

단양지역에 분포한 석회암동굴계의 수질에 대한 분석

임종호* · 홍시환**

An Analysis on the Water Quality of Limestone Cave System in Danyang region

Chongho Rheem* · Sihwan Hong**

요 약

본 연구에서는 단양지역에 분포한 석회암동굴계의 수질에 대한 주요 원소와 미량 원소 그리고 오염실태를 살펴보았다. 풍화물에 존재하는 미량 원소가 기반암보다 수 배 내지 수 백배 이상 부하되어 있었다. TDS와 EC 등은 화강암의 지하수보다 높은 경향이 있었고 pH는 중성 내지 알칼리성이었다. Ca와 Mg은 기반암에서 용탈되어 지하수로 용존된 것으로 50ppm이상을 함유하고 있다. Fe과 K은 다른 주요 원소보다 현저히 낮은 경향이 있었다. 주요 음이온인 F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻ 등은 환경기준치보다도 현저히 낮은 상태이며, 따라서 오염이 안된 상태로 볼 수 있다. 미량 원소중 Al, Sr, Ba 등이 높은 반면에 Co, Mo, Sb, Cs, W, Pb, U, Mn 등은 매우 극소량으로 존재하는 것으로 나타났다. 연구지역 중 온달굴, 고수굴, 천동, 노동 등지는 오염이 거의 안된 상태로 매우 양호한 편이나 천동굴은 관광객으로 인하여 일부 원소가 오염되어 있는 실정이다.

(주요어 : 주요 원소, 미량 원소, 용탈, 용식, 수질오염)

* 청주대학교 강사

** 한국동굴학회장

1. 서론

석회암은 다른 암석에 비해 용식이 잘 되기 때문에 다양한 지형과 지표가 잘 형성된다. 석회암의 표면을 덮고 있는 잔적피복물은 오랜 시간을 걸쳐 형성되어 왔으므로 석회암의 구성성분은 거의 없어진 상대성 토양화되기 쉽다.

대부분의 피복물이 상대성이라고 보기 어렵지만 우리나라에서 잘 나타나는 석회암의 피복물은 일부를 제외하고는 거의 상대성으로 보여지기 때문에 현재 일어나고 있는 석회암지대의 변화과정을 유추하는데 다소 어려움이 있다. 그러나 현재 석회암지대의 변화반응을 보여주고 있는 근본적인 인자는 지하수일 것이다. 석회암지대를 흐르는 지하수는 용탈성분이 많은 기반암의 특성에 의해 지하수에서도 그 특성이 이어지므로 지하수에 포함되어 있는 성분을 계산하므로써 용식량과 석회암의 저하되는 량을 구할 수 있을 뿐만아니라 오염상태를 비교 검토할 수 있다.

최근 공업화와 산업화로 인하여 환경 오염이 가장 큰 문제로 대두 되고 있다. 특히 산업폐기물이 지표수와 지하수에 유입되어 심각한 영향을 끼치고 있으므로 대부분 지표수와 지하수를 자연 상태로 유용할 수 없을 정도로 오염되어 있다. 그러나 자연 상태에서 암석의 풍화로 인하여 수질 변화와 특성에 대한 연구보고가 매우 미비하여 산업화로 인하여 어느정도, 어느 수준으로 수질 농도가 증가 되었는가에 대한 지표가 거의 없는 실정이다. 더우기 암석의 특성에 따라 원소의 용해와 이동이 상이 하므로 암석의 풍화에 따른 수질 변화에 대한 시계열적 분석이 있어야만 산업화로 인한 오염의 상태를 비교 검토할 수 있을 것으로 사료된다.

수문지질·오염 등에 대한 연구(Ball et al, 1979; Biggar et al, 1976; Dagan, 1986; Plummer et al, 1983; Truesdell, 1974; 송창영, 1986; 라승춘, 1987; 노승환, 1984)는 여러분야에서 매우 활발히 연구가 진행되고 있다. 암석과 물과의 반응에 대한 연구가 외국의 경우 지구과학 분야인 자원공학, 지질, 지리, 수문 (Freeze and Cherry, 1979; Matthes, 1982; Nordstorm et al, 1990; Faure, 1991) 분야에서 활발히 진행되고 있으나 우리나라 에서는 최근에 와서 자원공학·지질 (문건주, 1977; 안종성 등, 1989; 박창용, 1993), 지리학 분야(박수진, 1992; 최무용 등, 1992)에서 시도되고 있는 실정이다.

환경평가와 일부 연구에서 취급하고 있는 지하수의 성분은 주요 원소에 역점을 두었을 뿐 미량 원소에 대한 내용이 거의 없었다.

따라서 석회암지대에 존재하는 지하수의 성분이 대부분 알칼리계통이지만 미량 원소에 대한 기본적인 자료가 필요하다고 생각된다.

이러한 점을 고려하여 본 연구의 목적은 석회암이 다량 존재하는 단양군 일대를 연구지역으로 선정하여 석회암지대의 지하수 성분의 주요 원소 및 미량 원소

와 오염실태를 규명하는데 있다.

2. 연구방법

시료채취는 1992년 3월22일에 실시했으며 시료채취지점은 주로 조선계 석회암이 분포되어 있는 단양군 일대에 존재하는 석회암동굴주변과 석회동굴 주변에 있는 혈암층에서 각각 4개지점, 1개 지점 그리고 매포천 1개 지점이다(그림1). 샘플방법은 양이온 측정시료와 음이온 측정시료를 구분하여 채취하였다. 양이온 측정시료는 100cc 채수병으로 채취했고 채취시에는 0.5N질산용액을 투여했다. 음이온측정시료는 1000cc채수병으로 채취했고 24시간이내 냉장고에 보관했다.

