

제주도 현무암에 포획된 Type II 포획암: 성인과 조직적 특성

유재은 · 양경희* · 황병훈 · 김진섭

부산대학교 지구환경시스템학부, 부산광역시 금정구 장전동

Textural and Genetic Implications of Type II Xenoliths Enclosed in Basaltic Rocks from Jeju Island

Jae-eun Yu, Kyounghee Yang*, Byoung-Hoon Hwang and Jinseop Kim

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

요약: 제주도 동남부에 산출되는 초염기성 포획암은 두 그룹, Type I과 Type II로 분류되어진다. Type I 포획암은 Mg 성분이 높은 광물(mg#=89-91)로 구성된 페리도타이트로서 노두에서 비교적 흔하게 발견된다. 제주도 초염기성 포획암에 대한 대부분의 연구는 Type I 맨틀포획암에 관한 것이다. 반면에 Type II 포획암은 상대적으로 Mg, Ni, Cr 성분은 낮고 Fe, Ti 성분이 높은 감람석, 사방휘석, 단사휘석(mg#=77-83)으로 이루어져 있다. Type II 포획암의 성분은 웨라이트-감람석 단사휘석암-감람석 웹스터라이트-웹스터라이트이며, Ti이 풍부한 단사휘석을 가지는 것이 특징이다. Type II 포획암은 노두에서 포이킬리틱한 조직을 나타내어 큐물레이트의 특성을 보인다. Type II 포획암에 나타나는 삼중점과 킹크밴딩, 직선적인 입자경계 조직은 Type II 포획암이 열에 의해 야기되는 정적재결정작용과 어닐링을 경험하였음을 지시한다. 조립질의 사방휘석과 단사휘석은 용리엽리를 보이며(고온형 휘석), 세립질의 휘석은 용리엽리를 보이지 않는다(저온형 휘석) 특성을 보이지만 이들의 주성분조성은 거의 유사하여 저온에서 화학적 재평형이 완전히 이루어졌음을 지시한다. 단사휘석과 감람석의 가장자리를 사방휘석이 교대치환하고 있어 사방휘석의 부화작용(enrichment)이 일어났음을 지시한다. 같은 노두에서 발견되는 Type I 맨틀포획암, 반려암질포획암, 모암인 현무암내의 결정들과 비교해보면 Type II 포획암의 주성분원소 조성은 Type I 맨틀포획암과는 뚜렷하게 단절되는 불연속을 형성하지만 반려암질포획암과 모암인 현무암과는 연속적인 경향을 보인다. 이러한 조직적 특성과 주성분원소 성분조성은 Type II 포획암이 현재의 모암인 현무암과는 직접적인 관련성이 없다할지라도 제주도를 형성한 마그마계의 일부분으로 분별결정작용에 의한 집적암(cumulates) 기원임을 제시한다.

핵심어: 제주도, Type II 초염기성포획암, 큐물레이트, 부화, 화학적 재평형

Abstract: Ultramafic xenoliths from southeastern part of Jeju Island can be grouped into two types: Type I and Type II. Type I xenoliths are magnesian and olivine-rich peridotite (mg#=89-91), which are commonly found at the outcrop. Most previous works have been focused on Type I xenoliths. Type II xenoliths, consisting of olivine, orthopyroxene and clinopyroxene with higher Fe and Ti components (mg#=77-83) and lower Mg, Ni, Cr, are reported in this study. They are less common with a more extensive compositional range. The studied Type II xenoliths are wehrlite, olivine-clinopyroxenite, olivine websterite, and websterite. They sometimes show ophitic textures in outcrops indicating cumulate natures. The textural characteristics, such as kink banding and more straight grain boundaries with triple junctions, are interpreted as the result of recrystallization and annealing. Large pyroxene grains have exsolution textures and show almost the same major compositions as small exsolution-free pyroxenes. Although the exsolution texture indicates a previous high-temperature history, all mineral phases are completely re-equilibrated to some lower temperature. Orthopyroxenes replacing clinopyroxene margin or olivine indicate an orthopyroxene enrichment event. Mineral phases of Type II are compared with Type I xenoliths,

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

gabbroic xenoliths, and the host basalts. Those from Type II xenoliths show a distinct discontinuity with those from Type I mantle xenoliths, whereas they show a continuous or overlapping relation with those from gabbroic xenoliths and the host basalts. Our petrographic and geochemical results suggest that the studied type II xenoliths appear to be cumulates derived from the host magma-related system, being formed by early fractional crystallization, although these xenoliths may not be directly linked to the host basalt.

Key words: Jeju Island, Type II ultramafic xenoliths, cumulate, enrichment, chemical re-equilibration

서 언

지표면에 노출되어진 초염기성포획암, 알프스형(Alpine-type) 페리도타이트, 오포올라이트(ophiolites) 페리도타이트, 킴벌라이트(kimberite) 등은 상부맨틀의 물리화학적/유동학적(rheological) 상태 연구에 가장 실재적이고 정확한 정보를 제공하고 있다(Xu et al., 1998; Hidas et al., 2007). 알칼리 현무암에 포획된 맨틀포획암과 거정의 결정들은 일반적으로 높은 압력의 환경에서 형성된 것으로 알려져 있으며, 이들 외래포획암들(xenoliths)은 모마그마가 지표면을 향해 상승했던 지구 내부수직단면도의 어느 한 부분을 구성하고 있던 물질로서 지질학적 과정에 대한 실재적이고 정확한 정보를 지니고 있어 중요한 연구 대상이다(Wilson, 1989; Irving, 1974; Kovacs et al., 2003).

제주도는 대륙지판내(continent intra-plate)의 마그마 작용으로 형성된 제 4기 화산섬으로 지화학적으로는 판내부기원 현무암류 특성을 보인다(박준범 외, 1999; Tatsumi et al., 2005). 최근 제주도의 지하지질에 대한 연구가 보고되면서(이문원 외, 1994; Kim et al., 2003; 고기원 외, 2004) 중생대 백악기에는 제주도가 위치한 지역도 경상분지가 겪은 안디안형(Andean-type) 섭입환경에서의 칼크-알칼리(calc-alkaline) 마그마 활동을 경험하였음이 밝혀지고 있다. 현재 제주도와 한반도는 아모리 대륙판(Amurian continental plate) 내에 위치하면서 해양판인 태평양판과 필리핀판이 유라시아판 아래로 섭입하는 섭입대 환경 가까운 곳에 놓여있다(Hamdy et al., 2004). 이러한 지질학적 특성은 판구조론적으로 상반된 환경인 발산(constructive)/섭입(destructive), 혹은 비조산대(anorogenic)/조산대(orogenic) 환경이 시공간적으로 인접되어진 곳으로 한반도 주변에 서로 상반된 마그마활동을 주도한 환경을 나타내고 있다. 이러한 마그마작용은 한반도 상부맨틀/하부지각, 맨틀 켈지(mantle wedge)에 대한 물리화학적, 지구동력학적(geodynamic)

상태와 지구의 판구조론적 물질의 순환 연구에 중요하고 독특한 조건을 제공하고 있다.

제주도에 분포하는 현무암에는 제주도 하부 암석권에서 유래된 다양한 외래포획물질이 포획되어 있다. 이러한 포획물질들은 제주도하부 암석권의 일부를 구성하고 있던 실질적인 물질로서 고온고압의 환경에서 평형을 이루고 있던 다양한 조직과 성분을 나타내고 있다. 본 연구는 제주도에 분포하는 현무암에 포획된 포획암 중에 감람석, Ti이 풍부한 단사회석, 사방회석으로 이루어진 Type II 포획암을 대상으로 하고 있다. Type II 포획암에 대한 암석기재와 주성분원소 조성을 통해 Type II 포획암의 성인적 특성과 암석권에서의 교대작용(metasomatism)에 대해 보고한다.

