

## 울릉도와 독도 화산암의 생성연대 및 진화사

송용선 · 박맹언 · 박계현\*

부경대학교 환경지질과학과, 부산시 남구 대연동 599-1

## Ages and Evolutions of the Volcanic Rocks from Ulleung-do and Dok-do

Yong-Sun Song, Maeng-Eon Park and Kye-Hun Park\*

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**요약:** 동해 한복판에 위치한 울릉도와 독도의 화산암들에 대한 새로운 K-Ar 연대측정으로 독도로부터는  $3.67 \pm 0.40 \sim 1.89 \pm 0.29$  Ma, 그리고 울릉도로부터는  $8.07 \pm 0.39 \sim 0.51 \pm 0.07$  Ma의 결과를 얻었다. 이는 독도와 울릉도 모두 화성활동의 기간이 기존 연구에서 밝혀진 것보다 연장됨을 나타낸다. 울릉도의 화산활동 시점은 지금까지 알려졌던 것보다 훨씬 오래전인  $8.07 \pm 0.39$  Ma 전까지로 확장될 가능성이 있으며, 독도의 최후기 조면암 분출 및 관입은 울릉도의 화성활동 시기로 보고되었던 시기와 중첩되는  $1.89 \pm 0.29$  Ma까지 지속되었다. 그러나 울릉도 화산체의 형성은 주로 2.7 Ma 이후에 일어났으며, 독도의 화성활동은 이 시기 이전에 대부분 종료된 것으로 보인다. 이는 화산체의 주형성기로 볼 때 독도가 울릉도 이전에 형성되었음을 시사하며, 열점화산활동에 의해 독도 동남부의 해산들로부터 시작하여 독도, 그리고 울릉도로 화산활동이 이어졌다는 해석과 합치한다.

**핵심어:** 울릉도, 독도, 동해, 열점

**Abstract:** We report new K-Ar ages of volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do islands located at the middle of the Korea Sea;  $3.67 \pm 0.40 \sim 1.89 \pm 0.29$  Ma for the Dok-do and  $8.07 \pm 0.39 \sim 0.51 \pm 0.07$  Ma for the Ulleung-do. Such ages reveal that igneous activities of both Dok-do and Ulleung-do extend longer than previously reported. It is likely that igneous activity of Ulleung-do started as early as  $8.07 \pm 0.39$  Ma, which is much older than age known currently, and latest eruption and intrusion of trachyte of Dok-do lasted until  $1.89 \pm 0.29$  Ma, which overlaps previously reported igneous activity of Ulleung-do. However, it seems that the main volcano-building stage of Ulleung-do started after 2.7 Ma and igneous activities of Dok-do were finished mostly before then, which suggests that Dok-do was formed before Ulleung-do in the respect of main stages of volcano-building. Such explanation agrees well with the hypothesis that southeastern seamounts, Dok-do and Ulleung-do were sequentially generated by relatively fixed hotspot.

**Key words:** Ulleung-do, Dok-do, Korea Sea, hotspot

## 서 언

동해상에 자리잡고 있는 화산섬인 울릉도와 독도의 생성과정은 아직 완전하게 규명되지 못하고 있다. 두 섬들에 대해 현재까지 알려진 주요 내용들을 살펴보면 우선 이들은 주변 동해의 수심이 약 2000미터에 이르는 심해저로부터 약 2000~3000 미터의 높이로 솟아올라있는 상당한 규모의 화산체이다. 배호분지(back-arc

basin) 또는 주변해(marginal sea)로 설명되는 동해상에 위치한 울릉도와 독도는 중국의 북동부와 동부 그리고 한반도의 백두산과 한라산 등에서 관찰되는 제4기의 화산활동과 함께 일본열도 동쪽을 따라 아시아 대륙 밑으로 들어가는 태평양판의 섭입작용과 연관된 것으로 해석되기도 하였다(Kuno, 1959), 그러나 최근의 여러 연구에서는 이들이 섭입과 관련한 화성암에서 나타나는 지화학적 특징들이 결여되기 때문에 섭입작용과

\*Corresponding author: Tel. 82-51-620-6241, Fax. 82-51-628-6432, E-mail. khpark@pknu.ac.kr

는 무관한 판내부환경에서의 열점 화산활동에 의해 생성된 화산으로 새롭게 제안되었다(Nakamura *et al.*, 1990; Tatsumoto and Nakamura, 1991). 판의 내부에 위치하는 열점 화산활동의 경우 열점 위에 위치한 판의 움직임 때문에 화산의 생성연대가 열점의 위치로부터 멀어지며 점진적으로 변화할 수 있다. 이러한 현상은 해양판 내부의 대표적인 열점화산활동을 나타내는 하와이 열도 등에서 잘 알려져 있다. 만약 동해의 심해저 위에 자리잡은 울릉도와 독도가 고정된 위치의 심부맨틀에 자리 잡은 열점에 의해 그 위를 움직이는 지판의 내부에 만들어진 화산이라면 하와이 열도처럼 점차 좁아지는 일련의 화산섬들을 만들어 낼 수 있을 것이다. 이러한 가정은 최근에 독도의 남동쪽에 자리잡고 있는 몇 개의 해산이 발견됨으로써 그 가능성이 더욱 커지고 있으며(이종익 외, 2000), 해저지형, 자기 이상분석 및 중력자료로부터 계산한 하부지각의 유효 탄성두께 등의 후속연구에서는 독도로부터 남동쪽으로 가장 먼 곳에 위치하고 있는 제3독도해산으로부터 가장 가까운 제1독도해산의 순서로 형성된 것으로 제안되었다(박찬홍 외, 2002; 김창환 외, 2005).

