

## 독도 화산의 분출유회와 화산형태

황상구<sup>1\*</sup> · 전영권<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>대구가톨릭대학교 지리교육과

## Eruption Cycles and Volcanic Form of the Dokdo Volcano, Korea

S.K. Hwang<sup>1\*</sup> and Y.-G. Jeon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Geography Education, Catholic University of Daegu, Gyongsan 712-702, Korea

The Dokdo volcano in the south-central part of the East Sea is classified into 8 rock units. The units and sequence suggest that the Dok Island forms a small stratovolcano constructed from at least 3 times eruption cycles above the sea level and proceeded with transformation of a few different eruption styles during each cycle. Reconstruction of the volcanic form, from the geologic structures and spatial lithofacies changes, suggests that the island is remnants of the southwestern caldera rim of the stratovolcano whose central part lies several hundred meters to the northeast. The subaqueous volcano shows abig guyot, which looks like a shield volcano, that represents gentle slope at 90~175 m deep and relatively steep one in 200~2,000m, and 25~30 km wide base on sea floor. Therefore the total Dokdo volcano represents a multiple volcano that stratovolcano with small caldera overlies the big guyot.

**Key words :** Dokdo volcano, Eruption cycle, Vulcanian eruption, Stratovolcano, Multiple volcano

독도 화산은 크게 8개 암석단위로 구분되며 이 암석단위와 그 층서는 독도가 해수면 위에서 적어도 3차례 분출유회를 거치면서 성층화산을 형성하였음을 나타낸다. 각 분출유회는 분출 환경에 따라 몇 단계의 분출양식이 바뀌면서 진행되었으며 벌카니언 분출이 가장 지배적이었음을 보여준다. 독도의 원래 화산형태는 지질구조와 공간적인 암상면 화로부터 복원해본다면 작은 성층화산이고 북동부에 작은 칼데라를 가진다. 해수면 위의 독도는 이 성층화산의 외륜 남서부 잔류체라는 것을 지시하고 화구가 북동부 수백m의 근거리에서 위치하고 있는 것으로 추정된다. 해수면 아래에서 독도 화산은 수심 약 90~175 m까지 아주 완만한 경사를 가지는 넓고 평탄한 부분이 직경 약 11 km가량 형성되어 있다. 그 아래 수심 200~2,000 m까지는 상대적으로 급경사를 이루며 기저부 폭이 약 25~30 km를 이룬다. 따라서 해수면 아래의 독도 화산은 마치 거대한 순상화산을 닮은 평정해산을 나타낸다. 그러므로 독도 화산은 해수면 아래 해저까지 전체를 고려한다면 거대한 평정해산 위에 작은 성층화산을 갖는 복식화산을 나타낸다.

**주요어 :** 독도 화산, 분출유회, 벌카니언 분출, 성층화산, 복식화산

### 1. 서 언

독도는 동해 중남부에 솟아 있는 조그마한 해양성 화산도이며 우리나라 영토의 동쪽 끝에 위치하기 때문에 영토 문제로서 국민의 관심이 집중된 곳이다. 이 독도는 육지에서 동쪽으로 약 220 km 떨어져 위치하며, 비록 규모가 작지만 울릉도와 더불어 동해 수면상에 노출된 화산도이기 때문에 동해의 형성 및 발달과

관련하여 지체구조와 암석성인을 연구하는데 있어서 매우 중요한 위치를 점한다. 이 독도는 동해의 남부에 위치하는 울릉분지의 북부에 놓인다(Fig. 1).

울릉도는 역시 심도 약 2 km의 울릉분지의 해저에서 솟아오른 화산도이며 해수면 위에서는 대개 성층화산(stratovolcano)을 이루고 정상부에 직경 2 km 정도의 작은 칼데라(caldera)를 형성하고 있다. 해수면 위의 울릉도 화산활동은 신생대 플레이스트세에서 홀로세 동

\*Corresponding author: hwangsk@andong.ac.kr

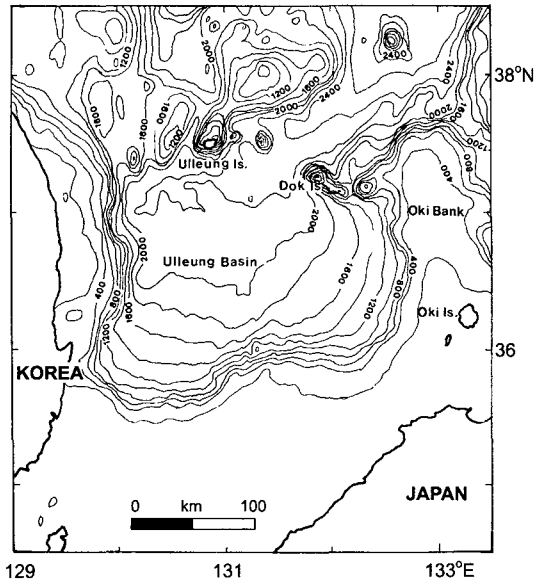


Fig. 1. Location of the Dok Island in the Ulleung basin of the East Sea. Bathymetric contour intervals are in 400 m.

안(1.4~0.01 Ma) 일어났으며(김윤규, 1985a; Kim *et al.*, 1999), 가장 최근의 활동은 9,300~6,300년 전에 있었던 것으로 보았다(Arai *et al.*, 1981; Machida and Arai, 1983). 이에 반해 독도는 후기 플라이오세(2.7~2.1 Ma)에 활동하였기 때문에 더 고기의 화산도이다(이종익 등, 2000).

독도는 울릉분지 내에서 북부에 위치하며 이의 북서쪽 92 km에 울릉도가 위치한다. 그리고 이의 동남동쪽에는 두 개의 해저화산이 존재하며 이들은 각각 독도로부터 약 15 km와 55 km에 위치한다(Fig. 1). 이러한 분포와 활동시기는 독도 동남동의 해저화산이 동쪽부터 차례로 형성된 후에 독도 화산이 형성되고 다음에 울릉도 화산이 생성되었다고 보고 있다(이종익 등, 2000). 즉 울릉분지 내의 북쪽에 분포하는 화산체들이 하와이 제도의 화산 체인처럼 울릉분지 내에서 일어난 일련의 판내부의 확장에 따른 화산작용의 결과로 보는 것이다.

