

브릴루앙 산란실험을 이용한 단결정 PbMoO_4 의 탄성계수 측정

박주일 · 이석목

인하대학교 물리학과

유윤식 · 김성철

동의대학교 물리학과

(1996년 4월 8일 받음)

정방정계의 단결정인 PbMoO_4 의 탄성특성을 조사하기 위하여 브릴루앙 산란 실험을 수행하였으며 모든 탄성계수 뿐만 아니라 복굴절(birefringence) 값도 결정할 수 있었다. 그 결과, $c_{11}=111.4 \pm 4.4$, $c_{12}=64.7 \pm 3.4$, $c_{44}=27.0 \pm 0.8$, $c_{13}=51.9 \pm 2.5$, $c_{33}=95.5 \pm 1.9$, $c_{66}=34.5 \pm 4.6$ 그리고 $c_{16}=15.8 \pm 1.2$ ($\times 10^9 \text{ N/m}^2$)이었으며 $n_o - n_e = 0.151 \pm 0.018$ 이었다.

I. 서 론

Lead Molybdate (PbMoO_4) 단결정은 1969년 D.A. Pinow^[1]가 처음으로 성장하여 광탄성 효과를 발표할 이래 이 물질의 여러 물성에 관한 연구 뿐만 아니라 그 응용면에 있어서도 많은 연구가 진행되어왔다. 이 물질은 광탄성 효과가 크며^[2] 초음파 손실이 적을 뿐만 아니라 광학적으로도 안정하기 때문에 광편향기 및 광 변조 소자로서의 응용이 활발히 시도^[3]되고 있다. 최근에는 레이저 프린터 소자로도 응용되고 있다. 국내에서는 이러한 응용성에 힘입어, 본 결정의 성장에 힘써온 결과 지난해부터 성장에 성공하였다.

현재까지의 연구결과에 의하면 PbMoO_4 단결정은 실온에서 정방정계 구조로서 점군은 $4/m$ (C_{4h})이며, 공간군은 $1 4_1/a$ 이고 단위세포는 4개의 PbMoO_4 분자로 이루어져 있다고 알려져 있다^[4]. 그러나 J. Leciejewicz는 중성자산란을 통해 MoO_4^{2-} 이온의 4개 산소원자가 다소 찌그러진 사면체 형태를 이루고 있을 뿐만 아니라, Pb 원자도 c -축에 대하여 약간 어긋나 있다는 것을 발표하였다^[5].

브릴루앙 산란(Brillouin scattering)이란 빛이 매질내의

열적으로 들뜬 장파장의 음향포논에 의해 비탄성산란되는 것을 가리키며^[6], 높은 분해능의 간섭계를 이용하여 산란된 빛의 진동수변이를 측정함으로써 매질의 음향포논의 위상속도를 결정할 수 있다. 이렇게 검출되는 음향포논들은 입자들의 간격에 비해 수 천배 긴 파장을 갖고 있기 때문에 매질은 연속체로 가정할 수 있으며 음향포논은 탄성파라 불리우기도 한다. 아울러, 매질의 탄성파의 위상속도는 진동수와 무관하며 매질의 탄성계수와 질량밀도에 의하여 결정되어진다. 그러므로, 만약 매질의 탄성파의 위상속도를 측정할 수 있다면 주어진 질량밀도를 이용하여 역으로 매질의 탄성계수를 결정할 수 있게 된다. 탄성계수는 일반적으로 4계 텐서로 이루어져 있으나, 텐서의 기본적인 대칭성으로 최대 21개의 계수들이 있다. 21개의 계수들은 매질의 구조 대칭성에 따라 독립계수의 수가 감소된다. 가장 높은 대칭성을 갖는 등방성 매질에 대해서는 단 2개의 독립적인 탄성계수 c_{11} 과 c_{12} 가 있으며 본 논문에서 다루는 PbMoO_4 단결정은 7개의 독립적인 탄성계수(c_{11} , c_{12} , c_{44} , c_{13} , c_{33} , c_{66} 그리고 c_{16})가 있다^[7].

