충주 아래산 일대에서 산출하는 희토류 광물의 광물학적 및 광물화학적 특성

유병운¹ · 이길재^{2*} · 고상모²

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원 광물자원본부

Mineralogy and Mineral-chemistry of REE Minerals Occurring at Mountain Eorae, Chungju

Byoung-Woon You¹, Gill Jae Lee^{2*} and Sang Mo Koh²

¹Geology and Earth Environment Science, Chungnam National University

²Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

The Chungju Fe-REE deposit is located in the Kyemyeongsan Formation of the Ogcheon Group. The Kyemyeongsan Formation includes meta-volcanic rocks and pegmatite hosted REE deposit which show different kind of REE-containing minerals. The meta-volcanic rocks hosted REE deposits' main REE minerals are allanite, zircon, apatite, and sphene, whereas the pegmatite hosted REE deposits is mainly composed of fergusonite, and karnasurtite, zircon, thorite. The meta-volcanic rock hosted major REE mineral is allanite as the form of aggregation and contains 23.89-29.19 wt% TREO (Total Rare Earth Oxide), 4.71-9.92 wt% La₂O₃, 11.30-14.33 wt% Ce₂O₃, 0.11-0.29 wt% Y₂O₃, 0.15-0.94 wt% ThO₂ as a formula of (Ca, Y, REE, Th)_{2.095}(Mg, Al, Ti, Mn, Fe³⁺)_{2.770}(SiO₄)_{2.975}(OH). Accompanying REE in a coupled substitution for Ca²⁺ (M1 site) and Al³⁺-Fe²⁺ (M2 site) leads to a large chemical variety. Due to the allanite's high contents of Fe, it belongs to Ferrianallite. The pegmatite hosted deposit's dominant REE mineral is fergusonite as prismatic or subhedral grains associated with zircon, fluorite and karnasurtite. Geochemical composition of the fergusonite(YNbO₄) suggests substitution of Y-REE and Y-Th in A-site, and Nb-Ta-Ti in B-site, furthermore the proportion of Y₂O₃ and Nb₂O₅ is oddly 1:1.5 comparing to the ideal ratio 1:1 and Nb is higher than Y, also A-site Y actively substitutes with REE. Karnasurtite in pegmatite variously ranges 9.16-22.88 wt% Ce₂O₃, 2.15-9.16 wt% and La₂O₃, 0.44-10.8 wt% ThO₂, as a calculated formula (Y, REE, Th, K, Na, Ca)_{1.478}(Ti, Nb)_{1.304}(Mg, Al, Mn, Fe³⁺)_{0.988}(Si, P)_{1.431}O₇(OH)₄·3H₂O. Firstly the 870-860 Ma is the initial age of the supercontinent Rhodinia dispersal and subsequent A-1 type volcanism, which contains Fe, REE, and HFS(High Field Strength elements; Nb, Zr, Y etc.) elements in Fe-rich meta-volcanic rocks dominant Kyemyeongsan Formation, might mineralized allanite. Another synthesis is that regional metamorphism at late Paleozoic 300-280 Ma(Cho *et al.*, 2002) might cause allanite mineralization. Also pegmatite REE mineralization highly related to the granite intrusion over the Chungju area in Jurassic(190 Ma; Koh *et al.*, 2012). Otherwise above all, A-1 type volcanism at the same time of the Kyemyeongsan Formation development, regional metamorphism and pegmatite, might have caused REE mineralization. Although REE ore bodies display a close spatial association, each ore bodies display temporal distinction, different mineral assemblage and environment of ore formation.

Key words : allanite, fergusonite, karnasurtite, REE, Mountain Eorae

충주 지역은 소위 옥천층군에 해당되는 계명산층이 분포하며, 계명산층내에는 변성화산암 모암과 페그마타이트 모암의 희토류 광체가 배태한다. 변성화산암 모암의 희토류 광체를 구성하는 희토류광물은 갈럼석, 저어콘, 인회석, 스피넬이 산출하나 갈럼석이 가장 우세하게 산출한다. 페그마타이트 모암의 희토류 광체를 구성하는 희토류 광물은 퍼구소나이트, 카르나수르타이트, 저어콘, 토륨석이 산출하나 퍼구소나이트가 가장 우세하다. 변성화산암에서 산출하는 갈럼석의 화학식은 (Ca, Y, REE, Th)_{2.095}(Mg, Al, Ti, Mn, Fe³⁺)_{2.770}(SiO₄)_{2.975}(OH)로서 TREO 23.89-29.12 wt%, La₂O₃ 4.71-9.92 wt%, Ce₂O₃ 11.30-14.33 wt%, Y₂O₃ 0.11-0.29 wt%, ThO₂ 0.12-0.94 wt% 이다. A(2) 사이트

*Corresponding author: gill@kigam.re.kr

에서 Ca^{2+} 와 REE^{3+} , M(2) 사이트에서 Al^{3+} 과 Fe^{2+} 의 치환이 일어나는데 이는 갈럼석의 화학조성에 밀접한 관련을 갖는 특징이고, Fe의 함량이 일반 갈럼석보다 높은 Ce 계열의 Ferriallanite에 해당된다. 이는 모암인 계명산층을 주로 구성하는 변성화산암(변성조면암)의 원암이 Fe이 풍부한 함철층이기 때문인 것으로 판단된다. 페그마타이트 모암에서 가장 우세하게 산출하는 퍼구소나이트의 화학조성은 A 사이트에서 Y-REE, Y-Th 치환이 우세하게 일어났으며, B 사이트에서는 Nb-Ta-Ti의 치환이 주로 초래되었으며, 계산된 화학식은 YNbO_4 이다. 또한 Y_2O_3 와 Nb_2O_5 만의 비율로 상관도를 확인 한 결과 연구지역에서 산출되는 퍼구소나이트는 Y과 Nb의 이상적인 비율인 1:1 비율과 달리 1:1.5의 비율을 나타내고 있으며, Nb의 함량이 Y 함량보다 높으며, Y 사이트 즉, A 사이트에서 희토류 원소의 치환이 활발하게 초래되었다. 페그마타이트에서 산출하는 카르나수르타이트는 REE 및 Th를 치환하는 조성은 각각 Ce_2O_3 9.16-22.88 wt%, La_2O_3 2.15-9.16 wt%, ThO_2 0.44-10.8 wt%, 화학조성으로 계산된 구조식은 $(\text{Y, REE, Th, K, Na, Ca})_{1.478}(\text{Ti, Nb})_{1.304}(\text{Mg, Al, Mn, Fe}^{+3})_{0.988}(\text{Si, P})_{1.431}\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 이다. 870-860 Ma 인 초기 원생대에 로디니아 대륙의 분열기로서 한반도에서 A-1형 화산활동이 초래되어 철, 희토류원소 및 고장력원소(Nb, Zr, Y 등)가 풍부한 변성화산암으로 주로 구성되는 계명산층을 형성 시켰다면 갈럼석은 모암이 형성될 당시 알칼리 화산암에서 정출되었거나 변성작용이 초래된 고생대 말(300-280 Ma, Cho *et al.*, 2002) 광역변성작용에 의해 형성 되었을 가능성이 높다. 희토류를 함유하는 페그마타이트에서 산출하는 저어콘 연대가 190 Ma 인 것은 줄라기에 충주지역에서 광범위하게 초래된 화강암 정치활동과 관련된 가능성이 크다. 따라서 충주지역 계명산층 내 배태된 희토류 광체는 인접한 지역에 배태되어 있지만 매우 차별적 희토류 광화작용이 초래 되어 희토류광물조성과 광체의 산상이 차별적으로 나타나는 것으로 해석된다.

주요어 : 갈럼석, 퍼구소나이트, 카르나수르타이트, 희토류, 어래산

1. 서 론

희토류자원은 1965년 이전에는 인도, 브라질, 말레이시아 등의 사광상에서 산출하는 모나자이트로부터 추출되어 산업에 활용되어 왔다. 1960년 중반부터 미국의 Mountain Pass 광산이 생산을 시작하였으며, 1998년에 이 광산이 생산을 중단한 후 중국의 Bayan Obo 광산이 가행하기 시작하면서 현재까지 세계 생산량의 대부분을 차지하고 있다. 이 광상들은 희토류 광상 유형에서 카보너타이트(carbonatite type)형에 속하며 산출되는 주요 희토류 광물종은 희토류 탄산염광물인 바스트너사이트(bastnesite)와 인산염광물인 모나자이트이다(Koh and Chang, 2011).

최근 들어 희토류 자원의 중요성이 인식되고 공급 불안정이 심화 되면서 비재래형 희토류 자원의 평가가 전 세계적으로 이루어지고 있다. 즉, 과거에 주로 생산되던 바스트너사이트와 모나자이트보다 희토류 함유량이 적고 현재까지 희토류를 추출하여 상업생산이 되지 않았던 광물들인 제노타임(xenotime), 갈럼석(allanite), 브리솔라이트(britholite), 퍼구소나이트(fergusonite), 인회석(apatite) 등에도 관심이 집중되고 이들 자원에 대한 탐사가 활발하게 이루어지고 있다.

우리나라에서는 20세기 초부터 희토류 광물의 부존이 알려지기 시작하여, 1945년 이전에는 주로 황해, 함북, 함남지방이 주요 산지로 조사 보고 되었으며, 1980

년 이후 충주, 울진, 양양 및 하동-산청지역에 희토류 광물 부존이 보다 자세하게 보고되어왔다(Chang and Seo, 2006).

