

황강리 형석 광화대내 석회암 및 화강암지역 지하수의 지구화학적 특성

황 정*

대전대학교 지구시스템공학과, 300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3

Geochemistry of Groundwater in Limestone and Granite of Hwanggangri Fluorite Mineralized Area

Jeong Hwang*

Department of Geosystem Engineering, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

Abstract : Hydrogeochemical characteristics of groundwater from a limestone and granite area were studied in the Hwanggangri district, where important fluorite ore deposits are distributed. The geochemical properties of groundwater from limestone and granite are commonly characterized as $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ and $(\text{Ca}^{2+}+\text{Na}^+)\text{-HCO}_3^-$ type, respectively. Groundwater, contaminated by mine drainage water from the neighboring ore deposits, has not been observed yet. However, fluoride in groundwater exceeding the drinking water permission level is found in the wells located in a Cretaceous granite area. The concentrations of F in the groundwater show a positive relationship with the values of Na, HCO_3^- , Li and pH. This may suggest that the groundwater come from the decomposition of fluoride-bearing silicate minerals within highly differentiated granitic rocks.

Keywords : groundwater, limestone, granite, fluoride

요 약 : 황강리 지역 형석 광화대내 석회암 및 화강암지역 지하수의 수문지화학적 특성을 연구하였다. 석회암 지역 지하수는 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 유형이며, 화강암 지역 지하수는 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Na}^+)\text{-HCO}_3^-$ 유형이다. 연구지역 내 광산폐수에 의한 음용지하수의 오염은 아직 발견되지 않았으나, 백악기 화강암내 음용지하수에는 불소함량이 기준치를 초과하는 곳이 많다. 화강암 지역 지하수는 F 함량이 증가함에 따라 Na, HCO_3^- , Li, pH 등이 증가 하는 지구화학적 특성을 보인다. 지하수내 불소의 기원은 형석 혹은 함불소 규산염광물의 용해에 기인하며, 이들 광물은 산성 화강암류와 성인적 관련이 깊은 것으로 판단된다.

주요어 : 지하수, 석회암, 화강암, 불소

서 론

산업의 급진적 발달로 수많은 유해물질이 자연계로 유출되고 있으며, 이들오염물질들은 환경매체중 최종 수용체인 토양에 유입되어 지하수에 많은 피해를 주고 있는 실정이다. 오염물질이 토양이나 지하수에 노출될 경우 이들 매질의 특성상 인위적으로 복원하기 전에는 이들 환경을 반영구적으로 오염시켜 자연계와 인간에 위해요소로 존재한다. 특히 자원개발로부터 발생하는 폐수, 분진, 폐광재 등에 의한 환경피해는

광산주변 환경오염 뿐만 아니라 주거공간 및 시설물 안전에도 심각한 영향을 미쳐 다수 민원 등 여러가지 사회문제로 대두되고 있다.

현재 국내 휴·폐광산 주변 환경에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으나 그 대부분이 산성 광산폐수에 의한 토양 및 자연수의 중금속 오염에 집중되어 있으며, 기반암의 종류에 따른 지하수의 지구화학적 특성(유재영 외, 1994; 전효택 외, 1997)과 이에 따른 음이온 유해원소 오염에 관한 연구(황 정, 2001)는 극히 부족한 실정이다. 황강리 지역은 형석 광상이 밀집 부존하여 과거 수많은 광산으로 개발되었던 곳 이므로 불소에 의한 지하수 오염이 가장 우려되는

*E-mail: jeongha@dju.ac.kr

지역중의 하나이다.

본 연구의 목적은 황강리 형석 광화대에서 화강암과 석회암을 모암으로 하는 광산 주변의 지하수를 분석하여 지하수의 지구화학적 특성과 불소의 분포특성을 밝히는데 있다. 이 연구결과는 형석광화대내 지하수의 불소 분포특성과 그 처리방안에 적용할 수 있으며, 형석광화대 주변 지표 및 지하수계를 통한 불소의 확산정도를 파악하여 향후 환경보존 및 환경복구대책을 수립하기 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

지질개요

연구지역의 지질은 주로 조선누층군의 삼태산층에 대비되는 석회암과 옥천누층군의 서창리층으로 불리는 천매암, 그리고 이를 관입한 중생대 백악기의 화강암류로 구성되어 있다(Fig. 1). 이 지역의 지질에 관하여는 황강리도폭(이민성과 박봉순, 1965)이 발간되어 있고, Reedman *et al.*(1973)의 보고가 있다.

