

제주도 맨틀포획암내의 실리카 부화작용: 모달 교대작용의 증거

유재은 · 김선웅 · 양경희*

부산대학교 지구환경시스템학부, 지질환경과학과, 부산광역시 금정구 장전동, 609-735

Silica Enrichment in Mantle Xenoliths Trapped in Basalt, Jeju Island: Modal Metasomatic Evidences

Jae-eun Yu, Sun-woong Kim and Kyounghee Yang*

Dept. of Geological Sciences, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, 609-735

요약: 제주도 신산리에 분포하는 알칼리현무암에 포획된 하즈버그이트와 레졸라이트 맨틀 포획암에는 조직적으로 뚜렷하게 구별되는 이차 사방휘석이 산출되어 다양한 정도로 교대작용을 받았음을 지시한다. 이차 사방휘석은 감람석의 가장자리나 입자경계에 형성되어 있으며, 코로나 혹은 포이킬리틱 조직을 보여준다. 이러한 조직은 감람석이 소모되면서 사방휘석이 만들어진 것을 나타내는 것으로, 실리카가 포획된 유체 또는 멜트가 관여한 교대작용이 있었음을 지시한다. 제주도의 구조적 특성, 맨틀 포획암의 조직 그리고 주원소 조성에 의하면 이 실리카가 포획된 멜트나 유체는 수렴경계에 형성되는 섭입대에서 유래된 것으로, 제주도 하부상부맨틀 암석권은 제주도가 형성되기 이전에 맨틀웨이 환경에서 광범위한 실리카부화작용을 경험하였음을 시사한다.

핵심어: 맨틀포획암, 제주도, 이차 사방휘석, 실리카부화 교대작용, 섭입대

Abstract: Mantle-derived xenoliths, corresponding to spinel harzburgite and lherzolite in alkali basalts from Jeju Island, are metasomatized to various extents. They contain distinctive secondary orthopyroxene, forming corona or poikilitic textures. It clearly indicate that this secondary orthopyroxene has been produced at the expense of olivine along the grain boundaries and margins, suggesting silica-enriched metasomatic melt infiltrated through grain boundaries. Based on the geotectonic characteristics of Jeju Island and textural characteristics and major elements composition of mantle xenoliths, it is suggested that the silica-enriched melt/fluid could have derived from the ancient subducted slab, possibly in the mantle wedge, implying that the high SiO₂ activity in the lithospheric upper mantle beneath Jeju Island at that time.

Key words: mantle xenoliths, Jeju Island, secondary orthopyroxene, silica enrichment metasomatism, subducted slab

서 언

알칼리 현무암에 포획되어 지표면에 노출되어진 페리도타이트 포획암은 모마그마가 지표면을 향해 상승했던 상부맨틀의 어느 한 부분을 구성하고 있던 물질로서 상부맨틀의 물리화학적/유동학적 상태 연구에 가

장 실제적이고 정확한 정보를 제공하고 있다(Frey and Prinz, 1978; Nixon, 1987; Choi *et al.*, 2002; Szabó *et al.*, 2004; Arai *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2010). 이들 페리도타이트 포획암은 구조조적 환경(tectonic setting)에 따른 산출(혹은 노출) 빈도에 차이점이 있음이 보고되고 있다. 즉, 섭입판 위에 놓여 있는 맨틀웨이(mantle wedge) 환경에서 유래된 페리도타이트 포획암이 판내부의 열곡이나 열점 환경에서 보다 더 빈번하고 다양하게 산출된다(Nixon,

*Corresponding author
Tel: yangkyhe@pusan.ac.kr
E-mail: 051-510-2247

1987). 대부분의 맨틀웨이 환경의 페리도타이트는 실리카 부화작용(silica enrichment)을 받았으며 이러한 실리카 부화작용은 섭입판에서 유래한 실리카가 풍부한 멜트나 유체에 의해 일어난 것으로 알려져 있다(Kelemen *et al.*, 1998). 판내부 환경인 경우에도 실리카 부화작용에 대한 증거가 보고되고 있으며 그 교대작용의 대행자(agent)는 섭입환경에서와는 달리 알칼리현무암의 결정분별작용의 결과로 형성된 실리카가 포화된(silica-saturated) 멜트로 알려져 있다(Nekvasil *et al.*, 2004; Arai *et al.*, 2006).

제주도는 대륙지판내의 마그마 작용으로 형성된 제4기 화산섬으로 지화학적으로는 판내부기원 현무암류의 특성을 보인다(Lee *et al.*, 1982; 박준범 외, 1999; Tatsumi *et al.*, 2005). 최근 제주도의 지하지

질에 대한 연구가 보고되면서 중생대 백악기에는 제주도 위치한 지역도 경상분지가 겪은 안디안형(Andean-type) 섭입환경에서의 칼크-알칼리 마그마 활동을 경험하였음이 밝혀지고 있다(이문원 외, 1994; Kim *et al.*, 2003; 고기원 외, 2004). 이러한 지질학적 특성은 판구조론적으로 상반된 환경인 발산(constructive)/섭입(destructive) 환경이 시공간적으로 인접되어진 곳으로, 한반도 주변에 서로 상반된 마그마활동을 주도하였으며, 제주도를 형성한 마그마작용은 한반도 지역의 상부맨틀/하부지각에 대한 물리화학적, 지구동력학적 상태와 지구의 판구조론적 물질의 순환 연구에 중요하고 독특한 조건을 제공하고 있다.

제주도에 분포하는 알칼리현무암내에는 암석권 상부맨틀에서 유래된 페리도타이트 포획암이 풍부하게

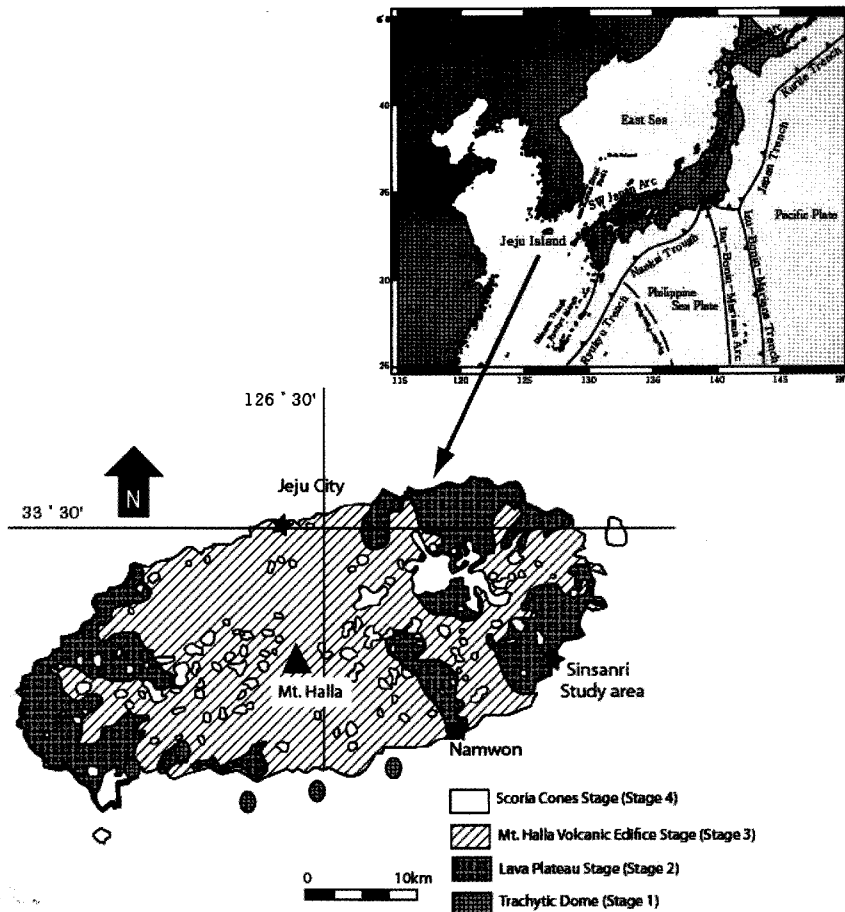


Fig. 1. Generalized geological map of Jeju Island showing stratigraphic relationships of volcanic rocks(after Lee, 1982) and a sample locality of this study. A photo-map containing present-day geodynamic setting along the eastern margin of Eurasian plate and geological framework of Jeju Island(top right) are also shown(after Tatsumi *et al.*, 2005).

