

남한의 알카리 현무암에 분포하는 맨틀포획암의 암석화학적 연구: 상부맨틀의 온도 및 압력 추정

이 한 영

한국자원연구소

요 약: 간성, 보은, 백령도의 알카리 현무암에 나타나는 맨틀포획암들은 감람석-사방휘석-단사휘석-스피넬의 구성광물로 이루어진 스피넬-러저조라이트이다. 스피넬은 갈색, 타형으로 감람석, 휘석 결정사이를 채우는 간극상으로 나타나며, 감람석과 휘석들은 킹크맨딩을 나타내며 삼중점이 결정경계선에 잘 나타난다. 일정한 방향의 배열성은 없으며 거칠질의 프로그래누라 및 등립질의 광물조직을 보인다. 감람석의 Fo 성분은 89.0-90.2로 입자의 중심부와 외연부 사이에서 매우 균질하며 CaO는 매우 낮은 0.03-0.12 wt%를 보인다. 사방휘석의 En 조성범위는 89.0-90.0 인 엔스타이트로 Al_2O_3 함량은 4-5 wt%이다. 단사휘석은 En 성분이 47.2-49.1인 디옵사이드이며 Al_2O_3 함량은 보은이 높은 7.42-7.64 wt%, 백령도가 낮은 4.70-4.91 wt%로 지역적인 차이를 보인다. 스피넬의 Mg 값은 75.1-81.9이며 Cr 수치는 8.5-12.6의 값을 보이며 Al 성분이 증가할수록 Cr 성분이 감소하는 뚜렷한 음의 경향을 보인다. 포획암들의 평형온도 및 압력을 구하기 위해 휘석-지질온도계(Wood and Banno, 1973; Wells, 1977; Mercier, 1980; Sachtleben and Seck, 1981; Bertrand and Mercier, 1985; Brey and Köhler, 1990)와 Al 용해도를 이용한 지질압력계(Mercier, 1980; Lane and Ganguly, 1980)를 이용하였다. Mercier(1980)와 Sachtleben and Seck(1981)의 지질온도계가 합당한 값을 보이며 이들 둘의 평균값인 평형온도는 970-1020°C이며 Mercier(1980)의 사방휘석-지질압력계의 평형압력은 12-19Kb (42-63 Km)를 나타내며 Lane and Ganguly(1980)의 Al-등성분선에 Fe의 영향(Lee and Ganguly, 1988)을 고려한 결과 측정된 압력, 온도, 사방휘석의 Al 함량은 합당한 값을 보였다. 맨틀포획암의 평형온도, 압력을 P-T space에 나타내 보면 남한의 상부맨틀 지온구배는 Mercier(1980)가 분류한 맨틀 지온구배중에서 해양 지온구배에 속하며, 시기적으로 다르지만 대륙 지온구배에 속하는 남아프리카(Lesotho) 및 남부 인도와는 뚜렷한 대조가 된다. 중국 동부와 남한의 스피넬-레졸라이트는 광물화학적 성이 매우 유사한 초생적 특징을 가지고 같은 해양 지온구배를 나타내고 있으나, 남한에 비하여 중국은 결정도가 심한 다양한 포획암들이 산출되는 것으로 보아 서로 다른 부분용융에 따른 상부맨틀의 결정도는 국부적으로 다를 가능성이 있다.

핵심어: 휘석-지질온도계, Al-용해도, 사방휘석-지질압력계, 맨틀지온구배, 상부맨틀의 결정도

서 언

현무암에 나타나는 초염기성 포획암들은 암석권의 성분과 지온진화에 대한 중요한 정보를 제공한다. 이러한 포획암들은 마그마에 의해서 매우 빠른시간에 지표에 도달하기 때문에(60시간 이내: Kushiro *et al.*, 1976) 화학적 재평형 내지 지체구조적 영향을 거의 받지 않아 맨틀 고유의 조성을 가지고 있다. 이러한 포획암류의 적절한 광물 조합에 대한 지질온도계와 지질압력계의 사용은 포획될 당시의 온도 특징을 규명하기 때문에(Boyd, 1973) 상부맨틀 성분과약과 분출이 일어난 지역하부의 고지온구배를 구축할 수 있으며 또한 알카리 현무암질 마그마의 성인에 대한 정

보도 얻을 수 있다.

이러한 이유 때문에 세계적인 분포를 가지고 있는 초염기성 포획암들은 다양한 광물학적, 암석학적, 지구화학적 및 지질온도 연구의 주제들이 되어 왔다. 남한에서의 초염기성 포획암들은 백령도, 강원도 고성군 간성, 충북 보은군 조곡리에서(Fig. 1) 제3기~4기의 소규모 알카리 현무암에 나타난다. 이들에 대한 연구는 조곡리 포획암의 암석학적 연구(김윤규 외, 1988)와 백령도 포획암의 암석지해학적 연구(나기창과 이문원, 1987)가 있을 뿐이다.

본 연구의 목적은 백령도(37° 55' N, 124° 40' E), 간성(38° 25' N, 128° 20' E) 및 보은(36° 20' N, 127° 35' E)의 초염기성 포획암류의 암석학적 및 지구화학적

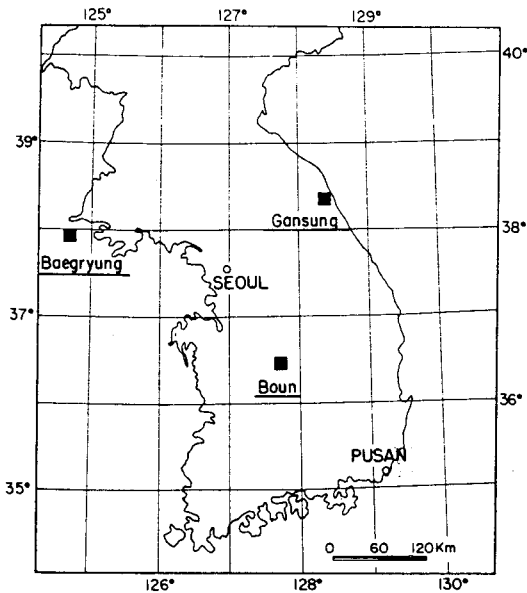


Fig. 1. Distribution map of the three localities of spinelherzolites in S. Korea. The localities are marked by underlining.

연구를 통하여 한반도 지각하부 상부맨틀을 이루고 있는 조성광물의 화학성분 분포범위와 P-T 영역을 규명하는 것이다.

암석기재

간성지역

강원도 고성군 동해안 일대에는 백악기 흑운모화강암류를 관입한 알카리 현무암이 산출되고 있다. 현무암류는 주위보다 약 200 m 높은 플러그 도움(plug dome)상으로 북으로부터 고성산(297 m), 오음산(290 m), 뒤배재(225 m), 오봉리 240 m 고지, 갈미봉(105 m) 및 운봉산(286 m)으로서 이들 산봉의 약 7부 능선 이상에서 타원형으로 분포하며, 산정의 노두에서는 주상절리가 잘 발달되어 있고, 원지형이 비교적 잘 보존되어 있다.

현무암류는 암회색의 치밀한 암석으로 반정광물은 감람석, 티탄-보통휘석, 사장석, 자철석으로 구성되며 감람석내에는 간혹 스피넬이 포함되기도 한다. 석기 광물은 상기 반정 광물외에 인회석, 유리질 물질등이 간극상 조직을 나타낸다. 직경 1cm이상의 거반정

(megacryst)으로는 감람석, 티탄-보통휘석, 사장석, 스피넬이 산출되며 특히 최대 4×8 cm의 단사휘석의 거반정이 자주 보인다.

이 지역의 포획암류는 한반도 내에서 산출되는 포획암류 중 양적으로나 암상으로 보아 가장 양이 많고 다양하게 산출된다. 6개소의 현무암 플러그도움 중 뒤배재 및 운봉산의 현무암이 이들 포획암류를 많이 포함한다. 포획암은 산정부의 노두, 테일러스 전석등에서 채집할 수 있으며 크기는 1-10 cm정도이며 5 cm크기가 대부분이다. 포획암류들은 맨틀기원암(mantle xenoliths), 집적암류(cumulates) 및 하부지각물질인 반려암류와 화강암류로 나타난다.

상부맨틀 포획암류들은 거의가 스피넬-레졸라이트이며 구성광물로는 감람석-사방휘석-단사휘석-스피넬이다. 감람석은 모자이크상으로 파동소광을 보이며 킹크밴딩(kink-banding)을 나타낸다. 단사휘석은 흑색으로 파동소광을 보이지만 용리 라멜라는 관찰되지 않는다. 사방휘석은 감람석과 함께 모자이크 조직을 띄지만 일부 반상변정도 인정된다. 스피넬은 갈색, 타형으로 감람석, 휘석 결정사이를 채우는 간극상으로 산출된다. 삼중점(triple junction)들이 결정경계선에 잘 나타나며 거정질의 프로토프래놀라(proto-granular) 및 등립질(equigranular) 조직을 보인다.

보은지역

조곡리 알카리 현무암류는 충북 보은군 화남면 조곡리 조곡탄전 부근에서 시대미상의 서로 분리된 2개의 소규모 현무암질 용암류로 산출되고 있다(이중혁, 1984). 각 용암류의 두께는 2-3 m이며, 맨틀 포획암류를 다량 함유하고 있는 것은 서쪽에 분포하는 용암류이다.

현무암류는 흑색내지 암회색의 치밀한 과상암석으로 반정은 주로 감람석, 단사휘석으로 구성되며 심하게 변질되어 있다. 석기는 감람석, 단사휘석, 사장석, 자철석과 변질광물이 간극상 조직을 이룬다. 그 외에 포획암류에서 유래된 감람석, 휘석, 스피넬의 외래결정(xenocryst)들이 다량 포함된다. 외래 결정은 흔히 현무암과 반응관계를 보이는데 감람석은 불규칙한 외형을 나타내며, 사방휘석의 외연부는 미립의 감람석결정에 의해 둘러싸여 있다. 또한 스피넬 외래결정

의 외연부는 자철석 반응연에 의해 둘러져 있다.

맨틀 포획암은 직경이 수 cm에서 큰것은 30 cm에 달하며, 형상은 원형-타원형으로 다양하게 산출되지만 비교적 타원형이 많다. 일반적으로 포획암은 모암과 뚜렷한 경계면을 갖고 있으나, 일부 포획암내 단사회석결정 외연부에는 휘석과 현무암질 마그마사이의 반응에 의해 반응연이 생성된것도 있다. 주 구성 광물은 감람석-단사회석-사방휘석의 양비에 의해 스피넬 레졸라이트로 분류된다.

