

제주도 고산층의 고환경 및 화산학적 의미

임재수 · 이진영* · 김진철 · 홍세선 · 최한우
한국지질자원연구원 국토지질연구본부 제4기지질연구실

요 약

제주도 당산봉 서부 선착장 뒤편에서 발견되는 고산층은 상부 수월봉 응회암층과 하부 용암류 사이에 놓여 있는 니질퇴적물로, 퇴적시기 및 당시 퇴적환경이 구체적으로 밝혀지지 않았다. 고산층의 고환경 및 화산학적 의미를 조사하기 위해서 약 86 cm 길이의 고산층 내의 퇴적물을 대상으로 방사성탄소연대측정, 입도분석, 탄소동위원소분석을 실시하였다. 고산층의 최상부의 연대는 $17,140 \pm 300$ cal. yr BP이며, 약 85 cm 깊이의 하부는 $22,000 \pm 400$ cal. yr BP의 연대값을 갖는다. 이러한 연대값은 해수면이 현재보다 약 100~120 m 낮았던 최종빙하기 후기에 해당하므로, 고산층이 적어도 약 22,000년전 이전에 형성되기 시작해서 약 17000년 전까지 육상환경에서 퇴적되었음을 의미한다. 고산층에 포함되어있는 유기 탄소동위원소 값은 -23% 에서 -22% 사이의 분포를 가지며, 수백 년~수천 년 규모의 작은 변동을 보인다. 이러한 고산층의 유기 탄소동위원소 값의 변화는 대륙빙하량 변동 및 여름 몬순 강도 변화에 따른 C3식물과 C4식물의 상대적 생산성 변화에 기인한 것으로 해석된다. 또한 고산층의 최상부연대($17,140 \pm 300$ cal. yr BP)는 고산층을 덮고 있는 수월봉 응회암층이 적어도 17,000년전 이후에 형성되었음을 시사한다.

주요어: 제주도, 고산층, 탄소동위원소, C3/C4 식물, 고환경, 고기후, 수월봉 응회암

Jaesoo Lim, Jin-Young Lee, Jin Cheul Kim, Sei Sun Hong and Hanwoo Choi, 2015, Paleoenvironmental and volcanologic implications of the Gosan Formation in Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 6, p. 537-544

ABSTRACT: The Gosan Formation found along the coastal line between Dangsangbong and Suwolbong, Jeju Island, Korea is clayey silt sediments intercalated between upper Suwolbong-tuff and lower basaltic lava and its forming age and environments have remained unclear. To specify the sedimentary environments and volcanologic meaning of the 86-cm thick Gosan Formation exposed in the west coast of Dangsangbong, we investigated radiocarbon dating and geochemical analyses. The age of the upper most part of the Gosan Formation was $17,140 \pm 300$ cal. yr BP and the age of 85-cm depth below was $22,000 \pm 400$ cal. yr BP. These ages belong to the late Last glacial period characterized by lower sea level by 100-120m than present and suggests that the Gosan Formation was formed between $22,000 \sim 17,000$ cal. yr BP under terrestrial environment. Sedimentary $\delta^{13}\text{C}$ values of total organic carbon in the Gosan Formation varied between -22% and -23% . The change in the $\delta^{13}\text{C}$ values, a proxy of relative abundance of C₃ and C₄ plants suggests that the climate and environments in the Gosan area had been affected by past continental ice volume/sea level and summer monsoon changes. Based on the age found at the upper part of the Gosan Formation, the Suwolbong-tuff layers layed on the Gosan Formation may have been formed at least younger than 17,000 cal yr BP.

Key words: Jeju, Gosan Formation, $\delta^{13}\text{C}$ values, C3 and C4 plants, paleoclimate, paleoenvironment, Suwolbong-tuff

(Jaesoo Lim, Jin-Young Lee, Jin Cheul Kim, Sei Sun Hong and Hanwoo Choi, Quaternary Geology Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

화산활동에 의해서 형성되는 용암류 또는 응회암과 교호하는 고토양 또는 호성 퇴적층은 크게 두 가

지 이유로 종종 연구대상이 되어왔다. 첫 번째는 이러한 퇴적층의 연대측정을 통해서 상부 또는 하부에 놓인 현무암 또는 응회암의 형성시기를 간접적으로 추정할 수 있다(Alvarado *et al.*, 2011; Avellán *et al.*,

* Corresponding author: +82-42-868-3477, E-mail: jylee@kigam.re.kr

2012). 예를 들어 제주도 상창리에서 발견된 현무암 아래의 고토양층에 대한 연대측정을 통해 상부에 놓인 현무암이 약 5천 년 전 이후에 형성되었음을 밝혔다(Lee *et al.*, 2014). 또한 제주도 사계리에서 발견되는 사람 발자국 흔적을 포함한 퇴적층의 하부에서 발견되는 현무암질 응회암층 연대(약 3800 yr BP)를 통해서 상부 퇴적층의 연대를 유추하기도 하였다(Ahn *et al.*, 2015). 두 번째는 상부에 놓인 용암류 또는 응회암으로 인해 하부에 놓인 고토양 또는 습지 퇴적물이 침식 및 생교란 작용 등의 영향을 받지 않게 되어 상대적으로 완전한 퇴적체로 유지될 수 있기에 이 퇴적체가 형성된 시기의 고환경/기후 정보를 고스란히 간직할 수 있다(e.g., Sheldon, 2003; Bader *et al.*, 2015). 최근 Koh *et al.* (2013)에 의하면, 0.3~0.1 Ma 동안 활발한 화산활동에 의해서 제주도 지형의 골격이 만들어졌으며, 그 이후 10만 년 전부터 현재에 이르기까지 한라산체를 포함한 현재의 지형이 만들어졌다. 그러나 제주도 화산암류의 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정법으로는 약 2만년에서 현재까지의 화산활동을 정확히 추적하는 것이 어렵다. 이러한 측면에서 제주도에서의 화산활동 시기 규명과 과거 환경/기후변화 복원을 위하여 퇴적층-화산암류 교호층 연구는 매우 유익하다고 할 수 있다.

