

제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구

박준범 · 박계현 · 정창식

기초과학지원연구소 동위원소분석 그룹, 대전광역시 유성구 어은동 52, 305-333

요 약 : 제주도의 알칼리암류 및 솔리아이트에 대한 Sr, Nd 그리고 Pb 동위원소비의 특징은 서로 유사하거나, 솔리아이트가 조금 더 부화된 특징을 갖는다. 그러나 분출시기에 따라 솔리아이트의 특징을 구분하면, 전기의 것은 Lee (1982)의 용암대지 형성기의 알칼리암류와 유사한 반면, 후기의 것은 이 연구의 알칼리암류와 유사하다. 이는 알칼리암류와 솔리아이트가 동질의 근원에서 유래하였음을 지지하며, 분출 시기에 따라 부분용융된 맨틀 근원지의 성질이 차이가 있었음을 시사한다. 제주도 화산암류는 사모아 군도의 화산암류의 변화 및 남중국 분지 화산암류의 변화 경향과 중첩되어 DMM과 EM II 사이의 혼합으로 잘 설명될 수 있는 변화경향을 지닌다. 이는 제주도를 제외한 우리나라의 신생대 화산암류 및 북동 중국 화산암류들이 DMM-EM I 사이의 혼합으로 설명이 되는 변화경향을 보이는 것과 차이가 난다. DMM-EM II 맨틀 물질간의 섞임 계산 결과, 제주도 화산암류를 형성한 맨틀 물질은 결핍 맨틀 (DMM)에 부화된 맨틀 (EM II) 물질이 약 10% 이내의 비율로 섞인 특징을 가짐을 지지한다. 제주도를 포함한 우리나라 및 중국의 신생대 화산암류의 동위원소적 특징을 북중국 지괴와 남중국 지괴의 충돌이론 (예, Yin and Nie, 1993)과 결부시키면, 부화된 맨틀 물질의 공급원으로 고려되는 대륙암권 맨틀의 지화학적 조성이 지괴에 따라 차이가 있었음을 나타낸다. 즉 북중국 지괴는 EM I의 표식을, 남중국 지괴는 EM II의 표식을 가지고 있었을 경우로 설명될 수 있음을 제시한다.

핵심어 : 제주도, 알칼리암류, 솔리아이트, 결핍 맨틀, 부화된 맨틀, 대륙암권, 지괴

서 론

화산암류의 방사기원(radiogenic) 동위원소비는 이들 화산암류를 형성한 마그마의 근원지에 대한 중요한 정보를 제공해 준다. Sr, Nd, Pb 등의 원소는 각 원소별 동위원소 사이의 상대적인 질량차이가 크지 않기 때문에 수소, 탄소, 산소 등의 동위원소들과는 달리 분별결정작용과 같은 일련의 분화과정동안 그 비가 변하지 않는다. 따라서 마그마 생성이래 지각물 질과의 혼화동이 없다면 지표에 노출된 화산암류의 방사기원 동위원소비는 마그마 근원지에서의 동위원소비를 바로 나타낸다. 특히 신생대 이후 분출된 염기성 화산암류는 지질학적으로 짧은 시간만이 경과되었기 때문에 대부분의 경우 방사성 붕괴에 의한 변화의 영향은 무시할 수 있을 정도이다.

우리나라의 제주도, 백두산 일대, 철원-한탄강 일대, 백령도, 울릉도, 독도와 일본의 오키-도고 (Oki-Dogo) 그리고 중국의 동부 및 동북부 지역등 유라시아 대륙판 동편의 한반도와 그 주변에는 신생대 화산

암류가 널리 분포하고 있다 (Fig. 1). 이들 화산암류에 대한 동위원소 지화학적인 연구는 신생대 화산암류를 형성시킨 이 지역 하부의 맨틀 근원물질에 대한 중요한 정보를 제공하여준다. 이 지역의 기존 연구들은 이 화산암류들의 근원인 맨틀물질들이 중앙해령 현무암의 근원지와 같이 결핍된 맨틀이 부화된 동위원소 조성을 갖는 맨틀물질들과 섞임에 의해 변화하는 동위원소 조성을 나타내게 된 것으로 설명하고 있다 (Nohda *et al.*, 1988; Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto and Nakamura, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992; Tu *et al.*, 1992). 이를 지역별로 나누어 Zindler and Hart(1986)이 제안한 맨틀 동위원소 조성의 단성분들로 살펴보면 울릉도, 독도 및 북동 중국내 신생대 화산암류는 DMM-EM I 섞임으로(Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto and Nakamura, 1991), 반면 남동 중국내 안후이(Anhui), 지양수(Jiangsu) 및 쩌지양(Zheijiang)과 하이난(Hainan)섬 및 남중국분지내 화산암류는 DMM-EM II 섞임(Peng *et al.*, 1986; Flower *et al.*, 1992; Tu *et al.*, 1992)으로 설명된다.

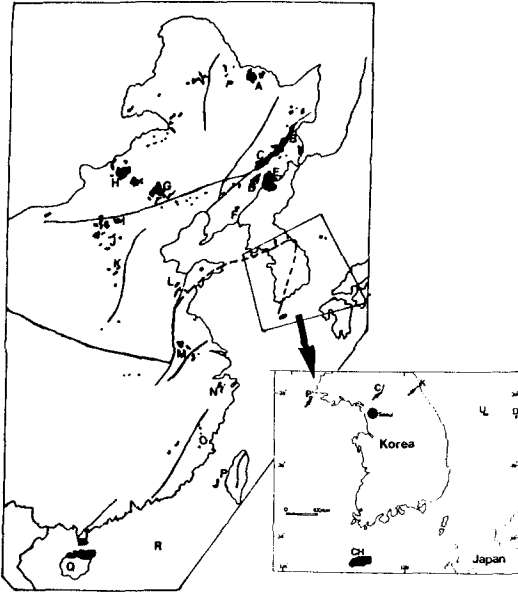


Fig. 1. Distribution map of Cenozoic volcanic rocks around Korean Peninsula after Zhou and Armstrong (1982). Isotopic signatures of Cenozoic volcanic rocks around Korean Peninsula are divided into DMM-EM I and DMM-EM II mixing relationships according to the inferred collision zone (heavy solid and dashed line) between North China Block and South China Block after Yin and Nie (1993). Locations in China: A; Wudalianchi, B; Mudanjiang, C; Huinan, D; Longgan, E; Changbai Mt., F; Kuandian, G; Weichang region, H; Abaga, I; Hannouba, J; Datong, K; Hebei, L; Shandong, M; Anhui-Jiangsu, N; Zhejiang, O; Fujian, P; Penghu Is., Q; Hainan Is. R; South Chian Sea. Locations in South Korea: P; Baengnyeong Island, C; Choo-garyong rift valley (Jeongok-Cheolwon), K; Kosong, U; Ulleung Island, D; Dok Island, CH; Cheju Island.

한편, 제주도 화산암류에 대한 동위원소적 연구는 Lee (1982)에 의해 21개의 다양한 성분의 알칼리암류에 대한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 보고되었으며, Nakamura *et al.* (1990)에 의해 3개의 하와이아이트의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비가 보고된 바 있다. 그러나, 제한된 자료로 인해 화산암류의 성인과 지구조적 관련성에 대한 연구는 미비한 실정이다.

이 연구에서는 이미 암석화학적 연구가 선행된(박준범과 권성택, 1993a, b, c, 1994, 1995) 제주도의 알칼리암류와 솔리아이트에 대해 Sr, Nd 및 Pb 동위원소비를 분석하였다. 이를 통해 알칼리암류와 솔리아이트의 동원성 여부 및 맨틀 근원물질에 대해 논의하였다. 또한 제주도 주변 동북아시아의 신생대 화산암

류와 비교하여 광역적인 규모에서의 맨틀 근원물질의 특성변화와 지구조적인 의미에 대해 고찰하였다.

일반지질

제주도는 한라산 (해발 1950 m)을 중심으로 ENE-WSW 방향의 장축 73 km와 이에 수직인 방향으로 단축 31 km를 가지는 타원의 화산섬으로 유사시대 (서기 1002, 1007년)까지도 화산폭발이나 지진과 같은 화산활동의 기록을 가지고 있으나, 현재는 그 징후가 없는 것으로 여겨지는 휴화산이다 (원종관, 1976). 360여 개의 기생화산을 가지고 있는 제주도는 전반적으로 순상화산의 지형을 보이며, 주로 용암류와 약간의 화산쇄설암 및 퇴적층으로 이루어져 있다.

제주도를 구성하는 다양한 화산암은 Na-계열의 알칼리 현무암, 하와이아이트, 뮤저라이트 및 조면암과 소량의 솔리아이트이다 (Lee, 1982; Lee, 1989; 박준범과 권성택, 1991). 이들 화산암은 해수면하 약 100 m까지만 존재하고, 그 이하는 시대미상의 미고결 퇴적층 및 중생대로 추정되는 기반암이 분포한다 (윤상규와 김원영, 1984; 고기원, 1991; 박준범과 권성택, 1991; 최순학 외, 1991). 제주도의 형성 시기 및 화산활동에 따른 암석 성분 변화에 대해서는 아직까지 논란의 대상이 되고 있다. Lee (1982)는 크게 전기의 기저용암 분출기 (basal basalt stage)와 용암대지 형성기 (lava plateau stage)와 중기의 순상기 (shield stage) 그리고 후기의 기생화산 형성기 (cinder cone stage)로 구분하였으며 (Fig. 2), 기저용암 분출기-용암대지 형성기 동안은 알칼리현무암에서 조면암, 순상기는 하와이아이트에서 조면암의 분화를 각각 보이는 것으로 해석하였다. 지금까지 알려진 제주도 화산암의 K/Ar 절대 연령은 최고 1.20 Ma (용머리 응회환내의 감람석-휘석 현무암 암편)에서 최소 0.025 Ma (한라산 조면암)로서, 제주도가 백만년 이상에 걸친 화산활동으로 형성된 것임을 보여준다 (윤상규 외, 1986; Won *et al.*, 1986; 이동영 외, 1987; Tamanyu, 1990).

