12. 참고문헌(Bibliography)

ISO 인용표준에 명시된 표현 규칙을 따른다. 기타 참고용 표준과 정보자료(인쇄물, 전자 형태)에 대해서는 ISO 690에 규정된 관련 규정을 따라야 한다.

13. 색인(Index)사용 편의를 돕기 위해 색인을 작성한다.

7. 폐전기전자제품 재활용 공정 유해·위험요인 관리방안 및 국제표준(안)

1) 물리적 요인 관리방안

(1) 기계 안전 및 자상, 찰과상 등 위험

일반적으로 공장에서는 기계 기구는 해머, 칼/끌, 사다리, 천공기(drilling machines), 동력 프레스(power press), 회전톱(circular saw), 기중기, 지게차, 덤프트럭 또는 전동차 등 다양한 기계·장비가 사용된다.

폐전기전자제품 재활용의 첫 번째 단계에서 수작업 해체를 위해 위 장비 일부가 사용되며 그다음 분쇄기(crushing, grinding) → 전송(conveying) → 포장(baling, compacting, palletising) 등 다양한 종류의 기계/장비가 사용된다. 각 단계에서 적합한 장비 선택 및 유지관리가 되어야 한다.

영국 HSE 기계안전지침(PUWER, Provision and Use of Work Equipment Regulations)에서는 적절한 가드/방호 장치, 표시 및 경고 장치, 시스템 조절 장치(예: 비상정지 단추), 개인보호구 지급 같은 ‘하드웨어’ 대책과 안전작업 시스템 준수, 적절한 정보제공, 특수 장비에 대한 지도 및 훈련 같은 ‘소프트웨어’ 대책에 따라 기계사용으로 인한 위험을 제거하도록 하고 있다(HSE, 2013).

해체하는 과정에서는 파손되었거나 손상 있는 부품으로 인한 베임 또는 찰과상의 위험이 있다.

(2) 근골격계질환, WRULDs(work-related neck and upper limb disorders)

무거운 물체를 들거나, 바르지 못한 작업 자세, 기존의 상해, 장시간에 걸친 반복 작업 등으로 인해 근골격계질환이 생길 수 있다. 특히 백색가전처럼 25kg 이 넘는 무거운 제품을 수작업으로 한다면 배선을 제거하기 위한 반복적인

동작으로 인해 발생할 수 있다.

영국 HSE MHOR(Manual Handling Operations Regulations)(HSE, 2012a)은 Health and Safety at Work Act(1974)에 따라 1993년 제정된 것으로 이 규정에 따르면 고용주는 위험한 수작업을 피해야 하며 피할 수 없는 경우, 이로 인한 상해 위험을 평가하고 위험을 감소시켜야 한다. 대형물체를 꼭 옮겨야 하는지, 아니면 물체가 있는 곳에서 작업을 안전하게 할 수 있는지 등이 먼저 고려되어야 하며 컨베이어, 지게차, 전동 또는 수동 호이스트 등 자동화나 기계화를 고려할 수 있다. 훈련이 매우 중요하며, 이것이 기계 보조 장치의 부족, 부적절한 작업부하량 또는 나쁜 작업조건을 상쇄할 수는 없다.

컨베이어 작업으로 인한 MSDs 위험도를 감소시키기 위해 작업대 높이, 작업 형태, 작업물체(크기, 형태, 무게, 종류 및 양 포함), 작업을 앉아서 수행할 수 있는지 등 환경을 고려하도록 하고 있다(HSE, 2012b).

‘사업장 근골격계질환 예방관리 프로그램(KOSHA Code H-65-2012)’과 ‘근골격계부담작업 유해요인조사지침(KOSHA Code H-9-2018)’에 근거하여 근골격계질환 예방관리에 활용할 수 있다.

(3) 소음

장비사용과 노출 감소를 위한 작업방법을 혼용한 대책으로 노동자 건강 영향을 최소화 할 수 있으며 제대로 된 혼용방법이 매우 중요하다. 실질적이긴 해도 적절하게 사용되지 않으면 효과가 없다. 어떤 ‘표준작업절차’라도 적절한 장비, 올바른 사용방법이 수반되어야 하며 이를 위해서는 노동자 지도, 교육 및 감독이 필요하다.

소음으로 인한 소음성난청 예방관리는 ‘소음성 난청 예방관리’를 참조할 수 있다(안전보건공단, 2014).

(4) 전기(Electrical) 안전 및 화재, 폭발 위험

예를 들어 배선을 제거하는 과정에서 전기아크(때로 플래시오버³³⁾ 또는 아

크 플래시라 함)는 때로 강한 열을 발생시킬 수 있으며 전기아크에서 발생한 강한 자외선은 눈에 손상을 일으킬 수 있다. 아크, 과열, 때로는 전류 누출은 화재 또는 폭발로 이어질 수 있다. 분리된 회로나 장비를 가지고 작업하기 전에 반드시 전기가 흐르지 않는 것을 확인하여야 한다.

일부 금속 분진뿐 아니라 냉장고 또는 냉동고에 탄화수소류나 암모니아, 폴리스티렌(냉장고나 냉동고 절연재로 사용되며 일반적으로는 패킹재로 사용됨. 폴리스티렌에 있는 펜탄은 인화성 있음), 전지(폐전기전자제품에서 제거된 전지는 적절하게 표시된 용기에 보관하여야 함) 등도 화재나 폭발 위험이 있다.