포획되어 있다. 이들 암석에 관한 다수의 지화학적 연구가 이루어졌으며, 이러한 연구는 제주도 상부맨틀이 모달 교대작용은 받지 않고 은폐(cryptic) 교대작용을 받았음을 보고하였다(e.g., Choi *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2010). 본 연구는 감람석을 교대하여 생성된 이차 사방휘석의 조직적 증거에 근거하여, 기존의 연구 결과와는 달리 제주도에서 산출되는 페리도타이트 포획암이 모달 교대작용에 의한 실리카 부화작용을 경험하였음을 보고하고자 한다.

일반 지질

판내부 기원의 제4기 화산암으로 알려진 제주도는 유라시아판의 동쪽 연변에 위치하고 있으며, 필리핀판이 유라시아판 아래로 섭입하고 있는 난카이 트러프(Nankai Trough) 섭입대 전면에서 약 600 km 뒤쪽에 위치하고 있다(Nakamura *et al.*, 1989; Kubo and Fukuyama 2003)(Fig. 1). 신생대 배호분지인 동해분지와 남쪽의 제주-타이완 분지가 열리기 전의 제주도는 한반도의 육지와 연결되어 있었으며 백악기 동안 육지와 유사한 섭입대 관련 칼크-알칼린 마그마작용을 경험하여 한반도의 육지 부분과 동일한 조구조 운동을 경험한 것으로 알려져 있다(Kim *et al.* 2003; 고기원 외, 2004). 현재 제주도는 한반도 육지부와 마찬가지로 아모리안판에 위치하고 있어, 국부적인 판내부 열곡시스템 환경에 놓여 있는 것으로 알려져 있다(Hamdy *et al.* 2004).

제주도는 현무암에서 조면암류의 조성을 갖는 용암류와 360여개의 단성화산체, 그리고 소량의 쏘리아이트 현무암류로 이루어져 있다(Lee 1982; 박준범 외, 1999; 윤성효 외, 2002; Tatsumi *et al.*, 2005). 이들 화산암은 MgO 성분이 1~10 wt.%, Ni 성분이 180 ppm 이하로, 마그마가 지표면으로 분출하기 전에 광범위한 분화작용을 경험했음을 나타내고 있다(Nakamura *et al.* 1989; 박준범 외, 1999; 윤성효 외, 2002; Tatsumi *et al.* 2005; Brenna *et al.* 2010). 이러한 넓은 범위의 조성을 갖는 마그마는 주로 분별결정작용에 의해 생성되었으며 마그마 혼합이나 지각오염에 의한 것은 미미한 것으로 알려져 있다. 제주도의 알칼리 계열의 암석과 쏘리아이트 계열의 암석은 동일한 석류석 페리도타이트 근원암으로부터 부분용융의 정도를 달리하면서 형성된 마그마로부터 형성된 것으로 해석되기도 하며(박준범과 권성택, 1996; 윤성효

외, 2002), 반면에 결핍된 플럼에서 부분용융의 깊이가 다르고 그에 따라 서로 다른 부분용융의 정도에 의해 형성된 마그마가 분리되어 다양한 성분의 용암이 지표면에 분출되어진 것으로 제시되기도 한다(Tatsumi *et al.* 2005). 제주도 동부 신산리 지역의 맨틀 페리도타이트를 포획하고 있는 모 용암은 $\text{SiO}_2=49\sim50\text{ wt}\%$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5\sim6\text{ wt}\%$, $\text{MgO}=7\sim8\text{ wt}\%$ 범위의 값을 가지며 $\text{mg}\#=[100\times\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}_2)]$ 는 55~57를 나타내는데 (윤성효 외, 2002; 엄영보 외, 2007), 이는 제주도를 구성하고 있는 화산암 중에 비교적 고철질 성분에 해당한다.

페리도타이트 맨틀 포획암

암석기재

제주도 신산리에 분포하는 페리도타이트 맨틀포획암은 2-20 cm 크기의 각상에서 아각상, 아몬드 형, 길쭉한 형, 불규칙한 형 등 다양한 형태로 산출된다. 모암인 현무암과의 경계는 뚜렷하며, 경계면에는 기공이 더욱 많이 발달되는 경향을 보인다. 이들 포획암의 모달 성분은 하즈버가이트(harzburgite)-레졸라이트(lherzolite)-웹스터라이트(websterite)이며, 모두 침정석을 포함하고 있다(Fig. 2). 노두에서 산출되는 맨틀포획암 중 90 vol% 이상이 육안으로 관찰하였을 때 레졸라이트로 분류된다. 이들 포획암은 입자의 크기와 엽리 등의 특징에 의해 조립의 프로토티그라놀라(protogranular), 쌍봉입자를 가지는 포피로클라스틱(porphroclastic), 그리고 세립의 엽리를 보이는 마일로니틱(mylonitic) 조직으로 구분되는데, 이 중 조립의 프로토티그라놀라 조직이 거의 90 vol% 이상을 이루고 있다(유재은 외, 2010).

하즈버가이트 포획암은 감람석이 65 vol%, 사방휘석이 25 vol% 이상이며 단사휘석과 침정석은 10 vol% 미만으로 구성되어 있다(Table 1)(Fig. 2). 입자들 사이의 경계는 불규칙하며 거의 모든 입자는 타형이다. 감람석 입자의 크기는 조립(5 mm)에서 세립까지의 연속적인 스펙트럼을 이루고 있고 조립의 감람석에서는 킹크밴드(kink band)가 관찰되기도 한다(Figs. 3a & b). 현재는 모두 세립의 결정으로 이루어져 있지만 이전에 멜트였음을 보이는 고멜트포켓(paleo-melt pocket)인 곳에는 세립의 감람석이 광학적 연속성을 보이고 있어 하나의 큰 감람석 결정이 침입받아 붕괴되고 있음을 알 수 있다(Figs. 3a & b). 단사휘석은 매우 소량

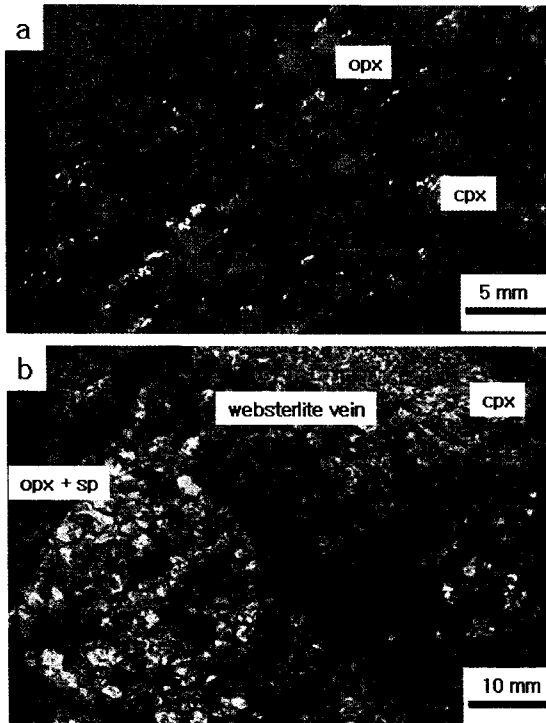


Fig. 2. Macroscopic views of the studied xenoliths from Jeju Island. (a) Harzburgite xenolith composed of mainly light greenish olivine and dark brownish orthopyroxene with considerably minor amount of interstitial emerald greenish clinopyroxene. (b) Lherzolite xenoliths composed of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene and spinel. Note that a websterite composed of dark green clinopyroxene and dark brown orthopyroxene cutting cross the lherzolite. ol=olivine, opx=orthopyroxene, cpx=clinopyroxene, sp=spinel.

으로 관찰되며 멜트포켓 내 세립의 감람석 결정 사이 (Fig. 3b)에서, 혹은 감람석과 사방휘석 사이의 간극을 채우면서 입자경계와 삼중점에서 대부분 산출된다 (Figs. 3c & e). 침정석도 매우 드물게 산출되며 멜트포켓 내에 세립의 입자와 함께 산출되는 것이 특징

적이다(Fig. 3a). 단사휘석과 침정석의 조직적 특징은 이 암석이 상당한 부분용융을 겪고 난 후 남아있었던 암석이란 것을 지시한다. 사방휘석은 뚜렷한 갈색의 다색성을 지니며 조립과 세립으로 쌍봉의 입자 분포(bimodal)를 보이는 것이 특징이다(Figs. 3a & c). 입자가 큰 사방휘석은 벽개가 발달되거나 미세한 단사휘석 엽리가 발달되어 지지분하게 보이는 반면, 세립의 사방휘석은 상대적으로 투명한 것이 특징이다(Figs. 3a & d). 세립의 사방휘석은 감람석 입자를 치환하거나(Figs. 3c & d), 감람석내의 미파쇄대나 아입자(subgrain) 경계를 따라 삼중점에서 형성되기도 하고(Figs. 3 & f), 감람석 입자의 가장자리에서 감람석을 치환하기도 한다. 사방휘석에 의해 치환된 감람석은 뚜렷한 결정을 이루지 않고 거의 비정질의 지지분한 모습을 보이며 사방휘석과 뚜렷한 경계를 보이지 않는다(Fig. 3d에서 굵은 점선화살표).