점진적으로 생성연대가 젊어지는 열점에 의한 판내부 화산활동의 검증에는 화산암에 대한 연대측정이 필수적이다. 현재까지 보고된 자료에 의하면 독도의 경

우  $4.6 \pm 0.4 \sim 2.06 \pm 0.14$  Ma의 범위를 보이며(Sohn and Park, 1994; 김규한, 2000; 이종익 외, 2002), 울릉도는  $2.7 \pm 0.9$  Ma로 보고된 한 표본(민경덕 외, 1988)을 제외하고는 모두  $1.8 \pm 0.7$  Ma 이후로 수천년 전까지 분출된 것으로 알려졌다(Arai *et al.*, 1981; Machida *et al.*, 1984; Xu *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999). 이러한 자료들을 종합하면 독도가 울릉도보다 상대적으로 오래되었으며, 두 섬의 화산활동이 거의 중복되지 않았던 것으로 볼 수 있다. 이는 독도의 남동쪽에 자리잡은 침식된 해저화산들로부터 시작하여 독도, 울릉도의 순으로 고정된 열점에 의해 만들어진 것이라는 가설을 뒷받침한다. 그러나 현재까지의 연대측정 결과가 열점활동을 비롯한 울릉도와 독도의 생성가설을 검증하기엔 충분하지 않다고 판단된다. 이 연구에서는 독도와 울릉도에서 층서적 위치를 고려하여 채취한 여러 화산암 표본으로부터 측정된 새로운 K-Ar 연대 결과를 보고하고, 이러한 화산암 연대자료를 독도 및 울릉도의 생성모델과 연관시켜 논의한다.

### 지질개요

울릉도와 독도의 화산암(Fig. 1, Fig. 2)에 대해서는 층서, 생성시기, 지구화학 등 여러 측면에서 여러 차례

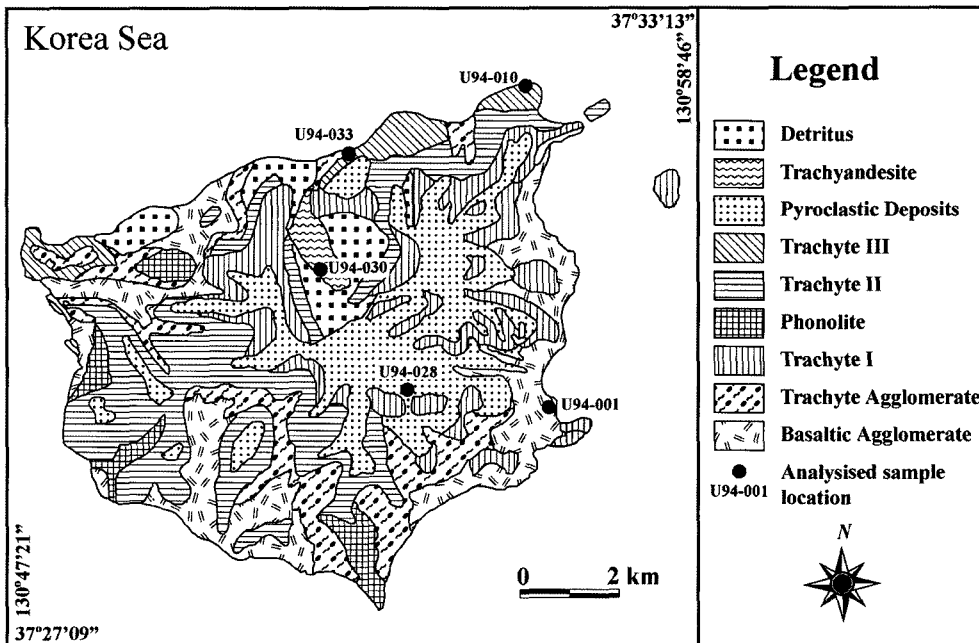


Fig. 1. Geologic map of Ulleung-do modified after Kim(1985a) and sample locations.

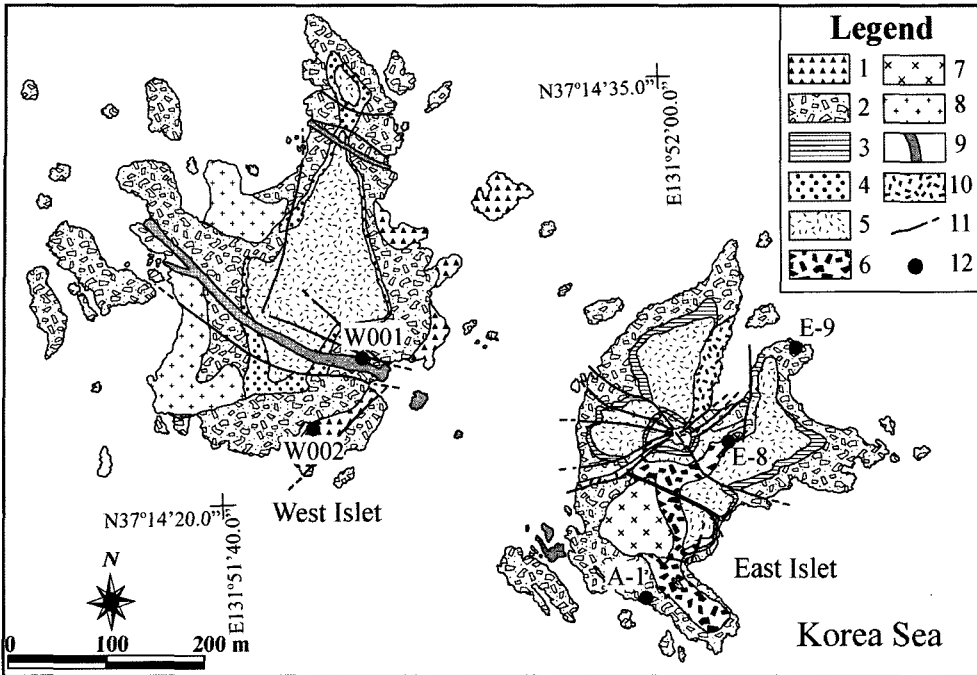


Fig. 2. Geologic map of Dok-do island and sample locations. 1. Fault breccia; 2. Trachyte dike; 3. Trahyte IV; 4. Trahyte III; 5. Scoriaceous lapilli tuff; 6. Trachyte II; 7. Lapilli tuff; 8. Laminated tuff; 9. Tuff breccia; 10. Trachyte I; 11. Fault.

