

합성 활석에 대한 압축 연구

A Compression Study on a Synthetic Talc

김 영 호(Young-Ho Kim)* · 김 순 오(Soon-Oh Kim)

경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소

(Department of Earth and Environment Sciences and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

요약 : 층상규산염광물 중 하나인 활석($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)은 경도가 매우 낮고, 산업분야에서 매우 다양하게 이용되는 재료물질이다. 실험에 이용한 활석은 외부가열열수고압기기를 이용하여 압력 200 MPa, 온도 600°C 인 조건하에서 합성한 분말시료이다. 포항가속기연구소에서 대칭다이아몬드 앤빌 기기와 방사광 및 각분산 X-선회절방법을 이용하여 상온에서 11.06 GPa까지 압축실험을 시행하였다. 본 실험의 압력 범위 내에서 상변이는 관찰하지 못하였다. 체적탄성률은 버치-머내한 상태방정식을 이용하여 72.4 GPa로 결정되었으며, 이 값은 천연산활석에 비해 낮은 것으로 나타났다.

주요어 : 합성활석, 대칭다이아몬드 앤빌 기기, 각분산X-선회절, 버치-머내한 상태방정식, 체적탄성률

ABSTRACT : Talc ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), one of sheet silicates, is soft and has been widely used in industry. Powdered talc specimen was synthesized at the pressure of 200 MPa and temperature of 600°C using external heated hydrothermal high pressure apparatus. High pressure angular dispersive X-ray diffraction (ADXRD) mode experiments were performed at the Pohang Light Source (PLS) using the symmetrical diamond anvil cell (SDAC). Compression pressure was loaded up to 11.06 GPa at room temperature. This synthetic talc shows no phase transition(s) within the present pressure limit. Based on ADXRD data, bulk modulus of talc was calculated to be 72.4 GPa using Birch-Murnaghan equation of state (EOS). This value is lower than that of natural talc determined previously.

Key words : synthetic talc, SDAC, ADXRD, Birch-Murnaghan EOS, bulk modulus

*Corresponding author: +82-55-772-1472, E-mail: yhkim@gnu.ac.kr

서 론

활석($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)은 돌로마이트나 석영질 퇴적암이 열수변성교대작용이나 광역변성작용을 받아 생성되거나 또는 염기성 내지 초염기성 암맥이나 화산암 등 화성암이 열수변질작용을 받아 생성되는 것으로 알려져 있다(Moine *et al.*, 1989; Anderson *et al.*, 1990). 또한 돌로마이트질 퇴적암이 화강암질암이나 염기성 내지 초염기성 화성암맥의 관입에 의한 접촉변성교대 작용을 받아 활석이 생성되기도 한다(Brown, 1973). 우리나라의 활석광상은 돌로마이트나 돌로마이트질 석회암과 같은 퇴적기원암석과 사문암과 같은 초염기성암이 열수변질작용이나 변성작용에 의하여 생성된 것으로 구분된다(Lee and Choi, 1994; Kim and Kim, 1997).

활석이 지체구조학적으로 주목을 받기 시작한 것은 활석이 해양지각의 섭입에 의해 지구내부로 들어가게 되면 맨틀에 물(H_2O)을 전달할 수 있는 공급원으로 인식되면서 부터이다(Pawley and Wood, 1995). 지구표면에서 물이 지구내부로 이동하여, 지구 규모의 크기로 순환하는 것은 지구의 진화과정에 지대한 영향을 미치고 있다. 물 또는 수소원자는 맨틀물질의 특성을 변화시키는데 매우 중요한 역할을 하고 있는데, 특히 용융온도와 점성에 미치는 영향이 크기 때문이다. 수렴경계에서 섭입하는 해양판은 수소원자를 보다 깊은 지구맨틀로 이동시키는 운반자 역할을 하는데, 이때 수소는 수화광물의 성분으로 또는 액상의 상태로 동반 이동하거나, 무수광물이지만 수소이온을 포함하고 있는 광물의 내부 구조에 포함되어 지구내부로 이동을 하게 된다. 따라서 지구 맨틀의 온도와 압력에 상응하는 조건에서 물을 포함하고 있는 수화광물에 대한 안정영역이나 탄성특성에 관한 지식과 정보를 바탕으로 정량적인 지구내부 모델링을 하는데 필요하다. 즉 다양한 범위의 온도-압력-성분에 대한 지식은 특히나 섭입하는 지판의 특성을 판단하는데 중요한 지표가 될 수 있다. 이에 제한된 온도-압력 범위에서 활석의 안정성에 대한 연구가 시행되었다(Pawley and Wood, 1995, Fumagalli *et al.*, 2001, Gleason *et al.*, 2008).

