

양당리굴내 수문환경

김 추 윤
신흥대학 지적과

1. 동굴내 수문환경

1) 수문환경의 이론적 배경

우리나라는 고생대의 조선계층에 석회암이 분포하는데 이 석회암지대는 탄산가스를 포함하는 우수에 용식되어 카르스트 지형이 널리 분포하고 있다.

석회암은 자연상태에서는 광범위하게 분포하는 퇴적암이므로 카르스트 지형도 광범위하게 분포할 것 같지만, 실제로는 매우 제한적인 분포를 보인다. 세계적으로 유명한 석회암 카르스트 지형 분포지는 프랑스의 코스지방을 비롯하여, 스페인의 안다루시아지방, 자메이카, 쿠바 서부, 중국의 화남지방, 버마 일부, 일본의 아키요시다이 등이다. 한국에서는 황해도의 서흥, 신막, 대평과 평안남도의 덕천, 성천, 강원도의 영월, 삼척, 대화, 충북의 단양, 경북의 울진 등지에 분포한다.

석회암이 분포하고 있는 지역은 토양층을 침투한 지하수가 유입될 때 석회암이 용식되면서 빈 공동이 생기고 이것이 시간이 지남에 따라서 동굴로 확대되는 것이다.

석회암에는 여러 종류가 있으나, 일반적으로 이를 정의 할 때는 주로 방해석의 형태로 존재하는 탄산염 광물이 최소한 50% 이상인 암석을 가리킨다. 카르스트 지형이 주목할 만한 정도로 발달하려면 탄산칼슘이 60% 이상, 충분히 발달하려면 90% 이상 포함되어야 한다. 영국의 남동 잉글랜드와 프랑스의 파리분지에 널리 분포하는 백악은 석회암의 일종으로 탄산칼슘의 함량이 95% 이상이나 된다. 방해석 이외는 일반적으로 석회암에는 아라고나이트(aragonite), 돌로마이트(dolomite), 탄산마그네슘 등의 가용성 광물과 불순물로서 석영·장석·점토광물·산화철·해녹석 등이 포함되어 있다. 불순물로서 가장 흔한 것은 석영과 점토광물이다.

양당리 및 북상리 동굴을 배태하고 있는 석회암 층은 그 지질연대로 보아 지금부터 4~5억년 전에 바다밑에서 퇴적되어 이루어진 석회암이 육지 위로 융기하여 이루어진 것이다.

원래 이 석회암이 퇴적시킨 옛날의 바다의 해수는 보통 0.12% 탄산칼슘을 용해시키고 있는 것으로 알려져 있다. 해중생물들은 이 해수중의 칼슘을 계속적으로 고체의 탄산칼슘으로 변화하게 하는 작용을 한다.

즉 산호층은 탄산칼슘으로 되는 벌집이나 아주 작은 섬의 형태로 바다의 밑바닥 위나 낮은 산호초 끝머리에 계속 퇴적하여 이른바 탄산칼슘의 퇴적층을 이루게 한다. 이것이 바로 오늘날 용기에 의해서 지표에 올라와 단양 일대의 석회암층으로 된 것이다.

대부분의 석회암은 해저에서 석회질 쇄설물·화학침전물·유기체 등 다수의 물질이 집적되어 이루어진 것이다. 어떤 석회암은 유기체들이 집단적으로 성장하여 제자리에 석회질 잔해를 집적해 놓음으로써 형성되는데, 유기체의 종류에 따라서 패각, 유공충, 산호석회석 등이 구별된다. 그리고 어떤 석회암은 물결이 잔잔한 해저에 거의 전적으로 미결질 석회연니만이 쌓여서 형성된다. 이 양극단간의 석회암들은 구조가 다양한데, 일반적으로 석회질 쇄설물이 쌓인 다음 쇄설물 사이의 공극에 탄산칼슘의 교결물이 침전되어 이뤄진 것이 대부분이다.

석회암의 종류는 다양하지만 보통 방해석의 형태로 존재하는 탄산염 광물이 50% 이상인 암석을 말한다.

방해석으로서의 석회암은 순수한 물에도 용해되지만 물에 용해된 탄산가스의 작용이 카르스트 지형을 형성하는데 보다 중요한 역할을 한다.

자연수에서는 탄산가스가 어느 정도 용해되어 있으나 그 양은 수면에 접한 공기의 탄산가스압에 따라 달라지며 수온과도 밀접한 관계를 갖는다.

즉 용액이 포화상태에 있을 때 용액속의 탄산가스 양은 공기의 탄산가스압에 비례하며 수온상승에 반비례한다.

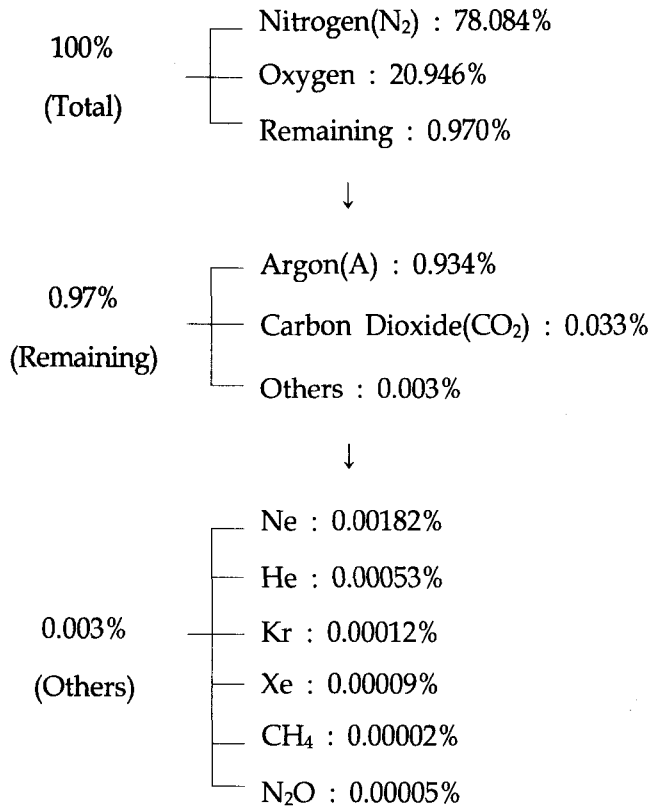
석회암 지역에서 탄산칼슘으로 포화된 지표수가 하계에 지하로 스며들면서 냉각될 경우 석회동굴의 공기에서 탄산가스를 더 흡수하여 석회암의 용식이 촉진될 수 있다.

