강원도 고성 뒤편재 화산암의 암석화학적 특성

김화성¹ · 길영우^{2,*} · 이문원³

¹태백기계공업고등학교, 235-100, 강원도 태백시 평화길 8-24

²전남대학교 에너지자원공학과, 500-757, 광주광역시 북구 용봉로 77

³강원대학교 사범대학 과학교육학부, 200-701, 강원도 춘천시 강원대학길 1

Petrochemical Characteristics of the Duibaejae Volcanic Rocks from Goseong, Gangwon-do, Korea

Hwa Sung Kim¹, Youngwoo Kil^{2,*}, and Moon Won Lee³

¹Taebaek Mechanical Technical High School, Gangwon 235-100, Korea

²Department of Energy and Resources Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

³Division of Science Education, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

Abstract: Duibaejae basalts from Goseong, Gangwon-do, are divided into the lower basalt and the upper basalt depending on the properties, such as occurrence, mineral compositions, and major and trace compositions of the basalts. The lower basalts have characteristics of agglomerate rocks as well as contain, crustal and mantle xenoliths, and olivine, pyroxene, and plagioclase xenocrysts. The upper basalts with columnar joints contain relatively more mantle xenolith and olivine xenocryst than the lower basalts. The major and trace element compositions suggest that the composition of the upper basalts is close to primary magma composition. Enrichment and depletion patterns of the trace and the rare-earth elements of the lower basalts are similar to those of the upper basalts, whereas the lower basalts are more LREE enriched than the upper basalts. The source magmas of the lower and upper basalts from Duibaejae volcanic edifice were generated from about 0.8-1.2% and 3.7-4.0% batch melting of garnet peridotite, respectively. The abundance of granite xenolith, and plagioclase and quartz xenocrysts with reaction rim indicates that the lower basalts, compared with upper basalts, might have been assimilated with the crustal materials during ascending to surface.

Keywords: Duibaejae volcanic edifice, garnet peridotite, batch melting, magma

요약: 강원도 고성 뒤편재 현무암은 산출상태, 구성광물, 주성분원소 및 미량원소의 특징에 의해 하부 현무암과 상부 현무암으로 구분된다. 하부 현무암은 집괴암의 특징을 보이고, 맨틀 및 지각기원의 포획암과 감람석, 휘석, 사장석 포획광물이 있다. 상부 현무암은 주상절리로 산출되며, 맨틀 포획암이 상대적으로 더 많고, 포획광물로는 감람석이 우세하다. 현무암의 주성분원소 및 미량원소 분석 결과 상부 현무암은 하부 현무암에 비하여 초생 마그마에 가까운 조성을 보인다. 원시 맨틀로 표준화한 미량원소 및 희토류원소의 부화 및 결핍 패턴은 두 현무암이 매우 유사하나, 하부 현무암이 상부 현무암보다 LREE의 부화 정도가 더 크다. 뒤편재 화산체의 하부 현무암은 약 0.8-1.2%, 상부 현무암은 약 3.7-4.0%의 동일한 맨틀 물질인 석류석 페리도타이트의 배취 용융으로 형성되었다. 그리고 하부 현무암내의 포획된 화강암, 포획광물의 반응연 및 사장석, 석영 등의 포획광물은 하부 현무암을 형성한 마그마와 지각물질과의 동화 가능성을 지시한다.

주요어: 뒤편재 화산체, 석류석 페리도타이트, 배취 용융, 마그마

*Corresponding author: ykil@jnu.ac.kr

Tel: +82-62-530-1731

Fax: +82-62-530-1729

서론

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

강원도 고성에는 후기 마이오세에 분출한 8개의 크고 작은 화산체들이 기반암인 중생대 화강암위에 플러그 돔형으로 분포하고 있다. Kim et al.(2012)는 고성군 죽왕면 오봉리 일대에 타원형으로 밀집되어

분포하는 뒤배재, 갈미봉, 102 m 고지, 166 m 고지, 오음산 및 249 m 고지의 화산체들을 오봉리 화산체군 이라 명명하였다(Fig. 1). 오봉리 화산체군을 중심으로 북서쪽으로는 고성산 화산체와 남쪽으로는 운봉산 화산체가 분포한다.

고성 지역의 현무암은 여러 연구자에 의해 연구된 바 있다(Lee et al., 1993; Lee, 1995; Park and Park, 1996; Cho et al., 1998; Koh and Yun, 2005; Kil et al., 2007; Kim et al., 2010; Song et al., 2011; Choi, 2012; Kim et al., 2012). Park and Park(1996)은 오봉리 화산체군을 이루는 뒤배재, 갈미봉, 166 m 고지와 운봉산 화산체의 현무암에서 주성분의 차이가 있는 것을 근거로, 이 지역에서의 화산암을 두 개의 그룹으로 나누고, 이곳의 마그마 성인이 다양하였음을 지적하였다. 특히 뒤배재 화산체에서 Sr 동위원소비의 값을 근거로 현무암을 상부 현무암과 하부 현무암으로 구분하고, 이곳의 마그마가 서로 다른 모 마그마로부터 분화하였거나, 마그마가 성인과 관련된 맨틀에서의 과정이 단순하지 않았음을 지적하였다. Koh and Yun(2005)는 이곳의 화산체를 열점으로 보고, 마그마가 석류석 페리도타이트의 부분용융에 의해 형성되었다고 해석하였다. 그리고 Kil et al. (2007)는 운봉산 화산체의 마그마가 깊이 약 160 km에서 결핍된 석류석 페리도타이트가 0.2-2%의 부분용융되어 형성된 것으로 해석하였다. Kim et al. (2012)는 오봉리 화산체군을 이루는 화산들을 화성쇄설층의 유무에 따라 다시 나누었다.