레졸라이트 포획암은 감람석이 40 vol%, 사방휘석이 23%, 단사휘석이 15% 이상이며, 침정석이 4~5%로 하즈버가이트 성분의 포획암에 비해 감람석 함량이 현저하게 줄어든 반면에, 그 외 다른 결정들의 함량이 증가했음을 노두에서도 뚜렷하게 관찰할 수 있다(Table 1)(Fig. 2b). 감람석을 치환하고 있는 이차 사방휘석은 앞서 구분한 세 가지 조직에서 모두 산출되는데, 이중 조립질인 프로토그라놀라 조직을 갖는 포획암에서 이차 사방휘석을 식별하는 것이 훨씬 용이하다(Fig. 4). 하즈버가이트 포획암에서의 유사하게 이차 사방휘석은 감람석의 아입자 경계(subgrain boundary)를 따라 치환하거나(Figs. 4a & b), 감람석을 완전히 둘러싸는 코로나(corona) 조직을 보이거나(Fig. 4c), 아니면 감람석을 포이킬리틱하게 포함하며 산출된다(Fig. 4d). 대부분의 경우 감람석은 광학적 연속성을 보여 간섭색이나 벽개가 연속적으로 이어지고 있어 하나의 큰 감람석 입자가 침입을 받아 붕괴

Table 1. Modal composition and lithology of the studied mantle xenoliths from Jeju Island

Xenoliths	ol	opx	cpx	sp	Rocknamea
SS13	68	25	4	3	harzburgite
SS132	70	25	3	2	harzburgite
06SS1	65	27	5	3	harzburgite
SS2	40	32	23	5	lherzolite
SS3	44	30	22	4	lherzolite
02SS2	56	25	15	4	lherzolite
07SS2	57	28	20	5	lherzolite
09SS2	55	23	18	4	lherzolite

Ol: olivine; Cpx: clinopyroxene; Opx: orthopyroxene; Sp: spinel

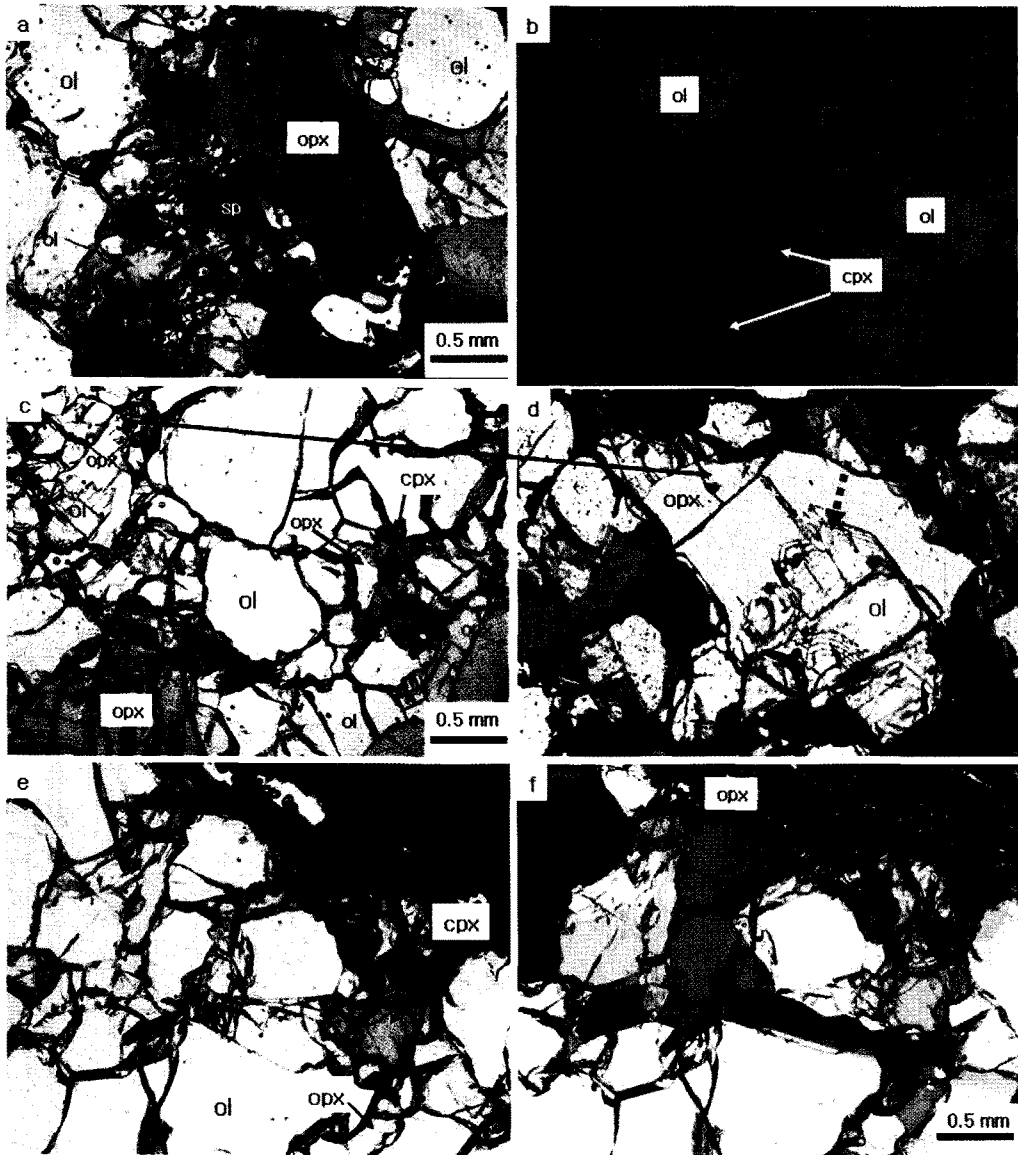


Fig. 3. Photomicrographs of harzburgite peridotite xenoliths from Jeju Island. Photos "b, c, e" were taken under plain-polarized light and "a, d, f" under cross-polarized light. (a) Characteristic textural feature of harzburgite showing paleo melting pocket containing fine-grained olivine, spinel and clinopyroxene surrounded by coarse-grained olivine and orthopyroxene. Note that the melted marginal phase and kink banding in olivine. (b) Enlarged photo of bottom left portion of the photo "a" showing fine-grained network-like olivine which is intermingled with clinopyroxene. (c) Interstitial clinopyroxene in considerably small amount. (d) Enlarged photo of the top left portion of the photo "c" showing secondary orthopyroxene replacing olivine and glass-like boundary between orthopyroxene and olivine (a dotted arrow). (e, f) Secondary orthopyroxene formed along the grain boundaries in olivine. ol=olivine, opx=orthopyroxene, cpx=clinopyroxene, sp= spinel.

되고 있음을 지시하고 있다.

웹스터라이트 포획암은 다량의 단사회석 함량에 의해 노두에서 뚜렷하게 인식되며 대체로 레졸라이트 포획암내에 맥상으로 산출된다(Fig. 2b). 하나의 입자

직경이 1 cm 이상인 것도 관찰되어 상부맨틀에서 페그마타이틱한 맥상으로 존재하는 것으로 예측되지만 앞으로 더 많은 시료채취를 통한 확인이 필요하다. 거정의 단사회석에 굵은 사방회석의 용리엽리가 매우

