

희토류광 선별기술 동향

전호석 / 김병곤 / 백상호 / 이진영
한국지질자원연구원 광물자원연구본부

1. 서 언

첨단 및 특수산업 원료소재로 많이 사용되고 있는 희토류 광물의 경우 산업과 과학의 발달에 힘입어 더욱 용도가 다양해지고 사용량도 크게 증가하고 있는 실정이다. 특히, 희토류 광물의 경우 대량으로 사용되는 양으나 Display, 반도체, 전기전자, 하이브리드 카 등 첨단산업에 비타민처럼 없어서는 안 될 존재로 자리매김을 하고 있다. 최근에는 희토류광물이 첨단산업에 필수적으로라는 기능을 이용해 2008년 기준 세계 생산량 124,000 톤 중 120,000 톤을 생산하여 세계 시장의 97% 이상 생산하고 있는 중국이, 자국의 이익과 국가간 정치적 목적 달성을 위해 공급량을 조절하고 있어, 첨단산업이 발달한 한국, 일본, 대만 등의 국가가 큰 영향을 받을 수 있을 것으로 예상된다.

희토류는 일반적으로 lanthanides라고도 불리워 지는데, 원소의 주기율 표에서 IIIB쪽에 속하는 원소로써 원자번호 57번인 란타(La)으로부터 71번인 루테튬(Lu)까지의 15 원소에 동족 원자번호 스칸디움(Sc)과 이트륨을 포함한 총 17개 원소들을 말한다. 이들 희토류 원소들은 화학적 성질이 매우 유사

하여 원소간의 분리가 어려워 그 동안 각 원소별로 분리하지 않고 혼합희토류 및 미시메탈(mischmetal)의 상태로 이용되어 왔으나, 최근 분리와 정제기술이 발달하면서 원소별 고순도 희토류를 공업적으로 생산하여 첨단소재로 활용하고 있다. 특히 산업의 급속한 발전과 더불어 전자, 특수소재 등 첨단산업이 괄목할만한 성장을 이루게 되어 원료소재인 희토류 산업이 크게 발전하게 되었다. 또한 희토류 원소를 이용한 꾸준한 용도개발이 이루어져 컬러TV, 전기, 전자, 촉매, 광학, 특수금속, 초전도체 물질, 원자력, 특수연마제 등 이제는 모든 분야에서 이용되고 있으며, 특히 특정 희토류 원소의 경우가 가격이 매우 높고 구입이 어려워 세계적으로 이 원료의 구입에 혈안이 되어 있다.

우리나라의 경우 희토류 광물의 생산은 전무하지만 전자 및 광학산업의 발달로 매년 희토류 광물의 수요가 증가하여 2000년 기준 1억불에서, 2010년에는 1억 8천만 불로 급성장 하였다. 그러나 무엇보다도 희토류 광물의 경우 부존 지역이 국가별로 편중되어 있고, 이를 보유하고 있는 나라는 정부에서 생산과 수출을 통제하고 있어 우리나라와 같이 희토류를 보유하고 있지 못한 나라의 경우 중장기적으로 이를 확보할 수 있는 방안

과 계획수립이 필요하다. 희토류 광물의 전세계 매장량은 약 5천만 톤으로 그중 약 75% 정도가 중국에 분포되어 있으며, 미국과 인도에는 각각 15%와 5% 그리고 남아프리카와 호주 그리고 베트남 등지에 일부 분포되어 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나 현재 희토류 광물의 생산은 중국이 97% 가까이 차지하고 있고, 전략광물로 분류하여 자체에서 선광과 제련을 거쳐 수출을 통제하고 있기 때문에, 우리나라와 같이 희토류 광물을 생산하지 못하는 나라에서는 관련산업의 보호가 어렵고 미래에도 생산국의 영향아래 놓이게 될 것이다.

Display, 전기전자, 철강, 자동차 등 첨단산업이 발달로 희토류 수요가 많은 우리나라는 전량수입에 의존하고 있는 희토류 원소를 일부라도 국내에서 대체할 수 있는 방안을 강구하기 위해 오래 전부터 이에 대한 계획을 수립하여 추진해 오고 있으나, 국내에서 대량의 희토류 광물을 확보하지 못해 관련분야의 연구가 거의 중단된 상태이다. 최근 강원도 홍천과 충주 여래산 지역에 대량의 희토류 광물의 매장량이 확인되어 우

수한 선별기술만 개발된다면 국내에서도 희토류광물을 생산할 수 있는 입지를 확보한 상태이다. 특히, 홍천지역은 국내 최대 철 매장지이기 때문에 기술개발의 척도에 따라 충분히 경제성을 갖출 수 있을 것으로 생각된다. 만일 국내에서 희토류 광물을 일부라도 생산할 경우 우리가 기대할 수 있는 것은, 희토류 원소를 사용하고 있는 국내관련 산업에 원료를 중장기적으로 안전하게 공급할 수 있어, 관련산업을 보호할 수 있고, 또한 국내 부족분을 수입할 때 수입가격을 능동적으로 조절할 수 있는 여건을 마련할 수 있을 것이다.

2. 국내의 희토류광 부존현황 및 선광 기술

2.1. 국내의 희토류광 부존현황

지구상에 존재하는 광물 중 희토류 성분을 함유한 광물은 200종 이상으로 알려져 있으나, 공업용으로 이용되고 있는 주요 광석은 모나자이트, 바스트나사이트, 제노타임

표-1 희토류 광물의 종류 및 특성

Minerals	Characteristic
Monazite	· 경희토류(La, Ce), 방사성 원소 함유한 인산염계 · 호주, 인도, 브라질, 이집트, 말레이시아, 세리온 · 국내 사광에 45000톤, 0.05%TREO
Bastnasite	· 경희토류(La, Ce), 불탄산염계로 Eu가 많음 · 중국, 미국, 아프리카, 브라질, 구소련 · 모나자이트보다 선광이 어려움.
Xenotime	· Y 다량 함유(산화물 60%)한 인산염계 · 말레이지아, 대만, 중국 호주
Ion absorption type	· 중국 강서성에서만 생산된 특수광 · 중 희토류 함량이 높음

