

부산 보배광상에서의 점토지질온도계의 적용

문지원* · 문희수*

Application of Clay Mineral Geothermometry in the Bobae Mine, Pusan, Southeastern Korea

Moon, Ji-Won* and Moon, Hi-Soo*

ABSTRACT : Clay mineral geothermometry using sericites and chlorites in Bobae sericite mine reveals that these clay minerals formed at relatively high temperature. It appears that sericites formed at around 200~350°C and chlorites formed at around 250°C. X-ray diffraction study of these minerals reveals that sericite 2M₁ type and chlorite IIb type are dominant phases. Both polytypes indicate that the precipitation temperatures of these minerals shows fairly good agreement with the estimated temperature by clay mineral geothermometry. The Bobae sericite mine was formed at relatively higher temperature than several non-metal ore deposits occurred in the southern part of Korea.

서 언

한반도 동남부에 위치한 경상분지는 백악기 퇴적암류와 화산암류가 연속성을 띠며 산출되는 곳이며, 상부 백악기의 연령을 가진 화산암류는 많은 열수변질광상을 배태하고 있다. 이들 광상에 대해서는 광상의 생성환경, 광석광물의 광학적 특성규명 등을 비롯한 많은 연구가 수행된바 있다 (Kim *et al.*, 1991; 김종대 등, 1992; 박희인 등, 1992, 1993; Choo, Kim, 1992; 황진연 등, 1993; 문지원, 문희수, 1995; Moon, Moon, 1996).

점토광물을 이용한 지질온도계는 열수변질과정 중 이동유체의 열적변화와 광상구의 형성을 보다 잘 이해하기 위해 이용되어왔다. 이 논문에서는 광물의 물리적인 구조변화와 화학조성의 변화가 온도와의 관계를 이용한 경험식 및 실험식을 토대로 한 견운모, 녹니석의 점토지질온도계를 보배 견운모 광상에 적용시켜 이 광상의 생성온도를 유추하고 이런 양상의 변질작용의 결과 형성된 광상에서의 적용성을 검토하고자 한다.

시료채취 및 연구방법

* 연세대학교 지질학과 (Department of Geology, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seoul 120-749, Korea)

연구대상인 보배광상 광석시료는 중앙통로와 노천채굴적 그리고 인근 연구지역에서 변질정도에 따라 체계적으로 채취되었으며, 이들 시료는 tungsten carbide ball mill을 이용, 100 μm 이하로 분쇄하였다. 퇴적법에 의해 분리한 점토입도의 시료는 냉동건조기를 이용하여 건조시켰다.

녹니석의 화학조성은 JEOL사 JCSA-733 WDS model의 전자현미분석기를 이용하였으며, 이때의 가속전압은 15 kV, 시료전류 15 nA, 빔의 직경은 10 μm, 측정시간은 피크가 10초씩 3번, 배경치는 5초씩 1번이다. 표준물질로 자연산 광물을 사용하였는데 각 원소에 사용된 물질은 Si: 휘석, Ti: 금홍석, Al와 Fe: 알만딘, Mn: 장미휘석, Mg: 휘석, Ca: 휘석, Na: 알바이트, K: 새니딘이다. 분석치는 Bence, Albee (1968)의 방법으로 보정되었다.

X-선회절분석은 정제된 점토의 비방향성시료를 이용하였고, MAC MXP-3 XRD system이 이용되었다. 분석조건은 Ni-filtered Cu-Kα (1.54052Å)선을 이용하였고, 가속전압 및 전류는 40 kV/30 mA, 발산 및 산란슬릿은 각각 1 mm, 수광슬릿은 0.15 mm, 측정방법은 step scanning (FT method)로 0.02°2θ당 2초씩 행하였다. 분석의 정확도와 정밀도를 유지하기 위해 석영을 표준시료로 사용하여 회절선의 좌우편차를 보정하였다. 또한 중첩된 회절선에 대하여서는 상기 시스템의 피크위치, 회절강도, 반폭치와 Gauss ratio를 이용하는 Multiple-peak Separation

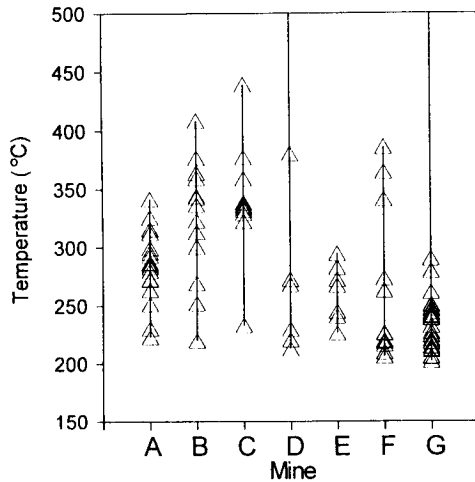


Fig. 1. Comparison of sericite-forming temperatures by mole fraction of paragonite component of sericite occurs in various non-metal ore deposits in Korea. A; Bobae mine (Moon, Moon, 1995), B; Bobae mine (Kim *et al.*, 1991), C; Sangdong mine (Kim *et al.*, 1992), D; Milyang mine (Lee, 1993), E; Haenam mine (Jeong, 1990), F; Sarisan mine (Kim, Kim, 1992), G; Daehyun mine (Rhee, 1991).

