



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

제주도 당처물동굴 석순의 조직적 특징 및
지화학적 성분을 이용한 지난 2,000년간의
고기후 연구

홍 석 우

강원대학교대학원

지질학과

2013년 2월

우 경 식 교 수 지 도

이학석사학위논문

제주도 당처물동굴 석순의 조직적 특징 및
지화학적 성분을 이용한 지난 2,000년간의
고기후 연구

Paleoclimate records over the past 2,000 years using
textural and isotopic results of the stalagmite from the
Dangcheomul Cave, Jeju Island.

강원대학교대학원

지질학과

홍 석 우

홍석우의 석사 학위논문을
합격으로 판정함

2013년 2월

심사위원장 (인)

위 원 (인)

위 원 (인)

제주도 당처물동굴 석순의 조직적 특징 및 지화학적 성분을 이용한 지난 2,000년간의 고기후 연구

홍석우

강원대학교 대학원 지질학과

제주도 북동부에 위치한 당처물동굴은 용암동굴이지만 지표에 발달한 탄산염 사구퇴적물에 의하여 용암동굴 입에도 탄산염 동굴생성물이 존재한다. 이러한 동굴에서 형성된 석순은 외부환경을 잘 반영하고 속성환경의 영향을 덜 받기 때문에 고기후 연구에 좋은 지시자(proxy)로서 장점을 가진다. 이번 연구는 225 mm의 석순 DC-1을 이용하여 이루어졌으며, 우라늄 계열을 이용한 연령분 석결과를 토대로 조직적 특징과 탄소동위원소 성분의 변화 그리고 태양활동의 변화량에 따른 북반구 대기중의 $\Delta^{14}\text{C}$ 복원기록을 상호 비교하여 제주도에 영향을 주었던 지난 후기 홀로세 기후를 연구하였다.

연령분석결과, 석순의 하부로부터 57.2 mm 지점에서 $2,741 \pm 200$ yr BP, 147.5 mm 지점에서 $1,950 \pm 117$ yr BP, 184 mm 지점에서 $1,332 \pm 57$ yr BP, 215.1 mm 지점에서 589 ± 107 yr BP로 나타났다. 동굴상부 지표에 발달하는 고토양층의 방사성탄소연대측정을 실시하였으며, 그 결과 $4,450 \pm 30$ yr BP로 측정되었다. 고토양층은 탄산염사구가 퇴적 되어진 이후에 식생의 발달정도에 따라서 생성되고 석순 또한 탄산염사구가 퇴적된 이후부터 성장하기 때문에 당처물동굴 석순은 고토양층이 생성된 시기인 $4,450 \pm 30$ yr BP 이후에 성장하기 시작한 것으로 판단된다.

석순 DC-1의 조직을 관찰한 결과 주상의 방해석 결정으로 이루어졌으며, 많은 성장선을 보인다. 성장선의 밀집 정도는 과거 연구지역의 강수량에 따른 석순의 성장속도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 성장선의 성장속도, 성장선사이의 간격 그리고 석순 조직 내에 유체포유물이 포함된 정도를 바탕으로 Type I에서 Type V까지 다섯 개의 형태로 석순의 조직을 구분 하였다. Type I 조직은 석순의 성장이 가장 느렸던 구간이고, 성장선과 성장선 사이의 간격은 0.025 mm이다. Type V 조직은 성장이 가장 빨랐던 구간이며, 성장선사이의 평균값은 0.42 mm이다. 이러한 결과는 석순이 성장하는 동안 유입되는 외부 강수량의 양과 관련이 깊으며, 석순의 조직적 특징 변화와 탄소동위원소 조성의 변화가 비교적 잘 일치하고 있어, 지화화학적 분석 외의 추가적인 정보를 제공하는 유용한 지시자로 활용할 수 있을 것으로 보인다.

석순의 고해상도 안정동위원소 분석결과 석순이 성장하는 동안 탄소동위원소 성분은 과거의 기후를 뚜렷하게 반영하여 변화를 보인다. 하지만 석순의 산소동위원소 성분은 명확한 경향성을 보이지 않는다. 강수의 산소동위원소 분석에서 알 수 있듯이 계절별 강수와 태풍에 따라서 다양한 변화를 보이며 명확한 경향성을 보이지 않는다. 따라서 석순의 탄소동위원소 성분 변화를 이용한 제주도의 고기후 복원이 유리할 것으로 생각된다. 석순의 탄소동위원소 성분은 여러 고기후 지시자(proxy) 중에서도 북반구 $\Delta^{14}\text{C}$ 복원 기록과 가장 잘 일치하고 있다. 특히 지난 2000년 동안에 일어났던 태양 흑점활동이 극소기였던 Oort minimum, Wolf minimum, Spörer minimum, Maunder minimum, Dalton minimum 기록이 석순의 탄소동위원소 기록과 잘 일치 하고 있으며, 석순의 조직적 특징과도 비교적 일치하고 있다. 이처럼 극소기가 나타나는 구간은 태양 흑점활동이 활발하지 못했던 시기로 상대적으로 건조했던 기간으로 생각할 수 있다. 하지만 소빙하기에 해당하는 시기에는 탄소동위원소 변화의 진동 폭과 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록의 진동 폭이 크게 변화하며, 이는 상대적으로 건조한 시기이긴 하지만

돌발적인 기후변화가 많이 일어났던 시기로 판단할 수 있다. 따라서 석순 DC-1의 탄소동위원소 조성 변화에는 과거에 일어났던 짧은 기간의 기후도 잘 반영되는 것으로 보인다.

목 차

요약	i
목차	iv
List of Tables	vi
List of Figures	vii
1. 서론	1
2. 연구지역	4
3. 연구방법	9
4. 연구결과	13
4-1. 동굴환경	13
4-2. 연구지역의 강수량과 산소, 수소동위원소 성분	17
4-3. 석순의 연령	22
4-4. 석순의 조직	26
4-5. 석순의 안정동위원소 성분	36
4-6. 사구퇴적물과 사구에 분포 하는 식생의 안정동위원소 성분	41
5. 토의	45
5-1. 과거 강수량과 관련된 석순 조직의 변화	45
5-2. 연구지역내 강수량의 안정동위원소 성분과 석순의 상관관계	52
5-3. 석순의 탄소동위원소 성분 변화	64
5-4. 석순의 탄소동위원소 성분 변화와 태양활동 변화에 따른 북반구 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록	67
5-5. 지난 2000년 동안 제주도의 기후변화	72
6. 결론	77

참고문헌	80
Appendix	92
Appendix 1. Carbon and oxygen isotope data of the DC-1 stalagmite.	92
Abstract	107

List of Tables

Table 1. Monthly variations of temperature, humidity and carbon dioxide of the Dangcheomul Cave and its adjacent area.	13
Table 2. $\delta^{18}\text{O}$ and δD compositions of rainwater on Jeju Island.	20
Table 3. $\delta^{18}\text{O}$ and δD compositions of rainwater during typhoon on Jeju Island.	21
Table 4. ^{230}Th dating results of the DC-1 stalagmite. The error is 2σ	25
Table 5. Stable isotope compositions along the five different growth laminae from the DC-1 stalagmite to check "the Hendy Test" (Hendy, 1971).	38
Table 6. Carbon isotope compositions of carbonate sediments in sand dune and vegetation.	44

List of Figures

Figure 1. Location map of the study area showing the locality of the Jeju Island south of the Korea peninsula.	5
Figure 2. Location of the Dangcheomul Cave. Gray zones denote the distribution of carbonate sand dunes.	6
Figure 3. A) The entrance of the Dangcheomul Cave. B, C and D) Numerous calcareous speleothems in Dangcheomul Cave.	7
Figure 4. Plan map of Dangcheomul Cave (from Jeju Special Self-Governing Province, 2007). Monitoring station of temperature, humidity, Pco ₂ are indicated.	8
Figure 5. A) The manmade entrance of the Dangcheomul Cave. B) The DC-1 stalagmite for this study. C) A slab of the DC-1 stalagmite showing sub-sampling sites for carbon and oxygen isotope analyses and uranium-series dating. TS=Areas made for thin sections	10
Figure 6. Carbon dioxide and temperature variations at the monitoring sites in Dangcheomul Cave.	15
Figure 7. Humidity variations at the monitoring sites in Dangcheomul Cave.	16
Figure 8. Seasonal variations of temperature and precipitation amount near Seongsan in Jeju Island.	19
Figure 9. A plot of ²³⁰ Th and ¹⁴ C dating results with depth for the DC-1 stalagmite and carbonate soil.	23
Figure 10. Radiocarbon ages of paleosol within the carbonate sand dune overlying the Dangcheomul Cave	24

Figure 11. Thin section photomicrograph of the DC-1 stalagmite showing the initial stage of calcite growth texture following the growth of opal crystal.	27
Figure 12. Thin section photomicrograph of the longitudinal growth section of the DC-1 stalagmite.	30
Figure 13. Variations of the spacing between growth laminae and thin section photomicrograph of the Type I texture.	31
Figure 14. Variations of the spacing between growth laminae and thin section photomicrograph of the Type II texture.	32
Figure 15. Variations of the spacing between growth laminae and thin section photomicrograph of the Type III texture.	33
Figure 16. Variations of the spacing between growth laminae and thin section photomicrograph of the Type IV texture.	34
Figure 17. Variations of the spacing between growth laminae and thin section photomicrograph of the Type V texture.	35
Figure 18. A plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values versus the age of the DC-1 stalagmite.	39
Figure 19. A plot $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^{13}\text{C}$ for the stalagmite DC-1. The low correlation coefficient ($R_{\text{DC-1}}^2=0.02$) indicates that carbon and oxygen isotope composition are in isotopic equilibrium and not kinetically controlled.	40
Figure. 20. Stable isotope data along five different growth laminae within the stalagmite to determine the "Hendy Test" (Hendy, 1971). Similar stable isotope data along these growth laminae suggest that the speleothem most likely grew under isotopic equilibrium condition. δ	

^{18}O variations along the same growth layers are relatively small compared with the variation along the growth axis.	40
Figure. 21. Carbon isotope values of organic matter within paleosols in the carbonate sand dune overlying the Dangcheomul Cave.	42
Figure 22. Vegetation living on the surface of carbonate sand dune overlying the Dangcheomul Cave. A) <i>Liriope spicata</i> (Thunb.) Lour, B) <i>Rubus parvifolius</i> L. f. parvifolius, C) <i>Chenopodium album</i> var. <i>centrorubrum</i> Makino, D) <i>Artemisia Princeps</i> Pamp, E) <i>Lonicera japonica</i> Thunb., F) <i>Miscanthus sinensis</i> Andersson var. <i>sinensis</i> , G) <i>Vitis amurensis</i> Rupr.	43
Figure. 23. Schematic diagram showing the ideal cave setting of the Dangcheomul Cave for paleoclimate investigation. A) Under less humid climate, the decrease in the amount of rainfall resulted in the longer residence time of meteoric water within carbonate sediments. B) Under more humid condition, the increase in the amount of rainfall passed through carbonate sand dune and basaltic rock more quickly.	46
Figure 24. Photomicrograph of the well developed corroded texture in the DC-1 stalagmite..	50
Figure 25. Variations of the spacing between growth laminae for different textural types.	51
Figure 26. A relationship between oxygen isotope variations of precipitation (upper curve) and temperature variation near the Seongsan region (lower curve).	53
Figure 27. A relationship between oxygen isotope variations of precipitation	

(upper curve) and amount of precipitation near the Seongsan region (lower curve).	53
Figure 28. Oxygen isotope values of rainfall near the Dangcheomul Cave versus the amount of rainwater near the Seongsan region.	55
Figure 29. Oxygen isotope values of rainwater near the Dangcheomul Cave versus temperature near the Seongsan region.	55
Figure 30. A Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus δD compositions of rainwater. A Local Meteoric Water Line (LMWL).	57
Figure 31. A Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus δD compositions of rainwater. $\delta^{18}\text{O}$ and δD data fall along different regression lines in summer and winter. ...	57
Figure 32. Oxygen isotope variations of all the typhoons which passed through Jeju Island.	60
Figure 33. A) Oxygen isotope variations of the typhoon (Dianmu) which passed through Jeju Island. B) Satellite images of the typhoon which passed through Jeju Island.	61
Figure 34. A) Oxygen isotope variations of the typhoon (Kompasu) which passed through Jeju Island. B) Satellite images of the typhoon which passed through Jeju Island.	62
Figure 35. A) Oxygen isotope variations of the typhoon (Malou) which passed through Jeju Island. B) Satellite images of the typhoon which passed through Jeju Island.	63
Figure 36. A plot of $\delta^{13}\text{C}$ values versus the age of the DC-1 stalagmite .	66
Figure 37. Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite and northern hemispheric atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ record.	69
Figure 38. Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite	

and northern hemispheric atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ record. The vertical bar depicts the correlation between the $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite and minimum of solar activity. 71

Figure 39. Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite, estimated temperature variations, other $\delta^{18}\text{O}$ records from Chinese stalagmite, and $\Delta^{14}\text{C}$ record from tree ring data. The $\delta^{13}\text{C}$ time series of the DC-1 stalagmite is in dark green. A, B) Northern hemispheric temperature reconstructions from proxy records (Blue line; Moberg et al., 2005; Orange line; Mann and Jones, 2003). C) Wanxiang Cave (Brown line; Zhang et al., 2008) $\delta^{18}\text{O}$ record. D) Northern hemispheric $\Delta^{14}\text{C}$ record from tree-ring study (Red line; Reimer et al., 2009). 75

Figure 40. $\delta^{13}\text{C}$ records (dark green line) and textural characteristic of the DC-1 stalagmite compared to northern hemispheric $\Delta^{14}\text{C}$ records from tree-ring study (red line). DACP= Dark Age Cold Period, CWP= Current Warm Period. 76

1. 서 론

기후는 지구 역사동안 여러 요인에 의하여 변화하게 되며, 특히 태양활동의 변화, 육상 및 해저의 화산활동, 해수순환의 변화 등이 밀접하게 연관되며 일어난다. 하지만 최근에는 위의 요인들 외에도 산업혁명 이후부터 증가한 인간의 화석연료 사용으로 인한 온실가스의 증가도 포함된다. 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, 2007)의 보고서에 의하면 2100년까지 전 지구 대기의 온도는 최대 약 6 °C의 상승을 예측하고 있다. 기후변화는 과거 문명의 흥망성쇠뿐만 아니라 우리의 사회 경제에 밀접한 영향을 미친다(Karl and Easterling, 1999; Hulme et al., 1999; Gowlett, 2001; Marris, 2007). 이러한 이유로 온도 상승이 과거에도 일어났는지, 그리고 온도가 상승하면 환경은 어떻게 변하는지를 알기 위하여 고기후의 연구가 필요하다.

최근까지 고기후 연구는 주로 해양퇴적물, 극지 지역의 빙하, 호수 퇴적물, 나무 나이테, 화분, 산호, 퇴스, 동굴생성물 등 기후변화에 민감하게 반응하는 다양한 물질들이 이용되어 왔으며, 인구가 밀집된 육상 환경의 고기후를 복원하려는 연구가 점차 활발하게 수행되는 추세에 있다(조경남 외, 2008). 이러한 육상의 고기후 지시자들 중 동굴생성물은 최근 들어 세계적으로 주목받고 있는 고기후 지시자로서(e.g., Henderson, 2006; Pasotti, 2007) 다양한 장점을 가지고 있다. 동굴생성물은 지화화학적 분석을 통하여 특히 안정동위원소 분석 자료를 이용해 지난 수 천년에서 수백만 년에 이르기까지 온도와 강수의 변화를 고해상도로 복원할 수 있는 고기후 지시자(proxy)로서 중요한 역할을 하고 있다. 여러 동굴생성물 중 중유석과 석순은 동굴수로부터 이산화탄소의 유리작용이

일어남에 따라 탄산염 성분이 광물로서 침전하면서 형성된다(Hendy, 1971). 이러한 동굴수가 지표 및 암석을 거쳐 동굴 내부로 빠르게 도달하면서 동굴생성물이 성장할 경우 동굴생성물은 동굴 내부뿐만 아니라 동굴 주변의 환경 변화를 반영하기도 한다(e.g., McDermott, 2004; Fairchild et al., 2006). 이러한 이유로 동굴생성물은 고기후변화 연구를 위한 중요한 지시자로 이용되고 있으며, 특히 우라늄 계열을 이용한 정확한 연령분석을 토대로 산소 및 탄소동위원소 자료를 이용한 연구가 많이 이루어져 왔다(Gascoyne et al., 1980; Dorale et al., 1992; McDermott et al., 2001; Fleitmann et al., 2003; Cruz et al., 2005; Wang et al., 2005, 2008; Henderson, 2006; Zhang et al., 2008; Hu et al., 2008; Martin et al., 2011)). 최근에는 산소 및 탄소동위원소 등 지화화학적 분석 뿐만 아니라 석순의 조직적 특징을 대비하여 고기후 복원에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다(e.g. Broecker et al., 1960; Genty, 1992, 1993; Baker et al., 1993; Shopov et al., 1994; Genty and Quinif, 1996; proctor et al., 2000, 2002; Polyak and Asmeron, 2001; Baker et al., 2002; Tan et al., 2003, 2006). 이러한 조직적 연구를 통한 고기후 추정은 지화학적 분석 중 발생할 수도 있는 오류를 검증할 수 있다는 점에서도 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. Baker et al. (1993)은 영국의 동굴생성물로부터 연간 성장띠(annual bands)를 보고하였으며, Polyak and Asmerom(2001)은 연간 성장띠의 두께를 측정하여 고기후 연구에 적용한 바 있다. 국내에서 이루어진 연구는 동굴생성물의 조직과 성장선, 광물학적 특징, 지화학 분석, 유체포유물 등을 이용해 해석되어졌다(e.g., 우경식 외, 2004; 최돈원 외, 2005; 조경남 외, 2006a, 2006b; Jo et al., 2010; 지효선 외, 2011). 우경식 외 (2004)는 당처물동굴 석주의 연구를 통해 동굴생성물의 조직적인 특성(e.g., 성장선의 밀집도)이 지화학 성분과 잘 대비되어 나타남으로서 동굴생성물의 조직이 고기후변화를 암시함을 제시하였다. Jo et al.

(2010)는 우리나라 계열을 이용한 연령측정을 바탕으로 강원도 관음굴의 석순을 이용하여 조직적 특징과 지화학적 분석결과를 대비하여 MIS4와 MIS5a 기간동안 한반도에 영향을 준 동아시아몬순의 강도를 추정하였다. 최근 지효선 외(2010)는 용천동굴의 석순에 나타나는 탄소동위원소 성분변화와 석순의 조직적 특징을 이용하여 제주도 내에서 소빙기가 끝난 시기를 제시하기도 하였다. 한반도를 포함한 동아시아몬순의 영향을 직접적으로 받는 지역은 동아시아 몬순에 대한 이해를 위해 이 지역에 분포하는 동굴생성물, 호수퇴적물, 퇴적층에 나타나는 퇴스 및 고토양 등을 이용해 고기후를 복원하는 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다(An et al., 2000; Burns et al., 2003; Cai et al., 2001; Cosford et al., 2008; Dykoski et al., 2005; Fleitmann et al., 2003; 2007; Hong et al., 2005; Selvaraj et al., 2007; Schettler et al., 2006; Wang and Follmer, 1998; Wang et al., 2005, 2008; Williams et al., 1997, 2001; Yancheva et al., 2007; Zhang et al., 2008).

당처물동굴은 제주도 북동부에 위치한 용암동굴이며 전형적인 용암동굴의 형태를 보여주지만 일반적인 용암동굴과는 달리 동굴 상부 지표에 퇴적되어 있는 탄산염퇴적물로 구성된 사구의 영향으로 동굴 내부에는 탄산염광물(방해석)로 이루어진 동굴생성물이 성장하고 있다(우경식 외, 2000; 우경식, 2004). 이번 연구는 당처물동굴에서 성장하던 석순(DC-1)을 이용하여 이루어졌다. 이 연구의 목적은 제주도 당처물동굴에서 성장하던 석순을 이용하여 조직적 특징 관찰과 안정동위원소 분석 등 지화학적 특징을 상호 대비하여 동굴생성물이 지시하는 고기후학적 의미를 이해하는데 있다. 또한 그 결과를 이용하여 당처물동굴의 석순이 성장하는 동안 제주도 및 한반도에 영향을 미친 홀로세 후기 고기후변화를 파악하고자 한다.

2. 연구지역

지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치한 한반도는 여름에는 강한 동아시아 몬순의 영향으로 고온다습하며 겨울에는 상대적으로 춥고 건조한 대륙고기압의 겨울몬순의 영향을 받는다(그림 1). 당처물동굴 인근에 위치한 제주도 성산기상대의 2005년 1월부터 2012년 3월까지 자료에 따르면 연구지역의 연평균 기온은 14.8 °C 이며, 연평균 강수량은 1,883.8 mm이다(기상청, 2012). 연평균 강수량 중 대부분은 7, 8, 9월에 강우가 집중되는 경향을 보이며, 12월부터 2월까지의 연평균 강수량의 12%만이 내리는 것으로 보고되었다.

당처물동굴은 제주도 북동쪽 구좌읍 월정리에 위치하고 있으며, 좌표 상으로 동경 126°41' 30" ~ 126°55' 30", 위도 상으로는 북위 33°24' 10" ~ 33°32' 50"에 위치하고 있다(그림 2). 이 지역은 유동성이 좋은 알칼리 현무암이 해안에 넓게 분포하며, 이 용암류는 이 지역 일대에 용암동굴을 형성하였다(원종관 등, 1993). 인접한 지역에는 만장굴, 용천동굴, 김녕굴 등이 위치하고 있다. 당처물동굴은 작은 규모와 함께 비교적 단순한 형태를 이룬다(그림 4). 동굴의 길이는 발견당시 조사에서는 110 m이고 폭은 5.5~18.4 m, 높이는 0.3~2.7 m로 알려졌다(최근에 이루어진 추가 조사로 70 m의 연장을 더 확인할 수 있었고 동굴생성물로 막혀있어 사람의 출입이 불가능한 연장까지 더하면 수십 m이상 연장될 것으로 추정 된다(제주특별자치도, 2011)). 동굴주변은 대체로 평탄한 경작지이며, 부분적으로 투물러스 지형과 사구들이 언덕형태를 이루고 있다. 용암동굴이 비교적 해안가와 근접한 곳에 형성되어 있는 용천동굴과 당처물동굴 상부에는 탄산염입자로 구성된 사구가 퇴적되어 있다. 이러한 탄산염사구의 퇴적

으로 인하여 빗물과 토양 내의 여러 유기산(fulvic and humic acid)에 의해 탄산염퇴적물이 용해되어 동굴 내부로 탄산칼슘이온이 이동된 후 유입된 물속의 이산화탄소가 유리되면서 방해석이 침전되어 당처물동굴 내부에 탄산염 동굴생성물이 성장하기 시작하였다. 동굴 지표 사구에서 발견되는 탄산염 입자들은 인근에 위치한 김녕해수욕장의 탄산염 입자들과 비슷한 백색의 탄산염퇴적물이며, 경작지의 모래는 주변 사구 토양에서 인위적으로 복토된 것으로 조사되었다. 당처물동굴은 전형적인 용암동굴의 형태와 동굴 내부의 미지형을 보여주고 있지만, 동굴내부에서는 석회동굴에서만 특징적으로 찾아 볼 수 있는 탄산염광물로 이루어진 종유석, 석순, 석주, 동굴산호, 커튼, 유석, 휴석, 월유 등 많은 동굴생성물이 나타난다(그림 3). 특징적으로 많은 동굴생성물들이 기형의 형태로 성장하고 있으며, 이는 동굴내부로 내려온 식물의 뿌리들을 탄산염 생성물이 피복하면서 기형적인 모양들로 성장한 것으로 알려졌다(우경식 외, 2000; Woo et al., 2008)).

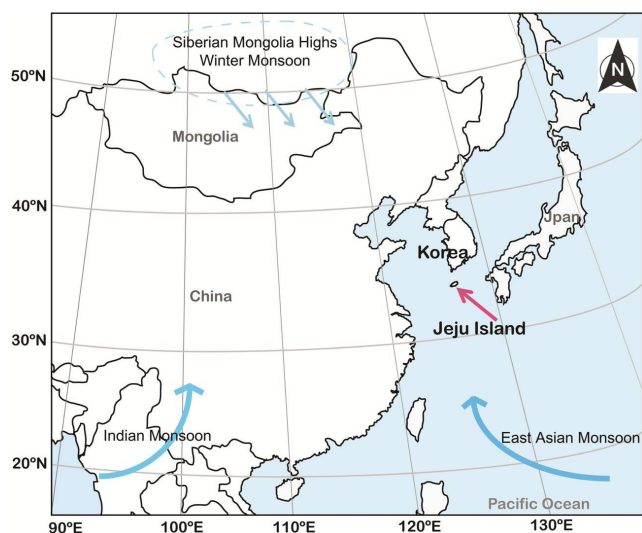


Fig. 1. Location map of the study area showing the locality of the Jeju Island south of the Korea peninsula.

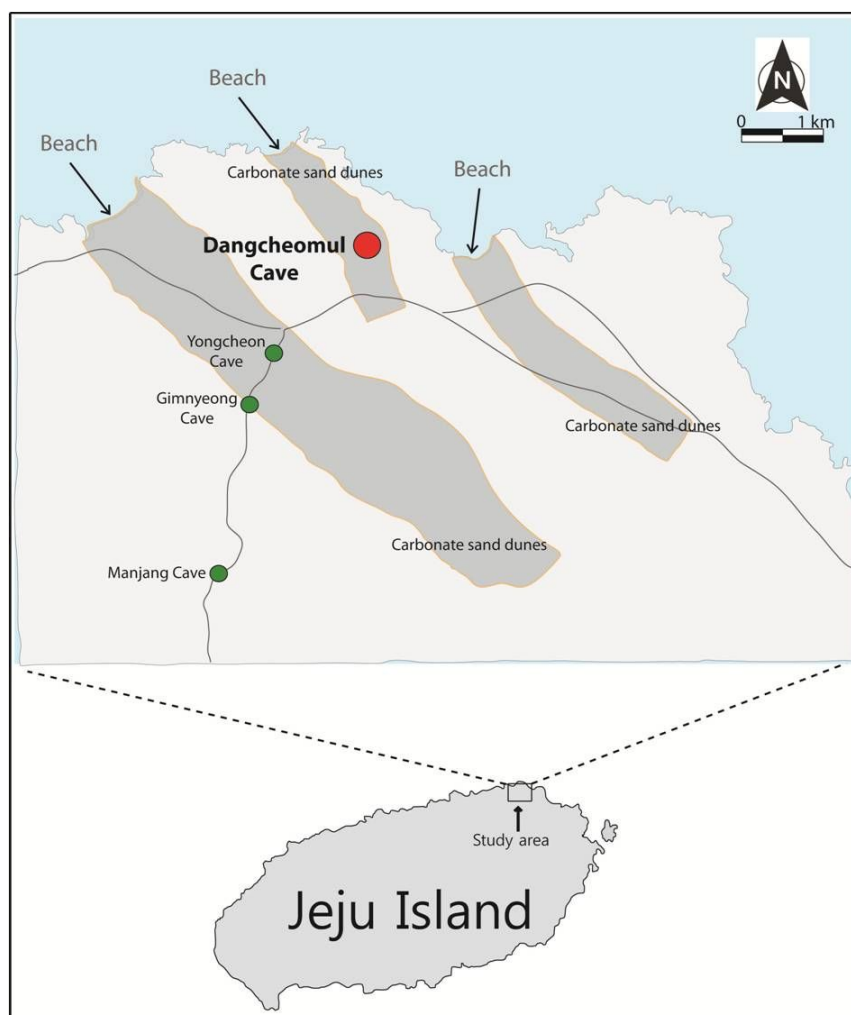


Fig. 2. Location of the Dangcheomul Cave. Gray zones denote the distribution of carbonate sand dunes.

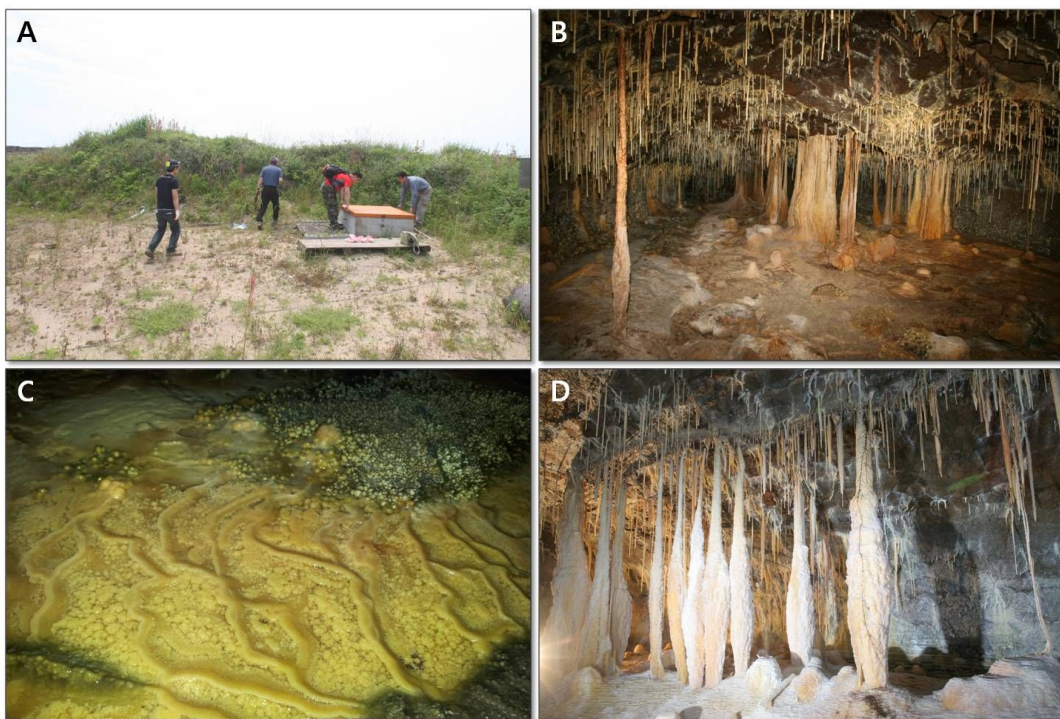


Fig. 3. A) The entrance of the Dangcheomul Cave. B, C, and D) Numerous calcareous speleothems in Dangcheomul Cave.

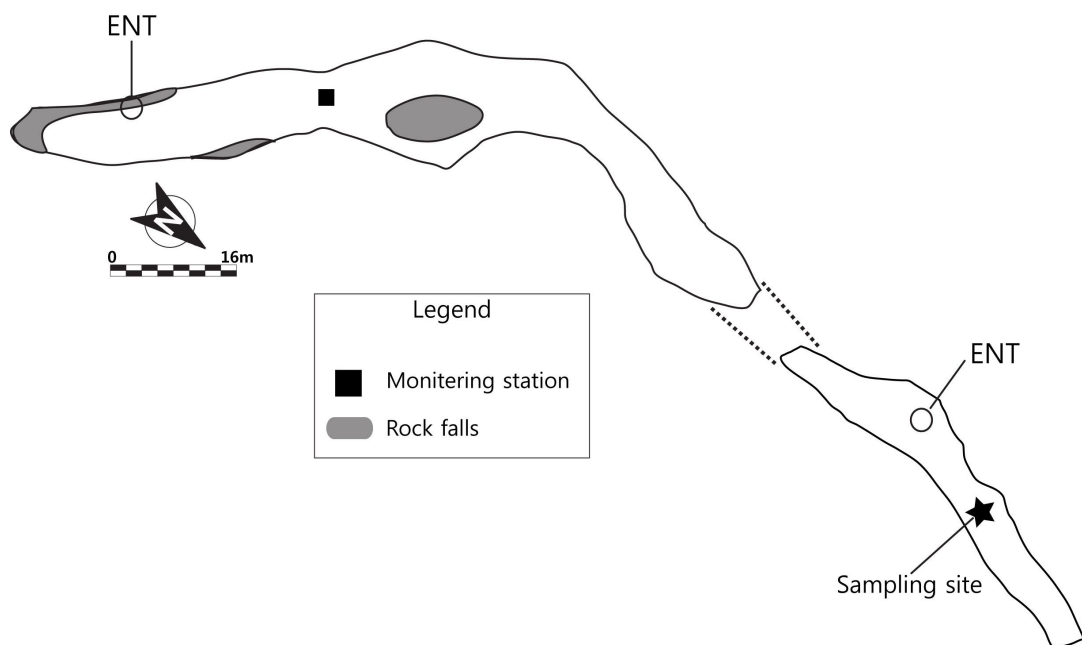


Fig. 4. Plan map of Dangcheomul Cave (from Jeju Special Self-Governing Province, 2007). Monitering station of temperature, humidity, P_{CO_2} are indicated.

3. 연구방법

연구를 위해 제주시 구좌읍 월정리에 위치한 당처물동굴 제 2입구에서 약 20 m 떨어진 지점에서 2009년 12월에 석순을 채취하였다. 석순의 길이는 225 mm이고 지름은 165 mm이다(그림 5B). 채취한 석순에 대한 조직관찰, 연령분석, 지화학분석을 위해 석순을 수지(epoxy)로 경화 시킨 후에 성장축을 따라 종방향으로 절단하였다(그림 5C). 절단한 석순의 한쪽 측면을 7.5×5 cm 규격의 슬라이드 글라스를 이용하여 4개의 박편을 제작하였으며, 제작된 박편을 실체현미경(Nikon, SMZ 800)과 편광현미경(Nikon, OPITTI 'Hot pol')을 이용하여 조직적 특징을 관찰하였다. 절단한 석순시료의 단면을 관찰한 후 연령분석을 위한 분말시료를 얻기 위하여 미량표품채취기(dental drill)를 사용하여 하부로부터 상부까지 4개의 지점에서 350 mg의 분말시료를 채취하였다.

