Jour. Petrol. Soc. Korea Vol. 16, No. 4, p. 196~207, 2007

강원도 고성지역에 분포하는 알칼리 현무암질 마그마의 상승경로

길영우[1] · 신홍자[1,*] · 고보균[2]

[1]한국지질자원연구원 지질박물관, [2]서울대학교 지구환경과학부

Magma Pathway of Alkali Volcanic Rocks in Goseong, Gangwon-do, Korea

Youngwoo Kil[1], Hong-Ja Shin[1,*] and Bokyun Ko[2]

[1]*Geological Museum, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea*

[2]*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea*

요 약: 강원도 고성지역에는 여러 종류의 포획암과 포획결정을 내포한 마이오세 현무암들이 화산전(volcanic plug) 형태를 이루며 분포한다. 이들 화산전중에서 운봉산화산전의 근원마그마는 지하 160 km 깊이에서 형성되어 지표로 올라왔다. 전암화학분석, 구성광물의 평형온도 및 압력은 운봉산화산전을 형성한 화산암이 알칼리현무암이며, 결핍된 석류석 페리도타이트의 0.2~2%의 부분용융에 의하여 형성되었음을 지시한다. 이 마그마는 감람석, 단사휘석, 사장석을 각각 75~110 km, 40~52 km, 37~54 km 깊이에서 정출하였으며, 맨틀포획암인 스피넬 페리도타이트를 지하 57~67 km에서 포획하여 지표에 빠른 속도로 올라왔다.

핵심어: 고성, 맨틀 포획암, 부분용융, 마그마

Abstract: Miocene basalt plugs in Goseong contain a large variety of crustal and mantle xenoliths and xenocrysts. One of basalt plugs, Unbongsan, are derived from 160 km depth. Whole-rock geochemistry and pressure and temperature conditions of mineral phases indicate that Unbongsan volcanic rocks are alkali basalts and the source magma of the alkali basalts was generated from about 0.2~2% partial melting of depleted garnet peridotite. Crystallization pressures and temperatures of mineral phases within ascending magma of Unbongsan alkali basalt indicate that olivines, clinopyroxenes, and plagioclases were crystallized at 75~110 km, 40~52 km, 37~54 km depth, respectively. The ascending magma of Unbongsan alkali basalts enclosed mantle xenoliths at about 57~67 km depth.

Key words: Goseung, mantle xenolith, partial melting, magma

서 론

현무암질 마그마에 의해 포획되어 지표에 노출된 상부맨틀암석은 지구내부의 물리, 화학적 성질과 맨틀암석의 구성성분 및 맨틀내에서의 지화학적 과정들의 정보를 제공하여 줄 수 있다. 최근 국내에서는 경기도 옹진군 백령도, 충북 보은군 조곡리, 제주도의 동부와 서부, 경기도 평택시 일대와 충남 아산시 일대에서 현무암질 마그마에 포획된 맨틀암석에 대한 연구가 이루어지고 있다(Lee, 1980; 이문원, 1984; 나기창과 이문원, 1987; 김윤규 외, 1988; 이한영, 1995, 윤성효 외, 1998; 길영우와 이석훈, 2005; 신홍자 외, 2006; Choi, 2000; Arai *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2001, 2002; Choi and Kwon, 2005, Kim *et al.*, 2005; Kil, 2006, 2007). 그러나 상대적으로 이들 포획암을 지표에 가져온 제4기 현무암에 대한 연구는 빈약하다(박준범과 박계현, 1996; 고정선과 윤성효, 2005).

강원도 고성군 동부 일대에는 후기 마이오세 현무암들이 여러 개의 화산전(volcanic plug) 형태를 이루며 소규모로 분포하고 있으며, 이들 현무암들은 포획암(xenolith) 및 포획결정(xenocryst)을 내포하고 있다. 이전 연구로서 이한영(1995)은 지온지압계를 이용하여 맨

*Corresponding author: Tel. 82-42-868-3281, E-mail. shj@kigam.re.kr

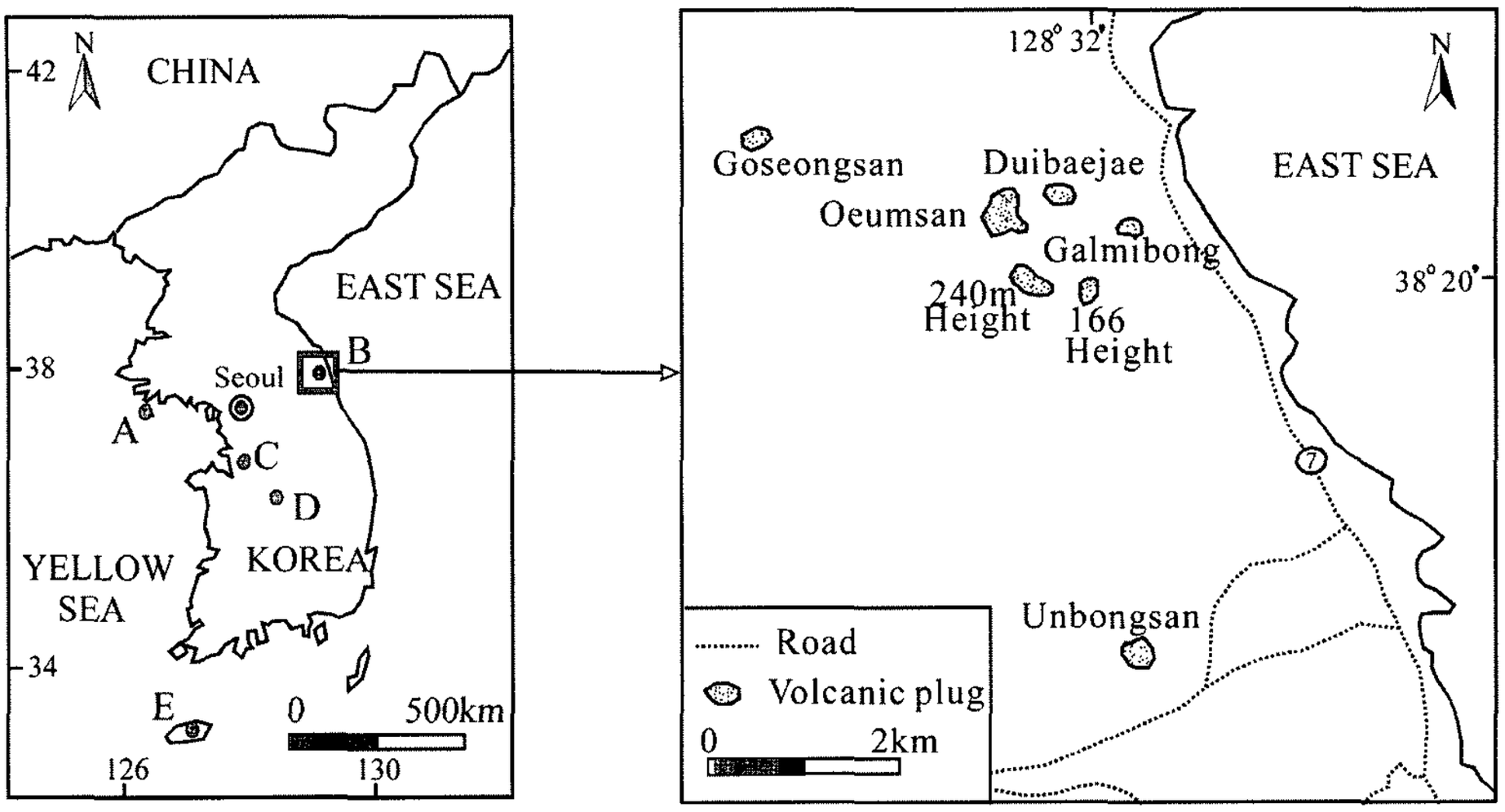

Fig. 1. Simplified geological map showing volcanic plugs of Goseong area(고정선과 윤성효, 2005). A = Baegryeong Island, B = Goseong, C = Asan and Pyeongtaeg, D = Boeun, and E = Jeju Island.

