

## 삼광광상의 모암변질과 원소분산

유봉철<sup>1</sup> · 이길재<sup>2</sup> · 이종길<sup>3</sup> · 지윤경<sup>1</sup> · 이현구<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 자연과학대학 지질환경과학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 국내/북한자원연구실

<sup>3</sup>한국광물자원공사 탐사지원팀

## Element Dispersion and Wallrock Alteration from Samgwang Deposit

Bong Chul Yoo<sup>1</sup>, Gil Jae Lee<sup>2</sup>, Jong Kil Lee<sup>3</sup>, Eun Kyung Ji<sup>1</sup> and Hyun Koo Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology and Environmental Sciences, Chungnam National University

<sup>2</sup>Domestic & North Korea Mineral Resources Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>3</sup>Metals Exploration Team, Exploration Department, Korea Resources Corporation

The Samgwang deposit consists of eight massive mesothermal quartz veins that filled NE and NW-striking fractures along fault zones in Precambrian granitic gneiss of the Gyeonggi massif. The mineralogy and paragenesis of the veins allow two separate discrete mineralization episodes (stage I=quartz and calcite stage, stage II=calcite stage) to be recognized, temporally separated by a major faulting event. The ore minerals are contained within quartz and calcite associated with fracturing and healing of veins that occurred during both mineralization episodes. The hydrothermal alteration of stage I is sericitization, chloritization, carbonitization, pyritization, silicification and argillization. Sericitic zone occurs near and at quartz vein and include mainly sericite, quartz, and minor illite, carbonates and chlorite. Chloritic zone occurs far from quartz vein and is composed of mainly chlorite, quartz and minor sericite, carbonates and epidote. Fe/(Fe+Mg) ratios of sericite and chlorite range 0.45 to 0.50(0.48±0.02) and 0.74 to 0.81(0.77±0.03), and belong to muscovite-petzite series and brunsvigite, respectively. Calculated  $Al_{IV}-Fe/(Fe+Mg)$  diagrams of sericite and chlorite suggest that this can be a reliable indicator of alteration temperature in Au-Ag deposits. Calculated activities of chlorite end member are  $a_3(Fe_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_6)=0.0275\sim0.0413$ ,  $a_2(Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_6)=1.18E-10\sim7.79E-7$ ,  $a_1(Mg_6Si_4O_{10}(OH)_6)=4.92E-10\sim9.29E-7$ . It suggest that chlorite from the Samgwang deposit is iron-rich chlorite formed due to decreasing temperature from high temperature ( $T>450^\circ C$ ). Calculated  $\alpha_{Na^+}$ ,  $\alpha_{K^+}$ ,  $\alpha_{Ca^{2+}}$ ,  $\alpha_{Mg^{2+}}$  and pH values during wallrock alteration are 0.0476(400°C), 0.0863(350°C), 0.0154(400°C), 0.0231(350°C), 2.42E-11(400°C), 7.07E-10(350°C), 1.59E-12(400°C), 1.77E-11(350°C), 5.4~6.4(400°C) and 5.3~5.7(350°C), respectively. Gain elements (enrichment elements) during wallrock alteration are  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3(T)$ , CaO, MnO, MgO, As, Ag, Cu, Zn, Ni, Co, W, V, Br, Cs, Rb, Sc, Bi, Nb, Sb, Se, Sn and Lu. Elements (Ag, As, Zn, Sc, Sb, Rb, S,  $CO_2$ ) represents a potential tools for exploration in mesothermal and epithermal gold-silver deposits.

**Key words** : Samgwang deposit, wallrock alteration, element dispersion, pathfinder

삼광광상은 선캄브리아기 경기육괴의 화강편마암내에 발달된 단열대(NE, NW)를 따라 충진한 8개의 괴상맥으로 구성된 중열수 석영맥광상이다. 이 광상의 광화작용은 여러번의 단열작용에 의해 형성된 두시기의 석영+ 방해석시기(광화I시기)와 방해석시기(광화II시기)로 구성된다. 광화I시기의 열수작용에 의한 변질작용은 견운모화, 녹니석화, 탄산염화, 황철석화, 규화, 및 점토화작용등이 관찰되며 견운모대는 석영맥과 접촉한 부분에서 녹니석대는 석영맥으로부터 멀어짐에 따라 관찰된다. 견운모대의 모암변질광물은 대부분이 견운모 및 석영이며 일부 일라이트, 탄산염광물, 녹니석으로 구성된다. 녹니석대의 모암변질광물은 주로 녹니석, 석영과 소량 견운모, 탄산염광물 및 녹염석으로 구성된다. 견운모의 Fe/(Fe+Mg) 값은 0.45~0.50(0.48±0.02)이며 백운모-펜자이트쪽에 해당되고 녹니석의 Fe/(Fe+Mg) 값은 0.74~0.81(0.77±0.03)이고 대부분 브룬스비자이트에 해당된다. 견운모와 녹니석에 대한  $Al_{IV}-Fe/(Fe+Mg)$ 의 다이어그램은 변질시 같은 광종의 견운모와 녹니석의 형성온도를 나타내는 지시자로서 유용하다. 이것은 계산된 녹니석 단종의

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

활동도가  $a_3(\text{Fe}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=0.0275\sim 0.0413$ ,  $a_2(\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=1.18\text{E}-10\sim 7.79\text{E}-7$ ,  $a_1(\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=4.92\text{E}-10\sim 9.29\text{E}-7$ 로서 삼광광상의 녹니석은 iron-rich 녹니석으로 비교적 고온 ( $T>450^\circ\text{C}$ )에서 모암과 평형상태에서 온도가 감소함에 따라 형성되었음을 알 수 있다. 모암변질시  $\alpha\text{Na}^+$ ,  $\alpha\text{K}^+$ ,  $\alpha\text{Ca}^{2+}$  및  $\alpha\text{Mg}^{2+}$ 는 각각  $\alpha\text{Na}^+=0.0476(400^\circ\text{C})$ ,  $0.0863(350^\circ\text{C})$ ,  $\alpha\text{K}^+=0.0154(400^\circ\text{C})$ ,  $0.0231(350^\circ\text{C})$ ,  $\alpha\text{Ca}^{2+}=2.42\text{E}-11(400^\circ\text{C})$ ,  $7.07\text{E}-10(350^\circ\text{C})$ ,  $\alpha\text{Mg}^{2+}=1.59\text{E}-12(400^\circ\text{C})$ ,  $1.77\text{E}-11(350^\circ\text{C})$ 이며 열수용액의 pH는  $5.4\sim 6.4(400^\circ\text{C})$ ,  $5.3\sim 5.7(350^\circ\text{C})$ 로서 모암변질시 열수용액은 약산성이었음을 알 수 있다. 모암변질시 이득원소(부화원소)는  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Se}$ ,  $\text{Sn}$  및  $\text{Lu}$  등이며 특히 대부분의 광상에서  $\text{Ag}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  등의 원소가 현저하게 증가하므로 중열수 및 천열수 금-은광상의 탐사에 지시원소로서 활용될 수 있을 것이다.

**주요어** : 삼광광상, 모암변질, 원소분산, 이득/손실, 지시원소

## 1. 서 언

광상의 형성시 열수용액과 모암과의 반응에 의한 여러 물리-화학적 변화요소에 의해 모암변질광물, 광석광물 및 초생성 투명광물들이 형성된다. 우리나라의 경우 알루미늄규산염으로 구성된 암석(변성암류, 화성암류)이 대부분을 차지한다. 따라서 이들 모암에 형성된 대부분의 후생성 열수광상들은 일반적으로 유사한 모암 변질광물들을 갖고 있다. 모암변질대의 종류 및 규모는 모암의 물성(모암의 화학조성, 광물조합, 모암의 투수성, 간극률, 흡수율) 및 열수용액의 조성(열수용액의 화학조성, 온도, 압력) 등에 좌우된다. 한 예로 모암의 간극률과 흡수율을 비교하면, 편마암( $0.3\sim 2.4$ ,  $0.1\sim 0.8$ )은 유문암( $1\sim 7$ ,  $0.1\sim 5.6$ ) 및 석회암( $0.8\sim 27$ ,  $0.1\sim 1.8$ )보다 간극률과 흡수율이 작아 열수변질대의 규모가 작게 나타난다. 모암내에 열수 물질의 이동은 침투와 확산에 의해 일어난다. 침투는 열수 물질이 한 방향으로 멀리 이동되는 증거가 관찰될 때 질량이동의 주된 요소가 된다. 확산은, 열수 물질이 양방향으로 이동되거나 고용체 광물이 분대 사이에 규칙적인 성분변화를 보일 때, 질량이동의 주된 요소가 된다(Hofmann, 1972). 실제로 대부분의 광상에서 침투와 확산이 동시에 일어나지만, 침투는 열수용액이 지나가는 열극에 한정되어 일어나고 확산은 비활성용체가 공극이 좋은 곳(암석의 공극률이 큰 것)에서 발생된다. 앞에서 설명한 조건들을 갖춘 암석은 화산기원의 암석으로 이것을 모암으로 하는 후생성 열수광상이 비교적 넓은 범위의 모암변질대가 일반적으로 관찰된다. 현장에서 모암변질대의 구별은 모암의 광물조합, 광물화학, 조직 및 색의 변화에 의해 관찰되며 부가적으로 호주에서 개발된 단과장 적외선 분광분석법을 이용하여 현장 및 실내에서 변질대를 조사하기도 한다.

전반적으로 지금까지 열수변질대에 대한 연구는 주

로 반암형 및 천열수광상을 대상으로 행해져 왔으나 열수성 중-고온형 금광상에 대한 모암변질의 유형에 따른 분산 원소의 종류 및 함량 등은 일부 연구가 있을 뿐 아직도 연구가 되어 있지 않은 실정이다. Yoo *et al.* (2002; 2007)은 삼광광상에 대한 간략한 모암변질에 대해 기술한 바 있으나 모암변질대의 분산 원소의 종류 및 함량과 초생성 투명광물 및 모암변질광물의 광물화학에 대해 자세하게 기술하지 않았다.

따라서 이 연구에서는 충남 청양군 운곡면 신대리에 위치하는 삼광광상의 모암변질의 종류, 모암변질대의 공간적 분포 특성과 분산 원소의 종류, 분산유형 및 함량, 생성광물의 광물화학 등에 대한 연구를 수행함으로써 이 광상의 모암변질특징 및 광화유체의 성질에 대해 고찰하고 지금까지 기 보고된 자료들과 비교하여 향후 이와 유사한 광상에 대한 탐광 및 탐사의 지침으로 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 주변지질

삼광광상의 주변지질은 기존연구(Lee *et al.*, 1995; 1998a; 1998b; Yoo *et al.*, 2002)에서 보고되어 있어 여기에서는 간략하게 설명하고자 한다. 이 광상은 선캠브리아기의 변성퇴적암류가 넓게 분포하고 있으며 이를 쥐라기 대동누층군의 백운사층이 부정합으로 피복하고 있다. 또한 상기의 암류들을 후기에 관입한 백악기의 맥암류가 소규모로 분포한다(Fig. 1).

