

화학조성으로 다시 보는 일라이트-백운모, 파이로필라이트 및 녹니석의 혼합상; 강원도 삼척시 석개재에 분포하는 직운산층 셰일에 대한 EPMA 정량분석

Illite, Reviewed on the Chemical Compositions -
The Mixed Phase among Muscovite, Pyrophyllite and Chlorite;
EPMA Quantitative Analysis of Shale from the Jigunsan Formation
at Seokgaejae in Samchuk-City, Gangwon-do

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 삼척시 석개재에서 산출되는 직운산층 셰일의 운모류 광물(일라이트)에 대한 EPMA 연구를 수행하였다. 정량분석으로 계산된 운모류 광물의 평균 화학식은 $(K_{1.17}Na_{0.04}Ca_{0.01})(Al_{2.80}Mg_{1.17}Fe_{0.78})(Si_{6.34}Al_{1.66})O_{20}(OH)_4$ 로, 소위 일라이트에 해당되는 화학조성을 보인다. 낮은 중간 양이온 값과 팔면체 자리의 높은 Mg, Fe값으로 보아 일라이트는 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석의 혼합상으로 판단된다. 이 연구에서 분석된 일라이트에 해당되는 화학식을 각각의 구성광물로 분리하였고, 그 분리 방법을 새로이 고안하여 제시하였다. 일라이트의 화학식으로부터 K(Na, Ca 포함)를 기준으로 백운모의 함량을, Mg+Fe로부터 녹니석의 함량을 추산하고 나머지를 파이로필라이트로 간주하였다. 파이로필라이트는 이상화학식을, 녹니석은 평균 분석값을 사용하여 일라이트의 분석값에서 빼면, 나머지는 백운모의 화학식이 되는데 이는 원칙적으로 백운모의 이상화학식이 된다. 이 연구에서 분석한 운모류 광물의 평균 분석값을 이 방법으로 분리하면 백운모 61%, 녹니석 27.3%, 파이로필라이트 11.7%로 되며, 여기에서 계산된 백운모의 화학식은 $(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.69}(Si_{6.75}Al_{1.25})O_{20}(OH)_4$ 이다. 이 백운모의 화학식은 대체로 낮은 Al값을 보이나 암석의 낮은 Al 함량과 녹니석 화학조성의 불확실성을 감안할 때 대체로 합리적인 것으로 간주되며, 이는 또한 이 연구에서 제시한 분리 방법이 합당하다는 것을 뒷받침한다.

주요어 : 일라이트, 백운모, 파이로필라이트, 녹니석, 혼합상, 일라이트의 분리, 석개재, 직운산층

*Corresponding author: +82-63-270-3394, E-mail: jhlee@jbnu.ac.kr

ABSTRACT : Mica-type minerals (illites) in the shales of the Jigunsan formation at Seokgaejae in Samchuk-City, Gangwon-do are studied using electron probe micro analysis (EPMA). The average chemical formula of the mica-type mineral obtained from the quantitative analysis is $(K_{1.17}Na_{0.04}Ca_{0.01})(Al_{2.80}Mg_{1.17}Fe_{0.78})(Si_{6.34}Al_{1.66})O_{20}(OH)_4$, which shows a chemical formula within the range of illite. These illites so called can be considered as mixed-phases among muscovite, pyrophyllite and chlorite due to the low contents of interlayer cations and high Mg, Fe. The formula of illite is separated into those three minerals and the method for the separation is newly formulated and proposed in this study. From the formula of illite, the content of muscovite is estimated from K (Na and Ca included), the content of chlorite by Mg+Fe, and the rest remains as pyrophyllite. The chemical formula of muscovite can be calculated by subtracting the compositions of pyrophyllite and chlorite from the analyzed composition of illite using an ideal formula for pyrophyllite and analyzed average formula for chlorite. The calculated formula of muscovite is supposed to be stoichiometric in principle. The result of the separation of analyzed illite is 61% muscovite, 27.3% chlorite and 11.7% pyrophyllite and the calculated formula of muscovite after separation is $(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.69}(Si_{6.75}Al_{1.25})O_{20}(OH)_4$. The calculated formula of muscovite slightly low in Al content can be considered to be reasonable in general when the low content of Al in the rock and the uncertainties of chlorite compositions used in the calculation are counted. This supports that the method of separation proposed in this study is also applicable.

Key words : Illite, muscovite, pyrophyllite, chlorite, mixed-phase, separation of illite, Seokgaejae, Jigunsan formation

서 언

소위 일라이트는 결정구조와 화학조성이 백운모와 유사한 광물로(Srodon and Eberl, 1984) 세일의 속성작용 및 저온 변성과정에 나타나서 여러 가지의 혼합층상의 단계를 거쳐 결국 백운모로 전이된다(Lee and Peacor, 1983; Lee *et al.*, 1984; Lee *et al.*, 1985). 백운모의 화학식을 골격으로 하는 일라이트의 실제 분석값은 백운모에 비해 낮은 K (1.0~1.5)값을 보이며(산소값 22 기준), 사면체의 Al을 Si이 치환하여 높은 Si (6.5~7.0)값을 나타내고(Deer *et al.*, 1992), 일반적으로 팔면체 자리에 약간의 Mg와 Fe 이온을 포함한다. 이와 같이 일라이트의 화학조성은 불규칙해서 일정한 값을 보이지 않는다. 한편 지금까지 수행된 TEM 연구(Lee and Peacor, 1983; Jiang *et al.*, 1990; Lee, 1993; Choi *et al.*, 2011)에서 일라이트는 많은 경우에 녹니석 또는 파이로필라이트와 혼합층상을 형성하는 것으로 밝혀졌다. 일라이트의 화학조성이 백운모와 유사하면서도 여러 가지 다른 점(K 및 사면체 Al 함량, Mg, Fe의 존재)을 보이는 것은 파이로필라이트(낮은 K, 낮은 Al)와 녹니석(Mg, Fe)이 백운모와 함께 분석되기 때문이며, 이것은 동시에 일라이트는 단일 광물이 아니며 백운모, 파이로필라이트 그리고 녹니석의 혼합상으로 존재한다는 것을 뒷받

침한다. 즉, 일라이트의 화학조성은 이들 세 광물의 상대적 비율에 따라 달라지게 되고, 따라서 자연히 불규칙하게 나타날 수밖에 없다.

