

충남지역 활석광상에서 산출되는 금운모의 광물특성 및 기원

Mineralogical Characteristics and Genesis of Phlogopite in the Talc Deposits of the Chungnam Area, Korea

김 건 영 (Geon-Young Kim)^{1,*} · 김 수 진 (Soo Jin Kim)² ·
고 용 권 (Yong Kwon Koh)¹ · 배 대 석 (Dae Seok Bae)¹

¹한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부 심부지질환경특성연구분야
(Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-606, Korea)

²서울대학교 지구환경과학부

(School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

요약: 충남지역 활석광상에서 산출되는 금운모의 광물학적 특성 및 활석화 작용과 연관된 금운모의 생성기원을 연구하였다. 연구지역의 활석광상에서 산출되는 운모류는 녹니석과 더불어 활석광석의 주요 불순광물이다. 화학적으로 활석과 공존하는 운모류들은 전형적인 금운모 조성을 보여주고, 활석과 직접적인 관련이 없이 산출되는 운모류들은 흑운모에서부터 금운모 조성까지 광범위한 분포를 보여준다. 금운모는 주로 활석광체의 외곽부의 검은 변질대에 분포하며, 특히 괴상 활석광석에 수반되어 산출된다. 편광현미경이나 후방산란전자상에서는 금운모와 녹니석이 혼정을 이루고 있는 양상을 흔히 관찰할 수 있으며, 드물게 활석과 함께 혼정을 이루는 양상을 관찰할 수 있다. 금운모의 투과전자현미경관찰결과, 일반적으로 전형적인 10 Å의 격자상 내에 14 Å의 녹니석층이 불규칙하게 혼합되어 있기 때문에 금운모의 생성과정이 녹니석과 밀접한 관계가 있음을 지시하고 있다. 이러한 금운모의 산출상태와 광물학적 특성 및 금운모생성에 필요한 K의 기원을 고려하였을 때, 연구지역의 금운모는 활석화 작용의 후기단계에서, 초기 성분과는 달리 K를 충분히 함유한 열수용액과 활석광체와의 반응에 의해서 주로 생성된 것으로 판단된다. K은 이러한 K-변질작용이 일어나기 용이한 구조조건을 가진 활석광체와 주변 화강암질 편마암과의 접촉부에서 화강암질 편마암으로부터 유입되었다.

주요어 : 금운모, 활석광상, 녹니석, 혼합층상, K-변질작용

ABSTRACT: Mineralogical characteristics and genesis of phlogopite in the talc deposits of the chungnam area were studied. Mica is one of the major impurity of talc ores in the study area. Talc-related micas show typical phlogopite composition, whereas talc-unrelated micas show wide compositional variations between biotite and phlogopite. Phlogopite mainly occurs in the black-wall type zone, especially in the nodular talc ores near the outer part of talc ore bodies. Interleaving textures of phlogopite and chlorite are easily observed under the optical microscope and back-scattered

*교신저자: kimgy@kaeri.re.kr

electron images. Interleaving textures of phlogopite and talc are observed also. Examination of the phlogopite by transmission electron microscope reveals that 14 Å layers of chlorite are randomly interlayered within the 10 Å layers of phlogopite, which suggests that the genesis of phlogopite is closely related to chlorite. Considering the occurrence and mineralogical characteristics of phlogopite, and the possible origin of K for the formation of phlogopite, phlogopite of the study area was formed by interaction between talc ore body and hydrothermal solution containing sufficient K at the late stage of talc formation. K might be introduced from the granitic gneiss at the contact zone between the talc ore body and the granitic gneiss under favorable structural condition for the potash metasomatism.

Key words : phlogopite, talc deposits, chlorite, interlayering, K-metasomatism

서 론

일반적으로 활석광상은 생성기원에 따라 초염기성암의 열수변질작용에 의해 생성된 것과 백운암과 같은 마그네슘 탄산염암의 열변성작용에 의해 생성된 것으로 나뉘어 진다. 우리나라에서는 고품질의 활석이 마그네슘 탄산염암 기원으로 산출되기도 하지만, 양적으로는 불순물을 다량 함유한 초염기성암 기원의 활석광상이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 초염기성암 기원의 활석광상이 우리나라 충청남도 예산-공주-청양지역에 다수 분포하고 있으며, 이 중 대흥, 평안, 청당 광산이 상대적으로 큰 규모로 개발된 바 있다. 이들 광산에서 산출되는 활석광석에는 일반적으로 활석과 함께 산출되는 마그네사이트 등의 탄산염 광물 이외에도 녹니석, 금운모, 투각섬석 등과 같은 많은 유색광물들이 불순물로 다량 포함되어 있기 때문에, 전체적인 백색도는 마그네슘 탄산염암 기원의 활석에 비해 매우 좋지 않다. 이 지역의 활석광상은 초염기성암 기원의 사문암이 열수변질을 받아서 생성된 것으로 알려져 있다(지정만과 김규봉, 1977; 우영균과 이동우, 2001; 우영균 외, 1991; 윤상필 외, 1994; Kim and Kim, 1995, 1997a, 1997b). 이들 광상에 대한 기존의 상세한 광물학적 및 생성기원 연구에 의하면 활석광상은 초염기성암의 사문암화 작용과 활석화 작용의 두 가지 변질작용에 의해 형성되었다. 또한 활석화 작용 중 외부로부터 다량의 원소들이 광화용액과 함께 첨가되었으며, 이들 특정원소의 첨가에 따라 녹니석, 금운모, 투각섬석 등의 불순광물의 상대적 함량이 결정되었다(Kim and Kim, 1995, 1997a, 1997b). 기존의 광물조성에 따른 동위원소 연구 결과에 의하면, 초염기성암의 사문암화 작용은

동위원소적으로 가벼운 강수기원의 광화용액에 의해 진행되었지만 활석화 작용의 주된 시기에는 화성기원의 열수용액이 관련된 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2000). 이처럼 연구지역의 활석광상에 대한 광물학적 및 생성기원 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어 있으며, 특히 불순광물 중 녹니석에 대한 연구는 활석광상의 기원과 연관지어 자세한 연구가 수행된 바 있으나(Kim and Kim, 1995, 2000), 녹니석과 더불어 주요 불순광물로 산출되는 금운모에 대한 자세한 연구는 수행된 바 없다. 이번 연구는 충남지역 활석광상에서 산출되는 운모류에 대한 광물학적 연구로서, 특히 금운모의 광물학적 특성과, 사문암의 변질작용에 의한 활석화 작용과 연관된 금운모의 생성기원을 규명하고자 하였다.