지 질

제주도는 동북동-서남서 방향으로 약 74 km, 북북서-남남동 방향으로 약 32 km을 이루는 타원형으로 한라산을 중심으로 제주도의 서측과 동측은 경사가 비교적 완만한 반면, 남측과 북측은 급경사를 나타내고 있는 순상화산의 지형을 나타내고 있다(Fig. 1). 제주도가 타원형의 형태를 보이는 것은 구조운동에 의해 신장된 것이 아니며, 화산활동과 관련한 지구조 운동과 분출된 용암의 흐름에 기인하는 것으로 해석되고 있다(황재하와 송교영, 2003). 제주도가 만들어진 동안에 여러 번의 빙하기가 있었으며, 빙하기에는 지금보다 해수면이 130 m 정도 낮아 여러 차례 육지와 연결되었던 적이 있었을 것이라는 보고도 있다(박기화, 2004). 최근의 심부시추조사에 의해 관찰된 제주도를 구성하고 있는 용암류의 수직적인 분포 깊이는 해수면 하 대략 40(서부지역)~140 m(동부지역)이며, 평균 3~5 m의 두께를 갖는 12~60매의 용암류가 분포하는 것으로 알려져 있다(고기원 외, 2004). 해수면을 기준으로 평균 200 m 아래에서는 서귀포층, 미교결 층이 존재하며 그 아래에는 제주도 화산활동

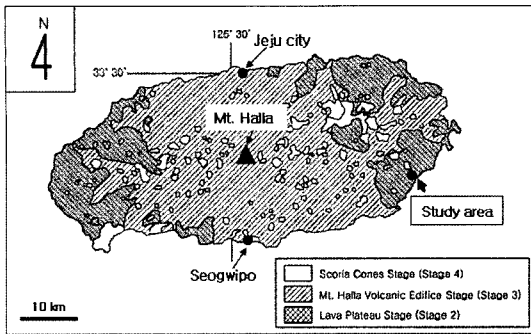


Fig. 1. Geological map of Jeju Island showing the sampling site for the type II xenoliths(after Lee, 1982).

의 기반암으로 화강암류와 용회암이 분포하는 것으로 확인되며, 제주도의 하부지질은 한반도 서남부 해남-강진 지역의 지질과 유사하다(이문원 외, 1994; Kim et al., 2003).

화산으로서의 제주도는 미교결 사니층과 접촉하는 서귀포층으로부터 시작되어지며, 약간의 시간적 단열은 있으나 제주도의 화산활동을 하나의 연속된 화산활동으로 보고되고 있으며, 대체로 4단계로 구분되어 설명되어진다(Lee, 1982; 고기원 외, 2004). 기저현무암분출기로 알려진 제1 분출기는 서귀포층에 퇴적물을 공급했던 화산활동으로 현재 해수면 하부에 분포하는 현무암류로부터 산방산 조면암까지를 형성했던 시기로 이때 형성된 화산암에 대한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연령은 1.7~0.5 Ma으로 보고된다. 시추코아에서 감람석-휘석 현무암 혹은 비정질 현무암으로 산출되며, 미교결 사니층을 덮고 있다. 제2 분출기는 0.6~0.4 Ma에 현재 해수면 주변부에 분포하는 장석-감람석 현무암류와 서귀포시 일대에 분포하는 조면암질 안산암류 등이 분출되었던 시기로 용암대지형성기로 구분된다. 제3 분출기는 0.3~0.2 Ma로 제주도의 중심부인 한라산체를 형성했던 시기로 중산간지역의 현무암류와 한라산조면암 등이 이에 해당한다. 제4 분출기는 0.125 Ma 이후부터의 화산활동을 의미하며, 주로 열하분출에 의한 지역적인 분석구들의 형성시기로 특징 지워진다(Fig. 1).

제주도에 분포하는 용암류의 성분조성은 SiO_2 가 46-62 wt%, MgO는 9-1 wt%로 현무암에서 조면암까지의 광범위한 성분을 나타낸다(진명식, 2004). 원시 초생마그마와 비교할 때, 낮은 Mg값과 Ni 함량을 나타내는 제주도 현무암의 특성은 분출하기 전에 분별작용을 많이 경험한 마그마로 알려져 있다. 이러한 용

암류는 알칼리암류와 쏘리아이트암류로 구분되며, 이는 마그마가 형성된 근원의 맨틀조성의 차이에 기인하는 것이 아니라 동일한 석류석-페리도타이트 맨틀 근원암에서 부분용융의 정도가 달라서 형성된 마그마의 조성차이에 의한 것으로 보고되었다(박준범과 권성택, 1996; 윤성호 외, 2002). 제주도 동부 신산리 해안에 Type II 맨틀포획암을 포획하고 있는 현무암은 세립질의 미반상조직으로 치밀한 암회색을 띠며, 기공률이 5-15 vol%를 차지하고 있어 모암인 현무암은 풍부한 휘발성 성분을 가지고 있었음을 지시한다. 모암인 현무암은 SiO_2 성분이 49-50 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 4.6-5.4 wt%로 알칼리계열에 속하며 Mg#은 57-61을 나타내고 있다(엄영보 외, 2007). 세립의 감람석이 석기로 비교적 풍부하게 나타나고 있어, 알칼리 현무암의 특징을 보여준다(McBirney, 1993). 모암인 현무암은 페리도타이트 뿐만 아니라 반려암, 휘석암 등의 포획암과 거정의 단사휘석과 사장석 등을 포획하고 있다.

Type II 포획암

연구방법

노두에서 채취/선택된 type II 포획암의 조직의 특성을 파악하기 위해 편광현미경을 통한 암석기재는 전통적인 박편과 연마편을 제작하여 관찰하였다. 30여개 시료 중에 대표적인 시료 7개가 현미경하에서의 기재와 성분분석을 위해 선택되었다(Table 1). 지화학적 특성을 파악하기 위해 Type II를 구성하고 있는 광물(감람석, 사방휘석, 단사휘석)에 대한 주성분원소 분석이 부산대학교 공동실험실습관에 있는 CAMECA SX100 전자현미분석기를 통해 이루어졌다. 가속전압 15 kv, 샘플 전류 20 nA, 빔 직경 $1\ \mu\text{m}$ 으로 분석되었으며 각 원소의 분석시간은 10초로 하였다. 분석을 위해 천연과 인조의 표준 샘플이 사용되었다. 정밀도는 $\pm 1\%$, 정확도는 $\pm 0.3\%$ 로 유지되었다. 하나의 결정 내에서 BSE 사진을 촬영하여 중앙부와 가장자리를 세밀하게 분석하였으나 화학적 누대가 관찰되지 않았으며 매우 균질한 조성을 보였다. 주성분 원소 성분 조성의 비교를 위해 모암 현무암에 반정 혹은 외래결정으로 산출되는 감람석과 단사휘석이 분석되었으며 이미 보고된 Type I 맨틀포획암, 반려암질포획암을 구성하고 있는 감람석, 사방휘석, 단사휘석에 대한 주성분원소 성분도 요약되었다(Table 2).

Table 1. Major element composition (wt%) of the rock forming minerals from the Type II xenoliths

Sample	Olivine					
	SS13-3 (n=9)*	SS13 (n=5)	SS13-1 (n=10)	06SS (n=4)	07SS12 n=6	09SS21 (n=4)
	Type IIa (wehrlite)	Type IIb (Olivine-clinopyroxenite)			Type IIc (olivine-websterite)	
	(Wehrlite)	(Wehrlite)	(Wehrlite)	(Wehrlite)	(Wehrlite)	
SiO ₂	38.83	38.59	38.34	38.83	39.17	38.53
FeO ^a	18.32	18.79	18.56	18.58	16.82	19.21
MnO	0.23	0.24	0.19	0.22	0.17	0.23
MgO	42.81	42.53	42.71	41.21	43.80	41.90
CaO	0.18	0.08	0.08	0.09	0.12	0.18
NiO	0.22	0.24	0.28	0.26	0.25	0.30
Total	100.58	100.47	100.16	99.18	100.33	100.33
Mg# ^b	080	80	80	80	82	79
Sample	SS13-1		SS13-3		09SS21	
	Inclusion in cpx		Host basalt			
SiO ₂	38.88	39.30	39.31	37.2	36.47	39.4
FeO ^a	18.51	16.91	15.82	25.66	29.16	19.05
MnO	0.21	0.22	0.21	0.37	0.32	0.22
MgO	42.81	43.74	44.58	36.52	32.90	41.63
CaO	0.08	0.21	0.19	0.27	0.18	0.16
NiO	0.25	0.22	0.27	0.13	0.12	0.28
Total	100.74	100.61	100.38	100.16	99.15	100.73
Mg# ^b	0.80	0.82	0.83	0.71	0.67	0.79