또한 토양층을 통과하면서 더 많은 탄산가스를 흡수한 물이 지하로 스며들 경우 동굴내에서 자유대기와 접하게 됨으로써 탄산가스의 일부는 방출되고 따라서 용해되었던 방해석의 일부가 침전될 수 있다.

이때 이산화탄소를 함유한 물(탄산수)이 석회암을 만나게 되면 칼슘이온과 중탄산이온으로 분해되어 화학적 풍화를 일으켜 용식작용을 일으켜 단단한 석회암을 녹이게 되어 지하에 공동이 생기는 것이다. 따라서 석회암을 통해서 흘러나오는 지하수에는 경도가 높은 것이 일반적인 특징이다.

이산화탄소의 성분은 우선 일상생활에서 흔히 접하고 있는 물질이다.
 대기중의 CO₂는 분자비로 0.03%가 포함되어 있어서 매우 희소하지만 질소(78%), 산소(21%), 아르곤(0.9%) 다음으로 많은 성분이다.

[표 1] 대기구성 중 CO₂의 양



특히 이산화탄소의 대기중에 체류시간은 50~200년으로 반영구적으로 볼수 있기에 오랫동안 화학적 용식작용에 영향을 미치고 있다.

대기조성 가운데에 있는 O₂가 2~3개월, CFC₁₁DL 65년, CH₄가 5~10년, N₂O가 120년인 것에 비하면 보편적으로 이산화탄소의 체류시간이 더 긴 편이다. 특히 CO₂의 양이 산업혁명 이전에 270ppm이던 것이 최근에는 400ppm에 가깝게 나타나 석회암의 용식작용도 과거보다 더욱 더 빨리 진행되고 있음을 알 수 있다.

[표 2] 대기중의 CO₂의 체류시간과 농도

대기중의 기체종류	체류시간 (년)	산업 혁명 이전 농도	1985년의 농도	2050년의 농도
CO ₂	50~200	275	345 _{ppm}	400~600 ppm
CH ₄	5~10	0.7	1.7 _{ppm}	2.1~4.0 ppm
O ₃	0.1~0.3	0~25% 감소	10~100 _{ppb}	15~20% 증가
N ₂ O	120	285 _{ppb}	304 _{ppb}	350~450 ppb
CFC ₁₂	110	0 _{ppb}	0.38 _{ppb}	0.7~3.0 ppb
CFC ₁₁	65	0 _{ppb}	0.22 _{ppb}	2.4~4.8 ppb

<ppm=100만분의 1, ppb=10억분의 1>

지구규모의 환경문제, 중앙법규사, 1993.

CO₂양은 화학적 용식작용 뿐만 아니라 지구의 평균기온을 상승시켜 지구온실효과를 가져오기도 한다.

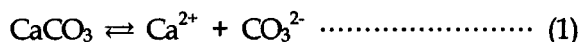
석회암 지역에는 기계적 풍화보다는 화학적 풍화가 보다 활발하게 진전되어 암석의 절리를 타고 CO₂를 함유한 우수가 침투하면서 각종 공동을 만들고 그 공동에 각종 스펬레오템을 형성시켜 경관이 다양한 석회동굴을 만든다.

따라서 석회암지역에서는 우수가 절리, 단층 등의 공극을 따라 반복해서 용식을 시켜서 점차 지표수는 적어지고 지하수가 증가한다. 따라서 지하에 침투된 지하수는 동굴속을 흐르면서 동굴내에서 활발하게 활동하여 종·횡적으로 퇴적 및 침식 미지형을 만든다.

그와 반대로 지표면은 하곡의 발달이 미약해지고 또 하곡이 있더라도 불규칙적인 분포 상태를 이룬다.

석회암은 용식작용에 약하며 석회동굴내의 지하수는 일반지하수와는 다르게 CaCO₃와 같은 탄산염 광물질 성분이 높다. 따라서 석회암지대의 지하수는 경수를 나타내는 것이 일반적이다.

방해석으로서의 석회암은 순수한 물에도 용해된다. 순수한 물에서 포화상태에 달했을 때의 탄산칼슘의 용해량은 수온의 상승과 더불어 약간 증가하여 16℃에서는 약 13mg/ℓ, 25℃에서는 약 15mg/ℓ로 나타난다. 순수한 물에 용해된 탄산칼슘은 다음과 같이 이온의 상태로 존재한다.



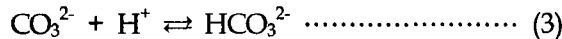
그러나 일반 자연수에는 이보다 훨씬 많은 양의 탄산칼슘이 용해되어 있는 것이 보통인데, 그것은 물에 용해된 탄산가스의 작용 때문이다. 물에 용해된 탄산가스의 일부는 물과 반응을 일으켜 탄산을 만드는데, 이것도 이온의 상태로 존재한다.