분석방법은 현지측정과 실내분석을 병행하였다. 현장 측정항목은 TDS, 수온, EC, pH 등이지만 TDS는 무게중량법으로 연구실에서 재 실시하여 보정하였다. 수온은 Digital Thermometer, pH는 Digital pH meter, EC는 Portable conductivity meter(Model M-1K)로 측정을 하였다. 실내분석에서 주요 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^-)은 이온크로마토그래프(IC)로 실시했다. 주요 양이온(Ca, Mg, K, Na, Fe)은 AAS를 이용했으며 알칼리도는 습식으로 실시했다. 수질에 대한 미량 원소인 Al, Ti, Cr, Co, Ni, Ca, Zn, Rb, Sr, Mo, Sb, Cs, Ba, W, Pb, U, Mn, Y, Zr, La, Ce, Bi, Th 등은 ICP-Mass로 기초과학지원센터에서 분석을 하였다.

3. 지역개관

연구지역은 조선계지층으로 행정구역상 단양군 영춘면, 매포면, 대강면 지역이다(그림 1). 지질연대는 고생대 오르도비스기이며 기반암은 석회암류로 구성되어 있다. 주성분은 Ca, Mg로 이루어져 있으며 불순물로는 Si, Al, Fe 등이 포함되어 있다. 암석의 주요 광물은 방해석, 백운석 등이며 부수물 광물로 운모와 장석이 포함되어 있다. 각 지점별로 지역개관을 살펴보면 다음과 같이 기술할 수 있다.

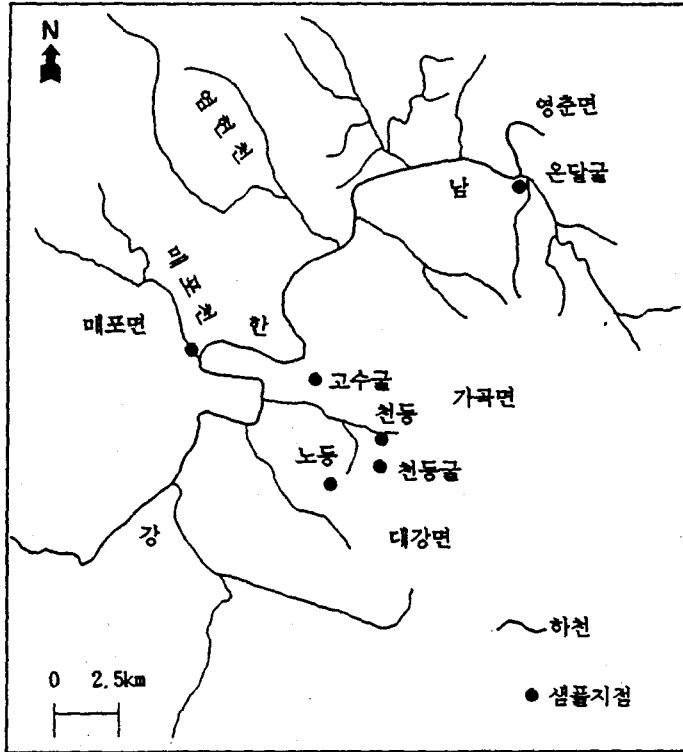


그림 1. 연구지역 및 시료채취지점

3-1. 지질 및 지형특성

(1) 고수동굴부근

고수동굴은 지질계통상 고생대의 조선계 대석회암층의 중부에 속하는 두무골 석회암층에 존재하며 이 층은 약 4-5억년 전에 이루어진 지층이다. 고수동굴의 주변에는 석영반암의 암맥이 평행된 열을 지으면서 대석회암층을 가로 뚫고 있으며 동굴속에서도 그 일부가 천정에 나타나고 있다. 고수동굴의 부근에는 갑입 곡류 하천지형과 가장 모식적인 카르스트 지형이 산재하며 특히 서북쪽의 도담과 북쪽의 여천리지역에서는 돌리네, 우발레, 폴리에 등의 카르스트지형이 잘 발달하고 있다.

(2) 노동굴 부근

노동굴 일대의 지형은 전형적인 만장년기의 산세를 이루며 본 노동굴에서 4km 떨어진 천동굴, 3km 떨어진 고수굴과는 매우 지질적으로 흡사한 점이 많다. 고수굴의 모양이 고생대의 오르도비스기에 속하는 두무골 석회암에 발달하고 있는

데 비해 노동굴은 오르도비스 하부층인 초동 석회암층에 발달하고 있다.

(3) 온달굴 부근

온달굴은 통칭 고성리 석회암으로 알려진 시대미상의 담회색 석회암으로 이질 함량이 많은 석회암이며 동굴의 주된 형성영역인 용식외에도 기계적 침식이 강력히 작용한다. 동굴 내부의 경관은 누구나 탐승할 수 있는 수평 석회 동굴이고, 그 통로가 매우 넓고 평탄하여 지형특색이 직선적으로 침식사박 작용이 심했던 흔적을 암벽에서 역력히 찾아볼 수 있다. 동굴 지형은 지굴이 작고 비교적 단조로운 경관을 나타내고 있다.