tion Program (Young, Wiles, 1982)을 이용하였다

견운모 지질온도계

광물의 화학조성

본 보배광상에서 견운모의 입도와 화학조성과의 관계는 Moon, Moon (1996)에 의해 보고된 바 있다. 또한 Velde (1965a) 등의 연구결과에서와 같이 셀라도나이트 분자를 적게 포함하는 견운모는 고온에서, 이를 많이 포함하는 경우는 비교적 저온에서 형성된다. Cathelineau, Nieva (1985)와 Cathelineau (1988)는 결정화 온도가 상승함에 따라 Na, K, Fe와 Al^{IV} 는 증가하고, Al^{VI} 와 Ca는 감소한다고 보고한바 있다. 이는 파라고나이트 몰분율의 증가와 납석, 셀라도나이트 및 Ca-파라고나이트의 감소를 지시한다.

문지원, 문희수 (1995)는 Cathelineau (1988)의 실험식을 이용, 보배광상의 조립질 견운모가 세립질 견운모보다 상대적으로 고온에서 형성되었음을, 또한 전체 결정화온도의 분포는 200~350°C임을 밝힌바 있다. Fig. 1은 한반도에 분포하는 여러 비금속광상에서 산출되는 견운모의 파라고나이트 몰분율을 이용, 형성온도를 비교한 것이다. 보배광상 (Kim *et al.*, 1991; Moon, Moon, 1996)과 상동광상 (김종대 등, 1992)은 300°C 이상의 비교적 고온에서, 밀양광상 (이강원, 1993), 해남광상 (정승우, 1990),

싸리산광상 (Kim, Kim, 1992), 및 대현광상 (Rhee, 1991)의 견운모는 비교적 낮은 온도에서 형성되었음을 알 수 있다.

다형연구

Kim *et al.* (1991)은 본 보배광상의 견운모를 $2M_1$ 형이 우세한 mm-size와 $2M_1$ 과 $1M_1$ 형이 공존하는 μ m-size의 두 가지로 대분하였고, $2M_1$ 형 견운모는 작은 결정 ($1M_1$)이 자유에너지를 줄이려는 Ostwald ripening으로 형성되었다고 보고한 바 있다. 또한 mm-size의 $2M_1$ 견운모는 전 광화대의 95%를 차지한다 하였다. 반면에 본 연구 및 문지원, 문희수 (1995)에서는 현미경 관찰을 통하여, 홍주석-납석대, 견운모대의 강변질대와 알바이트대의 약변질대 및 프로필릭대 시료간에 mm-size 견운모의 우세성이 확인되지 않는다.

그러나 보배광상에서와 같이 $1M$ 형과 $2M_1$ 형의 이괄면체 운모류의 공존은 여러 화산성분출암과 응회암류 (Eberl *et al.*, 1987)에서도 관찰되며, 이들은 암석의 진화를 이해하는데 많은 도움을 준다. 대부분의 경우, $2M_1$ 형의 존재비는 온도 및 압력의 상승 (Velde, 1965b; Maxwell, Hower, 1967)과 열수변질의 강도 (Di Macro *et al.*, 1989) 및 입도 (Velde, Hower, 1963)에 의존함이 밝혀졌으나, 최근 Eberl *et al.* (1987)은 변질에 의한 견운모의 경우 존재비와 입도간에는 아무 관련이 없음을 지적한 바 있다. 이러한 연구결과를 토대로 생각해보면 $2M_1$ 형이 $1M$ 형보다는 고온에서 형성되며, 250°C 근처에서 변화한다는 것이 일반적인 견해이다.

보배광상의 시료에 대한 X-선회절패턴은 많은 시료들이 $2M_1$ 형이 우세함을 알 수 있다. (Moon, Moon, 1996). 이는 강한 (002), (006) 피크와 약한 (004) 피크, 그리고 $2M_1$ 형의 전형적인 hkl 회절선 즉, 3.88, 3.72, 3.49, 3.20과 2.98Å (Bailey, 1980) 피크로 특징지어진다.

Fig. 2는 각 변질대의 대표시료에서의 $2M_1$ 형 존재비를 나타낸 것이다. 기존의 연구들에서 XRD를 이용한 $2M_1$ - $1M$ 존재비를 구하는 방법은 $1M$ 과 $2M_1$ polytype에서 동시에 나타나는 피크의 면적에 대한 $2M_1$ 형에서만 나타나는 피크의 면적비를 이용한 것으로, 단지 사용하는 특정 피크에서만 차이가 날 뿐이다. 본 연구에서는 각각의 시료는 같은 방향성을 가지고, 동일한 조건하에 측정되었다는 가정을 가지고 Maxwell, Hower (1967)와 Tettenhorst, Corbatö (1993)가 사용한 2.80Å 피크를 이용하였다. 그러나, Maxwell, Hower의 방법에서와 같이 이들 비율을 정확히 구하기 위해서는 각 입자의 방향 즉, March