연구 방법

활석광석의 광물조성 및 금운모의 감정을 위해서 서울대학교 지구환경과학부의 X-선회절분석기(Rigaku Geigerflex RAD3-C)를 이용하여 X-선회절분석(XRD)을 수행하였다. 층상광물의 미세한 구조 관찰과 상호 공생관계를 확인하기 위해, 서울대학교와 기초과학지원연구원에서 각각 후방산란전자상(BSEI, JEOL JXA 733)과 주사전자현미경(SEM, CAMECA SX50)관찰을 수행하였으며, 운모류 광물의 화학조성은 서울대학교의 전자현미분석기(JEOL JXA 733)를 이용하여 분석하였다. 특히 금운모의 격자상 및 공생광물과의 미세구조적 관계를 규명하기 위해 서울대학교 기초과학 공동기기원의 투과전자현미경(TEM, JEOL JEM 2000EX II)을 이용하였다.

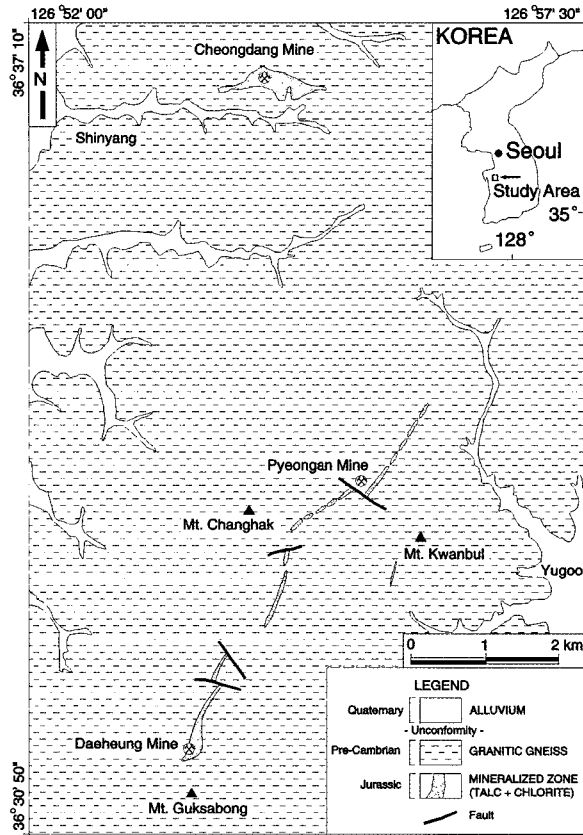


Fig. 1. Geologic map of the study area.

시료 및 산출상태

연구지역은 광범위하게 유구 화강암질 편마암으로 구성되어 있으며, 국지적으로 사문암이 변질되어 형성된 활석광체가 발달하고 있다 (Fig. 1). 유구 화강암질 편마암은 선캠브리아기의 경기변성암복합체에 속하며 지역에 따라 호상 편마암이나 흑운모 편마암으로 전이되기도 한다(우영균 외, 1991; 윤상필 외, 1994; 이상헌과 최기주, 1994). 이들은 후기 화강암화 작용동안 수반된 녹염석-각섬석 및 녹색편암상의 광역 변성작용의 결과로 알려져 있다(이상헌과 최기주, 1994). 활석광화대는 유구 화강암질 편마암 내에 북-북동 방향으로 길게 신장된 형태나 렌즈상으로 발달해 있다. 이 중 평안과 대홍광산을 있는 광체는 10~20 m 폭을 가지면서 약 7 km의 연장성을 보여준다. 대홍광산의 경우는 주 채광장의 활석광화대의 폭이 약 100 m에 이

르기도 한다. 또한 광체 주변에는 초염기성암의 관입시 변질작용의 영향으로 생성된 것으로 보이는 각섬석 편마암과 투각섬석 편암이 분포하고, 이밖에 광체중심에 활석-녹니석 편암과 변질되지 않고 남아있는 사문암 등이 분포하고 있으며, 이들을 소규모의 중성 및 염기성 암맥들이 절단하고 있다. 활석 광체 및 그 주변은 매우 심한 구조작용을 받았으며, 따라서 활석광체 내에는 수많은 절리와 소규모의 단층이 발달하여 있다. 이러한 절리면이나 단층면에는 녹니석이나 흑운모로 주로 이루어진 검은 광물의 집합체가 피복되어 있다. 특히 활석 광체의 주변부에서는 녹니석과 금운모의 양이 현저히 증가하여 국지적으로 검은색 내지는 암녹색의 농집대를 형성하면서 소위 “검은 변질대(black-wall type zone: Sanford, 1982)”를 이루어 주변암인 화강암질 편마암과의 경계를 명확히 이루기도 한다. 금번 연구의 주 대상광물인 금운모는 이러한 검

Table 1. XRD quantitative analysis of talc ores

Ore type	Tlc										Tlc-Chl						Tlc-Phi-Chl			Tlc-Tmm-Chl		
	CDBD	E-4	E-6	P-10	PAO3	Q-15	S-24	B-21	CDBL	CDGR	E-11	E-16	P-7	PAO1	PAO2	B-20	DHO1	PC-6	B-15	C-5	E-23	
Lizardite	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Talc	52.4	89.8	89.1	71.7	53.3	92.1	63.3	85.0	36.8	88.4	61.7	55.0	81.6	69.3	60.6	34.2	53.4	74.2	35.5	11.1	40.9	
Chlorite	1.1	1.3	1.8	5.8	6.4	7.1	8.4	14.0	54.3	11.0	13.0	14.5	15.6	16.6	22.4	35.0	10.8	7.9	20.7	48.3	25.1	
Phlogopite	0.6	0.3	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.8	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	1.9	1.0	25.1	29.9	4.5	0.6	0.0	0.5	
Tremolite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.2	40.6	33.5	
Magnesite	45.8	0.0	0.0	0.0	39.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Dolomite	0.1	0.0	0.1	18.6	0.5	0.8	12.4	0.2	8.9	0.0	24.6	24.5	2.8	2.9	14.7	1.4	5.9	13.4	0.0	0.0	0.0	
Calcite	0.0	8.6	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Forsterite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Albite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Quartz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Ore type	Srp-Tlc												Srp											
	B-30	C-17	C-2	C-28	C-44	E-22	P-12	P-13	P-16	Q-9	S-14	S-22	C-15	C-19	C-23	C-29	Q-14	R-17	S-15	T-2	T-4			
Lizardite	78.6	60.5	24.3	60.5	48.0	70.2	40.1	62.9	31.4	61.0	47.6	60.5	83.2	83.9	79.8	87.0	98.8	96.9	88.6	82.7	90.1			
Talc	13.2	19.6	45.4	19.6	32.1	9.9	39.7	13.3	40.8	28.1	36.5	9.5	3.4	3.8	6.1	5.2	1.2	3.1	3.0	6.6	2.8			
Chlorite	7.9	0.0	4.0	0.0	7.9	6.8	1.2	0.6	9.9	0.2	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0			
Phlogopite	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Tremolite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Magnesite	0.0	19.9	25.7	19.9	6.7	0.0	0.0	19.7	7.7	0.0	0.0	0.0	13.4	12.3	12.1	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1			
Dolomite	0.0	0.0	0.6	0.0	0.8	12.9	19.0	2.5	10.2	10.7	15.2	25.3	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	8.1	10.7	0.0			
Calcite	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Forsterite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Albite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
Quartz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