브릴루앙 산란을 이용하여 지난 1989년 S. Lee *et al.*은 삼방정계($r\bar{3}m$)의 $\text{Na}^+ \beta$ -alumina에 대하여 모든 탄성계수를 측정하였으나^[8] 아직 정방정계의 대칭구조에 대한 실험결과는 보고되지 않았다. 브릴루앙 산란 실험은 덩어리 시료의 매질에 대한 음향포논의 속도 측정 및 탄성계수의 결정 뿐만 아니라 박막이나 금속표면에 대한

*본 연구는 1995년도 교육부 기초과학육성연구비 지원과 인하대학교 연구비 및 동의대학교 학술연구비 지원에 의해 수행된 것입니다.

표면 음향포논에 대한 실험적 측정이 가능하다. 또한 자성체 박막에 대한 스핀파의 측정이 가능하기 때문에 이 들에 대한 연구논문이 계속적으로 발표되고 있다.

음향파의 위상속도는 광탄성효과를 얻기위한 기본적인 필요한 특성중에 하나이며 브릴루앙 산란 실험외에 transducer를 이용하여 실제로 음향파가 매질내에서 일정한 거리를 진행하는 시간을 측정하는 방법도 있다. 이 방법으로는 7개의 독립적인 탄성계수 모두를 구하기 위하여 특별한 결정면을 갖는 표면을 갖는 여러 개의 시료를 사전에 준비해야 하는 어려움 뿐만 아니라 transducer를 매질에 부착시키므로써 매질에 손상을 입히는 문제점도 있다. 그러나 브릴루앙 산란 실험은 간단히 빛을 이용하는 비파괴적인 방법이면서도 한 개의 시료만으로 모든 탄성계수를 구할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 브릴루앙 산란 실험을 이용하여 정방정계의 단결정 $PbMoO_4$ 의 탄성계수를 구하는 것이다.

단결정 $PbMoO_4$ 는 광학적으로 단축결정이기 때문에 두 개의 굴절률 n_o 와 n_e 를 갖고 있다. 이 두 굴절률에 의하여 시료표면 및 입사광선의 편광방향에 따라 두 개의 굴절광선이 형성^[9]되며 각각의 굴절광선이 음향포논들에 의해 산란되게 된다. 어떠한 매질이든 모든 방향에 대해서 항상 3개의 음향포논방식이 있기 때문에 두 개의 굴절광선에 대해서는 최대 6개의 음향포논에 의한 산란광선이 있을 수 있는 것이다. 따라서 본 연구논문에서는 두 굴절광선에 대한 진동수 이동을 분석함으로써 보다 정확한 탄성계수 뿐만 아니라 굴절률까지도 결정할 수 있게 되었다. 그러나 탄성계수와 굴절률이 결합되어 음향포논의 진동수를 결정짓기 때문에 두 개의 굴절률을 탄성계수와 마찬가지로 각각 독립적으로 결정할 수는 없다. 하지만 두 굴절률 간의 차이, 즉 복굴절(birefringence: $n_o - n_e$)값을 결정할 수 있었다.

II. 이론적 배경

광학적으로 선형등방균질하고 유전상수가 ϵ 인 투명한 매질에 대해서, 파수벡터가 q 이며 각진동수가 Ω 인 음향포논 혹은 탄성파는 국소적으로 매질을 변형시키며 그 변형은 국소적인 유전상수의 변형을 일으킨다. 그 변형된 유전상수 때문에 파수벡터가 k_i 이고 각진동수가 ω_i 인 빛이 입사할 때, 산란된 빛의 파수벡터 k_s 와 각진동수 ω_s 는 다음과 같다.

$$nk_s - nk_i = \pm q \tag{1}$$

$$\omega_s - \omega_i = \pm \Omega \tag{2}$$

여기서 +부호는 음향포논의 흡수(anti-Stokes 산란)를 그리고 -부호는 음향포논의 생성(Stokes 산란)을 가리키고 있다. n 은 매질의 굴절률이다. 이러한 탄성파의 각진동수는 입사파의 각진동수에 비해 무척 작기($\approx 10^{-5}$) 때문에 근사적으로 $|k_s| \approx |k_i| = k$ 으로 취할 수 있으며 식 (1)은

$$2nk \sin \frac{\theta}{2} = |q| \tag{3}$$

의 간단한 형태로 쓰여질 수 있다. 여기서 θ 는 입사파와 산란파사이의 각도로서 산란각이라고도 하며 본 실험에서 사용한 180° 후방산란인 경우에는

$$q = 2nk = \frac{4\pi n}{\lambda} \tag{4}$$

처럼 더욱 간단해지며 λ 는 입사하는 빛의 파장이다. 달리 표현하면, 식 (4)의 파수벡터를 갖는 음향포논만이 브릴루앙 산란 실험으로 측정가능하다. 음향포논의 각진동수는 높은 분해능을 갖는 간섭계를 이용하여 측정이 가능하며 이 들 두 개의 물리량으로부터 음향포논의 위상속도 v 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \frac{\Omega}{q} \tag{5}$$

