

## 유문암-열수 반응과 유광 견운모 광상의 성인

박맹언\* · 최인식\* · 김진섭\*\*

### Hydrothermal Solution-Rhyolite Reaction and Origin of Sericitite in the Yukwang Mine

Maeng-Eon Park\*, In-Sik Choi\* and Jin-Sup Kim\*\*

**ABSTRACT:** The hydrothermal alteration is evaluated using multicomponent equilibrium calculations with the program CHILLER<sup>1)</sup> for the reactions between hydrothermal water and rhyolite at the temperature of 300°C and pressure of 500 bars. The chemical-reaction model on the depositional processes of the sericitite confirms that the hydrothermal water-rock interaction(hydrothermal alteration) is the main mechanism of the sericitite formation.

The principal change in the aqueous phase during the reaction is the pH increase. Overall trends for the major species are the increase in total molalities of K, Ca, SiO<sub>2</sub>, Al, Mg, Fe, Na, and sulfide in solid phase with hydrothermal water-rhyolite reaction and the decrease of them in aqueous solution by precipitation of hydrothermal products.

Quartz and sericitite are the first minerals to form. The sequence of minerals to precipitate following them is chlorite, epidote, pyrite and microcline as water/rock ratio decreases.

Although calculated results cannot duplicate the complexities of natural hydrothermal alteration, the calculation provides thermodynamic constraints on the natural process. The calculation results resemble those of experimental studies. Sericitite forms where pH decreases and water/rock ratio increases.

## 서 언

국내 주요 납석<sup>1)</sup>광상은 백악기 안산암류와 유문암을 모암으로 배태된 열수변질 기원의 광상으로, 견운모형, 고령토형 및 엽납석형으로 구분되며 (상기남, 1964), 경상분지 동남부와 전라남도 서남부 지역에 주로 분포한다. 전남지역의 광상은 유문암질 응회암 중에 층상, 렌즈상 및 불규칙한 형태로 배태되며, 고령토, 엽납석, 견운모와 함께 명반석이 산출되고 광화작용은 화산활동에 관련된 것으로 연구된 바 있다 (문희수, 1975; 문희수 외, 1991). 경상남도 동남부는 안산암류와 유문암류를 모암으로 하는

견운모형과 엽납석형으로서 구조규제를 받으며 괴상 또는 렌즈상으로 납석광상이 분포한다.

납석광상에 대해서는 광물학적 연구 (문희수, 1975), 광상학적 연구 (김규봉, 1970; 문희수, 1975; 정영욱, 전효택, 1989; 문희수 외, 1991) 및 지구화학적 연구 (정영욱, 전효택, 1989) 등이 수행된 바 있으며, 본 연구대상인 동래지역 유광광산 광화작용에 대해서는 광상의 산출상태, 지질구조와의 관계를 통한 성인적 연구 (이장섭, 1986), 변질작용에 따른 지구화학적 원소분배 및 산소동위원소 특징 등에 의한 지구화학적 연구 (정영욱, 전효택, 1989) 및 수반광물에 대한 화학적 조성 및 구조적 특성에 대한 광물학적 연구 (Kim et al., 1990) 등이 있다. 그러나 지구화학적 수치모델링 기법을 이용한 국내 납석광상의 성인 연구는 전혀 진행되어 있지 않으며, 국제적으로도 광상의 형성기구에 대한 수치모델링 연구는 제안단계에 있다.

암석과 열수간의 반응에 의해 용액의 화학적 특성이 변화되고, 그 결과 각종 변질산물이 침전되나, 열수용액과 암석간의 반응은 그 양상이 다성분 다상의 불균질 매체

<sup>1)</sup> 납석은 광물학적으로 엽납석을 지칭하나 여기서는 특성이 엽납석과 유사한 요업원료를 총칭 (Kim et al., 1990).

\* 부산수산대학교 응용지질학과(Department of Applied Geology, Pusan National Fisheries University, Pusan, 608-737, Korea)

\*\* 부산대학교 지질학과(Department of Geology, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea)

<sup>1)</sup> 미국 오레곤 대학교 Reed 교수에 의해 제작되었으며 본 연구 목적을 위해 수정하여 사용함.

내에서 일어나는 것이기 때문에 자연현상과 동일 조건의 실험을 수행하기는 어렵다. 이러한 실험적 연구방법의 단점을 극복하고 암석과 용액과의 반응에 따른 변질특성을 파악하는 방법은 암석의 화학조성과 자연에서 유사하게 조성된 용액 (지표수 및 열수)을 설정하여 열역학 데이터에 의한 수치모델링 방법을 이용하는 것이다.

