

## 일라이트의 비등방적 압축특성 연구

윤서희 · 이용재\*

연세대학교 지구시스템과학과

## A Study on Anisotropic Compression Behavior of Illite

Seohee Yun and Yongjae Lee\*

Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

**요 약:** 천연산 일라이트( $K_{0.65}Al_2(A_{0.65}Si_{3.35})O_{10}(OH)_2$ ) 분말 시료에 대해 물과 알코올(메탄올:에탄올 = 4:1 체적 비, ME41)의 두 가지 압력매개체를 이용한 다이아몬드 앤빌 셀 고압 회절실험을 진행하였다. 물을 이용한 실험에서는 층간 유입을 유도하기 위해 약 250°C까지 열을 가하는 과정을 거치며 최대 약 2.7 GPa까지 압력을 가하였고, 알코올을 이용한 실험에서는 상온에서 최대 약 6.9 GPa까지 가압하면서 방사광 분말 회절법을 통해 시료의 압축특성을 관찰하였다. 위와 같은 조건에서는 층간의 확장이나 상전이는 관찰되지 않았다. 물과 알코올의 서로 다른 압력매개체 하에서 압축된 일라이트의 체적탄성률( $K_0$ )은 각각 45(3) GPa와 51(3) GPa로 도출되어 오차범위 내에서 크게 다르지 않음을 확인하였다. 또한 회절자료 분석결과 격자상수에 따른 선형압축률은 알코올 압력매개체일 때  $\beta^a$ ,  $\beta^b$ ,  $\beta^c$ 의 값이 각각 0.0025 GPa<sup>-1</sup>, 0.0029 GPa<sup>-1</sup>, 0.0144 GPa<sup>-1</sup>로 도출되어 *c*-축의 압축률이 약 6배 큰 것으로 확인되었다. 본 연구에서 확인된 일라이트의 체적탄성률 및 선형압축률을 일라이트와 구조적으로 유사한 백운모와 비교하였다.

**핵심어:** 일라이트, 고압회절, 체적탄성률, 선형압축률

**Abstract:** High-pressure synchrotron X-ray powder diffraction experiments were performed on natural illite ( $K_{0.65}Al_2(A_{0.65}Si_{3.35})O_{10}(OH)_2$ ) using diamond anvil cell (DAC) under two different pressure transmitting media (PTM), i.e., water and ME41 (methanol:ethanol = 4:1 by volume). When using water as PTM, occasional heating was applied up to about 250°C while reaching pressure up to 2.7 GPa in order to promote both hydrostatic conditions and intercalation of water molecules into the layer. When using ME41, pressure was reached up to 6.9 GPa at room temperature. Under these conditions, illite did not show any expansion of interlayer distance or phase transitions. Pressure-volume data were used to derive bulk moduli ( $K_0$ ) of 45(3) GPa under water and 51(3) GPa under ME41 PTM, indicating no difference in compressibility within the analytical error. Linear compressibilities were then calculated to be  $\beta^a = 0.0025$ ,  $\beta^b = 0.0029$ ,  $\beta^c = 0.0144$  under ME41 PTM showing the *c*-axis is ca. six times more compressible than *a*- and *b*-axes. These elastic behaviors of illite were compared to muscovite, one of its structural analogues.

**Keywords:** illite, high-pressure diffraction, bulk modulus, linear compressibility

## 서 론

일라이트는 Grim *et al.* (1937)에 의해 처음 보고 되었으며, '포타슘(K)-결핍 운모'로도 불린다(Grim *et al.*, 1937; Yates and Rosenberg, 1997). 일라이트는

운모와 비슷한 판상 구조를 가지며 Si 사면체(T) 판과 Al 팔면체(O) 판이 2:1 비율로 결합하여 기본 구조단위를 이룬다. 층간에 존재하는 K 양이온에 의해 물의 층간 유입이 차단되어 비평창성 점토광물로 알려져 있다. 일라이트는 단사정계로 단위포를 이루며 화학식은  $AM_{2-3}T_4O_{10}X_2$ 으로 각각 A = 내부층위 양이온(K, Na, Ca, Ba), M = 팔면체 양이온(Mg, Fe<sup>2+</sup>, Al, Fe<sup>3+</sup>), T = 사면체 양이온(Si, Al, Fe<sup>3+</sup>), X = (OH),

