

온달 동굴수에 관한 연구

김 추 윤*

I. 서 론

석회암 지역에는 기계적 풍화보다는 화학적 풍화가 보다 활발하게 진전되어 암석의 절리를 타고 CO₂를 함유한 우수가 침투하면서 각종 공동을 만들고 그 공동에 각종 스펬레오템을 형성시켜 보기 좋은 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 중·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.

본 연구에서는 2000년 3월 18일, 19일 2차에 걸쳐서 온달동굴내의 상류, 중류, 하류 4곳에서 각각 4ℓ씩 채수하여 경도, 탁도, 납, 불소 등 44가지 항목을 실내에서 분석하였다. 현지조사에는 수온, 기온, PH 값 등을 구간별로 측정하였다.

온달동굴은 충북 단양군 영춘면 하리 온달산성 및 남한강변에 위치한 석회동굴로 그 수리적 위치는 북 37° 03' 동경 128° 29' 이다.

* 이학박사, 신흥대학 교수

II. 동굴 지하수의 생성과정

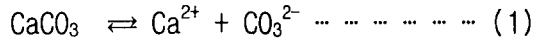
석회암은 자연상태에서는 광범위하게 분포하는 퇴적암이므로 카르스트 지형도 광범위하게 분포할 것 같지만, 실제로는 매우 제한적인 분포를 보인다. 세계적으로 유명한 석회암 카르스트 지형 분포지는 프랑스의 코스지방을 비롯하여, 스페인의 안다루시아지방, 자메이카, 쿠바 서부, 중국의 화남지방, 버마 일부, 일본의 아키요시다이 등이다. 한국에서는 황해도의 서흥, 신막, 대평과 평안남도의 덕천, 성천, 강원도의 영월, 삼척, 대화, 충북의 단양, 경북의 울진 등지에 분포한다.

석회암(limestone)에는 여러 종류가 있으나, 일반적으로 이를 정의 할 때는 주로 방해석(CaCO_3)의 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 애라거나이트(aragonite), 돌로마이트(dolomite), 탄산마그네슘 등의 가용성 광물과 불순물로서 석영·장석·점토광물·산화철·해녹석 등이 포함되어 있다. 불순물로서 가장 흔한 것은 석영과 점토광물이다.

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.

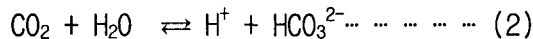
방해석으로서의 석회암은 순수한 물에도 용해된다. 순수한 물에서 포화상태에 달했을 때의 탄산칼슘의 용해량은 수온의 상승과 더불어 약간 증가하여 1

6℃에서는 약 13mg/l , 25℃에서는 약 15mg/l 로 나타난다. 순수한 물에 용해된 탄산칼슘은 다음과 같이 이온의 상태로 존재한다.



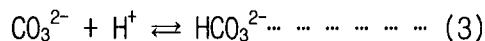
그러나 일반 자연수에는 이보다 훨씬 많은 양의 탄산칼슘이 용해되어 있는 것이 보통인데, 그것은 물에 용해된 탄산가스의 작용 때문이다. 물에 용해된 탄산가스의 일부는 물과 반응을 일으켜 탄산을 만드는데, 이것도 이온의 상태로 존재한다.

(용액 중의 탄산가스)



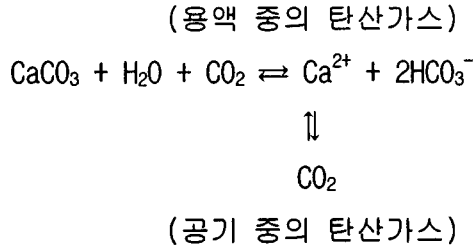
자연수에는 탄산가스가 어느 정도 용해되어 있다. 포화상태에 달했을 때 탄산가스의 양은 수면과 접한 공기의 탄산가스압의 상승과 더불어 증가하며, 수온의 상승과 더불어 감소하는 것이 특색이다. 수온이 0℃에서 35℃로 상승하면, 탄산가스의 포화량은 1/3~2/3로 떨어진다.

(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 좀 더 물에 용해되며, 용액 중의 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. 석

회암의 용해 과정은 다음과 같이 단순화할 수 있다.