의 연구결과 보고가 있었다. 울릉도에 대한 지질학적 연구는 Harumoto(1970)가 화산활동사와 화산암류의 암석기재적, 암석화학적 특성을 종합적으로 발표하였으며, 이후의 연구들은 이를 바탕으로 하고 있다(김윤규와 이대성, 1983; 원종관과 이문원, 1984; 이민성과 전용원, 1985; Kim, 1985a, 1985b, 1986). 울릉도 화산체의 대부분을 이루는 해수면 아래 부분에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 해수면 위에 드러난 부분은 섬의 둘레를 따른 집괴암층이 분포하고, 그 위에 조면암질 용암층이 급경사의 산체를 이루며, 상부에 후기의 조면암질 미고결 분출물층이 넓은 지역을 덮고 있다. 집괴암층은 조면현무암질인 하부층과 조면암질인 상부층으로 구분된다(Fig. 1). 조면암질 분출물의 생성 이후에 만들어진 나리분지 칼데라의 안쪽에 조면안산암이 분포한다. 울릉도 화산암에 대한 현재까지의 연대측정은 대부분 K-Ar 방법으로 이루어졌으며, 민경덕 외(1988)는  $2.7 \pm 0.9 \sim 1.8 \pm 0.7$  Ma, Xu *et al.*(1998)은  $1.56 \pm 0.04 \sim 0.58 \pm 0.01$  Ma, 그리고 Kim *et al.*(1999)는  $1.36 \pm 0.05 \sim 0.005 \pm 0.004$  Ma의 결과를 보고하였다. 한편  $^{14}\text{C}$  연대측정에 의하면 울릉도에서의 가장 최근 화산분출은 9300~6300 BP까지 지속되었다(Arai *et al.*, 1981; Machida *et al.*, 1984)

김윤규 외(1987)는 독도가 울릉도와 비슷한 화산활동으로 만들어졌으며, 하부로부터 조면현무암질 집괴암, 조면암-조면안산암 용암 분출이 있었고, 이후 암맥이 관입하였다고 기재하였으며, 여러 암상들을 분별정출에 의한 분화관계로 해석하였다. Sohn and Park (1994)은 하부로부터 조면암 I, 괴상(응회질) 각력암, 층상 응회암, 조면안산암, 스크리아질 용결 응회암, 조면암II, 조면암III, 조면암 암맥의 순서로 조금 더 세분된 화산층서를 제시하였다. 괴상 각력암은 김윤규 외(1987)가 집괴암으로 기재한 층으로 현무암질 내지는 조면현무암질 각력들과 응회질 물질들을 포함하며, 이 연구에서는 응회질 각력암(tuff breccia)으로 기재하였다(Fig. 2). 응회질 각력암이 형성된 이후 독도에서 여러 차례에 걸쳐서 일어났던 용암류의 분출은 총알갈리-실리카도형에서 조면암질 내지 조면안산암질 영역에 분산되어 도시된다(예, 이종익 외, 2002). 그러나 많은 암석들이 높은 작열감량(LOI) 값을 보이며, 이를 보정하여 휘발성분이 없는 상태로 재계산하면 대부분 조면암의 영역에 집중되어 도시되기 때문에 이 연구에서는 조면안산암을 따로 구분하지 않고 화산층서적 순서에 따라 조면암 II, III, IV로 기재하였다.

독도 화산암의 생성시기를 살펴보면 Sohn and

Park(1994)은 독도 각력암 내의 현무암력으로부터 4.6 ± 0.4 Ma, 그리고 그 상부의 조면안산암과 조면암으로부터는 2.7 ± 0.1~2.5 ± 0.1 Ma의 K-Ar 연대를 보고하였다. 한편 김규한(2000)은 하부의 응회질 각력암 내의 현무암 및 조면암 등에 대하여 2.42 ± 0.05~2.23 ± 0.12 Ma로 Sohn and Park(1994)의 연대보다 다소 젊은 K-Ar 연대를 보고하였으며, 이중익 외(2002)의 분석결과를 보면 2.65 ± 0.17~2.06 ± 0.14 Ma로 조금 더 젊은 쪽으로 범위가 확장된다. 현재의 독도는 성층화산이 붕괴된 뒤 잔존하는 외륜부에 해당한다고 추정되고 있다 (Sohn and Park, 1994; 황상규와 전영권, 2003).

여러 주원소와 미량원소의 지구화학적 특징과 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 자료로 볼 때 울릉도와 독도는 공통적인 근원물질에서 유래하였을 것으로 생각되는 매우 유사한 지구화학적 특징을 보인다(Nakamura *et al.*, 1985, 1990; Kim, 1986; 김윤규 외, 1987; Tatsumoto and Nakamura, 1991; 송용선 외, 1999; Kim *et al.*, 1999; 김규한, 2000; 이중익 외, 2002).

