

## 홍천-자은지역 철-희토류광상의 광화작용

김상중<sup>1\*</sup> · 이현구<sup>1</sup> · 윤경무<sup>1</sup> · 박종권<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지질학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원

## Fe-REE Mineralization of the Hongcheon-Jaeun District

Sang Jung Kim<sup>1\*</sup>, Hyun Koo Lee<sup>1</sup>, Jingwu Yin<sup>1</sup> and Joong-Kwon Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource, Daejeon 305-350, Korea

The Fe-REE deposit of the Hongcheon-Jaeun district occurs in Precambrian gneiss, and is classified into two ore bodies: the Jaeun ore body (northern ore body) and the Hongcheon ore body (southern ore body). Economically important minerals consist of magnetite, monazite, strontianite and barite. Based on mineral assemblages and textures, the mineralization can be classified into two stages (Na-carbonatite stage and Fe-carbonatite stage). Main REE minerals were precipitated during the Fe-carbonatite stage. Some evidences of the carbonatite origin include: 1) strontianite-monzonite exsolution texture, 2) strontianite-barite exsolution texture, 3) the occurrence of acmite of igneous origin at the area with abundant rare earth minerals, 4) the occurrence of the mineral assemblage consisting of carbonate minerals + magnetite + REE minerals. Therefore, we suggest that Fe-REE mineralization in the study area was related to carbonatite of igneous origin.

**Key words :** Fe-REE deposit, Na-carbonatite, Fe-carbonatite

연구지역의 철-희토류광상은 선캄브리아기의 편마암류내에 맥상으로 배태되어 있으며, 크게 두 개의 광체, 즉 자은 광체(북부광체)와 홍천광체(남부광체)로 나뉜다. 광상에서 산출되는 경제적인 광물로는 자철석, 모나자이트, 스트론티아나이트 및 중정석이다. 산출광물의 공생관계 및 조직을 근거로 본다면, 광화작용은 카보나타이트의 분화작용과 관련되어 Na-카보나타이트 단계와 Fe-카보나타이트 단계로 나눌 수 있다. 주된 희토류광물은 Fe-카보나타이트 시기 동안에 침전되었다. 이처럼 철-희토류광물이 카보나타이트와 관련되어 침전되었다고 고찰하는 증거로는 1) 스트론티아나이트와 모나자이트가 용리조직을 갖으며 산출되는 점, 2) 스트론티아나이트와 중정석이 용리조직을 갖는 점, 3) 희토류광물이 주로 산출되는 지역에서 화성기원의 액마이트가 산출되는 점, 4) 탄산염광물-자철석-희토류광물의 공생 및 공존 관계 등으로 볼 때 이 지역의 철-희토류광화작용은 화성기원의 카보나타이트에서 기원되었음을 암시하고 있다.

**주요어 :** 철-희토류광상, Na-카보나타이트, Fe-카보나타이트

### 1. 서 언

1970년대 이전에는 희토류 및 희유금속의 용도가 매우 제한되어 있었으나, 지난 10여년 동안 희토류, 스트론튬, 바륨, 마나튬, 형석 등이 전자, 레이저 공학, 신소재 공학, 레이저 사진술, 전기공학, 금속분야의 특수 경량합금 등에 사용되기 시작하면서 이들의 생산은 급속히 증가되었다. 최근들어 이러한 이유로 국외 및 국

내에서 희토류광상에 대한 광물학적 및 지화학적 연구가 활발하게 수행되고 있다. 희토류 광상은 성인적으로 알카리 화성암과 카보나타이트와 관련된 맥상광상, 페그마타이트광상, 접촉교대광상, 화산기원의 철광상 및 사광상에 흔히 수반되어 산출된다. 한국에서는 주로 철광상과 관련되어 산출되거나 회광암내에 소규모로 산출되고 있다. 기존의 희토류광상 연구에서는 희토류광물의 산상 및 광물학적 특징을 주로 다루고 있을 뿐 광화작용의 특성과 성인에 대한 연구는 드물다.

홍천지역의 희토류광상은 선캄브리아기의 편마암내

\*Corresponding author: kimsang@cnu.ac.kr

에 배대된 철광상과 함께 탄산염광물과 밀접한 공생관계를 갖으며 산출되고 있다. 홍천-자은 철광상은 1959년에 민간인에 의하여 탐사가 시작된 후 1969년까지 국립지질조사소와 광업진흥공사에 의하여 자력탐사와 시추탐사가 이루어져 평균品位 약 24% Fe의 철광을 88,500,000 M/T 확보하였다. 한국자원연구소에서는 홍천-자은 지역의 기존 철광상에서 희토류광상의 배대가능성을 인식하고 있었으며, 1988년에 선캄브리아기의 철광상에 해당하는 일부 국내 철광상을 재조사하는 과정에서 희토류원소(REE)광물이 수반되어 산출됨을 확인하였다. 이후 1994~1995년에 걸쳐 기존 철광체를 중심으로 지상방사능탐사와 시추탐사(720 m)가 실시되어 모나자이트를 주로하는 희토류 복합광석(REE-bearing complex ores)을 약 10,152,600 M/T 확보하였다. 이 광체는 평균 2.39%  $R_2O_3$ , 1.78%  $SrCO_3$ , 21.13% Fe, 2.93% P, 그리고 3.59% S를 함유하고 있다. 이 지역의 희유금속광상은 합희유금속-철광상으로 화강암질 편마암과 각섬석-흑운모 편마암이 알바이트화작용을 받은 변질대의 탄산염암내에 배대하며 주요 희유원소는 Le, Ce, Nd, Sr, P, Nb 등으로 희토류금속광물은 자철석, 탄산염광물, 인산염광물 등과 함께 복합광석(complex ore)의 형태로 탄산염암내에서 산출된다. 희토류금속광물은 모나자이트(monazite), 스트론티아나이트(strontianite), 탄산염 인회석(carbonate apatite)이고 광염상 내지 밀집상으로 산출하는 자철석과 함께 호층을 이루며 철광체의 기질부를 구성한다. 또한 이들은 돌로마이트, 방해석 등 탄산염광물과 함께 산출하며 소량의 중정성을 수반한다. 또한 광화대에는 다량의 황철석과 함께 미량의 섬아연석, 황동석, 방연석, 휘수연석 등 황화광물이 발달한다. 황철석은 광체로부터 변질대까지 넓게 광염상으로 발달한다.

