

희소금속을 이용한 산업현황 및 재활용 기술 동향

글 _ 강이승, 이찬기
고등기술연구원 신소재공정센터

1. 서론

최근 산업의 발달로 우주항공, 군사, 의료 등 다양한 분야에서 첨단 소재 및 고기능성 재료 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 국내 주력산업인 IT, 반도체, 디스플레이의 핵심소재로 사용하고 있는 희소금속은 영구자석, 이차전지, LED, 초경공구 등 다양한 제품군에 활용되며 그 중요성이 날로 커지고 있다.

희소금속은 ① 지각 내 존재량이 적거나 추출이 어려운 금속자원 중 현재 산업적 수요가 있고 향후 수요 신장이 예상되는 금속원소, ② 극소수의 국가에 매장량 생산이 편재되어 있거나 특정 국가에서 전량을 수입해 공급에 위협성이 있는 금속원소로 정의하며, 현재 수요가 있는 것과 향후 기술혁신에 수반해 새로운 공업용 수요가 예측되는 금속원소로 정의한다.¹⁾ 희소금속의 정의는 지역별, 시대별로 그 분류기준이 상이하며 현재 우리나라에서는 35종 56개 원소로 정의하고 있다.²⁾ 이용 형태는 광석, 화합물 금속 등 가공단계 및 용도에 따라 여러 형

태로 활용되고 있지만 용도별로는 크게 구조재용과 기능소재로 구분할 수 있다. 구조재용 희소금속은 철강이나 비철금속에 사용하는데 Cr, Ni, Mn, W, Mo, V, Co 등이 있으며 기존 소재의 강도, 내식성, 탄성 및 내마모성을 획기적으로 향상시킬 수 있기 때문에 소량 첨가하고 있다. 반면 첨단산업에서 활용하고 있는 기능성 소재로는 희토류, Ta, Ge, Ga, As, Zr, In, Ti, Si 등이 있다. 이와 같은 희소금속들은 조금만 첨가되어도 독특한 물리적, 화학적 특성을 나타내기 때문에 특수기능성 소재로서 필수적으로 사용된다.²⁾

한편 자원 빈국인 우리나라는 희소금속을 두고 펼치는 국가 간 치열한 경쟁 및 일부 국가의 공급통제 정책 등으로 말미암아 공급의 불안정성이 높으며 국내비축 재고도 낮다. 따라서 주요 자원인 희소금속의 안정적인 확보를 위해 폐제품 자원으로부터 희소금속을 회수하고 자원화하는 것은 매우 중요하다. 그러나 희소금속을 함유하고 있는 폐제품의 회수가 어려워 재활용 물량을 확보하기 어렵고 대상 금속이 미량으로 함유된 경우가 많아 기술



Fig. 1. 희소금속의 주요 사용처.

Table 1. 희유금속의 종류 및 분류²⁾

종류 (35종)	원소 (56개)
알칼리/알칼리토금속 (6종)	Li, Mg, Cs, Be, Sr, Ba
반금속 원소 (9종)	Ge, P, As, Sb, Bi, Se, Te, Sn, Si
철족 원소 (2종)	Co, Ni
보론그룹 원소 (5종)	B, Ga, In, Tl, Cd
고융점 금속 (11종)	Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Re
희토류 금속 (1종)	REE(Rare earth elements) : 17개
백금족 원소 (1종)	Ru, Rh, Os, Pd, Ir, Pt



적 난이도가 높거나 경제성이 매우 떨어지는 문제가 있다. 더구나 국내 시장의 인식 부족, 기술부족, 법적 제도 미비 등의 문제로 폐 제품이 폐기되거나 국외로 유출되는 경우가 많다.^{2,3)}

전술한 바와 같이 우리나라는 매장량이 극히 적고 지역적 편재성이 큰 35종(56 원소)의 금속원소를 희소금속으로 분류하고 있지만, 희소자원 개발과 지속가능한 관리를 위해서는 중요성이 보다 큰 몇 개의 산업군과 광종을 선택해 집중적으로 개발 및 관리하는 것이 보다 더 효율적인 것이다. 또한, 희소금속을 함유하고 있는 폐금속 자원의 발생 및 수거 현황, 재활용 기술 및 관련 업체 현황을 분석하여 자원순환 활성화를 위한 기술적, 제도적 장치를 마련하는 것이 시급한 실정이다. 따라서 본고에서는 국내 주력 산업 및 신성장동력 산업 5가지를 선정하고, 이들 산업군의 특징 및 사용하는 희소금속의 기술 현황, 재활용 기술 현황을 분석하여 향후 지속가능한 관리방안을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1. 디스플레이

현재 디스플레이 산업은 1세대 CRT, 2세대 LCD, PDP, OLED 등의 평판디스플레이(Flat Panel Display, FPD) 세대를 거쳐 3세대 플렉서블형 디스플레이 세대를 향하고 있다.⁴⁾ 1980년 중반부터 생산이 시작된 LCD로 인하여 평판디스플레이 시장은 1985년부터 1995년까지 연간 32% 이상 급격히 성장하였으며, 이후 1995년부터 2007년까지 노트북과 모니터, TV 시장을 중심으로 연간 20% 이상 급성장을 유지한 결과, 전체 디스플레이 시장의

93% 이상을 LCD 디스플레이가 차지하였다. 우리나라는 2001년 이후로 디스플레이 시장 점유율 세계 1위 국가로 성장하였으며 디스플레이 산업의 핵심기술 역시 세계 최고 수준으로 평가받고 있지만, 폐디스플레이에 관한 재활용 기술 및 현황은 선진국 대비 월등히 낮은 수준이다.⁵⁾

디스플레이 소비량이 지속적으로 증가함에 따라 폐제품의 발생량 역시 자연스럽게 증가하고 있는데 국내 폐디스플레이 발생량은 2015년 157만대에서 2025년 1,123만대로 약 7배 이상 증가할 것으로 예상되고 있으며, 이렇게 발생한 폐제품은 전국 각 권역별로 분포한 7개의 RC(Recycling Center)를 중심으로 수거 및 재활용이 이루어지고 있다.^{5,6)} 현재 국내에서 발생하는 FPD의 폐기량 및 수집량에 대한 체계적인 통계 파악은 이루어지지 않고 있지만, 제품의 예상 수명을 10년으로 가정할 경우 2015년부터 약 200-300만대의 폐 FPD 제품이 발생할 것으로 예측된다.⁴⁾ 특히 LCD 제품의 경우 2014년 기준으로 폐제품 발생량은 CRT 제품 대비 약 10% 수준으로 미비하지만, 향후 폐 CRT 제품 발생량을 앞지르고 폐제품 발생량의 거의 대부분을 차지할 것으로 예상된다. 증가하는 폐제품을 효과적으로 수거하기 위하여 2003년 생산자책임재활용제도(Extended Producer Responsibility, EPR)에 텔레비전 제품이 포함된 후 수거율이 증가하긴 했지만, 여전히 RC에서 회수하는 폐제품의 양은 43% 정도로 턱없이 부족한 실정이며 재활용 대상 품목 역시 일부 항목에 국한되어 있다.⁵⁾

한편 EU에서는 100cm² 이상 되는 LCD 제품의 폐기는 불허하고 반드시 회수해야 한다는 내용을 골자로 하는 WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment) 지침을 발표하고, 생산자 책임 재활용 및 전처리를 통한 폐 LCD 제품의 재활용에 적극적으로 나서고 있다. 이에 따르면 제품군별 재생비율이 의무화되고 특정 유해물질의 분리를 의무화하고 있다. EU의 적극적인 대응과 더불어 일본의 경우 정부 정책에 기반을 둔 기업의 LCD 내 일부 소재를 중심으로 한 재활용 연구가 활발히 이루어지고 있고, 미국과 중국에서도 E-scrap에 대한 재활용 입법화 혹은 준비 중이다.⁵⁾

폐 FPD 제품의 재활용이 필요한 이유는 환경적인 요

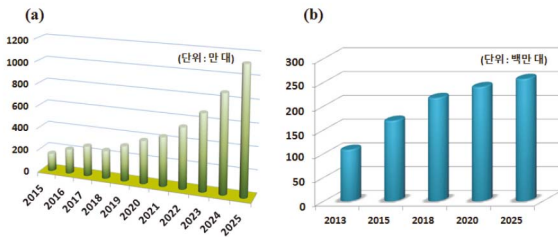


Fig. 2. (a)국내 및 (b)국외 폐 디스플레이 발생량.