선캠브리아기의 변성퇴적암류에 대해 몇몇 학자는 상부 쥐라기의 화강편마암으로 설정하여 유구화강편마암으로 보고하였으며(Um and Lee, 1963; So *et al.*, 1988) 또 다른 학자들은 선캠브리아기의 호상편마암으로 보고하였다(Lee and Hueley, 1973; Kang and Im, 1974; Woo *et al.*, 1991; Yun *et al.*, 1994). 이 변성퇴적암류는 편리구조를 보이는 호상편마암, 안구상

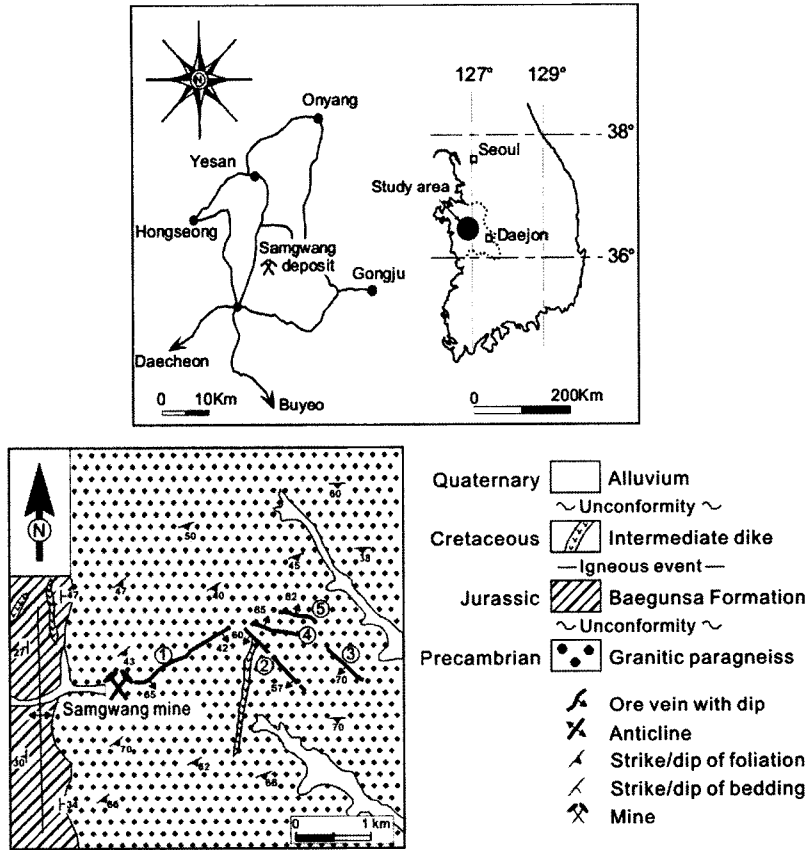


Fig. 1. Generalized geological map of the Samgwang deposit, showing the orientation of the principal quartz veins (1=Guksa vein, 2=Bongamri vein, 3=Sinri vein, 4=Daehung 1 vein, 5=Daehung 2 vein).

편마암 및 선구조가 관찰되지 않는 화강편마암으로 분류되나 상호 점이적이다. 이 편리의 일반적인 주향과 경사는 각각 N50~80°E, 45~70°SE이다. 구성광물로는 석영, 장석류, 흑운모, 백운모, 견운모, 녹니석 및 소량의 각섬석 등으로 각섬암상 정도의 광역변성을 받았다(Lee *et al.*, 1998a; Yoo *et al.*, 2002).

백운사층은 광상의 서측에 남북방향으로 분포하며 탄층을 포함한 퇴적암류이다. 이 층은 화강편마암과 경계부분에서 화강편마암을 역으로 포함하는 역암, 사암 및 흑색셰일로 구성된다. 이 층의 일반적인 주향은 N30~50°E 이며 경사는 27~30°NW, 34~48°SE로써 배사구조가 관찰된다.

맥암류는 석영맥, 염기성암맥 및 산성암맥이 있으며 광상부근의 여러지역에 분포된다.

### 3. 광상 및 모암변질

삼광광상은 선캠브리아기의 변성퇴적암류내에 발달

된 열극을 충진한 함 금-은 석영맥 광상이다. 이 광상은 1928년에 광업권이 등록되었고 1933년부터 일본 미쯔비시공업(주)에서 개발되어 오다가, 1943년도 조선 광업진흥(주)로 이전되었다. 1977년에는 조규호에 의해 인수되었으며 1980년부터는 일신산업(주)에서 개발하였다. 1994년도에는 영화기업사에서 하청받아 1996년도 2월 휴광신고를 내기까지 상반맥을 중심으로 총 7,900 m 정도가 연맥 굴진되었다. 휴광이후 최근까지 일부 회사들은 간헐적으로 광산 폐석에서 구사를 채취하기 위한 소규모 작업을 진행하기도 하였다.

삼광광상은 총 8개의 평행한 맥으로 구성된 석영맥 상광상이다. 석영맥의 평균폭은 0.5~1.5 m 이며 부분적으로 2~12 m에 달하는 곳도 있으나 맥의 연장성은 불량하며 대체로 렌즈상으로 이룬다. 이 광상은 광맥 방향에 따라 국사맥, 상반맥, 국성맥, 대홍맥, 봉가리맥 및 신리맥으로 분류되며 주로 국사맥, 상반맥 및 국성맥을 주 체굴대상으로 하였다.

국사맥은 강도 입구로부터 동측으로 약 2 km 이상

연장되는 구조대내에 단속적으로 배대된 렌즈상 광체로써 N60~80°E의 주향과 40~75°SE의 경사를 갖는다. 국사맥은 부광대의 위치에 따라 통동광체, 본향광체 및 구사봉광체로 구분하여 개발하였다. 통동광체는 대절개 입구에 있는 부광대로서 맥폭은 0.4 m 내외이며 연장성은 약 50 m 정도이다. 통동광체는 사갱 하부 60 m (2 level)에서 서쪽으로 250 m 굴진하여 개발하였으며 이 부광대를 따라 90 m (3 level)를 사갱으로 하향굴진하여 연속 개발하였다. 한편 180 m (6 level)에서 서측으로 180 m 굴진하여 착맥하였으나 석영맥의 평균 맥폭이 0.2 m, 연장성이 15 m, 평균품위가 2.7 g/t Au로 떨어져 하부로 갈수록 석영맥이 소멸된다. 본향광체는 대절개 입구로부터 325 m 지점에 위치한 부광대로서 석영 맥폭은 0.3~1.3 m 이내이고 연장성은 220 m 정도이다. 이 광체는 과거 일인에 의해 150 m (5 level) 하부까지 채광이 완료되었으나 하부 180 m (6 level)까지 연장굴진하여 동서로 650 m 탐광굴진하여 석영맥의 평균폭 0.6 m, 연장 70 m, 평균품위 11.7 g/t Au, 15.3 g/t Ag의 광체를 발견하였다. 국사봉광체는 대절개 입구로부터 1,250 m 지점에 위치한 부광대로서 2~3조의 석영맥이 발달된다. 맥폭은 0.5~1.5 m 이내이고 연장성은 320 m 정도이다. 이 맥은 수갱 2 level에서 하부로 180 m 연장굴진한 후 4개의 중단(level)을 개설하여 총 2,800 m의 탐광굴진하여 상반맥과 함께 개발되었다.

상반맥은 국사맥에서 역단층에 의해 분리된 것으로 EW의 주향과 30~40°S의 경사를 갖는다. 석영맥폭은 0.3~1.2 m 이내이고 연장성은 320 m 정도이다. 이 맥은 하부로 감에 따라 총 연장 820 m의 광범위한 분포를 갖으며 지역에 따라 석영맥이 소멸되는 곳도 관찰된다.

국사맥은 N30°W의 주향과 65~70°SW의 경사를 갖는다. 석영맥폭은 0.5~1.5 m 이내이고 연장성은 320 m 정도이다. 이 맥은 수갱 2 level까지 확인되거나 그 하부에서는 구조대가 미약하고 석영맥이 분산되거나 발견되지 않는다. 또한 지표에서는 과거 채굴된 흔적만 남아 있고 평균 맥폭은 1.1 m 정도이다(Yoo *et al.*, 2002).

삼광광상은 시기가 서로 다른 괴상백색석영맥(광화I 시기)과 방해석맥(광화II 시기)으로 구성된다. 괴상백색석영맥에서는 단열작용등에 의하여 형성된 리본-호상 구조와 각력상구조등이, 방해석맥의 경우 괴상의 방해석 형성시기로 황화광물이 관찰되지 않는다. 삼광광상의 괴상 백색석영맥은 동일시기의 회색석영, 백색석영과 투명회색석영으로 구성되며 구조운동에 의하여 심하

게 파쇄된 곳도 관찰된다. 광화I시기의 맥에서는 부분적으로 자형의 석영이 관찰되는 정동구조가 발견된다. 이 정동내에 소량의 방해석이 관찰된다. 괴상백색석영맥의 각력상구조에는 모암변질부분과 회색, 백색 및 투명회색석영의 일부분이 각력화된 것과 황화광물이 각력화한 것이 발견되며, 또한, 현미경하에서 회색, 백색 및 투명회색석영은 재결정화된 봉합선구조가 관찰된다. 이는 광화작용후에 계속적으로 구조운동과 변형작용이 있었음을 의미한다. 이 광상에서 산출되는 광물은 석영, 견운모, 녹니석, 방해석, 금홍석, 유비철석, 자류철석, 황철석, 백철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼 및 휘은석 등이다(Yoo *et al.*, 2002) (Fig. 2). 삼광광상의 광화I시기 초기 황화광물 정출과 관련된 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl-CH<sub>4</sub> 유체(균일화온도, 215~345°C; 압력, 1,296~2,022 bar; 염농도, 0.8~6.3 wt.%)와 광화I시기 말기 황화광물 및 에렉트럼과 관련된 H<sub>2</sub>O-NaCl+CO<sub>2</sub> 유체(균일화온도, 203~441°C; 압력, 320 bar; 염농도, 5.7~8.8 wt.%)이며 이들 유체는 광화작용이 진행됨에 따라 불혼합 및 순환수의 혼합 현상을 받았다(Yoo *et al.*, 2002). 또한 안정동위원소 자료( $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ , 1.8~4.9‰;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ , -5.9~10.9‰;  $\delta\text{D}$ , -102~-87‰)에 의한 이 광상의 광화유체는 마그마유체로부터 계속적인 순환수의 혼입이 있었던 것으로 생각된다(Yoo *et al.*, 2002).

