

충남 유구지역 활석광상에서 관찰되는 활석과 녹니석의 혼합층상 특성

Interlayered Structures of Talc and Chlorite in the Talc Deposits of the Yugu 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 : 충남 유구지역 활석광상의 활석광상에서 관찰되는 활석과 녹니석의 혼합층상특성을 투과전자현미경을 이용하여 연구하였다. 일반적으로 활석 내에 녹니석의 패킷이 존재하거나 혹은 그 반대로 녹니석 내에 활석의 패킷이 존재하는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 일부 시료에서는 국지적으로 불규칙한 활석-녹니석 혼합층상을 보인다. 확인된 활석-녹니석의 반응관계는 활석 층내에서 브루사이트층이 첨가 또는 제거되어 1개의 활석층과 1개의 녹니석층의 반응으로 나타나는 경우와, 하나의 활석층이 손실되면서 브루사이트층을 제공하거나 브루사이트층이 활석화되어 2개의 활석층과 1개의 녹니석층의 반응관계로 나타나는 경우가 있다. 이들은 모두 상당한 부피 변화를 수반한다. 또한 부피변화가 최소화되는 반응으로서 앞의 두 경우가 서로 결합된 경우와 부피변화가 증가되거나 감소되는 반응이 복합적으로 일어나는 경우가 있다. 이 경우 2개의 녹니석층과 3개의 활석층, 두 개의 녹니석층 + 1개의 활석층과 1개의 녹니석층 + 3개의 활석층, 3개의 녹니석층과 5개의 활석층 등의 복합적인 반응관계가 관찰되었다.

주요어 : 혼합층상, 투과전자현미경, 활석, 녹니석, 유구지역

ABSTRACT : Interlayered structures of talc and chlorite in the talc deposits of the Yugu area are studied using transmission electron microscope. Packets of chlorite-like layer in talcs or packets of talc-like layer in chlorites are commonly observed. Randomly interlayered features of talc and chlorite are locally observed in some specimens. Reactions observed in the present study include the addition or removal of a brucite-like layer in the interlayer region of the talc or chlorite resulting in the transformation between a talc and a chlorite layers and breakdown or formation of a talc-like layer resulting in transformation between two talc layer and one chlorite layer. Both reactions are accompanied

*교신저자: kimgy@kaeri.re.kr

by a significant change in volume. In addition to these mechanisms, there are two volume conserving mechanisms; the combination of both mechanisms and mutual transformation in a complex manner. Reactions from 2 chlorite layers to 3 talc layers, from 2 chlorite layers + 1 talc layers to 1 chlorite layers + 3 talc layers, and from 3 chlorite layers to 5 talc layers are observed among the complex type mechanisms.

Key words : interlayered structure, transmission electron microscope (TEM), talc, chlorite, Yugu area

서 론

충청남도 유구지역에는 다수의 활석광상이 분포하고 있으며, 이들은 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). 여기서 산출되는 활석광석에는 일반적으로 녹니석, 금운모, 투각섬석, 마그네사이트 등과 같은 많은 불순광물들이 다량 포함되어 있다. 특히 활석, 녹니석, 금운모 등의 층상규산염 광물은 화학적 및 미세 구조적으로 매우 밀접한 관계를 가지며 산출된다(Kim and Kim, 1995, 1997a, 1997b). 이 중 녹니석에 대한 연구는 활석광상의 기원과 연관지어 자세한 연구가 수행되어 활석의 생성과 직접적으로 연관된 녹니석과 그렇지 않은 녹니석이 화학적 및 광물학적으로 명확히 구별되는 것으로 알려져 있다(Kim and Kim, 1995, 2000). 또한 금운모의 생성은 주된 활석화작용의 후기에, 주로 활석광체와 주변모암과의 경계부에서 K-변질작용에 의해 생성된 것으로 밝혀진 바 있다(김진영 외, 2004). 이들 연구에 의하면 활석, 녹니석, 금운모가 서로 교대하고 있는 현상이 후방산란전자상에서 흔하게 관찰되며, 이 경우 투과전자현미경하에서 활석-녹니석 혹은 녹니석-운모류가 불규칙하게 혼합층상을 이루고 있는 현상을 관찰할 수 있다(Kim and Kim, 2000). 이러한 혼합층상은 결정구조가 유사한 층상규산염광물간에 일반적으로 나타나는 현상이며, 원래의 광물이 혼합층상구조로부터 미세구조적으로 변질 혹은 변형되는 메카니즘을 해석하고자 하는 연구는 많은 광물학자들에 의해 수행되었다(Berner and Holdren, 1977; Page, 1980; Veblen and Buseck, 1979, 1980, 1981; Veblen, 1983a, 1983b). 따라서 본 연구지역에서 혼합층상을 이루고 있는 활석-녹니석 혹은 녹니석-금운모 간의 미세구조적 관계는 활석화 작용을 포함

한 변질작용에서의 반응메카니즘을 해석하는데 중요한 정보를 제공한다. 이번 연구는 이 중 활석-녹니석 간의 다양한 혼합층상을 주로 투과전자현미경으로 관찰하고, 이들의 혼합층상구조 특징을 기술하였다.