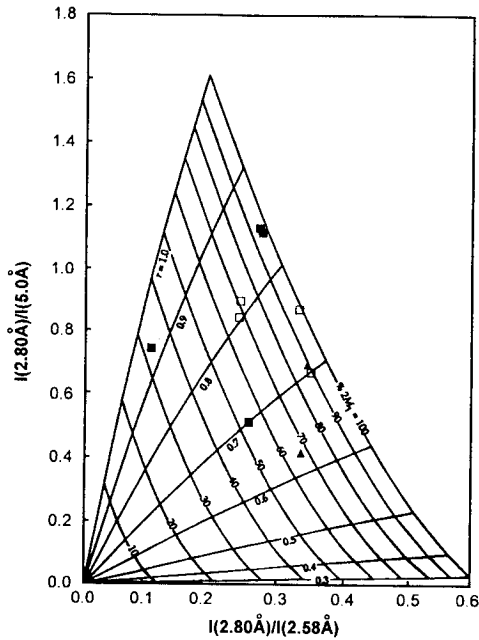


Fig. 2. Percentages of $2M_1$ mica in a $1M-2M_1$ mixture and values of r as a function of the ratios of the intensities (peak area) for the 2.80\AA and 5.0\AA peaks and the 2.80\AA and 2.58\AA peaks (Cuk α radiation). Solid lines: for calculated for Cap Rouge mica chemistries by Tettenhorst, Corbat (1993). Symbol: ■, Andalusite-Pyrophyllite zone; □, Sericite zone; △, Albite zone.

함수 $[(r^2 \cos^2 \zeta + r^{-1} \sin^2 \zeta)^{-3/2}]$, 이때 ζ 는 각각의 hkl 면과 preferred orientation plane의 사이각이 고려되어야 한다 (Tettenhorst, Corbat, 1993).

그러나 견운모 대표시료는 미세석영에 의한 오염이 심각하며 (Kim *et al.*, 1991), 견운모 단종의 hkl 값은 납석과 녹니석에 의한 중첩결과 구하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 March parameter (r)와 scale factor는 고려치 않고 Tettenhorst, Corbat (1993)의 방법을 이용, 전반적인 방향성만을 구하였다. 그러나 재현성을 높이기 위하여 측정시 동일한 입도와 동일한 중량의 시료를 front-packing method를 이용하여 측정하였다.

녹니석 지질온도계

광물의 화학조성

녹니석의 화학조성을 이용할 경우, 팔면체 자리에 Cr, Ti, Ni, Mn, V, Cu와 Li의 함유량이 작고, Mg, Fe²⁺, Fe³⁺, Al과 Si 등의 녹니석 주성분들이 스토이키오메트릭하지 않

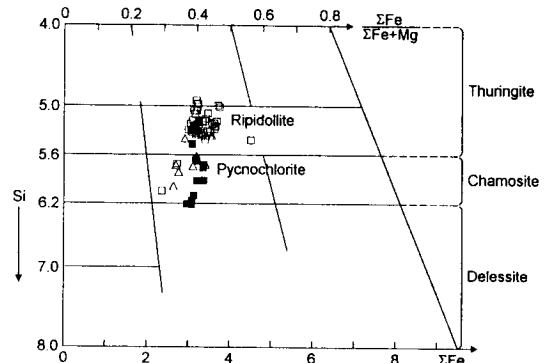


Fig. 3. Plot of probe analysis for chlorites occurred in study area (after Hey, 1954). Symbol: □, Ore; ■, Granite Porphyry; △, Rhyodacitic tuff.

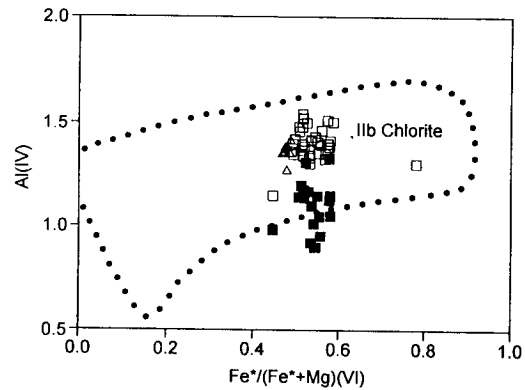


Fig. 4. Plot of tetrahedral Al vs. octahedral Fe/(Fe+Mg) for chlorites of IIb structural type. Composition determined from spacing graphs modified after Shirozu (1958) and Bailey, Brown (1962). Symbols are the same as Fig. 3.

게 넓은 조성범위를 갖는 녹니석은 물리화학적인 생성환경에 대한 유용한 자료를 기록할 수 있게 된다 (De Caritat *et al.*, 1993). 따라서 녹니석 화학조성의 정량적인 변화는 지질온도계로 이용되며, 열역학적인 고려없이도 선형함수를 구할 수 있게 된다.

