

제주도 용천동굴에서 성장한 석순 내 미량원소 성분을 이용한 지난 600년 동안의 고기후 변화 연구

우경식¹ · 조경남^{2,*} · 이상현² · 양동윤² · Li, H.-C.³

¹강원대학교 지질학과

²한국지질자원연구원

³National Taiwan University, Taiwan

요 약

이 연구는 석회장식 용암동굴인 용천동굴 내에서 성장하고 있던 석순(YC-1) 상부의 미량원소 성분을 이용하여 지난 약 600년 동안 한반도에 영향을 미친 고기후 변화를 알아보기 위하여 수행되었다. YC-1 최상부 2 cm 구간에서 실시한 excess ²¹⁰Pb 연령분석 결과, 이 석순의 성장률은 0.033 mm/yr로 나타났으며, 이러한 성장률은 석순 내부에서 관찰되는 성장띠의 간격(0.02~0.07 mm)으로 추정된 성장률과 유사한 결과로 판단된다. 따라서 석순의 연령은 excess ²¹⁰Pb 연령분석 결과를 이용하여 추정하였다. YC-1의 Mg/Ca, Sr/Ca 과 P/Ca비의 성분을 고해상도로 분석한 결과 석순 성장기간 동안의 변화는 세부적으로 약간의 차이가 나지만, 이들은 모두 약 19세기 후반부터 증가되는 경향을 보여준다. 이렇게 세 원소가 모두 같은 경향을 보이는 것은 이들이 소빙기(Little Ice Age)에서 현세온난기(Current Warm Period)에 이르는 기후변화를 반영한 것이라 생각된다. 즉 소빙하기 이후에 평균 기온과 강수량의 상승으로 풍화대 내에 포함되어 있던 P 성분이 동굴 속으로 더 많이 유입되고, 동굴 상부에 퇴적되어 있는 사구퇴적물이 풍화대 내에서 더 활발히 용해될 수 있는 조건을 제공하여 동굴로 유입되는 지하수의 성분 속에 Mg/Ca와 Sr/Ca의 비가 증가하였기 때문이다. 이러한 연구결과는 국내 동굴생성물 석순 내의 미량원소 성분이 고기후 연구를 위해 사용될 수 있는 좋은 지시자(proxy)가 될 수 있다는 것을 의미한다.

주요어: 석순, 미량원소, 용천동굴, 제주도, 홀로세, 고기후

Kyung Sik Woo, Kyoung-nam Jo, Sangheon Yi, Dong Yoon Yang and Hong-Chun Li, 2013, Paleoclimatic investigation using trace elemental compositions of the YC-1 stalagmite, Yeongcheon Cave, Jeju Island, Korea for the past 600 years. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 3, p. 325-337

ABSTRACT: Trace elements of the stalagmite (YC-1) in Yongcheon Cave (lime-decorated lava tube cave) were investigated to delineate paleoclimatic history near the Korean Peninsula for about the past 600 years. Using excess ²¹⁰Pb dating method from the upper 2 cm interval of the stalagmite, the growth rate of 0.033 mm/yr was calculated and the age of the YC-1 stalagmite is extrapolated. This rate coincides with the growth rate inferred from textural data using annual growth laminae preserved within columnar calcite with a spacing ranging from 0.02 to 0.07 mm. Even though high-resolution trends of Mg/Ca, Sr/Ca and P/Ca ratios vary during growth of the YC-1, all of them show the distinctive increase from late 19th century. This coeval increase should reflect the past climate change from the Little Ice Age to the Current Warm Period. The trend is due to the increase in the supply of P from the overlying paleosol layer and also due to more active corrosion of carbonate sands within the paleosol layer resulting in the increase in Mg/Ca and Sr/Ca ratio in cave water. Therefore, this study indicates that trace element compositions of the stalagmite in Korean natural caves can be used as a good proxy for paleoclimatic studies in the future.

Key words: stalagmite, trace elements, Yongcheon Cave, Jeju Island, Holocene, paleoclimate

(Kyung Sik Woo, Department of Geology, College of Natural Science, Kangwon National University, Chuncheon

* Corresponding author:

E-mail: jokyung95@hanmail.net

200-701, Korea; Kyoung-nam Jo, Sangheon Yi and Dong Yoon Yang, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea; Hong-Chun Li, Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, ROC)

1. 서론

최근 무분별한 화석연료 사용으로 지구온난화와 범세계적인 이상기후 현상이 점차 심해지는 추세에 있다. 우리나라의 경우, 우기 동안에 그 강도를 예측하기 어려운 강한 태풍의 직·간접적인 영향을 받고 있어 재산 및 인명 피해가 매해 반복적으로 발생하고 있다. 지구온난화에 따른 자연재해를 예방하기 위해서 정확한 장·단기적인 기후예측기술이 가장 필요하다. 이를 위해서는 과거 다양한 시기와 기간에 대한 방대한 고기후 자료의 축적이 이루어져야 한다. 이렇게 얻어진 고기후 자료를 기후모델링에 이용하여 정량적이고 신뢰할 만한 기후예측기술이 개발되어야만 가능하다. 20세기에 이르러 과학적으로 측정된 기상자료는 전체 지구의 기후역사에 미치지 못하며 단지 100년이라는 매우 짧은 시간의 자료만을 제공할 뿐이기 때문이다. 이렇게 제한적인 자료로 미래의 기후를 정량적으로 예측하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 정확한 미래의 기후예측에 필요한 과거의 기후 자료는 지속적이고도 다양한 방법으로 확보해야만 한다.

과거의 고기후는 빙하, 호수퇴적물, 심해퇴적물, 현생 산호와 조개, 그리고 퇴스와 같은 육성퇴적물 등 매우 다양한 대상에 보존되어 있는 지시자(proxy)들을 이용하여 연구되어 왔다(Allen *et al.*, 1999; Bradley, 1999; Montagna *et al.*, 2006). 이 중 동굴생성물은 다른 육상의 고기후 지시자들에 비해 매우 정확한 연령측정이 가능하고, 지난 50만년까지 다양한 기간 동안의 고해상도 기록을 알려줄 수 있다. 특히, 동굴생성물에서 얻은 고해상도의 기록은 아주 단기간 동안의 세밀한 기후변화를 추정할 수 있다는 장점을 가지고 있어서 최근 들어 전 세계 학계의 많은 주목을 받고 있다(Henderson, 2006; Tan *et al.*, 2006; Baker *et al.*, 2008). Henderson (2006)은 지난 20여 년 동안 고기후학의 발전에 극지의 빙하코어가 가장 중요한 기여를 해왔으나, 빙하가 주로 인간이 활동하는 지역과는 떨어진 위치에 존재하고 지구의 주요 기후 시스템인 몬순과 엘니뇨에 대한 기록을 보존하지 못하는

한계가 있음을 지적하면서 향후 20년은 동굴생성물을 이용한 고기후 연구 시대가 될 것을 주장 하였다.

동굴생성물을 이용한 고기후 연구는 과거 빙기/간빙기의 변화(Winograd *et al.*, 1992; Spötl *et al.*, 2002), Heinrich 사건과 같은 후기 플라이스토세의 단기 돌발기후변화(Wang *et al.*, 2001), 토양과 식생의 변화(Dorale *et al.*, 1992; Genty *et al.*, 2003), 강수량의 변화(Treble *et al.*, 2003; Bosato *et al.*, 2007) 등 매우 다양한 기간과 주기의 기후변화 현상을 추적하였다. 동굴생성물을 이용한 연구는 안정동위원소(산소와 탄소)를 이용한 연구가 대부분이나 최근에 이르러 미량원소를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(e.g., Fairchild and Treble, 2009). 그 이유는 과거의 기후변화의 양상이 전 지구적으로 지역마다 매우 다양하므로 하나의 지시자를 사용하는 것만으로는 과거 전 세계 여러 지역의 고기후를 추적하기에 한계가 있기 때문이다.

