

고령지역 지하수에 대한 지화학적 연구

Geochemical Study on the Groundwater in Goryeong Area

이재영(Jae - Yeong Lee)* · 김철호(Chul - Ho Kim)** · 이인호(In - Ho Lee)* · 고인석(In - Seok Koh)*

요 약 : 고령지역 지하수의 지화학적 특징은 34개 지하수 시료의 분석결과 낙동층, 하산동층, 진주층 및 고령화강암의 광물조성에 따라 다르고 대부분 용질의 농도는 퇴적암층의 지하수가 화강암의 지하수보다 현저히 높다. Ca^{2+} 농도는 주로 탄산수와 방해석 및 풍화된 사장석과의 반응의 결과이며 진주층의 평균 지하수는 방해석에 대하여 과포되어 있다. 지하수의 주요 형은 낙동층, 하산동층, 진주층의 지하수는 경도가 각각 155 mg/l, 150 mg/l, 140 mg/l인 경수질의 $Ca(HCO_3)_2$ 내지 $CaSO_4$ 형이며 고령화강암의 지하수는 경도가 90 mg/l의 연수질의 $Ca(HCO_3)_2$ 형이다. $Ca(HCO_3)_2$ 형은 방해석과 사장석의 분해와 관련되고 $CaSO_4$ 형은 황철석의 분해 및 일부 생활오수의 영향이 있을 것으로 사료된다. $CaSO_4$ 형은 퇴적층 지하수가 화강암 지하수보다 지화학적으로 더 진화되었음을 지시할 수 있으나 황철석의 분해와 생활오수의 영향 때문에 확실치는 않다. 황철석은 환원환경의 회색 내지 흑회색 알코스 사암 중에서 안정한 황화물로서 산출될 것으로 기대된다.

Abstract : Geochemical characteristics of groundwater in Goryeong area, based on chemical analyses of 34 water samples and mineralogical study of rocks, differ among Nagdong, Hasandong and Jinju formations and Goryeong granite in relation to mineralogical compositions of the rocks. Concentrations of most solutes are higher in groundwater of the sedimentary formations than in that of granite. Ca^{2+} in the sedimentary groundwaters results mainly from reaction of CO_2 -charged water with calcite and weathered plagioclase. Average groundwater in the Jinju formation is oversaturated with respect to calcite. Major types of groundwaters are hard $Ca(HCO_3)_2$ and $CaSO_4$ with hardness of 155 mg/l for Nagdong formation, 150 mg/l for Hasandong formation and 140 mg/l for Jinju formation whereas it is soft $Ca(HCO_3)_2$ with hardness of 90 mg/l for Goryeong granite. $Ca(HCO_3)_2$ type results from dissolution of calcite and plagioclase while $CaSO_4$ type results from dissolution of pyrite and partly from domestic pollutants. $CaSO_4$ type may indicate that the sedimentary groundwaters are more evolved geochemically than the granitic groundwater, but it is not obvious because the type might be affected by the dissolution of pyrite and domestic pollutions. Pyrite is expected to occur as a stable sulfide in the gray~dark gray arkosic sandstones formed under reducing environment.

서 론

본 연구는 고령지역의 지질환경이 지하수의 수질에 미치는 영향을 규명하기 위하여 고령읍 및 주변에 분포하는 신동층군의 낙동층, 하산동층, 진주층을 대상으로 사암의 광물조성 특히 방해석과 사장석을 조사하고 수질과의 관계를 비교검토하였다. 각 층 사암의 구성광물의 함량범위와 평균치는 기자료(민경희, 1981; 고인석, 1982)를 참고자료로 하여 낙동층 14개, 하산동층 17개, 진주층 18개의 광물조성에서 구하였다. 지하수의 분석치는 농어촌 진흥공사의 기자료(김철수, 1995)를 이용하였다. 그런데 본 연구에 포함된 지하수정은 약 10년전부터 조사지역내 농촌 주민들이 생활용수로서 사용해 온 간이 상수도(심도 100m 내외의 암반관정)를 대상으로 하였고 그 자료는 생활 및 농업용수를 목적으로 측정 및 분석된 것이므로 대수층의 광물

조성과 관련하여 상관관계를 연구하기에는 충분하다고는 생각되지 않는다. 그리고 지하수정은 갯수도 적고 위치상 한 곳에 편중된 것이 많으므로 비록 층별로 비교검토되었다고 하더라도 그 결과는 각 층의 대표적인 특징은 될 수 없다. 그러나 우리나라에서는 지하수에 대한 체계적인 조사연구는 최근에 와서야 비로소 활발히 이루어 지고 있고 국내 대부분의 농촌지역은 지하수 수질에 대한 자료가 거의 없는 실정이므로 본 자료에 심도, 온도의 값이 없고 지질환경과 수질과의 상관관계 연구에 필요한 SiO_2 , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 등의 함량이 일부 결여되어 있다고 하더라도 차후 본 역에서 체계적인 지하수 조사연구가 실시될 때 본 연구는 과거 수질의 일부 특징과 현재 수질의 변화를 파악하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

지질개론

금번 조사된 고령 지역은 현풍도폭(김기완, 여상철, 1970)과 구정도폭(최승오, 권영일, 1970)내에 포함되며 도폭 설명서와 해당지역의 퇴적암석학 및 암석학적 자료(민경희, 1981; 고인