표-2 희토류 광물의 분류 및 용도

제 품		용 도
혼합 희토	혼합희토(산화물)	· 유리용 연마제(판유리, TV브라운관, 카메라, 렌즈, 안경, 크리스탈 유리, IC Photomask 등)
	혼합희토(금속) (mischmetal)	· 첨가제(철강, Al, Mg 등) 발화합금, 자석, 수소흡장재, 접착제
분리 희토	경(輕)희토 La ₂ O ₃ , CeO ₂ Pr ₆ O ₁₁ , Nd ₂ O ₃	· 광학용유리, 세라믹컨덴서, 촉매, 열전자방사, 발열체, 초전도체 · 유리소색제, 촉매, 광학유리, 영구자석 · 안료, 영구자석, 촉매 · 유리용첨가제, 세라믹컨덴서, 영구자석, 레이저
	중(中)희토 Sm ₂ O ₃ , Eu ₂ O ₃ Gd ₂ O ₃ , Tb ₄ O ₇ Dy ₂ O ₃	· 세라믹컨덴서, 촉매, 영구자석 · 적색형광체(칼라 TV, 형광등), 원자로 제어재 · 원자로 감속재, 광자기 기록, 자기냉동, X-선중감지, 광학유리 · 고연색램프, 광자기 기록, 영구자석, 자기냉동
	중(重)희토 Ho ₂ O ₃ , Er ₂ O ₃ Tm ₂ O ₃ , Yb ₂ O ₃ Lu ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃	· 안료, 레이저 · 광학유리, 반도체 · 레이저 · 촉매, 광학유리 · 자기버블 메모리 · 적색형광체, 광학유리, 지르코니아안정제, 레이저, 내열합금, 원자로구재

그리고 최근 중국에서 산출되는 이온흡착형 광이 있다. 표 1은 희토류 광물의 종류와 특성을 나타낸 것으로, 모나자이트는 란타넘과 세륨 등의 경희토류가 주를 이루며 토륨 등 방사성 원소를 함유한 인산염계 광석으로 가장 널리 분포되어 있다. 바스트나사이트는 란타넘과 세륨 등의 경희토류가 주성분인 점인 모나자이트와 같지만 불탄산염계 광석으로 토륨이 적고 유로피움이 많으며 중국과 미국이 주산지이다. 제노타임은 이트륨이 다량 함유된 인산염계 광석으로 말레이시아와 태국을 중심으로 한 동남아시아에서 주석의 미광으로 그리고 중국, 호주 등에서도 일부 산출이 된다. 그리고 공업적으로 사용 가치가 가장 높은 이온흡착형광은 중국의 강서성 등에서 주로 산출하는 특수광으로 중국의 심오광과 용남광 이외에서는 아직 발견된 곳이 없다.

희토류 광물은 위에서 언급된 광종별 이

외에 광상별 그리고 원소군 별로도 나누어진다. 광상별 분류는 카보나타이트/알카리암 광상, 암맥광상 그리고 풍화산류광상으로 나누어지며, 원소 군별로는 표 2와 같이 경희토와 중(中)희토 그리고 중(重)희토류로 분류된다. 또한 희토류 광물은 용도에 따라 혼합희토와 분리희토로도 분류된다. 희토류 원소는 금속형태로서는 활성이 크고 합금되기 쉬우며, 산화물은 매우 안정하고 유리화되기 쉬워 오래 전부터 금속공업, 유리공업에 많이 사용되어 왔던 것은 잘 알려져 있다. 근래에는 촉매 화학적 특성으로 석유화학공업에 응용, 광학적 특성으로 각종 고급렌즈, 형광물질로 사용되어 왔으며, 최근에는 강력자성체, 초전도체, 수소흡장제, 고밀도 기억소자, 레이저 등 새로운 기능성재료로 응용확대가 이뤄지고 있다.

그림 1은 세계 희토류광의 분포지역 및 지역별 희토류광종을 나타낸 것으로, 크게 중

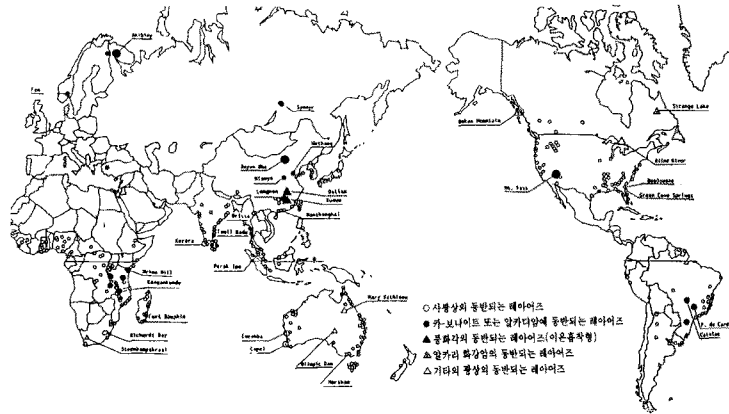


그림 1. 세계 희토류 광물의 분포 및 지역별 희토류 광증.

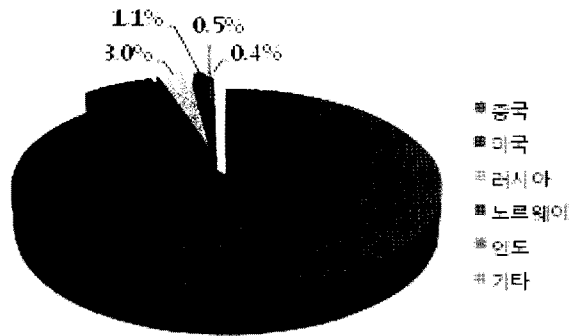


그림 2. 국가별 희토류 광물의 부존량

국과 호주, 북남미, 인도 그리고 남아프리카에 편재되어 있음을 알 수 있다. 현재 세계 희토류 매장량은 1천 년간 사용할 수 있는 것으로 예측하나, 대부분이 Ce와 La 등의 경희토류이고 중(中)-중(重) 희토류는 매우 적은 상태이다. 즉, 경희토류의 경우 전체 희토류의 94%를 차지하고 있으며, 그중 Ce와 La가 약 74%에 달한다. 따라서 Sm과 Dy 등의 중(中)희토류는 3.6% 그리고 중희토류는 0.9% 밖에 되지 않아, 새로운 중(中)-중(重) 희토류의 매장량이 확인되지 않으면 앞으로 수요의 심각한 불균형이 예상된다. 그림 2는

희토류광의 국가별 부존량을 나타낸 것으로 중국이 88.7%로 대부분을 이루고 있으며, 그 외 미국, 러시아, 노르웨이, 인도 등이 소량 부존되어 있다. 그러나 중국은 희토류 광물의 세계 생산량 97% 이상을 차지하고 있고, 유로퓸, 이트륨이 풍부한 제노타임, 이온 흡착형광이 많이 부존되어 있어, 희토류 관련 산업의 영향력이 매우 크다.

