

태백지역 만항층 셰일에서 산출되는 백운모-파이로필라이트 혼합상에 대한 연구

A Study on the Muscovite-Pyrophyllite Mixed Phase in the Shale from the Manhang Formation, Taebaek Area

최 승 현(Seung Hyun Choi)¹ · 문 향 란(Hyang Ran Mun)^{1,4} ·
이 영 부(Young Boo Lee)² · 이 정 후(Jung Hoo Lee)^{1,3,*}

¹전북대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea)

²한국기초과학지원연구원 전주센터

(Korea Basic Science Institute, Jeonju Center, Jeonju 561-756, Korea)

³전북대학교 지구환경시스템 연구소

(Institute of Earth's Environmental System, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea)

⁴(재)전북테크노파크

(Jeonbuk Technopark, Jeonju 561-844, Korea)

요약 : 강원도 태백지역에 분포하는 만항층 셰일의 운모류 층상규산염광물입자에 대한 EPMA 및 TEM 연구를 수행하였다. EPMA 분석에 의한 만항층 셰일 내 운모류 층상규산염광물의 평균 화학식은 $K_{1.35}(Fe_{0.18}Mg_{0.03}Al_{3.86})(Si_{6.55}Al_{1.45})O_{20}(OH)_4$ 이며, 이는 백운모의 이상화학식과 비교하면 층간 양이온인 K의 함량이 낮아서 일라이트에 가까운 조성을 갖는다. X-선 회절 분석에 의하면 만항층 셰일에서 파이로필라이트가 흔히 백운모와 함께 산출된다. TEM 격자상 관찰에 의하여 10 Å의 백운모와 9.3 Å의 파이로필라이트 층들이 단일 층 수준에서의 층간 혼합 및 층 내 혼합 현상이 동시에 관찰되었다. EPMA 분석에서 K 함량이 백운모에 비해 낮게 분석된 원인은 이처럼 입자 내에서 백운모와 파이로필라이트가 밀접하게 공존하기 때문으로 판단된다.

주요어 : 일라이트, 백운모, 파이로필라이트, EPMA, TEM, 격자상

ABSTRACT : Mica-type phyllosilicate particles in the shales of the Manhang formation at the Taebaek area in the Kangwon Province were studied using electron probe microanalysis (EPMA) and transmission electron microscopy (TEM). The average chemical formula of the mica-type phyllosilicate mineral analysed by EPMA is $K_{1.35}(Fe_{0.18}Mg_{0.03}Al_{3.86})(Si_{6.55}Al_{1.45})O_{20}(OH)_4$. Low K contents compared to the ideal chemistry of muscovite indicate the presence of illite in the mica-type phyllosilicate particle. X-ray diffraction study showed that pyrophyllite commonly coexists with muscovite in the shales from the Manhang Formation. TEM observations showed both the interlayer and intralayer mixing of 9.3-Å pyrophyllite and 10-Å muscovite layers. The low K content of the mica-type phyllosilicates apparently

*교신저자: jhlee@jbnu.ac.kr

come from the close mixing of pyrophyllite and muscovite.

Key words : Muscovite, pyrophyllite, EPMA, TEM, lattice fringe image, illite

서 언

세일과 같은 이질 퇴적암에 함유되어 있는 점토 광물들은 숙성작용의 증가에 따라 다른 광물로 전이되는데, 이 과정에서 생성된 일라이트는 온도가 증가하면서 백운모로 전이된다(Lee *et al.*, 1985). 이 과정에서 다양한 형태의 혼합층상이 나타나는데(Lee *et al.*, 1985), 먼저 스�멕타이트의 숙성작용에 의해 생성된 일라이트는 스�멕타이트와 혼합층상(I/S)을 이루게 된다(Srodon and Eberl, 1984). 일라이트/스멕타이트(I/S) 혼합층상은 스�멕타이트-녹니석으로 전이 단계의 중간 광물인 사문석 구조의 광물(berthierine)과의 혼합층상(I/Sp), 일라이트/녹니석(I/C) 혼합층상, 백운모/녹니석(M/C) 혼합층상을 수반하면서 각각의 광물(백운모와 녹니석)로 진화한다(Lee and Peacor, 1983; Lee *et al.*, 1984; Lee *et al.*, 1985; Ahn and Peacor, 1986).

일라이트와 백운모는 화학 조성[$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$]과 결정구조에서 큰 차이를 보이지 않으므로, 이 두 광물을 정확히 구분하는 것은 쉽지 않다. 이들의 TEM 10 Å 격자상을 비교하면, 전반적으로 불규칙한 층을 갖는 일라이트와 달리, 백운모는 구불구불하거나 층의 결손구조가 보이지 않는 완벽한 형태의 모습을 보여준다(최승현 외, 2008).

