

## ICT 산업의 핵심원료, 희토류의 고순도화 공정 소개

글 \_ 이진영  
한국지질자원연구원 광물자원연구본부

### 1. 서언

화학적으로 매우 안정되고, 건조한 공기 속에서도 오랫동안 잘 견디내며 열을 잘 전도하는 양도체인 희토류는 란타넘계열(lanthanoids) 15개 원소(La~Lu)와 스칸듐(Sc), 이트륨(Y)을 포함한 17개 원소를 통칭하며, 이 원소들은 우리 생활 전반, 특히 IT 등 첨단산업 분야에서 없어서는 안 될 산업의 필수소재로 알려져 있다.(Table 1 참조) 단편적인 예로, 희토류 성분 중의 하나인 네오디뮴(Nd)은 높은 보자력을 갖는 Nd계 자석의 핵심 원료로, IT 제품의 소형화를 가능하게 하였으며, 최근에는 친환경 자동차인 하이브리드 자동차 모터의 필수 소재로 사용되고 있다. 따라서 Nd계 자석의 핵심 원료인 Nd와 Dy 공급이 중단된다면, IT 분야 뿐만 아니라, 최근 환경 및 에너지 문제를 해결하기 위한 전기자동차 생산에도 치명적인 타격을 받을 것이다.

희토류 소재의 사용량 급증에 따른 가장 큰 문제점은

Table 1. 희토류 원소별 주요 용도

분 야	주요 용도(사용 원소)
금속산업	제강/합금제, 스테인레스(Y), 주조철소재(Ce)
축 매 제	석유정제, 자동차 배기가스 정화장치(Ce, Eu, Y)
유리/렌즈	색소제거(Ce화합물), 착색제(Nd, Pr, Er, Ce)
신세라믹	자기용 유약(Y-오렌지색, Nd-보라색, Ce-백색), 내화제(Y, Ce화합물), 전기전자용 신세라믹(La산화물), 공학용 신세라믹(Y산화물)
자성재료	영구자석(Sm-Co자석, Nd-Fe-B자석)
형 광 제	디스플레이(PDP, LCD 등), 형광램프 등(Y, Eu, Tb)
레이저	레이저 (Nd, Y)
연마/여과	브라운관 연마(Ce), 정수처리(La)
기타산업	광디스크(Gd, Dy, Tb), 원자력(Gd, Sm, Eu, Dy, Y), 초전도체(Y-Ba)

이러한 첨단산업의 비타민이라 불리는 희토류 생산이 중국에 집중되어 있다는 것이다. 즉 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 희토류 매장량이 전 세계 매장량의 50% 미만인 중국이, 세계 희토류 생산량의 97% 이상(2011년 기준)을 생산하였으나, 희토류 가격 폭등에 따라 중국 이외의 희토류 부존국(호주, 미국, 남아공 등)에서 희토류 생산을 시도하였으며 호주와 미국에서는 상용생산을 진행함에 따라 중국의 희토류 생산비율이 80%(2013년 기준)대로 감소하였다가 2014년에는 다시 90% 이상의 희토류를 독점 생산하고 있다. 따라서 중국의 의지 또는 내부 상황 변화에 따라, 세계 희토류 시장, 나아가서는 희토류 산업의 후방산업인 IT 산업과 환경 에너지 관련 산업에 이르기까지 지대한 영향을 받을 수 있다는 것이다.

세계 희토류 제품을 독점적으로 생산 공급하는 중국에서는 2005년 이후, 정부 주도로 거시 조정 정책 실시 및 환경보호 감독 강화로 희토류 공급 가격을 상승시켰으며, 2007년 시행된 중국 정부의 가격개혁은 중국 희토류 제품가격 폭등의 원인이 되었다. 2012년부터 세계 경제 침체와 공급 과잉에 따라 희토류 제품가격이 하락하였으나,

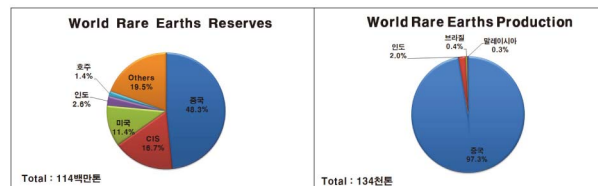


Fig. 1. 전세계 희토류 매장량 및 생산량 (USGS Mineral Commodity Summaries 2011).