^aAll FeO given as FeO. ^bmg# = 100 × [Mg/(Mg + Fe^b)] in atomic ratio. n=number of analysis

Table 1. Continued

	Orthopyroxene						
	SS13-3 n=6	SS13 n=4	SS13-1 n=9	06SS n=2	07SS12 n=6	09SS21 n=11	09SS23 n=5
	Type IIa	Type IIb			Type IIc		
SiO ₂	53.11	53.17	53.41	53.43	52.93	53.29	52.40
TiO ₂	0.34	0.27	0.30	0.26	0.33	0.33	0.37
Al ₂ O ₃	3.66	3.21	3.11	3.47	4.06	2.77	3.94
FeO ^a	11.64	11.90	11.71	11.61	10.86	12.18	13.94
MnO	0.21	0.23	0.21	0.20	0.19	0.21	0.24
MgO	29.35	29.94	29.97	28.62	29.76	28.92	26.87
CaO	1.59	1.04	1.06	1.14	1.14	1.35	1.34
Na ₂ O	0.08	0.03	0.05	0.07	0.06	0.08	0.10
Cr ₂ O ₃	0.19	0.18	0.17	0.18	0.34	0.19	0.16
NiO	0.08	0.04	0.06	0.07	0.05	0.10	0.06
Total	100.24	100.02	100.05	99.03	99.72	99.44	99.41
Mg# ^b	0.82	0.82	0.82	0.81	0.83	0.81	0.77
WO	3	2	2	2	2	3	3
EN	79	80	80	80	81	78	75
FS	18	18	18	18	17	19	22

Table 1. Continued

Sample	SS13	SS13-1	09SS21	09SS21
	Exsolution lamella in cpx			
SiO ₂	53.34	53.67	53.13	53.19
TiO ₂	0.26	0.30	0.28	0.31
Al ₂ O ₃	2.79	2.86	2.78	2.92
FeO ^a	11.29	11.37	12.11	12.02
MnO	0.24	0.27	0.24	0.19
MgO	29.86	30.36	28.95	29.05
CaO	1.30	1.22	1.21	1.29
Na ₂ O	0.10	0.07	0.09	0.06
Cr ₂ O ₃	0.13	0.15	0.19	0.15
NiO	0.10	0.06	0.08	0.09
Total	99.41	100.33	99.42	99.36
Mg# ^b	0.82	0.83	0.81	0.82
WO	3	2	2	3
EN	80	81	79	79
FS	17	17	19	18

암석기재 및 조직적 특성

노두에서의 Type II 포획암은 대체로 2-10 cm의 크기를 보이며, 형태는 아몬드 형, 길쭉한 형, 불규칙한 형 등으로 다양하다(Fig. 2). 모암인 현무암과의 경계는 뚜렷하며, 경계면에는 기공이 더욱 발달되는 경향을 보인다. 노두에서 Type I과 Type II 포획암을 구별할 수 있는 가장 특징적인 것은 Type II에는 Ti가 풍부한 단사회석이 검은색으로 산출되고, Type I에는 Cr이 풍부한 초록색의 단사회석이 산출되는 것이다. 또한 Type I에 산출되는 철정석은 노두에서 검은색, 박편에서는 붉은색을 띠는 갈색 혹은 검은색을 보인다. 제주도에서 관찰되는 Type II에는 철정석이 관찰되지 않는다. 모드성분에 의해 Type II 포획암은 웰라이트(wehrlite), 감람석 단사회석암(olivine clinopyroxenite), 감람석 웹스터라이트(olivine websterite), 웹스터라이트(websterite)이며, 다음과 같이 세 그룹으로 나누어 기재된다(Fig. 2).

Type IIa는 감람석이 약 70-80 vol%, 사방회석이 5-10 vol% 미만, 단사회석이 15-20 vol%로 이루어진 웰라이트 성분이다(Fig. 2a). 감람석 입자의 크기는

Table 1. Continued

Sample	Clinopyroxene							
	SS13-3 n=6	SS13 n=11	SS13-1 n=24	06SS n=5	07SS12 n=6	09SS21 n=14	09SS23 n=10	SS13
	Type IIa	Type IIb			Type IIc			Host
SiO ₂	51.33	51.19	50.84	50.79	49.92	50.66	49.60	49.25
TiO ₂	0.74	0.74	0.83	0.74	1.02	0.89	1.20	1.48
Al ₂ O ₃	3.06	4.07	4.34	4.88	5.36	4.28	5.96	5.51
FeO ^a	6.28	6.11	6.03	6.18	6.33	6.59	7.61	9.99
MnO	0.13	0.12	0.14	0.13	0.12	0.14	0.15	0.19
MgO	16.94	16.12	16.03	15.36	15.10	15.84	14.40	14.03
CaO	19.68	20.46	20.31	20.41	20.12	19.64	18.92	18.96
Na ₂ O	0.43	0.78	0.72	0.83	0.82	0.72	0.95	0.70
Cr ₂ O ₃	0.57	0.20	0.26	0.38	0.58	0.34	0.27	0.01
NiO	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03
Total	99.20	99.83	99.54	99.72	99.39	99.15	99.09	100.16
Mg# ^b	0.83	0.83	0.83	0.82	0.81	0.81	0.77	0.72
WO	40	42	42	42	42	41	40	40
EN	48	45	46	45	44	46	43	41
FS	10	10	10	10	11	11	13	16
Ac	2	3	2	3	3	2	4	3

Table 2. The range of major element composition of the rock forming minerals in Type I, Type II. gabbroic xenoliths and the host basalt

Sample	Olivine			
	Type I xenolith*	Type II xenolith	Gabbroic xenolith**	Phenocryst in the host basalt***
SiO ₂	39.4-41.0	38.3-39.2	Not Found	36.5-40.9
FeO ^a	9.0-11.3	16.8-19.2		15.8-29.2
MnO	0.10-0.23	0.17-0.24		0.17-0.37
MgO	48.4-52.3	41.2-43.8		32.9-45.7
CaO	0.03-0.22	0.08-0.18		0.16-0.27
NiO	0.30-0.44	0.22-0.30		0.12-0.32
Total	100.4-101.6	99.2-100.6		99.1-100.9
Mg# ^b	89-91	79-82		67-85
Sample	Orthopyroxene			
	Type I xenolith	Type II xenolith	Gabbroic xenolith	Phenocryst in the host basalt
SiO ₂	54.1-55.4	52.4-53.4	51.3-52.2	Not Found
TiO ₂	0.03-0.14	0.26-0.37	0.42-0.59	
Al ₂ O ₃	3.46-4.98	2.77-4.06	3.25-3.72	
FeO ^a	6.05-7.15	10.9-13.94	14.6-15.7	
MnO	0.07-0.26	0.19-0.24	0.16-0.21	
MgO	32.4-35.5	26.9-30.0	26.0-26.7	
CaO	0.67-0.76	1.04-1.59	1.64-1.75	
NiO	0.00-0.16	0.04-0.10	0.05-0.11	
Cr ₂ O ₃	0.28-0.51	0.16-0.34	0.07-0.20	
Total	99.0-101.9	99.0-100.2	99.1-100.2	
Mg# ^b	89-91	77-83	75-77	
Sample	Clinopyroxene			
	Type I xenolith	Type II xenolith	Gabbroic xenolith	Phenocryst in the host basalt
SiO ₂	49.6-52.2	49.6-51.3	48.3-49.5	48.7-49.3
TiO ₂	0.14-0.71	0.74-1.20	1.13-1.66	1.30-1.48
Al ₂ O ₃	4.43-6.29	3.06-5.96	3.87-7.36	4.50-5.51
FeO ^a	2.85-3.72	6.03-7.61	7.74-10.58	9.99-10.33
MnO	0.06-0.18	0.12-0.15	0.09-0.22	0.19-0.24
MgO	15.7-17.4	14.4-16.9	13.7-15.4	14.0-14.4
CaO	18.9-21.8	18.9-20.5	18.2-21.1	18.9-18.6
Na ₂ O	0.46-1.54	0.43-0.95	0.43-0.76	0.59-0.70
NiO	0.00-0.11	0.04-0.05	0.06-0.46	0.01-0.05
Cr ₂ O ₃	0.61-1.08	0.20-0.57	0.05-0.17	0.00-0.03
Total	98.7-100.2	99.1-99.8	99.0-99.7	98.9-100.2
Mg# ^b	89-91	77-83	70-77	71-75

* data from Yang et al.(2009); ** data from Um et al.(2007); *** data from this study plus from Yang and Hwang(2005).