인 외에도 사회경제적 가치에서 찾을 수 있다. 폐 FPD 제품에는 비철금속, 플라스틱뿐만 아니라 값비싼 희소금속이 함유되어 있는데 이것의 가치를 따지면 약 33조 원의 가치가 있는 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 현재 재활용 되고 있는 품목은 페디스플레이 해체/분리를 통해 얻은 Case/Frame, 플라스틱 등 비교적 재활용이 용이한 부품들이고, 재활용 기술력이 미비한 패널, BLU 등은 위탁 처리하여 매립/소각 처리하고 있다. 하지만 비철금속이나 플라스틱의 경우에도 조성 별로 구분이 되지 않아 부가 가치를 제대로 내지 못하는 실정이다.

LCD TV/모니터의 대체적인 구성성분을 보면 플라스틱 50-60%, 금속류 10-30%, LCD 패널 10-30% 및 BLU 10% 이하로 구성되어 있다. 이 중에서 LCD 패널 및 BLU는 적은 구성비를 가짐에도 불구하고 내부에 고가의 유용한 자원이 다수 포함되어 있다. 특히 BLU에서 발생하는 희소금속의 발생량을 계산해 보면 LCD TV 한 대당 평균 15개의 CCFL이 들어있고 CCFL 내에는 평균적으로 2.1%의 형광체가 들어 있기 때문에 매년 발생하는 형광체 분말의 양은 대략 80톤에 이를 것으로 추정된다.⁸⁾ 따라서 현재 소각 처리되는 LCD 중 35%의 가격 구성비를 가지는 BLU를 재활용한다면 매우 큰 경제적 가치를 가질 수 있을 것이다.

폐형광체로부터 희토류 원소별로 분리 및 정제하는 방법을 몇 가지 소개해보면 주로 용매추출법을 이용한 연구가 주를 이루고 있다.^{9,10)} 일반적으로 용매추출법은 희토류 원소별 분리에 있어 대표적인 방법으로 효율이 높고, 처리비용이 저렴하며, 생산능력이 크다는 장점이 있다. 2007년 일본에서 수행된 연구 결과에 따르면 폐형광체를 등유에 PC-88A를 녹인 용액을 사용하여 추출함으로써, Fig. 3과 같이 pH 평형상태의 각 금속 원소별 분포비가 다른 것으로부터 Ca, Ba, Sr을 쉽게 분리하였다. 이후에 pH를 1.1 및 1.4로 조절한 후 두 번의 세척을 거침으로써 La 과 Ce을 분리하였고, 다음 공정에서 믹서-세틀러 장치를 pH=1.02 및 pH=2.60의 두 단계로 조절하여 각각 Y와 Tb를 분리하였다. 마지막으로 Eu와 Al 용액에 옥살산을 첨가하여 침전시킴으로써 Eu를 쉽게 분리해낼 수 있다. 이렇게 회수된 Y는 회수율 97.8%, 순도

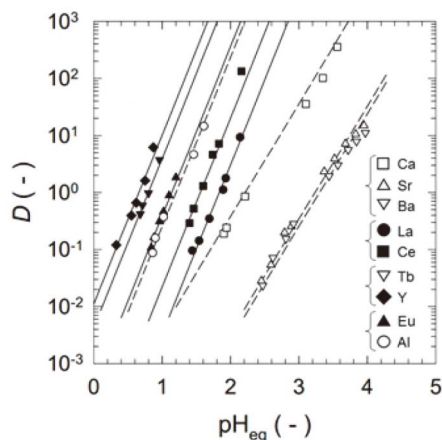


Fig. 3. pH조절이 희토류 원소 분리에 미치는 영향.⁹⁾

98.1%, Tb는 회수율 58.1%, 순도 85.7%, Eu는 52.8%, 순도 약 100%에 달했다. 다만 La과 Ce이 혼합된 용액에서 La과 Ce을 분리하는 것은 불가능했다.⁹⁾

용매추출법에 의한 희토류 분리 및 회수하는 과정에서, PC-88A/등유 이외의 다른 추출용매를 사용하여 그 추출 효율을 비교하는 연구도 진행되었다. 폐산과장 형광체를 산 침출하여 침출 용액을 만들고, 액액 추출로 희토류를 분리한 연구를 살펴보면, 형광체를 질산, 염산, 황산을 이용하여 산 침출한 결과, Table 2와 같이 Y와 Eu의 침출 효율이 다른 원소에 비해 월등히 높음을 확인할 수 있었다. 첫 번째 침출로 황산을 이용한 후, 다시 두 번째 침출로 농도를 길게 한 황산, 질산을 이용하여 산 침출한 결과 La, Ce, Tb가 다른 원소에 비해 월등히 높은 침출 효율을 보였다. 이렇게 침출한 용액에 대해 액액 추출로 희토류 금속을 회수하기 위한 추출용매로, N,N-dioctyldiglycol amic acid(DODGAA)를 용해시킨 n-dodecane과, PC-88A를 용해시킨 n-dodecane, DODGAA를 용해시킨

Table 2. 산 종류에 따른 금속이온의 침출거동¹⁰⁾

	Y	La	Ce	Eu	Pr	Tb	Ca	Sr
HCl	93.3±2.1	N.D.	N.D.	89.2±1.8	N.D.	N.D.	85.1±2.5	>99
HNO ₃	91.6±1.7	N.D.	N.D.	85.7±1.7	N.D.	N.D.	83.5±1.7	>99
H ₂ SO ₄	98.4±1.5	N.D.	N.D.	87.6±1.3	N.D.	N.D.	37.1±1.6	3.2±0.1



[C4min][Tf2N](IL)를 테스트한 결과, 추출제로써 널리 사용되던 PC-88A보다 DODGAA가 더 높은 선별 능력을 보였으며, DODGAA를 이용한 경우에도 n-dodecane보다 IL에 용해시켰을 때, 더 뛰어난 효과가 있었다. 그리고 IL에 용해시킨 DODGAA를 이용한 결과, Y와 Eu를 다른 원소로부터 효과적으로 분리할 수 있었다.¹⁰⁾

