



Research Paper

Microstructural and Petrological Characteristics of Spinel Peridotite Xenoliths from Boeun, South Korea

Yoonji Kim¹, Munjae Park^{1,*}, Dohyun Kim^{1,2}, Sejin Jung³, Haemyeong Jung³

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Advanced-Basic-Convergence Research Institute, Chungbuk National University

³School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

*Corresponding author : mpark@cbnu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 18 May 2026
Received in revised form 24 June 2026
Manuscript accepted 25 June 2026
Available online 29 June 2026

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2026.59.3.491>

Research Highlights

- Spinel peridotite xenoliths from Boeun exhibit a porphyroclastic texture of Iherzolite.
- EBSD analyses reveal AG-type and A-type olivine lattice-preferred orientations (LPOs).
- AG-type olivine LPO may reflect low-stress plate motion in a MORB-like mantle environment.

ABSTRACT

Mantle xenoliths derived from the upper mantle provide key constraints on deformation conditions, evolutionary history, and heterogeneity of the mantle through their deformation microstructures and geochemical analysis. Spinel Iherzolite xenoliths from the Boeun area were examined to investigate the deformation microstructures of olivine and their geochemical characteristics. The foliation and lineation of the samples were constrained by the typical lattice-preferred orientations (LPOs) of clinopyroxene and orthopyroxene. Electron backscatter diffraction (EBSD) analyses show that olivine in some samples exhibits an AG-type LPO, characterized by the [010] axis subnormal to foliation and the [100] and [001] axes forming a girdle within the foliation plane, whereas others display an A-type LPO with the [100] axis subparallel to lineation and the [010] axis subnormal to foliation. EPMA major-element analyses indicate that the samples are residual mantle peridotites formed within the spinel Iherzolite stability field. Smooth boundaries between adjacent minerals, the presence of triple junctions, the absence of mineral reaction rims, and homogeneous mineral compositions suggest that the minerals in the Boeun xenoliths reached equilibrium prior to magma eruption. The AG-type olivine LPO observed in the Boeun spinel Iherzolites suggests that upper-mantle material with MORB-like affinities experienced low-stress deformation associated with plate motion, during which (010)[100] and (010)[001] slip systems in olivine were possibly activated to produce the observed fabric.

Keywords : Boeun, mantle xenolith, deformation microstructure, AG-type LPO

Citation: Kim, Y., Park, M., Kim, D., Jung, S., Jung, H. (2026) Microstructural and Petrological Characteristics of Spinel Peridotite Xenoliths from Boeun, South Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.59, p.491-503, doi:10.9719/EEG.2026.59.3.491.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2026 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

보은 침정석 페리도타이트 포획암의 미세구조와 암석학적 특성

김윤지¹ · 박문재^{1,*} · 김도현^{1,2} · 정세진³ · 정해명³

¹충북대학교 지구환경과학과, ²충북대학교 첨단기초과학융합연구소, ³서울대학교 지구환경과학부

*책임저자 : mpark@cbnu.ac.kr

요 약

상부 맨틀에서 기원한 맨틀 포획암은 변형 미세구조와 암석화학 연구를 통해 맨틀의 변형 조건, 진화 과정 및 불균질성을 추론할 수 있는 중요한 데이터를 제공한다. 본 연구에서는 충청북도 보은군 일대에서 산출된 침정석 리졸라이트 맨틀 포획암을 대상으로 감람석의 변형 미세구조와 암석화학적 특성을 분석하였다. 시료의 엽리 및 선구조 방향은 자연적으로 변형된 암석에서 일반적으로 관찰되는 단사회석 및 사방회석의 전형적인 격자선호방향의 특성을 이용하여 정의하였다. EBSD 분석 결과, 일부 시료의 감람석은 [010] 축이 엽리면에 아수직하게 배열되고 [100] 및 [001] 축이 엽리면을 따라 거들 형태로 분산되는 AG-type LPO를 보이며, 일부에서는 [100] 축이 선구조에 아평행하고 [010] 축이 엽리면에 아수직인 A-type LPO가 관찰되었다. EPMA 주원소 분석 결과, 시료는 침정석 리졸라이트 안정화 영역에서 형성된 잔류 맨틀암석이며, 심해저 페리도타이트 기원의 영역 내에 도식된다. 인접한 광물 간의 매끄러운 경계, 삼중점의 존재, 광물 반응 테두리의 부재, 그리고 균일한 조성은 시료 내 광물이 마그마에 포획 이전에 평형 상태에 도달했음을 지시한다. AG-type 감람석 격자선호방향은 중앙해령 현무암의 특성을 지닌 맨틀이 저응력 환경에서 판의 이동에 의해 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립이 활성화되어 형성되었을 가능성을 지시한다.

주요어 : 보은, 맨틀 포획암, 변형 미세구조, AG-type 격자선호방향

1. 서 론

암석의 변형(deformation)에 관한 연구는 암석과 광물에 기록된 지질학적 정보를 해석하여, 지각과 판의 거동 및 진화를 이해하는 데 핵심적인 역할을 한다. 이 중에서도 변형 미세구조(microstructures) 연구는 암석이 지구 내부에서 형성된 후 지표면으로 노출되기까지 겪는 다양한 변형 과정을 이해하는 데 중요한 단서를 제공한다. 특히 상부 맨틀에서 형성된 광물의 소성 변형은 격자선호방향(lattice-preferred orientations; LPO) 발달로 인해 미세구조적 비등방성이 나타나며, 이러한 특성은 상부 맨틀의 불균질성(heterogeneity), 역학 및 구조적 특성을 이해하는 데 중요한 정보를 제공한다(Tommasi and Vauchez, 2015).

암석권 맨틀 시료의 산출 양식 중 맨틀 포획암(mantle xenolith)은 알칼리 현무암(alkali basalt)이나 킴벌라이트(kimberlite) 화산암 내에 포획되어 산출되는 맨틀 암석이다(Nixon, 1987). 맨틀 포획암은 상대적으로 빠른 속도로 지표에 도달하기 때문에 상부 맨틀의 물리·화학적 특성과 변형 조건들이 미세구조의 형태로 잘 보존되어 있으며, 맨틀의 진화 과정 및 불균질성과 연관된 중요한 정보를 제공한다(Park, 2022).

한반도의 경우 백령도, 간성일대, 아산-평택지역, 보은, 백

두산 및 제주도 등지에서 맨틀 포획암의 산출이 보고되고 있다(Kim et al., 1988; Lee, 1996; Yun et al., 1998; Arai et al., 2001; Choi and Kwon, 2005; Kil, 2006; Lee and Walker, 2006; Shin et al., 2006; Park et al., 2020). 이 중 보은 지역은 한반도 중부 옥천대에 위치하여 고생대 이후의 복잡한 지체구조 발달사를 기록하고 있으며, 동아시아 대륙 연변부 상부 맨틀의 특성을 규명할 수 있는 중요한 지질학적 위치에 있다. 그러나 국내에서 이루어진 맨틀 포획암에 관한 연구는 대부분 암석학·지구화학적 측면에서 집중되어 왔으며, 변형 미세구조적 관점에서 수행된 연구는 현재까지 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 충북 보은군 일대에서 산출되는 맨틀 포획암을 대상으로 암석기재, 변형 미세구조 및 주원소 분석을 종합하여 이들의 변형 미세구조 발달 환경과 그 기작에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구지역 지질개요

옥천대는 선캄브리아 변성복합체를 기반암으로 하는 경기육괴와 영남육괴를 경계로 하며, 일반적으로 퇴적암류가 분포하는 비변성대인 태백산분지(옥천대의 북동부)와 퇴적기원 변성암이 분포하는 옥천변성대(옥천대의 남서

