

제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구 (II): 가파도와 마라도 화산암류의 암석화학 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대

고기원¹ · 박준범^{2*}

¹제주특별자치도 환경자원연구원 물산업육성부, ²미육군극동공병단 지반환경공학부

The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (II): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute Ages of the Volcanic Rocks in Gapado-Marado, Jeju Island

Gi Won Koh¹ and Jun Beom Park^{2*}

¹Jeju Special Self-Governing Province Institute of Environmental Resources Research, Department of Water Industry Promotion

²US Army Corps of Engineers Far East District, Geotechnical and Environmental Engineering Branch

We report petrologic characteristics including $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface lavas recovered from borehole cores in two islets, Marado and Gapado, off the southwestern coast of Jeju in southernmost Korea and discuss on the volcanism in the region. The lavas in Gapado are apparently divided into one unit with bright colored, aphanitic texture and sheet jointed, and another unit with dark colored and massive. The outcrops often show differentially weathered pattern due to textural difference. While, the lavas in Marado have vesicular and glomerporphyritic texture, even though each lava flow unit in Marado has slight unique texture with variation of vesicularity and phenocrysts. The chemical composition of rock core samples from Gapa borehole and Mara borehole shows that the lavas from Gapado and Marado are classified into basaltic trachyandesite (SiO_2 52.6-53.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 7.3-7.5 wt%) and tholeiitic andesite (SiO_2 51.7-52.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3.6-4.1 wt%), respectively. The measured $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages range from 824 ± 32 Ka (MSL -69 m) to 758 ± 9 Ka (MSL 19 m) for core samples of Gapa borehole and 259 ± 168 Ka (MSL -26 m) for a core sample of Mara borehole, respectively. The absolute age of Gapado basaltic trachyandesite is well correlated with that of Sanbangsan trachyte (Won *et al.*, 1986). Meanwhile, the age of a sample in Marado has 259 ± 168 Ka (MSL -26 m) with poor plateau age formation and high error range. We report the data in caution but the rock composition and absolute age of Marado tholeiitic andesite are relatively correlated with those of lava units from Duksu and Sangmo-2 boreholes, indicating the volcanism during 260-150 Ka. On the basis of interpretation of occurrences of exposed and subsurface volcanic rocks of the study area, stratigraphic relationship with adjacent borehole cores and the bathymetry chart of surrounding area, it indicates that the lavas in Gapado were formed around 800 Ka during relatively early stage of volcanic activity in Jeju Island. Meanwhile, Marado may have originated around 260-150 Ka during relatively young stage of volcanism in Jeju Island. It is inferred that the volcanisms have originated in land and these islets were individual ancient volcanoes. The apparent topography has been re-shaped by tidal erosion due to transgression.

Key words : Gapado, Marado, petrochemistry, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages, volcanism

이 연구는 한반도 최남단에 위치한 가파도와 마라도를 구성하는 용암류에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료를 포함한 암석학적 특징을 보고하고 그 화산활동에 대해 고찰한다. 가파도의 용암류는 판상절리가 발달되어 있고 담황색 내지 담회색을 띠는 비현정질 부분과 진회색의 괴상질 부분으로 구분되는데, 암질에 따라 차별적 풍화 침식을 받았다. 한편, 마라도의 용암류는 비록 용암단위별로 그 조직이 미약한 차이를 가지지만, 주로 다공질 혹은 취반상 조직의 용암류이다. 시추코어의 지화학 자료는 가파공의 경우 현무암질 조면안산암 (SiO_2 52.6-53.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 7.3-7.5 wt%)

*Corresponding author: chunpom@lycos.co.kr

이, 마라공은 솔리아이트질 안산암(SiO_2 51.7-52.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3.6-4.1 wt%)으로 구성되어 있음을 지시한다. 가파도 암류의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대는 824 ± 32 Ka에서 758 ± 9 Ka로서, 인접한 산방산 조면암(Won *et al.*, 1986)에 대비된다. 한편, 마라도의 것은 259 ± 168 Ka로서, 비록 오차 범위가 넓어 정확한 연대를 제시하지는 못하지만 인접한 덕수공과 상모2호공에서의 암석 성분과 연대 관계를 고려하면 260-150 Ka기간 동안에 형성되었을 것으로 추정된다. 용암류의 산상, 인접 시추공과의 대비 및 해수면하의 지형을 고려하면, 제주도 남서부 지역에서 가파도는 산방산 조면암의 분출시기와 유사한 시기에 화산활동으로 한편, 마라도는 이후 260-150 Ka기간 동안 화산활동에 의해 각각 육상 환경에서 독립된 화산체를 이루었으며, 이후 해침에 의해 침식이 많이 진행되어 현재의 형태를 이루었음을 지시한다.

주요어 : 가파도, 마라도, 암석화학, ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대, 화산활동

1. 서 론

제주도 주변에 분포하는 다양한 크기의 부속 섬 중 이미 여러 연구를 통해 우도(Koh *et al.*, 2005)와 비양도(Koh *et al.*, 2008)는 화구를 포함하는 단성 화산체로 이루어져 있는 반면 문섬, 섯섬(혹은 숲섬) 및 범섬(Chang *et al.*, 1999; Won *et al.*, 1986)은 단일 조면암 조성을 가지는 등암 화산체로 이루어져 있음이 알려져 있다. 그러나 한반도 최남단에 위치한 마라도와 가파도는 모슬포-한림 지질도폭 조사서(Park *et al.*, 2000)와 해수 담수화 사업 관련 보고서(Namjeju County, 2003, 2005)를 통해 암석기체적으로 이들이 각각 용암류로만 이루어진 화산체로 이루어져 있음이 보고되었을 뿐 자세한 연구는 이루어진 바 없다.

이 연구에서는 가파도와 마라도 지역의 해수 담수화 취수정 개발 사업으로 착정된 시추공으로부터 획득된 시추코어 용암류 시료의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대 자료를 포함한 이 두 지역을 구성하는 용암류에 대한 암석학적 특징을 보고한다. 또한 제주도 남서부 해안에 위치한 해수침투관측정인 덕수공-상모1호공-상모2호공-하모공에서 회수된 시추코어 용암류에서 획득된 자료와 더불어 가파도와 마라도의 화산활동에 대해 고찰해 본다. 우리는 지난 2001년 이래 착정된 시추공으로부터 얻어진 시추코어 용암류 시료의 지화학 및 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대 자료를 토대로 제주도의 지하 층서 및 화산활동에 대해 재정리하고자 노력하고 있다. 이미 동부 지역의 연구 결과는 발표되었으며(Koh *et al.*, 2008), 이 연구도 그 일련의 결과이다.

2. 연구 방법

연구를 위해 가파도와 마라도의 육상 지질조사가 행해졌으며 더불어 여섯 지역의 시추공(덕수공, 상모1호공, 상모2호공, 하모공, 가파공 그리고 마라공)에서 회

수된 시추코어로 부터 용암류의 수직적 성분 변화와 절대연대를 밝히기 위하여 용암단위(flow unit)별로 치밀질이 우세한 중간부에서 분석 시료를 채취하였다. 연구에 사용된 시추공의 위치는 Fig. 1과 같으며, 이들 시추공의 시추종착심도는 가파공(해발 21.7 m)과 마라공(해발 31.3 m)은 각각 92 m와 60 m, 해수침투관측정인 덕수공(해발 71 m), 상모1호공(해발 17.9 m), 상모2호공(해발 22.6 m), 하모공(해발 7.1 m)은 각각 121 m, 171 m, 325 m, 150 m이다.

시추코어 용암 시료에 대한 전암 주성분 및 미량성분의 화학분석은 미국 오레곤 주립대학교 불활성기체 분석 실험실에서 X선 형광분석법으로 이루어졌다(Table 1). 또한, 전암 ^{40}Ar / ^{39}Ar 절대연대는 동일 실험실에서 MAP 215-50 모델의 불활성기체 질량분석기로 이루어졌으며, ArArCALC v2.2 전산프로그램(Koppers, 2002)으로 절대연대가 계산되었다. 시료별 연대는 그 표준편차(2 Standard Deviation; 95% 신뢰도) 및 MSWD(Mean Square of Weighted Deviates)값과 같이 나타내었다(Table 2). 이들 분석 방법에 대한 신뢰도는 Koh *et al.* (2008)과 같다.