Tlc: talc, Chi: chlorite, Phi: phlogopite, Tmm: tremolite, Srp: serpentine

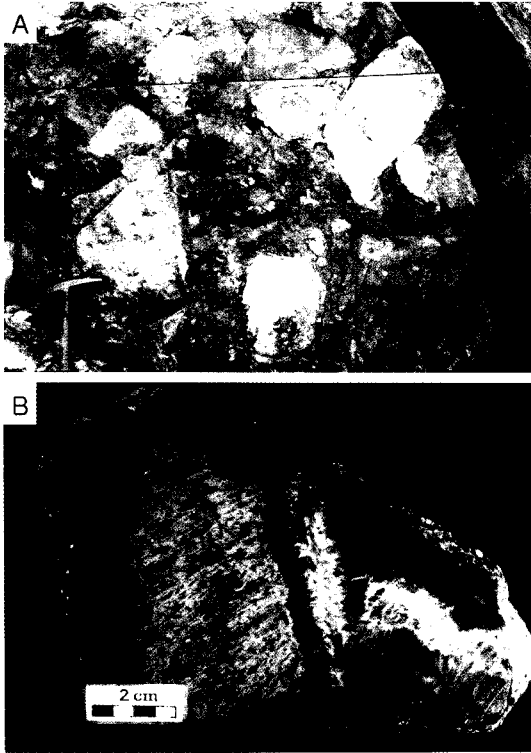


Fig. 2. Photographs of nodular talc ores in the black-wall zone. (A) Nodular talc ore from Daehung mine, (B) Hand specimen of nodular talc ore showing outer layers of tremolite, chlorite and phlogopite.

은 변질대에 주로 분포한다. 금운모를 포함하여 연구지역의 운모류는 녹니석과 더불어 활석광석의 주요 불순광물로서, SIROQUANT 프로그램을 이용하여 활석광석의 XRD 정량분석을 실시한 결과, 활석광석 중 약 30%까지 구성되기도 한다(Table 1). 이러한 운모류를 공존광물 및 산출상태에 따라 구분하면 다음과 같은 총 7가지의 유형으로 구분할 수 있다.

1. 광체와 접하여 변질된 화강암질 편마암에서 산출되는 운모류,
2. 활석광체에서 조립질로 산출되는 운모류,
3. 활석광체에서 세립질로 산출되는 운모류,
4. 활석광체 주변부에서 각섬석류와 함께 산출되는 운모류,
5. 중성 및 염기성 맥암류에서 산출되는 운모류,
6. 석영맥에서 산출되는 운모류,
7. 백운모

이 중 활석광체에서 조립질이나 세립질로 산

출되는 운모류는 활석과 직접 공존하는 운모류이며, 변질된 화강암질 편마암과 투각섬석 편암 및 각섬석 편마암, 중성-염기성 암맥류 및 석영맥과 관련된 운모류는 변질작용과는 관계있으나 활석과 직접 공존하지 않는 운모류이다. 이 중 활석과 직접 공존하는 운모류는 모두 금운모로서 연구지역에 존재하는 3개의 주요광산들 중, 특히 평안광산에서 다량 산출되고 있다. 이러한 금운모를 포함하여 불순광물들의 산출상태는 모암의 변질정도 및 활석광석의 공간적 분포와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히 투각섬석과 같은 고온형 광물의 경우, 그 산출범위가 광체 주변부에 제한되어 있고, 화강암질 편마암과의 접촉부로 갈수록 활석광석은 괴상으로 산출되는 양상이 뚜렷해진다(Fig. 2A). 이러한 괴상 활석광석은 특징적으로 2~3층의 방사상 혹은 판상의 녹니석, 금운모, 투각섬석이 반응대를 형성하면서 활석암피를 피복하고 있다(Fig. 2B). 따라서 이들은 괴상광석의 내부 혹은 광체 중심부에서 이들 광물이 활석과 공존하며 산점상으로 산출되는 양상과는 차이를 보여준다.

금운모의 광물학적 특징과 활석광체와의 생성관계

앞서 설명한 바와 같이 활석 광석은 산출상태에 따라서 균질한 조직의 활석광석과 불순광물들이 고품위의 활석광석을 층상으로 피복하고 있는 괴상의 활석광석으로 구분되어진다. 특히 괴상의 활석광석은 활석광체와 주변모암인 화강암질 편마암과의 경계부에 집중적으로 분포하고 있으며, 이들은 구형의 활석광석 외곽부에 녹니석, 투각섬석, 금운모 등의 불순광물이 층상을 이루고 농집되어 있다. 대부분의 금운모는 이러한 괴상 활석광석에 수반되어 산출되는데, 고유의 옅은 갈색으로 녹니석과 육안적으로 구별된다. 그러나 고품위의 활석광석 내에서는 육안으로 구분할 수 없을 정도의 세립질로 활석 및 녹니석과 공존하기도 한다. 연구지역 금운모 시료의 대표적인 X-선 회절분석결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 (060) 회절선이 1.536 Å이므로서 전형적인 삼팔면체구조를 나타내고 있다. 편광현미경이나 후방산란전자상(BSEI)에서는 금운모와 녹니석층이 층상으로 혼합되어 있는 양상을 흔히 관찰할 수 있

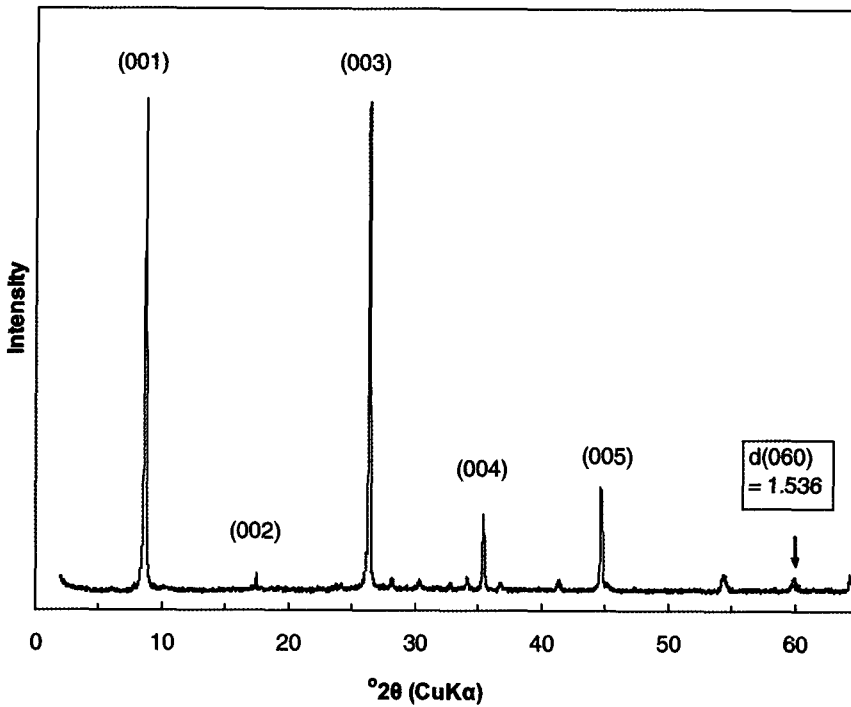


Fig. 3. XRD powder pattern of representative phlogopite sample of the study area.