경상분지 내 청암광산의 활석은 사문암이 열수변질작용을 받아 생성되었는데, 이 시료를 이용하여 상온에서 다이아몬드 앤빌 기기와 방사광 및 에너지 분산 X-선회절(Energy dispersive X-ray diffraction,

EDXRD) 실험을 하여 체적탄성률을 78.6 GPa로 결정하였다(Kim and Yi, 1999). 본 연구에서는 국내에서 합성한 활석에 대한 상온 및 고압 하에서의 상변이 계통과 상태방정식에 대한 고압 ADXRD 결과를 이미 연구된 국내산 천연 활석에 대한 기존의 고압 EDXRD연구결과와 비교하였다.

연구방법

출발시료

본 실험에 이용한 시료는 고려대학교 지구환경과학과에 설치된 Leco Company가 제작한 기기로, 외부가열 열수고압실험장치를 이용하여 합성한 것이다. 이 기기를 이용하여 얻을 수 있는 최대압력은 520 MPa이며, 압력측정은 압력용기(pressure vessel)에 연결된 튜브게이지를 이용하였다. 압력계의 오차 허용치는 최대범위의 0.25%로, 측정된 압력은 약 ± 1.3 MPa의 불확실성을 갖는 것으로 추정하였다. 압력용기는 수직으로 설치되어 있으며 외경이 32 mm, 길이는 184 mm, 재질은 Rene#41을 이용하여 제작한 것이다. 온도는 압력용기 외부에 설치한 전기를 이용하여 가열하였는데, 온도 증가는 유로썸 조절기(Eurotherm controller)를 이용하였다. 독립적으로 시행된 시험결과, 압력용기 외부와 내부에 위치하는 시료캡슐의 온도 차이는 1 기압에서 거의 같으며, 캡슐길이에 따른 온도증가율과 열전쌍(thermocouple)의 측정온도 차이 간의 오차를 감안하면 약 $\pm 2^\circ C$ 정도의 불확실성을 갖는 것으로 판단하였다.

시료방으로 이용된 캡슐은 외경 3 mm, 두께 0.15 mm, 길이 10 mm이며 재질은 은-팔라듐(Ag-Pd) 합금이였다. MgO (순도 99.95%, Aldrich, 34, 277-7)와 SiO_2 (Johnson Matthey Chemical, batch# S9000OB)를 처리하여 물 비 3:4로 혼합한 분말을 출발시료로 하였다. 시료캡슐에 출발혼합분말 40 mg과 함께 증류수 8 μl 를 첨가한 다음 용접을 하여 밀봉하였다. 완전히 밀봉된 캡슐을 압력용기에 장착한 다음 목표압력까지 가압하였다. 열수장치에 가열은 목표압력을 유지하면서, 온도를 높이는 등압가열방식을 이용하였다. 본 시료는 200 MPa 압력 및 600°C에서 577시간 동안 반응을 시켜 회수한 것으로, 실험 전 캡슐의 질량과 실험 후 질량의 차이가 ± 0.2 mg 이하로 실험 중 누출은 없는 것으로 판단하였다. 이러한 과정을 거쳐 합성

Table 1. Assignment in both monoclinic and triclinic crystal system at ambient conditions of the starting synthetic talc

I/I_0	d_{obs} (Å)	d_{cal} (Å)* (monoclinic)	(h k l) (monoclinic)	d_{cal} (Å)* (triclinic)	(h k l) (triclinic)
40	9.380	9.354	(0 0 2)	9.35433	(0 0 1)
25	4.682	4.677	(0 0 4)	4.67717	(0 0 2)
10	4.534	4.534	(1 1 0)	4.55101	(-1 1 0)
10	4.324	4.338	(-1 1 2)	4.33529	(-1 -1 -1)
10	3.884	3.863	(1 1 2)	3.88218	(1 -1 1)
100	3.118	3.118	(0 0 6)	3.11811	(0 0 3)
10	2.598	2.595	(-1 3 2)	2.59755	(-1 3 1)
10	2.476	2.482	(1 3 2)	2.47695	(1 3 1)
10	2.338	2.338	(0 0 8)	2.33858	(0 0 4)
20	1.871	1.871	(0 0 10)	1.87087	(0 0 5)
10	1.559	1.559	(0 0 12)	1.55906	(0 0 6)
10	1.527	1.527	(0 6 0)	1.52692	(-3 -3 1)
10	1.335	1.336	(0 0 14)	1.33633	(0 0 7)

* Lattice parameters of the monoclinic and triclinic system, respectively were calculated on the basis of the present experimental data; Monoclinic system, $a = 5.294$ (4) Å, $b = 9.161$ (3) Å, $c = 18.982$ (2) Å, β (deg) = 99.7 (3), $V = 907.4$ (3) Å³. Triclinic system, $a = 5.302$ (4) Å, $b = 9.163$ (3) Å, $c = 9.486$ (2) Å, α (deg) = 90.3, β (deg) = 99.5 (3), γ (deg) = 90.2 (3), $V = 454.5$ (3) Å³.

