

## 방사성탄소연대와 광여기루미네선스연대 비교를 통한 거문오름 분출시기 연구

안웅산<sup>1</sup> · 최정현<sup>2,\*</sup> · 여은영<sup>3</sup>

<sup>1</sup>제주특별자치도 세계유산본부

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원

<sup>3</sup>충남대학교 분석과학기술대학원

### 요 약

거문오름은 세계자연유산으로 등재된 거문오름 용암동굴계를 형성한 단성화산체로, 그 형성시기는 아직까 지 명확하게 밝혀지지 않았다. 본 연구에서 거문오름 용암류 및 분석층 하부에 있는 고토양층에 대한 방사성탄 소연대측정과 광여기루미네선스 측정결과 각각 약 1.2만년과 약 8천년의 연대를 얻었다. 방사성탄소연대측정 결과가 OSL 연대보다 오랜 연대를 보이는 것은 고토양 내에 포함된 old carbon 성분에 의한 것으로 추정되 지만, 이 논문에서는 확실한 원인은 규명되지 않았다. 지금까지 20~30만년 전에 형성된 것으로 알려졌던 거문오 림용암동굴계가 약 8천년 전 이후 형성된 매우 젊은 용암동굴임을 새롭게 밝혔다.

**주요어:** 제주도, 광여기루미네선스, 방사성탄소연대, 고토양, 고탄소, 과측정

**Ung San Ahn, Jeong-Heon Choi and Eun-Young Yeo, 2017, Eruption timing of the Geomun Oreum through the comparison of radiocarbon and quartz OSL ages. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 3, p. 367-376**

**ABSTRACT:** The eruption timing of the Geomun Oreum scoria cone, which is related with the formation of Geomun Oreum lava tube system, has not been well understood yet. In this study, results from quartz OSL and AMS <sup>14</sup>C dating on the paleosol underlying the scoria deposits and lava of Geomun Oreum were ca. 8 ka and ca. 12 ka, respectively. Although the overestimation of AMS <sup>14</sup>C ages compared with OSL ages is not fully understood here, it is suspected to be from the incorporation of old carbons into the paleosols. The Geomun Oreum lava tube system has long been considered to have formed at ca. 0.2-0.3 Ma. However, this study casts doubts on this traditional view, and shows that it is a very young lava tube formed since about 8 ka.

**Key words:** Jeju Island, OSL, radiocarbon age, paleosol, old carbon, overestimation

(Ung San Ahn, World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 63341, Republic of Korea; Jeong-Heon Choi, Division of Earth and Environmental Sciences, Ochang Center, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea; Eun-Young Yeo, Graduate School of Analytical Science and Technology (GRAST), Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)

### 1. 서 언

제주도에는 360여개의 단성화산체(monogenetic volcano)들이 분포한다. 서로 다른 시기에 활동한 개 개의 단성화산체에서 분출한 용암류 및 화성쇄설물 들은 서로 덮고 덮이는 관계를 가진다. 화산활동들 사 이의 휴지기에는 수 cm에서 수 m에 달하는 지표퇴적 물이 발달하기도 한다(Park *et al.*, 1998, 2000a, 2000b).

이들 화산분출물 사이에 협재된 퇴적층은 화산분출의 시기를 추정하는 좋은 시료가 된다(예, Lian and Shane, 2000; Siebe *et al.*, 2004, 2005; Shaanan *et al.*, 2011). 최근 제주도 화산분출물(용암류 혹은 화성쇄설물) 하 부의 고토양(혹은 생물편)에 대한 방사성탄소연대측 정 및 광여기루미네선스 연대측정으로 1만 년 이내의 비교적 젊은 화산활동들이 다수 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2014; Ahn *et al.*, 2015; Sohn *et al.*, 2015; Ahn

\* Corresponding author: +82-43-240-5333, E-mail: jhchoi@kbsi.re.kr

and Ahn, 2016; Choi, 2016). 이러한 기존의 연구성과는 지금까지 분출시기가 밝혀지지 않은 화산에 대하여 적절한 연대분석 시료만 확보된다면 분출연대를 정확하게 파악할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 거문오름과 관련된 용암류 및 분석(scoria)층 하부에서 고토양층을 찾아내고, 이에 대한 방사성탄소연대측정 및 광여기루미네선스 연대측정으로 거문오름의 분출시기를 밝히고자 한다.

2. 거문오름 분석구와 용암류

거문오름 분석구는 하단의 직경이 약 1.4 km, 비고가 약 120 m인 말밭급 분석구이다. 분석구의 북쪽 및 북서쪽에는 분석구 중앙으로부터 약 1.8 km에 걸쳐 분석층이 넓게 분포한다. 분석구의 북동쪽 방향으로는 거문오름에서 흘러나온 용암이 해안까지 약 13 km에 걸쳐 분포한다(그림 1). 거문오름 용암류 흐름과 관련된 일련의 용암동굴들을 거문오름용암동굴계라 한다(Hwang *et al.*, 2005; Ahn and Hwang, 2009). 거문오름은 초기 용암분천(lava fountain)에 의한 분석구 형성 단계에서 후기의 용암분류(lava effusion) 및 용암동굴 형성단계로 진화해 갔다(Ahn, 2010). 이러한 거문오름 화산분화과정은 초기에서부터 화산분화과정이 상세히 연구된 하와이 푸오오 화산(1983~

현재)에서의 분화패턴과 매우 닮았다(Heliker *et al.*, 2003). 세계 도처의 많은 단성화산들이 비교적 짧은 시간동안 활동하는 것을 감안할 때(Wood, 1980), 거문오름 또한 분석구 형성단계에서 용암류 분류 단계로의 전환에 있어 시간적 간극이 크지 않은 일련의 화산활동이었을 것으로 여겨진다.

지금까지 거문오름용암동굴계는 K-Ar연대측정으로 20~30만년 전에 형성된 것으로 보고된바 있다(Hwang *et al.*, 2005). 최근 Koh *et al.* (2013)는 제주도 전역의 지표 및 지하시료를 대상으로 연대측정을 시도하면서 만장굴 인근 지역에서 Ar-Ar연대측정을 시도하였으나 연대획득에 실패한 바 있다.