제주도의 암석기재 및 암석화학적 연구는 이상만 (1966), 원종관 (1976), Lee (1982, 1984), Lee (1989), 박준범과 권성택 (1991, 1993a, b, 1994, 1995), 원종관 외 (1993), Lee *et al.* (1994) 등에 의해 이루어진 바 있

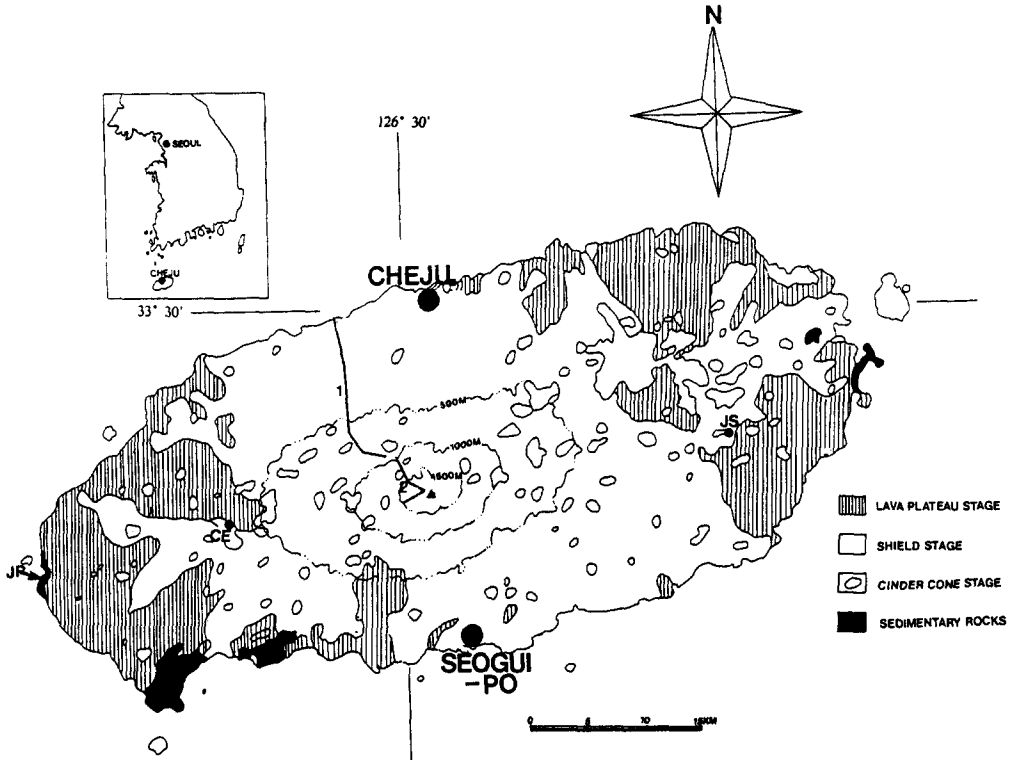


Fig. 2. The simplified geologic map and sampling sites of the volcanic rocks from Cheju island. Division of volcanic stages is after Lee (1982). Locations: 1; Kwangryeong gulch, 2; Aerimok-Yongsil trail, JS; Songupri core site, CE; Ishidol core site, JP; surface sampling site at the base of Suwolbong tuff ring.

다. 제주도의 주구성암인 알칼리 화산암류의 생성기원에 대해 Kuno (1966)의 가설에 따라 대륙연변에서 판의 섭입에 의한 화성활동의 산물로서 해석되기도 하였으나 (원종관, 1976), 1980년 이후 판내부 환경의 열점 관련 화성 활동으로 형성된 알칼리 현무암질 마그마의 결정분화작용에 의해 만들어진 것으로 해석된다 (Lee, 1982; Lee, 1989, 박준범과 권성택, 1993a, b, 1995; Lee *et al.*, 1994). 한편 솔리아이트는 비교적 최근들어 그 산출이 보고되기 시작하였다 (Lee, 1989; 박준범과 권성택, 1991). 박준범과 권성택(1994)은 석류석을 잔류물로 갖는 맨틀 물질에서 부분용융의 정도 차이에 의해 제주도의 알칼리암류와 솔리아이트가 형성되었던 것으로 설명하였다.

시 료

이 연구는 제주도 화산암 중 9개의 알칼리암류와

Table 1. Sampling localities.

sample number	altitude(m)	national grid(lat./long.)
J2	860	38.08/151.85
J6	770	38.05/150.48
J12	600	40.08/149.35
J17	470	41.85/148.65
J20	290	43.84/148.75
J28	30	48.50/148.00
J37	1670	35.30/155.34
J40	1410	34.06/153.35
JT23A	1640	34.48/156.70
JS1	160	40.05/182.50
JS17	25	40.05/182.50
CE1	356	32.75/128.35
JP	2	28.60/122.45
BDA1-2	1	52.90/158.15

4개의 솔리아이트를 대상으로 하였다 (Table 1과

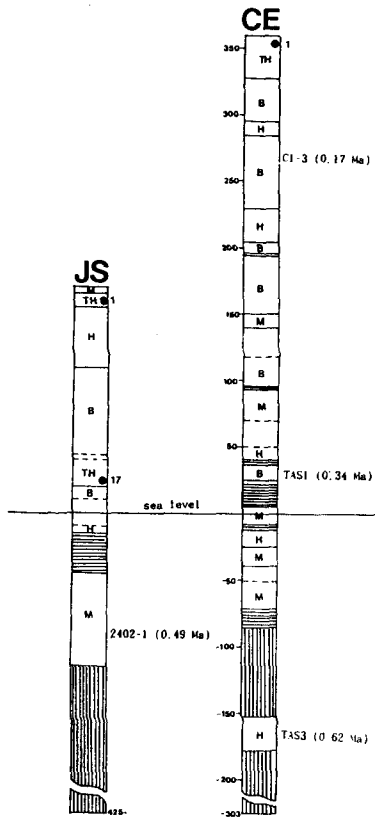


Fig. 3. Columnar section and sample location (solid circle) of two boring cores (JS and CE). Sample numbers with K/Ar date are quoted from Yun et al. (1992) and Miyake et al. (1993). Abbreviation: TH; tholeiite, B; alkali basalt, H; hawaiite, M; mugearite.

Fig. 2). 시료가 채취된 지역별로 특징을 살펴보면 다음과 같다. 제주도 북부의 광령계곡은 제주시에서 서쪽으로 약 3 km 정도 떨어진 해안에서 어승생약 주변 (고도 900 m)까지 연장 15 km의 길이를 갖는다 (Fig. 2). 이 곳에서는 평균 두께가 약 15 m인 25매 이상의 용암류가 확인되는데, 일부 괴상인 용암류를 제외하고는 대체로 각 용암류의 상부로 감에 따라 기공과 사장석 반정의 크기 및 양이 증가하는 경향을 보인다. 이들은 대부분 하와이아이트-뮤저라이트이며 약간의 알칼리 현무암과 벤모라이트로 구성된다 (박준범과 권성택, 1993a). 이 연구에서는 이들 중 알칼리 현무암, 하와이아이트 및 뮤저라이트 성분의 시료를 각각 2개씩 6개의 시료를 선정하였다(J 시료). 이들과 동일한 분화경향을 지시하는 조면암(박준범

과 권성택, 1995) 시료는 백록담의 하부(1640 m; JT23), 윗세오름(1714 m; J37) 그리고 영실(1350 m; J40) 지역에서 각각 1개씩 3개를 채취하였다.

한편, 솔리아이트 시료는 두 곳의 시추코아와 한 곳의 육상 노두에서 채취하였다. 동부의 성읍리 시추코아는 제주시에서 약 30 km 정도 남동쪽에 위치한 남제주군 표선면 성읍리 영주산 부근(해발 165 m)에서 시추된 것으로, 23매의 용암단위가 확인된다. 그 중 솔리아이트는 뮤저라이트에 협재하며 10 m 가량의 두께를 갖는 상부의 것(+160 m; JS1)과 해수면과 가까운 하부(+20~+40 m)에서 알칼리 현무암에 협재하여 각각 10 m의 두께인 2매의 솔리아이트(JS17)로 구분된다 (Fig. 3). 한편 서부의 이시돌 코아는 제주시에서 약 25 km 정도 남서쪽에 위치한 북제주군 한림읍 이시돌 목장주변에서 시추된 것으로, 성읍리 시추코아와 거의 대칭적인 위치에 있으며 이곳에서는 26매 이상의 용암류가 확인된다. 그 중 최상부에 솔리아이트(CE1)가 알칼리 현무암을 피복하여 분포한다 (Fig. 3). 두 곳의 시추코아 이외에, 이시돌 코아의 시추지역으로부터 약 15 km 정도 서쪽에 위치한 남제주군 고산리 수월봉 응회환의 기저부를 이루는 용암류 중 해안에 노출된 암류 (JP)도 포함하였다 (Fig. 2).

시료에 대한 특징적인 주성분 및 미량성분 원소 함량은 Table 2와 같다. 한편, 제주시에 인접한 별도봉 해안에 노출된 스크리아층내에 포획된 주라기 대보 (이동영 박사, 개인 통신) 화강암력 (BDA1-2)의 측정된 동위원소 비의 결과도 함께 보고한다. 이들 시료 중 백록담 조면암(0.025 Ma; Won *et al.*, 1986)을 제외하고는 직접적인 절대연령의 측정이 이루어지지 않았지만, 북부의 알칼리암류는 0.40 Ma 이후에(이동영 박사, 개인통신), 동부의 솔리아이트는 0.49 Ma 이후 (윤선 외, 1993), 서부 이시돌의 것은 0.17 Ma 이후 (Miyake *et al.*, 1993), 수월봉의 것은 0.60 Ma 이후(이동영 외, 1987)에 각각 분출된 것으로 판단된다.

시료의 전처리 및 분석

분말시료를 약 170 mg 정도를 취하여 테플론 바이알에 넣고 혼합산 (HF:HClO₄:HNO₃ = 3:1:1) 3~4 ml을 가한 후 뚜껑을 닫고, 150°C의 가열판위에서 밤새도록 (12시간 이상) 가열하였다. 다음날, 바이알의

Table 2. Selected major and trace element abundances of the volcanic rocks from Cheju Island, Korea.

Sample No.	Alkaline rocks									Tholeiites			
	J28 AB	J17 AB	J2 Hw	J6 Hw	J12 Mu	J20 Mu	J37 Tr	J40 Tr	JT23A Tr	JS1	JS17	CE1	JP
K ₂ O (wt%)	1.44	1.29	2.27	2.29	2.72	2.58	5.59	4.83	5.51	0.55	0.92	0.41	0.45
P ₂ O ₅ (wt%)	0.43	0.51	0.98	0.64	0.74	0.96	0.06	0.20	0.07	0.21	0.30	0.19	0.21
Ba(ppm)	376	345	673	388	792	599	567	1066	739	141	235	103	136
Nb(ppm)	44	39	73	42	76	64	125	102	119	12.2	17.7	9.1	10.8
Zr(ppm)	218	209	382	233	426	333	539	288	161	121	166	109	137
La(ppm)	32	28.4	59.4	33.1	67	57.8	26.3	34	28.6	17	22	8	18
Sr(ppm)	527	542	616	628	632	641	43	285	209	289	392	280	271
Nd(ppm)	34.6	32.8	62.4	52.5	64.5	61.2	27	37.5	25.6	11	19	9	16
Pb(ppm)	2.80	2.29	4.65	2.64	4.60	3.93	4.98	1.80	5.58	-	-	-	-
Th(ppm)	5.65	4.45	9.52	6.28	10.63	10.30	21.87	4.35	13.97	0.5	1.5	<0.5	2
U(ppm)	1.03	0.91	1.37	1.24	2.10	2.06	4.92	0.87	1.76	<0.5	<0.5	<0.5	0.5
P ₂ O ₅ /K ₂ O	0.30	0.40	0.43	0.28	0.27	0.37	0.01	0.04	0.02	0.38	0.33	0.46	0.47
Ba/Nb	8.55	8.85	9.22	9.24	10.42	9.36	4.54	10.45	6.21	11.56	13.28	11.32	12.59
La/Nb	0.73	0.73	0.81	0.79	0.88	0.90	0.21	0.33	0.24	1.39	1.24	0.88	1.67
Zr/Nb	4.95	5.36	5.23	5.55	5.61	5.20	4.31	2.82	1.35	9.92	9.39	11.98	12.69
Ba/La	11.75	12.15	11.33	11.72	11.82	10.36	21.56	31.35	25.84				
Ba/Th	66.55	77.53	70.69	61.78	74.51	58.16	25.92	24.51	52.90				

*Nine samples(J6, J12, J28, J2, J17, J20, J37, J40 and JT23A) were analyzed by XRF(K₂O and P₂O₅) and ICP-MS(Ba, Nb, Zr, La, Sr, Nd, Pb, Th, and U) at Korea Basic Science Institute(analyst; Choi, M.S.) and four samples(JS1, JS17, CE1 and JP) were analyzed by XRF except for La and Nd by ICP-AES at Dept. Geosciences, Franklin and Marshall College, Lancaster, PA, USA (analyst; Mertzman, S.A.). Analytical uncertainties were better than 1% for K₂O and P₂O₅, and 10-15% for trace elements in both Lab.

