



Short Note

강릉 옥계굴 석순에서 발현되는 발광 특성과 향후 고기후 연구로의 적용가능성

김지혜, 조경남*

강원대학교 지질학과

Luminescence property in a stalagmite from Okgye Cave and applicability for paleoclimate research

Jihye Kim, Kyoung-nam Jo*

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received: October 10, 2024 / Revised: January 14, 2025 / Accepted: January 15, 2025

*Corresponding author: +82-33-250-8555 / E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

요약: 동굴생성물 내의 발광 특성은 안정동위원소비 및 미량원소 성분과 함께 연계하여 고해상도 고기후 연구에 광범위하게 활용되고 있다. 그럼에도 불구하고 국내 동굴생성물에 대한 발광 특성 연구사례는 공식적으로 보고된 바 없으며, 이를 활용한 연구는 전무한 실정이다. 이 연구에서는 공초점 레이저 주사현미 분석기법(confocal laser scanning microscopy; CLSM)을 활용하여 옥계굴 석순(OG1)의 발광 특성을 보고하고, 이를 이용한 고기후 연구로의 적용가능성을 검토하였다. 석순 OG1은 내부 단면에서 관찰되는 암석학적 특징 및 결정 성장 형태에 따라 서로 다른 발광 특성을 보이며, 발광띠와 비발광띠가 쌍을 이루는 발광 엽층리 구조를 뚜렷하게 보존하고 있다. 동굴생성물이 발광 특성을 띠기 위해서는 토양기원 유기물이 동굴 내부로 이동될 만큼의 충분한 침출수가 필요하기 때문에, OG1에서 관찰되는 발광띠는 한반도의 강수량 및 침출수가 크게 집중되는 여름철 우기 동안 형성된 것으로 해석된다. 이번 연구결과는 국내 석순의 발광 특성을 통해 성장 당시의 계절 및 주변 환경 변화에 대한 정보를 획득할 수 있음을 제시하고, 아울러 발광띠 쌍을 활용한 누적집계 연대측정기법이 적용될 수 있음을 시사한다.

주요어: 석순, 발광, 성장선, 옥계굴, 고기후

ABSTRACT: Luminescence properties in speleothems have been widely used for high-resolution paleoclimate studies combined with stable isotope and trace element records. However, luminescence in Korean speleothems has not been reported before, and there is no research on it. Here, we describe luminescence properties of a stalagmite (OG1) from Okgye Cave, South Korea, using confocal laser scanning microscopy (CLSM) and discuss its applicability for the paleoclimate research. The stalagmite exhibits lithology-dependent luminescence properties, including crystal habit, and preserves luminescence lamination consisting of couplets of bright and non-luminescent bands. Based on previous reports, luminescence in speleothems is mostly caused by sufficient water infiltration to transport soil-derived organic matter into the cave. Therefore, the bright luminescent band in OG1 would have formed during summer rainy season, when extreme rainfall events occur over the Korean Peninsula. This study suggests that luminescence properties of Korean speleothems may provide information on seasonal paleoclimatic changes during the growth, and can also be used to improve geochronological uncertainty with an incremental age dating method.

Key words: stalagmite, luminescence, growth line, Okgye Cave, paleoclimate

1. 서론

일부 동굴생성물의 내부 단면에서는 자외선 또는 가시광선 파장의 전자기파를 조사할 때 발광하는 현상이 나타난다. 현재까지의 연구에 의하면 동굴생성물 내에서 발광을 일으키는 물질은 동굴 상부 토양에서 유래한 유기물, 특히 휴믹물질(humic substance)인 것으로 해석되고 있다(White and Brennan, 1989; Shopov *et al.*, 1994). 휴믹물질은 동식물의 분해과정에서 생성되는 고분자 유기화합물로, 형광 효율이 높은 방향족 고리(aromatic ring) 구조로 구성되어 있어 에너지의 흡수와 방출 반응 시 빛을 발산하는 특성을 띤다(Senesi *et al.*, 1991).

최근에는 동굴수(cave drip water)의 형광 스펙트럼 분석을 통해 리그닌(lignin)과 단백질계(protein-like) 형광 신호가 보고되고 있어 동굴생성물의 발광 현상이 다양한 물질로부터 기원한 것임이 밝혀지고 있다(Baker and Genty, 1999; Pearson *et al.*, 2020; Sliwinski and Stoll, 2021; Endres *et al.*, 2024). 이와 같이 발광 특성을 지닌 유기화합물이 지하수 내에 콜로이드 입자 또는 용해 상태로 통기대를 침투할 경우, 동굴수에 포함된 유기물이 동굴생성물 표면에 침착되어 발광 현상이 나타날 수 있다(Hartland *et al.*, 2012). 동굴생성물의 발광 특성은 미세조직적 특징 및 지하화 성분과 함께 변화한다고 보고된 바 있으며(Orland *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2018; Batchelor *et al.*, 2023), 발광 특성과 동굴 주변환경의 물리화학적 요인 사이의 관계를 파악하는 연구는 고기후 변화를 해석하는 데 활발히 응용되고 있다.

Baker *et al.* (1993)은 동굴생성물의 수직 단면에서 발광 강도의 주기적인 변화로 나타나는 발광 엽층리 구조(luminescence lamination)를 보고하고, 우라늄계열 연대측정 결과와 발광띠 두께를 직접 비교하여 누적집계 연대측정기법(incremental age dating method)의 근간을 마련하기도 하였다. 현재까지 동굴생성물의 발광띠 누적집계 연대측정기법은 연대측정 결과의 해상도 및 정확성을 향상시키기 위해 여러 연구들에 적용되고 있으며(e.g., Li *et al.*, 2017; Rossi *et al.*, 2018), 이에 더해 발광띠의 두께를 측정하여 고기후 프록시로 활용된 바 있다(Polyak and Asmerom, 2001; Baker *et al.*, 2015). 또한, 동굴생성물의 발광띠는 최근 분석기술의 발전으로 수십 μm 해상도의 안정동위원소 및 미량원소 분석이 가능해지면서 그동안 이루어지기 어려웠던 계절 변화 분석 등 초고해상도 해석에 기여하기도 하였다(Treble *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2009).