*경북대학교 지질학과(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

**농어촌 진흥공사(Rural Development Corporation, Daegu 702-280, Korea)

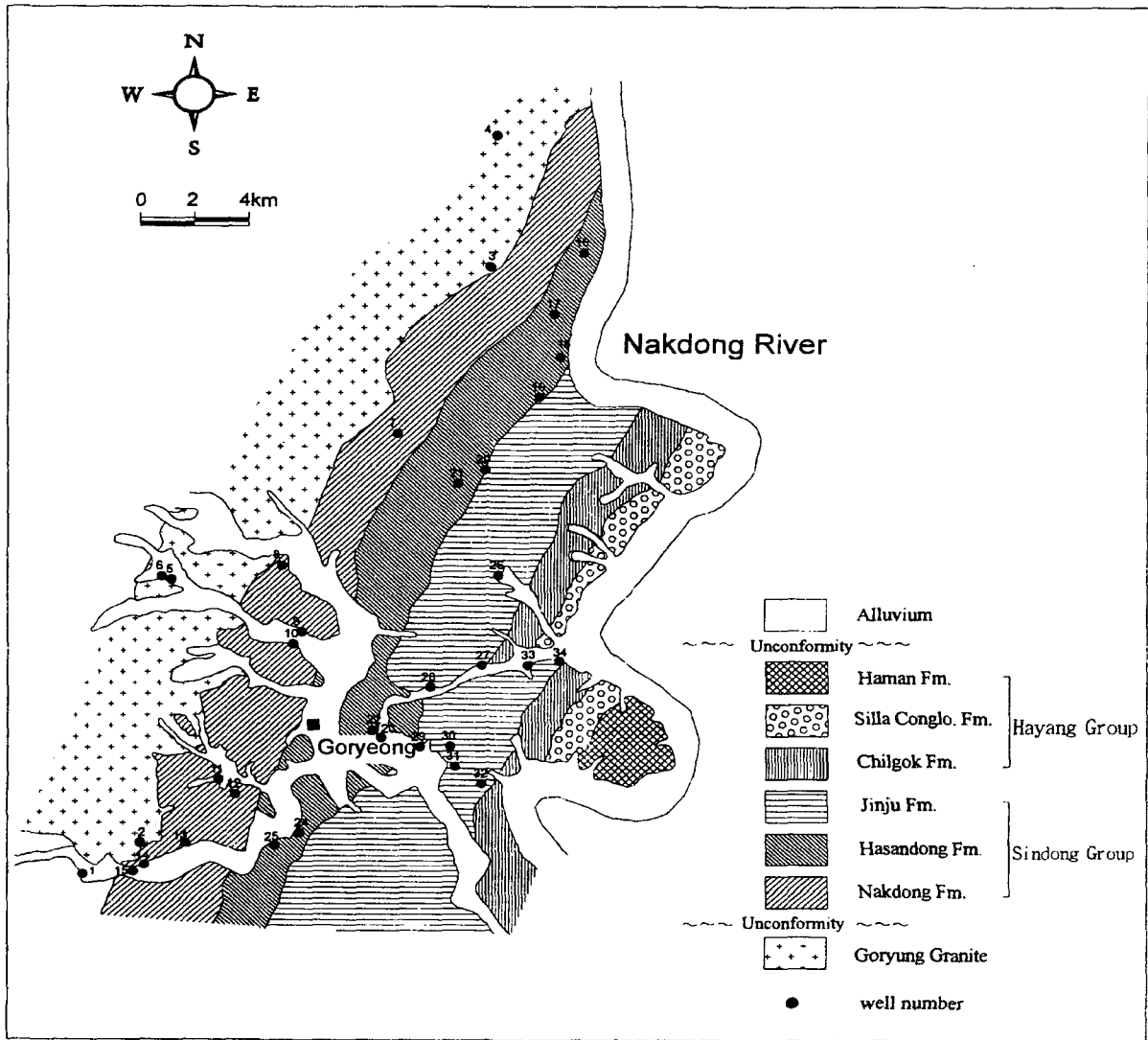


Figure 1. Geological map and well locations of Goryeong area.

석, 1982; 이효숙, 1996)에 의하면 본 역은 시대 미상의 고령 화강암과 이를 부정합으로 덮고 있는 신동층군의 낙동층, 하산동층 및 진주층으로 구성되어 있으며 신동층군의 최상부층인 진주층은 하양층군의 최하부층인 칠곡층에 의하여 정합으로 피복되어 있다. 신동층군의 주요 주향과 경사는 NNE와 SE 방향이다(Figure 1). 본 역의 지질을 요약하면 다음과 같다.

낙동층

본 층은 신동층군의 최하부층으로 주로 암회색의 이암, 사암 및 셰일과 갈색의 역암 등으로 구성되어 있다. 하부는 주로 역암, 역질 사암 및 조립질 사암이 우세하고 회색 내지 녹색 셰일과 흑색 셰일 내지 탄질 셰일이 협재한다. 상부는 중립질 사암이 우세하고 회색 이암이 협재한다. 본 층의 주향과 경사 및 층후는 N20~60°E, 15~25°SE, 700~800m이다.

하산동층

본 층은 낙동층을 정합으로 덮고 있으며 낙동층과 구별되는 특징인 저색의 이암과 셰일로 구성되어 있다. 하부는 담회색 알코스사암이 우세하고 1 m 내외의 담회색 셰일이 수매 협재하며 역질 사암이 협재하기도 한다. 중부는 녹색의 셰일과 사질 셰일, 저색의 셰일 또는 사질 셰일이 호층을 이루며 셰일이 우세하며 입간 물질에는 석회질이 많다. 석회질 결핵체도 포함되어 있다. 상부는 중부에 비해 저색의 사질 셰일 및 셰일이 우세하다. 본 층의 주향과 경사 및 층후는 N20~40°E, 15~25°SE, 약 700~800 m이다.

진주층

본 층은 하산동층을 정합으로 덮고 있으며 암회색 사암, 흑색 또는 암회색 셰일, 사질 셰일, 역질사암, 이암, 석회암 등으로 구성되어 있으며 석회암 결핵체가 포함되어 있다. 본 층에는 암회색 내지 흑색의 박층이 특징적으로 협재한다. 하부는 암회색 또는 회색의 사질 셰일 또는 셰일이 우세하다. 중부는 암회색 또

는 녹회색의 사암, 세일 및 세일 중에 협재하는 흑색의 사질 세일로 구성되어 있으며 흑색의 사질 세일이 우세하다. 이 흑색 세일 중에는 이질 석회암과 탄질 세일이 발달되어 있으며 녹회색 내지 암회색 세일에는 석회질 성분이 많이 포함되어 있다. 상부는 회색 사암이 우세하며 흑색의 사질 세일 또는 세일이 협재하나 빈약하고 녹회색 사암 내지 사질세일이 교호한다. 본 층의 층후는 대략 1200 m이다.

고령 화강암

본 암은 조사지역 서측에 북북동 방향으로 분포하며 신동층군의 낙동층에 의해 부정합으로 피복되어 있다. 본 암은 담회색 내지 녹회색의 중립질이며 비교적 장석이 많고 장석은 대부분 사장석으로 구성되어 있다. 홍색 또는 연한 녹색을 띠는 장석이 특징적이다. 절리는 N40~45°E, 70~80°SE 방향의 것이 관찰된다.

그런데 지하수의 수질은 대수층의 암류와 암질(광물 및 화학 조성)과 밀접한 관계를 가지며 특히 신동층군 지하수(본 역의 주요 생활용수원)의 Ca²⁺와 Mg²⁺의 농도는 주로 대수층의 방해석(사장석을 교대한 것, 층간물질), 사장석, Mg-규산염(예로 흑운모)의 영향을 많이 받으므로 대수층의 방해석, 사장석, 흑운모 등 광물의 함량을 조사하였다(Table 1). 그리고 사장석을 교대한 방해석의 함량은 신동층군의 퇴적환경과 관련되므로 산화/환원환경에 대하여 지시적인 광물(적철석, 갈철석, 녹니석)

과 암층의 암색(저색-갈색, 황-녹색, 회-흑색)에 유의하여 관찰하였다(Table 2). 본 역의 신동층군의 퇴적환경은 암색과 광물로 미루어 볼 때 낙동층과 진주층은 환원환경이 우세하고 하산동층은 산화환경이 우세한 경향을 보인다.

시료채취 및 화학분석

고령 지역의 암류별 지하수의 수질 특징을 파악하기 위하여 과거 약 10년전부터 생활용수로서 사용해 온 간이 상수도(심도 100 m 내외의 암반관정)를 대상으로 1993년 8월부터 9월 사이에 상류지역 고령 화강암에서 6개, 낙동층에서 9개, 하산동층에서 10개, 진주층에서 9개 총 34개 관정에서 채수되었다(Figure 1 참조). pH(휴대용 pH 미터, Orion/720A), Eh(휴대용 Eh 미터, Orion 720A와), EC(Conductivity bridge RC-20)는 현장 측정되었으며 양이온 분석 시수는 2리터의 PE병에 취하고 pH < 2가 되게 농질산을 가하였다. 그리고 음이온 분석을 위한 시수는 전처리 없이 시료보관용 박스에 넣고 실험실로 운반되었다. 운반된 시수의 음이온 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻은 분광광도(UV 20A, Shimatzu)로, 양이온 K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺은 질산 시약을 몇 방울 가하여 원자흡광분광분석기(Verian 40)로, 그리고 미량금속원소는 유도플라즈마분광분석기(Jovin Ybon)로 분석되었다. HCO₃⁻ 함량은 계산으로 구하였다(Table 3).