조립(5 mm)에서 세립까지의 연속적인 스펙트럼을 이루고 있으며, 감람석 입자들 사이의 경계는 불규칙하거나 커브형에서 직선형의 삼중점(triple junction)을

보이는 어닐링(annealing) 특징을 나타낸다(Fig. 3). 감람석 입자의 크기가 작아질수록 삼중점의 양은 증가하고 조립의 감람석에는 킹크밴드(kink band)와 파

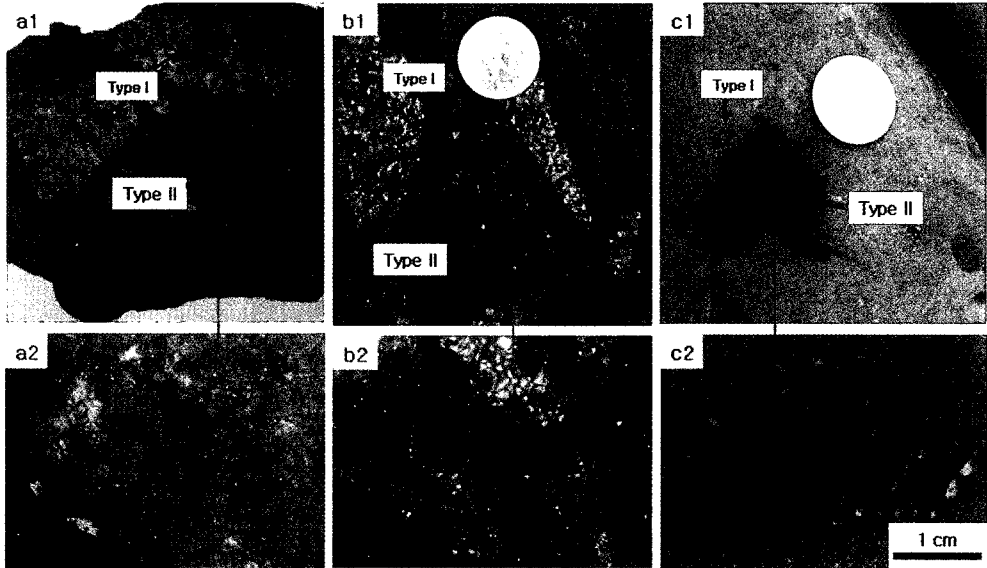


Fig. 2. Type II xenoliths from Jeju Island. (a1, a2) A yellowish wehrlite xenolith consisting mainly of olivine with a minor amount of clinopyroxene and orthopyroxene(sample SS13-3). (b1, b2) A olivine clinopyroxenite xenolith consisting of mainly black clinopyroxene and yellowish olivine(07SS12). (c1, c2) A websterite xenolith consisting of clinopyroxene and orthopyroxene(09SS23). Photos a2, b2 and c2 are enlarged polished sections of a1, b1 and c1, respectively. The scale bar in c2 is also applied to photos a2 and b2. Each photo also shows the greenish Type I mantle xenolith nearby.

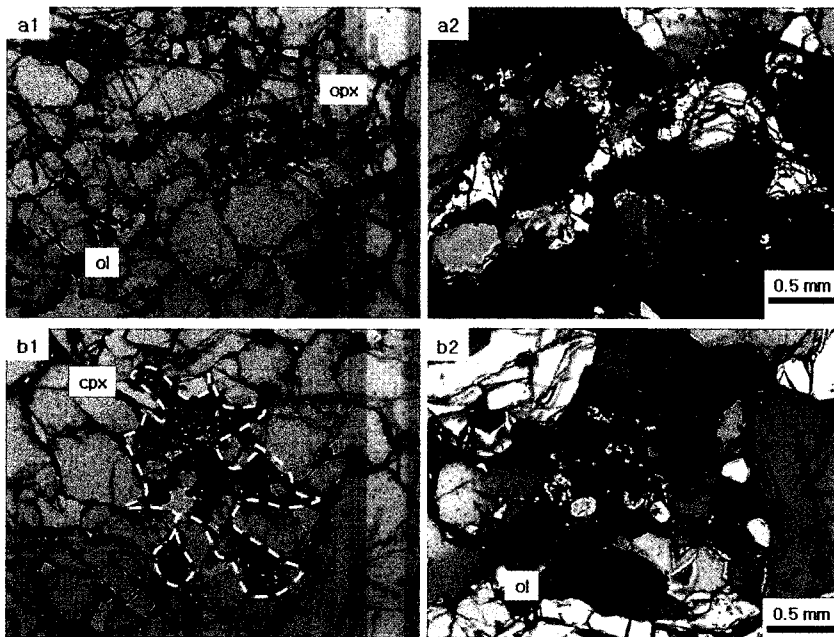


Fig. 3. Photomicrographs of textural features of Type IIa xenoliths (wehrlite) from the Jeju Island (sample SS13-3). Photos a1 and b1 were taken under plain-polarized light and a2 and b2 under cross-polarized light for the same spot as a1 and a2. (a1, a2) Irregular orthopyroxene is crosscutting or replacing olivines. (b1, b2) Sieve-textured clinopyroxene containing olivine in a melt pocket surrounded by olivine. ol=olivine, opx=orthopyroxene, and cpx=clinopyroxene.

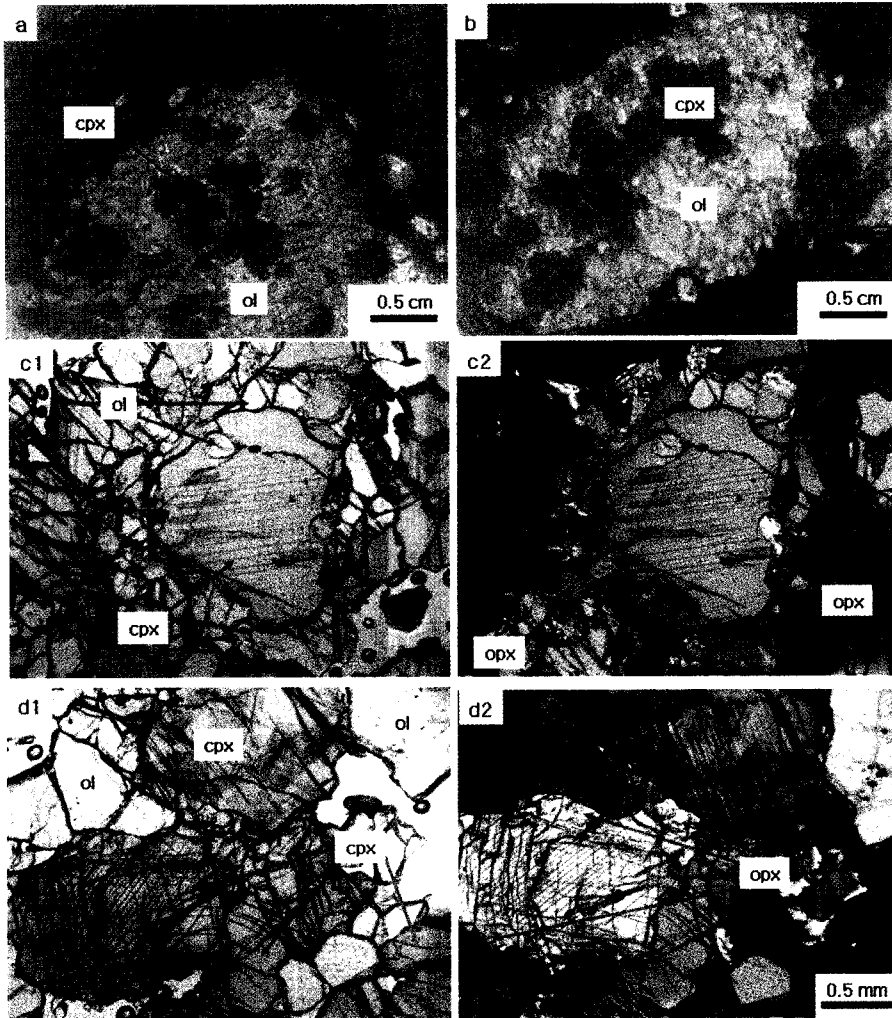


Fig. 4. Photomicrographs of textural features of Type IIb xenoliths (olivine clinopyroxenite). (a, b) Polished sections showing cumulate textures from samples 07SS12 and SS13-1, respectively. Photos c1 and d1 were taken under plain-polarized light and c2 and d2 under cross-polarized light. (c1, c2) Large clinopyroxene with orthopyroxene exsolution lamella surrounded by fine-grained olivine grains (SS13-1). Note an olivine inclusion in the lamella-free marginal area indicating GBM (grain boundary migration) recrystallization. Orthopyroxene occurs as replacement product along the margin of cpx. (d1, d2) Large clinopyroxene with exsolution lamella in the center and exsolution-free margin (07SS12). Orthopyroxene occurs as replacement product. ol=olivine, opx=orthopyroxene, and cpx=clinopyroxene.