태백지역 고생대 퇴적암에서 산출되는 백운모는 K 함량이 이상화학식에 비해 현저히 낮은 값을 보이는 백운모/파이로필라이트 혼합상(M/P)의 화학조성을 보이며(Lee, 1993; Choi, 2009), 일부는 녹니석이 혼합상에 포함되어 팔면체 자리의 Al을 Mg와 Fe가 50% 가까이 치환하기도 한다(Choi *et al.*, 2010). 이 밖에 옥천변성대 변성암과 경상분지 퇴적암에서도 이와 유사한 혼합상의 화학조성을 보이는 백운모가 산출된다(Baek, 1994; Lee, 1998). 한편 대부분의 일라이트 분석값에서 소량의 Na, Ca가 나타나는데, 이는 소량의 파라고나이트(Na)와 마가라이트(Ca)가 백운모와 함께 혼합상으로 존재하는 것으로 생각된다(Livi *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2012).

EPMA와 TEM 연구를 통하여 밝혀진 것처럼, 일라이트는 주로 백운모와 파이로필라이트 및 녹니석의 혼합상 형태로 존재하기 때문에 혼합상을 구성하는 광물 조합에 따라 다양한 화학조성을 보이게 된다. 즉, 백운모와 파이로필라이트가 혼합된 경우에 일라이트는 중간 양이온 값이 낮은 백운모의 화학조성을 보이며, 여기에 녹니석이 함유되면 낮은 중간 양이온 값과 함께, 높은 Mg와 Fe의 함

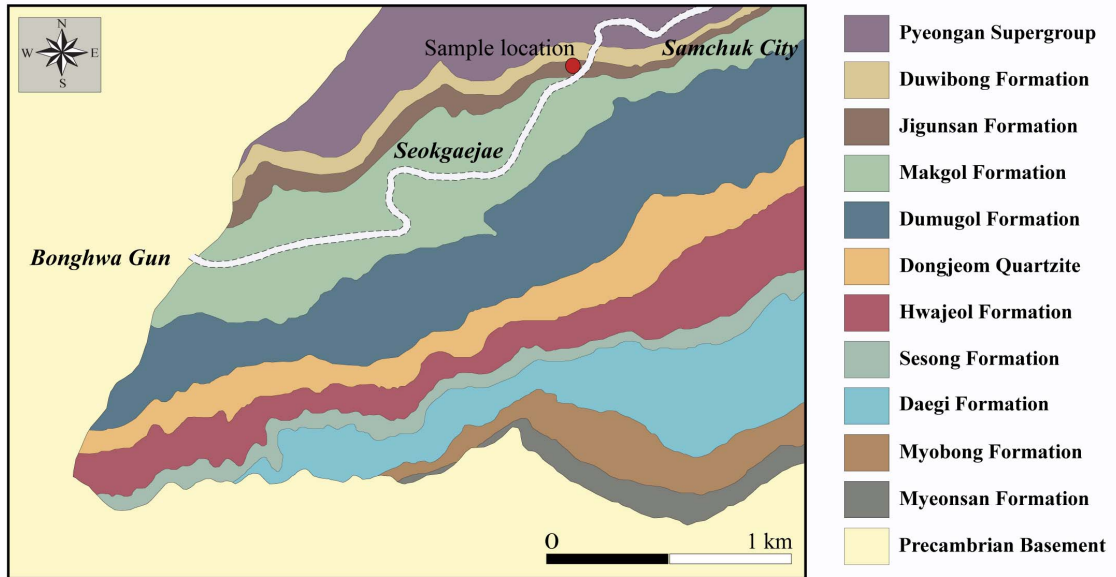


Fig. 1. Geological map of the study area (Modified from Chough *et al.*, 2000).

량을 보인다. 결국, 일라이트의 화학조성이 일정하지 않은 이유는 입자 내에 파이로필라이트와 녹니석처럼 백운모와 화학조성을 달리하는 광물이 혼합되어 있기 때문이다. 일라이트는 다양하고 불규칙한 화학조성을 보일 뿐만 아니라, 격자층 수준에서 다른 광물과 혼합상을 이루고 있는 것(Lee and Peacor, 1983; Lee *et al.*, 1984; Lee *et al.*, 1985; Jiang *et al.*, 1990; Choi *et al.*, 2011)으로 규명되었기 때문에 퇴적암 내지 변성암에서 산출되는 일라이트는 독립된 광물로 볼 수 없다. TEM 격자상 관찰(Lee and Peacor, 1983; Lee *et al.*, 1984; Lee *et al.*, 1985; Jiang *et al.*, 1990)에 의해서 일라이트의 결정 구조에 대한 연구는 수행되었으나, 혼합상의 화학조성에 대한 구체적인 연구는 진행되지 않았다. 혼합상으로 구성된 일라이트의 화학조성으로부터 혼합상을 구성하는 광물(백운모, 파이로필라이트 및 녹니석)을 분리할 수 있다면, 일라이트가 이들 광물의 혼합에 의해 형성되었다는 것을 정량적으로 밝힐 수 있을 것으로 판단된다.

이번 연구에서는 강원도 삼척시 석개재 부근의 직운산층 세일에서 산출되는 백운모에 대한 EPMA 정량분석으로 얻은 운모류 광물(백운모/파이로필라이트/녹니석)의 화학식으로부터, 백운모와 혼합된 파이로필라이트 및 녹니석을 분리하고 각각의 함량을 계산하여 일라이트가 혼합상으로 이루어졌다

는 사실을 정량적으로 규명하고자 하였다. 또한 혼합상을 구성하고 있는 각 광물의 함량을 기준으로 분리된 백운모의 화학식을 계산하여 백운모의 이상화학식과 비교함으로써 여기에서 사용한 분리방법이 적합한가를 검토하였다.

지 질 개 요

강원도 삼척시 가곡면과 경북 봉화군 석포면 경계에 위치한 석개재는 전기 고생대 캄브로-오르도비스기의 지층(조선누층군)과 후기 고생대 평안누층군이 분포하는 지역이다(그림 1). 이 지역에는 전기 고생대의 하부층인 면산층부터 조선누층군의 최상부층인 두위봉층까지 분포하고 있으며(Choi *et al.*, 2004), 석개재에서 삼척으로 가는 도로의 첫 노두에서 직운산층이 나타난다(Choi *et al.*, 2004). 이 지역의 직운산층은 태백시 장성동 일대의 직운산층과는 달리, 흑회색 이암과 녹회색 실트암 등으로 구성된다(Woo and Chough, 2007).

