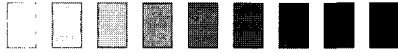


단 보



한국의 희토류 광물 자원

장 세 원¹⁾ · 서 정 름²⁾

¹⁾ 한국지질자원연구원 해저자원환경연구실

²⁾ 한국지질자원연구원 광물자원연구실

희토류는 늦게 발견되었거나 천연에서 산출이 드물거나 추출이 어렵거나 등의 이유로 희유원소 또는 희유금속이라고 불리는 원소들 중의 한 그룹으로서, 희토류란 용어는 라틴어의 'terra rarea'로부터 유래되어 약자로는 TR 또는 란탄족에서 유래한 심볼인 Ln로 사용된다. 희토류그룹은 란탄족의 원자번호 57~71번까지 지화학적으로 유사한 15개 원소들(La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)로 이루어지며 주기율표상의 같은 위치를 차지한다. Y와 Sc은 화학적 유사성과 지화학적 친화력 때문에 일반적으로 희토류와 함께 분류되는 원소이다. 그러나 Y와 Sc는 이 그룹의 정상적인 멤버는 아니고 주기율표에서 자신의 고유한 위치를 차지한다.

최초로 발견된 희토류광물인 'cerite'는 1751년에 'Cronstedt'에 의해 발견되었고, 1803년에 J. Berzelius와 V. Hisinger가 이 광물에서 미지의 산화물을 분리하여 'ceria'라 명명하였고 M.H. Klaproth에 의해서도 같은 발견이 이루어졌다. 또한 1787년 스톡홀름 근처의 'Ytterby'에 위치한 채석장에서 Lt C.A. Arrhenius가 자기에 사용되는 장석을 조사하다가 미지의 광물을 발견하였고, Johann Gadolin이 1794년에 분석하여 'new earth'를 발견하였다. 1797년 Anders

Gustaf Ekeberg가 다시 분석하여 'Gadolin'이 발견한 원소(실제로는 여러 희토류의 혼합물)에 'yttria'라는 이름을 붙였다. 이 광물은 'ytterbite'로 불리다가 M.H. Klaproth가 1800년에 'gadolinite'라고 명명하였다(Cesbron, 1989).

한동안 이 원소들은 드물며 실용적인 가치가 없는 것으로 생각되어 20세기 초반에는 가스램프의 가스 덮개에 유일하게 활용되기 시작하였으나, 1930년대 중반에는 비철금속, 'cast iron', 강철의 합금 용제로 사용되었다. 그러나 근자에 발견된 많은 새로운 용도가 희토류의 사용을 증가시켜서 특수합금, 유리공업, 석유산업, 칼라 TV, Co-Sm의 초전기합금, 레이저 등에 사용되고 있다. 희토류의 가장 중요한 소비처는 석유화학, 야금술, 세라믹이며, ¹⁷⁰Tm, ¹⁵⁶Eu, ¹⁴⁴Ce 동위원소는 방사능 공급, Gd의 조정에 사용되고 Sm과 Eu는 핵반응, 기타 등에 응용된다. 희토류는 멀지 않아 다양한 혼합물뿐 아니라 개별 원소로서도 산업에 이용될 것으로 생각되며, Ce, La, Nd, Sm, Gd과 특히 Eu, Y, Tm가 중요하다.

희토류를 함유하는 광물은 약 300여종이 알려져 있지만 경제성 있는 광물은 20여종에 불과하고 이 중에서 중요한 광물들은 모나자이트(monazite: (Ce,La,Y,Th)PO₄), 제노타임

(xenotime: YPO_4), churchite($(Ce, Y)PO_4 \cdot 2H_2O$), bastnasite($(Ce, La)CO_3F$), parisite($(Ce, La)_2Ca(CO_3)_3F_2$), synchysite-(Y)($(Y, Ce)Ca(CO_3)_2F$), loparite($(Ce, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3$), 퍼구소나이트(fergusonite: $(Y, Er, Ce, Fe)NbO_4$) 등이다. 최근에는 희토류의 공급원에 큰 변화가 있어서, 과거에는 대부분 해빈사광의 Th를 함유하는 모나자이트로부터 추출되었으나 현재는 Th의 수요가 매우 적어서 'bastnasite' 정광으로 교체되고 있다. 한편 희토류의 약 35% 정도는 Nb-Ta광석 또는 우라늄 광석의 부산물로 획득된다. 일반적으로 TR_2O_3 를 1~2% 이상 함유하면 고품위광석, 0.3~0.4% 이하면 저품위 광석으로 분류되고, TR_2O_3 매장량이 40~50만톤 이상이면 대규모 광상, 10만톤 이하면 소규모 광상으로 분류된다.

주요 희토류 광상은 중국, 미국, 인도, 호주 등에 집중되어 있으며 브라질, 남아프리카, 캐나다 등에도 부존되어 있다. 미국과 캐나다의 알칼리 암체광상, 중국 화남지방의 잔류풍화광상과 미국, 호주, 인도, 브라질, 남아프리카에서 같이 해빈이나 하천, 삼각주 등에 부존하는 사광상이 주요 산출상태이다. 현재 중국은 전 세계 희토류 매장량의 80% 이상을 차지하고 있으며 미국과 인도, 호주를 합하면 전 세계 매장량의 97%를 차지하게 되어, 보유국들이 이를 전략적으로 이용할 경우 희토류를 보유하지 못한 나라들은 큰 영향을 받을 것으로 생각된다(이재천 외, 2003).

우리나라에서는 20세기 초부터 희토류 광물 자원의 부존이 알려지기 시작하여 제 2차 대전 말기에는 육상 광상에 부존하는 희토류 광물 자원에 대하여 탐사, 탐광, 시굴 등이 각처에서 활발하게 실시되었고, 모나자이트 사광도 여러 곳에서 채굴되어 정광이 생산된 것으로 알려져 있다. 이 당시 밝혀진 우리나라의 희토류 광물 자원으로는 모나자이트, 제노타임, 갈럼석(allanite: $(Ce, Ca, Y)_2(Al, Fe^{2+}, Fe^{3+})_3(SiO_4)_3OH$), 세라이트

(cerite: $(Ce, Ca)_9((Mg, Fe^{2+})Si_7(O, OH, F)_{28})$, 레싱가이트(lessingite: 세라이트의 일종), 퍼구소나이트, 육세나이트(euxenite: $(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$), 탄탈-육세나이트, 이트로-탄탈라이트, 새마르스카이트(samarskite: $(Y, Ce, U, Fe)(Nb, Ta, Ti)_2(O, OH)_6$) 등이 보고되고 있다(立岩巖, 1976).

북한에서는 평북 철산 광산의 모나자이트를 현지에서 분쇄 및 2차 선광하여 정광(65%, 처리능력 1000톤/년)으로 만들어 함흥의 희토류 생산 공장으로 보내 총 13개 품목의 희토류 산화물과 희토류 금속을 연간 350톤 생산하며 주로 일본과 유럽에 수출하고 있다. 철산광산은 1950년대에 발견되어 소규모로 채굴해왔고 추정광량은 50만톤으로 알려져 있으며, 함흥의 희토류 생산 공장은 1991년도에 국제화학합병회사가 1,200만불을 투입해 건설한 것으로서, 국제화학합병회사는 1988년도에 북한 용악산총합회사와 일본 국제트레이딩이 합작해 설립한 것이다(변정규, 1992).

