

제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구 (III): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대자료에 근거한 제주도 형성 초기 용암 분출 기록

고기원¹ · 박준범^{2*}

¹제주특별자치도 환경자원연구원 물산업부, ²미육군극동공병단 지반환경공학부

The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (III): Early Lava Effusion Records in Jeju Island on the Basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute Ages of Lava Samples

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 twenty data for early lavas erupted during the initial period of formation of Jeju Island on the basis of review on 539 data of whole-rock geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating out of mainly core samples from 69 boreholes drilled in the lower land since 2001 and 66 outcrop sites. Out of 69 boreholes, the early lava flow units are identified from samples collected from Beophocheon (EL 235 m, 210 m deep), Donnaeko (EL 240 m, 230 deep), Donghong-S (EL 187 m, 340 m deep), 05Donghong (EL. 187.6 m, 340 m deep), Dosoon (EL 305 m, 287 m deep), Sangye (EL 230 m, 260 m deep), Mureung-1 (EL 10.2 m, 160 m deep), and Gapa (EL 17.5 m, 92 m deep), which are located in the southern and southwestern portion of Jeju Island. While, the well-known outcrops from Sanbangsan, Wolrabong, Wonmansa, and Kagsubawi are also reconfirmed. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating results of these lavas range from 1 Ma to 0.7 Ma, indicating that the data can be useful to constrain on age and geochemical characteristics of early lava effusion period in the formation of Jeju Island. Especially, samples with trachybasalt in composition collected from 143 m to 137 m, and from 135 m to 123 m below ground surface at 05Donghong hole have the oldest ages, 992 ± 21 Ka and 988 ± 38 Ka, respectively. This study suggests that in Jeju Island the first lava with trachybasalt in composition may have effused around 1 Ma ago, and the effusion style and chemical compositions of lavas must have changed to the formation of lava domes with trachyte-trachyandesite-basaltic trachyandesite and the eruption of lavas with alkali basalt and trachybasalt intermittently during the period from 0.9 Ma to 0.7 Ma ago. It also indicates that the initial lava flows below the ground are intercalated with or underlain by the Seoguiipo Formation except for several exposed domal structure areas such as Sanbangsan and Kagsubawi, implying that the early lava effusion may have intermittently and sporadically occurred with nearby hydrovolcanism and sedimentation.

Key words : Jeju Island, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute age, early lava effusion

2001년부터 제주도 전역의 중산간 이하 저지대에서 시행된 69개 시추공으로부터 획득된 시추 코어 용암류와 66곳의 노두에서 분석된 전암 암석화학 및 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료(539개)를 검토하여, 그 중 제주도 형성 초기 용암 분출 산물로 확인되는 20개의 자료를 보고한다. 시추공 중 남부와 남서부의 범호천공(고도 235 m, 심도 210 m), 돈내코공(고도 240 m, 심도 230 m), 동홍S공(고도 263 m, 심도 270 m), 05동홍공(고도 187.6 m, 심도 340 m), 도순공(고도 305 m, 심도 287 m), 상예공(고도 230 m, 심도 260 m), 무릉1호공(고도 10.2 m, 심도 160 m), 가파공(고도 17.5m, 심도 92m)에서만 확인되었고, 노두 중에서는 이미 알려져 있는 산방산, 월라봉, 원만사, 각수바위 지역에서 재확인하였다. 이들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료는 1 Ma - 0.7 Ma를 나타내어, 제주도 형성 초기 용암 분출시기 및 그 지화학적 특징을 규제할 수 있다. 특히 05동홍공의 심도 143~137 m와 135~123 m 구간에서 조면현무암 성분인 용암으로부터 각각 992 ± 21 Ka와 988 ± 38 Ka인 가장 오래된 연대를 보고한다. 이 연구는 제주도 형성 초기의 용암

*Corresponding author: chunpom@lycos.co.kr

분출이 약 1 Ma 경 조면현무암질 용암 분출로 시작하여, 이후에 약 0.9-0.7 Ma 기간 동안 주로 조면암-조면안산암-현무암질 조면안산암 성분을 지닌 용암류의 용암 돔 형성 그리고 간헐적인 알칼리현무암 및 조면현무암질 용암의 분출로 진행하였음을 제시한다. 산방산, 각수바위 등 현재 지표에 노출되어 돔상 지형을 이루는 일부 지역을 제외하면, 초기 용암류는 지표 하에서 서귀포층에 협재하거나 피복하고 있음을 나타낸다. 이는 제주도 형성 초기 용암 분출이 간헐적이며 국지적이었고, 주변에서 수성화산활동 및 퇴적작용이 동시에 진행되었음을 지시한다.

주요어 : 제주도, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 초기 용암분출

1. 서 언

제주도의 형성은 Haraguchi (1931)에 의해 보고된 이후, 70년대의 지하수 개발을 위한 지표 지질조사 및 시추 결과를 바탕으로, 80년대 초까지 제4기 화산암류의 암석화학적 특징을 포함한 제주도 화산 활동에 관한 단계별 모델이 제시되었다(예: Won, 1976; Lee, 1982, Yoon *et al.*, 1995). 그러나 지표 하에 존재하는 초기 용암 분출(effusion)물에 대한 정보는 제한된 시료, 즉 응회암층 내 포획된 암편이나 시추 코어에 의해 확인되는데, 이는 층서상으로 서귀포층 하부의 U층(Koh, 1997) 혹은 세화리층(Lee *et al.*, 1988)을 덮는 소위 “기저현무암”으로 분류되었다. 특히 이들 중 이미 보고된 4개의 K-Ar 연대자료-응회암층내 포획된 감람석-회석 현무암(1.20±0.05~0.94±0.05 Ma, Yun *et al.*, 1987; Lee *et al.*, 1988) 혹은 시추코어(관포시추공, Koh, 1997) 중 감람석-회석 현무암(2.22±0.16 Ma, Sawada *et al.*, 1993)-는 제주도 초기 화산활동 중 “기저현무암”의 연대를 규제하는데 지금까지 흔히 사용되어지고 있다(Lee, 1994; Lee *et al.*, 1994; Yoon *et al.*, 1995; Son *et al.*, 1998; Won *et al.*, 1998; Oh *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2002; Yun, 2004). 그러나 응회암층 내 포획된 감람석-회석 현무암 암편은 그 암석 화학 성분 자료를 포함한 자세한 연대 측정 분석 자료가 보고되지 않았으며, 시추 코어 중 감람석-회석 알칼리현무암은 상당히 변질된 기재적 특징을 지니고 있을 뿐만 아니라 이 시료의 전암 주성분 분석치는 이를 반영하고 있다(분석치의 합이 97.4 wt%). 따라서, 보고된 4개의 K-Ar 연대 자료에 대한 신뢰도를 검증해 보아야 할 필요성이 제기되어왔다.

