

제주도 선흘리 일대에 분포하는 맨틀포획암 내의 광물의 지화학적 특성 연구

Geochemical Characteristics of Mineral Phases in the Mantle Xenoliths from Sunheul-ri, Jeju Island

길 영 우(Young Woo Kil)¹ · 신 흥 자(Hong Ja Shin)^{1,*} · 윤 성 호(Sung Hyo Yun)² ·
고 정 선(Jeong Seon Koh)² · 안 웅 산(Ung San Ahn)³

¹한국지질자원연구원 지질박물관

(Geological Museum, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

²부산대학교 지구과학과

(Department of Earth Sciences, Pusan National University, Pusan 609-739, Korea)

³안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 제주도 동북사면에서 발견된 선흘리 스피넬 페리도타이트 맨틀포획암의 지화학적 특성은 처음 보고 되는 것으로 제 4기 제주도 동북사면 하부에 위치한 상부맨틀의 화학 조성, 평형 온도, 마그마 정체 시간에 관한 일련의 정보를 제공하여 준다. 감람석(FO_{89-90})을 포함한 스피넬 페리도타이트 내 구성광물들의 화학 조성은 일정하며 광물 중심부와 연변부의 화학 조성 차이 또한 크지 않다. 사방휘석-단사휘석 지온계를 이용하여 얻은 평형 온도 범위(약 $951 \sim 1035^\circ\text{C}$)는 기존 제주도 다른 지역에서 산출되는 맨틀포획암에서 얻어진 온도 범위와 유사하다. 스피넬 페리도타이트가 모마그마에 포획되어 정체된 시간은 확산방정식과 감람석 내 칼슘 농도 변화를 이용하여 계산하여 본 결과 약 42일이다.

주요어 : 선흘리, 맨틀포획암, 스피넬 페리도타이트, 평형 온도, 정체 시간

ABSTRACT : First reported geochemical characteristics of mantle xenoliths (spinel peridotites) from Sunheul-ri, Jeju Island, provide important clues for understanding the lithosphere composition, equilibrium temperature, and the period of entrainment and transport of the xenoliths in the host magma. Core and rim of mineral phases in the xenoliths are constant chemical compositions as FO_{89-90} of olivines. The ranges of equilibrium temperature, obtained by two pyroxenes geothermometer, are about $951 \sim 1035^\circ\text{C}$ for Sunheul-ri spinel peridotite xenoliths and are similar to the range of equilibrium temperatures for the xenoliths from other sites in Jeju island. The period of entrainment and transport of the xenoliths in the host magma of Sunheul-ri mantle xenoliths is about 42 days.

Key words : Sunheul-ri, mantle xenolith, spinel peridotite, equilibrium temperature, period of entrainment

*교신저자: shj@kigam.re.kr

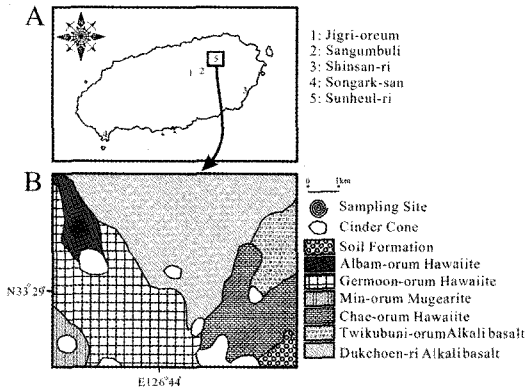


Fig. 1. (A) Distribution map of mantle xenolith locations in the Jeju Island and (B) Geological map of study area and sampling site of Sunheul-ri (After 길영우, 1995).

서 론

알칼리현무암, 킴벌라이트(kimberlite), 램프로파이어(lamprophyre)와 같은 화산암들을 형성한 마그마가 맨틀에서 형성되어 빠른 속도로 지표에 올라오는 과정에서 상부맨틀 암석을 포획하여 지표에 올라온다. 초염기성의 맨틀포획암은 맨틀의 물리적, 화학적 성질을 직접적으로 알 수 있는 귀중한 자료로 사용되어지고 있다(Maaløe and Aoki, 1977; Bonatti *et al.*, 1986; Nixon, 1987; Witt-Eickschen and Seck, 1987; Zipfel and Wörner, 1992).

국내에서는 경기도 웅진군 백령도, 충북 보은군 조곡리, 경기도 평택시와 충남 아산시, 강원도 고성군 간성 일대와 제주도 중산간 및 해안가에서 현무암에 포획된 맨틀포획암 분포한다(이문원, 1984; 김윤규 외, 1988; 이한영 1995; 윤성효 외, 1998; Choi, 2000; Choi *et al.*, 2001; 김규한 외, 2002; Choi *et al.*, 2002; Lee, 2002; 양경희, 2004; 신흥자 외, 2006; Lee and Walker, 2006; Kil, 2006, 2007; 한형현, 2007; 남복현, 2008). 특히 제주도에서 발견되는 맨틀포획암은 동부 중산간 지역의 지그리오름과 산굼부리, 남동부 해안가 지역의 신산리, 남서부 해안가 지역의 송악산과 동북부 선흘리 일대에 분포하고 있다(그림 1). 이들 지역에서 발견되는 맨틀암석의 대부분은 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 스피넬로 구성된 스피넬 페리도타이트이다.