독도는 해수면 위에 동도와 서도 두 섬과 30여 개의 작은 암초로 구성된다. 동도는 고도 88 m, 장경 450 m이며, 서도는 고도 168 m, 장경 550 m이다. 독도는 수중 또는 대기하에서 분출하였으며 섬 전체가 화성쇄설암, 용암과 관입암 등의 화산암류로 구성되어 있다. 특히 용암과 화성쇄설암은 여러번 교호하기 때문에 수차례 반복되는 분출윤회를 엮어낼 수가 있다. 분포면적은 적지만 동도와 서도에서 나타나는 지층경

사, 환상 단층과 암맥 등은 서로 연관성이 있고 규칙성을 보여 화산구조를 읽어낼 수가 있다. 우리는 이러한 점에 중점을 두어 독도 화산의 분출윤회와 원래의 화산형태를 복원하려고 한다.

## 2. 지질학적 배경

독도와 울릉도 화산암들은 중성 내지 산성조성을 갖는 알칼리 계열의 화산암류로 분출 시기별로 다양한 화학 조성을 보이지만 일련의 결정 분화 작용을 겪으면서 형성된 것으로 해석하였다(김윤규, 1985b, 1986; 김윤규 등, 1985, 1986; 김윤규 등, 1987; 송용선 등, 1999; 이종익 등, 2000).

독도와 울릉도 화산암류는 동해 형성과정 해석에 빼놓을 수 없을 정도로 중요한 위치에 있다. 미량 원소 및 희토류원소 조성은 독도 화산암류가 해양판의 섭입과는 관련없는 환경에서 형성된 해양도 화산암류의 성질을 나타내며, 응회각력암 내에 함유된 현무암편의 희토류원소 조성은 경희토류에서 중희토류로의 단조로운 분별작용이 인지되는 것으로부터 이들의 모암마그마가 석류석을 함유한 맨틀물질의 부분용융에 의해 형성된 것으로 해석하였다(이종익 등, 2000). Nd, Sr, Pb동위원소와 지화학적 자료는 동해 형성과 알칼리 화산암의 성인 해석으로부터 다양한 성인 모델이 제시되었다(Nakamura *et al.*, 1989, 1990; Tatsumi *et al.*, 1990; Tatsumoto and Nakamura, 1991; Jolivet *et al.*, 1994). 독도와 울릉도 화산암류는 방사성 동위원소로 구분할 수 없을 정도로 일치하고 이들의 동위원소 조성이 북동아시아 신생대 후기의 여러 알칼리 화산암류와는 대비되지 않는 다른 특성을 가진다(송용선 등, 1999). 또한 이들은 판내부 해양도 화산암류가 갖는 화학조성을 보이기 때문에 이 마그마는 깊은 맨틀로부터 상승한 플룸에 의해 형성된 것으로 해석하였다(이종익 등, 2000). 또한 Nd-Sr 동위원소 특성으로부터 이러한 현무암질 마그마는 맨틀 기원 알칼리 현무암질 마그마에 대륙지각물질의 혼입이 있었던 것으로 해석하기도 한다(김규한, 2000).

그러나 형성 시기면에서 현재 해수면 위의 독도 화산활동(2.7~2.1 Ma)이 울릉도 화산활동(1.4~0.01 Ma)보다 먼저 일어났으며 화산활동의 종결 시기를 비교하면 독도가 약 200만년 정도 앞선다. 따라서 독도와 울릉도 화산활동이 동일한 맨틀 플룸에 그 기원을 둔다면 양자의 분출시기 차이는 이동하는 판 밑에 존재하는 열점의 마그마활동에 의한 것으로 생각하는 것이

타당할 것으로 보고, 독도 화산이 열점으로부터 먼저 형성되고 판의 이동에 따라 동남동 방향으로 이동한 후 울릉도 화산이 후기 열점 활동에 의해 형성된 것으로 해석하였다(이종익 등, 2000). 독도 화산의 동남부에 발달하는 두개의 해저화산들이 울릉도와 독도를 연결하는 선상에 놓이는 것은 이를 뒷받침해준다.

### 3. 독도의 화산층서

현재 해수면 위에 노출된 독도 화산체는 화성쇄설암, 용암과 관입암 등의 화산암들로 구성된다. 이 화산암들은 1980년대 후반에 들어 국내 암석학자에 의해서 본격적인 연구가 시작되었으며(김윤규 등, 1986; 김윤규 등, 1987; Won and Lee, 1988) 1990년대에 그 층서가 수립되었다(Sohn and Park, 1994). 그들에 의하면 독도의 기저를 구성하는 암석은 용암 분출에 의해서 형성된 조면암 I이며 서도에서만 관찰된다. 이 조면암 상 위에는 오랜 기간동안의 화산활동의 중단에 의한 부정합면을 사이에 두고 두꺼운 화성쇄설암이 퇴적되었다. 화성쇄설암은 괴상 각력암(P-I)과 층상 응회암(P-II)으로 구분되었으며 조면안산암 용암의 분출이후에 스크리아성 라

필리응회암(P-III)이 쌓인 것으로 해석되었다. 화성쇄설암 사이에 협재된 조면안산암의 분출연대는 K-Ar 연대측정에 의해서  $2.7 \pm 0.1$  Ma로 분석되었다(Sohn and Park, 1994). 그리고 화성쇄설암층을 덮는 조면암 II의 용암 연대도 이와 동일한 것으로 분석되었다. 독도의 최후 화산활동은 조면암의 관입이며 이 조면암의 K-Ar 연대측정에 의하면  $2.5 \pm 0.1$  Ma로 분석되었다. 이들은 용암과 화성쇄설암의 반복을 나타내는데 이는 성층화산의 일부라는 것을 암시한다.

또한 독도의 용암과 관입암의 전암 K-Ar연대는 초기 분출 조면암 용암이 2.7~2.4 Ma, 중기분출 조면안산암 용암이 2.4~2.3 Ma, 그리고 말기의 조면암 용암 및 암맥이 2.2~2.1 Ma에 형성된 것으로 분석되었다(해양수산부, 2000). 따라서 현재 해수면 위의 독도 화산암류는 2.7~2.1 Ma기간 동안의 후기 플라이오세에 여러 번의 분출 활동을 통해 형성된 것으로 결론지어진다. 이 측정치는 Sohn and Park(1994)에 의해 측정된 2.7~2.5 Ma 범위보다는 상당히 넓은 기간 동안 독도 화산암류의 분출이 있었던 것을 나타낸다.

