

## FeS<sub>2</sub>의 압축성 연구

### Compressibility of FeS<sub>2</sub>

김 영 호(Young-Ho Kim)\*, 황 길 찬(Gil Chan Hwang), 조 현 구(Hyen Goo Cho)

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

**요약** : 황철석에 대한 압축성 연구를 다이아몬드 앤빌 기기 및 방사광을 이용하고 에너지분산 X-선회절법을 적용하여 상온에서 시행하였다. 황철석의 체적탄성률은 실험조건과 실험기기에 따라 매우 큰 변이를 보이고 있는데 이는 압력전달매체의 특성에 따른 것으로 알려져 있다. FeS<sub>2</sub>#1(황철석+NaCl)과 FeS<sub>2</sub>#2(황철석+MgO)에 대해 압력전달 매체로 각각 NaCl과 유체를 이용하여 체적탄성률 138.9 GPa와 198.2 GPa를 각각 얻었다. 이러한 값은 시료방의 압력상태에 따른 예측 결과치에 대치되는 것으로 그 원인은 압력전달액체의 상변이에 따른 것으로 추정되며 이외에 고상검출기의 차이,  $E^*d$  값의 차이 등도 영향을 미친 것으로 판단된다. 모든 실험은 포항가속기연구소 1B2 빔라인에서 시행되었다.

**주요어** : 황철석, 체적탄성률, 다이아몬드 앤빌 기기, 방사광, 에너지분산법, 고상검출기

**ABSTRACT** : Compression work on a pyrite powder has been carried out using energy dispersive X-ray diffraction (EDXRD) with Mao-Bell type diamond anvil cell (DAC) and synchrotron radiation (SR) at room temperature. It has been reported the bulk moduli of pyrite show the large variations depending on the experimental conditions as well as the apparatus used. Thus, two kinds of sample in different pressure transmitting media of both NaCl and MgO powder emerged in alcoholic fluids were subjected to measure their compressibilities. Bulk moduli thus obtained are 138.9 GPa and 198.2 GPa, respectively, and this result contradicts to the anticipated values according to the hydrostaticity conditions of the sample chamber. This might be due to the alcoholic fluids phase transition mainly with the side effects from the difference of both solid state detector (SSD) used and  $E^*d$  value applied. All experiments were performed at the Beam Line 1B2 of Pohang Light Source (PLS).

**Key words** : pyrite, bulk modulus, DAC, SR, EDXRD, SSD

\*교신저자: yhkim@gsnu.ac.kr

## 서 론

황철석이 갖는 중요성은 지구상에 존재하고 있는 황의 양은 지구내부로부터 공급되어지는 황의 양에 비해 현저히 작는데, 이는 화산활동 등에 의해 분출된 황이 지표상에서 황철석의 생성에 관여하였기 때문으로 여겨지며 또한 판구조운동에 의해 황을 포함하고 있는 다양한 광물이 섭입대를 통해 지구내부로 회귀하고 있기 때문인 것으로 판단되고 있다(Decker and Decker, 1981).

지구외핵은 액체 상태로 지구성분은 철(Fe)이지만 철보다 가벼운 원소가 존재하여 화합물을 이루고 있다(Birch, 1952). 가벼운 원소 후보로는 황(S), 산소(O), 수소(H) 및 규소(Si) 등이 거론되고 있으며, 이러한 후보 중에서 가장 가능성이 높은 원소는 황으로 추천되고 있다. 이에 따라 황을 포유하고 있는 다양한 광물 중에서 황철석이 선정되어 철과 더불어 황철석에 대한 다양한 고온-고압실험이 시행되어 왔으며, 이러한 실험 결과는 핵의 성분 및 온도를 추정하는데 이용되어 왔다(Jephcoat & Olson, 1987). 지구 핵의 온도, 밀도, 성분 등을 논하기 위해서는  $\epsilon$ -Fe 및 FeS<sub>2</sub>의 상태방정식과 더불어 FeO, FeH 등에 대한 상태방정식의 정보 역시 요구되고 있다.