틀암석의 평형 온도와 압력을 구하였고, 박준범 및 박계헌(1996)은 이 지역 현무암들을 한반도 신생대 현무암들과 비교 연구하였다. 또한 고정선과 윤성효(2005)는 고성군 일대 현무암에 대하여 암석학적 연구를 수행하였다.

본 연구는 10 cm 정도 크기의 스피넬 페리도타이트가 고성 운봉산화산전에 산출됨을 처음 보고 하고, 맨틀암석을 포획한 현무암의 기원물질, 기원물질의 부분용융정도, 마그마내 결정들의 정출깊이 등을 규명하여 맨틀에서 지표까지의 마그마 이동의 일련의 경로를 규명하는데 있다.

지질 및 암석기재

연구 지역인 강원도 고성군 일대는 7개의 화산전(volcanic plug)이 분포하고 있고, 주위 기반암은 쥬라기 대보화강암류에 해당하는 중립~조립질의 흑운모화강암이다(Fig. 1). K-Ar으로 측정된 기반암 즉, 흑운모 화강암의 연대는 170 Ma이며(한국지질자원연구소, 1995), 고성군 일대의 운봉산, 고성산, 오음산, 뒤배재, 갈미봉, 166고지, 240고지의 7개의 화산전 중에서 운봉산 현무암의 K-Ar연대는 7.2~7.5 Ma(이동영, 1996; Kim *et al.*, 2005)이다. 이 시기는 동해 확장이 끝난 후기마이오세에 해당된다. 운봉산 이외의 화산전들은 외형상 침식된 모양과, 운봉산과의 지형학적 유사성을 고려하면 운봉산 화산전과 유사한 시기에 형성되었을 가능성이 크다.

고성지역 현무암들은 많은 종류의 포획암 및 포획결정을 포함하고 있다. 포획암류로는 맨틀기원암(mantle xenolith), 집적암류(cumulates), 하부지각의 반려암류와 화강암류가 있고, 포획결정(외래암편)으로서는 거정의 감람석, 단사휘석, 사장석, 스피넬이 있다. 현무암내 다양한 포획암 및 포획결정들이 내포되어 있다는 것은 현무암들을 형성한 마그마가 복잡한 과정을 거쳐 지표로 올라왔다는 것을 의미한다.

포획암중 맨틀기원암은 대부분 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 스피넬로 구성된 스피넬 페리도타이트이다. 본 연구를 통해 처음으로 10 cm 이상의 스피넬 페리도타이트가 운봉산에서 산출됨이 확인되었다. 스피넬 페리도타이트 조직은 크게 원생 입상조직(protogranular texture), 잔쇄 반상조직(porphyroclastic texture), 등립상 조직(equigranular texture)으로 구분되는데(Mercier and Nicolas, 1975; Harte, 1977), 원생 입상조직, 잔쇄 반상조직, 등립상 조직 순으로 광물입자의 크기는 작아지고, 네오블라스트(neoblast)의 함량은 많아진다. 이것은 원생입상조직에서 등립상 조직으로 갈수록 변형의 정도가 증가함을 의미한다(Mercier and Nicolas, 1975). 운봉산에서 발견된 스피넬 페리도타이트는 원생 입상조직과 잔쇄 반상조직의 중간적인 조직을 보이고 있다(Fig. 2). 스피넬 페리도타이트내 감람석 및 단사휘석에서는 킹크밴딩(kink-banding)이 발견된다.

야외에서 보면, 고성지역 화산전들의 현무암들은 대부분 7부 능선 위에 위치한다. IUGS의 TAS(Total

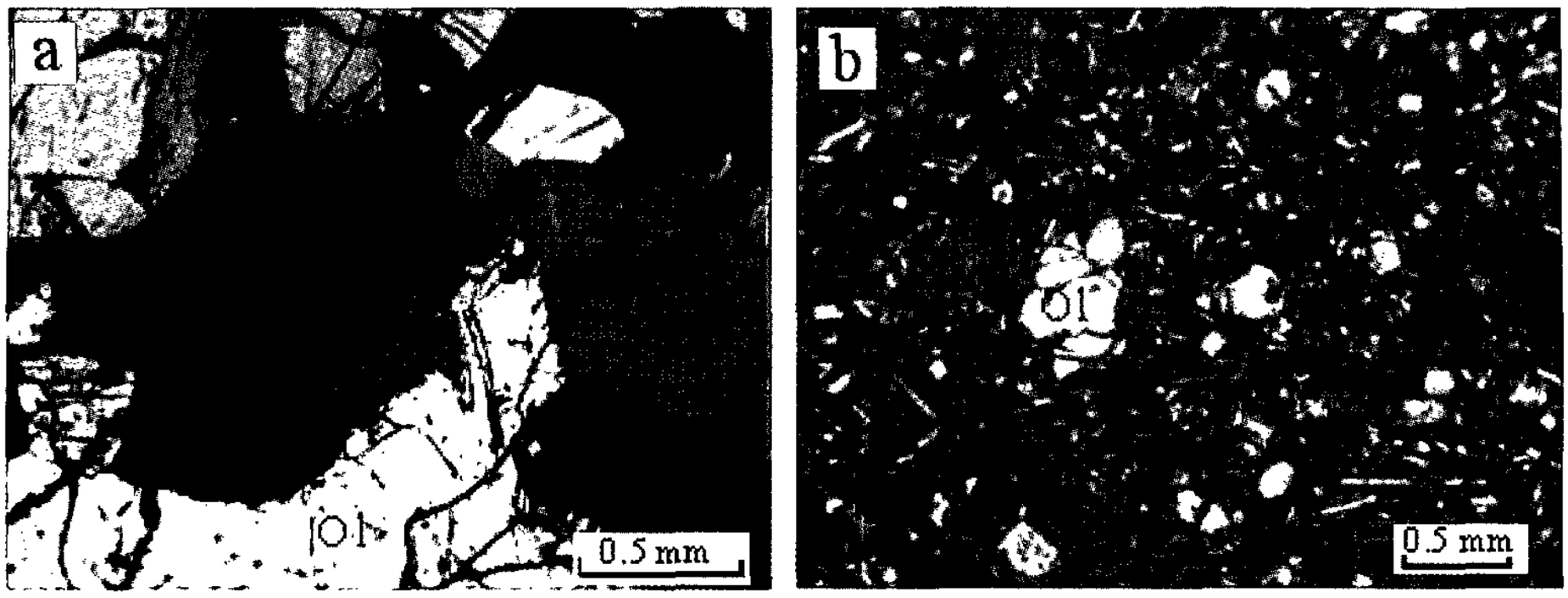

Fig. 2. a) Photomicrograph of protogranular texture in spinel peridotite and b) photomicrograph of microcrystaline texture in alkaline basalt from Unbongsan. Ol = olivine and Opx = orthopyroxene.

Alkali versus Silica) 분류도에 따르면, 이들 현무암들은 알칼리현무암에 속한다(Table 1). 이들 알칼리현무암들은 암회색을 띠우며, 반정광물로 감람석, 휘석, 사장석, 자철석 등을 포함하고 있고, 기질은 사장석, 감람석, 휘석, 유리질이 채우고 있다. 이들 알칼리현무암의 조직은 대부분 미정질(microcrystalline) 혹은 은미정질(cryptocrystalline)이다(Fig. 2).

