

## 미원지역 운교리층 편암에서 산출하는 마가라이트와 녹니석의 미세 협재조직

### Microstructural Intergrowth of Margarite and Chlorite in a Schist from Unkyori Formation of Miwon Area

이 승 준 (Syngjoon Rhee) · 안 중 호 (Jung Ho Ahn)\*

충북대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea)

요약 : 충청북도 미원지역의 운교리층 내에 산출하는 마가라이트(margarite)를 고분해능 투과전자현미경(HRTEM)을 이용하여 단위포 규모의 미세한 협재조직에 관하여 조사하였다. 편광현미경과 후방산란전자 영상을 이용하여 기존에 확인된 녹니석의 협재조직을 보여주는 마가라이트 결정들을 투과전자현미경으로 관찰한 결과, 마가라이트 결정내에는 녹니석이 흔히 얇은 packet 형태로 매우 불규칙하게 협재되어 있으며, 그 두께는 수백 Å에 달하거나 부분적으로 녹니석 layer가 개별 단위로 나타나기도 한다. HRTEM으로 관찰한 마가라이트는 매우 규칙적인 2M 다형구조를 보여주며, 전자회절 패턴에서  $00l$  (또는  $c^*$ ) 방향으로 강한 streaking을 보여주고 있지 않기 때문에 stacking disorder가 심하지 않은 것으로 판단된다. 마가라이트 packet 내에는 두께가 5 Å인 부르사이트 layer들이 부분적으로 관찰되는데, 마가라이트 layer 사이에 이러한 부르사이트 layer가 단위포 규모로 협재되어 부분적으로 녹니석 구조를 형성한다. 마가라이트의 (001)과 녹니석의 (001)은 서로 평행하지만 두 광물간의 구조적인 연속성이 결여되어 있으므로, 이러한 특징은 마가라이트내에 발견되는 녹니석은 용해와 침전 작용에 의해서 생성되어 협재조직을 이루었음을 지시한다.

주요어 : 고분해능 투과전자현미경 (HRTEM), 마가라이트, 녹니석, 부르사이트, 전자회절패턴

**ABSTRACT** : Margarite, occurring in an Unkyori Formation of Miwon area, Chungcheongbukdo, South Korea, was investigated using a high-resolution transmission electron microscope (HRTEM) to reveal the microstructural intergrowth textures of margarite. HRTEM images of margarite, which was previously confirmed to have intergrowth textures by petrographic microscope and back-scattered electron images, show that chlorite occurs as thin packets of layers interlayered within margarite crystals, and intercalated chlorite layers are intergrown irregularly in areas as a few hundred angstroms thick slabs or isolated chlorite unit layers. Margarite crystals observed by HRTEM consist of a well-ordered 2M polytype, and electron diffraction pattern shows no prominent streaking along the  $00l$  (or  $c^*$ ) direction, indicating that there is no significant stacking disorder in margarite. Intercalated extra brucite-like layers, which are approximately 5 Å thick, are observed locally within margarite crystals.

\*교신저자: junghahn@chungbuk.ac.kr

Insertion of such extra brucite-like layer at the interlayer of margarite would result in a chlorite-like structure unit. (001) margarite layers are parallel to (001) of chlorite, and margarite layers are not extended from (001) of chlorite, indicating that margarite was apparently produced through a dissolution-precipitation mechanism.

**Key words** : high-resolution transmission electron microscope, margarite, chlorite, extra brucite-like layer, electron diffraction pattern

## 서 론

마가라이트(margarite)는 변성암을 포함한 다양한 암석에서의 산출 상태가 지속적으로 알려짐에 따라 주요 조암광물의 하나로 고려되고 있다. 기존에 알려진 마가라이트의 산출양상은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데(Frey *et al.*, 1982; Guidotti, 1984), 첫번째 산출양상은 변성정도가 하부 녹색 편암상에서부터 각섬암상까지의 암석에서 주로 기질을 구성하는 전진 변성광물로서 산출하며 좀 더 높은 변성상에서는 반상변정의 특징을 나타낸다. 이러한 특징의 마가라이트는 스위스와 오스트리아 알프스지역 등에서 산출하는 변성 이회암과 석회질 변성 이질암에서 마가라이트의 산출 상태가 보고되었다(Ackermann and Morteani, 1973; Höck, 1974; Frey and Orville, 1974; Frey, 1978; Hoinkes, 1978; Frey *et al.*, 1982; Frank, 1983; Bucher *et al.*, 1983). 두번째 마가라이트 산출양상은 Al 성분이 많은 광물들의 가상 교대작용에 의하여 산출되는데, 최고 변성작용에 의해 생긴 광물이 아니라 후퇴변성작용이나 다변성작용에 의하여 생성된 광물임을 지시하는 조직을 보인다. 홍주석과 남정석의 반상변정들이 마가라이트화되는 경우가 흔하지만(Chinner, 1974; Guidotti and Cheney, 1976; Guidotti *et al.*, 1979; Cooper, 1980; Enami, 1980; Baltatzis and katagas, 1981; Morand, 1988), 규선석, 강옥, 경록니석, 십자석, 사장석, 단사조이사이트(clino-zoisite), 그리고 백운모가 마가라이트로 교대되는 경우도 알려져 있다(Gibson, 1979; Teale, 1979; Frey *et al.*, 1982; Yardley and Baltatzis, 1985; Grew *et al.*, 1986; Stähle *et al.*, 1986).