(4) 천동굴 부근

천동굴은 규모는 작지만 학술적인 가치가 있고 희귀종이 많아 최근에 부각된 석회동굴로 선캄브리아의 흑운모 화강암질 편마암과 대석회암통의 최하부인 풍촌 석회암통으로 혼합 형성되어 있는 수평굴이다. 동굴인근에는 혈암층이 부분적으로 혼재해 있으며 지하수 성분에 있어 석회암과 상이한 면을 보여 줄 수 있다.

3-2. 기상 및 토양

기상요소는 지하수의 수질에 직접적으로 영향을 주며, 연구지역에서도 기상요소중 강수량에 의해 수질변화가 일어나고 있다. 연평균 강수량은 1045.3mm이며 강우패턴은 대부분 6월에서 8월사이에 집중되는 경향이 있다. 연평균 기온은 주변의 지역보다 약간 온화하며 약 12.1°C이다.

토양은 다양하게 분포하지만 석회암 잔적풍화물인 테라로사가 대부분 차지하며 하천주위에는 충적토가 발달하고 있다.

4. 기반암 분석

기반암은 그 지역의 수질에 가장 큰 영향을 주기 때문에 기본적으로 수질을 분석하기 위해서는 기반암의 기본자료가 필요하다. 본 논문에서는 기반암과 풍화물이 존재하는 두 곳을 선택하여 주요 원소와 미량 원소를 분석하였다.

A, B, C, D는 동질의 암석을 기반암으로 하는 곳이며, 다량의 풍화물로 존재하는 F지점은 한 지점으로 깊이별로 시료를 채취하였다. F(1), F(2), F(3)은 풍화물이고 F(4)는 풍화암석, F(5)는 신선한 기반암이다.

조사지역의 기반암에 대한 8개 항목의 분석 결과는 표 1과 같다. Ig-loss가 3

5%이상 포함되어 있어 중탄산염이 지하수 중에 다량 포함될 가능성이 있으며 SiO₂는 대부분 6%이상으로 포함되어 있으나 현재의 지하수가 알칼리성을 나타내기 때문에 용해될 가능성이 다소 희박하다. 그러나 풍화물에서는 20%이상 존재하고 있어 산화조건만 된다면 다량 용해될 가능성이 있다. Al₂O₃는 Ig-loss, SiO₂ 보다 소량으로 포함되어 있으며 지하수가 알루미늄을 용해시킬 수 있는 pH가 아니기 때문에 더욱 용탈되기 어렵다. Fe₂O₃는 2%이하로 존재하며 알루미늄과 거의 같은 조건에서 유동하기 때문에 현재의 조건으로는 역시 용탈되기 어려울 것이다. CaO는 거의 20%이상으로 존재하며 알칼리성 지하수에서도 용탈되기 쉽기 때문에 지하수에 다량 포함될 가능성이 있다. MgO는 대부분 1% 내지 16%로 나타나고 있으며, 특히 풍화물에서 작은 량으로 존재한다는 것은 그만큼 용탈된 것으로 해석된다. 더우기 MgO가 CaO와 유사하기 때문에 현 조건에서도 지하수에 다량 용존될 수 있다. Na₂O와 K₂O는 1%이하로 존재하며 소량의 량이 지하수에 용존될 것으로 생각된다.

표 1. 석회암과 피복물의 주요 원소 분석결과(단위 : %)

샘플지점	깊 이(Cm)	Ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
A	0 - 30	24.19	34.22	13.37	5.78	11.87	8.23	0.54	2.03
B	0 - 25	8.96	64.20	14.22	5.78	2.50	1.25	0.15	2.56
C	0 - 25	16.73	46.80	12.70	5.45	8.39	6.03	0.27	1.65
D	0 - 25	6.48	65.32	17.22	2.13	2.71	1.95	0.55	1.50
기반암	30이하	39.66	7.18	1.15	0.44	47.98	1.97	0.12	1.02
F(1)	0 - 25	14.10	38.88	15.41	13.69	7.33	4.76	1.55	0.91
F(2)	25 - 60	17.55	39.77	11.62	3.38	18.61	4.46	2.96	1.85
F(3)	60 - 120	32.12	24.55	5.71	3.02	20.01	12.43	2.84	1.90
F(4)	120 - 250	41.38	7.26	2.55	2.25	27.63	18.26	1.05	0.61
F(5)	250이하	41.55	6.36	3.64	0.56	30.09	16.47	0.69	0.61

기반암 보다 풍화물에서 더 풍부하게 존재하는 미량 성분은 Ti, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Ba, La, Ce, Pb, Th 등이며 풍화물 보다 더 기반암에서 많이 성분은 Sr뿐이다(표 2).

표 2. 석회암과 피복물의 미량 원소 분석결과(단위:ppm)