본 연구는 유문암과 열수간의 반응 (열수변질작용)에 의한 유광광산의 견운모광상 성인을 규명하기 위해 열역학 데이터를 이용한 수치모델링을 수행하였으며, 그 결과를 실험적 방법의 결과와 비교하였다. 지화학 모델링 연구 결과는 유사형태의 열수계 조건에 따른 열수기원 견운모광상의 생성기구 규명뿐만 아니라 탐광을 위한 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

### 지질 모델

열수변질 작용은 열수-암석간의 반응으로서 열수는 순환과정에서 각기 다른 물리화학적 환경에 지배되어 다양한 화학적 특성의 변화를 초래하게 된다 (Meyer and Hemley, 1967). 열수변질산물 (여기서는 비금속 광상)의 형성은 온도, 압력, 암석종, 투수성의 정도, 유체의 성분 및 성분의 활동도에 따라 달라지며, 열수변질작용의 일반적 유형은 수소이온 교대반응, 금속 양이온 ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  등)의 교대 작용 및 음이온 ( $HCO_3^-$ ,  $HS^-$  등) 교대작용 등으로 분류된다 (Spycher and Reed, 1989). 변질작용에 의한 광물공생 특성은 광상형성에 따른 물리화학적 환경을 파악하고 광상형성의 변천과정을 이해하는데 중요한 단서가 되기 때문에 지질모델에 따른 열수변질작용의 특성파악은 비금속광상 성인연구에 유용하다.

경상남도 동남부의 납석광상은 화산암류 내에 분포하며 성인적으로 백악기 심성화성활동과 밀접한 연관성을 지니고 있다 (상기남, 1986). 본 연구대상인 유광광산은 양산 칼데라 연변부에 위치하며 (차문성, 1984), 모암인 유문암질 회류응회암 (灰流凝灰岩)의 분포는 칼데라의 함몰과 성인적 연관성을 갖는다 (황상구, 김상욱, 1990). 광상은 전반적으로 열수변질작용에 의한 특징을 나타내며 (정영욱, 전효택, 1989), 광화작용은 단층 및 절리 등과 같은 지질구조 규제에 의해 도입된 열수가 모암과 반응하므로써 모암내의 염기용탈과 수소이온 및 음이온 교대작용 등과 밀접한 관계를 갖는다.

Fig. 1은 열수계에서의 깊이와 화학조성상의 특징에 따른 열수변질작용을 도식화한 것으로서, 견운모 변질작용은

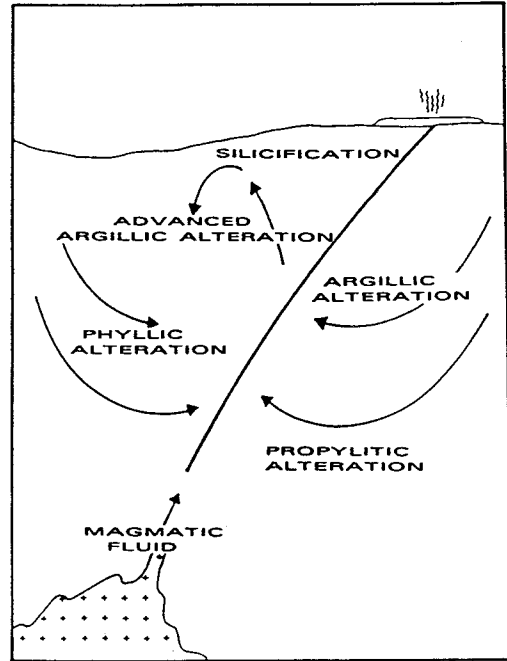


Fig. 1. Schematic model of hydrothermal alteration associated with circulating hydrothermal solution.

일반적으로 지하수가 순환과정에서 하부에 위치한 화성 암체에 의해 가열되고 부분적으로 마그마 기원의 열수와 혼합되어 조성된 용액에 의해서 이루어지며, 명반석, 납석 및 고령토를 주로 수반하는 고령토화 (argillization) 및 강고령토화 (advanced argillization) 변질작용은 지표 근처에서 조성된 강산성 유화염용액 (acid-sulfate water)에 의해 형성된다. 녹니석과 녹렴석을 수반하는 프로필리틱 변질작용은 상대적으로 낮은 열수/암석의 비와 염기이온의 첨가에 의해 형성된다.

본 연구에서는 유광 견운모광상 (sericitite)의 성인을 규명하기 위해 phyllic 변질대의 조건에서 열수-유문암의 반응을 수치모델링하였다 (유문암-열수반응 참조).

### 유광광산

#### 지질 및 광상개요

유광광산 일대는 경상누층군의 하양층군에 속하는 대양동층을 기저로 이들 퇴적암층을 분출피복 또는 관입한 유천층군의 화산암류 및 후기 백악기 불국사 심성 관입암 (이민성, 강필중, 1964)이 분포한다 (Fig. 2).