마가라이트는 Al과 Ca 성분이 많은 암석에서 점진적인 광역변성 작용뿐만 아니라 후퇴변성 작용과 다변성작용 등 넓은 범위의 물리화학적 조건에서 생성된다. 또한, 마가라이트는 Al 성

분이 많은 이전의 광물과 Ca 성분이 풍부한 유체 사이의 이온치환 작용에 의하여 비교적 큰 결정체로 흔히 형성되기도 하는데, 홍주석, 남정석, 규선석, 경록니석, 십자석 등과 같은 마가라이트의 Al/Si 비와 유사한 값을 가지는 광물들이 쉽게 마가라이트화 된다. 국내에서는 김현철 외(1995)와 Kim and Cho (1999)에 의하여 최초로 충청북도 미원지역의 운교리층에서 마가라이트의 산출이 보고되었으며, 이 마가라이트의 변질양상과 광물화학에 관해서는 이승준 외(2002)에 의하여 전자현미분석기 및 후방산란전자영상을 이용하여 조사되었다. 본 연구에서는 기존에 보고된 마가라이트와 녹니석을 고분해 투과전자현미경을 이용하여 관찰하여 두 광물이 이루는 협재조직 및 반응경계면을 관찰함으로써 두 광물이 이루는 변질양상을 세부적으로 조사하였다.

## 시료 및 연구방법

조사한 마가라이트는 미원지역의 북서-남동의 대각선방향으로 넓게 분포되어 있는 운교리층에서 산출되는데, 미원읍에서 상당산성으로 가는 512번 지방도로의 노두에서 발견된다. 이승준외(2002)에서 시료 채취 지점과 지질환경이 설명되었으며, 이 지역에 대한 지질구조 및 변성작용에 대해서는 Kim and Cho (1999)에 자세히 보고되었다.

암석의 엽리에 수직으로 절단하여 제작한 연마박편을 전자현미분석기(Electron probe micro-analyzer, EPMA)를 이용하여 화학분석을 실시하였으며, 후방산란전자영상(back-scattered electron image, BSEI) 관찰을 통하여 총상광물들이 이루는 변질양상과 협재조직들을 확인하였다. 전자현미분석기를 이용하여 획득한 마가라이트와 녹니석의 화학분석 결과와 후방산란전자영상 방법으로 관찰된 조직들은 이승준 외(2002)

에 보고되었다.

마가라이트와 녹니석을 단위포 규모의 미세 조직을 자세히 관찰하기 위하여 충북대학교의 JEOL JEM-2010 고분해능 투과전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 관찰에 사용된 현미경은 side-entry 스테이지의 형식이며 회전각도가  $\pm 20^\circ$ 이다. 또한, 사용한 투과전자현미경의 구면 수차 계수(Cs)가 1.0 mm이며, 점 분해능과 lattice fringe 분해능이 각각 2.3 Å와 1.4 Å이다. 마가라이트와 녹니석은 층상구조를 이루므로 (001) 이 투과전자현미경의 전자빔과 평행을 이루도록 전자회절패턴을 이용하여 방향성을 확인한 후 층상규산염광물들의 lattice fringe를 획득하였다.

### 투과전자현미경 관찰 결과

대부분의 마가라이트는 녹니석을 포함한 결정 구조를 이루고 있으며, 마가라이트 결정 내에 흑운모와 백운모 등 다른 운모류 광물들이 소량 협제되는 특징이 편광현미경하에서도 관찰된다 (이승준 외, 2002). 후방산란전자영상 관찰에 의하면 대부분의 마가라이트는 순수한 단결정으로 구성되어 있지 않으며, 녹니석이 마가라이트 결정의 테두리부근에 평행한 경계를 이루며 마가라이트와 녹니석 결정들은 교대로 호층을 이루어 협제되기도 한다(Fig. 1). 서로 협제되어 있는 녹니석의 두께는 다양하지만, 일반적으로 submicron 크기이다.