2.2. 영구자석

영구자석은 컴퓨터, 스피커, 자동차, 모터 그리고 통신 장비 등 전자기적 장치에 없어서는 안 될 필수적인 소재이다. 미국 내 일반 가정에서 보유하고 있는 희토류자석은 약 40개 이상이며, 완성된 자동차에는 30개 이상이 들어있다. 일반적인 ferrite 자석이 대체되기 시작한 것은 1970년대 말 Sm-Co계 영구자석이 개발된 이후인데 1978년에는 시장형성이 없었던 미국 내 Sm₂O₃의 소비가 1982년에는 1,048톤으로 증가할 정도였다. 이후 원료물질의 단가를 낮추면서 자력을 향상시킬 수 있는 새로운 금속간화합물 자석에 대한 연구가 꾸준히 진행되었고 1983년 Sagawa 등에 의하여 Nd-Fe-B 자석이 개발됨에 따라 희토류계 영구자석의 새로운 장이 열리게 되었다.^{11,12)}

Nd-Fe-B 소결자석은 출현 당시부터 가장 에너지가 높은 자석이였기 때문에 컴퓨터, 사무기기, 가전제품 등 각종 전자, 정보제품의 소형화, 경량화, 자동화에 적합한 소재였다. 따라서 Nd-Fe-B 소결자석은 IT산업, 특히 컴퓨터 산업의 발달과 함께 성장하였다고 하여도 과언이 아니다. 1990년대 들어서 본격적인 상용화의 궤도에 오른

Nd-Fe-B 소결자석은 그동안 VCM(Voice Coil Motor), MRI, motor/generator, 오디오, 비디오, 휴대폰, 전동공구, 가전제품, 자동차 등 다양한 분야에 적용되어 왔으며 점점 그 응용의 폭을 넓혀가고 있다.¹¹⁾ 2000년대 이전에는 Nd-Fe-B 자석의 50% 이상이 hard disc drive의 VCM에 사용되었지만 최근 들어 motor/generator 분야의 비중이 급증하고 있다. 이와 같이 최근 모터 분야의 수요가 급증하고 있는 것은 친환경 자동차인 하이브리드 자동차나 전기자동차의 등장과 그린에너지원인 풍력발전기의 발전에 의한 것으로, 하이브리드 자동차나 전기자동차의 구동에 필요한 모터나 풍력발전기의 효율 향상을 위해서는 고풍성 Nd-Fe-B 소결자석의 적용이 반드시 필요하기 때문이다. 현재 하이브리드 자동차 한 대에는 약 2kg의 Nd-Fe-B 소결자석이 사용되고 있으며, 2018년까지 1-2천만 대의 하이브리드 자동차가 생산될 것으로 예상되는데 이를 충족시키기 위해서는 적어도 2-4만 톤의 Nd-Fe-B 소결자석이 필요하다. 또한, 풍력발전기에서는 현재 1MW당 500kg의 Nd-Fe-B 소결자석이 필요하며, 이 용도만으로도 매년 25%의 성장률을 보일 것으로 예측되고 있다.

국내의 경우 Nd-Fe-B 자석을 전량 수입에 의존하고 있으며 수입된 자석을 일부 가공하여 판매하는데 그치고 있다. 가공 과정에서 20-30%의 손실이 스크랩의 형태로 나타내며 이러한 스크랩은 재활용하지 못하고 수집하여 중국에 수출하는 것으로 조사되었다.

해외에서도 Nd-Fe-B 자석을 재활용할 수 있는 상용 기술은 존재하지 않는다. 다만 하드 디스크 및 자석 활용 제조업체를 중심으로 Hitachi, Showa Denko, Mitsubishi Materials(일본), ECC(미국) 등에서 상용화를 목표로 기술 개발 중에 있다.

Mitsubishi에서는 영구자석을 포함하는 폐가전제품으로부터 자석이 들어있는 컴프레서 부분을 분해한 후 영구자석과 기타 금속을 분류하는 연구를 수행하였다. (Fig. 5) 컴프레서 rotor에 들어있는 영구자석의 양은 에어컨의 경우 약 100g, 세탁기의 경우 약 150g이기 때문에 적지 않은 양의 자석을 분리 및 회수할 수 있다. 하지만 rotor에서 자석을 분리한 후에 탈 자화 공정을 거치기 때

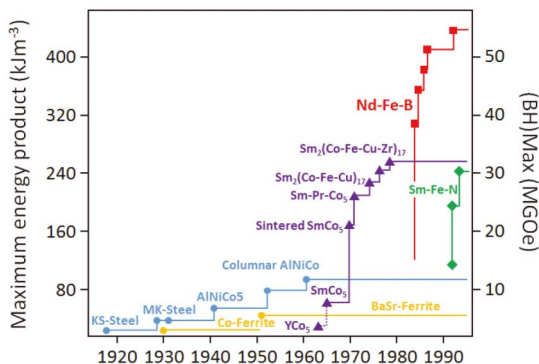


Fig. 4. 20세기 경자성재료의 발전 과정.

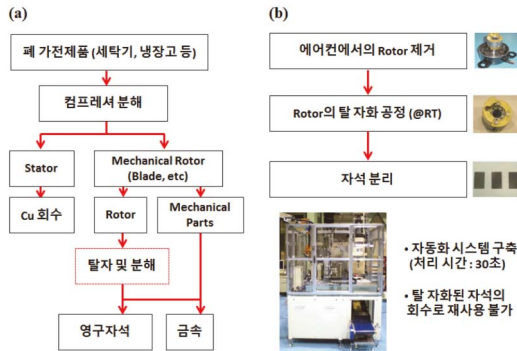


Fig. 5. Mitsubishi에서 개발한 Nd-Fe-B 자석 분리 (a)기술 공정도 및 (b)회수 시스템.

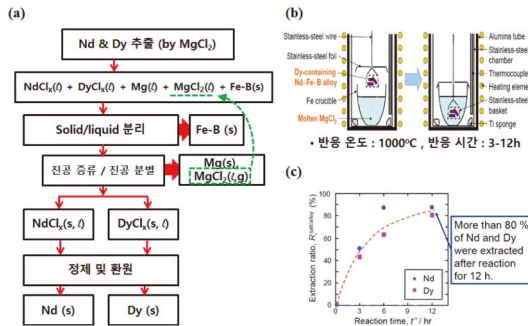


Fig. 6. 동경대학교에서 개발한 Molten Salt법을 이용한 Nd와 Dy의 회수 (a)기술 공정도, (b) 실험 장치 개략도 및 (c) 회수율 결과.

문에 개발된 장치의 빠른 tack time에도 불구하고 자석 재사용의 가치가 떨어지는 문제가 있다.

동경대학교에서는 Molten Salt 법을 이용하여 Nd-Fe-B 자석으로부터 Nd와 Dy를 회수하는 방안을 연구하였다. MgCl₂ 용탕 내에서 Fe와 B를 우선적으로 분리한 후에 정제 및 환원을 통해 Nd와 Dy를 최종적으로 회수하였는데 이 과정에서 사용하는 MgCl₂는 단계 내에서 지속적으로 재활용하여 사용할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 이러한 노력에도 불구하고 Nd-Fe-B 자석 재활용 기술 개발에는 몇 가지 걸림돌이 있다. 첫 번째는 Nd-Fe-B 자석 가공 과정에서 스크랩이 발생할 때 표면의 부식 및 산화로 인해 자력이 감소한다는 점이다. 일부 연구에서는 Nd-Fe-B 스크랩을 이용하여 자석으로 재사용하는 선순환 공정을 만들고자 하였으나 스크랩 자체의 자력이 감소하는 문제로 인해 실현되기 어려운 공정이라고

사료된다. 두 번째 문제는 Nd-Fe-B 자석 표면의 부식 방식을 위해 Ni 도금을 한다는 점이다. Nd 원소 회수를 위해서는 Ni 도금을 우선적으로 제거해야 하는데 이로 인해 공정의 난이도가 높아지고 단가가 상승하여 경제성이 떨어지는 문제가 있다.

