

제주도 용천동굴 석순에 기록된 산소동위원소를 이용한 지난 600년 동안의 고기후 연구

우경식¹ · 조경남^{2,‡} · 이상현² · 양동윤² · Li, H.-C.³ · 지효선¹

¹강원대학교 지질학과

²한국지질자원연구원

³National Taiwan University, Taiwan

요 약

이 연구는 석회장식 용암동굴인 용천동굴 내에서 성장하고 있던 석순(YC-1) 최상부 2 cm의 산소동위원소 성분을 이용하여 지난 약 600년 동안 고기후 변화를 알아보기 위하여 수행되었다. 해당 구간의 성장시기는 약 AD 1400년에서 시료가 채취된 2005년이며, 이 구간 내에서 산소동위원소 성분을 고해상도로 분석한 결과 약 1450년경에 고갈된 값을 보이다가 1460년부터 점차 부화되었다가 이후 다시 고갈되는 경향을 보여준다. 이와 같은 결과는 중세온난기(Medieval Warm Period)에서 소빙기(Little Ice Age)를 거쳐 현세온난기(Current Warm Period)에 이르는 기후변화를 반영한 것이라 생각된다. 중세온난기에서 소빙하기로 가면서 여름몬순의 강도가 약화되어 낮은 기온과 강수량을 보이면서 산소동위원소 성분이 부화되었다가, 소빙하기 이후에 평균 기온과 강수량의 상승으로 산소동위원소 성분이 고갈된 것으로 해석된다. 결론적으로, 이 연구의 결과는 국내 동굴 생물의 산소동위원소 성분을 이용하여 우리나라에 영향을 준 소빙하기의 기간을 처음으로 규명했다는 점에서 중요한 의미를 지니며, 최근에 발표된 같은 석순 내 미량원소 성분으로부터 추정된 결과를 강하게 지지한다.

주요어: 석순, 산소동위원소, 용천동굴, 제주도, 홀로세, 고기후

Kyung Sik Woo, Kyoung-nam Jo, Sangheon Yi, Dong Yoon Yang, Hong-Chun Li and Hyoseon Ji, 2013, Paleoclimatic investigation using oxygen isotope 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. 339-350

ABSTRACT: Trace elements of the stalagmite (YC-1) in Yongcheon Cave (lime-decorated lava tube cave) were obtained and investigated to delineate paleoclimatic history near the Korean Peninsula for about the past 600 years. Based on the age dating result of the same stalagmite, the growth period is estimated to be from about 1400 to 2005 AD. High resolution oxygen isotope data show the significant enrichment period which reflects the Little Ice Age between the Medieval Climate Anomaly and Current Warm Period. Oxygen isotope enrichment from the Medieval Climate Anomaly to the Little Ice Age reflect the decrease in summer monsoon intensity induced by colder and drier climate, and the depletion indicates the increase in summer monsoon intensity from the Little Ice Age to the Current Warm Period. This is the first report showing the full period of the Little Ice Age starting from ca. AD 1500 from oxygen isotope compositions of the stalagmite and the data also confirm the similar timing of the Little Ice Age demise based on trace element data previously reported.

Key words: stalagmite, oxygen isotopes, Yongcheon Cave, Jeju Island, Holocene, Paleoclimate

(Kyung Sik Woo and Hyoseon Ji, Department of Geology, College of Natural Science, Kangwon National University, Chuncheon 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)

[‡] Corresponding author:

E-mail: jokyung95@hanmail.net

1. 서 론

미래의 기후변화를 예측하기 위해 기후학자들은 지질학자들이 수집한 과거의 기후자료에 여러 기후 모델링 결과를 적용해서 분석하고 있다. 미래의 기후 모델링을 정량화하기 위해서는 기후학자들이 예측하는 모델링 시스템의 정확도가 판단되어야 하고, 이를 위해 가장 효율적인 방법이 과거의 기후변화 모델링 자료를 지질학적으로 확보된 고기후 자료와 비교하는 것이다. 이를 위해 지질학자들은 그동안 다양한 환경에서 수집된 자료를 얻어서 과거의 기후 자료를 복원하고 있다(e.g., Marchitto *et al.*, 2005; Henderson, 2006; Yu and Elderfield, 2007).

이 중에서 최근 20년 동안 가장 활발히 연구되고 있으며 가장 뚜렷한 고기후학적 발전을 이루고 있는 대표적인 연구재료로는 자연동굴 내에서 성장하는 석순 등 동굴생성물을 들 수 있다(e.g., McDermott, 2004). 동굴생성물의 고기후학적 장점은 1) 현재부터 과거 60만 년에 걸쳐 성장한 동굴생성물에 대한 정확한 연령측정이 가능하고(Richard and Dorale, 2003; McDermott, 2004), 2) 고해상도로 동굴생성물의 미시료를 채취할 경우, 최고 연변화(annual change)까지 기후변화의 추적이 가능하며(Tan *et al.*, 2006; Baker *et al.*, 2008), 3) 자연동굴은 빙하나 심해퇴적물과는 달리, 고위도에서 저위도에 이르기까지, 높은 고도에서 해안선 근처에 이르기까지 지구표면의 다양한 환경에서 발견되며(Woo, 2005), 4) 동굴을 답사할 수 있는 전문가와 동행한다면 시료채취에 많은 예산이 소요되지도 않으며, 5) 동굴생성물 내에 다양한 프록시(proxy; 조직적 특성, 산소, 탄소 및 황 안정동위원소, Mg, Sr, P, SO₄, Cu, Pb, Y, Zn 등 다양한 미량원소, excess ²¹⁰Pb, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비 등)를 이용해서 다양한 기후변화의 요소에 대한 해석이 가능하다는 것이다(e.g., Frisia *et al.*, 2005; Wynn *et al.*, 2006; Fairchild and Treble, 2009; Jo *et al.*, 2010a, 2010b, 2011).