위와 같은 해외 사례와는 달리, 우리나라 동굴생성물의 경우 발광 특성이 보고된 바 없으며, 이에 따라 계절적 시점 해석은 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강원특별자치도 강릉시 옥계굴의 석순에서 확인되는 발광 특성을

보고하고, 우리나라의 기후 조건에서 이루어진 발광띠의 계절적 형성 기작에 대하여 해석하였다. 나아가 동굴생성물 발광 특성의 고기후학적 연구로의 활용 방안에 대해 논의하였다.

2. 슬어

현재까지 보고된 동굴생성물의 발광띠 구조는 빛이 발현되는 발광띠와 빛을 내지 않거나 약한 비발광띠가 매우 규칙적으로 반복되는 특징을 보인다. 이 연구에서 사용하는 동굴생성물의 ‘발광띠’라는 용어는 해외의 선행연구들에서 일반적으로 사용되고 있는 영문 ‘luminescence (or fluorescence) band’를 번역한 것이나, 이들 선행연구들에서는 발광띠를 지칭하는 대상에 있어 많은 혼용이 이루어지고 있는 실정이다. 그 예로서, Baker *et al.* (1993)과 Tan *et al.* (2006)의 경우 발광띠와 비발광띠를 통칭하여 ‘luminescence band’라고 표현한 반면, Dasgupta *et al.* (2010)은 ‘fluorescent band’와 ‘non-fluorescent band’라는 용어를 사용함으로써 그 대상을 더 명확히 하였다. 이번 연구에서는 지칭 대상을 직접적으로 표현하고 후속 연구자들의 혼란을 피하기 위해 ‘발광띠’와 ‘비발광띠’라는 용어를 채택하였다. 따라서 이번 연구에서 ‘발광띠’는 선행연구들에서 사용된 용어 중 fluorescent, bright (or light) fluorescent band (Orland *et al.*, 2009) 등과 동격이며, ‘비발광띠’는 non- (or dark, dim, weaker, mildly) fluorescent band (Batchelor *et al.*, 2023) 등과 동격이다. 위와 같은 영문을 발광띠와 비발광띠로 정리한 이유는 ‘어두운 발광띠’ 혹은 ‘약한 발광띠’ 등의 형용사를 덧붙인 표현보다는 간단한 명사적 표현으로 나타내기 위함이다. 이 연구에서는 발광띠와 비발광띠를 한 쌍으로 표현하기 위해 영문 ‘luminescent band couplet (Batchelor *et al.*, 2023)’을 번역하여 ‘발광띠 쌍’이라는 용어를 사용하였다. 또한, 이러한 발광띠 쌍의 연속적인 적층 구조를 영문에서는 ‘luminescence lamination’으로 표현하였고, 이번 연구에서는 퇴적학적 용어를 차용하여 ‘발광 엽층리 구조’로 표현하였다.

한편, 일반 광학현미경 하에서 관찰되는 동굴생성물의 엽층리 구조는 선행연구들에 의해 표현된 dark brown layer (Frisia *et al.*, 2003), dark layer (Belli *et al.*, 2013), thin brown layer (Borsato *et al.*, 2007) 등과 translucent calcite layer (Frisia *et al.*, 2003; Borsato *et al.*, 2007)의 반복적 교호 구조로 특징지어진다. 이 연구에서는 전자를 표현함에 있어 기존 국내 연구논문에서 사용된 바 있는 ‘성장선’을 우선적으로 채택하였으며(Woo *et al.*, 2004), 후자를 ‘투명 방해석층’으로 번역하여 국내 연구자의 이해를 돕고자 하였다.

3. 시료 및 연구방법

동굴생성물 발광 특성 연구를 위해 사용된 석순 시료 OG1은 강원도 강릉시 옥계면 석빙산 중턱에 위치한 옥계굴의 내부 통로에서 채취하였다(그림 1a, 1b). 시료 채취 지점은 동굴 입구로부터 약 280 m 떨어져 있어 외부로부터 유입되는 지표수의 영향을 받지 않는 구간에 해당한다. 시료는 채취 당시 이미 훼손된 상태였으며, 주변 동굴생성물 분포 현황상 발견 위치 인근에서 성장한 것으로 추정된다. 옥계굴은 약 750 m 길이의 석회동굴이며, 동굴 입구는 해발 약 380 m 지점에 발달해 있다. 옥계굴을 배태하고 있는 조 선누층군 석빙산층은 강릉시 옥계면과 정선군 임계면 일대에 분포하는 시대 미상의 석회암 지층으로, 엽리가 발달한 결정질 석회암이 주를 이루며 돌로마이트와 돌로마이트질 석회암을 소량 협재하고 있다(Woo *et al.*, 1999). 옥계굴은 석빙산층에 발달한 절리의 주향 방향인 남북 방향으로 발달하였으며, 절리면을 따라 용식이 진행되어 동굴의 통로가

현재와 같이 확장된 것으로 알려져 있다(Woo *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 2003). 동굴 내부의 온도와 습도는 동굴 입구를 제외하고 각각 10.2~11.5°C 내외, 90~100%로 연중 일정하게 유지되며, 여름철의 대기 중 이산화탄소 농도는 동굴 내부로 갈수록 높아지는 경향을 보인다(Woo *et al.*, 1999). 연구지역으로부터 서쪽으로 5.8 km 떨어진 곳에 위치한 삼당령 지점(해발고도 660.4 m)의 관측 자료(KMA, 2024)에 따르면 연구 지역의 연평균 기온은 7.6°C, 연간 누적 강수량은 1,510.8 mm로, 연 강수량의 58.7%가 7월에서 9월 사이에 집중되었다(그림 1c).

동굴생성물의 발광은 자외선 또는 가시광선 광원이 장착된 형광현미경으로 관찰할 수 있으며, 이를 이용해 일반 현미경으로는 관측할 수 없는 발광 엽층리 구조를 확인할 수 있다. 최근에는 공초점 레이저 주사현미경(confocal laser scanning microscope; CLSM)이 대중화되면서 동굴생성물의 발광 특성 연구에 활발히 응용되고 있다. 기존의 형광현미경이 갖는 단점을 보완한 CLSM은 초점 밖 영역의