맨틀암석을 포획한 국내 다른 지역 제4기 알칼리현무암류와 비교하면 고성지역 알칼리현무암들은 맨틀포획암(스피넬 페리도타이트)에서 떨어져 나온 결정들이 상대적으로 많은 반응연을 보인다. 이것은 고성지역의 마그마가 빠른 속도로 지표에 올라왔지만, 맨틀포획암을 내포한 다른 지역 마그마들에 비하여 상대적으로 느린 속도로 지표에 올라왔다는 것을 의미한다(Kil, 2002; 길영우와 이석훈, 2005, 길영우 외 2006).

분석방법

운봉산, 뒤배재, 고성산 알칼리현무암들중 이차적으로 변질되지 않는 신선한 부분을 채취하였다. 전암 화학분석을 위해 망치로 조각낸 암석 조각을 100~200 메시 체를 이용하여 선별한 후, 선별 암석 조각을 초음파 세척기를 이용하여 세척하고, 60°C 오븐에서 건조시켰다. 건조된 암석 조각 중에 포함된 반정과 포획결정은 쌍안 실체현미경을 통해 제거하였다. 선별된 암석 조각은 아게이트 사발을 이용하여 분말로 만들어 전암 주성분원소를 지질자원연구원의 X-선 형광분석기(XRF; Shimadzu MXF-1700)로 분석하였다(Table 1).

알칼리현무암들의 전암 미량원소 및 희토류원소 분석은 한국기초과학지원연구원의 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Thermo Elemental X5, X7)와 유도

Table 1. Representative major element contents (wt%) of alkaline basalts from Unbongsan, Duibaejae, and Goseongsan

Location	Unbongsan				Duibaejae		Goseongsan		
Sample No.	KW01	KW02	KW03	KW04	KD01	KD02	KK02	KK03	KK05
SiO_2	48.69	47.47	49.55	47.93	46.55	49.59	48.16	47.48	46.30
TiO_2	1.94	1.96	1.79	1.80	2.18	1.93	1.83	2.20	2.09
Al_2O_3	14.70	14.27	14.45	14.89	15.70	15.25	14.69	14.88	14.38
Fe_2O_3(T)	10.56	11.01	9.86	10.30	11.96	10.28	10.88	11.38	11.79
MnO	0.16	0.16	0.14	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16
MgO	8.91	9.26	8.32	8.78	7.70	6.89	7.85	9.22	9.66
CaO	10.12	10.60	10.17	10.66	11.52	9.36	11.04	10.87	11.17
Na_2O	2.39	2.28	2.50	2.45	2.55	2.88	2.78	2.39	2.47
K_2O	1.91	1.89	2.23	1.71	0.92	1.94	1.33	1.35	1.34
P_2O_5	0.19	0.18	0.18	0.21	0.13	0.31	0.25	0.17	0.20
LOI	0.48	0.59	0.49	0.84	0.18	1.02	0.69	0.05	0.07
Total	100.05	99.67	99.68	99.72	99.55	99.61	99.65	100.15	99.63

결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES; Perkin Elmer Optima 4300DU)를 이용하여 분석하였다. 분석방법은 Choi *et al.*(1994) 방법을 따랐고, 분석 정밀도는 미량원소 15%, 희토류원소 10% 보다 낮다(Table 2).

운봉산 알칼리현무암내의 반정광물의 광물조성과, 운봉산에서 채취한 맨틀포획암인 스피넬 페리도타이트의 광물조성은 기초과학지원연구원의 전자현미분석기(EPMA; Shimadzu EPMA-1610)를 이용하여 분석하였다. 분석 이전에 운봉산에서 채취한 직경 10 cm 이상의 스피넬 페리도타이트내에 구성광물인 감람석, 단사휘석, 사방휘석, 스피넬은 X-선 형광효과를 방지하기 위해 쌍안 실체현미경을 통해 분리하여, 서로 다른 슬라이드 글라스에 올려놓고, 광물조성을 분석하기 위해 연마하였다. 전자현미분석기 분석조건은 가속전압 15

Table 2. Representative trace and rare earth element contents (ppm) of alkaline basalts from Unbongsan, Duibaejae, and Goseongsan

Location	Unbongsan				Duibaejae		Goseongsan		
Sample No.	KW01	KW02	KW03	KW04	KD01	KD02	KK02	KK03	KK05
Ba	495	444	500	471	258	660	463	416	395
Sr	577	576	564	526	490	676	577	550	551
Cr	345	342	357	348	102	288	305	371	397
Li	5.90	5.51	6.18	6.02	5.10	7.25	4.81	5.18	4.54
P	330	416	220	296	131	812	561	290	364
S	146	188	160	182	82.0	173	392	362	116
Sc	24.5	24.3	25.6	25.2	26.7	20.3	25.4	26.3	26.5
V	200	191	208	207	210	169	199	223	222
Zn	63.6	56.9	66.0	61.0	60.0	58.7	64.7	63.8	62.1
Zr	134	122	143	133	99.8	141	128	103	106
Co	49.0	47.8	49.5	48.9	47.6	40.1	46.5	52.1	54.3
Ni	174	169	173	159	88.7	122	133	154	182
Cu	52.1	45.8	49.1	48.5	35.9	41.4	54.7	36.8	54.0
Rb	34.7	29.0	35.1	32.0	18.6	38.0	20.1	21.6	21.0
Y	17.5	17.5	16.6	17.0	20.1	19.3	20.3	19.3	19.4
Mo	4.13	4.23	3.15	3.56	3.01	5.52	4.26	3.91	4.27
Cd	0.15	0.15	0.16	0.14	0.10	0.15	0.29	0.16	0.15
Sn	2.06	2.61	2.61	2.13	2.04	2.18	1.80	1.98	1.96
Sb	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.05	0.04
Cs	0.42	0.36	0.45	0.41	0.65	0.95	0.42	0.36	0.34
La	15.8	16.4	14.0	15.1	8.14	24.8	18.0	13.5	14.3
Ce	31.2	32.7	28.0	29.9	17.5	46.5	36.6	28.7	30.3
Pr	3.96	4.11	3.57	3.83	2.70	5.53	4.70	3.90	4.03
Nd	16.8	17.4	15.3	16.5	12.5	21.9	19.8	17.3	17.7
Sm	3.84	3.81	3.50	3.74	3.46	4.63	4.53	4.16	4.24
Eu	1.53	1.46	1.45	1.43	1.40	1.75	1.69	1.64	1.59
Gd	3.92	3.93	3.66	3.82	4.01	4.39	4.58	4.46	4.46
Tb	0.54	0.54	0.51	0.51	0.58	0.61	0.64	0.61	0.61
Dy	3.50	3.48	3.38	3.42	3.87	3.95	4.02	4.01	3.99
Ho	0.65	0.67	0.64	0.67	0.75	0.73	0.78	0.75	0.72
Er	1.92	1.89	1.81	1.90	2.18	2.03	2.18	2.15	2.11
Tm	0.26	0.24	0.24	0.25	0.30	0.28	0.28	0.28	0.28
Yb	1.84	1.73	1.72	1.75	2.03	1.91	1.93	1.87	1.85
Lu	0.27	0.25	0.26	0.26	0.31	0.28	0.26	0.28	0.25
Pb	2.88	2.17	2.92	2.30	2.09	3.15	2.07	1.86	1.88
Th	3.58	3.64	3.37	3.26	4.78	7.41	4.58	3.13	3.12
U	0.86	0.83	0.89	0.87	0.31	1.06	0.67	0.51	0.56

kV, 빔 전류 20 nA, 빔 직경 2~3 μm 이고, 주성분원소는 10~20초, 미량원소는 20~40초의 시간을 두고 분석하였다. 평형 온도를 계산하기 위해 사용된 사방휘석, 단사휘석의 Fe^{3+} 과 Fe^{2+}는 Droop(1987)의 방법으로 계산하였다(Table 3).

