

부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성

함 세 영 · 조 명 희 · 황 진 연 · 김 진 섭 · 성 익 환* · 이 병 대
부산대학교 지구환경시스템학부 · 한국자원연구소 지구환경연구부
(2000년 2월 1일 접수)

Geochemical characteristics of spring, ground and thermal waters in Mt. Geumjeong-Mt. Baekyang area, Pusan

Se-Yeong Hamm, Myong-Hee Cho, Jin-Yeon Hwang, Jin-Sup Kim,
Ig-Hwan Sung* and Byeong-Dae Lee

Division of Earth and Environmental System Sciences, Pusan National University, Pusan

Division of Earth Environment Research, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Daejeon

(Manuscript received 1 February, 2000)

Spring, ground and thermal waters in the vicinity of Mt. Geumjeong and Mt. Baekyang area have been sampled and analyzed for major and minor elements. According to the Piper diagram, spring water belongs to Ca-HCO₃ and Na-HCO₃ types, groundwater to Ca-HCO₃ type, and thermal water to Na-Cl type. Based on the phase stability diagrams of [Ca²⁺]/[H⁺]², [Mg²⁺]/[H⁺]², [K⁺]/[H⁺], and [Na⁺]/[H⁺] vs. [H₄SiO₄], spring water, groundwater and thermal water are mostly in equilibrium with kaolinite. The result of factor analysis shows three factors (factor 1, 2 and factor 3) for the spring water, the groundwater and the thermal water which are represented by the influence of the dissolution of feldspar, calcite, anthropogenic sources (domestic and industrial wastes) and salt water.

Key words : Mt. Geumjeong and Mt. Baekyang, spring water, water-rock interaction, anthropogenic source, salt water

1. 서 론

부산은 우리나라 6대 도시 중 지하수 의존도가 가장 높은 도시이며, 이는 부산의 지리적 여건상 낙동강의 수질 문제와도 맞물려 있다. 특히, 동래구와 금정구 지역은 부산시에서도 지하수 의존도가 높은 지역이며, 이 중에서 동래구 온천동일대에 위치하는 동래온천의 온천수(지열수) 사용량도 상당한 비중을 차지하고 있다. 또한, 금정산-백양산일대에는 60여군데의 약수터가 분포하고 있어서, 용천수가 부산 시민의 식수로 애용되고 있다.

지하수의 수질은 강우, 지질(토양 및 암석) 그리고 인위적인 오염원에 의해서 좌우된다. 인위적인 영향을 제외한다면, 지하수 수질에 큰 영향을 미치는 요인은 지질이다. 지질은 물-광물 반응에 의해서 지하수의 수질을 변화시킨다. 우리나라 화강암질암내 지하수의 수질 유형을 보면, 심도가 깊어질수록(즉, 유동 경로가 길어질수록) Ca-HCO₃에서 Na-HCO₃형으로 바뀌어간다.¹⁾ 또한, 불국사화강암 지역의 먹는샘물의 수질유형은 Ca-Na-HCO₃형을 나타내는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 따라서, 우리나라 화강암의 수질유형은 물-광물 반응의 정도에 따라 Ca-HCO₃형 내지 Na-HCO₃형을 보이는 것으로 나타난다.

한편, 변성퇴적암내 지하수의 수질유형은 화강암과는 달리 방해석의 영향으로 심부지하수에서도 Ca-HCO₃형을 나타내고 있다.³⁾ 이와 같이, 지하수의 수질은 암석의 종류와 산출심도에 따라 특징적인 유형을 나타내고 있다.

본 연구에서는 지하수 유동경로(심도)에 따라서 물-광물 반응에 의한 수질의 변화를 살펴보기 위해서, 금정산-백양산일대의 용천수, 100m 내외의 지하수공의 지하수 그리고 동래온천의 지열수의 시료를 채취하여, 이들 간의 지화학적 특성을 비교·분석하였다. 이러한 분석을 통하여 지하수의 유동경로에 따른 화학적 진화를 밝히며, 아울러 지하수 수질의 인위적인 오염의 영향이 있는 지를 파악하고자 하였다.

시료는 1998년 5월과 1999년 2월 두 차례에 걸쳐서 채취하였으며, 금정산-백양산일대에 분포하는 약수터 16개소에서 용천수 시료, 금정구 및 동래구 지역 일대의 지하수공에서 21개 지하수 시료, 동래온천공 9개소에서 지열수 시료를 채취하였다(Fig. 1, 등고선은 50m부터 시작하여 50m간격으로 도시하였음). 용천수와 지하수는 1999년 2월에 채수하였으며, 지열수는 DH1과 DH2를 제외하고는 1998년 5월에 채수하였다.