단축결정인 $PbMoO_4$ 는 두 개의 굴절률, 정상굴절률 n_o 와 이상굴절률 n_e 를 갖고 있으며 빛의 입사각 및 편광방향에 따라 두 개의 빛으로 굴절되며 각각의 굴절률은 n_o 와 $n_e(\theta)$ 이다. 이 중 후자는 θ 가 굴절된 빛의 파수벡터의 방향과 매질의 광축간의 사잇각일 때 다음과 같이 주어진다.

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \tag{6}$$

여기서 한가지 주목해야 할 부분은 식 (6)의 θ 가 굴절각으로서 180° 후방산란 실험에서는 탄성파의 진행방향을 뜻하기도 하며 입사각 θ 와는 다음과 같이 Snell의 법칙이 성립한다.

$$n_e(\theta) = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_e} \tag{7}$$

또한 굴절률 n_o 도 같은 입사각에 대하여 굴절각 θ_o 과 다음과 같은 Snell의 법칙이 성립한다.

$$n_o = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_o} \tag{8}$$

압전효과가 없는 매질내의 탄성파의 속도는 질량밀도 ρ 와 탄성상수 c_{ij} 으로부터

$$v = \sqrt{\frac{c_{ij}}{\rho}} \quad (9)$$

처럼 얻을 수 있으며 주어진 진행방향에 대한 탄성파 속도는 한 개의 탄성상수로 결정되는 것이 아니라 여러 탄성계수들의 함수로 주어진다. 예를 들어, 정방정계 구조의 (001)면을 따라 진행하는 가로파(longitudinal)의 속도는

$$v_L = \sqrt{\frac{c_{11} + c_{66} + \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 + 4C}}{2\rho}} \quad (10)$$

이며 두 세로파(transverse)의 속도는 각각

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{c_{11} + c_{66} - \sqrt{(c_{11} - c_{66})^2 + 4C}}{2\rho}} \quad (11)$$

$$v_{T2} = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}} \quad (12)$$

$$C = (c_{11} \cos^2 \phi + c_{66} \sin^2 \phi + c_{16} \sin 2\phi) \times (c_{11} \sin^2 \phi + c_{66} \cos^2 \phi - c_{16} \sin 2\phi) - (c_{16} \cos 2\phi + (c_{12} + c_{66}) \sin \phi \cos \phi)^2 \quad (13)$$

으로 주어진다.^[7] 여기서 ϕ 는 a -축으로부터의 각도를 나타내며, 각도에 따라 속도, 나아가서는 진동수가 매 90°마다 주기적으로 달라짐을 나타내주고 있다. 만약 특정한 대칭축이나 대칭면을 따라 진행하는 탄성파의 속도를 측정할 수 있다면 간단히 위의 식들을 이용하여 탄성계수를 구할 수 있으나 그러기 위해서는 한 개 이상의 시료를 준비해야하는 어려움이 있다. 그런 반면 한 개의 시료로부터 모든 탄성계수를 구하기 위해서는 일반적인 결정구조에 대하여 굴절되는 빛에 의한 임의의 진행방향에 대한 탄성파의 속도를 계산할 수 있어야 한다. 이 계산은 수치적인 방법으로 가능하며 이에 대한 상세한 설명은 참고문헌 7과 10에서 찾아볼 수 있다.

