

Article

독도 화산암류의 암석학적 특성과 지구화학

이종익*¹ · 허순도¹ · 이미정¹ · 유찬민² · 박병권³ · 김예동¹ · 권문상⁴ · Keisuke Nagao⁵¹한국해양연구원 극지연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29²한국해양연구원 해양자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29³공공기술연구원
(137-072) 서울시 서초구 서초2동 1376-1⁴한국해양연구원 연구정책실
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29⁵일본 동경대학 지각화학연구소

Petrology and Geochemistry of Dokdo Volcanic Rocks, East Sea

Jong Ik Lee*¹, Soon Do Hur¹, Mi Jung Lee¹, Chan Min Yoo², Byong-Kwon Park³,
Yeadong Kim¹, Moon Sang Kwon⁴, and Keisuke Nagao⁵¹*Polar Sciences Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*²*Marine Resources Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*³*Korea Research Council of Public Science and Technology
1376-1 Seocho 2-dong, Seocho-gu, Seoul 137-072, Korea*⁴*Policy Research and Development, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*⁵*Laboratory for Earthquake Chemistry, University of Tokyo
Hongo, Bunkyo-gu, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract : Petrological, geochemical, and geochronological studies of Dokdo volcanic rocks, East Sea, have been carried out to understand their petrogenesis. Dokdo volcanic activity is divided into three stages according to occurrences and eruption ages of rocks. The second-stage activity is accompanied by large volume of pyroclastics and lavas of intermediate composition, and occupies most of the East and West islets. K-Ar biotite and whole-rock ages indicate that Dokdo volcanic activity occurred during late Pliocene and became systematically younger toward later stages: namely, 2.7-2.4 Ma for the first-stage trachyte, 2.4-2.3 Ma for the second-stage trachyandesite and 2.2-2.1 Ma for the last-stage trachyte and dikes. Dokdo volcanic rocks are of intermediate to felsic compositions, and have OIB-like alkaline nature. The geochemical similarities between Dokdo and Ulleungdo volcanic rocks suggest that they were formed from the same mantle plume. However, considering the difference of eruption ages between Dokdo (2.7-2.1 Ma) and Ulleungdo (1.4-0.01 Ma) volcanic rocks, the former seems to have been formed by earlier hot spot activity.

Key words : 독도(Dokdo), 해양도 현무암(ocean island basalt), 열점활동(hot spot activity).

*Corresponding author. E-mail : jilee@kordi.re.kr

1. 서론

독도는 후기 플라이오세 동안에 수중 또는 대기중으로

분출한 화산활동에 의해 형성된 섬으로 섬 전체가 화산암과 화산쇄설성 퇴적암류로 구성되어 있다(Fig. 1).

독도는 비록 규모는 작지만 울릉도와 더불어 동해상에

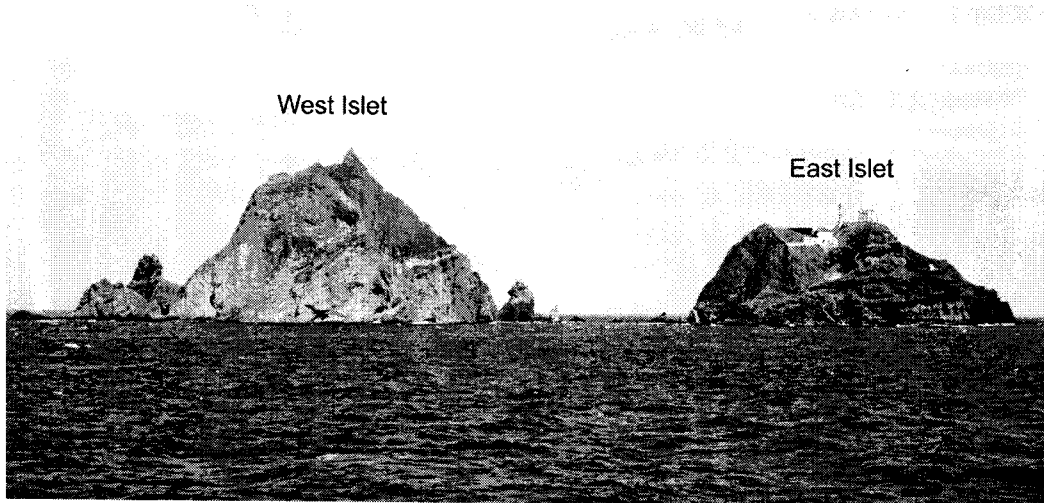


Fig. 1. Panoramic view of Dokdo (taken from the south), consisting of East and West islets with numerous small reefs.

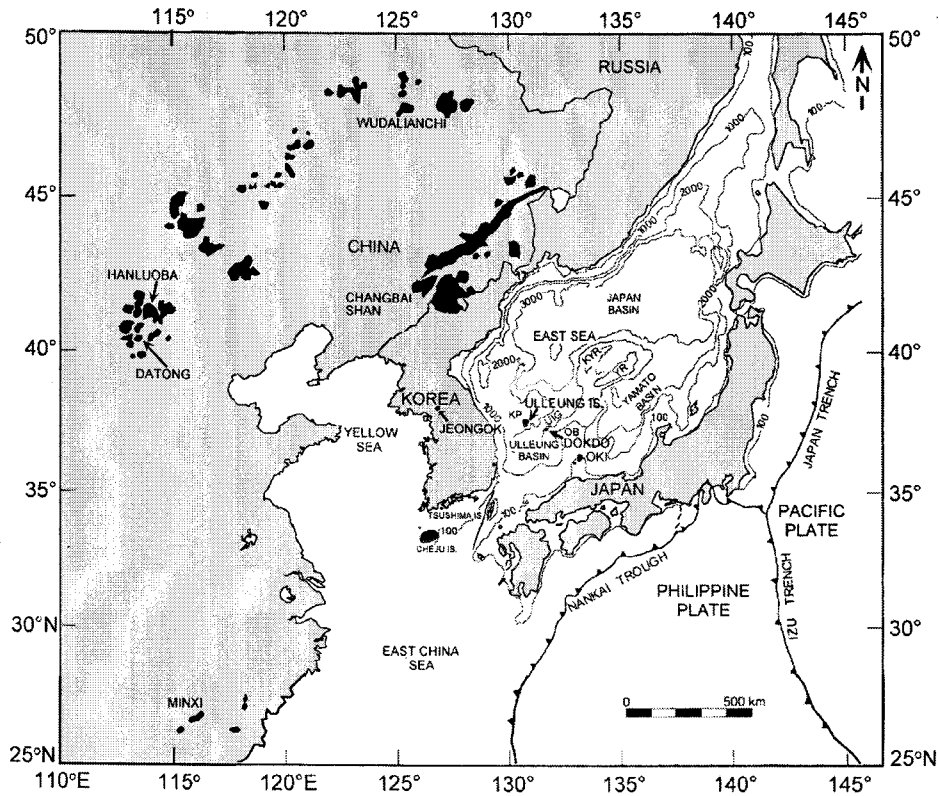


Fig. 2. Physiographic and tectonic map of the East Sea and the distribution of Late Cenozoic alkaline volcanic rocks. KP = Korea Plateau; OB = Oki Bank; YR = Yamato Ridge; KYR = Kita-Yamato Ridge; UIG = Ulleung Interplain Gap.

서 형성된 매우 드문 화산섬으로 동해의 형성 및 발달과 관련한 지체구조 환경 특성을 연구하는데 있어 매우 중요한 위치를 점한다. 독도와 울릉도가 속해 있는 동해뿐 아니라 우리나라 제주도, 전국, 백두산일대 그리고 중국 북동부 등 유라시아 대륙판 동편에는 신생대 후기 알칼리 화산암류가 광범위하게 분포하고 있다(Fig. 2). 이 화산암류는 판내부 해양도 화산암류의 지구화학적 특성을 보이기 때문에, 태평양판동의 해양판의 섭입과는 무관하게 깊은 맨틀로부터의 상승류에 의해 형성된 것으로 보인다(e.g., Miyashiro, 1986; Nakamura *et al.*, 1990). 울릉도와 독도의 남서부에 광범위하게 발달하며 신장된 대륙지각의 일부로 생각되어 온 울릉분지는 최근의 지진과 탐사 연구에 의해 지각 두께는 다소 두껍지만 전형적인 해양지각의 특성을 보이는 것으로 밝혀졌다(Kim *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1999). 따라서 독도 및 울릉도 화산암류들은 그 자체의 성인뿐 아니라 울릉분지의 형성 및 동해의 확장모드등과 관련된 지체구조 환경 특성을 규명하는데 있어 중요한 지구화학적 증거를 제공할 것으로 기대된다.

울릉도는 그 규모가 크고 교통편의 용이함으로 인해 현재까지 비교적 많은 암석학적 및 지구화학적 연구가 진행되어 왔다(원종관 · 이문원, 1984; 송용선 외, 1999; Kim, 1985a, 1985b, 1986; Nakamura *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 1999). 그러나 독도는 그 자체가 천연기념물로 보호되고 있는 등 접근의 어려움으로 인해 그동안 지질학 분야의 연구가 매우 미흡했다. 독도 화산암류에 대해서는 김윤규 외(1987)에 의해 지구화학적 특성이 최초로 보고된 이후 현재까지 극히 일부의 동위원소 조성만이 보고되었다(Tatsunoto and Nakamura, 1991; 김규한 외, 2000). Sohn and Park(1994) 및 Sohn(1995)는 독도에 대한 자세한 지질조사를 실시하여 독도 화산체의 형성 기작을 설명하고, 암석 연대측정을 통해 독도 화산암류가 약 270-250만년 전에 형성되었다고 하였다. 그러나 동해에서 독도 화산암체가 갖는 지체구조적 의미에 대해서는 아직도 제대로 밝혀진 바 없고, 화산체를 형성한 마그마의 특성 또한 규명된 바 없다.

본 연구에서는 독도 화산암류의 형성시기, 산출상태 및 마그마 조성 특성을 규명하고자 독도 화산체에 대한 체계적인 야외조사와 시료채취를 실시하였고, K-Ar 연대측정과 전암화학분석을 수행하였다. 독도 화산체의 각 단계별 분출물에서 보여지는 화학조성 차이를 시간 경과에 따른 마그마 진화 과정에서 그 원인을 설명하고자 하였으며 독도 화산체를 형성하고 관련된 지체구조 환경 특성에 대해 토의하였다.

2. 독도 주변 광역 지질

한반도와 일본열도에 둘러 싸여 있는 동해는 북서태평

양 연변부에 분포하는 대표적인 배호상분지 중 하나로서, 마이오세 초기부터 형성되기 시작한 것으로 보인다. 동해는 크게 3개의 분지(일본분지, 야마또분지, 울릉분지)와 각 분지들을 구분하는 3개의 고지구대(한국대지, 야마또뱅크, 오키뱅크)로 구성되어 있다(Fig. 2). Tamaki *et al.* (1992)은 지각구조 특성에 따라 동해의 3개의 분지 중 일본분지를 해양지각으로, 야마또분지와 울릉분지를 신장된 대륙지각으로, 그리고 3개의 고지구대는 전형적인 대륙지각으로 구분하였다.

동해의 북부 대부분을 차지하는 일본분지는 확인된 자력이상과 지각구조 특성에 의해 해저면 확장에 의해 형성된 것으로 알려져 있다(Ludwig *et al.*, 1975). 울릉분지는 최근의 탄성파 탐사 연구에 의하면 약 10 km 정도의 두께로 비교적 두껍지만 깊이 증가에 따라 연속적으로 증가하는 속도 분포를 갖는 해양지각으로 해석되며, 맨틀 플룸의 영향으로 정상맨틀보다는 고온인 상부 맨틀의 해저확장에 의해 형성된 것으로 보인다(Kim *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1999). 야마또분지는 배호 확장축으로 생각되는 해령(Yamato Basin Ridge; YBR) 구조를 갖고 있으며, 이 해령을 따라 두 줄의 해저 화산군이 선상 배열하고 있다(Kimura *et al.*, 1987). 따라서 야마또분지 또한 신장된 대륙지각이라기보다 해양지각일 가능성이 높다. 이 해저 화산군에서 채취된 화산암류는 17-7.3 Ma의 연령을 보인다(Kimura *et al.*, 1987; Kaneoka *et al.*, 1990). 화산암류는 대부분 알칼리계열의 조면안산암으로 구성되고, 일부 쉘레아이트계열의 현무암을 동반한다.