연구 방법

석개재 일대에서 산출되는 직운산층 세일로부터 10개의 시료를 채취하여 박편으로 제작하였으며, 편광현미경 관찰과 EPMA 분석을 실시하였다. 편

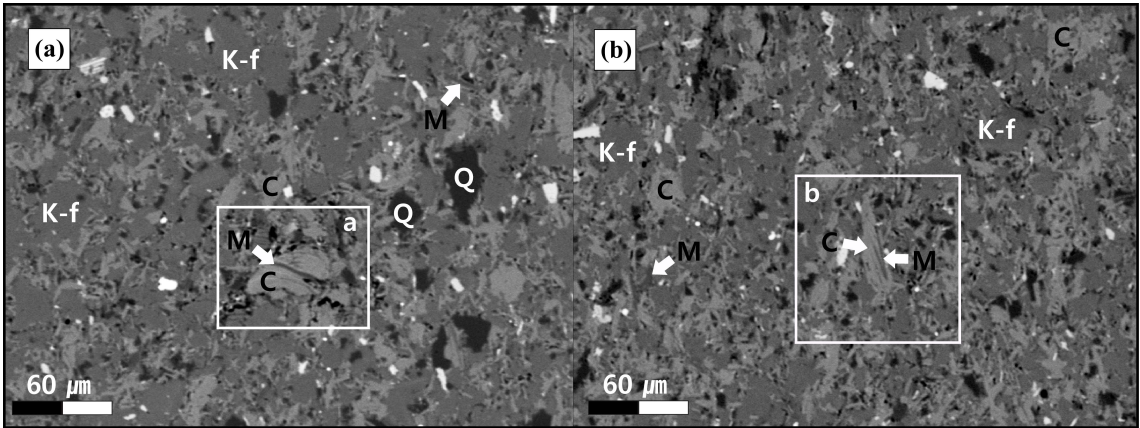


Fig. 2. BSE image of rocks of the Jigunsan formation from the Seokgaejae area. Mixed-phase between muscovite and chlorite particles are shown within areas marked a and b (M : Muscovite, C : Chlorite, Q : Quartz, K-f : K-feldspar).

광현미경 관찰에 사용된 박편은 먼저 BSE (Back Scattered Electron) image 관찰을 실시하고 여기에서 분석 대상 입자를 선별하여 EPMA 정량분석을 수행하였다. EPMA 분석은 한국기초과학지원연구원 전주센터의 Shimadzu EPMA 1600을 사용하여, 가속전압 15 kV, 빔 전류 20 nA, 그리고 빔 크기 1 μm의 조건에서 분석하였다.

연구 결과

EPMA 분석 결과

EPMA 분석의 전단계로 실시된 BSE image (그림 2) 관찰에서는 백운모, 녹니석, 석영 및 K-장석이 관찰된다(그림 2). 석영은 BSE image 상에서 가장 어두운 밝기를 보이며, K-장석과 백운모는 비슷한 명암으로 관찰되고, 녹니석은 가장 밝게 보인다(그림 2). 백운모는 단일 결정들이 관찰되기도 하지만, 그림 2a의 a 영역에서는 녹니석 입자 내에 백운모가 들어있는 형태로 보이기도 한다. 이러한 모습은 그림 2b에서도 볼 수 있는데(b로 표시된 영역), 이는 속성작용 혹은 변성작용에서 온도의 증가에 따라 일라이트(백운모와 녹니석이 혼합되어 있는 상태)에서 백운모와 녹니석이 분리되는 과정으로 생각된다. 이 연구에서 분석된 백운모(표 1)의 평균 화학식은 $(K_{1.17}Na_{0.04}Ca_{0.01})(Al_{2.80}Mg_{1.17}Fe_{0.78})(Si_{6.34}Al_{1.66})O_{20}(OH)_4$ 이며, 녹니석(표 2)은 $(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O_{20}(OH)_{16}$ 이다. 백운모의 화

학식을 보면, 층간 양이온(K 및 Na, Ca)은 평균 1.22로 백운모 이상화학식의 층간 양이온 값(2.0)에 비해 현저히 낮게 분석되었다. 이는 백운모와 층간 양이온을 갖지 않는 광물(파이로필라이트 및 녹니석)이 하나의 입자 내에 혼합되어 있는 경우의 분석값으로 볼 수 있다. 지금까지 운모류 광물에서 나타나는 혼합상은 주로 TEM 격자상 연구를 통하여 수행되었으며, 특히 백운모를 포함하는 일라이트에 대한 연구에서 백운모는 흔히 녹니석 및 파이로필라이트와의 혼합상으로 관찰되는 것으로 밝혀졌다(Lee and Peacor, 1983; Jiang *et al.*, 1990; Lee, 1993; Choi *et al.*, 2011). 그러나 이번 연구에서는 이와 같은 혼합상에 포함된 광물을 정량적으로 분리하여 혼합상 운모류 광물의 화학조성을 체계적으로 밝히고자 하였으며, 이를 위하여 새로운 운모류 광물의 화학식을 분리하는 방법을 고안하여 소개하고자 한다. 먼저 화학식 분리의 순서를 간단히 소개하면,

1) 분석한 운모류 입자의 화학 조성(표 1)의 층간 양이온 값으로부터 층간 양이온을 갖는 백운모와 그렇지 않는 광물(녹니석, 파이로필라이트)의 상대적 함량을 계산한다.

예: 운모류 광물의 평균 화학 조성에서 층간 양이온(K+Na+Ca)값 1.22는 백운모 61%, 녹니석 +파이로필라이트 39%로 나누어진다.

2) 층간 양이온을 갖지 않는 광물(39%)중에서 녹니석의 함량을 Mg+Fe 함량을 기준으로 먼저 계산한다.

