

## 충주지역 희유원소광상에서 산출되는 갈렘석의 지구화학적특성

박맹언\* · 김근수\*\* · 최인식\*\*\*

### Geochemical Characteristics of Allanite from Rare Metal Deposits in the Chungju Area, Chungcheongbuk-Do (Province), Korea

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

**ABSTRACT** : Rare metal (Nb-Zr-REE) ore deposits are located in the Chungju area. Geotectonically, the rare metal ore deposits are situated in the transitional zone between Kyeonggi massif and Okcheon belt. The rare metal deposits are distributed in Kyemyeongsan Formation which consist of schist and alkaline igneous rocks. Alkali granite has suffered extensive post-magmatic metasomatism and hydrothermal processes. The ore contains mainly Ce-La, Ta-Nb, Y, Y-Nd, Nd-Th group minerals. More than 15 REE and REE minerals are found in the ore deposits. Allanite, one of the Ce-La rich REE minerals belonging to the epidote group, is the most common mineral in the studied area. The allanite-bearing rocks may be divided into seven types by features of occurrence and mineral associations; zircon type (ZT), allanite-vein type (AT), feldspar type (KT), fluorite type (FT), quartz-mica type (QT), iron-oxide type (MT), and amphibole type (HT). The allanite veins (AT) and zircon rich rocks (ZT) contain the highest total REE contents. Differences in REE abundance can be interpreted in terms of varying portions of magmatic hydrothermal fluid. Petrographical and chemical data are presented for allanites which were collected from different types. The allanites show wide variations in optical properties, due in part to differences in their chemical composition (depending on the types) and to the degree of crystallinity of the individual specimens. Allanite metamicts in biotite are generally surrounded by well developed pleochroic haloes. Usually, allanite is accompanied by zircon and other REE-bearing minerals. CaO and total REE contents ( $\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3$ ) range from 9.29 to 18.79% and 11.66 to 26.31%, respectively. Also,  $\text{SiO}_2$  (28.87~32.61%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8.30~16.88%), and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (16.74~24.38%) contents show varying contents from type to type. The  $\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3$  of allanite has positive relationships with  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and negative relation with CaO,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Back-scattered electron microscope images (BEI) of allanite shows that the its mineral composition and texture is very complex. The allanite-bearing hosts show distinct light REE enrichment with strong negative Eu anomaly except for HT. The HT has an almost flat REE distribution pattern with a small negative Eu anomaly. The chemical variation of the allanites with occurrences and mineral association can be related to condition of temperature and oxidation states in precipitation environment.

## 서 언

과학기술의 발전에 따라 희유금속은 전자산업, 항공우주산업등 미래를 주도하게 될 첨단 산업에 필수 원료로서

그 가치와 이용도가 증대되고 있다. 이들 자원은 일부국가에 편중되어 분포함으로써 자원 강대국들의 자원보호정책에 따라 원활한 수급이 어려워지고 있다. 이미 선진제국은 희유금속광물을 국가전략물질로 선정하여 정책적 차원에서 비축을 행한지 오래되었으며, 이러한 환경에서 불매 전략 수입에 의존하는 우리나라는 이들 자원의 안정적인 수급을 위해서 더욱 활발한 탐사와 개발이 필요하다.

\* 부경대학교 응용지질학과 (Dept. of Applied Geology, Pukyong National Univ., Pusan 608-737, Korea)  
\*\* 부산대학교 지질학과 (Dept. of Geology, Pusan National Univ, Pusan 609-735, Korea)  
\*\*\* 전략광물자원연구센터 (Center for Mineral Resources Research, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea)

희토류 광상은 성인적으로 알카리 화성암인 카보나타이트와 관계된 맥상광상, 페그마타이트광상, 접촉교대광상과 인회석광상, 우라늄광상, 섀캄브리아가기 화산기원의

철광상 및 사광상에 수반되어 산출되며, 흔히 갈렘석을 수반한다 (Neary, Highley, 1984). 국내에 보고된 갈렘석의 산출은 경기도 안성군, 경북 월성군, 그리고 북한지방에서 페그마타이트의 조암광물, 염기성암맥의 부성분광물, 석회암의 접촉변성작용의 산물, 편마암의 조암광물 등의 산상으로 보고 (자원개발연구소, 1977; 조선광물지, 1943)된 바 있으며, 최근에는 충주지역 (오민수, 1989; 오민수 등, 1989; Kim, 1991; 박맹언, 김근수, 1995), 산청지역 (김원사 등, 1992) 등에서 산출됨을 보고하였다.

충주지역의 희유금속 광상은 주로 계명산층을 구성하는 편암내에서 편리를 따라 산점상 또는 괴상으로 산출되며 국부적으로 알카리 화강암과 편암의 경계부에서 맥상 또는 교대상으로 발달되며 갈렘석을 수반한다 (박맹언, 김근수, 1995). 고기의 변성암류와 수반되어 산출되는 희유금속광상은 대단히 복합적인 성인적 요소와 관련되어 오랫동안 논쟁의 대상이 되어왔다. 특히 충주지역의 희유금속광상은 퇴적작용, 화산-심성 화성활동, 변성작용, 접촉교대 및 열수교대 등 다양한 특성을 가짐으로 인해 성인 규명이 되어있지 않은 상태이다.

본 연구는 충주지역 계명산층내에 배태된 희유원소함 유광물중 가장 보편적으로 수반되며, REE (rare earth element)가 풍부한 녹염석군의 광물인 갈렘석의 산출상태에 따른 지화학적 특성등을 파악하고, 희유금속자원의 탐사와 개발에 유용한 자료를 얻고자 수행되었다. 연구지

역의 갈렘석은 암상에 따라 다양한 산출 양상을 가지므로 산출특성과 광물화학조성과의 대비를 통하여 희유원소광상의 성인에 따른 특성을 파악하고자 하였다.

### 지질개요

충주 서남부지역 일대는 시대미상의 계명산층이 분포하며, 구성암석은 크게 편암과 함철규암으로 분류된다. 편암은 구성광물의 조직, 양비에 따라 석영편암, 석영-운모편암 및 석영-장석편암으로 구분되어지며, 층상규제형 (strata-bound type)의 철광상이 발달되어 있다 (Kim *et al.*, 1994). 이들 암석들은 알카리 화강암류에 의해 포획, 교란되기도 한다. 계명산층을 구성하는 변성퇴적암 및 화성암 (Fig. 1)의 특징은 다음과 같다.

### 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 철광층의 상하반을 구성하면서 산출된다. 석영편암은 야외에서 암회색내지 백색의 호층에 의한 엽리의 발달로 쉽게 구별된다. 엽리에 평행하게 배열된 얇은 렌즈상의 철

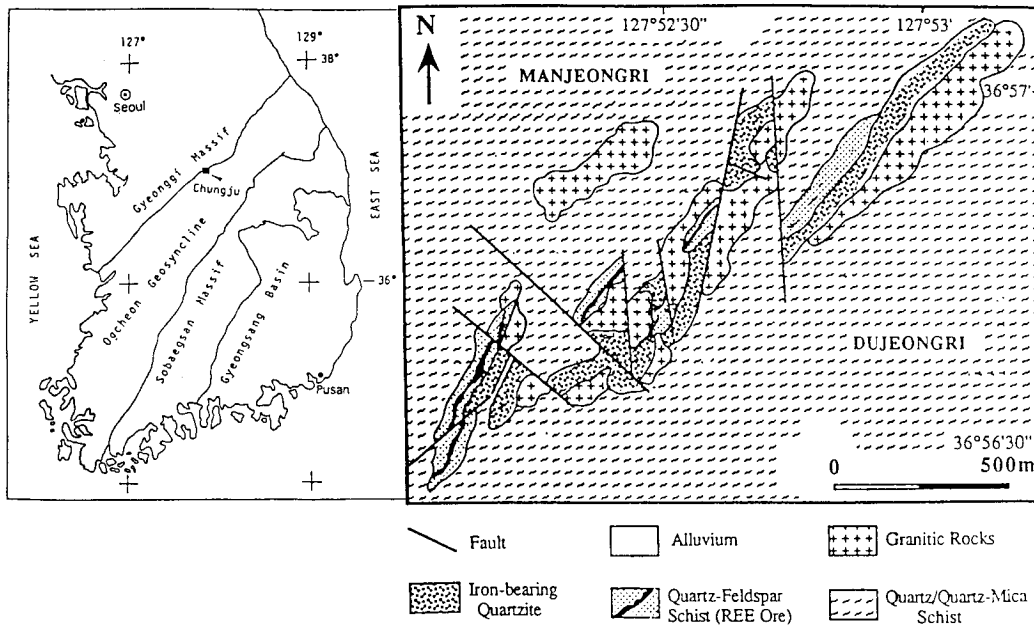


Fig. 1. Geologic map of the studied area.

산화광물의 집합체를 포유하며, 철광층과는 점이적인 변화를 보이거나 철산화광물의 증가와 장석의 감소에 의해 뚜렷이 구분된다. 구성광물은 석영, 미사장석, 사장석을 주로 하며, 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 장석등 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, 녹립석, 방해석, 저어콘 및 철산화광물이 수반된다.