동일 시기의 시료의 대표성을 고려하기 위하여, 지열수 중의 시료 DH1과 DH2의 1998년 5월과 1999년 2월 두 차례 분석결과를 보면(Table 1), 서로 거의 같은 값을 보이고 있으며, 이는 지열수(9개소의 지열수의 기원은 동일함)가 일정한 수질을 유지하고 있음을 나타내는 것이다. 장기적인 지열수의 수질 변화를 보더라도, 1922년부터 1999년까지 부정기적으로 측정된 성분함량에 큰 차이를 보이지 않고 있다.¹⁾ 지하수와 용천수는 같은 시기인 1999년 2월에 채수하였으므로 동일시기의 수질을 비교하는 데는 무리가 없는 것으로 판단된다. 용천수는 금정산-백양산 줄기의 소규모 단층파쇄대와 단열대를 따라서 용출하고 있으며, 지하수는 100m 내외 심도의 지하수공으로부터 채수되었으며, 지열수는 지하 심부로부터 유래하므로 수질의 대표성을 가지는 것으로 판단된다.

용천수의 시료 번호는 각 동별로 NP(노포동), PS(반송동), KU(구서동), JJ(장전동), MD(만덕동), HM(화명동), KG(금곡동), KP(구포), SJ(사직동), YJ(연지동), PA(부암동), KB(패법동), KS(금성동)으로 구분된다. 지하수의 시료번호는 각 동별로 BK(부곡동), S(서동), KmS(금사동), JJ(장전동), OC(온천동), MR(명륜동), SJ(사직동)로 구분하여 기재하였다. 지열수는 동래온천장의 온천공의 위치에 따라 DH1에서 DH9까지 번호를 매겼다.

분석된 시료에 대하여 용천수, 지하수, 지열수 각각의 물리화학적 성질, 용존성분의 함량을 검토하고, 지하수 수질 유형을 구분하였으며, 염수의 영향을 분석하였다. 그리고 물-암석반응 모델링을 통하여, 지하수가 유동하면서 암석과 반응에 따라 수질이 어떻게 변하는지를 용천수, 지하수 및 지열수를 통하여 분석하였다. 그리고,

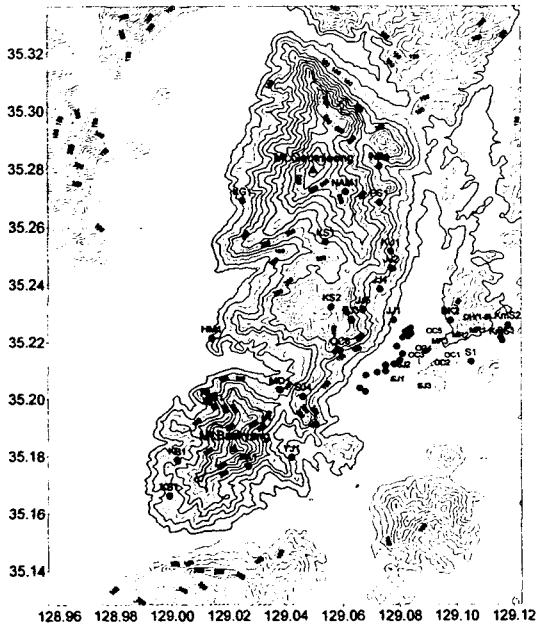


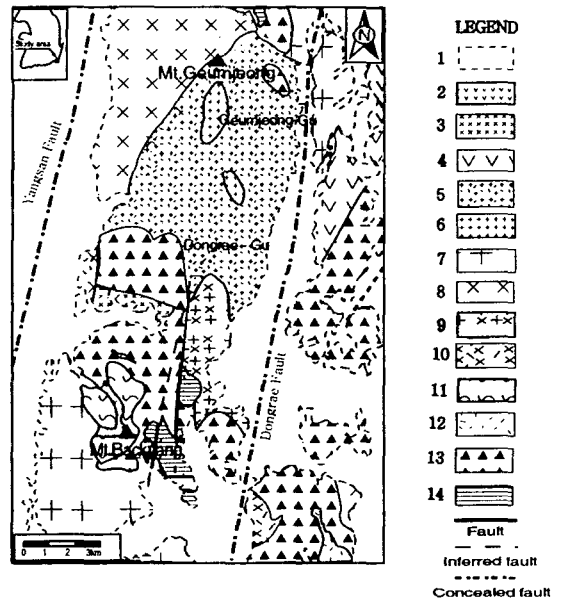
Fig. 1. Sampling sites in the study area.