(5) 자기장 안전

ACGIH(2015) TLV는 자기장의 자속밀도(flux densities)로 일상적인 작업환경에서 직업적 노출은 2테슬라(T)를 넘지 않아야 하지만, 통제된 작업환경에서 특별훈련을 받은 작업자가 작업하는 경우는 8테슬라(T)를 최고치(cciling value)로 권고하고 있다. 이때 특별훈련이란 자기장의 자속밀도가 2테슬라(T) 이상일 때 빠른 동작이나 움직임으로 인해 일시적인 감각에 미치는 영향을 작업자에게 인식시키는 것이 포함된다. 통제된 작업환경이란 자기장이 금속 물체에 가한 힘으로 인해 이 물체가 잠재적인 위험발사체가 되지 않도록 하는 작업장을 말한다. 일반 작업환경에서 작업자의 사지 노출은 20테슬라(T)를 넘지 않아야 한다. 강자석(ferromagnetic) 또는 전자의료장치를 이식받은 작업자는 0.5 밀리테슬라(mT)를 초과하는 자기장에 노출되지 않아야 한다<표 18>.

33) 섬락(flashover): 절연물을 끼워 놓은 두 도체간 전압이 일정 전압 이상이 되었을 때 아크방전이 지속되는 현상

<표 18> 정적 자기장의 ACGIH TLV(2015)

노출	최고치
전신(일반 작업환경)	2테슬라
전신(특별교육 받은 작업자와 제연관 작업환경)	8테슬라
사지	20테슬라
의료 장치 착용자	0.5밀리테슬라

(6) 기타 - 야적

폐전기전자제품 중 특히 백색가전을 야적할 때는 일반적 법칙으로 적재 높이는 최소바닥면적의 3배를 넘지 않아야 한다.

2) 화학적 요인 관리방안

유해물질 사용과 관련하여 Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) Regulations (2002)에서는 사용 물질 및 공정(substance, process), 제어 장비(control equipment), 작업방법(way of working), 관리(managing)에 관해 규정하고 있으며 밀폐, 개인보호구 지급, 국소배기장치, 환기장치 등이 포함된다(HSE, 2012c).

(1) 산·알칼리류

황산의 노출기준은 TWA 0.2mg/m³(발암성 1A, 강산 미스트에 한함)으로 설정되어 있다. 그러나 작업장 노출 관리를 위한 별도의 지침은 현재 없다.

IARC에서는 황산미스트에 노출되는 경우 후두암을 발생시킬 수 있는 물질로 분류하고 있다.

안전보건공단의 기술지침은 염산, 질산이나 암모니아를 화학안전 분야에서 다루고 있으며[예: 염산 및 질산의 탱크 저장에 관한 기술지침(P-59-2012), 암모니아 냉매설비의 안전관리 기술지침(P-60-2012)], 의학·보건학 또는 위생학

분야의 지침은 없다. 질산의 경우는 ‘생물학적 노출지표 물질 분석에 관한 기술 지침(H-152-2014)’이 있을 뿐이다. 보호구 없이 밀폐된 금속 탱크 안에서 질산을 이용한 세척작업 후 급성호흡곤란증후군 사례가 보고된 바 있다(김 대성 등, 2005).

산·알칼리류 노출을 감소시키기 위해서는 전체 환기 또는 국소배기 장치가 설치되어야 하고 개인보호구를 지급해야 한다. 노출 모니터링을 위한 정기적인 작업환경측정을 시행한다.

(2) 금속흡 및 분진

금속 분진은 파·분쇄 과정에서 각 금속 성분이 확인되지 않은 상태로 노출될 수 있으며 제련·정련 공정에서는 흡 상태의 금속에 노출될 수 있다.

통제된 조건하에서 구리 또는 아연 용접 흡에 노출된 남성 피시험자들을 대상으로 한 연구에서 혈중 CRP(C-reactive protein)이 증가하여 전신 염증이 유발되었다고 보고하였다(Markert 등, 2016).

「산업안전보건기준에 관한 규칙」에 따라 분진의 흡입 방지, 방진마스크 지급, 국소배기 장치를 설치하고 분진이 작업장으로 재유입되지 않도록 해야 한다. 노출 모니터링을 위한 정기적인 작업환경측정을 시행한다.

3) 국제표준(안)

1. 제목(Title)

폐전기전자제품에서 회토류를 재활용하는 공정에서 작업하는 노동자의 안전 보건 지침(안)

2. 범위(Scope)

이 지침은 폐전기전자제품에서 회토류를 재활용하는 공정에서 작업하는 노동자의 안전보건에 관한 요구사항과 권고사항을 제공한다.

3. 인용표준(Normative references)

다음의 지침이 이 지침에 인용됨으로써 이 지침의 규정 일부를 구성한다.

- ISO/IEC Guide 31:2014(E) Safety aspects-guidelines for their inclusion in standards

4. 용어(Terms)

이 지침에서 사용하는 용어는 다음과 같다.

4.1 폐전기전자제품(waste electrical and electronic equipment)

4.2 재활용(recycling)

4.3 유해성(hazards)

4.4 위험성(risks)

4.5 수거·분류(collecting·sorting)

4.6 해체·분해(dismantling·disassembling)

4.7 파쇄(crushing·shredding) 및 분쇄(pulverizing·grinding)

4.8 분리·선별(separating)

4.9 포장(packaging)

4.10 정련(smelting)

4.11 제련(refining)

4.12 작업환경측정(workplace environment measurement)

4.13 특수건강진단(special health checkup)

4.14 개인보호구(personal protective equipment)

5. 기호 및 약어(Symbols and abbreviated terms)

이 지침에서 사용하는 약어는 다음과 같다.

5.1 EEE: electrical and electronic equipment

5.2 WEEE: waste electrical and electronic equipment

5.3 PPE: personal protective equipment

5.4 RC: recycling center

6. 본문(Technical text)

6.1 물리적 인자의 안전보건 관리

a) 소음(noise)

b) 분진(dust)

c) 정적 자기장(static magnetic field)

d) 기계 안전(mechanical safety)

6.2 화학적 인자의 안전보건 관리

a) 금속 흙·분진(metal fume·dust)

b) 산 및 알칼리(acids and alkalis)

6.3 근골격계 질환 관리

a) 중량물(heavyweight)

b) 반복작업(repetitive work)

7. 참고문헌(Bibliography)

8. 색인(Index)

IV. 고찰

희토류를 포함한 제품으로부터 희토류를 회수하기 위해서는 효율적인 폐부품 분리를 위한 제품 설계가 우선되어야 하며 희토류를 함유한 제품의 수거를 위한 인프라 확충, 생산자책임재활용제도 확대, 재활용센터 확대 설치 및 기능 강화와 재활용공정 개발, 재활용공정 부산물의 on-site 부산물 소재화 기술개발, 자석 이외 형광체, 레이저, 희토류 함유 합금, 특수 유리 등 다양한 희토류 함유제품의 재활용 기술개발을 위한 정책 지원 등도 필요하다(한국산업기술평가관리원, 2018).