따라서 울릉도의 화산활동시기와 비교하면 독도는 조면암의 분출과 관입이 약 1~1.7 Ma 보다 먼저 일어

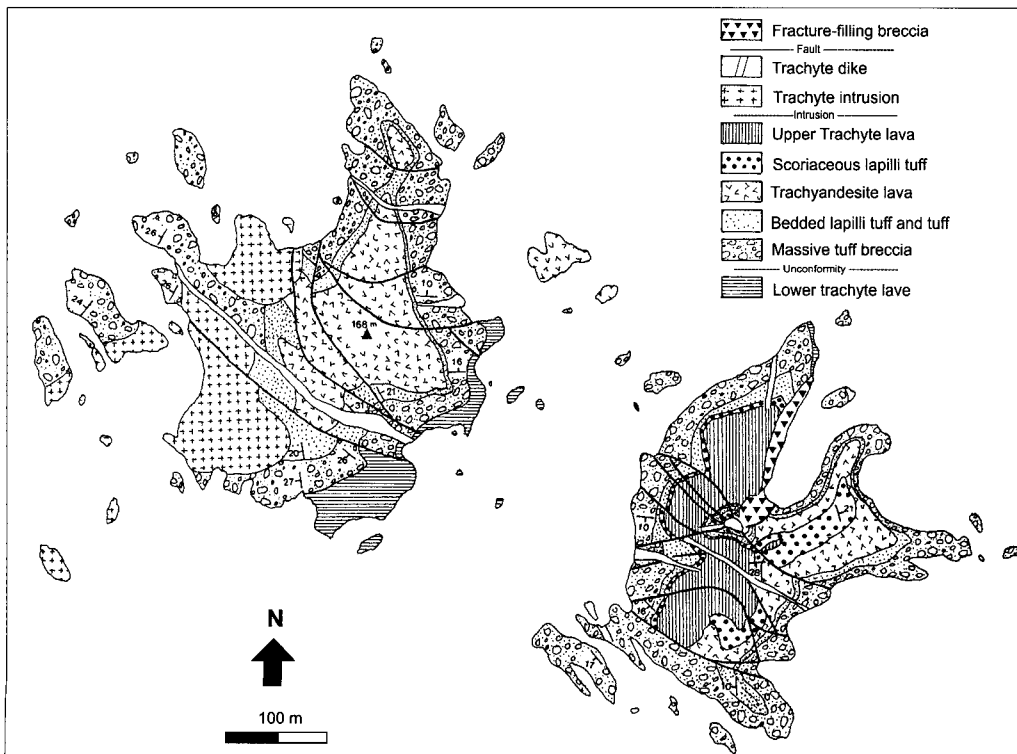


Fig. 2. Geological map Of the Dok Island(modified from Sohn and Park(1994)).

났으며 현무암질 용암류의 분출은 약 2 Ma보다 더 먼저 일어났다고 볼 수 있다.

#### 4. 암 상

독도에서 나타나는 암상은 크게 하부 조면암 용암, 괴상 용회각력암층, 층상 라필리용회암 및 용회암층, 조면안산암 용암, 스크리아성 라필리용회암층, 상부 조면암 용암, 조면암 관입체와 조면암맥 등의 8개 암석 단위로 구분된다.

하부 조면암 용암은 동도의 북부 일부와 서도의 남동부 해안의 해수면 근처에 노출된다(Fig. 2). 이 암상은 대부분 용암이지만 서도의 일부에서 급냉파쇄작용(quench fragmentation)으로 용암과 동질의 유리쇄설성 각력암(hyaloclastic breccia)을 이룬 곳도 있다. 이들은 수증분출에 의해 형성되었으며 상부에 광범위하게 덮고 있는 용회각력암과는 부정합 관계라고 해석하였다(Sohn and Park, 1994; Sohn, 1995).

괴상 용회각력암층은 동도와 서도의 하부에서 수십 m의 두께를 가지며 잘 노출된다(Fig. 3). 이 암상은 괴상 혹은 역점이 구조를 보이며 일부는 성층화되어 있지만, 상부로 가면서 조립화되는 역점이를 나타내는 것이 흔하다(Fig. 4A). 이 암상은 남서쪽으로 15~25° 내외로 경사지거나 거의 수평이며 대개 담갈색 내지는 담회색의 조립질 모래 크기의 기질부와 자갈 이상의 다양한 암편들로 구성된다. 암편들은 기공 함유가 다양하며 유리질 내지 반상 조직을 나타내고 현무암과 조면현무암이 우세하지만 회색의 조면암 및 스크리아 등도 상당히 포함된다. 이들은 대부분 이질 암편들이고 50% 이상을 차지한다. 특히 조면현무암은 휘석 반

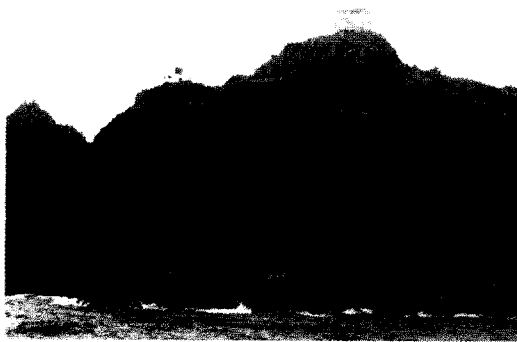


Fig. 3. Coastal cliff of the southeastern part of the east islet. The cliff exposes massive tuff breccia, bedded lapilli tuff and tuff, and trachyandesite lava in the upper order, which are cut by faults and a trachyte dike of WNW-ESE trend.

정이 15 mm에 달하는 반상 조직을 나타내는 것도 있다(Fig. 4B). 이 암편들은 무질서한 배열을 가지며 하부에서 이들의 횡적인 연장성이 아주 불량하고 상부로 가면서 횡적인 연장성이 다소 양호해진다. 암편의 크기는 대체로 북동쪽에서 수m이고 남서쪽 갈수록 작아지고 또한 상부로 가면서도 작아진다. 이 암상은 대규모 수증기마그마성 폭발로부터 대기중에서 화산사면을 따라 암설류 혹은 입자류에 의해서 생성되었고 일부는 이들이 화산 아래의 물 속으로 연속적으로 이동함으로써 형성되었다. 또한 북동에서 남서쪽으로의 두께와 입도 감소는 공급화구가 아마도 북동쪽의 근거리에 있음을 지시한다. 암편들이 다양하고 크며 매우 많이 함유하는 것은 주위의 이미 고결한 용암이나 새로운 마그마의 화구뚜껑을 암시한다. 이러한 암상은 닫힌 화구에서 수증기마그마성 폭발로 인해 발생하는 벨카니언 분출이 일어났음을 지시한다. 이 벨카니언 분출은 해수면 위의 독도에서 가장 강력하고 우세했던 것으로 해석된다.