동굴생성물 중에서 가장 많이 이용되는 시료는 석순이다. 석순은 천장에서부터 떨어지는 물방울이 바닥에 떨어지면서 성장하는 동굴생성물이다(Woo, 2005). 동굴생성물 중에서 석순이 가장 많이 이용되는 이유는 석순이 떨어지는 동굴수와 평형상태로 탄산염광물을 침전하기 때문으로 알려져 있다. 동굴생

성물은 주로 지하수가 동굴환경에 이르렀을 때, 이산화탄소의 유리작용이나 증발작용에 의해 동굴수가 탄산염광물에 대해 과포화상태에 이르면서 성장한다. 따라서 빠른 증발작용이나 이산화탄소의 유리작용은 동굴생성물을 매우 빠르게 자라게 하며, 이는 탄산염광물이 평형상태에서 침전되는 것이 아닌 동력학인 요소(kinetic effect)에 의해 광물 성장속도가 조절되어 비평형상태로 광물이 성장하기도 하게 한다. 동굴수가 외부의 환경을 지시하기 위해서는 그 동굴수의 성분이 동굴생성물 내에 그대로 기록되는 것이며, 이러한 과정은 동굴생성물을 형성하는 탄산염광물이 동굴수와 평형상태에서 광물을 침전할 때만이 보존되기 때문이다. 동굴생성물이 동굴수와 평형상태에 침전되는 지를 알아보는 방법이 알려져 있는데, 동굴생성물을 이용해 고기후 연구를 수행하는 학자들은 Hendy test라고 부르고 있다(Hendy, 1971). 특히 많은 학자들은 동굴 속에서 성장하는 석순이 동굴수와 주로 평형상태를 이루면서 성장한다고 많은 연구결과를 발표하였다(e.g., Talma and Volgel, 1992; Spötl and Mangini, 2002).

석순을 이용한 고기후 연구를 위해 가장 많이 외국에서 사용되어온 프록시는 안정동위원소이다. 안정동위원소 중에서 특히 산소동위원소는 여러 지역의 몬순기후를 지시하는 지시자로서 많이 활용되었다(Johnson *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2008). 특히 최근에 중국 석회동굴에서 발표된 일련의 연구들은 석회동굴 내에서 성장한 석순들의 산소동위원소 성분은 아시아몬순의 여름강도의 변화를 지시하는 중요한 지시자로서 사용되었다(Wang *et al.*, 2001, 2005; Yuan *et al.*, 2004). 산소동위원소 이외에 탄소동위원소도 석순을 이용한 고기후 연구에 많이 사용되어 왔다. 탄소동위원소는 산소동위원소와는 달리 온도에 의해 분별작용의 양이 영향을 받지 않기 때문에 주로 탄소의 기원에 관련된 연구가 이루어진 바 있다(Dorale *et al.*, 1992; Genty *et al.*, 2003). 특히 최근에 국내 석회동굴에서 이루어진 고기후연구는 석순의 탄소동위원소 결과로 많은 해석이 이루어지고 있다(Jo *et al.*, 2010a, 2010b, 2011). 또한 Ji *et al.* (2010)은 제주도 용천동굴 내의 석순에 대한 탄소동위원소 성분을 분석하여 한반도 주변에서 소빙기가 끝난 시기를 제안하기도 하였다. 석순의 미량원소 성분을 이용하여 많은 고기후연구가 수행되어 왔다(e.g., Fairchild

and Treble, 2009). 최근에 Woo *et al.* (2013)은 제주도 용천동굴 석순 내의 미량원소 성분을 분석하여 Ji *et al.* (2010)이 제안했던 소빙기가 끝나는 시기를 확인하였다.

동굴생성물의 산소동위원소 조성은 특히 동아시아지역, 인도지역, 브라질지역 몬순의 여름강도를 추정하기 위해 많이 이용되어 왔다(e.g., Porter and An, 1995; Wang *et al.*, 2001, 2008). 그 이유는 동굴 내의 연중 온도변화가 매우 작는데 비해 측정된 산소동위원소의 값이 시대별로 매우 큰 차이를 보이기 때문이다. 특히 Wang *et al.* (2001)은 중국 내 Hulu 동굴에서 성장한 석순의 산소동위원소 성분을 고해상도로 분석하여, 아시안 여름몬순의 강도, Heinrich 주기, D/O 주기 등 여러 돌발기후변화에 대한 자료를 빙하자료와 비교하여 아시아몬순의 여름강도와 전 지구적 기후변화와의 연관성을 밝히는데 큰 기여를 하였다. 이들이 산소동위원소의 값을 이용한 배경은 석순 내의 산소동위원소의 성분의 변화가 온도의 변화로는 해석할 수 없는 범위를 보이고, 이는 강수량의 변화의 영향으로 해석할 수 있었기 때문이다. 하지만 아직도 국내의 자연동굴 내에서 성장한 석순의 산소동위원소 성분을 이용하여 과거의 기후변화를 밝힌 논문은 아직 보고된 바 없다.

저자들은 최근 지질학회지 동권 동호에 발표한 같은 석순(YC-1)의 고해상도 미량원소 분석결과를 이용하여 같은 시기의 고기후 변화를 추정할 바 있다(Woo *et al.*, 2013). 하지만 발표된 미량원소 자료만으로는 석순의 조사 구간(최상부 2 cm)에 대한 여름몬순의 강도변화를 이용하여 소빙기가 시작된 시기를 추정하기가 어려웠다. 따라서 이 연구에서는 제주도 용천동굴 내에서 성장한 석순 시료(YC-1)를 이용하여 지난 600년 간 제주도 주변의 기후 변화를 추적하기 위해 수행하였다. 이 연구의 목적은 정확한 고기후 프록시로 이용되고 있는 고해상도 안정동위원소의 자료를 기존 미량원소결과와 비교하여 지난 600년 동안 제주도 주변지역에 영향을 주었던 기후변화를 더욱 정확하고 정량적으로 제시하는 것이다.

2. 연구지역

연구지역에 분포하는 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 해안저지대와 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, 미탐사된 수증통로까지 감안하면 전체길이는 3 km 이상이 될 것으로 추정하고 있다. 통로의 폭은 약 7~15 m, 높이는 약 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 관찰할 수 있는 용암종유, 용암석순 및 용암석주와 같은 동굴생성물과 함께 석회동굴에서만 주로 형성되는 매우 다양하고 많은 탄산칼슘 성분의 동굴생성물이 활발히 형성되고 있다(Ji *et al.*, 2010, 2011).

