

우로굴의 동굴환경*

김 추 윤

신홍대학 교수 · 한국동굴학회 부회장

I. 서론

동굴의 환경은 우선 햇빛이 차단된 지하 세계에서 형성되기에 지상세계와는 다른 점이 많다. 더구나 지하동굴내 대기 유입처인 동굴입구의 크기가 적은 경우, 지하수가 적은 경우 동굴 환경은 더 변화가 적다. 따라서 지하 동굴의 습도, 수온, 온도는 대부분 일정하고 항상 빛이 없는 어두운 세계를 구성하게 된다. 그러기에 이러한 항온, 항습, 항암 환경 조건에 잘 적응하는 생물들이 살게 된다. 때로는 동굴의 이러한 특성을 이용하여 피난처로, 농작물 재배처로 이용하기도 한다. 우리나라의 대표적인 동굴을 성인별로 보면 화산동굴, 석회암동굴, 해식동굴 등이 주류를 이루며, 이 가운데 관광동굴로 개발된 곳은 화산동굴과 석회암 동굴이다. 그러나 화산동굴은 제주도 등 특수한 지역에만 분포하고 남한의 육지에는 대부분 석회암 동굴이다. 석회암 동굴에 가장 크게 영향을 미치는 것이 지하수이다. 석회암 동굴은 지하수면 밑에서 잘 발달한다. 그것은 이 곳이 이산화탄소의 함유량이 비교적 높고, 지하수면 아래의 물은 탄산칼슘으로 충분히 포화할 때까지 오랫동안 석회암과 접촉해 있기 때문이다. 우로굴은 경북 문경시 호계면 우로실 마을 북쪽 해발 약 110m 야산에 조그만 입구를 가진 미개발된 석회암 동굴로 동굴내부로 진입하면서 수로동굴, 수평동굴 등의 특징을 나타낸다. 본 동굴이 위치한 곳은 좁고 긴 단층 협곡 모양의 지형 말단부이며 주변에 쌍용양회공업주식회사의 채석장이 있어서 석회암 원석을 채취했던 곳이다. 동굴이 위치한 곳의 계곡은 전면이 절벽형태로 되어있고 막혀 있으며 동굴 입구 바로 밑에는 물이 용출하는 작은 못이 있고, 바로 그 아래에는 이 물을 저장한 또 다른 저수지가 있다. 이 물들은 동굴을 배태한 주변 석회암 지대의 지하수가 네트워크화되어 용출된 것으로 보인다.

우로굴의 동굴환경을 측정하기 위해서 동굴환경지침서(환경부, 2002년 발행)에 의해 4곳을 임의로 선정하여 기온, 수온, 습도, pH, 이산화탄소, 경도 등을 조사 분석하였다.

II. 조사결과

1. 기온

동굴의 대기는 기류의 움직임이 매우 느린 관계로 대기온도와 동굴의 온도가 크게 달리 나타나지만, 동굴 안으로 차차 들어가면 대부분 항온을 유지하게 된다. 이 때문에 동굴 속 깊은 지점의 온도는 석회암 온도와 유사하며 또한 그 온도는 지표의 연간 평균온도와 비슷하다.

우로굴의 봄철 외부기온이 13℃일 때 내부기온은 입구에서 안쪽으로 들어갈수록 약간 높아졌으나 동굴내부에서는 역시 항온 상태를 유지하고 있다. 이것은 우로굴이 동굴내로 진입하여 무수 구간을

* 이 논문은 2003년 환경부 전국 자연 동굴조사의 일환으로 이루어졌음.

지나 동굴내 지하수가 모여서 호수형태를 만들고 있는 구간을 지나면 대형 낙반지점까지 지하수가 하상에 항상 흐르고 있고 동굴 지형구조가 수평동굴 형태를 유지하기 때문이다. 우로굴의 여름철 외부기온이 27℃일 때 내부기온은 일반동굴에서 보편적으로 나타나는 동굴입구에서 막장쪽으로 들어갈수록 온도가 점진적으로 낮아져서 보통 일반 동굴의 항온 기준인 13~15℃ 내외에 가깝게 나타나고 있다. 가을철의 경우는 외부기온이 12℃일때 동굴 외부의 기온이 낮은데 영향을 받아서 동굴입구 쪽의 기온은 낮지만 동굴 안쪽으로 진입하면서 내부기온이 15℃내외로 안정상태를 나타내고 있다. 겨울철은 외부기온이 8℃내외로 낮은 관계로 다른 계절 보다 동굴 입구 쪽 기온이 상대적으로 낮았으나 동굴 안쪽으로 계속 진입하면서 13℃내외를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 우로굴은 동굴입구가 작고 중간 중간에 자연 장애물이 있으며 동굴길이가 303m이므로 외부의 환경변화에 크게 영향을 받지 않는다.