### 표품채취 및 K-Ar 연대측정

울릉도와 독도의 화산암 표품 채취장소는 Fig. 1과 Fig. 2에 표시하였다. K-Ar 연대측정을 위하여 채취된 표품들의 화산층서적 위치에 대하여 기술하면 다음과 같다. 독도에서는 해수면 위에 드러난 부분 중에서 가장 하부에 분포하는 서도의 조면암 I에서 1개, 그 상부에 덮여있는 응회질 각력암 내에 포함된 현무암력 2개, 그 위를 피복하고 있는 조면안산암 III 1개 시료, 그리고 가장 후기로 생각되는 조면암 암맥 1시료를 채

취하였다. 울릉도에서는 가장 하부의 제1기 현무암질 집괴암에 포함된 조면암질현무암력 1시료, 각력질 응회암층보다 상위의 제3기~제5기 조면암 각 1시료씩, 그리고 가장 후기로 판단되는 조면안산암 1시료를 채취하였다. 일부 표품이 채취된 위치의 지질은 Fig. 1의 지질도에서는 축척의 문제 때문에 마치 상위의 지질구역인 것처럼 표시되어 있음을 밝힌다. K-Ar 분석을 수행한 울릉도 표품의 경우 주원소와 미량원소 농도가 송용선 외(1999)에 수록되어 있으며 지구화학적 특성에 대해 다른 울릉도 표품들과 함께 논의되었다. K-Ar 분석을 위한 암석의 처리는 파쇄 및 체질 뒤에 자력선별기와 양안실체현미경하에서 불순물을 제거하는 일반적인 방법을 따랐으며, K-Ar 연대측정을 위한 K의 농도분석과 Ar 동위원소의 분석은 중국과학원 지질연구소에서 수행하였다. Ar 정량분석에는 고정진공질량분석기(영국 RGA-10 모델)를 사용하였다.

### 결과 및 토의

울릉도와 독도의 화산암들에 대한 K-Ar 연대측정 결과(Table 1)를 살펴보면 독도와 울릉도 모두 각 섬에서 알려진 화산암들의 층서적 관계와 측정된 연대가 잘 일치한다. 독도와 울릉도 모두 가장 하부의 응회질 각력암 내지는 집괴암 내의 화산암편들이 가장 오래된 연대를 보이며, 후기의 분출암과 암맥들 순으로 젊은 연대를 보인다. 그러나 기보고된 연대자료들과 비교할 경우 다소 차이가 있거나 연대의 범위가 훨씬 더 확장되는 결과들을 얻었으며 이를 각각의 섬에 대하여 다음에서 논의한다.

Table 1. K-Ar ages of volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do islands.

Sample No.	Lithology	Stage	K (wt%)	Radiogenic <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-10</sup> mol/g)	<sup>40</sup> Ar <sub>air</sub> (%)	Age (Ma ± 2σ)	
Ulleungdo	U94-001*	Trachytic Basalt	1st	1.62	0.2271	94.07	8.06 ± 0.39
					0.2268	91.60	8.07 ± 0.39
	U94-028	Trachyte	3rd	5.03	0.1851	67.36	2.12 ± 0.32
	U94-010	Trachyte	4th	5.21	0.1419	72.95	1.57 ± 0.25
	U94-033	Trachyte	5th	5.81	0.08413	79.90	0.83 ± 0.15
Dokdo	U94-030	Trachyandesite	6th	4.72	0.04211	88.46	0.51 ± 0.07
	W-02	Trachyte	1st	5.19	0.2465	60.13	2.74 ± 0.43
	A-01	Basalt	2nd	3.59	0.2289	77.14	3.67 ± 0.40
	E-09	Basalt	2nd	3.10	0.1991	79.69	3.70 ± 0.34
	E-08	Trachyte	4th	4.93	0.2471	44.61	2.89 ± 0.43
	W-01	Trachyte	5th	5.14	0.1688	77.23	1.89 ± 0.29

\*Duplicate analyses of <sup>40</sup>Ar content were conducted for U94-001. Ages for this sample were calculated using the same K content.

## 독도

이 연구에서 구한 독도에 대한 연대범위는  $3.7 \pm 0.4 \sim 1.9 \pm 0.3$  Ma이다. 이러한 범위는 기 보고된 연대범위인  $4.6 \pm 0.4 \sim 2.06 \pm 0.14$  Ma(Sohn and Park, 1994; 김규한, 2000; 이종익 외, 2002)와 대체로 일치한다. 하지만 화산층서적 구분에 따른 연대의 범위를 살펴보면 독도에서의 화산활동 기간이 기존자료에서 보고된 것보다 연장됨을 알 수 있다. 우선 수면 위로 드러난 부분 중에서 가장 하부에 분포하는 조면암 I에 대하여  $2.74 \pm 0.43$  Ma의 연대를 얻었다. 동일 조면암에 대해  $2.65 \pm 0.17 \sim 2.38 \pm 0.16$  Ma의 연령을 보고한 이종익 외(2002)의 범위와 비교할 때 오래된 연령 쪽에서 중첩되는 결과이다.

조면암 I을 덮고 있는 응회질 각력암 내의 현무암질 암편 두 표품을 분석한 결과  $3.7 \pm 0.3$  및  $3.7 \pm 0.4$  Ma의 서로 일치하는 결과를 얻었으며 이 현무암질 암편들은 하부의 조면암 I보다 오래되었음을 나타낸다. 즉, 이 부분의 응회질 각력암이 분출할 당시 하부에 있던 오래된 현무암들이 암편으로 포함되었음을 지시한다. 동일한 암층으로부터 Sohn and Park(1994)은 한 개의 현무암질 암편에서 이 연구의 결과보다도 더 오래된  $4.6 \pm 0.4$  Ma의 연대를 얻었다. 그러나 김규한(2000)은 응회질 각력암 내에 포함된 피크라이트질 현무암, 현무암 및 조면암 조성의 4개 표품을 분석하여  $2.42 \pm 0.05 \sim 2.28 \pm 0.12$  Ma의 범위를 보고하였다. 이러한 결과는 조면암 I에 대한 이 연구의 결과보다 다소 젊은 연대를 보고한 이종익 외(2002)의 연대를 감안하더라도 조면암 I의 생성이후에 만들어진 현무암질 암석으로 판단된다. 따라서 조면암 I의 생성후 지표가까이 관입한 현무암질 암장이 형성되었고, 각력질 응회암의 분출시 이 부분으로부터 일부의 현무암질 암편들이 공급되었을 가능성을 나타낸다. 이종익 외(2002) 역시 2개의 현무암 암편으로부터 김규한(2000)의 결과와 유사

한  $2.47 \pm 0.15$  Ma와  $2.06 \pm 0.14$  Ma를 얻었다. 그러나 분석된 암석의 경우 대기  $^{40}\text{Ar}$ 의 비율이 매우 높은 편이며 특히 상부의 조면암들보다도 더 젊은 연대인  $2.06 \pm 0.14$  Ma로 측정된 DE34 시료의 경우 대기  $^{40}\text{Ar}$ 의 비율이 93.7%에 달하기 때문에 실제적인 오차는 보고된 것보다 훨씬 클 가능성이 있다고 판단된다.

