Econ. Environ. Geol.
Vol. 28, No. 6, p. 599-612, 1995.

충주지역 희토류 광상의 성인: 산출상태와 지화학적 특성

박맹언* · 김근수*

Genesis of the REE Ore Deposits, Chungju District, Korea: Occurrence Features and Geochemical Characteristics

Maeng-Eon Park* and Gun-Soo Kim*

ABSTRACT: Some REE ore deposits are located in the middle part the of Korean peninsula. Geotectonically, the REE ore deposits situated on the Kyemyeongsan Formation of northern margin of the Okcheon geosynclinal belt and in the transitional zone between Kyeonggi massif and the Okcheon belt, with a deep-seated fracture separating the two tectonic units. The Kyemyeongsan Formation are different in lithology and metamorphic grade from the Gyeonggi massif and the Okcheon super group. The sequence of Kyemyeongsan Formation is dominantly composed of acidic metavolcanic and volcaniclastic rocks associated with alkaline igneous rocks which are related to volcano-plutonism. The REE ore deposits contain mainly Ce-La, Ta-Nb, Y, Y-Nd and Nd-Th group minerals. More than 15 RE and REE minerals have been found in the deposits, such as allanite, fergusonite, thorite bestnaesite, euxenite, polyclase, monazite, columbite, (Nb)-rutile, okanoganite, sphene, zircon, illmenite and some other unknown minerals. According to the characteristics of the mineral association, the REE ore deposits may be divided into 4 ore types; Zircon-REE, allanite-REE, feldspar-REE and fluorite-REE type. The Sm-Nd isochron age of the REE ore is 330 Ma, and the Sm-Nd model age is 1.11 Ga with $\varepsilon_{Nd(t)}$ being −2.9. This data suggest that the REE ore deposit was formed in the early Carboniferous, and the ore-forming material came from the mantle. The REE ores show distinct light REE enrichment with strong negative Eu anomaly. The REE patterns of schistose rocks from Kyemyeongsan Formation are similar to felsic volcanics from rifts or back arc basins in or near continental crust. The genesis of the REE ore deposit is quite complicated. Different geologic processes are displayed in the studied area; sedimentation, volcanic activity, metamorphism and hydrothermal replacement. Alkali granite has suffered extensive post-magmatic metasomatism of a high temperature to produce alkali metasomatites. Geochemical charateristics show that metasomatism of alkaline fluid was probably the dominant ore-forming process in Chungju district.

서 론

산업의 급속한 발전에 따라 각종 소재광물의 수요가 증대되고 있는데 반하여 광물자원은 점점 고갈되어 가고 있다. 이러한 상황에서 자원 강대국들은 자원보호정책을 견지하게 되고 그로 인해 원활한 산업소재 광물자원의 수급이 어려워지고 있다. 특히, 전자공업 분야와 첨단 소재산업의 발달로 희토류원소 자원에 대한 수요가 증대되고 있으나 이들 자원이 일부국가에 편중되어 분포함으로서 안정적인 공급을 위한 장기적 대책이 요구되고 있는 실정이다.

희토류 광상은 성인적으로 알카리 화성암과 카보나타이트와 관계된 맥상광상, 페그마타이트광상, 접촉교대광상과 인회석 광상, 우라늄 광상, 선캠브리아기 화산기원의 철광상 및 사광상에 흔히 수반되어 산출된다(Neary and Highley, 1984). 국내에서는 주로 사광에서 발견되며, 홍천, 서산 및 어래산 지역에 분포하는 변성암과 하동-산청지역 회장암질내에서 산출되는 것으로 알려져 있다(김유동 등, 1988; 오민수, 1989; 김유동과 이평구, 1990). 국내 희토류광상에 대해서는 충청북도 어래산지역 계명산층내에서 산출되는 갈렴석(Allanite) 광상에 대한 지구물리 및 지구화학적 특성을 고찰한 연구(오민수, 1989), 하동-산청지역 회장암에 배태된 희유금속자원중 희토류에 관한 연구(김원사 등, 1992)와 충주 철광상의 광석과 모암 중에 미량의 부성분 광물로 산출되는 저어콘과 갈렴석에 대한 산상과 광물학적인 특성에 대한 단편적인 연구(Kim, 1991)가 수행된 바 있다. 그러나 희토류광상의 광화작용의 특성과 성인에 대한 연구는 전무한 실정이다. 충주지역의 희토류(희유원소종 포함) 광상은 주로 계명산층을 구성하는 편암내에서 편리를 따라 산점상 또는 괴상으로 산출되며

* 부산수산대학교 응용지질학과 (Department of Applied Geology Pusan National Fisheries Univesity, Pusan 608-737, Korea)

국부적으로 알카리 화강암과 편암의 경계부에서 맥상 또는 교대상으로 발달된다.

고기의 변성암류와 수반되어 산출되는 희토류광상은 대단히 복합적인 성인적 요소와 관련되어 오랫 동안 논쟁의 대상이 되어왔다. 특히 충주지역의 희토류광상은 퇴적작용, 화산-심성 화성활동, 변성작용, 접촉교대 및 열수교대 등 다양한 특성을 가지므로 인해 성인규명이 되어 있지 않은 상태이다. 본 연구는 충주지역 계명산층내에 분포하는 함 희토류층의 산출특성과 희토류광상의 유형 및 지화학적 특성 등을 파악하여, 희토류자원의 탐사와 개발지침 제시를 위한 종합적 연구를 수행하기 위해 계획되었으며, 산출상태 및 지구화학적 특성(주성분, 미량성분, REE 패턴 및 Nd-Sm 동위체)에 의한 성인과 광화시기가 파악되었다.

지질개요

계명산층은 한반도 중부 충주지역을 중심으로 하여 옥천대의 북측 경계부와 경기 육괴의 두 구조대를 분리시키는 전이대를 따라 북동-남서 방향으로 분포하며, 변성양상이 옥천층군 및 경기 편마암복합체와 상이하고 지질구조가 복잡함에 따라 층서대비 및 지질시대에 대한 논란이 계속되고 있는 실정이다. 계명산층의 층서적 위치를 옥천계의 기반암으로 보는 견해(김기완과 이홍규, 1965; 김옥준, 1968, 1970; 이대성, 1974)와 옥천계의 일부로서 그 상부 또는 하부로 해석(Reedman *et al.*, 1973; Lee, 1986; Cluzel *et al.*, 1991; Kang, 1994)하는 견해로 구분된다. 퇴적시기에 대해서는 옥천계와 층서대비에 대한 증거부족, 퇴적 후 변형 및 변성작용의 영향 등으로 인해 구체적으로 밝혀져 있지 않은 상태이며, 구조 지질학적 해석에 의해 선 캠브리아기에서 고생대까지 이견이 많다. Cluzel(1992)은 옥천대를 이화령, 보은, 두륜산, 피바령, 충주 unit로 구분하고, Kang(1994)은 옥천대 중 충주 북동부지역을 중심으로 부산, 충주, 계명산 nappe로 구분하였으며, 이 중 충주 unit 및 계명산 nappe는 섬장암내지 석영몬조니암질 심성암과 조면암질 산성화산암이 수반됨을 보고하였다.

충주지역 희토류 광화대는 옥천퇴적분지의 화성활동 중심지(Cluzel *et al.*, 1991)로 알려진 고생대(?) 변성암과 소규모 암주 또는 암맥으로 분포하는 알카리 화강암으로 구성된 계명산층 내에 발달된다(Fig. 1). 알카리 화강암은 압쇄암의 수반과 광물조성상의 차이에 의해 중생대 화강암인 충주화강암과 구별된다. 또한 상기 변성암류는 계명산층 외곽부에 광역적으로 분포하는 중생대 화강암질암에

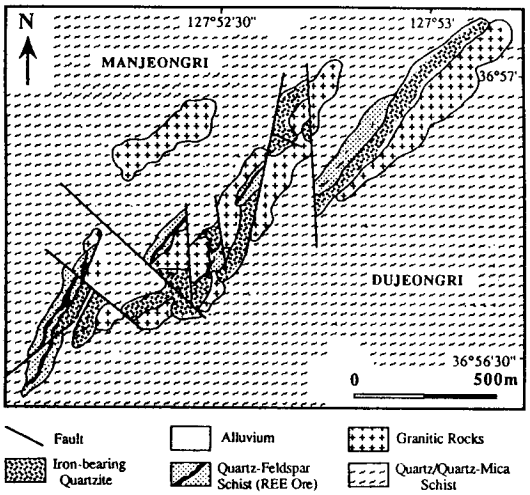

Fig. 1. Geological map of the studied area.

의해 관입되어 있다. 계명산층을 구성하는 변성암은 흑운모-각섬석편암과 함 자철석 규암 등으로 분류된 바 있으나(오민수, 1989), 본 연구에서는 구성광물의 조직, 양비에 따라 석영편암, 석영-운모편암 및 석영-장석편암으로 분류하였다. 석영편암층내에는 소위 층상규제형(strata-bound type)철광층이 협재되며, 호상광체와 괴상광체로 구분된다(Kim *et al.*, 1994). 한편 결정질 석회암은 주로 충주지역의 북서부와 남동부에 소규모 분포하며, 국부적으로 편암의 편리 방향에 평행하게 산출된다. 변성퇴적암류의 엽리는 N50~70°E의 주향과 60~80°SE의 경사를 보이며, 이들 암석을 관입하는 저반상의 중생대의 화강암류에 의해 둘러싸여 있다.

암석각론

계명산층의 구성암석들에 대한 지화학적 연구는 계명산층의 퇴적환경을 비롯한 옥천계의 발달 및 진화를 이해하는데 주요한 의미를 가진다고 볼 수 있다. 암석각론에서는 계명산층의 구성암석인 편암류와 이들 암석들을 후기에 소규모 암주 또는 암맥으로 관입한 알카리 화강암에 대해서만 서술하였다.

석영편암

일반적으로 석영-운모편암을 협재하며 가장 광범위한 분포를 하고 있다. 조직상으로는 석영-운모편암과 유사하며, 대체로 점이적인 변화를 보이지만 유색광물의 상대적인 양비에 따라 석영-운모편암과 구분된다. 석영편암은

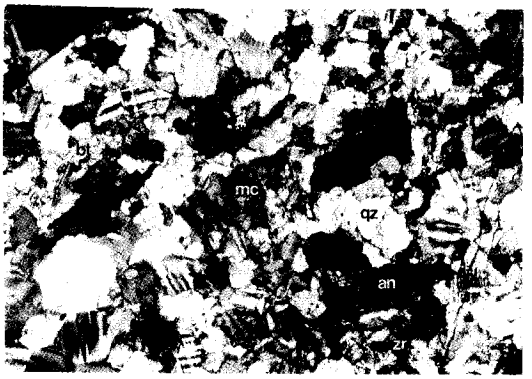

Fig. 2. Photomicrographs of quartz-feldspar schist. Quartz and microcline shows polygonal texture.