Mineral	Stage I		Stage II
	Grey/White	Transparent	
Quartz	Fracturing		Fault
Chlorite	—		
Sericite	—		
K-feldspar	—		
Arsenopyrite	—		
Pyrrhotite	—		
Pyrite	—		
Marcasite	—		
Sphalerite	—		
Chalcopyrite	—		
Galena	—		
Electrum	—		
Argentite	—		
Argentian tetrahedrite	—		
Pyrrargyrite	—		
Calcite	—		

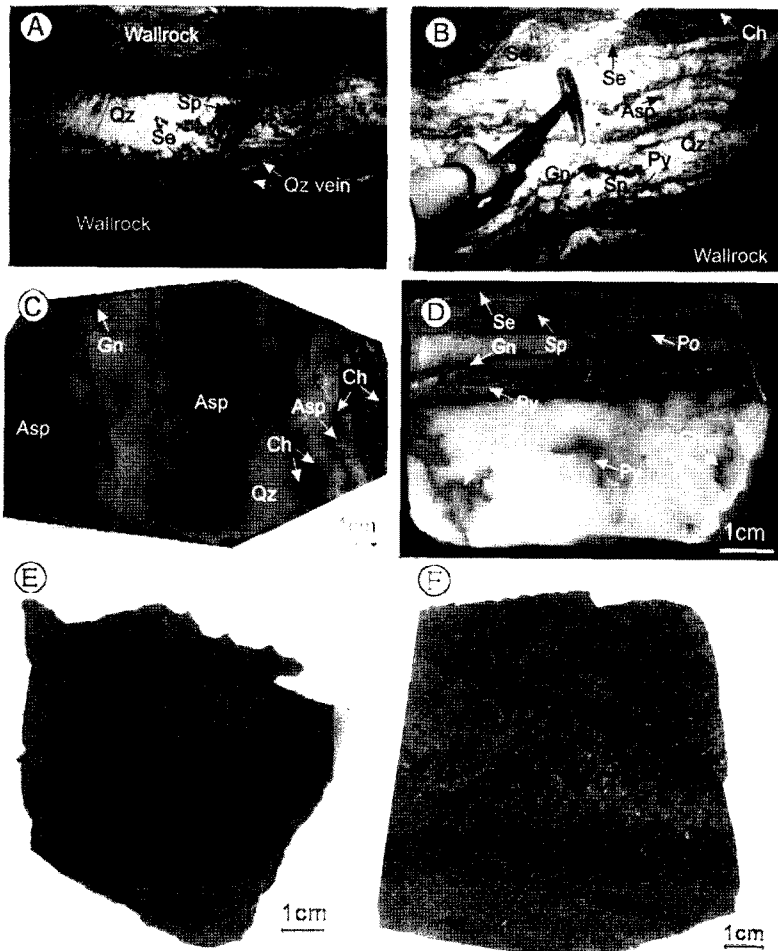
Fig. 2. Paragenetic sequence of minerals from the Samgwang deposit.

삼광광상의 모암변질은 각 광체 및 맥에서의 차이는 관찰되지 않으며 석영맥으로부터 1m 이내에 한정되어 산출된다(Fig. 3A, B). 모암변질작용은 견운모화, 녹니석화, 황철석화, 규화, 탄산염화 및 점토화작용등이 관찰된다. 견운모대는 석영맥과 접촉한 부분에서 관찰되며 석영맥으로부터 멀어짐에 따라 녹니석대가 관찰된다.

견운모대는 석영맥의 주변부를 따라, 그리고 맥의 규모에 따라 수 cm에서 60cm 이내에서 관찰되며 일부 암맥류와 접하는 곳에서 견운모대의 규모가 크다(Fig. 3A, B, D, E, F). 이 견운모대에서 PIMA 및 XRD 분석을 통한 모암변질광물은 대부분 견운모로 확인되었으며 주로 견운모, 석영과 소량 방해석, 일라이트 및 녹니석의

광물조합으로 구성된다(Fig. 4A, B). 또한 석영맥 내에 포획된 장석류 또는 주변부에 대상으로 산출되는 사장석 및 칼리장석 등을 교대하여 견운모가 우세하게 관찰된다(Fig. 4E).

녹니석대는 모암의 일부분(유색광물대)이 석영맥 내에 포획되어 산출되는 부분(Fig. 3A, C), 모암의 유색광물대가 산출되는 부분 및 석영맥에서 멀어짐에 따라 녹니석화작용이 관찰된다(Fig. 3E, F). 이 녹니석대에서 PIMA 분석을 통한 모암변질광물은 주로 녹니석과 일부 견운모가 확인되었다. 이 변질대의 열수변질광물은 흑운모를 교대하여 주로 녹니석과 소량 견운모, 석영, 방해석 및 녹염석 등이 산출된다(Fig. 4C, D, F).



**Fig. 3.** Photographs of quartz vein and wall-rock alteration samples from the Samgwang deposit. (A) and (B) Scope of wall-rock alteration (sericitization, chloritization) of gneiss. (C) and (D) Close-up of wall-rock alteration (sericitization, chloritization) in quartz vein. (E) and (F) Close-up of wall-rock alteration (sericitization, chloritization) of gneiss. Asp=arsenopyrite, Ch=chlorite, Gn=galena, Po=pyrrhotite, Py=pyrite, Qz=quartz, Se=sericite, Sp=sphalerite. Circles of (A) and (E) mean points of PIMA analysis.

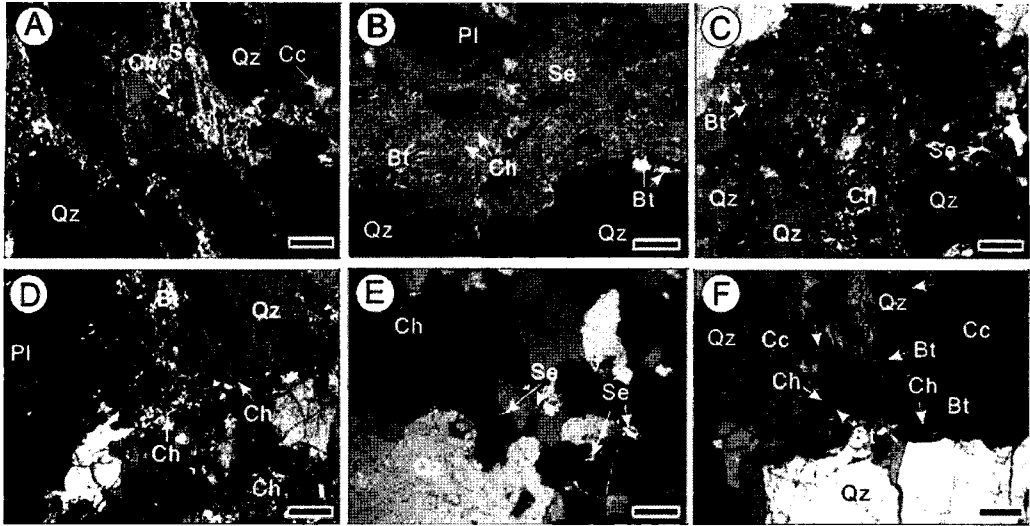


Fig. 4. Microphotographs taken in transmitted light of gangue minerals of hydrothermal wall-rock alteration from the Samgwang deposit. (A) and (B) The K-feldspar, plagioclase and biotite are replaced by mainly fine- and coarse-grained sericite, quartz with minor chlorite and calcite in sericite zone. (C) and (D) The coarse biotite, K-feldspar, plagioclase are partially replaced by mainly fine- to coarse-grained chlorite, quartz with minor sericite in chlorite zone. (E) Fine-grained sericite in quartz vein. (F) The biotite is replaced by fine- to coarse-grained chlorite in quartz and calcite vein. Abbreviations: Bt=biotite, Cc=calcite, Ch=chlorite, Qz=quartz, Pl=plagioclase, Se=sericite. Scale bar is 200 micron in length.

#### 4. 변질대 및 변질광물의 화학조성

##### 4.1. 광물화학

삼광광상의 석영맥 및 모암변질에 의해 산출되는 견운모, 녹니석, 칼리장석, 석영 및 금홍석의 화학조성은 충남대학교 공동실험실습관에 설치된 JEOL사 JXA-8800R에 의해 수행되었으며 분석조건은 다음과 같다. 가속전압 15 kv, 시료전류  $2.0 \times 10^{-8}$  A, 전자선의 크기는 약 5~10  $\mu\text{m}$ , 표준시료는 Na; 알바이트, K; 새니딘, Al; 강옥, Ca; 투회석, Si; 투회석, Fe; 석류석, Mg; 감람석, Ti; 금홍석, Mn; 장미휘석, Cr; 크롬철석을 사용하였다. 특성 X선과 분광결정은 LIF; FeKa, MnKa, CrKa, TAP; NaKa, AlKa, SiKa, MgKa, PET; KKa, CaKa, TiKa 를 사용하였다.

이 광상에서 산출되는 견운모에는 FeO <3.10 wt.%, MgO <1.90 wt.%가 포함되어 있으며 소량 Na<sub>2</sub>O <0.18 wt.%, CaO <0.05 wt.% 및 MnO <0.02 wt.% 등이 포함되어 있다(Table 1). 여기에서 삼광광상의 견운모에 대한 FeO 및 MgO 값은 대봉광상의 것보다 낮은 값을 갖는다. 일반적으로 백운모에 비하여 이 광상에 산출되는 견운모는 K(1.24~1.50)의 함량이 낮고, Fe(0.27~0.34) 및 Mg(0.30~0.37)의 함량이 다소 높아 열수 운모의 조성범위와 비슷하다. 견운모의 Fe/(Fe+Mg) 값은 0.45~0.50(0.48±0.02)로서 대봉(0.36~0.59(0.51±0.10)),

백전(0.45~0.49(0.47±0.01)), 무극(0.37~0.42(0.40±0.02)), 둔전(0.07~0.49(0.26±0.13)), 나림(0.11~0.16(0.13±0.02)) 및 가사도(0.25(0.25±0.01))와 비교할 때 대봉광상보다 다소 낮은 값을 갖으나 천열수성 기원인 광상들보다 높은 값을 갖는다(Lee, 1993; Lee and Lee, 1997; Kim *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2003; Yoo *et al.*, 2007). 일반적인 견운모와 같이 Si의 부하로 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 이 광상에서 산출되는 견운모는 대봉광상의 견운모와 같이 백운모-펜자이트족에 해당된다(Table 1).