(용액 중의 탄산가스)



자연수에는 탄산가스가 어느 정도 용해되어 있다. 포화상태에 달했을 때 탄산가스의 양은 수면과 접한 공기의 탄산가스압의 상승과 더불어 증가하며, 수온의 상승과 더불어 감소하는 것이 특색이다. 수온이 0℃에서 35℃로 상승하면, 탄산가스의 포화량은 1/3~2/3로 떨어진다.

(1)에서 석회암이 용해되어 생긴 탄산염 이온은 즉시 (2)의 수소 이온과 반응을 일으켜 중탄산 이온이 된다.



그런데 이 마지막 반응은 (1)과 (2)의 포화평형상태를 깨는 결과를 가져온다. 그리하여 용액 중의 CO_3^{2-} 의 양이 일정하게 유지되기 위하여 석회암이 좀더 물에 용해되며, 용액중의 HCO_3^{2-} 의 양이 일정하게 유지되기 위하여 물에 용해된 탄산가스의 일부가 물과 반응을 일으키게 된다. 마지막(3)의 반응은 특히 공기의 탄산가스압과 물의 그것간에 이루어진 평형상태를 깨고, 공기 중의 탄산가스가 좀 더 물에 흡수되게 함으로써 석회암의 용해를 촉진한다. 석회암의 용해 과정은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

(용액 중의 탄산가스)



(공기 중의 탄산가스)

그리하여 용액이 포화상태에 달했을 때, 석회암의 용해량은 공기의 탄산가스압에 비례하며, 수온은 탄산가스의 용해량을 결정하기 때문에 수온에 반비례한다. 석회암

의 용해에 있어서 수온의 직접적인 효과는 최고 최저간에 3배수 범위로 나타나나, 탄산가스압의 효과는 최소한 100배수에 달한다.

1~2%는 보통이고, 극단적인 경우 공기유통이 불량한 열대토양에서는 20~25%에 달하는 수도 있다. 따라서 토양의 탄산가스는 석회암의 용식을 주도하는데, 그것은 식물 뿌리의 호흡작용과 박테리아에 의한 유기물의 부패에서 비롯한다.

탄산가스·물·탄산칼슘간에서 일어나는 일련의 연쇄적인 화학반응은 반대방향으로 환원될 수 있는 성질의 것으로서, 일부 카르스트 지형의 이해에 매우 중요하다. 석회암 지대에서 탄산칼슘으로 포화된 지표수가 여름철에 지하로 흘러 들어가면서 냉각되는 경우를 가정하면, 이 물은 석회동굴의 공기에서 탄산가스를 더 흡수할 수 있으며, 이 때문에 석회암의 용식이 촉진되는 한편 동굴이 확장될 수 있다. 그리고 토양층을 통과할 때 다량의 탄산가스를 흡수한 물이 동굴로 흘러 들어가는 경우에는 동굴내에서 자유대기와 접하게 됨으로써 탄산가스의 일부를 방출하며, 이로 인하여 용해되었던 방해석의 일부를 침전시키면서 소규모의 각종 방해석의 집적지형을 형성할 수 있는 것이다. 탄산칼슘의 침전을 수분의 증발과 관련지우기도 하나 동굴내에서는 상대습도가 일반적으로 매우 높기 때문에 증발은 최소한으로 억제한다.

우리나라의 카르스트 지형 분포지에는 조선계층의 석회암이 주로 분포하는데, 이 석회암의 표면은 장기간 동안 풍화작용에 의해서 이루어진 적색토양인 테라로사(Terrarossa)가 덮여 있다. 이 지역에 우수에 의해서 표토가 제거되고 석회암의 절리를 따라 지하수가 흘러 들어가면 지하에 빈 공동이 생기고, 이것이 교차점을 따라서 확대되어 가면 지하동굴이 생성되는 것이다. 이때 용식작용은 지하수량이 많고 이산화탄소가 많이 함유되고 수온이 높으면 더욱더 빠르게 진행된다.

이 1차적인 빈 공동에 다시 2차적으로 용식된 석회암이 퇴적되어 집적되면 2차 생성물인 스펠레옴이 생긴다.

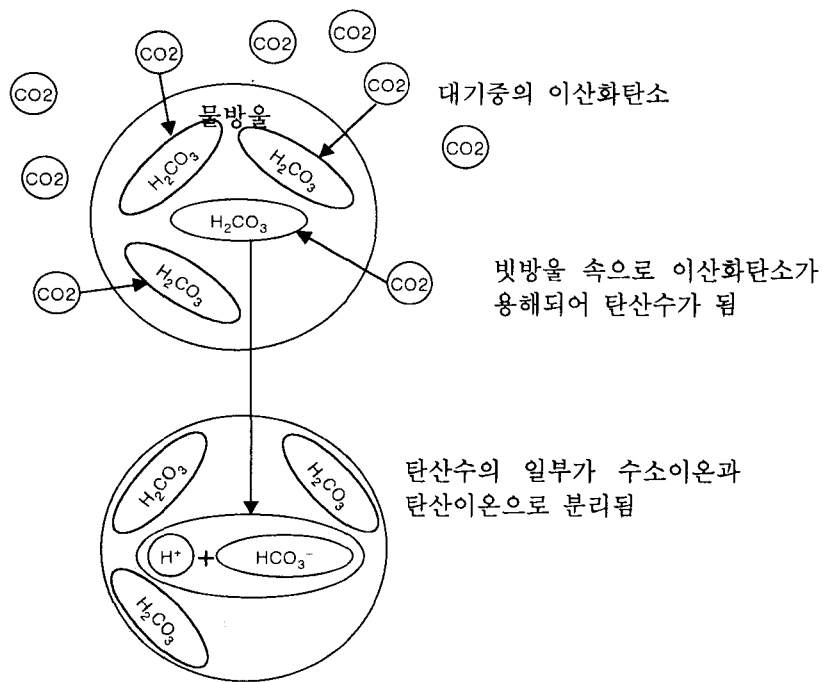
석회동굴은 지하수위면 밑에서 석회암이 탄산수에 의해서 제거된 다음, 계속해서 이산화탄소가 함유된 지하수의 유입으로 동굴내 하상이 깊이 침식되면 지하수위면이 낮아지는 동시에 빈공동이 지하수위면 위로 올라온다. 특히나 지하의 토양층에서 식물 등의 부식층을 통과한 지하수는 더 많은 탄산가스를 흡수하여 지하로 스며들어 동굴내에서 자유대기와 접하게 됨으로써 탄산가스의 일부는 방출되고 용식되었던 방해석의 일부가 침전된다. 즉 동굴류는 대기중에서 내린 우수가 석회암지대에 발달된 적색토인 잔류토양층이나 석회암의 열극을 통과하는 사이에 탄산염 물질을 용탈시켜 그의 경도는 증대된다.