용천동굴은 해변에 근접해 있으며, 이로 인하여 해변 퇴적물이 용천동굴 상부로 공급, 퇴적되었으며, 이러한 탄산염퇴적물은 제주도의 여러 해변에서 보고된 바 있다(Ji and Woo, 1995). Ji *et al.* (2008)은 용천동굴 상부 지표면을 덮고 있는 사구의 연령이 해안가에서 내륙으로 가면서 젊어지며 그 연령은 약 2000~4500년 전으로 제안한 바 있다. 용천동굴 위를 피복하고 있는 탄산염퇴적물은 빗물과 토양 내의 여러 산에 의해 용해되어 동굴 내로 칼슘 이온과 탄산염 이온을 공급하고, 그 결과로 용천동굴 내에는 석회동굴 내에서 발견되는 여러 종류의 동굴생성물이 성장하고 있다(Woo *et al.*, 2008). 용천동굴 내에서 발견되는 대표적인 동굴생성물로는 종유관, 용암종유, 석순, 석주, 동굴산호, 커튼, 유석, 휴석, 월유 등이 있다.

3. 연구방법

제주도 용천동굴에서 성장하는 석순(YC-1)을 채취하였다. YC-1은 채취 당시 과거 용천동굴을 출입

했던 인간에 의해 유입되어 사용된 나무 위를 피복하여 성장하고 있었다. 채취된 동굴생성물 표품을 성장축을 따라 수직 방향으로 절단한 후 내부 성장선을 관찰하고 내부 미세조직은 박편을 제작하여 관찰하였다(그림 2A). 석순의 측면부를 상부와 하부로 나눠 7.5×5 cm 규격의 슬라이드 글라스를 이용하여 박편을 제작하였으며, 박편관찰을 통해 내부 성장선의 특성과 빈도를 평가하였다. 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; Woo *et al.*, 2013).

같은 석순에 대한 미량원소 연구(Woo *et al.*, 2013)에서는 excess ²¹⁰Pb 법 한 가지 방법에 의해서만 연대가 추정되었다. 그러나 석순의 성장률은 매우 변화

가 심할 수도 있기 때문에 다양한 방법의 연대측정을 수행하여 그 결과를 서로 대비하는 절차가 요구된다. 분석한 석순(YC-1)의 기저에는 나무 파편이 포함되어 있다. 이 나무 파편은 과거 용천동굴의 입구가 있었을 당시 인간의 출입에 의해 운반된 것으로 추정되며, 이 나무 파편에 포함되어 있는 ¹⁴C 성분을 이용하여 방사성탄소 연대측정(Radiocarbon age dating)을 수행하였다. 분석은 미국의 Beta Analytic, Inc.에 의뢰하였으며, 채취한 시료 중 약 10 g을 취하여 Accelerator Mass Spectrometry Techhique (AMS Technique) 방법으로 분석하였다. 미량원소를 이용한 이전의 연구(Woo *et al.*, submitted)와 같은 구간에서 산소동위원소를 분석하기 위해 0 cm 지점부터 2 cm 지점까지 125 μm 간격으로 총 160개의 미시료를 채취하였다(그림 2B). 미시료 채취는 대

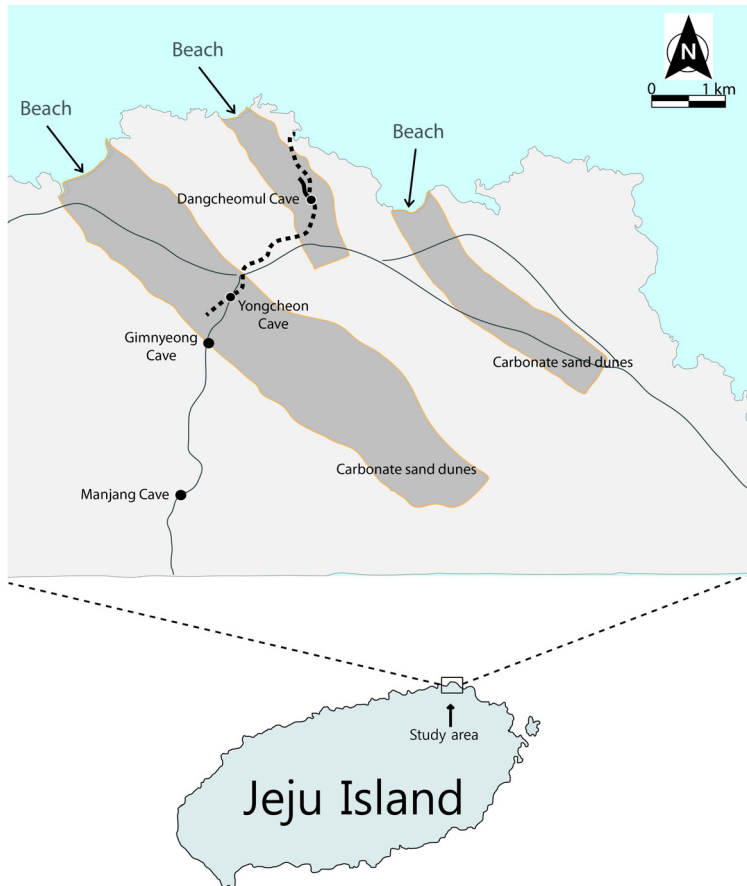


Fig. 1. Location map of the Yongcheon Cave on Jeju Island. Gray zones denote the distribution of carbonate sand dunes. The passages of the Yongcheon and Dangcheomul caves are denoted by dotted and solid lines, respectively.

만의 국립성공대학 지구과학과가 보유하고 있는 마이크로밀(micromill)을 이용하여 실시되었다. 채취된 미시료의 산소동위원소 분석은 대만 국립성공대학 지구과학과의 안정동위원소 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometer; Thermo Finnigan사, Delta XP plus)를 이용하였다. 분석오차는 $\pm 0.1\%$ 이며, 분석값은 PDB standard로 표기하였다.