석회암은 백색 내지 회색 괴상, 회백색 혹은 암회색 판상 석회암으로 구성되며, 백색 내지 암회색의 석회질대와 이질대가 교호하는 호상구조가 발달하기도 한다. 백색 내지 암회색의 이질석회암은 대부분 괴상으로 산출되며 재결정화되어 있다. 판상의 석회암이 괴상 석회암내에 간간히 협재되며 이들 판상 석회암내에는 다시 박층의 점판암이 간간히 협재된다. 연구지역 동부에 분포하는 석회암은 동측의 단양도폭으로 연장되고, 이는 삼태산층과 대비된다(이민성과 박봉순, 1965). 연구지역의 북서부에서 석회암은 천매암 및 변질천매암으로 구성된 서창리층에 의하여 부정합으로 피복되며 연구지역 남부의 월악산 화강암의 접촉부와 암주상으로 발달하는 소규모 화강암의 관입 접촉부에서는 회백색 및 담홍색의 석회규산암이 발달한다. 석회암층의 주향과 경사는 습곡과 크고 작은 단층운동, 그리고 화강암류의 관입으로 인하여 국부적 혹은 지역적으로 심한 변화를 보인다.

연구지역 북서부와 중앙부에는 박편상으로 잘 쪼개지는 암회색의 천매암류가 발달한다. 이 암층은 부분적으로 녹색편암상을 띠기도 한다. 녹색편암대와 천매암대와의 경계는 점이적이며, 녹색편암대 내에도 천매암질 암상을 띠는 부분이 잔존하기도 한다. 이 암층은 석회암층을 부정합으로 피복하며 암맥상 혹은 암주상으로 발달하는 화강암류에 의해 관입당한다.

이 암층은 서창리를 중심으로 전형적인 발달상태를 보이므로 서창리층으로 명명된 바 있다(이민성과 박봉순, 1965).

화강암류는 흑운모화강암, 화강반암 및 석영반암으로 구성된다. 화강암류는 피관입암층인 석회암층과 변성퇴적암의 접촉부에 스카른 내지는 호운펠스대를 형성시켰다. 연구지역 남부의 월악산 화강암과 북동부의 무암사 화강암은 저반상의 관입암체로서 중립질의 흑운모 화강암으로 구성되며, 소규모 암주상 및 암맥상으로 산출되는 화강암체는 석영반암 혹은 화강반암으로 구성된다. 이들 화강암류의 생성연령은 백악기말에 해당된다. 무암사 화강암과 월악산 화강암 주변에는 형석광상 이외에도 W, Mo, Cu, Pb-Zn, 중정석, 활석 등의 수많은 금속 및 비금속 광상이 발달한다. 이들 광상의 대부분은 이 지역에 발달하는 백악기말의 화강암체와 시·공간적으로 밀접한 관련을 가지며 발달한다.

시료채취 및 분석방법

이 연구를 위해 2000년 7월에 총 18개의 지하수 시료를 채취하였다(Fig. 1). 지하수 수질과 지질 특성과의 상관관계 연구를 위해 지하수 시료를 석회암지역에서 8개, 백악기 화강암 지역에서 7개, 그리고 석회암 지역내 폐광산의 갱내유출수 3개를 채취하였다. 채취된 시료는 현장에서 수동 진공펌프를 이용하여 0.45 μ m 공극을 갖는 질산염 섬유소 여과지로 물속에 존재하는 부유물질을 제거하였다. 그리고 현장에서 수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh), 온도, 전기전도도(EC), 중탄산이온(HCO_3^-) 농도, 용존산소량 등을 측정하였다. 중탄산이온은 메틸오렌지 지시약을 이용하여 염산으로 적정하여 계산하였다. 현장에서 물시료에 대한 pH는 Orion 290A 모델의 휴대용 pH 측정기, Eh는 동종의 기기로 백금전극을 이용하여 측정하였다. 전기전도도는 Orion model 142, 용존산소량은 Orion model 835 모델의 측정기로 각각 측정하였다.

시간경과에 따라 시료용기 벽면에 양이온이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 양이온 분석용 시료에는 농질산을 가해 pH를 2 이하로 조절하였다. 시료채취 과정과 현장분석 전처리 등은 Greenberg *et al.*(1992)의 방법을 참조하였다. 지하수의 화학성분중 Na, Mg, Al, Si, Fe 성분은 유도결합쌍 프라즈마 원자방