이와 같이 고성 일대에 분포하는 화산들에 대한 연구는 많았지만, 뒤배재 화산체의 마그마 성인에 대한 암석화학적 연구는 제대로 이루어지지 않았다. 이 연구의 목적은 오봉리 화산체군의 하나인 뒤배재 화산체를 중심으로 주성분, 미량성분 및 희토류 분석을 통하여 뒤배재 화산체를 형성한 마그마의 지화학적 특성과 기원을 고찰하는데 있다. 이 연구는 한반도에서의 신생대 화산활동의 암석화학적 특징을 밝히는데 기초자료가 될 것으로 판단된다.

뒤배재 화산

산출상태

뒤배재 화산체는 기반암인 중생대 화강암 위에 직경이 약 475 m, 높이가 약 70 m인 플러그 돔 형태이며, 지질은 하부로부터 화성쇄설층과 현무암의 순으로 이루어져 있다(Figs. 2a and 2b). 화성쇄설층은 두께가 약 3-6 m 범위이며, 기질은 석영과 장식 및 세립의 스크리아로 이루어졌고, 크기가 약 23 cm인 화강암편과 다공질의 스크리아 암편의 역이 있다(Kim et al., 2012). 화성쇄설층 위에는 현무암이 직접 접하고 있으며, 두께 약 65 m로 정상까지 분포하고 있다. 이 현무암은 화산체의 경사도와 표면 상태, 조직 및 암석화학적 차이에 따라 하부 현무암과 상부 현무암으로 구분된다. 하부현무암은 완만한 경사도(20°-30°)를 이루고 있고, 상부현무암은 경사가 약 45°로서 상대적으로 크다. 하부 현무암은 두께가 약 40 m이고 표면이 둥글거나 유동적인 형태의 집괴암 특성을 보이며(Fig. 2c), 상부 현무암은 전체 두께가 약 25 m이며, 주상절리로 산출된다(Fig. 2d). 또한 뒤배재 화산체의 정상부에는 주상절리의 풍화로 인하여 직경 90-120 cm 구형의 현무암이 분포하고 있다(Fig. 2e).

암석기재

뒤배재 화산체의 하부 현무암과 상부 현무암의 암석기재는 Table 1과 같다. 하부 현무암에는 맨틀암, 하부지각 기원의 반려암류 및 기반암인 화강암이 포획암으로 산출되나 빈도는 높지 않다. 그리고 포획광물에는 거정의 감람석, 휘석, 불투명광물 및 사장석

Table 1. Feature of Duibaekae basalts

type	xenolith	xenocryst	phenocryst	reaction rim	matrix
upper-basalt	mantle xenolith (++)	olivine (+++) pyroxene (++) opaque (+) plagioclase (-)	olivine pyroxene plagioclase opaque	-	olivine pyroxene plagioclase opaque
	mantle xenolith (+) granitic xenolith (-) gabbroid xenolith (-)	olivine (++) pyroxene (+++) opaque (+) plagioclase (-) quartz (-)	olivine pyroxene plagioclase opaque	++	olivine pyroxene plagioclase opaque

Relative frequency: +++ (abundant), ++ (normal), - (rare)

Fig. 1. A geology map of the Goseong area, showing the sampling site of Duibaejae basalts. Obongri volcanic edifice group consists of Duibaejae, Galmibong, 102 m height, 166 m height, Oeumsan, and 249 m height volcanic edifice.

Fig. 2. (a) Geological cross-section of Duibaejae volcanic edifice, (b) outcrop of pyroclastic deposit, (c) an enlarged photo of lower basalt, (d) columnar joint of upper basalt, and (e) spherical basalt on top of the Duibaejae volcanic edifice.

등이 있으며, 휘석의 양이 우세하다. 포획광물은 대부분이 길쭉하거나 각진 형태이며, 감람석과 사장석 포획광물은 타원형이다. 포획광물의 일부는 외연부가 액과 반응한 반응연을 보이기도 한다(Fig. 3a). 하부 현무암층에서 위쪽으로 갈수록 화강암 포획암의 양이 많아진다. 특히 감람석이 변질된 이딩사이트(iddingsite)가 현저하고(Fig. 3b), 1 cm 크기의 석영도 종종 관찰된다(Fig. 3c). 상부 현무암에서 지각기원의 포획암은 거의 관찰되지 않고, 맨틀 포획암은 약간 산출하며, 맨틀 포획암 내에는 적갈색의 스피넬이 있다(Fig. 3d). 포획광물로는 감람석, 휘석, 불투명 광물 및 사장석이 있고, 감람석의 양이 우세하다. 상부 현무암에서는 이딩사이트와 석영은 관찰되지 않으며, 포획광물은 매우 신선하며 외연부의 반응연이 거의 없다. 뒤편재 화산체의 하부 현무암과 상부 현무암의 반정과 석기는 감람석, 휘석, 사장석 및 불투명 광물로 거의 유사하다.

