

제주도의 솔리아이트 화산활동

박준범 · 권성택

연세대학교 이과대학 지질학과

요 약 : 이 연구는 알칼리 화산도로 특징지워진 제주도의 동부 성읍리, 서부 한림읍 이시돌 그리고 한경면 고산리 지구내 해안에 분포하는 수백의 솔리아이트에 대한 암석기재, 광물화학, 주성분 및 미량성분 원소의 화학자료를 보고한다. 이들은 주로 반상조적인 알칼리암류에 비해 세립질이며, 주상 혹은 침상의 사장석 (An_{61-46})과 사방회석 (브론자이트) 및 감람석 (Fe_{78-67})이 입간상 조직을 이룬다. 특징적으로 사방회석이 반자형의 반정 혹은 미반정으로 산출되고, 두 유형의 단사회석 (피저나이트와 보통회석)은 석기 광물로만 산출한다. 이들 솔리아이트는 노음 석영을 가지며, 주성분 원소의 변화 범위는 좁다 ($SiO_2=51.0-52.5$ wt%; $Mg\#=54-60$). 주성분 원소와 전이금속 원소의 변화경향이 알칼리암류와 두드러진 것은 동일 마그마의 분화로 솔리아이트와 알칼리암의 관계를 설명할 수 없다는 것을 시사한다. 한편, K, O, Rb, Ba, Nb, La들 간의 비는 솔리아이트와 알칼리암이 유사한 반면, P, Y, Yb 등 석류석과 친화적인 원소와 위 원소들 간의 비는 솔리아이트가 알칼리암보다 크다. 이러한 미량원소 특징은 제주도의 솔리아이트와 알칼리 현무암류는 동질 기원이나 부분용융정도가 다른 모마그마로부터 유래되었음을 시사한다.

핵심어 : 제주화산도, 솔리아이트, 알칼리현무암, 지구화학, 암석성인

서 언

관내부 환경에서 열점과 관련된 화성 활동에 의해 형성된 화산섬에는 솔리아이트질 및 알칼리 현무암류가 분포한다. 그러나 현무암류의 분포 양상은 그 화산활동의 규모, 즉 맨틀에서의 마그마 생성물에 따라 다양하다 (Philpotts, 1990). 예를들어, 태평양의 캐롤라인 (Caroline) 군도와 같이 비교적 작은 화산섬인 경우는 솔리아이트질 현무암은 산출하지 않으며, 변이질 (transitional) 현무암과 Na-계열의 알칼리암류로만 구성되어 있다 (Mattey, 1982). 대서양의 고프섬 (Gough Is.)이나 카나리섬 (Canary Is.)과 같은 경우는 주로 알칼리암류로 구성되지만 약간의 솔리아이트질 현무암을 포함하고 있기도 하다 (Borley, 1974; Le Roex, 1985). 반면, 하와이 열도의 화산섬들은 알칼리암류에 비해 솔리아이트질 현무암이 주 (95%)를 이루는데, 솔리아이트는 화산활동의 진화와 관련되어 그 분포와 산상이 다양하다 (Clague, 1987; Frey *et al.* 1991; Fodor *et al.*, 1992).

솔리아이트질과 알칼리 현무암류의 구별은 그 지화학적 특징으로부터 쉽게 인지되며, 암석조직에 의해

서도 가능하다. 솔리아이트질 현무암류는 알칼리 현무암류에 비해 반상조직이 뚜렷하지 않으며, 특징적으로 감람석 반정과 석기 성분과의 반응 (reaction)으로 형성된 Ca-poor 단사회석 (피저나이트 혹은 하이퍼신)이 감람석 반정을 감싸 띠 (rim)형태로 산출하는 것이 알칼리 현무암과 구분되는 유용한 기준이 된다 (Irvine and Baragar, 1971). 그러나 하와이섬의 예에서도 암석기재에 의한 구분은 매우 드물어 힘들기 때문에, 단사회석 석기 성분의 차이 (솔리아이트는 피저나이트, 반면 알칼리 현무암은 보통회석)나 입간 (interstice)을 채우는 광물 종류의 차이 (솔리아이트는 석영, 알칼리 현무암류는 알칼리 장석) 등과 같은 여러 기준을 사용하여 두 현무암류를 구분할 수 있다 (MacDonald and Katsura, 1964).

제주도는 주로 Na-계열의 알칼리 화산암류이며 약간의 퇴적암과 화산쇄설물로 이루어진 섬으로 알려져 있으나 (Kuno, 1966; Miyashiro, 1978; 원종관, 1976; Lee, 1982; 이동영 등, 1987), 최근 연구에서 알칼리암류 이외에도 아주 드물게 솔리아이트질 현무암류도 분포하고 있음이 보고되었다 (Lee, 1989; 박준범과 권성택, 1991; 원종관 등, 1993). Lee

(1989)와 원종관 등 (1993)은 제주 동부 구좌읍 및 성암읍과 서부 대정읍에서, 또한 우리는 예비연구 (박준범과 권성택, 1991)를 통해 동부 표선면 성읍리 시추코아에서 소량의 솔리아이트가 알칼리암류에 협재하여 분포하고 있음을 보고하였다.

그러나, 아직까지 제주도에서 솔리아이트에 대한 자세한 암석 기재, 광물화학, 암석화학 및 암석성인적 연구는 이루어진 바 없다. 이 연구는 제주도 동부 표선면 성읍리와 서부 한림읍과 한경면 고산리의 일부 지역에 산출하는 솔리아이트질 현무암류에 대한 암석학 및 지구화학적 연구 결과를 보고하며, 그 성인을 토론한다.

솔리아이트의 분포

제주도의 화산층서는 크게 기저 현무암 분출기, 용암대지 형성기, 한라산체 형성기 그리고 기생 화산

형성기로 구분되는데 (윤선, 1970; Lee, 1982; 이동영 등, 1987; 윤선 등, 1992), Fig. 1에 이 구분을 이용하여 간단한 제주도의 지질을 나타내었으며, 연구 대상 지역을 함께 표시하였다. 기존의 화산층서에 따르면, 성읍리 지역은 기저 현무암과 이를 피복하는 용암대지 형성기의 표선리 현무암에, 이시돌 지역은 표선리 현무암, 한라산체 형성기의 시흥리 현무암 및 기생화산 형성기의 용암류가 서로 중첩된 경우에, 그리고 수월봉 하부의 용암류는 표선리 현무암에 해당한다.

세 지역 중 두 곳 (JS와 CE)은 온천 조사의 일환으로 행해진 심부 시추 지역이다. 동부 성읍리 시료 (JS; 한국표준좌표 40.05/182.5)는 제주시에서 약 30 km 정도 남동쪽에 위치한 남제주군 표선면 성읍리 민속마을로부터 수산리 방향으로 약 1.5 km 떨어진 영주산 부근 (해발 165 m)에서 채취된 시추코아의

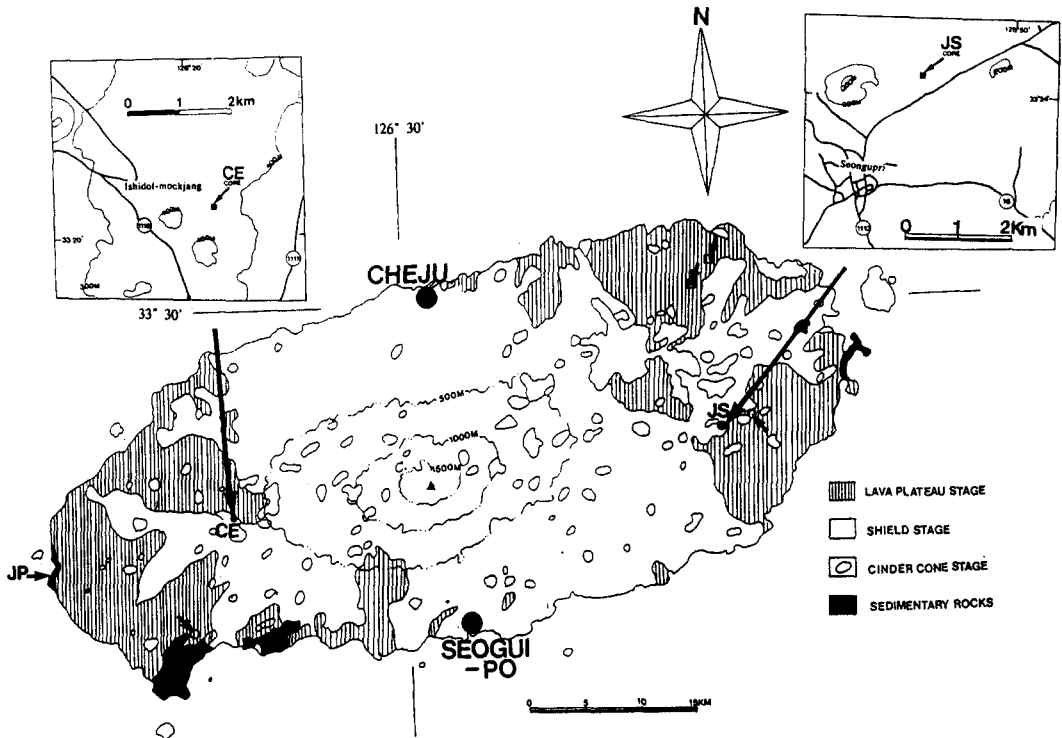


Fig. 1. Simplified geologic map of the Cheju volcanic island, modified after Lee (1982). The sample locations of this study are: JS, Songupri core (National Grid; 40.05/182.5); CE, Ishidol core (32.75/128.35); JP, Jigunae at the base of the Suwol-bong tuff cone (28.60/122.45). Open circle and square indicate location of tholeiite reported by Lee (1989) and Won *et al.* (1993), respectively.