황철석은 등축정계에 속하며, 매우 넓은 압력 범위에서 안정성을 유지하고 있다. 고압 X-선 회절실험결과에 의하면, 40 GPa 압력 범위 내에서 어떠한 다른 결정구조로 상변이하는 것이 관찰되지 않았다(Bridgman, 1949; Drickamer *et al.*, 1966; Jephcoat 1985; Fujii *et al.*, 1986, Merkel *et al.*, 2002). 더욱이 황철석에 대한 충격과 실험에 의하면 황철석 결정구조는 최소한 320 GPa까지도 안정된 결정상을 유지하고 있는 것으로 보고되었다(Ahrens and Jeanloz, 1987). 참고로 지구 중심, 즉 심도 약 6,371 km에서 압력은 약 360 GPa인 것으로 추정된다. 그러나 다이아몬드 앤빌 기기(diamond anvil cell, DAC)를 이용하여 측정된 상당수의 상태방정식으로부터 결정된 체적탄성률(bulk modulus)은 매우 다양한 값을 보여주고 있다. 더욱이 상온에서 고압실험을 할 때, 앤빌 사이에 장착된 분말시료가 비정압 상태(nonhydrostatic conditions)에 놓여 있는 경우에는 실험결과가 매우 이상하다는 것이 보고되었다: 실험에서 압력을 전달하는 매질이 다른 경우 체적탄성률 값의 변이가 130 GPa에서 250 GPa까

지 차이가 나타나는데, 이러한 차이는 시료에 전달되는 응력(stress)에 대해 황철석의 압축성이 매우 종속적인 것을 보여주고 있다(Jephcoat, 1985). 다이아몬드 앤빌 기기를 이용하여 측정하는 값에 나타나는 변이는 각각의 실험을 시행할 때 야기되는 비등방성 응력 상태(anisotropic stress conditions)가 유도되기 때문인 것으로 판단된다. 이것이 다이아몬드 앤빌 기기와 같이 주응력 축에 과도한 응력을 가할 수 있는 기기를 이용하여 물질에 대한 고압특성을 결정할 때 야기되는 오류의 주원인이며 실험결과에 일관성이 결여되는 동기가 되는 것이다. 따라서 고압실험을 수행할 때 물질의 고압특성과 더불어 기기의 응력상태에 대한 고려가 병행되어야 하는 이유가 여기에 있다.

본 실험의 목적은 압력전달 매체를 다르게 하여 준비한 시료에 대해 체적탄성률을 각각 구한 다음, 이미 발표된 결과와 비교하여 보는데 있다.

## 실험 방법

본 실험에 이용된 시료는 경남 하동군 황천면 일대 변성암의 석영맥 속에 결정화되어 있는 황철석을 채취하여 파쇄한 후, 현미경 하에서 황철석 입자와 석영입자를 분리한 것이다. 황철석 입자를 분말로 만든 후, X-선 회절 분석을 한 결과 대부분이 황철석으로 감정되었으나 회절강도가 매우 낮은 석영(011) 회절선이 존재하고 있는 것으로 판명되었다. 황철석의 격자상수는 5.400(6) Å (c.f., PDF # 42-1340,  $a_0=5.418$  Å)로 계산되었다. 황철석 입자에 대한 EPMA 분석을 기초과학지원연구원 전북분소에서 EPMA1600을 이용하여 실시하였으며, 모두 10번을 측정하여 평균을 내었다(표 1). EPMA결과에 따르면 준비된 출발 시료는 거의 순수한 황철석이나 이를 이용하여 분말시료를 만들 때 극소량의 석영입자가 들어간 것으로 판단된다.