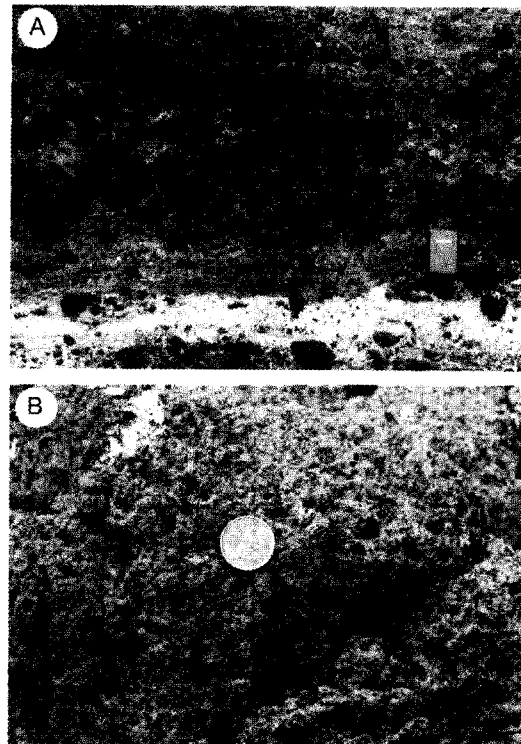
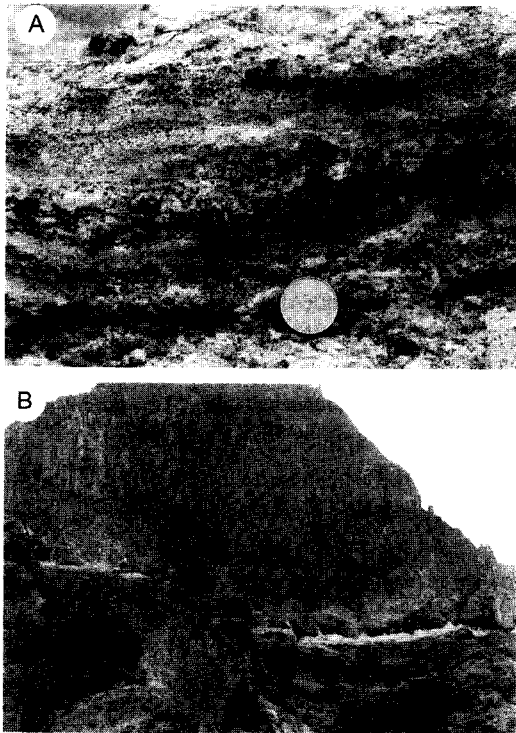


Fig. 4. A, Massive tuff breccia bed near the lowermost step into harbor of the east islet. The bed shows coarsening-upward reverse grading; B, A close-up view of a trachybasalt block containing pyroxene phenocrysts up to 15 mm in diameter within the massive tuff breccia at the southwestern part of the east islet.

층상 라필리응회암 및 응회암층은 괴상 응회각력암층 위에 정합적으로 놓이며 서로 점이적이지만, 그러나 독립문 바위 근처에서는 약한 층리를 보이는 응회각력암층과 뚜렷한 경계를 가지면서 잘 발달된 층리로 변한다. 전반적으로 두께는 수10m이지만 독립문 바위에서 최고 20m이고 남서쪽으로 가면서 얇아진다. 입도는 하부에서 라필리응회암이 우세하지만 상부로 갈수록 응회암이 우세해지며 동시에 남서쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 개개 층은 두께가 수10cm에서 1m정도로 다양하지만 위로 가면서 더 얇아진다. 이층은 주로 성층화되어 있으며, 하층부에서 세립질 라필리에서 조립질 라필리로 약하지만 상향조립화 현상을 보이고 다시 상부로 가면서 세립질 라필리를 거쳐 화산회로 강하게 상향세립화 현상을 보이는 역점이 정점이층을 반복적으로 나타내고 간혹 상향세립화 현상만을 나타내는 정점이층을 협제한다(Fig. 5A). 이 암상은 화구에 인접한 지역에서 수증기마그마성 폭발로



**Fig. 5.** A, Bedded lapilli tuff and tuff beds at the tank rock in the southeastern part of the east islet. The beds show repeatedly reverse-to-normal grading, coarsening upward in the lower part and fining upward in the upper one, and interbedded by a normal grading; B, Trachyandesite lava outcropped in the upper part of the west islet. The lava is characterized by vertical columnar joints, of which discontinuities suggest three flow units in the lava.

인한 탈리언 분출로부터 유래되는 화성쇄설 썩지에 의해 퇴적된 양상을 보이며 북동에서 남서쪽으로의 상변화는 공급화구가 아마도 북동쪽에 있음을 암시한다 (Sohn and Park, 1994).

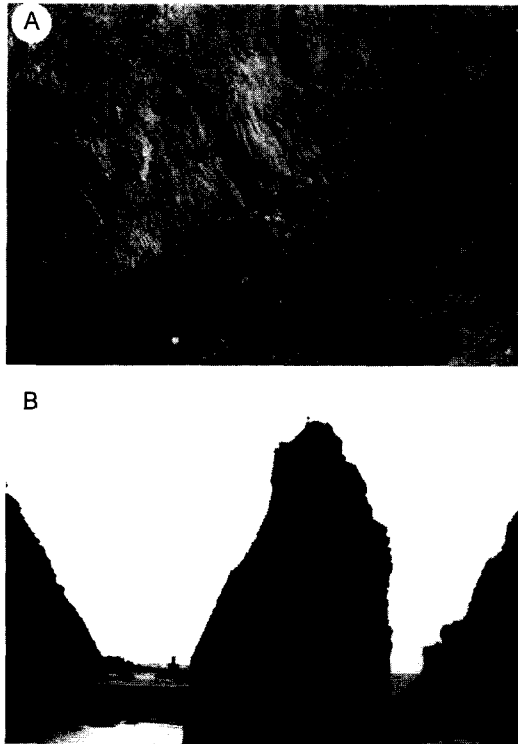
조면안산암 용암은 층상 라필리응회암 및 응회암층 위에 정합적으로 놓이며 그 두께는 최고 100 m 이상이지만 동·서도 전역에 북서-남동 방향으로 발달한 정단층들의 상대적 낙차운동에 지배되어 매우 다양하며 대체적으로 서도의 용암류 두께가 두꺼운 편이다. 이 용암은 층상 라필리응회암과 접하는 기저 경계부의 수 m 정도가 흔히 각력화되어 있다. 이 용암의 기저부는 수축에 의한 열극을 따라 흔히 층상 라필리응회암 최상부의 응회암이 주입되어 불꽃구조를 형성하는데 이로부터 양자는 큰 시간 차이 없이 분출된 것으로 생각할 수 있다. 이 용암은 거의 수직으로 주상절리가 잘 발달하는 것이 특징적이며 절리의 불연속이 용암의 흐름 단위를 암시해준다(Fig. 5B). 이 주상절리는 분출 후에 용암이 냉각될 때 수축됨으로서 형성되는 냉각절리이다. 이 용암의 암질은 담회색의 기저부와 사상석, 알칼리 장석, 단사회석 및 흑운모의 반정으로 구성되어 있는데 반정의 종류 및 함량은 지역적으로 매우 다양하다. 이 용암은 폭발적 분출에 뒤이어 조용한 분출로 전환되었음을 암시하며 곳에 따라 두께 차이는 아마도 단층운동에 따른 낮은 저지에 정지되었다는 것을 의미한다.