2.3. 일차, 이차 전지

전지란 두 전극판 사이에 존재하는 전해질에 금속 이온이 녹으면 금속의 특성에 따라 전위차가 생겨 전류를 발생시키는 화학 물질을 말한다. 전지의 종류는 일반적으로 가정에서 사용하는 건전지처럼 한 번 쓰고 나면 다시 충전해서 쓸 수 없는 일차 전지와 다시 충전해서 재사용할 수 있는 이차 전지로 구분할 수 있다. 일차 전지의 종류에는 알칼리 전지, 건전지, 수은 전지, 리튬 전지 등이 있으며, 이차 전지에는 니켈-카드뮴 전지, 니켈-수소 전지(NiMH battery), 리튬 이온 전지(Li Ion Secondary Batteries), 리튬 이온 폴리머 전지(Li Ion Polymer Secondary Batteries) 그리고 납 축전지(Lead-acid battery) 등이 있다.¹³⁾ 이차 전지는 여러 번 충전하여 사용할 수 있기 때문에 일차 전지에 비해 경제적, 환경적으로 이점이 많은 것 같지만, 일차 전지에 비해 더 비싸고 화학부나 금속의 독성이 강하다는 문제점이 있다.¹⁴⁾ 가장 대표적인 일차 전지로는 알칼리 전지를 꼽을 수 있는데, 음극은 Zn 분말 전극, 양극은 MnO₂ 전극을 사용하고 전해질은 알칼리 물질인 KOH를 사용한다.

전지가 연결되면 아래와 같은 반응식을 따르는 자발적인 산화·환원 반응이 진행되며 전극이 다 소모되거나 전해질이 고갈되어 더 이상 산화·환원 반응이 일어나지 못하면 전지의 수명은 다하게 된다.

대표적인 이차전지를 꼽으면 전통적으로 사용해온 납

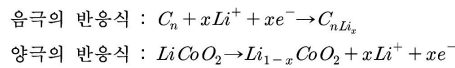


Fig. 7. 알칼리 전지의 (a)단면 및 (b)내부 구성 요소



음극의 반응식 : $Zn(s) + 2OH^-(aq) \rightarrow ZnO(s) + H_2O(l) + 2e^-$
 양극의 반응식 : $2MnO_2(s) + H_2O(l) + 2e^- \rightarrow Mn_2O_3(s) + 2OH^-$

축전지와 최근 각광받고 있는 리튬이온전지를 꼽을 수 있다. 리튬 이온전지를 예로 들면 방전과정에서 Li 이온이 음극에서 양극으로 이동하고, 충전 시에는 Li 이온이 양극에서 음극으로 이동하여 제자리를 찾는 방식이다. 리튬이온 전지는 에너지 밀도가 높고 기억 효과(Memory effect)가 없으며 사용하지 않을 때 발생하는 자연방전의 양이 적기 때문에 휴대용 전자 기기에 많이 사용되고 있다.



각종 휴대용 전자기기 및 가전제품에 필수적으로 전지가 사용되다 보니 연간 발생하는 폐전지의 양만 약 10억 개 이상 발생하고 있으며 2003년부터는 과거 예치금 부과 대상이던 산화은 전지가 생산자책임재활용제도(Extended Producer Responsibility, EPR) 대상에 포함되었으며 2005년에는 리튬이온 전지가 추가로 포함되었다. 2008년부터는 망간전지 및 알칼리 망간 전지 등의 모든 폐전지가 EPR 대상에 포함되어 폐전지 재활용 기술개발의 필요성은 더욱 커졌다.

폐전지 중에서도 사용량이 가장 많은 망간 및 알칼리 망간 전지는 무수은 전지의 시판으로 직접적인 환경오염은 없지만, Mn, Zn, Fe 등의 금속과 NaOH, NH₄Cl 등의 전해액이 사용되고 있으므로 매립, 소각에 의한 환경오염을 줄이기 위하여 폐전지의 친환경적인 분해 및 재활용 기술 개발이 필요한 상황이다. 또한, 군용 및 민간용으로 연간 250톤의 리튬 일차전지가 사용되어 폐기물로 발생하고 있으며, 2004년까지는 전량 매립 처리되었으나 이송 중 화재 및 폭발사고가 발생하고 매립 시에도 폭발

및 화재, 전해액 등으로 인한 환경오염 문제가 발생하여 2005년부터는 매립장에서 반입을 꺼리고 있다. 현재 국내에는 니켈-카드뮴 폐전지를 제외하고는 본격적인 재활용기술이 확립되어 있지 않아 재활용이 이루어지지 못하고 있으나 환경적 차원에서나 자원의 효율적 이용면에서 폐전지의 재활용에 대한 요구가 급증하고 있으므로 경제성 있는 재활용 기술개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.¹⁵⁾

현재 국내에서는 한국전해재활용협회에서 전지를 수거하고 있으며 각 지방 지자체 및 한국환경공단, 한국순환자원유통지원센터 등에서도 수거 업무를 담당하고 있다. 2012년까지 공개된 자료에 의하면 폐망간/알칼리 망간 전지 발생량에 비하여 재활용량과 재활용률은 턱없이 부족한 현황인 것으로 나타났다.

현재까지는 폐전지의 재활용률이 미미하지만, 폐전지 재활용 기술 개발을 통해 전략 광물인 Co, Mn, Zn, Ni 등을 국내에서 원료 확보가 가능하며 폐전지로 인한 환경오염문제를 해결함으로써 전지산업의 활성화와 국내 제조산업의 경쟁력을 높일 수 있다. 망간/알칼리 망간 전지의 주요 구성성분인 Mn의 국내 수요는 약 70만 톤으로 전량 수입하고 있으며, Zn은 도금재료, 피복 재료, 합금 등에 쓰이고 있는데 아연광의 2004년 국내 생산량은 30톤이고 수입은 1.15백만 톤(2005년)톤으로 국내 자급도는 거의 전무한 실정이다. 또한, 페리튬 이온 전지에는 Co(5-10%), Ni(5-10%), Li(5-7%) 등의 유가금속성분을 다량 함유하고 있으며 Co의 경우 페리튬 이차전지 재활용을 통해 연간 30-60톤의 Co를 얻을 수 있다는 연구결과가 있다.¹⁵⁾

리튬 이차전지 재활용 기술개발 중인 업체 현황을 살펴보면, 일본의 DOWA홀딩스(株)은 2010년 리튬이온 전지 제조공정에서 발생하는 스크랩 및 사용한 리튬이온

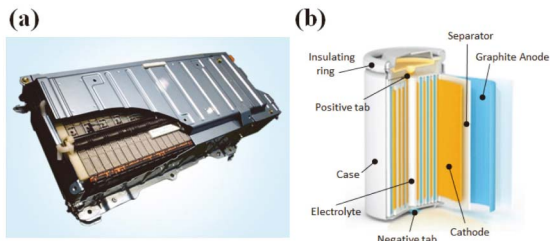


Fig. 8. 이차 전지의 (a)단면 및 (b)내부 구성 요소

Table 3. 폐 제품 발생량 및 재활용량

	2008	2009	2010	2011	2012
출고량 (천 톤)	13.2	11.7	11.2	12.6	10.5
재활용량 (천 톤)	0.8	1.1	1.6	1.7	1.9
재활용률 (%)	5.9	9.6	14.3	14.1	18.1