Fig. 3. Photomicrographs of (a) olivine in lower basalt showing the reaction rim, (b) iddingsite in lower basalt, (c) quartz xenocryst in lower basalt, and (d) mantle xenolith of upper basalt from the Duibaejae volcanic edifice. Ol=olivine, S=spinel, Q=quartz.

Table 2. Major element analyses (wt%) of Duibaekjae basalts

Sample	Lower basalt														Upper basalt	
	DL 1-1	DL 1-2	DL 2-1	DL 2-2	DL 3-1	DL 3-2	DL 4-1	DL 4-2	DL 5-1	DL 5-2	DL 6-1	DL 6-2	DL 7-1	DL 7-2	DU 1-1	DU 1-2
SiO ₂	47.50	47.60	48.10	48.20	47.70	47.50	47.60	47.40	46.70	46.50	48.50	48.20	47.70	47.80	45.00	45.20
TiO ₂	2.12	2.12	2.18	2.18	2.11	2.12	2.12	2.11	2.22	2.20	2.11	2.09	2.01	2.01	2.15	2.14
Al ₂ O ₃	16.50	16.60	16.6	16.40	16.00	16.20	16.60	16.80	16.50	16.30	17.00	16.70	16.50	16.60	15.80	15.60
Fe ₂ O ₃ ^T	10.20	10.30	10.00	10.00	10.40	10.20	10.90	10.70	10.60	10.60	10.30	10.30	10.10	10.00	10.80	10.70
MnO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16
MgO	7.08	7.13	7.01	7.11	7.64	7.71	6.84	6.88	7.12	7.06	3.95	3.98	7.11	7.00	10.60	10.70
CaO	9.33	9.31	9.23	9.21	9.60	9.52	9.28	9.21	9.47	9.40	9.28	9.32	9.27	9.15	11.40	11.30
Na ₂ O	2.85	2.93	3.10	3.15	3.43	3.45	3.55	3.47	2.68	2.61	3.54	3.60	2.74	2.72	2.34	2.39
K ₂ O	2.21	2.22	2.19	2.20	0.83	0.84	0.58	0.57	1.15	1.14	0.96	0.96	2.01	2.01	0.74	0.72
P ₂ O ₅	0.57	0.58	0.56	0.55	0.53	0.54	0.61	0.62	0.69	0.69	0.60	0.60	0.60	0.60	0.30	0.29
L.O.I	1.41	1.38	0.63	0.63	1.31	1.27	1.55	1.56	2.76	2.77	2.88	2.89	1.69	1.72	0.29	0.30
Total	99.94	100.00	99.77	99.80	99.72	99.52	99.81	99.50	100.00	99.44	99.27	98.80	99.90	99.78	99.59	99.50

Fe₂O₃^T as total Fe

암석화학

시료채취 및 분석

뒤배재 화산체의 현무암의 시료채취 위치는 Fig. 1과 같다. 전암 분석을 위하여 암석절단기를 이용해 약 1 cm³ 정도 크기의 암편을 제작하였다. 또한 풍화와 변질의 영향을 최소화하기 위하여 가능한 큰 시료의 안쪽 부분을 이용하였다. 암편은 니켈 몰타르(nickel mortar)와 체를 이용하여 0.5-1 mm 크기로 선별한 후, 실체현미경하에서 포획암과 포획결정 등을 제거하였다. 다시 니켈 몰타르를 이용하여 분말로 제작하여 전암 주성분 원소를 한국기초과학지원연구원(서울센터)의 X-선 형광분석기(WD-XRF; Phillips PW2404)로 분석하였다. 현무암의 전암 미량원소와 희토류원소는 한국기초과학지원연구원(오창센터)에서 원소 농도가 낮은 원소는 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS; Thermo Elemental X7)를 이용하였고, 원소 농도가 높은 원소는 유도결합플라즈마 원자방출 분광기(ICP-AES; Perkin Elmer Optima 4300DU)를 이용하여 분석하였다. 미량원소 및 희토류원소의 분석 정밀도는 10% 보다 낮다.

주성분원소

뒤배재 현무암의 주성분 값은 Table 2와 같다. SiO₂ 성분은 하부 현무암(46.50-48.50 wt%)이 상부 현무암(45.00-45.20 wt%) 보다 높으며, 하부 현무암과 상부 현무암은 MgO, CaO 및 P₂O₅ 성분에서 뚜렷한 차이를 보인다. 전체적으로 MgO의 범위는 3.95-

10.70 wt%이며, 하부 현무암의 일부(시료 DL6-1과 DL6-2)는 3.95-3.98 wt%이며, 나머지 시료는 6.84-7.71 wt% 값을 보인다. 상부 현무암은 MgO 성분이 10.70 wt%로 하부 현무암보다 크다. CaO 값은 전체적으로 9.21-11.40 wt%이고, 상부 현무암(11.40 wt%)이 하부 현무암(9.21-9.60 wt%)보다 높다. P₂O₅ 성분은 하부 현무암(0.53-0.69 wt%)이 상부 현무암(0.29-0.30 wt%)보다 약 2배 큰 것이 특징이다.

