

계명산층내 알카리 화강암 기원의 Nb-Y 광화작용에 수반되는 폐구소나이트의 지구화학 및 산출특성 연구

박맹언* · 김근수* · 최인식**

Geochemical and Petrographical Studies on the Fergusonite Associated with the Nb-Y Mineralization Related to the Alkaline Granite, Kyemyeongsan Formation, Korea

Maeng-Eon Park*, Gun-Soo Kim* and In-Sik Choi**

ABSTRACT : Some RE (Zr, Nb, REE) ore deposits are located in the middle part of the Korean peninsula. Geotectonically, the RE ore deposits situated on the Kyemyeongsan Formation of northern margin of the Okcheon geosynclinal belt and in the transitional zone between Kyeonggi massif and Okcheon belt. The rare metal deposits distributed in Kyemyeongsan Formation which consists of schist and alkaline granite. The alkali granite has suffered extensive post-magmatic metasomatism and hydrothermal processes. The ore contains mainly Ce-La, Ta-Nb, Y, Y-Nb, Ti-Nb-(U), Nd-Th group minerals. Fergusonite, one of Nb-Y rich REE minerals belonging to the A-B oxides, is most common mineral in the rare metal deposits. The fergusonite bearing rocks may be divided into four types by occurrence features and mineral association, that is, zircon type, allanite vein, feldspar type, and fluorite type. Fergusonites show wide variations in optical properties, due to part of differences in their chemical composition (depending on the types), but also the degree of crystallinity of the individual specimens. Fergusonite metamicts enclosed in biotite are generally surrounded by well developed pleochroic haloes. Usually, fergusonite is accompanied with zircon and other REE-bearing minerals. Petrographical and chemical data are presented for fergusonites which collected different types. Nb₂O₃ and Y₂O₃ contents range from 48.51 to 53.01 wt.% and 29.18 to 42.02 wt.% respectively. Also, ThO₂ (1.83~6.93), UO₂ (0.17~2.84), ΣRE₂O₃ (except to Y) (1.11~8.73), and TiO₂ (0.19~1.19 wt.%) contents show variational compositions according to fergusonite types. The ΣRE₂O₃ of fergusonites are positive relation with Y₂O₃ and negative relation with ThO₂ and (ΣRE₂O₃-Y₂O₃). The Nb₂O₃ is slightly negative relation with Ta₂O₅. Back-scattered electron microscope images (BEI) of fergusonite show the mineral composition and textural feature is very complicated. The variation of Nb, Th and REE content of fergusonite and the modes of occurrence of mineral, suggests that REE may have been mobilized during the circulation of hydrothermal fluids related to contact metamorphism (metasomatism). The chemical variation of the fergusonites with occurrences and mineral association can be related to metasomatism of alkaline fluid was probably the dominant ore-forming process in Chungju district.

서 언

폐구소나이트 (fergusonite)는 1827년 Haidinger에 의해 최초로 보고 (Gilbert, 1981)된 후 전자, 항공 및 신소재산업 등의 발달과 함께 그 수요가 증대되고 있는 Nb과 Y를 함유하는 주요 자원광물이다. 폐구소나이트는 주로 화강암

질 페그마타이트 (granitic pegmatite), 카보나타이트 (carbonatite) 및 퍼알카리 화강암 (peralkaline granite)에 수반되며, 사광, 스카른 광상 및 변성 퇴적암내에서 산출된다 (Deer *et al.*, 1992; Moller *et al.*, 1989; 김유동·등, 1989; Gilbert, 1981; 자원개발연구소, 1977; Nagashima, Nagashima, 1960; 조선광물지, 1943). 우리나라 폐구소나이트의 산출은 충청남도 천원군, 성남면, 수신면 일원과 황해도 연백군 해월면 금산리의 사금광에서 육세나이트 (euxenite), 사마르스카이트 (samarskite), 제노타임 (xenosime) 등과 함께 발견되었으며 (김수진, 1988a, 1988b;

* 부경대학교 응용지질학과 (Department of Applied Geology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

** 전략광물자원연구센터 (Center for Mineral Resources Resources Research, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

자원개발연구소, 1977; 조선광물지, 1943), 최근 충주지역 (박맹언, 김근수, 1995; 박종권 등, 1994; 오민수 등, 1989) 과 연천지역 (김유동 등, 1989)에서 철광상과 수반된 석영 장석질 변성암내에서 갈럼석등의 희유원소함유광물과 수반되어 산출함이 보고된 바 있다. 그중 충주지역 계명산층 내에서 산출되는 고품위 희유금속자원의 지구화학적 특성에 대한 연구가 발표된 바 있다 (박맹언, 김근수, 1995). 충주지역 희유원소 광상에서 산출되는 광석에서의 Y함량 및 Nb함량은 광석의 유형에 따라 각각 0.05~0.23%와 0.23~0.95% 범위를 갖는다.

천연에서 산출되는 퍼구소나이트-Y ($YNbO_4$)는 육방정계로서 포만나이트 (formanite-Y, $YTbO_4$)와 Ta 및 Nb 단성분 고용체 또는 란타넘계열원소 (lanthanide)와 고용체를 형성한다. 베타(β)-퍼구소나이트와는 동질이상체를 이루며, 흔히 Ce나 Nd 변종을 가진다. 암갈색 내지 흑색으로서 주상의 자형 상태로 산출되며, 벽개는 발달하지 않는다. 흔히 방사성 원소에 의한 매트릭트화 작용 (metamictization)에 의해 대부분은 광학적으로 등방화 되어 있으나 다색성을 보이기도 한다. Y 및 Nb의 치환에 의한 원자가 상쇄 때문에 산소 (O) 대신에 수산기 (OH)가 위치하게 되며, 풍화변질에 의해 2차적으로 형성될 경우 물의 함량을 4%이상 함유하기도 한다. 희토류원소분배는 Y족>>Ce족의 탄탈라이트 형이 기본이지만, ΣY_2O_3 : ΣCe_2O_3 는 상당범위 변화하고, Ce족은 최고 9%로 되어있다. UO_2 함량 변화 (0~8.16%)는 퍼구소나이트의 치환에 따른 결과가 아니라 광물이 형성된 후 냉각과정에서 퍼구소나이트와 우라나나이트의 2상이 분리하여 존재하는 것에 기인 된다고도 알려져 있다 (Nagashima, Nagashima, 1960).

지질광상

충주 서남부 지역 일대는 변성퇴적암류인 계명산층과 화강암질암이 널리 분포한다. 변성퇴적암은 주로 편암과 함철규암으로 분류되며, 편암은 구성광물의 조직과 함량비에 의해 석영 편암, 석영-운모 편암 및 석영-장석질 편암으로 나누어 진다. 함철규암은 호상 조직을 보이는 저품위 철광층으로서 석영 편암내에 부존된다. 석영 편암과는 점이적인 관계를 보이지만 상대적인 철산화광물의 함량에 의해 구분된다. 변성퇴적암류의 엽리는 $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}E$ 의 주향과 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}SE$ 의 경사를 갖는다 (Kim, 1991). 화강암질암은 저반상의 중생대 화강암과 소규모 암주 내지 암맥상으로 산출되는 고생대 알카리 화강암류로 구분된다. 알카리 화강암류는 대륙판 단열형 (intracontinental

rift type) 구조대를 따라 상승한 심부기원 현무암질 마그마의 분화에 의해 형성되었으며, 화성활동 후기의 알카리성 광화유체의 교대작용에 의해 형성된 희유원소 광상이 수반된다 (박맹언, 김근수, 1995). 알카리 화강암류의 구성광물은 유색광물이 많은 섬록암질 암석에서 유색광물이 거의 수반되지 않는 화강암류에 이르는 다양한 양상을 보여주며, 단층에 의해 규제된 불규칙한 산상을 나타낸다. 상기 편암류는 화산암 기원의 변성암으로서 알카리 화강암류와 동일 마그마에 의한 화산-심성 화성활동에 의해 기원됨이 보고 되었다 (Cruzell, 1992; Kang, 1994).

함희유원소광상은 편암과 알카리 화성암내에서 교대조직을 수반하는 연홍색의 알카리 교대암내에 특히 농집되는 양상을 갖으며, 편암내에서 렌즈상 또는 판상으로 산출하는 유색광물 (주로 흑운모 및 각섬석)과 선구조를 형성한다. 교대암은 다량의 저어콘과 REE광물을 함유하는 미사장석암 (microclineite)과 주로 갈럼석을 함유하는 교대암으로 구분되며, 화강암과 석영-장석편암의 경계부 또는 편암의 엽리를 따라 발달된다. 국부적으로 애플라이트 내에 포획체로서 산출되며, 그 밖에 조립질 갈럼석으로 구성된 암맥 (폭: 5~10cm)이 발달된다. 희유원소 광상의 유형은 엽리나 선구조를 수반하는 저어콘형, 장석형과, 맥상 또는 괴상의 갈럼석형, 형석형으로 구분된다 (박맹언, 김근수, 1995; 박맹언 등, 1996).