폐전기전자제품을 기계적으로 재활용하기 위한 스크리닝, 모양 분리, 자석 분리, 와전류 분리 등 물리적 방법은 상대적으로 간단하고 편리하며 친환경적이다. 또한, 초기 투자비와 에너지 비용이 낮다. 그러나 파·분쇄과정에서 발생하는 분진이나 금속의 손실은 큰 단점의 하나이다.

희토류 제련은 세계 생산량의 85% 이상을 차지하고 있는 중국을 중심으로 이루어지고 있으며 희토류 원광의 특성에 따라 적용되는 제련기술이 다르다. 현재 습식제련법을 기반으로 연구수준에서 기술이 개발되고 있으며 습식공정에서 발생하는 환경 문제와 원료수급 문제로 인해 산업화가 이루어지지 않아 희토류 공급을 위한 대체방안과 친환경 건식제련 기술개발이 필요하다.

희소금속의 생산량이 적을 뿐 아니라 폐전지전자제품에 함유된 희소금속의 양도 적기 때문에 특수 재활용 공정으로 가동하기엔 타산이 맞지 않아 화학적 단계는 제련·정련 공정으로 기본금속(구리, 납, 아연) 정련에 기반을 둔다. 이 경우 인위적인 (재활용) 정광을 만들기 위해서는 전통적인 추출 공정인 전처리나 재료의 컨디셔닝 단계를 거치게 된다. 정광 내 희소금속의 농도가 높을 필요는 없지만 진행되는 단위 공정에서 방해물질로 작용할 수 있는 특정 불순물은 최소화되어야 한다.

폐전기전자제품은 물리적 단계와 화학적 단계를 거쳐 처리되면 회수하고자 하는 금속을 얻을 수 있다. 조합의 재활용센터를 포함하여 환경부 EcoAS에 의무량·할당량을 신고해야 하는 수거·수집 사업장과 1차 처리 사업장은 약 50개로 추정되었으며 이들 사업장은 물리적 단계만을 수행한다. 2차 처리 사업장은 1차 처리가 끝난 부(분)품을 투입하여 목적금속을 회수하기 위한 제련·정련 과정인 화학적 단계를 수행하며 국내에는 2개소가 있는 것으로 확인되었다.

폐전기전자제품의 재활용 공정 중 발생할 수 있는 유해요인 조사를 위해 수거·수집 사업장, 1차 처리 사업장 및 2차 처리 사업장 각각 1개소와 폐전기전자제품을 직접 재활용하는 곳은 아니지만, 희토류가 함유된 영구자석(NdFeB)을 제조하는 사업장 1개소를 방문하여 작업공정, 작업환경측정결과 등을 확인하였다.

물리적 단계에서는 폐전기전자제품에서 유가물(철, 구리, 알루미늄, 플라스틱, 우레탄, 플라스틱 등), 인쇄회로기판 등과 기타 폐기물을 분리한다.

수거·하차·적재 작업에는 덤프트럭, 기중기, 호이스트, 지게차, 사다리 등이 사용되어 이 과정에서는 중량물작업에 의한 근골격계질환과 노면 미끄러움, 조병불량 등으로 인한 안전보건 문제 발생 가능성이 있다.

해체 공정에서는 사용하는 도구(칼/끌, 해머 등)로 인한 상해(신체 손상)가 생길 가능성이 있으며 소음과 분진이 발생할 수 있다. 그러나 이 공정에서는 금속의 종류가 확인되지 않는다는 점이다.

파·분쇄 공정에서도 분진과 소음이 발생하며 일부 파쇄품은 자력을 가진다. 그러나 작업환경측정결과, 자기장이 측정된 예는 없었다. 자력이 있는 파쇄품이 다음 공정으로 넘어가는 단계에서 흐름을 저해(예를 들면 덕트 내에 달라붙어 쌓이는 등)하여 연구를 통해 이 문제를 해결(특허출원)한 사업장이 있었다.

작업자의 자기장 노출과 관련한 연구는 주로 MRI 사용과 관련한 것이 대부분이다. Kanal 등(1993)의 설문조사 연구에서는 다른 직종 노동자에 비해 MRI-노동자의 상대위험비는 모성의 나이, 흡연 및 음주를 보정했을 때도 상관

성은 없다고 하였다.

Bowman과 Mehtner(2000)는 6개의 시설(플라스틱, 제약, 시멘트, 액화 공기 제품, 알루미늄 부품 및 알루미늄-프레임 필터)에서 생물학적 영향과 관련될 수 있는 자기장의 물리적 특성을 조사한 연구에서 극저주파(extremely low frequency)와 자기장 측정값은 지자기 참고치(geomagnetic reference field, 55.0 마이크로테슬라)보다 낮았으며 이는 강철구조물의 차폐 때문이라고 하였다. 또한, 극저주파의 크기만을 측정하는 일반적인 노출평가법으로는 생물학적 영향을 설명하는데 한계가 있다고 하였다.

자기장은 알루미늄 및 클로랄칼리³⁴⁾ 산업, 아크-용접 공정 및 일부 철도시스템에서도 발생할 수 있다. 자기장에 장기간 노출되어 발생할 수 있는 건강 영향에 관한 역학 연구는 많지 않으며, 대부분은 암 발생 위험에 초점이 맞춰져 있다. 그러나 자기장 노출을 추정한 연구결과 암 위험도는 증가하지 않았는데 이는 대부분 사례 수가 적고 조-노출(crude exposure) 평가에 기초한 것으로 교란변수 통제도 제한적이어서 “건강한 노동자(healthy worker)” 효과가 결과에 영향을 미쳤을 가능성이 높았다(Feychting, 2005).

