

제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구 (I): 동부지역 저지대 시추코어 화산암류의 암석화학 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대

고기원¹ · 박준범^{2*} · 박윤석¹

¹제주특별자치도 수자원본부, ²미육군극동공병단

The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute ages of the Subsurface Volcanic Rock Cores from Boreholes in the Eastern Lowland of Jeju Island

Gi Won Koh¹, Jun Beom Park^{2*} and Yoon Suk Park¹

¹Water Resources Office, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 690-170, Korea

²US Army Corps of Engineers Far East District, Seoul, 100-195, Korea

This study presents petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of subsurface volcanic rock cores from twenty(20) boreholes in the eastern lowland (altitude 200m below) of Jeju Island, Handeong-Jongdal-Udo-Susan-Samdal-Hacheon areas, and discusses topography and volcanism in the area. The subsurface volcanic rock cores are mainly basalts in composition with minor tholeiitic andesites and basaltic trachyandesites. Sequences of intercalated tholeiitic, transitional and alkalic lavas suggest that tholeiitic and transitional to alkalic lavas must have erupted contemporaneously. Especially, occurrences of trachybasalts and basaltic trachyandesites at the bases in the area imply that the volcanism in the area was initiated with slightly differentiated alkaline magma activity. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores range from $526\pm 23\text{Ka}$ to $38\pm 4\text{Ka}$. The lava-forming Hawaiian volcanic activities of the eastern lowland can be divided into five sequences on the basis of sediment distribution, whole rock geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores; stage I-U(550~400Ka), stage II(400~300Ka) and stage III(300~200Ka) during syn-depositional stage of Seoguiipo Formation, and stage IV(200~100Ka) and stage V(younger than 100Ka) during post-depositional stage. In the eastern lowland of Jeju Island, compositional variations and local occurrences of the subsurface volcanic rocks as well as existences of various intercalated sediment layers (including hydrovolcanogenic clasts) suggest that the volcanism must have continued for long time intermittently and that the land has been progressively grown from inland to coast by volcanic activities and sedimentation. It reveals that the subsurface volcanic rocks in the eastern lowland of Jeju Island must have erupted during relatively younger than 200Ka of stages IV and V. The results of this study are partly in contrast with those of previous studies. This study stresses the need that previous reported volcanic activities in Jeju Island based on K-Ar ages of volcanic rocks should be carefully reviewed, and that stratigraphic correlation from boreholes should be conducted by quantitative criteria combined with petrography and petrochemistry as well as radiometric studies of volcanic rock cores.

Key words : Jeju Island, Eastern lowland, Borehole, Petrochemistry, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute age

제주도 동부 저지대 (해발 200 m 이내), 한동-종달-우도-수산-삼달-하천 지역의 20개 시추공에서 얻어진 화산암류의 암석학적 특징과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 보고하고, 이에 근거하여 이 지역의 지형형성과 화산활동에 대해 고찰한다. 이 지역의 지하에 분포하는 화산암류는 주로 현무암류(알칼리 현무암, 전이질 현무암, 솔리아이트질 현무암)와 솔리아이트질 안산암 및 현무암질 조면안산암으로 구성된다. 솔리아이트질, 전이질 및 알칼리암류가 서로 호충을 이루어 분포하는 것은 이 지역에서 이들 화산활동이 동시에 일어났음을 지시한다. 특히, 조면현무암 혹은 현무암질 안산암이 이

*Corresponding author: chunpom@lycos.co.kr

지역의 기저부에 분포하는 점은 비교적 분화된 알칼리 화산활동이 먼저 시작되었음을 의미한다. 이 지역에 분포하는 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 최고 $526 \pm 23\text{Ka}$ 에서 최저 $38 \pm 4\text{Ka}$ 이다. 동부 지역 저지대에서 용암류의 분출과 같은 하와이형 화산활동은 퇴적층의 관계, 화산암류의 전암 화학성분 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대의 변화로부터 다섯 단계로 구분된다. 즉, 서귀포층이 퇴적할 동안의, I-U기(550~400Ka), II기(400~300Ka), III기(300~200Ka)와 퇴적 이후 IV기(200~100Ka), V기(100Ka이후)이다. 화산암류의 성분 변화 및 분포 지역의 차이 그리고 이들 시기 간에 분포하는 다양한 퇴적층(수성화산기원퇴적층 포함)의 존재는 화산활동이 오랜 기간 동안 간헐적으로 진행되었으며, 저지대의 육지 지형이 화산활동 및 퇴적작용에 의해 내륙에서 해안으로 점진적으로 확대되면서 만들어졌음을 지시한다. 특히 시추코어 화산암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료는 제주도 동부 저지대 지역 대부분이 IV와 V 화산활동기 동안 분출된 200Ka 이내의 비교적 젊은 화산암류로 이루어져 있음을 지시한다. 이는 제주도 화산활동 시기 및 지형 형성에 대한 기존의 연구와는 상이한 결과이며, 화산암류의 K-Ar 절대연대 자료를 바탕으로 한 기존의 제주도 화산활동 시기 구분이 재고되어야함을 확인하였다. 또한, 시추공에 근거한 화산 층서의 해석은 암석기재, 암석화학적 특징과 함께 절대연대 자료를 바탕으로 이루어져야 함을 강조한다.

주요어 : 제주도, 동부 저지대, 시추공, 암석화학, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대

1. 서 언

제주도는 한반도 및 그 주변의 타 지역에 비해 비교적 젊은 시기에 분출한 평균 수m내지 수십m 두께의 다양한 조성을 지닌 용암류와 퇴적층(화산퇴적층 포함)이 호층을 이루어 만들어진 섬으로, 용암류는 해수면 하 40~140m까지 분포하는 것으로 보고된다(Koh, 1997). 이전에 수행된 제주도의 지질 및 화산활동과 관련된 연구의 대부분은 지표 지질을 대상으로 하거나, 지하수(드물게 온천수) 개발용 시추공 자료의 문헌 해석에 근거하였다. 이들 연구 결과는 제주도의 구성 지질을 비롯하여 화산활동 과정과 화산 분출물의 특성, 수문지질 등을 이해하는데 주요 정보로 이용되고 있다(Jeu Provincial Government, 2005). 제주도는 한라산을 중심으로 순상 화산의 지형을 이루고 있으며 산방산과 같은 도움(Dome) 상의 조면암을 제외하면, 지표를 피복하고 있는 화산암은 주로 제주도 형성 말기의 화산활동 동안에 분출된 산물이다. 즉, 제주도 화산체를 이루고 있는 대부분은 지하에 분포하고 있어 육안 확인이 불가능하다. 따라서 제주도 화산활동의 진화 및 그 분화물의 특성, 그리고 층서를 연구하는데 시추공 시료를 이용한 체계적인 연구의 중요성이 강조되지 않을 수 없다. 또한, 이미 발표된 연구는 주로 제주도 전체를 대상으로 광역적인 면에서의 화산활동 과정과 지질계통을 제시함으로써 지역별 구성 지질의 다양성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 더불어, 기존 시추공 자료의 대부분은 착정 심도가 깊지 않을 뿐만 아니라 암석기재적 자료이므로, 지하 심부의 지질 분포나 지질 특성을 밝히는데 한계가 있었던 것도 부인할 수 없다.

2001년부터 제주특별자치도에서 추진하고 있는 해수

침투 감시 관측망 설치사업은 제주도의 지하수 대수층 내 해수 침투를 관측하는 일차적인 목적 이외에도 위와 같은 지질학적 연구의 한계를 해결하기 위한 정보를 축적하는데 주안을 두었다. 따라서 해수 침투 감시 관측정은 해안에서 내륙으로 일정 거리 간격으로 설치하고 있을 뿐만 아니라, 해수면 하 150 m 또는 미교결 사니질 퇴적층인 U층(Koh, 1997)이 포착되는 심도까지 시추를 진행하고 있다. 이 사업은 제주도 전역을 대상으로 진행되고 있으며, 중산간 및 한라산 지역의 고지대 시추사업과 연계하여 제주도 지하에 감춰진 화산 분출물 및 퇴적층의 종류와 분포 상태를 확인할 수 있는 좋은 계기가 되고 있다.

앞으로 우리는 이 사업의 성과에 대해 지역의 차이 및 자료의 방대함을 고려하여 지역별 혹은 연구 대상에 따라 구분하여 연재물 형식으로 보고하고자 한다. 우선, 이 연구는 동부 지역 저지대(해발 평균 200 m 이내) 20개의 시추공(북쪽에서부터 한동4-3-1호공; 종달5-4-3-2-1호공-우도공; 수산4-3-2-1호공; 삼달3-2-1호공, 하천4-3-2-1호공)으로부터 얻어진 시추코어 화산암류의 암석화학적 특징과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 보고하고, 이를 바탕으로 이 지역의 지형형성과 화산활동에 관해 고찰하였다. 한편, Koh *et al.*(2004, 2005)과 Park and Koh(2004)에 의해 예비적인 결과가 발표된 적이 있음을 밝힌다.

2. 연구 방법

모든 관측정의 착정 및 설치가 끝난 후에는 지하를 구성하고 있는 지질을 파악하기 위하여 관측정의 현장 지질검층을 실시하고, 직경 25cm의 시추코어에 대한

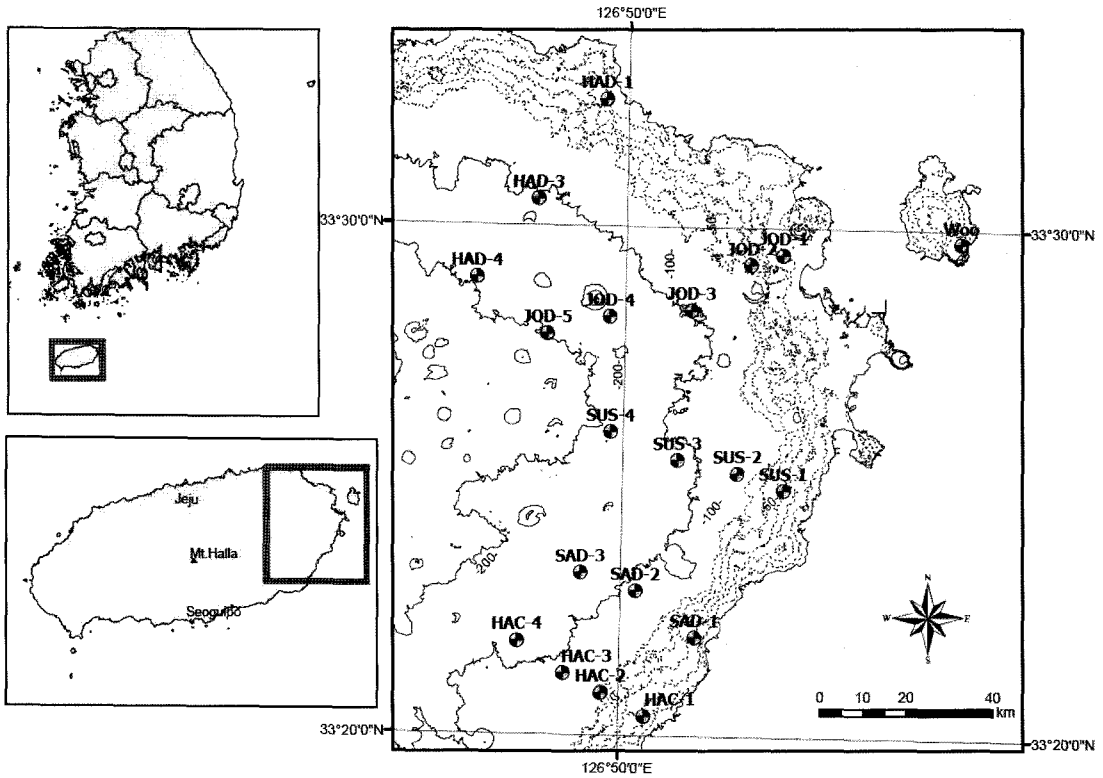


Fig. 1. Map of borehole locations in the eastern lowland of Jeju Island. Coordinate system is in WGS84, altitudes are shown in meters, and contours are shown in both 100 m (solid) and 10 m (dotted)-intervals. Abbreviation: HAD-Handong, JOD-Jongdal, Woo-Udo, SUS-Susan, SAM-Samdal, HAC-Hacheon.

지질주상도를 작성하였다. 또한, 지하에 분포하고 있는 화산암류의 수직적 성분 변화와 절대연대를 밝히기 위하여 용암 단위별로 치밀질이 우세한 중간부에서 분석 시료를 채취하였다. Fig. 1은 연구에 사용된 관측점의 위치를 나타낸다.