조면암 III으로부터 구한  $2.89 \pm 0.43$  Ma의 연대는 오차범위를 감안할 때 Sohn and Park(1994)이  $2.7 \pm 0.1 \sim 2.5 \pm 0.1$  Ma로 보고한 응회질 각력암 형성 이후 여러 차례에 걸쳐서 일어났던 조면암질 용암류의 분출 시기와 비슷하다고 볼 수 있다. 이 연대는 하부의 조면암 I과 오차범위 내에서 일치하는 값으로 조면암 I, 응회질 각력암, 조면암 II, 조면암 III의 생성이 상당히 짧은 기간 내에 이루어졌음을 말해준다. 한편 이종익 외(2002)는 조면암 II-조면암 IV의 분출시기를 이 연구 및 Sohn and Park(1994)보다 젊은  $2.38 \pm 0.15 \sim 2.13 \pm 0.20$  Ma의 연대로 보고하였다. 이와 같이 서로 일치하지 않는 이유는 보고된 자료들 중에 체계적인 측정값의 편향이 있을 가능성을 시사한다. 그러나 현재로는 평가할만한 근거가 없기 때문에 추후에 정밀하고 독립적인 분석을 통해 해결해야 할 과제이다.

한편 서도의 가장 후기 조면암 암맥으로부터 측정된 연대는  $1.89 \pm 0.29$  Ma로 훨씬 젊은 시기까지 독도의 화성활동이 연장됨을 나타낸다. 이종익 외(2002) 역시 가장 젊은  $2.13 \pm 0.29$  Ma의 연대로 보고하였으며 이 연구의 결과와 오차범위 내에서 중첩된다. 이러한 연대는 독도와 울릉도의 화산활동의 시기가 중첩될 가능성을 시사한다.

## 울릉도

울릉도에서 구한 연대자료들은 각 화산암의 층서적 위치에 따라 일관되게 변화하는 연대를 보여준다. 가장 하부의 집괴암에 포함된 조면암질 현무암류가 가장

Table 2. Comparison of K-Ar ages of the volcanics from Dok-do

Stage	Rock type	Sohn & Park (1994)	Kim (2000)	Lee <i>et al.</i> (2002)	This study
Stage 6	Trachyte dike			$2.13 \pm 0.29$ Ma	$1.89 \pm 0.29$
Stage 5	Trachyte IV	$2.5 \pm 0.1$ Ma		$2.16 \pm 0.20$ Ma $2.13 \pm 0.20$ Ma	
Stage 4	Trachyte III	$2.7 \pm 0.1$ Ma			$2.89 \pm 0.43$
Stage 3	Trachyte II	$2.7 \pm 0.1$ Ma		$2.38 \pm 0.1 \sim$ $2.28 \pm 0.20$ Ma	
Stage 2	Basaltic Agglomerate	$4.6 \pm 0.4$ Ma	$2.42 \pm 0.05 \sim$ $2.28 \pm 0.12$ Ma	$2.47 \pm 0.15$ Ma $2.06 \pm 0.14$ Ma	$3.70 \pm 0.34$ Ma $3.67 \pm 0.40$ Ma
Stage 1	Trachyte I			$2.65 \pm 0.17 \sim$ $2.38 \pm 0.16$ Ma	$2.74 \pm 0.43$ Ma

**Table 3. Comparison of K-Ar ages of volcanics from Ulleung-do.**

Stage	Main rock type	Min <i>et al.</i> (1988)	Kim <i>et al.</i> (1999)	This study
7	Pyroclastis*			
6	Trachyandesite	<0.01	0.51 ± 0.07	
5	Trachyte III, Tuff	0.47~0.24	0.83 ± 0.15	
4	Trachyte II, Phonolite	0.73~0.60	1.57 ± 0.25	
3	Trachyte I			2.12 ± 0.32
2	Trachytic agglomerate		0.83~0.77	
1	Basaltic agglomerate	1.8 ± 0.7 Ma 2.7 ± 0.9 Ma	1.37~0.97	8.07 ± 0.39

\*<sup>14</sup>C ages of Machida *et al.*(1984) and Arai *et al.*(1981) indicate 9,300-6,300 BP.