\*Corresponding author

Tel: +82-2-2123-5667

E-mail: yongjaelee@yonsei.ac.kr

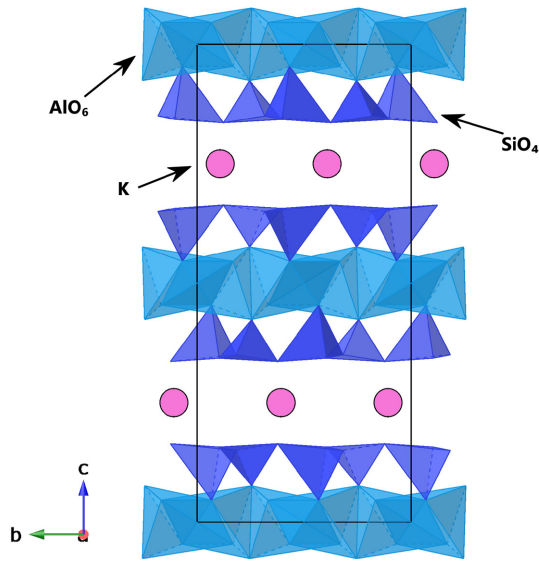


Fig. 1. The structure of illite at ambient condition projected along (100)(Wenk *et al.*, 2007).

F, Cl, O로 정의될 수 있다(Fig. 1)(Gualtieri and Ferrari, 2006).

일라이트는 점토광물로서, 고령석(Kaolinite), 녹점토(Smectite), 녹니석(Chlorite)과 더불어 점토질 퇴적암의 주요 구성 광물 4가지 중 하나에 포함될 만큼 해저와 육상에 풍부하게 존재한다(Windom, 1976). 고령석은  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 의 화학식을 가지며 Si 사면체(T), Al 팔면체(O)가 1:1 구조를 이루며 층간 사이는 반데르발스 결합과 수소 결합을 이루고 있어 물의 층간 유입이 차단되는 것으로 알려져 왔다(Cheng *et al.*, 2012). 녹점토는 일라이트와 비슷하게 사면체(T)와 팔면체(O)가 2:1 구조로 존재하는데, 층간 사이로 물이 들어가 층간 간격이 늘어날 수 있는 팽창성 점토광물이다(Klopprogge *et al.*, 1999). 녹니석은  $(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_6$ 의 화학식으로 표현되는 규산염 광물로 삼·팔면체(trioctahedral)구조를 가지며 활석과 같은 음전하의 T-O-T 2:1 층 구조를 보인다. 하지만 녹니석은 층간 구조 사이에 일라이트와는 다르게  $(Mg^{2+}, Fe^{3+})(OH)_6$ 로 이루어진 부루사이트 층(brucite layer)이 존재하여 2:1:1 구조를 가진 광물로도 불린다(Bailey., 1988). 한편 일라이트는 백운모(muscovite)와 구조, 화학적으로 비슷하지만, 점토 크기(clay-sized <math>4 \mu m</math>)에 속하는 입자로 구성되며, 백운모의 층간 구조에 존재하는 양이온의 층 전

하(layer charge)인 0.85에서 1 사이와 다르게 0.6에서 0.85의 범위를 보인다(Bailey *et al.*, 1984; Srodon *et al.*, 1984).

최근 해양 퇴적층에도 풍부한 고령석이 섭입대와 같은 고온고압의 환경에서 물을 층간으로 유입시키면서 초수화 고령석(super-hydrated kaolinite)로 변환됨이 관찰되었고, 이를 통한 물의 지구 심부로의 순환과 지진 및 마그마 생성의 새로운 연관성이 제시된 바 있다(Hwang *et al.*, 2017). 따라서 고령석과 화학적 및 구조적으로 유사함을 보이며, 해양 퇴적층에 풍부하게 존재한다고 알려진 일라이트 또한 고온고압의 환경에서 물의 층간 유입 등의 변화를 보일 수 있으며 섭입대 환경에서의 물의 이동으로 인한 마그마 생성, 지진 발생 등과도 연관 지을 수 있을 것이라 유추된다. 단일 광물로서 일라이트에 대한 고압연구는 약 1.5 GPa 이하까지 진행된 사례가 존재하지만 특별한 변화가 관찰되지는 않았다(George and Larry, 1960). 한편 Chapman (2008)은 고령토, 조장석(Albite) 그리고 일라이트로 구성되어진 유혈암(Oil shale)에 2.4 GPa까지 압력을 상온에서 가하여 해당 암석의 압축성을 보고하였고, Ebert *et al.* (2018)는 일라이트를 포함한 사암에 2.5 GPa부터 17.5 GPa까지 충격압을 주어 암석을 이루고 있는 광물의 변화를 SEM으로 관찰한 바 있다.

본 연구에서는 일라이트에서 일어나는 구조적, 화학적 변화를 물을 압력매개체(pressure transmitting media)로 사용한 다이아몬드엔빌셀 분말 회절 실험을 통해 약 250°C까지 열을 가하는 과정을 거치며 최대 약 2.7 GPa까지 관찰하였다. 또한, 일라이트의 압축특성 확인을 위한 비교군 실험으로 메탄올:에탄올 = 4:1 (ME41)을 압력매개체로 사용하여 상온에서 최대 약 6.9 GPa까지 압력만 증가시키는 실험을 추가로 진행하였다. 구해진 회절 자료의 분석을 통해 각 조건에서의 반응성 유무 및 체적탄성률과 선형압축률을 구하여 비교하였다.