3. 지질 개요

북위 $33^\circ 9'42''\sim 33^\circ 10'33''$, 동경 $126^\circ 15'50''\sim 126^\circ 16'47''$ 에 위치한 가파도는 행정구역상 제주특별자치도 서귀포시 대정읍 가파리에 소재한다. 대정읍 하모리 해안에서 남쪽으로 약 2.4 km 떨어져 있으며, 동서 길이는 1.5 km, 남북의 길이는 1.3 km이고 그 외관은 마름모 또는 가오리 형태의 섬이다. 가파도는 섬 전체가 단일 “강정동현무암질조면안산암(Park *et al.*, 2000)”으로 기재되나, 하부의 조면암과 그 상부의 조면암질 안산암으로 나누어 구분되기도 한다(Song, 2003; Namjeju County, 2005). 간조 동안 섬 주변의 해안을 따라 노두가 잘 관찰되는데, 주로 판상절리가 발달되어 있고

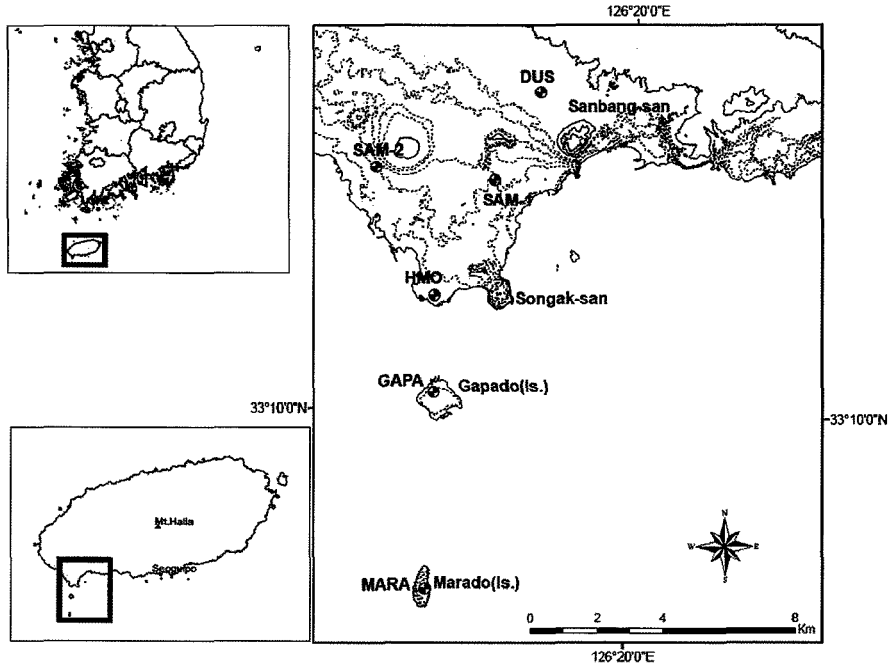


Fig. 1. Index map and location map of boreholes in the study area, southwestern Jeju Island. Dotted contours are in 10 m interval. Letters in bold indicate name of boreholes. Abbreviation: DUS-Deoksu, SAM-Sangmo, HMO-Hamo.

비현정질의 담황색 내지 담회색 부분이 괴상질 진회색 부분에 비해 차별적으로 풍화 침식이 많이 진행되어 있다(Fig. 2A and 2B). 이러한 이유로 이들이 서로 다른 용암단위에 의한 포획 혹은 관입 관계로 오해되기도 하였다(Song, 2003). 한편 이전 시추 주상도(Song, 2003; Namjeju County, 2005)에 따르면 역암층 및 화산쇄설성 퇴적층이 수 m의 두께로 용암류 상부를 덮고 있다. 섬의 서부 해안가를 따라 해변 자갈층이 분포하며, 북동부 지역에서는 오랜 기간 동안 풍화되어 핵석만 남은 호박돌을 쌓아 올린 돌담이 관찰된다.

한반도 국토의 최남단 섬 마라도는 북위 33°6'47"~33°7'26", 동경 126°15'55"~126°16'13"에 위치하며, 행정구역상 제주특별자치도 서귀포시 대정읍 가파리 580번지에 해당한다. 인접한 가파도로 부터 남쪽으로 약 4.5 km 정도 떨어져 있으며, 남북 길이 약 1.25 km, 동서 길이 약 0.5 km인 남북으로 길쭉한 “고구마형”의 타원형 섬이다. 전체적으로 평탄한 지형을 이루고 있으며, 해안선을 따라 해안 절벽과 해식 동굴이 잘 발달되어 있다(Fig. 2C). 마라도는 섬 전체가 단일 용암류로 이루어져 있는데, 광해악현무암(Park *et al.*, 2000) 혹은 침상장석감암석현무암(Namjeju County, 2003)으로 기재된다. 이 연구에서는 용암단위에 따라 서로 단위간

반정 광물의 미약한 양적인 차이를 가지는 것을 확인하였으며, 주로 다공질 혹은 취반상(glomeroporphyritic) 조직의 용암류로 구성되었음을 보고한다. 또한, 사장석과 휘석 및 감람석 반정이 취반상 조직을 이룸으로 인해 노두의 표면은 마치 꽃잎이 산포되어있는 듯 하다(Fig. 2D). 섬 주변의 해안 절벽에서는 해수면 위에 분포하는 1 m 내외의 두께인 십 여 개의 용암단위가 확인된다. 한편 분석층 혹은 스킨층이 분포하고 있지 않는 대신 약 1 m 두께의 토양층이 양호하게 발달되어 용암층의 최상부를 덮고 있다. 이들은 용암류의 풍화 침식 산물인 풍화잔적토(residual soil)로서 섬의 서북부에 위치한 선착장인 사리덕 해안 등지에서 그 단면이 쉽게 확인된다.

4. 결과 및 토의

4.1. 암석 화학

암석의 명명은 IUGS의 전암 실리카 대 알칼리 함량 분류도(Le Bas *et al.*, 1986)에 적용하였다(Fig. 3). 포토층을 제외한 가파공의 전구간(해발 21.7 m 에서 해수면 하 72 m까지)은 동일한 화학 성분을 가지는 현무암질 조면안산암(SiO_2 , 52.6~53.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

Table 1. Concentration of major(wt%) and trace elements(ppm) of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the study area, Jeju Island.