이번 연구를 위해 맨틀포획암을 채취한 제주도

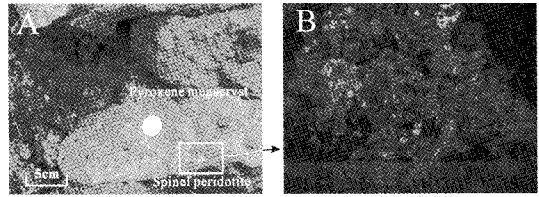


Fig. 2. (A) Outcrop photograph and (B) Photomicrograph (cm scale) of spinel peridotite with a protogranular texture.

동북부 선흘리 일대는 처음 보고 되는 지역이다. 선흘리 맨틀포획암(맨틀암석)을 포획한 화산암은 제주 · 애월 지질보고서(1998)에서는 선흘리 현무암질 안산암으로 기재되어 있고, 길영우(1995)는 알밤오름 하와아아이트라로 기재하였다(그림 1). 이번 연구의 목적은 새로이 발견된 제주도 동북부 선흘리 일대에 분포하는 알밤오름 화산암에 포획된 맨틀포획암, 특히 스피넬 페리도타이트에 대한 광물화학적 특성을 고찰하는데 있다.

암석기재 및 연구방법

맨틀암석을 포획한 화산암 용암은 거문오름에서 분출한 용암류 하부에 위치하고 있으며 해발고도 200~80 m 정도 선흘리 부근까지 분포한다(그림 1). 암상은 치밀하고 암회색을 띠며 휘석반정이 있다. 화산암에 대한 연대 측정치는 없으나, 야외 관찰과 알밤오름 단성화산체의 모양이 알밤오름 화산암 분출시기가 인근 화산암류에 비하여 젊을 것으로 사료된다(길영우, 1995). 알밤오름 화산암은 SiO₂ 값이 49.84 wt%이며 Na₂O+K₂O 값은 5.95 wt%로서 지화학적으로 알칼리 계열에 속한다(길영우, 1995). 모암인 알밤오름 화산암은 맨틀암석인 스피넬 페리도타이트 이외에도 하부지각 물질과 휘석 반정들을 지표에 올라오는 동안 포획하였다(그림 2A). 포획된 스피넬 페리도타이트는 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 스피넬로 구성되어져 있고, 크기가 3 cm 이하로 작게 산출된다(그림 2).

알밤오름 화산암에 포획된 맨틀암석은 크기가 작아서 모드조성을 통하여 암석명을 확인할 수는 없었지만 쌍안현미경을 이용하여 관찰한 결과 단사휘석의 함량이 5% 이상인 스피넬 페리도타이트 중에서도 스피넬 레졸라이트에 속한다(그림 2B). 스피넬 페리도타이트는 원생입상조직(protogranular texture), 반상쇄설조직(porphroclastic texture), 등

립상조직(equigranular texture)으로 구분된다(Mercier and Nicolas, 1975; Harte, 1977). 원생립상조직에서는 조립의 입자들이 1 mm 이상의 크기로 나타나며, 다각형의 네오블라스트(neoblast)를 거의 함유하고 있지 않다. 포획된 스피넬 페리도타이트는 대부분의 광물 입자의 크기가 1 mm 이상인 원생립상조직을 보인다(그림 2B).

단사회석 및 사방회석의 주성분 원소를 분석하고자 한국지질자원위원회의 전자현미분석기(Cameca SX-50)를 이용하였다. 분석조건은 가속전압 15 kV, 빔 전류 15 nA, 빔 직경 2~3 μm 이고, 주성분원소는 20~40초, 미량원소는 40~100초의 시간을 두

고 분석하였다. 평형 온도를 계산하기 위해 사용된 사방회석, 단사회석, 스피넬의 Fe^{3+} 과 Fe^{2+} 는 Droop (1987)의 방법을 사용하여 계산하였다.

광물 화학 조성

선홀리 스피넬 페리도타이트 맨틀포획암을 구성하고 있는 감람석, 사방회석, 단사회석, 스피넬의 주성분원소 분석결과는 표 1과 같다. 광물 화학분석을 실시한 7개의 선홀리 스피넬 페리도타이트의 구성광물들은 매우 유사한 조직과 화학 조성을 가지고 있으며, 구성광물 중심부와 연변부

Table 1. Electron probe microanalyses for the major element compositions (wt%) of olivines, orthopyroxenes, clinopyroxenes, spinels in spinel peridotite xenoliths from Sunheol-ri. Ol = olivine, Opx = orthopyroxene, Cpx = clinopyroxene, and Sp = spinel.