방사광(Synchrotron Radiation, SR)을 이용한 고압실험은 포항가속기연구소(Pohang Light Source, PLS)에서 백색광(white X-radiation)을 이용할 수 있는 1B2 빔라인(beamline)에서 시행되었다. 적용한 실험방법은 에너지 분산 X-선 회절법(Energy dispersive X-ray diffraction Method, EDXRD)이었으며, 고압기기는 마오-벨 타입 다이아몬드 앤빌기기(Mao-Bell type diamond anvil cell, DAC)이었다. 앤빌은 최고급 보석용 다이아

**Table 1.** Chemistry of pyrite (wt%)

Elements	Av. of Run 1~10
Na	0.012
Mg	0.002
Al	0.011
Si	0
S	53.092
K	0.001
Ca	0.002
Ti	0.001
Mn	0.001
Fe	46.629
Total	99.751

몬드를 연마한 것으로, 앤빌면(anvil culet)의 직경은 380  $\mu\text{m}$ 이었다. 이러한 앤빌면 사이에 놓이게 되는 개스킷(gasket)은 스프링 스틸(spring steel)을 이용하였으며 시료방으로 천공된 구멍의 직경은 150  $\mu\text{m}$ 이었다. EDXRD법 원리는 브래그 방정식(Bragg equation)과 광자에너지 관계식(photon energy equation)으로부터 유도할 수 있으며 공식은 다음과 같다:  $E_0 \cdot d_0 = E_h \cdot d_h = \text{일정}$  (*constant*), 여기서  $E$ 는 광자에너지,  $d$ 는 회절면의 거리이고,  $\theta$ 은 상온 그리고/또는 상압상태를,  $h$ 는 고온 그리고/또는 고압상태를 나타낸다. 이러한 종류의 실험방법에 대한 내용은 이미 발표한 논문에서 기술되어 있다(Hwang and Kim, 2005).

황철석 분말에 압력 지시자(pressure sensor)와 압력 전달자(pressure medium) 역할을 할 수 있는 물질을 혼합하여 두 종류의 시료를 준비하였다. 첫 번째 시료(FeS<sub>2</sub>#1)는 FeS<sub>2</sub>와 NaCl을 각각 2:1의 부피 비로 하여 준비하였다. 이 시료에 대한 압축성을 측정할 때,  $E \cdot d = 37.329$ 이었으며 시료방의 압력전달 상태는 의사정압상태(quasi-hydrostatic conditions)이었다. 즉 NaCl 분말이 액체와 같은 정도의 정압상태를 유지할 수는 없어 시료방의 압력 분포 상태가 준정압 상태임을 지시해 주고 있는 것이다. 두 번째 시료(FeS<sub>2</sub>#2)는 FeS<sub>2</sub>와 MgO를 각각 2:1의 부피 비로 혼합하여 준비하였고,  $E \cdot d = 40.980$ 이었으며 시료방을 정압상태(hydrostatic conditions)로 유지시켜주기 위해 액체용액(메탄올(methanol), 에탄올(ethanol), 물(H<sub>2</sub>O)의 부피 비가 16:3:1인 혼합 용액, MEW)을 주입하였다. 이렇게 두 종류의 시료를 준비한 이유는 첫째, 압력 매체가 압축성에 미치는 영향을