Borehole	MARA	MARA	MARA	MARA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	SAM-1	SAM-1	SAM-1	SAM-1	SAM-1
Depth(m)	8	32	58	60	23	13	30	48	61	72	85	91	85	61	72	85	91	85	61	8	8	27	42	42
Elevation(m)	24	0	-26	-28	19	9	-8	-26	-39	-50	-63	-69	-63	-39	-50	-63	-69	-63	-39	9.56	9.56	-9.44	-24.44	-24.44
Rock Name	ThA	ThA	ThA	ThA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	BTA	ThA	ThA	ThB	ThB	ThB
SiO ₂	52.07	52.75	51.71	52.59	53.64	52.58	53.27	53.26	53.18	52.96	53.07	52.75	53.07	53.18	52.96	53.07	52.75	53.07	53.18	52.70	49.55	50.78	50.78	50.78
TiO ₂	2.50	2.28	2.23	2.24	1.65	1.62	1.64	1.64	1.64	1.63	1.65	1.68	1.65	1.64	1.63	1.65	1.68	1.65	1.64	1.94	2.46	2.05	2.05	2.05
Al ₂ O ₃	14.81	14.94	14.47	14.53	18.38	18.17	18.41	18.45	18.41	18.33	18.28	18.40	18.28	18.41	18.33	18.28	18.40	18.28	18.41	14.18	14.33	13.91	13.91	13.91
MgO	5.57	6.00	7.05	6.82	1.85	2.26	2.33	2.33	2.31	2.26	2.39	2.46	2.39	2.31	2.26	2.39	2.46	2.39	2.31	7.61	8.02	8.38	8.38	8.38
FeO ^t	11.04	10.79	10.74	10.62	8.19	7.85	8.06	8.06	8.16	8.19	8.24	8.37	8.24	8.16	8.19	8.24	8.37	8.24	8.16	10.59	10.84	10.57	10.57	10.57
MnO	0.14	0.14	0.15	0.15	0.21	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.22	0.23	0.22	0.24	0.23	0.22	0.23	0.22	0.24	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15
CaO	8.99	8.96	9.02	8.96	6.75	6.57	6.69	6.61	6.60	6.75	6.51	6.76	6.51	6.60	6.75	6.51	6.76	6.51	6.60	8.55	8.83	8.72	8.72	8.72
Na ₂ O	3.27	3.10	3.07	3.05	4.97	4.81	4.89	4.93	4.79	4.77	4.83	4.79	4.83	4.79	4.77	4.83	4.79	4.83	4.79	2.90	3.14	2.81	2.81	2.81
K ₂ O	0.81	0.51	0.67	0.75	2.56	2.51	2.50	2.47	2.59	2.51	2.59	2.46	2.51	2.59	2.51	2.59	2.46	2.51	2.59	0.56	1.25	0.75	0.75	0.75
P ₂ O ₅	0.32	0.26	0.27	0.27	0.87	0.85	0.87	0.85	0.86	0.85	0.85	0.88	0.85	0.86	0.85	0.85	0.88	0.85	0.86	0.23	0.43	0.26	0.26	0.26
Total	99.53	99.74	99.38	99.98	99.08	97.45	98.89	98.85	98.78	98.47	98.64	98.79	98.64	98.78	98.47	98.64	98.79	98.64	98.78	99.41	99.01	98.39	98.39	98.39
(in ppm)																								
Ni	104	124	146	142	6	5	5	4	6	6	5	6	5	6	6	5	6	5	6	191	184	203	203	203
Cr	82	169	210	203	3	1	1	2	3	1	1	0	1	3	1	1	0	1	3	282	274	325	325	325
Sc	26	18	19	25	9	9	10	9	9	8	9	9	9	9	8	9	9	9	9	22	23	23	23	23
V	176	166	184	187	45	46	45	43	45	45	45	47	45	45	45	45	47	45	45	162	195	176	176	176
Ba	154	99	172	178	761	757	762	765	758	761	749	750	749	758	761	749	750	749	758	338	338	210	210	210
Rb	17	11	16	18	75	74	72	71	83	71	78	71	78	83	71	78	71	78	83	12	29	18	18	18
Sr	364	317	321	318	1034	996	1016	1015	1001	1029	995	1018	995	1001	1029	995	1018	995	1001	296	492	354	354	354
Zr	164	148	147	147	437	428	438	440	434	435	448	424	448	434	435	448	424	448	434	119	185	130	130	130
Y	26	25	24	24	38	38	38	38	39	39	39	37	39	39	39	39	37	39	39	22	24	21	21	21
Nb	21.5	15.9	18.0	19.3	83.2	81.8	83.3	84.3	83.0	82.5	85.5	82.2	85.5	83.0	82.5	85.5	82.2	85.5	83.0	12.7	33.7	17.7	17.7	17.7
Ga	18	21	22	19	23	22	21	23	23	23	22	22	22	23	23	22	22	22	23	20	20	20	20	20
Cu	46	39	41	53	2	2	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	4	3	3	57	43	47	47	47
Zn	118	120	114	117	131	130	127	127	136	128	130	127	130	136	128	130	127	130	136	113	112	108	108	108
Pb	2	2	4	2	8	6	6	7	18	5	6	6	6	18	5	6	6	6	1	1	3	4	4	4
La	7	8	12	11	71	72	73	74	68	72	71	74	71	68	72	71	74	71	68	11	27	14	14	14
Ce	23	25	25	31	138	132	138	140	139	138	141	132	141	139	138	141	132	141	139	23	59	35	35	35
Th			2	4	11	10	11	12	12	10	11	9	11	12	10	11	9	11	12	2	5	4	4	4

Table 1. Continued.

Borehole	SAM-1	SAM-1	SAM-2	SAM-2	SAM-2	SAM-2	SAM-2	SAM-2	SAM-2	SAM-2	SAM-2	DUS	DUS	DUS	DUS	DUS	DUS	DUS
Depth(m)	85	107	4	13	25	35	40	50	4	13	21	25	35	51	54			
Elevation(m)	-67.44	-89.44	18.59	9.59	-2.41	-12.41	-17.41	-27.41	67	58	50	46	36	20	17			
Rock Name	TrmB	AB	ThA	ThA	TrmB	TrmB	TrmB	TrmB	AB	AB	ThA	ThA	AB	AB	ThB			
SiO ₂	48.62	47.57	53.37	52.62	49.78	49.94	50.19	49.09	48.38	48.78	51.81	52.22	48.92	48.56	50.20			
TiO ₂	2.36	2.60	2.07	2.05	2.05	2.41	2.44	2.44	2.50	2.45	1.97	1.99	2.30	2.86	2.17			
Al ₂ O ₃	13.95	14.20	14.34	14.13	14.22	14.11	14.15	14.22	14.57	14.14	14.78	14.70	14.45	15.52	14.72			
MgO	8.90	8.63	7.32	7.59	9.64	8.81	8.55	8.33	9.01	8.99	8.53	8.46	8.91	8.62	9.40			
FeO ^t	11.19	11.23	10.51	10.85	10.76	11.15	11.21	11.18	11.37	11.16	10.74	10.80	10.91	11.08	10.83			
MnO	0.17	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16			
CaO	9.11	9.11	8.71	8.70	9.24	9.12	9.13	9.10	8.36	8.30	6.71	6.60	8.37	7.00	7.85			
Na ₂ O	2.91	2.89	3.06	2.98	2.95	3.04	3.10	3.09	3.22	3.16	3.08	3.18	3.23	3.38	2.94			
K ₂ O	1.05	1.39	0.62	0.66	0.85	1.00	1.02	1.13	1.25	1.32	0.86	0.90	1.52	1.61	0.68			
P ₂ O ₅	0.41	0.52	0.24	0.25	0.30	0.36	0.37	0.40	0.49	0.45	0.32	0.33	0.49	0.51	0.29			
Total	98.66	98.29	100.40	99.99	99.95	100.09	100.33	99.16	99.31	98.90	98.94	99.33	99.26	99.29	99.24			
(in ppm)																		
Ni	198	167	180	187	243	225	213	197	139	151	141	139	160	111	146			
Cr	334	263	275	273	304	300	295	288	256	275	206	198	282	162	313			
Sc	24	23	23	23	24	23	23	23	17	22	23	22	19	22	32			
V	203	205	164	159	183	189	190	195	201	195	173	178	201	225	191			
Ba	324	396	156	165	244	261	268	303	361	336	212	209	406	417	218			
Rb	25	33	16	17	21	23	23	25	19	27	19	21	34	37	12			
Sr	449	578	300	310	397	447	446	492	527	491	351	348	527	622	395			
Zr	162	200	133	135	144	165	169	186	204	195	149	153	205	217	146			
Y	23	24	22	22	22	22	23	23	24	24	23	24	24	23	23			
Nb	28.1	38.4	16.1	16.2	23.9	29.5	30.7	36.7	39.7	37.2	21.6	22.3	39.8	44.4	21.8			
Ga	19	20	18	19	17	19	20	23	19	20	22	20	21	22	22			
Cu	68	39	32	44	38	42	36	44	38	45	44	56	43	40	43			
Zn	109	114	117	115	112	112	113	115	115	111	114	114	110	115	112			
Pb	3	3	2	0	1	3	2	0	3	1	2	2	1	0	3			
La	23	31	14	13	15	23	18	24	37	22	17	25	8	36	10			
Ce	47	65	33	36	43	47	47	58	56	60	23	26	61	65	36			
Th	5	4	2	0	3	3	5	4	7	4	4	2	7	4	4			

Table 1. Continued.