뒤배재 현무암의 MgO 성분에 대한 주성분원소 변화는 Fig. 4와 같다. 하부 현무암의 경우 MgO 성분이 감소함에 따라 Al₂O₃, SiO₂, Na₂O, P₂O₅는 증가하고, MnO는 감소하며, CaO, Fe₂O₃^T, TiO₂, K₂O는 변화가 없거나 분산된다. 상부 현무암은 MgO의 함량이 하부 현무암에 비하여 일정하고 높아, MgO의 함량 변화에 따른 주성분원소의 변화를 알 수가 없다(Fig. 4). 일반적으로 알칼리 현무암질 마그마가 결정 작용을 할 때 주요 광물인 감람석, 단사회석, 사장석과 무관한 원소들은 증가하는 경향을 보인다. 하부 현무암에서 MgO 성분의 감소에 따른 Al₂O₃ 값의 증가는 하부 현무암을 형성한 마그마의 분화에서는 사장석이 주요 정출광물이 아니었음을 의미한다. 상부 현무암을 형성한 마그마는 MgO 함량이 많은 것으로 보아 사장석 정출이 많지 않았을 가능성이 크다.

미량원소

뒤배재 현무암의 미량원소 분석 결과는 Table 3과 같다. Ni은 하부 현무암(97.1-128 ppm)이 상부 현무암(284 ppm) 보다 낮다. 또한 Cr은 하부 현무암(250-

Fig. 4. Harker variation diagram of major oxide (wt%) vs. MgO of Duibaejae basalts. ■: Duibaejae upper basalt, □: Duibaejae lower basalt.

399 ppm)이 상부 현무암(553 ppm) 보다 약 2배 작다. 하부 현무암은 초생마그마의 Ni, Cr 함량(Ni, 250-300 ppm; Cr, 500-600 ppm; Green, 1980)에 비해서 낮으나, 상부 현무암은 초생마그마 값과 유사하다. 이는 상부 현무암이 높은 MgO 값으로 초생마그마에 가까운 Ni, Cr 값을 가지는 것과 일치한다.

현무암의 미량성분 원소 조성을 원시맨틀(Taylor and McLennan, 1985)값으로 표준화한 거미 성분도(spider diagram)는 Fig. 5a와 같다. 뒤편재 화산체의 현무암은 전체적으로 LIL(large ion lithophile)인 Ba, Rb 등의 원소와 Th, Nb 등의 불호정성 원소가 부화되었고, 석류석에 호정적인 Y로 가면서 점점 감소한다. 특히 Cr, Ni은 원시맨틀에 비해 매우 결핍되었다. 이는 감람석과 단사회석의 분별결정에 의한 것으로 해석된다. 하부 현무암은 상부 현무암에 비해, 불호정 원소와 LIL 원소의 함량이 더 부화되어 있는 특징을 보이고, Tb, Y, V, Zn 등의 함량은 유사하다.

희토류원소

뒤편재 현무암의 희토류 원소의 함량은 Table 4와

같다. 희토류 원소의 총량은 하부 현무암(186-208 ppm)이 상부 현무암(106 ppm)보다 높다. 원시맨틀 값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화한 희토류 원소의 함량에서, LREE가 HREE 보다 더 부화된 경향을 보인다(Fig. 5b). 특히 하부 현무암은 상부 현무암보다 LREE의 함량이 더 많고, HREE의 함량은 거의 유사하다. 전체적으로 하부 현무암과 상부 현무암의 패턴은 유사하고 Eu 이상이 나타나지 않는다. 이는 마그마에서 사장석의 분별정출작용이 크게 일어나지 않았음을 의미한다.

결론 및 논의

뒤편재 화산체의 현무암은 산출상태, 구성광물, 주성분 및 미량원소 등의 특징에 따라 하부 현무암과 상부 현무암으로 구분된다. 하부 현무암은 집괴암으로 분포하고, 맨틀 포획암과 지각기원의 포획암이 있다. 상부 현무암은 주상절리가 발달되어 있으며, 맨틀 포획암이 하부 현무암보다 더 많으며, 지각기원의 포획암은 거의 없다. 구성광물에서 하부

Table 3. Trace element analyses (ppm) of Duibaekjae basalts

Sample	Lower basalt							Upper basalt
	DL1-1	DL2-1	DL3-1	DL4-1	DL5-1	DL6-1	DL7-1	DU1-1
Ba	648	657	607	671	721	716	680	250
Sr	771	740	873	863	800	992	1128	514
Cr	286	283	363	399	265	250	263	553
Ga	22.1	22.6	27.7	29.0	23.5	24.5	26.8	27.1
Li	6.40	6.10	7.20	15.0	5.70	5.10	5.60	3.90
P	1995	2012	2364	2959	2493	2449	2502	1330
S	208	121	175	172	84.3	147	277	230
Sc	13.8	15.4	18.9	18.8	16.0	15.9	16.0	25.2
V	142	157	194	199	166	163	162	219
Zn	43.1	44.2	55.4	63.4	50.5	52.9	53.9	46.7
Co	40.4	41.9	43.1	40.9	40.6	38.5	41.5	58.2
Ni	113	122	128	110	113	97.1	112	284
Cu	48.4	49.4	50.0	46.4	47.2	62.7	42.7	118
Rb	47.8	50.6	89.9	73.9	10.7	54.3	48.2	13.5
Y	26.1	27.1	26.2	28.4	27.0	27.0	26.4	26.2
Zr	135	145	155	192	146	160	170	95.8
Nb	49.1	78.3	66.7	56.2	43.3	45.3	31.2	22.4
Mo	3.78	1.84	2.22	1.81	2.48	2.16	4.17	1.27
Cs	0.49	0.37	0.52	0.85	0.21	0.94	0.35	0.11
Hf	1.48	1.81	1.59	1.58	1.38	1.17	1.40	1.15
Ta	39.4	31.5	21.6	32.6	32.8	25.0	29.5	18.0
Pb	3.63	3.76	3.38	3.60	3.47	3.70	3.91	1.28
Th	6.16	6.35	5.72	6.30	6.12	5.92	6.20	1.56
U	1.51	1.44	1.23	0.66	1.46	0.97	1.51	0.42
Rb/Sr	0.06	0.07	0.10	0.09	0.01	0.05	0.04	0.03