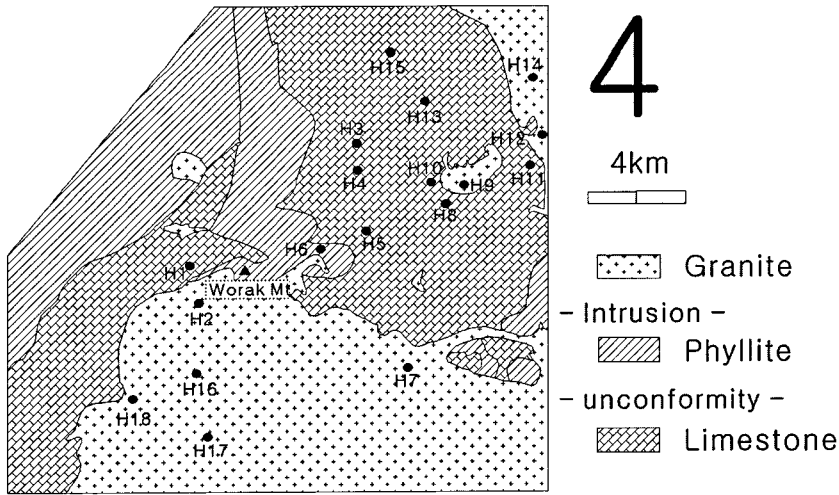


Fig. 1. Geological map and sampling locations of groundwater in the Hwanggangri area.

출분광분석기(ICP-AES)로, 그리고 그의 양이온 성분은 유도결합쌍 프라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 분석하였다. 음이온은 이온크로마토그래피(IC)로 분석하였다. 지하수 시료의 화학분석은 기초과학 지원연구원에서 수행되었다.

결과 및 토의

연구지역 지하수의 특성을 반영하는 물리적 성질과 대표적 양이온과 음이온에 대한 통계결과는 Table 1과 같다. 연구지역의 석회암과 화강암을 대수층으로 하는 지하수의 중요한 수문지구화학적 특성을 살펴보면 다음과 같다.

지구화학적 특성

pH: 지하수의 pH는 석회암지역에서는 7.04~7.87, 화강암지역에서는 5.85~7.59 범위를 보인다. 석회암 지역 지하수의 pH가 화강암 지역 지하수에서 보다 약간 높지만, 전체적으로는 중성의 지하수들이다. 연구지역에 발달하는 다금속광상을 개발한 석회암지역 내 폐광산의 갱내 유출수의 pH는 7.37~9.34로서 석회암지역 음용 지하수 보다 훨씬 높은 pH를 보인다.

Eh: 지하수의 Eh는 석회암지역에서는 -4.7~22.4mV, 화강암지역에서는 -3.8~10.6mV범위를 보인다. 화강암지역 지하수중 충북대학교 수련원(시료번호; H2) 지하수의 Eh는 -20.9mV를 보이는데 이는 지하수 시료 채취가 지하수를 장기간 사용하지 않은 관정에서

충분한 양수를 하지 못한 상황에서 시료채취가 이루어진 결과로 추정된다. 갱내 유출수의 Eh는 1.9~17.3mV 범위를 보인다. 연구지역 지하수 시료에서 측정된 Eh는 비교적 낮은 값을 보여주고 있으며, 암종별 Eh값의 범위가 대체로 유사한 것으로 보아 연구지역 지하수는 암종에 관계없이 유사한 산화-환원 환경하에 있는 것으로 판단된다.

EC: 지하수의 평균 전기전도도는 석회암지역에서 316~470 μ s/cm, 화강암지역에서 34~154 μ s/cm, 갱내유출수는 315~490 μ s/cm 범위이다. 석회암지역 지하수와 갱내 유출수의 EC는 서로 유사하며, 화강암지역 지하수는 이보다 훨씬 낮다. 이는 석회암내에는 반응성이 높은 탄산염광물과 물의 반응으로부터 용존물질이 많이 용탈된 물이 존재하기 때문이다.

양이온 성분: 각 암종별 지하수의 양이온과 SiO₂ 성분비는 석회암의 경우는 Ca \gg SiO₂ \geq Mg>Na>K순이며, 화강암에서는 SiO₂ \gg Ca \geq Na>Mg>K순으로 부화되어 있다(Fig. 2). 석회암 지하수에는 Ca²⁺와 Mg²⁺ 성분이 그리고 화강암 지하수에서는 SiO₂와 Na⁺ 성분의 부화가 상대적으로 현저하다. 석회암과 화강암 내 지하수의 K⁺ 성분은 극히 적다. 일반적으로 화강암 지하수내 K⁺ 성분의 자연적인 기원으로서는 조암 광물 중 카리장석과 운모류의 용해이다. 화강암 지하수내 K⁺ 함량이 Ca²⁺와 Na⁺ 함량에 비해 매우 낮은 값을 보이는 이유중 하나는 K-장석보다는 사장석의 용해가 더 용이하기 때문이다(Nesbitt and Young, 1984).