* Abbreviation: AB; alkali basalt, Hw; hawaiiite, Mu; mugearite, Tr; trachyte.

뚜껑을 열어 가열하여 시료를 건조시키고, 6N HCl 약 1 ml을 가해 더 건조시킨후 2.5N HCl 1 ml에 녹여 원심분리 시켰다. 시료중 조간대에 위치한 JP와 BDA1-2는 해수에 의한 오염의 영향을 제거하기 위해, 약 3~4시간가량 100°C에서 6N HCl에 담가두었다가 산을 따라낸 뒤 남은 부분을 초순수 물로 2~3회 세척하여 건조한 다음 위의 용해과정을 행하였다.

원심분리된 맑은 용액으로부터 양이온 교환수지(Dowex AG 50W-X8, H⁺form, 200~400# mesh)에서 2.5N HCl, 6N HCl, 2N HNO₃를 사용하여 Pb, Sr 과 전체 희토류 원소(REE)를 분리시켰다. 분리된 Pb, Sr과 REE 포함용액은 수지의 파괴를 위해 HClO₄과 HNO₃을 각각 두방울 가량 첨가하여 건조시킨후 다음 단계의 분리 작업을 수행하였으며, Sr은 건조물에 다시 HNO₃ 한방울을 첨가하여 건조후 분석하였다. 분리된 Pb시료는 1N HBr 1 ml을 가해 그 매질을 바꾼후 음이온교환수지(AG1×8, Cl⁻ form,

100~200#)에 통과하여 1N HBr과 6N HCl을 이용하여 Pb를 분리하였다. 이의 자세한 실험 방법은 박계현 외(1992)와 같다. 분리된 REE는 0.06N HCl 0.06 ml 가량으로 희석시킨 후, 양이온 교환수지(AG 50W-X8 200~400#, NH₄⁺form)를 통과시켜 0.5 M과 0.2 M의 HIBA(α-hydroxy-isobutyric acid; (CH₃)₂C(OH)CO₂H) 용액을 이용하여 Nd를 분리하였다. 분리된 Nd용액은 수지의 파괴를 위해 HClO₄을 첨가한 후, 완전 건조시켰다. 이의 자세한 실험방법은 박계현 외(1995)에 따랐다. 실험의 전 과정에 대한 배경값 (blank)은 Sr은 400 pg, Nd는 200 pg, 그리고 Pb는 1 ng 수준이었다.

동위원소분석은 기초과학지원연구소의 VG Sector 54-30 모델의 열이온화 질량분석기로 수행되었다. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr값은 0.1194로, 그리고 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd값은 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219로 동위원소 분별효과를 보정하면서 역동적 모드(dynamic mode)로 분석하였

다. 측정된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 표준시료 NBS 987의 값, 0.710210 ± 0.000010 ($n=25$, 2σ)으로, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 는 La Jolla의 0.511849 ± 0.000003 ($n=18$, 2σ)에 대한 상대적인 값으로 보고한다. 한편, Pb 동위원소비는 정적모드 (static mode)로 분석한 후 표준시료 NBS 981의 분석치로부터 시료 분석치의 분별작용에 의한 편차를 보정하였다. NBS 981의 분석값은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비에 대해 각각 16.909 ± 0.004 , 15.445 ± 0.006 , 36.57 ± 0.02 ($n=32$)이며, 전형적인 내부 정밀도는 0.02% (2σ)이내이고 외부 정밀도는 0.05% (2σ)이내이다 (박계현 외, 1992).

결 과

제주도 화산암의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소비에 대한 분석 결과는 Table 3과 같으며, 절대연령에 대한 보

정은 하지않았다. 이들 분석치는 Fig. 4부터 Fig. 8에서 주요 해양 화산도인 대서양의 세인트 헬레나 (St. Helena: Sun, 1980; White and Hofmann, 1982), 월비스 리지 (Walvis Ridge: Richardson *et al.*, 1982), 트리스탄 타 쿤하 (Tristan da Cunha: Cliff *et al.*, 1991), 인도양의 커구엘렌 (Kerguelen: White and Hofmann, 1982; Storey *et al.*, 1988) 및 태평양의 하와이 열도 (Stille *et al.*, 1983, 1986)와 사모아 군도 (Samoa: White and Hofmann, 1982; Palacz and Saunders, 1986; Wright and White, 1987)의 화산암류의 동위원소 자료와 비교하였다. 또한 제주도 주변의 신생대 화산암 지역 중 울릉도, 독도 및 동해내 야마토 (Yamato)분지 지역의 드렛지 (dredge) 시료 (Tatsumoto and Nakamura, 1991)와 북동 중국 (Peng *et al.*, 1986; Basu *et al.*, 1991) 및 남중국 분지내 드렛지 시료 (Tu *et al.*, 1992)의 자료와도 비교하였다.

Table 3. Sr, Nd and Pb isotopic composition of the volcanic rocks from Cheju Island, Korea.

Sample	Rock	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
J28	AB	0.704267 ± 9	0.512786 ± 5	19.071	15.661	39.712
J17	AB	0.704032 ± 7	0.512798 ± 6	19.034	15.640	39.611
J2	Hw	0.704129 ± 6	0.512778 ± 5	19.002	15.629	39.556
J6	Hw	0.704040 ± 6	0.512791 ± 5	19.047	15.601	39.527
J20	Mu	0.704207 ± 6	0.512776 ± 5	19.034	15.603	39.552
J12	Mu	0.704232 ± 7	0.512783 ± 6	18.984	15.627	39.565
J37	Tr	0.704089 ± 25	0.512781 ± 8	-	-	-
J40 ^b	Tr	0.704229 ± 7	0.512770 ± 29	18.900	15.541	39.177
J23A ^b	Tr	0.704089 ± 8	0.512788 ± 10	18.998	15.592	39.441
JS1	TH	0.704218 ± 6	0.512780 ± 7	19.058	15.655	39.719
JS17 ^b	TH	0.705305 ± 8	0.512698 ± 18	18.677	15.654	39.243
CE1	TH	0.704469 ± 6	0.512729 ± 5	18.611	15.601	38.975
JP ^a	TH	0.705198 ± 6	0.512684 ± 7	19.117	15.690	39.605
(unleached)		0.705354 ± 7	-	-	-	-
BDA1-2 ^{a, c}	granitic fragment	0.716646 ± 6	0.511625 ± 8	18.303	15.731	38.590

* Abbreviations are the same as in Table 2. Errors in isotope ratios are reported as 2σ of mean. No age correction was applied. Sr, Nd and Pb isotopic compositions were measured on multi-collector VG 54-30 mass spectrometer at Korea Basic Science Institute (analyst: C.-S. Cheong).

a; Leached 4 hours in hot (approximately 100°C) 6N HCl. b; Leached 4 hours in hot (approximately 50°C) 2.5N HCl.

c; Jurassic granite fragment in scoria bed (Lee, D.Y., personal communication).

* All $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios were normalized to $^{86}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.1194$ and the measured average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of standard NBS 987 was 0.710210 ± 0.000010 ($N=25$). All $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios were normalized to $^{146}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}=0.7219$. The measured $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ of La Jolla was 0.511849 ± 0.00003 ($N=18$). Pb isotopic ratios were corrected for mass fractionation based on the results for NBS 981; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.909 \pm 0.004$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.445 \pm 0.006$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.57 \pm 0.02$. Procedural blank levels were 400 pg Sr, 200 pg Nd and 1 ng Pb.

Sr-Nd 동위원소

제주도 알칼리암류의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 는 0.7040~0.7043, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 는 0.512776~0.512791로서 비교적 좁은 변화를 보이며, 암석 성분이 변화하더라도 동위원소비는 거의 일정하다. 이는 이들이 동질 근원에서 유래하였음을 지지하며 또한 근원 마그마로부터 분화되어 분출되는 일련의 과정동안 주변암(기반암)에 의해 오염되지 않았음을 지지한다. 이 연구에서 얻어진 알칼리암류의 Sr-Nd 분석치는 Nakamura *et al.* (1990)에 의해 보고된 하와이아이트의 결과와 거의 유사하다. Lee (1982)는 제주도 알칼리암류 중 대부분

분의 것(순상기 및 기생화산 형성기의 분출암류; 0.50~0.41 Ma 이후)은 Sr 동위원소비가 0.7040~0.7045의 범위에 해당하지만, 제주도 남부 지역의 조면암류(0.87~0.75 Ma)와 제주도 형성기 중 용암대지 형성기 (0.60 Ma 이전)에 해당하는 알칼리 현무암은 그 비가 0.7048~0.7052로서 화산암류의 형성시기와 Sr 동위원소비에 의해 두 그룹으로 구분될 수 있음을 제시한 바 있다.

이 연구에서 분석한 알칼리 현무암들은 Lee (1982)의 전자 그룹에 속하는데, 최근 미발표 자료에 따르면 (장광화, 개인통신) 후자 그룹 알칼리암류의 Nd 동위원소비는 이 연구의 결과에 비해 약간더 부화되었음을 나타낸다 (0.512710~0.512774). 한편, 처음 보고되는 제주도 솔리아이트 시료 역시 분출시기에 따라 동위원소 조성이 변화하는 것으로 보인다. 서부지역의 경우 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 수월봉 시료가 0.705198이고 후기에 분출한 것으로 보이는 이시돌 시료가 0.704469이다. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은 각각 0.512684와 0.512729이다. 한편 동부의 성음리 시추코어에서는 하부의 시료와 상부의 시료가 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 각각 0.705305와 0.704218로, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은 0.512698에서 0.512780로 변화한다. 이와 같이 분출시기에 따른 솔리아이트간 동위원소비의 변화는 Lee(1982)의 구분 기준에 따른 알칼리암의 그것과 서로 부합된다. 그러나 시료의 수가 매우 적기 때문에 이것이 제주도 솔리아이트의 일반적인 변화경향인지는 더 많은 수의 시료에 대한 정밀한 연대측정과 방사기원 동위원소의 분석을 통해 확인할 필요성이 인정된다. 한편, 조간대에 위치한 솔리아이트 시료 (JP)는 산척리를 한 경우 사이에 분석한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 0.0002 가량 차이가 있음을 보여준다. 이는 제주도 시료의 Sr 동위원소 분석시에는 해수에 의한 Sr 동위원소비의 변질 가능성은 고려해야 함을 나타낸다.