동아시아 몬순 기후에 영향을 강하게 받는 우리나라의 경우, 약 1,000여 개 이상의 동굴이 강원도, 충청북도, 전라북도, 경상북도, 제주도 등 비교적 넓은 지역에 걸쳐 분포하고 있어 이를 이용한 고기후 연구를 수행하기에 매우 유리한 조건을 갖추고 있다. 강원도와 충청북도에 분포하는 하부고생대 조선누층군 탄산염암 내에 발달하는 석회동굴 내의 동굴생성물과 제주도 용암동굴 중에서 당처물동굴이나 용천동굴과 같은 석회상식 용암동굴 내 석순을 이용한 고기후연구는 최근에 이르러 매우 활발히 진행되고 있다(Woo *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2010, 2011, Hong *et al.*, 2012). 최근에 Ji *et al.* (2010)은 용천동굴 내 석순의 탄소동위원소 성분을 이용하여 한반도 주변의 소빙기가 AD 1870년대에 끝난 것으로 제안하였다. 또한 같은 석순의 조직적 특성의 변화가 과거 제주도의 강수량의 변화를 잘 반영함을 제시하였다(Ji *et al.*, 2011) Hong *et al.* (2012)은 용천동굴의 부근에 있는 석순의 조직특성을 이용하여 지난 2000년 동안 한반도 주변의 기후가 로마 온난기, 암흑 한랭기, 중세 온난기, 소빙하기, 현생 온난기로 구분 될 수 있다고 주장하였다.

이 연구는 용천동굴 내에서 성장한 석순 시료(YC-1)를 이용하여 제주도 및 한반도 주변의 홀로세 최후기 고기후 변화를 추적하기 위해 수행되었다. 이를 위해 방사성동위원소 분석으로 석순의 연령을 추정하고 석순 내에 포함되어 있는 미량원소 성분을 분석하여 석순 내 미량원소 함량의 변화가 고기후 변화를 어떻게 반영하고 있는지를 조사하였다. 이러한 연구를 통해 앞으로 국내 자연동굴 내 동굴생성물에 포함되어 있는 미량원소의 함량변화가 고기후 변화 추적을 위한 지시자로서 사용될 수 있는지를 평가하는 것이 이 연구의 또 다른 목적이다.

2. 연구지역

제주도는 한반도 남서쪽 해상에 위치하는 화산섬으로, 제3기 말부터 제4기 동안의 화산활동에 의하여 형성되었다. 주로 용암류로 구성되어 있으며, 소량의 화산쇄설암도 분포한다. 특징적으로 368개의 분석구(cinder cone), 응회환(tuff ring), 응회구(tuff cone)가 분포한다(Yang *et al.*, 1997). 용암류의 대부분은 알칼리 현무암으로서, 유동성이 좋아 여러 곳에 용암동굴이 형성되어 있다. 용천동굴을 형성한 용암류는 온평리 알칼리 현무암으로서 제주도 해안에 넓게 분포하며, 용천동굴의 상류 지역에 위치한 김령사굴과 만장굴도 이 용암류에 의해 형성되었다(Won *et al.*, 1993). 온평리 알칼리 현무암은 소위 표선리 현무암으로 분류되던 것으로 해안을 따라 해안 저지대와 중산간지대 낮은 곳에 넓게 분포한다. 표선리, 태흥 지구 지역에서 온평리 현무암에 대비되는 알칼리 현무암의 K/Ar 연대값은 약 0.63 Ma로 보고된 바 있다(Won *et al.*, 1993).

용천동굴은 지리적으로 제주도의 북동부에 위치하며, 행정적으로 제주도 북제주군 구좌읍 월정리에 위치한다(그림 1). 용천동굴의 길이는 2,470 m로 보고된 바 있으나, 탐사되지 않은 수중통로까지 감안하면 전체길이는 3 km 이상이 될 것으로 추정하고 있다. 통로의 폭은 7~15 m이며, 높이는 1.5~20 m 범위를 보인다. 전체적으로 수평으로 발달한 수평굴에 속한다. 용천동굴은 모두 동저가 원용암류(primary lava flow)의 표면으로 되어 있어 비교적 평활한 면을 이루거나 다양한 표면 구조를 나타낸다. 용천동굴 내에는 보통 용암동굴 내에서 발견되는 용암중

유, 용암석순 및 용암석주와 같은 동굴생성물이 발견되지만, 탄산칼슘으로 이루어진 동굴생성물이 발견되고 있다(Ji *et al.*, 2010, 2011).

용천동굴은 해변에 근접해 있으며, 이로 인하여 해변 퇴적물이 용천동굴 상부에 공급되어, 퇴적되었으며, 이러한 탄산염퇴적물은 제주도의 여러 해변에서 보고된 바 있다(Ji and Woo, 1995). Ji *et al.* (2008)은 용천동굴 위를 덮고 있는 사구의 연령이 해안가에서 내륙으로 가면서 젊어지며 그 연령은 약 2000~4500 년 전으로 제안한 바 있다. 용천동굴 위를 피복하고 있는 탄산염퇴적물은 빗물과 토양에 녹아있는 산에 의해 용해되어 동굴 안으로 칼슘 이온과 탄산염 이온을 공급하고, 그 결과로 용천동굴 안에는 석회동굴에서 발견되는 여러 종류의 동굴생성물이 성장하고 있다(Woo *et al.*, 2008). 용천동굴에서 발견되는 대표적인 동굴생성물은 종유관, 용암종유, 석순, 석주, 동굴산호, 커튼, 유석, 휴석, 월유 등이 있다. 그러나 용천동굴의 탄산염 종유관, 종유석 및 석주는 보통 석회동굴 내에서 발견되는 것과는 형태와 가 매우 다르다(Woo *et al.*, 2008).

3. 연구방법

2005년 4월 제주도 용천동굴에서 성장하는 석순(YC-1)을 채취하였다. YC-1은 채취 당시 과거 용천동굴을 출입했던 인간에 의해 유입되어 사용된 나무위를 피복하여 성장하고 있었다. 채취된 동굴생성물 표품을 성장선에 대해 수직 방향으로 절단하여, 성장선을 관찰한 후 박편으로 제작하여 조직을 관찰하였다(그림 2A). 석순의 측면부를 상부와 하부로 나눠 7.5×5 cm 규격의 박편을 제작한 후 박편을 관찰하여 통해 내부 성장선의 특성과 빈도를 평가하였다. 또한 성장선이 비교적 뚜렷한 지점을 선택하여 성장띠의 간격을 측정하였다. 또한 성장선이 밀집되어 있는 부분을 성장선 밀집대(DGL: zone of densed growth laminae)로, 성장선이 희미한 부분을 성장선 비밀집대(SGL: zone of spaced growth laminae)로 구별하였다(그림 2B).

YC-1은 시료 채취당시 성장하던 석순이므로 excess ^{210}Pb 에 의한 연령분석이 가능할 것으로 추정되었다. 따라서 마이크로 드릴(micro-drill)을 이용하여 표면으로부터 2 cm 깊이까지 동일한 간격으로

미량의 시료를 8개 채취하였다(그림 2A). 미량 시료에 대한 화학적 처리 방법은 Flynn (1968)과 Baskaran and Iliffe (1993)가 제시한 방법과 동일하게 진행되었다. ^{210}Pb 분석은 반감기가 상대적으로 매우 짧은 딸원소인 ^{210}Po (반감기: 138일)의 측정으로 이루어졌으며, 대만의 국립성공대학 지구과학과가 보유하고 있는 Alpha spectrometry (ORTEC 576A)를 이용하여 분석하였다. 동굴생성물을 이용한 고기후 연구의 대표적인 장점인 고해상도 지화학 분석을 시도하기 위하여 YC-1의 표면으로부터 2 cm 지점까지 30 μm 간격으로 미량원소 분석이 수행되었다. 미량원소 분석은 대만의 국립성공대학 지구과학과가 보유하고 있는 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Inductively-Coupled Plasma Mass Spectrometer, Thermo Finnigan, Element II)가 이용하였다. 질량

분석기에 부착되어 있는 레이저 삭마 시스템(laser ablation system)을 이용하여 샘플 채취 및 로딩이 이루어졌다. 각 미량원소의 측정값은 cps (counts per second)로 얻은 다음 이를 Ca에 대한 몰 비로 나타내었다.