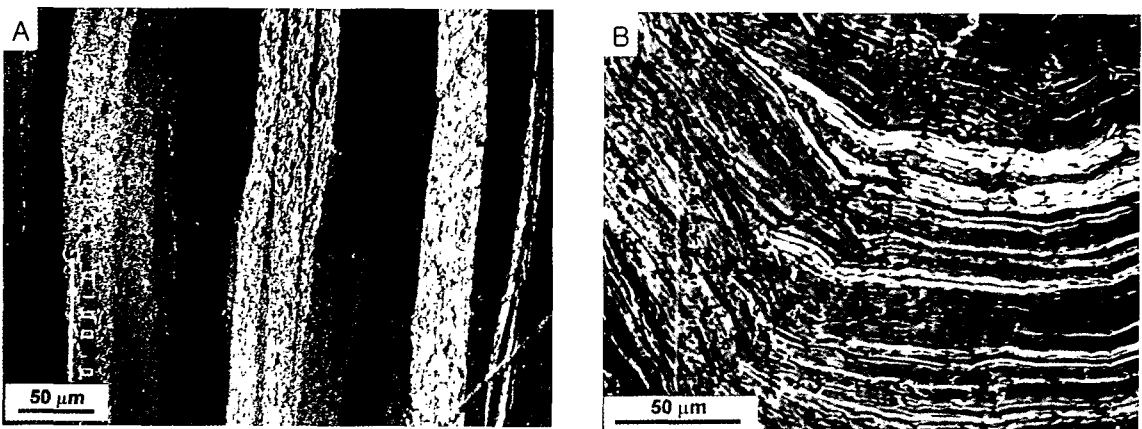


Fig. 4. (A) BSE image plus X-ray image for Al showing the coherent fine-scale interleavings of talc (dark), phlogopite (light) and chlorite (white-dotted), (B) BSE image of fine-scale interleavings of phlogopite (light) and chlorite (dark).

으며, 드물게 활석과 함께 층상으로 혼합된 양상을 관찰할 수 있다(Fig. 4).

운모류의 전자현미분석결과의 일부를 산출상태 및 공존광물에 따른 구분에 따라 Table 2에 나타내었다. 연구지역에서 산출되는 운모류는 백운모를 제외하고, 삼팔면체 운모류의 경우 전

체적으로 흑운모-금운모의 광범위한 조성을 갖고 있다. 이론적으로는 삼팔면체 운모류 중에서 팔면체 양이온 중 $Mg/(Mg+Fe+Mn)$ 비가 0.7 이상인 운모류를 금운모로 분류할 수 있으며(Foster, 1960), 연구지역 운모류의 분석결과에 의하면, 활석과 공존하는 그룹에 속하는 운모류는 모두

Table 2. Representative microprobe analyses of mica of the study area

Sample #	B-2	E-15	P-2	B-5	PC-9	B-1	B-32-1	B-32-3	B-5	P-15	R-15	E-31	P-3-1	P-3-2	E-2-1	E-2-2	E-9-1	E-9-2	E-13	R-12	C-27	
^a [N]	[5]	[5]	[7]	[2]	[3]	[7]	[8]	[4]	[5]	[5]	[6]	[2]	[3]	[1]	[2]	[2]	[2]	[2]	[1]	[5]	[8]	[5]
^b Type	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5	6	7	7	7
SiO ₂	37.33	37.14	36.77	39.33	37.73	39.87	40.56	40.59	40.63	40.82	40.29	37.66	36.73	38.63	36.63	37.55	37.46	38.30	47.01	46.33	48.54	
Al ₂ O ₃	14.99	16.38	17.75	16.91	16.04	14.31	13.10	12.86	15.81	14.58	14.98	14.74	16.17	15.76	14.04	13.69	17.29	17.10	32.40	35.06	31.72	
TiO ₂	3.14	2.39	1.31	1.09	0.81	0.23	0.22	0.17	0.29	0.47	0.37	3.96	0.97	1.04	4.55	3.93	1.06	1.13	0.05	0.20	0.00	
Cr ₂ O ₃	0.05	0.01	0.07	0.09	0.13	0.14	0.28	0.37	0.04	0.10	0.06	0.00	0.30	0.46	0.08	0.04	0.00	0.03	0.01	0.02	0.05	
NiO	0.05	0.01	0.04	0.01	0.07	0.11	0.15	0.11	0.02	0.08	0.02	0.04	0.13	0.15	0.06	0.04	0.08	0.04	0.00	0.01	0.01	
³ FeO	11.58	18.44	14.13	10.36	10.82	7.47	9.07	8.68	9.01	6.85	9.03	12.73	14.35	13.58	13.17	14.01	14.01	13.20	2.85	1.82	1.85	
MgO	15.40	10.46	13.41	18.13	17.94	20.40	20.01	19.99	19.67	22.07	20.03	15.65	15.53	14.83	14.17	14.96	15.16	14.22	1.94	1.06	1.75	
MnO	0.16	0.19	0.13	0.17	0.12	0.09	0.15	0.19	0.11	0.04	0.09	0.05	0.17	0.20	0.14	0.06	0.02	0.08	0.03	0.04	0.04	
CaO	0.01	0.88	0.02	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.02	0.01	0.03	0.05	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.02	
Nb ₂ O	0.14	0.04	0.05	0.06	0.03	0.06	0.00	0.00	0.04	0.13	0.05	0.85	0.06	0.08	0.57	0.46	0.04	0.02	0.25	0.45	0.36	
K ₂ O	10.23	9.08	9.98	10.29	9.99	10.35	9.87	9.97	10.03	8.49	10.53	8.02	8.67	10.08	8.55	8.17	9.18	10.77	10.82	11.26	11.30	
Total	93.08	95.00	93.66	96.45	93.69	93.08	93.41	92.95	95.65	93.68	95.46	93.72	93.08	94.83	92.01	92.91	94.34	94.90	95.38	96.25	95.65	
Si	5.65	5.64	5.57	5.66	5.63	5.88	5.99	6.02	5.84	5.89	5.83	5.62	5.58	5.76	5.62	5.70	5.59	5.70	6.31	6.15	6.47	
Al(IV)	2.35	2.36	2.43	2.34	2.37	2.12	2.01	1.98	2.16	2.11	2.17	2.38	2.42	2.24	2.38	2.30	2.41	2.30	1.69	1.85	1.53	
Sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	
Al(VI)	0.32	0.58	0.73	0.53	0.44	0.37	0.27	0.27	0.52	0.36	0.39	0.22	0.47	0.53	0.16	0.14	0.63	0.70	3.44	3.63	3.46	
Ti	0.36	0.27	0.15	0.12	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	0.44	0.11	0.12	0.53	0.45	0.12	0.13	0.01	0.02	0.00	
Cr	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ni	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
⁶ Fe	1.47	2.34	1.79	1.25	1.35	0.92	1.12	1.08	1.08	0.83	1.09	1.59	1.82	1.69	1.69	1.78	1.75	1.64	0.32	0.20	0.21	
Mg	3.47	2.37	3.03	3.89	3.99	4.49	4.41	4.42	4.21	4.74	4.32	3.48	3.52	3.30	3.24	3.38	3.37	3.16	0.39	0.21	0.35	
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	
Sum	5.65	5.59	5.72	5.82	5.91	5.85	5.90	5.87	5.86	6.01	5.87	5.75	6.00	5.73	5.65	5.77	5.89	5.64	4.16	4.08	4.02	
Ca	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.25	0.02	0.02	0.17	0.14	0.01	0.01	0.06	0.12	0.09	
K	1.97	1.76	1.93	1.89	1.90	1.95	1.86	1.89	1.84	1.56	1.94	1.53	1.68	1.92	1.67	1.58	1.75	2.05	1.85	1.91	1.92	
Sum	2.02	1.91	1.95	1.91	1.91	1.97	1.86	1.89	1.85	1.61	1.96	1.78	1.70	1.95	1.85	1.72	1.76	2.06	1.92	2.02	2.02	
Mg/(Fe+Mg)	0.70	0.50	0.63	0.76	0.75	0.83	0.80	0.80	0.80	0.85	0.80	0.69	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.54	0.51	0.62	