III. 실험

PbMoO₄ 단결정의 성장과정 및 X-ray 회절실험 등의 구조분석결과는 다음과 같다. 결정구조의 격자간 거리는 $a = 5.435 \text{ \AA}$, 그리고 $c = 12.11 \text{ \AA}$ 이다. 격자간의 거리와 단위세포내의 입자수들로부터 구한 질량 밀도는 기대한 바와 같이 6.95 g/cm^3 이다. 본 연구에서 사용한 PbMoO₄ 단결정의 성장조건은 일반적으로 산화물 결정을 성장시

킬 경우, 결정 내부에 산소 결핍 현상이 생기는 점을 고려하여 산소의 양이 다소 많이 들어가는 조성비로 하여 원료 분말을 만들었다. 이 분말을 이용하여 Czochralski 방법으로 결정을 성장시켰으며, 성장된 결정의 질은 표면이 매끄럽고 투명도가 좋음을 육안으로 식별할 수 있었다. 결정의 c -축은 conoscope상으로 정확히 결정하였으며 다이아몬드 절단기로 시료를 준비하였다. 브릴루앙 산란 실험을 위하여 시료는 직육면체형태로 준비되었으며 윗면과 아랫면은 (001) 면과 나란하게 하였으며 4개의 측면은 (110)면이 되도록 하였다. 원래는 측면이 각각 (100)면과 (010)면이 되도록 계획하였으나 준비과정상의 실수로 (110)면이 형성되었다. 이 사실은 브릴루앙 산란 실험결과로 알게되었으며 그 후의 X-ray 회절 실험 등으로 확인되었다.

브릴루앙 산란실험은 시료를 XYZ-병진운동 및 두 개의 회전운동이 가능한 시료받침대위에 시료를 고정시키고 시료내에 Ar-레이저에서 나오는 30 mW의 514.5 nm의 단일파장의 빛을 48 mm의 초점거리를 갖는 카메라 렌즈를 이용하여 집속하여 입사시켰다. F/1.7의 구경의 동일한 카메라 렌즈를 이용하여 시료내에서 회미하게 산란된 빛을 모아 180°의 후방산란 구조를 형성하였다. 모아진 산란광선은 spatial filter를 거친 후 Sandercock 형태의 (3+3) multi-pass tandem Fabry-Perot 간섭계^[11,12]로 분석되었다. 간섭계를 통과한 빛은 수냉식 광전배관으로 검출하였다. 사용된 간섭계의 공동거리는 기초 실험을 거친 후 3.33 mm으로 정하였으며 이에 해당하는 Free Spectral Range(FSR)은 45.05 GHz이다. 입사광선은 λ -편광이나 산란광선에 대한 편광은 분석하지 않았다. 산란 실험은 실온의 공기 중에서 수행되었다.

IV. 실험결과 및 논의

그림 1은 실험에서 얻은 스펙트럼 중의 대표적인 것들로서 (a)는 시료표면이 윗면-(001)면인 경우이며 (b)는 시료의 측면-(010)면에 대한 경우이다. 각 스펙트럼은 10 내지 20분동안 신호를 누적한 결과들이다. 그림 1의 0 GHz에 있는 신호는 입사광선이 시료와 탄성산란(Rayleigh 산란)된 광선의 세기로서 그 최고치가 그림상의 축척으로는 다른 신호들에 비해 수백배에 해당된다. 45 GHz에 위치한 신호는 일명 ghost peak들로서 탄성산란된 광선이 간섭계 때문에 그 신호의 세기가 줄어든 것이며 스펙트럼의 FSR을 가리킨다. 그 외의 스펙트럼상의 신호들은 매질내의 음향포논에 의한 산란된 광선들로서 산란된 광선과 입사광선간의 진동수 차이, 즉

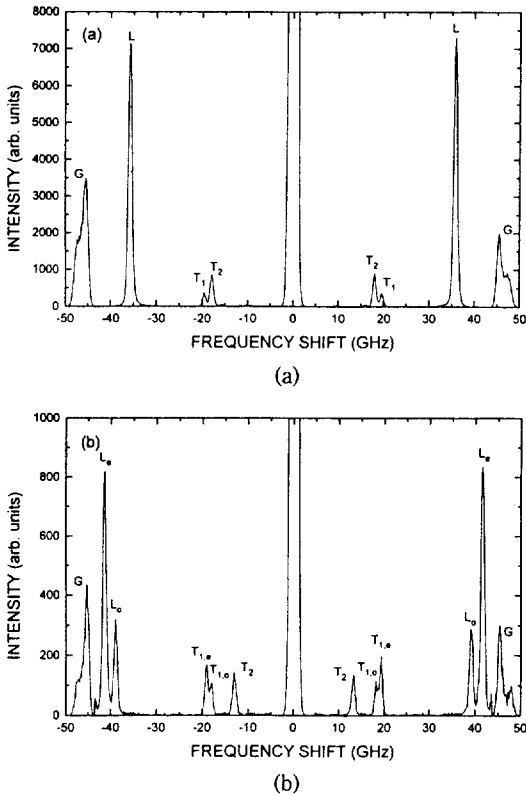


그림 1. 단결정 $PbMoO_4$ 에 대한 실온에서의 브릴루앙 산란 스펙트럼. 시료표면은 각각 (a) (001)면과 (b) (010)면이다. G: Ghost peak L: 세로파 T: 가로파를 가리키며 첨자 α (e)는 정상(이상) 굴절률에 의한 산란된 신호들임을 가리키고있다.