철광층의 상하반을 구성하면서 산출된다. 석영편암은 야외에서 암회색내지 백색의 호층에 의한 엽리의 발달로 쉽게 구별된다. 엽리에 평행한 얇은 렌즈상의 철산화광물의 집합체를 포유하며, 철광층과는 점이적인 변화를 보이나 철산화광물의 증가와 장석의 감소에 의해 뚜렷이 구분된다. 자철석, 적철석 및 석영 등의 양비의 반복에 의한 호상조직을 보이는 것이 일반적이다.

구성광물은 석영, 미사장석, 사장석을 주로하며, 소량의 흑운모와 저어콘, 철산화광물이 미량 수반된다. 석영은 입상집합체의 조직을 보이며, 변성작용 및 변형작용에 기인된 파동소광과 모자이크상의 조직적 특성을 나타낸다.

석영-운모편암

석영편암내에 협재되어 산출되며 백운모 및 흑운모의 함량비가 다양한 특징을 나타낸다. 일반적으로 방향성을 띠는 유색광물의 배열에 의한 편리 또는 미세한 호상구조를 보이며, 석영 및 장석 등 무색광물의 증가와 흑운모를 주로 하는 유색광물의 감소로 인한 엽상구조의 소멸에 의해 석영편암으로 전이된다. 석영 및 장석류의 조직은 석영편암과 유사하며, 서로 치밀하게 결합되는 입상조직을 나타낸다. 엽상의 흑운모는 엽리에 평행하게 산출되며 석영 및 장석류의 입자는 왜곡되어 있다. 미량의 녹니석, 녹렴석, 방해석, 저어콘 및 철산화광물이 수반된다.

석영-장석편암

석영-장석편암은 함 희토류 광상의 대표적인 모암으로 공간적으로 석영편암과 맥상의 알카리 화강암류와의 경계부에서 편리방향을 따라 분포한다. 주로 연홍색을 띠며, 유색광물에 의한 선구조(L-tectonite)가 잘 발달되어 있다. 후기 마그마 단계에서 수반되는 알카리 교대작용에 의한 형성된 교대암이 발달되며, REE 광상을 형성한다. 국부적으로 유동조직과 조면암질 조직을 가지며, 세립질의 석영과 장석류로 구성된다. 석영편암 및 석영-운모편암에 비해 미사장석의 함량이 높다. 교대작용의 양상이 우세한 부분에서는 조립질 조직을 띠며, 석영-장석편암은 함 희토류광물인 저어콘과 갈렴석을 비롯하여, 미량의 녹색 흑운모, 형석, 철 산화광물, 방해석, 녹렴석 및 녹니석 등이 수반된다(Fig. 2). 본 층에는 수십 cm 폭의 희토류원소 부화층이 형성되어 있으며, 국부적으로 석영, 장석, 백운모, 흑운모 및 형석 등으로 이루어진 페그마타이트 암맥이 발달된다. 특히 REE부광대 주위는 변질대의 발달과 함께 심한 구조적 작용에 의한 압쇄암이 산출된다.

알카리 화강암

주로 소규모 암주내지 암맥으로 산출되며 노두의 발달이 불량하여 분포상태와 중생대 화강암과의 관계 파악이 어렵다. 일반적으로 철광 및 REE 광체와 밀접히 수반되어 분포하고 있다. 편암을 포획하거나 뚜렷한 관입에 의한 접촉관계를 가지며 산출되며, 단층에 의해 분포양상이 규제되기도 한다. 구성광물의 함량변화는 매우 불규칙하고, 유색광물이 많은 석영섬장암에서 유색광물이 거의 수반되지 않는 알카리 화강암에 이르는 분화양상을 나타낸다(Table 1과 Fig. 3). 국부적으로 강한 파쇄작용에 의해 압쇄암화되어 있으며, 다량의 세립질 알카리장석들이 재결정작용에 의해 형성되어 있다. 저반으로 분포하는 중생대

Table 1. Modal composition of the alkali granite occur Kyemyeongsan Formation of Chungju district (in volume%).

	CJG-3	CJG-5	CJG-7	CJG-8	CJG-49	CJG-50	CJG-601	CJG-602
Quartz	2.5	29.1	13.0	4.9	7.8	4.9	43.1	38.3
Alkali-feldspar	92.8	63.4	70.9	90.1	78.1	71.3	56.4	55.6
Plagioclase	2.9	5.4	9.8	2.1	10.1	19.9	0.1	4.8
Mafic minerals	0.6	0.1	4.2	1.9	0.9	1.0	0.2	1.1
Accessory minerals	0.1	0.1	0.5	0.1	0.8	2.4	0.1	0.1
Opaque minerals	1.1	1.9	1.6	0.9	2.3	0.5	0.1	0.1

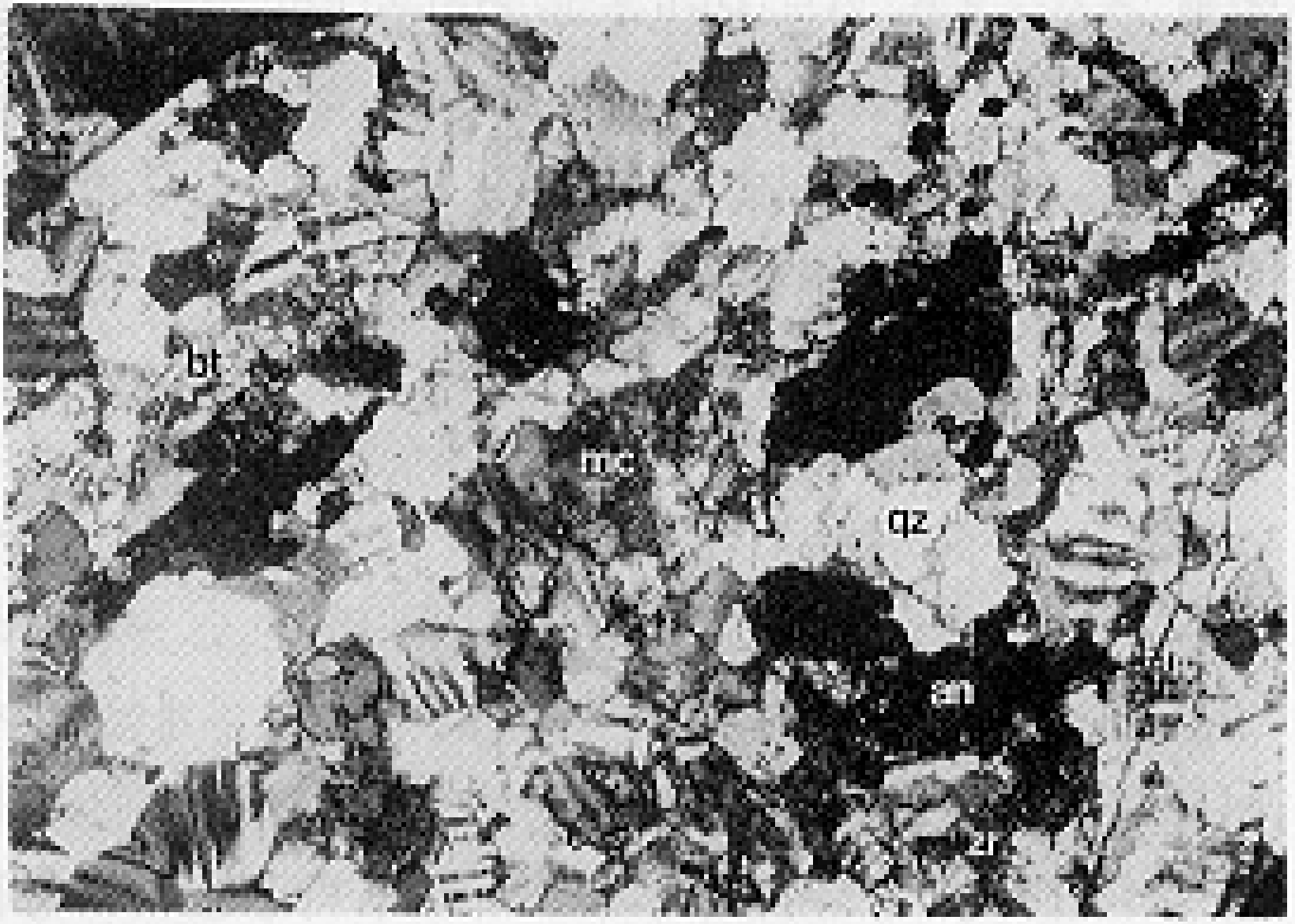

Fig. 2. Photomicrographs of quartz-feldspar schist. Quartz and microcline shows polygonal texture.

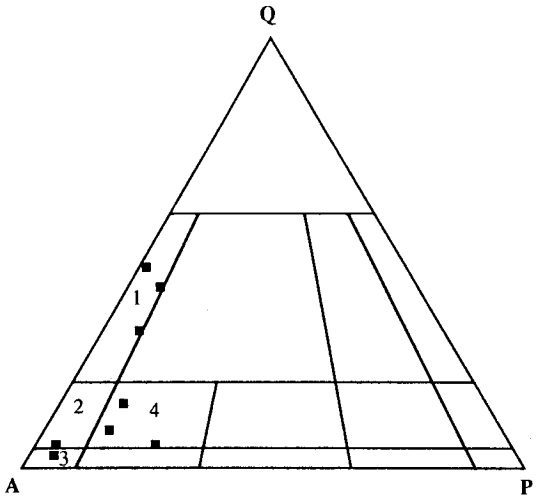

Fig. 3. Triangular diagrams of modal quartz (Q)-alkali feldspar (K)-plagioclase (P) for the alkali granitic rocks (Streckeisen, 1976). 1; Alkali feldspar granite, 2; Quartz alkali feldspar granite, 3; Alkali feldspar syenite, 4; Quartz syenite.

화강암은 계명산층과의 경계부에서 변질작용에 의한 알카리 장석의 형성과 교대조직이 발달하지 않는데 비하여 알카리 화강암은 편암과의 경계부에서는 부분적으로 교대작용을 수반한 REE광상을 형성한다.