경하에서 포획암류의 대부분은 프로토크레놀라와 잔쇄반상(porphroclastic) 조직 사이의 중간형을 나타내며 감람석과 사방휘석중 결정이 큰것은 파동소광을 보이며 감람석에는 킹크밴딩을 나타내고 감람석의 일부는 변형을 받았음을 암시한다(Tracy, 1980). 스피넬은 갈색을 띄며 불규칙한 외형의 간극상으로 산출된다. 포획암이 현무암과 접하는 경계부근에서는 단사회석 결정주위에 반응연을 갖기도 한다.

백령도 지역

백령도지역의 현무암류는 백령도 북동쪽 진촌리 마을을 중심으로 부채모양으로 분포한다. 분포면적은 약 4 km²이며 선캠브리아기 상원계의 규암및 슬레이트를 피복하고 있다(나기창과 이문원, 1987). 용암류의 두께는 해안가 노두에서 최대 10 m정도의 단일층으로 산출되며 이 현무암류내에 직경 5~10 cm(최대 30 cm) 크기의 맨틀 포획암이 다량 함유되어 있다. 그 외 사장석 거반정이 간혹 관찰된다. 현무암류는 반상조직을 나타내며, 반정광물로는 감람석, 보통휘석, 사장석, 자철석, 인회석이 확인되며 석기를 구성하는 사장석과 보통휘석은 오피틱 조직을 이룬다.

포획된 맨틀암류는 거의가 5-16 cm크기이며 형상은 원형내지 각력질까지 다양하다. 암석은 전체가 스피넬 레졸라이트의 단일종이며 사장석의 거반정이 현무암내에 간혹 관찰된다. 스피넬 레졸라이트는 등립상 조직으로 타형입상의 감람석, 사방휘석, 단사회석, 크롬 스피넬로 구성되며 사방휘석은 때로 조립질로 반상변정질로 산출되기도 한다. 크롬 스피넬은 세립 적갈색을 띄며 감람석은 모자역상으로 파동소광, 킹크밴드를 갖는다.

광물화학조성

맨틀 포획암류의 대표적인 시료에 대해 주요 구성 광물의 화학분석을 실시하였으며 연세대학 및 고려대학교 지질학과와 JEOL JXA 기종 WDX 및 EDX 방식의 전자현미경 분석장치를 이용하였고, 분석조건은 Lee(1991)의 방법에 의해 실시하였다.

대표적인 분석결과는 Table 1-4에 나타나 있으며 비교 검토를 위한 세계 도처의 샘플분석 결과는 Table 5에 요약되어 있다. 각 광물들은 제한된 범위 내에서 균질한 성분분포를 보이며 특이한 화학누대(chemical zonation)는 나타나지 않았다.

감람석

감람석은 산상및 지역에 관계없이 각 시료내에서 균질한 화학조성을 나타낸다(Table 4). 감람석의 Fe성분은 89.0-90.2 사이에서 일정한 조성을 나타낸다. 각 입자의 중심부와 외연부 사이의 화학성분 변화는 보이지 않고 거의 균질하며 NiO 함량은 0.34-0.42 wt%를 나타내며 CaO 성분은 매우 낮아(0.03-0.12 wt%), 이는 전세계 도처에서 발견되는 스피넬-레졸라이트의 감람석과 매우 유사한 화학조성을 보인다.

사방휘석

사방휘석의 평균 조성범위는 보은 조곡리 포획암류가 $Wo_{0.1} En_{88.6} Fs_{10.3}$, 간성지역이 $Wo_{0.9} En_{89.4} Fs_{9.7}$, 백령도 $Wo_{0.8} En_{90.0} Fs_{9.2}$ 로 엔스타이트로 분류되며 (Fig. 2) 조성차이가 거의 나타나지 않으며 전반적으로 균질한 조성범위를 나타낸다(Table 2). Al_2O_3 함유량은 보은지역이 4.66-5.38 wt%, 간성지역이 4.02-4.07 wt%, 백령도가 3.95-4.07 wt% 이며 Cr_2O_3 와 TiO_2 함유량은 전체적으로 0.21-0.43 wt%와 0.02-0.12 wt%에서 변화한다. Mg 값(100 Mg/Fe+Mg)은 감람석과 거의 같은 값을 보이며 단사회석보다는 약간 낮은 값을 보인다.

이러한 값들은 중국에서 산출되는 값들과(Fan and Hooper, 1989) 비슷하나, 다른지역(S. Australia, Song, 1994; Hawaii, Sen, 1987)에 비해서는 Al_2O_3 값

Table 1. Representative microprobe analyses of enstatites in spinel-ilherzolites from S. Korea

	Boun*				Gansung				Baegryung			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
SiO ₂	55.10	55.10	54.65	54.71	56.23	55.85	55.91	55.99	56.05	56.35	56.67	56.25
Al ₂ O ₃	4.85	4.66	5.38	5.02	4.02	4.02	4.07	4.03	3.95	3.99	4.00	4.07
TiO ₂	0.07	0.03	0.10	0.07	0.07	0.09	0.12	0.08	0.02	0.03	0.04	0.04
Cr ₂ O ₃	0.30	0.22	0.35	0.21	0.29	0.30	0.24	0.28	0.31	0.30	0.34	0.33
FeO	6.21	6.54	5.91	6.02	6.51	6.52	6.54	6.26	6.15	5.81	5.65	6.33
MgO	33.02	32.96	32.79	33.03	32.70	33.27	33.24	33.16	33.32	33.26	33.86	32.69
MnO	0.16	0.14	0.17	0.14	0.14	0.14	0.18	0.14	0.12	0.16	0.09	0.12
CaO	0.54	0.46	0.67	0.54	0.50	0.55	0.54	0.49	0.32	0.32	0.63	0.34
Na ₂ O	-	-	-	-	0.05	0.07	0.06	0.07	0.05	0.04	0.06	0.05
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-
NiO	-	-	-	-	0.13	0.04	0.08	0.08	0.09	0.21	0.14	0.10
Total	100.25	100.11	100.02	99.74	100.64	100.85	100.99	100.58	100.38	100.47	101.48	100.32
Cations based on 6 oxygens												
Si	1.896	1.901	1.884	1.890	1.931	1.913	1.913	1.920	1.923	1.929	1.921	1.928
Al ^{IV}	0.104	0.099	0.116	0.110	0.069	0.087	0.087	0.080	0.077	0.071	0.079	0.072
Al ^{VI}	0.093	0.090	0.103	0.095	0.096	0.075	0.077	0.082	0.083	0.090	0.081	0.090
Ti	0.002	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002
Cr	0.008	0.006	0.010	0.006	0.009	0.008	0.006	0.008	0.008	0.008	0.009	0.008
Fe	0.179	0.189	0.219	0.205	0.182	0.187	0.187	0.179	0.176	0.166	0.160	0.187
Mg	1.694	1.695	1.685	1.701	1.673	1.699	1.695	1.695	1.704	1.697	1.711	1.671
Mn	0.005	0.004	0.005	0.004	0.003	0.004	0.005	0.004	0.003	0.005	0.003	0.004
Ca	0.020	0.017	0.025	0.020	0.013	0.020	0.020	0.018	0.012	0.012	0.023	0.018
Na	-	-	-	-	0.003	0.005	0.004	0.005	0.003	0.003	0.004	0.003
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.006	0.004	0.004

Table 2. Representative microprobe analyses of diopsides in spinel-ilherzolites from S.Korea

	Boun*				Gansung				Baeryung			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
SiO ₂	51.29	52.07	51.97	51.99	52.76	52.65	52.36	52.86	53.18	52.34	53.36	53.65
Al ₂ O ₃	7.47	7.64	7.26	7.42	5.51	5.93	5.75	5.24	4.74	4.91	4.70	4.73
TiO ₂	0.48	0.46	0.41	0.43	0.47	0.48	0.45	0.49	0.17	0.20	0.22	0.20
Cr ₂ O ₃	0.66	0.66	0.71	0.52	0.63	0.68	0.71	0.53	0.60	0.70	0.35	0.58
FeO	2.59	2.70	2.62	2.52	2.79	2.95	2.78	2.60	2.70	2.61	1.78	2.68
MgO	14.82	14.86	15.28	15.31	15.21	15.17	15.17	15.21	16.03	15.97	16.05	16.16
MnO	0.02	0.03	0.12	0.02	0.10	0.07	0.09	0.10	0.07	0.09	0.07	0.08
CaO	19.84	19.92	19.25	19.76	21.53	21.34	21.48	21.60	21.95	22.06	21.70	19.90
Na ₂ O	1.93	2.16	1.99	1.91	1.28	1.42	1.36	1.35	1.02	0.09	0.92	1.03
H ₂ O	-	-	-	-	0.01	-	-	0.01	0.01	-	-	0.01
NiO	-	-	-	-	0.03	0.03	0.04	0.03	0.08	0.03	0.01	0.02
Total	99.10	100.50	99.61	99.88	100.32	100.72	100.19	100.02	100.55	99.90	99.16	99.04
Cations based on 6 oxygens												
Si	1.896	1.871	1.880	1.876	1.905	1.895	1.895	1.913	1.916	1.901	1.936	1.946
Al ^{IV}	0.131	0.129	0.120	0.124	0.095	0.105	0.105	0.087	0.084	0.099	0.064	0.054
Al ^{VI}	0.190	0.195	0.189	0.192	0.140	0.146	0.140	0.137	0.118	0.111	0.137	0.149
Ti	0.013	0.013	0.011	0.012	0.013	0.013	0.012	0.013	0.005	0.005	0.006	0.005
Cr	0.019	0.019	0.020	0.015	0.018	0.019	0.020	0.015	0.017	0.020	0.010	0.017
Fe	0.079	0.081	0.079	0.076	0.084	0.089	0.084	0.079	0.081	0.079	0.054	0.081
Mg	0.805	0.796	0.824	0.823	0.819	0.814	0.818	0.821	0.861	0.865	0.868	0.874
Mn	0.001	0.001	0.004	0.001	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002
Ca	0.775	0.767	0.746	0.764	0.833	0.823	0.833	0.833	0.847	0.859	0.843	0.773
Na	0.136	0.150	0.140	0.134	0.090	0.099	0.095	0.095	0.071	0.070	0.065	0.072
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	-	0.001

Table 3. Representative microprobe analyses of spinels in spinel-ilherzolites from S.Korea