(표 1) 우로굴의 온도(℃)

위치	4월	7월	10월	12월
S ₁ (입구안)	12.0	18.1	11.7	8.1
S ₂ (호수부근)	14.1	15.7	14.5	12.7
S ₃ (수로중간)	14.0	14.8	15.0	13.3
S ₄ (대형낙반지역)	14.7	14.2	14.8	13.1

2. 습도

우로굴의 습도변화는 입구 바로 안쪽을 제외하고는 외부습도 변화에 큰 영향없이 90%-95% 내외를 유지하고 있다. 봄·여름·가을·겨울 4계절 모두 동굴 입구 인접지역인 S₁ 지점을 제외하고는 S₂ 지점부터 급격하게 증가하고 그 이후부터 일정한 항습상태를 유지한다.

S₁ 지점에서 약간 습도가 낮아지는 것은 S₂, S₃ 지점이 지하수와 직접 접촉면이 있는데 비해서 S₄ 지점은 무수 구간이기 때문이다. 그러나 상대적으로 동굴 내부에서의 습도는 일정한 구간을 지나 안정상태에 들어서면 큰 차이가 없다.

우로굴의 외부 4월 습도는 55.7%, 7월 습도는 57.1%, 10월 습도는 75.2%, 12월 습도는 70.1%로 나타나 계절적으로 보면 봄에서 가을까지 높아지다가 겨울철에 다소 낮아지는 것으로 나타났다. 습도는 동굴내부의 건습 정도를 나타내기에 지하수의 양과 관련이 깊은데, 우로굴에서도 지하수의 상시 유수가 있는 곳에서는 습도가 상대적으로 다른 곳 보다 약간 높았다. 습도가 높을수록 스펬레오템의 형성에 영향을 크게 미친다. 7월의 경우 10월보다 다소 동굴내 습도가 높게 나타났는데 이것은 우리나라의 강우량이 6, 7, 8월 3개월에 집중적으로 내리기에 지하수의 동굴내 유출량이 많기 때문에 일어난 것으로 보인다.

(표 2) 우로굴의 습도(%)

위치	4월	7월	10월	12월
S ₁ (입구안)	60.1	68.2	78.1	72.3
S ₂ (호수부근)	91.2	93.3	89.0	92.1
S ₃ (수로중간)	92.1	93.8	90.1	92.3
S ₄ (대형낙반지역)	90.7	88.2	89.8	90.1

3. pH (수소이온농도)

동굴수의 수소이온 농도는 주변의 공장폐수나 농가의 가정하수 유입 등에 의한 지하수 수질오염의 변화 예측과 식수여부 등을 간접적으로 측정할 수 있는 요소이다. 수소이온농도는 pH 7을 중성, 그 이상을 알카리성, 그 이하를 산성이라 칭한다. 그리고 음용수 수질검사 기준치는 pH 5.8~8.5 사이이

다. 우로굴의 동굴 수는 계절이나 지점에 상관없이 대부분 pH 7~8 사이에 있는 것으로 나타났다. 이것은 약 알칼리성에 해당되며 먹는 물 수질 기준의 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 이것은 우로굴이 아직까지는 외부 오염수의 유입이 없는 깨끗한 물로 판명되며 동굴내부에서 지역에 따라 미세한 차이를 보이거나 이것은 특징적인 것을 나타내는 것은 아니다. 우리나라의 일반 석회동굴의 경우 오염이 안되었을 때는 대부분 pH 7~8의 범위를 넘지 않고 있다. 따라서 우로굴도 우리나라 석회동굴에 나타나는 일반현상의 범위를 벗어나지 않고 있다. 즉 동굴 내 지하수는 외부 오염 물질의 유입이 없는 한 동굴내 거리 위치에 큰 영향을 받지 않는다.