221개의 시추코어 화산암 시료에 대한 전암 주원소 및 미량원소의 화학분석은 미국 오레곤 대학교 불활성 기체 분석 실험실에서 X선 형광분석법으로 이루어졌다. 동일 시료의 반복 분석으로 얻어진 그 정밀도는 주원소는 1% 이하, Ni, Cr, V, Rb, Sr, Zr, Y, Nb, Cu, Zn는 3% 미만, Ba, Ga과 Sc는 7% 미만, La, 50%, Ce, 20%, 그리고 Pb와 Th은 적은 함량으로 인해 100%의 오차범위이다. 따라서 이 연구에서는 La, Pb, Th는 정성적인 보고 자료로만 사용한다. Table 1은 지면의 제한으로 분석된 결과를 각 암석 성분별 평균과 표준편차 값으로 나타내었다(시료별 원 자료가 필요하신 분은 주 저자 혹은 교신 저자에게 연락 바란다). 전철의 함량은 FeO 로 나타내었으며, 주원소 분석치는 변화도에 적용하기 전에 우선 물이 없는 상태의 백분

율로 재계산되었다.

한편, 150개의 시료에 대한 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 동일 실험실에서 MAP 21550 모델의 불활성기체 질량분석기로 이루어졌으며, ArArCALC v2.2 전산프로그램(Koppers, 2002)으로 절대연대가 계산되었다. 측정된 아르곤(Ar) 동위원소 결과는 전산프로그램에 의해 네 가지의 절대연대로 계산된다. 첫째, 총 가스(total fusion) 연대, 둘째, 단계별 가열에 의해 얻어지는 플래토(plateau) 연대이며, 셋째는 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비와 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비의 점시에 의한 정(normal) 등시선 연대, 마지막은 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 비와 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 비의 점시에 의한 역(inverse) 등시선 연대이다. Table 2는 시료별 플래토 연대를 그 표준편차(2 Standard Deviation; 95% 신뢰도) 및 MSWD(Mean Square of Weighted Deviates) 값과 같이 나타내었다. MSWD값과 더불어 등시선 연대와 플래토의 형태는 플래토 연대의 정확성을 논의하는데 중요한 역할을 한다. MSWD값이 1이상의 경우는 분석 오차의 시료가 지니고 있는 요인에 의해 영향 받은 경우를 지시하는데(Koppers, 2002) 이 연구에

Table 1. Average concentration of major (wt%) and trace elements (ppm) of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island.

Rock Type	TrmB(86)	AB(34)	TB(33)	H-Fe TB(2)	BTA(11)	L-K BTA (9)	ThB(22)	ThA(25)
SiO ₂	49.71 ± 1.07	48.39 ± 0.99	49.57 ± 1.33	44.81 ± 0.32	51.25 ± 1.11	52.94 ± 0.38	51.41 ± 0.61	52.50 ± 0.45
TiO ₂	2.74 ± 2.34	4.33 ± 4.18	4.94 ± 5.18	3.79 ± 0.08	2.24 ± 0.29	2.06 ± 0.04	2.75 ± 2.83	4.58 ± 5.11
Al ₂ O ₃	13.93 ± 2.26	12.82 ± 4.38	13.20 ± 5.14	16.16 ± 0.65	17.33 ± 0.91	15.19 ± 0.18	13.82 ± 2.62	11.87 ± 5.10
MgO	8.67 ± 1.10	8.68 ± 1.14	7.06 ± 1.40	5.59 ± 1.14	4.77 ± 1.97	6.64 ± 0.24	8.21 ± 0.57	7.81 ± 0.56
FeO	10.92 ± 0.33	11.08 ± 0.49	10.89 ± 0.19	12.78 ± 0.47	9.59 ± 0.87	9.84 ± 0.11	10.76 ± 0.28	10.64 ± 0.34
MnO	0.16 ± 0.00	0.16 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.15 ± 0.00	0.15 ± 0.00	0.15 ± 0.00
CaO	9.00 ± 0.44	9.07 ± 0.54	7.81 ± 0.79	9.69 ± 0.27	6.20 ± 1.49	7.73 ± 0.18	8.67 ± 0.52	8.19 ± 0.65
Na ₂ O	2.93 ± 0.37	2.87 ± 0.66	3.24 ± 0.78	3.31 ± 0.23	4.33 ± 0.28	3.50 ± 0.08	2.84 ± 0.48	2.52 ± 0.97
K ₂ O	1.21 ± 0.44	1.74 ± 0.52	2.05 ± 0.79	2.03 ± 0.17	2.39 ± 0.39	1.47 ± 0.06	0.76 ± 0.58	1.17 ± 0.95
P ₂ O ₅	0.40 ± 0.06	0.54 ± 0.09	0.64 ± 0.12	1.18 ± 0.42	0.87 ± 0.15	0.41 ± 0.01	0.28 ± 0.04	0.27 ± 0.04
Total	99.67 ± 0.52	99.66 ± 0.73	99.56 ± 0.57	99.51 ± 0.49	99.15 ± 1.14	99.92 ± 0.42	99.67 ± 0.45	99.70 ± 0.61
Ni	185 ± 36	174 ± 51	110 ± 32	23 ± 28	30 ± 27	136 ± 6	189 ± 30	176 ± 15
Cr	294 ± 60	275 ± 79	172 ± 58	45 ± 51	41 ± 37	211 ± 11	290 ± 37	259 ± 22
Sc	23 ± 4	21 ± 4	19 ± 4	17 ± 4	11 ± 5	19 ± 3	23 ± 2	21 ± 2
V	200 ± 17	211 ± 12	180 ± 22	238 ± 24	108 ± 44	155 ± 9	177 ± 8	168 ± 9
Ba	316 ± 42	417 ± 44	463 ± 80	514 ± 28	694 ± 142	374 ± 12	193 ± 35	178 ± 36
Rb	25 ± 5	35 ± 5	39 ± 7	41 ± 4	57 ± 11	35 ± 3	13 ± 4	16 ± 4
Sr	461 ± 55	591 ± 101	622 ± 137	928 ± 146	975 ± 286	434 ± 7	358 ± 33	322 ± 35
Zr	176 ± 18	215 ± 19	241 ± 28	246 ± 37	353 ± 79	242 ± 8	146 ± 12	141 ± 14
Y	23 ± 1	24 ± 1	26 ± 2	32 ± 1	31 ± 6	25 ± 1	22 ± 2	23 ± 1
Nb	31.3 ± 4.9	43.4 ± 4.5	46.5 ± 6.8	53.3 ± 6.7	68.7 ± 18.2	36.1 ± 1.4	19.0 ± 2.9	18.0 ± 3.4
Ga	20 ± 2	20 ± 1	22 ± 2	20 ± 1	22 ± 3	21 ± 2	20 ± 2	20 ± 1
Cu	43 ± 7	42 ± 8	34 ± 8	23 ± 11	18 ± 12	39 ± 3	47 ± 8	48 ± 7
Zn	110 ± 6	112 ± 4	123 ± 7	107 ± 16	128 ± 12	118 ± 4	116 ± 5	114 ± 5
Pb	2 ± 1	3 ± 2	2 ± 1	5 ± 2	4 ± 2	2 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
La	22 ± 8	34 ± 7	36 ± 9	47 ± 9	59 ± 20	26 ± 7	15 ± 7	14 ± 7
Ce	48 ± 12	69 ± 11	73 ± 14	90 ± 8	115 ± 31	49 ± 8	32 ± 10	27 ± 8
Th	4 ± 2	5 ± 2	6 ± 2	6 ± 1	9 ± 3	5 ± 2	3 ± 1	3 ± 2

Total FeO as FeO. Analyzed by XRF at Oregon State University. Parenthesis denote number of samples.

Abbreviations: ThA-Tholeiitic andesite, ThB-Tholeiitic basalt, TrmB-Transitional basalt, AB-Alkali basalt, TB-Trachybasalt, BTA-Basaltic trachyandesite, H-Fe-High FeO, L-K-Low K₂O

서는 150개의 분석 자료 중 MSWD값이 1이하의 것을 이용하였으며, 1이상 2.5 이하는 시료의 상하부 연대와 일률적인 경우 해석 시 참고 자료(13개 시료)로 사용하였다. 한편 MSWD가 2.5 이상이거나(McDougall and Harrison, 1988), 특히 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 플래토 연대가 등시선 연대 범위와 크게 다른 경우, 정등시선의 Y 축 절편 값인 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 의 비가 대기 중에서의 비(295.5)와 에러 범위 내에서 크게 차이가 나는 경우, 또한 플래토의 형성 모양이 과잉(excess)아르곤에 의해 말안장(saddle) 혹은 U자형인 경우(Kelley, 2002) 에러연대를 확인하고 이를 배제(45개 시료)하였다. 연대측정 시료는 각 용암 단위를 대표하고 육안 상 신선한 용암류의 가운데 부분을 대상으로 채취되었으나, 연대측정 자료의 약 30%는 실험오차 혹은 시료가 지니고 있는 과

잉아르곤에 의해 사용할 수 없었다. 이미 화산암의 경우 그 한 요인으로서 화산분출 전 마그마 챔버(chamber) 내에서 초기 정출된 반정 광물 내 포획된 아르곤에 의해 실제 분출 연대보다 오래된 연대를 제시하는 것으로 알려져 있다(Kelley, 2002). 우리는 이 연구를 통해 (1) 용암류가 분출 후 냉각 정지되는 과정으로 생긴 절리 또는 균열이 발달하거나, (2) 이후 지하수와 접촉에 의해 부분적으로 적색 혹은 청록색의 산화대 또는 변질대가 존재하거나, (3) 해수면 하부에 위치하여 오랜 기간 염분이 많은 지하수에 잠겨 있었거나, (4) 퇴적층 상하부에 접하여 존재하는 용암 단위에서 채취한 시료에서는 신뢰할 만한 결과를 기대하기 어렵다는 점을 확인하였다. 즉, 이러한 용암단위에서 비교적 신선한 시료를 선택하더라도, 그 시료의 $^{40}\text{Ar}/$

Table 2. Summarized $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating result (weighted plateau) of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Isia

Hole ID	Elev. (m)	Rock	Age(ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	Steps ³	MSWD	Hole ID	Elev. (m)	Rock	Age(ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	Steps ³	MSWD
HAD-1	10.79	TrmB	77.5*	30	78.2	5/7	1.17	SUS-2	61.62	TrmB	104.6**	42	60.9	3/6	0.87
HAD-1	-23.21	TrmB	236.2**	54	40.9	4/7	2.07	SUS-2	39.62	TB	49	12	100.0	5/5	0.25
HAD-1	-46.21	TrmB	384	56	29.6	3/7	0.38	SUS-2	15.62	TrmB	453.6**	200	96.5	4/5	8.48
HAD-1	-99.21	ThA	412.7**	75	83.9	4/7	1.87	SUS-2	1.62	TrmB	99	28	100.0	5/5	0.17
HAD-1	-130.21	ThA	369	38	100.0	7/7	1.00	SUS-2	-15.38	AB	115	18	89.9	3/5	0.12
HAD-3	105.25	TB	53.2*	11	100.0	7/7	2.18	SUS-2	-42.38	TrmB	207.8*	34	68.8	2/5	1.36
HAD-3	78.25	ThB	218	56	87.5	5/6	0.91	SUS-2	-68.38	TrmB	352.1**	34	67.8	2/5	1.73
HAD-3	35.25	ThA	307.7**	49	86.4	5/7	0.61	SUS-2	-89.38	AB	271.2*	15	80.1	3/5	1.18
HAD-3	-32.75	AB	303.6**	49	79.7	5/7	0.58	SUS-3	106.20	TrmB	78**	42	88.7	4/6	2.14
HAD-3	-63.75	TrmB	269	18	97.5	6/7	0.32	SUS-3	89.20	TrmB	72	31	100.0	5/5	0.81
HAD-3	-73.75	TrmB	258.1**	16	92.6	6/7	1.97	SUS-3	71.20	AB	41.1**	13	95.9	5/6	2.59
HAD-3	-100.75	TrmB	290	35	65.4	4/7	0.52	SUS-3	0.20	AB	152	9	88.8	3/6	0.07
HAD-4	184.49	TrmB	311.5**	30	80.4	3/5	0.91	SUS-3	-35.80	AB	165.6**	13	76.8	3/6	2.97
HAD-4	176.49	TrmB	206.6**	213	94.6	4/5	34.27	SUS-3	-50.80	TrmB	284.1**	28	67.8	2/6	0.15
HAD-4	156.49	TB	5	12	93.4	4/5	0.38	SUS-3	-80.80	AB	272*	11	88.2	5/6	1.77
HAD-4	141.49	BTA	34	8	100.0	5/5	0.34	SUS-4	171.16	TB	20.3*	17	100.0	5/5	1.36
HAD-4	116.49	TrmB	120	47	100.0	5/5	0.97	SUS-4	166.16	TrmB	288.7**	131	100.0	5/5	5.88
HAD-4	41.49	AB	232	16	89.1	5/6	0.35	SUS-4	130.16	TB	30.6*	12	90.8	3/6	1.13
HAD-4	25.49	AB	286.9**	16	100.0	5/5	2.47	SUS-4	2.16	TrmB	246	19	93.2	4/6	0.94
HAD-4	0.49	BTA	363.6*	15	100.0	6/6	1.58	SUS-4	-52.84	AB	251	20	100.0	5/5	0.20
HAD-4	-64.51	BTA	414	6	88.2	5/6	0.54	SUS-4	-66.84	AB	500**	70	67.5	4/8	3.10
HAD-4	-90.51	HFe TB	1760**	120	70.6	3/6	0.47	SUS-4	-95.84	BTA	430	6	99.8	5/6	0.56
WOO	52.50	ThA	304.4**	504	100.0	4/4	0.17	SAD-1	10.8	TB	91	10	100.0	7/7	0.11
WOO	45.50	ThA	288.6**	13	98.6	3/4	0.63	SAD-1	-15.2	TB	96	9	75.1	4/6	0.46

Samples irradiated at OSU TRIGA reactor for 6 hours at 1MW power. Neutron flux measured using FCT-3 biotite monitor(Renne *et al.*, 1998). *: Data in use with caution, **: Data excluded for interpretation.

