

울릉도 화산암의 주원소, 희토류 및 미량원소 지구화학

송용선 · 박계현 · 박맹언

부경대학교 응용지질학과, 부산시 남구 대연동 599-1

요 약 : 울릉도의 화산암들은 매우 높은 알칼리 함량을 보이며 대부분 K_2O/Na_2O 비율이 높은 K-계열에 속한다. 울릉도의 화산암들은 매우 넓은 범위에 걸친 조성변화를 보여 총알칼리-실리카 분류도에 현무암으로부터 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 조면안산암을 거쳐 조면암에 이르기까지의 범위를 차지한다. 이러한 조성의 일반적인 변화경향은 광물의 정출에 의한 분화에 의해 대체로 잘 설명되며 감람석, 단사휘석, 사장석, 티탄철석 및 인회석이 주된 정출광물로 판단된다. 울릉도 화산암의 Nb/U, Pb/Ce 값은 MORB, OIB 등과 같은 해양성 화산암과 같으며 도호환경의 암석들과는 상당한 차이가 있어 이들의 생성이 일본열도를 연한 섭입작용과는 직접적인 관계가 없음을 말해준다. LREE가 HREE에 비해 매우 부화된 모습을 보인다($(La)_N=193-420$, $(Lu)_N=7.5-19.5$). 다양한 암석중 조면암-1만이 두드러진 음의 Eu 이상치를 갖고며 상당한 사장석의 정출을 수반하여 만들어진 것으로 판단된다. 그러나 조면암-2와 조면암-3 및 포놀라이트와 부석들은 미량원소와 희토류원소의 변화경향이 조면암-1과 다르며, 열도의 마그마 솔에서 만들어져 서로 다른 분화경로를 갖고 진화한 것으로 판단된다. 울릉도 화산암에서는 성분의 양분화 및 중간 조성의 결핍 현상이 현저하게 나타난다.

핵심어 : 울릉도, 화산암, 분화, 희토류원소, 성분의 양분화

서 언

울릉도는 독도와 함께 동해의 수심 2000미터 심해저 위에 자리잡은 총 높이가 약 3000미터에 달하는 화산도로 지질학적으로도 많은 주목을 받아왔다. 지구조적 환경의 관점에서 보면 울릉도를 포함하는 동북아시아 대륙연변부에서 일어난 신생대의 활발한 알칼리 현무암 계열의 화산활동은 이 지역의 가장 두드러진 판구조 운동인 일본열도 동쪽으로부터의 태평양판의 섭입작용과 관련시켜 설명되기도 하였다. 그러나 최근의 연구에 의하면 일본에 가까운 울릉도나 제주도의 화산암들조차도 지화학적 조성으로 볼 때 섭입작용의 영향을 전혀 나타내지 않는다는 것이 밝혀졌으며 섭입작용과는 무관한 열점활동의 결과로 화산암이 생성되었다는 주장이 대두되었다(Nakamura *et al.*, 1985, 1989, 1990). 기원의 관점에서 보면 울릉도와 독도의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성은 북동 중국의 신생대 화산암들과 마찬가지로 부화된 근원물질로부터 유래되었음을 보여주며(Tatsumoto and Nakamura, 1991) 이는 울릉도를 포함한 북동아시아의 신생대 화산암류의 근원물질이 현재의 섭입작용과는 전혀 관계가 없으며 대양의 여러 화산도들과 같은 기원을 갖고있음을 말해준다(예; Peng *et al.*, 1986; Basu

et al., 1991). 한편 대부분의 북동아시아 신생대 화산암들과는 달리 중국의 오대련지(Wudalianchi) 지역(예; Zhang *et al.*, 1995)과 함께 K-계열의 분화 경로를 보여주고 있는 울릉도의 화산암들의 분화에 대한 연구도 수행되었다(김윤규와 이대성, 1983; 원종관과 이문원, 1984; Kim, 1986). 울릉도 화산암의 경우 대부분 상당히 분화가 진행된 암석들이 주로 산출되며 초기의 분화가 되지 않은 암석들을 발견하기 매우 힘들기 때문에 분화과정의 정확히 규명되어야 이를 바탕으로 다른 연구들, 예를 들어 근원물질의 추적을 위한 연구나 지구조환경 분석을 위한 연구들이 성공적으로 수행될 수 있다. 그러나 폭넓은 조성범위를 보이고 있는 울릉도 화산암들의 상호 관계는 아직 명확하게 밝혀지지 못하고 있다. 이번 연구에서는 기존의 암석분화관계를 새로운 원소 분석자료, 특히 희토류원소의 변화 경향에 따른 재조명하여 보았으며, 울릉도 화산암의 암석화학적 진화에 대한 재해석을 시도하였다.

일반지질

울릉도에 대한 지질학적 연구는 일본 학자들에 의해 1915~16년대부터 시작되었다(Harumoto, 1970). Tsuboi(1920)는 울릉도에서 산출되는 포놀라

이트와 류사이트를 기재하면서 개략적 지질도를 작성하였고, Harumoto(1930, 1933)는 새니디나이트와 분출물에대한 암석학적, 광물학적 연구를 수행하였다. 또한 Harumoto(1970)는 울릉도의 화산활동사와 화산암류의 암석기재적, 암석화학적 특성을 종합적으로 발표하였으며 이후의 연구들은 이를 바탕으로 하고 있다 (김윤규와 이대성, 1983; 원종관과 이문원, 1984; 이민성과 전용원, 1985; Kim, 1985a, 1985b, 1986).

울릉도의 화산체의 대부분을 이루는 해수면 아래부분에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 해수면 위에 드러난 부분을 살펴보면 우선 집괴암층이 섬의 둘레를 따른 해안가와 계곡의 저지대에 분포하고 있다. 그 위에 조면암질 용암층이 급경사의 산체를 이루고 있고, 그 상부에 후기의 조면암질 미고결 분출물층이 비교적 완만한 산정을 중심으로 넓은 지역을 덮고 있다. 집괴암층은 조면현무암질인 하부층과 조면암질인 상부층으로 구분된다. 집괴암층 위의 조면암질용암층은 곳곳에서 포놀라이트를 수반하는 것으로 알려져 있다(Harumoto, 1970; 김윤규와 이대성, 1983; 원종관과 이문원, 1984).

조면암질 용암과 그 위의 조면암질 분출물(ejecta)의 생성 이후에 일어난 함몰에 의해 섬의 중앙에 놓인 성인봉의 북쪽에 나리분지 칼데라가 형성되었고, 칼데라 안에서 일어난 화산활동으로 알봉 일대에 조면안산암이 분포하고 있다. 울릉도와 독도 지역의 마지막 화산활동은 9300년 전의 화산회 분출로 알려져 있다(Arai *et al.*, 1981).

암석화학조성

이번 연구를 위한 시료채취 지점은 Fig. 1의 지질도 위에 함께 나타내었다. 시료의 암석화학조성 분석은 기초과학지원연구소 서울분소의 기기를 이용하였다. 주성분 원소는 X-선 형광분석기(XRF, Philips PW1480 모델)로 분석하였으며 희토류원소를 포함한 미량원소는 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, VG PQII)를 이용하였다.

주성분 원소

분석된 주성분 원소의 함량은 2차적인 변질의 영

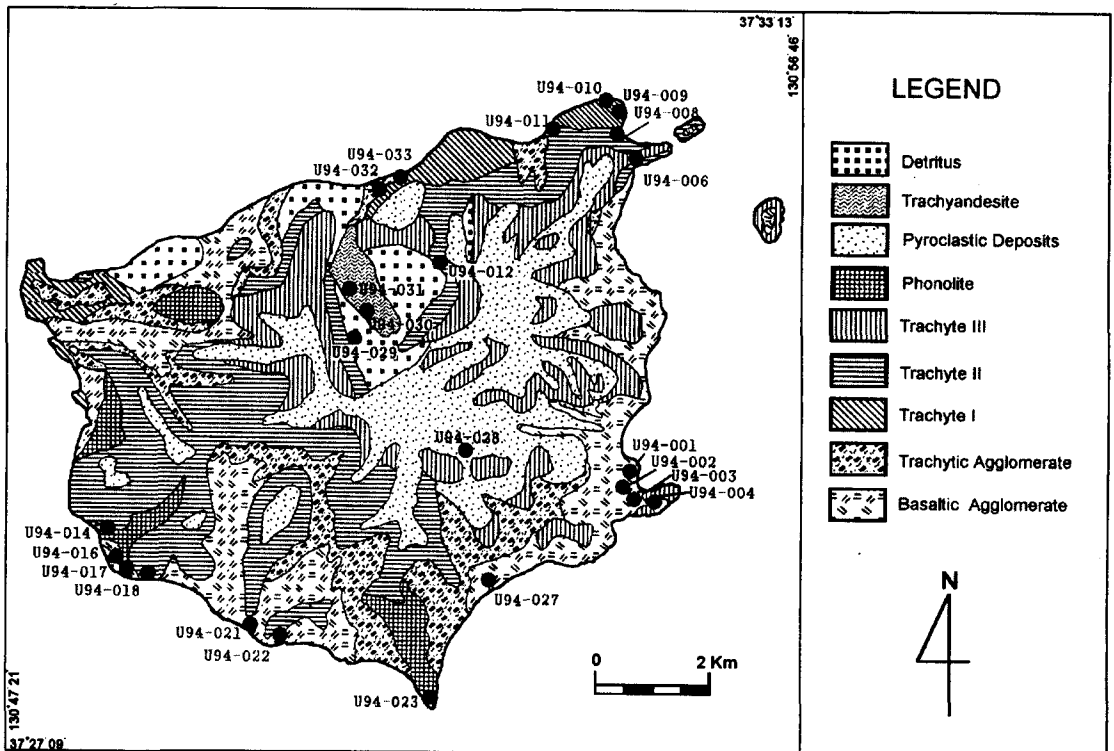


Fig. 1. Geologic map of Ulleungdo, modified after Kim (1985a). Sampling sites are plotted with their sample numbers.