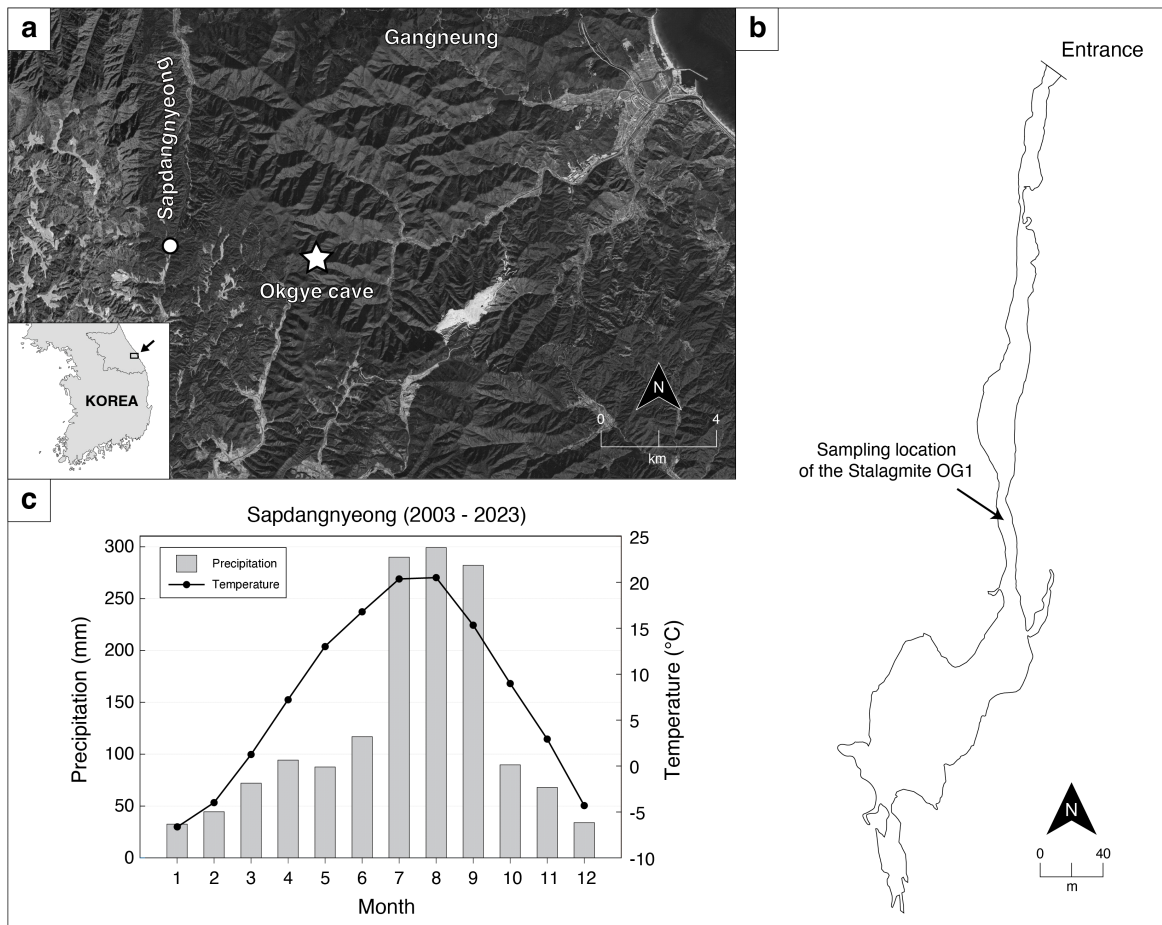


Fig. 1. (a) Location of Okgye Cave (star) in the Eastern region of South Korea. (b) A plan view of Okgye Cave (modified after Woo *et al.*, 1999). The sampling location is also indicated. (c) Monthly averages of precipitation (grey bars) and temperature (black line with dots) in Sapdangnyeong weather station. These data were collected over 20 years (2003-2023).

형광 간섭을 최소화하는 핀홀(pinhole)이 장착되어 있어 고해상도의 형광 이미지를 얻을 수 있다. 이번 연구에서는 석순 시료의 일부를 성장축에 평행한 방향으로 절단하여 박편을 제작하였으며, 발광 특성 관찰 및 형광이미지 촬영을 위해 강원연계형용합이미징특화센터(Kangwon Center for Systems Imaging, KCSI)의 CLSM (Nikon, Eclipse Ti2)을 이용하였다. 관찰 및 이미징에 사용된 레이저 광원의 파장은 488 nm, 검출 파장은 500-550 nm이며, 4배율과 10배율의 대물렌즈로 관찰 후 고해상도 이미지를 촬영하였다. 촬영한 이미지에 대한 발광 강도 프로파일(Luminescence intensity profile)은 내장 이미징 소프트웨어(Nikon, NIS-Elements)를 통해 획득하였다. 또한, 석순의 발광 특성과 암석학적 특징을 상호 비교하기 위하여 편광현미경 관찰을 병행하였다.

4. 결과

4.1. 암석학적 특징

옥계굴 석순 OG1은 월유(moonmilk)와 석회암 파편으

로 추정되는 기저를 피복하여 총 128 mm 길이로 성장하였다(그림 2a). 석순의 전체적인 형태는 돛형이며, 불규칙한 바닥면을 갖는다. 내부 단면은 수평연장성이 양호한 성장선으로 이루어져 있으며, 성장선과 투명 방해석층이 수십 μm 의 간격으로 교호하는 성장 엽층리 구조(growth lamination)를 보인다(그림 2b-e). 또한, 전체적으로 주상(columnar) 내지 섬유상(fibrous) 방해석 결정이 주를 이루며, 결정면 사이의 공극률이 적은 닫힌 주상 방해석(compact columnar calcite; CCC)과 결정면 사이의 공극률이 높은 열린 주상 방해석(open columnar calcite; OCC)이 관찰된다(Kendall and Broughton, 1978; Frisia, 2015; Perrin *et al.*, 2022) (그림 2b, 2c, 2f). 내부 구조는 연마면 색, 성장선의 구조 및 두께를 기준으로 상부구간(0-64 mm)과 하부구간(64-128 mm)으로 구분할 수 있다. 상부구간은 반투명한 회색을 보이고 전형적인 석순의 경우에서 나타나는 상향 성장이 뚜렷하지만, 하부구간은 연한 황백색을 띠고 전반적으로 측방 성장의 특징이 나타난다. 또한, 상부구간의 성장선은 상대적으로 얇고 미약한 반면, 하부구간에서는 성장선이 대부분 두