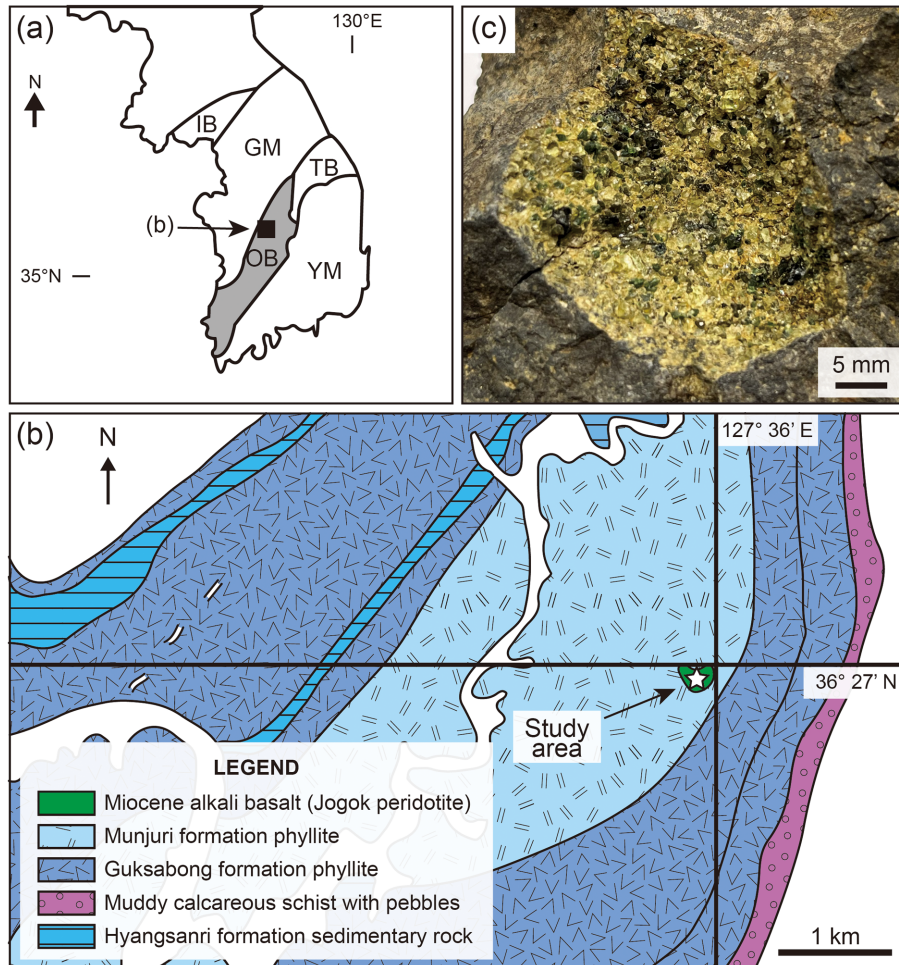


Fig. 1. (a) Simplified tectonic map of the Korean Peninsula showing the location of the study area at Boeun in South Korea. (b) Geological map showing Miocene alkali basalt (Jogok peridotite) in the northeastern Okcheon Metamorphic Belt, South Korea (modified after Kim et al., 1977). (c) Mantle xenolith hand samples from Boeun. IB (Imjingang Belt), GM (Gyeonggi Massif), TB (Taebaeksan Basin), OB (Okcheon Metamorphic Belt), and YM (Yeongnam Massif).

부)로 구분된다(Fig. 1a). 연구지역을 포함하는 충북 보은군 일대의 옥천변성대 북서부에는 지름 약 300 m의 마이오세 알칼리 현무암이 분포하고 있고(Fig. 1b), K-Ar 연대측정법에 의해 계산된 현무암의 연대는 약 11.1 Ma이다(Kim et al., 2005). 1:50,000 보은 도폭(Kim et al., 1977)에 따르면 이 현무암 내에는 직경이 최대 10 cm에 달하는 맨틀 포획암 형태의 침정석 페리도타이트(spinel peridotite)가 산출된다(Fig. 1c).

Kil and Lee (2005)에 따르면, 보은에서 산출되는 침정석 페리도타이트는 모두 러졸라이트(lherzolite)로 구분되며 원생입상조직(proto-granular texture)과 반상쇄정조직(porphyroclastic texture) 사이의 전이 조직을 보이며, 2 mm 이하의 단사휘석(clinopyroxene)은 사방휘석(orthopyroxene)과 용리구조(exsolution lamellae)를 보인다. 또한, 이 지역에서 단사휘석에서는 MgO 함량과 Al_2O_3 , TiO_2 , Y 함량

이 음의 상관관계를 보이며, 이러한 경향은 상부 맨틀 기원의 침정석 페리도타이트의 부분용융 정도의 차이에서 기인된다고 알려져 있다(Norman, 1998).

3. 연구방법

충북 보은군 조곡리에서 채취한 맨틀 포획암 중 4개의 시료를 선정하여 박편을 제작하였다. 시료의 변형 미세구조 특성화를 위하여 전자후방산란회절(Electron backscatter diffraction, EBSD) 분석을 수행하였으며, 주원소 화학조성을 파악하기 위해 전자현미분석기(Electron probe micro analyzer, EPMA)를 이용하였다.

EBSD 분석은 서울대학교 지구환경과학부에 설치된 전계방사 주사전자현미경(JEOL, JSM-7100F)과 전자후방산란회절 분석기(Oxford, EBSD Detector)를 이용하여 수행

하였다. 본 분석을 통해 시료 내 광물 모드 비율과 광물 내 격자선호방향(lattice-preferred orientations, LPOs)을 정량적으로 측정하였다. EBSD 분석에 사용된 분석조건은 가속전압(acceleration voltage) 20 kV, 프로브 전류(probe current) 16 nA, 작동거리(working distance) 25 mm, 노출 시간(exposure time) 8–10 ms이다. 시료 홀더를 70° 각도로 기울여 기쿠치 밴드(Kikuchi band)를 획득하고 광물 방향성을 측정하였다. 분석거리(step size)는 10 μm , 겹침(overlap) 범위는 10%로 설정하여 처리하였다. 시료의 엽리면 및 선구조 방향은 자연적으로 변형된 암석에서 일반적으로 관찰되는 단사휘석 및 사방휘석의 전형적인 격자선호방향의 배열 특성을 이용하여 정의하였다. 자연적으로 변형된 암석에서 사방휘석의 경우 [100] 축이 엽리면에 수직하고 [001] 축이 선구조에 평행한 형태, 단사휘석의 경우 [010] 축이 엽리면에 수직하고 [001] 축이 선구조에 평행한 형태가 가장 일반적이다. 이에 따라 서로 평행한 사방휘석의 [001] 축과 단사휘석의 [001] 축이 선구조를 정의할 수 있도록 각 시료에 대해 EBSD로 획득한 전 결정 방위 자료에 동일한 회전 보정을 적용하여 시료별 기준 좌표계를 설정하였다. 격자선호방향의 배열 강도(fabric strength)를 계산하기 위해 J-index (Bunge, 1982), M-index (Skemer et al., 2005), 격자선호방향 극점도 상에서의 대칭(symmetry)을 정량화한 수치인 BA-index (Mainprice et al., 2015)를 계산하였으며, 이 과정에서 MATLAB® 환경에서 구동되는 MTEX 5.11.2 코드(Bachmann et al., 2010)를 사용하였다. 일반적으로 EBSD 분석 결과를 해석하는 과정에서, 결정 입자 크기 분포가 매우 불균질한 시료에서 큰 입자의 분석 결과가 과도하게 반영되는 것을 방지하기 위해 한 결정 입자를 한 데이터 포인트로 취급(one-point-per-grain)하는 것이 바람직하다(Prior et al., 2009; Halfpenny, 2010; Park and Jung, 2020). 반면, 결정 입자 개수가 비교적 적고 결정 크기가 균질한 본 연구에서, 입자 크기가 작게 판별된 데이터들이 전체 데이터를 왜곡하는 일을 최소화하기 위해 결정 입자 내부의 모든 데이터 포인트를 반영(all-point-per-grain)하여 극점도를 도시하였다(Halfpenny, 2010).

시료 내 광물의 화학적 주원소 조성은 경상국립대학교 공동실험실습관에 소재한 전계방사 전자현미분석기(JEOL, JXA-8530F Plus)를 이용하여 분석하였다. EPMA 분석에 사용된 분석조건은 빔 크기(beam size) 5 μm , 가속전압 15 kV, 프로브 전류 10 nA, 피크계산시간(peak counting time)과 배경계산시간(background counting time)은 각각 20초와 10초가 적용되었다. EPMA 분석 결과를 활용하여 Brey and Köhler (1990)와 Wells (1977)의 양휘석 지온계(Two-pyroxene geothermometer)와 Witt-Eickschen and Seck (1991)의

사방휘석의 Ca와 Al의 용해도를 이용한 지온계를 사용해 시료의 평형온도를 계산하여 비교하였다. 지온계와는 달리 침정석 페리도타이트에 이용할 수 있는 지온계는 매우 제한적이며(Lee, 1996), 온도 조건과 침정석의 조성에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 따라서 평형온도 계산에 사용되는 압력은 페리도타이트 내 침정석의 안정 압력대인 12–20 kbar 범위 내에서, 경험적으로 많이 가정되는 압력인 15 kbar로 가정하고 계산하였다.