진동수변이(frequency shift)가 바로 음향포논의 진동수를 가리킨다. 산란광선의 세기는 음향광학의 상호작용의 크기를 나타내며 본 연구의 내용과는 직접적인 관계가 없기 때문에 이에 대한 논의는 생략되었다. 하지만 음향포논의 진동수는 음향포논의 위상속도를, 더 나아가서는 매질의 탄성특성을, 나타내기 때문에 본 논문에서 자세하게 논의되었다. 0 GHz의 양쪽은 Stokes와 anti-Stokes 산란의 결과이며 양쪽의 산란신호의 세기가 같은 것이 브릴루앙 산란실험의 특징이다. 그림 1(a)의 스펙트럼에는 세 개의 신호가 있으며 이들은 각기 1개의 세로파(약 35.8 GHz)와 2개의 가로파(약 19.6와 18.0 GHz)의 음향파동들로 판명되었다. 그림 1(b)의 스펙트럼에는 모두 5개의 음향포논에 의한 신호가 있으며 39.0와 41.5 GHz의 두 신호는 두 개의 세로파로, 19.2와 18.1 GHz의 두 신호와 13.1 GHz의 신호들은 가로파로 역시 판명되었다.

180° 후방산란에서는 입사광선의 방향이 음향파동의 진행방향과 나란하기 때문에 입사광선의 방향을 조절하여 원하는 방향의 음향포논을 검출할 수 있다. 그림 1(a)의 산란구조는 산란평면이 시료의 ca -평면으로부터 반시계방향으로 240° 만큼 회전되었으며 그림 1(b)의 산란구조는 산란평면이 시료 측면과 수직하고 c -축을 지나는 면으로부터 반시계방향으로 225° 만큼 회전되었다. 그러므로 입사각 70°에 대한 굴절각도를 알 수 있다면 음향포논의 실제진행방향을 결정할 수 있다.

다양한 진행방향과 그에 상응하는 음향포논들의 속도들을 알 수 있다면 비선형 최소자승법을 이용하여 수치적으로 탄성계수들을 얻을 수 있을 것이며 이 방법이 시료의 탄성계수를 구하기 위해 본 연구에서 채택된 방법이다. 따라서 가능한 모든 진행방향을 얻기 위하여 두 개의 회전받침대를 사용하였다. 그 중 한가지는 입사각을 변화시킬 수 있으며, 다른 하나는 산란평면을 시료표면에 수직한 축을 회전축으로하여 회전시킴으로 음향포논의 파수벡터의 시료표면에 대하여 투영된 성분의 방향이 결정축(시료의 윗면에 대해서는 a -축, 시료의 측면에 대해서는 c -축)과 이루는 사잇각을 변화를 주고 있다. 이 중 입사각의 변화는 시료의 높은 굴절률 때문에 실제로 음향포논의 진행방향에 많은 변화를 주지 못하지만, 파수벡터의 표면에서의 각도는 직접적으로 진행방향에 연관이 있다.

따라서, 본 연구에서는 입사각을 70°으로 고정시키고 산란평면을 시료표면에 수직한 축에 대해서 15°씩 변화시키면서 브릴루앙 산란 실험을 수행하였다. 시료의 대칭구조가 정방정계이기 때문에 윗면은 아랫면과 구조상 일치하며 4개의 측면은 서로 모두 일치하므로, 시료 표면으로 윗면과 한 개의 측면에 대해서 실험을 수행하였다. 그 결과 시료표면에 수직한 결정축을 회전축으로 하는 원뿔면을 따라 진행하는 음향포논들의 진동수의 회전각도에 대한 함수관계를 얻을 수 있다. 그림 2(a)는 윗면(수직축이 c -축인 경우)에 대한, 그리고 그림 2(b)는 측면(수직축이 $[110]$ 인 경우)에 대한 실험결과로서 원들이 브릴루앙 산란실험으로부터 얻은 음향진동수를 나타내고 있다. 특히 검게 색칠된 실험결과들은 그림 1의 스펙트럼에서 얻은 실험값들이다.