K-Ar 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정방법은 암석 내 방사성 붕괴로 인해 축적된 Ar 가스의 양을 측정해 그 암석의 생성연대를 구하는 기술로 비교적 최근에 형성된 제4기 화산암류나 단층대의 암석에도 쉽게 이용된다(Cheong *et al.*, 2004). 두 연대 측정의 자세한 실험 방법은 거의 동일하지만, K-Ar 법의 경우 K 함량은

별도의 분석을 통해 정량하게 된다. 반면, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 법의 경우 동일한 분취량(aliquot)으로 부터 Ar과 K 성분 분석을 수행하므로 시료 내에 있을 지 모르는 불균질성에 의한 연대 측정 오차를 제거할 수 있는 이점이 있으며, 또한 시료를 중성자 빔에 노출시키는 과정이 필요하다(Cheong *et al.*, 2004). 화산암 시료의 전암 K-Ar 측정 연대의 신뢰도는 정치(emplacement) 시기 동안 마그마 내에 포획된 방사기원 Ar의 완벽한 탈가스화(outgassing) 및 시료내 K-함유 광물상이 지니고 있는 Ar 보유(retention) 성질에 좌우된다(McDougall and Harrison, 1988). 감람석, 회석 혹은 사장석을 반정으로 가지는 현무암질암에서 분출 시기 이전 마그마 챔버에서 광물 정출 환경 동안 결정 내에 포획된 Ar에 의해 이례적으로 오래된 연대가 보고된다. 해상 환경에서 분출한 현무암의 경우 분출 후 급냉되므로 마그마 근원지로부터 유리질 성분 내에 포획된 불활성 기체가 탈가스화되지 못하여 이례적으로 오래된 연대 값을 얻게 되는 경우도 보고된다. 반면 포획암을 갖고 있지 않으며 신선한 대기중(subaerial) 분출암의 경우도 대기 성분의 Ar을 가질 경우나 혹은 변질된 경우는 원래 연대보다 젊은 연대 값을 얻는다. 한편, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정의 경우 시료의 가열 온도를 단계적으로 상승시키며 (step heating) 각 단계에서의 연대를 구한 후 이를 종합하여 연대 플래토(plateau) 혹은 스펙트럼(spectrum)을 얻는다. 만일 시료가 Ar의 폐쇄 온도 이후 Ar 손실이 없었고, 과잉 Ar이 존재하지 않았다면 연대 스펙트럼은 평탄한 형태를 갖는다. 그렇지 않을 경우에도 이 스펙트럼을 통해 그 이유에 대해 확인할 수 있는 장점이 있다(Cheong *et al.*, 2004). 또한 신선하거나 아주 미약하게 변질된 시료의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 시추 코어와 같이 이미 상하 층서 관계가 확인된 여러 시료를 동시에 분석함으로써 그 연대의 신뢰도를 높일 수 있다(McDougall and Harrison, 1988).

우리는 2001년부터 제주특별자치도에서 추진하고 있는 해수침투 감시 심부 모니터링 관측정 설치 사업을 포함한 여러 사업을 통하여 제주도 전역 중산간 이하

저지대에서 시행된 69개 시추공으로부터 획득된 471개의 시추 코어 용암류 시료와 이미 여러 연구(Won *et al.*, 1986; Yun *et al.*, 1987; Tamamyu, 1990; Miyake *et al.*, 1993; Won *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1994; Park *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2002; Koh *et al.*, 2005a, 2005b)를 통해 발표된 기존의 K-Ar 연대자료와의 비교를 위해 추가적으로 채집된 66개의 노두 시료에 대한 암석화학 및 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 측정을 하였다. 그 중 동부 지역의 연구 결과(Koh *et al.*, 2008)를 통해, 지표 용암류의 K-Ar 절대연대 자료를 바탕으로 한 기존의 제주도 화산 활동 시기 구분이 재고되어야 하며, 또한 시추 코어를 이용한 지하에 분포하는 화산암류에 대한 연구는 고정된 지역에서 용암류의 수직적인 변화를 잘 파악할 수 있다는 장점은 있으나 화산 활동의 특성상 이웃한 다른 시추공과 수평적으로 층서 대비를 할 경우 주의를 기울여야 함을 보고하였다.

이 연구는 그 동안 축적된 자료 중 시추 코어 및 노두 시료의 새로운 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료를 제시하고, 이를 근거로 제주도의 초기 용암 분출 활동에 관해 토의하는데 목적을 둔다.

2. 연구 방법

69개의 시추공 중 33개의 시추공은 서귀포층을 관통하여 U층에 도달한 후 시추가 종료되었다. 각 시추공에서 획득된 직경 25 cm의 시추 코어에 대해 지질 주상도를 작성하였으며, 지하에 분포하고 있는 용암류의 수직적 성분 변화와 절대연대를 밝히기 위하여 용암단위별로 치밀질이 우세한 중간부에서 분석 시료를 채취하였다. 한편 노두 시료의 경우 휴대용 코어 드릴을 이용하여 육안상 신선한 암석 시료를 채취하였다. Fig. 1은 연구에 사용된 시추공 및 노두 시료의 채취 위치를 나타낸다. 이들 시료는 육안상 반정량이 1%미만인 비현정질 비반상 조직을 지닌다. 따라서 전암 분석 및 연대측정을 위해 반정 광물을 별도로 제거하지는 않았다. 이들 용암 시료에 대한 전암 주원소 및 미량원소의 화학분석은 미국 오레곤 주립대학교 불활성 기체 분석 실험실에서 X선 형광분석법으로 이루어졌다. 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. 계산된 절대연대는 그 플래토 연대의 정확

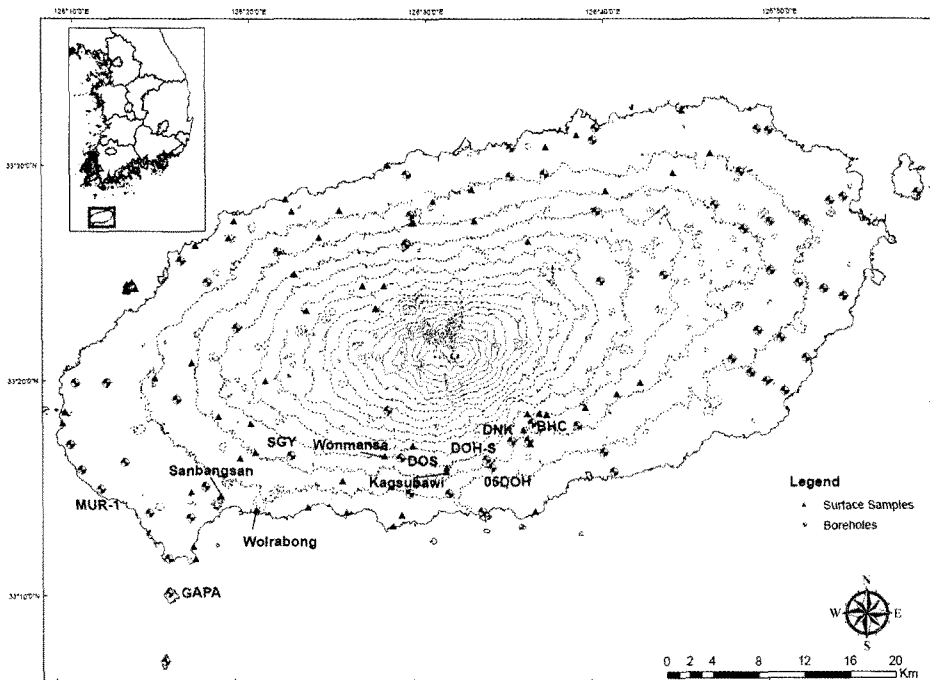


Fig. 1. Map of borehole locations and outcrop sample sites in Jeju Island. Coordinate system is in WGS84, altitudes are shown in meters, and contours are shown in both 100 m-intervals till 1900 m and 10 m-intervals till 1950 m. Abbreviations: MUR-1, Mureung-1; SGY, Sangye; DOS, Dosoon; DOH, Donghong; DNK, Donnaeko; BHC, Beophchoeon.

성을 논의하는데 중요한 기준인 MSWD(Mean Square of Weighted Deviates)의 값, 플래토의 형성 패턴에 근거하여 에러(error) 연대를 배제하였다(McDougall and Harrison, 1988; Kelley, 2002; Koppers, 2002; Baski, 2006). 이들에 대한 자세한 사항은 Koh *et al.* (2008)의 내용을 참조 바란다. 획득된 537개 연대 자료 중 이러한 기준에 따라 20% 가량의 자료가 배제되었다. 이 연구에서는 그 자료 중 초기 용암 분출 활동(1 Ma~0.70 Ma)에 해당하는 자료를 보고한다.