희토류 광상

충주지역 희토류 광상은 계명산층 구성암석 중 특히 석영-장석편암과 밀접하게 수반되어 발달되며, 대체적으로 북동-남서방향의 주향을 따라 분포되어 있다. 심한 풍화작용과 토양층의 피복에 의해 지표노두의 확인이 어려우나 폭 10~30 m, 연장 1.2 km가 확인된다. 광상은 공간적으로 볼 때 알카리 화강암과 밀접한 관계를 가지며, 화강암류의 관입과 N-S계의 단층에 의해 6개의 광체로 분리되어 산출된다(Fig. 1).

편암층내에서는 희토류원소 함유광물(이하 REE 광물) 및 저어콘이 전반적으로 미량으로 산출되나, 교대조직을 수반하는 연홍색 석영-장석편암내에서는 특히 농집되는 양상을 갖는다. REE 광물은 편암내에 소규모 렌즈상 또는 판상으로 유색광물(주로 흑운모 및 각섬석)과 선구조를 형성하며 수반된다. 알카리 교대암(alkali metasomatite)의 형태로 알카리 화강암과의 접촉부에 분포하는 광상은 저어콘과 다량의 REE광물을 함유하는 미사장석암(microclinite)과 갈렴석 교대암으로 구분되며, 국부적으로 알카리 화강암내에 포획체로서 산출된다. 저어콘 및 철산화광물과 함께 층상구조를 갖는 REE층과 편암층내의 편리를 따라 교대작용을 수반하는 연속성이 불량한 형석과 석류석을 수반하는 석영맥이 산출된다. 또한 화강암과 석영-장석편암의 경계부 또는 편암의 엽리를 따라 주로 괴상의 갈렴석으로 구성된 암맥(폭: 5~10 cm)이 발달된다.

충주지역에서 산출되는 희토류 광상의 유형은 엽리나 선구조를 수반하는 저어콘-REE형, 장석-REE형과 맥상 또는 괴상의 갈렴석-REE형 및 형석-REE형으로 구분된다(Fig. 4A~D). 희토류광물은 광상의 유형에 관계없이 저어콘과 갈렴석이 공통적으로 산출되며, 저어콘-REE형과 갈렴석-REE형, 장석-REE형에서 비교적 다양한 REE광물이 공생하는데 반하여 형석-REE형에서는 수반되는 REE 광물의 종류가 상대적으로 적은 양상을 띠며, 이러한 현상은 광석들의 REE 함량과도 비례적인 관계를 가진다. 광상유형에 따른 공생광물은 대체적으로 Ta-Nb계 광물, La-Ce계 광물, Y계 광물, Y-Nd계 광물, Nb-Th계 광물로 분류된다.

각 유형별 산출특성과 광석, 광물의 공생관계는 다음과 같으며, REE광물의 지화학 및 광물학적 연구결과는 본 논문에서 제외하였다.

저어콘-REE형

석영-장석 편암내의 편리를 따라 약 1 m의 폭으로 수십 m 연장분포한다. 층상 또는 렌즈상으로 산출되며, 교대작용의 특성을 갖는다(Fig. A). 15종 이상의 희토류광물을 함유하는 가장 품위가 높은 광석유형이다. 주로 담황색의 형광색을 보이는 다량의 저어콘(>40%)과 소량의 흑운모, 미사장석, 자철석이 수반되며, 갈렴석, 퍼구소나이트, 유세나이트, 베스내사이트, 모나자이트, 제노타임, 오카노가나이트, 파이로클로르, 콜롬바이트, 스핀, 인회석 등의 다양한 희유원소 함유광물이 공생한다. 갈렴석은 주로 저어콘 집합체내에 렌즈상으로 산출되며, 자형의 갈렴석이 미립(<10 μm)의 저어콘에 의해 교대된다. 입상, 주상, 교대상의 결정으로 산출되는 갈렴석 집합체는 비교적 깨끗한 결정을 이루지만, 저어콘이 풍부한 층내에서는 일반적으로 심하게 교대되어 결정의 형태가 불분명하게 나타난다. 입자의 틈을 따라 진한 갈색변질을 이루기도 한다(Fig. 5A).

저어콘은 미립의 입상 결정 또는 집합체로 갈렴석, 흑운모 등의 광물을 교대하며, 흑운모내에서는 방사성 후광을 형성한다. 퍼구소나이트는 저어콘, 갈렴석, 베스내사이트, 콜롬바이트, 흑운모등과 밀접하게 공생하며 주로 원형의 무색내지 옅은 회색 입자로 산출되나, 흑운모내에서 후광대를 형성시키는 것은 암갈색 내지 흑갈색으로 결정

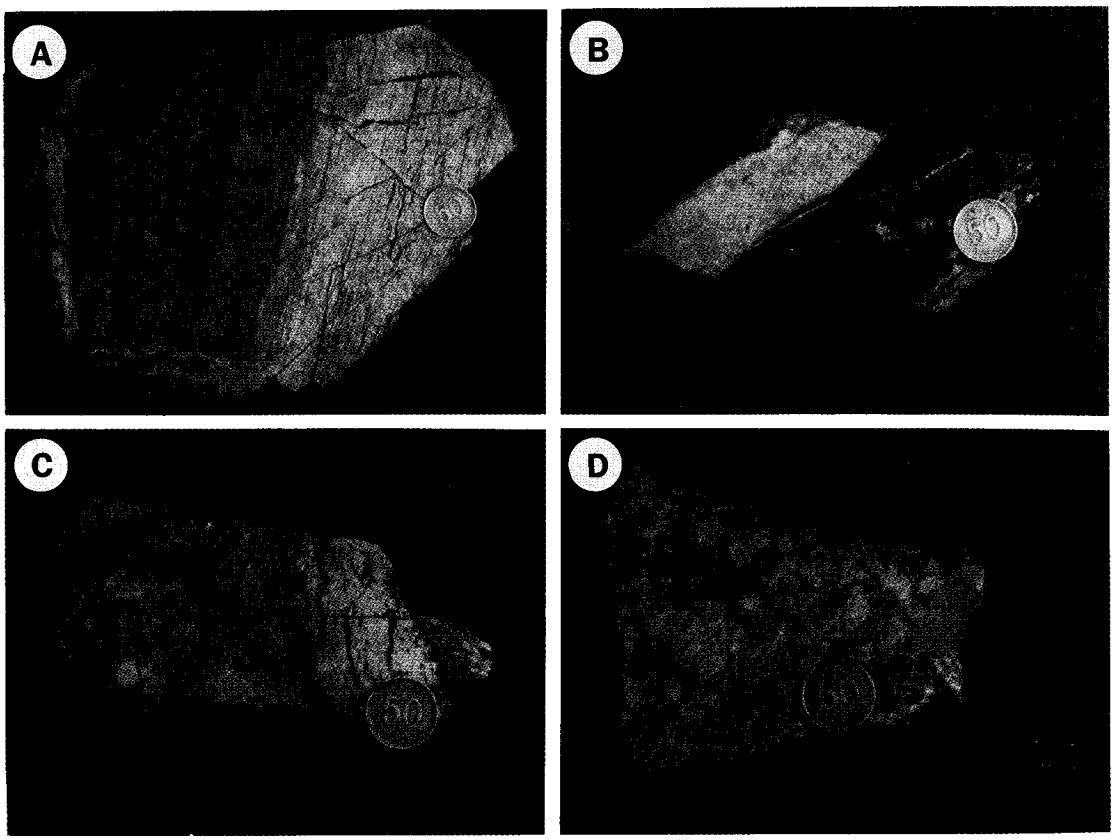

Fig. 4. Representative specimens of REE ore from Chungju district. A; Bedded zircon-REE ore (ZR) showing successive band with zircon and Fe-oxides, B; Massive allanite-REE ore (AR) dominantly consists of coarse-grained allanites, C; K-feldspar REE ore (KR) resulting from metasomatic process of quartz-feldspar schist, D; Fluorite-REE ore (FR) showing pegmatite texture.

형태도 매우 불규칙하다. 결정의 외곽부는 대개 암색을 띤다. 유세나이트는 황색 색상에 의해 쉽게 인지가 가능한며, 결정의 형태는 대개 부정형으로 저어콘, 갈렴석, 퍼구소나이트 등과 밀접히 수반되어 산출된다. 퍼구소나이트에 의해 교대되는 조직이 뚜렷이 보인다. 연황색의 베스내사이트는 저어콘이 풍부한 층내에서 저어콘, 퍼구소나이트 등과 수반되며, 타형의 결정 집합체 또는 세맥상으로 산출된다. 연황색의 콜롬바이트는 자철석, 운모류, 갈렴석과 수반되며 분명한 결정형태를 갖는다. 스핀은 갈렴석과 함께 자형의 결정 집합체로서 주로 퍼구소나이트 주변부에 발달된다. 오카노가나이트는 광학적 및 결정학적 특징을 알 수 없으며, 갈렴석 주변부에 변질상으로 존재한다. 그 외에 갈렴석과 기타 REE광물내에서 용리상 또는 교대상으로 존재하는 미동정의 광물이 수반된다.

갈렴석-REE형

알카리 화강암과 석영-장석편암과의 경계부에서 5~10 cm 맥상으로 페그마타이트조직을 형성하며 산출된다. 주로 조립질의 갈렴석 집합체로 이루어져 있으며(>80%), 미립 집합체의 저어콘, 미사장석이 소량 수반된다(Fig. 4B). 알카리 화성암(애프라이트질)에 의해 교대 또는 절단되는 양상을 보이기도 한다. REE광물은 결정입자의 경계나 미세한 균열부를 따라 저어콘 집합체에 의해 교대되는 양상을 나타내며, 흔히 REE광물로 치환된 장석이 잔존물로서 남아있다. 갈렴석의 결정 경계부에서는 결정도가 낮은 오카노가나이트가 변질산물로서 수반된다(Fig. 5B).