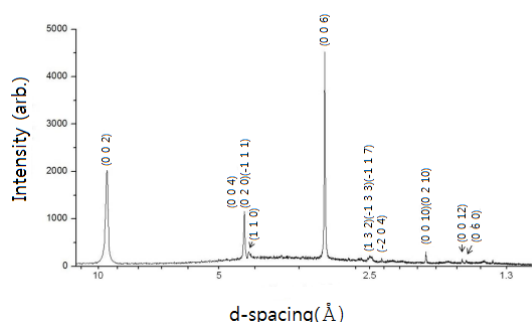


Fig. 1. X-ray diffraction pattern at ambient conditions. Miller index was assigned on the base of the monoclinic crystal system.

된 산출물은 X-선회절기기를 이용하여 분석하였다 (Table 1과 Fig. 1(a) 참조, Cho & Kim, 1997). 합성시료는 순수한 활석으로 판명되었으며, 격자상수는 PDF 13-558보다 약간 큰 것으로 결정되었다. 활석시료를 비롯하여 다른 시료의 합성에 관한 자세한 내용은 Cho & Kim (1997)에 나와 있다.

출발시료에 대한 XRD 결과는 Cho & Kim (1997)의 Table 1에 나타나 있으나, 본 실험에서는 다시 동일한 활석시료에 대해 다시 XRD 분석을 시행하였다(Table 1). XRD 분석에 이용한 기기는 SIEMENS D5005이며, 회절실험에 관련된 내용은 이미 발표된 논문을 참조할 수 있다(Hwang and Kim, 2013).

고압실험

고압 XRD 실험은 포항가속기연구소(Pohang Light Source, PLS)의 빔라인-10C(BL-10C)에서 시행하였다. 고압실험에 이용한 기기는 개량된 대칭 다이아몬드엔빌기기(modified symmetrical diamond anvil cell, SDAC)로, 엔빌의 큐릿은 직경이 350 μm이었다. X-선 회절을 목적으로 하는 다이아몬드 엔빌은 강력한 방사광에 의해 투과가 되므로 복굴절이나 형광은 문제가 되지 않기 때문에 천연에서 산출되는 보석용 다이아몬드의 거의 대부분을 차지하고 있는 Type I을 사용하였다. BL-10C에서

Table 2. Lattice parameters of the synthetic talc with pressures

P, GPa	a, Å	b, Å	c, Å	β , deg	V, Å ³
0.0001	5.285	9.174	18.945	99.44	907.40
0.13	5.288	9.160	19.091	99.90	906.34
0.69	5.266	9.132	19.062	99.81	903.40
0.96	5.270	9.130	18.993	99.85	900.50
1.51	5.271	9.116	18.947	99.86	897.10
2.03	5.248	9.115	18.757	99.38	885.30
3.18	5.225	9.084	18.575	99.16	870.50
4.43	5.213	9.052	18.420	98.72	859.30
5.41	5.197	9.028	18.366	98.66	851.90
6.18	5.181	8.997	18.295	98.76	843.00
7.80	5.174	8.973	18.266	98.76	838.20
8.79	5.057	8.954	18.340	98.12	822.50
11.06	5.016	8.913	18.220	98.06	806.70
0.0001*	5.299	9.152	19.006	99.76	908.50

* unloaded to ambient pressure (i.e., atmospheric pressure).

제공되는 X-선의 파장은 0.619992 Å이고, 에너지는 20 keV이다. 입사하는 X-선은 직경이 50 μm 인 콜리메이터(collimator)를 이용하여 크기를 조정하여 시료방 안의 합성활석 분말시료만을 통과하도록 하였으며, 회절된 X-선은 이미지 플레이트(Image Plate, IP), Mar345를 이용하여 검출하였다.

시료방으로 이용한 개스킷은 T301 스테인리스 스틸로, 두께가 0.25 mm이며, 천공한 시료방의 직경은 230 μm 이었다. 시료방 안에 메탄올-에탄올(ME)을 부피비 4:1인 혼합 액체를 주입하여 정압 상태가 유지되도록 하였다. SDAC과 X-선 및 검출기 배열은 각분산회절법(angular dispersive X-ray diffraction technique, ADXRD)을 이용하였다. SDAC 안에 장착된 시료와 IP까지 거리는 시료의 d-값을 계산하는데 매우 중요하므로, 표준물질인 란타나이드 보론 6 (LaB₆) 분말의 회절선을 이용하여 시료방과 검출기 사이의 거리를 결정하였다. 획득한 데이터는 FIT2D S/W를 이용하여 분석하였다. 자세한 실험방법은 다른 논문에 설명되어 있다(Kim *et al.*, 2009; Hwang and Kim, 2012). 시료방 안에 넣은 직경이 약 20 μm 정도 되는 공 모양의 루비로 부터 증가하는 압력의 변화 값을 루비 형광법(ruby fluorescence method)을 이용하여 측

정하였다(Bell *et al.*, 1986; Mao *et al.*, 1986; Chijioko *et al.*, 2005).