연구지역인 충주 어래산 일대는 충주 지역의 철광상과 밀접하게 연관되어 희토류 광화작용이 초래된 지역으로서 1979년부터 충주 철광상을 중심으로 많은 연구가 진행되었다. 충주, 양양 및 포천 철광상의 성인연구(Lee, 1979)를 시작으로 항공방사능 및 자력탐사(Koo *et al.*, 1986)가 수행된 바 있다. 또한, 충청북도 증원군 어래산지역 희유금속광물(갈럼석)자원의 지질광상연구(Oh *et al.*, 1988), 충주지역 희유원소광상에서 산출되는 갈럼석의 지구화학적 특성(Park *et al.*, 1996), 계명산층내 알칼리 화강암 기원의 퍼구소나이트의 지구화학 및 산출특성 연구(Park *et al.*, 1997)와 같이 희토류 광물에 대한 연구도 진행되었다. 그 외 충주 어래산지역 희유금속광물자원탐사(Park *et al.*, 1993), 충주지역 철광상의 성인(Kim *et al.*, 1994), 충주지역 희토류 광상의 성인 및 산출상태와 지화학적 특성(Park & Kim, 1995), 충주 계명산지역 옥천층군의 화성활동과 지질구조(Kang & Ryoo, 1997), 옥천층군 계명산층의 암석화학적 특성(Koh *et al.*, 2005), 계명산층내의 충주 철광상 주변에 분포하는 산성 변성화산암의 성인(Park *et al.*, 2005)등 다양한 연구가 진행 되어왔다. 또한 계명산 층의 페그마타이트에 수반되는 우라늄토륨광상의 지구화학적 특성(Park & Kim, 1998)

및 계명산층 내에 산출하는 알칼리 화강암의 지구화학적 특성(Kim *et al.*, 1998) 연구도 수행되었다.

이와 같이 다양한 연구가 진행 되었음에도 계명산층의 정확한 구성암상이나 형성연대가 최근에야 보고되기 시작하였다(Koh *et al.*, 2011). 또한 계명산층 내 발달하는 갈럼석의 광물 특성이나 광물화학적 특성은 충주 철광상 지역인 만정리 일대에서 산출하는 갈럼석에 대하여 보고 된 바 있다(Park and Kim, 1995). 그러나 갈럼석 광상은 충주 철광상지역에서 떨어진 남서편 아래산 일대에서도 세 개의 광체가 확인된 바 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 아래산 일대 희토류 광상에서 산출하는 갈럼석의 광물 특성이나 광물화학적 특성을 연구하였다. 연구지역에서 산출하는 희토류 광물은 변성화산암 모암과 페그마타이트 모암에서 매우 큰 차이를 보이고 있어 모암별 산출하는 희토류 광물의 광물학적 및 광물화학적 특성을 급변 연구에서 명확히 파악하였다.

희토류 자원은 부존규모나 품위에 의해 일차적으로 개발성이 판단되며, 광석의 품위인 총희토류산화물(TREO: Total Rare-earth Elements Oxide) 함량비는 희토류광물의 종류에 따른 광물화학과 조성비에

의해 지배된다. 따라서 희토류 광물의 광물학적 조성이나 광물화학적 조성은 희토류 자원의 품위를 가늠하고 선광 및 제련을 위한 기초자료로서 활용되어 개발성 평가에 적용된다. 아울러 희토류 광상의 성인을 해석하는 근간 자료로서도 활용 될 것이다.

2. 연구방법

충주 아래산 일대의 희토류 광석의 구성광물과 조성을 파악하고, 특히 희토류 광물의 동정과 광물화학을 파악하기 위해 희토류광석 37개 대표시료를 채취하여 현미경 관찰 및 전자현미분석(EPMA)을 수행하였다. 시료채취를 위해 캐나다 Radiation Solutions Inc.사의 Spectrometer (RS-230)와 Geometrics사의 Scintillation counter 방사능 측정기를 이용하여 광체를 확인하였다. 시료채취는 광체를 중심으로 주변부 모암까지 채취하여 광화암과 비광화암의 차이를 파악하고자 하였다(Fig. 2). 희토류 광물의 화학조성 파악을 위한 전자현미분석은 전북테크노파크에서 일본 시마즈 EPMA-1610 전자현미분석기를 이용하였고, 분석은 20nA, 15KV, PKT는 20, BGT는 10 조건에서 수행 되었다.

Fig. 1. Geologic map of the study area. modified after Kim and Lee (1965), Kim *et al.* (1995) and Koh *et al.* (2005).

Fig. 2. Irregular REE ore bodies confirmed by Koh *et al.* (2011). Red box area includes pegmatite hosted REE deposit and each number stands for sampling number.

3. 지질개요

조사지역인 충주 아래산 지역을 포함하는 충주-음성-괴산 지역은 옥천층군 북서부에 위치한다(Fig. 1). 이 지역을 포함한 옥천층군은 한반도 지질해석에 있어 가장 논란이 많은 지역 중 하나로서 현재까지도 옥천변성대의 생성과 변천에 대한 논의가 계속 진행 중이다(Cho and Kim, 2002; Park *et al.*, 2003; Cheong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005). 특히 옥천층군의 여러 블록 중에서 북동부에 위치한 계명산층 및 문주리층(Kim and Lee, 1965)은 구성암상과 형성시기 등에 대한 논란의 중심이다. 충주 지질도폭(Kim and Lee, 1965)에 의하면 조사 지역은 황강리층, 서창리층, 문주리층, 대향산 규암, 향산리 돌로마이트 및 계명산층으로 구성된다(Fig. 1).

Cluzel(1992)은 옥천층군이 초기 고생대 때 판내부 환경에서 대륙 내부의 열곡과 관련된 화산활동의 결과로 쌍봉형 마그마 활동이 있었다는 견해를 제시한 바 있다. 그리고 계명산층으로 명명되는 변성화산암을 형성시킨 화성활동이 신원생대(870-860 Ma)의 초대륙 로디니아의 분열과 관련한 열곡대에서 초래된 A-1형 마그마티즘의 산물임이 제안되었다(Koh *et al.*, 2005). 이러한 해석은 최근 아래산 일대에서 산출하는 화강암질암과 변성화산암에서 산출하는 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대가 870-860 Ma에 집중되고 있음이 이러한 해석을 지지한다(Koh *et al.*, 2011; 2012).

항공탐사에 의해 작성된 충주 1:50,000 지력도 및 방사능도(Koo *et al.*, 1986)에서 계명산층은 고자력이상대와 방사능이상대를 특징적으로 나타내고 있어 이

층은 명백하게 함철층이며 고방사능층임이 잘 확인된다. 이러한 연유로 계명산층 내에는 충주철광 및 금곡철광이 위치하며 철광상과 공간적 관련성을 나타내는 희토류 광체가 부존되고 있다(Fig. 1).

최근의 연구결과 계명산층을 구성하는 암상이 변성화산암, 변성심성암, 변성퇴적암, 함철 규암과 이를 관입하는 중생대 화성암류(화강암류, 섬강암, 반려암, 페그마타이트, 염기성 암맥, 석영맥 등)로 구성됨이 보고되었다(Koh *et al.*, 2011).

4. 광상

연구지역에서 아래산을 중심으로 발달하는 갈럼석 광체는 5개의 광체로 구획되어 기재된 바 있으며(Oh *et al.*, 1988; Oh *et al.*, 1989; Park *et al.*, 1993), 한 개의 광체가 단층에 의해 분리되고 변위되어 편의상 5개 광체로 구분하여 명명되었다. 갈럼석과 희토류 광물을 농집시킨 광체는 충주 화강암의 관입 접촉부에 발달하는 충상광체와 스카르대를 수반하는 열수교대광체로 해석한 바 있다(Park *et al.*, 1993).

Park과 Kim(1995)은 충주 철광상지역에서 산출하는 갈럼석, 퍼구소나이트 등을 함유하는 희토류광체의 형성에 대해 다양한 지질학적 작용(퇴적작용, 화산활동, 변성작용, 접촉교대 및 열수교대작용)을 제시하다가, 그 이후 알카리 화강암 및 페그마타이트의 관입과 희토류 광상의 직접적 관련성을 주장하기 시작하였다(Park *et al.*, 1997; Park and Kim, 1998; Kim *et al.*, 1998; Park *et al.*, 2005).

최근 연구된 아래산 일대 희토류 광상탐사 결과(Koh

Fig. 3. Outcrops of REE bearing pegmatite intruded meta-volcanics near the Chungju Fe deposits (A) and mountain Eorae area (B).

et al., 2011)에 의하면 광상의 형태는 불연속적이고 불규칙한 대상형태를 보이나 전반적으로 북동 주향과 북서 경사를 나타낸다(Fig. 2). 희토류 광체에는 항상 자철석이 수반되어 산출하나 자철석의 함유량과 희토류 광체의 상관성은 확실치 않다.

희토류 주 광체는 변성화산암(변성조면암)으로 구성되는 계명산층 내 배태되기도 하나 이를 관입하는 페그마타이트가 희토류 광체를 이루기도 한다(Fig. 2). 충주 철광상지역에 분포하는 페그마타이트는 수십 m 폭으로 발달하나 아래산 일대에서 분포하는 페그마타이트는 20-30cm 폭으로 소규모로 산출한다(Fig. 3).

지금까지의 연구결과에 의하면 연구지역 희토류 광상은 충주 철광상일대와 아래산 일대에 분포하며 변성조면암에 배태된 광체와 페그마타이트에 배태된 광체로 크게 구분되어진다. 아래산 일대 페그마타이트 모암인 희토류 광석의 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대가 약 190 Ma로서 주라기 화강암 관입과 관련되고 있음이 확인된다(Koh et al., 2011; 2012). 또한 변성화산암의 저어콘 연대가 870-860 Ma 인점을 고려한다면 희토류 광화시키는 신원생대와 주라기에 적어도 2회 이상 초래되었음을 지시한다(Koh et al., 2011; 2012).

4.1. 변성 화산암 모암 희토류 광상

REE 광물을 풍부하게 함유하는 변성화산암은 크게 세 가지의 암상을 나타낸다. 첫째, 가장 우세한 광석은 흑색의 자철석 띠와 홍색의 석영-장석대가 뚜렷이 발달하는 담홍색의 호상 변성화산암으로서, 석영-장석대는 핑크장석이 우세하다(Fig. 4A). 이 유형은 자철석은 연속적인 띠구조를 나타내며 재결정된 석영, 조장석과 미사장석이 모자이크 조직을 이루고 소량의 흑운모와

형석이 수반된다(Fig. 4B). 둘째, 약하고 불연속적인 흑색의 자철석 띠로 구성되는 담회색의 호상의 석영장석 질암도 일반적으로 산출된다(Fig. 4C). 구성 광물은 석영, 조장석 및 미사장석으로 주로 구성되고 소량의 흑운모와 형석이 수반된다(Fig. 4D). 셋째, 자철석과 산화철광물이 띠를 이루기도 하지만 광염상으로 산재되는 담갈색의 석영장석질암이다. 이는 다소 드물게 산출하는 경우이다(Fig. 4E). 이 광석은 석영, 미사장석, 조장석들이 재결정작용으로 모자이크 조직을 뚜렷이 나타내며(Fig. 4F), 자철석, 적철석, 흑운모 등이 수반된다.