Table 1. Results of chemical analyses for groundwater and mine drainage water in the Hwanggangri area.

Sample No.	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18
Rock	LS	GR	LS	MW	LS	LS	GR	LS	MW	LS	LS	GR	LS	GR	MW	GR	GR	GR
pH	7.87	7.03	7.37	9.34	7.62	7.18	5.85	7.04	8.25	7.42	7.53	6.45	7.36	7.59	7.37	7.39	7.08	6.32
Eh (mV)	-1.1	-20.9	22.4	14.6	17.3	1.4	6	-2.2	1.9	-0.2	-4.7	-3.8	-2.7	1.2	17.3	10.6	-0.4	2.4
T (°C)	19	17	21	26.3	17.1	21	20.8	17.4	18.4	19.3	18.6	23.5	17.7	19.3	21.7	18.4	18.4	19.8
EC (µs/cm)	316	73	428	373	446	338	33.8	396	315	470	440	153.5	466	112.6	490	76.5	77.8	120.8
Depth (m)	152	-	150	-	83	120	160	-	-	40	-	-	175	106	200	150	180	70
Na (mg/l)	6.03	7.78	2.45	1.17	2.63	5.57	2.73	4.77	1.65	3.15	4.10	14.82	2.9	13.77	3.64	6.94	9.14	6.33
K (mg/l)	1.22	0.38	1.76	1.39	3.96	1.24	0.25	5.57	0.39	1.16	1.65	0.88	4.6	0.48	4.99	0.43	0.49	0.77
Mg (mg/l)	6.82	0.7	24.5	15.8	17.1	10.3	0.6	15.1	25.3	27.6	23.9	1.42	28.7	0.51	15.1	0.48	0.84	3.54
Ca (mg/l)	58.1	9.04	67.4	62.4	79.8	57.1	2.61	69.4	42.2	78.1	74.9	14.2	68.3	13.4	87	10.7	8.75	14.5
Cl (mg/l)	13.58	2.17	9.45	1.57	16.36	11.61	2.35	16.2	2.33	18.9	14.34	1.97	12.37	2.45	6.28	3.1	5.34	5.01
F (mg/l)	<0.10	2.11	<0.10	1.01	0.29	0.32	0.35	0.44	2.74	0.82	0.37	2.32	0.37	3.96	0.44	3.02	1.97	1.31
SO ₄ (mg/l)	15.99	4.09	15.32	64.64	21.53	15.55	3.12	13.83	14.58	14.8	13.76	35.89	22.04	4.55	75.33	3.09	<1.00	26.04
HCO ₃ (mg/l)	140.35	43.32	264.52	190.38	262.39	190.08	21.05	253.223	240.72	309.98	280.08	36.00	296.86	66.51	268.49	41.49	41.19	30.2
NO ₃ (mg/l)	44.41	2.05	46.15	1.02	59.67	26.16	4.82	47.73	4.67	33.21	29.04	1.48	37.46	0.2	0.24	1.46	3.2	9.42
SiO ₂ (mg/l)	32.94	21.18	15.83	5.56	46.63	19.46	10.27	36.36	26.74	26.95	33.15	50.05	12.41	31.44	12.62	23.74	40.64	23.96
Fe (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Mn (µg/l)	<0.1	3.29	<0.1	5.92	0.63	0.76	0.5	0.25	<0.1	<0.1	<0.1	2.43	1.73	0.17	414.28	4.24	0.68	1.26
Zn (µg/l)	101.1	640.2	15.8	100.4	52.1	146.3	27.0	4.1	12.8	9.9	10.5	68.1	38.2	62.7	198.8	20.7	6.3	52.3
Cu (µg/l)	0.92	4.96	2.84	7.00	0.93	2.49	7.76	1.87	0.72	0.98	1.49	2.2	2.31	0.28	1.12	0.47	0.72	6.64
U (µg/l)	1.1	12.1	0.8	<0.1	0.4	0.5	0.3	0.4	8.4	6.6	1.2	4.2	1.0	11.4	2.0	8.5	4.7	5.2
Al (µg/l)	0.69	4.86	0.77	3.8	0.49	3.41	28.82	1.75	1.56	0.68	0.59	6.64	1.78	1.5	0.29	0.93	0.71	9.71
Cd (µg/l)	<0.1	0.21	<0.1	1.36	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.70	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.23	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cr (µg/l)	0.38	<0.2	0.36	<0.2	0.35	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.31	0.35	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
As (µg/l)	0.69	<0.2	0.56	1.22	1.80	0.72	<0.2	2.95	59.96	2.52	0.94	<0.2	2.83	2.18	311.39	3.00	0.67	0.61
Pb (µg/l)	0.26	0.2	0.45	11.37	0.57	0.23	0.55	0.20	0.16	0.14	0.18	<0.1	0.29	<0.1	0.49	0.13	<0.1	0.36
B (µg/l)	6.8	6.4	5.6	2.3	3.6	6.2	1.3	9.2	49.5	25.9	12.5	1.5	9.4	2.9	3.5	4.1	1.5	2.2
Be (µg/l)	<0.1	1.05	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.46	<0.1	<0.1	0.22	<0.1	6.44	<0.1	2.09	<0.1	0.76	0.26	0.39
Li (µg/l)	3.5	20.0	0.5	0.6	5.8	1.4	0.2	9.7	2.2	7.8	5.7	26.1	0.9	40.3	1.5	17.7	11.6	4.3
Cs (µg/l)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.45	0.19	0.73	0.79	<0.1	2.38	0.49	0.22	<0.1	<0.1
Rb (µg/l)	1.48	0.91	1.22	2.08	8.82	0.63	0.92	1.91	3.23	2.87	4.4	3.42	1.96	3.12	16.71	1.34	0.13	0.71

