

## 대봉 및 삼광광상의 모암변질광물 및 광물화학

유봉철<sup>1)\*</sup> · 지세정<sup>2)</sup> · 이현구<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

일반적으로 광물들은 열수용액과 모암의 반응과 더불어 그에 수반되어 일어나는 여러 물리-화학적 변화요소에 따라 정출된다. 모암변질은 모암의 광물조합, 광물화학, 조직 및 색의 변화에 의해 관찰된다. 모암변질 요소는 모암의 화학조성, 광물조합, 모암의 투수성, 간극률, 흡수률, 열수용액의 화학조성, 온도 및 압력 등에 좌우된다. 지금까지 열수변질은 주로 천열수광상을 대상으로 많은 보고가 있었으나 중-고온형 금광상에 대한 연구는 미비한 실정이다. 최근들어 캐나다, 호주, 미국 및 중국 등 많은 나라에서는 중-고온형 금광상을 찾는데 대학 및 관련 연구소를 중심으로 모든 과학적 지식을 총동원하고 있으며 국가적인 연구 지원과 산학협동에 의해 이를 적극 후원하고 있다. 이런 중-고온형 금광상은 단순한 광물조합과 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 함량을 갖는 것이 특징이다. 대봉 및 삼광광상은 선캠브리아기의 변성퇴적암류내에 발달하며 높은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> 함량, 단순한 광물조성 및 매우 높은 금함량을 갖는 광상이다. 따라서 이 연구에서는 대봉 및 삼광광상의 모암변질광물 및 광물화학 등에 대한 연구를 수행함으로써 이들 광상의 모암변질특징 및 광화유체의 성질에 대해 고찰하고자 한다.

### 2. 지질 및 광상개요

대봉 및 삼광광상의 주변지질은 기존연구(Lee et al., 1992; Yoo et al., 2002; 2003)에서 보고되어 있어 여기에서는 간략하게 그 개요만을 설명하고자 한다. 이들 광상은 선캠브리아기의 변성퇴적암류가 넓게 분포하고 있으며 이를 쥐라기 대동누층군의 퇴적암류가 부정합으로 피복하고 있다. 또한 상기의 암류들을 후기에 관입한 쥐라기 흑운모화강암과 백악기의 산성암류가 소규모로 분포한다. 선캠브리아기 변성퇴적암류는 호상편마암, 화강편마암, 안구상편마암, 각섬암질 편암, 사문암, 미그마타이트질 편마암, 결정질석회암 및 석회규산염암으로 구성된다.

쥐라기 대동누층군 퇴적암류인 조계리층, 백운사층 및 성주리층은 북북동방향으로 분포한다. 조계리층은 선캠브리아기 호상편마암과 단층으로 접하고 있으며 함장석각력사암대와 역암대로 분대된다. 백운사층은 조계리층을 정합으로 피복하고 사암대와 호층대로 분대된다. 사암대는 주로 세립질사암으로 구성되며 역암, 셰일 및 탄층이 협재된다. 성주리층은 크게 하부사암대, 호층대, 상부사암대로 분대된다. 하부사암대는 상향 세립구조를 보여주는 사암으로 구성되며 사암의 입자크기는 변화가 다양하다. 쥐라기 흑운모화강암은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 관입하였고, 대봉광상의 남서 및 북서지역과 갯내에서 관찰되며 함 금-은 석영맥에 의해 관입을 당하였다. 맥암류는 염기성암맥, 산성암맥 및 석영맥으로 구성되며 광상일대의 여러지역에서 산출된다.

대봉 및 삼광광상은 호상 또는 화강편마암 내에 발달된 열극을 충전한 함 금-은 석영맥광상

---

주요어 : 대봉 및 삼광광상, 석영맥, 모암변질광물, 산출상태, 화학조성

1) 충남대학교 지질환경과학과(chbong@cnu.ac.kr)

2) 한국지질자원연구원 지질기반정보연구부 광물자원연구실(csjung@kigam.re.kr)

으로 대봉광상 일대에는 총연장이 500~1,000 m인 5개조의 석영맥으로 관찰된다. 대봉광상은 1988년 영풍광업(주)에서 인수하여 새로이 개발한 후 1990년 11월 휴광신고를 내기까지 4개 level 총 1,400 m 연맥 굴진되었다. 삼광광산은 총 8개의 평행한 맥으로 구성되어 있으며 1996년도 2월 휴광신고를 내기까지 상반맥을 중심으로 총 7,900 m 정도가 연맥 굴진되었다.

