맨틀상부에서 암석의 변형 및 광물의 격자선호방향(LPO) 형성과 지진파 비등방성과의 연계성

정해명*

서울대학교 지구환경과학부

Rock Deformation and Formation of LPO of Minerals in the Upper Mantle: Implications for Seismic Anisotropy

Haemyeong Jung*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

요약: 감람석은 맨틀 상부의 주요 광물이고, 탄성적으로 매우 비균질하다. 맨틀암석이 고압고온에서 변형될 때, 이러한 감람석이 배열되어 격자선호방향(LPO, Lattice Preferred Orientation)이 형성된다. 감람석의 격자선호방향은 압력, 응력, 그리고 감람석 내부의 물(OH)의 양에 따라 크게 영향을 받을 수 있다. 이 논문에서는 물, 응력, 그리고 압력이 어떻게 감람석의 격자선호방향(LPO)의 형성에 영향을 주는지에 대해 그동안 발표된 논문들을 리뷰했고, 자연 맨틀암석에서 발견된 감람석의 격자선호방향들을 요약했으며, 감람석의 격자선호방향과 맨틀상부에서 나타나는 지진파의 비등방성과의 연계성에 대해 토의하였다. 그리고 최근에 맨틀암석에서 발견된 사방휘석의 네 가지 격자선호방향들을 기술하였다.

핵심어: 맨틀, 감람석, 사방휘석, 격자선호방향, 지진파 비등방성, 암석변형

Abstract: Olivine is a dominant mineral in the upper mantle and is elastically very anisotropic. When olivine is deformed under stress at high pressure and high temperature, lattice preferred orientation (LPO) is formed. It is known that the LPO of olivine is affected by water, stress, and pressure. In this paper, I reviewed the papers dealing with the effects of water, stress, and pressure on the LPO of olivine, summarized the papers on the LPOs of olivine in natural mantle rocks, and discussed its implications for seismic anisotropy in the upper mantle. In addition, I also described four types of LPOs of orthopyroxene recently found in natural spinel lherzolite.

Key words: mantle, olivine, orthopyroxene, lattice preferred orientation, seismic anisotropy, rock deformation

서 언

지구내부의 마그마가 상승하여 중앙해령(mid-ocean ridge)에서 해양판(oceanic lithosphere)을 만들고, 새로이 만들어진 해양판은 식으면서 좌우로 이동하여 나아간다. 무거운 해양판은 움직이다가 대륙판을 만나 충돌하고, 땅속으로 섭입되어 하강하며 다시 지구

의 내부로 들어간다. 이 과정에서 지각과 상부맨틀의 일부로 형성된 판들이 움직이고, 충돌하거나 스쳐지나가면서 암석들이 변형되어진다.

암석의 변형 메커니즘은 압력, 온도, 응력(stress), 변형률(strain rate), 그리고 광물 내부의 물(OH)함량에 따라 크게 좌우된다(Blacic, 1972; Carter and Avé Lallemant, 1970; Chopra and Paterson, 1981, 1984; Jung and Karato, 2001a; Jung et al., 2006; Jung et al., 2009a; Karato and Jung, 2003; Karato et al., 1986; Mackwell et al., 1985; Mei and

*Corresponding author
Tel: 02-880-6733
E-mail: hjung@snu.ac.kr

Kohlstedt, 2000; Zhang and Karato, 1995). 이 논문에서는 주로 맨틀암석의 변형, 광물(감람석, 사방휘석)의 격자선호방향 형성, 그리고 이로 인해 초래되는 지진파 전파속도의 변화와 지진파 비등방성에 대해 기술하고자 한다.

암석의 변형, 광물의 격자선호방향 형성, 지진파 비등방성과의 관계

암석의 변형 메커니즘은 크게 두 가지로 구분될 수 있는데, 하나는 취성변형(brittle deformation)이고, 다른 하나는 연성변형(ductile deformation or plastic

deformation)이다 (Van der Pluijm and Marshak, 2004; Karato, 2008).

취성변형은 주로 온도가 비교적 낮고, 응력이 크며, 변형률(strain rate)이 큰 경우에 생기며, 취성변형으로 생기는 지질학적 구조의 대표적인 예로는 단층(fault)을 들 수 있다(Figs. 1a-c) (Green and Jung, 2005; Jung et al., 2009b; Jung and Green, 2004; Jung et al., 2004; Scholz, 2002). 이러한 단층의 발생으로 인해 지진이 일어날 수도 있으므로, 취성변형은 우리의 생명과 재산에 크게 영향을 줄 수도 있다. 지진은 지하 얕은 곳(< 50 km)에서 많이 발생하기도 하지만, 지하 깊은 곳(i.e., 670 km)에서도 지진이 많이 발생

Fig. 1. (a) Natural example of a fault produced by brittle deformation. Quartz vein in Sochong island in NW Korea was cut by a fault with an offset of 15 cm. (b, c) Back-scattered electron images showing experimental examples of a fault produced by brittle deformation of serpentinite (Jung et al., 2004). Small arrows indicate dehydration products of antigorite along the fault. (b) $P = 1.0$ GPa, $T = 720$ °C. Long white arrows indicate the sense of shear. A fault offset of about $150\ \mu\text{m}$ is shown by the white thin Ni layers. (c) $P = 3.3$ GPa, $T = 750$ °C. Antigorite and olivine are shown as black and white color, respectively. (d) Natural example of ductile deformation of gneiss. Elongated feldspar is shown as white color. (e, f) Experimental examples of elongated olivine produced by ductile deformation of olivine aggregates deformed in shear using the Griggs apparatus. Optical photomicrographs in cross-polarized light showing the formation of strong LPO of olivine. Sense of shear is left-lateral. Sample was deformed at (e) $P = 0.5$ GPa, $T = 1200$ °C with shear strain (γ) = 3.5, and (f) $P = 2.1$ GPa, $T = 1200$ °C with shear strain (γ) = 1.1 under water-saturated condition (JK 11: Jung and Karato, 2001a; Jung et al., 2006).