이러한 결과와 함께 요인분석을 통하여 성분들간의 연관성을 검토하였다.

2. 연구지역의 지질 및 수리지질

본 역의 지질(Fig. 2)은 백악기 퇴적암류인 이천리층, 유천층군의 화산암류(안산암류 및 화산력응회암)과 이를 관입한 불국사 화강암류(화강섬록암, 각섬석 화강암, 흑운모화강암, 토날라이트, 아다멜라이트, 미문상화강암) 그리고 제4기 충적층으로 구성되어 있다.⁵⁻⁷⁾

이 지역의 중앙으로는 북북동-남남서방향의 동래단층이 지나는데 충적층으로 덮여 있어서 지표에서 단층의 증거를 찾을 수는 없으나, 인공위성사진에서는 선구조가 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 금정산줄기의 서편에는 양산단층이 역시 북북동-남남서 방향으로 달리고 있으며, 언양, 양산지역에서는 근년에 양산단층의 증거가 여러 곳에서 발견되고 있다.^{8,9)}



1. Alluvium
 2. Acidic dyke
 3. Felsite
 4. Micrographic granite
 5. Adamellite
 6. Tonalite
 7. Biotite granite
 8. Hornblende granite
 9. Granodiorite
 10. Gabbro
 11. Rhyolitic rocks
 12. Dark gray tuffaceous sediment
 13. Andesitic rocks
 14. Icheonri formation
- Fault
Inferred fault
Concealed fault

Fig. 2. Geological map of the study area(from Son et al, 1978).

금정산-백양산일대 기반암 지하수는 주로 N60-80E방향의 절리¹⁰⁾를 따라서 동래구 및 금정구의 저지대쪽으로 흐른다. 한편, 용천수는 화강암이나 안산암질암의 소규모 단층파쇄대와 단열대를 따라서 용출하고 있으며, 이들 소규모 단층파쇄대와 단열대는 금정산-백양산 줄기의 각각 동편과 서편에서 북북동방향으로 달리고 있는 양산단층 및 동래단층과 관련된다.⁵⁾ 용천수는 100m 심도 내외의 지하수공으로 개발하는 지하수보다 얇은 심도로부터 산출하므로 지하체제시간과 유동경로가 짧다. 동래단

부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성

Table 1. Physical and chemical components of spring water, groundwater and thermal water in the study area

