MUNHWAJAE *Korean Journal of Cultural Heritage Studies Vol. 53 No. 1, March 2020, pp.52~63.*

https://doi.org/10.22755/kjchs.2020.53.1.52

석회암 지역에 분포하는 동굴의 내부 온도 변동 특성

김련 (사)한국동굴연구소 책임연구원
박영윤* (사)한국녹색지구환경연구소 소장
이종희 (사)한국동굴연구소 부소장
최재훈 (사)한국동굴연구소 실장
정규성 (사)한국동굴연구소 실장
김중태 문화재청 천연기념물과 사무관
김인수 문화재청 천연기념물과 주무관
*Corresponding Author : young-yun@nate.com

국 문 초 록

이 연구는 국내 대표적인 석회 동굴인 대금굴, 온달동굴, 성류굴의 내부 온도 변동의 특성과 기온이 동굴 내부 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 2019년 4월 13일부터 2019년 6월 25일까지 대금굴, 온달동굴 및 성류굴의 각 세 지점에서 매시간 온도를 측정하였다. 또한, 같은 기간에 동굴 주변의 기온 자료를 기상청에서 수집하였다. 수집된 자료의 기초 통계, 시간에 따른 변동 특성, 시계열 분석을 수행하였다. 대금굴, 온달동굴 및 성류굴에서 동굴 입구, 동굴수 유입 지점, 중간 지점 순으로 온도 변화가 크게 나타났다. 연구 기간 동안에 동굴 온도는 점차 증가하는 경향을 보였다. 대금굴은 외부로부터 약 150m에 위치한 모노레일 정류장에서 온도 변화가 크게 나타났고, 중간 지점 이후부터는 거의 일정하게 유지되었다. 정류장에서는 관람객의 영향으로 인해 기온의 영향이 크게 나타나지는 않았지만, 동굴 입구에서 내부로 갈수록 기온의 영향이 점차 감소하였다. 온달동굴은 입구에서 기온의 영향으로 온도가 넓은 범위를 보였지만 내부는 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 동굴 내 관람 구간 가장 안쪽의 동굴수가 유입되는 지점에서는 유입되는 동굴수의 수온이 동굴 온도에 영향을 주었다. 성류굴은 입구와 중간 지점에서 뚜렷한 온도 변화를 보이고 내부는 거의 일정하게 유지되었다. 입구는 기온의 영향으로 온도 변화가 나타났지만, 중간지점은 기온보다는 호수의 수온에 영향을 더 많이 받은 것으로 추정되었다. 그러나 이번 연구에서는 이를 명확하게 설명하지 못하였다. 시계열 분석 결과 모든 동굴에서 기온이 약 1시간이 지난 후에 동굴 내부 온도에 영향을 주는 것으로 평가되었다. 동굴의 규모, 내부 구조, 동굴수, 동굴 입구의 크기와 형태, 공기의 흐름, 관람객 등이 동굴의 온도에 영향을 줄 수 있으므로 동굴 온도 변동 특성을 명확하게 이해하기 위해서는 이러한 요소들도 함께 고려되어야 한다.

주제어 석회 동굴, 대금굴, 온달동굴, 성류굴, 동굴 내부 온도, 시계열 분석

투고일자 2019. 11. 25 ● **심사일자** 2020. 01. 22 ● **게재확정일자** 2020. 02. 11

Ⅰ. 서론

동굴은 화산 활동, 풍화, 빙하, 해식 등으로 인해 자연적으로 지하에 형성된 공동(空洞)으로 크기와 형태가 매우 다양하다(Jennings, 1985). 동굴은 인위적으로 만든 갱도 및 터널과 구분된다. 국내에서는 석회암 지역, 제주도, 해안 및 섬 지역에 다양한 형태의 석회 동굴, 용암 동굴 및 해식 동굴이 1,500여 개 이상 분포한다. 이렇게 국내에 분포하는 동굴 중에 20개소 31개 동굴을 천연기념물로 지정하여 보호 및 활용하고 있다(이광춘 외 2018).

문화재청은 2003년부터 현재까지 국내 동굴에 대한 분포 조사와 기초 학술 조사를 지속적으로 수행하고 있다. 석회 동굴은 강원도와 충청북도 지역에 주로 분포하며 천연기념물로 지정된 동굴 중에 10개소(16개 동굴)가 이 지역에 해당된다. 천연기념물로 지정된 동굴 중에서 일반인들에게 개방된 공개 동굴에 대해서는 내부의 온도, 습도, CO_2 농도, 수질 등에 대한 조사가 이루어지고 있다. 천연기념물 이외의 동굴을 대상으로도 천연기념물적 가치를 가지고 있는 동굴에 대한 기초 학술 조사를 통하여 자연 유산적 및 학술적 가치를 평가하고 있다.

외국에서는 동굴 내부의 온도, 습도, CO_2 농도, 수질 등에 영향을 주는 요인과 이들의 변화가 동굴 환경 및 생태계에 미치는 영향에 관련된 연구들이 활발히 수행되었다. 이러한 연구들을 통해서 동굴 외부 온도와 동굴로 유입되는 동굴수의 수온이 동굴 내부의 온도 및 공기 순환에 영향을 주는 주요 인자인 것이 규명되었다(Badino, 2010; Gregorič et al., 2014). 국내에서도 1980년대 이후부터 최근까지 동굴과 관련된 연구들이 활발하게 진행되었다. 1990년대까지는 주로 동굴 내부의 온도, 습도, CO_2 농도 및 수질 등에 대한 기초 자료를 수집하고 이를 보고하였으나, 주로 동굴이 일반인에게 공개되면서 발생되는 문제점을 평가하고 체계적인 보전·관리와 교육적 활용 방안을 제안 및 개발하는 연구들이 진행되었다(홍시환·변태준 1994; 권동희·유영준, 1996; 최돈원·김련 2009). 최근에는 장기간 측정된 자료를 이용하여 동굴 내부 환경의 변화 요인을 밝히는 연구들과 동굴 내부 구조, 동굴 생성물의 화학 및 동위 원소 자료를 이용하여 동굴의 성인, 고기후 등을 해석하는 연구들이 활발히 진행되고 있다(최돈원 외 2010; 홍석우 외 2012; 조경남 2019). 특히 개방 동굴에서 관람객의 수가 동굴 환경에 미치는 영향을 평가하고 동굴의 규모 및 동굴 환경의 완충 능력 등을 고려하여 동굴의 환경 변화를 최소화하는 방안을 마련하려는 노력들이 이루어지고 있다(최돈원·김련, 2009). 그러나 장기적인 관측 자료가 충분하게 수집되지 않아 외부 환경이 동굴 내부 환경에 미치는 영향에 대한 연구들은 활발하게 이루어지지 않았다.