일라이트-백운모 전이과정에 대한 TEM 연구에서 10 Å의 일라이트와 백운모의 layer 이외에 9.3 Å의 d_{001} 값을 갖는 파이로필라이트가 관찰되었으며(Jiang *et al.*, 1990; 이영부, 1993), 최승현(2009)의 연구에서는 파이로필라이트의 층이 구불구불하고 불규칙적인 일라이트 내에 존재하는 것을 확인하였다. 또한 Lee and Peacor (1983)는 일라이트의 단일 층에서 다른 광물들(녹니석과 berthierine)의 층내혼합(intralayer mixing) 현상을 밝혀냈는데, 백운모와 파이로필라이트 역시 혼합층상으로 존재할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 만약 백운모/파이로필라이트(M/P) 혼합층상이 존재한다면, 파이로필라이트는 백운모와는 달리 층간 양이온인 K를 함유하지 않기 때문에 BSE (back-scattered electron) 상에서 백운모와 혼합되어 있는 모습을 볼 수 있을 것이다. 또한 이들의 d_{001} 값도 백운모가 10

Å, 파이로필라이트가 9.3 Å으로 약간의 차이가 있기 때문에 TEM 격자상 관찰에서 구분이 가능할 것으로 판단된다.

이번 연구는 강원도 태백시 장성동 일대에 분포하는 평안누층군의 만항층 세일을 대상으로 하였다. 암석 시료에 대한 EPMA 정량분석과 BSE상 관찰을 통하여 백운모/파이로필라이트(M/P) 혼합층상의 존재 유무를 확인하고, TEM 격자상 관찰을 통하여 백운모와 파이로필라이트가 어떠한 형태로 혼합층상을 이루고 있는지를 확인하고자 하였다.

지질개요

강원도 태백시 장성동 일대는 하부 고생대의 조선누층군과 이를 부정합으로 덮고 있는 상부 고생대의 평안누층군이 분포하고 있다(그림 1). 연구지역에 분포하는 조선누층군은 캄브리아기의 풍춘석회암층, 화절층과 오르도비스기의 동점규암층, 두무골층, 막골석회암층, 직운산층 및 두위봉층으로 구성되어 있다. 평안누층군은 만항층, 사동층, 고방산층 및 녹암층으로 구성되어 있으며, 최하부의 만항층은 조선누층군의 최상부층인 두위봉층을 부정합으로 피복하고 있다(홍민화, 1986). 이번 연구 대상인 만항층의 지질시대는 중기 석탄기에 해당되며(박수인, 1989), 녹색 또는 적색 세일, 녹색 사암으로 구성되어 있다(태백산지구지하자원조사단, 1962).

연구방법

시료채취 및 편광현미경 관찰

이번 연구를 위한 암석 시료는 강원도 태백시 장성동, 철암동과 정선군 예미지역에서 채취하였다. 채취한 암석 시료를 박편으로 제작한 다음, 편광현미경 관찰을 실시하여 암석 내에 방해석과 같은 탄산염 광물이 포함되어 있지 않는 암석을 선별하여 연구에 활용하였다.

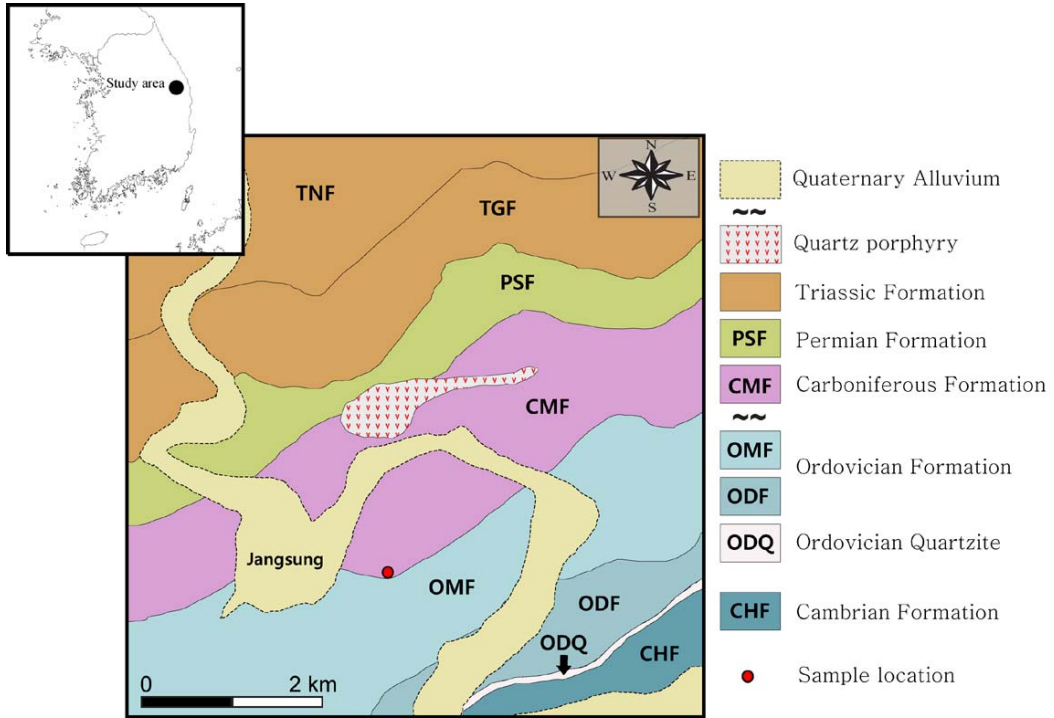


Fig. 1. Geological map of the study area (GICTR, 1962). CHF: Hwajeol formation, ODQ: Dongjeom quartzite, ODF: Dumugol formation, OMF: Maggol formation, CMF: Manhang formation, PSF: Sadong formation, TGF: Gobangsan formation, TNF: Nogam formation.