평형온도 및 압력

운봉산 맨틀 포획암의 평형온도 및 압력

운봉산 알칼리현무암에 포획된 스피넬 페리도타이트 내 단사휘석과 사장휘석을 전자현미분석기를 이용하여 광물조성을 분석한 결과 중심부와 주변부의 주성분원소 조성이 유사하다(Table 3). 이는 맨틀포획암의 구성광물간에 완전 평형상태에 있었다는 것을 의미한다(Kil, 2002). 이 암석 내에서 광물 상호간의 뚜렷한 경계와 삼중점을 포함하고 있고, 광물간의 반응연이 없다는 것도 광물간 완전 평형상태였음을 의미한다(Fig. 2a).

맨틀포획암의 광물간 평형온도를 계산하기 위하여 사방휘석-단사휘석을 이용한 Wood and Banno(1973), Brey and Köhler(1990), Bertrand and Mercier(1985)의 지온계들을 이용하였다. 계산된 평형온도는 평형압력을 15 kb으로 가정하여 계산하였다(Kil, 2002). 계산결과 Wood and Banno(1973) 지온계로 계산된 평형온도는 1099°C이며, Brey and Köhler(1990) 지온계로 계산

Table 3. Representive major element analysis (wt%) of olivine(Ol), orthopyroxene(Opx), clinopyroxene(Cpx) and spinel(Sp) in spinel peridotites, and olivine(Ol), clinopyroxene(Cpx) and plagioclases(Pl) in alkali basalts from Unbong-san, Goseong

Rock Name	Spinel Peridotite						Alkali Basalt		
Sample No.	Gu01						KW01		
Mineral Name	Ol (Core)	Opx (Core)	Opx (Rim)	Cpx (Core)	Cpx (Rim)	Sp (Core)	Ol	Ol	Ol
SiO_2	41.44	55.69	55.85	54.11	54.25	0.09	37.60	37.38	37.73
TiO_2	0.05	-	0.10	0.10	0.14	0.22	0.12	0.11	0.03
Al_2O_3	0.07	2.08	1.91	2.08	2.01	29.79	0.02	0.02	0.03
Cr_2O_3	0.04	0.41	0.33	0.65	0.61	37.20	-	-	-
FeO	10.48	6.62	6.89	2.66	2.72	15.73	26.39	29.10	26.83
MnO	0.18	0.18	0.15	0.12	0.08	0.20	0.44	0.55	0.49
MgO	47.68	35.08	33.90	16.95	17.90	13.72	34.95	32.84	34.43
CaO	0.15	0.73	0.67	22.55	22.40	-	0.42	0.39	0.42
Na_2O	-	0.05	0.02	0.40	0.42	0.06	-	-	-
K_2O	-	0.02	0.02	-	-	-	-	-	-
Total	100.09	100.85	99.84	99.61	100.54	97.01	99.94	100.39	99.96
Si	1.015	1.916	1.939	1.968	1.956	0.022	1.000	1.002	1.005
Ti	0.001	-	0.003	0.003	0.004	0.041	0.002	0.002	0.001
Al	0.002	0.084	0.078	0.089	0.086	8.564	0.001	0.001	0.001
Cr	0.001	0.011	0.009	0.019	0.017	7.178	-	-	-
Fe	0.215	0.191	0.200	0.081	0.082	3.213	0.587	0.653	0.598
Mn	0.004	0.005	0.004	0.004	0.002	0.041	0.010	0.012	0.011
Mg	1.742	1.800	1.755	0.919	0.962	4.992	1.386	1.313	1.367
Ca	0.004	0.027	0.025	0.878	0.865	-	0.012	0.011	0.012
Na	-	0.003	0.001	0.028	0.029	0.028	-	-	-
K	-	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-
Total	2.983	4.038	4.016	3.989	4.004	24.080	2.998	2.995	2.994
Mg#	89.0	90.4	89.8	91.9	92.1		70.2	66.8	69.6
En		89.0	88.4	48.8	50.3				
FS		9.7	10.3	4.5	4.4				
Wo		1.3	1.3	46.7	45.3				
An									
Ab									

Table 3. Continued

Rock Name	Alkali Basalt								
Sample No	KW02		KW03		KW04	KW01		KW02	
Mineral Name	Ol	Ol	Ol	Ol	Ol	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx
SiO_2	38.14	37.83	38.21	37.51	37.35	50.40	48.17	49.26	47.57
TiO_2	0.07	0.07	-	0.06	0.05	2.01	3.21	2.71	2.98
Al_2O_3	-	-	0.02	-	0.03	3.87	5.83	4.85	5.92
Cr_2O_3	-	-	-	-	-	0.20	0.17	0.03	0.28
FeO	26.29	27.71	25.84	27.07	25.41	7.16	7.54	7.36	7.56
MnO	0.42	0.55	0.45	0.45	0.44	0.13	0.14	0.10	0.14
MgO	35.33	33.55	35.89	34.69	35.93	13.59	12.58	12.66	12.57
CaO	0.44	0.41	0.40	0.40	0.39	22.15	22.03	22.20	22.04
Na_2O	-	-	-	-	-	0.40	0.54	0.68	0.49
K_2O	-	-	-	-	-	0.02	0.09	0.05	0.02
Total	100.69	100.12	100.81	100.18	99.60	99.93	100.29	99.90	99.56
Si	1.004	1.009	1.003	0.998	0.993	1.873	1.795	1.838	1.787
Ti	0.001	0.001	-	0.001	0.001	0.056	0.090	0.076	0.084
Al	-	-	0.001	-	0.001	0.170	0.256	0.213	0.262
Cr	-	-	-	-	-	0.006	0.005	0.001	0.008
Fe	0.579	0.619	0.568	0.603	0.565	0.223	0.235	0.230	0.238
Mn	0.009	0.012	0.010	0.010	0.010	0.004	0.004	0.003	0.004
Mg	1.387	1.335	1.405	1.377	1.424	0.754	0.699	0.704	0.704
Ca	0.012	0.012	0.011	0.011	0.011	0.882	0.879	0.888	0.887
Na	-	-	-	-	-	0.029	0.039	0.049	0.036
K	-	-	-	-	-	0.001	0.004	0.002	0.001
Total	2.992	2.988	2.998	3.000	3.005	3.998	4.007	4.004	4.012
Mg#	70.5	68.3	71.2	69.5	71.6	77.2	74.8	75.4	74.8
En						40.5	38.5	38.6	38.4
FS						12.2	13.2	12.8	13.2
Wo						47.4	48.4	48.6	48.4
An									
Ab									

된 평형온도는 987°C이고, Bertrand and Mercier(1985) 지온계로 계산된 평형온도는 1059°C이다. 광물주변부의 광물조성 분석치로 얻은 광물주변부 평형온도가 중심부의 평형온도와 ±50°C 범위 내에서 유사하다. 이 또한 맨틀포획암이 평형상태에 있었다는 것을 의미한다.

위의 세가지 지온계를 통해 얻은 운봉산 맨틀포획암의 평형온도 범위는 백령도(800~1100°C), 조곡리(847~1030°C), 제주도(880~1040°C)의 맨틀포획암의 평형온도와 유사하다(이한영, 1995; Choi *et al.*, 2001; Kil, 2006, 2007).