Sample	SHR-1							
	Ol		Opx		Cpx		Sp	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	41.31	40.79	56.18	55.85	52.22	52.39	0.05	0.06
TiO ₂	0.01	0.02	0.08	0.10	0.44	0.46	0.09	0.08
Al ₂ O ₃	0.02	0.02	4.00	4.34	6.54	6.68	56.06	55.86
Cr ₂ O ₃	0.06	-	0.34	0.36	0.98	0.93	11.01	11.24
FeO	10.11	9.94	6.15	6.11	2.74	2.75	11.11	11.25
MnO	0.14	0.17	0.12	0.11	0.09	0.06	-	-
NiO	0.26	0.29	0.07	0.04	0.02	-	0.28	0.34
MgO	48.29	47.93	33.24	33.27	15.24	15.12	20.58	20.35
CaO	0.07	0.04	0.51	0.51	20.87	20.92	0.03	-
Na ₂ O	-	-	0.11	0.03	1.52	1.47	0.01	-
K ₂ O	-	0.01	-	-	-	0.01	0.02	-
Total	100.27	99.21	100.80	100.71	100.66	100.79	99.22	99.17

Sample	SHR-2							
	Ol		Opx		Cpx		Sp	
	C	R	C	R	C	R	C	R
SiO ₂	41.00	41.24	55.19	55.48	52.27	52.35	0.07	0.07
TiO ₂	0.01	0.01	0.15	0.11	0.56	0.53	0.08	0.08
Al ₂ O ₃	0.02	-	4.19	4.23	6.65	7.02	56.96	57.24
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.28	0.32	0.73	0.80	9.51	9.55
FeO	10.45	10.29	6.68	6.74	2.68	2.78	11.25	11.30
MnO	0.15	0.11	0.17	0.18	0.04	0.05	-	-
NiO	0.26	0.30	0.01	0.08	0.04	0.07	0.31	0.31
MgO	47.38	48.21	33.11	33.04	14.67	14.68	20.45	20.55
CaO	0.06	0.07	0.54	0.60	20.44	20.61	0.01	0.01
Na ₂ O	0.03	0.01	0.10	0.08	1.74	1.54	-	-
K ₂ O	0.01	-	-	0.03	0.01	-	-	-
Total	99.38	100.27	100.42	100.89	99.83	100.43	98.64	99.13

Table 1. Continued

Sample Mineral	SHR-3							
	Ol		Opx		Cpx		Sp	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	41.62	41.81	55.24	55.25	52.67	52.14	0.07	0.04
TiO ₂	-	-	0.10	0.12	0.59	0.55	0.07	0.10
Al ₂ O ₃	-	0.01	4.74	4.94	6.80	6.76	58.78	58.65
Cr ₂ O ₃	-	0.02	0.38	0.33	0.64	0.69	8.14	8.21
FeO	9.94	9.91	6.53	6.18	2.67	2.78	10.63	10.50
MnO	0.18	0.17	0.15	0.16	0.03	0.10	-	-
NiO	0.29	0.27	0.08	0.06	0.04	0.06	0.32	0.29
MgO	48.22	48.69	32.89	32.86	15.61	15.64	21.42	21.37
CaO	0.04	0.07	0.58	0.89	20.52	20.4	0.01	-
Na ₂ O	-	-	0.10	0.13	1.42	1.42	0.07	0.05
K ₂ O	0.01	0.01	-	-	-	0.01	0.01	0.01
Total	100.30	100.96	100.79	100.90	100.99	100.55	99.52	99.22

Sample Mineral	SHR-4							
	Ol		Opx		Cpx		Sp	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	C	Rim
SiO ₂	41.68	41.92	55.18	55.70	52.65	52.35	0.04	0.05
TiO ₂	-	-	0.07	0.12	0.38	0.37	0.06	0.08
Al ₂ O ₃	-	0.03	4.88	4.38	5.83	5.68	54.65	55.74
Cr ₂ O ₃	0.04	0.03	0.52	0.40	0.75	0.71	11.90	10.97
FeO	10.38	10.26	6.75	6.84	3.08	3.01	12.16	12.19
MnO	0.17	0.15	0.15	0.14	0.05	0.12	-	-
NiO	0.29	0.27	0.07	0.05	0.02	0.06	0.37	0.27
MgO	48.14	48.11	32.51	32.38	15.88	15.87	20.03	20.50
CaO	0.05	0.05	0.69	0.70	21.22	21.2	0.01	-
Na ₂ O	-	-	0.03	0.04	1.09	1.03	-	0.02
K ₂ O	0.01	0.01	-	0.01	-	-	-	0.01
Total	100.76	100.83	100.85	100.75	100.95	100.4	99.21	99.83

Sample Mineral	SHR-5							
	Ol		OPX		CPX		SP	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	41.50	41.06	54.75	54.66	52.52	52.54	0.05	0.04
TiO ₂	-	-	0.13	0.11	0.31	0.33	0.11	0.11
Al ₂ O ₃	0.02	0.02	4.89	4.68	4.96	5.04	54.77	54.22
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.52	0.43	0.67	0.84	11.68	11.92
FeO	10.25	10.36	6.51	6.78	2.94	2.85	12.36	12.40
MnO	0.16	0.13	0.14	0.17	0.07	0.08	-	-
NiO	0.31	0.23	0.06	0.05	0.02	0.04	0.26	0.29
MgO	47.99	47.40	31.46	32.06	16.04	16.02	20.03	20.06
CaO	0.05	0.04	1.37	0.67	21.46	21.33	-	0.03
Na ₂ O	-	0.04	0.10	0.07	0.81	0.95	0.03	0.02
K ₂ O	-	-	0.01	-	-	-	0.01	0.02
Total	100.30	99.30	99.94	99.68	99.8	100.01	99.30	99.11