4. 결 과

4.1 석순의 조직적 특성

이번 연구에서 분석된 YC-1은 육안관찰 시 주로 흰색을 띠는 0.01 mm 이하의 가는 성장선으로 구성되어 있으며(그림 2A), 박편 관찰 시에도 성장성이 뚜렷하게 보인다(그림 2). 박편을 통해 관찰한 내부 결정은 성장선에 수직방향으로 배열된 주상 방해석으로 이루어져 있다(그림 2C). 성장선의 세부적인

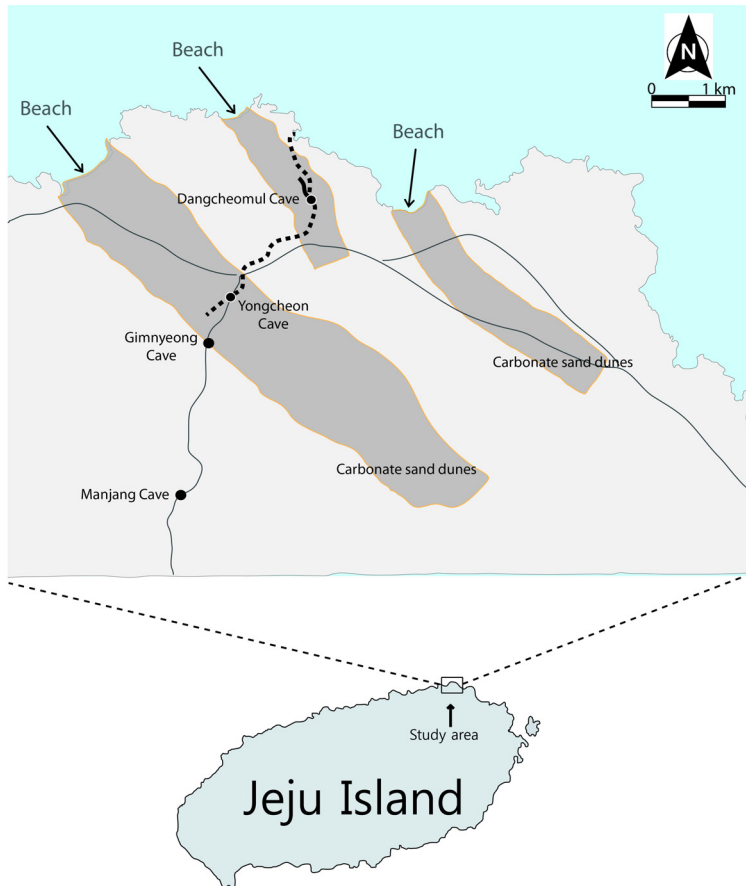


Fig. 1. Location map of the Yongcheon Cave on Jeju Island. Gray zones denote the distribution of carbonate sand dunes. The passages of the Yongcheon and Dangcheomul caves are denoted by dotted and solid lines, respectively.

특성은 YC-1의 내부에서 부분적으로 서로 다르며, 그 특성은 성장선의 형태, 두께, 진하기, 유체포유물의 포함정도 등으로 구분할 수 있다. 이러한 조직적인 차이는 최근에 용천동굴의 다른 석순(YC-2)과 용천동굴 부근 당처물동굴 내 석순(DC-1)에서 기술된 석순의 조직적인 결과와 유사한 것으로 판단된다(Ji *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2012). 상대적으로 진한 성장선이 일부분에 밀집되어 나타나는 성장선 밀집대와 성장선이 매우 희미하게 나타나는 성장선 비밀집대의 특징이 관찰됨에 따라 전체 석순의 미세 주상

도를 작성하여 석순 내에서 두 구간을 구별하였다. 그 결과, YC-1에서 13개의 성장선 밀집대와 12개의 비밀집대를 구분하였다(그림 2B). 성장선 밀집대의 두께는 상부의 한 부분을 제외하고 0.12 cm에서 2.05 cm에 이르는 넓은 범위를 보이지만, 성장선 비밀집대의 두께는 역시 상부의 한 부분을 제외하고 0.05~0.30 cm의 상대적으로 좁고 일정한 범위를 보인다. YC-1의 성장선 밀집대와 비밀집대 분대는 비교적 얇은 두께의 성장선 비밀집대가 두꺼운 성장선 밀집대 내에 협재되어 있는 형태를 보여준다. 그러

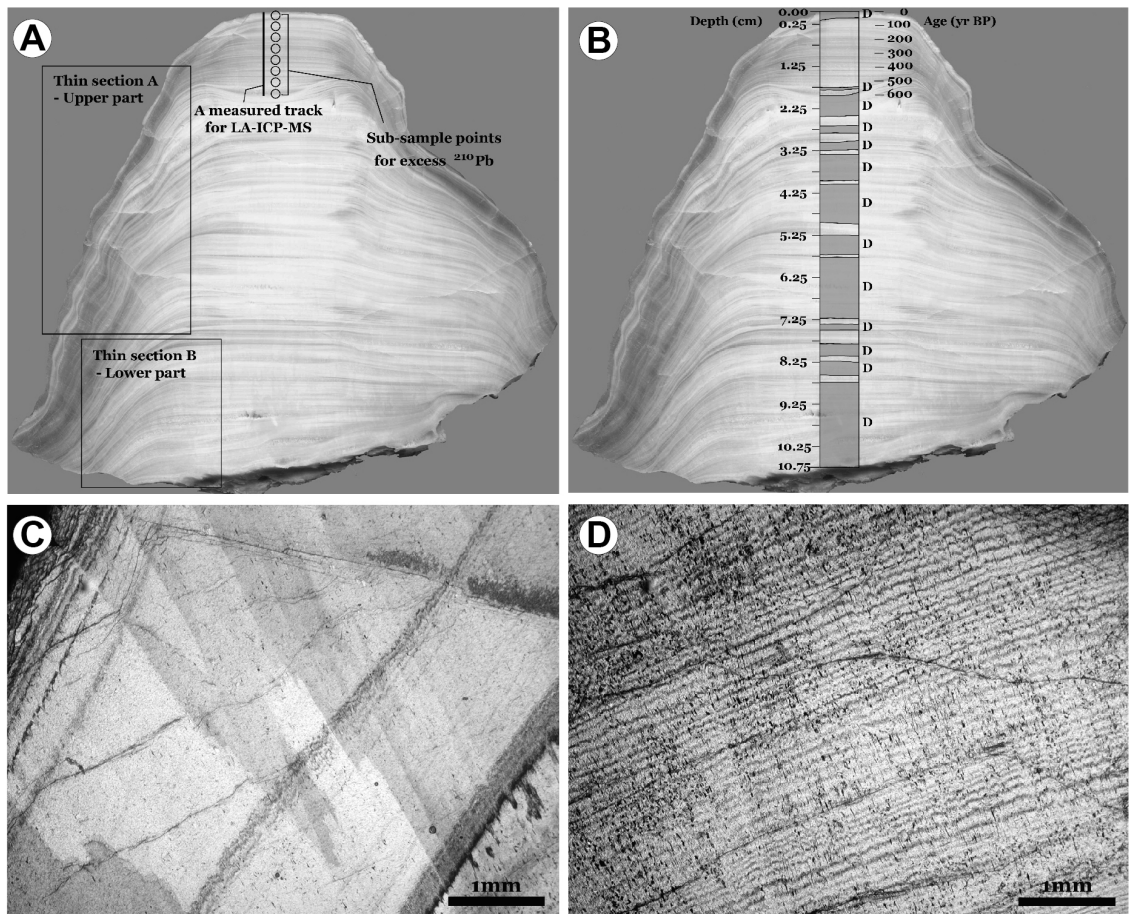


Fig. 2. (A) The YC-1 stalagmite slab used for this study. Two rectangles indicate the portions of the stalagmite made for two thin sections. Microsampling sites for excess ²¹⁰Pb are also indicated as circles and the track for trace elements is indicated. (B) The YC-1 stalagmite slab showing the calcite layers with densely spaced growth laminae (DSL). The calcite layers with less spaced growth laminae are between DSL. Note that the two layers are alternating and the DSL are thicker. (C) Columnar calcite crystals showing very few growth laminae. However, numerous annual growth laminae at the tip of the YC-1 stalagmite are present at the upper left corner. Note that the calcites with few growth laminae are inclusion-free. (D) Regularly spaced, annual growth laminae of calcite crystals with even spacing.