본 연구는 석회암 지역에 분포하는 대금굴, 온달동굴, 성류굴에서 측정된 온도의 시계열 자료를 이용하여 동굴 내부 온도의 변동 특성을 이해하고, 외부 온도가 동굴 내부 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행하였다.

Ⅱ. 일반 현황

대금굴, 온달동굴, 성류굴은 천연기념물로 지정된 석회 동굴로서 각각 강원도 삼척시, 충청북도 단양군, 경상북도 울진군에 분포하며(그림 1), 공통적으로 동굴 내부에 다량의 동굴수가 흐른다. 대금굴 내 동굴수는 지하수로부터 공급되지만, 온달동굴과 성류굴은 지하수뿐만 아니라 주변의 남한강과 왕피천이 일부 유입되어 동굴 환경에 영향을 준다.

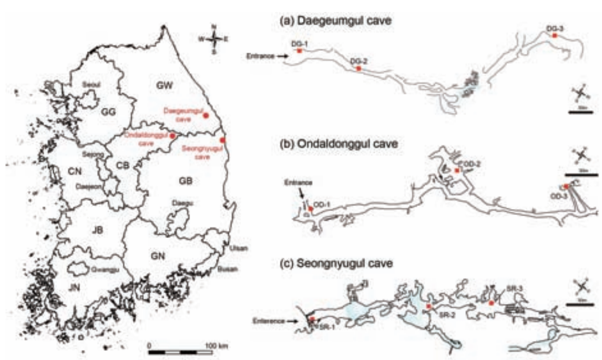

그림 1 연구 지역과 대금굴, 온달동굴, 성류굴의 온도 측정 지점.

1. 대금굴

대금굴은 2004년 발굴되어 2007년에 일반인들에게 개방되었으며 1966년 6월에 천연기념물 제178호로 지정된 삼척 대이리 동굴지대에 포함되어 보호·관리를 받고 있다. 대금굴은 강원도 삼척시 신기면 대이리의 해발 고도 약 380m에 위치하고, 총 연장은 약 1,610m(수중으로 연장 가능성 있음)이며, 동굴은 고생대 캄브리아기의 대기층의 석회암층에 분포한다(우경식 외 2005; 이광춘 외 2016; 지질정보서비스시스템 2019). 대금굴은 단일층 구조를 보이며, 폭포를 포함한 일부 구간(수직)을 제외하고 통로의 대부분이 수평 및 경사 통로로 이루어져 있다. 또한 대금굴의 끝 지점에서부터 동굴 입구 방향으로 동굴수가 흐르고 있으며 여러 개의 크고 작은 폭포가 있다. 종유관, 종유석, 석순(막대기형 석순), 석주, 커튼, 베이컨시트, 동굴산소, 휴석, 유석, 곡석, 동굴진주, 동굴방패, 석화, 부유방해석, 동굴피솔라이트 등의 다양한 동굴 생성물이 관찰된다(우경식 외 2005; 이광춘 외 2018). 동굴수의 수량은 집수역 내 강수량보다 많아 동굴수가 집수역 외부의 넓은 지역으로부터 공급되는 것으로 알려져 있으나 현재까지 정확한 지역은 확인되지 않았다. 대금굴이 개방되기 이전(인공 터널 형성 전) 보다 이후(인공 터널 형성 후)의 동굴 내부의 온도는 외부의 영향을 받아 상대적으로 큰 변화 폭을 보인다(이광춘 외 2016). 2018년 문화재청이 강원도에 분포하는 동굴에 대해 실시한 기초 조사에 따르면, "가 등급"으로 학술 가치가 매우 높은 것으로 평가되었다. 2010년부터 2019년까지 대금굴이 위치한 삼척의 연평균 기온은 11.8~13.3℃의 범위를 보이고 평균 온도는 12.6℃이다(그림 2). 연강수량은 701~1,526mm의 범위를 보이며 연강수량은 급격한 변화를 보인다. 이 기간의 연평균 강수량은 1,098mm였다(기상청 2019)(그림 3).

2. 온달동굴

천연기념물 제261호로 지정(1979년 6월 18일)된 온달동굴은 온달 장군이 수양을 하였다는 전설이 남아 있어 붙여진 이름으로 충청북도 단양군 영춘면 하리에 위치한다(문화재청 2019). 동굴은 고생대 오르도비스기의 막골층 내에 분포한다(우경식 외 2008; 최돈원 외 2010). 온달동굴은 단일층 구조로 이루어진 수평 굴로 총연장은 약 1,525m이다. 동굴 내부에 종유관, 종유석, 석순, 석주, 유석, 휴석, 동굴방패, 커튼, 베이컨시트와 일부 구간에서 소규모로 동굴진주, 석화, 곡석, 부유방해석, 박스웍 등의 동굴 생성물이 발달한다(우경식 외 2008; 최돈원 외 2010). 동굴의 마지막 지점에서 입구 방향으로 수평의 수로를 따라 동굴수가 연중 흐르고 있으며, 동굴 입구를 통해서 주변의 남한강으로 유입된다. 또한 홍수 시 남한강의 수위가 상승하여 동굴 입구로 배출된 동굴수가 남한강으로 빠져나가지 못하거나 남한강의 물이 범람하여 동굴 입구로 유입되어 동굴 내 수위가 상승하여 동굴 내부가 침수되기도 한다(우경식 외 2008).

2014년에 수행된 실태 조사에서는 외부의 영향을 받는 동굴 입구에서 여름과 겨울의 온도 차이는 약 20.6℃였지만, 내부 중 외부의 영향을 가장 적게 받는 지점의 측

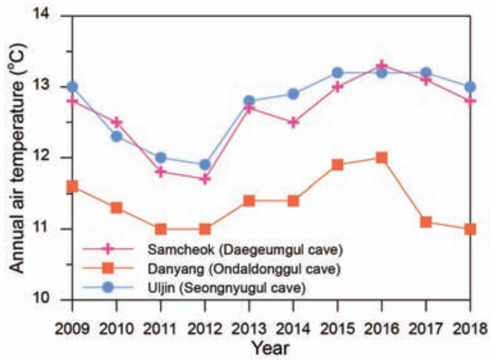

그림 2 삼척, 단양, 울진 지역의 연평균 기온(2009~2018년).