이 지역의 연구로는 일반지질 및 암석학적 연구(신병우 등, 1975; 이종혁과 이상현, 1989; 이한영 등, 1991; 조문섭과 김종욱, 1993; 좌용주, 1997)와 홍천 철광상에 대한 연구(이상현, 1998)가 있으며, 희토류광상에 대한 연구는 박중권 등(1995)에 의한 철광체내의 희토류광물 자원의 연구가 있다.

홍천지역 희토류광상의 성인에 대해서 변성작용에 기인한 것과 카보나타이트와 관련된 것으로 해석되어 왔으나, 아직까지 논쟁의 대상이 되고 있다. 특히 희토류광물이 철광체의 자철석 및 적철석과 밀접하게 관련되어 산출되는 이유로 성인 규명에 어려움을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 철광체 중에 산출되는 희토

류광물의 산출양상, 종류 및 광물조성을 밝히고 이를 토대로 그 성인을 규명하고자 한다.

## 2. 지질 개요

연구지역은 선캄브리아기 경기변성암 복합체의 동북부에 해당되며 주로 퇴적기원의 변성암류와 이를 관입한 쥘라기의 화강암 및 최후기에 관입한 열기성 암맥으로 구성되어 있다(Fig. 1).

변성퇴적암류는 각섬석-흑운모 호상편마암, 흑운모 편마암 및 화강암질 편마암으로 구성되어 있으며, 앰피블라이트가 각섬석-흑운모 편마암내에 렌즈상으로 소규모 협재되어 있다. 변성암류는 모두 상호 점이적으로 변화하며 엽리의 발달상태도 거의 비슷하다. 엽리는 지역적으로 변화가 심하나 주향은 NS, 경사는 W방향인 전체적인 경향이다.

각섬석-흑운모 편마암은 연구지역에 넓게 분포해 있으며 앰피블라이트와 반상변질질 편마암이 국부적으로 소규모로 협재되어 있다. 흑운모 편마암은 광체의 모암인 석영-장석질 편마암과 점이적으로 변한다. 주 구성광물로는 석영, 사장석, 흑운모, 퍼어사이트이며, 부수광물로는 석류석, 각섬석, 백운모, 녹염석, 스펀, 자철석, 인회석 등이다. 화강암질 편마암은 각섬석-흑운모 편마암과 흑운모 편마암의 중간에 남북으로 길게 발달되어 있으며, 산출광물은 다른 편마암과 유사하나 퍼어사이트를 많이 함유하며 석류석은 거의 포함하지 않는다.

화강암은 변성 퇴적암을 관입하고 있으며 본 지역의 동부에 발달하고 쥘라기 저반상 화강암체(신병우 등, 1975)의 일부분을 이룬다. 주로 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석으로 구성되어 있으며 소규모의 각섬석-흑운모 편마암의 잔류물을 포획하고 있다.

열기성 암맥은 암록색 세립질의 치밀 견고한 맥암으로 주로 각섬석과 Ca-장석으로 구성된 암석이다. 이 암맥은 편마암 및 화강암을 관입하여 발달되어 있다.

## 3. 광상 개요

연구지역의 철-희토류 광상은 흑운모 편마암과 화강암질 편마암 내에 층간주입상으로 발달되어 있으며, 자은광체(복광체) 및 홍천광체(납광체)로 나뉜다(Fig. 1). 복광체의 주향은  $N10^{\circ}E$ , 경사는  $30^{\circ}NW$ 이고, 폭은 15~50 m, 연장성은 약 1 km이다. 납광체의 주향은 NS이며 경사는  $30^{\circ}NW$ 이고, 폭은 25~50 m에 연장성

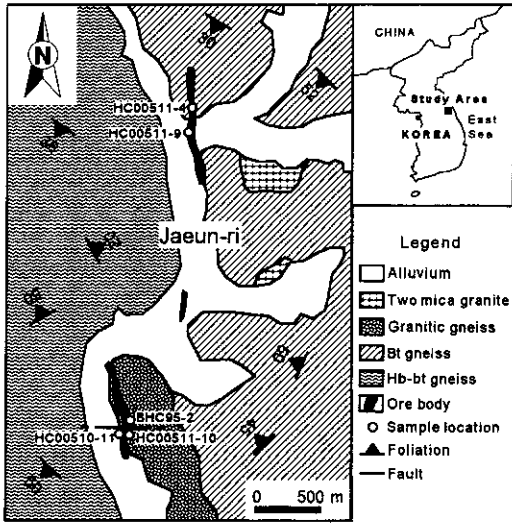


Fig. 1. Geological map and sample locations of the Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaeun district. Bt: biotite, Hb: hornblende.

은 약 1.5 km이다.

연구지역의 카보나타이트에서는 탄산염 멜트의 분화초기에 관찰되는 Na가 부화되는 알바이트화작용(페나이트)이 관찰된다. 이 시기에 산출되는 주구성광물은 알바이트와 석영이고 부수적으로 견운모, 녹니석, 자철석, 적철석, 황철석 및 모나자이트 등이 수반된다. Fig. 2A에서 보여주는 바와 같이 밝은 색부분은 Na-카보나타이트에서 분화된 Fe-카보나타이트 시기로서 모나자이트, 스트론티아나이트(strontianite), 중정석, 인회석, 액마이트(acmite) 및 함철 돌로마이트로 구성된다. 이들은 최후기에 관입하는 열수기원의 석영-방해석 세맥에 의해 절단되어 있다(Fig. 2B). 이처럼 이 지역의 철-희토류광상은 크게 두 개의 시기로 나뉘며, 철-희토류광물은 주로 Fe-카보나타이트시기를 구성하는 함철 돌로마이트와 밀접한 공생관계를 갖는다.

BHC95-2호공(120 m)의 시추시료를 검토해 보면, 시추시료를 이루는 암석은 하부로부터 각섬석-흑운모 편마암-탄산염암-중성암맥-탄산염암-중성암맥순으로 분포되어 있다. 광체는 크게 고품위와 저품위의 광체로 나뉘고, 고품위의 4개 광체와 저품위의 3개 광체가 관찰된다. 고품위 광체는 주로 42 m에서 52 m사이의 심도, 및 1내지2 m의 맥폭을 갖으며, 주로 탄산염암내에 자철석과 희토류광물이 광염상으로 분포되어 있다. 희토류광물로는 모나자이트 및 스트론티아나이트가 주로 산출된다.

