

중부옥천변성대의 활석광화작용에 관한 연구 (II) : 풍전활석광상을 중심으로

박희인* · 이인성* · 허순도* · 신동복*

Talc Mineralization in the Middle Ogcheon Metamorphic Belt (II) : Poongjeon Talc Deposit

Hee-In Park*, In Sung Lee*, Soon Do Hur* and Dong Bok Shin*

ABSTRACT : Poongjeon talc deposits is emplaced in dolomite and dolomitic limestone of the Cambro-Ordovician Samsaesan Formation. Ore in Poongjeon is low grade talc and the deposit has been known as the contact metasomatic or hydrothermal replacement type related to the intrusion of late Cretaceous granite in this area. X-ray diffraction, electron microprobe analysis, fluid inclusion and stable isotope analysis were utilized to examine the mineralogy of the ore and the origin of the ore fluid. The ore from Poongjeon mine mainly consists of talc and tremolite with minor amount of illite, vermiculite, smectite, and chlorite-vermiculite mixed layer. Occurrence of ore body indicates that the talc-tremolite ore was formed through the replacement by the SiO₂-rich hydrothermal fluid along the bedding and dike boundaries, or contact of amphibolite and basic dike with carbonate rocks. The temperature and pressure of the ore forming fluids at the time of the talc mineralization were estimated as 350°C and 400 bar, respectively, based on the heating and freezing data of the fluid inclusions in quartz from talc-tremolite veins. During the talc-tremolite formation, fluids were divided into CO₂-enriched fluid and CO₂-poor fluid from CO₂ immiscibility (or effervescence). Oxygen isotope values ($\delta^{18}\text{O}$) of the talc-tremolite fall within a range between 12.2 and 12.9‰. Hydrogen isotope values (δD) of the ore range from -60 to -85‰ and H₂O contents range from 2.0 to 3.4 wt.%. $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of talc ore indicate that the hydrothermal fluid involved in talc-tremolite formation was of igneous origin. Oxygen and hydrogen isotopic exchange between talc ore and the surface water was negligible after talc-tremolite ore formation.

서 언

충북 제천군 수산면과 단양군 단양읍 일원에는 캄브로-오르도비스기의 삼태산층에 속하는 돌로마이트와 돌로마이트질 석회암을 모암으로 배태된 활석광상이 밀집 분포한다. 이 지역의 활석광상은 향산리 돌로마이트층에 배태된 거의 순수한 활석이 산출되는 동양활석 광상으로 대표되는 충주 일원의 활석광상과는 광상의 산출상태와 광석의 광물조성과 조직이 판이하다. 이 지역의 광상에서 산출되는 광석은 공통적으로 미립의 투각섬석과 활석으로 구성되고, 엽리가 발달되어 있어 투각섬석-활석 편암 같아 보여 국내에서 개발된 활석광상 중에서는 광석의 광물 조성이나 조직에 있어 유례를 찾아 볼 수 없는 특징을 갖

는다. 이 지역의 광상이 개발된 것은 활석이 농약의 보충제로서 국내 수요가 컸던 1960년대 말에서 1980년대까지 사이에 저질 활석광으로 활발히 개발되었으나 현재 개발되고 있는 광상은 하나도 없다. 이 지역의 투각섬석-활석 광상은 모두 모암인 돌로마이트-돌로마이트질 석회암의 층리면에 따라 배태되어 있고 광체의 상반이나 하반에 각섬암과 접하는 공통적인 특징이 있다고 한다 (김규봉, 1972).

김규봉 (1972)은 이 지역의 광상을 황강리형 광상이라 부르고 광상들이 모두 무암사 화강암체 가까이에 부존하는 것으로 보아 이 화강암의 관입에 수반된 열수교대작용으로 생성된 광상이라고 하였다. Reedman 등 (1973)도 이 유형의 광상들이 화강암체에 근접한 곳에 분포하는 것으로 보아 접촉변성광상이라고 보고한 바 있다.

풍전활석광상은 제천군 수산면 하천리에 위치하며 이

* 서울대학교 지질과학과 (Department of Geological Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

유형의 광상 중에서 가장 크게 개발된 광상의 하나였으나 충주댐 건설로 지형상 저지대는 충주호에 수몰되어 있다.

이 연구는 풍전활석광상 주변의 지질을 정밀 조사하여 광상의 산출상태를 검토하고 소위 활석광석의 광물조성, 조직, 유체포유물과 안정동위원소 등을 분석하여 이 유형의 활석광상의 생성환경을 밝히고 광화유체의 특성을 고찰하여 본 것이다.

지 질

풍전활석광상 주변의 지질은 조선누층군의 삼태산층(三台山層)에 속하는 퇴적암류와 이를 관입한 각섬암, 무암사화강암, 염기성 암맥 등으로 구성되어 있다 (Fig. 1).

이 지역의 지질에 대하여는 황강리 도폭 (이민성, 박봉순, 1965)이 발간되어 있고, Reedman 등 (1973)에 의하여 보고된 바 있다.

삼태산층을 구성하는 암석은 하부로부터 상부로 이질

천매암, 판상석회암, 슬레이트, 돌로마이트-돌로마이트질 석회암의 순으로 되어 있다.

각섬암은 대체로 삼태산층의 층리면을 끊고 관입한 피상 암체와 삼태산층의 층리면에 따라 관입한 층상 암체가 있다. 피상암체는 암체의 연변부에서 엽리가 뚜렷하고 암체 중심부에서는 미약하나 층상암체에서는 엽리의 발달이 뚜렷하다.

화강암은 중립질의 흑운모화강암으로서 광상 동부에 NW-SE방향으로 길쭉하게 암주상으로 관입한 무암사화강암체에 속한다. 무암사화강암의 Rb-Sr 전암연령은 109.9 ± 2.5 Ma이고 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 0.7165 ± 0.001 이다 (진명식 등, 1992). 무암사화강암체와의 관입접촉부의 삼태산층은 스킨화되어 있거나 재결정되어 있다. 광화대 내에는 주향이 N50°W에 70~80°SW로 경사하는 단층들이 발달하여 shattered zone이 형성되어 있다.