Table 1. Abundances of major elements in volcanic rocks from Ulleung Island, Korea (wt %)

Sample No.	Rock Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I	Total
U94-001	Trachytic Ba.	46.67	15.75	10.36	2.9	0.21	8.61	4.81	2.05	3.64	0.76	3.35	99.10
U94-002	Trachytic Ba.	46.51	15.75	10.38	2.88	0.25	8.71	4.18	1.85	3.44	0.77	4.6	99.14
U94-003	Trachytic Ba.	48.06	15.35	10.12	2.83	0.22	8.31	4.4	1.93	3.48	0.82	4.05	99.58
U94-003-1	Basaltic Tr.	50.69	17.09	8.37	2.44	0.18	6.64	2.55	3.87	4.18	1.11	2.67	99.79
U94-022	Basaltic Tr.	49.75	18.06	9.74	3.04	0.13	7.67	2.5	3.47	3.23	0.92	1.1	99.59
U94-004	Trachyte I	62.7	19.31	2.02	0.4	0.05	0.64	0.24	6.28	5.54	0.11	2.15	99.44
U94-008	Trachyte I	45.36	14.06	4.19	0.42	0.12	1.13	0.41	4.75	4.65	0.11	0.45	74.52
U94-012	Trachyte I	59.55	19.27	3.92	0.25	0.19	1.41	0.28	6.29	6.5	0.07	1.4	99.15
U94-016	Trachyte I	62.29	18.75	4.08	0.57	0.23	1.03	0.44	6.22	6.92	0.11	0.2	100.83
U94-017	Trachyte I	61.39	18.4	3.79	0.52	0.21	1.06	0.39	6.03	6.91	0.08	0.68	99.44
U94-018	Trachyte I	61.22	18.32	3.81	0.65	0.19	1.18	0.53	6.24	6.47	0.12	0.74	99.47
U94-027	Trachyte I	60.03	17.91	4.24	0.42	0.22	1.08	0.32	5.81	6.65	0.08	2.19	98.95
U94-028	Trachyte I	60.61	18.18	3.96	0.45	0.22	0.88	0.32	5.88	7.01	0.07	1.49	99.07
U94-029	Trachyte I	58.93	18.97	4.82	0.18	0.21	1.13	0.15	5.75	7.58	0.05	0.71	98.48
U94-006	Trachyte II	59.12	18.13	3.40	0.43	0.18	1.06	0.34	5.92	6.47	0.09	1.11	96.59
U94-009	Trachyte II	59.93	18.85	4.42	0.49	0.15	1.58	0.57	6.5	6.13	0.15	0.55	99.31
U94-010	Trachyte II	60.3	19.14	3.75	0.52	0.15	1.72	0.51	6.18	6.19	0.16	0.44	99.06
U94-011	Trachyte III	61.21	18.24	4.12	0.65	0.19	1.21	0.55	6.31	6.29	0.14	0.8	99.71
U94-032	Trachyte III	58.56	19.28	3.60	0.59	0.14	1.95	0.47	6.82	6.22	0.14	0.56	98.30
U94-033	Trachyte III	58.98	19.51	3.71	0.61	0.14	1.98	0.51	6.86	5.84	0.15	0.35	98.64
U94-014	Phonolite	60.69	18.59	4.06	0.51	0.1	1.32	0.39	6.5	4.97	0.13	2.53	99.80
U94-021	Phonolite	60.95	18.91	3.85	0.49	0.16	1.64	0.48	6.5	5.7	0.13	0.46	99.27
U94-023	Phonolite	61.54	18.41	3.70	0.68	0.19	1.12	0.48	6.43	5.91	0.11	0.96	99.53
U94-030	Trachyandesite	56.04	18.83	5.49	1.27	0.14	3.52	1.57	5.88	5.46	0.33	0.23	98.75
U94-031	Trachyandesite	57.95	18.71	4.65	1.01	0.14	2.86	1.09	5.89	5.9	0.27	0.81	99.26
U1	Pumice	58.68	18.97	3.36	0.48	0.13	1.31	0.31	6.92	5.96	0.08	3.01	99.21
U2	Pumice	58.01	18.82	3.16	0.6	0.12	1.65	0.37	7.08	5.66	0.1	3.17	98.74

*:Total Fe as Fe₂O₃

항등을 최소화하기 위하여 H₂O 등의 휘발성 물질이 배제된 상태(volatile free)로 재계산한 값을 성분변화도와 분류도에 사용하였다. 울릉도 화산암들의 주성분 원소 함량을 보면 이미 널리 알려진 바와 같이(예, 김윤규와 이대성, 1983; 원종관과 이문원, 1984; 이민성과 전용원, 1985; Kim, 1985b) 매우 높은 알칼리 함량을 보이며 대부분 K₂O의 함량이 Na₂O의 함량보다 더 많은 K-계열의 분화경향을 나타낸다(Table 1, Fig. 2). 알칼리 원소의 함량 변화를 이용한 Le Bas *et al.*(1986)의 총알칼리-실리카(TAS) 그림에 의한 화산암 분류에 따르면 분석된 울릉도의 화산암들은 매우 넓은 범위에 걸친 변화를 보인다(Fig. 3). 집괴암 내에 함유된 화산암력들은 Le Bas *et al.*(1986)의 조면현무암에 해당하며 집괴암층 내의 암맥이나 용암류는 현무암질 조면안산암으로 분류된다. 이번 연구에서 분석된 시료에는 Kim(1985a)의 연구에서 보고된 것과 같은 피크라이트질 현무암은 포함되지 않았다. 기존의 연구에서(원종관과 이문원, 1984; Kim, 1985a) 조면안산암으로 분류되었던 알봉 주변의 암석은 Le Bas *et al.*(1986)의 분류로는 조면안산암에서 조면

암에 걸치는 변화를 보이며, 나머지 조면암질 용암류와 암맥, 부석, 그리고 포놀라이트로 분류되었던 암체 모두가 조면암 영역에 도시된다. 그러나 이 연구에서는 기존 연구결과와의 원활한 비교를 위해 포놀라이트라는 명칭을 그대로 유지하기로 하였으며 조면암-1, 조면암-2, 그리고 조면암-3과 같은 구분도 그대로 따르기로 하였다. 기존에 부석으로 분류된 암석은 엄밀히 말하면 조면암질 부석으로 불러야하나 간편성을 위해 이 논문에서는 그냥 부석이라고 부른다.

울릉도 화산암들의 주원소 변화경향을 Mg#(Mg number=Mg/[Mg+Fe])의 감소에 따라 살펴보면 Mg#값에 따라 구간별로 변화양상이 바뀔을 알 수 있다. 우선 Mg#>0.6인 구간에서는 Mg#의 감소에 따라 Fe₂O₃*(total iron as Fe₂O₃), TiO₂ 및 CaO가 완만하게 감소하고, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O 및 P₂O₅는 증가한다. Mg#가 0.6~0.5인 구간에서는 Fe₂O₃*, TiO₂ 및 CaO가 빠르게 감소하고, SiO₂, Na₂O 및 K₂O 및 빠르게 증가한다. P₂O₅는 이전의 증가추세에서 빠른 감소로 변화 양상이 바뀌며, Al₂O₃는 이전의 증가율보다 둔화된 미약한

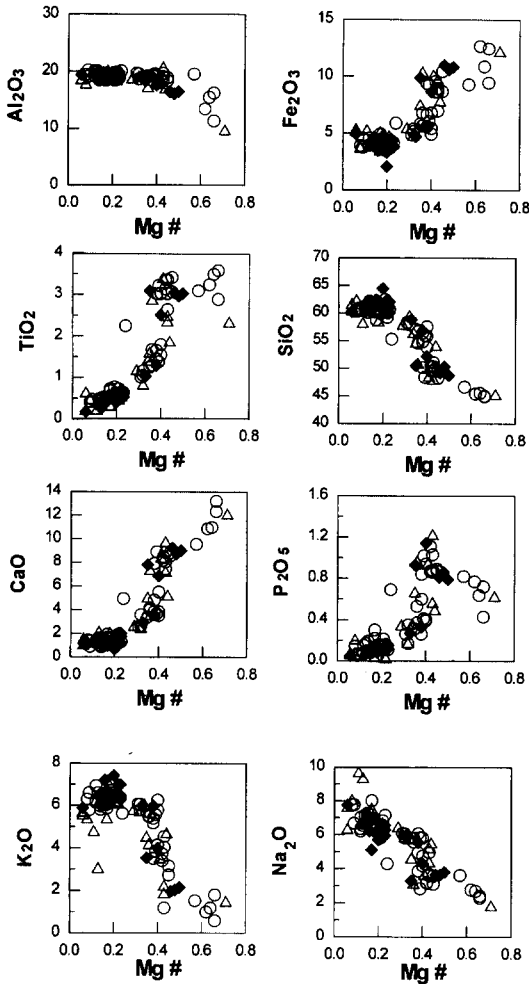


Fig. 2. Mg# vs major oxide abundances of Ulleungdo volcanics. The data from this study are plotted with open circles. Crosses represent the data from Kim (1985b).