**석영-장석편암**

석영-장석편암은 함 회토류 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 고온의 알카리 교대작용에 의해 형성된 교대암이 발달되며, REE 광상을 형성한다. 국부적으로 유동조직과 조면암질 조직을 가지며, 세립질의 석영과 장석류로 구성된다. 석영편암 및 석영-운모편암에 비해 장석의 함량이 높다. 교대작용의 양상이 우세한 부분에서는 조립질 조직을 띠며, 석영-장석편암은 함 회토류광물인 저어콘과 갈럼석을 비롯하여, 미량의 녹색 흑운모, 형석, 철 산화광물, 방해석, 녹립석 및 녹니석등이 수반된다. 본 층에는 수십 cm 폭의 회토류원소 부화층이 형성되어 있으며, 국부적으로 석영, 장석, 백운모, 흑운모 및 형석등으로 이루어진 페그마타이트 암맥이 발달된다. 특히 REE부광대 주위는 변질대의 발달과 함께 심한 구조적 작용에 의한 압쇄암이 산출된다.

**합철규암**

철광층으로서 편암내에 부존된다. 석영 편암과는 점이

적인 관계를 보이지만 상대적인 철산화광물의 함량에 의해 구분된다. 자철석, 적철석 및 석영등의 양비의 반복에 의한 호상조직을 보이는 것이 일반적이다. 합철규암이 화강암과 접하는 부분은 자철석의 함량이 증가되며, 호상구조는 소실되어 피상의 조직을 보이기도 한다. 주로 자철석, 적철석 및 석영으로 구성되고 미량의 미사장석, 흑운모가 수반된다.

**알카리 화강암**

소규모 암주 내지 암맥상으로 산출되는 고생대(?) 화강암류(박맹언, 김근수, 1995)로서 희유원소 및 철광체와 밀접히 수반되어 분포하고 있으며, 광체 및 모암을 포획하기도 하고, 뚜렷한 접촉관계를 보이기도 한다. 산상은 아주 불규칙하며, 단층에 의해 규제되기도 한다. 구성광물의 함량변화는 매우 불규칙하며, 좁은 지역에서도 유색광물이 많은 섬장암질 암석에서 유색광물이 거의 수반되지 않는 화강암질까지 다양하게 나타난다. 합철규암과 직접 접촉하여 고품위 철광체를 이루기도 하지만 어떤 부분은 주위모암에 전혀 영향을 주지 않고 분포하기도 한다.

**희유원소광상과 갈럼석의 산출상태**

충주지역 희유원소 광상(Nb-Zr-REE)은 계명산층 구성암석중 특히 알카리 화성암 기원의 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 분리되어 산출된다. 편암층내의 함 희유원소광물 및 저어콘은 전반적으로 미량으로 산출되나, 교대조직을 수반하는 연홍색 석영-장석편암내에서는 특히 농집되는 양상을 갖는다. REE 광물은 석영-장석 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(microclineite)과 갈럼석 교대암으로 구분되며, 국부적으로 알카리 화강암내에 포획체로서 산출된다. 저어콘 및 철산화광물과 함께 층상구조를 갖는 REE층, 편암층내의 편리를 따라 교대작용을 수반하는 연속성이 불량한 형석과 석류석을 수반하는 석영맥상

으로 산출된다. 또한 화강암과 석영-장석편암의 경계부 또는 편암의 엽리를 따라 주로 괴상의 갈럼석으로 구성된 암맥 (폭: 5~10 cm)이 발달된다. 충주지역에서 산출되는 희유원소 광상의 유형은 크게 엽리나 선구조를 수반하는 저어콘-REE형, 장석-REE형과 맥상 또는 괴상의 갈럼석-REE형, 형석-REE형으로 구분된다 (박맹언, 김근수, 1995).

갈럼석은 본 지역에 가장 보편적으로 산출되는 희유원소 함유광물로서 희유원소 광상의 유형에 관계없이 전 유형에서 산출되며, 저어콘-REE형과 갈럼석-REE형, 장석-REE형에서 비교적 다양한 REE광물이 공생하는데 반하여 형석-REE형에서는 수반되는 REE광물의 종류가 상대적으로 적은 양상을 띠며, 이러한 현상은 광석들의 REE 함량 (갈럼석 함량)과도 비례적인 관계를 가진다. 또한 화강암질 암석과 접촉한 함철규암 (철광층)의 철산화광물과 함께 수반되기도 하며, 모암인 석영-운모편암과 철광층의 상하부에 평행하게 산출되는 각섬암에서도 수반된다. 희유원소광상 유형에 따른 공생광물은 La-Ce계, Ta-Nb계, Y계, Y-Nd계 및 Nb-Th계로 분류된다. 본 논문에서는 1차적으로 La-Ce계에 속하는 갈럼석의 광물학적 및 지화학적 특성에 대한 결과를 언급하였다. 갈럼석의 산출특성과 암석 유형은 수반되는 주 구성광물의 종류에 따라 다음과 같이 분류된다.

#### 저어콘형 (ZT)

석영-장석편암내의 편리를 따라 약 1 m의 폭으로 수십 m 연장 분포하며 층상 또는 렌즈상으로 교대작용의 특성을 갖는 저어콘-REE형의 희토류광상에 수반되는 갈럼석의 산출 유형이다. 주로 담황색의 형광색을 보이는 다량의 저어콘 (>40%)과 소량의 흑운모, 미사장석, 자철석이 수반되며 퍼구소나이트 (fergusonite), 유세나이트 (euxenite), 베스나사이트 (bastnaesite), 모나자이트 (monazite), 폴리크레이스 (polycrase), 제노타임 (xenotime), 오키노가나이트 (okanoganite), 파이로클로르 (pyrochlore), 콜롬바이트 (columbite), 토라이트 (thorite), 스피넬 (sphen), 인회석 (apatite)등의 다양한 희유원소 함유광물이 공생한다. 갈럼석은 주로 저어콘 집합체내에 렌즈상으로 산출되며, 자형의 갈럼석이 미립 (< 10 μm)의 저어콘에 의해 교대된다 (Fig. 2A). 판상, 주상, 교대상의 결정으로 산출되는 갈럼석 집합체는 비교적 깨끗한 결정을 이루지만, 저어콘이 풍부한 층내에서는 일반적으로 심하게 교대되어 결정의 형태가 불분명하게 나타난다. 입자의 틈을 따라 진한 갈색변질을 이루기도

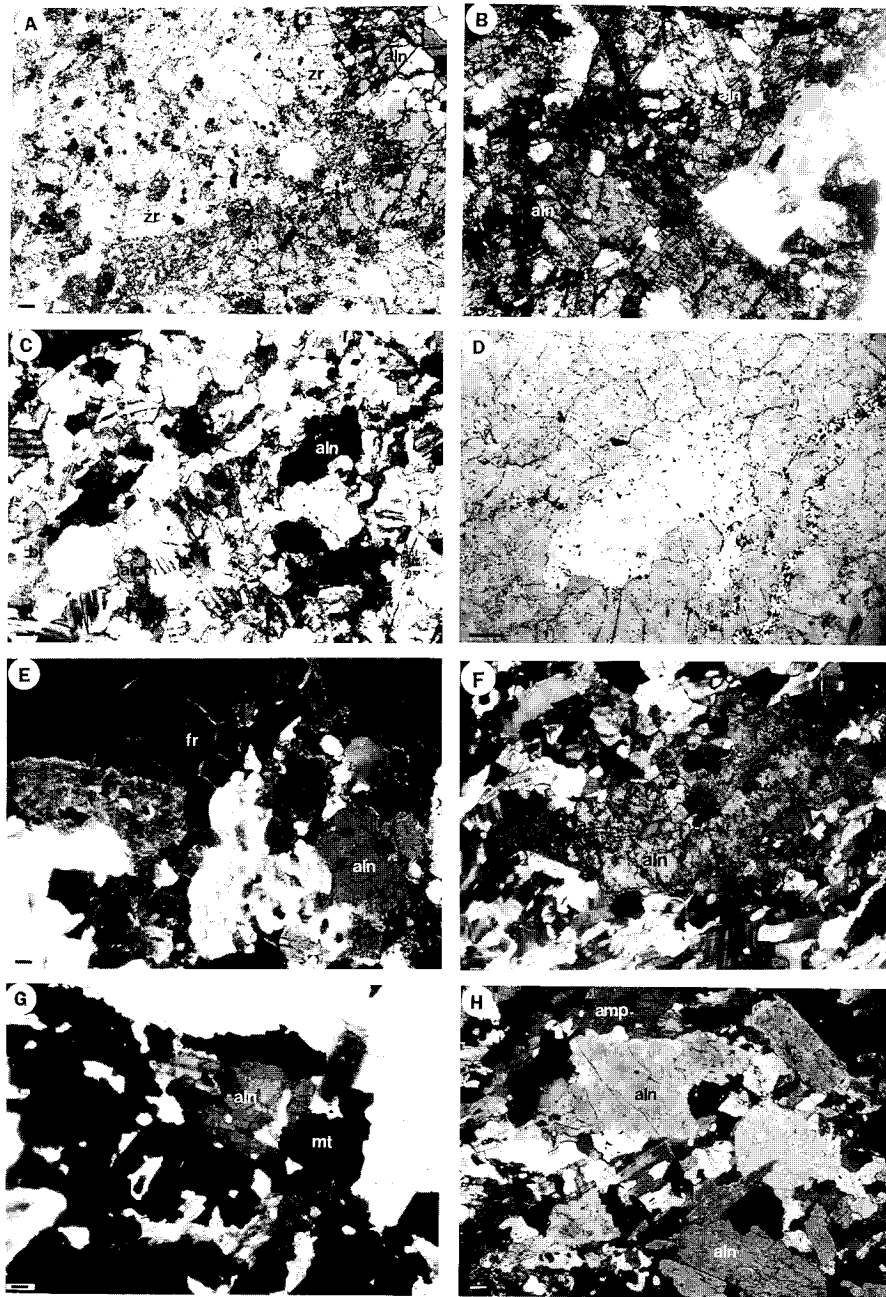
한다. 쌍정이나 벽개는 관찰되지 않으며, 연황색에서 담갈색까지 색의 변화가 심하다. 갈럼석 주변부에 변질상으로 오키노가나이트가 존재한다. 그 외에 갈럼석 내에는 용리상 또는 교대상으로 존재하는 미동정의 광물이 수반된다.