주요 희유원소 함유 광석광물은 저어콘 (zircon), 갈럼석 (allanite), 퍼구소나이트 (fergusonite), 육세나이트 (euxenite), 폴리크레이스 (polycrase), 베스나사이트 (bastnaesite), 모나자이트 (monazite), 제노타임 (xenotime), 오카노가나이트 (okanoganite), 파이로클로르 (pyrochlore), 콜롬바이트 (columbite), 사마르스카이트 (samaraskite), 토라이트 (thorite), 스피넬 (sphen), 인회석 (apatite) 등과 미동정된 광물을 포함하여 15여종 이상이 확인된다. 저어콘형과 갈럼석형, 장석형에서 비교적 다양한 REE광물이 공생하는데 반하여 형석형에 수반되는 REE광물의 종류가 상대적으로 적은 양상을 띠며, 이러한 현상은 광석들의 총 REE 함량과도 비례적인 관계를 가진다. 한편, 퍼구소나이트는 다량의 조립질 갈럼석을 함유하는 페그마타이트를 비롯하여 경희토류가 부화되어 있는 알카리 화성암 및 저어콘이 다량 함유되는 알카리 교대암에 특히 농집되어 있다.

산출상태와 광물공생

퍼구소나이트 산출은 알카리 화성암, 교대암 및 열수변질대 등 다양하며, 알카리 교대작용의 정도에 의해 조성비의 차이를 갖는다. 퍼구소나이트는 저어콘, 갈럼석 등과

함께 전 유형의 광상에서 산출되며, 그 중에서도 저어콘 형과 갈럼석형, 장석형에서는 비교적 많은 양이 수반되는 데 반하여 형석형에서는 상대적으로 적은 양상을 띤다.

페구소나이트는 저어콘이 풍부한 광석에서 주로 암갈색 내지 흑색을 띠나, 타 유형의 광석에서는 담황색 내지 담갈색을 띤다. 페구소나이트 결정은 치환된 방사성 원소에 의해 대부분이 메타미크티화 (metamictization)되어 광학적으로 등방화되어 있다. 결정의 외곽부는 암색을 이루며 인접 광물 (특히 운모류)에 강한 방사성 후광대를 형성한다. 자형의 결정형을 이루기 쉬운 광물이지만 대부분이 타형으로 산출된다. 주로 저어콘, 인회석, 모나자이트, 육세나이트, 베스네사이트, 갈럼석, 콜롬바이트, 토라이트, 스핀, 미사장석, 운모류, 석영, 자철석 등의 광물과 함께 산출되며, 특히 Ti 함유광물인 스핀, 육세나이트와 밀접하게 공생한다. 수반공생광물과의 상호관계는 불분명하나 성분조성의 차이로 인한 BEI (Back-scattered Electron Image)에서는 상

호관계를 보다 명확하게 알수 있다. 편광 현미경하에서는 구분되지 않으나 BEI성분도에서는 조성성분 (특히 이트륨)에 의한 명암 차이를 뚜렷이 나타낸다 (Fig. 1과 Fig. 2). 높은 원자량으로 인하여 BEI성분도에서 밝은색을 띠지만 열수변질에 의해 입자 가장자리나 광물내의 미세한 틈을 따라 회색의 불규칙한 조직을 나타낸다. 조직과 명암의 차이에 의해 타공생광물과 쉽게 구분되며, 특히 육세나이트, 스핀 및 콜롬바이트와는 교대 또는 용리상으로 밀접하게 수반되어 존재한다. 페구소나이트와 수반되는 콜롬바이트는 보다 짙은 암색을 띠며, 육세나이트와는 담황 내지 연적갈색에 의해 구별된다. 흑운모내에 산출되는 미립의 암색 광물에서도 강한 방사성 후광을 나타내며, 이들 중에는 화학조성의 변화가 상이하여 페구소나이트의 한 변종으로 추정되는 부분이 확인된다. 입자내부의 틈을 따라 오키노가나이트에 의해 교대 변질되어 있으며, 진한 갈색을 띠는 갈럼석과는 다색성의 차이에 의해 구별된다. 타형의 결정

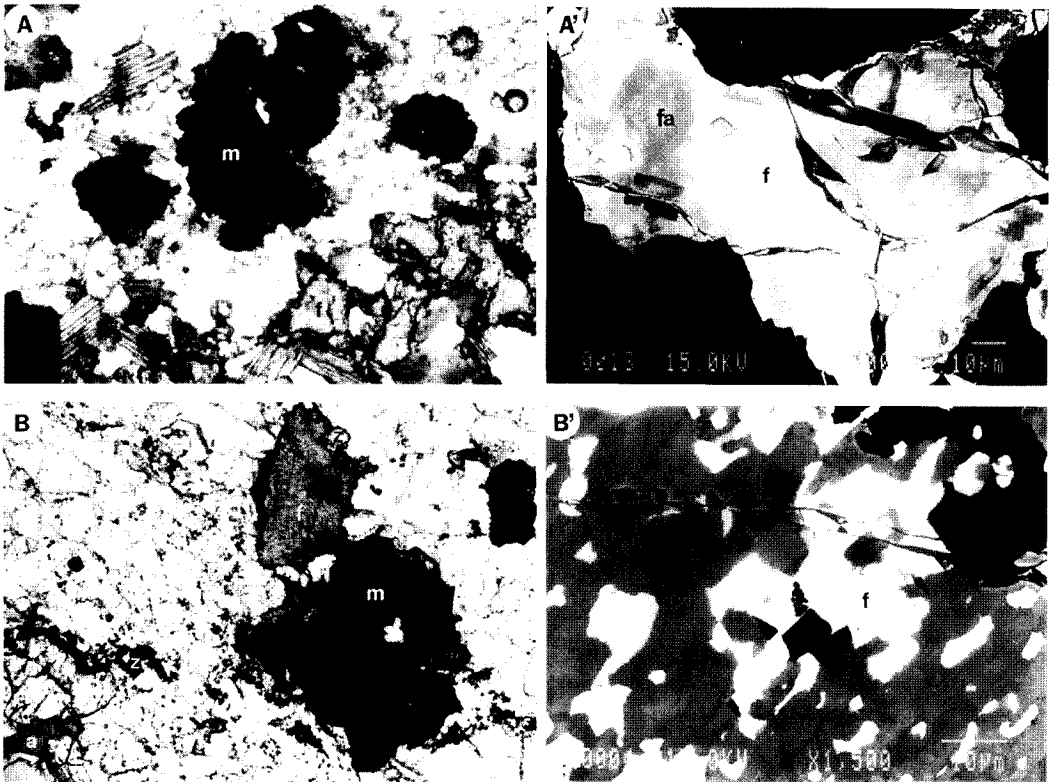


Fig. 1. Photomicrographs and back-scattered electron (BEI) of the fergusonite. A, A' ; Magmatic anhedral fergusonite (f) shows pale brown color and associated with magnetite and biotite. Biotite shows pleochroic haloes. In BEI (A'), white fergusonite partly replaced and/or contaminated by pale grey color materials (fa), which are hydrothermal altered products (compositional variations see text). B, B' ; Fergusonite associated with euxenite (e), magnetite (m), allanite (a), and zircon (z) in alkaline igneous rock. Matrixes are mainly of microcline and quartz. Fergusonite (white) is irregularly intergrowth with euxenite (pale gray) at BEI (B').

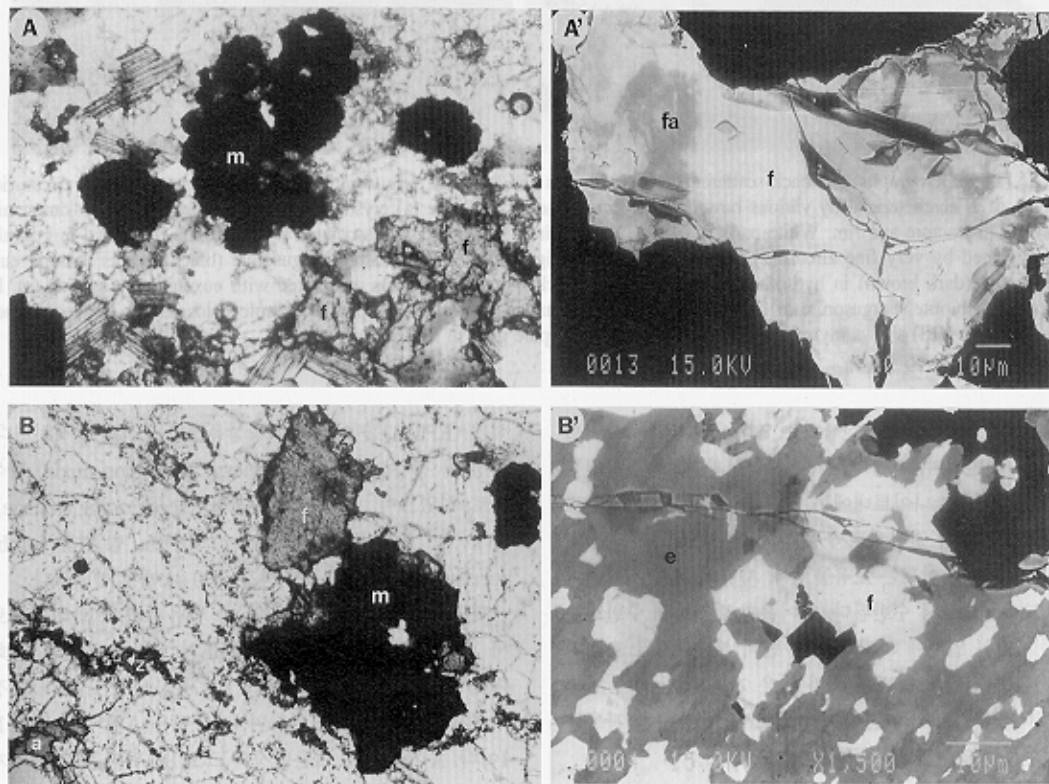


Fig. 1. Photomicrographs and back-scattered electron images (BEI) of the fergusonite. A, A' ; Magmatic anhedral fergusonite (f) shows pale brown color and associated with magnetite and biotite. Biotite shows pleochroic haloes. In BEI (A'), white fergusonite partly replaced and/or contaminated by pale grey color materials (fa), which are hydrothermal altered products (compositional variations see text). B, B' ; Fergusonite associated with euxenite (e), magnetite (m), allanite (a), and zircon (z) in alkaline igneous rock. Matrixes are mainly of microcline and quartz. Fergusonite (white) is irregularly intergrowth with euxenite (pale gray) at BEI (B').

