Nd-Fe-B 희토자석 순환기술

최한신 · 김용환*

한국생산기술연구원 생산기반연구본부 에코공정연구부

Recycling Technology of Nd-Fe-B based Rare Earth Element Magnets

Han Shin Choi and Yong Hwan Kim*

Eco-materials & Processing Department, Production Technology R&D Division,
Korea Institute of Industrial Technology(KITECH), 7-47 Songdo, Incheon 406-840, Korea

1. 서 론

천연자원과 관련하여 국제사회는 다양한 형태의 분쟁과 경쟁이 공존하는 양상을 나타내고 있으며, 이미 단순한 자원의 수급문제에 한정되는 것이 아니라 국가간 다른 분쟁의 활용카드로 이용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 특히, 희유금속(rare metals)의 일종인 희토류(REE: rare earth element)는 그동안 자원의 규모 및 생산 등 시장적인 측면에서 세계의 관심을 받기에는 너무나 미비하였다. 실제로, 세계 철강생산은 연간 1,000,000,000 톤 규모를 넘어서는 반면 희토류의 세계 총생산량은 약 130,000 톤 규모로 철강의 8,000분의 1 수준에 머무르고 있다. 그러나 그림 1에 나타난 바와 같이 우리의 일상생활과 국가의 안보 및 다양한 주력산업과 미래 산업 분야가 희토류에 기초하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 세계 주요국가는 희토류의 현실화된 수급 불안정성에 대응하는 측면에서 국가주도의 위기관리형 대응정책을 제시하고 있다. 미국의 경우, 자국의 희토류 광산개발에서 최종제품화와 순환기술에 이르기까지 밸류체인 전과정의 재활성화를 위한 법안[1]을 처리하고 있고, EU의 경우에는 '10년 6월 critical raw materials for the EU 라는 전략[2]을 통해서 희토류를 포함한 41개 자원의 수급 안정성을 확보하기 위한 공동의 노력을 강조하고 있다. 일본은 소재강국으로 희소금속 전체의 세계 소비대국이며 오랜기간 동안 수급 안정성을 위해 노력하고 있으며 크게 자원

확보, 순환기술, 저감대체 기술을 큰 축으로 국가 전략이 수행되고 있다. 우리나라의 경우도 제철산업 중심의 모방자 전략으로는 지속가능한 성장을 유지하기 어렵다는 점과 우리경제가 자원수급 불안정성의 안전지대에 있지 못하다는 인식에서 '09년 희소금속 산업 활성화 방안이 마련되었다.

최근의 국제분쟁에 자주 언급되는 희토류 원소는 하드디스크 드라이버, 풍력발전, 하이브리드 자동차 및 국방산업 등에 필수적으로 사용되는 희토자석용 희토류 원소인 네오디움(Nd)과 디스프로시움(Dy)이라 할 수 있다. 이러한 희토류 원소는 세계가 기후변화경제 패러다임으로 빠르게 전환되는 과정에 녹색성장의 새로운 신수종사업의 안정적 성장에 있어 난제가 되고 있다는 점에서 세계가 주목하고 있다. 그러나 Nd와 Dy는 수급 안정성과 별도로 천연자원의 매장량 자체가 지속적으로 팽창하는 수요량을 고려하는 경우 크게 부족하다는 점에 무게의 중심을 둘 필요가 있다. 다시 말해서, 새로운 천연자원의 확보를 위한 탐사와 생산량 증대를 위한 설비투자 등 공급측면에서의 안정성이 주요산업과 경제의 안정성에 있어 실효성이 높을 수 있으나 장기적으로 천연자원의 고갈을 가속하는 요인이 될 수 있다. 따라서 지구자원에 대한 국가간 및 세대간의 기회균등(environmental equity)의 측면에서 천연자원을 다른 국가와 다음 세대의 잠재적 필요를 위해 남겨둘 수 있는 근원적인 해법을 찾는 접근방법이 필요하다. 이러한 대안으로는 사용량 저감이나 보다 풍부한 자원

*Corresponding Author : [Tel : +82-32-850-0246; E-mail : yhkim@kitech.re.kr]

Fig. 1. Applications of rare earth element for various industries.