3. 시료채취 및 분석

퇴적물의 퇴적시기를 보다 정확히 파악하기 위해 동일한 퇴적물 시료에 대하여 방사성탄소연대측정이나 광여기루미네선스 연대측정과 같은 서로 다른 연대측정 기법을 적용하여 비교하거나(예, Lee *et al.*, 2011, 2014; ChongYi *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2012), 동일 층준의 서로 다른 여러 지점에서 시료를 채취하여 연대결과를 서로 비교(예, Lian and Shane, 2000; Siebe *et al.*, 2004; Ahn, 2016) 하는 등 다양한 시도를 할 수 있다.

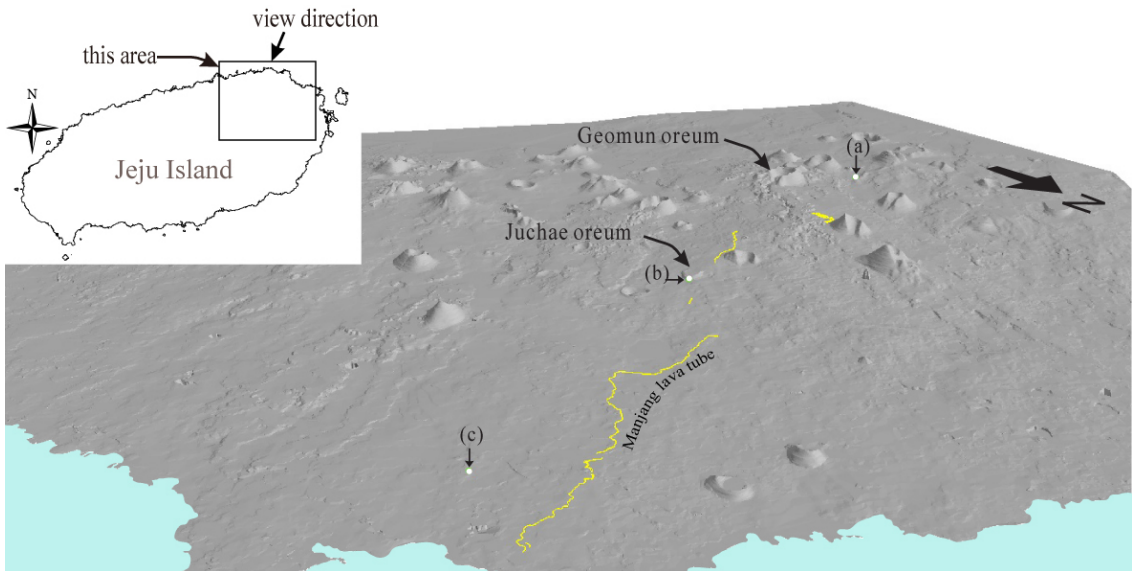


Fig. 1. Aerial view of Geomon Oreum and Geomon Oreum Lava Tube System (yellow line) from the northeast, with vertical exaggeration of x2. Black arrows indicate the locations of dating.

본 연구에서는 연대측정의 신뢰도를 높이기 위하여 거문오름 화산활동과 관련된 고토양층에 대하여 광여기루미네선스 연대측정(이하 OSL)과 방사성탄소연대측정을 실시하였다. 분석시료는 거문오름 분석층 하부의 고토양 1개 지점, 거문오름 용암 하부의 서로 다른 2개 지점에서 고토양층을 채취하였다(그림 1). 각 지점에서는 OSL 시료와 AMS 시료를 채취하여 각각의 연대결과를 비교할 수 있도록 하였다.

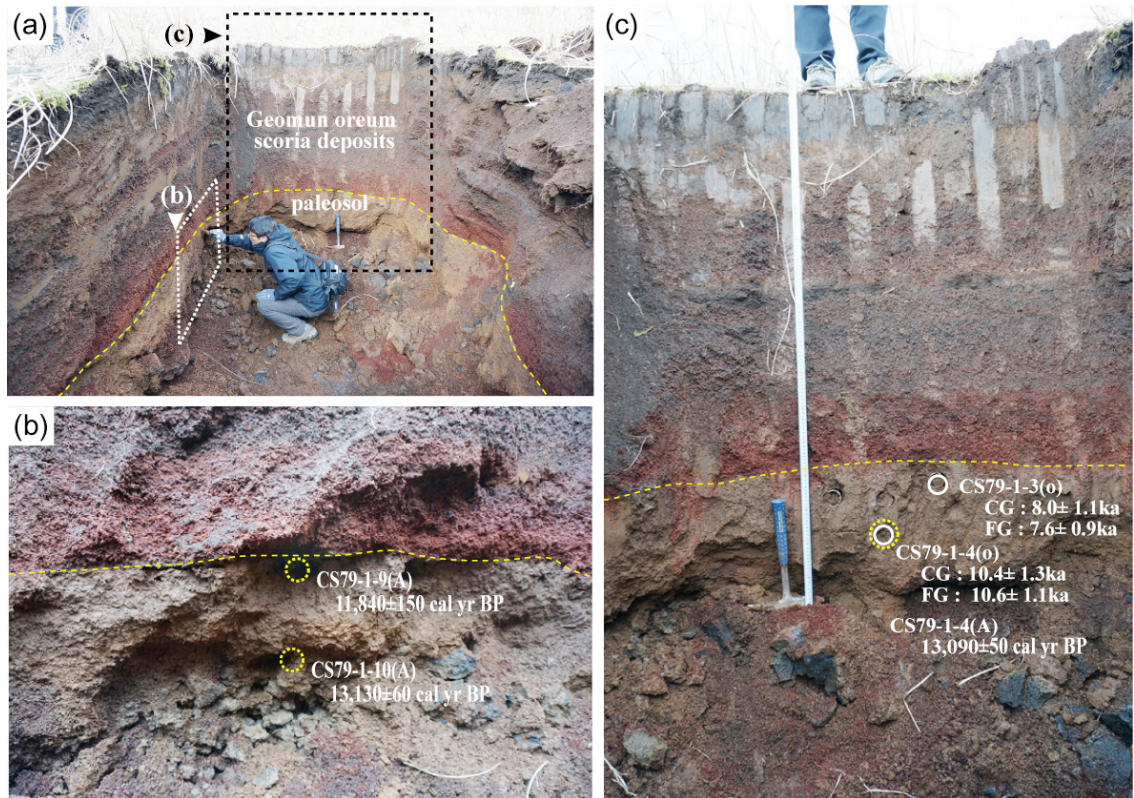
거문오름 분석층 하부의 고토양 시료는 거문오름에서 서쪽으로 약 1.5 km 떨어진 지점에서 굴삭기를 이용하여 약 1.4 m의 분석층을 제거하여 채취하였다(그림 1의 (a)지점, 그림 2). 거문오름 용암류 하부의 고토양 시료는 거문오름으로부터 북동쪽으로 약 5.2 km 지점에서 주채오름 분석층과 거문오름 용암류 사이에 협재하는 고토양에서(그림 1의 (b)지점, 그림 3), 그리고 거문오름으로부터 약 12.2 km 지점의 채석장에서 거문오름 용암류 하부에 놓이는 고토양(그