현무암은 이당사이트화된 감람석, 휘석 등의 포획광물이 우세하고, 상부 현무암에는 감람석이 우세하다. 지화학적 분석 결과 뒤배재 화산체의 상부 현무암은 하부 현무암에 비하여 MgO, Cr, Ni 함량이 높아 초생마그마에 가까운 값을 가지고 있다. Park and Park(1996)의 연구 결과 하부 현무암과 상부 현무암의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 각각 0.7041-0.7048와 0.7033-0.7037로 차이를 보였다. 이와 같이 뒤배재 화산체의 하부 현무암과 상부 현무암은 구성광물, 주성분 원소, 미량원소 등에서 뚜렷한 차이를 보인다. 이는 뒤배재 화산체의 마그마 기원 및 분화과정에 있어서 1) 동원 마그마에서의 분별결정, 2) 마그마와 주변암과의 동화, 3) 동질인 맨틀물질의 부분용융 정도 및 맨틀 물질의 지구화학적 이질성 등 여러 요인의 가능성을 논의할 수 있다.

동원마그마에서의 분별결정

동원마그마를 분류하는 기준으로는 SiO_2 의 불포화 정도, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 비, $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 비 및 TiO_2 와

P_2O_5 함량의 비교 등이 있다(Macdonald, 1980). 그리고 K_2O 는 마그마가 분별결정작용 동안 제한적으로 거동하여 마그마의 분화척도를 아는데 사용되기도 한다(Garcia et al., 2003). 또한 Sr 동위원소 값은 마그마의 기원, 분화과정 및 동화정도 등을 지시하는 수치이다. Fig. 6a와 같이 상부 현무암과 하부 현무암의 일부 시료는 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 비가 0.4로 일정하다. 그러나 하부 현무암의 일부 시료는 동떨어져 분포하고 있다. 이는 하부 현무암의 K의 손실 또는 부화 등의 영향이 고려된다. 상부 현무암과 하부 현무암의 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 비가 일정하게 나타나는 것은 두 현무암이 유사한 맨틀 물질로부터 유래한 동원마그마에서 기원하였을 가능성을 암시한다. 상부 현무암과 하부 현무암의 미량원소 및 희토류원소를 원시맨틀로 표준화한 결과에서도 두 현무암의 원소 패턴이 매우 유사하다(Fig. 5). 이는 두 현무암을 형성한 마그마가 동일한 맨틀 물질에서 형성되었을 가능성을 지시한다.

상부 현무암과 하부 현무암이 석류석 페리도타이트 맨틀물질에서 형성되었다고 가정한다면, 두 현무암의

Fig. 5. (a) Primitive mantle-normalized spider diagram of Duibaejae basalts (Taylor and McLennan, 1985). (b) Primitive mantle-normalized rare earth element patterns of Duibaejae basalts (Sun and McDonough, 1989).

Table 4. Rare earth element analyses (ppm) of Duibaejae basalts. Eu* is an expected concentration obtained by interpolating between the normalized values of Sm and Gd

Sample	Lower basalt							Upper basalt
	DL1-1	DL2-1	DL3-1	DL4-1	DL5-1	DL6-1	DL7-1	DU1-1
La	41.4	41.4	39.2	47.4	41.5	43.9	42.8	16.4
Ce	78.7	77.4	73.9	81.3	78.6	81.6	81.1	35.9
Pr	9.12	9.24	8.81	9.75	9.19	9.44	9.44	4.81
Nd	35.2	35.1	34.5	37.8	35.9	37.0	35.8	21.3
Sm	7.13	7.02	6.77	7.55	7.28	7.27	7.07	5.37
Eu	2.24	2.18	2.20	2.29	2.25	2.33	2.25	1.87
Gd	6.53	6.30	6.49	6.69	6.29	6.37	6.38	5.71
Tb	0.96	0.97	0.95	0.99	0.95	0.98	0.96	0.89
Dy	5.51	5.66	5.76	5.81	5.59	5.83	5.63	5.70
Ho	1.11	1.10	1.09	1.12	1.09	1.09	1.06	1.10
Er	3.07	3.11	3.12	3.17	3.20	3.16	3.08	3.25
Tm	0.41	0.43	0.41	0.43	0.41	0.41	0.41	0.42
Yb	2.67	2.92	2.75	2.87	2.81	2.69	2.75	2.71
Lu	0.40	0.41	0.38	0.42	0.41	0.40	0.39	0.39
ΣREE	194	193	186	208	196	202	199	106
Eu/Eu*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
(La/Yb) _n	11.2	11.1	10.3	11.9	10.6	11.7	11.2	4.4