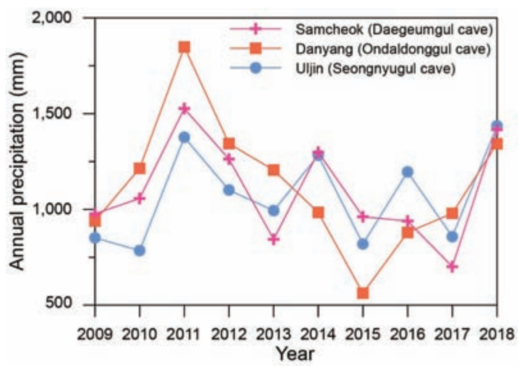

그림 3 삼척, 단양, 울진 지역의 연강수량(2009~2018년).

정에서는 여름과 겨울의 온도가 약 2.1℃ 차이를 보였다(김련 외 2014). 온달동굴이 위치한 단양의 최근 10년간 연평균 기온은 11.0~12.0℃의 범위를 보이고 평균 온도는 11.4℃이다(그림 2). 연강수량은 563~1,848mm의 범위를 보이고 2015년부터 2017년까지 연강수량이 크게 감소하였다. 이 기간의 연평균 강수량은 1,130mm이다(기상청 2019)(그림 3).

3. 성류굴

경상북도 울진군 근남면 구산리의 왕피천 옆에 위치한 성류굴은 1963년 5월 7일에 천연기념물 제155호로 지정되었다(삼척시 2019). 성류굴 입구 주변은 조선누층군의 태백층군과 대비되는 대기층, 화절층, 동점층이 분포하지만, 태백산층군의 동점층 상부에 분포하는 두무골층과 막골층은 확인되지 않는다(김련 외 2010). 태백지역에서 나타나는 두무골층 및 막골층에 대비되는 암상의 분포가 확인되지 않아서 이 두 층을 합하여 이 지역에 맞는 층의 이름으로 명명하여 근남층으로 하였으며, 성류굴은 고생대 오르도비스기의 근남층 내에 분포한다(김련 외 2010). 성류굴은 북동-남서로 발달하는 수평 동굴로 총 연장은 약 870m이고, 이 중에 약 85m 구간이 수중에 잠겨있다. 동굴내부에는 여러 구간의 바닥이 동굴수로 채워져 있으며, 이 중에서 3개 구간에 규모가 큰 호수(수심 약 2~8m)가 분포한다. 또한, 성류굴 내 동굴수는 주변에 흐르는 왕피천의 영향을 받고 있으며, 우기 시 왕피천의 하천 수위가 상승하면 동굴 내부로 하천수가 유입되어 동굴이 침수되는 사례가 있다(김련 외 2010; 문화재청 2019). 성류굴 내부에는 종유관, 종유석, 석순, 석주, 유석, 휴석, 동굴방패, 동굴산호, 베이컨시트, 커튼이 잘 관찰되고, 일부 구간에서는 동굴진주, 석화, 곡석, 부유방해석 등이 관찰된다(김련 외 2010).

동굴 입구에서 측정한 온도는 3.3~28.6℃의 범위를 보이고, 내부의 온도는 동굴 외부의 영향을 받는 지점을 포함하여 4.8~22.1℃의 범위를 보인다(김련 외 2010). 성류굴이 위치한 울진의 최근 10년간 연평균 기온은 11.9~13.2℃의 범위를 보이고 평균 온도는 12.8℃이다(그림 2). 연강수량은 785~1,436mm의 범위를 보인다. 2012년 이후 매년 연강수량이 200~500mm 차이를 보이면서 급격하게 변화하였다. 이 기간의 연평균 강수량은 1,070mm이다(기상청 2019)(그림 3).

Ⅲ. 연구 방법

1. 자료 수집 및 분석

대금굴(DG-1~3), 온달동굴(OD-1~3) 및 성류굴(SR-1~3) 내 각각 3지점에서 2019년 4월 13일부터 2019년 6월 25일까지 매시간 동굴 내부의 온도를 자동으로 측정하였다(그림 1). 또한 같은 기간에 대금굴, 온달동굴 및 성류굴이 위치한 삼척(신기), 단양(영춘), 울진(금강송)에서 매시간 측정된 기온 자료를 기상 자료 개방 포털(기상청 2019)에서 수집하였다. 수집된 자료는 기초 통계 및 시계열 분석을 수행하여 동굴 내부 온도의 변동 특성을 분석하였다.

2. 시계열 분석

2019년 4월 13일부터 2019년 6월 25일까지 매시간 분석된 자료를 이용하여 자기상관분석(auto-correlation analysis)과 교차상관분석(cross-correlation analysis)을 수행하였다. 자기상관분석은 시간의 흐름에 따라 수집된 자료들 사이의 상관관계를 분석하는 것으로 이 연구에서는 각 지점에서 측정된 온도의 지속성을 평가하고 자료들 사이의 변동 특성을 정량적으로 비교하였다. 자기상관함수는 다음과 같이 계산한다(Larocque et al., 1998).

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)}$$

$$C(k) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n-k}(x_t - \overline{X})(x_{t+k} - \overline{X})$$

여기서 k는 지연 시간(time lag, k=0~m), n은 측정된 자료의 수, $\overline{X}$은 측정된 자료의 평균이다. 자기상관함수에

서 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나지 않으면 온도가 일정하게 유지되는 것을 의미하고, 감소하는 경향성은 자료의 변화 특성을 나타내는 것으로 빠르게 감소할수록 수온의 변화 폭이 크다는 것을 의미한다.

교차상관분석은 두 시계열 자료 상관관계를 분석하는 것으로 입력 자료와 출력 자료의 상관관계를 이용하여 자료의 유사성을 평가할 수 있다. 교차상관함수는 다음과 같이 계산한다(Larocque et al. 1998).

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n-k}(x_t - \overline{X})(y_{t+k} - \overline{Y})$$

여기에서 σ_x와 σ_y는 각각 시계열 자료 x_t와 y_t의 표준편차이고, $\overline{X}$와 $\overline{Y}$는 시계열 자료 x_t와 y_t의 평균이다. 교차상관함수를 이용하여 입력 자료에 대한 출력 자료의 지체 시간(delay time)을 구할 수 있다. 지체 시간(지연 시간 k=0과 최대 교차상관함수 사이의 시간차)은 입력 자료에 대한 출력 값의 반응 시간 및 에너지의 전파 속도를 나타낸다(Larocque et al. 1998).

Ⅳ. 결과 및 토의

1. 동굴 내부 온도의 변동 특성

대금굴은 모노레일 정거장(DG-1), 중간 지점(DG-2), 관람 구간의 가장 안쪽(DG-3)에서 온도를 측정하였다(그림 1A). DG-1, DG-2, DG-3에서 측정된 온도는 각각 8.6~12.0, 10.8~11.9, 10.6~12.7℃의 범위를 보였다. 입구인 DG-1에서 가장 넓은 범위를 보였고 동굴 중앙의 DS-2에서 가장 작은 범위를 보였다. 전체적으로는 모든 지점에서 점차 증가하는 경향을 보였다. DS-3이 DS-2보다 넓은 범위를 보였지만 평균은 각각 11.2와 11.3℃로 거의 유사하였다.