LS; limestone, GR; granite, MW; mine drainage water

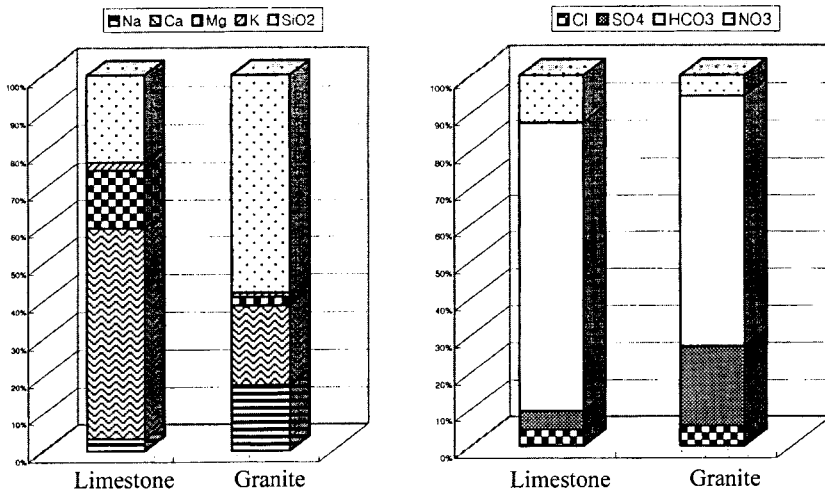


Fig. 2. Relative chemical compositions of dissolved components in groundwater from limestone and granite area, respectively.

Ca²⁺는 주로 방해석, 백운석, 석고 등의 조화용해나 Ca²⁺를 포함하는 규산염광물의 비조화용해에 기원한다. 일반적으로 방해석은 다른 광물보다 용해 및 침전속도가 빠르므로 방해석의 존재는 물속의 Ca²⁺ 거동을 조절하는 주요 요인이 된다(Fritz *et al.*, 1989). 따라서 연구지역 화강암류 내 높은 Na⁺ 함량은 주로 사장석-물의 반응결과이며, 석회암내 높은 Ca²⁺ 함량은 방해석-물의 반응결과로 추정된다.

음이온 성분: 지하수의 음이온 성분비는 석회암의 경우는 HCO₃⁻ >> NO₃⁻ > SO₄²⁻ = Cl⁻ 순이며, 화강암에서는 HCO₃⁻ >> SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ 순으로 부화되어 있으며, 이중 HCO₃⁻가 가장 우세하다(Fig. 2). HCO₃⁻는 규산염 및 탄산염 광물의 탄산에 의한 용해로 생성되는데, pH가 약 10.3 이상에서는 CO₃²⁻ 형태로 주로 존재한다. 연구지역 지하수의 pH 조건으로 보아 주로 HCO₃⁻ 형태로 존재할 것으로 보인다.