연령분석은 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 연령분석법을 통해 이루어 졌다. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 연령분석은 미국의 미네소타대학에서 MC-ICP-MS (Finnigan MAT Element)를 이용하여 분석하였다. 우라늄 토륨의 분리 및 정제 그리고 분석 절차는 Edwards et al. (1987, 1993)과 Cheng et al. (2000)의 방법에 따라 진행하였다. 미시료를 HNO_3 에 용해시킨 후 ^{229}Th 과 ^{233}U - ^{236}U ($^{233}\text{U} \cong ^{236}\text{U}$) 추적자를 가하였다. 우라늄(Uranium)과 토륨(Thorium) 추적자 용액은 뉴브론스웁스실험실(New Brunswick Laboratories; NBL)의 표준 시료(Standard Reference Material)인 112-A중액을 사용하여 보정하였으며, 아이오와(Iowa)의 아미즈(Ames) 연구소에 있는 표준물질조제센터(Standard Materials Preparation Center)의 정제토륨 금속이 이용되었다. 우라늄 토륨은 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 가 포함된 시료-추적자 용액으로부터

터 동시에 침전시켰으며, 이온 교환 반응으로 추출하였다. 이를 위해 바이오-래드 음이온교환합성수지(Bio-Rad anion exchange resin AGI X8, 100-200 mech)를 이용하였다. 석순의 하부 연령자료가 부족하여 탄산염사구 고토양층의 연령측정을 동시에 실시하였다. 탄산염사구 퇴적층의 최하부 고토양 시료의 연령측정은 미국의 BETA 분석실험실에서 이루어졌다. 고토양시료를 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 이용해 전처리한 후에 AMS (Accelerator Mass Spectrometry Technique)로 측정하였다. 측정값은 2 sigma calibration curve를 이용하여 calendar age로 보정 되었다.

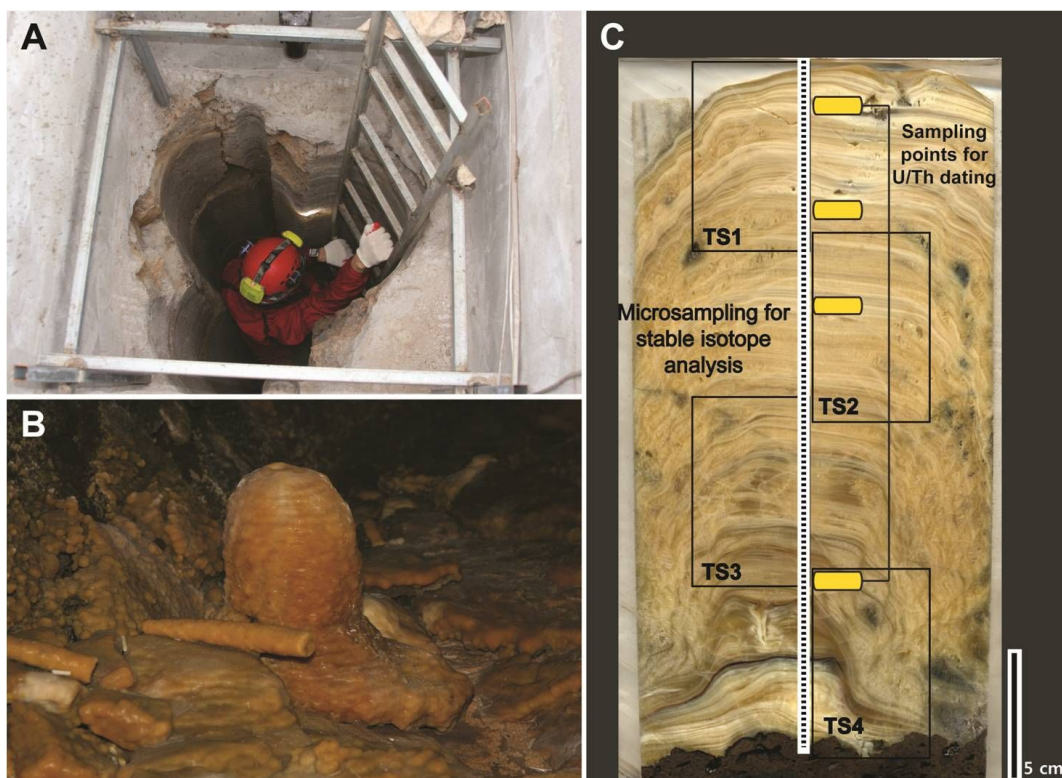


Fig. 5. A) The manmade entrance of the Dangcheomul Cave. B) The DC-1 stalagmite for this study. C) A slab of the DC-1 stalagmite showing sub-sampling sites for carbon and oxygen isotope analyses and uranium-series dating. TS=Areas made for thin sections

또한 석순의 탄소동위원소 성분변화에 영향을 미치는 동굴지표의 탄산염사구퇴적물과 사구에 분포하는 식생의 탄소동위원소 성분을 알아보기 위하여 한국기초과학지원연구원(KBSI)의 EA-IRMS (Elemental Analyzer-Isotope Ratio Mass Spectrometer, 영국 GV Instruments사의 Isoprime모델)를 이용하여 유기물의 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비를 분석하였다. 실험실 표준시료를 반복 분석한 결과 자료의 재현성은 약 $\pm 0.2\%$ 이다.

석순의 안정동위원소 성분을 알아보기 위해 석순의 성장축을 따라 한국해양연구원 부설 극지연구소에 미세분말채취기(MicroMill)를 이용하여 0.25 mm 간격으로 하부로부터 상부까지 862개의 분말시료를 채취하였다. 채취한 분말시료 중 상부 100개는 독일의 LEIBNIZ 연구소에서 IRMS (Isotope Ratio Spectrometer, Finnigan MAT251)를 이용한 dual inlet 모드로 이루어졌다. 산소와 탄소 동위원소의 분석 오차범위는 모두 $\pm 0.01\%$ 이다. 나머지 762개의 분말시료는 미국 Arizona University의 Environmental Isotope Laboratory에서 질량분석기(Mass spectrometer; Finnigan MAT 252)를 이용하여 분석하였다. 표준시료는 NBS-19를 사용하였으며 분석오차는 산소동위원소가 $\pm 0.1\%$, 탄소동위원소가 $\pm 0.04\%$ 이다.

석순의 안정동위원소 성분의 변화와 연구지역의 강수량의 안정동위원소 성분의 변화의 상관관계를 알아보기 위하여 2009년 1월부터 2012년 5월까지 연구지역에서 51개의 강수시료를 채취하여 분석하였다. 강수의 안정동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원에서 실시하였으며, 산소동위원소의 경우 물 0.3 ml를 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 평형법(Epstein and Mayeda, 1953)으로 25°C 에서 CO_2 와 동위원소 교환반응을 시킨 후에 안정동위원소 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer) (영국 GV Instruments사의 모델 Isoprime)로 분석하였다. 표준시료를 반복 측정된 오차범위는 약 $\pm 0.1\%$ 이다. 수소동위원소 분석은 Morrison et al. (2001)의 방법에 따라 온라인수소전처리장치(모델 PyrOH)를 이용하여 약

0.2 μl 의 물 시료를 Cr과 반응시켜 발생시킨 수소가스를 안정동위원소 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer) (영국 GV Instruments사의 모델 Isoprime)를 이용하여 분석하였으며, 표준시료를 반복 측정한 오차범위는 약 $\pm 1.0\text{‰}$ 이다.

4. 연구결과

4-1. 동굴환경

연구에 이용된 당처물동굴내의 동굴생성물(석순)은 연구지역의 강수량, 온도, 이산화탄소분압, 동굴상부의 탄산염사구 분포, 식생 등 여러 요인에 의해 영향을 받으며 성장한다. 이러한 요인들이 어떻게 작용하는지 알아보기 위하여 동굴내부 지점과 외부 지점에서 2010년 1월부터 12월까지 온도, 습도, 이산화탄소분압을 측정한 제주특별자치도의 모니터링 자료를 획득하여 이를 분석하였다(표 1, 그림4)).

Table 1. Monthly variations of temperature, humidity and carbon dioxide of the Dangcheomul Cave and its adjacent area.

collecting date	outside temperature (°C)	cave temperature (°C)	outside humidity (%)	cave humidity (%)	outside CO ₂ (ppm)	cave CO ₂ (ppm)
2010.01	8.3	16.1	57.8	99	404	693
2010.02	12	16.1	62	99	463	820
2010.03	11	16	74.7	97.3	411	539
2010.04	14.1	15.8	87.1	96	423	770
2010.05	21.3	18.6	86.6	85.6	467	1198
2010.06	25.7	19.9	93.9	97.1	325	1528
2010.07	32.1	18.6	68.2	93.5	291	1592
2010.08	28.7	20.4	86.2	96.4	350	1902
2010.09	25.6	18.9	61.7	84.7	347	1552
2010.10	12.5	19.2	50.5	99.9	324	638
2010.11	11.7	19	51.7	99.9	380	894
2010.12	15.1	18.3	49.5	99.9	367	995

당처물동굴의 외부 온도는 1월에 8.3 °C로 가장 낮은 값을 보였고, 7월에 32.1 °C로 가장 높은 값을 보였으며 2010년의 연평균 기온은 18.2 °C로 나타났다. 동굴내부 온도는 4월에 15.8 °C로 가장 낮은 값을 보였고, 8월에 20.4 °C로 가장 높은 값을 보였으며 평균값은 18.1 °C로 동굴외부온도의 평균값인 18.2 °C와 비슷한 값을 나타내며 동굴내부의 온도가 계절적인 변화에 크게 영향을 받지 않는 안정적인 환경으로 측정되었다(그림 6). 외부습도는 50.5%~93.9%까지 다양한 값을 보이고 있으며, 강수량이 늘어나는 4, 5, 6, 7, 8, 9월에 평균 80.6%로 비교적 높게 나타났고, 상대적으로 강수량이 적은 10, 11, 12, 1, 2, 3월에는 평균 57.7%로 측정 되었다. 동굴내부의 습도는 평균 95.7 %로 높은 값을 보이며, 계절에 따른 차이가 나타나지 않으며 비교적 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 하지만 5월과 9월에는 각각 85.6%, 84.7%로 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다(그림 7). 동굴내부의 이산화탄소분압은 638~1902ppm의 범위를 보였고 동굴외부의 온도가 상승하고 강수량이 많아지는 5, 6, 7, 8, 9월에 각각 1198, 1528, 1592, 1902, 1552ppm으로 높게 측정 되었으며, 8월의 이산화탄소분압은 1902ppm으로 가장 낮았던 3월의 539ppm보다 무려 1363ppm이 높게 측정되었다. 동굴내부의 이산화탄소분압 평균값은 1031.9ppm으로 나타났다(그림 6). 하지만 동굴외부의 이산화탄소분압은 291~467ppm의 범위를 보이며 계절적인 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났으며 평균 379.3ppm으로 측정 되었다.

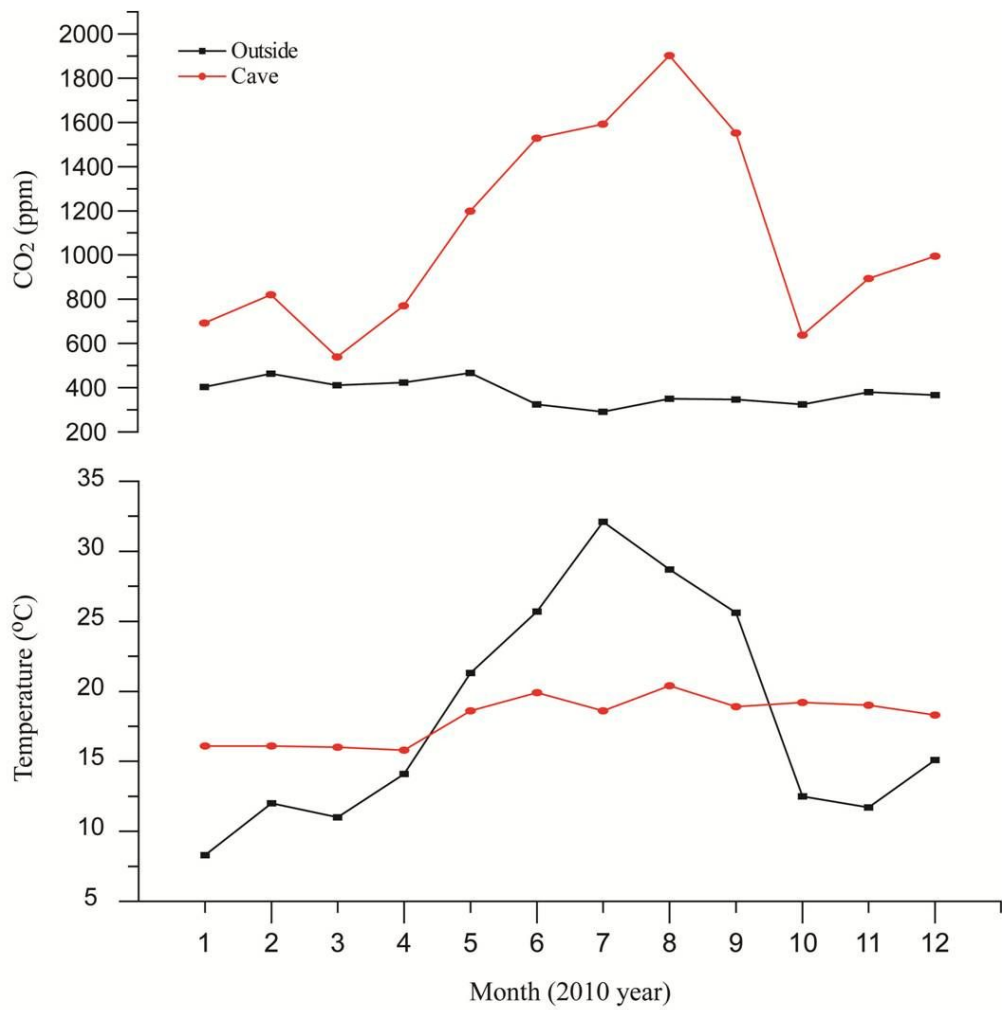


Fig. 6. Carbon dioxide and temperature variations at the monitoring sites in Dangcheomul Cave.

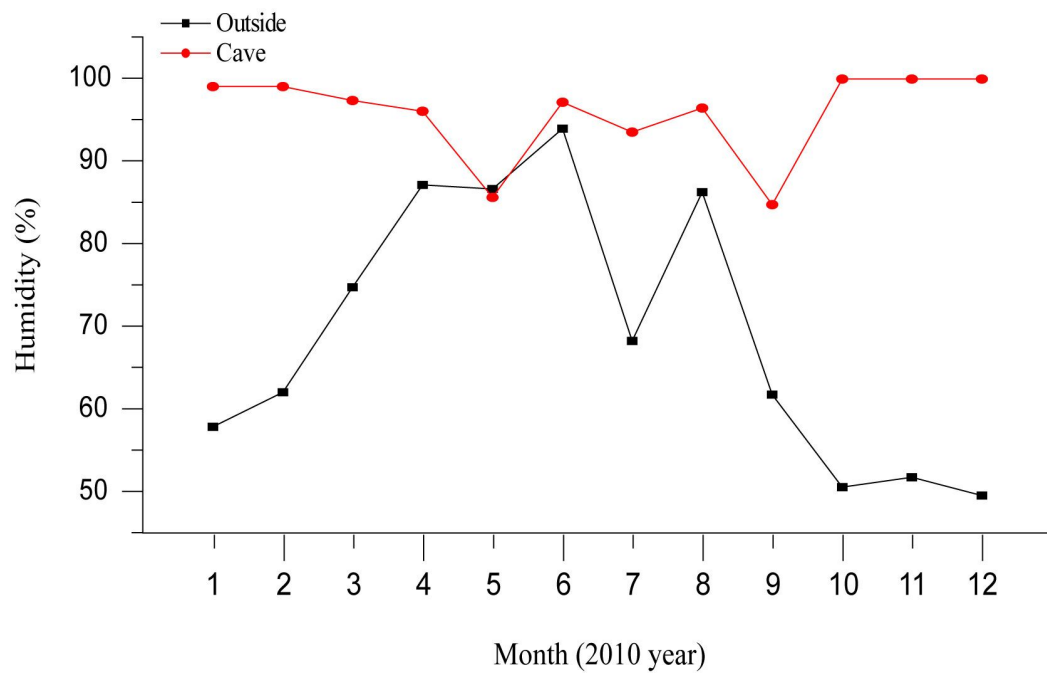


Fig. 7. Humidity variations at the monitoring sites in Dangcheomul Cave.

4-2. 연구지역의 강수량과 산소, 수소동위원소 성분

당처물동굴이 위치한 구좌읍 월정리와 가장 가까운 거리에 있는 성산기상대의 2005년 1월부터 2012년 3월까지의 자료에 따르면 이 지역의 연평균 강수량은 1,887.2 mm로 대부분의 강수는 6월, 7월, 8월 여름에 집중되는 경향을 보였다. 여름철에 해당하는 이 기간의 평균 강수량은 850.6 mm이며 연평균 강수량의 45.1%에 달한다. 겨울에 해당하는 12월부터 2월까지의 강수량은 여름철 강수량에 비해 상대적으로 적고 연평균 강수량의 12.2%만 내리는 것으로 나타났다(그림 8).

당처물동굴 석순의 안정동위원소 성분이 석순이 성장하던 당시의 환경과 계절적인 영향을 어느 정도 반영하는 지를 판단하기 위해 2009년 1월부터 2012년 5월까지 연구지역의 강수를 채취하여 안정동위원소 성분을 분석하였다. 강수의 산소동위원소 값은 $-13.2\sim-1.7\%$ 의 범위를 보이며, 평균값은 -6.8% 이다(표 2). 겨울에 해당하는 12, 1, 2월의 산소동위원소의 범위는 $-10.4\sim-3.3\%$ 로 나타나며, 평균값은 -6.6% 이다. 봄에 해당하는 3, 4, 5월에는 $-11.3\sim-1.8\%$ 의 범위를 보였고 평균값은 -6.9% 로 측정되었다. 제주도 연평균 강수량의 대부분을 차지하는 6, 7, 8월 여름의 산소동위원소 평균값은 -6.3% 로 나타났으며, 산소동위원소의 값이 $-12.1\sim-1.8\%$ 의 범위를 보이며 가장 큰 폭의 차이를 나타냈다. 가을에 해당하는 9, 10, 11월의 산소동위원소의 범위는 $-13.2\sim-3.8\%$ 이며 평균값은 -7.3% 로 측정되었다. 계절에 따라 산소동위원소 성분이 다양하게 나타나 경향성은 잘 나타나지 않는다. 또한 연구지역 내 강수의 수소동위원소 값은 $-102.1\sim-8.4\%$ 로 굉장히 큰 차이의 범위를 보이며 나타났고 평균값은 -46% 이다(표 2). 수소동위원소의 성분도 봄, 여름, 가을, 겨울을 월별로 구분하여 동위원소의 범위와 평균값을 측정하였다. 겨울에 해당하는 12, 1, 2월에는 $-65.2\sim-8.4\%$ 의 범위를 보였으며 평균값은 -38.1% 로 사계절의 평균값 중에서 가장 낮게 측정

되었다. 3, 4, 5월에는 $-81.9 \sim -15.1\%$ 의 범위를 보였고 평균값은 -49.3% 로 측정되었다. 연구지역의 연평균 강수량의 반 이상을 차지하는 여름에 해당하는 6, 7, 8월에는 $-102.1 \sim -10.1\%$ 의 범위로 가장 큰 편차를 보였으며 평균값은 -46% 이다. 9, 10, 11월에는 $-95.8 \sim -23.2\%$ 의 범위를 보였으며 평균값은 -46.3% 로 측정되었다.

일반적인 강수의 산소동위원소 구성과 태풍의 산소동위원소 구성을 비교하기 위하여 모니터링 기간 중에 네 번의 태풍의 강수를 채취하여 측정하였다(표 3). 2010년 8월 10일에 제주도에 영향을 주었던 태풍 덴무(Dianmu)의 경우에는 12시에서 14시에 채취한 강수의 산소동위원소 조성은 -7.0% , 14시에서 16시 사이에 채취한 강수는 -12.6% , 16시에서 18시 사이에 채취한 강수는 -12.4% , 18시에서 20시 사이에 채취한 강수는 -14.1% , 20시에서 24시 사이에 채취한 강수에서는 -10.9% 로 측정 되었다. 태풍 덴무가 제주도로 근접할수록 강수의 산소동위원소의 구성이 더 낮은 값을 보여 우량효과(amount effect)가 나타난 것으로 판단된다. 하지만 20시에서 24시까지 채취된 강수에서는 -10.9% 로 다시 부화되는 값을 보였다. 2010년 9월 1일에 제주도에 영향을 준 곤파스(Kompasu)는 8시에서 13시 사이에 채취된 강수의 산소동위원소 구성이 -5.9% , 14시에서 18시 사이에 채취된 강수가 -10.2% , 18시에서 21시 사이에 채취된 강수에서 -7.6% , 21시에서 24시 사이에 채취된 강수에서는 -10.2% 로 측정되었다(그림 31). 태풍 곤파스의 경우에는 강수의 산소동위원소 구성이 시간대에 따라서 부화된 값과 고갈된 값이 반복 되면서 측정되었다(그림 33). 2010년 9월 6일에 제주도에 영향을 준 태풍 말로우(Malou)는 강수의 산소동위원소가 9시에서 14시 사이에는 -11.1% , 14시에서 19시 사이에는 -10.3% , 19시에서 23시 사이에는 -9.0% 로 측정되어 태풍이 제주도를 근접해 지나 갈수록 산소동위원소 구성이 부화되는 경향을 보였다(그림 34). 2011년 9월 11일에 제주도에 영향을 준 태풍 킬랍(Kilap)은 제주도에 근접해서 열대성 저기압으로 소멸 되었다. 그리고 강수

의 산소동위원소 또한 $-5.1 \sim -3.0\%$ 로 다른 태풍들에 비해서 상당히 부화된 값을 보였다.

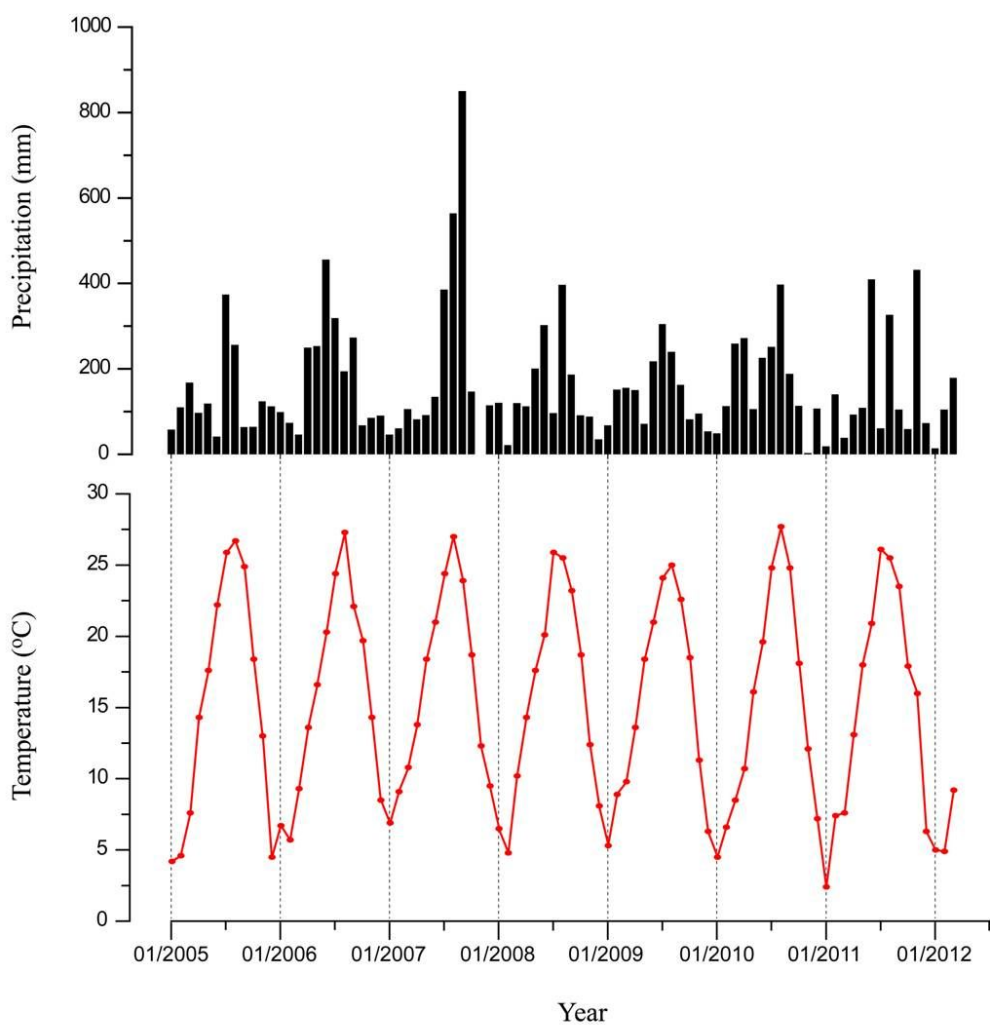


Fig. 8. Seasonal variations of temperature and precipitation amount near Seongsan in Jeju Island.

Table. 2. $\delta^{18}\text{O}$ and δD compositions of rainwater on Jeju Island.

collecting date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	δD (‰,VPDB)	collecting date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	δD (‰,VPDB)
2009.01.21	-3.3	-8.4	2011.05.27	-4.9	
2009.01.30	-9.2	-65.2	2011.06.03	-7.7	-57.5
2009.02.19	-4.0	-21.2	2011.07.02	-6.0	-44.3
2009.04.13	-8.1	-61.5	2011.07.06	-7.7	-56.0
2009.05.20	-2.7	-15.1	2011.07.09	-5.4	-41.6
2009.07.07	-5.5	-40.7	2011.07.11	-1.8	-10.1
2009.07.15	-5.0	-32.5	2011.08.01	-2.5	-16.9
2009.07.28	-7.1	-48.1	2011.08.22	-7.2	-49.7
2009.08.07	-4.2	-28.2	2011.08.26	-7.9	-58.4
2009.08.11	-3.9	-27.6	2011.09.10	-3.8	-23.2
2009.08.14	-12.1	-102.1	2011.10.14	-13.2	-95.8
2010.09.11	-8.4	-65.4	2011.12.07	-6.2	-33.9
2010.09.20	-3.9	-19.4	2012.02.28	-10.4	-62.0
2010.10.05	-6.1	-24.6	2012.03.02	-4.6	-13.7
2010.10.07	-6.2	-24.7	2012.03.05	-11.3	-81.9
2010.10.08	-5.8	-29.6	2012.03.23	-9.3	-56.7
2010.10.24	-6.1	-34.6	2012.03.30	-9.9	-57.2
2010.10.25	-8.5	-55.8	2012.04.10	-7.4	-47.1
2011.04.03	-5.5		2012.04.21	-6.5	-49.4
2011.04.07	-1.8		2012.05.01	-10.5	-73.8
2011.04.30	-10.2		2012.05.15	-6.4	-42.8
2011.05.09	-1.8		2012.05.24	-7.0	-43.0
2011.05.23	-11.3				

Table. 3. $\delta^{18}\text{O}$ and δD compositions of rainwater during typhoon on Jeju Island.

collecting date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	δD (‰,VPDB)	collecting date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	δD (‰,VPDB)
Typhoon DIANMU			Typhoon MALOU		
2010.08.10-1 (12:00~14:00)	-7.0	-53.3	2010.09.06-1 (09:00~14:00)	-11.1	-81.8
2010.08.10-2 (14:00~16:00)	-12.6	-94.7	2010.09.06-2 (14:00~19:00)	-10.3	-77.1
2010.08.10-3 (16:00~18:00)	-12.4	-95.3	2010.09.06-3 (19:00~23:00)	-9.0	-64.9
2010.08.10-4 (18:00~20:00)	-14.1	-109.3			
2010.08.10-5 (20:00~24:00)	-10.9	-83.1			
Typhoon KOMPASU			Typhoon KULAP		
2010.09.01-1 (08:00~13:00)	-5.9	-38.7	2011.09.10-1 (14:00~16:00)	-3.8	-23.2
2010.09.01-2 (14:00~18:00)	-10.2	-76.5	2011.09.10-2 (16:00~18:00)	-5.1	-30.5
2010.09.01-3 (18:00~21:00)	-7.6	-54.9	2011.09.10-3 (18:00~20:00)	-3.7	-21.8
2010.09.01-4 (21:00~24:00)	-10.2	-75.7	2011.09.10-4 (20:00~22:00)	-3.0	-16.9

4-3. 석순의 연령

석순의 연령분석은 하부에서부터 상부까지 총 4개 DC1-1, DC1-2, DC1-3, DC1-4 지점에서 분말시료를 채취하여 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 연령분석법을 이용하여 실시하였다. 그 결과는 석순의 하부로부터 57.2 mm 지점에서 $2,741 \pm 200$ yr BP, 147.5 mm 지점에서 $1,950 \pm 117$ yr BP, 184 mm 지점에서 $1,332 \pm 57$ yr BP, 215.1 mm 지점에서 589 ± 107 yr BP로 나타났다(표 3). 이 값들은 모두 석순의 상부로 가면서 더 젊은 연령을 보여주고 있으며, 이와 같은 결과는 당처물동굴의 석순이 우라늄과 토륨의 이동에 대해 닫혀있음을 지시한다(Dorale et al., 1998).

석순의 최하부 연령자료가 부족하여 동굴상부 지표의 고토양층의 방사성탄소연대측정을 실시하였으며, 그 결과 $4,450 \pm 30$ yr BP로 측정 되었다(그림 9). 석순의 최하부를 비롯하여 절대연령자료가 부족하지만 탄산염사구가 퇴적 되어진 후에 고토양이 생성되기 때문에 석순 또한 탄산염사구퇴적층이 생성된 이후부터 성장하였으므로 당처물동굴의 석순이 $4,450 \pm 30$ yr BP 이후로부터 성장하기 시작한 것으로 판단된다(그림 10). 이러한 근거가 되는 것은 고토양층에서 세립질의 탄산염입자들이 관찰되기 때문에 탄산염입자들이 녹은 후에 고토양층이 생성된 것으로 생각할 수 있다. 따라서 고토양의 생성은 탄산염사구퇴적물이 식생의 발달정도에 따라 유기작용에 의하여 생성되게 된다. 하지만 석순의 하부 28 mm구간에서 짙은 색의 두꺼운 성장선이 관찰되는데 석순이 성장을 멈추거나 매우 느리게 자란 휴지기일 가능성이 있기 때문에 이 석순의 성장시기를 정확히 추정하기 위해서는 앞으로 추가적인 절대연령 측정이 필요한 것으로 판단된다.

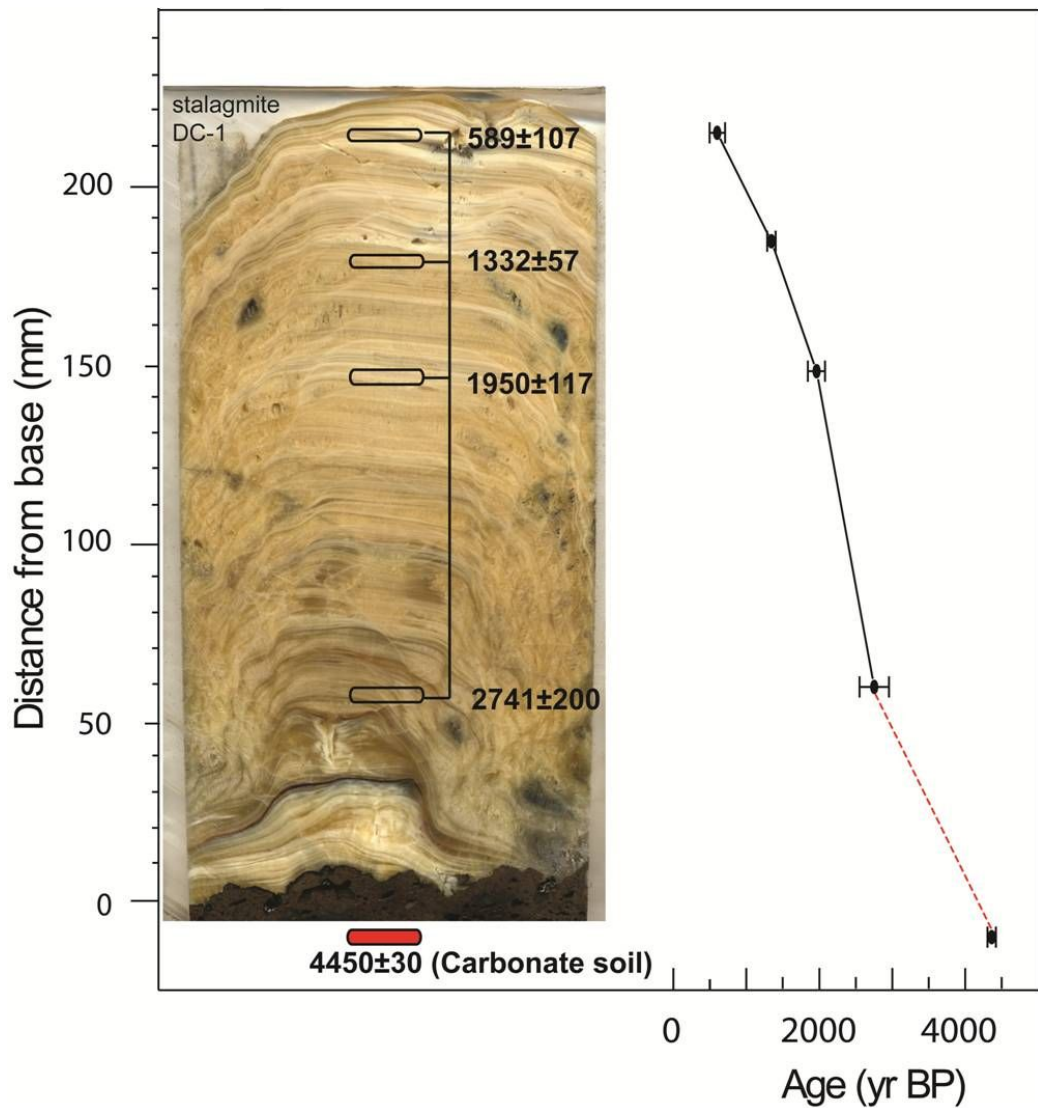


Fig. 9. A plot of ^{230}Th and ^{14}C dating results with depth for the DC-1 stalagmite and carbonate soil.

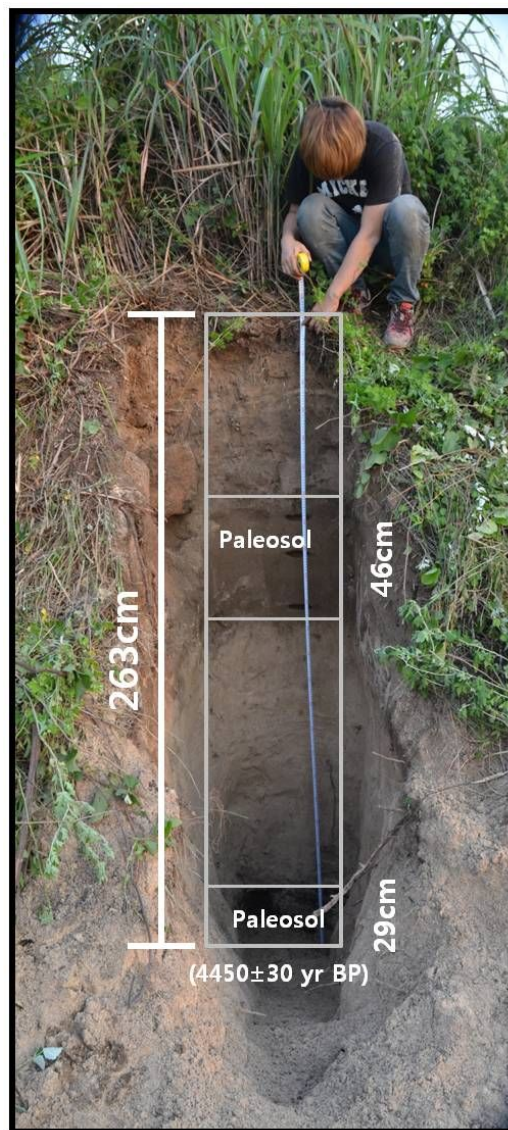


Fig. 10. Radiocarbon ages of paleosol within the carbonate sand dune overlying the Dangcheomul Cave.