## 연구방법

### 시료

본 실험에 사용된 일라이트 시료는 경북대학교에서 제공된 천연산 시료로써, 분말화된 시료에서 방위 배열(preferred orientation)이 확인되어, 마노 유발(agagate mortar)를 이용하여 약 40분 동안 추가적인 분말화를

진행한 후 고압 회절실험에 사용되었다. 일라이트 시료에 대한 EDS(Energy dispersive spectrometer, Inca X-act, Oxford) 화학성분 분석결과  $K_2O$  9.29 wt.%,  $Al_2O_3$  31.18 wt.%,  $SiO_2$  53.53 wt.%으로 도출되었고, 이를 화학식으로 계산하였을 때  $K_{0.73}Al_{1.99}(Al_{0.71}Si_{3.29})O_{10}(OH)_2$  임을 보였다. 상동정 분석은 연세대학교 결정학 연구실의 Micro-XRD(Rigaku VariMaxIV++ Raxis, target=Mo)를 이용한 분말 회절법을 사용하였고 0.3 mm  $\varnothing$  glass-capillary에 분말 시료를 주입하여 0~90°의 2 $\theta$  범위에 10분간 노출하여 회절 패턴을 측정하였다.

### 고압 회절실험

고압 X-선 회절실험은 다이아몬드 앤빌셀(Diamond anvil cell, DAC)을 이용하여 포항가속기연구소(Pohang Light Source, PLS-II) 6D 빔라인에서 수행하였다. 휨자석(Bending magnet)으로부터 발생한 X-선의 파장은 0.65303 Å(18.986 keV)이다. 핀홀(Pinhole)로 X-선의 크기를 100  $\mu$ m 크기로 조정하였다. X-선 회절 데이터는 CCD 검출기(MX225-HS, Rayonix, 5760  $\times$  5760 pixels)로 측정했으며 실험 전  $LaB_6$ (SRM 660C)를 사용하여 보정을 진행하였다. 모든 압력실험의 단계마다 5분 동안 X-선을 시료에 조사하여 데이터를 얻었다.

압력 실험장치는 대형 다이아몬드앤빌셀(Symmetric Diamond Anvil Cell, DAC)을 사용하였고, 텅스텐-카바이드(Tungsten carbide, WC) 판 한 쌍에 type-I이며, 쿨릿(Culet) 지름이 700  $\mu$ m의 다이아몬드앤빌을 부착하여 사용했다. 시료를 담은 개스킷은 스테인리스 스틸 재질에 예비 압입(Pre-indentation)을 가하여 두께를 약 100  $\mu$ m로 줄인 후, 약 400  $\mu$ m 지름으로 구멍을 EDM(electrical discharge method) 방식으로 만들어 시료를 담은 공간을 마련했다. 시료에 가해지는 압력을 측정하기 위해 수  $\mu$ m 크기의 루비 단결정을 시료와 함께 넣어서 루비 형광과 R1 피크( $\lambda = 694.2$  nm)의 압력에 따른 파장의 변화 값  $\Delta\lambda$ 에 대한 계산식  $P$  (GPa) =  $19.04/7.665((1+(\Delta\lambda/\lambda_0))^{7.665}-1)$ 을 이용하여 시료에 가해지는 압력을 측정하였다(Mao *et al.*, 1986). 압력전달매체(PTM)로 순수한 3차 증류수와 별도로 메탄올과 에탄올을 4:1의 부피비로 혼합한 용액(ME41)을 이용하였다. 물을 이용한 실험에서는 얼음(ice-VI, VII)이 형성되는 압력 이상에서 전기로에 DAC을 넣어 열을 가해주는 방식을 거치면서 해

당 압력에서 물과 일라이트와의 반응을 유도하였다. 회절 자료의 처리는 Dioptas 프로그램을 사용하여 2D 이미지를 1D 회절 패턴으로 전환한 후 분석을 진행했다(Prescher, 2015). 모든 압력 구간에서의 일라이트의 격자상수와 단위포 부피에 대한 계산은 GSAS 프로그램(Toby, 2001)의 LeBail 방법(Le bail *et al.*, 1988)을 사용하였다. 구해진 격자상수 값으로부터 버치-머나한 상태방정식(Birch-Murnaghan equation of state)을 적용한 체적탄성률과 선형압축률은 EOSFIT 프로그램(Angel *et al.*, 2014)과 다음의 계산식을 사용하였다:

$$P = 1.5K_0[(V_0/V)^{7/3} - (V_0/V)^{5/3}]\{[1+3/4(K'_0-4)]\} [(V_0/V)^{2/3} - 1]$$

### 결과 및 토의

Micro-XRD를 이용한 일라이트의 측정된 피크들에 대한 동정(indexing)을 통해 주요 피크인 (002), (004), (006)의 존재를 관찰하였고, 단사정계 공간군 C2/c에 해당하는 운모 폴리타이트 2M<sub>1</sub>임을 확인했다. 구해진 격자상수는  $a = 5.1741(5)$  Å,  $b = 8.9941(7)$  Å,  $c = 20.029(2)$  Å,  $\beta = 95.701(5)^\circ$ 이며, 기존에 보고된 일라이트의 격자상수와 비교하였을 때 비슷한 값을 나타내는 것을 확인하였다(Drits *et al.*, 1993). 물을 압력매개체로 사용했을 경우 압력이 증가하면서 일라이트의 첫 번째 피크인 (002)와 (004), (006) 피크들이 점진적으로 2 $\theta$  오른쪽으로 이동하는 것이 두드러지게 나타났다. 상온-상압에서 (002) 피크는  $2\theta = 3.73^\circ$ 로 면 간 거리(d-spacing) 약 10 Å을 보이다가 압력이 2.67 GPa로 증가하면서  $2\theta = 3.86^\circ$ 까지 이동하면서 면 간 거리가 9.71 Å로 감소하였다. 한편 (006) 피크는 상온-상압 환경에서는 (024) 피크와 겹쳐있어 구분이 쉽지 않았지만, 압력이 가해지면서 두 피크의 분리가 일어나는데, 압력이 높아질수록 상대적으로 오른쪽으로 더 많이 이동하는 경향을 보였다. 이는 일라이트의 압축특성이 (hkl)의 그룹에 따라 다르게 나타나는 것을 시사한다. 압력이 증가하면서 일라이트 상과 함께 압력매개체로 사용한 물의 결정화가 일어나는데, 얼음 VI은 1.44 GPa부터, 얼음 VII은 2.08 GPa부터 확인된다. 처음 얼음이 관찰된 1.44 GPa부터 다이아몬드 앤빌셀을 전기로에 넣어 가열 과정을 거친 후 회절자료를 측정했으며, 이 과정은 Fig. 2와 Table 1

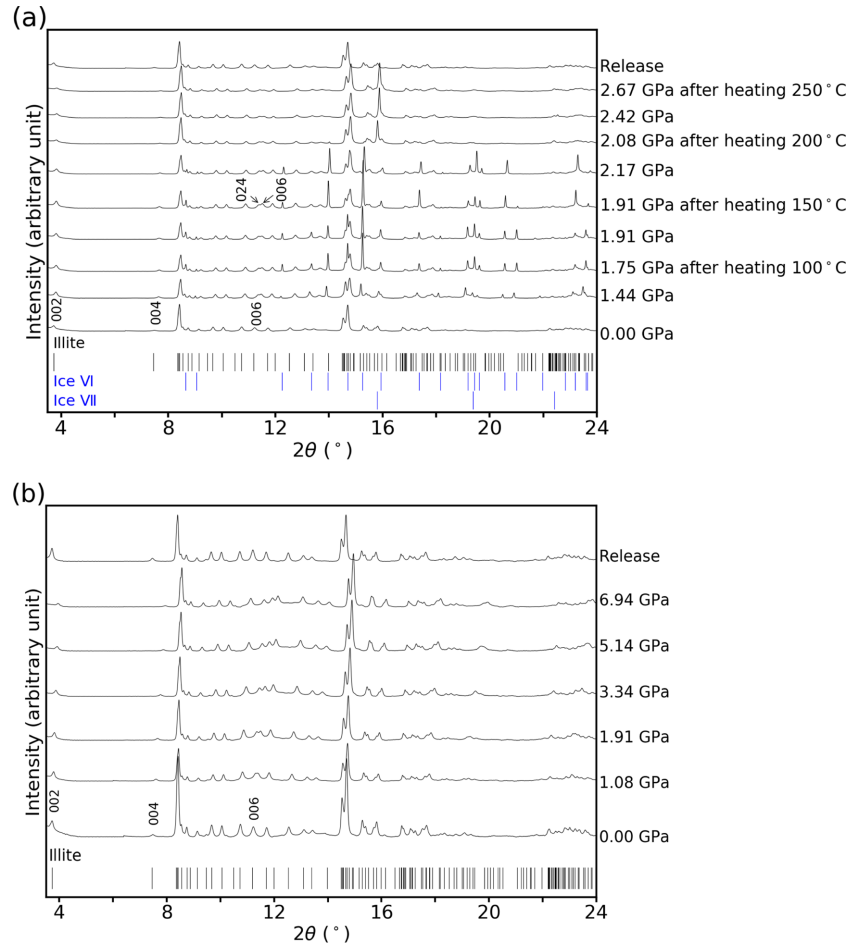


Fig. 2. XRD patterns of illite under (a) water and (b) ME41 (methanol:ethanol = 4:1 by volume) PTM (pressure transmitting media).

