

천연기념물 제260호 강원도 평창군 백룡동굴의 가을철 대기 이산화탄소 변화 및 조절요인

김상윤 · 조경남[‡]

강원대학교 지질학과

요 약

석회동굴의 대기 이산화탄소 농도는 과학적 측면뿐만 아니라 문화재 관리 및 지역 관광자원의 안전성 등 사회문화적 측면에서도 중요성을 지니고 있어 최근까지 해외의 여러 동굴에서 많이 연구되고 있다. 하지만 우리나라는 개방동굴의 밀집도가 매우 높음에도 불구하고 동굴 대기 이산화탄소 농도에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 국내 석회동굴 중 강원도 평창군 소재 천연기념물 제260호 백룡동굴의 가을철 이산화탄소 농도측정 결과를 보고하고자 하였다. 이번 연구를 위해 2019년 10월 11일부터 11월 16일까지 36일간 동굴 내·외부 다 항목(동굴 외부 온도, 대기압, 강수량 등과 동굴 내부 온도, 습도, 이산화탄소 농도) 대기환경 측정을 진행하였다. 동굴 대기 이산화탄소 농도측정 결과, 백룡동굴의 이산화탄소 농도는 국내 비개방 석회동굴의 일반적 범위 내에 속하며, 380 ~ 970 ppmv의 범위에서 큰 변동성을 보이는 전반기와 330 ~ 540 ppmv의 범위에서 상대적으로 작은 변동성을 보이는 후반기로 뚜렷이 구분된다. 연구 기간 내 발생된 강수 이벤트 등 잠재적 이산화탄소 공급원들과 동굴 이산화탄소 농도 사이의 낮은 상관관계로 보아 백룡동굴 대기 중 이산화탄소는 주로 상부 토양대로부터 유체에 의해 상시 공급되는 것으로 추정된다. 이와는 달리, 동굴 이산화탄소 농도와 외부 기온 사이의 매우 높은 상관계수($r=0.78$)는 토양대로부터 이산화탄소의 상시 공급과는 관계없이 동굴 내·외부 대기 사이의 밀도차에 의한 동굴 대기 순환이 백룡동굴 이산화탄소 농도를 조절하는 주요 요인임을 지시한다. 향후 여름철과 같이 동굴 대기 순환이 어려울 것으로 예상되는 계절의 추가적인 연구가 필요하지만, 이번 연구의 결과는 우리나라 석회동굴의 관리 및 보존에 중요한 정보를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 백룡동굴, 대기 이산화탄소, 모니터링, 천연기념물, 석회동굴

Sangyun Kim and Kyoung-nam Jo, 2020, Changes and controlling factors on atmospheric concentrations of carbon dioxide of Baeg-nyong Cave (Natural Monument No. 260), Pyeongchang-gun, South Korea, during a single autumn season. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 6, p. 669-681

ABSTRACT: The concentration of the atmospheric carbon dioxide (CO₂) in the limestone cave has been studied in many foreign countries due to the importance of scientific aspects as well as sociocultural perspectives. However, despite the fact that there are large numbers of tourist caves in South Korea, the researches on the atmospheric CO₂ in limestone caves are still insufficient. Here we report cave monitoring results on the concentrations of atmospheric CO₂ from Baeg-nyong Cave (Natural Monuments of South Korea, No. 260), Pyeongchang-gun, South Korea, during a single autumn season. The monitoring program was established to investigate variations in multi-parameters of atmospheric environments for both of the inside (temperature, relative humidity, atmospheric CO₂) and the outside (temperature, barometric pressure, rainfall amount and so on) of Baeg-nyong Cave from October 11th to November 16th, 2019. Total ranges of atmospheric CO₂ concentrations in Baeg-nyong Cave fell into those of natural limestone caves for non-tourists in South Korea. It can be readily distinguished as the first and second half of the monitoring period based on their large (380 ~ 970 ppmv) and small (330 ~ 540 ppmv) variabilities, respectively. According to the weak correlations between CO₂ concentrations and most of the potential sources of CO₂, we speculated that the cave air CO₂ has been originated constantly from soil zone through the diffusive air and drip water. Regardless of the sources, the high correlation coefficient ($r=0.78$) between CO₂ concentrations and outside temperature strongly suggests that air density flows and cave ventilation processes are major controls on the variations in atmospheric CO₂ concentrations of Baeg-nyong Cave. This result provides valuable information for the management and preservation of limestone caves in the temperate region although

[‡] Corresponding author: +82-33-250-8555, E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

it is needed to carry out further researches.

Key words: Baeg-nyong Cave, atmospheric CO₂, monitoring, natural monuments, limestone cave

(Sangyun Kim and Kyoung-nam Jo, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24314, Republic of Korea)

1. 서론

인간의 활동이 주로 이루어지고 있는 대기, 식생, 토양 및 지하수를 아우르는 지표영역인 크리티컬존(critical zone)은 최근 다양한 기후 및 지질조건 하에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 지구과학계의 큰 주목을 받고 있다(e.g., Critical Zone Exploration Network, 2020). 탄산염 크리티컬존은 이산화탄소의 통합적 반응을 통해 극도로 활발한 탄소순환이 발생하는 가장 대표적 공간영역 중 하나이다. 이러한 탄산염 크리티컬존 내에서도 가장 중요하고 특징적인 지형적 공간 중 하나로서 석회동굴을 들 수 있다. 석회동굴 내 이산화탄소 농도는 석회동굴이 갖는 사회경제적 측면과 과학적 측면에 대하여 중요하게 고려되는 요소 중 하나이다.

세계 여러 나라에서는 동굴 대기 이산화탄소 농도의 변화패턴을 이해하기 위해 이산화탄소에 관한 모니터링 연구가 활발하게 진행되고 있다(Breitenbach *et al.*, 2010; Sherwin and Baldini, 2011; Wong *et al.*, 2011; Duan *et al.*, 2012; Luetscher and Ziegler, 2012; Oster *et al.*, 2012; Breitenbach *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2015; Treble *et al.*, 2015; Shindoh *et al.*, 2017; Liñán *et al.*, 2018). 이산화탄소 모니터링의 중요성은 다음과 같다. 이산화탄소는 지구온난화를 가속화시키는 전 지구적인 영향 이외에도 고농도(> 5,000 ppm)로 대기 중에 존재할 경우 인체에 악영향을 끼치는 특징이 있다(Smith, 1999). 개방(관광)동굴에서 이산화탄소 농도는 동굴의 대기 질을 결정하는 요인 중 하나이기 때문에, 이는 국내 개방된 15개의 동굴(Cultural Heritage Administration, 2020)을 탐방하는 동굴관광객과 해설사를 고려하면 국민 건강과 직접적인 연관성을 지닌다고 볼 수 있다. 특히, 사람의 숨은 약 40,000 ppm의 이산화탄소 농도를 가지며, 이는 대기 순환이 원활하지 않은 밀폐된 공간에서는 건강상 치명적인 역할을 할 수 있으므로 국내 개방동굴의 이산화탄소 농도에 대한 면밀한 관측이

필수적으로 요구된다(e.g., Dragovich and Grose, 1990). 여기에 더해 비교적 내부 면적에 비해 작은 입구로 외부와 연결된 동굴의 지형적 특성에 의하면 동굴 대기 시스템에 대한 이해를 더욱 필요로 한다. 또한, 동굴 대기 중 이산화탄소 농도는 카르스트 시스템 내에서 탄산염 광물의 용해와 침전의 중요 요소이며, 이는 동굴생성물(speleothem)의 보존 연구에 있어서 핵심적인 역할을 한다(Baker and Genty, 1998). 그 이유는 동굴생성물의 형성이 카르스트 시스템을 통과한 동굴수(cave drip water) 속에 용존되어 있는 이산화탄소의 유리작용(degassing)으로 이루어지며, 이때 대기 중 이산화탄소 농도가 유리작용을 주로 조절하기 때문이다(Holland *et al.*, 1964; Fairchild and Baker, 2012). 동굴 대기 이산화탄소 농도는 동굴수의 지화학적 성분을 변화시키기도 하며, 결과적으로 이는 동굴생성물의 지화학적 변화로 기록된다(Fairchild *et al.*, 2000; Luo and Wang, 2008). 따라서 동굴 대기 이산화탄소 농도에 관한 연구를 통해 동굴생성물을 이용한 과거 환경변화 해석에 중요 과학적 근거로 사용할 수 있다(Banner *et al.*, 2007).