동소광이 나타나며, 세립의 감람석에는 이러한 조직이 관찰되지 않는다. 포획암에 나타나는 삼중점과 킹크밴딩은 모암인 현무암에 포획되기 이전에 고체상태였음을 지시한다. 사방회석은 뚜렷한 갈색의 다색성을 지니며, 감람석 입자를 침입하여 가로지르거나 감람석 사이의 간극을 채우는 모습으로 산출된다(Fig. 3a1 and a2). 단사회석은 감람석으로 둘러싸인 멜트포켓(melt pocket) 내에 체(sieve) 조직으로 산출된다

(Fig. 3b1 and b2). 체조직의 단사회석은 멜트포켓형 이외에도 실핏줄과 같은 모습으로 시료 전체에 퍼져 있다. 멜트포켓 중앙부에는 용융되어 남은 감람석이 항상 발달하고 있으며, 멜트포켓 조직 주변의 결정들은 직선의 입자 경계와 삼중점이 더욱 발달되어 있으며, 세립화되어 있다. 멜트포켓 내에는 단사회석이 주를 이루고 있으며, 불투명광물도 산출되고 있다.

Type IIb는 주로 감람석과 단사회석으로 이루어진

월라이트-감람석 단사휘석암로서 사방휘석은 5 vol% 미만의 2차 결정으로 산출된다(Fig. 2b). 월라이트와 감람석 단사휘석의 구별은 감람석의 함량비에 의해 구분되어지나 이러한 함량비에 관계없이 조직은 유사하게 산출되어지는 것으로 거의 연속적인 하나의 암석으로 여겨진다. 현미경하에서는 조립질로 산출되는 결정특성에 의해 인지되지 않지만 노두와 연마편에서는 뚜렷하게 오피틱(ophitic) 조직이 관찰된다(Fig. 4a, b). 광물입자들 사이의 경계는 type IIa와 유사하나 어닐링의 정도, 감람석에 나타나는 킹크밴드와 파동소광의 정도는 감소하는 경향이다. Type IIa에서 산출되는 멜트포켓이 관찰되지 않으며, 단사휘석은 Type IIa에서와 같이 체조직을 형성하지 않으며 하나의 뚜렷한 결정으로 가장 조립질로 산출된다(Fig. 4). 단사휘석의 가장자리는 대부분 응식작용을 받았으며, 조립의 고온형(사방휘석 용리엽리를 가지는 것)과 세립의 저온형(용리엽리가 없는 것)으로 나누어지며, 저온형의 단사휘석은 고온형 단사휘석의 가장자리 부분, 혹은 간극형으로 산출된다(Fig. 4c, d). 물방울과 같은

세립의 감람석이 용리엽리가 없는 단사휘석의 가장자리에 포유물로 산출되는 것(Fig. 4c1, c2)은 저온의 단사휘석의 형성에 의해 입자경계이동(GBM: grain boundary migration)이 일어났음을 의미한다. 사방휘석은 Type IIa에서의 사방휘석과 유사한 갈색의 다색성을 뚜렷하게 지니고 있으며, 항상 단사휘석의 가장자리 부분을 부분적으로 치환하고 있는 모습이다(Fig. 4c, d).

Type IIc는 주로 감람석이 0-10 vol% 미만, 사방휘석이 25-35%, 단사휘석이 55-75 vol% 정도로 구성된 감람석 웹스터라이트-웹스터라이트이다(Fig. 2c). 가장 큰 결정은 단사휘석이며, 입자의 크기는 조립에서 세립까지의 연속적인 스펙트럼을 이루고 있지만 Type IIa와 IIb에 비해 세립화/등립질화 되어지는 경향이 있다(Fig. 5). 휘석은 Type IIb에서와 같이 용리엽리를 가지고 있지 않으나, 모결정의 파쇄대 혹은 결정의 가장자리를 따라 작은 물방울과 같은 크기의 단사휘석과 사방휘석의 포유물을 각각 산출한다(Fig. 5). Type IIa, IIb와 같이 큰 결정들은 킹크밴딩을 보

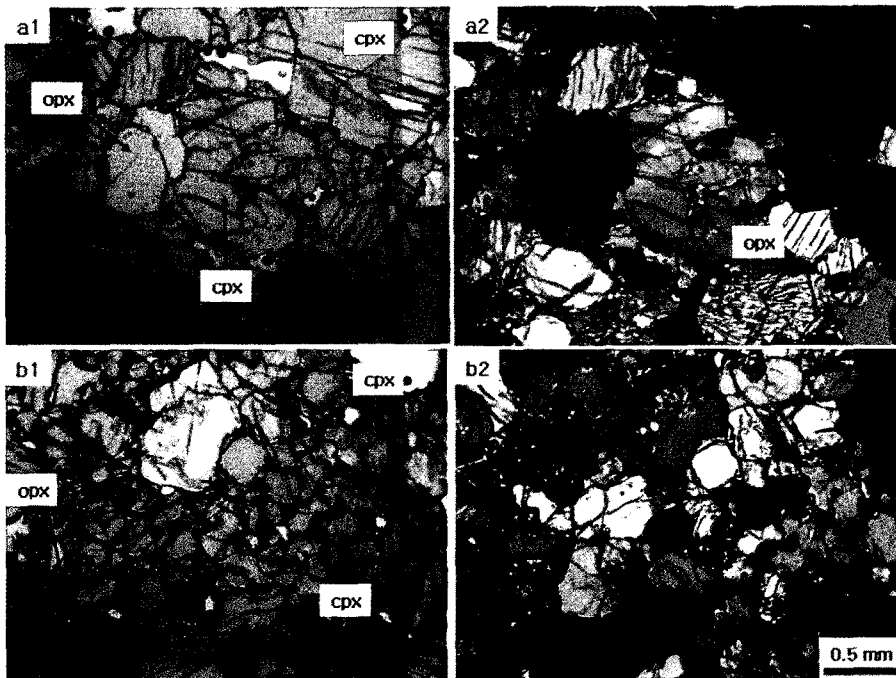


Fig. 5. Photomicrographs of textural features of Type IIc xenoliths(websterite). Photos a1 and b1 were taken under plain-polarized light and a2 and b2 under cross-polarized light. (a1, a2) Olivine websterite showing large clinopyroxene grain containing orthopyroxene along the fracture and smaller orthopyroxene showing light-brownish pleochroism(09SS21). (b1, b2) Websterite showing relatively equigranular fine-grained texture(09SS23). ol=olivine, opx=orthopyroxene, and cpx=clinopyroxene.