Table 4. 폐 리튬전지 재활용 방법의 기술적 분류¹⁶⁾

기술	중전유무	재활용 방법
폐 리튬전지 재활용 기술	1차전지	건식법
		습식법
	2차전지	건식·습식 혼합

Table 5. 주요 폐 리튬이차전지 재활용 업체 및 기술 동향

국가	업체명	핵심기술	특징
미국	Toxco	냉각-파쇄, 습식 회수	- 액체 아르곤으로 폐리튬전지를 -195℃로 냉각 후 파쇄하여 화재 및 폭발 방지 - 기계적 파쇄를 거친 후 습식공정을 통해 탄산리튬 회수
	RECYTEC	건식 회수	- 열분해와 자력선별에 의해 철스크랩과 무수인 아연분진이 얻어지고 특정 재활용 프로세스를 통해 유가금속 회수 - NiCd 전지를 제외한 거의 모든 전지 재활용에 사용
유럽	BATREC	건식 회수	- 일본 SUMITOMO사의 프로세스를 기본으로 제작
	AED	습식 회수	- 용매추출, 이온교환, 막분리 기술을 혼합한 프로세스 - 리튬전지 내 물질을 분리하기 위해서 분쇄기술을 이용하였으며 상온에서 환원반응을 이용하여 코발트를 회수
	ACCUREC	건식 회수	- LiMnO ₂ 전지를 진공중류를 통한 재활용
	SNAM	건식 회수	- 열분해와 자력선별을 이용한 제처리 및 재활용
	유미코어	건식 회수	- 별도의 전처리 없이 전지 전체를 smelter에 투입 - Smelter에서 회수되는 슬래그는 건설용 재료로 활용하고 코발트, 니켈, 구리 등으로 구성된 합금상은 습식침출, 용매추출 등의 공정을 적용하여 코발트 산화물과 니켈화합물 제조 - 용융과정에서 리튬이 슬래그로 50%, 배기가스로 50%가 배출되어 리튬을 회수하지 못하는 것이 단점
뉴질랜드	퍼시픽리튬	습식 회수	- 파쇄된 폐 리튬전지를 물에서 용해시켜 리튬염과 불순물들을 이온교환 멤브레인을 이용하여 분리 - 수산화리튬만을 농축하여 정제된 리튬수산화물 수용액으로부터 탄산리튬 회수
일본	SUMITOMO	건식 야금	- NiCd 전지를 제외하고 모든 휴대용 전지 재활용에 사용되는 프로세스 - 환원단계에서 발생된 가스로부터 수은을 회수하고 열분해를 통하여 페로망간합금이 생산
	도시바	습식 회수	- 폐 리튬이차전지를 시간당 10kg씩 처리할 수 있는 재활용공정의 파일럿 플랜트 - 폐전지를 해체하고 자력선별, 크기선별, 비중선별법으로 코발트 성분을 농축 - 황산을 침출제로 습식 침출하여 침출용액으로부터 수산화코발트를 침전 후 입자직경을 조절하여 구상코발트를 회수 - 침출용액으로부터 리튬이온만을 이온교환막을 사용하여 정제한 뒤 탄산리튬으로 침전, 회수
한국	(주)코바	습식 야금	- 물리적 해체-분리 이후 황산침출법을 이용하여 코발트와 리튬을 회수 및 재활용
	성일하이텍㈜	습식 야금	- 열처리 후 황산침출법을 이용하여 코발트와 리튬을 회수 및 황산코발트, 황산니켈로 재활용

전지의 재활용 기술을 상용화했으며 연간 1천 톤 이상을 처리하여 제련원료로 사용가능하다고 발표하였다. 또한, 도시바에서는 폐 리튬이온 전지를 시간당 10 kg 처리 가능한 재활용 공정 파일럿 플랜트를 개발하여 순도 99.8%의 구상 코발트 회수 및 침출용액으로부터 99.9%의 탄산리튬을 회수하고 있다. 유럽의 경우 스위스의 RECYTEC, BATREC, 독일의 AED, ACCUREC, 프랑스의 SNAM, 벨기에의 유미코어에서 리튬이온 전지에 대한 재활용 기술을 개발하였다. 특히 유미코어는 건식 처리공정으로 연간 4천 톤의 폐 리튬이온전지를 재활용하여 코발트 산화물과 니켈 화합물의 형태로 회수, 이차전지 원료로 제공하지만, 용융과정에서 Li이 슬래그로 50%, 배기가스로 50%가 배출되어 Li을 회수하지 못하는 것이 단점으로 꼽힌다.

국내의 경우 한국지질자원연구원에서 리튬이온 전지 재활용 공정을 연구·개발하였으며 (주)코바에서 연 500 ton 규모의 재활용 설비를 시험 운영 중에 있다. (주)성일하이텍에서는 한국생산기술연구원과 공동개발로 열처리 후 습식 추출을 이용한 재활용 기술 양산화에 성공하여 국내 최초 리튬이온 전지 재활용 공장을 준공하였다. 이 라인을 통해 약 97%의 유가금속을 회수하고 있으며, 순도 99.98%의 코발트 화합물과 순도 99.99%의 리튬 화합물을 회수하고 있다. 또한, 포스코와 LS니꼬 동제련은 리튬이온 전지에 대한 재활용 기술과 사업모델을 공유하여 리튬이온 전지 재활용사업 환경과 경제성을 검토하는 것으로 알려져 있다.

2.4. 반도체 공정부산물

실리콘 웨이퍼는 8-11N의 순도를 갖는 실리콘 잉곳을 시작으로 절단, 연마, 평탄화 및 박형화, 식각 세정 공정을 거쳐 웨이퍼로 가공된다. 웨이퍼 가공공정에서 발생하는 폐기물 및 공정 부산물로는 와이어 커팅 공정 폐기물, 백그라인딩(back grinding) 공정 폐기물, 실리콘 잉곳 등이 있는데, 전체 실리콘 폐기물 중 백그라인딩 공정에서 발생하는 공정 부산물이 90% 이상을 차지하고 있다. 백그라인딩 공정에서 사용하는 웨이퍼는 8인치 크기를 기준으로 와이어 커팅된 웨이퍼의 두께가 700-750 μm 되도록

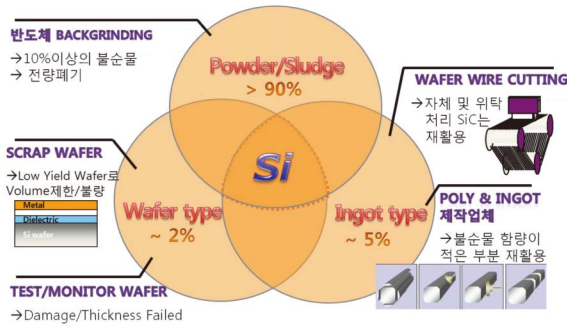


Fig. 9. 반도체 공정 실리콘 폐기물의 종류 및 발생현황.

	Rough Grinding	Fine Grinding	Polishing
Grinding			
Mesh	#325~400	#2000	Slurry + DI Water

Fig. 10. 반도체용 웨이퍼의 백 그라인딩 공정.

커팅하는데, 거의 대부분의 웨이퍼는 두께를 300 μm로 맞추기 위해 뒷부분을 그라인딩하며 이 중 일부는 80-150 μm 만 남기고 그라인딩 하기도 한다. 웨이퍼의 가공 및 박형화는 반도체 패키지 로드맵을 따라가고 있으며, 현재 MCP 및 3D Package 부분으로 비약적인 발전을 하고 있기 때문에 최근에 요구되는 웨이퍼의 두께는 30 μm 미만으로 급속도로 얇아지고 있다. 이러한 기술적 추세에 따라 백 그라인딩시 발생하는 실리콘 슬러지의 양 또한 급격하게 증가하고 있다.