본 연구에서는 고분해능 투과전자현미경을 이용하였는데, 이 기기는 대부분 광물들의 단위포 또는 몇 개 원자의 집합체까지 개별적으로 밝혀낼 수 있으므로 광물의 결정학적인 연구와 결정의 결합구조 및 광물의 반응 경계면까지 연구하는데 매우 유용하다(Allen, 1992; Peacor, 1992; Veblen, 1992). 층상규산염광물들이 이루는 혼합층상구조, 다형구조 및 stacking disorder 현상 등은 고분해능 영상에서 직접적으로 해석이 가능하며, 고분해능영상 및 lattice fringe로부터 (001) 층상면간의 거리를 직접 관찰함으로써 다양한 층상구조 광물들을 쉽게 구분할 수 있다.

투과전자현미경 관찰에 의하면 편광현미경에서 관찰되는 대부분의 마가라이트에 녹니석이 협제되고 있음을 확인할 수 있다. 녹니석은 수백 Å의 두께의 층으로 마가라이트 결정내에

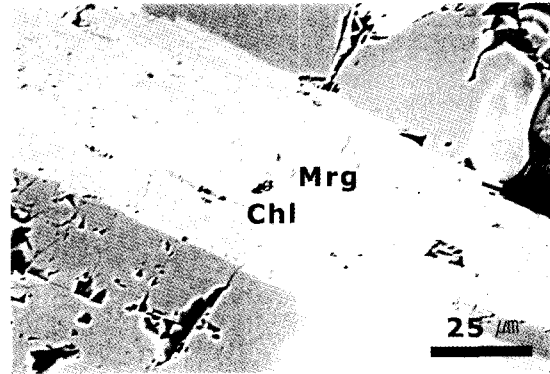


Fig. 1. BSE image of margarite and chlorite. The areas with darker contrast corresponds to margarite, and the areas with brighter contrast is chlorite. Chlorite packets are intergrown within margarite in parallel direction.

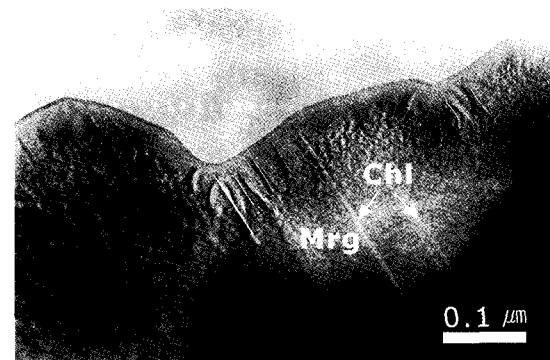


Fig. 2. Low-magnification TEM image showing typical chlorite lamellae intergrown within margarite crystals.

존재하고 있다. 그림 2는 마가라이트 결정내에 미세한 규모로 협제되어 있는 녹니석 층을 보여준다. 마가라이트는 비교적 전자빔에 강한 안정성을 보여주기 때문에(Yau et al., 1984; Ahn et al., 1986), 마가라이트의 얇은 가장자리부분은 전자빔의 손상 때문에 백운모에서 흔히 보이는 소위 반점 조직(mottled texture) 또는 렌즈 모양의 틈(lenticular fissure) 등이 관찰되지 않는다. 001 반사면에 의한 전자회절패턴에는 간격의 차이가 있는 두 종류의 회절점들로 구분되어 나타나는데, 이러한 현상은 전자회절패턴을 발생시키는 전자빔에 노출된 부분내에 층상면간 거리가 다른 두개의 층상규산염광물들인 마가라이트와 녹니석으로 구성되어 있음을 지시