제주도 고산리 해안 일대에 분포하는 고산층은 당산봉 일대에서 수월봉 일대에 이르기 까지 비교적 넓은 지역에 걸쳐 발견된다(Park *et al.*, 1998). 수월봉 일대의 고산층은 하부 광해악현무암과 상부 응회암층 사이에 니질 퇴적층으로 분포하며 약 23,000년 이전에 형성되었을 것으로 보고되었다(Cheong *et al.*, 2007). 그러나 이러한 고산층의 퇴적시기 및 퇴적당시의 주위 환경 등에 대한 연구는 아직까지 보고되지 않았다.

퇴적층 속에 기록된 과거 환경 변화는 환경 지시자들에 의해서 추적될 수 있다. 예를 들어 퇴적물 속에 포함된 유기 탄소동위원소비($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) 값의 변화는 과거 기후/환경 변화에 의해서 야기된 식생변화를 보여줄 수 있다. 일반적으로 육상 식물이 탄소를 고정할 때 탄소동위원소 분별이 일어나는데, 고정 방법에 따라서 크게 C3식물과 C4식물로 나눌 수 있다. 캘빈회로(Calvin cycle)를 이용하는 C3식물은 탄소동위원소비 값이 -32‰에서 -21‰의 범위를 보이며 평균 값은 약 -27‰이다. 주로 잡초류로 구성된 C4식물의 경우는 해치-슬랙 회로(Hatch-Slack cycle)를 이용하

며, -17‰에서 -9‰의 변동폭을 가지며 평균 약 -13‰의 값을 보인다(O'Leary, 1981, 1988; Tieszen, 1991; Meyers, 1997). 이렇게 식물의 조직에 기록된 탄소동위원소 값은 퇴적된 이후에도 그 값이 크게 변하지 않기 때문에 길게는 과거 수백만 년 전에 분포했던 식생정보를 제공해준다(Meyers, 1997; An *et al.*, 2005).

C3식물과 C4식물의 분포는 이들의 서로 다른 자연환경에 대한 생리적 반응에 의한 것으로 알려져 있다. 현재 일본열도를 따라 분포하는 사초과 C4식물의 점유율은 연평균온도에 비례하며, 고위도로 갈수록 점유율이 감소한다(Ueno and Takeda, 1992). 또한 C4식물은 C3식물에 비해 수분 활용 기능(water-use efficiency)이 뛰어나기 때문에 건조한 기후에 강한 것으로 알려져 있으며, 대기 중 탄소농도가 낮을 때 C3식물보다 C4식물이 더 잘 자라는 것으로 보고되었다(Cerling *et al.*, 1997; Collatz *et al.*, 1998; Schefuß *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2001, 2006).

현재 제주도에서의 C4식물은 새(*A. hirta*), 개솔새(*Cymbopogon tortillis*), 개억새(*E. speciosa*), 억새(*Miscanthus sinensis var. purpurascens*), 쥐꼬리새(*Muhlenbergia japonica*), 솔새(*Themada japonicus*) 등이 야초지에서 발견되며, C4식물의 점유율이 10-20%를 차지하고 있다(Chang and Lee, 1983a, 1983b). Lim and Fujiki (2011)에서는 제주도 동수악 습지퇴적물 속에 포함된 유기 탄소동위원소 값의 변화로부터 지난 6500년 동안 C3식물과 C4식물의 상대적 점유율 변화를 추적하여, 보다 습한 환경에서 C3식물이 증가하였고, 반대로 건조한 환경에서 C4식물이 증가하였음을 보여 주었다.

이번 연구에서는 고산층을 대상으로 탄소연대측정과 지화학분석 및 입도분석을 통해서 퇴적 당시의 고환경을 추적하고 고산층의 퇴적연대측정을 통해 상부에 놓인 수월봉 응회암의 분출시기를 간접적으로 추정하고자 한다.

2. 연구지역, 샘플링 및 분석 방법

당산봉 서쪽 해안, 차귀도 선착장의 주차장 뒤편에 위치하는 고산층은 제주시 현경면 고산리 자귀내 해안에 인접한다. 조사된 수월봉 응회암층 하부의 고산층은 해발고도가 0.5 m에 위치하며, 노출된 단면부를 제거하면 갈색에 가까운 니질 퇴적층이 나타난다. 차

귀도 선착장 일대에서 관찰되는 고산층은 특별한 퇴적구조를 보이지 않고, 점토질이 우세하며 굵은 모래와 1 cm 미만의 잔자갈이 극히 부분적으로 관찰된다.