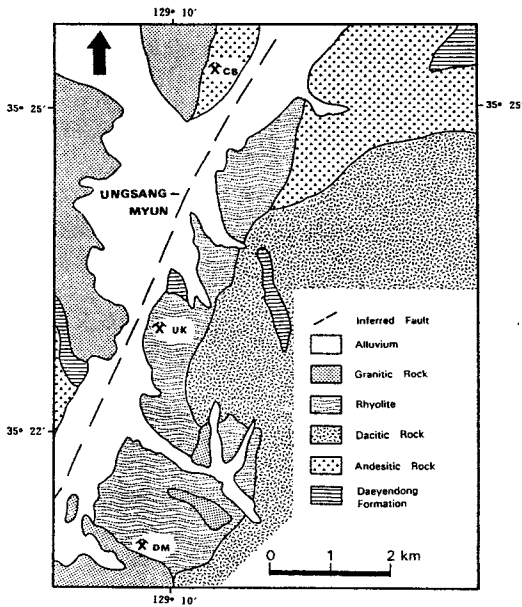


Fig. 2. Regional geological setting of the study area and containing sericitite deposits (modified from Cha, 1984). CB; Cheonbulsan Mine, UK; Yukwang Mine, and DM; Daemyeong Mine.

대양동층은 암회색 세일, 녹회색 세일 및 담녹회색의 사암으로 구성되며, 전체적으로 혼펠스화 되어 있다. 화산암은 주로 백악기 (민경덕외, 1982) 안산암류이며 소규모로 유문암류가 분포한다. 유광광산의 모암인 유문암류는 주로 회류응회암으로서 울산단층에 연하여 대체로 남북 방향으로 분포하고 칼데라 함몰과 성인적으로 관련성을 가지며 상기 안산암류를 관입한다. 본 암은 석영, 정장석 및 소량의 사장석 반정과 세립질의 석영, 정장석 석기로 구성되며, 부수광물로는 스피, 인회석, 저어콘, 황철석, 녹니석 등이 산출되며, 화강암류와의 접촉부를 따라 혼펠스화 되었다. 열수변질 작용에 의해 석기를 이루는 대부분의 정장석이 견운모화 되었으며, 2차 기원의 석영 세맥이 황철석과 수반되어 산출된다. 화강암류는 중립내지 세립질의 각섬석-흑운모 화강암으로 연령측정 결과 66~51 Ma로서 백악기말에서 고제 3 기초에 해당된다 (민경덕 외, 1982).

광상은 유문암을 모암으로하여 단층 및 절리에 의한 구조 규제를 받으며 괴상 또는 렌즈상으로 발달되며 단층면을 연하여 외측부로 갈수록 변질작용의 정도가 약해지는 양상을 갖는다. 광체는 폭 10~30 m, 연장 50~100 m 정도로서 1 km<sup>2</sup>내에 10개체에 산포되어 있다. 양질의 견

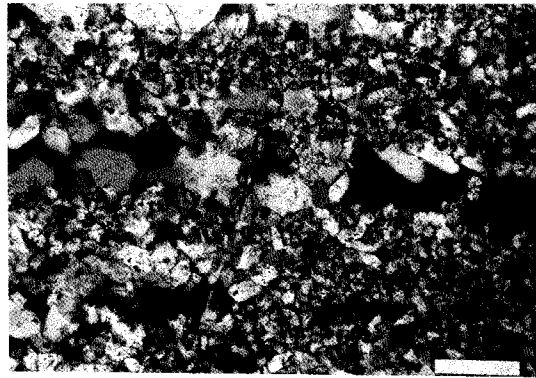


Fig. 3. Concentration of coarse grained quartz in the Uung-Napseok ore. Scale bar is 10  $\mu$ m.

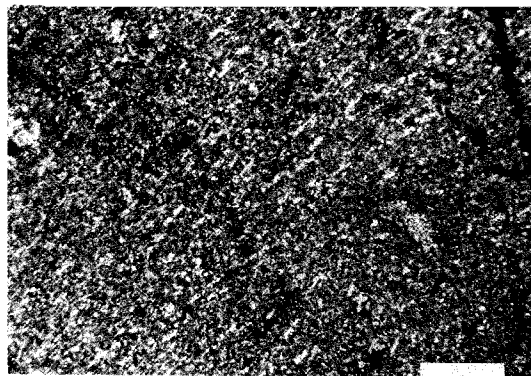
운모 광체 (sericitite)는 국부적으로 괴상의 결정질 석영 집합체 (5~10 cm)를 수반하는 특성을 나타낸다 (Fig. 3).

