

한국동굴의 수환경에 관한 연구

김 추 윤*

Hydrological Environment of Korea Caves

Choo-Yun, Kim

Abstract : Hydrological environment of Korea caves were investigating. Hydrologic environment gives a great influence on the formation of caves

Key Words : hydrological environment, Korea caves

국문초록 : 동굴형성에 영향을 주는 한반도의 자연환경 중에서 특히 수환경에 대하여 조사하여 그 특징을 간략하게 파악하고자 한다.

주요어 : 수환경, 한국의 동굴

I. 서론

동굴형성에 영향을 주는 한반도의 자연환경 중에서 특히 수환경에 대하여 조사하여 그 특징을 간략하게 파악하고자 한다. 먼저 한반도의 일반적인 지리적 특징을 살펴보면 대략 북위 33-43 °, 동경 124-132°부근에 위치하고 있으며 60-70%정도가 산지를 형성하고 있다. 산지는 경사를 수반하여 하천의 배태에 유리한 자연조건을 가지고 있으며 이것이 동굴형성에 일조를 하였다. 한반도의 남북간 최장거리는 함북의 온성에서 전남의 해남까지 1070km이고, 동서간 최단거리는 평북의 박천에서 함남의 정평까지 약 175km이다. 한국은 이와같이 남북은 길고 동서는 짧아 기후대가 수평적으로 여러 단계로 나누어져 난대기후에서 냉대기후까지 폭넓은 기후

분포대를 보이고 있다.

남북 방향으로 길게 발달한 한반도는 겨울철에 한냉한 북서계절풍을 받아 비교적 몹시 추우며 또한 편현상으로 태백산맥 동쪽지방에 승온현상을 일으키기도 한다. 여름에는 고온 다습한 남태평양 기단으로 비가 많이 오고 덥다. 동해에는 쿠로시오의 지류인 동한난류가 흐르고 있어 겨울철의 기온을 온난하게 해주고 있다. 이런 겨울은 춥고 여름은 더운 현상이 반복되는 것은 암석 풍화에 큰 영향을 미쳐 절리 형성에 많은 영향을 미치고 이것이 지하수의 흐름을 원활하게 하여 동굴 생성에 큰 영향을 미친다. 우리나라의 대부분 지역이 여름철에 우기가 나타나고 강우의 계절 편재성이 크다. 겨울철에는 건기에 해당하지만 겨울철 강수도 강설로 인하여 많은 편이다.

* 신흥대학 교수, cykimcy@naver.com

우리나라의 연평균기온은 남부지방은 12-14도C, 중부지방은 10-12도, 북부해안지방은 8도, 개마고원은 2-4도C정도이다. 따라서 남북간 대략 10도내외의 기온차가 나타나고 있다.

우리나라의 연평균 강수량은 약 1200mm정도로 일본의 1600mm보다는 적지만 프랑스 770mm, 미국의 750mm, 인도의 920mm보다는 많다. 따라서 우리나라는 세계에서 강수량이 많은 편에 속하며, 이러한 다량의 강수량은 석회동굴 형성에 결정적인 영향을 미친다. 동해안 쪽에 강수량이 많은 것은 겨울에 강설이 많기 때문이다.

II. 동굴수의 기원과 구조

20세기 초기까지 석회동굴은 지하수면보다도 높은 위치 즉 풍화대 가운데에서 지표로부터 투수된 지하수의 작용에 의하여 이루어지며 용해 작용보다는 물의 기계적인 침식작용에 보다 주요한 역할을 했다고 생각되어졌다. 그러나 미국의 데이비스라는 지형학자가 1930년 “석회동굴의 성인”이란 논문에서 2윤회설이라는 석회동굴 성인론을 제창했다. 즉 동굴의 대부분은 지하수면보다도 아래쪽에서 지하수에 의한 용식작용으로 생긴다고 하였다. 이것이 그의 1차 윤회설이다.

다음에 지하수면이 어떤 다른 이유로서 저하하면 지금까지 동굴속에 있던 지하수는 아래쪽으로 빠지고 동굴속에는 대신 공기가 채워지며 동굴내 수분은 지표에 스며든 우수만으로 된다. 이것이 데이비스의 2차윤회설이다. 이때에 석회암의 침전물이 석순, 석주, 종유석같은 2차지형물을 형성한다. 사실은 데이비스가 이 학설을 발표하기 전인 1903년에 유럽사람 구른드가 같은 의견을 제시했지만 그 논문이 사람들의 눈에 띄지 못하여 데이비스에게 명성을 빼앗겼다.

미국의 브래츠는 1953년 오자르스크의 석회동굴을 연구하여 성인에 관한 몇가지 사실을 발견했다. 첫째 대부분의 동굴은 지하수면 아래에서 생긴다. 둘째 동굴은 준평원화 되는것 보다 그 이전인 장년기시대에 만들어진다. 셋째 노년기에 들어가면 동굴은 형성되지 않는다. 넷째 다음에는 그 지역이 융기하여 계곡이 생기며 동굴은 지하수면 보다도 위쪽에 나타난다. 다섯째 동굴은 우선 지하수면 이하부터 생기기 시작하나 이것이 점차 넓어져 지하수면 위쪽으로 커져 간다. 일부의 학자들은 동굴가운데에서도 지표의 하천과 같은 작용을 하는 물의 흐름이 있다고 주장하기도 한다.

데이비스는 일반적으로 동굴내에서 물의 흐름에 의한 기계적인 침식작용을 부정하고 있으나 동굴내에 진흙이나 모래, 자갈 등이 있으며 소규모의 사행을 이루는 경우도 있어 일부 이것을 인정하고 있다. 동굴형성에서 용식이 주요 원인인지 기계적 침식이 주요 원인인지는 각각의 동굴마다 다르다.

많은 사람들이 동굴수의 기원이 우수라는 것을 과학적으로 증명한 것은 그리 얼마되지 않는다. 동굴 지하수에서 발견되는 삼중수소(Tritium)의 발견은 지하에 있는 물이 대기의 고공에서 만들어 진다는 것을 증명하게 되었다. 그전까지는 대부분 지하의 거대한 물의 대부분이 바닷물이 침투하여 이루어 졌을 것으로 추측하였다.

영국의 물리학자 캐번디쉬(Henry Cavendish, 1731~1810)가 산소와 수소가 물을 만드는 것을 발견하고 이어 프랑스의 화학자 포아쑤(Sinéon Denis Poisson; 1781~1840)과 스위스의 화학사 쉐레(Karl Wilhelm Scheele; 1742~1786)에 의해서 1773년 물이 원자량 1인 수소 2개와 원자량 146의 산소 1개로 구성되어 있는 것이 확인되었다.

천연수를 만드는 수소원자와 산소원자는 여

러 가지 원자량을 갖기에 주기표 가운데서 똑같은 위치를 갖고 있다고 말해도 물리적 성질이나 화학적 성질은 다르다. 이것이 소위 동위체(同位体)이다. 즉 원자량이 1, 2, 3, 4, 5로 다른 수소와 원자량이 16, 17, 18의 다른 산소가 있는 것이다. 천연의 산소가운데는 ^{16}O 산소의 동위체 원자 3,150개에 대해서 ^{18}O 산소 동위체는 5개, ^{17}O 산소동위체는 1개 비율로 존재한다.