Table 2. 연도별 희토류 가격 변화 추이

(산화물 99%, 중국 FOB 기준)

종류 (산화물기준)	단위	2007	2010	2011	2012	2013	2014 4/4	2015 3월
Ce	US\$/톤	3,010	22,918	98,889	22,884	7,625	4,707	4,117
Dy	US\$/톤	88	234	1,508	1,010	535	340	377
La	US\$/톤	3,412	23,437	99,356	23,341	7,438	4,850	4,289
Nd	US\$/톤	30,184	50,392	251,438	117,423	69,758	58,865	62,056

※ 자료원 : KORES(KOMIS)

아직까지도 급등 이전인 2007년 가격의 130~400% 수준은 유지하고 있으며 특히 자석 원료인 Nd, Dy의 가격은 매우 높은 가격대를 유지하고 있다. (Table 2. 참조)

한편 최근 중국 환경보호부에서 “희토류 산업오염물 배출기준”을 공표하였는데, 중국 희토류 관련 기업의 60%가량이 새로운 환경기준에 미달 된다는 것이 중국업체의 분석이다. 즉, 중국 정부의 관세 및 환경 정책으로 영세기업 및 기술력이 부족한 기업의 퇴출이 예상됨에 따라 중국 희토류 업계의 재편이 가속화될 것이다. 이러한 과정에서 희토류 제품의 생산 원가가 상승하고, 이는 수출가격에 그대로 전가되고 있어, 향후 희토류 제품 가격 상승의 원인으로 작용하고 있다.

이러한 희토류 가격 폭등은 희토류 수급 원인에 기인하므로, 이를 극복하기 위하여 과거 희토류 생산국 또는 희토류 자원 보유국에서는 희토류 자원 개발에 박차를 가하고 있으나, 희토류 정광의 80%를 생산하여, 희토류 제품 90%를 제조하는 중국 희토류 관련 기업의 생산 기술력은, 환경적인 문제를 경시하였던 상황만을 제외하면, 현재 세계 최고수준이며, 20여 년 동안 독점적으로 희토류 제품을 대량 생산하는 과정에서 축적된 know-how는 여타 국가나 기업이 단시간에 따라잡기에는 다소 격차가 있는 것으로 알려져 있다. 즉 당분간은 전 세계 희토류 수요 업체에서는 희토류 자원뿐만 아니라 생산기술에서도 중국의 영향력을 벗어나기가 힘들 것으로 예상된다.

## II. 희토류 제련기술 현황

세계적으로 가장 대표적인 희토류 광물은 불탄산염계 광물인 바스트나사이트(bastnasite, ((RE)(CO<sub>3</sub>)F)와 인산염계 광물인 모나사이트(monazite, (RE)(PO<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>))이다.

이러한 광물은 채광된 후 선광 과정을 거쳐 정광(concentrate)을 제조한 후, 제련공정에 투입된다. 일반적으로 바스트나사이트는 부선법(froth flotation method)으로, 모나사이트는 비중선광법(gravity separation method)에 의해 정광을 제조하며, 정광은 광종에 따라 전혀 다른 침출공정을 거쳐, 원소별 분리공정의 원료로 제조된다.

### 1. 희토류광의 침출공정

희토류광의 선별공정의 발전에 따라 현재 세계에서 생산되는 정광중 비 희토류 광물의 함량은 매우 적으며, 경우에 따라 거의 순수한 희토류 광물도 생산한다. 그러나 일반적으로 이런 정광중의 희토류는 산업원료로 직접 사용할 수 없으며, 사용하기 편리한 희토류 제품을 얻기 위하여 우선 정광을 분해 및 침출하는 것이 필요하다.

본 고에서는 대표적인 희토류광물인 모나사이트와 바스트나사이트의 침출 공정을 살펴보았다.

#### 1) 모나사이트 정광의 분해 및 침출

19세기 말 희토류 공업이 태동한 이래 모나사이트는 희토류 공업의 주요한 원료로 자리 잡았다. 20세기 들어서 모나사이트의 각종 분해방법이 개발되었으나 생산현장에서는 농황산분해와 가성소다 분해 두 가지 방법만 사용한다.