EPMA 분석

박편의 BSE 관찰로 운모류 입자와 파이로필라이트의 산출상태를 관찰한 후, 운모류와 파이로필라이트 입자를 대상으로 EPMA 정량분석을 실시하였다. EPMA 분석은 한국 기초과학 지원 연구원 전주센터의 Shimadzu EPMA 1600을 사용하여 가속전압 15 kV, 빔 전류 20 nA, 그리고 빔 크기 1 μm 에서 실시하였다.

TEM 관찰

TEM 관찰은 격자상에서 일라이트와 백운모의 차이점을 규명하기 위한 목적에서 실시되었다. 일반적으로 일라이트의 격자상은 불규칙하여 구불구불한 모습을 보여주며 백운모는 규칙적으로 나타나는데, 이러한 차이점에 착안하여 구불구불한 일라이트의 격자상을 정확히 규명하고자 하였다. TEM 관찰은 한국 기초과학 지원 연구원 전주센터

의 JEM-2200FS를 사용하였으며 200 kV의 전압에서 100 K, 200 K의 배율로 격자상을 관찰하였으며, 백운모($d_{001} = 10 \text{ \AA}$)와 파이로필라이트($d_{001} = 9.3 \text{ \AA}$)의 결정구조와 (00l) layer의 규칙성과 균질성을 관찰하기 위하여 제한시야전자회절상(selected area electron diffraction, SAED)을 함께 관찰하였다.

연구 결과

EPMA 분석 결과

BSE image 관찰 결과 소량의 석영, 운모류가 관찰되었고, 석영과 비슷하지만 약간 밝은 명암을 보이는 입자들이 관찰되었다. 이들 입자 형태는 운모와 같은 모습을 보이는데, 이들은 단일 결정의 파이로필라이트이다(그림 2). 또한 파이로필라이트는 백운모류 입자 내에서 혼합상의 형태로 관찰되기도 한다.

백운모의 정량분석 결과, 층간 양이온인 K 함량

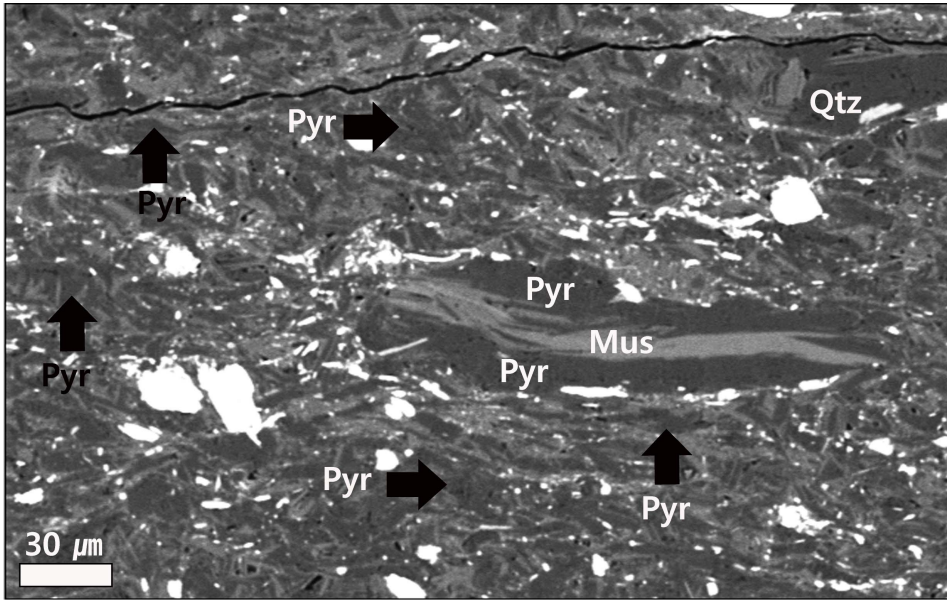


Fig. 2. BSE image of the shale from the Manhang formation. Qtz: Quartz, Mus: Muscovite, Pyr: Pyrophyllite.

이 일반적인 백운모의 K 함량에 비해 낮게 분석되었다(표 1). 파이로필라이트의 정량분석 결과를 보면(표 2), 소량의 K이 검출되지만 이상화학식 $[Al_4Si_8O_{20}(OH)_4]$ 에 가까운 파이로필라이트로 확인되었다.