시료 및 연구 방법

연구지역내의 활석 광체 및 그 주변은 매우 심한 구조운동을 받았으며, 따라서 활석광체 내에는 수많은 절리와 소규모의 단층이 발달하였다. 화강암질 편마암과의 접촉부로 갈수록 활석광석은 괴상으로 산출되는 양상이 뚜렷해진다. 이러한 괴상활석광석은 특징적으로 2~3층의 방사상 혹은 판상의 녹니석, 금운모, 투각섬석이 반응대를 형성하면서 활석암괴를 피복하고 있다. 특히 이러한 부분에는 국지적으로 검은색 내지는 암녹색의 농집대를 형성하며, 특히 광체와 모암과의 경계부에는 소위 “검은 변질대(black-wall type zone: Sanford, 1982)”를 이루어 주변암인 화강암질 편마암과의 경계를 명확히 이루기도 한다. 녹니석은 순도가 높은 활석광체내에서도 산재하여 분포하지만 주로 이러한 검은 변질대에 금운모와 함께 분포하며, 편광현미경하에서도 활석과 녹니석이 벽개면을 따라 대상으로 공존하고 있는 현상이 흔하게 관찰된다(그림 1A). 이러한 층상규산염광물간의 혼합층상에 의한 후방전자산란상(BSEI)은 비교적 잘 알려져 있으며(White *et al.*, 1985), 투과전자현미경(TEM)하에서도 잘 관찰되었다(Knipe, 1981; Lee *et al.*, 1985; Franceschelli *et al.*, 1986). 특히 투과전자현미경하에서는 한 점토평물에서 다른 점토평물로 결정구조가 전이되는 것을 관찰할 수 있으며 이들의 미세구조로부터 화학반응메카니즘이나 변질작용에서의 이온의 이동에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이들 활석과 녹니석의 미세구조를 관찰하고 상호 공생관계를 확인하기 위해, 주사전자현미경을 이용한 후방산란

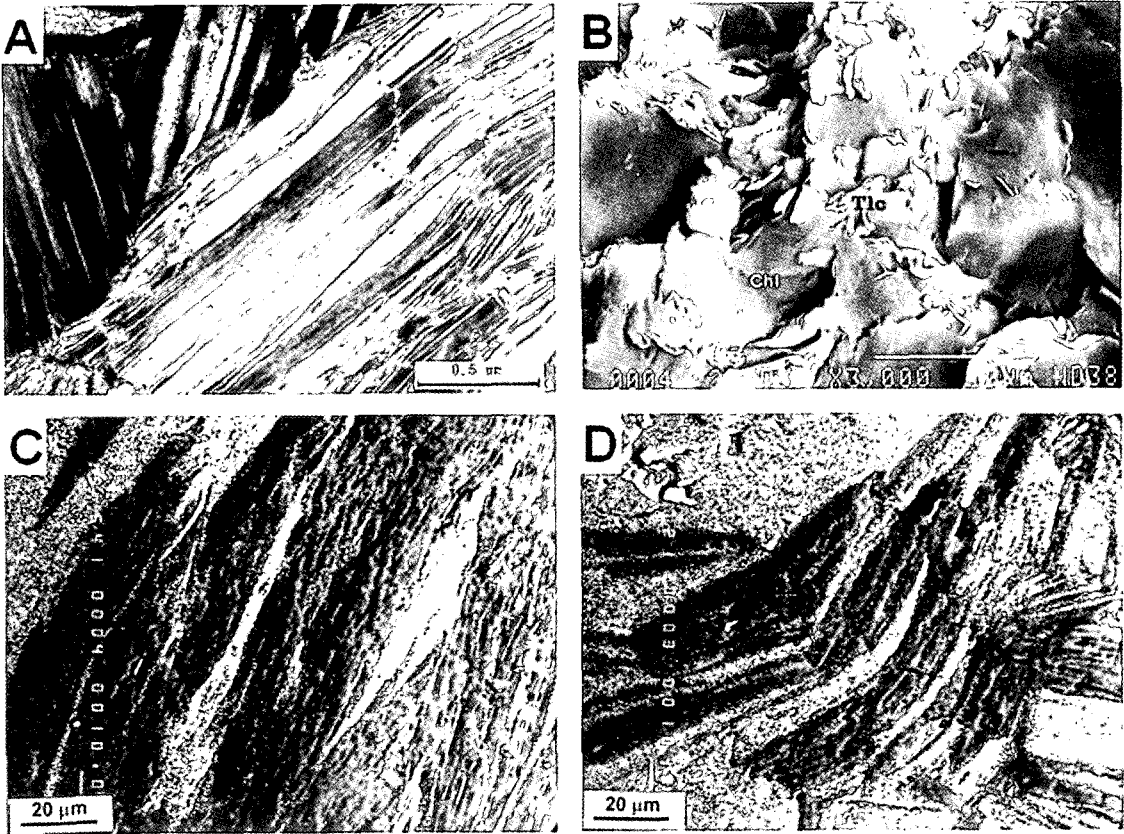


Fig. 1. (A) Photomicrograph of interleaved talc and chlorite. (B) SEM image showing closely coexisting talc and chlorite. (C, D) BSE images overlapped with X-ray image for Al of fine-scale interleavings of talc (dark) and chlorite (light).

전자상 관찰을 기초과학지원연구원의 CAMECA SX50과 서울대학교의 JEOL JXA 733을 이용하여 수행하였다. 이후 활석과 녹니석의 격자상은 서울대학교 기초과학 공동기기원의 투과전자현미경(TEM, JEOL JEM 2000EX II)을 이용하여 관찰하였다.