Table 4. ^{230}Th dating results of the DC-1 stalagmite. The error is 2σ .

Sample Number	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppt)	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (atomic $\times 10^{-6}$)	$\delta^{234}\text{U}^*$ (measured)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (activity)	^{230}Th Age(yr) (uncorrected)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{Initial}}^{**}$ (corrected)	^{230}Th Age(yr BP) *** (corrected)
DC1-1	44.0 \pm 0.4	438 \pm 9	49.5 \pm 1.4	77.1 \pm 6.5	0.0299 \pm 0.0006	3068 \pm 61	78 \pm 7	2741\pm200
DC1-2	98.7 \pm 1.0	581 \pm 13	60.3 \pm 1.6	94.3 \pm 4.7	0.0215 \pm 0.0004	2165 \pm 39	95 \pm 5	1950\pm117
DC1-3	135.2 \pm 1.0	377 \pm 8	87.0 \pm 2.2	102.6 \pm 4.1	0.0147 \pm 0.0002	1464 \pm 23	103 \pm 4	1332\pm57
DC1-4	128.4 \pm 0.7	728 \pm 15	23.4 \pm 0.7	107.3 \pm 3.9	0.0081 \pm 0.0002	796 \pm 19	107 \pm 4	589\pm107

* $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$. ** $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ was calculated based on ^{230}Th age (T), i.e., $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{1234 \times T}$. Corrected ^{230}Th ages assume the initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ atomic ratio of $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$. Those are the values for a material at secular equilibrium, with the bulk earth $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ value of 3.8. The errors are arbitrarily assumed to be 50%.

***B.P. stands for “Before Present” where the “Present” is defined as the year 1950 A.D.

4-4. 석순의 조직

당처물동굴에서 채취한 석순은 그 길이가 225 mm이며, 종유석으로부터 물이 떨어지는 지점에서 성장한 것으로 상부가 평평한 형태를 보이는 전형적인 평정석순에 속한다. 조직관찰을 위해 석순의 종단면을 절단한 후에 박편을 제작하였다. 박편관찰을 통해 알아본 전체적인 조직은 성장선에 수직방향으로 성장한 주상조직이며, 이러한 주상 조직은 석순의 하부에서 상부까지 전 구간에 나타난다. 석순을 이루고 있는 탄산염광물은 저마그네슘 방해석으로 이루어져 있다. 일반적으로 석순 내에서 관찰되는 갈색의 연성장선을 이루는 부분은 방해석 내에 상대적으로 높은 유기물, 이질 성분 혹은 포유물로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다(Polyak and Asmerom, 2001). 하지만 당처물동굴의 상부에 분포하는 탄산염사구퇴적층 내의 토양에서는 이질 성분이 거의 포함되어 있지 않기 때문에 당처물동굴 내 석순의 연성장선은 주로 유기물과 유체포유물의 함량의 차이에 의한 것으로 생각된다(지효선 외, 2010).

석순 DC-1의 조직을 관찰한 결과 최하부 현무암 기저위로 단백석(opal)으로 이루어진 동굴산호가 성장하고 있다(그림 11). 이러한 이유는 석순의 성장이 오팔산호가 성장한 이후 동굴지표에 탄산염사구가 퇴적되고, 탄산염이온이 동굴 내로 공급되면서 방해석 결정이 성장하기 시작했기 때문이다. 즉, 탄산염사구가 퇴적되기 이전에는 동굴로 유입되는 물이 단백석을 생성할 정도로 pH가 낮고 단백석에 대해 포화된 상태의 지하수가 유입되었다는 것을 의미한다(Woo et al., 2008). 석순의 조직은 많은 성장선을 보여주고 있으며 석순의 하부로부터 상부까지 성장선이 많이 나타나는 성장선 밀집대와 성장선의 밀도가 상대적으로 낮은 성장선 비밀집대가 반복되면서 나타난다. 성장선의 밀집 정도는 과거

연구지역의 강수량에 따른 석순의 성장속도와 밀접한 관련이 있다(지효선 외, 2010). 이러한 이유로 성장선의 밀집정도, 성장선사이의 간격 그리고 석순 조직 내에 유체포유물이 포함된 정도를 바탕으로 Type I에서 Type V까지 다섯 개의 형태로 석순의 조직을 구분하였다(그림 12).

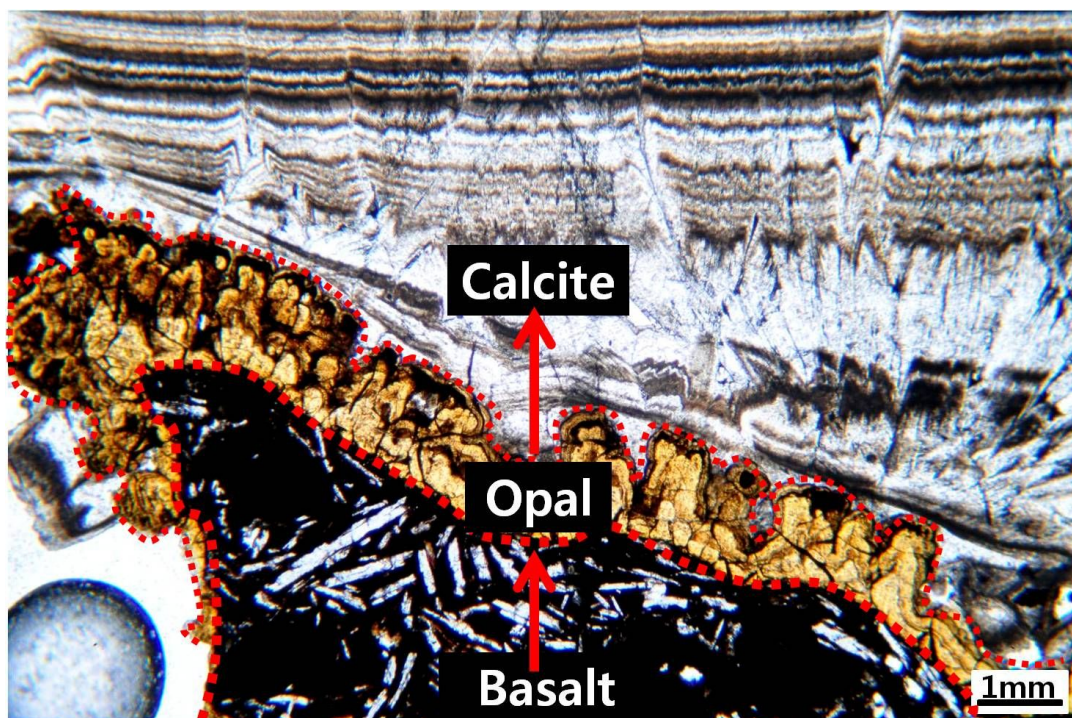


Fig. 11. Thin section photomicrograph of the DC-1 stalagmite showing the initial stage of calcite growth texture following the growth of opal crystal.

또한 석순의 조직 내에는 용식된 구조가 발견된다. 이 용식된 구조에 의해 나타나는 조직은 석순이 성장하면서 만들어진 성장선과 뚜렷이 구분된다. 보통 성장선을 이루는 띠는 그 간격이 성장기간이 여름기간보다 더 얇게 짙은 색을 보이며 현미경 하에서 나타나지만, 용식된 구조는 성장하던 방해석이 침식(용식)을 받은 형태로 나타나며 보통 방해석 결정의 끝이 매우 불규칙적으로 보이

거나 성장선이 일부 끊어진 형태가 발견되기도 한다. 이전의 연구에 의하면 이러한 용식구조는 동굴 밖에서 강수량이 매우 많으면 일시적으로 빗물이 동굴로 유입되면서 석순의 표면에 많은 양의 물이 떨어지면서 석순의 표면을 침식(용식)한 것으로 제안되었다 (Woo et al., 2009). 따라서 이러한 용식구조가 석순의 내부 조직에서 발견되면, 이는 일시적으로 강수량이 매우 높았음을 나타낸다.

Type I 조직은 성장선이 가장 밀집되게 나타는 구간이며 성장띠가 매우 짙은 색을 띠고 있으며 성장선과 성장선사이의 간격 변화가 최대값이 0.23 mm 이고 최소값이 0.01 mm으로 나타났다. 측정된 성장선사이의 간격 대부분은 0.05 mm 이하로 관찰되며, 일부 구간에서는 0.1~0.23 mm 까지 상대적으로 넓은 간격도 측정 된다. 하지만 Type I 구간의 성장선 간격은 대부분 0.05 mm 이하로 측정되기 때문에 0.05 mm 이하의 값들이 Type I 조직을 대표하는 형태이며, 그 이상으로 측정되는 값들을 상대적으로 많은 강수가 돌발적으로 내려왔던 것으로 볼 수 있다. 따라서 Type I 구간의 평균값은 0.05 mm 이상의 값들을 제외하고 구하였으며, 그 평균값은 0.025 mm의 간격을 보인다(그림13). 비교적 Type I 조직이 나타나는 구간은 성장선사이의 간격의 변화가 일정하며 성장선의 두께 역시 일정하게 측정 되었다. 이러한 Type I 형태의 조직이 나타나는 구간은 석순의 0~28 mm, 187~203 mm구간에서 대표적으로 나타난다(그림 12). Type II 조직은 성장선이 밀집되게 나타나지만 상대적으로 Type I 조직보다는 성장선과 성장선사이의 간격이 넓고 성장선사이에 유체포유물을 포함하고 있는 주상의 방해석 조직이 성장하고 있다. 또한 성장선의 표면에는 용식된 흔적이 발견되기도 하였다. Type II 조직의 성장선사이의 간격변화는 최대값이 0.18 mm이고 최소값이 0.01 mm으로 측정되었으며, 대부분의 측정값들이 0.10 mm 이하로 측정되었다. Type II 조직의 형태 또한 여섯 지점을 제외 하고는 대부분의 간격이 0.10 mm이하로 측정되었기 때문에 Type II 조직

의 대표적인 형태는 0.10 mm이하로 생각된다. 따라서 0.10 mm이상으로 높게 측정된 값들을 제외하고 평균값을 측정하였으며, 그 평균값은 0.034 mm의 간격을 보인다(그림 14). 이러한 Type II 조직은 석순의 상부에 해당하는 211~224 mm 구간에서 가장 잘 나타나고 있다. Type III 조직은 성장선과 성장선 사이에 유체포유물을 포함한 조직이 거의 나타나지 않고 성장선의 두께 또한 일정한 간격으로 나타나는 특징이 있다. 성장선사이의 간격은 최대값이 0.44 mm이고 최소값은 0.01 mm이며 성장선사이의 간격이 대부분 0.3 mm 이하로 측정되었으며, 0.3 mm이상으로 측정된 값들을 제외한 평균값이 0.11 mm로 측정되었다(그림 15). 이러한 Type III 조직은 석순의 27~40 mm구간과 70~99.5 mm구간에서 가장 대표적으로 관찰된다. Type IV 조직의 특징은 성장선의 색이 상대적으로 Type I, II, III 보다 옅은 색을 띠고 있고 성장선사이의 간격이 넓다. 또한 석순 조직 내에 유체포유물을 많이 포함 하는 것이 특징이다. Type IV 조직의 성장선사이의 간격의 최대값은 0.4 mm이고 최소값은 0.02 mm이며 평균값은 0.14 mm이다(그림 16). 일부 구간에서는 Type IV의 성장선사이의 간격이 Type III 조직보다 더 작게 측정 되지만 전체 구간에서는 유체포유물의 함량이 더 높고 성장선의 표면에서 용식된 흔적이 관찰되기 때문에 Type III 보다 성장속도가 더 빠르고 강수량이 많았던 시기임을 알 수 있다. Type V 조직은 성장속도가 가장 빨랐던 구간으로 성장선이 거의 관찰되지 않고 성장선의 색깔과 성장선사이의 유체포유물이 옅은 색을 띠고 있으며 성장선사이의 간격이 가장 넓고 유체포유물도 가장 많은 것으로 관찰되었다. Type V 조직의 성장선사이의 간격변화는 최대값이 2.78 mm이고 최소값이 0.07 mm이며 평균값이 0.42 mm이다(그림 17). 이러한 Type V 조직은 석순의 40~70 mm, 132~145 mm, 157~166 mm, 176~187 mm구간에서 대표적으로 나타난다(그림 12).

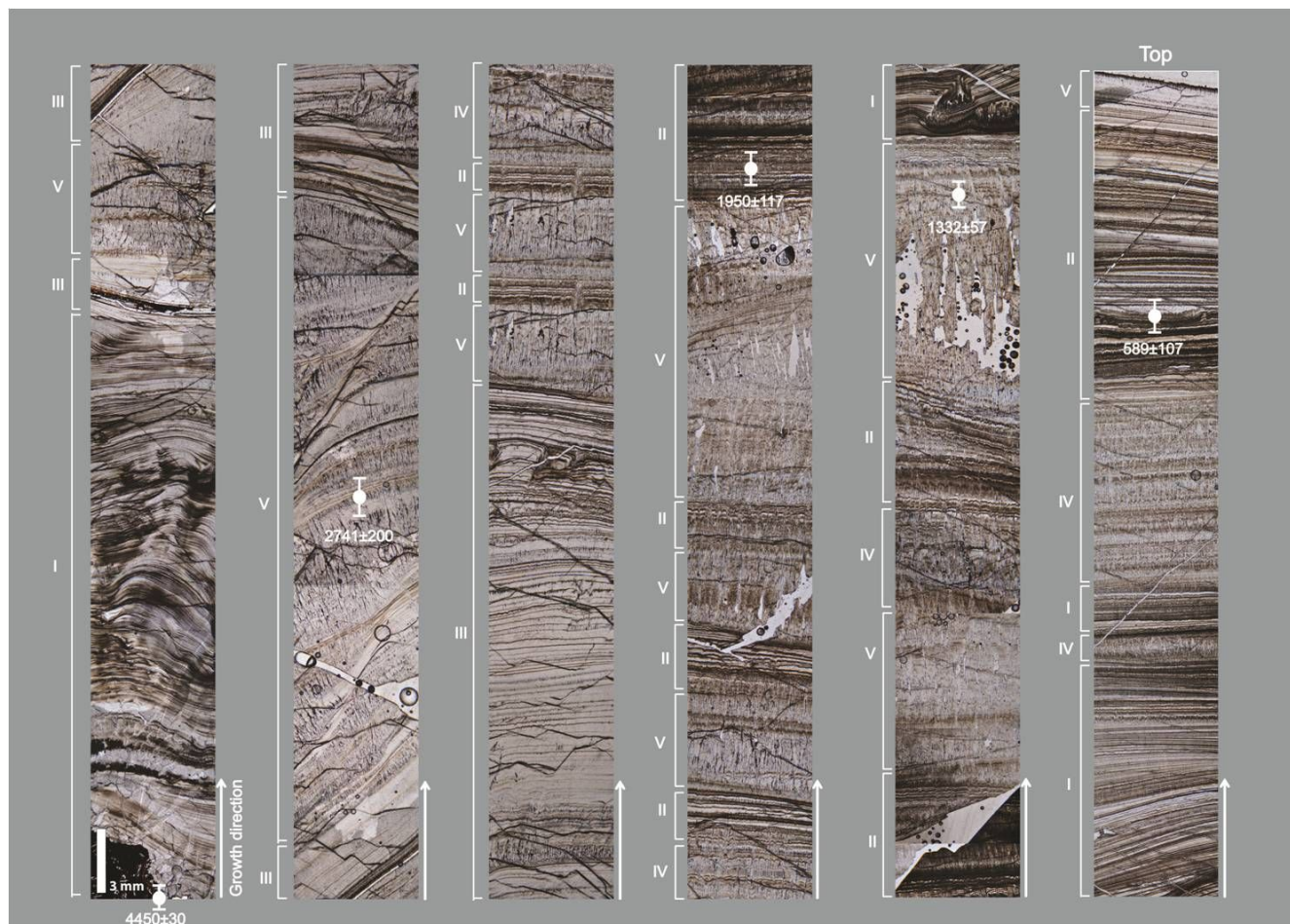


Fig. 12. Thin section photomicrograph of the longitudinal growth section of the DC-1 stalagmite.

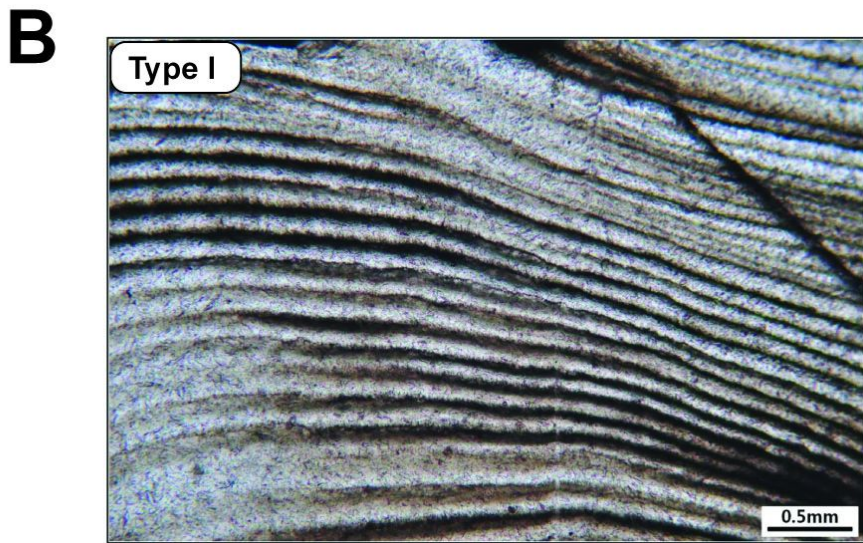
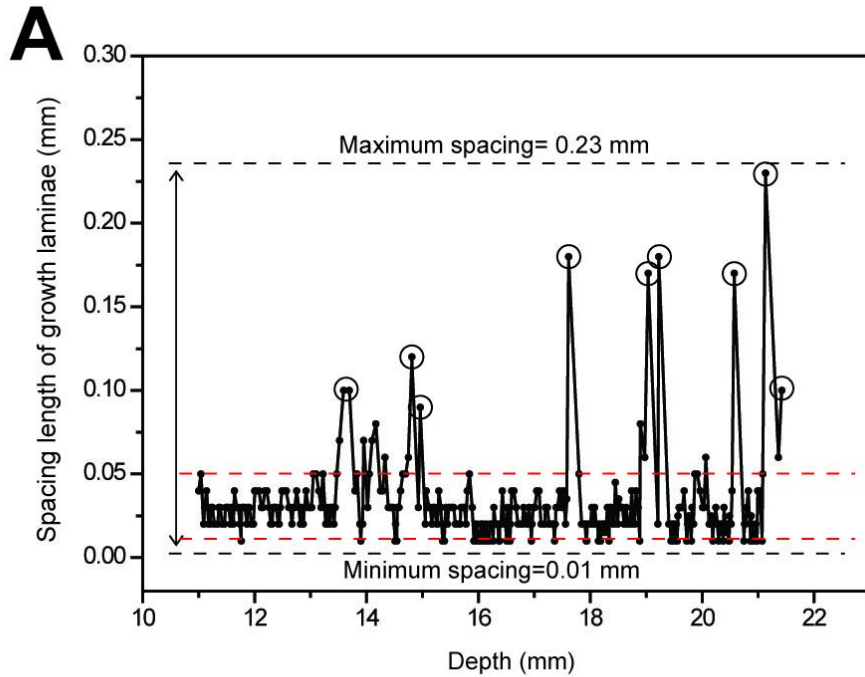


Fig. 13. A) Variations of the spacing between growth laminae. B) Thin section photomicrograph of the Type I texture. Averaged growth spacing is 0.028mm. The data in circles denotes abnormally high values, probably implaying intense precipitation. The averaged data under normal climatic condition can be calculated to be 0.025mm without considering the abnormally high values.

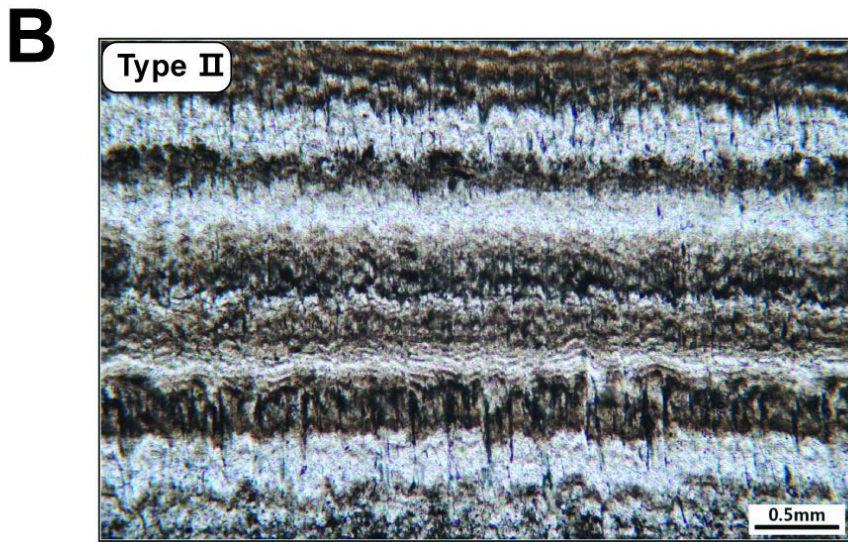
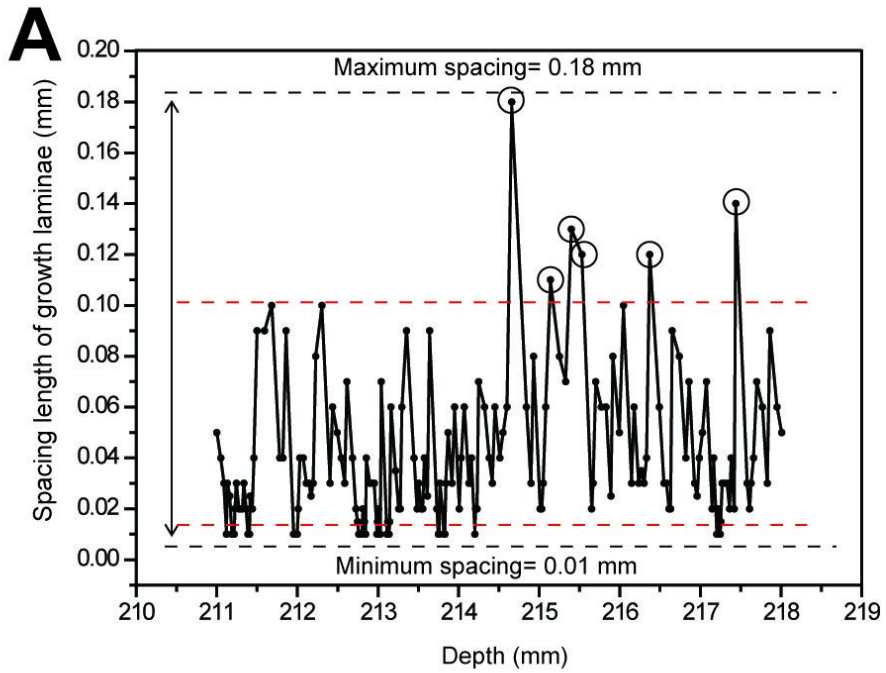


Fig. 14. A) Variations of the spacing between growth laminae. B) Thin section photomicrograph of the Type II texture. Averaged growth spacing is 0.039mm. The data in circles denotes abnormally high values, probably implaying intense precipitation. The averaged data under normal climatic condition can be calculated to be 0.034mm without considering the abnormally high values.

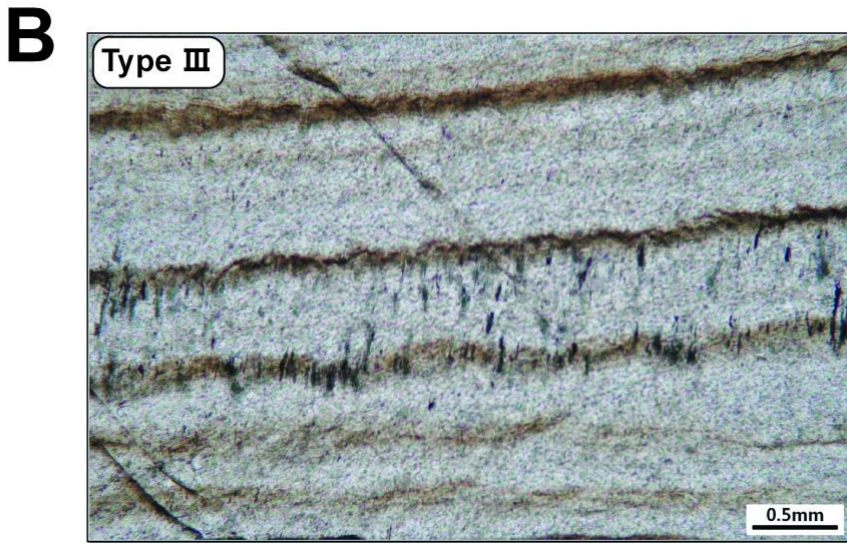
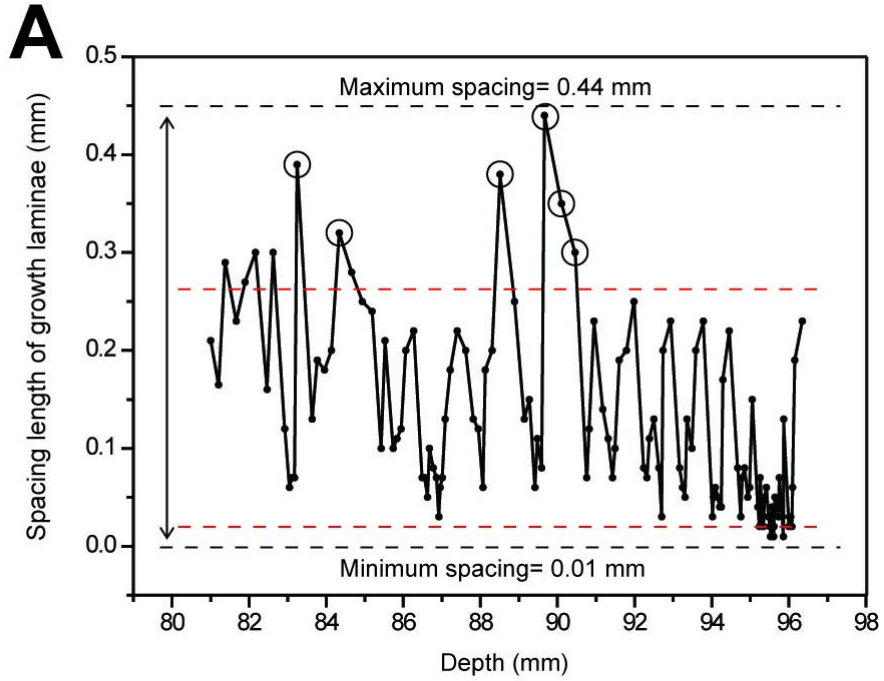


Fig. 15. A) Variations of the spacing between growth laminae. B) Thin section photomicrograph of the Type III texture. Averaged growth spacing is 0.125mm. The data in circles denotes abnormally high values, probably implaying intense precipitation. The averaged data under normal climatic condition can be calculated to be 0.11mm without considering the abnormally high values.

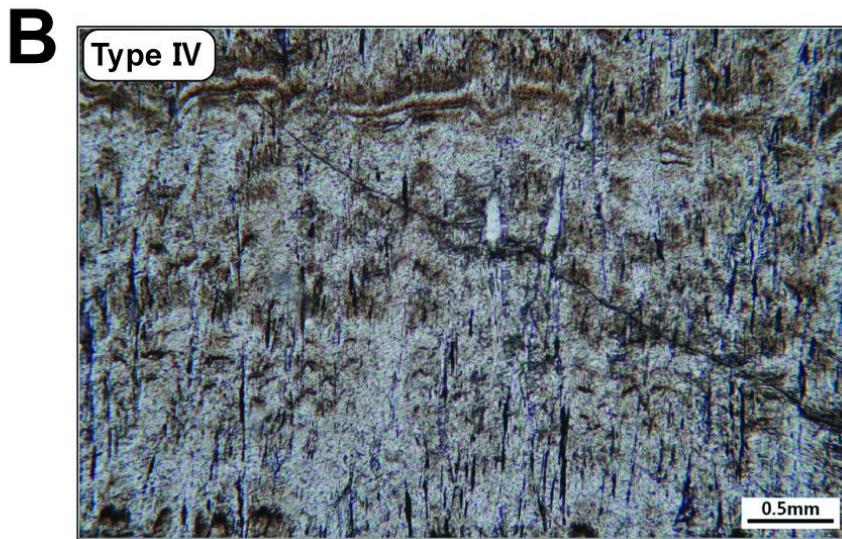
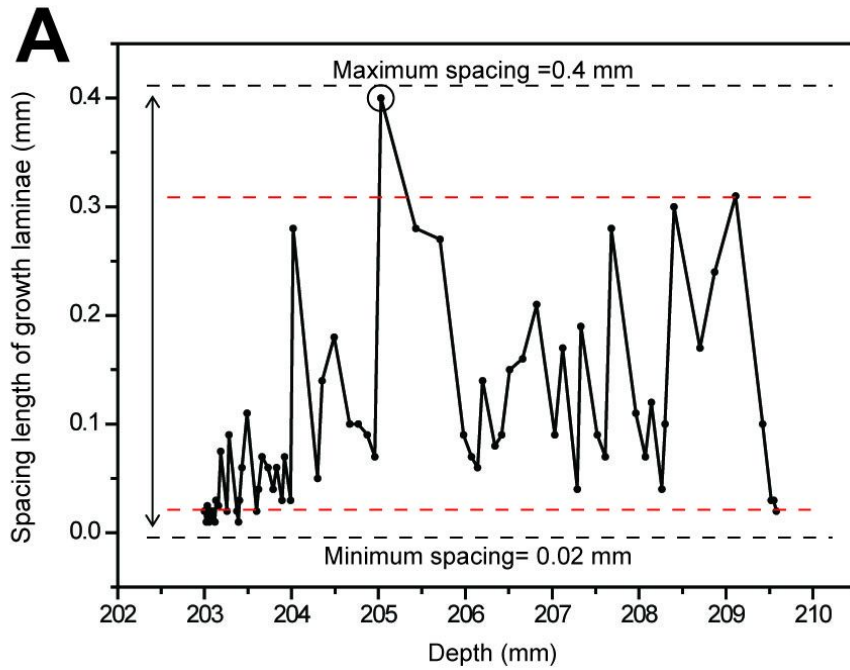


Fig. 16. A) Variations of the spacing between growth laminae. B) Thin section photomicrograph of the Type IV texture. Averaged growth spacing is 0.1mm. The data in circles denotes abnormally high values, probably implying intense precipitation. The averaged data under normal climatic condition can be calculated to be 0.14mm without considering the abnormally high values.

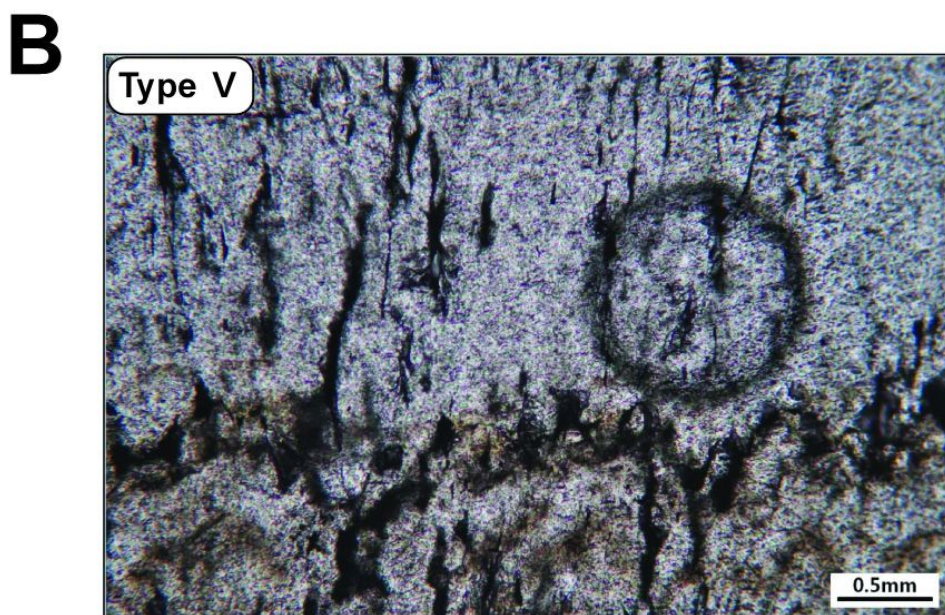
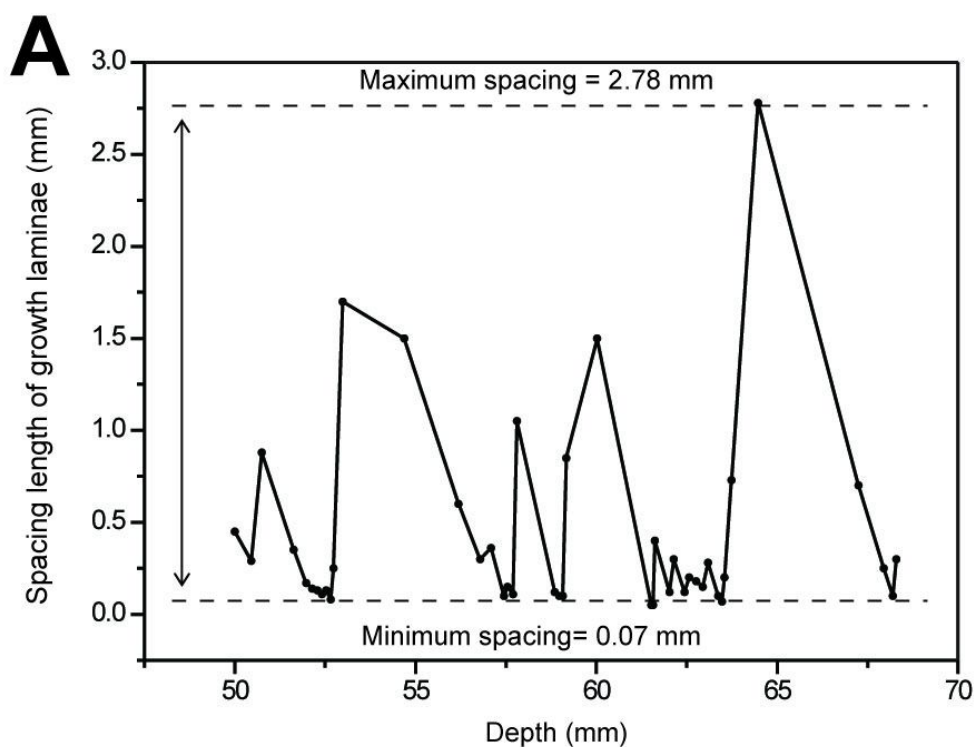


Fig. 17. A) Variations of the spacing between growth laminae. B) Thin section photomicrograph of the Type V texture. Averaged growth spacing is 0.42mm.