3. 결 과

Table 1은 이들의 위치 정보를 나타내며, Table 2와 Table 3은 각 시료의 전암 암석 화학성분 자료 및 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 정리한 것이다. Fig. 2와 Fig. 3은 각 시추공 및 노두 시료의 현장 사진이며, 암석의 명명은 IUGS의 전암 실리카 대 알칼리 함량 분류도(Le Bas *et al.*, 1986)에 적용하였다(Fig. 4). Fig. 5와 Fig. 6는 단계별 상승에 따른 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 스펙트럼으로부터 얻어진 각 시료별 플래토 연대를 나타낸다.

범호촌공(고도 235 m, 심도 210 m): 심도 165~115 m(고도 120~70 m)에서 50 m 구간의 용암단위로 비교적 치밀질이며 수평절리가 발달한다(Fig. 2A and 2B). 이 층의 성분은 하부에서는 현무암질 조면안산암이나 상부에서는 조면현무암으로(Fig. 4) 그 조성이 염기성화되어짐을 보인다. 각각의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 711 ± 6 Ka와 704 ± 16 Ka이다(Fig. 5A and 5B). 이 암층은 약 6 m 두께의 토양층에 의해 피복되며, 그

하부는 서귀포층이 분포한다(Fig. 7).

돈내코공(고도 240 m, 심도 230 m): 심도 188~60 m(고도 52~180 m)의 128 m 구간에서 분포하는 비교적 두꺼운 용암단위로 휘석-감람석 반정이 우세한 반상 조직을 가진다(Fig. 2C). 그 성분은 알칼리현무암이며(Fig. 4), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 795 ± 19 Ka이다(Fig. 5C). 이 층의 상부는 담황색의 화산회층에 의해 피복되며 그 하부는 서귀포층이 분포한다(Fig. 7).

동홍-S공(고도 263 m, 심도 270 m): 심도 152~82 m(고도 111~181 m) 구간에서 70 m의 비교적 두꺼운 용암단위로(Fig. 2D) 치밀질 조면안산암이며(Fig. 4), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 763 ± 8 Ka이다(Fig. 5D). 이 암층은 자기 풍화역을 지닌 4m 두께의 역암층에 의해 피복되며, 그 하부는 두꺼운 서귀포층이 분포한다(Fig. 7).

05동홍공(고도 187.6 m, 심도 340 m): 심도 143~137 m(고도 44.6~50.6 m)의 6 m 구간에서 파쇄되어 아각력의 형태(Fig. 3D)로 채취된 다공질 용암단위는 조면현무암(Fig. 4)의 성분을 지닌다. 이 암층은 992 ± 21 Ka로서 가장 오래된 연대를 가진다(Fig. 5H). 이 용암층의 하부는 서귀포층과 U층이 존재한다(Fig. 7). 이 용암층은 약 2 m 두께의 세립질 모래층에 의해 피복되고, 다시 심도 135~123 m(고도 52.6~64.6 m) 구간에서 12 m의 두께로 조면현무암이 분포한다. 이 용암단위는 치밀질 괴상 암체로 발달된 절리에 의해 깨진 형태로 채취되었다(Fig. 2F). 이 용암층의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 988 ± 38 Ka이며(Fig. 5G), 이 층을 다시 서귀포층이 피복한다(Fig. 7). 한편, 이들 용암층의 상부인 심도 88~60 m구간(고도 99.6-129.6 m)에서 28 m의 비교적 두꺼운 용암단위로 치밀질 조면안산암이 고토양층

Table 1. Locations of boreholes and surface samples from outcrops in Jeju Island

Type	Location	Hole/sample ID	Elevation (m)	Hole Depth (m)	X*	Y*
Outcrop	Sanbansan	SE04			136262.0	22671.3
Outcrop	Wolrabong	SE06			139304.5	21567.4
Outcrop	Wonmansa	SE09			150461.2	26430.2
Outcrop	Kagsubawi	SE10			155898.5	25492.2
Borehole	Donghong	DOH-S	263.0	270.0	159081.0	26295.5
Borehole	Dosoon	DOS	305.0	287.0	151601.5	26279.0
Borehole	Mureung	MUR-1	10.2	160.0	125493.6	23048.3
Borehole	Gapado	GAPA	17.5	92.0	131929.0	14035.0
Borehole	Donghong	05DOH	187.6	340.0	159564.7	25577.7
Borehole	Donnaeko	DNK	240.0	230.0	161241.0	27933.0
Borehole	Beophochon	BHC	235.0	210.0	163037.0	29484.0
Borehole	Sangye	SGY	230.0	260.0	142004.5	26285.7

*Tokyo Datum, TM projection

Table 2. Whole-rock compositions for major (wt%) and trace elements (ppm) of the subsurface volcanic rock cores from boreholes and surface samples from outcrops in Jeju Island

Borehole	BHC	BHC	DNK	DOH-S	05DOH	05DOH	05DOH	05DOH	05DOH	DOS	DOS	SGY	GAPA	GAPA	GAPA	GAPA	MUR-1
Depth (m)	147	163	143	132	74	85	130	140	140	127	164	165	23	48	72	91	80
Elevation (m)	88.0	72.0	97.0	131.0	113.7	102.7	57.7	47.7	178.0	141.0	141.0	65.0	19.0	-26.0	-50.0	-69.0	-69.8
Rock Name	TB	BTA	AB	TA	TA	TA	TB	TB	T	T	T	T	BTA	BTA	BTA	BTA	TA
SiO ₂	48.65	50.60	46.43	55.64	56.70	56.71	46.79	46.10	64.26	64.53	65.24	65.24	53.64	53.26	52.96	52.75	58.18
TiO ₂	2.84	2.32	2.62	1.29	1.29	1.28	3.06	3.04	0.41	0.41	0.20	0.20	18.38	18.45	18.33	18.40	1.03
Al ₂ O ₃	17.72	18.45	14.07	18.49	18.91	18.86	16.75	16.75	17.46	17.48	17.64	17.64	1.65	1.64	1.63	1.68	18.92
MgO	3.83	2.87	10.94	5.60	1.59	1.57	5.77	5.81	0.68	0.51	0.05	0.05	6.75	6.61	6.75	6.76	1.01
FeO ¹	11.14	9.80	11.23	6.59	6.56	6.56	10.75	10.82	4.27	4.19	3.46	3.46	8.19	8.06	8.19	8.37	5.87
MnO	0.21	0.21	0.18	0.23	0.24	0.24	0.21	0.20	0.13	0.22	0.13	0.13	0.21	0.24	0.23	0.23	0.24
CaO	8.63	8.02	10.62	1.68	5.64	5.58	8.82	8.85	2.26	2.35	1.43	1.43	1.85	2.33	2.26	2.46	4.89
Na ₂ O	4.06	4.16	2.40	5.32	5.55	5.55	3.71	3.23	5.75	5.77	6.15	6.15	2.56	2.47	2.51	2.46	5.92
K ₂ O	1.97	2.36	1.25	2.72	2.76	2.78	2.37	2.24	4.21	4.26	4.53	4.53	4.97	4.93	4.77	4.79	3.58
P ₂ O ₅	0.69	0.79	0.40	0.55	0.55	0.54	0.62	0.64	0.16	0.16	0.20	0.20	0.87	0.85	0.85	0.88	0.32
Total	99.75	99.57	100.13	98.12	99.78	99.67	98.95	97.68	99.60	99.89	99.03	99.03	99.08	98.85	98.47	98.79	99.95
(in PPM)																	
Ni	4	4	132	0	5	4	28	27	3	3	2	2	6	4	6	6	1
Cr	0	3	305	6	2	2	12	14	0	0	0	0	3	2	1	0	0
Sc	13	11	35	7	6	6	22	21	1	2	0	0	9	9	8	9	3
V	170	115	286	23	18	19	257	256	12	10	10	10	45	43	45	47	9
Ba	589	662	345	828	855	852	652	652	1183	1190	1113	1113	761	765	761	750	914
Rb	64	53	28	80	81	82	61	56	135	136	154	154	75	71	71	71	85
Sr	880	1092	525	1016	1062	1061	770	771	545	531	401	401	1034	1015	1029	1018	1048
Zr	306	330	196	479	489	490	315	314	632	626	508	508	437	440	435	424	449
Y	33	34	25	37	39	38	33	32	34	33	34	34	38	38	39	37	40
Nb	58.1	62.2	33.1	95.9	93.0	92.8	65.4	64.5	117.0	116.1	118.9	118.9	83.2	84.3	82.5	82.2	97.5
Ga	23	21	18	22	21	22	24	22	21	23	23	23	23	23	23	22	21
Cu	9	5	31	0	1	3	33	30	3	2	1	1	2	3	3	4	0
Zn	118	116	100	120	131	125	112	113	122	121	95	95	131	127	128	127	124
Pb	4	4	2	5	7	6	5	5	11	12	10	10	8	7	5	6	5
La	48	52	28	74	79	80	53	51	94	94	102	102	71	74	72	74	72
Ce	96	111	50	131	144	145	105	107	164	162	171	171	138	140	138	132	141
Th	6	6	5	13	13	12	9	8	17	18	21	21	11	12	10	9	12

