

## 충주부근 활석 광상의 성인

김형식 · 조동수

고려대학교 이과대학 지질학과

**요 약** : 충주부근 활석 광상주변에는 옥천대의 변성퇴적암류에 속하는 계명산층, 문주리층, 대항산 규암층, 향산리 돌로마이트층과 염기성암 기원 변성암류 등이 분포한다. 활석 광상은 향산리 돌로마이트층내에 대항산 규암층 인접부에서 산출된다. 향산리돌로마이트층의 변성광물군은 ①방해석-투각섬석-활석-석영, ②방해석-활석-석영, ③투각섬석-방해석-백운석 ④방해석-백운석-금운모-녹니석 등이다. 활석의  $X_{Mg}(=Mg/(Fe+Mg))$ 는 0.98이며 이상적인 활석의 화학성분에 가깝다. 활석의 형성은 규질 돌로마이트가 중압형 광역변성작용을 받아 형성된 것으로 인지되며, 접촉변성작용 또는 열수작용의 흔적은 찾아볼 수 없다. 향산리 돌로마이트층에 인접해 있는 이질암 또는 염기성 변성암의 공생광물군이 ①각섬석-흑운모-백운모-녹염석-석영 ②흑운모-녹니석-석영 ③각섬석-양기석-녹염석-사상석-석영인 것으로 보아 녹염석-엠피블라이트상 내지 녹색편암상에 해당함을 보여 준다. 활석 생성은 다음의 화학반응과 깊은 관련성이 있다; (I) 3 백운석+4 석영+H<sub>2</sub>O=활석+3 방해석+3 CO<sub>2</sub>; (II) 3 투각섬석+2 H<sub>2</sub>O+6 CO<sub>2</sub>=5 활석+6 방해석+4 석영. 활석, 투각섬석, 석영과 공생하는 방해석에 대한 지질온도계에서 약 434°C의 최저 평형 온도를 구할 수 있으며, X<sub>CO<sub>2</sub></sub>는 연구지역의 변성압력을 3 kbar로 가정할 때 약 0.1로 산정된다.

**핵심어** : 활석, 공생광물군, 녹염석-엠피블라이트상, 녹색편암상, 지질온도계

## 서 론

국내 활석 광상은 모암이 백운암이나 백운암질 석회암인 것과 사문암인 것이 있다. 양질의 활석 광석은 이중 백운암을 모암으로 하는 광상에서 산출되나 광량으로 보면 사문암을 모암으로 하는 것이 전체의 90% 이상을 차지한다(김규봉, 1972). 백운암에서 활석 광상의 산출은 ①백운암→활석, ②백운암질 석회암→활석, ③백운암질 석회암→석회질 규산염광물→활석의 3가지 유형으로 구분된다고 한다(박희인, 1982). 본 연구대상이 된 충주지역의 동양활석 광상은 규질 백운암에서 활석으로 직접 변화하는 유형으로 규모가 크고 양질의 활석을 생산하고 있다. 부광체는 향산리 돌로마이트층 중 대항산 규암층에 인접한 곳에 발달한다.

본 광상의 성인에 대하여 이민성 외(1965)는 백운암이 활석화된 것으로 기재했고 김규봉(1972)은 백운암질 석회암에 열수교대로 활석 광상이 형성되었다고 보고한 바 있다. 이종혁(1987)은 간접 요인과 직접 요인으로 분류하고, 간접 요인은 해저 화산 활동, 백운석화 작용, 열수교대작용이며, 직접 요인은 변성교대작용과 열수용액의 작용으로 백운암에 활석광체가 형성되었다고 보고하였다. 문희수 외(1988)

는 변성작용 후 습곡축 방향으로 생성된 통로를 통한 열수용액의 이동으로 활석 광상이 형성되었다고 했다. 또한 지질온도계를 적용하여 변성시의 최고온도는 475°C(방해석-백운석 지온계)이며 활석의 형성 온도는 165~190°C(녹니석 지온계)라 했다. 박찬영 외(1988)는 돌로마이트의  $\delta^{18}O(SMOW)$ 는 18.41~21.52‰,  $\delta^{13}C(PDB)$ 는 3.25~5.56‰의 범위로 열수기원이 아니며 심도별 규칙성이 없다고 보고하였다.

이상과 같이 본 활석 광상의 생성이 연구자에 따라 열수기원과 변성기원으로 대별되고 있는 바, 본 연구에서는 활석 형성이 변성작용과 밀접하게 관련이 있다는 것을 밝히고자 한다. 변성작용의 연구를 위하여 활석 광상이 부존하는 지역과 그 주변 일대에 대해 야외지질조사와 항내조사를 실시하였고, 아울러 실내연구 및 분석을 통해 변성암의 분류, 변성광물군, 화학반응, 변성상, 변성작용의 유형과 에피소드 등을 밝혔다. 상평형 관계와 지온계를 이용하여 변성온도를 산정하고, 유체의 성분을 유추하여 활석 생성환경을 규명하고자 하였다.

## 지질 개요

옥천대 중앙부를 접하는 본역은 선 캄브리아기(?)