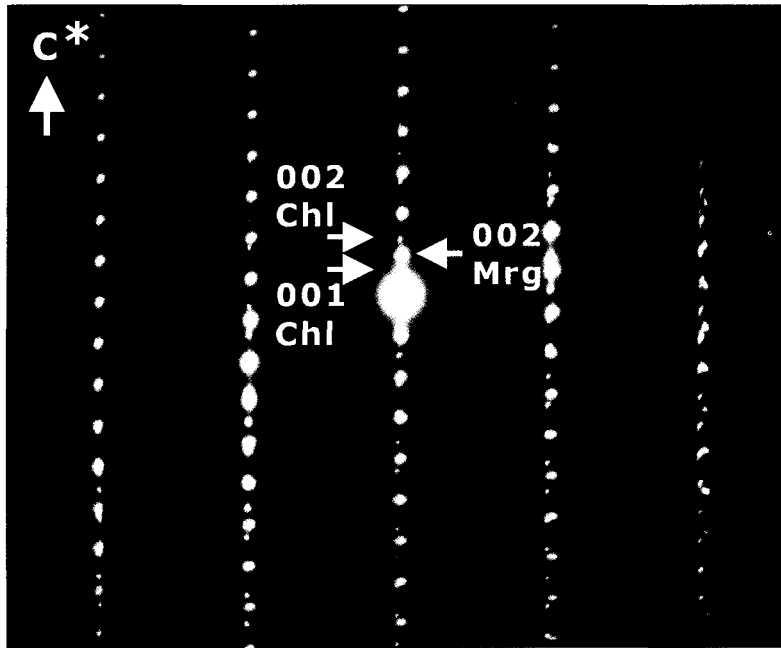


Fig. 3. Electron diffraction pattern of intergrown margarite and chlorite.

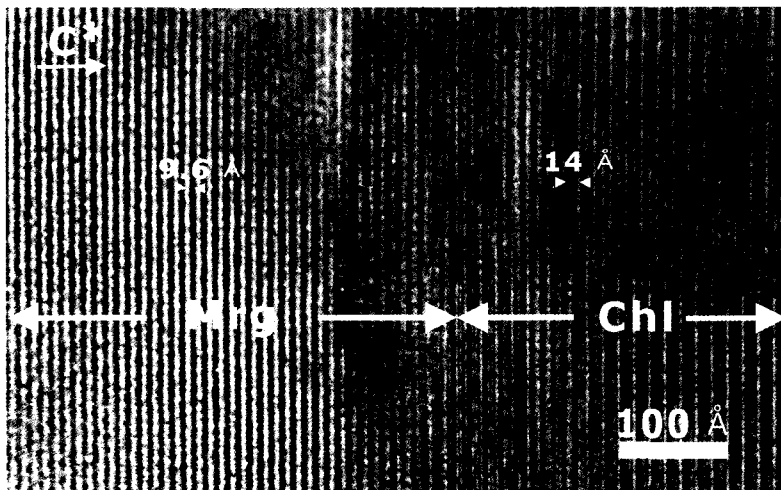


Fig. 4. HRTEM image showing the boundary between intergrown margarite and chlorite. The boundary is parallel with (001).

한다(Fig. 3).

고분해능 투과전자현미경관찰에 의하면, 마가라이트와 협재되어 있는 녹니석의 (001) 면은 서로 평행하다(Fig. 4). 이들 경계는 두 광물들의 (001)면을 따라 평행하게 이루어지며, 이 두 종류의 층상규산염광물들은 서로 다른 층상면

간 거리를 보이므로 쉽게 구분할 수 있다. 마가라이트의 층상면간 거리는 약 9.6 Å인 반면에 녹니석은 14 Å로 마가라이트와 비하여 넓다. 녹니석이 흔히 마가라이트 결정내에 얇은 packet 형태로 매우 불규칙하게 협재되어 있고 그 두께는 수백 Å에 달한다. 또한, 일부 마가라이트 결

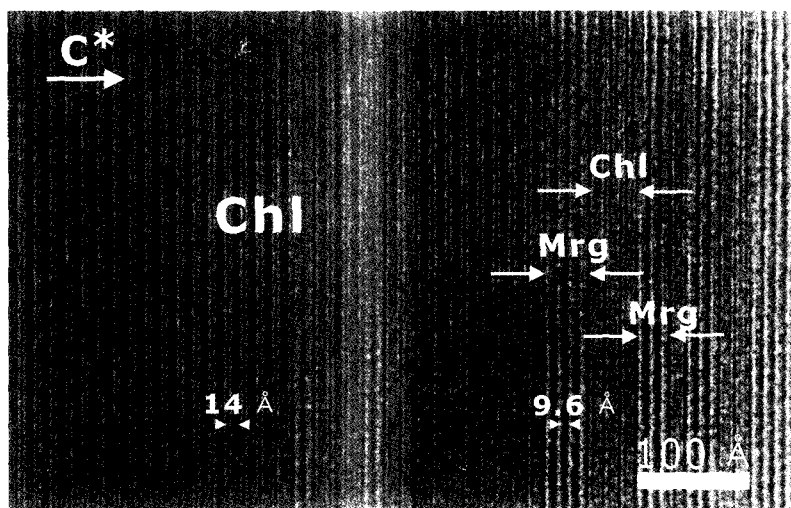


Fig. 5. HRTEM image shows that few layers of margarite are intercalated with chlorite.