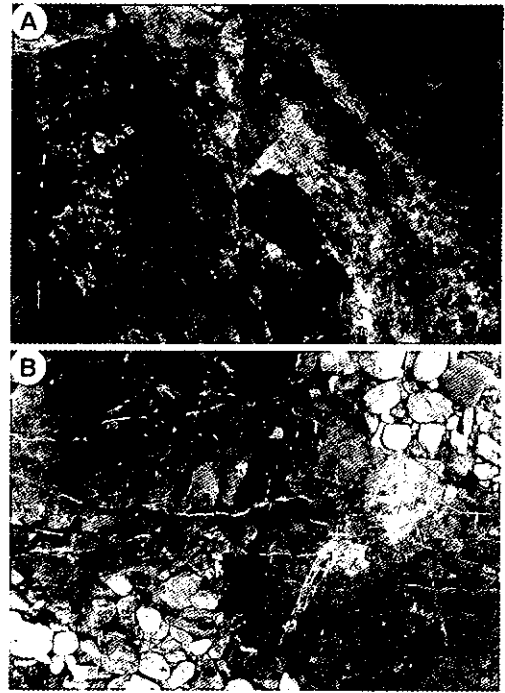


Fig. 2. Photographs of outcrops of carbonate rocks with Fe-REE mineralization (A), and hydrothermal veins intruded Fe-REE ore body (B).

#### 4. 광물공생관계 및 산출광물

본 연구지역의 철-희토류 광화작용은 광체의 구조 및 광물의 공생관계를 토대로 카보나타이트 시기와 열수 시기로 나뉜다(Fig. 3).

카보나타이트시기는 분화정도에 따라 Na-카보나타이트와 Fe-카보나타이트로 나뉜다. Na-카보나타이트 시기에서는 Na가 풍부한 유체가 주변의 모암과 반응하면서 Na가 부화된 알바이트화 작용을 야기 시켰다. 이때 자철석, 적철석, 황철석 및 소량의 녹니석, 견운모, 모나자이트가 정출되었다. Fe-카보나타이트 시기에서는 Na가 풍부한 카보나타이트에서 더 분화되어 모나자이트, 스트론티아나이트, 액마이트, 중정석, 인회석 등이 액마이트와 같은 광물과 함께 함철돌로마이트 및 방해석과 공생하면서 정출하였다. 최후기에는 열수기원의 방해석-석영 세맥이 카보나타이트의 시기에 정출된 광물들을 절단하며 맥상으로 관입하였다.

##### 4.1. 황화 및 황산염 광물

철광체에서 산출되는 황화광물은 일반적으로 염리의 방향에 따라 배열되어 있거나 방해석과 재결정된 석영

| Mineral      | Carbonatite    |                | Hydro-thermal |
|--------------|----------------|----------------|---------------|
|              | Na-carbonatite | Ca-carbonatite |               |
| Albite       | —              |                |               |
| Sericite     | —              |                |               |
| Chlorite     | —              |                |               |
| Acmite       |                | —              |               |
| Dolomite     | —              | —              |               |
| Calcite      | —              | —              | —             |
| Quartz       | —              |                | —             |
| Magnetite    | —              | —              |               |
| Hematite     | —              | —              |               |
| Pyrite       | —              |                | —             |
| Chalcopyrite |                |                | —             |
| Sphalerite   |                |                | —             |
| Molybdenite  |                |                | —             |
| Galena       |                |                | —             |
| Monazite     | —              | —              | —             |
| Strontianite |                | —              | —             |
| Barite       |                | —              |               |
| Apatite      |                | —              |               |

Fig. 3. Paragenetic sequence of minerals from Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaun district.

과 공존하면서 자철석의 깨진 틈에 충전되어 있다. 특히 황철석, 황동석 및 섬아연석은 철광체 내에 세맥으로 관입한 Na-카보나타이트 시기의 돌로마이트 및 방해석과 관련되어 산출된다.

황철석은 산출시기에 따라 두시기로 나뉜다. 즉, Na-카보나타이트 시기에 자철석과 공생하면서 자형 혹은 반자형을 갖는 것(Fig. 4A)과 Fe-카보나타이트 시기의 중기에 돌로마이트 및 방해석과 함께 광염상으로 산출되는 것으로 구분된다.

황동석은 타형을 갖으며 소량 산출되며, 자철석의 깨짐면에 충전되어 있다. 섬아연석과는 용리조적을 갖는다. 섬아연석은 소량으로 산출되며 황동석과 용리구조를 갖는다(Fig. 4B). 휘수연석은 Fe-카보나타이트 중기에 돌로마이트내에 소량 관찰된다. 중정석은 현미경 하에서 관찰 가능하다. 담황색 광물내에 스트론티아나이트, 모나자이트와 공존하여 산출되며 입자 크기는 수십  $\mu\text{m}$ ~수 mm이다.

#### 4.2. 산화광물

자철석은 철광체를 이루는 주요한 광물로서 대체로 타형이다(Fig. 4A). 엽리가 잘 발달되어 있는 부분에서는 엽리의 방향에 따라 길게 신장되어 있기도 하며 이 경우 매우 불규칙한 입자의 형태를 보인다. 자철석 결

정의 테두리나 열극은 황철석을 함유한 방해석-돌로마이트맥으로 충전되어 있다(Fig. 4C).

적철석은 자철석과 공존하여 0.1~0.5 mm의 입자 크기로 산출되거나 이차적으로 자철석을 교대하여 산출되고 있다.

#### 4.3. 탄산염광물

탄산염광물은 Na-카보나타이트 시기에 철광석광물과 함께 방해석, 돌로마이트가 산출되며, Fe-카보나타이트 시기에는 방해석, 돌로마이트, 스트론티아나이트 등이 산출된다. 흰색 및 회색을 띠는 부분의 탄산염광물은 모나자이트를 수반한다. 담황색 내지 분홍색을 띠는 부분은 스트론티아나이트가 우세하게 산출되고 이때 중정석, 인회석, 모나자이트를 수반한다(Fig. 4E). 방해석 및 돌로마이트는 상호 공존하고 있으며, 카보나타이트 전시기에 걸쳐 산출된다. 이들 광물은 주로 스트론티아나이트, 모나자이트와 밀접하게 공생관계를 갖는다(Fig. 4F). 스트론티아나이트는 분홍색 내지 담황색을 띠며 모나자이트, 인회석, 중정석을 수반한다. 대부분 비정질이며 모나자이트와 용리조적을 가지며 교대성장되어 있다.