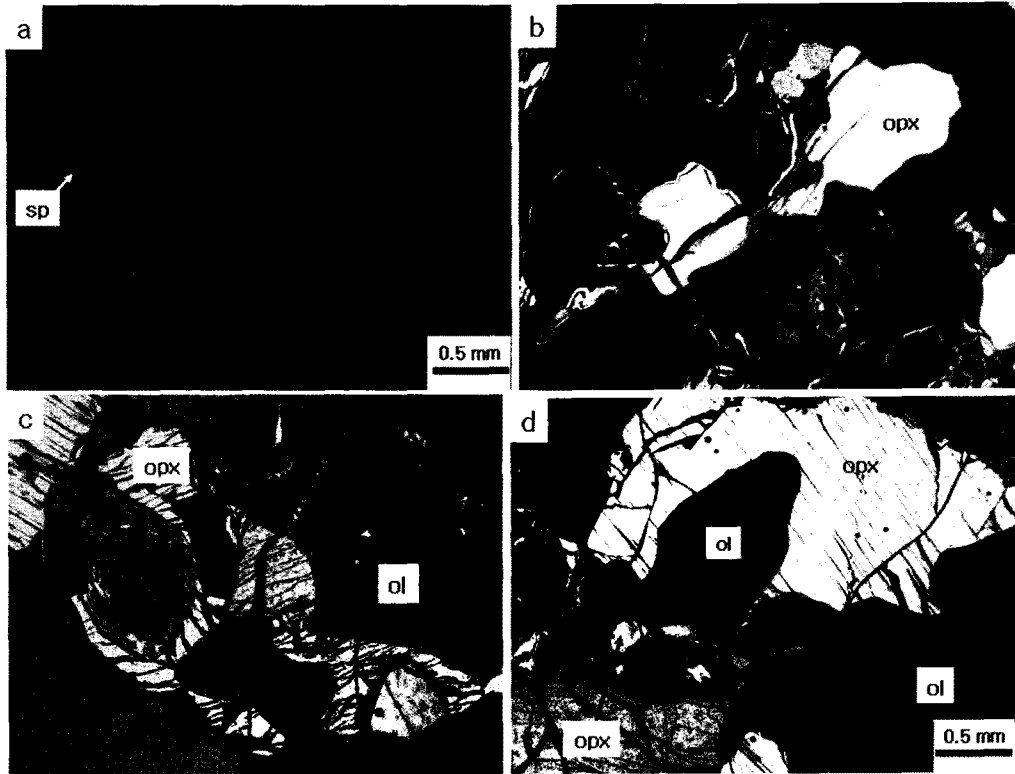


Fig. 4. Photomicrographs of Iherzolite xenoliths from Jeju Island. Except for the photo "a" under plain-polarized light, all pictures were taken under cross-polarized light. (a, b) Secondary orthopyroxene formed along the subgrain boundaries of olivine. (c) Secondary orthopyroxene showing corona texture, which is typical of metasomatic texture. Note that the consistent fracture direction and interference colors between two separated olivine grains indicating a optical continuity. (d) Poikilitically enclosed olivine in orthopyroxene indicating that the orthopyroxene is replacing olivine. ol=olivine, opx=orthopyroxene, cpx=clinopyroxene.

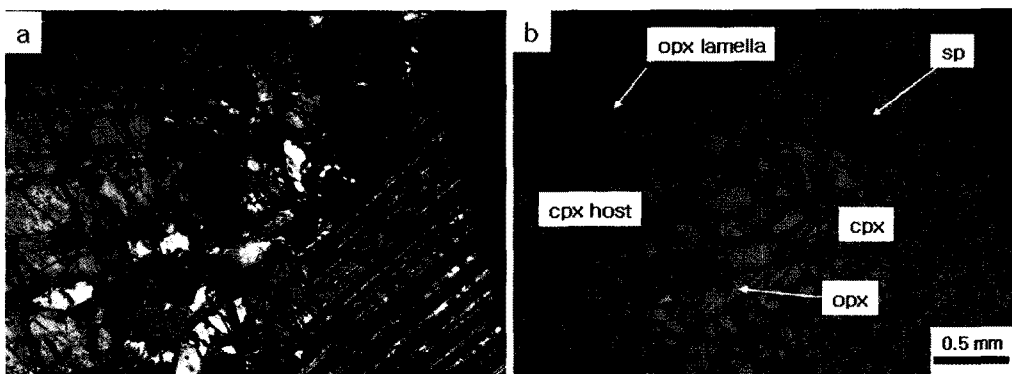


Fig. 5. Photomicrographs of websterite xenoliths from Jeju Island. The photo "a" were taken under cross-polarized light and "b" under plain-polarized light. (a, b) Large clinopyroxene containing thick orthopyroxene exsolution lamella. opx=orthopyroxene, cpx=clinopyroxene, sp=spinel.

특징적이며 이 용리엽리는 육안으로도 관찰 가능할 때도 있다. 이 용리엽리는 구부러져 있으며, 어떤 곳에서는 단사휘석이 절단되어 부딘(boudin)구조와 유

사한 모습으로 재결정화 되어 있다(Fig. 5). 재결정화가 이루어진 곳에서는 세립의 단사휘석, 사방휘석 및 침정석이 함께 산출된다. 웹스터라이트 포획암에서는

감람석이 관찰되지 않으며 그에 따라 이차 사방휘석의 인식도 어렵다. 이 논문에서는 이차 사방휘석의 형성이 뚜렷한 하즈버그이트-레졸라이트 포획암에 초점을 맞출 것이며, 웹스터라이트 포획암에 대해서는 예비적으로 소개만 할 뿐 이에 대한 자세한 연구는 향후 다른 연구에서 다루어 질 것이다.

주성분원소 성분조성

현미경 하에서 이차 사방휘석을 뚜렷하게 보이는 대표적인 시료 8개를 암석기재와 성분분석을 위해 선택하였다. 이들 포획암을 구성하고 있는 광물(감람석, 사방휘석, 단사휘석, 침정석)에 대한 주성분원소 분석은 부산대학교 공동실험실습관에 있는 CAMECA SX100 전자현미분석기를 이용하여 실시하였다(Tables 2-5). 가속전압 15 kv, 샘플 전류 10 nA, 빔 직경 1 μm으로 분석 하였으며 각 원소의 분석시간은 10초로 하였다. 분석을 위해 천연과 인조의 표준 샘플을 사용하였다. 정밀도는 ±1%, 정확도는 ±0.3%로 유지하였다. 하나의 결정 내에서 BSE 사진을 통해 중앙부와 가장자리를 세밀하게 분석하였으나 화학적 누대

가 관찰되지 않았으며 매우 균질한 조성을 보였다. 맨틀 페리도타이트 포획암을 구성하고 있는 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 침정석의 주성분원소 조성은 입자의 크기나 조직적 차이와는 상관없이 거의 일정하다(Choi *et al.*, 2002; 유재은 외, 2010; Yang *et al.*, 2010).

연구지역에서 채취된 하즈버그이트-레졸라이트 포획암을 구성하고 있는 감람석, 사방휘석, 단사휘석의 mg#는 거의 일정하지만 (감람석: 88~92; 사방휘석: 89~92; 단사휘석: 90~92)(Tables 2-5), 하즈버그이트 포획암이 레졸라이트 포획암보다 약간 높은 mg#와 cr#[=100×Cr/(Cr+Al)]를 보인다(Fig. 6). 공존하는 감람석과 침정석의 Fo함량과 cr#을 도시한 OSMA(olivine-spinel mantle array) 도표에서 하즈버그이트 포획암과 레졸라이트 포획암은 뚜렷하게 구별되며, 침정석의 cr#가 감소함에 따라 감람석에서 Fo 함량이 감소하는 경향이 인지된다(Fig. 6). 침정석의 cr#는 하즈버그이트 포획암인 경우에는 54~47이며, 레졸라이트 포획암인 경우에는 30~11로 모달성분과 주성분이 일관됨을 보여주며(Tables 1 & 2), 감람석의 Fo

Table 2. Selected microprobe analyses (wt%) of olivine in the studied mantle xenoliths from Jeju Island

	SS13		SSI32		06SSI		SS2	
	coarse	fine	coarse	fine	coarse	fine	coarse	fine
SiO ₂	39.43	39.11	41.16	41.66	41.78	41.85	40.89	40.62
FeO	9.25	9.47	8.97	8.88	8.00	8.19	8.83	9.55
MnO	0.13	0.12	0.16	0.11	0.14	0.07	0.11	0.11
MgO	50.99	51.09	48.81	48.96	49.55	49.81	50.21	50.22
CaO	0.06	0.02	0.08	0.08	0.05	0.07	0.03	0.07
NiO	0.36	0.44	0.40	0.38	0.43	0.41	0.43	0.37
Mg#	91	90	91	91	92	91	91	90
Total	100.22	100.25	99.58	100.07	99.96	100.40	100.50	100.94
	SS3		02SS2		07SS2		09SS2	
	coarse	fine	coarse	fine	coarse	fine	coarse	fine
SiO ₂	40.05	39.78	41.15	41.21	38.79	39.08	38.85	40.36
FeO	10.33	10.44	9.78	9.61	10.70	11.74	10.57	11.00
MnO	0.14	0.14	0.14	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
MgO	48.89	48.95	48.41	48.32	50.13	49.48	50.41	47.61
CaO	0.06	0.05	0.06	0.07	0.05	0.07	0.07	0.05
NiO	0.39	0.34	0.40	0.46	0.34	0.38	0.42	0.37
Mg#	89	89	90	90	89	88	89	88
Total	99.90	99.74	99.94	99.84	100.17	100.90	100.57	99.55

Table 3. Selected microprobe analyses (wt%) of spinel in the studied mantle xenoliths from Jeju Island