Borehole	DUS	DUS	DUS	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO	HMO
Depth(m)	67	85	97	3	5	10	15	28	33	40	52	61	65	
Elevation(m)	4	-14	-26	5	3	-2	-7	-20	-25	-32	-44	-53	-57	
Rock Name	ThB	AB	AB	ThB	ThB	ThB	ThB	TrnB	TB	TB	TB	ThB	ThB	
SiO ₂	51.01	47.30	47.66	51.81	51.59	51.55	51.44	51.36	50.79	50.70	50.26	51.47	51.87	
TiO ₂	2.20	2.56	2.93	2.15	2.12	2.08	2.01	2.04	2.09	2.08	2.18	2.34	2.43	
Al ₂ O ₃	14.21	14.14	14.89	14.47	14.08	14.20	14.40	15.08	14.82	14.89	15.32	14.37	14.11	
MgO	9.23	9.99	8.96	7.52	8.44	8.36	8.51	7.48	7.23	7.36	7.08	7.44	7.38	
FeO ^f	10.58	10.84	11.91	10.61	10.80	10.57	10.48	10.10	10.24	10.58	10.60	10.81	11.07	
MnO	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15	0.15	
CaO	8.00	9.41	7.18	8.96	8.78	8.88	9.00	8.49	8.26	8.33	8.02	8.59	8.61	
Na ₂ O	3.00	2.93	3.14	3.00	2.95	3.00	2.97	3.50	3.56	3.51	3.80	3.03	3.07	
K ₂ O	0.76	1.37	1.68	0.72	0.74	0.75	0.74	1.46	1.58	1.55	1.75	0.75	0.81	
P ₂ O ₅	0.28	0.52	0.54	0.29	0.28	0.28	0.28	0.47	0.52	0.53	0.64	0.33	0.33	
Total	99.42	99.22	99.05	99.67	99.94	99.81	99.99	100.14	99.25	99.69	99.80	99.27	99.83	
(in ppm)														
Ni	147	182	111	149	190	185	187	145	153	156	132	182	179	
Cr	309	370	161	297	307	312	327	287	284	293	221	243	225	
Sc	29	23	23	23	24	24	23	22	21	22	19	20	22	
V	184	228	229	177	174	176	175	172	170	168	158	175	180	
Ba	191	401	446	197	197	196	200	397	415	430	481	211	206	
Rb	16	33	39	17	16	17	17	32	37	31	42	17	18	
Sr	369	608	654	372	360	370	377	481	488	496	578	383	383	
Zr	143	190	231	159	156	153	149	229	238	242	262	170	177	
Y	23	23	26	25	23	23	23	25	27	27	26	23	25	
Nb	19.8	40.5	46.5	18.2	17.6	17.9	17.3	35.2	37.3	39.3	45.3	19.1	19.4	
Ga	21	20	21	19	18	19	19	20	21	20	22	20	19	
Cu	45	38	38	50	49	49	42	45	43	43	37	36	40	
Zn	109	102	118	113	118	114	114	117	120	123	127	122	123	
Pb	0	1	0	2	2	2	2	2	2	3	3	1	1	
La	10	21	44	20	15	20	18	31	30	33	40	19	19	
Ce	39	60	71	34	36	34	34	61	66	68	80	39	45	
Th	0	1	5	3	3	3	3	5	5	6	5	3	2	

Total FeO as FeO^f. Analyzed by XRF at Oregon State University

Abbreviations: ThA-Tholeiitic andesite, ThB-Tholeiitic basalt, TrnB-Transitional basalt, AB-Alkali basalt, TB-Trachybasalt, BTA-Basaltic trachyandesite, TA-Trachyandesite

Table 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating result of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the study area, Jeju Island.

Hole ID	Depth (m)	Elev. (m)	Rock Type	Weighted Plateau				Normal Isochron				Inverse Isochron						
				Age(ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	Steps ¹	MSWD	Age(ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	i	2 s.d.	MSWD	Age(ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	i
MARA	72	24	ThA	262**	471	56.4	3/4	0.70	259.3	1313.7	295.5	9.2	1.39	765.6	47.7	300.6	4.48	0.42
MARA	91	-26	ThA	259**	168	45.1	3/4	0.50	-116.5	813.6	305.9	22.0	0.05	800.6	50.8	297.9	4.18	1.15
GAPA	8	19.0	BTA	758	9	95.3	7/8	0.81	755.4	9.3	298.8	4.8	0.54	276.2	506.9	295.4	9.20	1.41
GAPA	58	-26.0	BTA	808	21	100.0	8/8	0.75	789.3	29.7	298.9	3.8	0.34	-116.8	654.6	305.9	22.00	0.05
GAPA	3	-50	BTA	813*	25	96.5	7/8	1.23	754.1	39.4	301.8	3.3	0.42	755.9	9.2	298.8	4.78	0.58
GAPA	48	-69	BTA	824*	32	99.7	6/7	1.23	799.7	50.5	297.9	4.2	1.15	789.2	29.7	298.9	3.84	0.34
SAM-1	8	9.6	ThA	210*	166	60.2	5/6	0.33	293.0	355.0	293.5	7.7	0.32	291.9	299.7	293.5	7.68	0.35
SAM-1	27	-9.4	TrnB	225	19	90.1	4/5	0.45	226.0	24.0	294.8	7.0	0.62	227.1	242.2	294.7	6.95	0.65
SAM-1	42	-24.4	ThB	302	76	95.8	4/5	0.34	377.0	170.0	291.8	7.5	0.04	377.2	169.8	291.8	7.53	0.04
SAM-1	85	-67.4	TrnB	314	19	100.0	5/5	0.84	306.0	20.0	300.5	7.2	0.43	309.4	20.3	300.3	7.24	0.52
SAM-1	107	-89.4	AB	354	20	88.9	4/5	0.95	347.0	32.0	297.4	6.1	1.18	347.1	31.4	297.5	6.13	1.18
SAM-2	4	18.6	ThA	153	57	95.8	5/6	0.18	138.0	72.0	299.0	11.0	0.07	138.4	71.0	299.2	10.63	0.07
SAM-2	13	9.6	ThA	415**	423	100.0	5/5	1.02	216.0	1887.0	203.1	231.9	1.21	203.1	231.9	296.9	12.31	1.33
SAM-2	25	-2.4	TrnB	163*	45	98.1	5/6	1.58	155.0	71.0	296.6	9.9	1.95	156.3	68.4	296.8	10.32	2.06
SAM-2	35	-12.4	TrnB	220	55	100.0	5/5	0.22	224.0	72.0	295.2	3.4	0.28	223.7	71.0	295.3	3.38	0.29
SAM-2	40	-17.4	TrnB	234*	31	100.0	5/5	1.20	217.0	34.0	300.8	5.5	0.31	217.8	33.7	300.8	5.47	0.31
SAM-2	50	-27.4	TrnB	250	43	100.0	5/5	0.88	204.0	67.0	300.3	5.3	0.03	203.8	66.7	300.3	5.31	0.03
DUS	4	67.0	AB	32	24	84.1	3/4	0.29	32.0	30.0	295.2	9.9	0.57	32.0	27.7	295.4	9.83	0.59
DUS	21	50.0	ThA	73**	441	99.0	3/4	0.04	247.0	2330.0	294.4	14.6	0.05	247.6	1602.1	294.4	14.56	0.05
DUS	35	36.0	AB	50	10	94.4	4/5	0.47	48.0	12.0	297.1	7.6	0.64	48.7	11.1	297.0	7.58	0.63
DUS	51	20.0	AB	192*	17	100.0	5/5	1.09	183.0	20.0	298.1	3.7	0.78	182.9	20.3	298.1	3.70	0.78
DUS	67	4.0	ThB	200	48	100.0	5/5	0.72	216.0	63.0	293.7	4.6	0.76	216.4	61.4	293.7	4.62	0.76
DUS	85	-14.0	AB	231	13	100.0	5/5	0.66	228.0	17.0	296.9	5.4	0.76	227.9	16.7	297.0	5.36	0.78
DUS	97	-26.0	AB	244	9	100.0	5/5	0.78	247.0	12.0	291.2	8.4	0.72	247.2	11.7	291.5	8.38	0.74
HMO	3	4.1	ThB	10*	86	100	6/6	0.89	172.0	216.0	292.3	3.9	0.45	174.7	166.4	292.3	3.91	0.45
HMO	5	2.1	ThB	80	107	100	6/6	0.35	134.0	187.0	294.5	2.7	0.31	136.1	148.3	294.5	2.70	0.31
HMO	10	-2.9	ThB	117**	116	28.0	5/6	0.07										
HMO	15	-7.9	ThB	105	52	100	5/5	0.45	119.0	119.0	294.9	4.5	0.70	119.5	98.9	294.9	4.46	0.57
HMO	28	-20.9	ThB	116**	38	44.3	2/6	0.01										
HMO	33	-25.9	TB	116	23	100	6/6	0.48	129.0	31.0	293.8	2.8	0.26	128.7	30.5	293.8	2.85	0.26
HMO	40	-32.9	TB	135*	23	85.6	4/6	1.05	134.0	42.0	295.6	5.8	1.59	135.0	40.9	295.5	5.81	1.58
HMO	52	-44.9	TB	147	13	100	6/6	0.67	148.0	14.0	293.7	4.4	0.66	148.3	13.4	293.8	4.37	0.69
HMO	61	-53.9	ThB	159	67	100	5/5	0.03	183.0	211.0	294.9	5.2	0.02	185.3	209.5	294.9	5.19	0.02
HMO	65	-57.9	ThB	163	36	69.6	4/5	0.06	154.0	66.0	296.7	7.7	0.04	154.1	66.1	296.7	7.67	0.04

Samples irradiated at OSU TRIGA reactor for 6 hours at 1MW power. Neutron flux measured using FCT-3 biotite monitor(Renne *et al.*, 1998).

($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)i indicates the y-intercept value of isochron. 2 s.d. is two standard deviation.