동해의 3개의 고지구대는 전형적인 대륙지각으로 생각되는데, 울릉도와 독도의 북부에 광역적으로 발달하는 한국대지는 그 중앙부에 북북서-남남동 방향의 정단층을 경계로 서측의 수심이 깊은 저지대와 동측의 수심이 얕은 고지대로 구분된다(최동림, 1999). 1999년 4월 한국해양연구소에서 보유한 종합조사선 온누리호를 이용한 한국대지 탐사과정 중 북서부 사면에서 암석준설기에 의해 화강암을 주로 하는 기반암편들이 채취되었다(허식 외, 2000). 이 화강암편들은 구성광물의 산출상태, 연정 조직, 변형양상, 전암화학 조성 및 Sr-Nd 동위원소 조성 특징 등에서 우리나라 중생대 트라이아스기-쥬라기에 관입한 대보화강암류와 매우 유사하다(이종익 외, 2000). 이 화강암편들의 동위원소 조성은 독도 화산암류의 동위원소 조성에 대륙지각물질의 기여 여부를 판별할 수 있는 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

서남 일본에 연해있는 오키뱅크는 오키군도 기반암을 구성하는 원생대 초기의 편마암류의 존재에 의해서도 대륙지각으로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다(Yamashita and Yanagi, 1994). 오키군도는 3개의 오키도젠섬과 1개의 오키도고섬으로 구성되는데, 신생대 후기 마이오세부터 알

칼리계열의 화산활동으로 형성되었다. 오키도겐의 화산활동은 마이오세 후기(7.0-5.6 Ma)의 비교적 짧은 기간동안 일어났지만(Morris *et al.*, 1997), 오키도고의 화산활동은 마이오세부터 최근까지(19-0.6 Ma) 긴 기간동안 일어났다(Uto *et al.*, 1994). 그러나 동해확장과 동시기적으로 마이오세 초기(19-18 Ma)에 일어난 오키도고 현무암의 화학 조성은 Nb, Ta의 결핍과 Ba, K이 부화되는 등 섭입 환경 성분의 기여를 보여준다. Uto *et al.*(1994)는 이런 특성을 섭입대에서 방출된 유체의 혼염에 의해 부화된 대륙암권에서 현무암질 마그마 발생했기 때문으로 해석하였다. 오키도고 화산활동은 이후 긴 휴지기를 거치고 동해확장이 완료된 플라이오세~플레이스토세(5.5-0.6 Ma) 동안 재개되었는데, 이때의 화산암류는 섭입 환경 성분의 영향이 없는 연약권 또는 깊은 맨틀 플룸으로부터 유래된 것으로 생각된다(Uto *et al.*, 1994). 오키군도 화산암류는 알칼리계열의 바사나이트(basanite)부터 유문암까지 넓은 조성 범위를 갖는데, 마이오세 초기 화산암류를 제외하면 필리핀판의 섭입과는 관련없이 깊은 맨틀로부터 플룸의 상승에 의해 형성된 것으로 생각된다(Nakamura *et al.*, 1990).

독도와 비교적 인접한 울릉도는 동해의 수심 2000 m의 심해저로부터 총 높이가 3000 m에 달하는 화산섬으로 해저면 위에서는 성층화산체를 이루고 정상부에 직경 2 km 정도의 칼데라를 갖고 있다. 해수면 위의 울릉도 화산활동

은 신생대 플레이스토세에서 홀로세(1.4-0.01 Ma) 동안 5 단계에 걸쳐 일어났으며(Kim, 1985a; Kim *et al.*, 1999), 가장 최근의 활동은 9300-6300 BP에 있었던 것으로 보인다(Arai *et al.*, 1981; Machida and Arai, 1983). 화산암류는 조면현무암에서 조면암까지 넓은 조성을 보이지만 산성의 조면암류가 주를 이루고 있으며, 이들은 모두 알칼리계열의 화학조성을 보인다(Kim, 1985b, 1986; 송용선의, 1999, Kim *et al.*, 1999).

동해 주변 뿐 아니라 우리나라 제주도, 백두산 일대, 철원-한탄강 일대, 백령도 그리고 북동 중국등 유라시아 대륙판 동편에는 신생대 후기 화산암류가 광범위하게 분포한다(박준범·권성택, 1993; 박준범 외, 1996; Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992). 이 화산암류들은 알칼리계열의 현무암을 주로 하고 일부 쏘라이트계열 화산암을 동반하는데, Miyashiro(1986)은 이 지역을 'hot region'으로 설정하고 뜨거운 맨틀상승류에 의해 형성되었을 것으로 제안한 바 있다.

3. 독도의 지질

현재 해수면 위에 노출된 독도 화산체의 형성시기를 용암류의 분출시기와 산출상태에 따라 분류하면 초기, 중기, 말기로 구분할 수 있는데, 중기분출물이 많은 화산쇄설암

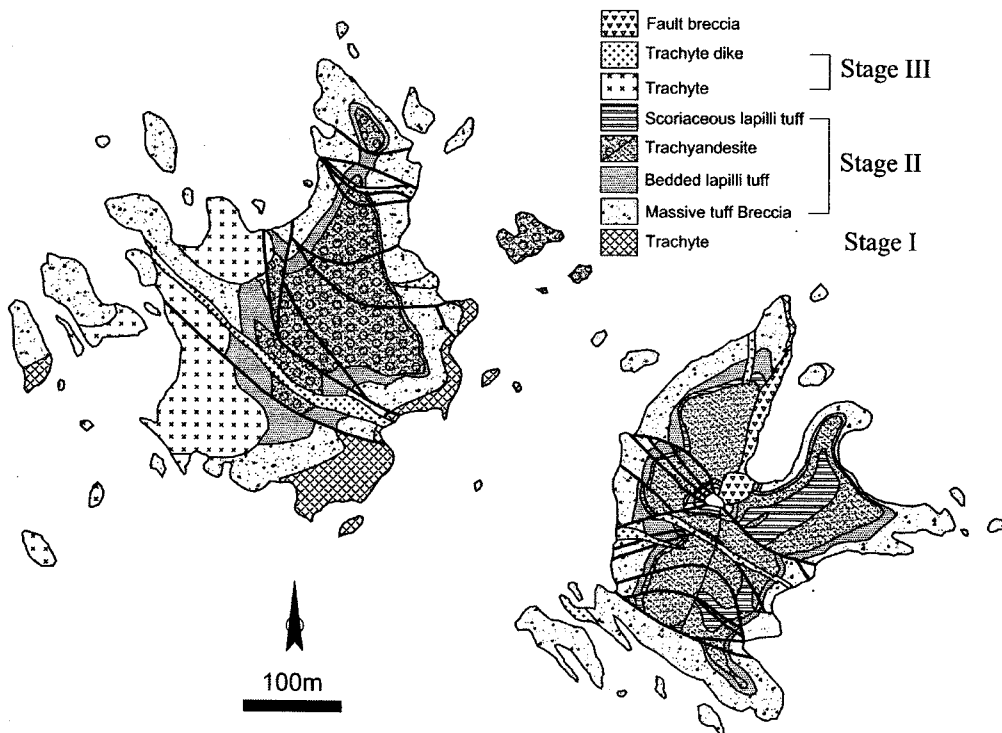


Fig. 3. Geological map of Dokdo (modified from Sohn (1995)).

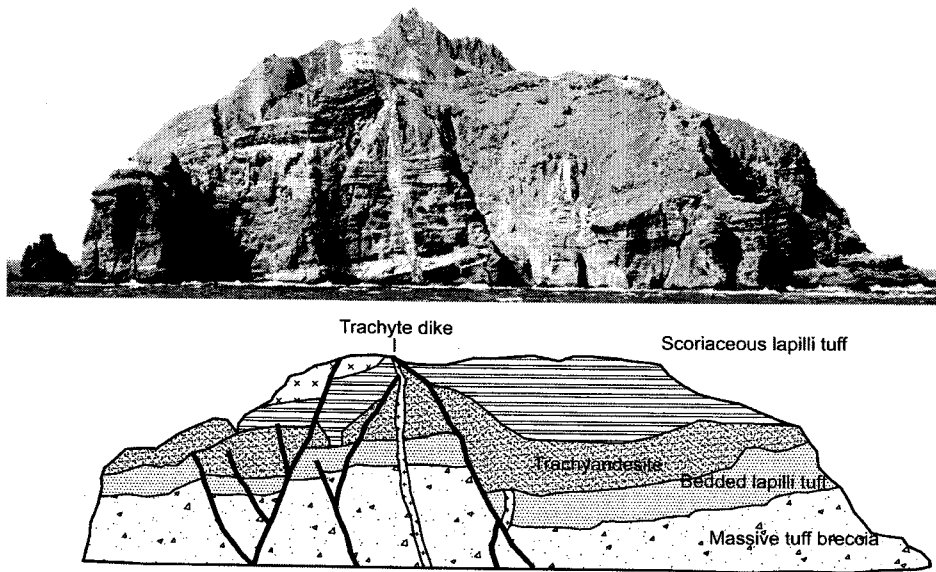


Fig. 4. Panoramic view of East islet (taken from the east) and its cross section.

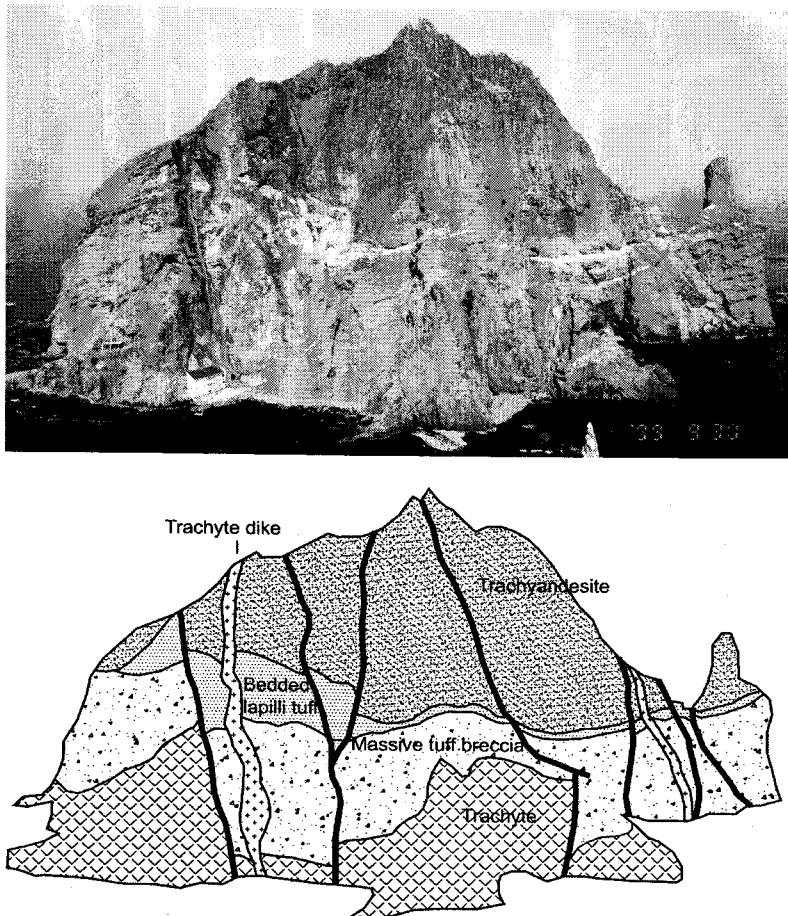


Fig. 5. Panoramic view of West islet (taken from the east) and its cross section.