한국지질자원연구원에서는 1981년부터 우리나라의 풍화잔류광상, 하천사광 및 해빈사광 등에 대한 조사를 수행하였으며, 1986년도에는 가행중인 제1연화화 제2연화 연·아연광산 그리고 상동 중석광산에서 산출되는 광석, 정광 및 광미 등에 함유된 희유원소에 대한 분석을 실시하였다. 1987년부터는 희유금속개발사업단을 조직하여 1991년까지 육상광상, 하천사광상, 광석 및 휴폐자원을 망라하여 희유금속 광물자원 조사를 수행하였고, 1993년부터 1995년까지 선캠브리아기 철광상의 희토류 광물 자원 탐사연구를 수행하였다. 또한 1994년부터 1999년까지는 연근해의 천해저에 분포하는 해저광물자원 조사연구를 수행하였다. 또한 2003년도부터는 해사 중 유용광물자원 회수기술 개발을 수행해오고 있다. 일반적으로 희토류 광물 자원은 희유원소나 희유금속원소 자원의 일부로

서 함께 언급되어 왔으나, 이번에는 기발간된 여러 자료에서 희토류 광물 자원에 관련된 부분만을 발췌하고, 요약하여 설명하고자 한다.

육상의 희토류 광물 자원

1936년 충남 청양군 청양광산의 함텅스텐광석영맥에서 녹주석이 발견되고, 1938년 충북 단양군 단양광산 및 평북 삭주군 은곡광산의 페그마타이트 중에서 콜럼바이트를 발견한 이후의 지질조사 사업과 제2차 대전 개시 후에 인식된 희유 원소 자원의 중요성에 의해 희유원소광물의 종류와 산지도 점차 증가하여 법정광물로 점차 편입되었고, 탐사, 탐광, 시굴 등이 각처에서 활발하게 실시되었다. 1943년 총독부 광무과의 자료를 보면, 희토류 광물 자원으로 세리움 및 토리움광·네오지오광에 속하는 광물로서 모나자이트, 갈럼석, 세라이트의 주요산지 및 산상이 보고되고 있다. 갈럼석과 모나자이트는 저어콘 등과 함께 우리나라에 광범위하게 분포하는 고기의 편마암류나 화강암질암 지역에 사광상으로

로 넓게 분포하지만 페그마타이트에서 산출되기도 한다(표 1). 아래 산지 중에는 갈럼석이 편마암, 석회암 또는 함니켈 염기성 암맥에 수반되는 예도 있으나 대부분 페그마타이트에서 산출된다(立岩巖, 1976).

강원 평강군 소림양장광산의 세라이트 광상

우리나라의 대표적인 세라이트 산지로서 1939년 최초로 지질조사 당시에 이미 노천 채굴흔적이 있었다고 한다. 광상은 알카리섬암 내의 평행한 2매의 페그마타이트로서 주 구성광물은 각섬석, 세라이트 및 형석이며 미량의 휘수연석, 갈럼석, 운모, 칼리장석, 석영을 수반한다. 이 광상의 세라이트는 괴상 또는 육각 주상결정으로 산출되며 화학성분상으로는 레싱가이트에 속하는 것으로 보고되었다(立岩巖, 1976).

황해 안악읍 부근 갈럼석 광상

1939년 최초 발견되었으나, 이 광물이 1941년에는 세라이트로서 법정광물로 추가되면서 탐

표 1. 1945년 이전에 알려진 우리나라 주요 희토류 광물 자원 및 산지.

광물	주요산지	비고
모나자이트	평북 철산군 백량면 선암광산	
갈럼석	황해 안악읍 판오리, 판육리	광상수가 많음
	함북 함성군 학남면 달리동	거정이며 저어콘과 함께 산출
	함북 함성군 학상면 업역동	
	함북 함성군 학서면 세천동 삼로	
	황해 안악군 은흥면 내평리	
	함북 부령군 부령면 입담	
	함북 무산읍 장열동, 일건동 복사평	
	함남 북두일면 학선동 윤지동 어구	
	경기 안성군 이죽면 죽산리	
	경북 경주군 외동면 개곡리	
세라이트	강원 평강군 남면 천마리 소림양장광산	레싱가이트에 속함
세라이트와 갈럼석	강원 금화군 근북면 산현리	

사, 탐광을 개시하여 제2차 대전이 끝날 때까지 계속되었다. 안악읍 부근의 지질은 고기화강암과 이를 관입한 복운모화강암 및 이를 관입하는 페그마타이트, 애플라이트, 석영 맥 등으로 구성되며, 갈럼석은 페그마타이트와 애플라이트에서 산출되며 석류석, 각섬석, 투회석, 저어콘, 설석, 금홍석, 티탄철석 및 여러 종류의 황화광물과 공생한다. 광상은 안악읍 내의 3개소 및 은흥면 내의 6개소 등이 보고되었으며, 갈럼석은 일반적으로 직경 2~3cm, 두께 1cm 내외의 판상의 결정으로 산출되며, 주요 광상의 광량은 220톤으로 추정된다고 한다(立岩巖, 1976).

함북 학성군 달리동의 갈럼석 · 저어콘 광상

본 광상은 1939년에 최초 발견되었으며 성진역 남쪽 약 6km의 낮은 산지에 분포한다. 부근의 지질은 주로 마천령계의 것으로 생각되는 변성암류와 거대한 페그마타이트 암맥으로 구성되며 페그마타이트 암맥은 연장 약 300m, 폭 약 100m에 달한다. 이 암맥에는 갈럼석 외에 저어콘, 설석, 희철회석, 조섬석 등이 나타난다. 갈럼석은 판상의 거정을 이루는 경우가 많고, 직경 30cm, 두께 4cm 또는 이에 준하는 거정을 이루는 것이 드물지 않다. 저어콘도 주상의 큰 결정은 직경 12~18mm, 높이 36mm에 달한다. 설석은 편평한 결정으로 산출되며 큰 결정은 장경 3cm, 단경 2cm, 길이 8cm에 달한다. 갈럼석, 저어콘, 설석은 페그마타이트뿐만 아니라 주변의 전석에서도 많이 산출된다.

남쪽 부분의 페그마타이트만을 대상으로 연장 100m, 폭 10m, 깊이 20m로 가정하여 추정된 광량은 갈럼석 500톤, 설석 50톤, 저어콘 5톤이고, 전석광상에 대해서도 연장 100m, 폭 50m, 깊이 1m로 가정한 광량은 갈럼석 50~500톤, 설석 5~50톤, 저어콘 0.5~5톤에 달한다고 한다(立岩巖, 1976).

평북 철산군 선암광산의 모나자이트 광상

우리나라에서 모나자이트가 페그마타이트 광상으로 산출된 예는 선암광산이 유일하며, 이 광상은 부근의 모나자이트 사광상과 함께 1943년부터 탐광과 채광을 하였으나 상세한 내용은 알려져 있지 않다. 선암광산 부근의 지질은 선캠브리아기 화강편마암과 이를 관입한 반상 흑운모화강암, 황반암, 페그마타이트, 석영 맥 등으로 구성되며, 페그마타이트나 석영 맥은 화강암 내에 포획암으로 산출되기도 하므로 화강암보다 고기의 것으로 생각된다. 모나자이트광상을 이루는 페그마타이트는 보산동과 신암동 두 지역에 분포하며 화강암 내에 포획된 정동식 페그마타이트 중에 나타나며 신암동에서 페그마타이트의 두께는 2.5m에 달하는 것으로 보고되었다. 모나자이트는 흑운모가 많은 부분에 농집된 경향이 있으며, 흔히 팔알 크기 이하의 작은 결정을 이루지만 보산동에서 산출된 최대의 것은 단정으로 1,300g 이상의 중량을 보이기도 한다. 철산군 백량면 일대의 해안이나 하안에서는 모나자이트 외에도 티탄철석, 석류석 등의 사광상이 분포하며, 이에 비해 페그마타이트 중의 모나자이트는 광량이 적다고 한다(立岩巖, 1976).