#### 갈럼석 맥상형 (AT)

알카리 화강암과 석영-장석편암과의 경계부에서 5~10 cm 맥상으로 페그마타이트조직을 형성하는 갈럼석-REE형에 수반되어 산출된다. 주로 조립질의 갈럼석 집합체로 이루어져 있으며 (>80%), 미립 집합체의 저어콘, 미사장석이 소량 수반된다 (Fig. 2B). 세맥상의 갈럼석 집합체는 알카리 화강암 (애프라이트질)에 의해 교대 또는 절단되는 양상을 보이기도 하며, 접촉부에서 갈럼석은 암갈색을 띠면서 결정도가 감소하는 경향이 있다. 갈럼석은 주상의 집합체로 장축의 크기가 수 mm에 이르며 입자 충전형태로 미량의 석영, 자철석, 흑운모, 미사장석, 저어콘 등이 수반된다. 연한 녹황색에서 암갈색으로 강한 다색성을 보이며, 접촉쌍정을 이루기도 한다. 세맥상의 석영, 녹니석 및 방해석에 의해 단절되기도 하고, 때때로 입자주위나 균열을 따라 극미립의 저어콘에 의해 교대되는 양상을 보이기도 한다. 갈럼석의 결정 경계부에서는 결정도가 낮은 오키노가나이트가 변질산물로서 수반된다.

#### 장석형 (KT)

희유원소 광상 중 가장 광범위하게 분포하는 석영-장석편암과 알카리 화강암의 교대작용에 의해 형성된 장석-REE형에 수반되는 갈럼석 유형으로, 교대반응의 정도에 따라 조직 (입자크기), 구성광물의 함량비가 달라진다. 유색광물인 각섬석, 흑운모와 함께 세립질의 석영과 미사장석을 주로하는 석영-장석편암에 선구조 (lination)를 이루기도 하며, 알카리 화강암과의 접촉부는 괴상조직을 보여 준다. 갈럼석의 결정형은 반자형내지 타형으로 더듬게 쌍정을 이루기도 하고 부분적으로 암갈색의 메타미트 (metamict)상으로도 나타난다 (Fig. 2C). 자형의 스피넬 (sphen), 파이로클로르 (pyrochlore), 저어콘 (zircon), 퍼구소나이트 (fergusonite) 등의 REE함유광물과 밀접히 공생하며, 미량으로 형석, 스피넬, 녹염석, 철산화광물, 사장석, 방해석, 견운모가 수반된다. 반사도와 BEI (Back-scattered Electron Image)성분도의 차이를 갖는 미립의 Nb-Ta등이 풍부한 광물이 갈럼석 입자내에 교대 또는 용리상으로 존재한다 (Fig. 2D).



**Fig. 2.** Photomicrographs of the allanite minerals. A; Zircon type, it is characterized by very fine zircon (zr) aggregates, which replace to long prismatic allanite (aln). Allanite is also replaced by REE-bearing minerals. B; allanite-vein type, allanite commonly appear as coarse euhedral to subhedral crystals, and show strong pleochroism and contact twinning. C; Feldspar type, anhedral allanite (aln) show dark brown color and contact biotite (bi) is developed pleochroic haloes. D; Feldspar type (photomicrograph in reflected light) allanite contains emulsed REE-rich minerals and very fine zircon. E; Fluorite type, allanite (aln) associated with the fluorite (fr). Hydrothermally formed allanite crystals are common anhedral and show strong pleochroism. F; Quartz-mica type, allanite (aln) occurs as anhedral to subhedral grains, partly in metamict states. Aggregated zircon and deformed discrete allanite grains lie parallel to the direction of foliation of the schist. G; Iron-oxide type, allanite (aln) associated with iron-oxide (mt) at the contact with granitic rock. Euhedral allanite show contact twinning and strong pleochroism. H; Amphibole type, allanite (aln) crystals having a long prismatic or tabular habit, is associated with hornblende (amp). Scale bars indicate 0.1 mm.

### 형석형 (FT)

편암의 엽리를 따라 교대조직을 수반하면서 세맥상으로 발달되며, 국부적으로 페그마타이트 조직을 갖는 괴상의 조립질을 형성하기도 한다. 열수맥의 특성과 유사하며, 주 구성광물은 형석, 석영, 미사장석 등이다. 석류석, 자철석, 적철석등과 함께 갈럼석, 저어콘 등이 수반된다. 또 석영편암과 석영-운모 편암내에는 분비성 석영맥이 연속성없이 분포하며, 이러한 석영의 집합체 내에는 형석, 석류석, 자철석, 적철석 등이 밀접하게 공생하며, 특히 형석 집합체와 수반되어 갈럼석, 저어콘 등의 희유원소 함유광물이 산출된다 (Fig. 2E). 갈럼석은 타형으로 강한 다색성을 보이며, 수반된 유색광물은 심하게 변질 교대된 양상을 띤다.

### 석영-운모형 (QT)

석영-운모 편암내에서 석영, 미사장석, 흑운모와 수반하여 비교적 조립의 갈럼석이 불규칙한 결정형으로 편리에 평행하게 나타난다 (Fig. 2F). 갈색으로 약한 다색성을 보이며, 부분적으로 매트믹트화되어 불투명한 암색을 띠며 인접하는 흑운모에 방사성후광을 형성하기도 한다. 타형의 석영에 의해 교대되는 양상을 나타내며 미립의 저어콘을 내포하거나 이들 광물에 의해 교대되기도 한다.

### 철산화광물형 (MT)

철광층과 화강암과의 접촉부에서 자철석 및 적철석에 수반하여 갈럼석이 산출되는 유형이다. 자형의 갈럼석은 적철석의 입자사이를 충전하여 산출되며 주상의 결정이 접촉쌍정을 이루며 강한 다색성을 갖는다 (Fig. 2G). 입자 경계부에서는 부분적인 매트믹트상으로도 나타난다. 교대작용의 특성을 갖지 않는 소량의 저어콘이 독립적으로 나타난다. 석영, 녹니석 및 흑운모가 철산화광물의 입자간극을 채우는 양상을 띠며 수반된다. 접촉부의 화강암은 일반적으로 변질되어 있으며, 화강암질암석은 주로 미사장석, 석영으로 구성된다.

### 각섬석형 (HT)

합철규암층에 발달되는 철광층의 상하반에서 주향과 평행하게 분포하는 수십 cm폭의 각섬암내에 산출되는 유형으로서 주로 각섬석, 피어사이트, 흑운모, 석영으로 구성된다. 부성분으로 스펀, 인회석, 탄산염광물, 갈럼석등

**Table 1.** Rare earth element (REE) contents (in ppm) of alunitic bearing host rocks. Abbreviations are the same as those of Fig. 3.

Sam. no.	ZT	AT	KT	FT	QT	MT	HT
	CR-3	AR-1	CJ335	CJ08	CJ04	CJ49	CJ14
La	3719	42560	432.0	240.0	68.6	31.4	50.0
Ce	7669	78780	569.0	480.0	162.2	60.6	82.0
Pr	924	9126	193.8	51.0	20.3	6.9	10.0
Nd	3465	21886	381.3	220.0	78.7	26.0	48.0
Sm	894	1409	161.4	31.0	16.8	7.1	6.8
Eu	49	43	8.9	2.3	0.4	0.9	2.1
Gd	965	425	146.9	52.0	16.5	8.8	7.5
Tb	187	30	28.3	5.0	3.1	1.8	0.8
Ho	244		36.6	14.0	4.5	2.8	1.1
Er	725	21	105.3	48.0	13.9	8.1	3.0
Tm	110		16.4	7.4	1.9	1.2	0.4
Yb	679	13	88.4	44.0	12.8	7.1	2.6
Lu	88		16.1	7.0	1.5	1.1	0.4

이 수반되며 갈럼석은 주상내지 관상으로 연녹황색에서 담갈색의 강한 다색성을 갖는다 (Fig. 2H). 흑운모와의 접촉부에서는 부분적인 방사능 후광을 보이기도 한다.

### 희토류원소 (REE) 분포양상

갈럼석은 희유원소광상을 구성하는 주요 광석광물로서 산출될 뿐만 아니라 수반하는 모암에서도 다양하게 나타난다. 갈럼석을 함유하는 광석 및 모암에 대해 이들의 기원 물질을 파악하고자 희토류원소 (rare earth element)를 분석하였으며, 이를 Boynton (1984)이 추천한 콘드라이트 (chondrite)의 존재비로 규격화 (normalized)하여 그 분포양상을 파악하였다. 박맹언, 김근수 (1995)는 연구지역 편암류의 REE 특성을 통한 연구에서 이들 암석들이 동일기원 또는 유사한 환경으로부터 유래되었을 가능성을 시사하였고, 옥천계 화산암의 연구결과 (Cluzel, 1992)와 비교하여 옥천계에 분포하는 대륙판 열극과 관련된 화산활동에 의해 유래된 석영-조면암질내지 유문암질 화산암과 대비하였다.