한편 최승현(2009)의 직운산층 세일에 대한 EPMA 연구에서는 파이로필라이트의 단일 결정 및 백운모와 파이로필라이트의 혼합상은 관찰되지 않았다. epizone에 해당되는 직운산층과 anchizone에 해당되는 만향층의 변성정도를 감안할 때(Ko and Lee, 1991), 만약 직운산층 세일이 epizone 단계의 변성작용을 경험하기 이전에 파이로필라이트가 존재하였다면, 파이로필라이트는 epizone 이상의 변성작용을 경험하면서 다른 광물로 치환된 것으로 추측된다.

TEM 관찰 결과

만향층 세일의 TEM 관찰에서 백운모의 10 Å 격자상이 관찰되었다(그림 3). 그림 3a를 보면, 좌상부의 비교적 불균질한 격자상과 우하의 균질한 격자상이 접하고 있는 것이 관찰된다. 이를 제한시야전자회절상(SAED)으로 확인한 결과(그림 3b), 좌상부의 격자상은 d_{001} 값이 10 Å으로 백운모이

고, 우하측은 9.3 Å의 파이로필라이트이다. 그림 3a에서 불균질한 부분을 확대해서 관찰하면(그림 4), ① 지역에서는 10 Å 백운모와 9.3 Å 파이로필라이트가 단일 격자층 수준에서 층간혼합(inter-layer mixing)된 현상이 관찰된다. 이러한 현상은 일라이트가 백운모와 파이로필라이트의 혼합으로 형성되어 있는 것을 의미한다.

그림 4 좌측의 백운모의 격자층이 우측의 파이로필라이트 층에 비해 불균질하고, 구불구불한 모습을 보이는 이유는 다른 d_{001} 값을 갖는 백운모와 파이로필라이트가 혼합층상(층간혼합층 및 층내혼합층)을 형성하고 있기 때문이다. 한편 그림 4의 좌하부에서 10 Å의 백운모 격자층을 따라가면(a,b로 표시된 부분), 도중에 9.3 Å의 파이로필라이트 격자층으로 바뀌는 현상이 관찰된다. 이러한 현상은 그림 5에서도 볼 수 있다. a,b로 표시된 부분의 화살표를 따라가면, 그림 4에서 관찰된 층내혼합현상을 볼 수 있다. 이와 같은 격자층 내 혼합현상은 여러 개가 모여서 격자층이 구부러져 보이는 결과를 나타낸다. 그림 5에서는 백운모(10 Å), 파이로필라이트(9.3 Å)와 함께 녹니석(14 Å)의 격자상이 관찰된다. 이들 간의 층간혼합 및 층내혼합현상은 보이지 않지만, 백운모/파이로필라이트(M/P) 혼합층상 혹은 백운모/녹니석(M/C) 혼합층상 이외

Table 1. EPMA data of muscovite-like grains in the shale from the Manhang formation. Chemical formula was calculated based on 22 oxygens.

	1	2	3	4	5	6	7	8		9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	51.297	55.302	50.937	46.767	51.912	46.406	45.867	46.840	SiO ₂	46.785	46.839	50.974	48.438	48.022	47.007	48.297
Al ₂ O ₃	34.308	32.006	33.971	34.577	34.022	36.390	35.512	32.310	Al ₂ O ₃	36.119	36.071	35.037	36.158	36.426	36.626	35.734
K ₂ O	8.678	6.528	8.691	9.082	7.821	9.025	9.040	8.304	K ₂ O	8.707	8.933	7.346	8.542	8.528	9.183	8.508
FeO	1.702	1.304	2.181	2.575	1.550	1.546	2.284	3.651	FeO	1.530	1.473	1.481	1.630	1.246	1.683	1.679
CaO	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.019	0.035	CaO	0.014	0.000	0.000	0.011	0.005	0.000	0.000
MgO	0.096	0.058	0.189	0.162	0.156	0.183	0.281	0.670	MgO	0.069	0.180	0.141	0.212	0.125	0.313	0.209
Na ₂ O	0.179	0.138	0.160	0.144	0.129	0.150	0.138	0.100	Na ₂ O	0.098	0.135	0.134	0.137	0.146	0.152	0.129
TiO ₂	0.046	0.038	0.697	1.741	0.045	0.058	0.413	1.154	TiO ₂	0.065	0.050	0.085	0.094	0.024	0.185	0.100
MnO	0.027	0.000	0.019	0.000	0.000	0.018	0.001	0.016	MnO	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.006
Total	96.333	95.375	96.855	95.047	95.635	93.775	93.556	93.080	Total	93.388	93.681	95.199	95.221	94.521	95.150	94.662