**Table 2.** Lattice parameter, volume and volume ratio at high pressures of FeS<sub>2</sub>#1

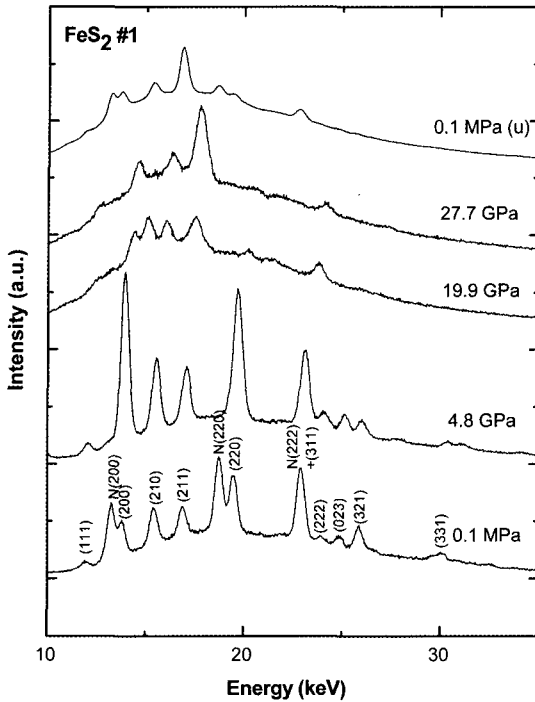
P (GPa)	a ( $\text{\AA}$ )	V ( $\text{\AA}^3$ )	V/V <sub>0</sub>
0.0	5.420 (5)	159.220	1.000
0.6	5.385 (20)	156.155	0.981
4.8	5.358 (8)	153.818	0.966
6.1	5.346 (10)	152.787	0.960
7.1	5.318 (11)	150.399	0.945
12.0	5.273 (20)	146.613	0.921
16.4	5.252 (25)	144.869	0.910
19.9	5.214 (20)	141.747	0.890
22.6	5.172 (20)	138.349	0.869
24.3	5.153 (44)	136.830	0.859
27.7	5.130 (27)	135.006	0.848

검증하고, 둘째 MgO의 회절 피크는 황철석 회절 피크와 겹치는 숫자가 NaCl에 비해 적으므로 이러한 배열이 압축성에 미치는 영향 또한 검증하기 위함이다. 셋째는 서로 다른  $E \cdot d$  배치가 미치는 영향에 대하여 또한 점검해 보는데 있다.

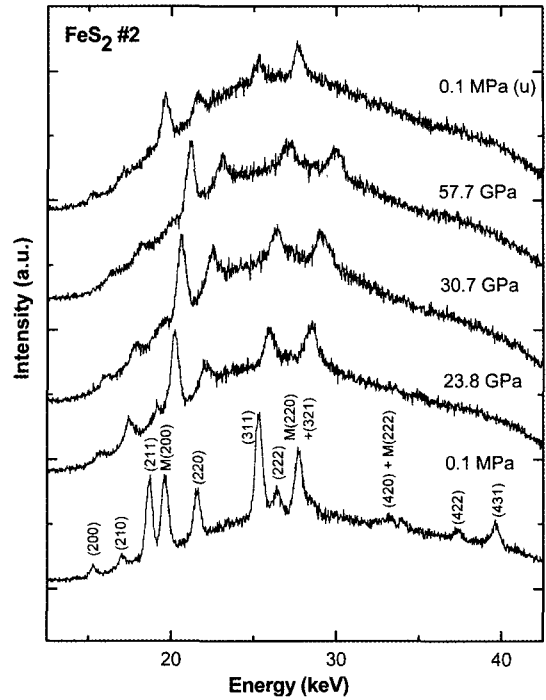
## 실험 결과 및 토의

### 실험 결과

FeS<sub>2</sub>#1의 EDXRD 스펙트럼에서 황철석 회절 피크 (111), (200), (210), (211), (220), (221), (311), (222), (023), (321), (331), (332) 및 (422)로부터 출발시료의 격자상수를 계산하였으며(즉  $a_0 = 5.420(5) \text{\AA}$ ), NaCl 회절피크 (200), (220), (222)로부터 격자상수를 계산하여 고압 값을 얻는데 이용하였다. FeS<sub>2</sub>#2의 경우는 황철석 회절 피크 (200), (210), (211), (220), (311), (222), (321)로부터  $a_0 = 5.382(15) \text{\AA}$ 를 얻었으며, MgO 회절피크 (200)와 (220)로부터 얻은 격자상수 4.189(2)  $\text{\AA}$ 을 이용하여 고압 값을 계산하였다. 두 경우 모두 고압 값은 NaCl과 MgO의 상태방정식을 이용하였는데 이 때 이용한 NaCl의 체적탄성률은 23.8 GPa (Sato-Sorensen, 1983), MgO의 체적탄성률은 156.0 GPa (Mao and Bell, 1979)를 이용하였다(Jamieson *et al.*, 1982). FeS<sub>2</sub>#1의 경우 최고압은 27.7 GPa이었으며(표 2), FeS<sub>2</sub>#2는



**Fig. 1.** A series of FeS<sub>2</sub>#1 EDXRD patterns. For these runs,  $E*d$  was set to be 37.329. N stands for NaCl. (U) at 0.1 MPa means the unloaded state to 0.1 MPa from 27.7 GPa, highest pressure of this run.