[표 3] 우로굴의 수소이온농도 (pH)

위치	4월	7월	10월	12월
W ₁ (호수)	7.10	7.40	7.52	7.41
W ₂ (수로입구)	7.30	7.38	7.40	7.21
W ₃ (수로중간)	7.28	7.30	7.18	7.50
W ₄ (수로끝)	7.14	7.32	7.00	7.28

4. 수온

우로굴의 동굴내 수온은 봄, 여름, 가을, 겨울 등 4계절에 따라 큰 차이가 없고 미세한 차이를 나타내고 있다. 이것은 동굴입구가 좁고 또 폐쇄된 소계곡에 입지하여 기류의 이동이 그리 크지 않기에 동굴내 대기 기온이나 수온에 직접적인 영향을 못 미쳐 일반적인 동굴내에서 나타나는 환경조건을 유지하고 있는 것이다.

계절에 따라 물론 여름철에 비해서 겨울철에 동굴수의 수온이 상대적으로 2~3℃ 낮아진 것은 동굴 밖 대기의 온도가 낮아짐에 따라 동굴 외부에서 동굴 내부로 유입되는 지하수의 수온이 그 만큼 낮아졌기 때문이다. 동굴 내 지하수의 원천은 모두 동굴 밖의 우수이다. 이 우수가 유입되면서 동굴내 각종 지형지물을 만들고 동굴수로 변하는 것이다. 동굴수가 빗물이라는 것은 대기의 공공에서 만들어지는 H³라는 방사성 동위원소가 동굴 지하수에서 검출되기 때문에 알려졌다.

[표 4] 우로굴의 수온(℃)

위치	4월	7월	10월	12월
W ₁ (호수)	13.2	15.1	13.2	12.0
W ₂ (수로입구)	13.0	14.2	13.0	12.4
W ₃ (수로중간)	13.1	14.3	13.2	12.6
W ₄ (수로끝)	12.9	14.8	13.3	12.5

동굴 지하수의 수온은 막장으로 들어갈수록 항상 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났는데, 이것은 일반적으로 동굴에 나타나는 현상으로 특이한 점은 아니다. 우로굴은 연평균 수온이 12~15℃ 내외의 안정된 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 기존 연구에 의하면 석회암 동굴이 화산 동굴보다 1~2℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 이것은 화산동굴은 구조가 간단하여 기류를 차단하는 장애물이 없고, 석회동굴은 복잡한 미로를 만들어 외부기류를 차단시키기 때문이다.

[표 5] 석회동굴과 화산동굴의 평균 수온 비교

석회동굴	성류굴	고수굴	고싸굴	백용굴
수온	14℃	15℃	15℃	12℃
화산동굴	만장굴	빌레못굴	소천굴	미천굴
수온	12℃	11℃	13℃	12℃

<자료> 한국동굴대관, 삼주출판사, 1990

5. 이산화탄소

석회암동굴 생성에 있어서 영향을 끼치는 주요한 인자는 우수의 양과 절리 및 이산화탄소의 양이다. 이산화탄소는 주로 빗물의 강하중에 대기나 토양 속에서 공급받는데 일반적으로 외부 대기값과 유사한 350~550ppmv의 값을 나타낸다. 박쥐의 배설물인 구아노나 동굴내부에 유기물의 퇴적이 많은 경우는 이산화탄소의 분압이 지역에 따라 다소 높게 나타날 수도 있다. 우로굴은 비공개 동굴이며 동굴내 경관이 상대적으로 화려하지 못해 외부인들의 출입이 없으므로 일반인들의 동굴출입으로 인한 이산화탄소의 분압이 영향을 받는 경우는 거의 없는 것으로 나타났다.

우로굴의 경우 여름철이 겨울철보다 이산화탄소의 분압이 다소 높게 나타난 것은 대기 강우량이 많아 동굴내부로 유입되는 지하수 양이 많기 때문이다. 봄철과 가을철은 유사하게 나타났는데 이것은 두 계절의 강우량이 비슷하기 때문이다. 이것은 대기중의 체류시간이 50~200년으로 반영구적인 이산화탄소가 빗방울 속에서 용해되어 빗물이 탄산수로 되고 또 토양층을 통과하면서 토양속의 유기물질 속에서 나오는 이산화탄소를 포함하여 동굴속으로 많이 유입되었기 때문이다. 특히 절리가 잘 발달된 석회암지대에서의 강우량 다소는 이산화탄소의 분압을 높이는데 영향을 미친다. 우로굴의 지표에 내린 우수는 절리와 단층의 공극을 따라 반복해서 용식을 시켜서 점차 지표수는 사라지고 지하수는 증가하며 좁고 낮은 통로를 따라서 동굴속을 흘러간다.