맨틀포획암인 스피넬 페리도타이트에 적용할 수 있는 지압계는 감람석과 단사휘석의 칼슘 분배를 이용한 Köhler and Brey(1990) 지압계가 유일하나, 감람석 내 낮은 칼슘 농도 문제와, 온도 변화에 칼슘 농도 변화가 민감하므로 지압계로 적용할 수가 없다(Kil, 2002; Kil and Wendlant, 2004). 그러므로 Han and Keehm (1996)의 지열류량 값인 75 mW/m^{2}와 Kim and Li (1998)이 제시한 모호 깊이 30 km를 이용하여 스피넬 페리도타이트의 평형압력, 즉 맨틀포획암이 어느 깊이에서 유래되었는지를 추정하였다(Fig. 3). Fig. 3에서와 같이 스피넬 페리도타이트의 평형온도 값과 이 지역의 지열류량 값을 이용하여 보면, 스피넬 페리도타이트가 지하 약 57~67 km 깊이에서 유래되었음을 알 수 있다. 이 깊이는 이한영(1995)이 Al 용해도를 이용하여 얻은 한반도내 맨틀포획암의 유래 깊이, 42~63 km와 유사하다.

운봉산 현무암내 결정의 정출 온도 및 압력

본 연구에서 운봉산에서 발견된 맨틀포획암만을 한

Table 3. Continued

Rock Name	Alkali Basalt									
Sample No.	KW03		KW04		KW01	KW02	KW03		KW04	
Mineral Name	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl
SiO_2	47.22	48.62	48.50	47.97	51.28	49.75	51.97	52.94	52.92	52.03
TiO_2	3.56	3.10	2.91	2.81	0.11	0.09	0.21	0.17	0.18	0.16
Al_2O_3	6.77	5.39	4.88	5.78	30.00	30.87	30.24	29.56	29.52	29.94
Cr_2O_3	0.30	0.17	0.08	0.39	0.03	-	-	-	0.02	-
FeO	7.46	7.24	7.72	7.31	0.81	0.84	0.74	0.71	0.64	0.52
MnO	0.13	0.12	0.14	0.12	-	0.02	-	-	0.03	0.03
MgO	12.31	12.88	12.89	12.77	-	-	-	-	-	-
CaO	21.98	22.19	21.59	21.93	13.51	13.92	12.98	12.55	12.77	13.17
Na_2O	0.57	0.51	0.54	0.53	3.61	3.56	3.49	4.05	4.02	3.88
K_2O	0.02	0.05	0.01	0.03	0.25	0.29	0.36	0.29	0.36	0.31
Total	100.31	100.26	99.27	99.64	99.60	99.34	99.99	100.27	100.46	100.04
Si	1.760	1.809	1.824	1.797	9.398	9.176	9.457	9.596	9.585	9.474
Ti	0.100	0.087	0.082	0.079	0.015	0.013	0.028	0.023	0.024	0.022
Al	0.297	0.236	0.216	0.255	6.479	6.711	6.486	6.315	6.300	6.424
Cr	0.009	0.005	0.002	0.012	0.004	-	-	-	0.003	-
Fe	0.233	0.226	0.243	0.229	0.124	0.130	0.112	0.107	0.096	0.079
Mn	0.004	0.004	0.004	0.004	-	0.003	-	-	0.005	0.004
Mg	0.685	0.714	0.723	0.714	-	-	-	-	-	-
Ca	0.878	0.884	0.870	0.880	2.653	2.751	2.530	2.436	2.478	2.570
Na	0.041	0.037	0.040	0.038	1.283	1.274	1.231	1.423	1.413	1.368
K	0.001	0.002	0.001	0.001	0.059	0.068	0.084	0.067	0.082	0.071
Total	4.008	4.003	4.005	4.010	20.015	20.126	19.928	19.967	19.986	20.012
Mg#	74.6	76.0	74.9	75.7						
En	38.0	39.1	39.3	39.1						
FS	13.2	12.5	13.4	12.8						
Wo	48.8	48.4	47.3	48.2						
An					67.4	68.3	67.3	63.1	63.7	65.3
Ab					32.6	31.7	32.7	36.9	36.3	34.7

정하여 포획암을 연구하였기에, 고성 지역 알칼리현무암의 마그마 경로 연구는 운봉산 알칼리현무암에 한정하였고, 결정광물의 정출 온도 및 압력도 운봉산 알칼리현무암에 한정하여 추정하였다. 운봉산 알칼리현무암내의 감람석, 단사휘석, 사장석의 정출 온도 및 압력은 전자현미분석기를 이용한 결정의 화학조성을 이용하였다(Table 3).

감람석 정출 온도를 추정하기 위하여 감람석-마그마액을 이용한 지온계가 일반적으로 사용되어진다(Roeder and Emslie 1970; Langmuir and Hanson 1981; Putirka 2005a). 이러한 지온계들 중에서 H_2O, CO_2의 함량과 높은 Fo 조성을 고려하여 만들어진 Putirka (2005a)의 지온계를 이용하여 운봉산 알칼리현무암내의 감람석 정출 온도를 계산하였다. 정출 온도를 계산하기 전에 1) 알칼리현무암의 전암분석치가 마그마액의 성분을 대표하며, 2) 정출된 감람석과 마그마액이 평형상태에 있었다는 가정 하에 지온계를 사용하였다. 그러므로 알칼리현무암은 실체현미경을 통해 알칼리현무암내 반정 및 포획결정을 제거한 후 분석하였다. Putirka(2005a)의 지온계를 이용하여 얻은 감람석의 정출 온도 범위는 1367~1446°C이다(Table 4).

단사휘석의 정출온도와 압력(깊이)은 단사휘석-마그마액 지온지압계(Putirka *et al.*, 2003)를 이용하여 계산하였다. 이 지온지압계 또한 위의 감람석-마그마액 지온계와 같은 가정 하에서 이용되었다. 이 지온지압계를 통해 얻어진 운봉산 알칼리현무암내의 단사휘석의 정출온도와 압력의 범위는 각각 1235~1270°C와 11~15 kb이다(Table 4). 단사휘석의 정출온도 범위는 감람석