Total FeO as FeO¹. Analyzed by XRF at Oregon State University
 Abbreviations: AB-Alkali basalt, TB-Trachybasalt, BTA-Basaltic trachyandesite, TA-Trachyandesite, T-Trachyte

Table 3. ^{40}Ar - ^{39}Ar age dating result of the subsurface volcanic rock cores from boreholes and surface samples from outcrops in Jeju Island

Hole ID	Depth(m)	Elev. (m)	Rock Type	Weighted Plateau				
				Age(ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	Steps ²	MSWD
BHC	147	88.0	TB	704	16	79.3	4/6	0.22
BHC	163	72.0	BTA	711*	6	90.2	4/6	1.20
DNK	143	97.0	AB	795*	19	84.4	4/6	0.47
DOH-S	132	131.0	TA	763	8	100.0	7/7	0.4
05DOH	74	113.7	TA	756	8	100.0	7/7	0.56
05DOH	85	102.7	TA	758*	8	100.0	7/7	1.21
05DOH	130	57.7	TB	988	38	100.0	8/8	0.58
05DOH	140	47.7	TB	992	21	86.5	5/8	0.93
DOS	127	178.0	T	768	21	97.1	5/6	0.71
DOS	164	141.0	T	774*	24	95.4	6/7	1.47
SGY ¹	165	65.0	T	747	6	100.0	7/7	0.80
MUR-1	80	-69.80	TA	698	13	85.3	4/7	0.19
GAPA	3	19	BTA	758	9	95.3	7/8	0.81
GAPA	48	-26	BTA	808	21	100.0	8/8	0.75
GAPA	72	-50	BTA	813*	25	96.5	7/8	1.23
GAPA	91	-69	BTA	824*	32	99.7	6/7	1.23
SANBANGSAN ³		SE04	T	802	5	94.0	6/8	0.36
WOLRABONG ³		SE06	TA	863*	7	93.7	5/7	0.68
WONMANSAN ³		SE09	T	765*	5	95.8	6/7	1.56
KAGSUBAWI ³		SE10	T	799	6	96.6	6/7	0.26

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,

1. pebble, 2. Plateau age includes % ^{39}Ar and number of steps in the plateau (steps in plateau/total steps), 3. outcrop samples Abbreviation of rock type is the same as in Table 1.

을 상하에 두고 분포한다(Fig. 2E). 이들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 758 ± 8 , 756 ± 8 Ka으로 상부로 감에 따라 젊어진다. 이 용암층은 위에 기재한 바와 같이 인접한 동홍-S공의 것과 같은 용암층이다.

도순공(고도 305 m, 심도 287 m): 심도 175~115 m(고도 125~190 m) 구간에서 60 m의 비교적 두꺼운 용암단위는 치밀질 조면암(Fig. 4)으로, 하부의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 774 ± 24 Ka(Fig. 2H and Fig. 6B), 상부는 768 ± 21 Ka(Fig. 2G and Fig. 6A)로서 상부로 감에 따라 젊어진다. 이층의 상부는 2 m 가량의 클링커(clinker)층에 의해 덮혀 있으며, 그 하부는 5 m 가량이 토양층을 피복하고, 그 하부는 서귀포층이 분포한다(Fig. 7). 이 용암층은 그 암상 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대로 미루어 인접 지역인 원만사 지역의 동상 조면암과 같은 시기에 분출한 것으로 추정된다.

상예공(고도 230 m, 심도 260 m): 심도 165.5~165 m(고도 65~64.5 m)의 0.5 m 구간에서 상하 각각 2 m와 1.5 m 두께인 역질의 서귀포층 사이에서

왕자갈 상태로 채취되었다(Fig. 7). 이 암석의 성분은 조면암이며(Fig. 4) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 747 ± 6 Ka이다(Fig. 6C). 이는 주변의 산방산과 월라봉과 같은 동상 조면암의 풍화물로 사료된다. 한편, 산방산 인근의 사계 시추공에서도 서귀포층의 상부에서 산방산 조면암에서 유래된 자갈이 기재된 바 있다(Sohn and Park, 2004).

무릉1호공(고도 10.2 m, 심도 160 m): 다른 시추공과는 달리 제주도 서부 지역에 존재하는 이 시추공은 해수면하 -61.8~-76.8 m(심도 87~72 m)의 15 m 구간에서 치밀질 조면안산암으로 산출한다(Figs. 3A and 4). 그 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 698 ± 13 Ka로서(Fig. 6D), 이 연구에서 보고하는 연대 중 가장 젊다. 이 암층은 조개 화석을 포함하는 6 m 두께의 이암층에 의해 피복되며, 그 하부는 다시 서귀포층과 U층이 분포한다(Fig. 7).

가파공(고도 17.5 m, 심도 92 m): 표토를 제외한 시추공 전구간에서 분포하는 본 암층은 현무암질 조면안산암이다(Fig. 3B and Fig. 4). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는