4-5. 석순의 안정동위원소 성분

석순의 성장축을 따라서 약 0.25 mm 간격으로 862개의 분말시료를 채취하여 안정동위원소 분석을 실시하였다(부록 1). 당처물동굴의 석순 DC-1의 산소동위원소 성분은 최소 -4.6‰에서 최대 -8.2‰의 범위를 보이며, 평균 -5.9‰의 값을 갖는다(그림 18). 탄소동위원소 성분의 평균값 -8.7‰보다 평균 2.8‰더 부화되는 값을 갖는다. 특히 750 yr BP부터 250 yr BP까지 산소동위원소 성분이 -4.8‰에서 -7.8‰까지 지속적으로 고갈되는 경향을 보이다가 250 yr BP 이후로 다시 부화되는 값을 보이는 것이 특징이다. 이 구간에서는 산소동위원소 성분과 탄소동위원소의 성분이 확연하게 상반되는 경향을 보인다.

석순의 성장이 평형상태에서 이루어졌는지를 알아보기 위하여 “Hendy Test”를 실시하였다. 석순의 하부로부터 49 mm, 120 mm, 166 mm, 202 mm, 220 mm까지 다섯 지점에서 성장축으로 부터 동일선상의 성장선의 다섯 지점에서 분말시료를 채취하여 안정동위원소 분석을 실시하였다(표 4, 그림 20). 49 mm지점의 산소동위원소 값은 -6.3‰에서 -6.5‰의 범위를 보이며, 아주 작은 범위 내에서 변화 하였으며, 탄소동위원소의 값 또한 -4.6‰에서 -5.3‰로 작은 범의 내에서 변화하였다. 120 mm지점의 산소동위원소 값은 -4.9‰에서 5.4‰로 측정되었다. 탄소동위원소의 값은 -8.3‰에서 -9.3‰의 범위를 보이며, 다른 네 개의 지점보다 큰 범위를 보였다. 166 mm지점의 산소동위원소 값은 -5.4‰에서 -6.1‰로 변화하고 있으며, 탄소동위원소의 값은 -11.1‰에서 -11.4‰의 범위를 보이고 있다. 202 mm지점의 산소동위원소 값은 -5.5‰에서 -6.4‰의 범위 내에서 변화하고 있으며, 탄소동위원소의 값은 -9.9‰에서 -10.4‰의 범위를 보이며 나타나고 있다. 220 mm지점의 산소동위원소 값은 -5.8‰에서 -6.3‰의 범위 내에서 변화하고 있으며, 탄소동위원소의 값은 -6.8‰에서 -7.6‰의 범위를 보이며 변화하고 있다. 다섯 개의 지점에서 모두 1‰이하의 작은 범위 내에서

동위원소의 성분이 변화하고 있다(그림 20).

탄소동위원소 값은 -12.0% 에서 -2.7% 의 범위를 보이며, 평균값은 -8.7% 로 산소동위원소의 평균값과는 약 2.8% 의 차이를 보였다(그림 18). 탄소동위원소의 성분 변화는 석순 하부로부터 상부까지 크게 네 구간으로 나눌 수 있다. 첫 번째 구간은 석순의 $0\sim 70.4$ mm로 하부에 해당하며, 4,450 yr BP에서 2,624 yr BP까지 성장한 시기이다. 이 구간의 탄소동위원소 값이 가장 부화되는 경향을 보이는 구간으로서 평균 -6.0% 로 나타났다. 두 번째 구간은 석순의 $70.4\sim 196.5$ mm까지이며, 2,624 yr BP부터 1,002 yr BP까지 성장한 구간이다. 이 구간의 탄소동위원소 값은 상대적으로 다른 구간보다 고갈된 값을 보이며, 평균 -10.3% 로 첫 번째 구간간의 평균값인 -6.0% 과 약 4.2% 의 차이를 보였다. 세 번째 구간은 지속적으로 탄소동위원소의 성분이 고갈되는 경향을 보이는 구간으로 최소 -11.2% 에서 최대 -4.2% 까지 약 7% 이 부화된다. 석순의 $196.5\sim 219.7$ mm에 해당하는 부분이고, 1,002 yr BP부터 244 yr BP까지 석순이 성장한 시기이다. 이구간의 탄소동위원소 평균값은 -8.1% 로 두 번째 구간의 평균값에 비해 약 2.1% 이 낮게 나타났다. 네 번째 구간은 석순의 최상부로 $219.7\sim 225$ mm까지이며, 244 yr BP부터 현재까지에 해당하는 시기이다. 이 구간에서는 -4.2% 까지 높아졌던 탄소동위원소의 성분이 -12.0% 까지 약 7.8% 가량 지속적으로 낮아지는 구간이며, 탄소동위원소의 평균값은 -8.6% 이다.

Table. 5. Stable isotope compositions along the five different growth laminae from the DC-1 stalagmite to check "the Hendy Test" (Hendy, 1971).

Sample ID	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Sample ID	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
49 mm-1	-5.3	-6.3	202 mm-1	-6.2	-10.4
49 mm-2	-5.1	-6.4	202 mm-2	-6.3	-10.4
49 mm-3	-5.0	-6.3	202 mm-3	-6.0	-10.2
49 mm-4	-4.7	-6.5	202 mm-4	-6.4	-10.4
49 mm-5	-4.6	-6.4	202 mm-5	-5.5	-9.9
120 mm-1	-8.8	-5.4	220 mm-1	-6.3	-7.5
120 mm-2	-8.5	-5.1	220 mm-2	-6.2	-7.6
120 mm-3	-9.3	-5.4	220 mm-3	-6.0	-7.3
120 mm-4	-8.3	-4.9	220 mm-4	-5.9	-7.2
120 mm-5	-8.5	-5.0	220 mm-5	-5.8	-6.8
166 mm-1	-11.2	-5.4			
166 mm-2	-11.4	-6.1			
166 mm-3	-11.4	-5.8			
166 mm-4	-11.4	-5.8			
166 mm-5	-11.1	-5.8			

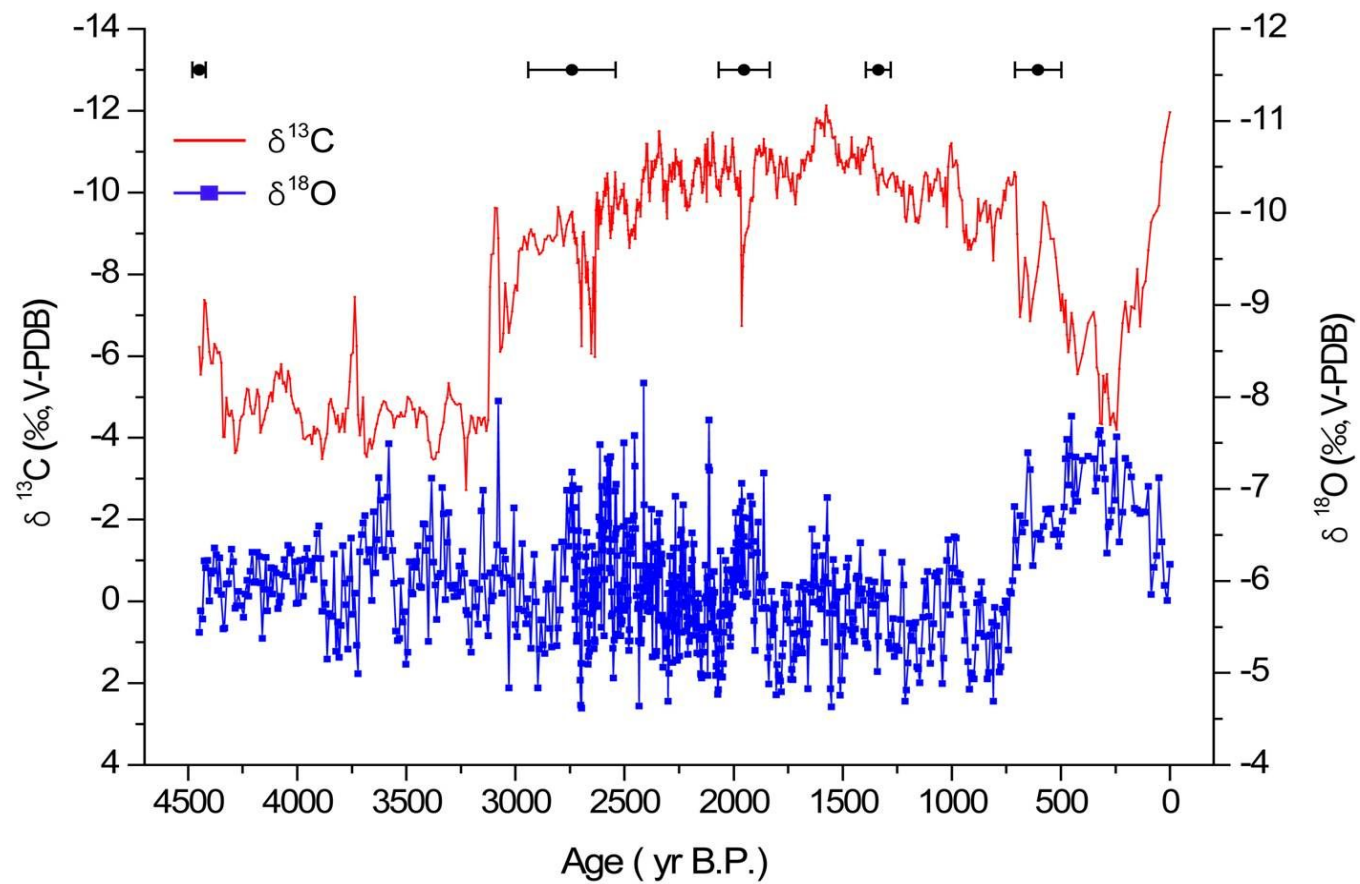


Fig. 18. A plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values versus the age of the stalagmite DC-1.

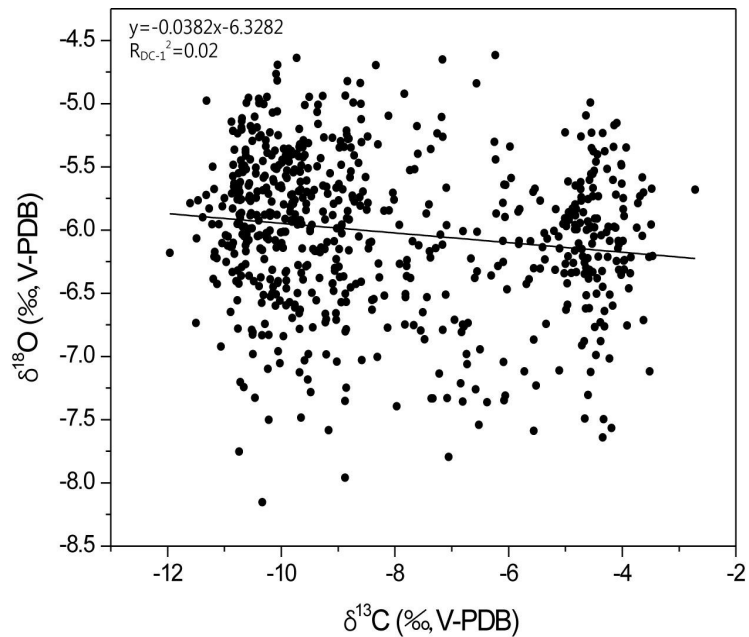


Fig. 19. A plot $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^{13}\text{C}$ for the stalagmite DC-1. The low correlation coefficient ($R_{\text{DC-1}}^2=0.02$) indicates that carbon and oxygen isotope composition are in isotopic equilibrium and not kinetically controlled.

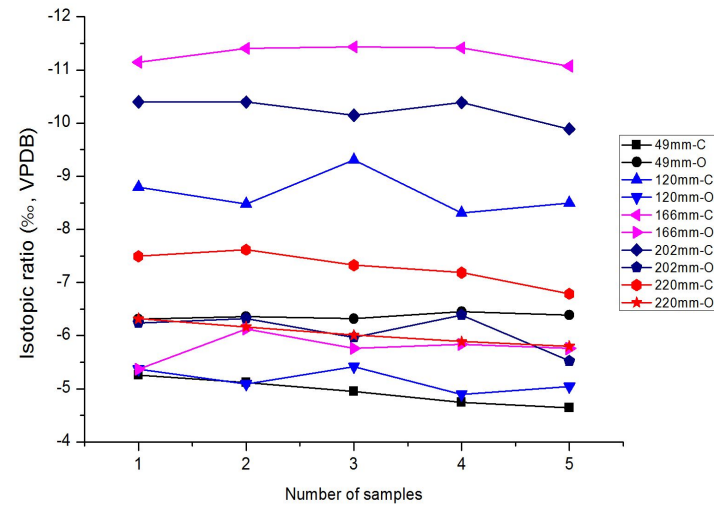


Fig. 20. Stable isotope data along five different growth laminae within the stalagmite to determine the "Hendy Test" (Hendy, 1971). Similar stable isotope data along these growth laminae suggest that the speleothem most likely grew under isotopic equilibrium condition. $\delta^{18}\text{O}$ variations along the same growth layers are relatively small compared with the variation along the growth axis.

4-6. 사구퇴적물과 사구에 분포 하는 식생의 안정동위원소 성분

당처물동굴 지표에 위치한 사구(DC-1 Dune)의 고토양에 포함되어 있는 유기물의 탄소동위원소 분석과 사구에서 가장 많이 성장하고 있는 7종의 식생에 대해서도 유기물의 탄소동위원소분석을 실시하였다. 퇴적물의 채취를 위하여 사구를 절개하였으며, 사구의 총 높이는 263 cm이다. 사구퇴적층에서 발견된 고토양층은 세 개이며, 최하부에는 약 29 cm두께로 가장 짙은 색깔을 띠고 있는 세립질의 고토양층이 나왔으며, 중부에는 약 46 cm두께의 고토양층이, 최상부에는 식생 바로 밑으로 약 3 cm두께의 고토양층이 발견되었다(그림 21). 사구의 하부층 부터 DC1-1에서 DC1-7까지 탄소동위원소 성분을 분석한 결과 -23.8~-7.7‰의 범위를 보이며 변화 하였다. 사구퇴적층의 가장 하부에 속하는 DC1-1~DC1-3 고토양 샘플의 탄소동위원소 평균값은 -22.7‰로 측정되었고, 중부 고토양층의 평균값은 -10.3‰로 측정되었으며, 사구 최상부의 탄소동위원소 값은 -21.8‰로 나타났다. 중부 고토양층의 탄소동위원소 성분이 하부와 상부층에 비해 상대적으로 부화되는 경향을 보인다.

사구퇴적층 지표에서 가장 많이 성장하던 식생은 개맥문둥(*Liriope spicata* (Thunb.) Lour], 명석딸기(*Rubus parvifolius* L. f. parvifolius), 명아주(*Chenopodium album* var. *centrorubrum* Makino), 쭉(*Artemisia Princeps* Pamp.), 인동덩굴(*Lonicera japonica* Thunb.), 억새(*Miscanthus sinensis* Andersson var. *sinensis*), 왕머루(*Vitis amurensis* Rupr.)로 일곱 종이다(그림 21). 위 일곱 종 식물의 탄소동위원소 분석결과 개맥문둥은 -30.3‰, 명석딸기는 -28.7‰, 명아주는 -30.6‰, 쭉은 -30.0‰, 인동덩굴은 -30.5‰, 왕머루는 -30.3‰로 측정 되었다(표 5). C₃ 식물의 탄소동위원소 값은 -35~-22‰의 범위를 보이며, 평균 -27‰의 값을 갖고, C₄ 식물은 -14~-9‰의 탄소동위원소 값의 범위를 보이며, 평균 -13‰의 값을 갖는다(Farquhar et al. 1989, Tieszen and Boutton, 1989). 대부분의 탄소동위원소 값은 -30.6~-28.7‰로 C₃ 식물의

탄소동위원소 성분 범위 내에서 나타났고, 평균 -29.9‰ 로 측정되었다. 하지만 역새의 탄소동위원소 값은 -13.0‰ 로 일곱 종의 식물 중에서 가장 부화되는 값을 보이며 C_4 식물의 탄소동위원소 성분 범위로 측정되었다(표 5). 이러한 결과는 기후에 따라 서로 다른 종류(C_3 혹은 C_4)의 식생이 동굴 위 사구의 표면을 더 많이 점유할 수 있다는 것을 의미한다.

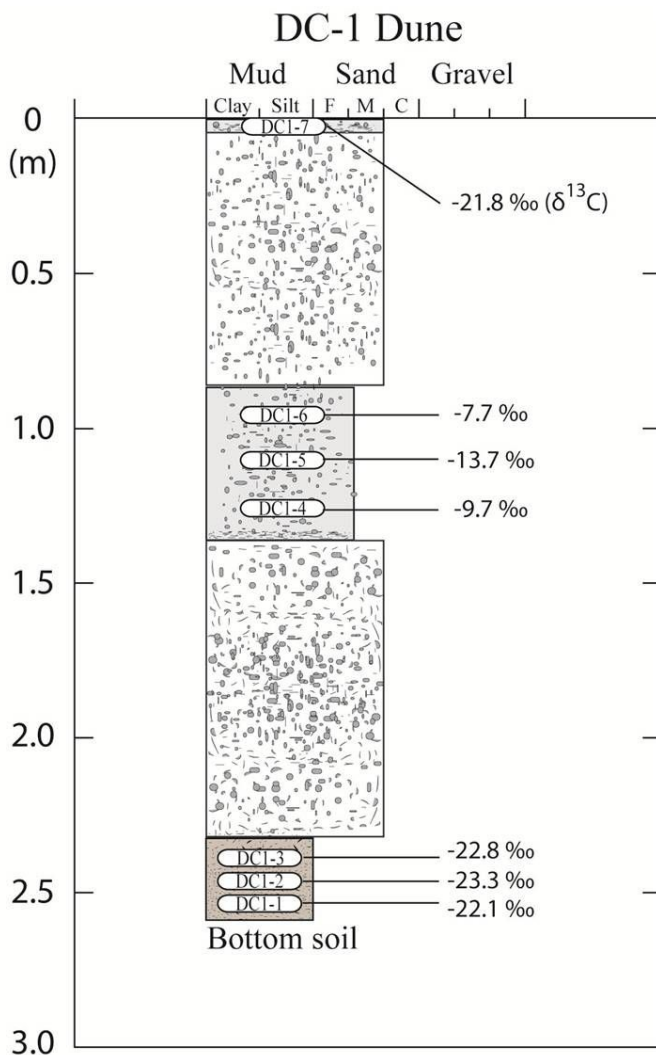


Fig. 21. Carbon isotope values of organic matter within paleosols in the carbonate sand dune overlying the Dangcheomul Cave.

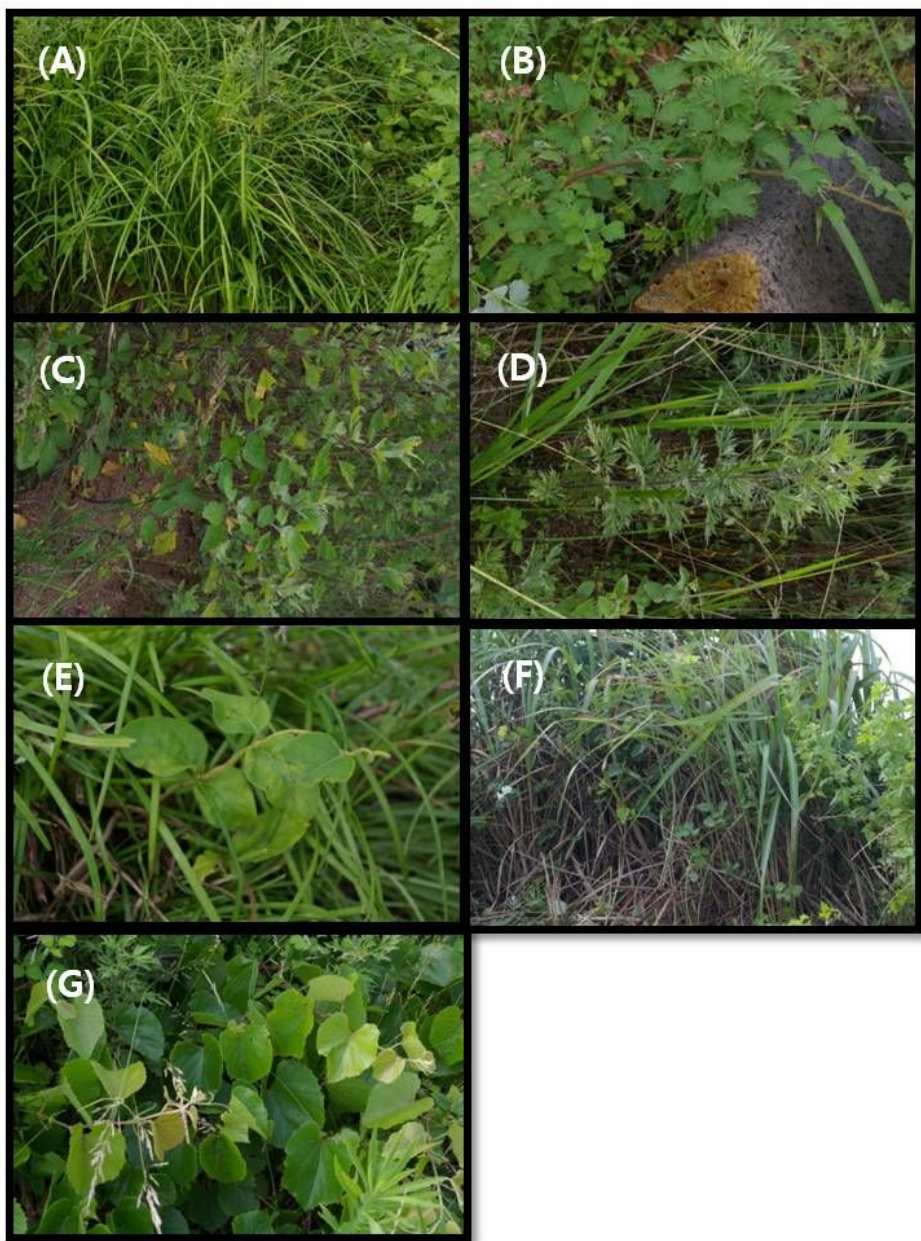


Fig. 22. Vegetation living on the surface of carbonate sand dune overlying the Dangcheomul Cave. A) *Liriope spicata* (Thunb.) Lour, B) *Rubus parvifolius* L. f. *parvifolius*, C) *Chenopodium album* var. *centrorubrum* Makino, D) *Artemisia Princeps* Pamp, E) *Lonicera japonica* Thunb., F) *Miscanthus sinensis* Andersson var. *sinensis*, G) *Vitis amurensis* Rupr.

Table. 6. Carbon isotope compositions of carbonate sediments in sand dune and vegetation.

Sample ID	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,PDB)	Sample ID	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,PDB)
DC1-1	-22.1	개맥문동	-29.5
DC1-2	-23.3	명석말기	-28.7
DC1-3	-22.8	명아주	-30.6
DC1-4	-9.7	쭈	-30.0
DC1-5	-13.7	인동덩굴	-30.5
DC1-6	-7.7	억새	-13.0
DC1-7	-21.8	왕머루	-30.3

5. 토 의

5-1. 과거 강수량과 관련된 석순 조직의 변화

석순의 성장은 외부환경의 변화와 밀접하게 관련이 있으며, 여러 요인 중에서도 강수량과 가장 큰 상관관계를 가진다. 따라서 석순의 조직적 특징 역시 외부 강수량의 변화에 의해 여러 형태로 나타나게 된다. 많은 연구자들이 이러한 조직적 특징의 변화와 안정동위원소분석 등 지화화학적 측정을 동시에 실시함으로써 보다 정확하고 정량적인 고기후 변화를 추적하기 위해 노력중이다. Baker et al. (1993)은 영국의 동굴생성물로부터 연간 성장띠(annual bands)와 우라늄계열을 이용한 연령측정을 동시에 실시하여 고기후 변화를 연구하였으며, Polyak and Asmerom (2001)은 연간 성장띠의 두께를 측정하여 고기후 연구에 적용한바 있다. Smith et al. (2006)은 스코틀랜드, 이탈리아, 중국에서 같은 시기에 성장한 석순 3개의 조직적인 연구를 통해 북반구 장주기의 온도 변화가 석순의 성장에 영향을 미쳤음을 밝힌바 있다. 또한 성장선의 두께를 측정하여 지난 500년 동안 기후를 복원 할 수 있음을 제시하였다.

석순은 동굴 천장으로부터 석순의 표면에 떨어진 후 석순의 옆면을 따라 물이 흘러내릴 때 이산화탄소의 유리작용이나 증발작용이 일어나면서 성장한다. 방해석이 성장하는 속도는 물이 방해석에 대해 과포화상태로 유지될 경우, 천장에서 떨어지는 물의 공급량에 따라 달라진다. 즉 물의 공급량이 많은 경우에 석순의 성장속도는 빨라지며, 공급량이 적은 경우에 석순의 성장속도는 늦어지게 된다. 이는 석순의 성장속도가 당처물동굴 상부의 외부 강수량과 직접적인 관계를 가지고 있다는 것을 의미한다. 이러한 이유는 당처물동굴 상부의 표면에 내리는 강수는 탄산염사구 퇴적층과 수 미터의 현무암의 균열대를 통과한

후에 바로 동굴 내로 유입되기 때문이다(그림 23).

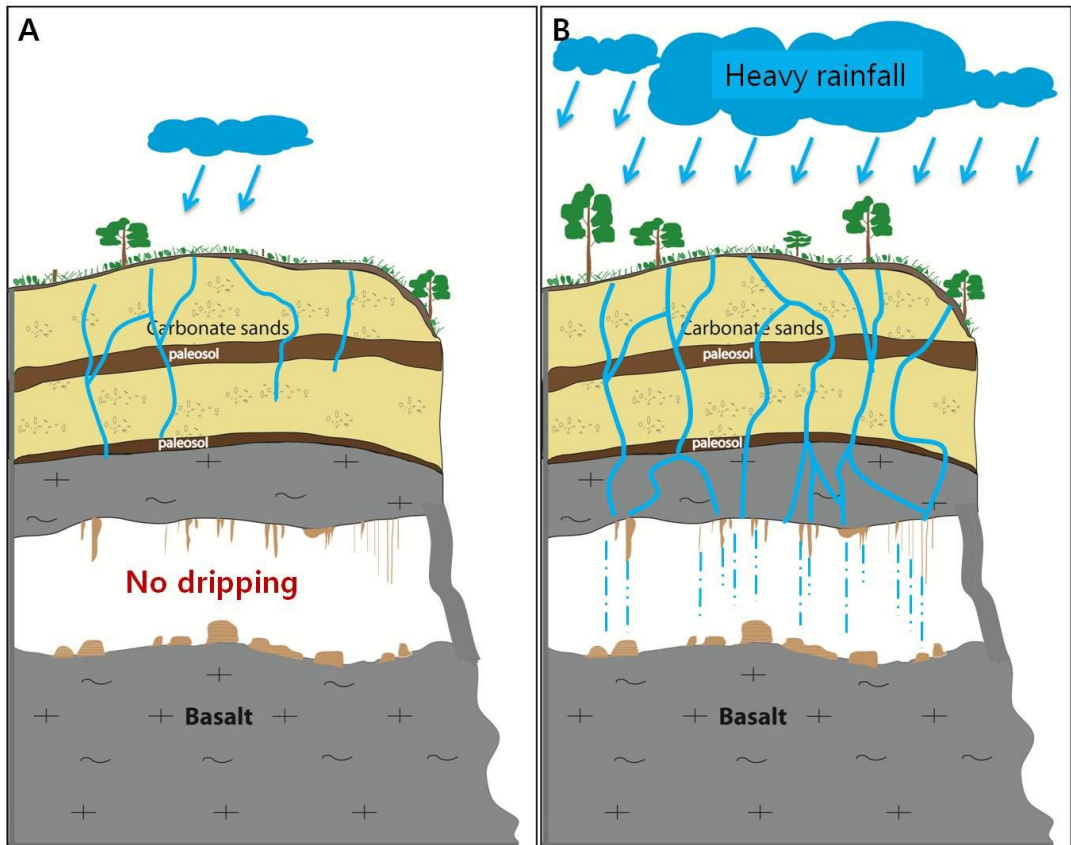


Fig. 23. Schematic diagram showing the ideal cave setting of the Dangcheomul Cave for paleoclimate investigation. A) Under less humid climate, the decrease in the amount of rainfall resulted in the longer residence time of meteoric water within carbonate sediments. B) Under more humid condition, the increase in the amount of rainfall passed through carbonate sand dune and basaltic rock more quickly.

하지만 강수량이 아주 적은 경우에는 빗물이 사구 퇴적층 내를 통과하지 못하고 남아 있을 수도 있으므로 강수량이 석순 내에 반영되기 위해서는 일정량 이상의 강수량이 필요하다(지효선 외, 2011). 석순의 성장과 동시에 석순의 내부

에는 나무의 절단면에서 관찰할 수 있는 나이테와 유사한 연성장선이 생성된다. 이러한 석순의 연성장선은 계절에 따른 유기물 함량의 변화에 의해서 생겨나게 된다. 지효선 외(2011)는 당치물동굴의 인접한 용천동굴에서 채취한 석순을 이용한 고기후 연구에서 연성장선을 측정하였다. 지효선 외(2011)에 의하면 용천동굴의 경우 이러한 석순의 연성장선은 외부 식생이 지기 시작하고 활발히 분해되는 계절인 11월부터 겨울동안 생성되는 것으로 제시하였다. 연구팀이 2008년 7월부터 2009년 9월까지 일년 동안 동굴 내부와 외부에서 이산화탄소 분압을 측정한 결과 식생의 낙엽이 지는 시기인 11월에 이산화탄소분압이 다른 시기보다 높게 측정되었고, 또한 동굴 내부와 외부의 이산화탄소분압의 절대값은 약 5배 이상 차이를 보이지만 계절적인 변화 양상은 비슷하게 나타났다. 이러한 이유는 외부에서 11월에 식생의 낙엽이 지면서 유기물의 분해가 활발하게 일어나며 이산화탄소분압이 높아지며, 이렇게 분해된 유기물이 비슷한 시기에 강수에 의해 동굴내부로 유입되어 분해되기 때문이라고 설명하였다. 따라서 성장선은 유기물의 유입이 다른 계절에 비해 상대적으로 많으며 강수량이 적은 겨울에 형성되는 반면, 성장선 사이의 방해석 결정은 외부에서 유입되는 물의 양이 많은 시기에 주로 형성되는 것으로 보고하였다.

동굴 내로 유입되어 석순의 성장에 영향을 미치는 강수량의 차이는 성장선 사이의 간격변화와 석순을 이루는 주상 방해석의 조직에 영향을 미친다. 물의 공급량이 많은 경우에는 빠른 성장을 하는 주상의 방해석은 광물 내의 아결정 사이에 물이 포획되어 유체포유물이 남아있게 된다. 또한 물의 공급량이 일정량 이상으로 과잉 공급되면 방해석 광물이 일시적으로 용식되기도 한다. 하지만 물의 공급량이 적을 경우에는 광물의 성장이 천천히 일어나기 때문에 방해석 내에 포함되는 유체포유물이 거의 없게 되고 물의 공급이 끊기면 석순의 성장이 잠시 멈추었다가 다시 성장하기도 한다. 석순 조직의 주기적 변화는 성장선의 특징과 성장선사이의 간격변화 그리고 유체포유물의 정도로 정의 되었으

며, 이러한 성장선의 특징은 식생이나 강수량의 변화를 암시한다. Gradziński et al. (1997)은 반복적인 성장선의 변화가 침출되는 동굴수의 계절적 변화를 반영한다고 하였으며, 유기물 또는 쇄설성 불순물이 우기동안 영향을 미치는 반면, 건기에는 흰색의 방해석 띠가 형성되는 것으로 보고하였다.