지하수 수질유형 및 오염현황

연구지역 지하수의 유형을 알아보기 위해 대표적인 양이온과 음이온을 선택하여 Piper(1944)의 삼각도에 표시하였다(Fig. 3). 석회암 지하수와 갭내 유출수는 Ca²⁺-HCO₃⁻ 유형이며, 화강암 지하수는 (Ca²⁺+Na⁺)-HCO₃⁻ 유형이나 이중 휴게소 지하수(시료번호; H12, H18)에서는 황산염 이온이 상대적으로 부화되어 있다. 연구지역 내에는 과거 형석 이외에도 금, 은, 연아연 등의 다금속광상을 개발하였던 폐광산이 주로 석회암 지역내에 많이 분포한다. 이들 광산내 채취된

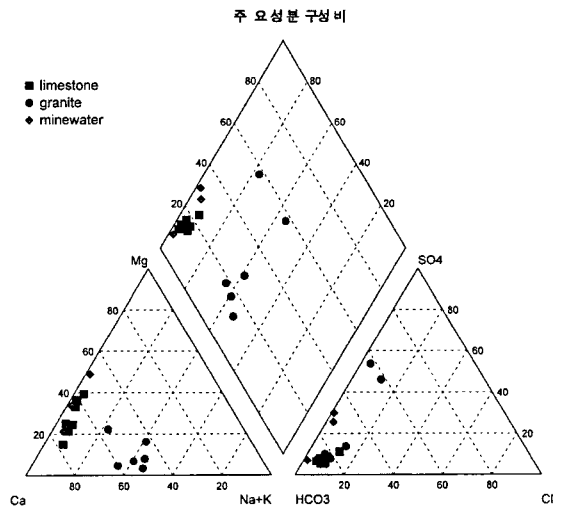


Fig. 3. The Piper's diagram showing the chemical compositions of the groundwater in limestone and granite area.

광산의 갭내 유출수에는 Mn과 As이 음용수 수질기준치를 초과하며, 석회암지역내의 음용지하수는 질산염 질소가 음용수 수질기준치를 초과하는 것이 일부 발견된다.

형석광상이 집중적으로 발달하는 석회암지역에는 불소의 음용수 수질기준을 초과하는 지하수는 발견되지 않았다. 그러나 백악기 화강암 지역에서 채취된 7개의 지하수 시료의 불소함량은 1.31~3.96mg/l로서 이중 6개가 음용수 기준치인 1.5mg/l(WHO, 1994)를 초과하는 지하수가 많아 이 지역 주민들의 불소에

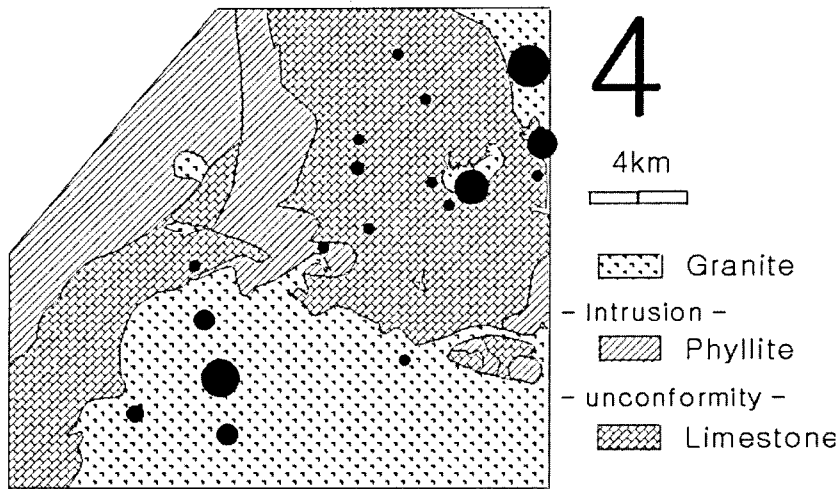


Fig. 4. Spatial distribution of fluoride groundwater overlain on geology in Hwanggangri area. High fluoride groundwaters are concentrated in the granite region. Scale of circle is proportional to F contents (0-3.96mg/l).

의한 식수오염이 우려된다(Fig. 4). 또한 휴계소 지하수에서 황산염 이온의 상대적 부하가 인위적 오염의 결과인지 주변 퇴적암 지역에 발달하는 광상의 영향에 기인하는지의 여부는 아직 확실하지 않다.

불소 함유 지하수의 지구화학 및 기원

연구지역에서 불소함량이 다소 높은 백악기 화강암 지역 지하수의 주요 성분, pH와 F함량간의 상관관계를 도시하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 F함량의 증가에 따라 Na, HCO₃, Li, pH는 증가하는 지구화학적 특성을 보인다. 이러한 특성은 케냐, 인도 등 세계 각지의 고불소 지하수에서 나타나는 특성과 유사하다 (Garciri and Davies, 1993; Rao, 1997).