	Boun*				Gansung				Baeryung			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
SiO ₂	0.24	0.24	0.24	0.29	0.03	0.02	0.05	1.23	0.08	0.51	0.06	0.10
Al ₂ O ₃	58.51	58.56	57.19	59.35	56.38	56.31	56.88	56.21	55.77	55.43	55.37	55.13
TiO ₂	0.13	0.11	0.20	0.12	0.09	0.08	0.08	0.09	0.05	0.01	0.05	0.08
Cr ₂ O ₃	8.52	8.17	10.34	8.23	10.62	10.38	10.70	10.26	12.57	12.44	12.67	12.32
FeO	11.05	10.80	10.53	10.48	11.83	12.24	12.12	11.86	10.90	11.23	10.57	10.81
MgO	21.04	21.16	21.34	21.46	20.14	20.03	20.19	19.71	20.81	20.17	20.54	20.76
MnO	0.12	0.12	0.06	0.14	0.11	0.13	0.12	0.10	0.13	0.08	0.08	0.03
CaO	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	0.01
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	0.08	0.03	0.02	-	0.01
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-	-	-	0.03
NiO	0.39	0.38	0.35	0.35	0.42	0.39	0.41	0.39	0.35	0.38	0.42	0.34
Total	100.00	99.54	100.35	100.42	99.62	99.58	100.57	100.05	100.69	100.27	99.76	99.62
Cations based on 4 oxygens												
Si	0.006	0.006	0.006	0.007	0.001	-	0.001	0.032	0.002	0.013	0.001	0.002
Al	1.770	1.776	1.730	1.781	1.739	1.740	1.739	1.720	1.704	1.700	1.706	1.701
Ti	0.003	0.002	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	-	0.001	0.001
Cr	0.173	0.166	0.210	0.166	0.219	0.215	0.219	0.210	0.257	0.256	0.261	0.255
Fe	0.232	0.228	0.222	0.220	0.259	0.286	0.263	0.257	0.236	0.244	0.231	0.236
Mg	0.805	0.811	0.820	0.814	0.785	0.783	0.781	0.763	0.804	0.782	0.800	0.810
Mn	0.003	0.003	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	-
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-	-	0.004	0.001	0.001	-	-
K	-	-	-	-	-	-	-	0.004	-	-	-	0.008
Ni	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.007

Table 4. Representative microprobe analyses of olivines in spinel-lherzolites from S.Korea

	Boun*		Gansung		Baegryung	
	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	40.43	40.69	41.09	41.37	41.30	41.06
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.01	0.01	-
TiO ₂	-	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.04	0.01
FeO	9.77	10.11	9.67	9.45	9.48	9.46
MgO	49.32	49.17	49.00	48.74	48.71	48.73
MnO	0.15	0.14	0.13	0.15	0.15	0.10
CaO	0.12	0.03	0.02	-	0.03	0.04
Na ₂ O	-	-	-	-	0.01	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-
NiO	0.34	0.34	0.34	0.34	0.39	0.40
Total	100.13	100.48	100.25	100.06	100.12	99.80
Cations based on 4 oxygens						
Si	0.992	0.995	1.004	1.001	1.009	1.007
Al	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	0.001	-
Fe	0.200	0.207	0.198	0.193	0.194	0.194
Mg	1.803	1.792	1.785	1.775	1.774	1.781
Mn	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
Ca	0.003	0.001	0.001	-	0.001	0.001
Na	-	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-
Ni	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008

*Data from Kim *et al.*(1988)

들은 높고 Cr₂O₃는 낮은 값을 나타낸다.

Al₂O₃ 함량은 Fig. 3에서 Al₂O₃ 함량과 스피넬의 Cr 수치(number)와의 약한 음(-)의 관계를 나타내고 있다.

단사휘석

Mg, Fe, Ca 함량은 지역에 관계없이 거의 비슷한 분포를 보이고 있으며 보은지역의 평균조성범위는 Wo_{46.1} En_{49.1} Fs_{4.8}, 간성이 Wo_{47.9} En_{47.2} Fs_{4.9} 백령도가 Wo_{46.8} En_{49.0} Fs_{4.2}로 다음사이드에 해당한다(Fig. 1). Al₂O₃ 함량은 지역에 따라 차이를 보이는데 백령도가

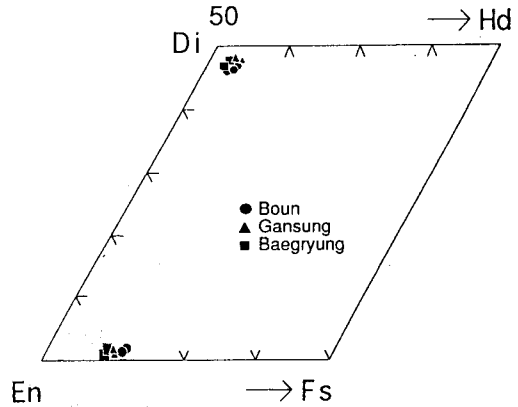


Fig. 2. Ca-Mg-Fe plot of pyroxenes in spinel lherzolites from S. Korea. Clinopyroxene and orthopyroxene plotted in diopside and enstatite area, respectively.

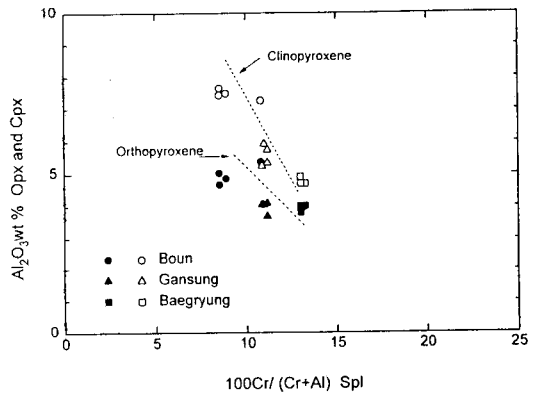


Fig. 3. Variation of wt% Al₂O₃ in clinopyroxene(cpx) and orthopyroxene(opx) vs. Cr number in spinel. Open and solid symbols represent cpx and opx, respectively. Dotted lines indicate arbitrary negative lines.

가장 낮은 4.70-4.91 wt%, 보은지역이 높은 7.42-7.64 wt%, 간성이 중간값인 5.24-5.94 wt%를 나타내며 이들 값들은 스피넬의 Cr 수치와 강한 음의 관계를 나타내며 사방휘석보다도 뚜렷하다(Fig. 3). Brown *et al.* (1980)도 French Massif Central의 포획암으로부터 Al₂O₃ 함량이 스피넬의 Cr함량이 증가함에 따라 감소하는 것을 보고하였다. Cr₂O₃는 지역적인 차이가 별로 없는 0.35-0.71 wt%이며, TiO₂는 0.20-0.49 wt%, Na₂O는 0.09-2.16 wt%의 분포를 보이는데 보은지역이 높은 1.91-2.16 wt% 이며 백령도가 0.09-1.03 wt%, 간성지역이 1.28-1.42 wt%의 중

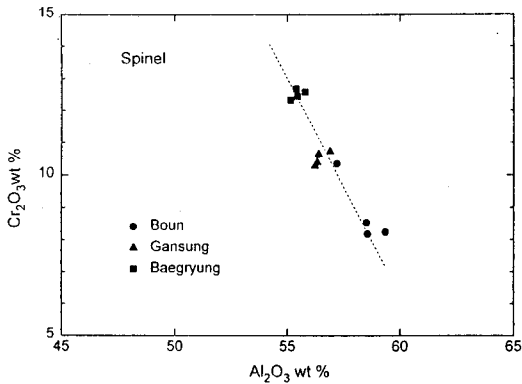


Fig. 4. Plot of wt% Cr₂O₃ vs. wt% Al₂O₃ in spinel. Dotted line is arbitrary negative line.

간값을 보인다. 전반적으로 다른 나라에서 발견되는 것들과 매우 비슷한 조성범위를 나타내며 Cr₂O₃ 함량은 중국것과 비슷하나 남부호주와 하와이 것들에 비해서는 낮은 값을 보인다.

스피넬

남한의 스피넬-레졸라이트에 나타나는 스피넬들은 전형적인 갈색 크롬 스피넬로서 세계도처에서 나타나는 스피넬-레졸라이트의 스피넬과 같은 양상이다. Mg 값(100 Mg/Mg+Fe²⁺)은 75.17-81.98의 균질한 값을 보이며 간성지역이 타지역보다 약간 낮은 값을 보인다. Cr₂O₃는 전체적으로 8.17-12.67 wt%로써 백령도가 높은 12.32-12.67 wt%이며 보은지역이 8.17-10.34 wt%의 낮은 값을 보이며 간성은 중간치를 나타낸다. Cr 수치(100 Cr/Cr+Al)은 8.5-13.1의 범위를 보이며 지역적인 차이는 앞서 언급한 Cr₂O₃ wt% 함량특성과 같다. Al₂O₃ 함량은 55.13-59.35 wt% 로써 보은지역이 높은 57.19-59.35 wt%를 나타내며 타 지역은 2-4 wt% 낮은 값을 나타낸다. 잘 알려진 Al₂O₃ vs Cr₂O₃ wt% 다이어그램이 Fig. 4에 나타나 있으며 강한 음의 경향, 즉 Al₂O₃ 함량이 증가할수록 CrO₃ 함량은 적어진다. TiO₂ 함량은 0.01-0.20 wt%, NiO는 0.34-0.42 wt%를 보여준다.

남 아프리카와 애리조나 샘플에 비해서 Al₂O₃ 함량은 높고 Cr₂O₃는 낮은 경향을 보이며 Mg 값도 이들 지역에 비해 높다. 중국 샘플과는 전반적으로 비슷한 화학조성을 나타낸다.

온도 및 압력 측정

초염기성 포획암을 구성하는 조성광물의 화학성분으로부터 평형온도와 압력을 측정하기 위하여 다양한 지질온도계와 지질압력계들이 제시되어 왔다. 석류석-페리도타이트의 경우에는 석류석의 열역학적 자료(thermochemical data)가 스피넬에 비하여 충분하며 공존하는 광물군들의 화학성분들이 (Ca, Fe, Mg, Al...등) 온도와 압력의 변화에 민감하게 반응하기 때문에 보다 다양하고 정확한 지질온도압력계들이 제시되어 왔다(Perkins and Newton, 1980; Carswell and Gibb, 1987 등). 예를들면 지질압력계에 있어서 석류석-페리도타이트의 경우 사방휘석의 Al 용해도(Al solubility)가 온도와 압력에 민감하게 영향을 받으나(적합한 지질온도압력계), 스피넬-페리도타이트의 경우 Al 용해도가 온도에는 민감한 변화를 보이고 압력변화에 따라서는 약간의 용해도 차이가 있을 뿐이다(Fig. 8 에서의 스피넬-페리도타이트 영역의 완만한 Al 등선분; 제한적인 지질압력계).

따라서 한반도 지각하부의 최상부 맨틀을 구성하는 스피넬-레졸라이트의 경우에는 스피넬의 물리화학적 특징도 있겠으나 열역학적 자료가 충분치 못하기 때문에 평형온도와 압력을 구하기 위해서는 석류석-페리도타이트에 비해서 제한된 지질온도계와 지질압력계를 사용할 수 밖에 없고 특히 지질압력계에 있어서는 석류석-페리도타이트에 사용되는 사방휘석의 Al 용해도 압력계에 비해서 정확도가 떨어지는 편이다.