특히 백 그라인딩 공정에서 발생하는 폐기물은 순도가 낮고 불순물의 처리가 어려워 전문 업체를 통해 매립하거나 해외로 수출하고 있으며 그 발생량은 약 2,500톤/년으로 추정되고 있다. 반면에 잉곳 형태의 실리콘 스크랩은 순도가 높고 다른 산업 및 공정에 활용가치가 높아서 실리콘 가공 및 웨이퍼 제조업체에서 직접 재활용하거나 위탁 처리 업체 등을 통해 반도체 또는 태양전지의 원료로 재이용 또는 재활용하고 있다.¹⁷⁾ 잉곳 형태의 실리콘 소재의 발생량은 2,000톤/년 정도지만, 대부분 재사용하고 있어서 실질적으로 폐기되거나 반출되지 않는다.

재활용 기술 개발 필요성이 있는 백 그라인딩 공정에서 발생하는 폐기물을 좀 더 자세히 살펴보면 그라인딩 공정에서 발생하는 폐기물과 폴리싱 공정에서 발생하는 폐기물로 나눌 수 있다. 그라인딩 공정에서 발생하는 실

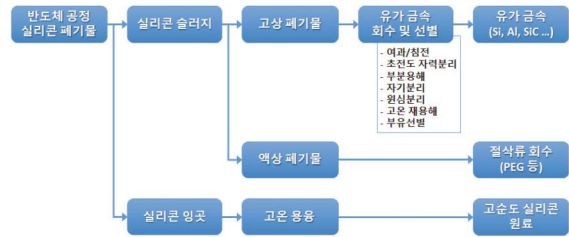


Fig. 11. 반도체 공정 실리콘 폐기물의 재활용 연구 동향.

Table 6. 웨이퍼 제조공정 실리콘 폐기물의 재활용 요소기술 및 특징

처리 기술	특징
여과/침전	상온에서 슬러리로부터 클리블 오일을 여과 분리하고 고온에서 실리콘 스크랩으로부터 SiC와 Si ₃ N ₄ 를 여과 분리 배치식이고 미세 입자의 개체물은 제거하지 못하는 문제가 있을 필드가 높고 큰 사이즈의 분말이 먼저 가라앉는 것을 이용 상온 수용액 또는 고온 용융 실리콘 시스템에 적용할 수 있음
초전도 자력분리	슬러리로부터 큰 사이즈의 SiC 연마제와 오일을 회수할 수 있는 방법 에너지 소모가 큰 문제가 있음
부분용해	높은 회수율로 MG-Si(metallurgical grade Si)를 정련할 수 있음 75%의 수율로 순도 99.95%의 실리콘을 얻을 수 있음 분배계수가 1에 가까운 B와 P의 제거에는 추가공정이 필요
전자기분리	용융금속으로부터 전자기적 방법으로 입자를 분리하는 방법 초 정정 급속을 제조할 수 있는 기술 용융 실리콘의 전기전도도가 높은 성질을 이용 비금속계물질이나 저전도성 금속입자들을 제거
원심분리	원심분리 후에 혼합물은 3층으로 분리되는데 상층에는 소량의 SiC를 함유한 실리콘, 중간층에는 무거운 액체, 하층에는 그보다 더 무거운 SiC가 분리됨
고온 재용해	SoG-Si 슬러리로부터 SiC 입자를 제거 도가니에 넣은 슬러리를 1470°C 이상에서 충분한 시간 동안 가열. SiC보다 가벼운 액상 Si가 도가니의 상부로 떠오르는 원리
부유선별	거품의 부유를 통해 용융 실리콘에서 제2상 입자를 제거. 실리콘 표면에 대한 높은 선택성을 가진 몇 가지 유기 표면활성제 이용 비용효과가 높은 것으로 알려졌지만 미세 입자들에 대한 분리효율은 높지 않아 단점으로 지적됨

리콘 소재는 대부분 큰 사이즈에 순도가 높은 실리콘 소재가 발생하는 반면, 폴리싱 공정에서 발생하는 실리콘 슬러지의 경우, 연마제(Al₂O₃, SiC, SiO₂ 등)의 혼입으로 인해 불순물의 함량이 높다. 하지만 가공하는 업체에서 두 공정에서 발생하는 슬러지를 따로 관리하지 않기 때문에 전체적으로 실리콘은 유·무기 불순물이 적게는 10%, 많게는 30% 까지 포함되어 있다. 또한 고객사의 니즈에 따라 웨이퍼를 가공하는 사업장 및 장비마다 실리콘 및 불순물의 순도와 성상이 다르기 때문에 균일한 실리콘 폐기물을 얻기란 불가능에 가깝다.

국내에 공개된 실리콘 재활용에 관한 특허를 조사한 결과, 대략 50여건의 특허가 검색되었으며, 대부분 반도체



체 웨이퍼의 인쇄패턴을 제거하여 태양전지용으로 활용하는 방안을 다루고 있다. 대상이 되는 물질은 실리콘 잉곳 성장 및 잉곳의 와이어 절단, 웨이퍼의 경면연마에서 발생하는 실리콘 슬러지를 중심으로 연구되었으며, 희소한 실리콘의 순도가 낮고 공정에 대한 사업성 연계가 부족해 기초적인 R&D 단계에 머물러 있는 상황이다.

국내의 반도체용 실리콘 웨이퍼를 재생 가공하는 업체로는 유스테크코리아, 후지미 파인테크놀로지 등이 있는데 반도체용 웨이퍼의 막 제거, 화학재생 그리고 연마재생 등의 공정을 통해 웨이퍼를 재생하고 있다. 이렇게 재생된 실리콘 웨이퍼는 앞선 특허 분석 결과와 유사하게 태양전지용 실리콘 웨이퍼로 제한적으로 재활용하고 있으며, 백 그라인딩에 의해 발생한 실리콘 슬러지에 대한 재활용 기술 및 소재화 기술에 대한 소개는 많이 되어 있으나 경제성의 이유로 상업화 실적은 없는 상태이다.

2.5. 초경공구

반도체, 전자, 정밀 산업 등의 성장과 더불어 다양한 신소재가 개발됨에 따라 이 재료를 가공하기 위한 가공 기계와 가공성에 대한 요구가 높아지고 관련 공구인 초경공구 및 다이아몬드공구와 같은 절삭공구에 대한 개발 및 수요가 급격히 증가하고 있다. 초경공구는 경도가 뛰어난 세라믹 재료와 인성이 높은 고속도강의 중간 정도 성질을 갖고 있어, 고온에서 높은 경도와 항절력을 가진다. 이에 따라 내마모성, 절삭성, 경도 등의 기계적 특성이 우수하여 정밀한 가공을 필요로 하는 산업현장에 널리 사용되고 있다. 반면, 다이아몬드공구는 지구상에서 가장 단단한 물질인 다이아몬드를 원료로 사용해 유리 혹은 세라믹과 같은 고경도 재료의 가공이나 콘크리트, 아스팔트 그리고 화강암과 같은 마모가 심한 재료의 가공 공구로 사용된다.¹⁸⁾

최근 초경공구의 수명을 향상시키기 위해 초경공구 표면에 다이아몬드 코팅을 적용한 초경 공구, 초경 모재를 이용해 다이아몬드 코팅 형태로 구현한 다이아몬드공구도 개발됨에 따라 두 공구 간의 경계는 점차 허물어지고 있다. 대표적인 기계소재인 초경 재료는 1900년대 프랑스의 Moissan에 의한 텅스텐카바이드 합성을 시초로, 1