정내에서 발견되는 녹니석 packet내에 마가라이트 layer가 소량 협제되어 나타나기도 한다(Fig. 5). 이러한 부분은 마가라이트가 대부분 녹니석 화되어 본래의 마가라이트 일부가 남아 있는 것으로 보인다.

마가라이트 결정내에는 특징적으로 두께가 5 Å인 부르사이트(brucite) layer들이 부분적으로 협제되어 관찰되기도 하는데(Fig. 6a), 마가라이트의 층간사이에 이러한 부르사이트가 협제되어 부분적으로 녹니석의 구조를 형성한다. 이러한 부르사이트 layer의 협제조직은 삼팔면체(trioctahedral) 구조를 가진 2:1 층상규산염광물들에서 판결함(planar defect)으로 자주 나타난다(Veblen, 1980, 1983; Olives *et al.*, 1983; Yau *et al.*, 1984; Eggleton and Banfield, 1985). 그러나, 아직까지 이팔면체(dioctahedral) 구조를 가진 2:1 층상규산염광물에서는 이러한 결함들이 보고된 바 없다. 그림 6a는 마가라이트 packet 내에 존재하는 부르사이트 layer들을 보여주는데, 이러한 layer들이 마가라이트 구조내에 협제됨으로써 국부적으로는 하나의 마가라이트 layer와 부르사이트 layer가 조합하여 하나의 녹니석 구조의 layer를 형성한다. 부르사이트 layer들은 마가라이트 결정내에 부분적으로 관찰되는데 일부 결정내에서는 부르사이트 layer가 소멸되는 구조를 보이기도 한다(Fig. 6b).

일반적으로 대부분의 마가라이트 결정내에

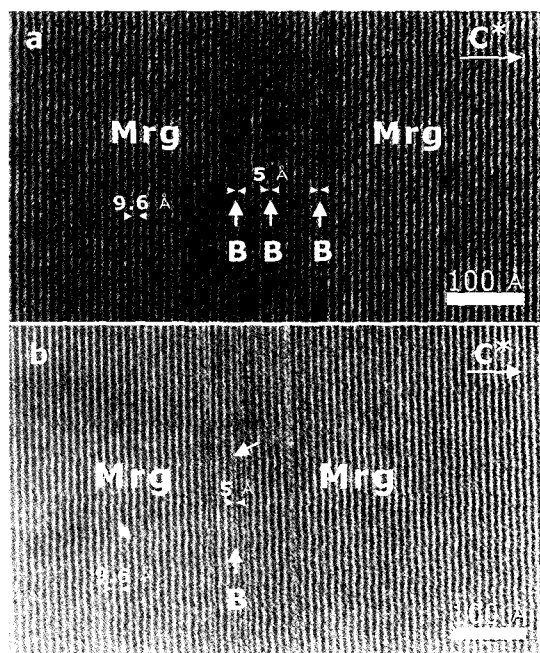


Fig. 6. HRTEM image showing (a) three extra brucite-like layers that are intergrown within margarite crystals and (b) extra brucite-like layer that is terminated within margarite crystals.

녹니석 layer들이 혼히 협제되어 있다. 일부 마가라이트 결정내에서는 부분적으로 비슷한 양의 마가라이트와 녹니석의 layer들이 매우 얇게

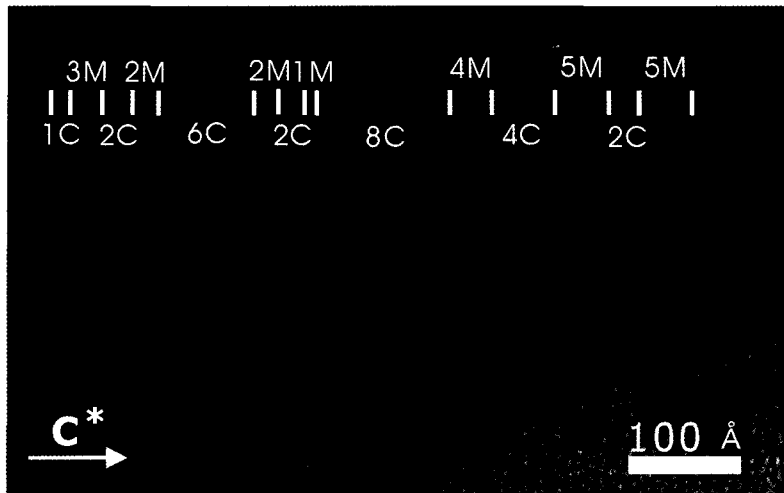


Fig. 7. HRTEM image showing mixed-layer margarite and chlorite. Margarite (M) and chlorite (C) slabs are quite narrow. The numbers marked indicate the number of layers of each structure unit.