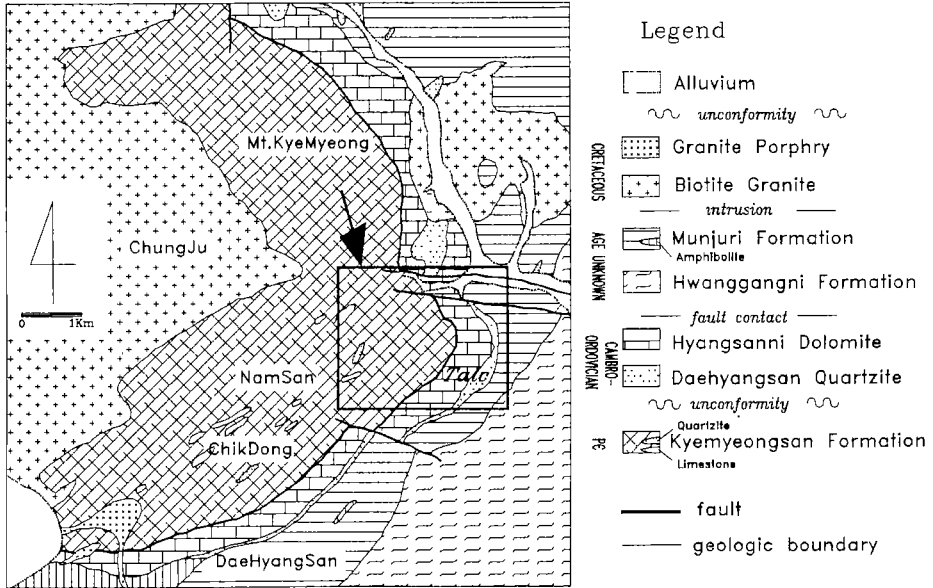


Fig. 1. Geological map of the Chungju area showing the location of Dongyang Talc Mine and the arrowed study area.

의 계명산층, 고생대 캄브로-오르도비스기의 향산리 돌로마이트층, 대향산 규암층, 그리고 시대 미상의 문주리층, 황강리층 등의 변성퇴적암층이 넓게 분포하며 이들 지층을 백악기의 충주화강암(흑운모 화강암)과 화강반암이 관입한다(그림 1).

계명산층은 각섬석-흑운모-석영 편암, 백운모-석영 편암, 흑운모석영 편암, 자철석-적철석-석영 편암, 각섬암, 렌즈상 규암과 결정질 석회암으로 구성된다. 향산리 돌로마이트층은 결정질 석회암, 결정질 백운암, 호상 결정질 석회암, 천매암 등으로 구성되며 이중 결정질 백운암에서 활석이 산출된다. 이 층들은 대체로 북동(30~60) 주향과 북서(50~70) 경사를 가지며 지역적으로 습곡구조를 보인다.

대향산 규암층은 유백색을 띠며 대부분 재결정된 석영으로 구성되어 있지만 백운모, 자철석 등이 소량 함유되어 있고, 향산리 돌로마이트층의 동측에서 이에 평행하게 분포한다. 지역적으로 등사습곡 구조가 발달하기도 하며 대부분 층리면을 보이지 않지만 부분적으로 이질 퇴적암과 호층을 이루기도 하여 층리면을 추측할 수 있게 한다.

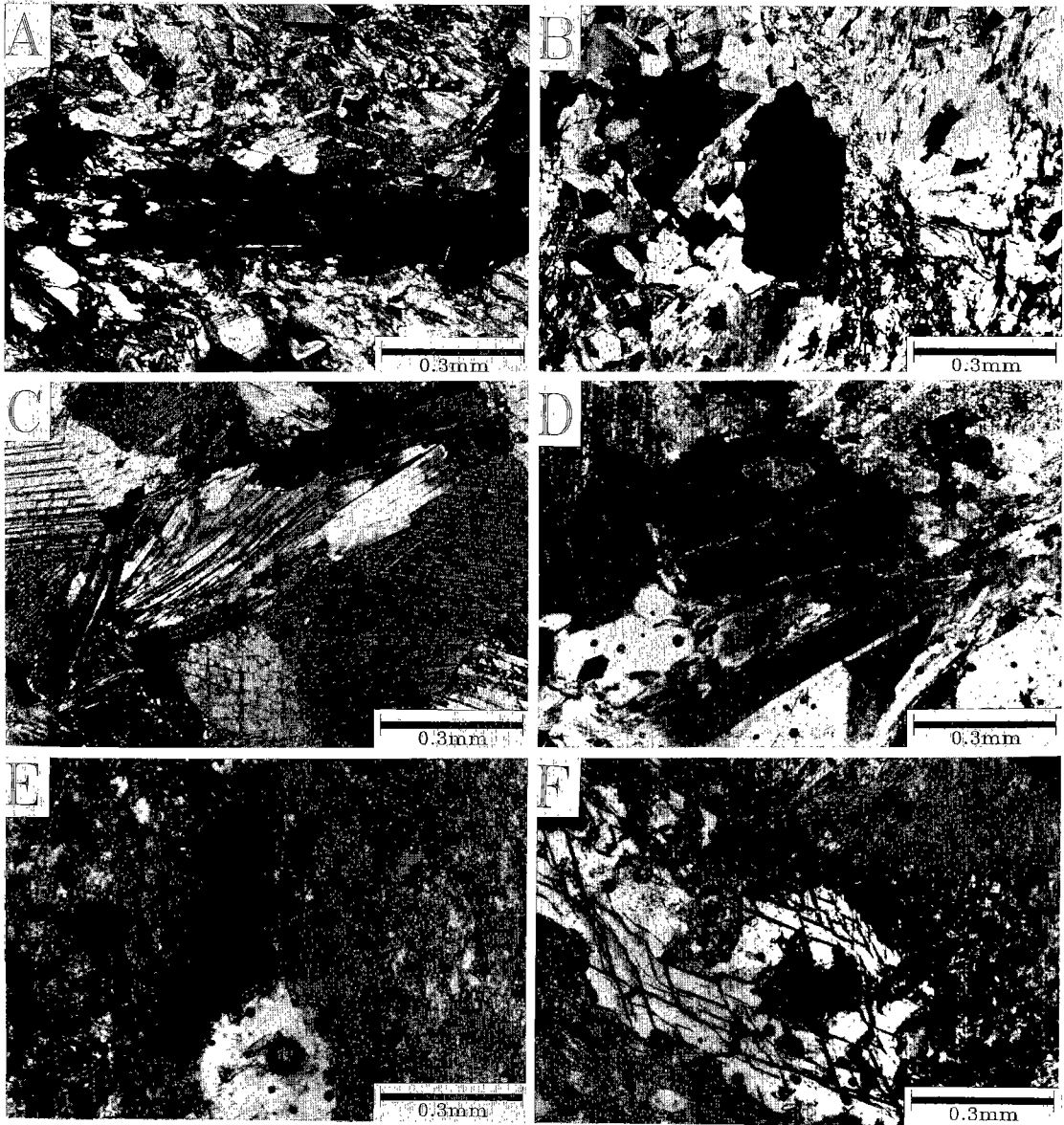
문주리층은 대향산 규암층 남동부에서 규암층에 평행하게 분포하며 주로 녹색의 파랑습곡 구조를 보이는 녹니석-백운모 편암과 특징적인 구조를 갖지 않는 치밀 견고한 녹니석-백운모-석영 편암, 등사