연구 기간 초기에는 DG-2의 온도가 DG-1과 DG-3의 온도보다 높았지만 6월 10일 이후에는 DG-1과 DG-3의 온도보다 낮아졌다(그림 4). 각 지점의 일변화 중에 가장 높은 시기와 가장 낮은 시기의 온도 차이는 0.0~1.1℃로 급격한 일변화를 보이지는 않았다. 지점별로 살펴보면, DG-1의 일변화 범위는 0.1~1.1℃로 가장 큰 변화를 보였고 DG-2와 DG-3에서는 일변화의 범위가 0.0~0.5℃로 온도가 거의 일정하게 유지되었다. 대금굴의 경우, 외부로부터 모노레일을 이용하여 약 150m의 인공 터널 구간을 이동한 후에 관람객이 하차하는 지점(DG-1)에 도착하기 때문에 외부 대기의 영향을 직접 받지 않는다. 이로 인해 DG-1의 온도 변화 특성은 외부 기온과 뚜렷한 차이를 보였다. DG-2는 대금굴 내에서 수로와 분리된 가지굴에 위치하며, 지리적으로 외부의 대기 환경과 동굴수의 영향을 가장 작게 받는 고립된 지역이라고 할 수 있다. 따라서 세 지점 중에서 온도의 변화 폭이 가장 작게 나타나는 지점이다. DG-3은 동굴 내부의 상류에서 동굴수(지하수)가 유입되는 지점으로서, 주변에 많은 물이 유입되는 큰 호수가 분포한다. 외부로부터 유입되는 물로 인해 전

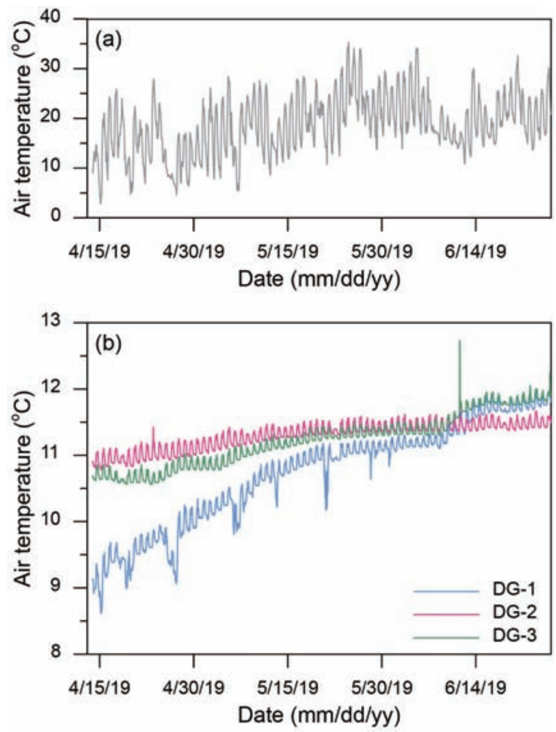

그림 4 삼척 지역의 기온과 대금굴 내 DG-1, DG-2, DG-3에서 온도의 시간적 변화.

체적으로 온도는 상승하지만, 호수의 영향으로 일변화의 폭은 크지 않은 것으로 판단된다.

온달동굴은 입구(OD-1), 중간 지점(OD-2), 관람 구간 가장 안쪽의 지굴(OD-3)에서 온도를 측정하였다(그림 1B). OD-1, OD-2, OD-3의 온도는 3.9~17.1, 12.4~13.3, 12.0~14.9℃의 범위를 보였다. OD-1의 범위가 가장 넓고, OD-2의 범위가 가장 작았다. OD-1은 대기와 동굴 내부의 공기가 혼합되는 지점으로 온도의 변동 특성은 기온과 유사하였지만, 변화 폭은 기온에 비해서 상대적으로 작았다(그림 5). OD-3은 관람 구간 중에서 동굴의 가장 안쪽이지만 주변에 연결된 통로가 많으며, 그 중에서 동굴수로 및 미공개 구간의 호수와 연결되는 통로와 연결되어 있기 때문에 동굴수의 영향으로 인해 OD-2보다 넓은 범위를 보인 것으로 판단된다. OD-2는 동굴수로부터 약 30 m정도 이격되었으며, 동굴수의 수면과 약 5m의 고도 차이를 보이고, 동굴수로와 연결되는 통로가 매우 협소하여 OD-3보다 상대적으로 동굴수의 영향을 작게 받았을 것으로 판단된다(그림 1B). 또한 고립된 형태의 광장이기 때문에 상대적으로 일정한 온도 변화를 보이는 것으로 판단된다. 연구 기간에 OD-1의 온도는 증가하는 경향이 뚜렷하게 관찰되었지만 OD-2와 OD-3에서는 거의 일정하게 유지되었다(그림 5B). 월별 일변화는 OD-1이 1.7~7.8℃로 범위가 가장 넓고 OD-2가 0.0~0.9℃로 범위가 가장 작았다. OD-3에서는 0.1~2.6℃의 범위를 보였다. 동굴의 입구에서는 일변화 폭이 점차 줄어드는 경향을 보였지만 OD-2와 OD-3에서는 일변화 폭이 5월에는 감소하였다가 6월에 다시 증가하는 경향을 보였다. 이것은 대기의 평균 기온이 동굴 내부의 평균 온도와 차이가 거의 나지 않는 시기에는 동굴에 미치는 영향이 작지만 평균 기온의 차이가 많은 시기에는 동굴에 미치는 영향이 더욱 커진다는 것을 나타낸다. 대기와 동굴 온도가 뚜렷이 차이를 보이는 겨울과 여름의 관측 자료가 확보되면 이러한 관계를 좀 더 명확하게 설명할 수 있을 것이다.