Table 1. Age dating results using excess ^{210}Pb . n.d. = no detection. Excess ^{210}Pb = measured ^{210}Pb - ^{226}Ra . According to the measured data, we assumed that the ^{226}Ra value is 0.05 ± 0.01 .

Sample name	depth (cm)	sample weight (g)	measured ^{210}Pb (dpm/g)	Error (\pm)	excess ^{210}Pb (dpm/g)	Error (\pm)
YC-1-Pb-1	0.13	0.3235	22.50	1.00	22.45	1.00
YC-1-Pb-2	0.38	0.3388	2.23	0.11	2.18	0.12
YC-1-Pb-3	0.63	0.3136	0.24	0.04	0.19	0.04
YC-1-Pb-4	0.88	0.3154	0.07	0.02	0.02	0.03
YC-1-Pb-5	1.13	0.3184	0.06	0.02	n.d.	n.d.
YC-1-Pb-6	1.38	0.3209	0.06	0.02	n.d.	n.d.
YC-1-Pb-7	1.63	0.4004	0.05	0.01	n.d.	n.d.
YC-1-Pb-8	1.88	0.3403	0.05	0.02	n.d.	n.d.

나 이러한 특징은 전체 길이 10.75 cm의 석순 중에서 상부 1.90 cm 이하에서만 관찰되며, 상부에서는 반대되는 특징을 보인다. 즉 성장선 비밀집대가 극도로 우세해지면서 반대로 성장선 밀집대가 협재되는 형태를 보인다. 지화학 분석이 실시된 상부 2 cm에서는 주로 성장선 비밀집대가 우세하며(그림 2B), 석순의 최상부 표면부분인 0.15 cm는 성장선 밀집대로 구성되어 있다. 이후 점차 성장선의 빈도 및 진하기는 약해지는 경향성을 보인다.

4.2 석순의 성장률 및 연령

동굴생성물의 성장률은 일정한 ^{210}Pb 의 유입량과 일정한 석순의 성장률을 가정한 다음과 같은 excess ^{210}Pb 와 성장률 간 관계식을 통해 계산할 수 있다.

$$C = C_0 \exp[-(\lambda/S)Z]$$

여기서 Z(cm)는 미시료의 깊이이고, C(dpm/g)은 깊이 Z에서의 excess ^{210}Pb 의 방사능 농도이며, C_0 는 석순 표면의 C값이다. 또한, λ 는 ^{210}Pb 의 붕괴 상수이며, S는 석순의 성장률(cm/yr)이다. 계산된 성장률을 이용하여 석순의 표면부를 현재로 가정하고 깊이에 따른 YC-1의 연령을 계산하였다. 8 지점의 분석치 중에서 하부 4 지점에서는 excess ^{210}Pb 이 검출되지 않았으며, 이는 ^{210}Pb 의 반감기 22.3년을 고려할 때 최소한 1.13 cm 부분부터는 200년 이상의 연령을 보임을 지시한다(표 1). 이 연구의 결과는 깊이에 따라 ^{210}Pb 의 함량이 매우 일정하게 감소하여 YC-1의 상부는 어느 정도 일정한 성장률로 성장하

였음을 나타낸다. Excess ^{210}Pb 분석을 통해 얻은 성장률은 0.033 mm/yr이며, 이러한 결과는 조직적 분석 결과 석순의 성장선 밀집대에서 측정된 성장띠의 두께가 0.02~0.07 mm라는 사실과 유사한 결과로 판단된다(그림 2D, 3; 표 1). 따라서 이 두 결과가 일치함에 따라 YC-1에서 분석된 성장률은 합리적인 결과로 생각할 수 있으며, 각 성장띠는 일 년을 지시하는 것으로 추정된다. 이 석순을 채취한 연대가 2005년이기 때문에 이러한 연구결과를 토대로 미량 원소 분석을 실시한 구간은 AD 1401~2005년 사이에 성장한 것으로 추정할 수 있다.

4.3 미량원소 분석 결과

YC-1의 상부 2 cm 구간에서 분석된 Mg/Ca의 값은 전체적으로 0~3 mm, 10~17 mm에서 상대적으로 높은 값을, 나머지 3~10 mm, 17~20 mm에서 상대적으로 낮은 값을 나타낸다(그림 4). 또한 약 2~3 mm 간격으로 확인되는 정점이 규칙적으로 나타나는 변화를 보이고 있다. Sr/Ca 값은 전체적으로 0~3 mm까지 상대적으로 높은 값을, 나머지 3~20 mm에서 상대적으로 낮은 값을 보인다. Mg/Ca에 비해 그 변화의 폭이 적으며, Mg/Ca와 고해상도 변화에서는 매우 다른 경향을 보인다. 하지만 Mg/Ca의 경우에서처럼 3 mm 지점에서 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 특히 0~4 mm 구간에서 Mg/Ca와 Sr/Ca는 전반적으로 역비례하는 뚜렷한 경향을 보여준다. 이러한 Mg/Ca와 Sr/Ca 분석 결과를 조직적 결과와 대비해 본 결과, 약 2.5 mm까지 확인된 성장선 밀집대 구간에서 Mg/Ca는 상대적으로 높

은 값을 나타내며, Sr/Ca도 상대적으로 높은 값을 보여주고 있는 것이 특징이다(그림 4).

YC-1의 상부 2 cm 구간에서 분석된 P/Ca의 값은 전체적으로 0~2 mm, 4~9 mm에서 상대적으로 높은 값을, 2~4 mm, 9~20 mm까지 상대적으로 낮은 값을 나타낸다(그림 4). Mg/Ca와 Sr/Ca 분석 결과를 조직적 결과와 대비해 본 결과와 마찬가지로, 약 2.5 mm까지 확인된 성장선 밀집대 구간에서 P/Ca는 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. Sr/Ca와 Ba/Ca 사이에서 흔히 관찰되는 높은 상관관계는 이번 연구에서도 나타났다. Mg/Ca, Sr/Ca과 마찬가지로 전체적인 경향성은 깊이가 증가할수록 값이 감소하는 특징을 보인다. P/Ca는 Sr/Ca과 같이 20 mm에서 약 15 mm까지 감소하는 경향을 보여준다(그림 4).

5. 토 의

최근까지 전 세계에서 수행되는 동굴생성물을 이용한 고기후 연구는 주로 산소와 탄소 안정동위원소와 미량원소를 이용해 이루어지고 있으며, 특히 산소동위원소 성분을 이용하여 많이 이루어지고 있다(McDermott, 2004; Cruz et al., 2005; Matthey et al., 2008). 산소동위원소 성분은 주로 물의 산소동위원소 성분의 변화를 반영하기 때문에 강우량과 강우량

이 반영하는 여름몬순의 강도를 보여준다(Wang et al., 2001; Wang et al., 2005). 산소동위원소와는 달리 동굴생성물 내의 탄소동위원소와 미량원소 성분은 강수, 강수와 반응하는 석회암(탄산염 퇴적물) 내에서 공급된다. 탄소동위원소 성분의 경우, 탄소의 기원이 토양의 유기물과 탄산염 광물이며(Dorale et al., 1992; Genty et al., 2003), 미량원소의 경우는 원소에 따라 그 공급되는 곳이 다르다(Kober et al., 2007; Fairchild and Treble, 2009). 동굴생성물 내에 포함된 Mg와 Sr, 그리고 P 성분은 고기후변화의 추적을 위해 많이 사용되는 미량원소이다(Roberts et al., 1998; Huang et al., 2001; Fuller et al., 2007; Zhou et al., 2008). 이중에서 Mg과 Sr은 전적으로 동굴 위에 있는 탄산염광물로부터 공급되지만 P의 경우에는 토양 내에 포함되어 있는 유기물에 의해 공급되는 경우가 대부분이다(Heathwaite, 1997; Fairchild et al., 2001; Huang et al., 2001; Treble et al., 2003).