	SS13		SS132	06SS1	SS2		SS3
SiO ₂	0.00	0.03	0.10	0.06	0.09	0.05	0.03
TiO ₂	0.16	0.15	0.18	0.14	0.17	0.15	0.08
Al ₂ O ₃	24.57	25.16	25.51	30.45	41.21	41.67	56.24
Cr ₂ O ₃	40.76	40.18	44.00	40.39	25.94	25.78	10.47
FeO	17.81	17.76	15.89	13.44	12.78	12.69	12.11
MgO	15.54	15.49	14.77	16.22	19.32	19.23	21.40
NiO	0.23	0.19	0.17	0.17	0.25	0.22	0.40
Mg#	61	61	62	68	73	73	76
Cr#	53	52	54	47	30	29	11
Total	99.07	98.96	100.62	100.87	99.76	99.79	100.78
	SS3	02SS2		07SS2		09SS2	
SiO ₂	0.11	0.11	0.03	0.05	0.07	0.07	0.08
TiO ₂	0.06	0.14	0.15	0.12	0.09	0.09	0.08
Al ₂ O ₃	55.15	53.60	54.86	47.05	46.89	48.44	50.50
Cr ₂ O ₃	10.14	11.24	11.64	19.26	19.05	17.84	16.01
FeO	12.03	11.78	11.65	14.65	14.18	13.66	12.90
MgO	20.85	21.73	21.77	19.11	19.11	19.70	20.11
NiO	0.39	0.43	0.43	0.31	0.37	0.31	0.31
Mg#	76	77	77	70	71	72	74
Cr#	11	12	12	22	21	20	18
Total	98.82	99.03	100.53	100.55	99.76	100.11	99.99

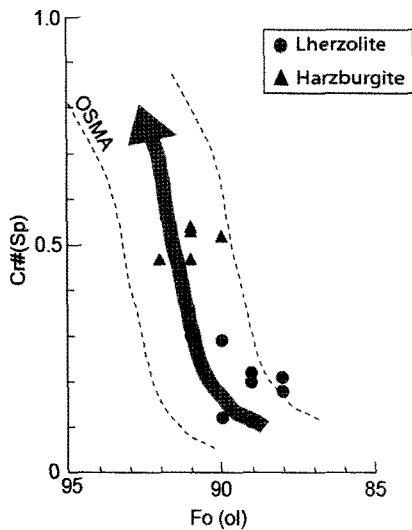


Fig. 6. Relationships between the Fo content of olivine and Cr# of spinel in peridotite xenoliths from Jeju Island. The thick gray line with arrow indicates those from unmetasomatized xenoliths denoting a residual trend within the olivine-spinel mantle array (after Arai *et al.*, 2003). OSMA: Olivine-Spinel Mantle Array from Arai (1994).

함량보다는 침정석의 cr#에 의해 이들 포획암이 더 쉽게 구분된다(Fig. 6). 교대작용을 받지 않은 페리도타이트가 나타내는 일련의 성분범위(즉, Fig. 6에서의 굵은 화살표)에서 제주도의 페리도타이트 포획암은 비교적 변이가 넓게 나타나 일련의 교대작용을 받았음을 지시하고 있다. 이들의 mg#과 cr# 범위는 제주도의 다른 지역 및 세계 다른 곳의 맨틀 페리도타이트 포획암의 값과 유사하다(Frey and Prinz, 1978; Xu *et al.*, 1998; 윤성효 외, 1998; Choi *et al.*, 2002; Szabó *et al.*, 2004). 특히 제주도의 하즈버가이트는 캄차카호상열도에서 산출되는 하즈버가이트와 유사한 값을 보인다(Arai *et al.*, 2003). 하즈버가이트 포획암은 약 25~30%의 부분용융을, 레졸라이트 포획암은 약 20%의 부분용융을 경험한 잔류맨틀임을 나타내고 있다(Choi *et al.*, 2002; 유재은 외, 2010; Yang *et al.*, 2010).

하즈버가이트 포획암 내의 사방휘석은 레졸라이트 포획암에 비해 낮은 Al₂O₃(하즈버가이트: 1.87~2.72 wt%; 레졸라이트: 3.22~4.85 wt%) 함량을 가지며, Cr₂O₃(하즈버가이트: 0.46~0.77 wt%; 레졸라이트: 0.31~0.71

wt%)와 CaO(하즈버그아이트: 0.68~0.83 wt%; 레졸라이트: 0.59~0.74 wt%)성분은 명확하게 구별 되지는 않지만 하즈버그아이트가 대체로 높은 편이다(Table 4)(Fig. 7). 또한 조립의 일차로 여겨지는 것과 세립의 이차로 여겨지는 사방휘석 사이의 성분조성의 차이도 없다. 교대작용에 의해 형성된 사방휘석의 주성분조

성은 조구조환경을 식별할 수 있는 두 개의 그룹, 즉 아바차형(Avacha-type)과 타카시마형(Takashima-type)으로 나누어진다는 연구가 보고되어 있다(Arai *et al.*, 2006). 즉, 아바차형은 캄차카 지역의 아바차 화산에서 수집된 맨틀포획암에서 유래한 것으로 섭입환경에서 섭입판으로부터 유래된 실리카가 부화된 수용성

Table 4. Selected microprobe analyses (wt%) of orthopyroxene in the studied mantle xenoliths from Jeju Island

	SS13		SS132		06SS1			SS2	
	coarse	fine	coarse	fine	coarse	fine	fine	coarse	fine
SiO ₂	56.26	56.63	56.87	56.83	56.98	57.03	56.82	55.56	56.21
TiO ₂	0.04	0.02	0.03	0.03	0.07	0.03	0.05	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	1.98	2.07	2.11	1.87	2.72	2.48	2.47	3.33	3.22
Cr ₂ O ₃	0.54	0.46	0.77	0.57	0.75	0.57	0.67	0.47	0.59
FeO	5.82	5.72	5.20	5.48	5.20	5.07	5.26	5.65	5.40
MnO	0.10	0.13	0.10	0.14	0.10	0.15	0.12	0.11	0.11
MgO	34.64	34.89	33.36	33.55	33.19	33.46	33.21	34.58	34.24
CaO	0.70	0.74	0.83	0.78	0.68	0.70	0.83	0.66	0.69
Na ₂ O	0.08	0.13	0.15	0.10	0.15	0.12	0.11	0.05	0.07
NiO	0.07	0.13	0.10	0.06	0.12	0.11	0.08	0.11	0.12
Mg#	92	92	92	91	91	92	91	92	92
Wo	1	1	2	2	1	1	2	1	1
En	88	88	90	90	91	91	90	90	90
Fs	10	10	8	8	8	8	8	8	8
Total	100.68	100.89	99.56	99.41	99.99	99.77	99.62	100.60	100.70
	SS3		02SS2			07SS2		09SS2	
	coarse	fine	coarse	fine	fine	coarse	fine	fine	coarse
SiO ₂	53.71	54.28	55.61	56.23	55.60	52.92	53.49	54.42	54.77
TiO ₂	0.08	0.10	0.13	0.07	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04
Al ₂ O ₃	4.85	4.84	4.26	4.18	4.44	4.32	3.86	4.42	4.22
Cr ₂ O ₃	0.47	0.42	0.31	0.31	0.36	0.71	0.47	0.63	0.53
FeO	6.87	7.05	6.19	6.05	6.24	6.65	6.92	6.41	6.86
MnO	0.12	0.12	0.12	0.16	0.15	0.13	0.09	0.11	0.09
MgO	32.67	32.77	32.60	32.51	32.74	33.73	33.84	33.76	32.06
CaO	0.59	0.64	0.74	0.69	0.74	0.72	0.69	0.70	0.65
Na ₂ O	0.05	0.06	0.09	0.12	0.10	0.11	0.10	0.08	0.07
NiO	0.13	0.09	0.02	0.08	0.11	0.07	0.11	0.06	0.15
Mg#	90	89	90	90	90	91	91	91	89
Wo	1	1	1	1	1	1	1	1	1
En	88	88	89	89	89	88	88	89	88
Fs	10	11	10	10	10	10	10	10	11
Total	99.55	100.28	100.05	100.39	100.49	99.44	99.65	100.63	99.43