습곡 구조가 발달한 녹니석-백운모-석영 편암으로 흔히 자형의 자철석이 수반된다.

### 변성 작용

활석 광상 주변부에 나타나는 변성퇴적암은 기원암에 따라 두 가지로 대별할 수 있다. 즉 탄산염암에서 유래한 변성암과 사질 및 이질암 기원의 변성암이다. 사질 및 이질암 기원 변성암은 계명산층의 대부분을 구성하며 향산리 돌로마이트층 중에도 이질기원암이 분포한다. 변성광물군은 사장석-흑운모-자철석/적철석-석영, 흑운모-녹염석-각섬석, 백운모-흑운모-석류석-석영, 흑운모-석류석-각섬석-석영, 백운모-흑운모-녹염석-석영, 백운모-흑운모-석영이 나타난다(그림 2A, B).

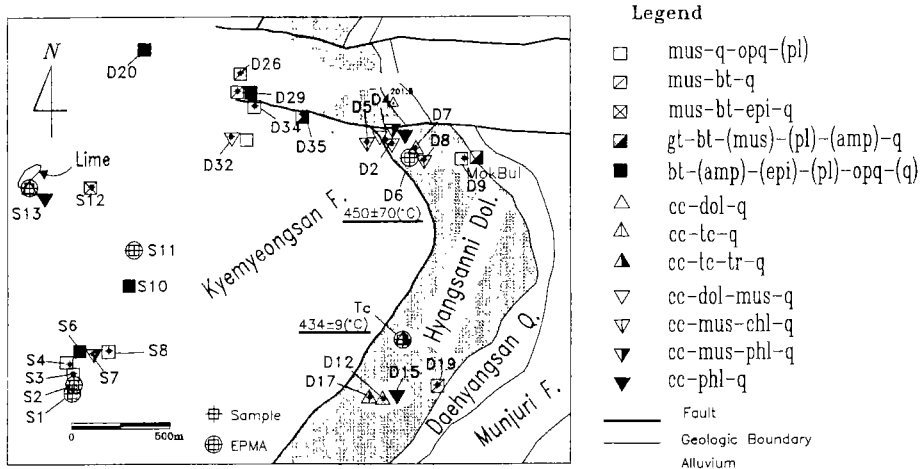
탄산염암 기원의 변성암은 방해석-백운석으로 구성된 순수한 탄산염암과 규산염 광물을 함유한 탄산염암으로 크게 구분할 수 있다. 석영과 함께 운모류 광물이 수반되는 경우에는 방해석과 백운석의 입자 사이에 금운모나 견운모가 성장하며 재결정된 석영이 국부적으로 모자이크조직을 이룬다. 공생광물군은 방해석-백운석-백운모-석영, 방해석-백운모-녹니석-석영, 방해석-백운모(견운모)-금운모-석영, 백운모-금운모-석영 등이다(그림 2C, D). 규산염 광물



**Fig. 2.** Photomicrographs of various mineral assemblages (A) muscovite-plagioclase-biotite-quartz (sp.: S1), (B) biotite-muscovite-hematite-quartz (sp.: S1), (C) calcite-phlogopite-chlorite (sp.: S13), (D) calcite-quartz-phlogopite (sp.: D6), (E) calcite-tremolite-talc-quartz (sp.: TC), and (F) tremolite replaced by talc, tremolite-calcite-talc-quartz (sp.: TC). All scale bars represent 0.3 mm.

을 함유한 탄산염암의 변성광물군은 방해석-백운석-석영, 방해석-활석-석영, 방해석-활석-투각섬석-석영이다. 방해석의 결정 내부에 포획물로서 다른 방해석의 결정이 성장하거나 석영의 포획물이 존재하기도 한다. 방해석-투각섬석-활석 광물군에서 투각섬석과 활석의 공존상태가 잘 나타난다(그림 2E, F).

광상 주변부에는 염기성 화산암 또는 반심성암 기원의 각섬석-양기석-올리고클레이스 편암, 양기석-알바이트 편암, 각섬석-녹염석-올리고클레이스 편암 등이 나타나기도 한다. 이상과 같은 변성광물군의 조합은 연구지역이 녹염석-엠펜볼라이트상에 대부분 해당하며 일부 녹색 편암상에 해당함을 지



**Fig. 3.** Mineral parageneses map showing the temperature from calcite geothermometry. Abbreviations used are: Lime=Limestone, F.=Formation, Q.=Quartzite, Dol.=Dolomite, mus=muscovite, q=quartz, opq=opaque, pl=plagioclase, bt=biotite, epi=epidote, gt=garnet, amp=amphibole, cc=calcite, dol=dolomite, tc=talc, tr=tremolite, chl=chlorite, phl=phlogopite.