장석-REE형

REE 광상 중 가장 광범위하게 분포하는 유형으로 다량의 알카리장석에 의해 연홍색을 띤다. 주로 석영-장석편암과 알카리 화강암의 교대작용에 의해 형성되었으며,

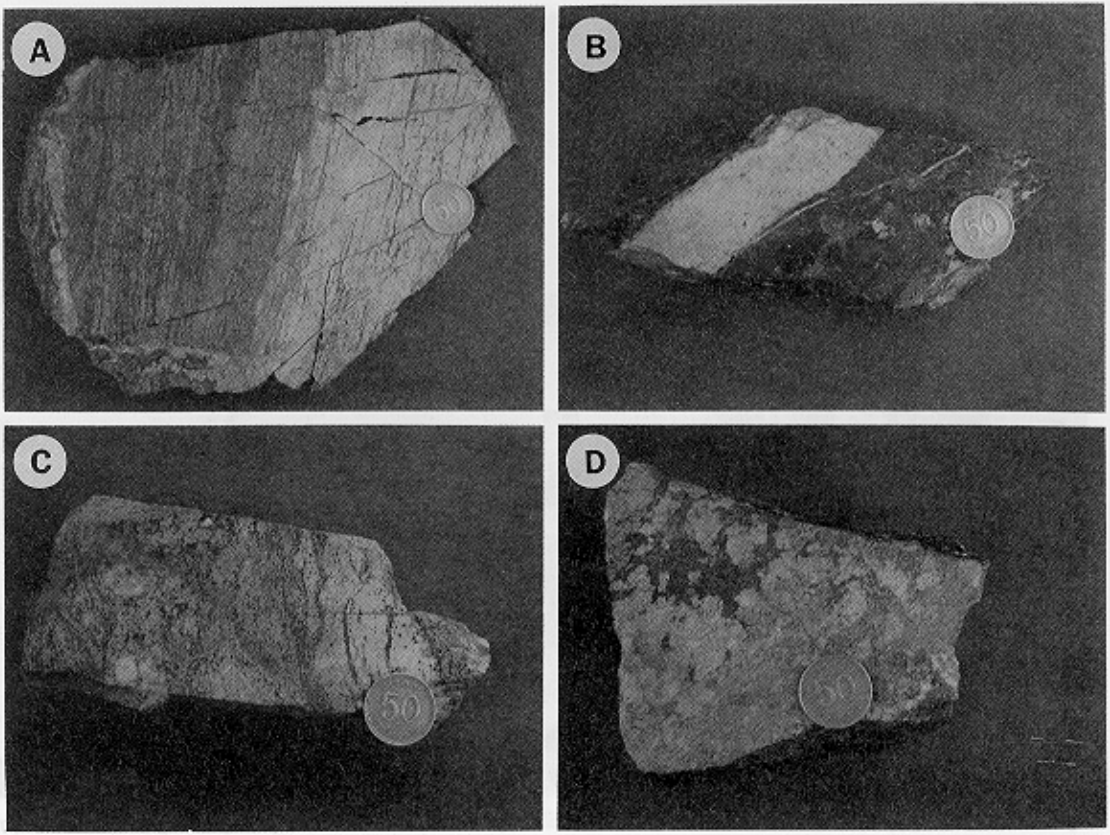

Fig. 4. Representative specimens of REE ore from Chungju district. A; Bedded zircon-REE ore (ZR) showing successive band with zircon and Fe-oxides, B; Massive allanite-REE ore (AR) dominantly consists of coarse-grained allanites, C; K-feldspar REE ore (KR) resulting from metasomatic process of quartz-feldspar schist, D; Fluorite-REE ore (FR) showing pegmatite texture.

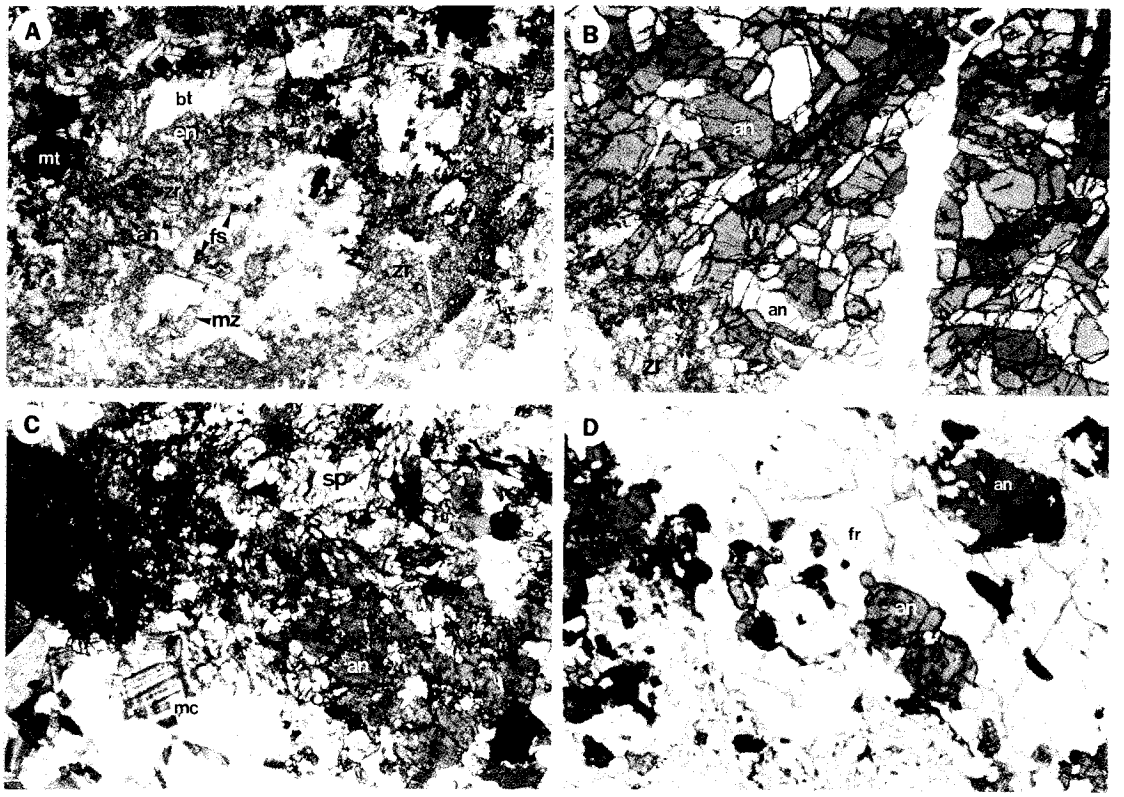

Fig. 5. Photomicrographs of REE minerals. A; Zircon-REE type, it is characterized by very fine-grained zircon (zr) aggregates, which replace to biotite(bt), allanite (an) and magnetite (mt). High relief monazite (mz), euxenite (en) and fergusonite (fs) associated with the zircon. B; Allanite-REE type, allanite commonly appear as coarse euhedal to subhedral crystals and show strong pleochroism. C; K-feldspar-REE type, allanite and fergusonite associated with the sphene (sp) and zircon which are often showing romb-shaped forms. Microcline (mc) twinning appears as a double set of polysynthetic twin laminae. D; Fluorite-REE type, allanite and fine-grained zircon associated with the fluorite (fr). Hydrothermally formed allanite crystals are commonly anhedra and show strong paleochroism.

교대반응의 정도에 따라 조직(입자크기), 구성광물의 함량비가 달라진다. 세립질 조직으로 알카리 화강암과의 접촉부는 괴상조직을 가지나 일반적으로 선구조를 나타낸다(Fig. 4C). 알카리 교대암(alkali metasomatite)으로 전이되며, 미사정석의 함량이 높은 미사장석암(microclinite), 석영-각섬석 및 갈렴석 특징으로 교대암의 점이적인 변화를 보여준다. 주 구성광물은 석영과 미사장석이며, 흑운모와 각섬석 이외에 갈렴석, 저어콘, 퍼구소나이트 등의 REE 광물이 수반된다(Fig. 5C). 미량으로 저어콘, 형석, 스핀, 녹염석, 철산화광물, 사장석, 방해석, 견운모가 수반된다. 흔히 쌍정을 갖는 갈렴석은 반자형내지 타형으로 부분적으로 메타믹트상으로 나타난다. 저어콘은 미립의 입상 집합체 또는 산점상으로 산출되며, 흑운모내에서는 방사상 후광을 나타내기도 한다. 퍼구소나이트는 진한 갈색과 다색성의 차이로 갈렴석과 구별되며, 갈렴석, 저어콘등과 수반하며, 편리구조에 조화적으로 분포한다. 자형의 스핀, 파이로클로르 집합체가 갈렴석, 각섬석류와 수반된다. 자형의 갈렴석은 반사도와 BEI(Back-scattered Electron Image) 성분도의 차이를 갖는 미립의 Nb-Ta 등이 풍부한 광물이 교대 또는 용리상으로 존재한다.

형석-REE형

편암의 엽리를 따라 교대조직을 수반하면서 세맥상으로 발달되며, 국부적으로 페그마타이트 조직을 갖는 괴상의 조립질을 형성하기도 한다(Fig. 5D). 열수맥의 특성과 유사하며, 주 구성광물은 석영, 형석, 미사장석 등이다. 석류석, 자철석, 적철석 등과 함께 갈렴석, 저어콘 등이 수반된다(Fig. 5D).