평형온도

한반도 최상부맨틀의 스피넬-페리도타이트의 평형온도를 구하기 위해서 사방휘석과 단사휘석 사이에서 Ca-Fe-Mg 성분치환을 이용한 지질온도계를(Wood and Banno, 1973; Wells, 1977; Mercier, 1980; Sachtleben and Seck, 1981; Bertrand and Mercier, 1985; Brey and Köhler, 1990)사용하였다. 사방-단사휘석 지질온도계 중에서 Kretz (1982)가 제시한 모델은 Ganguly and Saxena(1987)가 비이상격자 공식(non-ideal site formulation)을 이용한 합리적인 모델이라고 평하였지만, 본 연구에서는 이 모

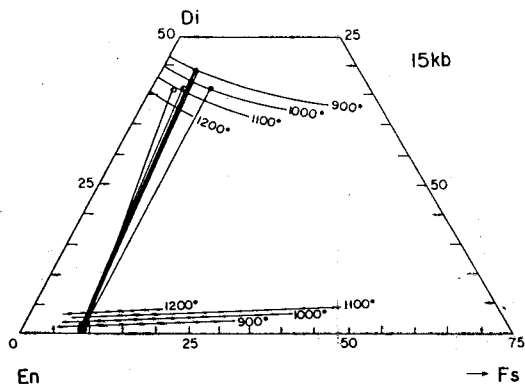


Fig. 5. Wo-En-Fs(mole %) plot of pyroxenes in spinel lherzolite in isotherms at 15 Kb from Lindsley's quadrilateral diagram (1983). Mole % of Wo, En and Fs recalculated from projecting multicomponent scheme of Lindsley (1983).

델을 사용한 평형온도가 상한 온도값인 Wood and Banno(1973)의 온도 및 사방휘석의 Al 용해도에 비해 너무 높게(≥ 1250°C) 나오며(Fig. 8 참조), 제한된 화학조성 변화 (Quairading 지역의 변성암, $K_D=1.86$ 와 Skaergaard 암석, $K_D=1.38$)을 이용한 모델이기 때문에 이러한 조성 범위에 속하는 자연계에는 합당할지 모르지만 본연구의 조여기성 포획암들에 대한 응용은 합당치 않기 때문에 제외시켰다.

Wood and Banno(1973)의 지질온도계는 MgO-Al₂O₃-SiO₂ 시스템에서의 이상 해석 모델(ideal solution model)을 사방-단사휘석의 M1과 M2 격자에 적용하였으며 Fe²⁺에 대한 영향을 경험적 값(empirical value)으로 적용하였다. Fe²⁺와 Mg은 M1 및 M2 격자에 불규칙하게 분포하며 M2 격자에는 큰 이온들인 Ca²⁺, Na⁺ 및 Mn²⁺가 치환되고 M1 격자에는 작은 이온들인 Al, Cr, Ti, Fe 등이 치환된다. 그들은,

$$(X_{Mg})_{M2} = (X_{Mg})_{M1} = (X_{Mg})_{\text{mineral}}$$

$$\left(\because X_{Mg} = \frac{Mg}{Fe^{2+} + Mg} \right)$$

로 가정하였으며, 각 상(phase)의 활성도 항(activity term)은

$$\left[\frac{Mg}{(Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn + Na)} \right]_{M2}$$

$$\left[\frac{Mg}{(Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mg + Al + Ti + Cr^{3+})} \right]_{M1}$$

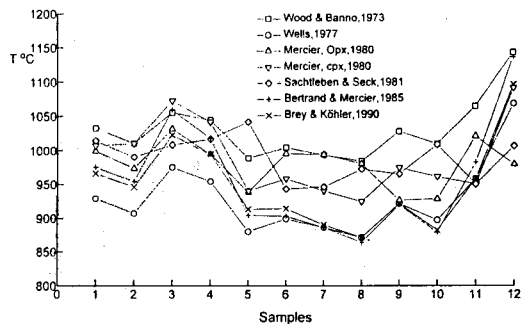


Fig. 6. Comparison of estimated temperatures derived from various geothermometers. Sample 1-4: Boun, Sample 5-8: Gansung, Sample 9-12: Baegryung.

의 이상 격자공식(ideal site formulation)으로 제시하였다. Wells(1977)의 지질온도계는 Wood and Banno(1973)의 지질온도계와 같은 열역학적 이론을 가지나 ΔH° 와 ΔS° value가 다르며 Fe²⁺의 영향값도 다르다. 이들 두 모델들은 제한된 실험결과를 사용하였으며 미량원소들의 영향을 고려치 않아서 정확한 온도값을 산출치 못하는 고전적 지질온도계이나 상한내지 하한값의 온도값을 나타내기 때문에 아직까지 전세계적으로 많은 암석학자들 사이에 활용되고 있으며 Wood and Banno(1973)의 온도값이 Wells(1977)의 값보다 일반적으로 높게(100°C 정도) 나타난다. 백령도, 간성, 조곡리 알카리 현무암에 포획된 스피넬-페리도타이트들에 대한 이들 온도값은 Table 6에 요약되어 있으며 본 연구 결과에서도 Wood and Banno의 값이 약 100°C 가량 높게 나타난다(Fig. 6).

이들 두 모델의 사용시, M1 및 M2 격자의 활성도(site activity)를 구할때 주의를 요한다. 즉, 각 격자에 치환되는 양이온 수(based on 6 oxygen)들을 감안 후 Mg/Mg+Fe²⁺을 곱해야 한다. 단순히 (Mg/Mg+Fe²⁺)^{mineral} 값을 격자 활성도 값으로 보면 심각한 오류를 범하여 매우 높은 값의 평형온도를 구하게 된다.

Mercier(1980)는 Al 용해도에 Cr이 상당한 영향을 미치는 것을 발견하고 사방휘석에서의 Wo 고용체와 스피넬과 평형상태인 사방휘석에서의 Al 용해도 평형반응을 이용한 열역학적 계산을 통해서 휘석 지질온도압력계를 제시하였는데 일반적인 지질온도압

Table 5. Chemical compositions of minerals in spl-lherzolites from other well-known localities

	Hawaii(Sen,1987) 77SL-5				S.Australia(Song,1994) CEL1				China(Fan & Hooper,1989) NB-3				Mexico(Meyer & Svisero,1987)			
	ol	opx	cpx	spl	ol	opx	cpx	spl	ol	opx	cpx	spl	ol	opx	cpx	spl
SiO ₂	40.62	54.64	52.39	-	41.34	56.79	52.94	0.26	40.85	55.65	52.78	0.04	41.30	56.40	52.90	0.19
Al ₂ O ₃	-	4.86	7.09	52.21	0.29	2.93	5.56	47.63	0.04	4.10	5.79	52.46	-	2.70	4.21	41.90
TiO ₂	-	0.15	0.35	0.15	0.10	0.18	0.34	0.11	-	0.08	0.43	0.14	-	0.15	0.05	0.07
Cr ₂ O ₃	-	0.57	0.91	14.26	-	0.44	1.68	23.02	0.02	0.40	0.68	14.08	-	0.41	1.22	26.60
FeO	8.96	6.59	3.05	12.13	8.70	5.67	1.86	10.48	10.33	6.25	2.86	11.82	8.17	5.54	1.74	14.30
MgO	50.31	32.36	14.43	20.96	50.02	34.43	15.52	19.66	48.90	34.64	15.58	20.43	51.80	35.40	16.40	16.30
MnO	-	0.12	0.15	0.11	0.19	-	0.14	-	0.15	0.15	0.06	0.11	0.13	0.11	0.09	0.26
CaO	0.09	0.55	18.80	0.01	0.09	0.53	21.44	-	0.09	0.66	20.57	-	-	0.45	21.70	-
Na ₂ O	-	0.21	2.41	-	-	-	1.13	-	-	-	1.44	-	0.13	-	1.24	0.12
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NiO	-	-	-	-	-	-	-	-	0.26	0.05	-	-	0.41	0.06	0.03	0.12
Total	99.98	100.05	99.58	99.83	100.73	100.97	100.60	101.16	100.65	101.98	100.19	99.08	101.90	101.10	99.60	99.90
Si	0.992	1.891	1.897	-	1.000	1.934	1.901	0.007	0.998	1.888	1.906	0.001	0.998	1.919	1.921	0.005
Al	-	0.198	0.303	1.614	0.008	0.116	0.234	1.494	0.001	0.164	0.246	1.637	-	0.108	0.180	1.383
Ti	-	0.004	0.009	0.003	0.001	0.004	0.009	0.002	-	0.002	0.012	0.003	-	0.004	0.001	0.001
Cr	-	0.015	0.026	0.296	-	0.011	0.047	0.484	-	0.011	0.022	0.295	-	0.011	0.035	0.589
Fe	0.191	0.092	0.266	0.253	0.176	0.161	0.056	0.232	0.211	0.177	0.086	0.255	0.163	0.158	0.053	0.335
Mg	1.813	1.670	0.779	0.819	1.8021	1.747	0.830	0.779	1.781	1.751	0.839	0.806	1.847	1.796	0.888	0.681
Mn	-	0.004	0.004	0.002	0.004	-	0.004	-	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.006
Ca	0.001	0.021	0.729	-	0.002	0.019	0.824	-	0.002	0.024	0.796	-	-	0.016	0.844	-
Na	-	0.014	0.167	-	-	-	0.078	-	-	-	0.101	-	0.006	-	0.087	0.007
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	0.005	0.001	-	-	0.008	0.002	0.001	0.003

*Cations of ol, opx, cpx, and spl based on 4, 6, 6, and 4 oxygens, respectively.

Table 6. Temperature and Pressure estimation for spl-lherzolites occurred in S. Korea

	T(°C)							P(Kb)		
	WB	W	M/opx	M/cpx	SS	BM	BK	MT	M/opx	M/cpx
Boun										
1	1032	929	999	1007	1014	975	966	1006	14.8	14.5
2	1010	907	973	1010	990	954	946	981	14.5	15.0
3	1055	975	1031	1072	1008	1059	1022	1019	16.5	19.0
4	1044	954	994	1041	1016	1017	994	1005	16.5	17.0
Gansung										
1	988	880	938	940	1041	904	913	989	12.4	12.5
2	1004	899	995	958	943	903	914	969	17.5	13.0
3	993	886	994	940	946	886	890	970	18.2	12.0
4	984	871	980	924	972	884	871	976	16.4	13.0
Baegryung										
1	1027	921	926	974	965	919	921	945	12.5	16.0
2	1009	897	928	961	1008	879	882	968	12.0	14.0
3	1064	958	1020	950	950	982	958	995	19.0	15.0
4	1143	1063	979	1006	1106	1136	1096	992	16.2	23.0

WB: Wood and Banno(1973), W: Wells(1977), M/opx & M/cpx: Mercier (1980)

력계 방정식(eqn. 37 in Mercier, 1980)에서 치환계수(Partition coefficients)인 Kw' 와 Ka' 를 eqn. 11과 eqn. 12 (in Mercier, 1980)에서 처럼 휘석의 화학조성을 사용하여 단순화 하였으며, ΔH , ΔS , V' 및 V'' 의 열역학적 값들은 Table II(Mercier, 1980)에 요약되어 있다. 이상의 것을 종합 간략화한 휘석 지질온도계(Appendix in Mercier, 1980)들은 실험 자료를 근거로 하지 않은 경험적 모델이지만, Fan and Hooper(1989)는 사방휘석 지질온도계가 단사휘석 지질온도계보다 합리적인 온도측정치를 제시한다고 보고하였다.