백룡동굴의 내부는 종유석을 포함한 낙수석(dripstone) 계열의 동굴생성물뿐만 아니라 동굴방패(cave shield), 석화(anthodite) 등 다양한 동굴생성물과 가바닥(false floor) 등 독특한 동굴 미지형이 형성되어 있어 학술적, 경관적 가치가 높다고 평가되어왔다(Woo *et al.*, 2006). 천연기념물 제260호 강원도 평창군 백룡동굴은 제한적 개방동굴로서, 국내에 분포하는 자연동굴 중에서는 동굴생성물을 이용한 고기후 연구 등 과학적 연구가 가장 폭넓게 이루어진 동굴이다(e.g., Jo *et al.*, 2017). 하지만, 해외의 동굴연구 수준에 비하면 연구의 다양성이 미흡한 측면이 있으며, 특히 2010년 개방 직전과 직후 동굴 내부 이산화탄소 농도변화와 조절요인에 대한 이해가 부족하며, 현재 국가문화재 관리 차원에서의 내부 대기질 평가가 미비한 상태이다. 백룡동굴 대기 모니터링을 통해 계절별 이산화탄소 농도의 조절요인을 파악한다면 우리나라

개방동굴 관리 및 보존에 중요한 정보를 제시할 수 있을 것으로 기대된다(e.g., Liñán *et al.*, 2018). 따라서 이번 연구에서는 백룡동굴의 가을철 동굴 대기 이산화탄소 농도측정을 바탕으로 이를 조절하는 요인에 대하여 정성·정량적으로 파악해보고자 하였다.

2. 연구지역

백룡동굴은 한반도의 중동부에 위치한 강원도 평창군 미탄면 마하리 백운산에 발달하고 있으며(그림 1a), 입구는 백운산 하부 영월 동강의 수면으로부터 약 15 m 상부인 해발 235 m 지점에 위치해 있다(Woo *et al.*, 2006). 백룡동굴은 내부의 경관과 학술적 가치가 인정되어 1979년 천연기념물 제260호로 지정되었으며, 2010년 7월 이후 현재까지 일부 구간(A 구역)

이 개방동굴로서 일반인들에게 공개되어 매년 15,000여 명 이상의 관람객이 방문하는 강원고생대 국가지질공원 명소 중 하나이다. 따라서 수차례 현장조사를 위한 접근성이 매우 우수할 뿐만 아니라 개방 구간은 관람객 수가 엄밀하게 관리되기 때문에 관람객에 의한 영향 파악이 가능하며, 미개방 구간은 인간의 개입이 제한되어 환경적으로 안정적인 보존상태를 보이기 때문에 이산화탄소 농도 모니터링 연구에 있어 최적의 장소로 평가된다. 위와 같은 특징을 바탕으로 국제 크리티컬존 연구네트워크인 CZEN (Critical Zone Exploration Network)에 등록되어 우리나라 자연동굴 중 유일하게 모니터링 프로그램이 운영되 바 있다(e.g., Critical Zone Exploration Network, 2020; Park *et al.*, 2020).

평창과 인접한 영월기상대의 관측 시작 이래로 1995

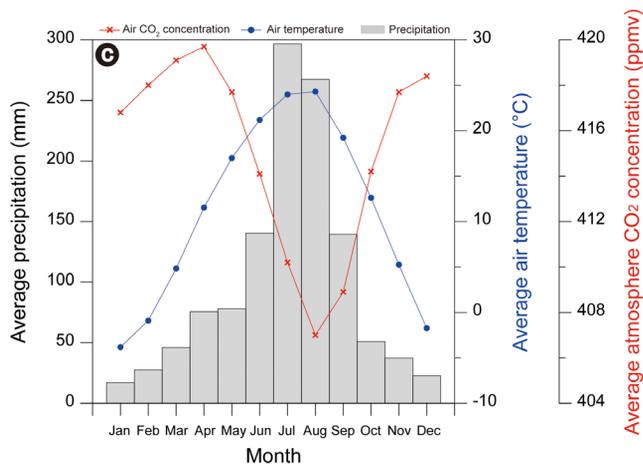
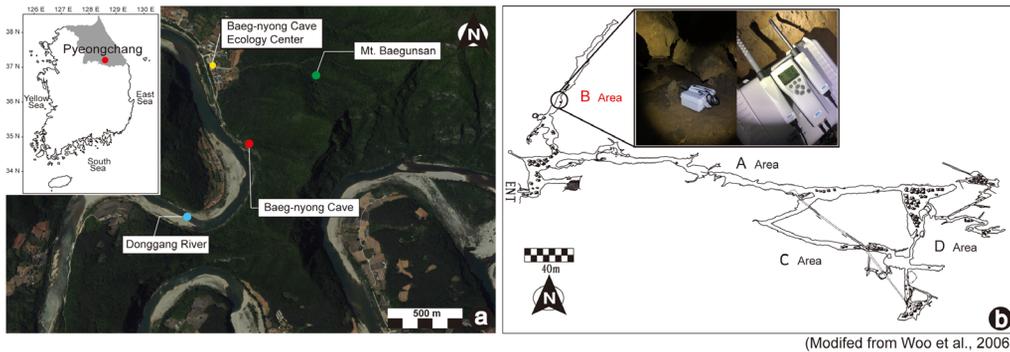


Fig. 1. The geographic and climatic settings of Baeg-nyong Cave and the surrounding area. (a) Baeg-nyong Cave is located in lower part of Mt. Baegunsan in Pyeongchang-gun, Gangwon-do, South Korea (37° 16' 19.65" N, 128° 34' 46.03" E). (b) A plan view of Baeg-nyong Cave. B area is the monitoring location with the CO₂ logger (Vaisala GM70). (c) The graph shows the monthly average of weather data measured over 25 years at Yeongwol weather station, 10 km apart from Baeg-nyong Cave (Korea Meteorological Administration, 2020).

년부터 2019년까지의 약 25년간 자료에 따르면 연평균 기온은 11.1°C이며, 월평균 기온은 8월에 24.3°C로 가장 높았고 1월에 -3.8°C로 가장 낮았다(그림 1c). 연평균 강수량의 경우 1,199.6 mm로 전 세계 연평균강수량(1,123 mm; Legates and Willmott, 1990)보다 약간 많았으며, 강수량의 약 60% 이상이 우기인 여름과 초가을(6월~9월) 동안 집중되는 전형적인 한반도 강수 패턴을 보였다(Korea Meteorological Administration, 2020). 백룡동굴 주변 지질은 고생대 초기에 퇴적된 조선누층군 태백층군 막골층으로 구성되며, 주요 퇴적암상으로는 담회색 내지 암회색의 층리가 잘 발달한 석회암, 괴상 석회암, 백운암질 석회암, 리본암 등을 들 수 있다(Woo *et al.*, 2006). 백룡동굴은 전체적으로 동서방향으로 발달해 있는 수평형태의 동굴로서 1개의 주굴(A 구역)과 3개의 가지굴(B, C, D 구역)로 구성되며 총 길이가 약 1,875 m이다(그림 1b). 백룡동굴 내부에는 다양한 종류의 동굴생성물이 분포하며, 특히 B 구역에서 발달하고 있는 용유관의 경우 다른 가지굴에 비해 다양한 형태의 용유관이 일부 구간에 밀집된 특징을 보여준다고 보고된 바 있다(Cho and Jo, 2017). 또한, Woo *et al.* (2006)에 따르면 백룡동굴 내부의 온도는 연중 약 11.0 ~ 13.5°C, 상대습도는 90 ~ 100%로 매우 안정적인 동굴 대기환경을 이루고 있다고 보고된 바가 있으며, 이산화탄소 분압의 경우 동굴 외부는 390 ~ 510 ppmv, 동굴 입구는 420 ~ 850 ppmv 그리고 동굴 내부는 계절에 따라 변화하는 양상을 보여 440 ~ 1,370 ppmv의 범위를 나타냈다.