P₂O₅의 차이는 인회석이 정출되는 분화환경의 차이로 설명할 수 있다(Fig. 6b)(Park and Park, 1996). 회토류 함량에서 전체적으로 LREE가 HREE보다 부화되었고, 하부 현무암의 (La/Yb)_n 값은 10.3-11.9, 상부 현무암은 4.4이다. 이러한 (La/Yb)_n 차이는 현무암질 마그마의 정출광물인 단사회석의 영향으로 생각할 수 있다. 즉 단사회석이 LREE인 La 보다 HREE인 Yb를 더 선호하기 때문이다($K_D^{La}=0.05$, $K_D^{Yb}=0.6$; Chen et al., 1990). 또한 마그마의 분화정도를 나타내는 SiO₂성분은 하부 현무암(46.50-48.50 wt%)이 상부 현무암(45.00-45.20 wt%) 보다 높다. 이는 마그마가 상

승할 때 분화된 윗부분이 먼저 분출하고, 후에 덜 분화된 마그마가 분출한 것으로 설명할 수 있다(Hildreth, 1981). 그러나 하부 현무암(0.7041-0.7048)과 상부 현무암(0.7033-0.7037)의 Sr 비 값이 차이를 보이는 것은, 두 현무암이 동원 마그마의 분별결정보다는 서로 다른 마그마 기원을 암시한다. 만약 두 현무암이 동원 마그마 기원이라고 하면, 지각물질인 화강암의 영향을 검토해 보아야 할 것이다.

주변암과의 동화

뒤편재 화산체 하부 현무암내에는 기반암인 화강암

Fig. 6. (a) K_2O vs. Na_2O (wt%) and (b) P_2O_5 vs. K_2O (wt%) diagrams. Symbols are the same as those in Fig. 4.

Fig. 7. (a) La vs. Ba (ppm), (b) Tb vs. Y (ppm), (c) La vs. Rb (ppm), and (d) La/Nb vs. Ba/Nb (ppm) diagram of Duibaejae basalts. Symbols are the same as those in Fig. 4.

의 포획암과 석영, 거정의 사장석 포획광물 및 액과 반응한 반응연이 잘 관찰된다. 이는 마그마가 상승하는 도중에 지각물질의 동화가 있었음을 암시한다. 지각물질의 오염여부는 맨틀기원의 Rb/Sr 및 K/Rb 의 비와 현무암의 값을 이용하여 해석하기도 한다 (Macdonald, 1980). 맨틀 기원의 $Rb/Sr=0.04$ 값(Sun and Hanson, 1975)과 비교하면, 상부 현무암은 0.03의 값으로 맨틀기원의 값과 거의 유사하다. 반면 하

부 현무암은 0.01-0.1 범위로 시료에 따라 비 값이 많이 흩어져 있다. 또한 Ba는 하부 현무암이 상부 현무암 보다 약 2.7배 높고, Rb은 시료 DL5-1을 제외한 나머지 시료에서 약 4.5배 높다. 이는 하부 현무암에서의 알칼리 장석에 의한 K의 부화를 시사하고, 하부 현무암의 마그마와 주변암의 동화작용을 지지한다. 일반적으로 현무암내의 포획암과 포획광물은 마그마의 빠른 상승(60시간 이내: Kushiro et al.,

Fig. 8. La vs. La/Sm diagram of Duibaeje basalts. Symbols are the same as those in Fig. 4. Calculation of degree of partial melting of a garnet peridotite with 60% olivine, 20% orthopyroxene, 10% clinopyroxene and 10% garnet. Equilibrium modal partial melting equation by Shaw (1979) has been used for the calculation.

1976)을 의미하지만, 하부 현무암내의 포획광물의 반응 등 은 지각 내에서 마그마 상승속도가 상대적으로 느렸음을 지시한다.

부분용융

La에 대한 Ba, Rb 변화도 및 Tb에 대한 Y 변화도 등은 맨틀의 부분용융 정도에 따라 변하지 않기 때문에 마그마 근원지에 대한 동질성을 지시하는 것으로 알려져 있다(Rollinson, 1993). 뒤편재 화산체의 현무암은 La-Ba, Tb-Y 및 La/Nb-Ba/Nb 비가 거의 일직선에 가까운 정(+)의 상관을 보인다(Figs. 7a, 7b, and 7d). 특히, Tb에 대한 Y변화도에서 하부와 상부 현무암이 거의 한 영역에 집중된다(Fig. 7b). 반면, La-Rb의 변화도에서 하부 현무암은 분산되어 나타난다(Fig. 7c). 이와 같이 Fig. 7은 뒤편재 화산체의 하부 현무암과 상부 현무암이 동질기원의 근원물질 또는 동일 기원의 마그마에서 형성되었음을 의미한다.

Koh et al.(2007)는 제주도 성산 일출봉 연구에서 La/Sm 대 La 변화도를 이용하여 배취 부분용융(batch partial melting)과 분별결정작용(fractional crystallization)을 구분한 바 있다. La/Sm 대 La 변화도에서 배취 부분용융은 정(+)의 상관을 보이고, 분별결정작용이 진행되는 동안에는 거의 일정한 값을 유지한다. 뒤편재의 두 현무암은 Fig. 8과 같이 직선으로 증가하는 경향이 뚜렷하다. 이는 뒤편재 화산체

에서 두 현무암의 마그마가 배취 부분용융에 의해 생성되었을 가능성을 암시한다. 맨틀광물과 조성을 감람석 60%, 사방회석 20%, 단사회석 10%, 석류석 10% ($Ol_{0.60} + Opx_{0.20} + Cpx_{0.10} + Gt_{0.10}$)으로 가정하고, Halliday et al.(1995)의 분배계수를 이용하여 배취 부분용융 정도를 계산하면, 뒤편재 화산체의 하부 현무암은 약 0.8-1.2%, 상부 현무암은 3.7-4.0% 정도이다. 즉 하부 현무암과 상부현무암의 마그마가 동일 근원물질인 석류석 페리도타이트의 부분용융 차이에 의한 것으로 해석할 수 있다.