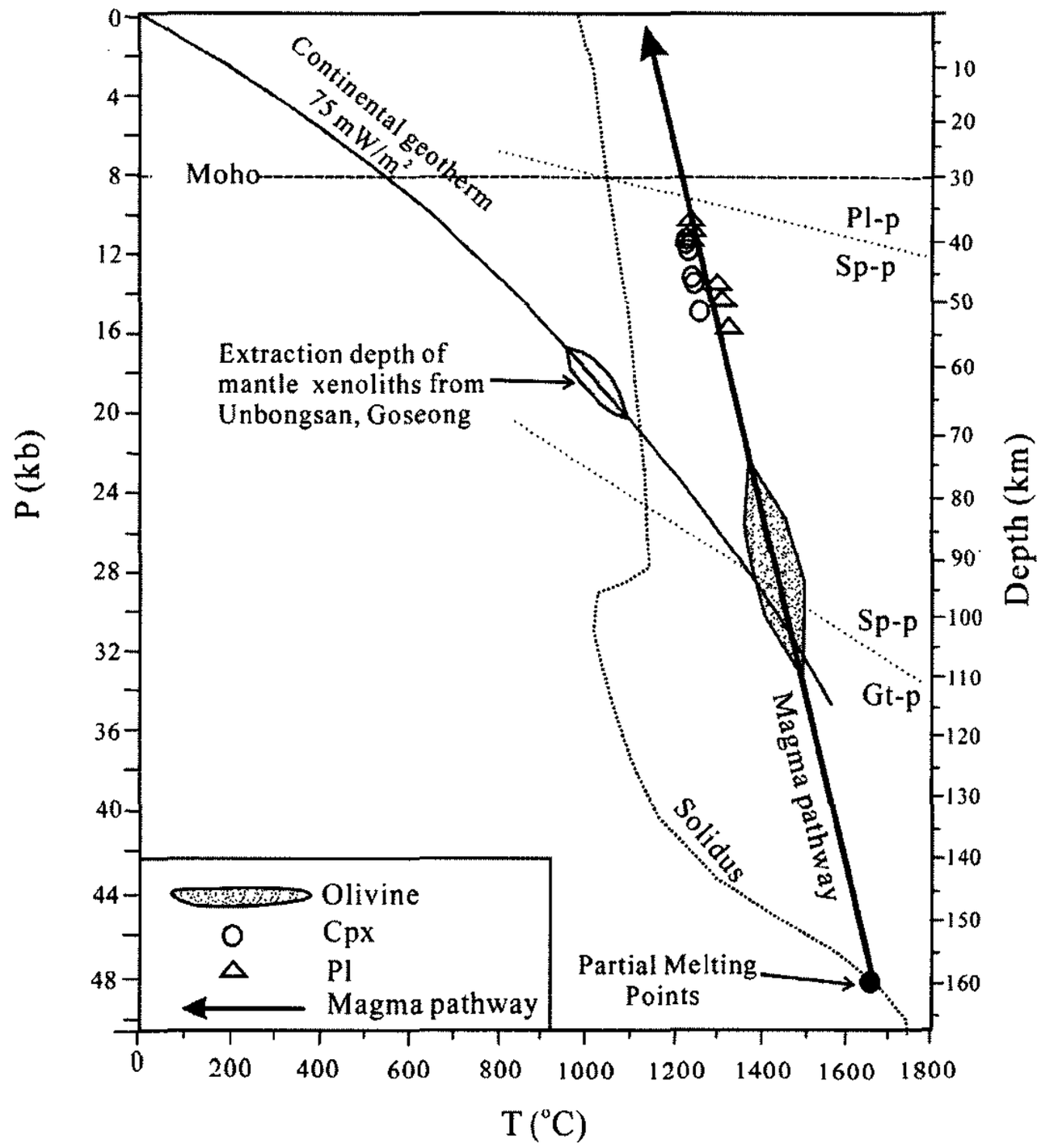

Fig. 3. Crystallization temperature and pressure (depth) conditions of olivine, clinopyroxene, and plagioclase in Unbongsan alkali basalt. Pressures and temperatures are determined by using Putirka *et al.* (2003), Putirka (2005a), and Putirka (2005b). The crust thickness is estimated to be 30 km (Kim and Li 1998). Heat flow around Goseong is 75 mW/m^2 (Han and Keehm 1996) and continental geothermal gradient is based on Pollack and Chapman (1977). Solidus line is from Green and Falloon (1998). Pl-p, Sp-p, and Gt-p are plagioclase, spinel, and garnet peridotites, respectively. Cpx and Pl are clinopyroxene and plagioclase, respectively.

의 정출온도 범위에 비하여 낮다. 이는 마그마방내에서 감람석이 단사휘석 보다 먼저 정출되었음을 의미한다.

운봉산 알칼리현무암내의 사장석의 정출온도 및 압력(깊이)을 계산하기 위하여 Putirka(2005b)의 사장석-마그마액 지온지압계를 이용하였으며, 위에서 언급된 동일한 가정을 두었다. 운봉산 알칼리현무암내의 사장석의 정출온도와 압력의 범위는 각각 1245~1340°C 와 11~16 kb이다(Table 4). 사장석 정출온도와 압력은 단사휘석 정출온도와 압력과 유사하며, 사장석 정출온도는 감람석 정출온도에 비하여 낮다.

감람석 정출압력(깊이)을 유추하기 위한 적합한 지압계가 없으므로, 감람석의 정출압력은 단사휘석 및 사장석의 정출온도 및 압력치를 이용하여 얻어진 선형회기 분석곡선을 이용하여 유추하였다(Fig. 3). 결과적으로 Fig. 3에서와 같이 마그마방내에서 감람석이 처음 정출한 후에 단사휘석과 사장석이 유사한 시기에 정출되었다.

결론 및 토의

근원 맨틀물질

상부맨틀암석은 광물조성과 평형온도 및 압력(깊이)에 따라 사장석 페리도타이트, 스피넬 페리도타이트, 석류석 페리도타이트 순으로 크게 구분 된다. 고정선과 윤성효(2005)는 고성지역 현무암에서 나타나는 HREE에 비하여 LREE가 부화되는 현상은 이 지역 현무암의 근원마그마가 석류석을 가지는 맨틀근원물질이 비교적 적은 부분용융에 의하여 형성되었다고 언급했다.

오랜 지질시대를 통해 원시맨틀은 결핍과 부화작용을 받았다. 즉, 상부맨틀은 맨틀이 형성된 후 계속적인 마그마 형성에 의하여 맨틀결핍작용을 받기도 하였고, 맨틀교대작용에 의하여 맨틀부화작용을 받기도 하였다. 그러므로 맨틀암석은 지화학적 과정과 화학조성의 특징에 따라 원시맨틀(primitive mantle), 부화맨틀(enriched mantle), 그리고 결핍맨틀(depleted MORB

Table 4. Crystallization temperature and pressure data for olivine, clinopyroxene, and plagioclase in Unbongsan alkali basalts, Goseong. Geothermobarometries are from Putirka (2005a), Putirka *et al.* (2003), and Putirka (2005b), respectively. Ol = olivine, Cpx = clinopyroxene, and Pl = plagioclase

Sample No.	KW01					
Mineral Name	Ol			Cpx		Pl
T (°C)	1410	1446	1418	1235	1255	1256
P (kb)				11	13	11
Sample No.	KW02					
Mineral Name	Ol		Cpx		Pl	
T (°C)	1413	1438	1270	1261	1250	
P (kb)			15	13	11	
Sample No.	KW03					
Mineral Name	Ol		Cpx		Pl	
T (°C)	1392	1406	1258	1247	1245	1310
P (kb)			12	11	10	14
Sample No.	KW04					
Mineral Name	Ol	Cpx		Pl		
T (°C)	1367	1253	1254	1340	1318	
P (kb)		12	12	16	14	

mantle)로 구분된다.

고성 지역 알칼리현무암들의 마그마가 어떠한 맨틀에서 유래하였고, 어느 정도 부분용융을 받았는지 알아보기 위해 La과 La/Sm비를 이용하였다(Fig. 4). 부분용융정도는 non-modal melting 모델을 이용하였다(Shaw 1979). 광물 및 멜트조성은 각각 $Ol_{0.60}+Opx_{0.20}+Cpx_{0.10}+Gt_{0.10}$과 $Ol_{0.08}+Opx_{0.14}+Cpx_{0.53}+Gt_{0.25}$로 가정하였으며(Walter 1998; Donnelly *et al.* 2004), 맨틀암석내 결정의 분배계수는 Halliday *et al.*(1995)의 값을 이용하였다. Shaw(1979)의 계산식에서 얻은 값을 이용한 결과, Fig. 4에서와 같이 고성 지역 알칼리현무암들을 형성한 마그마는 결핍된 석류석 페리도타이트의 0.2~2%의 용융에 의하여 형성되었음을 알 수 있다.

고성과 비슷한 시기에 분출한 아산 및 평택 지역 현무암류는 부화된 석류석 페리도타이트가 근원맨틀물질이나, 고성 운봉산 알칼리현무암은 결핍된 석류석 페리도타이트가 근원맨틀물질이 된다(길영우 외 2006). 이는 마이오세에 한반도 하부 맨틀의 지화학적 특성이 지역에 따라 차이가 있을 가능성이 있음을 의미한다.