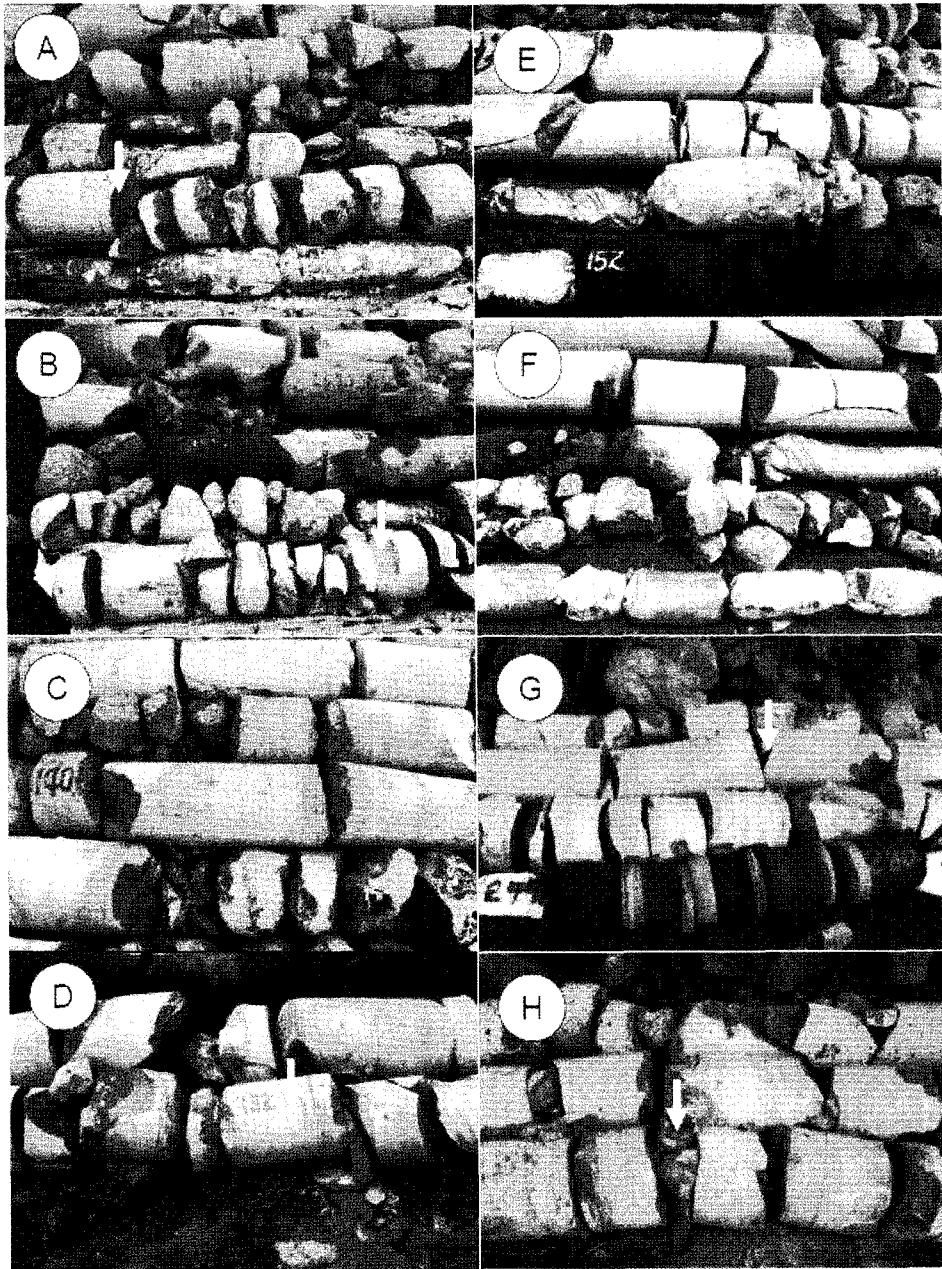


Fig. 2. Photographs of boreholes. Arrows in red show sampling locations. (A) BHC, EL. 88 m; (B) BHC, EL.72 m; (C) DNK, EL.97 m; (D) DOH-S, EL.131 m; (E) 05DOH, EL.102.7 m; (F) 05DOH, EL. 57.7 m; (G) DOS, EL.178 m; (H) DOS, EL.141 m.

824±32 Ka, 813±25 Ka, 808±21 Ka, 758±9 Ka 으
로, 상부로 감에 따라 젊어지는데, 이들의 연대 스펙트
럼 그림은 이미 다른 논문(Koh and Park, 2010)에서
보고한 바 있다.

노두 시료: 월라봉 조면안산암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대

는 863±7 Ka(Fig. 6F), 산방산 조면암(Fig. 3C)은
802±5 Ka(Fig. 6E), 각수바위 조면암은 799±6 Ka
(Fig. 6H), 원만사 조면암은 765±5 Ka(Fig. 6G)이다.
산방산 조면암의 절대연대는 기존 보고된 K-Ar 연대
범위 (0.87±0.13 Ma, Yun *et al.*, 1987; 0.747±0.023



Fig. 3. Photographs of boreholes and outcrop. Arrows in red show sampling locations. (A) MUR-1, EL.-69.8 m; (B) GAPA, EL. -26 m; (C) 05DOH, EL.47.7 m; (D) SE04 (Sanbongsan).

Ma, Won *et al.*, 1986)에 속하지만, 각수바위 조면암은 기존 K-Ar 절대연대(0.917 ± 0.028 Ma~ 0.893 ± 0.027 Ma, Lee *et al.*, 1994) 보다 젊은 연대를 제시한다.

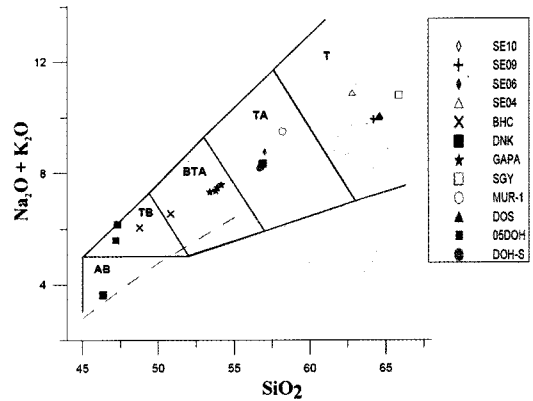


Fig. 4. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (wt%) vs. SiO_2 (wt%) plot of the selected samples from volcanic rock cores from boreholes and outcrops in Jeju Island. The fields show rock nomenclature schemes of Le Bas *et al.* (1986). The dashed line is from Irvine and Baragar (1971), dividing alkalic rocks from sub-alkalic rocks. Abbreviations: AB-alkali basalt; TB-trachybasalt; BTA- basaltic trachyandesite; TA- trachyandesite; T-trachyte.

4. 토 의

이 연구는 초기 용암류가 현재 지표에 노출되어 돛상 지형을 이루는 지역을 제외하면 대부분 지표 하에서 서귀포층을 피복하거나 혹은 그 층위에 협재하고 있음을 나타낸다(Fig. 7). 이는 제주도 형성 초기 용암 분출이 간헐적으로 소규모 국지적이었으며, 주변에서 수성화산활동 및 퇴적작용이 동시에 진행되었음을 시사한다. 서귀포층은 제주도 서귀포시 친지연폭포 남서쪽 절벽 해안에 분포하는 패류 화석대를 포함하는 퇴적층에 대해 Haraguchi(1931)에 의해 명명된 이래, 제주도 지하에 광범위하게 분포하고 있음이 알려졌다(Koh, 1997). 이 층은 다양한 해양생물 화석과 흔적 화석을 포함할 뿐만 아니라, 수성화산활동에 의해 육지 또는 수중에 쌓인 일차 화산쇄설암과 육성 또는 해상 환경에서 재퇴적된 퇴적상 그리고 비화산기원 퇴적상으로 구성된다(Koh, 1997; Sohn, 2004; Sohn and Park, 2004; Sohn *et al.*, 2007). 최근에는 일부 시추코어에서 U층 상부를 피복하여, 수증기성 폭발과 급냉으로 인한 마그마 기원 용암류의 파쇄작용으로 생긴 화도충진 화산쇄설암(diatreme)의 퇴적상을 가지고 있음도 보고된다(Jeon *et al.*, 2008; Jeon, 2009). 서귀포층 형성 시기는, 고생물학적 연구를 통해 하부 경계는 1.66 Ma (Yi *et al.*, 1998)로, 이 층을 피복하고 있는 용암류의 K-Ar 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료에 의해 지역에 따라 0.4-0.2 Ma의 상부 경계를 가지고 있음이