Sachtleben and Seck(1981)은 사방휘석의 Al-용해도가 스피넬의 Cr성분에 영향을 받는것을 발견하고(Cr이 낮은 스피넬에 비하여 200°C 이상의 온도차이) Fujii(1976)의 실험결과를 이용한 경험적 지질온도계를 제시하였는데, 평형상수(K)를 구하는데 MAS 시스템에서 사방휘석+스피넬→감람석+Al-사방휘석의 반응식을 이용하여 스피넬의 Al과 Cr성분의 영향을 특히 고려하였다. 이 모델을 이용한 온도측정치는 Wood and Banno(1973)와 Wells(1977)의 온도값 사이에 분포하여 본연구의 평형온도를 구하는데 이값을 응용하였다.

Bertrand and Mercier(1985)는 사방-단사휘석의

En-용해도에서 사방-단사휘석의 Na성분과 단사휘석의 Fe 영향을 고려한 경험적 모델을 제시하였는데 Al 영향은 무시할 수 있다고 하였다. 이 모델을 이용한 온도측정치는 대체적으로 Wells(1977)의 값들과 유사한 낮은 온도값을 나타내고 있다.

Brey and Köhler(1990)는 석류석-사방휘석-단사휘석-감람석의 광물조합에서 그들의 실험결과와 널리 사용되고 있는 기존의 지질온도압력계(Harley, 1984; Lee and Ganguly, 1988; Krögh, 1988 등)와 비교, 보완하여서 사방-단사휘석의 Ca치환에 Fe의 영향을 고려한 지질온도계, 사방휘석의 Ca만 이용한 지질온도계 및 사방-단사휘석에서 Na성분만 이용한 지질온도계를 제시하였으며 석류석의 여러 성분과 휘석의 격자 점유율(site occupancy)들을 이용한 지질압력계도 제시하였다. 본 연구를 위해서는 그들이 제시한 3가지 지질온도계 중 Na치환을 이용한 사방-단사휘석 지질온도계는 스피넬-레졸라이트에서 나오는 사방휘석의 Na함량이 너무 미미하기 때문에 정확한 온도를 구하기 어렵고 심각한 오류를 범하기 쉬워 제외시켰으며, 사방휘석에서 Ca성분만 이용한 지질온도계는 상한 온도값인 Wood and Banno(1973)의 온도 및 사방휘석의 Al 용해도에 비해(Fig. 8 참조) 매우 높은 값(1100-1230°C)을 보이기 때문에 스피넬-레

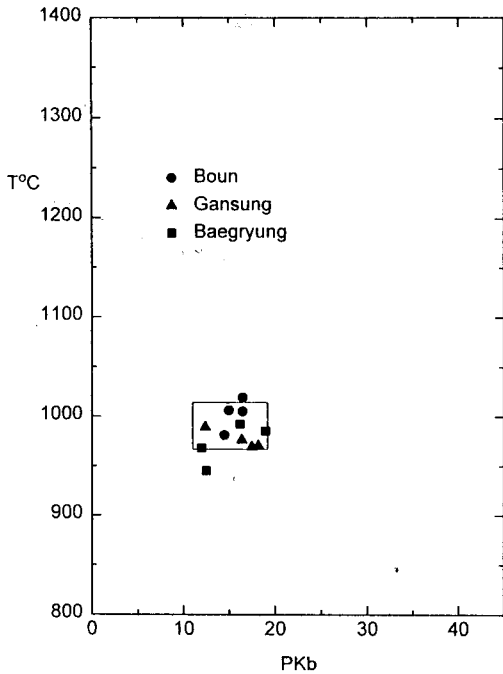


Fig. 7 P-T conditions of spinel lherzolites from S. Korea. Estimated T is an average value of T derived from thermometers of Mercier(1980), and Sachtleben and Seck (1981), P calculated from Mercier's opx-barometer (1980).

졸라이트의 평형온도로 보기에는 무리가 있어서 제외시켰으며 사방-단사휘석에서 Fe 영향을 고려한 Ca 치환 지질온도계를 본 연구의 온도측정을 위하여 응용하였으나 온도 분포가 넓으며 하한 온도인 Wells(1977)의 값들과 유사한 온도치를 보였다.

위에서 언급한 지질온도계를 이용한 온도계산결과는 Table 6 및 Fig. 6에 요약되어 있으며, 남한에 분포하는 스피넬-레졸라이트의 평형온도 값을 구하기 위해서 위에서 언급한 여러가지 지질온도계들 중에서 Bertrand and Mercier(1985)와 Brey and Köhler (1990)의 지질온도계는 Wells(1977)의 값처럼 낮은 온도와 넓은 분포를 보이고, Mercier(1980)의 단사휘석 지질온도계는 Fan and Hooper(1989)가 지적하였듯이 사방휘석 지질온도계에 비하여 넓은 온도 분포를 보이기 때문에 이들 모델들은 제외시켰다. 따라서 Wood and Banno(1973)와 Wells(1977)의 상한내지 하한값의 중간 값을 나타내며 같은 샘플 지역에서의 (사방 및 단사휘석의 화학성분이 비슷) 온도 분포가

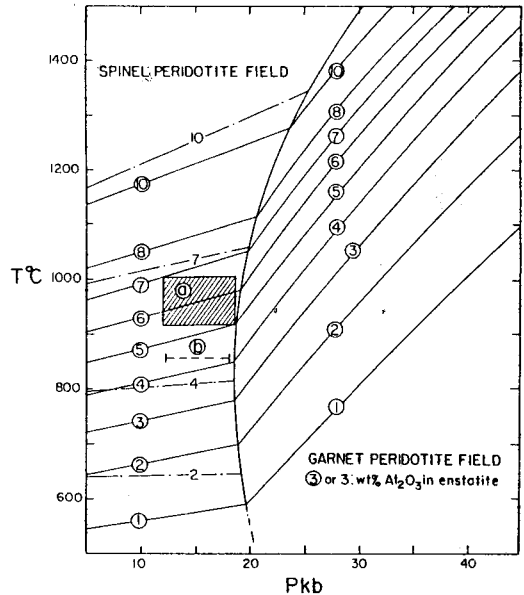


Fig. 8 Alumina content of orthopyroxene, dotted line of ⑩, in spinel lherzolites from S. Korea. Dashed rectangular of ⑩ indicates P-T conditions of the studied spinel lherzolites. Al-isopleths diagram adopted from Lane and Ganguly(1980).

크지 않고, 공식(formulation)에 있어서 미량원소의 영향과 M1, M2 격자에서의 양이온 치환을 고려하였기 때문에 Mercier(1980)의 사방휘석 지질온도계와 Sachtleben and Seck(1981)의 지질온도계에서 구한 값이 합리적인 것으로 사료되어 이들에게서 구한 평균 값을 각 샘플의 평형온도로 간주하였다. Carswell and Gibb(1987)는 Sachtleben and Seck(1981)의 온도결과가 응용할 수 있는 모델이라고 지적하였고 Fan and Hooper(1989)는 Mercier(1989)의 사방휘석-지질온도계의 결과가 온도분포가 좁은 합리적인 값을 보여 준다고 하였다. 지역적으로 보면 백령도 샘플들은 945-995°C, 간성 샘플들은 969-989°C, 조곡리 샘플들은 981-1019°C로서 지역적 분포에 따른 온도분포는 거의 없으며 굳이 세분한다면 조곡리 샘플들이 약간 높은 온도를 보이나 별다른 의미는 갖지 못한것 같으며 전체적으로 보면 945-1019°C 사이의 온도분포를 보인다고 할 수 있다.

스피넬-레졸라이트의 온도측정을 위한 지질온도계가 지금까지 사방-단사휘석 지질온도계에 국한되는 주요 이유는 주요 조암광물인 스피넬-사방휘석-단사

Table 7. Wo, En, Fs component calculated from projection scheme of Lindsley(1983)

	Cpx			Opx		
	Wo	En	Fs	Wo	En	Fs
Boun						
1	.420	.528	.052	.011	.895	.095
2	.420	.527	.054	.009	.892	.099
3	.401	.546	.052	.013	.896	.091
4	.412	.538	.050	.011	.898	.092
Gansung						
1	.443	.502	.055	.010	.894	.097
2	.435	.510	.056	.011	.891	.098
3	.439	.509	.052	.011	.891	.098
4	.435	.516	.050	.010	.896	.095
Backryung						
1	.430	.521	.049	.006	.901	.093
2	.444	.510	.047	.006	.905	.089
3	.417	.549	.034	.012	.903	.085
4	.411	.555	.034	.012	.904	.085

휘석-감람석에서 앞서 언급했듯이 스피넬의 열역학적 특징외에 감람석-휘석의 Fe-Mg 치환반응에서의 ΔG° 값이 열역학적으로 매우 낮은 값을 보이는데, 이것은 즉 온도변화에 민감치 못하기 때문에 좋은 지질 온도계가 될 수 없기 때문이다.

대비값(reference value)로써 볼때 Lindsley(1983)의 도해적 방법(graphical method)을 이용한 온도값들은 850-1120°C 사이의 넓은 분포를 보이는데 Lindsley (1983)의 다이어그램은 넓은 P-T 범위에서 사변형(quadrilateral)-휘석 성분의 실험상 평형자료(experimental phase equilibrium data)를 기초로 하고 있으며 사변형 시스템(quadrilateral system)에 있어서 휘석류의 정출 결정온도를 측정하는데 이용되고 있으며 전체적인 온도분포를 파악하는데 이용되고 있다. 넓은 P-T범위에서의 실험 자료에 근거를 두고 있기 때문에 변성암에서 열기성 화성암에 이르기 까지 다양한 자연계에 응용할 수 있으며 온도측정에 있어서 심각한 추정 오류를 범하지 않기 때문에 넓게 이용되고 있으나, 100°C 간격의 등온선을 사변형 다이어그램(quadrilateral diagram)에 제시하였기 때문에 정확한 온도를 구하지 못하는 단점이 있으나 개략적인 온도는 쉽게 파악할 수 있다. 온도측정에 있어서 Lindsley의 도해적 방법을 사용하기 위해서는 일반적인

Wo, En, Fs의 휘석 성분이 아닌 그의 다성분 투영법(projecting multicomponent scheme)을 따라야 하는데 미량원소를 고려한 Wo, En, Fs 성분인 것이다. 미량원소(Cr, Al^{IV}, Na...등)를 고려치 않은 일반적인 Wo, En, Fs 성분을 사용하면 과소 추정이 되는 오류를 범하게 된다. 투영법(Projection scheme)을 이용한 스피넬-레졸라이트에 나타나는 단사휘석, 사방휘석의 Wo, En, Fs 성분들은 Table 7에 요약되어 있고, 온도 측정을 위한 사변형 다이어그램에 대한 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 샘플의 평형온도는 850-1120°C 사이의 넓은 분포를 보여주며 앞에서 구한 평형온도들이 이 범주안에 속하는 것으로 보아 심각한 오류는 없는 것으로 보인다. 따라서 Lindsley의 도해적 방법을 이용한 온도측정치는 다른 지질온도계를 사용한 결과의 심각한 오류 유무를 판단하는데 유용하게 사용될 수 있는 좋은 대비값을 나타낸다고 할 수 있으나, 일반적으로 측정온도 분포가 넓게 나타나기 때문에 수렴하는(merge) 평형온도를 구하는데는 어려움이 따른다.

