

제주도 동부 알칼리 현무암내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구

윤성효* · 고정선* · 안지영*

A Study on the Spinel-Lherzolite Xenolith in the Alkali Basalt from Eastern Cheju Island, Korea

Sung Hyo Yun*, Jeong Seon Koh* and Ji Young Anh*

ABSTRACT : The spinel lherzolite of ultramafic xenoliths are found in the alkali basalt from eastern part of the Cheju island, Korea. The xenolith is are mainly composed of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene and spinel. Based on the chemical compositions of the constituent minerals, the ultramafic xenolith belong to upper mantle peridotite. Each minerals have a protogranular texture. Olivine with kink band texture partly shows undulatory extinction. Some clinopyroxenes have spongy textured rims. Brown spinels occur in the interstices between olivine and pyroxene grains. Olivine is mostly forsterite (Fo_{89-96}). Orthopyroxene is enstatite ($\text{Wo}_{1.3}\text{En}_{88.4}\text{Fs}_{10.3}$) with 3.87~5.25 wt% Al_2O_3 . Clinopyroxene is diopside ($\text{Wo}_{48.0}\text{En}_{46.2}\text{Fs}_{5.8}$) with 6.75~5.03 wt% Al_2O_3 . Spinel has the Mg value of 75.9 and its Cr-number is 10.2. According to the P-T estimations for the mantle xenoliths, equilibrium temperatures of the xenoliths range from 1023 to 1038°C and pressure is 18 kbar. Spinel lherzolite from this area, which is characterized by lower Cr-number (10.2) and homogeneous chemical compositions, supports that these ultramafic xenoliths are derived from the upper mantle.

서 언

상부맨틀 물질의 물리적, 화학적 성질을 밝히는 것은 고체지구과학분야에서 중요한 과제중의 하나이며 특히, 마그마의 기원을 알기 위해서도 중요하다. 하지만 아직까지는 상부맨틀까지 뚫고 들어가 그곳의 암석을 직접 관찰할 수는 없기 때문에, 킴블라이트나 알칼리 현무암에 포획되어 있는 초염기성 포획암에 의존할 수 밖에 없다. 이들 초염기성 포획암들은 마그마에 포획되어 60시간 이내에 지표로 급속하게 도달 (Kushiro *et al.*, 1976)하기 때문에 내부적으로나 외부적으로 거의 변화 없이 맨틀의 조성을 유지하고 있다. 따라서 이들은 상부맨틀의 물리적, 화학적 성질에 대한 가장 직접적인 정보를 제공한다고 할 수 있다.

이들 초염기성 포획암들은 전세계에 널리 분포하고 있으며, 암상도 다양하게 나타난다. Forbes and Kuno (1967)는 이들을 함유하는 현무암의 세계적 지리분포와 암석학적 성질을 검토하였으며, Nixon (1987)은 그간 전세계에서 연구되었던 논문들을 엮어서 'Mantle xenoliths'

라는 이름으로 내어놓았다. 이 외에도 여러 암석학자들 (Downes *et al.*, 1992; Johann *et al.*, 1997)이 연구를 계속하고 있으며, 일본이나 중국에서도 연구가 활발하다 (Qi *et al.*, 1995; Umino and Yoshizawa, 1996; Xu *et al.*, 1998). 우리나라에서는 포획암 연구의 중요성에 대한 소개 (Lee, 1967)가 있는 뒤, 제주화산암류에 함유하는 포획암에 대한 간략한 기재 (Won, 1975)와 옥천 지향사대 내의 현무암에 Dunite가 산출된다는 보고 (Lee, 1980)가 있었다. 제주도를 제외한 다른 지역의 초염기성 포획암에 대한 연구로는 조곡리 포획암의 암석학적 연구 (김윤규 외, 1988), 백령도 포획암의 암석기체학적 연구 (나기창과 이문원, 1987)와 남한의 알칼리 현무암내의 맨틀포획암의 암석화학적 연구 (이한영, 1995)가 있다. 우리나라에서는 초염기성 포획암들이 백령도, 강원도 고성군 간성 일원, 충북 보은군 조곡리일대, 제주도 등에서 알칼리 현무암내에 나타나고 있는데, 제주도의 초염기성 포획암에 대해서는 구체적으로 연구된 바가 없고, 단지 제주 화산암류에 함유하고 있는 포획암류중에서 염기성 (mafic) 포획암에 대한 연구 (이문원, 1984)가 있을 뿐이다.

이 연구는 제주도 동부의 지그리오름 북부와 신산리 해안 운평리용암 내에서 발견되는 초염기성 포획암과 이들

* 부산대학교 대학원 지구과학과 (Department of Earth Sciences, Pusan National University, Pusan 609-739, Korea), E-mail: yunsh@hyowon.pusan.ac.kr

을 함유하고 있는 알칼리 현무암의 암석학적, 광물학적 자료를 통해서 이들의 지화학적 특징을 밝히고, 제주도 지각하부 상부맨틀의 온도 압력을 추정하고자 한다.

암석 기재

제주도 동부지역 성산읍 신산리 해안 온평리용암(알칼리 현무암), 지그리오름 북부, 산굼부리 등 많은 지역에서는 대소규모(최대크기 16×5 cm)의 맨틀 포획암들이 발견된다(Fig. 1). 이들 맨틀포획암은 하나의 용암 flow unit 내에서는 하단부에 밀집 분포하여 나타나며 상부로 갈수록 크기도 작아지고 드물게 함유된다.

이들 맨틀 포획암의 주된 광물 조성은 감람석-사방휘석-단사휘석-크롬스피넬로서 모우드 분석 결과 스피넬-레졸라이트로 분류되며(Fig. 2), 스피넬의 Cr수치($Cr\# = 100Cr/(Cr+Al)$)가 낮고, 사방휘석의 Al_2O_3 함유량이 3.87~5.25 wt%인 Al-스피넬 레졸라이트로 분류된다(Carswell, 1980).

현미경하에서 전체적으로 프로토그래놀라 조직(proto-granular texture)을 보이며, 부분적으로 큰 감람석 결정은 파동소광을 보이며, 킹크밴딩(kink-banding)을 나타낸다. 일부 단사휘석 결정은 감람석과의 경계부에서 약간의 용융이 있었음을 지시하는 미약한 스폰지 조직을 보인다. 사방휘석에는 단사휘석이나, 감람석의 작은 결정이 포유물로 있기도 한다. 스피넬은 감람석과 휘석 결정 사이를 충전하는 간극상으로 갈색을 띠며, 불규칙한 외형으로 산출된다.

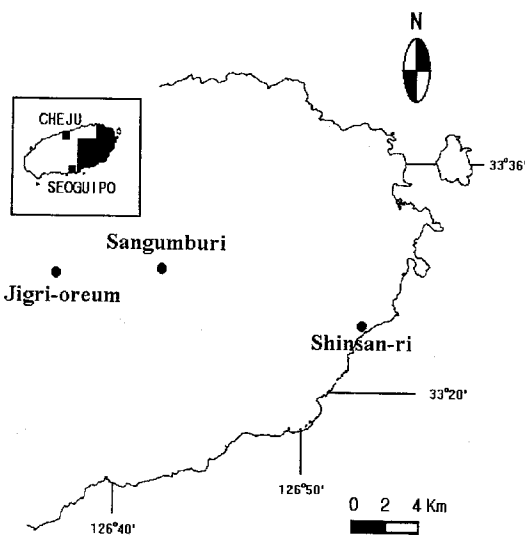


Fig. 1. Distribution map of spinel-lherzolite outcrops in the Cheju Island.