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

데, 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 스펬레옴이 생긴다.

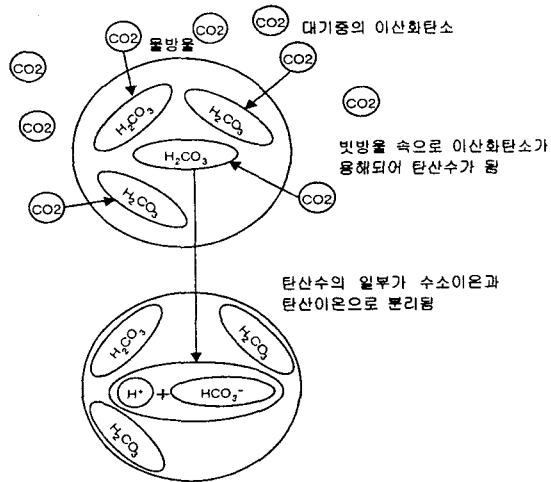
석회동굴은 지하수위면 밑에서 석회암이 탄산수에 의해서 제거된 다음, 계속해서 이산화탄소가 함유된 지하수의 유입으로 동굴내 하상이 깊이 침식되면 지하수위면이 낮아지는 동시에 빈 공동이 지하수위면 위로 올라온다. 특히나 지하의 토층에서 식물 등의 부식층을 통과한 지하수는 더 많은 탄산가스를 흡수하여 지하로 스며들어 동굴내에서 자유대기와 접하게 됨으로써 탄산가스의 일부는 방출되고 용식되었던 방해석의 일부가 침전된다. 즉 동굴류는 대기중에서 내린 우수가 석회암지대에 발달된 적색토인 잔류토양층이나 석회암의 열극을 통과하는 사이에 탄산염 물질을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

[그림 1]은 대기중의 CO₂와 빗물 즉 우수가 결합하여 탄산수의 생성을 보여 준다. 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.

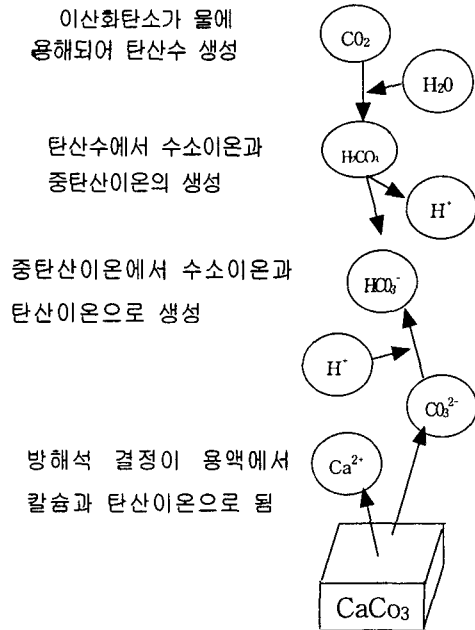
최근에 화학공업의 발달에 따라 대기중에 배출되는 유황가스가 산성우를 내리게 해서 논란이 되고 있다. 이때의 산성우는 황산을 미량 용해시킨 것으로서 탄산에 비해서 월등히 강한 것으로 동식물의 생존환경에 큰 영향을 미친다. 그러나 탄산수는 약황산이기에 적어도 동식물의 생존기간의 범위에서는 피해가 거의 없다.

탄산수가 H⁺이온과 HCO₃⁻이온으로 되는 비율은 HCl, KCl 등과는 달리 매우 희소하며 분자비로는 탄산수의 1000분의 1정도이며 여기서 $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

로 이온화되는 비율은 10만분의 1이다.



[그림 1] 탄산수가 만들어지는 모식도



[그림 2] 방해석이 탄산수에 용해되는 모식도

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. 장석 또는 다른 규산염 물질들이 탄산수에 의해 분해되기도 하지만 특히 강하게 영향을 받는 것은 석회암석의 주성분인 방해석(CaCO_3)과 고회석($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)과 같은 탄산염 광물이다.

온달동굴은 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 중유석이나 석순 등을 만든다.