산출 유형별 희토류원소 (REE)의 함량은 희유원소광상의 광체중 고품위 광석에 해당하는 저어콘형 (ZT) 및 갈럼석 맥상형 (AT)에서 매우 높은 함량을 보이며 저품위인 장석형 (KT), 형석형 (FT)에 이어 모암인 석영-운모형 (QT), 각섬석형 (HT), 철산화광물형 (MT)으로 갈수록 낮아진다 (Table 1). 이것은 희토류원소 함유광물의 하나인 갈럼석이 희유원소 광체뿐만 아니라 수반하는 암석중에 다양한 산출특성을 보이며 함량도 산출형에 따라 다양함을 반영한다. 콘드라이트 (chondrite)로 규격화한

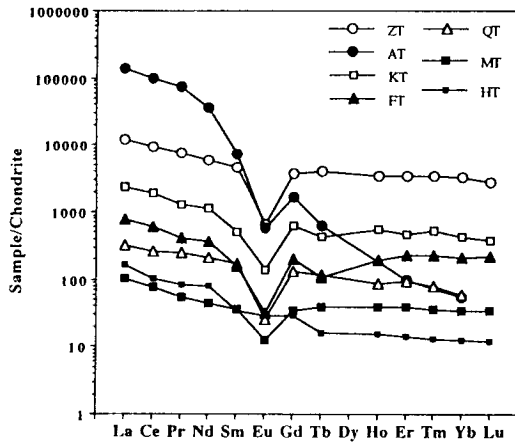


Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns for the allanite bearing host rocks of study area. ZT; zircon type, AT; allanite vein type, KT; feldspar type, FT; fluorite type, QT; quartz-mica type, MT; iron-oxide type, HT; amphibolite type.

희토류원소의 분포양상 (Fig. 3)을 보면 각 유형별 희토류원소의 상대적인 함량이 뚜렷한 차이를 나타내지만 전반적인 분포형태는 매우 유사하다. 이는 갈럼석을 함유하는 광석 및 암석의 기원 물질의 유사성을 반영하는 것으로 사료된다. 유형별 분포양상을 보면 갈럼석 맥상형이 특히 높은 LREE (light rare earth elements)와 LREE에서 HREE (heavy rare earth elements)로의 변화가 급격하게 변하는 양상이 특징적인데 이 유형은 대부분 (>80%)이 LREE의 조성을 갖는 갈럼석으로 이루어진 것에 기인하며, 다른 유형의 일반적인 특징은 HREE가 부화된 평행한 양상을 보여준다. 이것은 REE 분포양상이 갈럼석뿐만 아니라 수반하는 다른 광물의 영향을 나타낸다. 또한, 전체적으로 뚜렷한 Eu 부 (-) 이상 (anomaly)을 보이며 이와같은 특징은 갈럼석을 함유한 모암의 기원 물질의 유사성 또는 생성조건의 동일성을 반영하고 있다. 예외적으로 각섬석형에서 Eu이상이 미약한데 이는 후술할 갈럼석의 화학조성에서도 나타나듯이 각섬석형 갈럼석의 모암인 각섬암의 기원적 이질성을 반영하는 것으로 생각된다.

### 갈럼석의 화학조성

갈럼석의 화학조성을 파악하기 위하여 산출 유형별로 전자현미분석기 (EPMA)를 이용하여 화학조성 분석을 실시하였다. 분석기기는 일본 쓰꾸바대학의 JEOL사의 JXA 8621 superprobe 및 고려대학교 전략광물자원센터

의 JXA 8600 전자현미분석기를 이용하였다. 정량 및 정성분석은 WDS (wavelength dispersion mode) 및 EDS (energy dispersion mode)를 병행하였다. 철 ( $\Sigma\text{Fe}$ )의 함량은  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 로 분석하였으며, 원소에 따른 함량은 Table 2와 같다.

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

연구 지역에서 산출되는 갈럼석의 화학조성은 공생하는 광물의 종과 산출유형의 차이뿐만 아니라 단일광물에서도 다양한 함량의 변화를 나타낸다. 자형의 갈럼석은 대체적으로 반사도와 BEI (Back-scattered Electron Image) 성분도의 차이에 따라 화학조성의 변화가 인지된다 (Fig. 4). BEI 성분도의 차이에서 어두운 부분에 비해 밝은 부분이 비교적 낮은 Al함량과 높은 Fe함량을 갖는다. Al함량이 적고 Fe함량이 많은 부분이 Ca함량이 증가하고, Ce, La 등의 REE함량은 감소하는 경향이 있다. 한 입자에 있어서의 중심부와 외곽부의 누대조성의 변화는 나타나지 않는다.

Ca와 치환관계에 있는  $\Sigma\text{REE}$ 의 함량은 뚜렷한 상관관계를 나타낸다. Ca의 함량이 증가할수록  $\Sigma\text{REE}$ 의 함량은 감소 (Fig. 5)하며, CaO는 9.29~18.79 wt%,  $\Sigma\text{REE}$  ( $\text{TR}_2\text{O}_3$ )는 11.66~26.31 wt%까지의 다양한 함량변화를 보인다. 산출유형별로 볼 때  $\Sigma\text{REE}$ 의 함량은 철산화광물형에서 가장 낮게 나타나며 (15.46~17.93 wt%  $\text{TR}_2\text{O}_3$ ), 각섬석형에서는 그 함량의 변화폭이 매우 크다 (13.08~22.70 wt%). 이는 한 광물 입자내에서도 BEI 성분도의 차이에 따른 것으로 Ca와  $\Sigma\text{REE}$ 의 치환에 의한 고용체의 성분변화를 반영한다.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8.06~16.88 wt%)와  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  (16.08~25.19 wt%)의 상관관계 (Fig. 6)에서 Al의 함량이 증가할수록 Fe함량은 뚜렷한 감소의 경향을 나타낸다.

**Table 2.** Microprobe analyses of allanite from the Chungju deposits. Abbreviations are the same as those of Fig. 3.

Type	ZT	ZT	ZT	ZT	ZT	ZT	ZT	ZT	ZT	AT	AT	AT	AT	AT	AT
SiO <sub>2</sub>	29.78	30.11	29.64	29.36	28.82	29.67	29.68	29.61	29.81	29.57	29.69	30.21	29.77	29.87	29.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.77	10.92	10.59	10.41	10.90	10.94	11.24	11.46	10.97	11.02	10.92	11.16	10.79	10.31	11.89
TiO <sub>2</sub>	0.85	0.88	0.70	0.65	0.70	0.58	0.57	0.68	0.68	0.69	0.70	0.62	0.70	1.06	0.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.61	19.74	19.61	20.45	20.52	20.61	19.72	19.61	20.97	20.76	21.03	20.20	20.52	20.53	20.33
MgO	0.63	0.73	0.62	0.72	0.74	0.75	0.69	0.59	0.55	0.65	0.55	0.92	1.23	0.93	0.68
MnO	0.70	0.98	0.70	0.85	1.19	0.76	0.98	0.98	0.84	0.86	0.88	0.61	0.78	0.83	0.79
CaO	10.90	11.06	10.67	10.32	10.96	10.73	10.34	10.64	10.90	11.00	10.93	11.40	11.17	10.99	10.59
ThO <sub>2</sub>															
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>															
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.19	7.41	8.80	8.05	8.25	7.74	7.62	7.37	7.79	7.13	7.83	7.51	6.92	7.45	7.23
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.81	12.88	14.78	14.17	13.40	14.23	13.54	13.67	13.63	13.73	13.10	13.10	12.68	13.90	12.99
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.17	1.24	1.68	1.79	1.51	1.61	1.53	1.24	1.16	1.62	1.57	1.81	1.21	1.17	1.13
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.35	1.43	1.05	1.64	2.16	1.14	2.45	1.37	1.63	2.05	1.26	1.69	1.98	1.79	1.70
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>															
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>															
Total	97.74	97.37	98.84	98.40	99.15	98.75	98.34	97.22	98.92	99.08	98.45	99.22	97.73	98.84	97.80
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.51	22.96	26.31	25.64	25.32	24.72	25.14	23.65	24.20	24.52	23.75	24.11	22.79	24.32	23.05
Structural formulae (O=13)															
Si	2.998	3.026	3.008	3.025	2.986	2.983	3.017	3.017	2.964	2.951	2.981	3.003	2.985	3.007	2.987
Al	0.002	0.000	0.000	0.000	0.013	0.017	0.000	0.000	0.036	0.049	0.019	0.270	0.015	0.000	0.013
	3.000	3.026	3.008	3.025	3.000	3.000	3.017	3.017	3.000	3.000	3.000	3.003	3.000	3.007	3.000
Al <sub>6+</sub>	1.276	1.293	1.267	1.265	1.273	1.279	1.346	1.376	1.250	1.248	1.273	1.037	1.260	1.223	1.386
Ti	0.064	0.067	0.054	0.047	0.053	0.044	0.042	0.065	0.051	0.066	0.053	0.046	0.053	0.080	0.041
Fe <sub>3+</sub>	1.562	1.493	1.498	1.585	1.546	1.559	1.508	1.505	1.569	1.559	1.589	1.511	1.549	1.555	1.527
Mg	0.094	0.109	0.094	0.111	0.111	0.112	0.104	0.089	0.081	0.097	0.082	0.137	0.183	0.140	0.096
ΣM	2.996	2.962	2.913	3.008	2.983	2.994	3.000	3.035	2.951	2.970	2.997	2.731	3.045	2.998	3.050
Mn	0.060	0.084	0.060	0.074	0.101	0.064	0.084	0.085	0.071	0.073	0.074	0.051	0.066	0.090	0.067
Ca	1.174	1.190	1.161	1.139	1.176	1.155	1.126	1.162	1.161	1.177	1.175	1.225	1.200	1.185	1.133
Th															
Y															
La	0.267	0.275	0.329	0.306	0.305	0.287	0.285	0.277	0.286	0.263	0.290	0.276	0.256	0.277	0.266
Ce	0.472	0.474	0.550	0.535	0.491	0.524	0.504	0.510	0.496	0.502	0.482	0.477	0.465	0.513	0.475
Pr									0.042	0.072					
Nd	0.121	0.087	0.063	0.060	0.132	0.077	0.126	0.086	0.093	0.141	0.081	0.095	0.105	0.100	0.096
Sm															
Gd															
ΣA	2.094	2.110	2.163	2.114	2.205	2.107	2.125	2.120	2.149	2.228	2.102	2.124	2.092	2.165	2.037



Table 2. To be continued.