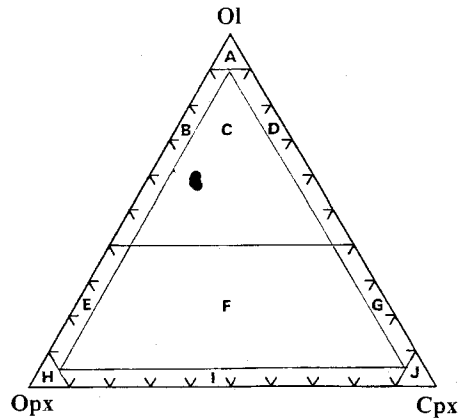


Fig. 2. Modal compositions of the ultramafic xenolith in the Cheju Island. A; Dunite, B; Harzburgite, C; Lherzolite, D; Wehrlite, E; Olivine orthopyroxenite, F; Olivine websterite, G; Olivine clinopyroxenite H; Orthopyroxenite, I; Websterlite, J; clinopyroxenite.

암석 화학 조성

본 연구대상인 스피넬-레졸라이트와 이를 포획하고 있는 알칼리현무암의 주성분, CIPW 노름 광물 조성 및 미량원소 조성은 Table 1~2와 같다.

스피넬-레졸라이트를 포획한 알칼리 현무암은 SiO_2 에 대한 Na_2O+K_2O 의 성분비 (Irvine and Baragar, 1971)에서 알칼리암 계열에 속한다. 미량원소를 초생적인 맨틀(primitive mantle: Taylor and McLennan, 1985)값에 대해서 표준화한 결과 현무암의 미량원소는 전체적으로 부화되어 있으며, Zr은 약한 이상을 보인다. 전체적으로는 Rb에서 Lu로 갈수록 감소하는 경향이 있다(Fig. 3A). 희토류원소를 콘드라이트값으로 표준화한 그림(Taylor and McLennan, 1985)에서 희토류원소의 변화 경향은 경희토류 원소가 중희토류 원소에 비해 부화되어 음의 기울기를 보이며, Eu 음의 이상은 나타나지 않는다(Fig. 3B).

포획암의 Mg값($MgX=100 \cdot Mg/(Mg+Fe)$)은 88로 높으며, SiO_2 와 MgO 성분의 합은 주로 함량이 83 wt%이다. 이러한 값은 스피넬-레졸라이트의 구성 광물중 감람석과 사방휘석이 우세한 것과 일치한다. Ni과 Cr함량은 각각 328~531 ppm, 1388 ppm으로 맨틀 조성을 지시하며, 희토류원소의 총량은 약 3.5 ppm으로 매우 적다. 미량원소를 초생적인 맨틀값으로 표준화한 그림에서 Nb의 함량이 높은 이상을 나타낸다. 그리고, Ba의 함량이 낮고, Sr과 Zr은 부의 이상을 보인다(Fig. 3A). 이는 제주도지역 하부의 상부맨틀이 Nb는 부화되어 있으며, Sr, Ba는 결핍된 특징을 가짐을 의미한다. 이들 초염기성 포획암의

Table 1. Representative analyses of major element concentrations (wt%) and CIPW norms in spinel-lherzolites from the Cheju Island.

Sample	Onpyeng-ri lava		Jigeuri-oreum	
	host 26-6	peridotite 26-6P	host 27-4	peridotite 27-4p
SiO ₂	49.93	44.73	52.11	44.09
TiO ₂	2.31	0.15	2.14	0.18
Al ₂ O ₃	14.78	2.98	15.63	3.21
Fe ₂ O ₃	3.38	-	3.70	-
FeO	7.09	9.30	6.18	9.69
FeO ^f	11.27	9.30	10.57	9.69
MnO	0.13	0.12	0.12	0.12
MgO	6.75	38.85	5.22	39.14
CaO	7.83	3.22	6.96	2.81
Na ₂ O	3.95	0.56	4.32	0.59
K ₂ O	1.93	0.01	2.03	0.03
P ₂ O ₅	0.64	-	0.61	-
CO ₂	-	0.01	-	0.22
H ₂ O	0.38	0.11	0.27	-
Total	99.90	100.04	99.90	100.08
MgX	62.90	88.20	60.10	87.80
CIPW norm				
or	11.56	0.06	12.13	0.18
ab	33.47	4.74	36.87	4.99
an	17.08	5.59	17.4	6.02
ne	0.19	-	-	-
Di wo	7.71	4.34	5.79	3.32
Di en	5.12	3.31	3.87	2.51
Di fs	2.02	0.58	1.48	0.45
Hy en	-	7.82	6.06	5.90
Hy fs	-	1.37	2.31	1.07
Ol fo	8.38	60.25	2.27	62.70
Ol fa	3.64	11.66	0.95	12.51
mt	4.97	-	5.42	-
il	4.45	0.29	4.11	0.34
ap	1.42	-	1.34	-

MgX=100Mg/(Mg+Fe).

회토류원소의 변화 경향은 콘드라이트값으로 표준화한 그림에서, 경회토류 원소 중 Ce이 약간 결핍되어 있다. 전체적으로 콘드라이트에 대해 표준화한 비는 거의 1의 값에 평행하며 중회토류 원소는 콘드라이트의 2배 정도로 부화되어 있다 (Fig. 3B).

광물 화학 조성

광물의 정량분석은 한국표준과학원 기초과학지원연구소의 CAMECA SX-51 EPMA 기기를 이용하여 분석하였으며, 분석조건은 조사전류 20 nA, 가속전압 15 kV, 빔직경 1 μm, 측정시간은 피크인 경우 10초, 그리고 배경치인 경우 5초간이다. 기기분석오차는 ±1% 미만이고, 측정

Table 2. Representative analyses of trace and rare earth element concentrations (p.p.m.) in spinel-lherzolites from the Cheju Island.

Sample	host	peridotite	host	peridotite
	26-6h	26-6P	27-4h	27-4p
Sr	664.6	1	649.4	5.5
Ba	494.4	1.5	480.4	2.9
Sc	15.6	6.7	13.3	0.9
Co	106.7	97	105.1	97.9
Ni	127.2	530.7	90.6	328.2
Cu	25.2	8.7	21.1	7.2
Zn	108	40.8	104.7	48.9
Cr	162.7	1387.6	131.3	1388.3
Ga	40.9	3	45.8	3.1
Rb	47.3	0.3	54.1	0.6
Y	22.1	2.9	21.4	2.6
Zr	233.7	3.7	257.9	4
Nb	50	1.3	51.5	2.2
Mo	1.59	0.05	2.51	0.16
Sn	2.14	0.08	2	0.23
Cs	0.31	0.01	0.39	0.02
Hf	5.74	0.11	6.16	0.15
Pb	3.88	0.84	4.21	0.68
Th	7.36	0.05	7.6	0.08
U	1.41	0.02	1.66	0.03
La	40.3	0.3	40.3	0.3
Ce	74.3	0.5	78.0	0.6
Pr	9.8	0.1	9.6	0.1
Nd	38.4	0.5	37.1	0.5
Sm	7.71	0.23	7.33	0.21
Eu	2.7	0.09	2.59	0.09
Gd	8.43	0.33	8.5	0.31
Tb	1.08	0.07	1.04	0.07
Dy	5.72	0.49	5.34	0.45
Ho	0.9	0.11	0.86	0.1
Er	2.38	0.34	2.22	0.31
Tm	0.28	0.05	0.27	0.05
Yb	1.76	0.36	1.64	0.32
Lu	0.24	0.05	0.22	0.05
ΣREE	194	3.52	195.01	3.46
(La/Lu) _N	17.3	0.618	18.872	0.618
Eu/Eu*	35.065	1.169	33.636	1.169

오차는 ±0.3% 미만이다. 분석된 주요 조암광물은 감람석, 휘석 (사방휘석, 단사휘석), 스피넬 등이 있다. 분석된 광물의 평균조성은 Table 3 (감람석), Table 4 (사방휘석), Table 5 (단사휘석), Table 6 (스피넬)과 같다. 각 광물들은 비교적 균질한 성분을 보인다.