삼태산층의 주향은 N45°W~N20°E에 20~30°SW 또는 NW로 경사하며 파상습곡으로 굽이치고 있다.

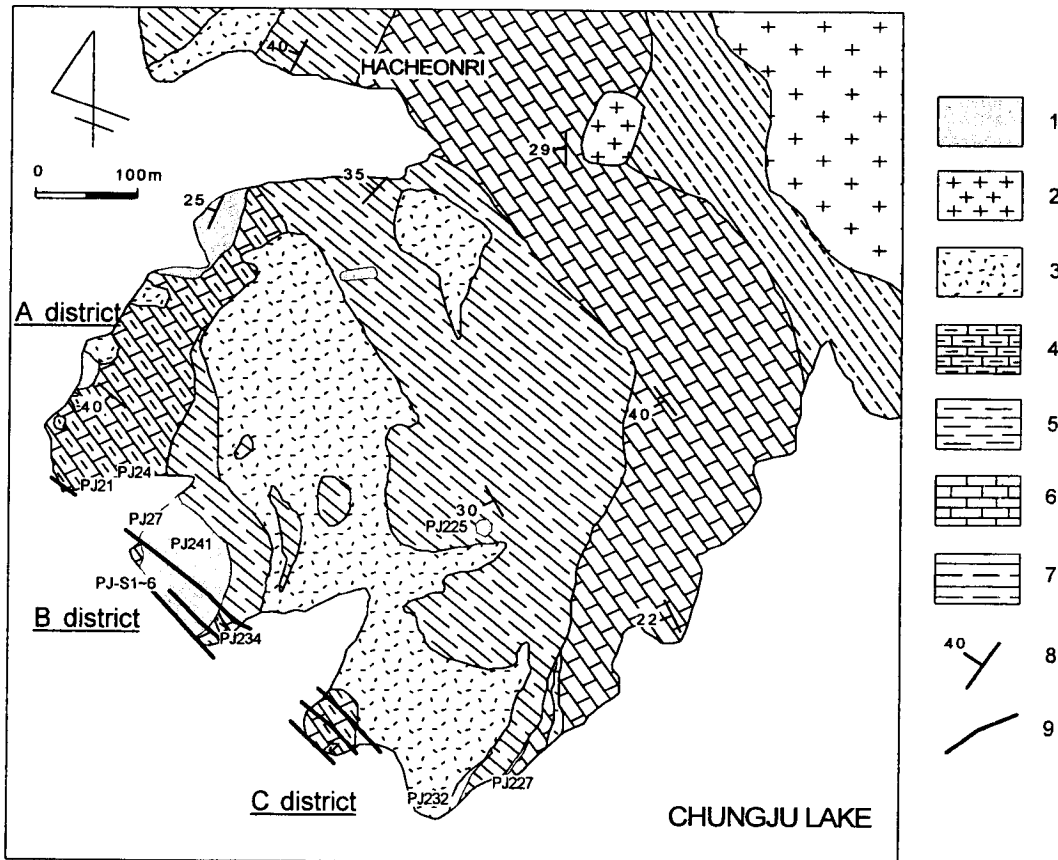


Fig. 1. Geologic map and sample location of Poongjeon deposit. 1; Tremolite-talc ores, 2; Granite, 3; Amphibolite, 4; Dolomite & Dolomitic limestone, 5; Slate, 6; Platy limestone, 7; Pelitic rocks, 8; Strike & Dip, 9; Fault.

광 상

광상부근의 지형은 충주호쪽으로 3개의 능선이 발달하고 있어 야구 글꼴모양을 하고 있다. 앞으로 설명의 편의상, 북쪽능선을 A구, 중앙과 남쪽 능선을 각각 B구와 C구라 부르기로 한다.

투각섬석-활석 광화대는 충주호 복안을 따라 A구에서 C구까지 NW-SE방향으로 발달한 shattered zone을 중심으로 연장 700 m, 폭 약 200 m 범위 내에 발달하고 있다.

투각섬석-활석광상은 산출상태로 보아 1) 이 지역의 삼태산층의 상위층원인 돌로마이트-돌로마이트질 석회암과 하위의 슬레이트 층원과의 경계면을 따라 돌로마이트-돌로마이트질 석회암을 교대하여 층상으로 배태된 것 2) 각섬암과 돌로마이트나 돌로마이트질 석회암 또는 슬레이트와의 경계를 따라 양쪽의 암석을 교대하여 배태된 것 3) 단층 등의 열극이나 4) 염기성 암맥을 교대하여 맥상으로 배태된 것 등으로 나뉘어진다.

풍전광상의 투각섬석-활석광상의 산출상태를 정리하면 Table 1과 같다.

김규봉 (1972)은 풍전광상의 모든 광체는 돌로마이트나 돌로마이트질 석회암 내에 층리면에 따라 배태되는 것으로 보고하고 있으나 Table 1에서와 같이 광체 배태를 규제하는 구조는 층리면뿐만 아니라 단층 등의 열극이나 화성암체와의 경계에 따라 배태되어 있음을 볼 수 있다. 투각섬석-활석광상은 광상의 모양이 돌로마이트나 돌로마이트질 석회암뿐만 아니라, 각섬석, 슬레이트와 염기성 맥암까지 교대하고 배태되어 있어 광상의 모양이 다양함을 알 수 있다.

풍전광상에서 과거에 개발된 주요 광체 중 규모 면에서 가장 큰 대표적인 광체는 B구의 슬레이트와 접하는 돌로마이트와 돌로마이트질 석회암의 층리면을 따라 층상교대한 광체로서 연장이 약 180 m에 두께는 최고 20 m나 된다. 이 광체의 주향과 경사는 지형의 사면과 비슷하며 노천채굴로 개발되어 있다.