성류굴은 입구(SR-1), 중간 지점의 호수 주변(SR-2), 내부 안쪽(SR-3)에서 온도를 측정하였다(그림 1C). SR-1, SR-2, SR-3의 온도는 10.4~17.6, 12.5~16.6, 12.7~17.2℃의 범위를 보였다(그림 6). 동굴의 입구에서 동굴 내부로 갈수록 온도가 증가하는 경향이 감소하여 가장 안쪽에서는 일정하게 유지되었다. 특히 SR-1과 SR-2에서의 온도가 선형적으로 증가하는 것이 뚜렷이 관찰된다. SR-1과 SR-2의 기울기는 각각 0.0015와 0.0011이고 결정계수(r2)는 0.916과 0.976이다. 관측 초기에는 동굴의 내부로 갈수록 온도가 점차 상승하지만 5월 11일 이후에는 SR-2의 온도가 SR-3보다 높아졌고, 5월 27일 이후에는 SR-1의 온도도 SR-3보다 높아졌다. 성류굴은 SR-1뿐만 아니라 SR-2가 위치하는 지점까지 대기가 영향을 주었기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 그러나 동굴 입구로부터 약 120m 떨어진 SR-2까지 대기가 직접 영향을 주었을 가능성도 있지만 다른 내부 또는 외부 요인에 의한 영향으로 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 즉, 왕피천의 하천수가 SR-2 지점의 호수에 까지 영향을 주고 있어 이러한 결과가 나타날 수 있으므로 왕피천의 영향성에 대해서도 추후에 동굴수와 왕피천의 수온 변화를 비교해 볼 필요가 있다.

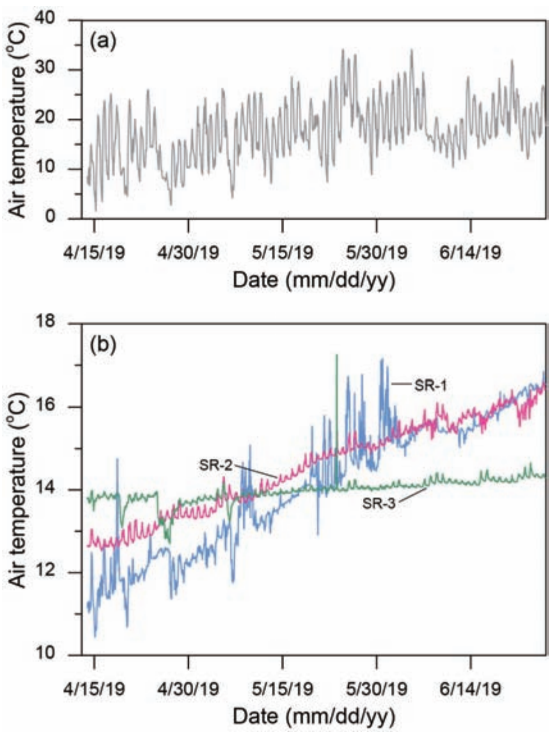

그림 5 단양 지역의 기온과 온달동굴 내 OD-1, OD-2, OD-3에서 측정된 온도의 시간적 변화.

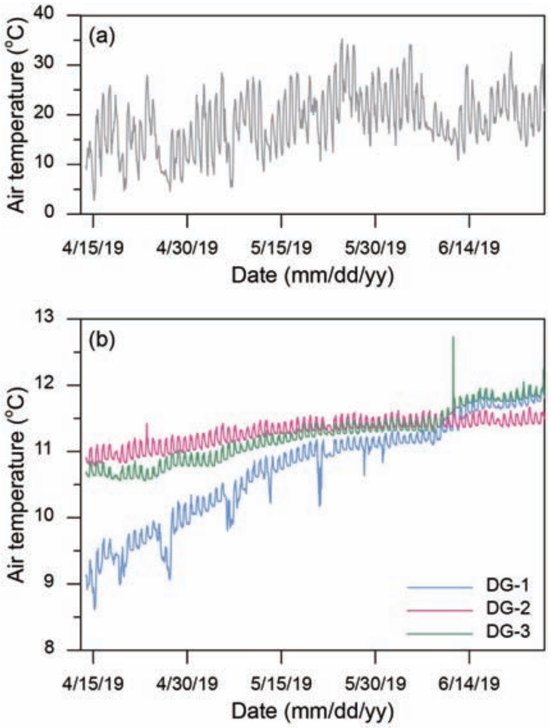

그림 6 울진 지역의 기온과 온달동굴 내 SR-1, SR-2, SR-3에서 측정된 온도의 시간적 변화.

SR-1, SR-2, SR-3에서 측정한 일변화는 각각 0.1~3.3, 0.1~0.8, 0.1~3.2℃의 변화를 보였다. SR-2의 온도는 전체적으로 증가하는 변화를 보였지만 일변화는 1℃ 이내로 거의 일정하게 유지되었다. SR-3에서 온도는 전체적으로 큰 변화를 보이지는 않았지만 4월 18일과 5월 30일에는 일시적으로 약 3℃의 일변화를 보였다. 이 시기의 기온은 이전과 비슷했으며 강우는 없었다. 따라서 외부 환경에 의한 영향보다는 탐방객, 내부 점검 등의 내부 환경 요인에 의한 영향으로 판단된다. 이번 연구에서는 기온 자료만을 수집하고, 내부 환경 변화와 관련된 자료를 수집하지 못하여 일시적인 일변화를 설명하지 못하였다. 향후 탐방객, CO_2 농도, 내부 점검 등에 대한 자료와 병행하여 해석하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

2. 자기상관분석

대금굴에서 대기의 지연 시간은 35시간(1.5일), 동굴 내부의 DG-1, DG-2, DG-3의 지연 시간은 30일 이상으로 분석되었다(그림 7A). DG-1과 DG-3의 분석값은 서로 비슷하였지만 DG-2는 큰 변동 폭으로 점차 감소하였다. 이것은 DG-1과 DG-3에서 온도가 증가하는 경향은 다르지만 일정한 변동 폭으로 꾸준히 증가하였고, DG-2에서의 온도는 안정적으로 유지되었지만 자료들 사이의 변동 폭이 일정하지 않았다는 것을 나타낸다.

온달동굴에서 대기의 지연 시간은 8시간, 동굴 내부의 OD-1, OD-2, OD-3의 지연 시간은 각각 752(31.3일), 6, 6시간으로 분석되었다. 특히 OD-1의 지연 시간이 752시간으로 매우 길게 분석되었다. 동굴 입구는 대기와 동굴 내부의 공기가 혼합되는 구간으로 대기와 동굴의 영향을 같이 받는 지역이다. 그렇기에, 연구 기간 동안 OD-1의 온도는 약 13.2℃ 증가하였지만 지연 시간이 길게 나타난 것은 급격한 변화 없이 대금굴의 DG-1이 DG-3과 같이 일정한 변동 폭으로 꾸준히 증가하였기 때문에 이전 값과의 상관관계가 높게 나타난 것으로 판단된다. OD-2와 OD-3에서는 동굴수의 수온, 관람객 수 등의 영향을 받아 온도의 지연 시간이 각각 6시간으로 나타난 것으로 분석되었으며 OD-2와 OD-3 부근에서는 동굴수와 관람객 등에 의한 영향을 거의 비슷하게 받는다는 것을 의미한다. OD-2는 관람 구간이고 OD-3은 관람 구간이 아니기 때문에 영향을 주는 요인들이 다를 것으로 판단되며 이를 명확하게 이해하기 위해서는 내부 요인에 의한 영향을 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