샘플지점	깊 이(Cm)	Ti	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y
A	0 - 30	4638	162	26.4	72.1	83	248.7	141.2	62	50.3
B	0 - 25	5345	198	28.2	81.7	84.2	232.3	209.5	63	44.1
C	0 - 25	6471	145	21.5	68.7	92.0	241.1	142	193	43.9
D	0 - 25	5027	40	2.3	27.1	22.3	42.7	29.6	456	5.7
기반암	30이하	528	0.7	0.8	3.1	7	9	1.2	661	3
F(1)	0 - 25	5750	125	15	50	40	107	184	47	33
F(2)	25 - 60	5925	126	13	46	38	124	197	64	24
F(3)	60 - 120	5832	128	11	42	57	94	213	66	48
F(4)	120 - 250	2871	116	14	45	21	71	127	820	44
F(5)	250이하	837	0.8	1	4.1	9	18	22	161	5
샘플지점	깊 이(Cm)	Zr	Sb	Ba	La	Ce	Pb	Bi	Th	U
A	0 - 30	93.9	0.89	197.8	53.1	90.7	41.3	2.3	15.1	3.1
B	0 - 25	114.3	1.08	315.4	58.3	98.8	35.7	1.5	18.1	3.8
C	0 - 25	97.9	1.1	157	49.3	92	37.4	1.6	17.7	3.4
D	0 - 25	12.9	0.19	58.2	9.4	16.2	5.9	0.27	2.7	0.68
기반암	30이하	5.2	0.01	26	5	4	2.6	0.04	0.8	1.0
F(1)	0 - 25	143	1.1	261	82	176	23	0.5	33	4.5
F(2)	25 - 60	139	1.4	238	79	173	22	0.47	31	4.2
F(3)	60 - 120	143	1	221	105	204	19	0.35	34	4.5
F(4)	120 - 250	87	1.1	152	54	111	19	0.24	16	2.5
F(5)	250이하	14	0.001	23	6	16	4	0.04	3.8	1.0

이와같이 석회암은 용탈이 잘 되는 성분이 많이 포함되어 있기 때문에 중금속과 미량 원소는 풍화층에서 집적된다. 이렇게 집적된 성분이 산성경향을 가진 pH조건하에서는 중금속과 미량 원소는 지하수로 유출될 가능성이 높다.

5. 일반 항목과 주요 원소의 분석 결과

일반항목인 TDS, EC, 수온, pH 등은 현장에서 직접 측정하는 항목이며 단 TDS는 연구실에서 재분석을 실시하여 보정하였다. 특히 일반 항목 중 수온을 제외한 TDS, EC, pH 등은 물속에 용존되어 있는 성분에 매우 민감한 반응을 보여준다. 이들 항목을 살펴보면 다음과 같다.

TDS는 천동굴이 430ppm으로 가장 높으며 천동이 30ppm으로 매우 낮아 이질 암석에서 유래된 지하수로 추정되지만 그외 지역은 대부분 200ppm정도이다.

EC는 천동굴이 330 μ m/sec로 가장 높으며 천동의 120 μ m/sec를 제외하고는 거의 유사한 경향을 가진다.

수온은 동굴에서 11.9°C - 13.9°C이며 천동과 노동이 10°C이하로 낮은 경향이 있으며 특히 천동이 4.3°C로 극히 낮은 것으로 보아 지표 가까이에서 기원한 지하수로 해석된다. pH는 천동을 제외하고는 모두 pH 8이상으로 대부분 약알칼리에 속한다.

수질에 있어 주요 원소는 음이온 주요 원소와 양이온 주요 원소로 구분할 수 있다. 우선 음이온의 주요 원소를 보면, F⁻는 고수굴, 천동, 노동, 천동굴에서 검출되지 않았으며 온달굴과 매포천에서 각각 0.01ppm, 0.16ppm이 검출되었다. Cl⁻은 온달굴에서 16.9ppm으로 가장 높으며 천동도 14.3ppm으로 매우 높으나 그 외 지역은 5ppm이하로 나타났다. NO₃⁻는 노동과 천동굴이 0.6ppm이하로 낮은 반면에 온달굴이 6.04ppm으로 가장 높게 나타났다. SO₄⁻는 온달굴과 노동이 각각 13.2ppm, 10.9ppm이며 천동굴이 0.8ppm으로 상당히 낮았다.

양이온의 주요 원소를 살펴보면, Ca는 대부분 동굴에서 40ppm이상으로 나타났지만 천동은 10.8ppm으로 상당히 낮았다. Mg는 천동굴과 매포천이 다른 지역보다 높은 경향이 있으며 천동이 3.87ppm으로 매우 낮은 경향이 있다. K는 알칼리 원소 중 매우 낮은 농도를 보여주고 있으며 전부 2ppm이나 노동은 검출되지 않았다. Na는 Mg와 마찬가지로 천동굴과 매포천이 높으나 고수굴은 검출되지 않았다. Fe은 매포천과 천동에서 검출되지 않았으나 온달굴과 노동에서 각각 0.4ppm, 0.1ppm씩 검출되어 다소 높은 경향을 보여 주고 있다. 알칼리도는 천동굴이 180ppm으로 가장 높으며 고수굴과 천동이 각각 86ppm, 32ppm으로 다른 지역보다 낮은 경향이 있다(표 3, 그림 2).

표 3. 조사지역의 일반 항목과 주요 성분(단위 : ppm)

샘플지점	TDS	EC**	°C	pH	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al*
온달굴	190	260	13.0	8.0	0.01	16.9	6.04	13.2	58.7	13.76	0.2	5.6	0.40	102
매포천	250	290	7.5	8.1	0.16	4.4	2.44	6.0	63.1	41.84	0.5	28.2	0.00	127
고수굴	195	270	11.9	8.1	0.00	3.0	2.40	5.7	42.7	12.53	1.1	0.0	0.07	86
노 동	200	250	9.3	8.0	0.00	1.6	0.51	10.9	77.0	15.52	0.0	14.0	0.10	140
천동굴	430	330	13.9	8.2	0.00	1.5	0.06	0.8	46.3	62.23	0.2	41.4	0.05	180
천 동	30	120	4.3	7.8	0.00	14.3	3.28	8.6	10.8	3.87	0.1	10.2	0.0	32