감람석

포획암의 감람석의 MgX은 84~90 범위를 보이며, 대부분은 89~90으로 거의 일정하다 (Table 3, Fig. 4). CaO함

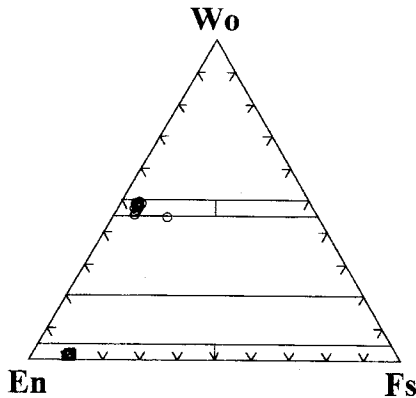


Fig. 5. Composition of Pyroxene from the spinel-lherzolite in the Cheju Island. A; Diopside, B; Hedenbergite, C; Augite, D; Pigeonite, E; Enstatite (=Clinoenstatite), F; Ferrosilite (=Clinoferrosilite).

(diopside)에 해당한다 (Fig. 5, Table 5). 이 광물의 Al_2O_3 함량은 6.75~5.03 wt%이고, Cr_2O_3 함량은 0.64~0.95 wt%이다. TiO_2 와 Na_2O 의 함량은 각각 0.37~0.59 wt%, 0.46~2.00 wt%이다. 그런데, 스폰지 조직을 보이는 단사휘석의 가장자리에서 Al과 Na의 함량은 낮고, Mg와 Ca는 높다. 이는 비조화용융 때문에 생긴 화학적 변화이며 (Fan and

Hooper, 1989), 이런 변화는 여기서 뿐만 아니라, 현무암과 접하고 있는 단사휘석에서도 유사한 화학조성 변화를 보인다. 이로 인해서 사방휘석은 거의 균질한 조성을 보이는데 반해서, 단사휘석은 약간 넓은 범위를 보인다.

스피넬

스피넬은 스피넬-레졸라이트에 나타나는 전형적인 갈색 크롬-스피넬이며, MgX은 평균 75.9이고, Cr#는 평균 10.2이다. Cr_2O_3 와 Al_2O_3 함량은 각각 8.88~9.80 wt%, 55.4~56.0 wt%이다 (Table 6).

지질온도계 및 지질압력계에 의한 온도-압력 추정

이 연구 목적 중의 하나는 제주도 지각 하부의 상부맨틀을 구성하는 맨틀 포획암의 온도-압력 (P-T) 영역을 추정하는 것이다. 그렇기 때문에 P-T를 계산하기 전에, 먼저 본 역의 초염기성 포획암이 상부맨틀에서 평형상태에 있었는지를 고려해야 한다.

그래서, 초염기성 포획암을 구성하는 광물의 화학 성분

Table 4. Representative microprobe analyses of enstatites in spinel-lherzolites from the Cheju Island.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	54.58	54.10	54.46	54.20	55.27	54.82	54.64	54.88	55.05	54.53	54.91	55.08	55.28
Al ₂ O ₃	5.25	5.08	4.98	5.10	4.82	4.66	4.86	4.26	3.87	4.43	4.59	4.01	3.95
TiO ₂	-	-	-	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0.45	0.33	0.50	0.48	0.39	0.42	0.35	0.32	0.31	0.42	0.31	0.34	0.31
FeO	6.75	6.37	6.61	6.37	6.90	6.34	6.43	6.60	6.23	6.55	6.44	6.87	6.48
MgO	31.07	30.73	31.08	31.08	31.81	31.42	31.49	31.49	31.90	31.91	31.72	31.57	32.13
Na ₂ O	0.24	0.37	0.32	-	0.30	-	-	0.33	-	0.28	-	0.27	0.25
CaO	0.81	0.96	0.85	0.93	0.64	0.64	0.60	0.44	0.51	0.83	0.54	0.50	0.63
Total	99.15	97.93	98.80	98.54	100.11	98.32	98.37	98.32	97.87	98.95	98.52	98.65	99.02
Cations based on 6 oxygens													
TSi	1.908	1.912	1.909	1.910	1.911	1.932	1.924	1.930	1.946	1.904	1.930	1.934	1.929
TAl	0.092	0.088	0.091	0.090	0.089	0.068	0.076	0.070	0.054	0.096	0.070	0.066	0.071
M1Al	0.124	0.123	0.115	0.121	0.107	0.126	0.125	0.107	0.107	0.086	0.120	0.100	0.091
M1Cr	0.013	0.009	0.014	0.013	0.011	0.012	0.010	0.009	0.009	0.011	0.009	0.009	0.008
M1Mg	0.863	0.868	0.872	0.855	0.882	0.862	0.865	0.885	0.885	0.902	0.872	0.891	0.901
M2Mg	0.756	0.750	0.752	0.777	0.757	0.789	0.788	0.766	0.796	0.759	0.790	0.761	0.771
M2Fe ₂	0.197	0.188	0.194	0.188	0.199	0.187	0.189	0.194	0.184	0.191	0.189	0.202	0.189
M2Ca	0.030	0.036	0.032	0.035	0.024	0.024	0.022	0.017	0.019	0.031	0.020	0.019	0.024
M2Na	0.016	0.025	0.022	-	0.020	-	-	0.023	-	0.019	-	0.019	0.017
Mg X	89.14	89.58	89.33	89.69	89.15	89.83	89.72	89.47	90.12	89.68	89.77	89.11	89.84
Cr#	5.68	4.09	6.36	5.80	5.31	5.83	4.74	4.84	5.29	5.70	4.52	5.14	4.71
WO	1.64	1.97	1.72	1.89	1.27	1.31	1.20	0.89	1.03	1.65	1.09	1.00	1.25
EN	87.68	87.82	87.80	88.00	88.02	88.65	88.64	88.68	89.19	88.21	88.79	88.22	88.71

Cr# = 100 Cr/(Cr+Al).