성류굴에서 대기의 지연 시간은 34시간으로 분석되었고, SR-1, SR-2, SR-3의 지연 시간은 30일 이상으로 분석되었으며 대금굴, 온달동굴에 비해 지연 시간이 더 긴 것으로 분석되었다. 이것은 동굴 내부의 온도가 꾸준히 상승하는 경향을 보이기는 하였지만 대기와 동굴 내부 요인에 의한 영향이 동굴 내부 온도에 빠르게 영향을 주지 않고 천천히 영향을 준다는 것을 나타낸다. 성류굴은 왕피천과 관람객의 영향을 가장 잘 받는 곳이기 때문에 동굴 내부 온도의 변화 폭이 가장 큰 동굴이지만 이번 연구에서는 제한된 측정 시기로 인해 봄과 초여름에는 이와 같은 경향을 보인 것으로 판단된다. 향후 추가적인 조사를 통해 다른 계절에도 이와 같은 변동 특성을 보이는지

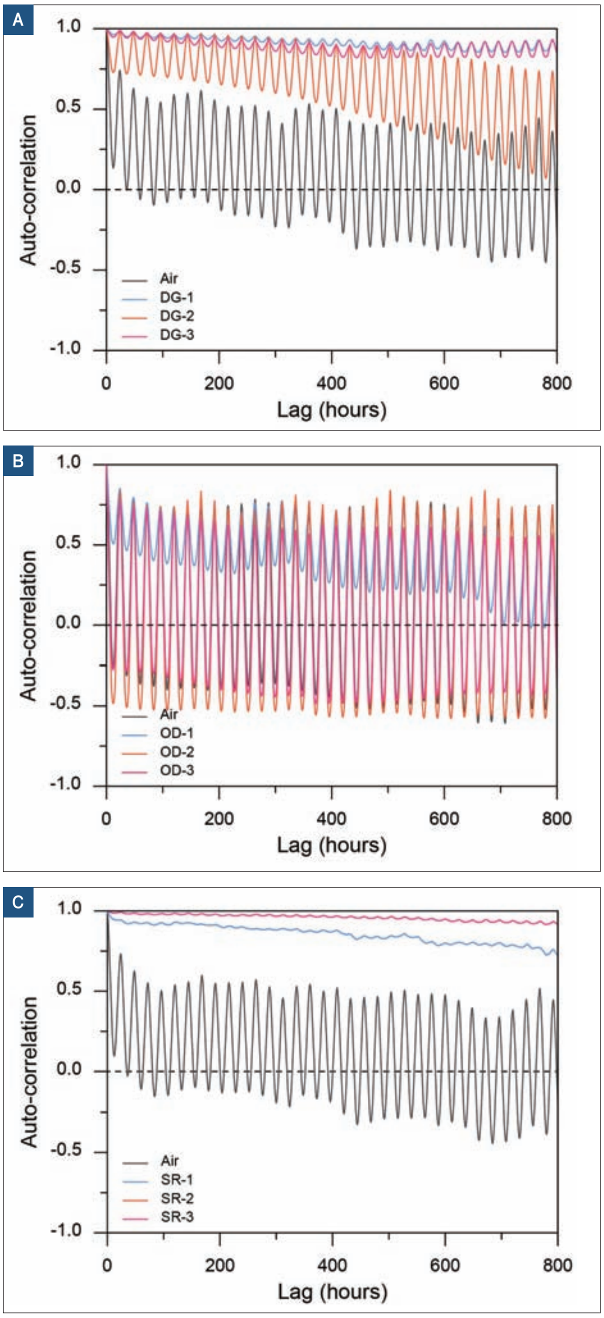

그림 7 **대금굴(A), 온달동굴(B), 성류굴(C)에서 측정된 온도와 삼척(A), 단양(B), 울진(C) 지역 기온에 대한 자기상관분석 결과.**

확인하는 것이 필요하다.

대금굴과 성류굴 내부 온도에 대한 자기상관분석 결과가 유사한 것은 대기의 지연 시간이 유사한 것도 일부 영향을 받은 것으로 판단된다. 이번 연구에서는 단기간에 세 개의 석회 동굴에서 온도 변동 특성을 분석하였기 때문에 기온의 변동 특성이 동굴 내부 온도에 미치는 영향을 명확하게 평가할 수 없었다. 향후 장기간 측정된 자료가 축적되면 기온의 변동 특성이 각 동굴 내부 온도에 어떠한 영향을 미치는 지를 명확하게 이해할 수 있을 것이다.

3. 교차상관분석

1시간 간격으로 측정된 온도의 시계열 자료를 이용하여 기온이 동굴 내부 온도에 미치는 영향을 평가하였다. 대금굴에서 기온과 DG-1, DG-2, DG-3의 온도에 대한 교차상관분석 결과, DG-1, DG-2, DG-3의 지체 시간은 모두 1시간이고 교차상관분석 함수는 각각 0.554, 0.672, 0.484로 분석되었다(그림 8A). 이것은 DG-1, DG-2, DG-3에서 온도의 변동 경향은 다르게 나타나지만, 기온의 변화가 동굴 내부의 온도에 약 1시간 이후에 영향을 주고, DG-2>DG-1>DG-3 순으로 대기의 영향을 받는다는 것을 나타낸다. DG-1에서 온도의 변동 특성을 보면 <그림 4B>에서 보는 바와 같이 대기의 영향을 가장 많이 받을 것으로 판단되었으나 교차상관분석 결과와 일치하지 않았다. DG-1은 모노레일의 탑승장으로 대금굴 관람 전에 관람객에게 주의사항을 전달하고 대금굴에 대하여 간단히 설명을 하는 곳이다. 또한, 관람이 끝난 후 탑승장에서 모노레일을 기다린다. 이러한 내부 요인들이 기온과 DG-1 온도의 시계열 자료에 영향을 주어 이러한 결과가 나타난 것으로 추정되므로 정기 휴관일 또는 관람객들의 관람이 이루어지지 않는 시간대를 선별해서 변동 특성을 살펴보는 것이 필요하다. 이번 연구에서는 이러한 시간대의 자료가 충분히 수집되지 않아 분석을 수행하지 못하였다.