* Alkalinity(mg/l as CaCO₃), ** 단위: μm/sec

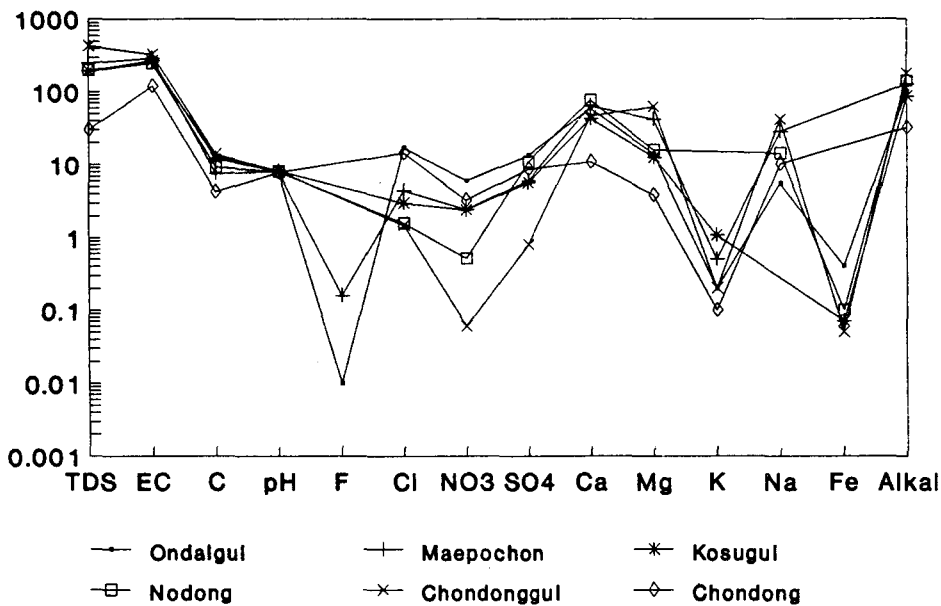


그림 2. 각 지점별 주요 성분과 일반 항목

6. 미량 원소의 분석결과

미량 원소는 물속에 소량으로 존재하는 것으로 자연상태에서 ppm단위에서는 거의 검출되지 않는 원소이다. 그러나 오염된 지역이나 광산지역에서는 ppm단위로 검출되곤 한다. 연구지역에서도 오염된 지역과 오염되지 않은 지역을 선정하여 분석한 결과 다음과 같이 기술할 수 있다(그림 3).

Al은 비용해성 원소로 물속에 미량으로 존재하는데 고수굴이 153.92ppb로 가장 높으며 그외 지역은 26ppb이하로 나타났다.

Ti도 Al과 마찬가지로 비용해성 물질로 물속에 극소량으로 존재한다. 고수굴이 5.43ppb로 다른 지역보다 몇 배 많으나 대부분 1ppb이하이다. Cr은 매포와 노동이 다소 높으며 그외는 3ppb이하로 나타났다. Co는 모든 지역에서 1ppb이하이며 천동굴이 0.56ppb로 가장 높다.

Ni은 천동굴이 892.79ppb로 가장 높으며 그외 지역은 2ppb이하이다. Ni이 천

동굴에서 가장 높은 이유는 천동굴 내에 주화가 곳곳에 산재해 있기 때문에 그 주화의 성분 중 하나인 Ni이 용해된 것으로 해석된다.

Cu도 Ni과 마찬가지로 천동굴에서 188.8ppb로 가장 높고 그외 지역은 5ppb이하이다. 천동굴이 Cu가 높은 이유는 Ni과 같은 이유로 추정된다.

Zn는 천동굴에서 992.48ppb로 가장 높으며 고수굴은 15.97ppb로 다른 지역보다 높은 경향이 있다. Zn도 Ni, Cu와 같이 주화의 성분 중의 하나로 구성되어 있기 때문에 그 일부가 용해되어 농도가 높은 경향을 보여 주고 있다.

Sr는 매포가 196.33ppb로 가장 높으며 천동이 21.53ppb로 가장 낮게 나타났다. 천동이 낮은 이유는 기반암이 혈암으로 구성되어 있어 Sr성분이 석회암보다 낮기 때문이다.

표 4. 조사지역의 미량 원소 분석결과(단위 : ppb)

샘플지점	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	
은달굴	5.47	1.07	2.06	0.06	1.04	2.28	1.66	85.64	
매포천	25.65	0.95	6.79	0.02	1.85	0.95	0.37	196.33	
고수굴	153.92	5.43	2.08	0.18	1.56	4.09	15.97	99.22	
노 동	22.82	0.43	5.94	0.05	0.49	0.47	0.04	96.68	
천동굴	11.47	0.97	2.08	0.56	892.79	188.8	992.48	46.99	
천 동	24.28	0.04	0.49	0.06	0.04	1.10	0.95	21.53	
샘플지점	Rb	Mo	Sb	Cs	Ba	W	Pb	U	Mn
은달굴	1.37	0.07	0.02	0.01	10.21	0.02	0.19	0.17	0.04
매포천	18.00	1.80	0.09	0.66	20.40	2.02	0.02	0.59	0.003
고수굴	1.29	0.08	0.04	0.06	9.39	0.08	3.30	0.26	1.87
노 동	0.58	0.20	0.02	0.03	8.47	2.38	0.02	0.20	0.48
천동굴	9.66	2.93	0.63	0.02	36.42	0.22	0.92	0.04	0.87
천 동	0.29	0.13	.	0.02	1.79	0.03	0.11	0.04	0.80

Rb은 매포에서 18.00ppb로 가장 높으며 천동이 9.66ppb로 다소 높게 나타났고 그외 지역은 2ppb이하로 존재한다. Mo은 전부 3ppb이하로 존재하며 천동굴과 매포천이 다른 지역보다 높은 경향이 있다. Sb는 전부 0.7ppb이하로 극소량 존재하며 천동에서는 검출되지 않았다. Cs은 Sb와 마찬가지로 극소량 존재하며 그중 매포천이 0.66ppb로 가장 높게 존재한다.