Table 1. Continued

Sample Mineral	SHR-6							
	Ol		Opx		Cpx		Sp	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	41.23	41.06	55.37	55.29	52.07	52.58	0.04	0.05
TiO ₂	0.01	-	0.09	0.12	0.60	0.59	0.12	0.11
Al ₂ O ₃	0.04	0.03	4.81	4.92	6.77	6.72	57.59	58.14
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.35	0.38	0.81	0.83	9.19	9.28
FeO	10.49	10.08	6.58	6.61	2.74	2.97	11.37	11.17
MnO	0.14	0.13	0.15	0.13	0.10	0.06	-	-
NiO	0.24	0.31	0.07	0.10	0.01	0.02	0.31	0.32
MgO	47.28	47.77	32.79	32.59	15.34	15.09	20.89	21.11
CaO	0.06	0.05	0.58	0.54	20.29	20.3	0.02	0.02
Na ₂ O	0.03	0.02	0.07	0.07	1.64	1.67	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	0.01
Total	99.54	99.46	100.85	100.75	100.37	100.83	99.52	100.19

Sample Mineral	SHR-7							
	Ol		Opx		Cpx		Sp	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	41.03	40.87	55.09	55.55	52.92	52.09	0.05	0.06
TiO ₂	-	-	0.09	0.10	0.54	0.52	0.11	0.11
Al ₂ O ₃	-	0.01	4.07	4.06	6.36	6.49	56.63	57.51
Cr ₂ O ₃	0.02	-	0.35	0.24	1.08	1.19	10.53	9.97
FeO	10.55	10.39	6.49	6.64	2.52	2.55	11.19	11.46
MnO	0.17	0.18	0.09	0.09	0.08	0.07	-	-
NiO	0.32	0.27	0.08	0.08	-	0.03	0.30	0.32
MgO	48.34	47.43	32.51	32.63	15.18	14.76	20.69	20.92
CaO	0.04	0.03	0.52	0.56	20.76	20.43	0.01	0.01
Na ₂ O	-	-	0.08	0.07	1.47	1.63	0.01	0.01
K ₂ O	0.01	-	0.01	-	0.01	0.02	0.01	-
Total	100.47	99.20	99.38	100.02	100.92	99.78	99.52	100.36

화학 조성 차이 또한 크지 않다(표 1).

감람석 화학 조성은 Fo₈₉₋₉₀로 거의 일정한 범위를 보이며, NiO와 CaO 함량은 각각 0.26~0.31 wt%와 0.03~0.07 wt%로서 남한의 다른 지역 맨틀 포획암속의 감람석이 가지는 화학 조성 결과와 거의 유사함을 보인다(이한영, 1995; 신흥자 외, 2006).

사방휘석도 중심부와 연변부의 Mg-Fe-Ca 화학 조성은 유사하다(표 1). 중심부와 연변부의 Mg-Fe-Ca 조성은 각각 En₈₇Fs₉Wo₁~En₉₀Fs₁₁Wo₃과 En₈₈Fs₉Wo₁~En₉₀Fs₁₁Wo₂이다. Mg-number [(Mg)/(Mg+ Fe²⁺)]는 중심부와 연변부가 각각 0.90~0.91과 0.89~0.91이다. Cr-number[(Cr)/(Cr+ Fe³⁺+Al)] 또한 유사한 값을 보이는데 중심부와 연변부가 각각 0.04~0.07과 0.04

~0.06이다. 사방휘석의 중심부와 연변부 Al₂O₃과 CaO 함량은 모두 4.00~4.94와 0.51~0.89의 좁은 범위를 보인다. 광물 화학 조성상 사방휘석은 엔스타이트(enstatite)이다.

단사휘석의 중심부와 연변부 Mg-Fe-Ca 화학 조성은 사방휘석과 같이 각각 En₄₈Fs₅Wo₄₆~En₄₉Fs₅Wo₄₈과 En₄₈Fs₅Wo₄₆~En₄₉Fs₅Wo₄₈의 좁은 범위를 보인다(표 1). 중심부와 연변부의 단사휘석 Mg-number [(Mg)/(Mg+ Fe²⁺)]는 각각 0.91~0.94와 0.91~0.93이고, Cr-number[(Cr)/(Cr+ Fe³⁺+Al)]는 각각 0.06~0.10과 0.07~0.11이다. Al₂O₃과 CaO 함량은 중심부와 연변부의 조성이 유사하며 5.04~6.80과 20.43~21.46의 좁은 범위를 보인다. 화학 조성상 이 단사휘석은 투휘석(diop-