현재까지 보고된 백룡동굴 모니터링 학술연구로서, Cho (2018)는 백룡동굴 이산화탄소 농도의 계절 변화를 파악하는 것을 목적으로 B 구역 한 지점에서 2016년 4월부터 2017년 10월까지 월별 모니터링을 수행하였다. 약 1년간 이산화탄소 농도의 계절 변화를 해상한 연구결과, 백룡동굴 대기는 동굴 내·외부 온도 차이에 따른 대기 순환에 의해 조절되고 있는 것으로 해석되었다. 이러한 1년 내 이산화탄소의 변화 중 특이한 점은 다른 계절과는 다르게 가을철에 급격한 이산화탄소 농도의 감소 현상이 나타났다는 것으로, 매우 세밀한 변화양상을 규명하기 위한 후속연구의 필요성이 대두되었다. 따라서 이번 연구에서는 Cho (2018)의 연구가 진행된 B 구역 동일 지점에서 가을철 이산화탄소 농도 조절요인을 알아보고

자 고해상도 동굴 대기 모니터링을 수행하였다. B 구역은 관람객 출입이 제한되어 안정적인 동굴환경을 유지할 가능성이 높으며, 동굴 지형적 특징으로는 공개 구간인 A 구역보다 공간이 협소하며 상대적으로 약 5 m 더 높은 위치를 들 수 있다. 또한, B 구역 내 모니터링 지점은 동굴 입구로부터 거리가 직선거리 약 100 m로 모니터링을 위한 접근성이 좋으며(그림 1b), 10.0 ~ 12.8°C 범위의 계절별 기온을 보인 A 구역과는 다르게 12.3 ~ 12.9°C 범위를 보이는 등 대기환경이 안정적이다(Woo *et al.*, 2006).

3. 연구방법

가을철 백룡동굴 대기의 이산화탄소 농도변화에 대한 조절요인을 알아보기 위해 2019년 10월 11일부터 11월 16일까지 36일간 동굴 내·외부 대기환경 측정을 진행하였다. 측정을 위해 문화재청의 허가를 받아 연구가 수행되었다. 동굴 대기환경 측정은 동굴 내부 대기의 온도 및 상대습도 등 기본 자료 획득 및 수 시간 해상도의 이산화탄소 농도 변화 특성을 파악하기 위해 자동 데이터 로거(data logger)로 수행하였다. 습도가 높은 동굴 대기환경에서 활용성이 검증된(Matthey *et al.*, 2016) Vaisala GM70 (VAISALA Company Inc., Finland)을 이용하여 기온, 상대습도, 이산화탄소 항목에 대하여 매 3시간마다 1회씩 측정하였다. 사용된 측정장비에는 이산화탄소 농도 측정을 위해 비분산 적외선 흡수 분석법(NDIR; Non-Dispersive Infrared Absorption)이 측정센서(Vaisala GMP222)에 적용되었다. 측정범위는 0 ~ 2,000 ppmv, 정확도는 ± 30 ppmv 이다. 비분산 적외선 측정 기법은 이산화탄소와 같은 기체상 물질이 분자 내 진동에 의해 전자기 스펙트럼의 적외선 부분(e.g., CO₂: 4.26 μ m)을 흡수하는 특징을 이용하며(Luetscher and Ziegler, 2012), 이산화탄소 분자의 적외선 흡수도를 농도로 환산하여 나타낸다. 또한, 동굴 주변 외부 기상 조건에 따른 동굴 내부 대기의 이산화탄소 농도 조절요인을 규명하기 위해 자동 기상측정지점 운영 및 자료 획득을 진행하였다. 측정지점은 백룡동굴 생태체험학습장 관리사무소 인근 1지점을 선정하였으며(그림 1a), HOBO U30 기상관측로거세트(ONSET Company Inc., USA)를 이용하여 기온, 강수량, 대기압 항목에 대하여 10분당 1회 측정하였다. 측정항

목에 대한 측정범위와 정확도는 각각 $-40 \sim 75^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.21^{\circ}\text{C}$), 시간당 $0 \sim 12.7 \text{ cm}$ ($\pm 1.27 \text{ mm}$), $660 \sim 1070 \text{ hPa}$ ($\pm 3 \text{ hPa}$)이다. 연구결과에는 동굴 내부 대기환경과의 연관성을 알아보기 위해 3시간 주기의 측정값을 도시하였다. 관람객 호흡에 의한 이산화탄소 농도변화를 파악하기 위해 백룡동굴 관리사무소에서 제공한 회차별 관람객 수를 이용하였다. 국내 유일의 체험형 제한적 개방동굴인 백룡동굴은 회차별 20명씩 하루 240명의 입장객 수 제한을 두어 동굴환경을 관리 중이며, 매주 월요일의 경우 휴관한다.

4. 연구결과

4.1 동굴 내·외부 대기환경 측정 결과

동굴 내부 및 외부 대기환경 측정은 지난 2019년 10월 11일부터 11월 16일까지 시행되었으며, 시작 시점인 11일 오후 2시를 기점으로 3시간의 측정주기에 따라 측정된 결과를 그림 2에 도시하였다. 측정기간의 외부대기압은 $978 \text{ hPa} \sim 1,002 \text{ hPa}$ 의 범위에서 변화를 보였으며 하루 주기의 변화에서 상대적인 절댓값 차이는 있으나 기온이 높아지는 낮에는 대기압이 낮아지고, 기온이 낮아지는 새벽에는 대기압이 높아지는 변화패턴을 나타냈다(그림 2a). 외부 기온은 $-3.9^{\circ}\text{C} \sim 25.0^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 나타내며, 낮에는 온도가 높고(평균 17.9°C) 밤에는 온도가 낮음(평균 5.6°C) 전형적인 환절기 하루 주기의 뚜렷한 온도변화를 보였다(그림 2b). 반면에 동굴 내부 기온은 $12.11^{\circ}\text{C} \sim 12.27^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 전체 관측기간 동안 $\pm 0.16^{\circ}\text{C}$ 의 변화량을 보여주었으며, 외부 기온과 비교하면 극히 안정적인 변화를 보였다(그림 2c). 이는 강원도 동남부 일대에 분포하는 다른 석회동굴뿐만 아니라 외국의 많은 동굴에서 흔히 나타나는 특징이다(e.g., Breitenbach *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2020; Pla *et al.*, 2020).

관측기간 동안의 이산화탄소 농도는 $330 \text{ ppmv} \sim 970 \text{ ppmv}$ 의 범위를 보였으며, 전반적인 변화양상은 10월 11일부터 10월 26일까지 큰 변동성을 보이는 전반기(the first half of the monitoring period, Fh)와 10월 27일부터 11월 16일까지 상대적으로 작은 변동성을 보이는 후반기(the second half of the monitoring period, Sh)로 뚜렷이 구분된다(그림 2d). 전반기 15일간 측정된 이산화탄소 농도는 $380 \sim 970 \text{ ppmv}$ 의 범위이며, 평균 555 ppmv 를 나타냈

다(표준편차 92 ppmv). 일 최대 변화량은 480 ppmv 이다. 이에 반해 후반기 동안 측정된 이산화탄소 농도는 $330 \text{ ppmv} \sim 540 \text{ ppmv}$ 를 보이며, 평균 394 ppmv (표준편차 37 ppmv)로 최대치가 600 ppmv 이상 상승하지 않고 일 최대 변화량이 160 ppmv 로 상대적으로 안정한 특징을 보였다.