**Fig. 2.** A series of FeS<sub>2</sub>#2 EDXRD patterns at  $E*d$  of 40.980. M stands for MgO. (U) at 0.1 MPa means the unloaded state to 0.1 MPa from 57.7 GPa, highest pressure of this run.

최고압이 57.7 GPa이었다(표 3). 각각의 경우 몇 개의 스펙트럼을 선별하여 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

황철석의 체적탄성률( $K_0$ )은 다음의 버치-머네한 상태방정식(Birch-Murnaghan equation of state)을 이용하여 계산하였다:

$$P = 1.5K_0[(V_0/V)^{7/3} - (V_0/V)^{5/3}][1 - \xi\{(V_0/V)^{2/3} - 1\}]$$

여기서,  $\xi = 3/4 * (4 - K_0')$ ,  $K_0' = (dK/dP)_T$ 이며  $K_0' = 4$ 로 가정하였다.

FeS<sub>2</sub>#1의 체적탄성률은 138.9 GPa, FeS<sub>2</sub>#2는 198.2 GPa로 결정되었다. 본 실험의 압력 범위 내에서 상변이는 발견되지 않았다.

#### 기존연구결과

황철석의 체적탄성률을 초음파 간섭법으로 측정하였을 때, 단열체적탄성률( $K_S$ ) 값은 142.7~

147.9 GPa이었는데, 이러한 범위는 측정된 시료의 차이에서 기인한 것이다(Simmons and Birch, 1963). 이렇게 측정된 단열체적탄성률 값을 등온체적탄성률( $K_T$ ) 값으로 변환시키면 약 1% 오차의 범위인 141.0~146.1 GPa이다. 다음으로 측정된 단열체적탄성률은 충격파실험 데이터를 분석한 것으로  $K_S = 162$  GPa이었다(Ahrens and Jeanloz, 1987). X-선 회절법을 이용하여 측정된 최초의  $K_T$ 는 147.1 GPa와 149.3 GPa (Brigman, 1949)이었으며, 이어 148 GPa (Drickamer *et al.*, 1966), 215 GPa (Chattopadhyay and Schnering, 1985), 157 GPa (Fujii *et al.*, 1986), 그리고 시료방의 압력전달 상태를 각각 정압 및 비정압으로 구분하여 측정된 147.9 GPa와 216.0 GPa (Jephcoat *et al.*, 1983) 등이 있다. 따라서 이미 발표된 황철석의 등온체적탄성률은 141 GPa에서 216 GPa에 걸쳐 매우 큰 차이를 나타내고 있다.

이에 Merkel *et al.*, (2002)은 시료방의 압력전달 상태에 따른 황철석의 체적탄성률을 체계적으로 측정하였는데 그 결과는 다음과 같다: 정압의

**Table 3.** Lattice parameter, volume and volume ratio at high pressures of FeS<sub>2</sub>#2

P (GPa)	a (Å)	V (Å <sup>3</sup> )	V/V <sub>0</sub>
0.0	5.382(20)	155.895	1.000
6.7	5.294(21)	148.372	0.952
11.6	5.257(19)	145.283	0.932
23.8	5.223(28)	142.482	0.914
23.8	5.212(42)	141.584	0.908
27.1	5.170(11)	138.188	0.886
30.7	5.128(44)	134.848	0.865
38.7	5.117(34)	133.982	0.859
47.3	5.073(54)	130.555	0.837
51.2	5.056(31)	129.247	0.829
51.4	5.014(52)	126.053	0.809
57.7	5.000(54)	125.000	0.804