국내에 부존되어 있는 희토류 원료광물은 대부분 강이나 바다 등의 모래 중에 함유된 모나자이트라 할 수 있으며, 이들 사광상은 모나자이트 이외에 자철광, 티탄철광, 지르

표-3 국내 사광상의 조사 현황

구 분	광 구	광 종	매 장 량
사 금 광	217	Gold Placer	17,838kg
규 사 광	71	Silica Sand	5,516만 Ton
중 사 광	308	Monazite	322,162 M/T
		Zircon	198,357 K/T
		Ilmenite	307,803 M/T
		Magnetite	389,727 M/T

표-4 국내 사광상의 지역별 희유원소 분포결과

Contents	Years	1987	1988	1989	1990	1991
		금 강 (공주~청양)	남 한 강 (목계~경주)	섬 진 강 (구례~하동)	낙 동 강 (안동~선산)	낙 동 강 (안동~예천)
- 원사중 품위(%)						
· Heavy Sand		0.80	2.30	0.90	1.10	1.40
· Monazite		0.08	0.05	0.01	0.02	0.04
· Zircon		0.01	0.04	0.00	0.01	0.02
· Ilmenite+Magnetite		0.37	1.37	0.49	0.68	0.85
· Garnet		0.08	0.06	0.07	0.03	0.02
- 매 장 량 (M/T)						
· Monazite		63,000	34,000	2,000	21,000	19,000
· Zircon		11,000	29,000	2,000	7,000	8,000
· Ilmenite+Magnetite		302,000	950,000	316,000	628,000	407,000
· Garnet		59,000	34,000	45,000	22,000	10,000

콘, 가네트 그리고 녹니석 등과 같이 비중이 높은 광물들과 혼합되어 산출되고 있다. 표 3은 국내 사광상의 조사현황을 나타낸 것으로 지역적으로는 경기, 충북, 충남 그리고 전남 등 하천 모래중에 약 322천톤의 모나자이트가 부존되어 있지만, 대부분은 TREO 함량이 0.1% 이하라 개발이 불가능한 상태이다. 표 4는 한국지질자원연구원에서 1987년부터 1991년까지 국내 사광상을 대상으로 희유원소 함량분포를 조사한 결과이다. 금강 지역에서부터 낙동강 지역까지 4대강을 유역별로 분류하여 이들 사광상에 분포되어

있는 희유금속원소 분포조사연구결과, 금강 지역에 63,000톤의 모나자이트가 매장 되었음이 확인되었으며, 전체적으로는 139,000톤의 모나자이트가 사광상에 분포되어 있다. 그러나 4대강 모든 지역의 경우 원광 중 모나자이트의 함량이 1% 미만으로 매우 낮아, 일정량의 희토류 광물을 보유하고 있음에도 불구하고 현재 전량을 수입에 의존하고 있는 실정이다.

희토류광이 국내 산업에 미치는 영향이 커지면서 1988년부터 국내 하드록(hard rock) 상태의 희토류광 매장량 연구를 수행

표-5 국내 흥천 및 충주지역 희토류 광물의 부존량 및 특성

Year	Area	Geology and Deposit	Reserve and Grade	Main Minerals
1988	충주 아래산 희토류 광상(1차)	· 계명산층(변성화산암) 내에 배태하는 대규모 대상 광체(성인 불명)	· 19,350,000M/T · R ₂ O ₃ 0.85% · ZrO ₂ 1.72%	· Allanite
1989	무주 니오비움 탄탈륨 광상	· 선캠브리아기 화강편마 암(원남통)내에 발달하는 페그마타이트 광상	· 1,588,000M/T · Ta+Nb 25~100ppm · 217,000M/T(백운모) · Ta+Nb 250ppm	
1993	충주 아래산 희토류 광상(2차)	· 계명산층(변성화산암) 내에 배태하는 대규모 대상 광체	· 1,544,000M/T · Nb ₂ O ₅ 0.17% · 20,904,000M/T · R ₂ O ₃ 0.84% · Nb ₂ O ₅ 0.17%	· Allanite · Zircon, · Spene
1999	흥천-자은 희토류 철광상	· 선캠브리아기 변성퇴적 암을 관입한 시대미상의 함철-희토류 탄산염암체	· 10,152,000M/T · R ₂ O ₃ : 2.4% · SrCO ₃ : 1.8% · Fe : 21% · Nb ₂ O ₅ : 0.12%	· Magnetite, · Monazite, · Strontianate, · Columbite, · Fergusonite

하여 표 5와 같이 강원도 흥천광 충북 충주 지역의 철광상에 대량의 희토류광이 부존되어 있음을 확인 하였다. 흥천지역 희토류광상은 1960년대 초 철광으로 개발된 적이 있으며, 우리나라 최대 철 부존지역이다. 희토류광물은 주로 모나자이트이며 자철석과 함께 탄산염암내에 배태한다. 지금까지 확보된 매장량은 약 2천6백만 톤이고 품위는 희토류 2.4% R₂O₃, 철 21% Fe₂O₃, 니오비움 0.1% Nb, 인 2.9% P, 스트론튬 1.78% R₂O₃이며 미량의 금이 확인 되었다. 충주 아래산 희토류광물은 주로 갈염석이며 지르콘과 함께 알카리 화산암내에 배태한다. 확보된 희토류광의 매장량은 약 2천만톤(REO 168천톤)이고, 품위는 희토류 0.84%R₂O₃, 지르콘 1% Zr 정도이다.

최근에는 중국의 희토류 수출통제 및 가격조절이 심화되면서 정부에서 국내부존 희

토류광의 안정적 확보 및 자립수급을 향상을 위해 이미 확인된 흥천과 충주지역의 정밀조사와 기타 양양, 무주, 하동 등 부존가능지역을 대상으로 집중적인 조사 및 활용 연구를 추진 중에 있다.