증가에 그친다. Mg# < 0.5의 범위에서는 Mg#의 감소에 따라 Fe₂O₃*, TiO₂, CaO 및 P₂O₅가 지속적으로 감소하지만 감소율은 훨씬 낮아지며, Na₂O 및 K₂O의 증가율도 둔화되는 경향을 보인다. 한편 SiO₂는 Mg#=0.4 부근까지는 약간의 증가를 계속하다가 그 다음부터는 거의 변화하지 않는 것으로 나타나며 Al₂O₃는 미약한 상승세를 유지하는 것으로 관찰된다.

이러한 주원소의 변화경향은 광물의 정출에 의한 분화로 잘 설명된다. 알칼리 현무암에서 조면현무암을 거쳐 현무암질 조면안산암으로 분화될 때 단사회석과 감람석이 주 정출광물이었으며, 현무암

질 조면안산암부터 사장석, 티탄철석, 인회석의 주된 정출이 일어나 조면암까지 분화되었음을 보여준다. 이러한 정출광물의 종류와 암석의 분화에 대한 해석은 기존연구의 결과와도 대체로 일치한다 (Kim, 1986; 원종관과 이문원, 1984).

미량원소

울릉도 화산암들의 경우 SiO₂ 함량이 60% 전후인 부분에 집중되기 때문에 SiO₂ 함량에 대한 그림으로는 미량원소의 변화를 보기가 쉽지 않아 분화의 말기까지 감소하지 않고 계속 증가하는 Zr을 지표로 하여 미량원소들의 변화경향을 살펴보았다 (Fig. 4). 울릉도 화산암의 미량원소 조성에서 가장 두드러진 특징은 Nb, Zr 등 일부 미량원소의 함량이 매우 높은 값까지 변화한다는 것이다. 이러한 결과는 분화후기까지 이들의 농도가 줄어들지 않고 계속 늘어난 결과이다. 그러나 다른 대부분의 친액(불호정) 원소들에서는 그 원소를 수용하는 광물들이 도중에 정출이 시작됨으로 인하여 중간에 줄어들기 시작하는 것이 관찰되며 어떤 원소들은 처음부터 계속 줄어드는 모양을 보인다. 특히 Ba, Sr, P 및 Ti 등은 현무암질 암석으로부터 조면암으로 가면서 뚜렷하게 감소된다. 이러한 변화는 주성분원소에서 추정되는 바와 같이 단사회석, 사장석, 인회석 및 티탄철석의 정출에 의한 것으로 해석된다. 그러나 이러한 광물들과 염기성 마그마 사이의 Ba 분배계수가 낮기 때문에 (Paster *et al.*, 1974; Matsui *et al.*, 1977; Luhr *et al.*, 1984; Hauri *et al.*, 1994) 이 광물들의 정출로 Ba의 감소를 설명할 수 없으며 Ba에 대한 분배계수가 큰 알칼리장석이나 흑운모 등의 정출이 Ba의 감소를 가져온 것으로 추정된다.

울릉도의 화산암중 조면암질 현무암은 대부분의 친액원소들에 대하여 가장 낮은 함량을 갖고 있다. 친액원소의 함량은 조면암질 현무암으로부터 현무암질 조면안산암, 조면안산암, 조면암-1의 순서로 증가하는 경향을 보인다. 그러나 조면암-2와 조면암-3은 조면암-1보다는 상당히 낮은 농도를 보이며 조면안산암이나 현무암질 조면안산암, 심지어는 조면암질 현무암보다도 낮은 친액원소의 함량을 보이는 경우도 있다. 이러한 현상은 조면암-2와 조면암-3은 조면암-1과는 다른 분화경로를 갖고 진화한 암석을 시사한다. 여러 그림에서 포플라이트와 조면암질 부석 역시 조면암-1에 비하여 상대적으로 낮은 친액원소의 함량을 보이며 조면암-2나 조면암

Table 2. Abundances of trace and rare earth elements in volcanic rocks from Ulleung Island, Korea (ppm)

Sample No.	Li	Be	Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Cd	Cs	Ba
U94-001	7.28	2.00	18.64	99.02	46.02	67.79	33.37	115.18	30.70	130.27	1106.19	27.58	368.71	125.63	2.86	0.09	1.55	926.35
U94-002	7.59	2.66	23.02	115.94	53.58	85.88	35.46	138.42	33.75	100.54	1137.84	29.67	332.13	91.67	2.72	0.09	7.46	916.60
U94-003	7.63	2.20	21.60	223.33	58.16	130.06	53.59	403.65	32.04	99.13	1128.85	29.15	242.58	51.63	1.77	0.19	106.04	968.26
U94-003-1	8.54	3.04	10.82	0.00	42.21	0.70	5.36	127.12	35.08	97.51	1119.00	33.52	440.05	153.20	5.15	0.03	1.43	1281.18
U94-022	7.69	3.05	11.26	1.02	27.10	9.83	58.49	105.36	31.30	76.50	1037.14	28.43	371.50	143.60	3.11	0.15	0.83	1112.36
U94-004	12.64	1.90	2.84	4.18	46.79	6.71	1.16	76.93	33.05	183.33	50.18	40.25	533.57	163.35	2.62	0.07	1.40	54.28
U94-012	8.03	5.44	0.98	1.66	31.68	0.86	1.87	102.00	28.87	168.40	80.31	32.09	776.27	172.23	4.77	0.15	1.83	102.68
U94-016	10.74	5.99	2.92	0.00	11.41	0.65	0.88	127.34	29.54	157.04	2.34	47.48	840.71	258.27	3.71	0.19	1.46	1.75
U94-017	11.63	6.74	3.09	1.06	6.41	0.60	0.00	137.29	30.73	155.49	0.72	46.63	704.19	180.22	3.85	0.23	1.95	0.14
U94-018	10.48	5.37	3.45	0.94	6.58	0.28	0.00	123.15	28.32	132.39	3.49	38.10	656.12	198.15	4.61	0.18	1.17	2.63
U94-027	18.69	3.78	2.59	0.95	9.77	0.69	0.00	133.87	28.54	134.34	26.72	44.73	549.80	131.46	4.38	0.36	1.64	8.48
U94-028	10.05	4.07	1.95	0.17	20.60	0.35	0.00	127.74	23.32	100.09	0.97	22.39	652.00	243.96	5.58	0.45	1.70	0.28
U94-029	9.91	6.21	0.49	0.13	6.73	0.48	0.79	119.23	26.38	182.61	5.17	29.49	802.33	209.67	4.05	0.42	2.57	6.37
U94-006	21.26	6.46	3.16	5.40	28.67	3.33	7.58	105.70	31.20	123.43	174.48	28.35	588.78	176.47	5.39	0.00	1.29	291.86
U94-009	14.32	7.68	2.91	3.80	107.26	2.65	8.02	106.05	29.30	139.31	139.49	28.79	558.17	139.22	5.07	0.07	1.16	2223.93
U94-010	15.87	6.11	2.17	3.18	23.02	1.63	2.49	95.79	32.73	132.50	280.67	29.67	706.81	192.86	9.55	0.27	1.57	544.32
U94-011	7.50	4.43	2.45	0.62	10.98	0.68	0.00	102.24	24.52	102.56	20.90	30.93	449.57	143.96	3.37	0.11	1.01	38.71
U94-008	16.75	5.35	1.65	4.16	17.84	2.44	1.19	109.19	36.60	141.37	330.48	23.37	490.10	150.03	5.20	0.15	1.33	1085.61
U94-032	9.50	2.20	1.04	0.61	11.20	0.84	0.49	70.91	26.18	159.27	301.52	18.38	396.26	109.40	9.56	0.01	1.79	619.88
U94-033	11.53	4.02	1.17	1.75	16.79	0.61	0.82	73.20	26.34	130.81	277.06	18.50	496.21	148.47	10.01	0.16	2.01	509.75
U94-014	12.76	5.77	1.30	1.24	10.89	0.76	0.00	106.85	23.98	136.55	89.86	31.58	606.31	198.86	4.97	0.17	1.55	84.01
U94-021	7.13	4.12	2.32	0.95	7.12	0.34	0.00	87.67	27.34	109.41	232.14	27.19	562.26	169.73	3.53	0.23	0.38	455.94
U94-023	8.42	4.20	1.98	0.58	12.97	0.78	0.29	87.71	23.72	100.75	24.94	32.16	539.83	162.81	3.99	0.18	0.69	27.44
U94-030	9.91	2.85	5.89	6.37	15.79	6.55	7.47	84.04	29.86	134.70	539.06	21.25	349.79	82.48	6.82	0.09	1.58	889.51
U94-031	7.98	3.07	3.02	1.01	11.11	2.99	5.01	74.88	25.97	127.31	390.32	19.27	519.31	166.89	5.73	0.10	1.73	672.80
U1	10.65	4.26	1.15	2.11	71.12	0.76	3.14	77.86	22.72	146.56	37.90	20.16	582.92	92.93	9.16	0.06	1.99	47.93
U2	6.36	3.53	0.97	0.27	75.98	0.69	10.18	65.52	22.35	136.52	226.20	17.35	451.62	96.35	6.89	0.32	1.74	507.70