Table 5. Representative microprobe analyses of diopsides in spinel-lherzolites from the Cheju Island.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15*
SiO ₂	52.09	51.77	52.50	51.81	51.97	51.13	51.75	52.20	52.79	52.20	51.93	51.97	51.89	51.63	50.79
Al ₂ O ₃	6.51	6.52	6.55	6.53	6.64	6.77	5.97	6.54	6.02	6.67	6.47	6.75	5.03	6.67	5.13
TiO ₂	0.57	0.55	0.37	0.59	0.58	0.55	0.42	0.40	0.46	0.56	0.47	0.54	0.44	0.41	0.52
Cr ₂ O ₃	0.78	0.80	0.91	0.70	0.67	0.88	0.64	0.65	0.64	0.85	0.65	0.95	0.90	1.10	0.92
FeO	2.57	2.89	2.59	3.12	3.25	2.75	2.97	2.83	3.31	3.02	2.86	2.44	3.52	2.64	3.47
MgO	14.18	14.53	14.69	15.07	14.31	14.31	14.44	14.19	15.07	14.49	14.42	14.53	16.23	14.14	15.74
Na ₂ O	1.88	1.73	1.92	2.00	1.62	1.63	1.83	1.81	1.76	1.80	1.69	1.80	0.58	1.85	0.46
CaO	20.99	21.12	20.40	20.15	21.73	20.37	21.42	21.43	20.90	21.20	21.70	21.21	21.15	20.86	22.36
Total	99.58	99.90	99.93	99.96	100.76	98.39	99.45	100.04	100.96	100.81	100.20	100.18	99.74	99.29	99.38
Cations based on 6 oxygens															
TSi	1.890	1.873	1.894	1.867	1.869	1.879	1.880	1.886	1.889	1.873	1.874	1.873	1.891	1.880	1.861
TAl	0.110	0.127	0.106	0.133	0.131	0.121	0.120	0.114	0.111	0.127	0.126	0.127	0.109	0.120	0.139
M1Al	0.169	0.151	0.173	0.144	0.150	0.172	0.135	0.164	0.143	0.155	0.149	0.159	0.106	0.166	0.082
M1Ti	0.016	0.015	0.010	0.016	0.016	0.015	0.011	0.011	0.012	0.015	0.013	0.015	0.012	0.011	0.014
M1Fe ₂	0.027	0.027	0.001	0.011	0.048	0.003	0.053	0.042	0.023	0.031	0.044	0.019	0.000	0.025	0.017
M1Cr	0.022	0.024	0.026	0.020	0.019	0.025	0.018	0.018	0.018	0.024	0.018	0.027	0.026	0.032	0.027
M1Mg	0.767	0.784	0.790	0.809	0.767	0.784	0.782	0.764	0.804	0.775	0.776	0.781	0.856	0.767	0.860
M2Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.026	-	-
M2Fe ₂	0.052	0.060	0.077	0.083	0.050	0.081	0.037	0.043	0.076	0.060	0.042	0.055	0.107	0.056	0.089
M2Ca	0.816	0.819	0.789	0.778	0.837	0.802	0.834	0.830	0.801	0.815	0.839	0.819	0.826	0.814	0.878
M2Na	0.132	0.121	0.134	0.139	0.113	0.116	0.129	0.127	0.122	0.125	0.118	0.126	0.041	0.130	0.033
Mg X	90.76	89.95	91.02	89.58	88.70	90.27	89.64	89.93	89.03	89.53	90.00	91.41	89.16	90.52	89.01
Cr#	7.31	7.64	8.52	6.73	6.33	7.86	6.59	6.08	6.62	7.84	6.14	8.63	10.79	10.06	10.89
WO	49.13	48.45	47.60	46.27	49.19	48.02	48.87	49.40	47.02	48.49	49.33	48.95	45.51	48.98	47.61
EN	46.17	46.37	47.69	48.13	45.07	46.93	45.84	45.51	47.17	46.12	45.60	46.66	49.58	46.18	46.63
FS	4.70	5.18	4.71	5.60	5.74	5.06	5.30	5.10	5.81	5.39	5.07	4.39	5.91	4.84	5.76

* spongy textured rims.

Table 6. Representative microprobe analyses of spinels in spinel-lherzolites from the Cheju Island.

	1	2	3	4	5
Al ₂ O ₃	55.37	55.78	55.80	56.00	56.23
Cr ₂ O ₃	9.50	9.80	9.58	8.88	9.00
FeO	12.02	11.40	11.53	10.99	11.79
MgO	19.83	20.36	20.18	20.56	19.76
Na ₂ O	0.00	0.33	0.00	0.25	0.24
Total	96.72	97.66	97.09	96.68	97.02
Cations based on 4 oxygens					
Al	1.755	1.748	1.756	1.764	1.772
Fe ₂	0.023	0.026	0.020	0.019	0.264
Cr	0.202	0.206	0.203	0.188	0.190
Mg	0.795	0.808	0.804	0.820	0.787
Na	0.000	0.017	0.000	0.013	0.012
Mg X	74.65	76.16	75.71	76.92	74.88
Cr#	10.32	10.54	10.36	9.63	9.68

을 사용해서, 많은 암석학자들이 제시한 지질온도계와 압력계로써 스피넬-레졸라이트의 평형온도와 평형압력을 추정해 보고자 한다 (Wood and Banno, 1973; Wells,

1977; Mercier, 1980; Eickschen and Seck, 1991; Brey and Köhler, 1990a). 단, 스피넬-레졸라이트의 평형온도-압력의 계산은 석류석-레졸라이트의 평형온도-압력에 비해 좀더 불확실하다는 것 (Carswell, 1980; Carswell and Gibb, 1980)을 미리 밝혀두며, 특히 스피넬-레졸라이트에 대한 지질압력계는 거의 없다.

온도 계산

일찍이 Davis and Boyd (1966)는 투회석과 엔스타타이트의 혼화 간격 (miscibility gap, 30 kb에서)을 FeO와 Al₂O₃가 낮은 양회석 광물조합의 지질온도계로 사용하였다. 이에 대해서 Wood and Banno (1973)는 Fe를 포함하는 성분까지 이 자료를 적용하여 지질온도계를 제시하였다. Wells (1977)는 실험을 통해 새로운 엔탈피와 엔트로피의 변화 값과 Fe값을 가지는 범위를 좀더 넓게 하여, Wood and Banno (1973)의 지질온도계를 수정하여 제시하였다. 이 두 지질온도계는 고전적인 것으로 문제점이 있음에도 불구하고, 아직까지 많은 암석학자들이 사용하

고 있다. 일반적으로 Wood and Banno (1973)의 온도 값은 Wells (1977)의 온도보다 높게 나타나는데, 이 연구에서도 전자의 경우 985.4°C, 후자의 경우 881.9°C로 Wood and Banno (1973)의 온도가 약 100°C 높게 나타난다 (Table 7).

Mercier (1976)와 Lindsley (1983)는 사방휘석과 단사휘석이 각각 지질온도계로써 정보를 갖고 있음과 포획체의 압력의 효과를 주장했다. Mercier (1976)는 고전적인 압력방정식 (Mercier and Carter, 1975)에 Al이 풍부한 상 (스피넬, 석류석)과 공존하는 휘석의 En (Enstatite) - Di (Diopside) join 또는 Al함량을 특징적으로 나타내는 평형반응에 대한 유용한 실험적 자료를 열역학적 상수 - 엔탈피, 엔트로피, 체적변화를 사용해서 간단히 나타내었다. 그런 후 자연상의 광물 조합으로부터 계산된 분배계수 (partition coefficients)를 사용해서 이들 상수 값을 온도와 압력에 독립적인 값으로 다시 상수화시켜 분배계수 ka' 와 kw' 에 관계되는 휘석 지질온도, 압력방정식을 이끌어 내었다.