4.2 동굴 대기 이산화탄소 농도변화의 주기성 분석결과 전반기와 후반기 동안 이산화탄소 농도변화의 시

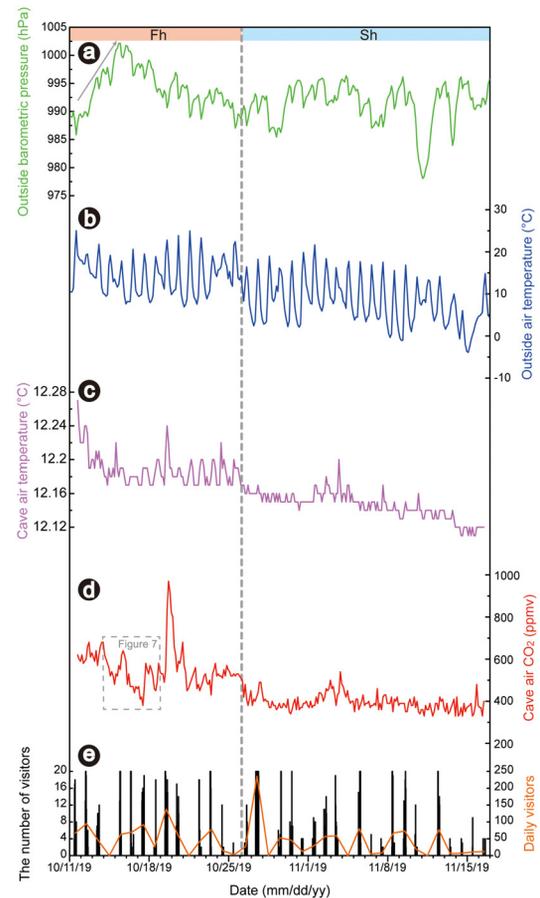


Fig. 2. The atmospheric environmental parameters in the study area and inside Baeg-nyong Cave. The monitoring period for all data is from October 11th to November 16th, 2019. Based on the variabilities of cave air CO_2 , it was divided into the first half (Fh) and the second half (Sh) of the monitoring period. (a) Outside barometric pressure. The grey arrow indicates an abrupt increasing trend. (b) Outside air temperature. (c) Cave air temperature. (d) Concentrations of cave air CO_2 . (e) The total number of visitors per day (orange line) and the number of visitors per cave tour (black bars).

계열 자료에 대한 주기성을 파악하기 위해 스펙트럼 분석(spectrum analysis)을 진행한 결과는 그림 3에 도시하였다. 전반기는 이산화탄소의 일주기 변화가 신뢰수준(confidence level) 99% 이상으로 뚜렷하게 나타났다(그림 3a), 후반기는 일주기에 해당하는 정점이 신뢰수준 90%에 미치지 못하여 상대적으로 주기성이 크게 약화된 결과를 보여주었다(그림 3b). 후반기의 5일과 6시간 주기성에 대해서는 각각 20일 내외의 측정 기간과 3시간 간격의 측정 간격을 고려하면 유의미한 결과가 아닌 것으로 판단하였다. 이러한 결과를 토대로 전반기 중 이산화탄소 농도의 일별 변화를 살펴보면 새벽 시간 동안 점차 감소하

다가 오전 11시에 최저치(평균 504 ppmv)를 보였으며(그림 4a), 이후 최고치(평균 594 ppmv)를 보이는 오후 8시까지 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 후반기 동안에는 이산화탄소의 하루 중 변화가 극히 미약하지만 약 400 ppmv 내외에서 전반기와 유사한 변화패턴을 보이는 것으로 나타났다(그림 4b).

5. 토 의

5.1 백룡동굴 대기 이산화탄소의 기원

현재까지의 상부기원 동굴(epigenic caves)에 관한 여러 연구들에서는 동굴 대기 이산화탄소의 기원

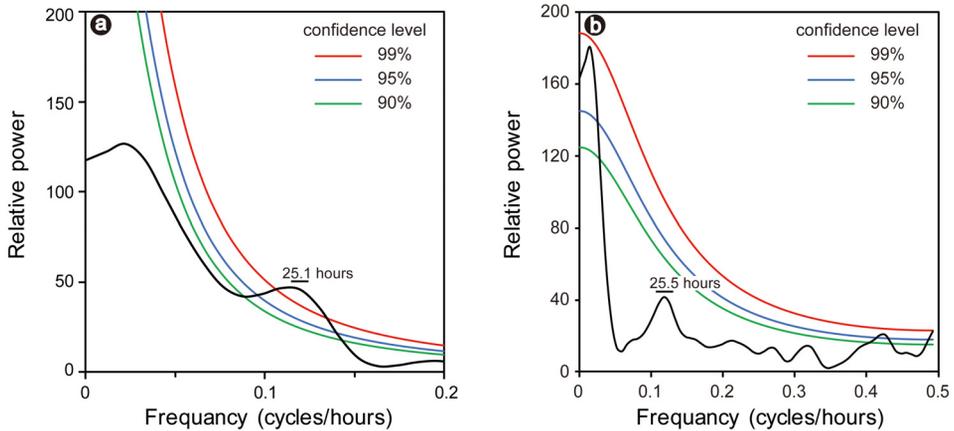


Fig. 3. Results of the spectral analyses for cave air CO₂ during the Fh (a) and Sh (b). The open-software REDFIT was used (Schulz and Mudelsee, 2002).

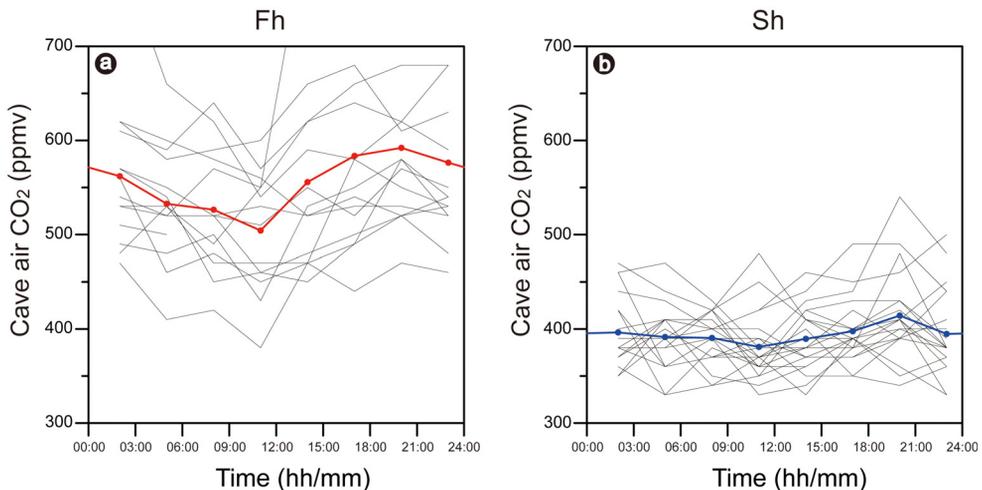


Fig. 4. Changes in the average concentration of cave air CO₂ during the Fh (red line in a) and Sh (blue line in b). The grey lines represent the variations of daily CO₂ in every days.

Table 1. Correlation coefficients between the daily mean cave air CO₂ concentration and other atmospheric environmental factors.

	Cave air CO ₂	Precipitation	Cave visitor	Outside air temperature	Outside barometric pressure
Cave air CO ₂	1	-0.282	0.303	0.788**	0.340*
Precipitation	-0.282	1	-0.192	-0.477**	-0.192
Cave visitor	0.303	-0.192	1	0.128	0.201
Outside air temperature	0.788**	-0.477**	0.128	1	0.105
Outside barometric pressure	0.340*	-0.192	0.201	0.105	1

** p < 0.01, * p < 0.05

으로서 토양 호흡(soil respiration)을 제시해왔으며, 이는 다시 토양대와 직간접적으로 연결된 열극을 통한 공기 흐름에 의한 이산화탄소 공급과 동굴수 유입 후 이산화탄소 유리작용(CO₂ degassing)에 의한 공급으로 나눌 수 있다(Baldini *et al.*, 2006; Wong and Banner, 2010; Frisia *et al.*, 2011; Peyraube *et al.*, 2018; Lyu *et al.*, 2020). 그리고 개방동굴의 경우 관람객 호흡(human respiration) 등의 인위적 교란을 배제할 수 없다(Dragovich and Grose, 1990; Liñán *et al.*, 2018). 위와 같은 다양한 요인들에 의해 동굴 대기로 공급된 이산화탄소는 동굴 주변 환경요소 사이의 상호작용으로 발생하는 동굴대기순환(cave ventilation)에 따라 농도가 조절된다. 이러한 동굴대기순환을 유발하는 요소는 동굴 내·외부 대기의 온도 차이, 동굴 내·외부 기압 차이, 동굴의 기하학적 구조(cave geometry) 그리고 탁월풍(prevaling winds)이 있으며(Pflitsch *et al.*, 2010; Fairchild and Baker, 2012; Cowan *et al.*, 2013; Pla *et al.*, 2020), 특히 중위도 지역은 계절별 대기 온도변화에 의한 동굴 내·외부 대기의 밀도차로 발생하는 순환의 영향이 크다고 보고된 바 있다(James *et al.*, 2015). 이번 연구에서는 가을철 백룡동굴 대기 이산화탄소 농도를 조절하는 요인에 대하여 파악하기 위해 외부대기 환경요소인 기온, 대기압, 강수 그리고 관람객 수에 대한 상관성 분석을 수행하였다(표 1).

