

송학박쥐굴의 수문 환경

김 추 윤*

Hydrological Environment in Songhakbakgui Cave

Kim, Choo-Yoon*

I. 서론

현재 우리나라에서는 동굴이 관광자원의 주요 대상으로 등장하여 지자체에서 앞다투어 무분별한 개발을 하고 있어 앞으로 잘못하면 자연 동굴이 사라질 위기에 놓여있다. 따라서 전국에 산재한 자연동굴을 체계적으로 조사하여 보존방안을 마련하기 위해서 환경부에서 현재 실시하고 있는 전국적인 동굴기초 조사는 획기적이고 가치 있는 일이다. 동굴은 햇빛이 차단된 암흑세계이기에 지상의 세계와는 전혀 다른 환경을 유지하게 된다. 즉 항상 일정한 온도, 습도, 암흑 환경을 장기간 유지해오기 때문에 자연히 이에 적응할 생물들만 살아남게 되거나 아니면 적응과정을 거쳐서 그러한 항온, 항습, 항암 환경 조건에 유리하도록 변화 하게 된다.

동굴은 크게 다음과 같이 구분 할 수 있다.

첫째, 해식동굴은 해류의 침식에 의해서 해안 연안에 주로 생성되는데 우리나라의 제주도, 울릉도, 흑산도, 남해안 등지의 해안 절벽에서 볼 수 있다. 현재 일부는 관광유람선이 관광코스로 이용되는 곳도 있다.

둘째, 하식동굴은 하천수의 침식작용에 의해서 하천 절벽에 생성되는데, 우리나라의 경우 동강, 한탄강 등지에 잘 나타나고 있다. 하식동굴

은 규모는 작지만 하천과 동굴의 생성 매커니즘을 잘 보여줄 수 있는 동굴이다.

셋째, 화산 동굴은 마그마가 지상에 분출한 후 용암이 급속히 냉각하는 과정에서 생성되는데, 제주도의 만장굴, 소천굴, 협재굴 등은 좋은 예이다.

넷째, 석회암 동굴은 카르스트 지형에 나타나는 대표적인 동굴인데, 주 성분이 방해석인 석회암이 우수 및 CO₂와 결합하는 과정에서 용식작용에 의해서 나타난다. 우리나라의 제천, 단양, 삼척, 영월, 울진 등지에 분포하는 동굴들은 모두 석회암 동굴이다. 이와 같이 남한 내에서 관광지로 각광받고 있는 동굴은 대부분 석회암 동굴이다. 석회암 동굴에서 가장 크게 영향을 미치는 것은 우수이다. 이 우수는 지표면을 침투하여 지하수가 되면서 석회암과 결합하여 공동을 형성하여 동굴을 형성하게 된다. 이 공동은 다시 스펬레오템이란 2차 생성물을 생성하여 석순, 석주, 종유석 등을 생성하게 된다.

석회암 동굴은 지하수면 밑에서 잘 발달한다. 그것은 이곳이 이산화탄소의 함유량이 비교적 높고, 지하수면 아래의 물은 탄산칼슘으로 충분히 포화될 때까지 오랫동안 석회암과 접촉해 있기 때문이다. 이산화탄소는 대기 중에 산재한 것이 우수와 함께 지하에 침투하거나 식물의 뿌리

* 신흥대학 교수

에서 발생하기도 한다. 따라서 강우량의 다과는 석회동굴의 생성과 아주 밀접한 관계가 있다. 왜냐하면 지수는 전부 화석수를 제외하고는 우수이기 때문이다. 따라서 석회동굴의 생성에 주요한 영향을 미치는 환경인자는 지하수, 이산화탄소 등이다.