Table 1. Mineral composition(%) of Sindong Group and Goryeong granite

Component	Formula	av.	Nagdong Fm.	Hasandong Fm.	Jinju Fm.	Goryeong Gr.
		range	(14)	(17)	(18)	(9)
Quartz	SiO ₂	av.	58.03	51.54	42.06	23.37
		range	39.27~70.19	39.48~66.88	24.09~59.45	12.98~34.94
K-feldspar	KAlSi ₃ O ₈	av.	3.68	6.19	8.57	29.54
		range	0.85~7.73	0.79~13.32	1.11~23.38	22.43~35.27
Plasioclase	NaAlSi ₃ O ₈ - CaAl ₂ Si ₂ O ₈	av.	2.24	5.47	11.67	38.77
		range	0.68~5.32	1.28~10.78	2.49~29.29	31.44~50.0
Biotite	K(Mg,Fe) ₃ (Al,Fe) Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	av.	2.5	0.79	2.21	6.66
		range	0.35~8.75	0.20~3.11	0.22~11.46	3.84~10.23
Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃) O ₁₀ (OH) ₂	av.	1.77	1.36	1.65	0.42
		range	0.60~3.66	0.1~2.43	0.46~4.00	0.06~1.37
Hornblende	(Ca,Na) ₂₋₃ (Mg,Fe ²⁺ , Fe ³⁺ ,Al) ₅ (Al, Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₂	av.	-	-	-	0.86
		range	-	-	-	0.06~1.37
Calcite	chemical interstitial material	av.	6.75	14.00	7.42	-
		range	0.51~35.78	2.05~24.13	1.98~19.72	-
	plagioclase- replaced form	Plagioclase is partly replaced by calcite, of which content is not determined in this study.				
Pyrite	accessory minerals	av.	2.12	2.28	0.81	-
		range	0.20~8.46	0.28~5.70	0.14~2.91	-
	Pyrite is present in small amounts as one of accessory minerals, which consist of hematite, limonite, magnetite, chlorite, epidote, garnet, tourmaline etc. including carbonic materials. The content of pyrite is not determined.					

*Data from Min (1981). (): Number of samples.

Table 2. Main iron pigments in sandstones of the Sindong Group in Goryeong area

State of oxidation	Oxidising environment, Fe(III)			Oxidising-Reducing environment, Fe(II-III)			Reducing environment, Fe(II)		
Compound	pigment mineral	formular	color	pigment mineral	formula	color	pigment mineral	formula	color
Oxide	hematite*	Fe ₂ O ₃	red	magnetite	Fe ₃ O ₄	black		FeO	
Hydroxide	limonite*	2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	brownish~yellowish					Fe(OH) ₂	white, colorless
Silicate							chlorite*	(Mg,Fe ²⁺) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	green

Main deposition environments are oxidising/reducing for Nagdong Fm., oxidising for Hassandong Fm and reducing for Jinju Fm.. FeO and Fe(OH)₂ are formed in reducing environment as metastable form, which is largely colorless. In a reducing condition, therefore, red, brownish, or yellowish sandstones turn gray due to the color of organic carbon.

*Data from Min (1981) and Koh (1982)

Table 3. Chemical and physical properties of groundwaters in Goryeong area. (conc. unit of elements in mg/l)

Formation	Goryeong Gr.						Nakdong Fm.						Hasandong Fm.					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
pH	6.39	6.46	7.34	6.66	6.78	6.59	7.58	7.08	7.22	7.37	7.42	7.75	7.07	7.62	7.57	7.48	7.9	6.91
Eh (V)	0.199	0.165	0.201	0.208	0.2	0.179	0.148	0.082	0.158	0.128	0.18	0.15	0.177	0.163	0.092	0.15	0.157	0.189
EC (μs/cm)	126	138	184	163	89	111	220	149	272	138	219	362	206	184	188	193	237	204
K	0.89	0.62	0.6	2.16	0.47	0.36	0.66	0.27	0.45	0.61	1.13	2.17	0.92	1.12	0.7	0.57	1.3	0.22
Na	5.64	6.76	10.6	6.96	6.47	5.17	6.66	3.49	6.88	6.23	17.86	.	5.29	5.44	3.32	.	6.14	.
Ca	34.71	35.91	42.84	32.35	20.11	25.16	60.33	40.7	60.48	38.95	57.72	.	55.52	47.7	62.11	72.8	52.44	.
Mg	2.87	2.37	4.06	3.67	1.03	1.73	7.1	3.37	10.65	4.87	4.09	7.01	5.17	7.17	6.7	5.51	3.19	3.88
Cl	5.52	8.86	13.14	8.2	N.D.	1.72	7.42	N.D.	19.2	N.D.	2.66	39.42	6.48	N.D.	6.1	3.64	N.D.	20.1
SO ₄	4.04	32.4	68.4	58.6	N.D.	1.24	94.4	24.4	98.4	2.44	70.4	182	78.4	26.4	74.4	N.D.	N.D.	24.4
NO ₃	2.14	1.55	0.98	2.05	0.7	1.34	N.D.	0.16	0.27	0.57	0.1	2.36	1.6	0.3	0.3	0.54	N.D.	0.14
HCO ₃	119.7	82.2	69.4	48.2	.	93.7	105.3	119.3	97.7	156.8	151.3	.	187	89.3	.	.	79.2	.
Fe	.	0.416	0.032	0.017	0.037	0.137	0.06	0.042	0.029	0.02	0.056	.	0.544	.	.	0.033	0.089	.
Mn	0.003	0.036	0.003	0.005	0.002	0.005	0.027	0.027	0.028	0.003	0.01	0.023	0.018	0.007	0.12	0.008	0.004	0.006
Cu	0.004	0.006	0.002	0.001	0.004	0.004	0.003	0.001	0.002	0.005	0.001	0.011	0.003	0.009	0.025	0.003	0.003	0.005
Zn	0.084	0.233	0.043	0.049	0.508	N.D.	0.049	0.042	0.016	0.018	0.093	N.D.	0.086	0.489	0.076	0.018	0.244	0.095
Pb	0.014	0.01	0.004	0.012	0.014	0.013	0.011	0.008	0.005	N.D.	0.011	0.067	0.016	0.023	0.012	0.011	0.006	0.006
Ni	0.011	0.001	0.006	0.003	0.003	0.004	0.006	0.01	0.001	0.008	0.008	0.004	0.006	0.009	0.004	0.009	0.004	0.004
Co	0.004	0.002	0.001	N.D.	N.D.	N.D.	0.003	0.004	0.003	N.D.	0.005	0.008	0.006	0.008	0.005	0.004	0.002	0.005
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Table 3. Continued (conc. unit of elements in mg/l)