림 1의 (c)지점, 그림 4)으로부터 시료를 채취하였다. 방사성탄소연대측정은 Beta analysis 연구소에 의뢰하여 분석하였다. 연대는 산 세척된 토양시료를 분석한 것으로, INTCAL 13을 이용하여 보정연대가 계산되었다. 광여기루미네선스 연대분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 루미네선스 자동측정장비(Riso TL/OSL-DA-20)를 활용하여 측정되었다.

#### 4. 연구결과

거문오름과 관련된 고토양층에 대한 방사성탄소연대측정 및 광여기루미네선스 연대측정 결과는 표 1, 표 2와 같다.

분석지점 (a)에서 OSL 시료 2점, 방사성탄소연대측정 시료 3점을 분석하였다(그림 2). OSL과 방사성탄소연대는 거문오름 분석층 하부에 놓이는 고토양층의 최상부와 최하부 시료에 대하여 각각 분석되었



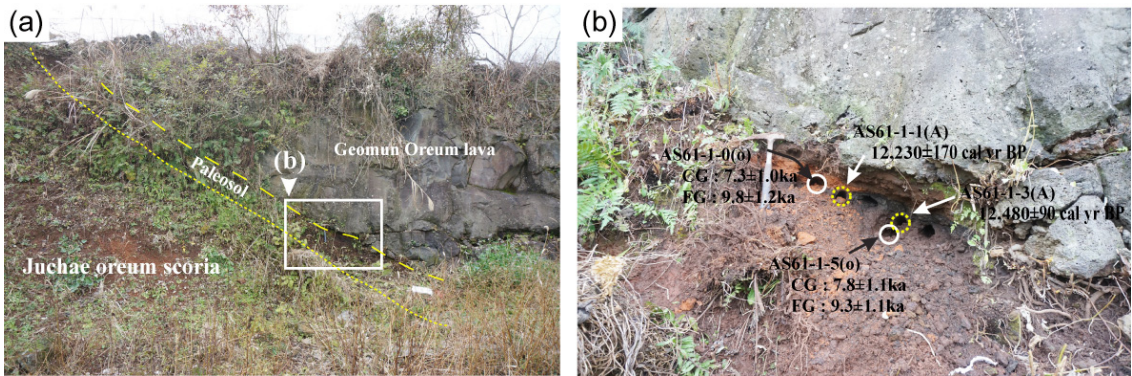
**Fig. 2.** Outcrop features of the dated paleosol beneath the scoria deposit, which originated from the Geomun Oreum. Results of dating are shown in Table 1 and 2. The location of sampling is marked as (a) with black arrow in Fig. 1. Results of radiocarbon dating are ca. 3~4 ka older than those of OSL dating.



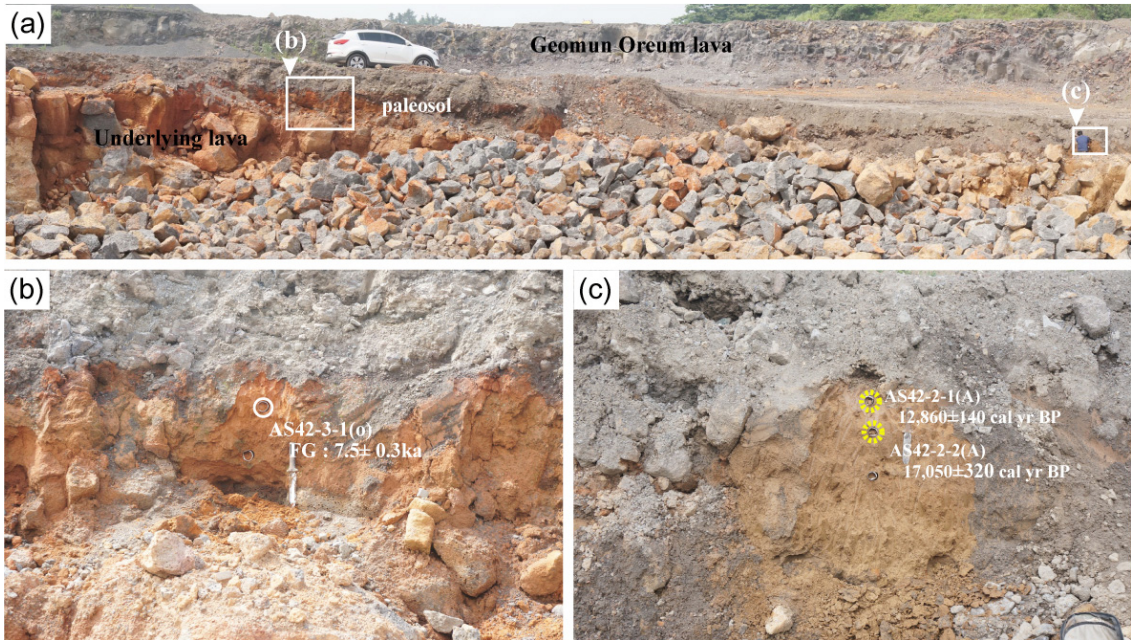
다(그림 2a). 방사성탄소연대 1개(CS79-1-4(A))는 OSL 연대(CS79-1-4(O))와 직접적인 비교를 위해 동일한 지점에서 측정되었다(그림 2c). 광여기루미네선스 연대측정은 조립석영(90~250  $\mu\text{m}$ )과 세립석영(4~11  $\mu\text{m}$ )으로 구분하여 실시하였다. 거문오름 분석층 직하부의 고토양층 최상부(CS79-1-3)에서 조립석영과 세립석영은 각각  $8.0 \pm 1.1$  ka와  $7.6 \pm 0.9$  ka로 오차범위 내에서 서로 일치한다. 고토양층의 하부에서도 조립석

영( $10.4 \pm 1.3$  ka)과 세립석영( $10.6 \pm 1.1$  ka)에서의 OSL 연대결과가 오차범위 내에서 서로 일치한다. 고토양층 상부가 하부의 연대보다 젊은 값을 보여 퇴적학적으로 조화로운 연대결과를 보인다(그림 2c; 표 2).