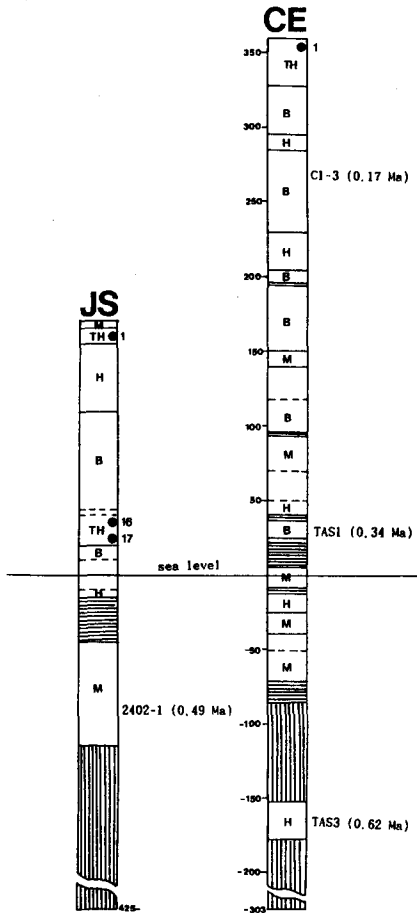


Fig. 2. Stratigraphic sections of Songupri (JS) and Ishidol (CE) cores. Boxes with horizontal and vertical lines indicate pyroclastic rocks and unconsolidated sediments, respectively. Sample numbers with K/Ar age in parenthesis are from Yun *et al.* (1992) for JS section and Miyake *et al.* (1993) for CE section. Vertical scale indicates altitude (in meters) relative to the sea level. Abbreviations: B, alkali basalt; H, hawaiite; M, mugearite; TH, tholeiite. Solid circles with numbers are samples of this study.

일부이다. 한라산에 대하여 성읍리 지역과 거의 대칭적인 위치에 있는 서부 지역의 한림읍 이시돌 시료 (CE; 한국표준좌표 32.75/128.35)는 제주시에서 약 25 km 정도 남서쪽에 위치한 북제주군 한림읍 이시돌 북장주변에서 채취된 길이 665 m 이상의 시추코아의 일부이다.

Fig. 2는 성읍리와 이시돌 시추코아에 대한 용암 주상도로서, 수직적인 암상변화와 솔리아이트의 시료

위치와 함께 동일한 코아에서 보고된 알칼리암류의 K/Ar 절대연령 (윤선 등, 1992; Miyake *et al.*, 1993) 을 같이 나타내었다. 성읍리 지역의 경우 하부에서부터, 미고결 혹은 미고결 (unconsolidated) 퇴적층 → 뮤저라이트 → 화산쇄설물 → 하와이아이트 → 알칼리 현무암 → 솔리아이트 → 알칼리 현무암 → 하와이아이트 → 뮤저라이트 → 솔리아이트 → 뮤저라이트의 암상 변화를 보인다 (Fig. 2). 최하부에 분포하는 퇴적층은 실트 및 사질 크기의 장석질 물질로 실제 두께는 주상도에 나타나 있는 것보다 더 두껍다 (약 100 여 m). 해수면 아래에서 이러한 퇴적층의 분포는 이 지역 주변의 다른 시추코아 (신흥, 종달, 세화)에서도 유사한 양상을 나타내며, 중생대로 추정되는 유문암질 용회암류를 피복하고 있는 것으로 확인된다 (최순학, 1992; 이동영, 1993; 원종관 등, 1993; 박준범, 1994). 이 퇴적층을 덮고 있는 뮤저라이트는 하나의 용암 단위로 그 두께는 약 65 m이며, K/Ar 전암연대는 약 0.49 Ma이다 (윤선 등, 1992). 솔리아이트는 서로 다른 층에서 3매가 확인되는데, 해수면과 가까운 하부 (해수면 위 +20~+40 m)에서는 각각 10 m의 두께인 2매의 솔리아이트가 알칼리 현무암에 협재하고, 상부의 것 (+160 m)은 10 m 가량의 두께로서 뮤저라이트에 협재한다.

이시돌 지역은 26매 이상의 용암류가 확인되는데, 용암류 사이에 수 매의 화산쇄설물과 미고결 퇴적물이 협재한다 (Fig. 2). 용암류의 암상변화는, 하부에서부터 하와이아이트 (미고결 퇴적층에 협재) → 화산쇄설물 → 뮤저라이트 → 알칼리 현무암 (간헐적으로 하와이아이트와 뮤저라이트가 협재) → 알칼리 현무암 (뮤저라이트가 협재) → 알칼리 현무암 (하와이아이트가 협재) → 솔리아이트 순의 변화를 보인다. 한편, 실트 및 점토질의 미고결층은 동부지역 시추코아에서 보이는 암상과 유사하다. 이 지역의 화산활동은 약 0.62 Ma의 하와이아이트 화산활동으로부터 시작되었음을 지지한다 (Miyake *et al.*, 1993). 솔리아이트는 성읍리 시추코아와 달리 해발 326-362 m의 지표부근에서 1매만 산출한다.

한편, JP 지점은 이시돌 코아의 위치로부터 약 15 km 정도 서쪽에 위치한 남제주군 한경면 고산리 지구내 해안에 있는 수월봉 응회환의 기저부 (한국표준좌표 28.60/122.45)를 이루는 용암류의 분포지역으

로, 2 내지 3개의 용암류가 분포하는데 그 중 해수와 바로 맞닿는 곳에 있는 용암이 솔리아이트로 확인되었다. 연구된 세 지역에서 솔리아이트는 동부 성읍리의 +25 m/150 m, 서부 이시돌의 +325 m 및 고산리의 해수면 근처로서, 그 산출 고도 및 화산층서 위치가 각각 다르다. 성읍리 코아에서 알칼리암류에 협재하는 3개의 솔리아이트는 0.49 Ma 이후 (윤선 등, 1992)에 최소 2회의 서로 다른 시기에 그 활동이 있었음을 시사한다. 서부 고산리 해안에서 수월봉 응회환의 기반을 이루고 있는 솔리아이트는 주변의 당산 응회환과 수월봉 응회환의 분출시기 (이동영 등, 1987)를 고려하면, 0.60 Ma 이후 수월봉 응회환의 형성 이전에 분출된 것으로 추정된다. 한편, 이시돌의 솔리아이트는 0.17 Ma 이후에 분출하였다 (Miyake *et al.*, 1993). 앞으로 솔리아이트에 대한 정확한 분출시기의 규명이 이루어져야 할 것이나, 수직 층서상에서 성읍리 경우에 한정하더라도, 약 0.5 Ma 이후부터 비교적 최근까지 알칼리 화산활동과 수반되어 최소한 두 차례 이상의 간헐적인 솔리아이트 화산활동이 있었음을 시사한다.

분석 방법

위의 세 지역에서 5개의 솔리아이트에 대해 암석기재, 광물화학 및 전암화학 분석을 실시하였다. 조암 광물의 분석은 연세대학교 지질학과에 설치되어 있는 3-채널 파장 분산형 JXA733 전자현미분석기

(EPMA)를 이용하여, 두 시료 (JS1과 JS16)에서 사장석, 감람석 그리고 사방휘석과 단사휘석의 반정 및 미반정과 석기에 대해 직접 분석하였다. 분석 조건 및 사용된 표준 물질과 분석치 간의 상대오차는 박준범과 권성택 (1993c)과 같다.

전암의 주성분 및 미량성분에 대한 화학분석은 미국 Franklin and Marshall College에서 XRF 법 (주성분 원소, Rb, Ba, Sr, Zr, Y, Cr, V, Ni, Nb, Zn, Cu, U, Th, Ga), 습식법 (FeO, Fe₂O₃) 및 ICP-AES 법 (Be, Sc, La, Ce, Yb)에 의해 이루어졌으며 그 정밀도는 Kwon *et al.* (1994)에 기술되어 있다. 한편, 희토류 원소의 함량은 영국의 London 대학에서 IC-P-AES 방법으로 반정량적으로 측정되었으며, 이에 대한 정밀도는 박준범과 권성택 (1993b)에 나타나 있다.

암 석 기 재

Table 1은 솔리아이트에 대한 모드 분석치와 현미경적 특징을 요약한 것이다. 중립 내지 세립질의 솔리아이트는 침상의 사장석과 이에 비해 그 양이 적은 단사휘석의 석기 결정들이 열기설기 서로 엮어져 입간상 조직을 이루는 사이로 미세한 기공을 많이 포함하고 있기 때문에 스폰지나 식빵의 단면과 같은 거친 표면을 가지는 육안적 특징을 지닌다. 현미경하에서는 특징적으로 사방휘석이 두 방향 혹은 한 방향의 벽개를 갖거나 혹은 균열 (parting) 만을 갖는 미반정

Table 1. Mode data for tholeiites of the Cheju volcanic island.

Location	Sample No.	ALT. (m)	Olivine		Pyroxene		Plagioclase		Ground-mass	texture
			ph	mph	ph	mph	ph	mph		
Songupri core	JS1									
	JS16	+160	0.9	1.9		2.6	2.5	11.9	80.2	intergranular
	JS17	+40	1.6	6.3	0.6			2.4	89.1	microcrystalline
		+25	0.6	8.1	tr		tr	2.6	88.8	microcrystalline
Ishidol core	CE1	+356	0.6	1.9	1.0	1.8	1.1	2.9	90.8	intergranular
Base of Suwolbong tuff cone	JP	+1	0.3	0.5	0.6	0.5		tr	98.1	subophytic

Modes based on about 1000 counts per sample.
Phenocrysts(ph) are >0.7mm; microphenocrysts(mph) 0.1-0.7; groundmass <0.1mm
Abbreviations: ALT-sampling altitude, tr-trace



Fig. 3. Photomicrograph (under crossed nicols) of thin section for tholeiite JS1, showing vesicular and intergranular texture, with orthopyroxene (Opx) microphenocrysts surrounded by plagioclase (Pl) laths and pigeonite (Pgt). The black area in the photo represents vesicles. The white bar is 400 μ m long.

으로 산출되고, 단사회석인 피저나이트 (pigeonite)와 보통회석이 석기에만 산출하여, 알칼리암류의 조직과는 구분된다. 그러나 MacDonal and Katsura (1964)가 제시한 알칼리암류와 구분기준이 되는 감람석을 감싸는 피저나이트나 입간의 석영은 관찰되지 않는다.