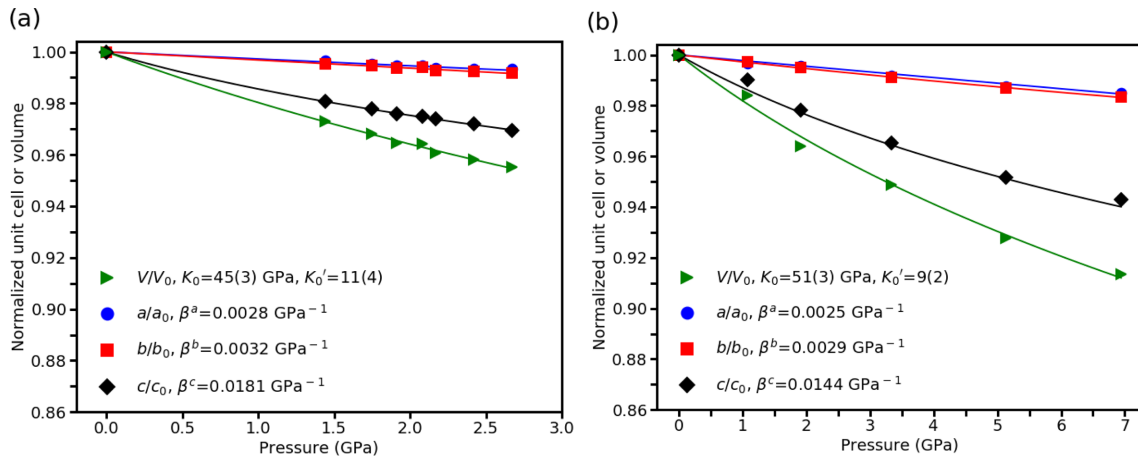
에 정리되어 있다. 물을 매개체로 진행한 실험에서는 최종 압력인 2.67 GPa까지 (002)의 팽창이나 다른 변화는 관찰되지 않았고, 피크들의 점진적인 이동만 관찰되었다. 2.67 GPa 이후 압력을 완전히 해소하였을 때 회절 패턴이 다시 원래대로 돌아오는 가역적인 변화를 보인다(Fig. 2). 압력매개체로 알코올(ME41)을 사용했을 때에도 회절 피크들의 점진적이며 비등 방향적인 이동이 관찰되었으며, 최대 압력인 약 6.9 GPa 이후 회절 패턴의 변화도 가역적임을 확인했다.

압력매개체로 물과 ME41을 사용하였을 때 압력 증가에 따른 격자상수와 단위포 부피 값을 Table 1에 도시하였다. 버치-머나한 상태방정식(Birch-Murnaghan equation of state)을 이용한 체적탄성률( $K_0$ )과 선형압축률( $\beta$ )은 각각  $V/V_0$ 와  $L/L_0$  ( $L$  = 각  $a$ -,  $b$ -,  $c$ -축)로

표기하여 Fig. 3에 표시하였다. 물로 진행하였을 때는 약 2.7 GPa까지 압력 증가에 따른  $a$ -,  $b$ -,  $c$ -축의 감소는 각각 0.69%, 0.81%, 3.05%이며, 부피에 대한 감소는 4.5%로 확인된다. 약 6.94 GPa까지 진행한 ME41 실험에서의  $a$ -,  $b$ -,  $c$ -축의 압축은 각각 1.44%, 1.66%, 5.81%이고, 부피 감소는 8.69%로 확인되었다. 두 실험에서 공통으로  $c$ -축이 상대적으로 크게 감소하였음을 알 수 있다. 물을 압력매개체로 사용한 실험 데이터를 바탕으로 상태방정식의  $K_0$ 의 값을 4로 고정하였을 때 체적탄성률이 51.3(5) GPa,  $K_0$ 의 값도 함께 계산식을 통하여 정제했을 때 11(4)로 증가하며 체적탄성률( $K_0$ )은 45(3) GPa로 값이 도출되었다. 이를 통해 일라이트는 압력 증가에 따른 압축률 감소의 정도가 일반적인 규산염 광물에 비해 크고 체적탄