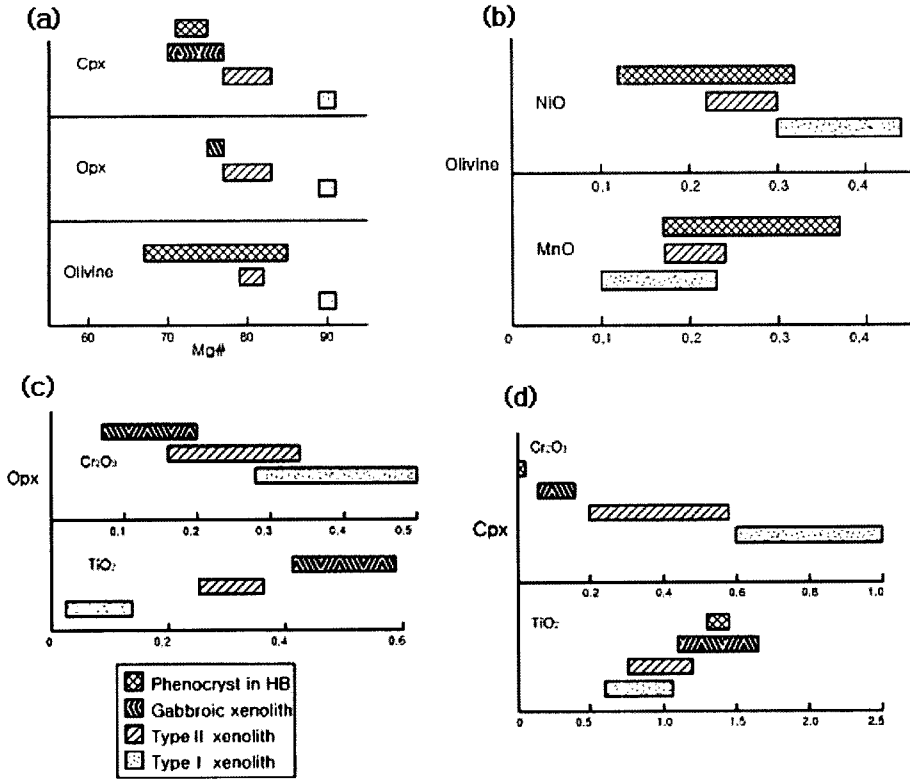


Fig. 6. Comparison diagram between Type II and Type I, gabbroic xenoliths and phenocryst in the host basalt. (a) mg# of olivine, orthopyroxene, and clinopyroxene. (b) NiO and MnO contents in olivine. (c and d) Cr₂O₃, and TiO₂ contents in orthopyroxene and clinopyroxene, respectively.

이고, 작은 결정들이수록 삼중점이 발달하고 있다.

주성분원소 성분조성

연구지역에서 채취된 Type II 포획암을 구성하고 있는 감람석, 사방휘석, 단사휘석의 mg#[=100×Mg/(Mg + Fe)]는 시료에 따라 약간의 차이는 보이지만 거의 일정하다(감람석: 79-82; 사방휘석: 77-83; 단사휘석: 77-83)(Table 1). 같은 연구지역에 포획된 Type I 맨틀포획암의 경우 감람석, 사방휘석, 단사휘석의 mg#는 모두 89-91를 나타내며, 반러암질 포획암의 경우, 사방휘석은 75-77, 단사휘석은 70-77을 보인다 (Table 2). 또한 모암인 현무암에 산출되는 감람석 결정(반정? 혹은 외래결정?)은 mg#가 67-85, 단사휘석은 71-75를 보이면서 다른 그룹에 비해 광범위한 성분조성범위를 보인다. mg#에 있어서 Type II 포획암이 Type I 맨틀 포획암과는 뚜렷한 불연속을 보이고 있다(Table 2).

감람석: Type II 감람석의 NiO와 MnO 성분은 각

각 0.22-0.30 wt%, 0.17-0.24 wt%를 이루며, Type IIa, IIb, IIc사이의 뚜렷한 성분의 차이는 없다(Table 1). 감람석 웨스터라이트(09SS21)가 가장 낮은 mg#(79)를 보이고, 감람석 클라이노파이록시나이트(09SS12)가 가장 높은 mg#(82)값을 보인다. 단사휘석 내에 포위되어 있는 작은 감람석 결정의 성분은 큰 결정으로 산출되는 감람석과 거의 동일한 성분조성이 다. Type I 맨틀포획암과 모암인 현무암에 산출되는 감람석 결정의 NiO는 각각 0.30-0.44 wt%와 0.12-0.32 wt%, MnO는 각각 0.10-0.23 wt%와 0.17-0.37 wt%으로 Type II 포획암의 NiO 성분은 Type I의 NiO 성분과 뚜렷한 불연속을 보인다(Table 2, Fig. 6).

모암인 현무암에 산출되는 감람석 결정(반정? 혹은 외래결정?)에 대한 분석이 이루어졌지만 상세한 토의나 해석은 본 연구의 초점이 아니므로 다른 연구에서 취급될 것이나 비교를 위해 다음과 같이 간략하게 서술된다. 대체로 모암 현무암에 산출되는 감람석 중에 용식을 받아 둥그러진 비교적 조립의 결정(0.3-

0.5 mm)은 mg#가 79-85이며, 감람석의 특징적인 육각형의 결정형을 보이는 세립의 반정인 감람석(0.1-0.2 mm)은 mg#가 77-71을 나타내고 있다. 큰 결정(직경이 2 mm)으로 용식은 받지 않았지만 파쇄된 감람석은 드물게 산출되며 매우 낮은 mg# 67을 보인다.

사방휘석: Type II 사방휘석의 TiO_2 와 Cr_2O_3 값은 각각 0.26-0.37 wt%, 0.16-0.34 wt%를 가진다(Table 1). 감람석이 관찰되지 않은 웹스터라이트(09SS23)의 mg#가 가장 낮게 나타난다. 단사휘석에 용리된 사방휘석 엽리의 조성도 이와 거의 동일한 값을 보인다. Type I 맨틀포획암과 반려암질 포획암을 구성하고 있는 사방휘석의 TiO_2 값은 각각 0.03-0.14 wt%와 0.42-0.59 wt%, Cr_2O_3 는 각각 0.28-0.51 wt%, 0.07-0.20 wt%를 보인다. Type II 포획암내 사방휘석의 TiO_2 와 Cr_2O_3 성분조성은 Type I과 반려암질 포획암의 사방휘석 결정의 성분 조성의 중간에 위치하고 있다(Table 2, Fig. 6).

단사휘석: Type II 단사휘석의 TiO_2 와 Cr_2O_3 값은 각각 0.74-1.20 wt%, 0.20-0.57 wt%를 가진다(Table 1). Type I 맨틀포획암, 반려암질 포획암, 모암인 현무암에 산출되는 단사휘석의 TiO_2 값은 각각 0.14-0.71, 1.13-1.66, 1.30-1.48 wt%를 나타내며, Cr_2O_3 는 각각 0.61-1.08, 0.05-0.17, 0-0.03을 보인다. 감람석이 없는 시료(09SS23)인 경우 단사휘석도 mg#가 낮게 나타난다. Type II 포획암의 TiO_2 와 Cr_2O_3 성분 조성은 Type I과 모암의 단사휘석 결정의 성분 조성의 중간에 위치하고 있다(Table 2, Fig. 6).

토 의

알칼리현무암에 포획되어 지표면에 노출된 초염기성 포획암은 크게 두 종류, Type I과 II로 분류되어진다. Type I 계열의 포획암은 mg#가 높은 감람석과 사방휘석, 크롬이 풍부한 단사휘석과 침정석으로 구성된 맨틀포획암으로 불호정성원소가 결핍된 암석으로 알려져 있다(Frey and Prinz, 1978). Type II 계열의 포획암은 mg#가 상대적으로 낮으며, Al과 Ti이 풍부한 단사휘석이 우세하게 산출되는 암석으로 분류된다. Type I 포획암은 모암인 현무암과는 성인적으로 관련성이 없으며, 현무암이 상승하는 도중에 우연히 맨틀암석을 포획한 것으로 알려져 있으며, 성분 조성은 Type II에 비해 상대적으로 균질하다(Frey and

Prinz, 1978; Kovacs et al., 2003). 반면에 Type II 계열의 포획암에 대한 기원은 아직 많은 의문점을 제시하면서 다음과 같이 여러 가지로 해석되고 있다. (1) 지각하부에 판상으로 관입한 현무암질 마그마에서 유래된 집적암의 일부(Sachs and Hansteen, 2000), (2) 상부맨틀에서 형성된 암맥의 일부(Mukasa and Shervais, 1999), (3) 모암인 현무암 마그마가 만들어지던 지역의 용융에 의해 형성된 분리물질(segregations)(Chen et al., 2001), 혹은 (4) 섭입된 해양지각의 파편의 일부(Allegre and Turcotte, 1986) 등이 그것이다. 하나의 노두지역에서 Type I이 Type II보다 풍부하게 산출되는 것과 성분조성범위가 Type I에 비해 Type II 포획암이 상대적으로 광범위하여 다양한 암석을 산출하고 있는 것은 전 세계적으로 일반적인 모습이다. 제주도에도 이러한 산출 모습이 역시 적용된다. 제주도에 산출되는 초염기성포획암에 대한 이전의 연구는 Type I 맨틀포획암(mg#89-91)에 관한 것이다(윤성효 외, 1998; Choi et al., 2002; Lee and Walker, 2006; 양경희 외, 2009). 본 연구에서 보고되는 제주도의 Type II 포획암은 월라이트에서 감람석 단사휘석암, 감람석 웹스터라이트, 웹스터라이트로 다양한 암질을 보인다(Fig. 2). 본 연구는 조직적 특성과 주성분원소 성분조성을 통해 Type II 포획암의 기원과 교대작용에 대해 보고한다.