그림 2(a)는 각 방향마다 오직 3개의 음향포논방식을 보여주고 있지만, 그림 2(b)에서는 5개의 음향포논방식들을 보여주고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 서로 다른 갯수의 음향포논방식이 검출된 것은 시료의 복굴절 현상에 기인한다. 그림 2(a)에서는 시료표면의 수직축이 c -축(이 경우 광축과 일치)이며, p -편광된 광선이 입사하

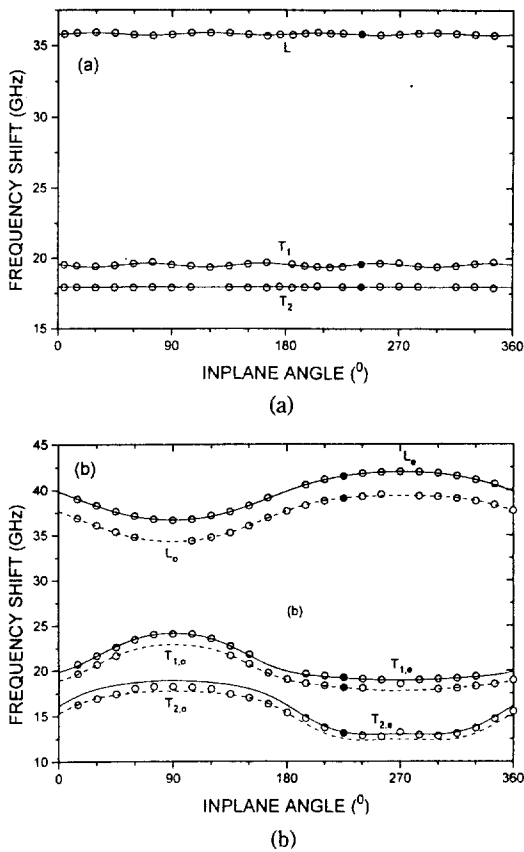


그림 2. 단결정 PbMoO₄에 대한 음향포논진동수의 분포. 시료표면은 각각 (a) (001)면과 (b) (010)면이다. 원들은 실험결과들이며 실선 및 점선은 이론치이다. 검은색 원들은 그림 1의 스펙트럼에서 구한 실험치들을 나타낸다.

기 때문에 어떠한 산란평면에 대해서도 투과광선은 언제나 이상광선 한가지밖에 존재하지 않으며 최대 3개의 음향포논방식들이 검출될 것이다. 하지만 그림 2(b)에서는 광축(c-축)이 시료의 표면과 나란하기 때문에 산란평면과 입사광선의 편광방향에 따라 정상광선과 이상광선의 2개의 투과광선이 있을 수 있으며 최대 6개의 음향포논방식이 검출될 수 있다. 특히 입사광선이 p-편광되었기 때문에 산란평면의 회전각도에 따라 투과광선에는 이상광선만이 존재하거나(그림 2(b)의 0°, 180° 그리고 360° 부근), 정상광선만이 존재하거나(그림 2(b)의 90°, 270° 부근) 또는 두가지 광선이 같이 존재(그 외의 부근)함을 실험적으로 확인되었다. 낮은 진동수의 가로파의 음향파의 경우에는 정상광선과 이상광선간의 진동수이동의 차이가 적으며 신호들의 세기 또한 작아, 실험적

표 1. 브릴루앙 산란실험으로 얻은 정방정계의 PbMoO₄의 탄성계수 및 이상굴절률. 탄성계수의 단위는 (GPa)이다.

	참고문헌 값 [7]	측정된 값
c_{11}	109.2	111.4 ± 4.4
c_{12}	68.3	64.7 ± 3.4
c_{44}	26.7	27.0 ± 0.8
c_{13}	52.8	51.9 ± 2.5
c_{33}	91.7	95.5 ± 1.9
c_{66}	33.7	34.5 ± 4.6
c_{16}	13.6	15.8 ± 1.2
n_r	2.315[1]	2.318 ± 0.018

으로 분해하기 어렵기 때문에 단지 한 개의 실험결과로 표시하였다.