### 광석광물의 특징

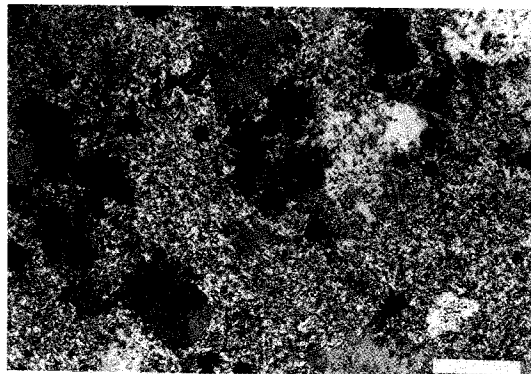
모암인 유문암은 회류응회암으로서 유리질 석기와 석영 및 장석 반정으로 구성되며, 열수변질에 의해 재결정된 석영이 방향성 있게 배열되어 나타난다. 광석은 담회색-회백색으로 위치에 따라 상이한 조성비를 갖는 석영, K-mica (Kim et al., 1990), 황철석 및 장석으로 구성된다 (Fig. 4-A, 4-B). 견운모는 섬유상의 집합체이나 미립의 산점상으로 산출되며, 2M<sub>1</sub>, 또는 1M polytype의 dioctahedral 백운모로서 2M<sub>1</sub>형이 높은 비율을 차지한다 (Kim et al., 1990). 광체와 모암의 접촉부에서는 소량의 녹니석, 녹렴석, 미사장석이 확인된다.

이상섭 (1986) 및 정영옥, 전효택 (1989)은 유광광산 모암과 변질산물인 광석의 화학조성 비교를 통하여 변질의 정도가 높은 시료에서 H<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>이 증가되며 SiO<sub>2</sub>, K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등의 성분은 감소된다고 보고하였다. Maclean and Lawrence (1991)는 유문암의 열수변질 중 석영-견운모대의 변질작용에 의한 화학종의 성분변화에 대한 연구를 통하여 견운모화 지수는 알칼리 원소종인 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O의 함량비의 변화를 초래함을 밝혔다.

Fig. 5은 유문암질 모암의 열수변질 작용에 의한 견운모화 지수를 나타내는 것으로서 K와 Na는 변질작용에 의해 상실되어 견운모 광석에서는 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O의 함량 (Wt. %)이 감소됨을 알 수 있다. K는 변질암내에서 열수통로에서부터 멀어짐에 따라 상대적인 함량이 증가 (enrich-



(A)



(B)

Fig. 4. Photomicrographs of the altered product of rhyolite. It shows different degrees of sericitization. It is composed of fine-grained quartz, sericite and pyrite (black). Scale bar is 10  $\mu$ m. A; altered rhyolite and B; sericitite.

ment)됨을 알 수 있다. 모암인 유문암과 석영-견운모 공생군을 갖는 약변질대 및 견운모-(석영)공생군의 강변질대 sericitite의 성분상의 차이는 초기 염기용출과 후기 실리카용출로 인해 점이적인 변화가 초래되었음을 보여준다. 이는 열수변질작용에 의해 모암의 실리카성분이 용출되면서 일차적으로 석영-견운모공생의 광물군을 형성하며 후기에 다량의 실리카가 빠져나가면서 sericitite로 변질되고 용출된 실리카에 의해 피상의 석영 집합체를 형성하였음을 시사한다 (Fig. 3).

### 열수-유문암변 모델링

#### 수치모델링 절차

지각 내에서 진행되는 지구화학적 과정은 광물, 기체

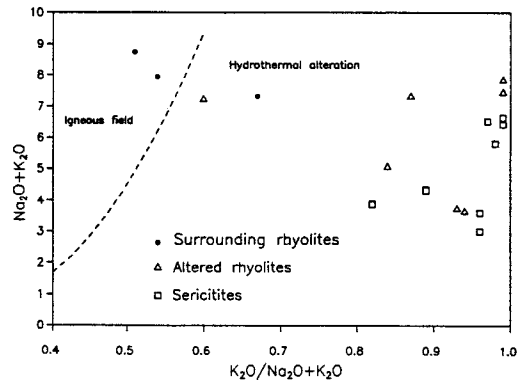


Fig. 5.  $K_2O/(K_2O+Na_2O)$  sericitization index diagram (modified after Hughes, 1972).

및 수용액간의 상호반응이기 때문에 온도, 압력, 화학조성의 변화에 따른 불균질한 조성을 갖는 광물, 기체 및 수용액간의 평형특성을 열역학데이터를 이용하여 계산함으로써 지각내의 반응특성을 이해할 수 있다 (Spycher and Reed, 1991). 즉 온도, 압력, 화학조성을 임의의 간격으로 평형계산을 실시하여 계산의 결과를 연결해석함으로써 물리 화학적조건의 변화에 따른 반응특성을 알 수 있다. 본 연구에서는 열역학적 모델링을 위해 프로그램 SOLVEQ와 CHILLER 및 SOLTHERM data file (Reed, 1989)를 본 연구에 적합하도록 수정하여 사용하였다. SOLVEQ와 CHILLER 프로그램에서 SOLVEQ는 수용액상만이 존재하는 다성분계의 평형계산을, CHILLER는 고체상, 기체상 및 수용액상이 공존하는 다성분계의 평형계산을 위해서 이용되었다. 계산방법은 다음과 같다.