1. Surface sample, 2. pebble, 3. 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 Table 1.

Table 2. Continued.

Hole ID	Elev. (m)	Rock	Age(ka)	2 s.d.	^{39}Ar	Steps ³	MSWD	Hole ID	Elev. (m)	Rock	Age(ka)	2 s.d.	^{39}Ar	Steps ³	MSWD
WOO	25.50	ThA	102	69	100.0	5/5	0.46	SAD-1	-24.2	AB	150	12	100.0	6/6	0.55
WOO	16.50	ThA	404.4**	185	100.0	5/5	0.26	SAD-1	-52.2	TrmB	191	17	100.0	7/7	0.78
WOO	7.50	AB	86	10	84.9	4/5	0.08	SAD-1	-71.2	AB	438**	74	93.8	5/9	0.57
WOO		ThA ¹	160.6**	108	100.0	5/5	1.15	SAD-2	81	TrmB	77	46	96.5	5/6	0.47
JOD-1	9.18	L-K BTA	54*	41	100.0	4/4	0.20	SAD-2	66	TB	84	10	96.5	5/6	0.44
JOD-1	-22.82	TrmB	74**	41	80.8	3/4	3.80	SAD-2	53	AB	135	9	85.4	5/6	0.42
JOD-1	-34.82	ThB	74**	97	100.0	4/4	0.18	SAD-2	23	AB	143	10	89.3	5/6	0.33
JOD-1	-49.82	ThB	137	27	98.7	3/4	0.22	SAD-2	-3	TrmB	147	15	74.9	4/6	0.18
JOD-1	-76.82	ThB	161	44	100.0	4/4	0.40	SAD-2	-13	ThB	209	111	100.0	5/5	0.16
JOD-1	-108.82	TrmB	152	14	85.0	5/6	0.86	SAD-2	-38	ThB	217	62	100.0	5/5	0.12
JOD-1	-138.82	BTA ²	639	27	96.4	5/6	0.08	SAD-2	-57	TB	246*	8	88.1	5/7	1.15
JOD-2	50.49	L-K BTA	49**	83	100.0	4/4	0.53	SAD-3	122	ThA	243**	239	100.0	5/5	0.03
JOD-2	7.49	AB	59	8	97.8	4/5	0.68	SAD-3	105	BTA	77	10	100.0	7/7	0.52
JOD-2	-9.51	TrmB	92*	13	87.4	3/5	1.79	SAD-3	87	TB	94	10	97.3	6/7	0.19
JOD-2	-48.51	AB	114	9	95.5	4/5	0.77	SAD-3	61	AB	118	11	92.0	6/7	0.64
JOD-2	-63.51	ThA	154	58	100.0	5/5	0.72	SAD-3	43	TrmB	150	18	100.0	7/7	0.2
JOD-2	-79.51	ThB	263**	286	100.0	5/5	2.25	SAD-3	18	TB	162	10	90.5	4/8	0.4
JOD-2	-95.51	TrmB	158	24	100.0	5/5	0.15	SAD-3	3	ThB	196	71	100.0	6/6	0.4
JOD-3	97.17	L-K BTA	53**	66	98.4	3/4	0.23	SAD-3	-14	TrmB	238	28	92.4	4/5	0.08
JOD-3	58.17	AB	57	17	96.8	3/4	0.26	SAD-3	-31	BTA	369	9	100.0	7/7	0.49
JOD-3	16.17	TB	47	21	100.0	4/4	0.42	SAD-3	-64	BTA	526	23	100.0	7/7	1.03
JOD-3	-3.83	TB	104	8	98.5	4/5	0.09	HAC-1	22.48	TrmB	36**	129	100.0	4/4	0.02
JOD-3	-12.83	ThA	165**	160	100.0	4/4	0.08	HAC-1	-2.52	TB	76	12	100.0	5/5	0.73
JOD-3	-35.83	ThA	318**	148	100.0	5/5	0.98	HAC-1	-22.52	TrmB	79**	94	100.0	5/5	1.41
JOD-3	-64.83	AB	202	11	96.3	4/5	0.22	HAC-1	-49.52	ThA	184	30	100.0	5/5	0.85
JOD-3	-72.83	TrmB	237	62	100.0	4/4	0.25	HAC-1	-80.52	TrmB	187	36	100.0	5/5	0.20
JOD-3	-123.83	TrmB	564**	378	93.8	4/5	2.22	HAC-2	47.90	TrmB	26	23	93.2	3/4	0.94
JOD-4	162.30	AB	13*	15	94.0	3/4	0.03	HAC-2	34.90	TrmB	55**	136	100.0	4/4	7.13

Table 2. Continued.

Hole ID	Elev. (m)	Rock	Age(ka)	2 s.d.	^{39}Ar	Steps ³	MSWD	Hole ID	Elev. (m)	Rock	Age(ka)	2 s.d.	^{39}Ar	Steps ³	MSWD
JOD-4	97.30	AB	59	19	86.6	3/5	0.00	HAC-2	4.90	TrmB	112	23	100.0	4/4	0.86
JOD-4	56.30	TB	120	10	100.0	4/4	0.37	HAC-2	-6.10	ThA	398**	486	100.0	4/4	2.43
JOD-4	41.30	ThB	106**	225	100.0	4/4	0.05	HAC-2	-27.10	TrmB	168	129	100.0	4/4	0.52
JOD-4	27.30	AB	161	21	100.0	5/5	0.43	HAC-2	-34.10	ThB	551**	397	100.0	4/4	0.50
JOD-4	5.30	ThA	214	73	95.1	4/5	0.64	HAC-2	-52.10	TrmB	156*	16	100.0	5/5	1.18
JOD-4	-38.70	AB	225	13	100.0	5/5	0.56	HAC-2	-59.10	TrmB	194	45	100.0	5/5	0.48
JOD-4	-68.70	TrmB	273	17	100.0	4/4	0.56	HAC-3	84.15	TrmB	10*	14	93.6	3/4	0.32
JOD-4	-91.70	BTA	441	9	88.3	4/5	0.71	HAC-3	48.15	TrmB	35	18	100.0	5/5	0.80
JOD-5	192.80	TB	58	19	100.0	5/5	0.57	HAC-3	31.15	TrmB	98	14	100.0	5/5	0.86
JOD-5	152.80	TrmB	53**	82	100.0	5/5	2.70	HAC-3	19.15	TB	111	10	100.0	5/5	0.42
JOD-5	125.80	TB	145	51	100.0	5/5	0.27	HAC-3	7.15	ThA	133	20	100.0	5/5	0.19
JOD-5	89.80	AB	168*	18	75.6	3/5	1.13	HAC-3	-3.85	ThB	171**	120	100.0	4/4	0.15
JOD-5	45.80	TB	204	16	94.5	4/5	0.31	HAC-3	-13.85	TrmB	182	16	98.1	4/5	0.59
JOD-5	35.80	ThB	384**	190	100.0	5/5	0.71	HAC-4	115.67	TB	70**	39	99.0	3/4	0.67
JOD-5	12.80	AB	267	18	100.0	5/5	0.70	HAC-4	107.67	TB	28	27	100.0	4/4	0.93
JOD-5	-5.20	TB	396	17	100.0	6/6	0.50	HAC-4	96.67	TB	50	34	100.0	4/4	0.11
JOD-5	-25.20	TB	462	44	99.3	5/6	0.65	HAC-4	78.67	TrmB	120	31	98.9	3/4	0.31
JOD-5	-185.20	AB	782**	483	100.0	7/7	0.79	HAC-4	37.67	TrmB	137	58	100.0	4/4	0.58
SUS-1	29.14	TrmB	44	31	96.8	4/5	0.22	HAC-4	33.67	TrmB	157	26	100.0	5/5	0.50
SUS-1	7.14	ThA	96	138	100.0	5/5	0.21	HAC-4	18.67	TB	191	23	100.0	5/5	0.55
SUS-1	-13.86	TrmB	112	18	98.4	3/4	0.19	HAC-4	-5.33	TB	235	28	100.0	5/5	0.65
SUS-1	-37.86	TrmB	144	43	100.0	6/6	0.13	HAC-4	-17.33	H-Fe TB	433**	29	99.6	4/5	0.29
SUS-1	-99.86	TrmB	270	13	100.0	5/5	0.40	HAC-4	-102.33	TB ²	774**	154	98.2	5/6	0.08

³⁹Ar 절대연대의 해석은 상당한 주의를 기울여야함을 지시한다. 언급한 바와 같이 화산암에서 과잉아르곤이 나타나는 요인에 대해 알려져(Kelley, 2002) 있으나, 우리는 제주도 지하 화산암에서 나타나는 요인에 대해 추후(준비 중) 자세히 논의하고자 한다.

3. 연구 결과

3.1. 시추 코어 화산암류의 암석화학적 명명

화산암류의 전암 조성분 자료는 GCDkit 전산프로그램(Janousek *et al.*, 2006)을 이용하여 IUGS의 전암 실리카 대 알칼리 함량 분류도(Le Bas *et al.*, 1986)에 적용하였다(Fig. 2). IUGS분류 중 현무암 영역에 속하는 것은 Park *et al.*(1999)에 의해 제시된 바와 같이 Irvine and Baragar(1971)의 구분선 상위에 점시되는 것은 알칼리 현무암, 그 하위의 비알칼리 현무암 부분을 다시 Macdonald and Katsura(1964)의 구분선 상위 영역은 전이질 현무암, 그 하위 영역의 것은 솔리아이트질 현무암으로 명명하였다. 솔리아이트질 현무암 중 Y/Nb 비가 1 이하의 것(Pearce and Cann, 1979)은 다시 전이질 현무암으로 구분하였다. 한편, 현무암질 안산암은 솔리아이트질 안산암으로 명명하였다. 시료 중 한동4호공의 최 하부 것은 다른 암류에 비해 FeO^t 함량이 높은 고(high)FeO 조면현무암으로, 종달1-2-3호공의 최 상부 용암류는 낮은 K₂O 함량을 가지는 저(low)K₂O 현무암질 조면안산암으로 구분하였다(Fig. 2; Table 1).

3.2. 화산암류의 암석화학적 특징

이 지역은 일반적으로 표선리현무암(Won, 1976; Lee, 1982) 혹은 표선리현무암군(Yoon *et al.*, 1995, 2001)의 화산암류가 분포하는 곳으로 기재되었다.

이 지역의 지하에 분포하는 화산암류는 그 SiO₂ 함량이 44.6~53.5 wt%이며, 알칼리계열의 현무암(15.4%) 조면현무암(15.8%), 현무암질 조면안산암(9%), 전이질 현무암(38.9%) 그리고 솔리아이트질 현무암(10%), 솔리아이트질 안산암(10.9%)으로 구성된다(Fig. 2). 성산 및 표선 도폭(Won *et al.*, 1993, 1995)내 지표 화산암류의 조성과 대부분 유사하나, 지하에 현무암질 조면안산암이 분포하고 있음을 추가로 보고한다. 한편, 제주도 동부 저지대 지하에 분포하는 화산암류 중 현무암 조성에서의 이러한 다양한 성분 변화는 하와이 섬의 마우나케아(Mauna Kea) 화산에서 나타나는 후순상(Postshield) 화산활동에 의한 암석 성분 변화(Wolf *et*

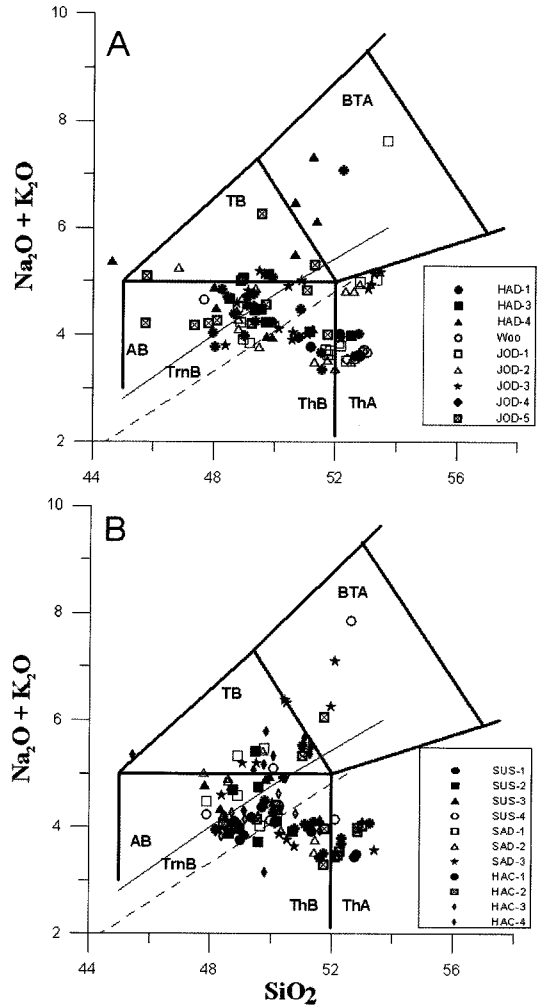


Fig. 2. (Na₂O+K₂O) (wt%) vs. SiO₂ (wt%) plot of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. The fields show rock nomenclature schemes of Le Bas *et al.*(1986). The solid line and the dotted line are from Irvine and Baragar (1971), and Macdonald and Katsura (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. (A) Handong-Udo-Jongdal Areas (B) Susan-Samdal-Hacheon Areas

al., 1997)와도 유사하다.