Fig. 2는 C구의 호안에 노출된 슬레이트와 석회암과의

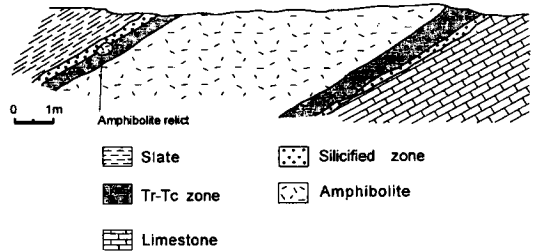


Fig. 2. Sketch of tremolite-talc occurrence along contact between amphibolite and slate or limestone.

경계에 따라 판입한 폭 4 m의 각섬암맥의 상·하반에 형성된 투각섬석-활석대의 두께는 각각 40 cm이고 이들 투각섬석-활석대와 상하반의 슬레이트와 석회암사이에는 10~15 cm 두께의 규화대가 발달되어 있다. 각섬암맥 상반쪽의 투각섬석-활석대와 규화대 경계에는 각섬암의 압편이 잔류물로 남아있어 투각섬석-활석대의 원암이 각섬암이었음을 가리키고 있다. 열극에 따라 형성된 투각섬석-활석맥에는 불규칙한 모양을 갖는 유백색 석영맥이 단속적으로 발달한다.

이상에서 언급한 바와 같이 투각섬석-활석광석의 산출상태로 보아 투각섬석-활석광체는 지층의 층리면이나 암맥의 맥벽 또는 단층 등의 열극을 따라 이동하여 온 SiO₂가 풍부한 유체에 의한 교대작용으로 형성된 것으로 생각된다.

광석의 광물조성

풍전 활석 광상은 모양의 종류에 따라 광물의 조성이 조금씩 달라진다. X선 회절 분석과 편광 현미경 관찰에 의하면 활석 광상의 주요 구성 광물은 투각섬석, 금은모, 석영, 칼리노클로어, 활석, 일라이트, 버미큐라이트, 녹니석, 버미큐라이트-녹니석 혼합 층상 광물 및 스멕타이트 등이 산출되고 소량의 티탄 철석이 포함되어 있다. 점토 광물은 현탁액 중에서 일정량을 취하여 방향성 시료를 만든 다음, 각 시료에 대해 Na-포화, Li-포화, 에틸렌 글리

Table 1. Geologic structure related to ore localization, host rock and morphology of ore body in Poongjeon deposit.

| Geologic structures controlling Tr-Tc ore loci | Host rock | Morphology of Tr-Tc orebody | Location |
|--|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| 1) Bedding | laminated dol.-ls., dol. | Lenticular, blanket | A, B, C |
| 2) Contact between Amph. and Sed.rock | dol.-ls., dol., sl. | Blanket, lenticular | A, B, C |
| 3) Fracture | dol.-ls., dol., Amph. | Steeply dipping vein | A, B, C |
| 4) Dike | basic dike rock & wall rock | Irregular vein | A district |
| 5) Combination of 1), 2), 3), 4) | | | |

Abbreviation: Tr; tremolite, Tc; talc, Amph; amphibolite, Sed. rock; sedimentary rock, dol.-ls; dolomitic limestone, dol.; dolomite

콜, 글리세롤 처리 및 110°C, 220°C, 320°C 및 550°C 등의 가열 실험 등을 통하여 감정하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 B지구의 각섬암과 돌로마이트-돌로마이트질 석회암과의 접촉부에 형성된 투각섬석-활석광체를 하반의 각섬암에서 상반쪽으로 광물조성의 변화양상을 검토하여 본 결과를 나타낸 것이다.

광체 하반의 괴상의 각섬암 (Fig. 3A)은 대체로 양기석, 사장석, 클리노클로어, 금운모 등의 광물 조성을 보인다 (Fig. 4A). 괴상의 각섬암과 접촉하여 나오는 엽상의 각섬암 (Fig. 3B)은 쪼개짐이 아주 잘 발달하고, 양기석, 사장석, 클리노클로어와 금운모 이외에 소량의 방해석이 포함되어 있다 (Fig. 4B). 엽상 각섬암의 접촉부에는 투각섬석으로만 되어 있는 치밀한 박층이 약 2 cm 두께로 산출된다 (Fig. 4C, Fig. 3C). 이 치밀한 투각섬석 박층의 상위부는 투각섬석 이외에 소량의 금운모, 버미쿠라이트, 녹니석과 버미쿠라이트-녹니석 혼합 층상 광물 등이 섞여 있어서, 비교적 연한 투각섬석대를 형성하고 있다 (Fig. 4D, Fig. 3D). 이들 투각섬석대 상반쪽에는 미립의 석영으로 구성된 엽층이 수개조 포함된 규화대가 발달한다 (Fig. 3E, F). 이 규화대의 하반쪽에는 활석이 비교적 많이 산출되는 활석대가 있고 (Fig. 4E) 규화대의 상반쪽에는 투각섬석이 활석보다 많이 산출하는 대가 있다 (Fig. 4F). 이 규화대에는 버미쿠라이트, 버미쿠라이트-녹니석 혼합 층상 광물 및 일라이트 등이 비교적 많이 함유된 것이 특징이다. 이들 규화대의 상반부에는 풍전 활석 광상에서 흔하게 나오는 파상 습곡 형태의 활석 광체가 있고, 이 암층은 여러 번의 변형 작용을 받은 흔적이, 암석 표면에 다양한 굴곡으로 남아 있는 것이 특징이다 (Fig. 3G). 이 암석은 야외에서 연한 미색 내지 백색을 보이며, 활석, 투각섬석, 석영, 일라이트, 버미쿠라이트 등으로 구성되어 있다 (Fig. 4G).