결과 및 고찰

활석-녹니석의 혼합층상

활석과 녹니석은 결정구조가 유사하기 때문에 이들 두 광물이 공존하는 시료에서는 주사전자현미경(SEM) 관찰시 EDS분석에 의해 두 광물의 구별이 가능하다(그림 1B). 주사전자현미경관찰시 활석과 녹니석은 대부분 편광현미경관찰에서 보이는 것과 동일하게 서로 벽개면에 평행하게

공존하고 있다. 후방산란전자상에서도 활석과 녹니석은 화학적 유사성 때문에 미세구조 관계를 관찰하는 것이 용이하지 못하다. 그러나 후방전자산란상에 Al의 X-선 이미지를 중첩시켜 관찰하면 활석과 녹니석의 공생관계를 비교적 명확하게 관찰할 수 있다. 대부분 활석과 녹니석 층의 패킷이 연속적으로 서로 평행한 호층을 이루며 접하고 있고 일부에서는 이들의 접촉면이 휘어지거나 끊어진 상태로 관찰되기도 한다(그림 1C, D). 이러한 사실은 활석화작용시의 교대작용에 대한 정보를 제공하며, 아울러 이들 두 광물이 미세구조적으로 서로 혼합층상을 이루고 있을 가능성을 지시한다. 그러나 XRD분석이나 기타 주사전자현미경 또는 후방전자산란상 관찰에서는 활석 등의 단일광물로만 이루어진 것으로 밝혀진 시료에서도 투과전자현미경 관찰시 다른 층상규 산업광물과 불규칙한 혼합층상을 이루는 것을 혼

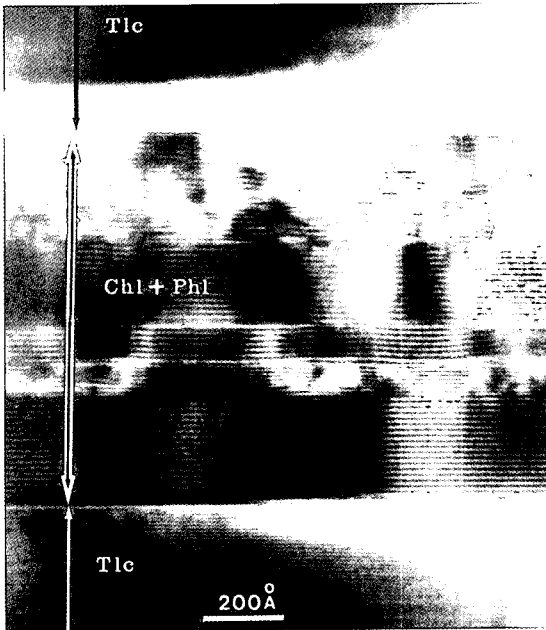


Fig. 2. (A) Chlorite (“Chl”) and phlogopite (“Phl”) packets in talc (“Tlc”) layers. The phlogopite and chlorite layers apparently occur coherently or semicoherently within packets of talc layers. White area in talc packet may be caused by beam damage.

히 관찰할 수 있다.

후방전자산란상 관찰결과, 혼합층상의 가능성을 보이는 시료들에 대한 투과전자현미경 관찰에서는 대부분의 시료가 둘 또는 세 광물의 혼합층상을 보여준다(그림 2). 이들 중 일부 시료에서는 활석과 녹니석의 혼합층상을 보여주며, 대부분의 경우에 활석내에 녹니석층의 패킷이 존재하거나 혹은 그 반대로 녹니석내에 활석층의 패킷이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이 경우 두 광물의 경계는 대부분 (001)면에 평행한 호층으로 접하고 있어서 대부분의 녹니석은 활석과 동시에 생성된 것으로 판단된다.

순수한 활석시료의 경우 투과전자현미경관찰시 보통 전형적인 9.3 Å의 규칙적인 배열을 보이지만 부분적으로 활석격자층의 변형이나 단절에 의한 명암의 대비(stain contrast)가 흔히 관찰된다(그림 3A). 또한 매우 규칙적인 활석의 격자상내에 녹니석층이 부분적으로 존재하기도 한다(그림 3B). 활석격자상내에 부분적으로 녹니석층이 존재할 경우에도 녹니석층에 인접한 활석층이 휘어진 양상이나 변형에 의한 명암대비 양상이 관

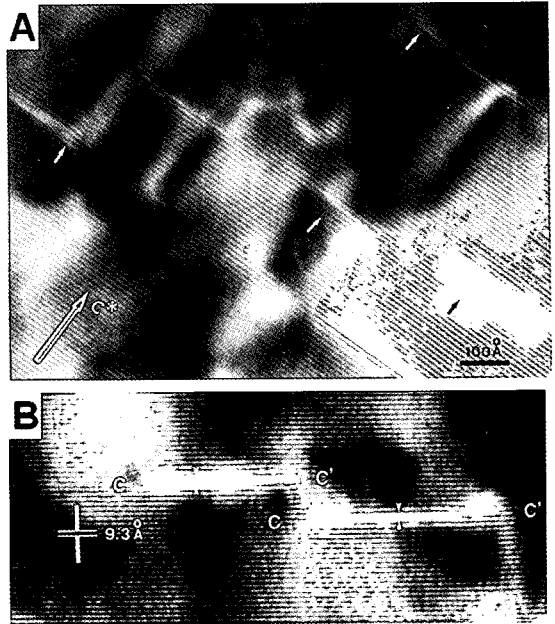


Fig. 3. Lattice fringe images of talc. (A) Strain contrasts by deformation are observed within talc layers (marked by arrows). (B) Partial interlayering of chlorite layers in talc layers showing that the brucite-like layers are situated between two talc layers. The chlorite layers extends between C and C' (marked by arrows). Strain contrast and bending of the nearby layers are found in association with the chlorite layer insertion.