Table 1. EPMA data of the illite-like particles in rocks of the Jigunsan formation from the Seokgaejae area

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	42.295	49.051	49.501	39.283	38.096	48.086	45.789	50.810	54.371	38.710
Al ₂ O ₃	28.149	26.303	30.251	28.748	26.932	25.134	24.251	29.006	24.866	27.438
FeO	7.992	5.732	2.284	8.874	10.983	7.545	6.259	2.707	3.608	9.679
MgO	5.844	3.785	6.938	5.969	9.157	4.409	6.538	2.781	3.564	6.660
CaO	0.075	0.026	0.055	0.046	0.055	0.053	0.047	0.117	0.127	0.060
Na ₂ O	0.003	0.126	0.178	0.170	0.176	0.218	0.007	0.037	0.121	0.277
K ₂ O	4.612	8.509	8.685	5.748	3.509	6.346	6.914	9.156	6.885	5.738
TiO ₂	0.087	0.619	0.334	0.314	0.451	0.370	0.140	0.206	0.218	0.443
MnO	0.021	0.029	0.027	0.021	0.023	0.003	0.024	0.002	0.011	0.005
Total	89.077	94.180	98.253	89.174	89.382	92.164	89.969	94.823	93.772	89.011
Number of ions on the basis of 22 O										
Si	6.08	6.68	6.37	5.76	5.59	6.68	6.54	6.75	7.21	5.73
Al	4.77	4.22	4.59	4.97	4.66	4.12	4.08	4.54	3.88	4.79
Fe	0.96	0.65	0.25	1.09	1.35	0.88	0.75	0.30	0.40	1.20
Mg	1.25	0.77	1.33	1.30	2.00	0.91	1.39	0.55	0.70	1.47
Ca	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
Na	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.00	0.01	0.03	0.08
K	0.85	1.48	1.43	1.07	0.66	1.12	1.26	1.55	1.16	1.08
Ti	0.01	0.06	0.03	0.03	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02	0.05
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3) 운모류 광물에 포함된 Mg, Fe는 모두 녹니석에 있는 것으로 보고, 같은 암석에서 분석된 녹니석의 평균 화학식(표 2)의 Mg, Fe 함량과 비교하여(이때 계산에 사용하는 녹니석의 화학식은 백운모 화학식과 맞추기 위하여 산소 28 기준에서 산소 22를 기준으로 변경하여야 한다) 녹니석의 함량을 구할 수 있다.

예: 백운모의 평균 화학조성에서의 Mg+Fe 값(1.95)을 산소값 22로 계산한 분석된 녹니석 [(Mg_{3.85}Fe_{3.30}Al_{2.07})(Si_{4.50}Al_{1.78})O₂₀(OH)₄]의 Mg+Fe 값(7.15)으로 나누어 주면[(1.95÷7.15)×100] 녹니석의 함량은 27.3%이다.

4) 마지막으로 파이로필라이트의 함량은 전체에서 백운모의 함량(61%)과 녹니석의 함량을 제외한 나머지(11.7%)가 된다.

5) 분석된 운모류 광물의 화학식에서 27.3%의 녹니석[(Mg_{3.85}Fe_{3.30}Al_{2.07})(Si_{4.50}Al_{1.78})O₂₀(OH)₄]과

11.7%의 파이로필라이트[Al_{0.47}Si_{0.94}O₂₀(OH)₄]에 포함된 원소들을 빼고 나면 나머지는 실제 백운모를 구성하는 원소들이 되며, 이는 61%의 백운모에 포함된 원소에 해당한다. 이 계산에서 녹니석은 같은 암석에서 분석된 단일 입자의 평균 화학식[(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O₂₀(OH)₁₆]을, 파이로필라이트는 이상 화학식 Al₄Si₈O₂₀(OH)₄를 사용하였다.

예: 27.3%로 계산된 녹니석(산소값 22 기준)에는 Mg+Fe=1.95, Al=1.05, Si=1.23이 있으며, 11.7%의 파이로필라이트에는 Al=0.47, Si=0.94가 포함된다. 분석된 운모류 광물의 평균 화학식에서 이들을 빼면, 층간 양이온 (K+Na+Ca)=1.22, Mg+Fe=0.00, Al=2.94, Si=4.17이 남는다. 이들 원소는 61%의 백운모 화학식을 구성하므로 이를 100% 화학식으로 환산하면, (K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.66}(Si_{6.84}Al_{1.16})O₂₀(OH)₄가 된다.

Table 2. EPMA data of the chlorites in rocks of the Jigunsan formation from the Seokgaejae area

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	26.311	26.754	26.358	26.500	26.665	27.216	26.225	26.167	26.768	25.949
Al ₂ O ₃	19.445	19.195	19.245	19.172	19.052	19.550	20.077	18.885	18.689	19.128
FeO	23.588	23.405	23.377	23.640	23.259	23.003	23.306	23.487	23.025	23.413
MgO	15.117	15.362	15.576	15.338	15.305	13.442	15.606	15.433	15.881	15.034
CaO	0.053	0.037	0.052	0.031	0.054	0.069	0.040	0.048	0.039	0.053
Na ₂ O	0.012	0.030	0.063	0.000	0.163	0.010	0.001	0.009	0.020	0.160
K ₂ O	0.082	0.094	0.070	0.070	0.144	0.703	0.089	0.051	0.051	0.095
TiO ₂	0.053	0.046	0.097	0.071	0.063	0.399	0.064	0.074	0.060	0.078
MnO	0.059	0.006	0.015	0.022	0.032	0.051	0.029	0.023	0.065	0.062
Total	84.720	84.929	84.853	84.845	84.737	84.444	85.436	84.175	84.597	83.973
Number of ions on the basis of 28 O										
Si	5.69	5.76	5.68	5.72	5.76	5.89	5.61	5.70	5.78	5.67
Al	4.95	4.87	4.89	4.88	4.85	4.98	5.06	4.85	4.75	4.93
Fe	4.26	4.21	4.22	4.27	4.20	4.16	4.17	4.28	4.16	4.28
Mg	4.87	4.93	5.01	4.94	4.93	4.33	4.98	5.01	5.11	4.90
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.01	0.01	0.03	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07
K	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.19	0.02	0.01	0.01	0.03
Ti	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01

Average chlorite composition : (Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O₂₀(OH)₁₆

위의 방법을 이용하여 실제 분석된 운모류 입자 (표 1 No. 1)의 화학식[(K,Na,Ca)_{0.86}(Al_{2.85}Mg_{1.25}Fe_{0.96})(Si_{6.08}Al_{1.92})O₂₀(OH)₄]으로부터 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석을 분리해 보면, 먼저 분석된 층간 양이온 값(K+Na+Ca = 0.86)으로부터 계산된 백운모의 함량은 43%가 된다. 여기에는 층간 양이온 K을 치환할 수 있는 Na(0.00)와 Ca(0.01) 값도 포함된다.