각 광석유형에 따른 수반 REE광물 및 함 희유금속 함유

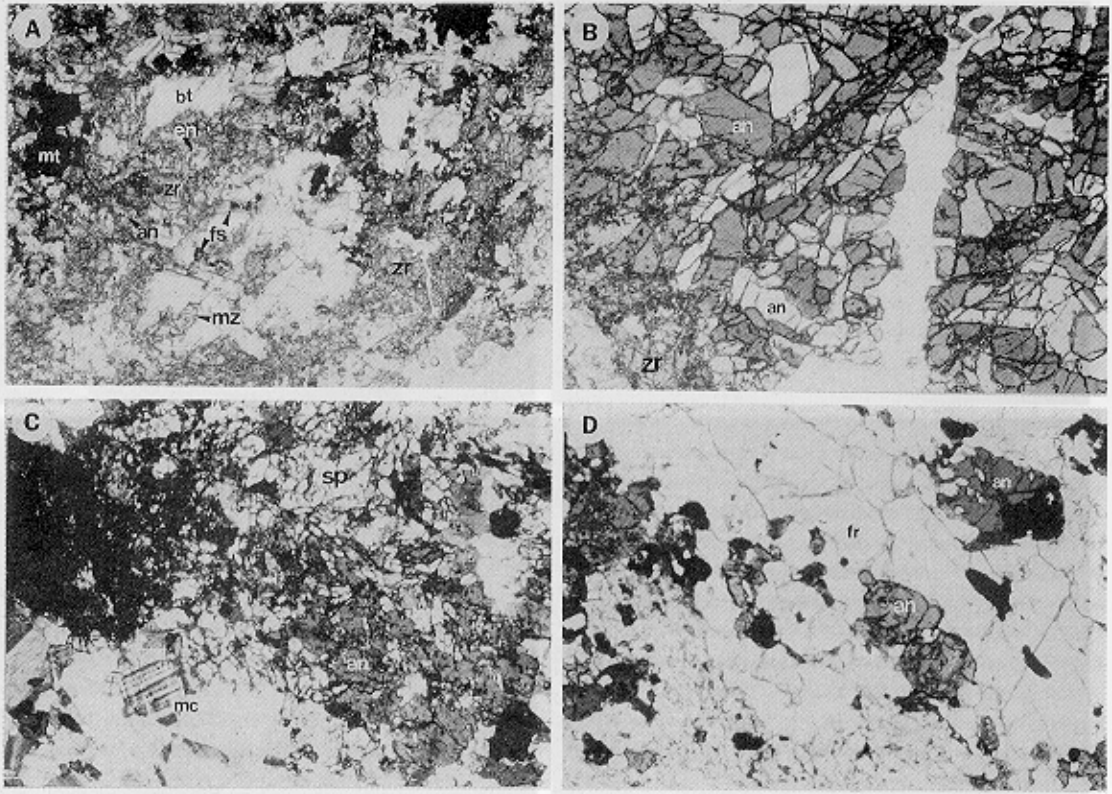

Fig. 5. Photomicrographs of REE minerals. A; Zircon-REE type, it is characterized by very fine-grained zircon (zr) aggregates, which replace to biotite(bt), allanite (an) and magnetite (mt). High relief monazite (mz), euxenite (en) and fergusonite (fs) associated with the zircon. B; Allanite-REE type, allanite commonly appear as coarse euhedal to subhedral crystals and show strong pleochroism. C; K-feldspar-REE type, allanite and fergusonite associated with the sphene (sp) and zircon which are often showing romb-shaped forms. Microcline (mc) twinning appears as a double set of polysynthetic twin laminae. D; Fluorite-REE type, allanite and fine-grained zircon associated with the fluorite (fr). Hydrothermally formed allanite crystals are commonly anhedra and show strong paleochroism.

Table 2. Mineral associations of REE ore and RE ore types from the Kyemyeongsan Formation.

Ore type	Main mineral	Minor mineral	RE and REE mineral
Zircon-REE	Magnetite Biotite Microcline	Quartz Muscovite Chlorite Calcite Fluorite Ilmenite	Zircon Allanite Fergusonite Bastnaesite Columbite Euxenite Polycrase Monazite Sphene Xenotime Okanoganite Pyrochlore Apatite Rutile
Allanite-REE		Quartz Magnetite Microcline	Allanite Zircon Okanoganite Fergusonite
K-feldspar-REE	Microcline Quartz Biotite Magnetite	Hornblende Plagioclase Hematite Epidote Chlorite Muscovite Fluorite	Allanite Zircon Fergusonite Thorite Bastnaesite Euxenite Sphene Monazite
Fluorite-REE	Quartz Microcline Fluorite Biotite Plagioclase Garnet Magnetite	Epidote Hematite Chlorite Muscovite Calcite	Allanite Zircon Sphene Fergusonite

광물(REE minerals)은 Table 2와 같다.

지구화학

부성분, 미량성분 및 희토류원소 분석자료의 신뢰도를 높이기 위하여 중국지질광상부 지질광상연구소, 일본 쯔꾸바대학 및 한국과학재단 기초과학지원센터에서 수행하였으며, Nd동위체 조성은 일본 쯔꾸바대학 지구과학연구과에서 행하여졌다. 전암 시료의 주성분과 미량성분은 Philips사의 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometry)를 사용하여 분석하였으며, GSJ 표준시료를 이용하여 보정

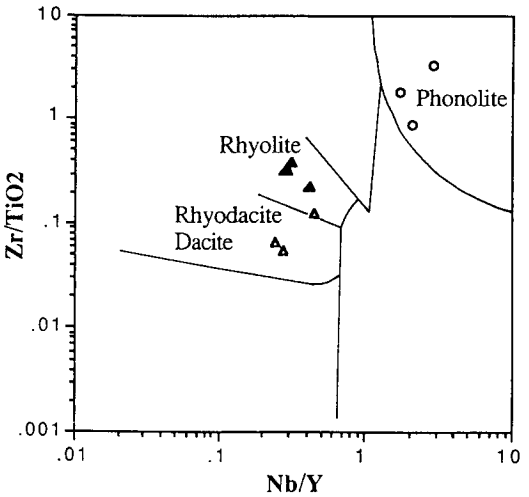

Fig. 6. Zr/TiO_2-Nb/Y diagram showing the distribution of schistose rocks from Kyemyeongsan Formation. Field boundaries from Winchester and Floyd (1977). Open triangle; quartz schist, solid triangle; quartz-mica schist, open circle; quartz-feldspar schist.

하였다. 미량성분의 정확도는 ±5% 이내이다. 희토류원소(REE)는 양이온 교환 수지 칼럼을 사용하여 분리한 다음 HPLC(High-Performance Liquid Chromatography)를 이용하여 분석하였다. REE측정의 정확도는 ±8%(1 σ)이다. Nd 동위체 조성은 Finnigan MAT262RPQ(nine Faraday cup collectors) 질량분석기를 사용하여 측정하였다. 측정된 동위원소비($^{143}Nd/^{144}Nd$)는 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$로 규격화(nomalize)하였다. LaJolla 표준시료에 대한 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 비의 값은 0.511854±9(2 σm)이며, $^{143}Nd/^{144}Nd$시료 평균 ±0.003%(1 σ)이다. 동시선 연대(isochron age)는 Kullerud (1991)의 최소자승법과 ^{147}Sm의 붕괴상수 $6.54\times10^{-12}\ yr^{-1}$ (Lumar and Marti, 1978)을 이용하여 계산하였다. 동시선상의 데이타의 정확도를 MSWD 대신 goodness-of-fit (R^2)로 나타내었다.

주성분과 미량성분

계명산층은 부분적으로 후기 알카리 화강암류의 관입에 의해 열적 영향을 받아 구조적인 변형과 광물조성의 변화가 수반되나 일반적으로 구성암석들의 화학적 특성은 점이적인 관계를 가진다(Table 3). 편암의 화학조성은 SiO_2, 전체 FeO, K_2O 및 Al_2O_3 등의 함량은 높고 변화폭이 크다. 특히 SiO_2는 최저 69.20%에서 최고 76.95%에 이르는 높은 함량 범위를 나타낸다. 전체적으로 미량원소의 함량

Table 3. Selected chemical analyses from the Kyemyeongsan Formation.

Sam. No	Quartz schist			Quartz-mica schist			Quartz-feldspar schist		
	CJ417	CJ804	CJ418	CJ01	CJ354	CJ04	CJ-8	CJ-9	CJ-23
SiO_2	72.16	69.20	70.93	75.38	76.95	74.56	75.25	74.90	73.26
TiO_2	0.30	0.36	0.26	0.59	0.37	0.31	0.23	0.27	0.29
Al_2O_3	7.45	3.87	3.89	6.99	9.12	9.18	8.69	8.12	9.65
FeO*	12.02	21.13	20.54	5.28	1.14	3.74	4.29	4.86	5.95
MgO	0.27	0.18	0.09	4.42	3.43	2.69	1.66	0.28	0.57
MnO	0.07	0.08	0.17	0.13	0.05	0.04	0.15	0.06	0.04
CaO	1.82	1.00	0.26	1.40	0.17	0.23	0.36	2.38	1.74
Na_2O	0.75	0.52	0.40	1.10	4.61	4.46	2.35	1.96	1.20
K_2O	3.42	2.14	2.04	3.61	2.09	2.43	4.21	4.57	6.93
P_2O_5	0.08	0.11	0.28	0.10	0.07	0.07	0.03	0.02	0.02
Total	98.34	98.59	98.86	99.00	98.00	98.34	97.22	97.42	99.65
Ba	298	476	260	180	530	56	240	220	184
Nb	18	33	24	68	52	46	1300	610	555
Rb							84	80	99
Sr	42	68	16	144	107	32	20	27	21
Ta							130	50	121
Th	12	14	15	16	20	8	150	175	102
Y	76	75	88	167	188	153	449	352	267
Zr	198	452	230	1341	1229	1184	7500	5000	2489
La	31	23	33	99	145	69	240	320	380
Ce	78	57	66	211	284	162	480	680	780
Pr	10	6	7	30	37	20	51	64	80
Nd	41	27	26	126	125	79	220	210	340
Sm	11	9	7	34	26	17	31	28	44
Eu	1	1	1	2	2	0	2	3	3
Gd	11	12	9	34	25	16	52	50	63
Tb	2	2	2	5	4	3	5	7	9
Dy									
Ho	3	3	3	6	6	5	14	14	15
Er	10	10	8	20	16	14	48	35	35
Tm	1	1	1	3	2	2	7	6	6
Yb	8	8	7	13	13	13	44	32	41
Lu	1	1	1		1	1	7	5	4

역시 다양한 함량의 범위를 나타내며, 그 중에서도 Nb, Y과 Zr의 함량이 특히 높고 함량 변화의 범위가 넓음을 알 수 있다. 이러한 결과는 구성물질의 기원이 상이함을 반영하고 있다고 볼 수 있다.

Nb/Y에 대한 Zr/TiO_2 좌표에서 석영-운모편암과 석영편암은 석영조면암내지 유문암에, 석영-장석편암은 알카리성분이 풍부한 포놀라이트(phonolite) 영역에 위치한다(Fig. 6).

알카리 화강암류의 주성분 원소조성은 대체적으로 볼 때 MgO, CaO함량은 낮고, K_2O, Na_2O와 전체 FeO의 함량이 대보화강암과 충주화강암의 조성(김규한, 1992)보다 높으며 변화폭이 크다. 이는 석영에 비해 K-장석이 많고 유색광물의 함량이 낮은 암상의 특징과 잘 일치된다. 미량성분 중 Ba, Y 및 Zr의 함량이 높고 Sr 함량은 낮다. 또한 이들 중 Ba, Y, Zr 함량은 대보화강암의 미량성분(김규한, 1992)과 비교할 때 상대적으로 높은 편이며, 특히 Zr함량이 높은 특징을 나타낸다.

(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3비에 대한 Zr과 Y을 비롯한 REE 함량에서 높은 정(+)의 상관관계를 나타내며(Fig. 7), Zr과 Y은 광체의 알카리 함량에 따라 모두 증가하는 특성을 나타낸다(Fig. 8). 이는 광석의 조직 및 산출특성과 대비할 때 희토류 광화작용이 알카리성 용액의 교대작용에 따른 특성을 반영한다.