Sample No	Depth (m)	Temp (°C)	pH	EC (µs/cm)	SiO ₂ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Fe ²⁺ (mg/l)	Zn ²⁺ (mg/l)	Cu ²⁺ (mg/l)	Pb ²⁺ (mg/l)	Mn ²⁺ (mg/l)	Al ³⁺ (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	altitude (m)	discharge (m ³ /day)	(+/-)	date	
Spring water																													
NP1	14.7	7.73	126.8	32.5	1.39	0.54	1.83	9.22	0	0.01	0	0	0	0	0	0.24	5.94	0.66	1.42	52.78	0.08	60	0	0	700	13.36	1.16	02/99	
PS1	14.8	6.71	133.7	33.8	1.25	1.47	3.88	8.21	0	0	0	0	0	0	0.04	5.44	0.84	2.31	59.50	0	64	0	0	75	5.08	1.13	02/99		
KU1	10.3	6.37	67.6	15.7	1.64	0.29	0.73	6.93	0.01	0	0	0	0.01	0	0.05	4.38	1.26	4.38	10.37	0.02	31	0	0	200	16.2	1.1	02/99		
JP2	11.5	6.89	205	34	4.54	1.03	0.92	13	0.01	0	0	0	0	0	0.06	4.38	1.67	3.82	33.87	0.05	97	0	0	150	2.67	1.14	02/99		
JP5	10.4	6.64	62.7	19.7	2.19	0.26	1.67	7.09	0.01	0	0	0	0	0	0.05	4.52	0.72	7.12	10.98	0	29	0	0	240	11.5	0.94	02/99		
MD1	10.8	7.5	219	27.1	10.7	0.4	4.87	6.34	0.02	0.01	0	0	0.01	0	0.05	4.36	0.8	15.5	42.10	0.05	104	0	0	140	13.64	1.03	02/99		
HM1	9.7	6.21	41.2	15.9	1.67	0.7	0.72	3.65	0	0.02	0	0	0	0	0	3.79	0.72	4.88	6.71	0.02	19	0	0	60	2.55	0.97	02/99		
RG1	7.5	7.2	60.3	31	2.89	0.48	0.54	6.81	0.01	0.05	0	0	0	0	0.11	3.19	0.03	0.57	22.88	0.03	28	0	0	90	0.9	0.14	02/99		
KP1	11.7	7.29	89.5	16.4	4.28	0.34	0.92	4.98	0.03	0.01	0	0	0	0	0.03	4.82	0.73	3.83	14.05	0.02	42	0	0	150	19.1	1.16	02/99		
SJ4	9.4	6.43	63.8	19.4	2.6	0.18	0.97	5.39	0.03	0.01	0	0	0	0	0.05	5.62	0.06	1.51	17.70	0	29	0	0	300	3.38	0.94	02/99		
YJ1	8	6.38	206	23.3	10.7	1.58	1.79	8.62	0.02	0.01	0	0	0	0	0	5.06	1.18	2.62	39.05	0.02	96	0	0	120	1.28	0.99	02/99		
PA1	9.1	7.36	60.2	12.4	2.54	0.27	0.77	4.22	0.03	0.03	0	0	0	0	0	4.69	0.96	4.39	7.32	0.08	28	0	0	230	5.4	1.08	02/99		
KB1	7.6	6.56	83.3	14.9	2.73	1.96	1.2	7.76	0.02	0	0	0	0	0	0.04	5.86	2.38	9.65	7.63	0.03	38	0	0	135	18.5	1.17	02/99		
KR2	5.5	6.83	224	15.1	2.68	0.47	1.46	7.32	0.03	0	0	0	0	0	0.05	5.42	2.95	6.84	6.41	0.03	102	0	0	180	10	1.31	02/99		
RS1	9.5	7.13	78.6	26.7	1.46	0.2	0.33	7.06	0.02	0	0	0	0	0	0.07	4.41	0	0.41	17.70	0	36	0	0	370	12	0.95	02/99		
KS2	74.7	6.37	114	22.8	5.87	0.78	0.93	13.11	0.01	0.01	0	0	0	0	0	8.11	4.29	1.15	26.24	0.05	65	0	0	420	4.11	1.28	02/99		
Min	5.5	6.21	41.2	12.4	1.46	0.18	0.16	3.65	0	0	0	0	0	0	0	3.19	0	0.41	6.41	0	19	0	0	60					
Max	14.8	7.73	224	34	13.9	1.96	4.87	13	0.03	0.05	0	0	0.01	0	0.24	5.94	2.55	15.5	59.50	0.08	104	0	0	370					
Average	10.03	6.892	114.78	22.53	5.13	0.68	1.41	7.11	0.02	0.01	0	0	0.00	0	0.06	4.79	0.99	4.62	23.31	0.03	54	0	0	186.00					
SLDev	2.52	0.46	66.33	7.70	4.40	0.57	1.31	2.26	0.01	0.01	0	0	0.04	0	0.06	0.77	0.81	3.96	17.75	0.03	31	0	0	93.55					
Groundwater																													
JJ1	16.8	6.84	162.9	46.8	12	0.32	3.02	13.2	0.07	0.02	0.006	0	0	0	0	0.6	10.4	2.55	9.52	51.72	0.01	132	0	0	95	1.014		02/99	
JB3	10.9	6.54	120.8	25.7	6.3	3	1.46	11.5	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0.09	11.8	2.33	0.83	23.9	0	57	0	0	420	0.148		02/99		