결과 및 토의

본 시료를 합성한 다음 시행한 XRD 패턴과 격자상수는 이미 발표되어 있다(Cho and Kim, 1997; Table 1 및 Fig. 1(a)). 여기서 주어진 격자상수 값은 다음과 같다: a = 5.316 (2) Å, b = 9.190 (4) Å, c = 19.018 (7) Å, $\beta = 100.3$ (35)°, V = 914.85 (1.22) Å³. 이러한 결과를 확인하기 위해 XRD 실험을 실시하여 결과를 서로 비교하였다 (Fig. 1 및 Table 1): a = 5.294 (4) Å, b = 9.161 (3) Å, c = 18.982 (2) Å, β (deg) = 99.7 (3), V = 907.4 (3) Å³. 두 결과는 실험에 따른 오차의 한계 내에서 서로 일치함을 알 수 있다. 활석은 층상 구조인데, 이러한 층은 층을 공유하는 8면체(O) 안에는 마그네슘이 있으며, 각각의 꼭지점을 공유하는 규산의 사면체(T)는 두 층 사이에 끼어 있다. 이러한 TOT층이 반데르발스결합을 하고 있기 때문에, 활석은 광물 중에서 경도가 가장 낮은 것이다. 활석은 다형체 결정구조를 보이는데, 이러한 특성 때문에 TOT층의 배열순서에 변화가 일어나면서 단사정계나 또는 삼사정계 구조로 결정화된

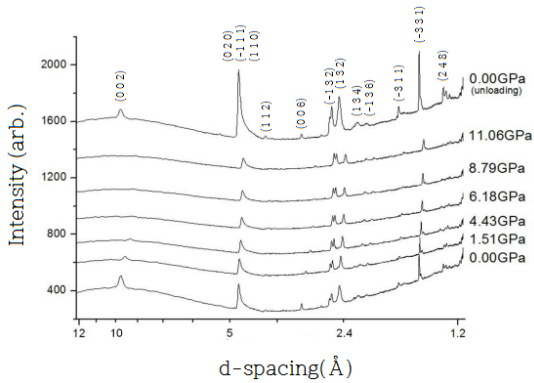


Fig. 2. A series of angular dispersive spectra of synthetic talc with increasing pressures with a spectrum at the unloaded to atmospheric pressure and room temperature.

다(Wenk and Bulakh, 2004). 따라서 본 실험에서 얻은 X-선 회절 데이터를 삼사정계로 배정 (assignment) 해보면 $a = 5.302(4) \text{ \AA}$, $b = 9.163(3) \text{ \AA}$, $c = 9.486(2) \text{ \AA}$, α (deg) = $90.3(3)$, β (deg) = $99.5(5)$, γ (deg) = $90.2(3)$, $V = 454.5(9) \text{ \AA}^3$ 이다(Table 1). 그러나 α 와 γ 의 값이 오차의 한계 내에 있기 때문에 삼사정계로 배정하는 것은 큰 의미가 없어 본 연구에서는 단사정계로 배정한 데이터를 이용하였다. 물론 온도 또는 압력을 조금만 가해주면 삼사정계는 단사정계로 변이할 가능성이 있음을 배제할 수는 없다.

고압실험에 획득한 일련의 X-선회절 피크 스펙트럼이 Fig. 2에 주어져 있으며, 압력의 증가에 따른 격자상수의 변이가 Table 2에 나타나 있다. Fig. 1에 보이는 시료 피크의 회절강도(intensity)는 DAC를 통과하면서 획득한 회절강도와 차이를 보이고 있는데, 이것은 다이아몬드에 의한 흡수가 영향을 주기 때문이다. 압력이 증가함에 따라 회절강도 변화가 큰 피크는 저면간격(basal spacing)을 나타내는 피크이다. 저면(002) 및 (006)의 강도는 압력이 4.43 GPa에서는 거의 사라지며, 또한 압축성 역시 매우 큰 것으로 나타났다. 이에 비해 다른 피크의 압축은 크지 않은 것으로 나타났다. 본 실험에서는 최고 압력인 11.06 GPa까지 압력을 증가시킬 때까지 회절패턴에서는 어떠한 변화도 발견되지 않았다. 압력을 제거하여 대기압 수준으로 낮춘 조건에서 얻은 회절패턴은 출발 때와 동일한 패턴으로 되돌아가는 것으로 관찰되었다. 압력을 받았을 때 회절강도가 매우 낮아졌던 저면 피크인(002)