Table 2. Continued

Sample No.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
U94-001	65.89	121.49	13.13	48.47	8.79	2.75	7.83	1.01	5.33	0.91	2.37	0.32	1.96	0.28	6.96	5.06	9.49	1.61
U94-002	63.76	118.57	12.37	46.48	8.64	2.68	7.53	1.01	5.37	0.88	2.47	0.33	1.82	0.26	5.32	4.82	8.94	1.81
U94-003	68.36	126.51	13.43	49.64	8.65	2.72	7.95	0.96	5.35	0.93	2.39	0.33	1.86	0.29	4.19	5.40	8.33	1.48
U94-003-1	84.15	156.01	16.48	60.85	11.15	3.43	9.88	1.20	6.51	1.11	3.06	0.38	2.38	0.32	8.49	6.14	10.72	2.29
U94-022	80.80	148.68	15.72	57.68	9.96	3.06	8.82	1.13	6.27	1.07	2.97	0.37	2.38	0.32	8.37	5.64	11.47	2.25
U94-004	105.99	191.50	17.54	55.84	8.78	1.37	7.49	1.04	6.32	1.18	3.45	0.56	3.34	0.47	7.97	11.71	18.19	2.74
U94-012	110.47	187.16	16.88	52.21	8.03	0.98	6.71	0.95	5.83	1.09	3.46	0.49	3.47	0.50	13.76	13.84	26.38	3.99
U94-016	135.71	256.52	24.42	81.67	12.97	0.86	11.16	1.59	9.24	1.68	5.12	0.70	4.54	0.66	16.33	12.12	23.27	3.83
U94-017	138.71	258.77	24.61	80.65	12.79	1.06	11.12	1.52	9.06	1.61	4.79	0.67	4.43	0.64	13.91	12.35	21.12	4.39
U94-018	111.39	219.68	20.13	67.21	10.52	1.38	9.43	1.33	7.57	1.40	4.06	0.57	3.50	0.50	12.88	9.70	16.22	2.55
U94-027	130.34	241.54	24.56	84.73	13.48	0.65	11.58	1.63	9.37	1.62	4.85	0.64	3.99	0.58	10.60	11.38	18.23	3.76
U94-028	67.66	112.82	12.60	43.23	6.67	0.40	5.83	0.89	5.00	0.98	3.09	0.42	2.82	0.40	15.58	11.82	12.61	2.53
U94-029	96.43	150.48	15.77	50.90	7.57	0.27	6.70	1.02	6.02	1.14	3.57	0.51	3.45	0.50	17.45	15.19	20.30	2.26
U94-006	80.46	142.66	12.98	42.37	6.73	1.61	6.10	0.79	4.84	0.86	2.51	0.36	2.37	0.34	9.67	7.94	14.05	2.63
U94-009	85.06	150.54	13.70	45.16	7.38	1.55	6.17	0.82	4.99	0.86	2.50	0.37	2.51	0.37	9.03	9.38	14.89	2.64
U94-010	86.59	151.48	14.00	45.68	7.34	1.86	6.48	0.88	5.22	0.93	2.75	0.42	2.68	0.39	12.10	9.90	17.51	3.20
U94-011	92.13	174.13	17.26	61.14	9.84	2.27	8.42	1.15	6.34	1.10	3.25	0.42	2.61	0.38	9.24	7.78	11.52	1.72
U94-008	82.55	144.41	12.47	39.52	5.98	2.27	5.20	0.67	3.95	0.70	2.14	0.31	1.97	0.29	8.09	8.55	12.76	2.16
U94-032	80.91	131.55	11.87	37.39	5.35	1.82	4.43	0.62	3.58	0.65	2.18	0.28	2.00	0.31	7.39	10.39	17.15	3.55
U94-033	79.60	129.14	11.74	36.55	5.39	1.77	4.54	0.61	3.58	0.67	2.09	0.28	2.11	0.30	9.86	9.95	17.59	3.49
U94-014	118.45	205.83	19.39	63.41	9.16	2.68	7.55	1.02	5.81	1.11	3.28	0.46	2.92	0.42	11.73	10.57	16.94	2.62
U94-021	82.85	154.26	14.68	48.89	7.90	2.33	6.83	0.91	5.56	0.99	2.83	0.39	2.75	0.37	12.15	8.38	14.18	3.73
U94-023	91.92	168.46	16.95	58.92	9.27	2.15	8.33	1.09	6.33	1.18	3.44	0.45	2.91	0.44	11.60	7.05	13.13	1.85
U94-030	83.62	138.10	13.03	42.16	6.72	2.27	5.72	0.77	4.29	0.74	2.31	0.33	2.12	0.32	5.93	7.53	17.12	3.62
U94-031	79.29	130.57	12.44	40.86	6.14	1.96	5.36	0.74	4.27	0.73	2.24	0.34	2.25	0.33	10.83	9.93	18.51	3.83
U1	85.03	139.90	12.64	39.48	5.81	1.29	4.89	0.69	4.00	0.74	2.29	0.34	2.25	0.34	11.85	10.51	20.07	4.03
U2	77.69	125.67	11.32	36.07	5.25	1.79	4.50	0.63	3.54	0.68	2.21	0.28	2.14	0.30	9.84	10.91	18.01	3.66

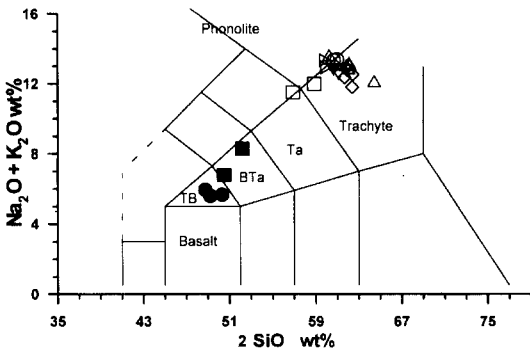


Fig. 3. Ulleungdo volcanics are plotted on the total alkali vs silica diagram of Le Bas *et al.*(1986). Solid circles are trachybasalts, solid squares are basaltic trachyandesites, open squares are trachyandesites, open triangles are trachytes (Δ : trachyte-I; ∇ : trachyte-II; \triangleright : trachyte-III), diamonds are phonolites, and open circles are pumices). Large compositional variation and bimodal distribution of Ulleungdo volcanics are apparent.

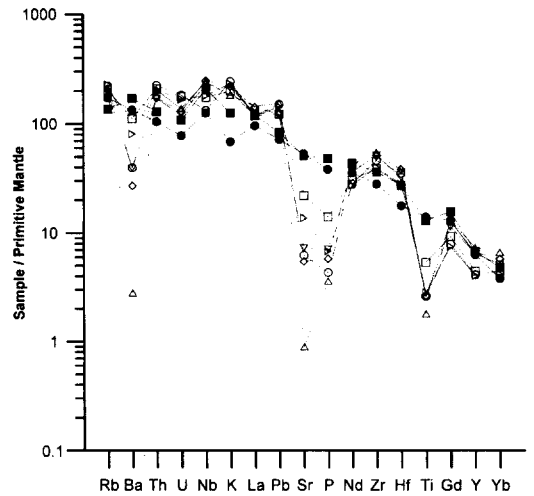


Fig. 5. Spidergram for the Ulleungdo volcanics normalized with primitive mantle abundances. Symbols are the same as in Fig. 3. Trachybasalts and basaltic trachyandesites of Ulleungdo volcanics show quite similar to typical oceanic island basalts, but different from island arc basalts, implying that they are not directly related with subduction processes along the Japanese arc. More differentiated rocks show significant decrease in Ba, Sr, P and Ti reflecting fractionation of some phases containing such elements.