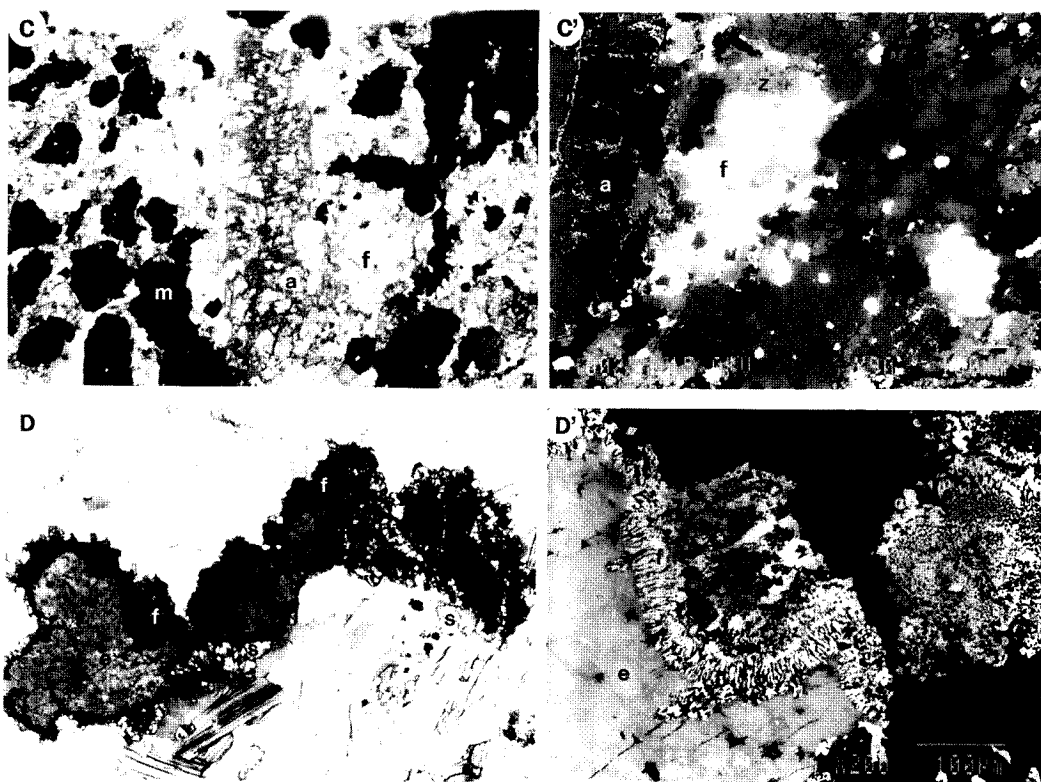


Fig. 2. Photomicrographs and back-scattered electron images (BEI) of the fergusonite. C, C'; High metasomatized zircon-rich ore type, it is characterized by various rare-metal bearing minerals. Allanite (a) crystal is replaced to needle shape okanoganite according to fracture and rim. White parts of BEI (C') are mainly fergusonite (f) associated with euxenite. Anhedronal fergusonite (f) is replaced by very fine zircon (z) aggregates (also see Fig. 3A). D, D'; Metamict fergusonite (black) occurs around euxenite crystal (dark brown) in hydrothermally metasomatic rock. Fergusonite (f) is associated with euxenite (e), sphene (s), K-feldspar, and biotite. Fergusonite in biotite is generally surrounded by well developed pleochroic halos. Black fergusonite part (white color in BEI) shows myrmekitic texture with euxenite (pale grey in BEI) (D').

집합체 또는 세맥상으로 산출하는 연황색의 베스내사이트와 흔히 수반되며, 자형의 스피넬, 갈럼석과 함께 집합체를 형성한다. 퍼구소나이트내에는 방사성 원소함유광물인 토라이트가 미립의 결정체로서 매우 밝은 색으로 나타난다. 인회석과 모나자이트는 포유물로서, 자형의 미립 저어콘이 후기 교대상으로서 수반된다. 저어콘과 밀접하게 수반되는 경우, 저어콘 입자에 의해 입자 주변이 부분적으로 교대되며, 저어콘 집합체에 비해 색과 높은 기복 (relief)에 의해 식별된다. 미립의 저어콘이 집합체로서 다른 수반 광물들을 치환하는 양상을 보여준다 (Fig. 3).

퍼구소나이트의 화학조성

퍼구소나이트 (fergusonite)의 화학조성을 파악하기 위해 고려대학교 전략광물자원센터의 JXA 8600 전자현미분

석기 (EPMA)를 이용하여 광상유형별 분석을 실시하였다. 정성 및 정량분석은 EDS (energy dispersion mode) 방식으로 하였으며, 분석은 가속전압 (accelerating voltage); 15 kv, 빔 직경 (beam diameter); 10 μ m, 빔 전류 (probe current); 30 nA, 빔 조사 시간; 100 sec에서 행해졌다.

퍼구소나이트는 Y-Nb (Ta)를 함유하는 복합 산화물로서 A-B 산화광물에 속한다. REE가 풍부한 광물로서 화학조성은 Miyawaki, Nakai (1987)에 의한 구조식의 정의에 따라 ABO_4 로 표현되며, 이상식은 A:B의 비율이 1:1이다. A-사이트는 이온반경이 크고 8배위의 낮은 원자의 양이온으로 이루어지며, B-사이트는 상대적으로 이온반경이 작고 6배위의 높은 원자의 양이온으로 구성된다. 이상적인 화학조성은 $YNbO_6$ 이지만 Y 자리에 Er, U, Th, Ca, Fe 및 Ce족희토류원소 (La, Nd) 등이 치환되고, Nb자리에 Ta와 Ti 등이 치환되며 소량의 물이 존재한다.

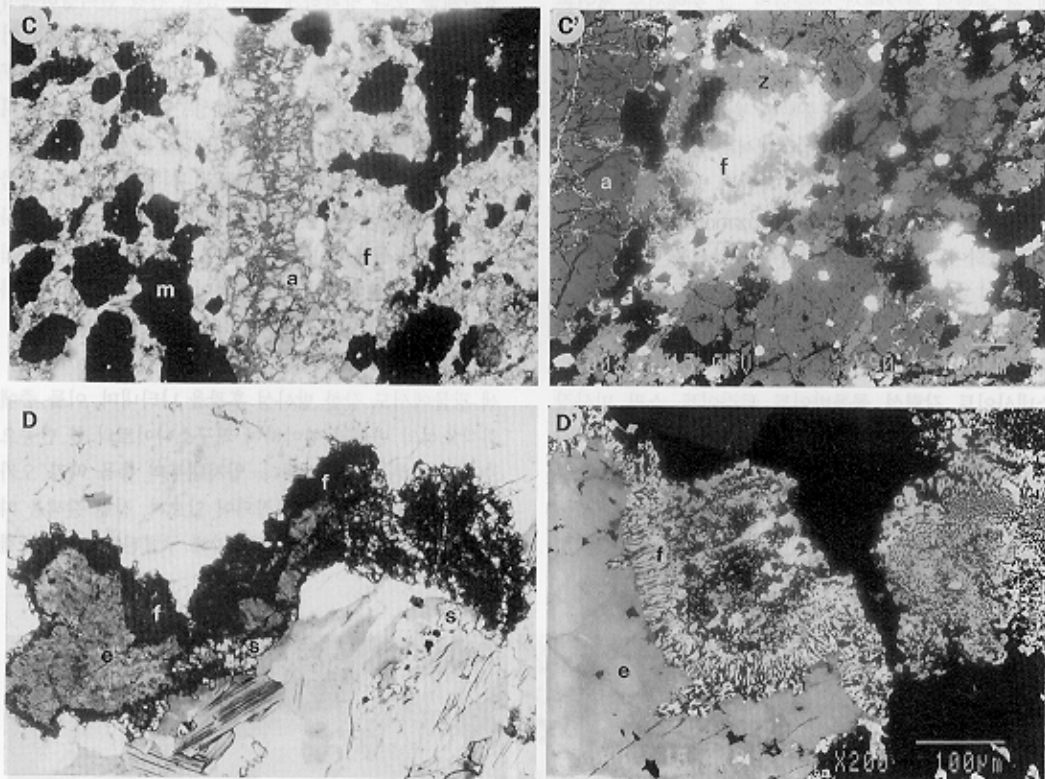


Fig. 2. Photomicrographs and back-scattered electron images (BEI) of the fergusonite. C, C'; High metasomatized zircon-rich ore type, it is characterized by various rare-metal bearing minerals. Allanite (a) crystal is replaced to needle shape okanoganite according to fracture and rim. White parts of BEI (C') are mainly fergusonite (f) associated with euxenite. Anhedral fergusonite (f) is replaced by very fine zircon (z) aggregates (also see Fig. 3A). D, D'; Metamict fergusonite (black) occurs around euxenite crystal (dark brown) in hydrothermally metasomatic rock. Fergusonite (f) is associated with euxenite (e), sphene (s), K-feldspar, and biotite. Fergusonite in biotite is generally surrounded by well developed pleochroic halos. Black fergusonite part (white color in BEI) shows myrmekitic texture with euxenite (pale grey in BEI) (D').