이 광상에서 산출되는 녹니석에는 TiO<sub>2</sub> <0.08 wt.%, CaO <0.44 wt.%, MnO <0.11 wt.% 및 Na<sub>2</sub>O <0.06 wt.% 등이 소량 함유되어 있다(Table 2). 녹니석의 Fe/(Fe+Mg) 값은 (0.74~0.81(0.77±0.03))로서 대봉(0.66~0.73(0.70±0.02)), 무극(0.51~0.66(0.57±0.06)), 백전(0.45~0.78(0.51±0.10)) 및 가사도(0.32~0.36(0.34±0.03))보다 높은 값을 갖는다(Lee, 1993; Kim *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2003; Yoo *et al.*, 2007). 이것은 온도가 높은 환경에서 생성된 녹니석내 Fe 함량은 온도가 낮은 환경에서 생성된 녹니석의 Fe 함량보다 높음을 지시한다. 또한 삼광광상의 모암인 편마암내 녹니석에서

의 Fe/(Fe+Mg) 값이 (0.54~0.65(0.58±0.04))와 비교할 때 높은 값을 갖는다. 광종이 다른 상동, 신예미, 삼봉, 삼산제일, 삼산 및 진흥광상과 비교할 때, 이 광상의 Fe/(Fe+Mg) 값은 상동(0.33~0.53(0.43±0.14)), 신예미(0.02~0.76(0.41±0.18)), 삼봉(0.41~0.84(0.62±0.11)), 삼산제일(0.56~0.77(0.65±0.08)), 삼산(0.54~0.83(0.69±0.12)) 및 진흥(0.50~0.67(0.61±0.05))보다 높은 값을 갖

는다(Chang, 1988; Yang, 1991; Lee, 1992). 녹니석에 대한 분석결과를 가지고 Hey(1954)가 제시한 다이아그램에 도시하면 대부분 브룬스비자이트(brunsvigite)에 해당된다(Fig. 5). 녹니석과 같은 고용체 광물은 단순한 화학분석자료로부터 녹니석 광물의 단종을 유추하기는 한계가 있으며 각 원소에 대한 몰분율( $X_i$ ,  $i$ =원소)의 계산도 녹니석의 결정학적 구조내에 존재 위

**Table 1.** Chemical compositions of sericite from the Samgwang mine

	SWS-1	SWS-2	SWS-3	SWS-4	SWS-5	SWS-6	SWS-7
SiO <sub>2</sub>	51.17	50.54	50.19	51.31	50.86	50.92	48.68
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.58	0.45	0.57	0.45	0.80	0.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.17	31.94	32.10	31.26	31.66	32.39	31.37
FeO	3.10	2.67	2.69	2.72	2.45	2.55	2.56
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
MgO	1.79	1.54	1.53	1.90	1.57	1.58	1.56
CaO	0.00	0.00	0.04	0.01	0.03	0.05	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.14	0.09	0.09	0.10	0.10	0.18	0.09
K <sub>2</sub> O	7.75	8.03	7.99	7.88	8.11	7.53	8.74
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.03	0.05	0.02	0.00	0.05
Total	95.81	95.42	95.13	95.80	95.25	95.99	93.79
Number of ions on the basis of 24 oxygens							
Si	6.68	6.61	6.59	6.68	6.66	6.60	6.53
Al <sub>IV</sub>	1.32	1.39	1.41	1.32	1.34	1.40	1.47
Al <sub>VI</sub>	3.48	3.53	3.55	3.47	3.54	3.54	3.48
Ti	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04	0.08	0.07
Fe	0.34	0.29	0.30	0.30	0.27	0.28	0.29
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.35	0.30	0.30	0.37	0.31	0.31	0.31
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Na	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.02
K	1.29	1.34	1.34	1.31	1.35	1.24	1.50
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Cations	13.53	13.55	13.56	13.53	13.54	13.49	13.67
Fe/Fe+Mg	0.49	0.49	0.50	0.45	0.47	0.48	0.48

**Table 2.** Chemical compositions of chlorite from the Samgwang mine

	SWC-1	SWC-2	SWC-3	SWC-4	SWC-5	SWC-6	SWC-7	SWC-8
SiO <sub>2</sub>	26.87	27.44	26.28	26.12	27.23	26.71	27.13	26.65
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.01	0.04	0.08	0.01	0.01	0.00	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.78	15.93	16.48	17.58	15.81	15.15	15.63	16.19
FeO	37.41	36.52	38.37	36.41	35.87	36.89	37.56	35.02
MnO	0.10	0.07	0.03	0.08	0.02	0.04	0.06	0.12
MgO	5.36	6.09	5.00	6.04	7.16	6.12	6.46	6.50
CaO	0.30	0.33	0.11	0.12	0.11	0.13	0.21	0.42
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	86.85	86.40	86.30	86.43	86.21	85.06	87.05	85.01

Table 2. Continued

Number of ions on the basis of 28 oxygens								
Si	6.11	6.24	6.06	5.94	6.19	6.21	6.17	6.14
Al <sub>IV</sub>	1.89	1.76	1.94	2.06	1.81	1.79	1.84	1.86
Al <sub>VI</sub>	2.61	2.51	2.54	2.66	2.42	2.37	2.35	2.54
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	7.11	6.95	7.40	6.93	6.82	7.18	7.14	6.75
Mn	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02
Mg	1.82	2.07	1.72	2.05	2.43	2.12	2.19	2.23
Ca	0.07	0.08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.10
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cations	19.64	19.62	19.70	19.69	19.69	19.71	19.74	19.66
Fe/Fe+Mg	0.80	0.77	0.81	0.77	0.74	0.77	0.77	0.75
a1	2.17E-9	6.56E-8	1.17E-10	5.19E-8	9.29E-7	8.98E-8	1.54E-7	2.73E-7
a2	2.16E-9	5.45E-8	1.18E-10	6.25E-8	7.79E-7	7.13E-8	1.27E-7	2.54E-7
a3	0.0395	0.0334	0.0468	0.0353	0.0294	0.0371	0.0361	0.0295
SWC-9	SWC-10	SWC-11	SWC-12	SWC-13	SWC-14	SWC-15	SWC-16	
SiO <sub>2</sub>	26.57	26.24	27.11	26.52	27.07	26.74	27.25	26.64
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.04	0.02	0.07	0.04	0.02	0.00	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.80	18.40	16.40	16.92	15.98	15.63	15.51	16.46
FeO	34.81	34.31	37.84	37.18	36.85	36.15	36.74	37.15
MnO	0.07	0.07	0.08	0.08	0.03	0.11	0.02	0.03
MgO	6.66	6.52	5.40	5.68	6.44	6.47	6.78	5.08
CaO	0.44	0.09	0.28	0.16	0.17	0.14	0.23	0.19
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	85.42	85.73	87.15	86.61	86.89	85.28	86.56	85.59
Number of ions on the basis of 28 oxygens								
Si	6.07	5.94	6.16	6.04	6.16	6.17	6.20	6.15
Al <sub>IV</sub>	1.93	2.06	1.85	1.96	1.84	1.83	1.80	1.85
Al <sub>VI</sub>	2.60	2.85	2.54	2.59	2.44	2.43	2.36	2.63
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Fe	6.66	6.50	7.19	7.09	7.01	0.98	6.99	7.17
Mn	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01
Mg	2.27	2.20	1.83	1.93	2.18	2.23	2.30	1.75
Ca	0.11	0.02	0.07	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05
Na	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cations	19.66	19.60	19.65	19.67	19.70	19.70	19.73	19.61
Fe/Fe+Mg	0.75	0.75	0.80	0.79	0.76	0.76	0.75	0.80
a1	3.60E-7	2.53E-7	2.28E-9	1.25E-8	1.66E-7	2.35E-7	3.88E-7	4.92E-10
a2	3.70E-7	3.34E-7	2.10E-9	1.32E-8	1.45E-7	2.00E-7	3.11E-7	4.75E-10
a3	0.0283	0.0275	0.0403	0.0385	0.0343	0.0332	0.0325	0.0413

a1=Mg<sub>6</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>6</sub>, a2=Mg<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>6</sub>, a3=Fe<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>6</sub>

치(site)에 따라 불분명하다. 그러므로 녹니석의 화학분석으로부터 물분을 및 활동도계산은 Neall and Phillips (1987)이 제시한 가정과 방법에 의해 구하였다. 또한 열역학적 자료는 Walshe (1986), Walshe and Solomon

(1981) 및 Helgeson *et al.* (1978)의 것을 참조하였다. 계산된 녹니석 단종의 활동도는 a3(Fe<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>6</sub>)=0.0275~0.0413, a2(Mg<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>6</sub>)=1.18E-10~7.79E-7, a1(Mg<sub>6</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>6</sub>)=4.92E-10~9.29E-7로서



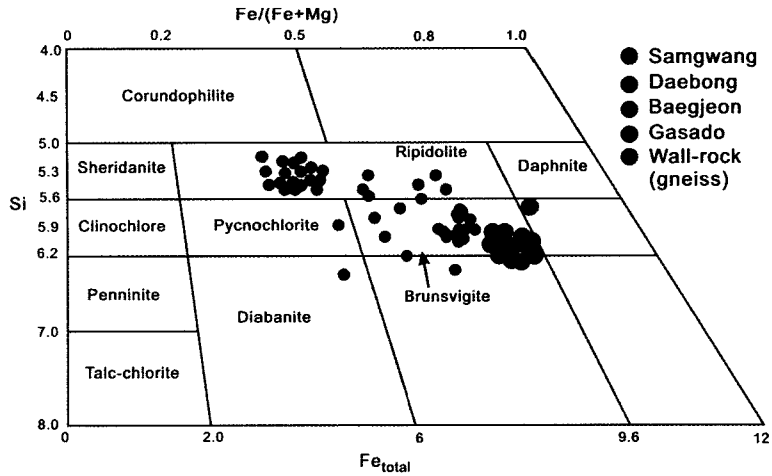


Fig. 5. Plot of Fe/(Fe+Mg) ratios versus Si ratios of chlorites from the Samgwang and other deposits, and gneiss. Nomenclature and boundaries are after Hey (1954).

Table 3. Chemical compositions of k-feldspar, quartz and rutile from the Samgwang mine

	SWK-1	SWK-2	SWK-3	SWK-4	SWQ-1	SWQ-2	SWR-1
SiO <sub>2</sub>	66.24	66.10	65.51	67.26	99.38	92.88	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.09	99.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.32	18.38	18.69	18.41	0.02	3.98	0.03
FeO	0.00	0.01	0.04	0.09	0.18	0.58	0.61
MnO	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.04
CaO	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.13	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.25	0.24	0.13	0.00	0.01	0.02
K <sub>2</sub> O	14.38	15.60	15.58	14.94	0.00	1.25	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.15
Total	99.24	100.35	100.10	100.97	99.68	99.16	100.18
Si	12.16	12.09	12.02	12.16			
Al	3.96	3.96	4.04	3.92			
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00			
Fe	0.00	0.00	0.00	0.01			
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00			
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00			
Ca	0.00	0.00	0.00	0.02			
Na	0.07	0.09	0.09	0.05			
K	3.37	3.64	3.65	3.45			
Cations	19.57	19.78	19.81	19.61			
Ab	2.10	2.40	2.30	1.30			
An	0.00	0.00	0.00	0.60			
Or	97.90	97.60	97.70	98.10			
	K-feldspar	K-feldspar	K-feldspar	K-feldspar	Quartz	Quartz	Rutile

Ab=albite, An=anorthosite, Or=orthoclase

iron-rich 녹니석이 우세하다(Table 2).

석영맥내 산출되는 칼리장석에는 FeO <0.04 wt.%, TiO<sub>2</sub> <0.03 wt.% 및 MnO <0.02 wt.% 등이 소량 함

유되어 있으며 대부분이 정장석으로 구성된다(Table 3).

석영은 TiO<sub>2</sub> <0.09 wt.%, FeO <0.58 wt.%, MgO <0.26 wt.%, CaO <0.13 wt.%, Na<sub>2</sub>O <0.01 wt.% 등

이 소량 함유되어 있으며 특히 일부 석영에서는  $Al_2O_3$  3.98 wt.%와  $K_2O$  1.25 wt.% 함유되어 있다(Table 3). 금홍석은  $MgO$  0.04 wt.%,  $Al_2O_3$  0.03 wt.%,  $Na_2O$  0.02 wt.% 등이 소량 함유되어 있으며 특히  $FeO$  0.61 wt.%,  $Cr_2O_3$  0.15 wt.% 함유되어 있다(Table 3).