되고 있다. 지하 깊은 곳으로 들어가면, 압력과 온도가 상승하여 암석이 흘러가며 변형되는 성질이 강해지므로 단층이 생겨서 지진이 발생되기가 어렵다. 하지만 지하 100 km, 200 km, 300 km, 심지어 670 km 깊이에서도 단층의 발생으로 인해 지진이 일어나고 있다(Frohlich, 1989). 이것은 아직까지 미스터리로 남아있다. 중간 깊이(약 60–300 km)의 지진발생 메커니즘으로는 함수광물(예, 사문석)의 탈수약화(dehydration embrittlement) 현상으로 인해 단층이 형성될 수 있음이 고압고온 실험을 통해 제안되었고(Jung et al., 2009b; Jung and Green, 2004; Jung et al., 2004; Raleigh

and Paterson, 1965), 심부(~300–670 km)에서의 지진 발생 메커니즘으로는 감람석–스피넬의 상변이로 생기는 앤티크랙(anticrack)이 단층을 만들기 때문이라고 제안된 바 있다(Green and Burnley, 1989; Green et al., 1990). 하지만 보다 정확한 지구내부의 지진발생 메커니즘을 이해하기 위해서는 앞으로 추가적인 연구가 더 필요하다.

연성변형은 주로 온도가 높고, 응력이 작으며, 변형률이 작은 경우에 생기며, 지구 내부 깊은 곳에서의 주된 암석변형 메커니즘이라 볼 수 있다. 암석의 내부에는 여러 광물들이 존재하는데, 암석이 연성변형

Fig. 2. An example of seismic anisotropy observed in NE Japan (after Karato et al., 2008). (a) Fast shear wave polarization in Tohoku, Japan, showing trench-parallel polarization near the trench that rotates nearly trench-normal behind the volcanic arc (Nakajima & Hasegawa 2004). (b) A model to explain the seismological observations in terms of temperature and stress distribution corresponding to simple slab-induced flow in the mantle wedge (modified after Kneller et al. 2005).

됨에 따라 광물들도 늘어나며 변형이 되고(Figs. 1d-f), 이 과정에서 광물들이 한 가지 방향으로 배열되기도 한다. 이러한 현상을 광물의 격자선호방향(lattice preferred orientation: LPO) 형성이라 한다. 또한, 격자선호방향은 다른 말로 결정선호방향(crystal preferred orientation, CPO)이라고 불리기도 한다. 이러한 격자선호방향의 형성은 광물이 탄성적으로 비균질한(elastically anisotropic) 경우, 지진파의 전파속도에 큰 영향을 줄 수 있고, 지진파 비등방성의 형성(Fig. 2)에도 상당히 큰 영향을 줄 수 있다. 지구내부의 맨틀의 흐름(flow)과 지체구조는 지진파 전파속도와 지진파의 비등방성 자료를 가지고 해석될 수 있으므로, 지진파 전파속도와 지진파 비등방성의 형성에 근본적인 영향을 주는, 광물의 격자선호방향 형성에 대한 연구는 상당히 중요하다.

맨틀암석의 구성 광물들은 대부분 감람석, 휘석, 석류석인데, 그 중에서도 맨틀의 주요 구성광물은 감람석(olivine)이다. 감람석은 탄성적으로 매우 비균질(Abramson et al., 1997)하여 지진파의 전파속도에 크게 영향을 주고, 맨틀에서 나타나는 지진파의 비등방성에 큰 영향을 준다고 알려져 있다(Ben Ismail and Mainprice, 1998; Mainprice et al., 2000; Nicolas and Christensen, 1987; Silver, 1996). 2001년 이전에는 고압고온에서 암석이 변형될 때 감람석의 [100]축이 선구조(lineation)에 평행하게 배열되고, [010]축이 감람석의 엽리(foliation)에 수직하게 배열되는 한 개의 격자선호방향이 주로 형성되어 존재한다고 알려졌고(Mainprice et al., 2000), 이 격자선호방향은 2001년 고압고온 암석변형 실험을 통하여 감람석의 type-A 격자선호방향으로 불리어졌다(Jung and Karato, 2001a). 그 밖에 감람석 내부의 물의 양과 응력의 세기에 따라 type-B, -C, -D, -E의 다른 격자선호방향이 발견되었는데(Jung and Karato, 2001a; Jung et al., 2006; Katayama et al., 2004), 다음 섹션에 요약되어 있다. 이들 감람석의 새로운 격자선호방향을 발견한 지구내부의 지진파 속도변화와 지진파 비등방성, 그리고 지체구조를 해석하는데 있어 새로운 장을 여는 계기가 되었다.

감람석의 격자선호방향: 물과 응력의 영향

물과 응력이 감람석의 격자선호방향에 어떤 영향을

(a)

(b)

Fig. 3. (a) Griggs apparatus at the Tectonophysics laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University in South Korea. Deformation experiments of rocks are typically conducted using the Griggs apparatus up to the pressure of 2 GPa and temperature of 1300 °C. (b) Central part of a wet sample assembly for Griggs apparatus.

주는지 알아보기 위해, 고압고온 암석변형 실험기기인 Griggs apparatus를 사용하여 실험하였다(Fig. 3a). 실험은 압력이 0.3–2.1 GPa (21 kbars), 온도가 1460–1570 K인 조건에서 실시되었으며, 변형률(strain rate)은 $9.5 \times 10^{-4} - 5.6 \times 10^{-6}$ /s, 전단변형(shear strain)값은 $\gamma = 0.6 - 6.3$ 범위에서 행해졌다(Jung and Karato, 2001a; Jung et al., 2006; Katayama et al., 2004). 실험 샘플은 철을 10% 포함하고 있는 상부맨틀을 대표할 수 있는, 미국 애리조나 주 San Carlos산 감람석($\text{Mg}_{0.9}, \text{Fe}_{0.1}\text{SiO}_3$)들로, 우선 압력이 300 MPa, 온도가 1200 °C인 조건에서 암석화(hot press)되었다. 실험은 감람석이 건조(dry)한 경우와 습한(wet) 경우에 대해 압력매개체(pressure medium)를 다르게 하여 실시되었다(Fig. 3b). 건조한 경우는 오븐에서 920 °C

Fig. 4. A fabric diagram of olivine at $P = 0.3 - 2.1$ GPa and $T \sim 1470$ K showing the dominant fabrics as a function of water content (C_{OH}) and stress (after Jung et al., 2006). σ : differential stress, μ : shear modulus.

로 구운 soft-fired pyrophyllite를 압력매개체로 사용하였고, 습한 경우에는 talc과 brucite의 혼합물을 압력매개체로 사용하여 물(OH)이 800 °C 이상에서 감람석에 스며들어가게(diffusion되게)하였다(Fig. 3b) (Jung and Karato, 2001b; Jung et al., 2006). 건조한 경우는 감람석 내부에 물함량이 200 ppm H/Si 미만인 경우를 일컫는다.