매질내의 원뿔면을 따라 진행하는 탄성파의 이론적인 속도 및 진동수값들을 얻기 위하여, 참고문헌 7과 10의 수치적인 방법을 이용하여 무한한 매질내의 탄성파의 속도를 탄성계수와 질량밀도를 이용하여 수치적으로 풀 다음, 산란실험의 구조적인 변수로부터 얻은 탄성파의 파장(식 4)과 굴절률 값(식 7과 8)을 사용하였다. 7개의 탄성계수와 이상 굴절률 n_r 를 변화시켜가며 얻은 이론치와 실험값들간의 표준편차가 최소화하도록 하였다. 비선형 함수에 대한 최소자승법 및 각 매개변수들의 오차계산에 대한 상세한 설명은 참고문헌 13에서 찾아볼 수 있다. 계산 과정에는 질량밀도와 정상 굴절률 n_o (= 2.469)를 참고문헌의 값 [1]을 인용하여 고정시켰으며 최종적으로 얻은 결과가 그림 2의 선들이다. 그림 2(a)의 실선들은 이상광선들만이 산란된 값들이며, 그림 2(b)의 실선들은 이상광선을, 그리고 점선들은 정상광선을 표시하고 있다. 이론치와 비교한 모든 실험결과들이 이론치와 평균 1% 미만의 차이만을 갖고 있기 때문에 최종적인 값들은 만족할 만하다고 판단되었다. 실험에 의해 측정된 탄성계수와 굴절률을 표 1에 참고문헌의 값들과 비교하였다.

특히, 그림 2(b)의 낮은 진동수의 가로파의 음향포논의 실험결과들은 비교과정에서 사용되지 않았다. 그 이유는 실험결과 그 자체가 두 굴절률간의 차이만큼 오차를 포함하고 있으며 이 오차는 음향포논방식의 속도에서 진동수를 얻는 데 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. 그래서 그림 2(b)의 낮은 진동수의 가로파에 대한 실험 결과는 다른 음향포논방식에 비해 이론치와 적지 않은 오차를 보이고 있다. 탄성계수 c_{66} 와 c_{16} 들의 오차가 다른 계수들의 오차에 비해 큰 것도 같은 이유로 판단된다.

브릴루앙 산란 실험으로 조사한 본 시료의 탄성계수와 굴절률이 기대한 바와 같이 참고문헌의 값과 거의 일치함을 보여주고 있어 시료의 탄성특성과 광학특성 뿐만 아니라 시료의 성장과정 및 모든특성에 확신을 가질 수 있게 되었다.

비록 시료의 결정면은 conoscope 실험결과를 이용하여 준비하였으나 브릴루앙 산란 실험 결과는 시료의 표면에 대한 결정면에 대한 중요한 정보 또한 제시함을 발견하였다. 첫째로, 그림 2(a)의 실험결과는 실험오차를 감안하더라도 음향포논의 진동수가 90°의 회전주기성을 갖고 있으며 이는 시료가 정방정계일 뿐만 아니라, 시료 표면의 수직방향에 결정축 c -축과 나란하다는 것(각도는 1° 미만)을 가리키고 있다. 둘째로, 그림 2(a)의 0°는 원래 산란평면이 측면과 나란한 방향으로 정했으나 실험결과들은 측면이 (010) (또는 이와 동등한 면)과 일치하지 않음을 보여주었다. 그림 2(a)의 각도에 대한 실험 결과의 함수관계를 맞추기 위해서는 각도의 값에 45°를 더해줘야 했으며 그런 후에야 실험치와 이론치간의 실제 비교가 가능하였다. 그러므로 측면이 (110) (또는 이와 동등한 결정면)과 일치한다고 판단되었다. 이 결과는 그림 2(b)의 실험결과를 이론과 비교할 때도 사용되었다. 측면이 (010)면이라고 하면 이론치들은 실험결과와 전혀 다른 형태를 보여주었으며 오직 (110)의 결정면일 때만 비교가 가능하였다. 이 사실은 그 후 X-선 회절 실험결과로도 확인되었다.

비교과정 중에 여러 가지 다른 정상굴절률 n_o 의 값을 갖고 탄성계수 및 굴절률을 결정해 보았지만 탄성계수는 변함이 없었으나 이상굴절률 n_e 가 같이 따라서 변하는 것을 발견하였다. 그러나 복굴절값 0.151은 변함이 없었다. 이는 브릴루앙 산란실험으로 각각의 굴절률을 결정할 수 없으나 복굴절값은 결정할 수 있음을 보여주고 있다.