#### 4.2. 원소분산

광종 및 광상형에 따라 석영맥의 석영과 섬아연석내에 분포하는 원소의 종류 및 함량, 모암변질에 따른

원소의 종류, 함량 및 분산을 알아보기 위해 단체분리한 석영, 섬아연석 및 모암변질시료에 대해 캐나다 ACTLABS에서 전암분석을 실시하였다(Tables 4; 5).

이 도표에서 보는 것과 같이 삼광광상의 석영내에 Cu, Pb, Zn 및 Sn 등의 원소들은 24,505~111,823 ppb, As, Ag, Cd, Co, Sr, Zr, Rb, Bi, Ga, Nb, Sb 및 Te 등의 원소들은 231~3,954 ppb이고 Hf, Th, U, Y, In 및 REE 등의 원소들은 3~94 ppb로써 주로 Cu, Pb Zn 및 Sn 원소들의 함량이 높다. 이들 원소

**Table 4.** Trace and rare earth elements (ppb) of quartz and sphalerite from the Samgwang and other mines

Mine	Samgwang Quartz	Daebong Quartz	Ogkye Quartz	Chungju Quartz	Jeonheung Quartz	Samgwang Sphalerite	Cheongsong Sphalerite	Youngdeog Sphalerite
Mn						13017	565	1062
Fe						36706	11551	7289
As	1159	740	57829	1928	5309	18	17	151
Cu	24732	11889	36215	30956	35462			
Pb	111823	22947	241093	56574	156684	6093	21096	20940
Zn	43753	23245	580432	50451	76371	240945	503930	301170
Ag	649	360	8213	697	1355	17	14	366
Cd	1163	406	7699	1224	1024	13017	2592	2482
Co	370	245	675	916	1227	0.3	168	39
Sr	2504	822	5106	45926	463736			
Zr	269	123	288	1835	4113			
Hf	27	24	91	7809	4348			
Rb	415	208	608	29351	11074			
Th	67	77	177	6398	2204			
U	54	22	50	337	178			
Y	57	36	90	3176	7981			
Bi	3954	1459	2571	18820	2902	0.8	1	0.6
Ga	436	290	398	4041	3015	3	3.2	4
Nb	231	71	178	3934	271			
Sb	1379	1580	2072	7615	16459	11	0.7	668
Sn	24505	12944	11523	46597	29192	0.8	3	35
Te	305	166	116	2153	888			
In	23	28	77	441	690	13	0.8	1
La	51	41	42	6118	11808			
Ce	94	95	100	11307	22706			
Pr	18	14	19	1334	2609			
Nd	91	100	122	5780	12731			
Sm	22	18	34	1115	2365			
Eu	8	12	12	789	3442			
Gd	14	22	30	1233	2697			
Tb	6	5	7	261	273			
Dy	9	17	26	841	1591			
Ho	6	6	6	224	244			
Er	8	7	14	472	755			
Yb	6	8	11	507	801			
Lu	3	7	3	199	137			

**Table 5.** Gains and losses of major (wt.%), trace and rare earth elements (ppm) of the altered granitic gneiss in the Samgwang mine

	SK14	SK2	SK2 Amount remaining(g)	SK2 Gain and loss(g)	SK2 gain and loss(%)	SK1	SK1 Amount remaining(g)	SK1 Gain and loss(g)	SK1 gain and loss(%)
SiO <sub>2</sub>	74.6	65.73	78.29	+3.69	+4.95	69.53	73.33	-1.27	-1.70
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.69	0.82	+0.59	+257.33	0.36	0.38	+0.15	+65.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	1.86	6.07	7.23	+5.37	+288.70	3.17	3.34	+1.48	+79.74
Na <sub>2</sub> O	2.59	0.4	0.48	-2.11	-81.60	1.59	1.68	-0.91	-35.26
CaO	0.49	2.76	3.29	+2.80	+570.90	1.49	1.57	+1.08	+220.69
MnO	0.01	0.09	0.11	+0.10	+971.98	0.04	0.04	+0.03	+321.85
MgO	0.57	2.41	2.87	+2.30	+403.60	1.14	1.2	+0.63	+110.93
K <sub>2</sub> O	5.49	3.65	4.35	-1.14	-20.81	3.77	3.98	-1.51	-27.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.9	11.67	13.9	0	0.00	13.18	13.9	0.00	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.19	0.23	+0.12	+105.73	0.07	0.07	-0.04	-32.89
LOI	0.98	6.37	7.59	+6.61	+674.21	3.81	4.02	+3.04	+310.01
Total	100.83	100.03	119.14			98.15	103.51		
As	2	181	215.59	+213.59	+10679.35	40	42.19	+40.19	+2009.26
Cu	6	9	10.72	+4.72	+78.66	17	17.93	+11.93	+198.81
Pb	41	85	101.24	+60.24	+146.93	29	30.58	-10.42	-25.40
Zn	32	117	139.36	+107.36	+335.49	57	60.11	+28.11	+87.86
Au	0.005 <sup>2)</sup>	0.606	0.72	+0.72	+14335.99	0.004	0	0.00	-15.63
Ag	0.1 <sup>2)</sup>	2.4	2.86	+2.76	+2758.61	0.1	0.11	+0.01	+5.46
Cd	1	0.9	1.07	+0.07	+7.20	0.5	0.53	-0.47	-47.27
Ni	30	29	34.54	+4.54	+15.14	31	32.69	+2.69	+8.98
Co	4	15	17.87	+13.87	+346.66	9.1	9.6	+5.60	+139.93
W	2 <sup>2)</sup>	7	8.34	+6.34	+316.88	3	3.16	+1.16	+58.19
Cr	49	58.8	70.04	+21.04	+42.93	45.3	47.77	-1.23	-2.50
Ba	942	415	494.3	-447.70	-47.53	361	380.72	-561.28	-59.58
Sr	182	149	177.47	-4.53	-2.49	117	123.39	-58.61	-32.20
Zr	167	188	223.92	+56.92	+34.09	149	157.14	-9.86	-5.90
V	16	92	109.58	+93.58	+584.88	40	42.19	+26.19	+163.66
Br	1	1.1	1.31	+0.31	+31.02	1	1.05	+0.05	+5.46
Cs	2	2.3	2.74	+0.74	+36.98	3.6	3.8	+1.80	+89.83
Hf	5	5.2	6.19	+1.19	+23.87	4.1	4.32	-0.68	-13.52
Rb	172	149	177.47	+5.47	+3.18	181	190.89	+18.89	+10.98
Sc	3	12.9	15.37	+12.37	+412.17	5.88	6.2	+3.20	+106.71
Th	43	14.2	16.91	-26.09	-60.67	12.6	13.29	-29.71	-69.10
U	4	2.58	3.07	-0.93	-23.17	4.16	4.39	+0.39	+9.68
Y	13	28	33.35	+20.35	+156.54	7	7.38	-5.62	-43.21
Ta	1.18 <sup>1)</sup>	1.1	1.31	+0.13	+11.03	1	1.05	-0.13	-10.62
Be	6 <sup>2)</sup>	4	4.76	-1.24	-20.59	3	3.16	-2.84	-47.27
Bi	0.009 <sup>2)</sup>	2.2	2.62	+2.61	+29015.49	0.4	0.42	+0.41	+4587.24
Ga	21.5 <sup>1)</sup>	15	17.87	-3.63	-16.90	16	16.87	-4.63	-21.52
Ge	1.7 <sup>2)</sup>	1	1.19	-0.51	-29.94	0.8	0.84	-0.86	-50.37
Nb	10.7 <sup>1)</sup>	12.6	15.01	+4.31	+40.26	12.1	12.76	+2.06	+19.26
Sb	0.2 <sup>2)</sup>	4.2	5	+4.80	+2401.29	1.3	1.37	+1.17	+585.51
Se	0.08 <sup>2)</sup>	0.6	0.71	+0.63	+793.32	0.1	0.11	+0.03	+31.83
Sn	1.37 <sup>1)</sup>	3	3.57	+2.20	+160.82	2	2.11	+0.74	+53.96
La	51	44.5	53	+2.00	+3.93	28.9	30.48	-20.52	-40.24
Ce	115	90.2	107.44	-7.56	-6.58	56.5	59.59	-55.41	-48.19
Pr	10.2 <sup>1)</sup>	9.9	11.79	+1.59	+15.61	5.97	6.3	-3.90	-38.27

Table 5. Continued

	SK14	SK2	SK2 Amount remaining(g)	SK2 Gain and loss(g)	SK2 gain and loss(%)	SK1	SK1 Amount remaining(g)	SK1 Gain and loss(g)	SK1 gain and loss(%)
Nd	43	35.9	42.76	-0.24	-0.56	20.6	21.73	-21.27	-49.48
Sm	8	6.56	7.81	-0.19	-2.33	3.86	4.07	-3.93	-49.11
Eu	1	1.34	1.6	+0.60	+59.61	0.67	0.71	-0.29	-29.34
Gd	6.76 <sup>1)</sup>	5.64	6.72	-0.04	-0.63	3.1	3.27	-3.49	-51.64
Tb	0.5	0.97	1.16	+0.66	+131.07	0.45	0.47	-0.03	-5.08
Dy	6.32 <sup>1)</sup>	5.21	6.21	-0.11	-1.81	1.88	1.98	-4.34	-68.63
Ho	1.12 <sup>1)</sup>	0.96	1.14	+0.02	+2.09	0.28	0.3	-0.82	-73.63
Er	3.13 <sup>1)</sup>	2.82	3.36	+0.23	+7.31	0.68	0.72	-2.41	-77.09
Tm	0.42 <sup>1)</sup>	0.4	0.48	+0.06	+13.44	0.09	0.09	-0.33	-77.40
Yb	0.7	2.55	3.04	+2.34	+333.90	0.54	0.57	-0.13	-18.64
Lu	0.07	0.38	0.45	+0.38	+546.59	0.08	0.08	+0.01	+20.53
S		0.02					0.03		
CO <sub>2</sub>		5.00					2.15		

\*Total Fe as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Data sources: 1)=Lee and Kim (1992), 2)=average content in crust