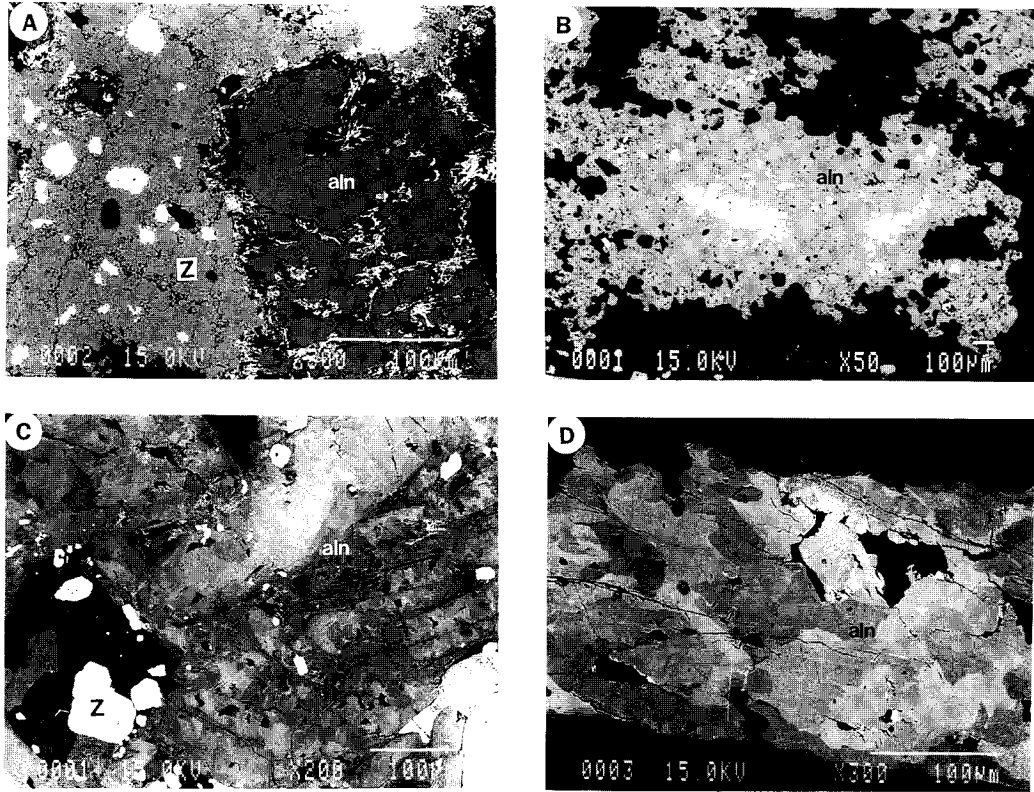
Type	KT	KT	KT	KT	KT	KT	KT	KT	KT	KT	FT	FT	FT	FT	FT	FT
SiO <sub>2</sub>	29.73	29.95	29.79	30.20	30.66	32.48	29.59	29.31	29.98	29.29	29.50	29.41	29.69	29.85	28.87	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.30	11.00	9.94	10.58	11.57	10.88	10.42	8.68	9.02	8.49	8.73	8.55	9.23	8.60	8.30	
TiO <sub>2</sub>	0.69	0.48	0.66	0.51	0.39	0.40	0.51	0.66	0.67	0.73	0.60	0.59	0.67	0.63	0.61	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.97	20.15	21.49	21.11	20.56	20.16	21.06	23.19	23.94	23.80	23.09	23.26	23.34	24.38	23.70	
MgO	1.15	1.16	1.05	0.78	0.60	0.78	0.90	0.49	0.34	0.64	0.50	0.42	0.51	0.54	0.64	
MnO	1.46	1.70	1.52	1.54	1.49	1.65	1.53	0.63	0.72	0.64	0.58	0.65	0.74	0.51	0.51	
CaO	9.90	9.29	10.21	10.65	11.52	9.66	10.34	11.51	12.22	11.56	11.77	11.59	11.90	12.40	10.39	
ThO <sub>2</sub>	0.25	0.16	0.33	0.34	0.46	0.35	0.38									
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.05									
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.17	5.96	4.66	5.35	4.39	4.85	4.81	9.28	7.41	9.77	8.42	8.12	6.87	7.62	7.88	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.85	15.37	14.35	13.58	13.16	13.41	13.68	13.28	12.74	13.16	12.78	13.50	12.17	12.29	13.95	
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.79	1.59	1.76	1.65	1.46	1.26	1.69	1.25	2.70	1.20	2.10	2.57	2.86	1.56	2.77	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.21	1.17	1.47	1.06	1.20	1.29	1.46									
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.00	0.24	0.14	0.14	0.36	0.22									
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.15	0.05	0.00	0.03	0.04	0.00									
Total	97.54	98.12	97.56	97.49	97.63	97.56	96.64	98.27	99.73	99.27	98.05	98.66	97.98	98.38	97.61	
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.11	24.24	22.57	21.80	20.39	21.20	21.91	23.80	22.85	24.12	23.29	24.19	21.90	21.47	24.60	
Structural formulae (O=13)																
Si	3.017	3.011	3.008	3.027	3.034	3.192	3.003	2.994	3.005	2.958	3.007	3.034	3.011	2.993	3.009	
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.046	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	
Al6+	3.017	3.011	3.008	3.027	3.034	3.192	3.003	3.000	3.005	3.000	3.007	3.034	3.011	3.000	3.009	
Ti	1.112	1.303	1.183	1.250	1.354	1.260	1.247	1.039	1.067	0.965	1.049	1.039	1.103	1.008	1.019	
Fe3+	0.052	0.036	0.050	0.038	0.029	0.029	0.039	0.051	0.051	0.056	0.046	0.046	0.051	0.047	0.046	
Mg	1.678	1.524	1.633	1.592	1.536	1.491	1.608	1.782	1.806	1.809	1.771	1.805	1.781	1.839	1.858	
ΣM	0.173	0.174	0.157	0.116	0.089	0.115	0.134	0.074	0.050	0.097	0.075	0.078	0.077	0.081	0.099	
Mn	3.015	3.037	3.023	2.996	3.008	2.895	3.028	2.946	2.974	2.926	2.941	2.068	3.012	2.975	3.023	
Ca	0.125	0.144	0.130	0.131	0.125	0.137	0.131	0.054	0.061	0.055	0.047	0.054	0.063	0.043	0.043	
Ca	1.077	1.001	1.105	1.144	1.226	1.177	1.124	1.259	1.313	1.251	1.285	1.281	1.293	1.332	1.160	
Th	0.006	0.004	0.007	0.008	0.010	0.008	0.008									
Y	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.002									
La	0.194	0.221	0.174	0.198	0.161	0.175	0.180	0.349	0.274	0.364	0.316	0.309	0.257	0.281	0.303	
Ce	0.552	0.566	0.531	0.499	0.487	0.483	0.508	0.497	0.467	0.487	0.477	0.510	0.452	0.451	0.532	
Pr	0.066	0.058	0.065	0.060	0.052	0.045	0.062									
Nd	0.044	0.042	0.053	0.038	0.043	0.045	0.053	0.046	0.097	0.043	0.076	0.091	0.103	0.056	0.103	
Sm	0.003	0.000	0.008	0.005	0.001	0.012	0.007									
Gd	0.001	0.005	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000									
ΣA	2.068	2.041	2.077	2.084	2.105	2.083	2.075	2.204	2.212	2.200	2.202	2.244	2.168	2.164	2.141	

Table 2. To be continued.