우로굴의 이산화탄소 분압은 동굴 안쪽으로 계속 가면서 다소 높게 나타났다. 이것은 우로굴의 동굴입구가 좁아서 대기순환이 이루어지지 않고 안쪽으로 갈수록 자정능력의 한계를 넘어서서 이산화탄소의 축적이 계속적으로 일어났기 때문이다. 특히 동굴내부 사이 사이에 동류기류의 흐름을 차단시키는 협착부와 장애물이 있기 때문이다. 이산화탄소의 분압은 동굴을 개방할 경우 관광객의 내방에 의해서 높게 나타난다. 또 강수량이 타 지역보다 풍부한 지역은 석회암의 화학적 풍화가 활발하여 이산화탄소의 분압이 다소 높아질 수 있다.

[표 6] 우로굴의 이산화탄소 (ppmv)

위치	4월	7월	10월	12월
S ₁ (입구안)	589	610	622	612
S ₂ (호수부근)	788	814	790	788
S ₃ (수로중간지역)	808	830	811	808
S ₄ (대형낙반지역)	918	940	922	917

6. 경도

동굴내 지하수의 경도는 주로 토양층과 암석층을 통과한 물에서 얻어지게 되는데 빗물자체로는 그 많은 양의 고형물질을 용해시킬만한 능력이 없다. 경도를 유발하는 용해능력은 토양속의 박테리아 작용으로 발생한 CO₂ 를 함유한 지하수가 석회암을 용해시킴으로써 높게 나타나는데, 우로굴은 100 내외로 나타났다. 이것은 우로굴을 덮고 있는 야산의 토양 표토층이 얇고 석회암층이 적어서 경도가 낮게 나타난 것이다. 이것은 우로굴이 한편으로는 지질적인 단층의 영향을 일부 받아서 경사굴 형태를 다소 취하고 있는 것에서도 엿 볼 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. 특히나 지하의 토양층에서 식물 등의 부식층을 통과한 지하수는 더 많은 탄산

가스의 일부는 흡수하여 지하로 스며들어 동굴내에서 자유대기와 접하게 됨으로써 탄산가스의 일부는 방출되고 용식되었던 방해석의 일부가 침전된다. 즉 동굴류는 대기중에서 내린 우수가 석회암지대에 발달된 적색토인 잔류토양층이나 석회암의 열극을 통과하는 사이에 탄산염 물질을 용탈시켜 그의 경도는 증대된다.

우로굴의 경도는 겨울철보다 여름철에 상대적으로 다소 높게 나타났는데, 이것은 하계집중 강우에 의한 CO₂ 를 함유한 지하수량의 용출이 많아서이다. 즉 동굴 밖 외부에서 표토를 침투한 빗물이 석회암 절리를 따라서 동굴내부로 많이 유입되었기 때문이다. 또 동굴 안쪽으로 갈수록 약간 낮게 나타났는데 동굴수의 시작이 되는 곳으로 입구의 호수 쪽으로 올수록 지하수의 양이 많아지면서 탄산칼슘의 양이 조금 많아졌기 때문이다. 경도의 음용수 수질 기준치는 300mg/l 이하인데 우로굴은 평균 110mg/l 내외로 나타났기 때문에 적합한 것으로 나타났다.