알루미늄 작업자와 MRI 작업자에서 생식계 영향에 관한 보고가 있으나 연구 설계의 한계로 결론을 짓기에는 무리가 있다고 하였다(Feychting, 2005).

즉, 자기장 노출 작업자에 관한 역학 연구의 한계는 기존의 발암물질을 포함하여 다른 많은 유해요인에 노출될 수 있다는 것으로 자기장의 영향에 특별히 초점을 맞춘 직업적 연구는 거의 없으며, 따라서 노출평가는 미미하거나 없다.

Stuart 등(2007)은 초전도 자석 주변에서의 작업자 움직임에 관한 모의실험에서 작업자가 imager에 근접하면 ICNIRP(International Commission for Non-ionizing Radiation Protection)와 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)에서 권고하는 수준 이상의 전기장/전류밀도를 유도할

34) chloralkali process: 염화나트륨 용액의 전기분해를 위한 공정으로 염소 및 수산화나트륨(lye/caustic soda) 생산에 사용

수 있어 1.5~7테슬라에서 작업자는 적어도 0.5~1.0m 떨어져 있어야 한다고 보고하였으며 자기장 노출과 관련하여 국제수준을 준수하기 위해서는 작업자는 자석 주위 일정 지역 범위 내에 접근을 제한하거나 지정된 지역에서는 동작을 천천히 할 것을 제안하였다. 결론적으로, 자기장 노출로 인한 잠재적인 건강 영향에 관한 결론을 도출하기에는 역학 연구에서 활용할 수 있는 근거가 부족하다(Feychting, 2005).

포장(약 2톤) 공정은 지게차, 호이스트 등을 이용한 작업으로 중량물작업으로 인한 근골격계질환 발생 가능성이 있다.

물리적 단계에서는 어떤 화학물질도 사용되지 않았다.

2차 처리 사업장에서도 전처리 공정은 수거·수집과 1차 처리 사업장과 같이 물리적 단계를 거친다. 이후 제련·정련 공정에서는 소성로, 2차 연소로를 거쳐 소성품은 황산 반응기(예: 구리 제조)를 거쳐 전기분해를 통해 동판이 얻어진다. 소성로와 2차 연소로에서 고열이 발생할 수 있으나 자동화 공정으로 점검을 위한 작업의 경우만 소성로 근처에서 작업한다. 황산도 반응조에 수시로 자동으로 투입되며 각 반응조의 황산 비율은 다른 것으로 알려져 있다. 기본금속 흡(구리, 납, 아연)과 황산에 노출될 가능성이 있으나 희소금속은 일상적인 작업공정으로 회수되지 않기 때문에 작업환경측정결과를 확인할 수 없었다.

폐전기전자제품에서 희토류를 포함한 희소금속을 재활용하는 공정 작업자의 안전보건 관리 방안이나 작업자 건강보호 대책은 영국, ILO, OSHA/NIOSH 등에서는 물리적·화학적 유해인자에 대한 관리 방안이 정립되어 있다. 그러나 중국은 EU RoSH와 WEEE 지침을 준수하기 위해 관련 법을 제정하였으나 제도권(formal sector) 내에서의 재활용률 증가를 목표로 하고 있으며 여전히 비제도권(informal sector)에서의 금속 회수 공정은 관리되지 않고 있는 실정으로 이는 국내에서 참고할만한 수준에 미치지 못한다. 인도 역시 폐전기전자제품의 90~95%가 비제도권(unauthorized를 뜻하는 것은 아님)에서 수행되고 있으며, 이를 제도권으로 유인하려는 연구가 수행된 바 있으나(Arora 등, 2013) 역시

국내에서 참고할만한 수준의 관리방안은 가지고 있지 않다.

요약하면, 물리적 단계에서는 어떤 화학물질도 사용되지 않으며 기계에 의한 상해, 중량물작업, 단순반복작업, 소음, 분진 및 자기장 노출에 대한 관리가 필요하다. 화학적 단계에서는 금속 흙·분진, 황산 등 산·알칼리에 대한 관리가 필요하다.

V. 결론

국내에서 폐전기전자제품으로부터 회토류를 포함한 회소금속이 회수되지 못하는 이유는 정광 공정과 마찬가지로 회수 공정에서 다량의 환경오염물질을 방출하기 때문에 이에 대한 부담이 커서 대부분 중간재 형태로 수입된 제품을 사용하고 있는 실정이다. 또한, 극히 일부의 회소금속은 기본금속 제련공정을 거친 후 회수되고 있으나 이를 재사용하는 산업시스템이 없으며 채산성 또한 낮다. 따라서 국내에서 회토류를 포함한 회소금속의 회수를 활성화하기 위해서는 회소금속 회수업체와 국내에서 필요한 중간제품 생산업체를 연계한 회토류 회수 산업시스템 구축이 필요할 것이다. 그리고 폐전기전자제품에서 회소금속 회수를 위한 원재료 수거 시스템 합리화와 회수 기술개발, 회수된 회소금속의 재사용산업 활성화 등 채산성 확보를 위한 노력이 뒷받침되어야 할 것이다.

폐전기전자제품 재활용은 물리적 처리 단계와 화학적 처리 단계가 있다. 국내 재활용 처리 사업장은 전국의 12개 재활용센터를 포함하여 약 50개소로 수거, 해체, 파·분쇄, 분리, 포장 공정을 포함하는 물리적 단계의 재활용 공정을 수행하고 있다. 물리적 처리 단계에서의 유해·위험요인은 기계 안전, 소음, 자기장, 중량물작업, 단순반복작업 등이다.