활석 광체 중에는 조립질 클리노클로어의 집합체가 부분적으로 농집되어 있는 경우가 많으며, 이 클리노클로어를 함유한 광체는, 전체적으로는 활석이 많으며, 투명한 버미쿠라이트가 활석 표면에 얇은 판상으로 덮혀 있기 때문에 야외에서는 비늘처럼 반짝이는 것이 특징이다.

유체포유물

유체포유물에 대한 연구는 열극을 따라 형성된 투각섬석-활석맥에서 단속적으로 발달한 불규칙한 모양의 유백색 석영맥을 대상으로 하였다.

유체포유물을 관찰하기 위해 두께 약 0.1 mm 정도의 양면 연마편을 제작하였으며, 가열 및 냉각실험은 서울대학

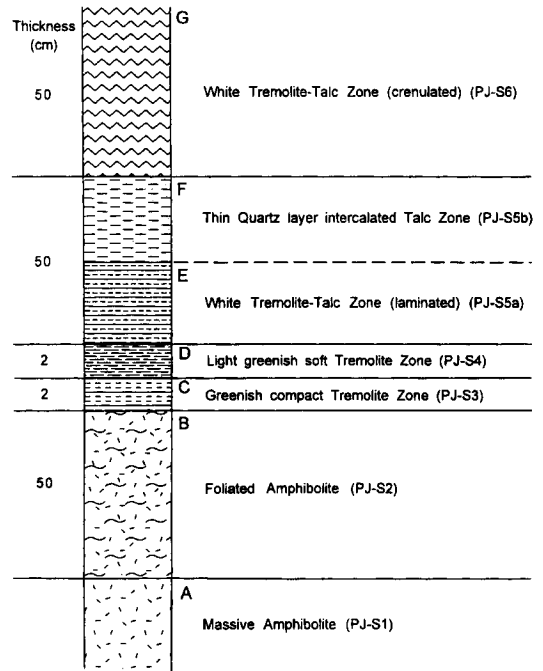


Fig. 3. Columnar section of the tremolite-talc ore.

교 지질학과와의 USGS-type Freezing/ Heating stage를 이용하여 실시하였다. 염농도, 유체의 밀도 등의 자료는 Brown (1989)의 컴퓨터 프로그램을 사용하여 계산하였고, CO₂상 (相)의 물비는 Schwartz (1989)가 제안한 방법으로 구하였다.

석영 내에서 관찰되는 유체포유물은 Roedder (1984)가 제시한 기준에 따라 초생, 의2차 및 2차 포유물로 구분하였으며, 가열 및 냉각 실험은 초생 및 의2차 포유물에 대하여 실시하였다. 유체포유물의 조성형은 상온 (약 20°C)에서 유체포유물내에 존재하는 상 (相)의 종류와 충전도에 따라 다음과 같이 분류하였다.

I형 포유물; 액상(液相)과 기상(氣相)으로 구성되며 액상의 충전도가 60~80% 정도되는 액체포유물로서, II형 포유물과 함께 산출된다. 크기는 5~10μm의 것이 대부분이며, 불규칙한 모양의 것들이 많이 산출된다. 냉각실험시 결빙된 물의 녹는 온도는 -8.5~-15.1°C로서 NaCl 상당염농도로 환산하면 12.3~18.7 wt.% (평균: 16 wt.%)에 해당한다. 가열실험시 I형 포유물은 모두 액상으로 균일화되며 균일화온도는 318~374°C (평균: 344°C)이다. NaCl 상당염농도와 균일화온도로부터 구한 유체의 밀도는 0.81~89 g/cc (평균: 0.85 g/cc)이다.