4.2. 페그마타이트 모암 희토류 광상

연구지역은 계명산층을 구성하는 변성화산암이 주로 분포하고 있으며 석영맥과 페그마타이트맥이 소규모로 변성화산암의 엽리를 절단하면서 흔히 관입하고 있다. 모든 페그마타이트가 희토류광물을 이상적으로 함유하고 방사능 이상대를 보이진 않지만 아래산의 북동부에 위치한 소규모로 관입하는 페그마타이트와 충주 철광상이 위치하는 골재 채석장(주식회사 신진개발)에서는 보다 큰 규모의 페그마타이트에서 강한 방사능치를 나타낸다(Fig. 3A). 강한 방사능치를 나타내는 페그마타이트는 다양한 희토류 광물을 함유하고 있다.

충주 철광상 지역의 페그마타이트는 (주)신진개발의 골재채석장에서 잘 노출된다(Fig. 3A). 주로 조립질 석영과 분홍장석으로 구성되며, 소량의 녹니석화된 흑운모, 백운모, 자철석 및 황철석이 수반되며, 변성화산암과의 접촉부는 단층접촉에서는 녹니석 변질이 뚜렷하다. 장석류는 견운모화된 사장석이 풍부하게 산출하며 미사장석도 다소 풍부하게 산출된다.

아래산 북동편에서 소규모로 관입하는 페그마타이트(Fig. 3B)는 거정의 석영, 퍼어사이트질 장석, 미사장석 및 사장석으로 주로 구성되며 수 mm 직경의 자철석 반정이 우세하게 산출함이 특징으로서, 작은 크기의 소량의 자철석을 함유한 충주 철광상 지역의 페그마타이트와 차별성을 가진다.

5. 희토류광물 특성

5.1. 변성화산암 모암 희토류 광상

변성화산암으로 이루어진 아래산 희토류 광상에서는 갈럼석, 스핀, 인회석등의 함희토류 광물이 산출되며, 갈럼석이 가장 우세하게 구성된다(Fig. 7B).

갈럼석은 대부분 농집되어 산출되며, 밝은 갈색을 나타내며, 원형에서 타원형까지 다양한 형태와 크기로 산

Fig. 4. Representative ore slaps (A, C and E) and microphotographs of metavolcanic hosted REE ores (B, D and F).

출된다(Fig. 7B). 석영-장석-각섬석으로 구성되는 광석에서는 각섬석과 갈럼석이 엇리방향으로 배열하여 공생하고 있음을 보여준다(Fig. 7D). 스펀은 약 0.1 mm의 입자 크기를 보이며 타형의 불규칙한 형태를 나타내며 석영과 장석을 표면연정하여 산출된다(Fig. 7A). 저어콘은 5-10 μm 크기로 아주 작은, 물방울 형태로 광염되어 산재 분포하거나, 자철석 띠를 따라 미세한 저어콘들이 농집되어 산점상으로 산출한다(Fig. 7C).

5.2. 페그마타이트 모암 회토류 광상

어래산 북동부에 소규모의 페그마타이트맥이 변성화 산암을 관입한다(Fig. 2, Fig. 3B). 이 페그마타이트맥의 총회토류함량(TR_2O_3)은 0.63-2.58 wt% 를 나타내며 Y, La, Ce, Nd, Gd, Dy, Er, Tm, Yb 등이 매우 높은 함량비를 나타낸다(Koh *et al.*, 2011).

이 페그마타이트에서 산출되는 회토류 광물은 페구

소나이트(fergusonite), 카르나수르타이트(karnasurtite), 저어콘 및 토륨석(thorite)으로 주로 구성된다(Fig. 5, Fig. 6). 페구소나이트는 적갈색을 띠고 간섬석은 매우 화려하며 입자 크기는 0.5 mm 내외이다. 결정형태는 매우 다양하나 주상 및 타원형태가 우세하다. 저어콘, 형석 및 카르나수르타이트와 수반됨이 특징이다(Fig. 5, Fig. 6B). 주로 구성되는 석영과 장석을 표면연정(overgrowth)하여 산출하는 것은 석영, 장석 이후에 형성되었음을 지시한다(Fig. 5A). 카르나수르타이트는 밝은 적갈색을 띠며, 입자크기는 0.3-0.5 mm 로서 페구소나이트 및 저어콘과 수반되고, 입자 주변부는 변질 및 산화된 형태를 보이며 미약하고 불규칙한 누대구조를 보인다(Fig. 5A). 이는 후방산란전자이미지(BSI: Back Scattering Image)로 관찰하면 누대구조가 잘 보이는데, REE 함량의 변화에 의한 것으로 생각된다. 토륨석은 카르나수르타이트 내 포획되어 산출하거나 주

Fig. 5. Microphotographs of pegmatite hosted REE ores (A: under crossed nicol, B: under open nicol). Abbreviation = Fgn: fergusonite, Kar: karnasurtite, Zr: zircon, Fl: fluorite.

Fig. 6. Back-scattered electron image (BEI) of pegmatite-hosted REE ores. Abbreviation = Kar: karnasurtite, To: thorite, Fgn: fergusonite, Zr: zircon.

변부 석영과 장석과의 접촉부에서 산출됨이 특징이다 (Fig. 6A).

BSI는 희토류광물의 함량이 높을수록 밝은 빛을 띠는데 약 79%의 ThO_2 함량을 보이는 토륨석의 경우 카르나수르타이트에 비해 매우 밝은 색으로 나타난다 (Fig. 6A). 피구소나이트도 BSI에서 희토류원소의 함량에 따라 주변의 저어콘보다 밝은색의 이미지로 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 6B).

6. 광물화학적 특성

6.1. 갈럼석

어래산의 변성화산암 모암의 광체에서 주로 산출되는 함희토류 광물인 갈럼석을 전자현미분석(Electron Probe X-ray MicroAnalysis)을 하였다. 13개의 갈럼석 결정에서 총 27지점 분석 결과 희토류 원소의 함량은 각각 TR_2O_3 는 23.89-29.19 wt%, La_2O_3 는 4.71-9.92

Fig. 7. Microphotographs of metavolcanic-hosted REE ores. Abbreviation = Spn: sphene, An: allanite, Mt: magnetite, Zr: zircon, Amp: amphibole.

wt%, Ce_2O_3 는 11.30-14.33 wt%의 범위로 나타나며, Y_2O_3 는 0.11-0.29 wt%, ThO_2 는 0.12-0.94 wt%로 나타난다(Table 1). 갈럼석의 이상적인 화학식은 $(\text{Ce}, \text{Ca}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$ 의 비율이며, 분석 결과로 계산된 화학식은 $(\text{Ca}, \text{Y}, \text{REE}, \text{Th})_{2.10}(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Ti}, \text{Mn}, \text{Fe}^{3+})_{2.77}(\text{SiO}_4)_{2.98}(\text{OH})$ 이다.

갈럼석의 화학조성은 Dollase(1971)의 정의에 의해서 $\text{A}_2\text{M}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{OH}$ 의 화학식으로 표현된다. A사이트는 각각 9배위수와 10배위수를 A(1)과 A(2)사이트로 이루어진다. A(1) 사이트는 항상 Ca^{2+} 로 채워지고, 보다 큰 A(2) 사이트는 REE^{3+} , Th^{4+} , Sr^{2+} , Mn^{2+} 가 Ca^{2+} 를 치환하면서 존재한다. 3개의 팔면체 사이트가 $\text{M}(1) < \text{M}(2) < \text{M}(3)$ 크기순으로 구성된다. M(2)사이트는 항상 Al^{3+} 로 채워지며, M(1)과 M(3)은 Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{2+} , Ti^{4+} , Mg^{2+} 에 의해 채워진다. Al^{3+} 이외의 양이온들은 M(3)사이트에 치환되는 경향이 있다. 갈럼석은 $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{OH}$ 의 화학조성을 갖는 녹염석과 보통 $\text{Ca}^{2+} + \text{Fe}^{3+} = \text{REE}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ 의 쌍치환(couple substitution)관계를 이루며 화학조성의 변화는 주로 $\text{Ca}^{2+} = \text{REE}^{3+}$ 와 $\text{Al}^{3+} = \text{Fe}^{2+}$ 의 두 치환관계와 밀접한 관련을 갖는다(Dollase, 1971). 갈럼

석의 주 구성원소는 Si, Al, Fe, Ca 및 REE로 구성되며, 미량의 Mg, Ti, Mn, Th, Y 등이 수반된다. 이런 갈럼석의 화학적 특성에 의하면 A(2) 사이트에서 Ca-Th-REE의 치환이 희토류 함량비를 결정하는 요인이다.

갈럼석의 결정화학적 특성을 고려할 때 연구지역의 갈럼석의 희토류함량은 철 함량과는 별다른 상관관계를 보이지 않으며 치환관계에 있는 Ca와 뚜렷한 상관관계를 보인다(Fig. 8A and B). 연구지역의 갈럼석의 A(2) 사이트의 치환도를 알아보기 위해 상관 삼각 다이어그램을 이용하여 도시하였다(Fig. 9). 그 결과 아래 산에서 산출되는 갈럼석의 경우 Ca-Th-REE의 치환반응에 있어서 Th의 치환율은 지극히 적으며, 대부분이 Ca와 REE가 치환되어 광물을 이루고 있으며, 69-72%의 치환율을 보이고 있다. 이는 Ca가 REE로의 치환이 Th와 치환보다 우세하게 이루어졌음을 말해준다. 또한 구조적인 쌍치환의 관계로 $\text{CaO} + \text{ThO}_2$ 의 함량이 감소할수록 REE의 함량이 증가하는 갈럼석의 전형적인 특징도 확인할 수 있다(Fig. 8C). 또한 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 는 약한 부(-)의 상관관계를 가지며, 이는 갈럼석의 결정화학적 특성과 일치한다(Fig. 8D).