충주 아래산 지역 갈럼석 광상

충주 아래산지역은 충북 중원군 주덕면, 이유면과 음성군 소이면 및 괴산군 불정면의 접경지로서 아래산의 정상부가 중심을 이룬다. 광상은 옥천층군의 계명산층 중에 함자철석호상규질암 형태로 산출되는 변성화성암 내에 발달하는 함회유금속, 희토류 광물층으로 본 지역에 발달하는 철 광체에서 약 50~200m 정도의 간격을 두고 같은 방향으로 발달하며 두께 20~80m, 연장 1.65km이다.

본 지역은 1986년 항공방사능 이상대의 지상

확인 탐사결과 희유금속 광화대로 확인되었으며, 1988년도에 충주지적 124호 광구에서 갈럼석의 부존을 확인하고 8개 공 1,000m의 시추탐사를 수행한 결과, 추정매장량은 19,350,000M/T이고 TR₂O₃ 품위는 0.85wt%로서(오민수 외, 1989), 선광시험 결과 갈럼석의 회수율은 21%였으며(김수영 외, 1992), 정광에 대한 전자현미분석결과, 갈럼석 이외에도 여러 종류의 합희토류 광물들이 소량으로 산출되는 것으로 보고되었다(김선익 외, 1989). 1993년도에는 2개 공 400m의 시추를 추가로 실시하여 TR₂O₃ 품위 0.68wt%, 매장량 1,554,000M/T을 확인함으로써, 본 지역에서 TR₂O₃ 평균품위 0.84wt%인 총 20,904,000M/T의 매장량이 보고되었다(박중권 외, 1994).

울진 지역

울진 지역에서는 1988년, 1990년, 1991년 3년간 페그마타이트를 모암으로 하는 거성광산(과거 쌍전광산), 옥방광산, 왕피리광산의 주대상광석인 중석 또는 석석, 그리고 주변암석의 조암광물에 수반되는 희유 금속광물의 배태유무를 조사하였는데, 이 중에서 희토류 광물에 관련된 부분을 요약하면 다음과 같다(서정률 외, 1989; 김수영 외, 1992).

거성광산의 광상은 원남층의 각섬암을 상반, 분천화강편마암을 하반으로 하여 이들 사이에 발달하는 합중석-휘수연석(molybdenite) 페그마타이트질 석영 맥으로서 주 광석광물은 흑중석(wolframite)과 회중석(scheelite)이다. 지표 확인 노두연장은 빈광대인 서쪽 함장석 페그마타이트질 석영맥 약 400m를 포함하여 1.2km에 이르며 맥 폭은 지표에서는 10~20m, 갱내에서는 10~40m에 달한다. 거성광산에서는 갱내시료에 함유된 La, Ce, Nd의 합이 최고 1,500ppm이며(김종환 외, 1989), 각 광물에

함유된 희유금속의 분석에서는 흑중석, 회중석, 그리고 전기석에서 CeO₂가 3,300~12,500ppm로서, 갈럼석, 저어콘, 인회석 등에 기인된 것으로 생각되며 광산 재개발시 중석을 위주로 선광한 후 부산물로서 Nb, Ta과 함께 Ce도 회수하는 방안을 검토할 필요가 있는 것으로 보고되었다.

옥방광산의 광상은 각섬암의 엽리방향과 평행하게 관입한 합중석-형석 페그마타이트 맥으로 연장은 1.6km에 달하며, 회중석이 주광석광물이다. 각 광물에 함유된 희유금속의 분석에서는 회중석에서만 CeO₂ 품위가 7,100ppm로 확인되므로 희유금속 광물자원의 개발가능성은 희박한 것으로 보고되었다.

하동-산청 지역

1992년도에는 하동 및 산청지역에 광범위하게 발달하는 고령토광상과 산청지역 일대의 섬장암에 대하여 희유금속 부존 특성을 조사하였다. 하동 및 산청지역의 고령토광상의 대표 시료 분석결과 Ce, La, Nb, Ta의 평균값이 10ppm 미만이고, 산청지역의 섬장암도 야외방사능 측정값과 Ce, La, Nb, Y, U의 함유량이 지각 평균품위보다 낮은 값을 보여주어 희유 금속광상의 배태 가능성이 희박한 것으로 보고되었다(서정률 외, 1993).

국내 철 광상

희토류 원소는 선캠브리아기의 철광상이나 화산기원의 철광상 등과 성인적으로 밀접한 관계를 보여주는 것으로 알려져 있고 국내에도 퇴적 기원의 호상철광상(홍천, 충주, 서산)이 보고된 바 있으므로, 1988년도에는 가행중이거나 휴·폐광중인 국내의 9대 철광상(양양, 연천, 포천, 소연평도, 홍천, 충주, 서산, 물금, 울산)을 대상으로 희유금속 및 희토류 원소의 부존 특성을 연구한 결

과 중에서 희토류 광물과 관련된 부분은 다음과 같다.

양양의 철광체 내에는 부산물로 희유 금속광물은 부존하지 않으나, 철광체에 접하여 Zr-Nb-REE 이상대가 대상으로 관찰되며 희토류 광물로는 갈렘석, 모나자이트가 산출된다.

홍천철광석 내에는 인회석 내에 0.01~0.1mm 크기의 모나자이트가 존재하며 철광석의 TR₂O₃의 평균함량은 1.3wt%이다. 충주 지역은 희토류 원소 함량이 높으며, 특히 연수동철광산의 광석 내에는 Ce이 평균 2,582ppm 함유된다. 이외에도 연천철광체의 주변 모암인 알칼리 반려암질암에 포획된 석영장석질암 내에 층리에 평행한 수개의 층상(폭 0.2~2.3m) 및 렌즈상(0.2×1~2m) 희토류 원소 이상대가 확인되며 희토류 광물로는 갈렘석, 모나자이트 등이 산출된다. 이들 결과를 바탕으로 양양, 홍천, 충주 지역이 향후 희토류 광물에 대한 정밀광상조사의 필요성이 있는 것으로 보고되었다(김유동 외, 1989).

홍천-자은지역 광상은 함희유금속-철광상으로 각섬석-흑운모 편마암이 알바이트화 작용을 받

은 변성대의 탄산염암내에 배대하며, 희토류광물로는 모나자이트가 자철석과 함께 돌로마이트나 스트론티아나이트 등의 탄산염광물과 공생한다. 본 지역은 1994년도에 5개 공 총 400m의 시추탐사가 수행되어 TR₂O₃ 품위는 2.47 wt%로서 매장량은 382,000M/T이 보고되었고(박중권 외, 1995), 1995년도에는 남부지역에 3개 공 총 320m의 시추탐사를 추가로 수행하였다. 1994년과 1995년의 시추탐사 결과, 북부지역은 평균진폭 8.18m, TR₂O₃ 품위는 2.09wt%로 총 990,000M/T의 확정광량, 남부지역은 평균진폭 7.06m, TR₂O₃ 품위는 2.79wt%로 총 911,600M/T의 확정 광량이 보고되었다(박중권과 황덕환, 1996).

연화광산과 상동광산의 정광과 광미

1986년도에는 한국지질자원연구원에서 우리나라에서 가행중인 제1연화와 제2연화 연·아연 광산 그리고 상동 중석광산에서 산출되는 광석, 정광 및 광미 등에 함유된 희유 원소를 분석하였

표 2. 연화광산과 상동광산의 정광과 광미에 함유된 La, Ce 함량.