	Chemical formulas		Chemical formulas
1	$K_{1.43}(Fe_{0.18}Mg_{0.02}Al_{3.82})(Si_{6.61}Al_{1.39})O_{20}(OH)_4$	9	$K_{1.48}(Fe_{0.17}Mg_{0.01}Al_{3.94})(Si_{6.25}Al_{1.75})O_{20}(OH)_4$
2	$K_{1.06}(Fe_{0.14}Mg_{0.01}Al_{3.84})(Si_{7.04}Al_{0.96})O_{20}(OH)_4$	10	$K_{1.52}(Fe_{0.16}Mg_{0.04}Al_{3.92})(Si_{6.25}Al_{1.75})O_{20}(OH)_4$
3	$K_{1.43}(Fe_{0.23}Mg_{0.04}Al_{3.72})(Si_{6.56}Al_{1.44})O_{20}(OH)_4$	11	$K_{1.21}(Fe_{0.16}Mg_{0.03}Al_{3.93})(Si_{6.59}Al_{1.41})O_{20}(OH)_4$
4	$K_{1.54}(Fe_{0.29}Mg_{0.03}Al_{3.62})(Si_{6.21}Al_{1.79})O_{20}(OH)_4$	12	$K_{1.43}(Fe_{0.18}Mg_{0.04}Al_{3.91})(Si_{6.34}Al_{1.66})O_{20}(OH)_4$
5	$K_{1.29}(Fe_{0.17}Mg_{0.03}Al_{3.86})(Si_{6.69}Al_{1.31})O_{20}(OH)_4$	13	$K_{1.43}(Fe_{0.14}Mg_{0.02}Al_{3.97})(Si_{6.32}Al_{1.68})O_{20}(OH)_4$
6	$K_{1.54}(Fe_{0.17}Mg_{0.04}Al_{3.93})(Si_{6.20}Al_{1.80})O_{20}(OH)_4$	14	$K_{1.54}(Fe_{0.19}Mg_{0.06}Al_{3.89})(Si_{6.20}Al_{1.80})O_{20}(OH)_4$
7	$K_{1.55}(Fe_{0.26}Mg_{0.06}Al_{3.82})(Si_{6.18}Al_{1.82})O_{20}(OH)_4$	15	$K_{1.43}(Fe_{0.18}Mg_{0.04}Al_{3.90})(Si_{6.36}Al_{1.64})O_{20}(OH)_4$
8	$K_{1.44}(Fe_{0.41}Mg_{0.14}Al_{3.54})(Si_{6.36}Al_{1.64})O_{20}(OH)_4$	Ave.	$K_{1.35}(Fe_{0.18}Mg_{0.03}Al_{3.86})(Si_{6.55}Al_{1.45})O_{20}(OH)_4$

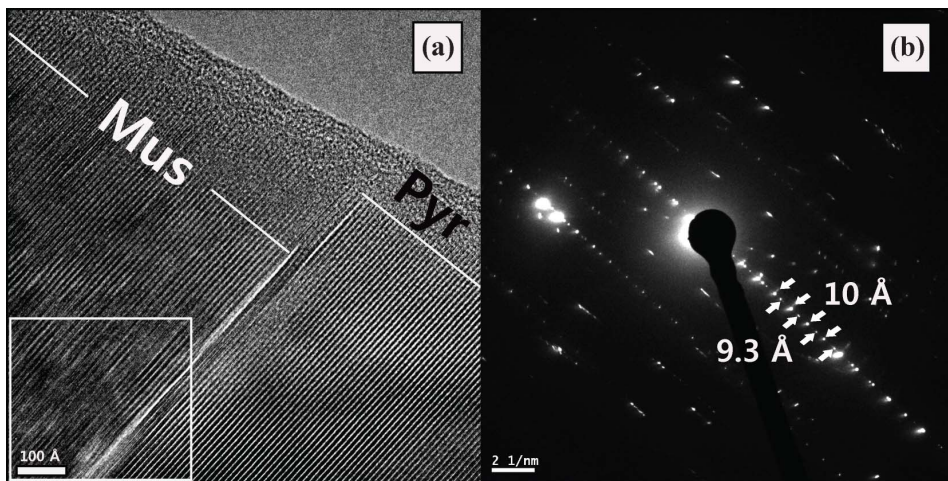


Fig. 3. TEM lattice fringe image of the muscovite and pyrophyllite of the shale from the Manhang formation (a), and a SAED pattern from the same area as Fig. 3a (b).

에도, 일라이트-백운모 전이과정에서 백운모/파이로필라이트/녹니석(M/P/C) 혼합층상도 형성될 수

있다는 것을 의미한다.

Table 2. EPMA data of the pyrophyllite in the shale from the Manhang formation. Chemical formula was calculated based on 22 oxygens