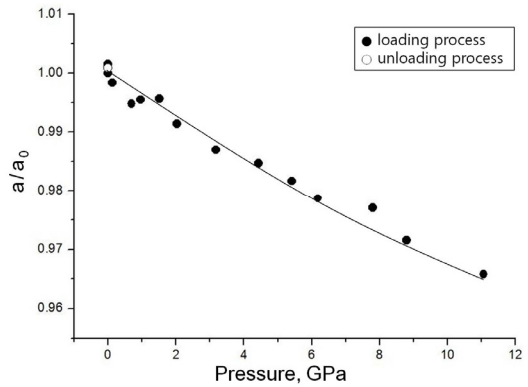


Fig. 3. Compressibility of a-axis of the synthetic talc.

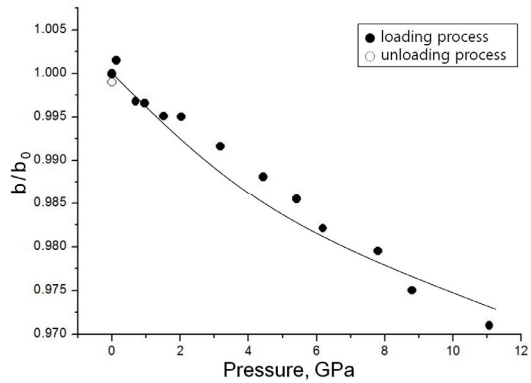


Fig. 4. Compressibility of b-axis of the synthetic talc.

및 (006)이 되돌아오는 것을 볼 수 있다.

Table 2에 기재되어 있는 a-, b-, c-축의 압력에 따른 압축성이 Fig. 3, 4 및 5에 그래프로 각각 나타나 있다. a/a_0 의 압축 패턴은 압력의 증가에 따라 대체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나, b/b_0 의 경우는 약간의 요동을 보이고 있다. 이에 더하여 c/c_0 의 변이 폭은 더욱 큰 것으로 나타났다. c-축의 경우, 회절 피크를 관찰할 수 있는 저면 피크의 수가 한정되어 있어, 이러한 경향을 보인 것으로 판단된다. 그러나 압력이 증가하면서 대체적인 경향은 3축 모두 축소하는 것을 알 수 있다. 활석의 이러한 패턴은 다른 연구에서도 나타나고 있는데, Gleason *et al.* (2008)의 경우, ADXRD 패턴에서 얻은 압축 데이터를 삼사정계로 배정(assignment) 하였을 경우 a-축의 압축은 매우 큰 요동을 보이고 있다. 이에 비해 b- 및 c-축은 그 정도가 매우 낮다. 같은 시료를 이용하여 실험을 EDXRD 방식으

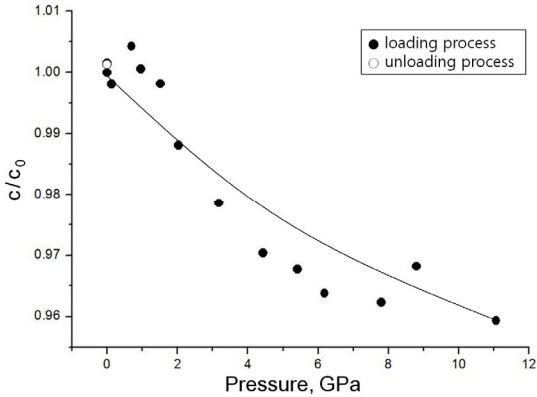


Fig. 5. Compressibility of c-axis of the synthetic talc.

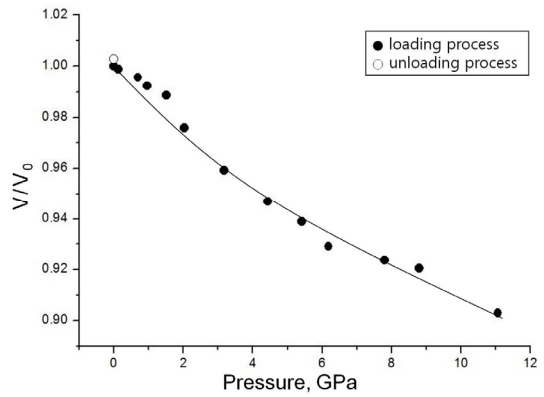


Fig. 6. Volume compressibility of the synthetic talc.

로 하여 얻은 압축 데이터를 단사정계로 재정하여 얻은 결과는 c-축을 제외한 다른 축의 압축 경향이 매우 큰 변동을 보이는 형태임을 알 수 있다. 이와 같이 압축실험의 형태를 바꾸어 가면서 획득한 데이터에서도 압축경향이 차이가 매우 크게 나타나고 있다.