그러나, Mg와 Fe의 변화량이 지질학적인 환경의 변화를 모두 반영할 수 없으므로, 제한된 온도영역 150~300°C에서만 사용 가능하다. 팔면체 자리의 Fe 함량과 $[6\text{-Al}^{(IV)}\text{-(Mg+Fe}^{2+})]$ 는 온도와 정의 관계를, 팔면체 자리의 빈자리는 부의 관계를 가진다 (Cathelineau, Nieva, 1985). 이러한 효과는 Si^{IV}가 높은 단종이 활동도가 감소함에 따라 고용체 내에서 불안정해 지기 때문이다 (Cathelineau, 1988). 또한 Shikazono, Kawahata (1987)는 Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg)와 모암과의 관계는 비례관계를, 또한 Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg)는 유체의 성격 (Fe²⁺/Mg), pH, 황농도

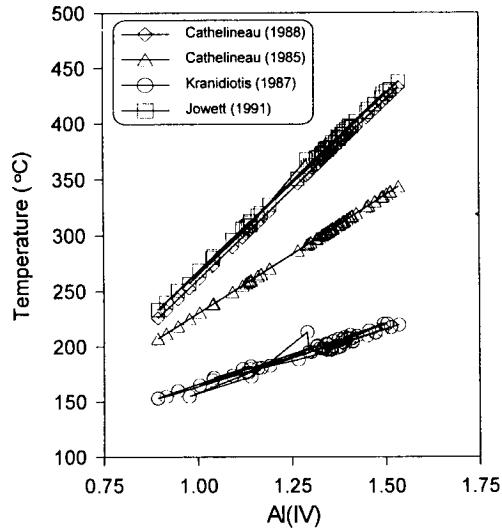


Fig. 5. Plot of Al^{IV} in chlorite vs. temperature for the Bobae sericite deposit.

와 온도의 종합적인 영향을 받는다고 보고한 바 있다.

Fig. 3은 광화대와 모암, 화강반암 내에서 자생한 자형의 녹니석이 리피돌라이트(ripidolite)와 피크노클로라이트(pycnochlorite) 계열임을 보여주고 있다. 이는 광화대와 유문석영안산암질 응회암의 녹니석은 유사한 환경에서 화강반암의 녹니석은 다소 다른 환경에서 생성되었음을 의미한다. 이러한 추론은 Fig. 4에서도 알 수 있다. 각각의 암상을 대표하는 세 종류의 녹니석중 광화대와 변질된 모암에서 산출되는 시료만이 IIb형 (Hey, 1954)에 해당된다.

Fig. 5는 여러 실험식을 이용하여 결정화 온도를 구한 것으로 각각에 사용된 식은 다음과 같다.

$$T=17.54+212.31Al^{IV}$$

Cathelineau, Nieva (1985)

$$T=-61.92+321.98Al^{IV}$$

Cathelineau (1988)

$$T=18+106 Alc^{IV}$$

여기서, $Alc^{IV}=Al^{IV}+0.7Fe/(Fe+Mg)$

Kranidiotis, MacLean (1987)

$$T=-69+319 Alc^{IV}$$

여기서, $Alc^{IV}=Al^{IV}+0.1Fe/(Fe+Mg)$

Jowett (1991)

Cathelineau (1988)의 함수는 75~215°C 정도 높게 측정되는 오류가 있는 것으로 알려져 있으며 (De Caritat *et al.*, 1993), Jowett (1991)의 실험식은 저자가 이야기한 $[Fe/(Fe+Mg)<0.6]$ 의 구간 내에서 Cathelineau (1988)의

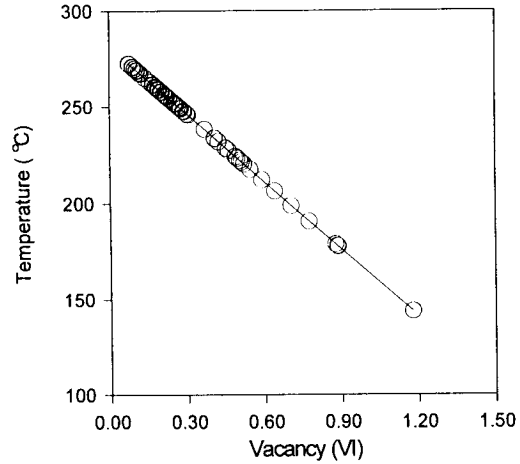


Fig. 6. Plot of octahedral vacancy in chlorite vs. temperature for the Bobae sericite deposit (after Cathelineau, 1985).

결과와 매우 유사한 값을 가진다. 따라서 이 두 라인은 비교적 넓고 높은 온도 영역인 230~430°C의 영역을 가지며 서로 잘 일치한다. 반면에 Kranidiotis, MacLean (1987)의 함수는 낮은 온도영역에 도시된다. 이러한 결과들은 다음에 논의되겠지만 이 전자현미분석 결과는 IIb형임을 가리키므로 이들 온도는 적용하기 어려운 온도이다. Cathelineau, Nieva (1985)의 함수는 본 보배광상에서 적용하기에 가장 타당한 함수이나, De Caritat *et al.* (1993)에 의해 20~15°C의 변화 폭을 가지는 문제점이 제시되었다.