운봉산 알칼리현무암의 마그마 경로

Fig. 3에서와 같이 결핍된 석류석 페리도타이트에서 유래된 마그마가 형성된 깊이를 추정하기 위하여 현무암내의 감람석, 단사휘석, 사장석의 정출 온도 및 압력들과, 맨틀암석의 고상선(solidus line)을 이용하였다(Green and Fallon 1998). 마그마방내의 결정의 정출온도 및 압력 값을 이용하여 얻어진 선형회기 분석곡선과 고상선이 만나는 곳을 초기 마그마의 형성 깊이로 생각한다면, 운봉산 알칼리 현무암은 Fig. 3에서와 같이 약 160 km 깊이에서 유래되었음을 알 수 있다. 이 깊이는 석류석 페리도타이트가 존재할 수 있는 깊이로(Fig. 3), 고성지역 알칼리현무암이 석류석 페리도타이트라는 맨틀 물질에서 기원했다는 것을 뒷받침해 준다.

운봉산 알칼리현무암내 결정들의 정출온도 및 압력을 바탕으로 약 160 km 지하에서 형성된 마그마는 빠른 속도로 지표로 올라오는 과정에서 약 40~52 km 깊이에서 단사휘석을, 약 37~54 km 깊이에서 사장석을 정출하였고, 감람석은 이 보다 깊은 약 75~110 km 깊이에서 정출하였다(Fig. 3). 지각과 맨틀사이의 밀도차가 있음에도 불구하고, 고성지역 현무암에 정출광물 대부분이 지각의 깊이에서는 정출 되지 않았음은, 현무암의 근원 마그마가 지각과 맨틀 사이의 모호면에 정체하는 시간이 적었다는 것을 의미한다. 이는 마그마가 지표에 올라오는 속도가 상대적으로 빨랐음을 의미한다.

지온계를 이용하여 계산된 운봉산 알칼리현무암의 맨틀포획암인 스피넬 페리도타이트의 평형 온도와 이 지역의 지온구배를 이용하여 유추한 스피넬 페리도타

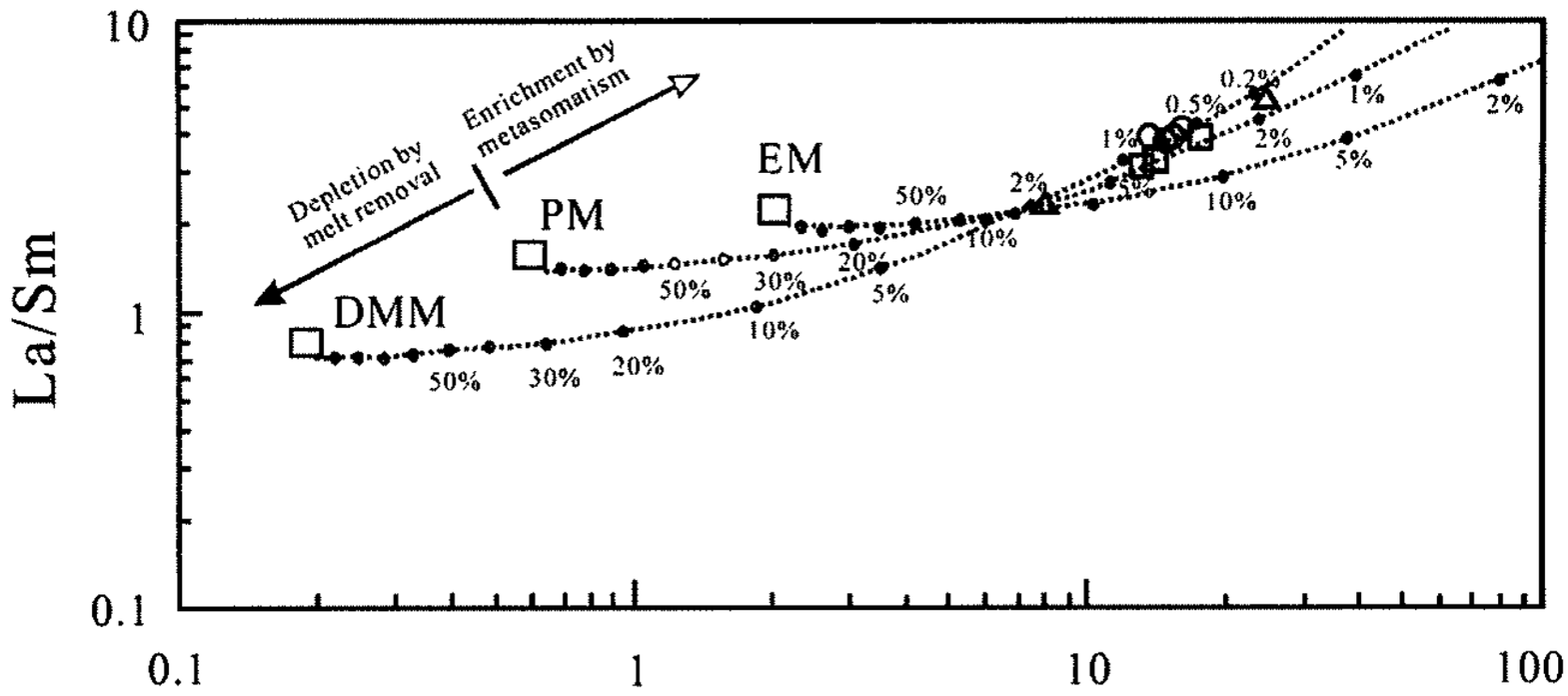

Fig. 4. Plots of La (ppm) vs. La/Sm to determine source mantle and degree of partial melting, based on non-modal batch melting. Melt curves are drawn for garnet lherzolite with mineral mode and melt mode of $Ol_{0.60}$+ $Opx_{0.20}$+ $Cpx_{0.10}$+ $Gt_{0.10}$ and $Ol_{0.08}$+ $Opx_{0.14}$+ $Cpx_{0.53}$+ $Gt_{0.25}$, respectively (Walter 1998; Donnelly *et al.* 2004). Distribution coefficients of mantle phases are from Halliday *et al.* (1995). PM, DMM, and EM compositions are from Hofmann (1988), Workman and Hart (2005), and Shin *et al.* (2006). Open circles, open triangles, and open squares indicate Unbongsan, Duibaejae, Gosengsan Alkali Basalts, respectively. PM = primitive mantle, DMM = depleted MORB mantle, and EM = enriched mantle.

이트의 평형 깊이는 지하 약 57~67 km이다(Fig. 3). 이 평형 깊이는 마그마가 지표에 올라오는 과정에서 지하 약 57~67 km에서 맨틀암석을 포획하였다는 것을 의미한다. 운봉산 알칼리현무암내의 맨틀포획암이 마그마 속에서 용융되지 않고 지표에 올라올 수 있었다는 것은 마그마가 지표에 빠르게 올라왔다는 것을 의미한다.

결과적으로 강원도 고성지역 운봉산 알칼리현무암을 형성한 마그마는 지하 160 km에서 결핍된 석류석 페리도타이트의 0.2~2%의 부분용융에 의하여 형성되었고, 마그마가 지표에 올라오는 과정에서 지하 57~67 km 깊이에서 스피넬 페리도타이트라는 맨틀암석을 포획하였으며, 단사휘석을 약 40~52 km 깊이에서, 사장석을 약 37~54 km 깊이에서, 감람석을 약 75~110 km 깊이에서 정출하여 지표에 올라왔다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지구과학 대중화 전시 컨텐츠 개발(07-3412-21)' 과제의 일환으로 수행되었다. 논문을 상세히 검토하여 주신 한국지질자원연구원의 이한영 박사님과 익명의 심사위원께 감사를 드립니다.