$$0.86 \div 2.0 \times 100 = 43\%$$

$$(\text{운모류 입자의 K+Na+Ca}) \div (\text{이상화학식의 층간 양이온 값}) \times 100 = 43\%$$

즉, 이 입자에는 43%의 백운모와 57%의 녹니석 + 파이로필라이트가 함유되어 있다. 다음으로는 녹니석의 함량을 운모류 광물에 함유된 Mg와 Fe(2.21)로부터, 같은 시료에서 분석된 녹니석의 평균 화학식 (Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O₂₀(OH)₁₆을 기준으로 계산하면 30.9%가 되며, 나머지 26.1%는 파이로필라이트의 함량이 된다. 이때, 운모류 광물의 Mg와 Fe는 산소값 22를 기준으로 계산되었기 때문에, 녹니석의 화학식을 산소값 22를 기준으로 환산하여 [(Mg_{3.85}Fe_{3.30}Al_{2.07})(Si_{4.50}Al_{1.78})O₂₀(OH)₄] 중에서 Mg+Fe값(7.15)과 Mg+Fe값(2.21)을 비교하여 녹니석의 함량을 계산한다.

Table 3. The compositions of illite-like particles separated into muscovite, chlorite and pyrophyllite from the analysis data in Table 1

1	${}^1(K,Na,Ca)_{0.86}(Al_{2.85}Mg_{1.25}Fe_{0.96})(Si_{6.08}Al_{1.92})O_{20}(OH)_4$		${}^2Si:6.08$ Al:4.77	${}^3-0.09$	${}^45.06$
Mus	43.0 %	$(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.96}(Si_{6.05}Al_{1.95})O_{20}(OH)_4$	${}^2Si:2.60$ Al:2.54	-0.07	3.96
Chl	30.9 %	$(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O_{20}(OH)_{16}$	${}^2Si:1.39$ Al:1.19		
Pyr	26.1 %	$Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$	${}^2Si:2.09$ Al:1.04		
2	$(K,Na,Ca)_{1.51}(Al_{2.90}Mg_{0.77}Fe_{0.65})(Si_{6.68}Al_{1.32})O_{20}(OH)_4$		Si:6.68 Al:4.22	-0.27	4.32
Mus	75.5 %	$(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.50}(Si_{7.17}Al_{0.83})O_{20}(OH)_4$	Si:5.41 Al:3.27	-0.33	3.50
Chl	19.9 %	$(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O_{20}(OH)_{16}$	Si:0.89 Al:0.76		
Pyr	4.6 %	$Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$	Si:0.38 Al:0.19		
3	$(K,Na,Ca)_{1.48}(Al_{2.96}Mg_{1.33}Fe_{0.25})(Si_{6.37}Al_{1.63})O_{20}(OH)_4$		Si:6.37 Al:4.59	-0.11	4.54
Mus	74.0 %	$(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.68}(Si_{6.84}Al_{1.16})O_{20}(OH)_4$	Si:5.06 Al:3.58	-0.12	3.68
Chl	22.1 %	$(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O_{20}(OH)_{16}$	Si:0.99 Al:0.85		
Pyr	3.9 %	$Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$	Si:0.32 Al:0.16		
4	$(K,Na,Ca)_{1.13}(Al_{2.73}Mg_{1.30}Fe_{1.09})(Si_{5.76}Al_{2.24})O_{20}(OH)_4$		Si:5.76 Al:4.97	-0.14	5.12
Mus	56.5 %	$(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.91}(Si_{6.10}Al_{1.90})O_{20}(OH)_4$	Si:3.45 Al:3.28	-0.17	3.91
Chl	33.4 %	$(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O_{20}(OH)_{16}$	Si:1.50 Al:1.29		
Pyr	10.1 %	$Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$	Si:0.81 Al:0.40		
5	$(K,Na,Ca)_{0.72}(Al_{2.25}Mg_{2.00}Fe_{1.35})(Si_{5.59}Al_{2.41})O_{20}(OH)_4$		Si:5.59 Al:4.66	-0.24	5.60
Mus	36.0 %	$(K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.89}(Si_{5.86}Al_{2.14})O_{20}(OH)_4$	Si:2.11 Al:2.17	-0.47	3.89
Chl	46.9 %	$(Mg_{4.90}Fe_{4.20}Al_{2.63})(Si_{5.73}Al_{2.27})O_{20}(OH)_{16}$	Si:2.11 Al:1.80		
Pyr	17.1 %	$Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$	Si:1.37 Al:0.69		

¹Na, Ca in the analysis are ignored and included in muscovite composition since they are small and similar to muscovite.

²Si and Al contents represent the actual proportions of the ions that belong to the suggested phases (The sum of Mus, Chl and Pyr is supposed to be the same as the analysed chemical compositions).

³Charge balance ⁴Total octahedral ions

$$2.21 \div 7.15 \times 100 = 30.9\%$$

(운모류 입자의 Mg+Fe) ÷ (산소값 22로 변형한 녹니석의 Mg+Fe) × 100 = 30.9%

파이로필라이트 : 100 - (43+30.9) = 26.1%

소들만 남게 되며, 이 원소들은 백운모 화학식의 43%에 해당되므로 100%로 환산하면 순수한 백운모의 화학식이 된다.

이제 계산된 녹니석과 파이로필라이트 함량에 해당하는 원소들의 함량을 분석된 운모류 광물의 화학식에서 빼주면 온전히 백운모를 구성하는 원

$$(K, Na, Ca) = 0.86 \quad (Mg, Fe) = 2.21 \quad Al = 4.77 \quad Si = 6.08 \quad (\text{분석값})$$

$$- (K, Na, Ca) = 0.00 \quad (Mg, Fe) = 2.21 \quad Al$$

Table 3. Continued.