De Caritat *et al.* (1993)는 Al이 풍부한 녹니석의 경우 온도에 의한 의존도가 크기는 하지만 이는 공존하는 광물 조합에 의한 의존도도 존재함을 밝혔다. 따라서, Al^{IV} 혹은 팔면체 자리의 빈공간이 더 정확한 정보를 줄 수 있다는 의견을 제시하였다 (Fig. 6). Fig. 6은 대부분의 분석치가 250°C 근처에 도시됨을 보여주며, 이는 Cathelineau, Nieva (1985)의 식을 이용한 결과와 잘 일치한다. 그러나, Fig. 5와 Fig. 6을 통해서 정확한 값에는 다소 차이가 있을 수 있으나 전반적으로 이들 녹니석은 250°C 혹은 이보다 다소 높은 온도 영역에서 형성된 것임을 알 수 있고, 따라서 보배광상의 녹니석은 고온형의 녹니석임을 알 수 있다.

다형연구

녹니석 다형의 안정영역은 온도, 압력 ($P_{lithostatic}$ 와 $P_{hydrostatic}$), 화학조성, 입도, 열역학적 조건 및 시간등을 고려해야 한다. Al^{IV} 와 $Fe/(Fe+Mg)^{VI}$ 의 관계를 고려한 Fig. 4에서는 대부분의 변질대 및 광화대 내의 녹니석이

IIb 형임을 보여주고 있다 (Bailey and Brown, 1962; Shirozu, 1958). 이러한 결과는 녹니석의 80% 정도가

IIb 형인 점을 감안한다면 당연한 결과일 수도 있으나, 녹니석 위에 자생하는 녹니석과 모암에 자생하는 자형의 녹니석 등을 고려해 보면 이들 녹니석은 열수변질과 관련이 있다는 것을 지시한다.

IIb 형 구조는 고온에서 안정하며, 200°C 근처에서 변화한다 (Bailey, Brown, 1962; Hayes, 1970). Ia 형의 경우, 팔면체 자리의 양이온과 2:1 층형에서 사면체 양이온이 중첩되어 강한 양이온 반발력을 가지게 되는 반면, IIb형은 인접한 2:1 층형의 구조내에서 어느 양이온과도 중첩되지 않으므로 반발력을 최소화 할 수 있다. 사면체회전이 H-결합길이를 최소화하기 위해 일어나며 (Shirozu, Bailey, 1965), 이들 결합이 층간 전하에 영향을 거의 받지 않을 정도의 안정한 구조를 갖게 되는 것이다 (Bish, Giese, 1981). 사면체회전은 사면체망의 저면산소들의 대칭이 인접한 면의 OH-group으로 회전하게하여 삼방 (trigonal)을 이루게 한다. 이러한 효과들은 다형변화가 어느 정도의 용해와 재결정화작용을 포함하는 것임을 의미하나, 고상 전체에서 일어나는 것은 아니다 (Walker, 1993).

일부 녹니석의 (202) 피크는 중첩되어 나타나 (Fig. 7), 모든 대표시료는 약한 2.66Å (1.5, 202)과 강한 2.59Å (6, 202), 2.55Å (5, 201), 2.45Å (5, 203), 2.39Å (5, 202), 2.26Å (4, 204) 및 2.01Å (6, 204) 등 IIb 형의 전형적인 피크를 가진다 (Bailey, 1980; Moore, Reynolds, 1989). Multiple-peak Separation Program을 이용하면, IIb 형의 녹니석에서 나타나는 이들 피크들의 분리를 확실하게 감지할 수 있고 (Fig. 8), 또한 중첩된 겹운모 (131)의

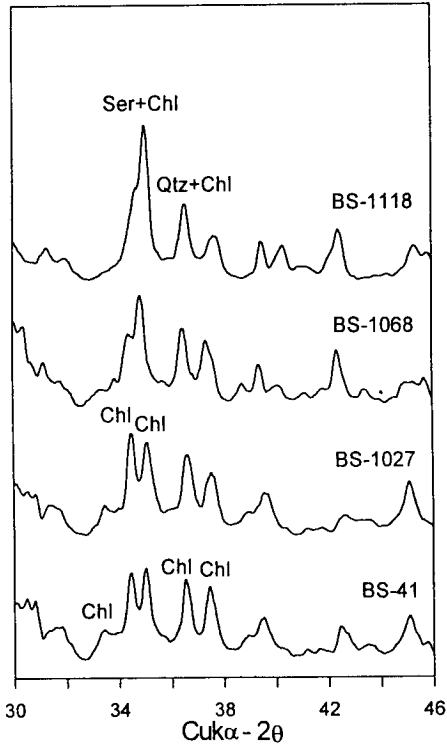


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of representative chlorites (Cu-Kα radiation).