3.2.1. 주원소의 특징

이 지역의 화산암류는 SiO₂(44.6~53.5 wt%) 함량이 현무암질의 좁은 성분 범위를 가지는 것에 비해 비교적 넓은 성분 범위의 MgO 함량 변화(11.3~2.3 wt%)를 가진다. 이 지역의 화산암류를 암석 성분에 따라,

MgO를 분화지수로 하여 주원소의 변화 경향을 알아보았다(Fig. 3). MgO의 함량이 감소함에 따라 SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O 와 P_2O_5 함량은 증가하는 반면, TiO_2 와 FeO 는 거의 일정하거나 MgO 5 wt%이후 감소하

며, CaO의 함량은 꾸준히 감소하는 경향을 보인다. 이는 이 지역 화산암류의 성분 분화 과정이 주로 마그마 챔버 혹은 화도 내에서 감람석, 단사회석 및 Fe-Ti 산 화광물의 정출로 인해 영향 받았음을 의미한다. 한편,

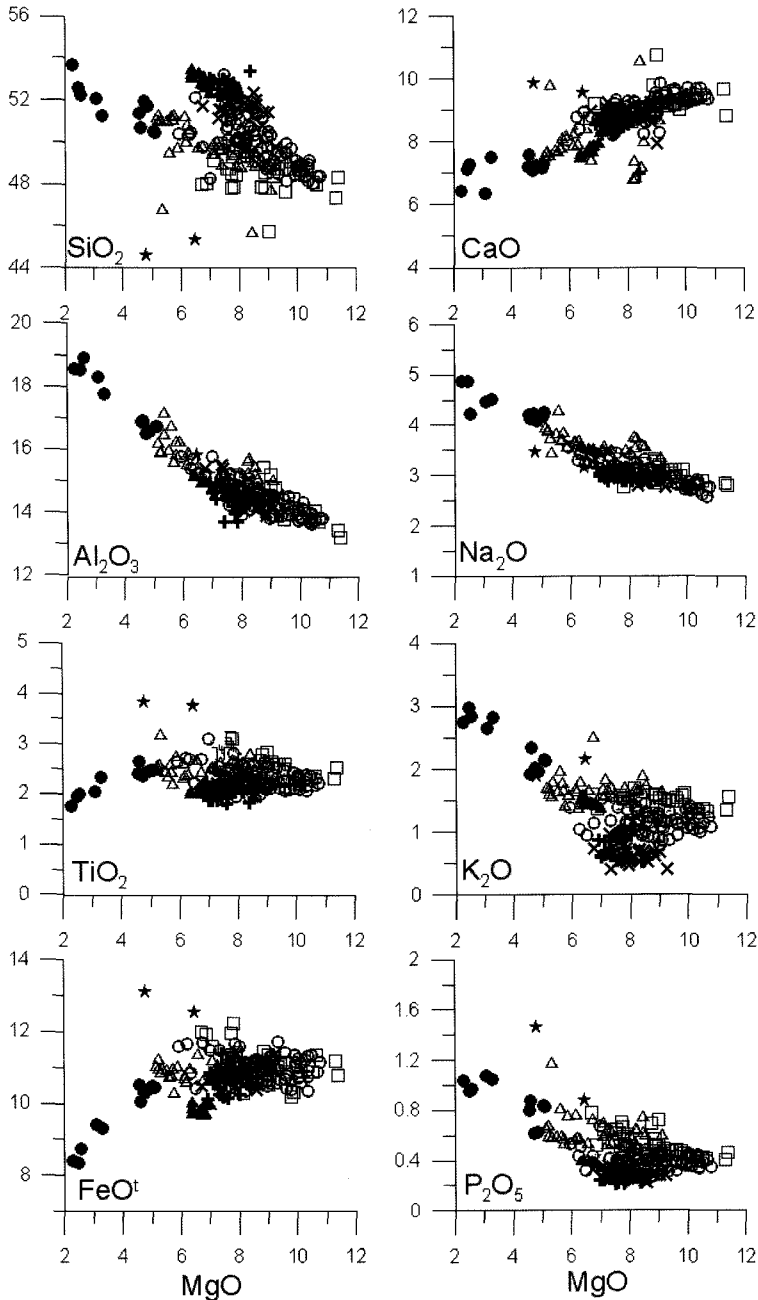


Fig. 3. MgO (wt%) vs. major element (wt%) variations of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. Symbols: AB-open square, TB-open triangle, BTA- solid circle, TrnB-solid circle, ThB-plus, ThA-x, High FeO TB-diamond, Low K_2O BTA-solid triangle.

암석 성분에 따른 주원소의 거동은 동일한 MgO에서 솔리아이트질암류(현무암 및 안산암)는 알칼리 현무암류 및 전이질 현무암류에 비해 SiO₂는 높으나, TiO₂, K₂O와 P₂O₅는 낮은 함량을 가진다. 이는 이들의 모마그마의 성분이 차이가 있었음을 반영한다(Park *et al.*, 2005; Tasumi *et al.*, 2005).

3.2.2 미량원소의 특징

MgO 함량이 감소함에 따라(Fig. 4), 호정적 미량원소 중 Ni, Cr, V과 Sc의 함량은 감소하는데 반해, 불호정 미량원소인 Y과 Nb의 함량은 증가한다. 암석 성분에 따른 MgO의 변화에 대한 Nb 성분의 변화는 K₂O와 P₂O₅의 함량 변화와 유사하다. 특히 이미 보고(Won *et al.*, 1998)된 바와 같이 초생 마그마 성분의 Ni 함량

(250 ppm 이상, Hart and Davis, 1978; Wilkinson and Le Maitre, 1987)을 가지는 알칼리 현무암이 분포한다. 이들은 다량의 감람석 반정(미반정 포함)을 가지는 피크라이트질(picritic)이거나, 맨틀 기원의 초염기성 포획체를 함유한다. 한편, 불호정적 거동을 보이는 Rb, Ba, Sr, Nb, Zr, Y, Ce의 함량 변화는 솔리아이트질암류에서 알칼리암류로 감에 따라 서로 정(+)의 양호한 관계를 보이며 증가한다. 현무암질 조성에서 Nb의 변화에 따른 Rb, Ba, Sr, Zr, Ce의 직선적인 함량 변화는 이들이 동질의 맨틀 근원암으로 부터 유래했을 가능성을 지시한다(Park and Kwon, 1996).

3.3. 화산암류의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대

20개 시추공의 지역별 절대연대의 특징은 다음과 같다.

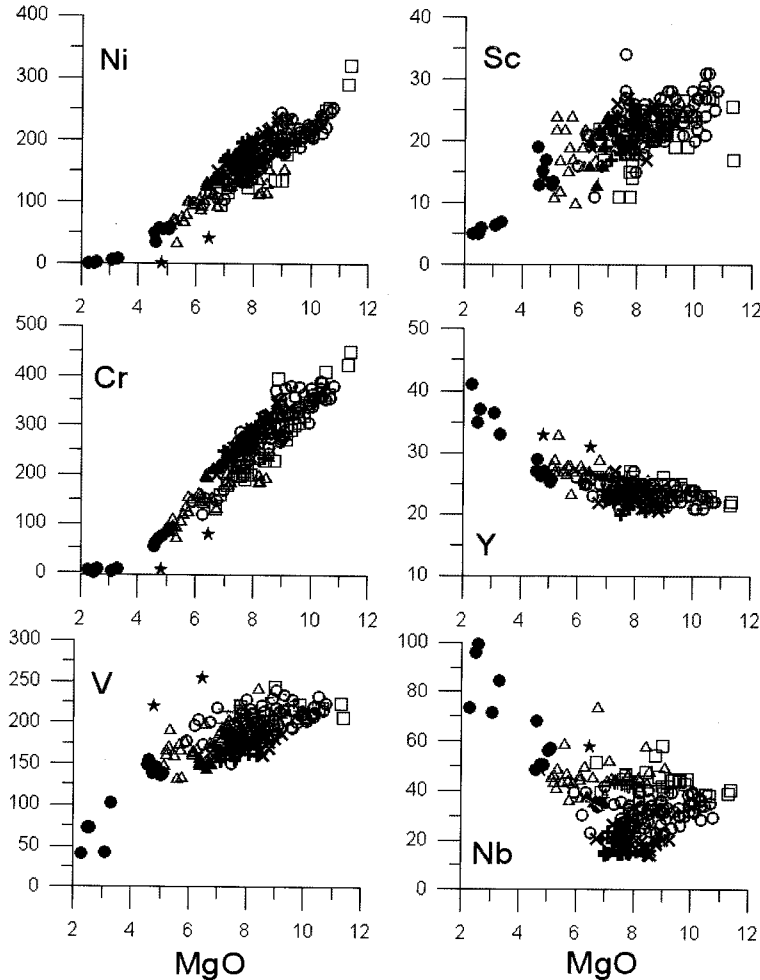


Fig. 4. MgO (wt%) vs. trace element (ppm) variations of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. Symbols are the same as in Fig. 3.

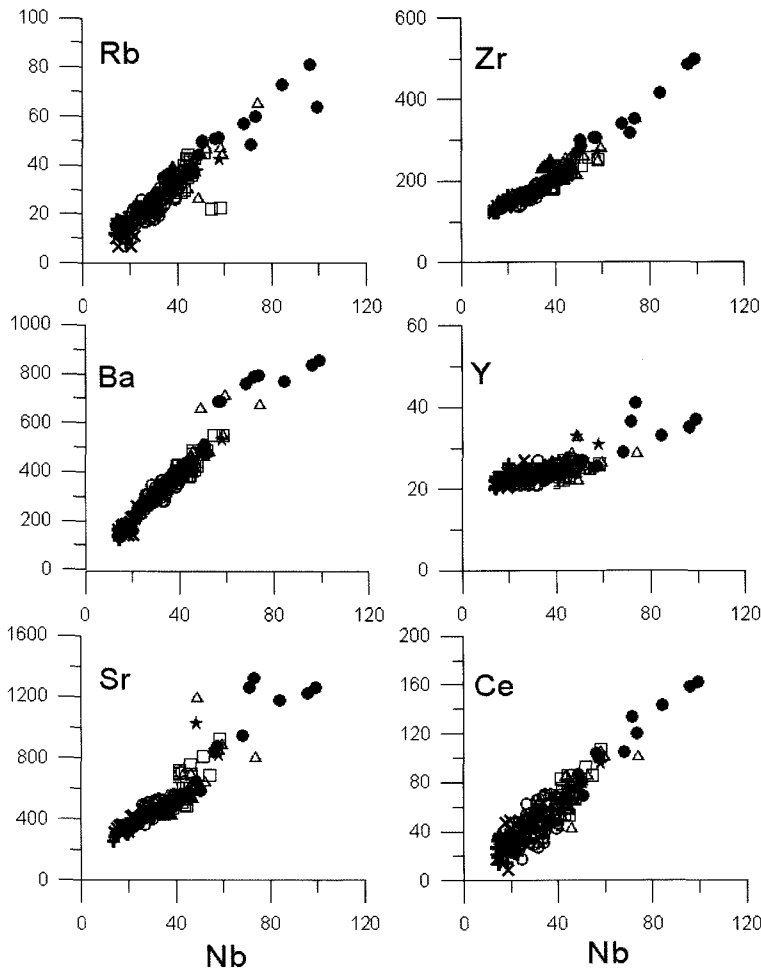


Fig. 5. Nb (ppm) vs. incompatible trace element variations of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. Symbols are the same as in Fig. 3.