성읍리 솔리아이트는 산출 위치뿐만 아니라 암석 조직에서도 두 가지로 구분된다. 즉, 하부의 것 (JS 16, JS17)은 사장석이나 사방회석보다 감람석 미반정이 우세한 미반상 조직을 가지며, 석기부는 입간상 조직과 급냉된 유리질 조직이 서로 혼합된 양상을 보인다. 반면, 상부의 것 (JS1)은 하부의 것이나 혹은 다른 알칼리암류의 조직과도 뚜렷이 구분되는데, 중립질이며 주상형의 사장석과 사방회석 및 감람석이 입간상 조직을 이룬다 (Fig. 3). 사장석의 경우 (Table 2), 시료 JS16의 미반정은 코아 (An_{54})와 주변부 (An_{46})가 서로 다른 성분누대를 보이며, 석기는 An_{39} 이며, 시료 JS1은 반정의 코아 (An_{61})에서 주변부 (An_{57})로 미약한 성분 누대를 보이지만, 미반정 및 석기는 An_{57-56} 로 거의 일정하다. 감람석 (Table 2)은 시료 JS1의 반정인 경우 Fo_{75} , 미반정은 Fo_{72} , 그리고 석기는 Fo_{67} 이다. 반면, JS16인 경우 모든 상이 일정한 성분 (Fo_{78})을 가진다. 시료 JS1과 JS16에서 미반정으로 산출하는 사방회석의 성분 (Table 2)은 브론

자이트 (bronzite; $Mg\# = Mg / (Mg + Fe^{+2}) \times 100 = 80-83$)로 거의 같다. 그러나 석기에만 관찰되는 단사회석 (Table 2)은 시료에 따라 차이를 보인다. JS1은 미반정의 사방회석 주변을 감싸고 두가지 유형의 단사회석이 산출하는데, Mg-피저나이트 ($Mg\# = 72$)와 보통회석 ($Mg\# = 69$)이다. 피저나이트의 성분은 제주 북부 뮤저라이트의 사장석 반정내 포유물 (박준범과 권성택, 1993c)로 산출하는 것 ($Mg\# = 43$)에 비해 더 Mg 성분이 부화된 특징을 가진다. 한편, JS 16에서는 피저나이트는 산출하지 않지만, 석기 부분의 조직에 따라 성분이 차이가 나는 보통회석이 산출한다. 즉, 주를 이루는 은미정질 석기 조직에서는 $Mg\# = 77$ 인 결정이 산출하며, 이와 함께 부분적으로 혼합된 양상을 가지는 급냉된 비정질 부분 (aphyric part; Table 2C의 약어)의 석기는 철성분이 보다 더 부화된 $Mg\# = 58$ 인 것이 산출된다.

이시돌 솔리아이트 (CE1)는 중세립의 다공상으로, 주상형의 사장석과 사방회석 및 감람석이 입간상 조직을 이룬다. 수월봉 솔리아이트 (JP)는 2% 이내의 미반정을 가지며 사브오피틱 (subophytic) 조직을 이룬다. 특징적으로 사방회석이 반자형의 반정 혹은 미반정으로 산출되며, 단사회석은 석기에만 산출한다.

암 석 화 학

분석된 시료의 주성분 및 미량성분 원소의 함량은 Table 3과 같다. 주성분 및 미량성분 원소의 변화를 해석함에 있어서, Lee (1989; CJ3, N9)와 원종관 등 (1993; 202-3, 203-15)이 보고한 솔리아이트의 분석치도 같이 포함시켰다. 이들은 $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ 관계도 (Fig. 4)에서 MacDonal and Katsura (1964)의 분류 방법을 적용하면, 솔리아이트로 분류된다. 한편, 이들을 제주도의 조면암을 제외한 알칼리암류 자료 (박준범, 1994)와 같이 점시함으로써 비교 해석하였다.

주성분 원소

이들은 MgO 7.8-6.5 wt%, Al_2O_3 13.5-15.0 wt%, SiO_2 51.0-52.5 wt%를 가지며, 노음 석영의 솔리아이트로서, 중국 동부 신생대 화산암류 및 판내부 환경의 다른 지역에서의 석영-솔리아이트 및 솔리아이트

Table 2. Average mineral compositions of two Cheju tholeiites

A. Plagioclase

sample No.	JS1				JS16		
	P-C(4)	P-M(2)	MP(6)	G(4)	MP-C(9)	MP-M(5)	G(3)
SiO ₂	52.83	53.58	53.41	53.84	54.05	55.86	57.79
Al ₂ O ₃	29.24	28.60	28.70	28.46	28.40	26.89	26.03
FeO(T)	0.46	0.39	0.49	0.52	0.49	0.57	0.64
CaO	12.65	11.91	12.05	11.74	11.44	9.74	8.29
Na ₂ O	4.40	4.98	4.86	5.02	5.26	6.22	6.94
K ₂ O	0.12	0.13	0.12	0.13	0.21	0.30	0.43
Total	99.70	99.58	99.63	99.71	99.84	99.58	100.12
%Or	0.7	0.7	0.7	0.7	1.2	1.7	2.4
Ab	38.4	42.8	41.9	43.3	44.9	52.7	58.8
An	60.9	56.5	57.4	56.0	53.9	45.6	38.8

B. Olivine

sample No.	JS1			JS16
	P(2)	MP(5)	G(3)	All(12)
SiO ₂	38.81	38.09	37.59	39.25
FeO(T)	23.22	25.18	29.28	20.01
MnO	0.28	0.30	0.31	0.24
MgO	38.15	36.90	33.10	40.45
CaO	0.22	0.22	0.23	0.22
Total	100.67	100.68	100.51	100.17
Mg/(Mg+Fe)	0.75	0.72	0.67	0.78

C. Pyroxenes

sample No.	Clinopyroxene				Orthopyroxene	
	JS1		JS16		JS1	JS16
	G(6)	G(4)	G(3)	Ap-G(2)	MP(13)	MP(4)
SiO ₂	53.17	51.05	51.30	49.42	53.67	55.22
TiO ₂	0.41	0.87	0.75	0.94	0.32	0.22
Al ₂ O ₃	0.81	1.36	2.30	1.94	2.16	1.49
Cr ₂ O ₃	0.17	0.15	0.19	0.02	0.28	0.17
FeO(T)	16.29	13.58	8.99	16.04	12.42	11.08
MnO	0.32	0.27	0.12	0.17	0.22	0.16
MgO	22.98	17.31	16.76	12.28	28.08	29.86
CaO	5.25	13.58	17.52	17.32	2.02	1.91
Na ₂ O	0.09	0.21	0.26	0.36	0.05	0.02
K ₂ O		0.01	0.01	0.01	0.01	
Total	99.48	98.37	98.21	98.45	99.20	100.12
%Wo	10.5	28.1	36.6	36.9	4.0	3.7
En	64.0	49.9	48.7	36.4	76.9	79.8
Fs	25.5	22.0	14.7	26.7	19.1	16.6
Mg/(Mg+Fe)	0.72	0.69	0.77	0.58	0.80	0.83

FeO(T) as total Fe.
 Abbreviations; P-phenocryst, MP-microphenocryst, G=groundmass, C-core, M-margin, NOA-number of analysis, Ap-aphyric part.

Table 3. Major element data for the Cheju tholeiites.

Sample	JS1	JS16	JS17	CE1	JP
SiO ₂	52.30	51.61	52.25	52.49	51.29
TiO ₂	1.74	2.16	2.08	1.80	2.14
Al ₂ O ₃	14.76	14.06	14.00	14.62	14.47
Fe ₂ O ₃	1.54	2.08	1.63	1.86	2.62
FeO	9.23	8.61	8.73	8.99	9.04
MnO	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15
MgO	7.22	7.11	7.50	6.86	6.56
CaO	8.70	8.81	8.43	8.90	8.23
Na ₂ O	3.04	2.95	3.04	3.03	3.05
K ₂ O	0.55	0.79	0.92	0.41	0.45
P ₂ O ₅	0.21	0.30	0.30	0.19	0.21
LOI	0.75	0.85	0.87	0.60	1.74
Total	100.18	99.48	99.89	99.89	99.95

CIPW norm					
q	1.38	1.99	1.31	2.82	3.20
or	3.27	4.73	5.49	2.44	2.71
ab	25.87	25.31	25.98	25.82	26.28
an	25.15	23.11	22.05	25.26	24.91
di-di	8.46	10.22	9.65	9.04	7.82
di-hd	5.36	5.43	5.18	5.66	4.66
hy-en	14.17	13.22	14.40	13.02	13.02
hy-fs	10.29	8.06	8.87	9.34	8.91
mt	2.25	3.06	2.39	2.72	3.87
il	3.32	4.16	3.99	3.44	4.14
ap	0.50	0.72	0.72	0.45	0.51

와 그 성분이 유사하다 (Fan and Hooper, 1991; Wilson, 1989). MgO 성분을 분화지수로 이용할 때 (Fig. 5), 좁은 범위의 MgO를 가지는 솔리아이트는 동일한 MgO 성분에서 알칼리 현무암류와 함량이 차이 있는데, CaO와 SiO₂는 높고, Al₂O₃, TiO₂, Na₂O K₂O 그리고 P₂O₅는 낮다. 이와같이 알칼리 현무암과 변화 경향과 함량이 차이가 나는 것은 이들의 모그마의 성분 및 분화과정이 알칼리암류의 그것과는 달랐음을 의미한다.

제주도 솔리아이트의 Mg#는 54-60으로서 일반적인 맨틀기원 초생 마그마의 Mg#인 68-71 (Wilson, 1989)에 비해 분화된 특징을 가진다. 솔리아이트의 주성분 원소를 이용한 상그림 (phase diagram)으로 분별압력을 어느 정도 추정할 수 있다 (Grove *et al.*, 1982, 1기압; Baker and Eggler, 1987, 8 kb). 여기서

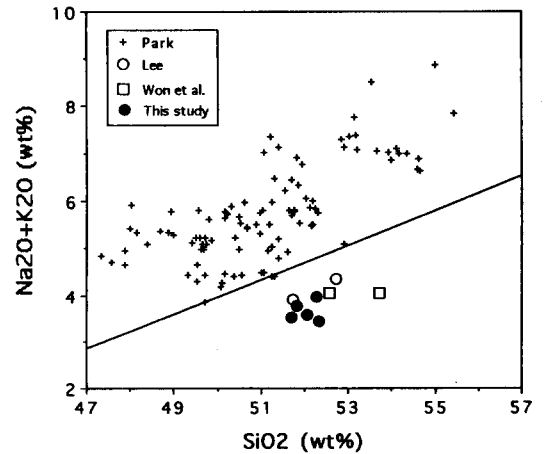


Fig. 4. Alkalis (wt%) vs. SiO₂ (wt%) plot of the Cheju volcanic rocks except for trachyte. The line (MacDonal and Katsura, 1964) divides alkali basalts from tholeiites. Symbols: solid circle, this study; open circle, data from Lee (1989); open square, data from Won *et al.* (1993); plus, alkalic rocks from Park (1994).