II. 조사기간 및 방법

석회암의 석순에 미치는 환경요소를 살펴보면, 첫째는 물방울의 크기, 둘째는 동굴내의 증발정도, 셋째는 동굴 속의 통풍온도·습도, 넷째는, 물방울의 이동, 다섯째는 표면장력 등이다. 송학박쥐굴은 충북 제천시 송학면 포전리 점말에 위치한 석회동굴이다. 이 동굴은 사골천의 지천이 시작되는 수직 석회암 절벽에 위치한 미개발 동굴로 해발 600m 산록의 남서쪽에 있다. 동굴 앞에서 마을까지의 하천은 평소 건천상태인 것으로 보다 송학박쥐굴 내부에서 잉태하고 있는 지하수는 극히 소량임을 알 수 있다. 송학박쥐굴 내부는 물이 조금씩 흐르는 우수지역이 있는가 하면 전혀 물이 흐르지 않는 무수지역이 있어 동굴생성에 성장지역과 정지된 지역이 극지적으로 나타난다. 송학박쥐굴의 동굴환경을 측정하기 위해서 동굴환경조사 지침서(환경부, 2002년발행)에 의해서 3곳을 선정하여 기온, 수온, 습도, 수소 이온농도(pH), 이산화탄소(CO₂), 경도 등을 조사 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 결과

1) 기온

송학박쥐굴과 같이 입구가 좁고 미공개 동굴인 경우와 같이 소동굴들은 내부에서 기류의 움

직임이 매우 느린 관계로 기온분포가 큰 차이가 나지 않는다. 즉 동굴내부로 들어가면 어느 지점부터는 항온을 유지하기에 동굴속 깊은 곳의 온도는 석회암 온도와 유사하다. 동굴내부에서 기온은 외기의 영향을 받지 않는 내부지점에 있어서는 동계, 하계의 구별로 인한 그 차이가 적다. 오히려 외기의 온도가 상승하면 도리어 기류는 동굴내부에서 동굴밖으로 흐르며, 급격한 온도 상승을 억제하여 비교적 낮은 온도를 유지하게 된다.

송학박쥐굴의 봄철 외부기온이 13.4℃일때 내부기온은 입구에서 안쪽으로 들어가면서 미세하게 점증했으나 전반부의 우수구간이 끝나는 지점부터는 14℃내외로 안정상태를 유지하고 있다. 여름철 외부기온이 26℃일때 입구 안쪽은 약 18℃를 유지했으나 이내 중간지역을 지나면서 15℃내외로 안정상태를 나타내고 있다. 가을철의 경우 외부기온이 13℃일대 외부대기의 영향을 받아서 동굴 입구 쪽의 기온은 13℃내외로 낮은데 비해서 동굴내부의 중간지대로 들어서면서 기류의 이동이 어느 정도 차단되어 15℃내외로 유지되고 있다.

[표 1] 송학박쥐굴의 온도(℃)

위치	4월	7월	10월	12월
S1(입구안)	12.5	17.8	12.8	9.1
S2(중간고인곳)	14.0	15.1	14.7	13.4
S3(최종고인곳)	14.3	15.5	14.3	13.5

겨울철의 외부기온이 9℃내외 일때 역시 동굴 입구는 거의 외부 대기 온도와 유사한 정도를 나타내고 있으나 동굴 안쪽으로 들어갈수록 13℃내외로 안정되어 있다. 즉 송학박쥐굴은 봄, 여름, 가을, 겨울의 외부대기 온도의 변화에 따라서 안쪽보다 상대적으로 기류의 이동이 많은

동굴입구쪽의 기온에 약간의 변화를 가져올 뿐, 중간지역을 넘어서면 거의 14~15℃의 항온을 유지하는 것으로 나타났다. 동굴내 기온은 위도, 표고, 지표에서의 깊이, 계절에 따른 외기온도의 변화 등에 따라 약간의 변화가 일어난다. 송학박쥐굴에서의 온도는 벽의 온도와 유사하게 나타났다. 이것은 지층의 구조암인 석회암의 온도에 지배되기 때문이다. 보통굴은 지하 깊은 곳에 위치할수록 온도의 교차가 거의 없다.

2) 습도

습도란 동굴내 공기의 건습상태를 나타내는 것으로 동굴내부의 2차생성물의 성장과 관계가 깊은 주요한 요소이다. 송학박쥐굴의 외부습도는 4월 57%, 7월 63.2%, 10월 74.2%, 12월 69.1%로 나타나, 봄에서 가을까지는 다소 높아지다가 겨울 건계에 들어가면 다소 낮아지는 것으로 나타났다. 습도는 동굴내부의 지하수의 수량과 관계가 깊은데, 점말 동굴은 용두산의 지하수 함양 능력이 많지 않고 송학박쥐굴 자체가 지하수면의 상층에 있는 부분이 많아 지하수량이 작아 습도에 큰 영향을 주지 못한다.