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
SiO ₂	64.828	63.986	66.012	66.930	66.189	67.707	66.715	62.394	66.327	68.904	65.447	66.265	SiO ₂	63.851	66.944	63.916	65.801	65.025	65.377	64.346	63.764	65.692	65.919	65.511
Al ₂ O ₃	29.226	29.385	28.169	28.881	29.206	27.959	28.108	30.105	27.545	28.630	28.548	28.133	Al ₂ O ₃	29.493	28.513	29.513	28.273	29.383	28.986	29.051	29.132	28.237	28.319	29.227
K ₂ O	1.048	1.245	0.055	0.131	0.726	0.059	0.041	2.379	0.062	0.157	0.109	0.041	K ₂ O	1.476	0.077	1.394	0.383	0.934	0.461	1.216	0.995	0.112	0.191	0.618
FeO	1.090	0.774	0.714	0.727	0.834	0.829	0.602	0.933	0.915	0.548	0.511	0.707	FeO	0.631	0.383	0.598	0.466	0.706	0.556	0.697	1.050	0.892	0.563	0.742
CaO	0.014	0.048	0.034	0.030	0.076	0.044	0.057	0.018	0.039	0.043	0.026	0.047	CaO	0.053	0.054	0.053	0.010	0.027	0.042	0.023	0.023	0.028	0.061	0.020
MgO	0.027	0.044	0.011	0.007	0.029	0.016	0.015	0.020	0.010	0.014	0.037	0.021	MgO	0.040	0.011	0.058	0.015	0.026	0.011	0.032	0.039	0.019	0.008	0.020
Na ₂ O	0.030	0.038	0.004	0.014	0.024	0.012	0.017	0.043	0.033	0.004	0.020	0.011	Na ₂ O	0.021	0.007	0.026	0.028	0.024	0.010	0.033	0.063	0.021	0.004	0.014
TiO ₂	0.041	0.052	0.036	0.041	0.043	0.058	0.054	0.044	0.058	0.007	0.006	0.010	TiO ₂	0.027	0.043	0.061	0.059	0.015	0.064	0.026	0.023	0.021	0.249	0.054
MnO	0.000	0.017	0.002	0.000	0.000	0.012	0.008	0.000	0.008	0.020	0.001	0.000	MnO	0.049	0.000	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	96.305	95.585	95.036	96.760	97.127	96.695	95.618	95.935	94.995	98.328	94.703	95.235	Total	95.643	96.032	95.619	95.040	96.140	95.513	95.424	95.089	95.022	95.314	96.206
Chemical formulas												Chemical formulas												
1	$K_{0.16}Al_{4.14}Si_{7.79}O_{20}(OH)_4$					7	$K_{0.01}Al_{3.96}Si_{7.98}O_{20}(OH)_4$					13	$K_{0.23}Al_{4.21}Si_{7.74}O_{20}(OH)_4$					19	$K_{0.19}Al_{4.15}Si_{7.80}O_{20}(OH)_4$					
2	$K_{0.19}Al_{4.2}Si_{7.75}O_{20}(OH)_4$					8	$K_{0.37}Al_{4.33}Si_{7.61}O_{20}(OH)_4$					14	$K_{0.01}Al_{4.00}Si_{7.97}O_{20}(OH)_4$					20	$K_{0.15}Al_{4.18}Si_{7.76}O_{20}(OH)_4$					
3	$K_{0.01}Al_{4.00}Si_{7.93}O_{20}(OH)_4$					9	$K_{0.01}Al_{3.92}Si_{8.00}O_{20}(OH)_4$					15	$K_{0.22}Al_{4.21}Si_{7.74}O_{20}(OH)_4$					21	$K_{0.02}Al_{4.02}Si_{7.93}O_{20}(OH)_4$					
4	$K_{0.02}Al_{4.03}Si_{7.93}O_{20}(OH)_4$					10	$K_{0.02}Al_{3.92}Si_{8.02}O_{20}(OH)_4$					16	$K_{0.06}Al_{4.02}Si_{7.94}O_{20}(OH)_4$					22	$K_{0.03}Al_{4.01}Si_{7.93}O_{20}(OH)_4$					
5	$K_{0.11}Al_{4.08}Si_{7.85}O_{20}(OH)_4$					11	$K_{0.02}Al_{4.07}Si_{7.91}O_{20}(OH)_4$					17	$K_{0.14}Al_{4.16}Si_{7.80}O_{20}(OH)_4$					23	$K_{0.09}Al_{4.12}Si_{7.84}O_{20}(OH)_4$					
6	$K_{0.01}Al_{3.90}Si_{8.02}O_{20}(OH)_4$					12	$K_{0.01}Al_{3.99}Si_{7.97}O_{20}(OH)_4$					18	$K_{0.07}Al_{4.11}Si_{7.86}O_{20}(OH)_4$					Ave.	$K_{0.09}Al_{4.08}Si_{7.87}O_{20}(OH)_4$					