*, Data in use with caution, **, Data excluded for interpretation.

1. Plateau age includes % ^{39}Ar and number of steps in the plateau (steps in plateau/total steps). Abbreviation of rock type is the same as in Table 1.

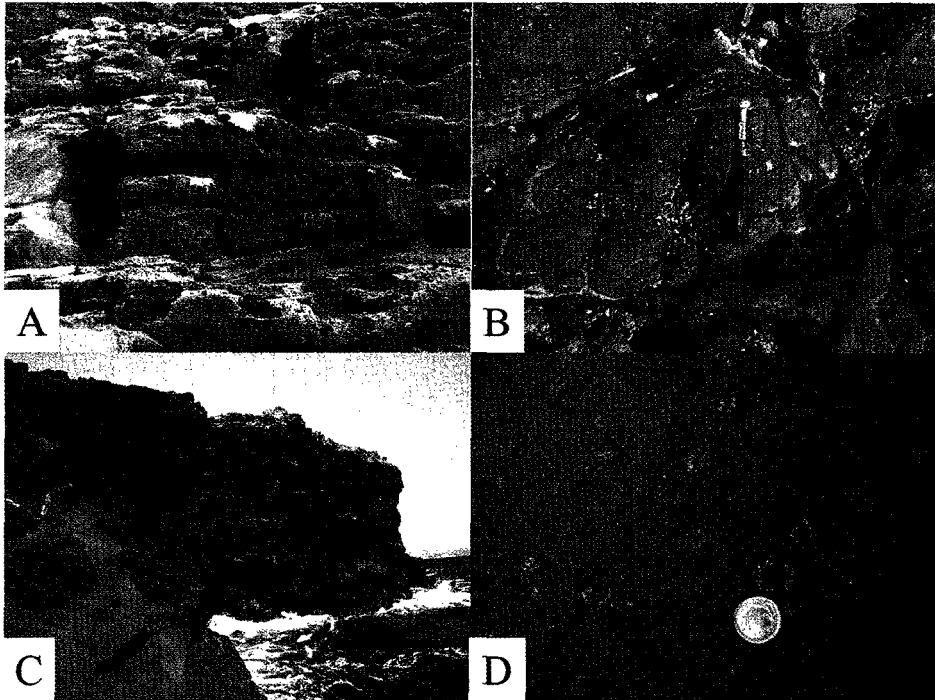


Fig. 2. Photographs of outcrops. (A) In Gapado(Is.), the rocks along the coastline are well exposed on the ebb. (B) The outcrops are apparently divided into one unit with bright colored, aphanitic texture and sheet jointed and another unit with dark colored and massive, and show differentially weathered pattern due to textural difference. (C) In Marado(Is.), steep sea cliffs and sea caves along the eastern and western rocky coastline are developed due to tidal erosion. (D) Each flow unit has slight unique texture with variation of vesicularity and phenocrysts, especially glomeroporphyric plagioclase-pyroxene-olivine clots on massive groundmass give occasionally an appearance on the outcrop of plagioclase rosette(2 cm diameter).

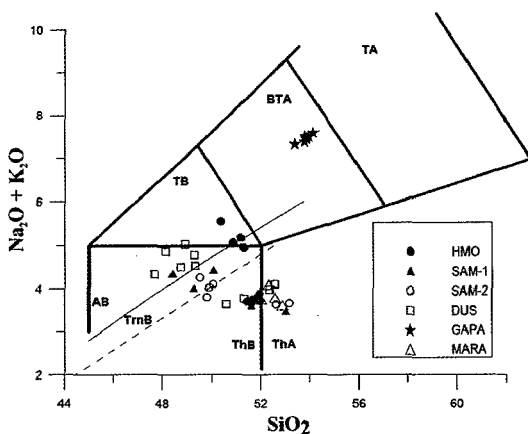


Fig. 3. ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (wt%) vs. SiO_2 (wt%) plot of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the study area, Jeju Island. The fields show rock nomenclature schemes of Le Bas *et al.* (1986). The solid line and the dotted line are from Irvine and Baragar (1971), and Macdonald and Katsura (1964) dividing alkalic rocks from sub-alkalic rocks. Abbreviations: AB-alkali basalt, TB-trachybasalt, BTA-basaltic trachyandesite, TA-trachyandesite, TrnB-transitional basalt, ThB-tholeiitic basalt, ThA-tholeiitic andesite.

7.3~7.5 wt%)으로 구성된다(Fig. 3). 이 지역의 용암류가 비록 용암단위에 따라 조직의 차이를 지니고 있지만 암석화학적으로는 단일 성분이다. 이는 용암류에 대한 암층명을 정할때 육안 기재적 특징에 암석화학적 명칭을 부여할 경우(Song, 2003; Namjeju County, 2005) 주의가 요구됨을 다시 강조해주는 실례라 하겠다. 한편, 마라공 역시 표토층을 제외한 전구간(해발 31.3 m 에서 해수면 하 28m까지)에서 동일한 화학 성분을 가지는 슬리아이트질 안산암(tholeiitic andesite, SiO_2 51.7~52.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3.6~4.1 wt%)으로 이루어져 있다(Fig. 3).

가파도와 마라도 뿐만 아니라 연구 지역내 6개 시추공에서 얻어진 시추코어 용암류에 대해 MgO 를 분화 지수로 하여 주성분원소 및 미량성분원소의 변화 경향을 알아보았다(Fig. 4 and 5). MgO 의 함량이 감소함에 따라 SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O 와 P_2O_5 함량은 증가하는 반면, TiO_2 , FeO 와 CaO 의 함량은 꾸준히 감소하는 경향을 보인다(Fig. 4). 이는 이 지역 용암류의 성분 분화 과정이 주로 마그마 방 혹은 화도내에서 감

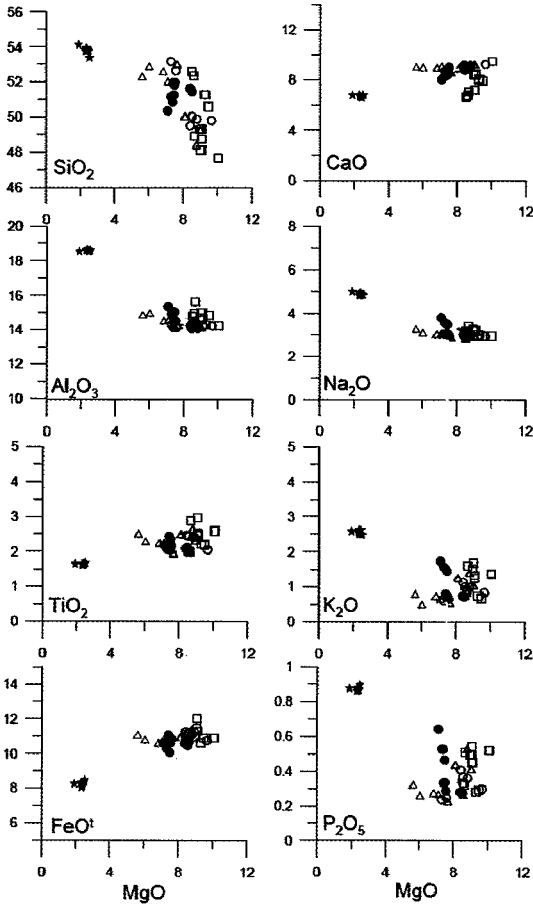


Fig. 4. MgO (wt%) vs. major element variations of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the study area, Jeju Island. Symbols are the same as in Fig. 3.

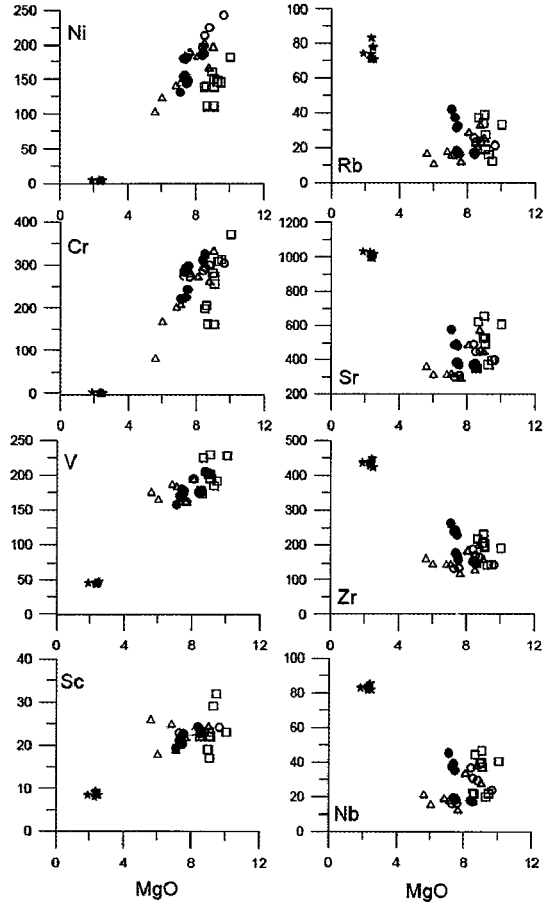


Fig. 5. MgO (wt%) vs. trace element variations of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the study area, Jeju Island. Symbols are the same as in Fig. 3.