4. 연구결과

4.1 석순의 조직적 연구결과

이 연구를 위해 분석된 YC-1 석순의 조직적 특성

을 요약하면 다음과 같으며, 좀 더 세밀한 조직적 연구결과는 Woo *et al.* (2013)에 나타내었다. 성장선은 육안관찰 시 주로 흰색을 띠는 0.01 mm 이하의 가는 선으로 구성되어 있으며(그림 2A), 박편 관찰 시에도 성장성이 뚜렷하게 보인다(그림 2C, 2D). 석순은 모두 저마그네슘방해석으로 이루어져 있으며, 내부 결정의 형태는 성장선에 수직방향으로 배열된 주상 방해석이다(그림 2C). 이 석순 내 성장선의 특징에 따라 상대적으로 진한 성장선이 일부분에 밀집되어 나타나는 성장선 밀집대와 성장선이 매우 희미하게 나타나는 성장선 비밀집대의 특징이 관찰됨에 따라 전체 석순의 미세 주상도를 작성하여 석순 내에

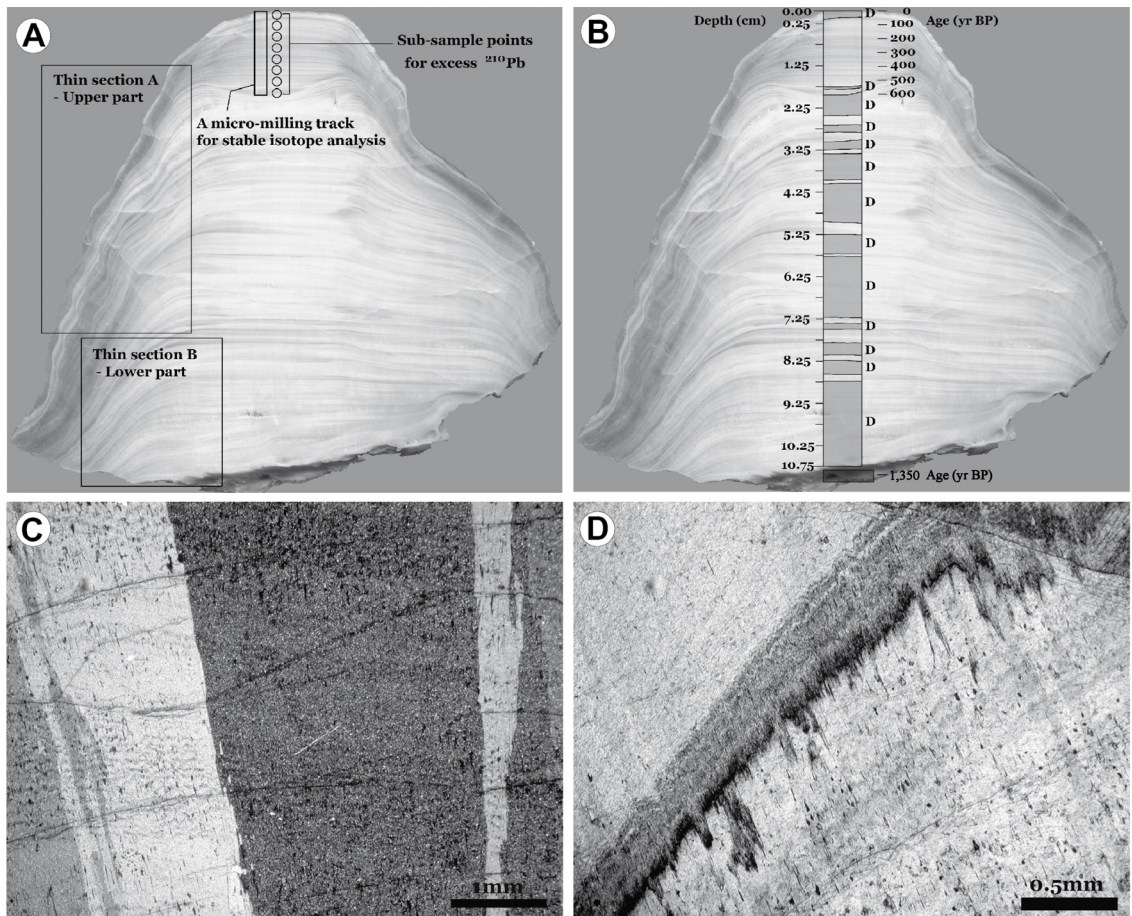


Fig. 2. (A) The YC-1 stalagmite slab used for this study. Two rectangles indicate the portions of the stalagmite made for two thin sections. Microsampling sites for excess ^{210}Pb are also indicated as circles and the track for trace elements is indicated. (B) The YC-1 stalagmite slab showing the calcite layers with densely spaced growth laminae (D). The calcite layers with less spaced growth laminae are between D's. Note that the two layers are alternating and the D's are thicker. (C) Columnar calcite with faint growth laminae in the YC-1 stalagmite. Note straight boundaries between columnar crystals. (D) Corroded surface on the tip of calcite crystals which indicate dripping water was acidic.

서 두 구간을 구별하였다. 그 결과, YC-1에서 나타나는 성장선 밀집대와 비밀집대는 각각 13부분과 12부분으로 나누어진다(그림 2B; Woo *et al.*, 2013). 성장선 밀집대의 두께는 상부의 한 부분을 제외하고 0.12~2.05 cm의 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 비밀집대는 비교적 얇은 두께의 성장선 비밀집대가 두꺼운 성장선 밀집대 내에 협재되어 있는 형태를 보여준다. 그러나 이러한 특징은 전체 길이 10.75 cm의 석순 중에서 상부 1.90 cm 이하에서만 유효하며, 상부에서는 반대되는 특징을 보인다. 즉 성장선 비밀집대가 극도로 우세해지면서 반대로 성장선 밀집대가 협재되는 형태를 보인다. 즉 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 진해기는 약해지는 경향성을 보인다(Woo *et al.*, 2013). 또한 성장선 밀집대 내에 주상의 방해석이 성장하다가 그 표면이 용식된 구조가 잘 관찰된다(그림 2D)

4.2 성장률 및 연령

Woo *et al.* (2013)은 YC-1 석순의 연령을 석순에 포함된 excess ^{210}Pb 을 이용하여 추정할 바 있다. 이들은 이 석순의 성장률은 약 0.033 mm/yr이며, 조사구간의 성장률은 거의 일정했던 것으로 해석하였다. 또한, 이러한 결과는 조직적 분석 결과 석순 내 성장띠의 두께가 0.02~0.07 mm라는 사실과 유사한 결과로 판단된다고 주장하였다. 이를 토대로 이들은 석순 내에 나타나는 각 성장띠를 1년간 성장한 연 성장띠로 해석하였으며, 분석이 실시된 YC-1의 최상부 2 cm 구간은 AD 1401~2005년에 형성된 것으로 추정할 바 있다.