화강암지역 지하수는 일반적으로 심부로 가면서 양이온내 Ca함량은 감소하고 Na함량은 증가한다. Ca함량의 감소와 Na함량의 증가는 심부지하수에서는 방해석이 침전되는 대신, 사장석의 용해가 주된 물-암석 반응이기 때문인 것으로 추정된다. 장석, 운모 등의 풍화와 같은 Al-규산염 광물의 가수분해 반응은 수소이온을 소모하면서 pH를 증가시킨다. 따라서 지하 심부로 가면서 pH는 증가하는 반면 방해석의 침전에 따라 Ca성분은 감소한다. 지하수내 Ca이온의 부족은 CaF₂의 침전을 억제시켜 불소가 풍부한 물을 생성시킨다. 따라서 불소 함유 지하수는 화강암지역의 심부지하수에서 나타나는 특성을 반영하는 것으로 추정된다.

일반적으로 F의 기원은 함불소 광물의 용해, 화산 및 분기공활동, 산업적 방출 등에서 기원한다. 연구 지역에는 형석 광상들이 밀집부존하여 석영맥과 화강암내에는 많은 형석이 산출되고 있으므로 지하수내 불소는 형석의 용해에 기인할 가능성도 있다. 그러나, 형석의 용해도가 일반적으로 매우 낮기 때문에 F의 기원으로는 형석 이외의 함불소 광물의 용해도도 고려해야 할 것으로 판단된다. 불소는 일반적으로 흑운모, 각섬석, 인회석의 OH를 치환하는 F의 용해로부터 기원할 수 있다(Savage et al., 1987; Nordstrom et al., 1989).

연구지역 함불소 지하수는 F함량이 증가함에 따라 Li⁺, Na⁺ 성분이 증가한다(Fig. 5). Li는 알칼리금속에 비해 이온반경이 훨씬 작아 크기가 같은 Mg와 화학적 거동을 같이 하므로 휘석, 각섬석, 운모등에 많으며, 특히 운모에 많다. F가 Na, Li과 강한 정의 상관관계를 보이는 것은 불소가 운모광물의 풍화에 기원할 가능성이 매우 높음을 시사한다.

남한의 형석광상은 화천지구(화천-춘천-가평일원), 황강리지구(단양-제천-괴산일원) 및 금산지구(금산-완주-무주-영동 일원)에 밀집 분포한다. 특히 금산지구와 황강리지구에는 석회질암을 모암으로 하는 열수교대광상과 중생대 화강암과 석영반암을 모암으로 하는 맥상광상이 집중 분포한다(박희인, 1976). 금산지구에서도 형석광상이 밀집 부존하는 석회암 지역에서는 불소 기준치를 초과하는 지하수가 발견되지 않았으나

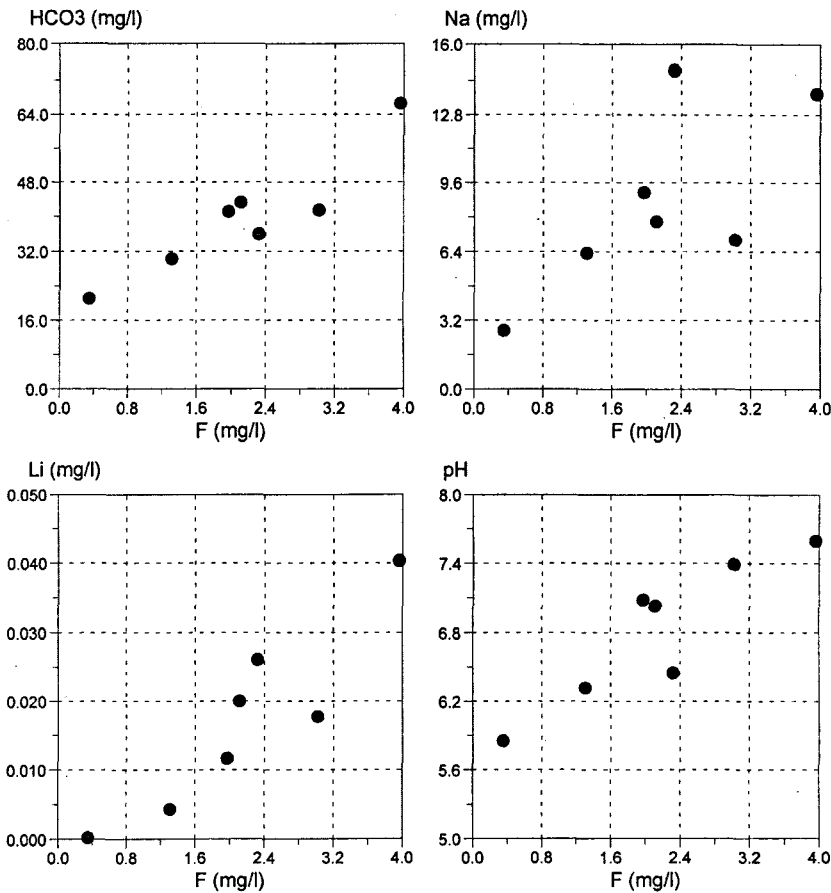


Fig. 5. The variation of major element contents and pH for F contents in fluoride water.