불규칙적으로 협재되기도 한다(Fig. 7). 그림 7에서의 숫자들은 연속되어 협재되어 있는 마가라이트(M)와 녹니석(C)의 layer의 수를 의미한다. 비슷한 수의 layer들이 협재되어 있는 결정들은 마가라이트와 녹니석의 혼합체를 이루며, 이러한 부분을 전자현미분석기를 이용하여 분석할 경우 마가라이트와 녹니석 사이의 중간정도 되는 화학조성을 보일 것이다.

### 토의 및 결론

미원지역 운교리층에서 발견되는 마가라이트는 같은 시료내의 다른 변성기원 광물들을 관입하고 암석에 분포하는 흑운모의 엽리방향과는 무관하게 산출하는데, 이러한 조직관계는 마가라이트가 최고변성작용 이후에 생성된 이차광물임을 지시한다. 일반적으로 변성암이 변성작용을 여러 차례 받았을 경우 최고변성작용 시기 이전의 광물들은 대부분 쉽게 다른 광물들로 반응한다. 또한 최고변성작용이후 후퇴변성작용이 일어날 경우 고온광물들은 보다 hydrous한 광물들로 변화하는데, 주변의 환경에 따라서 이러한 후퇴변성시 생성되는 후기광물들이 초기에 생성된 광물 결정내에 남아있을 수 있다. 마가라이트는 순수한 단결정으로 구성되어 있지 않고 녹니석이 마가라이트 결정내에 평행한

경계를 이루며 존재한다. 녹니석은 마가라이트보다 많은 수산기(OH)를 함유한 함수광물이고, 마가라이트 입자의 경계부를 따라서 생성되었거나 또는 마가라이트 결정의 파쇄면을 따라서 생성된다. 그러므로 마가라이트내에 협재되어 있는 녹니석은 마가라이트의 수화반응의 결과로 해석된다.

투과전자현미경으로 관찰한 순수한 마가라이트 결정들은 매우 규칙적인 2M 다형구조를 보여주며, 전자회절도형에서 00l (또는  $c^*$ ) 방향으로 streak를 보여주고 있지 않기 때문에 stacking disorder가 우세하지 않은 것으로 판단된다(Fig. 8). 그러나 운교리층에서 산출되는 대부분의 마가라이트 결정들은 녹니석 packet들이 협재되어 있다. 투과전자현미경으로 관찰한 결과에서는 녹니석 packet가 전자현미분석기의 후방산란전자영상에서 관찰된 것 보다 훨씬 미세한 규모로 협재되어 마가라이트 결정내에서 관찰된다. 이러한 이유 때문에 하나의 개별적인 광물들에 대한 정확한 화학성분 분석의 획득에 있어서 어려움이 있다. 그러므로 마가라이트를 전자현미분석기를 사용하여 분석한 데이터를 이용하여 해석할 경우 어느정도의 오차가 발생할 수 있다.

일부 마가라이트 결정내에는 부르사이트가 국부적으로 협재되어 산출한다. 마가라이트의 층간사이에 이러한 부르사이트가 협재되어 하

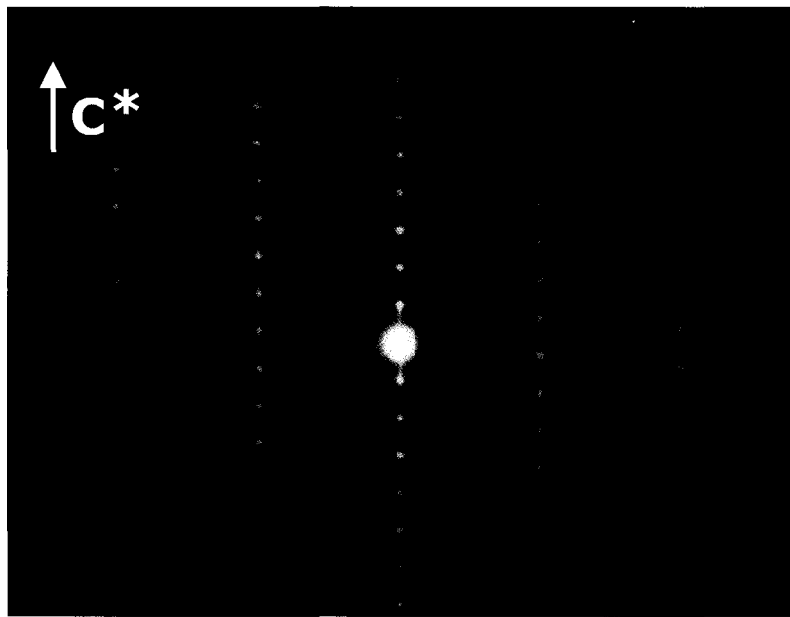


Fig. 8. Electron diffraction pattern of margarite shows no significant streakings along the 00 $\bar{l}$  direction.