제주도의 Type II 포획암은 동력재결정작용(dynamic recrystallization)≠정적재결정작용(static recrystallization)을 경험하였음을 지시하고 있다. 그러나 엽리가 발달하거나 완전히 등립화(equigranulation)되지 않아 재결정의 정도는 그리 강하지는 않았다. Type II 포획암이 키크밴드와 파동소광을 가지는 조립의 입자들 사이에 변형의 흔적이 없는 세립의 입자를 보이는 것은 특정한 편압에서 동력재결정화작용에 의해 부분적으로 재결정화된 조직을 의미하며, 이 편압 하에서 비교적 균질한, 변형의 흔적이 없는 세립의 결정이 새로 형성되어졌다(Passchier and Trouw, 1996). 또한 입자사이의 경계가 직선형이며 삼중점을 보이는 것과 입자의 크기가 작아질수록 삼중점의 양은 증가하는 것은 Type II 포획암이 어닐링 되어졌고 이는 정적재결정작용을 경험하였음을 지시한다(Fig. 3, 4, 5). 어닐링 특징은 멜트포켓을 따라 더욱 발달되어 있다. 이는 현무암질 마그마의 이동에 따른 열의 공급이거나, 교대 멜트/유체(metasomatic melts/fluids)의 이동으로 야기되었을 수 있음을 추정하게 한다. 거의

대부분의 맨틀/하부지각포획암은 열에 의해 야기되는 정적재결정작용과 어닐링을 경험한다는 것은 이미 널리 알려진 사실이며, 이때 용융체나 유체가 관여하게 되면 정적재결정작용을 촉진하게 된다 (Lloyd et al., 1997). 어닐링은 온도가 비교적 높은 맨틀환경에서는 변형작용이 끝나고 난후에 정적재결정작용에 의해 일어날 수도 있으며, 맨틀 플룸과 같은 뜨거운 연약권 물질이 유입되거나 맨틀포획암을 운반한 모암에 의해서 유도되어질 수도 있다 (Mercier and Nicolas, 1975; Vauchez and Garrido, 2001, Xu et al., 2003).

Type II 포획암을 구성하고 있는 감람석, 사방휘석, 단사휘석의 주성분원소 조성은 Type I 맨틀포획암과는 뚜렷하게 단절되는 불연속을 형성한다. 반면, 반러암질포획암과 모암인 현무암 내의 결정과는 연속적인 경향을 보이거나 겹치고 있다. 모암 현무암내의 결정이란 반정이거나 외래기원의 거정질의 결정을 의미한다. mg#에 있어서는 Type II는 뚜렷하게 Type I과 구별된다(Fig. 6a). Type II를 구성하고 있는 감람석의 Ni와 단사휘석의 Cr 조성은 Type I의 감람석과 단사휘석에 비해 결핍되어 있으며, 뚜렷한 단절을 보이지만 모암인 현무암내의 결정들과는 겹치는 조성을 보인다(Fig. 6b, d). Ti은 이와는 반대의 경향을 보이며 Type II의 사방휘석과 단사휘석의 Ti 조성은 Type I보다 높다(Fig. 6c, d). 또한 Type I 포획암에는 침정석이 산출되지만 Type II에는 침정석이 산출되지 않는 것은 다른 압력환경에서 형성되었음을 의미한다. 본 논문에서는 제시되고 있지 않지만 단사휘석의 REE원소 패턴 역시 Type I과는 다르지만 반러암질 포획암과는 유사한 패턴을 보이고 있다(미발표 데이터). 이는 Type II 포획암이 현재의 모암과는 직접적인 관련성이 없다할 지라도 제주도를 형성한 마그마 챔버계의 일부분으로 분별결정작용에 의한 큐물레이트(cumulates)임을 지시하며, 마그마챔버를 채웠던 마그마 배치(batch)와 관련된 결정화작용-고립화-포획과정의 암편임을 나타내고 있다.

큐물레이트 기원임을 확인할 수 있는 가장 강력한 증거는 포이킬리틱(poikilitic) 조직이다(Frey and Prinz, 1978; Winter, 2001). 현무암에 포획된 초염기성 포획암은 매우 적은 양만이 포획되었다는 것과 근원지에서 또는 지표면으로 운송되면서 받은 변성작용에 의해 이전의 조직이 많이 파괴되어졌다는 이유로 포획암의 원래 조직을 인식하는데 어려움이 있다. 제주도 Type II 포획암의 경우, 단사휘석이 매우 조립

질로 산출되고 있어 현미경으로는 관찰이 어렵지만 연마편에 나타나는 휘석과 감람석은 포이킬리틱 조직을 보인다(Fig. 4a, b). 또한 현미경하에서는 이들 감람석과 단사휘석이 서로 교호하면서(interlocking) 산출되는 조직이 아니라 결정들이 집적되어져 형성된 모습도 관찰된다(Fig. 5). 포이킬리틱 조직이란 하나의 큰 결정 내에 작은 결정들이 흩어져있는 모습인데 주로 사장석 바탕에 휘석류가 포함되어 있는 모습이 일반적이다. 여기에서 휘석이 먼저 결정화되면서 사장석이 뒤따라 결정을 이루거나 휘석과 사장석이 동시에 결정화 되는 것으로 해석되고 있다. 그러나 본 연구에서는 감람석이라는 하나의 큰 단 결정 내에 단사휘석이 포함된 전형적인 포이킬리틱 조직은 관찰되지 않지만 연마편에서는 휘석이 감람석 결정 내에 포유물과 같이 흩어져 결정화를 이룬 큐물레이트 조직을 나타내고 있다(Fig. 4a, b). 큐물레이트 기원으로 해석되는 윌라이트-감람석 클라이노파이록시나이트에 대한 다른 연구논문에서도 포이킬리틱 조직을 관찰하기가 어렵다고 보고되거나 포이킬리틱 조직을 보고하고 있지 않다(Frey and Prinz, 1978; Zoltan et al., 2007). 또한 이러한 드문 포이킬리틱 조직에 의해 Type II 포획암은 맨틀에 형성된 세맥이라고 해석되기도 한다(Frey and Prinz, 1978).

제주도 Type II 포획암은 사방휘석과 단사휘석의 부화작용(enrichment)을 경험한 것으로 나타난다. 제주도 Type II 포획암을 구성하고 있는 사방휘석과 단사휘석은 두 종류로 산출된다. 사방휘석은 감람석 입자를 침입하여 가로지르거나, 감람석 사이의 간극을 채우는 모습(Fig. 3a)으로 혹은 단사휘석의 가장자리를 치환하는 세립의 결정(Fig. 4c, d)으로 산출된다. 이는 사방휘석이 간극형의 1차 결정이 아니라 2차 조직으로 사방휘석의 부화가 일어났음을 지시한다. 또한 단사휘석의 경우 감람석으로 둘러싸인 멜트포켓내에 체조직을 가진 모습(Fig. 3b)은 포획암이 지표면으로 상승한데에 따르는 압력감소와 유입된 외부 마그마/유체와의 상호작용에 그 부분이 용융되었다가 다시 재결정화되어진 조직이다. 원래 있었던 결정은 단사휘석이 아니라 감람석으로 여겨진다. 즉 SiO₂가 풍부한 멜트의 유입에 의해 단사휘석의 부화가 일어났음을 보여주고 있다. 이들 부화작용의 순서는 단사휘석의 부화(enrichment)가 먼저 일어났고 사방휘석의 부화작용이 뒤따른 것으로 여겨진다(Fig. 4). 즉, 단사휘석과 사방휘석의 부화작용은 서로 독립적인 요인에

의해 형성된 것으로 보이며 여러 단계의 외부(external) 기원의 마그마 혹은 유체와의 상호작용이 있었음을 나타낸다. 이들 부화작용의 순서와 고대작용을 일으킨 마그마 혹은 유체에 관한 성분조성 등에 대해서는 좀 더 심도 깊은 데이터와 연구가 진행되어야 할 것이다.