백악기 화강암류 분포지역의 지하수에서 불소가 음용수 기준치를 초과하는 경우가 매우 흔하며, 불소는 산성화강암류내 운모류의 용해에 의한 것임이 보고된 바 있다(황 정, 2001). 이상에서 연구지역의 함불소 지하수는 백악기 화강암류에 집중 분포하며 지하수내 F함량은 Na, Li, HCO₃, pH와 정의 상관관계를 갖는다. 이는 지하수내 불소가 형석광화대 보다는 백악기 화강암류와 성인적 관련이 깊을 것임을 시사한다.

결론

1. 연구지역의 수질은 산화환경의 중성지하수로서 석회암 지하수에는 Ca²⁺ 성분, 화강암류 지하수에는 SiO₂ 및 Na⁺ 성분이 상대적으로 우세하며, 음이온은 암중에 관계없이 HCO₃⁻ 성분이 우세하다.
2. 연구지역내 석회암 지역의 지하수는 Ca²⁺-HCO₃⁻ 유형이며, 백악기 화강암 지역의 지하수는 (Ca²⁺+Na⁺)-HCO₃⁻ 유형이다.

Na⁺)-HCO₃⁻ 유형이다.

3. 연구지역 내 광산폐수에 의한 음용지하수의 오염은 아직 발견되지 않았으나, 백악기 화강암내 음용지하수는 불소함량이 음용수 수질 기준치를 초과하는 것이 많다.
4. 불소가 농집된 지하수는 F함량이 증가함에 따라 Na, HCO₃, Li, pH 등은 증가 하는 지구화학적 특성을 보인다.
5. 지하수내 불소의 기원은 형석 혹은 함불소 규산염광물의 용해에 기인하며, 이들 광물은 산성 화강암류와 성인적 관련이 깊다.

참고문헌

박희인, 1976, 우리나라 형석광상의 유체포유물 연구. 광산지질, 9(1), 27-44.
 유재영, 최인규, 김형수, 1994, 춘천지역의 기반암의 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성. 지질학회지, 30(3),

- 307-324.
- 이민성, 박봉순, 1965, 황강리 도폭, 국립지질조사소.
- 전효택, 이희근, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1997, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(II)-수리지구화학적 고찰. 지하수환경학회지, 4(1), 27-40.
- 황 정, 2001, 금산-완주지역 형석광화대내 석회암 및 화강암지역 지하수의 불소 분포특성 및 저감방안. 자원환경지질, 34(1), 105-117.
- Fritz, P., Fontes, J.C., Frape, S.K., Louvat, D., Michelot, J.L., and Balderer, W., 1989, The isotope geochemistry of carbon in groundwater at Stripa. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 53, 1765-1775.
- Garciri, S.J. and Davies T.C., 1993, The occurrence and geochemistry of fluoride in some natural waters of Kenya. *Journal of Hydrology*, 143, 395-412.
- Greengerg, A.E., Clesceri, L.S., and Eaton, A.D., 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed., American Public Health Association, Washington DC, 1010 p.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1984, Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 48, 1523-1534.
- Nordstrom, D.K., Ball, J.W., Nonahoe, R.J., and Whitemore, D., 1989, Groundwater chemistry and water rock interactions at Stripa. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 8, 153-160.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union, Transaction*, 5, 914-923.
- Rao, N.V.R., 1997, The Occurrence and behaviour of fluoride in the groundwater of the Lower Vamsadhara River basin, India, *Hydrological Sciences*, 42(6), 877-892.
- Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., Thyu, H.S., Jeong, S.H. and Park, J.N., 1973, Geology of the Hwanggangni mining district, Republic of Korea. *Anglo-Korean Mineral Exploration Group*, 118 p.
- Savage, D., Cave, M.R., Milodowski, A.E., and George, I., 1987, Hydrothermal alteration of granite by meteoric fluid; an example from the Cammenllis granite, United Kingdom. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 96, 391-405.
- WHO(World Health Organization), 1994, Fluorides and oral health. *World Health Organization Tech. Rep. Ser.* 846, Geneva.

2002년 5월 27일 원고 접수
 2002년 7월 8일 수정원고 접수
 2002년 7월 20일 원고 채택