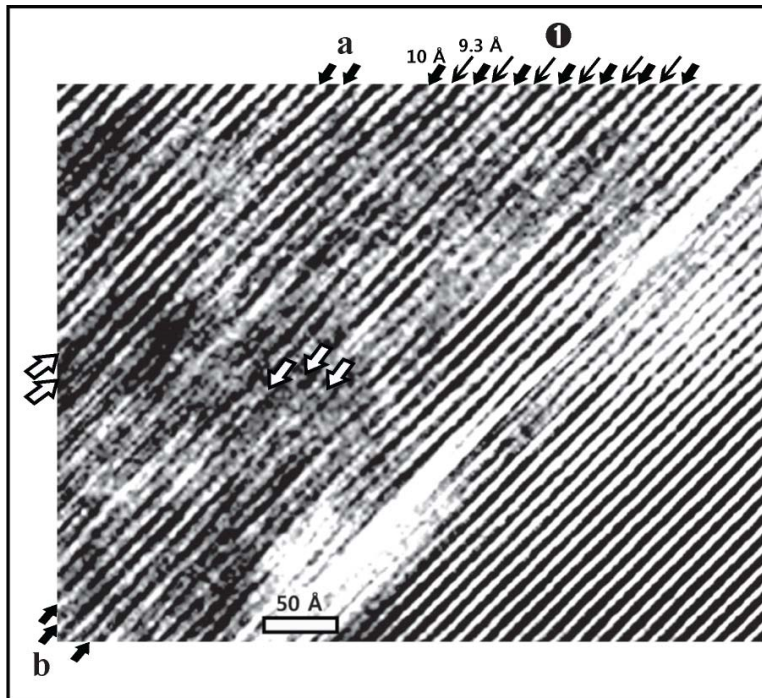


Fig. 4. Mixed layer image of muscovite and pyrophyllite of the area shown in box in Fig. 3a.

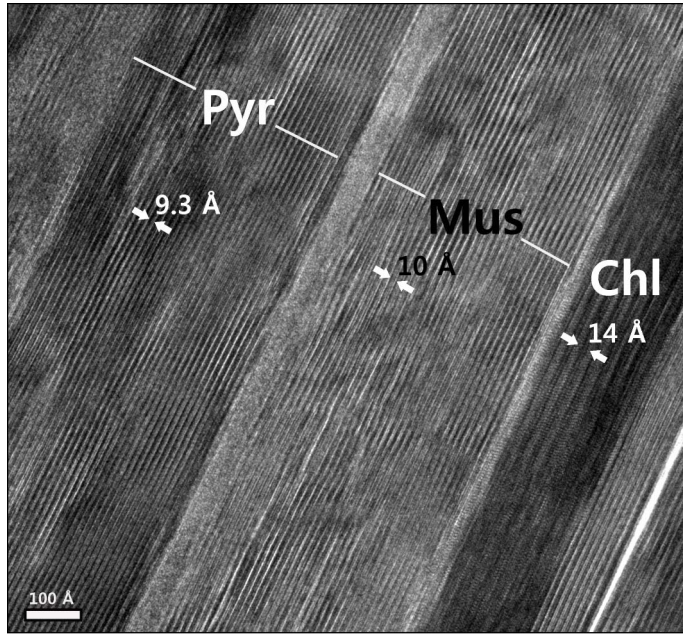
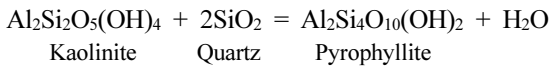


Fig. 5. An intralayering image between 10-Å muscovite and 9.3-Å pyrophyllite of the shale from the Manhang formation.

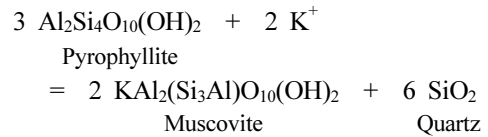
토 의

Frey (1987)와 Brattli (1997)는 온도와 압력의 증가에 따른 카올리나이트가 파이로필라이트로 전이되는 과정을 다음과 같이 제시하였다.



하지만 최승현(2009)의 만항층 셰일의 X선 회절 분석에서 카올리나이트가 산출되지 않은 점과 이번 연구의 BSE image 관찰에서 백운모/파이로필라이트 혼합상이 관찰된 것을 고려할 때, 만항층 셰일의 파이로필라이트는 일라이트 → 백운모 + 파이로필라이트로 분리되어 생성된 것으로 판단된다.

한편 백운모/파이로필라이트 혼합상에서 분리된 파이로필라이트는 온도와 압력이 증가하면 홍주석과 같은 광물로 전이될 수 있는데(Evans and Guggenheim, 1988), 만약 파이로필라이트가 K 이온을 공급받는다면, 다음의 반응식에 의해 백운모로 전이될 수 있다(Montoya and Hemley, 1975).



위 내용을 토대로, 일라이트-백운모 전이 과정의 중간 단계인 백운모/파이로필라이트 혼합상이 진화하여 백운모로 전이되는 과정과 함께, 일라이트에서 분리되거나 혹은 다른 과정에 의해 생성된 파이로필라이트가 K 이온을 공급받아 백운모로 전이되는 과정도 생각해볼 수 있을 것이다.