2.2. 희토류광 선별기술

일반적으로 희토류광물은 다른 유용광물과 함께 산출되기 때문에, 선별공정에서 한 선별법을 단독으로 사용하지 않고 여러 개의 선별법을 같이 사용하는 것이 보통이다. 그러나 암체로 형성된 광상으로부터 희토류광물을 회수할 경우 그림 3과 같이 부유선별 단일공정을 사용하기도 한다. 실험공정은 원광 단체분리가 이루어지는 입도로 제조한다음, 광액의 pH를 9-10으로 조절하여 규산염 광물을 억제한다. 그리고 모나자이트의

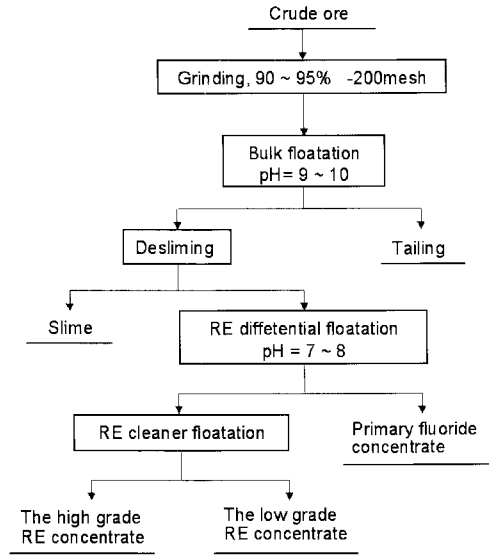


그림 3. 부유선별에 의한 희토류 광물의 선별공정도

포수제로 paraffins salt 포수제를 이용하여 모나자이트 정광을 회수하는데, 이때 paraffin salt 포수제는 모나자이트 이외에 형석, 중정석 그리고 탄산염 광물을 함께 부유시킨다. 그리고 모나자이트와 함께 부유된 여러 광물들은 sodium silicate, fluorosilicate 그리고 C5-C9 hydroxamic acid 부선 시약을 이용하여 광액의 pH 7-8에서 형석을 제거하여 희토류의 품위를 높이게 된다.

그림 4는 비중선별법과 부유선별법 그리고 자력선별법과 부유선별법을 이용하여 희토류광을 선별하는 혼합선별 공정도를 나타낸 것이다. (a)의 비중선별법과 부유선별법을 이용한 선별공정은 먼저 비중선별법을 이용하여 light mineral을 제거해 REO의 품위를 높인 다음, 맥석광물들의 억제제로 H₂O₂와 sodium silicate 그리고 포수제로 oleic acid 등의 부선시약을 사용하여 고품위 모나자이트 정광을 회수하는 공정이다. 그리

고 (b)의 자력선별과 부유선별법을 이용한 혼합 선별공정도는, 모암이 자철광과 같이 강자성 물질로 이루어져 있을 때 사용한다. 즉, 자력선별기를 이용하여 제조된 시료로부터 자성산물을 제거한 다음, 앞에서와 같이 부유선별법을 채택하여 모나자이트를 회수하는 것이다.

그림 5는 해변사 및 암체상인 광상별 희토류 광물인 모나자이트를 선별하기 위한 선별공정도를 각각 나타낸 것으로, 광상별 선별공정은 모두 여러 선별법을 혼합한 융합 선별 공정을 채택하고 있다. 즉, 해변사의 경우 풍화에 의해 시료가 제조되었기 때문에 선별에, 파분쇄 과정일 필요없지만 선별공정은 여러 선별법을 조합하여 구성되어 있음을 알 수 있다. 이는 모나자이트 희토류광 중에 맥석광물의 종류가 다양하여 단일 선별법으로는 이들 맥석광물들을 효과적으로 제거하기 힘들기 때문이다. 따라서 두 선별공

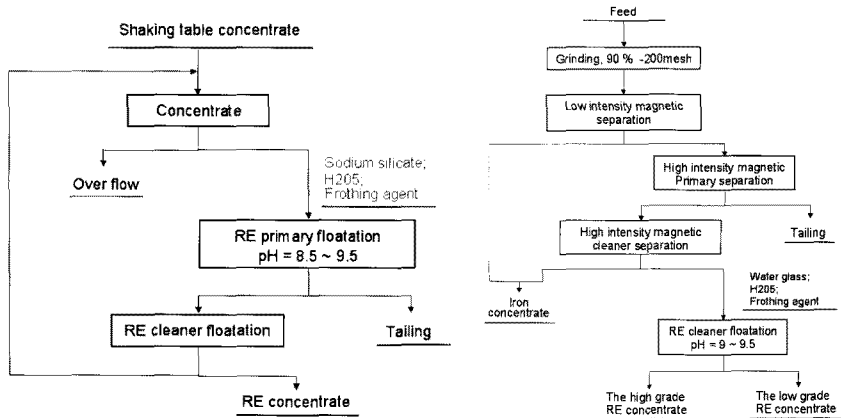
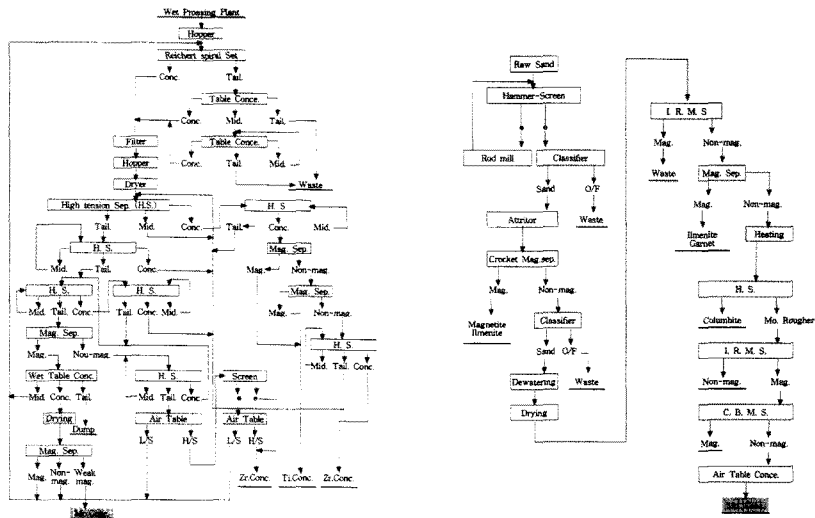


그림 4. 희토류 광물의 혼합선별 공정도.