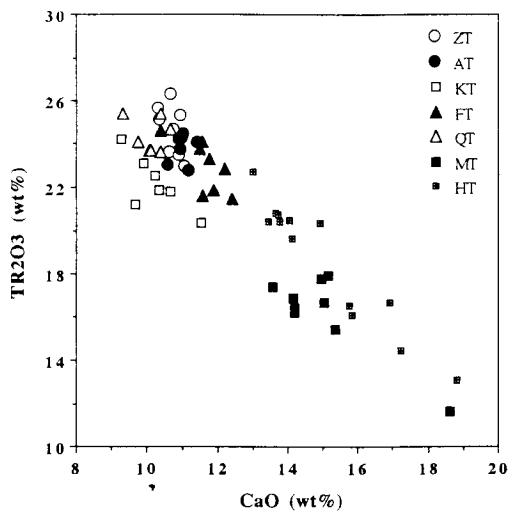
Type	QT	QT	QT	QT	QT	QT	QT	QT	QT	MT	MT	MT	MT	MT	MT	MT
SiO <sub>2</sub>	29.58	30.65	30.35	29.76	29.65	29.57	30.00	31.24	31.45	31.59	31.48	31.02	31.80	31.36	31.51	31.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.93	11.02	10.26	12.05	9.84	10.26	10.60	13.62	13.25	13.02	12.59	12.37	12.84	12.08	12.18	12.18
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.65	0.96	0.70	0.60	0.71	0.54	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.11	0.08	0.12	0.12
Fe <sup>2+</sup> O <sub>3</sub>	20.60	21.23	21.79	19.31	21.59	21.09	20.51	19.90	20.48	21.06	21.43	20.01	20.44	20.80	21.14	21.14
MgO	0.75	0.90	1.09	1.13	1.16	0.76	0.85	0.93	0.97	1.05	1.10	0.89	0.91	1.01	1.07	1.07
MnO	0.55	0.54	0.50	0.52	0.50	0.54	0.50	0.40	0.39	0.32	0.33	0.36	0.47	0.59	0.48	0.48
CaO	10.67	10.37	10.12	9.73	9.31	10.07	10.40	14.18	14.19	14.17	13.58	15.16	15.05	14.95	15.37	15.37
ThO <sub>2</sub>	0.09	0.05	0.12	0.10	0.01	0.13	0.07	0.64	0.49	0.46	0.50					
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01					
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.70	6.29	5.72	5.78	6.42	5.88	6.78	3.92	4.16	4.01	4.38					
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.35	14.82	14.94	15.05	15.98	15.05	15.98	9.02	9.12	9.38	9.74	9.09	9.05	8.99	8.36	8.36
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.49	1.44	1.59	1.76	1.59	1.44	1.26	1.13	0.93	1.23	1.13	1.24	0.87	1.26	1.18	1.18
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.13	1.07	1.30	1.38	1.38	1.22	1.36	0.92	0.94	0.89	0.97	1.95	1.84	1.72	1.12	1.12
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.00	0.08	0.11	0.02	0.09	0.00	0.28	0.17	0.30	0.14					
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.06	0.02					
Total	98.50	99.03	98.86	97.44	98.06	96.84	98.86	96.32	96.72	97.61	97.47	97.84	98.32	98.70	97.31	97.31
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.77	23.62	23.68	24.14	25.39	23.71	25.38	15.35	15.42	15.87	16.38	17.93	16.71	17.83	15.46	15.46
Structural formulae (O=13)																
Si	2.975	3.027	3.027	2.987	3.010	3.012	3.002	3.013	3.024	3.019	3.026	3.078	3.049	3.026	3.038	3.038
Al	0.025	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	3.000	3.027	3.027	3.000	3.010	3.012	3.002	3.013	3.024	3.019	3.026	3.078	3.049	3.026	3.038	3.038
Al <sup>4+</sup>	1.271	1.283	1.232	1.413	1.178	1.232	1.256	1.548	1.501	1.466	1.427	1.402	1.452	1.375	1.384	1.384
Ti	0.043	0.048	0.072	0.053	0.046	0.054	0.041	0.005	0.005	0.005	0.006	0.017	0.017	0.006	0.019	0.019
Fe <sup>3+</sup>	1.559	1.578	1.667	1.459	1.649	1.616	1.553	1.445	1.482	1.515	1.551	1.448	1.475	1.511	1.533	1.533
Mg	0.112	0.133	0.185	0.169	0.175	0.116	0.127	0.133	0.139	0.149	0.157	0.127	0.131	0.146	0.153	0.153
ΣM	2.985	3.042	3.156	3.094	3.048	3.018	2.977	3.131	3.127	3.135	3.141	2.994	3.074	3.038	3.089	3.089
Mn	0.047	0.045	0.042	0.044	0.043	0.047	0.043	0.032	0.032	0.026	0.027	0.032	0.041	0.048	0.041	0.041
Ca	1.149	1.097	1.081	1.047	1.013	1.099	1.121	1.465	1.461	1.451	1.398	1.562	1.546	1.546	1.588	1.588
Th	0.002	0.001	0.003	0.002	0.001	0.003	0.002	0.014	0.011	0.010	0.011					
Y	0.005	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001					
La	0.249	0.229	0.210	0.214	0.240	0.221	0.252	0.139	0.147	0.141	0.155	0.200	0.175	0.209	0.171	0.171
Ce	0.565	0.536	0.546	0.553	0.594	0.561	0.589	0.318	0.321	0.328	0.343	0.320	0.318	0.318	0.295	0.295
Pr	0.055	0.052	0.058	0.064	0.059	0.053	0.046	0.039	0.033	0.043	0.040					
Nd	0.041	0.038	0.046	0.049	0.050	0.045	0.048	0.032	0.032	0.031	0.033	0.067	0.063	0.059	0.073	0.073
Sm	0.001	0.000	0.003	0.004	0.001	0.003	0.000	0.009	0.006	0.009	0.005					
Gd	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.002	0.001					
ΣA	2.114	1.999	1.991	1.979	2.001	2.034	2.101	2.052	2.046	2.041	2.014	2.181	2.142	2.180	2.167	2.167

Table 2. To be continued.

Type	MT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT	HT
SiO <sub>2</sub>	31.89	31.19	30.72	30.71	31.98	31.23	30.25	30.91	31.35	31.13	31.61	32.25	32.61	31.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.17	13.19	12.78	12.47	13.54	12.50	12.77	12.57	13.98	14.54	14.12	15.63	16.88	14.66
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.74	0.53	0.53	0.73	0.74	0.61	0.54	0.72	0.74	0.75	0.41	0.44	0.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.41	17.76	18.48	19.50	17.77	18.19	18.98	18.73	18.08	16.90	18.24	17.96	16.74	17.89
MgO	0.58	0.82	0.89	0.90	0.85	0.66	0.51	0.55	0.63	0.45	0.40	0.36	0.34	0.38
MnO	0.79	0.76	0.65	0.92	0.69	0.59	0.79	0.99	0.57	1.06	0.64	0.48	0.50	0.64
CaO	18.59	14.03	13.65	13.44	14.90	14.12	13.71	13.77	15.83	13.01	15.75	17.21	18.79	16.89
ThO <sub>2</sub>														
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>														
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27	5.83	5.72	6.06	6.53	6.11	5.93	5.76	4.58	6.88	5.09	4.39	3.90	4.69
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.78	10.76	10.80	11.12	9.89	10.02	11.19	10.89	8.23	11.45	8.72	7.78	6.90	7.88
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	1.58	1.82	1.91	1.74	1.26	1.86	1.79	1.08	1.83	1.02	0.91	1.12	1.01
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.65	2.35	2.48	2.19	2.21	2.24	1.76	2.00	2.20	2.53	1.72	1.00	1.17	2.20
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>														
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>														
Total	97.11	99.00	98.52	98.95	100.83	97.66	98.36	98.51	97.23	100.52	98.04	98.75	99.38	99.34
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.66	20.51	20.83	20.45	20.37	19.62	20.75	20.44	16.10	22.70	16.54	14.44	13.08	15.78
Structural formulae (O=13)														
Si	3.053	3.022	3.011	3.010	3.097	3.054	3.047	3.073	3.060	3.021	3.037	3.015	3.037	3.048
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al <sup>iv</sup>	3.053	3.022	3.011	3.010	3.097	3.054	3.047	3.073	3.060	3.021	3.037	3.015	3.037	3.048
Ti	1.754	1.507	1.476	1.441	1.546	1.441	1.398	1.473	1.588	1.662	1.599	1.723	1.854	1.659
Fe <sup>3+</sup>	0.003	0.054	0.038	0.039	0.054	0.054	0.046	0.038	0.053	0.054	0.055	0.030	0.033	0.034
Mg	1.206	1.295	1.363	1.438	1.295	1.339	1.438	1.401	1.328	1.234	1.319	1.264	1.174	1.293
ΣM	0.080	0.118	0.131	0.132	0.122	0.097	0.076	0.081	0.096	0.064	0.057	0.050	0.049	0.053
Mn	3.042	2.974	3.009	3.050	3.017	2.931	2.959	2.994	3.064	3.014	3.030	3.066	3.110	3.038
Mn	0.067	0.062	0.054	0.077	0.055	0.049	0.067	0.084	0.047	0.087	0.052	0.038	0.043	0.052
Ca	1.834	1.457	1.434	1.411	1.546	1.480	1.371	1.360	1.656	1.353	1.621	1.724	1.875	1.646
Th														
Y														
La	0.111	0.209	0.207	0.219	0.233	0.220	0.220	0.211	0.165	0.246	0.180	0.151	0.099	0.166
Ce	0.194	0.382	0.388	0.399	0.350	0.359	0.413	0.396	0.294	0.407	0.307	0.266	0.201	0.277
Pr														
Nd	0.054	0.081	0.087	0.076	0.075	0.079	0.063	0.071	0.077	0.088	0.059	0.033	0.039	0.075
Sm														
Gd														
ΣA	2.260	2.191	2.170	2.182	2.260	2.187	2.135	2.122	2.239	2.180	2.219	2.213	2.257	2.217



**Fig. 4.** Back-scattered electron image (BEI) of the allanite crystals. A; Zircon type, allanite (aln) crystal is clean, but according to fracture and rim is replaced by fine-grained zircon (Z) aggregates and okanoganite (needle shaped). White part is fergusonite and/or RE-rich minerals. B; Quartz-mica type, anhedral allanite (aln) show very irregular grain contact with silicate mineral (black), and contain Nb-Ti series RE-bearing (white). C; Iron-oxide type, allanite (aln) crystals show dark-gray to light-gray image. White grains are zircon (Z). D; Amphibole type, Single grain allanite (aln) is also dark-gray to light-gray image. Dark part have higher Al contents and lower Fe contents. Light is lower Al and higher Fe, and higher REE.