을 동반하며 동, 서도의 대부분을 차지한다(Figs. 3-5). 초기에 분출한 조면암류는 동도의 북부 일부와 서도의 남동부 해안가 접하고 있으며, 주로 조면암질 용암류와 동질의 각력암으로 구성되어 있다. Sohn(1995)는 이들이 수중 분출에 의해 형성되었으며, 상부에 광범위하게 덮고 있는 응회각력암과는 부정합 관계로 해석하였다.

독도의 대부분을 차지하고 있는 중기분출물은 하부로부터 각력응회암, 층상라필리응회암, 조면안산암질 용암, 스킨아질 라필리응회암등으로 구성되어 있다. 피상 혹은 역점이 구조를 보이는 각력응회암은 대기중에서 입자류에 의해서나 수중에서 쇄설류에 의해 퇴적된 화산쇄설성 퇴적암류이다. 최대 40 내지 50 m의 두께를 갖는 이 암층은 담갈색 내지는 담회색의 조립질 모래 크기의 기질부와 자갈 이상의 다양한 암편들로 구성된다. 암편들은 유리질 내지는 반상 현무암이 우세하고, 회색의 조면암 및 스킨아암 등도 관찰된다.

층상라필리응회암은 화구에 인접한 지역에서 화쇄난류에 의해 퇴적된 점지구조와 층리를 동시에 보여준다. 독립된 바위 근처에서는 약한 층리를 보이는 각력응회암과 뚜렷한 경계를 갖으면서 잘 발달된 층리를 보이는 본 암층이 잘 관찰된다. 개개의 층의 두께는 수십 cm에서 1 m 정도로 다양하다.

동도와 서도의 상부 대부분을 점하는 조면안산암은 층상라필리응회암과 접하는 기저부의 수 m 정도는 흔히 각력화되어 있고, 그 상부에는 주상절리가 잘 발달한다. 이 용암류와 접하는 층상라필리응회암의 최상부에서 불꽃구조를 갖는 세립질 응회암이 발달하는데 이로부터 양자는 큰 시간 차이 없이 형성된 것으로 생각된다. 용암류는 담회색의 기저부와 사장석, 알칼리장석, 단사회석 및 흑운모의 반정으로 구성되어 있는데, 반정의 종류 및 함량은 지역적으로 매우 다양하게 분포한다. 용암류의 두께는 동서도 전역에 북서-남동 방향으로 발달한 정단층들의 상대적 낙차운동에 의해 매우 다양한데, 대체적으로 서도의 용암류의 두께가 두꺼운 편이다.

조면안산암 상부를 점하는 스킨아질 라필리 응회암은 동도에서만 산출되며, 최대 20 m의 두께를 갖는다. 이 응회암은 유리질 샤아드와 흑운모, 단사회석으로 구성된 기질부와 현무암 및 조면암편 그리고 다공질 스킨아암등으로 구성되어 있다.

후기분출물은 모두 관입상으로 서도 서부에 넓게 분포하는 조면암과 동 서도를 북서-남동 방향으로 관입한 암맥등으로 구성된다. 후기 조면암은 초기 조면암에 비해 알칼리 장석 반정이 크고, 유색광물의 반정이 현저히 줄어든 특징이 있다. 조면암질 암맥은 반정을 거의 함유하지 않는 담녹색의 세립암으로 독도의 북서-남동 방향의 단층대를 따라 관입된 것으로 생각된다.

이러한 일련의 암상 분포는 독도가 여러 단계의 화산활동을 통해 형성되었음을 지시한다. 초기에는 수중에서 비교적 조용한 용암분출이 일어나 각력질 조면암류가 형성되었으며, 해저산이 성장하여 수면위로 상승한 중기에는 폭발적인 화산분출(각력응회암과 층상응회암) 및 다량의 용암류가 피복되었다. 그리고 마지막 단계에서는 기존에 형성된 단층대 등을 통해 잔류 마그마의 관입이 있었던 것으로 생각된다.

4. 연대 측정

독도 화산암류의 분출시기를 알아보기 위해 흑운모와 전암시료를 대상으로 K-Ar 연대를 측정하였다. 흑운모의 K 정량은 대전 기초과학연구원 연구원의 원자흡광분석기를 이용하였고, 전암의 K 정량은 캐나다의 Activation Laboratories LTD.에 의뢰하여 X-선 형광분석기를 이용하였다. 표준시료(JG-1a)를 이용해 계산된 K의 정량 오차는 2% 미만이다. Ar 동위원소 분석은 일본 동경대학 지구화학연구소에서 질량분석기(modified VG5400)를 이용하였다. 자세한 분석 방법은 Nagao *et al.*(1996)을 참조하였다. 연대계산에 사용한 K의 동위원소비와 붕괴상수는 다음과 같다: $\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$, $\lambda_{e} = 0.581 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$, $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.01167(\text{atomic \%})$ (Steiger and Jäger, 1977). 분석결과는 Table 1에 제시하였다.

3개의 전암시료에서 분리한 신선한 흑운모의 K-Ar 연대는 2.65-2.38 Ma를 보이고, 반복 측정된 값도 재현성이 매우 좋다. 초기분출 조면암이 중기분출 조면안산암보다는 약 15만년 내지는 27만년 정도 오래된 연대를 보이므로 지질 층서와도 조화적이다. 그러나 같은 시료에서 분리된 흑운모와 전암은 10만년에서 27만년(평균 17만년) 정도의 연대 편차를 보이는데, 전암에 많이 함유된 알칼리장석의 패쇄온도가 흑운모보다는 낮기 때문에 낮은 온도의 열수변질 작용에도 쉽게 변할 수 있다는 점을 고려하면 자연스런 결과로 생각된다.

전암의 K-Ar 연대는 2.43-2.13 Ma로 30만년 정도의 범위에서 층서적으로 상위로 갈수록 조화적으로 젊어진다. 따라서 독도 화산암류는 초기분출 조면암이 2.7-2.4 Ma, 중기분출 조면안산암이 2.4-2.3 Ma, 그리고 말기분출 조면암 및 암맥이 2.2-2.1 Ma에 형성된 것으로 보인다. 따라서 현재 해수면 위의 독도 화산암류는 2.7-2.1 Ma 기간 동안의 후기 플라이오세에 여러 번의 분출 활동을 통해 형성된 것으로 결론지어진다. 이는 Sohn(1995)에 의한 2.7-2.5 Ma 범위보다는 상당히 넓은 기간 동안 독도 화산암류의 분출이 있었던 것을 지시한다.

중기분출물 하부의 각력응회암에 포함되어 있는 현무암질 암편은 독도 화산암체의 기저부를 형성하고 있었을 것

Table 1. K-Ar ages of biotites and whole-rocks for Dokdo volcanic rocks.

Sample No.	Rock description	Mineral/rock	Weight (mg)	K (wt%)	[⁴⁰ Ar] _{rad} (E ⁻⁸ cc/g)	Atm. ⁴⁰ Ar (%)	K-Ar age (Ma)
DW01	st1. trachyte	biotite	146.8	6.82	67.10±3.54	53.0	2.53±0.14
			91.1		68.60±3.70		2.59±0.15
DW55	st1. trachyte	biotite	113.3	6.73	69.27±3.90	42.9	2.65±0.16
			73.7		69.20±4.32		42.1
DE16	st2. trachyandesite(e)	biotite	117.3	7.49	69.32±4.02	38.1	2.38±0.15
			117.0		69.39±4.00		39.1
DW01	st1. trachyte	whole rock	225.0	4.07	38.41±2.03	51.2	2.43±0.15
DW55	st1. trachyte	whole rock	197.2	5.31	49.14±2.98	27.9	2.38±0.16
DW51	st2. trachyandesite(w)	whole rock	229.3	3.82	34.33±1.76	70.7	2.31±0.14
DE16	st2. trachyandesite(e)	whole rock	216.4	5.06	44.77±3.67	16.0	2.28±0.20
DE30	st2. trachyandesite(e)	whole rock	188.6	4.57	40.73±2.52	31.4	2.29±0.16
DW03	st3. trachyte	whole rock	192.7	4.98	41.11±3.66	16.8	2.13±0.20
DW09	st3. trachyte	whole rock	196.8	4.90	41.07±3.58	17.0	2.16±0.20
DE29	st3. trachyte dike	whole rock	198.1	4.81	39.87±5.27	10.6	2.13±0.29
DE34	basalt clast	whole rock	192.8	0.50	4.01±0.24	93.7	2.06±0.14
DE01	basalt clast	whole rock	191.9	2.82	27.09±1.43	88.7	2.47±0.15

으로 보여 해수면 위의 독도 화산암류들 보다는 오래된 연대를 갖는 것이 타당할 것으로 예상되나 2.5-2.1 Ma로 별다른 차이를 보이지 않는 연대가 얻어졌다. 이는 이 현무암편들이 고온의 화산쇄설류에 동반되어 분출하는 과정에서 방사성 ⁴⁰Ar이 손실되었기 때문으로 해석된다. 따라서 독도 화산암체의 기저부를 이루는 해저 화산암체의 형성시기를 규명하기 위해서는 Ar-Ar 연대 측정 등 다른 방법에 의해 분출 연대를 측정해야 할 것으로 생각된다.

울릉도와 독도의 화산활동은 양자 모두 알칼리계열의

조면암을 주로 하고 화학조성과 동위원소 조성도 매우 유사해 성인적인 연관성이 큰 것으로 인식되어 왔다(김윤규 외, 1987; 송용선 외, 1999; Tatsumoto and Nakamura, 1991). 그러나 현재 해수면 위에 노출된 울릉도와 독도는 규모 면에서도 차이가 크고 분출시기도 상당한 차이를 보인다(Fig. 6). 울릉도는 신생대 제4기(1.4-0.01 Ma) 동안 적어도 5회 이상의 화산분출 활동을 통해 형성된 것으로 보고되었다(e.g., Kim *et al.*, 1999). 따라서 현재 해수면 위의 울릉도와 독도의 화산활동은 초기 분출시기가 약 100만년 이상 그리고 최후기 분출시기는 약 200만년 정도 차이가 난다. 최후기 분출시기 차이가 더욱 크다는 점에서 두 지역 화산활동의 동시기성은 없는 것으로 보인다. 따라서 화학적 동질성이 인정되는 두 화산체가 시간차를 두고 분출되었다는 점은 마그마 활동의 주기성과 주변 지체구조 환경 변화에서 그 원인을 찾아야 할 것으로 생각하는데 이에 대해서는 뒤에서 논한다.

5. 지구화학적 특성

전암 화학조성으로부터 독도 화산암류의 마그마 특성과 지체구조 환경 특성을 살펴보고자 주성분원소와 미량원소를 분석하였다. 원소 분석은 캐나다의 Activation Laboratories LTD.에 의뢰하여 X-선 형광분석기와 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하였다. 표준시료를 이용해 계산된 주성분원소의 분석 오차는 모두 5% 미만이다. 표준시료 MAG-1, BIR-1, DNC-1, GXR-1 그리고

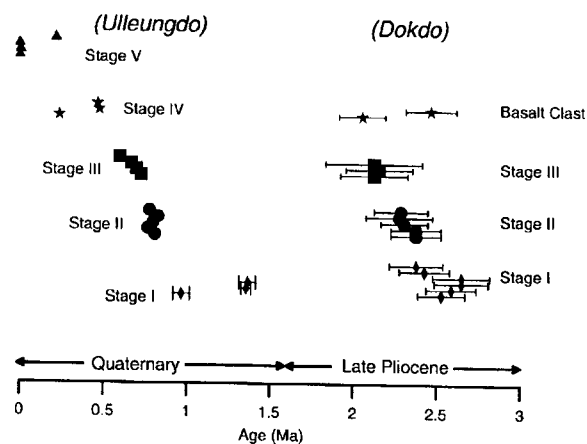


Fig. 6. Diagram showing eruption age distribution of Dokdo and Ulleungdo volcanic rocks. The K-Ar age data of Ulleungdo volcanic rocks are from Kim *et al.* (1999).