시료채취를 위하여 층의 표면을 긁어내고 고지자기 측정용 용기(7cc)를 이용하여 38개의 시료를 채취하였다. 또한 그림 1에서 보여지듯이 5개 지점에서 연대측정을 위해서 연대측정용 퇴적물 시료를 채취하였다. 연대측정 전처리 과정으로 먼저 퇴적물 속의 탄산염을 제거하기 위해서 연대측정용 시료가 들어있는 용기 속에 0.5M HCl용액을 넣고 80°C에서 30분 반응시킨 후 원심분리하여 상등액을 버렸다. 남은 시료에 증류수를 넣고 섞은 후 다시 원심분리하여 상등액을 버리는 과정을 3회 실시하여 세척하였다. 그리고 휴믹산(humic acid or alkali-soluble fraction) 부분을 추출하기 위해서, 남은 시료에 0.5M NaOH용액을 넣고 80°C에서 2시간 반응시킨 후 원심분리하여 상등액을 비커에 따로 담은 후 12M HCl 용액을 소량 넣어서 상온에서 30분 반응시켜 휴믹산이 침전하도록 하였다. 그리고 이 시료를 원심분리하여 상등액은 버리고 남은 휴믹산은 건조시켜 분말로 만들었다. 이 후에 분말 상태의 휴믹산을 원소분석기에 넣고 연소시켜서 이산화탄소를 포집하였다. 이렇게 포집된 이산화탄소를 원소분석기에 연결되어 있는 흑연화장치로 이동시켜서 환원반응을 통해 흑연가루로 만들었으며, 최종적으로 이를 이용하여 연대분석용 흑연타겟을 준비하였다. 연대측정은 한국지질자원연구원에서 보유하고 있는 가속질량분

석기(Accelerator mass spectrometry, AMS)를 이용하여 수행되었다.

퇴적물의 입도를 측정하기 위해서 과산화수소(H₂O₂)에 반응시켜 유기물을 제거하고, 1M HCl 용액과 반응시켜 탄산염을 제거하였다. 증류수로 시료를 세척한 후, 0.02~2000 μm의 측정범위를 갖는 Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Ltd., Worcestershire, UK) 장비를 이용하여 입도분석을 실시하였다.

지화학 분석을 위해서 부시료 약 300 mg을 준비하여 1M HCl 용액과 약 80°C에서 1시간동안 반응시켜서 탄산염을 제거하였다. 염산과 반응시킨 시료를 원심분리시킨 후에 상등액을 버리고 증류수를 채우고 원심분리한 후 상등액을 버리는 반복작업으로 세척한 후 건조시켰다. 유기탄소 함유량 및 유기 탄소 동위원소비는 건조시킨 시료를 분말화한 후에 약 3~5 mg을 tin capsule에 담아서 원소분석기와 Isoprime100 (GV Instrument, U.K.) 장비를 이용하여 측정하였다. 참고시료로는 IAEA의 CH6 (sucrose, δ¹³C = -10.45 ± 0.033‰)을 사용하였다.

3. 분석결과

퇴적물 시료 속에 포함된 유기탄소를 이용한 방사성 탄소연대측정 결과는 표 1과 같다. 고산층에서의 연대는 상부로부터 하부로 17,140±300 cal. yr BP, 17,500±360 cal. yr BP, 18,675±165 cal. yr BP, 20,830 ±430 cal. yr BP, 22,000±400 cal. yr BP의 순차적인

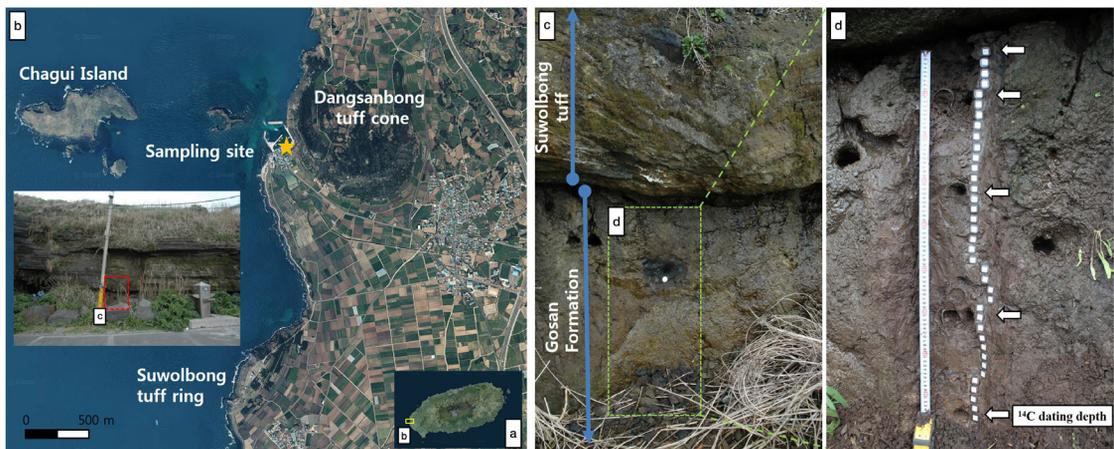


Fig. 1. Map of study site in Jeju Island, Korea including Dangsangbong and Suwolbong. The star indicates the sampling site location of the Gosan Formation in this study.