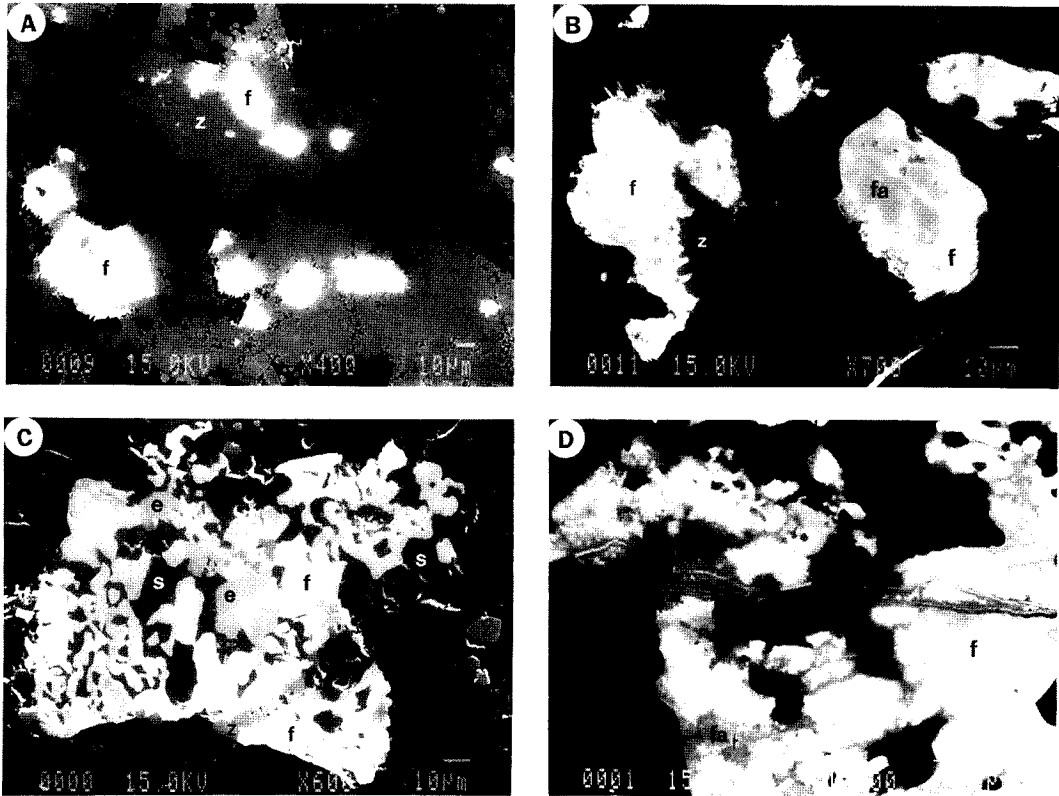


Fig. 3. Associated mineral relationships and hydrothermally altered textural features from back-scattered electron images (BEI) of the fergusonites. A; Fergusonite (f) is white color, and according to rim is replaced to fine-grained zircon (z) aggregates (grey color). B; Fergusonite (f, white) is partly altered features (fa, pale irregular grey) and replace by euhedral zircon (z, dark grey with rectangular shapes). C; Fergusonite occurs in alkali-metasomatite with K-feldspar, green biotite, cuxenite, allanite, and zircon. Fergusonite (f; white parts) closely intergrowth with euxenite (e; light grey part), sphene (s; dark grey), and euhedral very fine zircon (z; pale grey). Matrixes (dark part) are mainly composed of K-feldspar and quartz. D; Alteration characteristics of fergusonite (white) along with fractures and crystal rims (grey). f; fergusonite, fa; altered fergusonite.

Ta 치환체인 포마나이트 (formanite)와 Ti의 부분 치환체로서 보다 많은 물을 함유하는 리소라이트 (risorite)와는 동형이다. 결정내의 미세한 틈이나 경계부를 따라 발달되는 변질양상 (열수변질)을 나타내는 퍼구소나이트는 BEI에서 다소 어두운 색을 띠며, 전형적인 퍼구소나이트와는 현저한 화학조성의 차이를 나타낸다. Ca, U, Th, Si는 전반적으로 증가하는 경향을 나타내고, Y를 포함한 희토류원소의 함량은 감소된다. 이에 반하여 Ta, Ti, Fe는 증가하며, 그 중에서 Fe의 함량이 특히 증가된다. 그 밖에도 Nb의 함량조성의 범위가 매우 커진다 (39.75~53.66 wt.%). 한편 분석값의 전함량이 현저히 감소하는 요인은 변질에 의한 H₂O의 치환 결과로 생각된다.

퍼구소나이트는 BEI성분도뿐만 아니라 화학조성에서도 변질작용에 의한 특성을 반영하고 있다. 전형적인 퍼구소나이트는 A-사이트와 B-사이트에 속하는 원소들의

상호관계 도표 (Fig. 4)에서 비교적 이상식에 가까운 조성을 나타내며, 변질양상을 나타내는 것은 A-사이트의 함량이 감소하고 B-사이트의 함량이 증가하여 이상식에서 벗어남을 알 수 있다. 변질정도가 심한 것은 사마르스카이트의 이상식인 A₂B₂O₆ (OH) 또는 A₃B₃O₇ 조성에 가까워 지는 경향을 보인다. 변질작용을 받지 않은 전형적인 퍼구소나이트의 화학 조성 범위는 Y₂O₃이 29.18~42.02 wt.%, Nb₂O₅이 48.51~53.01 wt.%의 값을 보이며, Nb에 비해 Y의 조성 변화가 심하다. 퍼구소나이트의 Y와 Nb의 상호관계는 교대작용의 정도가 증가될수록, 즉 마그마에서 열수기원으로 전환됨에 따라 두 원소의 함량이 감소하는 경향을 나타낸다 (Fig. 5).

A-사이트의 Y와 치환관계에 있는 Th, U, REE (Y 제외), Ca 및 Si는 산화물의 형태로 각각 ThO₂: 1.83~6.93, UO₂: 0.17~2.84, RE₂O₃: 1.11~8.73, CaO: 0.27~1.50,