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

이 분해 진행의 모식도를 보면 중탄산이온은 수소이온과 탄산이온으로 분리되어 방해석내의 CO_2 성분은 가스로 소멸되기도 한다.

또한 칼슘이온과 중탄산 이온이 중탄산칼슘($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)용액으로 되어 제거되기도 하는데 이 용액은 다시 위 반응식의 가역반응을 일으켜 방해석 성분으로 재침전 될 수도 있다. 이와 같이 재침전된 것이 중유석이나 석순을 만든다.

따라서 온달동굴의 주변에 지속적으로 나무를 많이 심어서 식생상태를 양호하게 유지시켜 주어야 지하수의 함양조건이 좋아 땅속에 물이 오랫동안 저장되었다가 서서히 동굴내부로 흘러서 동굴내부의 스펬레옴의 생성조건을 양호하게 만들어 준다. 동굴내부에 지하수가 흐르지 않으면 석회암의 용식작용이 정지되어 죽은 동굴이 된다. 따라서 물이 흐르지 않으면 건화현상에 의해서 2차생성물이 부석부석하게 되어 힘없이 가루처럼 부서진다. 그러므로 석회동굴에서 지하수가 지속적으로 유입되도록 주위 환경을 만들어 주는 것은 아주 중요한 일이다.

Ⅲ. 동굴 지하수의 분석결과

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.

미개방된 동굴수는 아직까지도 처녀수 상태를 유지하여 환경오염이 안되었지만, 관광동굴 및 지구과학 학습장, 버섯재배지로 개방된 동굴수는 인간들의 유출입이 시작되면서 일부 오염현상이 나타나고 있는 것이 사실이다.

온달동굴에 대한 일반세균, 수소이온농도, 탁도, 황산이온, 폐놀 등 식수기준 44개 항목에 대한 분석결과 놀랍게도 43개 항목에 대해서는 기준치 이하로 나와서 아주 깨끗한 물로 판명되었으나 물 1ml에 포함된 세균수를 나타내는 일반 세균이 기준치보다 약26배나 높게 나타나 식수로 부적격하게 나타났다.

이것은 아마도 관광객들의 동굴내 출입시 운동화, 구두 등에 묻혀 들어간 세균들이 상판에 붙어 있다가, 동굴내를 흐르는 지하수로 유입된 것으로 추정된다. 따라서 앞으로는 동굴입구에 발판 등을 깔아서 동굴내부로 들어가기 전에 운동화나 구두 바닥을 닦고 들어가 미생물이나 불순물의 반입을 방지하는 대책을 세워야 할 것이다.

이제 중요항목별로 수질분석결과를 고찰해 보면 아래와 같다(표 1)(표 2)(표 3)(표 4).

수소이온농도는 대략 8정도로 나왔는데, 이것은 중성에 속하는 것으로, 상수도 원수 기준에 의하면 1급수에 해당되는 것이다. 즉 온달동굴수는 산성수도 아니고 알칼리수도 아닌 중성수임을 알 수 있다.

온달동굴수의 경도는 약 150정도로 나타났다. 이것은 약한 센물과 센물의 중간에 해당되는 것으로 석회암 동굴수로서는 그리 높은 편이 아니다. 보통 단물은 경도가 0~75, 약한 센물은 75~150, 센물은 150~300, 대단히 센물은 300이상이다.

[표 1] I지구 수질검사 현황

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	2800	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-디클로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	152
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨 소비량	10mg/ℓ 이하	0.7
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	2.7	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
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.0002
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	17
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	중발잔류물	500mg/ℓ 이하	274
카바릴	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	0.3
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	13
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

[표 2] II지구 수질검사 현황

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	2500	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-디클로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	152
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨 소비량	10mg/ℓ 이하	0.5
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	2.5	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	7.8
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.0001
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	영소이온	250mg/ℓ 이하	16
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	증발잔류물	500mg/ℓ 이하	272
카바릴	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	0.3
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	12
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