유체가 맨틀 감람석과 반응하여 형성된 사방휘석으로 정의하였으며, 타카시마형은 일본 남서부의 타카시마 지역의 타카시마 화산에서 수집된 맨틀포획암에서 유래한 것으로 판내부 환경에서 형성된 알칼리 현무암의 분화과정(즉, 분별결정작용)에서 유래된 실리카가 부화된 멜트와 맨틀 감람석이 반응하여 형성된 사방휘석으로 정의하였다. 타카시마는 제주도에서 약 400 km 떨어진 곳으로 그 지역의 현무암도 제주도와 유사하게 판내부 OIB 특성을 가진다(Nakamura *et al.*, 1989; Arai *et al.*, 2006). 제주도의 사방휘석은 아바차형과 타카시마형보다 높은 Cr₂O₃ 함량을 가지고 있지만 Cr₂O₃와 CaO 함량에 있어서 비교적 아바차형 영역 근처에 도시되는 경향을 보여준다(Fig. 7). 즉,

Cr₂O₃와 CaO 함량에서 제주도 이차 사방휘석은 타카시마형과 뚜렷하게 구별되고 있지만 Al₂O₃ 함량은 아바차형과 타카시마형 사이에서 연속적인 스펙트럼을 형성하고 있다(Fig. 7). 단사휘석의 Na와 Al 사이의 상관관계 다이어그램에서 하즈버가이트 포획암은 레졸라이트 포획암과 뚜렷하게 구별되어 도시되며, 레졸라이트 포획암보다 높은 Na, 낮은 Al 함량을 보이고 있다(Fig. 8a). 이들 포획암은 각각 양의 상관관계를 나타내고 있으며, 이러한 패턴은 지하하부의 암석권 맨틀의 일반적인 모습이다(Frey and Prinz, 1978; Szabot *et al.*, 2004). 이는 하즈버가이트 포획암에 불호정성 원소가 더욱 결합되어 있으며, 더 높은 부분용융 사건을 겪었음을 나타내고 있다. 또한 단사휘석은

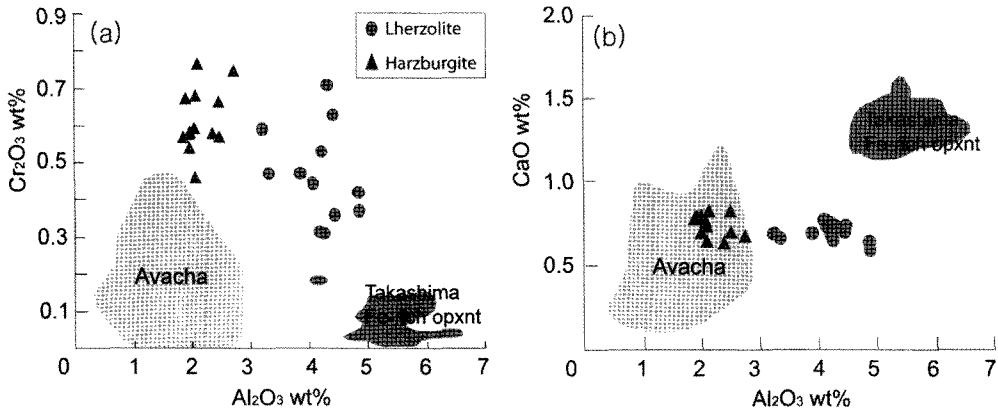


Fig. 7. Relationships between Al₂O₃ versus Cr₂O₃ and CaO of secondary orthopyroxenes from the studied xenoliths from Jeju Island compared to those from Avacha and Takashima volcano (Arai *et al.* 2006).

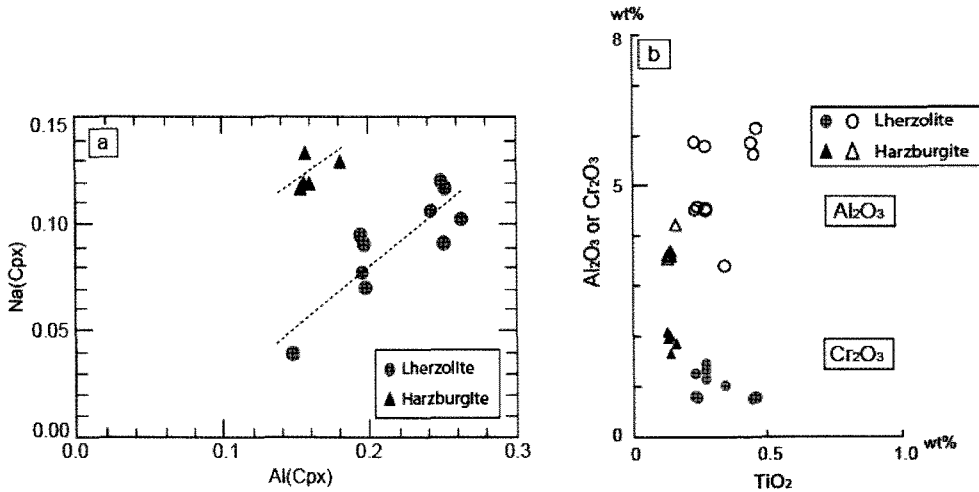


Fig. 8. (a) Correlation diagram of Na-Al(atomic#) and (b) relationships between TiO₂ and Al₂O₃ or Cr₂O₃ of clinopyroxene for the studied mantle xenoliths.

Table 5. Selected microprobe analyses (wt%) of clinopyroxene in the studied mantle xenoliths from Jeju Island

	SS13		SS132		06SS1		SS2	
SiO ₂	52.77	53.08	52.76	53.51	53.79		52.49	52.17
TiO ₂	0.14	0.14	0.13	0.13	0.16		0.27	0.27
Al ₂ O ₃	3.63	3.73	3.65	3.57	4.27		4.55	4.59
Cr ₂ O ₃	2.01	1.67	2.09	1.96	1.87		1.46	1.15
FeO	2.74	2.62	2.46	2.52	2.52		2.63	2.61
MnO	0.07	0.05	0.02	0.01	0.02		0.08	0.08
MgO	16.45	16.43	15.68	15.62	15.69		16.48	16.32
CaO	19.85	20.01	20.41	20.46	20.21		20.56	20.85
Na ₂ O	1.69	1.69	1.89	1.65	1.85		1.35	1.28
NiO	0.04	0.04	0.05	0.09	0.02		0.06	0.07
Mg#	92	92	92	92	92		92	92
Wo	44	44	46	46	46		45	46
En	51	51	50	49	50		50	50
Fs	5	5	4	5	4		5	4
Total	99.39	99.46	99.17	99.55	100.43		99.93	99.39
	SS3		02SS2		07SS2		09SS2	
SiO ₂	52.19	51.66	51.98	52.63	51.93	51.53	52.57	52.71
TiO ₂	0.44	0.46	0.45	0.34	0.23	0.27	0.23	0.24
Al ₂ O ₃	5.90	6.18	5.66	3.44	5.91	5.83	4.56	4.62
Cr ₂ O ₃	0.77	0.80	0.81	1.03	1.27	1.33	0.82	0.80
FeO	2.89	2.89	3.02	3.66	3.07	3.06	2.88	2.91
MnO	0.07	0.07	0.11	0.11	0.08	0.07	0.09	0.05
MgO	15.35	15.31	15.89	17.64	15.71	15.66	16.03	16.24
CaO	21.27	21.27	19.93	20.22	19.79	20.10	21.29	21.24
Na ₂ O	1.30	1.46	1.51	0.55	1.67	1.71	1.09	0.99
NiO	0.07	0.04	0.08	0.10	0.01	0.03	0.04	0.05
Mg#	91	91	91	90	91	91	91	91
Wo	47	47	45	42	45	45	46	46
En	48	47	50	51	50	49	49	49
Fs	5	5	5	6	6	5	5	5
Total	100.23	100.12	99.45	99.73	99.68	99.62	99.66	99.84

TiO₂ 0.13~0.46 wt%, Cr₂O₃ 0.77~2.09 wt%, Al₂O₃ 함량은 3.44~6.18 wt% 범위를 보인다(Table 5). Al₂O₃와 TiO₂는 양의 상관관계, Cr₂O₃와 TiO₂는 음의 상관관계를 나타내는데(Fig. 8b), 이러한 경향은 세계 다른 곳의 대부분의 맨틀 페리도타이트 포획암에서 관찰되는 것과 유사하다 (Frey and Prinz, 1978; Xu *et al.*, 1998; Szabó *et al.*, 2004; Arai *et al.*, 2006).