4. 결 과

4.1. 보은 맨틀 포획암의 암석기재

보은 맨틀 포획암은 알칼리 현무암에 수 cm 크기로 포획된 침정석 페리도타이트이다. 시료는 대부분의 영역이 변질되지 않고 신선하며, 전형적인 페리도타이트의 조직과 변형 미세구조가 관찰된다. 이 침정석 페리도타이트는 연녹색의 감람석(olivine), 암갈색의 사방휘석, 암녹색의 단사휘석과 소량의 불투명(opaque)한 침정석으로 이루어져 있다(Fig. 2).

광물 모드 비율은 감람석 30.99–43.47%, 사방휘석 12.13–21.35%, 단사휘석 11.08–13.72%로, IUGS(International Union of Geological Sciences) 분류법에 의해 모두 전형적인 리

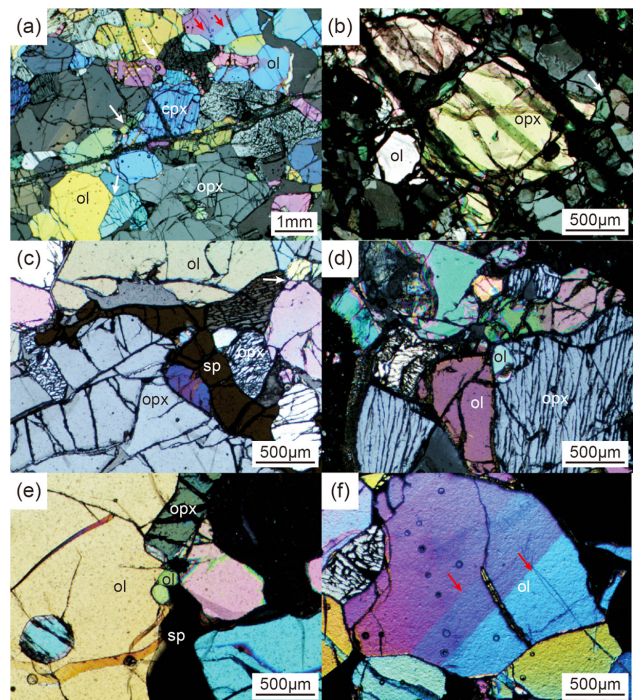
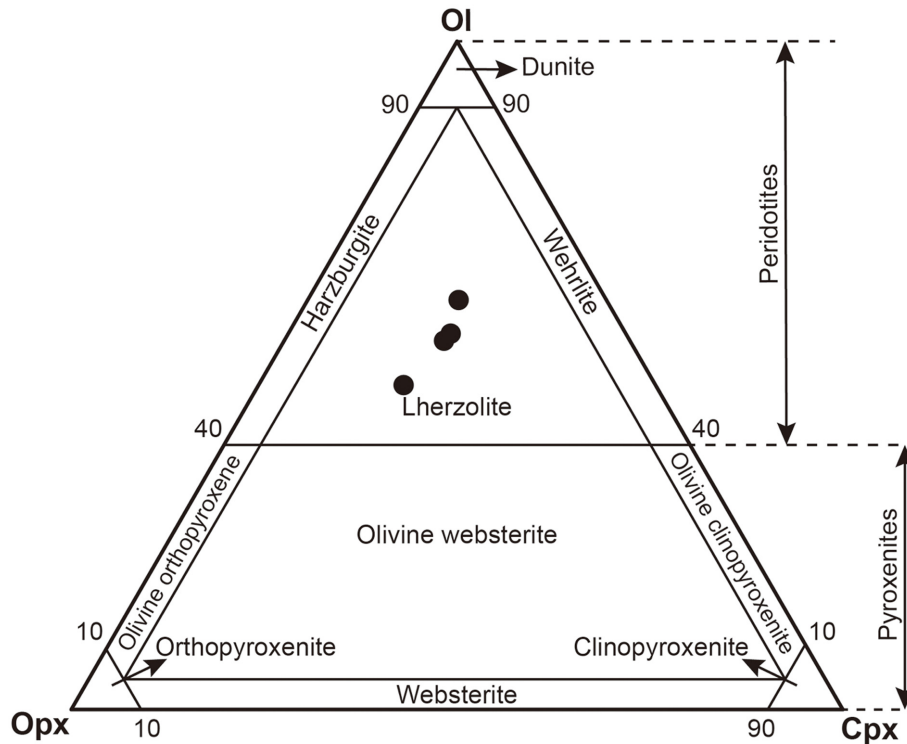


Fig. 2. Optical photomicrographs of thin sections in cross-polarized light of Boeun mantle xenoliths. (a, c, f) JCX-01, (b) JCX-02, (d) JCX-04, (e) JCX-05. Subgrain boundaries and triple junctions are identified by red and white arrows, respectively. Ol (olivine), Opx (orthopyroxene), Cpx (clinopyroxene) and Sp (spinel).

Table 1. Modal composition and lithology for studied peridotite xenoliths from Boeun

Sample	Modal composition (%)				Rock type	Texture
	Ol	Opx	Cpx	Sp		
JCX-01	36.52	14.74	13.71	0.03	lherzolite	porphyroclastic
JCX-02	36.39	15.88	13.72	0.20	lherzolite	porphyroclastic
JCX-04	30.99	20.83	12.08	0.06	lherzolite	porphyroclastic
JCX-05	38.90	12.13	12.48	0.07	lherzolite	porphyroclastic

Ol (olivine), Opx (orthopyroxene), Cpx (clinopyroxene), Sp (spinel).


Fig. 3. Modal composition of spinel lherzolites from Boeun. Ol (olivine), Opx (orthopyroxene), Cpx (clinopyroxene).

줄라이트로 구분된다(Table 1, Fig. 3).

광물의 크기는 장경 약 0.5–5.0 mm 정도로 다양하게 나타나며, 감람석과 사방휘석이 단사휘석과 침정석에 비해서 상대적으로 큰 결정이 많다. 인접한 광물 간의 경계는 매끄러우며(smooth boundaries), 광물 결정의 경계가 만나서 형성되는 삼중점(triple junction)이 흔히 관찰된다(Fig. 2). 모든 시료가 상대적으로 큰 결정인 반상쇄정(porphyroclast) 주위로 재결정화된 작은 결정 입자들이 있는 형태를 띠며, 이는 Mercier and Nicolas (1975) 분류법에 의해 반상쇄정조직으로 분류된다. 시료 내 반상쇄정의 경우 주로 장경 2.5–5.0 mm의 감람석이나 사방휘석이 관찰된다. 반상쇄정 주변에서 재결정화된 네오블라스트(neoblast) 형태의 감람석, 사방휘석, 단사휘석 등이

관찰된다(Fig. 2). 일정한 방향으로 길게 신장되어 나타나는 형태선호방향(shape preferred orientation, SPO)은 약하게 관찰된다.

4.2. 보은 맨틀 포획암의 변형 미세구조

EBSD 분석을 통해 암석 내 감람석, 사방휘석, 단사휘석의 격자선호방향을 측정하였다(Fig. 4). 감람석의 격자선호방향은 2개 시료(JCX-02, JCX-05)에서 [010] 축이 엽리면에 아수직하게 배열되고, [100] 축과 [001] 축은 엽리면을 따라 분산된 거들(girdle) 형태를 이루고 있다(Fig. 4). 이러한 배열은 AG-type 격자선호방향으로 분류된 바 있다(Nicolas et al., 1973; Tommasi et al., 2000). 감람석의 AG-type 격자선호방향은 [100] 및 [001] 두 개의 결정축이 거