**Fig. 5.** CaO-TRE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (total REE) variation diagram for the allanites form Chungju deposits.

형석형 갈럼석에서 장식형, 석영-운모형, 저어콘형, 갈럼석 맥상형, 철산화광물형, 각섬석형으로 갈수록 Al의 함량은 증가하는 반면 Fe함량은 감소하는 경향이 뚜렷하다. Fig. 6에서 특별히 높은 Al의 함량과 낮은 Fe함량을 나타내는 시료는 BEI성분도 (Fig. 4)에서 어두운 부분에 해당한다. SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 상관도 (Fig. 7)에서는 Si의 함량이 증가할수록 Al함량도 대체로 증가하는 경향이 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 상관관계는 철산화광물형의 갈럼석에서 Al함량이 높은 반면에 ΣREE 함량은 낮은 값을 보인다 (Fig. 8). 주 희토류원소인 Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와의 관계는 대체로 정의 관계로 (Fig. 9) La함량이 높을수록 Ce함량도 증가하는 경향이 있지만 장식형과 석영-운모형의 갈럼석은 La함량의 변화에 비해 Ce함량이 더 높은 특성을 나타낸다. 갈럼석의 미량성분인 Ti, Mg, Mn, Th, Y등은 주성분원소와 같은 성분변화는 보이지 않지만, 철산화광물형 갈럼석에서 비교적 낮은 Ti 및 Mn함량과 상대적으로 높

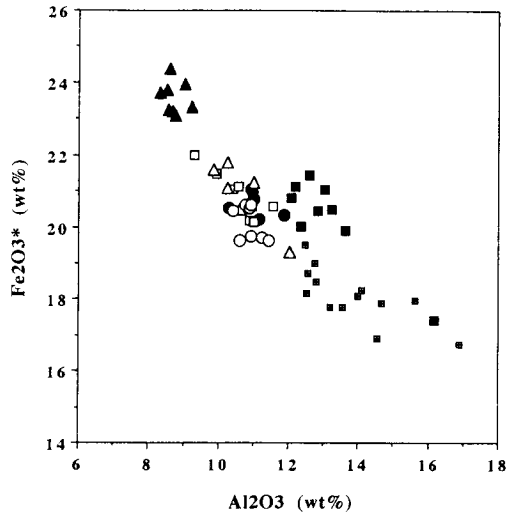


Fig. 6.  $Al_2O_3$ - $Fe_2O_3^*$  (total Fe) variation diagram for the allanites form Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 5.

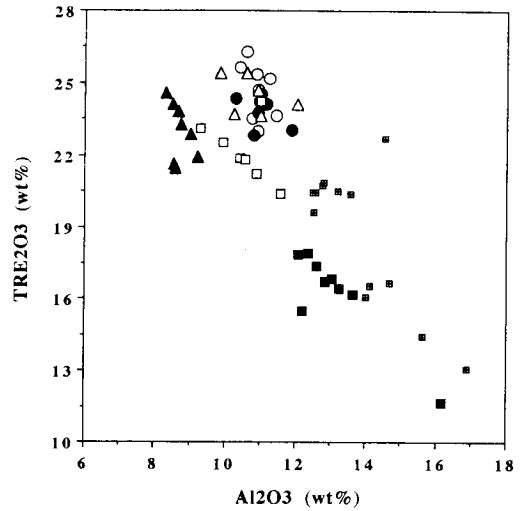


Fig. 8.  $Al_2O_3$ - $TRE_2O_3$  variation diagram for the allanites form Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 5.

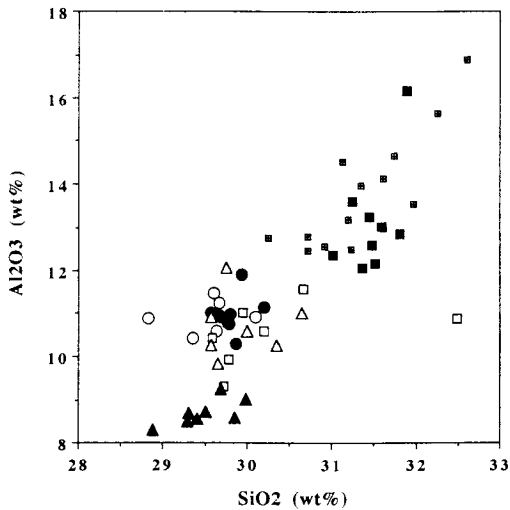


Fig. 7.  $SiO_2$ - $Al_2O_3$  variation diagram for the allanites form Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 5.

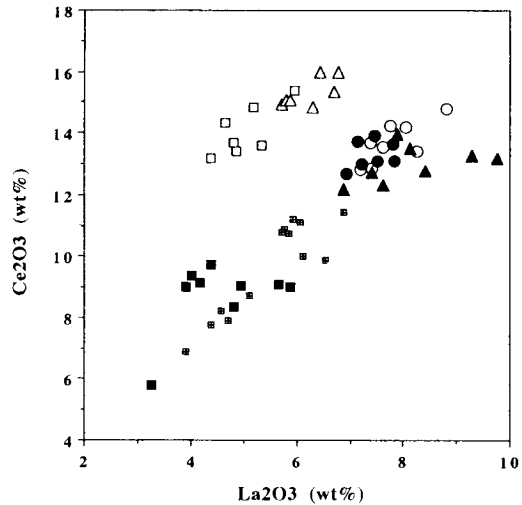


Fig. 9.  $La_2O_3$ - $Ce_2O_3$  variation diagram for the allanites form Chungju deposits. Symbols are the same as those of Fig. 5.

은 Th함량을 보인다. 희토류원소중 Nd는 2.86 wt% ( $Nd_2O_3$ )까지 함량을 보이나, 그 외 Sm, Gd, Y 등은 검출한계 이하의 값을 나타낸다.

### 토 의

육천퇴적분지내의 화성활동 중심지 (Cluzel *et al.*, 1991)로 알려진 계명산층내에는 철과 희토류 및 희유원소 광상이 발달되어 있으며, 그 중 REE를 포함하는 희유원소

광상은 주로 계명산층을 구성하는 석영-장석편암과 알카리 화강암류와의 경계부에서 발달된다. 계명산층은 퇴적작용, 화산-심성 화산활동과 변성작용, 집축교대 및 열수교대등 다양한 지질작용의 영향을 받았으며, 희유원소 광상중 희토류 광석의 조성분 및 미량성분의 상관관계와 광석의 조직 및 산출특성은 광화작용이 알카리성 용액의 교대작용과 밀접한 관련성을 갖는 것으로 알려져 있다 (박맹언, 김근수, 1995). 갈럼석은 변성퇴적암, 페그마타이트, 열수맥등의 다양한 지질환경에서 산출되며, 성인적으로

회유원소 광화대의 광화작용과 밀접한 관계를 갖는다.

갈럼석은 일반적으로 화강암, 화강섬록암, 몬조나이트, 그리고 섬강암의 부성분 광물로서 수반되며 (Cerny, Cerna, 1972; Morin, 1977; Ghent, 1972), 페그마타이트 (Hasegawa, 1957, 1958; 김원사 등, 1992), 열수성 석영맥 (Exley, 1980), 석회질 스퀴르 (Deer *et al.*, 1992)에서 다량으로 산출된다. 편마암과 편암 및 규암 등과 같은 변성암 (Sutton, 1974; Kim, 1991; 오민수, 1989, 박중권 등, 1994), 응회암 (Izett, Wilcox, 1968), 퇴적암중의 쇄설성 광물 (Hutton, 1950)로도 산출된다. 갈럼석은 다양한 지질환경에서 나타나지만 그 화학조성의 일관성은 보여지지 않으며, 산출양상에 따라 변화폭이 다양하다.

연구지역에서 산출되는 갈럼석의 주구성원소 및 REE의 함량변화는 다양한 침진조건을 반영하고 있다. 산출특성 및 수반광물에 따라 함량의 변화폭이 심하고, 특히 Al과 Fe의 치환관계는 산소분압과 관련이 있다 (Holdaway, 1972; Liou, 1973). 갈럼석의 Fe/(Al+Fe) (atom.%)값은 0.38~0.67까지의 변화폭이 크며  $Al_2O_3$ 와  $Fe_2O_3$ 의 상관관계는 Fig. 6에서 보여준다. Fe/(Al+Fe)의 변화는 각섬석형 갈럼석에서 가장 낮으며 그 변화폭이 크고 철산화광물형, 저어콘형, 갈럼석 맥상형, 장석형, 석영-운모형, 형석형 갈럼석으로 갈수록 증가하며, Fe/(Al+Fe)값이 증가할수록 Fe는 증가하고 Al은 뚜렷이 감소한다. 갈럼석은 흔히 철산화광물을 수반하며, 자철석, 적철석, 자철석+적철석으로 변화하는 양상으로 보아 산소분압의 범위는 대체적으로 자철석-적철석 완충곡선 부근영역으로 추정된다. 또한 공생광물로 수반되는 흑운모의 화학조성의 변화 (특히, Fe, Mg, Ti), 자철석의 Mn함량 및 적철석의 Ti함량은 갈럼석이 산출되는 유형에 따라 다소 차이가 있으며 (Kim, 1991; Kim *et al.*, 1994), 이러한 성분변화는 역시 갈럼석의 REE 및 주구성원소의 변화와 상관성을 띠을 알 수 있다.