시한다. 김형식(1970), Kim(1971, 1976), 김형식 외 (1984)에 의하면 옥천변성대는 중생대초에 일어난 중압형의 광역 변성작용에 의해 형성된 것으로 변성작용시 P/T 구배는 약 7.6 bar/°C (김형식 외, 1984)이다. 활석광체 주변부의 변성조건은 대략 400~550 °C, 3~4.5 kbar에 이른 것으로 사료된다.

**광물 화학**

활석과 공생하는 변성광물들과 활석을 배태한 돌로마이트층에 인접한 이질 및 사질암 기원 변성암의 구성광물들을 정량분석하였다. 전자현미분석은 서울대학교 지질과학과의 JEOL JXA-733을 이용하였고 분석시 사용된 표준물질은 자연산과 인공합성광물을 사용하였다. 분석조건은 가속전압 15 kV, 측정전류 10 nA, 빔(beam) 직경 5 µm이며 분석측정 시간은 F를 제외한 원소는 20초이며 F는 원소의 휘발성을 고려하여 30초간 측정되었다.

**활 석**

분석된 활석은 방해석-투각섬석-석영과 공생관계를 이룬다(그림 3). 활석의 평균 조성은 Mg<sub>5.66</sub>Fe<sub>0.13</sub>-Si<sub>8.10</sub>O<sub>20</sub>(OH)<sub>3.96</sub>F<sub>0.06</sub>이다. 활석에 Mg 대신 Fe의 치환은 산소분압(f<sub>O2</sub>)과 온도에 영향을 받으며 압력에 의한 영향은 거의 없다(Forbes, 1971). 온도가 감소

**Table 1.** Compositions of talc from Dongyang Talc Mine (on the basis of 22 anhydrous oxygens)

Sample No.	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4
SiO <sub>2</sub>	61.43	61.49	62.1	62.09
TiO <sub>2</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	0.02
FeO	1.23	1.11	1.14	1.06
MnO	0.02	0.02	0.02	n.d.
MgO	28.88	28.62	29.32	29.07
CaO	0.14	0.17	0.01	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	n.d.	n.d.
K <sub>2</sub> O	n.d.	0.01	0.02	0.01
F	0.08	0.07	0.34	0.13
Total	81.8	91.49	92.95	92.4
Si	8.09	8.11	8.09	8.11
Fe	0.14	0.13	0.13	0.11
Mg	5.67	5.63	5.69	5.66
Ca	0.02	0.03	—	—
F	0.03	0.03	0.14	0.05
Total	13.92	13.89	13.91	13.88
a*	0.920	0.919	0.934	0.944
Mean a(± 2σ)	0.929(± 0.021)			

\*a=activity of talc (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub>), is calculated as [X<sub>Mg</sub>]<sup>3</sup> where X<sub>Mg</sub>=[Mg]/[Fe+Mg+Ca]. (Nordstrom *et al.*, 1985); n.d.: not detected.

함에 따라 활석의 철함량은 증가하는 경향을 보이는데 본 역의 활석은 X<sub>Mg</sub> 0.98로 그 치환이 적은 편이다. 수화 광물의 F 성분은 상평형에 영향을 준다 (Valley *et al.*, 1982, Westrich, 1981). 활석의 OH

대신 F 치환의 양이 많을수록 활석의 안정 범위는 확대된다. Abercrombie *et al.*(1987)에 의하면 활석, 투각섬석, 방해석, 백운석, 석영의 반응은 투각섬석과 활석의 OH 대신 F의 치환으로 반응 온도가 변화하는데 투각섬석의  $X_{OH}$  0.70, 활석의  $X_{OH}$  0.80일 경우 반응온도가  $X_{OH}$  1.0인 경우 보다 반응온도가 약 20~50°C 상승하는 것으로 보고하고 있다. 분석된 활석과 공생하는 투각섬석의  $X_F$ 는 0.04~0.08이며 활석의  $X_F$ 는 0.01~0.04로 활석의 안정영역을 확장시킬 정도의 치환은 발생하지 않았으며 활석과 투각섬석의 안정범위에는 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 활석( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ )의 활동도(activity)를 이상적인 혼합용액에서 8면체 격자의 치환정도로 계산하면  $X_{Mg}^2(=[Mg]/[Mg+Fe+Ca])$ 이다(Nordstrom *et al.*, 1985). 분석된 활석의 활동도는 평균 0.93이다.

투각섬석

활석, 석영, 방해석과 공생하는 투각섬석의 성분은 표 2와 같다. 투각섬석( $Ca_2Mg_5Si_8O_{23}$ )의 활동도(activity)는  $[X_{Si}]^8[X_{Mg}]^5[X_{Ca}]^2$ 으로 계산될 수 있고,  $[X_{Si}]$ ,  $[X_{Mg}]$ 와  $[X_{Ca}]$ 는 각각  $[Si]/[Si+Al]$ ,  $[Mg]/[Mg+Fe]$ ,  $[Ca]/[Ca+Na]$ 이다(Nordstrom *et al.*, 1985). 분석된 투각섬석의 활동도는 평균 0.88이며,  $X_{Mg}$ 는 0.98이다.

방해석

향산리 돌로마이트층 중 활석-투각섬석-석영과 공생관계를 이루는 방해석과 계명산층 중에 협재된 렌즈상 결정질 석회암의 방해석 조성은 표 3과 같다. 계명산층 중에 분포하는 결정질 석회암 중 시료번호 S13과 S2에서의 방해석은  $X_{Ca}$ 가 0.99 이상으로 순수한 방해석이며 Fe, Mg, Mn 성분은 극히 적다. 향산리 돌로마이트층의 시료번호 D6-1과 D6-2는 방해석의  $X_{Ca}$ 가 0.95~0.96이고,  $X_{Fe}$ 는 계명산층 중의 결정질 석회암(S2, S13) 것보다 차이를 보이지 않으나  $X_{Mg}$ 는 0.02~0.04로 크다. 방해석( $CaCO_3$ )의 활동도(activity)를 이상적인 혼합용액에서 계산하면  $X_{Ca}$ 와 같은 값을 가진다(Nordstrom *et al.*, 1985). 향산리 돌로마이트 중 시료번호 D-6은 평균 0.96, 활석부근의 시료 TC의 경우 평균 0.97, 계명산층내의 방해석(S13, S2)은 0.99이다.