GXR-2등을 이용해 계산된 미량원소 및 희토류원소의 분 그리고 U등은 약 10%에 가까운 오차를 보인다. 분석 결 석 오차는 대부분이 5% 내외이나 Ni, Ga, Zr, Ta, Pb, Th 과는 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Major and trace element compositions for Dokdo volcanic rocks.

Sample	DW-01	DW-18	DW-54	DW-55	DW-56	DW-5	DW-51	DW-52	DW-3	DW-9	DW-11	DW-53
rock	st1. tra	st1. tra	st1. tra	st1. tra	st1. tra	st2. ta (w)	st2. ta (w)	st2. ta (w)	st3. Tra	st3. Tra	dike	dike
SiO ₂ (wt%)	52.20	56.51	59.98	58.77	57.00	54.71	57.28	54.97	60.47	60.45	59.28	59.36
TiO ₂	2.02	1.65	1.21	1.26	1.64	1.18	1.20	1.55	0.38	0.36	0.21	0.23
Al ₂ O ₃	18.13	17.73	17.94	17.87	17.95	17.11	18.02	17.13	18.42	18.39	18.34	18.32
Fe ₂ O ₃ *	6.87	5.76	4.15	4.95	5.33	5.77	6.05	7.88	4.75	4.87	4.36	4.55
MnO	0.25	0.33	0.10	0.18	0.13	0.28	0.13	0.13	0.15	0.16	0.12	0.19
MgO	1.80	1.85	1.29	1.21	1.35	1.42	1.42	2.00	0.37	0.32	0.26	0.24
CaO	5.51	4.24	2.98	2.95	4.14	4.35	4.12	4.63	1.73	1.63	0.88	2.10
Na ₂ O	3.81	4.55	5.00	4.94	4.53	4.48	4.48	3.92	5.52	5.60	6.28	5.31
K ₂ O	4.91	5.15	6.26	6.37	5.50	4.63	5.05	5.00	5.95	5.87	5.80	5.61
P ₂ O ₅	0.87	0.75	0.33	0.52	0.79	0.24	0.32	0.67	0.10	0.12	0.05	0.25
LOI	2.72	1.47	0.91	1.33	2.06	3.49	2.17	2.37	2.61	2.70	4.76	3.72
Total	99.08	100.00	100.14	100.36	100.43	97.66	100.25	100.25	100.45	100.46	100.34	99.87
Sc (ppm)	8.0	8.0	6.0	5.0	7.0	8.0	7.0	10.0	2.0	2.0	1.0	2.0
Be	2.0	2.0	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0	2.0	4.0	4.0	5.0	5.0
V	122.1	94.0	60.6	67.9	85.8	70.9	69.2	99.7	6.3	5.3		
Co	9.2	12.5	5.0	5.8	8.4	8.9	10.7	14.8	2.5	2.5		
Ni	43.0	44.7	32.6	42.6	38.9	34.0	33.0	55.9	15.8		21.7	36.0
Ga	20.7	22.5	21.9	22.5	21.3	23.1	25.7	25.4	28.9	30.8	31.0	30.5
Rb	105.0	70.2	567.4	135.9	79.5	103.5	97.2	131.5	174.6	183.0	222.0	181.2
Sr	1140.0	829.7	558.4	598.2	821.3	368.6	407.5	444.8	124.6	106.6	16.4	46.3
Y	27.3	25.7	26.9	26.8	24.8	30.9	32.0	28.7	40.5	43.3	47.7	65.3
Zr	327.2	342.3	454.3	455.3	344.3	393.1	409.8	348.4	595.9	635.8	685.8	703.6
Nb	96.1	101.9	123.0	122.5	102.2	109.4	120.4	108.7	182.5	192.2	227.1	222.5
Sn	1.3	1.8	2.2	2.3	1.8	1.6	2.6	2.3	4.1	4.6	4.0	4.0
Cs	1.7	6.0	1.5	1.2	0.4	1.3	1.3	0.8	3.7	3.4	2.0	1.8
Ba	1680.0	1380.0	793.7	872.6	1370.0	724.1	775.4	926.5	262.3	198.7	20.2	19.6
Hf	7.0	7.9	10.4	10.5	7.7	8.9	9.7	8.4	14.5	15.3	15.9	15.7
Ta	6.2	6.3	8.0	7.9	6.2	7.0	7.4	6.6	11.5	11.9	13.8	13.7
W	2.9	5.4	7.4	4.6	2.6	3.3	6.0	4.7	4.4	3.0	2.6	3.7
Th	10.2	11.1	15.4	15.2	11.2	13.0	14.3	11.9	22.7	23.7	24.6	24.1
U	2.3	2.4	3.6	3.3	2.4	2.6	3.7	1.8	4.5	4.6	3.0	4.5
La	93.1	90.2	96.4	94.3	86.9	84.3	89.2	79.7	121.7	124.7	153.0	169.1
Ce	167.7	159.3	165.8	166.2	154.4	149.7	154.5	134.2	209.5	216.9	264.4	287.8
Pr	18.1	17.0	17.1	17.3	16.5	15.8	16.7	15.4	21.7	22.4	27.3	29.6
Nd	63.0	58.0	56.5	56.7	56.1	53.9	56.7	55.0	70.4	71.4	87.8	96.7
Sm	9.9	8.9	8.5	8.4	8.4	9.1	9.3	9.2	11.2	11.4	13.6	14.7
Eu	3.7	3.8	3.0	3.1	3.6	2.5	2.6	2.9	1.3	1.2	1.0	1.0
Gd	8.1	7.3	6.9	6.9	6.9	7.8	8.0	8.0	9.2	9.4	11.3	13.2
Tb	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.7	2.0
Dy	5.3	5.0	5.3	5.1	4.8	6.2	6.2	5.8	7.8	8.0	9.3	10.8
Ho	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.2	1.2	1.1	1.5	1.6	1.8	2.2
Er	2.6	2.5	2.7	2.7	2.4	3.2	3.2	2.8	4.2	4.4	4.9	5.9
Tm	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.9
Yb	2.0	2.0	2.4	2.4	1.9	2.6	2.6	2.3	3.7	4.0	4.2	4.8
Lu	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.6	0.6	0.6	0.7

Table 2. Continued.

Sample	DE-29	DE-07	DE-12	DE-08	DE-16	DE-30	DE-18	DE-23	DE-31	DE-34	DE-01	DE-02	DE-04
rock	dike	st2. ta (e)	st2. ta (e)	st2. ta (e)	st2. ta (e)	st2. ta (e)	st2. ta (e)	st2. ta (e)	bas	bas	bas	bas	bas
SiO ₂ (wt%)	60.70	57.25	56.79	58.92	56.85	57.21	56.74	56.85	47.03	47.80	46.60	45.91	45.22
TiO ₂	0.43	1.59	1.65	1.71	1.64	1.73	1.63	1.66	2.50	2.23	2.84	2.86	2.75
Al ₂ O ₃	18.42	18.36	18.11	18.95	18.23	18.29	18.46	18.56	14.85	12.66	16.81	16.90	15.34
Fe ₂ O ₃ *	4.41	5.66	6.31	3.72	6.20	5.05	5.92	5.63	11.52	8.03	10.43	9.38	11.58
MnO	0.09	0.11	0.11	0.06	0.09	0.12	0.10	0.10	0.46	0.17	0.28	0.78	0.39
MgO	0.31	1.08	1.19	0.67	1.35	1.44	1.02	1.11	4.63	7.24	3.26	3.07	4.64
CaO	1.65	3.40	3.31	2.96	3.27	4.44	3.43	3.41	10.14	13.60	8.95	9.44	9.85
Na ₂ O	4.94	4.28	4.25	4.55	4.40	4.45	4.37	4.28	3.51	3.11	2.99	3.48	3.70
K ₂ O	5.84	6.06	6.14	5.84	6.07	5.51	5.63	5.79	1.28	0.64	3.40	2.72	1.34
P ₂ O ₅	0.11	0.88	0.84	0.83	0.78	0.79	0.89	0.97	0.61	0.64	1.10	1.04	0.90
LOI	3.33	1.35	1.32	1.95	1.40	1.26	2.06	2.12	3.66	4.18	3.41	3.94	4.64
Total	100.22	100.02	100.02	100.15	100.27	100.29	100.24	100.47	100.17	100.30	100.06	99.52	100.36
Sc (ppm)	3.0	7.0	7.0	7.0	7.0	9.0	7.0	8.0	25.0	43.0	17.0	19.0	24.0
Be	2.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	2.0	2.0	1.0	2.0	2.0	2.0
V	8.4	82.8	94.9	85.0	96.3	94.7	96.4	92.6	238.7	262.1	267.6	293.9	303.5
Co	4.1	5.4	8.4	5.4	6.8	8.7	8.2	7.1	27.3	38.4	30.8	42.3	51.1
Ni	22.0	33.6		41.8	39.2	44.4	46.4	39.5	107.3	157.8	87.3	141.5	169.9
Ga	32.9	21.3	22.2	24.8	21.9	22.3	23.3	24.2	18.6	17.5	24.1	26.7	24.6
Rb	163.4	115.4	115.9	64.6	115.3	62.0	63.6	78.0	41.7	41.0	92.5	76.1	75.2
Sr	91.8	825.9	809.0	871.7	810.6	886.2	853.6	901.8	871.5	691.0	1020.0	1050.0	926.6
Y	39.1	20.3	25.4	22.4	20.0	26.9	23.6	22.1	21.7	21.4	25.6	26.1	23.4
Zr	612.5	339.5	338.0	357.6	327.6	333.1	352.8	337.1	235.9	213.9	343.5	340.8	292.2
Nb	203.6	96.7	103.4	108.2	102.6	99.8	99.3	102.4	67.0	67.4	96.0	95.5	78.9
Sn	4.0	1.8	1.8	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0		1.3	2.1	2.2	1.9
Cs	0.5	1.5	1.1	0.3	1.0	1.2	0.5	0.8	0.9	1.4	1.1	1.4	1.8
Ba	264.2	1370.0	1430.0	1520.0	1400.0	1390.0	1400.0	1520.0	790.4	768.1	1040.0	1090.0	864.3
Hf	13.9	7.6	7.6	8.2	7.6	7.7	7.7	7.6	5.5	5.2	8.0	7.8	7.0
Ta	11.6	6.2	6.4	6.8	6.4	6.3	6.2	6.3	4.7	4.4	6.1	6.0	5.1
W	3.2	3.7	5.4	3.0	5.5	2.8	9.8	2.8	1.8	3.0	5.2	5.7	3.3
Th	19.8	10.8	11.1	11.8	11.1	11.0	11.1	10.9	7.0	6.8	10.3	9.7	8.1
U	3.7	2.2	2.2	2.6	2.3	2.5	2.4	2.5	1.5	1.7	2.2	2.1	1.4
La	109.0	77.3	88.3	83.4	79.1	91.8	87.5	80.7	59.2	56.0	79.8	76.5	65.7
Ce	185.0	138.1	149.0	150.0	138.9	160.7	145.0	139.9	108.7	102.0	144.7	141.3	120.6
Pr	20.8	14.9	16.7	16.2	15.1	17.7	17.2	16.0	11.9	11.1	15.6	15.4	13.5
Nd	69.3	51.0	58.4	55.3	51.3	60.8	58.3	55.0	43.2	40.1	54.3	54.2	48.0
Sm	11.2	7.8	8.9	8.4	7.7	9.2	8.9	8.7	7.3	7.0	8.6	8.9	8.1
Eu	1.8	3.8	3.9	3.9	3.6	3.9	3.9	4.0	2.4	2.2	2.9	2.9	2.7
Gd	9.7	6.3	7.3	6.8	6.4	7.9	7.5	7.2	6.3	5.9	7.5	7.9	7.1
Tb	1.4	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0
Dy	7.6	4.3	4.9	4.4	4.1	5.3	4.8	4.7	4.4	4.4	5.1	5.0	4.8
Ho	1.5	0.8	0.9	0.9	0.8	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	1.0	1.0	0.9
Er	4.0	2.1	2.4	2.3	2.1	2.6	2.3	2.3	2.1	2.1	2.4	2.5	2.3
Tm	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Yb	3.4	1.6	1.9	1.8	1.6	2.1	1.8	1.8	1.6	1.7	1.9	1.9	1.7
Lu	0.5	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2

*Total Fe as Fe₂O₃, LOI; loss on ignition.