천연의 기체수소 가운데에는 경수소(輕水素, ^1H , Protium)의 원자 5,500개에 대해서 중수소(重水素, ^2H , Deuterium)는 1개의 비율로 존재한다. 삼중수소(三重水素, ^3H , Tritium)와 ^4H , ^5H 는 지구상의 천연수 가운데 미세한 양 밖에 없지만 우주 진화과정에서 저온의 흑성공간이나 혜성에 존재하고 있는 것으로 추측된다.

수소원자와 산소원자가 만드는 물분자의 구조는 분자의 전자운(電子雲)이 8개의 외각전자(外殼電子)와 2개의 내각전자(內殼電子)로 구성되어 있다. 정상 상태라며 H_2O 분자 가운데 산소원자 1개와 결합한 2개의 수소원자가 이루는 각도는 180° 가 아니라 $104^\circ 31'$ 이다. 이 결과 분자내 결합력은 완전히 보상되지 않음으로써 그 여분의 힘은 분자 밖으로 나타난다. 물분자의 크기는 살펴보면 분자의 직경은 2.76\AA , 산소와 수소의 중심을 연결한 직선거리는 0.96\AA , 산소를 정점으로 3개의 원자의 중심을 연결해서 이루는 각도는 104.31 이다.

물분자 가운데 정전하(正電荷)와 부전하(負電荷)는 불균일하게 비대칭으로 분포하고 있다. 이와같이 분자내의 정전하와 부전하의 중심이 일치하지 않는 분자를 극성분자(極性分子)라고 부른다. 우리들은 결국 물분자는 중성(中性)으로 있다고 하지만 이 극성 때문에 분자의 부(負)에 하전(荷電)한 극은 정전하에 그리고 정(正)에 하전한 극은 부전하에 이끌리게 된다는 법칙에 따

라서 공간의 가운데에 위치를 정하게 된다.

물분자 내부의 이 전하의 분극(分極)은 다른 물질의 전하의 분극과 비례해서 대단히 크다. 물리학자는 이 현상을 쌍극자(雙極子) 모멘트(moment)라고 부른다. 물분자의 이 특성을 유전율(誘電率)이라고도 부르는데 대단히 크며 여러 물질의 용해과정에서 굉장히 중요한 의미를 갖는다. 만일 진공에서의 유전율을 1이라 하면 온도 0°C 의 물속에서는 87.7, 50°C 에서는 69.9, 100°C 에서는 55.7이 된다. 더 나아가 실온에서는 유전율이 80이다. 이것은 두 개의 정반대의 전하는 물속에서는 대기의 $1/80$ 의 상호작용력으로서 서로 끌어당긴다. 분리할때에는 공기중보다 물속의 편이 80배 정도 쉽다는 것이다. 그러나 ‘물은 똑같은 분자만으로 된 것이 아니다’라고 말하는 것은 물분자는 정(正)에 하전한 수소이온(H^+)과 부(負)에 하전한 수산이온(OH^-)으로 해리(解離) 즉 분해될 수 있기 때문이다. 순수한 물은 보통상태에서는 굉장히 해리하기 어렵다.

1000만개의 순수한 물분자의 가운데서 단 1개만이 수소이온과 수산이온으로 분해되기 때문이다. 단 온도를 상승시키고 다른 조건을 변화시키는 것에 의해서 그 해리도는 현저하게 두드러진다. 물은 화학적으로 중성으로 있지만 수소이온과 수산이온의 존재가 물을 굉장히 활성화시킨다. 물가운데에는 부에 하전한 산소이온(O^{2-})도 존재하는데 큰 역할을 하지 못한다.

자연가운데에는 산소와 수소의 별도의 화합물도 보인다. 우선 이러한 화합물에는 광범위하게 분포하고 있는 정에 하전한 히드로늄이온(H_3O^+)이 있다. 이것은 고온, 고압일때 암염(NaCl)의 용액중에서 보인다. 하이드로키치움이온은 0°C 때에 수산이온과 함께 얼음의 결정격자(晶格子)중에 0.27×10^{-9} 의 비율로서 존재하지만 더 나아가 다수의 광물속에 결합상태로 존재한다.

하이드로키치움이온과 수산이온은 지하심부에서 특히 화강암과 작용과정에서 많은 화합물의 운반수단으로 되고 있다.

과산화수소(H₂O₂, HO₂, H₃O₂)등은 수수와 산소의 별도의 화합물로 있다. 이것들은 모든 지표의 환경에서는 불안정하지만 그것보다 높은 온도와 압력에서는 자연히 장시간 존재할 수 있다. 그위에 H₃O₂는 해발100km의 높은 전리층(電離層)의 구름 가운데서 발견된다.

물분자가 보통 중성으로 있는 것을 이미 설명한 바와 같다. 그러나 물분자에서 베타선(빠른전자)으로 전자를 뺏으면 하전한 물의 분자 즉 정(正)의 이온 H₂O⁺가 형성된다. 이온과 물의 상호작용으로서 아래식과 같이 수산기(水酸基, OH⁻)가 발생한다.



전자와 하이드로키치움(H₃O⁺)이 재결합 할때는 1몰당 196Kcal의 에너지가 방출되고 이 에너지는 H₂O을 H와 OH로 분해하는데 충분하다.

보통 화합물을 만드는 기(基)는 유리해서 존재하지 않지만 특수한 조건하에서는 그것이 유리한 형태로 존재한다 이 유리기(遊離基) 즉 다른 물질과 자유로 결합할 수 있는 기는 천체물리학과 지구대기물리학에서 굉장히 중요한 일을 한다. 태양표면에서 수산기(OH⁻)가 발견되었다면 그중에서도 흑점에서 그 수가 많다.

더 나아가 수산기는 항성의 가운데나 혜성의 두부에도 출현되고 있다. 이와 같이 해서 물을 수소의 원자와 산소의 원자와 그 분자 및 이온에서 만들어지는 물질로 생각하는 경우 물은 기체, 액체, 고체의 3가지 형태로 해서 36종류의 화합물로 분류된다. 단 이때 이것들에 포함된 현탁액(懸濁液),유탁액(乳濁液), 불순물로서 해서

수분에 포함된 다른 원소나 그의 무기화합물, 유기화합물은 생각에 넣지 않는다. 보통 H₂O의 그 밖의 동위체의 존재율은 그렇게 많은 것이 아니고 전체에서 약 0.3%에 지나지 않는다.

삼중수소(H³, T)는 약한 방사성을 나타내고 있고 그 반감기는 12.3년이다. 원자량4(⁴H)와 5(⁵H)인 방사성 수소 동위체와 삼중수소(³H)는 극도로 짧은 반감기를 갖는다. 예를 들면 ⁴H의 반감기는 4×10⁻¹¹초 즉 4/100,000,000,000초이다. 우리는 이러한 삼중수소의 반감기를 이용하여 동굴수의 연대를 측정할수 있다. 그래서 제주도 지역의 동굴수를 조사해보면 물의 생성연대가 다르다. 어떤 지하수는 6개월이 된것이 있는가 하면 어떤 것은 10-20년이 된것도 있다. 연구회가 다면 단양동굴수의 반감기를 이용하여 동굴수의 나이를 측정 할수 있다. 지하에는 화석수와 같은 처녀수를 제외하고는 대부분 빗물이 동굴수가 되었기에 삼중수소를 이용하여 동굴수의 나이를 알수 있는 것이다.