6	${}^1(\text{K,Na,Ca})_{1.19}(\text{Al}_{2.80}\text{Mg}_{0.91}\text{Fe}_{0.88})(\text{Si}_{6.68}\text{Al}_{1.32})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		${}^2\text{Si}:6.68$ Al:4.12	${}^3-0.15$	${}^44.59$
Mus	59.5 %	$(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.52}(\text{Si}_{7.25}\text{Al}_{0.75})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	${}^2\text{Si}:4.32$ Al:2.54	-0.19	3.52
Chl	25.0 %	$(\text{Mg}_{4.90}\text{Fe}_{4.20}\text{Al}_{2.63})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$	${}^2\text{Si}:1.12$ Al:0.96		
Pyr	15.5 %	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	${}^2\text{Si}:1.24$ Al:0.62		
7	$(\text{K,Na,Ca})_{1.27}(\text{Al}_{2.62}\text{Mg}_{1.39}\text{Fe}_{0.75})(\text{Si}_{6.54}\text{Al}_{1.46})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		Si:6.54 Al:4.08	-0.05	4.76
Mus	63.5 %	$(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.55}(\text{Si}_{7.35}\text{Al}_{0.65})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:4.67 Al:2.67	0	3.55
Chl	29.9 %	$(\text{Mg}_{4.90}\text{Fe}_{4.20}\text{Al}_{2.63})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$	Si:1.35 Al:1.15		
Pyr	6.6 %	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:0.52 Al:0.26		
8	$(\text{K,Na,Ca})_{1.58}(\text{Al}_{3.29}\text{Mg}_{0.55}\text{Fe}_{0.30})(\text{Si}_{6.75}\text{Al}_{1.25})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		Si:6.75 Al:4.54	-0.10	4.14
Mus	79.0 %	$(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.65}(\text{Si}_{6.94}\text{Al}_{1.06})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:5.49 Al:3.72	-0.11	3.65
Chl	11.9 %	$(\text{Mg}_{4.90}\text{Fe}_{4.20}\text{Al}_{2.63})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$	Si:0.54 Al:0.46		
Pyr	9.1 %	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:0.72 Al:0.36		
9	$(\text{K,Na,Ca})_{1.21}(\text{Al}_{3.09}\text{Mg}_{0.70}\text{Fe}_{0.40})(\text{Si}_{7.21}\text{Al}_{0.79})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		Si:7.21 Al:3.88	-0.11	4.19
Mus	60.5 %	$(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.45}(\text{Si}_{7.60}\text{Al}_{0.40})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:4.60 Al:2.23	-0.05	3.45
Chl	15.4 %	$(\text{Mg}_{4.90}\text{Fe}_{4.20}\text{Al}_{2.63})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$	Si:0.69 Al:0.59		
Pyr	24.1 %	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:1.92 Al:0.96		
10	$(\text{K,Na,Ca})_{1.17}(\text{Al}_{2.52}\text{Mg}_{1.47}\text{Fe}_{1.20})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		Si:5.73 Al:4.79	-0.20	5.19
Mus	58.5 %	$(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.79}(\text{Si}_{6.35}\text{Al}_{1.65})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:3.72 Al:3.18	-0.28	3.79
Chl	37.3 %	$(\text{Mg}_{4.90}\text{Fe}_{4.20}\text{Al}_{2.63})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$	Si:1.68 Al:1.44		
Pyr	4.2 %	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Si:0.33 Al:0.17		

Average muscovite composition : $(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.69}(\text{Si}_{6.75}\text{Al}_{1.25})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

= 1.19 Si = 1.39 (30.9% Chl)
- Al = 1.04 Si = 2.08 (26.1% Pyr)

(K, Na, Ca) = 0.86 (Mg, Fe) = 0.00 Al
= 2.54 Si = 2.61 (43% Mus)
 $(\text{K,Na,Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.96}(\text{Si}_{6.05}\text{Al}_{1.95})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
(100%로 환산한 백운모 화학식)

이 결과를 토대로, 표 1의 1번 운모류 입자를 구성하는 각 광물의 함량과 화학식은 아래와 같다.

43% Muscovite $(\text{K, Na, Ca})_{2.00}\text{Al}_{3.96}(\text{Si}_{6.05}\text{Al}_{1.95})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

30.9% Chlorite $(\text{Mg}_{4.90}\text{Fe}_{4.20}\text{Al}_{2.63})(\text{Si}_{5.73}\text{Al}_{2.27})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$
26.1% Pyrophyllite $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

이 방법을 이용하여 표 1의 운모류 입자들을 분리한 결과는 표 3에 제시하였다.

토 의

소위 일라이트(백운모, 파이로필라이트 및 녹니석의 혼합상)의 분석값에 포함된 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석의 상대적 함량을 정량적으로 밝히기 위하여, 이번 연구에서는 분석된 화학식을 이

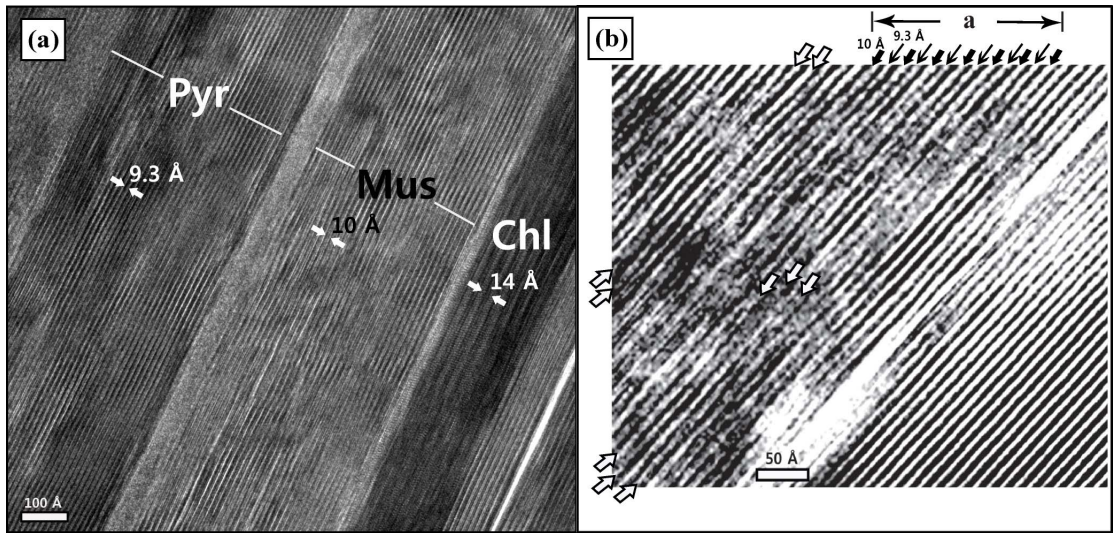


Fig. 3. TEM lattice fringe image of mixed-phase illite (Modified from Choi *et al.*, 2011). (a) Packets of muscovite, pyrophyllite and chlorite layers coexisting in a single particle of illite. (b) Muscovite (thick arrows) and pyrophyllite (thin arrows) layers show the interlayer mixing within the range marked a and muscovite and pyrophyllite are forming intralayer mixing along single layers between the two open arrows on the opposite sides.