프로그램은 관심의 대상이 되는 열수계를 일차적으로 프로그램에서 미리 정해진 성분 (Components)으로 나타낼 것을 요구한다. 각 성분은 계의 성분을 대표할 수 있는 최소수의 이온들과 분자로 이루어지며 하나의 성분이 다른 성분에 의해 표현될 수 있어서는 안된다. 현재 사용되는 성분은 37종으로서 주로  $H^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HS^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{3+}$ ,  $Na^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cu^+$ ,  $Zn^{2+}$  등의 금속 및 비금속 이온과  $SiO_2$ ,  $H_2O$  등의 전하를 띠지 않는 분자로 구성되어 있다. 그 외 화학종은 이 성분을 결합하여 표현된다. 프로그램상에서 성분간의 결합에 의해 생성될 수 있는 2차 생성물 (Derived species)은 수용액상에 존재할 수 있는 이온 (Ion) 168종, 광물 159종 및 기체 12종이다.

계산방식은 성분의 종류와 양 및 계산조건이 주어지면

음이온종과 양이온종의 전기적 부하를 계산하여 음이온종과 양이온종의 총부하의 값이 일치하도록 성분의 양 및 종류를 조정한다. 이어서 질량작용방정식 (Mass-action equation) 및 질량보존방정식 (Mass-balance equation)을 이용하여 주어진 조건 (온도, 압력, 열수계의 제성분의 농도 등)에서 열역학적으로 안정한 이온 및 2차 생성물의 양을 계산하였다. 이때 필요한 각종 열역학 데이터 (Spycher and Reed, 1991)는 미리 작성하여 입력하였다. 고용체 광물의 경우는 단성분 광물종의 화학포텐셜 값을 이용하였으며 이상혼합 (ideal mixing)에 의한 단성분 함량비를 표시하였다.

성분종  $i$ 에 의해  $j$ 라는 2차 생성물이 나타날 경우 성분종  $i$ 와 생성물  $j$  사이에는 다음과 같은 질량균형 방정식이 성립한다.

$$K_j = \frac{\prod_i m_i^{v_{ij}} \gamma_i^{v_{ij}}}{m_j \gamma_j} \quad (1)$$

여기서  $K_j$  : 평형상수

$m_i$  : 성분종( $i$ )의 평형상태에서의 몰랄농도

$m_j$  : 생성물( $j$ )의 평형상태에서의 몰랄농도

$\gamma_i$  : 성분종( $i$ )의 활동도 계수

$\gamma_j$  : 생성물( $j$ )의 활동도 계수

$v_{ij}$  : 생성물( $j$ ) 1몰에 포함되는 성분종( $i$ )의 몰수

반응에서 고체 광물종이 생성되는 경우, 방정식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$k_k = \prod_i m_i^{v_{ik}} \gamma_i^{v_{ik}} / a_k \quad (2)$$

$K_k$  : 광물( $k$ )의 평형상수 (성분종으로부터 생성될 때)

$a_k$  : 광물( $k$ )의 활동도

$v_{ik}$  : 생성물( $k$ ) 1몰에 포함되는 성분종( $i$ )의 몰수

주어진 열수계내에서 각각의 성분종과 생성물은 반응 전후를 통해 전체 질량이 보존되어야 하므로 성분종 ( $i$ )에 대해 다음과 같은 질량보존방정식이 성립한다.

$$M_i^f = n_w [m_i + \sum_j v_{ij} m_j] + \sum_k v_{ik} n_k \quad (3)$$

여기서  $M_i^f$  : 성분종( $i$ )의 총 몰수

$n_w$  : 용매로서 작용하는 물의 무게 (kg)

$n_k$  : 광물( $k$ )의 몰수

방정식 (1)을 이용하여 방정식 (3)을 변형하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$M_i^f = n_w [m_i + \sum_j \frac{v_{ij} \prod m_j^{v_{ij}} \gamma_j^{v_{ij}}}{\gamma_i K_j} + \sum_k v_{ik} n_k] \quad (4)$$

주어진 열수계가 평형상태에서  $N_i$ 종의 성분종과  $N_k$ 종의 광물을 포함하고 있다면 (4)번 형태의 방정식이  $N_i$ 개, (2)번 형태의 방정식이  $N_k$ 개 성립한다. 이 연립방정식은 각 성분종의 주어진 초기농도를 이용하여 Newton-Raphson 방법으로 최적화하여 평형상태에서 성분종의 농도를 계산한다. 일단 성분종의 평형상태에서의 농도가 알려지면 방정식 (1)을 이용하여 생성물의 농도를 계산할 수 있다.