이와 같이 excess ^{210}Pb 법에 의해 추정된 석순의 연령에 대한 보완자료를 얻기 위해 석순의 밑에서 발견된 과거 용천동굴을 출입했던 사람들이 버리고 간 것으로 추정되는 나무 파편에 대한 방사성 탄소 연대측정을 실시하였다. 이 시료가 석순의 기저에 위치하기 때문에, 측정된 연령은 석순이 형성되기 시작한 연령이라기보다는 이 석순이 보일 수 있는 최대의 연령을 의미한다. 분석 결과, conventional

radiocarbon age는 $1,350 \pm 50$ yr BP로 나타났다(그림 2B). 이러한 결과는 excess ^{210}Pb 법에 의해 추정된 최상부 2 cm 구간의 성장률이 석순 전체가 형성되는 동안 일정하다고 가정하여 계산되는 약 3,000 yr BP와 매우 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 excess ^{210}Pb 연령측정법의 원리 상 최대 200년 이상의 연령을 추정하는 것이 어렵기 때문에 위와 같은 방사성 탄소 연대측정 결과가 잘못된 결과라고는 하기는 어렵다. 또한 YC-1의 excess ^{210}Pb 와 방사성 탄소 연대측정 결과가 모두 매우 믿을만한 결과를 보였기 때문에 이러한 석순 최하부 연령의 문제는 YC-1이 성장하는 동안 성장률이 크게 변했던 것으로 해석하는 것이 더 합리적이다. 따라서 이 석순에 대한 정확한 성장률과 성장시기를 밝히기 위해서는 석순의 전 구간에 대해 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 연대분석을 실시해야 할 것으로 생각된다. 이 연구에서는 YC-1 석순의 연대해석을 위해 최상부 2 cm 구간을 대상으로 실시한 excess ^{210}Pb 결과를 적용하였으며, 따라서 해당구간에 대해서만 고기후학적 해석을 실시하였다.

4.3 산소동위원소 분석 결과

이 연구를 통해 YC-1 최상부 2 cm 구간에서 분석한 산소동위원소 값은 -5.8~-7.4‰의 범위를 나타낸다(그림 3). 산소동위원소의 최대값과 최소값은 약 1.6‰ 가량의 차이를 보인다. 산소동위원소는 매우 불규칙한 변화를 보이지만 전체적으로 하부로부터 고갈되다가 점차적으로 부화된 후 다시 고갈되는 양상을 보인다. 특히 최하부인 20 mm 구간에서 약간 부화되다가 약 17~19 mm에서 급격히 고갈되는 양상을 보인다. 약 17 mm보다 상부로 가면서 16 mm까지 점차적으로 부화되고 있다. 하지만 부화되는 양상은 불규칙적으로 변화하고 있으며, 어느 정도 계단식의 변화를 보여주고 있다. 약 9.5 mm에서 가장 부화된 값인 -5.8‰의 값을 보이며 약 8 mm 구간까지 약간 부화되었다가 다시 고갈되는 경향을 보인다. 약 6 mm 구간에서는 매우 부화된 값을 보이며, 어느 정도 일정한 값을 유지하다가 약 2 mm 깊이로부터 표면까지 다시 부화되는 경향을 보여준다.

5. 토 의

동굴 내에서 성장하는 석순은 생물의 영향을 전

혀 받지 않고 무기적으로 탄산염광물이 성장하면서 자란다. 특히 석순은 중유석과 같이 동굴 내로 침투한 지하수로부터 이산화탄소가 빠르게 유리되면서 탄산염광물이 성장하면서 자라는 것이다. 그 이유는 빗물이 석회암층을 통과하면서 이산화탄소의 분압이 물속에 증가하게 되고, 동굴 내로 지하수가 동굴 속으로 침투하면 동굴 내 이산화탄소의 분압이 상대적으로 낮기 때문에 유리작용이 일어나는 것이다 (Woo, 2005). 석순을 이루고 있는 방해석은 침전할 때 산소동위원소 성분에 대해 방해석을 침전시킨 동굴수와 평형상태에 있다는 것은 많은 학자들이 제안한 바 있다(e.g., Gascoyne *et al.*, 1980). 따라서 용천동굴 내의 석순에 기록된 산소동위원소 성분은 과거 동굴수 내 산소동위원소 성분의 변동, 혹은 석순이 성장하는 동안의 동굴 내 기온 변화로 해석할 수 있다.

지난 15년 동안 석순 내에 기록된 산소동위원소 성분을 이용하여 아시아몬순의 변화에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그 중에서 가장 선도적인 연구결과를 발표했던 것은 Wang *et al.* (2001)의 연구이다. 이들은 중국 동남부 Hulu 동굴의 석순으로부터 고해상도로 산소동위원소 성분을 분석하여, 지난 75000~100000년 전 사이에 성장한 석순 내에서 Heinrich cycle, D/O cycle의 기록을 밝혀냈으며, 이러한 기록이 그린란드에서 시추한 빙하 코아의 기록과 일치함을 보여주었다. 특히 이들이 밝혔던 기록은 주로 간빙기 동안에는 아시아 여름몬순의 강도가 더 강해졌다는 사실이다. 이들이 이러한 결론에 도달할 수 있었던 가장 중요한 증거는 석순 내에 기록된 산소동위원소 값의 변화이다. 보통 석회동굴 내의 기온 변화는 연 중 내내 일정하다. 따라서 이들이 분석한 석순 내에서 약 5‰에 걸쳐 산소동위원소 성분의 차이를 보이는 것은 동굴 내의 기온이 섭씨 18도 정도 변화한 것을 의미하는데, 이는 사실상 불가능하다는 것이 이들의 논리였다. 이들은 따라서 이러한 석순 내 산소동위원소의 변동이 비가 많이 오는 간빙기 동안에는 비가 내리는 양이 많아지면서 산소동위원소의 성분이 고갈된 값을 보이고 반대로 비가 상대적으로 적게 오는 빙하기 동안에는 더 부화된 산소동위원소 성분을 보이는 것이라고 제안했다. 즉 고갈된 산소동위원소를 보이는 시기는 동아시아 여름몬순의 강도가 더 강화되었던 시기이고, 반대로 더 부화된 산소동위원소 성분을 보이는 시기

는 동아시아 여름몬순의 강도가 약화되었던 빙하기라는 것이다. 이들은 또한 이들의 자료가 지구가 태양으로부터 받은 일사량과 일치한다는 사실도 밝혀냈다. 이들의 연구결과가 발표된 이후, 석회동굴 내 석순의 산소동위원소 성분을 이용한 동아시아몬순에 대한 연구는 매우 활발히 이루어졌으며, 석순 내 산소동위원소 성분의 변화는 동아시아 여름몬순과 인디안 몬순의 강도를 지시하는 중요한 지시자료로 이용되고 있다(Fleitmann *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005).