실험 결과는 fabric diagram에 요약되어 있고(Fig. 4) (Jung et al., 2006), 각각 다른 타입의 대표적인 감람석의 격자선호방향은 Fig. 5에 나타나 있다. 감람석의 type-A 격자선호방향은 응력이 낮고 물함량이 200 ppm H/Si 미만인 조건에서 형성 되었으며, 이 격자선호방향은 감람석의 [010]축이 전단면(shear plane)에 수직하고, [100]축이 전단방향(shear direction)에 거의 평행하게 배열하는 것이 특징이다. 감람석의 type-B 격자선호방향은 응력이 비교적 높고 물함량이 200 ppm H/Si 이상인 조건에서 형성 되었으며, 이 격자선호방향은 감람석의 [010]축이 전단면에 거의 수직하고, [001]축이 전단방향에 거의 평행하게 배열하는 것이 특징이다(Jung and Karato, 2001a). 감람석의 type-C 격자선호방향은 응력이 낮고 물함량이 약 700 ppm H/Si 이상인 조건에서 형성 되었으며, 이 격자선호방향은 감람석의 [100]축이 전단면에 거의 수직하고, [001]축이 전단방향에 거의 평행하게 배열하는 것이 특징이다. 감람석의 type-D 격자선호방향은 응력이 높고 물함량이 200 ppm H/Si 미만인 조건에

Fig. 5. Typical pole figures of olivine showing type-A, -B, -C, -D, and -E (modified after Jung et al., 2006). (a) type-A (MIT23), (b) type-B (JK21), (c) type-C (JK11), (d) type-D (SVF-49: Jung et al., 2009c), and (e) type-E (GA25). Pole figures are presented in the lower hemisphere using an equal area projection. The sense of shear is presented by arrows. The north (south) poles correspond to the shear plane normal. Crystallographic orientations of $\sim 200 - 650$ grains of each sample were measured manually by the EBSD technique. A half-width of 30° was used to draw the pole figure. The color coding refers to the density of data points (contours in the pole figures correspond to the multiples of uniform distribution).

서 형성 되었으며, 이 격자선호방향은 감람석의 [100] 축이 전단방향에 거의 평행하고, [010]축과 [001]축이 둘 다 전단방향에 거의 수직한 거들(girdle) 형태로 배열하는 것이 특징이다. 마지막으로, 감람석의 type-E 격자선호방향은 응력이 낮고 물함량이 중간정도 ($200 \leq C_{OH} < 700$ ppm H/Si)인 조건에서 형성 되었으며, 이 격자선호방향은 감람석의 [001]축이 전단면에 거의 수직하고, [100]축이 전단방향에 거의 평행하게 배열하는 것이 특징이다.

감람석의 격자선호방향: 압력의 영향

압력이 감람석의 격자선호방향에 어떤 영향을 주는

지 밝혀내기 위해, Couvy et al. (2004)은 고압고온 실험기기의 일종인 멀티엔빌(multianvil)기기를 사용하였다. 이 기기는 원래 hydrostatic($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)한 상태에서 실험을 하도록 만들어졌으나, 한쪽의 방향으로 좀 더 응력이 가해지도록 고안된 실험어셈블리를 이용하여 전단변형(shear strain)값이 0.2 정도 되도록 하고, 압력은 11 GPa, 온도는 1400 °C인 조건에서 실험을 수행하였다. 저자들(Couvy et al., 2004)은 지구 내부의 고압이 type-C 격자선호방향을 만든다고 발표하였으나, 이것은 다음과 같은 몇 가지 이유로 타당하지 않다고 여겨진다. 첫째, 실험 후 적외선 분광기를 사용해서 감람석 샘플을 분석한 결과, 샘플에 몰함량이 약 1500–2500 ppm H/Si 이상 존재한 것으로 드러났다. 감람석에 물이 많은 경우 type-C 격자선호방향이 생기는 것은 이미 밝혀진 사실이다(Jung and Karato, 2001a). 둘째, 감람석 샘플에 가해진 응력의

세기가 실험하는 도중에 크게 변화(100–1500 MPa)하였다. 큰 응력은 감람석의 슬립(slip)방향(미끄러지는 방향)을 [001]축 방향으로 쉽게 만들 수 있고, 이로 인해 감람석의 격자선호방향이 바뀔 수 있음은 이미 오래 전에 밝혀진 사실이다(Carter and Avé Lallemant, 1970). 셋째, 철이 들어있지 않은 감람석(forsterite; Mg_2SiO_4)을 가지고 실험을 수행하였다. 하지만 지구 내부에 존재하는 자연산 감람석은 대부분 철(Fe)을 함유하고 있기 때문에, 실제 지구내부에서 이러한 일들이 일어나는가에 대해서는 의문이 든다. 넷째, 전단변형(shear strain, γ)값이 0.2로 실제 지구내부에 비해 상당히 작았다. 지구내부의 전단변형값은 위치에 따라 다르겠지만 일반적으로 전단변형값이 1 or 3 이상 될 것으로 여겨진다.

한편, 최근에 압력이 감람석의 격자선호방향에 주는 영향을 면밀히 알아보기 위해, 실험시료의 준비에

Fig. 6. Pole figures of olivine showing the effect of pressure on the LPO of olivine (after Jung et al., 2009a). Arrows show the shear sense, and north-south poles correspond to the shear plane normal. Contours correspond to multiples of a uniform distribution of data points. In all three specimens represented here, the water content was undetectable. (a) $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma = 3$, differential stress = 120 MPa. (b) $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma = 3$, differential stress = 150 MPa. (c) $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma = 6$, differential stress = 390 MPa. A half-width of 20° was used to draw the pole figures. MPD = maximum pole figure density. LPOs of ~200–460 grains of olivine for each sample were measured by the EBSD technique.