온달동굴의 OD-1, OD-2, OD-3에서 측정된 지체 시간은 모두 1시간 이내이고 교차상관분석 함수는 각각 0.750, 0.511, 0.628로 분석되었다. 이것은 기온의 변화가 온달동굴 내부 온도에 1시간 이내에 영향을 주고 OD-1>OD-3>OD-2 순으로 대기의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 이것은 기온이 온달동굴 내부 온도에 미치는 영향을 잘 설명해 준다. OD-1은 기온의 영향을 주로 받지만 동굴 내부 온도의 영향도 받고 있어 기온과 유사한 변동 특성을 보이지만 변동 폭에는 차이를 보였다. OD-2는 기온의 영향을 가장 적게 받는 지점으로 일변화는 관찰되지

만 거의 일정하게 유지되었다. OD-3은 유입되는 동굴수의 영향으로 기온의 영향을 OD-2보다 더 많이 받는 것으로 분석되었다.

성류굴의 SR-1, SR-2, SR-3에서 측정된 지체 시간은 모두 1시간이고, 교차상관분석 함수는 각각 0.548, 0.499, 0.555로 분석되었다. 이것은 기온의 변화가 성류굴 내부 온도에 약 1시간 후에 반영되고 SR-3>SR-1>SR-2 순으로 대기의 영향을 받는 것을 의미한다. SR-3의 온도는 기온이 급격하게 변화하는 시기를 제외하고는 거의 일정하게 유지되었지만, 기온 변화에는 가장 많은 영향을 받는 것으로 분석되었다. 교차상관분석은 입력 자료의 변동 유형과 출력 자료의 변동 유형의 유사성에 대한 상관관계를 분석하는 것으로 통계적으로 기온의 변동 특성과 유사하기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 이와 관련해서는 추가적으로 자료를 수집한 후에 재분석이 필요한 것으로 판단된다. 한편으로는 SR-3 주변 동굴 입구의 영향일 수도 있지만 이번 연구에서는 이를 명확하게 규명하지는 못하였다. SR-1은 성류굴의 입구로 기온의 영향을 받지만 높은 상관관계를 보여주지 않았다. SR-1의 위치가 동굴 입구에서 약 3m의 수직 통로 하부에 위치하고 있어서 대기와 열에너지의 교환이 원활하게 이루어지 않아 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다. SR-2는 기온의 변동에 따라서 뚜렷이 증가하는 경향을 보였지만 기온과의 상관관계가 낮게 나와 기온의 영향을 크게 받지 않은 것으로 해석하였다. SR-2에서는 온도의 변동 특성이 SR-1과 유사하여 SR-1과 SR-2의 교차상관관계를 분석하였다. 분석 결과, 지체 시간과 교차상관 함수는 각각 1시간 이내와 0.959로 나타났다. 이것은 SR-1의 온도 변화가 SR-2의 온도 변화에 많은 영향을 주고 있다는 것을 의미한다.

Ⅴ. 결론

대금굴, 온달동굴, 성류굴은 천연기념물로 지정된 대표적인 석회 동굴로 동굴을 체계적으로 관리하기 위해서는 동굴 내부의 환경과 조절 요인을 명확하게 이해하는 것이 중요하다. 이번 연구에서는 석회 동굴 내부 온도의 변동 특성을 분석하고 시계열 자료를 이용하여 기온에 의한 영향을 평가하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

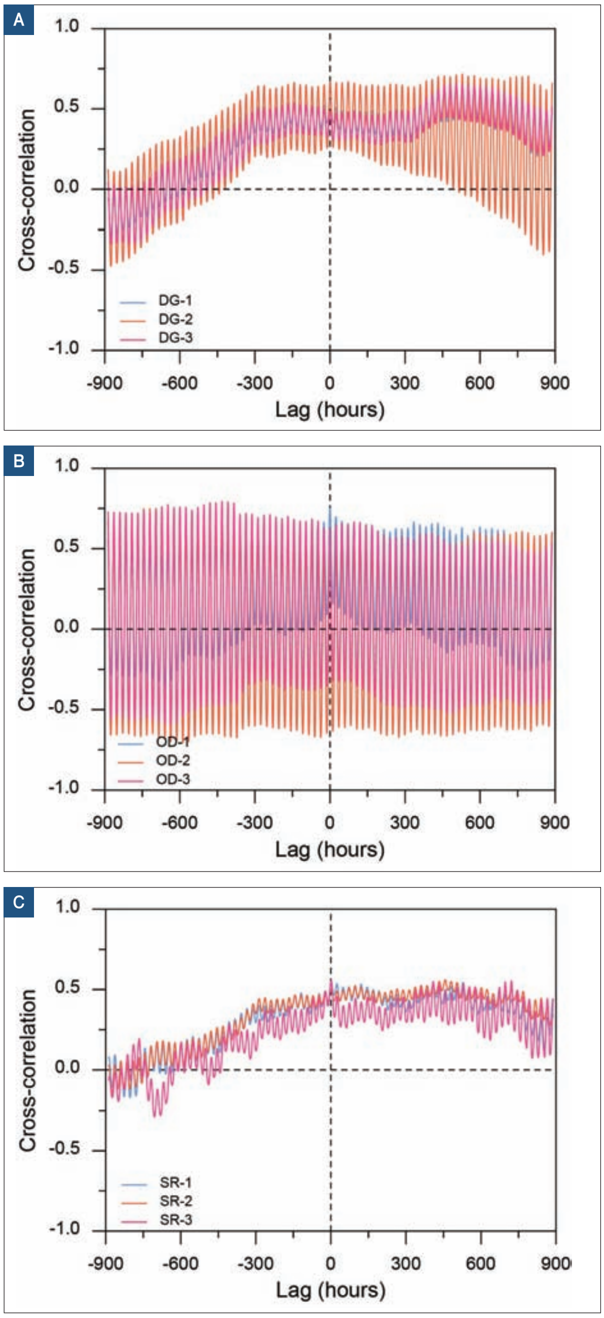

그림 8 대금굴(A), 온달동굴(B), 성류굴(C)에서 측정된 온도와 삼척(A), 단양(B), 울진(C) 지역 기온에 대한 교차상관분석 결과.

첫째, 대금굴은 동굴 입구로부터 약 150m에 위치한 정류장의 온도 변화가 가장 심하였고 동굴의 중간 지점 이후부터는 거의 일정하게 유지되었다. 입구는 관람객의 영향으로 인해 기온의 영향이 교란을 받는 것으로 추정되

지만, 동굴 입구에서부터 내부로 갈수록 점차 기온의 영향이 감소하였다.

둘째, 온달동굴은 입구에서 기온의 영향으로 온도가 넓은 범위를 보였지만 내부는 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 동굴 내 관람 구간의 가장 안쪽은 유입되는 동굴수가 내부 온도에 영향을 주는 것으로 판단된다.