들의 함량에 대해 대봉, 옥계, 청주 및 전홍광상과 비교할 때, 삼광, 대봉 및 옥계광상의 함량은 청주 및 전홍광상에 비해 낮은 함량을 갖는다. 특히 청주 및 전홍광상의 석영내에 Sr, Zr, Rb, Ga, Nb, Sb, Te 및 REE 등의 원소들의 함량은 삼광, 대봉 및 옥계의 것들보다 9배 이상 높은 함량을 갖는다(Table 4). 단체분리한 섬아연석은 주로 Zn, Fe, Mn, Cd 및 Pb이 함유되며 소량 As, Ag, Sb, In, Ga, Sn, Co 및 Bi 등의 원소가 함유된다(Table. 4). 이 도표에서 보는 것과 같이 삼광광상의 섬아연석은 청송 및 영덕광상의 섬아연석보다 Fe, Mn 및 Cd의 함량이 높고 Pb의 함량은 낮게 산출된다. 부분적으로 청송 및 영덕광상에서 As, Ag, Co 및 Sb가 높게 산출된다(Table 4). 모암변질시 열수용액과 모암사이에는 성분의 이동에 의해 이득/손실이 존재한다. 시료는 삼광광상 갱내에서 석영맥에서 20 cm 떨어진 곳(SK2)과 50 cm 떨어진 곳(SK1)에서 채취하였다. 전자는 열수용액에 의해 주로 견운모화가 우세하게 관찰되며 소량 녹니석화 및 황철석화작용도 관찰된다. 후자는 열수용액에 의해 녹니석화가 우세하게 관찰되며 소량 견운모화작용이 관찰된다. 삼광광상의 모암인 화강편마암(SK14)에 비해 변질을 받은 SK2 및 SK1시료에서 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Ba, Sr, Th, Be 등이 감소하며 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, As, Cu, Zn, Ag, Co, W, V, Sc, Bi, Sb, Sn 등이 증가하는데 특히 As, Zn, Co, V, Bi, Sb 등의 원소가 현저하게 증가한다(Table 4; Fig. 6A, B). 모암변질시 구성성분-부피의 상관관계를 기초로 변질과 비변질 광물 및 암석에 대한 화학분석치 및 비중으로 물질의 이득 및 손실을 계산하는 방법

식을 이용하여 광화작용 후의 변질 암석의 원소 이득 및 손실을 살펴보면(Gresens, 1967; Grant, 1986), SK2시료에선 현저히 증가한 원소들은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(+5.4 g), As(+213.6 g), Ag(+2.8 g), Pb(+60.2 g), Zn(+107.4 g), Co(+13.9 g), W(+6.3 g), Cr(+21.0 g), Zr(+56.9 g), V(+93.6 g), Rb(+5.5 g), Sc(+12.4 g)이고 SK1시료에선 현저히 증가한 원소들은 As(+40.2 g), Cu(+11.9 g), Zn(+28.1g), Co(+5.6g), V(+26.2g), Rb(+18.9g)이다(Table 5). 도표 5에서 모암 중에 S 및 CO<sub>2</sub>에 대한 자료가 없어 이득/손실 계산을 하지 않았지만 모암변질과정 중에 S 및 CO<sub>2</sub> 원소들의 함량은 각각 0.02~0.03 ppm, 2.15~5 ppm를 갖는다. Yoo *et al.* (2007)에 의하면 대봉, 무극 및 나림광상에서 공통적으로 증가하는 원소는 K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ag, As, Ba, Cr, Cu, Pb, Rb, Sb, Sc, Sm, Sr, V 및 Zn 등의 원소라고 보고하였다(Fig. 6C). 또한 백운광상은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(T), Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Sn, W, Zn, CO<sub>2</sub> 등의 원소가 증가하고(Fig. 6D-E) 팔공광상은 K<sub>2</sub>O, Au, Ag, As, Co, Cs, Cu, Rb, S, Sb, Sc, Sn, U, W, Zr, CO<sub>2</sub> 등의 원소가 증가한다(Fig. 6F-H). 이들 대부분의 광상들의 모암은 알루미노실리케이트 암석으로 구성되어 있다. 또한 우리나라의 대부분이 주로 이들 암석으로 구성되어 있어 광상의 생성시기 및 광상형에 관계없이 이들 광상에서 공통적으로 증가하는 원소들은 Ag, As, Zn, Sc 및 Sb 등이다. 여기에서 Rb 원소는 대봉 및 나림에서 일부 감소하는 원소로 도시되지만 다른 광상에선 증가하는 원소로 표시된다. 또한 삼광, 백운 및 팔공광상에서 공통적으로 S 및 CO<sub>2</sub>

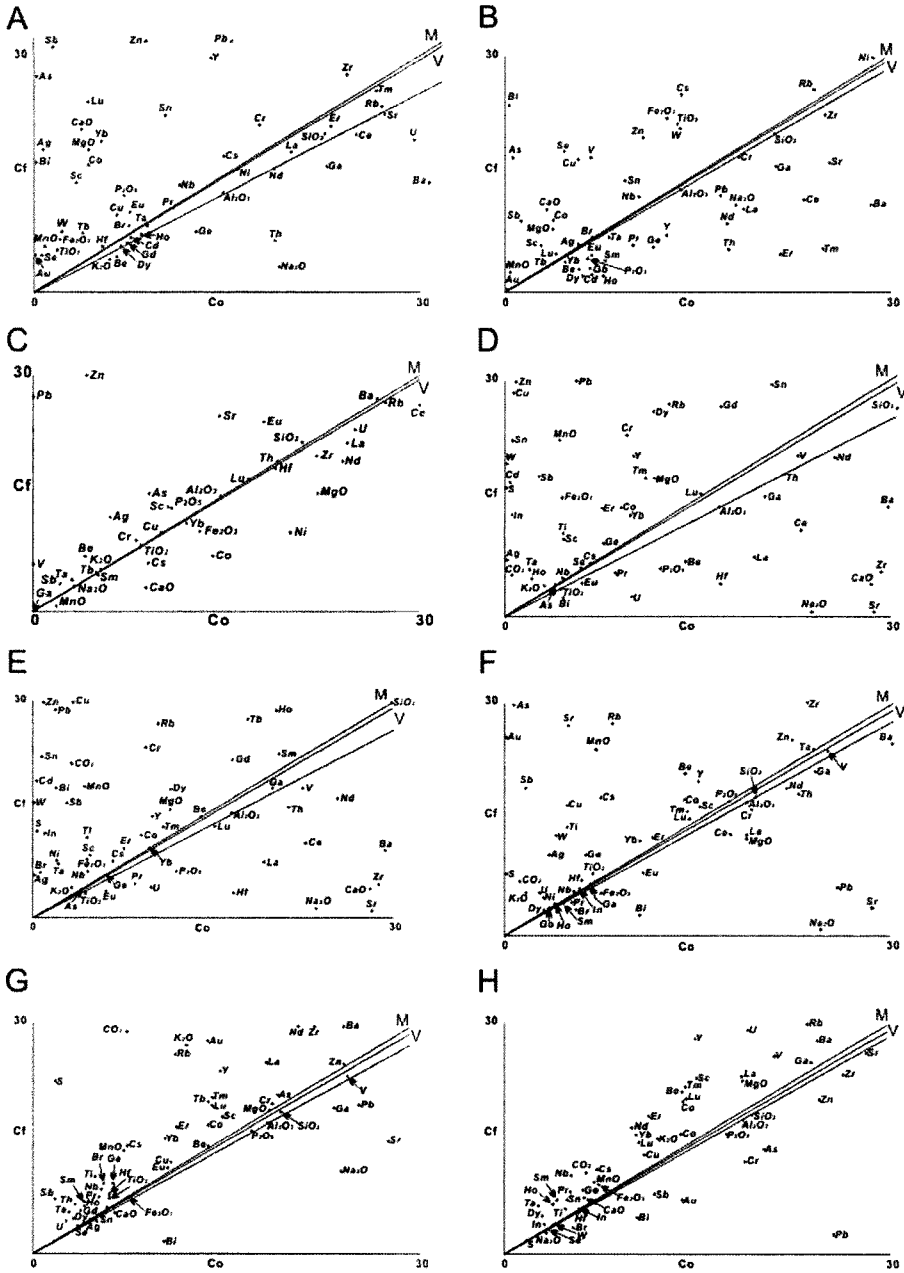


Fig. 6. Isochron diagrams showing chemical changes that occur during wallrock alteration from the Samgwang(A-B), Daebong(C), Baegun(D-E) and Paigong(F-H) deposits. Co and Cf refer to unaltered and altered rocks, respectively. M and V indicate constant mass and constant volume conditions, respectively.

원소들도 증가된다.

### 5. 토 론

삼광광상에서 관찰되는 모암변질은 균운모화작용이

가장 우세하며 녹니석화작용, 황철석화작용, 탄산염화작용, 규화작용, 프록시라이트화작용 및 점토화작용이 있다. 모암변질은 가수분해반응, 수화/탈수화반응, 탄산/탈탄산반응, 산화 환원반응, 이온교환반응 등에 의해 일어난다. 이들 반응 중 모암변질조합을 통해 주로 가수

분해반응에 의해 일어났으며 모암의 광물조합 및 구성 성분에게 크게 영향을 받았음을 알 수 있다. 경기변성복합체의 편마암내에 발달된 대표적인 태창-보련, 전의 및 대남광상(양평-원주지역 광화대내의 한 광상)등의 모암은 대부분 알루실리케이트로 구성되어 있어 열수 작용에 의해 만들어진 모암변질광물(견운모, 녹니석, 황철석, 녹염석)으로 삼광광상의 것과 큰 차이가 없다 (Shelton *et al.*, 1988; Robert *et al.*, 1997). 가수분해반응에 의하여 모암내 구성광물들은 열수용액사이에  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  등의 양이온이 이동되어진다 (Rose and Burt 1979). 삼광광상에서 산출되는 화강암질편마암에 대한 광화작용후의 변질 및 비변질 암석의 원소 이득 및 손실 계산을 살펴보면, 변질된 시료에서 Na, K 및 Sr원소는 감소한다. 이것은 대봉광상의 흑운모화강암내 이들원소들이 증가하는 것과 반대로 삼광광상에서는 정장석과 사장석(알바이트)의 가수분해반응에 의하여 열수용액내 Na 및 K 원소들이 용출된 것으로 설명될 수 있다.

삼광광상에서 산출되는 녹니석과 견운모의 Fe/(Fe+Mg) 값은 각각 0.45~0.50(0.48±0.02), 0.74~0.81(0.77±0.03)의 값을 갖는다. 또한 기 보고된 Au-Ag, Pb-Zn, Cu 및 W광상에서 산출되는 녹니석 및 견운모에 대한  $Al_{IV}$ -Fe/(Fe+Mg) 다이어그램에 도시하여 보면, 한 광상에서 녹니석의 Fe/(Fe+Mg)와  $Al_{IV}$  값은

정의 상관관계를 갖으나 견운모는 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않는다. 광종에 따라 금-은 광상의 Fe/(Fe+Mg) 값은 Pb-Zn, W 및 Cu광상보다 높으며 같은 금-은광상에서 중열수(삼광, 대봉)에서 천열수(나립, 무극, 가사도)로 감에 따라 감소함을 알 수 있다(Fig. 7). 이 그림에서 일본의 다금속광상, 천열수광상 또는 Kuroko광상과 비교할 때, 중열수광상형인 삼광 및 대봉광상의 녹니석내에  $Al^{IV}$  함량은 이들 광상보다 다소 낮으며 Chitose 천열수광상 및 Kuroko광상보다 현저히 Fe/(Fe+Mg) 값이 높다. 또한 견운모의 Fe/(Fe+Mg) 값은 비교적 중열수(삼광, 대봉)에서 천열수(나립, 무극, 가사도)로 감에 따라 감소하는 경향이 보인다(Fig. 8). 녹니석내 Fe/(Fe+Mg) 값은 여러 요인(유체-모암의 반응비,  $f_{O_2}$ ,  $f_{S_2}$ , pH, 열수조성, 모암성분)에 의해 영향을 받는다(Kranidiotis and MacLean, 1987; De Caritat *et al.*, 1993; Jiang *et al.*, 1994). 녹니석내 Mg/Fe 비는 형성온도에 반비례하며 이는 높은 온도에 녹니석과 평형상태에 있는 열수용액은 iron-rich 녹니석을 형성하고 낮은 온도에 녹니석과 평형상태에 있는 열수용액은 magnesium-rich 녹니석을 형성한다고 Ohta and Yajima(1988)에 의해 보고된 바 있다. 따라서 삼광광상에서 산출되는 녹니석은 높은 온도에서 모암과 평형상태에서 온도가 감소함에 따라 형성되었음을 알 수 있다.