본 연구에서는 수정, 보완된 지질온도, 압력계 (Mercier, 1980)를 적용하였다. 우선 지질온도계로 계산된 온도는 사방휘석 977~1108°C, 단사휘석 762~1096°C이며, 사방휘석 지질온도계로 구한 온도는 단사휘석 지질온도계로 구한 온도에 비해서 좁은 범위에서 변화하고 있다 (Table 7). 이 사실에 대해서 Fan and Hooper (1989)는 사방휘석 지질온도계가 단사휘석 지질온도계보다 합리적인 온도측정치를 제시한다고 지적하였다.

그렇다면 위의 결과와 같이 단사휘석의 온도 범위가 사방휘석의 온도범위보다 넓은 이유는 무엇인가? 단사휘석은 용융이 일어나는 동안 다른 광물들에 비해서 먼저 용융이 된다는 사실 (Mysen and Kushiro, 1977)로 미루어 보아, 스피넬-레졸라이트가 포획되어 상승하는 도중에 현무암질 마그마의 열이 단사휘석을 조금 용융시켰으나, 이들 포획암은 빠른 시간내에 상승하기 때문에 사방휘석에는 영향을 미치지 못했을 것이다. 즉, 단사휘석은 초기상태 그대로이기 보다는 약간의 변질을 받았다고 생각한다면, 위와 같은 결과가 나올 수 있을 것 같다. 따라서, 사방

Table 7. Temperature and pressure estimation for spinel-lherzolites in the Cheju Island.

	T (°C)							P (Kb)	
	WB	W	M/opx	M/cpx	Es	BK	BK/opx	M/opx	
1	982	875	1072	862	1084	1002	809	17.3	
2	962	857	1009	985	991	932	918	16.2	
3	1000	902	995	913	976	912	845	20.9	
4	967	859	1012	850	1018	932	753	15.0	
5	1002	901	1034	856	976	960	823	17.2	
6	963	857	1108	1059	943	942	966	20.6	
7	998	898	1085	1096	1024	902	830	22.7	
8	966	858	1100	872	1080	1010	849	18.6	
9	1002	900	1032	904	1078	912	915	18.6	
10	960	851	1019	963	1020	902	942	17.0	
11	959	850	1032	1021	1074	951	796	15.4	
12	949	837	1018	858	1043	1047	931	15.0	
13	947	837	977	923	991	1018	918	15.6	
14	987	886		968		1040		17.7	
15	1025	932		861		951			
16	976	868		762		942			
17	1107	1025				951			
18						932			
Average	985	882	1038	922	1023	958	869	17.7	

Temperature and pressure estimation for spinel-lherzolites in S. Korea. (H.Y. Lee, 1995)

	WB	W	M/opx	M/cpx	SS	BK	BM	M/opx
Boun	1035	941	999	1032	1007	982	1001	15.6
Gansung	992	884	977	940	975	897	894	16.1
Baegryung	1060	960	963	973	1007	964	979	14.9

Temperatures were calculated by geothermometers of WB; Wood and Banno (1973), W; Wells (1997), M/opx, M/cpx; Mercier (1980), SS; Sachtleben and Seck (1981), ES; Eickschen, and Seck (1991), BK, BK/opx; Brey and Kohler (1990), BM; Bertrand and Mercier (1985).

회석 지질온도계가 단사회석 지질온도계에 비해서 더 합당한 값을 보인다고 할 수 있겠다.

많은 실험적인 연구 (Fujii, 1976; Danckwerth and Newton, 1978)와 이론적인 연구 (Obata, 1976)는 스피넬과 감람석이 함께 공존하는 사방회석의 Al-등성분도 (isopleths)가 압력에는 무관하고 온도에는 민감한, 지질온도계로서 사용된다는 것을 밝히고 있다.

그 중 Fujii (1976)는 사방회석+스피넬→Al-사방회석+감람석의 반응에 기초를 둔 사방회석의 M1 site내의 X_{Al} 과 온도와의 방정식을 제시하였다. 그러나, Sachtleben and Seck (1981)는 이 지질온도계가 자연상의 스피넬 페리도타이트의 지질온도계로써 부적당하다고 하였다. 그들은 Fujii (1976)의 방정식으로 계산한 온도는 스피넬의 Cr성분에 영향을 받는 것을 발견하였고, 이것은 각 상들의, 특히 스피넬의 비이상 해석 (non-ideal solution) 효과를 무시했기 때문이라고 지적하였다. 즉, 간단한 계에서 관측된 사방회석의 Al용해도를 자연상의 암석에 적용하는 것은 부가적인 화학성분 (M1-site내에 Al이 부가)에 의해 영향을 받을 수도 있기 때문에 문제가 된다는 것이다.

이러한 사실을 고려하여, 그 뒤 Sack (1982), Oka *et al.* (1984), Webb and Wood (1986), Chatterjee and Terhart (1985)은 사방회석과 스피넬 사이의 반응 모델을 기초로 한 방정식을 제안하였지만, Eickschen and Seck (1991)는 사방회석과 스피넬 반응 모델을 만들기 위해 필요한 열역학적 데이터가 지질온도계의 요구를 충족시키는 정밀한 방정식을 이끌어 내지 못한다는 것을 여러 학자들의 지질온도계로 구한 온도를 비교 설명, 해석하여 지적하고 있다. 그리고 이들은 자연상의 페리도타이트의 사방회석의 X_{Ca} 가 사방회석내 X_{Al} 과 체계적으로 변하는 것에 기초를 두고 Cr-Al사방회석 지질온도계를 발표하였고, 이 지질온도계로 구한 온도의 결과가 Brey and Köhler (1990b)의 Ca사방회석 지질온도계의 온도와 비슷함을 보여주었다.

우리의 자료를 Eickschen and Seck (1991)와 Brey and Köhler (1990a)의 방정식에 적용하여 구한 온도는 각각 평균 1023°C, 958°C이다. 여기서 Brey and Köhler (1990a) 지질온도계에서 압력은 15 kbar로 주어 계산하였다. 이는 일반적으로 스피넬 페리도타이트는 8~25 kbar의 범위에서만 존재할 수 있고 (Webb and Wood, 1986; Nic-kel, 1986; Brey and Köhler, 1990b), Ca사방회석 지질온도계에서 압력에 대한 온도의 변화는 5°C/kbar (Brey and Köhler, 1990b)이므로 압력을 15 kbar로 고정해서 온도를 계산한다고 해서 신뢰성이 크게 떨어지지 않는 것 같다.

두개의 지질온도계로 구한 온도는 모두 좁은 범위의 온도 변화를 보이고, Ca사방회석 지질온도계로 계산한 온도가 Cr-Al사방회석 지질온도계로 계산한 온도에 비해서 약간 낮음을 볼 수 있다. 이처럼 온도 차이를 나타내는 것은, 위에서 언급을 한 압력의 고정이 약간의 영향을 미칠 수도 있다고 생각한다. Brey and Köhler (1990a)는 앞에서 언급이 되었던 Ca사방회석 지질온도계 뿐만 아니라 공존하는 사방회석과 단사회석의 Ca치환에 Fe의 영향을 고려한 지질온도계도 제안하였다. 이것은 그들이 제안한 Ca감람석-단사회석 지질압력계 (Brey and Köhler, 1990b)와 결합해서 사용하기에 가장 적합하다고 그들의 논문에서 밝히고 있다. 이 지질온도계로 구한 온도는 평균 869°C이며, Wells (1977)의 온도보다 약간 낮은 온도 (20°C정도)를 나타낸다.