^aNumber of analyses, ^bType of mica: illustrated in text, ^cAll Fe calculated as Fe³⁺

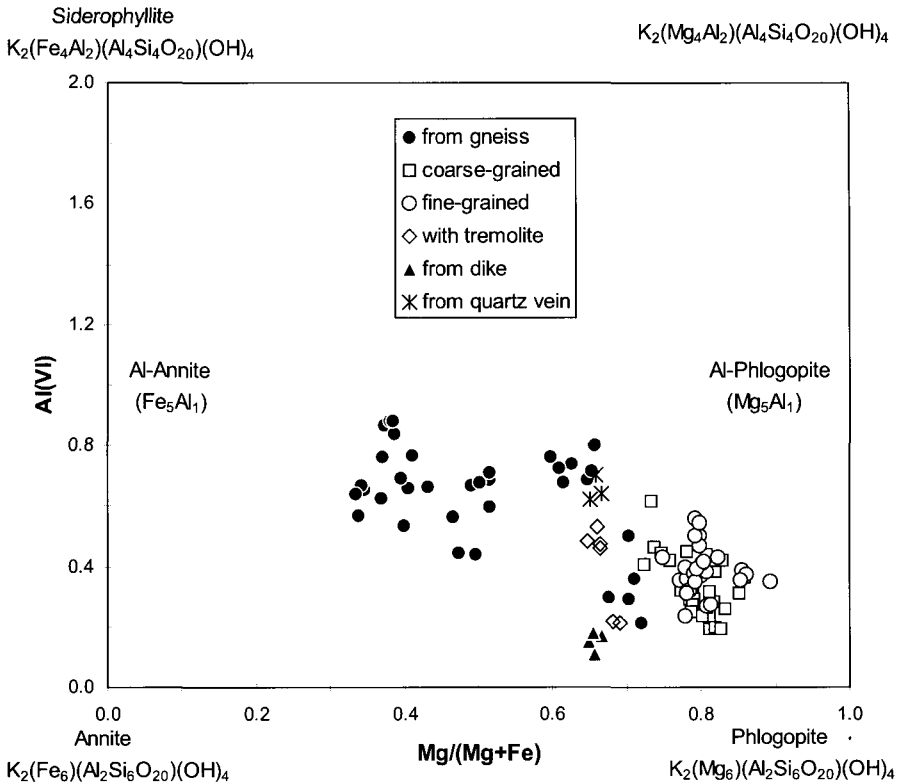


Fig. 5. Mica compositions in Mg/(Mg+Fe) vs. Al(VI). Cations of mica were calculated on the basis of 22 oxygens.

금운모에 해당한다. Fig. 5는 운모류 결정내 팔면체위치상의 Mg/(Mg+Fe)비와 팔면체 내의 Al 함량과의 관계를 도시할 수 있는 이상적인 흑운모 평면으로서, 운모류를 연속적인 화학 및 구조적 고용체를 기초로 하여 앤나이트(annite), 시데로필라이트(siderophyllite), 금운모(phlogopite), 이스토나이트(eastonite) 등의 4개의 단종(end member)으로 나누고 있다. 이 그림에 표시된 Al-앤나이트와 Al-금운모는 타 문헌에서 시데로필라이트와 이스토나이트로 각각 표시되기도 한다(Guidotti, 1984). 연구지역 운모류의 화학조성을 이 그림에 도시한 결과에 따르면, 앞서 설명하였듯이 Mg/(Mg+Fe)비에 따라 명확히 두 개의 그룹으로 구분되며 이들은 각각 활석과의 공존 여부에 따른 구분과 일치한다. 즉, 활석과 공존하는 운모류들은 전형적인 금운모 조성을 보여주고, 활석과 직접적인 관련이 없이 산출되는 운모류들은 흑운모에서부터 금운모에 가까운 조성까지 광범위한 분포를 보여준다. 아울러 Mg

의 증가에 따라 삼팔면체 운모류의 이상적인 Al과 Si의 비율인 1:3으로 근접하면서 팔면체 내의 Al함량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 운모류의 팔면체 치환에서의 구조적 제한 때문에 Fe²⁺가 Mg를 많이 치환할수록 팔면체 내의 Al함량이 증가한다는 이론(Hazen and Wones, 1972)과 잘 일치한다. 또한 활석과 공존하는 운모류들도 활석광체와 화강암질 편마암과의 접촉대로 갈수록 Fe함량이 높아지는 경향을 보이는 것으로 보아, 금운모를 포함하여 연구지역의 삼팔면체 운모류의 화학조성은 활석광체와 주변 모암인 화강암질 편마암 사이에서 산출되는 공간적 분포양상에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 자연산 흑운모의 화학조성은 모암의 화학조성과 공존광물에 따르는 것으로 알려져 있으며(Pattison, 1987), 이는 광범위한 흑운모-금운모 조성을 보여주는 연구지역의 운모류에 대해서도 비교적 잘 일치한다. 운모류 중 백운모는 화강암질 편마암이나 각섬석 편마