표현하지는 않았지만 이 상그림에 적용할 경우 두 압력에서 얻어진 보통회석+피저나이트 (혹은 사방회석)+사장석 공정선이 서로 겹쳐지는 부분에 점시되어 정확한 압력을 추정하기가 곤란하다. 한편, Thompson (1972)은 Fe-Ti 산화광물 (특히 티탄철석)이 압력이 높을 경우 현무암질 마그마로부터 비교적 초기에 정출하지만, 저압의 환경에서는 온도가 감소함에 따라 감람석-사장석-회석이 정출된 후 비교적 나중에 정출함을 실험을 통해 보였다. 이러한 예는 비교적 천부의 분화환경을 지시하는 중앙해령 현무암 (MORB)이나 하와이섬의 킬라우에아 (Kilauea) 솔리아이트에서 관찰된다 (Clague, 1987; Nielsen, 1988; Wilson, 1989). 이미 언급한 바와 같이 제주도 솔리아이트에는 Fe-Ti 산화광물이 관찰되지 않는데, 이는 비교적 천부 (저압)에서 분화되었을 가능성을 시사한다. 또한, 이는 중압임을 나타내는 알칼리암의 분화환경 (박준범과 권성택, 1993a, c)과 대조된다.

미량성분 원소

호정 (compatible) 원소: MgO가 감소함에 따라 Ni과 Cr은 급히 감소하여 감람석이나 휘석류의 정출이 있었음을 지시한다. 한편, V과 Sc는 거의 일정하

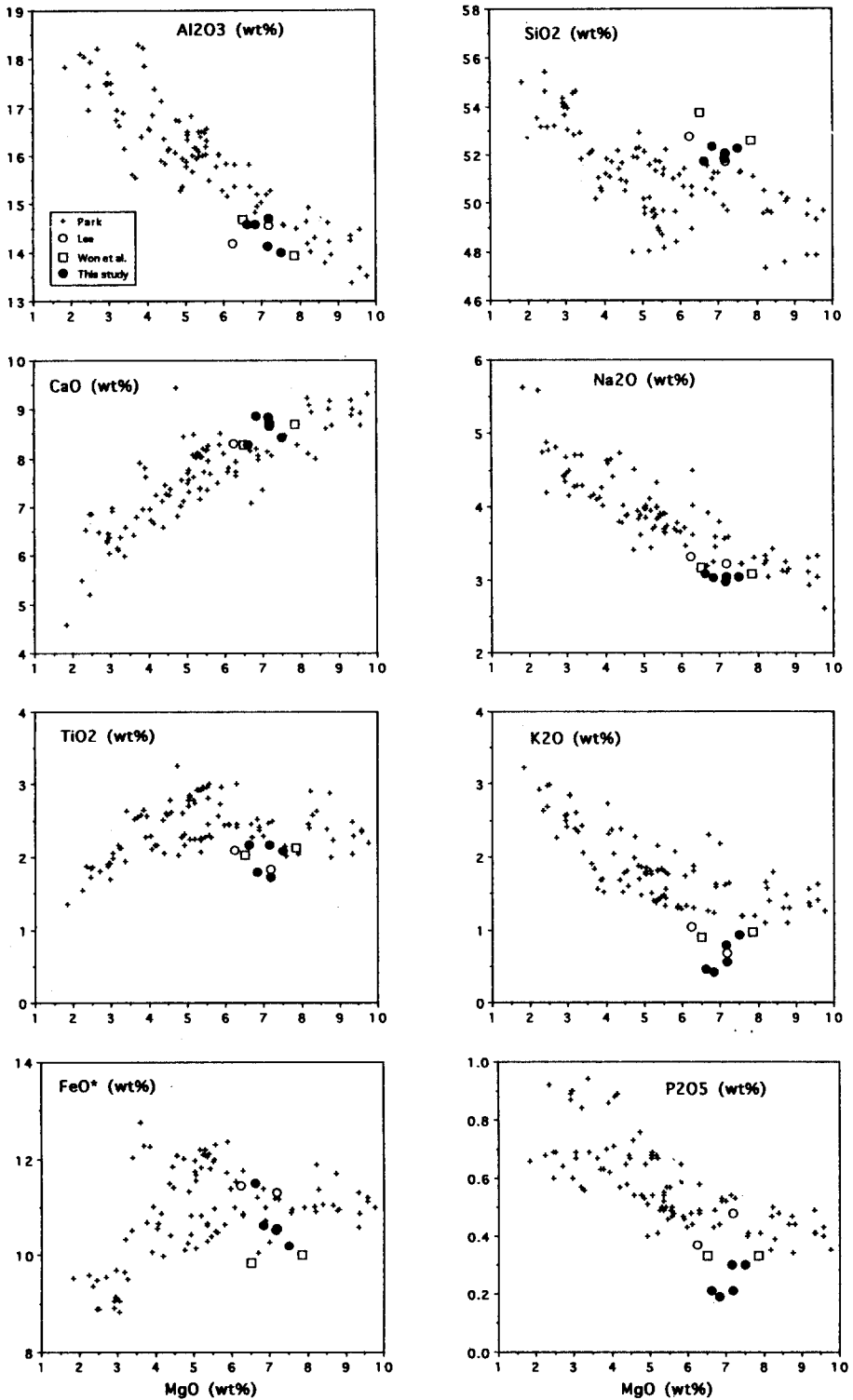


Fig. 5. MgO (wt%) vs. major oxide (wt%) variation diagrams for Cheju volcanic rocks. Symbols are the same as in Fig. 4.

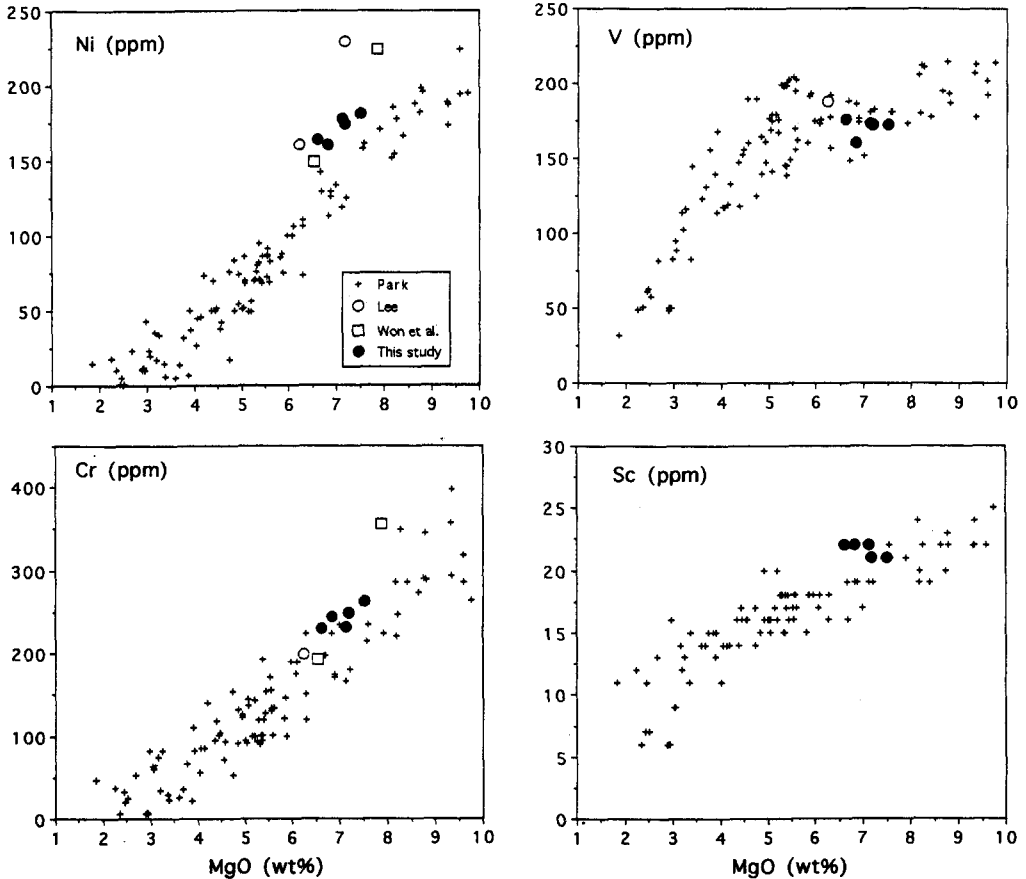


Fig. 6. MgO (wt%) vs. transitional metal elements plot for Cheju volcanic rocks. Symbols are the same as in Fig. 4.

다 (Fig. 6). 동일한 MgO에서 비교하면 알칼리 현무암류에 비해 Ni은 높은 값을 가지나, V, Cr과 Sc은 거의 유사하다.

불호정 (incompatible) 원소: Fig. 7은 불유동성, 고장력 (high field strength) 원소인 Nb을 마그마의 분화 척도 (예, Pearce and Norry, 1979)로 하여 불호정 미량원소의 변화경향을 나타낸 것이다. 솔리아이트의 Ba, Rb, Zr, Sr, LREE의 변화는 Nb의 변화에 대해 알칼리암류와 같이 정 (+)의 상관관계를 보이며 증가하지만, 이들 원소의 함량은 알칼리암류에 비해 낮다. Y과 Yb의 변화패턴과 함량은 알칼리암류와 유사하여 Nb의 변화에도 거의 일정하게 유지된다. 솔리아이트와 알칼리 현무암류의 불호정 원소간 함량의 차이는 맨틀 근원지에서 초생 마그마가 형성될 당시 맨틀 잔류광물과 마그마 간의 불호정성

(incompatibility)에 기인되었음을 의미한다. 알칼리 현무암류와 솔리아이트의 불호정 원소간 변화 기울기가 유사한 것은 이들이 동일 기원 물질의 서로 다른 부분 용융 혹은 동일 기원 마그마의 분화로 해석될 수 있음을 시사한다 (Hanson, 1989). 그러나, 나중에 토의하는 것처럼 전자가 보다 타당한 것으로 생각된다.

희토류 원소 (rare earth elements): 분석된 희토류 원소의 함량은 LREE의 경우 알칼리암류에 비해 낮은 함량을 가지나, Yb은 거의 유사하다 (Fig. 7). 콘드라이트 값 (Taylor and McLennan, 1985)으로 표준화하여 그 비를 나타내면 (La/Yb)_n, 3.9-9.8 로서 LREE가 HREE에 비해 더 부화된 특징을 가지며, 알칼리암류에 비해 낮은 값을 지시한다 (Fig. 8).