Baldini *et al.* (2006)은 동굴 위 토양대에서의 미생물 활동 및 유기물의 분해과정에서 형성되는 토양 CO₂와 PCP (prior calcite precipitation) 과정 중 발

생되는 CO₂의 경우, 확산 효과에 의해 동굴 위 통기대의 공극 사이를 통과하거나 동굴 주변 지표에 내린 강수가 통기대를 따라 흐를 때 용존되어 동굴로 유입된다는 것을 언급하였다. 여기서 토양대 이산화탄소의 동굴 내 유입 체제(inflow regime)는 동굴 대기 이산화탄소 변화에 매우 중요한 요인으로서 이에 대한 해석이 선행되어야 할 필요가 있다. 만약 이산화탄소의 유입 체제가 통기대 내 지하수로(conduit) 또는 절리를 통한 빠른 흐름에 주로 조절된다면 이벤트성 강수에 의한 동굴 대기 이산화탄소 농도의 변화가 나타날 것으로 예상된다. 하지만 연구 기간 중 백룡동굴 주변에 내린 총강수량은 8.4 mm이고 기록될만한 이벤트성 폭우가 내리지 않았으며, 외부 강수와 동굴 대기 이산화탄소 농도 사이의 상관성 분석결과($r=-0.28$)는 다소 낮은 것으로 나타났다. 따라서 백룡동굴 대기 중 이산화탄소 농도는 이벤트성 강수에 의한 공급보다는 확산 흐름 체제에 의해 상시 공급되는 동굴수의 이산화탄소 유리작용(Treble *et al.*, 2015)과 모암 공극 내 유체 확산 등 상대적으로 느린 흐름에 더 큰 영향을 받았을 것으로 추정된다(Frisia *et al.*, 2011; Lyu *et al.*, 2020). 이는 외부 강수의 공급이 없는 기간에도 B 구역 내 중유관에서의 지속적인 낙수(dripwater)가 발생되고 있다는 사실로도 뒷받침될 수 있다(Cho and Jo, 2017). 하지만 이러한 해석은 겨울철 건기의 시작 시기에 대한 설명으로서 강수가 집중되는 여름철 우기 동안은 이벤트성 강수량에 의한 이산화탄소 농도 증가의 가능성을 배제할 수 없으므로 추후 지속적인 고해상도 모

니터링이 요구된다.

개방동굴에서 관람객의 호흡은 동굴 대기 이산화탄소 농도를 변화시키는 또 다른 요인 중 하나이다. Dragovich and Grose (1990)에 의하면 오스트레일리아에 있는 Jenolan 관광동굴의 이산화탄소 농도는 관람 전 400 ppm에서 일일 최고 1,000 ppm까지 올라가며, 농도의 일 최고치는 관람객 수와 밀접한 관계가 있다고 언급하였다. 또한, 증가된 이산화탄소 농도는 관람객의 출입이 없는 새벽 동안 감소하여 오전 중 관람 이전의 상태로 되돌아온다고 하였다. Liñan *et al.* (2018)은 스페인에 있는 Nerja 관광동굴에서 관람객이 내뿜는 이산화탄소를 이용하여 계절별 동굴대기순환을 평가하였으며, 증가된 관광동굴의 이산화탄소 농도가 공기 흐름에 의해 동굴 내 비 관광 구역까지 영향을 끼친다고 보고하였다. 백룡동굴은 국내 다른 개방동굴과는 다르게 체험형 동굴로서 하루 입장 가능 인원은 총 240명으로 1회당 20명으로 제한되어있으며, 주굴인 A 구역에 대해 공개구간을 설정하여 동굴환경에 대한 보호를 진행

하고 있다. 연구 기간동안 총 관람객은 1,684명이며, 하루 최대 및 최소 관람객은 각각 236명(10월 27일)과 3명 (10월 25일)이다(그림 2e). 만약 관람객 수에 의하여 동굴 대기 이산화탄소 농도가 증가한다면 관람객이 가장 많이 온 날과 두 번째로 많이 온 날은 이산화탄소 농도변화의 영향이 있어야 한다. 하지만 실제로 10월 19일(138명)과 10월 27일(236명)의 평균 이산화탄소 농도는 각각 705 ppmv와 434 ppmv로 나타났으며(그림 5a, 5b), 약 100명이 적게 관람한 19일은 오히려 이산화탄소 농도가 급격한 증가를 보였다. 또한, 비슷한 수의 관람객이 온 10월 23일(78명)과 11월 5일(80명)의 동굴 대기 이산화탄소 농도는 120 ppmv의 차이를 보였다(그림 5c, 5d). 따라서 관람객 수와 동굴 대기 이산화탄소 농도 사이의 상관관계($r=0.30$)가 다소 낮은 것으로 해석된다.

이산화탄소 농도가 측정된 구역은 관람객들에게 공개된 구간이 아닌 출입이 제한된 B 구역에서 진행하여 상대적으로 농도변화에 끼치는 영향이 미미할 가능성이 있으며, 지속적인 모니터링을 통해 다른

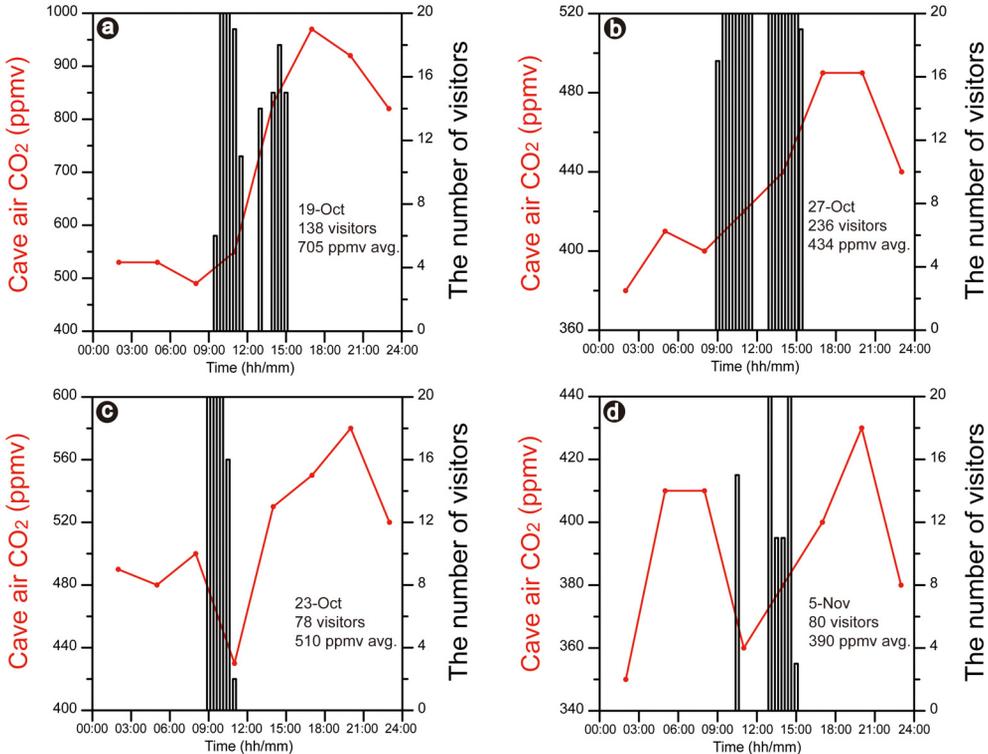


Fig. 5. Comparisons between the number of visitors and CO₂ concentration of cave air. (a) and (b) Two cases with large number of visitors. (c) and (d) Two cases with similar number of visitors.

Table 2. Comparison of atmosphere temperature and cave air CO₂ during the first (Fh) and second half (Sh) of the monitoring period. The number in parenthesis indicates the mean value.