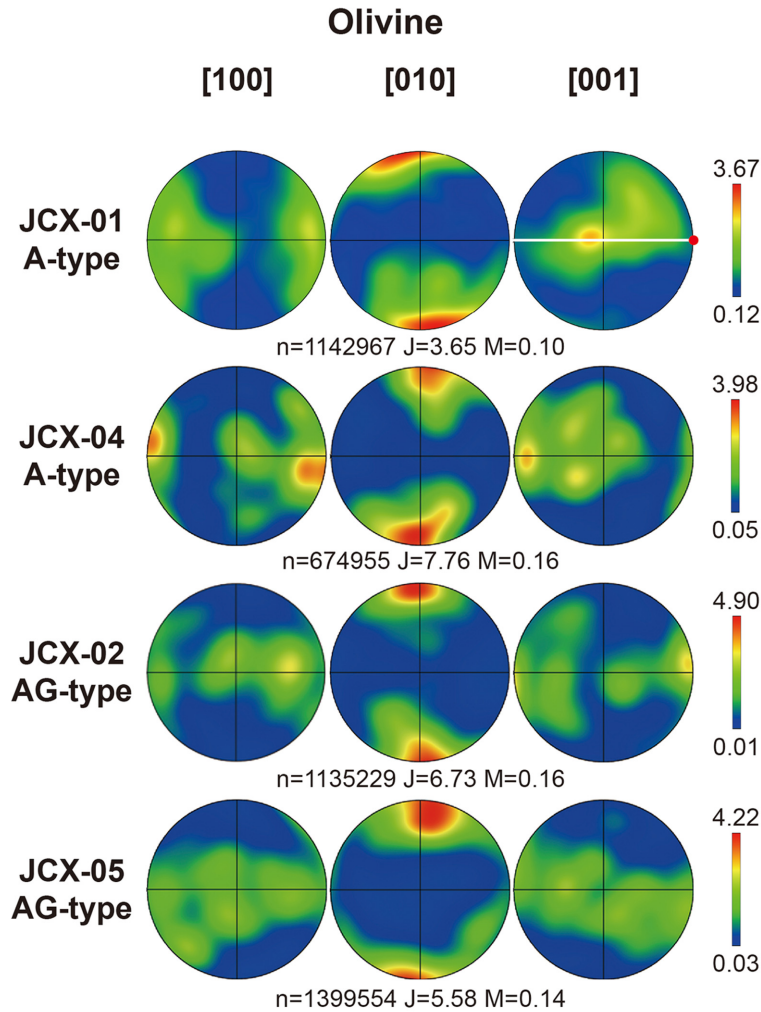


Fig. 4. Pole figures illustrating the LPOs of olivine. All-point-per-grain data were used in constructing the pole figures. The foliation and lineation directions of the samples were determined using the characteristic LPO features of clinopyroxene and orthopyroxene, which are commonly observed in naturally deformed rocks. The white line and red dot represent foliation and lineation, respectively. The color-coding indicates the density of data points. Equal-area and lower-hemisphere projection methods were employed with a half-scattering width of 30° . n=number of measured points, J=J-index, M=M-index.

들 형태를 보이는 특징을 지니고 있으므로, 암석의 엽리면 및 선구조 방향 결정과 무관하게 판별할 수 있다. 반면, 2개 시료(JCX-01, JCX-04)에서는 감람석의 [100] 축이 선구조에 아평행하고, [010] 축이 엽리면에 아수직하게 배열되는 패턴이 관찰되었으며(Fig. 4), 이는 (010)[100] 슬립 시스템이 지배적인 A-type 격자선호방향으로 해석된다(Jung and Karato, 2001). 각 시료의 J-index와 M-index는 감람석에서 3.65–7.76과 0.10–0.16, 사방휘석에서 5.47–12.09와 0.03–0.05, 단사휘석에서 14.72–21.56과 0.11–0.18로 자연 상태의 맨틀 암석에서 일반적으로 관찰되는 범위 내에서 계산되었다(Fig. 4). 감람석의 격자선호방향 극점도 상에서의 대칭(symmetry)을 정량화한 수치인 BA-index는 0.22–0.47의 범위로 계산되었다(Fig. 5).

4.3. 보은 맨틀 포획암의 화학조성 및 평형온도

EPMA를 통해 암석 내 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 침정석에 대해 주원소 분석을 실시하였다(Table 2). 이 중 일부 반상쇄정(porphyroclast)의 형태로 존재하는 사방휘석과 단사휘석의 경우 하나의 반상쇄정 내에서 광물 중심부(core)와 연변부(rim), 반상쇄정의 주변에서 재결정화된 네오블라스트로 나누어 분석하였으나 유의미한 화학적 누대구조를 보이지 않고 균질한 조성이 나타났다.

보은 지역의 맨틀 포획암 내 감람석의 Fo(100Mg/(Mg+Fe))는 89.24–89.96으로 Fo 조성이 높으며, 사방휘석은 $Wo_{1-2}En_{88-89}Fs_{9-10}$ 으로 엔스터타이트(enstatite)에 속하고, 단사휘석은 $Wo_{46-49}En_{47-49}Fs_{4-5}$ 으로 투휘석(diopside)에 속한다. 침정석의 Cr# ((Cr)/(Cr+Fe3+Al))는 0.78–0.79의 범

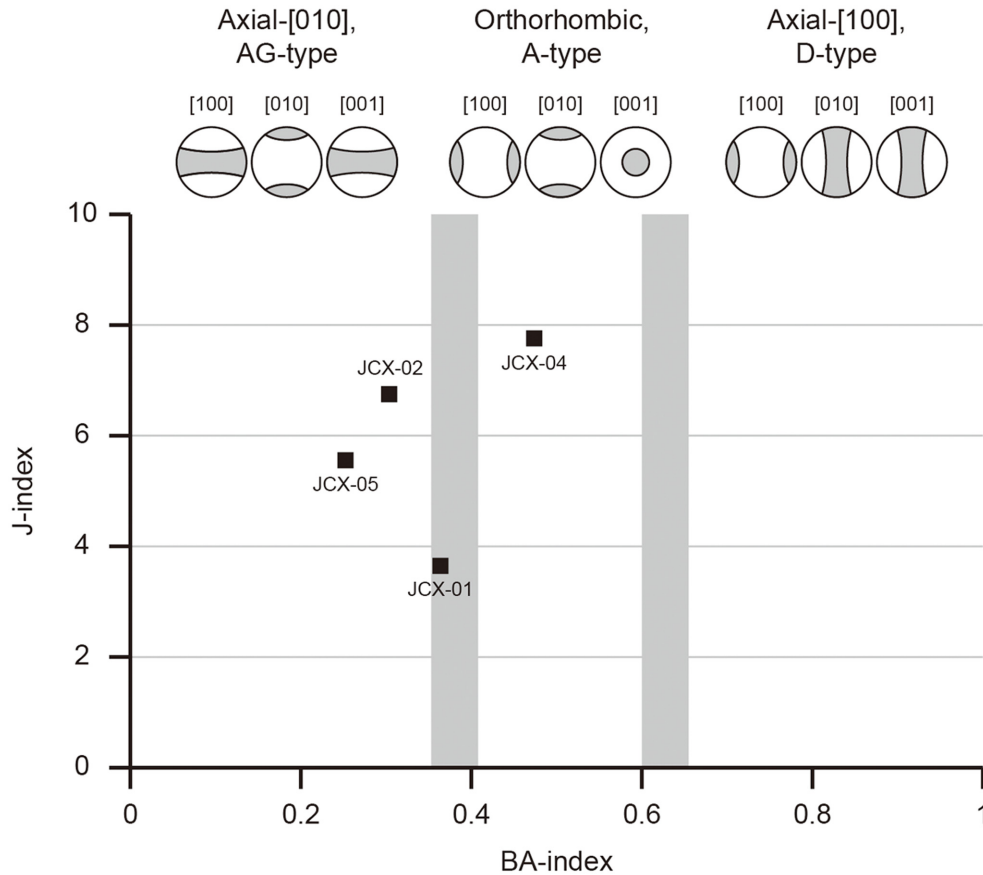


Fig. 5. Olivine LPO symmetry (BA-index) versus LPO strength (J-index) for all samples. JCX-01 (BA=0.36), JCX-02 (BA=0.30), JCX-04 (BA=0.47), JCX-05 (BA=0.25).

위를 보인다. 이들 구성 광물 모두 시료에서 매우 좁은 조성 범위를 보였다.

공존하는 감람석의 Fo와 침정석의 Cr#를 도시한 OSM (olivine-spinel mantle array) 도표에서 보은 페리도타이트는 Arai (1994)가 정의한 맨틀영역 내에 도시되며, 이는 침정석 리졸라이트 안정화 영역에서 형성된 맨틀 잔류암 (restite)임을 지시한다. 또한 침정석의 $Mg\#((Mg)/(Mg+Fe^{2+}))$ 와 $Cr\#((Cr)/(Cr+Fe^{3+}+Al))$ 도표에서 심해저 페리도타이트 기원의 영역 근처에 도시되었다(Fig. 6).

EPMA 분석 결과를 활용하여 보은 지역 맨틀 포획암의 평형온도를 계산하였다. 평형온도는 Brey and Köhler (1990)의 계산식에서 879–1020°C 범위, Wells (1977)의 계산식에서 888–1009°C 범위, Witt-Eickchen and Seck (1991)의 계산식에서 910–1070°C(오차범위 $\pm 16^\circ\text{C}$) 범위로 계산되었다. 세 모델에서의 중앙값은 각각 935.8°C, 934.7°C, 988.8°C로, 모델 간에 약 40°C 이내의 차이가 있으나 Kil (2007)의 기존 연구결과(847–1030°C)와 유사한 값을 보인다(Table 3).