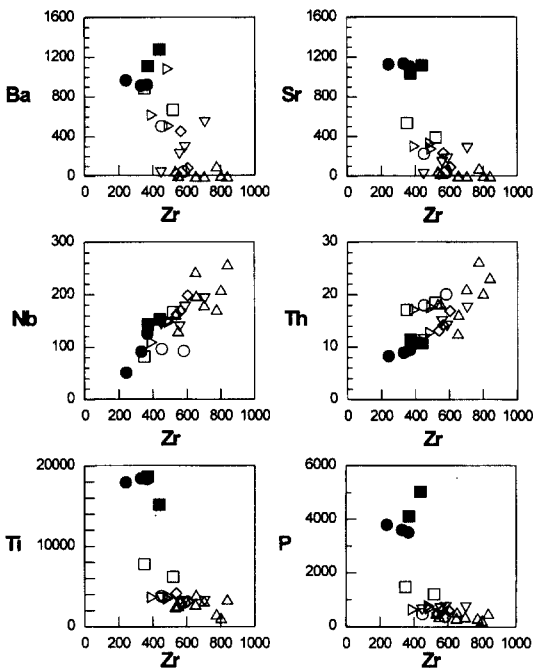


Fig. 4. Zr vs other trace element (Ba, Sr, Nb, Th, Ti, P) abundances. The contents of Ba, Sr, Ti and P decrease with increasing Zr content, suggesting fractionation of mineral phases containing Ba, Sr, Ti and P. However, Nb and Th does not show such influence of mineral fractionation.

3과도 다른 변화양상을 보인다. 이는 포놀라이트와 부석이 각각 또 다른 분화경로를 겪었음을 나

타낸다.

Fig. 5는 일부 미량원소의 함량을 시원맨틀에 대하여 표준화한 거미그림이다. 울릉도의 화산암들은 불호정원소들이 농집된 경향을 보이며 전체적인 모습은 전형적인 해양 화산도의 현무암류에서 나타나는 양상과 흡사한 반면 섭입대를 연한 도호 환경의 변화양상과는 다르다. 따라서 울릉도의 화산암들은 섭입작용의 영향을 직접적으로 받아 만들어진 암석이 아니며, 해양화산도와 같은 기원을 갖고 있음을 시사한다. 분화가 진행된 암석인 조면암들과 포놀라이트, 부석 등은 Ba, Sr, P, Ti 등이 두드러지게 감소한 모습을 보이며 이는 분화시 이들 원소를 많이 함유하는 장석, 인회석, 티탄철석, 흑운모등이 상당량 분리되었음을 지시한다.

희토류원소

울릉도 화산암의 희토류원소 변화경향을 보면 대부분의 다른 알칼리 현무암질 화산암들과 같이 가벼운 희토류원소들(LREE)이 무거운 희토류원소들(HREE)에 비하여 매우 부화된 특징을 보이고 있다(Fig. 6). La의 함량은 탄질 운석(Carbonaceous

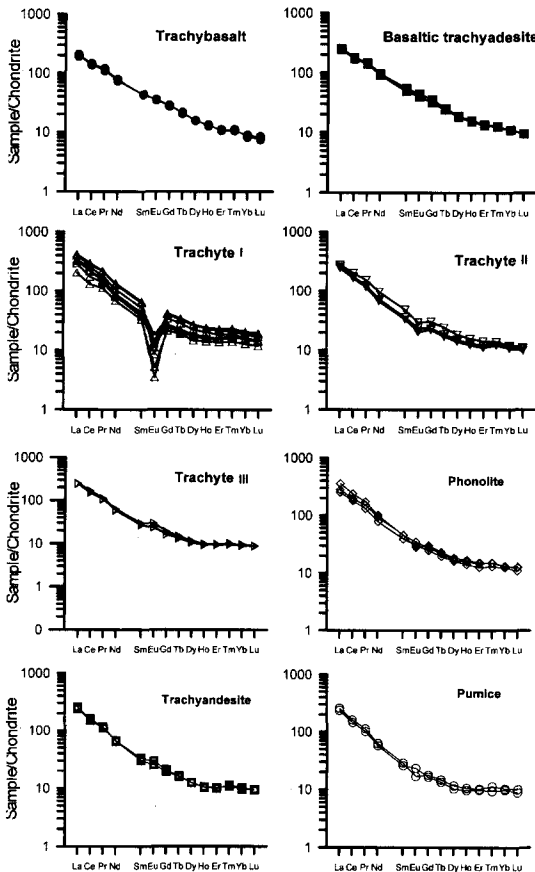


Fig. 6. Chondrite normalized REE pattern of Ulleungdo volcanics. Symbols are the same as in Fig. 3. All the rock types show light rare earth element enriched patterns. Only trachyte-I reveal significant negative Eu anomalies. Differentiated rocks show flatter pattern in middle to heavy rare earth elements than trachybasalts and basaltic trachyandesites.

chondrite)의 193에서 420배 사이의 값을 나타낸다. 반면에 Lu의 경우 이보다 훨씬 낮은 값을 보여 탄질 운석에 비해 약 7.5-19.5 배의 범위 값을 갖는다.

분석된 암석들 중에 초기의 알칼리 현무암, 조면암질 현무암, 현무암질 조면안산암들은 Eu의 이상치를 보이지 않으며 조면암-1만이 두드러진 Eu 음의 이상치를 보인다. 즉 조면암-1이 생성되기 이전의 암석들은 사장석이 분별정출 되기 이전에 분출하였으며 조면암은 상당한 사장석의 분별정출을 수반한 분화에 의해 만들어진 것으로 생각된다. 하지만 조면암-2는 미약한 음의 Eu 이상만을 보이며 조면암-3은 오히려 미약한 양의 Eu 이상치를 보인다. 그리고 이전의 연구에서 포놀라이트로 명명된

암석과 부석들도 Eu 이상치가 없거나 매우 미약하다. 이들 암석들의 생성에는 사장석의 분별이 따르지 않은 것으로 판단된다. 이러한 현상은 미량원소의 함량변화에서 유추한대로 조면암-2, 조면암-3, 포놀라이트, 부석 등은 조면암-1과는 다른 분화경로를 가짐을 의미한다. 한편 미약한 Eu의 양의 이상치를 보이는 시료들도 있으며 이는 이미 정출한 일부 사장석들이 축적되어 야기된 현상으로 설명할 수 있다.

탄질운석의 값과 비교한 희토류 원소의 변화경향을 조금 더 자세히 관찰해 보면 조면암질 현무암은 La에서 Dy까지는 대체로 곧은 변화를 보이며 Ho 이후의 HREE들은 기울기가 약간 더 완만하여 윗부분을 향해 조금 오목한 모습을 보인다. 그리고 현무암질 조면안산암은 조면암질 현무암보다 약간 더 오목해진 HREE 변화를 보인다. 이러한 경향은 조면암질 안산암과 조면암, 포놀라이트, 부석 등 분화의 정도가 더 높을 것으로 생각되는 암석에서는 HREE의 탄질운석에 대한 상대값이 원자번호에 따라 크게 줄어들지 않아 HREE 부분이 더욱 평평해지는 모습으로 관찰된다. 이러한 희토류원소 변화경향의 변화 정도를 살펴보면 조면암질 현무암과 현무암질 조면안산암 사이에는 작은 차이가 있긴 하지만 그렇게 두드러지지 않는다. 그러나 현무암질 조면안산암과 조면안산암 사이에는 매우 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 조면안산암과 다른 조면암들, 포놀라이트, 부석 등의 차이는 조면안산암과 현무암질 조면안산암과의 차이에 비하면 그 정도가 작다.

희토류원소 변화경향의 형태변화의 원인을 알아보기 위하여 LREE와 HREE의 비율(여기서는 $(La/Lu)_N$)과 MREE(중간의 희토류원소)와 HREE의 비율(여기서는 $(Gd/Lu)_N$) 변화를 살펴보면(Fig. 7) 조면암질 현무암, 현무암질 조면안산암과 조면안산암의 $(La/Lu)_N$ 값은 약 25 부근으로 큰 차이가 없으나 $(Gd/Lu)_N$ 값은 조면암질 현무암과 현무암질 조면안산암은 약 3.5 부근의 값을 갖고 조면안산암은 약 2 부근으로 뚜렷이 감소한다. 따라서 조면암질 현무암 및 현무암질 조면안산암에서 조면안산암으로 가는 사이에서 희토류원소 변화경향의 형태를 바꾸는 것은 LREE와 HREE의 비율은 대체로 일정하게 유지되는 상태에서 MREE가 상대적으로 감소됨에 의해서 일어나는 현상임을 알 수 있다. 이와 같은 중간의 희토류원소를 선택적으로 제거할 수 있는 대표적인 광물은 단사회석이나 앰피블에 속하는 광물들이다. 따라서 울릉도 화산암의 분화

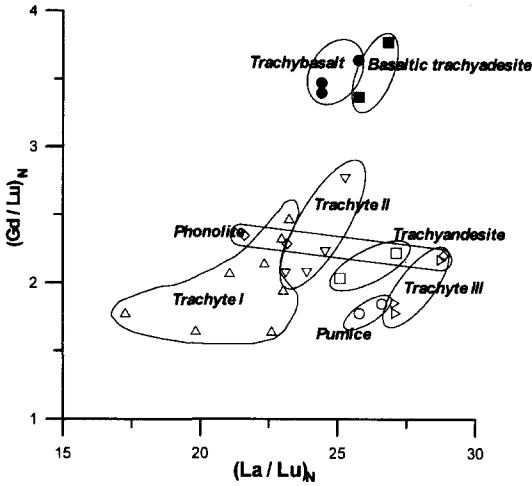


Fig. 7. $(La/Lu)_N$ vs $(Gd/Lu)_N$ diagram. Symbols are the same as in Fig. 3. Differentiated rocks show lower $(Gd/Lu)_N$ than trachybasalts and basaltic trachyandesites, which reflecting flatter pattern in middle to heavy rare earth elements of Fig. 6. Trachyte-I, -II, and -III have different $(La/Lu)_N$ ratios.