국내에서 분리된 부품으로부터 금속을 회수하는 제련·정련 공정인 화학적 처리 단계를 수행할 수 있는 사업장은 2개소이며 이 공정에서는 금속흡·분진, 산 등에 노출될 수 있다. 폐전기전자제품 재활용 공정에서 새로운 화학물질은 사용하지 않는 것으로 확인되었다.

작업자 건강장해 예방 등 산업재해 발생에 선제적으로 대응하기 위한 안전보건 기준 관련 국제표준(안)은 ISO 표준의 작성절차 및 작성방법에 따라 제목, 범위, 인용표준, 용어, 약어, 본문 등을 제안하였다.

참고문헌

- 관계부처합동. 지속가능한 순환경제 실현을 위한 제1차 자원순환기본계획(2018~2027); 2018.9 보도자료
- 국가청정생산지원센터. 도시광산자원 함유제품 및 사용 후 제품 함유 금속. Available from: URL:<http://www.kncpc.or.kr>
- 국가광물자원지리정보망(KMRGIS).2019 Available from: URL:<https://www.kmrgis.net/kmrgis/MRPresentCondition/MRPC0101.aspx?menuID=MRPC01>
- 국가기술표준원(KATS). KATS 기술보고서. 희토류 분야 산업현황과 표준화 동향. 제101호; 2017.
- 국립환경과학원. 전기·전자폐기물(e-waste)의 국가 간 이동에 관한 기술지침서. NIER-GP2013-41; 2013.
- 김 대성, 윤 혜은, 이 승재 등. 질산(Nitric Acid) 증기 흡입에 의한 급성호흡곤란증후군 1예. Tuberculosis and Respiratory Diseases 2005;59(6):690-5.
- 김 범성. 국제표준화 기구의 희토류 표준개발 현황. Ceramic Korea; 2018년 9월.p.60-6.
- 김 수민, 이 현숙, 이 우영. 희토류 영구자석의 현황과 전망. J Korean Magnetics Society 2018;28(6):248-59.
- 신 서호, 임 경택, 김 종춘. 산업보건측면에서의 희토류 건강영향 평가. 한국산업보건학회지 2916;26(3):237-52.
- 안전보건공단. 소음성 난청 예방관리. 직업건강 가이드라인. 안전보건공단;2014.
- 이 미혜, 최 원정, 서 석준, 김 범성. 희소금속 재활용을 위한 ITU-T 국제표준

- 개발현황. 한국분말야금학회지 2016;23(4):325-30.
- 정 진기, 김 민석, 김 병수, 이 재천. 폐인쇄회로기판으로부터 금속의 회수를 위한 재활용공정 연구. Applied Chemistry 2012;16(1):77-80.
- 조 지혜, 이 희선, 김 중현, 신 경희. 희토류자석의 자원순환 활성화를 위한 폐 자원흐름의 분석. 한국환경정책평가연구원 연구보고서 2013-13, 2013.
- 한국산업기술평가관리원. 희토류 친환경 재활용 기술 및 자원 확보 방안. KEIT PD Issue Report. Vol. 18-8, 2018.
- 한국생산기술연구원(KITECH). 희소금속의 유통구조 및 산업 수요 조사 연구. 한국생산기술연구원; 2017.
- 한국산업안전공단. 근골격계질환 예방관리 프로그램 운영매뉴얼(전자제품 제조업). 보건분야-기술자료 근예 2005-7-271, 한국산업안전공단; 2005.
- 한국전자제품자원순환공제조합. 폐전기·전자제품 자원순환 가이드북. 동화기술; 2019a.
- 한국전자제품자원순환공제조합(KERC) 2019b. Available from <http://www.k-erc.or.kr/membership/collector>
- 한국지질자원연구원(KIGAM). 희유금속 원재료 고역 분석; 2019. Available from <http://mici.kigam.re.kr>
- 한국표준협회(KSA). 국제표준화 성공과 추진사례; 2019. Available from <http://roadmap.ksa.or.kr/webzine/>
- 환경부. 폐전기·전자제품 재활용실태 분석 및 재활용비율 제고방안 연구. 환경부, 2009.
- ACGIH. TLVs and BEIs. ACGIH; 2015.
- Arora R, Chaturvedi A, Eisinger F, Strasser C. WEEE recycle: Making

- India's informal electronic waste recycling sector formal. Focus India Weekly Recovery 2013;6:10-7.
- Binnemans K, Jones PT. Rare earth and the balance problem. J Sustain Metall 2015;1:29-38.
- Binnemans K, Jones PT, Blanpain B, et al. Recycling of rare earths: a critical review. J Clean Prod 2013;51:1-22.
- Bladé CP, Forti V, Gray V, Kuehr R, Stegmann P. The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources. International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). Bonn/Geneva/Vienna, 2017.
- Bowman JD, Mehtner MM. Hazard surveillance for industrial magnetic fields: II. Field characteristics from waveform measurements. Ann Occup Hyg 2000;44(8):615-33.
- Broome DR. Nephrogenic systemic fibrosis associated with gadolinium base contrast agents: A summary of the medical literature reporting. 2008;66:23-234. Available from: URL: <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2008.02.011>.
- Carlin JF. USGS 2011 Minerals Yearbook - Antimony. 2012 Available from: URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/antimony/myb1-2011-antim.pdf>
- CDC. Lead and cadmium exposure in electronic recyclers—Two States, 2015 and 2017. MMWR 2019;68(7):181-182.
- Ceballos DM, Dong Z. The formal electronic recycling industry: Challenges