Formation	Hasandong Fm.							Jinju Fm.								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
pH	7.27	7.5	7.78	7.78	7.48	8.12	7.71	6.9	8.59	8.11	7.45	8	7.68	7.75	7.9	7.53
Eh (V)	0.192	0.147	0.154	0.144	0.112	0.149	0.169	0.099	0.111	0.115	0.12	0.136	0.125	0.146	0.139	0.129
EC (μs/cm)	259	176	224	153	152	213	148	283	403	243	.	287	209	283	224	235
K	0.78	0.51	0.52	6.08	4.86	1.32	0.43	12.1	4.28	4.26	6.29	16.2	0.4	11.2	7.19	0.59
Na	5.35	5.79	9.97	7.74	8.14	13.3	4.83	12.4	59.9	59.9	35	35.3	8.41	16.8	43	8.71
Ca	70.97	40.25	55.82	31.21	33.83	48.7	38.05	59.3	18.33	18.39	.	39.5	53.52	57.12	24.23	24.46
Mg	6.43	3.33	8.95	6.36	4.96	10.77	4.14	13.1	4.12	4.12	6.76	17.2	4.24	11.9	7.34	8.76
Cl	16	N.D.	4.58	N.D.	N.D.	12.2	1.72	15.14	33.14	9.04	.	16	1.52	13.14	8	3.62
SO ₄	12.4	24.4	1.64	N.D.	N.D.	N.D.	8.4	7.84	285.6	183.6	.	86.4	134	128.4	3.84	34.4
NO ₃	1.74	0.74	N.D.	0.35	0.33	0.33	1.27	2.59	0.44	N.D.	.	0.3	0.72	N.D.	0.45	0.13
HCO ₃	218.7	123.7	232.2	.	.	.	13.52	259.5	178.2	6.5	.	187.9	33.6	109.6	216.8	213.7
Fe	0.081	0.06	0.038	0.031	0.115	0.459	0.097	0.02	0.41	0.041	0.101	0.013	0.12	.	0.018	0.022
Mn	0.009	0.004	0.007	N.D.	0.002	0.003	0.002	0.009	0.008	0.005	0.007	0.013	0.002	0.006	0.002	0.004
Cu	0.008	0.001	0.002	N.D.	N.D.	0.005	0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.002	N.D.	N.D.	0.004
Zn	0.021	0.161	0.027	0.005	0.121	0.537	0.173	0.019	0.021	0.021	0.055	0.003	0.16	0.066	0.013	0.044
Pb	0.011	0.011	0.014	N.D.	N.D.	0.042	0.013	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.11	N.D.	N.D.	0.005
Ni	0.009	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	0.006	0.002	0.004	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	0.003
Co	N.D.	N.D.	0.002	N.D.	N.D.	0.009	0.003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.003	N.D.	N.D.	0.006
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.005	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	0.001

지하수의 지화학적 성질

용존성분

자연 지하수의 보통 용존성분인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 의 농도는 대수층의 암류와 암질에 따라 다르고 대구지역은 하양층군 지하수가 팔공산 화성암 지하수보다 높은 경향을 보이는데(이인호외, 1997) 본 역도 신동층군의 지하수가 고령 화강암의 지하수보다 상기 성분의 농도가 현저히 높고 신동층군 중에서는 진주층의 지하수가 가장 높다(Table 3 참조). 이들 성분의 농도는 대수층의 광물조성과 조성광물의 용해도와 풍화정도에 밀접히 관련된다. 예로 신동층군의 낙동층, 하산동층, 진주층은 모두 고령 화강암보다 사장석의 함량이 현저히 낮으나 사장석은 상당 부분 방해석으로 교대되어 있으므로 Ca^{2+} 의 용출이 훨씬 용이하다. 신동층군에서는 진주층이 사장석의 함량이 가장 많음에도 지하수 중 Ca^{2+} 농도는 제일 낮은 것은 지하수의 pH, 교질물에 의한 흡착과 이온교환, 사장석의 풍화정도의 차이 및 방해석의 양에 관련될 것으로 사료된다. 그리고 박편 제작을 위한 암석시료의 채취는 지표의 비교적 신선한 노두에 국한되고 지하수 주요 이온의 농도는 지하수의 Eh-pH 조건에 따른 관련 광물의 안정도와 용해속도 등의 지배를 받으므로 지하수의 농도와 조암광물의 함량에서 비례적 상관관계만을 기대하기는 어렵다.

본 역 지하수의 주요 이온과 관련 광물 및 기타 공급원과의 관계를 보면 대수층의 주요 구성광물인 장석류는 주로 Na^+ , K^+ 및 Ca^{2+} 의 주요 공급원이 되고 Mg^{2+} 은 각섬석과 흑운모와 관련되며 방해석은 Ca^{2+} , HCO_3^- 그리고 SO_4^{2-} 는 황철석과 관련된다. Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 는 다른 공급원으로 석고를 고려할 수 있으나 석고($K=10^{-46}$)는 방해석($K=10^{-84}$)보다 훨씬 가용성으로 지표 환경에서는 잔존하기 힘들고 실제 본 역 지질에 대한 문헌에는 아직 기재된 것이 없다. 따라서 SO_4^{2-} 의 공급은 주로 황철석과 관련되고 극히 소량은 유기물의 분해(Mitchell, 1974; Orr, 1978)에서 공급될 수 있다. Cl^- 는 고령 화강암에서는 마그마에서 유래되었던 휘발성분의 일부로서 화강암의 구성광물 중에 함유되었던 것이 용출되어 나올 수 있으며 생활하수에 관련 된다.

지하수의 수질형

고령 지역 지하수는 낙동층, 하산동층 및 진주층의 주요 구성광물인 장석류와 방해석의 성분이 반영된 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형과 그리고 황철석의 영향을 받았을 것으로 생각되는 CaSO_4 형이 발달하는데 고령읍 중심부에서 멀리 떨어진 소가천 상류의 오염이 적은 고령 화강암은 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형이 우세하고 낙동층은 CaSO_4 형이 우세하며 하산동층은 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형이 우세하다. 진주층은 불규칙한 경향을 보인다(Figure 2). 지하수의 암류별 평균경도는 낙동층이 155 mg/l, 하산동층이 150 mg/l, 진주층이 140 mg/l로 경수이고, 고령 화강암이 90 mg/l로 연수이다.

주음이온의 변화

지하수가 지하 유로를 따라 이동함에 따라 주요 성분인 양이온 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 음이온 HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 의 농도가 점차 증가하게 되는데 주양이온은 농도의 변화가 일정하지 않

으나 주음이온은 일반적으로 지하수의 이동 거리가 크고 기간이 길수록 그리고 심도가 깊을 수록 HCO_3^- 는 감소하고 SO_4^{2-} 와 Cl^- 는 증가하여 지하수의 수질은 HCO_3^- 에서 SO_4^{2-} 를 거쳐 Cl^- 로 진화되는 것(Chebotarev, 1955; Domenico, 1972; Freeze and Cherry, 1979)으로 일찍부터 알려져 왔다. 고령 지역 지하수의 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형과 CaSO_4 형은 유로 과정에서 지하수가 접한 암석의 구성광물과 관련된다. 즉, 물은 대수층 내 여러 광물과 접촉하고 있으므로 지하수형의 변화에는 접촉하는 광물들의 양과 용해도가 중요 인자가 된다. 일반적으로 HCO_3^- 는 토양대의 CO_2 와 방해석 및 돌로마이트에서 공급되고 그 농도는 토양대의 Pco_2 와 방해석 및 돌로마이트의 용해도에 의하여 조정된다.

주음이온의 공급원을 고령 지역 지질과 관련하여 보면 소가천 상류는 고령 화강암이 분포하므로 HCO_3^- 는 장석류의 풍화와 관련되며 고령 지역 중심부의 낙동층, 하산동층, 진주층에는 Table 1에서 보는 바와 같이 풍화된 장석류는 상당 부분 방해석으로 교대되어 있고 화학적 입간물질(interstitial material)에 방해석이 많이 함유되어 있으므로(민경희, 1981; 고인석, 1982) CO_2 를 녹히고 있는 지하수에 쉽게 용해되어 HCO_3^- 를 공급하게 된다.