오래된 연대인 8.07 ± 0.39 Ma를 나타내며, 상위의 조면암들은 속한 화산층서적 단계에 따라 점차 젊어지는 연대를 보이고(각각 2.12 ± 0.32 Ma, 1.57 ± 0.25 Ma, 0.83 ± 0.15 Ma), 가장 상위의 조면암질 안산암이 가장 젊은 연대(0.51 ± 0.07 Ma)를 나타낸다. 현재까지 울릉도의 화산암으로부터 보고된 연대 중에서 가장 오래된 것은 2.7 ± 0.9 Ma이다(민경덕 외, 1988). 이 자료 하나를 제외하고는 울릉도에 대한 연대측정 결과가 모두 1.8 ± 0.7 Ma 이후부터 수천년 전까지로 알려졌다(Arai *et al.*, 1981; Machida *et al.*, 1984; Xu *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999). 이번 연구의 결과 중 대부분(2.12 ± 0.32~0.51 ± 0.07 Ma)은 이러한 연대범위에 포함된다. 특히 2.12 ± 0.32 Ma는 지금까지의 자료로 볼 때 화산활동의 상당한 공백기간(2.7 ± 0.9~1.8 ± 0.7 Ma)에 속하는 연대로써 이 기간 중에도 화산활동이 있었음을 보여준다. 이와 함께 8백만년을 상회하는 연령(8.07 ± 0.39 Ma)까지 울릉도의 화산암 연대 범위가 확장되는 결과를 얻었다는 것은 특기할만하다. 하지만 Kim *et al.*(1999)이 보고한 울릉도의 화산층서별 K-Ar 연령은 이 연구의 결과와 엄밀하게 일치하지는 않는다. 층서적 위치에 따라 점차 젊어지는 전체적인 경향성은 동일하지만 이 연구의 결과는 Kim *et al.*(1999)에 비해 다소 오래된 연령으로 측정되었다(Table 3). 이러한 체계적 차이의 원인은 지금 자료만으로는 알 수 없으며, 추가적인 연구를 통해 규명되어야 할 것이다.

한편 이 연구에서 구한 울릉도의 연대 중 8.07 ± 0.39 Ma의 연대는 기존의 연구에서 보고되었던 연대들과 비교시 훨씬 오래된 연대이며 울릉도 화산활동의 역사를 규명하는데 매우 중요한 의미를 가질 수 있기 때문에 자료의 신뢰성에 대한 논의가 필요하다고 판단된다. 따라서 다음과 같이 이 연대가 오류일 가능성에 대한 토의를 거친 후 그 의미를 논하고자 한다.

**8.07 ± 0.39 Ma가 의미없는 연대일 가능성**

**연대측정 오류의 가능성:** 이 표품(U94-001)에 대한 K 함량분석은 서로 다른 두 가지 방법에 의해 구한 것이 있다. 우선 연대산출을 위해 준비한 알갱이들에 대한 K 함량 분석값이 있으며(1.62wt%, Table 1), 주원소의 분석을 위해 독립적으로 분말을 제작하여 X-선 형광분석기로 분석한 값이 있다(송용선 외, 1999). 송용선 외(1999)가 구한 K<sub>2</sub>O 값(2.05wt%)을 K 원소농도로 환산하면 1.71wt%이며 이 표품에 대한 두 분석 값이 큰 차이가 난다고 볼 수 없다.

Ar 분석 결과를 확인하기 위한 한 차례의 추가적 분석을 수행한 결과 역시 오차 범위 내에서 동일한 결과를 나타낸다(Table 1). 따라서 K 및 Ar의 분석실험에서의 심각한 오류는 없는 것으로 판단된다.

**표품 변질의 가능성:** 원래와 다른 연대를 산출할 수 있는 다른 가능성으로는 표품의 변질을 가정해 볼 수 있다. 분석된 표품이 화산질 각력이기 때문에 더욱 더 변질의 가능성을 검증해 볼 필요가 있다. 그 이유는 화산암으로 분출된 이후 화산력이나 각력으로 만들어지는 동안에 풍화나 열에 의한 변질을 받았을 가능성도 있다. 이러한 과정 중에 가스질인 Ar의 손실과 유동성인 K의 추가나 손실을 생각해 볼 수 있다. 또한 상당히 높은 대기 40Ar의 비율(91.6-94.1%) 역시 변질의 결과일 가능성도 있다. 그러나 표품의 상태로 볼 때 적어도 육안으로는 다른 표품들에 비해 현저한 변질의 영향이 관찰되지는 않는다. 이 표품의 작열감량(LOI) 값이 3.35%(송용선 외, 1999)로 다른 표품들에 비해 특별히 높지는 않은 점도 변질의 영향이 그리 크지 않음을 지시한다. 또한 변질이 일어날 경우 불활성기체인 Ar의 손실이 K의 손실보다 쉽게 일어나는 경우도 예상할 수 있다. 이러한 변화는 원래의 연대보다 더 젊

**Table 4. Comparison of geochemical characteristics of the volcanic rocks from Ulleung-do and Oki Dozen Islands**

Geochemical elements	Ulleungdo	Oki Dozen
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	5.29~13.89 wt%	6.89~11.98 wt%
Average	11.3±2.6 (n=27)	10.8±1.5 (n=15)
Nb	51~258 ppm	65~289 ppm
Average	154±48 (n=27)	131±59 (n=15)
(La/Yb) <sub>CN</sub>	16.2~28.2	16.2~34.5
Average	23.0±2.7 (n=27)	23.4±7.7 (n=5)
( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	0.70380~0.70922	0.70517~0.70641
Average	0.70531±0.001276 (n=28)	0.70577±0.00046 (n=12)
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.512509~0.512615	0.512314~0.512476
Average	0.512554±0.00031 (n=27)	0.512405±0.00047 (n=9)

Geochemical data for the Ulleung-do and Oki Dozen are from the literatures (Morris *et al.*, 1997; Song *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 1999). All the standard deviation values indicate 1 sigma.

은 연대가 산출되게 만드는 변화로, 만약 이러한 영향이 있었다면 이 표품은 이 연구에서 측정된 것보다도 오히려 더 오래된 연령을 가져야만 한다. 그러나 변질과정중 알칼리 원소인 K의 선택적 용출 등의 가능성을 완전히 배제할 수는 없으며 이의 확인을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

**과잉 Ar 측정 가능성:** 연대가 오래되게 나올 수 있는 요인으로는 과잉 Ar의 측적을 들 수 있다. 그러나 이 표품은 맨틀 근원의 열기성 암석이기에 때문에 마그마의 근원지에 오래된 지각물질들과 같이 상당히 높은 <sup>40</sup>Ar 값을 갖는 물질이 존재했을 것으로 생각되지 않는다. 그러나 동해의 생성과정에서 만들어진 이 지역의 지각이 완전한 해양지각은 아니며, 부분적으로는 대륙지각의 잔존물들이 상당량 포함되어 있다고 알려져 있다. 따라서 맨틀 기원의 마그마가 상당기간 이러한 전이지각 내에 형성된 마그마방에 체류하였다면 어느 정도의 과잉 Ar 효과를 생성시켰을 가능성도 완전히 배제할 수는 없다. 그러나 다른 암석 표품들과는 달리 이 표품에만 과잉 Ar의 영향이 존재해야하는 모순적인 결과가 도출된다. 더욱이 알칼리 현무암질 마그마의 분출은 지하 깊은 곳으로부터 빠르게 상승하여 이루어지는 경우가 많기 때문에 얕은 지각 내에서의 장기적 체류는 가능성이 낮다고 판단된다.