	시료 종류	La (ppm)	Ce (ppm)	비 고
제 1 연화광산	Cu 정광	16.5	6,250	
	Zn 정광	15.4	2,425	Cd 0.30wt%
	Pb 정광	31.5	8,331	Bi 2.22wt%
	황화철광석	15.6	6,771	
	광미	21.1	64,834	
	Cu 정광	15.7	4,676	Ga 0.07wt%
	Zn 정광	15.8	5,462	Cd 0.27wt%
	Pb 정광	52.7	11,670	
	광미	22.0	66,390	
	원광	21.2	63,693	
	W 정광	27.8	82,692	
	W 광미	20.8	66,157	
	Bi 정광	19.1	17,324	
	Bi 광미	21.3	64,082	

표 3. 우리나라 연·아연 광상의 광물별 및 광미의 La, Ce 함량.

	시료 종류	La (ppm)	Ce (ppm)
제 1 연화광산	황동석	3.7~5	14~81
	섬아연석	1.2~20	3~1,100
	방연석	1.8~3	4.7~40
	원광	4.6~600	14~400
	rhodocrosite	98	1393
	광미		< 100
제 2 연화광산	섬아연석		< 60
장군광산	섬아연석		< 10~200
	방연석		60
	광미		200
신에미광산	섬아연석		700
	자철석		80
	rhodocrosite		100
삼보광산	섬아연석		40~1,700
	방연석		10
	광미		< 100
금장광산	섬아연석		120
서석광산	섬아연석		40
거도광산	광미		500

는데 그중에서 La과 Ce의 함량은 표 2와 같다 (박노영 외, 1987).

Ce의 함유량은 전반적으로 매우 높아서 모든 시료가 0.24wt% 이상의 값을 보여주며, 특히 광미들에 함유된 Ce은 6.3~6.6wt%의 값을 보여준다. 또한 상동광산의 W 정광의 Ce함량은 약 8.3wt%로 매우 높다.

그리고 광석 및 휴폐자원의 희유금속 특성연구의 일환으로 1987년도에는 연화광산(제1, 제2), 신에미광산, 장군광산 등의 연·아연광상을 대상으로 광물별 시료 및 광미 등에 함유된 희유 금속의 특성을 연구하였는데, 이 중에서 희토류와 관련된 부분은 표 3과 같다(김유동, 1988). 또한 1989년도에는 동광상인 거도, 대장, 동남, 금령, 홍신, 및 삼산제일광산, 중석광상인 상동광산을 대상으로 광체, 광물 및 선광공정별 시료에 대한

여 희토류 원소의 함량을 분석한 결과, 대장광산의 시료에서 Pr 224.7ppm, Nd 277.7ppm, 홍신광산의 시료에서 Nd 194.5ppm, 삼산제일광산의 시료에서 Nd가 104.7ppm과 161.6ppm이 검출되었고, 상동광산에서는 석영 맥에 수반된 인회석에서 La 340ppm, Ce 473.8ppm, Pr 137.8ppm, Nd 555ppm의 함량을 보여주었다 (김유동 외, 1990).

사광상의 희토류 광물 자원

20세기 초 충북 괴산 부근의 충적층에서 사금 채취가 성행하였는데, 그 부산물로서 모나자이트 정광이 미국으로 보내졌다고 한다. 1941년에는 강원도 고성군 해변에서 중사광상에 대한 시

표 4. 우리나라 중사광상의 주요 산지 및 추정 광량의 예(1952년 이전 통계).

유형	산지	모나자이트 광량 (톤)	저어콘 광량 (톤)	비고
해빈층 (해빈사광상)	강원 고성군 거진면	210	850	채광
	강원 고성군 고성읍			
	강원 통천군 통천면	55	170	
	강원 양양군 강현면	200	500	채광
	항해 장연군 해안면 몽금포	300	600	
해빈층 및 산사	충남 보령군 대천면, 청라면	800	1,700	
산사 (잔류광상)	충남 논산군 은진면			
	충북 청주군 오창면, 옥산면	150	200	
	충남 천안군 동면, 수신면			
	전북 익산군 왕궁면			
	전북 익산군 금마면	50	100	
하성층 및 산사	경기 이천군 이천읍			
하성층	충남 조치원읍			
	경북 영주군 영주읍			
	경북 풍천면, 용문면			
하성층(?)	충남 연기군 서면			채광

추 탐사가 수행된 결과, 다량의 모나자이트 및 저어콘이 중사 층에 포함된 것이 알려졌고, 중사 광상은 각지에서 계속 발견되어 2차 대전 말기에는 중사를 대상으로 하는 광업 출원이 거의 2만 건에 달했다고 한다. 모나자이트 사광도 여러 곳에서 채굴되어 모나자이트 정광은 1944년에 668톤이 생산된 것으로 기재되고 있다. 세라이트도 생산되어 일본에서 정련한 것으로 알려져 있으나 양은 분명치 않다. 1944년과 1952년에 일본인 야마구찌가 종합한 우리나라 중사광상의 주요 산지는 표 4와 같다. 일반적으로 모나자이트의 함유율은 저어콘보다 낮다(立岩巖, 1976).

표 3에 언급한 산지 이외에 주요산지와 주된 희유원소 광물의 종류는 아래와 같다(立岩巖, 1976).

- 1) 평북 철산군 백량면 선암광산 - 모나자이트
- 2) 평북 삭주군 의남면 은곡광산 - 콜럼바이트
- 3) 강원 철원군 갈말면 단록광산 - 콜럼바이트

4) 황해 연백군 해월면 국근광산 - 콜럼바이트, 퍼구소나이트

5) 경기 수원군 성호면 오산읍 부근 - 저어콘, 모나자이트

한편 한국지질자원연구원에서는 1981년부터 우리나라의 사광상에 대한 조사를 수행하여 왔으며, 서해안의 서천군(1981년), 서산군(1982년, 1985년), 웅진군(1983년), 관매도(1984년) 일대의 해빈사광을 조사하여 1986년도에는 서해안의 해빈사광분포도를 작성하였으며, 1994년부터는 웅천해역(김승우 외, 1995), 비인해역(김승우 외, 1996), 구시포해역(김승우 외, 1997), 장봉도해역(김승우 외, 1998; 강중석 외, 1999), 원산도해역(강중석 외, 2000)의 천해저에 분포하는 해저광물자원 조사연구를 수행하였다. 표 5는 한국지질자원연구원에서 조사한 남한의 사광상 모나자이트 부광대의 평균품위 및 추정매장량을 요약한 것이며(이재천 외,

표 5. 남한의 사광상 모나자이트 부광대의 평균품위 및 추정매장량 (1986.12.31기준).

지 역	모나자이트	
	평균품위(g/m ³)	매장량(M/T)
강원 양양군 죽왕면, 고성군 현내면 (간성도폭 17,18,26,27 광구)	1,795	1,590
강원 삼척군 근덕면 (삼척 7,8,9,10,18,19)	4,220	18,024
경기 이천군 장호원 (장호원 71,72,73,74)	1,289	17,038
경기 안성군 서운면, 충남 천원군 입장면(진천 133,134, 142,143,144,145,146)	1,206	12,897
충북 음성군 감곡면 (음성 41,61,71,81)	1,289	17,038
충북 청원군 오창면 (병천 56,57,67,77)	1,171	5,573
충북 진천군 문백면 (병천 34,35)	974	830
충남 서천군 웅천면 소항리 (남포 128,129,138)	3,600	4,812
충남 서천군 비인면 (서천 112,121,122,131,132,141)	1,770	1,495
충남 천원군 입장면 (평택 26,34,35,36,44)	555	10,499
전북 정읍군 태인면 (정읍 14,23,24,32,33,41,42,43)	782	2,346
전남 담양군 오에천지역 (송정 13,23,33,34,44,45,55)	930	12,052
전남 담양군 월산리지역 (창평 133,136,137,143)	974	204
전남 담양군 창평지역 (창평 146,147)	776	776
전남 담양군 망월리지역 (창평 104,113,114,123,124)	1,301	4,627
전남 광산군 일대 (광주 101,102,103)	1,523	42,599
전남 승주군 황전면 (괴목 22,23,33,34)	1,690	3,173
전남 나주군 영산포지역 (영산포 14,15,21,22,23,24)	1,318	20,897
전남 강진군, 영암군 (영암 11,12,13,14,22,23,24)	509	1,748
전남 강진군 양전면 (장흥 115,116,125,126,135,136,144)	458	2,198
전남 보성군 미력면 (보성 62,72,82,92,93,103)	1,000	5,602

표 6. 우리나라 천해저에 부존하는 모나자이트 이상대의 품위.