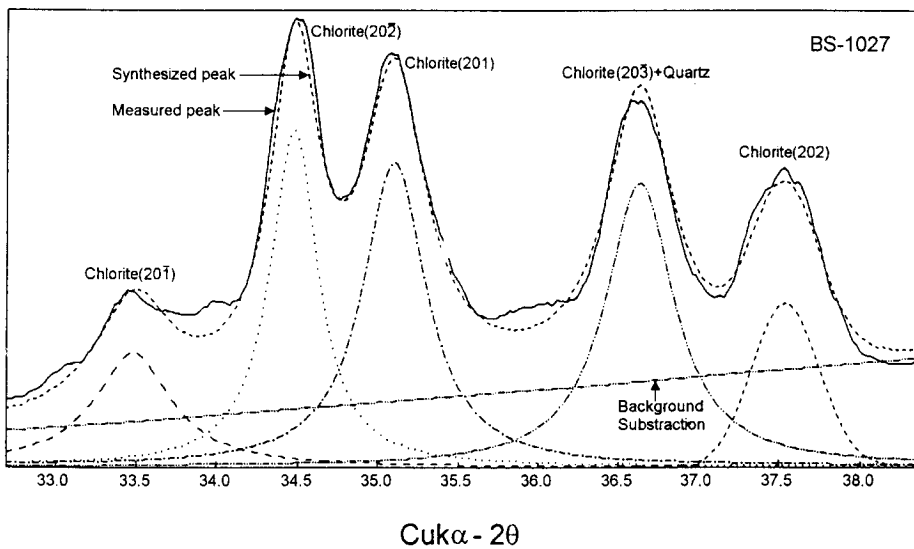


Fig. 8. Synthesized peak result for representative chlorite from multi-peak separation program.

피크도 녹니석 (203) 피크와 분리할 수 있다. 이러한 결과들을 고려해 볼때, 본 역에 존재하는 녹니석중 IIb 형이 우세하다는 것을 알 수 있다.

토의 및 결과

견운모

Fig. 1에서와 같이 보배광상의 견운모는 상동광상의 견운모와 같이 다른 비금속 광상에 비해 비교적 고온에서 형성된 것임을 알 수 있고, 이러한 결과는 저자들에 의해 이미 논의된 바 있다. 그러나, Cathelineau (1988)는 200°C 이하의 온도에서 형성된 견운모는 선형합수가 맞지 않으며 이는 다른 점토광물과의 혼합 또는 구별하기 힘든 혼합층상점토광물때문이라고 지적한 바 있다. 그러나 Kim *et al.* (1991)과 Moon, Moon (1996)은 이미 본 광상에서의 혼합층상광물은 존재하지 않음과 대부분의 변질대에서의 2M₁ 형의 우세함을 밝힌바 있다. Kim *et al.* (1991)은 또한 본 광상이 330°C에서 형성되었음을 제안하였으므로 이러한 결과는 상당한 타당성이 있다고 사료된다.

다형연구에 있어서는, 1M-2M₁ 혼합체 중 2M₁의 존재비를 Cap Rough mica (Tettenhorst and Corbatö, 1993) 연구결과에 도시하였다. 만일 강변질대에 mm-size 견운모가 우세하다 (Kim *et al.*, 1991)면 2M₁ 형이 홍주석-납석대에서 우세하게 나타나야 한다. 그러나, 도시결과 이는 현미경관찰결과와 마찬가지로 변질대간에 특별한 차이를 나타내지 않는다. 결과적으로, 이는 강변질대의 견운모도 역시 조립질과 세립질이 공존하므로, 존재비가 불규칙함을 지시한다. 이는 후기의 세립질 견운모가 조립질의 견운모를 재치환함을 제안한 문지원, 문희수 (1995)의 결과와 잘 일치한다.

녹니석

화산암의 열수변질로 생성된 자생 녹니석을 지질온도계로 이용하는 기존의 연구들은 구조변화를 중심으로하는 다형연구와 양이온, 이온의 위치, 녹니석과 유체간의 평형을 고려하는 6개 단종 (Walshe, 1986)을 중심으로하는 화학조성의 변화연구로 구분된다. 그러나 녹니석 지질온도계는 형성온도 뿐만 아니라 f(O₂), Fe/(Fe+Mg), 유체의 pH, 전암성분, 매물심도 및 열수변질 정도에도 영향을 받는다.

우선 전자현미분석결과, 황진연 등 (1993)에 의해 본

광상의 열적기원으로 보고된 화강반암의 녹니석은 다른 녹니석과 화학조성상의 차이가 두드러지므로, 열적기원에 대한 Kim *et al.* (1991)과 문지원과 문희수 (1995)의 제안을 뒷받침 해주는 것이다. 보배광상의 녹니석의 경우, 자생녹니석이 한반도 남부의 화산암에서 대부분 발견되는 prophyllitization의 변질산물이고, 모암의 영향을 거의 받지 않았다 하더라도 상기된 여러 다른 요인에 영향을 받을 것이다. Seyfried, Mottl (1982)은 치환가능한 양이온 중 Mg 함량이 Fe 함량보다 높을 경우, 이러한 열수는 많은 해수를 포함한 것이라고 지적하였다. 그러나 전자현미분석결과, Fe : Mg의 평균양이온비는 4.52 : 3.97이며, 이는 본 광상에 인접한 해수의 영향을 거의 받지 않은 것임을 알 수 있다. 만일 녹니석이 유체 혹은 황철석과 평형을 이루었다면, 유체 내의 Fe²⁺/Mg²⁺ 비는 pH, f(O₂), 온도 및 황농도와 관련이 있다 (Shikazono, Kawahata, 1987). 보배광상의 녹니석은 Fe²⁺ 농도를 고려해 볼때, f(O₂), S, and SO₄²⁻/H₂S가 낮고, pH가 높은 환경에 형성된 것임을 알 수 있다 (Giggenbach, 1984), 또한 이는 문지원, 문희수 (1995)가 제안한 바와 같이 이 녹니석은 prophyllitization의 산물임을 지시하는 것이다.