동굴생성물의 미량원소는 동굴에 공급되는 물에 포함된 미량원소에 의해 조절되기 때문에 동굴생성물의 성장 기간 동안 동굴 상부 통기대(vadose zone)의 수리학적 작용을 추정하는 데 이용된다(e.g., Verheyden, 2005). 특히, 동굴생성물의 Mg/Ca 비는 주로 온도의 변화, 앞선 방해석의 침전(Prior Calcite Precipitation) 또는 불규칙한 용해(incongruent dissolution) 등에 의해 조절되는 것으로 알려졌다(Roberts et al., 1998;

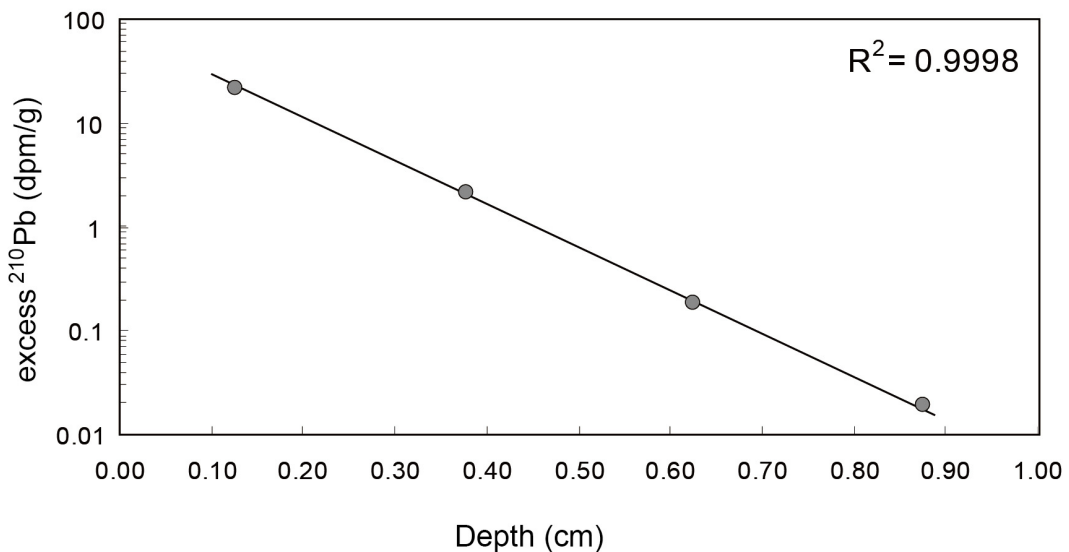


Fig. 3. Contents of excess ²¹⁰Pb with the microsampling depth of the YC-1 stalagmite from the surface.

McDonald *et al.*, 2004). Sr/Ca는 통기대 내 지하수의 지체시간, PCP 또는 동굴생성물의 성장률에 조절되는 것으로 알려져 왔다. 또한, P/Ca는 주로 식생의 부식작용, 즉 토양의 발달정도에 의해 조절되는 것으로 보인다(Verheyden, 2005). 그러나 용천동굴의 지질학적 조건은 일반적인 석회동굴의 조건과는 매우 다르기 때문에 앞에서 언급한 연구들의 해석을 그대로 적용하기 어렵다. 용천동굴 상부에는 전적으로 미고화된 탄산염퇴적물이 지역에 따라 차이가 있지만 약 수 미터 정도 분포하고 있으며, 몇 개의 고토양층을 포함하고 있다(Ji *et al.*, 2008). 따라서 석회동

굴은 빗물이 동굴에 이르기까지의 시간과 과정을 추정하기가 매우 어렵지만 용천동굴의 경우에는 그 예측이 가능하다. 어느 정도 이상의 비가 내린 후 수 시간 내에 빗물은 동굴에 도달할 수 있다. 따라서 식생의 부식작용과 토양의 발달 정도에 따라 공급되는 P/Ca의 경우에는 고온다습하고 강수량이 많아질수록 동굴로 유입되는 물속에 많이 포함될 수 있는 것을 예측할 수 있다. 하지만 Mg/Ca 비와 Sr/Ca 비의 경우에는 다양한 현상이 나타날 수 있으며 이들의 변화를 세 가지 현상으로 설명할 수 있다. 첫째는 동굴 위에 돌로마이트와 석회암이 모두 분포할 경우,

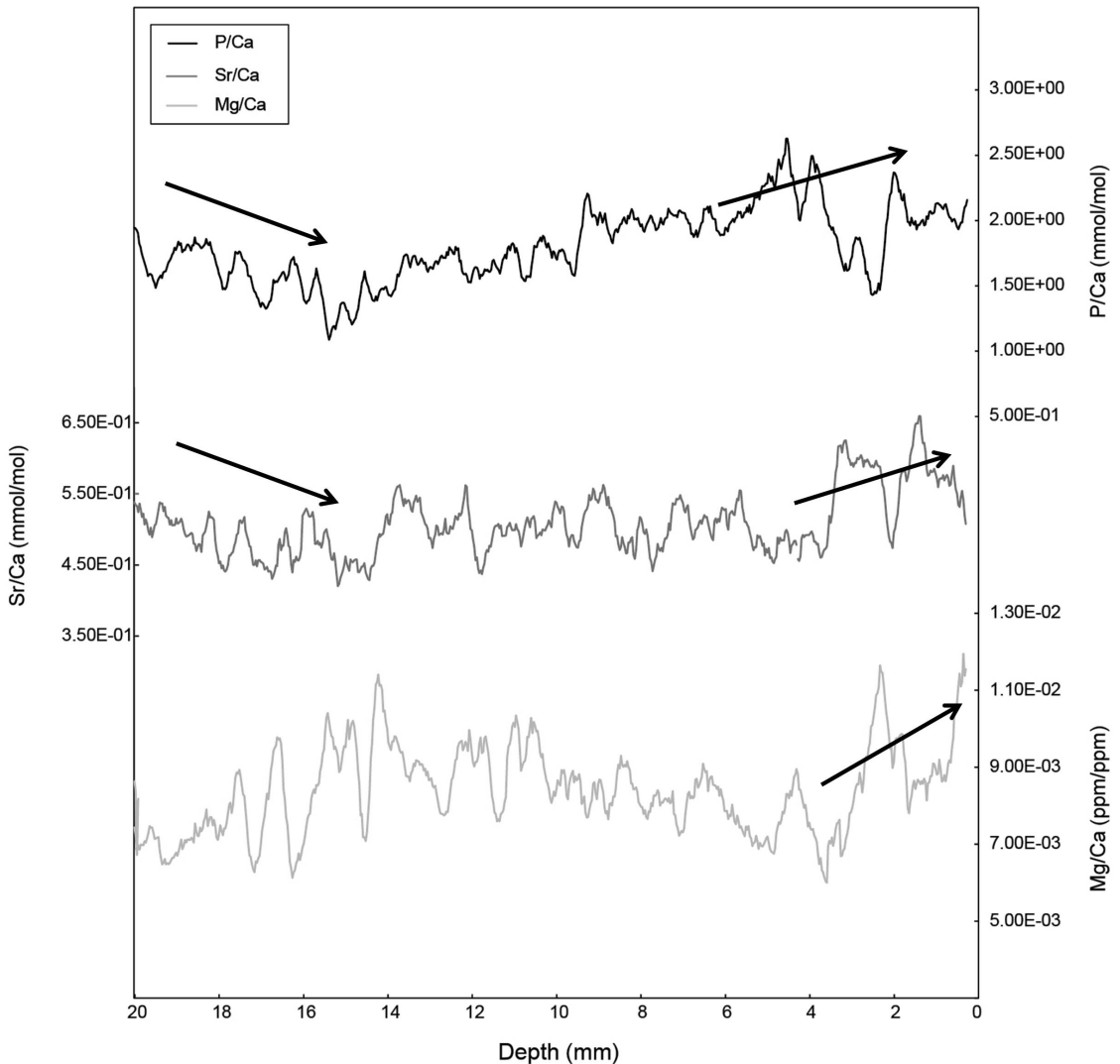


Fig. 4. High resolution P/Ca, Sr/Ca and Mg/Ca compositions with depth from the surface of the YC-1 stalagmite.