들 세 광물로 분리하는 방법을 고안하여 제안하였으며, 이 분리 과정에는 몇 가지 가정을 설정하여 사용하였다.

1) 분석값은 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석의 3개 광물의 혼합으로 이루어졌다.

2) 파이로필라이트의 화학조성은 Deer *et al.* (1992)의 이상화학식[Al₄Si₈O₂₀(OH)₄]을 사용한다.

3) 녹니석의 화학조성은 같은 암석에서 분석된 녹니석의 평균 화학식을 사용한다(녹니석의 화학 조성은 암석에 따라 다양하므로 여기에서는 같은 암석에 있는 녹니석의 화학조성을 적용하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다).

4) 백운모의 화학조성은 K₂Al₄(Si₆Al₂)O₂₀(OH)₄를 이상화학식으로 하며(Deer *et al.*, 1992), 분석값에서 나타나는 K(Na, Ca 포함)값으로부터 백운모의 함량을 계산하고 나머지를 파이로필라이트+녹니석의 함량으로 간주한다.

5) 분석값에 포함된 Mg와 Fe는 모두 녹니석으로부터 유래된 것으로 간주하여 분석된 화학식의 Mg+Fe값과 녹니석의 평균 화학식을 비교하여 녹니석의 함량을 계산하고, 나머지를 파이로필라이트의 함량으로 한다.

6) 분석값으로부터 계산된 함량의 파이로필라이트와 녹니석에 포함된 원소를 계산하여 빼고 나면

나머지는 백운모에 포함된 원소가 되는데, 이렇게 계산된 백운모의 화학조성을 백운모의 이상화학식 K₂Al₄(Si₆Al₂)O₂₀(OH)₄와 비교한다.

7) 계산된 백운모의 화학식이 이상식에 근접하면 혼합상의 분리는 합리적으로 이루어진 것으로 볼 수 있다. 단, 이 계산에서 O, (OH)는 자유로이 조정가능한 것으로 간주한다.

10개의 EPMA 정량분석값을 앞에 제시한 방법을 사용하여 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석의 세 광물로 분리하고, 각 광물의 함량을 구하였다(표 3). 또한 각각의 분석값으로부터 백운모의 화학식이 새로이 계산되었다. 여기에서 계산된 백운모의 화학식은 파이로필라이트나 녹니석과 달리 계산에 의해 산출되므로, 분리 방법이 얼마나 합당한지를 알아볼 수 있는 척도가 된다. 계산된 백운모의 화학식은 평균 (K,Na,Ca)_{2.00}Al_{3.69}(Si_{6.75}Al_{1.25})O₂₀(OH)₄로 팔면체 자리의 Al이 이상식에서의 4.0에 비해 낮는데(평균 3.69), 이것은 사면체 자리에서 Si(평균 6.75)이 Al(평균 1.25)을 치환하여서 원자의 불균형은 어느 정도 완화되었다. 개별 분석에서 계산된 백운모의 화학식(표 3)을 가지고 원자가 균형(charge balance) 및 팔면체 자리의 Al이온 함량을 기준으로 검토하면, 원자가는 전반적으

로 양이온이 부족한 현상을 보이거나 2번, 5번 및 10번 분석을 제외한 나머지는 -0.2 이내로 비교적 균형에 가깝게 나타난다. 팔면체 자리의 Al 함량은 이상식의 함량 4.0을 기준으로 최저 3.45(9번)에서 최대 3.96(1번)까지의 값을 보여 전반적으로 부족하다(표 3). 2번(-0.33) 분석값의 경우는 팔면체 자리의 Al 함량(3.50)이 워낙 낮기 때문에 사면체에서 Si의 치환(7.17)으로도 원자의 불균형이 심한 것으로 보이며, 5번과 10번 분석에서는 팔면체 자리의 Al 함량(3.89, 3.79)은 4.0에 근접하지만 사면체 자리의 Si^{4+} 값(각 5.86, 6.35)이 낮아 원자의 불균형을 보인다. 9번 분석의 백운모는 팔면체 자리의 Al 함량(3.45)이 10개 분석값 중 가장 낮지만, 사면체 자리의 Si^{4+} 함량(7.60)이 높아서 원자가 균형을 맞춘다. 일부 계산된 백운모의 원자가 균형과 팔면체 자리의 Al 값이 이상화학식과 차이를 보이지만, 일라이트의 분석 오차, 암석 자체(운모류 광물의 분석값)가 낮은 Al 함량을 보이는 점, 그리고 화학식의 분리에 사용된 녹니석의 평균 화학조성에 포함된 불확실성을 감안하면, 계산된 백운모의 불일치는 어느 정도 용인할 수 있는 수준으로 판단된다. 이번 화학식의 분리에서는 같은 암석에 있는 녹니석 입자의 분석값을 사용하였는데, 이것은 녹니석은 화학조성이 워낙 다양하여 특정 화학식을 사용할 수 없으며 그 암석에 있는 순수한 녹니석의 화학조성을 사용하는 것이 그나마 최선의 방법이라고 판단하였기 때문이다. 그러나 녹니석은 다양한 형태의 혼합상으로 존재하는 경우가 많으며 단일 입자의 녹니석이라도 미세 규모의 혼합상이 존재할 수 있으므로, 사용된 녹니석의 화학조성은 순수한 녹니석의 화학조성과는 차이가 있을 수 있다. 이번 연구에서 분석된 녹니석도 소량의 K, Na 및 Ca를 포함하고 있는 것을 확인할 수 있다(표 2). 따라서 여기에서 계산된 백운모의 화학식에는 녹니석의 화학조성으로부터 유래하는 불확실성이 포함되어 있을 수밖에 없다. 암석 내에 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석이 독립된 입자로 존재하는 방향층 암석에서는(Choi *et al.*, 2011) Al 함량이 높고, Mg, Fe가 낮아서 혼합층상을 보이는 운모류 광물이 높은 Al 함량을 보이며(평균 $K_{1.35}(Fe_{0.18}Mg_{0.03}Al_{3.86})(Si_{6.55}Al_{1.45})O_{20}(OH)_4$ 의 화학식), 여기에 제시된 방법으로 분리하면 석개재 암석에 비해 녹니석의 함량이 낮고(2.9%) 계산된 백운모는 이상화학식에 아주 근접한 화학식[$K_2Al_{3.96}(Si_{6.0}Al_{2.0})O_{20}(OH)_4$]을 보인다. 따라서 이번 연구에서 계산된

백운모의 화학식에서 Al 함량이 낮은 것은 녹니석 함량이 높고 파이로필라이트의 함량이 적기 때문으로 판단된다.