Mg를 함유하는 방해석 중 백운석과 공생을 이루

Table 2. Compositions of tremolite from the Hyangsa-nni Dolomite Formation (on the basis of 23 anhydrous oxygens)

Sample No.	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4
SiO <sub>2</sub>	58.84	60.3	57.53	59.14
TiO <sub>2</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.09	n.d.	0.03
FeO	0.88	1.06	0.88	0.89
MnO	0.05	0.06	0.09	0.05
MgO	23.17	24.11	22.65	23.73
CaO	14.06	14.09	13.98	14.1
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.03	n.d.	0.10
K <sub>2</sub> O	n.d.	0.01	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.	n.d.	0.03	n.d.
F	0.17	0.32	0.21	0.37
Total	97.35	100.07	95.37	98.43
Si	8.03	8.03	8.03	8.02
Al	0.02	0.02	n.d.	0.00
Fe	0.10	0.12	0.10	0.10
Mg	4.72	4.78	4.72	4.80
Ca	2.05	2.00	2.09	2.05
Na	0.02	0.00	n.d.	0.03
F	0.08	0.13	0.10	0.16
Total	15.03	15.11	15.05	15.16
a*	0.866	0.866	0.901	0.876
Mean a(±2σ)		0.877(±0.028)		

\*a=activity of talc ( $Ca_2Mg_5Si_8O_{23}$ ) is calculated as  $[X_{Si}]^8[X_{Mg}]^5[X_{Ca}]^2$  where  $[X_{Si}]=[Si]/[Si+Al]$ ,  $[X_{Mg}]=[Mg]/[Mg+Fe]$ ,  $[X_{Ca}]=[Ca]/[Ca+Na]$ . (Nordstrom *et al.*, 1985); n.d.: not detected.

는 경우 적용할 수 있는 지질온도계는 Rice(1977)에 의해 온도와 Mg 성분을 다음과 같은 관계로 설정한 바 있다.

$$\text{Log}_{10}[X_{MgCO_3}^{cc}] = \frac{-1690}{T(K)} + 0.795,$$

$X_{MgCO_3}^{cc}$ 는 방해석의  $MgCO_3/(MgCO_3+FeCO_3+CaCO_3)$  비의 값이다.

본 지질온도계의 적용온도범위는 400~650°C 이다. 이 지질온도계는 Rice(1977), Bowman and Essene(1982), Essene(1983) 등에 의해 탄산염암 변성 작용에 적용되었고, Skippen and Hutcheon(1974)와 Skippen(1975) 등은 백운석이 소멸되는 반응 이후에도 투각섬석, 석영과 공생하는 방해석의  $MgCO_3$  성분으로 지질온도계를 적용할 수 있음을 보였다. 방해석만 단독으로 산출되는 경우에 적용한 예는 Bowman and Essene, 1982; Essene, 1983 등이 있다.

**Table 3.** Compositions of calcite from the Hyangsanni Dolomite and Kyemyeongsan Formations

Sample No.	D6-1	D6-2	D6-3	TC-1	TC-2	TC-3	S13	S2
FeO	0.53	0.49	0.40	0.24	0.16	0.24	0.24	0.20
MgO	3.63	2.34	2.05	2.24	2.32	2.50	0.51	0.19
MnO	0.08	0.03	0.08	0.12	0.13	0.07	0.04	0.04
CaO	51.24	52.61	54.22	53.47	54.40	54.82	54.71	54.84
Total	55.49	55.48	56.95	56.06	57.01	57.62	55.49	55.27
$X_{Fe}$	0.011	0.010	0.008	0.005	0.003	0.005	0.005	0.004
$X_{Mg}$	0.040	0.026	0.022	0.024	0.025	0.027	0.006	0.002
$X_{Ca}$	0.949	0.964	0.970	0.971	0.972	0.969	0.990	0.994
Fe/Mg	0.011	0.010	0.008	0.005	0.003	0.005	0.005	0.004
$a_{CaCO_3}^*$	0.949	0.964	0.970	0.971	0.972	0.969	0.990	0.994
Mean $a(\pm 2\sigma)$		0.957 $\pm$ 0.018			0.971 $\pm$ 0.003		0.992 $\pm$ 0.004	
T(°C)**	499	436	416	429	432	440		
Mean T°C ( $\pm 2\sigma$ )		450( $\pm$ 70)			434( $\pm$ 9)			

\* $a_{CaCO_3}$  = activity of calcite ( $CaCO_3$ ) is calculated as  $[X_{Ca}]$  where  $X_{Ca} = [Ca]/[Fe+Mg+Ca]$ . (Nordstrom *et al.*, 1985). \*\*Equilibrium temperature using the  $[MgCO_3]$  of calcite in equilibrium with talc, tremolite, and quartz. n.d.: not detected.