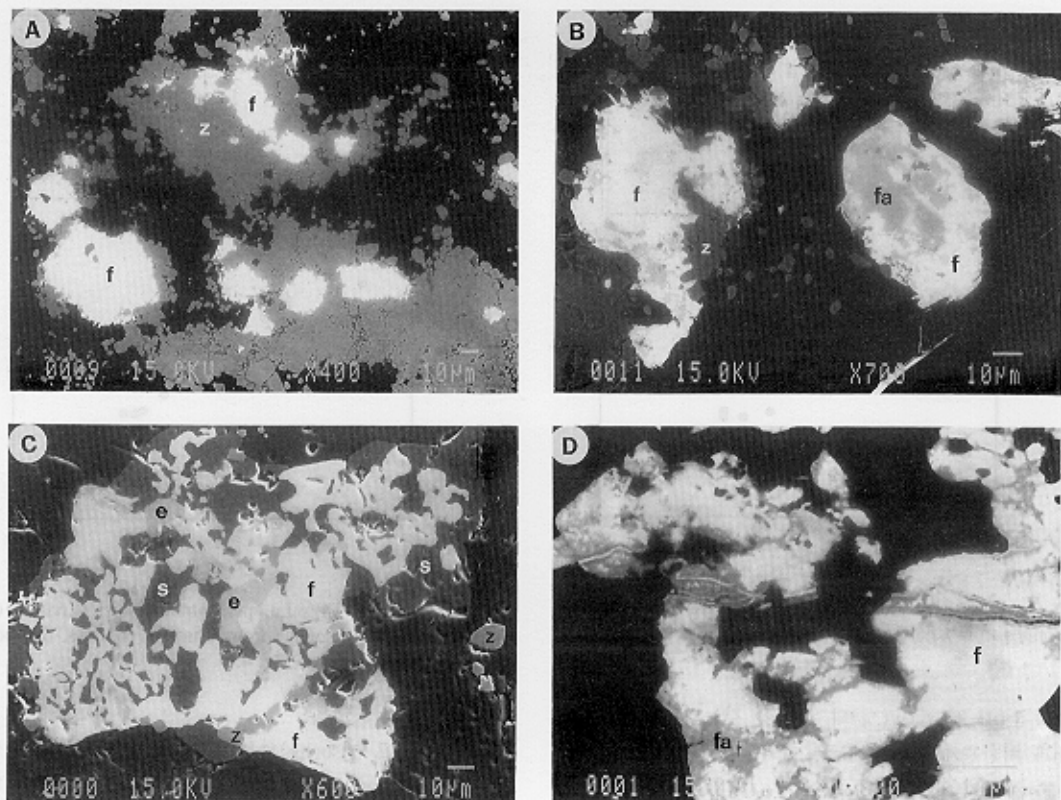


Fig. 3. Associated mineral relationships and hydrothermally altered textural features from back-scattered electron images (BEI) of the fergusonites. A; Fergusonite (f) is white color, and according to rim is replaced to fine-grained zircon (z) aggregates (grey color). B; Fergusonite (f, white) is partly altered features (fa, pale irregular grey) and replace by euhedral zircon (z, dark grey with rectangular shapes). C; Fergusonite occurs in alkali-metasomatite with K-feldspar, green biotite, euxenite, allanite, and zircon. Fergusonite (f; white parts) closely intergrowth with euxenite (e; light grey part), sphene (s; dark grey), and euhedral very fine zircon (z; pale grey). Matrixes (dark part) are mainly composed of K-feldspar and quartz. D; Alteration characteristics of fergusonite (white) along with fractures and crystal rims (grey). f; fergusonite, fa; altered fergusonite.

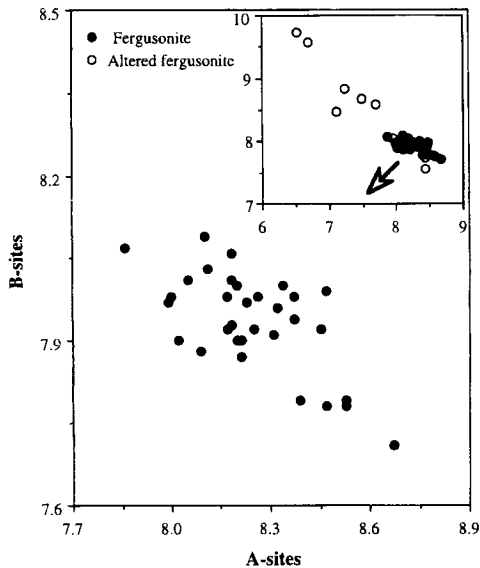


Fig. 4. A sites-B sites variation diagram for the fergusonites from Chungju deposits.

SiO₂: 1.01~3.53 (wt.%)의 조성을 갖는다. B-사이트의 Nb과 치환관계에 있는 Ta은 거의 나타나지 않으며, Ti 및 Fe은 각각 TiO₂: 0.19~1.19, Fe₂O₃: 0~0.68 (wt.%)로서 거의 Nb으로만 구성되어 있다. Ta 치환체인 포마나이트 (formanite)와 Ti의 부분치환체로 다량의 물을 함유하

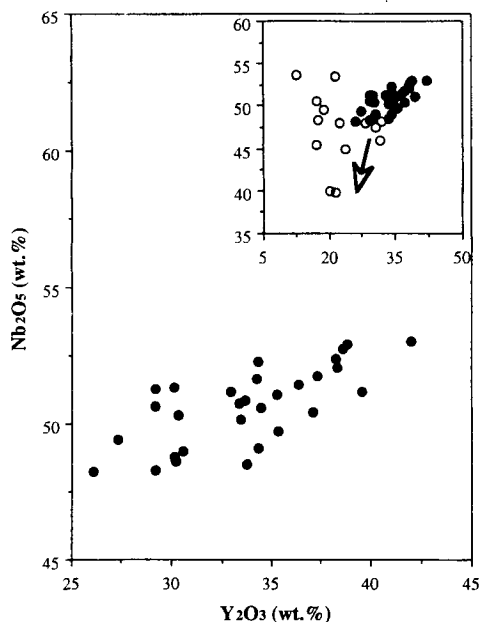


Fig. 5. Y₂O₃-Nb₂O₅ variation diagram for the fergusonites from Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 4.

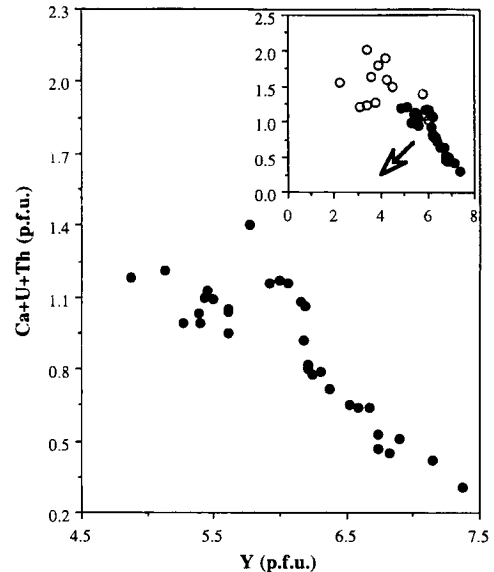


Fig. 6. Y-(Ca+U+Th)(p.f.u.=per formula unit) variation diagram for the fergusonites from Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 4.

는 리소라이트 (risorite)와는 동형으로 천연에서 흔히 산출 (Nagashima, Nagashima, 1960)되나, 연구지역의 퍼구소나이트는 Ta, Ti이 거의 수반되지 않는 특징을 갖는다. Y과 뚜렷한 치환관계에 있는 (Ca+Th+U)의 상관관

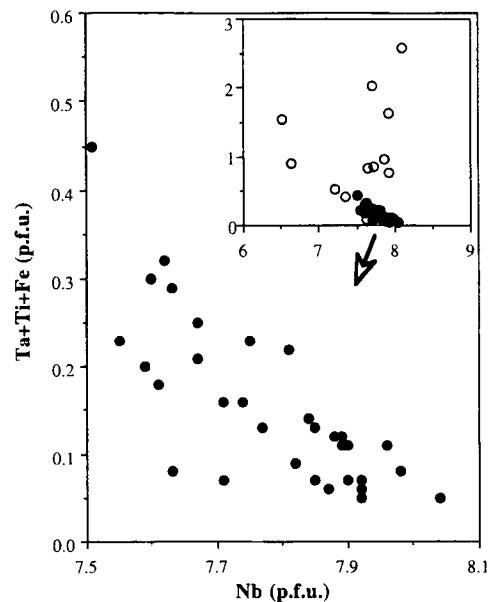


Fig. 7. Nb-(Ta+Ti+Fe)(p.f.u.=per formula unit) variation diagram for the fergusonites from Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 4.

계를 보면 Ca을 포함한 방사성원소의 함량이 알카리 교대 작용이 진행될수록 뚜렷이 증가하는 특성을 보여준다 (Fig. 6). 이러한 결과는 광물의 공생관계에서 방사성원소를 함유하는 광물이 후기에 정출되는 공생관계의 특성과 잘 일치된다. (Ti+Ta+Fe)-Nb의 상호 관계도에서 Nb 조성은 교대정도가 심한 시료에서 다소 감소하며, 변질양상이 현저할수록 Ti와 Fe의 대체적인 증가 양상을 보여준다 (Fig. 7).

피구소나이트는 PREE, Nb, Th 및 U 등의 원소를 함유하며, 이들 원소의 치환에 의해 고용체의 성분이 광범위한 변화를 나타낸다 (Table 1). 화학조성의 변화 범위는 공생하는 광물의 종과 산출 유형의 차이뿐만 아니라 단일광물에서도 변질 양상 (BEI 성분도의 차이)에 따라 다양한 함량의 변화를 나타낸다. 변질정도가 높아질수록 Y을 포함한 REE 함량이 감소하며, 방사성원소 (Th, U)는 증가하는 경향을 나타낸다 (Fig. 8).

충주지역 알카리암 기원의 희유원소 광상 (희토류원소 광상 포함)에서 산출되는 공생광물의 정출순서는 갈럼석과 피구소나이트 결정 내부에 포획체로서 밀접히 수반되는 모나자이트 및 인회석과 같은 인산염광물이 먼저 정출되고, 이어 Y을 비롯한 REE를 함유한 광물, Nb-Ta함유 광물 (콜롬바이트), 갈럼석, 저어콘 및 방사성원소함유광물 (주로 토라이트) 순으로 정출된다. 이러한 특성은 마그마에서 교대, 열수환경으로 진행됨에 따른 Y과 Nb의 함량변화를 보여주는 연구 결과와 일치되며, 이러한 화학조성의 변화는 마그마의 분별작용 (fractionation)이 진행될수록 즉 마그마의 영향에서 멀어질수록 Y의 함량이 감소되는 결과를 반영한다.