Koh and Yun(2005)는 HREE에 비해 LREE의 부화는 석류석을 함유한 맨틀 근원물질의 낮은 부분용융에 의한 산물로 해석하고 있다. Fig. 5a에서처럼 두 현무암은 LIL(large ion lithophile)인 Ba, Rb 등의 원소가 부화되고, 석류석에 호정적인 Y는 감소한다. 이는 두 현무암의 마그마 기원이 석류석 페리도타이트의 부분용융을 뒷받침한다. 따라서 동질의 근원물질에서 기원된 마그마로 가정하면, 뒤편재 두 현무암은 석류석 페리도타이트의 맨틀이 부분용융정도의 차이에 따라 형성된 것이며, 하부 현무암의 마그마는 상부 현무암에 비해 부분용융이 작게 일어난 것으로 해석할 수 있다.

P_2O_5 는 감람석과 휘석에 비하여 석류석에 대한 분배계수가 크다. Park and Park(1996)은 석류석 페리도타이트의 낮은 부분용융에 의해 P_2O_5 함량이 높아짐을 지적하였다. Table 5는 석류석 페리도타이트의 광물조성을 $Ol_{0.60} + Opx_{0.20} + Cpx_{0.10} + Gt_{0.10}$ 으로, Shaw (1979)의 미량원소 모델 방정식을 이용하여 부분용융 정도에 따른 P_2O_5 와 K_2O 의 값을 계산한 것이다. 상부 현무암의 P_2O_5 값은 약 3.0-3.5%의 부분용융이 있을 때의 값과 유사하다. 한편 하부 현무암의 P_2O_5 성분은 0.1%의 부분용융이 일어났을 때의 값보다 더 크다. 즉 하부 현무암은 0.1% 보다 더 적은 부분용융이 일어나야 한다. 상부 현무암의 K_2O 을 이용하여 계산된 부분용융정도는 약 3.7-3.8%이고, 하부 현무암은 시료 DL4-1,2를 제외한 나머지 시료에서 약 1.1-2.4% 정도로 계산된다. La에 대한 La/Sm 변화도(Fig. 8)의 계산 값과 비교 시, 두 현무암의 P_2O_5 와 K_2O 의 계산된 부분용융정도 값과 비슷하다. 결과적으로 상부 현무암은 하부 현무암에 비하여 상대적으로 높은 부분용융으로 형성된 마그마에서 유래되었다는 것을 알 수 있다.

뒤편재 화산체를 이루는 두 현무암의 마그마 기원

Table 5. Calculation of degree of partial melting of a garnet peridotite with 60% olivine, 20% orthopyroxene, 10% clinopyroxene and 10% garnet. The equilibrium modal partial melting equation is as given by Shaw (1979): $C_i/C_o = 1/(F + D(1-F))$, where F; the degree of partial melting, D; the bulk distribution coefficient for the starting source assemblage, C_i ; elemental abundance in the evolved liquid, C_o ; elemental abundance in the source

	Partion coefficients									Source abundance (C_o)
	Ol		Opx		Cpx		Gt		Primitive Mantle (wt%)	
P ₂ O ₅	0.043		0.014		0.009		0.15		0.022	
K ₂ O	0.0004		0.0005		0.0013		0.003		0.028	
F (%)	C_i from C_o									this study (mean)
	0.1	1.1	1.5	2.4	3	3.5	3.7	3.8	4	
P ₂ O ₅ (wt%)	0.48	0.40	0.37	0.33	0.30	0.28	0.28	0.27	0.27	DLB: 0.53-0.69 (0.60) DUB: 0.29-0.30 (0.30)
K ₂ O (wt%)	15.83	2.38	1.78	1.13	0.91	0.78	0.74	0.72	0.69	DLB: 0.57-2.22 (1.42) DUB: 0.72-0.74 (0.73)

Partition coefficients: P from Frey et al. (1978) and K from Chen and Frey (1985).

Source abundance from McDonough (1994).

DLB: Duibaejae lower basalt, DUB: Duibaejae upper basalt.

을 다음과 같이 정리할 수 있다. 동질의 석류석 페리도타이트의 부분용융정도에 따라 하부 현무암(0.8-1.2%)과 상부 현무암(3.7-4.0%)이 형성되었다(Fig. 8). 초기에 분출된 하부 현무암은 지각 내에서 마그마와 지각물질의 동화가 발생하였다. 하부 현무암내의 포획된 화강암, 포획광물의 반응열, 사장석, 석영 등의 포획광물 및 높은 Ba와 Rb 함량이 이를 지지한다. 그러나 지각물질의 동화는 MgO 함량에서 하부 현무암(3.95-7.64 wt%)과 상부 현무암(10.70 wt%)의 차이 및 미량원소 Ni와 Cr의 차이를 효과적으로 설명하지는 못한다. 따라서 뒤배재 하부 현무암과 상부 현무암의 주성분원소 및 미량원소의 차이의 주 요인은 석류석 페리도타이트의 부분용융 차이이며, 초기에 분출된 마그마와 주변암과의 동화가 하부 현무암의 Sr 비와 P₂O₅ 등의 함량을 높인 것으로 해석된다.