5. 토 의

5.1. 보은 맨틀 포획암의 평형온도

맨틀 포획암은 맨틀에서 상승하는 마그마에 포획되어 지표로 운반된 맨틀 암석의 일부로서, 내부 광물(감람석, 사방휘석, 단사휘석, 침정석)이 평형상태를 이루고 있었다는 것은 이들이 포획되기 직전까지 맨틀 내에서 존재했던 온도 조건을 기록하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 맨틀 포획암 내부 광물의 화학조성을 이용하여 평형온도를 추정하는 것은 해당 시료가 포획되기 전 원래 있던 맨틀의 환경을 추적하는 데에 중요한 정보를 제공한다.

보은 맨틀 포획암 내에 존재하는 인접한 광물 간의 매끄러운 경계, 삼중점(triple junction)의 존재, 광물 반응 테두리(reaction rim)의 부재, 광물의 균일한 조성 등의 특징은 맨틀 포획암 내 광물이 마그마에 의한 포획 이전에 열역학적 평형상태에 도달했음을 지시하는 암석학적 근거이며, 계산된 평형온도가 유효함을 뒷받침한다(Fig. 2, Table 3).

Table 2. Compositions of minerals of a studied peridotite xenolith from Boeun.

Sample		JCX-02							
Mineral	Ol		Opx			Cpx			Sp
	core	rim	core	rim	nb	core	rim	nb	
SiO ₂	41.30	41.00	55.23	55.79	55.41	51.82	52.10	52.12	0.02
TiO ₂	0.01	-	0.12	0.13	0.11	0.62	0.55	0.59	0.14
Al ₂ O ₃	0.03	-	4.81	4.18	4.37	6.95	6.29	6.49	58.56
Cr ₂ O ₃	0.01	-	0.41	0.27	0.34	0.76	0.67	0.72	9.32
FeO*	9.90	9.94	6.29	6.23	6.47	2.65	2.77	2.55	10.19
MnO	0.16	0.15	0.14	0.19	0.14	0.12	0.10	0.06	0.09
MgO	48.11	48.15	32.14	32.14	32.27	14.46	14.76	14.48	20.34
CaO	0.03	0.04	0.68	0.56	0.53	20.48	20.71	20.72	-
Na ₂ O	0.02	-	0.09	0.09	0.07	1.78	1.68	1.63	0.03
K ₂ O	0.01	-	0.01	0.01	-	0.02	-	0.01	-
Total	99.58	99.28	99.91	99.60	99.70	99.65	99.61	99.37	98.68
Si	1.014	1.011	1.908	1.930	1.918	1.881	1.893	1.895	0.001
Ti	-	-	0.003	0.003	0.003	0.017	0.015	0.016	0.003
Al	0.001	-	0.196	0.171	0.178	0.297	0.269	0.278	1.795
Cr	-	-	0.011	0.007	0.009	0.022	0.019	0.021	0.192
Fe	0.203	0.205	0.182	0.180	0.187	0.081	0.084	0.078	0.222
Mn	0.003	0.003	0.004	0.006	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
Mg	1.762	1.770	1.654	1.657	1.665	0.783	0.799	0.785	0.789
Ca	0.001	0.001	0.025	0.021	0.020	0.796	0.806	0.807	-
Na	0.001	-	0.006	0.006	0.005	0.125	0.118	0.115	0.001
K	-	-	-	0.001	-	0.001	-	-	-
Sum	2.986	2.989	3.989	3.981	3.989	4.006	4.007	3.997	3.004
Mg#	89.6	89.6	90.1	90.2	89.9	90.7	90.5	91.0	78.1
Cr#			5.4	4.2	4.9	6.8	6.7	7.0	9.6

A selection of the analysis results is presented here. Total Fe as FeO*; Mg# = 100Mg/(Mg + Fe); Cr# = 100Cr/(Cr + Al); Ol (olivine), Opx (orthopyroxene), Cpx (clinopyroxene), Sp (spinel) and nb (neoblast).

Brey and Köhler (1990), Wells (1977), Witt-Eickschen and Seck (1991)가 제안한 평형온도 계산식에 의해 계산된 평형온도는 각각 879–1020°C, 888–1009°C, 910–1070°C(오차범위 $\pm 16^\circ\text{C}$)이다. 시료 각각의 폐쇄 온도(blocking temperature)가 같다고 가정했을 때 이 중 Brey and Köhler (1990)의 계산식에 의한 결과가 가장 합리적이라고 볼 수 있는데, 그 이유는 크게 두 가지가 있다. (1) Kil (2007)은 Brey and Köhler (1990)의 지온계 계산식이 다른 지온계(e.g., Ballhaus et al., 1991; Witt-Eickschen and Seck, 1991)와 가장 조화적인(concordant) 값을 산출한다고 설명하였다. 이는 각각 다른 모델에서도 상호 검증을 가능하게 하여 연구의 용이성을 높일 수 있다. (2) Brey and Köhler (1990)는 침정석 러줄라이트 시스템에 대한 광범위한 실험 데이터를 기반으로 개발되었다. 이 지온계는 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 침정석의 네 가지 광물이 동시에 존재하는 조건

에서 가장 잘 작동하도록 고안되었으므로 보은 맨틀 포획암에서 안정적으로 적용될 수 있다.

5.2. 보은 맨틀 포획암 내 감람석의 격자선호방향

보은 맨틀 포획암 내 감람석에 대한 EBSD 분석 결과, [010] 축이 엽리면에 수직하고 [100] 축이 선구조에 평행한 형태의 A-type 격자선호방향과, [010] 축이 엽리면에 아수직한 형태로 강하게 배열되고 [100] 축과 [001] 축은 엽리면을 따라 분산된 거들 형태를 보이는 AG-type의 격자선호방향이 확인되었다(Fig. 4).

감람석의 A-type 격자선호방향은 일반적으로 응력이 낮고 물함량이 200 ppm H/Si 미만인 건조한 조건에서 형성되는 것으로 잘 알려져 있다(Jung and Karato, 2001). 감람석의 AG-type 격자선호방향은 자연적으로 변형된 암석에서 흔히 나타나는 유형으로 보고되어 왔다(Nicolas