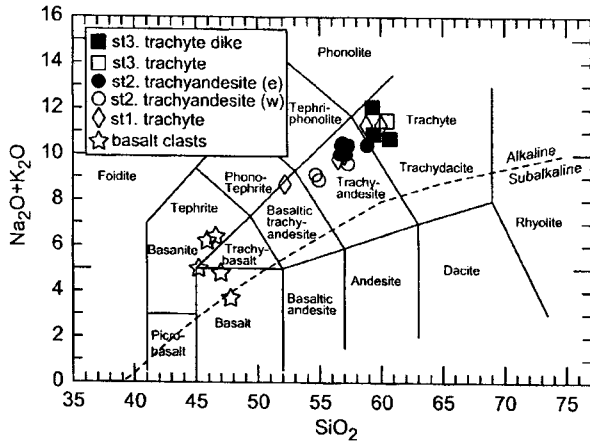


Fig. 7. Chemical classification and nomenclature of volcanic rocks using TAS diagram of Le Maitre *et al.* (1989). The boundary between alkaline and subalkaline series is taken from Irvine and Baragar (1971).

주성분원소

독도 화산암류는 중성 내지는 산성 조성을 갖는 알칼리 계열 화산암으로 분출 시기별로 다양한 화학조성을 보인다(Fig. 7). 서도에서 최하부층을 구성하는 조면암류(st1. trachyte)는 현무암질 조면암산암에서 조면암까지 비교적 넓은 조성을 보이지만 통칭하여 조면암으로 분류하였다. 주 분출시기(st2)에 해당하는 암상은 동도와 서도에서 각각 균질한 조면안산암질 조성을 갖는다. 분출말기(st3)에서도 서부를 광범위하게 관입하거나 암맥상으로 동서도를 관통하는 암맥류는 모두 분화가 많이 진행된 조면암 조성을 갖는다. 각력응회암 내에서 채취한 현무암 암편들은 알칼리계열의 현무암 또는 바사나이트 조성을 보이는데, 이들과 독도 조면암류와의 사이에는 다소의 조성 차이가 인정된다.

MgO를 축으로 한 주성분원소 변화도에서는 독도 화산암류가 일련의 결정분화작용을 겪으면서 형성되었다는 점을 지지한다(Fig. 8). 즉 현무암질 화산암편에서 분출말기의 조면암류로 갈수록 MgO의 함량이 감소하는데 이는 기본적으로 휘석, 각석, 흑운모 등의 유색광물의 분별결정작용과 관련이 있다. Fe₂O₃와 TiO₂는 현무암류에서는 별다른 변화를 보이지 않다가 조면암류에서는 분출초기부터 말기까지 점진적으로 감소하는데 이는 자철석 등의 Fe-Ti 산화광물 분별정출작용을 지지하는 것으로 생각된다. MgO 함량의 감소에 따라 CaO 함량은 감소하고, Al₂O₃, Na₂O, K₂O는 증가하는데 이는 장석류 중에서 사장석은 계속 분별정출한 반면 알칼리장석 성분은 액상 성분을 유지하였던 결과로 생각된다.

미량원소

미량원소의 조성변화도 독도 화산암류의 화학적 연관성을 잘 지시한다(Fig. 9). 즉 현무암질 화산암편에서 분출말기의 조면암을 향해(MgO 함량의 감소 방향으로) 호정성 원소에 해당하는 Sc, V은 점진적으로 감소하는 반면 Rb, Th, U 등의 불호정성원소는 점차 증가하는 특성을 보여 화산암류의 일반적인 분화경향을 잘 보여준다. 대표적인 고전화 양이온인 Y, Zr, Nb등도 MgO 함량의 감소와 더불어 점차 증가하다가 분출말기 산물인 st3 조면암 또는 조면암맥에 이르러서는 급격하게 증가하는 특성을 보인다. 이런 특성은 독도 화산암류의 분화과정의 모든 단계에서 이들을 함유한 대표적 부성분광물인 저어콘등이 분화과정에 참여하지 않았음을 지적한다. MgO 함량의 감소와 더불어 Ba, Sr 등은 현무암편에서는 다소 증가하다가 조면암류들어 급격히 감소하고 분출 단계별로 조성 차가 매우 큼을 알 수 있다. 이런 특성은 조면암을 분출시킨 마그마 챔버에서 일어난 다이내믹한 과정을 반영한다고 생각되는데, 이에 대해서는 뒤에서 논한다.

Pearce(1982)가 제시한 Th/Yb-Ta/Yb 상관도는 화산암류의 모마그마가 발생한 지체구조 환경을 지시하는데 매우 유용하게 사용된다(Fig. 10). 이 경우 Th과 Ta은 이온 반경의 유사성 때문에 일반적으로 고상에서 액상이 만들어질 경우 그 거동을 같이하는 경향이 있다. 반면 섭입대와 같이 마그마 발생시 H₂O와 같은 유체가 관여할 경우 Ta은 유체상으로 이동하지 않고 고상에 잔류하려는 성질을 보인다. 따라서 섭입 환경하에서 발생하는 마그마는 그 조성상 높은 Th/Ta 비를 갖게 된다. 독도 화산암류는 Th/Yb 비가 4.1-7.1이고 Ta/Yb 비가 2.6-4.1로 Th/Yb 비가 다소 크지만 정의 상관관계를 보인다. 이런 특성은 두 비가 모두 1 이하로서 극단적인 결핍환경에서 형성되는 중앙해령 현무암(MORB)과는 매우 상이한 조성이고, Th/Yb 비가 매우 큰 섭입 관련 칼크알칼리 계열 화산암류가 보이는 성질과도 많은 차이를 보인다. 결과적으로 독도 화산암류는 판내부에서 형성되는 화산암류의 화학조성과 매우 유사한 조성을 갖고 있는 것으로 생각된다.

Mullen(1983)과 Pearce and Cann(1973)이 제시한 판구조 판별도 상에서 독도 화산암류는 기존에 구분과 잘 맞지 않는 경향을 보인다(Fig. 11). 그러나 이 경우 독도 화산암류는 대부분이 분화가 진행된 조면암류이기 때문에 초기 조성을 대표하는 현무암류의 화학조성에 기초해 제시된 두 판별도에 잘 적용되지 않는 점이 오히려 당연시 된다. 독도 화산암류의 초기 조성을 대표할 것으로 생각되는 현무암편들은 Pearce and Cann(1973)의 판별도에서 대체적으로 판내부 현무암류의 영역에 해당한다.

미량원소의 조성을 액상 농집이 강한 성질 순서대로 배열하여 시원맨틀 값과 비교하면 독도 화산암류들은 불호

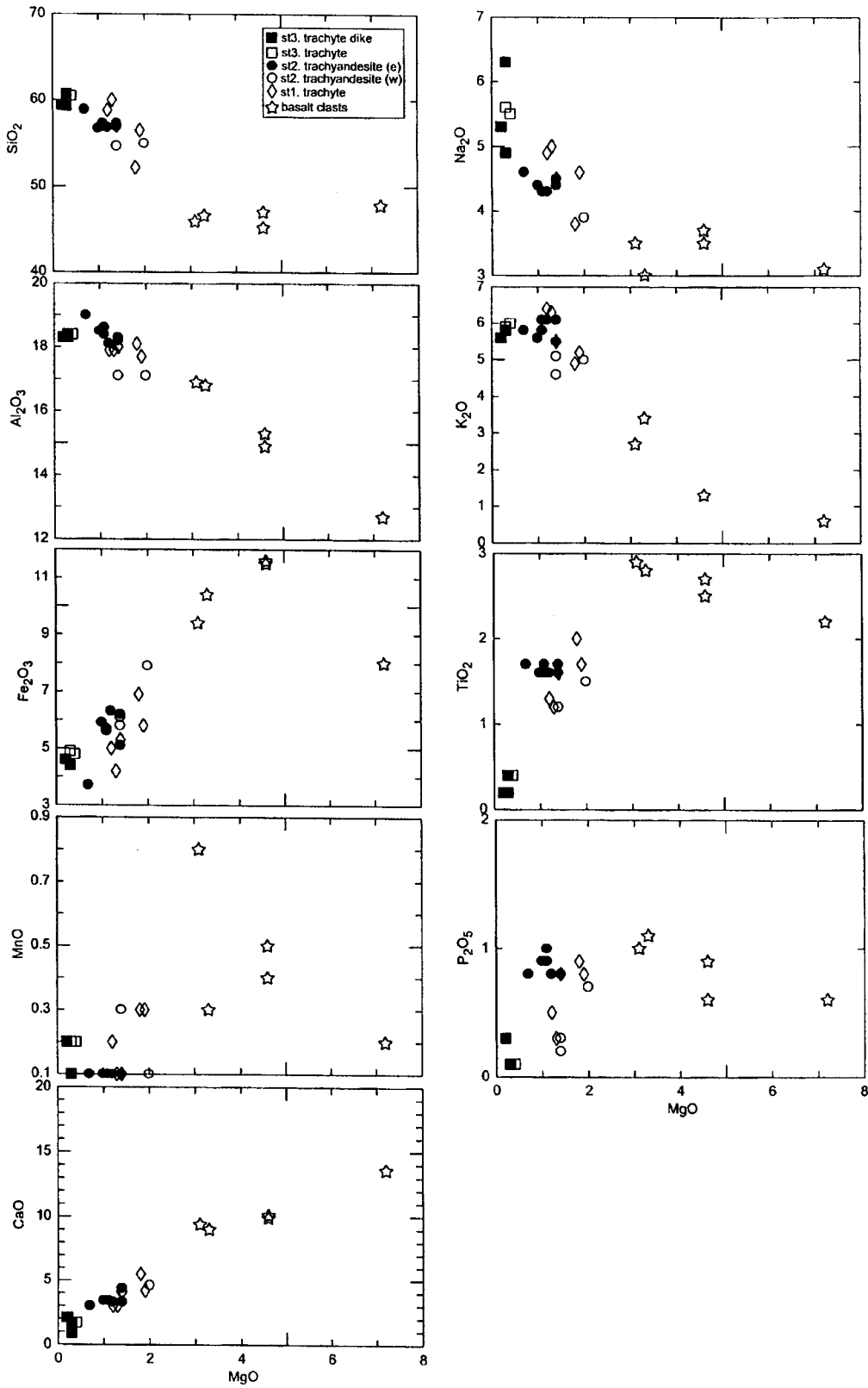


Fig. 8. Major element variation diagrams of Dokdo volcanic rocks.