람석, 단사휘석 및 Fe-Ti 산화광물의 정출로 인해 영향 받았음을 의미한다. MgO 함량이 감소함에 따라, 호정적 미량성분 원소 중 Ni, Cr, V와 Sc의 함량은 감소하는데 반해, 불호정 미량성분 원소인 Rb, Sr, Zr과 Nb의 함량은 증가한다(Fig. 5). 암석 성분에 따른 원소의 거동은 동일한 MgO에서 마라도를 포함한 솔리아이트질 현무암 및 안산암류가 알칼리 현무암류 및 전이질 현무암류에 비해 특징적으로 K₂O, P₂O₅ 및 불호정적 미량원소가 낮은 함량을 가진다. 이는 이들의 모마그마의 성분이 차이가 있었음을 반영한다. 한편, 가파도의 현무암질 조면안산암과 다른 지역의 현무암질암류를 동시에 점시함으로써 이 지역의 화산활동은 쌍모형(bimodal)의 성분 분포를 이루고 있음을 보여준다. 그러나 장광화 등(2006)은 가파도의 용암류와 유사한 성분 및 분출 시기를 가지는 산방산 조면암류의 Sr-Nd

동위원소비가 비교적 젊은 연대를 가지는 용암류와 차이를 보여 그 근원 마그마의 성분이 서로 다를 수 있음을 보였다. 앞으로 가파도의 현무암질 조면안산암에 대한 성인적 관계를 밝히기 위한 연구가 이루어져야 할 것이다.

4.2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대

이 연구 지역의 용암류에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 시추공내 시료의 위치와 그 암석 성분에 대해 종합하였으 며(Fig. 6), 가파도와 마라도의 용암 시료에 대한 자세한 플래토 연대는 각각 Fig. 7과 8에 나타내었다.

가파도 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 824±32 Ka(해수면 하 69 m)에서 758±9 Ka(해발 19 m)로서 섬의 지표면으로 감에 따라 약간 젊어지는 양상을 띤다(Fig. 6 and 7). 이는 가파도가 화산 분출에 의해 하부에서 상부로 섬이 성장했음을 나타낸다. 또한 이 절대연대는

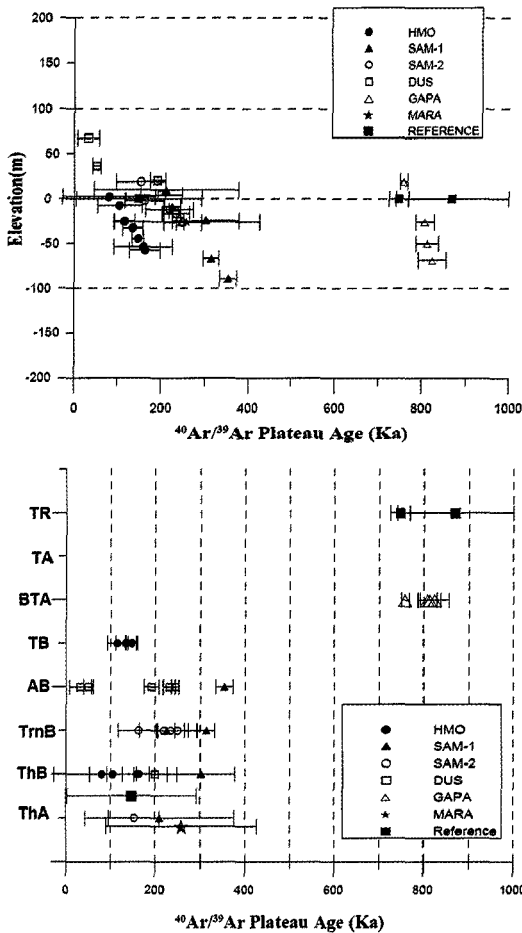


Fig. 6. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age variation of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the study area, Jeju Island. (A) against elevation (m) of rock cores, (B) against rock types of rock cores. References from Won *et al.* (1986) and Yun *et al.* (1986) for Sanbangan trachyte and Cho *et al.* (2005) for Kwanghaek basalt. Abbreviations of rock composition are the same as in Fig. 3 except for TR (trachyte).

인접한 산방산의 K-Ar 절대 연대(0.87 ± 0.13 Ma, Yun *et al.*, 1987; 0.733 ± 0.056 Ma, Won *et al.*, 1986)와 유사하며(Fig. 6), 제주도 남서부에서 가장 오래된 화산 활동의 산물임을 지시한다. 반면, 도폭 조사에서 명명된 “강정동현무암질조면안산암(Park *et al.*, 2000)”의 표식지 주변에서 채취한 용암 시료의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 403 ± 9 Ka(미발표 자료)로서, 가파도를 구성하는 용암류의 연대와 차이를 보인다. 따라서 이들은 다른 화산활동의 산물이므로 앞으로 제주도 화산 층서에서 서로 구분하여 기재되어야 하며, 도폭 내용도 수정되어야 함을 보고한다.

마라도 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 각각 259 ± 168 Ka(해수면 하 26 m), 262 ± 471 Ka(해발 24 m)이다(Fig. 8). 일반적으로 MSWD값이 1이하의 경우는 그 연대값이 분석 오차 및 그의 시료가 지니고 있는 요인에 의해 영향받지 않은 경우를 지시한다(Koppers, 2002). 그러나, 마라도 시료의 MSWD값은 1이하에도 불구하고, 플래토 형성이 양호하지 못하고 오차 범위가 비교적 크기 때문에(Baski, 2006) 이 연구에서는 참고 자료로 제시한다(Fig. 8). 이미 보고된 동부 지역(Koh *et al.*, 2008) 및 연구 지역내 사계리 지역 광해악현무암의 연대 자료(148.1 ± 144.6 Ka, Cho *et al.*, 2005)에서 인지되는 바와 같이 해수면 주변의 일부 솔리아이트질암류에서 비교적 큰 오차 범위를 갖는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대가 보고된다(Fig. 6). 앞으로 그 요인에 대한 연구 및 대안이 되는 절대연대 측정방법을 통한 신뢰할 만한 연대 자료를 얻기 위한 노력이 필요하다. 한편, 이 연구에서는 마라도의 구성암석과 유사한 성분을 가지는 덕수공 솔리아이트질 현무암(해발 4 m)의 연대, 200 ± 48 Ka와 상모2호공 최상부 솔리아이트질 안산암(해발 18.6 m)의 연대, 153 ± 57 Ka를 보고한다(Fig. 8). 비록 마라도의 경우 신뢰할 만한 연대 자료를 얻지 못하였으나, 그 암석 성분과 주변 지역의 연대 자료들로 미루어 볼때, 마라도는 최고 26만년에서 15만년 사이에 형성되었을 것으로 추정된다.

4.3. 화산활동

제주도 남서부 해안 지역은 수월봉 및 송악산의 연구를 통해 수성화산활동에 대한 연구가 비교적 활발히 진행되었다(예, Sohn and Chough, 1989; Sohn *et al.*, 2002). 그러나 이 연구의 결과에서 나타난 바와 같이 이 지역에서의 용암 분출과 같은 화산활동의 시기는 약 80만년전의 용암 분출 이후에 비교적 오랜 기간의 휴지기를 지낸 후 약 40만년경에서 부터 다시 활발한 현무암질 용암 분출이 있었음을 나타낸다(Fig. 6). 또한 시추코어에서 얻어진 해수면 하에 분포하는 용암류의 절대연대는 이 지역 주변의 지표에 응회환과 응회구를 형성한 수성화산활동 시기가 용암 분출에 의한 화산활동에 비해 비교적 짧았음을 지시한다.