4종류의 수소동위체 이외의 더 나아가 2종류의 산소 방사성 동위체가 있다. 즉¹⁴O, ¹⁵O가 있는데 이것은 천연수 가운데 큰 의의를 갖는 것은 아니다. 왜냐하면 이것들의 반감기는 굉장히 적어서 수십분의 1초에 지나지 않기 때문이다. 단 순수한 물의 종류에 관해서라면 결코 이것이 전부는 아니다.

1cm³의 액체의 물 가운데에는 온도 0℃에서 3.35×10²²개의 분자가 포함되어 있다. 이것들의 입자가 물 가운데 어떻게 분포하고 있는가 알아보자. 물의 입자는 결코 제멋대로 분포하고 있는 것이 아니고 물의 3가지 형상 고체, 액체, 기체에 걸쳐서 일정한 구조를 만들고 이것은 온도나 압력에 따라서 변한다. 우선 가장 경이스런 물의 특성은 물이 보통의 온도와 압력의 조건가운데서 3가지 형상 즉 고체(얼음), 액체(물), 기체(수

증기)로 해서 존재할 수 있는 지구상의 유일한 물질이라는 것이다.

온도나 압력 기타의 조건에 의해서 물이 여러 가지 집합상태(형상)로 변하는데 물분자가 이런 형상을 만드는 구조의 특징을 연구할 필요가 있다. 이 문제에 대해서는 아직 통일된 견해가 없다. 현재 대부분의 연구자료들은 물이 이중구조 모델을 갖고 있다고 말한다. 즉 첫째 허술한 틈이 많은 얼음과 유사한 구조와 둘째는 빈틈이 없어 뻘뻘한 구조의 혼합물로 있다고 한다.

얼음의 결정은 결정계(結晶系)의 가운데 육방정계(六方晶系)에 속하기에 결국 6면 프리즘의 형을 하고 있다. 얼음구조 가운데서는 각각의 물분자는 가장 근접하는 4개의 분자로 둘러싸여 있고 그래서 이 4개의 물분자에서는 거리가 같다. 그런데 이온 결정 등에서 하나의 이온이 다른 몇 개의 이온과 결합되어 있는 경우 그 수는 배위수(配位數)로 있다. 결국 각각의 물분자는 배위수를 갖고 있다고 말할 수 있다.

물분자는 정에 하전한 극과 부에 하전한 극이 접촉하는 것 같이 배치되어 있다. 분자간의 거리는 인규석형(磷珪石型)의 얼음구조는 4.5Å로 되어 있고 석영형(石英型)의 얼음구조에서는 4.2Å로 있다. 전자의 경우는 이것은 온도가 약 0°C에서 녹는 얼음으로 있고 후자의 경우는 온도가 약 4°C에서 물분자가 보다 뻘뻘한 구조로 된다고 생각된다.

결빙할때에는 약 10% 정도의 불가사의한 팽창이 일어나는데 뻘뻘한 구조가 급속히 격자상의 틈이 많은 느슨한 구조로 전이 하는 것으로 설명할 수 있다. 얼음의 구조에서는 배위수가 적기 때문에 많은 틈이 생기는데 이것은 물분자 그 자체보다도 많다. 각각의 틈은 6개의 물분자로서 경계지워지고 역으로 각각의 물분자의 주위에는 틈의 중심이 6개 있다.

온도가 약 4°C일때 이것들의 틈은 물이 자유로운 분자로 메꾸어져 그 밀도가 최대가 된다. 온도가 상승을 계속하면 점점 틈이 많아지고 격자상의 구조가 점점 생긴다. 온도가 상승하는 것에 따라서 분자의 열운동이 증대하는 결과 얼음 구조는 점점 잘 붕괴되어 수소결합이 약화되고 인규석형의 얼음 구조의 붕괴가 격심하게 되어 물의 밀도가 감소하고 그 용적이 크게 된다.

최근에 물에 '기억력' 또는 '이력(履歷)'이라고 부르는 것이 존재하는 것을 러시아 과학자들이 발견했다. 우선 증류에 증류를 거듭해서 굉장히 순수한 물을 1기압, 88기압, 390기압, 800기압을 기초로 200°C, 300°C, 400°C, 500°C의 온도로 가열한다. 일반적으로 온도와 압력이 물의 성질을 변화시킨다는 것은 전부터 알려져 있습니다만 놀라운 일은 고온과 고압을 없애도 몇 개의 새로운 성질이 그 물에 그대로 보관되어 있다는 것이다.

III. 동굴수의 생성과정

석회동굴이 배태되고 있는 지역은 석회암지역이므로 이 지역의 지표수는 거의가 지하로 스며들고 있어 비교적 적은 양의 지표유수가 있을 뿐이다. 즉 대부분의 물은 복류하여 지하수류를 이루고 있는데 따라서 지표면에서는 여름철의 강우 계절에나 지표유수를 보게 된다.

유고슬라비아와 이탈리아의 국경지대인 아드리아해(Adriatic Sea)의 북동해안을 따라 카르스트(Karst)라는 지역이 있는데 이곳에는 대소의 저지가 많이 발달되어 있다. 이러한 지형은 이 지대가 석회암지대이고 지하수의 용해작용에 의해서 형성되었기에 카르스트 지형이라고 부른다.

카르스트지형에는 지표에 돌리네, 우발레, 폴리에 등 각종 지표 지형이 나타나고 지하에는

절리를 따라 스며들어온 지하수에 의해서 공동이 생기고 여기에 석순, 석주, 중유석 같은 2차 생성물이 생긴다.

이러한 경관은 지하수의 용식작용 때문에 일어나는데 이때 암석의 성분에 따라 지하수의 수질에는 큰 차이를 가져오게 된다.

빛물과 같은 순수한 지하수를 발견할 수 있는 장소는 석영모래(Quartz Sand)로 이루어진 이산화탄소의 양이 우수와 거의 같은 정도이며 또 미량이나마 다른 물질도 포함되어 있다.

석회동굴이 있는 카르스트 지형의 지하수는 경수로 용존칼슘과 약간의 마그네슘을 함유하므로 비누가 잘 풀리지 않는다.

지하로 침투한 우수는 암석과 토양을 화학적으로 변화시키거나 반응함으로써 지하수는 많은 용존 이온을 함유하며 토양과 표층으로부터 공급된 다른 성분도 함유하게 된다.

순수한 모래층이 아닌 석회암이나 세일층은 지하수에 의해서 많은 성분들이 용해되어 물맛을 해치는 경우가 많다.

소량의 지하수는 자연적으로 연성화가 가능한데 이같은 현상은 지하수가 지올라이트(Zeolite) 광물을 함유하는 지층을 통과하거나 또는 그런 지층과 서로 반응하므로써 이루어지게 된다. 지올라이트는 수화된 규산염으로써 물속에 있는 어떤 이온이 고체에 결합되어 있는 어떤 이온과 교환됨으로써 화학적으로 흡착하는 것이다.