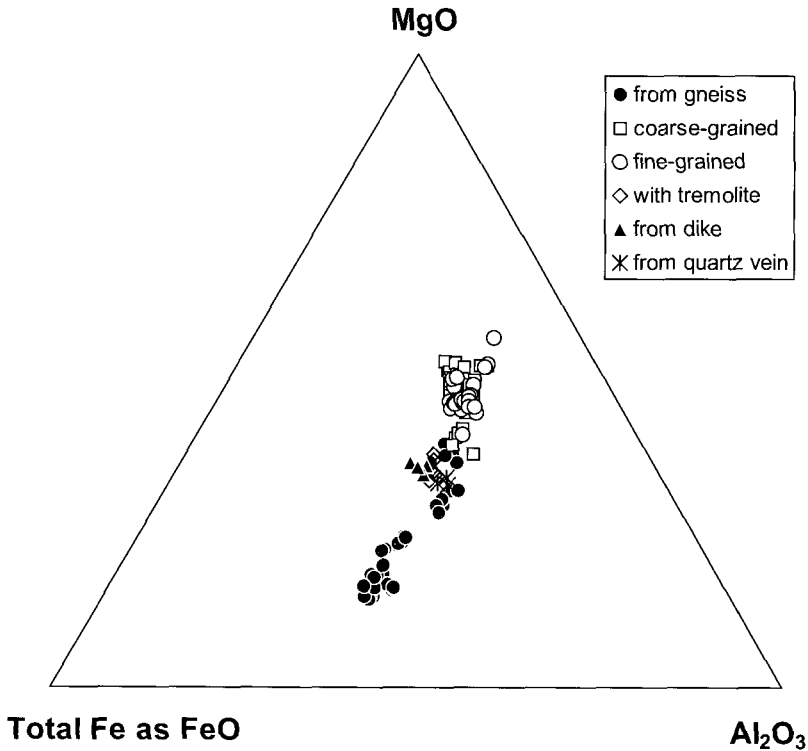


Fig. 6. Triangular MgO-(total Fe as)FeO-Al₂O₃ diagram of mica compositions.

암에서만 산출될 뿐, 활석광석 내에서는 전혀 산출되지 않는다. 이밖에 MgO-FeO-Al₂O₃ 삼각도표에 연구지역 운모류들의 화학조성을 도시하여 보았다. Nockolds (1947)는 이 도표를 이용하여 화성암에서 흑운모의 화학조성과 성인과의 관계를 고찰하여 공존광물 및 모암에 따른 흑운모의 조성변화를 구분한 바 있다. 연구지역의 운모류에 대해 도시한 결과에 의하면, 이상적인 흑운모 평면에 도시한 결과와 유사하게 두 그룹으로 나누어지는 결과를 보인다(Fig. 6). 또한 매우 일정한 Al₂O₃ 함량을 유지하면서 MgO와 FeO의 함량비에 따라 화학조성이 주로 변화하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 활석과 공존하는 금운모의 경우에는, 활석암괴를 피복하고 있는 경우와 암괴내부나 광체중심부에서 활석과 공존하는 경우의 산출상태에 있어서의 차이에도 불구하고 동일한 Mg/(Mg+Fe)비를 보여준다. 이러한 현상은 연구지역에서 산출되는 녹니석에 대한 기존 연구(Kim and Kim, 1995)와도 일치하고 있으며, 따라서 이들 금운모나 녹니석과 같은 유색 불순광물들의 성인은 활석광체를 생

성시킨 열수변질작용과 시·공간적으로 밀접한 연관을 갖는 것으로 보인다. 이와 관련하여 활석화 작용의 시기를 알아보기 위하여 활석광체에서 활석과 공존하는 세립질 금운모에 대한 K-Ar 방법에 의한 연령측정 결과, 쥬라기 말에 해당하는 153±3 M.Y.의 연령을 얻은 바 있다(Kim and Kim, 1997a). 이 시기는 연구지역의 광체형성과 관련된 구조선의 방향들이 대보조산 운동에 의한 구조선의 방향에 해당하는 결과와 일치한다. 따라서 활석광화대 전반에 걸쳐 광범위하게 산출되는 활석암괴는 광체를 형성시킨 열수변질작용이 전반적으로 구조작용의 영향을 크게 받았음을 지시하는 증거이며 활석암괴를 피복하고 있는 녹니석, 금운모, 투각섬석 등은 활석광체를 형성시킨 열수용액이 파쇄대를 따라 광체의 모암인 사문암을 활석화시키는 동안 외부로부터 Al₂O₃, K₂O, CaO 등의 첨가가 용이한 장소에서 형성된 것으로 사료된다.

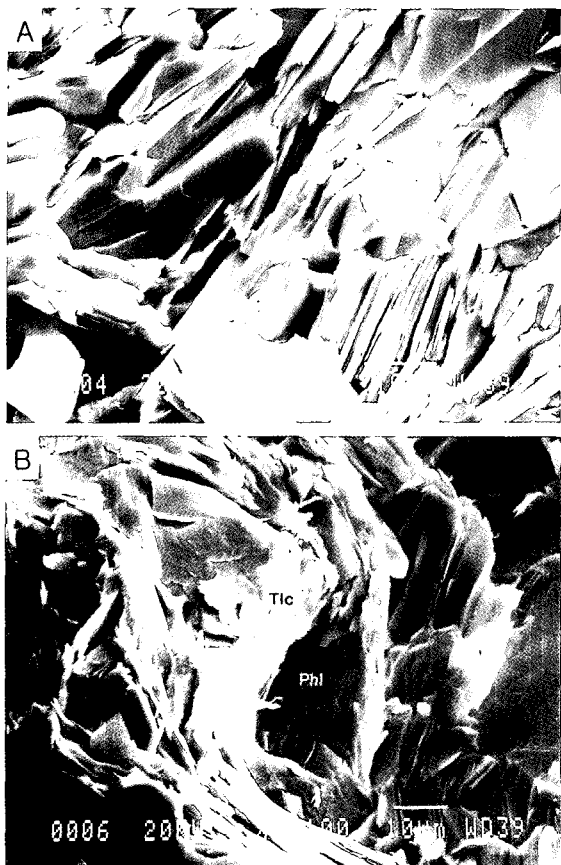


Fig. 7. SEM images of phlogopite. (A) Well-crystallized phlogopite showing parallel orientation of stacking. (B) Phlogopite with talc showing interleaving texture.