### 3. 모암변질광물

#### 3-1. 산출상태

대봉 및 삼광광상의 모암변질은 회녹색을 띠며 석영맥으로부터 1 m 이내에 산출된다. 모암인 호상편마암, 화강편마암 및 흑운모 화강암에서 관찰되는 모암변질은 큰 차이가 없으며 산출되는 변질작용은 견운모화, 녹니석화, 황철석화, 규화, 탄산염화, 프로필라이트화 및 점토화작용 등이 관찰된다. 이들 모암이 석영맥과 접촉한 부분에서는 주로 견운모화작용이 관찰되나 녹니석화작용은 호상편마암과 접하는 석영맥으로부터 멀어짐에 따라 유색광물대에서 관찰된다.

견운모화작용은 석영맥의 주변부를 따라, 그리고 맥의 규모에 따라 수 cm에서 60 cm 이내로 칼리장석, 흑운모, 사장석 등을 교대하며 산출된다. 석영맥 내에 포획된 칼리장석 또는 주변부에 대상으로 산출되는 칼리장석에도 견운모화작용이 잘 관찰된다. 녹니석화작용은 석영맥의 주변부, 모암의 일부분(유색광물대)이 석영맥 내에 포획되어 산출되는 곳, 흑운모 화강암과 호상편마암의 유색광물대가 산출되는 부분에서 흑운모를 교대하여 산출된다. 현미경하에서 관찰되는 모암변질 광물은 석영맥 주변부에선 칼리장석, 흑운모, 사장석 등을 교대하여 주로 견운모와 소량 녹니석, 방해석, 녹염석이 관찰되며 석영 내 유색광물에선 흑운모를 교대하여 녹니석과 녹염석이 관찰된다. 또한 석영맥으로부터 멀어짐에 따라 흑운모가 많은 곳에선 녹니석이 산출된다. 유색광물대는 석영맥의 주향에 평행하게 리본-호상(ribbon-banded)구조로 관찰되며 모암 내 석영도 재용융 및 재결정화작용이 관찰된다.

칼리장석은 흑운모 화강암과 호상편마암과 접하는 석영맥 주변부 또는 석영맥 내에서 담회색을 띠며, 대상 또는 단결정의 산점상으로 산출된다. 대상으로 산출되는 칼리장석은 호상구조가 관찰되는 부분에서 석영맥의 주향과 평행하게 유색광물대와 함께 관찰된다. 산점상으로 산출되는 칼리장석은 석영맥 내에 다양한 크기로 산출되며, 특히 모암 내에 석영의 재결정화작용이 관찰되는 곳에서도 산출된다. 이런 부분은 모암내 석영의 재결정화작용 및 이동에 의해 유색광물대가 부화되어 있다. 그러므로 석영내 산출되는 칼리장석은 열수용액에 의한 모암변질광물 또는 모암의 잔존 광물로 생각된다.

#### 3-2. 화학조성

대봉 및 삼광광상산 녹니석, 견운모, 칼리장석 및 방해석에 대해 EPMA 분석을 실시하였다.

이들 광상에서 산출되는 녹니석에는  $K_2O < 1.06 \text{ wt.}\%$ (대봉),  $TiO_2 < 0.09 \text{ wt.}\%$ (대봉),  $0.08 \text{ wt.}\%$ (삼광),  $CaO 0.49 \text{ wt.}\%$ (대봉),  $0.44 \text{ wt.}\%$ (삼광),  $MnO < 0.25 \text{ wt.}\%$ (대봉),  $0.12 \text{ wt.}\%$ (삼광) 및  $Na_2O < 0.16 \text{ wt.}\%$ (대봉),  $< 0.06 \text{ wt.}\%$ (삼광) 등이 소량 함유되어 있다. 녹니석의  $Fe/(Fe+Mg)$  값은  $0.66 \sim 0.73$ (대봉),  $0.74 \sim 0.81$ (삼광)으로 삼광광상의 녹니석이 다소 높은 값을 갖는다. 또한 녹니석 단종의 활동도는  $a_3(Fe_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_6)$ :  $0.0096 \sim 0.0291$ (대봉),  $0.0275 \sim 0.0538$ (삼광)  $a_2(Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_6)$ :  $9.99E-7 \sim 1.87E-5$ (대봉),  $-8.82E-15 \sim 7.79E-7$ (삼광) 및  $a_1(Mg_6Si_4O_{10}(OH)_6)$ :  $9.12E-7 \sim 1.79E-5$ (대봉),  $-5.56E-15 \sim 9.29E-7$ (삼광)

광)로서 Iron-rich 녹니석이 우세하게 산출된다. 녹니석에 대한 분석결과를 가지고 Hey(1954)가 제시한 다이어그램에 도시하면 대부분 브룬스비자이트(brunsvigite)에 해당된다.