### 결과 및 토의

유문암-열수간의 반응에 의한 열수변질작용의 특성을 파악하기 위하여 다성분 평형 계산을 프로그램 CHILLER를 이용하여 실시하였다. 이 때의 조건은 유광납석 광상내에 괴상으로 산출되는 석영의 유체포유물 실험에 의해 산출된 온도인 300°C 와 500기압하에서 수행하였으며, 계산은 열수용액 (Table 2)에 유광광산지역 유문암 (Table 1)을 적정시키고 매 적정반응 후 완전한 평형상태를 유지하면서 진행하였다. 수치반응에서 고용체 광물종의 화학포텐셜치는 단성분 (end-member) 광물종의 값을 이용하였으며, 이상혼합 (ideal mixing)에 의한 단성분 광물종의 함량비로 표시하였다.

계산결과는 Fig. 6A, 6B, 6C에서 열수와 유문암의 반응비 (Water/Rock)에 대비한 상대적인 광물함량, 열역학종 (이온종) 및 각 성분의 molality로 나타나 있다. Fig. 6A, 6B, 6C의 좌측에서 우측으로 갈수록 Water/Rock비가 감소되며, 이는 단층면과 같은 열수통로를 연하여 모암쪽으로 멀어질 때의 열수변질양상과 대비된다. 또한 고용체광물종은 단성분 광물종의 함량으로 표시하였다 (녹니석의

Table 1. Chemical composition of reactant rhyolite (wt. %).

Component	Amounts
SiO <sub>2</sub>	74.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.36
FeO	2.68
MgO	0.39
CaO	1.57
Na <sub>2</sub> O	4.10
K <sub>2</sub> O	3.30
Total	99.59

Table 2. Compositional variation (total moles) of reactant water on rock/water ratios.

W/R ratio	1,143,000	12,875	3,430	1,028	205	103
Grams rock	0.0009	0.0790	0.2999	0.9999	4.9999	9.9999
pH	4.350	4.387	5.402	5.592	5.640	5.670
Cl <sup>-</sup>	3.6370E-01	3.6370E-01	3.6390E-01	3.6390E-01	3.6390E-01	3.6520E-01
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	8.7520E-13	1.0200E-12	5.6560E-11	1.4110E-10	1.6680E-10	1.0760E-10
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.4700E-06	5.9040E-06	6.0760E-05	9.3850E-05	1.0470E-04	1.1170E-04
HS <sup>-</sup>	2.2400E-06	2.4170E-06	1.8660E-05	2.9310E-05	3.4790E-05	4.0840E-05
SiO <sub>2</sub>	8.3870E-03	8.3870E-03	8.3870E-03	8.3870E-03	8.3870E-03	8.3830E-03
Al <sup>3+</sup>	2.1280E-11	1.6490E-11	6.8180E-15	1.5940E-15	1.1420E-15	9.3760E-16
Ca <sup>2+</sup>	3.3180E-03	3.3180E-03	3.3180E-03	3.3250E-03	3.3470E-03	3.0520E-03
Mg <sup>2+</sup>	9.9570E-06	1.0130E-05	8.9230E-06	4.0430E-06	3.3180E-06	2.9190E-06
Fe <sup>2+</sup>	6.1270E-06	6.3320E-06	1.3170E-06	5.3030E-07	3.8740E-07	3.3390E-07
K <sup>+</sup>	4.5940E-02	4.5940E-02	4.5900E-02	4.5100E-02	4.0350E-02	3.7730E-02
Na <sup>+</sup>	2.9940E-01	2.9940E-01	2.9970E-01	3.0050E-01	3.0500E-01	3.1060E-01

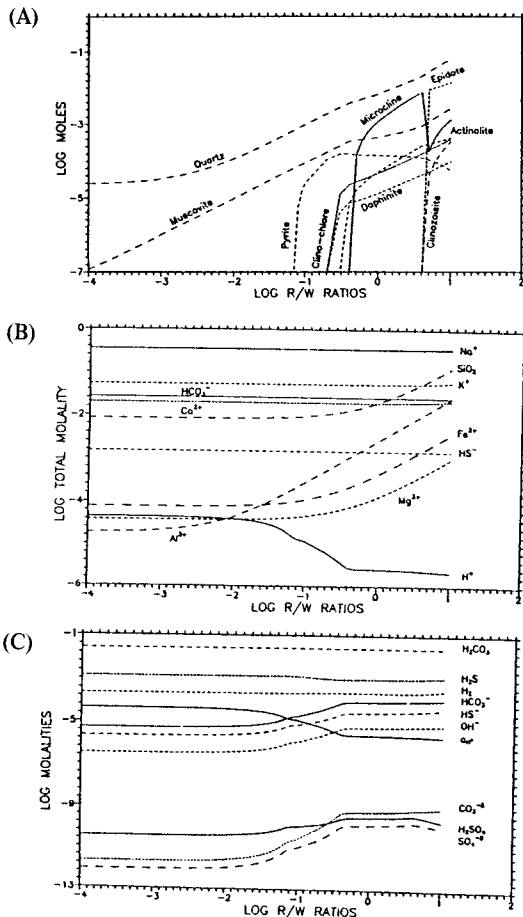
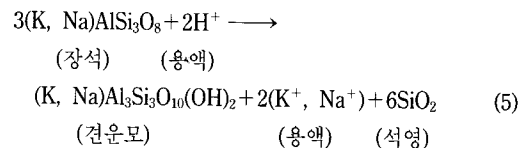


Fig. 6. Results of calculated hydrothermal water-rhyolite interaction at 300°C. Abundance of alteration product (A), total molality of aqueous component species (B), and molalities of individual ions of component species and activity of H<sup>+</sup> (C) as a function of water/rock ratio.