방사성탄소연대측정에서는 고토양층 최상부(CS79-1-9)에서  $11,840 \pm 150$  cal yr BP를, 최하부(CS79-1-10)에서  $13,130 \pm 60$  cal yr BP를 얻었다(그림 2b). 고토양층의 상부에서 하부로 연대증가를 보인다. CS79-1-4



**Fig. 3.** Outcrop features of the dated paleosol intercalated between pre-existing Juchae Oreum scoria deposit and Geomun Oreum lava. Results of dating are shown in Table 1 and 2. The location of sampling is marked as (b) with black arrow in Fig. 1. Results of radiocarbon dating are ca. 3~5 ka older than those of OSL dating.



**Fig. 4.** Outcrop features of the dated paleosol beneath Geomun Oreum lava. Results of dating are shown in Table 1 and 2. The location of sampling is marked as (c) with black arrow in Fig. 1. Results of radiocarbon dating are ca. 5 ka older than that of OSL dating.

**Table 1.** AMS radiocarbon data for paleosol underlying the scoria deposit and lava flow of the Geomun Oreum.

| Location      | Sample Code* | Latitude       | Longitude       | $\delta^{13}C$ (‰) | $^{14}C$ age yr BP | Calibrated age (2 $\sigma$ range) Cal yr BP | Note         |
|---------------|--------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|---|--------------|
| (a) in Fig. 1 | CS79-1-4     | N33° 27' 16.9" | E126° 42' 17.2" | -20.6              | 11,230±40          | 13,090±50                                   | bulk organic |
|               | CS798-1-9    | N33° 27' 16.9" | E126° 42' 17.2" | -20.7              | 10,150±40          | 11,840±150                                  | bulk organic |
|               | CS79-1-10    | N33° 27' 16.9" | E126° 42' 17.2" | -20.7              | 11,270±40          | 13,130±60                                   | bulk organic |
| (b) in Fig. 1 | AS61-1-1     | N33° 29' 37.3" | E126° 45' 01.1" | -22.7              | 10,370±40          | 12,230±170                                  | bulk organic |
|               | AS61-1-3     | N33° 29' 37.3" | E126° 45' 01.1" | -24.4              | 10,520±40          | 12,480±90                                   | bulk organic |
| (c) in Fig. 1 | AS42-2-1     | N33° 32' 33.8" | E126° 47' 29.7" | -21.4              | 10,950±70          | 12,860±140                                  | bulk organic |
|               | AS42-2-2     | N33° 32' 33.8" | E126° 47' 29.7" | -23.3              | 14,030±80          | 17,050±320                                  | bulk organic |

\* All but underlined two samples are analyzed at Beta Analytic Inc. Underlined two samples are determined by accelerator mass spectrometer at the Korea institute of geoscience and mineral resources in Daejeon, South Korea

**Table 2.** OSL age results for paleosol underlying the scoria deposit and lava flow of the Geomun Oreum.

| Location      | Sample Code*  | Dose Rate (Gy/ka) | Water content* (%) | Equivalent Dose (Gy) | Aliquots used (n/N) | OSL age (ka, 1 $\sigma$ SE) | Note  |
|---------------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|-------|
| (a) in Fig. 1 | CS79-1-3 (CG) | 1.61±0.21         | 20±20              | 12.8±0.5             | 15/15               | 8.0±1.1                     | Fig.2 |
|               | CS79-1-3 (FG) | 1.89±0.21         | 20±20              | 14.4±0.3             | 12/12               | 7.6±0.9                     |       |
|               | CS79-1-4 (CG) | 1.09±0.14         | 20±20              | 11.4±0.4             | 23/23               | 10.4±1.3                    |       |
|               | CS79-1-4 (FG) | 1.28±0.14         | 20±20              | 13.6±0.3             | 11/11               | 10.6±1.1                    |       |
| (b) in Fig. 1 | AS61-1-0 (CG) | 1.38±0.18         | 20±20              | 10.2±0.5             | 23/23               | 7.3±1.0                     | Fig.3 |
|               | AS61-1-0 (FG) | 1.61±0.18         | 20±20              | 15.9±0.4             | 13/13               | 9.8±1.2                     |       |
|               | AS61-1-5 (CG) | 1.48±0.20         | 20±20              | 11.5±0.5             | 20/20               | 7.8±1.1                     |       |
|               | AS61-1-5 (FG) | 1.72±0.20         | 20±20              | 14.0±0.4             | 12/12               | 9.3±1.1                     |       |
| (c) in Fig. 1 | AS42-3-1 (FG) | 3.77±0.09         | 20.0               | 28.2±0.7             | 12/12               | 7.5±0.3                     | Fig.4 |

\* CG: coarse quartz grain (90-250  $\mu$ m), FG: fine quartz grain (4-11  $\mu$ m)

의 경우, OSL측정에서 약 10.5 ka를, 방사성연대측정에서 13,090±50 cal yr BP의 값을 보인다(그림 2c). 전반적으로 분석지점 (a)에서 방사성탄소연대가 OSL 연대에 비해 약 3 ka만큼 오랜 연대를 보인다.