당처물동굴 석순의 Type I 조직은 0~28 mm, 187~203 mm구간에서 대표적으로 나타나고 성장선과 성장장선 사이의 평균값은 0.025 mm로 측정 되었으며, 이 시기는 각각 4,450 yr BP에서 3,619 yr BP까지와 1,249 yr BP에서 830 yr BP까지에 해당한다. Type I 조직이 나타나는 이 시기에는 상대적으로 몬순의 강도가 약했던 시기로 외부에서 유입되는 물의 양이 적어 석순의 성장이 느렸던 기간으로 판단된다. Type II 조직은 성장선이 밀집되게 나타나지만 상대적으로 Type I 조직보다는 성장선과 성장선사이의 간격이 넓고 성장선사이에 유체포유물을 포함하고 있는 주상의 방해석 조직이 성장하고 있다. 또한 성장선의 표면에는 용식된 흔적이 발견되기도 하였다. Type II 조직의 성장선사이의 간격변화는 최대값이 0.18 mm이고 최소값이 0.01 mm으로 측정되었으며, 그 평균값은 0.034 mm의 간격을 보였다. 이러한 Type II 조직은 석순의 상부에 해당하는 211~224 mm 구간에서 가장 잘 나타나고 있으며, 이 시기는 약 557 yr BP에서 375 yr BP까지에 해당하는 시기로 제주도에도 영향을 준 몬순의 강도가 상대적으로 약했던 소빙하기(Little Ice Age)로 판단된다. Type III 조직은 성장선과 성장선 사이에 유체포유물을 포함한 조직이 거의 나타나지 않고 성장선의 두께 또한 일정한 간격으로 나타나는 특징이 있다. 성장선사이의 간격은 최대값이 0.44 mm이고 최소값은 0.01 mm이며 성장선사이의 간격이 대부분 0.3 mm 이하로 측정되었으며 평균값이 0.11 mm로 측정되었다. 이러한 Type III 조직은 약 3,642 yr BP에서 3,250 yr BP까지 해당하는 시기로 석순의 27~40 mm구간과 약 2,628 yr BP에서부터 2,371 yr BP까지 성장한 70~99.5 mm구간에서 가장 대표적으로 관찰된다. 이처럼 Type III형태의 조직이 나타나

는 시기는 비교적 일정하게 성장선사이의 간격이 유지되는 것으로 보아 외부강수량이 일정량 이상으로 공급되었던 시기로 생각할 수 있다. Type IV 조직의 특징은 성장선의 색이 상대적으로 Type I, II, III 보다 옅은 색을 띠고 있고 성장선사이의 간격이 넓다. 또한 석순 조직 내에 유체포유물을 많이 포함 하는 것이 특징이다. Type IV 조직의 성장선사이의 간격의 최대값은 0.4 mm이고 최소값은 0.02 mm이며 평균값은 0.14 mm이다. 일부 구간에서는 Type IV의 성장선사이의 간격이 Type III 조직보다 더 작게 측정 되지만 전체 구간에서는 유체포유물의 함량이 더 높고 성장선의 표면에서 용식된 흔적이 더 많이 관찰되기 때문에 Type III 보다 성장속도가 더 빠르고 강수량이 많았던 시기임을 알 수 있다. 이러한 Type IV조직은 203~211 mm 구간에서 뚜렷하게 나타나는데, 이는 약 830 yr BP에서 568 yr BP까지로 중세온난기(Medieval Climate Anomaly)에 해당하는 시기이며 상대적으로 강수량이 많아 석순이 성장이 빨랐던 구간으로 판단할 수 있다. Type V 조직은 성장속도가 가장 빨랐던 구간으로 성장선이 아주 옅은 색으로 관찰 되고 성장선의 성장선사이의 유체포유물 또한 옅은 색을 띠고 있으며 성장선사이의 간격이 가장 넓고 유체포유물도 가장 많은 것으로 관찰되었다. Type V 조직의 성장선사이의 간격변화는 최대값이 2.78 mm이고 최소값이 0.07 mm이며 평균값이 0.42 mm이다. 이러한 Type V 조직은 석순의 40~70 mm, 132~145 mm, 157~166 mm, 176~187 mm, 224~225 mm구간에서 대표적으로 나타난다. 특히 224~225 mm구간은 Type II조직이 끝나면서 Type V조직이 나타나는 구간으로 소빙하기가 끝나고 현재에 이르기까지 지속적으로 강수량이 늘어난 구간이며, 현재온난기(Current Warm Period)에 해당하는 시기이다. 이처럼 Type IV, V는 석순의 성장속도가 가장 빨랐던 시기로 물의 공급이 너무 많아지면 나타나는 용식흔적(corroded surface)도 다른 구간보다 더 많이 관찰되었다(그림 24). 이러한 용식면은 우경식 외(2000, 2004)에 의해 보고된바 있으며, 용식면은 석순에 공급되는 동굴수

가 방해석에 대해 불포화 상태였거나 석순의 표면이 동굴수에 의해 침식되었음을 나타내며, 이는 강수량이 많은 기후 조건을 암시한다. 즉 성장선과 성장선사이의 간격이 넓고 유체포유물이 많이 포함된 조직은 성장속도가 빨랐으므로 이러한 조직을 나타내는 Type IV, V는 동아시아 여름 몬순의 강도가 강했던 습윤한 기후를 지시하며, 상대적으로 좁은 구간인 Type I, II는 상대적으로 몬순의 강도가 약한 강수가 적었던 기후로 추정할 수 있다(그림 25).

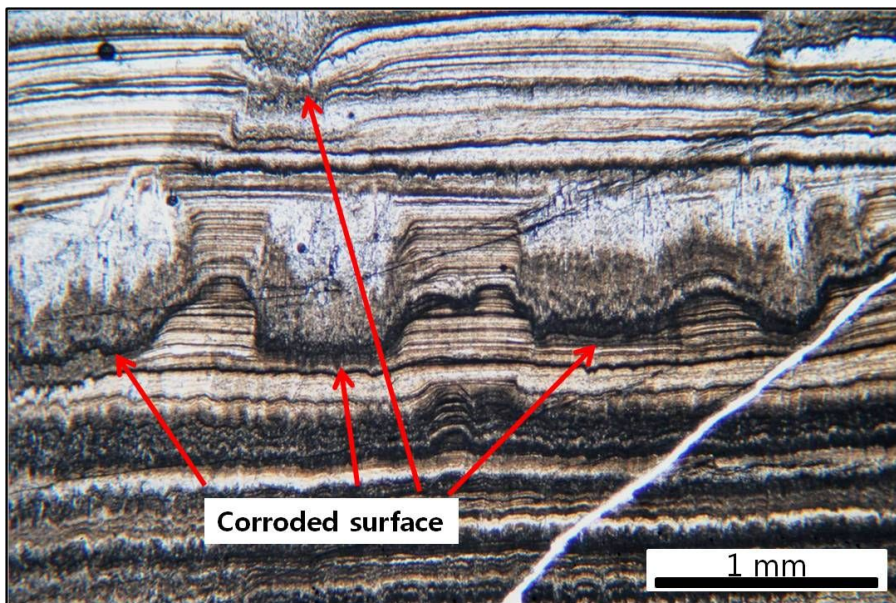


Fig. 24. Photomicrograph of the well developed corroded texture in the DC-1 stalagmite.

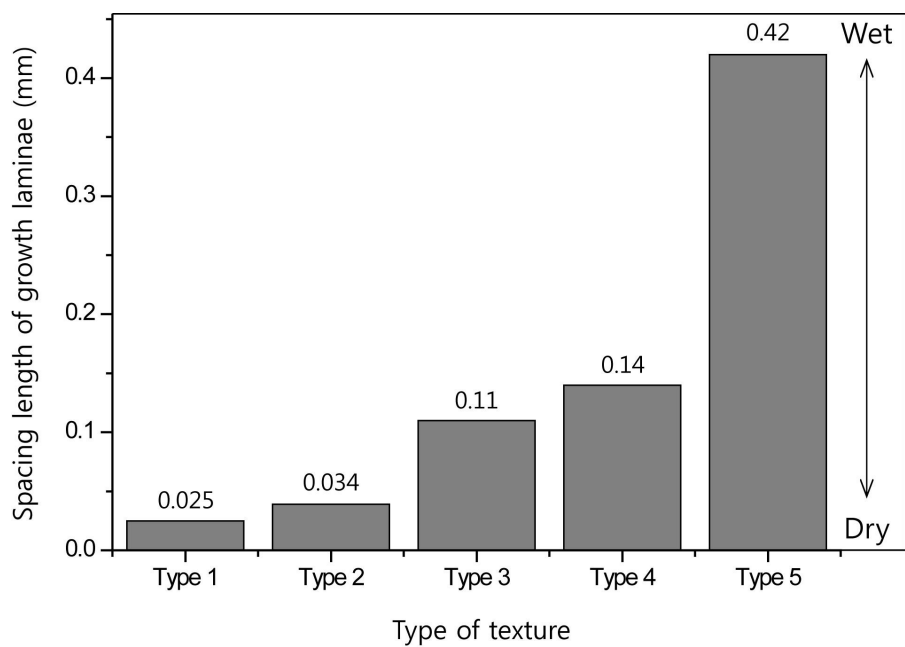


Fig. 25. Variations of the spacing between growth laminae for different textural types.

5-2. 연구지역내 강수의 산소/수소동위원소 조성과 석순(DC-1)의 산소동위원소 성분 변화

연구지역에 내리는 강수의 산소동위원소 조성은 기후에 따라 변화하기 때문에 석순의 산소동위원소 조성은 강수에 의해 직접적으로 영향을 받게 되고 그 지역의 기후 변화를 지시하게 된다(Genty et al., 2003). 특히 아시아 지역의 강수량은 아시아몬순의 강도에 의해서 많은 영향을 받기 때문에 최근 한반도를 비롯한 여러 아시아 지역에서 아시아몬순의 순환체계를 이해하기 위하여 활발히 연구가 이루어지고 있다(An et al., 2000; Burns et al., 2003; Cai et al., 2001; Cosford et al., 2008; Dykoski et al., 2005; Fleitmann et al., 2003; 2007; Hong et al., 2005; Selvaraj et al., 2007; Schettler et al., 2006; ; Wang and Follmer, 1998; Wang et al., 2005, 2008; Williams et al., 1997, 2001; Yancheva et al., 2007; Zhang et al., 2008). 이들의 연구 결과에 따르면 동굴생성물을 비롯한 고기후지시자의 산소동위원소 기록은 강수의 산소동위원소 변화에 따라 좌우되며, 이러한 변화는 ITCZ (Intertropical Convergence Zone)의 북상과 남하를 야기하는 북반구의 일사량(solar insolation)변화와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. Liu et al. (2004)은 중국 서북부의 나무 나이테의 산소동위원소 조성의 변화를 이용하여 여름몬순의 강도를 복원한바 있으며, 우량효과(amount effect)가 겨울보다 여름에 내리는 강수에서 더 잘 나타난다고 해석하였다. Pape et al. (2010)은 텍사스 오스틴 지역 다섯 개의 동굴에서 동굴수와 강수를 채취하여 산소동위원소 조성을 분석하였으며, 우량효과에 의한 산소동위원소의 조성은 따뜻한 기후에서 잘 나타난다고 해석하였다. 하지만 상대적으로 추운 기간의 우량효과는 온도효과(temperature effect)와, 대양에서 수증기가 증발될때의 동역학적효과(kinetic effect)에 의해서 영향을 받는다고 보고 하였다.

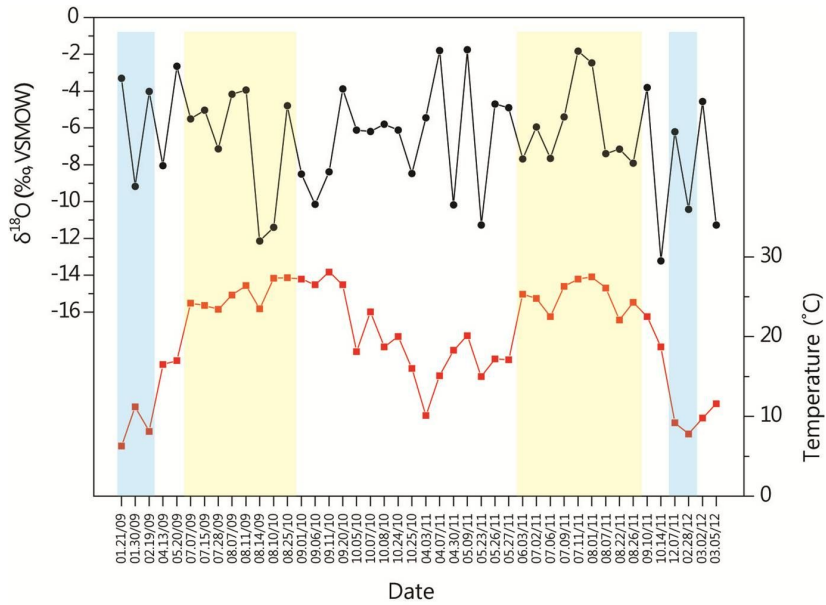


Fig. 26. A relationship between oxygen isotope variations of precipitation (upper curve) and temperature variation near the Seongsan region (lower curve).

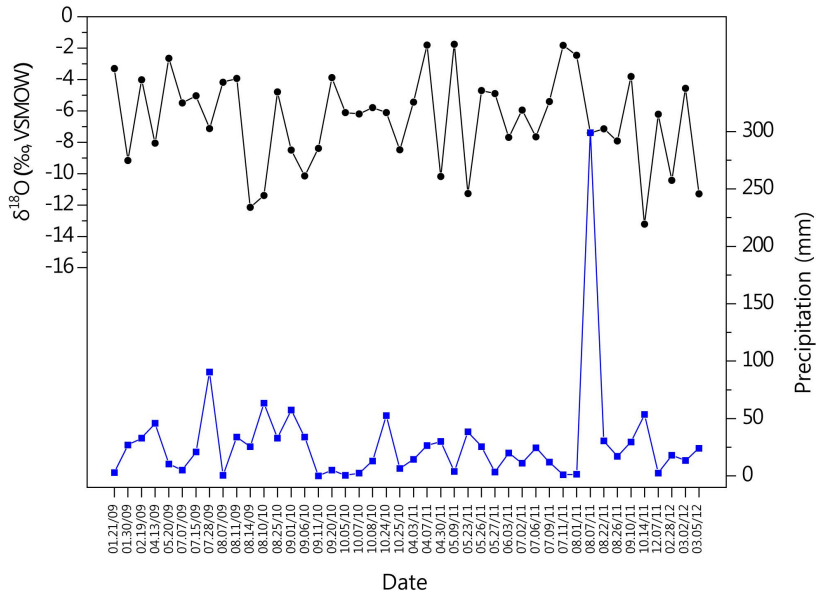


Fig. 27. A relationship between oxygen isotope variations of precipitation (upper curve) and amount of precipitation near the Seongsan region (lower curve).

위의 연구에서처럼 석순의 산소동위원소의 조성은 그 지역의 강수동위원소의 조성 및 밀접한 관련을 가지고 있다. 이러한 이유로 당처물동굴 석순의 안정동위원소 성분이 석순이 성장하던 당시의 환경과 계절적인 영향을 어느 정도 반영하는 지를 판단하기 위해 2009년 1월부터 2012년 5월까지 연구지역의 강수를 채취하여 안정동위원소 성분을 분석하였다. 강수의 산소동위원소 값은 $-1.8 \sim -13.2\text{‰}$ 로 약 -11.4‰ 의 범위를 보이며, 평균값은 -6.8‰ 이다(그림 26, 표 2). 겨울에 해당하는 12, 1, 2월의 산소동위원소의 범위는 $-10.4 \sim -3.3\text{‰}$ 로 나타나며, 평균값은 -6.6‰ 이다. 봄에 해당하는 3, 4, 5월에는 $-11.3 \sim -1.8\text{‰}$ 의 범위를 보였고 평균값은 -6.9‰ 로 측정되었다. 제주도 연평균 강수량의 대부분을 차지하는 6, 7, 8월 여름의 산소동위원소 평균값은 -6.3‰ 로 나타났으며, 산소동위원소의 값이 $-12.1 \sim -1.8\text{‰}$ 의 범위를 보이며 가장 큰 폭의 차이를 나타냈다. 가을에 해당하는 9, 10, 11월의 산소동위원소의 범위는 $-13.2 \sim -3.8\text{‰}$ 이며 평균값은 -7.3‰ 로 측정되었다. 각각의 계절에 따른 연구지역의 산소동위원소 평균값을 살펴보면 $-7.3 \sim -6.6\text{‰}$ 의 범위로 약 0.7‰ 의 근소한 차이를 보인다. 이러한 이유는 계절에 상관없이 강수의 산소동위원소 조성이 다양하게 나타나기 때문으로 판단된다. 이는 기온과 산소동위원소 값이 비례관계를 보이는 강수의 온도효과(temperature effect)와 상이한 결과이다(Yursever and Gat, 1981; Rozanski, et al., 1993). 제주도 뿐만 아니라 한반도 내륙 지방과 일본에서도 강수의 온도효과가 거의 관찰되지 않는 것은 여러 연구에 의해서 알려진바 있다(이광식과 장병욱, 1994; 이광식과 정재일, 1997; Araguás-Araguás et al., 1997, 이광식 외, 1997, 2001).

연구지역의 강수량에 따른 강수의 산소동위원소 조성 역시 우량효과가 잘 나타나지 않는 것으로 판단된다(그림 27, 28). 2011년 8월 7일의 일강수량은 299 mm로 많은 양이 내렸지만, 강수의 산소동위원소 값은 -7.4‰ 로 20mm의 강수가 내렸던 2011년 7월 6일의 산소동위원소 값 -7.7‰ 과 별 다른 차이가

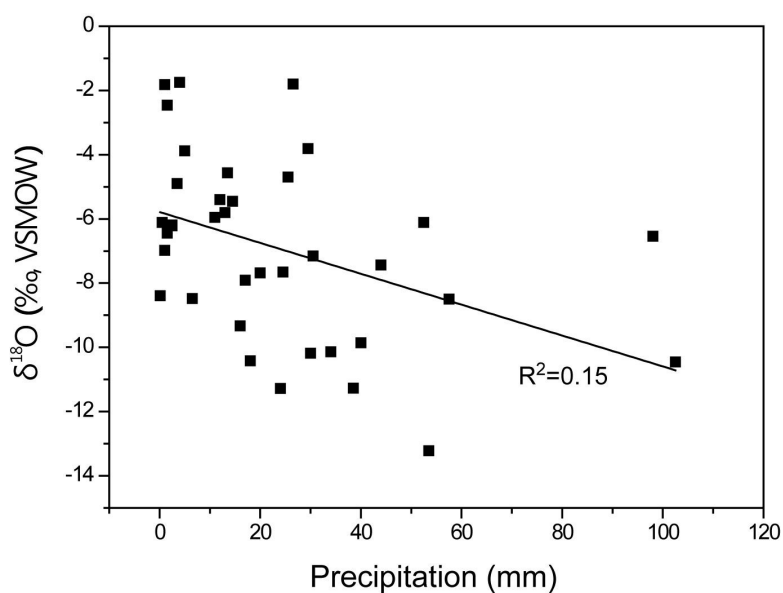


Fig. 28. Oxygen isotope values of rainfall near the Dangcheomul Cave versus the amount of rainwater near the Seongsan region.

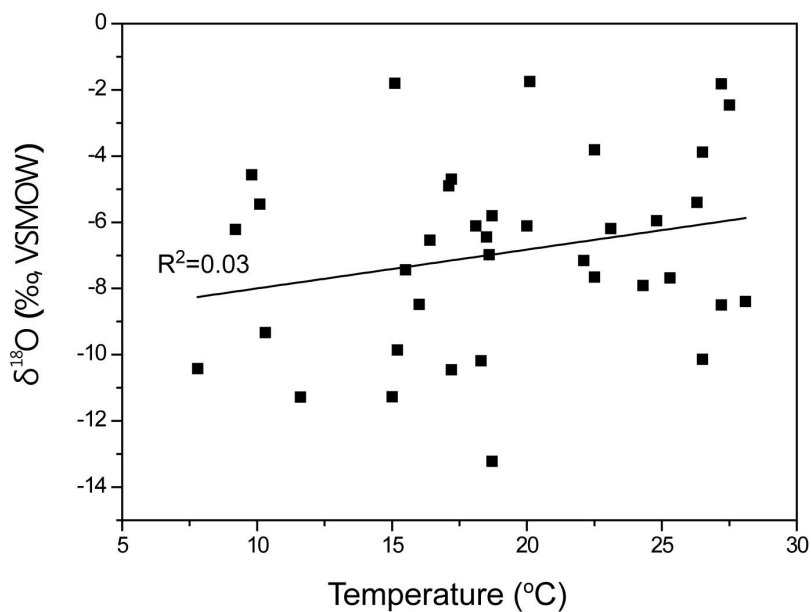


Fig. 29. Oxygen isotope values of rainwater near the Dangcheomul Cave versus temperature near the Seongsan region.

없다. 상대적으로 강수량이 적은 겨울에 우량효과에 의해 산소동위원소의 조성이 높은 값을 나타낼 것으로 예상했지만, 2012년 2월 28의 경우에는 -10.4‰로 상당히 고갈된 값을 나타내는 등 계절과 강수량에 의한 우량효과가 명확하게 나타나지 않는 것으로 생각된다. 이광식 외(2003)는 제주도 강수의 산소동위원소의 조성이 온도효과와 우량효과가 혼합되어 나타나기 때문에 특별한 계절변화를 보여주지 않는다고 해석하였다. 하지만 이광식 외(2003)는 제주도 강수의 중수소과잉값(d -값)이 겨울철에 크고 여름철에 적은 주기적인 특징을 뚜렷하게 보여준다고 하였다. 이처럼 제주도 강수에서 중수소과잉값이 뚜렷한 계절변화를 보이는 것은 여름철에는 북태평양 기단이 영향을 미치고 겨울철에는 시베리아 기단이 영향을 주는 것에 이유가 있다고 보고 하였다(이광식 외, 2002; Lee et al., 2003). 태평양 기단은 고온 다습한 상태에서 천천히 증발되어 생성되었기 때문에 중수소과잉값이 $\sim 10\%$ 이하의 값을 보이는 것이고, 겨울철에는 제주도에 영향을 주는 차고 건조한 시베리아 기단이 상대적으로 온도가 높은 황해를 지날 때 빠른 증발현상에 의하여 중수소과잉값이 $\sim 15\%$ 이상으로 높은 값을 보인다고 해석하였다(Araguäs-Araguäs et al., 1998; 이광식외, 2002; Lee et al., 2003).

이번 연구를 위해 채취된 강수의 중수소과잉값 역시 여름에는 평균 4.6‰로 10‰이하의 낮은 값을 보였고, 겨울에는 평균 14.9‰로 높게 측정되었다. 연구지역 강수의 산소, 수소동위원소를 도시해본 결과 지역순화수선(Local Meteoric Water Line)은 $\delta D = 8.07\delta^{18}O + 9.93$ ($n=44$, $r^2=0.91$)이다(그림 30). Craig (1961)의 지구순환수선($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)과 비교해보면 기울기와 Y절편이 유사하게 도시된다. 여름 강수의 경우는 $\delta D = 8.42\delta^{18}O + 7.30$ 으로 기울기는 유사 하지만 Y절편이 2.6‰ 작은 직선에 도시되고, 겨울 강수의 역시 $\delta D = 7.81\delta^{18}O + 13.16$ 으로 기울기는 유사했지만 Y절편은 Craig (1961)의 지구순환수선 보다 3.2‰ 큰 직선 부근에 도시되었다. 이러한 현상은 계절에 따라 동북아시아에 영향을 미치는 기단

의 종류가 달라짐과 밀접한 관계가 있다(이광식 1997).

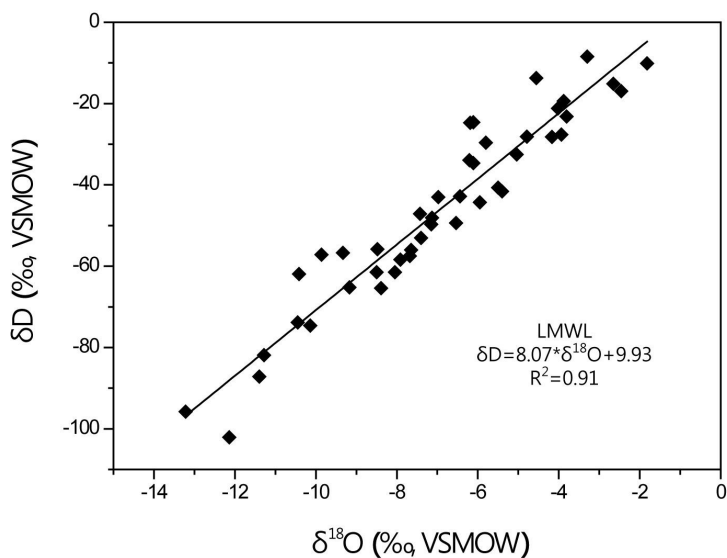


Fig. 30. A Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus δD compositions of rainwater. A Local Meteoric Water Line (LMWL).

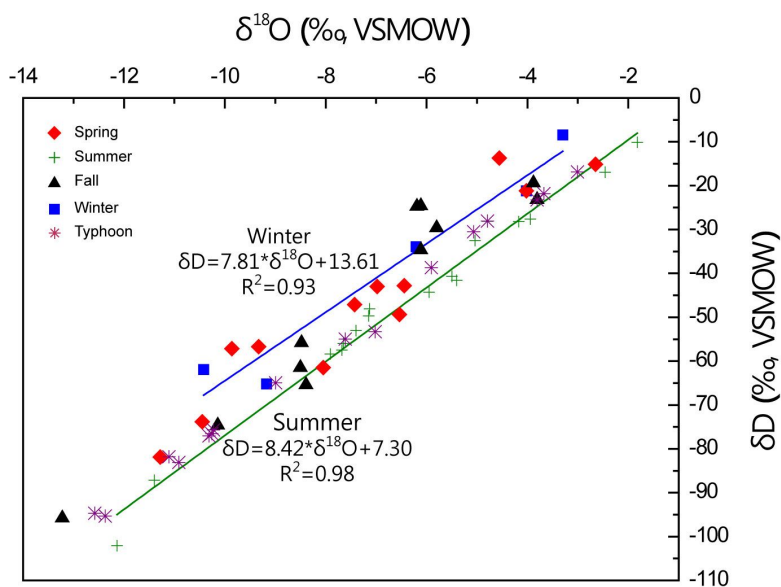


Fig. 31. A Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus δD compositions of rainwater. $\delta^{18}\text{O}$ and δD data fall along different regression lines in summer and winter.

이처럼 연구지역이 위치한 제주도의 강수동위원소 조성은 수증기의 기원지가 되는 대양의 특징, 기단, 온도효과, 우량효과, 대륙효과 그리고 제주도 중앙부에 위치한 한라산에 의한 고도효과 등 다양한 요인들이 강수의 동위원소 조성 변화에 복합적으로 작용한다. 때문에 중국의 Hulu동굴(Wang et al., 2001), Sanbao동굴(Zhao et al., 2010), Dongge동굴(Yuan et al., 2004; Wang et al., 2005) 등에서 이루어진 석순의 산소동위원소 조성변화를 이용한 과거 몬순기후 연구와는 다르게 당처물동굴 석순의 산소동위원소 조성 변화로 과거 기후를 복원하는데 어려움이 많을 것으로 판단된다. 특히 여름철 장마와 더불어 간헐적으로 제주도에 영향을 미치는 태풍의 산소동위원소 조성 또한 굉장히 다양한 값들을 보이고 있어 석순의 산소동위원소 조성만을 이용한 고기후 연구에 어려움을 주고 있는 것으로 판단된다(그림 32). 2010년 8월 10일에 제주도에 영향을 주었던 태풍 덴무(Dianmu)의 경우에는 12시에서 14시에 채취한 강수의 산소동위원소 조성은 -7%, 14시에서 16시 사이에 채취한 강수는 -12.6%, 16시에서 18시 사이에 채취한 강수는 -12.4%, 18시에서 20시 사이에 채취한 강수는 -14.1%, 태풍의 핵이 제주도에 가장 근접한 20시에서 24시 사이에 채취한 강수에서는 -10.9%로 측정 되었다(그림 32). 태풍 덴무가 제주도로 근접할수록 강수의 산소동위원소의 조성이 더 낮은 값을 보여 우량효과(amount effect)가 나타난 것으로 판단된다. 하지만 20시에서 24시까지 채취된 강수에서는 -10.9%로 다시 부화되는 값을 보였다(그림 33). 2010년 9월 1일에 제주도에 영향을 준 곤파스(Kompasu)는 8시에서 13시 사이에 채취된 강수의 산소동위원소 조성이 -5.9%, 태풍의 핵이 제주도로 가장 근접한 14시에서 18시 사이에 채취된 강수가 -10.2%로 낮은 값을 보였다. 태풍의 핵이 가까워질수록 산소동위원소의 성분이 고갈되는 경향을 보이는 듯 했지만, 18시에서 21시 사이에 채취된 강수에서 -7.6%, 태풍의 핵이 제주도에서 벗어난 시간인 21시에서 24시 사이에 채취된 강수에서는 -10.2%로 측정되었다(그림 32). 태풍 곤파스의 경우에는 강수의

산소동위원소 조성이 시간대에 따라서 부화된 값과 고갈된 값이 반복 되면서 측정되었다(그림 34). 2010년 9월 6일에 제주도에 영향을 준 태풍 말로우(Malou)는 강수의 산소동위원소가 9시에서 14시 사이에는 -11.1% , 14시에서 19시 사이에는 -10.3% , 19시에서 23시 사이에는 -9.0% 로 측정되어 태풍이 제주도를 근접해 지나 갈수록 산소동위원소 조성이 부화되는 경향을 보였다(그림 35). 2011년 9월 11일에 제주도에 영향을 준 태풍 꿀랍(Kulap)은 제주도에 근접해서 열대성 저기압으로 소멸되었다. 그리고 강수의 산소동위원소 또한 $-3.0\sim -5.1\%$ 로 다른 태풍들에 비해서 상당히 부화된 값을 보였다. 이처럼 태풍의 산소동위원소 조성은 태풍에 따라서 그리고 태풍의 경로에 따라서 굉장히 다양한 값들을 보이고 있어 석순의 산소동위원소 조성만을 이용한 고기후 연구에 어려움을 주고 있다(그림 32, 33, 34, 35). 따라서 이번 연구에서는 석순의 산소동위원소 조성 변화 보다 탄소동위원소의 조성 변화를 이용한 고기후 연구가 적합할 것으로 생각된다. 따라서 이번 연구에서는 석순의 탄소동위원소 조성 변화와 조직적 특징 그리고 북반구 대기 중의 방사성 탄소동위원소 농도를 대비하여 제주도의 후기 홀로세 기후를 추정하였다.

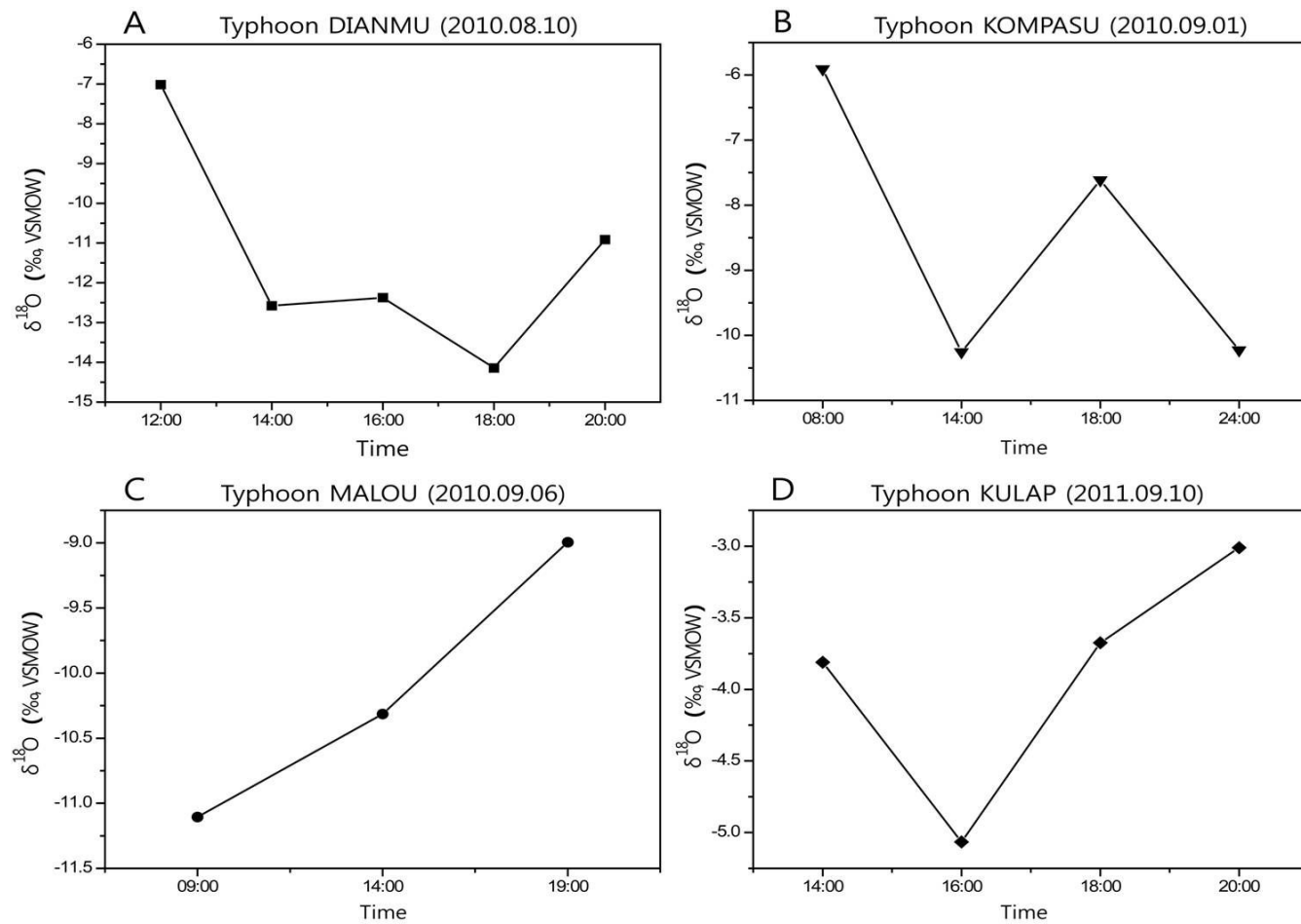


Fig. 32. Oxygen isotope variations of all the typhoons which passed through Jeju Island.