빗물에 의해 돌로마이트와 석회암의 녹는 정도가 달라서 동굴생성물의 Mg/Ca 비가 조절되는 경우이다(Fairchild *et al.*, 2000). 이 경우 돌로마이트가 녹는 양에 따라 Mg/Ca비가 높아질 수 있다. 하지만 용천동굴 위에 분포하는 탄산염 퇴적물 내에는 돌로마이트가 포함되어 있지 않아서 이 요인은 고려의 대상이 아니다. 둘째는 동굴 내 온도의 변화에 따른 Mg/Ca비의 변화이다(Gascoyne, 1983; Geode and Vogel, 1991). 온도가 높을수록 Mg/Ca의 비가 높다고 알려져 있다. 하지만 용천동굴 내의 온도의 변화는 그리 심하지 않으며, 연중 변화가 6°C 정도이다. 따라서 이러한 변화가 동굴생성물 내의 Mg/Ca비의 변화를 반영하기는 어렵다고 생각된다. Roberts *et al.* (1998)은 일반적으로 동굴 내의 온도변화가 크지 않기 때문에 긴 기간 동안 동굴수의 Mg/Ca값은 석회암/돌로마이트 내의 체류시간에 주로 조절된다고 제안하였다. 셋째는 PCP의 영향이다. 이것은 빗물이 동굴에 이르기까지 방해석이 침전하는 경우이다. 미량원소를 포함하고 있는 빗물이 동굴에 이르기 전이나 도달하자마자 탄산염광물(방해석)을 침전할수록, 빗물 속의 Mg/Ca의 성분은 더 높아진다. 그 이유는 Mg/Ca의 분별계수(distribution coefficient)의 값이 1보다 작기 때문이다. 따라서 상대적으로 건조한 기후에서는 지하수의 유동속도가 매우 느려서 PCP의 양이 많아지고 동굴수 내에 Mg/Ca비가 높아지는 현상이 나타난다(Fairchild *et al.*, 2000; Fairchild *et al.*, 2006a, 2006b; Karmann *et al.*, 2007). 그러나 세번째의 경우도 용천동굴의 환경에서는 적용되기 어렵다. 그 이유는 용천동굴 위에 분포하는 사구퇴적층은 그 두께가 수 미터 정도로 매우 얇아서 빗물이 통과되는 시간이 매우 짧고 사구퇴적층 내에 방해석이 침전된 증거는 전혀 보이지 않기 때문이다. 탄산염퇴적물은 미고결상태이며 원래 사구의 조직과 성분을 그대로 유지하고 있다. 동굴 내에서도 석순 위에서는 종유석이 자라는 경우가 거의 없으며, 대부분의 석순 위에 종유관이 자라고 있다. 이는 빗물이 동굴 속으로 유입된 후에도 방해석이 거의 침전하지 않는다는 것을 나타낸다. 즉 유입된 다양한 빗물이 종유관을 따라 석순 위로 그대로 떨어지고, 빗물의 양이 거의 없을 때에만 종유관의 끝에 물방울이 맺혀 종유관이 자라는 것이다. 따라서 석순이 자라기까지 침전되는 방해석의 양은 거의 없기 때문

에 PCP의 이론이 용천동굴의 석순에 적용될 수는 없다. 또한 PCP의 영향을 받을 경우 석순의 Mg/Ca, Sr/Ca의 비가 서로 같은 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(McMillan *et al.*, 2005; Johnson *et al.*, 2006). 따라서 용천동굴의 석순 내 Mg/Ca와 Sr/Ca 비가 서로 약간 다른 경향을 보이는 것은 이 석순 내 두 원소의 비가 PCP의 영향을 받지 않았다는 것을 지시한다. 넷째는 P/Ca의 경우처럼 고온다습하고 강수량이 많아질수록 동굴로 유입되는 빗물에 Mg와 Sr이 많이 포함되는 경우이다. 기온과 강수량의 변화는 식생의 발달을 조절하며 탄산염퇴적물에 발달하는 토양 내 탄산염퇴적물의 용식정도를 조절한다. 즉, 높은 기온과 강수량의 특징을 보이는 강한 여름몬순의 기후인 경우에는 토양 내에서 유기물과 부식된 탄산염퇴적물의 양이 많아져 높은 미량원소 성분이 동굴 내로 유입되는 동굴수 내에 포함되게 된다. Sr/Ca의 경우도 Mg/Ca와 거의 비슷하게 거동하는 특징이 있다. 하지만 Mg/Ca의 경우와는 달리 온도의 영향은 거의 받지 않는다.

용천동굴의 주변 암석은 온평리 알칼리 현무암으로서 현무암이 빗물과 반응하는 속도는 탄산염퇴적물에 비해 매우 늦고 빗물이 동굴에 이르는 시간이 매우 짧다. 따라서 위에서 제시한 미량원소의 변화를 조절하는 주된 요인으로 작용하기 어려울 것으로 추정된다. 이러한 미량원소의 변화는 용천동굴 상부에 퇴적되어 있는 탄산염 사구퇴적물과 사구 내에 포함되어 있는 고토양층과 현생 토양층에 의한 영향으로 판단된다. 사구퇴적층을 관찰한 결과, 입자의 조직의 변화는 거의 일어나지 않은 것으로 알려져 있다(Ji *et al.*, 2008). 따라서 미량원소의 변화도 토양층 내에서 탄산염광물이 부식되면서 미량원소의 용탈작용(leaching)이 일어난 결과로 생각된다. 그 이유는 토양층 내에서의 탄산염입자는 사구퇴적층에 비해 그 크기가 작으며 부식된 조직을 보이기 때문에(Ji *et al.*, 2008), 강수량과 토양의 발달 정도에 따라 YC-1의 미량원소의 성분이 조절된 것이다.

YC-1의 미량원소 성분이 지시하는 고기후 변화를 추적하기 위해 연대모형을 이용하여 지난 약 600년 간의 고기후 변화 기록과 대비해 보았다(그림 5). YC-1의 Mg/Ca, Sr/Ca, P/Ca는 세부적으로 매우 다른 변화를 보여주지만, 이들은 모두 약 1880년을 전후하여 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

Mg/Ca 비는 약 1500년부터 1600년까지 높은 변동성(variability)과 함께 상대적으로 높은 값을 보여 주고 있지만 나머지 원소들은 대부분 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 YC-1의 미량원소 변화 경향에서 특징적인 것은 Mg/Ca, Sr/Ca, P/Ca 모두 높은 값을 보인 시점은 19세기 중반에서 후반에 이르는 산업혁명 시기로 나타났다. 이러한 경향은 지구온난화가 가속화되고 있는 현재까지 지속되고 있다(그림 5). 특히 P/Ca의 변화는 온도와 강수량과 관련된 토양의 발달 정도 및 강수량의 차이에 직접적인 영향

을 받으므로 이러한 YC-1 내 세 원소의 증가는 소빙하기(Little Ice Age)에서 현재(최근)온난기(Current Warm Period)로 변했던 동일한 기후변화가 일어났다는 것을 강력히 지시한다. 즉, 산업화 이후 평균 기온과 강수량의 상승은 전반적으로 동굴 상부에 퇴적되어 있는 사구퇴적물 등이 쉽게 풍화되고 용해될 수 있는 조건을 제공하였을 것으로 판단된다. 현재까지 여러 연구들은 동아시아 지역에 소빙하기의 영향이 존재함을 암시하고 있다. 또한 기간 동안에는 4번의 주요 태양 흑점 극소기가 존재한다(e.g., Grove,