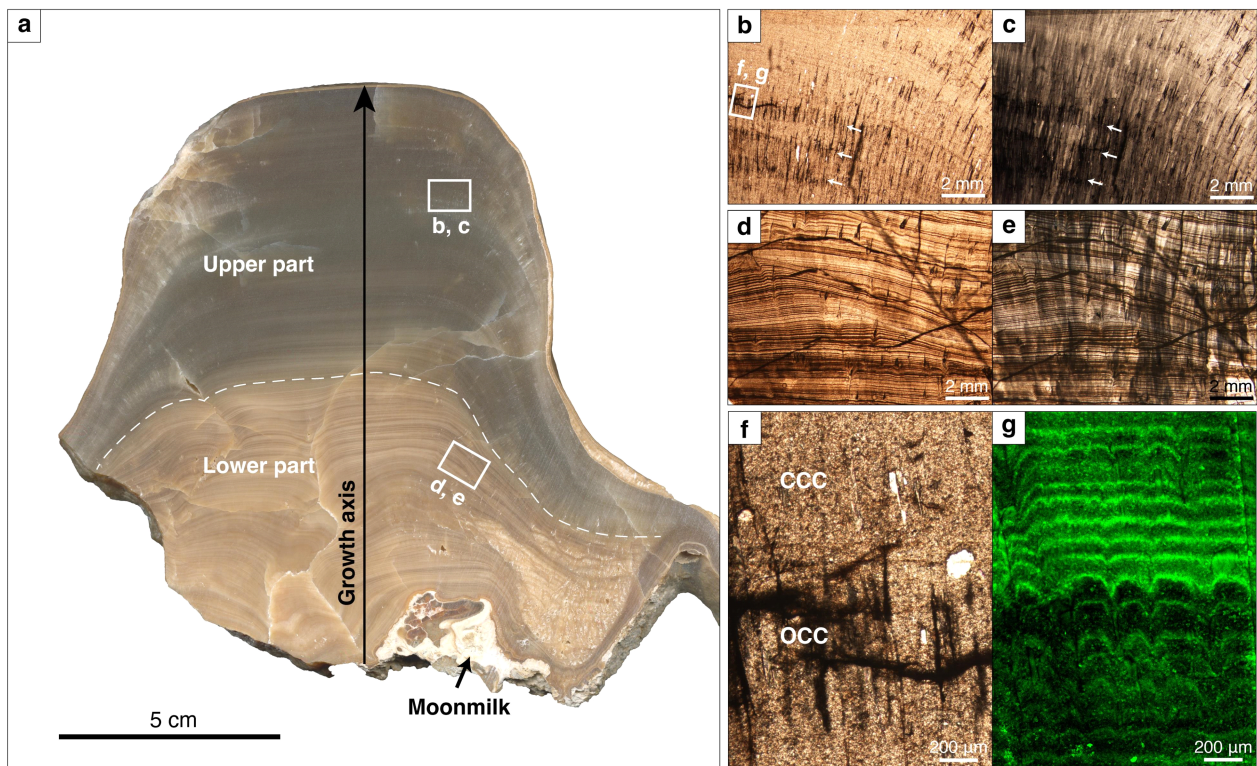


Fig. 2. Stalagmite OG1 from Okgye Cave. (a) A cross-section of the OG1 cut parallel to the growth axis. (b)~(e) Thin section polarizing microscope images in upper part (PPL; b, XPL; c) and lower part (PPL; d, XPL; e). The OG1 consists of alternating couplets of translucent calcite layer and growth line. Arrows indicate open columnar calcite (OCC). (f) Details of compact columnar calcite (CCC) and open columnar calcite (OCC). Columnar calcite has straight crystal boundaries, and those with dense crystal boundaries are CCC, and those with inter-crystalline pores or inclusions are OCC. (g) CLSM image of panel f, showing contrast in luminescence intensity and shape between the two calcite growth types.

겹고 조밀하게 나타난다.

4.2. 발광 특성

석순 OG1의 발광 특성을 관찰한 결과, 높은 발광 강도(1,000~5,000 a.u.)를 갖는 발광띠와 낮은 발광 강도(0~2,000 a.u.)를 갖는 비발광띠가 매우 규칙적으로 반복하는 구조를 보인다(그림 2g, 3a, 3b). 또한, 석순의 방해석 정벽 등 암석 광물학적 특징에 따라 다른 발광 특성이 나타난다. 예를 들어, OCC가 성장한 구간은 전반적으로 CCC에 비해 발광 강도가 낮으며, 썩기 형태의 발광띠가 관찰된다(그림 2f, 2g).

석순 상부와 하부구간이 서로 다른 암석학적 특징을 갖는 것과 마찬가지로, 발광 패턴을 크게 상부와 하부구간으로 구분할 수 있다. 상부구간에서는 발광띠가 비발광띠에 비하여 얇지만 매우 뚜렷하게 나타나며, 이러한 특징은 그림 3a에서 발광띠의 발광 강도 변화가 크고 뚜렷한 변동성을 보이는 것으로도 확인할 수 있다. 또한, 상부구간에서 관찰되는 발광띠는 편광현미경에서 성장선 파악이 불가능한

구간에서도 선명하게 관찰되며, 발광띠의 위치는 성장선이 나타나는 지점과 동일하다(그림 3a, 4a). 이와 대조적으로 하부구간에서는 발광띠가 차지하는 비율이 높아 구간 전체가 높은 발광성을 띤다(그림 3b). 하부구간의 경우, 그림 3b에서 보이는 바와 같이 성장선의 위치가 비발광띠를 포함하는 것으로 확인되는데, 이는 성장선이 발광띠와 일치하는 상부구간의 발광 패턴과 상반된다.