Table 1. Results of AMS ^{14}C dating from the Gosan Formation, Jeju Island, Korea.

Depth (cm)	^{14}C yr BP ($\pm 1\sigma$)	a cal. yr BP ($\pm 2\sigma$)	$\delta^{13}\text{C}$ (per mil)	Lab. Code	Dated material
1	14030 \pm 70	17140 \pm 300	-21.7	ITg130590	humic
10	14380 \pm 80	17500 \pm 360	-21.7	ITg130591	humic
32	15400 \pm 80	18675 \pm 165	-23.8	ITg130592	humic
60	17470 \pm 90	20830 \pm 430	-21.8	ITg130593	humic
85	18520 \pm 90	22000 \pm 410	-21.5	ITg130594	humic

^aCalibrated with Radiocarbon Calibration Program (CalPal) (<http://c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=ox-cal.html>)

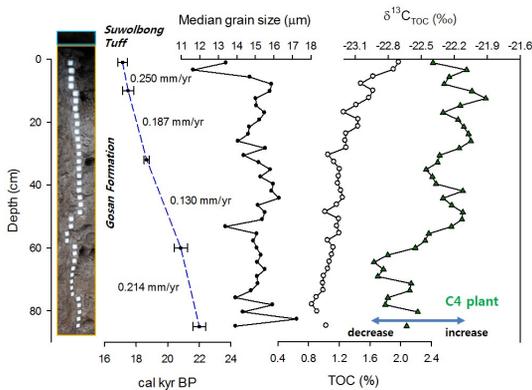


Fig. 2. Results of ^{14}C dating, grain size analysis, and geochemical analysis (TOC% and $\delta^{13}\text{C}$ of TOC) for the Gosan Formation in Jeju Island, Korea. Sedimentation rate changes are shown in the age dating results. TOC means total organic carbon.

결과를 보였다. 따라서 이번 연구 대상 고산층은 과거 약 22,000년부터 약 17,000년 전에 형성되었음을 알 수 있다. 퇴적물은 하부층에서 0.214 mm/yr를 보였으며, 중간층에서 0.13~0.187 mm/yr로 상대적으로 낮은 값을 보이다가 상부층에서 다시 0.25 mm/yr로 증가했다. 이러한 퇴적률을 바탕으로 연대측정 구간별로 퇴적층의 깊이를 절대연대로 환산하였다.

그림 3의 입도분포에서 나타났듯이, 고산층은 점토 16~20%, 실트 68~80%, 그리고 모래 2~10%를 함유하고 있다. 퇴적물의 중양값(median grain size)은 약 11~18 μm 의 범위를 보였으며, 전체적으로 세립질 실트 입자로 구성되어 있다.

유기탄소함량은 퇴적층의 하부에서 약 0.8~1%의 값을 보였으며, 상부로 갈수록 증가하는 경향을 보여 최상부에서는 약 1.8%의 값을 보였다. 유기 탄소 동위원소 값($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)은 -22‰에서 -23‰의 좁은 분

포범위를 보였으며 전체적으로 유기탄소함량 변화와 비슷한 증가추세를 보였다. 특히 탄소동위원소 값은 뚜렷한 증가와 감소가 반복되었는데, 예를 들어 85~64.6 cm 깊이에서는 깊이가 낮아짐에 따라 탄소동위원소 값이 -22.5‰에서 -22.9‰로 감소하였으며, 64.6~48.5 cm 구간에서는 -22.1‰까지 증가하였다. 26.2 cm와 12.3 cm 깊이에서 각각 -22‰과 -21.9‰의 증가된 값을 보였다.

4. 토 의

4.1 고산층의 형성 시기 및 화산학적 의미

이번 연구를 통해 당산봉 서쪽 해안 지역에 형성되어 있는 고산층이 약 22,000년~17,000년 사이에 형성되었음을 알 수 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 연대 측정 결과가 층서적으로 일치하기에, 과거 22,000년~17,000년 전 동안 퇴적물의 침식 및 재이동 등의 교란이 적었을 것으로 생각된다. Cheong *et al.* (2007)에 의하면 당산봉 하부에서 발견되는 고산층의 형성 시기는 약 23.2 \pm 1.0 ka 라고 보고된 바 있다. 기존에 보고된 연대는 이번 연구 결과의 최하부 연대와 유사하며, 이번 연구결과는 고산층이 적어도 17,000년 전까지 형성되어 왔음을 새롭게 제시하고 있다. 또한 과거 여러 조사에 의하면 고산층은 수월봉을 형성하는 응회암층에 의해서 피복된다(Park *et al.*, 1998; Cheong *et al.*, 2007). 이번 연구에서 고산층 최상부에서 얻은 연대결과(17,140 \pm 300 cal. yr BP)는 고산층 상부에 수월봉 응회암층이 적어도 약 17,000년 이후에 형성되었음을 유추할 수 있다. 이러한 연대는 과거 수월봉의 형성시기로 제시된 약 18,300 \pm 700년전(Cheong *et al.*, 2007) 보다 젊은 연대로, 수월봉의 형성 시기에 대한 보다 다양한 후속 연구의 필요성을 시사한다.