(a) Beach Sand

(a) Massive deposit

그림 5. 해변사 및 광상 희토류광의 선별공정도.

정 모두 비중선별, 자력선별, 정전선별 혹은 부유선별법을 적용하여 선별공정이 개발되었음을 알 수 있다.

3. 국내 희토류광 선별실험

3.1 시 료

표 6은 본 연구에 사용된 강원도 홍천군 두촌면 자은리에 위치한 홍천철광으로부터 채취한 희토류 원광시료에 대한 성분분석 결과를 나타낸 것으로, CeO_2 와 La_2O_3 가 각각 3.41%와 2.06% 그리고 Nd_2O_3 는 0.78%로

TREO 품위가 6.25%인 비교적 품위가 높은 시료를 사용하였다. 이 지역에 분포하는 모나자이트의 TREO 평균품위는 약 2.5% 정도이나, 선별실험의 정확성을 높이기 위해 radio activity meter를 사용하여 선택 채취하여 비교적 높은 품위의 원광시료를 사용하였다. 시료 중 중(中), 중(重) 희토류는 대부분이 80ppm이하로 미량 존재하고 있어 이 지역 희토류 광물은 경희토류임을 알 수 있으며, P₂O₅ 함량이 6.25%로 인산염계 모나자이트임을 알 수 있다.

모나자이트 이외에 불순물로 존재하는 광물의 화학성분은 철광상이라 Fe₂O₃가 36.66%로 높고 SiO₂도 13.261%로 비교적 높아, 상당량의 석영과 규산염 광물이 존재함을 알 수 있다. 그리고 원광 중에 SrO가 2.37%나 존재하고 있어, 모나자이트 이외에 유용광물의 종합적인 선별공정개발이 필요함을 알 수 있다. 특히, CaO 함량이 9.92%로 높아 스트로튬의 존재 가능성을 입증해 주고 있다.

그림 6과 그림 7은 원광시료에 대한 광물 조성을 관찰하기 위한 XRD 및 현미경 감정 결과를 나타낸 것으로, 희토류 광물인 모나자이트 이외에 주요 불순물로 자철광, 석영, 황철석, 백운석, 적철석이 존재함을 확인하였으며, 미량의 활석, 녹니석, 조장석도 확인되었다. 광물감정 결과를 기초로하여 모나자이트와 부산물로 철광석을 회수하기 위해, 비중선별법과 자력선별 그리고 부유선별법

을 사용한 혼합선별 공정을 개발하였다. 즉, 비중선별에서 모나자이트와 자철광을 고비중으로 회수하고, 이들을 대상으로 자력선별법을 적용하여 고품위철광석을 분리하여 모나자이트의 품위를 높였다. 그러나 모나자이트 정광 내에는 자력선별에서 제거되지 않은 황철석이 다량 존재하고 있어 부유선별법을 적용하여 이들을 제거하였다.

3.2 실험방법

그림 8은 원광으로부터 모나자이트 희토류광을 회수하기 위해 개발한 선별공정을 나타낸 것으로, 광물감정결과 고비중 및 저비중의 광물이 다양하고 존재하고 있어 단일선별법이 아닌 비중선별, 부유선별 그리고 자력선별 3가지 선별법을 혼합사용하여 공정을 개발하였다. 모나자이트광의 경우 경도가 낮아 과분쇄 과정에서 미분발생이 많아 비중선별법의 적용이 쉽지 않으나, 산화물 상태로 존재하고 있어 부유선별법도 효과적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 모나자이트가 비중이 높기 때문에 비중선별법에 의해 1차 정광을 회수한 다음, 이때 함께 회수된 약자성의 황철석을 부유선별법에 의해 제거하였다. 부유선별에 의해 황철석이 제거되면 대부분 모나자이트와 자철광이 남게 되는데, 이들을 대상으로 자력선별법을 적용하여 고품위 모나자이트 정광과 철광석을 회수하는 방법을 선택하여 실험하였다.

표-6 흥천철강에서 채취한 희토류 원광시료의 분석결과

Elements	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Content(%)	3.41	2.06	0.78	0.27	13.26	1.55	36.66
Elements	CaO	MgO	K ₂ O	SrO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Content(%)	9.92	4.91	0.18	2.37	0.09	1.48	6.36

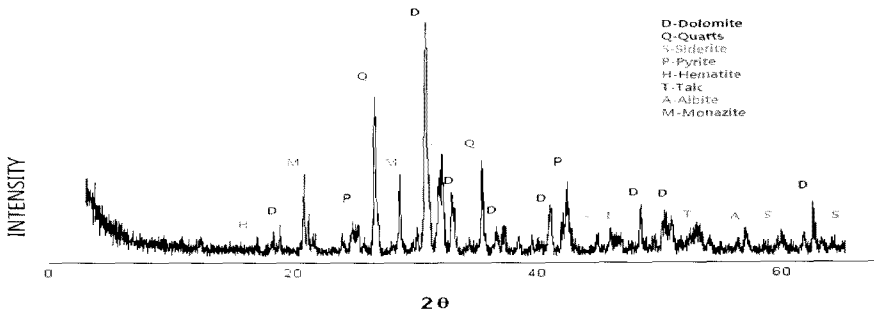


그림 6. 원광 시료에 대한 XRD 광물감정 결과.