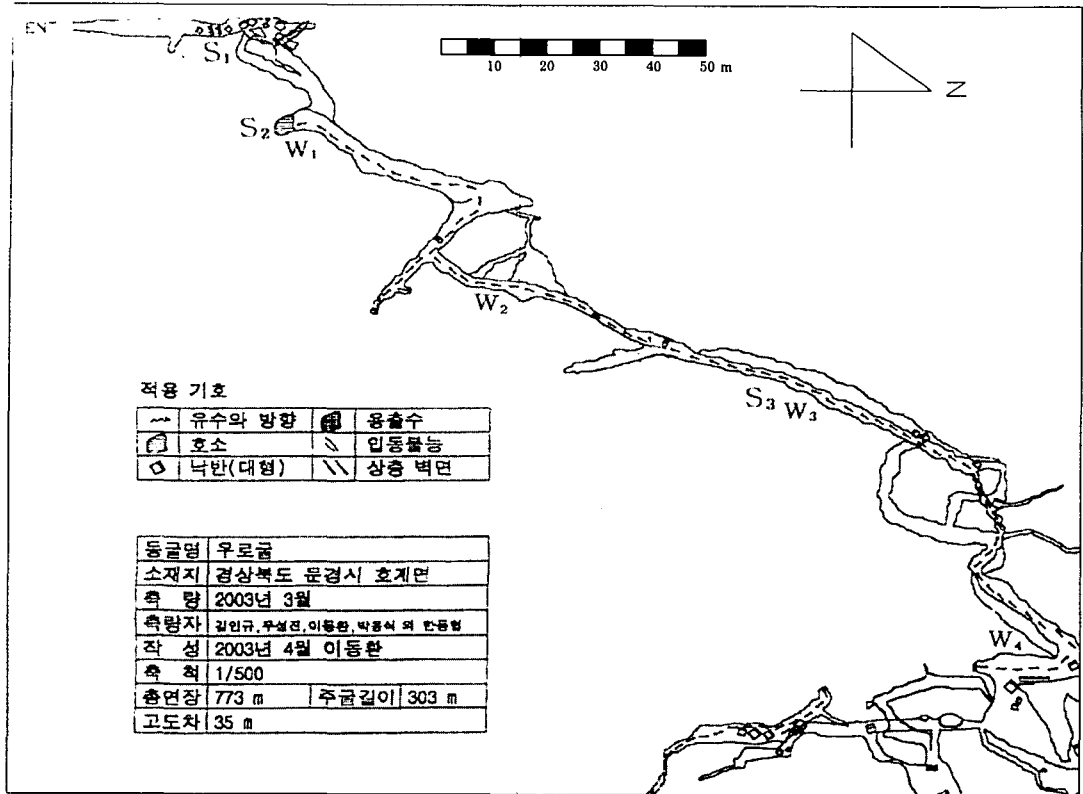
(표 7) 우로굴의 경도(mg/l)

위치	4월	7월	10월	12월
W ₁ (호수)	112	115	108	107
W ₂ (수로입구)	112	115	107	105
W ₃ (수로중간)	111	110	105	106
W ₄ (수로끝)	110	110	105	105

Ⅲ. 고 찰

우로굴내의 지하수의 흐름은 일부 구간에 무수 구간이 있음에도 불구하고 전반적으로 상시 유출수가 있어 동굴내부의 수문 환경조건은 양호하며 경사된 통로를 따라 입구쪽의 호소지대로 일단 유입된 후 동굴 입구 밖에 있는 연못에서 용출한 후 하류로 흘러가서 저수지에 고였다가 구서골 하천에 유입되는 것으로 나타났다.

막장 부분에서 유출된 동굴내 지하수는 외부에서 유입된 만큼의 수량이 다시 수위가 낮은 곳으로 유출되는 것이며, 그 과정에서 여러 지형지물이 생기는데 방해석 성분이 낮아 지하공동은 웨이브 형태를 유지하지 못하고 뾰족뾰족한 암석들이 곳곳에 위치하고 지하수가 항상 유출하는 곳만이 도랑형태로 청정수가 흘러서 직선상 유로를 만들고 있다. 따라서 2차 생성물의 발달이 전반적으로 미약하며 동굴내 기온, 습도, pH, 수온, 이산화탄소, 경도의 조사결과 동굴내에서 구간별로 상대적으로 다소 미세한 차이를 보이거나 전반적으로는 큰 특징을 찾을 수 없으며, 이러한 결과는 한국의 석회동굴에 일반적으로 나타나는 현상이다. 그리고 동굴내 지하수는 아직까지 외부의 오·폐수에 의한 2차 오염이 안된 음용수의 수질기준치 범위 안에 있는 깨끗한 물로 나타났으며 경도도 수질기준치에 훨씬 못 미치게 낮게 나타났다. 그리고 동굴수를 이용한 농작물 재배, 식수 개발 등을 위해서 특별히 보존할 필요성은 없는 것으로 사료된다.



(그림 1) 우로굴의 조사지점

文 獻

환경부, 2002, 전국 자연동굴 조사 지침서
 동화기술 편집부, 2001, 공정시험방법(수질오염), 도서출판 동화기술
 환경부·국립환경연구원, 2003, 2002, 전국 자연동굴조사 보고서
 단양군·한국동굴학회, 2002, 양당리·복상리굴 학술조사보고서
 영월군, 2001, 천연동굴학술조사 보고서
 단양군·한국동굴학회, 2000, 온달동굴 타당성 조사보고서
 홍시환, 1990, 한국동굴대관, 삼주출판사
 대한 홍시환 교수 정년퇴임 기념논문 준비위원회, 1990, 정년퇴임기념논문집