4.2 고산층의 고환경학적 의미

앞에서 언급하였듯이 이번 연구대상인 고산층은 과거 22,000년~17,000년 전 사이에 형성되었다. 이 시기는 최후빙하기의 후반부에 해당되며, 지금보다 해수면이 약 100~120 m 정도 낮았다고 여겨지는 시기이다(Linsley, 1996; Liu *et al.*, 2004). 해수면 변동과 관련하여 서부 태평양에 위치한 Sulu Sea 퇴적물 속에 포함된 유공충의 산소동위원소 값은 빙기-간빙기 및 수천년 규모의 대륙빙하량 및 해수면 변화를 지시한다고 제안되었다(Linsley, 1996). 그림 4에서 볼 수 있듯이 과거 22,000년~17,000년 전의 산소동위원소 값은 해수면이 과거 6만년 동안 가장 낮았던 시기에 해당된다. 현재 고산층 상부 해발고도가 약 0.5 m 임을 고려하면, 고산층이 해안에서 멀리 떨어진 해발고도 약 100~120 m의 내륙에서 형성되었다고 생각될 수 있다. 또한 연구지역은 동아시아 몬순변화에 민감한 지역이므로 과거 여름-겨울 몬순 세기 변화에 크게 영향을 받았을 것으로 생각된다(Chung, 2007; Lee *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2014a, 2014b; Park and Park, 2015). 그림 4에서 볼 수 있듯이 중국 남부지방에서 회수된 동굴생성물(석순)의 산소동위원소 값에 의하면 여름 몬순의 강도가 약 3만 년 전부터 급격히 약해져서 22,000년~17,000년 전 사이에는 여름 강수량이 상당히 감소했음을 알 수 있다(Wang *et al.*, 2001). 도폭조사에 따르면, 고산층은 조사지역의 해안에서부터 내륙으로 확장되어 넓게 분포하는데, 이러한 점을 미루어 볼 때 고산층은 고산리 일대에 넓게 분포한 평지

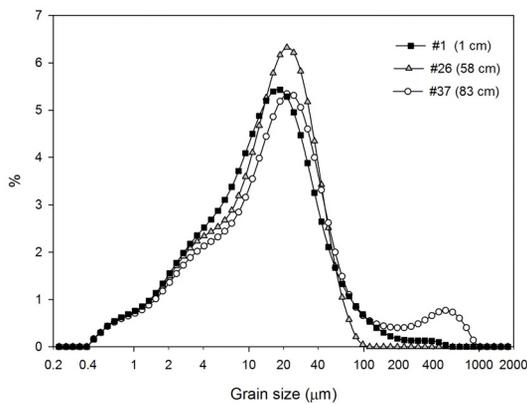


Fig. 3. Representative grain size distributions of the Gosan Formation. #1 and 1 cm indicate sample number and depth, respectively.

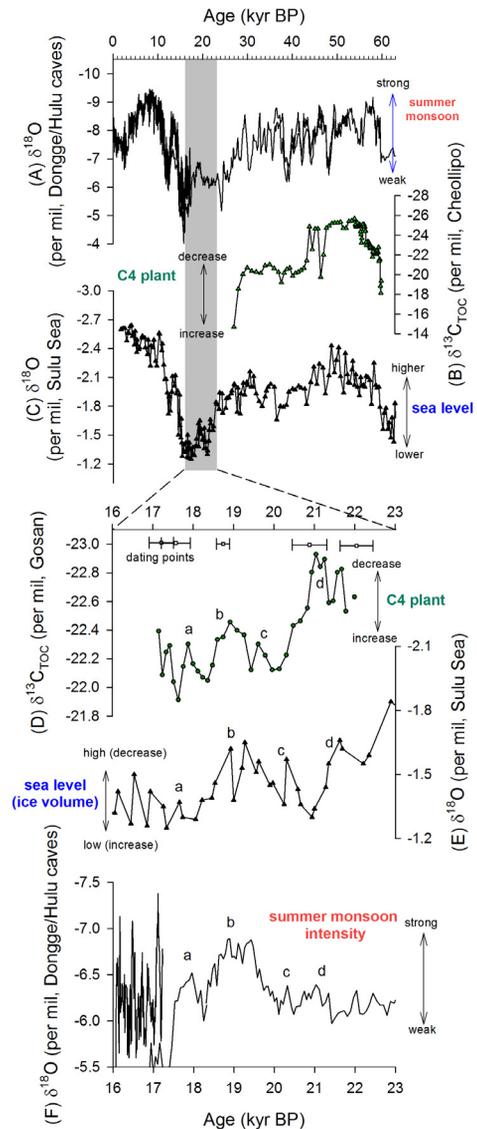


Fig. 4. Comparison of the $\delta^{13}C_{TOC}$ values, a proxy for relative abundance change of C4 or C3 plants, from Gosan Formation in Jeju Island, Korea with other paleoenvironmental proxies. (A and F) Asian summer monsoon index reconstructed from $\delta^{18}O$ values of stalagmites in Hulu and Dongge caves, south China (Wang *et al.*, 2001). (B) $\delta^{13}C_{TOC}$ values of sediments from Cheollipo, Korea (Lim *et al.*, 2010). (C and E) Continental ice volume or sea level inferred from $\delta^{18}O$ values in deep-sea sediment from the Sulu Sea (Linsley, 1996). (D) $\delta^{13}C$ values from the Gosan Formation in Jeju Island, Korea. Comparable millennial-scale changes in $\delta^{13}C_{TOC}$ values in the Gosan Formation, Jeju Island and $\delta^{18}O$ values from Sulu Sea and Dongge Cave were assigned to each peak from a to d. Squares with error ranges represent age-dating points in the Gosan Formation, Jeju Island, Korea.