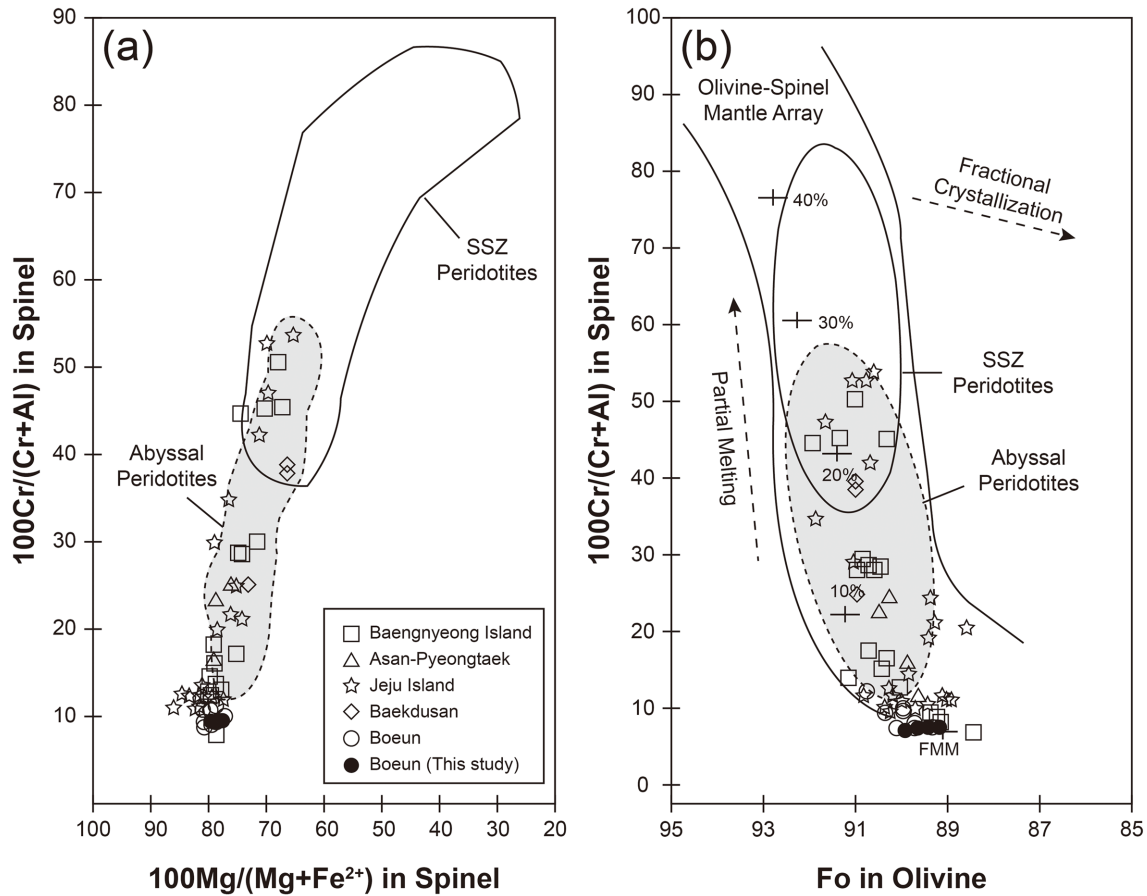


Fig. 6. (a) Plots of spinel Cr# versus Mg# relationship and (b) olivine Fo versus spinel Cr# relationship. (b) The olivine–spinel mantle array and melting trend (annotated by melting percent) from (Arai, 1994). Previous data from Korean mantle xenoliths (Kim et al., 1988; Lee, 1996; Choi and Kwon, 2005; Kil and Lee, 2005; Kil, 2006; Shin et al., 2006; Kil, 2007; Kil et al., 2008; Yang et al., 2009; Yu et al., 2011; Park et al., 2020), abyssal peridotites (Dick and Bullen, 1984) and suprasubduction zone (SSZ) peridotites (Teruaki et al., 1992; Parkinson and Pearce, 1998; Pearce et al., 2000) were used. FMM (fertile mid-ocean ridge basalt mantle).

Table 3. Temperatures estimated using the geothermometers for spinel lherzolite xenoliths from Boeun.

	JCX-01	JCX-02	JCX-04	JCX-05
T_{BK} (°C)	1020	879	914	941
T_W (°C)	989	897	906	936
T_{WS} (°C)	1051	980	955	987

T_{BK} (Brey and Köhler, 1990), T_W (Wells, 1977), T_{WS} Ca-Al-in-opx (Witt-Eickchen and Seck, 1991) geothermometers. 15 kbar has been used as an input pressure for the temperature estimation. Average values of the calculated results are presented here.

et al., 1973; Tommasi et al., 2000; Jung, 2017). 감람석의 AG-type 격자선호방향의 발달 조건은 아직 명확하지 않으나, 적어도 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립 시스템이 동시에 발생하는 상황이 요구된다. 이러한 현상의 원인에 대한 가설로 (1) (010)[100] 단일 슬립 시스템에 의한 횡압력 변형(Tommasi et al., 1999), (2) 멜트 포켓(melt pocket)에 의한 확산-수용

크리프(diffusion-accommodated creep)의 영향력 증대 및 감람석 전단 변형 시의 광물 경계 미끄러짐(grain boundary sliding) 발생(Holtzman et al., 2003a; Holtzman et al., 2003b), (3) 용융물 침투에 의해 발생한 용융된 감람암에서의 어닐링(annealing) 및 정적 재결정화 작용(static recrystallization)과 관련된 변형률 분할(strain partitioning) (Liu et al., 2019), (4) 고응력 또는 고압 환경에서의 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립의 활성화(Tommasi et al., 2000; Mainprice et al., 2005), (5) 동적 재결정화(dynamic recrystallization)에 의한 아입자 회전(subgrain boundary rotation) (Tommasi et al., 2000), (6) 0.1–1 MPa의 저응력 환경 하의 중앙해령 현무암(mid-ocean ridge basalt; MORB) 특성을 지닌 맨틀 페리도타이트가, 판 이동에 의해 수동적(passive)인 이동을 경험하는 상황에서 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립이 동시에 발생하는 경우 (Hirth and Kohlstedt, 2004; Harigane et al., 2011; Wang et al., 2016). (7) 감람석의 A-type 격자선호방향을 형성하는

물 함량이 적은 환경에서 B-type 격자선호방향을 형성하는 물 함량이 많은 환경으로의 변화가 발생하는 상황에서, 두 격자선호방향이 순차적으로 발달하면서 최종적으로 중첩된 형태를 보이는 경우(Jung et al., 2014, 2020) 등이 제안되었다.

AG-type 격자선호방향을 보이는 감람석에 대한 연구 중 환압력 변형이 발생하는 환경에서 형성된 경우, 감람석 [100] 축과 사방휘석 [001] 축에서의 엽리면에 평행하게 분산된 거들이 함께 보고되었다(Tommasi et al., 1999; Vauchez and Garrido, 2001; Tommasi et al., 2006; Bascou et al., 2008). 그러나 이는 보은 맨틀 포획암 내 감람석 및 사방휘석과는 일치하지 않는다.

Holtzman et al. (2003b)은 용융물이 감람석에 빠른 확산 경로(fast-diffusion path)를 제공하여, 확산에 의해 조절되는 크리프(diffusion-accommodated creep)와 결정립계 미끄럼(grain boundary sliding)의 중요성을 증대시킨다고 주장하였다. 이러한 과정은 전위 운동(dislocation movement)과 상호작용하며, 멜트 포켓의 이방성(anisotropy in melt-pocket orientation, MPO)이 [100] 축과 [001] 축의 방향을 무작위화(randomize)시키는 반면, [010] 축의 방향은 유지되어 AG-type의 격자선호방향을 형성할 수 있다. 한편, 아입자 회전(subgrain rotation)에 의한 회복(recovery)과 정적 재결정화(static recrystallization)가 발생하는 동안의 선택적 결정 성장(selective grain growth)의 조합이 AG-type의 격자선호방향 발달을 유도할 수 있음이 보고되었다(Boullier and Nicolas, 1975; Vauchez et al., 2005; Tommasi et al., 2008). 하지만 보은 맨틀 포획암은 재결정화가 충분히 일어나지 않은 반상쇄정조직을 보이므로(Fig. 2), 용융물과의 반응 및 재결정화 기반의 메커니즘과는 거리가 멀다.

해양 맨틀(oceanic mantle)과 유사한 0.1–1 MPa의 저응력 상부맨틀 환경을 가정할 수 있다. 이러한 환경 하에서 중앙해령 현무암(MORB) 특성을 지닌 맨틀 페리도타이트는 판 이동에 의해 수동적인 이동을 경험하면서 AG-type 격자선호방향을 형성했을 가능성이 있다(Hirth and Kohlstedt, 2004; Harigane et al., 2011; Wang et al., 2016). [100] 축 및 [001] 축이 특정 평면 내에서 넓게 분산되는 형태의 감람석의 AG-type 격자선호방향 발달은 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립 시스템이 동시에 활성화되어 두 시스템 모두 변형에 기여하는 상황을 필요로 한다(Tommasi et al., 1999). Wang et al. (2016)은 감람석 내에서 전위의 교차 슬립(cross slip) 속도가 크리프(creep)의 속도를 제한하는 과정일 때 (010)[100] 칼날 전위(edge dislocation)와 (010)[001] 나사 전위(screw dislocation)에 의한 변형률이 유사해질 수 있으며, 특히 0.1–1 MPa의 저응력 조건에서는 두 슬립 시스템의 전위 이동성이 비슷해져 AG-type 격자선호방향이

지배적으로 형성된다고 설명하였다. 보은 맨틀 포획암에 대한 주원소 분석 결과, 시료가 FMM(fertile mid-ocean ridge basalt mantle rock)에 해당하는 페리도타이트 암석이었으며, 이는 부분용융이 5% 미만의 풍부(fertile)한 맨틀 기원일 가능성을 지시한다(Fig. 6). 또한 Kil (2007)은 보은 지역에서 산출되는 맨틀 포획암 내 단사휘석에서 획득한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 및 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비율을 분석하여 해당 암석이 MORB와 같은 특성을 가짐을 입증하였다. 따라서 본 연구에서 확인된 감람석의 AG-type 격자선호방향을 부분용융이 다량 존재하는 환경에서 기인한 것이 아니라, 중앙해령 현무암이 형성되는 환경과 같은 저응력 환경 하에서 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립이 발생한 환경에서 비롯되었다고 해석하는 것이 가장 타당하다. 다만, 감람석의 AG-type 격자선호방향이 맨틀 암석의 중앙해령에서의 형성 직후에 발달했는지, 아니면 그 이후 판 이동 과정에서 추가적인 변형을 겪으면서 형성되었는지 규명하기 위한 추가 연구가 요구된다.