II형 포유물; 물, 액체CO₂와 기체 CO₂로 구성된 포유물로서 I형 포유물과 함께 초생포유물로 산출된다. 크기는

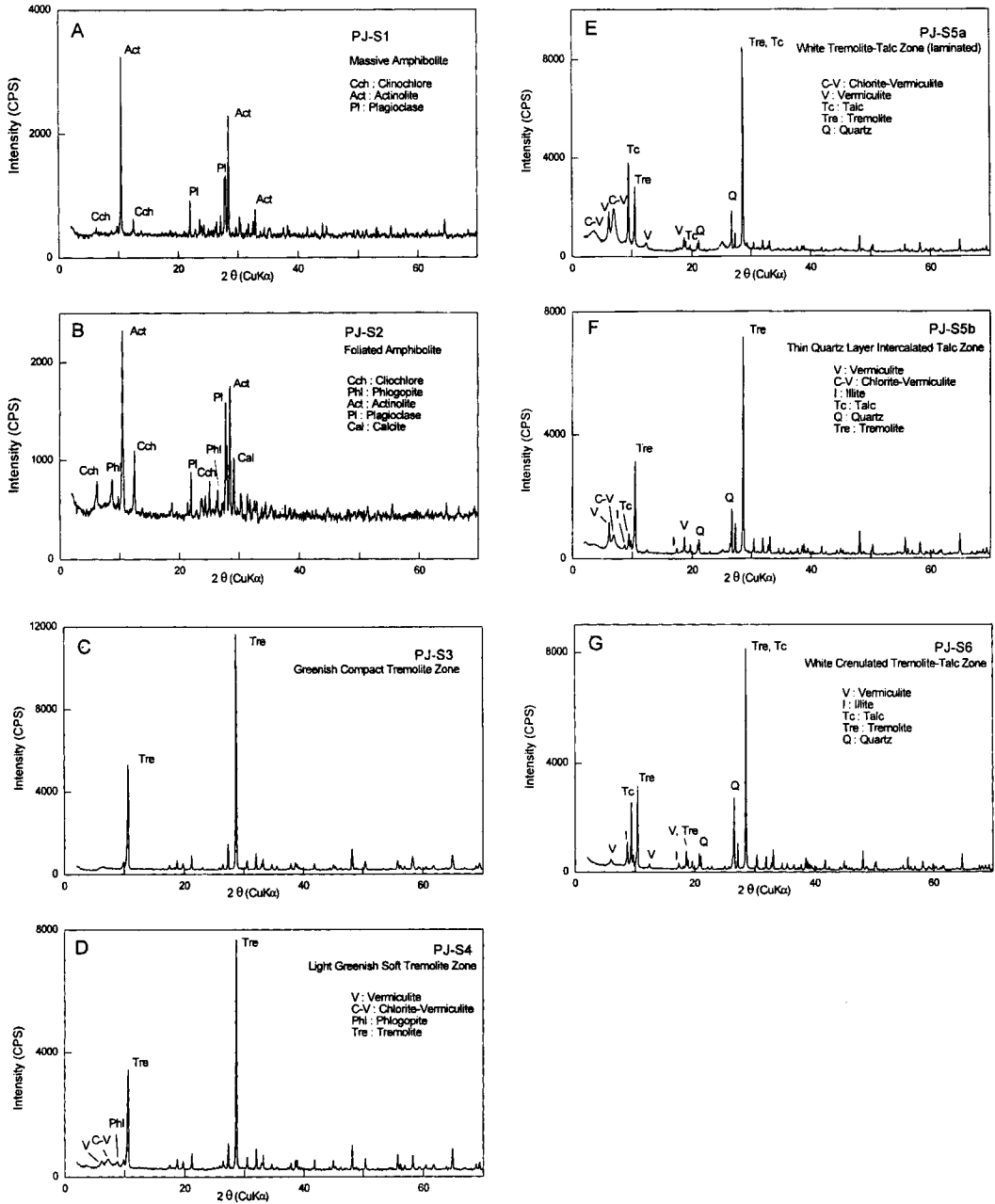


Fig. 4. XRD patterns of tremolite-talc ores. See Fig. 3 for sample description.

5~25 μ 정도이고, 대부분은 석영의 부정정 (負結晶, negative crystal)으로 산출된다. II형 포유물은 냉각실험시 고체 CO₂가 형성되며, CO₂의 수화물 (CO₂ clathrate)이 관찰된다. 고체 CO₂의 용융온도는 -56.7~-57.9°C (평균: -57.4°C)로서 CO₂의 녹는 온도로 부터 구한 기체상 내 메탄의 몰비(X_{CH₄})는 0.05 이하이다 (Higgins, 1980). CO₂

수화물의 녹는 온도는 0.4~8.6°C 이고 이로부터 구한 NaCl 상당염농도는 2.8~15.1 wt.% (평균: 6.2 wt.%)이다. 상온에서 II형 포유물의 CO₂ 상은 액체 CO₂와 기체 CO₂로 구분되어 관찰되지만, 상온에서는 단일상으로 관찰되나 냉각 실험시 CO₂ 상이 분리되는 것도 드물게 관찰된다. 두 경우에 있어서 CO₂ 상은 기체 CO₂ 상으로 균일

화되며, 균일화온도는 22.7~27.6°C (평균: 25.5°C) 이다. II형 포유물의 전체 균일화는 CO₂ 상으로 균일화되는 것과 H₂O상으로 균일화되는 것이 있다. 전자의 경우 균일화온도는 328~399°C (평균: 358°C)이고, 후자의 경우는 334~392°C (평균: 354°C)로서 두 경우 모두 같은 범위의 균일화온도를 가진다.

안정동위원소

분석방법

산소동위원소분석은 모든 과정이 미국 인디애나 대학교 안정동위원소 실험실에서 이루어 졌으며, 분석을 위한 활석과 수반광물의 기체시료준비는 Clayton, Mayeda (1963)의 방법에 따라 시료를 처리하였다. 시료를 진공 오븐에서 하룻밤동안 건조시킨 후 규산염전처리장치를 이용 600°C에서 BrF₅와 반응시킨 결과 산소가 발생되었다. 이 발생된 O₂를 다시 CO₂로 변환시켜 유리시료용기에 채집한 후, 이 CO₂를 Finnigan사 제품의 Mat 251 질량분석기를 사용하여 산소동위원소비를 측정하였다.

수소동위원소분석은 기초과학연구원 동위원소그룹 안정동위원소실험실에서 실시되었다. 분석을 위한 광물시료의 처리과정은 대체로 Vennemann, O'Neil (1993)의 방법과 유사하게 진행되었다. 분말화된 시료를 물 함량에 따라 30~200 mg을 6 mm Quartz tube에 넣고 quartz powder와 quartz wool로 입구를 막고 110°C 진공 오븐에서 하룻밤 동안 가열하여 흡착수를 제거한 다음 이들 시료를 진공 속에서 산소+LPG 불꽃으로 가열하여 녹임으로서 시료 중에 포함된 모든 물을 추출하여 이연을 포함하고 있는 6 mm vycor 시료용기에 채집하고 불꽃으로 봉한다. 물 시료가 들어있는 Vycor tube를 500°C 전기로에서 30분 정도 반응시키면 물과 아연이 반응하여 수소가스가 발생하는데 (Kendall, Coplen, 1985) 이 수소가스시

료를 기초과학연구원 연구소의 VG PRISM II 안정동위원소비 질량분석기를 사용하여 분석하였다.

측정된 δ¹⁸O와 δD의 분석의 정밀도 (analytical precision)는 각각 0.1, 1.0% 이다.