Table 1. Microprobe analyses of allanite from the metavolcanic-hosted REE ore (wt%)

Type	CJ-1	CJ-2	CJ-3	CJ-4	CJ-5	CJ-6	CJ-7	CJ-8	CJ-9	CJ-10	CJ-11	CJ-12	CJ-13	CJ-14
MgO	1.21	1.08	1.37	1.07	1.03	1.08	1.27	1.48	1.10	1.33	1.23	1.41	1.25	1.34
Al ₂ O ₃	11.49	11.95	10.74	11.15	12.02	11.59	10.24	10.83	10.89	10.06	10.47	11.08	10.68	11.03
SiO ₂	30.95	31.59	30.68	30.45	31.13	30.96	30.81	30.73	30.92	30.44	30.84	31.40	31.02	31.68
CaO	11.15	11.24	10.69	10.08	11.72	11.13	10.09	10.42	10.38	9.47	9.40	11.42	10.61	11.08
TiO ₂	0.99	0.93	1.15	0.95	0.82	0.83	1.11	1.00	1.14	0.95	0.77	0.95	1.09	1.08
MnO	1.09	0.99	1.07	1.23	1.09	1.05	1.15	1.03	1.27	1.08	1.21	1.04	1.03	1.08
Fe ₂ O ₃	17.62	17.04	17.06	17.55	17.03	16.92	18.24	17.72	17.22	17.79	18.14	17.87	17.72	17.62
Y ₂ O ₃	0.25	0.11	0.27	0.22	0.22	0.21	0.11	0.18	0.21	0.15	0.14	0.23	0.19	0.25
La ₂ O ₃	5.49	5.48	6.90	6.11	5.45	5.82	6.99	5.56	5.94	9.92	8.41	5.41	6.15	5.85
Ce ₂ O ₃	12.02	12.40	12.50	13.72	12.40	12.63	13.31	12.28	13.32	12.73	14.33	11.44	13.05	11.73
Pr ₂ O ₃	1.75	1.46	1.77	1.80	1.53	1.71	1.83	1.64	1.75	1.91	2.01	1.73	1.93	1.65
Nd ₂ O ₃	3.95	3.27	2.99	3.72	3.49	3.62	3.02	3.98	3.59	1.95	2.16	3.86	3.43	3.43
Sm ₂ O ₃	0.45	0.46	0.37	0.31	0.41	0.41	0.27	0.43	0.36	0.21	0.26	0.40	0.31	0.45
Eu ₂ O ₃	0.22	0.25	0.19	0.22	0.23	0.23	0.12	0.26	0.25	0.12	0.10	0.10	0.20	0.18
Gd ₂ O ₃	1.17	1.23	1.15	1.31	1.19	1.20	1.14	1.19	1.35	1.40	1.35	1.21	1.18	1.24
Tb ₂ O ₃	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Dy ₂ O ₃	0.34	0.30	0.29	0.33	0.25	0.32	0.29	0.30	0.48	0.33	0.29	0.29	0.34	0.36
Yb ₂ O ₃	0.08	0.08	0.08	0.06	0.12	0.06	0.25	0.06	0.06	0.09	0.07	0.12	0.13	0.06
ThO ₂	0.61	0.49	0.65	0.44	0.53	0.38	0.17	0.60	0.42	0.14	0.12	0.49	0.33	0.64
Total	100.83	100.23	99.93	100.67	100.65	100.09	99.63	99.83	100.61	100.09	101.18	100.45	100.63	100.66
TR ₂ O ₃	25.79	25.09	25.09	26.57	27.86	25.35	26.27	27.38	25.95	27.39	28.89	29.19	24.86	26.97

Type	CJ-15	CJ-16	CJ-17	CJ-18	CJ-19	CJ-20	CJ-21	CJ-22	CJ-23	CJ-24	CJ-25	CJ-26	CJ-27
MgO	1.23	1.17	0.93	1.16	1.56	1.01	1.33	0.96	1.01	0.88	1.05	1.19	1.22
Al ₂ O ₃	10.87	9.91	10.52	9.83	9.40	11.98	10.38	12.36	11.91	12.71	11.07	9.29	10.41
SiO ₂	31.74	30.26	31.58	30.70	30.31	30.74	30.36	31.02	31.04	31.54	30.68	30.43	30.64
CaO	11.08	9.35	11.98	10.34	10.28	11.09	9.74	11.37	11.39	11.92	10.01	10.62	11.12
TiO ₂	1.01	0.72	0.92	0.93	1.08	0.74	0.84	0.71	1.02	0.75	0.67	0.92	0.96
MnO	1.14	1.91	1.48	1.58	1.47	1.55	1.54	1.46	1.48	1.38	1.38	1.45	1.49
Fe ₂ O ₃	17.60	18.48	17.62	18.29	18.16	17.12	18.58	17.28	17.06	17.20	18.10	19.30	18.35
Y ₂ O ₃	0.11	0.11	0.29	0.11	0.23	0.27	0.15	0.19	0.26	0.21	0.22	0.14	0.17
La ₂ O ₃	5.82	8.04	5.64	6.47	5.77	5.12	6.64	4.71	5.63	5.31	6.13	8.80	6.09
Ce ₂ O ₃	11.83	13.32	11.30	13.08	13.31	11.94	13.20	11.57	11.55	11.35	12.69	12.54	12.87
Pr ₂ O ₃	1.68	1.86	1.67	1.85	1.79	1.59	1.78	1.66	1.61	1.48	1.84	1.68	1.56
Nd ₂ O ₃	3.24	2.89	3.13	3.35	3.94	3.86	3.47	3.90	3.64	3.05	3.84	1.92	2.83
Sm ₂ O ₃	0.35	0.31	0.53	0.35	0.45	0.39	0.42	0.45	0.45	0.48	0.38	0.21	0.31
Eu ₂ O ₃	0.18	0.15	0.07	0.17	0.25	0.10	0.15	0.20	0.19	0.16	0.09	0.19	0.07
Gd ₂ O ₃	1.35	1.22	1.26	1.71	1.23	1.17	1.21	1.20	1.20	1.19	1.33	1.22	1.12
Tb ₂ O ₃	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Dy ₂ O ₃	0.33	0.59	0.06	0.10	0.50	0.48	0.43	0.42	0.48	0.42	0.44	0.44	0.59
Yb ₂ O ₃	0.14	0.06	0.09	0.38	0.08	0.06	0.09	0.18	0.11	0.17	0.08	0.09	0.06
ThO ₂	0.71	0.15	0.94	0.32	0.64	0.74	0.37	0.68	0.37	0.57	0.45	0.23	0.40
Total	100.29	100.44	99.89	100.74	100.46	99.87	100.66	100.32	100.41	100.78	100.45	100.66	100.19
TR ₂ O ₃	25.09	28.61	24.12	27.65	27.62	25.05	27.59	24.55	25.19	23.89	27.10	27.30	25.74

변성화산암에서 산출되는 갈럼석의 기원물질과 생성 환경을 비교하기 위해서 Boynton(1984)의 콘드라이트(chondrite) 함량비로 규격화 해보았다. 연구지역의 갈럼석은 LREE가 매우 부화되어 있고, Sm이 강한 음

의 이상치를 보여주고 있다. 또한 Eu 이상치(Eu/Eu^* ; Henderson, 1984)는 0.03~0.92, 평균 0.55의 값을 갖는다. La/Gd은 3.90~7.55, 평균 5.27이며, 특히 Gd이 부화됨이 특징이다(Fig. 10).

Fig. 8. Variation diagram for the allanite. A: TREO versus Fe₂O₃, B: TREO versus CaO, C: TREO versus CaO+ThO₂, and D: Al₂O₃ versus Fe₂O₃.

Fig. 9. REE-Ca-Th diagram (unit: %; modified from Chesner and Ettlinger, 1989).

이와 같은 결과는 연구지역의 갈럼석이 LREE가 매우 높은 Ce계열의 갈럼석에 해당된다. 또한 연구지역의 갈럼석의 결정화학적 특성중 Al과 Y+REE+Th을 이용하여 녹염석군 내에 도시하여 보았다. 그 결과 연구지역의 갈럼석은 Fe의 함량이 일반 갈럼석보다 높은 Ferriallanite-(Ce)에 해당된다(Fig. 11).

6.2. 퍼구소나이트

연구지역의 페그마타이트 세맥에서 산출되는 퍼구소

Fig. 10. Chondrite-normalized REE patterns for the allanite (normalizing data from boynton, 1984).

Fig. 11. REE versus Al(cations per formula unit) diagram showing the chemical relationships in the system allanite-ferriallanite-epidote-clinozoisite. Lines radiating from the clinozoisite endmember represent lines of constant Fe-oxidation state and are labeled for Fe³⁺/Fe_{total}. This diagram, introduced by Petrik *et al.* (1995), can be used to estimate the proportions of Fe²⁺ and Fe³⁺ in compositions within this chemical system.

나이트의 광물화학적 특성을 연구하기 위해 구성원소의 함량분석을 하였다. 분석은 갈럼석과 동일한 전자현미분석(EPMA)을 수행하였다. 퍼구소나이트에서 산출되는 Y는 18.71-22.11 wt% 이며, Nb는 45.09-48.87 wt%의 범위를 나타내고, Y를 포함한 TR₂O₃의 함량은 43.43-49.10 wt% 이다. 이를 바탕으로 계산된 O 4개기준의 화학식은 (Y, REE, Th, K, Ca, Si, Mn, W, Pb)_{0.98}(Nb, Ta, Ti, Fe)_{1.01}O₄ 이다.