찰된다. 또한 녹니석의 브루사이트층(brucite-like layer)이 활석층(talc-like layer)에 비해 조사된 전자빔에 의해 더 많은 손상을 입었음을 알 수 있다. 일반적으로 브루사이트층은 투과전자현미경 관찰의 시료준비를 위한 이온밀링동안 조사되는 이온빔, 혹은 투과전자현미경관찰동안 조사되는 전자빔에 의해 쉽게 손상되는 것으로 알려져 있다(Olives *et al.*, 1983). 그러나 Spinnler 외(1984)는 활석층이 브루사이트층에 비해 상대적으로 쉽게 손상된다고 보고한 바도 있다. 이번 연구에서 관찰된 대부분의 시료에서는 브루사이트층이 활석층에 비해 현저하게 손상받은 것으로 나타난다(그림 3).

투과전자현미경하에서는 순수한 활석이나 녹니석보다 이들의 혼합층상이 더 흔하게 관찰된다. 일부 시료에서는 국지적으로 불규칙한 활석-녹니석 혼합층상을 보이기도 한다. 그림 4는 활

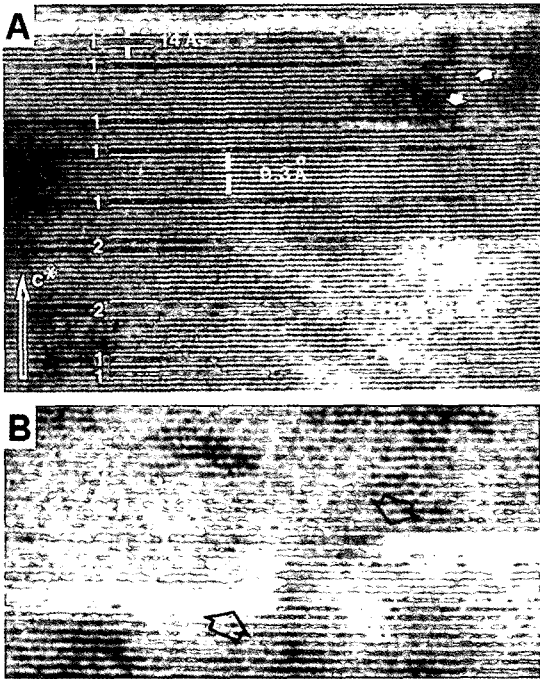


Fig. 4. (A) Parallel interlayering of talc and chlorite, showing intercalation of chlorite layers between the talc layers. Terminations of chlorite layers are marked by arrows. Numbers of adjacent chlorite layers within packet of talc layers are indicated. (B) Complex transition of chlorite layers into talc layers are found and strain contrasts are found in association with the chlorite layer insertion (marked by arrows).

석층들 사이에 녹니석층이 평행하게 혼합층상을 이루고 있는 것을 잘 보여주고 있다. 활석층내에 1개 또는 2개의 녹니석층이 불규칙하게 존재하며, 일부 녹니석층은 활석층내에서 단절되어 사라지기도 한다. 활석과 녹니석층이 규칙적으로 1:1로 혼합층상을 보일 경우 쿨카이트(kulkeite)로 명명될 수 있으나(Schreyer *et al.*, 1982), 이 경우는 불규칙한 활석-녹니석 혼합층상이며 규칙적인 혼합층상양상은 연구지역의 분석된 시료에서는 관찰되지 않는다. 기존의 보고에 의하면 활석이 녹니석으로 전이되는 경우, 활석층을 구성하는 팔면체층은 계속 연장되고 Si-사면체층이 손실되면서 브루사이트층이 되어 녹니석층을 구성하게 된다 (Veblen, 1980; Veblen and Buseck, 1980, 1981). 이와 같이 브루사이트층이 첨가 또는 제거되면서 활석층과 녹니석층이 반응관계를 보이는 결과는 이



Fig. 5. (A) 1-2 talc layers are interlayered within chlorite layers. (B) Transformations of two chlorite layers (28 Å) into two talc layers (18.6 Å) are shown within packets of chlorite layers. Transition areas are marked by arrows.

번에 조사된 시료들에서도 쉽게 관찰된다(그림 4B). 또한 이번 연구에서는 그림 3과 4에서 보이는 바와 같이 활석층내에 브루사이트층이 생성되면서 녹니석층을 형성하는 경우 이외에도 규칙적인 녹니석층내에서 브루사이트층이 손실되어 활석층이 생성되는 경우도 관찰되었다(그림 5). 이처럼 녹니석내에 활석층이 생성되는(혹은 브루사이트층이 손실되는) 경우, 2개의 녹니석층이 2개의 활석층으로 전이되는 양상이 관찰되기도 한다(그림 5B).