#### 4.4. 인산염광물

Fe-카보나타이트 시기 중기에 산출되는 인산염 광물로는 모나자이트 및 인회석이다. 이들 광물들은 탄산염광물이 풍부한 지점에서 많이 관찰된다. 대부분의 희유금속광물은 스트론티아나이트와 공생관계를 가지며 산출된다.

모나자이트의 산출시기는 두 개로 나뉜다. 하나는 Na-카보나타이트 시기에 자철석과 함께 철광화시기에 정출되는 것과 또 하나는 Fe-카보나타이트 시기에 스트론티아나이트와 함께 정출되는 것이다. Na-카보나타이트 시기에 산출되는 모나자이트는 크기가 수~수십  $\mu\text{m}$ 이며 일부는 돌로마이트에 의해서 균열대가 충전되어 있다. Fe-카보나타이트 시기에 정출되는 것은 탄산염광물과 공생하며 원형이나 반원형으로 산출된다.

인회석은 Fe-카보나타이트 시기에 주로 돌로마이트 및 스트론티아나이트와 밀접한 공생관계를 갖으며 소량 산출된다. 입자크기는 수  $\mu\text{m}$ ~1 mm이며 주로 스트론티아나이트와 용리조적을 갖거나 교대되어 있다.

#### 4.5. 규산염 광물

규산염광물로는 석영, 알비이트 및 휘석류의 액마이

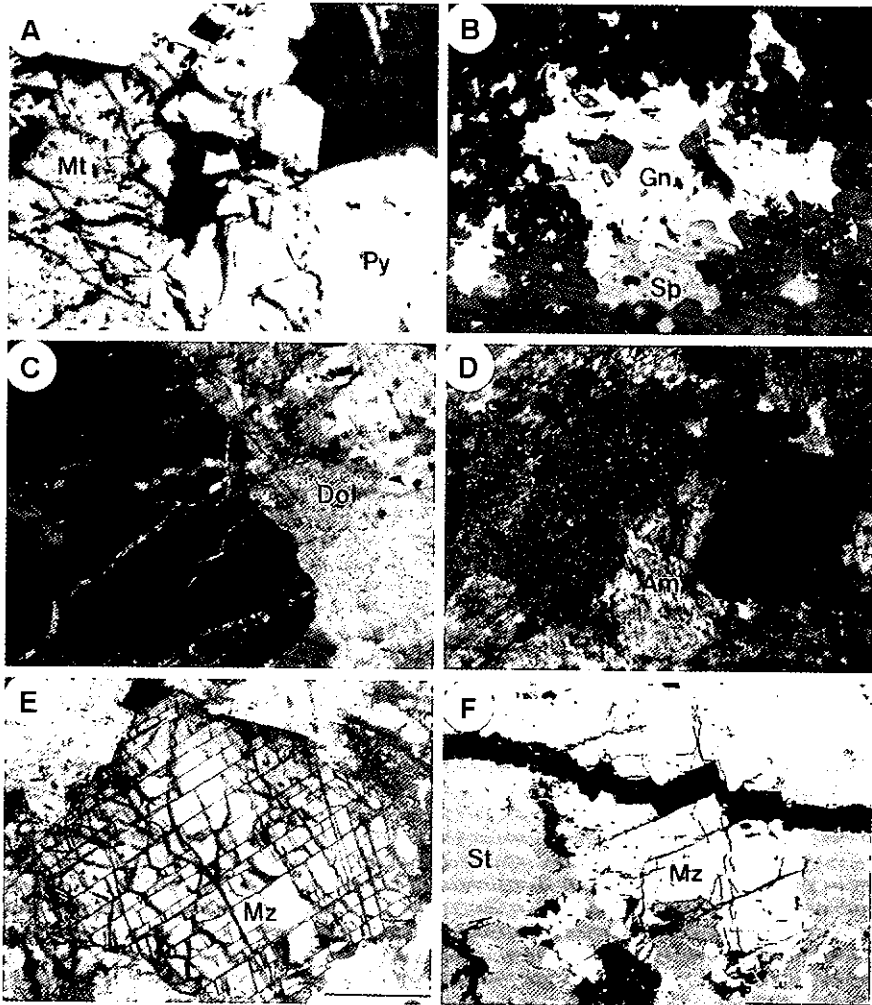


Fig. 4. Microphotographs of minerals from Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaeun district. All scale bars are 0.1mm. A; Pyrite (Py) coexisting with magnetite (Mt), B; Sphalerite (Sp) replaced by galena(Gn), C; Dolomite (Dol) infilling the fracture of magnetite, D; Acmite (Am) coexisting with dolomite, E; Fractured monazite (Mz), F; Monazite (Mz) replaced by strontianite (St).

트 등이다.

석영은 알바이트화작용을 받은 변질대에서 알바이트와 공생하며 타형으로 산출되거나 방해석-석영의 세맥에서 방해석과 공생하면서 자형 및 반자형의 결정으로 산출된다.

알바이트는 알바이트화작용을 받은 변질대에서 잘 관찰되며 재결정작용으로 인하여 대체적으로 타형의 결정을 갖는다.

액마이트는 주로 철광체를 관입한 Fe-카보나타이트 시기에 스트론티아나이트와 함께 알카리변질대에서 잘 관찰되며, 대체적으로 직각색을 띠고 있다(Fig. 4D).