한편 본 역 퇴적암층에는 부수광물로서 소량의 황철석이 관찰되는데(민경희, 1981) 일반적으로 황철석은 환원환경의 흑색 내지 암회색 세일층에 흔히 산출된다. 황철석은 풍화로 산화되면 황산철이 생성되고 이는 SO_4^{2-} 의 주요 공급원이 될 뿐만 아니라 HCO_3^- 보다 강한 분해력을 가지고 방해석과 돌로마이트를 용해한다. 따라서 본 역 지하수의 주요 음이온은 HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 가 되며 지하수는 HCO_3^- - SO_4^{2-} 조성으로 된다. 그러나 SO_4^{2-} 와 Cl^- 의 주요 공급원이 될 수 있는 석고와 염화물은 본 역에 산출되지 않으므로 SO_4^{2-} 형과 Cl^- 형으로 진화되지는 않는다. Figure 2에 의하면 화강암에서 퇴적암 지역으로 올수록 음이온은 SO_4^{2-} 가 현저히 증가하고 양이온은 다소 불규칙하나

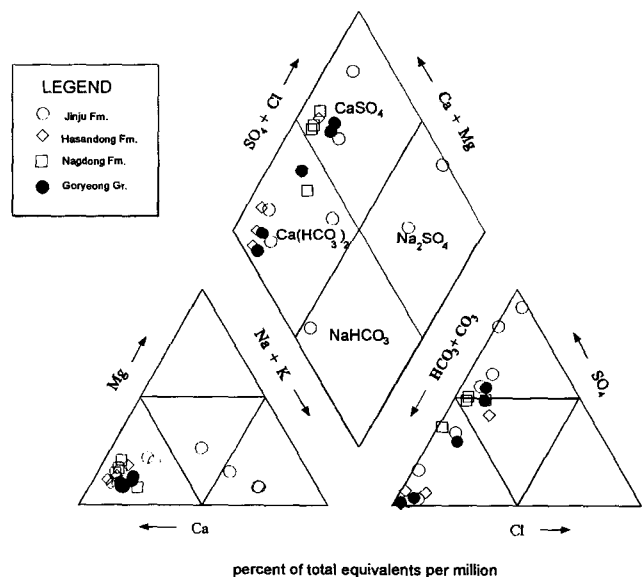


Figure 2. Piper diagram of groundwaters in Goryeong area.

Ca²⁺가 증가하는 경향을 보이며 지하수형은 Ca(HCO₃)₂형에서 CaSO₄형이 우세해지는 경향을 보인다.

Eh-pH

고령 지역 지하수의 pH와 Eh의 영역은 고령 화강암 지역과 신동층군 지역간에 약간의 차이가 있다. 고령 화강암 지역은 pH=6.4~7.3(평균 6.7), Eh=179~208 mv(평균 190 mv)로 약산성 내지 중성의 전이환경에 해당되고 석회질 성분이 있는 신동층군 지역은 pH=6.4~8.6(7.6), Eh=82~192 mv(140 mv)로 약산성 내지 약알칼리성의 전이환경에 해당된다. 그리고 신동층군 지역은 층에 따라 그 영역이 조금씩 다른데 낙동층은 pH=6.4~7.6(7.4), Eh=82~180 mv(140 mv), 하산동층은 pH=6.9~8.1(7.6), Eh=112~192 mv(160 mv), 진주층은 pH=6.9~8.6(7.8), Eh=99~146 mv(120 mv)로 pH는 진주층이 제일 높고 Eh는 산화환경이 우세한 하산동층이 제일 높다(Figure 3).

본역 지하수의 pH는 전체적으로 볼 때 약산성 내지 약알칼리성이고 신동층군에서 진주층의 지하수는 pH가 높고 낙동층의 지하수는 pH가 낮은 것은 석회질 성분이 양과 관련된다. Eh는 생활하수로 인한 오염의 가능성이 있는 고령읍의 신동층군 지역이 오염이 적은 고령 화강암 지역보다 현저히 낮으나 그 영역은 Garrels와 Christ(1965)에 의하여 Eh-pH도에 표시된 지하수의 Eh영역(약 -100~-200 mv)보다 훨씬 높고 대구지역의 파쇄대가 발달한 함안층(131 mv) 보다도 높다. Eh는 일반적으로 지하수가 깊고 상부에 파쇄대가 발달되어 있지 않으면 지

표수의 영향을 받지 않으나 파쇄대가 있으면 영향을 받게 된다. 따라서 고령 지역 신동층군의 지하수는 파쇄대를 통해 Eh값이 높은 하천수의 유입이 있었을 가능성이 있다. 낙동층, 하산동층 및 진주층을 흐르는 하천의 Eh는 각각 167 mv, 191 mv, 97 mv이다.

주이온의 농도비

주이온의 농도에는 공급원 광물과 오염원 등의 영향이 반영되므로 그 농도비를 통하여 관련 광물의 함량과 조성 및 오염의 정도 등을 추리하는데 도움이 된다. 예로 Ca²⁺/Na⁺비는 방해석의 함량, 사장석의 An/Ab비 및 생활하수에 의한 NaCl의 오염을 고려할 수 있다. 신동층군 사암의 사장석 조성은 Ab₈₅An₁₅ 내외(민경희, 1981)로 An함량이 낮은 것으로 보고되어 있는데 방해석이 대부분을 차지하는 입간물질의 함량은 진주층(7.4%)이 낙동층(6.8%)과는 비슷하고 하산동층(14.0%)의 약 1/2배밖에 되지 않으나 지하수의 Ca²⁺/Na⁺비는 진주층이 1.3로 낙동층의 7.0과 하산동층의 7.1보다 매우 낮은 것은 주로 pH의 증가와 교질물에 의한 흡착과 이온교환에 관련되는 것으로 생각된다. Ca²⁺/Mg²⁺비는 진주층의 지하수(4.9)가 하산동층의 지하수(8.8)의 약 1/2이 되는데 방해석의 함량도 진주층이 하산동층의 약 1/2로 비례적 관계를 보이나 낙동층과는 불규칙하고 흑운모의 함량도 비례적 관계를 보이지 않는다. 따라서 Ca²⁺/Mg²⁺비는 관련 광물 뿐만 아니라 지하수의 지화학적 요인이 고려되어야 한다.

수질에 미치는 광물학적인 요인

규산염 광물

신동층군 : 본 신동층군 지하수의 Ca²⁺, Na⁺ 및 K⁺와 관련되는 주요 규산염 광물은 장석류인데 장석류 중 층별 사장석의 함량은 낙동층이 2.24%, 하산동층이 5.47%, 진주층이 11.67%로 고령 화강암의 38.77%보다 현저히 낮지만 신동층군의 사장석은 대부분 풍화를 많이 받아 고령석화되는 과정에서 상당 부분이 방해석으로 치환되어 있기 때문에 Ca²⁺ 농도는 화강암 지하수보다 높다. Mg²⁺는 현재로서는 알려진 돌로마이트가 없으므로 주로 흑운모 등과 관련되는 것으로 생각되는데 흑운모의 층별 함량을 보면 낙동층은 2.5%, 하산동층은 0.79%, 진주층은 2.21%로 고령 화강암의 6.7%보다 낮지만 풍화가 많이 되어 있기 때문에 지하수의 Mg²⁺ 농도는 진주층이 8.6 ppm, 낙동층이 6.2 ppm, 하산동층이 5.8 ppm로 고령 화강암의 2.6 ppm보다 높다.