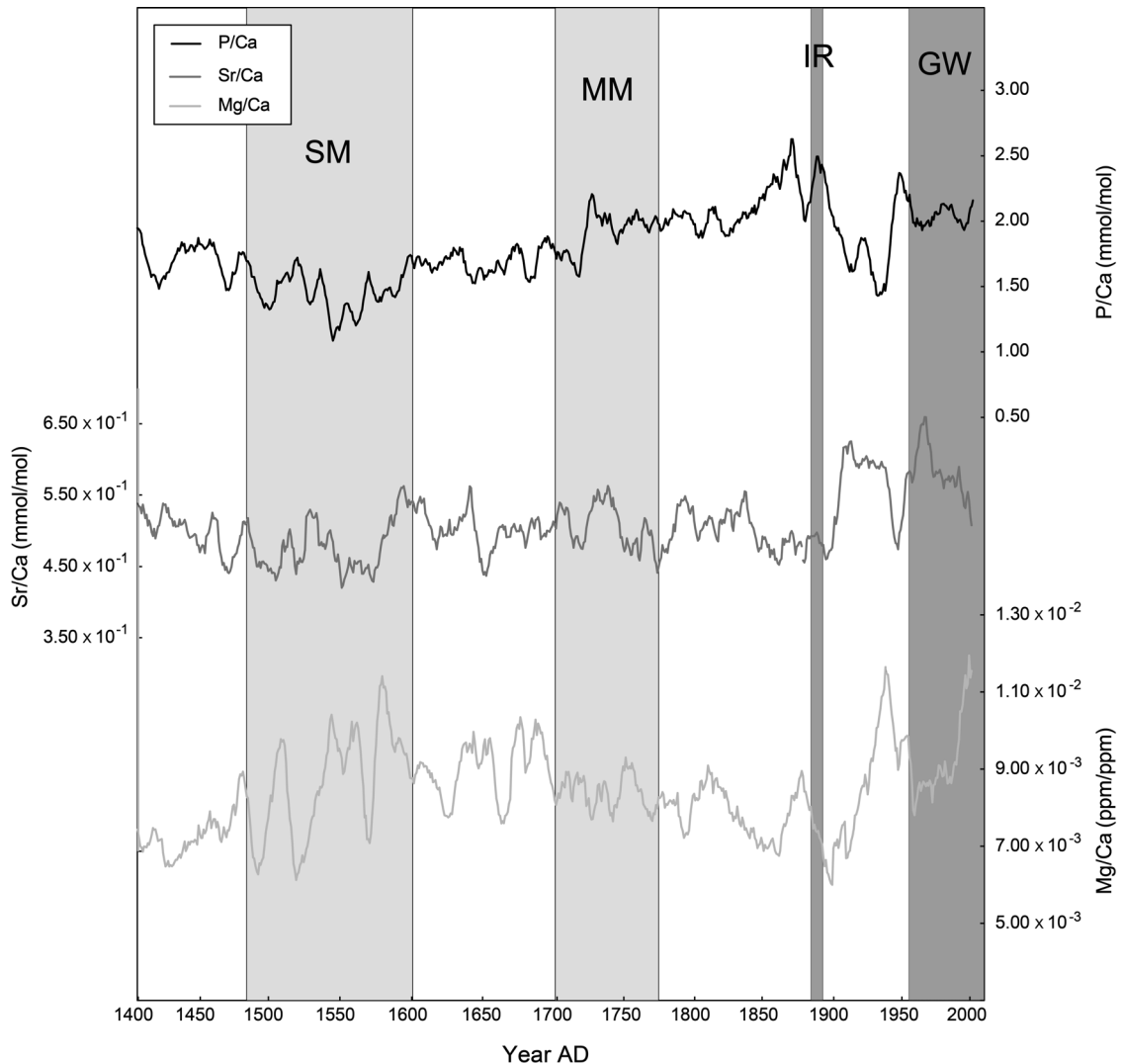


Fig. 5. High resolution P/Ca, Sr/Ca, and Mg/Ca compositions of the YC-1 stalgmite of the past 600 years. GW=Global Warming, IR=Industrial Revolution, MM=Maunder Minimum, and SM=Spörer Minimum.

2004). 특히 P/Ca와 Sr/Ca의 경우 Spörer Minimum (SM) 동안에 가장 낮은 값을 보여주는 것이 특징이며, P/Ca의 경우에는 점차 그 값이 증가하는 경향을 보인다(그림 5). 하지만 Mg/Ca가 높은 값을 보이는 약 1500년부터 1600년까지와 P/Ca가 높은 값을 보이는 약 1840년부터 1880년까지의 기간에는 기후변화를 지시하는 다른 프록시 자료와 잘 일치하지 않는 경향을 보인다. 이는 국지적인 기후변화가 YC-1의 미량원소 성분에 영향을 주었던 것으로 판단된다. 더 지역적이고 세부적인 YC-1의 고해상도 미량원소 성분 변화를 좀 더 정량적으로 해석하기 위해서는 용천동굴 내부에서의 동굴수 모니터링 등이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다. 주목할 만한 사실은 P/Ca와 Sr/Ca의 값이 15세기에 들어서면서 동시에 감소하고 있다는 사실이다. 지역마다 차이는 있지만 아시아에서 소빙기의 시작은 15세기 초로 알려져 있다(Qian and Zhu, 2002). 따라서 이 두 미량원소의 감소로 제주도 부근에서도 소빙기의 시작이 15세기 초였을 것으로 추정할 수 있다.

YC-1의 기존에 밝혀진 조직적 결과(Ji et al., 2011)와 이번 연구를 통해 얻어진 미량원소 결과를 해석하면 성장선 밀집대는 상대적으로 강우량이 많은 강한 여름 몬순의 영향을 받은 시기를 지시하며, 성장선 비밀집대는 상대적으로 약한 여름 몬순에 영향을 받은 시기를 지시한다. 이러한 조직적인 결과는 미량원소의 결과와도 잘 일치하고 있다. 성장선 비밀집대는 소빙하기의 상대적으로 건조하고 여름몬순의 강도가 낮았던 시기를 지시하고 있으며, 이 시기에는 P/Ca, Mg/Ca와 Sr/Ca의 값이 상대적으로 낮게 나타난다. 성장선 밀집대는 상대적으로 고온 다습하고 여름몬순의 강도가 더 높았던 현세(최근)온난기를 나타내고 있으며, 이 시기에는 P/Ca, Mg/Ca와 Sr/Ca의 값이 상대적으로 높게 나타난다(그림 5). 이러한 결과는 석순의 조직적인 결과와 함께 국내 자연동굴에서 성장한 석순 내에 포함된 미량원소도 기후변화를 추적할 수 있는 프록시로서 사용될 수 있다는 것을 나타낸다.

6. 결론

용천동굴 내에서 지난 600년 간 성장한 석순 내에 포함된 미량원소(Mg/Ca, Sr/Ca, P/Ca)의 성분

을 고해상도로 분석한 결과, 가장 특징적인 것은 Mg/Ca, Sr/Ca, P/Ca 모두 높은 값을 보인 시점이 19세기 중반에서 후반에 이르는 산업혁명 시기라는 것이다. 이는 소빙하기(Little Ice Age)에서 현세온난기로 기후변화가 일어나면서 온도와 강수량이 증가한 결과로 생각된다. 또한 P/Ca와 Sr/Ca는 15세기 초부터 점차 감소하는 경향을 보이며, 이는 소빙기가 시작된 것으로 추정할 수도 있지만 다른 프록시의 자료가 더 필요할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 국내 자연동굴에서 성장한 석순 내에 포함된 미량원소도 과거의 기후변화를 추적할 수 있는 프록시로서 사용될 수 있다는 것을 나타낸다.

사 사

이 연구는 2007년도 한국지질자원연구원 기본사업 '단주기/돌발 지구환경변화 복원 및 미래예측 5'의 과제에서 강원대학교 우경식 교수에게 지원하였던 '동굴생성물을 이용한 마지막 빙기 이후의 미세 기후변화 추적'의 연구비로 이루어졌다. 이 연구를 위해 현장 조사를 허가해준 문화재청과 제주특별자치도에 감사한다. 이 연구를 위해 현장조사 연구를 지원해준 (사)한국동굴연구소에 감사한다. 이 논문을 심사해준 심사자들에게도 감사한다.