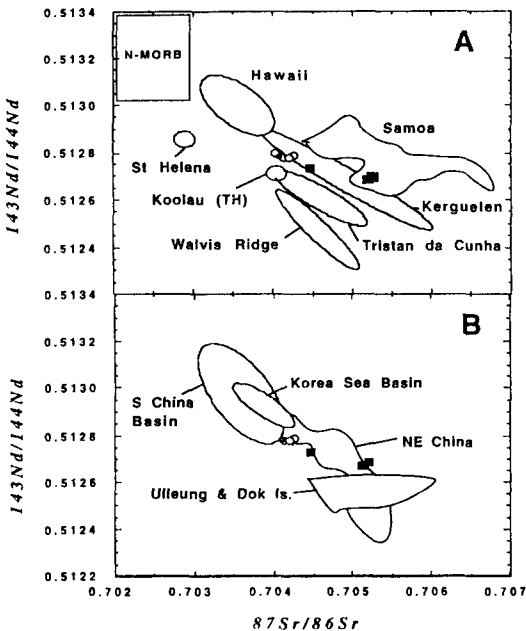


Fig. 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ plot for the volcanic rocks from Cheju island. Symbols: open circle; alkali volcanic rocks, solid square; tholeiite. Shown for comparison with (A) representative OIBs and (B) Cenozoic volcanic rocks around Cheju Island. Data fields are from St. Helena (Sun, 1980; White and Hofmann, 1982), Walvis Ridge (Richardson *et al.*, 1982), Tristan da Cunha (Cliff *et al.*, 1991), Kerguelen (White and Hofmann, 1982; Storey *et al.*, 1988), Hawaii (Stille *et al.*, 1983, 1986), Samoa (White and Hofmann, 1982; Palacz and Saunders, 1986; Wright and White, 1987), Ulleung Island, Dok Island and dredged sample from Yamato Basin in Korea Sea (Tatsumoto and Nakamura, 1991), NE China (Peng *et al.*, 1986; Basu *et al.*, 1991) and dredged samples from South China Basin (Tu *et al.*, 1992).

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 변화 그림 (Fig. 4)에서 제주도 화산암류는 커구엘렌섬 화산암류의 변화 영역에 중첩되며, 두개의 솔리아이트는 사모아 군도의 영역과도 중첩된다. 한편, 제주도의 알칼리 화산암류는 울릉도 및 독도의 것에 비해 동위원소적으로 결핍된 반면, 남중국 분지 및 동해 야마토 분지의 화산암류에 비해 부화된 특징을 가지며, 북동 중국 화산암류의 영역내에 점시된다. 알칼리암류에 비해 솔리아이트가 동위원소

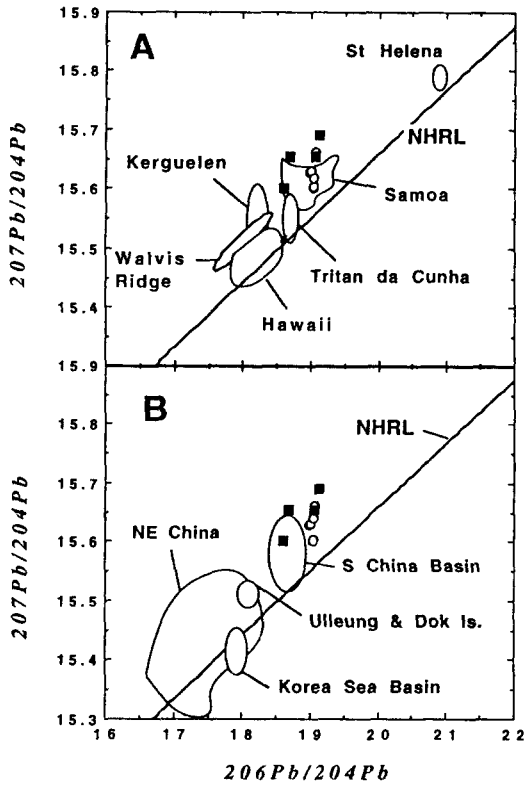


Fig. 5. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plot for the volcanic rocks from Cheju island. NHRL (Northern Hemisphere reference line; Hart, 1984) is also shown. Symbols and data fields are the same as in Fig. 4.

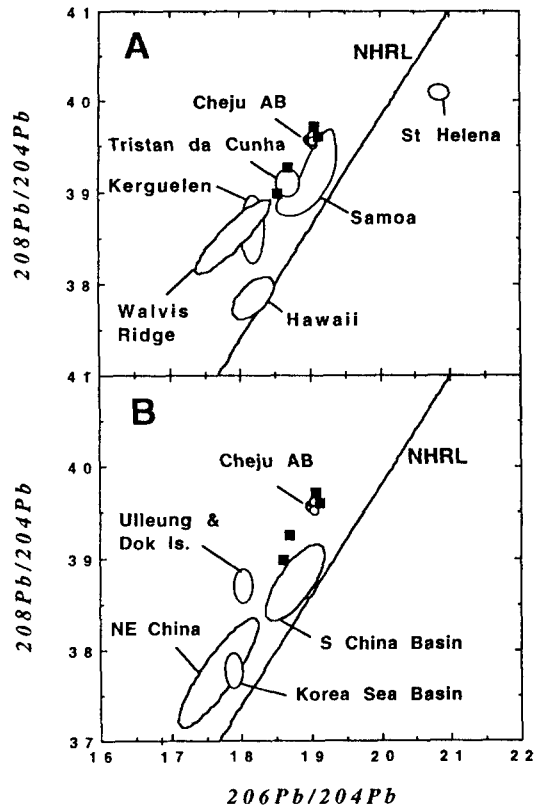


Fig. 6. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plot for the volcanic rocks from Cheju island. Symbols and data fields are the same as in Fig. 4.

적으로 부화된 특징을 갖는 것은 하와이 열도(Stille *et al.*, 1983, 1986)에서는 일반적인 특징으로 알려져 있으며, 북동 중국의 한누버(Hannuba)와 쿠안디언(Kuandian) 지역 (Song *et al.*, 1990; Basu *et al.*, 1991; Zhi *et al.*, 1992)에서도 보고된 바 있다.

Pb 동위원소

알칼리암류의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 18.9~19.1, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 15.5~15.7, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 39.4~39.7이며, 솔리아이트의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 18.6~19.1, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 15.6~15.7, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 39.0~39.7이다. 비교적 좁은 변화를 보이는 알칼리암류와는 달리 솔리아이트는 다소 시료에 따른 분석치의 변화를 보인다.

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 5)과 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

변화 (Fig. 6)에서 제주도의 화산암류는 주변의 신생대 화산암류와 같이 Hart(1984)의 NHRL (Northern Hemisphere Reference Line)의 윗부분에 점시된다. 이는 제주도가 해양도 화산암들 중에서도 함께 표시한 듀팔 이상(Dupal anomaly)을 보이는 그룹의 특징을 갖고 있음을 나타낸다. 제주도 화산암류의 Pb 동위원소비의 특징은 제주도 와 Sr-Nd 동위원소 비가 유사한 커구엘렌 화산암류에 비해서는 높은 값을 보이는 반면 사모아 화산암류와는 비슷한 영역에 점시된다. 또한 Sr-Nd 동위원소 비가 유사한 북동 중국의 화산암류와 확연히 구분되며 제주도 주변 지역의 화산암류들중 가장 높은 Pb 동위원소비를 갖는다. 한편, 남중국 분지 화산암류와 비교하면 평균적인 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비가 모두 조금 더 높긴

하지만 대체로 유사한 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비를 갖고 있음을 알 수 있다.

고찰

부화된 맨틀의 석입

제주도 및 중국 내륙에 분포하는 신생대 알칼리 화산암류는 지화학적인 연구로부터 백악기말 이후부터 섭입하고 있는 태평양 판의 직접적 영향을 받지는 않았음이 확인되었으며 열점활동에 의해 생성된 것으로 판단되고 있다(예; Nakamura *et al.*, 1985). 해양 환경이나 대륙연변부에서의 열점에 의한 화산활동에서는 지각물질에 의한 오염 등의 영향이 거의 알려져 있지 않다. 따라서 이러한 화산암의 지화학적인 특징은 맨틀 근원지의 조성을 그대로 반영한다. 제주도 및 주변 동북아시아의 신생대 알칼리 현무암류를 비롯하여 많은 해양 화산섬등 일반적으로 판 내부 환경에서의 열점에 의한 화산암은 결핍된 맨틀에서 만들어지는 중앙해령의 화산암보다는 부화된 동위원소 조성을 갖는 것이 대부분이다. 이것은 결국 결핍 맨틀보다 상대적으로 부화된 동위원소적 특징을 갖는 맨틀의 존재를 지시한다.

이러한 부화된 맨틀 물질의 성인과 저장고의 형성에 대해서는 많은 논란이 있다. 상부 맨틀의 결핍된 동위원소 성분과는 다른 부화된 동위원소 조성을 갖는 맨틀부분이 만들어지려면 지질학적으로 상당히 오랜 시간동안 대류하는 맨틀로부터 격리되어 있어야 한다(Zindler and Hart, 1986). 이러한 부화된 맨틀의 생성에 대해서는 여러 가지 제안이 있다. 분화되지 않은 원시 맨틀(Schilling, 1973), 변성교대작용(metasomatism)을 받은 맨틀(Wright, 1984; Hawkesworth *et al.*, 1987, 1990; Hart, 1988), 과거에 섭입된 해양 지각 및 퇴적물(White and Hofmann, 1982; Hofmann and White, 1982; Weaver, 1991) 및 대륙암권에서 밑부분 맨틀의 윤회(Dosso and Murthy, 1980; Mckenzie and O'Nions, 1983) 등이 부화된 맨틀을 형성하며 이러한 부분에서 플룸이 만들어지고 이것이 열점의 화산활동을 일으킨다고 설명하고 있다.

이와 같이 다양한 유래가 주장되고 있는 부화된 맨

틀 물질의 근원을 좀 더 구체적으로 연구하기 위해서는 맨틀을 지화학적인 특징에 따라 묶어서 살펴보는 것이 유용하다. Zindler and Hart (1986)와 Hart (1988)는 화산암류 및 초염기성 포획체를 이용한 연구를 통해, 그 성분과 동위원소비가 서로 다른 맨틀 물질의 단성분(혹은 저장고)을, 결핍된 MORB 맨틀(DMM), 부화된 맨틀(EM I, EM II), 높은 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 인 맨틀(HIMU)들로 구분하고, 해양 화산섬을 구성하는 화산암류의 Sr, Nd 및 Pb 동위원소비는 이들 물질간의 석입으로 설명할 수 있음을 제시하였다. 실제로 많은 화산섬들이 부화된 맨틀 성분과 결핍 맨틀 사이의 석입으로 설명될 수 있는 동위원소 조성을 보인다(예; Wright and White, 1987; Stille *et al.*, 1986). 이러한 현상은 부화된 맨틀에서 만들어진 마그마나 상승하는 플룸 물질 그 자체는 항상 주변에 존재하는 결핍 맨틀과 다양한 석입을 받을 가능성이 있음과도 일치한다. 한편, Allegre *et al.* (1981)은 대륙 환경에서 분출된 알칼리 현무암의 지화학적 특징도 마그마가 상승하는 동안 지각물질에 의한 영향을 거의 받지 않았으며, 해양 화산암류의 근원과 유사한 근원 물질에서 유래되었음을 제시하였다.