이번 연구에서 관찰된 활석-녹니석의 혼합층상은, 그림 6에서 불규칙한 활석-녹니석 혼합층상을 보여주며 그림 7에서는 활석-녹니석 혼합층상에서의 다양한 층간의 변화를 보여준다. 특히 그림 7A는 2개의 활석층으로부터 1개의 녹니석층으로의 전이가 서로 반대방향에서 조합적으로 이루어지면서 부피변화가 상쇄되고 있음을 보여준다. 따라서 활석과 녹니석간의 격자크기의 차이에 의한 인접층에서의 휘어짐이나 명암의 대비현상이 관찰되지 않는다. 이와 같은 두 광물상의 반응시 부피보존적인 전이는 2개의 녹니석층 : 3

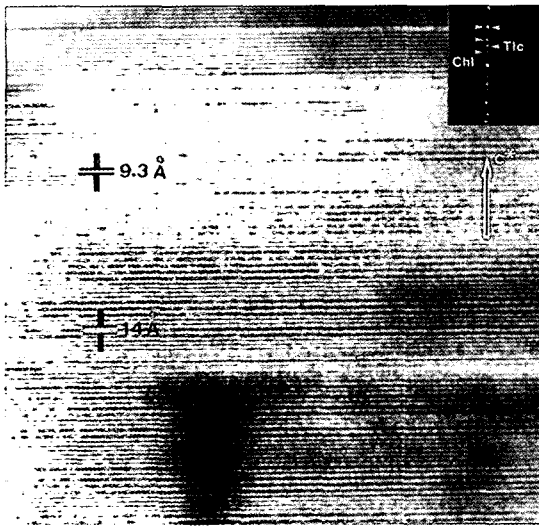


Fig. 6. Lattice fringe image and electron diffraction pattern of randomly interlayered talc-chlorite. 1-5 chlorite layers (14 Å) are intercalated in talc layers (9.3 Å).

개의 활석층(그림 7B)의 형태로도 관찰된다. 또한 2개의 녹니석층 + 1개의 활석층 : 1개의 녹니석층 + 3개의 활석층(그림 7C), 3개의 녹니석층 : 5개의 활석층(그림 7D) 등의 복합적인 양상으로도 나타난다. 이러한 두 광물상간의 복합적인 반응시 부피변화는 각각 12.3%와 10.7%로 예상되지만, 1:1 반응에 비해서 상대적으로 부피변화가 감소되었다.

활석-녹니석의 혼합층상 메카니즘

이번 연구에서처럼 투과전자현미경 관찰시 활석이나 녹니석층내에서 브루사이트층이 추가되거나 손실되어 미세구조적으로 국지적인 불규칙한 혼합층상특성을 보이는 것은 일반적인 현상이다(Veblen and Buseck, 1980, 1981; Veblen, 1980, 1983b; Cressey *et al.*, 1982; Iijima and Zhu, 1982; Olives *et al.*, 1983). 특히 연구지역의 경우는 활석 입자 내에 녹니석층이 불규칙하게 존재하는 경우와 녹니석 입자 내에 활석층이 불규칙하게 존재하는 경우가 모두 흔하게 관찰되며, 앞서 관찰된 다양한 혼합층상양상의 생성 메카니즘은 2:1 층상구조에서 사면체격자층의 단순한 추가 또는 제거로서는 충분히 설명될 수 없다. 이에 관하여는 기존에 주로 운모류와 녹니석과의

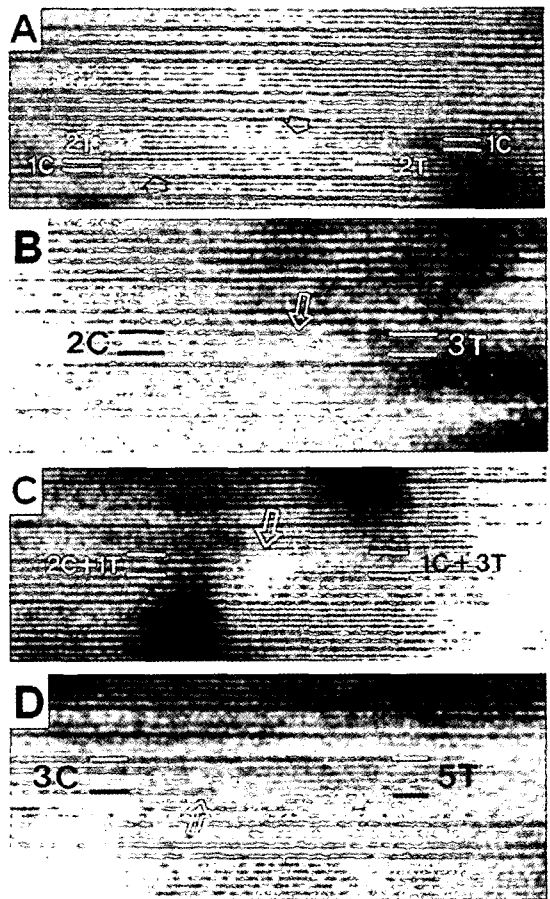


Fig. 7. Termination of layers in interlayered talc-chlorite showing transitions between 9.3 Å talc ("T") and 14 Å chlorite ("C"). (A) Cooperative transitions from 2 talc layers to 1 chlorite layer. Notice that strain contrast resulting from the volume change cannot be found because of compensational transitions of both direction (marked by arrows). (B) Transition from 2C to 3T. Arrows point out termination of chlorite layer. Because simultaneous transitions of both volume expansion and contraction mechanism took place and volume change was compensated, there are no strain contrast or bending of nearby layers associated with the termination. (C) Transition from 2C+1T to 1C+3T. Strain contrast in the middle of the figure results from the termination. (D) Transition from 3C to 5T. Arrows point out termination of chlorite layer.