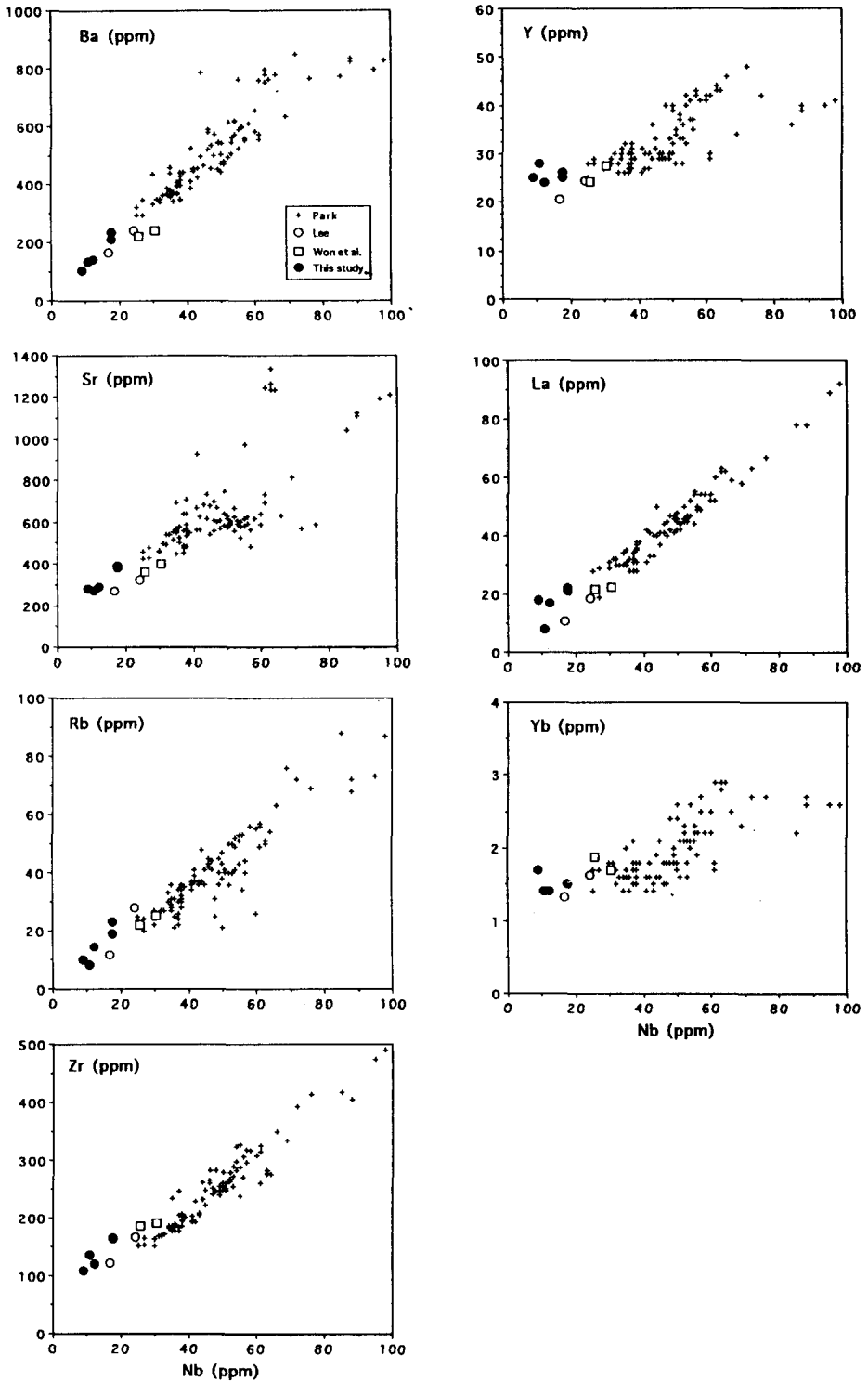


Fig. 7. Variation of incompatible elements against Nb for Cheju volcanic rocks. Symbols are the same as in Fig. 4.

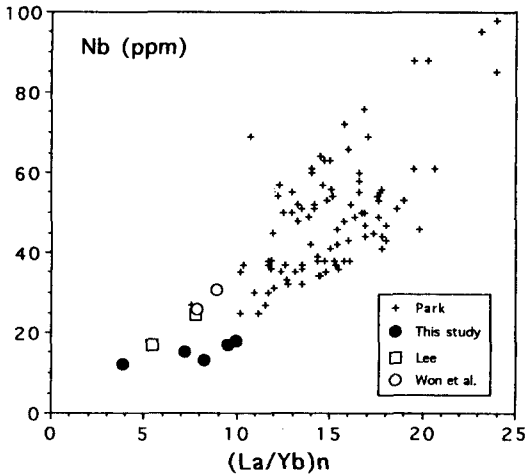


Fig. 8. (La/Yb)_n vs. Nb (ppm) variation for Cheju volcanic rocks. Chondrite values are from Taylor and McLennan (1985). Symbols are the same as in Fig. 4.

솔리아이트의 성인

일반적으로 알칼리 현무암과 솔리아이트를 만든 모그마의 성인은 맨틀 근원지에서의 여러 변수에 의해 차이가 날 수 있지만, Jaque and Green (1980)은 용융실험을 통해 동질의 부화된 맨틀 근원지에서부터 부분용융의 정도와 압력(깊이)의 차이에 의해 알칼리 현무암질과 솔리아이트질 마그마가 형성될 수 있음을 보였다. 즉, 10 kbar이하의 압력에는 부분용융도와 관계없이 항상 솔리아이트질 마그마만이 형성되지만, 10 kbar 이상에서는 부분용융정도가 증가함에 따라 형성되는 마그마의 성분은 알칼리 현무암질에서 솔리아이트질로 변화한다. 즉, 동질의 맨틀 근원지에서 알칼리 현무암과 솔리아이트가 형성되는 데는 부분용융정도가 주요인임을 지시한다. 한편, 이외에도 이들이 각각 이질 기원으로부터 유래된 것으로도 설명될 수 있다 (Wilson, 1989).

화산암에서 불호정 원소비의 차이를 주는 요인은 분별결정작용으로는 설명할 수 없으며, 맨틀 근원지에서의 과정에 의해 기인된다 (Weaver *et al.*, 1987, 등). 이때 분배계수가 유사한 성분간의 비는 근원지의 동질성을, 반면 분배계수가 두드러지게 다른 성분간의 비는 동원의 경우일때 부분용융정도의 차이를 지시한다 (Hanson, 1989). Table 4는 제주도의 솔리

Table 4. Trace element data for the Cheju tholeiites.

Sample	JS1	JS16	JS17	CE1	JP
Ba	141	209	235	103	136
Be	0.8	0.9	1	0.8	0.7
Cr	248	231	263	243	229
Cu	53	59	55	61	53
Ga	20.1	21	20.7	20	21.5
Nb	12.2	17.6	17.7	9.1	10.8
Ni	174	178	181	160	164
Rb	14.6	19	23	10.1	8.2
Sc	21	22	21	22	22
Sr	289	382	392	280	271
Th	0.5	2.2	1.5	<0.5	2
U	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5
V	172	173	172	160	176
Y	24	26	25	25	28
Zn	10	116	113	112	122
Zr	121	163	166	109	137
La ¹	17	21	22	8	18
Ce	25	35	37	26	32
Nd	11	17	19	9	16
Sm	4.2	5.7	5.5	5.1	4.8
Eu	1.1	1.4	1.4	1.4	1.2
Dy	3.6	4.3	4.2	4.3	4.2
Yb	1.4	1.5	1.5	1.4	1.7
Y/Nb	1.97	1.48	1.41	2.75	2.59
(La/Yb) _n ²	8.21	9.46	9.91	3.86	7.15

¹ Rare earth element data are semi-quantitative.

² Chondrite-normalized ratio using the values by Taylor and McLennan(1985)

아이트와 두 그룹의 알칼리암류 (박준범, 1994)에서 특징적인 불호정 원소비에 대해, 그 비의 평균값과 표준편차 (1σ)를 나타낸 것이다. 오차를 고려하더라도 암석성분 혹은 암류에 따라, 특징적으로 LIL (Large Ion Lithophile) 원소 간의 비 (예, Ba/La, Rb/La)는 유사하지만, LIL 원소에 대한 Y, P₂O₅, Yb의 비 (예, Y/Nb, P₂O₅/K₂O, Yb/La)는 서로 다르다. 또한 Zr/Nb 비는 알칼리 현무암류간에는 거의 유사하지만, 알칼리 현무암과 솔리아이트는 차이가 난다. 일반적으로 석류석 페리도타이트 맨틀 기원인 경우 맨틀 광물에 대해 상당히 불호정적인 원소 (LIL 및 LREE)간의 비는 부분용융정도가 1% 이상일 때

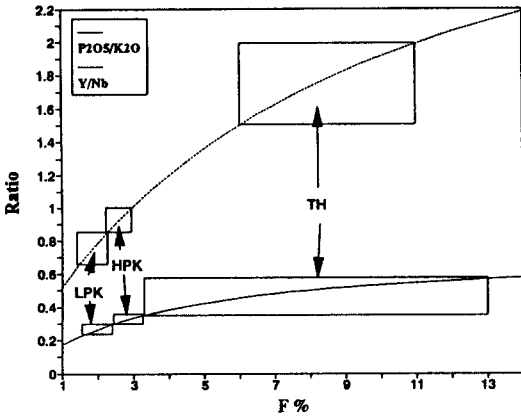


Fig. 9. Variation of P_2O_5/K_2O and Y/Nb with variable degrees of partial melting (F%). Non-modal batch melting equation was used for calculation, as given by Shaw (1970). Source mineralogy and phase relation during melting are assumed to follow the relationship given by Johnson *et al.* (1990). Source concentrations of P_2O_5 and K_2O are from McDonough and Frey (1989) and of Y and Nb from Taylor and McLennan (1985). Partition coefficient for K_2O is from Chen and Frey (1985), and those for P_2O_5 and Y from Frey *et al.* (1978), and that for Nb from Shimizu and Allegre (1978). The boxes of LPK, HPK and Tholeiite indicate range of the degree of partial melting for corresponding elemental ratios. Abbreviations: LPK, alkali basaltic rocks with $P_2O_5/K_2O < 0.3$; HPK, those with $P_2O_5/K_2O > 0.3$; TH, tholeiitic rock.