또는 습지 등의 육상환경에서 형성된 것으로 볼 수 있다.

만약 고산층이 연안환경이 아닌 육상환경에서 형성되었다면, 퇴적물 속에 유기물은 주로 육상식물로부터 유래되었을 것으로 생각할 수 있다. 그림에서 보이듯이 고산층의 탄소동위원소 값은 약 -22‰에서 -23‰의 좁은 범위의 값을 가진다. 서론에서 언급하였듯이 잡초류로 구성된 C4식물의 경우는 -17‰에서 -9‰의 범위의 값을 보이며 평균은 약 -13‰을 갖고 있다. C3식물은 -32‰에서 -21‰의 범위를 가지며 평균값은 약 -27‰이다(O'Leary, 1981, 1988; Tieszen, 1991; Meyers, 1997). 각각의 C3 식물과 C4식물의 평균값을 고려할 때 고산층의 유기물은 주로 C3식물로부터 유래했으며, C4식물의 영향은 상대적으로 적었을 것으로 생각된다.

과거 22,000년~17,000년 동안 고산층의 탄소동위원소 값의 변화 즉 식생변화는 해수면 변동 또는 대륙 빙하량 변동, 그리고 여름 몬순 변동의 영향을 받았다. 그림 4에서 알 수 있듯이 고산층의 유기물 구성은 주로 C3식물 기원으로 형성되었지만, 다소 C3식물이 감소하면서 C4식물의 증가가 나타나는 수천 년 규모의 변동을 보이는 것을 알 수 있다. 비록 연대측정의 오차로 인해서 시기적인 일치를 보이지는 않지만, a~d로 표시되어 있는 탄소동위원소 값의 변동은 대륙 빙하량 또는 해수면 변화와 유사하며, 또한 여름 몬순 변동과 부분적으로 비슷하다. 그림 4(b)는 현재 천리포 해안가에 노출되어있는 약 6~3만 년 전 사이에 쌓인 퇴적물에 기록된 유기 탄소동위원소 값의 변화가 상대적인 C4식물 점유율의 변화임을 확실히 보여주고 있으며, 그 당시의 해수면 상승과 대륙 빙하 감소와 연계되어 있다. 특히 유기 탄소동위원소 값이 -25‰에서 -15‰로 약 5만 년 전부터 감소한 해수면 변화 즉 대륙빙하량 증가에 의한 겨울몬순 강화는 과거 천리포 지역에서의 C3식물 우점환경을 크게 변화 시켜서 C4식물 점유율의 점진적 증가를 야기했다. 또한 수천 년 규모의 C4식물 점유율의 변동이 여름 몬순의 강도 변화와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다(Lim *et al.*, 2010). 즉 대륙빙하량이 증가한 보다 추운 시기에는 겨울 몬순이 강해지고 여름 몬순이 약해져서 건조한 환경에 강한 C4식물이 증가하였으며, 반대로 대륙빙하량이 감소한 상대적으로 따뜻하고 습한 시기에는 C4식물이 감소하였음을 나타낸다. 제주도 고산리 지역에서의 약 22,000~17,000년 전 탄소

동위원소 값의 변동폭이 천리포에서 복원된 과거 약 6~3만년 전과 비교할 때 상당히 작지만 여전히 장주기 대륙빙하량(겨울 몬순)/해수면 변동과 여름 몬순의 영향을 받았음을 알 수 있다.

이번 연구에서 확인된 탄소동위원소 값의 범위가 주로 C3식물의 영향을 받았다고 한다면, 기후변화 또는 환경변화에 대한 C3식물의 생리적 반응에 의한 탄소동위원소 값의 변화를 고려할 수 있다. 이론적인 관점에서 탄소고정 가운데 나타나는 C3식물 내의 탄소동위원소 값은 습도에 크게 영향을 받는다(Farquhar *et al.*, 1982; Tieszen, 1991). 예를 들어, 습도의 감소 즉 물부족은 기공을 닫는 효과를 낳아 식물체 내의 이산화탄소 농도를 감소시켜 동위원소 분별을 축소시킨다. 결과로 식물체 내의 탄소동위원소 값이 증가하게 한다. 이러한 C3식물의 탄소동위원소 값과 습윤도에 대한 연구로서 지역에 따른 연강수량과의 관계가 많이 연구되었다. 예를 들어 연강수량 350~1500 mm를 보이는 동부 호주지역에서 강수량 100 mm가 증가할 때 C3식물의 탄소동위원소 값이 약 0.33‰ 감소하였으며(Stewart *et al.*, 1995), 연강수량 200~700 mm 변화를 보이는 중국 북서지역에서는 -1.1‰/100 mm의 변화를 보이는 것이 보고되었다(Liu *et al.*, 2005). 또한 최중빙하기 동안 쌓인 풍성층 속에 포함된 유기물의 탄소동위원소 값의 변화(-26‰~-23‰)로부터 이러한 관계식을 적용해서 과거 강수량 복원을 시도하기도 하였다(Hatté *et al.*, 2001). 최후빙하기 동안의 제주도에서의 강수량 변화는 아직 보고된 바가 없다. 위에서 예로 든 강수량 변화에 따른 C3식물의 탄소동위원소 값 변화율을 적용해 본다면, 22,000~17,000년 전 동안 고산층에서 탄소동위원소 값이 약 1‰ 감소했는데, 이러한 감소는 이 기간 동안 적게는 약 100 mm, 크게는 300 mm의 연강수량이 감소했을 수도 있음을 시사한다.