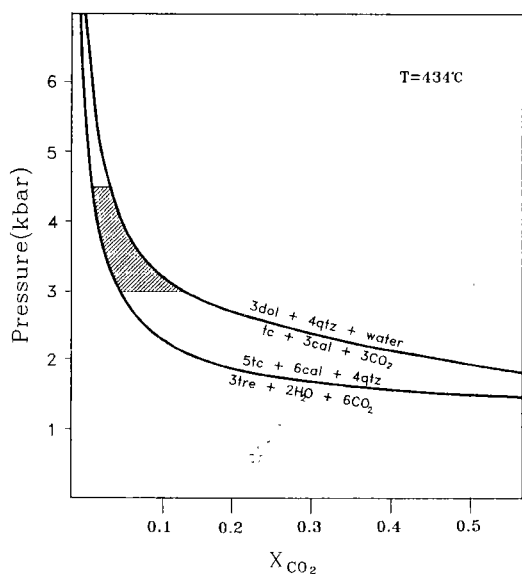
본 역은 전술한 바와 같은 광물공생 관계로 미루어 보아 Skippen and Hutcheon(1974), Skippen(1975), Bowman and Essene(1982), Essene(1990)의 경우와 같다고 본다. 따라서 표 3에 표시된 바와 같이 방해석-금운모-석영의 공생관계를 이루는 D6-1 시료에서의 방해석 최저 지질온도는 416~499°C이며, 방해석-활석-투각섬석-석영이 공생관계를 이루는 활석광상 향내시료(TC-1, 2, 3)의 경우에는 429~440°C이다. 이와 같은 온도는 본 역의 광역변성작용의 범위와도 대체로 일치하고, 또한 뒤에 기술할 활석 생성반응식 (I)과 (II)에 의해 설정된 조건과도 부합된다.

### 활석 광상의 형성

본 역의 활석 광상의 성인에 대해 서론에서 언급한 바와 같이 열수작용에 그 기원을 두고 있는 학자들도 있지만 금변 연구에 의하면 열수기원보다는 변성기원임을 지지하는 여러 증거를 찾을 수 있다. 즉 첫째로 본 역에 분포한 광역변성암류에 열수용액에 의한 변질작용이 중첩되어 있지 않고 단순히 광역변성작용에 의한 단일상의 변성광물군만이 관찰될 뿐이다. 둘째로 열수 광상 주변에 일반적으로 풍부히 나타나는 유화 광물이나 스카른 광물의 존재는 확인할 수 없다. 셋째로 석영맥의 발달은 광상주변부에만 국한되어 있지 않고 광역적이다.

백운석에 석영과 물이 첨가되어 활석이 형성되는 작용은 규질 백운암이 변성작용을 받을 경우 흔히 일어나며, 이에 대한 실험적 연구가 Metz and Winkler(1963), Gordon and Greenwood(1970), Skippen(1971), Poty *et al.*(1972), 박홍봉(1980) 등에 의해 수행된 바 있다. Gordon과 Greenwood(1970)의 실험에서 활석 형성반응은  $CO_2$ 의 분압이 낮을수록 저온에서 일어나며 반응온도는 400~500°C 전후이다. Skippen(1971)의 실험은 압력에 대한 영향을 보여주는데 압력이 낮을수록 생성온도가 낮아짐을 밝혔다. 박홍봉(1980)의 실험은 최고 117 bar로서 상대적으로 낮은 압력하에서 행해진 실험으로 이때 활석형성온도는 Skippen(1971)의 실험에서 예상할 수 있듯이 293°C로 낮은 온도이다.

연구지역의 활석형성시  $CO_2$ 의 분압을 추정하기 위하여, 방해석 온도계로 산정한 최저온도 434°C에서 활석, 투각섬석, 방해석의 활동도(각각 0.93, 0.88, 0.97)와 석영의 활동도를 1로 가정하여 “5 활석+6 방해석+4 석영=3 투각섬석+2  $H_2O$ +6  $CO_2$ ”의 반응에 대하여  $CO_2$ 의 분압에 대한 압력도표를 작성하였다(그림 4)(Berman, 1988). 위의 반응은 활석, 방해석과 석영이 반응하여 투각섬석,  $H_2O$ 와  $CO_2$ 를 생성하며, 규질 백운암에서 “백운석+4 석영+ $H_2O$ =활석+3 방해석+3  $CO_2$ ”의 반응 이후 과잉의 석영이 있을 경우 일어날 수 있으며 연구지역에서는 석영-투각섬석-활석-방해석의 공생광물군으로 관찰



**Fig. 4.** Pressure- $X_{CO_2}$  at 434°C for estimating  $X_{CO_2}$ , mineral reaction curve in the system Ca, Si, Mg, C, O, H at activities of talc, tremolite, and calcite are 0.93, 0.88, and 0.97 respectively (Berman, 1988). The lined area represents the conditions of talc deposits. cal= calcite, dol=dolomite, qtz=quartz, tc=talc, and tre=tremolite.

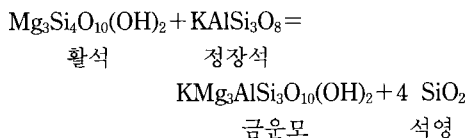
된다. 그림 4에서 압력을 본 역에 기 연구된 자료 (Kim, 1971; 김형식 외, 1984)로부터 3 kbar로 가정하여  $X_{CO_2}$ 는 약 0.1에 해당한다.

앞에서 언급한 바와 같이 충주 일대의 광역변성 작용은 그 변성온도와 압력이 대략 400~550°C, 3~4.5 kbar에 이른다는 사실과 위의 실험적 연구결과들로 미루어 보면 활석과 공생하는 방해석 지질은 도계로서 산정된 최저 온도 약 434°C는 활석의 형성온도로 인정되며  $CO_2$  분압은 약 0.1로 사료되는 바이다.

### 토론 및 결론

규질 백운암이 중온 중압하에서 백운석과 석영의 혼합으로 활석이 형성될 수 있는데도 활석의 분포가 많지 않은 이유에 대해서 Gordon 외(1970)는 백운석에 포함된 다른 성분들이 활석의 안정영역을 줄이기 때문이라고 설명하고 있다. Gordon 외(1970)에 의하면 적은 양의 정장석(KAISi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) 성분만으로도 활석 대신 금운모를 생성하며 이 성분은 일라이트(illite)나 백운모에 포함될 수 있다. 금운모는 활석과

다음과 같은 반응에 의해 연관되어 있다.