관계에 대하여 많은 연구가 되어왔으며(Veblen and Ferry, 1983; Yau *et al.*, 1984; Eggleton and

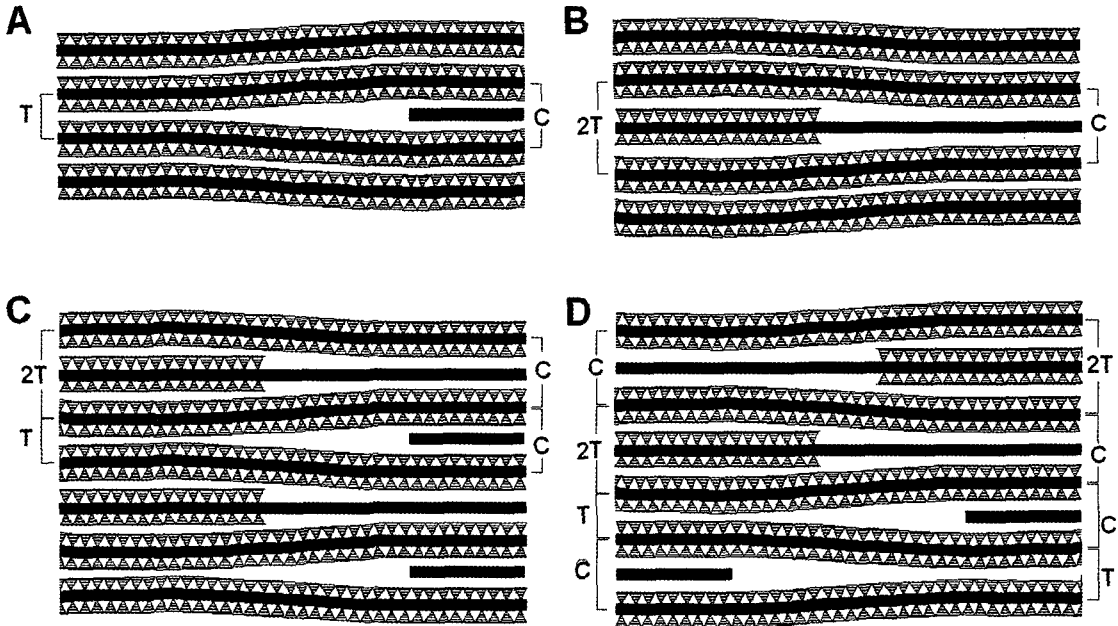


Fig. 8. Schematic diagram of the possible relations of talc (T) and chlorite (C) following Veblen and Ferry (1983), Yau *et al.* (1984), and Eggleton and Banfield (1985). (A) Growth of a brucite-like layer into the interlayer region between two TOT talc-like layers. One talc layer become one chlorite (mechanism 1). (B) The loss of tetrahedra from one talc-like layer reduces it to a brucite-like layer, so that 2 talc layers become one chlorite (mechanism 2). (C) Combination of the mechanism 1 and 2. (D) Mutual transformation in opposite directions together.

Banfield, 1985; Lee and Peacor, 1983), 이를 이번 연구의 활석과 녹니석과의 반응관계에 적용해 보았다. 이를 위하여 기존의 결과를 응용하여 앞서 관찰된 가능한 결정구조적인 관계를 그림 8에 모식적으로 나타내 보았다.

첫 번째 가능한 메카니즘은 활석층 내에서 브루사이트층이 추가되어 1개의 활석층에서 1개의 녹니석층으로 전이되는 경우이다(그림 8A). 이 경우는 녹니석의 일차적 성장(primary growth)이나 고체상태의 반응(solid-state reaction)으로써, 브루사이트층이 활석층들 사이의 층간을 치환하여 활석층이 벌어지면서 부피를 증가시키게 된다. 그 결과 하나의 녹니석층이 2개의 활석층간에 생성되며 양쪽의 활석층은 추가적인 브루사이트층의 생성을 위한 공간 때문에 휘어짐 등의 변이가 일어난다(그림 3). 이처럼 브루사이트화(brucitization) 혹은 녹니석화(chloritization)는 주로 기존에 존재 하던 변형에 의한 결손부위로부터 시작되어(그림 3A) 층간이 확장됨과 동시에 인접층과의 결합력이 약해지면서, 2:1 층상구조를 이루는 활석층들

사이의 층간이 브루사이트층으로 치환된다. 또한 이 메카니즘은 역으로도 일어나 브루사이트층이 층간에서 제거되어 녹니석이 활석화 될 수도 있을 것이다. 이 경우 부피의 변화는 이론상 50.5%에 이르며 변질작용중에 상당량의 Mg, Al, H 등이 유입 또는 제거되면서 브루사이트층이 생성 또는 소멸되는 것으로 사료된다. 연구지역의 경우는 기존의 연구결과, 전체적인 열수변질작용에 의해서 활석과 녹니석이 동시에 생성된 이후, 다시 후기 열수에 의하여 활석광체와 모암과의 접촉부에 녹니석이나 금운모가 농집되는 과정을 거쳤기 때문에 녹니석의 활석화나 활석의 녹니석화는 대상 시료에 따라 달라질 수 있다.

두 번째 가능한 메카니즘은 반응의 방향에 따라 활석층의 일부가 손실되어 브루사이트층으로 전이되는 경우이다. 이 메카니즘 역시 일차적인 성장으로부터 기인하며, 활석층을 구성하는 사면 층이 손실되어 브루사이트층으로 전이되면서 결과적으로 2개의 활석층으로부터 1개의 녹니석이 생성되어 약 32.9%의 부피변화가 일어난다

(그림 8B). 이러한 메카니즘에 의한 변질은 기존에 흑운모나(Veblen and Ferry, 1983; Eggleton and Banfield, 1985) 금운모에서(Yau *et al.*, 1984) 보고된 바 있으며 이번 연구에서는 활석에서도 관찰되었다(그림 7A). 연구지역에서는 주로 광체와 모암과의 접촉부에서 광화용액 자체나 주변모암인 편마암내의 수분으로부터 공급된 수소이온이 활석의 사면체격자층에 흡착되어 Si-O 또는 Al-O 결합을 약화시켜서 활석층이 분해되기 시작하였고, 이후 층간이 확장되면서 더욱더 수분이 유입되기 용이해지고 활석층의 변질이 가속화되었을 것이다. 이 결과 2개의 활석층이 1개의 녹니석층으로 변질된 것으로 판단된다. 이 역시 이와는 반대방향의 반응으로 1개의 녹니석으로부터 브루사이트층이 활석층으로 전이되면서 2개의 활석층이 생성될 수도 있다.