경우; 압력전달매체로 네온 가스를 이용하여  $K_T=133.5$  GPa를 얻었다. 비정압의 경우; (1) 다이아몬드의 앤빌면이 큰 것(직경: 950 μm)을 이용하였을 때,  $K_T$ 는 140.8 GPa이었으며, 작은 것(직경: 550 μm)을 이용한 경우  $K_T$ 는 255.0 GPa이었다. 앤빌면의 크기에 따른 측정치의 차이가 매우 크게 나타났는데 앤빌면이 큰 경우 앤빌을 가로지르는 압력구배(pressure gradient)를 감소시켜서 비정압도(degree of nonhydrostaticity)를 줄여 줄 수 있으나 두 값의 차이는 무려 114 GPa이다. 정압도를 고려하지 않으면 체적탄성률의 차이는 약 122 GPa로 증가하게 된다. 이러한 데이터 중에서 Jephcoat *et al.*, (1983)과 Merkel *et al.*, (2002)의 발표 값과 본 연구의 계산 값을 표 4에 비교하였다.

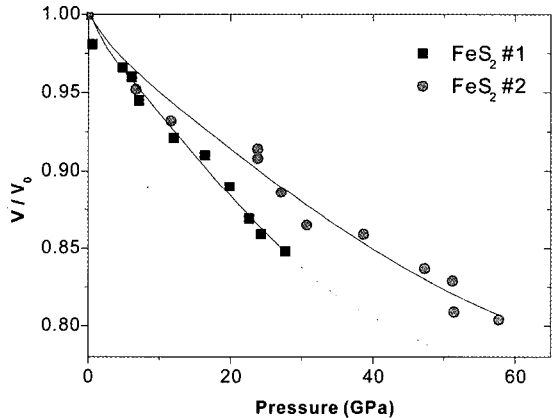
**결과에 대한 고찰**

본 연구에 이용한 다이아몬드 앤빌면의 크기는 380 μm로써 압력구배가 작을 것이라고 기대할 수는 없다. 그러나 두 번의 독립된 실험에 동일한 다이아몬드 앤빌 기기는 물론 동일한 개스킷을 사용하였으므로 기기에 따른 오차발생은 고려대상에서 제외할 수 있다. 동일한 황철석 시료를 이용하여 측정한 체적탄성률이 서로 차이를 보이는 것은 다르게 준비된 시료와 기기 배치 등의

**Table 4.** Bulk moduli of pyrite

a (Å)	K (GPa)	Remark	Reference
5.418	147.9 <sup>*1</sup>	DAC	*4
	216.0 <sup>*2</sup>		
5.417	142.8 <sup>*1</sup>	DAC	*5
	224.0 <sup>*2</sup>		
5.420	138.9 <sup>*3</sup>	DAC	*6
5.382	198.2 <sup>*2</sup>		*6

\*1. Hydrostatic conditions, \*2. Non-hydrostatic conditions, \*3. quasi-hydrostatic conditions, \*4. Jephcoat *et al.*, 1983, \*5. Merkel *et al.*, 2002, \*6. This study. DAC: Diamond Anvil Cell



**Fig. 3.** Compression of the volume of FeS<sub>2</sub>#1 and #2 at room temperature.

차이에 의하여 발생하고 있는 것으로 판단된다. FeS<sub>2</sub>#1의 경우 NaCl 분말이 의사정압상태를 유지한 반면, FeS<sub>2</sub>#2는 유체로 시료의 공극을 채워 주어 정압상태를 유지시켜 주었기 때문에 서로 압축성의 차이가 발생할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 결과는 정압상태의 압축성이 그러하지 않은 경우보다 낮아야 하는 일반적인 예측을 만족시켜 주지 못하고 있다. 즉, 정압상태의 FeS<sub>2</sub>#2의  $K_T$ 가 198.2 GPa인 것에 반하여 FeS<sub>2</sub>#1의  $K_T$ 는 138.9 GPa로써 반대의 경우를 보여주고 있다. 이러한 현상은 매우 특이한 것으로 이것에 대한 하나의 설명은 압력전달 매체로 이용한 유체 MEW가 약 20 GPa 인근에서 고체(얼음)상으로 상변이한 것이 아닌가 생각된다(Shen *et al.*, 1992). 이러한 현상은 11.6 GPa 이후 20 GPa 이상으로 가