3.3.1 한동 지역

한동1-3-4호공의 22개 자료 중 13개 시료의 결과를 이용하였다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 34~414Ka의 범위를 나타내며, 지표에서 하부로 내려갈수록 절대연대가 뚜렷이 증가한다. 시추공별로 보면, 한동1호공의 경우는 78~369Ka의 범위를, 한동3호공은 53~290Ka의 범위를, 한동4호공에서는 34~414Ka이다. 이들 지역에서 서귀포층과 접하는 화산암류의 절대연대는 대체로 290~414Ka를 나타낸다. 한편, 한동4호공(해발 190.5 m)의 해수면 하 89 m 시추코어 암석(고-FeO 조면현무암)은 $1,760 \pm 120\text{Ka}$ (MSWD: 0.47)이다. 그러나 이 시료는 과잉아르곤이 있었음을 지시하는 전형적인 U형의 플레토 모양을 가진다(Fig. 6). 이 용암 단위는 하위의 서귀포층과 상위의 이암 사이에 약 6 m의 두께로, 그

암상은 짙은 청록색 유리질이며 진주상 쪼개짐이 발달하고, 급랭된 특징과 더불어 그 성분도 다른 시료와 달리 높은 FeO값을 지닌다. 이는 퇴적층과 접하여 분출하거나 혹은 실(sill) 상으로 관입할 때 탈가스화되지 않은 방사기원의 아르곤 성분을 가지거나 혹은 변질에 의해 영향을 받은 것으로 해석된다.

3.3.2 종달-우도 지역

종달1-2-3-4-5호공의 화산암 시료 42개 중 30 시료, 우도공 시료 6개 중 2개 시료의 결과를 이용하였다. 종달 지역의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 57~462Ka의 범위이며, 한동 지역의 경우에서처럼 지표에서 하부로 내려갈수록 절대연대가 전반적으로 증가하고 있다. 종달 1호공의 해수면 하 139 m의 서귀포층 하부에 포함된

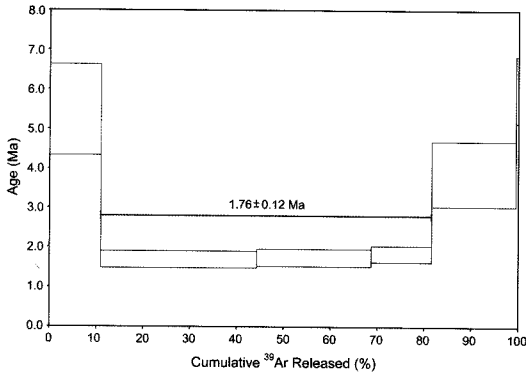


Fig. 6. ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age plot (apparent age vs. cumulative % ^{39}Ar released) for a sample (MSL, -90.5 m) from Handong-4 borehole. 6-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.47.

등근 자갈(현무암질 조면안산암 성분)의 절대연대는 $639 \pm 27\text{Ka}$ 를 나타내어, 이 지역에서 서귀포층이 퇴적되는 기간 동안에도 다른 지역에서 일어났었던 화산활동의 산물이 풍화 이동되어 왔음을 지시한다. 한편, 종달4호공의 해수면 하 92 m의 서귀포층 직상부 화산암(현무암질 조면안산암)은 $441 \pm 9\text{Ka}$ 이다. 종달5호공은 다른 시추공과는 달리 서귀포층이나 U층을 포착하지 못하였을 뿐만 아니라 해수면 하에 두꺼운 응회암층이 용암층과 교호하여 분포하는 것으로 미루어 이곳은 비교적 고기의 화구와 근접된 곳을 시사한다. 종달5호공 최하부에 분포하는 치밀질이며 질리가 매우 발달된 알칼리 현무암(해수면 하 185 m)은 $782 \pm 483\text{Ka}$ 의 비교적 넓은 범위의 오차를 가지는데 과잉아르곤에 의한 것으로 해석된다.

한편, 우도 지역(해발 75.5 m)은 해수면 하 4.5 m까지 시추가 이루어졌는데 응회암류 상부를 용암류가 덮고 있어 화구에 근접한 지형적 형태를 반영하고 있으며 하부에서 알칼리 현무암층이 소규모로 분포하나 대부분 솔리아이트질 안산암 성분이다. 이는 이 지역의 화산활동이 알칼리 성분에서 비알칼리 성분으로 전이되었음을 지시한다. 이들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 $86 \sim 102\text{Ka}$ 로서 우도 지역 지표 부근의 솔리아이트질 현무암의 K/Ar 연대, $0.114 \pm 0.003\text{Ma}$ (Koh *et al.*, 2005)와 유사하다.

3.3.3. 수산 지역

27개의 시료 중 18개의 자료를 이용하였다. 절대연대는 $20 \sim 430\text{Ka}$ 의 범위를 나타내며, 지표에서 하부로 내려갈수록 절대연대가 전반적으로 증가한다. 수산4호공(해발 176 m 지점) 해수면 하 96 m 시추코어 화산암

(현무암질 조면안산암)의 절대연대는 $430 \pm 6\text{Ka}$ 로서 수산 지역 4개 시추공에서 가장 오래된 연대를 나타낸다. 시추공별로 보면, 수산1호공의 경우 $44 \sim 270\text{Ka}$ 를, 수산2호공은 $49 \pm 272\text{Ka}$ 의 범위를, 수산3호공은 $72 \sim 272\text{Ka}$ 의 범위를 나타내며, 수산4호공에서는 $20 \sim 43\text{Ka}$ 이다.

3.3.4. 삼달 지역

23개의 시료 중 21개의 자료를 이용하였다. 절대연대는 $77 \sim 526\text{Ka}$ 의 범위를 나타내며, 지표에서 하부로 갈수록 절대연대가 증가한다. 삼달3호공에 해수면 하 64 m 시추코어 화산암(현무암질 조면안산암)의 절대연대는 $526 \pm 23\text{Ka}$ 로서 동부지역 저지대에서 얻어진 화산암 연대 중 가장 오래된 연대를 나타낸다. 이 층은 인접한 종달4호공(해수면 하 92 m)과 수산4호공(해수면 하 96 m)의 암층과 동일한 용암층에 해당되는 것으로 해석된다.

한편, 수산4호공과 삼달3호공 사이 지역에 위치한 성읍 온천 시추공의 해수면 하 65~155 m 구간에는 치밀한 현무암질 조면안산암이 분포하며(Koh, 1991; Park and Kwon, 1996), 해수면 하 150 m 시료의 K/Ar 절대연대 $0.497 \pm 0.01\text{Ma}$ (Miyake *et al.*, 1993)이다. 이는 한동4호공/수산4호공/종달4호공/삼달3호공의 서귀포층 직상부에 분포하는 용암류와 암상 및 그 화학 조성 그리고 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대도 $414 \pm 6 \sim 526 \pm 23\text{Ka}$ 로서 유사하다. 이 지역에서 보고된 지표 화산암류에 대한 K/Ar 절대연대는 0.31Ma (표선리현무암: Tamanyu, 1990), $0.37 \sim 0.51\text{Ma}$ (덕천리현무암: Won *et al.*, 1993), $0.60 \sim 0.63\text{Ma}$ (온평리현무암: Won *et al.*, 1993)이나, 이 연구에서 보고된 시추공의 최상부에 분포하는 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 이보다 훨씬 젊은 값을 나타낸다. 최근 분석기관에 따른 K/Ar 절대연대 자료의 신뢰도에 대한 의문이 제기되기도 하였다(Park *et al.*, 1998, 2000). 현재 제주도 전역의 지표 화산암 시료를 대상으로 한 암석기재 및 암석화학과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 연구가 진행 중 이다. 그 결과는 이러한 절대연대 분석방법의 차이에 의한 화산활동시기의 문제를 해결할 실마리를 제공해줄 것으로 기대한다.

3.3.5. 하천 지역

30개 중 21개 시료에 대한 자료를 이용하였다. 이 시추공에서도 다른 지역 시추공처럼 지표에서 지하로 내려감에 따라 절대연대가 증가하는 현상을 잘 나타낸다. 인접한 삼달1호공 및 종달1-2호공과 같이 하천 1-2호공에서 서귀포층 상부에 분포하는 용암류의 절대연

대는 150~180Ka로 가장 젊은 값을 가진다. 한편 하천 4호공 하부에 분포하는 고-FeO 조면현무암(해수면 하 17m)의 절대연대도 과잉아르곤에 의해 영향 받았음을 지시하며, 서귀포층 내 조면현무암 성분의 자갈(해수면 하 102 m)의 절대연대는 $774 \pm 154\text{Ka}$ 를 나타낸다.

4. 토 의

시추코어를 이용한 지하에 분포하는 화산암류에 대한 연구는 고정된 지역에서 용암류의 수직적인 변화를 잘 파악할 수 있다는 장점은 있으나 화산활동의 특성상 이웃한 다른 시추공과의 수평적인 층서대비가 힘들다는 제한점이 있다. 즉, 퇴적암과는 달리 용암류는 분출 당시 화구의 위치, 지형경사, 용암 분출량, 용암류의 물리적 특성, 그리고 바람의 방향 등 여러 가지 요인에 의해 유동 방향이 제어되므로 경우에 따라 수평적인 연속성이 매우 불량하다. 또한 작성과정에서, 용암 단위 간 접촉면이 교란된 경우 암맥과 용암간의 구분 및 존재를 파악하기가 쉽지 않을 뿐 아니라, 고결도가 낮은 얇은 두께의 퇴적층 또한 굴진수에 의해 물에 씻겨 손실되는 경우도 발생하며, 코어 회수율이 낮은 절리 또는 파쇄가 발달한 구간이 반복되는 등의 이유로 층서적 해석에 제한을 받게 된다.

4.1. 제주도 동부 저지대의 지형 발달

Fig. 7은 지역 별 시추공의 고도에 따른 화산암류의 수직적인 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대의 변화를 나타낸 것이다. 화산암류의 절대연대는 깊어짐에 따라 점진적으로 증가하나 드물게 동일 고도에서 지역에 따라 급격하게 증가하기도 한다. 이러한 현상은 화산활동의 시기 또는 용암류의 분포 시기가 수직적으로 상이함은 물론, 지역별로도 차이가 있음을 의미하는 것이다. 즉, 동일한 고도(표고)라고 할지라도 화산활동과 용암류의 분포 시기는 상당한 차이가 있다는 것을 의미한다. 특히, 서귀포층 상부를 덮고 있으며 다양한 화학 성분을 가진 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대가 150~550Ka의 비교적 넓은 연대 범위를 나타내고 있음은 단순한 암석기재 혹은 암석화학적 기재에 근거한 제주도의 화산층서 대비에 오류를 범할 수 있음을 지시한다.

제주도 동부 지역 저지대는, 전반적으로 해발 100 m 이상의 내륙 지역이 그 이하 지역보다 먼저 화산활동이 진행되면서 화산 지형이 형성되었으며, 뒤이은 화산활동으로부터 분출한 용암류가 해안 저지대로 확산되면서 오늘날의 화산 지형이 완성된 것으로 해석된다. 특히 한

동1-3호공, 하천1-2호공, 종달1-2-3호공, 삼달1-2호공의 해수면 하부에 존재하고 있는 베게용암(pillow lava)을 포함한 유리쇄설성 각력암(hyaloclastite breccia)층은 육상 분출 용암류가 바다 속으로 유입되는 과정에서 만들어진 용암 삼각주(lava delta)로서 동부지역의 화산 지형 발달 과정을 지시하는 좋은 증거이다. 또한, 해변 퇴적물이 산출 심도 및 그 상하위 화산암류의 절대연대는 동부 지역의 고해안선이 화산활동 시기에 따라 상당히 불규칙한 모양을 하고 있었던 것으로 해석된다. 이는 45만년 이후 최근까지 전 세계 해수면의 변화가 상당히 유동적이었음을 나타내는 결과(Alverson *et al.*, 2002)와도 조화적이다. 결론적으로 제주도 동부 지역은 우선 손가락을 펼친 형상과 같은 고지형을 이루고 그 이후에 점진적으로 이들 사이를 채워나가면서 지형이 발달해 가는 과정을 밟은 것으로 해석된다. 다만, 한동 1호공 지역은 동부 저지대의 다른 지역과는 달리 부분적으로 비교적 이전 시기의 화산활동에 의해 독립적인 화산 지형이 형성되었을 것으로 사료된다.

4.2. 제주도 동부 저지대의 화산활동

최근 제주도의 화산 활동에 관해 연구자에 따라 달리 정의한다. Yun(2004)은 ~1.2-0.7Ma의 기저용암류와 고기 응회환과 응회구 형성시기 및 서귀포층 퇴적기와 0.7Ma-0.025Ma의 한라산 순상화산체와 후기 응회환/응회구 형성 및 퇴적기로 구분하였다. 한편, Sohn(2004)은 ~0.4Ma까지의 서귀포층 퇴적 및 수성 화산활동기, 0.4-0.1Ma의 한라산 순상 화산활동기 그리고 0.1M 이후 홀로세 화산활동기로 구분한 바 있다.

이 연구에서는 시추공별 시추코어에 대한 지질주상도와 용암류 단위별 화산암류의 전암성분 자료, 그리고 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 값을 이용한 시추공간의 대비를 통해 동부 저지대의 퇴적/화산활동을 재구성하였다 (Figures 8-12).