JK1	80	13	654	187.2	46.4	9.36	0.75	2.29	17.1	0.01	0.06	0.02	0	0	0.05	10.4	1.31	8.46	62.55	0	89	0	0	155	0.93		02/99		
BK2	150	11.3	7.57	166	33.5	13.6	0.41	3.72	9.5	0.031	0.227	0.009	0	0	0.31	6.87	2.86	5.94	64.65	0.08	122	0	0	75	0.990		02/99		
BK3	150	16.9	6.25	373	45.1	39.8	1.51	11.2	14.8	0.029	0.141	0.11	0	0	0.34	25.1	2.3	28.6	148.38	0.06	283	0	0	55	0.947		02/99		
MRI1	100	16	7.71	472	44	60.4	0.51	6.92	15.7	0.068	0.106	0.023	0	0.04	0.63	37.1	11	41.1	101.59	0.05	363	0	0	40	1.120		02/99		
MRI2	23	17	6.69	336	25	60.8	12.5	8.66	53.4	0.494	5.271	0.007	0	0.304	0.35	68	10.9	38.2	206.25	0.06	449	0	0	5	1.650		02/99		
MRI3	20	15.1	6.62	583	166	58.7	8.4	6.25	45.4						0.4	52	6	94.5	137.30	0.06	405	0	0	5	0.970		02/99		
S1	130	16	6.71	242	43.8	56.6	1.41	13.7	18.1	0.042	0.063	0.013	0	0.005	0.28	57.5	7.4	18.9	124.37	0.09	388	0	0	10	1.140		02/99		
Kms1	150	18.8	6.89	160	32.5	38.2	0.88	7.09	16	0.004	0.02	0	0	0	0.35	31.3	3.07	15.3	168.28	0.02	232	0	0	30	1.020		02/99		
Kms2	150	17.8	6.55	210	35.9	16.2	0.87	4.98	13.5	0.017	0.261	0.047	0	0.008	0.28	15.2	4.8	8.43	65.88	0.08	160	0	0	50	1.030		02/99		
NAMI	100	7.4	6.3	184.9	31.4	3.87	0.76	0.68	9.9	0.01	0.11	0	0	0.01	0.02	8.74	0.82	0.4	22.27	0.03	86	0	0	690	1.11		02/99		
OC1	15.1	6.42	501	57.3	45.4	1.61	9.53	20.1	0.018	0.051	0.009	0	0.051	0	0.3	45	4.29	50	107.75	0.06	347	0	0	10	1.048		02/99		
OC2	17.9	7.03	477	34.2	32.4	0.87	20.3	19.6	0.015	0.018	0.012	0	0	0	0.33	40.9	8.39	45.5	101.59	0.09	308	0	0	30	1.064		02/99		
OC3	16.1	6.15	623	32.7	58.3	1.41	22.7	29.1	0.131	1.301	0.232	0	0.011	0	0.3	49.2	3.77	62	200.10	0.13	416	0	0	40	1.020		02/99		
OC4	130	15.6	6.89	521	47.7	36.8	0.32	22.2	22.6	0.029	0.449	0.01	0	0.004	0.31	46.1	11.4	50	108.32	0.21	365	0	0	25	1.086		02/99		
OC5	113	15.4	7.33	574	42.9	19.6	6.57	7.44	77.1	0.353	0.243	0.007	0	0.258	0.41	48.7	0.03	1.81	227.8	0.17	340	0	0	6	0.990		02/99		
OC6	13.7	7.52	162.7	33.1	16.5	0.31	11.1	11.5	0.03	0.02	0	0	0	0	0.27	7.01	0.83	2.72	71.39	0.02	77	0	0	230	0.99		02/99		
SJ1	87	15.8	6.55	389	5	30.9	1.01	9.98	18.2	0.004	0.011	0	0	0.008	0.3	39.6	7.67	30	70.19	0.05	235	0	0	40	1.050		02/99		
SJ2	15.2	6.5	243	31	19.3	0.68	7.36	13.5	0.08	0.064	0.015	0	0.003	0	0.32	16	4.8	14.6	75.44	0.09	166	0	0	25	1.043		02/99		
SJ3	100	15.3	7.29	300	37.6	28.9	0.6	8.29	1.12	0.06	0	0.006	0	0	0.31	22.4	3.79	15.7	101.59	0.04	224	0	0	65	0.978		02/99		
Min	7.4	6.15	120.8	5	3.87	0.31	0.68	9.5	0.004	0	0	0	0	0	0.02	6.87	0.03	0.4	22.27	0	57	0	0	0					
Max	18.8	7.71	623	57.3	60.8	12.5	22.7	77.1	0.494	5.271	0.232	0	0.258	0	0.63	68	11.4	94.5	227.8	0.21	449	0	0	600					
Average	15.016	6.89	340.78	35.57	32.45	2.27	8.84	0.08	0.45	0.03	0	0	0.03	0	0.30	35.88	4.89	26.80	106.63	0.07	230	0	0	98.30					
SLDev	2.6829	0.46	165.87	11.47	19.24	3.18	6.55	17.21	0.13	1.21	0.06	0	0.072	0	0.13	18.92	3.53	24.97	55.41	0.05	128	0	0	170.31</					