산출유형별 갈럼석의 화학조성에서 보면  $\Sigma$ REE함량은 철산화광물형과 각섬석형 갈럼석에서 다른 산출유형에 비해 뚜렷이 낮은 값을 가진다. 그리고 각섬석형 갈럼석은 변화폭이 매우 심하다 (13.08~20.83 wt%  $RE_2O_3$ ). 치환관계에 있는 Ca의 함량은 반대의 경향을 나타낸다. Fe와 Al함량은 형석형 갈럼석에서 가장 높은 Fe값과 가장 낮은 Al값을 보이며, 장석형, 석영-운모형, 갈럼석 맥상형, 저어콘형, 철산화광물형, 각섬석형 갈럼석 순으로 Fe함량은 감소하는 반면 Al함량은 증가한다. 갈럼석을 수반하는 모암은 변성작용, 마그마작용, 알카리교대작용 및 열수작용 등의 다양한 지질현상의 결과를 나타내는 갈럼석 맥상형, 저어콘형, 장석형, 형석형, 석영-운모형, 철산화광물형 및 각섬석형으로 구분되며, 화학조성상의 변화는 상기 지

질작용의 복합적인 요인의 결과를 반영하고 있다고 볼 수 있다. 그 중 생성 온도와 산소분압의 차이는 가장 중요한 요인으로 해석된다. 충주지역에서 산출되는 갈럼석의 화학조성은 수반광물의 유형에 따라 다양한 변화를 나타내며, 이는 갈럼석의 생성 과정상의 다양한 지질학적 특성을 반영한다. 이와 같은 특성은 계명산층, 철광층 및 회유원소 함유광상의 성인과도 밀접한 관련성이 있는 것으로 생각된다. 특히 갈럼석과 공생하는 회유금속함유광물 (REE광물)의 성인과 밀접한 관계가 있을 것이다. 정확한 성인적 관점은 계속 연구가 진행되고 있다.

## 결론

충주지역의 갈럼석을 수반하는 암석 (회유원소광석)은 모암에 따른 산출유형과 구성광물의 차이에 따라 저어콘형 (ZT), 갈럼석 맥상형 (AT), 장석형 (KT), 형석형 (FT), 석영-운모형 (QT), 철산화광물형 (MT) 및 각섬석형 (HT)으로 구분된다. 각 유형별 모암의  $\Sigma$ REE함량은 갈럼석 맥상형 (154,298 ppm), 저어콘형 (19,718 ppm), 장석형 (2,184 ppm), 형석형 (1,201 ppm), 석영-운모형 (401 ppm), 철산화광물형 (163 ppm), 각섬석형 (214 ppm) 순으로 갈럼석 맥상형에서 가장 높은 함량을 가진다. 콘드라이트 존재비로 규격화한 희토류원소의 분포양상을 보면 전반적으로 HREE가 부화된 평행한 양상을 보이며, 뚜렷한 Eu 부 (-)이상이 특징적이다. 전자현미분석 (EPMA)에 의한 BEI 성분도는 현미경이나 육안적으로 구별이 불가능한 갈럼석 입자의 조직 및 화학조성의 변화가 인지되며, 갈럼석의 REE치환은 다른 회유원소 광물의 공생과 함께 아주 복잡함을 보여준다. 갈럼석은 순수한 것에서부터 주 구성광물의 함량변화, 용리상, 치환상, 교대상, 분해상, 포획상 등의 다양한 회유원소 (희토류원소) 함유광물과의 관계가 보여진다. 갈럼석의 주 구성원소인 Si, Ca, REE, Al 및 Fe의 함량은 산출유형에 따라 변화폭이 심하며, 이들 원소 상호간의 관계를 보면 REE의 함량이 증가 할수록 Fe의 함량은 증가하고, 반면 Ca, Al 및 Si의 함량은 감소하는 경향이 있다. 그리고 주 REE 구성원소인 Ce과 La의 함량은 산출유형에 따라 그 변화폭이 심하나 이들 상호간의 관계는 정의 특성을 보인다. 갈럼석내의  $\Sigma$ REE의 함량은  $RE_2O_3$  (wt%)로 11.66~26.31의 범위에 놓이며, 이와 치환관계에 있는 CaO (wt%)는 18.79~9.29로 CaO가 감소하면  $RE_2O_3$ 의 함량이 증가하는 상관관계를 잘 나타낸다.  $Al_2O_3$  (8.30~16.88%)과  $Fe_2O_3$ 함량 (24.38~16.74%)도 상호 상반된 양상을 보여주며 이들도 치환관계가 잘 나타난다.

유형별 특징으로는 희유금속광상의 광체에 상응하는 저어콘형, 갈럼석 맥상형, 장석형, 형석형에서 REE의 함량이 비교적 높게 나타난다. 철산화광물형과 각섬석형 갈럼석에서 주 구성원소의 함량 범위가 매우 넓으며, 이들 유형이 가장 낮은 REE함량을 갖는다. 또, 형석형 갈럼석에서 특히 높은 Fe함량 (낮은 Al, Si)을 보이고, 각섬석형에서 가장 낮은 Fe를 가진다. 산소 분압의 영향을 반영하는 Fe/(Fe+Al)값도 형석형 갈럼석에서 가장 높고 석영-운모형, 장석형, 갈럼석 맥상형, 저어콘형, 철산화광물형, 각섬석형 갈럼석 순으로 감소하며, 철산화광물형과 각섬석형 갈럼석에서 값의 변화폭이 심하다. REE의 함량도 Fe/(Fe+Al)값의 증가에 따라 증가하는 경향이 있다. 충주지역 갈럼석의 화학조성은 변화가 심하며 각 유형별 광생광물의 특징과 갈럼석의 화학조성 차이는 생성 환경중 온도와 산소분압등의 변화를 나타내며, 이는 다양한 지질과정의 반영과 함께 성인적 복잡성을 의미한다.

## 사 사

본 연구는 전략광물자원연구센터의 연구과제 및 학술진흥재단 연구과제중 일부로 수행되었으며, 이들 기관에 사의를 표한다.

## 참고문헌

김원사, 정지근, 이강호, Watkinson, D.H. (1992) 하동-산청 지역 회장암에 배대된 희유금속자원에 관한 연구, 한국광물학회지, 5권, p. 14-21.  
 박맹언, 김근수 (1995) 충주지역 희토류광상의 성인: 산출상태와 지화학적 특성. 자원환경지질, 28권, p. 599-612.  
 박중권, 오민수, 박성원 (1994) 충주 어래산지역 희유금속광물자원 탐사연구 (II). 한국자원연구소 연구보고서 (KR-93-1C-2), p. 1-105.  
 오민수 (1989) 어래산 지역의 갈럼석광상. 광산지질, 22권, p. 151-166.  
 오민수, 서정률, 구성분, 최종호 (1989) 충청북도 중원군 어래산지역 희유금속광물 (갈럼석)자원의 지질 광상연구. 한국동력자원연구소 연구보고서 (KR-88-8A), p. 3-111.  
 자원개발연구소 (1977) 한국의 광물.  
 조선광물지 (1943) 조선의 광물.  
 Boynton, W.V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In P. Henderson (ed.). Elsevier Science Publishers B.V., p. 63-114.  
 Cerny, P. and Cerna, I. (1972) Bastnaesite after allanite from Rough Lake, Ontario. Can. Mineral., v. 11, p.

541-543.  
 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.  
 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.  
 Dollase, W.S. (1971) Refinement of the crystal structures of epidote, allanite and hancockite. Am. Mineral., v. 56, p. 447-464.  
 Exley, R.A. (1980) Microprobe studies of REE-rich accessory minerals: Implications for Skye granite petrogenesis and REE mobility in hydrothermal systems. Earth and Plan. Sci. Lett., v. 48, p. 97-110.  
 Ghent, Z.D. (1972) Electron microprobe study of allanite from the Mt. Falconer quartz monzonite pluton, Lower Taylor Valley, South Victoria Land, Antarctica. Can. Mineral., v. 11, p. 526-530.  
 Hasegawa, S. (1957) Chemical studies of allanites and their associated minerals from the pegmatites in the Northern part of the abukuma massif. Sci. Rept. Tohoku. Univ., Ser. v. 3, p. 345-371.  
 Hasegawa, S. (1958) Chemical composition of allanite. Sci. Rept. Tohoku. Univ., Ser. v. 5, p. 331-387.  
 Holdaway, M.J. (1972) Thermal stability of Al-Fe epidote as a function of fo<sub>2</sub> and Fe content. Contr. Mineralogy Petrology, v. 37, p. 307-340.  
 Hutton, C.O. (1950) Studies of heavy detrital minerals. Bull. Geol. Soc. Amer., v. 61, p. 635-707.  
 Izett, G.A. and Wilcox, R.E. (1968) Perrierite, chevkinite, and allanite in Upper Cenozoic ash bed in the Western United States. Am. Mineral., v. 53, p. 1558-1567.  
 Kim, G.S., (1991) Iron Mineralization in the Chungju mining district, Korea. Ph.D. Thesis, Inst. of Geosci. Univ. of Tsukuba, 102p.  
 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.  
 Liou, J.G. (1973) Synthesis and stability relations of epidote Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>FeSi<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(OH). Jour. Geol., v. 14, p. 381-413.  
 Morin, J.A. (1977) Allanite in granitic rocks of the Kenora-Vermilion Bay area, northwestern Ontario. Can. Mineral., v. 15, p. 297-302.  
 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.  
 Sutton, J.S. (1974) The Precambrian gneiss and supracrustal rocks of the western shore of Kaipokok Bay, Labrador, Newfoundland. Can. Jour. Earth Sci., v. 9, p. 1677-1692.