4.2.1. U층 퇴적기

U층은 Koh(1997)에 의해 명명된 미교결 상태의 사니질 퇴적층으로, Won *et al.*(1993)은 “세화리층”으로도 명명한 바 있다. U층의 주 구성 물질은 사질(석영과 장석)과 실트질이며, 층후는 약 150m(Koh, 1997)이다. 최근 이 연구와 동일 지역의 시추공에서 얻어진 U층내 석회질 초미화석 연구(Yi *et al.*, 2005)는 그 퇴적 시기를 플라이오세에 한정된다.

이 연구에서는 우도공과 종달5호공을 제외한 시추공에서 U층의 존재가 확인되었다. 지역별 U층의 포착심

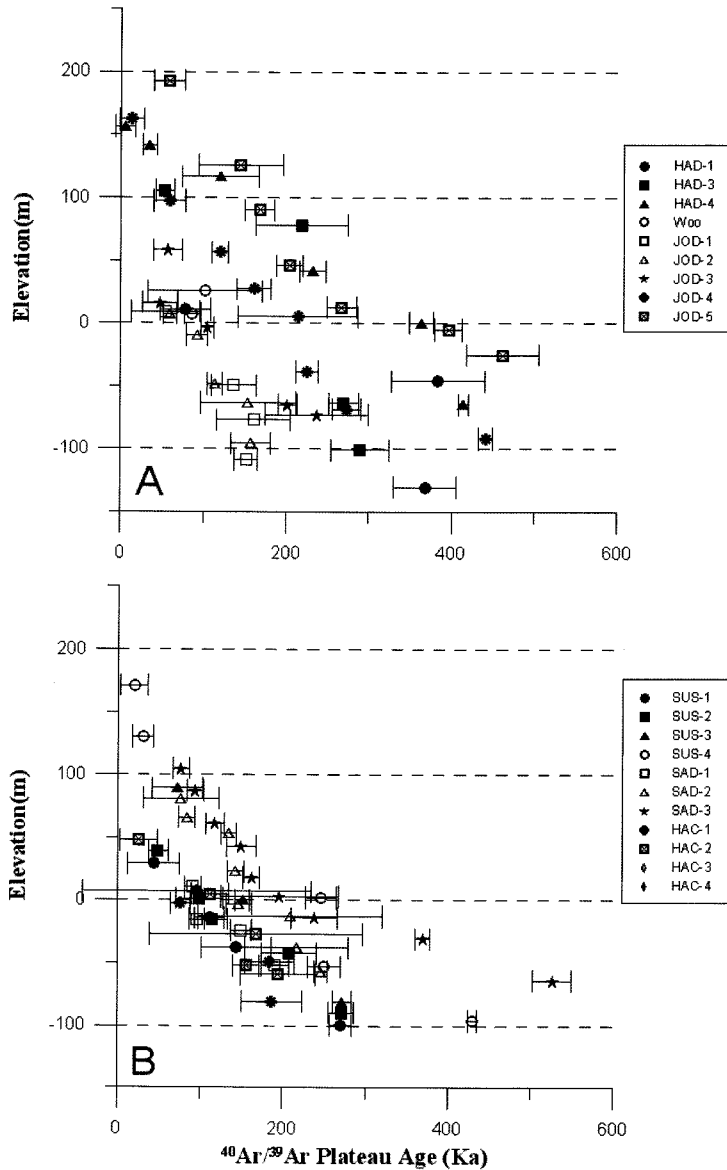


Fig. 7. $^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$ age vs. vertical variation of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. (A) Handong-Udo-Jongdal Areas (B) Susan-Samdal-Hacheon Areas.

도는, 한동 지역(평균 150 m), 종달 지역(평균 145.2 m), 수산 지역(평균 127 m), 삼달 지역(평균 125 m), 하천 지역(평균 91 m)이며, 이 같은 U층의 포착심도는 현재 연안의 해저 깊이와 비교적 비슷하다. U층은 제주도 동남부에 위치한 하천 지역에서 비교적 얇은 위치에서부터 포착되고, 동북부의 한동 지역에서 가장 깊게 분포하고 있다. 또한, U층의 분포 심도는 해안에서 내륙 쪽으로 향하면서 다소 깊어지는 경향을 보이고 있으나 시추공들이 해발 200 m 이하 지역에 위치해 있는 관

계로 단정 짓기는 곤란하다. 획득된 시추코어에서는 이 시기 동안의 화산활동 증거를 찾을 수 없었다.

4.2.2 서귀포층 퇴적기간 동안의 화산활동

서귀포층내에서 플라이오세(1.72-0.41 Ma)를 지시하는 석회질 조미화석의 산출(Yi *et al.*, 2004)은 제주도에서 서귀포층이 비교적 오랜 시간에 걸쳐 퇴적이 이루어졌음을 지시한다. 또한 최근 서귀포층은 대부분 수성화산활동 기원의 물질들이 일차퇴적 또는 재퇴적 작

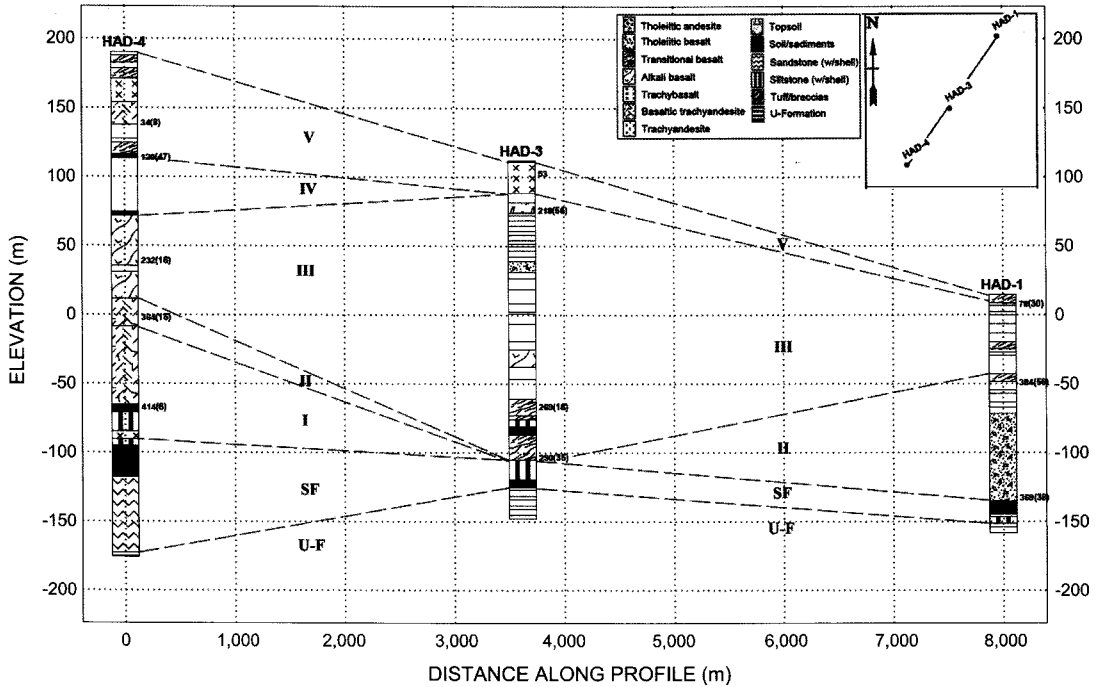


Fig. 8. Schematic graphic logs of Handong 4-3-1 boreholes. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration $\times 12.5$. Numbers with number in parenthesis are $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages with 2 sigma standard deviation of the subsurface volcanic rock cores. Blank area in log depicts range for no chemical analysis. Abbreviations: U-F, U-Formation, SF, Seoguiipo Formation, Volcanic activities, I, II, III, IV and V.

용을 거쳐 형성된 것이며, 육성 환경과 해성 환경이 교차하는 조건하에서 퇴적되었거나 전적으로 육상 환경에서 퇴적된 경우로 해석된다(Sohn, 2004; Sohn *et al.*, 2007). 동부 지역 심부 시추공에서 회수된 서귀포층의 암상은 하위로부터 해양생물 화석을 포함한 이암 및 사암, 유리질쇄설암을 포함한 응회암, 상위의 해양생물 화석을 포함한 이암 및 사암으로 크게 구분되는데, 이는 서남부 지역의 사계 시추공에서 보고된 암상(Sohn and Park, 2004)과도 유사하다. 그러나 지역에 따라 그 암상이 전부 혹은 부분적으로 산출한다.

이 연구에서 서귀포층의 상위 퇴적 시기를 규제해주는 화산암류의 절대연대는 지역적인 변화를 보여, 가장 오랜 시기를 제시하는 526Ka(삼달3호공)에서 가장 젊은 152Ka(종달1호공)까지 다양하다. 즉, 비교적 최근까지도 국지적인 서귀포층의 퇴적작용이 화산활동과 더불어 지속되었음을 지시하며, 다양한 두께의 유리질 쇄설암을 포함한 응회암상이 존재하는 것도 이와 부합된다. 다만, 하천1호공과 4호공의 최하부에서 U층 상부와 서귀포층 하부에서 용암류가 존재하고 있음이 기재된다. 이들은 각각 전이질 현무암(해수면 하 78~83 m,

두께 5 m)과 조면현무암(해수면 하 89~102 m, 두께 13 m)의 조성을 가지는데, 대부분 치밀질이며, 절리가 발달된 특징을 지닌다. 이미 설명한 바와 같이, 이들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 과잉이르곤에 의해 에러연대를 지시하므로 사용하기 곤란하다. 동일 시추공에서 서귀포층 상부에 분포하는 용암층과 암상 및 그 조성이 동일하며, 그 분포 지역의 연장성이 결여된 것으로 미루어 이들은 서귀포층 상부에 분포하는 용암층이 분출할 당시에 U층 상부와 서귀포층 하부 사이의 연약대를 따라 실(sill) 상으로 관입한 것으로 해석된다. 한편, 종달 1-2호공 및 하천4호공에서 U층 상부 서귀포층 하부에서 얻어진 자갈은 조면현무암에서 현무암질 조면안산암의 조성을 가지는데, 이의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 각각 $774 \pm 154\text{Ka}$, $639 \pm 27\text{Ka}$ 이다. 이들은 제주도 남부 및 서부 지역(준비 중)에서 나타나는 초기 화산활동(1Ma~650Ka)의 산물에 해당한다. 우리는 이를 제1기 하부 (I-L) 화산활동기로 구분한다.

이 지역에서 서귀포층의 퇴적 기간 동안 화산활동은 다음과 같이 구분된다.

1) 제1기 상부 화산활동기(I-U): 서귀포층 내 용암류

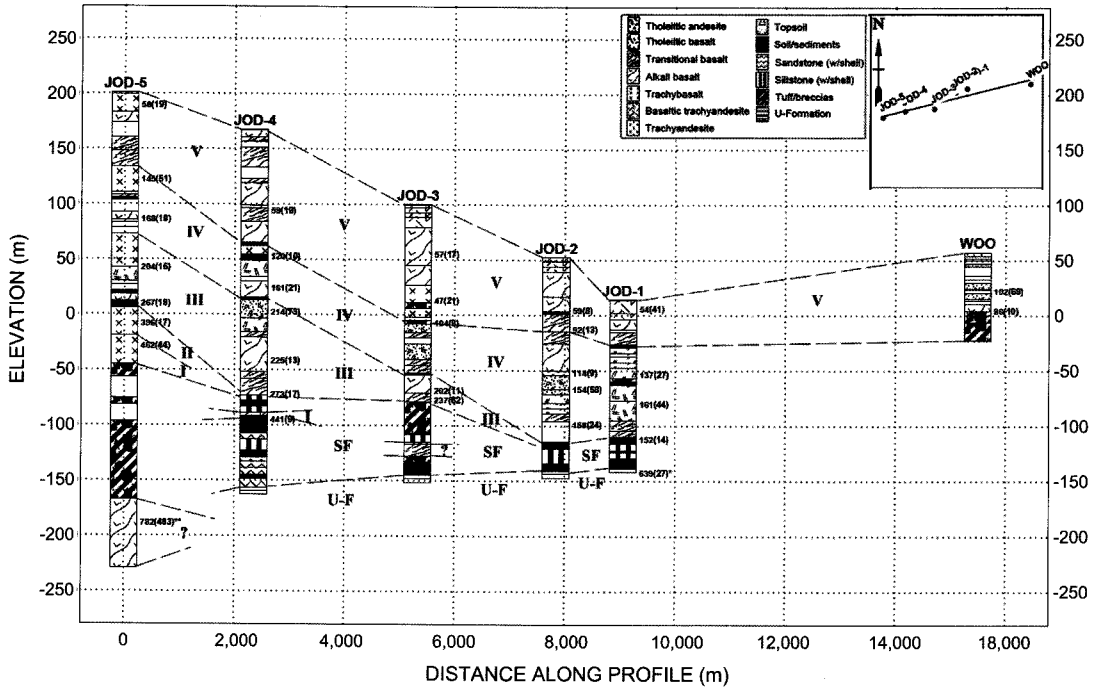


Fig. 9. Schematic graphic logs of Jongdal 5-4-3-2-1-Udo boreholes. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration x20. Numbers with number in parenthesis are ^{40}Ar - ^{39}Ar ages with 2 sigma standard deviation of the subsurface volcanic rock cores. Blank in legend depicts range for no chemical analysis. Abbreviations: U-F, U-Formation, SF, Seoguiipo Formation, Volcanic activities, I, II, III, IV and V. *gravel, **data excluded.