카르스트지형의 지하수는 쉽게 오염되는데 그것은 함몰공과 균열된 석회암의 기반암을 통해서 지상의 오염물질이 대수층으로 빠르게 운반되기 때문이다. 우리가 보통 약수라고 부르는 탄산수는 지하수의 일종인데 물에 이산화탄소가 용해되어 있는 것이다. 이산화탄소의 성분은 우리가 일상생활에서 항상 접하고 있는 물질이다.

대기중의 CO₂는 분자비로 0.03% 가 포함되어 있어서 매우 희소하지만 질소(78%), 산소(21%), 아르곤(0.9%) 다음으로 많은 성분이다.

탄산수는 극히 약한 산이기 때문에 염산 또는 황산에 비해 물질에 대한 화학적 영향력이 매우 약하지만 지표에서 다량으로 그리고 지속적으로 장기간 공급될 수 있으므로 암석의 풍화에는 충분한 힘을 발휘하는 것이다. 대기중의 CO₂와 우수와의 반응에서 탄산수의 생성을 모식적으로 보여주고 있다(그림-1).

이의 반응은 아래 식으로 간단히 표현되지만 CO₂의 용해도가 극히 낮으며 온도와 압력에 따라 가역반응이 된다.



그림 1. 탄산수의 생성 모식도

대기중에서 CO₂의 용해도는 1ℓ의 순수한 물에 0.0006gr의 탄산수가 평형을 이루는 정도이지만 장구한 시간을 고려하면 석회암의 풍화를 충분히 시킬 수 있다.

최근 자동차 배기가스나 공장의 굴뚝에서 배출되는 유황가스가 산성비(Acid Rain)를 내리게 해서 환경오염의 문제로 등장하고 있다. 이때 산성비는 황산을 미량 용해시킨 것으로 탄산에 비해서 월등이 강한 것이다.

탄산수는 약 황산이기 때문에 동식물의 생존에는 큰 피해를 주지는 않는다. 탄산수가 H⁺ 이온과 HCO₃⁻ 이온으로 되는 율은 HCl, KCl 등과는 달리 매우 희소하며 분자비로는 탄산수의 1,000분의 1 정도이며 여기서 아래 식으로 이온화되는 율은 10만분의 1 정도이다.



그림 2. 방해석의 탄산수와 반응에 의한 화학적 풍화작용

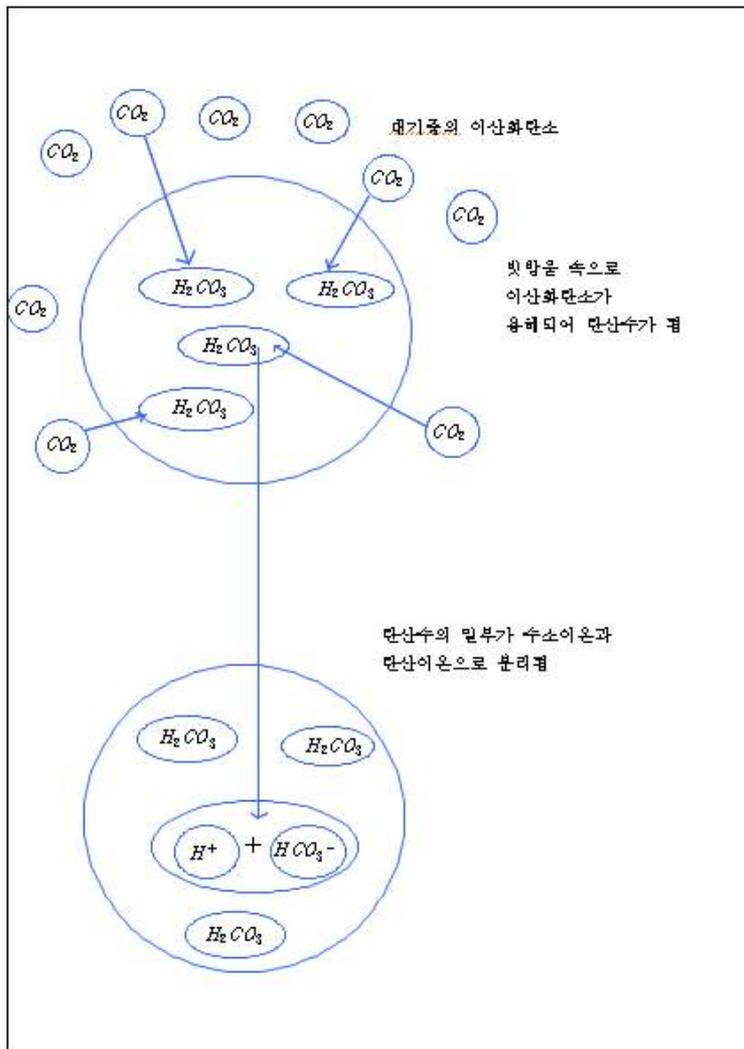
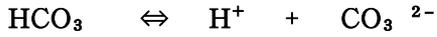


그림 3. CO_2 가스가 우수에 용해되어 약한 탄산수를 만들고, 이는 다시 물과 반응하여 수소이온과 탄산이온으로 되는 모식도



이산화탄소는 대기중에서 보다 토양내에서 더욱 더 풍부하다. 동식물의 호흡이나 유기물의

부식에서 발생하는 양이 많기 때문에 토양 하부로 침투되는 물에는 탄산수의 공급량이 많아지므로 암석의 화학적 풍화는 지표하부에서 보다 활발하게 이루어진다.