참고문헌

고정선, 윤성효, 2005, 강원도 고성군 일대의 후기 마이오세 현무암의 암석학적 연구. 지구과학회지, 26, 78-92.

길영우, 이석훈, 2005, 백령도와 보은 지역의 상부맨틀암석내의 단사휘석의 지화학적 특징. 한국광물학회지, 18, 63-74.

길영우, 신홍자, 진명식, 박명호, 2006, 아산, 평택 지역 화산암의 지화학적 특징. 대한자원환경지질학회 춘계 학술발표회 논문집, 493.

김윤규, 이대성, 송윤규, 김선억, 1988, 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. 지질학회지, 24, 57-66.

나기창, 이문원, 1987, 백령도의 지질. 자연실태 종합보고서, 7, 33-48.

박준범, 박계현, 1996, 한반도 중부의 신생대 알칼리 화산암류에 대한 암석학 및 암석성인적 연구(I): 암석기재, 광물화학 및 전암 주성분원소. 지질학회지, 32, 223-249.

이동영, 1996, 백령도, 조곡리, 제주, 한탄강, 울릉도, 아산 일대의 신제3기 및 제4기 화산암의 K-Ar 연대. 한국동력자원연구소 연구보고서.

이문원, 1984, 제주화산암류에 함유된 mafic 포획암. 지질학회지, 20, 306-313.

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

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

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

한국지질자원연구소, 1995, 한국 심성암 동위원소 연대지도 (1/1,000,000).

Abe, N., Arai, S. and Yurimoto, H., 1998, Geochemical

characteristics of the uppermost mantle beneath the Japan island arcs: implications for upper mantle evolution. Physics of Earth and Planetary Interiors, 107, 233-248.

Arai, S., Kida, M., Abe, N. and Yurimoto, H., 2001, Petrology of peridotite xneoliths in alkali basalt (11Ma) form Boun, Korea: an insight into the upper mantle beneath the East Asian continental margin. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 96, 89-99.

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 and Planetary Science Letters, 76, 109-22.

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

Choi, S-H., 2000, Oxidation state of mantle xenoliths from Jeju-do, South Korea. Geoscience Journal, 4, 211-220.

Choi, S-H. and Kwon, S-T., 2005, Mineral chemistry of spinel peridotite xenoliths from Baenganyeong Island, South Korea, and its implications for the paleogeotherm of the uppermost mantle. The Island Arc, 14, 236-253.

Choi, M-S., Cheong, C-S. and Park, K-H., 1994, An experimental study on the trace element analysis of rock samples with regard to the decomposition method. The Journal of the Petrological Society of Korea, 3, 41-48.

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. The 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. The Island Arc, 11, 221-235.

Donnelly, K.E., Goldstein, S.L., Langmuir, C.H. and Spiegelman, M., 2004, Origin of enriched ocean ridge basalts and implications for mantle dynamics. Earth and Planetary Science Letters, 226, 347-366.

Droop, G.T.R., 1987, A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. Mineralogical Magazine, 51, 431-435.

Green, D.H. and Falloon, T.J., 1998, Pyrolite: A Ringwood concept and its current expression. In The earth's mantle: composition, structure, and evolution (ed. I. Jackson), Cambridge university press, Cambridge, 311-378.

Halliday, A.N., Lee, D-C., Tommasini, S., Davies, G.R., Paslick, C.R., Fitton, J.G. and James, D.E., 1995, Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichement in the sub-oceanic mantle. Earth and Planetary Science Letters, 133, 379-395.

Han, U. and Keehm, Y., 1996, A study on the heat flow distribution in the Korean peninsula and its vicinity. Jouranl of Geological Society of Korea, 32, 267-275.

Harte, B., 1977, Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallization textures in olivine-bearing xenolith. Journal of Geology, 85, 279-288.

Hofmann, A.W., 1988, Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. Earth and Planetary Science Letters, 90, 297-314.

Kim, S.G. and Li, Q., 1998, 3-D Crustal Velocity Tomography in the Southern part of the Korean peninsula. Journal of Korea Society of Economic and Environmental Geology, 31, 127-139.

Kim, K.H., Nagao, K., Tanaka, T., Sumino, H., Nakamura, T., Okuno, M., Lock, J.B., Youn, J.S. and Song, J., 2005, He-Ar and Nd-Sr isotopic compositions of ultramafic xenoliths and host alkali basalts from the Korean peninsula. Geochemical Journal, 39, 341-356.

Kil, Y., 2002, Mantle evolution associated with the Rio Grande rift: geochemistry and geothermobarometry of upper mantle xenoliths, Ph.D. dissertation, Colorado School of Mines, 160p.

Kil, Y. and Wendlandt R.F., 2004, Pressure and temperature evolution of upper mantle under the Rio Grande Rift. Contributions to Mineralogy and Petrology, 148, 265-280.

Kil, Y., 2006, Characteristics of subcontinental lithospheric mantle beneath Baegryeong Island, Korea: spinel peridotite xenoliths. The Island Arc, 15, 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 a geothermobarometer for natural lherzolites from 2 to 60 kb with applications. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, 2375-2388.

Langmuir, C.H. and Hanson, G.N., 1981, Calculating mineral-melt equilibria with stoichiometry, mass balance, and single component distribution coefficients. In Thermodynamics of Minerals and Melts (ed. R.C. Newton, A. Navrotsky, B.J. Wood), Springer, New York, 247-271

Lee, D.S., 1980, Igneous activity and geotectonic interpretation in the Ogcheon geosynclinal zone, Korea-especially referred to ophiolite determination. Yeonsei Nonchong, 17, 109-137.

Mercier, J.C. and Nicolas, A., 1975, Texture and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. Journal of Petrology, 16, 454-487.

Pollack, H.N. and Chapman, D.S., 1977, On the regional variation of heat flow, geotherms and lithospheric thickness. Tectonophysics, 38, 279-296.

Putirka, K.D., Mikaelian, H., Ryerson, F. and Shaw, H., 2003, New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lava from Tibet and the Snake River

Plain, Idaho. American Mineralogist, 88, 1542-1554.
Putirka, K.D., 2005a, Mantle potential temperature at Hawai, Iceland, and the mid-ocean ridge system, as inferred from olivine phenocrysts: evidence for thermally driven mantle plumes. Geochemistry Geophysics Geosystems, 6, Q05L08, DOI 10.1029/2005GC000915
Putirka, K.D., 2005b, Igneous thermometers and barometers based on plagioclase+liquid equilibria: Tests of some existing models and new calibrations. American Mineralogist, 90, 336-346.
Roeder, P.L. and Emslie, R.F., 1970, Olivine-liquid equilibrium. Contributions to Mineralogy and Petrology, 29, 275-289.
Shaw, D.M., 1979, Trace element melting models. Physics and chemistry of the Earth, 11, 577-586.
Shin, H-J., Kil, Y., Jin, M-S. and Lee, S-H., 2006, Petrological study on upper mantle xenoliths from Asan and Pyeongtaek area. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 95-113.
Walter, M.J., 1998, Melting of garnet peridotite and the origin of komatite and depleted lithosphere. Journal of Petrology, 39, 29-60.
Wood, B.J. and Banno, S., 1973, Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene- clinopyroxene relationships in simple and complex systems. Contributions to Mineralogy and Petrology, 42, 109-124.
Workman, R.K. and Hart, S.R., 2005, Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). Earth and Planetary Science Letters, 231, 53-72.

(2007년 10월 22일 접수; 2007년 11월 28일 채택)