경우 daphnite와 clinocllore이며 녹염석은 clinzoisite와 epidote로 표시됨). 그러나 본 연구에서는 열수변질에 의해 생성된 고용체 광물의 화학조성과는 비교되지 않았다.

석영은 암석으로부터 Si가 용탈됨에 따라 정출이 시작되며, 물/암석비의 감소에 따라 계속적으로 견운모, 황철석, 녹니석 (Fe-녹니석과 Mg-녹니석의 고용체), 미사장석 및 녹염석 순으로 침전된다 (Fig. 6A). pH의 변화는 용액 내의 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>S의 해리에 의한 H<sup>+</sup> 농도에 지배되나 pH buffer 광물인 견운모의 침전에 따라 변화한다. 열수와 암석 간의 반응과정에서 용액상 (aqueous phase)의 pH는 낮은 열수/암석비의 조건에서 견운모의 침전에 따라 약간 감소되며 견운모의 침전이 줄어들고 미사장석이 생성됨에 따라 증가한다. 또한 구성 성분종의 총농도는 열수와 유문암간의 반응에 의해 전반적으로 볼 때 Ca, Mg, Fe, K, Na, Al, SiO<sub>2</sub>는 증가됨에 따라 규산염 광물의 정출이 수반된다.

견운모는 열수와 유문암의 반응시 알카리 이온의 해리와 수소 이온의 교대작용에 의해 생성되었으며, 다음과 같은 반응식으로 표현된다.

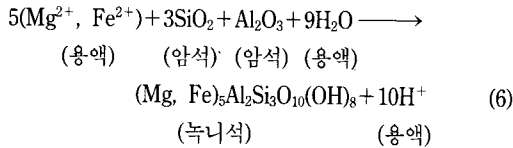


이때 pH는 장석-운모-석영 평형에 의해 buffer된다.

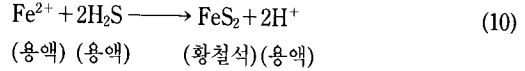
녹니석은 열수-유문암의 반응과정에서 초기의 낮은 pH조건에서 해리된 Fe<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>이온이 후기에 열수/유문암비가 낮아진 상황에서 암석 내의 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 결합함으로써 침전되었다.

Table 3. Distribution of alteration minerals (in wt. %) at various ratios of hydrothermal solution to rhyolite.

W/R ratio	1,143,000	12,875	3,430	1,028	205	103
Grams rock	0.0009	0.0799	0.2999	0.9999	4.9999	9.9999
muscovite	15.37	33.94	38.23	17.49	9.05	10.60
quartz	84.63	66.06	61.77	40.08	33.17	38.02
pyrite	0	0	0	1.75	0.26	0.07
clinocllore	0	0	0	1.30	1.11	1.08
daphinite	0	0	0	0.48	0.37	0.35
microcline	0	0	0	33.81	48.19	37.86
actinolite	0	0	0	4.98	5.69	4.07
clinozoisite	0	0	0	0	0.39	1.51
epidote	0	0	0	0	1.84	6.43
Total	100	100	100	100	100	100

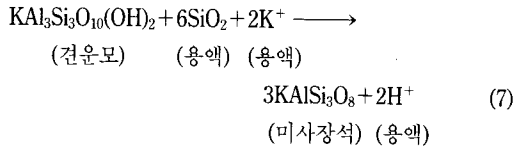


감소되었다.



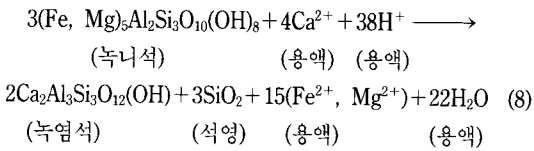
미사장석은 H<sup>+</sup> 이온의 활동도가 감소 (pH 증가)되면서 열수반응에 의해 해리된 SiO<sub>2</sub>가 견운모와 반응하여 침전되었다.

### 결론

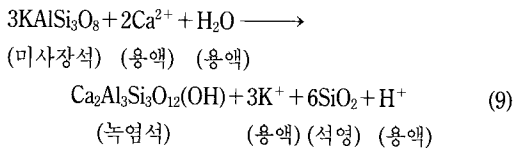


열수-유문암반응 (열수변질작용)에 의한 유광광산의 성인을 규명하기 위하여 실제 반응 (natural hydrothermal alteration) 산물에 대한 기재적 연구 결과와 열역학 데이터를 이용한 수치열수반응 (numerical hydrothermal alteration) 결과를 요약하면 다음과 같다.