탄산수에 의해서 장석(長石) 등도 분해되지만

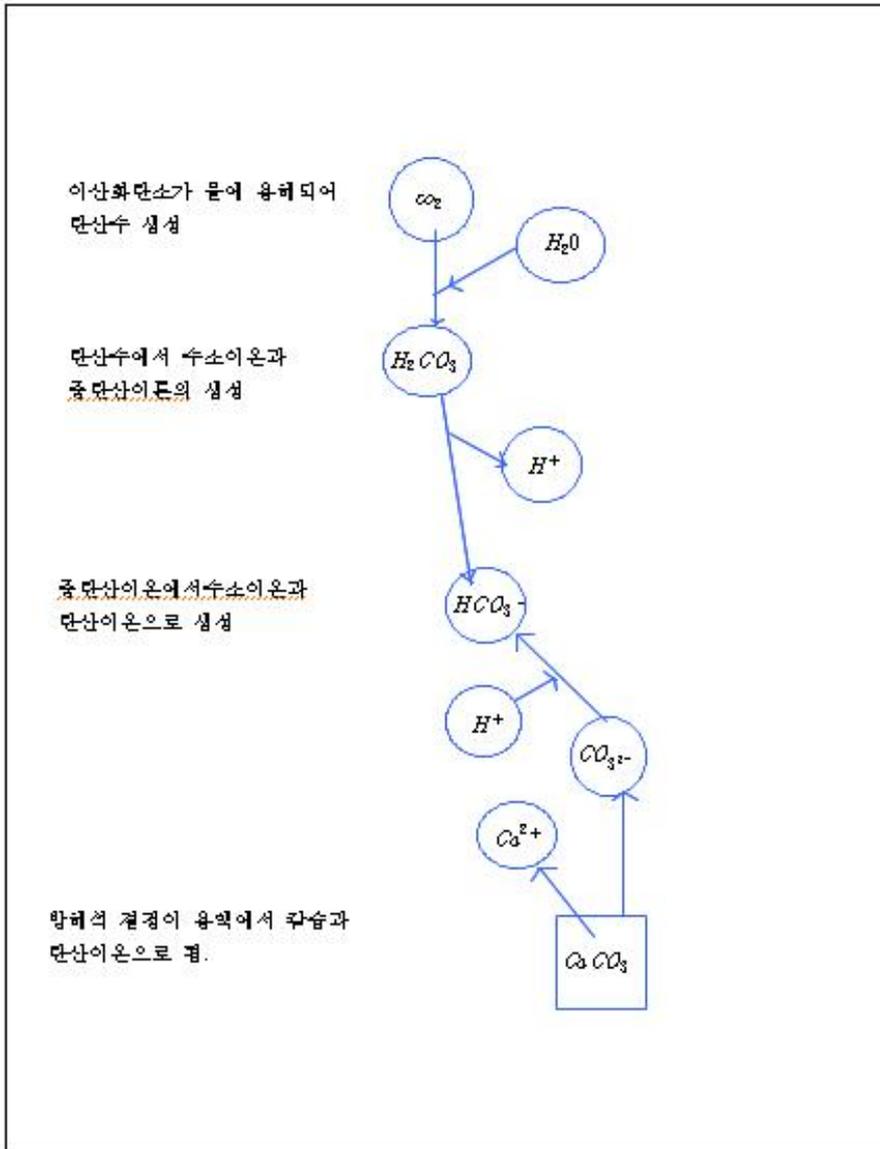


그림 6. 방해석과 같은 탄산염 광물이 탄산수에 의해 용해되는 모식도

가장 크게 영향을 받는 것은 석회동굴의 주성분인 방해석(CaCO_3)이나 고회석($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)과 같은 탄산염 광물이다.

한국의 단양, 영월, 울진, 삼척을 비롯하여 곳곳에는 석회동굴이 산재하는 것을 흔히 볼 수 있다. 이것은 석회암의 절리(Joint)로 흘러 들어간 지하수가 탄산가스를 많이 함유하고 있어 암석의 화학적 풍화 즉 용식작용을 일으켜서 큰 공동을 1차적으로 만들고 그 큰 공간에 2차적으로 중유석 석순, 석주 등을 만든 것이다.

석회석을 용해한 물이 통풍이나 기타 요인에 의해서 수분이 증발되면 그 속에 용해되었던 석회암 성분이 재차 침전되어 석순, 중유석 등을 만드는 것이다.

방해석이 탄산수와 반응해서 화학적 풍화작용을 일으키는 반응식은 아래와 같다.

분해과정을 모식적으로 살펴보면 <그림- 2>와 같다. 즉 중탄산이온은 수소이온과 탄산이온으로 분리되어 방해석내의 CO_2 성분을 가스로 소멸되기도 한다. 또한 칼슘 이온과 중탄산이온이 중탄산칼슘($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) 용액으로 되어 제거되기도 하는데 이 용액은 다시 반응식의 가역반응을 일으켜 방해석 성분으로 재 침전될 수도 있다. 이와 같이 재침전된 것이 중유석이나 석순이 된다. 그러나 예를 들면 처음부터 SiO_2 가 주 성분인 석영은 거의 용해되지 않고 모래로 남는다.

IV. 동굴수의 수질특성

동굴은 항상 폐쇄된 세계로 향온 향습 향암의 지하세계이므로 특수한 환경을 이루고 있다. 즉 동굴의 온도는 년중 거의 일정하고 햇빛이 없는 캄캄한 암흑의 세계라는 것이 하나의 특색이다.

대체로 동굴의 대기는 기류의 움직임이 매우 느린 관계로 동구부근에는 대기온도와 동굴의 온도가 크게 달리 나타나지만 차차 안으로 들어가면서 동굴내의 대기온도는 동굴벽, 즉 동굴의 온도와는 거의가 비슷하게 나타난다. 이 때문에 굴속 같은 지점의 온도는 석회암의 온도와 관계되고 있으며 그온도는 대체로 지표의 년간 평균기온과 비슷하다.

지표온도의 일교차 년변화는 그 열이 참은에 전달되어 밑에 있는 지하의 동굴에 이르면서 점차 그 온도가 감소되는 경향이 있다.

수온은 대개 년중 비슷하고 여름이 약간 높고, 동굴의 깊이에 따라서도 큰 차이가 없는 것이 보통이다.

이와같은 동굴의 특수 환경은 마침내 동굴생태계와 환경을 특수하게 만들어 이른바 지하세계의 환경을 이루게 하였다.

즉 특이한 동굴생물의 생태계를 이루게 하여 이질적인 지하생물을 나타나게 하였다.

그리고 지표에서와 같은 공간변화를 나타나게 하는 풍화작용이 거의 없으면 반면 지하수류에 의한 수식지형이 나타나는 특수환경을 나타내고 있다.

동굴의 수질에서 pH는 6.8-7.6 사이를 내고 있는데 동굴의 위치나 깊이에 따른 변화는 없다. 즉 수질중의 칼슘은 고치굴이 5.2-6.8mg/l, 노동굴은 7.6-8.5mg/l, 고수굴은 7.4-8.2mg/l 이다.

이러한 온도의 차이는 동굴내부를 흐르는 물의 양이 많을수록 칼슘 함량이 적은 경향을 나타낸다. 칼슘외에 다른 성분들은 일반적으로 고치굴은 수질에 무기물의 함량이 작은 경향을 나타냈고 다른 동굴의 수질은 비슷한 경향을 띄운다. 이러한 결과는 외국의 동굴내 수질분석 결과와 비교해 볼때 pH값은 약간 높은 값을 나타내나 무기성분의 분석값은 비슷한 값을 나타내고

표 3. 동굴수의 거리별 수질 비교

거 리(M)	pH	Ca	Mg	Na	K	Sio2	SO	Cl
고수동굴								
100	7.6	7.5	3.2	5.4	0.8	35	4.2	4.5
300	7.3	8.2	4.5	5.2	0.5	42	5.0	12
600	7.4	7.4	4.5	5.7	1.0	38	3.8	6.5
고씨굴								
100	7.4	3.2	2.0	4.2	0.2	33	5.2	4.5
300	7.4	5.5	1.0	4.3	0.2	38	4.2	4.5
500	7.2	6.8	2.0	4.2	0.2	40	5.0	5.0
700	7.4	5.2	3.0	4.0	0.2	32	4.5	4.5
800	7.3	5.8	1.0	4.0	0.2	35	4.2	4.5
성류굴								
100	7.4	16.2	5.0	8.5	0.9	28	7.8	6.8
300	7.2	17.8	4.8	8.8	1.3	27	6.5	9.5
600	7.5	15.6	4.7	8.4	1.2	26	9.7	7.6

있다. 이러한 결과로 미루어 보아 화학성분을 이용하여 동굴의 환경오염을 판정하는 것은 대단히 어려운 문제라고 본다.

동굴내외수의 수질을 보면 동굴내 떨어지는 물은 CaCO3 성분이 동굴밖 물보다 10정도 높게 나타나며 나머지 성분에서는 큰차를 보이지 않는 경향이 보통이다.