에는 이러한 광물들이 양적으로 볼 때 매우 중요한 역할을 하였음을 알 수 있다. 한편 조면안산암과 더불어 조면암-1, 2, 3과 포놀라이트, 부석 등은 대체로 같은 $(Gd/Lu)_N$ 값에서 $(La/Lu)_N$ 비율이 상당히 변화하는 양상으로 나타난다.

토의

데일리 갭과 의미

울릉도 화산암들은 알칼리 현무암, 현무암질 안산암, 조면암질 안산암과 조면암 등 다양한 암석으로 구성되어 있으며 분화관계로 해석되어 왔다. 그러나 이들의 주성분 원소의 조성 분포는 연속적으로 이어지지 않고 덜 분화된 암석과 상당히 분화가 진행된 암석들 사이에 틈이 있는 소위 데일리 갭(Daly gap)의 모습을 나타낸다(Fig. 8). 이와 같이 SiO_2 함량에 따른 분석된 시료수의 분포에서 중간 조성을 갖는 암석이 결핍되어 있는 것이 두드러지게 나타나는 경향은 이 연구에서 분석된 자료뿐만 아니라 기존의 분석결과들을 함께 도시하여도 마찬가지이다(Fig. 9). 따라서 중간 조성을 갖는 암석이 결핍된 현상은 충분치 못한 시료채취의 결과가 아닌 실제의 변화양상으로 해석된다.

화학조성과 용융체의 밀도사이의 관계(예, Lange

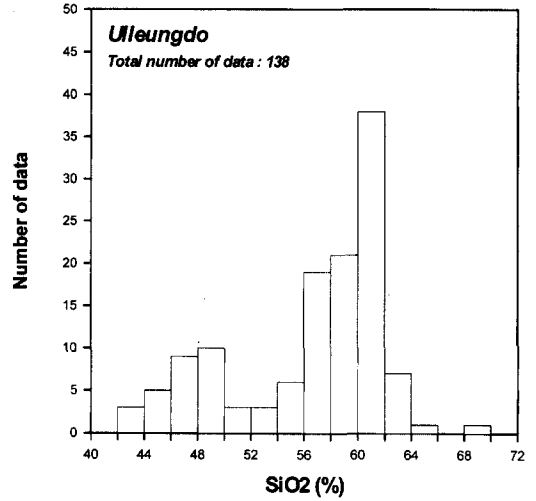


Fig. 8. Bimodal distribution of SiO_2 contents in Ulleungdo volcanics.

and Carmichael, 1987)를 이용해 울릉도 화산암들의 밀도를 구해보면 SiO_2 의 증가에 따라 밀도가 2.8로부터 2.4이하까지 지속적으로 감소됨을 보여 주며 데일리 갭의 전후를 비교하면 약 2.6에서부터 2.55로 감소함을 알 수 있다. 그러나 밀도의 감소는 동시에 일어나는 점성의 증가와 연계되어 바로 분화된 마그마의 분출로 이어지기는 어려울 것으로 생각되며, 밀도만의 감소보다는 마그마 방의 하부에서 뜨거운 마그마의 재공급으로 인한 점성의 급격한 감소와 휘발성물질의 농집으로 인한 분출 압력의 상승의 수반등 다른 요인이 함께 작용하여 데일리 갭 이후 성분의 분출이 일어났을 것으로 생각한다.

한편 데일리 갭이 만들어지는 동안에 어떤 일들이 마그마의 진화과정에서 일어났는지를 알아보기 위하여 데일리 갭 전후에서의 주성분 원소의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 우선 $Fe_2O_3^*$, TiO_2 , CaO 등은 데일리 갭 전후 변화경향의 연장선이 일치하는 것으로 보이며 이 동안에 일어난 광물의 분별 정출은 그 이전과 마찬가지로의 비율로 이 원소들을 감소시키는 작용을 하였음을 알 수 있다(그림 9). 그러나 가장 두드러지게 변화하는 것이 Al_2O_3 , K_2O 와 P_2O_5 이다. 이들의 변화양상은 데일리 갭의 전과 후 사이에 뚜렷한 차이를 보인다. Al_2O_3 와 K_2O 의 경우 데일리 갭의 이전에는 SiO_2 의 증가에 따라 상당히 급하게 상승하였으나 데일리 갭 이후에는 미약하게 상승하는 양상을 보인다. Na_2O 의 경우도 그 정도가 다소 약하기는 하지만 Al_2O_3 와

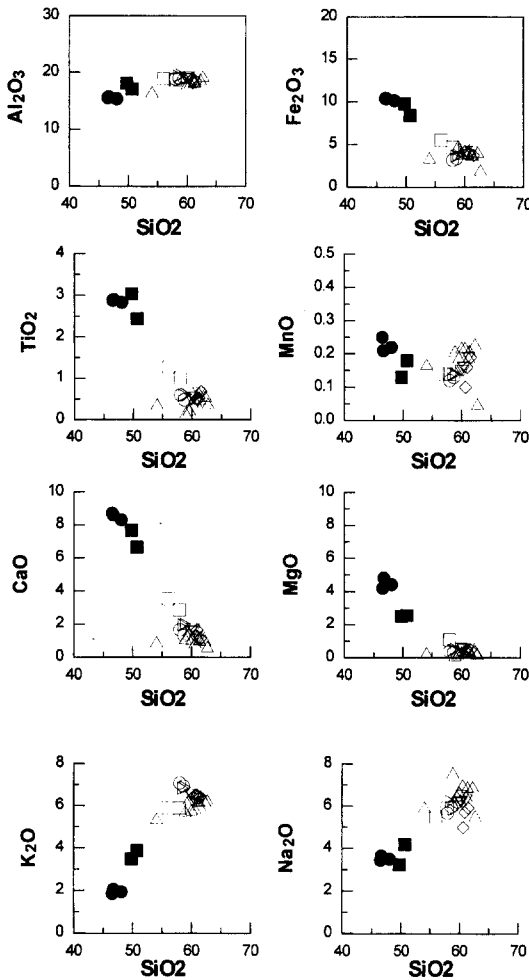


Fig. 9. SiO_2 vs major oxides of Ulleungdo volcanics.

K_2O 의 변화 경향을 닮았다. P_2O_5 의 경우는 이보다 더 심하여 테일리 갭 이전의 상승변화가 테일리 갭 이후에는 감소경향으로 바뀌었다.

테일리 갭 전후의 변화로부터 이러한 주성분 원소조성의 특이 만들어지는 동안에 일어난 분별정출 광물의 종류를 추정할 수 있다. 우선 감람석, 단사회석 및 티탄철석으로 생각되는 Fe, Mg, Ca를 함유하는 광물들은 그 비율이 비교적 일정하게 유지되며 계속 정출이 되었다. 이 원소들을 함유하는 새로운 광물들의 정출은 없었거나 그 정도가 미미하였을 것이다. 그러나 주로 장석 광물일 것으로 생각되는 Al과 K 등을 함유하는 광물의 정출은 테일리 갭이전에는 거의 없었으나 이러한 성분의 특이 만들어지는 동안에 정출이 시작되어 잔류마그

마 내의 농도 증가율이 감소하였다. 인회석으로 생각되는 P_2O_5 를 함유하는 광물의 정출은 두드러져서 테일리 갭 직후의 P_2O_5 농도는 푹 떨어지게 된다. 희토류원소의 경우 조면암-1이 생성되기 이전의 암석들은 Eu 이상치를 보이지 않으며 조면암-1만이 상당한 음의 Eu 이상치를 보인다. 이러한 현상은 조면암-1이 분출되기 이전에 상당량의 사장석의 분별이 일어난 결과로 해석된다.

암석의 분화

기존의 연구에 의하면 울릉도의 포놀라이트와 부석은 울릉도의 다른 암석들보다 더 높은 분화에 의하여 만들어진 것으로 해석되어 왔다(원종관과 이문원, 1984; Kim, 1986). 그러나 포놀라이트나 부석의 희토류 조성을 살펴보면 주목할만한 Eu의 이상치를 나타내지 않는다. 이러한 Eu 이상치의 결핍은 상당량의 사장석이 분화없이 이 암석들이 만들어졌음을 지시한다. 만약 울릉도의 다른 화산암들과 동일한 분화계열에서 만들어졌으며 Kim(1986)에 의해 주장된 것과 같이 조면암으로부터 추가적인 광물의 정출로 만들어졌다면 조면암-1과 마찬가지로 상당한 Eu의 이상치를 보여야 할 것이다. 그러나 이와 반대로 이렇다할 Eu 이상치를 나타내지 않음은 포놀라이트나 부석이 조면암-1을 형성한 분화경로와는 직접적으로 연결되지 않는 다른 분화경로를 갖고 있음을 나타낸다. 즉, 포놀라이트 및 부석은 조면암-1과는 한 솥의 마그마에서 만들어진 것이 아니라 별도의 마그마 솥에서 만들어진 것으로 판단된다. 한편 조면암-2와 조면암-3에 대하여도 포놀라이트 및 부석과 동일한 논리가 똑같이 적용되며 이들이 조면암-1과는 별도의 마그마 솥에서 만들어졌다고 판단된다. 조면암-2 및 조면암-3 역시 포놀라이트나 부석과 분별정출작용에 의한 분화관계로 연관짓기 힘들기 때문에 이들도 서로 다른 마그마 솥에서 만들어진 것으로 해석된다.