으로 전면 대체하는 기술과 채굴된 자원이 소모없이 지속적으로 순환되는 순환기술을 들 수 있다. 순환기술은 제품화 과정이나 사용 후 제품의 폐기과정에서의 환경오염을 최소화하는 동시에 천연자원대비 물질을 얻기까지의 자원과 에너지 효율을 높일 수 있다는 측면이 높게 평가된다.

본고에서는 희토류 및 자석용 희토류의 일반현황을 공급측 측면과 수요측 측면에서 간략히 살펴보고, 수급의 불균형과 수급의 불안정에 대한 대안으로서의 희토류 폐기물의 순환기술 동향을 소개하고자 한다.

2. 희토류 및 희토자석 현황

우리나라는 란탄족(Lanthan) 15개 원소와 스칸듐

(Sc), 그리고 이트륨(Y)을 합한 17개 원소를 희토류 1종으로 분류하고 있으며 희토류는 크게 경희토류원소(LREE: light rare earth elements)와 중희토류원소(HREE: heavy rare earth elements)로 구분할 수 있다[3]. 희토류 원소는 유사한 물리적, 화학적 특성으로 원소간의 결합이 강해서 개별 원소로의 분리 및 정제가 어렵다는 측면에서 희유금속으로 분리된다. 다양한 광물이 존재하고 있으나 이중 대표적인 광물로는 베스트너사이트(Bastnasite)와 모나자이트(Monazite)가 있다. 이들 광물의 종류에 따라서 희토류 원소의 함유량 및 제련 기술이 상이하다. 예를 들어, 모나자이트의 경우 베스트너사이트에 비해 중희토 원소의 함유량이 상대적으로 높으나 방사성 원소인 토륨을 함유하고 있어, 제련과정이 베스트너사이트와 차이를 나타낸다. 표 1에는 희토 원소별 대표적인 응용분야를 요약 하였으며, 표에서 보여지는 바와 같이 희토원소 고유의 광학, 자기적 특성 및 화학 특성이 다양한 응용분야에 사용되고 있고 새로운 응용분야가 확대되고 있다. 그러나 현재까지 이들 원소의 대체 원소를 찾기 어려운 실정이다.

현재까지 보고된 자료에 의하면 참고하면 희토류 천연자원은 중국, 미국, 독립국가연합(C.I.S)에 편재되어 있는 것으로 조사되었으며, 이들 국가의 자원보유량은 가용 확인보유량(reserve)이 68%, 잠재 자원기 준량(reserve base)이 80%에 이르고 있다[5]. 자원 최대 보유국가인 중국은 확인 보유량이 31%, 잠재 자원량이 58%에 달하는 것으로 알려져 있다. 자원보유의 지역적 편재성보다 더욱 심각한 문제는 실제 생산국가의 편재성이라고 할 수 있다. 중국은 80년대 중반이후 적극적인 정부의 자원 시장에 대한 개입을

Table 1. Applications of rare earth element [4]

원소명	응용분야	원소명	응용분야
La	정유산업 촉매, 하이브리드 자동차 배터리 (니켈수소전지)	Dy	영구자석 (Nd-자석), 레이저
Ce	자동차촉매, 정유산업 촉매, 반도체	Ho	레이저, 유리
Pr	자성, 합금원소, 광전자	Er	레이저 (의학), 유리
Nd	그린카, 풍력, 전자산업 (희토자석)	Tm	의학용 x-선 장치
Pm	핵배터리 (nuclear powered battery), 레이저	Yb	레이저, 합금
Sm	영구자석, 스텔스, 레이더	Lu	정유산업 촉매, PET
Eu	LED 인광물질	Y	전자통신 (국방, 위성), 휴대폰, LED
Gd	MRI, 합금원소	Sc	레이저, 합금 (Al)
Tb	연료전지, 광자기, LED, 영구자석

Fig. 2. Trend of global productions of rare earth elements.