그 정도의 차이에 의해서도 거의 변화되지 않지만 (Chen and Frey, 1985), LIL 및 LREE와 석류석에 대해 친화적 성분인, P_2O_5 , Y 및 HREE 간의 비는 부분용융정도에 따라 그 값이 변화한다. 이는 석류석에 대해 상대적으로 높은 분배계수를 가지는 P_2O_5 ($Kd_p = 0.15$; Thompson, 1975; Exley and Smith, 1982), Y ($Kd_y = 1.4$)와 Yb ($Kd_{yb} = 4.03$ 혹은 7.4)로 인해 맨틀에서 부분용융되는 동안 잔존물 (residue)로 남는 석류석이 이들 원소에 큰 영향을 주기 때문이다 (Frey *et al.*, 1978; Budahn and Schmitt, 1985). Zr/Nb 비인 경우 근원지의 동질성을 점검할 때 사용되기도 하지만 (Erlank and Kable, 1976), Zr이 Nb에 비해 석류석 ($Kd_{zr} = 0.65$, $Kd_{nb} = 0.03$)과 단사회석 ($Kd_{zr} = 0.2$, $Kd_{nb} = 0.02$)에 대해 친화적이어서 부분용융정도가 커짐에 따라 그 비는 증가하게 된다 (McCallum and Charette, 1978; Shimizu and Allegre, 1978; Le Roex *et al.*, 1985). 한편, 부분용융정도에 대해서도 변화하지 않아 근원지의 동질성

을 나타내는 Ba/La, Rb/La, 그리고 Nb/La 비는 알칼리암과 솔리사이트가 거의 일치한다. 따라서 제주도의 솔리사이트와 알칼리 현무암의 불호정 원소비는 이들이 동질 기원에서 부분용융정도가 다른 마그마로부터 유래되었음을 시사한다.

우리는 이미 제주 북부의 알칼리 화산암류 연구를 통해 알칼리암류를 만든 모암마가 석류석 페리도타이트로부터 부분용융될 경우, 이들의 불호정 미량 원소간의 비와 그 성분 변화 경향이 설명될 수 있음을 보였다 (박준범과 권성택, 1993a, b). 이 연구에서는 제주도의 솔리사이트가 알칼리암류와 동일 기원의 석류석 페리도타이트 맨틀 근원암에서 부분용융 정도의 차이에 의해 형성된 마그마로부터 기원된 경우를 전제로 하여 P_2O_5/K_2O 비와 Y/Nb 비의 변화를 설명할 수 있는지 고찰한다. 이때, Mysen (1982)의 모델 대신에 천연 및 합성 시료를 이용한 용융모델 (예, Mysen and Kushiro, 1977)의 연구 결과와 더 부합되는 Johnson *et al.* (1990)의 모델을 사용하였는데, 맨틀 근원지의 광물조합은 55% 감람석+25% 사방휘석+10% 단사회석+10% 석류석, 부분용융시 멜트에 참여하는 각 맨틀 광물의 상대적인 비는 3% 감람석+3% 사방휘석+44% 단사회석+50% 석류석이다. 마그마의 각 원소별 함량 변화의 계산은 근원지의 성분이 원시맨틀 성분 (P_2O_5 와 K_2O , McDonough and Frey, 1989; Y와 Nb, Taylor and McLennan, 1985)과 같은 경우에 대해, 비모드 배치 (non-modal batch) 부분용융 방정식 (Shaw, 1970)으로 계산하였다. Fig. 9는 부분용융정도에 따른 계산된 비의 변화를 나타낸 것으로, 암석 성분에 따른 P_2O_5/K_2O 비와 Y/Nb 비가 지시하는 부분용융정도가 서로 유사하다. 즉, 알칼리암류 중 LPK군은 $2.0 \pm 0.5\%$, HPK군은 $2.9 \pm 0.4\%$, 반면, 솔리사이트는 $8.0 \pm 4.5\%$ (Y/Nb비에 의하면, $8.0 \pm 2.5\%$)의 부분용융된 마그마로부터 기원되었음을 보인다. 알칼리암류의 계산 결과는 박준범과 권성택 (1993a)이 발표한 바 있는 파이롤라이트 (pyrolite) 및 비결핍 (undepleted) 맨틀 성분에 대해 LPK군은 5-10%, HPK군은 10-15% 계산과 차이가 난다. 이는 근원물질 화학성분의 차이에 의한 당연한 결과이다. 솔리사이트의 계산값은 파이롤라이트 및 비결핍 맨틀 성분에 대해 $30 \pm 10\%$ 의 부분용융정도를 나타내는 것에

비해 1/3의 값을 나타낸다. 그러나 이전 연구에 비해 이 연구에서 계산된 부분용융정도는 판내부 환경에 위치한 타 지역의 알칼리 화산암 및 솔리아이트에 대한 부분용융 모델의 결과 (Nakamura *et al.*, 1989; Kay and Gast, 1973; McDonough *et al.*, 1985; Liotard *et al.*, 1986)와도 유사할 뿐만아니라, 각 성분에 대한 계산된 함량이 실제 관찰값에 보다 더 근접한

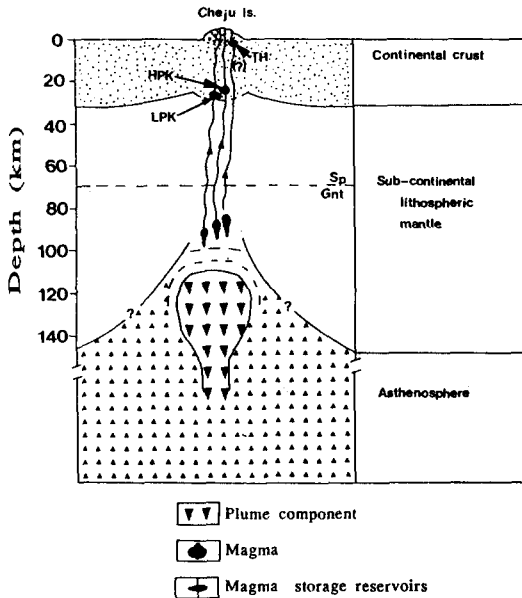


Fig. 10. Schematic diagram showing a model for the petrogenesis of Cheju volcanic rocks. The depth of continental crust (=32 km) under the southern part of Korean Peninsula quoted from Kim and Kim (1983), Kwon and Yang (1985), and of sub-continental lithospheric mantle from Wilson (1989). The dashed line indicates boundary between spinel (Sp)- and garnet (Gnt)-herzolite stability field. Abbreviations are the same as in Fig. 9.

다. 한편, 맨틀물질의 용융실험 (Kushiro, 1994) 결과는 약 10%를 기준으로 그 이하에서는 알칼리 현무암질 마그마가, 반면 그 이상에서는 솔리아이트질 마그마가 형성됨을 지지한다. 이와 비교하면 유사한 범위를 나타내는 알칼리암에 비해 솔리아이트의 계산값이 약간 낮은데, 모델 계산 결과와 용융실험값간의 차이는 자연계에서 맨틀암의 부분용융으로 만들어진 멜트가 분리되는 일련의 과정과 압력을 고정하여 행해지는 용융실험과의 차이때문에 기인된 것으로 여겨진다. 결론적으로, 제주도 화산암류의 불호정 미량원소간의 비를 이용한 모델 결과는 수치적인 의미보다 동질의 석류석 페리도타이트에서 서로 다른 부분용융정도에 의해 형성된 모마그마로부터 제주도의 알칼리 현무암류와 솔리아이트가 기원될 경우로 그 비의 변화를 잘 설명할 수 있음을 지지한다. 이때 솔리아이트는 알칼리 마그마에 비해 근원지에서의 부분용융정도가 큰 값을 갖는데 비해, 지금까지 알려진 솔리아이트의 분포는 동부와 서부 지역에 국한되어 있다. 이는 맨틀에서의 부분용융정도와 지표로 분출된 양이 반드시 일치하지 않음을 의미하며, 해양의 여러 화산도 (카나리섬, 고프섬 등)에서 볼 수 있다 (Borley, 1974; Le Roex, 1985).

Fig. 10은 우리의 이전 연구 (박준범과 권성택, 1993a, b)와 이 연구를 토대로 하여 제주도 화산암류의 근원 마그마의 형성과 분화 모델을 모식적으로 그린 것이다. 일반적으로 맨틀에서의 부분용융정도나 잔류 광물 그리고 형성된 마그마의 성질은 맨틀 환경에서의 압력과 온도 조건에 의해 좌우되는데 (Frey *et al.*, 1978; McKenzie and Bickle, 1988), 제주도 화산암류의 암석화학적 특징 (예, 불호정적 미량원소

Table 5. Average incompatible element ratios for the Cheju basaltic rocks.

	Alkali basalts		Tholeiites (5)
	HPK (16*)	LPK (7)	
P ₂ O ₅ /K ₂ O	0.33±0.02	0.29±0.02	0.46±0.12
La/Ce	0.50±0.09	0.54±0.08	0.55±0.10
Ba/Nb	11.0± 1.4	10.60±0.32	11.3± 1.5
La/Nb	0.89±0.12	0.91±0.08	1.13±0.20
Zr/Nb	5.37±0.46	5.37±0.57	8.07±0.30
Y/Nb	0.85±0.16	0.76±0.08	1.71±0.20

Data for alkali basalts are from Park and Kwon(1993a and b).

* Parenthesis unit indicates number of data.