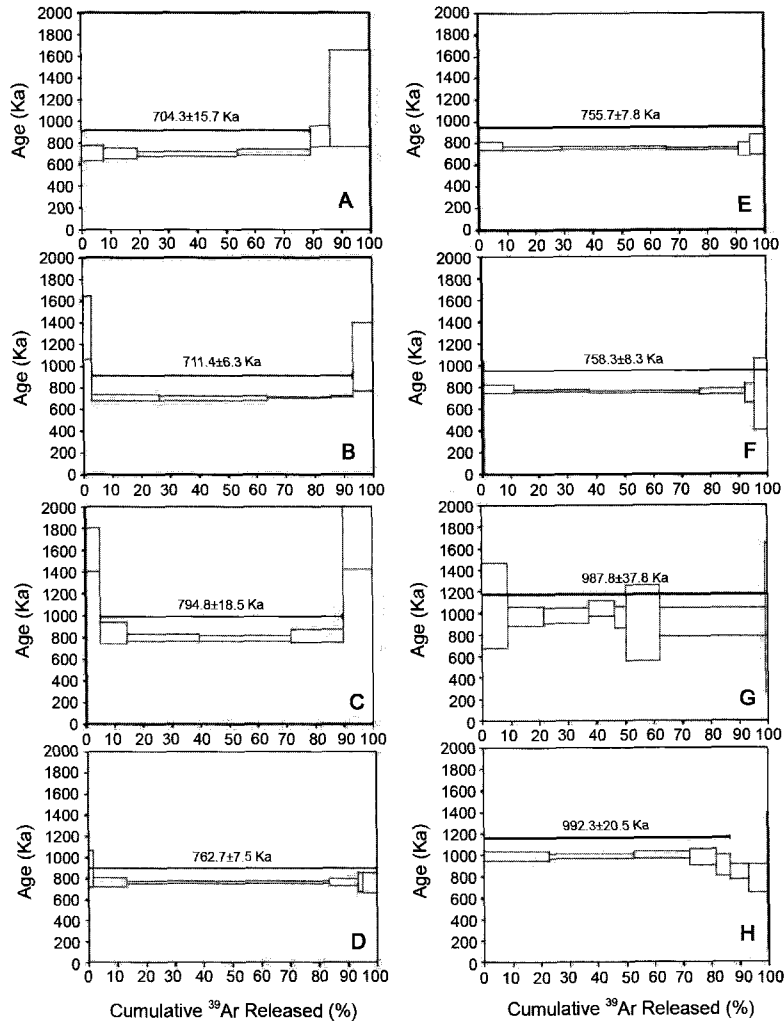


Fig. 5. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ plateau age plot (apparent age vs. cumulative % ^{39}Ar released) for samples. (A) BHC, EL.88 m, 6-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.22; (B) BHC, EL.72 m, 6-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=1.20; (C) DNK, EL.97 m, 6-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.47; (D) DOH-S, EL.131 m, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.4; (E) 05DOH, EL.113.7 m, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.56; (F) 05DOH, EL.102.7 m, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=1.21; (G) 05DOH, EL.57.7 m, 8-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.58; (H) 05DOH, EL.47.7 m, 8-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.93.

알려져있다(Lee *et al.*, 1988; Koh *et al.*, 2008; 미발표 자료). 이는 응회환 및 응회구를 형성시키는 수성화산활동과 퇴적작용이 오랜 기간에 걸쳐 제주도 형성과정과 연관되어 지속되어 왔음을 지시한다(Sohn, 2004; Sohn and Park, 2004). 69개의 시추공에서 U층까지 도달한 33개의 시추공 중 중달1-2호공 및 하천4호공에서 U층 상부를 피복하고 서귀포층의 최하부에서 자갈 혹은 암괴로 회수된 용암류는 조면현무암에서 현무암질 조면안산암의 조성을 가지는데, 그 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 각각 774 ± 154 Ka, 639 ± 27 Ka이다(Koh *et al.*, 2008).

이러한 점은 비록 서귀포층이 가지고 있는 화산쇄설암에 대한 수성화산활동의 시작 연대를 정확히 정의하기는 곤란하지만, 그 시기가 이 연구의 결과에서 제시하는 바와 같이 최초 용암 분출이 시작된 약 1 Ma의 시기와 거의 유사할 가능성을 지시한다. 한편, 동부 지역 한동4호공 시추 코어(해수면하 89 m)에서 보고된 조면현무암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대($1,760\pm120.0$ Ka)로 인해 제주도 초기 용암 분출의 시작을 170만년으로 논의된 적이 있다(Koh *et al.*, 2004; Park, 2004). 그러나 이 연대는 과잉 Ar에 의한 에러 연대(error-chron)

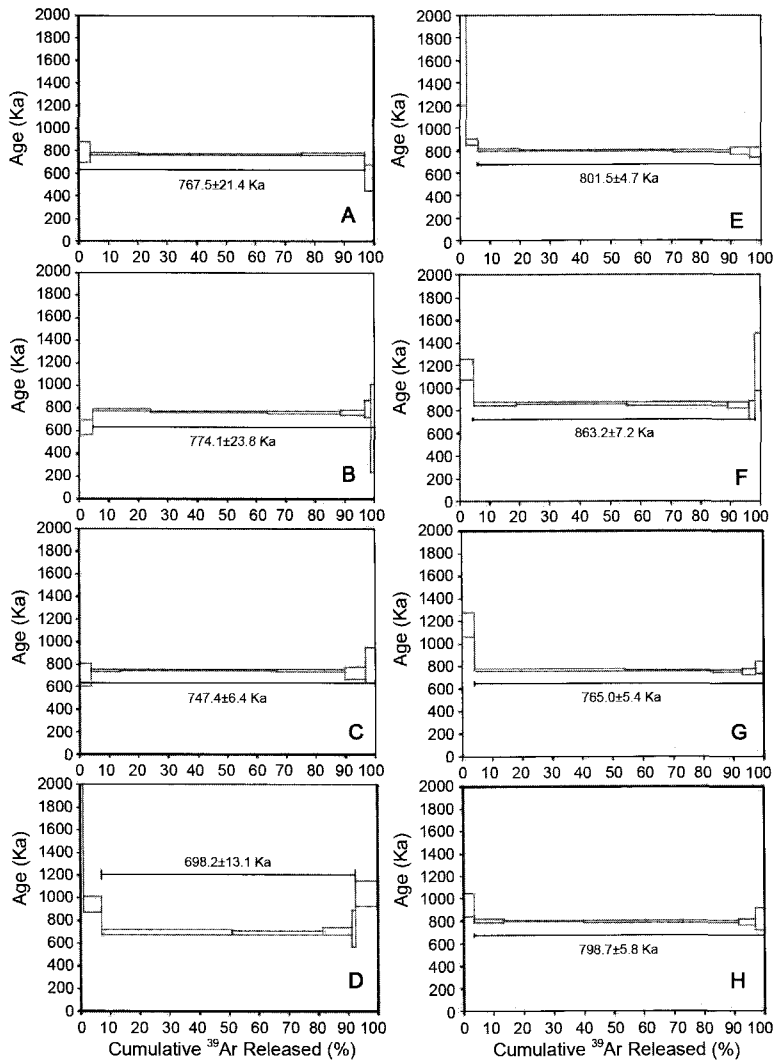


Fig. 6. ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age plot (apparent age vs. cumulative % ^{39}Ar released) for samples. (A) DOS, EL.178 m, 6-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.71; (B) DOS, EL.141 m, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=1.47; (C) SGY, EL. 65 m, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.80; (D) MUR-1, EL.-69.8 m, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.19; (E) SE04, 8-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.36; (F) SE06, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.68; (G) SE09, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=1.56; (H) SE10, 7-steps heating (600°C-1400°C), MSDW=0.26.