- and opportunities in occupational and environmental health research. *Environment International* 2016;95:157-66.
- Chaturvedi B, Bhardwak S. Learning to re-e-cycle: What working with e-waste has taught us. New Delhi, Chintan Environmental Research and Action Group, 2013. In: ILO. Tackling informality in e-waste menagement: The potential of cooperative enterprises. ILO, Geneva, 2014.
- Chen Z, Zhu X. Accumulation of rare earth elements in bone and its toxicity and potential hazard to health. *Rural Eco Environ* 2008;24:256-7.
- Chen J, Algeo TJ, Zhao L, et al. Diagenetic uptake of rare earth elements by bioapatite, with an example from lower Triassic conodonts of South China. *Earth Sci Rev* 2015a;149:181-202.
- Chen J, Xiao H-J, Qi T, et al. Rare earth exposure and male infertility: the injury mechanism study of rare earth on male and human sperm. *Environ Sci Pollut Res* 2015b;22(3):2076-86.
- Chi X, Streicher-Porte M, Wang MYL, Reuter MA. Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on CHINA. *Waste Management* 2011;31:731-42.
- Chris Y, Yuan H, Zhang C, et al. Experimental studies on cryogenic recycling of printed circuit board. *J Advanced Manufacture Technology* 2007;34:657-66.
- Cryan J, Fregard K, Morrish L, Myles N. Demonstration of flat panel display recycling technologies. Axion Consulting and Waste Resource Action Program (WRAP), MDD014. Banbury, Oxon. 2010 Available from: URL: http://www.wrap.org.uk/downloads/Flat_Panel_Display_recycling_technolog

y_report.0d462064.9820.pdf,

- Cui J, Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *J Hazard Mater* 2008;158:228-56.
- De Michelis I, Ferella F, Varelli EF, Veglio F. Treatment of exhaust fluorescent lamps to recover yttrium: experimental and process analyses. *Waste Management* 2011;31(12):2559-68.
- Delmas A, Belguerras L, Weber N, et al. Calibration and non-orthogonality correction of three-axis Hall sensors for the monitoring of MRI workers' exposure to static magnetic field. *Bioelectromagnetics* 2018;39(2):108-19.
- Delmas A, Weber N, Piffre J, et al. How to analyze, compare and represent worker exposure to static magnetic field? *Raiat Prot Disimetry* 2017;177(4):415-23.
- DEFRA. Guidance on Best Available Treatment Recovery and Recycling Techniques (BATRRRT) and Treatment of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Department of Environment, Food and Rural Affairs. 2006.
- Du X, Graedel TE. Uncovering the global life cycles of the rare earth elements. *Scientific Report* 2011, 1:145. DOI 10.1038/srep00145 Available from: URL: <https://www.nature.com/articles/srep00145.pdf>
- Eggert R, Wadla C, Anderson C, et al. Rare earth: market disruption, innovation, and global supply chain. *Annu Rev Environ Resour* 2016;41:199-222.
- Elshkaki A, Graedel TE. Dysprosium, the balance problem, and wind power technology. *Appl Energy* 2014;136:548-59.

- EU. Directive 2002/96/EC. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Official Journal of the European Union. European Parliament. Brussels, 2002;L37:24-9.
- EU. Directive 2002/95/EC. Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment. Official Journal of the European Union. European Parliament. Strasbourg, 2003;L37:19-23.
- EU. Directive 2011/65/EU. Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS), 2011.
- European IPPC Bureau. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the New-ferrous Metal Industries-Draft 3 (February 2013) 2013 Available from: URL: http://cippcb.jcr.es/reference/BREE/NFMbw_17_04-03-2013.pdf
- Feychting M. Health effects of static magnetic field-a review of epidemiological evidence. Prog Biophy Mol Biol 2005;87(2-3):241-6.
- Gourishankar KV, Srivastava AM, Mammalwar PK, Manepalli SK. Rare Earth Recovery from Phosphor Material and Associated Method.US2012152062-A1; WO2012087456-A1; US8282703-B2, 2012.
- HSE. Guidance on Best Available Treatment Recovery and Recycling Techniques (BATRRRT) and treatment of Waste and Electronic Equipment(WEEE). DEFRA, 2006.
- HSE. Manual handling at work. A brief guide. INDG143(ver3) 11/12. 2012a Available from: URL: <http://www.hsc.gov.uk/pubns/indg143.pdf>
- HSE. Conveyor belt workstation design. 2012b. Available from: URL: <http://www.hsc.gov.uk/pubns/geis4.pdf>

- HSE. Providing and using work equipment safely. A brief guide. INDG291(ver1) 03/13. 2013. Available from: URL: <http://www.hsc.gov.uk/pubns/indg291.pdf>
- HSE. Working with substances hazardous to health. A brief guide to COSHH. INDG136(ver5), 10/12. 2012c. Available from: URL: <http://www.hsc.gov.uk/pubns/indg136.pdf>
- ILO. Tackling informality in e-waste management: The potential of cooperative enterprises. ILO, Geneva, 2014.
- ISO. ISO/IEC Directives, Part 2 - Principles and rules for the structure and drafting of ISO and IEC documents. ISO, 2018.
- Itoh M, Miura K, Machida K-I. Novel rare earth recovery process on Nd-Fe-B magnet scrap by selective chlorination using NH₄Cl. J Alloys Compd 2009;477:484-7.
- Jakobsson LK, Kennedy MW, Aune RE, Tranell G. Recovery of rare earth elements from the ferrous fraction of electronic waste. In: Rewas 2016, pp. 89-93. Springer International Publishing
- Jang M, Hong SM, Park JK. Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps. Waste Management 2005;25(1):5-14.
- Jenkins W, Perone P, Walker K, et al. Fibroblast response to lanthanoid metal ion stimulation: potential contribution to fibrotic tissue injury. Biol Trace elem Res 2011;144(1-3):621-35.
- JFS. 2019. Available from: URL: https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id032954.html
- JOGMEC. 2019. Available from: URL:

http://www.jogmcc.go.jp/english/stockpiling/metal_10_000002.html

- Kanal E, Gillen J, Evans JA, Savitz DA, Shellock FG. Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiology* 1993;187(2):395-9.
- Kaya M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management* 2016;57:64-90.
- Kucuker MA. Biomining concept for recovery of rare earth elements (REE) from secondary sources. In: *Hamburger Berichte Bd. 48. Verlag Abfall der Ingenieurgruppe RUK GmbH, Stuttgart, Germany, ISBN 978-3-9817572-8-6*, 2018.
- Kuehr R, Magalini F. UNU & WHO survey on e-waste and its health impacts on children. United Nations University, Institute for Sustainability and Peace, 2013. In: ILO. *Tackling informality in e-waste management: The potential of cooperative enterprises*. ILO, Geneva, 2014.
- Kulaksiz S, Bau M. Anthropogenic dissolved and colloid/nanoparticle-bound samarium, lanthanum and gadolinium in the Rhine River and the impending destruction of the natural rare earth element distribution in rivers. *Earth Planet Sci Lett* 2013;362:43-50.
- Kumari A, Jha MK, Pathak DD. Review on the processes for the recovery of rare earth metals (REMs) from secondary resources. In: *Rare Metal Technology*. Kim H, Wesstrom B, Alam S, et al. Edt. Conference Proceedings TMS 2018, Springer, 2018,p. 53-65.
- Lecler M-T, Zimmermann F, Silvente E, et al. Exposure to hazardous substances in cathode ray tube (CRT) recycling sites in France. *Waste*

- Management 2015;39:226-35.
- Li L, Dunn JB, Zhang XX, et al. Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment. J Power Sources 2013;233:180-9.
- Li J, He X, Zang X. Designing and examing e-waste recycling process: methodology and case studies. Environ Technol 2017;38:652-60.
- Li J, Zeng X, Chen M, Ogunseitan OA, Stevels A. “Control-Alt-Delete”; rebooting solutions for the E-waste problem. Environ Sci Technol 2015;49(12):7095-108.
- Lundgren K. The global impact of e-waste: Addressing the challenge. ILO, Geneva, 2012.
- Marckmann P. An epidemic outbreak of nephrogenic systemic fibrosis in a Danish hospital. Eur J Radiol 2008;662:187-190. Available from: URL: <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2008.01.032>.
- Marckmann P, Skov L, Lossen K, Thomsen HS. Clinical manifestation of gadodiamide-related nephrogenic systemic fibrosis. Clin Nephrol 2008;69:161-8.
- Markert A, Baumann R, Gerhards B, et al. Single and Combined Exposure to Zinc- and Copper-Containing Welding Fumes Lead to Asymptomatic Systemic Inflammation. J Occup Environ Med 2016;58(20):127-32.
- Marzec-Wróblewska U, Kaminski P, Lakota P, et al. Determination of rare earth elements in human sperm and association with sperm quality. Arch Environ Contam Toxicol 2015;62(9):191-201.
- Menad N, Seron A. Characteristics of Nd-Fe-B permanent magnets present

- in electronic compounds. *Int J Waste Resources* 2017;7(1) DOI: 10.4172/2252-5211.1000263.
- National Risk Management Research Laboratory. Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. EPA/600/R-12/572, 2012.
- Okabe TH, Takeda O, et al. Direct extraction and recovery of neodymium metal from magnet scrap. *Materials Transaction* 2003;44:798-801.
- Pagano G, Guida M, Tommasi F, Oral R. Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements - knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicol Environ Saf* 2015;115:40-8.
- Potysz A, van Hullebsch ED, Kierczak J. Perspectives regarding the use of metallurgical slags as secondary metal resources - a review of bioleaching approaches. *J Environ Manag* 2018;219:138-52.
- Porru S, Palcidi D, Quarta C, et al. The potential of rare earths in the pathogenesis of interstitial lung disease: a case report of movie projectionist as investigated by neuron activation analysis. *J Trace Elem Med Biol* 2000;14:232-6.
- Prince MR, Zhang H, Morris M, et al. Incidence of nephrogenic systemic fibrosis at two medical centers. *Radiology* 2008;248:807-16.
- Rabah MA. Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamps. *Waste Management* 2008;28(2):318-25.
- Reuter M, Oyi O, Hudson C, et al. Metal recycling: opportunities, limits, infrastructures. A Report of the Working Group on the Global Metal

- Flows to the International Resource Panel. In: International Resource Panel, W.G.O.I.G.M.F. Ed., UNEP, 2013.
- Rombach E, Friedrich B. Recycling of rare metals. In: Handbook of recycling. Worrell E, Reuter MA Edt, Elsevier, 2014, pp. 125-50.
- Sannino A, Romeo S, Scarfi MR, et al. Exposure assessment and biomonitoring of workers in magnetic resonance environment: An exploratory study. *Front Public Health* 2017, doi: 10.3389/fpubh.2017.00344.
- Schluep M, et al. Recycling - from e-waste to Resources, Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. UNEP, Paris, France, 2009.
- Schmidt CW. Unfair trade: e-waste in Africa. *Environ Health Perspect* 2006;114(4):A232-5.
- Schüler D, Buchert M, et al. Survey on rare earths and their recycling. Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament. Öko-Institute V, 2011.
- Shimizu R, Sawada K, Enokida Y, Yamamoto I. Supercritical fluid extraction of rare earth elements from luminescent material in waste fluorescent lamps. *J Supercritical Fluids* 2005;33(3):235-41.
- Shirayama S, Okabe M, et al. In: Proc. of Annual Meeting of MMIJ, March 27-29. The mining and materials Processing Inst. of Japan pp. 67-70, 2008.
- Stuart C, Trakic A, Wang H, Liu F. Numerical study of currents in workers induced by body-motion around high-ultrahigh field MRI magnets. *J*