이상에서 언급한 지질온도계로 계산된 온도계산 결과는 Table 7에 요약되어 있다. 본 논문에서 스피넬-레졸라이트의 평형온도를 구하기 위해서 위에서 언급한 지질온도계 중에서 우선 Mercier (1980)의 단사회석 지질온도계는 같은 샘플 내에서도 너무나 넓은 범위의 온도 분포를 나타내기 때문에 제외시키고, Wells (1977)의 지질온도계와 Brey and Köhler (1990a)의 Ca단사-사방회석 지질온도계는 낮은 온도를 보이며, Brey and Köhler (1990a)의 Ca사방회석 지질온도계는 Wood and Banno (1973)와 Wells (1977)의 중간 값을 보이며, Eickschen and Seck (1991)와 Mercier (1976)의 사방회석 지질온도계는 Wood and Banno (1973)보다 40°C 정도 높은 값을 보인다. 이들 지질온도계중 Mercier (1976)의 사방회석 지질온도계는 Fan and Hooper (1989)가 합리적이라고 지적하였고, Eickschen and Seck (1991)의 Cr-Al사방회석 지질온도계는 이한영 (1995)에 의해 한반도 스피넬-레졸라이트의 온도를 구하는데 합리적이라고 한 Sachtleben and Seck (1981) 지질온도계의 문제점을 보완한 최근의 향상된 버전이라는 점에서 신뢰성을 가진다.

따라서 본 논문의 연구대상인 제주도 초염기성 포획체인 스피넬-레졸라이트의 평형온도는 1023~1038°C이고, 이는 스피넬-레졸라이트가 안정할 수 있는 온도 범위 900~1150°C (Wilson, 1989)의 중간적인 값을 나타낼 수 있다. 이는 남한의 다른 지역 (백령도, 간성, 조곡리)에서 발견되는 포획체의 온도에 대한 결과 (이한영, 1995)와 비슷하게 나타남을 볼 수 있다 (Table 7).

압력 추정

초염기성 포획암의 평형압력은 우선, Mercier (1980)의 사방회석 지질압력계를 사용하여 17.7 kb의 얻을 수

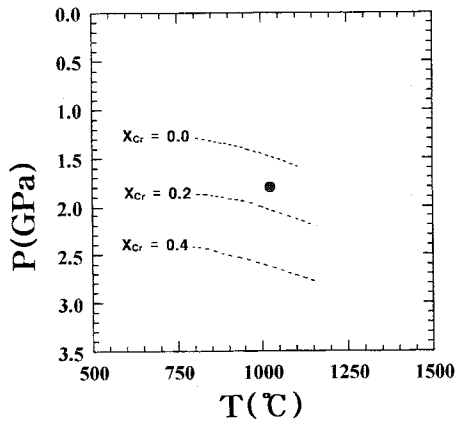


Fig. 6. Equilibration pressure and temperature of xenoliths from the Cheju Island (after O'Neill, 1981).

있었다 (Table 7). 단사회석 지질압력계는 위에서도 언급한 것처럼 신뢰성을 가지지 못한다고 판단하여 제외시켰다. 두 번째로, O'Neill (1981)이 제시한 온도-압력 상 다이어그램에 도시해서 구해보았다 (Fig. 6). 이 상 다이어그램은 CFMASCr 시스템에서 감람석의 Fo=90 일 때, 스피넬의 Cr#에 따른 온도-압력을 나타내고 있다. 온도는 앞에서 얻어진 평형온도를 사용하였고, 스피넬-레졸라이트의 Cr#는 약 10이므로 X_{Cr}=0.1을 내삽해서 압력을 구해보면 1.8 GPa가 얻어진다. 온도가 900~1000°C사이일 경우 압력이 1.7~1.8 GPa로, 온도100°C가 변하는데 압력은 0.1 GPa밖에 변하고 있지 않다 (Fig. 6).

그래프 상에 도시해서 압력을 구하는 것이어서 절대온도를 구할 수는 없지만 사방회석 지질압력계로 구한 평형압력과 비교해 볼 때, 신뢰성을 가지는 것으로 사료된다. 그리고 얻어진 압력은 사장석과 석류석이 결핍되어 있는 스피넬-레졸라이트 안정 영역의 압력인 8~25 kbar의 범위 (Wood, 1974; Webb and Wood, 1986; Nickel, 1986; Brey and Köhler, 1990b)내의 값이다.

토의 및 결론

위에서 구한 스피넬-레졸라이트의 온도와 압력이 제주도 지각 하부 상부맨틀의 온도-압력 영역을 지시한다고 말하기 위해서는 우선, 스피넬-레졸라이트가 평형상태에 있었는지를 논의하여야 한다. 그래서, 각 광물의 Fe-Mg교환 분배계수를 계산해서 (사방회석 0.116, 단사회석 0.110, 감람석 0.125) 공존하는 광물들 사이의 K_D 값을 계산해보았다. 각 광물에 대한 Fe/Mg비는 평균으로 계산했다. 그 결과 K_D^{ol-cpx}=1.0775, K_D^{sp-cpx}=1.134, K_D^{op-cpx}=0.928가 된다. 따

라서, 포획암들이 평형상태에 있었다는 것은 K_D=1에 가까운 값을 보이는 것으로 확인할 수가 있으며, 포획암들이 평형상태에 있었다는 것에 대한 검증은 포획암의 온도, 압력을 계산하는 초기조건이라고 할 수 있다 (Fan and Hooper, 1989).

다음으로, 스피넬-레졸라이트가 상부맨틀 기원임을 확인하고, 이것이 상부맨틀에서 알칼리 현무암에 포획되어 물리, 화학적으로 큰 변화없이 지표로 상승했다는 것이 논의되어야 한다. 우선, 스피넬-레졸라이트가 맨틀 기원임을 알기 위해서, 감람석과 스피넬의 화학분석치를 감람석의 Fo 대한 스피넬의 Cr/(Cr+Al) 다이어그램에 도시하였다 (Arai, 1987). 선으로 구획되어진 내부에 샘플이 도시됨을 확인 할 수 있으며, 이는 스피넬 레졸라이트가 맨틀 기원임을 나타낸다 (Fig. 7). 그리고 앞서 계산되어진 압력으로 깊이를 추정 (3 km/1 kbar)해보면 54 km가 나오는데, 이는 상부맨틀이 모호면에서 심도 670 km까지 인 것으로 보아서 상부맨틀 기원임을 알 수 있다 (Wilson, 1989).

두번째, 앞에서 언급된 암석기재적 특징을 보면, 현미경 관찰시 감람석에서 변형의 증거가 약간은 발견되지만, 전체적으로 결정의 경계부가 뚜렷하고, 등립질의 프로토크라놀라 조직을 가지므로, 본 역의 스피넬-레졸라이트는 알칼리 현무암에 포획되어 상승하는 도중에 큰 변화는 없었던 것으로 생각되며, 단사회석의 가장자리에서 보이는 스폰지 조직이 비록 용융의 증거가 되기는 하나, 이는 앞서 언급된 것처럼 용융이 일어나는 동안에 공존하는 다른

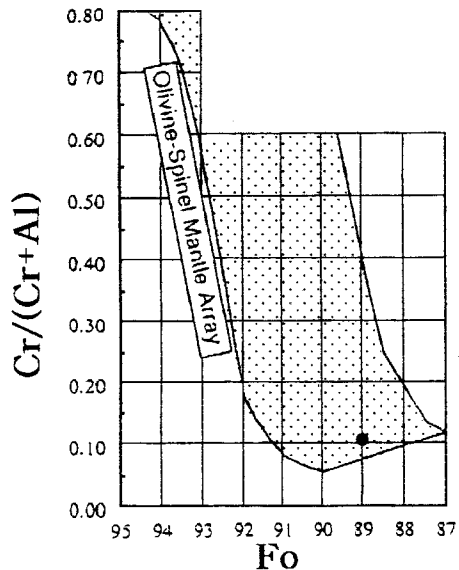


Fig. 7. Cr/(Cr+Al) of spinel is plotted against Fo of coexisting olivine. The dotted area is the range of mantle peridotites (after Arai, 1987).