50년대 이전부터 사용된 농황산 분해법의 제일 큰 장점은 정광에 대한 적응성이 강하다는 것이다. 즉, 정광중에 가치 있는 원소 함량이 낮고 입도가 굵어도 비교적 만족한 결과를 얻을 수 있다는 것이다. 단점은 황산이 설비를 쉽게 부식시키고 조업자 및 환경보호에 큰 문제를 발생시키며 정광중 함량이 희토류 다음으로 많은 인의 회수가 곤란하다는 것이다.

가성소다 분해법에 의한 모나사이트 분해공장은 1952년에 프랑스의 기술을 이용하여 인도의 Alwaye에 최초로 건립되었다. 그 후 미국, 브라질, 프랑스, 중국, 말레이시아, 북한 등이 잇따라 가성소다로 모나사이트를 처리하는 공장을 건립하였으며, 가성소다법이 점차적으로 농황산분해법을 대체하였다.

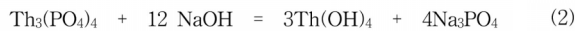
가성소다 분해공정의 단점은 농황산법과는 달리 가능



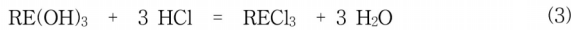
한 공정투입원료는 불순물 함량이 적고, 분해 전에 정광을 미립화하여야 한다는 것이다. 그러나 가성소다 공정 중 설비의 부식, 조업자 및 환경보호를 해결하기가 비교적 쉬우며 모나자이트중의 인성분의 회수가 가능하여 현재 모나자이트 분해 공장은 대부분 알카리 분해법을 적용하고 있다.

### (1) 가성소다에 의한 모나자이트 분해 및 침출

모나자이트 분해공장은 대부분 가성소다용액 상압분해법을 적용하고 있다. 모나자이트와 가성소다가 반응하여 희토류와 토륨은 물에 용해되지 않는 수산화물로 생성되고 인 성분은 수용성 인산나트륨으로 변환된다.



가성소다에 의해 분해된 분해 산물은 희토류 수산화물의 형태이며 이는 아래 반응식과 같이 염산으로 비교적 쉽게 용해된다.



세척 후의 분해 산물 중에 희토류 외에 토륨, 우라늄, 철 등 비희토류 원소가 있는데 희토류 성분을 묽은 염산으로 선택적으로 우선 용해 시키므로써 비 희토성분을 분리할 수 있다.

모나자이트 정광 분해에 사용된 가성소다 용액에는 반응식 (2)에서 보는 바와 같이, 분해된 모나자이트 정광량에 비례하여 인산나트륨이 생성되어 함유되어있고, 미반응 가성소다도 상당량 포함되어 있다. 따라서 인산나트륨 회수와 미반응 가성소다의 재사용을 위해, 정광 분해 반응 후, 가성소다 용액을 가열하여 수분을 일정량 증발시키면(NaOH 함량 40~50% 수준), 대부분의 인산나트륨이 결정으로 생성되어 용액과 분리가 가능하며, 인산나트륨이 제거된 가성소다 용액은 일부 규소성분을 제거한 후 분해용액으로 다시 사용하게 된다. (Fig. 1 참조)

### 2) 바스트나사이트 정광의 분해

바스트나사이트 정광은 고농도 염산 또는 산화 배소 후 황산 침출 공정에 의해 침출한다. 그러나 고농도 염산 침출은 염산의 가격 및 반응 공정 제어가 어렵다는 단점

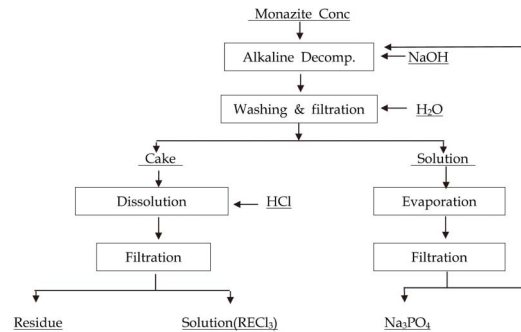


Fig. 1. 모나자이트광의 분해 및 침출공정.