제주도 화산암류의 성인

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 7) 및 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 변화 그림(Fig. 8)들은 해양화산암들의 맨틀 근원물질들을 잘 나타낸다. Zindler and Hart(1986)의 맨틀 단성분으로 볼 때 사모아 군도는 대표적으로 EM II 방향의 변화를 보이는 화산섬이며(DMM-EM II 사이의 석입), 커구엘렌 및 트리스탄 다 쿤하의 화산암류는 대표적으로 EM I을 향해 변화한다(DMM-EM I 사이의 석입). 제주도 화산암류의 Sr, Nd, Pb 동위원소적 특징을 Fig. 7과 8에서 살펴보면 사모아 군도의 화산암류 영역과 겹치며 가장 비슷한 변화경향을 보여주고 있으며, 커구엘렌 및 트리스탄 다 쿤하의 화산암류에 비하면 좀 더 방사기원의 납 동위원소 비가 높은 쪽인 우측에 놓임을 알 수 있다. 부연하면 제주도의 솔리아이트들은 부화된 맨틀 단 성분인 EM II 성분을 향한 변화를 보이고 있으며, 제주도의 알칼리 현무암류는 비교적 균질한 조성으로 솔리아이트 보다는 상대적으로 결핍된 동위원소 조

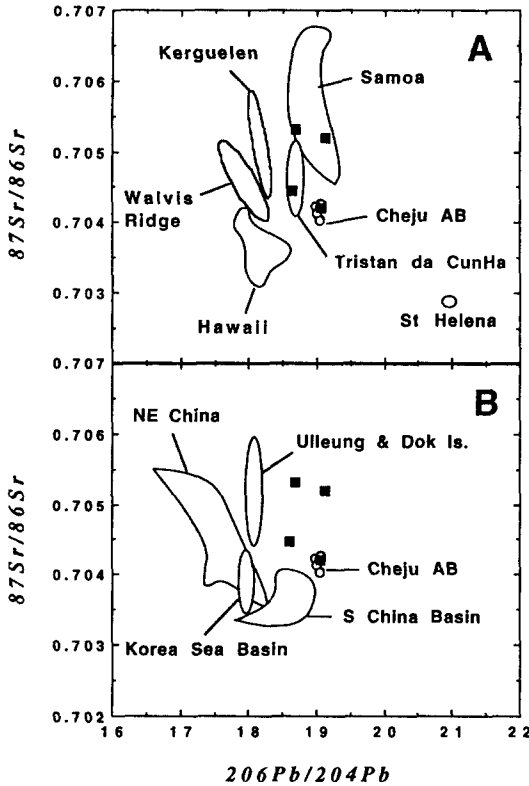


Fig. 7. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plot for the volcanic rocks from Cheju island. Symbols and data fields are the same as in Fig. 4.

성을 보인다. 이러한 조성은 Zindler and Hart(1986)가 제안한 맨틀 단성분들과 비교해 볼 때 부화된 맨틀 단성분인 EM I이나 EM II보다는 훨씬 결핍된 조성이며 가장 결핍된 맨틀 단성분인 DMM보다는 많이 부화된 상당히 부화된 조성이다. 따라서 이러한 맨틀 단성분 사이의 섞임으로 설명한다면 이 Fig. 7과 8에서도 가장 유사한 사모아 군도의 화산암류와 마찬가지로 EM II와 DMM 사이의 섞임으로 설명하는 것이 가장 타당할 것으로 판단된다. 한편 제주도 주변의 화산암류들과 비교하면 제주도의 화산암류는 남중국 분지 화산암류와 비교적 유사한 특징을 나타낸다. 이처럼 제주도 화산암류와 유사한 특징을 나타내는 남중국 분지의 화산암류 역시 DMM-EM II 성분의 섞임으로 설명하고 있다 (Tu *et al.*, 1992; Flower *et al.*, 1992; Liu *et al.*, 1994).

앞에서 기술한대로 결핍 맨틀과 부화된 맨틀 물질

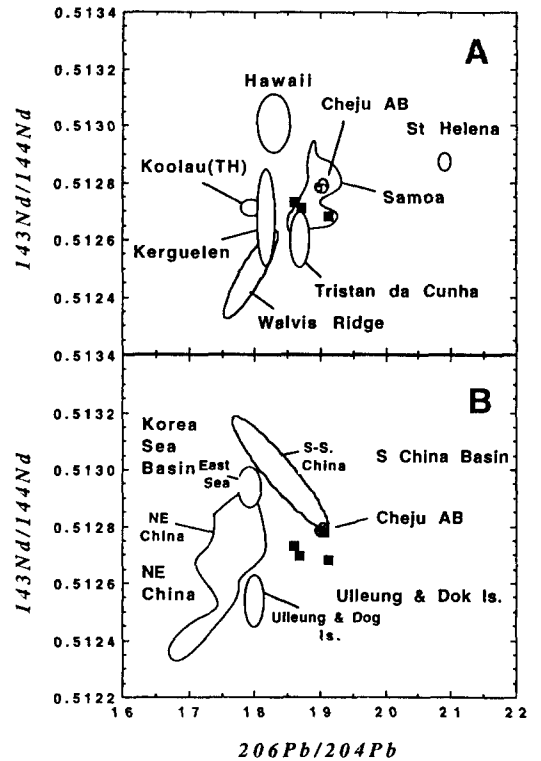


Fig. 8. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ plot for the volcanic rocks from Cheju island. Symbols and data fields are the same as in Fig. 4.

간의 섞임을 통해 제주도 화산암류를 형성한 맨틀 근원 물질이 만들어졌다는 설명이 타당성이 있는지 조사해 보기 위해 각 맨틀 단성분 사이의 섞임을 계산하여 이를 제주도의 화산암류 조성과 비교해 보았다 (Fig. 9). 이 계산에서는 여러 문헌에서 단성분 조성을 인용하여 사용하였다. 우선, 결핍 맨틀 성분으로는 Zindler and Hart (1986)의 DMM-A 성분 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7022$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.4\sim 17.7$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51335$, Sr=6 ppm, Pb=0.02 ppm, Nd=0.33 ppm)을 이용하였다. 그러나, 부화된 맨틀 성분인 경우 동위원소비 및 성분이 다양하여 그 성격을 정확히 규정할 수 없지만 (Hart, 1988) 및 Weaver (1991)가 HIMU-심해 퇴적물 (pelagic sediment)과 HIMU-육성기원 퇴적물 간의 섞임 계산을 통해 제시한 EM I ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7055\sim 0.7060$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.6\sim 17.7$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51230$, Sr=106 ppm, Pb=1.49 ppm, Nd=11.7 ppm)과 EM II 성분 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=\text{---}$

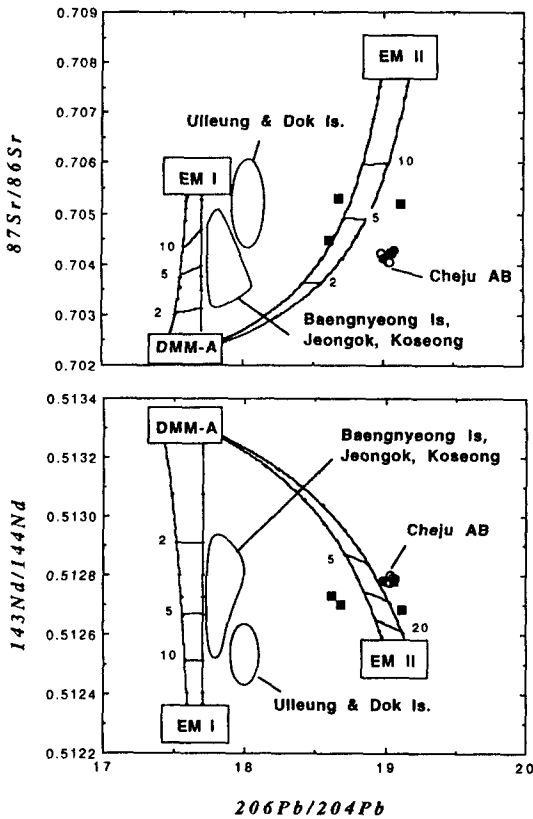


Fig. 9. Mixing calculations with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (A) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (B) plot for the volcanic rocks from Cheju island. Mixing parameters: DMM-A from Zindler and Hart (1986) ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7022$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.4-17.7$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51335$, Sr=6 ppm, Pb=0.02 ppm, Nd=0.33 ppm), EM I from Weaver (1991) ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7055-0.7060$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.6-17.7$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51230$, Sr=106 ppm, Pb=1.49 ppm, Nd=11.7 ppm), EM II from Weaver (1991) ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7080$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.0-19.2$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51250$, Sr=102 ppm, Pb=1.725 ppm, Nd=9.4 ppm). Symbols are the same as in Fig. 4. Because the end components have some ranges in their isotope compositions, mixing relations between any two of them cannot be shown by single curve. Two curves between DMM-A and EM I and other two curves between DMM-A and EM II represent the compositional range which can be produced by the mixing of enriched materials (EM). Mixing proportions of EM are shown by percent number. Fields of Ulleung Island and Dok Island (Tatsumoto and Nakamura, 1991) and Baengnyeong Island, Jeongok and Koseong area (unpublished data) are also shown for the comparison.

0.7080, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.0\sim 19.2$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51250$, Sr=102 ppm, Pb=1.725 ppm, Nd=9.4 ppm)을 인용하였다. 계산에 사용한 부화된 맨틀의 Sr과 Pb 함량

은 West and Leeman (1987)이 하와이섬 할리아칼라(Haleakala) 화산암류의 근원 계산에 사용된 EM 성분 (각각 100 ppm, 1.6 ppm)과 유사하다. 이러한 종류의 그림에서는 부분용융에 의한 마그마의 생성이나 분별결정작용에 의한 마그마의 분화등과는 달리 단성분의 조성에 대한 규제가 엄밀히 이루어지지 못하기 때문에 모델 변화선과 실제의 조성이 잘 일치하지 않는 경우가 대부분이다. 그러나 전체적인 변화경향이나 추정되는 마그마의 용융도 등을 통해 어느정도 타당성이 있는지를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9에는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 동위원소비의 변화에 대한 섞임 계산 결과를 제주도 화산암류의 값과 함께 울릉도-독도 화산암류 (Tatsumoto and Nakamura, 1991) 및 백령도, 전곡, 고성 지역의 화산암류(미발표 자료)의 변화 영역을 같이 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소적 특징은 비록 섞임 곡선 위에 완벽히 놓이지는 않는다. 그러나 이미 다른 화산지역과의 비교를 통해 보인 바와 같이 DMM-EM II 간의 섞임으로 설명하는 것이 DMM-EM I 간의 섞임으로 설명하는 것 보다는 훨씬 더 제주도 화산암류의 동위원소 조성을 잘 설명해 준다. 이것은 EM I을 향한 변화를 보이는 울릉도-독도 화산암류와는 확연히 구분된다. 또한 Fig. 9B의 EM I 및 EM II 위치를 살펴보면 DMM을 제외한 부화된 맨틀 사이의 섞임으로는 제주도 화산암류의 Nd 동위원소 조성을 잘 설명할 수 없음을 알 수 있다.