이와 같이 서로 다른 단계의 조면암들과 포놀라이트, 부석 등이 별도의 마그마 솥에서 만들어진 것이라면 부분용융의 정도도 달랐을 수 있다. 따라서 밀도 등에 의해 좌우될 수 있는 분화가 진행된 마그마 방의 깊이도 달랐을 수 있으며, 비슷한 깊이의 마그마 방에서 분화가 진행되었더라도 서로 다른 모마그마의 조성 때문에 분별 정출되는 광물의 종류나 양적 비율이 달랐을 가능성이 있다. 이러한 차이 때문에 많은 양의 사장석의 분별없이 분화가 진행된 것으로 추정할 수 있다.

마그마 기원

현재 채취가 가능한 지표에 분포하는 울릉도의 암석들은 매우 분화된 암석이 대부분이며 분화되지 않은 암석을 찾기 어렵기 때문에 모마그마의 조성을 추정하거나 이를 바탕으로 근원암의 조성을 알아내기는 매우 힘들다. 하지만 미량원소 중 고체보다는 마그마에 더 잘 농집되는 경향성이 강한 원소들 사이의 비율은 마그마의 분화에 따른 변화가 매우 적다. 따라서 울릉도와 같이 매우 분화가 많이 진행된 암석들의 경우에도 이러한 원소들 사이의 비율을 근원암의 성질을 유추하는데 매우 유용한 지표로 활용할 수 있다. 특히 Nb/U, Ce/Pb와 같은 원소의 비율은 마그마의 근원에 상관없이 지구조적 환경에 따라서 전 세계적으로 매우 일정한 값을 보인다고 알려져 있다. Hofmann *et al.*(1985)에 따르면 중앙해령 현무암과 해양화산도 현무암 모두 Nb/U는 47 ± 10 , Ce/Pb는 25 ± 5 의 값을 보인다. 울릉도 화산암의 Nb/U, Ce/Pb 평균값은 각각 57 ± 22 와 18 ± 5 로 Hofmann *et al.*(1985)에 의해 밝혀진 MORB 및 OIB 값과 비슷하다고 볼 수 있으며, 특히 분화에 의한 영향을 덜 받았을 것으로 판단되는 조면암질 현무암과 현무암질 조면암만을 평균내면 각각 59 ± 17 과 25 ± 1 로 Ce/Pb의 값은 전체 평균을 낸 경우보다 더욱 잘 일치하는 값을 보인다. 이러한 값은 Nb/U 및 Ce/Pb 비율이 각각 10과 5 정도에 불과한 대륙지각의 값과는 상당한 차이가 있다. 또한 울릉도 화산암이 매우 높은 Nb 함량(52-258 ppm)을 보이는 것은 일반적으로 매우 낮은 Nb 농도를 갖는 도호환경의 현무암들과는 대조적이며, 이러한 사실들은 앞에서 살펴본 미량원소 거미그림의 원소변화 양상과 함께 울릉도의 화산활동이 일본열도 동쪽의 섭입작용과는 직접적 관계가 없음을 나타내며 Nakamura(1989, 1990)의 주장과도 일치한다.

Tatsumoto and Nakamura(1991)에 의하면 울릉도와 독도 화산암들의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 조성은 대체로 EMI의 맨틀 단성분을 지향하는 해양화산도들과 비슷하며 어느 정도 불균질한 변화를 보인다. 서로 다른 마그마 가마에서 만들어진 것으로 추정된 조면암-1, -2, -3 그리고 포놀라이트와 부석 등이 비슷한 조성분원소의 함량에도 불구하고 미량원소 조성에서 상당한 차이를 보이는 것 역시 이러한 동위원소 조성의 불균질로 대표되는 마그마 근원지 조성의 불균질과 관계있을 것으로 해

석된다.

울릉도 화산암의 마그마 진화 모델

울릉도 화산암은 Tatsumoto and Nakamura (1991)의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 자료에서 볼 수 있듯이 어느 정도 불균질한 조성을 갖는 근원지로부터 만들어진 마그마가 여러 차례로 나뉘어 분출을 하여 만들어진 것으로 판단된다. 화산활동의 초기에는 높은 휘발성물질의 함량에 힘입은 알칼리 화산암 특유의 빠른 상승속도와 폭발력에 의해 비교적 분화가 많이 진행되지 않은 마그마가 깊은 맨틀의 근원지로부터 빠른 속도로 지구표면에 분출하기도 하였다. 그러나 상당량의 마그마는 높은 밀도를 가지기 때문에 지표에까지 이르지 못하고 맨틀과 지각의 경계부분 혹은 지각 내에 다시 마그마 방을 만들어 머물게 되었을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 낮은 깊이의 마그마 방에 머무는 동안 많은 광물의 정출로 분화가 진행되며 이와 동시에 밀도가 낮아지게 되나, 동시에 점성의 증가와 휘발성분의 손실에 의한 압력감소 등으로 추가적인 분출이 제한되었을 수 있다. 따라서 분출이 되지 않은 상태로 분화가 진행된 암석들은 이미 분출된 암석들과는 상당한 성분상의 차이를 보이며 조성분 원소조성의 틈을 갖게되었을 것으로 추정할 수 있다.

분화가 진행됨과 함께 점차 차가워지는 낮은 깊이의 마그마 방에 경우에 따라서는 다시 깊은 곳으로부터 분화되지 않은 뜨거운 마그마가 공급이 되기도 하였을 것으로 생각된다. 이 경우 갑작스런 온도의 상승으로 낮아진 점도와 하부에서 공급된 휘발성 물질 등에 의한 압력상승으로 폭발적인 분출이 이루어질 수 있다. 이 때 상부에 있던 이미 만들어졌던 분화가 덜된 암석들을 포획하여 함께 분출하기도 하였을 것으로 생각된다. 휘발성물질의 공급 감소 혹은 재공급되는 마그마의 온도나 부피 감소등이 일어나면 폭발적인 분출은 지속되지 못하고 멈추게 되었을 것이다. 그러나 때에 따라 더욱 분화된 조면암들의 분출은 간헐적으로 일어났던 것으로 추정된다. 이전의 연구에서는 포놀라이트로 분류되었던 사장석의 분별정출이 없거나 미미하여 Eu 이상치를 갖지 않는 조면암 조성 암석들이 출현함을 설명하자면, 때로는 대부분의 다른 조면암들과는 다른 마그마 솔에서 만들어져 부분 용융의 정도와 분별 정출된 광물의 구성이 다른 조면암 조성의 암석들도 분출된 것으로 추정된다.

결 론

약 3000 미터에 달하는 울릉도 화산체의 대부분을 이루는 해수면 아래 부분에 대한 직접적인 시료채취는 거의 이루어지지 못하고 있다. 그러나 해수면 윗부분에서 가장 오래된 것으로 판단되는 해안가를 따라 좁게 분포하는 화산암들이나 나중의 분출시 잡혀올라와 집괴암 내에 분포하게 된 암편들을 살펴보면 조면암질 현무암, 현무암질 조면안산암들이 발견된다. 이는 해수면 윗부분의 암석들이 대부분 조면암에 해당하는 조성을 보이는 것과 비교시 상대적으로 덜 분화된 암석들이 해수면 아래 부분을 구성하고 있음을 알려주는 것이다. 따라서 시간에 따른 전체적인 변화는 후기로 갈수록 분화가 더 진행된 암석이 분출된 것으로 볼 수 있다. 그러나 희토류원소의 변화경향과 Eu 이상치의 유무로 볼 때 울릉도에서 각 단계별로 분출한 화산암들이 단순한 분화경로를 따라 계속 더 분화된 암석이 분출한 것은 아니라고 판단된다. 조면암질 암석들 중에서 뚜렷한 음의 Eu 이상치를 보이는 조면암-1은 마그마로부터 상당량의 사장석이 분화되어 만들어진 것이다. 그러나 그 이후에 분출한 조면암-2, 조면암-3, 그리고 이전의 연구에서 포놀라이트로 명명된 암석과 부석등은 모두 뚜렷한 음의 Eu 이상치를 보이지 않으며 사장석의 분화정도가 조면암-1처럼 두드러지지 못하였다는 것을 나타내며 조면암-1의 조성을 갖는 마그마로부터 정출에 의한 분화로 이들 암석이 만들어진 것은 아님을 말해준다. 따라서 조면암-1보다 후기의 암석들은 이전의 암석들과 단순한 분별정출에 의한 분화관계로 설명할 수 없으며 각각이 별도의 마그마 솥에서 만들어진 별도의 분화단계를 거친 산물로 해석하는 것이 타당하다고 판단된다.