희토류 원소 중에서 Y를 제외한 다른종의 원소의 함량은 매우 적은 것을 알 수 있다(Table 2). 퍼구소나이트는 Y-Nb(Ta)를 함유하는 복합 산화물인 A-B 산화광물로서, REE가 풍부하고 화학조성은 Miyawaki, Nakai (1987)에 의한 구조식으로 ABO 형태로 표현되

Table 2. Microprobe analyses of fergusonite from the pegmatite (wt%)

Type	CJ-7	CJ-8	CJ-9	CJ-10	CJ-11	CJ-12	CJ-13	CJ-14	CJ-15	CJ-16
NaO	0	0	0.42	0	0	0.42	0	0	0.42	0
SiO ₂	0.56	0.57	0.55	0.67	0.70	0.60	0.63	0.63	0.59	0
K ₂ O	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0	0.09	0.09	0
CaO	0.75	0.96	0.90	0.92	0.82	0.88	0.86	0.99	0.91	0.76
TiO ₂	0.96	1.24	0.74	1.07	0.88	1.11	1.30	1.05	1.06	0.58
MnO	0.29	0.26	0.26	0.23	0.23	0.25	0	0.24	0.23	0
Y ₂ O ₃	20.11	19.52	19.93	19.77	21.03	19.27	20.72	19.42	20.16	22.11
Nb ₂ O ₅	47.45	45.91	46.32	46.90	46.91	46.36	47.59	47.53	46.99	48.87
La ₂ O ₃	0.25	0.29	0.21	0.22	0.15	0.38	0.10	0.15	0.22	0.10
Ce ₂ O ₃	2.33	2.75	2.35	1.93	1.73	2.87	1.10	1.53	1.81	1.24
Pr ₂ O ₃	0.54	0.61	0.60	0.46	0.49	0.55	0.33	0.42	0.46	0.38
Nd ₂ O ₃	3.62	4.07	4.14	3.37	2.76	4.04	3.22	3.77	3.55	3.69
Sm ₂ O ₃	1.76	1.86	1.91	1.73	1.79	1.83	1.89	1.96	1.79	2.13
Eu ₂ O ₃	0.17	0.23	0.18	0.13	0.23	0.27	0.22	0.25	0.19	0.18
Gd ₂ O ₃	2.78	2.95	2.99	2.59	2.86	2.83	3.20	2.67	2.87	3.02
Tb ₂ O ₃	0.30	0.58	0.58	0.54	0.54	0.43	0.62	0.68	0.54	0.61
Dy ₂ O ₃	4.57	4.51	4.83	4.72	4.69	4.51	5.09	5.00	4.80	5.00
Ho ₂ O ₃	2.46	2.31	2.42	2.30	2.34	2.31	2.88	2.44	2.33	2.66
Er ₂ O ₃	3.65	3.12	2.99	2.99	3.17	2.95	3.37	3.07	3.31	3.29
Tm ₂ O ₃	0.48	0.66	0.66	0.61	0.68	0.58	0.77	0.65	0.82	0.66
Yb ₂ O ₃	3.31	2.96	2.93	3.08	3.37	2.96	3.20	2.77	3.12	3.33
Lu ₂ O ₃	0.30	0.62	0.59	0.65	0.74	0.61	0.71	0.59	0.66	0.68
Ta ₂ O ₅	0.45	0.42	0.50	0.45	0.47	0.44	0.36	0.52	0.51	0.42
WO ₃	0.41	0.35	0.30	0	0.30	0.34	0.43	0.41	0.37	0.40
PbO	0.53	0.50	0.35	0.43	0.43	0.42	0.44	0.39	0.45	0.42
ThO ₂	4.88	5.78	4.05	5.92	4.22	5.59	5.07	5.86	5.19	2.64
Total	103.01	103.12	101.77	101.78	101.61	102.89	104.10	103.10	103.44	103.18
TR ₂ O ₃	46.63	47.03	47.30	45.09	46.55	46.39	47.42	45.39	46.64	49.10

Type	CJ-17	CJ-18	CJ-19	CJ-20	CJ-21	CJ-22	CJ-23	CJ-24	CJ-25	CJ-26
NaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO ₂	0.55	0.58	1.93	0.61	0.58	0.58	0.64	0.58	0.58	0.65
K ₂ O	0.10	0	0.10	0.10	0.09	0	0.10	0.09	0.10	0
CaO	0.89	0.94	0.94	0.98	0.90	0.93	0.95	0.80	0.66	0.77
TiO ₂	0.94	1.27	1.34	1.19	1.18	1.17	1.21	1.22	0.72	1.25
MnO	0.25	0.26	0.25	0.24	0.23	0.24	0.27	0.26	0.25	0.24
Y ₂ O ₃	21.15	19.64	19.88	19.44	20.70	19.86	20.08	19.99	21.29	18.71
Nb ₂ O ₅	48.50	45.09	47.22	47.52	47.94	48.07	47.53	46.98	48.49	46.17
La ₂ O ₃	0.26	0.41	0.40	0.34	0.22	0.25	0.27	0.31	0	0.36
Ce ₂ O ₃	1.83	2.52	2.28	2.50	1.81	1.95	2.03	1.89	1.07	2.75
Pr ₂ O ₃	0.43	0.54	0.49	0.52	0.35	0.45	0.51	0.32	0.39	0.61
Nd ₂ O ₃	3.24	3.68	0	3.87	3.32	3.38	3.39	3.28	3.35	3.99
Sm ₂ O ₃	1.75	2.14	1.95	1.90	1.78	1.83	1.90	1.58	1.95	1.95
Eu ₂ O ₃	0.14	0.23	0.24	0.18	0.20	0.19	0.18	0.19	0.22	0.34
Gd ₂ O ₃	2.98	3.22	3.00	3.10	3.19	3.05	3.08	2.96	3.03	3.12
Tb ₂ O ₃	0.59	0.55	0.59	0.60	0.60	0.61	0.57	0.64	0.60	0.58
Dy ₂ O ₃	5.16	4.51	5.01	4.74	4.90	5.13	4.79	5.19	5.12	4.72
Ho ₂ O ₃	2.58	2.55	2.46	2.53	2.43	2.64	2.46	2.55	2.67	2.37
Er ₂ O ₃	3.30	3.09	3.03	3.14	3.23	3.08	3.09	3.53	3.54	3.03
Tm ₂ O ₃	0.68	0.69	0.73	0.58	0.58	0.67	0.71	0.63	0.75	0.73
Yb ₂ O ₃	3.18	2.63	2.76	2.76	3.01	3.00	2.95	3.20	3.18	2.78
Lu ₂ O ₃	0.66	0.81	0.61	0.52	0.66	0.61	0.80	0.84	0.73	0.47
Ta ₂ O ₅	0.42	0.33	0.39	0.40	0.38	0.49	0.42	0.32	0.29	0.34
WO ₃	0.43	0.38	0.38	0.27	0.37	0.40	0.30	0.47	0.36	0.31
PbO	0.34	0.51	0.51	0.53	0.37	0.33	0.46	0.49	0.47	0.42
ThO ₂	4.48	6.18	5.71	6.09	5.70	5.72	6.17	5.56	4.78	5.88
Total	104.83	102.74	102.19	104.64	104.73	104.63	104.85	103.86	104.60	102.97
TR ₂ O ₃	47.93	47.21	43.43	46.72	46.99	46.70	46.79	47.09	47.91	46.52

며 이상적 비율은 1:1이다. A-사이트는 이온반경이 크고, 8배위의 낮은 원자가의 양이온으로 이루어지며, B-사이트는 상대적으로 이온반경이 작고 6배위의 높은 원자가의 양이온으로 구성된다. 이상적인 화학조성은 YNbO_4 이지만 Y 자리에 Er, U, Th, Ca, Fe 및 Ce족 희토류원소 (La, Nd) 등이 치환되고, Nb 자리에 Ta, Ti 등이 치환되며 소량의 물이 존재한다. Nb, Th 및 Y 등의 원소를 비롯하여 미량의 Nd와 Pb 등이 함유되며, 이들 원소의 치환에 의해 고용체의 성분이 광범위하게 변화한다(Park and Kim, 1998).

연구지역에 산출하는 퍼구소나이트는 A 사이트의 Y 과 치환관계에 있는 Th, REE, Ca 및 Si 함량은 각각 ThO_2 2.64-6.18 wt%, TR_2O_3 43.43-49.10 wt%, CaO 0.66-0.99 wt%, SiO_2 0-1.93 wt% 의 함량을 보인다. B 사이트의 니오븀과의 치환 관계에 있는 탄탈륨, 티타늄은 각각 Ta_2O_5 0.29-0.52 wt%, TiO_2

Fig. 12. Variation diagram for the fergusonite. A: Y versus Ca+Th, B: Nb versus Ti+Ta+Fe, and C: Y_2O_3 versus Nb_2O_5 .

Table 3. Microprobe analyses of karnasurtite and Thorite from the pegmatite (wt%)