는 한동4호공, 종달4·5호공, 수산4호공 및 삼달3호공 지역과 같이 해발 100~200 m 사이 지역의 지하에서 확인된다. 이들 지역에서 용암류는 서귀포층과 해양성 퇴적층 또는 이암층 사이에 존재하는데, 용암류의 절대연대로부터 이 시기를 약 550Ka에서 400Ka까지로 정의한다. 그 조성은 주로 현무암질 조면안산암(한동4·종달4·수산4·삼달3호공)이며 드물게 조면현무암(종달5호공)이다. 육안으로 볼 때, 기공이 거의 없는 치밀질이고 견고한 암상을 가진다. 부분적으로 절리가 발달되어 있으며, 특히 한동4호공에서의 암상은 특징적으로 냉각에 의한 소규모의 주상절리가 발달한다.

2) 제2기 화산활동기(II): I-U기 용암류를 덮고 분포하고 있으며, 이 시기를 약 400Ka에서 300Ka까지로 정의한다. 한동4호공, 종달4호공 및 삼달3호공에서 관찰되며, I기의 용암류와 시간적 간격을 지시하는 침식면(한동4호공) 및 퇴적층(삼달3호공)이 분포하며, 그 성분은 I기의 용암류와 유사한 현무암질 조면안산암과 조면현무암이다. 한편, 한동1·3호공 및 수산4호공에서 이 시기의 암석은 전이질 현무암 및 솔리아이트질 안산암이다. 한동1호공에서는 유리쇄설성 각력암인 상태로 회

수되는 것으로 미루어 육상 환경에서 분출된 용암이 당시 해안가로 흘러들어 가면서 용암 삼각주가 형성되고, 지형이 바다 쪽으로 확장된 것으로 해석된다. 이들 I-U 및 II 시기의 용암류가 지역으로 제한적으로 분포하는 것은 화산활동이 산발적이고 국부적이었으며, 이 지역에서 주로 내륙 부분에서 현무암질에 비해 좀더 분화가 진행된 마그마의 화산활동이 먼저 시작되었음을 지시한다.

3) 제3기 화산활동기(III): I 및 II기 용암류를 덮고 있으며, 이 시기를 약 300Ka에서 200Ka까지로 정의한다. 이 시기의 화산 분출물은 해안 지대인 종달1·2호공, 삼달1호공, 하천1·2·3호공에서는 발견되지 않는다. 즉, 이 시기 동안에도 이들 지역에서는 여전히 퇴적 및 수성화산활동이 진행되었거나, 분출된 용암이 도달되지 않았음을 의미한다. 이 시기의 용암류의 성분은 알칼리현무암조면현무암전이질 현무암솔리아이트질 현무암(안산암)이 서로 반복되는 현무암질 마그마 활동의 산물이다.

4.2.3 서귀포층 퇴적기 이후의 화산활동

이 시기는 모든 시추공에서 서귀포층을 덮고 있는

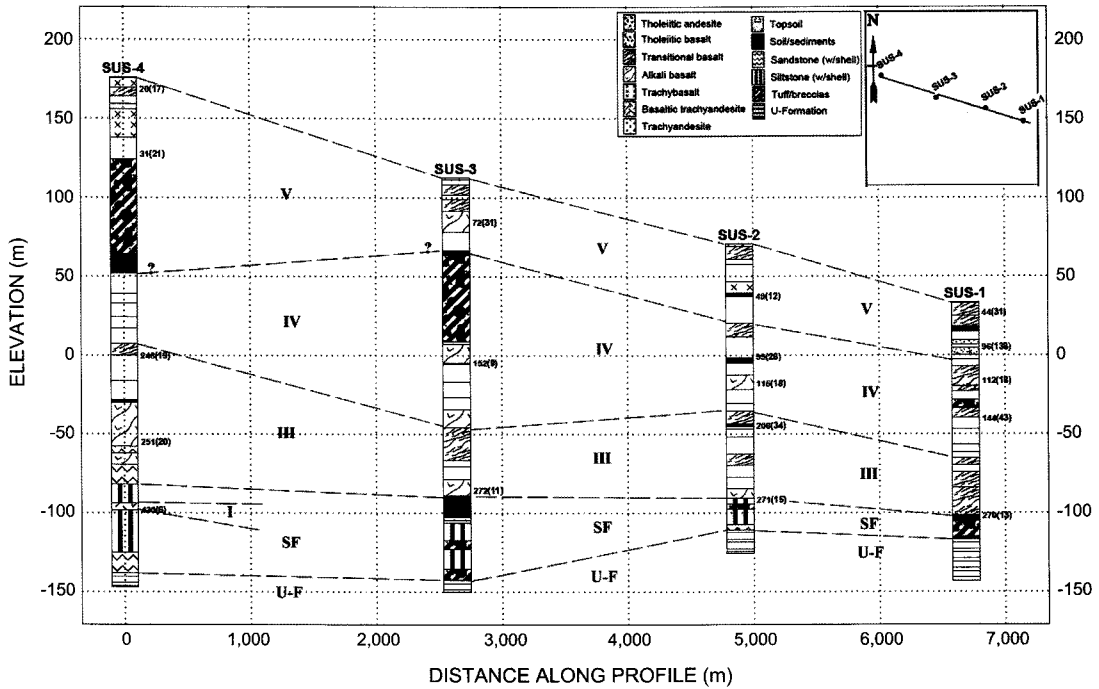


Fig. 10. Schematic graphic logs of Susan 4-3-2-1 boreholes. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration $\times 12.5$. Numbers with number in parenthesis are $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages with 2 sigma standard deviation of the subsurface volcanic rock cores. Blank area in log depicts range for no chemical analysis. Abbreviations: U-F, U-Formation, SF, Seoguiipo Formation, Volcanic activities, I, II, III, IV and V.

화산활동을 정의한다.

1) 제4기 화산활동기(IV): 이 시기 동안 화산활동의 산물은 종달, 삼달 및 하천 지역의 해안선 부근까지 즉, 동부 지역 전역에서 산출되며, 그 시기는 약 200Ka에서 100Ka까지로 정의한다. 이 시기 용암류의 성분은 이전 시기의 조성 범위와 유사하다. 특히 내륙에 해당하는 종달3-4-5호공과 삼달3호공에서는 조면현무암이 가장 상위에서 산출한다. 이 시기 동안에도 용암류와 더불어 다양한 퇴적암이 협재하는 데, 응회암과 사암층 또는 패사층으로 분류된다. 특히 종달1호공(해발고도 50.5~54.5 m), 종달2호공(해발고도 59.8~62.8 m) 및 수산1호공(해발고도 30.9~33.4 m)에는 패류화석을 포함한 사암층 및 패사층이 용암층 사이에 협재되어, 이 시기 동안 지역에 따른 해수면의 변화를 지시한다. 또한, 두산봉으로 부터 동북쪽으로 약 1.5 km 떨어진 종달1호공(해발고도 56.8~59.8 m)과 서북쪽으로 약 2.6 km 떨어진 종달3호공(해발고도 3.8~6.8 m)에서 각각 3m의 응회암층이 용암류 사이에 분포하고 있다. 이상의 사암층, 패사층, 응회암층은 지금으로부터 약 12~14만년 사이 해수면이 상승된 동안(Alverson *et*

al., 2002) 형성된 것으로 해석되며, 두산봉과 일출봉 응회구도 이 시기에 형성된 것으로 추정된다.

2) 제5기 화산활동기(V): 이 시기는 전기의 화산활동과 대부분 고토양층으로 구분되거나 침식면 접촉을 하고 있으며, 약 100Ka이후 최근까지의 화산활동으로 정의한다. 용암류와 고토양층 또는 화산화층, 분석구(스코리아구)로 이루어져 있다. 이 기간은 이 지역에서 마지막 단계의 화산활동기로서 용암류의 조성은 알칼리 현무암, 조면현무암, 전이질 현무암, 솔리아이트질 현무암 및 안산암과 더불어 좀더 분화된 현무암질 조면안산암으로 다양하다. 그러나 30Ka보다 젊은 용암류, 특히 솔리아이트질 현무암(안산암) 조성의 용암류는 분석 방법의 정밀도에 의해 정확한 분출 시기를 보고하기가 곤란하다.

결론적으로 제주도 동부 저지대에서 용암류의 분출과 같은 하와이형 화산활동은 최고 55만년전 부터 시작되었으며, 다양한 퇴적층과의 관계, 화산암류의 화학 조성 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대에 근거하여 크게 다섯 단계의 활동기로 구분된다. 특히 시추코어 화산암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료 중 200Ka이내인 시료가 약

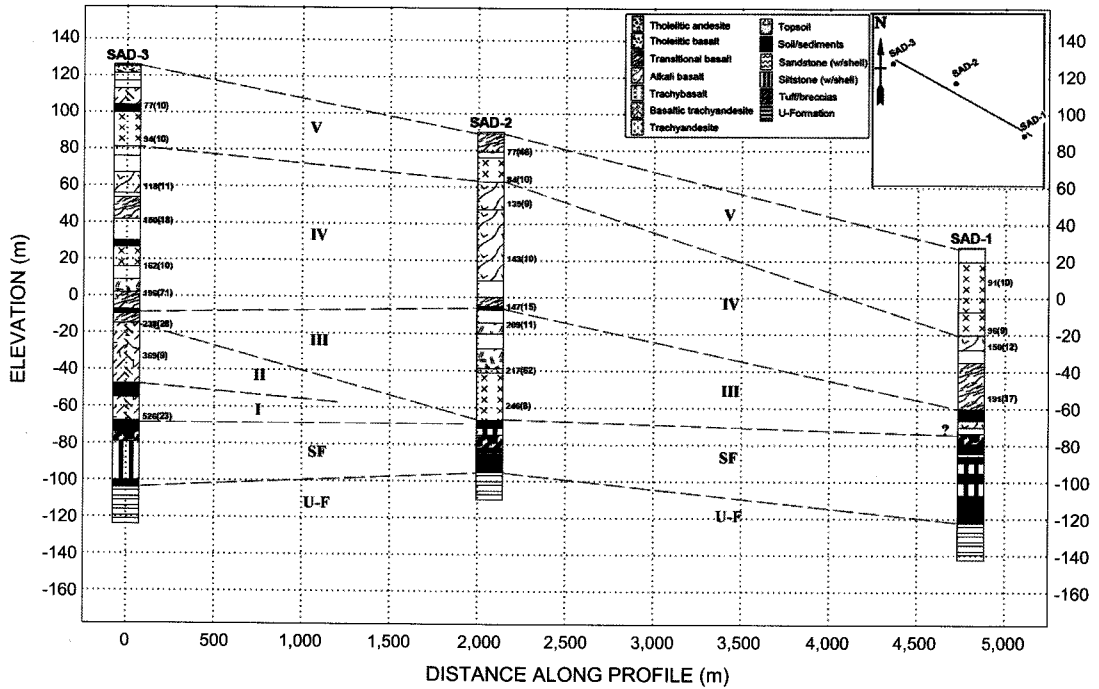


Fig. 11. Schematic graphic logs of Samdal 3-2-1 boreholes. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration $\times 10.5$. Numbers with number in parenthesis are ^{40}Ar - ^{39}Ar ages with 2 sigma standard deviation of the subsurface volcanic rock cores. Blank in legend depicts range for no chemical analysis. Abbreviations: U-F, U-Formation, SF, Seoguiipo Formation, Volcanic activities, I, II, III, IV and V.

70%인 점은 제주도 동부 저지대 지역 대부분이 IV와 V 화산활동기 동안 분출된 200Ka이내의 비교적 젊은 화산암류로 이루어져 있음을 지시한다.

5. 결 론

제주도 동부 지역 저지대(해발 평균 200 m 이내) 20개의 시추공(북쪽에서 부터 한동4-3-1호공; 중달5-4-3-2-1호공우도공; 수산4-3-2-1 호공; 삼달3-2-1호공; 하천4-3-2-1호공)으로부터 얻어진, 이 지역 지하 화산암류의 암석화학적 특징과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대에 의한 화산활동 특징은 다음과 같다.

(1) 이 지역의 지하에 분포하는 화산암류는 그 SiO_2 함량이 44~54 wt%이며, 알칼리계열의 현무암(15.4%), 조면현무암(15.8%), 현무암질 조면안산암(9%), 전이질 현무암(38.9%) 그리고 솔리아이트질 현무암(10%)과 솔리아이트질 안산암(10.9%)으로 구성된다. 그 중, 한동4호공의 최하부 것은 다른 암류에 비해 FeO 함량이 높은 고 FeO 조면현무암의 특징을 가지며, 중달1-2-3호공의 최상부 용암류는 낮은 K_2O 함량을 가지는 저

K_2O 현무암질 조면안산암이다.