Ba은 알칼리 성분의 하나로 미량 성분 중 다소 높은 경향이 있다. 천동굴과 매포천, 온달굴이 10ppb이상으로 존재하며 천동이 1.79ppb로 가장 낮게 존재한다. W은 매포천과 노동굴이 각각 2.02ppb, 2.38ppb로 다른 지역 보다 월등히 높으며 그외 지역은 0.3ppb이하이다. Pb는 고수굴이 3.3ppb로 가장 높으며 그외 지역은 1ppb이하로 존재한다. U은 분석 성분 중 가장 낮게 존재하는 미량 원소 중의 하나로 모두 0.6ppb이하이다. Mn은 고수굴이 1.87ppb로 가장 높으며 매포천이 0.003ppb로 극히 낮은 경향이 있다(표 4, 그림 3).

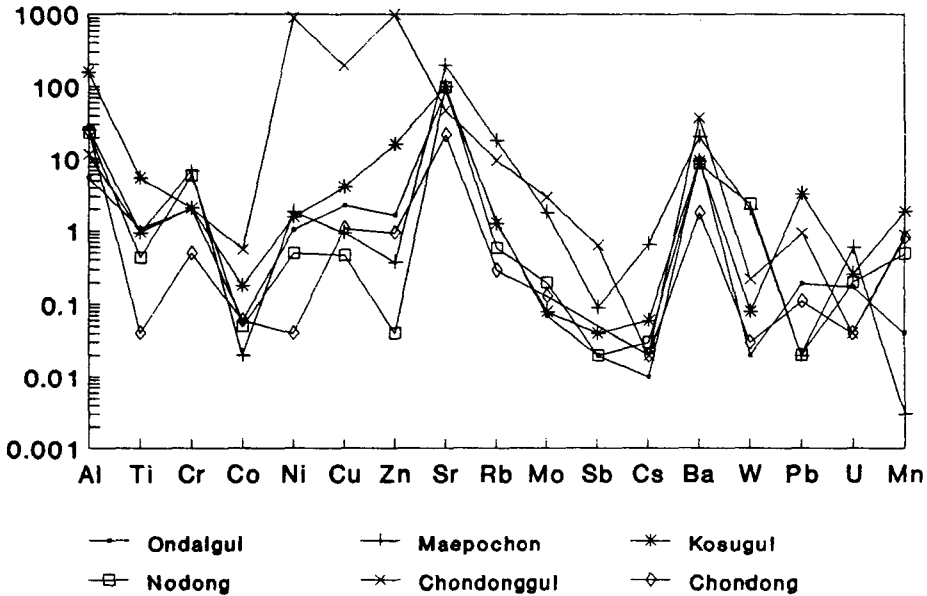


그림 3. 각 지점별 미량 원소 농도

6. 환경기준치의 적용

앞에서 분석한 항목을 WHO, EEC, 미국, 일본, 한국 등의 음용적용기준치와 비교하였다. 중발잔유물은 미국, 일본, 한국의 500mg보다 낮은 430mg이하로 나타났으며 WHO의 기준치 1000mg보다 훨씬 작다. pH는 각국의 기준치가 5.8 - 8.6 사이로 연구지역의 검출치는 7.80 - 8.20으로 각국의 기준치 범위안에 포함된다. 불소는 미국의 기준치가 4ppm 이하를 나타내며 WHO, EEC, 일본, 한국 등은 거의 1.5ppm이하를 기준으로 설정하고 있는데 연구지역은 0.15ppm이하로 후자의 기준치보다 낮게 나타났다. 염소는 한국의 기준치가 150ppm으로 각국의 기준치 중 가장 낮는데 연구지역의 분석치는 16.90ppm이하로 나타나 한국의 기준치 보다도 훨씬 낮다. 질산성질소는 각국의 기준치 중 한국의 것이 10ppm이하로 가장 낮은데도 연구지역의 최대치가 한국의 기준치 보다도 낮은 6.04ppm이다. 황산이온은 한국의 기준치가 200ppm으로 가장 낮는데 연구지역의 최대치가 13.20ppm로 상기 기준치보다도 매우 낮게 나타났다. Ca은 EEC에서 100ppm으로 기준을 삼았지만 연구지역에서는 EEC기준치 보다 낮다. Mg은 EEC에서 50ppm으로 설정했는데 연구지역 중 천동굴의 62.23ppm를 제외하고는 거의 EEC의 기준치 보다 낮다. Na은 WHO의 기준치 200ppm, EEC의 기준치100ppm보다 훨씬 낮은 41.4ppm로 나타났다. 철은 세계각국이 0.3ppm을 기준으로 삼았는데 연구지역 중 은달굴의 0.4ppm를 제외하고는 상기 기준치보다 훨씬 낮게 나타났다. 경도는 한국, 일본의 기준치 300ppm, WHO의 기준치 500ppm보다 낮은 결과치가 연구지역에서 나왔다. 상기 내용으로 보아 Ca, Mg, Fe이 일부 지역에서 세계각국의 기준치 보다 다소 높게 나타났지만 전반적으로 세계기준치 보다 낮게 나타났다(표 5).