5. 토 의

5.1. 발광 특성의 발생 원인

동굴생성물의 발광 염색리 구조는 현재까지 스코틀랜드(Baker *et al.*, 1993; Proctor *et al.*, 2000), 잉글랜드(Baker and Genty, 1999), 스페인(Rossi *et al.*, 2018; Sliwinski and Stoll, 2021; Endres *et al.*, 2024), 노르웨이(Linge *et al.*, 2009), 이스라엘(Orland *et al.*, 2014), 중국(Li *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018) 등 다양한 기후대에서 전 세계적으로 보고되어 왔다. 이 연구를 통하여 우리나라 동굴생성물에

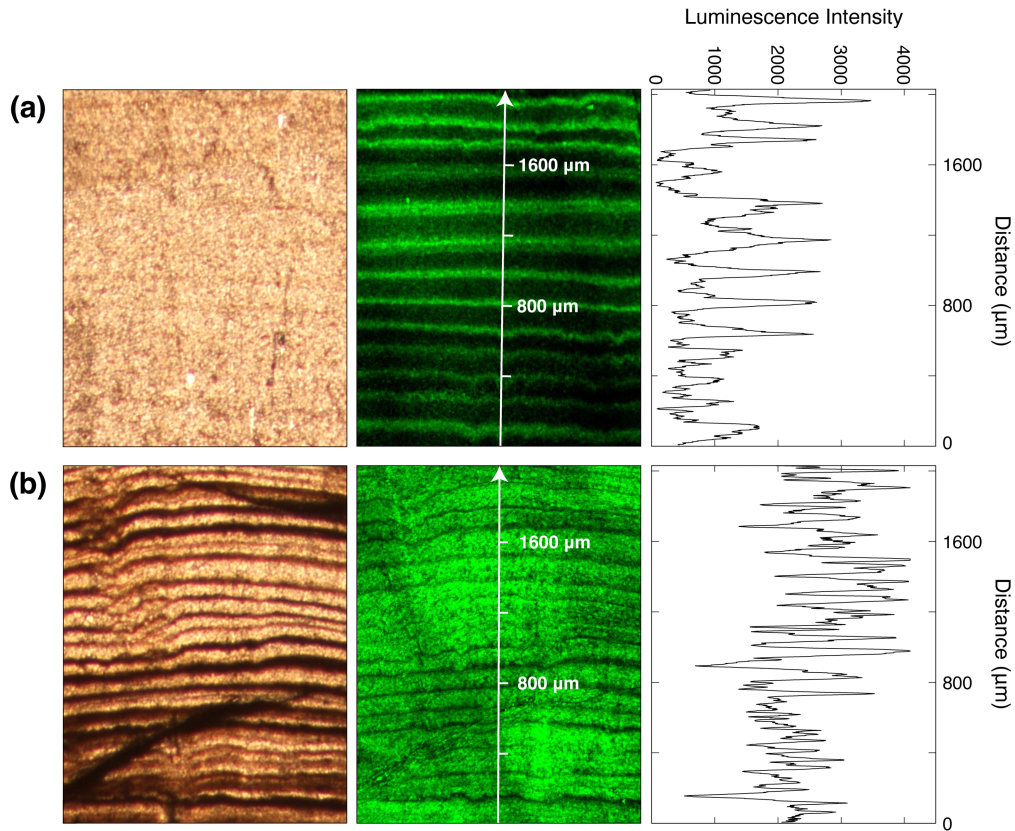


Fig. 3. Examples of couplets of growth line and translucent calcite layer (left), luminescence lamination (center), and luminescence intensity along the growth axis (right) observed in stalagmite OG1. (a) Growth lines in the upper part are typically showing faint, and in some cases, barely visible. Bright luminescent bands are evident, and their positions are well aligned with growth lines. (b) Growth lines in the lower part are dark and thick. Translucent calcite layers exhibit bright luminescence, while the darkest parts of the growth lines are not luminescent.

서도 발광 특성 및 발광 염층리 구조가 발달할 수 있음을 처음으로 확인하였다. 동굴생성물의 발광띠는 일반적으로 계절적인 강수량 편차가 큰 지역의 동굴 그리고 식생이 발달한 토양층 하부의 동굴에서 흔히 발견되며, 건조한 기후 조건에서는 상대적으로 드물게 보고되고 있다(Meyer *et al.*, 2009; Rossi *et al.*, 2018; Baker *et al.*, 2021). 즉, 충분한 물의 공급으로 지표의 유기물이 동굴 내부로 유입될 수 있고 이와 동시에 계절에 따른 강수량 및 온도 편차가 큰 지역에서 주기적인 발광띠가 형성될 가능성이 높다(Baker *et al.*, 1993). 연구지역은 동아시아 몬순의 영향을 받아 7월부터 9월 사이에 편중된 강수 분포를 보이며(그림 1c) 옥계굴 상부의 지표는 삼림으로 우거져 있기 때문에, 장마철에 내린 비로 인해 토양에 축적된 유기물이 동굴 내부로 유입되어 발광띠가 형성될 수 있는 유리한 조건에 해당한다.

동굴생성물의 발광 특성을 이용한 고기후 및 고환경 연구는 점차 증가하는 추세이지만 발광띠의 형성 기작이 무엇인지는 세밀하게 밝혀지지 않았으며, 이를 둘러싼 논의가 계속되고 있다. 가장 잘 알려진 견해는 앞서 언급한 바와 같이 유기물질이 빗물과 함께 침투될 때 발광띠가 형성된다는 것이다(Baker *et al.*, 2008; Orland *et al.*, 2014). 반면 Endres *et al.* (2024)은 강수량에 의한 직접적 영향보다는 식생 신진대사 유형 등 동굴 상부 식생의 변화, 지하수의 암석 내 체류시간, 그리고 토양 호흡률이 주된 영향요소로 작

용한다는 의견을 제시하였다. 또한, 이들은 석순의 성장률 증가가 발광 강도 감소를 유발한다는 메커니즘을 주장하였는데, 이와 마찬가지로 Baker *et al.* (1996)은 동굴생성물의 빠른 성장속도와 매우 높은 유량이 휴믹물질의 농도 및 발광 강도를 감소시킨다는 희석 효과에 대해 언급한 바 있다. 이처럼 동굴생성물의 발광 특성은 강수량 뿐만 아니라 성장률 등 다양한 요소들에 의해 복합적으로 조절되며(Shopov *et al.*, 1994; Baker *et al.*, 1996), 유사한 조건 하에서도 지질학적 특성, 암반의 두께 및 침출수의 이동 경로에 따라 동굴생성물에 기록되는 발광 신호가 서로 다른 양상으로 작용할 가능성이 있으므로 발광 특성을 고환경 연구에 적용할 경우 이에 주의하여 여러 인과관계를 종합적으로 고려해야 한다(Baker *et al.*, 2000). 특히, 대부분의 연구가 한반도와 다른 기후 특성을 갖는 지역에 국한되어 있어 석순 OG1의 발광띠 형성 계절을 추정하기 위해서는 한반도의 계절 특성을 반영하여 새롭게 해석할 필요가 있다.