스코리아성 라필리응회암층은 동도에서만 조면안산암과 층상 라필리응회암 및 응회암 상위에서 산출된다. 이층은 성층화 응회암이 협제한다. 그 두께는 최고 20 m를 가지며 남서쪽으로 갈수록 얇아진다. 이 암상은 유리질 샤아드와 흑운모, 단사회석으로 구성된 기질에 다양한 크기의 조면암, 조면안산암과 현무암편, 그리고 다공질 스크리아 등이 풍부하게 포함되어 있다. 특히 유리질 샤아드 내에 스크리아는 층리를 따라 편평화된 부분도 관찰된다. 남서쪽으로의 두께와 입도 감소는 공급화구가 아마도 북동쪽의 근거리에서 있음을 지시한다. 다양한 암편들은 먼저 분출된 용암의 파편 혹은 폭발 후에 상승한 새로운 마그마의 화구의 뚜껑 부분을 의미한다. 풍부한 스크리아와 유리질 샤아드는 오로지 수증기마그마성 폭발만을 유지할 정도로 외부 물의 유입이 적었기 때문에 짧은 기간의 마그마성 폭발에 의해 초래되었음을 지시하는 것 같다. 그러므로 이러한 양상은 단한 화구에서 수증기마그마성 폭발로 인해 벌카니언 분출이 일어났음을 의미한다.

상부 조면암 용암은 동도에서만 산출되며 그 두께가 최고 40 m 이상이지만 곳에 따라 다양하다. 상부 조면암 용암은 하부 조면암 용암에 비해 알칼리 장석 취반정이 크고 유색광물의 반정이 현저히 줄어든 특징이 있다. 이 조면암 용암은 스트롬볼리언 분출에 의한 폭발력이 줄어들면서 조용한 용암 분류로 전환되었음을 암시한다. 곳에 따른 두께 변화는 아마도 단층운동에 따른 저지에 용암이 주로 정치되었다는 것을 의미한다.

조면암 관입체는 서도의 서부에 넓게 분포하며 괴상 응회각력암층과 층상 라펠리응회암 및 응회암층을 완만하게 절단하는 양상을 나타낸다(Fig. 6A). 이 관입체는 연변부를 따라 주상절리가 그 접촉부에 직각으로 발달하며, 알칼리 장석 반정이 풍부하다. 이 관입체가 크게 정치된 것은 그 원인을 확실하게 알기는 곤란하지만 아마도 화도에 가까운 부분의 단층대와 약한 층리를 따라 정치된 것으로 생각된다.

조면암맥은 여러 곳에서 산출되며 마지막 관입체를



**Fig. 6.** A, Discordant contact relation of intrusive trachyte with tuff breccia beds. The trachyte intrusion develop closely spaced columnar joints perpendicular to the contact; B, Trachyte dike, 3 m wide, which is a sea stack called as Sutdol rock around the harbor of the east islet. The dike is characterized by horizontal columnar joints normal to the intrusive contacts.

자르고 있다(Fig. 2). 이들은 대부분 북서-남동의 단층 방향에 거의 평행하게 수직으로 발달된다. 그 폭은 모두 10 m 이내이며 흔히 관입 접촉부에 직각으로 주상절리를 형성한다. 특히 주상절리가 거의 수평으로 발달되면서 차별침식으로 주변의 화성쇄설암이 침식되어 없어지고 파식대 상에 시스택(sea stack)을 형성하면서 홀로 솟아있는 경우도 있다(Fig. 6B). 이 암맥은 담녹색을 띠며 반정을 거의 함유하지 않고 세립질이다. 이 암맥들은 대부분 독도의 서북서-동남동 방향의 여러 단층을 따라 관입된 것으로 생각된다.

그리고 동도에서는 관입암 이외에 활발한 단층운동에 의해서 형성된 열극을 따라 화성쇄설물로 채워진 열극충진 각력암(fissure-filling beccia)이 관찰된다(Fig. 2). 이 각력암들은 동도의 천장굴 주변에 북서-남동 방향의 단층대를 따라 분포한다. 이 각력암은 용암에서 떨어져 나온 블록, 이미 고결된 화성쇄설암에서 떨어져 나온 블록들로 혼합되어 있다. 그리고 여기에는 단층운동에 수반되는 파쇄현상이 나타나지 않는다. 그러므로 필자들은 이 각력암이 단층 각력암이라기보다 주위에 불안정하게 놓여있던 크고 작은 쇄설물이 단층에 의해 벌어진 열극으로 슬라이딩됨으로서 채워진 것으로 판단한다.

이러한 생각을 더 연장하면 일부 학자들이 동도의 분화구라고 보는 침식 위치의 설명도 가능하다. 이 위치는 열극충진 각력암을 포함하는 단층선상에 놓여있고 아래에서 같은 방향의 천장굴로 연결되며, 다른 방향의 여러 단층이 교차하는 지점이다. 그러므로 이 위치는 여러 개의 단층이 교차하는 지점이고 열극충진 각력암이라는 약한 구성물로 되어있기 때문에 침식 저항력에는 매우 약했을 것이고 구조적으로 불안정했을 것이다. 따라서 이 곳은 빠른 차별침식작용이 일어남으로서 굴뚝과 같은 수직적인 위치가 형성될 수 있었던 것으로 판단된다.