또한 동굴속의 수온은 지역에 따라 약간의 차이를 보이나 대체로 12-16도C 내에 있다. 단 겨울에는 여름보다 2-3도C 낮아 그리고 동굴의 길이에 따라 입구를 제외하고는 수온의 큰 차이를 나타내지 않고 안정상태를 이룬다. 그러나 화산동굴이 석회동굴보다 1-2도C 정도 낮게 나타나고 있는데, 이것은 화산동굴은 구조가 간단하여 기류를 차단하는 장애물이 없고, 석회동굴은 복잡한 미로를 이루에 외부기류를 차단시키기 때문이다.

동굴의 일반적인 특성은 습도가 높고 온도의 변화가 적은 것인데 동굴내의 기후온도는 석회

암의 온도와 관련되고 있으며, 대체로 지표의 년평균기온과 비슷하다. 그러나 계절의 변화, 동구의 수의 영향을 받으므로 실제로 동굴의 기온은 1년을 통해서 보면 항온을 나타내지 않는다. 일반적으로 동굴의 입구 부근이 높고 깊은 곳으로 갈수록 낮아진다.

동굴내의 기상은 동굴 소재지의 위도, 표고, 지표에서 부터의 깊이 및 계절과 동굴의 크기, 형태, 그리고 동굴입구의 수에 따라서 상당히 달라 질 수 있다.

동굴의 기상 환경조건중 적합한 습도의 유기는 동물퇴적물의 생성 발달에는 물론 동굴동물의 생존유지에 절대적인 영향을 미친다. 동굴내부의 습도는 90%내외이며 전체적인 습도변화는 10%내외로 항습이 유지되고 있는 것으로 판단 된다.

지표온도의 일교차의 년변화는 그 지표열이 석화암층 때문에 밑에 있는 지하의 동구에 이르면서 점차 그 온도가 감소되는 경향이 있어 주

표 5. 동굴내의 수의 수질비교

성류굴							
장소	OC	습도 (%)	pH	경도 CaCO3 (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)
	왕피천물	23.8	-	7.74	15.9	2.2	0.55
동굴내 고인물	17.4	95	7.78	81.3	2.6	0.28	1.04
동굴내 적하수	16.6	92	8.18	154.1	2.0	0.30	0.66
Ca (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	알칼리도 HCO3-(ppm)	l (ppm)	SO4 (ppm)	PO4 (ppm)	SiO2 (ppm)
4.2	0.07	0.07	14.4	1.4	3.3	0.01	12.1
40.8	0.04	0.04	124	2.4	3.1	0.00	18.4
57.4	0.06	0.01	166	2.9	4.4	0.00	8.4
고수동굴							
장소	OC	습도 (%)	pH	경도 CaCO3(ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)
	동굴앞 개천	23.3	-	7.75	16.7	2.0	0.62
동굴내 고인물	16.8	95	7.92	82.5	2.8	0.25	1.02
동굴내 적하수	16.0	92	8.21	152.5	1.8	0.33	0.61
Ca (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	알칼리도 HCO3-(ppm)	l (ppm)	SO4 (ppm)	PO4 (ppm)	SiO2 (ppm)
4.6	0.01	0.05	14.2	1.6	3.2	0.01	12.5
40.5	0.03	0.03	126	2.2	3.0	0.00	18.2
58.8	0.04	0.01	162	2.7	4.8	0.00	8.2

야의 온도변화가 30도C인 경우에도 지표밑에 1m깊이의 지점에서는 그 변동이 거의 1도C 밖에 안되고 있다.

그리고 동굴내 기온은 여름에는 대체로 평균 16도C내외, 겨울에는 14도C 내외이다.

여름 계절의 동굴내 기온의 차는 높은 위치에 있는 동굴의 기온이 낮은 위치에 있는 동굴보다는 기온이 높게 나타난다. 외기의 온도가 상승하면 도리어 기류는 동굴내무 끝에서 동굴 밖으로 흐르며 급격한 온도 상승을 억제하고 비교적 낮은 온도를 유지하게 된다. 밤이되면 공기는 차지고 기압은 낮아진다.

그러므로 공기는 해가 지면 굴속으로 유입되고 해가 뜨면 동굴에서 유출하고 있다. 더구나 동굴의 입구와 출구지역에서의 기류의 이동은 현저하게 나타나고 있다.

동굴은 분포하는 해발고도의 차에 의해서 약간의 기온차가 발생하는데, 제주도의 화산동굴 조사에 의하면 해안저지대에 분포하는 협재굴, 김녕사굴 등 보다는 한라산의 산간지역에 있는 해발 700m 지점의 구린굴이 동굴 속 온도에서 2-3도C의 차로 낮다.

대체로 8월의 동굴내 기온범위를 측정하면 15-19도C 사이에서 동굴에 따라 다르게 나타나

표 3. 석회동굴과 화산동굴의 수온비교

성류굴										
위치	동굴 입구	제1 동방	제2 동방	제3 동방	제4 동방	제5 동방	제6 동방	제7 동방	제8 동방	제9 동방
수온	16.1	14.7	14.4	13.6	-	14.8	14.4	-	13.4	-
고수굴										
위치	용수굴			동굴속 용해수		동굴류		동굴밖 금곡천		
수온	14.2			16.4		16		18.4		
고씨굴										
위치	용수굴			동굴속 용해수		동굴류		동굴밖 금곡천		
수온	13.4			15.2		15.8		17.0		
화산동굴										
동굴명	만장굴	빌레못	소천굴	한들굴	와홀굴	신창굴	구린굴	미천굴		
수온	12도C	11도C	13도C	13도C	13도C	12도C	11도C	12도C		

표 4. 동굴내 기온및 습도 비교(화산동굴)

동굴명	만장굴	금녕사굴	수산굴	빌레못굴	협재굴	항금굴
기온	15도C	17도C	16도C	14도C	16도C	17도C
동굴명	소천굴	옥산굴	한들굴	와홀굴	신창굴	협재굴
기온	16도C	16도C	17도C	17도C	16도C	15도C

표 5. 동굴내 기온및 습도 비교(석회동굴)

고씨굴					
거 리 (M)	100	300	500	700	800
온 도 (도C)	13.5	12.8	13.0	14.0	14.2
상대습도 (%)	88	89	92	97	98
성류굴					
거 리 (M)	100		300		600
온 도 (도C)	13.2		13.3		14.0
상대습도 (%)	93		97		98
노동굴					
거 리 (M)	100		200		300
온 도 (도C)	13.8		14.5		14.5
상대습도 (%)	88		89		97
고수굴					
거 리 (M)	100		300		600
온 도 (도C)	13.7		14.2		14.2
상대습도 (%)	87		98		98
용담굴					
거 리 (M)	100		200		300
온 도 (도C)	13.0		14.7		14.7
상대습도 (%)	86		94		94

고 있다. 즉 지표면 기온이 높은 저지대의 동굴 기온이 높고, 기온이 낮은 고산지대 동굴일수록 낮은 분포를 보이고 있다.

즉 이는 동굴 기온의 일변화나 년변화가 크지는 않지만, 대체로 지표면의 기온 변화와 일치한다고 생각된다.

V. 결론

미공개 동굴인 소동굴들은 내부의 공동이 적은 관계로 기류의 움직임이 매우 느려서 기온분포가 큰 차이가 나지 않는다. 즉 동굴내부로 들어가면 입구를 제외하고는 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 기류는 동굴내부에서 동굴 밖으로 흐르며, 급격한 온도 상승을 억제하여 비교적 낮은 온도를 유지하게 된다. 그래서 여름철 외부는 더워도 내부는 시원한 것이다.