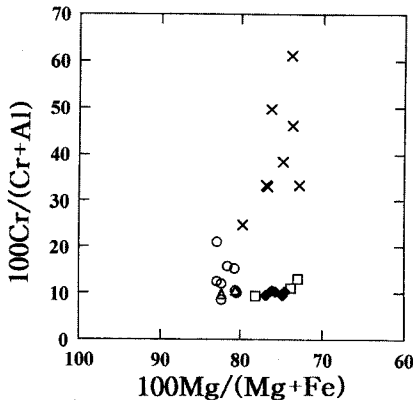


Fig. 8. Mg value vs. Cr-number in spinel. spinel-lherzolite showing protogranular texture from the Cheju Island (this study: ◆); Boun, Gansung and Baegyung area (Lee, 1995: □); Eastern China (Fan and Hooper, 1989: ○); Wangqing in NE China (Xu *et al.*, 1998: △); Harzburgite from Eastern China (Fan and Hooper, 1989: ×).

광물상들 보다 먼저 단사휘석이 용융된다는 사실 (Mysen and Kushiro, 1977)과 단사휘석 이외의 다른 광물들에서 용융의 증거를 찾을 수 없다는 사실로 스피넬-레졸라이트가 상부맨틀의 조성과 큰 차이가 있다고 단정하기에는 어려운 것 같다.

또한, 용융의 정도를 스피넬의 Cr#로 확인할 수가 있다. 스피넬의 Cr#는 그 수치가 높을수록 맨틀에서 부분용융이 많이 되었다는 것을 지시하는데 (Dick and Bullen, 1984), 본 역의 스피넬-레졸라이트에서 스피넬의 Cr#는 평균 10.2로 낮은 값을 보인다. 이는 Fig. 8에서 보는 것처럼 여러 곳에서 발견되는 초염기성 포획암의 MgX가 70~85의 범위에서 거의 일정한데 반해서, Cr#는 중국 동부에서 산출되는 스피넬-하츠버자이트 (Harzburgite)보다는 작음을 볼 수 있으며, 같은 지역에서 산출되는 스피넬-레졸라이트 (Fan and Hooper, 1989)와 남한의 보은, 간성, 백령도 (이한영, 1995)와도 비슷한 값을 보임을 알 수 있다. 이는 레졸라이트에 비해서 하츠버자이트가 맨틀에서 부분용융이 더 많이 된 암석임을 지시한다.

그리고, 스피넬의 Cr#와 단사휘석의 Al (VI) vs Al (IV)의 다이어그램 (Jagoutz *et al.*, 1979)에 자료를 도시해 본 결과, 이들 포획암은 부분용융도가 낮은 초생적인 맨틀 (primitive mantle)의 영역에 도시됨을 확인할 수가 있다 (Fig. 9). 따라서, 스피넬-레졸라이트는 본 역의 상부맨틀의 조성하고 거의 일치한다고 생각할 수 있으며, 계산되어진 스피넬-레졸라이트의 평형온도, 압력을 제주도 지각 하부 상부맨틀의 온도, 압력으로 간주한다는 것은 무리가 없다고 생각한다.

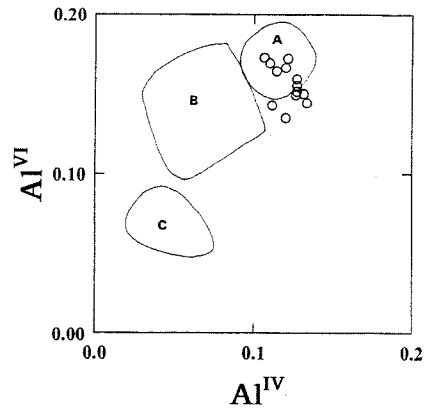


Fig. 9. Al^{VI} vs. Al^{IV} in clinopyroxene (Jagoutz *et al.*, 1979). A; Primitive group, B; Transitional group, C; Harzburgitic group.

이상의 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 제주도에서 산출되는 맨틀 포획암은 감람석-사방휘석-단사휘석-스피넬의 구성광물로된 스피넬-레졸라이트이며, 더 세분하면 Al-스피넬 레졸라이트로 분류된다. 각 광물들은 프로토히틀라조석을 보이며, 감람석은 약한 키크밴드를 나타내며, 사방휘석과 감람석은 부분적으로 파동소광을 보이고, 단사휘석은 미약한 스폰지 조직을 나타내며 스피넬은 갈색으로 결정사이를 충전하는 간극상으로 나타난다.
2. 각 광물들은 균질한 성분분포를 나타낸다. 감람석의 Fo성분은 89~90이고, CaO함량은 0.21 wt% 이하이다. 사방휘석의 평균조성은 엔스타타이트 (Wo_{1.3}En_{88.4}Fs_{10.3})이며, Al₂O₃ 함유량은 3.87~5.25 wt%이다. 단사휘석의 평균 조성은 투회석 (Wo_{48.0}En_{46.2}Fs_{5.8})이고, Al₂O₃ 함량은 6.75~5.03 wt%로 나타난다. 스피넬은 스피넬 레졸라이트에 나타나는 갈색 크롬-스피넬이며, MgX는 평균 75.9이고, Cr#는 평균 10.2이다.
3. 포획암들의 온도를 계산하기 위하여 다양한 휘석-지질온도계를 사용하여 검토하였으며, 이들 중에서 Mercier (1980)와 Eickschen and Seck (1991)의 지질온도계로 구한 평형온도는 1023~1038°C이며, 압력은 Mercier (1980)의 사방휘석 지압계와 Cr#를 사용하여 온도-압력 다이어그램으로 구하였으며, 18 kbar로 나타난다.
4. 제주도의 스피넬-레졸라이트는 스피넬의 Cr#가 낮고 광물의 화학조성이 균질한 초생적인 조성을 보인다.