위에서 설명된 두 가지 반응 메카니즘은 모두 상당한 부피변화를 초래한다. 따라서 변질작용이 일어나는 부분에서는 부피변화에 의한 인접층들의 휘어짐이나 변형에 의한 명암 대비현상이 일어나야만 한다. 그러나 광물 반응에 있어서는 접촉하는 계면 에너지가 최소화되려는 경향 때문에(Iijima and Zhu, 1982) 이 반응들은 큰 규모에서 단독으로 일어나지는 않는다. 따라서 여러 가지 변질 메카니즘이 동시에 결합되어 부피변화를 상쇄하면서 반응에서의 변형을 최소화하게 된다(Yau *et al.*, 1984). 예를 들어 그림 7D에서는 5개의 활석층이 3개의 녹니석층으로 큰 부피변화 없이 전이되었음을 보여준다. 이 경우 인접층간의 휘어짐이나 명암의 대비현상이 명확하게 관찰되지 않는다. 또한 위의 두 메카니즘이 동시에 일어나서 부피변화가 상쇄될 수도 있다. 이와 관련된 가능한 반응관계가 그림 8C에 도시되어 있다.

또 다른 부피변화가 상쇄되는 메카니즘은 부피변화가 증가되거나 감소되는 반응이 서로 반대방향에서 동시에 일어나는 경우가 될 수 있을 것이다(그림 8D). 이러한 반응으로서 그림 7A는 2개의 활석층이 1개의 녹니석층으로 변질되는 반응이 서로 반대방향에서 동시에 일어나서 특별한 부피변화 없이 각 층들이 연속되어 보존되고 있음을 보여준다. 이처럼 반대방향에서의 상호 변질작용은 두 종류의 층상규산염광물간의 변질작용에서 거치는 중간과정일 것으로 사료된다. 이에 관하여는 보다 해상도 높은 투과전자현미경을 사용한 추가연구가 필요하다.

이상과 같이 혼합층상현상에 대한 투과전자현미경 연구는 광물의 격자규모에서의 반응 관계를 직접 해석할 수 있는 정보를 제공한다. 그러나 한 광물의 격자상내에 다른 광물의 격자층이 일부 혼합층상으로 존재하는 경우, 이것이 한 광물에서 다른 광물상으로 변질되기 시작하는 단계인지 아니면 변질되고 남은 잔존물에 의한 결과인지에 대한 판단은 투과전자현미경 관찰만으로는 매우 어려운 일이다. 이처럼 투과전자현미경을 이용한 연구는 관찰할 수 있는 영역이 매우 미세한 부분에 국한되기 때문에, 연구지역의 경우와 같이 기존에 여러 가지 기본적이고 다양한 광물학적 분석방법을 이용하여 밝혀지거나 추정된 광물생성의 선후관계 및 기원에 관한 연구결과를 근거로 투과전자현미경의 분석결과를 해석하는 것이 보다 합리적인 것으로 사료된다.

결 론

충남 유구지역 활석광산에서 산출되는 활석광석은 활석 이외에도 녹니석 및 금운모 등의 불순광물을 다량 함유하고 있다. 이들은 모두 층상규산염광물로서 결정구조의 유사성 때문에 투과전자현미경 관찰시 이들 광물들간의 불규칙한 혼합층상양상이 쉽게 관찰된다. 이 중 활석-녹니석 혼합층상 특성에 대해 투과전자현미경분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 활석내에 녹니석의 패킷이 존재하거나 혹은 그 반대로 녹니석내에 활석의 패킷이 존재하는 양상을 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 매우 규칙적인 활석의 격자상내에 녹니석층이 부분적으로 존재하기도 하는데, 이 경우 두 광물간의 격자크기의 차이에 의해서 녹니석층에 인접한 활석층이 휘어진 양상이나 변형에 의한 명암대비 양상이 관찰된다.

2) 일부 시료에서는 국지적으로 불규칙한 활석-녹니석 혼합층상양상을 보인다. 주로 활석층내에 1개 또는 2개의 녹니석층이 불규칙하게 존재하며, 일부 녹니석층은 활석층내에서 단절되어 사라지기도 한다. 규칙적인 혼합층상양상은 연구지역의 분석된 시료에서는 관찰되지 않는다.

3) 격자규모에서 확인된 연구지역의 활석과 녹니석의 반응관계는 부피가 변화하는 반응으로서 활석층내에서 브루사이트층이 첨가 또는 제거되어 1개의 활석층과 1개의 녹니석층의 반응으로

나타나는 경우와 하나의 활석층이 손실되면서 브루사이트층을 제공하거나 브루사이트층이 활석화 되는 2개의 활석층과 1개의 녹니석층의 반응 관계이다. 이는 기존 연구자들의 연구결과들과 매우 유사한 반응관계로서 각각 50.5%, 32.9%의 부피변화가 일어난다. 이번 연구에서는 특이하게 앞의 두 경우가 서로 결합된 경우와 부피변화가 증가되거나 감소되는 반응이 복합적으로 일어나는 경우가 관찰되었으며 이들은 결과적으로 격자 크기가 서로 다른 두 광물간의 반응시 부피변화가 최소화되는 메카니즘으로 반응이 일어나는 것으로 판단된다.