(2) 150개의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료를 보고한다. 그러나 분석된 자료 중 약 30%의 자료는 실험오차 혹은 시료가 지니고 있는 과잉아르곤에 의해 사용할 수 없었다. 비록 육안으로 비교적 신선한 시료를 선택하더라도, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대의 해석에 상당한 주의를 기울여야함을 지시한다.

(3) 이 지역에 분포하는 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 최고 526 ± 23 Ka에서 최저 38 ± 4 Ka이나 대부분 200 Ka이내의 연대를 나타내며, 분포 지역에 따른 변화는 이들 지역의 육지 지형이 내륙에서 해안으로 점진적으로 커져갔음을 나타낸다.

(4) 퇴적층의 분포, 화산암류의 성분 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대의 변화로부터 동부 지역 저지대의 용암류의 분출과 같은 하위이형 화산활동은 다섯 단계로 구분된다. 즉, 서귀포층이 퇴적할 동안의, I-U기(550~400Ka), II기(400~300Ka), III기(300~200Ka)와 퇴적 이후 IV기(200~100Ka), V기(100Ka이후)이다. 특히 화산암류의 성분 변화 및 분포 지역의 차이 그리고 이들 시기 간에 분포하는 다양한 퇴적층의 존재는 화산활동이 오랜

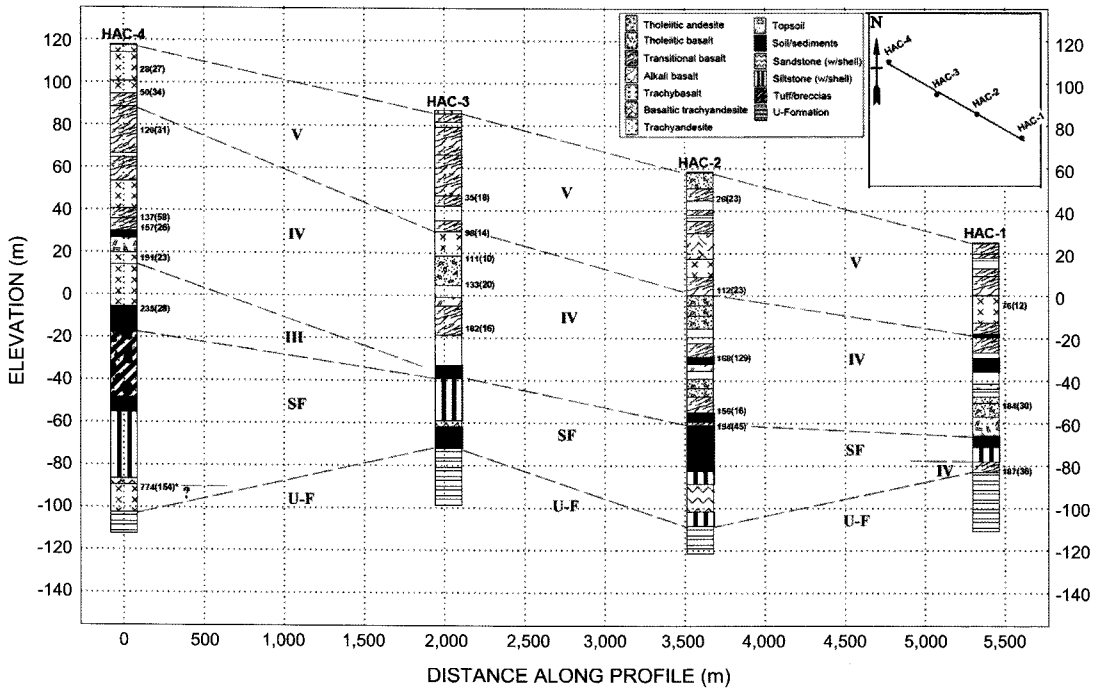


Fig. 12. Schematic graphic logs of Hacheon 4-3-2-1 boreholes. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration $\times 13$. Numbers with number in parenthesis are $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages with 2 sigma standard deviation of the subsurface volcanic rock cores. Blank area in log depicts range for no chemical analysis. Abbreviations: U-F, U-Formation, SF, Seogupo Formation, Volcanic activities, I, II, III, IV and V.

기간 동안 간헐적으로 진행되었음을 지시한다. 이는 제주도 화산활동 시기 및 지형 형성에 대한 다양한 기존의 연구 결과(Jeju Provincial Government, 2005)와는 상이한 결과이다. 특히 제주도 화산활동 시기의 구분에 있어 흔히 언급되는 일명 “기저현무암”에 해당하는 용암 단위를 발견할 수 없었다. 또한, 지표 화산암류의 K/Ar 절대연대 자료를 바탕으로 한 기존의 제주도 화산활동 시기 구분이 재고되어야함을 확인하였다.

(5) 이 연구는 제주도 동부 지역 저지대의 지형이 화산활동 및 퇴적작용에 의해 점진적으로 만들어졌음을 지시한다. 또한 시추공에 근거한 화산 층서의 해석은 암석기재, 암석화학적 특징과 함께 절대연대 자료를 바탕으로 이루어져야 함을 강조한다.

사 사

이 연구는 행정자치부의 온천자원 보전방안연구 과제에서 일부 지원되었음을 밝힌다.

관측정 작성 및 조사에 많은 도움을 주신 한국농촌공사 제주본부 황중환 팀장을 비롯한 관계자 여러분께

감사를 드린다. 또한, 암석성분 분석 및 절대연대 측정 그리고 연대자료의 해석에 도움을 준 미국 오레곤 대학교 Robert A. Duncan 교수님과 John Huard 연구원께 깊이 감사드린다. 이 논문에 대해 세심한 조언을 해주신 박기화 박사님, 박원배 박사님 그리고 황상구 교수님께 진심으로 감사드린다.

참고문헌

Alverson, K.D., Bradley, R.S. and Pedersen, T.F. (2002) Paleoclimate, Global Change and the Future, Springer, 37p.
 Hart, S.R. and Davis, K.E. (1978) Nickel partitioning between olivine and silicate melt. Earth Planet. Sci. Lett., v. 40, p. 203-219.
 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.
 Janousek, V., Farrow, C.M. and Erban, V. (2006) Interpretation of whole rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). Journal of Petrology, v. 47, p. 1255-1259.
 Jeju Provincial Government (2005) Collection of abstracts from references of geology and water

- resources in Jeju Island. Jeju Provincial Water Resource Management Office, 436p. (title translated).
- Kelly, S. (2002) Excess argon in K-Ar and Ar-Ar geochronology. *Chemical Geology*, v. 188, p. 1-22.
- Koh, C.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. *Jour. Petrol Soc Korea*, v. 14, p. 45-60.
- Koh, C.S., Yun, S.H. and Kang, S.S. (2003) Petrology of the volcanic rocks in the Paekrogdam crater area, Mt. Halla, Jeju Island. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v. 12, p. 1-15.
- Koh, G.W. (1991) Subsurface distribution of Seoguipo Formation in Cheju Island. Report of Ocean Science Institute, Cheju National Univ., v. 15, p. 81-91 (title translated).
- Koh, G.W. (1997) Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implication of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Doctoral dissertation, Pusan National Univ., 325p.
- Koh, G.W., Park, Y.S., Kang, B.R. and Kim, B.S. (2005) Subsurface geology and volcanic activities in the eastern area of Jeju Island. Symposium of the 13th World Water Day, Jeju Provincial Government, p. 3-44 (title translated).
- Koh, G.W., Park, Y.S. and Park, W.B. (2004) Subsurface stratigraphy and ⁴⁰Ar-³⁹Ar absolute age in the eastern area of Jeju Island. Volcanic rocks and Volcanic activities in Jeju Island. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea, p. 29-50 (title translated).
- Koppers, A.A. (2002) ArArCALC software for ⁴⁰Ar-³⁹Ar 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.
- Lee, M.W. (1982) Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. *Sci. Rpt. Tohoku Univ.*, v. 15, p. 177-256.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T. (1964) Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, v. 5, p. 82-133.
- McDougall, I. and Harrison, T.M. (1988) *Geochronology and thermochronology by the ⁴⁰Ar-³⁹Ar Method*. Oxford University Press, Inc., New York, 212p.
- Miyake, Y. Furuyama, K., Yoon, S., Koh, K.W. and Nagao, K. (1993) Temporal chemical variation of Pleistocene volcanic rocks from Jeju Island. In *Geological correlation of southwest Japan and Korea peninsula tectonics for spreading of active continental margin*. Sci. Report, Shimane Univ., p. 106-111.
- Park, J.B. and Koh, G.W. (2004) A note on geochemistry and absolute ages of Cenozoic lava flows in Jeju Island based on interim results of several borehole cores in the eastern part of Island. *Geology of Korea Special Pub, No.2, KIGAM*, p. 161-172.
- Park, J.B. and Kwon, S.T. (1996) Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, v. 5, p. 66-83.
- Park, J.B., Park, K.H., Cho, D.L. and Koh, G.W. (1999) Petrochemical classification of the Quaternary volcanic rocks in Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 35, p. 253-264.
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.C., Cho, B.W., Jang, Y.N., Lee, B.J., Lee, S.R., Son, B.K. Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U. (2000) Geologic report of the SeogwipoHahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163p.
- Park, K.H., Park, J.B., Cheong, C.S. and Oh, C.W. (2005) Sr, Nd and Pb isotopic Systematics of the Cenozoic Basalts of the Korean Peninsula and their implications for the PermoTriassic Continental Collision Boundary. *Gondwana Research*, v. 8, p. 529-538.
- Park, K.H., Song, K.Y., Hwang, J.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Cho, B.W., Kim, Y.B., Choi, P.Y., Lee S.R. and Choi, H.I. (1998) Geological report of the ChejuAewol Sheet (1:50,000), Cheju Provincial Government, 290p.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1979) Petrogenesis implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 69, p. 33-47.
- 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 ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Chem. Geol.* v. 145, p. 117-152.
- Sohn, Y.K. (2004) Hydrovolcanism and Quaternary Depositional Processes in Jeju Island. Volcanic rocks and Volcanic activities in Jeju Island. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea, p. 3-15, (title translated).
- Sohn, Y.K. and Park, K.H. (2004) Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, v. 8, p. 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H. (2007) Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydrovolcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea., (Proceeding) 2007 Annual Conference of Geological Society of Korea, p. 226.
- Tamanyu, S. (1990) The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanic, Korea. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, v. 41, p. 527-537.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Yoshikawa, M, Chang, Q., Sato, K, and Lee, M.W. (2005) The Petrology and Geochemistry of volcanic rocks in Jeju Island: Plume magmatism along the Asian Continental Margin. *Journal of Petrology*, v. 46, p. 523-553.
- Wilkinson, J.F.C. and LeMaitre, R.W. (1987) Upper mantle amphibole and micas and TiO₂, K₂O and P₂O₅ abundances and 100xMg/(Mg+Fe⁺²) ratios of mantle metasomatism and undepleted mantle composition. *J. Petrol.*, v. 28, p. 37-73.
- Wolfe, E.W, Wise, W.S and Dalrymple, G.B. (1997) *The Geology and Petrology of Mauna Kea Volcano, Hawaii-A Study of Postshield Volcanism*. USGS Prof. Paper 1557, 129p.
- Won, C.K. (1976) Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 12, p. 207-226.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K. (1993) Explanatory text of the geological map of Sungsan

- Sheet (1:50,000), Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 104p. (title translated).
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Yun, S.H. (1995) Explanatory text of the geological map of Pyoseon Sheet (1:50,000), Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 59p. (title translated).
- Won, C.K., Lee, M.W., Yun, S.H., and Ko, B.K. (1998) Geochemical characteristics of the volcanic rocks in Pyoseon Area, Southeast Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 34, p. 172-191.
- Yi, S.S., Bak, Y.S., Yoon, S., Jung, C.Y., Yun, H.S. and Lee, J.D. (2004) The characteristics of nanofossils from the Seoguipo Formation and "U" Formation in boreholes, Eastern Jeju Island. (Proceeding), *J. Paleont. Soc. Korea*, v. 20, p. 51-52, (title translated).
- Yoon, S., Koh, G.W. and Kim, I.T. (1995) Development history of Cheju Island. *Bulletin of Chejudo Provincial Government*, v. 98, p. 148-164.
- Yoon, S., Jung C.Y., Song, S.T. and Yang, K.H. (2001) Volcanic debris avalanche and epiclastic deposits in the Seongeup area, Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, v. 5, p. 47-55.
- Yun, S.H. (2004) Introduction to the Formation of Jeju Volcano. *Proceedings of the second symposium, Jeju Volcanological Institute*, p. 17-29, (title translated).

2007년 12월 10일 원고접수, 2008년 2월 4일 게재승인.