* 자원은 잠재보유량 (reserve base) 기준 (단, 가채굴량 (reserve) 기준 36%)

** 자석은 Nd-자석과 Sm-자석

Fig. 3. Value chains of REE magnets and its concentration on China.

통해 시장 점유율을 크게 높여왔다. 반면에, 중국 이전의 세계 희토류 공급의 거점은 미국이었으나 광산 개발과 제련산업에 의한 환경오염이라는 국내문제와 중국의 저가정책에 의한 외부문제에 의해 희토류 생산량이 감소하여 미국내 희토류 관련 광산업이 쇠퇴하였다. 위와 같은 이유로 인해서 전세계 희토류 공급 시장이 미국에서 중국으로 급격히 전환되었으며, 세계시장에서의 중국 생산점유율이 현재 97%라는 비정상적인 공급구조가 고착되었다(그림 2). 또한, 중국은 희토류와 관련하여 세계 1위의 자원보유 및 생산 국가일 뿐만 아니라 최대 수요국이다. 중국은 이미 90년대부터 자국의 자원을 산업육성에 활용하는 기

민한 국가전략을 수행하고 있으며, 이와 같은 국가 전략을 통해 결과적으로 그림 3에 제시된 바와 같이 세계의 희토류 밸류 체인이 자원에서 자석에 이르기까지 중국에 의존하는 구조를 가지고 있다.

희토자석은 크게 Sm-Co계 희토자석과 Nd-Fe-B계 희토자석으로 구분가능하나 자석 자체의 자성특성이나 제품응용시의 부가특성(경박단소, 고효율) 및 경제성 등의 측면에서 상대적 우위를 가지는 Nd-계 희토자석의 시장점유율이 점차적으로 상승하여 현재는 세계 희토자석 생산의 98%를 점유하고 있다[6]. 희토자석의 수요는 2000년대 초반까지 주로 정보저장 매체나 가전기기용의 용도가 주요 시장이었다. CDs,

DVDs 같은 광학정보저장매체의 경우 정보처리 구동 계통의 coarse actuator에 희토자석이 채용되고 있다. Coarse actuator는 구동계통의 seeking 기능을 수행하며 구동형태에 따라 linear 방식과 회전방식으로 구분 가능하다. VCM(voice coil motor)는 자석과 전류가 흐르는 코일사이의 전자기력을 이용하는 선형 구동 방식으로 고속 정보처리에 강점을 가지고 있다. VCM은 하드디스크용 액츄에이터로 적용되며 초기 구동방식이 스피커 구동방식과 유사한 특성으로 VCM으로 불리게 되었다. 하드디스크 적용 영구자석이 희토자석으로 전환되는 것은 자성특성 및 경제성과 더불어 경박 단소화의 트렌드에 가장 부합하는 독보적인 소재특성이 주원인이 된다. 2000년대 중반 이후 점차로 모터나 액츄에이터 용도의 수요가 크게 증가하고 있으며 현재 희토 자석의 글로벌 공급시장에 있어 가장 큰 문제는 희토 자석의 수요산업 중 하나인 풍력발전산업과 e-bike나 하이브리드 자동차와 같은 그린 수송수단의 시장팽창에 원인이 있다. 풍력발전의 경우 바람의 운동 에너지를 기계 에너지로 전환한 후 발전기를 통해서 최종 전기 에너지를 생산하게 되며 희토자석은 발전효율 측면에서 필수적인 소재로 적용되고 있다. Plug-in 하이브리드 자동차에서 희토자석을 이용한 synchronous motor가 induction motor나 DC motor에 비해서 높은 효율을 가지고 있어 사용량이 증가할 것으로 보인다. 이러한 산업분야는 대표적인 신수출산업분야로 각 국가가 경쟁적으로 투자 육성하고 있으며 중국 역시 대규모의 국가투자에 가세하고 있다. 표 3은 미국, 중국 및 독일 3국의 풍력발전 현황과 Nd 수요를 예측한 표이다. 표 2에서 보여지는 바와 같이 이들 국가의 풍력발전 투자가 지속적으로 상승하고 있으며, 특히 풍력발전의 후발 주자인 중국은 '09년 신규발전 분야에서 세계 풍력발전 신규투자의 36%를 점유하였다. 결과적