광물의 정출은 온도 변화나 산화조건 (산소분압의 변화), 기체의 활동도에도 밀접한 관련성을 갖는다. 그러므로 피구소나이트에 대한 연구는 Nb-Y 광화작용을 수반하는 희유원소 (희토류원소 포함) 광상의 성인 연구와 병행되어야 한다. 특히 방사성원소의 붕괴로 인한 결정의 메타믹트화로 희유원소 및 희토류원소의 분석상의 곤란함 때문에 광물의 결정학적 연구와 지화학적 특성은 앞으로 수행하여야만 할 과제이다.

토 의

옥천퇴적분지내의 화성활동 중심지 (Cluzel, 1992; Cluzel *et al.*, 1991)로 알려진 계명산층내에는 철과 희유원소 광상이 발달되어 있으며, 그 중 REE를 포함하는 희유원소 광상은 주로 계명산층을 구성하는 알카리 화산암 기원의 석영-장석편암과 알카리 화강암류와의 경계부에서

발달된다. 계명산층은 퇴적작용, 화산-심성 화산활동과 변성작용, 접촉교대 및 열수교대 등 다양한 지질작용의 영향을 받았다. 희유원소 광상의 주성분 및 미량성분의 상관관계와 광석의 조직 및 산출 특성은 광화작용이 알카리성 용액의 교대작용과 밀접한 관련성을 갖는 것으로 보고된 바 있다 (박맹언, 김근수, 1995). 주로 알바이트, 미사장석, 석영으로 구성된 알카리암은 희유원소 화강암 (rare metal granitoid) 또는 알바이트 화강암으로 분류되기도 하며 (Beus, 1968; Beus *et al.*, 1962), 일반적으로 천소 화강암의 마그마기원 유체가 교대작용에 의해 overprinting 됨으로서 형성된다. 다량의 저어콘 (최대 40%)과 밀접하게 수반되는 Nb-Y군 광물은 계명산층의 변성퇴적암과 알카리 화산암의 접촉부를 따라서 발달된다.

충주지역 REE 광체에서 나타나는 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 에 대한 Y의 상관관계 (박맹언, 김근수, 1995)는 화강암질 마그마의 분화 과정에서 알카리 함량이 증가됨에 따라 Y의 포화도가 증가되어 다량의 Y-Nb 광물을 침전시켰음을 시사한다. 철산화 광물과 밀접하게 수반되는 REE를 함유한 후기 마그마기원 교대성 물질이 철함량이 높은 모암과 REE 광물이 반응함에 따라 REE의 용해도가 급격하게 감소되어 함께 정출되었음을 알 수 있다. 또한 단속적으로 발달되는 세맥상의 형석과 방해석맥은 열수에 의한 후기의 교대작용이 진행되었음을 의미한다.

교대작용의 특징을 나타내지 않은 모암에서보다 교대 조직이 우세한 모암에서 REE가 부화되어 있는 특성은 열수유체에 의한 REE의 운반과 침전을 증명하는 것이다. 계명산층을 구성하는 암석의 REE 패턴은 강한 Eu 부 (-)의 이상치를 나타내며 (박맹언, 김근수, 1995), 이는 알카리장석이 풍부한 화강암류의 특성 (Cullers, Graf, 1984)에 대비된다. 희토류 광상에서 보여주는 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 대륙관 단열형 (intracontinental rift type) 구조대에서 유래된 심부기원 현무암질 마그마의 동시성 분화에 의해 분리된 알카리 화강암과 밀접한 성인적 연관성을 띠고 있다.

모암은 마그마의 결정화작용 후기단계 (late-stage magmatism)와 마그마작용 이후 (post magmatism)의 변질작용에 의해 영향을 받아 주로 석영, 장석으로 구성되는 부분과 흑운모의 함량이 증가되고 다량의 희유금속 광화작용을 수반하는 부분으로 구분된다. 희유원소광상의 광화작용은 고생대 알카리 화산활동에 수반된 후기의 알카리성 광화유체에 의해 형성되었다고 연구되었다 (박맹

Table 1. Microprobe analyses of fergusonite from the Chungju deposits

Type; magmatic	CJ-76	CJ-76	CJ-76	CJ-76	CJ-76	CJ-76	CJ-76	CJ-76	CJ-76*	CJ-76*	CJ-76*	CH-75	CH-75	CJ-75	CJ-75
SiO	1.82	1.31	1.66	1.09	3.32	1.18	3.34	2.99	5.17	4.04	1.55	1.61	1.72	1.30	
CaO	1.20	1.32	1.23	1.23	1.87	1.41	3.08	2.28	0.57	2.74	0.59	1.24	1.20	1.25	
Y ₂ O ₃	29.17	26.09	29.19	29.19	21.34	27.29	17.60	22.40	17.27	12.45	38.86	33.68	33.46	33.44	
Ce ₂ O ₃	3.76	4.56	.02	3.02	1.85	3.14	1.77	2.32	1.36	1.44	0.34	1.93	1.06	1.53	
La ₂ O ₃	0.97	1.35	0.63	0.63	0.52	0.83	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.63	0.24	0.78	
Nd ₂ O ₃	5.83	6.39	5.05	5.05	2.73	6.11	4.67	3.68	2.93	2.30	1.75	2.43	1.43	1.34	
UO ₂	0.81	1.39	1.32	1.32	1.57	0.00	0.20	1.36	2.12	2.17	1.03	2.84	1.81	2.06	
ThO ₂	6.31	7.16	5.43	5.43	5.71	8.50	9.64	7.67	9.56	5.53	2.93	6.84	6.23	6.93	
Nb ₂ O ₅	51.26	48.22	50.64	50.64	53.43	49.43	48.32	48.00	45.53	53.66	42.90	50.83	50.18	50.75	
Ta ₂ O ₅	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	
TiO ₂	0.25	0.59	0.40	0.40	0.74	0.46	0.47	0.64	0.88	0.92	0.32	0.84	0.54	0.49	
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	5.33	0.00	2.11	2.31	1.90	8.10	0.00	0.31	0.00	0.33	
Total	99.66	98.69	97.50	97.50	98.49	97.18	89.92	92.52	86.57	94.05	97.30	102.18	95.67	98.58	
Structural formula (O=32)															
Si	0.62	0.46	0.56	0.38	1.09	0.42	1.21	1.06	1.92	1.35	0.52	0.53	0.59	0.44	
Ca	0.44	0.50	0.51	0.46	0.66	0.53	1.20	0.87	0.23	0.98	0.21	0.44	0.45	0.46	
Y	5.27	4.88	5.45	5.40	3.73	5.13	3.40	4.27	3.41	2.21	6.90	5.92	6.16	6.06	
Ce	0.47	0.59	0.38	0.38	0.22	0.41	0.24	0.30	0.18	0.18	0.04	0.23	0.13	0.19	
La	0.12	0.18	0.10	0.08	0.06	0.11	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08	0.03	0.10	
Nd	0.71	0.80	0.58	0.63	0.32	0.77	0.61	0.47	0.39	0.28	0.21	0.29	0.18	0.16	
U	0.06	0.11	0.06	0.10	0.12	0.00	0.02	0.11	0.18	0.16	0.08	0.21	0.14	0.16	
Th	0.49	0.57	0.56	0.43	0.50	0.68	0.80	0.62	0.81	0.42	0.22	0.51	0.49	0.54	
ΣA site	8.18	8.09	8.20	7.86	6.70	7.05	7.48	7.69	7.12	5.58	8.18	8.21	8.17	8.11	
Nb	7.87	7.67	7.89	7.96	7.93	7.89	7.92	7.72	7.64	8.11	7.98	7.60	7.84	7.81	
Ta	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ti	0.06	0.16	0.11	0.11	0.18	0.12	0.13	0.17	0.25	0.23	0.08	0.21	0.14	0.13	
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46	0.00	0.64	0.69	0.59	2.26	0.00	0.09	0.00	0.09	
ΣB site	7.93	7.88	8.00	8.07	9.57	8.01	8.69	8.58	8.48	10.69	8.06	7.90	7.98	8.03	