서부터 데이터 분석에 이르기까지 좀 더 조심스러운 연구가 진행되었다(Jung et al., 2009a). 실험시료는 자연산으로, 맨틀상부의 감람석의 성분을 대표하는 미국 애리조나 주 San Carlos 감람석(Fo_{90})을 사용하였다. 실험은 개조된 Griggs apparatus를 사용해 이루어졌으며, 변형률(strain rate)은 $2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-5}/\text{s}$, 전단변형(shear strain)값은 $\gamma = 3 - 6$ 범위 내로 하고, 압력은 2.5 - 3.6 GPa 범위 내, 온도는 1300 °C를 유지한 상태인 건조한(dry) 환경 하에서 고압고온 암석 변형 실험이 수행되었다. 감람석의 격자선호방향은 서울대 지구환경과학부 내에 설치된 전자현미경에 부착된 HKL EBSD (electron backscattered diffraction) 기기를 사용하여 정밀하게 분석되었다. EBSD 테크닉을 사용하여 광물의 방향 측정시 불확실성은 1° 미만이다. 감람석 내부의 물(OH)의 함량은 서울대 지구환경과학부 지체구조물리학 연구실에 설치된 Nicolet 6700 FTIR and continuum IR microscope를 사용하여 정밀하게 분석되었다. 이 실험 결과, 압력이 감람석의 격자선호방향 형성에 크게 영향을 준다는 것을 발견하였다(Fig. 6) (Jung et al., 2009a). Fig. 6에서 볼 수 있듯이 상대적으로 저압(2.5 GPa = 2만5천 기압; 지하 약 70 km에서의 압력)에서는 감람석의 [100]축이 전단방향에 아평행(subparallel)하지만, 고압(3.1 GPa = 3만1천 기압; 지하 약 90 km에서의 압력)에서는 감람석의 [001]축이 전단방향에 아평행하게 배열하는 격자선호방향을 볼 수 있다. 즉, 고압에서 감람석의 슬립면(slip plane, 미끄러지는 면)은 (010) 면으로 바뀌지 않았으나, 압력이 3.1 GPa 이상 됨으로써 감람석의 슬립방향(slip direction, 미끄러지는 방향)이 전단방향에 아평행하게 [100]에서 [001]축으로 바뀌며 type-B 격자선호방향을 형성한 것이다. 이 실험 후 감람석 내부의 물(OH)함량은 90 ppm H/Si 이하로, 이전 실험들(Jung et al., 2006)에 비해 건조한 환경에서 감람석 샘플들이 변형되었음을 알 수 있다. 이에 대한 후속연구로 2011년 멀티엔빌의 일종인 D-Dia (Deformation-dia) 기기를 사용하여 압력이 5 GPa 이상인 고압에서도 감람석의 type-B 격자선호방향이 만들어질 수 있음을 보여주었다(Ohuchi et al., 2011). 감람석의 격자선호방향이 3 GPa 이상에서 변하는 이유는 압력이 커지면 [001]축 방향으로의 슬립이 [100]축 방향보다 더 쉬워지기 때문으로 생각되는데, 근본적인 이유를 알기위해 추가적인 연구가 더 필요하다.

자연암석에서 발견된 감람석의 격자선호방향

2001년 이전에 발표된 논문들(Ben Ismail and Mainprice, 1998; Nicolas and Christensen, 1987)에 따르면, 맨틀 암석에서 발견되는 감람석의 격자선호방향은 주로 type-A 격자선호방향으로 보고 되었다. 2001년까지도 주로 type-A 격자선호방향이 많이 보고되었고, Jung and Karato (2001a)의 논문이 발표된 이후로 감람석의 type-B, -C, -D, and -E의 격자선호방향이 세계의 여러 곳에서 발견되어 보고되기 시작했다. 먼저, 감람석의 type-B 격자선호방향은 일본의 Sanbagawa 고압저온 변성암 지대의 Higashi-akaishiyama에서 발견되었고(Mizukami et al., 2004), 스위스의 Cima de Gagnone 지역과(Skemer et al., 2006), 일본의 Mariana trench 근처에서 채취된 암석(Michibayashi et al., 2007), 그리고 일본의 남서부 Sanbagawa 변성암대에서도 발견되었다(Tasaka et al., 2008). 또한, 최근에 이태리의 북부 Val Malenco 맨틀 암석에서도 type-B 격자선호방향이 발견되었다(Jung, 2009). 감람석의 type-C 격자선호방향은 스위스의 Alpe Arami 감람암(peridotite) (Buiskool Toxopeus, 1976, 1977; Frese et al., 2003; Mckel, 1969), 노르웨이의 서부 Otrøy island 석류석 감람암(Katayama et al., 2005), 중국의 동부 Sulu 지역의 Zhimaifang 석류석 감람암(Xu et al., 2006), 미국의 애리조나 주 Rio Grande rift 지역의 Adams Digging's의 스피넬 감람암 등에서 발견되었으며(Park et al., 2012), 최근에 중국의 북서부 North Qaidam지역의 석류석 감람암에서도 발견되었다(Jung et al., 2012). 감람석의 type-E 격자선호방향은 미국의 알래스카 주 Talkeetna 지역에서 발견되었고(Mehl et al., 2003), 일본의 Horoman 감람암과(Sawaguchi, 2004) 이태리 북부 Val Malenco 감람암 등에서 발견되었으며(Jung, 2009), 최근에 Oman의 Hilti massif 맨틀 전단대에서도 발견되었다(Linckens et al., 2011). 마지막으로, 감람석의 type-D 격자선호방향은 북극의 스발바드 Spitsbergen지역 스피넬 감람암에서 발견되었다(Jung et al., 2009c). 최근에는 사문석화된 감람석에서 새로운 type-EB 격자선호방향이 관찰되었는데, 이 격자선호방향은 감람석의 [001]축이 엽리에 거의 수직하게 배열되고, [010]축이 선구조에 아평행하게 배열하는 격자선호방향으로 정의되었다(Jung, 2011). 아직까지

type-EB 격자선호방향의 형성 메커니즘은 알려지지 않았으며, 이에 대한 후속 연구가 필요하다.

사방휘석의 격자선호방향

사방휘석(orthopyroxene: opx)은 상부맨틀에서 두 번째로 많은 광물로, 감람석과 함께 대부분의 상부맨틀을 구성하고 있는 중요한 광물이다(Ringwood, 1970). 따라서 상부맨틀의 지진과 비등방성을 더 잘 이해하기 위해서는 감람석뿐만 아니라 사방휘석의 격자선호방향 역시 이해할 필요가 있다. 하지만, 아직까지 고압고온 실험을 통하여 휘석의 격자선호방향의 형성에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 1980년대 초의 논문(Christensen and Lundquist, 1982)에 따르면, 여러 자연암석 내부에서 관찰되어 온 사방휘석의 격자선호방향은 다음과 같다. 즉, 사방휘석의 [100]축이 엽리에 수직하게 배열하고, [001]축이

선구조에 평행하게 배열하는 격자선호방향으로, 이는 사방휘석의 변형을 일으키는 주요한 슬립시스템이 (100)[001]로 여겨진다. 이러한 사방휘석의 격자선호방향은 최근에 type-AC 격자선호방향(Fig. 7)으로 정의되었는데(Jung et al., 2010), 이는 사방휘석에서 가장 흔히 발견되는 격자선호방향으로 알려져 왔다(Hidas et al., 2007; Ishii and Sawaguchi, 2002; Jung et al., 2010; Skemer et al., 2006; Skemer et al., 2010; Soustelle et al., 2009; Tommasi et al., 2008; Xu et al., 2006). 하지만 최근에 북극 스발바드 Spitsbergen에서 산출하는 맨틀 지놀리스(mantle xenolith, 맨틀포획암)의 연구에서, 그와 다른 세 가지의 사방휘석의 격자선호방향이 존재한다는 것이 발견되었다(Jung et al., 2010). Fig. 7은 위에 기술한 사방휘석의 type-AC 격자선호방향과 더불어, 새로이 정

Fig. 7. Representative pole figures of orthopyroxene (opx: enstatite). Four types of LPOs of opx are shown after Jung et al. (2010). Pole figures of the crystallographic orientation of enstatite are presented in the upper hemisphere using an equal area projection. The color coding refers to the density of data points (the numbers in the legend correspond to the multiples of uniform distribution). Type-AB: sample SVF-04, N = 172. Type-AC: sample SVF-49, N = 176. Type-BC: sample SVF-30, N = 138. Type-ABC: sample SVF-71, N = 168. A half scatter width of 30° was used. S: foliation, L: lineation.