활석과 같이 층상구조를 하는 규산염광물의 경우, c-축을 따라 수소결합을 하고 있으므로 이러한 구조에 압력을 가하게 되면 압축은 이러한 결합을 하고 있는 방향으로 일어나게 된다. 따라서 이 축 방향의 대체적인 압축률은 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이러한 패턴을 살펴보기 위해 이미 발표된 천연산 활석의 압축데이터와 본 실험에서 얻은 합성활석압축데이터를 이용하여 각 축의 압축성을 계산하였다. 이러한 축의 압축은 선형으로 발생한다는 가정 하에 이러한 패턴을 계산하는데 버치-머나한 상태방정식(Birch-Murnaghan equation of state)과 머나한 상태방정식(Murnaghan EoS)을 이용하였다. 버치-머나한 상태방정식은 다음과 같다. $P = 1.5K_0[X^{-7/3}-X^{-5/3}][1-\xi(X^{-2/3}-1)]$, 여기서 K_0 는 등온 체적탄성률, $X = \frac{V}{V_0}$, $\xi = \frac{3}{4}(4 - K_0')$ 이고, $K_0' = (\frac{dK}{dP})_T$ 로 K_0 의 미분값이다. 머나한 상태방정식(Murnaghan EoS)은 다음과 같다. $P = (K_0/K_0')[(V/V_0)^{K_0'} - 1]$, 여기서 $K_0' = (\frac{dK}{dP})_T$ 로 K_0 의 압력에 따른 증가 즉, 미분값이다. 압력별 각 축의 압축 데이터와 체적변이($\frac{V}{V_0}$) 데이터를 이용할 때 K_0' 을 모두 4로 가정하였다. Kim and Yi (1999)의 Table

4 데이터를 이용하여 계산한 각 축방향의 압축률과 합성시료를 이용한 본 연구의 압축률이 Table 3에 주어져 있다. 이 표에는 부피의 압축률, 즉 체적탄성률도 나타나 있다.

활석의 경우도 a-축이나 b-축 방향에 비해 c-축 방향의 압축률이 매우 낮게 나타난다. 각각의 EOS의 적용에 따라 차이는 보이고 있지만 c-축의 경우 합성활석의 경우 다른 축의 반 정도 값을 보이고 있다. 천연산 활석의 경우도 마찬가지로, c-축을 따라 발생하는 압축은 다른 축에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다(Kim and Yi, 1999, Figs 4, 5 & 6 참조).

압력별 각 축의 변이 데이터와 체적변이($\frac{V}{V_0}$) 데이터 이용하여 합성활석의 등온 체적탄성률(K_0)을 $72.4 (\pm 4.0)$ GPa로 결정하였다. Table 4에 활석과 유사한 결정구조를 갖고 있는 규산염광물의 체적탄성률을 비교하였다. 활석의 체적탄성률은 다른 유사구조광물인 금은모, 녹리석 및 백운모에 비해 높은 것으로 나타났다. 녹리석은 활석-같은 구조와 브루사이트(brucite)-같은 구조가 매우 규칙적으로 교대하고 있는 층상구조이다. 천연산 활석과 비교하여 보면, 합성활석의 체적탄성률 값이 낮게 나타나는데, 이는 천연산에 함유되어 있는 불순물이 합성시료에 비해 압력에 대한 저항도를 높이는 역할을 하는 것으로 판단된다. 대부분의 수산화광물은 층상인 결정구조를 보이고 있다. 이러한 구조에서는 수소결합으로 연결되어 있어, 압력을 받게 되면 이러한 방향으로 압축이 발생하게 되어 체적탄성률은 대체로 낮게 나타난다.

자연 상태에서 사문석으로부터 분해된 활석과

Table 3. Comparison of the linear compressibilities of the synthetic talc and natural talc using two equations of state, B-M EOS and M EOS

synthetic talc (This study)			
	EOS	K_0 , GPa	K_0'
a/a_0	M	306.3	4.0
	B-M	310.1	4.0
b/b_0	M	342.6	4.0
	B-M	346.1	4
c/c_0	M	176.6	4.0
	B-M	180.9	4.0
V/V_0	M	71.9	4.0
	B-M	72.4	4.0
natural talc (Kim and Yi, 1999)			
	EOS	K_0 , GPa	K_0'
a/a_0	M	695.3	4.0
	B-M	715.2	4.0
b/b_0	M	785.2	4.0
	B-M	804.3	4.0
c/c_0	M	122.4	4.0
	B-M	215.6	4.0
V/V_0	M	75.3	4.0
	B-M	78.6	4.0

같이 수산화기를 포함하고 있는 광물이 섭입을 할 경우를 배제할 이유가 없다(Liu, 1986). 이러한 광물의 상변이에 의해 지진의 발생을 연계하는 것은 무리가 있지만 분해된 물이 마그마 발생과 연관이 있을 가능성은 매우 높다. 섭입대의 온도-압력 조건에서 탈수작용이 일어나면 천발 및 중발지진 발생 원인으로 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 압력에 의한 압축성이나 상변이 이외에 온도가 상온을 벗어나 고온에서 압축실험이 필요한 이유가 여기 있다.