조사지역 (조사년도)	모나자이트 함량		비 고
	품위의 범위 평균범위(%)	이상대 면적 매장량	
웅천해역 (1994)	0.000~0.117 0.017	755,000m ²	2-3 ϕ 입도 대상 모나자이트 함량 0.025% 이상 유망구역 6개 선정
비인해역 (1995)	0.011~0.034	7,824,000m ² 6,381M/T	2-3 ϕ 입도 대상 원사중 중광물 함량 2.0% 이상, 중광물중 모나자이트 함량 0.65% 이상 유망구역 3개 선정 퇴적물 심도 1m 가정 매장량 산출
장봉도해역 (1997, 1998)	0.000~0.051 0.016	26,510km ² 68,689M/T	1-4 ϕ 입도대상 퇴적물 심도 6m 산정

2003), 표 6은 천해저에 부존하는 해저광물자원 중에서 모나자이트 이상대의 면적 또는 추정 매장량과 모나자이트의 품위를 요약한 것이다.

한국지질자원연구원에서는 1987년도부터 1990년도까지 공주 금강유역(김정택 외, 1988), 남한강유역(민충기 외, 1989), 섬진강유역(김정택 외, 1990), 낙동강 상류지역(김정택 외, 1991) 하천 사광상의 희토류 자원 부존 특성 연구를 수행해왔다. 일반적으로 우리나라 모나자이트 사광상은 표층으로부터 약 2m 사이에 수개의 중사 층을 이루어 부광대를 형성하며, 심도 2m 이하부터 기반암까지는 저품위가 계속되다가 기반암 위의 함금사력층에서는 고품위로 농축되는 산출 상태를 보인다. 또한 장애물이 있는 곳이나 지형과 유속 변화에 따라 중사가 농집된 경향을 보이며 부광대의 형성은 하천의 폭이 약 30m 이내의 소하천이나 근원암에서 멀지 않은 평원지역이 적합하다.

하폭이 100m 이상의 대하천의 하류 지역에서

는 중사의 품위 변화가 광상에 따라 심하며 대체로 저품위 광상을 형성하는 것으로 보고된다. 다음 표 7은 엠파이어 시추 조사의 결과를 요약한 것이다.

또한 2003년도부터는 한국지질자원연구원서 해사 중 유용광물자원 회수기술 개발을 수행해오고 있는데, 2003년도에는 우리나라에 분포하는 해빈사를 대상으로 중사의 함량과 ICP 분석을 수행하였다. 표 8은 이중에서 희토류원소의 분석값을 나타낸다(이재천 외, 2003).

Y 등의 원소가 분석되지 않은 관계로 ICP 분석값에서 모나자이트의 함량을 환산할 수는 없으나, 편의상 분석된 원소들만을 이용해 모나자이트의 최저 함량을 산출하였다. 전북 고창군 동호리, 전북 부안군 격포, 충남 태안군 몽산포의 해빈사는 0.255~0.385wt%의 모나자이트 최저함량을 보여주므로 희토류 광물 자원이 비교적 풍부하게 함유된 지역으로 생각된다.

표 7. 우리나라 하천 사광상의 모나자이트 품위 및 매장량.

조사지역 (조사년도)	하상연장 (km)	시추 공수	최대심도 평균심도 (m)	모나자이트		비 고
				품위의 범위 평균품위(%)	매장량(M/T)	
공주금강유역 (1987)	28	22	14.4 11.8	0.045~0.121 0.074	63.354	전조사지역
				0.083~0.121 0.131	34.878	모나자이트 0.08% 이상
				0.151~0.430 0.234	14.921	모나자이트 0.15% 이상
남한강유역 (1988)	36	25	13.5 6.1	0.012~0.183 0.048	34,000	
섬진강유역 (1989)	32	22	21.5 12.2	0.001~0.020 0.005	2,400	
낙동강유역 (1990)	120	15	12.9 9.5	0.006~0.045 0.024	21,145	

표 8. 남한 해빈사의 La, Ce, Nd 함량.

조사대상지역		ICP 분석값 (wt%)			모나자이트 최저함량 (wt%)
		La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	
전남 보성군	보성강하구	0.0022	0.0041	0.0020	0.012
전남 고흥군	외나로도	0.0016	0.0031	0.0015	0.009
	소록도	0.0011	0.0013	0.0005	0.004
전남 무안군	도대리	0.0067	0.0097	0.0032	0.028
	도포리	0.0120	0.0230	0.0081	0.062
	송현리	0.0031	0.0085	0.0034	0.021
	강정리	0.0015	0.0023	0.0009	0.007
전남 영광군	향화도	0.0096	0.0180	0.0008	0.041
	가미미	0.0068	0.0120	0.0065	0.036
전북 고창군	동호리	0.0720	0.0710	0.0350	0.255
전북 부안군	격 포	0.0970	0.1200	0.0300	0.354
	변 산	0.0048	0.0086	0.0041	0.025
	모 항	0.0052	0.0096	0.0037	0.026
충남 서천군	장 포	0.0093	0.0180	0.0073	0.050
	춘장대	0.0089	0.0160	0.0079	0.047
충남 보령시	무창포	0.0053	0.0089	0.0035	0.025
	대 천	0.0041	0.0076	0.0024	0.020
충남 태안군	몽산포	0.0710	0.1400	0.0580	0.385
	만리포	0.0082	0.0092	0.0033	0.030
	연 포	0.0069	0.0120	0.0058	0.035
	갈 음	0.0050	0.0093	0.0038	0.026
	백사장	0.0049	0.0110	0.0037	0.028
강원 고성군	대 진	0.0035	0.0062	0.0026	0.018
	화진포	0.0035	0.0054	0.0024	0.016
	공현진	0.0041	0.0077	0.0030	0.021
	아야진	0.0033	0.0067	0.0024	0.018
강원 양양군	하조대	0.0048	0.0084	0.0026	0.023
강원 강릉시	엽 전	0.0018	0.0023	0.0014	0.008
강원 삼척시	맹 방	0.0029	0.0045	0.0024	0.014
	입 원	0.0034	0.0067	0.0027	0.018
경북 울진군	후 포	0.0047	0.0084	0.0036	0.024
경북 영덕군	고래불	0.0028	0.0057	0.0022	0.015
경북 포항시	북 부	0.0030	0.0059	0.0024	0.016

광구 등록 현황

현재 남한에서 희토류 광물 자원으로 등록된 광구의 수는(2003. 10. 24 기준), Ce이 44개 광구, La이 14개 광구, Y이 16개 광구이다. Ce으로 등록된 광구는 창암점도폭에서 2개, 온수

리 2개, 김포 2개, 서울 1개, 이곡 1개, 충주 1개, 모항 1개, 김제 32개, 진교 2개이며, La은 간성 7개, 만대리 1개, 창암점 3개, 속초 2개, 충주 1개이고, Y은 간성 7개, 간성특 1개, 창암점 1개, 속초 2개, 충주 1개, 연양 4개 광구이다(최걸 외, 2003). 표 9는 이들 희토류 광물 자

원의 등록된 도폭, 광구 번호, 등록 번호와 이를 생산한 광산 및 위치, 그리고 연도별 생산 실적을 종합한 것이다. 이트륨이나 란타넘은 2002년 이후에는 생산 실적이 없고, 사광상은 대부분 규사나 사금을 생산하였다.