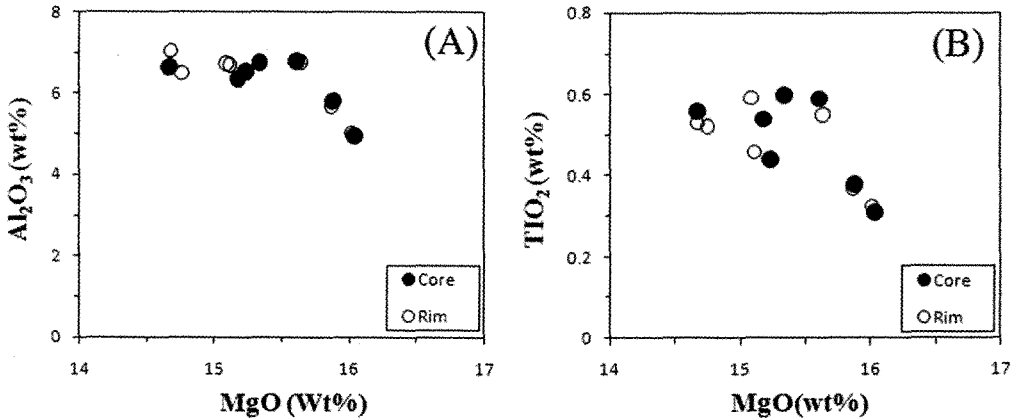


Fig. 3. (A) Al_2O_3 vs. MgO and (B) TiO_2 vs. MgO contents of clinopyroxenes in the spinel peridotites from Sunheul-ri.

side)에 속하다. 사방휘석과 단사휘석의 화학 조성 또한 다른 지역 맨틀 포획암의 화학 조성과의 유사한 값을 보이고 있다(이한영, 1995; 신흥자 외, 2006). 단사휘석에서는 MgO 성분이 감소하면서 Al_2O_3 과, TiO_2 함량이 감소하는 경향을 보인다(그림 3). 이러한 경향은 상부맨틀 기원 스피넬 페리도타이트의 부분용융 정도 차이에서 기인된다(Norman, 1998).

전형적인 갈색 크롬스피넬 중심부와 연변부 Mg-number[$(Mg)/(Mg + Fe^{2+})$]는 0.79~0.83, Cr-number[$(Cr)/(Cr + Fe^{3+} + Al)$]는 0.08~0.13의 좁은 범위 내에 속한다. 감람석 Fo 조성과 스피넬의 Cr/(Cr+Al)비는 Arai (1987)에 의해 정의된 OSMA (Olivine-Spinel Mantle Array)에 속하나 광물 내의 화학 조성의 변화 폭이 적어 감람석 Fo가 증가에 따른 스피넬 Cr/(Cr+Al)비가 감소하는 경향은 뚜렷하게 보이지 않는다(그림 4).

평형 온도와 압력

선홀리 스피넬 페리도타이트가 모마그마에 포획되기 이전에 구성광물들이 상호 평형 상태에 있었다는 것은 화학 분석 값과 스피넬 페리도타이트의 암석조직을 통하여 알 수 있다. 선홀리 스피넬 페리도타이트 내의 구성 광물들의 중심부와 연변부의 화학 조성 값이 유사하다. 또한 여러 지온계들을 이용하여 얻은 중심부 평형온도와 연변부 평형온도 차이가 50°C 이하라는 것은 이들 스피넬 페리도타이트가 모마그마에 포획되기 이전에 구

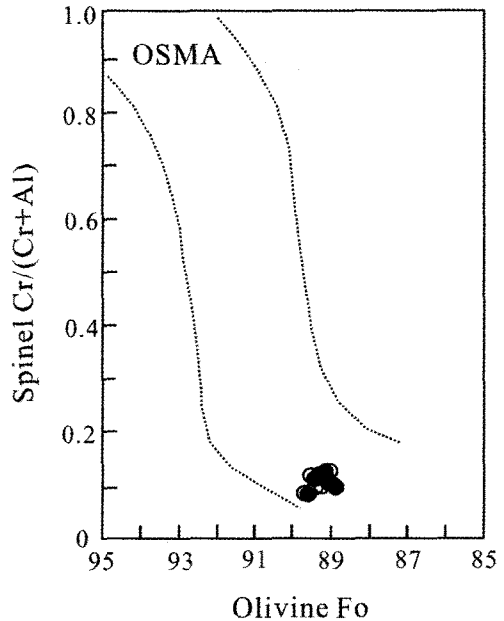


Fig. 4. Cr/(Cr+Al) of spinels vs. forsterite compositions of olivines in the spinel peridotites from Sunheul-ri. OSMA is Olivine-Spinel Mantle Array (After Arai, 1987).

성 광물간 평형 상태에 있었다는 것을 의미한다(표 2, 그림 5). 또한 감람석-사방휘석, 감람석-단사휘석, 단사휘석-사방휘석의 광물간 Fe/Mg비에 대한 평균 교환분배계수가 각각 1.068, 1.180, 1.105로서 1에 가까운 값을 나타낸다. 이 또한 선홀리 스피넬 페리도타이트가 모마그마에 포획되

Table 2. Temperature data for spinel peridotite xenoliths from Sunheul-ri. T_{WB} = Wood and Banno (1973), T_{BK} = Brey and Köhler (1990), $T_{Ca-in-Opx}$ = Brey and Köhler (1990), T_{WS} = Witt-Eickschen and Seck (1991), T_B = Ballhaus *et al.* (1991), and T_{PP} = Powell and Powell (1974) geothermometers. P_O = O'Neill (1981) geobarometer.