삼광광상의 열수용액내 용질의 활성도( $\alpha Na^+$ ,  $\alpha K^+$ ,  $\alpha Ca^{2+}$ ,  $\alpha Mg^{2+}$ )는 모암변질광물상에 대한 열수용액의 가수분해와 양이온 교환 등에 의한 평형방정식을 구하

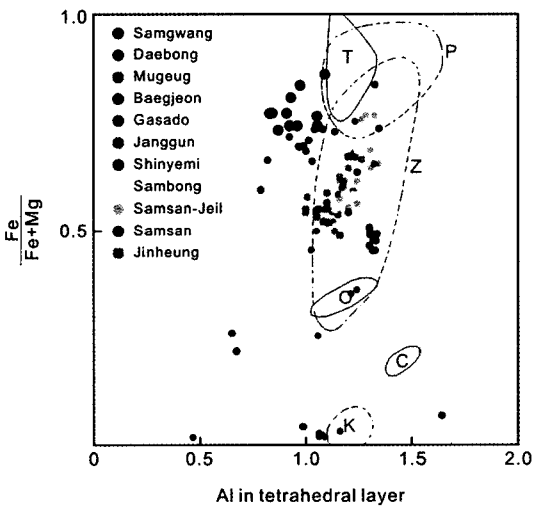


Fig. 7. Plot of  $Al_{IV}$  ratios versus Fe/(Fe+Mg) ratios of chlorites from the Samgwang, some Au-Ag, Cu, W and Fe deposits in Republic of Korea and some deposits in Japan (C=Chitose epithermal Au-Ag veins, K=Kuroko deposits, O=Ohe Pb-Zn-Mn veins, P=polymetallic veins, T=Toyoha polymetallic veins, Z=Cu-Pb-Zn veins).

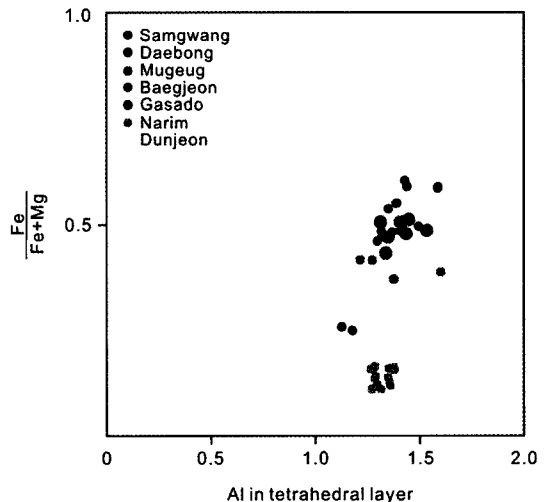


Fig. 8. Plot of  $Al_{IV}$  ratios versus Fe/(Fe+Mg) ratios of sericites from the Samgwang and some Au-Ag deposits.

여 유추할 수 있다. 이 광상에서 칼리장석, 사장석, 흑운모 등을 교대하여 견운모화작용이 관찰된다. 모암변질광물상, 유체포유물 자료( $m\text{Na}^+ + m\text{K}^+ + m\text{Ca}^{2+} + m\text{Mg}^{2+} = 0.35, 0.35$ ) (Yoo *et al.*, 2003) 및 광물상의 평형방정식의 반응물과 생성물의 열역학적 자료(Helgeson 1969; Helgeson and Kirkham, 1978; Arnorsson *et al.*, 1982; Berman, 1988)를 기초로 하여 구한 삼광광상의  $\log \alpha\text{K}^+/\alpha\text{H}^+$  값은 4.6(400°C), 4.1(350°C),  $\log \alpha\text{Na}^+/\alpha\text{H}^+$  값은 4.0(400°C), 4.2(350°C) 및  $\log \alpha\text{Ca}^{2+}/\alpha^2\text{H}^+$  값은 1.8(400°C), 4.5(350°C)이다. 또한 삼광광상에 대한 원소농도( $m\text{Na}^+$ ,  $m\text{K}^+$ ,  $m\text{Ca}^{2+}$ ,  $m\text{Mg}^{2+}$ )는 Yoo *et al.* (2007)에서 제시한 방법에 의해 구할 수 있다. 여기에서 활동도계수( $\gamma\text{Na}^+$ ,  $\gamma\text{K}^+$ ,  $\gamma\text{Ca}^{2+}$ ,  $\gamma\text{Mg}^{2+}$ )는 Garrels and Christ(1965)에 의해 제시된 mean-salt method와 Bronsted-Guggenheim 방정식( $\log \gamma_i = -Az_i^{2/3}/1 + B\alpha_i^{1/2} + bI$ )에 의해 구하였다. 여기에서 Debye-Huckel solvent 매개변수(A, B 값)는 Helgeson and Kirkham (1974)의 자료를 기초로 하여 다항회귀분석한 결과 다음과 같은 다항식이 구해졌다.

$$A = 0.4911 + 7.2035 \times 10^{-4} \times T + 8.9936 \times 10^{-7} \times T^2 + 4.7815 \times 10^{-8} \times T^3 - 2.5348 \times 10^{-10} \times T^4 + 5.0592 \times 10^{-13} \times T^5$$

$$B = 0.3244 + 1.5103 \times 10^{-4} \times T + 1.1861 \times 10^{-7} \times T^2 + 2.7327 \times 10^{-9} \times T^3 - 1.523 \times 10^{-11} \times T^4 + 2.7029 \times 10^{-14} \times T^5$$

이 다항식을 이용한 400°C와 350°C의 Debye-Huckel solvent 매개변수(A, B 값) 각각  $A = 2.6748, 1.7569$ ,  $B = 0.4656, 0.4224$ 이다. 이들 자료를 가지고 계산된 이들 광상의 열수용액내 용질의 활동도( $\alpha\text{Na}^+$ ,  $\alpha\text{K}^+$ ,  $\alpha\text{Ca}^{2+}$ ,  $\alpha\text{Mg}^{2+}$ )는 온도 400°C와 350°C에서의 각각  $\alpha\text{Na}^+ = 0.0476, 0.0863$ ,  $\alpha\text{K}^+ = 0.0154, 0.0231$ ,  $\alpha\text{Ca}^{2+} = 2.42\text{E-}11, 7.07\text{E-}10$ ,  $\alpha\text{Mg}^{2+} = 1.59\text{E-}12, 1.77\text{E-}11$  로써 삼광광상의 열수용액내에 주로  $\text{Na}^+$ 와  $\text{K}^+$ 으로 구성되어 있었음을 알 수 있으며 대봉광상의 용질내 활동도보다 다소 낮은 값을 갖는다.

삼광광상의 열수용액내 pH 변화는 pH buffer 광물인 견운모의 침전에 따라 변화한다. 삼광광상에서 관찰되는 견운모화작용은 석영맥의 주변부를 따라 맥의 규모에 의해 수 cm에서 60 cm 이내로 칼리장석, 사장석, 흑운모 등을 교대하며 산출된다. 따라서 모암변질 광물상 평형방정식 및 앞서 구한 열수용액내 용질의 활동도자료 등을 이용하여 삼광광상에 대한 400°C와 350°C의 반응온도에서 열수용액의 초기 pH는 각각

5.4~6.4, 5.3~5.7 으로 모암변질시 초기 열수용액은 약산성이었음을 알 수 있으며 대봉광상의 것과 유사한 값을 갖는다.

삼광광상의 열수 용액내  $m\text{H}_2\text{S}$ 는 온도 350°C에서  $\log f\text{O}_2 - \log f\text{S}_2$  다이어그램상에 공생광물군 및 화학조성을 가지고 유추할 수 있다.  $\log f\text{O}_2$  값은 -30.4~-30.3 atm(유비철석과 황철석이 공생할 때 구한 값)와 FeS mole% 값은 10.07~13.82(섬아연석의 화학조성)를 이용하여 계산된  $m_{\text{H}_2\text{S}}$ 를 계산하면 -2.4~-2.5내에 해당되며 이 값은 삼광광상의 초기 열수용액의  $\Sigma m$ 에 해당된다고 생각되며 대봉광상의 값보다 낮은 값을 갖는다.

삼광광상 뿐만 아니라 백운, 팔공, 대봉, 무극 및 나림광상에 대한 모암변질시 이득/손실 계산시, 이득원소는  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Se}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Lu}$ (삼광광상),  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Dy}$ ,  $\text{Ho}$ ,  $\text{Er}$ ,  $\text{Tl}$ ,  $\text{CO}_2$ (백운광상),  $\text{MnO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Tb}$ ,  $\text{Dy}$ ,  $\text{Ho}$ ,  $\text{Er}$ ,  $\text{Tl}$ ,  $\text{Tm}$ ,  $\text{Yb}$ ,  $\text{CO}_2$ (팔공광상),  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Sb}$ (대봉광상),  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Dy}$ ,  $\text{Ho}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Yb}$ ,  $\text{Er}$ ,  $\text{Lu}$ (무극광상) 및  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Nd}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ (나림광상)로서 각 광상마다 원소의 종류 및 부화정도에 차이가 있다. 그러나 이들 광상에서 공통적으로 증가하고 분산도가 좋은 원소들은  $\text{Ag}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Sc}$  및  $\text{Sb}$  등으로 금-은광물의 탐사에 지시원소로서 활용될 수 있을 것이다.  $\text{Rb}$  원소는 대봉 및 나림광상 일부에서 감소되나 삼광, 백운, 팔공 및 무극광상에선 분산도가 좋은 원소로 나타난다(Fig. 6)(Yoo *et al.*, 2007). 또한 삼광, 백운 및 팔공광상에서 모암변질시 공통적으로  $\text{S}$ 와  $\text{CO}_2$  원소들도 증가되어진다. 따라서 이들 원소들도 금-은 광물의 탐사에 활용될 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

1. 삼광광상의 모암변질작용은 견운모화, 녹니석화, 탄산염화, 황철석화, 규화, 및 점토화작용등이 관찰되며 견운모대는 석영맥과 접촉한 부분에서 관찰되고 녹니석대는 석영맥으로부터 멀어짐에 따라 관찰된다. 이 광상의 견운모는 백운모-펜자이트족에 해당되며  $\text{Fe/}$

(Fe+Mg) 값은 0.45~0.50(0.48±0.02)로서 기 보고된 광상들과 비교할 때 대봉광상보다 약간 낮고 백전과 유사하나 다른 광상들보다 높은 값을 갖는다. 이는 고온형 중열수에서 저온형 천열수 광상으로 감에 따라 Fe 함량이 감소함을 알 수 있다.