으로, 풍력발전용 희토자석의 중국자체 수요가 크게 증가하였다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 희토 자석의 수요분야에서 공동으로 나타나는 현상으로 생산독과점 구조에서 공급의 불안정성의 근원적인 문제점으로 간주할 수 있다. 따라서 공급 안정성 재고를 위한 다각적인 접근이 요구된다.

3. 희토자석 순환기술

순환기술은 천연자원 확보, 저감대체 기술개발과 더불어 자원 공급의 안정성을 확보할 수 있는 3대 중점방안으로 간주된다. 이미 제품화 과정에서 발생하는 soft 스크랩은 상당부분 재사용되는 것으로 판단되나 대부분의 hard 스크랩이나 사용 후 제품내 함유된 희토원소에 대한 순환은 아직 활성화되지 못하고 있다는 측면에서 희토자석 순환산업은 도입기에 있다고 할 수 있다. 거시적으로, 생태산업적 측면(ecological industries)에서 물질흐름에 따른 순환은 크게 폐쇄형 순환경로(closed-loop circulation)와 개방형 순환경로(open loop circulation)로 구분할 수 있다. 전자의 경우 순환대상소재가 동일한 산업 밸류체인내에서 재사용이 되는 반면 후자의 경우에는 이종 산업간에 물질흐름을 유발하게 된다. 예를 들어, 자석 스크랩이 다시 자석으로 사용되는 경로를 가지는 경우 폐쇄형 순환경로이나 자석 스크랩이 마그네슘 합금원소로 사용되는 경우 개방형 순환경로를 가진다고 할 수 있으며, 이를 토대로 아래에 각각의 순환 기술에 대하여 기술하였다.

3.1. 폐쇄형 순환기술

Zaktnik 등은 HDD용 VCM에 사용되는 희토자석을 순환하는 기술로 HD 공법(hydrogen decrepitation)을 적용하였다[8]. 그러나 반복 순환 사이클 과정 중

Table 2. Status of global wind power generations and the forecast of Nd demand for wind power generation [7]

국가	2007			2009				
	누적 발전량 (MW)	점유율 (%)	Nd소비량 (ton)*	누적 발전량 (MW)	점유율 (%)	누적 Nd소비량 (ton)	신규 발전량 (MW)	신규 Nd소비량 (ton)
미국	16,823.0	17.9	3,364.6	35,159.0	22.1	7,031.8	9,922.0	1,984.4
중국	5,912.0	6.3	1,182.4	26,010.0	16.3	5,202.0	13,800.0	2,760
독일	22,247.0	23.7	4,449.4	25,777.0	16.2	5,155.4	1,880.0	376

*Nd 사용량: 0.2 ton/MW를 적용

Fig. 4. Variations of magnetic properties with repeated recycling process; (a) without Nd-hydride and (b) with Nd-hydride [8].

Nd 감소, 탄소와 산소의 증가 등 화학조성이 변화하고 자성특성에 영향을 미치는 Nd-rich 상의 상분율 감소 및 밀도저감 등이 발생하게 되고 이에 따라 재생 회토자석의 자성특성이 저하하는 문제점을 발견하였다. 이를 해결하기 위한 방법으로 순환과정에 HD 처리된 자석 스크랩 분말에 Nd-hydrides를 첨가하는 방법을 제시하였다. Nd-hydride의 첨가는 순환 과정에서 발생하는 Nd 손실을 보충함으로써 후속 공정 시 Nd-rich 상분율을 유지하여 반복 순환과정에서 자성특성 저하를 억제하는 방법이 된다는 것을 그림 4에 나타난 바와 같이 실험적으로 입증하였다. 결과적으로 Zaktnik의 접근방법은 회토자석 스크랩 반복 순환 사이클을 겪는 동안에 소재와 회토자석의 신뢰성을 확보하기 위해 순환주기에 따른 야금학적 특성과 자성특성의 모니터링이 중요하며 문제발생시 이를 해결할 수 있는 방법의 개발이 산업화에 앞서 선행되어야 할 주요한 산업기술임을 시사하고 있다.