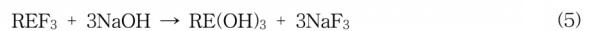
때문에 주로 산화 배소 후 황산 침출 공정법에 의해 침출되고 있다.

### (1) 염산에 의한 바스트나사이트 분해 및 침출

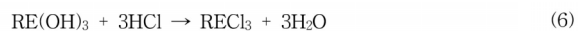
바스트나사이트 중에 함유된 희토류 원소는 90°C에서 4시간 동안에 고농도 HCl과 반응하여 가용성 희토류 염화물로 전환된다.



침출 여과 후 얻어진 REF<sub>3</sub> 고체는 반응온도 96°C에서 4시간 동안 20% NaOH 용액과 반응시키면 아래 반응식과 같이 희토류 수산화물로 전환된다.



반응 혼합물 중의 용액을 제거하기 위하여 decantation 및 여과 과정을 거친 다음, 세척하면 희토류 수산화물 cake를 얻게 되며, 이것은 식(4)에서 생성된 잔여 HCl를 중화시키는데 사용된다.



염화 희토류 용액 중에 함유된 철성분을 침전 제거시키기 위하여 pH 3.0으로 중화된 용액을 가열한 다음 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 첨가하며, 또한 barium을 침전 제거시키기 위하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 첨가한다. 이후에 토륨 생성물과 과량의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 침전 제거시키기 위하여 BaCl<sub>2</sub>가 첨가되는데, 이 과정을 거쳐서 용액 내의 불순물들은 모두 제거된다. 침전 반응물질은 정제된 희토류 염화 용액을 얻기 위하여 여과된 다음에 농축된 희토류 염화물의 고체 또는 용액으로 제조된다. 이 공정의 설계는 공정에 사용되는 고순도 바스트나사이트 농축물의 특성에 영향을 받으며, 적은



양의 시약소모, 낮은 생산비 그리고 높은 수율의 희토류 농축물을 얻는 특징을 가지고 있다. 그러나 고농도의 HCl의 첨가에 따른 부식방지가 고려되어야 한다.

### (2) 황산에 의한 바스트나사이트 분해 및 침출

황산에 의한 바스트나사이트의 침출 공정은 산화 배소, 황산 침출로 이루어진다.

산화배소는 바스트나사이트내 희토류 원소들을 효과적으로 침출시키기 위하여 수행되는 전처리 공정으로서, 산화배소가 진행되면서 cerium은 3가에서 4가로 산화가 일어나며, 산화율은 약 95% 정도로 알려져 있다.

바스트나사이트 산화배소과정 중의 희토류 원소는 황산 용액에 의해서 침출이 효과적으로 이루어지는데, 이를 반응식으로 나타내면 다음과 같다.



## 2. 희토류 원소별 분리 공정

희토류 원소들은 그 화학적 성질이 매우 유사하기 때문에 여러 원소들로부터 한 원소를 분리하는 것은 매우 어렵다. 1787년에 희토류가 발견된 이래로, 20세기 중반까지는 희토류 원소별 분리를 위해 분별결정법, 분별침전법 그리고 선택적 산화 환원법으로 희토류 원소를 분리하여 왔으나, 낮은 생산성과 회수율, 그리고 낮은 순도 때문에 대량 생산에는 적절하지 못한 공정이었다.

1960년대 토륨과 우라늄 등을 분리 농축하는 공정으로 개발된 이온교환법, 용매추출법이 고순도의 희토류 원소 및 화합물을 얻기 위한 공정으로 응용되기 시작하면서 상업적인 수준의 원소별 고순도 희토류 성분 분리가 가능하게 되었고, 이를 통해 새로운 희토류 응용분야 개발을 촉진시켰다.

### 1) 분별결정법

분별결정법은 희토류복염 화합물들이 물 또는 산 속에서 용해할 때의 용해도 차이를 이용하여 원소별로 분리하는 공정을 말한다. 높은 용해도를 가진 희토류복염은 용액상에 농축되나, 낮은 용해도를 가진 다른 물질들은

주로 고체상에 다량 존재한다. 즉 희토류복염의 용해, 결정 및 분리 공정을 반복 처리하면 원소별 희토류를 얻을 수 있다. 이 때 얻어지는 희토류 산물의 순도는 희토류복염의 용해도 차이 및 분별 회수에 의존하게 된다.