평형압력

스피넬-레졸라이트의 압력측정에 있어서 현재까지 정확한 지질압력계가 없는 편이다. MacGregor (1974)가 처음으로 MgO-Al₂O₃-SiO₂ (MAS) 시스템에서 스피넬-석류석과 평형을 이루고 있는 사방휘석의 Al 용해도가 압력에 민감한 반응을 한다고 제시한 후, 여러사람들(Obata 1976; Ganguly and Ghose, 1979; Lane and Ganguly, 1980; Perkins *et al.*, 1981 등)에 의해서 계속해서 연구되어 왔으며 스피넬과 평형인 사방휘석의 Al 용해도는 MacGregor(1974)가 처음으로 밝힌 압력보다 오히려 온도에 민감한 반응을 보인다고 밝혀졌다.

Fig. 8에서 보듯이 P-T 공간에서 스피넬-페리도타이트 영역의 Al 등성분선의 완만한 기울기는 압력에 민감치 못한 것을 잘 반영하며, 석류석-페리도타이트 영역의 급격한 기울기는 압력에 민감한 좋은 지질압력계를 의미한다. 따라서 본 연구에서는 평형압력을 구하기 위해서 차선적이지만 경험적 모델인 Mercier(1980)의 휘석-지질압력계를 사용하였으며 여기에 대한 소개는 앞에서 이미 간략히 언급하였다. 사

방휘석 및 단사휘석 지질압력계를 이용한 압력값은 Table 6에 요약되어 있다.

본 연구에서 백령도 시료들은 단사휘석 지질압력계를 사용할 경우 매우 높은 값인 23 Kb를 나타내며 넓은 범위인 14-23 Kb의 압력분포를 보인다(Table 6). Fan and Hooper(1989)는 사방휘석 지질압력계가 단사휘석보다 합당한 압력추정치치를 보이는 이유에 대해서는 언급치 않았으나 일반적으로 자연계에서 사방휘석들은 단사휘석들에 비해서 미량원소(Cr, Na... 등)의 함량이 현저히 적은 편이기 때문에 Al 치환에서의 미량원소들의 영향이 작기 때문이라 사료된다. 본 연구결과에서도 사방휘석 지질압력계를 이용한 평형 압력치가 12-19 Kb의 좁은 범위를 보이는 타당한 값으로 보인다.

Adams and Bishop(1982, 1986)은 감람석과 사방휘석에서 Ca-Mg치환을 이용한 지질압력계를 제시하였으나 연구대상 감람석의 Ca함량이 무시할 정도로 매우 적기 때문에 본 연구에서는 이 모델을 응용할 수 없었다.

위에서 언급한 지질온도계와 지질압력계에서 구한 남한에 분포하는 초염기성 포획암의 평형온도와 평형압력들은 Fig. 7에 나타나 있다.

토론 및 결론

스피넬-레졸라이트의 광물조성 특징상 평형압력을 구하기 위한 지질압력계의 제한으로 앞에서 구한 평형압력값의 신뢰도를 평가, 비교하기 위한 대안으로써 정확한 값을 구할수는 없으나 Lane and Ganguly(1980)가 제시한 Al 등성분선을 이용하여 보았다. 실험연구들이 MgO-Al₂O₃-SiO₂(MAS) 시스템에서 수행되었기 때문에 Fe, Ca, Cr들의 영향들을 고려치 못한 단점들이 있으나, 이는 자연계의 다성분의 상(phase)을 실험실에서 완전 복제할 수 없는 어려운 점들 때문에 대부분의 실험들이 단순한 2-3 성분계로 이루어지기 때문이다.

Fig. 8에서 본 연구 대상인 스피넬-레졸라이트의 평형온도를 950°C 정도로 가정하면, 10-20 Kb 사이에서는 Al 용해도가 $\approx 5.5-6.5$ wt%로 나타나는데 백령도, 조곡리등 남한에 분포하는 스피넬-레졸라이트에서 나타나는 사방휘석의 Al₂O₃ 함량은 $\approx 4-5$ wt%

에 해당된다(Table 1). 이와 같이 ≈ 1.5 wt%의 차이가 나는것은 Al 용해도에 있어서 미량원소들의 영향 때문으로 사료된다. Lee and Ganguly(1988)는 그들의 실험결과에서 Al 용해도에 대한 Fe의 영향이 심대함을 나타내었다. 특히 엔스터타이트(pure enstatite)에서 $X_{Fe}^{opx}=0.1$ 로 증가하면 ≈ 1.5 wt%의 Al₂O₃의 감소가 현저히 눈에 띄게 나타난다(Fig. 9).

Perkins and Newton(1980)과 Chatterjee and Terhart(1985)는 Ca과 Cr이 Al 용해도에 미치는 영향을 보고하였다. 따라서 MAS 삼성분계(ternary system)와 ≈ 1.5 wt%의 Al 함량 차이가 나는것은 이러한 미량원소들의 영향에 기인하는 것으로 보이며, 본 연구대상의 사방휘석은 Ca 및 Cr의 함량이 미미하기 때문에 주로 Fe($X_{Fe}=0.1$)의 영향으로 사료된다.

평형압력을 Mercier(1980)의 15-19 Kb로 볼 때 Fig. 8에서 Lee and Ganguly(1988)의 Fe 영향을 고려한 MAS 삼성분계의 사방휘석의 Al 함량($\approx 5.5-6.5$ wt%)은 측정된 P-T 영역에 속하는 합당한 값으로 보이나, 다른 연구결과들의(Wood, 1974; Harley, 1984; Bertrand *et al.*, 1986) Fe 영향값($\approx 0.5-0.8$ wt%)을 고려하면 Al 함량이 측정된 P-T 영역 밖에 $\approx 0.7-1.0$ wt% 낮게 나타난다. 앞으로 다성분계의 보다 완벽한 실험결과에 의해서 이러한 Fe 영향값들의 정확도에 대하여 밝혀 지겠지만 Lee and Ganguly(1988)는 Harley(1984)의 실험과정에서 흑연캡슐(graphite capsule) 대신 샘플들의 Fe 성분에 오염을 끼칠 수 있는 Fe 캡슐을 사용한 치명적 실수를 지적하였으며, Wood(1974)와 Bertrand *et al.*(1984)의 실험결과는 역전실험(reversal experiment)에 의거하지 않았으므로 수렴하는 정확한 Fe 영향값을 추정할 수 없는 단점을 내포하고 있다. 따라서 Lee and Ganguly(1988)의 결과가 정확하다고 가정하면 이들 압력의 대비값으로써 스피넬-페리도타이트 영역에서의 Al 등성분선을 볼 때 앞에서 언급한 바와 같이 $X_{Fe}^{opx}=0.1$ 의 영향을 고려하여 사방휘석에서 나타나는 $\approx 4-5$ wt%의 Al 함량에다 ≈ 1.5 wt%(Fe 영향)를 더하여 주면 5.5-6.5 wt%로 되는데 이는 MAS 시스템에서 본 연구에서 구한 평형온도와 평형압력이 잘 일치하는 Al 함량이라 할 수 있다.

Ca와 Cr 함량이 미미하면서 Fe 성분이 증가하면

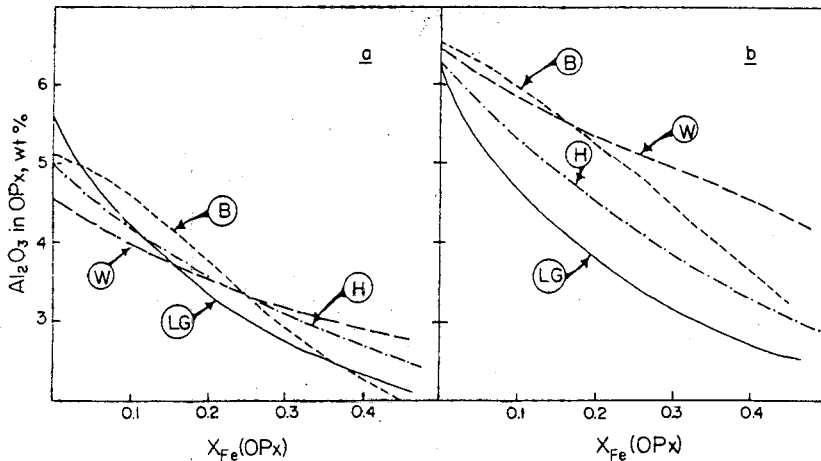


Fig. 9. Fe effect on alumina solubility in orthopyroxene. (a) 20 Kbar, 975°C (b) 25 Kbar, 1200°C. LG: Lee & Ganguly(1988), W: Wood(1974), H: Harley(1984), B: Bertrand *et al.*(1986). Figure adopted from Lee and Ganguly(1988).

Al 용해도는 감소하는 음의 경향을 보이지만, Ca와 Cr 함량이 어느정도 증가하면서 Fe 성분도 증가하면 Al 용해도는 감소하는 것이 아니라 오히려 증가하는 양의 경향을 보이는 복잡한 양상을 띄게되는데 이는 이들 원소들이 치환할때 서로의 왕복반응(reciprocal process)에 기인하기 때문이다. 본 연구의 사방휘석은 Ca와 Cr 함량이 미미하기 때문에 왕복반응의 복잡한 영향은 받지않고 앞서 언급했듯이 Fe 성분에 기인한 Al 용해도의 감소를 나타낸다고 할 수 있다.