본 신동층군 지하수는 모두 K⁺가 Na⁺에 비하여 그 농도가 현저히 낮는데 이는 K-장석은 사장석보다 풍화에 강하여 덜 분해되며 일단 암석에서 빠져 나온 K⁺도 점토광물에 흡착이 잘 되기 때문에 그 농도가 낮아진다(Livingstone, 1963; Rose et al., 1979). 예로 낙동층과 하산동층의 K-장석과 사장석의 함량을 보면 K-장석이 사장석보다 높으나 이들 이온의 농도는 K⁺가 Na⁺에 비하여 현저히 낮다. 그리고 이들 이온의 농도순위는 대수층의 광물 및 화학적 조성에 따라 농도의 고저에는 차이가 있으나 대체로 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺ (Lee, 1993)로 Na⁺가 K⁺보

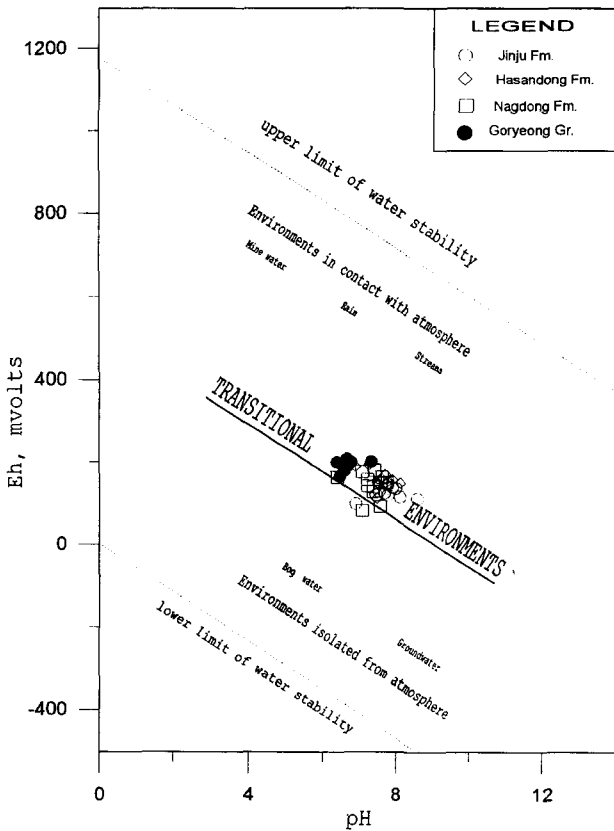


Figure 3. Eh-pH diagram of groundwaters in Goryeong area.

다 농도가 높다. 따라서 신동충군 지하수의 주요 이온의 농도는 관련 광물의 함량과 용해도 및 풍화된 장석의 고령석과 입간물질 중의 점토광물에 의한 흡착 등에 의하여 영향을 많이 받는 것으로 사료된다.

고령 화강암: 본 고령 화강암 지하수의 Ca^{2+} , Na^+ 및 K^+ 는 주로 사장석과 K-장석에, 그리고 Mg^{2+} 는 각섬석과 흑운모 등에서 공급된다. 이들 광물의 용해도는 대체로 각섬석 > 사장석 > K-장석 > 흑운모로 차이가 있기 때문에 상기 이온의 농도와 관련된 광물의 함량 및 화학조성은 반드시 일치하지는 않는다. 예로, 본 역 화강암 지하수의 주요 성분의 농도는 Ca^{2+} 31.9 ppm, Na^+ 6.9 ppm, Mg^{2+} 2.6 ppm, K^+ 0.85 ppm로 Ca^{2+} 가 제일 높고 K^+ 가 제일 낮는데 본 고령 화강암의 광물조성을 보면 사장석 38.8%, K-장석 29.5%, 각섬석 0.86%, 흑운모 6.7%로 K-장석이 각섬석과 흑운모보다 함량은 높지만 풍화에 강하기 때문에 덜 분해되고 일단 용출된 K^+ 도 점토광물에 쉽게 흡착되어 물에서 제거되므로 지하수 중 농도는 Mg^{2+} 보다 오히려 낮아진다. Ca^{2+} 농도는 사장석이 제일 많고 사장석은 K-장석보다 쉽게 풍화되며 An는 Ab보담도 쉽게 분해되기 때문에(Ohse *et al.*, 1983; Appelo and Postma, 1993) 지하수에는 Na^+ 보다 더 많이 농축될 수 있다. 상기 주이온의 농도 순위는 신동충군의 지하수와 같은 $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ 이다. 따라서 고령 화강암의 지하수도 관련 광물의 함량과 용해도 및 점토광물의 흡착 등에 의하여 주요 이온의 농도가 영향을 받는 것으로 생각된다.

Cl^- 은 규산염 광물의 주성분으로서는 산출되지 않으나 마그마에서 유래된 휘발성분의 일부로서 화강암의 구성광물 중에 함유되어 있다. 우리나라 백악기 화강암지대 지하수의 Cl^- 의 농도(홍영국의, 1993)를 보면 심부 지하수가 평균 57.6 ppm이고 천부 지하수에 해당하는 팔공산 화강암의 것이 22.3 ppm, 언양 화강암의 것이 7.33 ppm, 유천 화강암의 것이 13.6 ppm으로 심부 지하수에 비하여 천부 지하수가 현저히 낮는데 본 역 고령 화강암의 천부 지하수도 Cl^- 의 농도가 7.5 ppm으로 낮다.

탄산염 광물

신동충군: 본 역의 주요 탄산염은 방해석으로 신동충군에는 입간물질로서 낙동층에 6.75%, 하산동층에 14%, 진주층에 7.42% 산출되며 그 함량은 많지 않지만 방해석은 탄산수에 쉽게 용해되므로 Ca^{2+} 및 HCO_3^- 의 주요 공급원이 된다. Hs(1967)에 의하면 지하수 중 Mg^{2+} 의 농도가 증가하여 Ca^{2+} 에 대한 비($[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$)가 > 0.67가 되면 방해석은 Mg^{2+} 로 교대되어 돌로마이트화될 수 있다고 하나 본 역에는 Mg^{2+} 농도가 낮아 대구지역의 함안층에서 처럼 방해석이 Mg^{2+} 로 치환되어 있을 가능성(이인호외, 1997)은 희박하며 아직 본 역에서 돌로마이트가 관찰된 기록은 없다.

Ca^{2+} 농도는 특히 대수층의 방해석의 용해도와 밀접한 관계가 있으므로 신동충군 지하수의 Ca^{2+} 농도가 포화인지 또는 불포화 상태인지를 방해석에 대한 포화지수 $SI = \log(IAP/K)$ 로서 검토해 보면 다음과 같다. 본 신동충군 지하수는 심도 100m 내외의 간이상수도용 암반관정을 대상으로 조사되었는데 층별 방해석에 대한 SI는 진주층이 0.260, 하산동층이 -0.213, 낙동층이 -0.113으로 진주층의 지하수만 $SI > 0$ 이나 기타 층의 지하수도

거의 SI는 0(평형상태)에 가깝다. 따라서 신동충군에는 풍화를 받아 방해석으로 치환된 사장석이 많고 방해석이 주요 화학적 입간물질이 되는 사실과 일치한다.