분석지점 (b)에서 거문오름 용암류 하부의 고토양층은 주채오름 분석구의 경사면을 따라 경사지계 분포하며, 약 25~30 cm의 두께를 가진다(그림 3). 고토양층의 상부 10~15 cm 이내에서 OSL과 방사성탄소연대측정용 시료를 각각 2점씩 채취하여 그 결과를 비교하였다. OSL의 경우 조립석영(90~250  $\mu$ m)과 세립석영(4~11  $\mu$ m)으로 구분하여 연대를 측정하였다. 두 시료의 조립석영 OSL 연대는 각각 7.3±1.0 ka와 7.8±1.1 ka (1 $\sigma$  표준오차), 세립석영은 9.8±1.2 ka와 9.3±1.1 ka (1 $\sigma$  표준오차)로서, 2 $\sigma$  표준오차의 범위

를 고려하면 서로 일치하는 결과로 판단된다(즉, 2 $\sigma$  표준오차 범위에서 조립석영의 OSL 연대범위는 5.3-9.3 ka, 5.6-10.0 ka, 세립석영의 OSL 연대범위는 7.4-12.2 ka, 7.1-11.5 ka이다). 인접한 시료에 대한 방사성탄소연대측정 결과는 12,230~12,480 cal yr BP의 범위를 보인다. 전반적으로 방사성탄소연대가 OSL 연대보다 약 3-5 ka만큼 오랜 연대를 보인다.

분석지점 (c)에서는 거문오름 용암류 하부의 고토양에 대하여 OSL (1점)과 방사성탄소연대측정(2점)을 실시하였다(그림 4). 이 지점에서 용암과 용암 사이의 고토양층은 얇은 곳은 0.5 m인데 비해(그림 4b) 두꺼운 곳은 1 m 이상의 두께를 가진다(그림 4c). OSL 측정에서는 세립석영으로 7.5±0.3 ka의 연대를 얻었다(그림 3b). 이러한 결과는 분석지점 a와 b 지점에

서의 OSL 연대와 일치한다. 방사성탄소연대측정으로는 고토양층의 상부에서  $12,860 \pm 140$  cal yr BP을, 하부에서  $17,050 \pm 320$  cal yr BP를 얻었다(그림 3c). 방사성탄소연대측정 결과는 분석지점 b (약 12.3 cal ka BP)와는 조화로우나, 분석지점 a의 최상부 연대(약 11.9 cal ka BP)에 비해서는 오랜 값을 보인다. 전반적으로 방사성탄소연대가 OSL연대에 비해 약 5 ka 만큼 오래된 연대를 보인다.

## 5. 토 의

지금까지 제주도 고토양층 연대측정 연구에서는 신뢰할 만한 연대결과를 얻기 위해 방사성탄소연대측정과 OSL 연대측정이 동시에 시도되어 왔다. 하지만, 서로 다른 연대측정기법으로 얻어진 결과에서 나타나는 연대 불일치 현상에 대한 심도 있는 논의는 없었다. 국외의 경우 황사퇴적층, 호수퇴적층, 하성퇴적층 등 다양한 퇴적 환경에서의 연대측정 연구에서 OSL 연대와 방사성탄소연대가 서로 잘 일치한다는 연구결과들도 있지만(Lang *et al.*, 2003; Long *et al.*, 2011), 많은 대부분의 비교 연구들에서 두 연대측정 결과에 있어 서로 차이가 있음이 보고되고 있다(Antoine *et al.*, 2009; Briant and Bateman, 2009; Feng *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011; ChongYi *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2012, 2015; Lai *et al.*, 2014; Long and Shen, 2015). OSL 연대에 비해 방사성탄소연대측정결과가 짧게 얻어진 예들을 살펴보면, 약 25~30 ka보다 짧은 퇴적층에서는 OSL 연대와 방사성탄소연대가 서로 일치하는데 반해, 그 이상의 연대에 있어서 방사성탄소연대는 짧은 탄소성분의 영향으로 실제 퇴적연대 보다 젊은 연대가 얻어질 수 있어 주의를 기울여야 함을 지적하고 있다(Briant and Bateman, 2009; ChongYi *et al.*, 2012; Lai *et al.*, 2014; Long and Shen, 2015; Song *et al.*, 2015). 그런가 하면, OSL 연대가 방사성탄소연대보다 젊은 연대를 보이는 사례들이 보고되었는데, 그 원인으로 old carbon 물질의 혼입이 제시하기도 하였다(Antoine *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011).

본 연구에서 동일 층준에 놓이는 서로 다른 세 지점의 고토양층에 대하여 방사성탄소연대와 OSL 연대를 측정한 결과, 방사성탄소연대(~12 ka)가 OSL 연대(~8 ka)보다 약 4-5 ka 정도 오랜 값을 보인다.

동일한 시료에 적용된 서로 다른 연대측정법에서 서로 다른 연대결과가 얻어진 것이다. 그 원인에 대한 검토가 필요하다.

### 5.1 방사성탄소연대의 과대측정 가능성

만약 본 연구에서 얻어진 OSL 연대가 퇴적층이 실제 퇴적된 연대를 지시하는 것이라고 가정한다면, OSL 연대보다 약 4-5 ka 정도 오랜 연대를 보이는 방사성탄소연대가  $^{14}\text{C}$ -deficient carbon (older carbon material)의 영향을 받았을 가능성을 검토해야 할 것이다(Antoine *et al.*, 2009; Grimm *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011). 탄소연대에 영향을 미치는 old carbon material의 기원은 연대측정 대상인 고토양의 구성 성분 및 퇴적기작에 대한 연구가 뒷받침되어야 보다 구체적인 원인을 제시할 수 있을 것이다. 하지만 제주도 고토양에 대한 기존 연구들을 통해 old carbon 물질의 기원을 유추해 볼 수 있다.

기존 연구에 의하면 제주도 고토양은 지구화학적 으로 한반도 타지역의 풍성퇴적물과 제주도 화산암류의 혼합 특성을 보이며(Jeong *et al.*, 2015), 광물학적으로 제주도 현무암질 화산활동으로는 설명이 어려운 석영입자들이 고토양 내에 평균 30% 이상(Lee *et al.*, 2014)에서 최대 47.7%(Mizota *et al.*, 1991)까지 포함되어 있을 뿐만 아니라, 직경 10  $\mu\text{m}$  이하의 석영입자에 풍성기원 석영의 산소동위원소적 특징( $\delta^{18}\text{O} = +16 \sim 17\text{‰}$ , Mizota *et al.*, 1991)이 나타난다. 이러한 특징은 고토양층이 풍성기원 퇴적물일 가능성을 지시한다. 이러한 해석은 제주도 고지대 산정 분화구(동수악) 퇴적물의 석영입자 유입량 변화를 계절풍의 강도변화에 따른 풍성기원 물질의 유입량 변화로 해석한 Lim *et al.* (2005)의 연구결과로도 추정이 가능하다. 왜냐하면, 산정호수 퇴적물에 풍성기원의 황사물질이 존재한다면 제주도 전역에 풍성기원 퇴적물이 넓게 분포한다는 것을 유추할 수 있기 때문이다.