Location	SHR-1		SHR-2		SHR-3		SHR-4	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
T_{WB} at15 kb (°C)	1053	1045	1034	1039	1085	1103	1073	1069
T_{BK} at15 kb (°C)	958	964	951	987	1031	1035	995	993
$T_{Ca-in\ opx}$ at15 kb (°C)	902	902	912	932	922	1025	960	969
T_{WS} at15 kb (°C)	939	961	903	924	963	957	1030	982
T_B at15 kb (°C)	1011	960	1000	974	1117	1093	979	1015
T_{PP} at15 kb (°C)	1011	1014	1014	1015	1014	1013	1014	1013
P_O at T_{BK} (kb)	19	19	18	19	19	19	19	19

Location	SHR-5		SHR-6		SHR-7	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
T_{WB} at15 kb (°C)	1073	1066	1071	1056	1040	1026
T_{BK} at15 kb (°C)	999	983	993	998	986	961
$T_{Ca-in\ opx}$ at15 kb (°C)	1142	960	922	912	902	922
T_{WS} at15 kb (°C)	1045	1001	959	982	953	912
T_B at15 kb (°C)	965	1019	1065	1030	1037	1041
T_{PP} at15 kb (°C)	1014	1014	1011	1014	1014	1014
P_O at T_{BK} (kb)	19	19	19	19	19	18

기 전에 평형상태에 있었다는 것을 의미한다(Fan and Hooper, 1989).

스피넬 페리도타이트의 평형온도를 알아보기 위하여 다양한 지온계를 사용하였다(표 2). 평형온도 계산을 위해 사방휘석-단사휘석을 이용한 Wood and Banno (1973)와 Brey and Köhler (1990) 지온계, 사방휘석을 이용한 Brey and Köhler (1990) 지온계, 감람석-스피넬을 이용한 Ballhaus *et al.* (1991) 지온계, 감람석-사방휘석-스피넬을 이용한 Witt-Eickschen and Seck (1991) 지온계, 감람석-단사휘석-스피넬을 이용한 Powell and Powell (1974) 지온계를 이용하였다(표 2). 여러 지온계에서 얻어진 선흘리 스피넬 페리도타이트의 평형 온도 범위는 약 900°C ~ 1100°C이다(그림 5). 지온계 중에서 사방휘석-단사휘석을 이용한 Brey and Köhler (1990) 지온계는 평균에 가까운 온도 범위를 보이고 있고 중심부와 연변부 온도 범위가 크지 않으므로 스피넬 페리도타이트의 평형 온도를 나타내는

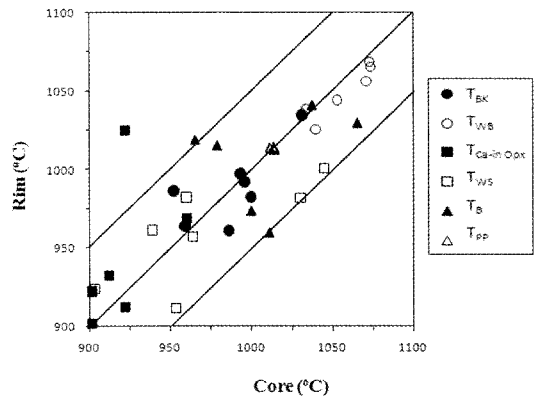


Fig. 5. Comparison of core and rim temperature. T_{BK} = Brey and Köhler (1990), T_{WB} = Wood and Banno (1973), $T_{Ca-in-Opx}$ = Brey and Köhler (1990), T_{WS} = Witt-Eickschen and Seck (1991), T_B = Ballhaus *et al.* (1991), and T_{PP} = Powell and Powell (1974) geothermometers.

지시자로서 사용하기에 적당하다. 결과적으로 스피넬 페리도타이트에 대한 적당한 지압계가 아직 없으므로 평형압력이 15 kb라는 가정 하에서 Brey and Köhler (1990) 지온계에서 얻어진 평형온도 범위는 중심부가 951°C ~ 1031°C 이고 연변부가 961°C ~ 1035°C 이다.

맨틀암석의 마그마 정체 시간

선홀리 스피넬 페리도타이트는 모마그마에 포획된 후 용융되지 않고 빠른 속도로 지표에 올라왔기 때문에 암석 본래의 형태를 잘 보존하고 있다. 그래서 얼마나 오랫동안 스피넬 페리도타이트가 모마그마에 포획되어져 있었는지는 항상 궁금한 사항 중에 하나이다.

감람석 내의 칼슘은 농도가 대부분 1000 ppm 이하로 낮으며, 칼슘 이온 반경이 마그네슘과 철에 비하여 상대적으로 크므로 Brey and Köhler (1990)는 칼슘 농도 변화를 이용하여 지압계를 만들었다. 그러나 감람석 내의 칼슘 이온 농도 변화가 온도 변화에 민감하여 온도 변화에 따른 칼슘 이온 확산속도가 상대적으로 다른 원소들에 비하여 빠르다(Takahashi, 1990; Zipfel and Wörner, 1992; Kil, 2002, 2004). 그러므로 감람석 중심부에서부터 연변부로 갈수록 변화하는 칼슘 농도, 감람석 내의 칼슘 이온 확산속도(diffusion velocity), 아래 확산 방정식은 포획된 스피넬 페리도타이트가 얼마나 오랫동안 모 마그마에 포획되어져 있었는지를 알려준다(Kil, 2002).