Fig. 8. Seismic anisotropy of orthopyroxene for different types of LPOs of opx in Fig. 7 (after Jung et al., 2010). The east-west direction corresponds to the lineation (L), and the north-south corresponds to the foliation normal. Azimuthal anisotropy of P-waves (Vp) and polarization anisotropy of S-waves are shown (AVs is a contour plot of the magnitude of shear wave polarization anisotropy and Vs1 is a plot of the polarization direction of fast S-waves along different orientations of propagation).

의된 사방휘석의 type-AB, -BC, and -ABC 격자선호방향을 보여준다(Jung et al., 2010). 먼저 사방휘석의 type-AB 격자선호방향은 사방휘석의 [100]축이 엽리에 거의 수직하게 배열하고, [010]축이 선구조에 거의 평행하게 배열하는 격자선호방향으로 정의되었다. 사방휘석의 type-BC 격자선호방향은 사방휘석의 [010]축이 엽리에 거의 수직하게 배열하고, [001]축이 선구조에 거의 평행하게 배열하는 격자선호방향으로 정의되었다. 마지막으로 사방휘석의 type-ABC 격자선호방향은 사방휘석의 [100]축과 [010]축 둘 다 엽리에 거의 수직하게 배열하고 선구조에 수직한 거들의 형태를 지니며, [001]축이 선구조에 거의 평행하게 배열하는 격자선호방향으로 정의되었다. 네 가지 타입의 사방휘석의 격자선호방향으로 형성된 지진파 속도와 지진파 비등방성은 Fig. 8에 나타나 있다. 여기서 각각 다른 사방휘석의 격자선호방향들은 각각 다른 지진파 비등방성을 초래함을 알 수 있다.

지구물리학적 연계성 (geophysical implications)

감람석의 각각 다른 격자선호방향(Fig. 5)에 따른 지진파 전파속도와 지진파 비등방성은 Fig. 9에 표시되어 있다. 상부맨틀에서 나타나는 지진파의 비등방성을 해석하기 위해, 2001년까지는 주로 감람석의 type-A 격자선호방향에 의존하여 왔었다(Mainprice et al., 2000; Nicolas and Christensen, 1987; Savage, 1999; Silver, 1996; Smith et al., 2001). 하지만, 판의 충돌대(collision zones)와 하와이와 같은 열점(hot spot)지역에서 나타나는 지진파 비등방성을, 감람석의 type-A 격자선호방향으로 설명하는 데는 어려움이 많이 있었다(Jung and Karato, 2001a; Park and Levin, 2002). Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 고압고온 실험연구를 통해 발견된, 물의 양과 응력의 세기에 따라 나타난 감람석의 type-B, -C, -D, -E 격자선호방향들은 type-A 격자선호방향과는 다른 독특한 지진파 전파특성(i.e., 지진파 비등방성)을 보여준다. 암석학적 연구에 의하면, 지구내부의 중앙해령 현무암(mid-ocean ridge basalt: MORB)의 근원지(i.e., oceanic asthenosphere)에서 물함량은 약 500–1000 ppm H/Si으로 알려져 있다(Hirth and Kohlstedt, 1996). 그리고 열점 기원의 현무암은 이보다 훨씬 더 많은 물을 포함하고 있는 것으로 알려져 있다(Jamtveit et al., 2001;

Fig. 9. Seismic anisotropy of olivine for different types of LPOs of olivine in Fig. 5 (modified after Jung et al., 2006). Seismic anisotropy is shown on a stereographic projection in which the center of a plot is the direction normal to the shear plane, and the E-W direction corresponds to the shear direction. P-wave anisotropy, the amplitude of shear wave splitting (dVs) and the direction of polarization of the faster shear wave (Vs1) are shown.

Wallace, 1998). 따라서, 하와이와 같은 열점 밑에서 나타나는 이례적인 지진파의 비등방성(Gaherty, 2001; Montagner and Guillot, 2000)은 아마도 물에 의한 감람석의 격자선호방향 변화(i.e., type-C LPO)로 설명될 수 있다.

또한, 전 세계 섭입대(subduction zone)의 맨틀웨지(mantle wedge)에서 독특한 지진파의 비등방성(예, 횡파의 분열현상: shear wave splitting)이 흔히 관찰된다(Long and Silver, 2008; Park and Levin, 2002; Savage, 1999). 즉, 빠른 횡파의 편광방향(polarization

direction)이 해구(trench)와 평행하게 나타나는데(i.e., Fig. 2), 이것은 대부분 섭입대의 Forearc에서 나타나는 현상이다(Ando et al., 1983; Fouch and Fischer, 1996; Long and Becker, 2010; Long and van der Hilst, 2005; Margheriti et al., 1996; Nakajima and Hasegawa, 2004; Smith et al., 2001). 이러한 현상을 해구의 후퇴(trench rollback)로 인한, 해구와 평행한 맨틀의 흐름(flow)에 의한 것으로 가정하여 설명하려 했으나(Long and Silver, 2008; Russo and Silver, 1994), 이는 너무 복잡하다. 하지만 슬랩(slab, 판) 상부의 맨틀웨이에서 형성되는 감람석의 type-B 격자선호방향으로 섭입대의 황파 분열현상이 대부분 쉽게 설명될 수 있다(Jung and Karato, 2001a; Jung et al., 2006). 왜냐하면, 슬랩이 하강하면서 함수광물들(i.e., 사문석)이 상전이 되고, 이 때 탈수된 물이 슬랩 상부의 감람석을 적시어, 물을 많이 포함한 감람석(hydrous olivine)이 맨틀웨이에서 변형될 가능성이 높기 때문이다. 또한, 수치 모델링 연구를 통해 감람석의 type-B 격자선호방향이 황파 분열현상을 초래할 수 있고, 해구와 평행한 황파의 비등방성을 설명할 수 있음이 보고된 바 있다(Fig. 2b) (Kneller et al., 2005; Kneller et al., 2007). 최근에 세계 여러 곳의 충돌대에서 맨틀암석 내부의 감람석이 type-B 격자선호방향을 형성하고 있음이 많이 관찰되고 있다(Jung, 2009; Skemer et al., 2006; Tasaka et al., 2008). 이 결과들은 섭입대의 맨틀웨이 부분에서 관찰되는 황파분열 현상이 물에 의한 감람석의 type-B 격자선호방향에 기인될 수 있음을 크게 지지해 주고 있다.