희토류 광석은 Zr, Y, Nb 및 Ta 성분이 높은 함량을

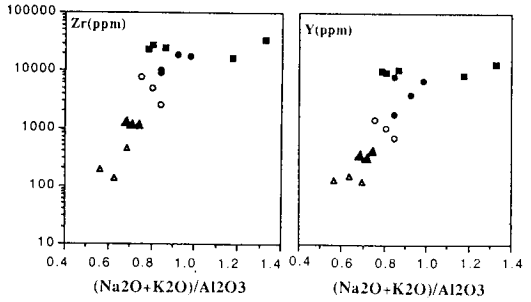

Fig. 7. $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$-Zr-Y diagrams showing the extent of alkalic trends (highly increasing Y and Zr content with differentiation. Quartz schist; open triangles, quartz-mica schist; solid triangles, quartz-feldspar schist; open circle, REE ores (K-feldspar-REE ore; solid circles, Zircon-REE ore; solid square).

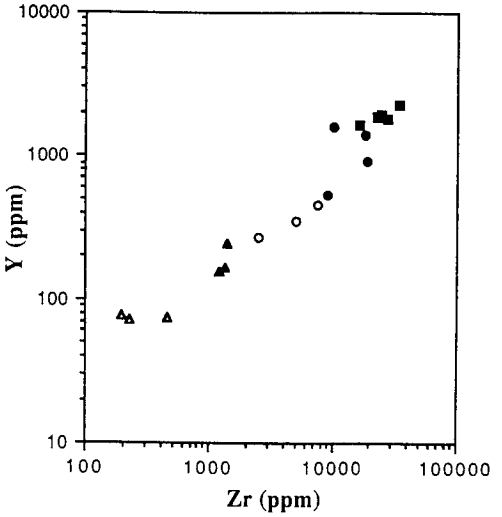

Fig. 8. Zr-Y diagrams for schistose rocks and REE ores from Kyemyeongsan Formation. See text for comments. Symboles are the same as those of Fig. 7.

나타낸다(Table 4). 이들 성분은 저어콘-REE형에서 가장 높고, 갈렴석-REE형, 장석-REE형과 형석-REE형 순으로 낮아진다. 그러나 Ba 성분은 장석-REE형에서 가장 높게 나타난다. 이러한 미량성분의 함량변화는 희토류 광석의 품위와 밀접히 관련되며, 일반적으로 REE 광석품위는 갈렴석-REE형, 저어콘-REE형, 장석-REE형 및 형석-REE형으로 갈수록 낮아지는 경향이 뚜렷하다.

희토류원소(REE)

계명산층을 구성하는 편암류의 REE 패턴에서 석영편암, 석영-운모편암 및 석영-장석편암은 함량변화폭은 크지만 동일한 REE 패턴을 나타낸다. 변화는 HREE에 비해 LREE에서 함량범위가 크고 강한 Eu부(−)의 특성을 나타낸다. 석영-장석 편암, 석영-운모편암, 석영편암으로 갈수록 Eu부(−)의 이상 정도가 더 커지는 경향이 있다. 그러나 LREE는 경사는 급하게 변화하는 양상을 나타내는 반면 HREE는 완만한 경사로 변화하는 양상을 보여준다(Fig. 9). 이러한 결과는 동일기원 또는 환경으로부터 유래되었을 가능성을 시사하고, 옥천계 화산암의 연구결과(Cluzel, 1992)와 비교하면 옥천계에 분포하는 대륙판 열극과 관련된 화산활동에 의해 유래된 석영-조면암질내지 유문암질 화산암의 REE 패턴과 유사하다.

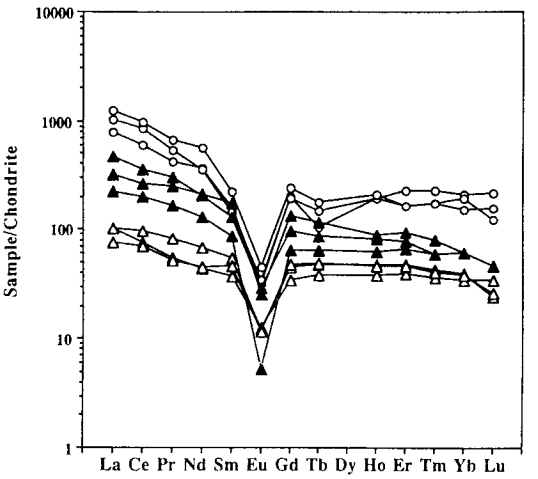

Fig. 9. Chondrite-nomalized REE patterns for schistose rocks of Kyemyeongsan Formation from the Chungju district. Chondrite values from Boynton (1984). Open triangles; quartz schist, solid triangles; quartz-mica schist, open circle; quartz-feldspar schist.

함 희토류 광석은 La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Er 및 Yb의 함량이 높으며, 이들 원소 상호간의 상관관계는 높은 정(+)의 특성을 나타낸다. 광체의 유형으로 볼 때 맥상 갈렴석-REE형과 층상의 저어콘-REE형이 높은 REE품위를 나타내는 반면 장석-REE형, 형석-REE형은 상대적으로 낮은 품위를 가진다(Table 4). REE 광상의 유형 중 저어콘-REE형과 장석-REE형의 REE패턴은 HREE와 LREE 함량의 변화폭이 작은 특징을 나타낸다. 갈렴석-REE형은 높은 LREE 함량을 가지며, LREE에서는 HREE로의 변화가 급격하게 변하는 양상을 띠며, 전반적인 경향은 현저한 강한 Eu 부(−)의 특징을 가진다. 장석-REE형의 분포양상도 전반적으로 저어콘-REE형 패턴과 유사하며,

Table 4. Selected chemical analyses for the REE ores of Chungju district.

Type	Zircon-REE					Allanite-REE	Feldspar-REE			
Sam. no.	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	AR-1	CJ335	CJ-13	CJ-4	CJ-5
SiO_2	33.92	34.14	33.27	34.14	31.89		73.93	73.33	74.00	74.52
TiO_2	0.20	0.20	0.24	0.28	0.29		0.35	0.36	0.33	0.33
Al_2O_3	2.20	3.72	3.35	3.92	2.91		8.03	7.74	7.18	7.16
FeO*	29.14	30.74	30.41	27.51	38.11		6.23	6.89	6.31	5.95
MgO	1.09	3.16	3.01	4.78	1.49		0.47	0.76	0.43	0.30
MnO	0.15	0.03	0.05	0.08	0.01		0.16	0.12	0.14	0.10
CaO	0.15	0.78	0.54	0.39	0.47		2.79	2.48	1.95	1.78
Na_2O	2.86	2.90	2.83	2.42	3.34		2.29	1.97	3.01	2.52
K_2O	0.05	0.02	0.06	0.72	0.08		4.48	4.51	3.60	4.52
P_2O_5							0.08	0.03	0.05	0.06
Total	69.76	75.69	73.76	74.24	78.59		98.81	98.20	97.00	97.24
Ba	55	10	23	25	18		144	255	260	120
Nb	8500	9500	9500	9000	8500		2300	1900	3000	2700
Rb	20	49	90	114	23		50	66	65	52
Sr	16	51	71	46	75		128	67	63	64
Ta	290	350	300	280	320		125	98	100	120
Th	289	541	573	605	393		186	294	210	220
Y	2274	1882	1930	1810	1648		1585	530	921	1400
Zr	34326	22966	25000	27586	16660		10300	9143	19000	18000
La	560	4397	3719	2352	3869	42560	432	623	720	810
Ce	1454	9327	7669	5274	7614	78780	569	1023	1500	2000
Pr	371	1102	924	673	897	9126	194	173	160	260
Nd	2113	4249	3465	3018	3270	21886	381	541	670	1000
Sm	856	1038	894	890	778	1409	161	125	100	140
Eu	57	58	49	49	45	43	9	6	10	12
Gd	1063	1063	965	943	851	425	147	129	160	200
Tb	232	206	187	184	168	30	28	23	20	23
Ho	330	255	244	238	219		37	31	39	43
Er	971	730	725	726	645	21	105	76	100	120
Tm	156	108	110	106	97		16	11	17	17
Yb	956	668	679	653	576	11	88	71	90	100
Lu	134	90	88	80	70		16	7	12	13

Table 5. Sm-Nd isotope data from the REE-rich ore samples.

Sample No.	Sm(ppm)	Nd(ppm)	$^{143}Nd/^{144}Nd$	± 2s	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$\varepsilon_{ND(0)}$	$\varepsilon_{ND(t)}$	$T_2dm(Ga)$
CR-1	862.9	2179.0	0.512635	± 5	0.241049	−0.1	−1.9	1.11
CR-2	1060.8	4386.0	0.512457	± 5	0.147213	−3.5	−1.5	1.07
CR-3	947.2	3784.0	0.512445	± 5	0.152336	−3.8	−1.9	1.11
CR-4	882.8	3096.0	0.512489	± 7	0.173576	−2.9	−1.9	1.11
CR-5	771.5	3265.0	0.512423	± 5	0.143822	−4.2	−2.0	1.11

전체 REE함량이 적음을 보여준다(Fig. 10).

동위원소

계명산층에 분포하는 REE 광상에 대한 Sm-Nd 동위원소 연구를 통해서 그 기원과 생성시기를 파악하기 위하여 광상유형별로 동위체 분석을 실시하였다(Table 5). 각 시료는 선캠브리아기의 기반암인 경기육괴나 영남육괴의 변성암류에 비해(Lee, 1991; Na, 1994) 높은 $^{143}Nd/^{144}Nd$비 및 Sm/Nd비의 특성을 나타낸다. 고품위 희토류

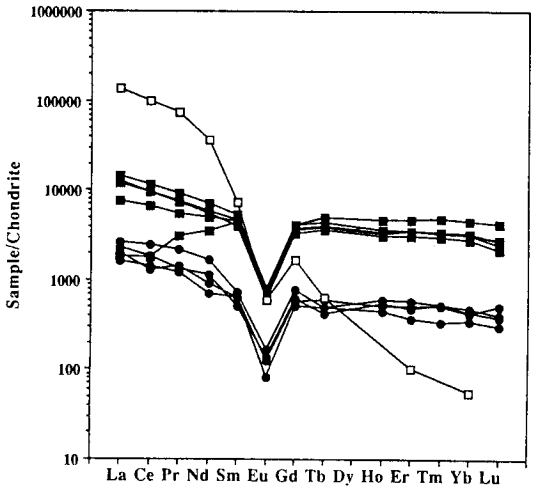

Fig. 10. Chondrite-nomalized REE patterns for REE ore types from the Kyemyeongsan Formation. Solid squares; Zircon-REE type, open squares; Allanite-REE type, solid circles; Feldspar-REE type.