이번 연구에서 연대측정에 사용된 고토양층들이 풍성기원의 퇴적물이라면, old carbon 물질은 퇴적 당시 황사유입과 함께 날려 온 암석기원의 쇄설성 방해석입자일 수 있다(예, Grimm *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011). 이러한 추정은 Jeong *et al.* (2011)이 한반도 황사연구를 통해 암석기원의 쇄설성 방해석 입자들이 약 11%(입자비율) 포함되었음을 보고한 것에 의해 뒷받침된다. 또 다른 old carbon의 기원으로

퇴적층 인근 주변으로부터 유입된 보다 오래된 유기질 탄소물질을 들 수 있다. 제주도과 같이 시기를 달리하는 화산활동들이 산발적으로 발생하는 조건에서는 주변의 오랜 토양으로부터 오래된 유기질 퇴적물이 퇴적물로 유입될 가능성을 배제할 수 없을 것이다(예, Rittenour *et al.*, 2015). 향후 이를 증명하기 위해 고토양층의 구성성분, 퇴적기작 등에 대한 연구들이 진행되어야 할 것이다.

## 5.2 OSL연대의 과소측정 가능성

이번 연구에서 얻은 방사성탄소연대측정 결과가 실제 고토양층의 퇴적시기를 지지하는 것이라면, OSL 연대는 실제 퇴적시기보다 젊은 시기를 지지하는 것이다. OSL연대가 실제보다 짧게 얻어질 수 있는 경우로는, 석영만을 선별해내는 시료처리과정에서 소량의 장석이 포함되는 경우를 생각해 볼 수 있다. 하지만 시료처리과정에서 IR테스트를 별도로 실시하였으며, 그 값이 무시할 정도로 체크 되었기에 때문에 장석의 영향에 의한 연대치 감소의 가능성은 배제될 수 있다. 또 다른 가능성은 거문오름 분출시 고토양층이 열급힘에 의해 OSL연대가 재설정 되었다는 것이다. 즉 약 12 ka에 퇴적된 퇴적물이 약 8 ka 전 거문오름 용암에 덮이면서 OSL 연대만 재설정되었을 가능성을 생각해 볼 수 있다. 고토양이 상부의 용암류와 직접 접하는 분석지점 (b)나 (c)의 경우 그러한 해석이 가능하다. 하지만 강하 분석층과 접하는 분석지점 (a)의 경우 급힘작용에 의해 OSL연대가 재설정 되었을 가능성은 낮다.

또 다른 가능성으로 교란작용과 같은 퇴적 후 작용에 의해 상부에 분포하는 젊은 입자들이 층의 하부로 이동하여 실제 퇴적시기 보다 젊은 연대를 나타내는 경우를 생각할 수 있다(예, Forrest *et al.*, 2003). 하지만 분석지점 (a)와 같이 약 1 m 두께의 강하성 (air-fall) 분석층의 하부에 놓이는 고토양층 OSL 연대는 분석층이 새롭게 쌓인 직후 생물 교란작용이 완료된 시기를 지지하는 것이다(그림 1의 (a) 지점, 그림 2). 즉 이 지점의 OSL 연대는 고토양층의 퇴적시기 혹은 늦어도 교란작용의 마지막 단계를 지지하는 것이다. 이러한 해석은 분석층 아래에서 채취한 OSL시료 (CS79-1-3, CS79-1-4)가 조립석영 및 세립석영에서 모두 오차범위 내의 동일한 연대결과를 보인다는 것에 의해 지지된다(그림 5). 본 연구에서 서로 다른 세

지점에서 얻어진 OSL연대가 퇴적 후 교란작용, 퇴적 후 열급힘, 시료처리에서의 오류 등의 이유로 과소측정 되었을 가능성은 매우 낮다고 판단된다.

이상과 같이 거문오름과 관련하여 얻어진 OSL연대와 방사성탄소연대를 종합 검토해 보면, 거문오름의 분출시기는 OSL 연대측정으로 얻어진 고토양층의 연대인 약 8 ka 전 이후로 추정된다. 고토양층의 방사성탄소연대가 OSL연대보다 오랜 것은 풍성기원의 고토양층 내에 포함된 old carbon 물질(암석기원의 쇄설성 inorganic carbon 물질 및 older organic carbon 물질)의 영향으로 추정되며, 향후 이에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요할 것이다.

## 6. 향후 전망과 과제

제주도에 분포하는 360여개의 단성화산체들 중 극히 일부만이 최근 분출시기가 밝혀지고 있다(예, Lee *et al.*, 2014; Ahn *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2015; Ahn and Choi, 2016). 연대측정을 기반으로 한 제주도 화산활동사 연구는 시작단계인 것이다. 금번 연구는 좁은 의미에서는 하나의 단성화산체의 분출시기를 밝히는 것이지만, 넓은 의미에서는 제주도 화산활동의 시간적 주기 더 나아가 시공간적 분출 패턴을 파악할 수 있어, 향후 화산활동 예측에도 크게 기여할 것이다(e.g., Lian and Shane, 2000; Siebe *et al.*, 2004, 2005). 향후 연대측정의 정밀도 증대와 신뢰도 향상을 위해서는 연대측정 대상이 되는 고토양층의 기원 및 퇴적기작 등 연대측정에 영향을 미치는 요인에 대한 보다 다양한 연구들이 진행되어야 할 것이다. 더 나아가 화산암을 대상으로 하는 Ar-Ar 연대측정이나 U씨리즈 비평형 연대측정과 같은 다양한 분석기법의 확대적용이 요구된다.