그림 4는 석순 OG1에서 나타나는 두 가지 유형의 발광 패턴을 모식도로 표현한 것이다. 석순 OG1의 상부구간에서 발광띠와 성장선이 서로 일치하는 것(그림 3a, 4a)은 두 유형이 동일한 시점에 형성되었음을 지시한다. 발광띠와 성장선은 각각 소량의 유기물과 이물질을 포함하며(Borsato *et al.*, 2007; Belli *et al.*, 2013), 이와 같은 토양 기원 물질이 암석의 균열대를 따라 동굴 내부로 통과하기 위해서는

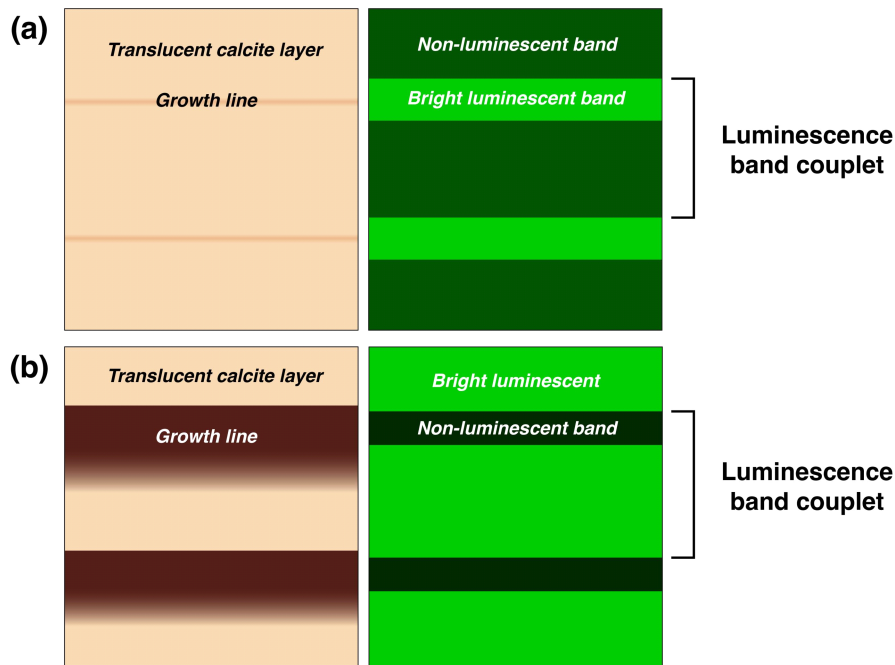


Fig. 4. Two patterns of luminescent band couplets (right) observed from the upper part (a) and lower part (b) of stalagmite OG1. Note that the difference in growth line thickness between the two patterns in the right panel. The pattern in OG1 gradually changes from (b) to (a) along the growth axis.

충분한 양의 물이 공급되어야 한다. 따라서 석순 OG1의 발광 띠 및 성장선의 형성은 강수에 의한 지하수 충전 및 침출이 이루어지는 우기 동안에 이루어진 것으로 해석할 수 있다. 비발광 띠는 건기의 지속으로 물의 공급이 줄어들어 따라 유기물의 유입이 감소한 시기에 성장한 것으로 판단된다. 한편, 하부구간은 상부구간과 상반되는 발광 패턴을 보여준다. 하부구간의 경우, 비발광 띠가 성장선과 동일한 시기에 형성된 것으로 나타나는데(그림 3b, 4b), 이는 성장선에 함유되어 있는 이물질로 인해 발광 강도가 감소되었기 때문으로 추정된다. 하부구간과 같이 성장선을 제외한 구간 전체가 높은 발광을 보이는 것은 성장 당시 토양의 식생 활동이 매우 활발하였거나 유기물이 포함된 동굴수가 지속적으로 유입된 것 등 다양한 가능성을 고려할 수 있으나 이번 연구에서는 명확히 해석하기 어려운 부분이다.

동굴생성물 성장 당시 동굴수의 물리화학적 조건을 반영하는 것으로 알려진 방해석 결정 조직은 석순 OG1에서 그 유형에 따라 서로 다른 발광 특성을 보인다. 석순 OG1에서 관찰되는 OCC는 CCC에 비해 확연히 낮은 발광 강도를 보이고 불규칙한 켜기 형태의 결정면을 갖고 성장하였다(그림 2g). 이와 유사한 결과는 Perrin *et al.* (2022)에서 보고된 바 있으며, 이들은 방해석 유형 간 Mg/Ca 비율의 차이로 인해 서로 다른 발광 특성을 나타낸다고 언급하였으나 이에 대한 구체적인 근거는 제시하지 않았다. 일반적으로 CCC는 일정하지만 낮은 낙수율 조건 하에서 주로 형성되는 반면, OCC는 이보다 조금 높고 불안정한 낙수율과 이로 인해 제한된 이산화탄소 유리 조건에서 발달하며 높은 공극률을 수반한다고 알려져 있다(Frisia, 2015). 따라서 낙수율이 비교적 높았던 시기에 OCC가 성장한 것으로 판단되며, 이 구간의 발광 강도 감소는 강수량이 급격하게 증가함에 따라 발광 물질의 상대적 함량 감소, 즉 희석효과가 발생한 것이 원인이 될 수 있다. 일정 수준 이상의 높은 유량이 공급되는 조건에서는 동굴수의 발광 강도가 비선형적 변화를 보이거나 상당한 희석이 발생한다는 연구 결과도 이를 뒷받침한다(Baker and Barnes, 1998; Baker *et al.*, 2000). 따라서 CCC와 OCC가 서로 다른 발광 특성을 보이는 것은 석순의 성장 환경에 따라 결정 성장 유형과 발광 특성이 함께 변화할 수 있다는 것을 시사한다.

5.2. 발광 특성의 고기후학적 활용

석순 OG1에서 매우 뚜렷하게 관찰되는 발광 띠 쌍은 각각 건기와 우기를 합친 1년으로 해석되어 매년 한 쌍씩 성장한 것으로 볼 수 있기 때문에, 성장 휴지기(hiatus)가 존재하지 않았다고 가정한다면 발광 띠 쌍의 개수는 석순의

성장 기간과 같다. 다시 말하면, 발광 띠 쌍의 누적집계 연대 측정기법을 통해 석순의 성장 기간을 추정할 수 있으며, 연대 측정 결과를 토대로 수년 내의 초고해상도(ultra-high-resolution) 시점 판별이 가능하다(Tan *et al.*, 2006). 발광 띠를 편광현미경 상의 성장선과 동시에 관찰하여 상호보완 및 비교 검증을 수행한다면 더욱 정확한 연대 추정이 가능할 것으로 기대된다. 나아가 정밀한 연대 분석이 바탕이 되어 지화학적 분석을 수행하면 연간 해상도 내지 최대 계절 해상도의 고기후를 복원하는 데 기여할 것으로 기대된다.