## 5. 광물화학

### 5.1. 섬아연석

섬아연석은 주로 시추시료에서 관찰되며 심도와 광석광물의 품위에 따라 지표, 16.8 m(저품위대), 50.1 m(고품위대)로 나누어서 분석을 하였다(Table 1). 지표에서 산출되는 섬아연석의 FeS mole함량은 6.77~11.41%의 범위를 보이고, 16.8 m 지점의 섬아연석은 9.21~9.94%의 범위, 50.1 m 지점의 섬아연석은 13.80~15.21%의 범위로서 심도가 깊어지면서 Fe의 함량이 증가하는 경향을 보인다. 한편

**Table 1.** Chemical composition of sphalerite from Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaeun district.

| Sample No.              | Weight % |      |      |      |      |       | Mole % |       |      |
|-------------------------|----------|------|------|------|------|-------|--------|-------|------|
|                         | Zn       | Fe   | Cu   | Mn   | Cd   | S     | Total  | FeS   | CdS  |
| 98-1<br>(Surface)       | 60.63    | 4.50 | 0.47 | -    | -    | 32.97 | 98.57  | 7.94  | -    |
|                         | 63.50    | 3.95 | 0.12 | -    | -    | 32.92 | 100.49 | 6.77  | -    |
|                         | 60.40    | 5.13 | 0.33 | -    | -    | 32.90 | 98.76  | 9.00  | -    |
|                         | 59.01    | 6.57 | 0.67 | -    | -    | 32.81 | 99.06  | 11.41 | -    |
|                         | 63.02    | 4.12 | 0.24 | -    | -    | 32.77 | 100.15 | 7.08  | -    |
|                         | 61.41    | 3.92 | 0.23 | -    | -    | 33.11 | 98.66  | 6.92  | -    |
|                         | 60.99    | 5.20 | 0.00 | -    | -    | 33.58 | 99.78  | 9.07  | -    |
| 95-2-1<br>(16.8m depth) | 57.67    | 5.18 | 0.01 | 0.01 | 3.58 | 33.44 | 99.89  | 9.21  | 3.17 |
|                         | 58.18    | 5.61 | 0.01 | 0.01 | 2.23 | 33.79 | 99.83  | 9.94  | 1.96 |
|                         | 56.57    | 5.30 | 0.02 | 0.01 | 4.96 | 33.07 | 99.93  | 9.45  | 4.39 |
| 95-2-4<br>(50.1m depth) | 57.08    | 8.17 | 0.72 | -    | -    | 32.79 | 98.76  | 14.20 | -    |
|                         | 57.63    | 8.05 | 1.19 | -    | -    | 32.76 | 99.64  | 13.80 | -    |
|                         | 56.51    | 8.82 | 1.01 | -    | -    | 32.85 | 99.20  | 15.21 | -    |

16.8 m 지점의 섬아연석에서는 다른 지점에서 포함되지 않은 CdS가 1.96~4.39 mole% 포함되어 있다.

## 5.2. 모나자이트

모나자이트의 일반적인 화학식은  $4[(Ce, La)PO_4]$ 이고, 일반적으로 다양한 희토류원소 및 Th와 U를 갖는다. 또한 P를 치환하여 소량의 Si가 함유되기도 한다.

모나자이트의 분석결과는 Table 2에 정리하였다. 분석된 모나자이트내의  $RE_2O_3$  함량은 71.94~74.30 wt.%이다. 광물의 산출시기 및 공생관계에 따라 함량의 차이를 다소 보인다. Fe-카보나타이트 시기에 스트론티아나이트와 공생하는 모나자이트의  $La_2O_3$  및  $Ce_2O_3$ 의 함량은 각각 20.98~23.74 wt.%, 34.14~35.59 wt.%로서 Na-카보나타이트 시기의 자철석과 공생관계를 갖는 것(각각 20.34~22.16 wt.%, 33.98~34.81 wt.%)보다 다소 높은 함량 범위를 갖는다. 반면에  $Pr_3O_3$ ,  $Nd_2O_3$ ,  $Eu_2O_3$  및  $Gd_2O_3$ 의 함량은 자철석과 공생하는 모나자이트에서 다소 높게 나타났다(Fig. 5). 홍천-자은지역의 광상에서 산출되는 모나자이트는 특징적으로 매우 낮은 Th 함량(0.07~0.35 wt.%)을 보이며, U이 함유되어 있지 않다.

특히 변성기원의 모나자이트의  $Eu_2O_3$ 은 일반적으로 0.5 wt.% 이하의 함량을 갖는 것으로 알려져 있으나, 연구지역의 모나자이트는 이보다 다소 높은 0.48~0.92 wt.%의 범위를 갖는다.

## 5.3. 스트론티아나이트

남부광체의 변질대부분인 하부광체에서 액마이트와 공생되어 산출된다. 스트론티아나이트의 화학분석결과 Sr, Ca의 함량은 2.01~2.06 wt.%까지 나오며 C와의 비율이 거의 2:2로서 이상적인 화학식과 거의 일치한다. SrO의 wt.%의 경우 67.4~69.5%, CaO는 1.65~1.71%,  $CO_2$ 는 29.78~30.04의 범위를 보인다(Table 3).

## 5.4. 액마이트

액마이트는 철-희토류광체의 하부광체와 변질대부분에서 스트론티아나이트와 공생한다. 액마이트의 화학조성중  $SiO_2$ 의 함량은 51.14~52.22 wt.%,  $Al_2O_3$ 는 2.70~3.26 wt.%,  $Fe_2O_3$ 는 27.18~28.84 wt.%, CaO는 2.18~2.78 wt.%,  $Na_2O$ 는 12.16~13.25 wt.%를 보이며, 미량으로 Mg 및 Mn을 함유하고 있다(Table 4). 액마이트는 휘석계열의 광물로서 이상적인 액마이트는  $NaFe[Si_2O_6]$ 이다. 연구지역 액마이트의 화학식은  $(Na, Ca)1.001\sim1.080(Fe, Mg, Mn, Al)0.980\sim0.998[(Si, Al)_2O_6]$ 로서, Na 및 Ca가 다소 부화되어 있다.