TEM 관찰 결과를 토대로, 만약 일라이트가 백운모와 파이로필라이트의 혼합층상이라면 어떠한 형태로 존재할 것인지는 다음의 두 가지 경우를 생각할 수 있다. 첫째, 10 Å 백운모의 층과 9.3 Å 파이로필라이트의 층이 개별 단위 혹은 그 이상의 단위로 층간혼합(interlayer mixing)을 형성하는 경우이다. 두 번째의 경우는 단일 층 내에서 백운모와 파이로필라이트가 층내혼합(intralayer mixing)을 이루는 경우이다. Lee and Peacor (1983)의 연구에서는 단일 층에서 백운모와 berthierine, 그리고 녹니석의 층내혼합이 관찰되었고, 이번 연구에서는 그림 4에서 보이는 것처럼 백운모와 파이로

필라이트가 단일 층 내에서 혼합층상을 이루는 것을 확인하였다. 또한 백운모/파이로필라이트/녹니석(M/P/C) 혼합상이 존재하는 점을 감안할 때(그림 5), TEM 연구가 계속 진행된다면 이들 간의 층내혼합 및 층간혼합 현상도 발견할 수 있을 것으로 기대된다.

일라이트가 진화하여 생성된 백운모가 낮은 K 함량을 보이는 이유는 층 내에서 K 이온을 갖는 백운모와 K 이온이 없는 파이로필라이트가 교대되어 있기 때문이라 생각된다. 또한 K 이온을 갖지 않으면서, Fe와 Mg 성분을 가진 녹니석이 백운모 층 내에 존재하게 되면, 이상화학식과 비교할 때 팔면체 자리에 Fe와 Mg 성분이 나타나는 것으로 판단된다.

사 사

이번 연구를 위한 야외조사와 암석 시료 채취에 많은 도움을 준 전북대학교 지구환경과학과 광물 연구실의 학부생들에게 고마움을 전한다. 그리고 지질도 작업 및 그림작업에 도움과 조언을 한 장용석 박사에게도 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

박수인 (1989) 사북-고한지역에 분포하는 평안누층군의 코노돈트 생층서에 관한 연구. 지질학회지, 25, 192-201.
 이영부 (1993) 직운산층과 만항층의 속성 및 변성작용에 대한 광물학적 연구 : EPMA, TEM 연구. 전북대학교 지구과학과 석사 학위논문.
 최승현, 문향란, 이영부, 최문철, 이정후 (2008) TEM을 이용한 일라이트-백운모 전이에 대한 연구 : 태백지역 퇴적암에 대한 예비 연구. 2008년 추계지질과학연합 학술발표회 초록집, 대전컨벤션센터, 10월 23일, 142p.
 최승현 (2009) 태백지역 퇴적암에서 산출되는 Illite에 대한 광물학적 연구 : EPMA, TEM 연구. 전북대학교 지구환경과학과 석사 학위논문.
 태백산지구지하자원조사단 (1962) 태백산지구 지질도. 국립지질조사소.
 홍민화 (1986) 강원도 영월, 상동-태백, 소도리 간에 분포하는 조선누층군 상부(직운산층, 두위봉층)의 층서와 고생물학적 연구. 연세대학교 지질학과 석사 학위논문.

Ahn, J.H. and Peacor, D.R. (1986) Transmission and analytical electron microscopy of the smectite to illite transition. *Clays and Clay Minerals*, 34, 165-179.
 Brattli, B. (1997) A rectorite-pyrophyllite-chlorite-illite assemblage in pelitic rocks from Colombia. *Clay Mineralogy*, 32, 425-434.
 Evans, B.W. and Guggenheim, S. (1988) Talc, pyrophyllite and related minerals. *Reviews in Mineralogy*, 19, 225-294.
 Frey, M. (1987) Very low grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In: Frey, M. (ed.), *Low temperature metamorphism*, Blackie & Son Ltd., Glasgow, 9-58.
 Jiang, W.T., Essene, E.J., and Peacor, D.R. (1990) Transmission electron microscopic study of coexisting pyrophyllite and muscovite : Direct evidence for the metastability of illite. *Clays and clay minerals*, 38, 225-240.
 Ko, H.K. and Lee, Y.I. (1991) The mineralogy and chemistry of clay minerals of the Middle Ordovician Jigunsan Formation : Implications for the metamorphic grade. *J. Miner. Soc. Korea*, 4, 32-42.
 Lee, J.H. and Peacor, D.R. (1983) Intralayer transitions in phyllosilicates of the Martinsburg Shale. *Nature*, 303, 608-609.
 Lee, J.H., Peacor, D.R., Lewis, D.D. and Wintsch, R.P. (1984) Chlorite-illite/muscovite interlayered and interstratified crystals: A TEM/STEM study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88, 372-385.
 Lee, J.H., Ahn, J.H. and Peacor, D.R. (1985) Textures in layered silicates: progressive changes through diagenesis and low-temperature metamorphism. *J. Sediment. Petrol.*, 55, 532-540.
 Montaya, J.W. and Hemley, J.J. (1975) Activity relations and stabilities in alkali feldspars and mica alteration reactions. *Econ. Geol.*, 70, 577-583.
 Srodon, J. and Eberl, D.D. (1984) Illite, *Reviews in Mineralogy*. vol. 13, Micas, ed. S.W. Bailey, 495-544.

접수일(2011년 12월 21일), 수정일(1차 : 2011년 12월 23일), 게재확정일(2011년 12월 26일)