## 5. 화산구조

독도는 불충분하지만 여러 지질구조와 공간적인 암상변화로부터 원래 화산형태를 복원해볼 수 있다. 괴상 응회각력암층의 주향은 대개 북서-남동 방향이고 경사는 서도의 남서부에서 20~25° 내외로 남서쪽으로 기울어지며 서도의 북동부에서 10~15° 내외로 다소 완만해진다. 동도에서는 남부에서 대체로 15~20° 내외로 남쪽으로 경사되고 북부에서 10° 내외로 더 완만하거나 거의 수평에 가깝다. 그러므로 전체적으로 서도

의 남서부와 동도의 남부에서 더 급하게 남서쪽 혹은 남쪽으로 경사되고 그 북동부와 북부에서 다소 완만해지는 경사를 보인다. 이러한 주향과 경사는 원래 화산의 사면을 지지하는 것으로 생각되며 이들의 변화는 원래 화산의 분화구 외륜을 나타내거나 가깝다는 것을 나타낸다.

독도에서 큰 단층들은 동도 남부의 몇 개를 제외하면 대부분 북서-남동 방향 혹은 서북서-동남동 방향으로 배열되어 있으며(Fig. 2) 북동쪽으로 60° 내외의 경사를 갖는 정단층들이고(Fig. 7A) 대체로 북동부를 중심으로 환상을 이룬다(Fig. 2). 이러한 단층들은 화산체의 형성시에 분화구 혹은 칼데라를 에워싸면서 형성되는 퇴적동시성 단층들이다. 그러므로 이 단층들은 주요 함몰 부분이 북동부라는 것을 지시하고 화산의 분화구 외륜을 따라 발달하는 내측경사의 환상단층이라는 것을 지시한다. 마찬가지로 큰 암맥들도 대체로 서북서-동남동 방향이고 북동쪽으로 급경사를 이루며 환상을 이루는 것도 있다(Fig. 2). 작은 암맥들도 주로 N40°W, 60°NE로 관입되며 북서-남동 방향의 단열대와

일치한다(Fig. 7B). 따라서 이 암맥들은 이 환상단층을 따라 관입되었다는 것을 암시한다.

분출물의 이동방향과 거리 즉 공급화구의 방향과 거리를 암시하는 여러 증거들이 있다. 먼저 층서단위의 두께 변화이다. 예를 들면 층상 라필리용회암 및 용회암층과 스코리아성 라필리용회암층은 각각 북동쪽에서 20 m이고 남서쪽으로 가면서 약 10 m 두께로 얇아진다. 또한 층서단위 내에서 상면화에서 그 증거를 찾을 수 있다. 즉 과상 용회각력암층은 북동쪽에서 암편의 크기가 크고 과상 용회각력암으로서 조립질을 이루지만 남서쪽으로 가면서 암편이 작아지고 성층화 라필리용회암으로 점차 바뀐다. 이러한 변화는 화성쇄설암들이 북동쪽에서 남서쪽으로 이동하였고 이 화산의 화구가 현재 독도의 북동부에 위치한다는 것을 지지해준다.

스코리아성 라필리용회암층의 스코리아들은 화구가 근거리에서 있다는 것을 지시한다. 왜냐하면 스코리아는 흔히 탄도비행으로 이동하고 화구에서 멀어야 수100 m 이내에 떨어지기 때문이다. 그러므로 현재 독도의 분출물들은 근거리의 화구에서 유래되었다고 생각할 수 있다. 이러한 해석들을 종합하면 독도는 화산의 분화구 외륜의 남서부 잔류체라는 것을 지시하고 화구가 북동부 근거리에서 위치한다는 것을 암시한다. 즉 독도를 형성한 화산의 주 화구는 북서-남동방향으로 주로 발달한 단층들을 고려할 때 현재 독도에서 북동쪽으로 수백m 떨어진 곳에 위치하고 있는 것으로 추정된다.

## 6. 분출과정과 화산복원

### 6.1. 분출윤회

이러한 일련의 8개 암석단위와 그 층서는 독도가 여러 단계의 화산활동을 통해 형성되었음을 보여준다. 그러나 여기서 우리는 3개의 용암 단위를 기준으로 그 층서에 따라 적어도 3차례 분출윤회로 묶을 수 있다 왜냐하면 용암분출은 화산연속체에서 마지막 분출물을 나타내기 때문이다(Cas and Wright, 1987). 그리고 각 분출윤회는 분출 환경에 따라 몇 단계의 분출양식이 바뀌면서 진행되었다.

1차 분출윤회는 독도 해저화산 위의 수중에서 비교적 조용한 용암분출이 일어나 도움상 조면암 용암과 유리쇄설성 각력암을 형성하였다. 이러한 분출물은 해수면 아래에 더 크게 연장될 것으로 짐작된다. 또한 용암분출 직전에는 폭발적인 분출단계가 있었을 것으로 생각될 수도 있지만 해수면 위에서는 확인되지 않는다. 그리고 이 용암과 다음 윤회의 화성쇄설암층과

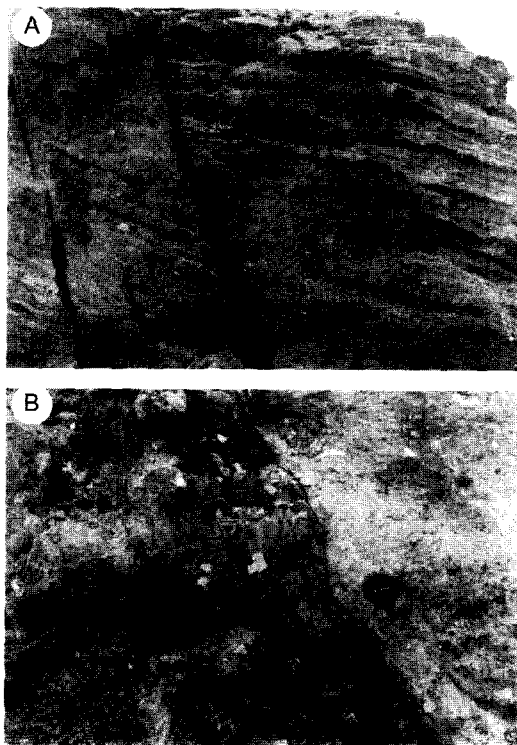


Fig. 7. A, Normal faults developed into NW-SE trend at 60° dip in the west islet; B, Trachyte dike, intruding scoriaceous lapilli tuff beds toward N40°W, 60°NE, is in concordance with the NW-SE trend faults.

의 부정합은 화산활동의 휴지기가 도래하여 다음 폭발 활동이 시작되기 전에 독도의 침식이 일어났음을 암시한다(Sohn and Park, 1994; Sohn, 1995).