IV. 결 론

정방정계의 단결정인 $PbMoO_4$ 의 탄성계수를 구하기 위하여 브릴루앙 산란 실험을 수행하였으며, 그 결과 한 개의 시료에서 7개의 탄성계수 모두와 복굴절 값을 결정할 수 있었다: $c_{11}=111.4\pm 4.4$, $c_{12}=64.7\pm 3.4$, $c_{44}=27.0\pm 0.8$, $c_{13}=51.9\pm 2.5$, $c_{33}=95.5\pm 1.9$, $c_{66}=34.5\pm 4.6$ 그리고 $c_{16}=15.8\pm 1.2(\times 10^9 \text{ N/m}^2)$ 이었으며 $n_o=2.469$ 일 때

$n_e=2.318\pm 0.018$ 이었다. 이 뿐만 아니라 브릴루앙 산란 실험은 덩어리 시료의 결정면 및 결정구조의 측정이 가능함을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] D. A. Pinow, L. G. Van Uitert, A. W. Warner and W. A. Bonner, "Lead Molybdate: A Melt-Grown Crystal with a High Figure of Merit for Acousto-Optic Device Applications", *Appl. Phys. Lett.* **15**, 83 (1969).
- [2] A. M. D'yakov, V. V. Lemanov and, M. Sattikulov, *Sov. Phys. Solid State* **22**(2), 207 (1980).
- [3] 木村光宏, 일본특허청 공개특허공보, 627 (1980).
- [4] A. Canepari and Potenza, *Rend Soc. Mineral Ital.* **18**, 41 (1962).
- [5] J. Leciejewicz, *K. Krist.* **121**, 150 (1965).
- [6] J. R. Sandercock, "Trend in Brillouin scattering: Studies of opaque materials, supported films, and central mode," in *Light Scattering in Solids III*, edited by M. Cardona and G. Guntherodt, *Topics in Applied Physics* 51 (Springer-Verlag, Berlin, 1982).
- [7] A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids", Vol. I (John Wiley & Sons, New York, 1973).
- [8] S. Lee, B. Hillebrads, G. I. Stegeman, B. Dunn and L. A. Momoda, "Elastic Properties of $Na^+ \beta$ -alumina measured by Brillouin Spectroscopy," *Solid State Comm.*, **70**, 15-18 (1989).
- [9] M. Born and E. Wolf, "Principle of Optics". (Pergamon Press, Oxford, 1980).
- [10] 최상범, "Lithium Niobate 단결정과 Lithium Tantalate 단결정의 탄성파속도분포에 관한 연구", 석사학위논문, 경남대학교 (1980).
- [11] S. M. Lindsay, M. W. Anderson and J. R. Sandercock, "Construction and alignment of a high performance multipass vernier tandem Fabry-Perot interferometer," *Rev. Sci. Instrum.*, **52**, 1478 (1981).
- [12] 이석목, George I. Stegeman, "이중 페브리-페로 간섭계에 대한 분광학적 분석방법", *한국광학회지* **5**, 231 (1994).
- [13] P. R. Bevington, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences" (McGraw-Hill, New York, 1969).

**Measurement of Elastic Constants of Single Crystal PbMoO_4
by using Brillouin Scattering Experiment**

Juil Park and Sukmock Lee

Department of Physics, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

Yun Sik Yu and Sung Chul Kim

Department of Physics, Dongeui University, Busan, 614-013, Korea

(Received: April 8, 1996)

We have performed Brillouin scattering experiments to investigate the elastic properties of tetragonal symmetry single crystal PbMoO_4 , and could determine the value of birefringence as well as the whole elastic constants. As a result, $c_{11} = 111.4 \pm 4.4$, $c_{12} = 64.7 \pm 3.4$, $c_{44} = 27.0 \pm 0.8$, $c_{13} = 51.9 \pm 2.5$, $c_{33} = 95.5 \pm 1.9$, $c_{66} = 34.5 \pm 4.6$ and $c_{16} = 15.8 \pm 1.2$ ($\times 10^9$ N/m²) and $n_o - n_e = 0.151 \pm 0.018$.