Table 1. Continued

Type; matasomatic	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506	CJ-506*	CJ-506*	CJ-71	CJ-71	CJ-71
SiO ₂	1.85	2.50	2.14	1.01	1.88	1.74	1.53	1.46	1.80	5.40	3.25	3.53	1.41	1.68	1.95
CaO	1.06	1.10	1.08	1.10	0.94	1.39	1.11	0.83	1.50	1.39	2.15	1.34	1.64	0.96	0.79
Y ₂ O ₃	30.13	34.33	33.74	30.35	35.39	29.18	35.27	34.52	30.61	17.21	18.92	30.24	32.96	34.35	37.35
Ce ₂ O ₃	1.61	1.26	1.34	2.38	2.12	2.89	1.30	0.85	2.14	1.05	1.95	1.59	1.00	0.76	1.90
La ₂ O ₃	0.56	0.24	0.48	0.92	0.66	1.12	1.10	0.54	0.15	0.21	0.37	0.43	0.40	0.17	1.09
Nd ₂ O ₃	5.04	3.64	3.26	5.30	2.56	4.72	2.43	2.79	3.70	1.98	4.94	2.10	3.24	3.20	2.41
UO ₂	1.38	1.36	0.98	1.29	0.86	1.17	1.09	1.31	1.86	1.85	0.42	1.26	2.40	2.20	0.38
ThO ₂	6.60	3.57	5.64	5.52	4.04	6.16	3.98	5.21	4.59	7.46	0.01	6.40	5.04	3.93	4.58
Nb ₂ O ₅	47.76	49.10	48.51	50.34	49.71	48.28	51.09	50.61	48.97	50.65	49.57	48.62	51.19	52.30	51.74
Ta ₂ O ₅	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TiO ₂	0.58	0.22	0.47	0.26	0.32	0.64	0.53	0.56	0.45	0.70	0.72	1.19	0.20	0.19	1.01
FeO	0.04	0.48	0.37	0.00	0.34	0.39	0.00	0.00	0.68	6.54	2.61	0.50	0.00	0.00	0.00
Total	96.27	96.00	96.46	98.08	97.88	96.78	98.39	98.76	95.34	93.34	93.79	94.57	97.47	96.86	100.03
Structural formula (O=32)															
Si	0.65	0.86	0.74	0.35	0.64	0.61	0.51	0.49	0.96	1.82	1.14	1.21	0.48	0.57	0.64
Ca	0.40	0.40	0.40	0.41	0.34	0.52	0.40	0.30	0.55	0.50	0.81	0.49	0.60	0.35	0.28
Y	5.61	6.25	6.18	5.61	6.38	5.43	6.31	6.21	5.61	3.09	3.54	5.50	6.00	6.21	6.52
Ce	0.21	0.16	0.17	0.30	0.26	0.37	0.16	0.11	0.27	0.13	0.25	0.21	0.13	0.09	0.23
la	0.07	0.03	0.06	0.12	0.08	0.15	0.14	0.07	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.02	0.13
Nd	0.63	0.45	0.40	0.66	0.31	0.59	0.29	0.34	0.46	0.24	0.62	0.26	0.40	0.39	0.28
U	0.11	0.10	0.08	0.10	0.07	0.09	0.08	0.10	0.14	0.14	0.03	0.10	0.18	0.17	0.03
Th	0.53	0.28	0.44	0.44	0.31	0.49	0.31	0.40	0.36	0.57	0.80	0.50	0.39	0.30	0.34
ΣA site	8.21	8.53	8.47	7.99	8.39	8.25	8.20	8.02	8.37	6.52	7.24	8.32	8.23	8.10	8.45
Nb	7.71	7.59	7.55	7.90	7.61	7.63	7.77	7.74	7.62	7.71	7.87	7.50	7.92	8.04	7.67
Ta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.15	0.06	0.12	0.07	0.08	0.17	0.13	0.14	0.12	0.18	0.19	0.31	0.05	0.05	0.25
Fe	0.01	0.14	0.11	0.00	0.10	0.12	0.00	0.00	0.20	1.84	0.77	0.14	0.00	0.00	0.00
ΣB site	7.87	7.79	7.78	7.97	7.79	7.92	7.90	7.90	7.94	9.73	8.83	7.96	7.97	8.09	7.92

Table 1. Continued

Type; metasomatic	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70	CJ-70*	CJ-70*	CJ-70*	CJ-70*	CJ-70*	CJ-70*
SiO ₂	2.07	1.10	1.30	1.86	1.77	1.46	2.75	1.41	1.79	2.56	5.72	5.38	2.54	3.11	5.34	
CaO	0.49	0.27	0.48	0.65	0.82	0.60	1.37	0.85	1.15	0.87	1.80	1.62	1.82	1.20	1.61	
Y ₂ O ₃	38.32	42.02	39.59	38.25	37.08	38.60	34.24	36.38	31.82	31.45	20.19	21.27	30.47	28.31	23.80	
Ce ₂ O ₃	0.65	0.48	0.00	1.31	1.53	1.75	0.64	0.82	1.46	0.96	0.51	1.35	1.07	1.43	2.01	
La ₂ O ₃	0.15	0.21	0.06	0.79	0.93	0.79	0.36	0.56	0.46	0.45	0.00	0.00	0.46	0.13	0.36	
Nd ₂ O ₃	2.33	0.42	1.25	2.32	2.49	2.12	1.28	3.09	2.86	3.60	1.35	1.50	3.11	2.05	1.82	
UO ₂	0.46	0.91	1.29	0.17	1.23	0.76	1.28	2.05	0.91	3.17	5.35	6.26	1.86	1.84	1.78	
ThO ₂	3.18	1.83	1.84	3.03	3.29	3.46	6.01	2.20	6.42	6.34	8.01	8.79	6.90	5.12	9.24	
Nb ₂ O ₅	52.08	53.01	51.18	52.42	50.40	52.77	51.63	51.43	48.18	45.91	39.99	39.75	47.44	47.96	44.86	
Ta ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TiO ₂	0.46	0.42	0.26	0.51	0.29	0.35	0.26	0.24	0.89	1.55	5.23	3.29	0.30	0.65	1.09	
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.17	0.82	
Total	100.19	98.70	96.21	98.15	97.52	100.66	95.02	96.65	93.74	93.82	86.89	87.66	93.12	90.42	90.27	
Structural formula (O=32)																
Si	0.69	0.36	0.44	0.62	0.60	0.48	0.93	0.48	0.63	0.91	2.06	1.99	0.90	1.11	1.90	
Ca	0.18	0.10	0.18	0.23	0.30	0.21	0.50	0.31	0.44	0.33	0.70	0.64	0.69	0.46	0.61	
Y	6.82	7.37	7.15	6.74	6.68	6.74	6.19	6.59	6.00	5.93	3.87	4.18	5.77	5.39	4.50	
Ce	0.08	0.06	0.00	0.16	0.19	0.21	0.08	0.10	0.19	0.13	0.07	0.18	0.14	0.19	0.26	
La	0.02	0.03	0.01	0.10	0.12	0.10	0.05	0.07	0.06	0.06	0.00	0.00	0.06	0.02	0.05	
Nd	0.28	0.05	0.15	0.28	0.30	0.25	0.16	0.38	0.36	0.46	0.17	0.20	0.40	0.26	0.23	
U	0.03	0.07	0.10	0.01	0.09	0.06	0.10	0.16	0.07	0.25	0.43	0.51	0.15	0.15	0.14	
Th	0.24	0.14	0.14	0.23	0.25	0.26	0.46	0.17	0.52	0.51	0.66	0.74	0.56	0.42	0.75	
ΣA site	8.34	8.18	8.17	8.37	8.53	8.31	8.47	8.26	8.27	8.58	7.96	8.44	8.67	8.00	8.44	
Nb	7.88	7.90	7.85	7.85	7.71	7.82	7.92	7.92	7.71	7.36	6.52	6.64	7.63	7.75	7.21	
Ta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ti	0.12	0.11	0.07	0.13	0.07	0.09	0.07	0.06	0.24	0.41	1.42	0.91	0.08	0.18	0.29	
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.05	0.24	
ΣB site	8.00	8.01	7.92	7.98	7.78	7.91	7.99	7.98	7.95	7.77	8.06	7.55	7.71	7.98	7.74	

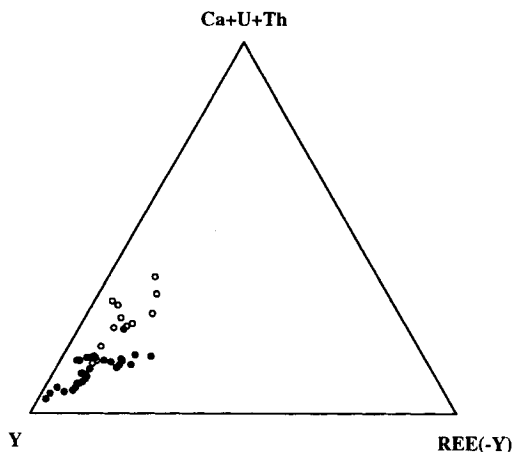


Fig. 8. Triangular diagram of Y-REE ($\Sigma\text{REE}-\text{Y}$)-(Ca+U+Th) for the fergusonites from Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 4.

언, 김근수, 1995). Na, K 등 알칼리원소를 비롯하여 Zr, REE, Nb, Y 등의 불호정성 (incompatible) 원소의 농집은 유체 및 휘발성원소 (H_2O , CO_2 , F, Cl 등)의 비율이 높은 마그마의 후퇴적 비등 (retrograde boiling)에 의해 이루어진다. 이러한 조건에서 미사장석과 알바이트화작용에 의한 광물생성이 촉진되고, 그 결과 희유금속원소의 부화가 수반된다. 이러한 양상은 고도의 분별화작용이 진행된 화강암질 마그마의 후기단계에서 일어나며, 일반적으로 K와 Na 교대작용에 이어 Fe교대작용, 그라이젠화작용 및 규화작용 등의 대상분포를 형성한다 (Best, 1982). Pointer *et al.* (1988)은 흑운모 화강암이 후기 마그마성 교대작용 (post magmatic metasomatism)에 의해 알바이트, 미사장석화, 그라이젠화 작용 등이 일어나고, 이러한 과정에서 교대작용에 의해 희유원소나 Y함량이 높은 방사성 광물 (U, Th 함유광물)이 침전됨을 보고한 바 있다.