Type	CJ-29	CJ-30	CJ-31	CJ-32	CJ-33	CJ-34	CJ-35	CJ-36	CJ-37	CJ-38	CJ-39	CJ-40	CJ-41	CJ-42
NaO	0.55	0.46	0.43	0.56	0.46	0.43	0.46	0.47	0.41	0.42	0.47	0.47	0.44	0.47
MgO	0.43	0.46	0.47	0.42	0.43	0.44	0.44	0.44	0	0	0.41	0.41	0.44	0.43
Al_2O_3	1.81	0.31	0.32	1.16	0.46	0.29	0.32	0.55	0.47	0.49	0.53	0.60	0.31	0.31
SiO_2	11.75	19.48	19.26	15.01	17.12	19.32	19.59	14.60	1.19	1.32	15.71	14.80	19.49	19.34
P_2O_5	0.52	0.35	0.29	0.54	0	0.29	0.31	5.25	1.47	1.57	2.89	3.40	0.32	0.33
K_2O	0.25	0	0.09	0.26	0.11	0.11	0.10	0.13	0.11	0.10	0.16	0.13	0.09	0.09
CaO	0.74	2.05	2.12	1.00	1.49	1.86	1.85	1.17	1.10	1.01	1.20	1.03	1.80	1.96
TiO_2	28.01	13.93	14.07	20.86	18.22	14.53	14.19	20.35	21.28	22.28	19.16	23.33	14.89	13.60
MnO	0.24	1.21	1.14	0.31	0.56	0.87	0.85	0.42	0	0.36	0.53	0.51	0.79	0.79
Fe_2O_3	23.20	10.67	10.77	7.13	14.33	11.89	11.72	15.74	3.95	4.41	15.29	17.07	11.16	11.75
Y_2O_3	0.45	1.11	0.98	1.30	0.77	0.79	0.78	0.56	1.11	1.12	0.68	0.63	0.92	0.90
Nb_2O_5	5.26	2.88	2.74	8.61	4.30	2.77	2.89	5.75	4.23	4.27	5.18	5.06	2.67	2.67
La_2O_3	2.15	8.30	8.50	3.18	6.25	8.25	8.54	4.93	9.16	8.98	5.93	4.64	8.51	8.30
Ce_2O_3	9.16	21.98	22.32	14.68	16.62	21.58	21.71	12.41	22.88	22.31	15.06	12.23	21.56	21.03
Pr_2O_3	0.90	3.04	2.80	1.55	2.46	3.41	3.00	1.80	3.02	3.09	2.34	1.73	3.06	2.92
Nd_2O_3	1.98	6.35	6.16	3.20	5.88	7.79	8.16	4.67	8.41	8.04	5.81	3.89	7.88	7.88
Sm_2O_3	0.42	0.94	0.97	0.74	0.96	1.42	1.35	0.76	1.21	1.39	0.80	0.56	1.38	1.33
Eu_2O_3	0.12	0.38	0.53	0.18	0.35	0.68	0.41	0.36	0.56	0.60	0.41	0.39	0.43	0.44
Gd_2O_3	0.85	2.32	2.20	1.65	2.07	2.67	2.57	1.71	2.98	2.81	1.86	1.62	2.45	2.53
Dy_2O_3	0.14	0.61	0.53	0.39	0.38	0.62	0.58	0.22	0.44	0.43	0.49	0.25	0.75	0.83
Ho_2O_3	0	0.08	0	0.08	0.07	0	0.24	0	0	0.18	0.21	0	0.19	0.19
Tm_2O_3	0	0	0.14	0	0	0.24	0.29	0.21	0.27	0.19	0	0.30	0	0.14
Yb_2O_3	0	0	0	0.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lu_2O_3	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0	0.08	0	0
Ta_2O_5	0.23	0.09	0	0.16	0.11	0	0	0.16	0.21	0.21	0.22	0.12	0	0
PbO	0.26	0.39	0.22	0.18	0	0.07	0.12	0.19	0.14	0.24	0.19	0.36	0.08	0
ThO_2	7.46	4.84	4.42	10.08	2.52	1.83	1.98	4.53	3.18	3.23	2.76	4.04	1.88	1.77
Total	96.88	102.24	101.44	93.54	95.91	102.26	102.44	97.39	87.79	89.04	98.28	97.66	101.49	100.00
TR_2O_3	16.16	45.12	45.13	27.26	35.80	47.55	47.64	27.64	50.06	49.13	33.59	26.32	47.13	46.48

0.58-1.34 wt% 의 범위로 나타나며 미량으로 존재하여 대부분 B 사이트는 Nb으로 구성되어 있음을 알 수 있다. Y과 치환관계에 있는 Ca+Th 사이트의 치환관계는 약한 부(-)의 관계를 나타내고 있으며(Fig. 12A), Nb과의 치환관계에 있는 Ti+Ta+Fe 의 치환관계도 약한 부(-)의 관계를 보여주고 있다(Fig. 12B). 또한 Y₂O₃와 Nb₂O₅만의 비율로 상관도를 확인 한 결과 연구지역에서 산출되는 퍼구소나이트는 Y과 Nb의 이상적인 비율인 1:1 비율과 달리 약 1:1.5의 비율을 나타내고 있으며, Nb의 함량이 Y 의 함량보다 더 많으며, Y 사이트 즉, A 사이트에서 다른 희토류 원소의 치환이 더 진행되었음을 의미한다(Fig. 12C).

6.3. 카르나수르타이트

페그마타이트에서 관찰된 카르나수르타이트는 알칼리 광물과 연관되어진 페그마타이트 스톱 환경에서 산

출되는 함 희토류 광물로서 최초 러시아의 콜라반도내 카르나수르트 산(Mt. Karnasurt) 에서 발견되어 새로운 광물로 보고되었다(Kuz'menko and Kozhanov, 1959). 카르나수르타이트는 규산염광물로서 Al, Ce, H, O, Si, Ti 를 필수 원소로 갖는 광물이며, 소량의 물을 포함한다. 연구지역의 카르나수르타이트는 필수 원소의 함량 및 REE의 함량이 굉장히 다양한 범위를 갖는 결과를 보여준다. REE 및 Th를 치환하는 A 사이트의 조성은 Ce₂O₃ 9.16-22.88 wt%, La₂O₃ 2.15-9.16 wt%, ThO₂ 0.44-10.8 wt% 까지 그 함량 범위가 굉장히 다양하다. 현미경 관찰에서 확인한 누대구조에 따른 함량의 변화로 생각되어진다. 또한, Nb₂O₅는 대체로 2.67-5.97 wt% 의 조성을 보이며, TiO₂ 또한 2.74-28.01 wt% 다양한 조성을 보여준다. Al₂O₃는 0.31-6.83 wt%, FeO는 3.83-23.09 wt% 의 범위를 나타낸다(Table 3).

Table 3. Continued

Type	CJ-43	CJ-44	CJ-45	CJ-46	CJ-47	CJ-48	CJ-49	CJ-50	CJ-51	CJ-52	CJ-53	CJ-54	CJ-55	CJ-56
NaO	0.47	0.46	0.48	0.48	0.44	0.45	0.50	0.47	0.43	0.44	0.51	0.53	0.52	0.50
MgO	0.42	0.41	0.76	0.72	0.42	0.42	0.43	0.41	0.43	0.43	0.42	0.47	0	0.40
Al ₂ O ₃	0.60	0.49	6.52	6.83	0.50	0.46	0.58	0.41	0.29	0.32	0.73	0.71	0	0
SiO ₂	15.86	17.25	29.75	29.79	18.00	17.85	13.79	17.30	19.43	19.51	14.01	11.63	18.31	17.90
P2O5	1.82	1.23	0	0.28	1.09	1.38	4.66	2.66	0.30	0.29	4.15	4.97	0.45	0.28
K ₂ O	0.15	0.10	0	0	0.11	0.12	0.14	0.15	0.11	0.09	0.17	0.25	0.12	0.21
CaO	0.82	0.96	7.54	7.86	1.14	1.11	0.97	1.35	1.76	1.82	1.01	1.28	0.33	0.32
TiO ₂	24.23	21.10	2.87	2.74	19.84	20.67	23.40	17.75	14.05	13.98	23.95	27.08	0	0.44
MnO	0.31	0.46	2.95	2.55	0.63	0.55	0.51	0.57	0.85	0.90	0.43	0.36	0	0
Fe ₂ O ₃	19.17	17.61	19.72	19.13	16.01	16.12	18.97	15.83	12.04	11.77	17.40	17.23	0.27	0.32
Y ₂ O ₃	0.48	0.58	0.25	0.26	0.88	0.26	0.51	0.61	0.64	0.74	0.63	0.58	0.21	0.57
Nb ₂ O ₅	4.88	4.29	0.17	0.19	4.04	4.19	4.54	4.38	2.88	2.99	4.71	5.97	0.17	0.16
La ₂ O ₃	4.03	4.85	5.26	5.13	6.03	5.69	4.46	6.76	8.82	8.67	4.37	3.15	0	0
Ce ₂ O ₃	10.65	12.92	13.00	13.33	15.02	14.35	12.07	16.88	21.94	21.90	13.89	10.75	0	0
Pr ₂ O ₃	1.42	1.68	1.87	1.71	1.95	1.92	1.67	2.46	2.72	3.10	1.39	1.08	0	0
Nd ₂ O ₃	3.80	4.60	4.22	4.68	5.32	5.43	3.20	6.01	7.97	8.03	3.23	2.16	0	0
Sm ₂ O ₃	0.70	0.86	0.57	0.57	0.93	0.80	0.40	0.98	1.15	1.28	0.46	0.16	0	0
Eu ₂ O ₃	0.15	0.37	0.30	0.31	0.24	0.32	0.13	0.38	0.47	0.51	0.19	0.12	0	0
Gd ₂ O ₃	1.22	1.48	1.34	1.24	1.80	1.68	1.21	2.14	2.27	2.38	1.22	0.93	0	0
Dy ₂ O ₃	0.25	0.51	1.02	0.75	0.36	0.51	0.16	0.53	0.69	0.78	0.27	0.23	0	0
Ho ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.07	0	0.11	0	0.14	0	0	0	0
Tm ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
Lu ₂ O ₃	0	0	0.13	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0
Ta ₂ O ₅	0.24	0.16	0	0	0	0.20	0.27	0.13	0	0	0.26	0.46	0	0
PbO	0	0.17	0.14	0.10	0.19	0.20	0.27	0.18	0.08	0.16	0.39	0.35	0.71	0.83
ThO ₂	4.86	3.31	0.51	0.44	2.57	3.23	4.32	2.54	2.23	1.64	4.42	5.77	79.86	79.48
Total	96.52	95.82	99.38	99.10	97.51	98.18	97.15	101.01	101.58	101.89	98.16	96.22	100.95	101.41
TR ₂ O ₃	22.71	27.83	27.96	27.99	32.55	31.24	23.80	36.87	46.68	47.54	25.63	19.15	0.44	0.49

Fig. 13. Variation diagram for the karnasurtite. A: TiO_2 versus SiO_2 , B: ThO_2 versus $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$, C: Nb_2O_5 versus TiO_2 , D: Fe_2O_3 versus Al_2O_3 , and E: TR_2O_3 versus $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$.