맨틀 단성분 사이의 섞임 비율은 동위원소 쌍의 종류에 따라 약간씩 다른 결과를 나타낸다. Sr과 Pb 동위원소에 의한 결과에 의하면 제주도 화산암류를 형성한 맨틀 물질은 결핍 맨틀(DMM-A)과 부화된 맨틀(EM II) 물질간에 약 97~93% 대 3~7%의 비율로 섞인 것으로 나타나며, Nd과 Pb 동위원소 사이의 관계는 이것이 85~93% 대 7~15%의 비율로 나타난다. 이러한 차이는 맨틀 단성분의 값이 계산에 사용된 것과 다소 차이가 있음을 지시한다. 그러나 이 두 그림 모두에서 슬러아이트는 알칼리암류보다 DMM 단성분이 적게 나타나며 이는 슬러아이트가 제주도의 열점활동을 야기한 부화된 맨틀물질을 보다 더 잘 나타내고 있음을 나타낸다. 반면 알칼리암류는 보다

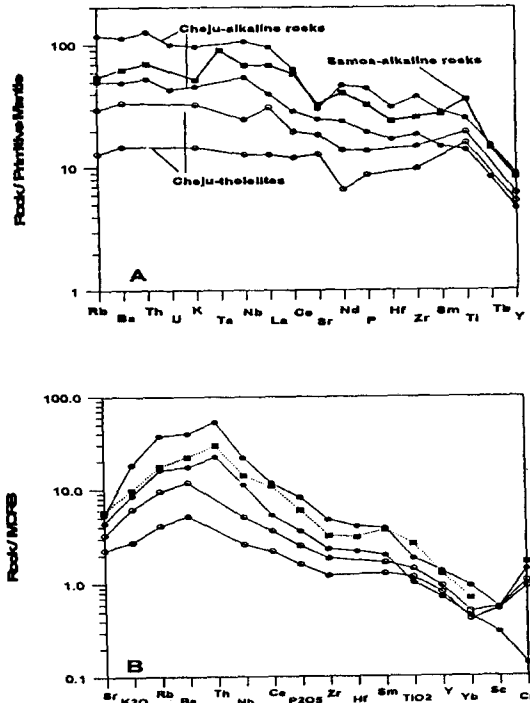


Fig. 10. (A) Primitive mantle (McDonough et al., 1992) normalized and (B) N-MORB (Pearce, 1982, 1983)-normalized diagrams for the alkali basalts and tholeiites from Cheju island. Average trend of basaltic rocks in Samoa (Palacz and Saunders, 1986) is shown for comparison.

많은 양의 DMM 물질이 섞여서 생성되었음을 지지한다. Lee (1982)의 Sr 동위원소 조성자료에서는 제주도 화산활동의 초기 시기에 보다 부화된 동위원소 조성의 마그마가 분출하였고 화산활동의 후기에는 상대적으로 결핍된 마그마들이 분출된 것으로 나타난다. 만약 이것이 제주도 화산활동의 일반적이 경향이라면 앞에서 설명한 부화된 맨틀과 결핍맨틀 사이의 섞임이 화산활동의 진행과 더불어 마그마 형성에 참여하는 결핍 맨틀의 상대적인 양이 점점 더 늘어난 것을 반영한다고 해석할 수 있다. 그러나 이러한 추론은 더욱 많은 연대측정과 동위원소비의 분석에 의해 검증되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 맨틀 근원의 유추를 위해 화산암류의 미량성분 원소를 이용하기도 한다. 거미그림을 그릴 때 나누어 주는 비교값을 원시맨틀의 성분 혹은 중앙해령의 현무암 성분을 사용하여 이에 대한 상대적인 변화 패턴을 해석하거나(예, Pearce, 1982; Wilson, 1989),

마그마의 분화과정동안에 잘 변화하지 않는 불호정적(incompatible) 미량원소 사이의 비율을 이용하여 근원물질의 추정에 활용하기도 한다(예, Weaver et al., 1987; Weaver, 1991). Fig. 10은 이 연구의 시료 중 조면암을 제외한 알칼리암류와 솔리아이트 성분 에 대해 원시맨틀 (McDonough et al., 1992)과 대서양 중앙해령 현무암 (Pearce, 1982, 1983) 성분으로 표준화하여 그 최대-최소 변화 구간을 나타낸 것이다. 비교를 위해 사모아 군도 알칼리 현무암의 평균 성분(5개 시료의 평균; Palacz and Saunders, 1986) 변화도 같이 나타내었다. 이 그림에서 제주도의 솔리아이트는 알칼리암류에 비해 불호정적인 원소들의 함량은 낮지만 대체로 나란한 성분 변화를 보이며, Pearce(1982)의 판내부 환경 현무암류의 특징적인 변화 패턴과 일치한다. 또한 제주도 화산암류와 유사한 동위원소 특징을 나타내는 사모아 군도의 알칼리 현무암과도 상당히 유사한 양상을 보인다.

한편, Weaver (1991)는 동위원소 특징에 의해 구분되는 HIMU-, EM I- 그리고 EM II-화산섬의 특징이 화산암류의 불호정 미량원소비로도 구분된다고 하였으며, 특히 Ba/Nb, Ba/Th 및 Ba/La비는 EM I-과 EM II-화산섬을 구분하는 지시자로 사용할 수 있음을 제시하였다. Fig. 11은 Ba/Nb-La/Nb, Zr/Nb-La/Nb 그리고 Ba/Th-Ba/La의 변화그림을 보여준다. Ba/Nb-La/Nb 및 Zr/Nb-La/Nb 그림에서 제주도 알칼리암류는 주로 EM I과 EM II의 영역이 겹치는 부분에 놓이며, 솔리아이트는 알칼리암류에 비해 더 높은 값을 갖는다. Ba/Th-Ba/La의 변화그림에서는 알칼리암류의 대부분이 EM II의 영역에 놓인다. 이 그림에서 솔리아이트는 Th 분석값이 없어 도사하지 못하였다. 일반적으로 불호정적 미량성분원소비를 이용한 맨틀 근원의 유추는 그 비가 부분용융과정 동안 변화하지 않아야 하는 것을 전제로 한다(Weaver et al., 1987; Weaver, 1991). 그러나 석류석 페리도타이트의 동질 근원암이 부분용융되는 경우 맨틀 광물과 마그마간의 분배관계에서 Nb에 비해 Zr, La가 좀더 호정적인 특징을 갖기 때문에 부분용융이 진행됨에 따라 Zr/Nb와 La/Nb 비는 커지게 된다. 따라서 이러한 원소들 사이의 비율은 화산암류의 맨틀 근원암의 특징 뿐만 아니라 근원지에서의 부분용융의 정도를 동시에 반영하게 된다(예, le Roex,

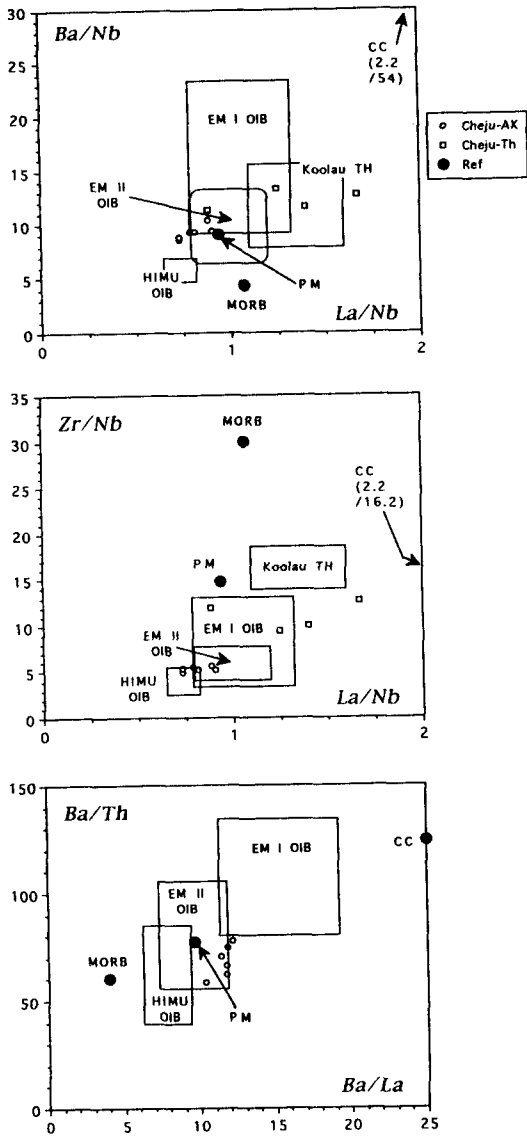


Fig. 11. Incompatible trace element ratio plots. (A) Ba/Nb-La/Nb, (B) Zr/Nb-La/Nb and (C) Ba/Th-Ba/La. Symbols are the same as in Fig. 4. The fields of EM I OIB, EM II OIB and HIMU OIB from Weaver (1991). Koolau tholeiite data are from Roden et al. (1994). Reference values of PM (primitive mantle), MORB and CC (continental crust) are from Saunders et al. (1988) and Weaver (1991).

1987; Roden *et al.*, 1994). 따라서 알칼리암류와 솔리아이트 간의 불호정 미량원소비의 차이는 박준범과 권성택 (1994)이 이미 보인 바와 같이 제주도의 솔리아이트가 알칼리암류에 비해 부분용융정도가 높

았음을 반영하는 것일 수도 있다.

지구조적 특성: DMM-EM II의 근원

이 연구에서 제시된 제주도 화산암류의 DMM-EM II 섭입 관계는 제주도 주변의 울릉도, 독도 및 북동 중국내 신생대 화산암류의 DMM-EM I 섭입 (Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto and Nakamura, 1991) 과는 차이를 보이지만, 남동 중국내 안후이, 지양수 및 제지양과 하이난섬 및 남중국분지내 화산암류 (Peng *et al.*, 1986; Flower *et al.*, 1992; Tu *et al.*, 1992)와 유사하다. 따라서 신생대 화산암류를 형성시킬 당시의 동북 아시아 일대 유라시아 대륙판 밑 상부 맨틀의 결핍된 특징과는 달리, 플룸 물질에 해당하는 부화된 맨틀 성분은 지역적에 따라 EM I과 EM II로 달랐음을 지시한다. 하지만 제주도 및 중국 내륙의 알칼리 화산암류의 지화학적 특징은 백악기말 이후부터 섭입하고 있는 태평양 판의 직접적 영향을 받지 않았음이 확인된다 (Nakamura *et al.*, 1985). 따라서 이 지역의 열점 근원을 형성한 맨틀 물질의 부화는 훨씬 더 과거의 지질과정을 통해 만들어진 것임을 지시한다. 그러나 이와 같이 과거에 만들어졌던 무화된 맨틀 물질들이 열점활동을 통하여 재순환하게 된 것은 이 북동 아시아의 화산활동을 야기시킨 광역적인 지구조 활동과 연관이 되어있을 것이다.