수 유동 및 지열수 순환을 규제하는 것으로 판단된다.

3. 물리화학적 성질, 용존성분의 함량 및 오염물질의 영향

수질분석은 현장분석과 실내분석으로 나누어 실시하였다. 현장에서는 pH, EC(전기전도도), TDS(총용존고용물), 염도, 온도, 용천수의 용출량을 분석하였다. pH는 pH meter(Orion Model 250A), 수온은 디지털온도계(Sato Model SM-1250MC), EC와 TDS는 EC meter(Orion Model 115)를 사용하여 분석하였다. 그리고 HCO_3^- 와 CO_3^{2-} 는 메틸오렌지와 페놀프탈레인을 이용한 산 중화 적정법으로 현장에서 분석하였다. 실내분석을 위해서 채취된 모든 시료는 $0.45\mu\text{m}$ 여과지로 여과하였다. 양이온 분석을 위한 시료는 pH를 2~3으로 유지시키기 위해서 0.05N HCl 용액으로 산처리하였다. 그리고 시료를 실험실까지 운반할 때는 아이스박스를 사용하여 4°C 로 냉장하였다. 양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+})은 한국자원연구소 화학분석실에서 AAS(Perkin Elmer 3100)를 그리고 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-})은 IC(Dinex DX-300)를 사용하여 분석하였다. SiO_2 는 ICP(Jobin Yvon사 JY38PLUS)로 그리고 NH_4^+ 는 흡광광도계(Hach사 DR-3000)로 분석하였으며, 중금속은 초미량중금속분석기(Cheometrics사 PDV3000)로 분석하였다.

본 연구지역의 용천수의 pH는 6.21~7.73, 지하수는 6.15~7.71 지열수는 7.74~8.07로서 지열수의 pH가 용천수나 지하수보다 높게 나타나며, 용천수와 지하수의 pH는 거의 비슷한 값(약산성 내지 중성)을 나타낸다(Table 1). 이는 지열수가 지하수나 용천수보다 더 심부에서 오랜 시간동안 암석과 반응하면서 수소이온을 소모하였기 때문이다.

EC는 용천수는 $41.2\sim 224\mu\text{S}/\text{cm}$, 지하수는 $120.8\sim 623\mu\text{S}/\text{cm}$, 지열수는 $1044\sim 1767\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 지열수의 EC가 지하수와 용천수보다 높게 나타나며, 이는 지열수와 암석간의 반응시간이 일반지하수보다 더 길었기 때문이다. 또한, 지하수와 용천수를 서로 비교하면, 지하수의 EC값이 더 높은 경향성을 보인다. 이는 지하수의 유동경로 및 지하 체류시간이 용천수보다 더 길거나 또는 인위적인 오염의 영향을 받고 있다는 것을 나타낸다.

온도를 보면, 용천수는 $4.7^\circ\text{C}\sim 14.8^\circ\text{C}$, 지하수는 $7.4^\circ\text{C}\sim 18.8^\circ\text{C}$, 지열수는 $50.6^\circ\text{C}\sim 67.5^\circ\text{C}$ 의 범위를 보이며, 지열수는 지하수 km떨에서 상승하므로 용천수와 지하수의 온도보다 훨씬 더 높게 나타난다.

Ca^{2+} 이온은 방해석, 백운석, 석고, 사장석, 각섬석, 휘석, 녹엽석, 녹니석 등의 용해로부터 유래한다.^{12,13)} Mast et al. (1990)¹⁴⁾은 비록 암석내 방해석이 미량으로 들어있더라도 방해석의 활동도는 Ca^{2+} 이온과 HCO_3^- 이온을 만드는 가장 중요한 요인이라고 하였다. 방해석은 식생에 의해서 방출되는 토양 내 CO_2 와 방해석으로 불포화된 강수에 의해서 더 잘 용해된다. 용천수의 Ca^{2+} 이온함량은 $1.46\sim 13.9\text{mg}/\ell$, 지하수의 Ca^{2+} 이온함량은 $3.87\sim 60.8\text{mg}/\ell$, 지열수의 Ca^{2+} 이온함량은 $30.7\sim 68.5\text{mg}/\ell$ 로서 지열수에서 높게 나타나며, 다음으로 지하수, 용천수의 순

으로 Ca^{2+} 이온함량이 더 높다(Table 1). 그러나, 일부 지하수 시료에서 특히 높게 나타나는 Ca^{2+} 이온함량은 확실하지 않으나, 인위적인 오염의 영향으로 추정된다.

Na^+ 이온의 가장 중요한 자연적인 기원은 조암광물인 사장석의 용해이다. 이외에 염수와 근접한 지역에서는 지하로 침투한 염수의 영향을 받아 높은 Na^+ 이온 함량을 나타낼 수 있다. 용천수의 Na^+ 이온은 $3.65\sim 13.1\text{mg}/\ell$, 지하수의 Na^+ 이온은 $9.5\sim 77.1\text{mg}/\ell$, 지열수의 Na^+ 이온은 $170\sim 237\text{mg}/\ell$ 로서 지열수에서 높게 나타난다(Table 1).