- Magn Imaging 2007;26(5):1261-77.
- Sun YH, Nan JM. Method for Recycling Discarded Fluorescent Lamp. CN101150032A, 2007.
- Takahashi T, Takano A, Saitoh T, et al. Separation and recovery of rare earth elements from phosphor sludge in processing plant of waste fluorescent lamp by pneumatic classification and sulfuric acidic leaching. Shigen to Sozai 2001;117(7):579-85.
- Takeda O, Okabe TH, Umetsu Y. Phase equilibrium of the system Ag-Fe-Nd, and Nd extraction from magnet scraps using molten silver. J Alloys Comp 2004;379:305-13.
- Takeda O, Nakano K, Sato Y. Molten salt. High Temp Chem 2009;52:63-70.
- Tanaka M, Oki T, et al. Recycling of rare earth from scrap. In: Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. vol. 43, Elsevier, p. 159-211, 2013.
- Terazono A, Oguchi M, Lino S, Mogi S. Battery collection in municipal waste management in Japan: challenge for hazardous substance control and safety. Waste Management 2015;39:246-57.
- Thomsen HS. Nephrogenic systemic fibrosis: a serious late adverse reaction to gadodiamide. Eur Radiol 2006;16:2619-21. Available from: URL: <http://doi.org/10.1007/s00330-006-0495-8>.
- Tunsu C, Retegan T, Ekberg C. Sustainable Process Development for Recycling of Fluorescent Phosphorous Powders-Rare Earths and Mercury Separation: A Literature Report. Gothenburg, Sweden, 2011.
- Umicore 2013. Available from: URL:

- <http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Process/>(visited 02.05.13) In: Handbook of recycling. Worrell E, Reuter MA Edt, Elsevier, p.131, 2014.
- UNEP. Recycling Rates of Metals - A Status Report. 2011. Available from: URL: http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf
- US Geological Survey. Mineral Commodity Summary, 2013. Available from: URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>.
- US Geological Survey. Rare Earths. 2019a Available from: URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2019-raree.pdf
- US Geological Survey. 2015 Minerals Yearbook. US DOI, USGS. 2019b. Available from: URL: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/
- Viet HM, Diehl TR, Salami AP, et al. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. Waste Management 2005;25:67-74.
- Wang F, Huisman J, Meskers CEM, et al. The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. Waste Management 2012;32(11):2134-46.
- Xu Y, Chumbley IS, Laabs FC. Liquid metal extraction of Nd from Nd-Fe-B magnet scrap. J Material Res 2000;15:2296-304.
- Yang C, Li J, Tan Q, Liu L, Dong Q. Green process of metal recycling:

co-processing waste printed circuit boards and spent tin stripping solution. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 2017;5:3524-34.

Zakotnik M, Harris IR, Williams AJ. Multiple recycling of Nd-Fe-B type sintered magnets. *J Alloys Compd* 2009;469:314-21.

Zeng X, Zheng L, Xie H, et al. Current status and future perspective of waste printed circuit boards recycling. *Proc Environ Sci* 2012;16:590-7.

Zhu WF, Xu SQ, Zhang H, et al. Investigation of children intelligence quotient in REE mining area: bio-effect study of REE mining area of South Jianxi. *Clin Sci Bull* 1996;41:914-6.

Zimmermann F, Lecler M-T, Clerc F, et al. Occupational exposure in the fluorescent lamp recycling sector in France. *Waste Management* 2014;34:1257-63.

Abstract

A study on the status and countermeasures of hazardous substances in process of recycling of electrical and electronic equipments

Hyoung-Ah Kim¹⁾, Chae-Kwan Lee²⁾, Min-Ji Kim³⁾, Yoon Heo¹⁾,
Hycon-Jung Lee²⁾

1) Department of Preventive Medicine, The Catholic University of Korea
222 Banpode-ro, Secho-gu, Seoul 06509, Korea

2) Department of Occupational and Environmental Medicine, Inje University
197 Inje-ro, Gimhae-si 50834, Korea

3) Graduate School of Public Health, The Catholic University of Korea
222 Banpode-ro, Secho-gu, Seoul 06509, Korea

Objectives: This study is to prevent industrial accidents efficiently in recycling process of high-tech electrical and electronic equipments including rare earth elements and to prepare international standards for preemptive response to workers' safety and health in the future.

Methods: Recycling process, working environment, physical and chemical hazardous factors, safety and health standards were investigated through literature review. The current status of recycling factories of rare elements including rare earth elements was investigated through visits to the workplaces and the results of the workplace environment measurement were

reviewed.

Results: Recycling of waste electric and electronic equipments was performed through physical (primary treatments; noise, magnetic field, heat, mechanical safety etc.) and chemical (secondary treatments; metal fume-dust, acid etc.) stages. The hazardous factors that may be exposed at each stage are identified and management measures are proposed. There was no process using new chemicals during recycling or recovering the rare elements. Authors proposed a simple contents such as title, scope, terms, abbreviations and text to prepare a international standard.

Conclusions: It can be used for safety and health management of workers in the process of recycling waste electric and electronic products and for preparing working drafts that can be required in ISO/TC 298 WG2 related to safety and health for workers.

Keywords : Waste electrical and electronic equipment, Rare elements, Rare earth elements, Recycling, Workers, Safety and health

〈연구진〉

연구기관 : 가톨릭대학교 산학협력단

연구책임자 : 김 형 아(교 수, 가톨릭대학교 예방의학교실)

연구 원 : 이 채 관(교 수, 인제대학교 환경산업의학연구소)

연구보조원 : 김 민 지(가톨릭대학교 보건대학원)

연구보조원 : 허 윤(가톨릭대학교 예방의학교실)

보 조 원 : 이 현 정(인제대학교, 환경산업의학연구소)

연구상대역 : 김 현 옥(부 장, 산업화학연구실)

〈연구기간〉

2019. 4. 29 ~ 2019. 10. 31

본 연구는 산업안전보건연구원의 2019년도 위탁연구 용역사업에 의한 것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해
이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을
알려드립니다.

산업안전보건연구원장

전자제품 재활용 등 신공정 유해물질 현황 및 대책 연구

2019-연구원-1453

발 행 일: 2019년 10월 31일

발 행 인: 산업안전보건연구원 원장 고 재 철

연구책임자: 가톨릭대학교 예방의학교실 김 형 아

발 행 처: 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소: (44299) 울산광역시 중구 중가로 400

전 화: (042) 869-0321

F A X : (042) 863-9001

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>