용천동굴 내에서 성장하던 YC-1 석순의 성장시기를 excess ^{210}Pb 으로 추정된 결과 최상부에서 2 cm 지점은 AD 1401년으로 추정된다(Woo *et al.*, 2013). 또한 석순의 최상부는 이 시료를 채취한 시점인 2005년이다. 이를 토대로 석순의 성장률이 0.033 mm/yr라고 가정하면(Woo *et al.*, 2013), 각 지점별로 이 석순의 연령을 추정할 수 있다(그림 3). YC-1 석순의 산소동위원소 성분은 전체적으로 2 cm 구간인 1401년부터 약 1450년까지 감소하다가 그 이후에 약 1700년까지 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 그리고 이렇게 부화된 값은 1900년 정도까지 지속되다가 다시 1950년부터 급격히 증가한다. 가장 값이 부화된 시기와 고갈된 시기의 산소동위원소 값의 차이는 약 1.5‰이다. 이러한 차이는 용천동굴 내에 유입되는 동굴수 성분의 차이, 혹은 용천동굴 내 온도의 변화로 해석될 수 있다. 만일 이 차이가 온도에만 의한 것이라면 이 차이를 온도로 환산하면 약 5.5~6℃의 차이에 해당한다. 2008년에 용천동굴의 내부 온도를 모니터링한 결과에 의하면 용천동굴의 내부의 기온은 지역에 따라 약간의 차이는 있지만 YC-1 시료를 채취한 지점 부근에서는 대부분 2~3℃의 차이를 보인다(Jeju Special Self-governing Province, 2009). 이렇게 상대적으로 부화된 산소동위원소 성분을 보이는 기간은 소비하기에 해당하는 구간으로 추정된다. 일 년 내에 동굴 내 기온의 변화가 3℃ 이내일 경우, 소비하기 동안과 그 이전, 이후의 기간에 동굴 내의 온도가 평균 5.5~6℃의 차이를 보이는 것은 거의 현실적으로 불가능한 기온의 차이이다. 왜냐하면 동굴 내의 평균온도가 이 정도의 차이를 보인다면 동굴 위 지표에서 보이는 온도의 차이는 더 클 것이기 때문이다. 이러한 온도의 차이는 소비하기 동안에 이미 보고된 온도의 차이보다 매우 큰 값

이며, 여러 자료를 통해 추정하고 있는 소빙기 동안 온도의 차이는 약 2°C 이내이다(IPCC, 2007). 따라서 이러한 산소동위원소 값의 차이는 동굴로 유입된 동굴수의 산소동위원소 성분의 차이에 의한 것으로 해석된다.

YC-1의 산소동위원소 조성은 강우의 산소동위원소 성분과 탄산염 퇴적물과 반응할 수 있는 체류 시간에 영향을 받을 수 있다. 하지만 강우가 내릴 경우, 사구퇴적층을 통과하여 동굴로 도달하는 시간이 수 시간 이내일 정도로 매우 짧기 때문에 실제로 상부의 탄산염퇴적물과 반응하는 것보다는 내리는 강수

의 산소동위원소 성분의 차이에 더 많은 영향을 받았을 것으로 추정된다. 즉, 강수의 산소동위원소 성분의 차이는 여름 몬순이 강한 시기 동안 강우량이 많아짐에 따라 “강우량 효과”에 의해 강우의 산소동위원소 성분이 더 결정된다는 것이 여러 자료를 통해 잘 알려져 있다(e.g., Wang *et al.*, 2001). 따라서 YC-1의 산소동위원소 성분이 결정되는 것은 동아시아 몬순이 강화된 시기를 나타내는 것이며, 부화된 경우는 동아시아 몬순이 약화된 시기로 해석할 수 있다. 즉 소빙기 동안에는 여름몬순의 강도가 약해서 부화된 산소동위원소 성분의 값을 보이지만 그

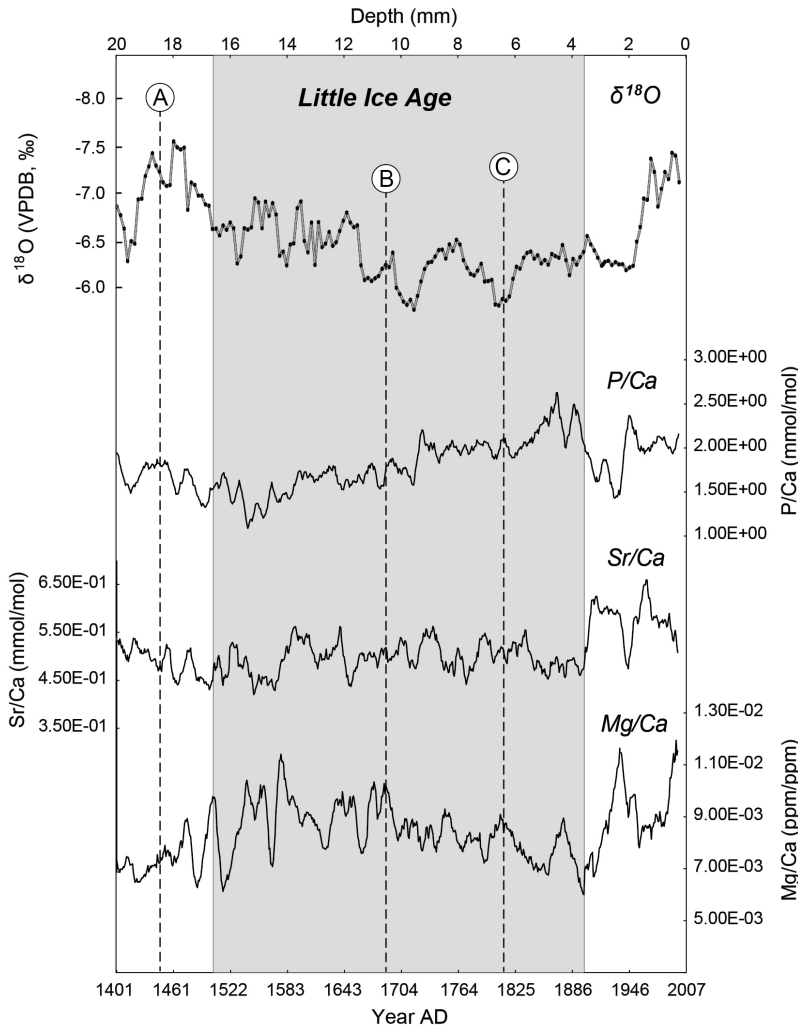


Fig. 3. Stable isotope variations of the YC-1 stalagmite compared with trace elemental compositions (Woo *et al.*, 2013). The dashed lines with A, B and C indicate the timings of the notable paleoclimatic signals. Note that oxygen isotope compositions clearly show the period of the Little Ice Age.