2차 분출유희는 독도 화산이 해수면 위로 출현되고 3단계의 분출양식으로 바뀌면서 진행되었다. 먼저 화도에 해수가 유입되어 폭발적인 수증기마그마성 폭발로 유도되었다. 이때 분출양식은 화구가 폐쇄된 상태이었기 때문에 순간적인 폭발이 반복되는 벌카니언 분출이었으며 이로 인하여 매우 크고 다양한 블록을 함유하는 괴상 응회각력암층을 형성하였다. 순간적인 폭발은 폭발후에 상승한 새로운 마그마가 화구에서 뚜껑으로 존재하다가 증가되는 가스 압력으로 인해 순간적으로 붕괴됨으로서 일어난다(Self *et al.*, 1979; Wilson, 1980). 벌카니언 분출은 마치 대포와 같은 강력한 폭발을 일으킨다. 매 폭발마다 포출되는 암석 덩어리는 대개 100~100만톤이고 이질 물질의 함유량이 50% 이상으로 매우 높다. 폭발 사이의 간격은 1분 이하에서 1일 정도이고 화쇄류가 자주 발생된다(Self *et al.*, 1979).

후기로 가면서 점차 해수 유입은 감소되어 해수와 마그마의 혼합비가 폭발강도에 최적에 달하였고 이때 분출은 점차 탈리언 분출로 전환되어 화성쇄설 씨지를 수반하면서 층상 라필리옹회암층을 형성하였다. 이 분출 단계의 마지막에는 마그마 파쇄작용이 거의 절정에 달하여 응회암층을 형성하였다. 그리고 갑자기 해수 유입이 완전히 차단됨으로 또다시 조용한 용암 분출로 전환되어 다량의 조면안산암을 생산하면서 2차 유희는 종식되었다.

그리고 화산구조의 불안정성으로 주위의 단열대 등을 따라 적더라도 해수가 유입되면 다시 폭발력이 생길 수도 있고 마그마 자체의 폭발력이 점차 비축될 수도 있다. 이러한 원인에 의해 3차 분출유희는 스트롬볼리언 분출의 마그마성 폭발과 수증기마그마성 폭발이 교호하는 벌카니언 분출로 다시 전환되어 스킨리아성 라필리옹회암층을 형성하였다. 그리고 점차 폭발력의 소진으로 다시 조용한 분출로 전환되어 조면암 용암이 소량으로 흘러나왔다. 이 용암은 독도에서 마지막 분출물이었으며 거의 도움과 같은 형태로 제한적으로 분포되었다. 그리고 마지막 단계에서는 기존에 형성된 단층과 단열대 등을 통해 잔류 마그마의 관입이 있었던 것으로 생각된다.

## 6.2. 화산 형태

화산 형태는 흔히 마그마성분과 화산분출물에 의해

서 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Tilling *et al.*, 1987). 일반적으로 점성이 낮은 현무암질 용암류(basaltic lava flow)는 넓고 매우 완만한 정상부를 갖는 거대한 순상화산(shield volcano)를 형성하며, 이에 반해 성층화산(stratovolcano)은 중성 마그마의 다중분출(multiple eruption)로 용암과 화성쇄설암 또는 라하르층의 복합적인 구성에 의해 형성된다(Fisher and Schmincke, 1984). 순상화산은 하와이 섬의 마우나케아 화산과 마우나로아 화산이 대표적인 예이고 성층화산은 일본의 후지산과 필리핀의 마운 화산 등이 그 예이다.

전체적인 독도 화산체는 현재 해수면을 기준으로 수심 약 173 m까지는 아주 완만한 경사를 가지며 지름 약 11km의 넓고 평탄한 정상에 형성되어 있는 것으로 보고되었다(Yoon *et al.*, 2001). 그리고 수심 약 200 m부터 약 2,000 m까지는 상대적으로 더 급한 경사를 이루며 독도 화산체의 기저부 직경은 약 25~30 km에 달한다고 한다. 구체적으로 본다면 독도 해저화산은 수심에 따라 7~16°로 다르고 또한 약 800 m 등수심에서 방향에 따라 북쪽과 서쪽이 약 13°의 경사를 이루고 이에 비해 동쪽과 남쪽이 약 8°로서 더 완만하다. 하지만 해저화산의 정상부는 수심 200 m부터 수심 60 m 사이에서 경사가 2° 미만으로 매우 완만하고 평탄한 지형을 이루며 그 위에 동도와 서도가 해수면 위로 솟아 있다(해양수산부, 2000). 그러므로 독도 화산은 전체적으로 수심 약 173 m 아래에는 마치 넓고 완만한 대규모 육상 순상화산을 닮고 정상부가 평탄한 평정해산(guyot)을 이루고 있으며 그 상 위에는 용암과 화성쇄설암이 반복되는 소규모 성층화산을 형성한다. 그러므로 이 양자를 고려하면 순상화산을 닮은 평정해산 위에 작은 성층화산이 겹치는 복식화산을 나타내는 것으로 해석된다.

독도는 독도 화산 하부에 해당하는 거대한 평정해산의 평탄한 정상부 중심으로부터 다소 남측부에 위치한다. 또한 천부지층탐사자료에 의하여 이 평정해산의 평탄한 정상부 상에 독도의 북쪽과 북동쪽에는 높이 약 10 m, 지름 약 250 m의 해저에 작은 화산 잔류체가 발견된다고 한다(해양수산부, 2000). 즉 수심 약 70 m 이하에서 평탄한 지형이 발달하며 독도와 그 주변에 해저화산 잔류체가 솟아 있는 해저지형을 보여준다고 한다. 따라서 독도와 이 해저화산 잔류체들을 연결하면 그 안쪽에 칼데라로 해석될 수 있는 저지가 나타나는데, 이 저지를 독도 칼데라로 칭하였다(해양수산부, 2000). 이 칼데라는 안쪽 수심이 외측보다 약 10m 정



도 얇은 특성을 보이며, 장경 약 2.5 km이고 단경이 약 1.5 km인 타원형을 이룬다. 그러므로 독도 화산 상부의 성층화산에는 소규모 칼데라를 형성했던 것으로 해석할 수 있다.

### 7. 결 론

독도의 화산암류는 크게 하부 조면암 용암, 괴상 응회각력암층, 층상 라필리용회암 및 응회암층, 조면안산암 용암, 스크리아성 라필리용회암층, 상부 조면암 용암, 조면암 관입체와 조면암맥 등의 8개 암석단위로 구분된다. 이러한 일련의 8개 암석단위와 그 층서는 독도가 적어도 3차례 분출유회를 거치면서 성층화산을 형성하였다. 각 분출유회는 분출 환경에 따라 몇 단계의 분출양식이 바뀌면서 진행되었으며 별카니언 분출이 가장 크게 지배하였다.