이들 광상에서 산출되는 견운모에는 FeO <4.49 wt.%(대봉), <3.10 wt.%(삼광), MgO <3.41 wt.%(대봉), <1.90 wt.%(삼광)가 포함되어 있으며 소량 Na<sub>2</sub>O <0.13 wt.%(대봉), <0.18 wt.%(삼광), CaO <0.04 wt.%(대봉), <0.05 wt.%(삼광) 및 MnO <0.04 wt.%(대봉), <0.02 wt.%(삼광)등이 포함되어 있다. 일반적으로 백운모에 비하여 이들 광상에 산출되는 견운모는 K(대봉=1.05~1.15, 삼광=1.24~1.50)의 함량이 낮고, Fe(대봉=0.33~0.49, 삼광=0.27~0.34) 및 Mg(대봉=0.44~0.68, 삼광=0.30~0.37)의 함량이 다소 높아 열수 운모의 조성범위와 비슷하다. 일반적인 견운모와 같이 Si의 부화로 인한 팔면체 자리의 Al 및 층간 K의 결핍이 관찰된다. 견운모에 대한 팔면체 내에서 Fe 양이온수가 0.25개 이상이면 백운모-펜자이트족으로 그 이하이면 셀라도나이트-글라코나이트족으로 구분하는데 이들 광상에서 산출되는 견운모는 백운모-펜자이트족에 해당된다.

삼광광상산 칼리장석에는 FeO <0.09 wt.%, TiO<sub>2</sub> <0.03 wt.% 및 MnO <0.01 wt.%가 소량 포함되어 있다. 분석자료에 의하면 칼리장석은 Or<sub>98</sub>Ab<sub>2</sub>의 조성을 갖는다. 이 광상산 방해석에는 FeO <2.55 wt.%, MnO <1.05 wt.% 및 MgO <0.25 wt.%가 포함되어 있다.

모암변질시 열수용액과 모암사이에는 성분의 이동이 존재한다. 대봉광상 갱내에서 흑운모 화강암의 중심부(D.B.150-17)와 석영맥에 인접한 곳(D.B.150-14)에서 채취하였다. 전자는 열수용액에 의해 변질이 관찰되지 않지만 후자는 견운모화, 녹니석화 및 황철석화작용이 관찰된다. 열수용액에 의한 모암변질시 두 시료간의 미량원소에 대한 원소분산은 전자보다 후자에서 Rb, Zr, Hf, Co, Ni, Cs, U등이 감소하며 Ba, Sr, Cr, Sc, V, Pb, Zn, Be, Ag, As, Ta, Sb등이 증가하는데 특히 Sr, V, Pb, Zn, As등이 현저하게 증가한다. 모암변질시 구성성분-부피의 상관관계를 기초로 변질과 비변질 광물 및 암석에 대한 화학분석치 및 비중으로 물질의 이득 및 손실을 계산하는 방정식을 이용하여 광화작용 후의 변질 및 비변질 암석의 원소 이득 및 손실을 살펴보면, 전자보다 후자에서 Pb(+229g), Zn(+189g), Sr(+58g) 및 As(+6g)등이 현저하게 증가하였다.

#### 4. 토론

대봉 및 삼광광상의 모암변질광물과 화학조성은 큰 차이가 관찰되지 않으며 이들 광상에서 관찰되는 모암변질은 견운모화 및 녹니석화작용이 가장 우세하며 황철석화작용, 탄산염화작용, 규화작용, 프로펠라이트화작용 및 점토화작용이 관찰된다.

가수분해반응에 의하여 장석, 운모 및 점토광물은 열수용액사이에 K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등의 양이온이 이동되어진다. 대봉광상 갱내에서 산출되는 흑운모 화강암에 대한 광화작용후의 변질 및 비변질 암석의 원소 이득 및 손실 계산을 살펴보면, 변질된 시료에서 K와 Na원소는 소량 증가하고 Ca, Mg 및 Mn원소들은 소량 감소한다. 여기에서 K와 Na원소는 칼리장석과 사장석(알바이트)의 가수분해반응에 의하여 부화된 것으로 설명될 수 있다. 그리고 모암변질산물 중 황철석이 산출되는 것으로 보아 산화/환원상태는 황철석 안정영역내에 있었음을 알 수 있다.