K^+ 이온은 K-장석이나 운모류의 용해로부터 유래하며, 그 외에도 K^+ 이온은 비료의 주 구성요소이므로 농업활동에 의해서 물 속으로 투입될 수 있다. K^+ 이온의 함량은 Na^+ 와 Ca^{2+} 에 비해 낮은 값을 보이며 그 이유는 K-장석의 용해(풍화)속도는 사장석보다 느리기 때문이다. 또한, K^+ 이온이 점토광물에 쉽게 흡착되기 때문에 K^+ 이온의 함량이 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 이온의 함량보다 낮다. 이 지역에서 K^+ 이온은 주로 K-장석이나 운모류의 용해로부터 유래하며, 용천수 내 K^+ 이온의 함량 범위는 $0.18\sim 1.96\text{mg}/\ell$ (평균값 $0.68\text{mg}/\ell$), 지하수는 $0.31\sim 12.5\text{mg}/\ell$ (평균값 $2.18\text{mg}/\ell$), 지열수는 $3.84\sim 6.42\text{mg}/\ell$ (평균값 $5.51\text{mg}/\ell$)로서 지하수 시료 중 하나가 $12.5\text{mg}/\ell$ 로서 높게 나타나, 전체적으로는 지열수, 지하수, 용천수의 순서로 낮아진다(Table 1).

Mg^{2+} 는 일반적으로 천부 지하수에서는 돌로마이트나 Mg를 함유하는 광물로부터 유래한다.¹¹⁾ 그러나, 고온에서는 Mg^{2+} 이온함량은 녹니석, 운모, 몬토렐로나이트, 또는 그 외 덜 흔한 경우지만 돌로마이트를 형성하면서 급격히 감소한다.¹⁵⁾ 용천수의 Mg^{2+} 이온 함량 범위는 $0.16\sim 4.87\text{mg}/\ell$ 이며, 지하수는 $0.68\sim 22.7\text{mg}/\ell$, 지열수는 $0.08\sim 0.28\text{mg}/\ell$ 로서 지하수, 용천수, 지열수의 순으로 낮아진다(Table 1). 이와 같이, Mg^{2+} 이온이 지열수에서 상대적으로 낮은 이유는 용존 Mg^{2+} 이온이 지하 심부에서 다시 Mg^{2+} 를 포함하는 광물로 들어가기 때문으로 보인다.

NH_4^+ 는 대부분의 경우 기반암과의 반응에 의한 것이라기보다는 유기물의 부식, 생활하수나 축산 폐기물 등의 오염에 의하여 물 속에 존재하게 되며, 용존산소의 농도가 낮은 물일수록 NH_4^+ 함량이 높은 것으로 알려져 있다.¹³⁾ 용천수의 NH_4^+ 함량은 $0\sim 0.08\text{mg}/\ell$, 지하수는 $0\sim 0.21\text{mg}/\ell$, 지열수는 $0\sim 0.12\text{mg}/\ell$ 의 범위를 나타내며, 주거지역과 비교적 가까운 곳에 위치하는 지하수공에서 용천수보다 더 높게 나타난다. 지열수는 심부에서 지표로 상승 도중에 천부 지하수의 영향으로 NH_4^+ 가 나타나는 것으로 생각된다.

HCO_3^- 는 탄산염 광물의 용해 또는 천부지층에 풍부하게 들어있는 CO_2 에 의해서 생성된다. HCO_3^- 함량은 용천수에서 $6.41\sim 59.50\text{mg}/\ell$, 지하수는 $22.27\sim 227.8\text{mg}/\ell$, 지열수는 $39.4\sim 318.8\text{mg}/\ell$ 의 범위로서 지열수에서 최대 값을 보이나 전체적으로는 지하수, 지열수, 용천수의 순서로 낮아지고 있다. 이는 지하수공이 위치하는 지역에 충전층과 풍화대가 잘 발달해 있고 따라서 CO_2 가스가 풍부하기 때문으로 생각된다.

Cl⁻이온의 함량은 지하심부에서 높게 나타나며, 그 원인은 과거 염수에 의한 침입에서 유래하거나, 내부적 기원으로서 규산염 광물(흑운모 및 각섬석 등)의 수화반응 및 유체포유물로부터의 유출 등에서 유래한다.^{12,16)} 그 외에도 각종 오염원(산업용 폐수, 하수, 동물의 배설물 및 제설제)에 의해서 지하수로 유입되기도 한다. 용천수의 Cl⁻함량은 3.19~8.11mg/ℓ, 지하수는 6.87~68mg/ℓ, 지열수는 234~472mg/ℓ의 범위를 보이고 있으며, 지열수에서 가장 높게 나타나고, 지하수, 용천수의 순으로 낮아지고 있다. 따라서, Cl⁻이온은 주로 지하 심부에서 유래하는 것으로 판단되므로, 지하수 중에 나타나는 일부 Cl⁻이온은 오염의 영향 때문으로 설명된다.