종합 및 결론

이번 연구에서는 운모류 광물(소위 일라이트)의 분석값을 이 광물을 구성하는 혼합상 광물인 백운모, 파이로필라이트 및 녹니석으로 분리하여 지금까지 TEM 연구(Lee and Peacor, 1983; Lee *et al.*, 1984; Lee *et al.*, 1985; Jiang *et al.*, 1990; Lee, 1993; Choi *et al.*, 2011)를 통해 규명된 일라이트의 혼합상[백운모/파이로필라이트(M/P), 백운모/녹니석(M/C) 및 백운모/파이로필라이트/녹니석(M/P/C) 혼합상]의 실체를 체계적으로 밝히고 이 혼합상을 구성하는 광물(백운모, 파이로필라이트 및 녹니석) 각각의 함량과 화학조성을 밝힘으로써 일라이트는 독립된 광물이 아닐 가능성이 매우 높은 것으로 규명하였다.

이 연구에서 밝혀진 내용을 종합하면

- 1) 일라이트는 백운모/파이로필라이트/녹니석 혼합상(M/P/C)으로 존재한다(때로는 백운모/파이로필라이트 또는 백운모/녹니석 혼합상으로도 나타나며, 백운모에는 소량의 파라고나이트와 마가라이트가 혼합되기도 한다).
- 2) 일라이트의 화학조성은 이들 혼합상을 구성하는 광물의 상대적 함량에 따라 매우 다양하게 나타난다.
- 3) 일라이트의 낮은 K(Na, Ca 포함)값은 파이로필라이트와 녹니석의 혼합 때문이며, Mg와 Fe의 존재는 녹니석의 혼합 때문이다.
- 4) 일라이트를 구성하는 백운모와 파이로필라이트의 화학조성은 이상화학식으로 간주할 수 있으며, 녹니석은 암석에 따라 다양한 화학조성을 갖는다.

사 사

논문을 심사하고 많은 조언을 해주신 황진연, 추창오 두 심사위원께 감사드립니다. 이 연구에서는 한국기초과학지원연구원 전주센터의 Shimadzu EPMA 1600을 사용하였으며, 이번 연구를 위해 야외조사와 암석 시료 채취 및 시편 제작에 많은 도움을 준 광물 연구실의 유민수, 주용현 군에게 감사한다.

참고문헌

- Baek, J.H. (1994) A mineralogical study of layer silicates in the metamorphic rocks from the Southwestern part of the Ogcheon Metamorphic Belt. M.D. Thesis, Chonbuk National University, Jeonju (in Korean with English abstract).
- Choi, D.K., Chough, S.K., Kwon, Y.K., Lee, S.B., Woo, J., Kang, I., Lee, H.S., Lee, S.M., Shon, J.W., Shinn, Y.J., and Lee, D.J. (2004) Taebaek Group (Cambrian-Ordovician) in the Seokgaejae section, Taebaeksan Basin : a refined lower Paleozoic stratigraphy in Korea. *Geosciences Journal*, 8, 125-151.
- Choi, S.H. (2009) A mineralogical study on the illite in the sedimentary rock from the Taebaek area : EPMA, TEM study. M.D. Thesis, Chonbuk National University, Jeonju (in Korean with English abstract).
- Choi, S.H., Lee, J.H., Lee, Y.B., Mun, H.R., and Choi, M.C. (2010) A study on the muscovite-pyrophyllite mixing from the EPMA analysis of illite. *Proceedings of the Annual Joint Conference, Petrological Society of Korea and Mineralogical Society of Korea*, Jeonju, Korea, May 27, 47-49.
- Choi, S.H., Mun, H.R., Lee, Y.B., and Lee, J.H. (2011) A study on the muscovite-pyrophyllite mixed phase in the shale from the Manhang formation, Taebaek area. *J. Miner. Soc. Korea*, 24, 313-320 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.H., Mun, H.R., Lee, Y.B., Lee, J.H., and Kim, Y.M. (2012) Mineralogical study on shales of the Sadong and Gobangsan formation, Munkyung area. *J. Miner. Soc. Korea*, 25, 1-8 (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H., and Choi, D.K. (2000) Tectonic and Sedimentary evolution of the Korean peninsula : a review and new view. *Earth Science Reviews*, 52, 175-235.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J. (1992) An introduction to the rock forming minerals. 2nd edition. John Wiley and Sons, New York.
- 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. *Clay. Clay Miner.*, 38, 225-240.
- 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. Petr.*, 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.
- Lee, S.W. (1998) Mineralogical studies on the diagenesis of the shale in the Sindong group at the Kyongsang Basin : XRD, EPMA and TEM study. M.D. Thesis, Chonbuk National University, Jeonju (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.B. (1993) Mineralogical studies of phyllosilicates on the diagenesis and metamorphism of the Jigunsan and the Manhang formation : EPMA/TEM study. M.D. Thesis, Chonbuk National University, Jeonju (in Korean with English abstract).
- Livi, K.T., Christidis, G.E., Árkai, P., and Veblen, D.R. (2008) White mica domain formation : A model for paragonite, margarite and muscovite formation during prograde metamorphism. *Am. Mineral.*, 93, 520-527.
- Srodon, J. and Eberl, D.D. (1984) Illite. In: Bailey, S.W. (ed.) *Micas, Reviews in Mineralogy*, Vol. 13, Mineral. Soc. America, 495-544.
- Woo, J. and Chough, S.K. (2007) Depositional process and sequence stratigraphy of the Jigunsan Formation (Middle Ordovician), Taebaeksan Basin, mid-east Korea : implications for basin geometry and sequence development. *Geosciences Journal*, 11, 331-355.

접수일(2012년 9월 4일), 수정일(1차 : 2012년 9월 24일),
 게재확정일(2012년 9월 25일), 책임편집위원 : 김영규