대봉 및 삼광광상의 열수용액 내 용질의 활성화도(aNa<sup>+</sup>, aK<sup>+</sup>, aCa<sup>2+</sup>, aMg<sup>2+</sup>)는 열수용액의 가수분해와 양이온 교환 등에 의하여 유추할 수 있다. 이러한 열수용액의 가수분해와 양이온 교환 등은 모암변질에서 잘 관찰된다. 모암변질광물상, 유체포유물 자료(mNa<sup>+</sup>+mK<sup>+</sup>+mCa<sup>2+</sup>+mMg<sup>2+</sup>) = 0.32, 0.57(대봉), 0.35, 0.35(삼광)) 및 광물상의 평형방정식의 반응물과 생성물의

열역학적 자료를 기초로 이들 광상의  $\log aK^+/aH^+$ ,  $\log aNa^+/aH^+$  및  $\log aCa^{2+}/a^2H^+$  값은 구할 수 있다. 그 값은  $\log aK^+/aH^+$  : 4.6(400°C), 4.1(350°C),  $\log aNa^+/aH^+$  : 4.0(400°C), 4.2(350°C),  $\log aCa^{2+}/a^2H^+$  : 1.8(400°C), 4.5(350°C)이다. 또한 이들 광상에 대한 원소농도 ( $mNa^+$ ,  $mk^+$ ,  $mCa^{2+}$ ,  $mMg^{2+}$ )는 Henley et al.(1984), Giggenbach(1988)가 제시한 방법에 의해 구했으며 활동도계수( $\gamma Na^+$ ,  $\gamma K^+$ ,  $\gamma Ca^{2+}$ ,  $\gamma Mg^{2+}$ )는 Garrels and Christ(1965)에 의해 제시된 mean-salt method와 Bronsted-Guggenheim 방정식( $\log \gamma_i = -Az_i^{1/2}/(1+Ba_i^{1/2} + bI)$ )에 의해 구하였다. 여기에서 400°C와 350°C의 Debye-Huckel solvent 매개변수(A, B 값)는 각각 A = 2.6748, 1.7569, B = 0.4656, 0.4224이다. 이들 자료를 가지고 계산된 이들 광상의 열수용액내 용질의 활동도( $aNa^+$ ,  $aK^+$ ,  $aCa^{2+}$ ,  $aMg^{2+}$ )는 온도 400°C와 350°C에서의 각각  $aNa^+$  : 0.0449, 0.1264(대봉), 0.0476, 0.0863(삼광),  $aK^+$  : 0.0449, 0.1264(대봉), 0.0476, 0.0863(삼광),  $aCa^{2+}$  : 2.25E-11, 1.31E-9(대봉), 2.42E-11, 7.07E-10(삼광),  $aMg^{2+}$  : 1.45E-12, 3.53E-11(대봉), 1.59E-12, 1.77E-11(삼광)으로 이들 광상에서 주로  $Na^+$ 와  $K^+$ 으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

열수광산에서 열수용액의 pH는 가수분해와 양이온 교환 등을 갖는 광물의 공생관계로부터 유추할 수 있다. pH의 변화는 pH buffer 광물인 견운모의 침전에 따라 변화한다. 계산된 이들 광상에 대한 열수용액의 초기 pH(400°C와 350°C)는 5.4~6.5, 5.1~5.5(대봉), 5.4~6.4, 5.3~5.7(삼광)으로 초기 열수용액은 약산성이었음을 알 수 있다.

대봉광산에서 산출되는 녹니석과 황철석의 평형반응식을 이용하여  $aH_2S$  값을 구할 수 있다. 녹니석 단종의 활동도자료와 온도 350°C에서 산소분압(-35.1~-27.2) 자료를 이용하여  $\log a_{H_2S}$ 를 구하면 -0.78~-2.76 atm이다. 여기에서 온도 350°C에서  $\log \gamma_{H_2S}$ 는 0.35(I=1)적용하여  $m_{H_2S}$ 를 계산하면 -1.1~-3.1이며 이 값은 대봉광산의 초기 열수유체의  $\Sigma mS$ 에 해당된다고 생각된다.

## 5. 참고문헌

- Garrels, R.M. and Christ, C.L. (1965) Solutions, minerals and equilibria. Freeman, Cooper and Company, 450p.
- Giggenbach, W.F. (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoinicator. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 52, p. 2749-2765.
- Henley, R.W. Truesdell, A.H. and Barton, Jr.P.B. (1984) Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. *Reviews in Economic Geology*, v. 1, 267p.
- Hey, M.H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, v. 3, p. 87-102.
- Lee, H.K. Yoo, B.C. and Kim, S.J. (1992) Mineralogy and ore geneses of the Daebong gold-silver deposits, Chungnam, Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 25, p. 297-316.
- Yoo, B.C. Lee, H.K. and Choi, S.G. (2002) Stable isotope, fluid inclusion and mineralogical studies of the Samkwang gold-silver deposits, Republic of Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 35, p. 299-316.
- Yoo, B.C. Lee, H.K. and Kim, S.J. (2003) Stable isotope and fluid inclusion studies of the Daebong gold-silver deposits, Republic of Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 36, p. 391-405.