압 할 때 너무 빠르게 한 것이 원인이 될 수 있다(그림 3). 이와 같은 상태에서는 고체로 변한 유체의 영향으로 응력이 시료방에 생성되어 비등방성 응력 상태가 우세하게 된다. 이로 인해 응력이 시료에 충분하게 전달되지 못하게 되면, 시료방의 물질이 응력에 저항하게 되어 압축이 완전하게 발생하지 못하게 된다. 이것이 주원인이 되어 표 3에서 23.8 GPa 이상의 압력에서 격자상수 값이 높아지는 것으로 추정할 수 있다.

다른 가능성은 독립적으로 시행된 두 실험에서 이용한 고체검출기(solid-state detector, SSD)의 차이점에서 기인할 수도 있다는 점이다. FeS<sub>2</sub>#1을 압축할 때 이용한 SSD는 Si(Li)-SSD이었는데 이 검출기의 특징은 대체적으로 낮은 광자에너지 쪽에서 회절하는 피크를 보다 효율적으로 검출한다. 그림 1을 보면, 에너지가 12 keV에서 30 keV 이하에서 회절 피크가 검출되고 있다. 이에 반하여 FeS<sub>2</sub>#2의 경우에는 Ge-SSD를 이용하였는데, FeS<sub>2</sub>#1보다 다소 높은 에너지 쪽으로 피크가 전이되어 나타나는 것을 알 수 있다(그림 2). 이러한 차이는 회절 피크의 분해능에 영향을 주어 데이터 분석 결과에 차이를 유도할 수 있다.

또 다른 하나의 가능성은  $E*d$ 값의 차이이다.  $E*d$ 값이 변화한다는 것은  $2\theta$  값이 변하는 것인데(Hwang and Kim, 2005, 그림 2 참조), 이 때 시료와 압력매체로부터 회절된 피크 사이의 간격이 변화하면서 위치가 겹치거나 떨어지게 된다. 피크가 겹치는 경우 광자 에너지 값으로부터  $d$ 값을 얻는데 오차가 발생하게 된다. 그러나 후자의 두 가지 원인은 황철석의 압축성에 영향을 줄 수 있는 부수적인 효과에 불과하다.

## 결 론

경남 하동군에 분포하는 편마암내의 석영맥에서 채취한 황철석에 대한 등온체적탄성률을 포함 가속기연구소에서 방사광과 다이아몬드 앤빌 기기를 이용하여 상온에서 측정하였다. 시료방의 조건을 정압상태와 의사정압상태로 각각 조성한 후 독립적인 압축실험을 시행하였다.

황철석과 NaCl을 혼합한 시료의 경우 NaCl 분말이 의사정압상태를 유지하였고, 황철석과 MgO를 혼합한 시료는 유체(MEW)로 시료의 공극을 채워주어 정압상태를 유지시킨 상태에서 압축성을 측정하였다. 측정결과는 정압상태의 체적탄성

률(즉, 198.2 GPa)이 그렇지 않은 경우의 체적탄성률(즉, 138.9 GPa)보다 높게 나타났는데 이것은 일반적인 예측에 반하는 것이다.

다이아몬드 앤빌 기기를 이용하여 압축을 하는 경우 주응력 축을 통해 과도한 응력이 시료방에 가해지게 되어 비등방성 응력 상태가 유도되고 있다. 이러한 응력에 의해 시료방에 존재하는 시료 이외에 압력전달매체로 이용된 유체에 이러한 응력이 가해지면 시료의 압축을 방해하게 되어 특이하게 높은 체적탄성률 값이 유도될 수 있다. 따라서 다이아몬드 앤빌 기기와 같이 기기를 이용하여 물질에 대한 고압특성을 결정할 때 오류를 격감시키기 위해서는 물질의 고압특성과 더불어 기기의 응력상태에 대한 고려가 병행되지 않으면 안 된다.