신생대 동안 제주도를 포함한 주변의 중국 일대의 화산활동은 태평양 판의 섭입 방향의 변화와 인도판과 유라시아판의 충돌로 인해 야기된 장력 환경에서 일어난 것으로 설명된다 (예, Xingyuan and Daning, 1987). 이러한 환경에서 환경변화와 시간을 맞추어 광범위하게 열점활동을 일으킬 수 있는 근원물질은 우선 대륙암권 맨틀의 재순환을 들 수 있다. 장력 환경에서 대륙암권의 신장이나 조개집이 일어나게 되면 지표에서만 변화가 일어나는 것이 아니고 대륙암권의 하부까지 함께 영향을 받을 수 밖에 없다. 지표에서 관찰할 수 없기 때문에 이러한 대륙암권 하부의 영향을 잘 알 수 없는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 연구에 따르면 이러한 암권의 신장시 암권하부를 이루고 있던 맨틀 부분의 상당량의 대류하는 맨틀부분으로 떨어져 나가는 것으로 밝혀졌다(Dunbar and Sawyer, 1989). 이렇게 떨어져 나간 대륙암권 하부

의 맨틀은 대륙암권을 형성하고 있을 때는 낮은 지온 구배율에 의하여 고상성보다 낮은 온도에 놓여 있었으나 대류하는 맨틀내부의 새로운 환경에서 주변의 높은 온도로 인해 고상선의 온도를 넘을 가능성도 있고 따라서 적합한 환경에서는 열점활동을 야기할 가능성도 있다(Park, 1990). 다른 가능성은 이미 맨틀 내로 재순환된 부화된 맨틀 물질들이 동북아시아의 지구조적 환경변화에 따라 열점활동을 개시하게 된 결과로 생각해 볼 수 있다. 맨틀 상층부 및 표면에서 일어나는 지구조 활동이 어떻게 이러한 변화를 야기시킬 수 있는지 명확하지는 않지만 만약 맨틀 내의 어디엔가 저장되어 있던 부화된 물질들이 중력적으로 안정되지 못한 상황이 야기되고 이에 따라 플룸으로 상승하여 열점활동을 야기할 수도 있다. 동북아시아의 광역적인 지구조 활동의 변화가 이러한 상황을 촉발시킬 수 있다면 이러한 맨틀 내부에 있던 부화된 물질에 의한 광역적 열점 활동도 고려해 볼 수 있다.

그러나 문제는 동북아시아 지역의 신생대 화산암들의 동위원소적 특성이 통일되지 않았다는 것이다. 제주도과 남동 중국 일대의 화산암류는 EM II의 특징을 지니고 있고, 울릉도, 독도 및 북동 중국의 화산암류들은 EM I의 특성을 보인다. 따라서 기원물질을 논의할 때는 거의 동시에 활동을 시작한 이 화산암류들의 근원 물질이 서로 다른 단성분을 대표하는 것을 고려해야만 한다. 근원물질의 기원으로는 섭입작용과 관련되어 생성된 부화된 물질들을 EM I의 근원물질로 보며(예; Dudas *et al.*, 1987; Hart, 1988), EM II의 근원물질은 떨어져 나온 대륙암권의 맨틀부분으로 추정하는(예; Allegre and Turcotte, 1985; Cohen and O'Nions, 1982) 의견들이 있다.

우선 대륙암권을 구성하는 맨틀물질들이 동북아시아의 열점 화산활동을 야기한 근원물질로서의 타당성에 대해 검토해보면 다음과 같다. 알칼리 화산암에 포획되어 올라온 초염기성 포획암들은 화산활동이 일어나는 지역의 하부에 존재하는 대륙암권의 맨틀 부분에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다. 북동 중국의 신생대 화산암류에 포획된 초염기성 암석의 동위원소 조성은 이 지역 밑의 대륙암권의 맨틀이 EM I의 특징을 가지고 있었음을 나타낸다 (Song and Frey, 1990; Tatsumoto *et al.*, 1992). 한편 Tatsumoto *et al.* (1992)은 중국 동부의 화산암에 나타나는 초염기

성 포획암의 연구를 통해 EM I 뿐만 아니라 EM II의 특징 역시 대륙성 암석권내 나타난다고 보고하였다. 이들은 EM I과 EM II가 층상화된 상태로 존재하며, EM I가 EM II 보다는 하부 암석권의 특징을 나타낸다고 제시하였다. 이와 같이 대륙암권이 EM I의 특징도 함께 나타내는 것은 과거에 이러한 암권 부분이 섭입작용시의 마그마나 섭입작용시 발생한 유체에 의한 변성교대작용(metasomatism)을 받았기 때문으로 설명할 수도 있다. 따라서 제주도를 포함한 동북아시아에서의 신생대 화산암류에서 나타나는 EM I과 EM II의 특징은 대륙암권을 이루던 맨틀물질을 근원 물질로 하는 모델에 잘 부합한다. 즉 과거에 대륙암권을 이루고 있던 맨틀의 일부가 신생대 이래의 광역적인 지구조적 환경이 팽창환경으로 바뀌면서 그 결과로 떨어져 나갔으며, 이러한 물질들이 이 지역의 열점을 생성시켰다는 설명이 가능하다. 한편 섭입되거나 다른 이유로 맨틀 내에 저장되어 있던 물질이 광역적인 지구조 환경변화와 함께 중력적인 안정성에 변화가 야기되어 열점활동을 야기시켰다는 모델도 가정해 볼 수는 있다. 그러나 이러한 안정성의 변화가 지구조 활동의 결과로 일어날 수 있는지에 대한 검증이 이루어지지 않은 상태이며, 이러한 물질의 분포와 지구조환경 변화가 일어난 지역이 우연히 일치해야 하는 등의 문제점이 지적된다. 따라서 이 연구에서는 이보다는 대륙암권을 이루던 맨틀의 재순환을 보다 신빙성있는 모델로 제시한다.

최근 동북아시아의 지구조적 특징에 대한 커다란 논쟁거리 중의 하나가 북중국 지괴와 남중국 지괴의 충돌대가 한반도의 어느 곳을 지나가는 가 하는 것이다 (예, Yin and Nie, 1993; Fig. 1). 비록 Yin and Nie (1993)의 구분에서 제주도의 지구조적인 위치는 모호하지만, 제주도 화산암류의 동위원소적인 특징이 남중국 지괴내 화산암류와 유사함은 제주도 밑의 대륙암권이 남중국 지괴에 속할 가능성을 시사한다. 이는 북중국 지괴에 속하는 백령도, 전곡 및 고성 지역 화산암류의 동위원소적 특징(준비중)이 북동 중국 화산암류의 그것과 유사한 것으로도 설명된다. 따라서 우리는 제주도를 포함한 주변 동북 아시아일대 신생대 화산암류의 동위원소적 특징에서 나타나는 DMM-EM I과 DMM-EM II 맨틀 물질의 섞임 관계는 소속된 대륙암권의 사이의 성분차이를 반영할 가

능성을 제시한다. 즉, 각 화산 지역이 속한 지괴의 맨틀부분은 서로 다른 지질사를 갖고 있으며, 이것의 일부가 재순환되어 만들어진 열점활동의 결과로 나타난 화산암류들은 이를 그대로 반영한다고 생각한다.

결 론

제주도의 알칼리암류 및 솔리아이트에 대한 Sr, Nd 그리고 Pb 동위원소적 특징은 다음과 같다. 알칼리암류의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 는 0.7040~0.7043, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 는 0.512776~0.512791이며 암석성분의 변화에 무관하여, 동원 마그마에서 유래하였음이 재확인되었으며, 분출, 정지되는 과정동안 주변암의 영향을 받지 않았음을 지시한다. 한편, 솔리아이트는 화산층서적인 면에서 전, 후기 분출암으로 구분되는데, 각각 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 는 0.7052~0.7053, 0.7042~0.7045, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 는 0.512684~0.512698, 0.512729~0.512780이다. 분출시기에 따라 후기의 것은 이 연구에서 보고된 알칼리암류와 유사하지만, 전기의 것은 이에 비해 조금 더 부화된 특징을 갖는다. 한편, 전기에 해당하는 솔리아이트의 동위원소비는 Lee (1982)의 용암대지 형성기에 분출된 알칼리암류 (산방산 조면암류)와 유사한 동위원소비를 가져, 이들과 성인적으로 관련이 있음을 시사한다. 알칼리암류의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 18.9~19.1, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 15.5~15.7, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 39.4~39.7이며, 솔리아이트의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 18.6~19.1, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 15.6~15.7, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 39.0~39.7로서, Pb 동위원소비는 비교적 좁은 변화를 보이며, 암류간에 서로 중첩된다.

제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소적 특징은 사모아 군도의 경우와 유사하며, 한반도 주변의 화산 지역 중에서는 남중국 분지내에 분포하는 화산암류의 특징과 유사하다. 제주도 화산암류의 동위원소적 특징은 DMM-EM II 맨틀 물질간의 섞임 모델로서 잘 설명되며 솔리아이트가 알칼리암류보다는 결핍된 맨틀의 영향을 덜 받은 것으로 나타난다.

제주도를 포함한 동북아시아의 신생대 화산암류들은 신생대 이래 이지역에 널리 작용되고있는 광역적인 지구조적 팽창환경과 관련되어 생성된 것으로 판단된다. 이러한 환경 속에서 대륙암권을 구성하고 있던 맨틀의 일부가 환경변화와 더불어 떨어져 나가 열

점활동을 야기한 부화된 맨틀의 근원 물질로 작용했다는 모델을 제시한다. 최근 그 논의가 활발히 진행되고 있는 북중국 지괴 (block)와 남중국 지괴의 충돌이론(예, Yin and Nie, 1993)과 결부시켜 볼 때 지역적으로 신생대 화산암의 동위원소 특성이 그룹지어지는 현상은 상당한 의미가 있을 것으로 생각된다. Yin and Nie(1993)의 모델에서 볼 때 북중국 지괴로 표시한 부분에 위치한 백령도, 전곡, 고성 (박준범 외, 준비중), 울릉도, 독도 및 북동 중국 화산암류의 특징이 DMM-EM I 섞임으로 나타나며, 이 연구에서 보인 바와 같이 제주도는 남중국 지괴내의 화산암류와 함께 DMM-EM II 특징을 갖는다. 이러한 차이는 부화된 맨틀 플룸 물질의 근원이 되는 대륙암권의 이질성을 나타낸다고 생각한다.

감 사

원고에 대해 건설적인 도움말씀을 주신 권성택 교수께 감사드린다. 이 연구는 박준범의 한국과학재단 박사후 연수과제 (2311-556)와 박계현에 대한 과학기술처의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드린다.