감사의 글

이 논문의 세심한 검토와 심사 및 중요한 의견을 제시해 주신 부산대학교 윤성호 교수와 익명의 심사 위원께 깊은 감사를 드립니다. 이 연구는 전남대학교 학술연구비 지원 사업(2012-2688)에 의해 수행되었다.

참고문헌

Chen, C.Y. and Frey, F.A., 1985, Trace element and

isotopic geochemistry of lavas from Haleakala volcano, East Maui, Hawaii: Implications for the origin of Hawaiian basalts. *Journal of geophysical research*, 90, 8743-8768.

Chen, C.Y., Frey, F.A., and Garcia, M.O., 1990, Evolution of alkalic lavas at Haleakala volcano, east Maui, Hawaii major, trace element and isotopic constraints. *Contribution to mineralogy and petrology*, 105, 197-218.

Cho, D.L., Hong, S.H., Chwae, U.C., Lee, B.J., and Choi, P.Y., 1998, Geological report of the Goseong-Ganseong sheet. Korea Institute of Geology, Mining and Materials 59 p. (in Korean)

Choi, S.H., 2012, Lithospheric mantle beneath the Korean Peninsula: Implications from peridotite xenoliths in alkali basalts. *Petrological Society of Korea*, 21, 235-247. (in Korean)

Frey, F.A., Green, D.H., and Roy, S.D., 1978, Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal petrology*, 19, 463-513.

Garcia, M.O., Pietruszka, A.J., and Rhodes, J.M., 2003, A petrologic perspective of Kilauea volcano's summit magma reservoir. *Journal petrology*, 44-12, 2313-2339.

Green, T.H., 1980, Island arc and continent-building magmatism: A review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63, 367-385.

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 enrichment in the sub-oceanic mantle. *Earth and*

- Planetary Science Letters, 133, 379-395.
- Hildreth, W., 1981, Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of geophysical research*, 86, 10153-10192.
- Kil, Y.W., Shin, H.J., and Ko, B.K., 2007, Magma pathway of alkali volcanic rocks in Goseong, Gangwon-do, Korea. *Petrological Society of Korea*, 16, 196-207. (in Korean)
- Kim, H.S., Kil, Y.W., and Lee, M.W., 2012, The formation of the cenozoic volcanic edifice in the Goseong-Ganseong area, Gangwondo, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 33, 627-636. (in Korean)
- Kim, Y.B., Chwae, U.C., and Hwang, S.K., 2010, Geological report of the Changamjeom sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 80 p. (in Korean)
- Koh, J.S., Yun, S.H., and Jeong, E.J., 2007, Petrology of the basalts in the Seongsan-Ilchulbong area, Jeju Island. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 324-342. (in Korean)
- Koh, J.S. and Yun, S.H., 2005, Petrology on the late miocene basalts in Goseong-gun, Gangwon Province. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 26, 78-79. (in Korean)
- Kushiro, I., Yoder, H.S., and Mysen, B.O., 1976, Viscosities of basalt and andesite melts at high pressures. *Journal of geophysical research*, 81, 6351-6356.
- Lee, H.Y., 1995, Petrochemical study on the mantle xenoliths in alkali basalts from S. Korea: P-T Regime of upper mantle. *Petrological Society of Korea*, 4, 104-123. (in Korean)
- Lee, H.Y., Kim, Y.K., Koh, S.M., and Hong, S.S., 1993, Study on the mantle xenoliths for the calculation of heat flow. Korea Institute of Geology, Mining and Materials, KR-93(B)-10, 98 p. (in Korean)
- Macdonald, B.R., 1980, Trace element evidence for mantle heterogeneity beneath the Scottish Midland Vally in the Carboniferous and Permian. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, A 297, 245-257.
- McDonough, W.F., 1994, Chemical and isotopic systematics of continental lithospheric mantle. In (Meyer, H.O.A. and Leonardos, O., editors) *proceedings of the 5th international kimberlite conference*, 478-485. CPRM, Brasilia.
- Park, J.B. and Park, K.H., 1996, Petrology and petrogenesis of the Cenozoic alkali volcanic rocks in the middle part of Korean Peninsula (I): Petrography, mineral chemistry and whole rock major element chemistry. *Geological Society of Korea*, 32, 223-249. (in Korean)
- Rollinson, H.R., 1993, *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Pearson Education Limited, Edinburgh, 352 p.
- Shaw, D.M., 1979, Trace element melting models. *Physics and chemistry of the earth*, 11, 577-586.
- Song, K.Y., Park, S.I., and Cho, D.L., 2011, Geological report of the Sokcho-Yangyang sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 81 p. (in Korean)
- Sun, S.S. and Hanson, G.N., 1975, Origin of Ross island basanitoids and limitations upon the heterogeneity of mantle sources for alkali basalts and nephelinites. *Contribution to mineralogy and petrology*, 52, 77-106.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42, 313-345.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p.

2013년 2월 12일 접수
2013년 3월 2일 수정완료 접수
2013년 3월 19일 채택