[그림 1] 는 대기중의 CO₂와 빗물 즉 우수가 결합하여 탄산수의 생성을 보여준다.

간단히 표현되지만 실제적으로 CO₂의 용해도는 극히 낮다. 또 온도와 압력에 따라 가역반응이 되기도 한다. 대기중의 CO₂의 용해도는 1ℓ의 순수한 물에 0.0006g의 탄산수가 평형을 이룰 정도이지만 수 만년 또는 수 억년 등의 장구한 시간을 고려하면 암석의 화학적 풍화를 가져와 녹이기에 충분하다.

최근에 화학공업의 발달에 따라 대기중에 배출되는 유황가스가 산성우를 내리게 해서 논란이 되고 있다. 이때의 산성우는 황산을 미량 용해시킨 것으로서 탄산에 비해서 월등히 강한 것으로 동식물의 생존환경에 큰 영향을 미친다. 그러나 탄산수는 약황산이기에 적어도 동식물의 생존기간의 범위에서는 피해가 거의 없다.

탄산수가 H⁺이온과 HCO₃⁺이온으로 되는 비율은 HCl, KCl등과는 달리 매우 희소하며 분자비로는 탄산수의 1000분의 1정도이며 여기서 HCO₃⁻ ⇌ H⁺ + CO₃²⁻로 이온화되는 비율은 10만분의 1이다.