동굴의 통로가 수평굴, 수직굴, 복합굴이냐에 따라 대기흐름의 차단여부가 달려있어 동굴 내부의 온도가 미세하나마 차이가 있지만 보편적으로 동굴 내부로 어느 정도 진입하면 큰 차이가 나지 않는다. 충북지방은 우리나라의 중위도 지역에 속하여 온대성 기후의 특성을 잘 나타내고 있는데, 봄철 외부기온이 14.4도C일때 내부기온은 동굴 입구쪽에서 안쪽으로 들어가면서 미세하게 점증했으나 중간 지점부터는 14도C내외로 안정상태를 유지하고 있다. 여름철 외부기온이 27.2도C일 때 입구 안쪽은 약 18.0도C를 유지했으나 이내 중간지역을 지나면서 15도C 내외로 안정상태를 나타내고 있다. 여름철이 봄철보다 기온이 높은 것은 우리나라에 고온 다습한 남태

평양 기단이 불어와 동굴밖의 대기에 영향을 주기 때문이다. 가을철의 경우 외부기온이 14.0도C 일대 외부대기의 영향을 받아서 동굴의 기온은 13도C 내외로 낮아는데 비해서 동굴내부의 중간지대로 들어서면서 기류의 이동이 어느정도 안정되어 15도C내외로 유지되고 있다.

겨울철의 외부기온이 8.9도C 내외 일때 역시 동굴입구는 거의 외부 대기 온도와 유사한 정도를 나타내고 있으나 동굴안으로 들어갈수록 14도C내외로 안정되어 있다. 겨울철에 동굴기온이 타 계절보다 낮은 것은 이때는 한랭한 북서 계절풍이 우리나라 대륙에 불어와 영향을 끼치기 때문이다. 즉 동굴은 봄, 여름, 가을, 계절변화에 따른 기온에 영향을 받아 약간씩 계절별 온도 차이를 가져오고 있다. 겨울은 외부대기 온도의 변화에 따라서 안쪽보다 상대적으로 기류의 이동이 많은 동굴 입구쪽의 기온에 약간의 변화를 가져올 뿐, 중간지역을 넘어서면 거의 13-15도C의 항온을 유지하는 것으로 나타났다. 동굴내 기온은 위도, 표고, 지표에서의 깊이, 계절에 따른 외기온도의 변화 등에 따라 약간의 변화가 일어난다. 동굴에서의 온도는 굴벽의 온도와 유사하게 나타났다. 이것은 지층의 구조암인 석회암의 온도에 지배되기 때문이다. 보통굴은 지하 깊은 곳에 위치할수록 온도가 항온이다.

습도란 동굴내 공기의 건습상태를 나타내는 것으로 동굴내부의 2차생성물의 성장과 관계가 깊은 주요한 요소이다. 결국 습도는 지하수의 유무, 다량에 관계되는 것으로 동굴의 생성뿐만 아니라 성장하고도 관계가 있다. 용암 동굴과 달리 석회동굴은 습도가 없으면 건조상태가 되어 동굴이 커 질수 없다. 동굴의 습도는 동굴 입구를 제외하고는 4월, 7월, 10월, 12월 모두 대체로 90%내외를 나타내고 있다. 봄에서 가을까지는 다소 높아지다가 겨울 건계에 들어가면 다소 낮

아지는 것으로 나타났다. 습도는 동굴내부의 지하수의 수량과 관계가 깊은데, 지하수 함양 능력이 많지 않은 동굴은 동굴 자체가 지하수면의 상층에 있는 부분이 많아 지하수량이 작아 습도에 큰 영향을 주지 못한다. 지하수위면보다 높은 곳에 있는 동굴은 우계에만 상층에서 유입되는 빗물과 만날 수 있어 습윤 상태의 환경을 오랫동안 유지하지 못한다. 따라서 이 부분에서 동굴의 낙반이나 파괴가 불규칙하게 일어난다.

동굴의 습도는 외부대기와 다소 소통이 되는 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 습기로 포화되어 있기 때문이다. 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절 모두 동굴입구 안쪽을 제외하고는 동굴 내부로 들어 갈수록 급격한 변화 없이 완만한 증가를 하다가 일정한 지역부터 항습상태를 유지한다. 동굴 내에서도 유,무수구간에 따라서 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 1년 전체 강우량의 약 60-70%가 집중해서 내리기에 일시적으로 심복굴 내에 지하수의 유량이 계절적으로 증가하기 때문이다. 동굴의 이러한 습도변화는 다른 석회동굴과 거의 유사한 형태이다.

수소이온농도는 물속에 녹아있는 수소이온(H⁺)의 농도를 말한다. pH1(산성)-pH7(중성)-pH14(알칼리성)의 범위로 나타내는데, 현재 환경부 음용수 수질검사 기준치는 pH5.8-pH8.5 사이 이다. 동굴내의 동굴수는 사계절 모두 각 지점에 상관없이 대부분 중성에 가깝게 pH7.3로 나타나 수질기준의 범위 안에 들어간다. 동굴수

는 외부의 우수가 암석의 절리를 타고 침투하여 생긴 지하수이기에 동굴 밖 외부의 공장폐수, 가정하수, 축산폐수, 광산폐수, 농가의 하수 유입 여부등에 의해 다소 변화를 가져올 수 있다. 우리나라 대부분의 동굴이 배태된 주변지역이 깊은 산중이고, 주변에 아직까지 크게 환경오염을 미칠 인자가 없기에 동굴로 외부 오염수가 유입된 흔적은 없다. 남한의 대부분의 석회동굴의 수소이온농도가 pH7-8 사이를 나타내는 것으로 보아 수소이온농도 값도 일반적인 현상이지 특이한 결과 값은 아니다.

동굴내 지하수의 수온은 계절적으로 가장 온인 하계를 제외하고는 봄, 가을, 겨울 3계절에 상관없이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 한반도 7의 기후가 온대몬순지대에 속해있어 여름철에는 고온다습한 남태평양기단의 영향으로 강수량이 집중하여 가장 많고 온도가 가장 높기 때문이다. 동굴내부로 진입하면 입구를 제외하고 바깥기온의 영향을 크게 받지 않기에 수온이 일정하게 된다. 즉 동굴외부 대기의 기온이 동굴내 수온에 큰 영향을 못 미치기 때문이다.

계절에 따라 물론 하계에 비해서 동계의 동굴수온이 1-2도C다소 낮아진 것은, 도울 밖 대기의 찬 공기가 동굴내부로 유입되어 지하수온이 그만큼 낮아 졌기 때문이다. 겨울철은 우리나라가 한랭하고 건조한 시베리아 기단에의 영향을 받아 바깥 대기가 몹시 차가워지기 때문이다. 동굴 지하수는 봄에서 겨울철까지 평균 13-15도C내외를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 우리나라의 석회동굴에 일반적으로 나타나는 평균수온 12-15도C와 유사하다.