한편 해구에서 멀어질 경우, 빠른 황파의 편광방향이 해구와 평행한 방향에서 해구와 수직한 방향으로 바뀌는 현상도 관찰되었다(Fig. 2a) (Long and van der Hilst, 2005; Nakajima and Hasegawa, 2004; Smith et al., 2001). 이러한 현상을 설명할 수 있는 가설 중 하나는, 해구와 가까운 곳에서는 감람석이 type-B 격자선호방향을 형성하고 있으나, 해구와 멀어지면서 감람석의 격자선호방향이 type-A (or -E) 격자선호방향으로 바뀌는 경우이다(Jung et al., 2006). 또한, 지진학자들에 의해 지하 100 km 이상의 슬랩 하부에서도 해구와 평행한 빠른 황파의 편광방향이 세계 여러 섭입대에서 관찰되었다(Long and Becker, 2010; Russo and Silver, 1994). 이 현상은 슬랩 하부가 상대적으로 건조하기 때문에(Karato et al., 2008), 지하 100 km 이상 깊은 곳에서는 압력의 영향

에 의한 감람석의 type-B 격자선호방향이 형성됨으로써 쉽게 설명될 수 있다(Jung et al., 2009a). 최근에는 지하 120 km 밑에서 올라온 남아프리카 Finsch 지역 킴벌라이트 맨틀암석에서 건조한(dry) 감람석이 type-B 격자선호방향을 형성하고 있음이 발견되었다(Lee and Jung, 2011). 이 결과는 압력으로 인해 감람석의 type-B 격자선호방향이 생길 수 있음을 보여주는 최초의 예라 할 수 있고, 위에 기술한 내용들(고압에 의해 감람석의 type-B 격자선호방향이 생길 수 있음)을 강하게 지지해 주고 있다. 앞으로 지구내부의 심부기원 맨틀암석의 격자선호방향에 대한 연구가 더 필요하다.

결론

고압고온에서 감람석의 변형실험을 통해, 물과 응력의 세기에 따라 감람석이 다른 격자선호방향들(type-B, -C, -D and -E)을 가짐이 발견되었다(Jung and Karato, 2001a). 실험을 통해 새로이 발견된 감람석의 격자선호방향들은 근래에 세계 여러지역의 맨틀암석에서 많이 발견되고 있다. 맨틀상부 섭입대에서 섭입하는 슬랩 윗부분(맨틀웨이)에서 관찰되는 이례적인 지진파의 비등방성들은 물에 의한 감람석의 격자선호방향 형성에 의해 쉽게 설명될 수 있다. 또한, 최근에 고압고온 실험연구 결과로부터, 건조한 상태에서 압력에 의해 감람석의 격자선호방향이 type-A에서 type-B로 바뀌는 현상이 발견되었다(Jung et al., 2009a). 섭입하는 슬랩 하부의 심부(지하 약 100 km 이상)에서 발생하는 지진파의 비등방성은 압력에 의한 감람석의 type-B 격자선호방향으로 설명될 수 있다. 앞으로 맨틀상부의 지진파의 전파속도와 지진파 비등방성을 더 잘 이해하기 위해, 맨틀상부를 구성하고 있는 이차적인 광물들(opx, cpx, garnet)이 고압고온 하에서 어떻게 변형되고, 어떤 격자선호방향을 형성하여, 지진파의 전파속도에 궁극적으로 어떤 영향을 주는지 밝혀낼 필요가 있다. 여러가지 지구내부의 환경에서 체계적인 고압고온 암석변형 실험연구가 필요하고, 이와 병행해서 실제 지구내부에서 변형된 자연암석들의 연구가 추가적으로 필요하다. 나아가, 아직은 거의 전무하나, 지각을 구성하고 있는 암석들의 변형과 구성광물들의 격자선호방향을 형성, 그리고 지진파 전파속도 및 지진파 비등방성에 주는 영향에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 중 중견과학자 지원사업(No. 3345-20100013)의 지원을 받아 수행된 연구결과 중의 하나입니다. 이 논문을 심사하여 좋은 제안을 해주신 익명의 심사위원에게 감사드립니다. 또한, 실험실에서 함께 연구를 해온 학생들과 이 논문의 편집을 도와준 박용에게 감사를 표합니다.