[표 2] 송학박쥐굴의 습도(%)

위치	4월	7월	10월	12월
S1(입구안)	61.0	66.9	77.3	71.2
S2(중간고인곳)	87.2	91.0	88.2	90.2
S3(최종고인곳)	89.3	92.1	89.2	89.4

송학박쥐굴의 습도는 동굴 입구 안쪽을 제외하고는 외부 습도 변화에 큰 영향 없이 중간지역을 넘어서면 90%내외를 유지하고 있다. 이것은 천장이나 벽에서 스며 나오는 습기, 동굴하상을 흐르는 지하수에 의해서 대기가 수증길 포화되어 있기 때문이다. 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절

모두 동굴입구 안쪽을 제외하고는 급격한 변화 없이 완만한 증가를 하다가 항습상태를 유지한다. 송학박쥐굴 내에서도 무수구간이 있고 지하수량이 적어서 국지적으로 미세한 차이가 있으나 그것은 무시해도 좋을 정도로 적은 양이다. 가을철인 10월과 봄철인 4월보다는 7월인 여름철이 다소 높게 나타났는데 이것은 우리나라의 강우량이 6, 7, 8월 3개월에 1년전체 강우량의 약 60~70%가 집중해서 내리기에 일시적으로 송학박쥐굴 내에 지하수의 유량이 계절적으로 증가하기 때문이다.

3) 수소이온농도(pH)

수소이온농도는 물속에 녹아있는 수소이온(H+)의 농도를 말한다. pH1(산성)~pH7(중성)~pH14(알칼리성)의 범위로 나타내는데, 현재 환경부 음용수 수질 검사 기준치는 pH5.8~pH8.5 사이 이다. 송학박쥐굴내의 지하수는 4계절이나 각지점에 상관없이 대부분 중성에 가깝게 나타나 수질기준의 범위 안에 들어간다. 동굴수는 외부의 우수가 암석의 질리를 타고 침투하여 생긴 지하수이기에 외부의 공장폐수, 가정하수, 농가의 하수유입 등에 의해 다소 변화를 가져올 수 있다.

[표 3] 송학박쥐굴의 수소이온농도(pH)

위치	4월	7월	10월	12월
S1(입구안)	7.28	7.40	7.51	7.32
S2(중간고인곳)	7.16	7.22	7.21	7.22
S3(최종고인곳)	7.20	7.31	7.18	7.28

송학박쥐굴이 배태된 용두산 산록에 아직까지 환경오염 인자가 없기에 동굴로 외부오염수가 유입된 흔적은 없다. 동굴내부에서 지역에 따라 미세한 차이를 보이는 것은 어떤 특징적인

현상이 아니고 일반적인 현상이다. 남한의 카르스트 지역에 나타나는 대부분의 석회동굴이 수소이온농도가 7~8사이를 나타내는 것으로 보아 송학박쥐굴의 수소이온농도 값도 일반적인 형상이지 특수한 결과 값은 아니다.

4) 수온

송학박쥐굴내 지하수의 수온은 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절에 상관없이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 송학박쥐굴 입구가 좁고 동굴내로 진입하면 통로가 부분적으로 꺾여있어 기류의 이동이 그리 크지 않기 때문에 수온이 일정하게 된다. 동굴외부대기의 기온이 동굴내 수온에 큰 영향을 못미치기 때문이다. 계절에 따라 물론 하계에 비해서 동계의 동굴수온이 1~2℃ 다소 낮아진 것은, 동굴 밖 대기의 찬 공기가 동굴내부로 유입되어 지하수온이 그만큼 낮아졌기 때문이다. 정말 동굴 지하수는 봄에서 겨울철까지 13~15℃를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 우리나라의 동굴에 나타나는 일반적인 평균 수온 12~15℃와 거의 유사하다.