**Table 1. Lattice parameters and volume of illite with different pressure media**

Pressure (GPa)	<i>a</i> (Å)	<i>b</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	$\beta$ (°)	<i>V</i> (Å <sup>3</sup> )	Heat treatment
Water						
0.00	5.177(1)	8.982(1)	20.127(9)	95.783(2)	931.160(6)	
1.44	5.161(4)	8.941(1)	19.738(1)	95.783(5)	906.000(1)	
1.75	5.153(4)	8.935(1)	19.678(3)	95.760(1)	901.500(2)	100°C
1.91	5.150(2)	8.926(2)	19.639(1)	95.795(4)	898.090(7)	150°C
2.17	5.144(4)	8.916(8)	19.602(2)	95.720(7)	894.600(1)	
2.08	5.150(3)	8.927(5)	19.625(1)	95.771(5)	897.750(10)	200°C
2.42	5.143(2)	8.914(4)	19.562(1)	95.817(4)	892.200(1)	
2.67	5.142(2)	8.909(4)	19.513(2)	95.808(3)	889.300(1)	250°C
ME41						
0.00	5.177(1)	8.982(1)	20.127(9)	95.783(2)	931.160(6)	
1.08	5.163(5)	8.958(6)	19.902(2)	95.716(5)	915.900(2)	
1.91	5.157(2)	8.938(4)	19.667(1)	95.785(4)	901.970(9)	
3.34	5.138(2)	8.902(4)	19.405(1)	95.774(4)	882.970(9)	
5.14	5.117(2)	8.864(3)	19.132(1)	95.709(4)	863.400(1)	
6.94	5.103(5)	8.833(4)	18.957(2)	95.721(5)	850.200(2)	



**Fig. 3. The variation of unit cell lengths and volume under (a) water and (b) ME41 (methanol:ethanol = 4:1 by volume) PTM (pressure transmitting media) normalized to the ambient value. Solid lines are fits to the data with third-order Birch-Murnaghan equation of state.**

성질은 고령석(kaolinite, 59.7 GPa), 금운모(phlogopite, 58.5 GPa), 녹니석(chlorite, 55.0 GPa)등의 대표적 판상형 광물보다 약간 작은 값을 보이는 것으로 확인된다(Welch and Crichton, 2010; Hazen and Finger, 1978). 비교군으로서 ME41을 사용한 실험과 비교하면  $K_0$ 이 4일 때  $K_0$ 가 59(1),  $K_0'$ 가 정제되어 8(2)로 변화하게 되면 51(3) GPa로 감소하면서 전체적으로 물

을 이용한 실험과 비교하였을 때 약간 큰 값 혹은 오차범위 내에서 동일한 값을 보임을 확인할 수 있었다. 기존에 Wang *et al.* (2001)이 구한 일라이트의 체적탄성률은 압력에 의한 부피 변화로서 계산한 것이 아닌 Hashin-Shtrikman bound의 방법을 통해  $V_p$ 와  $V_s$ 의 값을 바탕으로 구한 것으로 체적탄성률은 60.1(5) GPa로 제시되어 본 연구 결과에 비교했을 때

**Table 2. Comparison of bulk compression behavior between muscovite (M) and illite (I) (Shock P = Shock Pressure)**

$K_0$ (GPa)	$K'_0$	Ref	etc
52.0	3.2	Sekine <i>et al.</i> (1991)	shock P (M)
49.0	4.0	Catti <i>et al.</i> (1994)	M
61.4	6.9	Faust <i>et al.</i> (1994)	M
60.1	7.3	Ortega-Castro <i>et al.</i> (2010)	M
60.1(5)		Wang <i>et al.</i> (2001)	Velocity (I)
45.0(3)	11.0(4)	This study	Water
51.0(3)	9.0(2)	This study	ME41

**Table 3. Comparison of linear compression behavior between muscovite (M) and this study**

$\beta^a$ (GPa <sup>-1</sup> )	$\beta^b$ (GPa <sup>-1</sup> )	$\beta^c$ (GPa <sup>-1</sup> )	Ref	etc
0.00296	0.00339	0.0117	Catti <i>et al.</i> (1994)	M
0.00280	0.00320	0.0181	This study	Water
0.00247	0.00286	0.0144	This study	ME41

다소 큰 값으로 확인된다.