팔면체자리의 빈자리를 이용하는 Cathelineau, Nieva (1985)는 본역에서의 녹니석 생성환경과 잘 일치하나, 최근에 Jiang *et al.* (1994)과 Essene, Peacor (1995)는 여러 연구에서 사용되는 빈자리를 이용하는 실험식들은 주로 다른 미세광물포유물에 의해 교란됨을 지적하였다. 그러나 그들 역시, 혼합층상광물과 공존하는 미세광물들이 변성도의 증가와 열수변질의 강도가 늘어남에 따라 결정의 입도와 균질성이 증가함으로의 팔면체에서의 자리와 사면체 Al이 연속적인 증감함수를 보인다고 하였다. 따라서 본역에서 산출되는 자생 녹니석이 전형적인 형태를 갖추고 있으며, 또한 혼합층상광물의 존재는 이미 부정된바 (Kim *et al.*, 1991; Moon, Moon, 1996), 겉보기 팔면체 빈자리 또는 사면체 Al을 이용한 지질온도계는 비교적 정확한 값이라 생각된다. 온도영역을 고려해보면, Ia형의 최고형성온도는 300°C (Weaver *et al.*, 1984), IIb형의 최저생성온도는 200°C (Walker, 1989), 135°C (Walker, Thompson, 1990)등 다양한 의견이 제시되고 있다. 따라서 다형을 이용한 지질온도계의 활용은 다소 정확한 값을 유추하기 힘들게 한다. 이러한 기존의 연구들은 Ia형 녹니석이 300°C (Weaver *et al.*, 1984)에서도 안정할 수 있고, IIb형녹니석도 135°C (Walker, Thompson, 1990)의 낮은 온도영역에서도 안정할 수 있음을 의미하는 것이다. Walker (1993)는 다형변화에 있어서 압력의 영향을 강조하였는데, Ia형은 조립질암석에서 P_{pore} < P_{lithostatic} 한 환경에

서 IIb형은 세립질 암석에서 $P_{\text{pore}}=P_{\text{lithostatic}}$ 한 환경에서 생성된다고 제안한 바 있다. 이러한 결과 역시, 본역의 광화대, 즉 치밀한 광석 내에서 산출된 자생한 녹니석이 IIb형이었음을 뒷받침한다.