[표 3] Ⅲ지구 수질검사 현황

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	2450	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
볼소	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-디클로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	148
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨 소비량	10mg/ℓ 이하	0.5
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	2.7	동	1mg/ℓ 이하	불검출
카드뮴	0.01mg/ℓ 이하	불검출	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
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.0002
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	17
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	증발잔류물	500mg/ℓ 이하	271
카바릴	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	0.3
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	11
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

[표 4] IV지구 수질검사 현황

수질항목	기 준	검사결과	수질항목	기 준	검사결과
일반세균	100CFU/ml	2600	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
볼소	1.5mg/ℓ 이하	불검출	에틸벤젠	0.3mg/ℓ 이하	불검출
비스	0.5mg/ℓ 이하	불검출	크실렌	0.05mg/ℓ 이하	불검출
세레늄	0.01mg/ℓ 이하	불검출	I, I-디클로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출
수은	0.001mg/ℓ 이하	불검출	경도	300mg/ℓ 이하	150
시안	0.01mg/ℓ 이하	불검출	과망간산칼륨 소비량	10mg/ℓ 이하	0.4
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	2.06	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
파라티온	0.06mg/ℓ 이하	불검출	아연	1mg/ℓ 이하	0.0002
말라티온	0.25mg/ℓ 이하	불검출	염소이온	250mg/ℓ 이하	16
페니트로티온	0.04mg/ℓ 이하	불검출	증발잔류물	500mg/ℓ 이하	270
카바릴	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	0.3
사염화탄소	0.002mg/ℓ 이하	불검출	황산이온	200mg/ℓ 이하	10
트리클로로에틸렌	0.03mg/ℓ 이하	불검출	알루미늄	0.2mg/ℓ 이하	불검출

분석: 신홍대학 지역사회개발연구소

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 온달동굴의 경우 검출이 안되었다. 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 질소가 3미만으로 기준치 이하로 나타난 것으로 보아 동굴주위에 대규모 산업폐수나 생활오수의 유입원은 없는 것으로 사료된다. 동의 함량이 없는 것으로 보아 인근 주위에 금속광산이나 공장폐수의 유입이 없는 것으로 나타났다. 건강한 성인의 경우에는 알루미늄도 전혀 검출되지 않았다. 정상인의 인체에는 12~20mg의 망간이 함유되어 있다. Ca는 50ppm내외로 경도로 구성하는 중요요소인데, 석회암 지대에 다량으로 존재한다. Ca가 많으면 경도가 높아 경수가 된다. 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, 황산이온, 염소 등을 들 수 있다.

염소 이온은 보통 암석 성분의 영향을 받는데, 물 중에 녹아있는 염화물 중의 염소를 말하는데, 온달동굴에서는 기준치보다 훨씬 적은 17로 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. 온달동굴의 경우 1미만으로 기준치에 비해서 극히 적게 나타났다. 대장균은 온달동굴내에서 검출되지 않았다.

대장균은 보통 가축의 장속에 많이 생존되어 있는데, 이것으로 보아 온달동굴은 주위로부터 인축의 분뇨들이 유입되어 오염되고 있지 않음을 알 수 있다.

수은은 인체에 축적되는 것으로 사람에게 위험한 독성을 가지고 있어 환경 공해병을 일으키는 원인이 된다. 최대 섭취허용량을 넘어서 섭취하면 기형아

출산, 손발이 마비되고, 눈의 시력이 떨어진다. 온달동굴수에서는 수은의 검출이 전혀 안되었다.

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

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

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

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

세제는 ABS제를 말한 것으로 온달동굴내에서는 검출되지 않았다. 물의 냄새는 오수의 혼입, 플랑크톤의 번식, 염소처리, 지질 등에 기인하는 것으로 대개 저온에서는 없지만, 온도가 높아지면 보통 냄새가 난다. 온달동굴에서는 적당한 것으로 나타났다.

물의 맛도 역시 하수, 공장폐수, 암석종류 등에 따라 다르게 나타난다. 온달동굴의 경우 물의 맛도 적당한 것으로 나타났다.

탁도란 물의 탁한 정도를 나타내는 것으로, 부유물질의 혼합, 토사유입이 없으면 탁도는 낮게 나온다. 온달동굴의 경우 0.3내외로 물이 맑은 것으로 나타났다.