분별결정법은 희토류원소 분리의 초기 단계에 순수한  $La_2O_3$ 를 제조하는데 효과적인 기술이었다. 예를 들면 순도 99.9%  $La_2O_3$ 는 질산암모늄 희토류복염으로부터 분별결정법에 의해서 제조될 수 있다.

분별결정법은 사용 장치가 간편하고 조업이 용이하다는 이점을 가지고 있으나, 조업의 효율성이 매우 낮다. 고순도 물질을 얻기 위해서는 수백 또는 수천 번의 분별 결정 조작을 하여야 하는데, 이 공정은 높은 노동력, 낮은 생산성 및 낮은 회수율 때문에 대량 생산에는 적절한 방법이 아니다.

### 2) 분별침전법

분별침전법은 원리 면에서 분별결정법과 매우 비슷한데, 분리는 희토류원소 화합물 사이의 용해도 차이에 기초를 두고 있다. 희토류 혼합 용액 중에 적정량의 시약을 첨가하면, 용해도가 낮은 희토류 화합물은 침전되고, 용해도가 높은 기타 화합물은 용액 중에 남아 있게 된다. 이를 여과 분리하여 얻은 침전물을 수차례에 걸쳐서 다시 침전, 여과 및 용해의 과정을 거치면, 각각의 원소별 희토류는 다른 희토류원소 및 기타 불순물로부터 분리된다.

황산희토류복염 침전공정은 희토류를 세륨군(La, Ce, Pr, Nd, Sm), 터비움군(Eu, Gd, Tb, Dy), 및 이트륨군(Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)의 세 가지 군으로 분리하는데 이용된다. 황산희토류복염의 침전 생성과정 중에 EDTA와 같은 복염 침전제가 희토류복염간의 용해도 차이를 증대시키고, isomorphous capture 현상을 감소시키며, 분리효과 증가 및 순수한 산물을 얻을 목적으로 첨가된다. 이 방법은 순도 99.99%의  $Y_2O_3$  및  $Dy_2O_3$ , 99.9%의  $Ho_2O_3$  및  $Pr_6O_{11}$ , 97%  $Tb_4O_7$ 를 제조하기 위하여 이용된다.

옥살산 분별침전의 경우, 이 방법에 의해서 부분적인 농도 차이가 없고 분리 효과가 개선된 균일한 상의 침전을 얻을 수 있다. 이 옥살산 공정은 2회의 반복 조작을 통해서 순도 97%의  $La_2O_3$ 를 혼합 용액으로부터 쉽게 얻

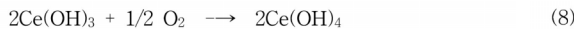


을 수 있다. 분별침전법의 장단점은 분별결정법과 비슷하다.

### 3) 선택적 산화 환원법

#### (1) 세륨 분리회수의 산화법

원자가 차이에 따라 나타나는 특성을 이용하여 효과적으로 희토류 원소를 분리하는 것을 말한다. 예를 들면 3가 세륨이 산화되어 4가 세륨으로 되면, 염기도가 약해져 쉽게 세륨 수산화물이 전환되어 다른 희토류 3가 원소들과 분리된다. 실제 생산 공정에서 희토류 수산화물 슬러리에 산화제로 공기를 지속적으로 주입시키면, 세륨 3가는 다음 반응식과 같이 4가 세륨으로 전환된다.

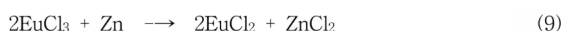


수산화물은 질산 첨가에 의해서 쉽게 용해되는데 용액의 pH를 잘 조절하면, 3가 희토류 원소의 수산화물은 용해되지만 4가의 세륨 수산화물은 용해되지 않아 여과에 의해서 분리된다. 이때 얻어진  $\text{CeO}_2$ 는 한 번의 조작에 의해서 순도가 90% 정도 되는데, 이러한 조작을 수차례 반복하면 순도 99% 이상의 제품을 얻을 수 있으며, 이와 같은 방법은 상업적으로 아직도 이용되고 있다.