[표 4] 송학박쥐굴의 수온(℃)

위치	4월	7월	10월	12월
S1(입구안)	12.9	15.0	13.1	12.0
S2(중간고인곳)	13.5	14.7	13.0	12.2
S3(최종고인곳)	13.3	14.8	13.3	12.7

보편적으로 제주도에 소재한 환산동굴들은 석회암동굴에 비해서 1~2℃ 높은데, 이것은 환산동굴이 2차생성물이 적고 수평구조가 많아서 기류를 차단하는 장애물이 적고, 석회동굴은 가지굴 형태의 미로가 많아 외부기류를 부분적으로 곳곳에서 차단시키기 때문이다. 동굴내의 지하수는 전부 우수이기에 우수의 오염여부에 의

해서 수질에 큰 영향을 받으나 수온은 일단 동굴내로 유입되면 외부대기와 차단되어 일정한 온도를 유지하게 된다.

5) 이산화탄소(CO₂)

이산화탄소는 대기 중에 떠있는 것이 우수와 함께 지하로 스며들거나, 우수가 땅속을 침투하는 과정에서 공급되는데 박쥐의 배설물인 구아노나 동굴내부에 유기물의 퇴적이 많은 경우 이산화탄소의 분압이 지역에 따라 다소 높게 나타날 수 있다. 정말 동굴은 비공개동굴이고 동굴내 2차생성물이 공개된 국내관광 석회암 동굴보다 화려하지 못해 외부인의 출입이 없어 일반인의 출입으로 인한 이산화탄소의 분압이 영향을 받지 않는다. 다만 단체로 탐굴시 약간 분압이 높아질 수 있다. 송학박쥐굴의 경우 다른 일반동굴과 같이 동계보다 하계에 이산화탄소의 분압이 다소 높게 나타났는데, 이것은 여름철에 강우가 집중적으로 내려, 동굴내부로 유입되는 지사후의 양이 많아지기 때문이다.

[표 5] 송학박쥐굴의 이산화탄소(ppmV)

위치	4월	7월	10월	12월
S1(입구안)	594	609	640	617
S2(중간고인곳)	807	822	841	809
S3(최종고인곳)	910	921	930	918

봄철보다는 가을철에 다소 높게 나타났는데, 이것도 봄철보다 가을철에 비가 다소 많이 내렸기 때문이다. 이것은 대기 중에 반영구적으로 떠있는 이산화탄소가 우수에 용해되어 빗물이 탄산수로 되고, 이산화탄소가 토양층을 통과하면서 토양속의 유기물질 속에서 나오는 이산화탄소를 포함하여 동굴 속으로 유입되었기 때문이다. 특히 송학박쥐굴 벽에 새긴 절리를 따라서

빗물이 침투하면서 석회암에 용식 작용을 가해서 동굴을 확장해 나감과 동시에 지하수는 하상의 낮고 좁은 통로를 따라서 동굴속 수로를 통해 더 낮은 곳으로 스며들며 결국에는 지표수로 다시 나타난다. 정말 동굴의 이산화탄소 분압은 동굴 안쪽으로 들어갈수록 다소 높게 나타났다.

이것은 송학박쥐굴의 입구가 좁고 직선굴이 아니므로 대기순환이 거의 이루어지지 않고 안쪽으로 갈수록 자정능력의 한계를 넘어서 이산화탄소의 축적이 계속적으로 일어났기 때문이다. 송학박쥐굴은 동굴내로 유입되는 지하수의 양이 풍부하지 않아 이산화탄소의 분압이 좋지 않다.

6) 경도

송학박쥐굴의 경도는 4계절에 따라 약간씩 차이는 있으나 대략 110ppm내외를 유지하고 있다. 다소 다른 석회암 동굴보다 낮게 나타났는데, 이것은 정말동굴을 배태한 용두산의 석회암이 방해석 성분이 낮고, 또한 돌리네와 우발네의 발달이 없어 우수를 공급해주는 주위 환경이 불리하기 때문이다. 송학박쥐굴의 경도는 동계보다 하계에 상대적으로 다소 높게 나타났는데, 이것은 이 지역 강우의 약 60~70%정도가 여름철에 집중적으로 내려 이산화탄소를 함유한 지하수량의 용출이 일시적으로 많아져 지하수위가 높아져 정말 동굴의 절리면을 따라 지하수가 유입되어 용식작용을 활발하게 진전시켰기 때문이다.