방해석이 수질에 미치는 중요 영향 중에는 pH가 포함되는데 방해석은 탄산수로 분해되면 계산상 약 8.3, 가수분해되면 9.9가 되므로(이인호외, 1997) 탄산이 많은 열은 지하수보다 탄산이 적은 깊은 지하수가 높은 pH를 가지게 된다. 따라서 방해석은 대기가 황화가스로 오염되어 있던지 층 중에 황철석이 포함되어 있어도 지하수의 산성화를 막는데 효과를 가질 수 있다.

황철석

신동충군: 황철석은 부수광물 중의 하나로 신동충군에 소량 산출되나 황철석의 정확한 함량은 알 수 없다. 다만, 부수광물의 양은 낙동층이 2.12%, 하산동층이 2.28%, 진주층이 0.81%(Table 1 참조)로 하산동층이 가장 높다. 그런데 지하수의 SO_4^{2-} 농도를 보면 하산동층이 22.3 ppm으로 가장 낮고 오히려 부수광물의 함량이 가장 낮은 진주층이 108 ppm으로 가장 높다. 따라서 황철석의 함량은 부수광물의 함량과 비례적이지 않으며 오히려 암색으로 반영되는 층의 산화/환원환경에 더 좌우되는 것으로 보인다. 즉 진주층은 환원환경을 반영하는 암회색 내지 흑색의 사암과 셰일이 우세하고 하산동층은 산화환경을 반영하는 적색 및 황갈색의 이암과 셰일이 우세한데(Table 2 참조) 황철석은 환원환경의 진주층에서는 쉽게 생성되고 안정하게 유지될 수 있기 때문이다. 따라서 풍화에 노출될 때 진주층 지하수에는 SO_4^{2-} 가 많이 용출될 수 있다.

회색 내지 암회색 퇴적암이 환원환경을 암시하는 이유는 퇴적암에는 보통 철성분이 많이 함유되어 있는데 철이 3가의 산화철로 있을 때는 암색은 적색이 되고, 수산화철로 있을 때는 갈색 내지 황색을 띄게 되나 2가로 환원되면 거의 무색이 되므로 신동충군 사암들의 암색은 함유된 유기탄소에 의하여 회색, 암회색 및 흑색 등으로 되며 2가 철의 규산염 예로 녹니석으로 있을 때는 암색은 녹색을 띄게 된다. 따라서 신동충군의 암색과 탄질물의 유무에 의하여 퇴적 환경을 추리할 수 있다. 황철석의 철도 2가($Fe^{2+}S_2^{2-}$)이므로 황철석의 존재는 환원환경을 암시한다.

황철석은 산화로 쉽게 분해되어(Nicholson, 1994; Ritchie, 1994) 황산과 황산철을 공급할 뿐만 아니라 이들은 강한 분해력을 가지고 암석의 성분을 녹혀 지하수에 많이 공급하게 된다. 특히 방해석은 제이 황산철에 의하여 쉽게 분해되므로 지하수에 많은 Ca^{2+} 를 공급하게 된다. 황철석은 환원환경에서 혐기성 박테리아로 유기물에서 분해된 수소가 퇴적물 중 황산염의 유황과 결합하여 또는 박테리아에 의하여 황산염에서 유리되어 나온 유황이 수소와 결합하여 형성된 황화수소가 철화합물과 반응함으로써 생성되며(Widdel, 1985) 본 신동충군의 암석 박편에서 부수광물로서 관찰된다. 따라서 환원환경을 암시하는 회색, 암회색을 띄는 신동충군의 지층에는 지표에서는 황철석이 관찰되지 않을 지라도 지하 심부에는 존재할 수 있다. 예로 대구 지역의 함안층은 지표 암석에서는 황철석이 잘 관찰되지 않으나 지하 심부의 코아에서는 미립의 황철석이 상당량 육안 관찰된다(성익환외, 1995; 이인호외, 1997).

암색이외에도 지하수 중 SO_4^{2-} 농도로도 황철석의 존재가능성을 간접 검토할 수 있는데 시추공에서 황철석이 많이 발견된 함안층 지하수의 평균 SO_4^{2-} 농도는 6월은 약 238 mg/l이고 11월은 148 mg/l(이인호외, 1997)였는데 생활오수에 의한 오염은 11월이 6월보다 낮으므로 11월의 SO_4^{2-} 농도가 황철석등의 자연적 요인에 의한 영향이 더 크다고 볼 수 있다. 따라서 생활오수에 의한 오염 요인이 적은 고령 지역의 지하수는 대구 지역의 11월 평균치 148 mg/l보다 높은 것은 지층 심부에는 황철석의 함량이 높을 가능성이 있다. SO_4^{2-} 농도가 148 mg/l 이상의 지하수정은 진주층에 2개(1개는 > 238 mg/l), 낙동층에는 1개가 있는데 이들 지하수정은 모두 읍 중심부에서 멀리 떨어진 곳에 위치한다.

지하수의 오염

본 고령 지역은 농촌지역이므로 산업폐수나 대기오염과 관련된 오염원은 없으나 농축산폐수와 인구가 밀집된 곳에서는 생활하수에 의한 지하수의 오염이 발생할 수 있으므로 생활하수와 농축산폐수와 관련되는 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 지하수 중 평균 함량을 살펴 보면 NO_3^- 는 낙동층 지역이 0.69 mg/l, 하산동 지역이 0.68 mg/l, 진주층 지역이 0.77 mg/l, 고령 화강암 지역이 1.46 mg/l로 모두 음용수 기준치(약 < 46 mg/l)보다 훨씬 낮으며 기준치를 초과하는 암반관정은 하나도 없다. SO_4^{2-} 은 낙동층 지역이 71.16 mg/l, 하산동 지역이 22.25 mg/l, 진주층 지역이 108.01 mg/l, 고령 화강암 지역이 32.94 mg/l로 평균치는 음용수 기준치(< 200 mg/l)를 초과하지 않으나 관정별로 비교해 보면 초과하는 것이 진주층에 1개 그리고 기준치에 가까운 180 mg/l 이상의 것이 진주층과 낙동층에 각각 1개씩 있다. 중금속류도 산업폐수가 없기 때문에 음용수 기준치를 초과하는 것이 하나도 없다. 따라서 고령 지역 지하수는 현재로는 오염되지 않은 깨끗한 수질을 보존하고 있다고 판단된다. 그러나 인구의 증가와 산업이 발전될 경우에 대비한 지하수의 수질 보존에 대한 연구가 필요하다.

결 론

고령 지역 지하수의 지화학적 특징은 대수층의 광물조성 특히 방해석과 풍화된 장석 및 황철석과 밀접한 관계를 가진다. 신동층군은 방해석이 많고 주구성광물인 장석류도 풍화를 많이 받아 고령토화되면서 방해석으로 교대되어 있으며 황철석도 고령 화강암보다 많기 때문에 지하수의 주요 성분인 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 는 신동층군의 것이 고령 화강암의 것보다 높다. 그리고 신동층군은 층별로 Ca^{2+} 함량에 차이가 있는데 이것은 방해석과 사장석의 함량 및 사장석의 An/Ab비와 풍화의 정도와 관련된다.

지하수의 전체적인 Eh-pH영역은 고령 화강암 지역이 pH=6.4~7.3, Eh=165~208 mv로 약산성 내지 중성의 전이환경 영역에 해당하고 신동층군 지역은 pH=6.4~8.6, Eh=99~192 mv로 약산성~알칼리성의 전이환경에 해당한다. 신동층군의 층별 평균 pH는 석회질 성분이 많은 진주층이 약 7.8로 제일 높고

평균 Eh는 산화환경이 우세한 하산동층이 160 mv로 제일 높다. 본 역 지하수의 Eh는 생활하수와 농축산폐수의 오염이 있는 대가천, 소가천 및 소림천 하류의 신동층군 지대가 오염이 적은 소가천 상류의 고령 화강암 지대보다 낮다. 그러나 전체적으로 볼 때 본 역 지하수의 Eh는 하천수의 혼입으로 전형적인 지하수에 비하면 대체로 높은 편이다.