#### (2) 아연 환원법에 의한 유로피움 회수

표준 전위차에 의하여 3가의 유로피움은 금속아연에 의해서 쉽게 2가의 유로피움으로 환원된다. 또한  $\text{EuSO}_4$ 는  $\text{Eu}_2(\text{SO}_4)_3$ 보다 낮은 용해도 및 강한 염기도를 가지는 특징이 있다. 이 두 가지 특성을 이용한 Zinc Reduction-Basicity Process는 1960년 이후 혼합 희토류 용액으로부터 유로피움을 분리 및 정제하는데 폭넓게 이용되었다. 이 공정의 자세한 내용은 다음과 같다.

황산화희토류들의 용해도 차이를 이용해서 금속아연으로 희토류 혼합 용액 중의  $\text{Eu}^{3+}$ 를  $\text{Eu}^{2+}$ 로 환원시킨 다음, 황산을 첨가하면  $\text{EuSO}_4$  침전물이 생성된다.



여과 후, 침전물은 질산으로 용해하는데, 용해과정 중 유로피움은 다시 3가 상태로 산화되므로 금속아연

에 의해서 다시 환원시킨다. 여기에 적정량 암모니아수를 가하면 유로피움을 제외한 희토류 원소는 수산화물을 생성하나, 유로피움은 용액 상태로 존재한다. 다시 수산화물 혹은 옥살산염으로 만든 다음 하소하면 99.99%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ 를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법은 조업시간이 길고 많은 양의 시약을 사용하여야 하는 단점이 있음에도 불구하고, 간편한 장치 및 쉬운 조작의 장점 때문에 현재도 폭넓게 이용되고 있다.

### 4) 용매추출법

용매추출은 희토류의 분리와 정제에 관한 주요 기술인데, 그러한 이유는 고전적인 방법들과 비교하여 효율이 높고 조작이 간편하기 때문이다. 또한, 이온교환 방법과 비교하여, 용매추출 공정은 처리비용이 싸고, 생산성이 높기 때문에, 1970년대 이후부터는 대부분의 원소별 희토류 화합물은 용매추출공정에 의해 생산되고 있으며, 중국을 중심으로 생산기술이 급격히 발전하였다.

#### (1) 희토류 원소의 용매추출

추출제를 함유하는 유기상이 희토류를 함유하는 수상과 접촉할 때, 추출제는 유기상에 용해될 수 있는 새로운 화합물을 형성하기 위하여 희토류 이온과 반응한다. 즉, 희토류가 수상에서 유기상으로 이동된다. 이러한 과정은 희토류의 용매추출로서 알려져 있다.

분배 비(distribution ratio) D는 추출계가 평형에 도달할 때 수상의 희토류 전체 농도에 대한 유기상의 희토류 전체 농도의 비로 정의된다.

$$D = \frac{C_{a(o)}}{C_{a(w)}} \quad (11)$$

D는 희토류 이온을 추출할 수 있는 추출제의 추출능을 표현한다. 따라서 D가 더욱 강할수록, 추출능이 더욱 강하다.

이웃하는 희토류 원소에 대한 분리 계수(separation factor)  $\beta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{D_A}{D_B} = \frac{C_{A(o)}/C_{A(w)}}{C_{B(o)}/C_{B(w)}} = \frac{C_{A(o)}^* C_{B(w)}}{C_{B(o)}^* C_{A(w)}} \quad (12)$$

여기서  $CA(o)$ ,  $CB(o)$ ,  $CA(a)$  그리고  $CB(a)$ 는 각각 유



기상과 수상 내 원소 A와 B의 농도를 나타낸다. 아래첨자 (o)와 (a)는 상호 평형이 이루어진 유기상과 수상을 의미한다.  $\beta$ 가 클수록 분리효과가 크다.

### (2) 희토류 추출제 및 추출화학

일반적으로, 희토류 추출제들은 수상에서 희토류 양이온을 복합체화하여 유기상에 용해되어 추출할 수 있는 형태로 만드는 능력이 있는 유기화합물들이다.

희토류 분리에 사용되는 추출제는 주로 산성 phosphorous 시약들을 포함하는 organo-phosphorous 추출제, carboxyl acids 그리고 소수의 중성계 추출제 등이다.