독도는 지질구조와 공간적인 암상변화로부터 원래 화산형태를 복원해본다면 작은 칼데라를 갖는 성층화산의 외륜 남서부 잔류체라는 것을 지시하고 그 중심부가 북동부 근거리에 위치한다는 것을 암시한다. 즉 독도를 형성한 화산의 주 분화구는 북서-남동 방향 혹은 서북서-동남동 방향으로 발달한 단층들을 고려할 때 현재 독도에서 북동쪽으로 수백m 떨어진 곳에 위치하고 있는 것으로 추정된다

독도 화산은 현재 해수면으로부터 대기하에 노출된 지역이 최고 168 m이며 해수면 아래 수심 약 90~175 m까지 아주 완만한 경사를 가지는 넓고 평탄한 부분이 직경 약 11 km가량 형성되어 있다. 그리고 수심 200~2,000 m까지는 상대적으로 급경사를 가지고 기저부 폭이 약 25~30 km를 이루는데 이러한 형태적 특징은 마치 육상의 순상화산을 닮은 평정해산에 대비된다. 그 상위에는 독도를 포함하는 신장된 원형의 장경 약 2.5 km, 단경 약 1.5 km의 독도 칼데라를 가지는 성층화산을 형성한다. 따라서 독도 화산은 해수면 아래 해저까지 전체를 고려한다면 거대한 평정해산 위에 작은 성층화산을 갖는 복식화산을 이룬다.

### 사 사

이 연구는 울릉군과 경주대학교 울릉학연구소의 지원에 의해 수행되었다. 조사시에 경주대학교 황정환 교수님의 협력에 사의를 표한다. 원고 초교단계에서 자문과 지적해주시는 손영관 교수에게도 감사한다. 그리고 원고 심사과정에서 건설적인 비평과 지적을 해주신 강

원대학교 이문원 교수님과 교원대학교 위수민 교수님에게 감사를 표한다.

### 참고문헌

김규한 (2000) 독도 알칼리 화산암류의 K-Ar연대와 Nd-Sr조성. 지질학회지, 36권, p. 313-324.  
 김윤규, 이대성, 이경호 (1987) 독도 화산암의 분별결정작용. 지질학회지, 23권, p. 67-82.  
 송용선, 박계현, 박맹인 (1999) 울릉도 화산암의 주원소, 희토류 및 미량원소 지구화학. 암석학회지, 8권, p. 57-70.  
 이종익, 허순도, 유찬민, 김예동, 박찬홍, 허식, 권문상, 박병권, Nagao, K. (2000) 독도 화산 활동의 성인: 열점 기원에 대한 새로운 고찰. 대한지질학회 2000년도 추계공동학술발표회 초록집, p. 96.  
 해양수산부 (2000) 독도 생태계 등 기초조사 연구. 서울: BSPM.  
 金允圭 (1985a) 韓國, 鬱陵火山島の岩石學-その1. 地質. 岩石鑛物鑛床學會誌, 80卷, p. 128-135.  
 金允圭 (1985b) 韓國, 鬱陵火山島の岩石學-その2. 岩石記載ひ全岩化學組成. 岩石鑛物鑛床學會誌, 80卷, p. 293-303.  
 金允圭 (1986) 韓國, 鬱陵島火山岩の結晶分化作用. 岩石鑛物鑛床學會誌, 81卷, p. 165-180.  
 金允圭, 吉田武義, 青木謙一郎 (1985) 韓國, 鬱陵島火山岩の地球化學的研究. 東北大學 校理研究報告, 18, 139-157.  
 金允圭, 吉田武義, 李大聲, 青木謙一郎 (1986) 獨島火山噴出物の地球化學的研究. 東北大學校理研究報告, 19卷, p. 335-348.  
 Arai, F., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y. and Machida, H. (1981) Late Quaternary tephrochronology and paleo-oceanography of the sediments of the Japan Sea. Quaternary Research, v. 20, p. 209-230.  
 Cas, R.A.F. and Wright, J.V. (1987) Volcanic succession: Modern and ancient. London, Allen and Unwin, 528p.  
 Fisher, R.V. and Schmincke, H.-U. (1984) Pyroclastic rocks. Berlin, Springer-Verlag, 472p.  
 Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M. (1994) Japan sea, opening history and mechanism: A synthesis. J. Geophys. Res., v. 99, p. 22237-22259.  
 Kim, K.H., Tanaka, T., Nagao, K. and Jang, S.K. (1999) Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East sea, South Korea. Geochem. J., v. 33, p. 317-341.  
 Machida, H. and Arai, F. (1983) Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from late Quaternary eruptions. J. Volcanol. Geotherm. Res., v. 18, p. 151-164.  
 Nakamura, E., Campbell, I.H., McCulloch, M.T. and Sun, S.S. (1989) Chemical geodynamics in the back-arc region around the Sea of Japan: Implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. J. Geophys. Res., v. 94, p. 4634-4654.  
 Nakamura, E., McCulloch, M.T. and Campbell, I.H., 1990, Chemical geodynamics in the back arc region of Japan based on the trace element and Nd-Sr isotopic compositions. Tectonophysics, v. 174, p. 207-233.  
 Self, S., Wilson, L. and Nairn, I.A. (1979) Vulcanian eruption mechanism. Nature, v. 277, p. 440-443.  
 Sohn, Y.K. (1995) Geology of Tok Island, Korea: eruptive

- and depositional processes of a shoaling to emergent island volcano. *Bull. Volcanol.* v. 56, p. 660-674.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H. (1994) Geology and evolution of Tok Island, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 30, p. 242-261.
- Tatsumi, Y., Maruyama, S. and Noda, S. (1990) Mechanism of back-arc opening in the Japan Sea: role of asthenospheric injection. *Tectonophysics*, v. 181, p. 299-306.
- Tatsumoto, M. and Nakamura, Y. (1991) DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 55, p. 3697-3708.
- Tilling, R.I., Heliker, C. and Wright, T.L. (1987) Eruptions of Hawaiian volcanoes: past, present and future. Denver, U.S. Geological Survey.
- Wilson, L. (1980) Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosion. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 8, p. 297-313.
- Won, J.K. and Lee, M.W. (1988) The study on petrology for the Quaternary alkali volcanic rock of the Korean peninsula. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 20, p. 296-305.
- Yoon, S.-H., Lee, Y.K. and Han, S.-J. (2001) High-resolution echo facies analysis of sedimentary deposits around Dok Island volcanoes. *J. Korean Soc. Oceanography*, v. 6, p. 103-113.

---

2003년 10월 2일 원고접수, 2003년 11월 28일 게재승인.