참고문헌

고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포와 지하수와의 관계. 요약, 지질학회지, 27, 552.
 박계현, 최만식, 이석훈, 정창식, 이광식, 한정희, 1992, 도입 첨단기기의 성능평가 및 활용도 제고에 대한 기초 연구-지구과학 관련 연구 기기에 관하여 (II). 기초과학지원센터, 미발간 연구보고서.
 박계현, 박병권, 김윤중, 이인성, 최만식, 박은주, 이광식, 정창식, 한정희, 이석훈, 신형선, 박찬수, 김용준, 1995, 지질 및 해양 시료의 미량조성 및 구조분석법 연구 (I). 기초과학지원연구소, 미발간 연구보고서. UCPN00010-025-4, 467p.
 박준범, 권성택, 1991, 제주도 화산암의 암석화학적 진화 (2): 제주 동부 일라봉부근 시추코아 연구. 요약, 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.
- 박준범, 권성택, 1994, 제주도 화산암류의 암석학 및 지구화학: 요약. 암석학회지, 3, 180.
- 박준범, 권성택, 1995, 제주 북부 화산암류의 분화: 질량득실평가. 지질학회지, 31, 151-161.
- 원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12, 207-226.
- 원종관, 이문원, 이동영, 손영관, 1993, 성산도폭 지질설명서. 건설부, 104p.
- 윤상규, 김원영, 1984, 제주지역 지열조사연구. 한국동력자원연구소, 83-5-08, 109-134.
- 윤선, 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, 1992, 제주도 동부지역의 지질구조. 요약, 지질학회지, 28, 531-532.
- 이동영, 윤상규, 김주용, 김윤중, 1987, 제주도 제4기 지질조사연구. 한국동력자원연구소, 233-278.
- 최순학, 김영기, 이동영, 1991, 제주도 임해지역에서의 해수침입. 광산지질, 24, 319-327.
- Allegre, C.J., Dupre, B., Lambret, B. and Richard, P., 1981, The continental versus suboceanic debate, I. Lead-neodymium-strontium isotopes in primary alkali basalts from a shield area: the Ahagar volcanic suite. Earth Planet. Sci. Lett., 52, 85-92.
- Allegre, C.J. and Turcotte, D.L., 1985, Geodynamic mixing in mesosphere boundary layer and the origin of oceanic islands. Geophys. Res. Lett., 12, 207-210.
- Basu, A.R., Wang, J., Huang, W., Xie, G. and Tatsumoto, M., 1991, Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. Earth Planet. Sci. Lett., 105, 149-169.
- Cliff, R.A., Baker, P.E. and Mateer, N.J., 1991, Geochemistry of Inaccessible Island volcanics. Chem. Geol., 92, 251-260.
- Cohen, R.S. and O'Nions, R.K., 1982, The lead, neodymium and strontium isotopic structure of oceanic ridge basalts. J. Petrol., 23, 299-324.
- Dosso, L. and Murthy, V.R., 1980, A Nd isotopic study of the Kerguelen islands: influences on enriched oceanic mantle source. Earth Planet. Sci. Lett., 48, 268-276.
- Dudas, F.O., Carlson, R.W. and Eggler, D.H., 1987, Regional Middle Proterozoic enrichment of the subcontinental mantle source of igneous rocks from central Montana. Geology, 15, 22-25.
- Dunbar, J. A. and Sawyer, D. S., 1989, How preexisting weakness control the style of continental breakup. J. Geophys. Res., 94, 7278-7292.
- Flower, M.F.J., Zhang, M., Chen, C.-Y. Tu, K. and Xie, G., 1992, Magmatism in South China Basin 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China. Chem. Geol., 97, 65-87.
- Hart, S.R., 1984, A large scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. Nature, 309, 753-757.
- Hart, S.R., 1988, Heterogeneous mantle domains: signature, genesis and mixing chronologies. Earth Planet. Sci. Lett., 90, 273-296.
- Hawkesworth, C.J., Kempton, P., Rogers, N.W., and Menzies, M.A., 1987, Isotope variations in recent volcanics: a trace-element perspective. In Menzies, M.A. and Hawkesworth, C.J. (eds.) Mantle metasomatism, Academic press, 365-388.
- Hawkesworth, C.J., Rogers, N.W., Ellam, R.M. and van Calsteren, P.W., 1990, Continental mantle lithosphere, and shallow level enrichment process in the Earth's mantle. Earth Planet. Sci. Lett., 96, 256-268.
- Hofmann, A.W. and White, W.M., 1982, Mantle plumes from ancient oceanic crust. Earth Planet. Sci. Lett., 57, 421-436.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basalt magma across continental margins and island arcs. Bull. Volcanol., 29, 195-222.
- 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.
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y. and Park, G.H., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju Island, Korea. J. Geol. Soc. Korea., 30, 521-541.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Durek, A., Keller, J., Lameye, Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Wooley, A.R. and Zanettin, B., 1989, A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.
- Le Roex, A.P., 1987, Source regions of Mid-ocean ridge basalts: evidence for enrichment processes. In Menzies, M.A. and Hawkesworth, C.J. (eds.) Mantle metasomatism, Academic press, 389-422.
- Liu, C.-Q., Masuda, A. and Xie, G.-H., 1994, Major and trace-element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: Petrogenesis and mantle source. Chem. Geol., 114, 19-42.
- McDonough, W.F., Stosch, H.-G. and Ware, N., 1992, Distribution of titanium and the rare earth elements between peridotitic minerals. Contrib. Mineral. Petrol., 110, 321-328.
- McKenzie, D. and O'Nions, R.K., 1983, Mantle

- reservoirs and oceanic island basalts. *Nature*, 301, 229-231.
- 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.*, 106-111.
- 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.
- Nakamura, E., Campbell, I.H., and Sun, S.-S., 1985, The influence of subduction processes in the geochemistry of Japanese alkaline basalts. *Nature*, 316, 55-58.
- Nakamura, E., McCulloch, M.T. and Campbell I.H., 1990, Chemical geodynamics in a back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Nd isotopic compositions. *Tectonophysics*, 174, 207-233.
- Nohda, S., Tatsumi, Y., Otofujii, Y., Matsuo, T. and Ishizaka, K., 1988, Asthenospheric injection and back-arc opening: isotopic evidence from the northeast Japan. *Chem. Geol.*, 68, 317-327.
- Palacz, Z.A. and Saunders, A.D., 1986, Coupled trace element and isotope enrichment in the Cook-Austral-Samoa islands, southwest Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79, 270-280.
- Park, K.-H., 1990, Sr, Nd and Pb isotope studies of Ocean Island basalts: constraints on their origin and evolution. Columbia Univ. Ph.D. dissertation thesis, 252p.
- Pearce, J.A., 1982, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In Thorpe, R.S. (ed.), *Andesites*, Wiley, Chichester, 525-548.
- Pearce, J.A., 1983, Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. (eds.) *Continental basalts and mantle xenoliths*, Shiva, Nantwich, 230-249.
- Peng, Z.C., Zartman, R.E., Futa, K. and Chen, D.G., 1986, Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chem. Geol.*, 59, 3-33.
- Richardson, S.H., Erlank, A.J., Duncan, A.R. and Reid, D.L., 1982, Correlated Nd, Sr and Pb isotope variation in Walvis Ridge basalts and implications for the evolution of their mantle source. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59, 327-342.
- Roden, M.F., Trull, T., Hart, S.R. and Frey, F.A., 1994, New He, Nd, Pb, and Sr isotopic constraints on the constitution of the Hawaiian plume: results from Koolau Volcano, Oahu, Hawaii, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 1431-1440.
- Saunders, A.D., Norry, M.J. and Tarney, J., 1988, Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints. *J. Petrol. Special Lithosphere Issue*, 415-445.
- Schilling, J.G., 1973, Iceland mantle plume: geochemical study of Reykjanes Ridge. *Nature*, 242, 565-571.
- Song, Y. and Frey, F.A., 1989, Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, Eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 97-113.
- Song, Y., Frey, F.A. and Zhi, X., 1990, Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chem. Geol.*, 85, 35-52.
- Stille, P., Unruh, D.M., and Tatsumoto, M., 1983, Pb, Sr, Nd and Hf isotopic evidence of multiple sources for Oahu, Hawaii basalts. *Nature*, 304, 25-29.
- Stille, P., Unruh, D.M., and Tatsumoto, M., 1986, Pb, Sr, Nd and Hf isotopic constraints on the origin of Hawaiian basalts and evidence for a unique mantle source. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50, 2303-2319.
- Storey, M., Saunders, A.D., Tarney, J., Leat, P., Thirlwall, M.F., Thompson, R.N., Menzies, M.A. and Marriner, G.F., 1988, geochemical evidence for plume-mantle interactions beneath Kerguelen and Heard Islands, Indian Ocean. *Nature*, 336, 371-374.
- Sun, S.S., 1980, Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 297, 409-445.
- Tatsumoto, M., Basu, A.R., Wankang, H., Junwen, W. and Guanghong, X., 1992, Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113, 107-128.
- Tatsumoto, M. and Nakamura, Y., 1991, Dupal anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotope variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 3697-3708.

- Tu, K., Flower, M.F.J., Carlson, R.W., Xie, G., Chen, C.-Y. and Zhang, M., 1992, Magmatism in South China Basin 1. Isotopic and trace-element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chem. Geol.*, 97, 47-63.
- Weaver, B.L., 1991, The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104, 3810-397.
- 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, J.G. and Upton, B.G.J. (eds.) *Alkaline igneous rocks*, *Geol. Soc. Sp. Pub.*, 30, 253-267.
- West, H.B. and Leeman, W.P., 1987, Isotopic evolution of lavas from Haleakala Crater, Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 84, 211-225.
- White, W.M. and Hofmann, A.W., 1982, Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296, 821-825.
- Wilson, M., 1989, *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, 466p.
- Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K. H. and Lee, M. W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geology*, 19, 25-33.
- Wright, T.L., 1984, Origin of Hawaiian tholeiites: a metasomatic model. *J. Geophys. Res.*, 89, 3233-3252.
- Wright, E. and White, W.M., 1987, The origin of Samoa: new evidence from Sr, Nd and Pb isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 87, 151-162.
- Xiangyuan, M. and Daning, W., 1987, Cenozoic extensional tectonics in China. *Tectonophysics*, 133, 243-255.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- Zhi, X., Song, Y., Frey, F.A., Feng, J. and Zhai, M., Geochemistry of Hannuba basalts, eastern China: constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt. *Chem. Geol.*, 88, 1-33.
- Zhou, X. and Armstrong, R.L., 1982, Cenozoic volcanic rocks of eastern China: secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 58, 301-329.
- Zindler, A. and Hart, S.R., 1986, Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 493-571

(책임편집 : 권성택)

Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Lavas from Cheju Island, Korea

Jun-Beom Park, Kye-Hun Park and Chang-Sik Cheong

*Isotope Research Group, Korea Basic Science Institute
Eoendong 52, Yuseong Gu, Taejeon, 305-333, Korea*

ABSTRACT : Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of alkaline lavas and tholeiites in Cheju Island show that the isotopic compositions of the former slightly overlap, but have relatively more depleted than the latter. However, in viewpoint of the two eruptional stratigraphies of tholeiites, the isotopic composition of the older one is similar to those of alkaline rocks in Lava Plateau Stage after Lee (1982), while those of the younger is overlapped with those of alkaline rocks in this study (Shield Stage). These suggest that the parental magmas of alkaline lavas and tholeiites might have originated from the homogenous mantle source and that the characteristics of the mantle source to be partially melted might be different between the eruption stages. The isotopic signatures of the volcanic rocks in Cheju Island overlap with those in Samoa Islands and South China Basin, indicating the DMM-EM II mixing trend. This is distinguished from the DMM-EM I trend of the Cenozoic volcanic rocks in Korea except for Cheju Island and Northeastern China. The modelled binary mixing calculation between DMM and EM II materials indicates that the mantle source of the volcanic rocks in Cheju Island had been mixed about less than 10% of enriched mantle material (EM II) with depleted mantle material (DMM). Concerned with the indentation model between North China Block (NCB) and South China Block (SCB) after Yin and Nie (1993), we suggest that the distinct isotopic features of DMM-EM I and DMM-EM II of the Cenozoic volcanic rock in Korea as well as China can be explained by the difference of the nature of subcontinental lithospheric mantle as enriched mantle materials, i.e. EM I of NCB, while EM II of SCB.

Key words : Cheju Island, alkaline lavas, tholeiite, depleted and enriched mantle, subcontinental lithosphere, block