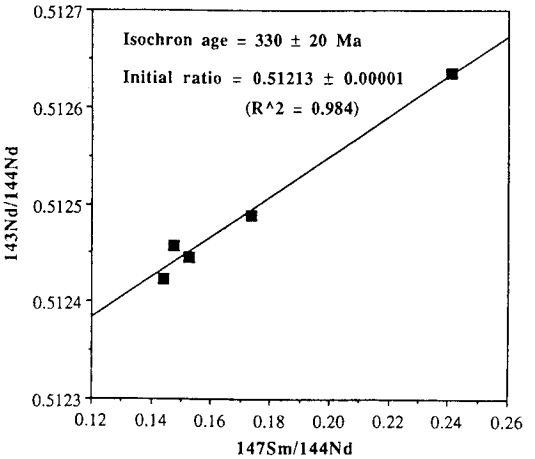

Fig. 11. Sm-Nd isochron diagram for the REE ores from the Chungju district.

광석 중 저어콘 모드 함량이 20% 이상인 시료에 대한 Sm-Nd 동위체에 의한 동시선연대는 330 Ma이고(Fig. 11), $\varepsilon_{Nd(0)}$는 −0.1∼−4.2, $\varepsilon_{Nd(t)}$는 −1.5∼−2.0의 값을 나타났다.

Nd 동위원소 진화도(isotope evolution diagram)는 Sm-Nd 모델연령으로부터 유래된 원연령(source age)의 범위 가능성을 보여준다. 모델연대는 맨틀에서 니오디움이 분리되어 지각에 체재한 시간으로 간주될 수 있으며, 구성 암석의 고기지각 진화과정을 이해하는데 이용되기도 한다 (Depalo and Wasserburg, 1976; Jacobsen and Wasserburg, 1979). T_2dmNd= 보정식으로 계산된 모델 연대(Jacobsen, 1988)는 REE 광석에서 1.1Ga로 계산되었다. 모델연대는 선캠브리아기 기반암(2.1∼2.6 Ga)과 옥천계 화강암(1.7∼2.2 Ga)보다 낮고 경상분지내의 백악기 화강암의 0.8 Ga보다는 조금 높다(Na, 1994).

토 의

계명산층은 옥천퇴적분지내의 화성활동 중심지(Cluzel *et al.*, 1991)로 알려져 있으며 철과 REE 광상이 발달되어 있다(박맹언과 김근수, 1994). 화학조성과 Sm-Nd 및 Sr 동위원소, REE 지화학적 자료를 이용한 계명산층 형성과 관련된 조구조적 환경과 퇴적물의 기원을 밝히는 것은 옥천계의 변천을 이해하는데 중요한 단서가 된다.

계명산층은 주로 화산암 기원의 변성암인 석영편암, 석영-운모편암, 석영-장석편암 및 결정질 석회암과 소규모의 암주 및 암맥상으로 산출되는 알카리 화강암류로 구성된다. 이러한 암상의 분포는 연속된 화산-심성 화성활동의 결과로 형성되었음을 시준한다. 계명산층 암석에서 측정된 $^{143}Nd/^{144}Nd$와 $\varepsilon_{Nd(0)}$치는 −0.1∼−4.2로서 대륙지각 물질이 일부 혼염된 맨틀기원의 대륙형 현무암 특성에 대비된다. REE 패턴은 계명산층을 구성하는 암석종에 구분없이 강한 Eu 부(−)의 이상치를 나타내며, 이는 알카리장석이 풍부한 화강암류의 특성(Cullers and Graf, 1984)에 대비된다.

고기 변성암내의 REE와 Fe의 밀접한 공생은 해수의 물리화학적 조건에 의해 설명되며, 계명산층내에 산출되는 철광층과 석영편암내에 보여주는 동일한 REE 패턴과 낮은 ΣREE는 이들이 해수중에 용해되어 있던 성분으로부터 유래됨을 시사한다. 또한 REE 기원은 해저 화산작용에 의해 형성되었을 가능성을 암시한다. 화성활동, 변성작용, 마그마작용, 접촉교대 및 열수교대 등 다양한 지질작용으로 인해 희토류원소의 기원과 광상의 성인규명은 용이하지 않다. 석영-장석편암과 화강암과의 접촉부에 주로 발달되는 알카리 교대암은 흔히 편리구조와 조화적으로 산출되며, 주로 미사장석으로 구성된 미사장석암에서 석영의 함량이 증가되는 석영교대암, 각섬석과 흑운모를 수반하는 갈렴석교대암으로 전이되는 특징을 보여준다. Kang(1994)은 계명산 nappe를 충주-장성리지역에서 가장 높은 변성도를 갖는다고 연구하고, 산성의 화산-심성암은 동력작용에 의해 강한 압쇄암화작용이 수반되었으며, 이러한 과정에서 사장석, K-장석의 재결정작용이 일어났으며, 그러한

변형은 450℃ 이상의 온도조건에서 야기되었음을 보고하였다.

그러나, 충주지역 REE 광체에서 나타나는 $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$에 대한 Zr과 Y의 상관관계는 화강암질 마그마의 분화에 의해 후기 알카리 함량이 증가됨에 따라 Zr의 포화도가 증가되어 주변 모암과의 반응에 의해 다량의 저어콘을 침전시켰음을 알 수 있으며, 특히 철산화 광물과 밀접하게 수반됨은 Zr, REE를 함유한 후기 마그마기원 교대성 물질이 철함량이 높은 모암과의 교대작용에 의해 저어콘의 용해도가 급격하게 감소됨에 따라 철산화 광물과 함께 정출되었음을 알 수 있다. 또한 단속적으로 발달되는 세맥상의 형석과 방해석맥은 후기 단계의 열수에 의한 교대작용이 진행되었음을 의미한다. 교대작용의 기원 유체는 알카리성으로서 석영-장석편암에서는 석영-운모편암과 석영편암보다 큰 영향을 주었으며, 그 결과 석영-장석편암은 알카리 교대암 양상을 가지게 되었다. 교대작용의 특징을 나타내지 않은 모암에서 보다 교대조직이 우세한 모암에서의 REE가 부화되어 있는 특성은 열수유체에 의한 REE의 운반과 침전을 증명하는 것이다.

Watson(1979)은 SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-K_2O계 용융체내에 함유되어 있는 Zr의 포화정도는 용융체의 Na_2O+K_2O/Al_2O_3의 비에 의해 좌우됨을 밝히고, 용융체내에 포함되어 있는 CaO와 FeO의 함량은 적은 양(1 wt.%)일지라도 퍼알카리인 용융체에서는 저어콘의 용해도를 감소시킨다고 보고하였다. 즉 저어콘과 지르콘늄원소의 거동에 있어서 규장질의 non-peralkaline 마그마는 저어콘 결정을 함유하는데, 그 이유는 이들 성분에 대한 저어콘의 포화도가 매우 낮기 때문이다. 규장질 용융체에서 저어콘의 용해도는 단순한 알카리 산화물인 알카리-저어콘 규산염 복합체 형성에 의해 조정된다. Pointer *et al.*(1988)은 흑운모화강암이 후기 마그마성 교대작용(post magmatic metasomatism)에 의해 알바이트, 미사장석화 그라이젠 작용 등이 일어나고, 이러한 과정에서 교대작용에 의해 Zr이나 Y함량이 높은 방사성 광물(U, Th 함유광물)이 침전됨을 보고한 바 있다.

국내 고생대 화성활동과 광화작용에 대해서는 영남육괴 북서부에 위치하는 울진광산 서측에서 선캠브리아기의 화강편마암과 페그마타이트를 관입하여 산출하는 우백질 화강암체가 고생대 중기(Yun, 1978)로 알려져 있으며, 이 시기의 화성암류의 관입은 상부 오오도비스기에서 하부 석탄기에 걸친 대결층 기간이 끝날 무렵 중부 데본기에 이르러 새로운 퇴적작용이 시작되는 평안계 퇴적분지의 침강에 앞선 지괴운동의 소산으로 해석된 바 있다. 또한 고생대의 광상으로서는 오오도비스기 하부 동점규암층과 적색의 해성퇴적층으로 구성된 석탄기 홍점통 기저에 수반되는 적철광층과 소위 사동통 상부에 나타나는 갈철광층을 들 수 있으며, 이들은 모두 퇴적기원으로 조선계와 평안계의 분포지역인 태백산지역 북동부 삼척-영월등지에 주로 분포한다(윤석규, 1979).

한편 북한에서의 고생대 화성활동은 청진복합체, 평강복합체, 남강복합체 및 두만강복합체의 일부에서 알려져 있으며, 주로 하부 데본기에서 상부 페름기에 속한다(Geology of Korea; N. Korea, 1990). 이 중 페름기로 알려진 평강복합체내의 화강암질암의 연대는 361 Ma로 측정된 바 있으며, 마그마의 근원을 조산대 또는 대륙판의 열극형 구조대에 수반되는 심부기원 현무암질 마그마로부터 형성되었다고 해석하였다. 평강-금화지역 평강복합체중에는 주로 알카리암인 반려암과 섬장암이 수반되며, 이들 암석과 성인적 연관성을 가지고 저어콘, REE, Nb 및 자철석을 함유하는 광상이 수반된다.

고품위 희토류 광석 중 저어콘의 모드함량이 20% 이상인 시료에 대한 Sm-Nd 동위체의 동시선 연대는 330 Ma이며, 이때의 모델연대(T_2DM)는 1.1 Ga이고 $\varepsilon_{Nd(t)}$는 −2.9로 나타났다. 이러한 결과는 희토류 광상을 형성한 물질이 주로 맨틀로부터 기원하였음을 시사하며, 희토류 광상의 광화시기는 주로 화산성 기원물질로 구성된 고생대 전기의 계명산층이 퇴적(Cluzel, 1991)된 이후인 석탄기로 추정된다. 동시선에 의한 연대와 모델연대의 차이는 광화용액이 근원 마그마로부터 급속하게 분리되어 형성되지 않았음을 의미한다. 또한 알카리 화강암의 관입시기는 관입양상과 알카리 화강암 기원의 광화작용시기 등으로 미루어 볼 때 고생대 중기로 추정할 수 있다.