Table 2에 지금까지 보고된 백운모의 체적탄성률과 본 연구에서 구한 일라이트의 체적탄성률을 비교하였다. 대체로 백운모의 체적탄성률이 본 연구에서 구한 일라이트의 체적탄성률보다 조금 큰 값을 보인다. 체적탄성률의 값이 클수록 압축성이 작다는 것을 의미하여 일라이트가 백운모보다 압력에 대한 부피 감소가 조금 크다는 것을 알 수 있다. 이는 일라이트와 백운모와의 결정 화학적인 차이를 통해 추론해볼 수 있다. 일라이트는 백운모보다 Si 사면체에 Al의 치환이 보다 적게 일어나서 층간 K 양이온의 값이 보다 작은 0.6에서 0.85 범위를 보인다(Brindley, 1980). 층상 광물의 체적탄성률은 층에 수직인  $c$ -축의 감소에 의한 영향을 크게 받는데, 층간에 존재하는 K의 양이 적고 사면체에 치환된 Al의 값이 백운모보다 적으므로 구조상으로 덜한 강성 구조(Rigid structure)를 보이게 된다. 이때 압력에 의해 힘을 받게 되면 백운모보다 더 큰 압축성을 보여 체적탄성률이 보다 작은 값을 보이는 것으로 유추된다. 실제로 일라이트의 선형압축률은 물이 압력매개체일 때  $\beta^a$ ,  $\beta^b$ ,  $\beta^c$ 이 각각 0.0028 GPa<sup>-1</sup>, 0.0032 GPa<sup>-1</sup>, 0.0181 GPa<sup>-1</sup>로 구해진다(Fig. 3a). ME41을 이용한 측정에서도 비슷한 값을 나타내어  $\beta^a$ ,  $\beta^b$ ,  $\beta^c$ 이 각각 0.0025 GPa<sup>-1</sup>, 0.0029 GPa<sup>-1</sup>, 0.0144 GPa<sup>-1</sup>로 계산되어 전체적으로  $c$ -축의 압축률의 수치가  $a$ -,  $b$ -축의 압축률 수치보다 최대 6.5배 크게 나타나므로 압력에 대한 압축특성이 비 등방적이며 일라이트의 층에 수직인  $c$ -축 방향으로 압축이 우세

하게 진행되는 것으로 확인된다. 한편 백운모에서 보고된 선형압축률의 비등방성은 일라이트에 비해 작아서  $c$ -축의 압축률이  $a$ -,  $b$ -축보다 약 4배 정도 더 큰 정도로 나타난다(Table 3). 이는 Si 사면체와 Al 팔면체의 압력에 의한 압축성은 일라이트나 백운모에서 큰 차이가 나지 않지만  $c$ -축의 압축성에서 일라이트가 백운모보다 더 크게 나타나 위와 같은 결과가 도출되는 주요 요인이라고 사료된다. 일라이트는 해양 퇴적물을 이루는 주요한 광물 중 하나이기 때문에 향후 물을 포함한 차가운 섭입대 환경에서의 실시간 고온 및 고압 연구를 통해 지구 내부로의 물 운반에 관한 새로운 기작을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

## 결론

알루미늄 규산염 광물인 일라이트에 대해 물과 알코올 혼합액(ME41)의 서로 다른 압력매개체를 사용한 고압 환경 하에서 방사광 X-선 분말 회절실험을 수행하였다. 물을 압력매개체로 사용한 실험에서는 열처리를 통해 고압에서 형성된 얼음 상의 용융을 유도하며 약 2.7 GPa까지 가압하였고 ME41의 경우 약 6.9 GPa까지 상온에서 가압하며 회절 패턴의 변화를 관찰하였다. 두 실험에서 모두 상전이나 층간 유입에 따른 부피팽창은 일어나지 않았으며 결정성이 유지되는 가역적 압축 현상을 확인하였다. 구해진 체적탄성률은 물과 ME41에서 각각 45(3) GPa와 51(3) GPa로 확인되었고  $c$ -축의 압축률이  $a$ -,  $b$ -축의 압축률에

비해 최대 약 6.5배 큰 비등방성을 보임을 확인했다. 일라이트는 심해 퇴적물의 주요 광물로 분포하고 있어서 섭입대를 따라 지구 내부로 이동하게 될 때 접촉면에서 물의 이동과 그에 따른 지진의 발생에 영향을 끼칠 수 있는 주요 매개체 중 하나이다. 이에 따라 본 연구 결과는 일라이트의 섭입대 지온 구배에 따른 고온 고압 광물물리 연구의 기초 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 한국연구재단 리더연구자 사업(2018R1A3B1052042)의 지원으로 수행되었다. 방사광가속기를 이용한 실험은 포항가속기연구소의 지원으로 수행되었다. 본 연구를 위해 소중한 시료를 제공한 경북대학교 김영규 교수께 감사드린다.