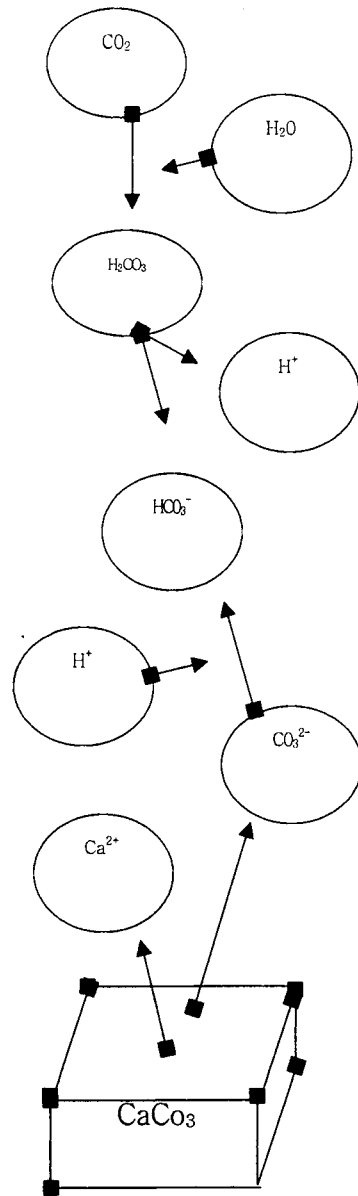
(그림 1) 탄산수가 만들어지는 모식도

이산화탄소가 물에 용해되어
탄산수 생성

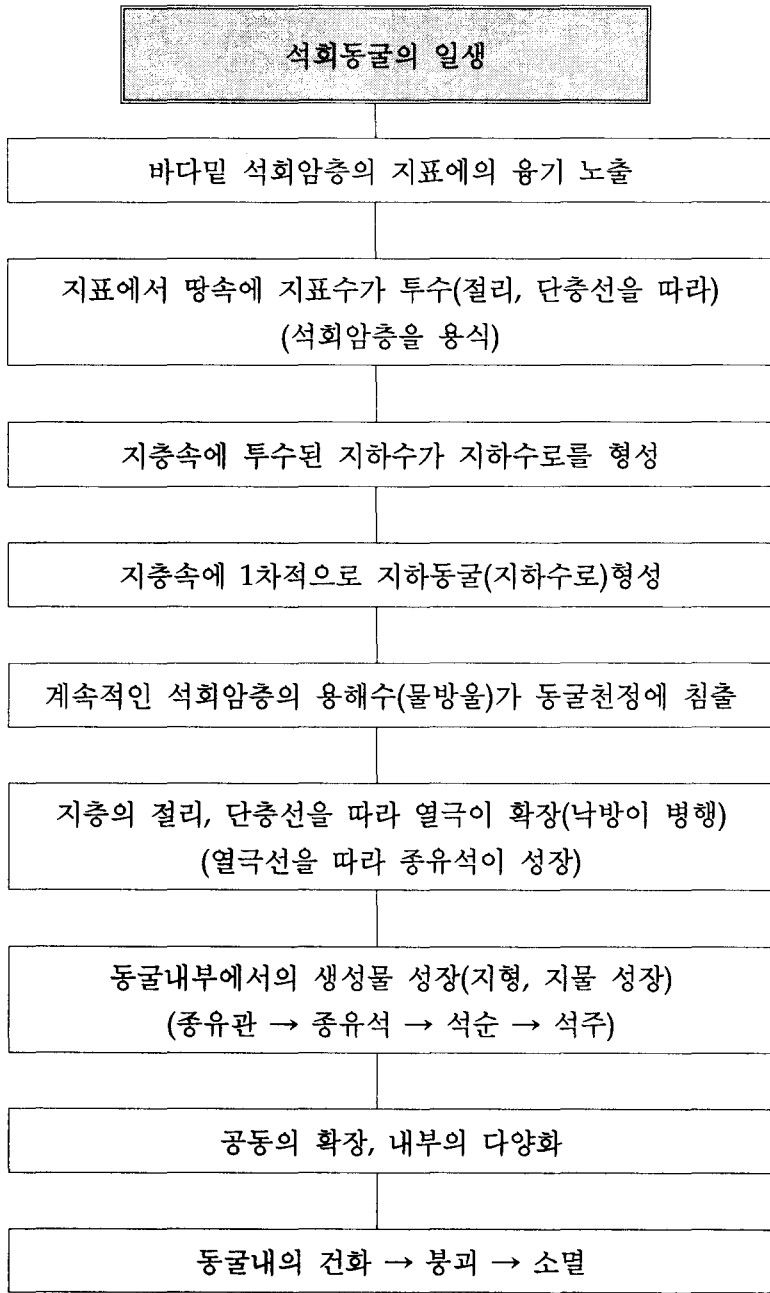
탄산수에서 수소이온과
중탄산이온의 생성

중탄산이온에서 수소이온과
탄산이온으로 생성

방해석 결정이 용액에서 칼슘과
탄산이온으로 됨



[그림 2] 방해석이 탄산수에 용해되는 모식도



[그림 3] 석회동굴의 일생

이산화탄소는 대기중에서 보다 토양내에서 더욱 풍부해진다. 동식물의 호흡이나 유기물의 부식에서 발생하는 양이 많기 때문에 토양밑으로 침투되는 물에는 탄산수의 공급량이 더욱 더 많아져 석회암의 풍화는 더욱 활발하게 진행될 수 있다. 장식 또는 다른 규산염 물질들이 탄산수 광물이다.

양당 및 북상리동굴은 석회암지대에 지하수가 흘러 들어가 만든 굴이다. 석회암의 틈 즉, 절리를 따라 흘러 들어간 지하수가 화학적 풍화 즉 용식작용을 일으키면서 많은 세월이 걸쳐서 큰 공동을 만들었기 때문이다. 이 공동에 석회석을 용해한 물이 통풍이나 기타 다른 원인에 의해서 수분이 증발하면 다시 침전되어 종유석이나 석순 등을 만든다.

방해석이 탄산수와 반응해서 화학적 풍화를 일으켜 용식되는 과정은 [그림 2]과 같다.

이 분해 진행의 모식도를 보면 중탄산이온은 수소이온과 탄산이온으로 분리되어 방해석내의 CO₂ 성분은 가스로 소멸되기도 한다.

또한 칼슘이온과 중탄산 이온이 중탄산칼슘(Ca(HCO₃)₂)용액으로 되어 제거 되기도 하는데 이 용액은 다시 위 반응식의 가역반응을 일으켜 방해석 성분으로 재침전 될 수도 있다. 이와 같이 재침전된 것이 종유석이나 석순을 만든다.

따라서 양당리동굴의 주변에 지속적으로 나무를 많이 심어서 식생상태를 양호하게 유지시켜 주어야 지하수의 함양조건이 좋아 땅속에 물이 오랫동안 저장되었다가 서서히 동굴내부로 흘러서 동굴내부의 스펀레옴의 생성조건을 양호하게 만들어 준다. 동굴내부에 지하수가 흐르지 않으면 건화현상에 의해서 2차생성물이 부식부식하게 되어 힘없이 가루처럼 부서진다. 그러므로 석회동굴에서 지하수가 지속적으로 유입되도록 주위 환경을 만들어 주는 것을 아주 중요한 일이다.

2) 수문환경의 분석결과

지하수의 원천에 관해서는 17세기까지 많은 학자들 사이에서 논쟁의 대상이 되어 왔다. 즉 지하수의 근원이 빗물이라는 설과 해수라는 설이 논쟁의 초점이었다. 그러다가 지하수속에서 대기의 고공에서만 만들어지는 삼중수소가 포함되어 있는 것이 과학적으로 증명된 후 지하수가 곧 빗물의 토양침투에 의해서 이루어진다는 것이 증명되었다.

그러므로 동굴수는 전부 대기중에서 내린 우수가 토양표면을 침투한후 암석의 절리를 따라서 동굴내부까지 유입된 것이다. 그러기에 동굴수의 오염여부는 지표수의 오염여부와 밀접한 관계를 가지게 되고 역설적으로 동굴수 오염은 또 한편 지표수를

오염시킬 수 있기에 중요한 것이다. 물론 빗물이 토양층을 흐르면서 자연정화 과정을 거치기는 하지만 거기에는 자정작용의 한계성이 있는 것이다. 동굴 지하수의 유출입이 많으면 상대적으로 암석의 공극율과 투수도가 높아져 그 동굴은 많은 용식작용이 일어나 살아있는 동굴이 되는 것이다.

지하수는 석회암 동굴의 주요 구성물질인 방해석을 용식시키고, 이것을 운반, 침전시켜서 동굴내에 전혀 새로운 침전물을 만들어 내기도 한다. 이러한 동굴내 침전물은 경관상, 학술상 화려하거나 가치있는 것이 많아 관광상, 학문연구상 귀중한 천연자원으로 여겨진다.