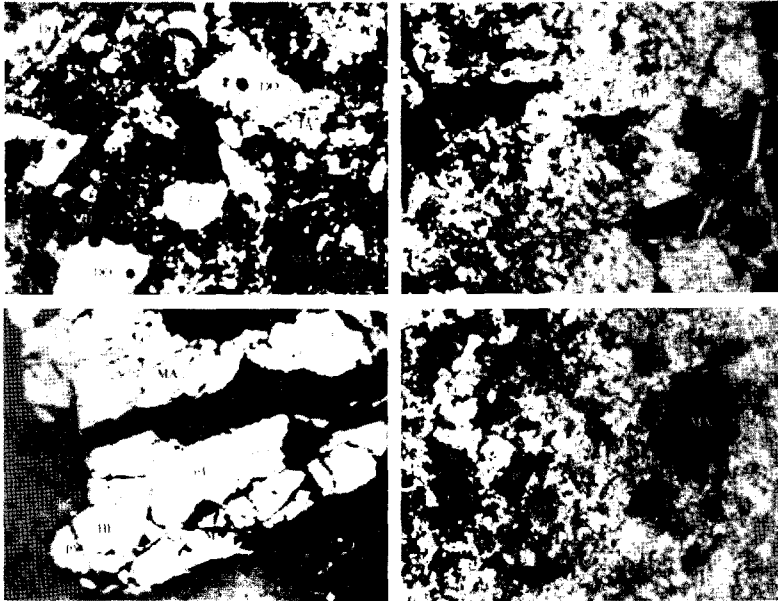


그림 7. 원광 시료에 대한 현미경 감정결과.

4. 실험결과 및 고찰

시료에 대한 광물감정 결과 모나자이트 광물이 철광석 등 다량의 고비중 광물과 혼합되어 있어 먼저, 고비중 광물을 회수하기 위한 비중선별 실험을 수행하였다. 그림 9는 모나자이트 정광을 1차 회수하기 위한 비중

선별 실험결과를 나타낸 것으로, 단체분리도 및 본 연구에 사용된 비중선별에 가장 효과적인 입도를 규명하기 위한 입도크기 변화실험 결과이다. 실험조건은 비중선별에 가장 큰 영향을 미치는 물의 첨가량을 1,400 ml/min. 그리고 stroke frequency 370 rpm에서 실험을 수행하였다.

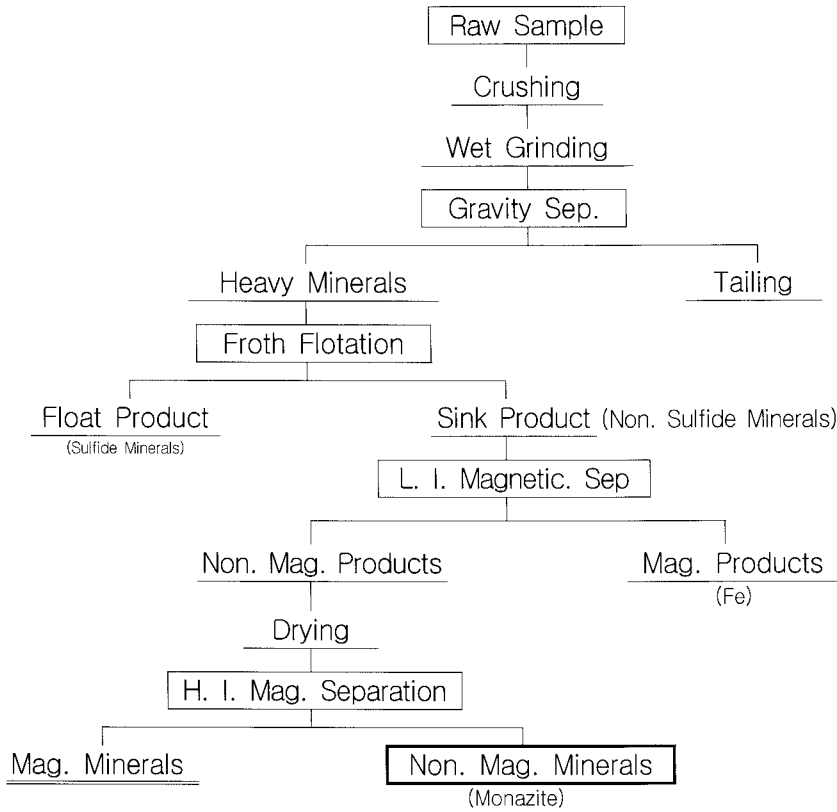


그림 8. 모나자이트 희토류광 선별을 위해 본 연구에서 개발한 선별공정도.

실험결과 시료의 입도크기 65 mesh 이하의 입도에서 TREO 품위가 회수율이 각각 26.3%와 60.0%로 가장 높고 이보다 입도가 커지거나 작아지면 선별효율이 크게 감소되는 것을 알 수 있다. 즉, 입자의 크기가 가장 큰 35 mesh 이하 입도에서는 TREO 품위와 회수율이 각각 23.4%와 49.2%를 그리고 입자의 크기가 가장 작은 100 mesh 이하의 입자에서는 TREO 품위와 회수율이 각각 24.1%와 52.0%로 감소되어 65 mesh 이하로 제조된 시료가 모나자이트의 선별효율에 가장 좋은 입자크기임을 알 수 있다. 이와 같이 65 mesh 입도를 기점으로 입자가 커질 경우 선별효율이 감소하는 이유는 입자가 커

지면서 단체분리도가 감소하고, 또한 본 연구에 사용된 비중선별기인 shaking table에 적합한 입도가 아니기 때문이다. 그리고 입자의 크기가 100 mesh 이하로 작아지면 단체분리도는 증가하나 비중선별이 어려운 slime의 발생이 많아 선별효율이 감소하였기 때문이다.

비중선별에서 회수된 1차 모나자이트 정광은 자철광 이외에 황철석이 대량 존재하고 있어 자력선별에 앞서 먼저 이들을 제거하기 위한 부유선별 실험을 수행하였다. 즉, 황철석의 경우 자성강도가 약해 일반 자력선별에 의해서는 거의 제거가 되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 황철석의 제거에 효

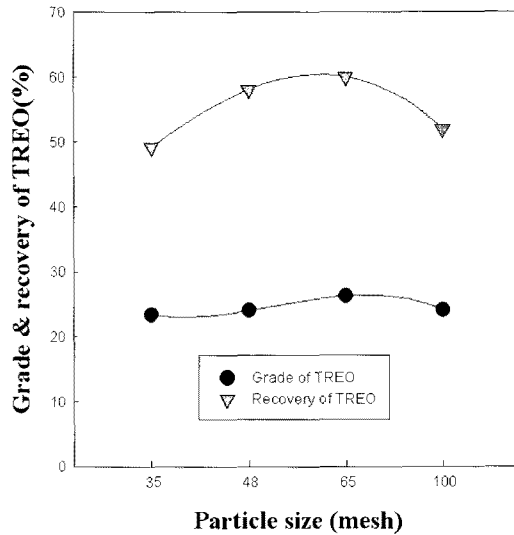


그림 9. 비중선별에서 입자크기가 TREO 품위와 회수율에 미치는 영향.