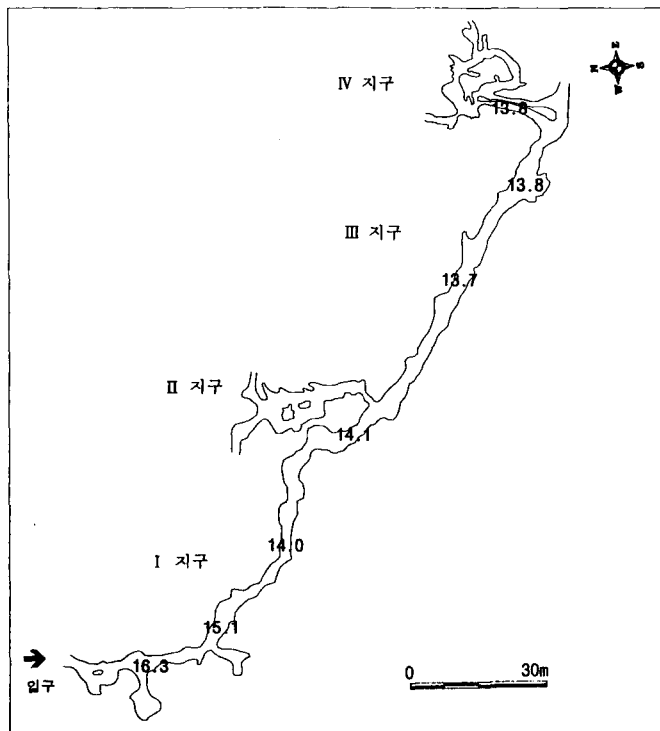
색도란 물의 색을 말하는 것으로 주로 토양이나 암석의 성분에 따라 오는 Humin질이 원인이 되는데 공장폐수, 하수 등이 유입되면 탁도가 높아진다. 온달 동굴의 경우 0.3NTU로 기준치 이하로 낮게 나타났다.

증발잔류물이란 물을 증발 건조 시켰을 때 남은 물건을 뜻하며, 용해성 물질의 양을 파악하는데 의미가 있다.

온달동굴의 경우 274로 기준치 이하로 나왔다.

동굴입구에서 막장까지의 기온, 습도, 풍속을 여름철에 조사한 결과에 의하면 기온은 동굴입구의 대기 온도가 동굴안 50m~60m정도를 넘어서면 기온의 안정상태가 동굴의 막장까지 계속되는 것으로 나타났다. 따라서 동굴의 입구 부분은 동굴내부보다도 석회암의 풍화작용이 활발하게 일어나고 있으나, 상대적인 풍화도는 극히 미약하다. 특히 온달동굴이 입구부분과 중간부분만 약간 휘어지고, 막장부분만 직각으로 구부러진 것을 제외하면 전체적으로 직선에 가까운 동굴인데도 불구하고 기온변화가 거의 없는 것을 보면, 동굴내부의 기온 안정상태는 거의 일반적인 법칙임을 알 수 있다.

2000년 3월 18일 오후 2시에 측정한 자료에 의하면 동굴입구에서 막장까지 거리에 따라 6.7℃→ 7.7℃→ 9.3℃→ 10.6℃→ 11.1℃→ 11.5℃→ 12.3℃→ 12.4℃→ 13.7℃→ 13.0℃→ 13.3℃→ 13.4℃→ 13.8℃의 순서로 미세하나마 기온이 증가함을 알 수 있다(그림 3).



[그림 3] 지구별 수온변화

단위: ℃

동굴내 습도변화상태를 살펴보면, 동굴입구는 외부 열에너지의 영향을 받아서 40~60%정도를 유지하는데, 동굴내부로 들어가면서 점차 증가하다가, 역시 100~150m을 지나면서는 다소 변화상태를 보이나 큰 변화는 없고 안정된 습도를 유지하고 있다. 동굴내의 하상에 사시사철 지하수가 다량 상시 유수로 흐르고 있어, 내부의 습도는 항상 80%이상을 유지하고 있어 높게 나타났으며, 동굴밖 지표면의 건·우기에 따른 동굴내부 습도의 연변화는 10%정도 거의 일정하게 유지되고 있다. 2000년 3월 18일에 조사한 습도변화 상태를 동굴입구에서 내부쪽으로 가면서 살펴보면, 45%→70%→80%→83%→94%→94%→95%→96% 등의 순서로 나타났다. 역시 3월29일에 조사한 자료에 보면 60%→70%→80%→81%→89%→90%→92%→91%→93%→95% 등으로 나타났다.