$$T_{1/2} = X^2_{1/2} / 2D$$

여기서 T는 시간이며, X는 연변부에서부터 칼슘 농도가 변한 거리이며, D는 확산계수(diffusion coefficient)이다. 감람석 내의 칼슘 이온 확산계수 ($3.182 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$)는 감람석 C-axis 방향으로 $f(\text{O}_2) = 10^{-8}$, $T = 1200^\circ\text{C}$, $P_{\text{tot}} = 1 \text{ bar}$ 의 실험조건에서 얻어진 값이 이용되었다(Jeurewicz and Watson, 1988; Köhler and Brey, 1990). 칼슘농도가 낮은 감람석에서 칼슘농도 측정치의 신뢰도를 높이기 위해 전자현미분석기로 3~5회 측정된 칼슘 농도의 평균치를 사용하였고, 인접 단사회석의 이차 형광효과(second fluorescence effect)를 줄이기 위해 감람석 결정을 암석에서 분리하여 칼슘 농도를 측정하였다(그림 6). 그림 6에서와 같이 칼

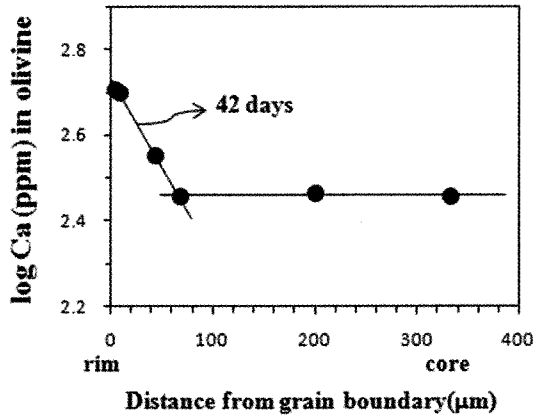


Fig. 6. Plot of log Ca (ppm) vs. distance from grain rim in the spinel peridotite xenolith (SHR-3) from Sunheul-ri. 333 μm (distance from rim) = 286 ppm (Ca concentration), 200 μm = 291 ppm, 68 μm = 286 ppm, 44 μm = 357 ppm, 9 μm = 500 ppm, and 4 μm = 510 ppm.

슘 농도 변화는 중심에서는 일정하나 연변부에서 약 68 μm 떨어진 지점부터 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이는 감람석 내 칼슘이온 확산이 모마그마 내의 상대적으로 높은 온도 때문에 일어났다는 증거이다. $X_{1/2} = 34 \mu\text{m}$ 과 위의 확산계수를 통해 얻어진 시간(T)은 42일이 된다. 그러므로 맨틀에서 형성된 모마그마가 스피넬 페리도타이트 맨틀암석을 포획하여 정체한 시간은 약 42일이다. 이는 마그마가 지표에 올라온 시간과 유사할 것으로 생각되며 상대적으로 빠른 속도로 모마그마가 지표에 올라왔다는 것을 의미한다(그림 6).

결론

제주도 선홀리 맨틀포획암인 스피넬 페리도타이트의 광물화학 자료는 제주도 상부 맨틀 조성과, 평형온도, 포획암인 스피넬 페리도타이트의 정체 시간에 대한 정보를 다음과 같이 제공한다.

1) 선홀리 맨틀포획암은 감람석, 단사회석, 사방회석, 스피넬로 구성된 스피넬 페리도타이트이며, 구성 광물들의 중심부와 연변부 화학 조성 변화의 폭이 좁다. 감람석의 Fo 조성이 89-90이며 스피넬의 Mg-number와 Cr-number는 이 암석이 일반적인 맨틀 기원의 암석임을 지지한다.

2) Brey and Köhler (1990) 지온계에서 얻어진 중심부와 연변부의 평형 온도는 50°C 이내로 일정

하며, 7개의 스피넬 페리도타이트에서 얻어진 평형 온도는 951~1035°C의 좁은 범위를 보인다.

3) 맨틀에서 형성된 모마그마가 스피넬 페리도타이트 맨틀암석을 포획하여 지표에 올라온 시간은 확산방정식을 이용한 결과 약 42일이다.

사 사

이 논문에 세심한 심사를 해주신 심사위원님께 진심으로 감사드리며 광물화학분석에 많은 도움을 주신 지질자원연구원 조동룡 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 한국지질자원연구원 자체사업인 '맨틀암석의 전이콘텐츠개발(08-7522)'과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김영우 (1995) 제주도 동북사면에 분포하는 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 강원대학교 석사논문, 106p.

김규환, Nagao Keisuke, 장형숙, Sumino Hirochika, 정정인 (2002) 백령도에 분포하는 알칼리 현무암과 맨틀 포획암의 Nd-Sr과 영족기체 동위원소. 자원환경지질학회지, 35, 523-532.

김윤규, 이대성, 송윤구, 김선익 (1988) 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. 지질학회지, 24, 57-66.

남복현 (2008) 제주도 현무암에 포획된 엽리를 가지는 맨틀 페리도타이트. 부산대학교 석사학위논문, 102p.

신홍자, 김영우, 진명식, 이석훈 (2006) 아산, 평택 지역 상부맨틀 포획암의 암석학적 연구. 지질학회지, 42, 95-113.