과적인 부유선별법을 적용하여 이들을 제거하기 위한 실험을 수행하였다.

그림 10은 황철석의 부유선별에서 포수제인 KAX (potassium amyl xanthate)의 첨가량에 따른 모나자이트 선별결과를 나타낸 것으로, 황철석 및 기타 유화광의 제거에 따른 모나자이트광의 선별결과이다. 실험결과 포수제의 첨가량이 증가하면 모나자이트의 품위는 증가하나 회수율은 다소 감소되는 것을 알 수 있다. 그러나 포수제의 첨가량 200 g/t까지는 TREO 회수율의 큰 감소없이 황철석만 효과적으로 제거되어 품위가 크게 증가되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 포수제 첨가량 200 g/t이 가장 효과적임을 알 수 있으며, 이보다 포수제의 첨가량이 적으면 황철석의 포집력이 부족하여 품위가 감소하고, 반대로 이보다 포수제의 첨가량이 많아지면 황철석에 충분히 포집력을 부여하여 황철석의 제거는 효과적으로 이루어지나 시약의 소모가 많고 부유선별 시간이 길어지면서 일부 모나자이트가

손실되어 회수율이 감소되기 때문에 효과적이지 못함을 알 수 있다.

부유선별에서 회수된 2차 모나자이트 정광에는 여전히 제거가 되지 않은 철광석이 다량 존재하여 이들의 제거를 위한 자력선별 실험이 필요하다. 그림 11은 이들 철광석을 제거하기 위한 건식 corss belt type 자력선별기를 이용한 실험결과를 나타낸 것으로, 황철석 등 유화광 계통의 Fe 근원광물들이 대부분 제거되었기 때문에, 이 과정에서 모나자이트 정광과 고품위철광석의 생산이 가능할 것으로 생각된다. 자장세기에 따른 실험결과 모든 조건에서 자철광이 효과적으로 제거되어 모나자이트 선별효율이 동일함을 알 수 있다. 이는 자철광이 자성강도가 가장 커 비교적 낮은 자장강도에서도 효과적으로 제거되었기 때문이다. 그러나 본 연에서는 모나자이트 TREO 품위와 회수율을 고려하여 자장의 세기 20 amphere을 최적실험 조건으로 하였다. 그림 12는 최종 정광으로 회수된 모나자이트 정광에 대한 XRD 광물감

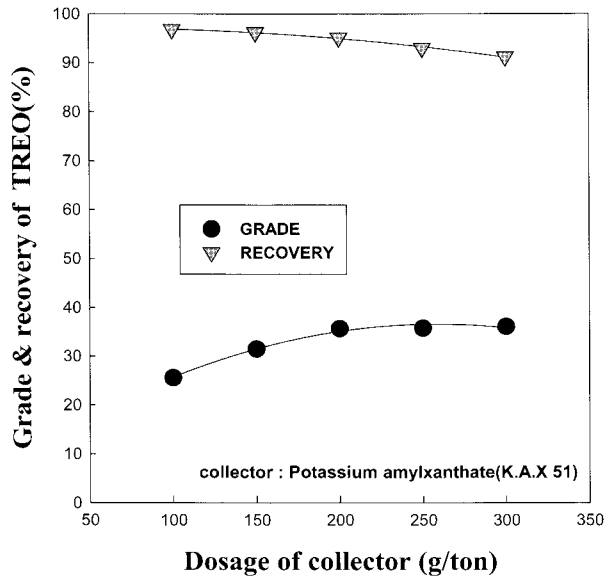


그림 10. 비중선별 정광으로부터 유화광 제거를 위한 포수제 첨가량 변화.

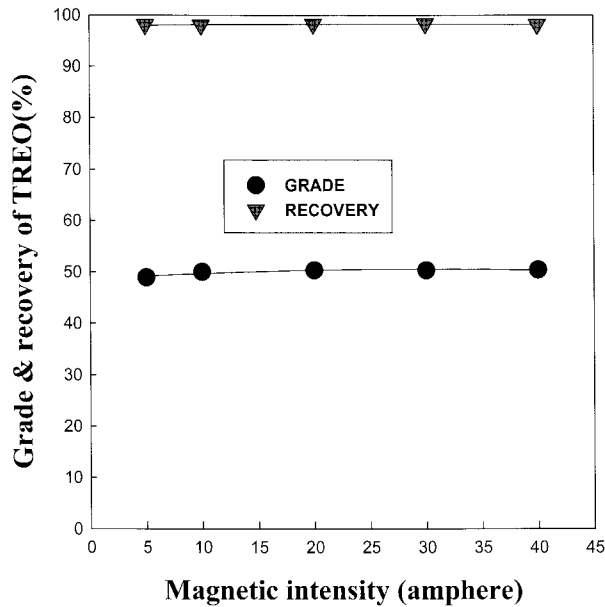


그림 11. 부유선별 정광으로부터 자성산물 제거를 위한 자력선별 실험결과.

정결과를 나타낸 것으로 모나자이트 이외의 불순물이 확인되지 않아 비교적 선별이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

6. 결 언

전기전자, Display, 하이브리드카, 특수철

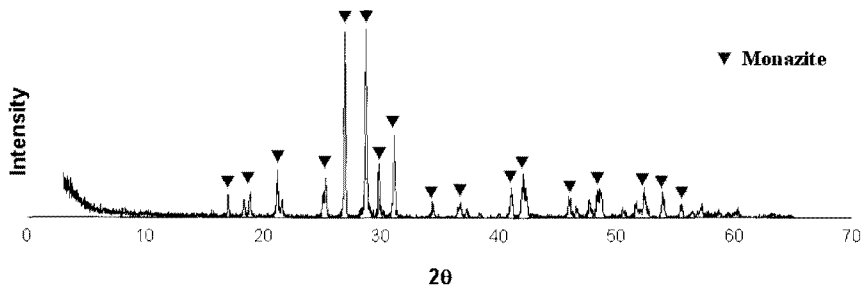


그림 12. 최종 모나자이트 정광에 대한 XRD 광물감정 결과.