사 사

본 논문에 대해 비평과 아낌없는 조언을 해주신 전북대학교 이정후 교수님과 익명의 심사위원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김건영, 김수진, 고용권, 배대석 (2004) 충남지역 활석광상에서 산출되는 금운모의 광물특성 및 기원. 한국광물학회지, 17, 221-233.
- 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, 송운구 (1994) 초염기성암 기원의 평안 및 대흥활석광상의 성인과 광물화학. 자원환경지질, 27, 131-145.
- 지정만, 김규봉 (1977) 사문암의 활석화과정에 관한 연구. 광산지질, 10, 67-74.
- Berner, R.A. and Holdren, G.R.Jr. (1977) Mechanism of feldspar weathering : Some observational evidence. *Geology*, 5, 369-372.
- Cressey, B.A., Whittaker, E.J.W., and Hutchison, J. L. (1982) Morphology and alteration of asbestiform grunerite and anthophyllite. *Mineral. Mag.*, 46, 77-87.
- Eggleton, R.A. and Banfield, J.F. (1985) The alteration of granitic biotite to chlorite. *Am. Mineral.*, 70, 902-910.
- Francheschelli, M., Mellini, M., Memmi, I., and Ricci, C.A. (1986) Fine-scale chlorite-muscovite association in low-grade metapelites from Nurra (NW Sardinia), and the possible misidentification of metamorphic vermiculite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93, 137-143.
- Iijima, S. and Zhu, J. (1982) Electron microscopy of a muscovite-biotite interface. *Am. Mineral.*, 67, 1195-1205.
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (1995) Chemistry of chlorite and its genetic significance in the talc deposits in the Yesan-Gongju-Cheounyang area. *Jour. of Mineral. Soc. of Korea*, 8, 91-107.
- 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. (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.
- Knipe, R.J. (1981) The interaction of deformation and metamorphism in slates. *Tectonophysics*, 78, 249-272.
- Lee, J.H. and Peacor, D.R. (1983) Intralayer transitions in phyllosilicates of Martinsburg shale. *Nature*, 303, 608-609.
- Lee, J.H., Ahn, J.H., and Peacor, D.R. (1985) Textures in layered silicates: Progressive changes through diagenesis and low-temperature metamorphism. *Jour. Sed. Petrol.*, 55, 532-540.
- Olives, J.O., Amouric, M., De Fouguet, C., and Baronnet, A. (1983) Interlayering and interlayer slip in biotite as seen by HRTEM. *Am Mineral.*, 68, 754-758.
- Page, R.H. (1980) Partial interlayers in phyllosilicates studied by transmission electron microscopy. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 75, 309-314.
- Sanford, R.F. (1982) Growth of ultramafic reaction zones in greenschist to amphibolite facies metamorphism. *Am. Jour. Sci.*, 282, 543-616.
- Schreyer, W., Medenbach, O., Abraham, K., Gebert, W., and Muller W.F. (1982) Kulkeite, a new metamorphic phyllosilicate mineral : Ordered 1:1 chlorite/talc mixed-layer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80, 103-109.
- Spinnler, G.E., Self, P.G., Iijima, S., and Buseck, P.R. (1984) Stacking disorder in clinoclone chlorite.

- Am. Mineral., 69, 256-263.
- Veblen, D.R. (1980) Anthophyllite asbestos: microstructures, intergrown sheet silicates, and mechanisms of fiber formation. *Am. Mineral.*, 65, 1075-1086.
- Veblen, D.R. (1983a) Exsolution and crystal chemistry of the sodium mica wonesite. *Am. Mineral.*, 68, 554-565.
- Veblen, D.R. (1983b) Microstructures and mixed layering in intergrown wonesite, chlorite, talc, biotite and kaolinite. *Am. Mineral.*, 68, 566-580.
- Veblen, D.R. and Buseck, P.R. (1979) Serpentine minerals: intergrowths and new combination structures. *Science*, 206, 1398-1400.
- Veblen, D.R. and Buseck, P.R. (1980) Microstructures and reaction mechanisms in biopyriboles. *Am. Mineral.*, 65, 599-623.
- Veblen, D.R. and Buseck, P.R. (1981) Hydrous pyriboles and sheet silicates in pyroxenes and uralites : intergrowth microstructures and reaction mechanisms. *Am. Mineral.*, 66, 1107-1134.
- Veblen, D.R., and Ferry, J.M. (1983) A TEM study of the biotite-chlorite reaction and comparison with petrologic observations. *Am. Mineral.*, 68, 1160-1168.
- White, S.H., Huggett, J.M., and Shaw, H.F. (1985) Electron-optical studies of phyllosilicate intergrowths in sedimentary and metamorphic rocks. *Mineral. Mag.*, 49, 413-423.
- Yau, Y.-C., Anovitz, L.M., Essene, E.J., and Peacor, D. R. (1984) Phlogopite-chlorite reaction mechanisms and physical conditions during retrograde reactions in the Marble Formation, Franklin, New Jersey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88, 299- 306.

2005년 9월 1일 원고접수, 2005년 9월 15일 게재승인.