이처럼 이번 연구를 통해서 밝혀진 고산층의 유기 탄소동위원소 값의 변화는 C3식물과 C4식물의 상대적 분포량 변화 및 습윤도 변화에 따른 C3식물 내의 탄소동위원소 값의 변화라는 두 가지 측면에서 의미를 추적할 수 있겠지만, 고산층의 탄소동위원소 값이 C4식물 영향을 완전히 배제할 수 없는 약 -22‰에서 -23‰의 범위를 가진다는 점에서 두 가지 영향을 동시에 받았을 것으로 생각된다. 두 가지 해석 모두 강수량 변화 즉 여름몬순 강도 변화에 크게 영향을 받았음을

알 수 있기에 22,000~17,000년 전 동안 고산층에서 발견된 탄소동위원소 값의 변동은 수천 년 규모의 습윤도 또는 건조도 변화를 보여준다고 할 수 있을 것이다.

5. 결론

차귀도 선착장 부근에서 발견된 고산층 퇴적물을 대상으로 연대측정 및 탄소동위원소 분석을 실시한 결과는 고산층의 형성 당시의 환경변화와 고산층 위에 놓여 있는 수월봉 응회암층의 형성 연대를 추정할 수 있는 근거를 제시하였다. 고산층 상부 및 하부의 연대측정 결과는 현재보다 해수면이 약 100~120 m 낮았던 약 22,000~17,000년 전 즉 최종빙하기 후기에 고산층이 형성되었음을 나타내었으며, 퇴적물의 유기 탄소동위원소 분석 결과는 그 당시 제주도에서의 환경 및 기후 변화가 대륙빙하량/해수면 변동과 여름 몬순 변동 등의 영향을 받았음을 보여주면서, 고산층이 제주도에서의 중요한 환경 및 기후 변화 정보를 간직하고 있음을 보여주었다. 또한 고산층 최상부 연대는 고산층 위에 놓여있는 수월봉 응회암층의 형성 연대가 적어도 17,000년 전 이후였음을 의미한다. 이번 연구는 현무암 사이에 끼어있는 고토양 또는 습지 퇴적물 등을 대상으로 제주도에서의 화산활동 시기 규명과 과거 환경/기후변화 복원이 가능할 수 있음을 보여주었다.

사 사

이 논문을 심사해 주시고 유익한 조언을 해주신 편집위원님, 한양대학교 신경훈 교수님 그리고 제주특별자치도 세계유산·한라산연구원의 안웅산 박사님께 감사드립니다. 이 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업(과제명: 제주도 제4기 미고결 퇴적층 연구 중장기 계획 수립)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn, U.S., Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ryu, C.K., Jeong, J.O. and Kang, C.W., 2015, Geochemical fingerprinting of basaltic glass in tephra deposits underlying the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Provenance of tephra and age of the human footprints. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 105-126 (in Korean

with English abstract).
 Alvarado, G.E., Soto, G.J., Salani, F.M., Ruiz, P. and de Mendoza, L.H., 2011, The formation and evolution of Hule and Río Cuarto maars, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 201, 342-356.
 An, Z.S., Huang, Y., Liu, W., Guo, Z., Steven, C., Li, L., Warren P., Ning, Y., Cai, Y., Zhou, W., Lin, B., Zhang, Q., Cao, Y., Qiang, X., Chang, H. and Wu, Z., 2005, Multiple expansion of C₄ plant biomass in East Asia since 7 Ma coupled with strengthened monsoon circulation. *Geology*, 33, 705-708.
 Avellán, D.R., Macías, J.L., Pardo, N., Scolamacchia, T. and Rodriguez, D., 2012, Stratigraphy, geomorphology, geochemistry and hazard implications of the Nejapa Volcanic Field, western Managua, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 213-214, 51-71.
 Bader, N.E., Nicolaysen, K.P., Lopez-Maldonado, R., Murray, K.E. and Mudd, A.C., 2015, Extensive middle Miocene weathering interpreted from a well-preserved paleosol, Cricket Flat, Oregon, USA. *Geoderma*, 2339-240, 195-205.
 Chang, N.-K. and Lee, S.-K., 1983a, Studies on the classification, productivity and distribution of C₃, C₄ and CAM plants in vegetations of Korea: I. C₃ and C₄ type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 62-69 (in Korean with English abstract).
 Chang, N.-K. and Lee, S.-K., 1983b, Studies on the classification, productivity and distribution of C₃, C₄ and CAM plants in vegetations of Korea: III. The distribution of C₃ and C₄ type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 128-141 (in Korean with English abstract).
 Cerling, T.E., Harris, J.M., MacFadden, B.J., Leakey, M.G., Quade, J., Eisenmann, V. and Ehleringer, J.M., 1997, Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, 389, 153-158.
 Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C. and Jeong, G.Y., 2007, Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southern coast of Jeju Island, Korea. *Quaternary Geochronology*, 2, 266-271.
 Chung, C.-H., 2007, Vegetation response to climate change on Jeju Island, South Korea, during the last deglaciation based on pollen record. *Geosciences Journal*, 11, 147-155.
 Collatz, G.J., Berry, J.A. and Clark, J.S., 1998, Effect of climate and atmospheric CO₂ partial pressure on the global distribution of C₄ grasses: present, past, and future. *Oecologia*, 114, 441-454.
 Farquhar, G.D., O'Leary, M.H. and Berry, J.A., 1982, On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration of leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 121-137.
 Hatté, C., Antoine, P., Fontugne, M., Lang, A., Rousseau, D.D. and Zöller, L., 2001, δ¹³C of loess organic matter