울릉도 화산암에서 뚜렷하게 관찰되는 조성의 양분화 현상, 즉 데일리 갭의 존재는 매우 빠르게 상승하는 많은 휘발성물질을 갖는 초기의 알칼리 현무암질 마그마의 분출이 휘발성물질의 감소와 높은 밀도, 분화에 의한 점성의 상승등으로 인하여 표면에 분출되지 못하고 맨틀과 지각의 경계나 지각 내부등에 위치한 마그마 방에서 상당기간 체류하게 되어 만들어진 것으로 판단된다. 하부로부터의 마그마 재주입에 의한 휘발성 물질의 재공급이나 뜨거운 마그마의 재주입에 의한 휘발성 물질의 비등등에 의해 마그마의 추가적인 분출이 간헐적으로 이루어졌을 것으로 생각된다. 데일리 갭 전후의 상당한 조성차이로 볼 때 이러한 화산활동의 재개

는 상당히 오랜 시간적 간격을 두고 일어나게 되었을 것으로 판단되며 이동안에 마그마로부터의 결정정출에 의한 분화가 많이 진행되어 조면암-1을 만들게 된 것으로 생각된다.

사 사

시료채취와 분석을 위한 시료준비, 원고준비 등에 많은 도움을 준 류호정 석사와 김동연 석사에게 감사드린다. 또한 심사과정에서 유익한 지적을 해주신 권선택 교수께도 감사드린다. 이 연구는 1994년도 교육부 해양/수산과학분야 학술연구조성비와 1991년도 동원학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 김윤규, 이대성, 1983, 울릉도 북부 알카리 화산암류에 대한 암석학적 연구. 광산지질, 16, 19-36.
- 원종관, 이문원, 1984, 울릉도의 화산활동과 암석학적 특성. 지질학회지, 20, 296-305.
- 이민성, 전용원, 1985, 한반도 남부의 제4기 화산암류과 이들의 tectonic한 환경. 지질학회지, 21, 260-280.
- Arai, F., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y. and Machida, H., 1981, Late Quaternary tephrochronology and paleo-oceanography of the sediments of the Japan Sea. Quat. Res. Japan, 20, 209-230.
- Bailey, D.K., 1980, Volatile flux, geotherms, and the generation of the kimberlite-carbonatite-alkaline magma spectrum. Mineral. Mag., 43, 695-699.
- Baker, B.H., Crossley, R. and Goles, G.G., 1978, Tectonic and magmatic evolution of the southern part of the Keyna Rift Valley: in Neumann, E.R., and Ramberg, I.B., eds., Petrology and geochemistry of continental rifts. E. Reidel Publishing Co., Dordrecht, The Netherlands, 29-50.
- Basu, A.R., Wang, J.-W., Huang, W.K., Zie, G.-H. and Tatsumoto, M., 1991, Major element, REE, and Pb, Nd, and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of Eastern China: Implications for origin from suboceanic-type mantle reservoirs. Earth Planet. Sci. Lett., 105, 149-169.
- Davies, G.R. and Macdonald, R., 1987, Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-rhyolite complex: combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints. Jour. Petrol.

- ogy, 28, 1009-1031.
- Geist, D., Howard, K.A. and Larson, P., 1995, The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: the basalt-rhyolite association at Volc n Alcedo, Gal pagos Archipelago. *Jour. Petrology*, 36, 965-982.
- Hauri, E.H., Wagner, T.P. and Grove, T.L., 1994, Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts. *Chem. Geol.*, 117, 149-166.
- Harumoto, A., 1930, Sanidine of Ulreung-do. The memoirs for Dr. Ogawa's sixtieth birthday, 539-548 (in Japanese).
- Harumoto, A., 1933, On the kaersutite and pigeonite found in the ejecta, Ulreung Island. *Chikyū*, 19, 96-100 (in Japanese).
- Harumoto, A., 1970, Volcanic rocks and associated rocks of Utsuryoto Island (Japan Sea). Nippon Printing & Publishing Co., Kyoto, 39p.
- Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M. and White, W.M., 1986, Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79, 33-45.
- Kim, Y.K., 1985a, Petrology of Ulreung volcanic island, Korea-Part 1. *Geology. J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 80, 128-135 (in Japanese with English abstract).
- Kim, Y.K., 1985b, Petrology of Ulreung volcanic island, Korea-Part 2. Petrography and bulk chemical composition. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 80, 292-303 (in Japanese with English abstract).
- Kim, Y.K., 1986, Magmatic differentiation in the volcanic rocks from Ulreung volcanic island, Korea. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 81, 165-180 (in Japanese with English abstract).
- Lange, R.A. and Carmichael, I.S.E., 1987, Densities of $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO-MgO-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ liquidus: New measurements and derived partial molar properties. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51, 2931-2946.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Jour. Petrology.*, 27, 747-750.
- Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E. and Varekamp, J.C., 1984, The 1982 eruptions of El Chichon Volcano, Chiapas, Mexico: mineralogy and petrology of the anhydrite-bearing pumices. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 23, 69-108.
- Matsui, Y., Onuma, N., Nagasawa, H., Higuchi, H., and Banno, S., 1977, Crystal structure control in trace element partition between crystal and magma. *Bull. Soc. Fr. Min. Crystallogr.*, 100, 324-328.
- Nakamura, E., Campbell, I.H. and Sun, S.-s., 1985, The influence of subduction processes on the geochemistry of Japanese alkaline basalts. *Nature*, 316, 55-8.
- Nakamura, E., Campbell, I.H. and McCulloch, M.T., 1989, Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: Implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. *Jour. Geophys. Res.*, 94, 4634-4654.
- Nakamura, E., McCulloch, M.T., and Campbell, I.H., 1990, Chemical geodynamics in the back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Nd isotopic compositions. *Tectonophysics*, 174, 207-233.
- Paster, T.P., Schauwecher, D.S. and Haskin, L.A., 1974, The behavior of some trace elements during solidification of the Skaergaard layered series. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 1549-1577.
- Peng, Z.-C., Zartman, R.E., Futa, K. and Chen, D.-G., 1986, Pb-, Sr-, and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chem. Geol.*, 59, 3-33.
- Philpotts, A.R., 1982, Compositions of immiscible liquids in volcanic rocks: *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80, 201-218.
- Tatsumoto, M. and Nakamura, Y., 1991, DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 3697-3708.
- Tsuboi, S., 1920, On the leucite rock, Vulsinitic vicoite, from Utsuryoto island in the Sea of Japan. *Jour. Feol. Soc. Tokyo*, 27, 91-104.
- Vogel, T.A. and Wilband, J.T., 1978, Coexisting acidic and basic melts: geochemistry of a composite dike. *Jour. Geology*, 86, 353-371.
- Zhang, M., Suddaby, P., Thompson, R.N., Thirwall, M.F. and Menzies, M.A., 1995, Potassic volcanic rocks in NE China: Geochemical constraints on mantle sources and magma genesis. *Jour. Petrology*, 36, 1275-1303.

(책임편집 : 권성택)

(1999년 3월 31일 접수, 1999년 5월 20일 수리)

Major, Rare-Earth and Trace Geochemistry of Ulleungdo Volcanic Rocks

Yong-Sun Song, Kye-Hun Park, and Maeng-Eon Park

Department of Applied Geology, Pukyong National University

ABSTRACT: The volcanic rocks of Ulleungdo reveal very high alkali element abundances and most of them have high K_2O/Na_2O ratios and belong to potassium-series. Ulleungdo volcanics show very wide range of variation in their composition from basalts to trachytic basalt, basaltic trachyandesite, trachyandesite, and finally to trachyte on total alkali-silica diagram. Such a general trend of compositional variation can be explained well by differentiation due to fractional crystallization of various minerals. Olivine, clinopyroxene, plagioclase, ilmenite, and apatite are suggested as the major fractionated minerals. Ulleungdo volcanics show Nb/U and Pb/Ce ratios similar to oceanic volcanics such as MORB and OIB, but significantly different from volcanic rocks of island arc environments, which suggest that they are not directly related with subduction along the Japanese arc. LREE abundances of Ulleungdo volcanics are highly enriched compared with HREE abundances ($(La)_N=193-420$, $(Lu)_N=7.5-19.5$). Only trachyte-1 show appreciable negative Eu anomalies among various rock types, which suggests significant amount of plagioclase were fractionated. However, trachyte-2, trachyte-3, phonolite, and pumice reveal quite different variation trend of trace and rare earth element abundances from trachyte-1, which suggest that they have originated from different magma batches and have experienced different differentiation processes. A prominent bimodal distribution, thus lacking of intermediate composition, is observed from the Ulleungdo volcanics.

Key words: Ulleungdo, volcanics, differentiation, rare earth element, bimodal distribution