REFERENCES

- Allen, J.R.M., Brandt, U., Brauer, A., Hubberten, H.-W., Huntley, B., Keller, J., Kraml, M., Mackensen, A., Mingram, J., Negendank, J.F.W., Nowaczyk, N.R., Oberhänsli, H., Watts, W.A., Wulf, S. and Zolitschka, B., 1999, Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature*, 400, 740-743.
- Baker, A., Smith, C.L., Jex, C., Fairchild, I.J., Genty, D. and Fuller, L., 2008, Annually laminated speleothems: a review. *International Journal of Speleology*, 37, 193-206.
- Baskaran, M. and Iliffe, T.M., 1993, Age determination of recent cave deposit using excess ^{210}Pb -A new technique. *Geophysical Research Letter*, 20, 603-606.
- Borsato, A., Frisia, S., Fairchild, I.J., Somogyi, A. and Susini, J., 2007, Trace element distribution in annual stalagmite laminae mapped by micrometer-resolution X-ray fluorescence: implications for incorporation

- of environmentally significant species. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 71, 1494-1512.
- Bradley, R.S., 1999, *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary* 2nd edition. Academic Press, San Diego, 158-166 p.
- Cruz, Jr., F.W., Burns, S.J., Karmann, I., Sharp, W.D., Vuille, M., Cardoso, A.O., Ferrari, J.A., Silva Dias, P.L. and Viana, Jr. Oduvaldo, 2005, Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*, 434, 63-66.
- Dorale, J.A., Gonza'lez, 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.
- Fairchild, I.J., Baker, A., Borsato, A., Frisia, S., Hinton, R.W., McDermott, F. and Tooth, A.F., 2001, High-resolution, multiple-trace-element variation in speleothems. *Journal of the Geological Society, London*, 158, 831-841.
- Fairchild, I.J., Borsato, A., Tooth, A.F., Frisia, S., Hawkesworth, C.J., Huang, Y., McDermott, F. and Spiro, B., 2000, Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology*, 166, 255-269.
- Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F. and EIMF, 2006a, Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75, 105-153.
- Fairchild, I.J. and Treble, P.C., 2009, Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28, 449-468.
- Fairchild, I.J., Tuckwell, G.W., Baker, A. and Tooth, A.F., 2006b, Modelling of dripwater hydrology and hydrogeochemistry in a weakly karstified aquifer (Bath, UK): implications for climate change studies. *Journal of Hydrology*, 321, 213-231.
- Flynn, W.W., 1968, The determination of low-levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica Chimica Acta*, 43, 221-227.
- Fuller, L., 2007, *High-Resolution Multiproxy Geochemical Holocene Climate Records From 1000-year Old Scottish Stalagmites*. Ph.D. thesis (unpublished), University of Birmingham, UK.
- Gascoyne, M., 1983, Trace-element partition coefficients in the calcite-water system and their paleoclimatic significance in cave studies. *Journal of Hydrology*, 61, 213-222.
- Genty, D., Blamart, D., Ouahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel, J. and Van-Exter, S., 2003, Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421, 833-837.
- Goede, A. and Vogel, J.C., 1991, Trace element variations and dating of a Late Pleistocene Tasmanian speleothem. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 88, 121-131.
- Grove, G.M., 2004, *Little Ice Ages: Ancient and Modern* 2nd edition Volume II. Routledge, New York, 523-529.
- Henderson, G.M., 2006, Caving in to new chronologies. *Science*, 313, 620-622.
- Heathwaite, A.L., 1997, Sources and pathways of phosphorus loss from agriculture. In: Tunney, H., Careton, O.T., Brookes, P.C., Johnstone, A.E. (Eds.), *Phosphorus Loss From Soil to Water*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 205-223.
- Hong, S.W., Woo, K.S., Yi, S.H. and Jo, K.N., 2012, Paleoclimatic reconstructions using textural data of the stalagmite from the Dangcheomul Cave, Jeju Island for the Past 2,000 years. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 445-458 (in Korean with English abstract).
- Huang, Y., Fairchild, I.J., Borsato, A., Frisia, S., Cassidy, N.J., McDermott, F. and Hawkesworth, C.J., 2001, Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy). *Chemical Geology*, 175, 429-448.
- Ji, O.M. and Woo, K.S., 1995, Compositional Variations of the Beach Sediments in Cheju Island. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, 30, 480-492 (in Korean with English abstract).
- Ji, H.S., Woo, K.S., Jo, K.N., Cheng, H., Edwards, R.L. and Yi, S.H., 2011, Paleoclimatic reconstruction of the past 300 years using textural data of the YC-2 stalagmite from the Yongcheon Cave on Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 139-153 (in Korean with English abstract).
- Ji, H.S., Woo, K.S., Kim, R., Choi, D.W., Yang, D.Y. and Park, B.K., 2008, The age and origin of carbonate sand dunes in Gimnyeong area, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 615-628.
- Ji, H.S., Woo, K.S. and Yang, D.Y., 2010, Little Ice Age recorded in the YC-2 stalagmite of the Yongcheon Cave, Jeju Island (South Korea). *Korean Meteorological Society*, 20, 261-271 (in Korean with English abstract).
- Johnson, K.R., Hu, C., Belshaw, N.S. and Henderson, G.M., 2006, Seasonal trace-element and stable isotope variations in a Chinese speleothem: the potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 244, 394-407.

- Karman, I., Cruz, F.W., Viana Jr., O. and Burns, S.J., 2007, Climate influence on trace element geochemistry of waters from Santana-Pérolas cave system, Brazil. *Chemical Geology*, 244, 232-247.
- Kober, B., Schwab, A., Schettler, G. and Wessels, M., 2007, Constraints on paleowater dissolved loads and on catchment weathering over the past 16 ka from Sr-87/Sr-86 ratios and Ca/Mg/Sr chemistry of freshwater ostracode tests in sediments of Lake Constance, Central Europe. *Chemical Geology*, 240, 361-376.
- Mattey, D., Lowry, D., Duffet, J., Fisher, R., Hodge, E. and Frisia, S., 2008, A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem: reconstructed drip water and relationship to local precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 269, 80-95.
- McDermott, F., 2004, Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23, 901-918.
- McDonald, J., Drydale, R. and Hill, D., 2004, The 2002-2003 El Nino recorded in Australian cave drip waters: Implications for reconstructing rainfall histories using stalagmites. *Geophysical Research Letters*, 31, L22202.
- McMillan, E.A., Fairchild, I.J., Frisia, S., Borsato, A. and McDermott, F., 2005, Annual trace element cycles in calcite-aragonite speleothems: evidence of drought in the western Mediterranean 1200-1100 yr BP. *Journal of Quaternary Science*, 20, 423-433.
- Montagna, P., McCulloch, M., Taviani, M., Mazzoli, C. and Vendrell, B., 2006, Phosphorus in cold-water corals as a proxy for seawater nutrient chemistry. *Science*, 312, 1788-1791.
- Qian, W. and Zhu, Y., 2002, Little Ice Age Climate near Beijing, China, Inferred from Historical and Stalagmite Records. *Quaternary Research*, 57, 109-119.
- Roberts, M.S., Smart, P. and Baker, A., 1998, Annual trace element variations in a Holocene speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 154, 237-246.
- Spötl, C., Mangini, A., Frank, N., Eichstadter, R. and Burns, S.J., 2002, Start of the last interglacial period at 135 ka: Evidence from a high Alpine speleothem. *Geology*, 30, 815-818.
- Tan, M., Baker, A., Genty, D., Smith, C., Esper, J. and Cai, B.G., 2006, Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: comparison with dendro-chronology/climatology. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2103-2117.
- Treble, P., Shelley, J.M.G. and Chappell, J., 2003, Comparison of high-resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 141-153.
- Verheyden, S., 2005, Trace elements in speleothems: a short review of the state of the art. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 3 (1), 1-5.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.-C. and Dorale, J.A., 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.
- Winograd, I.J., Coplen, T.B., Landwehr, J.M., Riggs, A.C., Ludwig, K.R., Szabo, B.J., Kolesar, P.T. and Revesz, K.M., 1992, Continuous 500,000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada. *Science*, 258, 255-260.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K., 1993, Geologic Map of the Seongsan area. Jeju Province, 51-52 p (in Korean).
- Woo, K.S., Kim, J.C., Choi, D.W., Kim, J.K., Kim, R. and Nehza, O., 2008, The origin of erratic calcite speleothem in the Dangcheomul Cave (lava tube cave), Jeju Island, Korea. *Quaternary International*, 176-177, 70-81.
- Yang, M.S., Moon, J.H., Kang, S.S., Hyun, K.S. and Ja, Y.J., 1997, The Oreum of Jeju, Jeju Provincial Government, 473 p (in Korean).
- Zhou, H., Chi, B., Lawrence, M., Zhao, J., Yan, J., Greig, A. and Feng, Y., 2008, High-resolution and precisely date record of weathering and hydrological dynamics recorded by manganese and rare-earth elements in a stalagmite from Central China. *Quaternary Research*, 69, 438-446.

투 고 일 : 2013년 5월 10일

심 사 일 : 2013년 5월 16일

심사완료일 : 2013년 6월 19일