토양층을 통과한 물은 대량의 이산화탄소를 포함하여 방해석을 용식 시킬수 있는 수소이온농도가 낮은 산성수를 생산하고, 이것이 암석의 절리를 점점 더 넓힌다. 이런 동굴과정이 더욱더 진전되면 동굴내부에 다양한 지물 지형 경관을 형성한다. 특히나 과거에 동굴내부에 완전히 지하수가 가득찰 때 장기간에 걸쳐서 동굴천장, 벽면의 조건이 만들어지고 그후 지하수가 유출되고 동굴 하상에만 흐르게 되어서 현재의 동굴내부 경관이 유지되는 곳이 많다.

동굴수는 보통 지하계를 흐르기 때문에 깨끗한 물로 인식되어 왔다. 따라서 옛부터 우리 선조들은 동굴수를 이용하여 버섯재배수, 식수, 양어장 용수 등으로 사용하였다. 그러나 최근에 산중에 공장이 입지하고, 별장, 러브호텔 등이 들어서면서부터 지표수가 오염되고, 이것이 2차적으로 지하수를 오염시켜 외국에서는 큰 사회적인 문제로 진전되기도 하였다.

미개발된 동굴수는 아직까지도 처녀수 상태를 유지하여 환경오염이 안되었지만, 관광동굴로 개발된 동굴수는 인간들의 유출입이 시작되면서 일부 오염현상이 나타나고 있는 것이 사실이다.

양당리굴에 대한 경도, 대장균수, 망간, 황산이온, 페놀 등 44개 항목에 대한 분석결과 놀랍게도 43 항목에 대해서는 기준치 이하로 나와서 아주 깨끗한 물로 판명되었고 물 1ml에 포함된 세균수를 나타내는 일반 세균도 기준치보다 낮게 나타났다. 일부 나타난 세균은 박쥐 등 동물들이 동굴내외를 오가면서 배설물을 남겨서 부패되어 생긴 것으로 추측된다. 탁도가 양당리굴은 기준치 이하인데 비해서 북상리굴은 기준치를 넘게 나왔는데, 이것은 바로 윗부분에서 이루어지는 토목공사와 호소 깊숙히 있는 샘플을 채취할 때 벽면의 점토가 유입되어 영향을 받은 것으로 추정되는데, 토목공사에 의한 영향은 일시적 현상으로 공사가 끝나면 자연적으로 기준치 이하로 떨어져서 문제가 되지 않을 것이다.

두 동굴 모두 대장균도 검출된 것으로 보아 인간 또는 박쥐 등 동물의 장관으로부터

터 배출되는 물질이 유입된 것으로 사료된다.

이제 양당리 동굴의 중요항목별로 수질분석결과를 4계절로 나누어 분석해 보면 [표 3,4,5,6]와 같다.

수소이온농도는 공장폐수나 가정하수 등의 유입으로 변화하기 쉬운데 수질오염의 변화를 간접적으로 예측할 수 있다. 수소이온농도 7은 중성이고, 해수는 8.2, 빗물의 경우 대기중 보통 5.6을 띠게 된다.

수소이온농도는 대략 두 동굴 모두 8정도로 나왔는데, 이것은 약알카리성에 속하는 것으로, 상수도 원수 기준 8.5미만이며 1급수에 해당되는 것이다. 즉 양당리동굴수는 약알카리수이지만 중성수인 pH 7에 가까운값임을 알 수 있다. 북상리 동굴은 약간 높아 pH 8정도를 나타내고 있다.

양당리동굴수의 경도는 약 140내외로 북상리 동굴은 약 80~100내외로 나타났다. 이것은 북상리 동굴은 약한 센물 그리고 양당리 동굴은 센물에 해당되는 것으로 석회암 동굴수로는 그리 높은 편이 아니다. 보통 단물은 경도가 0~75, 약한 센물은 75~150, 센물은 150~300, 대단히 센물은 300이상이다.

동굴내 지하수의 경도는 주로 토양층과 암석층을 통과한 물에서 얻어지게 되는데 빗물자체로는 그 많은 양의 고형물을 용해시킬 만한 능력이 없다.

경도를 유발하는 용해능력은 흙속의 박테리아 작용으로 발생한 CO₂가 용해되고 탄산과 평형형태를 이루게 된다. 여기서 생긴 산성계통의 pH의 토양수가 염기성 물질인 석회암을 용해시킨다. 북상리, 양당리는 표토층이 얇고 석회암층이 드물어서 경도가 낮게 나타났다.

경도가 높은 물은 비누거품이 일어나지 않고, 목욕해도 뽀뽀하며, 난방 설비에 스케링(Scaling), 즉 물때를 일으킨다. 경도가 높으면 구토, 위장장애, 담석 등의 원인이 될 수 있다. 철은 양당리동굴의 경우 검출이 안되었으나 북상리 동굴에서는 약간 검출되었다. 철은 토양 암석 속에 널리 들어 있는 것으로 지하수에 다량 들어 있으면 금속맛이 난다. 양당리 동굴의 경우 지표상에 적색토인 테라로사(Terrarossa)토양이 적어 함량이 검출안되었다.