산소 및 수소동위원소 분석결과

풍전지역의 광석 시료에 대한 산소 및 수소동위원소분석 결과는 Table 2와 같다. 활석광석에 대한 δ¹⁸O값은 12.2 내지 12.9‰ (vs. SMOW)의 비교적 균질한 산소동위원소비를 보여 주고 있다. 이들 광석들은 활석이외에도 투각섬석과 소량의 스멕타이트, 견운모, 방해석을 함유하고 있다. 수소동위원소 값은 활석을 포함하고 있는 시료들에서 그 δD값이 -60 내지 -85‰ (vs. SMOW)의 범위를 보이고 H₂O의 함유량은 2.0~3.4 wt.%의 범위를 보이고 있다. 활석에 대한 수소 및 산소 동위원소 자료는 일부 보고된 것들 (Blount, Vassiliou, 1980; Blount *et al.*, 1983; Park *et al.*, 1995)이 있으나 매우 드문 편이다. 물과 활석간의 분별계수는 아직 잘 알려져 있지 않으나, 몇몇 제한된 분석치에서 나타난 결과와 점토광물들의 자료들을 이용하여 그 관련유체의 성분을 추정하고 있다 (Blount, Vassiliou, 1980; Noack *et al.*, 1986; Tennie *et al.*, 1995). 이들 광석시료에 대한 산소 및 수소동위원소 분석결과와 추정된 관련 유체의 성분을 도시하면 Fig. 5와 같다.

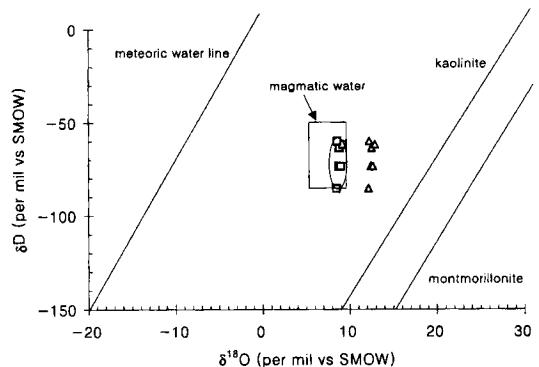


Fig. 5. δD and δ¹⁸O cross plot of the talc-tremolite ores from the Poongjeon deposit. Meteoric water line, kaolinite line, montmorillonite line, and a box of magmatic water are shown together. Triangles denote isotope data of the talc-tremolite ore. Squares denote the calculated oxygen and hydrogen isotope values of the fluid related to the talc-tremolite ore formation. Ellipse shows the area of possible range of ore fluid composition. Only oxygen isotope fractionation was considered in this estimation.

Table 2. Oxygen and hydrogen isotopic values of the samples from Poongjeon deposit.

| Sample No | ¹⁸ O per mil (SMOW) | δD per mil (SMOW) | H ₂ O (wt.%) | Minerals |
|-----------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------|
| PJ21 | 12.6 | -64 | 3.1 | Tc+Sm+Tr+Il |
| PJ24 | 12.5 | -73 | 2.0 | Tc+Tr+Il+Sm |
| PJ225 | 12.9 | -62 | 2.8 | Tc+Tr+Sm |
| PJ227 | 12.2 | -85 | 2.6 | Tc+Tr+Sm |
| PJ232 | 12.3 | -60 | 3.2 | Tc+Tr+Sm+Cal |
| PJ234 | 12.7 | -73 | 3.4 | Tc+Tr+Sm |

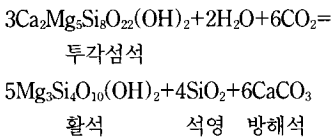
Tc; Talc, Sm; Smectite, Tr; Tremolite, Il; Illite, Cal; Calcite

고찰

X-선 회절법에 의한 광물의 분석에 의하면 본 지역의 광석의 광물조성은 순수한 활석은 드문 편으로 거의 예외 없이 일정량의 투각섬석을 포함하고 있으며 그 이외 소량의 일라이트, 버미쿠라이트, 스�멕타이트, 녹니석-버미쿠라이트로 구성되어 있다. 따라서 광석 중 활석의 함량은 매우 낮은 편이며 주변의 동양활석광상에 비하여 매우 품위가 낮은 편이다. 지역적으로 풍화에 노출되어 있는 곳에서는 좀 더 많은 양의 점토광물들이 발달된 곳도 있으나 이러한 2차적인 풍화산물로서 활석이나 투각섬석이 형성된 것은 아닌 것으로 사료된다.

풍전광상의 광석 산출상태를 검토한 결과 이는 과거에 제시되었던 돌로마이트나 돌로마이트질 석회암내에 배태된(김규봉, 1972; Reedman *et al.*, 1973) 단순 접촉교대광상의 형태가 아니라 지질학적 구조에 의해 지배되는 몇 가지 유형으로 구분될 수 있으며 각 유형마다 그 모양들의 구조에 지배를 받는 열수기원의 교대광상의 양상을 띠고 있다.

풍전활석광상의 생성온도와 압력은 유체포유물의 가열 및 냉각실험 자료로부터 유추할 수 있다. 유체포유물의 측정 대상광물은 열극을 채운 맥상 투각섬석-활석에서 산출되는 석영으로서, 석영의 생성은 다음과 같은 활석의 생성반응과 관계된 것으로 생각된다.



석영내에서 관찰되는 유체포유물은 H₂O-NaCl 계 (I형 포유물)와 H₂O-CO₂-NaCl 계 (II형 포유물)의 두 가지 형이 서로 공존하며 산출된다. II형 포유물에서 계산된 CO₂의 몰비 (XCO₂)는 0.06인 것과 0.43~0.69인 것의 두 부류로 나누어지나 이들의 균일화온도는 서로 일치한다. CO₂의 함량이 서로 다른 유체포유물이 공존하며 동일한 범위의 균일화온도는 갖는 것은 CO₂의 비등현상 (effervescence)에 의한 결과로 해석되며 이때의 생성온도는 균일화온도와 일치한다 (Diamond, 1994). 즉, CO₂를 함유한 유체의 온도와 압력이 불혼화 곡선상에 위치하면 유체의 조성은 CO₂ 함량이 높은 것과 CO₂ 함량이 낮은 것으로 분리된다 (Fig. 6). 불혼화시의 유체의 압력은 유체의 상태방정식으로부터 구할 수 있으며, Bowers, Helgeson (1983a, b)의 자료로부터 구한 유체의 압력은 300~470 bars (평균: 390 bars)로서 약 400 bar 정도이다.