## 사 사

황철석에 대한 압축 실험을 포항가속기연구소(PLS)에서 시행하는데 많은 도움을 준 빔라인 1B2의 윤화식 박사, 빔라인 5A의 최재영 박사, 국방과학연구소의 김광주 박사께 감사드린다. 원고 심사에 조언을 준 지질자원연구원 장영남 박사께 사의를 표한다.

## 참 고 문 헌

- Ahrens T.J. and Jeanloz R. (1987) Pyrite: shock compression, isentropic release, and the composition of the Earth's core, *J. Geophys. Res.*, 92, 10363-10375.
- Birch F. (1952) Elasticity and constitution of the Earth's interior, *J. Geophys. Res.*, 57, 227-286.
- Bridgman P.W. (1949) Linear compression to 30000 kg/cm<sup>2</sup>, including relatively incompressible substances, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, 77, 189-234.
- Chattopadhyay T. and Schnering H.G. von. (1985) High pressure X-ray diffraction study on *p*-FeS<sub>2</sub> and *m*-MsS<sub>2</sub> to 340 kbar: a possible high spin-low spin transition in MnS<sub>2</sub>, *J. Phys. Chem. Sol.*, 46, 113-116.
- Decker R. and Decker B. (1981) *Volcanoes*, Ch. 11, Origin of the sea and air, p244, Freeman.
- Drickamer H.G., Lynch R.W., Clendenen R.L. and Perez-Albuena E.A. (1966) X-ray diffraction studies of the lattice parameters of solids under very high pressure, *Sol. State Phys.*, 19, 135-229.
- Hwang G.C. and Kim Y.H. (2005) A study of compressibility on a natural almandine using synchrotron ra-

- diation, Jour. Mineral. Soc., Korea, 18(4), 249-258.
- Jamieson J.C., Fritz J.N. and Manghnani M.H. (1982) Pressure measurement at high temperature in X-ray diffraction studies, *Advances in Earth and Planetary Sciences*, 12, 27-48.
- Jephcoat A.P., Mao H.K. and Bell P.M. (1983) Pyrite: Hydrostatic compression to 40 GPa, *AGU Transactions*, EOS, 64(45), F847.
- Jephcoat A.P. (1985) Hydrostatic compression studies on iron and pyrite to high pressures: the compression of the Earth's core and the equation of state of solid argon, PhD Thesis, John Hopkins Univ., Baltimore, Maryland.
- Jephcoat A.P. and Olson P. (1987) Is the inner core of the Earth pure iron?, *Nature*, 325(22), 332-335.
- Mao H.K. and Bell P.M. (1979) Equation of state of MgO and  $\epsilon$ -Fe under static pressure conditions, *J. Geophys. Res.*, 84, 4533-4536.
- Merkel S., Jephcoat A.P., Shu J., Mao H.K., Gillet P. and Hemley R.J. (2002) Equation of state, elasticity and shear strength of pyrite under high pressure, *Phys. Chem. Minerals*, 29, 1-9.
- Sato-Sorensen Y. (1983) Phase transition and equations of state for the sodium halides: NaF, NaCl, NaBr and NaI, *J. Geophys. Res.*, 88, 3543-3548.
- Shen A.H., Bassett W.A. and Chou I.-M. (1992) Hydrothermal studies in a diamond anvil cell: Pressure determination using the equation of state of H<sub>2</sub>O, *High-Pressure Research: Application to Earth and Planetary Sciences*, Syono Y. and Manghnani M.H.(eds), Terra Sci. Pub. Co, 61-70.
- Simmons G. and Birch F. (1963) Elastic constants of pyrite, *J. Appl. Phys.*, 34, 2736-2738.

---

2006년 9월 8일 원고접수, 2006년 9월 21일 게재승인.