차 세계대전 이후 1923년 독일의 Schroter에 의해 분말 형태의 텅스텐카바이드와 금속 코발트를 혼합하여 액상 소결시킴으로 초경합금 소재가 탄생했다.¹⁹⁾ 그 후 1930년경에 미국 General electric사와 일본의 Tungalloy사로부터 초경합금이 개발되어 상품화되었고 WC-Co, WC-TiC-Co, WC-TiC-TaC-Co의 3계열 합금이 초경 공구의 주류를 이루고 있다.²⁰⁾ 국내의 경우, 대한 중석 등에서 입자 미세화에 대한 연구를 1980년대부터 수행하여 현재 카바이드 입자 크기가 0.5 μm 정도의 초경합금 제품을 생산하고 있으나, 외국의 기술 수준에는 미치지 못하고 있는 실정이다.²¹⁾ 초경 재료의 기계적 특성은 크게 소결 조건, 코발트 함량, 원료의 입자크기(WC, Co)에 의존하는 경향이 있으며, (Fig. 12.) 특히, 코발트의 입자크기, 분포 및 형상에 따라 초경재료의 기계적 특성을 변화를 가져온다. 예를 들어, 동일한 WC 원료를 사용하여도 미세한 Co 원료를 사용할 경우, 보다 조대한 WC가 형성되어 인성이 우수한 초경합금을 제조할 수 있다. 따라서 미세한 Co 입자를 제조하는 기술이 초경공구 특성 향상에 매우 필수적인 역할을 한다고 할 수 있다.^{22,23)}

다이아몬드공구 분야에서의 코발트와 같은 금속 결합체의 두 가지 주된 기능은 다이아몬드를 단단히 지지하고 다이아몬드의 결손에 적절히 맞추어 마모되는 것이다. 다이아몬드 입자가 너무 적게 돌출되거나 일찍 떨어져 나가지 않도록 하기 위해서는 피삭재의 마모 경향에 맞추어 본드의 내마모성을 결정해야 한다. 다이아몬드보다 너무 빨리 마모되는 금속 결합체를 사용하면 다이아몬드가 쉽게 손실될 수 있으며, 반면에 극도로 내마모 저항성이 강

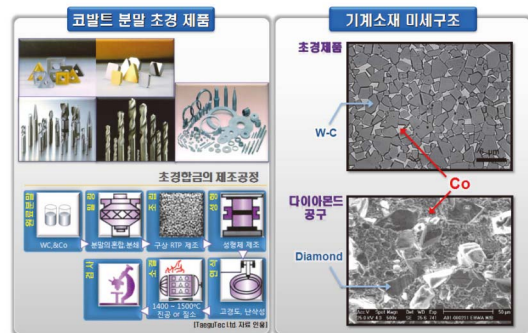


Fig. 12. 코발트 분말 초경제품 및 기계소재 미세구조



한 금속 결합체는 다이아몬드가 깨져서 새롭게 다이아몬드가 돌출되는 것보다 더 늦게 결합체가 마모되어 절삭 팁 표면이 매끈해지고 더 이상 작업이 불가능한 상태인 **막힘 (glazing)** 현상이 나타난다.

다이아몬드공구에서 코발트는 이러한 역할에 가장 적합한 소재이며 제조 공정에 있어서도 우수한 성형성과 입자 크기, 형상, 화학적 순도 등이 다양한 형태로 사용 가능하며, 상대적으로 낮은 온도, 압력 하에서 소결에 의해 이론 밀도까지 효과적으로 치밀화할 수 있는 장점을 갖고 있어 가장 보편적으로 사용하는 소재이다.

Fig. 13에서는 국내의 기계소재용 코발트에 대한 국내 흐름을 나타내고 있다. 코발트와 관련된 광산이 전무하고, 제련시설이 미흡함에 따라, 기계 공구용 코발트 관련 업체는 코발트 금속분말 및 금속과 상태로 한국유미코아 등의 수입업체를 통하여 대부분을 조달하고 있다. 창성, TMC코리아 등에서 코발트 금속분말을 일부 제조, 재활용하고 있으며, 이렇게 조달된 코발트 분말 및 코발트 금속을 이용하여 대표적 초경공구 업체인 대구텍과 다이아몬드공구업체인 이화다이아몬드, 신한다이아몬드, 효성다이아몬드에서 절삭공구, 내마모공구 및 다이아몬드공구 등의 기계소재용 공구를 제작하고 있다. 초경공구 및 다이아몬드공구의 종류에 따라 코발트의 함유량은 매우 다양하지만, 대략 연간 500여 톤의 코발트가 각종 기계소재용 공구제작에 사용되고 있다. 이때 발생하는 공정스क्र랩은 대부분 수거하여 재사용되나, 사용 후 폐기되는 공구의 경우는 재활용 기술의 부족으로 인해 연간 20% 이상의 폐스크랩이 그대로 폐기 또는 수출 되고 있는 실정이다. 나머지는 향후 재활용을 위해 축적하고 있는 것으로 파악된다.

이와 같이 초경 공구 내 코발트 재활용 기술의 부재로 현재 연구는 초경 공구에 사용하는 코발트의 양을 줄이

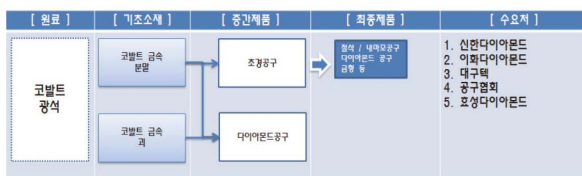


Fig. 13. 기계소재용 코발트 국내 물질흐름.

Table 7. 코발트 저감·대체 합금 분말의 조성구 특성²⁴⁾

Model	Chemical composition	Oxygen content(%)	Fisher sub-sieve size(μm)	Theoretical density (g/cm ³)	Apparent density (g/cm ³)	Producer
Cobalite 601	70% Fe	0.5	4.9~5.0	8.18~8.20	1.68~2.10	Union Miniere
	20% Cu					
Cobalite 801	10% Co	0.27~0.40	2.9~4.0	8.80	1.60~1.83	
	55% Cu					
	25% Co					
Next 100	13% Fe	0.8~1.2	1.0~2.5	N.A.	1.05~1.65	Eurotung stene
Next 200	7% Ni					
	Cu, Fe, Co	0.8~1.2	1.0~2.4	N.A.	0.95~1.55	

는 방향으로 연구가 진행되고 있다. Table 7에서는 코발트 저감을 위해 제조사별로 상업화시킨 합금 분말의 조성구 특성을 나타내고 있다. 그러나 합금 분말 제품들은 코발트와 같은 동일한 특성을 보이지 못하고 있으며, 여전히 코발트와 유사한 소결 특성과 작업성을 갖기 위해 공정을 개선시키고 있다. 다이아몬드공구업체들은 이들 코발트 분말과 개발된 대체품을 혼합시켜 사용하거나 제한적인 용도로 활용하고 있으며, 이와는 별도로 독자적인 연구를 진행하여 코발트와 다른 첨가원소와의 기계적 합금화 처리 등을 통해 코발트 사용을 저감시키려는 연구를 꾸준히 진행시키고 있는 상황이다.²⁴⁾

3. 결론

우리나라는 희소금속 자급률이 12%에 그칠 만큼 부존량 및 원료 단계 가공 기술이 절대적으로 부족하다. 열악한 원재료 부존량과 더불어 국내 특유의 산업구조로 인하여 희소금속 산업의 대부분은 최종제품 단계에 집중되어 있고, 이로 인해 원료 및 기초 소재 기술인 광물의 정·제련 기술과 중간제품 단계인 소재·부품 기술이 매우 미흡한 실정이다. 그 결과 핵심 기술의 대부분을 수입에 의존하거나, 재활용 기술 개발을 통한 사업화에 대한 인프라가 부족하여 축적된 스크랩이나 폐기물을 해외로 수출하는 문제가 있다. 이와 같은 희소금속의 자원 문제 해결을 위해 정부와 POSCO 등의 기업에서도 희소금속 원료확보를 위한 해외광산 투자에 적극적으로 나서고 있으나, 국내의 희소금속 원소의 분리/정제 및 고순도화 기술 등은 Lab scale의 기초적인 수준에 머무르고 있으며,



정제된 희소금속의 상업적인 제조가 거의 이루어지지 않아 희소금속 산업 발전을 위한 원료의 안정적인 공급 및 산업 기반 조성의 구축이 어려운 상황이다.