Period	Cave air CO ₂ (ppmv)	Daily CO ₂ variation (ppmv)	Outside air temperature (°C)	Cave air temperature (°C)	Daily temperature	
					Max. (Day)	Min. (Night)
Fh (2019/10/11 ~ 2019/10/26)	380~970 (555)	20~480 (141)	6.91 ~ 25.02 (14.24)	12.17~12.27 (12.19)	16.42 ~ 25.02 (20.91)	5.51 ~ 14.82 (9.37)
Sh (2019/10/27 ~ 2019/11/16)	330~540 (393)	30~160 (79)	-3.90 ~ 21.65 (7.93)	12.11~12.20 (12.15)	4.53 ~ 21.65 (15.54)	-3.90 ~ 7.67 (2.76)

계절 동안의 관람객 영향에 대한 평가가 필요하다. 향후 추가 연구가 필요하지만, 위와 같은 해석을 종합하면 백룡동굴 내 비공개 구간인 B 구역의 대기 이산화탄소의 기원은 주로 유체에 의해 상시 공급되는 토양대 이산화탄소일 것으로 추정된다.

5.2 백룡동굴 대기 이산화탄소 농도의 조절요인

앞서 언급한 이산화탄소의 다양한 기원으로부터 지속적인 영향을 받는 동굴 대기환경은 외부 대기의 영향에 대해 반 고립상태에 있으며, 동굴 외부에서의 이산화탄소 조절요인과는 다른 변화 체계를 보인다(Fairchild and Baker, 2012). Kowalczk and Froelich (2010)에 따르면 동굴 위 토양대 및 통기대에서 유입되는 유체로 인해 증가된 동굴 대기 이산화탄소 농도는 동굴 주변 지역 기상환경요소에 의해 유발되는 동굴대기순환으로 조절되며, 주로 계절에 따른 온도 변화로 구분되는 3가지(여름-가을-겨울) 동굴대기순환 체계를 제시했다. 또한, Peyraube *et al.* (2017)은 동굴 대기 이산화탄소의 계절 또는 일변화는 외부대기와 이산화탄소 기원의 공급 작용 사이의 혼합된 결과로서 나타나며, 주로 온도에 의해 발생하는 물리적인 힘으로 조절된다고 하였다. 이를 바탕으로 온대 기후에 속한 프랑스 Cussac 동굴의 겨울철 동굴대기순환은 새벽 시간에 차가운 외부대기가 동굴 내부로 들어오며, 외부대기와 동굴 대기가 비슷해지는 낮에는 반대로 동굴 대기가 외부로 빠져나간다고 보고하였다. 가을철 백룡동굴 이산화탄소 농도는 다양한 조절요인 중 외부 기온과 유의미한 상관관계($r=0.78$)를 보였으며(표 1), 백룡동굴 대기 이산화탄소 농도의 변화패턴은 시간에 따른 외부온도의 변화에 따라 서로 다르게 나타났다. 그림 6은 외부 기온

과 동굴 대기 이산화탄소 농도 사이의 강제(forcing)-반응(response)의 관계를 보여주며, 외부 기온의 일변화 중 기온의 정점과 저점 이후 이산화탄소 농도의 정점과 저점이 지연되어 반응하는 패턴을 알 수 있다. 이러한 변화패턴은 동굴 내·외부에서 측정된 두 환경요소 사이의 반응시간(response time) 및 지체시간(lag time)이 존재함을 시사한다. 태양의 일주기에 따라 나타나는 외부 기온의 일변화는 새벽 5시경 최저온도(평균 7.03°C) 이후 오후 2시까지 급격한 증가(평균 17.49°C)를 하고 저녁 11시까지 급격히 감소하는 패턴을 보였다. 반면, 동굴 대기 이산화탄소는 농도의 최고치와 최저치가 외부 기온 변화에 비해 6시간 지연되어 반응하였으며, 사인파(sinusoidal wave)의 변화양상을 보였다(그림 6). 이러한 이산화탄소 농도의 변화패턴은 전반기와 후반기 동안 시간에 따른 외부 기온의 점진적인 감소로 인해 뚜렷하

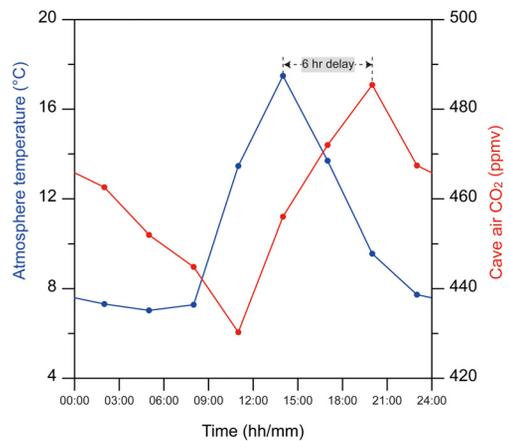


Fig. 6. A daily comparison between average values of air temperature and cave air CO₂. The arrow with number indicates a lag time between two parameters.

계 구분된다(그림 2d).

전반기는 낮 최고기온(평균 20.91°C)이 동굴 기온(평균 12.19°C)보다 높아 동굴 내·외부 기온의 차이가 크다(표 2). 낮 동안 차갑고 밀도가 높은 동굴 대기는 상대적으로 뜨겁고 밀도가 낮은 외부 공기 유입의 영향을 최소로 받는다. 이때 동굴 내부 대기는 토양 및 통기대로부터 지속적으로 유입되는 이산화탄소의 영향으로 농도가 증가하게 된다. 하지만 밤 동안 동굴 기온보다 차가워지는 외부 기온(평균 최저기온 9.37°C)으로 인해 동굴 내·외부 대기의 밀도 차이가 역전된다. 따라서 외부대기의 밀도 증가로 인해 동굴 내부는 이산화탄소 농도가 낮은 외부 공기의 유입이 많아지며, 이는 낮 동안 높아진 동굴 대기 이산화탄소 농도를 희석해 농도치를 낮추는(평균 141 ppmv) 것으로 판단된다. 하지만 외부 공기의 유입에도 불구하고 이산화탄소와 같은 기체상 물질과는 다르게 에너지로 표현되는 동굴 대기의 온도는 주변 모양으로부터 조절되어 동굴대기순환 동안 거의 변화가 없는 특징을 가지며, 이러한 차이로 인해 나타나는 낮과 밤 동굴 내·외부 기온의 역전이 동굴 대기순환의 일주기적 작용을 유발하는 것으로 해석된다(그림 3a). 하지만 전반기 중 낮 동안 외부 기온 상승에도 불구하고 이산화탄소 농도의 변화가 없는 날이 관찰된다(그림 7). 이에 대해서는 보다 다각적인 모니터링 항목을 요구하지만, 이산화탄소의 농도 변화가 없는 날의 대기압 변화를 고려했을 때 급격한 대기압의 증가에 의한 것으로 추정된다(그림 2a grey arrow). 반면에 후반기는 낮 최고기온(평균 15.54°C)이 동굴 기온(평균 12.15°C)보다 낮거나 비슷하며(표 2), 동굴 내·외부 대기의 큰 밀도차로 인

한 공기 흐름의 정체가 발생하는 전반기와는 다르게 지속적 외부대기의 유입 가능성이 있다. 또한, 밤의 외부 기온(평균 최저기온 2.76°C)이 동굴 기온보다 현저히 낮아서 외부대기의 유입이 원활히 이루어지거나 이산화탄소 농도가 330 ppmv 이하로 내려가지 않는 특징을 보인다. 전반기와 비교하면 낮과 밤의 뚜렷한 기온 감소 즉, 후반기 외부 기온의 평균(7.93°C)이 동굴 기온보다 낮아 지속적인 외부 공기의 유입을 받을 것으로 판단되며(표 2), 이산화탄소 농도의 일주기를 약화시키는 동시에 그에 따른 이산화탄소 농도치(평균 393 ppmv)도 낮게 유지되고 있는 것으로 해석된다(그림 4b). 결과적으로 백룡동굴 대기 이산화탄소는 동굴 내·외부 대기의 온도 차이가 유발하는 내·외부 대기의 밀도차에 의한 동굴대기순환이 농도를 주요하게 조절하는 것으로 판단된다. 이와 같은 동굴 내·외부 대기의 밀도차에 의한 순환의 영향으로 나타나는 계절 또는 수일 내 이산화탄소 농도의 변화는 해외 여러 지역의 동굴에서도 보고된 바 있다(Spötl *et al.*, 2005; Banner *et al.*, 2007; Cai *et al.*, 2011; Oster *et al.*, 2012; Breitenbach *et al.*, 2015; Matthey *et al.*, 2016; Shindoh *et al.*, 2017). 또한, 외부 기온의 일교차가 커지는 환절기 동굴대기순환 작용의 유지 정도에 따라 동굴 대기 이산화탄소 농도의 일주기 변화가 조절된다. 이는 가을철 동굴 대기 이산화탄소의 감소가 가을철 전체 기간동안 지속해서 발생하기보다는 어느 한 시점 동안 급격하게 발생될 수 있음을 시사한다. 위와 같은 결과는 사계절이 뚜렷한 우리나라의 외부 기온 변화에 따라 계절 또는 일별 동굴대기순환의 영향이 존재할 가능성을 보여준다.