토 의

제주도에 분포하는 현무암과 맨틀포획암에 대한 기존의 지화학적 연구는 제주도 하부 상부맨틀은 깊이가 깊어질수록 더욱 더 부화되어지는 특성을 보이며, 모달 교대작용의 가능성을 배제한 채 은폐 교대작용만을 경험하였다고 보고하였다(Choi *et al.*, 2002;

Tatsumi *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2010). 그러나 연구가 점차 진행되면서 다양한 형태의 산출양상을 보이는 이차 사방휘석의 거의 모든 맨틀 페리도타이트 포획암에서 산출된다는 것이 관찰되었다(Figs. 3 & 4). 포획암을 구성하고 있는 감람석의 가장자리나 입자경계에 형성된 사방휘석, 감람석을 포위하는 포이킬리틱 혹은 코로나 조직 등은 분명하게 반응연(reaction rim)을 나타내고 있으며, 입자 경계면에서 광물들이 다시 반응하였음을 나타내는 교대작용의 증거로 제시되어진다(White, 2001). 제주도 맨틀 포획암 내에 존재하는 이차 사방휘석이 선택적으로 감람석과 관련되어 산출되는 양상은 이 광물이 감람석을 소모시키는 반응에 의해 생성된 것임을 분명하게 지시한다. 이러한 조직적 특성은 제주도 하부 상부맨틀이 광범위한 실리카 부화작용을 경험하였으며, 많은 양의 실리카가 유입되었음을 시사한다. 조직적으로는 일차(primary) 혹은 이차(secondary) 사방휘석임이 확연하게 다르게 산출되지만 이들 결정들 사이의 주성분 조성, mg#, 그리고 cr#에 큰 차이가 없어 성분상의 평형이 이루어졌음을 의미한다. 이는 높은 온도에서 Mg와 Fe 원소의 분산속도(diffusion rate)가 빨라 이들 광물이 빠르게 평형에 이르렀거나 혹은 비교적 오랜 기간에 걸쳐 반응이 일어났음을 지시한다.

섭입환경에 있는 맨틀웨지의 페리도타이트에 실리카부화작용이 광범위하게 일어나고 있다는 것은 널리 알려진 사실이다(Ertan and Leeman, 1996; Smith and Riter, 1997; Kelemen *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 1999; Franz *et al.*, 2002; Arai *et al.*, 2003; Bali *et al.*, 2008, and references therein). 교대작용의 결과물로서 이차 사방휘석 뿐만 아니라 이차의 각 섬석 혹은 급운모의 산출 등이 보고되고 있다. 그러나 이 중에 실리카부화작용에 대한 연구는 비교적 최근의 일이며, 실리카부화작용은 가장 광범위한 교대작용으로 여겨지고 있다(Franz *et al.*, 2002; Arai *et al.*, 2003). 섭입환경에서 실리카부화작용을 야기한 대행자는 하강하는 섭입판에서 유래된 실리카가 풍부한 멜트/유체로서, 이러한 멜트나 유체는 지표면을 향해 상승하면서 맨틀웨이 환경에 놓인 감람석과 반응하는 것으로 알려져 있다(e.g., Kelemen *et al.*, 1998). 판 내부 환경인 경우에도 실리카부화작용의 증거가 보고되고 있으며 그 교대작용의 대행자는 섭입환경에서와는 달리 부분용융에 의해 형성된 알칼리현무암에 기원을 가지는 실리카가 포화된 멜트로 보고되어 있다

(Nekvasil *et al.*, 2004; Arai *et al.*, 2006). 맨틀 페리도타이트의 부분용융에 의해 형성된 현무암질 마그마가 효율적인 결정분별작용을 거친다면 충분히 실리카가 포화된 멜트가 형성되어질 수 있으며, 이 멜트는 맨틀 페리도다이트와 반응하여 이차의 사방휘석을 형성하는 것으로 보고되고 있다(Nekvasil *et al.*, 2004; Arai *et al.*, 2006).

본 연구에서 획득된 조직과 주성분 조성의 특성은 제주도 하부 상부맨틀 암석권이 섭입환경에서 형성된 멜트/유체에 의해 실리카부화작용을 경험하였음을 다음과 같은 증거로 제시한다. 만약에 모마그마와 관련된 현무암질 마그마의 분화과정에서 유래된 실리카부화작용이라면 매우 최근의 사건이다. 3 Ma의 화산활동과 관련되어 만들어진 타카시마 지역의 이차 사방휘석은 침상의 방사성 모양이거나 모자이크 유사한 세립의 결정으로 비교적 급하게 냉각된 증거를 보인다(Arai *et al.*, 2006). 헝가리의 카파시안-페노니안(Carpathian-Pannonian) 지역에는 제주도와 유사한 연대를 보이는 화산암이 분포하며, 이에 포획된 맨틀포획암 내 멜트포켓(melt pocket)의 존재와 그 중요성에 대해 보고되었다(Bali *et al.*, 2002, 2008; Szabó *et al.*, 2004). 멜트포켓은 현미경 하에서 유리(glasse)와 같이 급냉된 멜트의 모습을 보이는 조직이다. 제주도의 맨틀포획암의 사방휘석은 뚜렷한 결정의 모습을 보이며, 간극을 채우는 유리질의 흔적은 전혀 관찰되지 않고, 고(paleo)멜트포켓만이 관찰된다(Fig. 3a). 이러한 조직적 특성은 맨틀포획암이 실리카부화작용을 오래전에 경험하였음을 지시하는 것으로 유추된다.

Arai *et al.*(2006)는 이차 사방휘석의 주성분 조성에 의해 이들이 형성된 조구조환경, 즉 판내부환경(타카시마형)과 섭입환경(아바차형)의 식별이 가능한 다이어그램을 제안하였다(Fig. 7). 동 논문에서 제시된 아바차형은 캄차카지역의 아바차 화산뿐만 아니라 세계의 다른 섭입환경에서 실리카부화작용에 의해 형성된 사방휘석들의 주성분 조성을 포함하여 정의한 것이기 때문에 다이어그램의 식별 신뢰도는 높다고 여겨진다. 즉, 스페인의 달란트(Tallante)(Shimizu *et al.*, 2004), 파푸아 뉴기니아(McInnes *et al.*, 2001), 미국의 캐스캐이드(Cascades)(Ertan and Leeman, 1996), 일본의 호로만(Horoman)지역(Morishita *et al.*, 2003a), 알프스 서부지역(Morishita *et al.*, 2003b)에서 획득된 데이터는 모두 아바차형이라고 제시된 영역 속에 도

시된다(Fig. 7). 이 다이어그램에 제주도의 데이터를 도시해보면, 제주도의 이차 사방휘석은 대체로 아바차형에 도시되며 타카시마형과는 식별이 되고 있다(Fig. 7). 더욱이 제주도를 포함하여 한반도에 분포하는 맨틀포획암에 대한 He-Ar과 Nd-Sr 동위원소 연구는 한반도 아래 암석권 상부맨틀은 현재가 아닌 과거의 섭입환경에서 유래된 유체에 의해 교대작용을 받았음을 제시하고 있다(Kim *et al.*, 2005).

제주도는 지질학적으로 혹은 조구조적으로 매우 특별한 곳이다. 현재 제주도는 판내부 리프트시스템에 놓여있으며 일본의 난카이 트러프 섭입대 전면에서 약 600km 뒤쪽에 위치하고 있다(Nakamura *et al.*, 1989; Kubo and Fukuyama, 2003). 백악기 동안은 유라시아판 아래로 필리핀 판이 섭입하는 섭입대 관련 칼크-알칼린 마그마 작용을 경험하였으며, 그 당시 제주도는 한반도의 육지 부분과 동일한 조구조 운동을 경험한 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2003; 고기원 외, 2004). 이러한 조구조적 특성은 제주도가 현재 판내부 리프트시스템에 놓여있지만 과거에는 섭입환경 혹은 맨틀웨이 시스템에 있었음을 의미한다. 이러한 제주도의 조구조 특성, 포획암의 조직적 특성과 주원소 성분조성의 특성은 제주도 하부 상부맨틀 암석권은 섭입환경에서 형성된 유체에 의한 실리카 부화작용을 경험하였음을 시사한다. 그러나 실리카부화작용 대행자의 기원에 대한 좀 더 확연하고 세밀한 특성을 파악하기 위해서는 미량원소 성분조성, 유체포유물연구와 같은 심도 깊은 데이터와 함께 더 많은 검토와 토의가 필요하다.

결 론

1. 제주도 신산리에 분포하는 페리도타이트 맨틀포획암은 하즈버가이트(harzburgite)-레졸라이트(lherzolite)-웹스터라이트(websterite)이며, 모두 침정석을 포함하고 있다. 웹스터라이트 포획암은 레졸라이트 포획암내에 맥상으로 산출된다.

2. 제주도 맨틀포획암은 광범위한 모달 교대작용을 받았으며, 조직적으로 뚜렷하게 구별되는 이차 사방휘석이 산출된다. 이차 사방휘석은 감람석이 소모되면서 형성되어진 것으로 이는 제주도 하부 상부맨틀이 광범위한 실리카 부화작용을 경험하였음을 의미한다. 교대작용에 의해 형성된 이차 사방휘석의 주성분 조성은 일차로 여겨지는 조립의 사방휘석과 조성의

차이가 없어 완전한 평형상태에 도달하였음을 나타내고 있다.