희토류 광상의 유형

세계적으로 1950년까지는 사광상(주로 브라질, 후에는 호주와 인도)의 모나자이트와 페그마타이트 광산의 부산물이 희토류의 유일한 공급원이었다. 그러나 1949년 미국 캘리포니아의 'Mountain Pass'에서 'bastnäsite'를 발견한 후에는 이 광물이 경희토류의 주공급원이 되었고 두 번째가 호주, 브라질, 중국, 인도와 말레이시아의 Ti, Zr과 Sn 광물 사광상의 부산물로 산출되는 모나자이트이다(Robjohns, 1984). 더욱이 1980년대 초반 이후에는 중국 'Bayan Obo' 광산의 철 생산시 부산물로서 'bastnäsite' 회수가 증가되었다. 러시아는 탄산염암과 알칼리암체에 서 대부분의 희토류를 생산하고 있다. 브라질은 모나자이트 사광상 뿐 아니라 심하게 풍화된 탄산염암을 채광하고 있다. 말레이시아, 호주, 중국과 태국의 사광상에서는 제노타임이, 캐나다와 호주에서는 우라늄 광산에서 부산물로 중희토류가 생산된다. 현재 대부분의 희토류 정광은 알칼리암이나 탄산염암과 관련된 광화대와 사광상에서 생산되고 있다. 희토류 광상의 광화작용은 크게 내인성(endogenic), 외인성(exogenic), 변성(metamorphic)의 세 가지로 나뉘며, 대부분은 다금속광상으로서 희토류는 단지 부성분일 뿐이다(Möller, 1989).

내인성 광화작용

내인성 광화 작용은 화성 기원이나 열수 기원

을 일컬으며, 가장 중요한 공급원은 탄산염암과 알칼리암으로서 상부맨틀에서 유래된 것으로 생각된다. 아알칼리(subalkaline) 또는 알칼리화강암과 관련된 희토류광상의 희토류는 하부지각에서 유래된 것으로 생각된다. 함희토류 페그마타이트는 화강암류(granitoid)와 관련된 것으로 생각되는 반면에 열수기원의 희토류 광화작용은 알칼리화강암, 네펠린섬장암, 알칼리섬장암 및 'shonkinite'와 연관된 것으로 생각된다. 모암의 종류에 따른 산출상태는 다음과 같다.

알칼리-초염기성 복합체

20%에 달하는 'loparite' 함유 'malignite' (우후질 네펠린섬장암), 'uritite' (장석이 없고 네펠린이 70% 이상인 네펠린암), 20%에 달하는 'eudialyte' 함유 'lujavrite' (agpaitic 네펠린섬장암), 80%에 달하는 인회석이 풍부한 네펠린과 자철석암 등을 갖는 초염기성복합체는 희토류의 잠재적인 공급원이다. 이들 암석 내에서 희토류는 수반광물로 산출되나 때로는 극히 농집되기도 한다. 특히 35%에 달하는 'knopite'와 티탄자철석을 함유하는 암석은 Sm, Gd 및 Dy 함량이 높아서 관심의 대상이 된다. 희토류를 함유하는 일차 수반광물들(perovskite, loparite, eudialyte)은 네펠린화나 탄산염암화작용 같은 교대과정 중에 희토류를 방출해서, 'pyrochlore', 'bastnäsite' 및 'parisite'로 재결정되기도 한다. 그러나 이런 유형의 일차광석으로부터 희토류를 추출하기는 어려운 편이다.

탄산염암

탄산염암(carbonatite)은 마그마기원으로서 경희토류가 풍부하다. 탄산염암의 결정화 초기에는 대부분의 희토류는 인회석과 방해석에 들어가지만 나중에는 'pyrochlore'가 자철석, 금운모, 인회석 및 황화 광물들과 함께 만들어진

한국의 희토류 광물 자원

표 9. 남한의 희토류 광물 자원 등록 현황 및 생산 실적.

도 폭	광구번호	등록광종	등록번호	광산명	행정구역	생산광종	생산실적 (M/T)															
							1997	1998	1999	2000	2001	2002										
간 성	10	이트륨, 란타늄	57408	우덕	강원도 고성군 간성면	이트륨	-	28	10	8	0	0										
	19		57409																			
	20		57051																			
	29		57053																			
	30		58258																			
	39		57050																			
	40		57052																			
	창암점	1	57410	란타늄	-	28	18	8	0	0												
	속 초	141	58165																			
		144	57145																			
만대리	90	란타늄	72147																			
간성특	150	이트륨	71264																			
창암점	105	유화철 코발트 세륨, 란타늄	72932																			
	106		72933																			
언 양	116	이트륨	57705	언양	대전	이트륨	0	7,800	-	-	200,940	0										
	117		58311																			
	126		57707																			
	127		57706																			
온수리	117	티탄철, 사철, 세륨, 질코늄	69077																			
	127		67061																			
김 포	2	세륨, 질코늄	51601																			
	3		51602																			
서 울	143		51603																			
충 주	124	세륨, 이트륨, 란타늄	70242																			
이 곡	40	세륨, 질코늄	59566	제2신두	충남 태안군	규사	3,665	80	-	-	8,631	7,516										
모 향	31	규사, 세륨	57042	사광	원북면																	
김 제	5, 15, 25, 26, 35, 36	사금, 세륨, 질코늄	07795	김제 채금	전북 김제군 봉남면	사금 (52481, 52482, 54034, 54363, 59483 포함)	0	850	-	969	1,146	1,200										
			7										60945									
	8		67465, 67466, 67467																			
			13658																			
	24, 34, 35, 36, 45		13659																			
	36, 45, 46, 47, 56		70843, 70844, 70845																			
			18016																			
	35, 36, 45, 46, 55, 56		금, 은, 세륨, 질코늄										18016									
	7		사금, 세륨, 질코늄										60945	원평	전북 김제군 금산면	사금	0	-	-	-	-	-
	8		질코늄										67466									
24	사금, 세륨, 질코늄	72585																				
45	질코늄	72586																				
35	금, 은, 세륨, 질코늄	72587																				
진 교	18	티탄철, 세륨, 질코늄	61985, 61986																			
	19		61987																			

다. 냉각 말기에는 방해석이 돌로마이트와 앵커라이트(ankerite)에 의해 부분적으로 교대되기도 한다. 이런 과정 중에 희토류는 방해석에서 방출되어 주로 모나자이트와 불화탄산염 광물들(bastnäsite, parisite, synchysite)이 만들어진다. 이런 이유로 탄산염암과 관련된 희토류 산상의 일부는 열수광상으로도 기재된다.

교대암

지역에 따라서 교대암(metasomatite)에는 상당량의 희토류 광물이나 희토류, Nb, Th, Zr 및 Be의 혼합광물들이 나타난다. 이들 희유금속은 알칼리성 교대용액 내의 용해성 화합물로 근원암에서 추출된 후, 관입암이나 모암의 알바이트화 작용에 의해 함희토류 광물로 집적된다. 'Pyrochlore'와 저어콘이 풍부한 알바이트(albitite)는 Nb, Th, Zr과 희토류의 혼합광석으로 주로 네펠린섬장암 지괴(massif)에서 산출되며 'thorite', 'becklite', 'britholite', 'fersmite', 'aeschnynite' 및 'ilmenorutile' 등도 함유한다. 알칼리섬장암과 알카리화강암 지괴의 둘 부분에서는 퍼구소아이트와 'priorite'를 함유하는 알바이트가 기재되었고 광석광물들은 산염상으로 산출되거나, 때로는 stringer나 맥상, 망상을 이루기도 한다. 탄산염 암질과 알칼리질 관입체에서 방출된 알칼리와 철이 풍부한 후기 열수용액은 모암을 교대하여 'perovskite', 'pyrochlore', 'thorogumite', 'brockite'와 'REE-miserite' 등의 함희토류 광물을 형성한다.