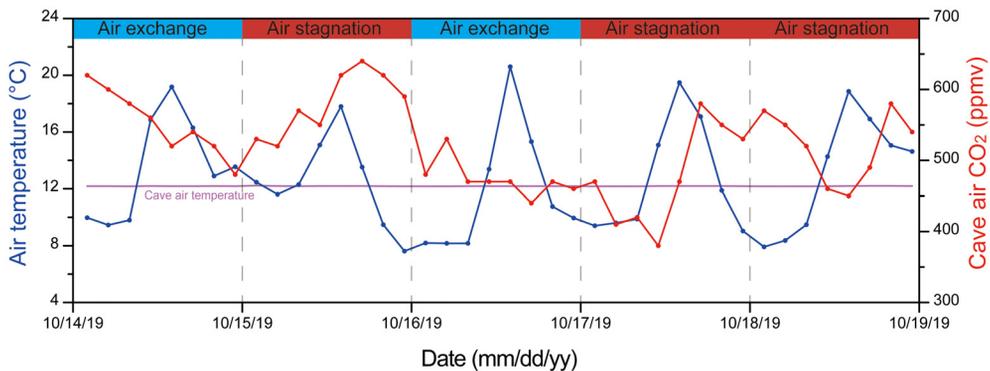


Fig. 7. Variation of CO₂ concentrations in the Fh by the outside temperature.

전반기 중 나타나는 이산화탄소 농도의 변화패턴은 낮과 밤 사이 외부 기온의 큰 일교차로 인한 동굴 대기순환 영향으로 일주기의 양상을 보였으며(그림 4a), 특히 10월 19일의 이산화탄소 농도의 최고치는 다른 날에 비해 유독 높게 증가하였다(그림 2d). 이는 동굴 내·외부 대기의 온도 차로 유발되는 동굴 대기순환 이외 동굴 대기 이산화탄소 농도에 영향을 끼치는 또 다른 조절요인이 있음을 암시한다. Pflictsch *et al.* (2010)은 미국 중서부 사우스다코타주에 있는 Jewel 동굴과 Wind 동굴에서 동굴 내·외부 대기의 기압 차이가 유발하는 공기 흐름의 속력과 방향을 이용하여 동굴대기순환을 평가하였으며, 외부 대기압이 낮아질 때 동굴 내부에서 외부로 공기의 흐름이 형성되어 기압의 평형을 맞춘다고 보고하였다. 동굴 대기 이산화탄소 기원을 고려하면 10월 19일에 나타나는 이산화탄소 농도의 급격한 증가치는 관람객 수의 영향과 외부 강수의 영향은 미미할 것으로 판단된다. 따라서 토의 5.1에서 제시한 동굴 주변 토양으로부터 이산화탄소가 상시 공급될 가능성으로 미루어 보아 토양대 이산화탄소의 급격한 유입 현상이 나타난다고 추정된다. 토양대 및 통기대 내부 공극에 갇혀 있는 이산화탄소는 동굴 내부 대기의 흐름에 따라 영향을 받는다. 낮 동안 증가하는 외부 기온과 상호작용하여 나타나는 이산화탄소 농도의 증가는 외부대기압이 급격히 낮아지는 시간과 일치한다(그림 2). 이는 동굴 내·외부 대기의 온도 차이가 유발하는 동굴대기순환과 함께 동굴 내·외부 기압 차이로 인해 동굴 내부에서 외부로 향하는 공기의 흐름이 형성되어 이산화탄소 농도가 급격히 증가할 가능성을 보여준다(Vieten *et al.*, 2016; Chignola and Badino, 2019).

6. 결론

국내 자연동굴 중 유일한 제한적 개방동굴인 천연기념물 제260호 백룡동굴의 가을철 동굴 대기 이산화탄소의 기원은 주로 토양대로부터 유체에 의한 이산화탄소 공급이 배경 효과로서 상시 발생하고 있을 가능성이 있다. 연구 기간동안 관측된 동굴 대기 환경은 낮과 밤 동안 큰 일교차를 보이는 환절기 외부 기온 변화로 인한 반복적인 동굴대기순환의 작용을 받는다. 이는 전반기(10월 11일~10월 26일) 중 나

타는 동굴 대기 이산화탄소 농도변화의 일주기에 영향을 끼치며, 점진적인 외부 기온의 감소로 인한 지속적인 동굴대기순환의 작용은 이산화탄소 농도 변화의 일주기를 약화시키는 결과를 보여줬다. 위와 같은 결과를 바탕으로 백룡동굴 B 구역의 대기 이산화탄소 농도는 관람객의 영향보다는 자연적 현상에 의해 조절되는 것으로 판단된다. 하지만 가을철과 달리 동굴 내·외부 기온의 차이가 낮과 밤 동안 역전되지 않는 여름철에는 동굴대기순환이 억제될 수 있으며 이에 따른 영향에 대한 평가가 추가로 필요하다. 그럼에도 불구하고 가을철 동굴 대기 이산화탄소 농도는 동굴 내·외부 대기 온도변화가 유발하는 동굴대기순환이 효과적으로 일어나기 때문에 외부 대기 이산화탄소 농도 수준과 비슷하게 자연적인 상태를 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 동굴대기순환 작용의 유지 정도에 따라 이산화탄소 농도의 일주기 변화가 조절되며, 이는 가을철 동굴 대기 이산화탄소의 감소가 가을철 전체 기간동안 지속해서 발생하기보다는 어느 한 시점 동안 급격하게 발생할 수 있음을 암시한다. 따라서 백룡동굴 대기 이산화탄소 농도에 대한 고해상도 모니터링을 지속적으로 수행한다면 계절별 대기 온도변화에 따라 변화하는 동굴대기순환 체계를 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 연내 단주기 고해상도 이산화탄소 모니터링 결과는 동굴대기순환 시스템 이해를 통한 우리나라 개방동굴 관리 및 보존에 중요한 정보를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 기본연구지원사업(No. NRF-2020R1F1A1050252)의 일환으로 수행되었다. 동굴의 미개방 구역을 조사할 수 있도록 행정 지원을 제공해 준 문화재청과 평창군 담당자 그리고 야외답사에 도움을 준 백룡동굴 해설사들과 직원들께 감사드립니다.