비)은 그 모마그마의 맨틀 근원지에 잔류광물로서 석류석의 역할에 의해 영향을 받았음을 나타낸다. 맨틀에서 석류석은 무수 조건의 경우 25 kbar 이상의 압력에서 안정한 고상 (solidus phase)이며, 0.3 wt% 이하의 물이 존재할 경우는 20 kbar 이상에서 안정하다 (Green, 1973; Kay and Gast, 1973; Takahashi, 1983; Elthon and Scarfe, 1984). 열점에서 마그마는 상승하던 플룸 물질이 단일 갑압에 의해 맨틀의 고상선 온도를 가로지르게 되면서 부분용융이 일어나고 그 가로지르는 정도, 즉 상승하는 정도에 따라 부분용융정도는 변화하게 된다 (McKenzie and Bickle, 1988). 석류석을 맨틀 광물군으로 갖는 이러한 깊이에서 페리도타이트가 부분용융되려면, 단일 갑압으로 상승하는 플룸 내의 잠재적 (potential) 온도는 약 1400°C 이상이어야 한다 (Latin *et al.*, 1993). 이러한 점으로 미루어 제주 화산암류를 만든 모마그마는 최소 20 kbar 이상 (약 70 km 이상; 1 kbar/3.5 km, Hess, 1989)의 깊이와 약 1400°C 이상에서 석류석 페리도타이트가 부분용융되어 기원되었음을 시사한다. 한편, 천연 시료를 이용한 Adam (1990)과 Kushiro (1994)의 용융 실험은 맨틀에서 부분용융으로 형성된 초생 마그마의 SiO₂ 함량은 마그마의 형성 깊이에, 그리고 알칼리 함량은 부분용융정도에 비례함을 지시한다. 제주도의 부분용융 모델 결과는 LPK군에서 HPK군 그리고 솔리아이트로 갈수록 그 정도가 증가하는데, 이는 상승하는 플룸 물질의 서로 다른 부분이 각각 다른 깊이에서 맨틀 고상선을 가로지르는 정도에 따라 부분용융정도의 차이가 있었음을 의미한다. 이들 모마그마는 각각으로 상승하다가 일정한 깊이에서 밀도차 (주성분 원소를 이용한 밀도 계산에 의하면 알칼리 현무암류에 비해 솔리아이트가 약 2% 정도 가볍다)에 의해 마그마 방 (chamber)을 이루는데, 이때 중압의 알칼리암류 중 LPK군이 HPK군에 비해 보다 심부에, 반면 솔리아이트는 천부에 마그마 방을 이루었을 것으로 생각된다.

알칼리암류와 솔리아이트의 성인에서 그 다음으로 고려할 수 있는 점은 이들이 이질의 맨틀 근원으로부터 유래했을 경우이다. 그 변수로서 깊이에 따른 맨틀 광물군의 차이나 맨틀 변성교대작용 (mantle metasomatism)에 의한 성분의 차이 등을 고려할 수 있다. 이러한 예는 판내부 환경에 위치한 많은 화산

지역의 화산암 연구를 통해 보고되며, 인접한 중국의 경우도 Fan and Hooper (1989)는 신생대 알칼리암과 솔리아이트가 각각 다른 기원암으로부터 유래된 것으로 해석하였다. Lee (1989)는 제주도의 알칼리 화산암내에서 스피넬 레졸라이트 (spinel lherzolite) 외래암편 (xenolith)이 보고하였는데, 제주도와 지구 조적으로 유사한 환경인 중국의 신생대 화산암류의 경우처럼 (Fan and Hooper, 1989), 층상화된 맨틀의 서로 다른 깊이에서 부분용융된 마그마로부터 알칼리암류와 솔리아이트가 각각 유래되었을 가능성도 있다. 이는 솔리아이트가 알칼리 현무암류의 맨틀 근원암인 석류석 레졸라이트에 비해 보다 낮은 깊이에서 스피넬 레졸라이트의 부분용융에 의해 형성되었음을 의미한다.

요약 및 결론

이 연구는 제주도 동부의 성읍리, 서부의 한림읍 이시돌 그리고 한경면 고산리 지구내 해안에 수매의 솔리아이트가 알칼리암에 협재하여 분포하고 있음을 보고하고, 이에 대해 처음으로 암석학 및 암석성인적 연구를 행하였다. 반상조직이며, 다공질 혹은 괴상의 알칼리암류와는 달리, 중세립질의 솔리아이트는 침상의 사장석과 단사휘석의 석기 결정들이 열기설기 서로 엮어져 입간상 조직을 이루는 사이로 미세한 기공을 많이 포함하고 있기 때문에 스폰지의 단면과 같은 거친 표면을 가지는 육안적 특징을 지닌다. 현미경하에서는 특징적으로 사방휘석 (브론자이트)이 반자형의 반정 혹은 미반정으로 산출되며 피저나이트와 보통휘석은 석기 광물로만 산출한다. 이들은 노음 석영을 가지는 솔리아이트로서 중국 동북부의 신생대 솔리아이트의 성분과도 유사하며, 제주도의 알칼리 현무암에 비해 동일한 MgO 성분에서 CaO와 SiO₂는 높고, Al₂O₃, TiO₂, Na₂O, K₂O 그리고 P₂O₅는 비교적 낮다. 알칼리암에 비해 Ni은 높은 값을 가지나 Cr, V, Sc은 거의 유사하다. 한편, Ba, Rb, Zr, Sr, LREE의 변화는 Nb의 변화에 대해 알칼리암류와 같이 정 (+)의 상관관계를 보이며 증가하지만 이들 원소의 함량은 알칼리암류에 비해 낮은 반면, Y과 Yb의 함량은 유사하다. 알칼리 현무암과의 주성분 및 전이금속원소의 지화학적인 차이는 모마그마 성분

및 분화과정이 알칼리암류의 그것 (중압; 박준범과 권성택, 1993a)과는 달랐음을 의미한다. 한편, 불호정 미량원소의 변화는 동질의 맨틀 근원지에서 맨틀 잔류광물과 마그마간의 불호정성에 기인되었음을 시사한다.

제주 화산암에서 특징적으로 차이가 나는 P_2O_5/K_2O 와 Y/Nb 비를 이용한 부분용융모델 계산은 맨틀 근원지의 성분이 원시맨틀의 그것과 동일할 경우, 동질의 석류석 페리도타이트에서 서로 다른 부분용융 정도를 갖는 마그마로부터 제주도의 알칼리 현무암류와 솔리아이트가 기원되었음을 보인다. 계산된 부분용융정도는 알칼리암류인 LPK군에서 HPK군 그리고 솔리아이트로 갈수록 그 정도가 증가하는데, 이는 상승하는 플룸 물질의 서로 다른 부분이 각각 다른 깊이에서 맨틀 고상선을 가로지르는 정도에 따라 부분용융정도의 차이가 있었음을 의미한다.

솔리아이트의 분포와 분출시기에 관한 연구는 제주도의 형성사를 밝히는 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 첫째, 지금까지 제주도의 화산층서를 구분하는 건층 (key bed)으로 주로 조면암류의 분출시기를 이용하는데 (예, Lee, 1982; 이동영, 1993), 이 연구의 결과는 제주도의 형성에 알칼리 화산활동과 더불어 최소한 두차례 이상의 간헐적인 솔리아이트 화산활동이 있었음을 나타내어 솔리아이트가 또하나의 건층의 역할을 할 수 있을 것이다. 두번째는, 솔리아이트의 성분 변화는 이들이 천부에서 분화되었음을 나타내는데, 이는 마그마가 형성된 맨틀에서부터 비교적 쉽게 천부에 도달할 수 있는 통로가 있었음을 내포한다. 윤상규와 김원영 (1984)은 제주도의 동북동-서남서 방향으로 밀집된 기생화산의 분포로부터 '동서 열곡대'를 제시한 바 있는데, 솔리아이트의 성분과 지금까지 보고된 솔리아이트의 발견 지역 (Lee, 1989; 원종관 등, 1993; 장광화, 개인통신; 이 연구)은 알칼리암류와는 달리 이들이 제시한 동부와 서부 지역에만 한정되어 있어, 그 분출통로로서 열곡대와 관련되었을 가능성이 있다.

감 사

이 연구에 사용된 코아 시료를 흔쾌히 제공해 준 한국자원연구소의 이동영 박사, 암정엔지니어링의 김

효경 전무과 제주도청의 고기원 사무관에게 감사드린다. 또한, 초고에 대해 유익하고 건설적인 비평을 해준 기초과학지원연구소의 박계현 박사에게 깊이 감사드린다. 이 논문은 CMR연구비에 의해 부분적으로 지원되었다.

참 고 문 헌

- 박준범, 1994, 제주도 화산암의 지화학적 진화. 이학박사 학위논문, 연세대학교 대학원, 미발표, 305p.
- 박준범, 권성택, 1991, 제주도 화산암의 암석화학적 진화 (2): 제주 동부 율라봉부근 시추코아 연구. 요약문. 지질학회지, 27, 531.
- 박준범, 권성택, 1993a, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부지역의 화산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29, 39-60.
- 박준범, 권성택, 1993b, 제주도 화산암의 지화학적 진화 (II): 제주 북부지역의 화산암류의 미량원소적 특징. 지질학회지, 29, 477-492.
- 박준범, 권성택, 1993c, 제주 북부 화산암의 광물화학. 암석학회지, 2, 139-155.
- 원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12, 207-226.
- 원종관, 이분원, 이동영, 손영관, 1993, 성산도폭 지질설명서. 건설부, 제주도, 수자원공사, 104p.
- 윤상규, 김원영, 1984, 제주지역 지열조사연구. 한국동력자원연구소, 연구보고, 83-5-08, 109-134.
- 윤선, 1970, 제주도 성읍리-대록산 지역의 용암류 분출 및 기생화산구 형성의 순서에 관하여. 지질학회지, 6, 205-212.
- 윤선, 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, 1992, 제주도 동부 지역의 지질구조. 요약문, 지질학회지, 28, 531-532.
- 이동영, 1993, 종달리 시추 지점의 심부 지질 구성. 제주도 화산지질에 대한 심포지움 요약집, 한라산-백두산 화산비교 연구회, 51p.
- 이동영, 윤상규, 김주용, 김윤종, 1987, 제주도 제4기 지질조사연구. 한국동력자원연구소, 233-278.
- 최순학, 1992, 제주도와 Oahau도의 지질구조 및 수자원의 특성. 지질공학회지, 2, 70-91.
- Adam, J., 1990, The geochemical and experimental petrology of sodic alkaline basalts from Oatland, Tasmania. *J. Petrol.*, 31, 1201-1223.
- Baker, D.R. and Eggler, D.H., 1987, Compositions of anhydrous and hydrous melts coexisting with plagioclase, augite, and olivine or low-Ca pyroxene from 1 atm to 8 kbar: application to the Aleutian volcanic center of Atka. *Am. Min.*, 72, 12-28.
- Borley, G.D., 1974, Oceanic islands. In Sorensen, H. (ed.) *The alkaline rocks*. John Wiley & Sons, London, 311-330.