참고문헌

- Abramson, E.H., Brown, J.M., Slutsky, L.J., and Zaug, J., 1997. The elastic constants of San Carlos olivine to 17 GPa. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 102, 12253-12263.
- Ando, M., Ishikawa, Y., and Yamazaki, F., 1983. Shear wave polarization anisotropy in the upper mantle beneath Honshu, Japan. *J. Geophys. Res.*, 88, 5850-5864.
- Ben Ismail, W., and Mainprice, D., 1998. An olivine fabric database: an overview of upper mantle fabrics and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, 296, 145-157.
- Blacic, J.D., 1972. Effects of water in the experimental deformation of olivine, in: Heard, H.C., Borg, I.Y., Carter, N.L., Raleigh, C.B. (Eds.), *Flow and Fracture of Rocks*. American Geophysical Union, Washington DC, 109-115.
- Buiskool Toxopeus, J.M.A., 1976. Petrofabrics, microtextures and dislocation substructures of olivine in a peridotite mylonite (Alpe Arami, Switzerland). *Leidse Geol. Meded.*, 51, 1-36.
- Buiskool Toxopeus, J.M.A., 1977. Fabric development of olivine in a peridotite mylonite. *Tectonophysics*, 39, 55-71.
- Carter, N.L. and Avé Lallemant, H.G., 1970. High temperature flow of dunite and peridotite. *Bulletin of the Geological Society of America*, 81, 2181-2202.
- Chopra, P.N. and Paterson, M.S., 1981. The experimental deformation of dunite. *Tectonophysics*, 78, 453-473.
- Chopra, P.N. and Paterson, M.S., 1984. The role of water in the deformation of dunite. *Journal of Geophysical Research*, 89, 7861-7876.
- Christensen, N.I. and Lundquist, S.M., 1982. Pyroxene orientation within the upper mantle. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 279-288.
- Couvy, H., Frost, D.J., Heidelbach, F., Nyilas, K., Ungar, T., Mackwell, S., and Cordier, P., 2004. Shear deformation experiments of forsterite at 11GPa-1400 degrees C in the multianvil apparatus. *European Journal of Mineralogy*, 16, 877-889.
- Fouch, M.J., and Fischer, K.M., 1996. Mantle anisotropy beneath northwest Pacific subduction zones. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 101, 15987-16002.
- Frese, K., Trommsdorff, V., and Kunze, K., 2003. Olivine [100] normal to foliation: lattice preferred orientation in prograde garnet peridotite formed at high H₂O activity, Cima di Gagnone (Central Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 145, 75-86.
- Frohlich, C., 1989. The nature of deep-focus earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 17, 227-254.
- Gaherty, J.B., 2001. Seismic evidence for hotspot-induced buoyant flow beneath the Peckyanes ridge. *Science*, 293, 1645-1647.
- Green, H.W. and Burnley, P.C., 1989. A new self-organizing mechanism for deep-focus earthquakes. *Nature*, 341, 733-737.
- Green, H.W. and Jung, H., 2005. Fluids, faulting, and flow. *Elements*, 1, 31-37.
- Green, H.W., Young, T.E., Walker, D., and Scholz, C.H., 1990. Anticrack-associated faulting at very high-pressure in natural olivine. *Nature*, 348, 720-722.
- Hidas, K., Falus, G., Szabo, C., Szabo, P.J., Kovacs, I., and Foldes, T., 2007. Geodynamic implications of flattened tabular equigranular textured peridotites from the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field (Western Hungary). *Journal of Geodynamics*, 43, 484-503.
- Hirth, G., and Kohlstedt, D.L., 1996. Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 144, 93-108.
- Ishii, K., and Sawaguchi, T., 2002. Lattice- and shape-preferred orientation of orthopyroxene porphyroclasts in peridotites: an application of two-dimensional numerical modeling. *Journal of Structural Geology*, 24, 517-530.
- Jamtveit, B., Brooker, R., Brooks, K., Larsen, L.M., and Pedersen, T., 2001. The water content of olivines from the North Atlantic Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 186, 401-415.
- Jung, H., 2009. Deformation fabrics of olivine in Val Malenco peridotite found in Italy and implications for the seismic anisotropy in the upper mantle. *Lithos*, 109, 341-349.
- Jung, H., 2011. Seismic anisotropy produced by serpentine in mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 307, 535-543.
- Jung, H., Fei, Y.W., Silver, P.G., and Green, H.W., 2009b. Frictional sliding in serpentine at very high pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 277, 273-279.
- Jung, H. and Green, H.W., 2004. Experimental faulting of serpentinite during dehydration: Implications for earthquakes, seismic low-velocity zones, and anomalous hypocenter distributions in subduction zones. *International Geology Review*, 46, 1089-1102.
- Jung, H., Green, H.W., and Dobrzynetskaia, L.F., 2004.

- Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change. *Nature*, 428, 545-549.
- Jung, H. and Karato, S., 2001a. Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, 293, 1460-1463.
- Jung, H. and Karato, S.I., 2001b. Effects of water on dynamically recrystallized grain-size of olivine. *Journal of Structural Geology*, 23, 1337-1344.
- Jung, H., Katayama, I., Jiang, Z., Hiraga, T., and Karato, S., 2006. Effect of water and stress on the lattice-preferred orientation of olivine. *Tectonophysics*, 421, 1-22.
- Jung, H., Lee, J., Ko, B., Jung, S., Park, M., Cao, Y., and Song, S.G., 2012. Analysis of C-type olivine fabrics obtained from North Qaidam UHP belt in NW China and its implications for recycling water into deep mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, submitted.
- Jung, H., Mo, W., and Choi, S.H., 2009c. Deformation microstructures of olivine in peridotite from Spitsbergen, Svalbard and implications for seismic anisotropy. *Journal of Metamorphic Geology*, 27, 707-720.
- Jung, H., Mo, W., and Green, H.W., 2009a. Upper mantle seismic anisotropy resulting from pressure-induced slip transition in olivine. *Nature Geoscience*, 2, 73-77.
- Jung, H., Park, M., Jung, S., and Lee, J., 2010. Lattice preferred orientation, water content, and seismic anisotropy of orthopyroxene. *Journal of Earth Science*, 21, 555-568.
- Karato, S., 2008. Deformation of earth materials. An introduction to the rheology of solid earth. Cambridge.
- Karato, S. and Jung, H., 2003. Effects of pressure on high-temperature dislocation creep in olivine. *Philosophical Magazine*, A, 83, 401-414.
- Karato, S., Paterson, M.S., and FitzGerald, J.D., 1986. Rheology of synthetic olivine aggregates: Influence of water and grain size. *Journal of Geophysical Research*, 91, 8151-8176.
- Karato, S.I., Jung, H., Katayama, I., and Skemer, P., 2008. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 59-95.
- Katayama, I., Jung, H., and Karato, S.I., 2004. New type of olivine fabric from deformation experiments at modest water content and low stress. *Geology*, 32, 1045-1048.
- Katayama, I., Karato, S.I., and Brandon, M., 2005. Evidence of high water content in the deep upper mantle inferred from deformation microstructures. *Geology*, 33, 613-616.
- Kneller, E.A., van Keken, P.E., Karato, S., and Park, J., 2005. B-type olivine fabric in the mantle wedge: Insights from high-resolution non-Newtonian subduction zone models. *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 781-797.
- Kneller, E.A., van Keken, P.E., Katayama, I., and Karato, S., 2007. Stress, strain, and B-type olivine fabric in the fore-arc mantle: Sensitivity tests using high-resolution steady-state subduction zone models. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 112.
- Lee, J. and Jung, H., 2011. B-type LPO of olivine in diamond-bearing garnet peridotites from Finsch, South Africa. AGU Fall meeting abstract, San Francisco.
- Linckens, J., Herwegh, M., Muntener, O., and Mercolli, I., 2011. Evolution of a polymineralic mantle shear zone and the role of second phases in the localization of deformation. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 116.
- Long, M.D. and Becker, T.W., 2010. Mantle dynamics and seismic anisotropy. *Earth and Planetary Science Letters*, 297, 341-354.
- Long, M.D. and Silver, P.G., 2008. The subduction zone flow field from seismic anisotropy: A global view. *Science*, 319, 315-318.
- Long, M.D. and van der Hilst, R.D., 2005. Upper mantle anisotropy beneath Japan from shear wave splitting. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 151, 206-222.
- Mckel, J.R., 1969. Structural petrology of the garnet-peridotite of Alpe Arami (Ticino, Switzerland). *Leidse Geol. Meded.*, 42, 61-130.
- Mackwell, S.J., Kohlstedt, D.L., and Paterson, M.S., 1985. The role of water in the deformation of olivine single crystals. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 90, 1319-1333.
- Mainprice, D., Barruol, G., and Ismail, W.B., 2000. The seismic anisotropy of the earth's mantle from single crystal to polycrystal., in: Karato, S., Forte, A.M., Liebermann, R.C., Masters, G., Stixrude, L. (Eds.), *Earth's deep interior American Geophysical Union, Geophysical Monograph*, 117, pp. 237-264.
- Margheriti, L., Nostro, C., Cocco, M., and Amato, A., 1996. Seismic anisotropy beneath the Northern Apennines (Italy) and its tectonic implications. *Geophysical Research Letters*, 23, 2721-2724.
- Mehl, L., Hacker, B.R., Hirth, G., and Kelemen, P.B., 2003. Arc-parallel flow within the mantle wedge: Evidence from the accreted Talkeetna arc, south central Alaska. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 108.
- Mei, S. and Kohlstedt, D.L., 2000. Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates 2. Dislocation creep regime. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 105, 21471-21481.
- Michibayashi, K., Tasaka, M., Ohara, Y., Ishii, T., Okamoto, A., and Fryer, P., 2007. Variable microstructure of peridotite samples from the southern Mariana Trench: Evidence of a complex tectonic evolution. *Tectonophysics*, 444, 111-118.
- Mizukami, T., Wallis, S.R., and Yamamoto, J., 2004. Natural examples of olivine lattice preferred orientation patterns with a flow-normal a-axis maximum. *Nature*, 427, 432-436.