희토류 광상은 LREE의 부화와 강한 부(−)의 Eu 이상치는 열극 또는 후열도 분지의 대륙지각내에 수반되는 규장질 화산암류와 유사하며, 미량원소 및 Nd-Sm 동위체의 화학적 특성등으로 미루어 볼 때 대륙판 열극형(intracontinental rift type) 구조대에서 유래된 심부기원 현무암질 마그마의 동시성 분화에 의해 분리된 알카리 화강암과 밀접한 성인적 연관성을 띠고 있다.

결 론

충주지역 희토류 광화대는 옥천퇴적분지내의 화성활동 중심지로 알려진 계명산층(Cluzel *et al.*, 1991)내에 분포한다. 계명산층은 주로 석영편암, 석영-운모편암, 석영-장석편암 및 결정질 석회암과 소규모의 암주 및 암맥상으로 산출되는 알카리 화강암류로 구성된다. 이들 중 변성암들이 갖는 높은 $^{143}Nd/^{144}Nd$비는 화산암 기원임을 지시하며, 연속된 화산-심성 화성활동의 결과로 추정된다.

희토류 광상은 주로 계명산층을 구성하는 석영-장석편암과 알카리 화강암류와의 경계부에서 발달되며, 계명산층의 퇴적작용, 화산-심성 화산활동과 변성작용, 접촉교대 및 열수교대 등 다양한 지질작용에 의한 성인적인 연관성을 띠고 있다. 희토류 광석은 Na_2O+K_2O/Al_2O_3비에 대한 Zr과 Y을 비롯한 REE함량에서 높은 정(+)의 상관관계를 나타내며, 이는 광석의 조직 및 산출 특성과 대비할 때 희토류 광화작용이 알카리성 용액의 교대작용에 따른 것임을 알 수 있다.

희토류 광상의 유형은 선구조를 수반하는 저어콘-REE형, 장석-REE형과 맥상 또는 괴상의 갈렴석-REE형 및 형석-REE형으로 구분된다. 희토류 및 희유원소 광물은 Ta-Nb계 광물, La-Ce계 광물, Y계 광물, Y-Nd계 광물, Nb-Th계 광물 및 저어콘으로 구분되며, 광상유형에 따라 공생광물의 특성 및 수반함량의 비가 달라진다.

희토류 광석의 $\varepsilon_{Nd(0)}$치는 −0.1∼−4.2로서 적은 비율의 대륙지각 물질이나 쇄설성 물질이 혼염된 맨틀기원의 대륙현무암 특성에 대비된다. 고품위 희토류 광석 시료에 대한 Sm-Nd 동위체의 동시선 연대는 330 Ma± 20이며, 이때의 모델연대(T_2DM)는 1.1 Ga로서 $\varepsilon_{Nd(t)}$는 −2.9로 나타났다. 이러한 결과는 희토류 광상을 형성한 물질이 주로 맨틀로부터 기원하였음을 시사하며, 희토류 광상의 광화시기는 주로 화산성 기원물질로 구성된 계명산층이 퇴적된 이후인 석탄기 초임을 알 수 있다. 또한 동시선에 의한 연대와 모델연대의 차이는 광화용액이 근원 마그마로부터 급속하게 분리되어 형성되지 않았음을 의미한다.

희토류원소의 기원은 LREE의 부화와 강한 부(−)의 Eu 이상치, 미량원소 및 Nd-Sm 동위체의 화학적 특성 등으로 미루어 볼 때 대륙판 열극형(intracontinental rift type) 구조대에서 유래된 심부기원 현무암질 마그마의 동시성 분화에 의해 형성된 알카리 마그마로 추정되며, 광화작용은 이들 마그마로부터 분리된 후기의 알카리성 광화유체에 의한 교대작용으로 형성되었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구비(KOSEF 93-0400-006-2)와 전략광물자원연구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이들 기관에 사의를 표한다. Nd-Sm 동위원소 분석과 해석에 도움을 주신 연세대학교 권성택 교수님과 목포대학의 나춘기 교수님께 감사를 드립니다.

참고문헌

김규한 (1992) 남한의 일부 중생대화강암류의 지구화학적 연구. 광산지질, 25권, 4호, p. 435-446.

김기완, 이홍규 (1965) 1/5만 충주도폭 지질설명서와 지질도. 상공부 국립지질조사소, 단행본.

김옥준 (1968) 충주-문경간의 옥천계의 층서와 구조. 광산지질, 1권, p. 36-46.

김옥준 (1970) 남한 중부지역의 지질과 지대구조. 광산지질, 2권, p. 73-90.

김원사, 정지곤, 이강호, Watkinson, D. H. (1992) 하동-산청지역 회장암에 배태된 희유금속 자원에 관한 연구. 한국광물학회지, 5권, 1호, p. 14-21.

김유동, 이평구 (1990) 휴·폐광석내 희유금속 부존특성 연구 종합. 동력자원연구소 연구보고서(Kr-90-2d-3), p. 63-110.

김유동, 장세원, 이평구 (1988) 국내 철광상내 희유금속 부존특성 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서(KR-88-8A), p. 415-508.

박맹언, 김근수 (1994) 충주지역 계명산층의 지화학적 특성에 관한 연구. 한국암석학회 제3차 정기발표회 요약문.

윤석규 (1979) 연화-울진 연·아연광산지대 화성암류의 K-Ar 연대에 대한 암석연대학적 및 성인론적 연구, 박사학위논문.

오민수 (1989) 어래산 지역의 갈렴석광상. 광산지질, 22권, 2호, p. 151-166.

이대성 (1974) 옥천계 지질시대 결정에 관한 연구. 연세논총, 11p.

Boynton, W. V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In P. Henderson (ed.) Elsevier Science Publishers B. V., p. 63-114.

Cluzel, D. (1992) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): an int racontinental rift-related volcanic activity. Jour. Southeast Asian Earth Sci., v. 7, p. 195-209.

Cluzel, D., Cadet, J. P., Kim, D. H., Hwang, J. H. and Lee, B. J. (1991) Early Paleozoic geodynamic evolution of the Ogcheon belt (South Korea). Stratigraphy and tectonic setting of the Ogcheon Supergroup. In Cluzel, D., (ed.), Ph.D. thesis, The Ogcheon belt (South Korea) summary, p. 51-68.

Cluzel, D., Cadet, J. P. and Lapierre, H. (1991) Geodynamics of the Ogcheon Belt, South Korea. Tectonophysics, v. 183, p. 41-56.

Cullers, R. L. and Graf, J. L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks-Ore petrogenesis. In P. Henderson (ed.) Elsevier Science Publishers B. V., p. 275-342.

Depaolo and Wasserburg(1976) Nd isotopic variations and petrogenetic models. Geophys. Res. Letters, v. 3, p. 249-252.

Geology of Korea; N. Korea (1990).

Jacobsen, S. B. (1988) Isotopic constraints on crustal growth and recycling. Earth Planet Sci. Lett, v. 90, p. 315-329.

Jacobsen, S. B. and Pimentel-Klose, M. R. (1988) A Nd isotopic study of the Hamersley and Michipicoten banded iron formations; the source of REE and Fe in Archean oceans. Earth and Planetary Science Letters, v. 87, p. 29-44.

Jacobsen, S. B. and Wasserburg, G. J. (1979) Nd and Sr isotopic study of the Bay of Islands ophiolite complex and the evolution of the source of mid-ocean ridge basalts.

J. Geophys. Res., v. 84, p. 7429-7455.
Kang, J. H. (1994) Geological Structure and Tectonics of Ogcheon Zone in the Chungju-Jangseonri Area, South Korea. Jour. Sci. Hiroshima Univ., Series C, v. 10, p. 11-23.
Kang, J. H. (1994) Tectonic Evolution of the Ogcheon Zone as Inferred from the Geological Structures of the Chungju-Jangseonri Area, Korea. IGCP 321-Gondwana Dispersion and Asian Accretion(IV), 50p.
Kim, G. S. and Park, M. E. and Enjoji M. (1994) Banded and massive Iron mineralization in Chungju mine(I): Geology and ore Petrography of iron deposits. Environ. Geol., v. 27, p. 523-535.
Kim, G. S. (1991) Iron Mineralization in the Chungju mining district, Korea. Ph.D. Thesis, Ins. of Geosec., Univ. of Tsukuba, 102p.
Lee, C. H. (1986) Stratigraphy and depositional environments in the Ogcheon Supergroup with the special consideration on the carbonate key deds. Dr. Thesis, Univ. of Tsukuba, Ibaraki, Japan.
Na, C. K. (1994) Genesis of granitoid batholiths of Okchon zone, Korea and its implications for crustal evalution. Ph. D. Thesis, Tsukuba Univ., 154p.
Neary, C. R. and Highley, D. E. (1984) The economic importance of rare earth elements. In P. Henderson (ed.), Elsevier Science Publishers B. V., p. 423-466.
Pharaoh, T. C. and Pearce, J. A. (1984) Geochemical evidence for the geotectonic setting of early Proterozoic sequences in Lapland. Precambran Research, v. 25, p. 283-308.
Pointer, C. M., Ashworth, J. R. and Ixer, R. A. (1988) The Zircon-Thorite Mineral Group in Metasomatized Granite, Ririwai, Nigeri 1. Geochemistry and Metastable Solid Solution of Thorite and Coffinite. Mineralogy and Petrology, v. 38, p. 245-262.
Reedman, A. J., Fletcher, C. J. N., Evans, R. B., Workman, D. R., Yoon, K. S., Rhyu, H. S., Jeong, S. H. and Park, J. N. (1973) The geological, geophysical and investigations in the Hwangganri area, Chungcheon-bug-do. In Report of Geological and Mineral Exploration. Park 2. Report of Mineral Exploration. Geol. Min. Inst. Korea, v. 1, p. 1-118.
Watson, E. B. (1979) Some experimentally determined zircon/liquid partition coefficients for the rare earth elements. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 44, p. 895-897.
White, R. W. (1973) Progressive metamorphism of iron formation and associated rocks in the Wologizi Range, Liberia. U.S. Geol. Surv. Bull., 1302p.
Winchester, J. A. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, v. 20, p. 325-343.
Yun, S. (1978) Petrography, chemical composition and depositional environments of the Cambro-Ordovician sedimentary sequence in the Yeonhwa I mine area, southeastern Taebaegsan region, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 14, p. 145-174.

1995년 8월 14일 원고접수