[표 3] 봄 수질검사 현황(양당리굴)

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	38	디클로로메탄	0.02mg/ℓ 이하	불검출
대장균군	불검출/50ml	검출	벤젠	0.01mg/ℓ 이하	불검출
납	0.05mg/ℓ 이하	불검출	톨루엔	0.7mg/ℓ 이하	불검출
불소	1.5mg/ℓ 이하	불검출	에틸벤젠	0.3mg/ℓ 이하	불검출
비소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	크실렌	0.05mg/ℓ 이하	불검출
세레늄	0.01mg/ℓ 이하	불검출	I, I -디클로에칠렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	140
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨소비량	10mg/ℓ 이하	4.8
6가 크롬	0.05mg/ℓ 이하	불검출	냄새	무취	적합
암모니아성 질소	0.5mg/ℓ 이하	4.14	맛	무미	적합
질산성 질소	10mg/ℓ 이하	불검출	동	1mg/ℓ 이하	불검출
카드뮴	0.01mg/ℓ 이하	0.003	색도	5도이하	1
페놀	0.005mg/ℓ 이하	불검출	세제	0.5mg/ℓ 이하	불검출
다이아지논	0.02mg/ℓ 이하	불검출	수소이온농도	5.8~8.5	8.1
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.014
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	3
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	중발잔류물	500mg/ℓ 이하	262
카비틸	0.07mg/ℓ 이하	불검출	철	0.3mg/ℓ 이하	불검출
I, I, I -트리클로로에탄	0.1mg/ℓ 이하	불검출	망간	0.3mg/ℓ 이하	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/ℓ 이하	불검출	탁도	1NTU	0.82
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	5
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

(표 4) 여름 수질검사 현황(양당리굴)

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	48	디클로로메탄	0.02mg/ℓ 이하	불검출
대장균군	불검출/50ml	검출	벤젠	0.01mg/ℓ 이하	불검출
납	0.05mg/ℓ 이하	불검출	톨루엔	0.7mg/ℓ 이하	불검출
불소	1.5mg/ℓ 이하	불검출	에틸벤젠	0.3mg/ℓ 이하	불검출
비소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	크실렌	0.05mg/ℓ 이하	불검출
세레늄	0.01mg/ℓ 이하	불검출	I, I -디클로에칠렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	140
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨소비량	10mg/ℓ 이하	1.2
6가 크롬	0.05mg/ℓ 이하	불검출	냄새	무취	적합
암모니아성 질소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	맛	무미	적합
질산성 질소	10mg/ℓ 이하	1.2	동	1mg/ℓ 이하	불검출
카드뮴	0.01mg/ℓ 이하	불검출	색도	5도이하	1
폐놀	0.005mg/ℓ 이하	불검출	세계	0.5mg/ℓ 이하	불검출
다이아저는	0.02mg/ℓ 이하	불검출	수소이온농도	5.8~8.5	7.8
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.016
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	1
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	중발잔류물	500mg/ℓ 이하	260
카비틸	0.07mg/ℓ 이하	불검출	철	0.3mg/ℓ 이하	0.05
I, I, I -트리클로로에탄	0.1mg/ℓ 이하	불검출	망간	0.3mg/ℓ 이하	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/ℓ 이하	불검출	탁도	1NTU	1.50
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	5
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	0.03

(표 5) 가을 수질검사 현황(양당리굴)

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	42	디클로로메탄	0.02mg/ℓ 이하	불검출
대장균군	불검출/50ml	검출	벤젠	0.01mg/ℓ 이하	불검출
납	0.05mg/ℓ 이하	불검출	톨루엔	0.7mg/ℓ 이하	불검출
불소	1.5mg/ℓ 이하	불검출	에틸벤젠	0.3mg/ℓ 이하	불검출
비소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	크실렌	0.05mg/ℓ 이하	불검출
세래늄	0.01mg/ℓ 이하	불검출	I, I -디클로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	142
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨소비량	10mg/ℓ 이하	0.8
6가 크롬	0.05mg/ℓ 이하	불검출	냄새	무취	적합
암모니아성 질소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	맛	무미	적합
질산성 질소	10mg/ℓ 이하	1.1	동	1mg/ℓ 이하	불검출
카드뮴	0.01mg/ℓ 이하	불검출	색도	5도이하	1
폐놀	0.005mg/ℓ 이하	불검출	세제	0.5mg/ℓ 이하	불검출
다이아지논	0.02mg/ℓ 이하	불검출	수소이온농도	5.8~8.5	8.0
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.013
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	1
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	중발잔류물	500mg/ℓ 이하	265
카비틸	0.07mg/ℓ 이하	불검출	철	0.3mg/ℓ 이하	불검출
I, I, I -트리클로로에탄	0.1mg/ℓ 이하	불검출	망간	0.3mg/ℓ 이하	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/ℓ 이하	불검출	탁도	1NTU	0.09
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	5
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

(표 6) 겨울 수질검사 현황(양당리굴)

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	45	디클로로메탄	0.02mg/ℓ 이하	불검출
대장균군	불검출/50ml	불검출	벤젠	0.01mg/ℓ 이하	불검출
납	0.05mg/ℓ 이하	불검출	톨루엔	0.7mg/ℓ 이하	불검출
불소	1.5mg/ℓ 이하	불검출	에틸벤젠	0.3mg/ℓ 이하	불검출
비소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	크실렌	0.05mg/ℓ 이하	불검출
세레늄	0.01mg/ℓ 이하	불검출	I. I -디클로에칠렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	147
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨소비량	10mg/ℓ 이하	0.9
6가 크롬	0.05mg/ℓ 이하	불검출	냄새	무취	적합
암모니아성 질소	0.5mg/ℓ 이하	불검출	맛	무미	적합
질산성 질소	10mg/ℓ 이하	13	동	1mg/ℓ 이하	불검출
카드뮴	0.01mg/ℓ 이하	불검출	색도	5도이하	1
패놀	0.005mg/ℓ 이하	불검출	세계	0.5mg/ℓ 이하	불검출
다이아지논	0.02mg/ℓ 이하	불검출	수소이온농도	5.8~8.5	8
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.017
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	2
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	증발잔류물	500mg/ℓ 이하	263
카비릴	0.07mg/ℓ 이하	불검출	철	0.3mg/ℓ 이하	불검출
I, I, I -트리클로로에탄	0.1mg/ℓ 이하	불검출	망간	0.3mg/ℓ 이하	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/ℓ 이하	불검출	탁도	1NTU	0.8
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	5
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