이전과 이후의 시기는 더 강한 여름몬순의 강도 때문에 고갈된 값을 보이는 것이다. 이와 같은 결과는 동아시아몬순의 변화를 잘 보여주는 중국 내 여러 석회동굴에서 자란 석순 연구에서 많이 보고된 바 있다(Fleitmann *et al.*, 2003; Johnson and Ingram, 2004; Yuan *et al.*, 2004; Dykoski *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008; Cosford *et al.*, 2009).

산소동위원소 분석결과를 같은 석순에서 분석된 미량원소와 비교하면 매우 흥미로운 결과를 보여준다. 산소동위원소 성분이 전반적으로 부화된 시기 동안에 P/Ca비와 Sr/Ca비도 대체적으로 낮은 값을 보여준다. 하지만 Mg/Ca비는 그 경향이 뚜렷이 나타나지 않는다. 흥미로운 사실은 산소동위원소와 같이 P/Ca, Sr/Ca, Mg/Ca 값이 모두 1890년경부터 급격한 차이를 보인다는 것이다. Woo *et al.* (2013)은 이러한 미량원소의 증가는 강수량이 많아지면서 토양 내의 미량원소 성분이 동굴수 내에 더 많이 포함된 결과라고 제안하였으며, 이 시기가 소빙하기가 끝나는 시점일 것으로 제안하였다. Ji *et al.* (2010)은 이 석순이 채취된 용천동굴 내 다른 위치에서 채취한 석순(YC-2)의 탄소동위원소 성분을 분석하여 제주도에서 소빙하기가 끝난 시기는 약 1870년이라고 제안한 바 있다. 산소동위원소 성분의 결과는 미량원소의 결과보다는 다소 늦은 약 1950년경부터 급격히 변하는 값을 보이고 있다. 따라서 소빙하기가 끝나는 시기는 미량원소의 값이 급격히 증가하는, 그리고 탄소동위원소의 성분이 고갈된 값을 보이는 1890년경으로 판단하는 것이 더 타당하다고 생각된다. 산소동위원소 성분이 미량원소나 탄소동위원소 성분과 약간의 시기 차이를 보이는 이유는 확실하지 않지만, 아마도 산소동위원소 성분이 태풍과 같이 많은 강우량을 보이는 경우에 일시적으로 변화를 보일 수도 있기 때문으로 생각된다(Lawrence and Gedzelman, 1996). 산소동위원소 성분이 가장 고갈된 성분을 보이는 구간은 약 1460년경이며, 이 시기 이전의 값은 이번 연구를 통해 분석되지 못한 상태이다. 하지만 1460년 이후에 지속적으로 산소동위원소 성분이 부화되기 때문에 이 시기를 소빙하기가 시작되는 시기로 판단할 수 있으며, 그 이전의 시기는 중세온난기(Medieval Warm Period)에 해당하는 시기로 판단된다. 즉 소빙하기가 시작되면서

강수량이 점차 줄어들어서 동아시아 몬순의 여름강도가 점차 약해지고 있었다는 것을 나타낸다. 이러한 소빙하기의 시기는 용천동굴과 같은 특성을 가진 부근의 당치물동굴 내에서 성장한 석순의 조직적 결과를 이용하여 추정된 시기와 비슷한 값이다(Hong *et al.*, 2012). 따라서 용천동굴에서 조사된 석순(YC-1)의 산소동위원소 결과는 우리나라 제주도 부근에서 발생했던 소빙하기가 약 1460년부터 1890년까지 지속되었음을 보여준다. 이는 YC-1 석순의 조직적 결과와도 잘 일치하고 있다(Woo *et al.*, 2013). 즉 YC-1 석순의 최상부 2 cm 구간은 대부분 부화된 산소동위원소 성분의 값을 보이는 소빙하기로 이루어져 있으며, 이 구간이 성장선 비밀집대에 해당되는 구간이다(그림 2B, 3). 즉 성장선 밀집대는 상대적으로 강우량이 많은 강한 여름 몬순에 영향을 받은 시기를 지시하며, 성장선 비밀집대는 약한 여름 몬순에 영향을 받은 시기를 지시하기 때문에 산소동위원소 결과와 잘 일치하고 있다. 이러한 석순 YC-1에 나타난 소빙하기의 기록은 부근 동아시아 지역의 다른 연구 결과와 매우 유사한 경향을 보이고 있다(e.g., Qian and Zhu, 2002; Paulsen *et al.*, 2003). 하지만 동아시아 몬순의 약화를 보이는 구간의 시작은 약 1460년경으로 나타나 1300년경부터 1850년경까지 유럽 등 세계 여러 지역에서 보고된 소빙하기(Little Ice Age)의 기록과 시작된 시점과 끝나는 시점에서 약간의 차이를 보이고 있다.

6. 결론

용천동굴 내에서 성장한 석순(YC-1) 내에 포함된 산소동위원소 성분을 고해상도로 분석한 결과, 산소동위원소 성분은 약 AD 1460년경부터 뚜렷이 부화되는 경향을 보여주며, AD 1890년경부터 다시 고갈되는 경향을 보여준다. 산소동위원소의 성분의 변화는 아시아몬순의 여름강도의 변화를 지시하기 때문에 이러한 변화는 제주도 주변의 강수량의 차이에 의한 것으로 추정된다. 따라서 산소동위원소 성분이 부화되기 시작하는 약 AD 1480년경부터는 중세온난기(Medieval Warm Period)에서 소빙하기로 변화하는 기간이며 두 시기가 전이되는 기간은 50년 정도였던 것으로 추정된다. 약 AD 1520년경부터 지속된 소빙하기는 19세기 말부터 현재의 지구온난화

시기로 전이된 것으로 추정된다. 산소동위원소 기록만으로는 지구온난화가 약 AD 1950년경에 시작된 것으로 추정될 수 있으나, 이미 발표된 미량원소의 기록과 함께 고려할 경우 제주도 주변의 소빙하기는 약 AD 1890년경에 끝난 것으로 생각된다. 이는 최근에 발표된 같은 석순 내 미량원소 성분으로부터 추정된 시기와 유사한 결과이다.