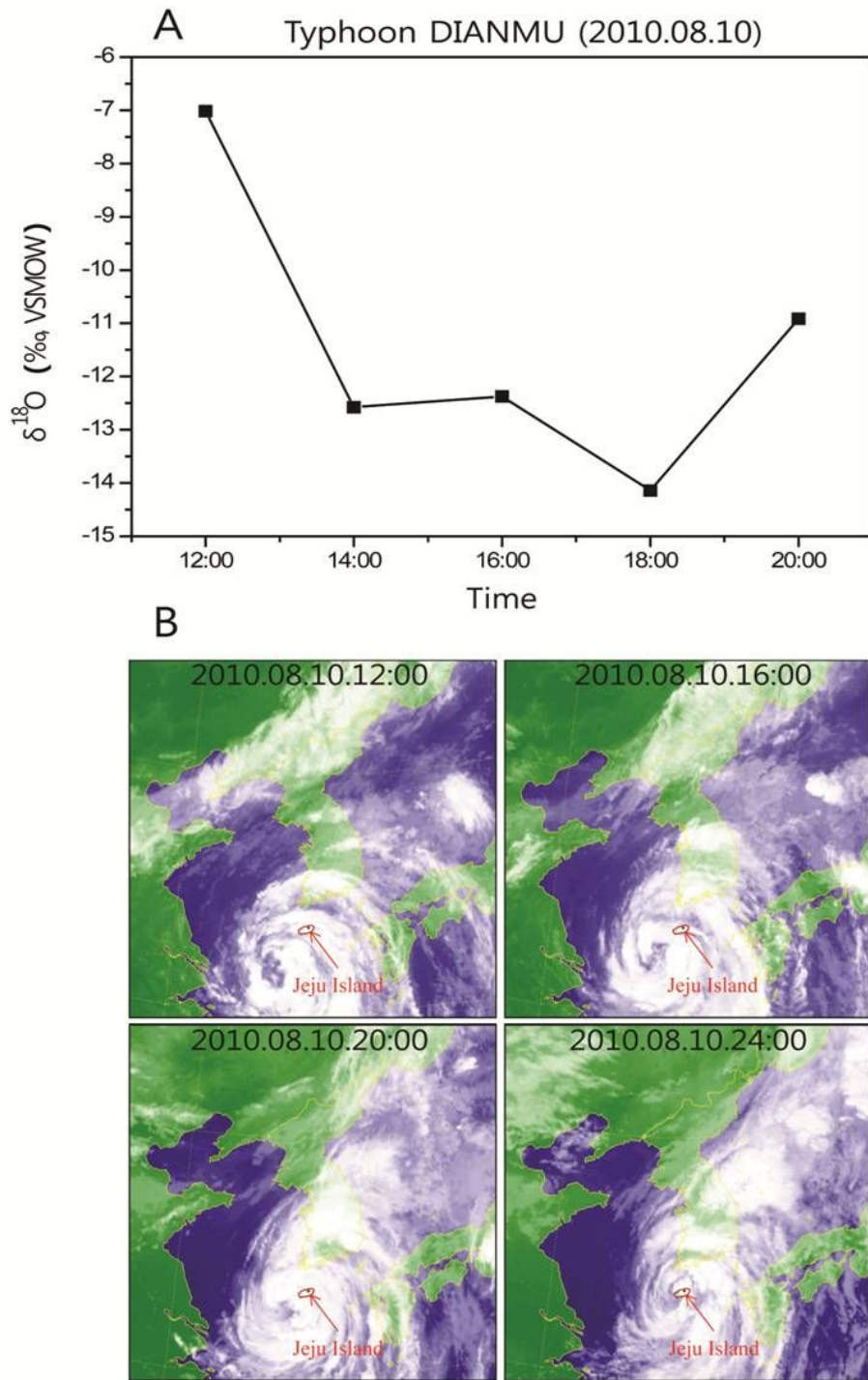


Fig. 33. A) Oxygen isotope variations of the typhoon (Dianmu) which passed through Jeju Island. B) Satellite images of the typhoon which passed through Jeju Island.

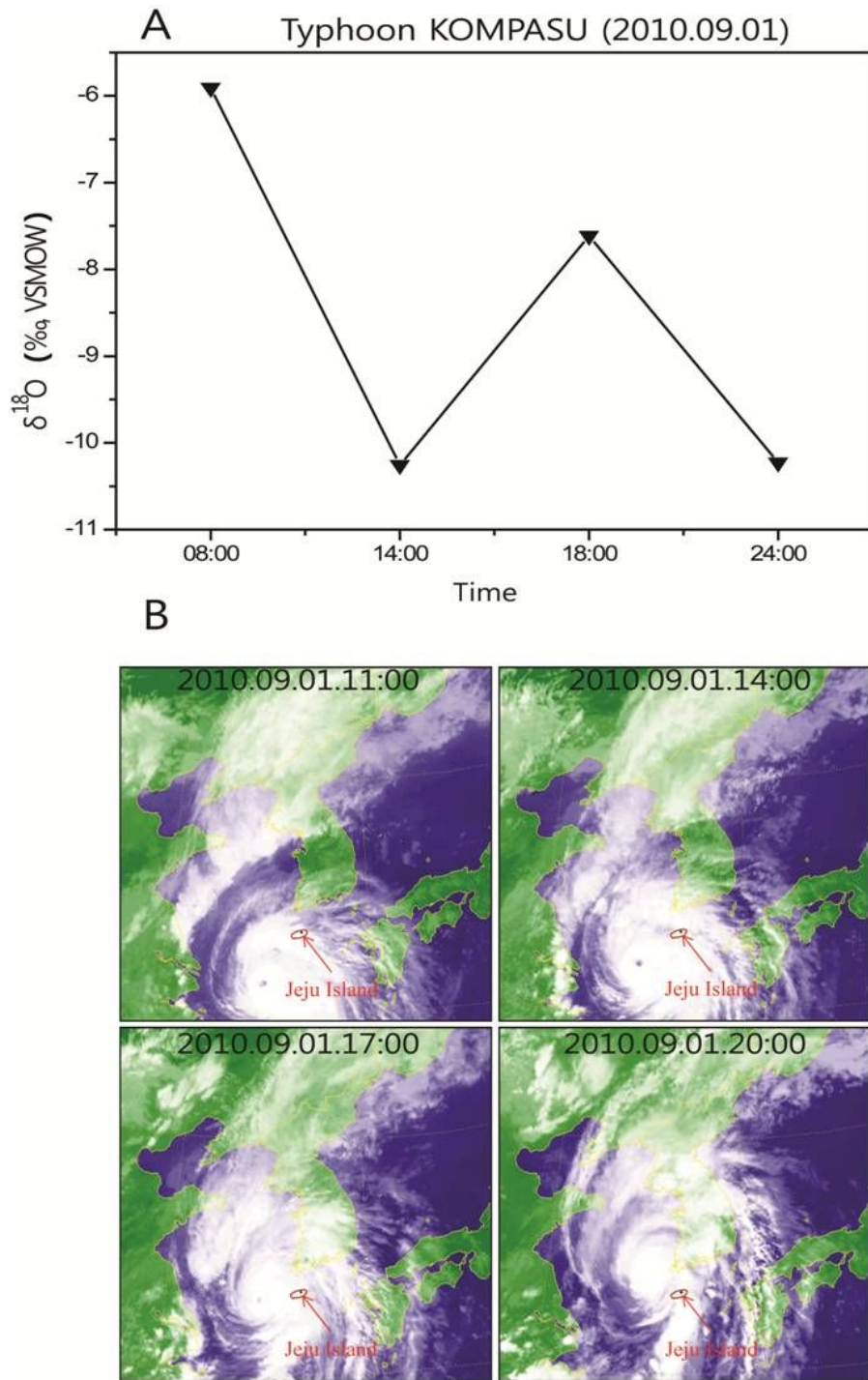


Fig. 34. A) Oxygen isotope variations of the typhoon (Kompasu) which passed through Jeju Island. B) Satellite images of the typhoon which passed through Jeju Island.

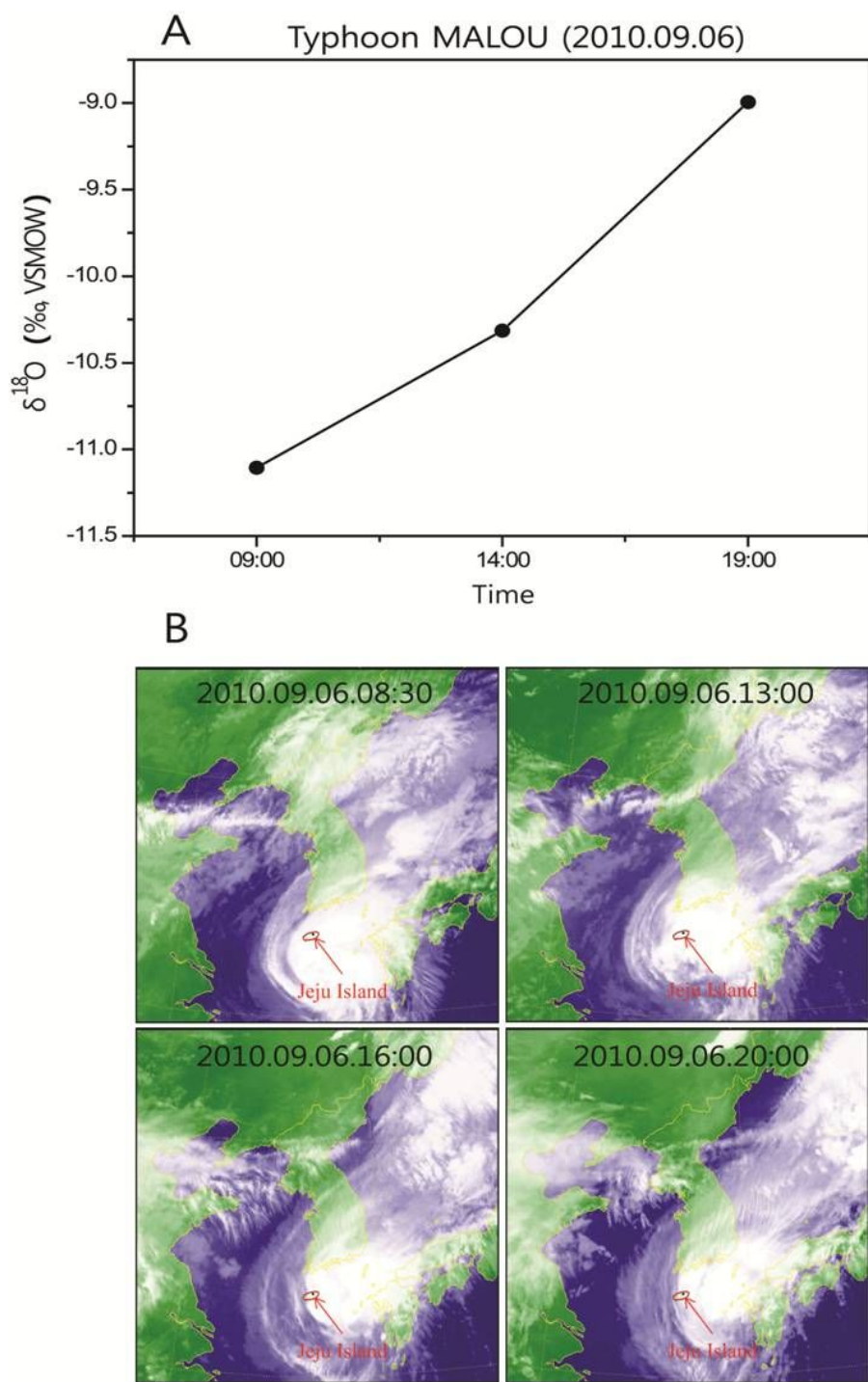


Fig. 35. A) Oxygen isotope variations of the typhoon (Malou) which passed through Jeju Island. B) Satellite images of the typhoon which passed through Jeju Island.

5-3. 석순의 탄소동위원소 성분 변화

동굴생성물의 탄소동위원소 성분은 주로 동굴이 위치한 지역의 식생에 따른 토양의 발달과 그에 따른 토양 내에 CO₂농도, 그리고 동굴수로부터 유리되는 이산화탄소의 양에 의해 조절된다고 알려져 왔다(Dorale et al., 2002; Genty et al., 2003; Paulsen et al., 2003). 특히 토양 내 유기물의 탄소동위원소 값의 변화는 C₃과 C₄ 식물 비에 영향을 받으며, C₃과 C₄ 식물의 상대적인 양의 변화는 대기의 이산화탄소분압, 온도, 강수량과 같은 과거의 기후변화에 영향을 받는다고 알려져 있다(Cayet and Lichtfouse, 2001; Liu, et al., 2005). 당처물동굴 상부에 퇴적된 사구의 하부층부터 DC1-1에서 DC1-7까지 탄소동위원소 성분을 분석한 결과 -23.8~-7.7‰의 범위를 보이며 변화하였다. 사구퇴적층의 가장 하부에 속하는 DC1-1~DC1-3 고토양 샘플의 탄소동위원소 평균값은 -22.7‰로 측정되었고, 중부 고토양층의 평균값은 -10.3‰로 측정되었으며, 사구 최상부의 탄소동위원소 값은 -21.8‰로 나타났다. 중부 고토양층의 탄소동위원소 성분이 하부와 상부층에 비해 상대적으로 부화되는 경향을 보인다. 이처럼 중부 고토양층의 탄소동위원소 성분이 하부 고토양층과 상부 고토양층보다 부화되는 값을 보이는 것은 이 시기에 C₄ 식물이 상대적으로 번성했던 시기로 생각할 수 있다. 사구퇴적층 지표에서 가장 많이 성장하던 일곱 종 식물의 탄소동위원소 성분은 억새를 제외한 여섯 종의 식물이 -30.6~28.7‰의 범위를 보이며 C₃ 식물의 탄소동위원소 성분 범위 내에서 나타났다. 하지만 억새의 탄소동위원소 성분은 -13.0‰로 일곱 종의 식물 중에서 가장 부화되는 값을 보이며 C₄ 식물의 탄소동위원소 성분 범위로 측정되었다(표 5). 따라서 고온, 건조 등의 환경에서 성장하기 유리한 C₄ 식물이 이시기에 더 번성했던 것으로 판단된다.

석순의 탄소동위원소 조성은 -12.0‰에서 -2.7‰의 범위를 보이며, 평균값은 -8.7‰로 최소값과 최대값이 비교적 큰 차이를 보인다(그림 36). 탄소동위원소

의 성분 변화는 석순 하부로부터 상부까지 크게 네 구간으로 나눌 수 있다(그림 36). 첫 번째 구간은 석순의 0~70.4 mm로 하부에 해당하며, 4450 yr BP에서 2624 yr BP까지 성장한 시기이다. 이 구간의 탄소동위원소 값이 가장 부화되는 경향을 보이는 구간으로서 평균 -6.0% 로 나타났다. 이 구간의 조직적 형태 또한 건조했던 시기로 판단할 수 있는 성장선간격이 좁고 포유물이 거의 관찰되지 않는 Type I 이 우세하게 나타난다. 이러한 탄소동위원소 조성을 보이는 구간은 상대적으로 건조한 시기로 온도가 낮거나 강수량이 적어 C_4 식물의 생장에 유리한 조건이 되기 때문에 C_4 식물이 더 우세하게 번성하였던 시기로 볼 수 있다. 따라서 C_4 식물의 상대적인 증가로 인하여 부화되는 경향을 보이는 토양 내 유기물의 탄소성분이 석순에 반영되었을 가능성도 있다. 두 번째 구간은 석순의 70.4~196.5 mm까지이며, 2624 yr BP부터 1002 yr BP까지 성장한 구간이다. 이 구간의 탄소동위원소 값은 상대적으로 다른 구간보다 고갈된 값을 보이며, 평균 -10.3% 로 첫 번째 구간간의 평균값인 -6.0% 과 약 4.3% 의 차이를 보였다. 이처럼 큰 폭으로 탄소동위원소 조성이 변화하는 경향은 첫 번째 구간보다는 습윤한 기후로 접어들었던 시기로 판단된다. 즉, 두 번째 구간에 들어서는 습윤한 기후로 변화함에 따라서 C_4 식물보다 C_3 식물의 상대적인 양이 증가하여 토양 내 유기물의 탄소동위원소 성분이 고갈되는 경향을 보이는 것으로 생각된다. 이 구간에서 나타나는 조직 또한 성장선의 간격이 넓고 유체 포유물이 많은 Type III, IV형태로 첫 번째 구간보다 강수량이 많았던 시기임을 알 수 있다. 세 번째 구간은 지속적으로 탄소동위원소의 성분이 높아지는 경향을 보이는 구간으로 최소 -11.2% 에서 최대 -4.2% 까지 약 7% 이 부화된다. 석순의 196.5~219.7 mm에 해당하는 부분이고, 1002 yr BP부터 244 yr BP까지 석순이 성장한 시기이다. 이 구간의 탄소동위원소 평균값은 -8.1% 로 두 번째 구간의 평균값 -10.3% 에 비해 약 2.2% 이 낮게 나타났다. 특히 이 구간은 탄소동위원소 조성의 변화가 큰 폭으로 변화하는 마루와 골이 많이 관찰되며 이는

상대적으로 단주기의 급격한 돌발기후가 잦았던 시기로 판단된다. 실제로 이 구간의 조직 형태 또한 Type I, II, IV가 반복적으로 보이고 있어 짧은 기간 동안 건조했던 시기와 많은 강수량이 짧은 주기로 반복 된 것으로 볼 수 있다 (그림 12). 네 번째 구간은 석순의 최상부로 219.7~225 mm까지이며, 244 yr BP부터 현재까지에 해당하는 시기이다. 이 구간에서는 -4.2‰까지 높아졌던 탄소동위원소의 성분이 -12.0‰까지 약 7.8‰가량 지속적으로 낮아지는 구간이며, 이는 현세온난기(current warm period)에 해당하는 시기로 조직의 형태 또한 강수량이 가장 많은 시기로 생각할 수 있는 Type V 형태가 우세하게 나타나기 시작한다.

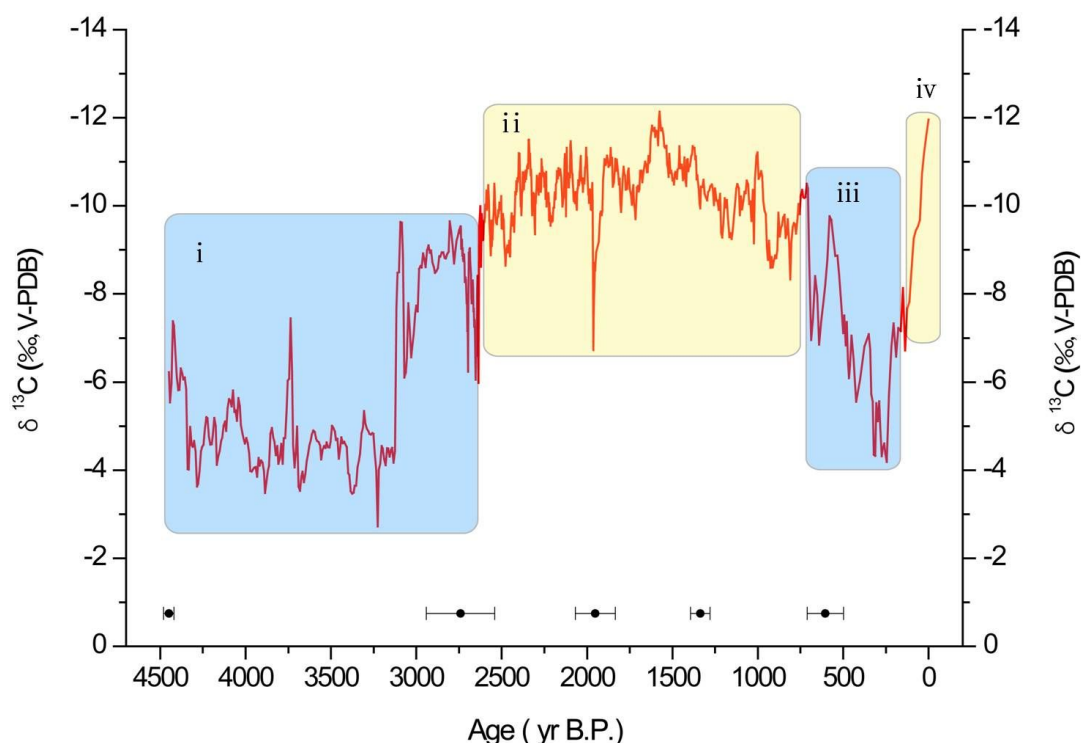


Fig. 36. A plot of $\delta^{13}\text{C}$ values versus the age of the DC-1 stalagmite .

5-4. 지난 2,000 yr BP 동안 석순의 탄소동위원소 성분 변화와 태양활동 변화에 따른 북반구 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록

제주도를 비롯한 한반도 지역은 동아시아 여름몬순의 강도와 강수량이 밀접한 관련을 가지고 있기 때문에 동아시아 여름몬순의 강도는 동굴생성물의 성장에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 동굴생성물의 성장은 동굴 내부로의 물의 공급량과 직접적인 관련이 있다. 따라서 동굴수의 공급이 많아지는 상대적으로 습윤한 기후 하에서 동굴생성물의 성장이 더 우세한 경향이 있다 (Gascoyne et al., 1983; Hening et al., 1983; Goede and Harmon, 1983). 이러한 몬순의 강도는 태양활동의 강도 즉 일사량과 밀접한 관계를 갖게 된다. 이러한 일사량의 정도를 알 수 있는 지시자가 대기의 $\Delta^{14}\text{C}$ 이다. ^{14}C 는 우주선(cosmic ray)이 지구 대기의 상층부에 있는 ^{14}N 와 충돌하여 생성되는 방사성 원소로서 지상의 식물이나 동물은 살아있는 동안 물질 대사를 통하여 ^{14}C 를 흡수하기도하고 방출하기도 한다(Davis, 1977). 태양활동이 활발하고 일사량이 증가하게 되면 대기의 $\Delta^{14}\text{C}$ 농도는 낮아지게 된다(Stuiver and Brziunas, 1993). Wang et al. (2004)은 브라질 북동부에 분포하는 동굴생성물과 트래버틴(travertine)에 대해 체계적인 연령분석을 실시하여 이들의 성장이 일사량 최대기(insolation maxima)에 집중되어 있음을 밝힌바 있다. 그리고 2005년에는 중국 Dongge 동굴 석순의 안정동위원소 기록을 이용하여 홀로세 전 기간에 해당하는 기록을 보여 주었다. 이 연구에서 저자들은 2,124개의 산소동위원소 분석과 45개의 연령분석 자료를 통해 아시아 몬순 변화에 대한 시계열 자료를 제시하였다(Wang et al., 2005). 또한 이 연구결과를 INTCAL98의 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록 및 그린란드 빙하코어인 GRIP, GISP2의 $\delta^{18}\text{O}$ 기록과 대비하였으며, 이들은 모두 일

치하는 결과를 보여주었다. 이전 연구들에 의하면 석순의 $\delta^{18}\text{O}$ 기록은 아시아 몬순의 변화를 나타내며(e. g., Yuan et al., 2004), 대기 $\Delta^{14}\text{C}$ 의 기록이 일사량에 직접적으로 영향 받는 것으로 알려져 있다(e.g., Stuiver and Quay, 1980). 따라서 이전의 연구와 Wang et al. (2005)의 연구를 종합하면, 동아시아 몬순의 변화는 일사량의 변화와 직접적으로 관련되어 있다는 사실을 알 수 있다(Wang et al., 2005). 아시아 지역뿐만 아니라 미국 남서부에 위치한 Pink Panther동굴 석순의 산소동위원소 기록 역시 대기 $\Delta^{14}\text{C}$ 의 기록과 잘 일치하는 결과를 보여주었다(Asmerom et al., 2007).

주기적인 변화를 보이는 당처물동굴 석순(DC-1)의 탄소동위원소 조성 변화를 해석하기 위하여 지난 2,000 yr BP 동안에 해당하는 142~225 mm구간의 탄소동위원소 변화를 북반구 대기중의 $\Delta^{14}\text{C}$ (INTCAL 09; Reimer et al., 2009) 기록과 비교해 보았다(그림 37). INTCAL09의 기록은 나무 나이테를 비롯한 여러 지시자로부터 방사성탄소 기록을 통해 0~50 Cal Kyr BP 동안의 북반구 대기의 $\Delta^{14}\text{C}$ 농도를 복원하였고 이를 토대로 태양활동의 변화를 설명하였다(Oeschger et al., 1975; Stuiver et al., 1993; Heaton et al., 2009; Reimer et al., 2009). 지난 2,000 yr BP 동안 석순(DC-1)의 탄소동위원소 변화는 크게 세 구간으로 나눌 수 있다. 첫째 구간은 2,000 yr BP에서 688 yr BP까지의 시기로 석순의 142~208 mm에 해당하며, 이 구간의 탄소동위원소 값의 평균은 -10.4‰로 상대적으로 고갈된 값을 보인다. 둘째 구간은 688 yr BP에서 150 yr BP까지의 시기로 석순의 208~221 mm에 해당하며, 이 구간의 탄소동위원소 평균 값은 -6.9‰로 첫 번째 구간보다 3.5‰ 더 높은 값을 보였다. 세 번째 구간은 150 yr BP에서 0 yr BP까지로 지속적으로 탄소동위원소 값이 고갈되는 경향을 보이는 구간이다. 석순의 221~225 mm 구간으로 최상부에 해당하는 구간으로 탄소동위원소의 평균 값은 -10.2‰로 두 번째 구간보다 3.3‰ 더 적은 값을

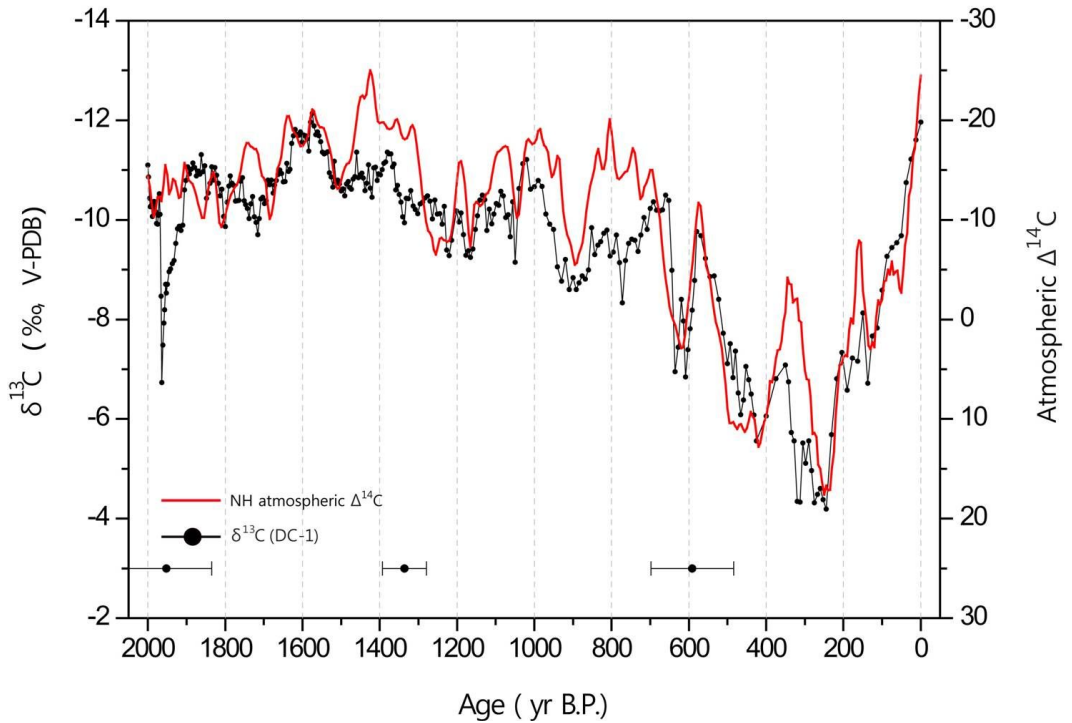


Fig. 37. Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite and northern hemispheric atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ record.

보였다. 흥미로운 사실은 이러한 세 구간에 나타나는 탄소동위원소 값의 마루와 골의 주기가 북반구 대기의 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록과도 잘 일치하고 있다는 것이다(그림 38). Eddy (1977a)는 나무 나이테를 이용한 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록 복원 연구에서 지난 5,000년 동안에 여섯 번의 태양활동의 극소기(grand minima), 다섯 번의 극대기(grand maxima)를 제시 한바 있다. 특히 지난 1,000 yr BP 동안에 태양 흑점 활동이 극소기 시기였던 Oort minimum, Wolf minimum, Spörer minimum, Maunder minimum, Dalton minimum (Eddy, 1976) 기록이 석순(DC-1)의 탄소동위원소 기록과 잘 일치 하고 있다(그림 38). Oort minimum에 대비되는 석순

의 탄소동위원소 변화는 -11.2‰에서 -8.6‰까지 부화되는 값을 보였으며, 1,002 yr BP에서 878 yr BP까지 지속 되었다. Wolf minimum에 대비되는 석순의 탄소동위원소 변화는 -10.5‰에서 -6.8‰까지 부화되는 경향을 보여 비교적 큰 폭의 진동을 보였으며, 688 yr BP에서 580 yr BP까지 해당하는 시기이다. Spörer minimum에 대비되는 탄소동위원소 변화는 580 yr BP에서 350 yr BP에 해당하는 시기로 -9.8‰에서 -5.6‰까지 부화되는 값을 보여 주고 있다. Maunder minimum에 대비되는 탄소동위원소 변화는 -7.1‰에서 -4.2‰까지 부화되는 값을 보였다. 이처럼 극소기가 나타나는 구간은 태양 흑점활동이 활발하지 못했던 시기로 상대적으로 건조했던 기간으로 판단할 수 있다. 하지만 소빙하기에 해당하는 시기에는 탄소동위원소 변화의 진동 폭과 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록의 진동 폭이 크게 관찰되는데 이는 상대적으로 건조한 시기이기는 하였지만 돌발적인 기후변화가 많이 일어났던 시기로 판단할 수 있다. 실제로 과거 기록을 살펴보면 이러한 짧은 주기의 기후변화가 관찰되었다. 이호철과 박근필(1996)은 조선 왕조실록과 인조실록 내의 기후관련 기록을 이용하여 1,799년부터 1824년까지 19세기 초 조선의 기후 변동을 연구하였다. 1,809년부터 1,813년은 전국적인 극심한 가뭄이 발생하였지만, 황해도와 평안도에서는 수재가 발생하였다는 기록이 있다. 1,814년에서 1,825년은 수재가 빈번하게 발생하였지만, 지역적으로 극심한 가뭄이 있었다. 따라서 석순의 탄소동위원소 조성 변화에 과거에 일어났던 짧은 기간의 기후도 잘 반영되는 것으로 판단할 수 있다. 이처럼 당처물동굴의 석순의 탄소동위원소 성분은 북반구 태양활동의 변화량, 특히 태양흑점활동의 극소기와 잘 일치하고 있으며, 이에 따른 단주기의 기후변화도 잘 반영하는 것으로 판단된다.

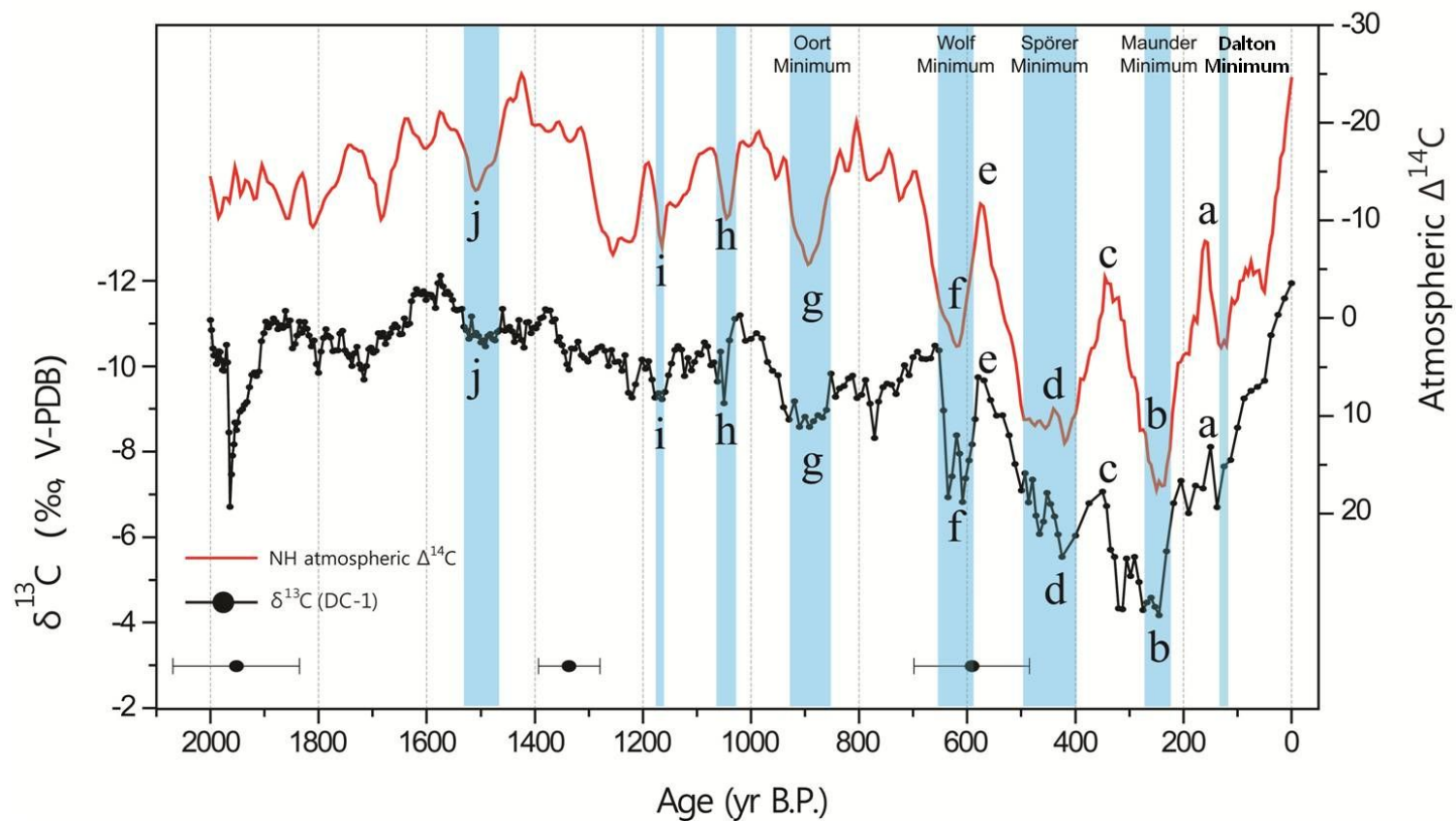


Fig. 38. Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite and northern hemispheric atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ record. The vertical bar depicts the correlation between the $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite and minimum of solar activity.