녹염석은 후기 열수/유문암비가 낮아지면서 용액내의 Ca<sup>2+</sup>의 농도가 증가되면서 녹니석, 미사장석을 부분적으로 대체하여 침전되었다.



1. 유광광산의 sericitite는 주변암과 변질체에 대한 알카리 원소종의 농도비로 볼 때 유문암-열수반응에 의한 열수변질 산물로서 생성되었으며, 견운모-석영집합체 (Sericities)의 형성은 H<sup>+</sup>의 교대작용과 밀접한 관계를 갖는다.



2. 열수-유문암반응의 모델링 결과, pH는 초기에는 미세하게 감소하나 다량의 견운모 생성에 따라 후기에는 증가되며, 전체 Ca, Mg, Fe, Al, Si의 함량은 증가된다.

유화광물인 황철석은 타 성분원소의 소모에 따라 전체 용액내의 유황종 (H<sub>2</sub>S)의 농도가 상대적으로 증가되면서 침전되며, 낮은 열수/유문암비 조건에 따라 Fe녹니석의 침전으로 Fe<sup>2+</sup>의 농도가 감소되면서 후기에는 정출량이

3. 수치반응 모델링의 결과 열수/유문암 비의 감소와 pH의 증가에 따라 석영, 견운모, 황철석, 녹니석, 미사장석 및 녹염석 순으로 침전이 되었으며, 이는 야의 산출상태와 실험결과와도 잘 일치한다.

4. 주요 수반 유화광물종인 황철석은 모암에서 해리된 Fe<sup>2+</sup> 성분이 증가됨에 따라 열수용액 내의 유황종인 H<sub>2</sub>S와 결합하여 침전되었으며, Fe-녹니석 (daphinite)의 침전으로 인한 Fe<sup>2+</sup>의 활동도 감소로 인하여 정출함량이 감소된다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 후원 전략광물자원 연구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 김규봉 (1970) 전남일대 명반석광상 조사보고서, 지질광상조사연구보고. 국립지질조사소, 제12호, p. 171-235.
- 문희수 (1975) 전남 명반석 광상의 성인에 관한 연구. 광산지질, 8권, p. 283-302.
- 문희수, 정승우, 송윤구, 박영석 (1991) 전남 해남지역 해남남석광상의 변질작용 및 생성환경. 광산지질, 19권, p. 83-96.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조 적용성 연구. 광산지질, 15권, p. 123-154.
- 상기남 (1986) 한반도 남부지역의 고령토-남석광상 생성기. 광산지질, 19권, p. 43-52.
- 상기남, 김철 (1964) 점토 및 점토광물-동태남석에 대하여~, 지질광상조사연구보고. 국립지질조사소, 제7호, p. 157-168.
- 이민성, 강필중 (1964) 양산지질도폭(Scale 1:50,000). 지질조사소.
- 이장섭 (1986) 경남 양산 유광남석광상의 성인에 관한 연구. 부산대학교 석사학위논문, p. 86.
- 정영욱, 전효택 (1989) 경남 양산 및 밀양 광상의 지구화학적 연구. 광산지질, 24권, p. 341-354.
- 차문성 (1984) 양산군 대운산 함물체, 부산대학교 사범대학 논문집, 제8집, p. 265-276.
- 황상구, 김상욱 (1990) 밀양, 양산간의 칼데라를 동반한 규질 화류응회암. 지질학회지, 26권, p. 329-340.
- Hughes, C.J. (1972) Spillites, Keratophyres and the igneous spectrum. Geol. Mag., v. 109, p. 513-527.
- Kim, S.J., Kim, Y.K. and Noh, J.H. (1990) Mineralogy and genesis of hydrothermal deposits in southeastern part of Korea Peninsula. (1) "Napseok" deposits in Yangsan area. Jour. Miner. Soc. Korea, v. 3, p. 44-57.
- Meyer, C and Hemley J.J. (1967) Wall rock alteration, In Barnes, H.L., ed., Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, New York, Holt Rinehart and Wilson, Inco, v. 204, p. 183-218.
- Maclean W.H. and Lawrence D.H. (1991) Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne Mine, Noranda, Quebec. Econ. Geol., v. 86, p. 506-528.
- Reed, M. (1982) Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gasses and an aqueous phase, Geochim. Cosmochim. Acta, v. 46, p. 513-528.
- Spycher, N.F. and Reed, M.H. (1989) Evolution of a Broadlands-type epithermal ore fluid along alternative P-T paths: Implications for the transport and deposition of base, precious, and volatile metals. Econ. Geol., v. 84, p. 328-359.
- Spycher, N.F. and Reed, M.H. (1991) SOLTHERM data base for program SOLVEQ, MINSOLV, CHILLER, GEOCAL and KCAL (Personal Communication).

1991년 11월 8일 원고접수