Cu는 미국의 기준치가 1.5ppb로 가장 높는데 연구지역에서는 천동굴이 199.8ppb로 수 십배 초과했으며 매포천과 노동, 천동이 기준치 이하로 나타났다.

Mn은 한국과 일본의 기준치가 0.3ppb로 여러 나라 기준치 보다 높는데 연구지역에서는 은달굴, 매포천을 제외하곤 전부 기준치를 넘고 있다.

Pb은 Mn과 마찬가지로 한국과 일본의 기준치가 다른 나라보다 높은 0.1ppb로 연구지역은 매포천과 노동을 제외하곤 전부 기준치를 넘고 있다.

Zn은 WHO, EEC, 미국의 기준치가 5.0ppb로 천동굴이 수십배, 고수굴이 3배 초과하고 있으며 그외 지역은 기준치 이하이다.

Ba은 EEC의 100ppb, 한국과 WHO는 기준치가 없으나 미국의 5,000ppb 보다 전부 낮게 나타났다.

Ni은 미국의 기준치가 100ppb로 설정되어 있다. 연구지역의 천동굴이 892.79ppb로 약 9배 초과하지만 그외 지역은 기준치 이하로 나타났다.

표 5. 각국의 음용수 수질기준(단위 : ppm)

항 목	WHO	EEC	미국	일본	한국
TDS(mg)	1,000	-	500	500	500
pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	5.8 - 8.6	5.8 - 8.5
F(ppm)	1.5	0.7 - 1.5	4.0	0.8	1.0
Cl(ppm)	250	200	250	200	150
NO ₃ (ppm)	10	-	10	10	10
SO ₄ (ppm)	400	250	400	-	200
Ca(ppm)	-	100	-	-	-
Mg(ppm)	-	50	-	-	-
Na(ppm)	200	100			
Fe(ppm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Cu(ppb)	1.0	0.05	1.3	1.0	1.0
Mn(ppb)	0.1	0.05	0.05	0.3	0.3
Pb(ppb)	0.05	0.05	0.005	0.1	0.1
Zn(ppb)	5.0	5.0	5.0	1.0	1.0
Ba(ppb)	-	100	5000		-
Ni(ppb)			100		

(자료: 환경기술, 1991, 통권제 8호, pp.17-18.)

7. 결 토

지하수나 지표수의 수질은 기반암의 주성분 원소에 의해 지배받기 때문에 유역의 기반암이 수질을 결정한다고 해도 과언은 아니다. 연구지역은 알칼리토금속 원소로 구성된 석회암류로 Ca와 Mg가 90%정도를 차지하고 있다. 이 두 원소는 용해성 원소이기 때문에 연구지역의 지하수나 지표수 수질에 직접적인 영향을 주고 있다. 연구지역의 수질분석결과 주요 원소 중 대부분 양이온이 Ca와 Mg라는 것은 기반암에서 용해되어 유입된 것으로 해석할 수 있다.

풍화물에 존재하는 미량 원소가 기반암보다 수 배 내지 수 백배 이상 부하되어 있기 때문에 산성에 가까운 강우현상이 있을 경우 용탈되어 지하수로 유입될 가능성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 현재의 풍화물 자체의 pH가 pH 7 내지 pH 9사이가 많기 때문에 풍화물에 존재하는 미량 원소 또는 중금속은 용탈되기 어려

을 것이다.

TDS와 EC가 석회암지대에서 높은 이유는 용해성물질인 Ca와 Mg가 다량 용존되어 있기 때문으로 추정되며 pH가 알칼리성을 나타내는 것은 알칼리토금속원소와 중탄산염이 다량 용존되어 있기 때문이다. 문병열(1966)도 석회암지대의 수질은 Ca, Mg가 높고 화강암지대의 수질에서는 낮다고 보고한 바 있다. Fe과 K이 화강암지역 보다 낮은 것은 화강암 보다 석회암류에 K성분이 적게 함유되어 있어 화강암보다 낮게 용해되기 때문이다. 이진표 등(1962)은 주요 하천과 저수지 수질 조사에서 일반적으로 Na, Cl이 높으나 Ca의 함량이 낮은 것으로 보고했는데 이는 지질환경과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 보였다.

세계각국의 음용기준치와 비교한 결과 주요 양이온과 음이온은 각국의 기준치에 미달하고 있으나 미량 원소 중 Cu, Zn, Ni 등의 원소가 일부지역에서 몇 배 높은 사례가 나타났다. 이것은 자연적인 원인이라기 보다는 인위적인 원인으로 보여진다. 동굴 내에서는 관광객들이 일종의 미신행위로 미관이 좋은 자연경관에 동전 넣기를 하곤한다. 이러한 행위로 인하여 동굴 내의 지하수에 미량 원소가 용해되어 매우 높은 농도로 존재하게 되었다. 기존의 연구에서 미량 원소에 대한 분석자료가 없기 때문에 비교할 수 없으나 동굴내의 지하수 중 몇 개의 미량요소가 매우 오염되어 있다는 것을 알 수 있다.

8. 결 론

본 연구에서는 단양지역에 분포한 석회암동굴계의 수질에 대한 주요 원소와 미량 원소 그리고 오염실태를 살펴보는데 목적을 두었다. 앞에서 분석한 결과를 토대로 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

최근에는 석회암지대의 동굴이 많이 개발되어 동굴을 찾는 관광객이 급증하게 되었다. 많은 인파로 인해 석회동굴의 내부가 일부 파손되고 지하수도 오염되고 있는 실정이다. 석회동굴을 보존하는 차원에서 동굴환경평가를 실시하면서부터 동굴과 석회암 경관의 파손이 감소하게 되었다.