## 8 Ma 연대의 해석

이상에서는 측정된 연대가 오류일 가능성에 대하여 논의하였다. 그러나 앞에서 논의한 것과 같이 이 표품의 연령이 확실히 잘못되었다고 의심할만한 논리적 근거는 희박하기 때문에 여기서는 8Ma가 이 표품의 연령이라는 전제하에 그 의미에 대하여 논의한다.

동해는 울릉도의 화산활동이 일어나기 이전에 생성되기 시작하였다. 즉, 울릉도는 이미 동해가 만들어진 이후에 형성된 화산체이기 때문에 울릉도의 하부에는 동해의 형성과 관련하여 만들어진 해양성 혹은 준해양성 지각이 존재할 것으로 생각되며, 이러한 지각을 구성하는 현무암질 암석이 울릉도의 화산체 형성 동안에 암편으로 포함되었을 가능성을 배제할 수 없다. 그러나 8 Ma를 갖는 암편(U-001)의 화학조성을 살펴보면 울릉도의 다른 화산암들에 비해 비교적 낮은 K<sub>2</sub>O 함량 및 높은 MgO 함량 등 상대적으로 덜 분화된 화학조성을 갖고 있다. 그러나 높은 친액원소의 함량과 높은 (La/Lu)<sub>CN</sub> 비율 등과 같은 울릉도와 독도의 전형적인 화학조성 특징들을 갖고 있으며(송용선 외, 1999), 중앙해령 현무암(Mid-Ocean Ridge Basalt; MORB)이나 배호분지 현무암(Back Arc Basin Basalt; BABB)과 같은 전형적인 해양지각의 특징적 조성과는 다르다고 할 수 있다. 따라서 동해의 해양성 내지 준해양성 지각의 형성과 관련된 암석이라기보다는 울릉도 및 독도를 형성시킨 열점활동과 유사한 근원물질에서 공급된 마그마의 산물로 해석하는 것이 타당하다고 판단된다.

울릉도에서 독도의 화산암보다도 오래된 화산암이 발견된다는 것은 울릉도와 독도가 단순히 순차적 형성 과정을 겪은 것은 아닐 수도 있음을 시사한다. 그러나 울릉도에서 현재까지 측정된 대부분의 화산암 연대는 두 표품을 제외하고는 모두 2.12±0.32 Ma~6800BP이며, 독도의 경우도 최후기의 조면암 암맥을 제외하고는 모두 4.6±0.4~2.28±0.12 Ma이다. 즉, 두 화산섬의 주된 형성시기를 보면 독도가 먼저 형성되었으며, 울릉도 화산체의 주된 형성시기는 독도가 다 만들어진 이후에 시작되었음을 알 수 있다. 열점활동에 의해 순차적으로 형성된 것으로 잘 알려진 하와이 열도의 경

우에도 다음의 화산체가 만들어진 이후까지 화산활동이 지속되는 경우도 많기 때문에 울릉도가 형성되기 시작한 이후에 관입한 독도의 암맥은 열점활동에 의한 순차적인 화산체 형성 가설에 배치되지는 않는다고 할 수 있다. 그러나 울릉도에서 발견된 독도의 화성활동보다도 오래된 연령을 갖는 암석은 동일한 열점으로부터 만들어진 것으로 해석하기 곤란하다. 만약 독도 남동부의 해산들과 독도 및 울릉도를 순차적으로 형성시킨 맨틀 플룸과는 다른 맨틀 플룸에서 만들어진 화산암이 울릉도 하부에 존재하는 것은 동해의 형성 뒤에 열점화산활동의 근원인 맨틀 플룸이 동해에 여러 개 존재하였을 가능성을 시사한다. 즉, 여러 개의 플룸 중에서 짧은 활동기간을 가졌던 맨틀 플룸이 울릉도 하부에서 마그마를 공급한 뒤 소멸되었을 가능성도 있다.

약 7 Ma부터 형성되기 시작한 동해 남동부 Oki Dozen 섬의 화산암의 조성(Morris *et al.*, 1997)을 살펴보면 최고 11.98wt%에 이르는 매우 높은 알칼리 함량( $K_2O + Na_2O$ )과 같은 주원소 특징, 최고 289 ppm에 달하는 높은 Nb 함량 및 높은  $(La/Lu)_{CN}$  비율등의 미량원소 조성, 그리고 상당히 부화된 특징을 보이는 Sr 및 Nd 동위원소 조성 등이 울릉도 및 독도와 매우 비슷한 특징을 갖는다(Table 4). 이는 Oki Dozen 섬 역시 동해에 존재했던 울릉도-독도의 경우와 비슷한 근원물질로 구성된 맨틀 플룸에서 만들어진 열점활동 산물일 가능성이 높다고 판단된다. 이는 울릉도와 독도를 형성시킨 것과 매우 유사한 근원물질로 구성된 플룸이 동해의 여러 곳에 존재하였을 가능성을 뒷받침해 준다.

## 결 론

울릉도 화산체의 주형성기는 독도 화산체의 주형성 단계 이후에 시작되었다고 판단된다. 이는 열점화산활동에 의해 독도 동남부의 해산들로부터 시작하여 독도, 그리고 울릉도로 화산활동이 이어졌다는 해석을 뒷받침한다.