셋째, 성류굴은 입구와 중간 지점에서 뚜렷한 온도 변화를 보이고 내부는 거의 일정하게 유지되었다. 입구는 외부 기온의 영향으로 온도 변화가 나타났지만 중간 지점은 외부 기온보다는 호수의 수온 변화에 영향을 받는 것으로 추정되지만 이번 연구에서는 이를 명확하게 설명하지 못하였다.

본 연구에서는 외부 기온이 동굴 내부의 온도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였지만 동굴 내부의 온도 변화를 명확하게 설명하는 데에는 한계가 있었다. 향후 장기 온도 관측 자료, 관람객 현황, 동굴수 수온 등을 이용하여 동굴 내부 환경 변화를 평가하는 연구들이 활발하게 수행되면 동굴 내부 환경 변화를 명확하게 이해하는데 큰 도움이 될 것이다.*

* 본 연구는 문화재청 과제인 “2019년 공개 동굴 환경 모니터링 방안 연구 용역”에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 권동희·유영준, 1996, 「화암동굴의 환경보전에 관한 연구」『동굴학회지』 46, pp.35~47
- 김련 외, 2010, 「성류굴(천연기념물 제155호)의 과학적 중요성」『문화재』 43, pp.236~259
- 김련 외, 2014, 『단양 온양동굴 실태조사 보고서』, 한국동굴연구소, 단양군
- 우경식 외, 2005, 『물골생태동굴(대금굴) 종합학술조사 보고서』. 삼척시, p.138
- 우경식 외, 2008, 『온달동굴 종합학술조사 보고서』, 단양군, p.232
- 이광춘 외, 2016, 『삼척 대이리 동굴지대(대금굴) 실태조사 및 안전진단 보고서』. 삼척시, p.298
- 이광춘 외, 2018, 『강원도 동굴 기초조사 보고서 VIII』, 문화재청
- 조경남 외, 2019, 「전라남도 시도기념물 제24호 화순 색아산 자연동굴의 동굴지질학적 특징 및 형성과정」『지질학회지』 55, pp.21~36
- 최돈원·김련, 2009, 「천연기념물 고씨굴과 고수동굴의 환경변화에 대한 연구」『문화재』 42, pp.158~186
- 최돈원 외, 2010, 「천연기념물 제261호 온달동굴에서 발달하는 박스워(boxwork)의 성인에 대한 연구」『지질학회지』 46, pp.1~11
- 홍석우 외, 2012, 「제주도 당처물동굴 석순의 조직적 특징을 이용한 지난 2,000년간의 고기후 변화 연구」『지질학회지』 48, 6, pp.445~458
- 홍시환·변태준, 1994, 「고씨동굴의 환경오염에 관한 조사연구」『동굴학회지』 37, pp.9~25

- Badino G. 2010. Underground meteorology - 'What's the weather underground?'. *Acta Carsologica*, Založba ZRC, 39, pp.427~448
- Gregorič, A., Vaupotič, J. and Šebela, S., 2014, 'The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia)'. *International Journal of Climatology*, 34, pp.1488~1500
- Jennings, J.N., 1985, *Karst geomorphology*, Basil Blackwell Inc., p.135
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. and Banton, O., 1998, 'Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a karst aquifer (Charente, France)'. *Journal of Hydrology*, 205, pp.217~231

- 기상청, 2019. 10. 21. 최종 접속, https://www.kma.go.kr
- 문화재청, 2019. 10. 21. 최종 접속, http://www.cha.go.kr
- 삼척시, 2019. 10. 21. 최종 접속, www.samcheok.go.kr
- 지질정보서비스시스템, 2019. 10. 2. 최종 접속, https://mgeo.kigam.re.kr

MUNHWAJAE *Korean Journal of Cultural Heritage Studies Vol. 53 No. 1, March 2020, pp.52~63.*
Copyright©2020, National Research Institute of Cultural Heritage
https://doi.org/10.22755/kjchs.2020.53.1.52

Variation of Air Temperature Inside Carbonate Area Caves

Lyoun Kim Senior researcher, Cave Research Institute of Korea
Youngyun Park* Director, Research Institute of Korea Green Earth Environmental
Jonghee Lee Deputy director, Cave Research Institute of Korea
Jaehun Choi Manager, Cave Research Institute of Korea
Qyusung Jung Manager, Cave Research Institute of Korea
Jungtae Kim Deputy director, Cultural Heritage Administration
Insu Kim Assistant director, Cultural Heritage Administration
*Corresponding Author : young-yun@nate.com

Abstract

This study was conducted in order to evaluate the characteristics of air temperature fluctuation inside the Daegeumgul, Ondaldonggul, and Seongnyugul Caves, which are the most representative limestone caves in Korea, and also to assess the effects of air temperature on cave temperature. Temperature was measured hourly at three sites in Daegeumgul, Ondaldonggul, and Seongnyugul Caves from April 13 to June 25, 2019. Additionally, air temperature data for the areas around the caves was provided by the Meteorological Administration. Using this collected data, the basic statistical measure of fluctuation characteristics over time was ascertained, and time series analyses were performed. Wide variation of temperature was exhibited in the order of the cave entrance, the cave water inflow point, and the midpoint. Cave temperature was observed to increase gradually during the study period. There was a vast range in temperature at the Daegeumgul station located approximately 150 m outside the cave, but it remained nearly constant beyond the midpoint. Although the effect of air temperature was not significant due to the influence of visitors, the effect of air temperature on cave temperature gradually decreased from the entrance to the interior. At Ondaldonggul, there was a wide range in temperature recorded at the entrance due to the influence of air temperature, but it stayed almost constant in the interior. However, at the site where cave water flows into the cave, temperature was influenced by the cave water temperature. At Seongnyugul, there was a distinct fluctuation in temperature recorded at the cave entrance, while the middle of the cave remained nearly constant. Temperature fluctuated due to the air temperature at the entrance, while at the middle of the cave, measurements were expected to be affected to a greater extent by the lake water temperature than by the air temperature. However, this pattern was not observed. According to the time series analysis results, in all caves, fluctuations of air temperature affected cave temperature after approximately one hour. Cave size and structure, water presence, the entrance's size and shape, air flow, and visitor patterns can all influence cave temperature. Therefore, consideration of these factors is very important in the pursuit to clearly understand cave temperature characteristics.

Keywords Limestone Cave, Daegeumgul Cave, Ondaldonggul Cave, Seongnyugul Cave, Cave Temperature, Time Series Analysis

Received 2019. 11. 25 ● **Revised** 2020. 01. 22 ● **Accepted** 2020. 02. 11