- Budahn, J.R. and Schmitt, R.A., 1985, Petrogenetic modelling of Hawaiian, tholeiitic basalts: a geochemical approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 67-87.
- Chen, C.Y. and Frey, F.A., 1985, Trace element and isotopic geochemistry of lavas from Haleakala volcano, East Maui, Hawaii: implications for the origin of Hawaiian basalts. *J. Geophys. Res.*, 90, 8743-8768.
- Clague, D.A., 1987, Hawaiian alkaline volcanism. In Fitton, J.C. and Upton, B.G.J. (eds.) *Alkaline igneous rocks*. *Geol. Soc. Sp. Pub.*, 30, 227-252.
- Elthon, D. and Scarfe, C.M., 1984, High-pressure phase equilibria of a high-magnesia basalt and the genesis of primary oceanic basalts. *Am. Min.*, 69, 1-15.
- Erlank, A.J. and Kable, E.J.D., 1976, The significance of incompatible elements in mid-Atlantic ridge basalt from 45°N, with particular reference to Zr/Nb. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 54, 281-291.
- Exley, R.A. and Smith, J.V., 1982, The role of apatite in mantle enrichment processes and in the petrogenesis of some alkali basalt suite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 1375-1384.
- Fan, Q. and Hooper, P.R., 1989, The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: implications for upper mantle composition and paleogeotherms. *J. Petrol.*, 30, 1117-1158.
- Fan, Q. and Hooper, P.R., 1991, The Cenozoic basaltic rocks of eastern China: petrology and chemical composition. *J. Petrol.*, 32, 765-810.
- Fodor, R.V., Frey, F.A., Bauer, G.R. and Clague, D. A., 1992, Age, rare-earth element enrichment, and petrogenesis of tholeiitic and alkali basalts from Kahoolawe Island, Hawaii. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 442-462.
- Frey, F.A., Green, D.H. and Roy, S.D., 1978, Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *J. Petrol.*, 19, 463-513.
- Frey, F.A., Wise, W.S., Garcia, M.O., West, H., Kwon, S.T. and Kennedy, A., 1990, Evolution of Mauna Kea volcano, Hawaii: petrologic and geochemical constraints on postshield volcanism. *J. Geophys. Res.*, 95, 1271-1300.
- Frey, F.A., Garcia, M.O., Wise, W.S., Kennedy, A., Gurriet, P. and Albareda, F., 1991, The evolution of Mauna Kea volcano, Hawaii: petrogenesis of tholeiitic and alkalic basalts. *J. Geophys. Res.*, 96, 14347-14375.
- Green, D.H., 1973, Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressures under water-saturated and water-undersaturated conditions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 37-53.
- Grove, T.L., Gerlach, D.C. and Sando, T.W., 1982, Origin of calc-alkaline series lavas at Medicine Lake volcano by fractionation, assimilation and mixing. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80, 160-182.
- Hanson, G.N., 1989, An approach to trace element modelling using a simple igneous system as an example. In Lipin, B.R. and McKay, G.A. (eds.) *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. *Rev. Min.*, 21, 79-97.
- Hess, P.C., 1989, *Origins of Igneous Rocks*. Harvard University Press, Cambridge, 336 p.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Jaque, A.L. and Green, D.H., 1980, Anhydrous melting of peridotite at 0-15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73, 287-310.
- Johnson, K.T.M., Dick, H.J.B. and Shimizu, N., 1990, Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotite. *J. Geophys. Res.*, 95, 2661-2678.
- Kay, R.W. and Gast, P.W., 1973, The rare earth content and origin of alkali-rich basalts. *J. Geol.*, 81, 653-682.
- Kim, S.J. and Kim, S.G., 1983, A study on the crustal structure of South Korea by using seismic waves. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, 16, 51-61.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basalt magma across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, 29, 195-222.
- Kushiro, I., 1994, Recent experimental studies on partial melting of mantle peridotites at high pressures using diamond aggregates. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100, 103-110.
- Kwon, B.D. and Yang, S.Y., 1985, A study on the crustal structure of the Southern Korea peninsula through gravity analysis. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, 18, 309-320.
- Kwon, S.T., Cho, D.L., Lan, C.Y., Shin, K.B., Lee, T., and Mertzman, S. A., 1994, Petrology and geochemistry of the Seoul granitic batholith. *J. Petrol. Soc. Korea*, 3, 109-127.
- Latin, D., Norry, M.J. and Tarzey, R.J.E., 1993, Magmatism in the Gregory Rift, East Africa. Evidence for melt generation by a plume. *J. Petrol.*, 34, 1007-1027.
- Lee, J.S. 1989, Petrology and tectonic setting of the

- Cretaceous to Cenozoic volcanics of South Korea; geodynamics implications on the East-Eurasian Margin. Ph. D. Thesis Universite D'ORLEANS.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. Sci. Rep. Tohoku Univ. Series 3, 15, 177-256.
- Le Roex, A.P., 1985, Geochemistry, mineralogy and magmatic evolution of the basaltic and trachytic lavas from Gough island, South Atlantic. J. Petrol., 26, 149-186.
- Le Roex, A.P., Dick, H.J.R., Reid, A.M., Frey, F.A., Erlank, A.J. and Hart, S.R., 1985, Petrology and geochemistry of basalts from the American-Antarctic ridge, Southern Ocean: implication for the westward influence of the Bouvet mantle plume. Contrib. Mineral. Petrol., 90, 367-380.
- Liotard, J.M., Barszczus, H.G., Dupuy, C. and Dostal, J., 1986, Geochemistry and origin of basaltic lavas from Marquesas Archipelago, French Polynesia. Contrib. Mineral. Petrol., 92, 260-268.
- MacDonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian lavas. J. Petrol., 5, 82-133.
- Mattey, D.P., 1982, The minor and trace element geochemistry of volcanic rocks from Truk, Ponape and Kusaie, eastern Caroline islands: the evolution of young hot spot trace across old Pacific ocean crust. Contrib. Mineral. Petrol., 80, 1-13.
- McCallum, I.S. and Charette, M.P., 1978, Zr and Nb partition coefficients: implications for the genesis of mare basalts, KREEP and sea floor basalts. Geochim. Cosmochim. Acta, 49, 2051-2067.
- McDonough, W.F., McCulloch, M.T. and Sun, S.S., 1985, Isotopic and geochemical systematics in tertiary-recent basalts from southeastern Australia and implications for the evolution of the sub-continental lithosphere. Geochim. Cosmochim. Acta 49, 2051-2067.
- McDonough, W.F. and Frey, F.A., 1989, Rare earth elements in upper mantle rocks. In Lipin, B.R. and McKay, G.A. (eds.) Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Rev. Min., 21, 99-167.
- McKenzie, D. and Bickle, M.J., 1988 The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. J. Petrol., 29, 625-679.
- Miyake, Y., Furuyama, K., Yoon, S., Koh, G.W. and Nagao, K., 1993, Temporal chemical variation of Pleistocenes 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. 106-111.
- Miyashiro, A., 1978, Nature of alkalic volcanic rock series. Contrib. Mineral. Petrol., 66, 91-104.
- Mysen, B.O., 1982, The role of mantle anatexis. In Thorpe, R.S. (ed.) Andesite: orogenic andesites and related rocks. John Wiley & Sons, New York, 489-522.
- Mysen, B.O. and Kushiro, I., 1977, Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle. Am. Min., 62, 843-865.
- Nakamura, E., Campbell, I.H. and McCulloch, M.T., 1989, Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. J. Geophys. Res., 94, 4634-4654.
- Nielsen, R.L., 1988, A model for the simulation of combined major and trace element liquid lines of descent. Geochim. Cosmochim. Acta, 52, 27-38.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, Petrogenesis implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contrib. Mineral. Petrol., 69, 33-47.
- Philpotts, A.R., 1990, Principles of igneous and metamorphic petrology. Prentice Hall, 498p.
- Shaw, D.M., 1970, Trace element fractionation during anatexis. Geochim. Cosmochim. Acta, 34, 237-243.
- Shimizu, N. and Allegre, C.J., 1978, Geochemistry of transition elements in garnet lherzolite nodules, in kimberlites. Contrib. Mineral. Petrol., 67, 41-50.
- Takahashi, E., 1983, Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magma genesis. Am. Min. 68, 859-879.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312p.
- Thompson, R.N., 1972, Melting behavior of two Snake River lavas at pressures up 35 kb. Carnegie Inst. Wash. Geophys. Lab. Yearbook 71, 406-410.
- Thompson, R.N., 1975, Is upper mantle phosphorous contained in sodic garnet? Earth Planet. Sci. Lett., 26, 417-424.
- Weaver, B.L., Wood, D.A., Tarney, J. and Joron, J. L., 1987, Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan da Cunha. In Fitton JG, Upton BGJ (eds). Alkaline igneous rocks, Geol. Soc. Sp. Pub., 30, 253-267.
- Wilson, M., 1989, Igneous petrogenesis. Unwin Hyman, London, 466p.

(책임편집 : 박계현)

Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea

Jun-Beom Park and Sung-Tack Kwon

Department of Geology, Yonsei University

ABSTRACT : We report petrography, mineral chemistry, and major and trace element chemistry for rare tholeiites in Cheju Island where alkalic rocks predominate. Available age data indicate that the tholeiitic magmatism was younger than 0.49 Ma, possibly younger than 0.17 Ma. The tholeiites are generally fine-grained, porphyritic rock and show intergranular texture with lath-shaped plagioclase (An_{61-66}), orthopyroxene (bronzite) and olivine (Fo_{78-87}). Characteristically, two kinds of clinopyroxene (pigeonite and augite) occur only in groundmass. The tholeiites have normative quartz and show limited compositional variations ($SiO_2=51.0-52.5$ wt%; $Mg\#=54-60$). Major and transitional metal element variations of tholeiites are distinct from those of alkaline rocks in MgO diagram, suggesting that the two rock types cannot be simply related to differentiation process from the same magma. The ratios among K₂O, Rb, Ba, Nb and La are similar for both tholeiites and alkali basalts, however the ratios between the elements (P, Y and Yb) having an affinity with garnet and the above elements are higher for tholeiites than for alkali basalts. These trace element ratios suggest that the tholeiites and alkali basalts were produced by different degrees of partial melting from a similar source material (garnet lherzolite mantle).

Key words : Cheju volcanic island, tholeiite, alkali basalt, geochemistry, petrogenesis