## REFERENCES

- Grim, R.E., Bray, R.H. and Bradley, W.F., 1937, The Mica in Argillaceous Sediments. *American Mineralogist*, 22, 813-829.
- George V. Chilingar (2). and L.K., 1960, Relationship Between Pressure and Moisture Content of Kaolinite, Illite, and Montmorillonite Clays. *AAPG Bulletin*, 44, 101-106.
- Windom, H.L., 1976, Lithogeneous materials in marine sediments. *Chemical Oceanography*, 5, 103-135.
- Hazen, R.M. and Finger, L.W., 1978, The crystal structures and compressibilities of layer minerals at high pressure; II, phlogopite and chlorite. *American Mineralogist*, 63, 293-296.
- Brindley, G.W. and Brown, G., 1980, Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. London Mineralogical Society, Monograph 5, 495 p.
- Bailey, S.W., Brindley, G.W., Fanning, D.S., Kodama, H. and Martin, R. T., 1984, Report of The Clay Minerals Society Nomenclature Committee for 1982 and 1983. *Clays & Clay Minerals*, 32, 239-240.
- Środoń, J., Eberl, D.D. and Bailey, S.W., 1984, Illite. *Micas*, 13, 495-544.
- Mao, H.K., Xu, J.A. and Bell, P.M., 1986, Calibration of the ruby pressure gauge to 800 kbar under quasi-hydrostatic conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, 4673-4676.
- Bailey, S.W., 1988, Chlorites; structures and crystal chemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 19, 347-403.
- Le Bail, A., Duroy, H. and Fourquet, J.L., 1988, Ab-initio structure determination of LiSbWO<sub>6</sub> by X-ray powder diffraction. *Materials Research Bulletin*, 23, 447-452.
- Sekine, T., Rubin, A.M. and Ahrens, T.J., 1991, Shock wave equation of state of muscovite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96, 19675-19680.
- Drits, V.A., Weber, F., Salyn, A.L. and Tshipursky, S.I., 1993, X-ray identification of one-layer illite varieties: Application to the study of illites around uranium deposits of Canada. *Clays and Clay Minerals*, 41, 389-398.
- Catti, M., Ferraris, G., Hull, S. and Pavese, A., 1994, Powder neutron diffraction study of 2M1 muscovite at room pressure and at 2 GPa. *European Journal of Mineralogy-Ohne Beihefte*, 6, 171-178.
- Faust, J. and Knittle, E., 1994, The equation of state, amorphization, and high-pressure phase diagram of muscovite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99, 19785-19792.
- Comodi, P. and Francesco Zanazzi, P., 1995, High-pressure structural study of muscovite. *Physics and Chemistry of Minerals*, 22, 170-177.
- Yates, D.M. and Rosenberg, P.E., 1997, Formation and stability of endmember illite: II. Solid equilibration experiments at 100 to 250°C and  $P_{v, \text{soln}}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 3135-3144.
- Klopprogge, J.T., Komarneni, S. and Amonette, J.E., 1999, Synthesis of smectite clay minerals: a critical review. *Clays and Clay Minerals*, 47, 529-554.
- Toby, B.H., 2001, EXPGUI, a graphical user interface for GSAS. *Journal of Applied Crystallography*, 34, 210-213.
- Wang, Z., Wang, H. and Cates, M. E., 2001, Effective elastic properties of solid clays. *Geophysics*, 66, 428-440.
- Gualtieri, A.F. and Ferrari, S., 2006, Kinetics of illite dehydroxylation. *Physics and Chemistry of Minerals*, 33, 490.
- Wenk, H.R., Lonardelli, I., Franz, H., Nihei, K. and Nakagawa, S., 2007, Preferred orientation and elastic anisotropy of illite-rich shale. *Geophysics*, 72, E69-E75.
- Chapman, K.W., Chupas, P.J., Winans, R.E. and Pugmire, R. J., 2008, High pressure pair distribution function studies of Green River oil shale. *The journal of Physical Chemistry C*, 112, 9980-9982.
- Ortega-Castro, J., Hernández-Haro, N., Timón, V., Sainz-Díaz, C.I. and Hernández-Laguna, A., 2010, High-pressure behavior of 2M<sub>1</sub> muscovite. *American Mineralogist*, 95, 249-259.
- Welch, M.D. and Crichton, W.A., 2010, Pressure-induced transformations in kaolinite. *American Mineralogist*, 95, 651-654.
- Cheng, H., Liu, Q., Yang, J., Ma, S. and Frost, R.L., 2012, The thermal behavior of kaolinite intercalation complexes-A review. *Thermochimica Acta*, 545, 1-13.
- Angel, R.J., Alvaro, M. and Gonzalez-Platas, J., 2014, EoS-Fit7c and a Fortran module (library) for equation of state

- calculations. *Zeitschrift Für Kristallographie - Crystalline Materials*, 229, 405-419.
- Prescher, C. and Prakapenka, V.B., 2015, DIOPTAS : a program for reduction of two-dimensional X-ray diffraction data and data exploration. *High Press. Res.* 35, 223–230.
- Hwang, H., Seoung, D., Lee, Y., Liu, Z., Liermann, H.P., Cynn, H., Vogt, T., Kao, C.C., and Mao, H.K., 2017, A role for subducted super-hydrated kaolinite in Earth's deep water cycle. *Nature Geoscience*, 10, 947-953.
- Ebert, M., Kowitz, A., Schmitt, R.T., Reimold, W.U., Mansfeld, U. and Langenhorst, F., 2018, Localized shock-induced melting of sandstone at low shock pressures (<17.5 GPa): An experimental study. *Meteoritics & Planetary Science*, 53, 1633-1643.
- 

**Received** January 22, 2020

**Review started** January 22, 2020

**Accepted** March 2, 2020