한편, 발광 띠의 두께는 석순의 연간 성장률 계산에 활용될 수 있으며 그 자체로 고해상도 프록시 자료이다. 동굴생성물의 성장률은 온도, 강수량, 동굴 대기 이산화탄소 농도, 그리고 동굴수의 칼슘이온 함량 등과 같이 동굴 내외부의 물리화학적 환경 변화에 의해 조절되는 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 동굴생성물의 성장률이 성장 당시의 기후 변화를 반영한다고 해석되어 고해상도 고기후 자료로서 활용되어 왔다(Dreybrodt, 1999; Proctor *et al.*, 2000; Polyak and Asmerom, 2001). Baker *et al.* (2015)은 Uamh an Tartair 동굴에서 채취한 5개 석순을 종합한 결과를 토대로 발광 띠 두께의 변화가 지난 3,000년 동안의 북대서양 진동(NAO)과 밀접한 관련이 있다고 주장하였으며, Ji *et al.* (2011)은 제주도 용천동굴에서 채취한 탄산염 석순의 성장선 간격과 조직적인 특성을 관찰하여 동아시아 여름몬순의 강도 변화를 복원한 바 있다. 이들은 석순의 성장이 강수량이 높은 습윤한 기후 하에서 더욱 활성화된다고 주장하였다. 그러나 동굴 외부의 환경 조건이 동일하여도 개별 동굴생성물마다 서로 다른 카르스트 시스템과 여러 요인에 대한 고유한 민감성을 갖기 때문에 동굴생성물의 발광 특성 및 성장률이 지점별로 매우 상이한 양상을 보일 수 있다(Baker *et al.*, 2000; Tan *et al.*, 2006). 따라서 동굴생성물의 발광 특성 및 성장률을 고기후 프록시로 적절히 활용하기 위해서는 성장에 관여하는 변수들의 영향을 검증하기 위한 동굴별, 지점별 모니터링 등 후속 연구가 우선적으로 요구된다(Baldini, 2010).

6. 결론

옥계굴에서 성장한 석순 OG1은 CLSM 하에서 뚜렷한 발광 현상을 나타내며, 암석학적 특징 및 방해석 결정의 유형에 따라 다양한 발광 특성을 보였다. 또한, 성장축을 따라 발광 띠와 비발광 띠가 주기적으로 교호하는 발광 엽층리 구조가 확인되었다. 상부구간에서 관찰되는 발광 띠는 집중 호우가 발생하는 여름철에 토양의 유기물질이 동굴 내부로 이동되어 형성된 것이며, 비발광 띠는 건기 동안 유기물의

유입량이 감소하여 형성된 것으로 해석된다. 이와 같은 결과는 석순의 발광 특성이 성장 당시의 계절 변화에 대한 정보를 담고 있으며, 하나의 발광띠 쌍이 일 년을 의미한다는 것을 나타낸다. 하지만 동굴생성물의 발광 특성은 다양한 물리화학적 요인들에 의해 복합적으로 조절되기 때문에 고기후학적 연구에 활용하기 이전에 기후 변화의 영향 및 형성 기작을 명확히 이해하기 위한 동굴 모니터링 등 후속 연구가 선행되어야 한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2023-00260267)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2023R1A2C1006352).

REFERENCES

- Baker, A. and Barnes, W.L., 1998, Comparison of the luminescence properties of waters depositing flowstone and stalagmites at Lower Cave, Bristol. *Hydrological Processes*, 12, 1447-1459.
- Baker, A., Barnes, W.L. and Smart, P.L., 1996, Speleothem luminescence intensity and spectral characteristics: Signal calibration and a record of palaeovegetation change. *Chemical Geology*, 130, 65-76.
- Baker, A. and Genty, D., 1999, Fluorescence wavelength and intensity variations of cave waters. *Journal of Hydrology*, 217, 19-34.
- Baker, A., Genty, D. and Fairchild, I.J., 2000, Hydrological characterisation of stalagmite dripwaters at Grotte de Villars, Dordogne, by the analysis of inorganic species and luminescent organic matter. *Hydrology and Earth system sciences*, 4, 439-449.
- Baker, A., Hellstrom, J.C., Kelly, B.F., Mariethoz, G. and Trouet, V., 2015, A composite annual-resolution stalagmite record of North Atlantic climate over the last three millennia. *Scientific reports*, 5, 10307.
- Baker, A., Mariethoz, G., Comas-Bru, L., Hartmann, A., Frisia, S., Borsato, A., Treble, P.C. and Asrat, A., 2021, The Properties of Annually Laminated Stalagmites-A Global Synthesis. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000722.
- 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., Smith, C., Jex, C., Fairchild, I., Genty, D. and Fuller, L., 2008, Annually laminated speleothems: a review. *International Journal of Speleology*, 37, 193-206.
- Baldini, J.U., 2010, Cave atmosphere controls on stalagmite growth rate and palaeoclimate records. *Geological Society, London, Special Publications*, 336, 283-294.
- Batchelor, C.J., Marcott, S.A., Orland, I.J., He, F. and Edwards, R.L., 2023, Decadal warming events extended into central North America during the last glacial period. *Nature Geoscience*, 16, 257-261.
- Belli, R., Frisia, S., Borsato, A., Drysdale, R., Hellstrom, J., Zhao, J.X. and Spötl, C., 2013, Regional climate variability and ecosystem responses to the last deglaciation in the northern hemisphere from stable isotope data and calcite fabrics in two northern Adriatic stalagmites. *Quaternary Science Reviews*, 72, 146-158.
- 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 et cosmochimica Acta*, 71, 1494-1512.
- Choi, D.W., Woo, K.S., Kim, R. and Lee, K.C., 2003, The origin of the Okgye Cave and the genesis of speleothems, Kangneung, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 41-64 (in Korean with English abstract).
- Dasgupta, S., Saar, M.O., Edwards, R.L., Shen, C.C., Cheng, H. and Alexander Jr, E.C., 2010, Three thousand years of extreme rainfall events recorded in stalagmites from Spring Valley Caverns, Minnesota. *Earth and Planetary Science Letters*, 300, 46-54.
- Dreybrodt, W., 1999, Chemical kinetics, speleothem growth and climate. *Boreas*, 28, 347-356.
- Endres, L.S., Jacquín, C., González-Lemos, S., Rodríguez-Rodríguez, L., Sliwinski, J., Kaushal, N., Kost, O. and Stoll, H. M., 2024, Climatic and cave settings influence on drip water fluorescent organic matter with implications for fluorescent laminations in stalagmites. *Quaternary Research*, 118, 41-61.
- Frisia, S., 2015, Microstratigraphic logging of calcite fabrics in speleothems as tool for palaeoclimate studies. *International Journal of Speleology*, 44, 1-16.
- Frisia, S., Borsato, A., Preto, N. and McDermott, F., 2003, Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 411-424.
- Hartland, A., Fairchild, I.J., Lead, J.R., Borsato, A., Baker, A., Frisia, S. and Baalousha, M., 2012, From soil to cave: Transport of trace metals by natural organic matter in karst dripwaters. *Chemical Geology*, 304, 68-82.
- 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).
- Kendall, A.C. and Broughton, P.L., 1978, Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Research*, 48, 519-538.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2024, <https://data.kma.go.kr> (October 7, 2024).
- Li, X., Cheng, H., Tan, L., Ban, F., Sinha, A., Duan, W., Li, H., Zhang, H., Ning, Y., Kathayat, G. and Edwards, R.L., 2017, The East Asian summer monsoon variability over the last 145 years inferred from the Shihua Cave record, North China. *Scientific*