카르나수르타이트를 이루는 결정구조의 화학적 특성을 알아보기 위해 다양한 상관 그래프를 나타내 보았다. TiO_2 의 함량이 높을수록 SiO_2 의 함량이 낮아지는 상대성을 보이며 사이트에 따라 특징적인 치환관계를 나타낸다(Fig. 13A). 또한, 희토류 원소를 주로 치환하여 위치하는 ThO_2 와 $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$ 의 상관관계는 ThO_2 의 함량이 높을수록 $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$ 의 함량이 낮아지는 약한 부(-)의 패턴을 확인할 수 있다(Fig. 13B). 또한 TiO_2 와 Nb_2O_5 는 TiO_2 의 함량이 증가함에 따라 Nb_2O_5 의 함량도 증가하는 정(+)의 상관관계를 보이며, 이는 두 원소가 동일한 사이트를 구성하지만 치환관계를 이루고 있지 않음을 의미한다(Fig. 13C). 또한 다른 하나의 사이트를 이루는 Al_2O_3 과 Fe_2O_3 의 상관그래프에서는 Fe_2O_3 의 함량 변화와 상관없이 일정한 Al_2O_3 값을 나타낸다(Fig. 13D). TR_2O_3 의 함량은 주로 구성하고 있는 $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량이 증가할수록 증가하는 경향

을 보이며, 철 성분과 연관성을 보인다(Fig. 13E).

BSI 상에서 확실한 누대구조를 볼 수 있으며, 일반적으로 함회토류 광물의 경우 Th 함량에 따라 밝기가 달라지는 것으로 알려졌으나, 카르나수르타이트는 Th의 함량과 BSI상에서의 밝기는 상관성을 보이지 않는다. 주변부는 변질에 의해 좀 더 어두운 색을 띠며 중심부를 갈수록 밝은 색을 보인다. 일부 토륨석을 포획한 입자들과 비교해보면 Th의 함량 차이로 인한 밝기의 차이를 확인할 수 있다. 연구지역에서 산출하는 카르나수르타이트의 이상적인 화학식으로는 $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb})(\text{Al}, \text{Fe})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 로 나타낼 수 있으며, 결과값으로 계산된 화학식은 $(\text{Y}, \text{REE}, \text{Th}, \text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_{1.478}(\text{Ti}, \text{Nb})_{1.30}(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Mn}, \text{Fe}^{3+})_{0.99}(\text{Si}, \text{P})_{1.43}\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 이다.

6.4. 토륨석

카르나수르타이트와 수반되어 산출되는 토륨석은 Th 및 Si를 주성분으로 하는 규산염 광물로서 A 사이트의 양이온군은 일반적으로 Th 및 U, B 사이트 양이온군은 Si, Al로 주로 구성된다(Lumpkin and Chakoumakos, 1988). 연구지역의 토륨석 ThO_2 의 함량은 79.48-79.86 wt%의 범위이며, SiO_2 는 17.90-18.31 wt%의 범위를 보인다. 그 외에 F, Na, Mg, P, K, Ca, Ti, Fe, Y, Nb 및 Pb가 함유된다. 이러한 결과를 토대로 계산된 화학식은 $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Ti}, \text{Y}, \text{Nb}, \text{Pb}, \text{Th})_{1.03}(\text{Si}, \text{P}, \text{Fe}, \text{Mg})_{0.98}\text{O}_4$ 이다. 퍼구소나이트와 같이 U의 함량이 확인되지 않는 특징을 보이고 있다. 미립의 입자로 소량으로 카르나수르타이트에 포획된 상태로 관찰되어 분석 지점이 부족하나 산화물 형태로 전형적인 ThSiO_4 화학식구조를 나타낸다(Table 3; CJ-55 and 56).

6.5. 인회석

어래산 동부광체 남부에서 채취한 철광체와 접촉부에서 관찰된 인회석은 갈렘석과 자철석과 함께 관찰된다. 미량으로 관찰되는 인회석의 일부를 EPMA 정량 분석을 한 결과, 아주 소량의 희토류 원소를 포함하며 전형적인 인회석의 정량 분석결과를 보여준다. TR_2O_3 가 0.5-1.26 wt%의 범위를 보인다. 일부 시료에선 0.12-0.19 wt%의 ThO_2 함량을 보이며, P_2O_5 , CaO의 함량이 각각 42.75-43.60 wt%, 51.56-53.81 wt%로 나타난다(Table 4) 이렇게 계산된 인회석의 화학식은 $(\text{Na}, \text{Al}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Ti}, \text{Mn}, \text{Fe}^{3+}, \text{Y}, \text{REE}, \text{Pb}, \text{Th})_{4.60}(\text{Mg}, \text{Si}, \text{P})_{2.99}\text{O}_4(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ 이다.

Table 4. Microprobe analyses of apatite from the alkali granite (wt%)

Type	CJ-43	CJ-44	CJ-45	CJ-46	CJ-47	CJ-48	CJ-49
NaO	0.42	0.42	0.43	0.42	0.47	0.43	0.44
MgO	0.40	0.40	0	0	0.40	0.40	0.40
Al ₂ O ₃	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
SiO ₂	0.81	1.06	0.70	0.76	1.05	0.94	0.83
P ₂ O ₅	43.47	43.03	43.62	43.60	42.75	43.09	43.54
K ₂ O	0	0.15	0	0	0.09	0.09	0.12
CaO	51.56	52.53	53.81	53.52	52.20	51.73	53.22
TiO ₂	0.40	0.43	0.42	0.43	0.40	0.44	0.43
MnO	0.30	0.31	0.30	0.30	0.32	0.29	0.36
Fe ₂ O ₃	0.68	0.18	0.17	0.16	0.23	0.24	0.19
Y ₂ O ₃	0.42	0.55	0.21	0.25	0.64	0.53	0.45
La ₂ O ₃	0	0	0.09	0	0.08	0.10	0
Ce ₂ O ₃	0	0	0	0.14	0.17	0	0
Pr ₂ O ₃	0	0	0	0.09	0	0.09	0.10
Nd ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.12	0
Sm ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.13	0
Eu ₂ O ₃	0	0	0	0.07	0	0	0.09
Gd ₂ O ₃	0.09	0.10	0.10	0	0.17	0	0.08
Dy ₂ O ₃	0.12	0.08	0	0.07	0.09	0.18	0.18
Er ₂ O ₃	0	0	0.09	0.07	0	0.10	0
Yb ₂ O ₃	0.07	0	0	0	0	0	0.07
Lu ₂ O ₃	0.20	0.11	0	0	0.11	0	0
Ta ₂ O ₅	0.10	0.11	0.11	0	0.10	0.12	0
PbO	0	0.13	0.13	0.14	0.08	0	0
ThO ₂	0	0.19	0.16	0.13	0.17	0.12	0
Total	99.04	100.02	100.59	100.42	99.78	99.40	100.75
TR ₂ O ₃	0.91	0.84	0.50	0.70	1.26	1.26	0.97

7. 결과 및 토의

충주 지역은 소위 옥천층군에 해당되는 계명산층이 분포하며, 계명산층내에는 변성화산암 모암과 페그마타이트 모암의 회토류 광체가 배태한다. 변성화산암 모암의 회토류 광체를 구성하는 회토류광물은 갈럼석, 저어콘, 인회석, 스피인 산출하나 갈럼석이 가장 우세하게 산출한다. 페그마타이트 모암의 회토류 광체를 구성하는 회토류 광물은 퍼구소나이트, 카르나수르타이트, 저어콘, 토륨석이 산출하나 퍼구소나이트가 가장 우세하다.

변성화산암 모암의 회토류 광체에서 주로 산출하는 원형-타원형의 갈럼석은 집합체로 농집됨이 특징이다. TR₂O₃는 23.89-29.19 wt%, La₂O₃는 4.71-9.92 wt%, Ce₂O₃는 11.30-14.33 wt%, Y₂O₃ 0.11-0.29 wt%, ThO₂ 0.12-0.94 wt% 로서 계산된 화학식은 (Ca, Y, REE, Th)_{2.10}(Mg, Al, Ti, Mn, Fe³⁺)_{2.77}(SiO₄)_{2.98}(OH)이다. 연구지역의 갈럼석은 전형적인 갈럼석의 화학적 특성

인 A(2) 사이트에서 Ca²⁺-REE³⁺의 치환이, M(2) 사이트에서 Al³⁺-Fe²⁺의 치환이 일어난다. 갈럼석의 REE 패턴에서는 LREE의 부화, 작은 Eu 부 이상치, 높은 La/Yb비를 나타냄이 특징이다. 연구지역 갈럼석은 Fe의 함량이 일반 갈럼석보다 높은 Ce 계열의 Ferriallanite에 해당된다. 이는 모암인 계명산층을 주로 구성하는 변성화산암(변성조면암)의 원암이 Fe이 풍부한 함철층이기 때문인 것으로 판단된다.

변성화산암을 관입하는 페그마타이트 모암에서 가장 우세하게 산출하는 퍼구소나이트의 결정형태는 주로 주상 및 타원형태로서 저어콘, 형석 및 카르나수르타이트와 수반된다. 주요 화학조성은 A 사이트에서 Y-REE, Y-Th 치환이 우세하게 일어났으며, Nb-Ta-Ti의 치환은 B 사이트에서 초래되었으며, 계산된 화학식은 (Y, REE, Th, K, Ca, Si, Mn, W, Pb)_{0.98}(Nb, Ta, Ti, Fe)_{1.01}O₄ 이며, 이상식은 YNbO₄ 이다. 또한 Y₂O₃와 Nb₂O₅만의 비율로 상관도를 확인 한 결과 연구지역에서 산출되는 퍼구소나이트는 Y과 Nb의 이상적인

비율인 1:1 비율과 달리 1:1.5의 비율을 나타내고 있으며, Nb의 함량이 Y 함량보다 높으며, Y 사이트 즉, A 사이트에서 희토류 원소의 치환이 활발하게 초래되었다.

페그마타이트에서 산출하는 카르나수르타이트는 REE 및 Th를 치환하는 A사이트의 조성은 각각 Ce_2O_3 9.16-22.88 wt%, La_2O_3 2.15-9.16 wt%, ThO_2 0.44-10.8 wt%로서 그 함량 범위가 굉장히 다양하여 특징적인 누대구조를 나타낸다. 카르나수르타이트 화학조성으로 계산된 구조식은 $(\text{Y, REE, Th, K, Na, Ca})_{1.48}(\text{Ti, Nb})_{1.30}(\text{Mg, Al, Mn, Fe}^{3+})_{0.99}(\text{Si, P})_{1.43}\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 이며, 이상식은 $(\text{Ce, La, Th})(\text{Ti, Nb})(\text{Al, Fe})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 이다. ThO_2 와 $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$ 는 부(-) 상관성을 나타내며, 전술된 A 사이트에서의 치환관계에 잘 부합된다. TiO_2 와 Nb_2O_5 는 정(+)의 상관관계를 보이고, Al_2O_3 의 함량은 Fe_2O_3 의 함량과 상관없이 일정하며, TR_2O_3 는 $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량에 따라 증가하는 정(+)의 상관성을 나타낸다. 또한 SiO_2 는 TiO_2 와 부(-)의 상관관계를 갖는다. 이는 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 는 치환관계에 상관성이 적으며 일정한 함량을 갖으며, TiO_2 의 함량이 증가하면 SiO_2 의 함량은 감소하며, TR_2O_3 와 Nb_2O_5 의 함량은 증가하는 결정화학적특성을 갖고 있음을 의미한다.