남한의 제3기-4기 상부맨틀의 고지온구배(paleogeotherm)를 구축하기 위하여 Mercier and Carter(1975)와 Mercier(1980)가 제시한 3가지 유형의 맨틀 지온구배(Continental, Oceanic, and Rift/ridge)에 평형온도, 압력을 대비한 결과 간성과 백령 샘플들의 일부가 해양 지온구배에서 약간 벗어 나지만 전체적으로는 전형적인 해양지온구배에 속하며 (Fig. 10) 중국 동부에서 산출되는 맨틀 포획암들도 같은 결과를 보여주고 있다(Fan and Hooper, 1989). Fan and Hooper(1989)에 의하면 이 시기에는 태평양판이 유라시아판과 만나서 중국동부 연변부에 침강대(subduction zone)가 형성되면서 배호 확장(back-arc spreading)과 연약권(asthenosphere)의 융기(upwelling) 및 확장(extension)이 일어나고 단층 및 열개(rift)들이 형성되면서 활발한 화산활동이 있던 활성 대륙지역(active continental area)이었으

며 북북동의 Tan-Lu 단층도 이때 형성되었다고 하였다. 남한에서 산출되는 맨틀 포획암들도 이러한 과정에서 형성된 것으로 보이며 해양 지온구배를 나타내는 맨틀의 고지온구배도 이러한 조구조적(tectonic) 환경을 반영한 것으로 추정된다. 남아프리카(Lesotho), 남부 인디아 및 중국 동부에서 산출되는 스피넬 및 석류석-페리도타이트의 평형온도와 압력도 Fig. 10에 나타나 보았다. 석류석-페리도타이트의 온도와 압력을 구하고 객관적 평가를 위하여 Mercier (1980)의 지질온도-압력계 대신 석류석-사방휘석 지질온도계(Lee and Ganguly, 1988)와 사방휘석의 Al 용해도 지질압력계(Ganguly and Saxena, 1987; Lane and Ganguly, 1980)를 사용하였으며 (Table 8), 중국 동부 샘플은 해양 지온구배에 남아프리카 및 남부 인디아 샘플들은 대륙 지온구배에 속하여 지역에 따른 특징적인 상부맨틀의 고지온구배를 보여주었다.

남한에서 스피넬-레졸라이트만 나타나며 일본에서도 대부분이 스피넬 레졸라이트이나(Aoki, K., 1987), 중국동부 가장자리에는 석류석-레졸라이트가 우세하고 동부 내륙부에는 스피넬-레졸라이트가 우세하게 산출되는 이유는 상부맨틀에서 이들을 포획한 알카리 현무암의 형성깊이와 연관된 것으로 추정되나 조구조 환경과 관련하여 좀더 깊이 있는 연구가 앞으로 진행되어야 할 것 같다. 마그마의 부분용융은 그 지역의 맨틀 지온구배가 여러가지 요인들에 의하여 페리도타

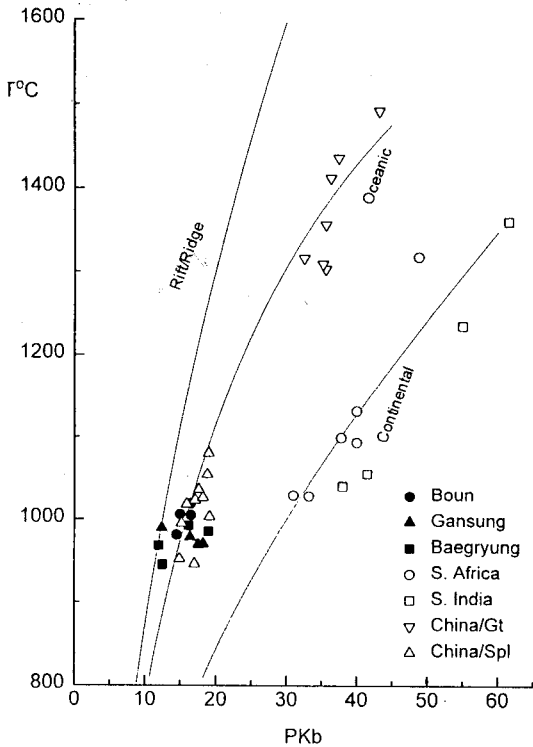


Fig. 10. Comparison of the P-T conditions of various mantle xenoliths from S. Korea, Eastern China, S. India, and S. Africa (Lesotho) in the mantle geotherms of Mercier (1980).

이트의 고체곡선(solidus curve)을 벗어날때 일어나는데 일반적으로 알카리 현무암의 마그마 형성깊이는 스피넬/석류석-페리도타이트가 분포하는 60-150 Km로 보고 있으며(Yoder, 1976; Middlemost, 1985), H₂O가 많은 조건에서는 석류석-레졸라이트 영역에서만 부분용융이 가능하나 CO₂가 풍부한 환경하에서는 스피넬-레졸라이트 영역에서도 가능하다(Mysen and Boettcher, 1975). 따라서 맨틀 포획암의 종류에만 의존하여 부분용융이 일어난 깊이를 추정하기는 어려우나, 마그마 형성이 맨틀 포획암이 분포하는 영역 가까운 데서 일어났다고 가정하면 남한의 스피넬-레졸라이트를 운반한 알카리 현무암의 마그마는 중국의 석류석-레졸라이트를 운반한 것 보다는 좀 더 얇은 부분에서 형성되어서 급속한 마그마 상승도중 상부의 스피넬-레졸라이트만 포획하였으며, 이것보다 깊은 하부에서 부분용융된 마그마는 상승도중 중국처럼 석류석-레졸라이트를 포획할 가능성이 높은것으로

추정된다. 일반적으로 석류석-레졸라이트는 알카리 현무암 마그마보다 형성깊이가 더욱 하부인(최소 150 Km 이하, Middlemost, 1985) 김벌라이트(Kimberlite)에 의해 대부분 포획되어 나오는데, 중국처럼 알카리 현무암에 포획된 곳은 소수이다. Fan and Hooper(1989)는 중국동부 가장자리(Xinchang-Minqing area)에서만 석류석-레졸라이트가 우세한 것은 이 지역이 맨틀의 융기(upwelling)가 일어난 중심부이기 때문이라는 의견을 제시하였다.

남한의 상부맨틀 화학조성은 맨틀포획암의 광물화학적 조성에서 살펴보면 스피넬의 Cr 수치가 매우 낮고 사방휘석, 단사휘석 및 감람석의 화학성분 변화가 거의 없는 것이 특징이다. 스피넬의 Cr 수치가 높을수록 맨틀에서의 부분 용융도가 높다는 점(Dick and Bullen, 1984)과 조성광물들의 화학조성 변화가 거의 없는 균질한 점을 고려할때, 남한의 상부 맨틀의 화학적 특징은 결핍도(depletion)가 적고 부분 용융도가 낮은 초생적인(primitive) 조성을 보인다고 하겠으나, 전체적인 화학조성 특징을 알려면 REE 및 전암분석 연구가 앞으로 진행되어야 한다. 남한에 비하여 중국은 다양한 종류의 맨틀포획암, 즉 부분용융이 많이 진행되어서 결핍도가 높은 잔류맨틀인 듀나이트 및 하야츠버자이트들이(Sen, 1983; Middlemost, 1985) 산출되는 것으로 보아 서로 다른 부분용융에 따른 상부맨틀의 결핍도는 중국것과 국부적으로 다를 가능성이 있다.

이상의 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 간성, 보은, 백령도에 산출되는 맨틀포획암은 감람석-사방휘석-단사휘석-스피넬의 구성광물로 된 스피넬-레졸라이트이다. 감람석, 휘석들은 킹크밴딩과 삼중점이 결정경계선에 잘 나타나며 일정한 방향의 배열이 없는 거정질의 프로토크라누라 및 등립질의 조직을 보인다. 스피넬은 갈색, 타형으로 결정사이를 채우는 간극상으로 나타난다.

2) 감람석의 Fo성분은 89.0-90.2로 입자의 중심부와 외연부 사이에서 매우 균질하며 CaO는 매우 낮은 0.03-0.12 wt%를 보인다. 사방휘석의 En 89.0-90.0인 엔스타이트로 Al₂O₃ 함량은 4-5 wt%이다. 단사휘석은 En 47.2-49.1인 디옵사이드이며 Al₂O₃ 함량은 보은이 높은 7.42-7.64 wt%, 백령도가 낮은 4.70-4.91 wt%로 지역적인 차이를 보인다. 스피넬의 Mg 값

Table 8. Temperature and Pressure estimation for spinel/garnet-lherzolites from other localities

Lesotho, S. Africa (Nixon & Boyd, 1973)			S. India (Ganguly & Bhattacharya, 1987)			E. China (Fan & Hooper, 1989)		
Sample No.	T°C	PKb	Sample No.	T°C	PKb	Sample No.	T°C	PKb
<u>gt-lher.</u>			<u>gt-lher.</u>			<u>gt-lher.</u>		
1567	1029	31.0	1	1235	55.0	HT-28X	1316	32.5
1569	1028	33.2	2	1360	61.5	ZN-8	1492	43.2
1559	1099	37.8	4	1055	41.5	ZN-12X	1589	48.0
E3	1318	48.8	5	1040	38.0	ZN-20	1356	35.6
1610	1418	51.7				MQ-8	1412	36.3
2125	1132	40.0				MQ-8X	1436	37.4
						MD-4X	1303	35.6
						MD-8XX	1309	35.2
						<u>spl-lher.</u>		
						NB-3	1023	17.1
						B-2	995	15.2
						YT-23	1003	19.1
						YT-30	1080	19.0
						KH-8	1026	18.2
						HDW-4	1054	18.8
						SQ-12	946	17.0
						SQ-15	952	14.9
						SQ-23	1018	15.9
						LQ-20	1036	17.6

*Gt-opx thermometer (Lee and Ganguly, 1988) and Al-opx barometer (Lane and Ganguly, 1980) used for gt-lherzolites. Opx-thérmo-barometer (Mercier, 1980) used for spl-lherzolites.

은 75.1-81.9이며 Cr 수치는 8.5-12.6의 값을 보이며 Al 성분이 증가할수록 Cr 성분이 감소하는 뚜렷한 음의 경향을 보인다.

3) 포획암들의 평형온도 및 압력을 구하기 위해 휘석-지질온도계(Wood and Banno, 1973; Wells, 1977; Mercier, 1980; Sachtleben and Seck, 1981; Bertrand and Mercier, 1985; Brey and Köhler, 1990)와 Wo 고용체 및 Al-용해도를 이용한 지질압력계(Mercier, 1980; Lane and Ganguly, 1980)를 이용하였다. Mercier(1980)와 Sachtleben and Seck(1981)의 지질온도계가 합당한 값을 보이며 이들 둘의 평균 값인 평형온도는 945-1019°C이며 Mercier (1980)의 사방휘석-지질압력계의 평형압력은 12-19 Kb(42-63 Km)를 나타낸다.

4) 맨틀포획암의 평형온도와 압력을 P-T 공간에 나타내 보면 남한의 상부맨틀 지온구배는 Mercier and Carter(1975) 및 Mercier(1980)가 분류한 맨틀 지온구배중에서 해양 지온구배에 속하며, 시기적으로

다르지만 대륙 지온구배에 속하는 남아프리카(Lesotho) 및 남부 인도와는 뚜렷한 대조가 된다. 중국 동부와 남한의 스피넬-레졸라이트는 광물화학조성이 매우 유사하여(스피넬의 Cr 수치가 낮고 조성 광물의 화학조성이 균질) 초생적인 조성을 보이고 상부 맨틀은 같은 해양 지온구배를 나타내고 있으나, 남한에 비하여 중국은 결핍도가 높은 다양한 종류의 맨틀포획암이 산출되는 것으로 보아 서로 다른 부분 용융에 따른 상부맨틀의 결핍도는 중국 것과 국부적으로 다를 가능성이 있다.