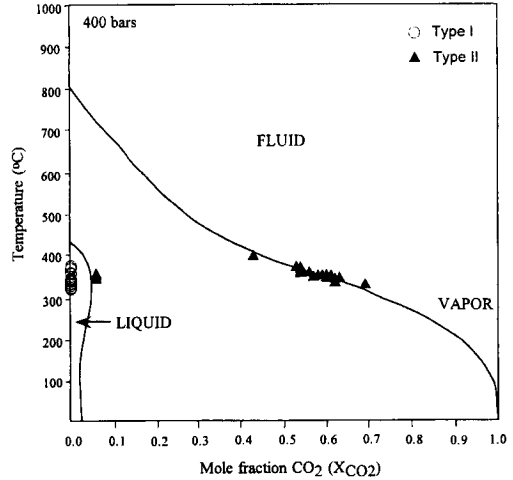


Fig. 6. Temperature-XCO₂ diagrams for 6 wt.% NaCl (modified from Bowers, Helgeson, 1983a). Open circles and filled triangles represent homogenization temperature and estimated XCO₂ values from type I and II fluid inclusions in quartz, Poongjeon deposit.

Fig. 6은 Bowers, Helgeson (1983a)의 자료로부터 구한 6 wt.% NaCl 상당염농도와 400 bar일 때의 불혼화곡선을 표시하고 풍전광상에서 산출되는 유체포유물의 균일화온도와 CO₂의 몰비 (XCO₂)를 도시한 것이다. XCO₂가 0.05 이하일 때, 냉각 및 가열 실험 중에도 CO₂ 상이 관찰되지 않는 것을 고려한다면 I형 포유물도 낮은 XCO₂ 값을 갖는 유체의 영역에 속하게 되며, 측정된 대부분의 유체포유물은 불혼화곡선상에 위치한다. 그러므로 풍전광상에서 광화작용시의 광화유체의 온도와 압력은 약 350°C, 400 bar이며, 이때 광화유체는 CO₂의 불혼화 (또는 비등)에 의해 I형 포유물로 대표되는 CO₂ 함량이 낮은 유체와 II형 포유물로 대표되는 CO₂ 함량이 높은 유체로 분리되었다.

수소동위원소 분석결과 물 함유량이 차이를 보이는 이유는 시료들이 순수한 활석이 아니라 활석 이외에도 다른 함수 광물 (예: 점토광물이나 투각섬석)이나 탄산염광물들을 포함하고 있기 때문이다. 대체로 투각섬석이 함유되어 있으면 순수 활석 보다 물 함량이 낮아지게 되며, 녹니석이나 스�멕타이트를 함유하게 되면 오히려 활석 보다 물 함량이 높아 질 수도 있으나, 궁극적으로 시료 중의 물 함량은 이들 여러 광물의 상대적인 함량비에 의하여 결정된다고 볼 수 있다. 시료 PJ24에서 다른 시료에 비하여 낮은 물 함량을 보이고 있는 데 이는 XRD분석결과에서 알 수 있듯이 다량의 투각섬석을 포함하고 있기 때문이다. 비교적 높은 물 함량을 보이는 시료와 비교적 낮은 물 함량을 보이는 활석포함 시료들간 (예를 들어 PJ24와 PJ234)에

서도 그 δD 값은 많은 차이를 보여주지는 않고 있다. 풍전 광산에서 그리 멀리 떨어져 있지 않은 동양활석광상 시료들은 그 δD 값이 -65 내지 -90‰ (vs. SMOW)의 범위를 보이고 H_2O 의 함유량은 대체로 4.0 wt.% 근처로 이론적으로 계산된 물의 양과도 일치를 보이고 있다 (Park *et al.*, 1995). 이와 비교하면 풍전의 광석들은 많은 불순물을 포함하고 있어서 그 발생하는 물의 양이나 수소동위원소비가 좀 더 변화가 심한 것도 무리는 아니다.

활석광석의 산소동위원소 분석결과는 상당히 좁은 범위 (12.2~12.9‰)에 집중되어 나타나고 있어 생성에 관련된 유체와 평형상태에 이르렀음을 지시해 주고 있다. 아울러 관련 유체의 동위원소성분이 상당히 균질한 기원으로부터 유래하였을 가능성을 보여주고 있다. 활석의 수소 및 산소 동위원소 자료는 점토광물 중에서도 몬모릴로나이트와 유사한 분별계수를 가지는 것으로 알려져 왔으므로 이들 광물들간의 혼합물에 대한 자료를 바탕으로 그 관련 유체의 성격을 논하는 것은 단일 광물 (활석)자료에 대한 것보다 그리 많은 차이를 가져오지는 않을 것으로 간주된다 (Blount, Vassiliou, 1980; Noack *et al.*, 1986). 광석의 수소와 산소동위원소비를 함께 도시한 Fig. 5에서는 광석의 분석결과가 삼각형으로 표시되어 있는데 유체포유물로부터 얻어진 350°C의 생성온도를 가정할 때 이들과 관련된 유체의 산소동위원소비는 광석보다 3.5% 정도 낮은 값을 갖는 것으로 추정되며 이들 유체의 동위원소비는 정사각형으로, 그리고 그 범위는 타원으로 표시하였다. 이 타원이 가지는 범위는 화성기원으로부터 유래한 물의 범위에 속하며, 동양활석광상의 자료와 상당히 유사함을 보여주고 있다 (Park *et al.*, 1995). 그러나 동양활석광상의 자료는 그 산소동위원소비가 풍전광상보다 상당히 광범위하게 분산되어 분포하는 차이점을 보인다. 안정동위원소자료에서 나타나는 바와 같이 풍전지역의 활석 형성에 관련된 유체의 기원은 주로 화성기원의 물이었을 가능성이 크다. 산소와 수소동위원소 분석의 대상이 된 시료는 비교적 치밀한 고화된 시료들과 풍화의 영향이 예상되는 잘 부서지는 분말상태의 시료 모두를 포함하였으나 이들 두 종류의 시료들간에 동위원소비 차이는 별로 보이지 않는다. 이는 1차적인 활석과 투각섬석 형성 후 풍화에 의한 동위원소 교환반응이 거의 일어나지 않았으며 원래의 동위원소비가 비교적 잘 보존되어 있음을 보여주고 있다. 그리고 산소 및 수소동위원소값으로부터 추정된 관련 유체의 안정동위원소비가 보여 주는 바로는 관련 유체가 화성기원의 물이었을 가능성을 지시해 주고 있으며, 활석 및 투각섬석 형성이 이 지역 지표수에 의한 풍화의 산물이 아님을 간접적으로 뒷받침해 주고 있다.