변성광물로 활석을 형성하기 위하여 원암성분에 상당량의 SiO<sub>2</sub>와 MgO가 필요하다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 4% 이하이고 K<sub>2</sub>O가 결핍된 경우 중온·중압의 변성환경에서 활석이 형성될 수 있다(Gordon et al., 1970).

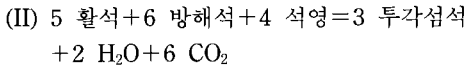
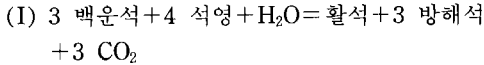
이종혁(1987)의 탄산염암의 화학분석을 인용하여 보면 ①백색대리암의 경우 SiO<sub>2</sub>의 함량이 0.48~12.01%, MgO 함량이 0.53~2.19%로 Si와 Mg가 활석을 형성시키기 위해서는 부족하다. ②호상석회암은 SiO<sub>2</sub>가 22%, MgO 함량이 28%이지만 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 4.9%로 활석의 형성보다는 석영-녹니석의 광물군을 보이는 점을 설명할 수 있다. ③백운암질 대리석의 경우 SiO<sub>2</sub>의 함량이 4.7~10.22%, MgO 함량이 20~28%로 Si 성분이 활석을 형성하기에는 비교적 적은 양이다. ④활석을 배태한 백운암질 석회암의 경우 SiO<sub>2</sub> 함량 4.7~29%, MgO 함량 6.6~22.4, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량 1.2~2.0%, K<sub>2</sub>O 함량 0.05~0.4%로 Al과 K 성분이 낮아 변성작용을 받을 경우 활석이 형성되었을 것으로 추정할 수 있다. 박찬영 등(1988)의 연구에서 본 역의 돌로마이트가 퇴적기원임을 밝히고, 활석의 형성은 열수기원보다는 광역변성작용에 의해 형성될 가능성을 시사한 바 있다.

활석 광상을 배태하고 있는 향산리돌로마이트층과 인접한 계명산층 및 문주리층은 변성작용의 에피소드가 동일하고 즉 단일상의 변성광물군이 나타나며, 변성도 또한 대체로 녹염석-엠포블라이트상 내지 녹색편암상에 해당하여 서로 일치한다. 활석-투각섬석-방해석 광물군에 적용된 방해석 지질온도계는 429~440°C로 본 역을 지배한 녹염석-엠포블라이트상의 광역변성작용의 범위내에 있다. 이상과 같은 사실을 근거로 본 활석 광상의 생성은 열수작용보다는 옥천변성대를 형성한 광역변성작용과 깊은 관련성이 있는 것으로 해석된다.

활석-방해석-석영과 활석-투각섬석-석영의 공생 광물군은 규질 성분이 풍부하고 운모류와 장석류가 결핍된 백운암질 석회암에서 녹염석-엠포블라이트상에 해당하는 광역변성작용시 다음의 (I)반응으로 활석이 형성되었고 국부적으로 과잉의 석영이 있을 경우 (I)반응의 생성물인 활석, 방해석과 석영이 반

응하여 투각섬석을 형성하게 된다.

활석이 형성될 당시의  $X_{CO_2}$ 는 (II)반응 이전이기 때문에 (II)반응에서 유추한  $X_{CO_2}$ , 0.1보다 낮은 값을 가졌을 것이다(Gordon *et al.*, 1970).