이러한 희토류 추출제 가운데, 상업적으로 가장 많이 사용되는 추출제는 산성 phosphorus 계열의 추출제로서, 이 추출제는 적어도 하나 또는 두 수산화 그룹(OH-)이 에스테르화되거나 치환되지 않는 인산으로부터 얻어지는 약 유기산이다.

organo-phosphorous 계 추출제에 의한 추출반응은 양이온 교환과 배위반응 모두를 포함하는 공정이다. 한편, 킬레이트 추출제, acidic phosphorus 추출제 또는 카르복실산과 같은 추출제 분자들로부터 방출되는 수소이온은 수상에서 추출물 중의 희토류 양이온과 교환된다. 즉 양이온 교환반응이 일어난다. 동시에, 여러 착화물을 형성하기 위하여 keton 그룹(C=O) 또는 phosphoryl 그룹(P=O)의 산소원자가 희토류 이온들과 배위결합하여 평형을 이룬다.

이들 평형공정 모두는 다음 식으로 표현될 수 있다.



여로서 phosphorus 시약을 택하여 설명해 보면 다음과 같다.

### (3) 용매추출에 의한 희토류 분리공정

앞서 살펴본 다양한 희토류 원소별 분리 공정중에서, 현재 상업적으로 세륨과 유퀴륨을 제외한 고순도 희토류 성분을 대량으로 분리할 수 있는 공정은 용매추출공정이 유일한 것으로 알려져 있으며, 현재 이를 대체할 만한 기술은 보고된 바 없다.

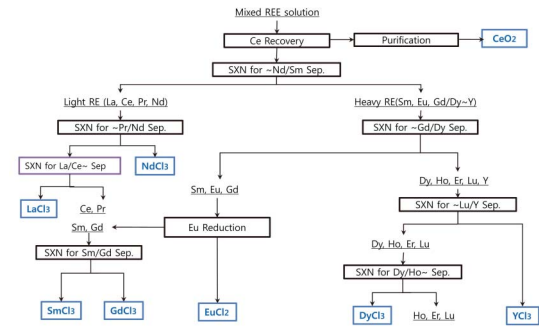


Fig. 2. 용매추출에 의한 희토류 원소별 분리공정 개략도

그럼 일반적인 혼합 희토류 침출 용액으로부터 희토류 원소별 분리 계통도를 나타낸 것이다. 경희토류가 주성분인 모나자이트 및 바스트나사이트광의 경우, 이러한 체계에 의해 원소별 분리를 수행하며, 필요에 따라서 일부 원소별 용매추출공정이 생략 또는 추가되는 경우가 있다.

## III. 국내 희토류광의 개발 가능성

앞서 기술한 바와 같이, 희토류 자원의 편재성에 의해 수급에 많은 문제점이 발생하고 있으며, 이를 극복하기 위한 노력으로 희토류 자원 보유국의 희토류광 개발 열기가 뜨겁게 달아오르고 있다. 미국의 Mountain Pass 광산과 호주의 Mountain Weld 광산 개발 프로젝트를 통해 상용생산 중이고, 남아공 등의 국가에서 추가적인 광산개발을 진행 중이다.

북한의 경우, 중국 국경 접경지역에 희토류 매장량이 확인되고 있으며, 국내의 경우도 양양, 홍천, 충주 지역에서 희토류광의 부존 사실이 알려져 있다.

한국지질자원연구원에서는 국내 희토류광의 탐사 연구와 제련기술 개발 연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 이러한 연구개발의 성과로 국내 희토류광의 매장량 추가 확보 및 제련 기반기술을 확보하고 있다. 특히 지난 10여 년간 해외 희토류광 제련 연구를 통해 확보된 희토류 제련기반 기술을 활용하여 국내 희토류광을 대상으로 제련 공정



확립 연구를 진행하고 있다.

아직까지 경제성과 환경적인 문제로 상용생산을 검토할 단계에까지는 이르지 못하였으나, 환경적인 문제를 극복할 수 있는 친환경 제련기술과 상용화 기술을 확보하기 위한 연구개발 꾸준히 진행된다면, 첨단소재의 핵심 원료인 희토류를 자급자족할 수 있는 시기도 도래할 것으로 기대해 본다.

## 이진영



- 1999년 광운대학교 화학공학과 박사
- 2000년-현재 한국지질자원연구원 책임연구원
- 2014년-현재 한국지질자원연구원 제련연구실장