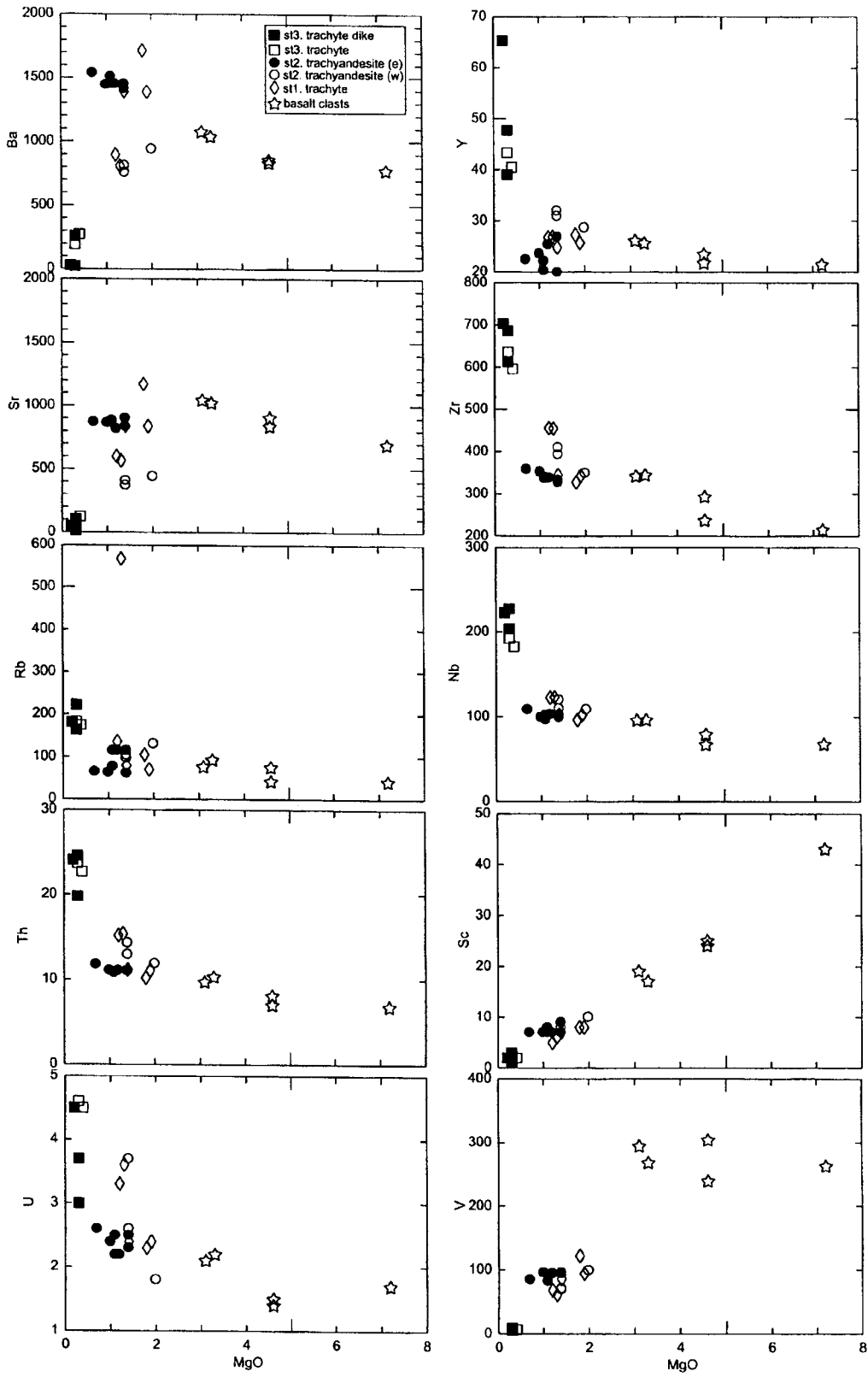


Fig. 9. Trace element variation diagrams of Dokdo volcanic rocks.

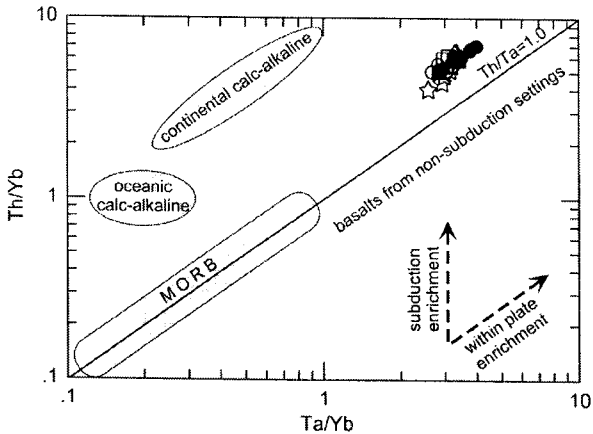


Fig. 10. Th/Yb versus Ta/Yb diagram showing the "within plate" character of Dokdo volcanic rocks and their lack of subduction zone enrichment. Vector for within plate and subduction enrichment, and fields for oceanic and continental calc-alkaline rocks are from Pearce (1982). The symbols are the same as those in Fig. 9.

정성 원소이며 이온 반경이 큰 친석원소(large ionic lithophile element; LILE)들이 호정성인 고전하 양이온(high field strength element; HFSE)들 보다 전체적으로 부화되어 있고 호정성이 강한 원소를 향하여 점진적으로 결핍되는 성질을 보인다(Fig. 12). 이런 특성을 여러 지체구조 환경에서 형성된 화산암류와 비교하면 해양도 현무암이 갖는 성질과 매우 유사함을 알 수 있다(Sun and McDonough, 1989). 또 섭입하는 해양판에 고정되기 때문에 화산호 화산암에서는 결핍되는 Nb이 다소 부화되어 있는 점은 독도 화산암류가 해양판의 섭입과는 관련 없는 환경에서 형성되었다는 점을 지시한다(Tatsumi and Eggins, 1995). 그러나 독도 화산암류는 해양도 화산암류에 비해 전체적으로 Pb가 부화되는 점이 특징적이다. 또 주 분출 시기(st2)에 해당하는 조면안산암의 조성에서 동도와 서도의 것들 중 Sr과 P의 조성차이가 인지된다. 말기 분출 산물인 st3 조면암과 암맥은 이전 것들에 비해 호정성원소의 함량이 다소 증가하고, Ba, Sr, P, Ti등이 부의 이상이 보이는데 이는 사장석, 인회석, Fe-Ti 산화광물등이 상당히 분별되었기 때문인 것으로 생각된다.

희토류원소

시원적인 운석 값에 표준화한 희토류원소 조성 도면에서 독도 화산암류는 모두 경희토류원소(LREE)가 중희토류원소(HREE)에 비해 부화되어 있다(Fig. 13). 독도 화산암류의 모마그마 조성을 대표한다고 생각되는 현무암편들은 경희토류원소에서 중희토류원소로의 단조로운 분별작

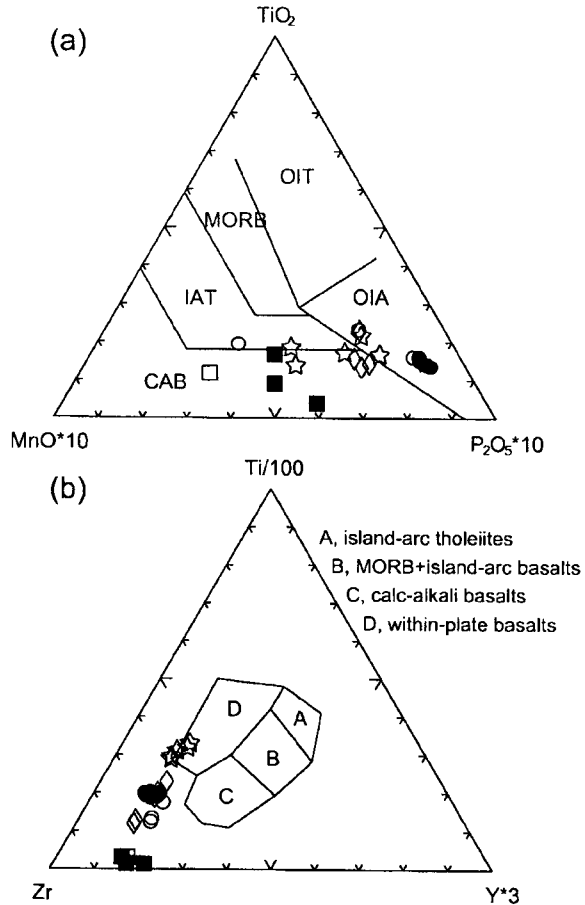


Fig. 11. (a) The MnO-TiO₂-P₂O₅ discrimination diagram for basalts (after Mullen, 1983). OIT, ocean island tholeiite; OIA, ocean island alkali basalt; CAB, island arc calc-alkali basalt; IAT, island arc tholeiite. (b) The Ti-Zr-Y discrimination diagram for basalts (after Pearce and Cann, 1973). The symbols are the same as those in Fig. 9.

용이 인지되고, 중희토류원소의 함량이 낮은 특성을 갖는데(Fig. 13a), 이는 모마그마가 석류석을 함유한 맨틀물질의 부분용해에 의해 형성되었다는 점을 지시한다(Briggs and Goles, 1984). 상부맨틀에서 석류석 감람암은 적어도 60 km 이상 깊이의 비교적 고압하에서 안정한 것으로 생각된다(Mckenzie and O'Nions, 1991).

초기 분출 조면암은 현무암편의 조성과 매우 유사하지만 약한 규모의 Eu 정의 이상을 갖는 특성이 있다(Fig. 13b). 또 주 분출기의 조면안산암은 동도의 경우 Eu 정의 이상이 뚜렷하지만 서도의 것은 Eu 이상을 보이지 않는다(Fig. 13c). 말기 분출한 조면암과 암맥은 이전 것들에 비해 Eu의 부의 이상이 현저하고, 중희토류원소가 증가한 특성을 보인다(Fig. 13d).

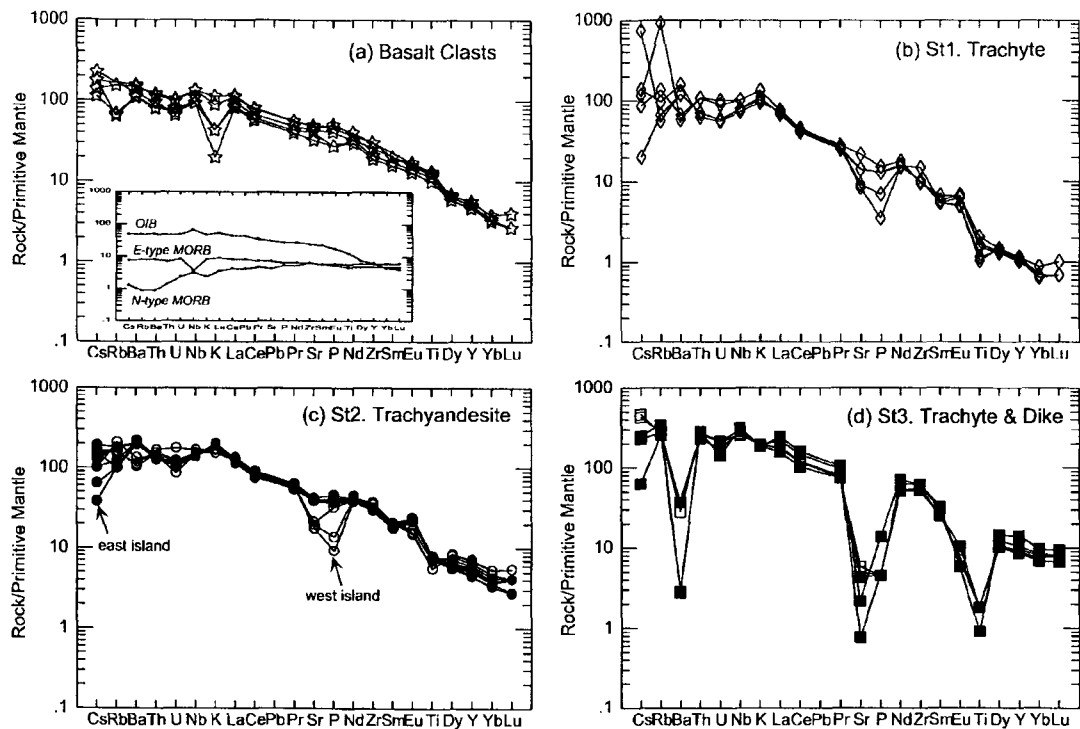


Fig. 12. Primitive mantle-normalized diagrams of Dokdo volcanic rocks. The data of primitive mantle are taken from Sun and McDonough (1989).