한편 감람석 격자선호방향을 형성하는 변형 과정에서 물의 존재 여부 등 여러 인자들에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다(Jung and Karato, 2001; Katayama et al., 2004; Jung et al., 2006; Katayama and Karato, 2006). 이에 따라 보은 맨틀 포획암에서 관찰되는 재결정화 양상과 슬립 시스템 활성 조건을 보다 정밀하게 이해하기 위해서는 고해상도 EBSD 매핑과 미량원소 분석, 시료 내 물 함량 분석 등을 포함한 추가 연구가 요구된다.

6. 결 론

충청북도 보은군 일대에서 산출된 맨틀 포획암 내 광물의 변형 미세구조 및 암석화학적 특성에 대해 분석하였다. 수집된 시료들은 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 침정석으로 이루어진 침정석 러줄라이트에 해당하였으며, 상대적으로 큰 결정인 반상쇄정 주위로 깨지거나 재결정화된 작은 결정 입자들이 있는 형태의 반상쇄정조직에 해당하였다. 변형 미세구조 분석 결과, 감람석에서 [010] 축이 엽리면에 아수직하게 배열되고, [100] 축과 [001] 축은 엽리면을 따라 분산된 거들 형태 AG-type의 격자선호방향과 [100] 축이 선구조에 평행한 A-type 격자선호방향이 관찰되었다. 주원소 성분분석 결과, 모든 시료의 화학 조성은 매우 좁은 범위를 보였으며, 평형온도는 879–1020°C 범위로 산출되었다. 보은 맨틀 포획암 내에 존재하는 인접한 광물 간의 매끄러운 경계, 삼중점의 존재, 광물 반응 테두리의 부재, 광물의 균일한 성분 등의 특징은 맨틀 포획암 내 광물이 마그마 분출 전에 평형상태에 도달했음을 지시하는 암석학적 근거이며, 계산된 평형온도가 유효함을 뒷받침

한다. 보은 맨틀 포획암 내에 존재하는 감람석의 AG-type 격자선호방향은 중앙해령 현무암의 특성을 지닌 맨틀이 저응력 환경에서 판의 이동에 의해 (010)[100] 및 (010)[001] 슬립이 발생하여 비롯되었음을 추정하였다. 더 나아가, 보은 지역의 구조적 모델을 제시하기 위해 추후 더 많은 시료에 대한 분석으로부터 통계적으로 유의미한 결과를 도출하는 과정이 필요하다.

사 사

이 논문은 한국연구재단(과학기술정보통신부)의 우수 신진연구과제(No. RS-2022-NR071770) 및 한국연구재단(교육부)의 G-램프(LAMP)사업(No. RS-2024-00445180)의 지원으로 수행된 연구입니다. 논문의 세심한 검토와 질적 향상을 위해 유익한 제안을 주신 익명의 심사위원 분들과 편집위원께 감사를 표합니다.

References

- Arai, S. (1994) Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, v.113(3), p.191-204. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3)
- Arai, S., Kida, M., Abe, N., and Yurimoto, H. (2001) Petrology of peridotite xenoliths in alkali basalt (11 Ma) from Boun, Korea: an insight into the upper mantle beneath the East Asian continental margin. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, v.96(3), p.89-99. <https://doi.org/10.2465/jmps.96.89>
- Bachmann, F., Hielscher, R., and Schaefer, H. (2010) Texture Analysis with MTEX – Free and Open Source Software Toolbox. *Solid State Phenomena*, v.160, p.63-68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.160.63>
- Ballhaus, C., Berry, R.F., and Green, D. H. (1991) High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.107(1), p.27-40. <https://doi.org/10.1007/BF00311183>
- Bascou, J., Delpech, G., Vauchez, A., Moine, B.N., Cottin, J.Y., and Barruol, G. (2008) An integrated study of microstructural, geochemical, and seismic properties of the lithospheric mantle above the Kerguelen plume (Indian Ocean). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.9(4). <https://doi.org/10.1029/2007GC001879>
- Boullier, A.M. and Nicolas, A. (1975) Classification of textures and fabrics of peridotite xenoliths from South African kimberlites. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.9, p.467-475. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(75\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0079-1946(75)90034-8)
- Brey, G.P. and Köhler, T. (1990) Geothermobarometry in Four-phase Lherzolites II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers. *Journal of Petrology*, v.31(6), p.1353-1378. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>
- Bunge, H.J. (1982) *Texture Analysis in Materials Science*. Butterworth-Heinemann, London, 595p.
- Choi, S.H. and Kwon, S.-T. (2005) Mineral chemistry of spinel peridotite xenoliths from Baengnyeong Island, South Korea, and its implications for the paleogeotherm of the uppermost mantle. *Island Arc*, v.14(3), p.236-253. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2005.00469.x>
- Dick, H.J.B. and Bullen, T. (1984) Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.86(1), p.54-76. <https://doi.org/10.1007/BF00373711>
- Halfpenny, A. (2010) Some important practical issues for the collection and manipulation of Electron Backscatter Diffraction (EBSD) data from geological samples. *Journal of the Virtual Explorer*, v.35. <https://doi.org/10.3809/jvirtex.2011.00272>
- Harigane, Y., Mizukami, T., Morishita, T., Michibayashi, K., Abe, N. and Hirano, N. (2011) Direct evidence for upper mantle structure in the NW Pacific Plate: Microstructural analysis of a petit-spot peridotite xenolith. *Earth and Planetary Science Letters*, v.302(1), p.194-202. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.011>
- Hirth, G. and Kohlstedt, D. (2004) Rheology of the Upper Mantle and the Mantle Wedge: A View from the Experimentalists. In Eiler, J.(ed.) *Inside the Subduction Factory*. American Geophysical Union (AGU), Washington, D.C., p.83-105.
- Holtzman, B.K., Groebner, N.J., Zimmerman, M.E., Ginsberg, S.B. and Kohlstedt, D.L. (2003a) Stress-driven melt segregation in partially molten rocks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.4(5). <https://doi.org/10.1029/2001GC000258>
- Holtzman, B.K., Kohlstedt, D.L., Zimmerman, M.E., Heidelbach, F., Hiraga, T. and Hustoft, J. (2003b) Melt Segregation and Strain Partitioning: Implications for Seismic Anisotropy and Mantle Flow. *Science*, v.301(5637), p.1227-1230. <https://doi.org/10.1126/science.1087132>
- Jung, H. (2017) Crystal preferred orientations of olivine, orthopyroxene, serpentine, chlorite, and amphibole, and implications for seismic anisotropy in subduction zones: a review. *Geosciences Journal*, v.21(6), p.985-1011. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0045-1>
- Jung, H. and Karato, S.-i. (2001) Water-Induced Fabric Transitions in Olivine. *Science*, v.293(5534), p.1460-1463. <https://doi.org/10.1126/science.1062235>
- 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*, v.421(1), p.1-22. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.02.011>
- Jung, S., Jung, H., and Austrheim, H. (2014) Characterization of olivine fabrics and mylonite in the presence of fluid and implications for seismic anisotropy and shear localization. *Earth, Planets and Space*, v.66(1), p.46. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-46>
- Jung, S., Jung, H., and Austrheim, H. (2020) Microstructural Evolution of Amphibole Peridotites in Åheim, Norway, and the Implications for Seismic Anisotropy in the Mantle Wedge. *Minerals*, v.10(4), p.345. <https://doi.org/10.3390/min10040345>
- 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*, v.32(12), p.1045-1048. <https://doi.org/10.1130/g20805.1>