활석은 천연산인 경우에도 단성분($(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)으로부터 성분의 변이가 적게 산출된다. Si를 치환하는 Al은 최대 0.15 정도이며, Mg를 치환하는 Fe는 0.1 정도이다(Deer *et al.*, 1962). 활석이 섭입대에서 탄수반응을 하면 주변 암석에 물을 공급하게 되어 부분용융을 유발시키면서 마그마 생성에 기여하기 때문이다(Gill, 1981). 활석에 함

유되어 있는 물의 함유량은 보통 약 4.7 wt% 정도이다.

이러한 추론에 따라 이루어진 일련의 후속 고온-고압실험 결과는 다음과 같다: 상온-상압 하에서 TOT 층 사이의 거리, 즉 기저면의 d-값(basal spacing)은 약 9.4Å이다(Table 1 & Fig. 1 참조). 온도와 압력을 증가시키면 물과 함께 작용을 한 활석은 상변이를 하는데 물 분자가 TOT층 사이로 들어가게 된다. 이렇게 층 사이로 들어간 물은 기저면 d-값을 10Å으로 증가시킨다(Chijoke *et al.*, 2005; Comodi *et al.*, 2005). 또한 활석이 coesite + enstatite + water로 분해되는 것은 압력이 약 3-5 GPa 정도 및 온도가 700-800°C 정도인 것으로 연구되었다(Pawley and Wood, 1995). 그러나 상온에서는 단사정계에서 사방정계로 상변이를 배제할 수 없지만, β값을 제어하기가 어렵고 다른 XRD 패턴의 변화가 관찰되지 않기 때문에 상변이를 언급하기는 매우 어렵다. 결정구조의 변이가 현

Table 4. Zero pressure bulk modulus (K_0 in GPa) in sheet silicate minerals

Compounds	K_0	References
$KMg_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$ (Phlogopite)	58.5 ± 2	Hazen and Finger (1978)
$(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$ (Chlorite)	5.0 ± 10	Hazen and Finger (1978)
$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ (Muscovite)	61.4 ± 4	Faust and Knittle (1993)
$BaFeSi_4O_{10}$ (Gillepsite I)*	62 ± 3	Hazen and Finger (1983)
$BaFeSi_4O_{10}$ (Gillepsite II)**	66 ± 3	Hazen and Finger (1983)
$(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2)$ (natural talc)	78.6 ± 3	Kim and Yi (1999)
$(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2)$ (synthetic talc)	72.4 ± 4	This study

* low-pressure tetragonal structure

** high-pressure orthorhombic structure

저한 1차상변이보다는 축 사이의 유일한 경사각도인 β 를 직각으로 가정을 할 경우 사방정계로 상변이하는 2차상변이로 볼 수도 있다.

결 론

활석($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)은 산업계에서 용도가 매우 넓은 층상의 규산염광물이다. 외부가열 열수 합성기기를 이용하여 합성한 활석에 대해 11.06 GPa 까지 압축실험을 상온에서 시행하였다. 압력발생에 이용한 기기는 개량된 대칭 다이아몬드 앤빌기기이며, 포항방사광 가속기 연구소의 빔라인 10-C에서 20 keV인 방사광을 이용하여 각분산 X-선회절 방법을 적용하였다. 출발시료는 단사정계와 삼사정계로 배정할 수 있으나, 본 실험에서는 단사정계로 배정하여 버치-머내한 및 머내한 상태방정식을 이용하여 각 축의 압축률과 체적탄성률을 계산하였다. 압력에 따른 활석의 상변이는 배제할 수는 없으나, 특별한 1차상변이의 징후 역시 X-선 회절패턴에서 발견되지 않았다. 압력과 더불어 온도를 상승시킬 수 있는 실험의 필요성이 대두되나, 국내에서 이러한 실험이 제한되어 있어 실험의 범위를 확장시키는 데는 한계가 있다.

사 사

본 실험에 사용한 합성활석 분말시료는 고려대학교 지구환경과학과의 고 김형식 교수께서 제공한 것이다. 이에 깊은 감사를 드린다. 포항방사광가속기연구소에서 시행된 고압실험에 동참한 경성대학교 지구환경과학과 김민석, 하명근, 하승수 학생에게 고마움을 전한다. 포항방사광가속기연구소에서의 실험은 교육과학기술부(MEST)와 포항공대(POSTECH)의 지원을 받았다(2013-2nd-10C-016).