전자현미경 관찰결과

연구지역에서 산출되는 전형적인 금운모는 일반적으로 수 mm까지의 큰 입자크기를 가지며, 어두운 갈색이나 밝은 갈색을 띠면서 주로 녹니석과 함께 활석광체의 외곽부에서 산출된다. 특히, 앞서 설명한 바와 같이 괴상활석광체의 외곽 표층부는 주로 조립질의 금운모결정의 집합체로 이루어져 있다. 반면에 세립질의 금운모 역시 활석광체 내부에서 흔히 산출된다. 주사전자현미경(SEM)상에서 괴상활석광체내의 금운모는 매우 결정도가 좋고, 활석 및 녹니석 등의 다른 층상규산염광물과 벽면에 평행하게 호층으로 결정화된 경향을 잘 보여준다(Fig. 7). 비록 연구지역에서 운모류가 맥암류나 석영맥,

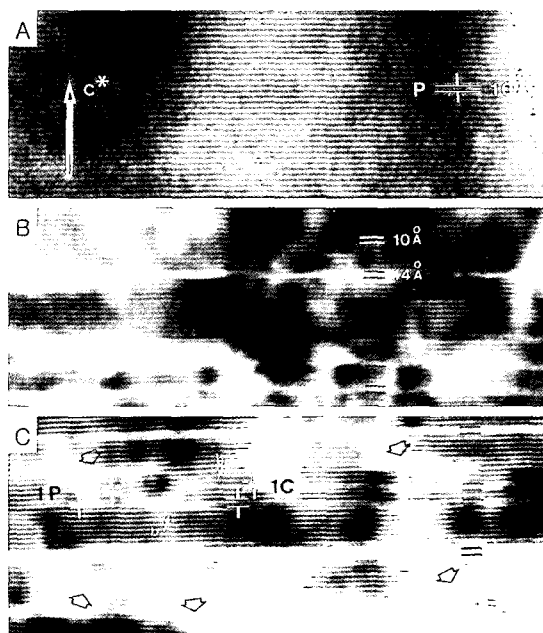


Fig. 8. Lattice fringe images of (A) phlogopite and (B) phlogopite interlayered with chlorite. (C) Development of an extra chlorite layer(brucite-like layer) ("C") between phlogopite layers ("P") is marked as white arrow "b". Microcleavages and associated bending of adjacent layers are observed (marked by arrows).

각섬석 편마암 및 변질된 화강암질 편마암에서도 산출되기는 하지만 이들은 모두 활석과는 직접적으로 공존하고 있지 않으며, 주사전자현미경관찰시 EDS분석에 의해서도 이들은 대부분 Fe가 우세한 흑운모의 조성을 보인다.

활석, 녹니석, 금운모 등과 같은 층상규산염광물은 서로 유사한 층상구조와 화학조성을 갖고 있어서 흔히 혼합층상광물로 함께 산출된다. 이중 금운모와 녹니석의 혼합층상 양상은 후방산란전자상에서 매우 흔하게 관찰된다. 일반적으로 녹니석과 금운모가 서로 미세하게 평행한 호층을 이루고 있지만, 경우에 따라서는 녹니석층 내에서 금운모의 층이 휘어지거나 단절된 상태로 관찰되기도 한다(Fig. 4). 이러한 혼합층상의 간접증거들은 투과전자현미경으로 보다 명확하게 감정될 수 있다. 금운모의 투과전자현미경(TEM) 관찰결과는 대개 전형적인 10 Å의 격자상과 회절상을 보여준다(Fig. 8A). 그러나 일부 시료에서는 금운모의 10 Å 격자상 내에 부루사이트층(brucite-like layer)이 불규칙하게 존재하

Stage	I	II	III	IV	V
Mineral	Ultramafic Intrusion	Serpentinization (Autometamorphism & Hydrothermal Alteration)	Steatitization (Hydrothermal Alteration)	Potash Metasomatism	Supergene Alteration
Olivine	■				
Serpentine		■			
Talc			■		
Chlorite			■		
Phlogopite				■	
Magnesite			■		
Dolomite			■		
Calcite			■		
Amphibole			■		
Expandable Mineral					■

Fig. 9. Mineral paragenesis for the talc ore bodies in the study area.

면서 14 Å의 녹니석층이 불규칙하게 혼합되어 있기도 한다(Fig. 8B). 특히 한개의 금운모층이 한개의 녹니석층으로 연결되는 현상도 관찰된다(Fig. 8C). 이처럼 금운모 격자상 내에서 녹니석 격자상이 비연속적으로 혼합되어 불규칙한 금운모-녹니석 혼합층상을 이룰 경우, 격자층 간격의 차이로 인한 부피변화 때문에, 인접 격자상의 일그러짐이나 모서리의 휘어짐 현상 등을 보여주게 된다(Fig. 8C). 이처럼 금운모와 녹니석이 미세구조적으로 불규칙한 혼합층상을 이루고 있는 현상은 금운모의 생성과정이 녹니석과 밀접한 관계가 있음을 지시하고 있다.

활석화 작용 및 금운모의 생성기원

일반적으로 연구지역의 활석광체는 초염기성암의 변질작용으로 생성된 사문암이 단열대를

따르는 열수변질작용에 의해 생성된 것으로 알려져 있으며, 매우 다양한 불순광물과의 광물조합에 따라 6가지 유형으로 분류되어 이들 광물 조합에 따른 변질작용시의 물질이동 및 부피변화가 연구된 바 있다(Kim and Kim, 1997a). 기존 연구들에 의하면 활석광체의 생성과정은 초염기성암의 관입-사문암화 작용-활석화 작용(사문암의 열수변질) 및 녹니석과 금운모 생성-후기 풍화작용 등으로 구분될 수 있다. 그러나 금번 연구결과에 의하면, 금운모의 산출상태와 공간적 분포현황 및 활석광체의 모양인 사문암에는 거의 없는 K의 공급기원을 고려하였을 때, 금운모의 생성단계를 활석화 과정 이후의 단계로 따로 세분하는 것이 보다 합리적인 것으로 사료된다. 즉, 활석의 생성과정이 충분히 진행된 후, 열수변질작용 말기에 화강암질 편마암과 충분히 반응하여 초기성분과는 다르게 K를 충분

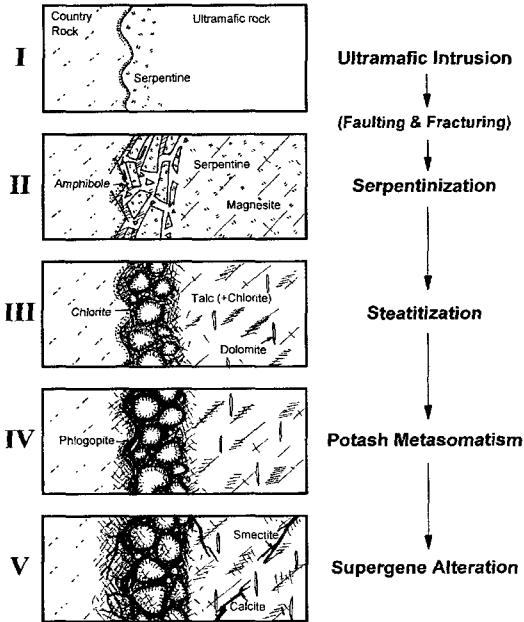


Fig. 10. Schematic diagram of mineral paragenesis related to the formation of talc ore body in the study area.