- Katayama, I. and Karato, S.-i. (2006) Effect of temperature on the B- to C-type olivine fabric transition and implication for flow pattern in subduction zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.157(1), p.33-45. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2006.03.005>
- Kil, Y.W. (2006) Characteristics of subcontinental lithospheric mantle beneath Baegryeong Island, Korea: Spinel peridotite xenoliths. *Island Arc*, v.15(2), p.269-282. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2006.00526.x>
- Kil, Y.W. (2007) Geochemistry and petrogenesis of spinel lherzolite xenoliths from Boeun, Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, v.29(1), p.29-40. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.12.006>
- Kil, Y.W. and Lee, S.H. (2005) Geochemical Characteristics of Clinopyroxenes in the Upper Mantle Rocks under the Baegryeong Island and the Boeun. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, v.18(1), p.61-72.
- Kil, Y.W., Shin, H.J., Yun, S.H., Koh, J.S., and An, W.S. (2008) Geochemical Characteristics of Mineral Phases in the Mantle Xenoliths from Sunheul-ri, Jeju Island *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, v.21(4), p.373-382.
- Kim, K.H., Nagao, K., Tanaka, T., Sumino, H., Nakamura, T., Okuno, M., Lock, J.B., Youn, J.S. and Song, J. (2005) He-Ar and Nd-Sr isotopic compositions of ultramafic xenoliths and host alkali basalts from the Korean peninsula. *Geochemical Journal*, v.39(4), p.341-356. <https://doi.org/10.2343/geochemj.39.341>
- Kim, O.J., Lee, D.S. and Lee, H.Y. (1977) Geological report of the Boeun sheet (1:50,000). Geological survey of Korea.
- Kim, Y.K., Lee, D.S., Song, Y.K., and Kim, S.E. (1988) Petrology of Ultramafic Nodules in Jogok-ri Basalt, Boun Area. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.24, p.57-66. <https://doi.org/10.14770/jgsk.1988.24.s.57>
- Lee, H.Y. (1996) Petrochemical Study of Mantle Xenoliths in Alkali Basalts from South Korea: P/T Regime of the Upper Mantle. *International Geology Review*, v.38(4), p.320-335. <https://doi.org/10.1080/00206819709465338>
- Lee, S.R. and Walker, R.J. (2006) Re-Os isotope systematics of mantle xenoliths from South Korea: Evidence for complex growth and loss of lithospheric mantle beneath East Asia. *Chemical Geology*, v.231(1), p.90-101. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.003>
- Liu, S., Tommasi, A., Vauchez, A., and Mazzucchelli, M. (2019) Deformation, Annealing, Melt-Rock Interaction, and Seismic Properties of an Old Domain of the Equatorial Atlantic Lithospheric Mantle. *Tectonics*, v.38(4), p.1164-1188. <https://doi.org/10.1029/2018tc005373>
- Mainprice, D., Bachmann, F., Hielscher, R. and Schaeben, H. (2015) Descriptive tools for the analysis of texture projects with large datasets using MTEX: strength, symmetry and components. *Geological Society, London, Special Publications*, v.409(1), p.251-271. <https://doi.org/10.1144/sp409.8>
- Mainprice, D., Tommasi, A., Couvy, H., Cordier, P. and Frost, D.J. (2005) Pressure sensitivity of olivine slip systems and seismic anisotropy of Earth's upper mantle. *Nature*, v.433(7027), p.731-733. <https://doi.org/10.1038/nature03266>
- Mercier, J.C.C. and Nicolas, A. (1975) Textures and Fabrics of Upper-Mantle Peridotites as Illustrated by Xenoliths from Basalts. *Journal of Petrology*, v.16(1), p.454-487. <https://doi.org/10.1093/petrology/16.1.454>
- Nicolas, A., Boudier, F., and Boullier, A.M. (1973) Mechanisms of flow in naturally and experimentally deformed peridotites. *American Journal of Science*, v.273(10), p.853-876. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.10.853>
- Nixon, P.H. (1987) *Mantle Xenoliths*. Wiley, Chichester, 844p.
- Norman, M.D. (1998) Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.130(3), p.240-255. <https://doi.org/10.1007/s004100050363>
- Park, M. (2022) Upper Mantle Heterogeneity Recorded by Microstructures and Fluid Inclusions from Peridotite Xenoliths Beneath the Rio Grande Rift, USA. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, v.35(3), p.273-281. <https://doi.org/10.22807/KJMP.2022.35.3.273>
- Park, M. and Jung, H. (2020) Analysis of electron backscattered diffraction (EBSD) mapping of geological materials: precautions for reliably collecting and interpreting data on petro-fabric and seismic anisotropy. *Geosciences Journal*, v.24(6), p.679-687. <https://doi.org/10.1007/s12303-020-0002-2>
- Park, M., Kil, Y. and Jung, H. (2020) Evolution of Deformation Fabrics Related to Petrogenesis of Upper Mantle Xenoliths Beneath the Baekdusan Volcano. *Minerals*, v.10(9), p.831. <https://doi.org/10.3390/min10090831>
- Parkinson, I.J. and Pearce, J.A. (1998) Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): Evidence for Mantle Melting and Melt-Mantle Interaction in a Supra-Subduction Zone Setting. *Journal of Petrology*, v.39(9), p.1577-1618. <https://doi.org/10.1093/ptro/39.9.1577>
- Pearce, J.A., Barker, P.F., Edwards, S.J., Parkinson, I.J. and Leat, P.T. (2000) Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.139(1), p.36-53. <https://doi.org/10.1007/s004100050572>
- Prior, D., Mariani, E. and Wheeler, J. (2009) EBSD in the Earth Sciences: Applications, Common Practice, and Challenges. In Schwartz, A.J., Kumar, M., Adams, B.L. and Field, D.P.(ed.) *Electron Backscatter Diffraction in Materials Science*. Springer, New York, p.345-360.
- Shin, H.J., Jin, M.S., Kil, Y.W. and Lee, S.H. (2006) Petrological study on upper mantle xenoliths from Asan and Pyeongtaek area. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.42(1), p.95-113. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2006.42.1.95>
- Skemer, P., Katayama, I., Jiang, Z., and Karato, S.-i. (2005) The misorientation index: Development of a new method for calculating the strength of lattice-preferred orientation. *Tectonophysics*, v.411(1), p.157-167. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.08.023>
- Teruaki, I., Paul, T.R., Hirokazu, M. and Richard, F. (1992) Petrological Studies of Peridotites from Diapiric Serpentine Seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana Forearc, Leg 125. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, v.125, p.445. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.125.129.1992>
- Tommasi, A., Mainprice, D., Canova, G. and Chastel, Y. (2000) Viscoplastic self-consistent and equilibrium-based modeling of olivine lattice preferred orientations: Implications for the upper mantle seismic anisotropy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.105(B4), p.7893-7908. <https://doi.org/10.1029/1999JB900411>

- Tommasi, A., Tikoff, B. and Vauchez, A. (1999) Upper mantle tectonics: three-dimensional deformation, olivine crystallographic fabrics and seismic properties. *Earth and Planetary Science Letters*, v.168, p.173-186. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00046-1)
- Tommasi, A. and Vauchez, A. (2015) Heterogeneity and anisotropy in the lithospheric mantle. *Tectonophysics*, v.661. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.026>
- Tommasi, A., Vauchez, A., Godard, M., and Belley, F. (2006) Deformation and melt transport in a highly depleted peridotite massif from the Canadian Cordillera: Implications to seismic anisotropy above subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, v.252(3), p.245-259. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.042>
- 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*, v.272(1), p.65-77. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.020>
- Vauchez, A., Dineur, F. and Rudnick, R. (2005) Microstructure, texture and seismic anisotropy of the lithospheric mantle above a mantle plume: Insights from the Labait volcano xenoliths (Tanzania). *Earth and Planetary Science Letters*, v.232(3), p.295-314. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.024>
- Vauchez, A. and Garrido, C.J. (2001) Seismic properties of an asthenospherized lithospheric mantle: constraints from lattice preferred orientations in peridotite from the Ronda massif. *Earth and Planetary Science Letters*, v.192(2), p.235-249. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00448-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00448-4)
- Wang, L., Blaha, S., Pintér, Z., Farla, R., Kawazoe, T., Miyajima, N., Michibayashi, K. and Katsura, T. (2016) Temperature dependence of [100](010) and [001](010) dislocation mobility in natural olivine. *Earth and Planetary Science Letters*, v.441, p.81-90. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.029>
- Wells, P.R.A. (1977) Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.62(2), p.129-139. <https://doi.org/10.1007/BF00372872>
- Witt-Eickchen, G. and Seck, H.A. (1991) Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.106(4), p.431-439. <https://doi.org/10.1007/BF00321986>
- Yang, K.H., Nam, B.H. and Kim, J.S. (2009) Textural Implications of Fine-Grained Peridotite Xenoliths in Basaltic Rocks from Jeju Island. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, v.22(1), p.1-11.
- Yu, J.E., Kim, S.W., and Yang, K.H. (2011) Silica Enrichment in Mantle Xenoliths Trapped in Basalt, Jeju Island: Modal Metasomatic Evidences. *Journal of the Petrological Society of Korea*, v.20(1), p.61-75. <https://doi.org/10.7854/JPSK.2011.20.1.061>
- Yun, S.H., Koh, J.S., and Anh, J.Y. (1998) A Study on the Spinel-Lherzolite Xenolith in the Alkali Basalt from Eastern Cheju Island, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.31(5), p.447-458.