REFERENCES

- Anderson, D.L., Nogk, D.W., and Childs, J.F. (1990) Petrogenesis and timing of the talc formation in the Ruby Range, Southwestern Montana. *Economic Geology*, 85, 585-600.
- Bell, P.M., Xu, J., and Mao, H.K. (1986) Static compression of gold and copper and calibration of the ruby pressure scale to 1.8 Megabars, in *Shock Waves in Condensed matter*. Gupta, Y.M. (eds), Plenum Pub. Co., New York, 125-130.
- Brown, C.E. (1973) Talc, USGS Prof. Pap., 820, 619-626.
- Chijioke, A.D., Nellis, W.J., Soldatov, A., and Silvera, I.F. (2005) The ruby pressure standard to 150 GPa, *Journal of Applied Physics*, 98, 1149051-1149059.

- Chinnery, N.J., Pawley, A.R., and Clark, S.M. (1999) In situ observation of the formation of 10 Å phase from talc+H₂O at mantle pressure and temperature, *Science* 286, 940-942.
- Cho, D.S. and Kim, H.S. (1997) The high temperature stability limit of talc, Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂, *Journal of Petrological Society of Korea*, 6, 123-132 (in Korean with English abstract).
- Comodi, P., Fumagalli, P., Nazzareni, S., and Zanazzi, P.F. (2005) The 10 Å phase: Crystal structure from single crystal X-ray data, *American Mineralogist*, 90, 1012-1016.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J. (1962) *Rock forming minerals, v3: Sheet silicates*, Longman, London, 270p.
- Faust, J. and Knittle, E. (1993) The equation of state, amorphization and high-pressure phase diagram of muscovite, *Journal of Geophysical Research*, 99, 19785-19792.
- Fumagalli, P., Stixrude, L., Poli, S., and Snyder, D. (2001) The 10 Å phase: a high-pressure expandable sheet silicate stable during subduction of hydrated lithosphere, *Earth and Planetary Science Letter*, 186, 125-141.
- Gill, J. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*, Springer-Verlag, New York, 390p.
- Gleason, A.E., Parry, S.A., Pawley, A.R., Jeanloz, R., and Clark, S.M. (2008) Pressure-temperature studies of talc plus water using X-ray diffraction, *American Mineralogist*, 93, 1043-1050.
- Hazen R.M. and Finger L.W. (1978) The crystal structures and compressibilities of layer minerals at high pressures. II. Phlogopite and Chlorite, *American Mineralogist*. 63, 293-296.
- Hazen, R.M. and Finger, L.W. (1983) High pressure and high temperature crystallographic study of the gillepsite I-II phase transition, *American Mineralogist*, 68, 595-603.
- Hwang, G.C. and Kim, Y.H. (2012) Phase transition studies on TiO₂ anatase under high pressure, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 25, 77-84 (in Korean with English abstract).
- Hwang, G.C. and Kim, Y.H. (2013) High pressure X-ray diffraction study of LiFePO₄/C-olivine-like phase, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 26, 35-44 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.Y. and Kim, S.J. (1997) Chemistry of talc ores in relation to the mineral assemblages in the Yesan-Gongju-Cheongyang area, Korea, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 10, 60-73 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.H., Hwang, G.C., and Kim, S.O. (2009) Compression study on a synthetic goethite, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 22, 325-330 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.H. and Yi, Z. (1999) High pressure X-ray diffraction studies on a natural talc, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 12, 1-10.
- Lee, S.H. and Choi, G.J. (1994) Geochemistry and chemical equilibria of coexisting minerals in the gneisses around the Daehung Talc Deposits, Korea, *Journal of Petrological Society of Korea*, 3, 138-155 (in Korean with English abstract).
- Liu, L.G. (1986) Phase transformations in serpentine at high pressures and temperatures and implications for subducting lithosphere, *Physics of Earth and Planetary Interior*, 42, 255-262.
- Mao, H.K., Xu, J., and Bell, P.M. (1986) Calibration of the ruby pressure gauge to 800 kbar under quasi-hydrostatic conditions. *Journal of Geophysical Research*, 91, 4673-4676.
- Moine, B., Fortune, J.P., Moreau, P., and Viguiier, F. (1989) Comparative mineralogy, Geochemistry and conditions of formation of two metamorphic talc and chlorite deposits: Trimouns (Pyrenees, France) and Rabenwald (Eastern Alps Austria), *Economic Geology*, 84, 1398-1416.
- Pawley, A.R. and Wood, B.J. (1995) The high pressure stability of talc and 10 Å phase: Potential storage sites for H₂O in subduction zones, *American Mineralogist*, 80, 998-1003.
- Wenk, H. and Bulakh, A. (2004) *Minerals, Their constitution and origin*, Cambridge University Press, New York, 448p.

Received December 3, 2014, Revised December 18, 2014, Accepted December 21, 2014, Responsibility Editor: KideokD. Kwon