사 사

이 연구는 2008년도 기상청 연구개발 프로그램 (CATER) 과제(2008-4306)의 지원으로 강원대학교 우경식 교수에게 지원하였던 ‘한반도 주변 지역의 홀로세 고기후 변화 복원’ 과제의 연구비로 이루어졌다. 이 연구를 위해 현장 조사를 허가해준 문화재청과 제주특별자치도에 감사한다. 이 연구를 위해 현장조사 연구를 지원해준 (사)한국동굴연구소에 감사한다. 이 논문에 심사를 해준 심사자들에게도 감사한다.

REFERENCES

- 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.
- Cosford, J., Qing, H., Matthey, D.E. and Zhang, M., 2009, Climatic and local effects on stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ values at Lianhua Cave, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280, 235-244.
- 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.
- Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z. and Revenaugh, J., 2005, A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233, 71-86.
- Fairchild, I.J. and Treble, P.C., 2009, Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28, 449-468.
- Fleitmann, D., Burns, S.J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A. and Matter, A., 2003, Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. *Science*, 300, 1737-1739.
- Frisia, S., Borsato, A., Fairchild, I.J. and Susini, J., 2005, Variations in atmospheric sulphate recorded in stalagmites by synchrotron micro-XRF and XANES analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 729-740.
- Gascoyne, M., Schwarcz, H.P. and Ford, D.C., 1980, A palaeotemperature record for the mid-Wisconsin in Vancouver Island. *Nature*, 285, 474-476.
- 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.
- Henderson, G.M., 2006, Caving in to new chronologies. *Science*, 313, 620-622.
- 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, 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).
- Hu, C., Henderson, G.H., Huang, J., Xie, S., Sun, Y. and Johnson, K.R., 2008, Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266, 221-232.
- IPCC, 2007, *Climate change 2007: the physical Science basis. Contribution of working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental panel on climate change.* In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate change 2007: the physical Science basis. Contribution of working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental panel on climate change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeju Special Self-governing Province, 2009, Report of academic research for Yongcheon Cave. 71-82 p (in Korean).
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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).
- 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).
- Jo, K., Woo, K.S., Cheng, H., Edwards, L. Wang, Y.J., Kim, R. and Jiang, X., 2010a, Textural and carbon iso-topic 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., Hong, G.H., Kim, S.H. and Suk, B.C., 2010b, Rainfall and hydrological controls on speleothem geochemistry during climatic events (droughts and typhoons): An example from Seopdong Cave, Republic of Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 441-450.
- Jo, K., Woo, K.S., Lim, H.Y., Cheng, H., Edwards, R.L., Wang, Y., Jiang, X., Kim, R., Lee, J.I., Yoon, H.I. and 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.
- Johnson, K.R. and Ingram, B.L., 2004, Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters*, 220, 365-377.
- Johnson, K.R., Ingram, B.L., Sharp, W.D. and Zhang, P., 2006, East Asian summer monsoon variability during Marine Isotope Stage 5 based on speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records from Wanxiang Cave, central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 236, 5-19.
- Lawrence, J.R. and Gedzelman, S.D., 1996, Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains. *Geophysical Research Letters*, 23, 527-530.
- Marchitto, T.M., Lynch-Stieglitz, J. and Hemming, S.R., 2005, Deep Pacific CaCO_3 compensation and glacial-interglacial atmospheric CO_2 . *Earth and Planetary Science Letters*, 231, 317-336.
- McDermott, F., 2004, Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23, 901-918.
- Paulsen, D.E., Li, H. and Ku, T., 2003, Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*, 22, 691-701.
- Porter, S.C. and An, Z., 1995, Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375, 305-308.
- Qian, W. and Zhu, Y., 2002, Little ice Age Climate near Beijing, China, Inferred from Historical and Stalagmite Records. *Quaternary Research*, 57, 109-119.
- Richard, D.A. and Dorale, J.A., 2003, Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 52, 407-460.
- Spötl, C. and Mangini, A., 2002, Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard-Oeschger events during isotope stage 3: implications for the absolute chronology of Greenland ice cores. *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 507-518.
- Talma, A.S. and Vogel, J.C., 1992, Late Quaternary paleotemperature derived from speleothem from Cango Caves, Cape Province, South Africa. *Quaternary Research*, 37, 203-213.
- Tan, M., Baker, A., Genty, D., Smith, C., Esper, J. and Cai, B.G., 2006, Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: comparison with dendrochronology/climatology. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2103-2117.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, 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., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M.J., Dykoski, C.A. 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., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jiang, X., Wang, X. and An, Z., 2008, Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 2,24,000 years. *Nature*, 451, 1090-1093.
- 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., 2005, *Caves: A Wonderful Underground*. Hollym, Seoul, 230 p.
- Woo, K.S., Jo, K.N., Yi, S.H., Yang, D.Y. and Li, H.-C., 2013, Paeloclimatic 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*, 49, 325-338 (in Korean with English abstract).

- 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 Dangecheomul Cave (lava tube cave), Jeju Island, Korea. *Quaternary International*, 176-177, 70-81.
- Wynn, P.M., Fairchild, I.J., Baker, A., Frisia, S., Borsato, A. and Miorandi, R., 2006, Atmospheric forcing of sulphate in speleothem carbonate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, A710.
- Yu, J. and Elderfield, H., 2007, Benthic foraminiferal B/Ca ratios reflect deep water carbonate saturation state. *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 73-86.
- Yuan, D., Cheng, H., Edwards, R.L., Dykoski, C.A., Kelly, M.J., Zhang, M., Qing, J., Lin, Y., Wang, Y., Wu, J., Dorale, J.A., 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. and Johnson, K., 2008, A Test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322, 940-942.

투 고 일 : 2013년 6월 10일

심 사 일 : 2013년 6월 11일

심사완료일 : 2013년 6월 25일