Fig. 9는 연구 지역의 시추공에 대해 모식적인 주상 단면을 나타낸 것이다. 우선 가파공 및 마라도공의 시추 종착심도가 제주도 섬내부의 다른 시추공과 달리 그 심도가 얕아 서귀포층이나 U층의 존재여부를 확인할 수 없다. 그러나 가파도 현무암질 조면안산암의 분출 연대(약 80만년)는 인접한 덕수공-상모1호 및 2호공-하

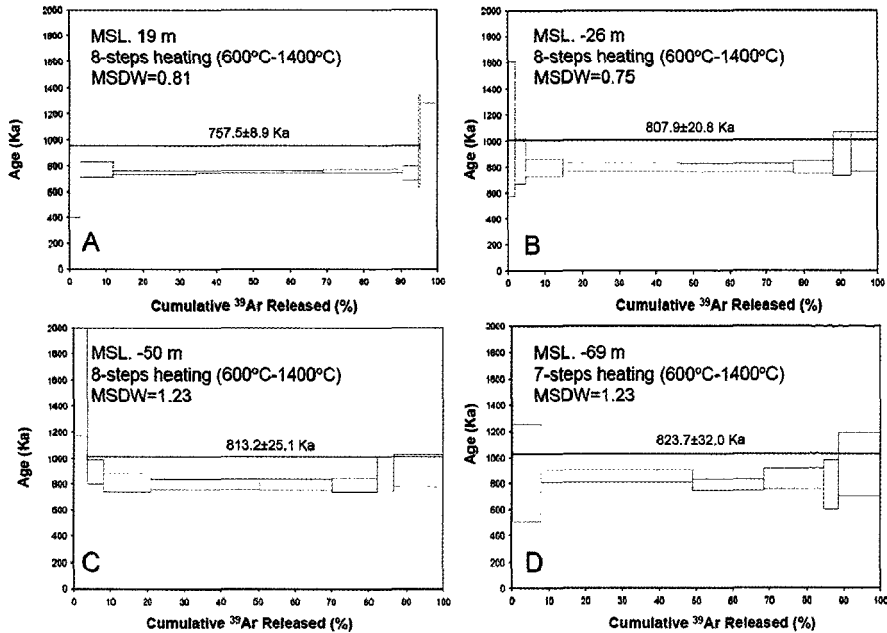


Fig. 7. ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age plot (apparent age vs. cumulative % ^{39}Ar released) for the selected samples from GAPA boreholes.

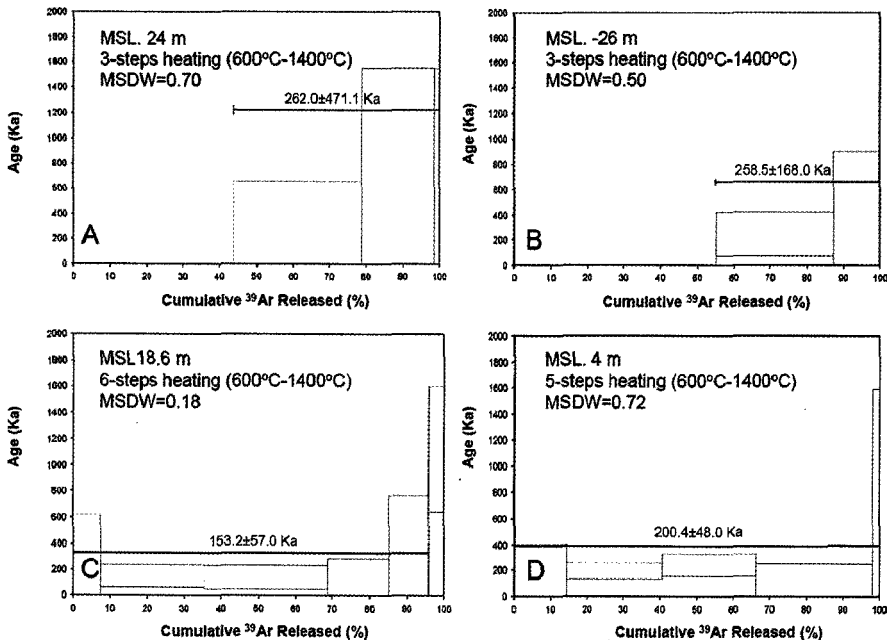


Fig. 8. ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age plot (apparent age vs. cumulative % ^{39}Ar released) for the selected samples from MARA (A, B), SAM-2 (C) and DUS (D) boreholes.

모공에서 최하부 용암류가 서귀포층과 접하는 연대(약 35~25만년)보다 상당히 오래되어 서귀포층이 연장되었을 가능성은 거의 희박하다고 여겨진다. 또한 다른

지역과 달리 단일 조성을 가지는 두꺼운 용암 단위의 두께는 이들이 돔상 화산체(가파도)이거나 분출화구와 근접한 위치(마라도)에 있었음을 시사해준다.

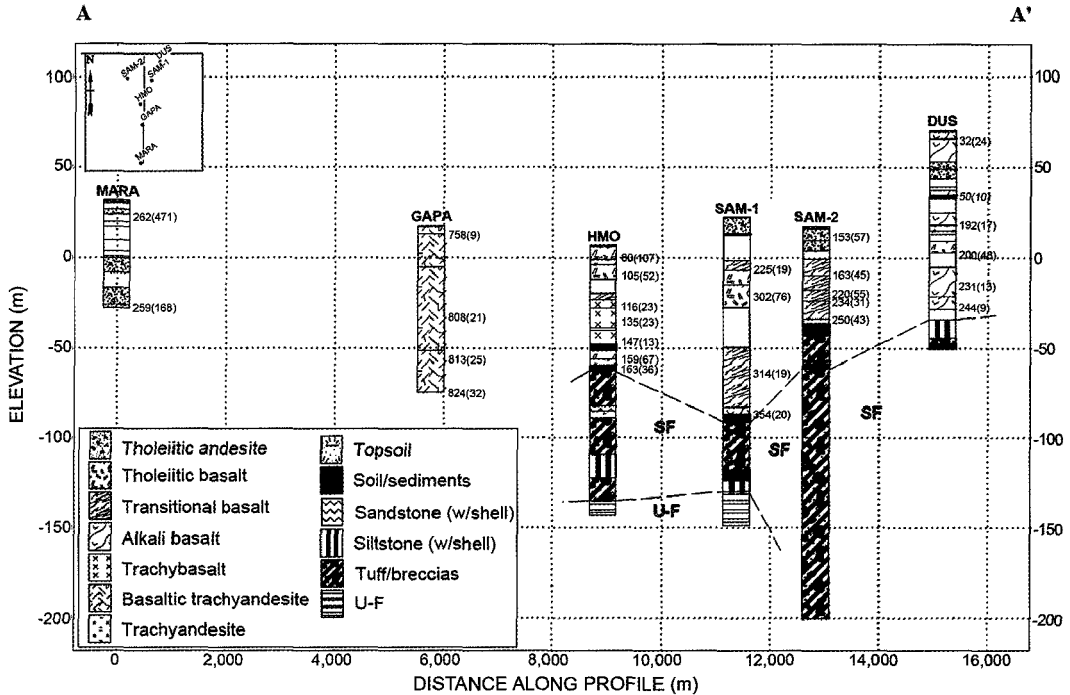


Fig. 9. Schematic graphic logs of boreholes in the study area, Jeju Island. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration $\times 35.5$. Numbers with number in parenthesis are $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the subsurface volcanic rock cores. Blank area in log depicts rock core range for no chemical analysis. The area in red line indicates zone with hyaloclastites and pillow lava blocks. Abbreviations: U-F, Unconsolidated Formation, SF, Seougiupo Formation.

한편, 덕수공-상모1호공 및 2호공-하모공에서 약 30만년, 20만년 및 10만년의 절대연대를 지나는 용암류의 하위에 베게용암(pillow lava)을 포함한 유리쇄설성 각력암(hyaloclastite breccia)층이 분포하는 양상은 여러번에 걸친 해침에 의한 해수면 상승 기록을 나타낸다. 이에 비해 가파도와 마라도의 시추코어 용암류에서는 관찰되지 않는다. 이러한 점은 이들 용암류가 분출할 당시 시기적으로 이 두 섬지역은 육상환경이었을 가능성을 시사한다.