## 6. 광화학작용에 관한 고찰

자은광체와 홍천광체에서 산출되는 광물, 산출량 및 화학조성에는 차이를 보이지 않는다. 자은광체는 주향 N10°E, 경사는 30°NW이다. 홍천광체의 주향은 NS, 경사는 30°NW로서 자은광체와 연장된 광체로서 단층에 의해 절단되어 연장성이 불연속적이다. 두 광상의 기

**Table 2.** Chemical composition of monazite from Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaemun district.

| Sample No.   | Shape | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | ZrO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Total |        |
|--|-------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------|--------------------------------|------|------------------|-------------------------------|-------|--------|
| <i>Na-carbonatite stage related to magnetite</i>   |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| <i>Southern ore body</i>                           |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| HC00510-10(3)                                      | CM    | 20.34                          | 34.74                          | 6.68                           | 6.17                           | 0.81                           | 4.10                           | -                              | 0.06                           | -                              | 0.07                           | 0.08                           | 0.07             | 0.01             | 0.03             | 0.07 | 0.01                           | -    | 0.01             | -                             | 27.18 | 100.42 |
| HC00510-11-1(2)                                    | FM    | 20.85                          | 33.99                          | 6.14                           | 7.00                           | 0.92                           | 3.76                           | -                              | 0.30                           | -                              | 0.04                           | 0.04                           | 0.27             | 0.02             | 0.05             | 0.09 | -                              | 0.01 | 0.05             | 0.05                          | 26.58 | 100.04 |
| HC00510-11-2(3)                                    | FM    | 20.41                          | 34.37                          | 6.09                           | 6.15                           | 0.69                           | 4.10                           | 0.09                           | 0.24                           | -                              | -                              | -                              | 0.15             | 0.02             | 0.05             | 0.02 | -                              | -    | 0.10             | 0.10                          | 26.35 | 98.86  |
| <i>Northern ore body</i>                           |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| HC00511-4-1(3)                                     | FM    | 21.67                          | 34.76                          | 6.53                           | 6.26                           | 0.71                           | 3.93                           | 0.08                           | 0.06                           | 0.07                           | -                              | 0.06                           | 0.34             | 0.01             | 0.03             | 0.12 | -                              | -    | 0.02             | -                             | 27.08 | 101.73 |
| HC00511-4-7(2)                                     | RM    | 21.40                          | 34.81                          | 6.05                           | 6.16                           | 0.68                           | 3.92                           | -                              | -                              | 0.08                           | -                              | 0.06                           | 0.21             | 0.02             | -                | 0.05 | -                              | -    | 0.03             | 0.03                          | 26.56 | 100.01 |
| <i>Core boring (57.45m depth from surface)</i>     |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| 95-2-6-1(3)  | FM    | 21.07                          | 33.98                          | 6.22                           | 6.01                           | 0.74                           | 3.80                           | 0.03                           | -                              | 0.08                           | 0.01                           | -                              | 0.35             | 0.03             | 0.02             | 0.10 | -                              | -    | 0.05             | 0.05                          | 26.91 | 99.40  |
| 95-2-7-1(3)  | FM    | 22.16                          | 34.01                          | 6.29                           | 5.63                           | 0.76                           | 3.96                           | 0.01                           | -                              | -                              | 0.18                           | 0.20                           | 0.12             | 0.02             | 0.04             | 0.10 | -                              | 0.01 | 0.05             | 0.05                          | 26.84 | 100.37 |
| <i>Fe-carbonatite stage related to stromianite</i> |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| <i>Southern ore body</i>                           |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| HC00510-10-2(3)                                    | CM    | 21.95                          | 35.33                          | 6.16                           | 5.81                           | 0.74                           | 3.91                           | 0.03                           | 0.16                           | 0.06                           | 0.03                           | 0.08                           | 0.27             | 0.03             | 0.02             | 0.06 | 0.01                           | 0.01 | 0.04             | 0.04                          | 26.60 | 101.28 |
| HC00510-10-5(3)                                    | FM    | 21.05                          | 34.58                          | 6.30                           | 6.13                           | 0.73                           | 3.92                           | 0.01                           | -                              | -                              | 0.10                           | 0.06                           | 0.37             | -                | -                | 0.06 | 0.01                           | 0.03 | 0.04             | 0.04                          | 27.26 | 100.64 |
| HC00510-11-3(3)                                    | RM    | 20.98                          | 35.07                          | 6.08                           | 6.05                           | 0.65                           | 3.85                           | 0.01                           | 0.01                           | 0.21                           | 0.05                           | 0.02                           | 0.18             | 0.22             | 0.03             | 0.08 | 0.05                           | 0.02 | -                | -                             | 26.58 | 100.14 |
| <i>Northern ore body</i>                           |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| HC00511-4-4(1)                                     | RM    | 21.26                          | 35.59                          | 5.74                           | 6.16                           | 0.70                           | 4.10                           | 0.17                           | -                              | 0.15                           | 0.12                           | 0.22                           | 0.15             | 0.02             | 0.06             | 0.04 | 0.01                           | 0.02 | 0.01             | 0.02                          | 27.16 | 101.68 |
| HC00511-9-3(2)                                     | CM    | 22.04                          | 35.00                          | 6.25                           | 5.69                           | 0.61                           | 3.86                           | -                              | -                              | -                              | -                              | 0.06                           | 0.34             | 0.07             | -                | 0.07 | -                              | -    | -                | -                             | 26.33 | 100.32 |
| HC00511-9-4(2)                                     | FM    | 21.13                          | 35.46                          | 6.14                           | 5.80                           | 0.80                           | 3.94                           | -                              | 0.15                           | 0.06                           | 0.04                           | -                              | 0.25             | 0.12             | 0.01             | 0.06 | -                              | -    | 0.07             | 0.07                          | 26.22 | 100.25 |
| <i>Core boring (57.45m depth from surface)</i>     |       |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                                |                  |                  |                  |      |                                |      |                  |                               |       |        |
| 95-2-7-2(3)  | CM    | 22.92                          | 34.14                          | 5.97                           | 5.12                           | 0.56                           | 3.87                           | 0.01                           | 0.12                           | 0.16                           | 0.18                           | 0.11                           | 0.15             | 0.08             | 0.05             | 0.09 | -                              | -    | 0.05             | 0.05                          | 26.92 | 100.45 |
| 95-2-7-5(1)  | RM    | 23.74                          | 34.25                          | 5.88                           | 5.58                           | 0.48                           | 4.11                           | -                              | -                              | 0.21                           | -                              | 0.05                           | 0.14             | 0.13             | -                | 0.08 | -                              | -    | 0.01             | 0.01                          | 26.82 | 101.48 |