신동층군에는 평균경도 140~155 mg/l의 $Ca(HCO_3)_2$ 및 $CaSO_4$ 형의 경수가 주로 발달하는데 $Ca(HCO_3)_2$ 형은 진주층과 하산동층이 우세하고 $CaSO_4$ 형은 낙동층이 우세하다. 그리고 고령 화강암에는 평균경도 90 mg/l의 $Ca(HCO_3)_2$ 형과 $CaSO_4$ 형의 연수가 발달하나 $Ca(HCO_3)_2$ 형이 우세하다. 따라서 고령 화강암지대에는 연수질의 $Ca(HCO_3)_2$ 형 지하수가 발달하고 신동층군 지대에는 경수질의 $Ca(HCO_3)_2$ 및 $CaSO_4$ 형의 지하수가 발달하는 것이 고령 지역 지하수의 특징이라 볼 수 있다. $Ca(HCO_3)_2$ 형은 신동층군 지역에서는 주로 방해석과 풍화된 사장석에 관련되고 고령 화강암 지역에서는 사장석에 관련되며 $CaSO_4$ 형은 황철석 및 오염원과 관련된다.

암색은 퇴적환경과 관련되고 회색 내지 흑색은 환원환경을 암시하므로 회색 내지 흑색의 신동층군의 심부층에는 황철석이 안정하게 존재할 수 있으며 지표수의 유입을 받게 되면 산화환경에서는 쉽게 분해되어 SO_4^{2-} 를 지하수에 공급하게 된다. 따라서 지층의 암색과 지하수 중 SO_4^{2-} 농도에 의하여도 황철석의 존재 가능성을 추적하는데 도움이 된다.

사 사

본 연구는 1998년도 교육부의 기초과학연구소 학술연구조성비 BSRI-97-5421로 수행되었으며 전략광물자원 연구센터의 부분지원이 있었다. 본 연구를 수행하는 과정에서 지화학 연구실 대학원생 김은지양과 학부 졸업생 서경희양과 남은경양이 실내 작업을 도왔으며 이에 감사한다.

참고문헌

- 고인석, 1982, 낙동층군의 사암에 관한 퇴적암석학적 연구, 서울대학교 이학박사학위논문, 197p.
- 고인석, 이용태, 김중근, 1994, 경상분지 백악기 상부경상누층군 사암의 퇴적변질, 한국석유지질학회지, 2, p.19-31.
- 김기완, 여상철, 1970, 현풍도폭(1: 50,000), 국립지질조사소, 12p.
- 김중근, 이재영, 1997, 대구지역에 분포하는 약수의 지화학적 특징, 한국환경위생학회, 23, p. 56-65.
- 김철수, 1995, 고령지역 신동층군에 부존된 지하수의 지화학적 연구, 경북대학교 대학원 이학석사논문, 57p.
- 민경희, 1981, 고령부근 낙동층군 사암의 퇴적암석학적 연구, 경북대학교 대학원 이학석사논문, 59p.
- 성익환, 조병욱, 이봉주, 김석중, 김통권, 김원영, 이병태, 황상기, 이재영, 김영기, 장태우, 이인호, 김석기, 김귀환, 이강근, 김윤영, 배광옥, 현윤정, 1995, 지하수 오염방지 및 음용화 기술연구, 과학기술처 KR-95 (S)-2, 459p.
- 이인호, 이재영, 김통권, 1997, 대구시 지하수의 수질에 대한 지화학적 연구, 자원환경지질, 30, p. 327-340.

- 이효숙, 1996, 가야산 일대 화강암류의 암석학적 연구, 경북대학교 교육대학원 교육학석사논문, 65p.
- 최승오, 권영일, 1970, 구정도폭(1:50,000), 국립지질조사소, 9p.
- 홍영국, 박중근, 전효택, 문치성, 김성제, 지세정, 성익환, 김통권, 박희열, 1993, 지질환경에서 유해원소들의 지화학적 분산연구 (I), 과학기술처, KR-93, (T)-10, 464p.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D., 1993, Correction for solubility calculations. In: Geochemistry, groundwater and pollution, p. 49-55. A.A. Baklema publisher, 539p.
- Chebotarev, I.I., 1955, Metamorphism of natural waters in the crust of weathering, *Geochem. Cosmochim. Acta*, 8, p. 22-84, 137-170, 189-212.
- Domenico, P. A., 1972, Concepts and models in groundwater hydrology. McGraw-Hill, N.Y.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, Major-ion evolution sequence, In: *Groundwater*, p. 241-244. Prentice-Hall, Inc. 604p.
- Garrels, R. M. and Christ, C. L., 1965, Natural limits of Eh and pH, In: *Solutions, minerals, and equilibria*, p.379-383. Harper & Row.
- Hs, K. J., 1967, Chemistry of dolomitic formation, In: *Carbonate rocks* (Ed. by G. V. Chilingar, H. J. Bissel and R. W. Fairbridge) p.169-191, Elsevier Amsterdam.
- Lee, J. Y., Lee, J. K, Lee, I. H. and Kim, Y. K., 1993, Geology in relation to characteristics of natural waters in Taegu City, Korea, *International symposium on ecosystem and environmental problems*, J. Environ. Sci. (Kyungpook Nat. Univ.), 7, p. 1-16.
- Livingstone, D. A., 1963, Chemical composition of river and lakes, chap. G, In: *Data fo geochemistry*, 6th ed., USGS, prof. paper 440-G.
- Mitchell, R., 1974, Sulfur, chap. 10 (nutrient cycle), In: *Introduction to environmental microbiology*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Nicholson, R. V., 1994, Iron-sulfide oxidation mechanism: laboratory studies, In: *Short course handbook v. 22 on Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes* (Ed. by Jambor, J.L. and Blowes, D.W.) p. 163-184, Mineralogical Association of Canada
- Ohse, W., Matthes, G., Pekdeger, A. and Schulz, H. D., 1984, Interaction water-silicate minerals in the unsaturated zone controlled by thermodynamic disequilibria, *Int. Ass. Hydrol. Sci.* 150, 31-40.
- Orr, W, 1978, Biogeochemistry, chap. 16 (Sulfur), In: *Handbook of geochemistry vol. II/2*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Plummer, L. N., Jones, B. F. and Truesdell, A. H., 1978, WATEQ-A FORTRAN IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium in natural water, *USGS Water Resources Invest*, 76-13, 61p.
- Ritchie, A. I. M., 1994, Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport, In *Short course handbook v. 22 on Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes* (Ed. by Jambor, J.L. and Blowes, D.W.) p. 201-246, Mineralogical Association of Canada
- Rose A. W., Hawkes, H. E. and Webb, J. S., 1979, Adsorption and ion exchange on colloidal particles, chap. 8, In: *Geochemistry in mineral exploration*, 2nd ed., Academic Press.
- Widdel, F., 1985, Mircobiology and ecology of sulfate- and sulfur-reducing bacteria, In: *Biology of anaerobic microorganisms*, A. Wiley-Interscience, p. 469-586.