페그마타이트

일부의 화강암질 페그마타이트는 소량의 모나자이트, 육세나이트, 제노타임, 갈륨석과 'gadolinite' 등의 희토류 광물을 수반한다. 페그마타이트의 K-장석이 풍부한 부분에서는 함희토류 광물들이 알바이트, 백운모, 석영과 수반된

다. 일반적으로 페그마타이트는 중희토류가 풍부한 편으로 제노타임, 퍼구소나이트, 육세나이트, 새마르스카이트와 'gadolinite'로 산출된다. 육세나이트와 새마르스카이트는 페그마타이트 형성 후기 단계에서 부분적으로 'pyrochlore'로 심하게 변질된다. 섬장암, 네펠린섬장암과 알칼리화강암 등의 과알칼리(peralkaline)암에 관련된 페그마타이트 암맥은 'pyrochlore-저어콘', 'pyrochlore-ilmenorutile'과 'pyrochlore-aeschnynite' 집합이 특징적이다. 이 중에서 'aeschnynite'를 포함하는 'pyrochlore-저어콘 페그마타이트' 암맥만이 경제적으로 중요성을 갖는다. 희토류 광물들은 페그마타이트 암맥의 알바이트화된 부분에 주로 농집되며, 미래에는 Nb과 경희토류의 공급원으로서 중요성을 갖게 될 것이다. 때로는 알칼리-초염기성 복합체와 관련된 페그마타이트는 조립질의 미사장석, 정장석, 네펠린, 'arfvedsonite' 및 'aegirine'으로 구성된 다양한 두께의 암맥을 형성하며, 희토류는 'mosandrite'나 'lovchorrite' 등의 수반광물로 산출될 뿐만 아니라 조암광물을 치환하기도 한다.

열수광화작용

습곡대에는 희토류-탄산염, -불화탄산염, -불산염, -인산염, -규산염광물들을 갖는 열수광상이 광범위하게 산출된다. 형석도 광범위하게 상당량의 희토류를 함유하기도 한다. 열수광상으로 유망한 것은 볼리비아와 남아프리카에서 나타나는, 제노타임과 모나자이트를 갖는 석석(cassiterite)-흑중석 광화작용이지만 이들의 산출상태는 산업적으로는 중요하지 않다. 'Shonkinite', 알칼리섬장암, 그리고 알칼리화강암으로 이루어진 관입복합체와 관련된 맥상이나 렌즈상의 열수광상은 형석이 풍부하고 Be, Nb, Ta, 희토류, Th 및 U 광물들을 수반한다. 때로는 이들 광상에는 Fe가 풍부하여 능철석,

적철석 및 자철석으로 존재하므로 이들 철광석을 채광하기도 하며 모암은 알바이트화 되어 있기도 한다. 광상은 탄산염맥, 파쇄광화대 및 평탄한 광체를 이루기도 하며, 탄산염이 많아서 종종 탄산염암과 관련된 것으로 생각되기도 한다. 그러나 광체가 맥상으로 발달되어 있고, 탄산염암에서 보여주는 등근 윤곽이 없고, 알칼리 초염기성암과 연관이 없고, 붕석(barite), 능철석(siderite) 및 형석의 함량이 매우 높은 점으로 보아 전형적인 탄산염암과는 다르다. 열수광상의 유형으로는 미국 캘리포니아의 'Mountain Pass'에서 같이 bastnäsite-붕석-탄산염 광체(맥상), 중국의 Bayan Obo의 자철석-적철석-형석 광체, 그리고 황화광물-형석 맥 등이 있다. 다른 유형으로는 알칼리화강암, 알칼리초염기성 및 섬장암질암에 관련된 희토류가 풍부한 맥상의 광화작용이 있으며, 다단계의 광석형성을 보여준다. 이러한 'thorite'가 풍부한 맥상 광상은 산출이 매우 많지만 구성 광물들은 산화철에 의해 심하게 얼룩져서 인지하기가 어렵다. 이들은 알칼리마그마의 휘발성 말기 단계에 형성되는 것으로 생각된다.

외인성 광화작용

외인성 광화작용은 퇴적 기원을 말한다. 사광상은 풍화, 침식, 운반과 재퇴적의 과정을 거쳐서 희토류 광물이 농집된다. 알칼리암의 풍화대에서는 희토류가 표성기원(supergene) 탄산염(bastnäsite, tengerite, lanthanite)이나 인산염(rhabdophane, churchite) 또는 함유규산염(vudyavrite) 광물로 결정화된다. 철, 망간 등의 수화광물은 희토류 수산화 광물을 흡착해서 저품위의 광석을 만든다. 열대지방의 탄산염암 풍화대는 두께 100m 이상에 달하는 Nb, Zr, P, 희토류 및 Fe의 고품위광상을 만들어서 희토류(주로 Ce)의 함량이 10%에 이르기도 한다. 희토류는 잔류된 'pyrochlore'와 인회석 또는

'synchysite'와 같은 이차 광물에 함유된다. 해양이나 하천의 사광상 대부분은 모나자이트 및 부성분으로 제노타임, 피구소나이트, 육세나이트, 새마르스카이트, 갈럼석, 'knopite', 'pyrochlore'와 'loparite'를 함유하고 있다. 모나자이트가 풍부한 모래는 그 연장이 한정적이며 대부분 모나자이트가 다른 중광물의 부성분으로 산출되므로 사광상은 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 석석 또는 사금 등의 중광물을 대상으로 개발할 때에만 희토류 생산이 경제성을 갖는다. 인도의 티탄철석 사광상만이 모나자이트 함량이 1~2%이고, 사광상의 평균 모나자이트 함량은 대부분이 0.1% 이하이다. 이외에도 역청질 셰일, 인회암, 아스팔트, 석유, 석탄 등의 다른 퇴적층도 상당량의 희수 가능한 희토류를 함유하기도 한다. 대지(platform) 인회암은 P₂O₅ 함량이 28% 미만이지만 희토류 함량은 0.7%에 이르는 작은 광체를 형성한다.

변성 광화작용

일부의 변성 광화작용은 희토류 뿐만 아니라 U, V, Mo, Ge 및 Au를 함유하는 거대한 광체를 형성하기에 유망하다. 혼성(migmatization)대에서는 세립질의 동시기원(syngenetic) 갈럼석과 함유희토류 티탄철석이 협재되어 산출되기도 하며 지체구조적 변형과 교대변질이 강한 지역에서는 이 세립질 광물들이 수cm 크기로 재결정되어 모암 내에서 산염상으로 나타난다.

제노타임-모나자이트 집합체가 혼성질 편마암 내에 발견되며, 모나자이트 광화작용이 편마암과 편암에 협재된 렌즈상의 대리석에서 산출된다. U, Th 및 Au와 함께 희토류가 'brannerite-thucholite'를 함유하는 변성 사광상이나 Au-U-희토류를 함유하는 역암에서 산출된다. 어느 경우이나 희토류는 부산물로 회수된다. 한편 접촉변성대에서는 희토류 광물의 함량이 높은 스킨이 발견되고 있다.