사 사

본 연구는 한국과학재단과 전라광물연구센터의 연구비 보조로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- 김종대, 문희수, 김성금, 김인준 (1992) 김해지역 상동광상산 견운모의 광물화학 및 안정동위원소 조성. 광산지질, v. 25, p. 275-282.
- 문지원, 문희수 (1995) 부산 보배견운모광상의 산출상태와 생성환경. 자원환경지질학회지, v. 28, p. 93-107.
- 박맹언, 최인식, 김진섭 (1992) 유문암-열수 반응과 유광 견운모 광상의 성인. 광산지질, v. 25, p. 225-232.
- 박희인, 장호완, 문희수 (1992) 경상분지내 광상생성기와 생성구. 목적이초연구 제1차(1992) 보고서. 한국과학재단.
- 박희인, 장호완, 문희수 (1993) 경상분지내 광상생성기와 생성구. 목적이초연구 제2차(1993) 보고서. 한국과학재단.
- 이강원 (1993) 밀양 납석 광상에 대한 광물광상학적 연구 연세대학교 석사학위논문, p. 129.
- 정승우 (1990) 전남 해남 납석광상의 열수변질작용 및 이에 수반된 일라이트의 광물학적 특성 연구. 연세대학교 석사학위논문, p. 84.
- 황진연, 김광혜, 정윤영 (1993) 부산 보배도석광상에서 산출하는 점토광물의 산상. 한국광물학회지, 6권, p. 27-37.
- Bailey, S.W. (1980) Summary of recommendations of AIPEA nomenclature committee. Clay Miner., v. 15, p. 85-93.
- Bailey, S.W. and Brown, B.E. (1962) Chlorite polymorphism: I. Regular and semi random one-layer structures. Amer. Miner., v. 47, p. 819-850.
- Bence, A.E. and Albee, A.L. (1968) Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. J. Geology, v.76, p.382-403.
- Bish, D.L. and Giese, R.F., Jr. (1981) Interlayering bonding in IIb chlorite. Amer. Miner., v. 66, p. 1216-1220.
- Cathelineau, M. (1988) Cation site occupancy in chlorite of temperature. Clay Miner., v. 23, p. 471-485.
- Cathelineau, M. and Nieva, D. (1985) A chlorite solid solution geothermometer, The Los Azufres (Mexico) geothermal system, Contrib. Miner. Petrol., v. 91, p. 235-244.
- Choo, C.O. and Kim, S.J. (1992) Formation of illite in the natural $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ system in the hydrothermal clay deposit of the Bobae mine, Korea. J. Miner. Soc. Korea, v. 5, p. 6-13.
- De Caritat, P., Hutcheon, L., and Walshe, J.L. (1993) Chlorite geothermometry: A review. Clays Clay Miner., v. 41, p. 219-239.
- Di Macro, M.J., Ferrell Jr., R.E., and Lowe, D.R. (1989) Polytypes of 2:1 dioctahedral micas in silicified volcanoclastic sandstones, Warrawoona Group, Pilbara Block, Western Australia. Amer. J. Sci., v. 289, p. 649-660.
- Eberl, D.D. Srodon, J., Lee, M., Nadeau, P.H., and H Northrop H.R. (1987) Sericite from the Silverton caldera Colorado: Correlation among structure, composition, origin, & particle thickness. Amer. Miner., v. 72, p. 914-934.
- Essene, E.J. and Peacor, D.R. (1995) Clay mineral geothermometry-A critical perspective. Clays Clay Miner., v. 43, p. 540-553.
- Giggenbach, W.F. (1984) Mass transfer in hydrothermal alteration systems - A conceptual approach. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 47, p. 925-939.
- Hayes, J.B. (1970) Polymorphism of chlorite in sedimentary rocks. Clays Clay Miner., v. 18, p. 285-306.
- Hey, M.H. (1954) A new review of the chlorites. Min. Mag., v. 30, p. 277.
- Jiang, W.T., Peacor, D.R., and Buseck, P.R. (1994) Chlorite geothermometry?-Contamination and apparent octahedral vacancies. Clays Clay Miner., v. 42, p. 593-605.
- Jowett, E.C. (1991) Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting (Toronto), Abstracts 16, A62.
- Kim, G.Y. and Kim, S.J. (1992) Mineralogy of clay minerals from the Sarisan mine, Korea. J. Miner. Soc. Korea, v. 5, p. 79-92.
- Kim S.J., Choo, C.O., Park, H.I. and Noh, J.H. (1991) Mineralogy and genesis of hydrothermal deposits in the Southeastern part of Korea Peninsula: (2) Bobae sericite seposits, Jour. Miner. Soc. Korea, v. 4, p. 129-140.
- Kranidiotis, P. and MacLean, W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. Econ. Geol., v. 82, p. 1898-1991.
- Maxwell, D.T. and Hower, J. (1967) High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian Belt Series. Amer. Miner., v. 52, p. 843-857.
- Moon, J.W. and Moon, H.S. (1996) Characterization of sericite occurred in the Bobae mine, Pusan, Korea. Econ. Environ. Geol., v. 29, p. 129-138.
- Moore, D.M. and Reynolds, Jr., R.C. (1989) X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. ed. Oxford University press, Oxford, New York, p. 332.
- Rhee, B.Y. (1991) Mineralogy of sericites in the Daehyun mine, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- Seyfried, W.E., Jr. and Mottl, M.J. (1982) Hydrothermal alteration of basalt by seawater under seawater-dominated conditions. Geochim. Cosmochim. Acta. v. 46, p. 985-1002.
- Shikazono, N. and Kawahata, H. (1987) Compositional differences in chlorite from hydrothermally altered rocks and hydrothermal ore deposit. Canadian Mineralogist, v. 25, p. 465-474.
- Shirozu, H. (1958) X-ray powder patterns and cell dimensions of some chlorites in Japan, with a note on their interference colors. Mineral. J., (in Japanese), v. 2, p. 209-223.

- Shirozu, H. and Bailey, S.W. (1965) Chlorite polytypism. III. Crystal structure of an orthohexagonal iron chlorite. *Amer. Miner.*, v. 50, p. 868-885.
- Tettenhorst, R.T. and Corbató, C.E. (1993) Quantitative analysis of mixtures of 1M and 2M dioctahedral micas by X-ray diffraction. *Clays & Clay Miner.*, v. 41, p. 45-55.
- Velde, B. (1965a) Phengite micas: Synthesis, stability and natural occurrence. *Amer. Jour. Sci.*, v. 263, p. 886-913.
- Velde, B. (1965b) Experimental determination of muscovite polymorph stabilities, *Amer. Miner.*, v. 50, p. 436-449.
- Velde, B. and Hower, J. (1963) Petrological significance of illite polymorphism in Paleozoic sedimentary rocks. *Amer. Mineral.*, v. 48, p. 1239-1254.
- Walker, R.J. (1989) Polymorphism of chlorite in very low grade metamorphic rocks. *Amer. Mineral.*, v. 74, p. 738-743.
- Walker, R.J. (1993) Chlorite polytype geothermometry. *Clays & Clay Miner.*, v. 41, p. 260-267.
- Walker, R.J. and Thompson, G.R. (1990) Structural variations in chlorite and illite in a diagenetic sequence from the Imperial Valley, California. *Clays & Clay Miner.*, v. 38, p. 315-321.
- Walshe, J.L. (1986) A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems. *Econ. Geol.*, v. 81, p. 681-703.
- Weaver, C.E., Highsmith, P.B. and Wampler, J.M. (1984) Chlorite: in "Shale-slate metamorphism in the Southern Appalachians", C.E. Weaver and associates, ed. Elsevier, Amsterdam, p. 99-139.
- Young, R.A. and Wiles, D.B. (1982) Profile shape functions in Reitvelt refinements. *J. Applied Cryst.*, v. 14, p. 430-438.

1996년 6월 8일 원고접수