나의 마가라이트 층과 부르사이트층이 결합하여 부분적으로는 녹니석의 구조를 형성하게 되는데, 부르사이트의 존재는 마가라이트가 녹니석화 되는 과정에 관여하였음을 지시한다. 고분해능 투과전자현미경으로 관찰한 결과, 마가라이트의 (001)과 녹니석의 (001)은 서로 평행한 경계를 이루고 있다. 마가라이트와 녹니석이 서로 (001)을 따라서 서로 평행하게 나타나는 특징은 두 광물이 모두 층상구조를 이루므로 후기에 생성된 녹니석이 마가라이트와 방향성이 평행하게 유지된 것으로 보인다. 두 광물간의 구조적인 연속성이 결여되어 있으며, 또한 마가라이트와 녹니석은 이팔면체와 삼팔면체의 전혀 다른 화학적인 특징을 나타내므로 고체상태 치환작용(soild-state reaction)이 작용하였을 가능성은 매우 낮으며, 마가라이트내의 녹니석은 용해와 침전 작용(dissolution-precipitation reaction)에 의해서 생성되었음을 지시한다. 또한, 마가라이트내에 발견되는 삼팔면체 구조의 부르사이트의 존재도 이러한 생성과정을 지지한다.

사 사

마가라이트의 산출 지역을 안내해 주신 서울

대학교 김현철 박사와 조문섭 교수에게 감사드리며, 이 연구의 분석을 위하여 도와주신 기초과학지원연구원 이석훈 박사에게도 감사드린다. 또한 원고를 심사하여 중요한 사항들을 지적하여주신 노진환 교수와 익명의 심사위원께도 감사드린다. 이 연구는 과학재단 지역대학 우수과학자 연구과제(R05-2001-000-00258-0)에 의해 지원되었다.

참 고 문 헌

김현철, 조문섭, 고희재 (1995) 증평-덕평 지역에 분포하는 중부 옥천 변성대의 변성 지구구조적 진화. 대한지질학회지, 31, 299-314.  
 이승준, 안중호, 김현철, 조문섭 (2002) 충북 미원지역에서 산출하는 마가라이트의 변질양상 및 광물 화학. 한국광물학회지, 15, 69-77.  
 Ackermant, D. and Morteani, G. (1973) Occurrences and breakdown of paragonite and margarite in the Greiner Schiefer Series (Zillertal Alps, Tyrol). Contrib. Mineral. and Petrol., 40, 293-304.  
 Ahn, J.H., Peacor, D.R., and Essene, E.J. (1986) Cation-diffusion-induced characteristic beam damage in transmission electron microscope images of micas. Ultramicroscopy, 19, 375-382.  
 Allen, F.M. (1992) Mineral definition by HRTEM:

- problems and opportunities. In : Buseck, P. R, (ed.), *Reviews in Mineralogy Vol. 27, Minerals and reactions at the Atomic Scale: Transmission Electron Microscopy*. Washington, D.C. Mineralogical Society of America, 288-333.
- Baltatzis, E. and Katagas, C. (1981) Margarite pseudomorphs after kyanite in Glen Esk, Scotland. *Amer. Miner.*, 60, 265-272.
- Bucher, K., Frank, E., and Frey, M. (1983) A model for the progressive regional metamorphism of margarite-bearing rocks in the central Alps. *Amer. Jour. Sci.*, 283-A, 370-395.
- Chinner, G.A. (1974) Dalradian margarite : A preliminary note. *Geol. Mag.*, 111, 699-709.
- Cooper, A.F. (1980) Retrograde alteration of chromian kyanite in metachert and amphibolite whiteschist from the Southern Alps, New Zealand, with implications for uplift on the Alpine Fault. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 75, 153-164.
- Eggleton, R.A. and Banfield, J.F. (1985) The alteration of granitic biotite to chlorite. *American Mineralogist*, 70, 902-910.
- Enami, M., (1980) Note on petrography and rock-forming mineralogy (8) Margarite-bearing metagabbro from the Iratsu mass in the Sanbagawa Belt, Central Shikoku. *Jour. Jap. Asso. Mineral. Petrol. Eco. Geol.*, 75, 245-253.
- Frank, E. (1983) Alpine metamorphism of calcareous rocks along a cross-section in the Central Alps: occurrence and breakdown of muscovite, margarite and paragonite. *Schw. Mineral. Petro. Mitt.*, 63, 39-93.
- Frey, M. (1978) Progressive low-grade metamorphism of a black shale formation, Central Swiss Alps, with special reference to pyrophyllite and margarite bearing assemblages. *Jour. Petrol.*, 19, 95-135.
- Frey, M. and Orville, P. M. (1974) Plagioclase in margarite-bearing rocks. *Amer. Jour. Sci.*, 274, 32-47.
- Frey, M. Bucher, K., Frank, E., and Schwander, H. (1982) Margarite in the central Alps. *Schw. Mineral. Petro. Mitt.*, 62, 21-45.
- Gibson, G.M. (1979) Margarite in kyanite and corundum-bearing anorthosite, amphibolite and hornblendite from Central Fiordland, New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 68, 171-179.
- Grew, E.S., Hinthorne, J.R., and Marquez, N. (1986) Li, Be, B and Sr in margarite and paragonite from Antarctica. *Amer. Mineral.*, 71, 1129-1134.
- Guidotti, C.V. (1984) Micas in metamorphic rocks. In: Bailey, S. W., editor. *Reviews in Mineralogy 13. Micas*. Washington, D.C. Mineralogical Society of America, 357-467.
- Guidotti, C.V. and Cheney, J.T. (1976) Margarite pseudomorphs after chiastolite in the Rangeley area, Maine. *Amer. Mineral.*, 61, 431-434.
- Guidotti, C.V., Post, J.L., and Cheney, J.T. (1979) Margarite pseudomorphs after chiastolite in the Georgetown area, California. *Amer. Mineral.*, 64, 728-732.
- Höck, V. (1974) Coexisting phengite, paragonite and margarite in metasediments of the Mittlere Hohe Tauern, Austria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 43, 261-273.
- Hoinkes, G. (1978) Zur Mineralchemie und Metamorphose toniger und mergeliger Zwischenlagen in Marmoren des südwestlichen Schneebergerzuges (Ötztaler Alpen, Südtirol). *Neues Jahrb. Mineral., Abh.*, 131, 272-303.
- Kim, H. and Cho, M. (1999) Polymetamorphism of Ogcheon supergroup in the Miwon area, central Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Geosciences Journal*, 3, 151-162.
- Morand, V.J. (1988) Vanadium-bearing margarite from the Lachlan Fold Belt, New South Wales, Australia. *Mineral. Mag.*, 52, 341-345.
- Olives Baños, Juan, Amouric, Marc, de Fouquet, Chantal, and Baronnet, Alain (1983) Interlaying and interlayer slip in biotite as seen by HRTEM. *American Mineralogist*, 68, 754-758.
- Peacor, D.R. (1992) Diagenesis and low-grade metamorphism of shales and slates. In : Buseck, P. R, editor. *Reviews in Mineralogy 27. Minerals and reactions at the atomic scale: transmission electron microscopy*. Washington, D.C. Mineralogical Society of America, 335-380.
- Stähle, V., Frenzel, G., and Mertz, D.F. (1986) Retrograde metamorphism in anorthositic layers from Finero (Ivrea zone). *Schw. Mineral. Petro. Mitt.*, 66, 73-98.
- Teale, G.S. (1979) Margarite from the Olary Province of South Australia. *Min. Mag.*, 43, 433-435.
- Veblen, D.R. (1980) Anthophyllite asbestos: microstructures, intergrown sheet silicates and mechanisms of fiber formation. *American Mineralogist*, 65, 1075-1086.
- Veblen, D.R. (1983) Microstructures and mixed layering in intergrown wonesite, chlorite, talc, biotite and kaolinite. *American Mineralogist*, 68, 566-580.
- Veblen, D.R. (1992) Electron microscopy applied to nonstoichiometry, polysomatism, and replacement reactions in minerals. In : Buseck, P.R, editor. *Reviews in Mineralogy 27. Minerals and reactions at the atomic scale: transmission electron micros-*



- copy. Washington, D.C. Mineralogical Society of America, 181-229.
- Yardley, B.W.D. and Baltatzis, E. (1985) Retrogression of staurolite schists and the sources of infiltration fluids during metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 89, 59-68.
- Yau, Y., 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88, 299-306.
- 
- Yau, Y., Anovitz, L.M., Essene, E.J., and Peacor, D.R. 2003년 8월 28일 원고접수, 2003년 9월 9일 게재승인.