양경희 (2004) 제주도의 하부지각/상부맨틀 기원의 포획암에 포획된 유체포유물: 예비연구. 암석학회지, 13, 34-45.

윤성효, 고정선, 안지영 (1998) 제주도 동부 알칼리 현무암내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구. 자원환경지질, 31, 447-458.

이문원 (1984) 제주화산암류에 포획된 mafic 포획암. 지질학회지, 20, 306-313.

이한영 (1995) 남한의 알칼리 현무암에 분포하는 맨틀 포획암의 암석화학적 연구: 상부 맨틀의 온도 및 압력추정. 암석학회지, 4, 104-123.

제주·애월 지질보고서(1998) 제주·애월 지질보고서, 한국자원연구소, 290p.

한영현 (2007) 제주도에서 산출되는 페리도타이트 포획체내의 단사회석의 미량원소 특성. 부산대학교 석사학위논문, 45p.

Arai, S. (1987) An estimation of the least depleted

spinel peridotite on the basis of olivine-spinel mantle array. Neues Jahrb Mineral Monatsh, H8, 347-354.

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. Contrib. Mineral. Petrol., 107, 27-40.

Bonatti, E., Ottonello, G., and Hamlyn, P.R. (1986) Peridotites from Island of Zabargad (St. John) Red Sea: Petrology and geochemistry. J. Geophys. Res., 91, 599-631.

Brey, G.P. and Köhler, T. (1990) Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. J. Petrol., 31, 1353-1378.

Choi, S-H. (2000) Oxidation state of mantle xenoliths from Jeju-do, South Korea. Geosci. J., 4, 211-220.

Choi, S-H., Jwa, Y-J., and Lee, H-Y. (2001) Geothermal gradient of the upper mantle beneath Jeju Island, Korea: Evidence from mantle xenoliths. Island Arc, 10, 175-193.

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.

Droop, G.T.R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. Mineral. Mag., 51, 431-435.

Fan, Q. and Hooper, P.R. (1989) The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: Implications for upper mantle composition and the Paleogeotherms. Journal of Petrology, 30, 1117-1158.

Harte, B. (1977) Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallization textures in olivine-bearing xenolith. J. Geo., 85, 279-288.

Jeurewicz, A.J.G. and Watson, E.B. (1988) Cations in olivine, Part2: Diffusion in olivine xenocrysts, with application to petrology and mineral physics, Contrib. Mineral. Petrol., 99, 186-201.

Kil, Y. (2002) Mantle evolution associated with the Rio Grande Rift: Geochemistry and geothermobarometry of upper mantle xenolith. Colorado School of Mines Ph.D. thesis, 160p.

Kil, Y. (2004) Pressure and temperature evolution of upper mantle under the Rio Grande Rift. Contrib. Mineral. Petrol., 148, 265-280.

Kil, Y. (2006) Characteristics of subcontinental lithospheric mantle beneath Baegryeong Island, Korea:

- Spinel peridotite xenoliths. *Island Arc*, 14, 269-282.
- Kil, Y. (2007) Geochemistry and petrogenesis of spinel lherzolite xenoliths from Boeun, Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 29-40.
- Köhler, T.P. and Brey, G.P. (1990) Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 54, 2375-2388.
- Lee, H.Y. (2002) Petrology of spinel lherzolite from South Korea: Implication of P/T estimate. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 23, 38-51.
- Lee, S.R. and Walker, R.J. (2006) Re-Os isotope systematics of mantle xenolith from South Korea: Evidence for complex growth and loss of lithospheric mantle beneath East Asia. *Chemical Geology*, 231, 90-101.
- Maaløe, S. and Aoki, K. (1977) The major element composition of upper mantle estimated from the composition of lherzolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 63, 161-173.
- Mercier, J.C. and Nicolas, A. (1975) Texture and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *J. Petrol.*, 16, 454-487.
- Nixon, P.H. (1987) *Mantle xenoliths*. Wiley and Sons, New York, 844p.
- Norman, M.D. (1998) Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICP-MS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 130, 240-255.
- O'Neill, H.S.T.C. (1981) The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contrib. Mineral. Petro.*, 77, 185-194.
- Powell, M. and Powell, R. (1974) An olivine-clinopyroxene geothermometer. *Contrib. Mineral. Petro.*, 48, 263.
- Takahashi, E. (1980) Thermal history of lherzolite xenoliths-I. Petrology of lherzolite xenoliths from the Ichinomegata crater, Oga peninsula, northeast Japan, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 44, 1643-1658.
- Witt-Eickchen, G. and Seck, H.A. (1987) Temperature of sheared mantle xenoliths from the West Eifel, West Germany: evidence for mantle diapirism beneath the Rhenish massif. *J. Petrol.*, 28, 475-493.
- 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. *Contrib. Mineral. Petro.*, 106, 431-439.
- Wood, B.J. and Banno, S. (1973) Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petro.*, 42, 109-124.
- Zipfel, J. and Wörner, G. (1992) Four- and five-phase peridotites from a continental rift system: evidence for upper mantle uplift and cooling at the Ross Sea margin (Antarctica). *Contrib. Mineral. Petro.*, 111, 24-36.

접수일(2008년 11월 24일), 수정일(1차 : 2008년 12월 15일),
 게재확정일(2008년 12월 15일)