2. 삼광광상산 녹니석은 브룬스비자이트(brunsvigite)에 해당되며 녹니석의 Fe/(Fe+Mg) 값은 0.74~0.81(0.77±0.03) 이고 계산된 녹니석 단종의 활동도가  $a_3(\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=0.0275\sim 0.0413$ ,  $a_2(\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=1.18\text{E}-10\sim 7.79\text{E}-7$ ,  $a_1(\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6)=4.92\text{E}-10\sim 9.29\text{E}-7$ 로서 iron-rich 녹니석이 우세하다. 이것은 같은 광종 및 다른 광종의 광상보다 Fe함량이 높은 값을 갖으며 동종의 금-은광상에서 고온형 중열수에 저온형 천열수 광상으로 감에 따라 Fe 함량이 감소함을 알 수 있다.

3. 삼광광상산 석영에는 Cu, Pb, Zn 및 Sn 등의 원소(24,505~111,823 ppb), As, Ag, Cd, Co, Sr, Zr, Rb, Bi, Ga, Nb, Sb 및 Te 등의 원소(231~3,954 ppb) 및 Hf, Th, U, Y, In 및 REE 등의 원소(3~94 ppb) 이 함유되어 있으며 대봉, 옥계, 청주 및 진흥광상의 석영과 비교할때, 삼광, 대봉 및 옥계광상의 함량은 청주 및 진흥광상에 비해 낮은 함량을 갖는다.

4. 삼광광상산 섬아연석에는 주로 Zn, Fe, Mn, Cd 및 Pb 등의 원소가 함유되며 소량 As, Ag, Sb, In, Ga, Sn, Co 및 Bi 등의 원소가 함유된다. 이 광상의 섬아연석은 청송 및 영덕광상의 섬아연석보다 Fe, Mn 및 Cd의 함량이 높고 Pb의 함량은 낮게 산출된다.

5. 삼광광상의 모암변질시 원소들의 이득/손실 계산 시,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ , CaO, MnO, MgO, As, Ag, Cu, Zn, Ni, Co, W, V, Br, Cs, Rb, Sc, Bi, Nb, Sb, Se, Sn 및 Lu 등의 원소는 증가하며 특히 As, Zn, Co, V, Bi, Sb 등의 원소가 현저하게 증가한다. 기 보고된 광상들의 자료와 비교하여 공통적으로 증가하는 원소들은 Ag, As, Zn, Sc 및 Sb 등이며 Rb 원소는 대봉 및 나림에서 일부 감소하는 원소로 도시되지만 다른 광상에선 증가하는 원소로 표시된다. 또한 삼광, 백운 및 팔광광상에서 공통적으로 S 및  $\text{CO}_2$  원소들도 증가된다. 따라서 이들 원소들은 금-은광물의 탐사에 지시원소로서 활용될 수 있을 것이다.

6. 삼광광상의 모암변질시 물리-화학적 조건을 살펴 보면, 열수용액의  $\alpha_{\text{Na}^+}$ ,  $\alpha_{\text{K}^+}$ ,  $\alpha_{\text{Ca}^{2+}}$  및  $\alpha_{\text{Mg}^{2+}}$ 는 각각  $\alpha_{\text{Na}^+}=0.0476(400^\circ\text{C})$ ,  $0.0863(350^\circ\text{C})$ ,  $\alpha_{\text{K}^+}=0.0154(400^\circ\text{C})$ ,  $0.0231(350^\circ\text{C})$ ,  $\alpha_{\text{Ca}^{2+}}=2.42\text{E}-11(400^\circ\text{C})$ ,  $7.07\text{E}-10(350^\circ\text{C})$ ,  $\alpha_{\text{Mg}^{2+}}=1.59\text{E}-12(400^\circ\text{C})$ ,  $1.77\text{E}-11$

(350°C)이며 열수용액의 pH는 5.4~6.4(400°C), 5.3~5.7(350°C)로써 모암변질시 열수용액은 약산성이었음을 알 수 있다.

## 사 사

이 연구는 2008학년도 충남대학교 학술연구지원사업에 의해 연구되었다. 이 기관에 사의를 표한다. 심사과정에서 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 염승준 박사님과 다른 심사위원님들께 깊이 감사드립니다. 또한 PIMA 분석에 도움을 주신 고려대학교 최선규 교수님 및 텍스지오 박창성 팀장에게 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Arnorsson, S., Sigurdsson, S. and Svarvarsson, H. (1982) The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46, p. 1513-1532.
- Berman, R.G. (1988) Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . *Journal of Petrology*, v. 29, p. 445-522.
- Chang, S.W. (1988) Mineralogy of tungsten ores from Sangdong mine. Ph.D. thesis, Seoul National University, 287p.
- De Caritat, P., Hutcheon, I. and walshe, J.L. (1993) chlorite geothermometry: A review. *Clays and Clay Minerals*, v. 41, p. 219-239.
- Garrels, R.M. and Christ, C.L. (1965) *Solutions, minerals and equilibria*. Freeman, Cooper and Company, 450p.
- Grant, J.A. (1986) The isocon diagram-A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, v. 81, p. 1976-1982.
- Gresens, R.L. (1967) Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, v. 2, p. 47-65.
- Helgeson, H.C. (1969) Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*, v. 267, p. 729-804.
- Helgeson, H.C., Delany, J.M., Nesbitt, H.W. and Bird, D.K. (1978) Summary and critique of the thermodynamic properties of rock forming minerals. *American Journal of Science*, v. 278-A, 229p.
- Helgeson, H.C. and Kirkham, D.H. (1978) Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. II. Debye-Huckel parameters for activity coefficients and relative partial molal properties. *American Journal of Science*, v. 274, p. 1199-1261.
- Helgeson, H.C. and Kirkham, D.H. (1974) Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. II. Debye-Huckel parameters for activity coefficients and relative partial molal properties. *American Journal of Science*, v. 274, p. 1199-1261.



- Hey, M.H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, v. 3, p. 87-102.
- Hofmann, A. (1972) Chromatographic theory of infiltration metasomatism and its application to feldspar. *American Journal of Sciences*, v. 272, p. 69-90.
- Jiang, W.T., Peacor, D.R. and Buseck, P.R. (1994) Chlorite geothermometry-contamination and apparent octahedral vacancies. *Clays and Clay Minerals*, v. 42, p. 593-605.
- Kang, P.S. and Im, P.S. (1974) Geological map of Kwangjung sheet. Geological Survey of Korea.
- Kim, S.S., Choi, S.G., Choi, S.H. and Lee, I.W. (2002) Hydrothermal alteration and its genetic implication in the Gasado volcanic-hosted epithermal gold-silver deposit: Use in exploration. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, v. 15, p. 205-220.
- Kranidiotis, P. and MacLean, W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit. Matagami, Quebec. *Economic geology*, v. 82, p. 1898-1911.
- Lee, C.H., Lee, H.K., Yoo, B.C. and Cho, A. (1998b) Geochemical enrichment and migration of environmental toxic elements in stream sediments and soils from the Samkwang Au-Ag mine area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 31, p. 111-125.
- Lee, C.H. (1993) Geology, mineralogy, fluid inclusion and stable isotope of gold, silver and antimony ore deposits of the Dunjeon-Baegjon area, northern Taebaegsan mining district, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, 422p.
- Lee, J.H. (1992) Hydrothermal copper mineralization in the Goseong district, Korea. Ph.D. thesis, Korea University, 177p.
- Lee, J.H. and Hueley, P.M. (1973) U-Pb zircon age of the Precambrian basement gneisses of South Korea. *Geology and ore deposit No.21*, Geological and mineral institute of Korea, p.5-7.
- Lee, H.K., Yoo, B.C., Kim, K.W. and Choi, S.G. (1998a) Mode of occurrence and chemical composition of electrum from the Samkwang gold-silver deposits, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resource Engineers*, v. 35, p. 8-18.
- Lee, H.K. and Lee, C.H. (1997) Mineralogy and geochemistry of green-colored Cr-bearing sericite from hydrothermal alteration zone of the Narim gold deposit, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 30, p. 279-288.
- Lee, H.K., Yoo, B.C., Hong, D.P. and Kim, K.W. (1995) Structural constraints on gold-silver-bearing quartz mineralization in strike-slip fault system, Samkwang mine, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 28, p. 579-585.
- Neall, F.B. and Phillips, G.N. (1987) Fluid-wallrock interaction in an Archean hydrothermal gold deposit: A thermodynamic model for the Hunt mine, Kambalda. *Economic Geology*, v. 82, p. 1679-1694.
- Ohta, E. and Yajima, J. (1988) Magnesium to iron ratio of chlorite as indicator of type of hydrothermal ore deposit. *Mining Geology Special Issue*, p. 17-22.
- Park, S.J., Choi, S.G. and Lee, D.E. (2003) The genetic implication of hydrothermal alteration of epithermal deposits from the Mugeuk area. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, v. 16, p. 265-280.
- Robert, F., Poulsen, K.H. and Dube, B. (1997) Gold deposits and their geological classification. *Exploration 97*, April 1997, Toronto, Canada, p. 209-219.
- Rose, A.W. and Burt, D.M. (1979) Hydrothermal alteration: In geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed., Wiley-Interscience, p. 173-235.
- Shelton, K.L., So, S.C. and Chang, J.S. (1988) Gold-rich mesothermal vein deposits of the Republic of Korea: Geochemical studies of the Jungwon gold area. *Economic Geology*, v. 83, p. 1221-1237.
- So, C.S., Shelton, K.L., Chi S.J., and Choi, S.H. (1988) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver-bearing hydrothermal vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Cheongyang area. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 21, p. 149-164.
- Um, S.H. and Lee, M.S. (1963) Geological map of Taehung sheet. Geological Survey of Korea.
- Walshe, J.L. (1986) A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal system. *Economic Geology*, v. 81, p. 687-703.
- Walshe, J.L. and Solomon, M. (1981) An investigation into the environment of formation of the volcanic-hosted Mt. Lyell copper deposits, using geology, mineralogy, stable isotopes, and a six-component chlorite solid solution model. *Economic Geology*, v. 76, p. 246-284.
- Woo, Y.K., Choi, S.W. and Park, K.H. (1991) Genesis of talc ore deposits in the Yesan area of Chungnam, Korea. *The Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, v. 24, p. 363-378.
- Yang, D.Y. (1991) Mineralogy, petrology and geochemistry of the magnesian skarn-type magnetite deposits at the Shinyemi mine, Republic of Korea. Ph.D. thesis, Waseda University, 323p.
- Yoo, B.C., Chi, S.J., Lee, G.J., Lee, J.K. and Lee, H.K. (2007) Element dispersion and wall-rock alteration from Daebong gold-silver deposit, Republic of Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 40, p. 713-726.
- 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.
- Yun, S.P., Moon, H.S. and Song, Y.G. (1994) Mineralogy and genesis of the Pyoungan and Daeheung talc deposits in ultramafic rocks, the Yoogoo area, Republic of Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 27, p. 131-145.