이러한 상황을 타개하기 위해 정부에서는 2009년 “희소금속 소재 산업육성 종합대책(지식경제부)”을 발표하고 ‘희소금속 산업 육성위원회’를 구성하여 산·학·연의 협력을 강화하려고 노력하고 있다. 이와 더불어 한국지질자원연구원에서는 ‘희유금속 광물의 처리’, ‘희유금속의 분리/정제’ 등에 대한 연구를 지속적으로 수행해왔으며, 고등기술연구원, 한국과학기술연구원, 한국생산기술연구원 등의 정부출연연구소와 대학에서 희소금속의 고순도화 기술, 재활용 기술, 대체 및 저감 기술 등에 대한 연구를 진행하고 있다. 그러나 이러한 정부 정책 및 연구소, 대학의 연구성과가 실제 산업과 연계되지 않고 있고, 수거 방안 및 재활용 방안에 미흡한 부분이 여전히 많이 존재하고 있어 본고를 통해 이러한 문제점을 짚어 보았다.

우선적으로 ① 폐제품의 발생량, 재활용 기술의 난이도, 사업화에 대한 경제성 등을 종합적으로 고려하여 주요 타겟을 정하는 것이 중요하고, ② 정부 정책과 산·학·연의 유기적인 협력 관계 구축을 통해 희소금속 재활용 기술을 이용한 원료 확보 대책을 마련하며, ③ 저감 기술 및 대체소재 개발을 통한 희소금속 수요 조절을 할 수 있다면 국제적으로 문제 되고 있는 공급자의 시장 지배력을 벗어나 수요 자간 수요확보를 위한 경쟁에서 우위를 점할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Rare earth elements-critical resources for high technology, U. S. geological survey, fact sheet 087-02, USGS (2002).
2. 한국비철금속학회, 산업용 원자재 중장기 수급 안정화 방안 연구(희유금속을 중심으로) 최종보고서, 지식경제부, 2008
3. 이병욱, 폐금속자원 희유금속 자원순환 활성화를 위한 기술적·제도적 지원방안, 한국환경정책·평가연구원, 2011
4. H. S. Hong, M. S. Kong, S. K. Lee, and H. Y. Kang, “Overview and Future Concerns for Recycling Display

- Wastes,” *KIC News*, **13** 10-19 (2010).
5. L. Kang, D. Shin, J. Lee, J. W. Ahn, and H. S. Hong, “Current Technology Trends Analysis on the Recovery of Rare Earth Elements from Fluorescent Substance in the Cold Cathode Fluorescent Lamps of Waste Flat Panel Displays,” *J. Kor. Powd. Met. Inst.* **22** 27-31 (2015).
6. J. Li, S. Gao, H. Duan, and L. Liu, “Recovery of Valuable Materials from Waste Liquid Crystal Display Panel,” *Waste Manage.*, **29** 2033-39 (2009).
7. J. Cryan, K. Freegard, L. Morrish, and N. Myles, “Demonstration of Flat Panel Display Recycling Technologies,” *WRAP final report*, **46** (2010).
8. M. Buchert, A. Manhart, D. Bleher, and D. Pingel, Oeko-Institute.V (2012).
9. A. Otsuki, G. Mei, Y. Jiang, M. Matsuda, A. Shibayama, J. Sadaki, and T. Fujita, “Solid-Solid Separation of Fluorescent Powders by Liquid-Liquid Extraction Using Aqueous and Organic Phases,” *Resour. Process.*, **53** 121-33 (2006).
10. F Yang, F. Kubota, Y. Baba, N. Kamiya, and M. Goto, “Selective Extraction and Recovery of Rare Earth Metals from Phosphor Powders in Waste Fluorescent Lamps using an Ionic Liquid System,” *J. Hazard. Mater.*, **254** 79-88 (2013).
11. B. D. Cullity, Addison Wesley Publishing Co. (1972).
12. J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, and F. E. Pinkerton, “Pr Fe and Nd Fe Based Materials: A New Class of High Performance Permanent Magnets,” *J. Appl. Phys.*, **55** 2078-82 (1984).
13. H. C. Jung, G. H. Kim, H. S. Hong, and D. W. Kim, “Overview and Future Concerns for Lithium-Ion Batteries Materials,” *J. Kor. Powd. Met. Inst.*, **17** 175-89 (2010).
14. B. Y. Cho, “Secondary Battery TRM,” KETI (2008).
15. J. S. Sohn, S. M. Shin, K. S. Kang, and M. J. Choi, “Trend on the Recycling Technologies for the used Lithium Battery by the Patent Analysis,” *J. of Korean Inst. of Resource Recycling*, **16** 50-60 (2007).
16. “Trend on the Recycling Technologies for Spent Batteries by the Patent and Paper Analysis,” *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, **16** 50-60 (2007).
17. K. Lee, I. S. Kim, H. J. Nam, and C. Park, “Fabrication of Low cost, High Efficiency Single Crystal Silicon Solar Cells,” *J. Inst. Elec. Inf. Eng.*, **31A** 102-9 (1994).
18. K. Y. Eun, Y. J. Paek, and W. S. Lee, “Synthesis of Diamond Film by CVD Method,” *Bull. Kor. Ceramic Soc.*, **5** 133-44 (1990).



특 집 ■■■ 강이승, 이찬기

- 19. Cobalt Development Institute, Cobalt facts 2006.
- 20. 한국기계연구원, “입자 극미세화에 의한 WC/Co 합금의 초강도화 기술 개발,” 과학기술부 (2003).
- 21. 나노테크, “초미립 초경공구 개발,” 과학기술부 (2002).
- 22. D. F. Carroll, Proc. of the 14th Inter. Plansee, Conf. 168-82, Metallwerk Plansee, Austria, 1997.
- 23. D. F. Carroll and C. L. Conner, Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 61-74, Princeton, New Jersey, 1997.
- 24. H. S. Hong, Y. D. Ko, Y. C. Kim, L. S. Kang, and K. R. Choi, “Overview and Future Concerns on Cobalt for Mechanical Component Materials,” *Trends in Metals & Materials Engineering*, **24** 28-35 (2011).

●● 강이승



- 2015-현재 고려대학교 신소재공학과 박사과정
- 2011-현재 고등기술연구원 선임연구원

●● 이찬기



- 2009년 큐슈대학교 물질이공학 박사
- 2009-2011년 일본 산업기술종합연구소 연구원
- 2011-현재 고등기술연구원 수석연구원