사 사

본 논문을 읽어주시고 건설적인 비평과 수정을 해 주신

강원대학교 이문원 교수님, 이화여자대학교 김규한 교수님, 그리고, 참고자료와 지온지압계에 대해 많은 조언을 해 주신 한국자원연구소 이한영 박사님께 감사의 말씀을 드립니다. 야외조사에 동행하여 많은 도움을 주신 이정숙선생님께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- 김윤규, 이대성, 송윤규, 김선익 (1988) 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. 지질학회지, 24권, 특별호, p. 57-66.
- 나기창, 이문원 (1987) 백령도의 지질. 자연상태 종합보고서, 7집, p. 33-48.
- 이문원 (1984) 제주화산암류에 함유된 mafic 포획암. 지질학회지, 20권, 4호, p. 306-313.
- 이한영 (1995) 남한의 알칼리 현무암에 분포하는 맨틀포획암의 암석화학적 연구: 상부맨틀의 온도 및 압력추정. 암석학회지, 4권, p. 104-123.
- Arai S. (1987) An estimation of the least depleted spinel peridotite on the basis of olivine-spinel mantle array. Neues Jahrb Mineral Monatsh. H8, p. 347-354.
- Brey, G.P. and Köhler T. (1990a) Geothermobarometry in four phase lherzolite II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermo-barometers. J. Petrol., v. 31, p. 1353-1378.
- Brey, G.P. and Köhler T. (1990b) Ca exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 Kb with applications Geochim Cosmochim Acta. v. 54, p. 2375-2388.
- Carswell, D.A., (1980) Mantle derived lherzolite nodules associated with kimberlite, carbonatite and basaltic magmatism: a review. Lithos, v. 13, p. 121-38.
- Carswell, D.A. and Gibb, F.G.F. (1980) Geothermometry of garnet lherzolite nodules with special reference to those from the kimberlites of northern Lesotho. Contrib. Mineral. Petrol., v. 74, p. 403-16.
- Chatterjee, N.D. and Terhart, L. (1985) Thermodynamic calculations of peridotite phase relations in the system MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ with some geological applications. Contrib. Mineral. Petrol., v. 89, p. 273-84.
- Dankwerth, P.A. and Newton, R.C. (1978) Experimental determination of spinel peridotite to garnet peridotite reaction in the system MgO-Al₂O₃-SiO₂ in the range 900~1000°C and Al₂O₃ isopleths of enstatite in the spinel field. Contrib. Mineral. Petrol., v. 66, p. 189-202.
- Davis, B.T.C. and Boyd, F.R. (1966) The join Mg₂Si₂O₆-CaMgSi₂O₆ at 30 kb pressure and its application to pyroxenes from kimberlite. J. Geophys. Res., v. 71, p. 3567-3576.
- Dick, H.J.B. and Bullen, B. (1984) Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine type peridotites and spatially associated lavas, Contrib. Mineral. Petrol., v. 86, p. 54-76.
- Downes, H., Embey-Isztin, A. and Thirlwall, M.F. (1992) Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from the western Pannonian Basin (Hungary): evidence for an association between enrichment and texture in the upper mantle. Contrib. Mineral. Petrol., v. 109, p. 340-354.
- Eickschen, G.W. and Seck, H.A. (1991) Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer. Contrib. Mineral. Petrol., v. 106, p. 431-439.
- Fan, Q. and Hooper, P.R. (1989) The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: Implications for upper mantle composition and the Paleogeotherms. J. Petrol., v. 30, p. 1117-1158.
- Forbes, F.B. and Kuno, H. (1967) Peridotite inclusions and basaltic host rocks, "Ultramafic and Related Rocks", P. J. Wyllie (ed.), New York, p. 328-37.
- Fujii, T. (1976) Solubility of Al₂O₃ in enstatite coexisting with forsterite and spinel. Annual Rep. Carnegie Inst. Washington Year Book, v. 75, p. 566-571.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., v. 8, p. 523-548.
- Jagoutz, E., Palme, H., Baddenhausen, H., Blum, K., Cendales, M., Dreibus, G., Spettel, B., Lorenz, V., & Wanke, H. (1979) The abundances of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. Proc. 10th Lunar Planet. Sci. Conf., p. 2031-50.
- Johann, S., Viljoen, K.S. and Marsh, J.S. (1997) Petrology and geochemistry of peridotite xenoliths from the Letlhakane Kimberlites, Botswana. Contrib. Mineral. Petrol., v. 127, p. 147-158.
- Kushiro, I., Yoder, H.S. and Mysen, B.O. (1976) Viscosities of basalt and andesite melts at high pressures. J. Geophys. Res., v. 81, p. 6351-6356.
- Lee, D.S. (1967) The regional petrology of peridotite inclusions and basaltic host rocks. Abstract Jour. Geological Society of Korea, v. 2, No 2, 80p.
- Lee, D.S. (1980) Igneous activity and geotectonic interpretation in the Ogcheon geosynclinal zone, Korea - especially referred to ophiolite determination. Yeonsei Nonchong, v. 17, p. 109-137.
- Lindsley D.H. (1983) Pyroxene thermometry. Am. Miner., v. 88, p. 477-493.
- Mercier, J.C.C. and Carter, N.L. (1975) Pyroxene geotherms. J. Geophys. Res., v. 80, p. 3349-62.
- Mercier, J.C.C. (1976) Single-pyroxene geothermometry and geobarometry. Am. Miner., v. 61, p. 603-15.
- Mercier, J.C.C. (1980) Single-pyroxene thermobarometry. Tectonophysics, v. 70, p. 1-37.
- Mysen, B.O. and Kushiro, I. (1977) Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle. Am. Miner., v. 62, p. 843-865.
- Nickel K.G. (1986) Phase equilibrium in the system SiO₂-MgO-Al₂O₃-CaO-Cr₂O₃ and their bearing on spinel/garnet lherzolite relationships. N. Jb. Miner. Abh., v. 155, p. 259-287.
- Nixon, P.H. (ed) (1987) Mantle xenoliths. John Wiley & Sons Ltd.
- Obata, M. (1976) The solubility of Al₂O₃ in orthopyroxenes in spinel and plagioclase peridotites and spinel pyroxenite, Am. Miner., v. 61, p. 804-816.
- O'Neill H.St.C. (1981) The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geo-

- barometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 77, p. 185-194.
- Oka Y. and Steinke P. and Chatterjee N.D. (1984) Thermodynamic mixing properties of $Mg(Al,Cr)_2O_4$ spinel crystalline solution at high temperatures and pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 87, p. 195-204.
- Qi Q., Taylor, L.A. and Zhou, X. (1995) Petrology and geochemistry of mantle peridotite xenoliths from SE China. *J. Petrol.*, v. 36, p. 55-79.
- Sachtleben, T. and Seck, H.A. (1981) Chemical control of Al-solubility in orthopyroxene and its implications on pyroxene geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 78, p. 157-165.
- Sack, R.O. (1982) Spinel as petrogenetic indicators: activity-composition relations at lower pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 79, p. 169-186.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312p.
- Umino, S. and Yoshizawa, E. (1996) Petrology of ultramafic xenoliths from Kishyuku Lava, Fukue-jima, southwest Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 124, p. 154-166.
- Webb, S.A.C. and Wood B.J. (1986) Spinel lherzolite inclusions in basaltic rocks from Tasmania and elsewhere. *J. Petrol.*, v. 18, p. 1-23.
- Wells, P.R.A. (1977) Pyroxene thermometry in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 62, p. 129-39.
- Wilson, M. (1989) Igneous petrogenesis. Berne Convention Ltd., p. 37-52.
- Won, C.K. (1975) Study of geologic development and the volcanic activity of the Cheju Island. *Bull. Kon-Kuk Univ. Korea, I. P.*, p. 7-48.
- Wood, B.J. and Banno, S. (1973) Garnet-orthopyroxene and clinopyroxene relationships in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 42, p. 109-124.
- Wood, B.J. (1974) The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 46, p. 1-15.
- Xu, Y., Menzies, M.A., Pieter, V., Mercier, J.C. and Lin, C. (1998) Texture-temperature-geochemistry relationships in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China. *J. Petrol.*, v. 39, p. 469-493.

1998년 6월 12일 원고접수, 1998년 8월 7일 게재승인.