5-5. 지난 2,000년 동안 제주도의 기후변화

당처물동굴 석순의 조직적 특징, 탄소동위원소 조성 변화를 지난 2,000년 동안 북반구 대기의 $\Delta^{14}\text{C}$ 복원 기록을 중심으로 비교하여 제주도의 기후변화를 추정하였다(그림 39, 40). 북반구 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록 외에도, 북반구 복원온도, 중국 Wanxiang Cave 석순의 $\delta^{18}\text{O}$ 기록을 함께 비교하여 보았다(그림 39). 지난 2,000년 동안에는 로마온난기(Roman Warm Period)의 일부 구간, 암흑한랭기(Dark Age Cold Period), 중세온난기(Medieval Climate Anomaly), 소빙기(Little Ice Age), 그리고 최근 약 100년 전부터 지속적으로 온도가 상승하고 있는 현세온난기(Current Warm Period) 등 홀로세 후기에 일어난 전 세계적인 기후변화가 관찰되는 시기이다(그림 39). Zhang et al. (2008)은 중국 Wanxiang Cave에서 채취한 석순의 산소동위원소 조성 변화를 이용하여 지난 1,810년 동안의 기후변화를 복원하였으며, 이 시기의 아시아몬순 강도에 따른 기후 변화가 중국 왕조의 번성과 멸망한 시기와 일치함을 밝혀냈다. 이들은 연구 결과를 바탕으로 190~950년을 암흑한랭기, 950~1,340년을 중세온난기, 1,340~1870년을 소빙하기, 1,870년 이후를 현세온난기가 일어난 시기로 보았다. 이러한 복원 결과는 석순(DC-1)의 탄소동위원소 조성변화와 전체적인 경향은 비교적 잘 일치하고 있다(그림 39). 하지만 석순(DC-1)의 탄소동위원소 성분이 가장 부화되게 나타나는 1700~1800년 사이의 골과 Wanxiang Cave (Zhang et al., 2008) 산소동위원소 성분이 가장 부화되어 나타나는 골의 시기는 1,600년으로 100년의 차이를 나타냈으며, 다른 세부 구간에서도 조금의 차이를 보였다. 석순(DC-1)의 탄소동위원소기록은 여러 고기후 지시자(proxy)를 이용해 복원한 북반구 온도(Mann and Jones., 2003; Moberg et al., 2005) 기록과도 전체적인 경향은 비교

적 잘 일치하지만 중세온난기(Medieval Climate Anomaly)가 나타나기 전 0~800년 사이의 온도복원 기록과는 차이를 보였다(그림 39). 이처럼 일련의 기후 변화들은 전 세계적으로 일어난 사건이라고 할 수 있지만, 그 시기와 세부 형태는 조금씩 다르게 나타나곤 하는데 이는 지역적인 영향을 받기 때문이다. 특히 북반구 복원온도 기록의 경우에는 지시자(proxy)가 대부분 유럽이기 때문에 아시아 지역과는 조금의 차이를 보이는 것으로 판단된다. 한반도는 위와 같은 기후사건들이 발생했던 시기에 현재와 같이 정확한 수치로 표현되는 기상관측이 이루어지지 않았기 때문에 정확한 시기를 파악하기 어렵지만 조선시대의 문헌에서 당시의 기후상황을 추정할 만한 사료들이 발견되고 있다. 임규호와 심태현(2002)은 조선왕조실록의 기상빈도를 근거하여 기후를 복원하였다. 특히, 비, 대우(대설)와 대풍우, 가뭄 기록을 이용하여 건습 지수를 구성하였으며, 건습지수의 신뢰성을 판단하기 위하여 1,777년부터 1,907년까지 역사 기록 자료에 근거하여 전산화한 측우기 강수량과 비교하였다. 그 결과 한반도는 1,440년 무렵과 1,540년, 1,600년 전후, 1,680년, 그리고 1,770년과 1,800년 무렵에 극심한 건조기였으며, 1,410년, 1,520년, 1,660년경은 습윤한 시기였음을 제시하였다. 석순(DC-1)의 탄소동위원소 성분 역시 위의 결과와 비슷한 시기에 고갈되거나, 부화되는 값을 보이고 있다. 임규호와 심태현(2002)의 복원 기록과 당처물동굴 석순의 탄소동위원소 성분 변화를 비교해보 결과 1,590년에는 -5.6‰, 1,681년 역시 -5.6‰로 상대적으로 높은 탄소동위원소 값을 나타내고 있으며, 이는 석순의 탄소동위원소 성분 역시 건조했던 기간임을 지시하고 있다. 1,404년에는 -8.2‰, 1,515년에는 -7.5‰, 1,660년에는 -7.1‰로 측정되어 비교적 작은 값의 탄소동위원소 기록을 보이고 있으며, 이는 위의 연구결과에서 제시한 습윤한 기간과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

당처물동굴 석순의 탄소동위원소 기록은 여러 지시자(proxy)들 중에서도 특

히 북반구 $\Delta^{14}\text{C}$ 복원 기록과 가장 잘 일치 하고 있다(그림 39). 지난 2,000년 동안에 일어났던 태양 흑점활동이 극소기였던 Oort minimum, Wolf minimum, Spörer minimum, Maunder minimum, Dalton minimum (Eddy, 1976)기록이 석순(DC-1)의 탄소동위원소 기록과 잘 일치 하고 있으며, 석순의 조직적 특징과도 비교적 일치하고 있다(그림 40). Oort minimum에 대비되는 석순의 탄소동위원소 변화는 -11.2% 에서 -8.6% 까지 부화되는 값을 보였으며, 1,006년에서 1,130년까지 지속 되었다. Wolf minimum에 대비되는 석순의 탄소동위원소 변화는 -10.5% 에서 -6.8% 까지 부화되는 경향을 보여 비교적 큰 폭의 진동을 보였으며, 1,320년에서 1,428년까지 해당하는 시기이다. Spörer minimum에 대비되는 탄소동위원소 변화는 1,428년에서 1,660년에 해당하는 시기로 -9.8% 에서 -5.6% 까지 부화되는 값을 보여 주고 있다. Maunder minimum에 대비되는 탄소동위원소 변화는 -7.1% 에서 -4.2% 까지 부화되는 값을 보였다. 이처럼 극소기가 나타나는 구간은 태양 흑점활동이 활발하지 못했던 시기로 상대적으로 건조했던 기간으로 판단할 수 있다. 하지만 소빙하기에 해당하는 시기에는 탄소동위원소 변화의 진동 폭과 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록의 진동 폭이 크게 관찰되는데 이는 상대적으로 건조한 시기이기는 하였지만 돌발적인 기후변화가 많이 일어났던 시기로 판단할 수 있다. 따라서 석순의 탄소동위원소 조성 변화에 과거에 일어났던 짧은 기간의 기후도 잘 반영되는 것으로 판단할 수 있다. 이처럼 당처물동굴 석순의 탄소동위원소 성분은 북반구 태양활동의 변화량, 특히 태양흑점활동의 극소기와 잘 일치하고 있으며, 이에 따른 단주기의 기후변화도 잘 반영하는 것으로 판단된다. 이는 석순의 탄소동위원소가 태양활동에 따른 강수량, 식생의 변성, 그리고 C_3 과 C_4 식물의 상대적인 양의 변화에 의해 가장 큰 영향을 받게 되고, 동굴지표의 사구퇴적층 토양내 CO_2 농도의 변화가 석순에 잘 반영된 것으로 생각할 수 있다.

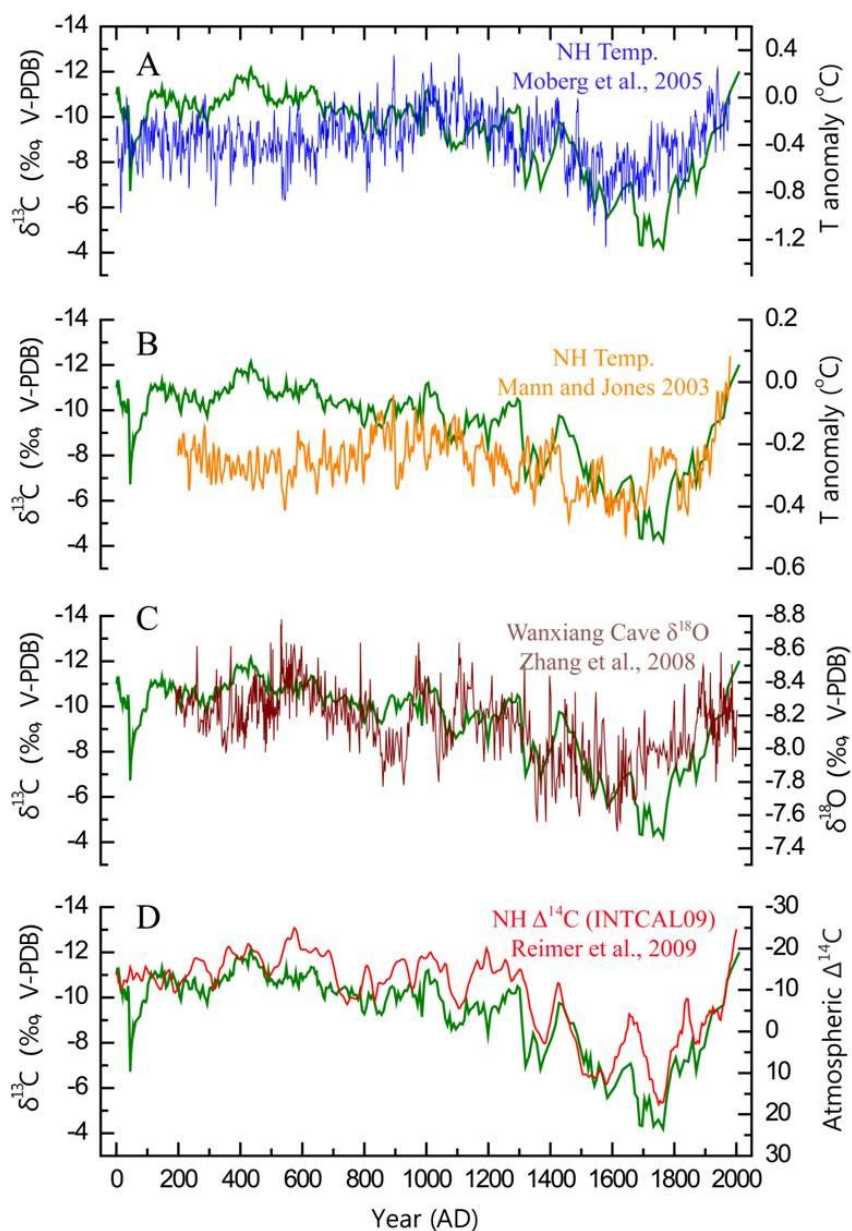


Fig. 39. Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ compositions of the DC-1 stalagmite, estimated temperature variations, other $\delta^{18}\text{O}$ records from Chinese stalagmite, and $\Delta^{14}\text{C}$ record from tree ring data. The $\delta^{13}\text{C}$ time series of the DC-1 stalagmite is in dark green. A, B) Northern hemispheric temperature reconstructions from proxy records (Blue line; Moberg et al., 2005; Orange line; Mann and Jones, 2003). C) Wanxiang Cave (Brown line; Zhang et al., 2008) $\delta^{18}\text{O}$ record. D) Northern hemispheric $\Delta^{14}\text{C}$ record from tree-ring study (Red line; Reimer et al., 2009).

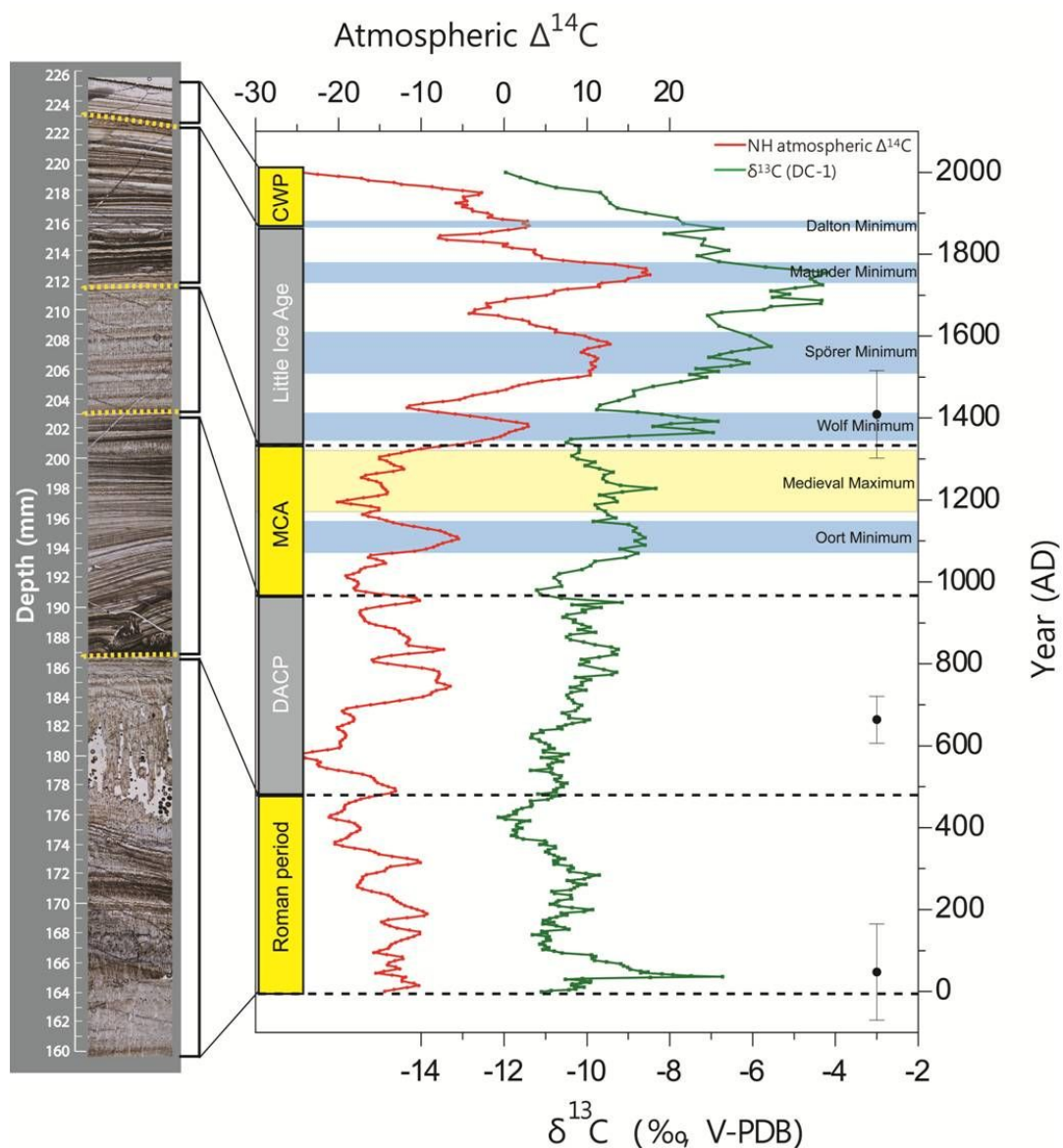


Fig. 40. $\delta^{13}\text{C}$ records (dark green line) and textural characteristic of the DC-1 stalagmite compared to northern hemispheric $\Delta^{14}\text{C}$ records (red line) from tree-ring study (red line). DACP= Dark Age Cold Period, CWP= Current Warm Period.

6. 결 론

1. 제주도 북동부에 위치한 당처물동굴은 용암동굴이지만 지표에 발달한 탄산염 사구퇴적물에 의하여 탄산이온과 칼슘이온을 공급받아 용암동굴임에도 탄산염 동굴생성물이 존재한다. 이러한 동굴에서 형성된 석순은 외부환경을 잘 반영하고 속성환경의 영향을 덜 받기 때문에 고기후 연구에 좋은 지시자(proxy)가 된다.

2. 제주도의 강수동위원소 조성은 수증기의 기원지가 되는 대양의 특징, 기단, 온도효과, 우량효과, 대륙효과 그리고 제주도 중앙부에 위치한 한라산에 의한 고도효과 등 다양한 요인들이 강수의 동위원소 조성 변화에 복합적으로 작용한다. 따라서 다른 아시아 지역처럼 석순의 산소동위원소 조성변화를 이용한 과거 몬순기후 연구와는 다르게 당처물동굴 석순의 산소동위원소 조성 변화만으로 과거 기후를 복원하는데 어려움이 많을 것으로 판단된다. 특히 여름철 장마와 더불어 간헐적으로 제주도에 영향을 미치는 태풍의 산소동위원소 조성 또한 굉장히 다양한 값들을 보이고 있어 석순의 산소동위원소 조성만을 이용한 고기후 연구에 어려움을 주고 있는 것으로 판단된다. 따라서 이번 연구에서는 석순의 탄소동위원소 조성 변화와 조직적 특징 그리고 북반구 대기 중의 방사성 탄소동위원소 농도를 대비하여 제주도의 후기 홀로세 기후를 추정하였다.

3. 석순 DC-1의 조직을 관찰한 결과 많은 성장선을 보여주고 있다 성장선이 많이 나타나는 성장선 밀집대와 성장선의 밀도가 상대적으로 낮은 성장선 비밀집대가 반복되면서 나타난다. 성장선의 밀집 정도는 과거 연구지역의 강수

량에 따른 석순의 성장속도와 밀접한 관련이 있다. 이러한 이유로 성장선의 밀집 정도와 성장속도, 성장선과 성장선사이의 간격 그리고 석순 조직 내에 유체 포유물이 포함된 정도를 바탕으로 Type I에서 Type V까지 다섯 개의 형태로 석순의 조직을 구분 하였다.

4. Type I 조직은 석순의 성장이 가장 느렸던 구간으로 성장선 사이의 평균 간격은 0.025 mm이다. Type II 조직의 성장선 사이의 평균 간격은 0.034 mm이며, Type III는 0.11 mm, Type IV는 0.14 mm, Type V는 0.42 mm이다. 이러한 결과는 석순이 성장하는 동안 유입되는 외부 강수량의 양과 관련이 깊으며, 석순의 조직적 특징 변화와 탄소동위원소 조성의 변화가 비교적 잘 일치하고 있어, 지화학적인 분석의 오류를 보완하는데 유용한 지시자로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 우라늄 계열을 이용한 연령분석결과 석순의 하부로부터 57.2 mm 지점에서 2741 ± 200 , 147.5 mm 지점에서 1950 ± 117 , 184 mm 지점에서 1332 ± 57 , 215.1 mm 지점에서 589 ± 107 yr BP로 나타났다. 석순의 최하부 연령자료가 부족하여 동굴상부 지표의 고토양층의 연령분석을 실시하였으며, 그 결과 4450 ± 30 yr BP로 측정 되었다. 탄산염사구가 퇴적 되어진 후에 식생의 발달 정도에 따라 고토양층이 생성되기 때문에 석순 또한 탄산염사구퇴적층이 생성된 이후부터 성장하였으므로 당처물동굴의 석순이 4450 ± 30 yr BP 전후로 성장한 것으로 판단 된다.

6. 석순의 고해상도 동위원소 분석결과 석순이 성장하는 동안 탄소동위원소 성분은 과거의 기후를 뚜렷하게 반영하여 변화를 보이지만, 석순의 산소동위원소 성분은 연구지역의 강수의 산소동위원소 분석에 알 수 있듯이 계절별, 태풍에 따라 다양한 변화를 보여 명확한 경향성을 보이지 않는다. 그렇기 때문에

탄소동위원소 성분 변화를 이용한 제주도의 고기후 복원이 유리할 것으로 생각된다.

7. 석순의 탄소동위원소 성분은 여러 고기후 지시자(proxy) 중에서도 북반구 $\Delta^{14}\text{C}$ 복원 기록과 가장 잘 일치하고 있다. 특히 지난 2000년 동안에 일어났던 태양 흑점활동이 극소기였던 Oort minimum, Wolf minimum, Spörer minimum, Maunder minimum, Dalton minimum 기록이 석순의 탄소동위원소 기록과 잘 일치 하고 있으며, 석순의 조직적 특징과도 비교적 일치하고 있다. 이처럼 극소기가 나타나는 구간은 태양 흑점활동이 활발하지 못했던 시기로 상대적으로 건조했던 기간으로 판단할 수 있다. 하지만 소빙하기에 해당하는 시기에는 탄소동위원소 변화의 진동 폭과 $\Delta^{14}\text{C}$ 기록의 진동 폭이 크게 관찰되는데 이는 상대적으로 건조한 시기이기는 하였지만 돌발적인 기후변화가 많이 일어났던 시기로 판단할 수 있다. 따라서 석순의 탄소동위원소 조성 변화에 과거에 일어났던 짧은 기간의 기후도 잘 반영되는 것으로 판단할 수 있다. 이처럼 당 처물동굴 석순의 탄소동위원소 성분은 북반구 태양활동의 변화량, 특히 태양흑점활동의 극소기와 잘 일치하고 있으며, 이에 따른 단주기의 기후변화도 잘 반영하는 것으로 판단된다. 이는 석순의 탄소동위원소가 태양활동에 따른 강수량, 식생의 번성, 그리고 C_3 과 C_4 식물의 상대적인 양의 변화에 의해 가장 큰 영향을 받게 되고, 동굴지표의 사구퇴적층 토양내 CO_2 농도의 변화가 석순에 잘 반영된 것으로 생각할 수 있다.

8. 석순 DC-1의 고해상도 안정동위원소 분석결과 석순이 성장하는 동안 탄소동위원소 값은 태양활동의 변화에 따른 북반구의 방사성탄소동위원소 변화량과 일치하는 경향성을 보였으며, 조직적인 특징 또한 이러한 지화학적 분석결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 기상청, 2012, <http://www.kma.go.kr>
- 우경식, 최돈원, 김련, 김진경, 2000, 제주도 당처물동굴 내 동굴생성물의 기원. 지질학회지, 35, 411-434.
- 우경식, 김련, 김진경, 최돈원, 조경남, 2004, 제주도 당처물동굴에서 발견되는 석주의 조직과 안정동위원소 결과: 고기후학적 의미. 지질학회지, 40, 133-144.
- 우경식, 2009, 용천동굴 종합학술조사 보고서, 138-182 p.
- 원종관, 이문원, 이동영, 손영관, 1993, 성산도폭 지질도 설명서. 제주도, 51-52 p.
- 이광식, 우남철, 김강주, 2001, 동북아시아강수의안정동위원소 구성에 영향을 주는 요인들. 지질학회지, 37, 183-192.
- 이광식, 이인성, 최만식, 박은주, 1997, 제주도 강수의 환경동위원소 연구. 지질학회지, 33, 139-147.
- 이광식, 장병욱, 1994, 우리나라 대전과 서울 지역 강수의 안정동위원소 성분. 지질학회지, 30, 475-485.
- 이광식, 정재일, 1997, 포항 강수의 안정동위원소 조성변화. 자원환경지질, 30, 321-325.
- 이호철, 박근필, 1996, 19세기 초 조선의 기후변동과 농업위기. 조선시대사학회, 1, 1-191.
- 임규호, 심태현, 2002, 조선왕조실록의 기상 현상 기록 빈도에 근거한 기후. 한국기상학회지, 38, 343-354.

- 전용문, 남지미동굴 종합학술보고서, 2011, 제주특별자치도, 10-16p.
- 조경남, 우경식, 김정찬, 양동윤, 2006a, 예텐동굴석순에 기록된 후기 플라이스 토세의 고기후 변화. 지질학회지, 42, 127-142.
- 조경남, 우경식, 김정찬, 양동윤, Wang, Yongjin, Edwards, R. Lawrence, Cheng, Hai, 2008, 삼척시 대이리 관음굴석순에 기록된 Dansgaard-Oeschger 기후변동. 지질학회지, 44, 795-802.
- 지효선, 우경식, 양동윤, 2010, 제주도 용천동굴 석순(YC-2)에 기록되어 있는 한반도의 소빙하기. 한국기상학회지, 20, 261-271.
- 지효선, 우경식, 조경남, Cheng, Hai, Edwards, R. Lawrence, 이상현, 2011, 제주도 용천동굴 석순(YC-2)의 조직적 특징을 이용한 지난 약 300년 동안의 고기후 변화 연구, 지질학회지, 47, 139-153.
- An, Z., Porter, S.C., Kutzbach, J.E., Wu, X.H., Wang, S.M., Liu, X.D., Li, X.Q., Zhou, W.J., 2000, Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon, Quat. Sci. Rev. 19, 743-762.
- Araguás-Aaraguás, L., Froehlich, K. and Rozanski, K., 1998, Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. Journal of Geophysical Research, 103, 28721-28742.
- Asmerom, Y., Polyak, V., Burns, S., Rasmussen, J., 2007, Solar forcing of Holocene climate: New insights from a speleothem record, southwestern United States. Geology Society of America, 35, 1-4.
- Baker, A., Smart, P.L., Edwards, R.L., and Richards, D.A., 1993, Annual growth banding in a cave stalagmite. Nature, 364, 518-520.
- Baker, A., Proctor, C.J., Barnes, W.L., 2002, Stalagmite lamina doublets: a 1000 year record of extreme winters in NW Scotland. international

- Journal of Climatology 22, 1339–1345.
- Broecker, W.S., Olson, E.A., Orr, P.C., 1960, Radiocarbon measurement and annual rings in cave formations. *Nature*, 185, 93–94.
- Cai, Y.J., Zhang, M., Peng, Z., Lin, Y., An, Z., Zhang, Z., Cao, Y., 2001, The $\delta^{18}\text{O}$ variation of a stalagmite from Qixing Cave, Guizhou Province and indicated climate change during the Holocene, *Chin. Sci. Bull.* 46, 1904–1908.
- Cayet, C., and E. Lichtfouse, 2001, d_{13}C of plant-derived n-alkanes in soil particle-size fractions. *Organic Geochemistry*, 32, 253–258.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Hoff, J., Gallup, C.D., Richards, D.A., and Asmeron, Y., 2000, The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chemical Geology*, 169, 17–33.
- Cosford, J., Qing, H.R., Eglington, B., Matty, D., Yuan, D.X., Zhang, M.L., Cheng, H., 2008, East Asian monsoon variability since the Mid-Holocene recorded in a high resolution, absolute-dated aragonite speleothem from eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 275, 296–307
- Cruz, F.W.Jr., Burns, S.J., Karmann, I., Sharp, W.D., Vuille, M., Cardoso, A.O., Ferrari, J.A., Silva Dias, P.L., and Viana, O.Jr., 2005, Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*, 434, 63–66.
- Davis, W. JR., 1977, Carbon-14 production in nuclear reactors, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Dorale, J.A., Edwards, R.L., Ito, E., and Gonzalez, L.A., 1998, Climate and vegetation history of the mid-continent from 75 to 25 Ka: A

- speleothem record from Crevice Cave, Missouri, USA. *Science*, 282, 1971–1874.
- Dorale, J.A., Gonzalez, L.A., Reagan, M.K., Pickett, D.A., Murrell, M.T., and Baker, R.G., 1992, A high-resolution record of holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water Cave, Northeast Iowa. *Science*, 258, 1626–1630.
- Dorale, J.A., Edwards, R.L., Onac, B.O., 2002, Stable isotopes as environmental indicators in speleothems. In: *Karst Processes and the Carbon Cycle*. Yuan, S. (Ed.), Final report of IGCP379. Geological mPublishing House, Beijing, pp. 107–120.
- Dykoski, C. A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Qing, J., An, Z., Revenaugh, J., 2005, A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 233, 71–86.
- Eddy, J. A., 1976, The maunder minimum. *Science*, 192, 1189–1202.
- Eddy, J. A., 1977a, The case of the missing sunspots. *Scientific American*, 236, 80–92.
- Edwards, R.L., Chen, J.H., and Wasserburg, G.L., 1987, ^{238}U – ^{234}U – ^{230}Th systematics and the precise measurement of time over the past 5000,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81, 175–192.
- Edwards, R.L., Beck, J.W., Burr, G.S., Donhue, D.J., Chappell, J.M.A., Bloom, A.L., Druffel, E.R.M., and Taylor, F.W., 1993, A large drop in atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and reduced melting in the Younger Drays, documented with ^{230}Th ages of corals. *Science*, 260, 962–968.
- Epstein, S. and Mayeda, T. K., 1953, Variation of ^{18}O content of waters

- from natural sources, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 213-224.
- Fairchild, I.J., Smith, C.L. Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F., and E.I.M.F., 2006, Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75, 105-153.
- Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., and Hubick, K.L., 1989, Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503-538.
- Fleitmann, D., Burns, S.J., Mudelsee, M., Neff, U. Kramers, J., Mangini, A., Matter, A., 2003, Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. *Science*, 300, 1737-1739.
- Fleitmann, D., Burns, S.J., Mangini, A., Mudelsee, M., Kramers, J., Villa, I., Neff, U., Al-Subbary, A.A., Buettner, A., Hippler, D., Matter, A., 2007, Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quat. Sci. Rev.* 26, 170-188.
- Gascoyne, M., Ford, D.C., and Schwarcz, H.P., 1983, Rates of cave and landform development in the Yorkshire Dales from speleothem age data. *Earth surface Processes and Landforms*. 8, 557-568.
- Gascoyne, M., Schwarcz, H.P., and Ford, D.C., 1980, A paleotemperature record for the mid-Wisconsin in Vancouver Island. *Nature*, 285, 474-476.
- Genty, D., 1993, Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites. Intérêt pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux, *Comptes Rendus del Academie des*

- Sciences Série II, Paris 317, 1229–1236.
- Genty, D., Quinif, Y., 1996, Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites importance for paleoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 275–288.
- Genty, D., Blamart, D., Quahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel, J., Van-Exter, S., 2003, Precise dating of Dansgaard-Oescher climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421, 833–837.
- Gowlett, J.A.J., 2001, Out in the cold. *Nature*, 413, 33–34.
- Henderson, G.M., 2006, Caving in to new chronologies. *Science*, 313, 620–622.
- Hening, G.J., Grun, R., and Brunnacker, K., 1983, Speleothems, travertines and paleoclimates. *Quaternary Research*, 20, 1–29.
- Hendy, C., 1971, The isotopic geochemistry of speleothems– I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 801–824.
- Hong, Y.T., Hong, B., Lin, Q.H., Shibata, Y., Hirota, M., Zhu, Y.X., Leng, X.T., Wang, Y., Wang, H., Yi, L., 2005, Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Nino. *Earth Planet. Sci. Lett.* 231, 337–346.
- Hulme, M., Zhao, Z.C., and Jiang, R., 1994, Recent and future climate change in East Asia. *Int. J. Climatol.*, 14, 637–658.

- Jo, K., Woo, K.S., Cheng, H., Edwards, R.L., Wang, Y.J., Kim, R. and Jiang, S., 2010a, Textural and carbon isotopic evidence of monsoonal changes recorded in a composite-type speleothem from Korea since MIS 5a. *Quaternary Research*, 74, 100–112.
- Jo, K., Woo, K.S., Lim, H.S., Cheng, H., Edwards, R.L., Wang, Y., Jiang, X., Kim, R., Lee, J.I., Yoon, H.I., Yoo, K., 2011, Holocene and Eemian climatic optima in the Korean Peninsula based on textural and carbon isotopic records from the stalagmite of the Daeya Cave, South Korea, *Quaternary Science Reviews*, 30, 1218–1231.
- Karl, T.R., and Easterling, D.R., 1999, Climate extremes; Selected review and future research directions. *Climatic Change*, 42, 309–325.
- Liu, W., Feng, X.H., Liu, Y., Zahang, Q., An, Z., 2004, $\delta^{18}\text{O}$ values of tree ring as a proxy of monsoon precipitation in arid Northwest China, *Chemical Geology*, 206, 73–80.
- Liu, W., Huang, Y. Z. An, S.C., Clemanes, L. Li, W.L., Prell, and Ning, Y., 2005, Summer monsoon intensity controls C4/C3 plant abundance during the last 35ka in the Chinese Loess Plateau: Carbon isotope evidence from bulk organic matter and individual leaf waxes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220, 243–253.
- Maris, E., 2007, Market takes a gamble on carbon futures. *Nature*, 448, 974–975.
- Martin-Chivelet, J., Munoz-Garcia, M.B, Edwards, R.L., Turrero, M.J., Ortega, A.I., 2011, Land surface temperature changes in Northern Iberia since 4000 yr BP, based on $\delta^{13}\text{C}$ of speleothems. *Global and Planetary*

- Change, 77, 1–12.
- Mcdermott, F., Matthey, D.P., and Hawkesworth, C., 2001, Centennial-scale holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from SW Ireland. *Science*, 294, 1328–1331.
- Mcdermott, F., 2004, Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23, 901–918.
- Morrison, J., Brockwell, T., Merren, T., Fourel, F., Phillips, A.M., 2001. On-line high precision stable hydrogen isotopic analyses on nanoliter water samples. *Analytical Chemistry* 73, 3570–3575.
- Paulsen, D.E., Hong-C. Li, and The-L. Ku, 2003, Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*, 22, 691–701.
- Pascotti, J., 2007, Deciphering Ancient Weather Reports, Drip by Drip. *Science*, 317, 448.
- Pape, J.R., Banner, J.L., Edward, R.L. Musgrove, M.L. Guilfoyle, A., 2010, *Journal of Hydrology*, 385, 203–215.
- Polyak, V.J., Asmeron, Y., 2001, Late Holocene climate and cultural changes in the Southwestern United States. *Science*, 294, 148–151.
- Proctor, C.J., Baker, A., Barnes, W.L., Gilmour, M.A., 2000, A thousand year speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland. *Climate Dynamics*, 16, 815–820.
- Proctor, C.J., Baker, A., Barnes, W.L., 2002, A three thousand year record of N Atlantic climate. *Climate Dynamics*, 19, 449–454.
- Reimer, P. J., Baillie, M. G., Bard, E., Bayliss, A., Beck, W., Bertrand, J.,

- Paul Blackwell, J., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, L. Fairbanks, R., Friedrich, M., Guilderson¹, T. P., Hogg, G., Hughen, A., Kromer, A., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C. B., Reimer, R. W., Remmele¹, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., Plicht, J. V., Weyhenmeyer, C. E., 2009, INTCAL09 AND MARINE09 RADIOCARBON AGE CALIBRATION, 0–50,000 YEARS CAL BP. RADIOCARBON, 51, 1111–1150.
- Sabadini, R., 2002, Ice sheet collapse and sea level change. *Science*, 295, 2376–2377.
- Schettler, G., Liu, Q., Mingram, J., Stebich, M., Dulski, P., 2006, East-Asian monsoon variability between 15000 and 2000 cal.yr BP recorded in varved sediments of Lake Sihailongwan (northeastern China, Long Gang volcanic field). *Holocene* 16, 1043–1057.
- Selvarak, K., Chen, C.T.A., Lou, J.-Y., 2007, Holocene East Asian monsoon variability: Links to solar and tropical Pacific forcing, *Geophys. Res. Lett.* 34, L01703.
- Shopov, Y.Y., Ford, D.C., Schwarz, H.P., 1994, Luminescent microbanding in speleothems high-resolution chronology and paleoclimate. *Geology*, 22, 407–410.
- Smith, C.L., Baker, A., Fairchild, I.J., Frisia, S. and Borsato, A., 2006, Reconstructing hemispheric-scale climates from multiple stalagmite records. *International Journal of climatology*, 26, 1417–1424.
- Stuiver, M., Braziunas, T.F., 1993, Sun, ocean climate and atmospheric ¹⁴CO₂: An evaluation of causal and spectral relationship. *The Holocene*,

3, 289–305.