풍화물에 존재하는 미량 원소가 기반암보다 수 배 내지 수 백배 이상 부하되어 있기 때문에 산성에 가까운 강우현상이 있을 경우 용탈되어 지하수로 유입될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

TDS와 EC 등은 화강암의 지하수 보다 높은 경향이 있었고 pH는 중성 내지 알칼리성이었다. Ca와 Mg은 기반암에서 용탈되어 지하수로 용존된 것으로 수질의 대부분을 차지하고 있으며 일반적으로 50ppm이상을 함유하고 있다. Fe과 K은 다른 주요 원소보다 현저히 낮은 경향이 있었다.

주요 음이온인 F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^- 등은 환경기준치 보다도 현저히 낮은 상태로 오염이 안된 상태로 볼 수 있다.

미량 원소 중 Al, Sr, Ba 등이 높은 반면에 Co, Mo, Sb, Cs, W, Pb, U, Mn 등은 매우 극소량으로 존재하는 것으로 나타났다.

연구지역 중 온달굴, 천동, 고수굴, 노동 등지는 오염이 거의 안된 상태로 매우 양호한 편이나 천동굴은 관광객으로 인하여 일부 원소가 오염되어 있는 실정이다.

단양지역이 관광지로 전환됨에 따라 각종 오락시설, 휴양지, 주택 등 여러 시설이 늘고 있어 수질오염을 유발시킬 수 있는 여건이 조성되고 있다. 이에 대한 단양지역의 수질 등 여러 환경평가에 대한 시계열적인 연구가 절실히 요구된다.

참고문헌

- 노승환, 1984, 광주시의 수질오염에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문, pp.1-30.
- 라승춘, 1987, 의정부시 광천수 환경 및 수질조사연구, 한양대학교 석사학위논문, pp.1-32.
- 문건주, 1977, 산동광상의 동위원소연구, 광산지질, 제 17권 3호, pp.171-177.
- 문병열, 1966, 지질환경에 따른 수질변화, 중앙대논문집, 11, pp.397-402.
- 박수진, 1992, 소규모 화강암질 하천유역의 물질수지와 풍화특성에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 청구논문, pp.1-89.
- 박창용, 1993, 충북 음성 무극광산지역의 수리지구화학과 화강암질암에서의 물-암석반응, 서울대학교 석사학위논문, pp.1-69.
- 송창영, 1988, 주암댐의 기초수질에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문, pp.1-24.
- 안종성, 1989, 백암 온천수의 환경동위원소 특성연구, 한국 에너지 연구소.
- 안종성, 한정상, 이정호, 정창조, 유장걸, 1988, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(5), KAERI/RR-824/89.
- 이진표, 이명호, 전광주, 1962, 주요 하천 및 저수지수질조사, 농사시험연구소, 5, pp.17-19.
- 주왕기, 조동현, 김우호, 윤경민, 1976, 의암호, 춘천호, 소양호의 이화학적 수질조사, 강원대연구논문집, 10, pp.285-290.
- 최무웅, 남기창, 임종호, 안중기, 1992, 주요원소를 이용한 석회암지대의 수질특성에 관한 연구, 지하수, 제 2집, pp.86-99.
- 홍시환, 1990, 천동동굴 환경실태조사 연구보고서, 한국동굴학회, pp.1-93.
- 홍시환, 1993, 온달굴 학술조사보고서, 한국동굴학회, pp.1-169.
- 홍시환, 1993, 고수동굴 학술조사 보고서, 한국동굴학회, pp.1-166.

- Back, W., J.S. Rosensheir, and P.R. Seaber, 1988, Hydrogeology, Geology of North America, Geological Society of America, 524 pp.
- Briz-Kishore, B.H., and G. Murali, 1992, Factor Analysis for Revealing Hydrochemical Characteristics of a Watershed, Environ Geol Water Sci, Vol.19, No.1, pp.3-9.
- Ball, J.W., Jenne E.A., and Nordstrom, D.K., 1979, WATEQ2-A computerized chemical model for trace and major element speciation and mineral equilibria of natural waters, In Chemical Modeling of Aqueous Systems, Amer. Chem. Soc. Symposium Series 93, pp.815-835.
- Biggar, J.W., and D.R. Nielsen, 1976, Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. Water Resour. Res. 12(1):78-84
- Dagan, G., 1986, Statistical theory of ground water flow and transport: pore to laboratory, laboratory to formation, and formation to regional scale, Water Resour. Res., 22, pp.1305-1345.
- Faure, G., 1991, Principles and Applications of Inorganic Geochemistry, macmillan publishing company, pp.1-611.
- Freeze, R.A., 1975, A stochastic conceptual analysis of one-dimensional ground water flow in nonuniform homogeneous media, Water Resour. Res., 11(5), PP.725-741.
- and J.A., Cherry, 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
- Matthess, G., 1982, The Properties of Groundwater, John Wiley and Sons, pp.1-406.
- Nordstrom, D.K., and J.L., Munoz, 1986, Geochemical Thermodynamics, Blackwell Sci., pub., 477 pp.
- Plummer, L.N., Parkhurst, D.L., and Thorstenson, D.C., 1983, The development of reaction models for groundwater systems, Geochim. Cosmochim. Acta 47, 665-686.
- Truesdell, A.H., and Jones, B.F., 1974, WATEQ, A computer program for calculating chemical equilibria of natural waters, USGS J.Res. 2, 233-248.