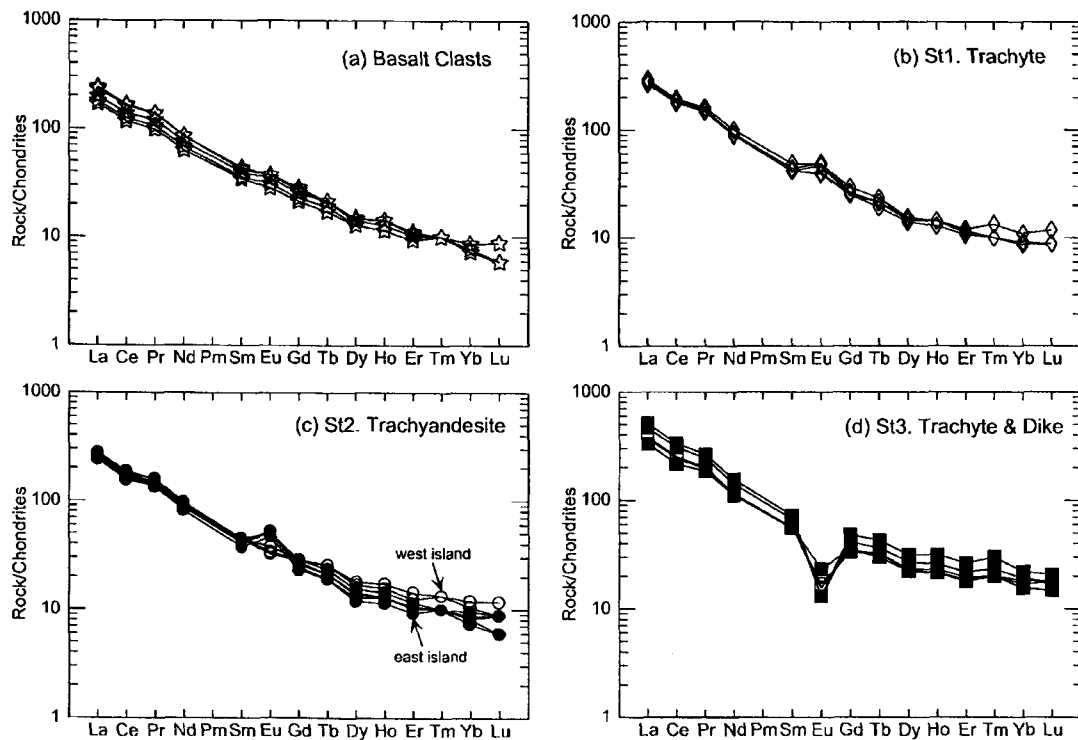


Fig. 13. Chondrite-normalized rare earth element patterns of Dokdo volcanic rocks. The chondrite values used in normalizing REEs are from Nakamura (1974).

분출시기별로 희토류원소 조성이 차이가 나는 것은 기본적으로 결정분화작용의 결과로 생각되나, 이런 결정분화작용은 특정광물(예를들면, 사장석)이 마그마 챔버의 일정부분으로 농집되는 집적작용을 수반한 결과로 해석된다.

6. 토 의

마그마 진화 과정

현재 해수면 위에 노출되어 있는 독도는 후기 플라이오세 동안 여러 단계의 화산활동에 의해 형성되었으며, 마그마의 조성도 후기 단계로 갈수록 결정분화작용을 통해 말기 조성으로 변한 특성을 잘 보여준다. 각력응회암 내에서 암편으로 산출되는 현무암류와 육상 독도를 형성하는 조면암질 용암류와는 앞서 살펴본 바와 같이 화학적 동질성이 잘 인지된다. 결국 독도 해수면 하의 대규모 화산체의 상당부분은 현무암류로 구성되어 있을 것으로 유추된다.

그러나 해수면 위의 독도 조면암류가 보이는 화학조성은 현무암질 모 마그마로부터 직접적인 결정분화작용에 의해 형성되었다는 점을 지지하지 않는다. 특히 독도 조면암류의 희토류원소 조성은 현무암질 마그마 보다는 분화된 중성 조성의 마그마 챔버가 지각 상부에 위치했고, 이 챔버 내에서의 다양한 기작에 의해 각 단계의 용암류가 분출했을 가능성을 시사한다. 희토류원소가 갖는 Eu의 정 또는 부의 이상은 하나의 마그마 챔버에서 시기별로 조성차를 보이는 조면암질 마그마가 분출했다고 가정하면 분출 이전에 가벼운 장석류(특히 사장석)가 챔버 상부로 떠올라 이들에 의해 마그마 상하부가 현격한 조성차를 보이게 되었을 가능성을 시사한다.

즉, 초기 조면암 분출전에 이미 마그마 챔버 상부에는 사장석의 집적이 일어났고, 이 부분부터 지표로 분출해(독도의 경우는 아직 수중이지만) Eu 정의 이상을 갖는 초기 조면암이 형성되었을 것으로 생각된다. 이후 다량의 중기 분출기 까지 비교적 상부 챔버의 마그마가 상승해서 동서도의 조면안산암을 형성했을 것으로 보인다. 이 시기에 라필리응회암 상부에 놓이는 조면안산암은 동도와 서도에서 Eu 이상과 Sr, Ba 등의 조성 차이를 보인다. 즉 동도의 조면안산암이 서도의 것에 비해 뚜렷한 Eu의 정의 이상을 보이고 장석류와 친화적인 Ba과 Sr의 함량도 월등히 높다. 따라서 동도의 조면안산암이 사장석이 보다 집적된 챔버 상부로부터 먼저 상승 분출했고, 이후 사정석 집적이 적은 챔버의 보다 깊은 레벨로부터 서도의 조면안산암이 분출했을 것으로 생각된다.

주 분출기를 거치면서 마그마 챔버의 상당 부분의 액상 성분은 상승 분출했을 것이고, 이 과정을 통해 챔버 내의 잔류 액상 성분은 사장석의 분별작용에 의해 Eu의 부의

이상을 보이는 분화 말기 조성을 갖게 되었을 것으로 생각된다. 결과적으로 이런 잔류 액상 성분이 기존에 발달한 단층대를 따라 관입하면서 독도 화산활동이 종료되었을 것으로 보인다.

독도 화산체의 성인

앞서 살펴본 바와 같이 동해에는 독도를 포함하여 다양한 시기의 화산분출 활동이 있었고, 이런 화산활동의 시공간적 분포 특성은 동해의 형성과정과 밀접한 관련성이 있을 것으로 생각된다. 아마도분지 내의 확장축을 따라 분출한 화산암류들은 중기-후기 마이오세의 연령을 갖기 때문에 후기 플라이오세 이후에 분출한 독도, 울릉도 화산암류들과는 시간적으로 대비되지 않는다. 아마도 분지 화산암류들은 주로 확장축을 따라 선상 배열하고 있고(Kimura *et al.*, 1987), Sr-Nd 동위원소 조성에서 MORB와 유사한 결핍된 성질을 보인다(Tatsumoto and Nakamura, 1991)는 점에서 아마도 분지의 열개 과정과 동시기적으로 형성되었을 것으로 보인다.

서남 일본에 연해있는 오키군도의 화산활동도 독도, 울릉도와는 시간적으로 차이가 있다. 오키군도 중 3개의 오키도젠섬의 화산활동은 마이오세 후기(7.0-5.6 Ma)에 일어났고, 오키도고섬의 화산활동은 마이오세부터 최근까지(19-0.6 Ma) 비교적 긴 시간동안 일어났다(Uto *et al.*, 1994; Morris *et al.*, 1997). Uto *et al.*(1994)는 오키도고섬의 화산활동을 4단계(19-18 Ma, 5.5-5.4 Ma, 4.4-2.4 Ma, 1.3-0.6 Ma)로 구분하고, 이중 마이오세 초기(19-18 Ma)의 화산활동은 그 지구화학 조성에서 해양판의 섭입 성분의 영향을 받은 것으로 보고하였다. 오키군도 화산활동에서 오키도고섬의 후기 화산활동만이 독도, 울릉도 화산활동과 시기적으로 중첩되는 경향을 보인다. 그러나 오키군도 알칼리 화산암류는 Sr-Nd 동위원소 조성 상에서 독도, 울릉도 화산암류와 차이를 보이는 것으로 알려져 있다(Tatsumoto and Nakamura, 1991). Iwamori(1992)는 오키군도를 포함하고 서남 일본에 광범위하게 분포하는 후기 마이오세 이후의 알칼리 화산활동을 휘발성 성분이 풍부한 맨틀 플룸의 상승에 의해 형성된 것으로 보고, 이들의 화학조성 차이는 플룸 중심에서 멀어지면서 부분용해의 정도가 줄어들었기 때문으로 설명하였다. 따라서 오키군도 화산활동은 시기적으로나 화학조성 상에서 독도, 울릉도 화산활동과는 관련없는 또 다른 맨틀 플룸에 그 기원을 갖는 것으로 생각된다.

독도와 울릉도 화산암류는 모두 알칼리 계열의 조면암이 육상 화산체의 대부분을 차지하고 있으며(송용선 외, 1999; Kim, 1986; Sohn, 1995), Sr-Nd-Pb 동위원소 조성도 구분할 수 없을 정도로 일치해 동일 기원물질로부터 유래된 것으로 생각된다(Tatsumoto and Nakamura, 1991;

Kim et al., 1999). 또 이들의 동위원소 조성은 북동아시아 신생대 후기의 여러 알칼리 화산암류와도 전혀 대비되지 않는 독특한 특성을 갖는다. 결과적으로 독도, 울릉도 화산암류는 모두 판내부 해양도 화산암류가 갖는 전암화학 조성을 보이기 때문에 이들은 깊은 맨틀로부터 상승한 플룸에 의해 형성된 것으로 생각된다. 그러나 형성 시기면에서 현재 해수면 위의 독도(2.7-2.1 Ma)와 울릉도(1.4-0.01 Ma; Kim et al., 1999)는 많은 차이를 보인다(Fig. 6). 특히 화산 활동이 종결된 시기를 비교하면 독도가 약 200만 년 정도 오래되었다. 따라서 독도와 울릉도 화산활동의 기원을 동일 맨틀 플룸으로 생각한다면 양자의 분출시기 차이는 플룸활동의 주기성과 상부에 존재하는 판의 이동으로 설명될 수 밖에 없다. 즉 독도 화산체가 열점 활동에 의해 형성되고 난 후 판이 동남동 방향으로 이동했으며, 울릉도 화산체가 이후의 열점 활동에 의해 형성되었다고 생각할 수 있다. 최후기 울릉도 화산활동 시기(9300-6300 BP; Arai et al., 1981)를 고려하면 현재 열점의 위치는 울릉도 화산체 하부에 존재할 것으로(또는 그 위치에서 소멸된 것으로) 생각된다.

독도 화산체의 해수면 아래에는 커다란 세 개의 해저화산체가 동남동 방향으로 배열하는데, 서쪽부터 제1, 제2, 제3 독도해산으로 불리기도 한다(김창환 외, 2002). 독도는 현재 제일 서쪽의 제1 해산의 정상부에 위치한다. 독도 화산체의 동남부에 발달하는 두 개의 해저 화산체(제2, 제3 독도해산)는 그 정상부가 거의 편평한 기요(guyot) 구조를 잘 보여준다(김창환 외, 2002). 이런 지형적 특성은 하와이열도의 해저 화산군에서 잘 보여지는데, 화산활동이 종결된 후 마그마 근원지로부터 멀어지기 때문에 화산체가 식어가면서 전체적으로 침강하고, 오랜 침식의 결과 정상부가 편평한 구조를 갖는 것으로 해석된다. 결과적으로 독도 주변 해저화산체의 지형적 특성은 제2, 제3 독도해산이 현재 육상 독도를 포함하는 화산체(제1 독도해산)보다 오래된 열점 활동의 산물일 가능성을 시사한다.