결정의 중앙부는 고온형 단사회석(용리엽리를 가지는 것)으로 이루어져 있으나 결정의 가장자리는 용리엽리가 없는 저온형의 회석을 보이는 조직은 전형적인 비평형조직을 보인다 (Fig. 4). 그러나 이들의 주 성분조성은 거의 유사하여 저온에서 화학적 재평형이 완전히 이루어졌음을 지시한다. Type IIa, IIb, IIc 포획암은 암질과 조직은 유사하지 않지만 주 성분 조성은 상당히 균질하며 변화의 폭도 좁다. 이러한 불일치는 포획암이 위치하고 있던 암석권의 이질적 차이와 부분용융 또는 제주도 하부 암석권 맨틀의 오랜 기간 성숙과 부화 작용, 저온에서 화학적 재평형에 기인한다. 이에 대한 정량적이고 체계적인 분별과 해석을 위해서는 좀 더 민감한 데이터, 즉 미량원소 성분조성, 동위원소 성분조성, 유체포유물 연구 등이 뒤따라야 할 것이다.

결 론

본 논문은 Type II 포획암으로 분류되는 월라이트, 감람석 단사회석암, 감람석 웹스터라이트, 웹스터라이트에 대한 조직적 특성과 주 성분원소 성분조성에 의해 다음과 같은 결론을 보고한다.

1. 제주도의 Type II 포획암은 Mg, Ni, Cr 성분은 낮고 Fe, Ti 성분이 높은 감람석, 사방회석, 단사회석 (mg# = 77-83)으로 이루어져 있다. 이들은 노두에서 포이킬리틱한 조직을 보인다. 제주도 Type II 포획암은 멜트 유입에 의해 사방회석과 단사회석의 부화작용을 경험했으며 동력재결정작용±정적재결정작용을 경험하였다.

2. Type II 포획암을 구성하고 있는 광물의 주 성분원소 조성은 Type I 맨틀포획암과는 뚜렷하게 단절되는 불연속을 형성하지만 반려암질포획암과 모암인 현무암 내의 결정과는 연속적인 경향을 보이거나 겹치고 있다. Type I 포획암에는 침정석이 산출되지만 Type II에는 침정석이 산출되지 않는 것은 이들 포획암이 형성된 곳의 압력조건의 차이를 반영하고 있다.

3. Type II 포획암이 현재의 모암과는 직접적인 관

련성이 없다 할지라도 제주도를 형성한 마그마 챔버계의 일부분으로 집적암 기원임을 지시하고 있다.

사 사

본 논문을 심사하여 논문의 질을 높여주신 최성희 박사님과 심사자께 깊은 감사를 보냅니다. 본 연구는 2008년 여성과학자지원사업으로 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. C00069).

참고문헌

고기원, 박윤석, 박언배, 2004, 제주도 동부지역의 지하 지질분포와 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 연대. 2004 대한지질학회 춘계학술답사, 대한지질학회, 29-50.

남북현, 양경희, 엄영보, Karoly Hidas, Csaba Szabo, 2007, 제주도 현무암과 맨틀포획암에 산출되는 함수광물의 중요성, 2007 한국광물학회·한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 176-179.

박기화, 2004, 제주도 형성사, 2004 대한지질학회 춘계학술답사, 대한지질학회, 1.

박준범, 권성택, 1996, 제주도의 솔리아이트 화산활동. 암석학회지, 5, 66-83.

박준범, 박기화, 조동룡, 고기원, 1999, 제주도 제 4기 화산암류의 암석화학적 분류. 지질학회지, 35, 253-264.

엄영보, 양경희, 남북현, 황병훈, 김진섭, 2007, 제주도 알칼리 현무암에 포획된 반려암질 포획암, 광물학회지, 20, 103-114.

윤성효, 고정선, 안지영, 1998, 제주도 동부 알칼리 현무암 내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구, 자원환경지질학회지, 31, 447-458.

윤성효, 고정선, 박정미, 2002, 제주도 남동부 태흥리 용암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 11, 17-29.

이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30, 521-541.

양경희, 남북현, 김진섭, Szab, C., 2009, 제주도 현무암에 포획된 세립질 맨틀 페리도타이트 포획암의 조직적 특성. 광물학회지, 22, 1-11.

진명식, 2004, 한국의 화성활동. 한국암석학회 추계학술심포지엄 논문집, 한국의 화성활동, 한국암석학회, 103-104.

황재하, 송교영, 2003, 제주도의 지구조운동, 제1회 학술심포지엄, 제주화산연구소 개소기념, 제주화산연구소, 1-6.

Allegre, C.J. and Turcotte, D.L., 1986, Implications of a two-component marble-cake mantle. Nature, 323, 123-127.

Chen, S., O'Reilly, S.Y., Zhou, X., William, L.G., Zhang, G., Sun, M. and Feng, J., Zhang, M., 2001, Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hamuoba, Sino-Korean craton, China: evidence from xenoliths.

- Lithos, 56, 267-301.
- Choi, S.H., Lee, J.I., Park, C.H. and Moutte, J., 2002, Geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from Jeju Island, Korea, *The Island Arc*, 11, 221-235.
- 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.
- Irving, A.J., 1974, Megacrysts from the newer basalts and other basaltic rocks of southeastern Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1503-1514.
- 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.
- 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.
- Kovacs, I., Zajacz, Z. and Szabo, C., 2004, Type-II xenoliths and metasomatism beneath the Nograd-Gomor volcanic field, Carpathian-Pannonian region (northern Hungary-southern Slovakia). *Tectonophysics*, 393, 139-161.
- 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.
- 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.
- 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. *Chem. Geol.*, 231, 90-101.
- Lloyd, G.E., Farmer, A.B. and Mainprice, D., 1997, Misorientation analysis and orientation of subgrain and grain boundaries. *Tectonophysics*, 279, 55-78.
- McBirney R.B., 1993, *Igneous petrology* (2nd ed), Jones and Bartlett, 508p.
- Mercier, J.C.C. and Nicolas, A., 1975, Textures and fabrics of upper-mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Journal of Petrology*, 16, 454-487.
- Mukasa, S.B. and Shervais, J.W., 1999, Growth of subcontinental lithosphere: evidence from repeated dike injections in the Balmuccia lherzolite massif, Italian Alps. *Lithos*, 48.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin, 289p.
- Sachs, P.M. and Hansteen, H.T., 2000, Pleistocene underplating and metasomatism of the lowercontinental crust: a xenolith study. *J. Petrol.*, 41, 331-356.
- 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.
- Vaucher, 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 Planet. Sci. Lett.*, 192, 235-249.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Winter, J.D., 2001, *Igneous and metamorphic petrology*. Prentice Hall, New Jersey, 697p.
- 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*, Geodynamics Series, 27, 167-95.
- Xu, Y.G., Menzies, M.A., Matthew, F., Huang, X.L., Liu, Y. and Chen, X.M., 2003, "Reactive" harzburgites from Huinan, NE China: Products of the lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 487-505.
- Yang K., 2004, Fluid and melt inclusions trapped in xenoliths from the lower crust/upper mantle beneath Jeju Island (I): A preliminary study. *Petrolological Society of Korea*, 13, 34-45.
- Zoltan, Z., Kovacs, I., Szabo, C., Halter, W. and Pettke, T., 2007, Evolution of Mafic Alkaline Melts Crystallized in the Uppermost Lithospheric Mantle: a Melt Inclusion Study of Olivine-Clinopyroxenite Xenoliths, Northern Hungary. *Journal of Petrology*, 48, 853-883.

2009년 8월 3일 접수

2009년 8월 4일 심사개시

2009년 9월 2일 채택