사 사

논문내용에서 숫자 및 오자하나까지 세밀히 지적하여 주신 책임편집 박계현, 원성택, 송석환 박사들께 감사드리며, 백령도, 간성 및 보은 샘플 채취 때 도움을 주신 나기창, 현전기, 김윤규, 홍세선 박사들께도 역시 감사를 드린다.

참고문헌

- 김윤구, 이대성, 송윤구, 김선억, 1988, 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. 지질학회지, 제24권특별호, 57-66.
- 나기창, 이문원, 1987, 백령도의 지질. 자연실태 종합보고서, 제7집, 33-48.
- 이종혁, 1984, 회인지역에 산출되는 분출암상의 역전구조와 그의 암석학적 연구. 지질학회지, 20호, 85-96.
- Adams, G. E. and Bishop, F. C., 1982, Experimental investigation of Ca-Mg exchange between olivine, orthopyroxene, and clinopyroxene: potential for geobarometry. Earth Planet. Sci. Lett., 57, 241-250.
- Adams, G. E. and Bishop, F. C., 1986, The olivine - clinopyroxene geobarometer: experimental results in the CaO-FeO-MgO-SiO₂ system. Contrib. Mineral. Petrol., 94, 230-237.
- Aoki, K., 1987 Japanes Island arc: xenoliths in alkali basalts, high-alumina basalt, and calc-alkaline andesites and dacites. In Mantle Xenoliths(ed. P. H. Nixon) John Wiley & Sons, 319-334.
- Bertrand, P. and Mercier, J. C. C., 1985, The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? Earth Planet. Sci. Lett., 76, 109-122.
- Bertrand, P., Sotin, C., Mercier, J. C. C., and Takahashi, E., 1986, From the simplest chemical system to the natural one: garnet peridotite barometry. Contrib. Mineral. Petrol., 93, 168-178.
- Boyd, F. R., 1973, The pyroxene geotherm. Geochim. Cosmochim. Acta., 37, 2533-2546.
- Brey, G. P. and Kohler, T., 1990, Geothermobarometry in four phase lherzolite II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermo-barometers. J. Petrol., 31, 1353-1378.
- Brown, G. M., Pinsent, R. H. and Coisy, P., 1980, The petrology of spinel-peridotite xenoliths from the Massif Central, France. Amer. J. Sci., 280A, 471-496
- Carswell, D. A. and Gibb, F. G. F., 1987, Evaluation of mineral thermometers and barometers applicable to garnet lherzolite assemblages. Contrib. Mineral. Petrol., 92, 448-445.
- 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., 89, 273-84.
- 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., 86, 54-76.
- 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., 30, 1117-1158.
- Fujii, T., 1976, Solubility of Al₂O₃ in enstatite coexisting with forsterite and spinel. Annual Rep. Carnegie Inst. Washington Year Book, 75, 566-571.
- Ganguly, J. and Bhattacharya, P. K., 1987, Xenoliths in Proterozoic Kimberlites from S. India: Petrology and geophysical implications. In Mantle Xenoliths(ed. P. H. Nixon) John Wiley & Sons, 249-266.
- Ganguly, J. and Ghose, S., 1979, Aluminous orthopyroxene: Order - disorder, Thermodynamic properties, and petrologic implications, Contrib. Mineral. Petrol., 69, 375-385.
- Ganguly, J. and Saxena, S. K., 1987, Mixtures and mineral reactions. Springer-Verlag, 226-231.
- Ganguly, J. and Saxena, S. K. 1984, Mixing properties aluminosilicate garnets: Constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. Am. Mineral., 69, 88-97.
- Harley, S. L., 1984, An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. Contrib. Mineral. Petrol., 86, 359-73.
- Kretz, R., 1982, Transfer and exchange equilibrium in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data. Geochim. Cosmochim. Acta., 46, 411-422.
- Krögh, E. J., 1988, The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer reinterpretation of existing experimental data. Contrib. Mineral. Petrol., 99, 44-8.
- Kushiro, I., Yoder, H. S. and Mysen, B. O., 1976, Viscosities of basalt and andesite melts at high pressures. J. Geophys. Res., 81, 6351-6356.
- Lane, D. and Ganguly, J. 1980, Al₂O₃ solubility in orthopyroxene in the system MgO-Al₂O₃-SiO₂: A reevaluation and mantle geotherm. J. Geophys. Res., 85, 6963-6972.
- Lee, H. Y. and Ganguly, J., 1988, Equilibrium compositions of coexisting garnet and orthopyroxene experimental determinations in the system FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂, and applications. J. Petrol., 29, 93-113.
- Lee, H. Y. 1991, Metamorphism in the Hongcheon

- area: Petrology, Pressure and temperature. *J. Geol. Soc. Korea*, 27, 339-358.
- Lindsley D. H. 1983, Pyroxens thermometry. *Am. Mineral.*, 68, 477-493.
- MacGregor, I. D., 1974, The system $MgO-Al_2O_3-SiO_2$: Solubility of Al_2O_3 in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions. *Am. Mineral.*, 59, 110-119.
- Mercier, J. C. C., 1980, Single-pyroxene thermobarometry. *Tectono- physics*, 70, 1-37.
- Mercier, J. C. C and Carter, N. L., 1975, Pyroxene geotherms. *Jour. Geophys. Res.*, 80, 3349-62.
- Meyer, H. O. A, and Svisero, D. P., 1987, Mantle xenoliths in S. America. In *Mantle Xenoliths*(ed. P. H. Nixon) John Wiley & Sons, 85-91.
- Middlemost, E. A. K., 1985, Magmas and magmatic rocks. Longman Inc., New York, 266p.
- Mysen, B. O. and Boettcher, A. L., 1975, Melting of a hydrous mantle: I. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities of water, carbon dioxide and hydrogen. *J. Petrol.*, 16, 520-548.
- Nixon, P. H. and Boyd, F. R., 1973, Petrogenesis of the granular and sheared ultrabasic nodule suite in kimberlites. In *Lesotho Kimberlite*(ed. P. H. Nixon), Lesotho National Development Corporation.
- Obata, M., 1976, The solubility of Al_2O_3 in orthopyroxenes in spinel and plagioclase peridotites and spinel pyroxenite, *Am. Mineral.*, 61, 804-816.
- Perkins, D., Holland T.J.B., and Newton R.C., 1981, The Al_2O_3 contents of enstatite in equilibrium with garnet in the system $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ at 15-40 kb and 900-1600°C. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78, 99-109.
- Perkins, D. and Newton, R. C., 1980, The compositions of coexisting and garnet in the system $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ at 900-1100°C and high pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 75, 291-300.
- Sachtleben, T. and Seck, H. A., 1981, Chemical control of Al - solubility in orthopyroxene and its implications on pyroxene geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78, 157-165.
- Sen, G., 1983, A petrologic model for the constitution of the upper mantle and crust of the Kolau shield, Oahu, Hawaii and Hawaiian magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 215-228.
- Sen, G., 1987, Xenoliths associated with the Hawaiian Hot Spot. In *Mantle Xenoliths*(ed. P. H. Nixon) John Wiley & Sons, 359-375.
- Song, S. H., 1994, Geochemical evolution of Phanerozoic lithospheric mantle beneath S. E. South Australia. Ph. D. Thesis, The University of Adelaide.
- Tracy, R.J., 1980, Petrology and genetic significance of an ultramafic xenolith suite from Tahiti. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 48, 80-96.
- Wells, P. R. A., 1977, Pyroxene thermometry in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62, 129-39.
- Wood, B. J. and Banno, S., 1973, Garnet-orthopyroxene and clinopyroxene relationships in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42, 109-124.
- Wood, B. J., 1974, The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 46, 1-15.
- Yoder, H. S., 1976, Generation of basaltic magma. National Academy of Sciences, Washington, D. C., 265p.

(책임편집 : 박계현)

Petrochemical Study on the Mantle Xenoliths in alkali basalts from S. Korea: P-T Regime of Upper Mantle

Han Yeang Lee

*Korea Institute of Geology, Mining and Materials
(30 Gajeong-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-350, KOREA)*

ABSTRACT : Mantle xenoliths in alkali basalt from Boun, Gansung area, and Baegryung island in S. Korea are spinel lherzolites composed of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, and spinel. The xenoliths generally show triple junctions among grains, kink-banding in olivine and pyroxenes, and protogranular and eqgranular textures having no orientation of specific direction. Anhedral brown spinels are disseminated in the intergranular spaces of minerals. Mineral compositions are very homogeneous without compositional zonation from rim to core in grains regardless different localities. Olivine shows Fo component of 89.0-90.2 and low CaO of 0.03-0.12wt%, orthopyroxene is enstatite with En component of 89.0 - 90.0 and Al_2O_3 of 4-5wt%, and clinopyroxene is diopside having En component of 47.2-49.1 and Al_2O_3 of 7.42-7.64wt% from Boun and 4.70-4.91wt% from Baegryung showing local variation. Spinel shows the distinctive negative trend with increasing of Al and decreasing of Cr, and Mg value and Cr number are 75.1-81.9 and 8.5-12.6, respectively. To estimate T and P for these mantle xenoliths pyroxene-geothermometers (Wood and Banno, 1973; Wells, 1977; Mercier, 1980; Sachtleben and Seck, 1981; Bertrand and Mercier, 1985; Brey and Köhler, 1990) and Al-solubility geobarometer (Mercier, 1980; Lane and Ganguly, 1980) are used. Temperatures of Mercier (1980) and Sachtleben and Seck (1981) are compatible and equilibrium temperatures of xenoliths, average value of these two, are from 970°C to 1020°C, and equilibrium pressures derived from Mercier (1980) are in the range of 12-19 Kb (42-63 Km). These temperatures and pressures seem to be reasonable with the consideration of Al-isopleths in MAS system (Lane and Ganguly, 1980) and Fe effect on Al-solubility in orthopyroxene (Lee and Ganguly, 1988). Equilibrium of temperatures and pressures of xenoliths in P-T space belong to oceanic geotherm among the Mercier's mantle geotherms (1980) and are completely different from continental geotherms of S. Africa (Lesotho) and S. India having different geological ages. Mineral compositions of spinel-lherzolites in S. Korea and eastern China are primitive and paleogeotherms of both are very similar, but degrees of depletion of upper mantle could be locally different from each other since eastern China has various depleted xenoliths due to different degrees of partial melting.

Key word : pyroxene-geothermometer, Al-solubility geobarometer, mantle geotherms, degrees of depletion of upper mantle