[표 6] 송학박쥐굴의 경도(mg/L)

위치	4월	7월	10월	12월
S1(입구안)	111	114	110	112
S2(중간고인곳)	110	120	115	114
S3(최종고인곳)	113	121	117	116

동굴 안쪽으로 갈수록 큰 차이는 없지만 경도가 높게 나타났는데, 이것은 송학박쥐굴내 지하수가 하계 집중 강우를 제외하고는 유출구가 없어 정지 상태를 유지하고 있는 곳이 있기 때문이다. 우리나라에게 관광석회동굴로 유명한 성류굴의 경도가 154ppm, 고수굴이 150ppm내외를 나타내는 것과 비교해보면 정말동굴의 경도는 이런 동굴에 비해서 매우 낮다고 할 수 있다. 석회동굴은 지하수위면 밑에서 석회암이 탄산수에 의해서 제거된 다음 계속해서 이산화탄소가 함유된 지하수의 유입으로 동굴내 하상이 깊이 침식되면 지하수위면이 낮아지는 동시에 빈공동이 지하수위면 위로 올라온다. 특히 지하의 토양층에서 식물 등의 부식층을 통과한 지하수는 더 많은 탄산가스의 일부를 흡수하여 지하로 스며들어 동굴내에서 자유대기와 접하게 됨으로써 탄산가스의 일부는 방출되고 용식되었던 방해석의 일부가 침전된다.

2. 고찰

송학박쥐굴은 지표에 우수를 함양할 만한 돌리네, 우발네의 발달이 없고 해발 200m정도의 지점에 위치하여 지하수가 풍부한 조건은 아니다. 따라서 여름철 하계 집중기간을 제외하고는 평소 무수구간이 존재하며, 유수구간의 지하수량도 적은 편이다. 동굴내부는 과거 지하수위가 높을 때 형성된 각종 2차 지형물들이 국지적으로 형성되어 있지만 대규모는 아니다. 이것은 동굴내 지하수의 유량이 적고 석회암의 주성분인 방해석 성분이 낮기 때문이다. 따라서 동굴은 웨이브 형태를 유지하지 못하고 뽀족뽀족하고 불규칙한 돌출물이 많다.

송학박쥐굴의 조사결과 기 개발된 관광 석회암동굴보다 방해석 성분이 낮은 지대에 위치하기에 제천, 단양 지역의 소규모 미개발 석회동굴

의 내용과 큰 차이가 없는 결과를 나타내고 있다. 즉 계절별, 장소별로 약간 차이는 있으나 기온은 평균 12~15℃, 습도는 90%내외, 수소이온농도(pH)는 7내외, 수온은 13℃ 내외, 이산화탄소는 800~900ppm내외, 경도는 110~120mg/L를 나타낸다. 전반적으로 우리나라 석회동굴에 일반적으로 나타나는 항온, 항습, 항암 환경에서 나타나는 결과와 큰 차이가 없으며, 큰 특이성을 갖고 있지는 않다. 아직까지 외부에 의한 2차 오염현상은 나타나지 않고 있다. 점말의 지하통로는 지하수면 바로 밑에 처음 형성되었으며, 이것이 시간이 지나면서 점점 낮아졌다. 이 부분은 이산화탄소 함량이 많고, 지하수면 하의 물은 탄산칼슘으로 충분히 포화할때까지 장기간 석회암과 접촉해 있기 때문이다.

4. 결 론 및 요 약

첫째, 동굴내 기온은 4월 14℃, 7월 15℃, 10월 14.5℃, 12월 13.5℃ 내외를 나타낸다.

둘째, 동굴내 습도는 4월 88%, 7월 91%, 10월 89%, 12월 90% 내외를 나타낸다.

셋째, 수소이온농도는 4월 7.2pH, 7월 7.3pH, 10월 7.2pH, 12월 7.2pH 내외를 나타낸다.

넷째, 수온은 4월 13℃, 7월 15℃, 10월 13℃, 12월 12℃ 내외를 나타낸다.

다섯째, 이산화탄소는 4월 800~900ppmV, 7월 820~920ppmV, 10월 840~930ppmV, 12월 800~918ppmV 내외를 나타낸다.

여섯째, 경도는 4월 110mg/L, 7월 120mg/L, 10월 115mg/L, 12월 115mg/L 내외를 나타낸다.