그러나 현재까지의 자료만으로 독도, 울릉도 화산암체의 성인을 열점 기원으로 설명하기에는 여러 제한점이 있다. 특히 독도, 울릉도 해저 화산체에 대한 지구화학 자료와 절대 연령 측정 자료가 없어 이들 화산체가 형성되기 시작한 시기를 규정할 수 없다는 어려움이 있다. 또 독도와 울릉도 화산체가 일련의 열점 작용으로 형성되었다면 주변 판의 이동이 전체되어야 하고, 이 판의 이동은 울릉분지의 열개과정과 불가분의 관계를 갖아야만 한다. 그러나 울릉분지의 형성 기작에 대해서는 현재까지도 많은 논란이 있고 그 형성시기를 규정하기에는 자료가 많이 부족한 실정이다. 따라서 독도 및 울릉도 해저화산체에 대한 체계적인 시료 채취가 시급하고 이 시료들에 대한 절대 연령 측정 및 지구화학적 연구가 이루어져야 한다.

7. 결 론

독도 화산암류에 대한 암석학적, 지구화학적, 연대기학적 특성을 종합하면 다음과 같다.

1. 독도는 울릉도와 더불어 동해에 존재하는 매우 드문 화산섬으로, 후기 플라이오세 동안에 수중 또는 대기 중으로 분출한 여러 번의 화산활동에 의해 형성된 섬이다.

2. 현재 해수면 위에 노출된 독도 화산체의 형성시기를 용암류의 분출시기와 산출상태에 따라 분류하면 초기, 중기, 말기로 구분할 수 있는데, 중기분출물이 많은 화산쇄설암을 동반하며 동, 서도의 대부분을 차지한다. 흑운모 및 전암에 대한 연대 측정 결과는 말기분출물을 향해 매우 조화적으로 젊어지는 경향성을 보여준다. 즉 초기분출 조면암이 2.7-2.4 Ma, 중기분출 조면암이 2.4-2.3 Ma, 그리고 말기분출 조면암 및 암맥이 2.2-2.1 Ma에 형성된 것을 지시한다.

3. 독도 화산암류는 중성 내지는 산성 조성을 갖는 알칼리계열 화산암류로 분출 시기별로 다양한 화학조성을 보이는데, 이는 독도 화산암류가 일련의 결정분화작용을 겪으면서 형성되었다는 점을 지시한다. 미량원소 및 희토류 원소 조성은 독도 화산암류가 해양판의 섭입과는 관련 없는 환경에서 형성된 해양도 화산암류의 성질을 갖고 있음을 나타낸다. 각력응회암내에 함유된 현무암편의 희토류 원소 조성은 경희토류원소에서 중희토류원소로의 단조로운 분별작용이 인지되는데, 이로부터 독도 화산암류의 모마그마는 석류석을 함유한 맨틀물질의 부분용해에 의해 형성되었다는 점을 알 수 있다.

4. 독도와 울릉도 화산암류는 모두 알칼리 계열의 조면암을 위주로 한다는 점이 유사하다. 그러나 형성 시기면에서 현재 해수면 위의 독도 화산활동(2.7-2.1 Ma)이 울릉도 화산활동(1.4-0.01 Ma) 보다 먼저 일어났다는 점이 특징적인데, 화산 활동이 종결된 시기를 비교하면 독도가 약 200만년 정도 오래되었다. 따라서 독도와 울릉도 화산활동이 동일 맨틀 플룸으로부터 유발되었다면 양자의 분출시기 차이는 이동하는 판 밑에 존재하는 열점(hot spot)의 주기적 활동에 의한 것으로 생각하는 것이 타당할 것이다. 즉, 독도 화산체가 형성되고 난 이후 판이 동남동 방향으로 이동한 후 울릉도 화산암체가 이후의 열점 활동에 의해 형성된 것으로 보인다. 울릉도 화산활동의 종결 시기를 고려하면 현재 열점의 위치는 울릉도 화산체 하부의 맨틀에 존재해야 할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 해양수산부 지원으로 한국해양연구원에서 1999년부터 2000년까지 수행된 “독도 생태계 등 기초조사

연구(BSPM 99045-00-1282-7)" 사업의 연구비를 통해 이루어졌다. 현장조사에 많은 도움을 주신 온누리호, 이어도호 승조원분들께 감사의 말씀을 드립니다. 이 논문을 심사해 주시고 건설적인 비평을 해주신 대전대학교 황정 교수와 연세대학교 최성희 박사께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 김규한, 박은진, 이성은, 송지혜. 2000. 독도 알칼리 화산암류의 K-Ar 연대와 Nd-Sr 조성. 2000년도 한국자원환경공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회 춘계 공동 학술발표회(초록), p. 281.
- 김윤규, 이대성, 이경호. 1987. 독도 화산암의 분별결정작용. 지질학회지, 23, 67-82.
- 김창환, 박찬홍, 민경덕, 한현철, 권문상, 최성호, 오순복. 2002. 자기이상을 이용한 동해 독도 및 독도주변의 구조와 성인에 관한 고찰. Ocean and Polar Research, 24, p. 491-500.
- 박준범, 권성택. 1993. 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부 지역의 화산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29, 39-60.
- 박준범, 박계현, 정창식. 1996. 제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소 조성. 암석학회지, 5, 89-107.
- 송용선, 박계현, 박맹언. 1999. 울릉도 화산암의 주원소, 희토류 및 미량원소 지구화학. 암석학회지, 8, 57-70.
- 원종관, 이문원. 1984. 울릉도의 화산활동과 암석학적 특성. 지질학회지, 20, 296-305.
- 이종익, 허순도, 허식, 천종화, 한상준. 2000. 동해 한국대지에서 채취된 화강암편의 지구화학 및 Sr-Nd 동위원소 조성. 지질학회지, 36, 279-294.
- 최동림. 1999. 한국대지의 탄성과 층서 및 지질구조 해석. 동해분지의 해양환경 변화와 지구구조 진화 연구(3차년도), BSPE 99755-00-1236-5, 한국해양연구소, 66-82.
- 허식, 천종화, 한상준, Lelikov, E.P. 2000. 동해 한국대지에서 채취한 인산염암의 특징. 지질학회지, 36, 113-118.
- Arai, F., T. Oba, H. Kitazato, Y. Horibe, and H. Machida. 1981. Late Quaternary tephrochronology and paleoceanography of the sediments of the Japan Sea. *Quat. Res.*, 20, 209-230.
- Basu, A.R., W. Junwen, H. Wankang, X. Guanghong, and M. Tatsumoto. 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.
- Briggs, R.M. and G.C. Goles. 1984. Petrological and trace element geochemical features of the Okete volcanics, western North Island, New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, 77-88.
- Irvine, T.N. and W.R.A. Baragar. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Iwamori, H. 1992. Degree of melting and source composition of Cenozoic basalt in southwest Japan: Evidence for mantle upwelling by flux melting. *J. Geophys. Res.*, 97, 10983-10995.
- Kaneoka, I., K. Notsu, Y. Takigami, K. Fujioka, and H. Sakai. 1990. Constraints on the evolution of the Japan Sea based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Sr isotopic ratios for volcanic rocks of the Yamato seamount chain in the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 97, 211-225.
- Kim, H.J., S.J. Han, G.H. Lee, and S. Huh. 1998. Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implication for the opening of the East Sea (Japan Sea). *Marine Geophys. Res.*, 20, 219-237.
- Kim, K.H., T. Tanaka, K. Nagao, and S.K. Jang. 1999. Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea. *Geochem. J.*, 33, 317-341.
- Kim, Y.K. 1985a. Petrology of Ulreung Island, Korea - Part I. Geology. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 80, 128-135 (in Japanese with English abstract).
- Kim, Y.K. 1985b. Petrology of Ulreung Island, Korea - Part 2. Petrography and bulk chemical composition. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 80, 292-303 (in Japanese with English abstract).
- Kim, Y.K. 1986. Magmatic differentiation in the volcanic rocks from Ulreung Island, Korea. *J. Japan. Asso. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 81, 165-180 (in Japanese with English abstract).
- Kimura, M., T. Matsuda, H. Sato, I. Kaneoka, H. Tokuyama, S. Kuramoto, A. Oshida, K. Shimamura, K. Tamaki, H. Kinoshita, and S. Uyeda. 1987. Report on DELP 1985 cruises in the Japan Sea, Part VII: Topography and geology of the Yamato Basin and its vicinity. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, University of Tokyo, 62, 447-483.
- Lee, G.H., H.J. Kim, M.C. Suh, and J.K. Hong. 1999. Crustal structure, volcanism, and opening mode of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Tectonophys.*, 308, 503-525.
- Le Maitre, R.W., P. Bateman, A. Dudek, J. Keller, M.J. Lameyre Le Bas, P.A. Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, A. Streckeisen, A.R. Woolley, and B. Zanettin. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms - Recommendations of the IUGS Subcommittee of the systematics of igneous rocks. Blackwell Scientific Pub-

- lications, Oxford. 193 p.
- Ludwig, M.S., S. Murauchi, and R.E. Houtz. 1975. Sediments and structure of the Japan Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, 651-664.
- Machida, H. and F. Arai. 1983. Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from late Quaternary eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 18, 151-164.
- McKenzie, D. and R.K. O'Nions. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *J. Petrol.*, 32, 1021-1091.
- Miyashiro, A. 1986. Hot regions and the origin of marginal basins in the western Pacific. *Tectonophys.*, 122, 196-216.
- Morris, P.A., T. Itaya, S. Iizumi, H. Kagami, R.J. Watling, and H. Murakami. 1997. Age relations and petrology of alkalic igneous rocks from Oki Dozen, Southwest Japan. *Geochem. J.*, 31, 135-154.
- Mullen, E.D. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implication for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 53-62.
- Nagao, K., A. Ogata, Y.N. Miura, and K. Yamaguchi. 1996. Ar isotope analysis for K-Ar dating using two modified-VG5400 mass spectrometers - I: Isotopic dilution method. *J. Mass Spec. Soc. Japan*, 44, 39-61.
- Nakamura, E., I.H. Campbell, M.T. McCulloch, and S.-S. Sun. 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., M.T. McCulloch, and I.H. Campbell. 1990. Chemical geodynamics in the back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Nd isotopic compositions. *Tectonophys.*, 174, 207-233.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 757-775.
- Pearce, J.A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. p. 525-547. In: *Andesites* ed. by R.S. Thorpe. John Wiley, New York.
- Pearce, J.A. and J.R. Cann. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 290-300.
- Sohn, Y.K. and K.H. Park. 1994. Geology and evolution of Tok Island, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 30, 242-261.
- Sohn, Y.K. 1995. Geology of Tok Island, Korea: eruptive and depositional processes of a shoaling to emergent island volcano. *Bull. Volcanol.*, 56, 660-674.
- Steiger, R.H. and E. Jäger. 1977. Subcommission on geochronology convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 359-362.
- Sun, S.-S. and W.F. McDonough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. p. 313-345. In: *Magmatism in the Ocean Basins*. ed. by Saunders, A.D. and M.J. Norry. Geological Society Special Publication 42, Blackwell Scientific Publications, London.
- Tamaki, K., K. Suyehiro, J. Allen, J.C. Jr. Ingle, and K.A. Pisciotto. 1992. Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. *Proc. ODP Sci. Results*, 127/128, 1333-1348.
- Tatsumi, Y. and S. Eggins. 1995. *Subduction Zone Magmatism*. Blackwell Science Inc., Cambridge, Massachusetts, 211 p.
- Tatsumoto, M. and Y. Nakamura. 1991. DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 3697-3708.
- Tatsumoto, M., A.R. Basu, H. Wankang, W. Junwen, and X. Guanghong. 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.
- Uto, K., E. Takahashi, E. Nakamura, and I. Kaneoka. 1994. Geochronology of alkali volcanism in Oki-Dogo Island, Southwest Japan: geochemical evolution of basalts related to opening of the Japan Sea. *Geochem. J.*, 28, 431-449.
- Yamashita, K. and T. Yanagi. 1994. U-Pb and Rb-Sr dating of the Oki metamorphic rocks, the Oki Island, Southwest Japan. *Geochem. J.*, 28, 333-339.

Received Oct. 21, 2002

Accepted Dec. 24, 2002