일반적으로 제주도에 소재한 용암동굴들은 석회암동굴에 비해서 1-2도C 높은데, 이것은 화산동굴이 동굴 입구가 넓고 2차생성물이 적고

수평구조가 많아서 기류를 차단하는 장애물이 적고, 석회동굴은 가지굴 형태의 미로가 많아 외부기류를 부분적으로 곳곳에서 차단시키기 때문이다. 동굴내 지하수는 전부 우수이기에 우수의 오염여부에 의해서 수질에 큰 영향을 받으나 수온은 일단 동굴내로 유입되면 외부대기와 차단되어 일정한 온도를 유지하게 된다. 동굴이 깊은 곳에 배태된 경우는 지하수가 장기간 암석의 절리 사이를 유동하여 약간 높다. 그러나 보통동굴은 심층 암반에 생성된 동굴이 아니기에 평균적인 수온을 유지하고 있다.

이산화탄소는 원천적으로 대기중에 떠있는 것이 우수와 함께 지하로 스며들거나, 우수가 땅속을 침투하는 과정에서 식물이 뿌리에서 공급되는데 박취의 배설물인 구아노나 동굴내부에 유기물의 퇴적이 많은 경우, 혹은 개방동굴인 경우 인간의 출입으로 인한 이산화탄소의 분압이 지역에 따라 다소 높게 나타날 수 있다. 관광동굴을 제외한 일반동굴은 비공개동굴이고 동굴내 2차생성물이 이미 개발된 관광석회암 동굴보다 화려하지 못해 외부인의 출입이 거의 없어 이산화탄소의 분압이 영향을 거의 받지 않는다. 다만 단체로 기초조사를 위하여 탐굴시 약간 분압이 높아질 수 있다. 동계보다 하계에 이산화탄소의 분압이 다소 높게 나타났는데, 이것은 여름철에 강우가 집중적으로 내려, 동굴내부로 유입되는 지하수의 양이 많아지기 때문이다.

봄철보다는 가을철에 나소 높게 나타났는데, 이것도 봄철보다 가을철에 비가 다소 많이 내렸기 때문이다. 이것은 대기중에 반영구적으로 떠있는 이산화탄소가 우수에 용해되어 빗물이 탄수로 되고, 이산화탄소가 토양층을 통과하면서 토양속의 유기물질 속에서 나오는 이산화탄소를 포함하여 동굴내부로 유입되었기 때문이다. 특히 심복굴 벽에 생긴 절리를 따라서 빗물이 침

투하면서 석회암에 용식작용을 가해서 동굴을 확장해 나감과 동시에 지하수는 하상의 낮고 좁은 통로를 따라서 동굴속 수로를 통해 더 낮은 곳으로 스며들어 결국에는 지표수로 다시 나타난다. 심복굴의 이산화탄소 분압은 동굴 안쪽으로 들어갈수록 다소 높게 나타났다.

이것은 동굴의 내부에서 대기순환이 거의 이루어지지 않으면 안쪽으로 갈수록 자정능력의 한계를 넘어서 이산화탄소의 축적이 계속적으로 늘어난다. 동굴내로 유입되는 지하수의 양이 풍부하지 않아 이산화탄소의 분압이 높지 않다.

경도란 물속의 칼슘, 마그네슘의 이온량을 이에 대응하는 탄산칼슘의 ppm으로 환원하여 나타낸 것이다. 동굴내 지하수의 칼슘과 마그네슘은 주로 암석에서 기인한다. 따라서 동굴의 암석 성분이 무엇이냐에 따라 경도가 크게 달라진다. 경도는 동굴내 적하수와 고인물 사이에도 크게 차이가 난다. 적하수고 보통 2배정도 높다. 우리나라의 주요 동굴인 고수굴을 150내외, 성류굴은 155내외를 나타내는데 비해서 심복굴은 110-120내외를 나타내고 있는 것으로 보아 경도가 다소 낮게 나타났다.

동굴의 경도는 4계절에 따라 약간씩 다소 차이는 있으나 평균 110-120ppm내외를 유지하고 있다. 다소 다른 석회암 동굴보다 낮게 나타났는데, 이것은 동굴을 배태한 석회암의 방해석 성분이 낮고, 유입 우수량이 적고, 절리의 발달이 빈약하고, 방해석 성분이 적고 주위에 돌리네와 우발레 발달이 없어 우수를 함유해주는 주위 환경이 좋지 않기 때문이다. 따라서 동굴내 지형지물의 발달이 빈약하게 나타났다. 심복굴의 경도는 동계보다 하계에 상대적으로 다소 높게 나타났는데, 이것은 이 지역 강우의 약 60-70%정도가 6, 7, 8월 여름철에 집중적으로 내려 이산화탄소를 함유한 지하수량의 용출이 동굴내에 일시적

으로 많아져 지하수위가 높아져 심복굴의 절리면을 따라 지하수가 유입되어 용식작용을 활발하게 진전시켰기 때문이다.

동굴 안쪽으로 갈수록 큰 차이는 없지만 경도가 높게 나타났는데, 이것은 심복굴내 지하수가 하계 집중 강우를 제외하고는 유출구가 없어 정지 상태를 유지하고 있는 곳이 있기 때문이다. 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.

참고문헌

- 김추윤 외 2인. 1994. 온달굴지대의 자연지리 환경. 한국동굴학회지. 37호. pp.38-67
- 김추윤. 1993. 온달굴의 생태환경에 관한 연구. 한국동굴학회지. 34호. pp.30-40
- 김추윤. 2005. 심복굴의 동굴 환경. 한국동굴학회지. 67호. pp.35-42
- 남궁준 외 2인. 1987. 한국의 동굴 동화기술 편집부. 2001. 공정시험방법(수질오염). 동화기술출판사
- 매헌 홍시환박사 회고록 간행위원회. 1997. 매헌 황시환박사 회고록
- 이금수. 1990. 동굴의 환경보전 대책에 관한 연구. 한국동굴학회지. 22호. pp.57-66
- 한국동굴협회. 1970. 한국의 동굴. 문공부 문화재관리국
- 한국의 동굴. 1987. 동굴생물. 아카데미서적. pp.264-281
- 홍시환 외 2인. 1991. 천동굴의 환경보전 및 안전진단조사보고서.
- 홍시환 외 3인. 1990. 천동굴의 동굴환경에 관한 연구.
- 홍시환. 1990. 한국동굴대관. 삼주출판사
- 홍현철 외 1인. 1990. 노동굴의 환경실태에 관한 연구. 한국동굴학회지. 24호 pp.73-106
- 환경부 국립환경연구원. 2003. 전국자연동굴 조사보고서
- 환경부, 국립환경연구원. 2004. 2002전국자연동굴조사보고서(안산안굴, 강릉1,2,3)
- 환경부, 국립환경연구원. 2004. 2003전국자연동굴조사보고서(환티기굴, 우로굴)
- 환경부. 2001. 천연동굴 실태 및 보호 방안
- 환경부. 2002. 전국 자연동굴 조사 지침서
- Bretz, J. H. 1942. Vadose and phreatic feature of limestone caverns, Jour. Geology 50호 pp.675-811
- Sweeting, A. C. 1950. Erosion cycled and limestone caverns, Geogr. J.(115).
- June C. Schmid. 1980. Karst Hydrology and Physical speleology, Springer-Verlag, New York Heidelberg
- J. N. Jennings. 1985. Karst Geomorphology, Basil Blackwell Ltd