철은 인체에 필요한 미량원소로 1일 100mg이 필요하다. 철은 인체내에서 혈액의 중요성분이 되며, 생리 작용을 통해서 혈액을 몸의 구석구석까지 운반하여 산소를 공급한다. 또한 세포가 질식하지 않도록 건강하게 활동하도록 한다. 질산성 두 동굴 모두 질소가 2미만으로 기준치 이하로 나타난 것으로 보아 동굴주위에 대규모 산업 폐수나 생활오수의 유입원은 없는 것으로 사료된다. 두 동굴 모두 동의 함량이 없는 것으로 보아 인근 주위에 금속광산이나 공장폐수의 유입이 없는 것으로 나타났다. 두 동굴 모두 알루미늄은 계절에 따라 기준치 이하로 검출되었다. 정상인의 인체에는 12~20mg의 망간이 함유되어 있다. 할로젠 원소로서 독소에 속하는 불소, 비소 등은 전혀 검출이 안되었다. 특히 지하수에 악취를 가져다 주는 페놀도 검출이 안되었다.

용해된 원소중 수질의 물맛을 좋게 하는 성분은 칼슘, 칼륨, 규산 등이고, 물맛을 나쁘게 하는 요소는 마그네슘, 황사이온, 염소 등을 들 수 있다.

염소 이온은 보통 암석 성분의 영향을 받는데, 물 중에 녹아있는 염화물 중의 염소를 말하는데, 기준치인 250mg/l 보다 훨씬 적은 3~5 내외로 나타났다.

과망간산칼륨 소비량은 물속의 유기물질, 제일철염, 아질산염, 유화물 등과 같이 산화되기 쉬운 물질에 의해서 소비되는 $KMnO_4$ 의 양을 뜻하는 것으로 주위 지역에 하수, 공장폐수, 분뇨 등의 유입처가 있으면 높아진다. 양당굴은 1내외로 나타나 기준치에 비해서 극히 적게 나타났다.

수은은 인체에 축적되는 것으로 사람에게 위험한 독성을 가지고 있어 환경 공해병을 일으키는 원인이 된다. 최대 섭취허용량을 넘어서 섭취하면 기형아출산, 손발이 마비되고, 눈의 시력이 떨어진다. 수은의 검출이 전혀 안되었다.

시안은 독소로 점화하면 보라빛의 불꽃을 내며 타서 탄산가스와 질소로 유리된다. 양당굴에서는 시안이 전혀 검출되지 않았다.

불소는 독소로 미량의 경우 충치예방에 효과가 있다고 알려져 있으나, 이것 역시 과도한 경우 뼈에 이상을 초래한다. 양당굴에서는 불소는 검출되지 않았다.

크롬의 경우 일부국가에서는 총크롬으로 또는 3가 크롬과 6가크롬을 분리하여 기준을 정하고 있으나, 실제로 3가 크롬은 거의 흡수가 되지 않기 때문에 독성이 문제가 되지 않고 6가 크롬만 문제가 된다. 양당굴에서는 6가 크롬도 전혀 검출이 안되었다.

비소는 주로 하수도, 공장폐수에 의해서 유입되며 자연수에는 거의 포함되어 있지 않다. 양당굴에서는 전혀 검출이 안된 것으로 나타났다.

세제는 ABS제를 말한 것으로 두 동굴내에서 모두 검출되지 않았다. 물의 냄새는

오수의 혼입, 플랑크톤의 번식, 염소처리, 지질 등에 기인하는 것으로 대개 저온에서는 없지만, 온도가 높아지면 보통 냄새가 난다. 두 동굴 모두 적당한 것으로 나타났다. 물의 맛도 역시 하수, 공장폐수, 암석종류 등에 따라 다르게 나타난다. 양당굴에서는 물의 맛도 적당한 것으로 나타났다.

탁도란 물의 탁한 정도를 나타내는 것으로, 부유물질의 혼합, 토사유입이 없으면 탁도는 낮게 나온다. 양당리동굴의 경우 계절에 따라 기준치인 1NTU를 넘는 경우도 나타났는데, 이것은 물 자체의 원인보다 외부인사의 출입에 의해서 일시적으로 기준치보다 약간 상회한 것으로 나타났다.

색도란 주로 토양이나 암석의 성분에 따라 오는 Humin질이 원인이 되는데 공장폐수, 하수 등이 유입되면 색도가 높아진다. 양당리 동굴의 경우 1도로 기준치 이하로 낮게 나타났다.

증발잔류물이란 물을 증발 건조 시켰을 때 남는 물질을 뜻하며, 용해성 물질의 양을 파악하는데 의미가 있다. 양당리동굴의 경우 260으로 나타나 기준치 이하로 나왔다.

양당리 동굴수에 대한 수질분석 결과를 요약하면 거의 대부분이 기준치 이하로 나타났다으나 대장균수가 약간 검출되었다. 이러한 원인은 동굴내 박쥐의 배설물이 동굴수에 많이 침적되어 나타난 것으로 판단된다.

1. 양당굴에서는 경도는 약 80~140으로 나타나 동굴수치고는 경도가 강한 것이 아니고 중간정도로 나타났는데 이것은 동굴을 잉태하고 있는 산의 표토층이 얇아 석회암의 주성분인 방해석의 함유가 높지 않은 것으로 판단된다.