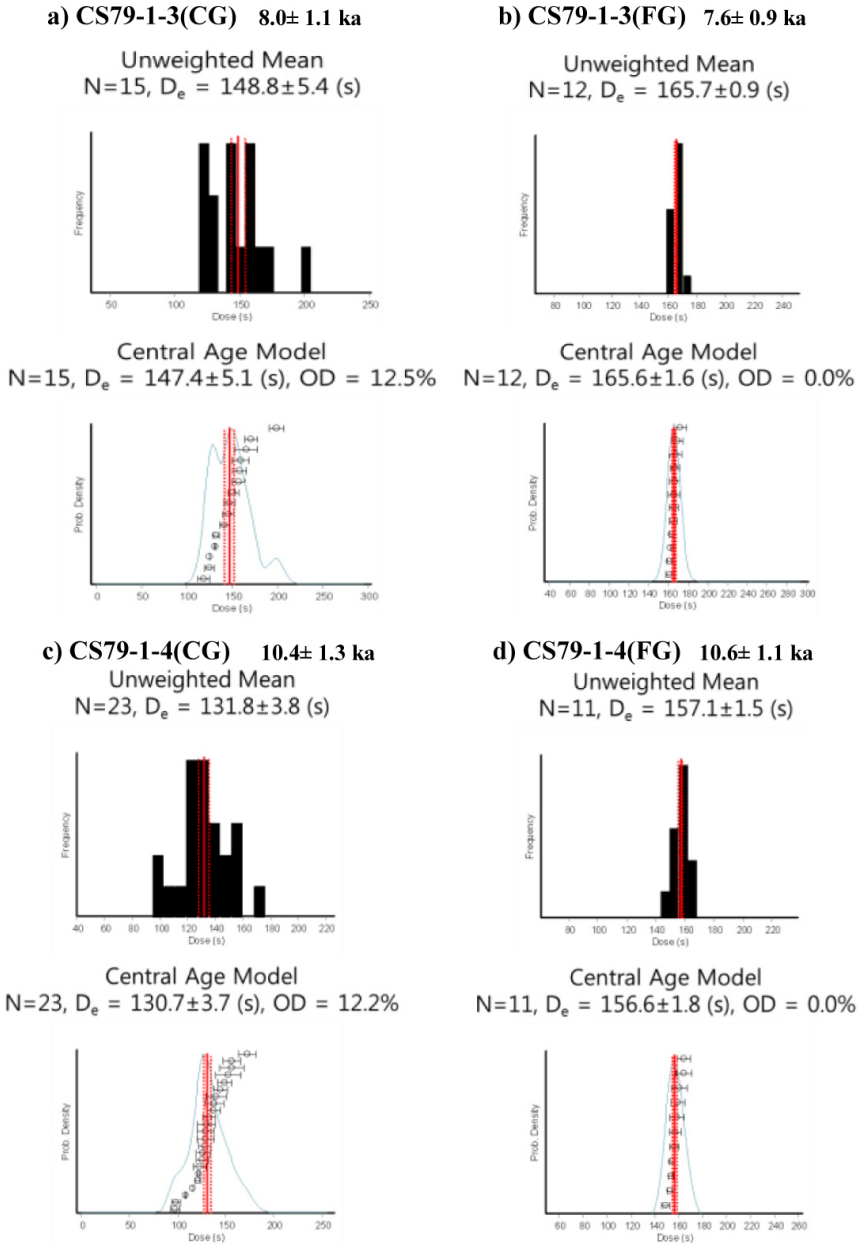
## 7. 결 론

본 연구에서는 거문오름 분출시 분출한 용암류와 분석층을 추적하여 그 하부에 놓이는 고토양층을 찾아내고, 고토양층을 대상으로 방사성탄소연대측정 및 광여기루미네선스 연대측정을 실시하였다. 연대측정 결과 방사성탄소연대는 약 12 ka, OSL연대는 약 8 ka의 연대를 보인다. 방사성탄소연대측정결과가 OSL 연대보다 오랜 연대를 보이는 것은 고토양 내



에 포함된 old carbon 성분에 의한 것으로 판단된다. 본 연구는 지금까지 20~30 만년 전에 형성된 것으로 알려졌던 거문오름용암동굴계가 최소한 약 8 ka 전 이후에 형성된 매우 젊은 용암동굴임을 새롭게 밝혔

다. 향후 고토양층 연대측정 결과에 대한 보다 정확한 해석을 위해서는 고토양이라는 연대측정 대상물질이 퇴적되는 퇴적환경과 퇴적기작에 대한 연구들이 수행되어야 할 것이다.



**Fig. 5.** Histograms, probability density plots of single aliquot equivalent doses for the samples from location (a) in Fig. 1. a & c are for the coarse quartz grain (90-250 μm) and b & d for the fine quartz grain (4-11 μm), respectively. The conversion of time to energy (Gy = J/kg, i.e. equivalent dose of each aliquot) can be achieved by multiplying the time by the dose rate of the beta source of the OSL reader used in this study, which is 0.087±0.001 Gy/s. Vertical line (in red) indicates the D<sub>e</sub> values of the samples derived using central age model.



## 사 사

본 연구는 제주특별자치도 세계유산본부의 자체 연구과제로 한국기초과학지원연구원과 공동연구로 수행되었다. 심사과정에서 건설적인 비평과 유익한 조언으로 논문의 오류와 부정확한 표현을 바로잡아 주신 부산대학교 윤성효교수님과 한국지질자원연구원 홍세선 박사님께 감사드린다.