Nd-계 회토자석을 순환하는 경우 불순물의 유입이 재생 자석의 특성저하의 주요 요인이 되며 탄소와 산소가 대표적인 불순물로 간주된다. 탄소의 경우 결정립을 따라서 free carbon이나 탄화물상을 형성하는 것으로 알려져 있다. Asabe 등은 회토자석 스크랩의 재용융 이전에 탄소를 제거하는 기술로 대기중에서 스크랩을 1000°C 이상 온도에서 산화처리함으로써 free carbon과 결정립계 탄화물을 제거하여 탄소 함량이 300 ppm 수준까지 제거할 수 있다는 실험결과를 보였다[9]. Saguchi 등도 유사한 실험결과를 나타냈으며 Nd-계 회토자석 스크랩을 재용해의 원료소재로 활용하는 순환경로를 제시하고 이 과정에 탄소와

산소를 제거하는 공정기술을 제시하였다[10]. 스크랩에서 우선적으로 탄소를 산화반응을 통해서 이산화탄소로 제거한 이후에 철산화물이나 회토원소 산화물 상의 형태로 존재하는 산소를 수소와 칼슘을 이용하여 환원한 후에 최종적으로 용해구조의 원료소재로 첨가하는 공정기술이다. 탄소제거를 위한 산화과정에서 생성되는 철산화물은 수소를 이용하여 α -Fe으로 환원이 가능하나 FeNdO_3 와 NdBO_3 형태로 회토류가 산화물형태로 존재하게 된다. 잔류된 산화물상은 Ca 과 함께 장입하여 환원과 합금화의 2단 열처리(Ca 환원: 1,223 K $\rightarrow$ 합금화: 923 K)를 실시하여 최종적으로 탄소와 산소를 제거한 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 화합물이 만들어 지는 것으로 보고하고 있다. 이 외에도, Itoh 등은 소결자석의 처리과정에 발생하는 스크랩을 Ca을 이용하여 환원하고 이를 melt spinning 공정을 통해 본드자석의 원료소재로 이용하는 방법을 제시하였다[11]. 스크랩 분말이 가지는 상조성이나 미세조직의 문제를 보완하는 방법을 통해서 재생하는 공정기술이 제시되기도 하였다. 실제로, Kawasaki 등은 소결 회토자석에 Nd-rich 합금 분말을 혼합하여 소결하여 사용 후 소결자석의 특성저하를 보상할 수 있음을 실험적으로 제시하였다[12]. 소결자석은 가공 과정에서 상당량의 가공 잔재물(sludge)가 발생하게 된다. Uda는 FeCl_3 를 활용하여 슬러지로부터 Nd와 Dy을 염화물의 형태로 추출하고 산화물 형태로 순환하는 기술을 제시하였다[13]. 전통적인 습식야금 기술을 이용한 회토자석의 순환기술은 황산을 이용한 용해-침전 방법으로 분쇄된 자석 스크랩을 황산을 이용하여 용해하고 용해된 액상을 수산화암모늄을 이

용하여 침전하고 분리하는 기술이다. 네오디움 염은 불화수소를 이용하여 네오디움 불화물 (NdF_3)를 만든다[14, 15].