IV. 결 론

온달 동굴수에 대해서 44개 항목에 대한 수질분석 결과 거의 대부분이 기준치 이하로 나타났으나 일반세균 항목만 기준치보다 약 26배나 더 높게 나타났다. 이것은 관광객의 신발류에 세균이 붙어서 들어온 것으로 추측되어 향후 이 부분에 대한 예방대책이 필요한 것으로 사료된다.

경도는 약 150으로 나타나 동굴수치고는 경도가 강한 것이 아니고 중간정도로 나타났는데 이것은 온달동굴을 잉태하고 있는 산이 석회암의 주성분인 방해석의 함유가 높지 않기 때문이다. 즉 순도높은 석회암이 아니기 때문이다.

동굴지하수를 오염시키지 않기 위해서는 아래와 같은 방법들이 유용할 것이다.

첫째, 동굴내 지하수의 세균감염을 막기 위해서 동굴입구에서 안전모 착용과 동시에, 가급적 동굴신발을 착용토록 한다. 동굴신발은 관리사무소에서 준비하여 일정기간마다 무공해 약으로 소독한다.

둘째, 동굴입구문을 완전 밀폐하지 말고 일정한 공기 유통 공간을 두어 동굴내에서 건화, 풍화현상이 적게 발생하도록 한다.

셋째, 동굴내에서 사용하는 기자재는 무공해 자재를 써서 지하수가 오염되지 않도록 한다.

넷째, 벽면의 오염공해 제거처리는 하이클론 같은 약물세제를 사용하거나 동굴지하수를 재이용하는 것이 좋다.

다섯째, 온달산성의 식생피복을 잘 보전하여 지하수의 유입이 천천히 장기적으로 동굴내에 유입되어 살아있는 동굴이 되도록 해야 한다.

여섯째, 막장의 끝을 뚫어 새로운 출구를 내는 것은 동굴내 기류의 변화, 생태환경의 파괴 등을 가져오기에 신중을 기하는 것이 좋다.

* 참고문헌

- 한국동굴협회, 문화재관리국, 1970, 한국의 동굴.
단양군, 1993, 온달굴 개발 타당성 및 개발계획 학술조사보고서.
한국동굴학회, 단양군, 2000, 온달동굴내의 일부지구 환경과 개·보수 타당성 조사 연구보고서.
건설부, 한국수자원공사, 1992, 물관련 정책토론회 논문집.
한국지하수학회, 1992, 지하수이용의 현재의 미래기술.
연세대학교 보건대학원, 환경공해연구소, 1992, 음용수의 안전성 관리를 위한 상수 고도 처리.
충북대학교 수자원·수질연구센터, 1992, 수자원·수질 종합관리와 제주도 지하수자원 종합개발 및 보존.
한국식품공업협회 식품연구소, 1988, 광천수의 성분분석 및 규격 기준안에 관한 연구(Ⅰ).
五百井正樹, 1992, 水汚染の構造, 北斗出版社.
大失雅彦, 1993, 河川地理學, 古今書院.
藤田四三雄, 1992, 水と生活, 積書店.
F, Raymond., 1967, The Problem of Water, Faber and Faber Limited.

Abstract

A Study on the Groundwater of Ondal Limestone Cave

Kim, Choo-Yoon*

The Ondal cave, as limestone cave, located in 37° 03' N, 128° 29' E and in Ha-ri, Yongchun-myeon, Danyang-gun, Chungchongbuk-do.

This study analyzed the groundwater of Ondal Cave with 44 items.

On investigation almost of items were low and only germs were high than a base numerical value, this is supposedly caused by tourist entrance.

For the better management of the Ondal cave the preventing is required.

* Professor, Shinhung College