## REFERENCES

- Ahn, U.S., 2010, Lava source and Formation processes of the Manjanggul lava tube, Jeju Island, Korea. Ph.D. Thesis, Andong National University, Andong, 178 p.
- Ahn, U.S., 2016, Study of the last volcanic activity on historical records on Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 69-83 (in Korean with English abstract).
- Ahn, U.S., Sohn, Y.K., Kang, S.S., Jeon, Y.M. and Choi, H.S., 2015, The Major causes of Gotjawal formation in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 1-19 (in Korean with English abstract).
- Ahn, U.S. and Choi, H.S., 2016, Very young Gotjawal lavas (aged < ca. 10 ka) on Jeju Island, Korea: The major causes of Gotjawal formation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 433-441 (in Korean with English abstract).
- Ahn, U.S. and Hwang, S.K., 2009, Study on source of lava flows forming the Manjanggul Lava Tube. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 237-253 (in Korean with English abstract).
- Antoine, P., Rousseau, D.-D., Fuchs, M., Hatté, C., Gauthier, C., Marković, S.B., Jovanović, M., Gaudenyi, T., Moine, O. and Rossignol, J., 2009, High-resolution record of the last climatic cycle in the southern Carpathian Basin (Surduk, Vojvodina, Serbia). *Quaternary International*, 198, 19-36.
- Briant, R.M. and Bateman, M.D., 2009, Luminescence dating indicates radiocarbon age underestimation in late Pleistocene fluvial deposits from eastern England. *Journal of Quaternary Science*, 24, 916-927.
- ChongYi, E., Lai, Z., Sun, Y., Hou, G., Yu, L. and Wu, C., 2012, A luminescence dating study of loess deposits from the Yili River basin in western China. *Quaternary Geochronology*, 10, 50-55.
- Feng, Z.-D., Ran, M., Yang, Q., Zhai, X., Wang, W., Zhang, X. and Huang, C., 2011, Stratigraphies and chronologies of late Quaternary loess-paleosol sequences in the core area of the central Asian arid zone. *Quaternary International*, 240, 156-166.
- Forrest, B., Rink, W., Bicho, N. and Ferring, C., 2003, OSL ages and possible bioturbation signals at the Upper Paleolithic site of Lagoa do Bordoal, Algarve, Portugal. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1279-1285.
- Grimm, E.C., Maher, L.J. and Nelson, D.M., 2009, The magnitude of error in conventional bulk-sediment radiocarbon dates from central North America. *Quaternary Research*, 72, 301-308.
- Heliker, C., Swanson, D.A. and Takahashi, T.J., 2003, The Pu'u O'o-Kupaianaha eruption of Kilauea Volcano, Hawaii: The first 20 years. Professional Paper, 1676, USGS.
- Hwang, S.K., Ahn, U.S., Lee, M.W. and Yun, S.H., 2005, Formation and internal structures of the Geomunorm Lava Tube system in the Northeastern Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 385-400 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., Choi, H.J. and Kwon, S.K., 2011, Single-particle mineralogy and mixing state of Asian dust, spring, 2009. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 24, 225-234 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., Han, A., Cho, M., Park, M., Kwak, T. and Ahn, U.S., 2015, Mineralogical and geochemical study on the origin of paleosols in Jeju Island. 2015 Fall Joint Conference of Geological Science of Korea (Abstracts), Jeju, 68 (in Korean).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, G.-P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Lai, Z., Mischke, S. and Madsen, D., 2014, Paleoenvironmental implications of new OSL dates on the formation of the "Shell Bar" in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Paleolimnology*, 51, 197-210.
- Lang, A., Hatté, C., Rousseau, D.-D., Antoine, P., Fontugne, M., Zöller, L. and Hambach, U., 2003, High-resolution chronologies for loess: Comparing AMS <sup>14</sup>C and optical dating results. *Quaternary Science Reviews*, 22, 953-959.
- Lee, J.Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J.S., Hong, S.S. and Choi, H.W., 2014, Age of volcanic activity from Quaternary deposits in Sangchang-ri, Jeju island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 697-706 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.K., Lee, Y.I., Lim, H.S., Lee, J.I., Choi, J.H. and Yoon, H.I., 2011, Comparison of radiocarbon and OSL dating methods for a Late Quaternary sediment core from Lake Ulaan, Mongolia. *Journal of Paleolimnology*, 45, 127-135.
- Lian, O.B. and Shane, P.A., 2000, Optical dating of paleosols bracketing the widespread Rotoehu tephra, North Island, New Zealand. *Quaternary Science Reviews*, 19,

- 1649-1662.
- Lim, J., Lee, J.Y., Kim, J.C., Hong, S.S. and Choi, H.W., 2015, Paleoenvironmental and volcanological implications of the Gosan Formation in Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 537-544 (in Korean with English abstract).
- Lim, J., Matsumoto, E. and Kitagawa, H., 2005, Eolian quartz flux variations in Cheju Island, Korea, during the last 6500 yr and a possible Sun-monsoon linkage. *Quaternary Research*, 64, 12-20.
- Long, H., Lai, Z., Wang, N. and Zhang, J., 2011, A combined luminescence and radiocarbon dating study of Holocene lacustrine sediments from arid northern China. *Quaternary Geochronology*, 6, 1-9.
- Long, H. and Shen, J., 2015, Underestimated 14C-based chronology of late Pleistocene high lake-level events over the Tibetan Plateau and adjacent areas: Evidence from the Qaidam Basin and Tengger Desert. *Science China Earth Sciences*, 58, 183-194.
- Mizota, C., Endo, H., Um, K., Kusakabe, M., Noto, M. and Matsuhisa, Y., 1991, The eolian origin of silty mantle in sedentary soils from Korea and Japan. *Geoderma*, 49, 153-164.
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.-C., Cho, B.-W., Jang, Y.N., Lee, B.-J., Lee, S.-R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000b, Geologic report of the Seogwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Rittenour, T.M., Coats, L.L. and Metcalfe, D., 2015, Investigation of late and post-Fremont alluvial stratigraphy of Range Creek, east-central Utah: Use of OSL when radiocarbon fails. *Quaternary International*, 362, 63-76.
- Shaanan, U., Porat, N., Navon, O., Weinberger, R., Calvert, A. and Weinstein, Y., 2011, OSL dating of a Pleistocene maar: Birket Ram, the Golan heights. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 397-403.
- Siebe, C., Arana-Salinas, L. and Abrams, M., 2005, Geology and radiocarbon ages of Tláloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 225-243.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P. and Abrams, M., 2004, Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: Implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology*, 66, 203-225.
- Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ahn, U.S., Kim, G.B., Lee, J.H., Ryu, C.K., Jeon, Y.M. and Kang, C.H., 2015, Stratigraphy and age of the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Controversies and new findings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 4, 264-275.
- Song, Y., Lai, Z., Li, Y., Chen, T. and Wang, Y., 2015, Comparison between luminescence and radiocarbon dating of late Quaternary loess from the Ili Basin in Central Asia. *Quaternary Geochronology*, 30, 405-410.
- Song, Y., Li, C., Zhao, J., Cheng, P. and Zeng, M., 2012, A combined luminescence and radiocarbon dating study of the Ili loess, Central Asia. *Quaternary Geochronology*, 10, 2-7.
- Wood, C.A., 1980, Morphometric evolution of cinder cone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7, 387-413.

---

Received : March 10, 2017

Revised : May 24, 2017

Accepted : May 24, 2017