3.2. 개방형 순환기술

현재 Nd는 소결 희토자석의 수요가 높은 반면 향후 경량구조소재인 마그네슘 합금의 수요가 추가로 발생할 수 있다. 현재, 마그네슘 합금에 네오디움 약 2% 정도 소요되나 소재비용 대비 네오디움의 가격 점유율이 크게 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 희토자석의 순환주기와 마그네슘의 산업 성장기 진입까지의 시간을 고려하면 희토자석 스크랩을 마그네슘 합금소재로 활용하는 기술의 개발이 순환산업과 수소산업의 중장기적 안정성 측면에서 요구된다. 이러한 기술이 대표적인 개방형 순환기술로 Nd-Fe-B 희토자석 스크랩을 이용하여 마그네슘 합금용 미시금속(mish metal)을 만드는 기술이다. 희토자석 스크

랩을 700~850°C 범위의 마그네슘 용탕내에 침지하여 자석내 Nd와 Dy이 마그네슘 용탕내로 확산하므로써 자석 스크랩으로부터 Nd와 Dy를 선택적으로 용출할 수 있으며 잔류된 Fe-B계 공정 스크랩의 경우 철강용 소재로 활용되어질 수 있다[16]. 그림 5에는 선택적 용해반응의 열역학적 배경을 나타냈다. 그림 5에서 보여지는 바와 같이 공정 온도 범위 내에서 Mg 내에 Nd는 충분히 고용도를 가지는 반면에 Fe와 B의 경우 용해도가 극히 낮은 것을 알 수 있다. 희토자석 스크랩과 마그네슘의 반응을 통한 희토류 원소의 선택적 용해반응은 그림 6에 나타난 바와 같이 마그네슘 용탕에 의한 스크랩의 침식반응과 고상내 Nd와 Dy의 확산, 고상 스크랩/액상 마그네슘의 반응계면에서의 Nd와 Dy의 선택적 용해반응 및 희토원소의 마그네슘 액상을 통한 확산의 과정으로 이루어지는 것을 알 수 있다. 결과적으로 반응속도는 마그네슘의 침투속도에 영향을 미치는 스크랩의 미세조

(a) concept of selective melt extraction

(b) Mg-Nd binary system

(c) Fe-Mg binary system

(d) Mg-B binary system

Fig. 5. Concept of the selective melt extraction of Nd and the binary phase diagrams of Mg-Nd, Mg-Fe and Mg-B.

Fig. 6. Example of selective extraction of REE element in the Nd-Fe-B magnets using Mg melt (These photos are solidified microstructure of the Nd-Dy-Fe-B Magnet scraps in the Mg melt holding at 720°C for 30 min. and then furnace cooled).

직적인 측면과, 반응온도, 반응물의 장입비, 액상유통 등의 공정적 측면의 인자와 초기 장입 스크랩의 상조성과 입도 등의 물질변수가 회토원소의 고상 확산 속도, 고액 계면에서의 용해반응에 영향을 미치는 액상 확산 및 농도에 영향을 미치게 된다. 제안된 기술의 경우 진식반응으로 습식반응과 같이 유해한 화학물질을 이용할 필요가 없다는 점과 비교적 반응공정이 간단하고, 이중산업간 물질흐름이 용이하다는 측면에서 타 공정대비 우위성을 가진다고 할 수 있다. 그러나, 실질적인 공정의 물질회수율은 투입량 대비 얻어지는 마그네슘-네오디움(디스프로시움) 합금량으로 결정되며, 원소 회수량은 투입 스크랩내 회토원소 총량에서 반응 후 잔류물 내 회토원소 총량을 제외해야 하므로 충분한 반응시간과 용탕내 고상과 액상의 분리 등 반응 시스템적인 측면을 고려할 필요가 있다. 아울러, 마그네슘과 회토원소 합금으로부터 필요에 따라 회토원소를 회수하고자 하는 경우 마그네슘의 낮은 기화거동을 활용하는 기술과 네오디움-디스프로시움의 분리-정제기술이 고려될 수 있다. 실제로, Takeda 등은 Fe-Mg-Nd의 상평형 계산과정을 통해 Mg 액상을 통한 Fe-B 분리와 Nd 함유 Mg 액상으로부터 Mg의 기화를 통해 분리하는 상용화 방안을 제시하였다[17].