결 론

1. 풍전광상의 광석을 구성하는 광물은 활석과 투각섬석이 그 주구성광물이며 그 이외 소량의 일라이트, 버미쿠라이트, 스�멕타이트, 녹니석-버미쿠라이트로 이루어져 있다.
2. 광상은 그 산출상태로 보아 투각섬석-활석광체는 지층의 층리면이나 암맥의 맥벽 혹은 단층들의 열극을 따라 이동해온 SiO_2 가 풍부한 열수의 교대작용으로 형성되었다.
3. 투각섬석-활석맥에서 산출되는 석영내의 유체포유물의 가열 및 냉각 실험자료로부터 구한 활석생성시 광화 유체의 온도와 압력은 약 350°C, 400 bar이고, 이때 광화 유체는 CO_2 의 불혼화(또는 비등)에 의해 CO_2 가 풍부한 유체와 CO_2 가 적은 유체로 분리되었다.
4. 풍전광상에 관한 산소 및 수소동위원소 자료들은 근처의 동양활석광상의 자료와 유사하며 그 유체가 지표수 기원보다는 화성기원일 가능성을 시사한다.
5. 활석 및 투각섬석의 형성에 있어 주 광화작용은 열수에 의한 교대작용으로 사료되며, 광화작용 이후 풍화등에 의한 지표수-광석간의 동위원소 교환반응은 광석의 산소 및 수소 동위원소조성에 별다른 영향을 미치지 않은 것으로 보여진다.

사 사

이 연구는 1995년도 교육부의 기초과학 연구 조성비로서 이루어진 것으로 이에 사의를 표한다. 이 연구 수행과정에서 수소동위원소분석을 도와준 기초과학지원연구소의 이광식 박사과, 산소동위원소분석을 맡아준 인디아나 대학교 지질과학과의 Ripley교수와 박영록 박사에게 감사드리며 특히 광물의 X-선 회절연구를 하여준 이수재 박사에게도 감사드린다.

참고문헌

- 김규봉 (1972) 한국의 활석광상. 지질광상조사연구보고, v. 14. 국립지질조사소, p. 5-67.
- 이민성, 박봉순 (1965) 황강리 지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 진명식, 김성재, 지세정, 신성천, 주승환 (1992) 옥천습곡대 중앙부 고생대-중생대 화강암체의 방사성 연대측정 연구. 동위원소 지질연구, 연구보고서, KR-92-1G-2-1, 한국지질연구소, 34p.
- Brown, P.E. (1989) FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, v. 74, p. 1390-1393.

- Bowers, T.S. and Helgeson, H.C. (1983a) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of states for H_2O-CO_2-NaCl fluids at high pressures and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 47, p. 1247-1275.
- Bowers, T.S. and Helgeson, H.C. (1983b) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geologic system: metamorphic equilibria at high pressures and temperatures. *American Mineralogist*, v. 68, p. 1059-1075.
- Blount, A.M. and Vassiliou, A.H. (1980) The mineralogy and the origin of the talc deposit near Winterboro, Alabama. *Economic Geology*, v. 75, p. 107-116.
- Blount, A.M., Williams, D., Jenkins, J. and Warner, B. (1983) Expandable layer silicates associated with the hydrothermal talc deposits of Murphy, North Carolina. *Economic Geology*, v. 78, p. 486-497.
- Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1963) The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 27, p. 43-52
- Diamond, L.W. (1994) Introduction to phase relations of CO_2-H_2O fluid inclusions, In *Fluid Inclusions in Minerals: Method and Application* (B. De Vivo & M.L. Frezzotti, eds). Virginia Polytechnic. & State Univ., p. 131-158.
- Kendall, C. and Coplen, T.B. (1985) Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotopic determination. *Anal. Chem.*, v. 57, p. 1438-1440.
- Noack Y., Decarreau A. and Manceau, A. (1986) Spectroscopic and oxygen isotopic evidence for low and high temperature origin of talc. *Bull. Mineral.*, v. 109, p. 253-263.
- Park, H.-I., Lee, I., and Hur, S. (1995) Talc mineralization in the Middle Okcheon Metamorphic Belt(I: with emphasis of the stable isotope studies of the Dongyang talc deposit, *Econ. and Environ. Geol.*, v. 28, p. 635-646.
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusions. *Rev. Mineralogy*, v. 12, 644p.
- Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., Thyu, H.S., Jeong, S.H. and Park, J. N. (1973) *Geology of the Hwanggangni mining district, Republic of Korea*. Anglo-Korean Mineral Exploration Group, 118p.
- Schwartz, M.O. (1989) Determining phase volumes of mixed CO_2-H_2O inclusion using microthermometric measurements. *Mineral. Deposita*, v. 24, p. 43-47.
- Tennie, A., Hoffbauer, R. and Hoernes, S.(1995) Experimental determination of the oxygen isotope fractionations in the systems kyanite-calcite and talc-carbonate-water. *Mineralogical Magazine*, v. 58, p. 893-894.
- Vennemann, T.W. and O'Neil, J.R. (1993) A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, v. 103, p. 227-234.