- Montagner, J.P. and Guillot, L., 2000. Seismic anisotropy in the Earth's mantle. In: Boschi, E., Ekström, G., Morelli, A. (Eds.), *Problems in Geophysics for the New Millennium*, pp. 217-253.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A., 2004. Shear-wave polarization anisotropy and subduction-induced flow in the mantle wedge of northeastern Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 225, 365-377.
- Nicolas, A. and Christensen, N.I., 1987. Formation of anisotropy in upper mantle peridotites: A review. *American Geophysical Union*, 16, 111-123.
- Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishihara, Y., Nishiyama, N., and Irifune, T., 2011. High pressure and temperature fabric transitions in olivine and variations in upper mantle seismic anisotropy. *Earth and Planetary Science Letters*, 304, 55-63.
- Park, J. and Levin, V., 2002. Seismic Anisotropy: Tracing Plate Dynamics in the Mantle. *Science*, 296, 485-489.
- Park, M., Jung, H., and Kil, Y., 2012. Lattice preferred orientation of olivine and orthopyroxene in spinel peridotites from the Rio Grande rift, New Mexico. *Journal of Geophysical Research*, submitted.
- Raleigh, C.B. and Paterson, M.S., 1965. Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 70, 3965-3985.
- Raterron, P., Chen, J., Li, L., Weidner, D., and Cordier, P., 2007. Pressure-induced slip-system transition in forsterite: Single-crystal rheological properties at mantle pressure and temperature. *American Mineralogist*, 92, 1436-1445.
- Raterron, P., Chen, J.H., Geenen, T., and Girard, J., 2011. Pressure effect on forsterite dislocation slip systems: Implications for upper-mantle LPO and low viscosity zone. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 188, 26-36.
- Ringwood, A.E., 1970. Phase transformations and the constitution of the mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 3, 109-155.
- Russo, R.M. and Silver, P.G., 1994. Trench-parallel flow beneath the Nazca plate from seismic anisotropy. *Science*, 263, 1105-1111.
- Savage, M.K., 1999. Seismic anisotropy and mantle deformation: What have we learned from shear wave splitting? *Reviews of Geophysics*, 37, 65-106.
- Sawaguchi, T., 2004. Deformation history and exhumation process of the horoman Peridotite Complex, Hokkaido, Japan. *Tectonophysics*, 379, 109-126.
- Scholz, C.H., 2002. *The Mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge.
- Silver, P.G., 1996. Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24, 385.
- Skemer, P., Katayama, I., and Karato, S.I., 2006. Deformation fabrics of the Cima di Gagnone peridotite massif, Central Alps, Switzerland: evidence of deformation at low temperatures in the presence of water. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152, 43-51.
- Skemer, P., Warren, J.M., Kelemen, P.B., and Hirth, G., 2010. Microstructural and rheological evolution of a mantle shear zone. *Journal of Petrology*, 51, 43-53.
- Smith, G.P., Wiens, D.A., Fischer, K.M., Dorman, L.M., Webb, S.C., and Hildebrand, J.A., 2001. A complex pattern of mantle flow in the Lau backarc. *Science*, 292, 713-716.
- Soustelle, V., Tommasi, A., Demouchy, S., and Ionov, D.A., 2009. Deformation and fluid-rock interaction in the supra-subduction mantle: microstructures and water contents in peridotite xenoliths from the Avacha volcano, Kamchatka. *Journal of Petrology*, 51, 363-394.
- Tasaka, M., Michibayashi, K., and Mainprice, D., 2008. B-type olivine fabrics developed in the fore-arc side of the mantle wedge along a subducting slab. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 747-757.
- Tommasi, A., Vauchez, A., and Ionov, D.A., 2008. Deformation, static recrystallization, and reactive melt transport in shallow subcontinental mantle xenoliths (Tok Cenozoic volcanic field, SE Siberia). *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 65-77.
- Van der Pluijm, B.A., and Marshak, S., 2004. *Earth structure*. Norton.
- Wallace, P.J., 1998. Water and partial melting in mantle plumes: Inferences from the dissolved H₂O concentrations of Hawaiian basaltic magmas. *Geophysical Research Letters*, 25, 3639-3642.
- Xu, Z.Q., Wang, Q., Ji, S.C., Chen, J., Zeng, L.S., Yang, J.S., Chen, F.Y., Liang, F.H., and Wenk, H.R., 2006. Petrofabrics and seismic properties of garnet peridotite from the UHP Sulu terrane (China): Implications for olivine deformation mechanism in a cold and dry subducting continental slab. *Tectonophysics*, 421, 111-127.
- Zhang, S.Q. and Karato, S., 1995. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, 375, 774-777.

2012년 4월 2일 접수
 2012년 4월 5일 심사개시
 2012년 5월 1일 채택