있음을 밝힌 바 있다(Koh *et al.*, 2008). 따라서 이 연대자료의 인용은 바람직 하지 않다.

시추공에서 비교적 두꺼운 두께를 가지는 가파도의 현무암질 조면안산암과 도순공의 조면암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 하부에서 상부로 감에 따라 점진적으로 젊어 짐을 보인다. 이는 지표에 노출된 윌라봉 조면안산암, 산방산 조면암, 각수바위 조면암 그리고 원만사 조면암의 최초 분출 시기가 이 연구에서 보고하는 연대보다 더 오래되었을 가능성을 시사한다(Fig. 8). 따라서, 이들

지역에서 기존 K-Ar 절대연대와 이 연구의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대의 차이가 분석 방법에 의한 것 이외에도 시료 채취 위치에 기인할 가능성도 있음을 배제할 수 없다.

Fig. 8은 시료의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 위치(장소 및 고도)와 용암 성분을 달리하여 나타낸 그림이다. 이를 정리하면 제주도 형성 초기의 용암 분출은, 약 1 Ma 경 국지적인 소규모 조면현무암질 용암 분출로 시작하여, 이후에 약 0.9-0.7 Ma 기간 동안 주로 조면암-조면안산암-현무암질 조면안산암 성분을 지닌 용암류의

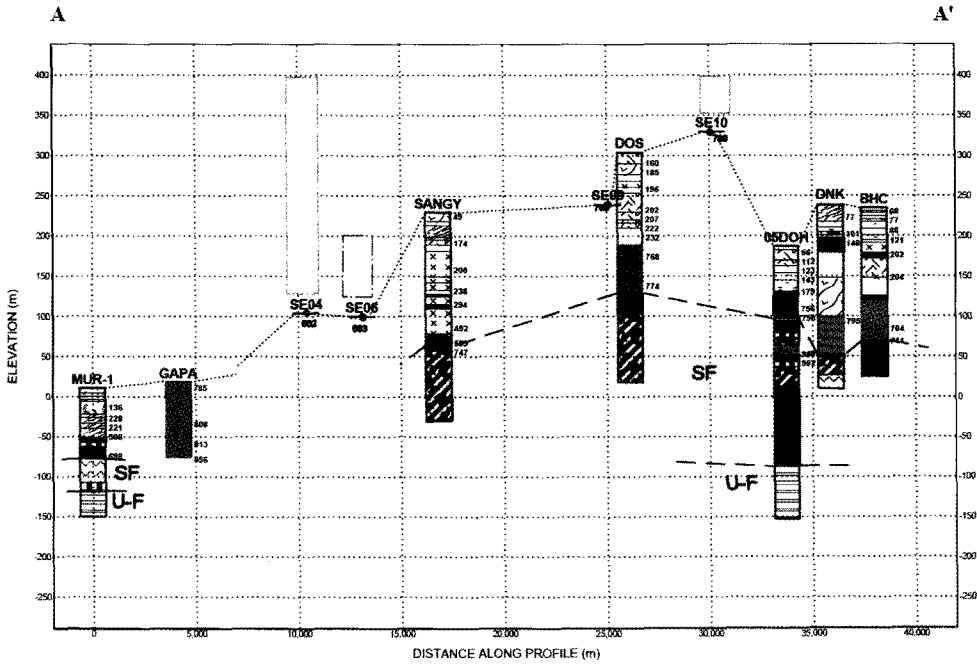


Fig. 7. Schematic graphic logs of boreholes and outcrops. The vertical position of each column is shown relative to the present sea level. Vertical exaggeration $\times 38.5$. Numbers are $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the subsurface volcanic rock cores and outcrop samples. Abbreviations: U-F, U-Formation; SF, Seouipo Formation. Colors: red-trachyte; blue-trachyandesite; green-basaltic trachyandesite; brown-trachybasalt; pink-alkali basalt. Dash Dotted areas show the top elevation of dome structure for outcrops.

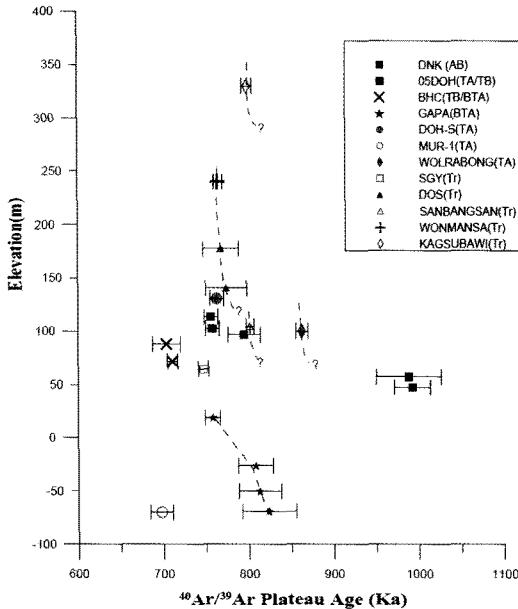


Fig. 8. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age vs. vertical variation (elevation) of the subsurface volcanic rock cores from boreholes and outcrop samples in Jeju Island. Note that dashed curves depict possible domal growth due to multiple lava eruptions.

용암 돔 형성, 그리고 간헐적인 알칼리현무암 및 조면 현무암질 용암의 분출로 요약된다. 오늘날 지표에 노출되어있는 가파도, 산방산, 월라봉, 각수바위, 원만사, 문섬(조면암, 0.728 ± 0.034 Ma; Won *et al.*, 1986), 설섬(조면암, 0.725 ± 0.038 Ma; Won *et al.*, 1986) 및 시오름(조면안산암, 0.700 ± 0.021 Ma; Lee *et al.*, 1994) 등이 이 기간에 형성된 것이다. 전암 미량원소 성분 중 불호정적 원소의 거동(Fig. 9)은 이들이 이 기간동안 동일 기원의 마그마로부터 분별정출과정을 통해 분화되었음을 지시하지만, Nd-Sr 동위원소비의 자료 획득을 통한 초기 분출 용암류의 근원지 특성에 관한 검토가 앞으로 이루어져야 할 것이다. 기존의 연구에서 제주도 형성 초기 용암 분출 활동을 고제주화산체 형성기(Yoon *et al.*, 1995; Oh *et al.*, 2000) 혹은 기저용암대지형성단계(Lee, 1994; Son *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2002), 기저용암류와 고기 응회환과 응회구의 형성시기 및 서귀포층의 퇴적기(Yun, 2004)로 분류한 바 있다. 지금까지 시추 코어에서 획득된 용암류의 K-Ar 절대연대와 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료(Miyake *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 2002; Koh *et al.*, 2008, 이 연

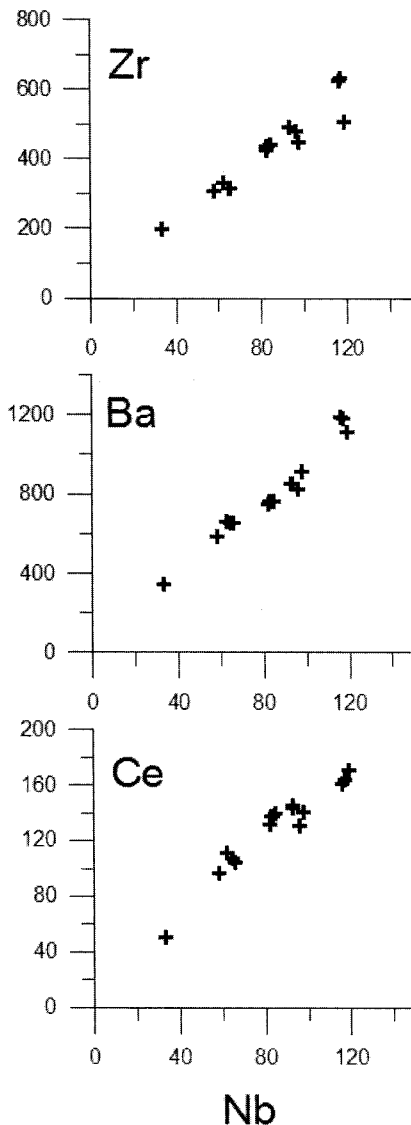


Fig. 9. Nb-variation diagrams (in ppm) for the subsurface volcanic rock cores from boreholes and outcrop samples in Jeju Island.