위의 (I)의 반응으로 형성된 활석은 반응식에서 몰비로 알 수 있는 바와 같이 동시에 생성, 수반되는 방해석과 석영에 비해 양적으로 소량이지만 본 지역에서 다량의 고품위 광상으로 농집되는 것은 변성작용과 동시에 또는 그 이후에까지 계속된 지각 변형작용으로 인한 습곡작용시 핀치와 스웰(pinched and swell)됨으로 해서 주로 습곡축을 따라 부화된 것으로 판단된다. 이러한 현상은 '항내 조사 결과에서도 그대로 인지되며 강원도 지역에 습곡작용을 심하게 받은 탄전지대에서 탄층이 부화되는 현상과 같다고 본다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 전략광물연구센터의 1992년도 연구기금(CMR 92-2-3)에 의해 수행되었으며 이에 깊은 사의를 표합니다. 이 논문의 초고를 세심하게 검토하고 유익한 비평을 많이 해주신 조문섭 교수, 송용선 교수, 익명의 심사위원 외 여러 분께 감사드립니다. 항내조사를 허락하여 주신 동양활석광업소 김경배 주임님과 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 김규봉, 1972, 한국의 활석광상, 국립지질조사소, 지질광상조사연구보고, 14, 5-121.
- 김형식, 1970, 한국 서남부 일대의 광역변성작용에 관하여, 지질학회지, 6, 97-118.
- 김형식, 김영겸, 이재록, 1984, 충북 괴산군 화양리 일대 옥천변성대의 다변성작용에 관한 연구, 고려대학교 이공논집, 25, 203-218.
- 문희수, 김성태, 1988, 동양활석광상에서 산출되는 활석에 대한 광물화학적 및 성인적 연구, 광산지질, 21, 235-255.
- 박찬영, 전효택, 1988, 동양활석광상의 관련암인 염기성 변성암과 돌로마이트의 지구화학적 연구, 대한광산학회지, 25, 135-147.
- 박홍봉, 1980, 수산화광물인 수활석, Xonotlite, 활석, 투각섬석 및 Antigorite의 열수합성, 광산지질, 13, 65-68.
- 박희인, 1982, 한국의 지질과 광물자원, 연세대학교 지질학과 동문회, 362-368.
- 이민성, 박봉순, 1965, 한국지질도(1:50,000), 황강리도 폭설명서, 국립지질조사소.
- 이종혁, 1987, 충주일원 활석광상의 성인에 관한 암석학적 연구 - 원암의 종류 및 성인 -, 지질학회지, 23, 173-188.
- Abercrombie, H.J., Skippen, G.B., and Marshall, D.D., 1987, F-OH substitution in natural tremolite, talc, and phlogopite, *Cont. Min. Pet.* 97, 305-312.
- Berman, R.G., 1988, Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system  $Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2$ , *Jour. Petrol.*, 29, 445-522.
- Bowman, J.R. and Essene, E.J., 1982, P-T-X( $CO_2$ ) conditions of contact metamorphism in the Black Butte aureole, Elkhorn, Montana. *Am. J. Sci.* 282. 311-340.
- Essene, E.J., 1990, Solid solution and solvi among metamorphic carbonates with applications to geologic thermobarometry, In: Reeder, R.J. *Rev. Mineral.* 11, Carbonates: Mineralogy and Chemistry, 77-96.
- Forbes, W.C., 1971, Iron content of talc in the system  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2-Fe_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , *Jour. Geol.*, 79, 63-74.
- Gordon, T.M. and Greenwood, H.J., 1970, The reaction: Dolomite + Quartz + Water  $\rightleftharpoons$  Talc + Calcite + Carbon dioxide, *Am. Jour. Sci.*, 268, 225-242.
- Kim, H.S., 1971, Metamorphic Facies and Regional Metamorphism of Ogcheon Metamorphic Belt, *Jour. Geol. Soc. Korea.* 7, 221-256.
- Kim, H.S., 1976, Biotite from metapelites of the Ogcheon-Geosan District. *Korea Jour. Geol. Soc. Korea.* 12, 189-206.
- Metz, W., and Winkler, G.F., 1963, Experimentelle Gesteins-metamorphose-VII Die Bildung von Talc aus Kieseligen Dolomit: *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27, 431-457.
- Nordstrom, D.K., and Munoz, J.L., 1985, *Geochemical Thermodynamics*, Blackwell Scientific Publications, Palo Alto, 147-179.
- Poty, B., Holland, H.D., and Borcsik, M., 1972, Solution-mineral equilibria in the system  $MgO-SiO_2-H_2O-MgCl_2$  at 500°C and 1 kbar, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, 1101-1113.
- Rice, J.M., 1977, Progressive metamorphism of impure dolomitic limestone in the marysville aureole, Montana, *Am. Jour. Sci.*, 277, 1-24.
- Skippen, G.B., 1971, Experimental Data for reactions in siliceous marbles, *Jour. Geol.*, 79, 457-481.
- Skippen, G.B., 1974, An experimental model for low pressure metamorphism of siliceous dolomitic marble, *Am. Jour. Sci.*, 274, 487-509.
- Skippen, G.B., and Hutcheon, I., 1974, The experimental calibration of continuous reactions in siliceous carbonate rocks, *Canadian Mineral.* 12, 327-333.



Valley, J.W., Petersen, E.U., Essene, E.J., and Bowman, J.R., 1982, Fluorophlogopite and fluorotremolite in Adirondack marbles and calculated C-O-H-F fluid compositions, *Am. Mineral.*, 67, 545-557.

Westrich, H.R., 1981, F-OH Exchange equilibria bet-

ween mica-amphibole mineral pairs, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78, 318-323.

(책임편집 : 조문섭)

## Genesis of talc deposits in the Chungju area, Korea

Hyung Shik Kim and Dong Soo Cho

*Department of Geology, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

**ABSTRACT :** The geology of the talc ore deposits in the Chungju area consists of the Kyemyeongsan Formation, the Munjuri Formation, the Daehyangsan Quartzite, the Hyangsanni Dolomite, and the basic rocks of the Ogcheon belt. The talc ore occurs in the Hyangsanni Dolomite near the Daehyangsan Quartzite. The mineral assemblages in the Hyangsanni Dolomite are ① calcite-tremolite-talc-quartz, ② calcite-talc-quartz, ③ tremolite-calcite-dolomite, and ④ calcite-dolomite-phlogopite-chlorite. Talc has almost the ideal composition ( $X_{Mg} = Mg/(Fe+Mg) = 0.98$ ). Talc was formed in siliceous dolomite by the medium-pressure type regional metamorphism. The evidences for contact metamorphism and/or hydrothermal reaction are not clear. The metamorphic grade of the Hyangsanni Dolomite and its adjacent pelitic or basic rocks near the deposits corresponds to epidote-amphibolite facies or greenschist facies based on the mineral assemblages of ① hornblende-biotite-muscovite-epidote-quartz, ② biotite-chlorite-quartz, and ③ hornblende-actinolite-plagioclase-quartz. The formation of the talc deposits were caused by the following reactions due to greenschist facies metamorphism of siliceous-dolomitic rocks in the Hyangsanni Dolomite. (I)  $3 \text{ dolomite} + 4 \text{ quartz} + \text{H}_2\text{O} = \text{talc} + 3 \text{ calcite} + 3 \text{ CO}_2$ ; (II)  $3 \text{ tremolite} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 = 5 \text{ talc} + 6 \text{ calcite} + 4 \text{ quartz}$ . The minimum temperature of the talc-tremolite-quartz assemblage is about 434°C from calcite thermometry and the carbon dioxide mole fraction in metamorphic fluid ( $X_{\text{CO}_2}$ ) is about 0.1 at assumed pressure, 3 kbar.

**Key Words :** Talc, mineral assemblages, epidote-amphibolite facies, greenschist facies, thermometry