이 지역의 해저 지형에 대한 정보를 제공해 주는 1대 25,000 축척의 “모슬포” 연안정보도(MMAF, 2006)는 가파도 주변이 다양한 크기의 암초를 포함하는 넓은 해저지형이 존재하고 있음을 보여준다(Fig. 10). 이 지역의 해침과 해퇴의 역사를 고려할 때, 가파도의 원시 화산지형은 단일 조면암 돔을 이루고 있는 산방산보다도 더 넓은 화산체였음을 시사한다. 한편 가파도와 마라도 사이는 제주 주변 해역 중 가장 수심이 깊은 곳의 하나(해수면 하 163 m)가 존재하는 협곡에 해당하며 마라도는 해수면 하 50 m에서부터 해수면 위

로 뾰족한 형태의 화산체를 이루고 있다. 제주도 본섬은 알칼리 성분의 용암류가 주를 이루지만, 마라도의 용암류는 우도(Koh *et al.*, 2005)와 같은 서브 알칼리 성분이다. 그러나 하부에 알칼리현무암 성분의 용암과 응회구를 가지는 우도와는 달리, 마라도는 솔리아이트질 안산암의 단일 조성을 지닌 용암류로 구성된 섬이다. 일반적인 솔리아이트질 마그마의 분출 양상을 고려하면, 마라도가 중심 분출보다는 열극 분출의 화산 활동과 연관되었을 것임을 시사한다.

따라서, 두 섬에 분포하는 용암류의 산상은 이들이 육상 화산활동의 산물이며, 해수면 하의 해저지형과 인접 제주도 남서부 해안 지대의 화산암 분포 양상을 고려하면, 각각 독립된 화산체를 이루었고 이후 해침에 의해 침식이 많이 진행되어 현재의 형태를 이루었음을 지시한다. 앞으로, 마라도를 구성하는 솔리아이트질 안산암의 정확한 절대연대를 구하려는 노력과 더불어 제주도 본섬에 분포하는 다른 솔리아이트질 용암류와의 성인적 관계 그리고 분출 기원과 유형을 밝히기 위한 연구가 요구된다.

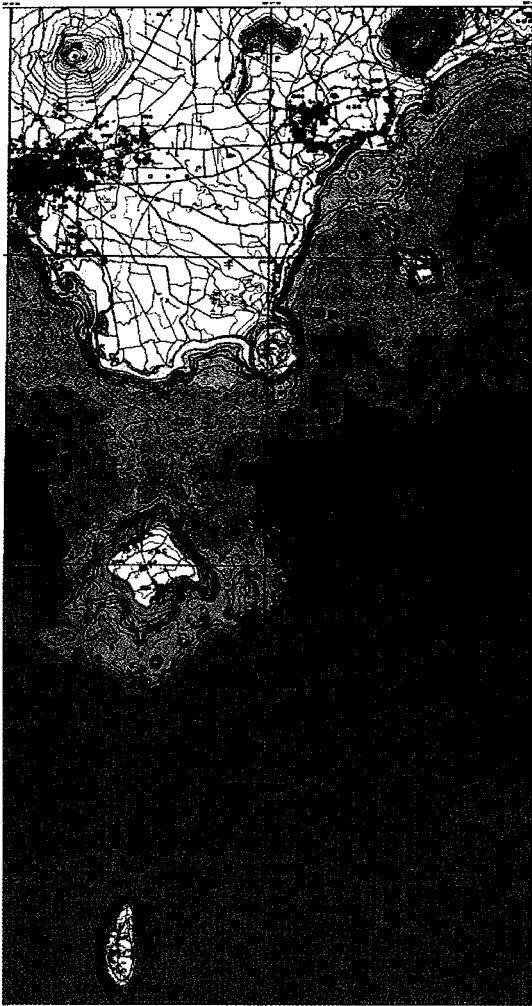


Fig. 10. General bathymetry of the study area (reference: Coastal Information Map, MMAF, 2006, Mosulpo. 1: 25,000).

4. 결 론

1) 가파도와 마라도를 구성하는 용암류는 단일 조성을 가지며, 각각 현무암질 조면안산암(SiO_2 52.6~53.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 7.3~7.5 wt%)과 솔리아이트질 안산암(SiO_2 51.7~52.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3.6~4.1 wt%)으로 구성된다.

2) 가파도의 현무암질 조면안산암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대 연대는 824 ± 32 Ka(해수면 하 69 m)에서 758 ± 9 Ka(해발 19 m)로서, 인접한 산방산 조면암(Won *et al.* 1986)에 대비되며, 이들은 비교적 제주도 화산활동 초기인 80 만년경에 각각 독립된 화산체를 이루었음을 지시한다. 한편 마라도의 솔리아이트질 안산암의 절대연대는

259 ± 168 Ka(해수면 하 26 m)의 값을 얻었으나 이 연구에서는 참고 자료로서만 제시한다. 인접한 송악산 지역을 포함한 덕수공과 상모2호공에서 얻어진 솔리아이트질암류의 절대연대 관계와 산상으로 미루어 마라도의 솔리아이트 안산암은 비교적 젊은 시기(약 26-15만 년 경)에 분출하였음을 시사한다.

3) 용암류의 산상 및 해수면 하의 해저지형 그리고 인접 제주도 남서부 해안 저지대의 화산암 분포 양상은 두 섬에 분포하는 용암류가 육상 화산활동의 산물로서 각각 독립된 화산체를 이루었으며, 이후 해침에 의해 침식이 많이 진행되어 현재의 형태를 이루었음을 지시한다.

사 사

이 연구를 수행하는데 많은 도움을 주신 제주특별자치도 환경자원연구원 물산업육성부 수자원연구과 문덕철 연구원을 비롯한 모든 연구원께 감사를 드린다. 또한, 암석성분 분석 및 절대연대 측정 그리고 연대자료의 해석에 도움을 준 미국 오레곤 주립대학교 Robert A. Duncan 교수님과 John Huard 연구원께 감사 드린다. 이 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 해주신 이승렬 박사님, 김정민 박사님과 익명의 심사위원께 깊이 감사 드린다.

참고문헌

Baski, A.K. (2006) Guidelines for assessing the reliability of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages: application to ages relevant to hotspot tracks. <http://www.mantleplumes.org/ArAr.html>.

Chang, K-H, Park, J-B. and Kwon, S-T. (1999) Petrography and mineral chemistry of trachytes in Cheju Volcanic Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.35, p.15-34.

Chang, K-H, Park, J-B. and Kwon, S-T. (2006) Geochemical Characteristics of trachytes in Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.42, p.235-252.

Cho, D.L., Park, K.H., Jin, J.H. and Hong, W. (2005) Age Constraints on Human Footmarks in Hamori Formation, Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society in Korea*, v.14, p.149-156.

Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, p.523-548.

Kelly, S. (2002) Excess argon in K-Ar and Ar-Ar geochronology. *Chemical Geology*, v.188, p.1-22.

Koh, J.S, Yun, S-H, Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y-W. (2005) Petrology of the basalt in the Udo monogenetic

- volcano, Jeju Island. *Journal of the Petrological Society in Korea*, v.14, p.45-60.
- Koh, G.W., Park, K-H, Park, J-B. and Park, W-B. (2008) Interpretation of volcanism in Biyangdo, Jeju Island (2). *Proceeding 2008 Annual Conference Geological Society of Korea*, Daejeon, p.28.
- Koh, G.W., Park, K-H, Park, J-B. and Park, Y-S. (2008) The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rocks cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. *Econ. Environ. Geol.*, v.41, p.93-113.
- Koppers, A.A. (2002) *ArArCALC*-software for ^{40}Ar - ^{39}Ar calculations. *Computers & Geosciences*, v.28, p.605-619.
- 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. *Journal of Petrology*, v.27, p.745-750.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T. (1964) Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, v.5, p.82-133.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2006) Coastal information map of Mosulpo (1:25,000).
- Namjeju County (2003) Report of groundwater impact due to service change of exploratory well in Marado. 104p. (translated)
- Namjeju County (2005) Report of groundwater impact due to service change of exploratory well in Gapado. 104p. (translated)
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C. (2000) Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Inst. Geology, Mining and Materials, Taejon., 56p.
- Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D.B., Owens, T.L. and DePaolo, D.J. (1998) Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Chemical Geology*, v.145, p.117-152.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K. (1989) Depositional processes of the Suwolbong tuff ring, Cheju Island (Korea). *Sedimentology*, v.36, p.837-855.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W. (2002) Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. *Journal of volcanology and geothermal research*. v.119, p.1-20.
- Song, S.T. (2003) Research on morphology and geology of Gapado. Jeju Provincial Office of Education. Science Education, 19. (translated).
- Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W. (1986) Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. *Jour. Korean Inst Mining Geology*, 19, 25-33.
- Yun, S.K., Han, D.S. and Lee, D.Y. (1987) Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. *Korea Inst Energy & Resources Rpt KR-86-2-(B)-2*, 64p.

2009년 10월 9일 원고접수, 2010년 2월 17일 게재승인