구)는 지표 하에 최고 1 Ma에서 수만년 까지 다양한 시기의 용암류가 분포하고 있음을 지시한다. 따라서 지표 하에 존재하는 용암류라는 의미를 지닌 “기저용암류”라는 용어는 더 이상 사용하지 말 것을 제안한다.

5. 결 론

539개의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료로 부터 검토된 제주도 형성 초기 용암 분출 산물로 확인되는 20개의 자

료를 보고한다.

1) 주로 제주도 남부와 남서부의 시추공 중 법호천, 돈내코, 동흥-S, 05동흥, 도순, 상예, 가파, 무릉-1호공 그리고 산방산, 율리봉, 원만사, 각수바위 지역에서 확인되었다.

2) 이들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료는 1 Ma - 0.7 Ma 를 나타내어, 제주도 형성 초기 용암 분출시기 및 그 특징을 규제할 수 있다.

3) 제주도 형성 초기의 용암 분출은, 약 1 Ma 경 조면현무암질 용암 분출로 시작하여, 이후에 약 0.9-0.7 Ma 기간 동안 주로 조면암-조면안산암-현무암질 조면안산암 성분을 지닌 용암류의 용암 돔 형성 그리고 간헐적인 알칼리현무암 및 조면현무암질 용암의 분출로 요약된다.

4) 초기 용암류가 현재 지표에 노출되어 돔상 지형을 이루는 지역을 제외하면 대부분 지표 하에서 서귀포층을 피복하거나 혹은 그 층중에 협재하고 있음을 나타낸다. 이는 제주도 형성 초기 용암 분출이 간헐적이며 소규모 국지적이었고, 주변에서 수성화산활동 및 퇴적작용이 일어나고 있던 동시기에 있었음을 지시한다.

사 사

이 연구를 수행하는데 많은 도움을 주신 제주특별자치도 환경자연연구원 물산업육성부 수자원연구과 문덕철 연구원을 비롯한 모든 연구원께 감사의 마음을 드린다. 이 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 해주신 이승렬 박사님, 김정민 박사님과 이미정 박사님께 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>.
- Cheong, C.-S., Lee, H.K., Park, K.-H., Barg, E.J., Chang, B.U., Kim, J., Choi, J.-H. and Im, C.B. (2004) State of the Art of Quaternary Geochronological Techniques. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea, p.51-127.
- Haraguchi, K. (1931) Geology of Saishu(Jeju) Island. Bulletin of Geological Survey of Korea. v.10, p.1-34.
- 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.

- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J. (2002) Evidence of the presence of old continental basement in Cheju volcanic island, South Korea, revealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. *Geochemical Journal*, v.36, p.421-441.
- Koh, G.W. (1997) Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguiipo Formation in Cheju Island. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Pusan, 326p.
- Koh, G.W., Park, Y.S. and Park, W.B. (2004) Subsurface stratigraphy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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).
- Koh, G.W. and Park, J.-B. (2010) 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. *Econ. Environ. Geol.*, v.43, p.53-66.
- Koh, G.W., 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 rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. *Econ. Environ. Geol.*, v.41, p.93-113.
- Koh, J.S., Yun, S.-H., Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y.-W. (2005a), Petrology of the basalt in the Udo monogenetic volcano, Jeju Island. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.14, p.45-60.
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Hong, H.-C. (2005b) Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Dae-podong basalt in Jeju Island, Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.14, p.212-225.
- Koppers, A.A. (2002) ArArCALC software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ calculations. *Computers & Geosciences*, v.28, p.605-619.
- Jeon, Y. M. (2009) Lithofacies and emplacement processes of the volcanogenic rocks in the Cretaceous Gyeongsang Basin and Quaternary Jeju Island, Korea. Ph.D. Thesis, Gyeongsang National University. 165p.
- Jeon, Y.M., Park, K.H. and Sohn, Y.K. (2008) Characteristics of diatreme deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. (Proceeding) The 6th International symposium of Jeju Volcanological Institute, p.105-117.
- 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, D.Y., Yun, S.K., Kim, J.Y. and Kim, Y.J. (1988) Quaternary geology of the Jeju Island. *Korea Inst Energy & Resources Rpt* 87-29, p.233-278.
- Lee, M.W. (1982) Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. *Sci Rep., Tohoku Univ., Ser.*, 315, p.521-541.
- Lee, M.W. (1994) Formation History and geologic structures of Jeju Volcanic Island. (Proceeding) Symposium of environmental conservation, development and use of groundwater resources in Jeju Island, Korean Society of Soil and Groundwater environment, .54-74. (title translated)
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S. (1994) Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in Southern Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. v.30, p.521-541.
- Miyake, Y., Furuyama, K., Yoon, S., Koh, G.W. and Nagao, K. (1993) Temporal chemical variation of Pleistocene volcanic rocks from Jeju Island, Korea., In Geological correlation of southwest Japan and Korea Peninsula-tectonics for spreading of active continental margin. *Sci Rpt Shimane Univ.*, p.106-111.
- McDougall, I. and Harrison, T.M. (1988) Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method. Oxford University Press, Inc., New York, 212p.
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.-D. (2000) Subsurface stratigraphy of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea.*, v.36, p.181-194.
- Park, K.-H. (2004) Formation History of Jeju Island. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea, p.1 (title translated).
- 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 Segwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163p.
- 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. *Chem. Geol.* v.145, p.117-152.
- Tamanyu, S. (1990) The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. *Bull Geol Surv Japan*, v.41, p.527-537.
- Sawada, Y., Yoon, S., Orihashi, Y. and Nagao, K. (1993) K-Ar age and chemical composition of alkali olivine basalt from drilled hole in the Cheju Island, Korea. In Geological correlation of southwest Japan and Korea Peninsula-tectonics for spreading of active continental margin. *Sci Rpt Shimane Univ.*, p.94.
- Sohn, Y.K. (2004) Hydromagmatism and Quaternary Sedimentation 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.
- Son, I.S., Lee, M.W. and Yoon, J.S. (1998) The subsurface stratigraphy of Cheju volcanic island, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, v.19, p.581-589.
- Won, C.K. (1976) Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island., *Journal of the Geological Society of 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., Yun, S.-H. and Ko, B.-K. (1998)

- Geochemical Characteristics of the volcanic rocks in Pyoseon Area, Southeast Cheju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v.34, p.172-191.
- Won, C.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, v.19, p.25-33.
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S. (1998) Calcareous nannoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleoceanographic implication. Paleontological Research, v.2, p.253-265.
- Yoon, S., Koh, G. W. and Kim, I. T. (1995) Development history of Cheju Island. *Chejudo (Bull. Chejudo Prov. Govern.)*, v.98, p.148-164.
- Yun, S.H. (2004) The volcanic sequences of Jeju volcano: General. (Proceeding)The second international symposium, Jeju volcanological institute, Jeju, p.17-29.
- 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.

2010년 1월 31일 원고접수, 2010년 4월 9일 게재승인