강, 반도체, 원자력, 촉매, 초전도체 등 첨단 소재 원료로 사용되는 희토류광물은 과학과 산업의 발달로 용도가 더욱 다양해지고 사용량도 급증하고 있어 전량 수입에 의존하고 있는 우리나라는 안정적 확보를 위한 정책수립 및 기술개발이 매우 시급한 실정이다. 이는 우리나라의 핵심 산업구조가 대부분 희토류 원소를 사용하는 첨단산업으로 발전되어 있고, 희토류광을 보유한 국가에서 전략적으로 수출을 통제하고 가격급등을 유도하고 있기 때문이다. 특히, 최근에 중국의 경우 일본과의 정치적 불화에 희토류광물의 수출을 중단하는 목적으로도 활용한 예가 있어, 핵심 첨단산업의 보호 및 대외 경쟁력 제고를 위해 중장기 안정적 확보를 위한 대책이 필요하다.

중국의 경우 세계 희토류 광물의 88.7%가 부존되어 있으며, 미국과 러시아 등을 합치면 세계 매장량의 98.0%나되어 이들 3개 국가가 연합을 이루면 희토류 광물의 확보는 더욱 어려워질 것으로 생각된다. 그러나 희토류 광물의 생산량은 중국 단독으로 세계 시장의 97% 이상을 점하고 있어, 중국 단일 국가의 수출통제 결정에 따라 확보가 불가능해질 수도 있는 실정이다. 현재 우리나라는 희토류 광물의 수입은 많지 않으나 일본과 같은 국가로부터 희토류 원소 및 이를 이

용해 제조한 희토류 소재가 많이 수입되고 있어, 중국의 영향 아래 놓여있는 실정이다.

지구상 존재하는 광물 중 희토류 성분을 함유한 광물이 200종에 이르는 것으로 보고되고 있으나, 공업용으로 사용이 가능한 광석은 모나자이트, 바스트나사이트, 제노타임 그리고 이온흡착 형광이다. 모나자이트와 바스트나사이트는 경희토류가 많아 경제적 가치가 높지 않지만 제조타임과 이온흡착 형광은 유품, 이트륨 등 중희토류가 많아 활용 가치가 매우 높다. 이들의 대부분은 중국 강서성 등에 분포하고 있어 앞으로도 희토류 자원과 관련하여 중국의 영향력은 클 것으로 기대된다.

우리나라도 희토류광물이 국내 산업에 미치는 영향이 너무 크기 때문에 1990년대 후반부터 확보를 위한 정책수립과 기술개발을 추진해 오고 있다. 최근에는 중국의 수출통제가 심화되면서 국내부존 희토류광의 확보 및 활용을 위한 기술개발 지원을 확대하고 있으며, 개발된 기술을 활용한 해외부존 희토류 광의 확보 및 활용에도 관심을 두고 있다. 다행히도 강원도 홍천지역에 TREO 2.4% 정도인 모나자이트 광이 2천6백만 톤 이상 확보되었고, 충주 아래산 지역에서도 TREO 1% 내외의 희토류광이 2천만 톤 부존되어 있는 것으로 확인되어 경제성 있는

선별기술만 개발된다면 국내에서도 일부 희토류 광을 확보할 수 있는 기회를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

특히, 강원도 홍천산 희토류광을 대상으로 한 연구결과 모나자이트 희토류광 이외에 부산물로 철광석과 스트론튬도 확보가 가능한 비중선별, 부유선별, 비중선별을 혼합한 융합선별 공정을 개발하여, TREO 50%인 모나자이트 정광을 회수율 53%로 생산하는 기술을 확보하였다. 그러나 실험실 규모의 기초연구 단계로 여전히 해결해야 할 많은 연구과제가 남아있다. 특히, 경제성을 갖출 수 있는 저비용, 고도선광 요소기술 개발이 필요하며, 또한 상용화가 가능한 대량 연속처리 실증화 공정개발이 요구된다. 그리고 충주 아래산 및 양양 그리고 무주 지역 등 앞으로 확보가 가능한 지역을 대상으로 한 우수한 선별기술 개발도 요구된다.

참고문헌

- “자은철광석으로부터 희토류광물 회수에 관한 연구”, 전호석, 김준수, 문영배, 이재장, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 2001, 제 21권, A, PP. 257-261
- “희토류광물 회수율 향상을 위한 선별공정 개발”, 2001년도 한국자원공학회 추계 학술발표회(제77회), 10월 18~19, 서울대학교 호암컨벤션센터.
- “홍천철광으로부터 모나자이트 회수를 위한 종합 선별공정 개발”, 한국지구시스템공학회, 춘계학술발표회, 전호석, 김준수, 이진영, 신선명, 신희영, 2003.04, PP. 311-314, 대전한국지질자원연구원 국내산 희토류 광물의 현황 및 선광기술 개발, 한국광물학회, 광물산업유관단체 공동 심포지움, 전호석, 김병곤, 조성백, 2008. 10. 10일 서울 교육문화회관, PP. 113-128
- 희토류광의 현황 및 모나자이트광의 선별기술, 제33회 자원활용소재심포지움, 전호석, 김병곤, 조성백, 2009. 2. 26, 서울 교육문화회관, PP 233-254(2009).
- “A New Development of Minerals Processing Flowsheet for the Treatment of a Complex Ore Containing Fe, Rare-Earth”, Fluo Jiake and Chen Xiangyong
- “Geochemistry of Elements”, Science Press, Beijing, 1984 (in Chinese), Liu Yingjun, Cao Liming, LiZhaolin et al.,
- “Mineral Processing of Rare Earth Metal”, Metallurgical Industry Press, Beijing 1975(in Chinese) Gui Guangren.
- “New Development of Separation of Bastnasite in China”, Symposium of second Annual Conference of the Chinese Rare Earth Society(VI), Wang Zhong, Che Liping, 1990.
- “Proceeding of the 2nd International Conference on Rare Earth Development and Application”, Huang Wenmei, Beijing, 1991, p.416.
- “Research and Development of Rare Earth Materials in China”, Rare Earth Reserch Institute General Research Institute for Nonferrous Metals, Qin Shuncheng, Beijing China(1993)
- “Research on Selective Flotation Separation of monazite from Bastnasite and Its Mechanism”, Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Lue Jiake, Zhou Gaoyun, Beijing 100044