4. 맺음말

순환기술은 이전에 폐기물로 간주되던 제품화 과

정이나 사용 후 제품(end-of-products)을 천연자원의 대체 공급원으로 활용한다는 측면에서, 일차적으로 유한한 자원의 활용도를 높이는 측면과 폐기과정에서 발생하는 환경오염을 억제하는 측면에서의 순기능을 가지고 있다. 이와 더불어, 천연자원의 산업 순유입량을 저감하여 천연자원개발의 과정에서 발생하는 환경과 파괴가 저감되는 효과와 동일량 순금속을 얻는 과정에서 소모되는 에너지 저감, 고상액상기상 배출 저감을 통해 물질흐름 전과정의 녹색전환에 기여하게 된다. 그러나 문제는 여전히 순환소재에 대한 산업과 사회 전반의 낙인효과(stigma effect)가 산업의 활성화에 걸림돌이 되고 있으며, 다양한 순환대상 소재의 특성에 따른 최적의 순환기술이 부족하다는 점에서 산업의 견인효과가 부족한 실정이다. 이와 더불어, 순환산업의 중장기적 안정성에 있어 순환자원의 공급 안정성이 사회와 산업전반에서 배출되는 배출량에 대한 정확한 정보와 수거의 사회-산업 시스템과 연동되어 있다는 것을 고려해야 한다. 회토류와 같이 희소한 자원의 경우 가격의 상승이나 수급의 불안정성이 사용량 저감이나 부분 대체기술 혹은 전면 대체기술의 개발로 이어질 수 있다는 점은 순환산업의 가장 큰 위험요인이 된다. 요컨대, 제품당 사용량을 저감하기 위해서 순환을 고려하지 않은 채 제 2, 제 3의 원소를 첨가하는 경우 회수하기 어렵거나 회수비용을 높이는 결과를 초래할 수 있다. 결론적으로, 회토자석의 수급 불안정성을 완화하기 위해서는 순환산업을 활성화할 필요가 있다. 회토자석의 순환기술은 순환경로에 따라서 산업계에 다양한 물질흐름의 경로를 창출할 수 있고, 이러한 다양화된 순환기술은 물질의 효율성을 극대화하는 동시에 순환산업의 중장기적 리스크를 경감하는 기능을 수행할 수 있다. 특히, 우리나라의 경우 소재산업의 경쟁력이 부족하여 기술이 산업을 견인하는 접근방법이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 “자원순환 및 에너지기술 개발 보급사업(S20090135)”의 지원을 받아 수행된 연구결과로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. Humphries: Rare earth elements, the global supply

- chain, CRS report for congress, Congressional research service (2010).
- [2] http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm
- [3] Nomenclature of inorganic chemistry: IUPAC recommendations 2005, RSC publishing, ISBN 0-85404-438-8 92005.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Rare_earth_element
- [5] <http://www.usgs.org>
- [6] Takehisa Minowa: Resource geology, **58** (2008) 414.
- [7] World wind energy association: World wind energy report 2009 and 2010.
- [8] M. Zaktnik, I. R. Harris and A. J. Williams: J. Alloys and Compd., **469** (2009) 314.
- [9] K. Asabe, A. Saguchi, W. Takahashi, R. O. Suzuki and K. Ono: Mat. Trans. JIM, **42** (2001) 2487.
- [10] A. Saguchi, K. Asabe, T. Fukuda, W. Takahashi and R. O. Suzuki: J. Alloys and Compd., **408-412** (2006) 1377.
- [11] M. Itoh, M. Masuda, S. Suzuki and K. I. Machida, J. Alloys Compd., **375** (2004) 396.
- [12] T. Kawasaki, M. Itoh and K. Machida: Mater. Trans. JIM, **44** (2003) 1682.
- [13] T. Uda: Mater. Trans. JIM, **43** (2002) 55.
- [14] US patent No. 5129945.
- [15] US patnet No. 5238489.
- [16] Met. powder report 57 (2002) 6.
- [17] O. Takeda, T. H. Okabo and Y. Umetsu: J. Alloys Compd., **392** (2005) 206.
- [18] T. Okabe and Y. Umetsu: J. Alloys Compd., **408-412** (2006) 387.