맺는 말

우리나라에서는 희토류 광물 자원을 생산하는 광산이 우덕광산과 연양광산 만이 보고 되어 있고, 그나마도 2002년 이후에는 생산이 중단된 것으로 생각된다(표 9). 그러나 앞서 언급한 모든 자료들을 볼 때, 한반도 곳곳에서 여러 종류의 경제성 있는 희토류 광물들의 산출이 기대되어 있고, 사광상의 모나자이트는 대규모는 아니지만 일부 지역에서는 품위가 높은 편으로 생각된다(표 5, 7, 8). 육상에 분포하는 광상들 또한 세계적으로 알려진 여러 유형의 희토류 광상의 산출상태를 다양하게 보여주고 있다.

특히 홍천-자은 지역에서는 TR₂O₃ 평균 품위가 2.1~2.8wt%인 모나자이트 광석이 약 2백만톤 정도가 부존되어 있는 고품위의 대규모 희토류 광상을 발견하였다(김유동 외, 1989; 박중원 외, 1995; 박중권과 황덕환, 1996). 이외에도 충주 애래산 지역에서는 TR₂O₃ 평균 품위가 0.84wt%인 갈럼석 광석이 약 2천만톤 정도가 보고 되었다(오민수 외, 1989; 박중권 외, 1994).

우리나라의 희토류 수입량은 2000년 약 3,122만불에서 2004년 약 3,368만불로 증가추세에 있으며, 전자산업 및 자동차 배기가스 정화와 관련하여 세륨화합물과 산화이트륨이 많이 수입되고 있고 Nd는 자석 형태로 수입량이 늘어가고 있다. 희토류 가격은 아직 하락세에서 벗어나지 못하고 약세를 유지하나 일부 원소는 상승 움직임을 보이고 있다(한국지질자원연구원 2005년 자원총람). 그러나 향후 첨단 산업분야에서의 희토류원소의 응용이 급속히 늘어갈 전망이므로 국내에 부존하고 있는 여러 유형의 희토류 광물 자원에 대한 자원탐사, 개발경제성 평가, 선광 및 제련 기술개발 등을 종합적이며 체계적으로 수행할 필요가 있다고 생각된다.

참고 문헌

- 강중석, 김승우, 장세원, 최현수, 민건홍, 김성필, 김정기 (1999) 한반도해역 해저광물자원탐사연구(장봉도 서북부해역). KR-98(C)-38, 한국자원연구소, 135p.
- 김선익, 장세원, 최현수 (1989) 애래산지역 희유금속 정광에 대한 광물학. 광물과 산업, Vol.2, No.2, 21-33.
- 김수영, 서정률, 양정일, 김상배 (1992) 하동-울진지역 희유금속 광물자원 조사연구. 희유금속 광물자원조사연구. KR-91-2D-1, 한국자원연구소, 158p.
- 김승우, 민건홍, 장세원, 이성록, 진재화, 김정기, 김상우, 이치원, 이윤오, 이호영 (1995) 해저광물자원연구(웅천해역). KR-94(C)4-5, 한국자원연구소, 83p.
- 김승우, 이성록, 진재화, 이윤오, 이치원, 이호영, 김정기, 김상우 (1996) 해저광물자원연구(비인해역). KR-95(C)-28, 한국자원연구소, 122p.
- 김승우, 이성록, 민건홍, 김성필, 최현수, 김정기, 이호영 (1997) 해저광물자원연구(구시포해역). KR-96(C)-31, 한국자원연구소, 101p.
- 김승우, 장세원, 이성록, 김성필, 민건홍, 최현수, 김정기 (1998) 한반도해역 해저광물자원탐사연구(장봉도 서부해역). KR-97(C)-22, 한국자원연구소, 94p.
- 김유동 (1988) 연·아연광석내 희유금속 부존특성연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-87-13, 한국동력자원연구소, 137-200p.
- 김유동, 장세원, 이평구 (1989) 국내 철광상내 희유금속 부존특성연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-88-8A, 한국동력자원연구소, 413-508p.
- 김유동, 이평구 (1990) 동, 중석, 휘수연광상내

- 의 희유금속 부존특성연구. 희유금속광물 자원조사연구. KR-89-7A-3, 한국동력자원연구소, 72p.
- 김정택, 민충기, 고원식, 한대석 (1988) 공주 금강유역 희토류 자원 부존특성연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-87-13, 한국동력자원연구소, 201-356p.
- 김정택, 민충기, 안지환, 한대석 (1990) 섬진강 유역 희토류자원 부존특성연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-89-7A-2, 한국동력자원연구소, 3-225p.
- 김정택, 민충기, 안지환, 한대석 (1991) 낙동강 상류지역 희토류자원 부존특성연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-90-2D-2, 한국동력자원연구소, 3-176p.
- 민충기, 김정택, 안지환, 현전기, 한대석, 고원식 (1989) 남한강 유역 희토류자원 부존특성연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-88-8A, 한국동력자원연구소, 171-356p.
- 박노영, 김수영, 서정률 (1987) 희유 금속 광물 자원의 탐사기초연구. KR-86-2(B)-3, 한국동력자원연구소, 79p.
- 박중권, 오민수, 박성원 (1994) 충주 아래산 지역 희유금속광물자원 탐사연구(II). KR-93-1C-2, 한국자원연구소, 105p.
- 박중권, 이재호, 서정률 (1995) 선캠브리아기 철광화대의 희유금속광물자원탐사연구(홍천-자은지역). KR-94(C)1-7, 한국자원연구소, 133p.
- 박중권, 황덕환 (1995) 희유금속광물자원 탐사연구—선캠브리아기 철광화대지역, 홍천-자은(2차), 양양(1차). KR-95(C)-10, 한국자원연구소, 112p.
- 변정규 (1992) 북한의 금속광물자원 현황 분석 연구. KR-92-(B)-17, 한국자원연구소, 111p.
- 서정률, 오민수, 장병표, 황선국 (1989) 울진지역 희유금속 광상조사 및 철원·금화지역 합 Nb, Ta페그마타이트 광석에 대한 선광시험 연구. 희유금속광물자원조사연구. KR-88-8A, 한국동력자원연구소, 111-170p.
- 서정률, 박성원, 이평구, 오민수, 이봉주 (1993) 하동지역 희유금속 광물자원 조사연구. 희유금속 광물자원 탐사연구. KR-92-1C-2, 한국자원연구소, 72p.
- 오민수, 서정률, 구성본, 최종호 (1989) 충청북도 증원군 아래산지역 희유금속광물(갈렙석) 자원의 지질·광상연구. 희유금속광물 자원조사연구. KR-88-8A, 한국동력자원연구소, 5-111p.
- 이재천, 정강섭, 전호석, 남철우, 신희영, 김완태, 윤치호, 박제현, 김은진, 황택성, 박재구 (2003) 해사 중 유용광물자원 회수기술 개발. 해수·해사 중 유용광물 회수기술 개발. KR-20030-S-11, 한국지질자원연구원, 103-195p.
- 최걸, 이경한, 김대형, 유옥종 (2003) 등록광물 분포도. 한국지질자원연구원, 385p.
- 立岩巖 (1976) 한반도 지질학의 초기연구사. 양승영 번역 1996년. pp.657.
- Cesbron, F.P. (1989) Mineralogy of the Rare-Earth Elements. p.3-26. In: Lanthanides, Tantalum and Niobium. Proceedings of a workshop in Berlin, November 1986. P. Moller, P. Cerny and F. Saupe(Eds.). Special Publication No.7 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 380.
- Moller, P. (1989) Rare Earth Mineral Deposits and Their Industrial Importance. p. 169-188. In: Lanthanides, Tantalum and Niobium. Proceedings of a workshop in Berlin, November 1986. P. Moller, P. Cerny and F. Saupe(Eds.). Special Publication No.7 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 380.