울릉도의 집괴암에 포함된 약 8백만년된 암석은 울릉도 화산체를 형성시킨 맨틀 플룸과는 다른 맨틀 플룸 즉, 동해에 존재했던 여러 개의 맨틀 플룸 중 단기간 활동했던 플룸의 산물일 가능성이 높은 것으로 판단된다. 울릉도의 8백만년된 암석과 울릉도-독도, 그리고 Oki Dozen 섬의 화산암들이 모두 비슷한 지화학적 특징을 보이는 것은 이러한 맨틀 플룸들이 공통적인 지화학적 특징을 가진 근원물질로 구성되었음을 시사한다.

## 사 사

원고의 준비에 많은 도움을 준 김남훈 석사에게 감사한다. 또한 원고를 읽고 많은 건설적 비판을 아끼지 않은 이종익 박사와 김정민 박사께 감사드린다. 동해는 서양의 고지도 상당수에 Korea Sea, Corea Sea, Sea of Korea 혹은 Sea of Corea 등으로 기록되어 있기 때문에 Korea Sea를 사용하였음을 밝힌다.

## 참고문헌

김규한, 2000, 독도 알칼리 화산암류의 K-Ar 연대와 Nd-Sr 조성. 지질학회지, 36, 313-324.  
 김윤규, 이대성, 1983, 울릉도 북부 알카리 화산암류에 대한 암석학적 연구. 광산지질, 16, 19-36.  
 김윤규, 이대성, 이경호, 1987, 독도 화산암의 분별결정작용. 지질학회지, 23, 67-82.  
 김진호, 박수철, 강무희, 김경오, 한현철, 2005, 울릉분지와 동해 해산의 기원과 발달과정에 대한 해양지구물리학적 연구. 자원환경지질, 38, 643-656.  
 김창환, 박찬홍, 유상훈, 민경덕, 심재설, 2005, 중력자료를 이용한 울릉분지 북동부의 독도해산들에 관한 연구. 지질학회지, 41, 523-531.  
 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 김규한, 1988, 한국 남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론 적용성 연구(II). 지질학회지, 24, 특별호, 11-40.  
 박찬홍, 김창환, 천종화, 민경덕, 한현철, 박용안, 2002, 해저지형 및 자기이상 분석에 의한 독도 및 주변 해산 구조 및 성인 연구. 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 제57차 추계공동학술발표회 초록집, 18.  
 송용선, 박계현, 박맹언, 1999, 울릉도 화산암의 주원소, 휘토류 및 미량원소 지구화학. 암석학회지, 8, 57-70.  
 원종관, 이문원, 1984, 울릉도의 화산활동과 암석학적 특성. 지질학회지, 20, 296-305.  
 이민성, 전용원, 1985, 한반도 남부의 제4기 화산암류와 이들의 tectonic한 환경. 지질학회지, 21, 260-280.  
 이종익, 허순도, 유찬민, 김예동, 박찬홍, 허식, 권문상, 박병권, Keisuke Nagao, 2000, 독도 화산활동의 성인: 열점 기원에 대한 새로운 고찰. 대한지질학회 추계학술발표회, 초록집, 96.  
 이종익, 허순도, 이미정, 유찬민, 박병권, 김예동, 권문상, Keisuke Nagao, 2002, 독도 화산암류의 암석학적 특징과 지구화학. Ocean and Polar Research, 24, 465-482.  
 천종화, 한상준, 정대교, 허식, 박정준, 최동립, 1998, 울릉분지 북동부 해저수로 주변 퇴적층의 화산체증서. 지질학회지, 34, 192-210.  
 황상구, 전영권, 2003, 독도 화산의 분출유희와 화산형태. 자원환경지질, 36, 527-536.



- 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. *The Quaternary Research*, 20, 209-230. (in Japanese with English abstract)
- Harumoto, A., 1970, Volcanic rocks and associated rocks of Utsuryoto Island (Japan Sea). Nippon Printing & Publishing Co., Kyoto, 39p.
- 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.*, 33, 317-341.
- Kim, Y.K., 1985a, Petrology of Ulreung volcanic island, Korea -Part 1. *Geology-. J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 80, 128-135. (in Japanese with English abstract)
- Kim, Y.K., 1985b, Petrology of Ulreung volcanic 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. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 81, 165-180. (in Japanese with English abstract)
- Kuno, H., 1959, Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas. *Bull. Volcanol.*, 20, 37-76.
- Machida, H., Arai, F., Lee, B.S., Moriwaki, H. and Furuta, T., 1984, Late Quaternary tephtras in Ulreungdo Island, Korea. *J. Geography*, 93-1, 1-14.
- Min, K.D., Kim, O.J., Yun, S., Lee, D.S. and Kim, K.H., 1982, Igneous activity and mineralization since late Cretaceous in southern Korea. KOSEF Report, 70p.
- Morris, P.A., Itaya, T., Iizumi, S., Kagami, H., Watling, R.J. and Murakami, H., 1997, Age relations and petrology of alkalic igneous rocks from Oki Dozen, Southwest Japan. *Geochemical Journal*, 31, 135-154.
- Nakamura, E., Campbell, I.H. and Sun, S.-s., 1985, The influence of subduction processes on the geochemistry of Japanese alkaline basalts. *Nature*, 316, 55-58.
- 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 Sr-Nd isotopic compositions. *Tectonophysics*, 174, 207-233.
- 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.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 1994, Geology and evolution of Tok Island, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 30, 242-261.
- 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*, 55, 3697-3708.
- Xu, S., Uto, K. and Kim, Y.K., 1998, K-Ar dating of volcanic rocks from Ulreung Island, Korea. *Geochem. J.*, 32, 117-123.

---

(2006년 4월 25일 접수; 2006년 5월 9일 채택)