- Reports, 7, 7078.
- Linge, H., Baker, A., Andersson, C. and Lauritzen, S.-E., 2009, Variability in luminescent lamination and initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ activity ratios in a late Holocene stalagmite from northern Norway. *Quaternary Geochronology*, 4, 181-192.
- Meyer, M., Cliff, R., Spötl, C., Knipping, M. and Mangini, A., 2009, Speleothems from the earliest Quaternary: Snapshots of paleoclimate and landscape evolution at the northern rim of the Alps. *Quaternary Science Reviews*, 28, 1374-1391.
- Orland, I.J., Bar-Matthews, M., Kita, N.T., Ayalon, A., Matthews, A. and Valley, J.W., 2009, Climate deterioration in the Eastern Mediterranean as revealed by ion microprobe analysis of a speleothem that grew from 2.2 to 0.9 ka in Soreq Cave, Israel. *Quaternary Research*, 71, 27-35.
- Orland, I.J., Burstyn, Y., Bar-Matthews, M., Kozdon, R., Ayalon, A., Matthews, A. and Valley, J.W., 2014, Seasonal climate signals (1990-2008) in a modern Soreq Cave stalagmite as revealed by high-resolution geochemical analysis. *Chemical Geology*, 363, 322-333.
- Pearson, A.R., Hartland, A., Frisia, S. and Fox, B.R., 2020, Formation of calcite in the presence of dissolved organic matter: Partitioning, fabrics and fluorescence. *Chemical Geology*, 539, 119492.
- Perrin, C., Honiat, C. and Prestimonaco, L., 2022, Deciphering paleohydrology from the petrography and microstratigraphy of stalagmites (MIS 5-Holocene, Moulis Cave, Ariège, S. France). *Sedimentary Geology*, 440, 106256.
- Polyak, V.J. and Asmerom, Y., 2001, Late Holocene climate and cultural changes in the southwestern United States. *Science*, 294, 148-151.
- Proctor, C., Baker, A., Barnes, W. and Gilmour, M., 2000, A thousand year speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland. *Climate Dynamics*, 16, 815-820.
- Rossi, C., Bajo, P., Lozano, R.P. and Hellstrom, J., 2018, Younger Dryas to Early Holocene paleoclimate in Cantabria (N Spain): Constraints from speleothem Mg, annual fluorescence banding and stable isotope records. *Quaternary Science Reviews*, 192, 71-85.
- Senesi, N., Miano, T.M., Provenzano, M.R. and Brunetti, G., 1991, Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy. *Soil Science*, 152, 259-271.
- Shopov, Y.Y., Ford, D.C. and Schwarcz, H.P., 1994, Luminescent microbanding in speleothems: high-resolution chronology and paleoclimate. *Geology*, 22, 407-410.
- Sliwinski, J.T. and Stoll, H.M., 2021, Combined fluorescence imaging and LA-ICP-MS trace element mapping of stalagmites: Microfabric identification and interpretation. *Chemical Geology*, 581, 120397.
- Smith, C.L., Fairchild, I.J., Spötl, C., Frisia, S., Borsato, A., Moreton, S.G. and Wynn, P.M., 2009, Chronology building using objective identification of annual signals in trace element profiles of stalagmites. *Quaternary Geochronology*, 4, 11-21.
- Tan, M., Baker, A., Genty, D., Smith, C., Esper, J. and Cai, B., 2006, Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: comparison with dendrochronology/climatology. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2103-2117.
- Treble, P., Schmitt, A.K., Edwards, R., McKeegan, K.D., Harrison, T., Grove, M., Cheng, H. and Wang, Y., 2007, High resolution secondary ionisation mass spectrometry (SIMS) $\delta^{18}\text{O}$ analyses of Hulu Cave speleothem at the time of Heinrich Event 1. *Chemical Geology*, 238, 197-212.
- White, W.B. and Brennan, E.S., 1989, Luminescence of speleothems due to fulvic acid and other activators. *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology, Budapest*, p. 212-214.
- Woo, K.S., Kim, R., Kim, J.K., Choi, D.W. and Jo, K.N., 2004, Textural and stable isotopic results of the column in Dangcheomul Cave, Jeju Island, Korea: Paleoclimatic implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 133-144 (in Korean with English abstract).
- Woo, K.S., Lee, K.C., Namkung, J. and Won, C.K., 1999, Scientific investigation of the Okgae cave, Dongdae cave, and Namdae cave in Okgae area, Gangneung. *Gangneung-si*, 269 p (in Korean).
- Zhang, H., Cheng, H., Spötl, C., Cai, Y., Sinha, A., Tan, L., Yi, L., Yan, H., Kathayat, G., Ning, Y., Li, X., Zhang, F., Zhao, J. and Edwards, R.L., 2018, A 200-year annually laminated stalagmite record of precipitation seasonality in southeastern China and its linkages to ENSO and PDO. *Scientific reports*, 8, 12344.