카르나수르타이트와 수반되어 산출되는 토륨석은 ThO_2 79.48-79.86 wt%, SiO_2 17.90-18.31 wt%의 범위를 보인다. 그 외에 F, Na, Mg, P, K, Ca, Ti, Fe, Y, Nb 및 Pb가 함유된다. 미립의 입자로 소량으로 카르나수르타이트에 포획된 상태로 관찰되고 계산된 화학식은 $(\text{Na, K, Ca, Ti, Y, Nb, Pb, Th})_{1.03}(\text{Si, P, Fe, Mg})_{0.98}\text{O}_4$ 이며, 이상식은 ThSiO_4 이다.

어래산 동부광체 남부에서 채취한 철광체와 접촉부에서 관찰된 인회석은 갈럼석과 자철석과 함께 산출한다. 인회석은 아주 소량의 희토류 원소를 포함하며 P_2O_5 42.75-43.60 wt%, CaO 51.56-53.81 wt%로 나타내며, TR_2O_3 0.5-1.26 wt%의 범위를 보이며, 계산된 화학식은 $(\text{Na, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe}^{3+}, \text{Y, REE, Pb, Th})_{4.60}(\text{Mg, Si, P})_{2.99}\text{O}_4(\text{OH, F, Cl})$ 이다.

희토류광상의 모암인 변성화산암과 페그마타이트에서 산출하는 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대가 870-860 Ma 및 190 Ma로 보고된 바 있다(Koh *et al.*, 2012). 따라서 희토류 광화작용과 관련된 화성활동은 후기 원생대와 유라기에 초래되었음을 알 수 있다. 870-860 Ma인 초기 원생대는 로디니아 대륙의 분열기(860-570 Ma, Li *et al.*, 2008)로서 한반도에서 A-1형 화산활동이 초래되어 철, 희토류원소 및 고장력원

소(Nb, Zr, Y 등)가 풍부한 변성화산암으로 주로 구성되는 계명산층을 형성시켰다면 갈럼석은 모암이 형성될 당시 알카리 화산암에서 정출되었거나 변성작용이 초래된 고생대 말(300-280 Ma, Cho *et al.*, 2002) 광역변성작용에 의해 형성되었을 가능성이 높다. 희토류를 함유하는 페그마타이트에서 산출하는 저어콘 연대가 190 Ma인것은 유라기에 충주지역에서 광범위하게 초래된 화강암 정치활동과 관련된 가능성이 크다.

따라서 충주지역 계명산층 내 배태된 희토류 광체는 인접한 지역에 배태되어 있지만 매우 차별적 희토류 광화작용이 초래되어 희토류광물조성과 광체의 산상이 차별적으로 나타나는 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원에서 수행중인 “국내 희유금속자원 탐사 및 활용기술개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Boynton, W.V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In Hederson P. (ed) Rare earth element geochemistry, Elsevier, Amsterdam, 63-114.
- Chang, S.W. and Seo, J.R. (2006) REE mineral resources in Korea. Jour. Miner. Soc. Korea(Mineral and industry), v.19, p.13-29.
- Cheong, C.S., Jeong, G.Y., Kim, H., Choi, M.-S., Lee, S.-H. and Cho, M. (2003) Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. Chem. Geol., v.193, p.81-92.
- Cho, M.S. and Kim, H.C. (2002) Metamorphic evolution of the Ogcheon metamorphic belt: review of recent studies and remaining problems. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.11, p.121-137.
- Cluzel, D. (1992) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): an intracontinental rift-related volcanic activity. Jour. Southeast Asian Earth Sci., v.7, p.195-209.
- Chesner, C.A. and Ettlinger, A.D. (1989) Composition of volcanic allanite from the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia. Am. Mineral, v.74, p.750-758.
- Dollase, W.S. (1971) Refinement of the crystal structures of epidote, allanite and hancockite. Am. Mineral, v.56, p.447-464.
- Henderson, P. (1984) General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In Henderson, P.(ed.) Rare Earth element geochemistry, Elsevier, New York, p.1-32.
- Kang, J.H. and Ryoo, C.R. (1997) Igneous activity and

- geological structure of the Ogcheon metamorphic zone in the Kyemyeongsan area, Chungju, Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.6, p.151-165.
- Kim, G.S., Park, M.E. and Enjoji, M. (1994) Banded and massive iron mineralization in Chungju mine(I): geology and ore petrography of iron ore deposits. Econ. Environ. Geol., v.27, p.523-535.
- Kim, H., Cheong, C.S., Cho, M. and Jeong, G.Y. (2005) Late Paleozoic metamorphism in the Ogcheon metamorphic belt, South Korea: U=Pb stepwise leaching ages of garnet affected by allanite inclusions. Proceed. Annual Joint Conf., Mineral. Soc. Korea and Petrol. Soc. Korea, p.63.
- Kim, J.S., Park, M.E. and Kim, G.S. (1998) A geochemical study of the alkali granite in the Kyemyeongsan Formation. Econ. Environ. Geol., v.31, p.349-360.
- Kim, J.W., Park, J.K. and Koh, S.M. (1995) Geology and mineral deposits on the Ogcheon Group. Ministry of science and technology. KR-95(B)-4, p.1-52
- Kim, K.W. and Lee, H.K. (1965) Geological map of Chungju, Sheet 6724-I, 1:50,000, Geological survey of Korea, 35p.
- Koh, S.M. and Chang, H.W. (2011) Geological characteristics of rare earth deposits. The Nation. Aca. of Sci. Rep. of Kor. (Natural Sci. Ser.) v.50, p.37-71.
- Koh, S.M. et al. (2011) Exploration and security of domestic rare metal mineralized belt. KETEP 2011 annual report, unpublished.
- Koh, S.M. et al. (2012) Exploration and security of domestic rare metal mineralized belt. KETEP 2012 annual report, unpublished.
- Koh, S.M., Kim, J.H. and Park, K.H. (2005) Neoproterozoic A-type volcanic activity within the Okcheon metamorphic belt. v.14, p.157-168.
- Koo, J.H., Park, Y.S., Lim, M.T., Suh, S.Y. and Choi, J.H. (1986) Regional geophysical and geochemical studies for the exploration of mineral deposits. Korea Institute of Energy and Resources. KR-86-2-74, p.7-27.
- Lee, S.H. (1979) Ore petrological studies on the genesis of the metamorphic iron deposits in Southern Korea—with special reference to the Yangyang, Pocheon and Chungju iron deposits-Part I: Geology and petrology. Jour. of the Geol. Soc. of Korea, v.15, p.210-229.
- Lumpkin, G.R. and Chakoumakos, B.C. (1988) Chemistry and radiation effects of thorite-group minerals from the Harding pegmatite, Taos Country, New Mexico. American Mineralogist, v.73, p.1405-1419.
- Kuz'menko, M.V. and Kozhanov, S.I. (1959) The new mineral Karnasurtite. Trudy inst, Mineral., Geokhim. I kristallokhim. redkikh emenentov, v.2, p.95-98.
- Na, K.C., Kim, H.S., Lee, D.J. and Lee, S.H. (1982) Comparative studies between Chungju and Seosan Groups. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v.15, p.177-188.
- Oh, M.S. (1989) Allanite mineralization in the Mt. Eorae area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v.22, p.151-166.
- Oh, M.S., Seo, J.R., Koo, S.B. and Choi, C.H. (1988) Rare-Earth mineralization in Kyemyungsan Formation of Ogcheon Group, Mt. Eorae area near Choongju City, Middle Korea. Korea institute of energy and resources research report. KR-88-8A, 508p.
- Park, G.S. and Kim, G.S. (1998) Geochemistry of uranium and thorium deposits from the Kyemyeongsan pegmatite. Econ. Environ. Geol., v.31, p.365-374.
- Park, J.G., Kim, S.W., Oh, C.W. and Kim, H.S. (2003) Geochemical and geochronological studies on metaigneous rocks in the Gyemyeongsan Formation, North-western Okcheon metamorphic belt and their tectonic implication. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.12, p.155-169.
- Park, J.K., Oh, M.S. and Park, S.W. (1993) Rare-Earth mineralization of the Kyemyungsan Formation in the Mt.Eorae area (Choongju), middle Korea(II). Korea institute of geology, mining and materials research report, KR-93-1C-2, 105p.
- Park, M.E. and Kim, G.S. (1995) Genesis of the REE ore deposits, Chungju district, Korea: Occurrence features and geochemical characteristics. Econ. Environ. Geol., v.28, p.599-612.
- Park, M.E., Kim, G.S. and Choi, I.S. (1996) Geochemical characteristics of allanite from rare metal deposits in the Chungju area, Chungcheongbuk-Do (Province), Korea. Eon. Environ. Geol., v.29, p.545-559.
- Park, M.E., Kim, G.S. and Choi, I.S. (1997) Geochemical and petrographical studies on the fergusonite associated with the Nb-Y mineralization related to the alkaline granite, Kyemyeongsan Formation, Korea. Econ. Environ. Geol., v.30, p.395-406.
- Park, M.E., Kim, G.S. and Park, K.H. (2005) Genesis of the acidic metavolcanic rocks distributed around the Chungju iron deposit in the Gyemyeongsan Formation. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.14, p.169-179.
- Petrik, I., Broska, I., Lipka, J. and Siman, P. (1995) Granitoid allanite-(Ce): substitution relations, redox conditions and REE distribution (on an example of I-type granitoids, Western Carpathians, Slovakia). Geol. Carpath., v.46, p.79-94.