REFERENCES

Baker, A. and Genty, D., 1998, Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing

- surface land use and increased cave tourism. *Journal of Environmental Management*, 53, 165-175.
- Baldini, J.U., Baldini, L.M., McDermott, F. and Clipson, N., 2006, Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: evidence from Ballynamintra Cave, Ireland. *Journal of Cave and Karst Studies*, 68, 4-11.
- Banner, J.L., Guilfoyle, A., James, E.W., Stern, L.A. and Musgrove, M., 2007, Seasonal variations in modern speleothem calcite growth in central Texas, USA. *Journal of Sedimentary Research*, 77, 615-622.
- Breitenbach, S.F., Lechleitner, F.A., Meyer, H., Diengdoh, G., Matthey, D. and Marwan, N., 2015, Cave ventilation and rainfall signals in dripwater in a monsoonal setting—a monitoring study from NE India. *Chemical Geology*, 402, 111-124.
- Cai, B., Zhu, J., Ban, F. and Tan, M., 2011, Intra-annual variation of the calcite deposition rate of drip water in Shihua Cave, Beijing, China and its implications for paleoclimatic reconstructions. *Boreas*, 40, 525-535.
- Chignola, R. and Badino, G., 2019, Fluctuations of atmospheric pressure and the sound of underground karst systems: the Antro del Corchia case (Apuane Alps, Italy). *Frontiers in Earth Science*, 7, 147.
- Cho, J. and Jo, K., 2017, The Petrographic Investigation of Soda Straws in Baeg-nyong Cave, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, South Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 38, 64-79 (in Korean with English abstract).
- Cho, J.N., 2018, Monitoring on the carbonate critical zone and speleothems in a limestone cave. Master's thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 89 p (in Korean with English abstract).
- Cowan, B.D., Osborne, M.C. and Banner, J.L., 2013, Temporal variability of cave-air CO₂ in central Texas. *Journal of Cave and Karst Studies*, 75, 38-50.
- Critical Zone Exploration Network (CZEN), 2020, <https://criticalzone.org/national/> (September 1, 2020).
- Cultural Heritage Administration, 2020, http://www.cha.go.kr/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=76273&bbId=BBSMSTR_1021&mn=NS_03_08_01 (September 8, 2020).
- Dragovich, D. and Grose, J., 1990, Impact of tourists on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. *Geoforum*, 21, 111-120.
- Duan, W., Cai, B., Tan, M., Liu, H. and Zhang, Y., 2012, The growth mechanism of the aragonitic stalagmite laminae from Yunnan Xianren Cave, SW China revealed by cave monitoring. *Boreas*, 41, 113-123.
- Fairchild, I.J. and Baker, A., 2012, *Speleothem science: from process to past environments* (Vol. 3). John Wiley & Sons.
- 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.
- Frisia, S., Fairchild, I.J., Fohlmeister, J., Miorandi, R., Spötl, C. and Borsato, A., 2011, Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 380-400.
- Holland, H.D., Kirsipu, T.V., Huebner, J.S. and Oxburgh, U. M., 1964, On some aspects of the chemical evolution of cave waters. *The Journal of Geology*, 72, 36-67.
- James, E.W., Banner, J.L. and Hardt, B., 2015, A global model for cave ventilation and seasonal bias in speleothem paleoclimate records. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 1044-1051.
- Jo, K.N., Yi, S., Lee, J.Y., Woo, K.S., Cheng, H., Edwards, L.R. and Kim, S.T., 2017, 1000-year quasi-periodicity of weak monsoon events in temperate Northeast Asia since the mid-holocene. *Scientific reports*, 7, 1-9.
- Kim, L., Park, Y., Lee, J., Choi, J., Jung, Q., Kim, J. and Kim, I., 2020, Variation of air temperature inside carbonate area caves. *MUNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 53, 52-63 (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2020, <https://data.kma.go.kr> (August 5, 2020).
- Kowalczyk, A.J. and Froelich, P.N., 2010, Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: how fast do caves breathe?. *Earth and Planetary Science Letters*, 289, 209-219.
- Legates, D.R. and Willmott, C.J., 1990, Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. *International Journal of Climatology*, 10, 111-127.
- Liñán, C., Del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J. and Ojeda, L., 2018, Highlighting the importance of transitional ventilation regimes in the management of Mediterranean show caves (Nerja-Pintada system, southern Spain). *Science of The Total Environment*, 631, 1268-1278.
- Luetscher, M. and Ziegler, F., 2012, CORA—a dedicated device for carbon dioxide monitoring in cave environments. *International Journal of Speleology*, 41, 13.
- Luo, W. and Wang, S., 2008, Transmission of oxygen isotope signals of precipitation-soil water-drip water and its implications in Liangfeng Cave of Guizhou, China. *Chinese Science Bulletin*, 53, 3364-3370.
- Lyu, Y., Luo, W., Wang, Y., Zeng, G., Wang, Y., Cheng, A., Zhang, L., Chen, J., Cai, X., Zhang, R. and Wang, S.,

- 2020, Impacts of cave ventilation on drip water $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and its paleoclimate implication. *Quaternary International*, 547, 7-21.
- Mattey, D.P., Atkinson, T.C., Barker, J.A., Fisher, R., Latin, J.P., Durrell, R. and Ainsworth, M., 2016, Carbon dioxide, ground air and carbon cycling in Gibraltar karst. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184, 88-113.
- Oster, J.L., Montañez, I.P. and Kelley, N.P., 2012, Response of a modern cave system to large seasonal precipitation variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 91, 92-108.
- Park, S., Cho, Y.J., Jung, D.Y., Jo, K.N., Lee, E.J. and Lee, J.S., 2020, Microbial Diversity in Moonmilk of Baeg-nyong Cave, Korean CZO. *Frontiers in Microbiology*, 11, 613.
- Peyraube, N., Lastennet, R., Denis, A., Malaurent, P., Houillon, N. and Villanueva, J.D., 2018, Determination and quantification of major climatic parameters influencing the CO_2 of Lascaux Cave. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 1291-1301.
- Peyraube, N., Lastennet, R., Villanueva, J.D., Houillon, N., Malaurent, P. and Denis, A., 2017, Effect of diurnal and seasonal temperature variation on Cussac cave ventilation using CO_2 assessment. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 1045-1058.
- Pflitsch, A., Wiles, M., Horrocks, R., Piasecki, J. and Ringeis, J., 2010, Dynamic climatologic processes of barometric cave systems using the example of Jewel Cave and Wind Cave in South Dakota, USA. *Acta Carsologica*, 39, 449-462.
- Pla, C., Fernandez-Cortes, A., Cuezva, S., Galiana-Merino, J.J., Cañaveras, J.C., Sanchez-Moral, S. and Benavente, D., 2020, Insights on Climate-Driven Fluctuations of Cave ^{222}Rn and CO_2 Concentrations Using Statistical and Wavelet Analyses. *Geofluids*, 8858295, 17 p.
- Schulz, M. and Mudelsee, M., 2002, REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 28, 421-426.
- Sherwin, C.M. and Baldini, J.U., 2011, Cave air and hydrological controls on prior calcite precipitation and stalagmite growth rates: Implications for palaeoclimate reconstructions using speleothems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 3915-3929.
- Shindoh, T., Mishima, T., Watanabe, Y., Ohsawa, S. and Tagami, T., 2017, Seasonal Cave Air Ventilation Controlling Variation in Cave Air P_{CO_2} and Drip Water Geochemistry at INAZUMI Cave, OITA, Northeastern Kyushu, Japan. *Journal of Cave & Karst Studies*, 79, 100-112.
- Smith, A.C., Wynn, P.M., Barker, P.A. and Leng, M.J., 2015, Drip water electrical conductivity as an indicator of cave ventilation at the event scale. *Science of the Total Environment*, 532, 517-527.
- Smith, G.K., 1999, Foul air in limestone caves and its effect on cavers. In *Australian Speleological Federation 22nd Biennial Conference*.
- Spötl, C., Fairchild, I.J. and Tooth, A.F., 2005, Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 2451-2468.
- Treble, P.C., Fairchild, I.J., Griffiths, A., Baker, A., Meredith, K.T., Wood, A. and McGuire, E., 2015, Impacts of cave air ventilation and in-cave prior calcite precipitation on Golgotha Cave dripwater chemistry, southwest Australia. *Quaternary Science Reviews*, 127, 61-72.
- Vieten, R., Winter, A., Warken, S.F., Schröder-Ritzrau, A., Miller, T.E. and Scholz, D., 2016, Seasonal temperature variations controlling cave ventilation processes in Cueva Larga, Puerto Rico. *International Journal of Speleology*, 45, 259-273.
- Wong, C. and Banner, J.L., 2010, Response of cave air CO_2 and drip water to brush clearing in central Texas: Implications for recharge and soil CO_2 dynamics. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G4).
- Wong, C.I., Banner, J.L. and Musgrove, M., 2011, Seasonal dripwater Mg/Ca and Sr/Ca variations driven by cave ventilation: Implications for and modeling of speleothem paleoclimate records. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 3514-3529.
- Woo, K.S., Kim, R., Lee, K.C., Choi, Y.G. and Choi, D.W., 2006, Scientific investigation of the Baegnyong Cave, Pyeongchang gun, Gangwondo. Korea, 222 p (in Korean with English abstract).

Received : September 21, 2020

Revised : October 28, 2020

Accepted : November 18, 2020