히 함유한 후기 열수용액과 기존 활석광체와의 반응에 의해서 금운모가 생성된 것으로 판단된다(Fig. 9). 따라서 전체적으로는 초염기성암의 관입-사문암화 작용-활석화 작용(사문암의 열수 변질)-K의 유입에 의한 금운모 생성(K-변질작용)-후기 풍화작용에 의해 현재의 활석광상이 생성되었으며, 이러한 과정을 거치면서 금운모는 화강암질 편마암과 활석광체와의 접촉부에 주로 농집된 것으로 해석된다. 또한, K의 유입 단계 이전(혹은 동시기)에 Al_2O_3 와 CaO 등의 유입 정도에 따라 현재 괴상활석광석에서 관찰되는 녹니석, 투각섬석, 금운모 등의 분포양상을 갖게 되었다(Fig. 10). 이러한 생성과정에 대한 해석은 투과전자현미경 관찰에서도 확인되어, 녹니석이나 활석층이 금운모 내에 일부 잔존하면서 불규칙한 혼합층상광물을 이루고 있음이 관찰되었다. 그러나 이들은 금운모의 생성시 함께, 동시기적으로 생성된 것으로도 해석할 수도 있으므로 금운모와 녹니석과의 성인적 관계는 투과전자현미경 연구 이외에 각 광물별 동위원소 연구 등과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 그렇다 하더라도 금운모의 생성시기는 주된 활석광체의 생성시기 이후로서, 외부로부터 K의 유입

에 따른 K-변질작용에 의한 것으로 해석하는 것은 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

결론

연구지역의 활석광석은 산출상태에 따라서 균질한 조직의 활석광석과 불순광물들이 고품위의 활석광석을 층상으로 피복하고 있는 괴상의 활석광석으로 구분되어진다. 특히 괴상의 활석광석은 활석광체와 주변모암인 화강암질 편마암과의 경계부에 집중적으로 분포하고 있으며, 전형적인 검은 변질대를 이루고 있다. 대부분의 금운모는 이러한 괴상 활석광석에 수반되어 산출된다. 연구지역 내의 금운모를 포함한 운모류를 공존광물 및 산출상태에 따라 구분하면, 활석과의 공존여부에 따라 크게 2가지로 구별할 수 있다. 화학분석결과는 전체적으로 흑운모에서 금운모까지의 연속적인 화학변화를 보여주고 있으나, 활석과의 공존여부에 따라서는 명확히 구분되어, 활석과 공존하는 운모류들은 전형적인 금운모 조성을 보여주고, 활석과 직접적인 관련이 없이 산출되는 운모류들은 흑운모에서부터 금운모에 가까운 조성까지 광범위한 분포를 보여준다. 또한 매우 일정한 Al_2O_3 함량을 유지하면서 MgO와 FeO의 함량비에 따라 화학조성이 주로 변화하고 있으며, 또한 활석과 공존하는 운모류들도 활석광체와 화강암질 편마암과의 접촉대로 갈수록 Fe 함량이 높아지는 경향을 보인다.

금운모의 후방산란전자상에서는 금운모와 녹니석의 혼합층상 양상이 매우 흔하게 관찰된다. 이러한 혼합층상은 투과전자현미경으로 보다 명확하게 감정되어 전형적인 10 Å의 격자상과 회절상 이외에도, 금운모의 10 Å 격자상 내에 부루사이트층이 존재하면서 14 Å의 녹니석층이 불규칙하게 혼합된 양상을 흔히 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 금운모의 생성과정이 녹니석과 밀접한 관계가 있음을 지시하고 있다. 따라서 금운모의 산출상태와 공간적 분포현황 및 금운모생성에 필요한 K의 공급기원을 고려하였을 때, 금운모의 생성은 주된 활석화 작용의 후기에, 주로 활석광체와 주변모암과의 경계부에서 화강암질 편마암과의 반응에 의해 K를 충분히 함유한 후기 열수용액과 기존 활석광체와의 반응에 의해서 생성된 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 우영균, 최석원, 박기화 (1991) 충남 예산지구 활석광상의 성인에 관한 연구. 광산지질, 24, 363-378.
- 우영균, 이동우 (2001) 충남 예산지구 활석광상의 기원암과 활석화 작용. 한국지구과학회지, 22, 548-557.
- 윤상필, 문희수, 송윤구 (1994) 초염기성암 기원의 평안 및 대홍활석광상의 성인과 광물화학. 자원환경지질, 27, 131-145.
- 이상헌, 최기주 (1994) 대홍활석광상 주위의 편마암류의 지화학적 특징과 공존광물의 화학적 평형. 암석학회지, 3, 138-155.
- 지정만, 김규봉 (1977) 사문암의 활석화과정에 관한 연구. 광산지질, 10, 67-74.
- Foster, M.D. (1960) Interpretation of the composition of trioctahedral micas. Prof. Pap. U.S. Geol. Surv. 354-B, 11-48.
- Guidotti, C.V. (1984) Micas in metamorphic rocks. In: Bailey, S.W. (ed.), Micas, Reviews in Mineralogy, Vol. 13, Mineral. Soc. America, 357-467.
- Hazen, R.M. and Wones, D.R. (1972) The effect of cation substitutions on the physical properties of trioctahedral micas. Am. Mineral., 57, 103-129.
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (2000) Chemical and TEM studies of chlorites in the talc deposits of the Chungnam area, Korea. Jour. of Mineral. Soc. of Korea, 13, 53-64.
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (1997a) Chemistry of talc ores in relation to the mineral assemblage in the Yesan-Gongju-Cheongyang area, Korea. Jour. of Mineral. Soc. of Korea, 10, 60-73.
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (1997b) Serpentinization of the ultramafic rock in the Yesan-Gongju-Cheongyang area, Korea. Jour. of Mineral. Soc. of Korea, 10, 126-138.
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (1995) Chemistry of chlorite and its genetic significance in the talc deposits in the Yesan-Gongju-Cheongyang area. Jour. of Mineral. Soc. of Korea, 8, 91-107.
- Lee, I., Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (2000) Stable isotope study of the Yugu talc deposit, Korea. Geosciences Journal, 4, special edition, 170-171.
- Nockolds, S.R. (1947) The relation between chemical composition and paragegesis in the biotite micas of igneous rocks. Am. J. Sci., 245, 401-420.
- Pattinson, D.R.M. (1987) Variation of Mg/(Mg+Fe), F and (Fe.Mg)Si=2Al in pelitic mineral in the Ballachulish thermal aureol, Scotland. Am. Mineral., 72, 255-272.
- Sanford, R.F. (1982) Growth of ultramafic reaction zones in greenschist to amphibolite facies metamorphism. Am. Jour. Sci., 282, 543-616.

2004년 8월 31일 원고접수, 2004년 9월 10일 게재승인.