충주지역 계명산층내의 알칼리암은 타지역과 비교해 볼 때 성분 및 조직이 다양하고 변화가 크며, peralkaline 유체의 영향에 따른 천부 또는 subvolcanic emplacement 특성을 나타낸다 (Balck *et al.*, 1985; Bowden, 1985). Y-Nb군 광물을 포함한 희유원소 광화작용은 알칼리 화성작용에 수반된 알바이트화와 미사장석화작용 및 후기의 열수작용에 기인되며, 산출특성과 REE 광물의 지화학적 거동 (fraction trend) 등으로 볼 때 상부에 위치한 암석이 상대적으로 낮은 온도에서 교대될 때 형성되었음을 시사한다. 모암은 마그마의 결정화작용 후기단계 (late-stage magmatism)와 마그마작용 이후 (post magmatism)의 변질작용에 의해 영향을 받아 주로 석영, 장석으로 구성되는 부분

과 흑운모의 함량이 증가되고 다량의 희유금속 광화작용을 수반하는 부분으로 구분된다. 초기에는 K나 Na 교대작용에 의한 양상을 띠며, 다량의 철산화광물 (자철석과 적철석) 및 합희유원소 광물을 수반한다. 한편, 후기의 변질작용을 받은 부분에서는 석영, 운모, 형석, 방해석 및 소량의 REE 광물이 수반되며, 부분적으로 다량의 석영대가 발달된다. 이러한 현상은 알칼리 화성암에 의한 페나이트화 (fentitization)의 결과로 해석될 수 있다.

결론

충주지역의 계명산층내에는 알칼리암 (알칼리 화강암, 페그마타이트, 교대암)에 수반된 고품위의 희유금속광상이 부존하며, 다양한 희유원소함유광물이 수반된다. 퍼구소나이트는 저어콘, 갈럼석과 함께 보편적으로 산출되는 광석 광물로 이트륨-니오븀계에 속하는 대표적인 광물이다.

현미경하에서 퍼구소나이트는 담황색 내지 담갈색을 띠며, 결정의 외곽부는 암색을 이룬다. 결정은 방사성 원소의 치환에 의해 대부분이 메타미트화작용 (metamictization)으로 등방화되어 있으며, 인접광물 (특히 운모류)에 강한 방사성 후광대를 형성한다. 열수변질에 의해 입자의 가장자리나 광물내의 미세한 틈을 따라 불규칙한 교대조직을 형성한다. 편광이나 반사광에서 수반광물의 상호관계는 용리, 교대, 변질 등에 의해 매우 불규칙하여 구별이 매우 어려우나 BEI 성분도에서는 뚜렷한 조성상의 특징을 나타낸다.

공생광물의 정출순서는 갈럼석과 퍼구소나이트 결정 내부에 포획체로서 밀집히 수반되는 모나자이트나 인회석과 같은 인산염광물이 먼저 정출되고, 이어 Y를 비롯한 REE를 함유한 광물, Nb-Ta함유광물 (콜롬바이트), 갈럼석, 저어콘 및 방사성원소함유광물 (주로 토라이트) 순으로 나타난다.

퍼구소나이트의 화학조성 범위 (Y_2O_3 : 29.18~42.02, Nb_2O_5 : 48.51~53.01 wt.%)는 니오븀에 비해 이트륨의 조성 변화가 다양한 특징을 보여준다. A-사이트에서 이트륨과 치환관계에 있는 토륨, 우라늄, 이트륨을 제외한 희토류 원소, 칼슘 및 규소는 각각 ThO_2 : 1.83~6.93, UO_2 : 0.17~2.84, RE_2O_3 : 1.11~8.73, CaO : 0.27~1.50, SiO_2 : 1.01~3.53 wt.%의 조성을 나타내며, B 사이트의 니오븀과 치환관계에 있는 탄탈륨은 거의 나타나지 않으며 (<0.1 wt.%), 티타늄 및 철은 각각 TiO_2 : 0.19~1.19, Fe_2O_3 : 0.00~0.68 wt.%로서 대부분 니오븀으로만 구성되어 있음을 알 수 있다.

변질양상 (열수변질)을 띠는 퍼구소나이트는 전형적인

폐구소나이트에 비해 현저한 화학조성의 차이를 나타낸다. 칼슘, 우라늄, 토륨 및 규소는 전반적으로 증가하는 경향을 나타내고, 이트륨을 포함한 희토류원소의 함량은 뚜렷이 감소 (최소 12.45 wt.%) 된다. 탄탈륨, 티타늄 및 철은 증가하며, 그 중에서도 철의 함량은 최대 8.79 wt.% 까지 증가한다. 니오븀의 함량은 조성변화의 범위가 심하게 나타난다 (39.75~53.66 wt.%). 분석값의 전함량이 현저히 적은 경우는 변질에 의한 H₂O의 치환 결과로 해석된다.

폐구소나이트의 화학조성은 모암이 마그마 기원에서 열수 기원으로 변함에 따라 이트륨과 니오븀이 감소하는 경향을 나타낸다. 이트륨의 함량 변화에 따른 Y/Nb 값은 모암이 알카리화성암에서 교대암, 열수기원으로 변천됨에 따라 감소한다. 이러한 화학조성의 변화는 마그마의 분별 작용 (fractionation)이 진행될수록 즉 마그마의 영향에서 멀어질수록 이트륨이 감소함을 반영한다. 폐구소나이트를 수반하는 모암은 변성작용, 마그마작용, 알카리교대작용 및 열수작용 등의 다양한 지질현상의 결과를 나타내며, 화학조성상의 변화는 상기 지질작용의 복합적인 요인의 결과를 반영하고 있다고 볼 수 있다. 이와 같은 특성은 계명산층, 철광층 및 희유원소 함유광상의 성인과도 밀접한 관련성이 있는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 전략광물자원연구센터 (CMR)의 연구과제 및 학술진흥재단 연구과제 중 일부로 수행되었으며, 이들 기관에 사의를 표한다. 아울러 본 논문을 심사해주신 자원연구소의 이진수 박사님께 감사드린다.

참고문헌

- 김수진 (1988a) 희유원소광물 (1) 니오븀과 탄탈륨광물. 광물과산업, 1권, p. 28-33.
- 김수진 (1988b) 희유원소광물 (2) 이트륨 (Y)광물. 광물과산업, 1권, p. 23-27.
- 김유동, 장세원, 이평구 (1989) 국내 철광상내 희유금속 부존 특성 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서 (KR-88-8A), p. 413-508.
- 박준권, 오민수, 박성원 (1994) 충주 아래산지역 희유금속광물자원 탐사연구 (II). 한국자원연구소 연구보고서 (KR-93-1C-2), p. 1-105.
- 박맹언, 김근수 (1995) 충주지역 희토류광상의 성인: 산출상태와 지화학적 특성. 자원환경지질, 28권, p. 599-612.
- 박맹언, 김근수, 최인식 (1996) 충주지역 희유원소광상에서 산출되는 갈륨석의 지화학적 특성. 자원환경지질, 29권, p. 545-559.
- 오민수, 서정철, 구성본, 최종호 (1989) 충청북도 중원군 아래산지역 희유금속광물 (갈륨석)자원의 지질 광상연구. 한국동력자원연구소 연구보고서 (KR-88-8A), p. 3-111.
- 자원개발연구소 (1977) 한국의 광물.
- 조선광물지 (1943) 조선의 광물.
- Balck, R., Lameyre, J., and Bonin, B. (1985) The structural setting of alkaline complexes. Journal of African Earth Sciences, v. 3, p. 5-16.
- Best, M. (1982) Igneous and metamorphic petrology. W. H. Freeman and Company, New York, San Francisco.
- Beus, A.A. (1968) Albite deposits. In: Smirnov VI (ed.) Genesis of the endogenic ore deposits. Nedra Publishing House, Moscow, p. 66-114 (in Russian).
- Beus, A.A., Severov, V.A., Sitnin, A.A., and Subbotin, K. D. (1962) Albitized and greisenized granite (apogranites): Moscow, Akademia, Nauk SSSR, 196p. (in Russian).
- Bowden, P. (1985) The geochemistry and mineralization of alkaline ring complexes in Africa (a review). Journal of African Earth Sciences, v. 3, p. 17-39.
- 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.
- 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.
- Cullers R.L. and Graf J.L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: predominantly basic and ultrabasic rocks. In P. Henderson (ed.), Rare earth element geochemistry, Elsevier Science Publishers B.V., p. 237-274.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (1992) An introduction to the Rock-Forming Minerals (2nd ed.). Ortho- and Ring Silicate. Longmans, London.
- Gilbert, J.A. (1981) The Encyclopedia of Mineralogy. Frye, T. (ed.). Hutchinson Ross Publishing Company. Stroudsburg, Pennsylvania.
- 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.
- Kim, G.S. (1991) Iron Mineralization in the Chungju mining district, Korea. Ph.D. Thesis, Inst. of Geosci. Univ. of Tsukuba, 102p.
- Miyawaki, R. and Nakai, I. (1987) Crystal structures of rare-earth minerals. Rare Earths (Kidorui), no. 11, p. 1-133.
- Moller P., Cerny P., and Saupe F. (eds) (1989) Lanthanides, tantalum and niobium. Springer New York Berlin Heidelberg.
- Nagashima, O. and Nagashima, H. (1960) 일본 희토소 광물. Tokyo, 436p.
- 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.