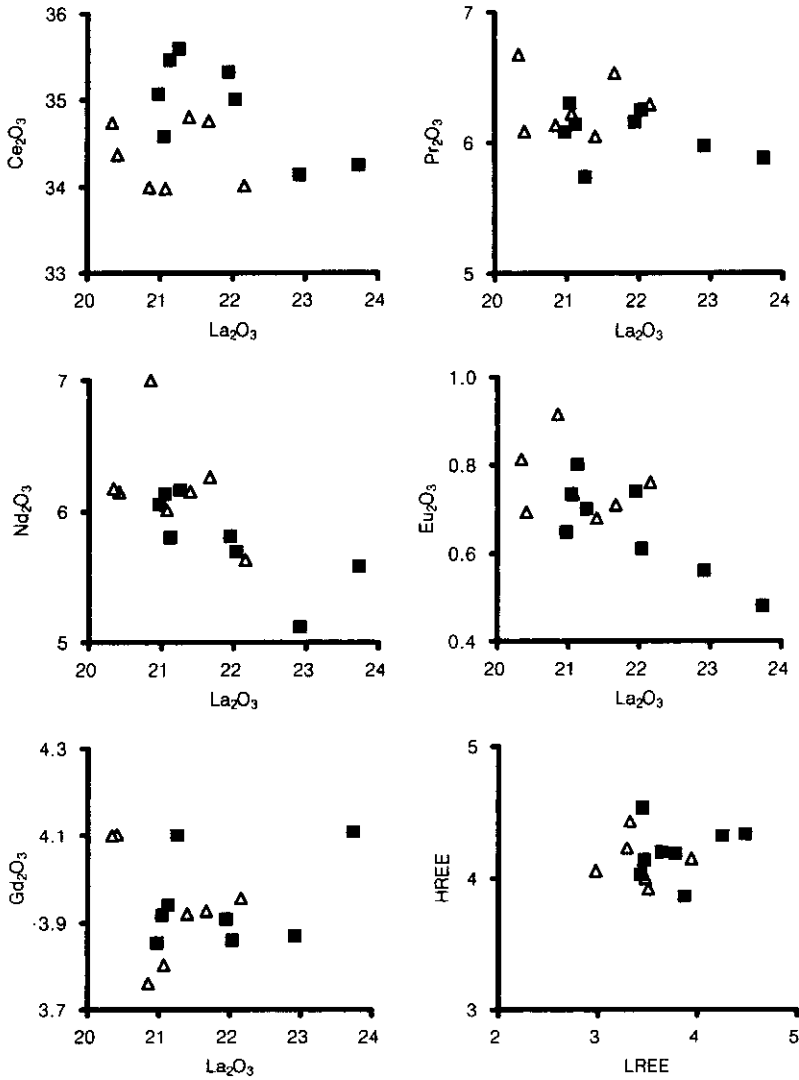


Fig. 5. Diagrams of  $La_2O_3$  versus other earth elements, and LREE versus HREE in monazite. Triangle; monazite related to Na-carbonatite stage, Full square; monazite related to Fe-carbonatite stage.

Table 3. Chemical composition of strontianite from Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaeun district.

|                 | HC00510-10          |        |       |        |       |       |
|-----------------|---------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| SrO             | 68.45               | 68.66  | 68.40 | 68.98  | 68.29 | 67.99 |
| CaO             | 1.68                | 1.71   | 1.65  | 1.69   | 1.71  | 1.67  |
| CO <sub>2</sub> | 29.77               | 29.67  | 29.92 | 29.34  | 29.99 | 30.04 |
| Total           | 99.90               | 100.04 | 99.97 | 100.01 | 99.99 | 99.70 |
|                 | Basis of 16 (O, OH) |        |       |        |       |       |
| Sr              | 1.94                | 1.95   | 1.93  | 1.97   | 1.93  | 1.92  |
| Ca              | 0.09                | 0.09   | 0.09  | 0.09   | 0.09  | 0.09  |
| Ca+Sr           | 2.03                | 2.04   | 2.02  | 2.06   | 2.02  | 2.01  |
| C               | 1.99                | 1.98   | 1.99  | 1.97   | 1.99  | 2.00  |

원에 대해서는 지금까지 논쟁의 대상이 되어 왔으나, 본 연구의 결과를 토대로 본다면 이 지역에서 Na-교대작용(알바이트화 작용)을 야기시킨 Na-카보나타이트 시기와 이 보다 더 진화된 Fe-카보나타이트 시기로 나눌 수 있다. Na-카보나타이트 시기는 주로 철광물과 모나자이트의 침전기(자철석, 적철석, 황철석), Fe-카보나타이트 시기는 희토류광물(모나자이트, 스트론티아나이트 및 중정석 등)과 황화광물(황철석, 황동석, 섬야연석, 휘수연석)의 침전기, 최후기에는 이들을 절단하는 열수기원의 방해석-석영의 세맥의 관입기이다.

앞에서 언급한 카보나타이트와 관련되어 철-희토류



**Table 4.** Chemical composition of acmite from Fe-REE deposit in the Hongcheon-Jaeun district.

| HC00510-10                     |        |       |       |        |       |       |
|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 51.39  | 51.36 | 51.14 | 51.83  | 51.35 | 52.22 |
| TiO <sub>2</sub>               | -      | 0.01  | -     | 0.01   | -     | -     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.06   | 2.88  | 2.70  | 3.03   | 3.19  | 3.26  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 28.26  | 28.06 | 28.84 | 28.5   | 27.74 | 27.18 |
| MgO                            | 1.67   | 1.59  | 0.18  | 0.3    | 0.19  | 0.22  |
| MnO                            | 0.82   | 0.17  | 1.52  | 1.87   | 1.67  | 1.72  |
| CaO                            | 2.78   | 2.48  | 2.18  | 2.36   | 2.37  | 2.34  |
| Na <sub>2</sub> O              | 13.22  | 13.25 | 12.16 | 12.85  | 12.61 | 12.86 |
| Total                          | 101.20 | 99.80 | 98.72 | 100.80 | 99.12 | 99.80 |
| Basis of 6 (O)                 |        |       |       |        |       |       |
| Si                             | 1.938  | 1.956 | 1.976 | 1.965  | 1.974 | 1.987 |
| Al                             | 0.062  | 0.044 | 0.024 | 0.035  | 0.026 | 0.013 |
|                                | 2.000  | 2.000 | 2.000 | 2.000  | 2.000 | 2.000 |
| Al                             | 0.074  | 0.086 | 0.099 | 0.101  | 0.118 | 0.134 |
| Ti                             | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000  | 0.000 | 0.000 |
| Fe <sup>+3</sup>               | 0.802  | 0.804 | 0.839 | 0.813  | 0.802 | 0.779 |
| Mg                             | 0.094  | 0.090 | 0.010 | 0.017  | 0.011 | 0.012 |
| Mn                             | 0.026  | 0.005 | 0.050 | 0.060  | 0.054 | 0.055 |
|                                | 0.997  | 0.986 | 0.998 | 0.992  | 0.986 | 0.980 |
| Ca                             | 0.112  | 0.101 | 0.090 | 0.096  | 0.098 | 0.095 |
| Na                             | 0.967  | 0.979 | 0.911 | 0.945  | 0.940 | 0.949 |
|                                | 1.079  | 1.080 | 1.001 | 1.041  | 1.037 | 1.044 |