- as a potential proxy for paleoprecipitation. *Quaternary Research*, 55, 33-38.
- Huang, Y., Shuman, B., Wang, Y., Webb, T., Grimm, E.C. and Jacobson, G.L., 2006, Climatic and environmental controls on the variation of C3 and C4 plant abundances in central Florida for the past 62,000 years. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 237, 428-435.
- Huang, Y., Street-Perrott, F.A., Metcalfe, S.E., Brenner, M., Moreland, M. and Freeman, K.H., 2001, Climate change as the dominant control on glacial-interglacial variations in C3 and C4 plant abundance. *Science*, 293, 1647-1651.
- 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).
- Lee, J.Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J., 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, S.H., Lee, Y.I., Yoon, H.I. and Yoo, K.C., 2008, East Asian monsoon variation and climate changes in Jeju Island, Korea, during the latest Pleistocene to early Holocene. *Quaternary Research*, 70, 265-274.
- Lim, J. and Fujiki, T., 2011, Vegetation and climate variability in East Asia driven by low-latitude oceanic forcing during the middle to late Holocene, *Quaternary Science Reviews*, 30, 2487-2497.
- Lim, J., Nahm, W.-H., Kim, J.-K. and Yang, D.-Y., 2010, Regional climate-driven C₃ and C₄ plant variation in the Cheollipo area, Korea, during the late Pleistocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 298, 370-377.
- Linsley, B.K., 1996, Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150,000 years. *Nature*, 380, 234-237.
- Liu, J.P., Milliman, J.D., Gao, S. and Cheng, P., 2004, Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209, 45-67.
- Liu, W.G., Feng, X.H., Ning, Y.F., Zhang, Q.G., Cao, U.N. and An, Z.S., 2005, $\delta^{13}\text{C}$ variation of C₃ and C₄ plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid north-western China. *Global Change Biology*, 11, 1094-1100.
- Meyers, P.A., 1997, Organic geochemical proxies of palaeoceanographic, palaeolimnologic, and palaeoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27, 213-250.
- O'Leary, M.H., 1981, Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 20, 553-567.
- O'Leary, M.H., 1988, Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience*, 38, 328-335.
- Park, J., Lim, H.S., Lim, J., Yu, K.B. and Choi, J., 2014a, Orbital- and millennial-scale climate and vegetation changes between 32.5 and 6.9 k cal a BP from Hanon Maar paleolake on Jeju Island, South Korea. *Journal of Quaternary Science*, 29, 570-580.
- Park, J., Lim, H.S., Lim, J. and Park, Y.-H., 2014b, High-resolution multi-proxy evidence for millennial- and centennial-scale climate oscillations during the last deglaciation in Jeju Island, South Korea. *Quaternary Science Reviews*, 105, 112-125.
- Park, J. and Park, J., 2015, Pollen-based temperature reconstructions from Jeju island, South Korea and its implication for coastal climate of East Asia during the late Pleistocene and early Holocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 417, 445-457.
- 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, Taejeon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Schefuß, E., Schouten, S., Jansen, J.H.F. and Sinninghe Damsté, J.S., 2003, Africa vegetation controlled by tropical sea surface temperatures in the mid-Pleistocene period. *Nature*, 422, 418-421.
- Sheldon, N.D., 2003, Pedogenesis and geochemical alteration of the Picture Gorge subgroup, Columbia River basalt, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, 115, 1377-1387.
- Stewart, G.R., Turnbull, M.H., Schmidt, S. and Erskine, P.D., 1995, ^{13}C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22, 51-55.
- Tieszen, L.L., 1991, Natural variations in the carbon isotope values of plants: Implications for archaeology, ecology, and paleoecology. *Journal of Archaeological Science*, 18, 227-248.
- Ueno, O. and Takeda, T., 1992, Photosynthetic pathways, ecological characteristics, and the geographical distribution of the Cyperaceae in Japan. *Oecologia*, 89, 195-203.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Chen, C.-C. and Dorale, J.A., 2001, A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294, 2345-2348.
- Zhang, Z.H., Zhao, M.X., Lu, H.U. and Faiia, A.M., 2003, Low temperature as the main cause of C₄ plant declines during the glacial periods on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 214, 467-481.

Received : October 1, 2015

Revised : December 7, 2015

Accepted : December 7, 2015