3. 제주도의 조구조 특성, 포획암의 조직적 특성과 주원소 조성의 특성은 제주도 하부 상부맨틀 암석권은 섭입환경에서 형성된 유체에 의해 실리카 부화작용을 경험하였음을 지지하고 있다.

사 사

세심한 심사를 통해 논문의 질을 높여주신 강원대학교 박영록 교수님과 이승렬박사님께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 2010년 여성과학자지원사업으로 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2011-0003692).

참고문헌

- 고기원, 박윤석, 박언배, 2004, 제주도 동부지역의 지하 지질분포와 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대. 2004 대한지질학회 춘계학술답사, 대한지질학회, 29-50.
- 박준범, 권성택, 1996, 제주도 솔리아이트 화산활동. 암석학회지, 5, 66-83.
- 박준범, 박기화, 조동룡, 고기원, 1999, 제주도 제 4기 화산암류의 암석화학적 분류. 지질학회지, 35, 253-264.
- 임영보, 양경희, 남복현, 황병훈, 김진섭, 2007, 제주도 알칼리 현무암에 포획된 반려암질 포획암, 광물학회지, 20, 103-114.
- 유재은, 양경희, 김진섭, 2010, 제주도 침정석 페리도타이트 포획암의 조직 및 지화학적 특성과 그 관련성, 암석학회지, 19, 227-244.
- 윤성호, 고정선, 안지영, 1998, 제주도 동부 알칼리 현무암내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구. 자원환경지질학회지, 31, 447-458.
- 윤성호, 고정선, 박정미, 2002, 제주도 남동부 태흥리 용암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 11, 17-29.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30, 512-541.
- Arai, S., 1994, Compositional variation of olivine-chromian spinel in Mg-rich magmas as a guide to their residual spinel peridotite. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 59, 279-293.
- Arai, S., Ishimaru, S. and Okrugin, V.M., 2003, Metasomatized harzburgite xenoliths from Avacha volcano as fragments of mantle wedge of the Kamchatka arc: an implication for the metasomatic agent. The Island Arc, 12, 233-246.
- Arai, S., Shimizu, Y., Morishita, T. and Ishida, Y., 2006, A

- new type of orthopyroxene xenolith from Takashima, Southwest Japan: Silica enrichment of the mantle by evolved alkali basalt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152, 387-398.
- Arai, S., Abe, N. and Ishimaru, S., 2007, Mantle peridotites from the western Pacific. *Gondwana Res.*, 11, 180-199.
- Bali, E., Szab, C., Vaselli, O. and Trk, K., 2002, Significance of silicate melt pockets in upper mantle xenoliths from the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Western Hungary. *Lithos*, 61, 79-102.
- Bali, E., Zajacz, Z., Kovcs, I., Szab, Cs., Halter, W., Vaselli, O., Trk, K. and Bodnar, R.J., 2008, A quartz-bearing orthopyroxene-rich websterite xenolith from the Pannonian Basin, Western Hungary: Evidence for release of quartz-saturated melt from a subducted slab. *Journal of Petrology*, 49, 421-439.
- Brenna, M., Cronin S.J., Cronin, I., Sohn, Y. and Németh, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contrib Mineral Petrol.*, 160, 931-950.
- Choi, S.H., Lee, J.I., Park, C.H. and Moutte, J., 2002, Geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from Jeju Island, Korea. *Island Arc*, 11, 221-235.
- Ertan, I.E. and Leeman, W.P., 1996, Metasomatism of Cascades subarc mantle: evidence from a rare phlogopite orthopyroxene xenolith. *Geology*, 24, 451-454.
- Franz, L., Becker, K.-P., Kramer, W. and Herzig, P.M., 2002, Metasomatic mantle xenoliths from the Bismarck microplate (Papua New Guinea): Thermal evolution, geochemistry and extent of slab-induced metasomatism. *Journal of Petrology*, 43, 315-343.
- Frey, F.A. and Prinz, M., 1978, Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona; petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 38, 129-178.
- Hamdy, A.M., Park, P.H., Lim, H.C. and Park, K.D., 2004, Present-day relative displacements between the Jeju Island and the Korean peninsula as seen from GPS observations. *Earth Planets Space*, 56, 927-931.
- Kelemen, P.B., Hart, S.R. and Bernstein, S., 1998, Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth Planet Sci. Lett.*, 164, 387-406.
- Kim, K.H., Nagao, K., Suzuki, K., Tanaka, T. and Park, E.J., 2003, Evidences of the presence of old continental basement in Jeju volcanic Island, South Korea, revealed by Radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. *Journal of Geochemical Exploration*, 36, 421-441.
- 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 basalts from the Korean peninsula. *Geochem. J.*, 39, 341-356.
- Kubo, A., and Fukuyama, E., 2003, Stress field along the Ryukyu Arc and the Okinawa Trough inferred from moment tensors of shallow earthquakes. *Earth Planet Sci. Lett.*, 210, 305-316.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea. The Science Report of the Tohoku Imperial University Section Series III, 15, 177-256.
- McInnes, B.I.A., Grégoire, M., Binns, R.A., Herzig, P.M., and Hannington, M.D., 2001, Hydrous metasomatism of oceanic sub-arc mantle, Lihir, Papua New Guinea: petrology and geochemistry of fluid-metasomatized mantle wedge xenoliths. *Earth Planet Sci. Lett.*, 188, 169-183.
- Morishita, T., Arai, S. and Green, D.H., 2003a, Evolution of low-Al orthopyroxene in the Horoman Peridotite, Japan: an unusual indicator of metasomatizing fluids. *J. Petrol.*, 44, 1237-1246.
- Morishita, T., Arai, S., and Tamura, A., 2003b, Petrology of an apatite rich layer in the Finero phlogopite-peridotite, Italian Western Alps; implications for evolution of a metasomatizing agent. *Lithos*, 69, 37-49.
- Nakamura, E., Campbell, I.H., McCulloch, M.T. and Sun, S.S., 1989, Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea and China. *J. Geophys. Res.*, 94, 4634-4654.
- Nekvasil, H., Dondolini, A., Horn, J., Filiberto, J., Long, H. and Lindsley, D.H., 2004, The origin and evolution of silica-saturated alkalic suites: an experimental study. *J. Petrol.*, 45, 693-721.
- Nixon, P.H., 1987, *Mantle Xenoliths*. John Wiley & Sons, New York.
- Shimizu, Y., Arai, S., Morishita, T. and Yurimoto, H., 2004, Petrochemical characteristics of felsic veins in mantle xenoliths from Tallante (SE Spain): an insight into activity of silicic melt within the mantle wedge. *Trans R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 95, 265-276.
- Smith, D. and Riter, J.C.A., 1997, Genesis and evolution of low-Al orthopyroxene in spinel peridotite xenoliths, Grand Canyon field, Arizona, USA. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 127, 391-404.
- Smith, D., Riter, J.C.A. and Mertzman, S.A., 1999, Erratum to "water-rock interactions, orthopyroxene growth and Si-enrichment in the mantle: evidence in xenoliths from the Colorado Plateau, southwestern United States". *Earth Planet Sci. Lett.*, 167, 347-356.
- Szab, Cs., Falus, Gy., Zajacz, Z., Kovacs, I. and Bali, E., 2004, Composition and evolution of lithosphere beneath the Carpathian-Pannonian Region: a review. *Tectonophysics*, 393, 119-137.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Yoshikawa, M., Chang, Q., Sato, K. and Lee, M.W., 2005, The petrology and geochemistry of volcanic rocks on Jeju Island: Plume magmatism along the Asian continental margin. *Journal of Petrology*, 46, 523-553.

White, J.D., 2001. An introduction to igneous and metamorphic petrology. Prentice Hall, New Jersey, 686p.
Xu, X., Oreilly, S.Y., Griffin, W.L., Zhou, X. and Huang, X., 1998, The nature of the Cenozoic lithosphere at Nushan, Eastern China. In Flower M.F.J., Chung S.L., Lo, C.H. and Lee T.Y.(eds.), Mantle dynamics and plate interactions in east Asia American Geophysical. Union, Washington D.C., Geodynamics Volume, 27, 167-196.
Yang, K., Hidas, K., Falus, G., Szab, C., Nam, B., Kovcs,

I. and Hwang, B., 2010, Relation between mantle shear zone deformation and metasomatism in spinel peridotite xenoliths of Jeju Island (South Korea): Evidence from olivine CPO and trace elements. J. Geodynamics, 50, 424-440.

2011년 3월 7일 접수
2011년 3월 9일 심사개시
2011년 3월 21일 채택