광물이 침전되었다고 고찰하는 이유는 1) 스트론티아 나이트와 모나자이트가 용리조직을 갖으며 산출되는 점, 2) 스트론티아나이트와 중정석이 용리조직을 갖는 점, 3) 희토류광물이 주로 산출되는 지역에서 화성기원의 액마이트가 산출되는 점, 4) 탄산염광물-자철석-희토류광물의 공생 및 공존관계 등으로 볼 때 이 지역의 철-희토류광화작용은 알카리 화성암에서 기원된 열수 용액에서 기원되었음을 암시하고 있다. 한편 카보나타이트의 분화에 따라 알바이트화작용이 진행되면서 알카리손실이 되는 것을 펜사이트(fenite)라 한다(Le Bas, 1987). Fig. 2A에서 보여주는 바와 같이 본 광화대에는 탄산염암이 관입하였다는 증거가 있고, 그 주변에 알카리 변질대가 형성되어 있다는 것은 펜사이트의 산출이 카보나타이트와 관련되었다는 것을 지적한다. 특히 이러한 결과는 고대작용-열수기원으로 알려진 중국 내몽고의 Bayan Obo 광상에서 보여주는 산출광물 및 공생관계와 상당히 유사성을 갖는 것이다(Chao *et al.*, 1992; Le Bas *et al.*, 1992).

박중권(2001)은 합철 탄산염암 및 알카리초염기성암 복합체에서 산출되는 돌로마이트 및 스트론티아나이트를 대상으로한 안정동위원소 연구로부터,  $\delta C^{13}$  값은

-3.9~-9.3‰,  $\delta O^{18}$  값은 8.0~12.8‰임을 보고하였다. 카보나타이트 기원의 탄산염암은 일반적으로  $\delta C^{13}$  값은 -1~-9‰,  $\delta O^{18}$  값은 +6.0~+12.0‰의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다(Deines, 1989). 이러한 안정동위원소결과는 연구지역의 철-희토류광상은 전형적인 화성기원의 탄산염광물에서 갖는 값의 범위에 해당되고 있어서 앞에서 언급한 기원의 해석에 설득력을 제공하고 있다.

따라서 변질작용, 광물의 공생관계, 광물조직 및 동위원소의 연구결과를 종합하여 검토하여 보면, 자은-홍천지역의 철-희토류광상은 카보나타이트에 기인하여 형성된 광상으로 판단된다.

## 7. 결 론

아외조사, 현미경관찰 및 화학분석결과를 토대로 본 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 홍천-자은지역의 지질은 선캄브리아기의 편마암류와 쥘라기의 화강암으로 구성된다.
2. 철-희토류광체는 편마암내에 층간주입상으로 발달되어 있다.
3. 주요한 광석광물로는 자철석, 모나자이트, 스트론티아나이트, 중정석 등이 산출된다.
4. 희토류광물의 정출시기는 자철석-모나자이트의 초기시기와 모나자이트-스트론티아나이트-중정석의 후기시기로 나뉜다.
5. 광물의 조직 및 안정동위원소의 분석결과에 의하면, 이 지역의 철-희토류광상은 카보나타이트와 관련된다.

## 사 사

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-99-015-DI0108)에 의해 지원되었으며 이에 감사드린다. 본 논문에 사용된 자료는 충남대학교 공동실험실습관에 설치된 EPMA에 의해 분석되었으며, 관련 기관에 감사한다.

## 참고문헌

박중권, 이재호, 서정률 (1995) 선캄브리아기 철광화대의 희유금속광물자원조사연구(홍천-자은지역). 한국자원연구소, KR-94(C)1-7. 133pp.  
 박중권 (2001) 홍천-자은 철-희토류광상의 광화작용에 관한 연구. 충남대학교 대학원 석사학위논문, 73pp.

- 신병우, 홍만섭, 이유대, 박봉순 (1975) 자은도폭설명서 (1:50,000), 국립지질광물연구소, 16pp.
- 이상현 (1998) 홍천자철광상의 구성광물의 화학적 특징. 암석학회지, 7권, p. 98-110.
- 이종혁, 이상현 (1989) 홍천철광상의 성인에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 25권, p. 239-258.
- 이한영, 고상모, 홍세선, 김종환 (1991) 홍천지역의 변성작용. 지질학회지, 27권, p. 339-356.
- 조문섭, 김종욱 (1993) 춘천-홍천 지역 용두리 편마암 복합체내에 산출하는 납정석. 암석학회지, 2권, p. 1-8.
- 좌용주 (1997) 북운모 화강암의 암석학적 특징; 청산, 인제-홍천, 영주 및 남원. 암석학회지, 6권, p. 210-225.
- Chao E.C.T., Back JM, Minkin Ja, Ren Y (1992) Host-rock controlled epigenetic, hydrothermal metasomatic origin of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, P.R.C. Appl Geochem., v. 7, p. 443-458.
- Deines, P. (1989) Stable isotope variations in carbonatites. Carbonatites Genesis and Evolution (Edited by Keith Bell). Unwin Hyman, p. 301-359.
- Le Bas, M.J. (1987) Nephelinites and carbonatites. Alkaine Igneous Rocks (Edited by J.G. Pitton and B.G.J. Upton) Geological Society Special Publication n. 30, p. 53-83.
- Le Bas, MJ, Keller J, Kejie T, Wall F, Williams CT, Peishan Z (1992) Carbonatite dykes at Bayan Obo, Inner Mongolia, China. Mineral Petrol., v. 46, p. 195-228.

---

2001년 4월 8일 원고접수, 2001년 8월 14일 게재승인.