- Stuiver, M., and Quay, P.D., 1980, Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science*, 207, 11–19.
- Tan, M., Liu, T.S., Hou, J.Z., Qin, X.G., Zhang, H.C., Li, T.Y., 2003, Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophysical Research Letters*, 30, 191–194.
- Taiz, L., and Zeiger, E., 2006, *Plant Physiology* 4/E. Sinauer Associates, 139–184 pp.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Dansgarrrd, W., and Grootes, P.M., 1986, The LIA as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, 234, 361–364.
- Thraikill, J., 1965, Studies in the excavation of limestone caves and the deposition of speleothem, unpublished Ph.D. dissertation, Princeton University, 193p.
- Thraikill, J., 1971, Carbonate deposition in Carlsbad Caverns. *Journal of Geology*, 79, 683–695.
- Tieszen, L.L., and Boutton, T.W., 1989, Stable carbon isotopes in terrestrial ecosystem research, in Rundel, P.W., et al., eds., *Stable isotopes in ecological research*. New York, Springer-Verlag, p. 167–195.
- Wang, H. and Follmer, L.R., 1998, Proxy of monsoon seasonality in carbon isotopes from paleosols of the southern Chinese Loess Plateau. *Geology*, 32, 337–340.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R., An, Z., Wu, J., Shen, C.-C., Dorale, J., 2001. A high-resolution absolute-dated late pleistocene monsoon

- record from Hulu Cave. China. Science 294, 2345–2348.
- Wang, Y., Chen, H., Edwards, R., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M., Dykoski, C., and Li, X., 2005, The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. Science, 308, 854–857.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jing, X., Wang, X., and An, Z., 2008, Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. nature, 451, 1090–1093.
- Williams, A. M., 1959, The formation and deposition of moonmilk, Trans. Cave Res. Group, Great Britain, 5, 133–138.
- Williams, A. M., 1966, Further investigation into bacterial and algal populations of caves in south Wales, International Journal of Speleology. 2, 389–395.
- Yancheva, G., Nowaczyk, N.R., Mingham, J., Dulski, P., Schettler, G., Negendank, J.F.W., Liu, J., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Haug, G.H., 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian Monsoon. Nature, 445, 74–77.
- Yuan, D., Cheng, H., Edwards, R.L., Dyoski, C.A., Kelly, M.J., Zhang, M., Qing, J., Lin, Y., Wang, Y., Wu, J., Dorale, J., An, Z., and Cai, Y., 2004, Timing duration and transitions of the last interglacial Asian monsoon. Science 304, 575–578.
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R.L., Chen, F., Wang, Y., Yang, X., Liu, J., Tan, M., Wang, X., Liu, J., An, C., Dai, Z., Zhou, J., Zhang, D., Jia, J., Jin, L., and Johnson, K.R., 2008, A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese Cave Record. Science, 322,

940–942.

Zhang, D., and Lu, L., 2007, Anti-correlation of summer/winter monsoons. *Nature*, 450, E7.

Zhao, K., Wang, Y., Edwards, R.L., Cheng, H., Liu, D., 2010, High-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records of Asian monsoon changes in central and southern China spanning the MIS 3/2 transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 191–198.

Appendix

Appendix 1. Carbon and oxygen isotope data for the stalagmite DC-1.

Length	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	Length	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
(mm)	(‰, VPDB)	(‰, VPDB)	(mm)	(‰, VPDB)	(‰, VPDB)
0.279	-5.44	-6.23	8.109	-6.11	-4.77
0.54	-5.67	-5.54	8.37	-6.31	-4.58
0.801	-5.59	-5.96	8.631	-5.99	-4.58
1.062	-6.22	-7.38	8.892	-5.99	-4.80
1.323	-6.14	-7.29	9.153	-6.31	-5.18
1.584	-6.22	-6.66	9.414	-6.27	-5.00
1.845	-5.78	-6.10	9.675	-5.98	-4.12
2.106	-6.08	-5.82	9.936	-5.38	-4.31
2.367	-6.11	-5.82	10.197	-5.91	-4.44
2.628	-6.36	-6.31	10.458	-6.26	-4.66
2.889	-6.28	-6.19	10.719	-5.67	-4.74
3.15	-5.90	-6.06	10.98	-5.91	-5.01
3.411	-6.25	-6.10	11.241	-6.15	-5.11
3.672	-5.85	-5.83	11.502	-5.86	-4.89
3.933	-5.48	-4.02	11.763	-6.14	-5.40
4.194	-5.49	-4.02	12.024	-6.09	-5.61
4.455	-5.97	-4.98	12.285	-5.70	-5.57
4.716	-5.97	-4.57	12.546	-5.77	-5.45
4.977	-6.11	-4.53	12.807	-5.84	-5.81
5.238	-6.35	-4.66	13.068	-6.07	-5.32
5.499	-6.21	-4.42	13.329	-6.23	-5.36
5.76	-5.70	-3.63	13.59	-6.05	-5.12
6.021	-5.73	-3.69	13.851	-6.39	-5.64
6.282	-5.89	-3.97	14.112	-6.31	-5.45
6.543	-5.73	-4.42	14.373	-6.34	-5.02
6.804	-5.73	-4.52	14.634	-5.99	-4.84
7.065	-5.60	-4.58	14.895	-6.21	-4.70
7.326	-5.86	-4.94	15.156	-5.75	-4.60
7.587	-6.01	-5.20	15.417	-5.77	-4.72
7.848	-5.84	-5.17	15.678	-6.22	-4.61

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)
15.939	-6.04	-4.37	23.769	-5.64	-6.08
16.2	-5.84	-3.98	24.03	-5.87	-7.45
16.461	-6.24	-3.96	24.291	-5.30	-6.25
16.722	-6.35	-4.02	24.552	-4.99	-4.56
16.983	-6.11	-4.05	24.813	-6.31	-4.06
17.244	-6.14	-4.07	25.074	-6.50	-4.46
17.505	-6.22	-3.85	25.335	-6.63	-4.99
17.766	-6.02	-4.28	25.596	-6.71	-3.63
18.027	-6.25	-4.10	25.857	-6.21	-3.53
18.288	-6.51	-4.22	26.118	-6.34	-3.86
18.549	-6.60	-4.17	26.379	-6.31	-3.97
18.81	-6.24	-3.97	26.64	-5.79	-3.73
19.071	-5.67	-3.48	26.901	-6.75	-3.92
19.332	-5.98	-3.75	27.162	-6.09	-4.22
19.593	-5.75	-3.99	27.423	-6.45	-4.35
19.854	-5.15	-4.10	27.684	-7.12	-4.56
20.115	-5.65	-4.82	27.945	-6.88	-4.67
20.376	-5.61	-4.96	28.206	-6.33	-4.81
20.637	-5.62	-4.73	28.467	-6.34	-4.90
20.898	-6.30	-4.64	28.728	-6.26	-4.86
21.159	-5.23	-4.34	28.989	-6.91	-4.71
21.42	-5.55	-4.55	29.25	-7.49	-4.66
21.681	-5.17	-4.14	29.511	-6.52	-4.63
21.942	-5.51	-4.27	29.772	-6.33	-4.56
22.203	-6.38	-4.59	30.033	-5.97	-4.25
22.464	-5.97	-4.14	30.294	-5.46	-4.47
22.725	-5.74	-4.72	30.555	-5.35	-4.54
22.986	-5.26	-4.73	30.816	-5.38	-4.51
23.247	-6.02	-5.37	31.077	-6.00	-4.63
23.508	-6.47	-6.03	31.338	-5.56	-4.52

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)
31.599	-5.67	-4.52	39.429	-5.96	-4.83
31.86	-5.09	-4.64	39.69	-5.84	-4.81
32.121	-5.23	-5.00	39.951	-6.16	-4.84
32.382	-6.21	-4.96	40.212	-5.88	-4.83
32.643	-5.88	-4.87	40.473	-6.32	-4.36
32.904	-5.86	-4.69	40.734	-6.08	-3.99
33.165	-6.15	-4.71	40.995	-5.68	-2.72
33.426	-6.21	-4.26	41.256	-5.63	-4.01
33.687	-6.38	-4.45	41.517	-5.34	-4.15
33.948	-5.94	-4.74	41.778	-5.23	-4.54
34.209	-5.93	-4.61	42.039	-5.98	-4.49
34.47	-6.62	-4.65	42.3	-5.97	-4.24
34.731	-6.62	-4.59	42.561	-5.72	-4.11
34.992	-6.33	-4.52	42.822	-5.53	-4.49
35.253	-5.35	-3.93	43.083	-5.91	-4.49
35.514	-6.46	-3.89	43.344	-6.76	-4.31
35.775	-7.12	-3.52	43.605	-6.99	-4.46
36.036	-6.20	-3.47	43.866	-6.05	-4.50
36.297	-5.96	-3.49	44.127	-5.60	-4.17
36.558	-5.58	-3.65	44.388	-5.40	-4.44
36.819	-6.05	-3.65	44.649	-6.09	-7.69
37.08	-6.08	-4.07	44.91	-5.78	-8.48
37.341	-7.01	-4.23	45.171	-5.84	-8.50
37.602	-6.73	-4.39	45.432	-6.14	-9.63
37.863	-5.80	-4.83	45.693	-6.39	-9.62
38.124	-6.42	-4.97	45.954	-7.96	-8.88
38.385	-6.74	-5.34	46.215	-6.08	-6.10
38.646	-5.95	-5.04	46.476	-5.87	-6.22
38.907	-5.92	-4.94	46.737	-6.33	-6.56
39.168	-5.83	-4.88	46.998	-6.24	-7.79

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
47.259	-6.04	-7.20	55.089	-5.49	-9.65
47.52	-4.84	-6.56	55.35	-5.68	-9.42
47.781	-6.01	-6.80	55.611	-6.42	-9.10
48.042	-5.96	-7.09	55.872	-6.42	-8.69
48.303	-6.79	-7.55	56.133	-6.02	-8.94
48.564	-5.53	-7.74	56.394	-6.98	-9.21
48.825	-5.40	-7.60	56.655	-6.38	-9.33
49.086	-5.70	-8.57	56.916	-6.77	-9.45
49.347	-6.05	-8.64	57.177	-7.18	-9.53
49.608	-6.41	-8.60	57.438	-6.55	-9.38
49.869	-5.68	-8.92	57.699	-6.98	-9.53
50.13	-5.54	-8.78	57.96	-7.04	-9.02
50.391	-5.81	-8.61	58.221	-5.92	-9.23
50.652	-5.64	-8.99	58.482	-6.80	-8.87
50.913	-5.27	-9.10	58.743	-6.23	-9.03
51.174	-5.96	-8.94	59.004	-5.58	-8.79
51.435	-6.29	-8.99	59.265	-5.73	-8.75
51.696	-5.78	-8.72	59.526	-6.16	-8.81
51.957	-4.84	-8.61	59.787	-5.34	-8.89
52.218	-5.26	-8.48	60.048	-5.41	-8.72
52.479	-5.58	-8.52	60.309	-6.37	-8.27
52.74	-5.31	-8.59	60.57	-6.27	-8.29
53.001	-5.21	-8.86	60.831	-6.54	-8.37
53.262	-5.91	-8.85	61.092	-7.00	-8.31
53.523	-5.97	-8.95	61.353	-6.28	-7.80
53.784	-5.48	-8.94	61.614	-4.92	-7.84
54.045	-5.28	-8.83	61.875	-4.65	-7.16
54.306	-5.92	-8.81	62.136	-5.11	-7.18
54.567	-6.37	-8.91	62.397	-4.62	-6.23
54.828	-5.30	-8.96	62.658	-5.76	-8.02

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
62.919	-5.96	-8.93	70.749	-5.96	-9.46
63.18	-5.85	-8.83	71.01	-5.74	-8.62
63.441	-5.99	-9.02	71.271	-6.09	-9.19
63.702	-5.66	-9.04	71.532	-6.70	-9.81
63.963	-5.75	-8.74	71.793	-6.49	-9.46
64.224	-6.10	-8.45	72.054	-7.48	-9.66
64.485	-6.27	-7.92	72.315	-6.66	-9.23
64.746	-6.36	-7.79	72.576	-6.15	-9.24
65.007	-6.53	-7.81	72.837	-5.50	-9.37
65.268	-5.84	-8.10	73.098	-7.03	-9.59
65.529	-5.32	-8.30	73.359	-6.34	-9.65
65.79	-5.10	-8.12	73.62	-6.61	-9.76
66.051	-5.18	-7.61	73.881	-6.56	-10.03
66.312	-5.52	-7.66	74.142	-5.41	-9.92
66.573	-5.24	-7.26	74.403	-6.02	-10.01
66.834	-5.80	-7.40	74.664	-6.83	-10.34
67.095	-6.11	-7.16	74.925	-6.46	-9.91
67.356	-5.64	-6.06	75.186	-6.84	-9.96
67.617	-6.01	-6.56	75.447	-7.10	-10.24
67.878	-6.38	-6.60	75.708	-6.96	-10.06
68.139	-5.66	-7.10	75.969	-7.33	-10.47
68.4	-5.71	-8.04	76.23	-6.60	-10.10
68.661	-6.09	-8.42	76.491	-6.63	-9.67
68.922	-5.26	-7.16	76.752	-7.28	-9.48
69.183	-5.36	-7.37	77.013	-6.14	-9.30
69.444	-5.34	-5.98	77.274	-6.32	-9.06
69.705	-6.12	-7.59	77.535	-7.35	-8.88
69.966	-6.29	-9.57	77.796	-6.09	-9.07
70.227	-5.72	-9.83	78.057	-5.62	-9.67
70.488	-6.11	-10.00	78.318	-5.88	-9.09

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
78.579	-5.65	-9.27	86.409	-6.17	-9.32
78.84	-5.27	-9.25	86.67	-5.79	-9.08
79.101	-4.95	-9.51	86.931	-5.35	-8.98
79.362	-5.36	-9.87	87.192	-5.25	-8.85
79.623	-6.45	-10.15	87.453	-5.47	-8.64
79.884	-6.98	-10.50	87.714	-5.35	-8.77
80.145	-6.51	-10.31	87.975	-6.37	-8.97
80.406	-7.05	-10.03	88.236	-6.30	-9.06
80.667	-6.57	-9.86	88.497	-6.42	-9.10
80.928	-6.28	-9.71	88.758	-6.57	-8.94
81.189	-5.42	-9.62	89.019	-6.48	-9.08
81.45	-5.69	-9.69	89.28	-6.66	-9.04
81.711	-5.41	-9.59	89.541	-6.71	-9.03
81.972	-5.96	-9.71	89.802	-6.71	-9.21
82.233	-5.88	-9.75	90.063	-7.58	-9.17
82.494	-5.59	-9.90	90.324	-7.25	-8.86
82.755	-5.41	-9.84	90.585	-6.57	-8.86
83.016	-5.53	-9.90	90.846	-6.17	-9.37
83.277	-5.88	-10.08	91.107	-5.84	-9.56
83.538	-5.57	-9.92	91.368	-5.92	-9.83
83.799	-5.91	-9.93	91.629	-5.70	-9.55
84.06	-6.33	-9.93	91.89	-5.75	-9.62
84.321	-6.60	-9.92	92.151	-5.35	-9.67
84.582	-7.50	-10.22	92.412	-4.64	-9.73
84.843	-6.01	-9.49	92.673	-5.35	-9.62
85.104	-5.68	-9.66	92.934	-5.93	-9.77
85.365	-5.73	-9.48	93.195	-6.17	-9.41
85.626	-5.93	-9.81	93.456	-5.32	-9.67
85.887	-6.50	-9.71	93.717	-5.36	-9.96
86.148	-6.66	-9.69	93.978	-5.59	-10.31

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
94.239	-6.02	-10.26	102.069	-6.65	-10.89
94.5	-5.73	-10.56	102.33	-6.12	-10.95
94.761	-8.15	-10.33	102.591	-5.57	-10.85
95.022	-6.83	-10.51	102.852	-6.06	-11.49
95.283	-6.17	-10.62	103.113	-6.73	-11.50
95.544	-5.88	-10.55	103.374	-6.43	-11.13
95.805	-6.09	-10.61	103.635	-6.21	-11.18
96.066	-5.95	-10.77	103.896	-6.25	-10.97
96.327	-6.39	-11.20	104.157	-6.29	-10.69
96.588	-6.04	-10.98	104.418	-6.19	-10.83
96.849	-5.68	-11.18	104.679	-5.63	-10.56
97.11	-5.76	-10.78	104.94	-5.06	-10.07
97.371	-6.10	-10.00	105.201	-5.54	-9.79
97.632	-6.07	-10.23	105.462	-5.52	-10.08
97.893	-5.79	-9.79	105.723	-5.51	-10.10
98.154	-5.67	-9.99	105.984	-5.57	-10.29
98.415	-6.37	-10.36	106.245	-5.29	-10.27
98.676	-6.16	-10.33	106.506	-5.37	-9.82
98.937	-6.78	-10.76	106.767	-5.31	-9.53
99.198	-5.71	-10.76	107.028	-5.16	-9.35
99.459	-5.18	-10.54	107.289	-5.86	-10.21
99.72	-6.04	-10.38	107.55	-4.69	-10.07
99.981	-6.08	-10.57	107.811	-5.34	-10.27
100.242	-5.99	-10.55	108.072	-5.00	-10.39
100.503	-6.32	-10.77	108.333	-5.97	-10.68
100.764	-6.40	-10.80	108.594	-6.27	-10.63
101.025	-6.03	-10.61	108.855	-5.55	-10.45
101.286	-5.19	-10.70	109.116	-5.87	-10.53
101.547	-5.23	-10.77	109.377	-6.06	-10.26
101.808	-6.13	-10.89	109.638	-5.51	-10.45

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
109.899	-5.12	-10.69	117.729	-5.52	-9.77
110.16	-5.76	-10.73	117.99	-5.20	-9.69
110.421	-6.36	-10.57	118.251	-5.95	-9.64
110.682	-5.49	-10.69	118.512	-5.34	-9.68
110.943	-5.45	-10.32	118.773	-5.54	-9.67
111.204	-5.92	-10.40	119.034	-5.82	-9.84
111.465	-6.92	-11.06	119.295	-5.80	-9.96
111.726	-5.66	-10.83	119.556	-6.14	-9.97
111.987	-5.14	-10.88	119.817	-6.01	-9.96
112.248	-5.14	-10.70	120.078	-6.52	-10.19
112.509	-5.64	-10.75	120.339	-6.23	-10.30
112.77	-6.05	-10.66	120.6	-5.60	-10.15
113.031	-5.97	-10.64	120.861	-5.41	-10.17
113.292	-5.75	-10.44	121.122	-6.40	-10.48
113.553	-5.19	-10.43	121.383	-5.77	-10.54
113.814	-5.95	-10.73	121.644	-5.71	-10.79
114.075	-6.50	-10.16	121.905	-5.55	-10.75
114.336	-6.36	-10.70	122.166	-5.62	-10.72
114.597	-6.55	-10.78	122.427	-5.41	-10.63
114.858	-5.44	-9.98	122.688	-5.22	-10.85
115.119	-6.14	-10.09	122.949	-5.48	-10.85
115.38	-6.83	-10.22	123.21	-5.86	-10.70
115.641	-6.39	-10.20	123.471	-5.76	-10.70
115.902	-5.88	-10.29	123.732	-5.70	-10.73
116.163	-5.77	-10.17	123.993	-5.36	-10.83
116.424	-5.92	-9.66	124.254	-5.20	-10.70
116.685	-6.40	-10.06	124.515	-4.99	-10.61
116.946	-5.46	-9.87	124.776	-4.98	-10.38
117.207	-5.72	-9.81	125.037	-4.95	-10.25
117.468	-5.61	-9.55	125.298	-5.47	-9.99

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
125.559	-5.49	-10.04	133.389	-4.77	-10.10
125.82	-5.50	-10.12	133.65	-4.82	-10.07
126.081	-5.39	-10.25	133.911	-5.00	-10.31
126.342	-5.23	-10.20	134.172	-5.25	-10.06
126.603	-5.37	-10.63	134.433	-5.62	-10.13
126.864	-5.81	-11.04	134.694	-5.65	-10.01
127.125	-6.17	-11.17	134.955	-6.33	-9.91
127.386	-5.83	-10.86	135.216	-5.66	-10.26
127.647	-5.76	-9.76	135.477	-5.27	-10.39
127.908	-6.03	-10.69	135.738	-4.96	-10.40
128.169	-4.98	-11.32	135.999	-4.95	-10.58
128.43	-5.87	-10.71	136.26	-5.10	-10.47
128.691	-7.24	-10.66	136.521	-5.44	-10.55
128.952	-7.75	-10.74	136.782	-5.66	-10.75
129.213	-7.20	-10.72	137.043	-5.63	-10.83
129.474	-6.05	-10.42	137.304	-5.75	-11.00
129.735	-5.69	-10.42	137.565	-6.22	-11.14
129.996	-5.54	-10.68	137.826	-5.90	-10.72
130.257	-5.49	-10.65	138.087	-5.75	-10.58
130.518	-5.90	-11.38	138.348	-6.12	-10.63
130.779	-5.76	-11.47	138.609	-5.99	-10.51
131.04	-5.83	-11.27	138.87	-5.73	-10.56
131.301	-5.50	-11.21	139.131	-5.69	-10.32
131.562	-6.10	-10.85	139.392	-5.52	-10.62
131.823	-5.88	-10.74	139.653	-5.65	-10.58
132.084	-5.45	-10.71	139.914	-5.29	-10.51
132.345	-5.21	-10.51	140.175	-5.39	-10.63
132.606	-4.97	-10.39	140.436	-5.71	-10.87
132.867	-5.07	-10.16	140.697	-6.13	-10.87
133.128	-5.37	-10.11	140.958	-6.10	-11.04

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
141.219	-5.72	-11.32	149.049	-6.92	-9.82
141.48	-6.05	-10.94	149.31	-6.28	-9.87
141.741	-5.95	-11.10	149.571	-6.83	-9.79
142.002	-6.33	-10.86	149.832	-6.43	-9.89
142.263	-5.88	-10.44	150.093	-5.57	-10.60
142.524	-6.04	-10.26	150.354	-5.25	-10.79
142.785	-6.74	-10.29	150.615	-5.77	-11.06
143.046	-6.42	-10.07	150.876	-6.31	-10.93
143.307	-6.04	-10.25	151.137	-6.64	-11.01
143.568	-6.15	-10.37	151.398	-5.88	-11.14
143.829	-6.58	-10.35	151.659	-6.04	-11.05
144.09	-6.31	-10.16	151.92	-5.87	-10.88
144.351	-6.01	-9.93	152.181	-5.70	-10.98
144.612	-6.40	-9.91	152.442	-6.05	-10.92
144.873	-6.51	-10.09	152.703	-7.17	-11.31
145.134	-6.79	-10.52	152.964	-6.06	-10.97
145.395	-6.08	-10.11	153.225	-5.71	-11.09
145.656	-6.14	-8.47	153.486	-5.70	-10.44
145.917	-7.06	-6.73	153.747	-5.16	-10.54
146.178	-6.86	-7.48	154.008	-4.88	-10.74
146.439	-5.96	-7.92	154.269	-5.28	-11.07
146.7	-5.85	-8.19	154.53	-5.45	-10.80
146.961	-6.69	-8.71	154.791	-5.89	-11.05
147.222	-6.48	-8.53	155.052	-5.41	-10.90
147.483	-6.38	-8.71	155.313	-5.68	-10.73
147.744	-5.98	-8.96	155.574	-5.49	-10.48
148.005	-5.83	-9.02	155.835	-5.75	-10.62
148.266	-5.86	-9.12	156.096	-4.76	-10.07
148.527	-6.38	-9.18	156.357	-5.09	-9.87
148.788	-6.68	-9.53	156.618	-4.98	-10.36

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
156.879	-4.95	-10.68	164.709	-4.83	-11.00
157.14	-4.91	-10.89	164.97	-5.54	-10.93
157.401	-4.80	-10.73	165.231	-5.96	-10.76
157.662	-5.18	-10.69	165.492	-5.88	-10.77
157.923	-5.32	-10.37	165.753	-6.56	-11.14
158.184	-5.87	-10.39	166.014	-5.77	-10.97
158.445	-5.96	-10.39	166.275	-6.04	-11.02
158.706	-5.71	-10.78	166.536	-6.26	-11.54
158.967	-5.58	-10.85	166.797	-5.94	-11.69
159.228	-5.75	-10.39	167.058	-6.38	-11.82
159.489	-5.95	-10.30	167.319	-5.77	-11.72
159.75	-5.55	-10.23	167.58	-5.75	-11.69
160.011	-4.93	-10.03	167.841	-5.80	-11.77
160.272	-5.04	-10.32	168.102	-5.70	-11.57
160.533	-4.93	-10.47	168.363	-5.91	-11.70
160.794	-5.15	-10.06	168.624	-6.28	-11.69
161.055	-5.43	-9.95	168.885	-5.99	-11.63
161.316	-5.21	-9.70	169.146	-5.34	-11.38
161.577	-5.29	-10.02	169.407	-6.05	-11.96
161.838	-5.58	-10.42	169.668	-6.47	-12.14
162.099	-5.76	-10.45	169.929	-6.91	-11.88
162.36	-5.93	-10.33	170.19	-5.97	-11.71
162.621	-5.45	-10.38	170.451	-5.65	-11.77
162.882	-5.27	-10.79	170.712	-4.83	-11.69
163.143	-5.22	-10.70	170.973	-4.63	-11.57
163.404	-5.99	-10.80	171.234	-5.73	-11.36
163.665	-5.42	-10.54	171.495	-6.23	-11.33
163.926	-5.91	-10.70	171.756	-5.75	-11.34
164.187	-5.41	-10.79	172.017	-6.11	-11.37
164.448	-5.43	-10.91	172.278	-5.65	-10.94

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
172.539	-5.82	-10.86	180.369	-5.32	-11.01
172.8	-5.29	-10.66	180.63	-5.31	-11.13
173.061	-5.88	-11.18	180.891	-5.27	-11.16
173.322	-4.76	-10.75	181.152	-6.01	-11.36
173.583	-4.92	-10.80	181.413	-5.86	-11.32
173.844	-4.92	-10.72	181.674	-5.74	-11.32
174.105	-5.43	-10.58	181.935	-5.89	-11.06
174.366	-5.51	-10.62	182.196	-5.65	-11.12
174.627	-5.19	-10.49	182.457	-5.99	-10.60
174.888	-5.89	-10.72	182.718	-5.99	-10.69
175.149	-6.15	-10.77	182.979	-5.73	-10.51
175.41	-5.94	-10.65	183.24	-5.74	-10.35
175.671	-6.25	-10.62	183.501	-5.01	-10.06
175.932	-5.66	-10.82	183.762	-5.40	-9.94
176.193	-5.47	-10.87	184.023	-5.84	-10.44
176.454	-5.66	-11.36	184.284	-5.84	-10.43
176.715	-5.42	-10.85	184.545	-6.31	-10.59
176.976	-5.58	-10.90	184.806	-5.81	-10.28
177.237	-5.34	-10.94	185.067	-5.81	-10.21
177.498	-5.48	-10.84	185.328	-5.98	-10.13
177.759	-6.02	-10.59	185.589	-5.33	-10.32
178.02	-6.05	-10.74	185.85	-5.27	-10.36
178.281	-5.74	-11.10	186.111	-5.41	-10.44
178.542	-6.05	-10.64	186.372	-5.59	-10.49
178.803	-6.42	-10.46	186.633	-5.18	-10.38
179.064	-5.86	-11.05	186.894	-5.29	-10.02
179.325	-5.91	-11.06	187.155	-5.27	-10.40
179.586	-5.79	-10.79	187.416	-5.25	-10.12
179.847	-5.45	-10.93	187.677	-5.58	-10.13
180.108	-5.40	-10.90	187.938	-6.21	-9.91

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
188.199	-5.96	-10.27	196.029	-6.45	-10.63
188.46	-4.69	-9.40	196.29	-5.63	-11.13
188.721	-4.81	-9.28	196.551	-6.00	-11.21
188.982	-5.11	-9.59	196.812	-6.14	-10.62
189.243	-5.54	-10.18	197.073	-6.48	-10.66
189.504	-5.40	-9.96	197.334	-6.47	-10.79
189.765	-5.35	-10.14	197.595	-6.09	-10.67
190.026	-5.48	-9.70	197.856	-5.99	-10.12
190.287	-5.55	-9.29	198.117	-6.07	-9.91
190.548	-5.07	-9.38	198.378	-5.91	-9.81
190.809	-5.04	-9.25	198.639	-5.74	-9.06
191.07	-4.89	-9.42	198.9	-5.35	-8.77
191.331	-5.24	-9.81	199.161	-5.66	-9.20
191.592	-5.60	-10.08	199.422	-5.12	-8.60
191.853	-6.00	-10.40	199.683	-4.82	-8.84
192.114	-5.73	-10.50	199.944	-5.00	-8.60
192.375	-6.10	-10.41	200.205	-4.99	-8.74
192.636	-5.62	-9.79	200.466	-4.94	-8.87
192.897	-5.10	-10.21	200.727	-5.28	-8.81
193.158	-5.28	-9.92	200.988	-5.76	-8.99
193.419	-5.53	-10.12	201.249	-5.85	-9.85
193.68	-6.06	-10.33	201.51	-5.43	-9.31
193.941	-6.09	-10.29	201.771	-5.99	-9.50
194.202	-5.99	-10.58	202.032	-5.79	-9.56
194.463	-6.11	-10.48	202.293	-5.40	-9.73
194.724	-5.42	-10.04	202.554	-5.40	-9.79
194.985	-4.88	-10.10	202.815	-4.94	-9.27
195.246	-5.16	-9.66	203.076	-5.01	-9.35
195.507	-5.74	-10.36	203.337	-5.42	-9.70
195.768	-6.23	-9.15	203.598	-5.55	-9.14

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)	Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰,VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰,VPDB)
203.859	-4.69	-8.34	211.689	-6.50	-8.88
204.12	-5.71	-9.19	211.95	-6.55	-8.41
204.381	-5.51	-9.53	212.211	-6.38	-7.73
204.642	-5.29	-9.61	212.472	-6.51	-7.11
204.903	-5.01	-9.59	212.733	-6.65	-7.51
205.164	-5.07	-9.37	212.994	-6.81	-6.83
205.425	-5.69	-9.70	213.255	-7.33	-7.36
205.686	-5.66	-10.05	213.516	-7.54	-6.52
205.947	-5.78	-9.81	213.777	-7.04	-6.09
206.208	-5.71	-10.23	214.038	-7.36	-6.38
206.469	-5.25	-10.36	214.299	-7.79	-7.06
206.73	-5.89	-10.20	214.56	-6.76	-6.79
206.991	-5.87	-10.18	214.821	-6.94	-6.50
207.252	-6.00	-10.20	215.082	-7.35	-6.08
207.513	-6.81	-10.50	215.343	-6.87	-5.56
207.774	-6.44	-10.39	215.604	-7.31	-6.06
208.035	-6.15	-8.98	215.865	-7.36	-6.81
208.296	-6.71	-6.95	216.126	-7.33	-7.08
208.557	-6.53	-7.44	216.387	-6.98	-6.74
208.818	-6.63	-8.40	216.648	-7.12	-5.73
209.079	-7.39	-7.97	216.909	-7.59	-5.56
209.34	-7.21	-6.84	217.17	-7.64	-4.35
209.601	-6.17	-7.39	217.431	-7.50	-4.33
209.862	-6.51	-7.81	217.692	-7.23	-5.52
210.123	-6.52	-8.19	217.953	X	X
210.384	-6.45	-8.78	218.214	-7.11	-5.11
210.645	-6.59	-9.76	218.475	-6.30	-5.56
210.906	-6.78	-9.68	218.736	-6.59	-4.97
211.167	-6.73	-9.23	218.997	-6.64	-4.31
211.428	-6.78	-8.86	219.258	-6.77	-4.49

Appendix 1. Continued.

Length (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)
219.519	-7.30	-4.60
219.78	-6.88	-4.38
220.041	-7.56	-4.19
220.302	-6.43	-5.69
220.563	-6.75	-6.81
220.824	-7.33	-7.34
221.085	-7.26	-6.58
221.346	-7.13	-7.22
221.607	-6.79	-7.16
221.868	-6.77	-8.13
222.129	-6.73	-6.72
222.39	-6.75	-7.67
222.651	-6.75	-7.83
222.912	-7.03	-8.58
223.173	-5.85	-9.27
223.434	-6.15	-9.44
223.695	-6.28	-9.54
223.956	-7.12	-9.68
224.217	-6.42	-10.75
224.478	-5.95	-11.22
224.739	-5.79	-11.61
225	-6.18	-11.96

Late Holocene paleoclimate reconstructions using the
textural and geochemical compositions of the stalagmite
(DC-1) from the Dangcheomul Cave, Jeju Island.

Hong, Seok-Woo

Department of Geology

ABSTRACT

Dangcheomul Cave is a lava tube cave located in northeastern part of Jeju Island, but contains numerous carbonate speleothems due to overlying carbonate dune sands. Because this cave is located very close to the surface and intimately affected by climate changes outside, the stalagmite in this cave can be used as a good paleoclimate proxy. Late Holocene paleoclimate changes were inferred based on uranium-series dating, textural characteristics and geochemical compositions of the 225 mm-long DC-1 stalagmite by comparing with coeval Northern Hemispheric $\Delta^{14}\text{C}$ record by solar activity.

Based on $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating, four age data were obtained from the bottom of the stalagmite (2,741 \pm 200 yr BP from 57.2 mm, 1,950 \pm 117 yr BP from 184 mm, 1,332 \pm 57 yr BP from 215.1 mm and 589 \pm 107 yr BP from 215.1

mm). The radiocarbon age of the paleosol layer within overlying carbonate sand dune is $4,450 \pm 30$ yr BP. Because this paleosol was developed after the deposition of carbonate sands in this area, the growth of stalagmite should have started to grow after $4,450 \pm 30$ yr BP.

The stalagmite DC-1 is composed of columnar calcite, and numerous growth laminae are present. The density of the growth laminae is indicative of the amount rainfall in this region. Therefore, five types of calcite texture can be divided based on growth rate, spacing between laminae and fluid inclusion density. Type I has the average spacing of growth laminae of 0.025 mm and the narrowest spacing indicates the slowest growth rate whereas Type V has the widest spacing of 0.42 mm indicating the fastest growth rate. It appears that the spacing of growth laminae is intimately related to the amount of rainfall together with carbon isotopic compositions. Thus, coordinated textural and geochemical data can be used for paleoclimatic reconstruction.

Stable isotope data show that carbon isotope values clearly demonstrate the climatic changes during the growth of the DC-1 stalagmite, however interpretation of oxygen isotope data is still problematic. It is especially notable that carbon isotopic compositions of the stalagmite correspond very well to Northern Hemispheric $\Delta^{14}\text{C}$ record. Carbon isotope trend coincides very excellently with sun spot activities for the past 2000 years showing the close relationship between the abrupt decrease in $\delta^{13}\text{C}$ values together with textural results and the minimal periods of solar activities (Oort minimum, Wolf minimum, Spörer minimum, Maunder minimum, and Dalton minimum). Periods of low solar activities are thought to result in dry

climate. Also, carbon isotope values and $\Delta^{14}\text{C}$ records are highly fluctuating during the Little Ice Age, and this period is also characterized by more abundant abrupt climate changes under drier climate. Thus, it appears that past short-term climate changes are also well reflected from carbon isotope compositions of the stalagmite DC-1.