SO₄²⁻이온은 황화광물(황철석, 황동석)의 산화작용 및 용해에 의해서나 대기중의 SO₄²⁻으로부터도 유래한다.¹⁷⁾ 용천수의 SO₄²⁻이온 함량은 0.41~15.5mg/ℓ, 지하수는 0.4~94.5mg/ℓ, 지열수는 52.0~96.7mg/ℓ로서 역시 지열수에서 가장 높게 나타나며, 지하수, 용천수의 순으로 낮아진다. 따라서, SO₄²⁻이온은 주로 조암광물의 용해로부터 유래하며, 인위적인 음용수 기준치(200mg/ℓ 이내)에 속하고 있으므로 인위적인 오염의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다(Table 1).

NO₃⁻는 대부분 생활하수와 축산 폐기물의 오염에 의해 생성된다. 본 연구지역에서 NO₃⁻의 함량범위는 용천수에서 0~4.29mg/ℓ, 지하수는 0.03~11.4mg/ℓ, 지열수는 0~3.95mg/ℓ이다. 지하수의 MR1(11.0mg/ℓ), MR2(10.9mg/ℓ)와 OC4(11.4mg/ℓ)가 기준치인 10mg/ℓ를 초과하고 있다. 그 외는 기준치 내에 존재하며, 전체적으로 지하수, 용천수, 지열수의 순으로 낮아진다. 이는 지열수가 지하 심부로부터 유래하므로 오염의 영향을 상대적으로 덜 받기 때문으로 판단된다(Table 1).

지하수 중의 SiO₂(aq)는 암석(특히, 화강암질 암석)에서 규산염 광물과 같은 주요 조암광물의 분해로부터 유래한다. 연구지역에서 SiO₂(aq) 함량범위는 용천수 12.4~34mg/ℓ, 지하수 5.0~57.3mg/ℓ, 지열수 41.1~56.7mg/ℓ로서 오랜 시간동안 암석과 반응한 지열수에서 가장 높게 나타난다.

중금속이온함량을 보면, 지하수 중 두 시료(MR2, OC3)에서 아연의 음용수 기준치(1.0mg/ℓ)를 초과하고, 역시 지하수 중의 두 시료(MR2, OC5)에서 철의 음용수 기준치(0.3mg/ℓ)를 초과하는 것을 제외하고는 모든 시료에서 음용수 기준치 이내에 있다(Table 1). 이것은 지하수 중의 일부가 중금속에 의해서 오염되어 있으나, 비교적 산위에 위치하고 있는 용천수나 지하 심부에서 상승하는 지열수는 오염의 영향을 거의 받지 않고 있음을 지시한다.

4. 지하수 수질의 유형

용천수, 지하수 및 지열수의 수질형을 파악하기 위해 Piper diagram에 수질을 도시해 본 결과 용천수 수질형은 Ca-HCO₃형과 Na-HCO₃형이 각각 반을 차지하고, 지하수는 대부분이 Ca-HCO₃형에 속하는 반면, 지열수는 Na-Cl형에 속한다(Fig. 3). 지하수와 용천수에서 HCO₃

가 우세한 것은 장석의 용해 및 CO₂(g)의 영향을 받고 있음을 지시한다. 그러나, 지하수보다 용천수에서 Na-HCO₃형이 더 많이 나타나는 것은 용천수 중의 일부가 지하수와 다른 화학적 기원임을 지시한다. 한편, 지열수는 지하 심부 암석 및 염수의 영향으로 Na⁺와 Cl⁻이 우세하게 나타나며 따라서 Na-Cl형에 속하는 것으로 판단된다.

Langelier-Ludwig diagram¹⁸⁾에 수질을 도시해 본 결과(Fig. 4), 지열수는 Na-Cl영역에 위치해 있으며, 이는 지하 심부 암석 또는 염수의 영향으로 보여진다. 한편, 지하수 시료와 용천수 시료는 분산되어 위치해 있는데 지하수는 대부분 Ca-HCO₃ 영역에 위치하나, 용천수는 대부분 Na-HCO₃영역과 Ca-HCO₃영역에 위치해 있으나 일부는 지열수와 가까운 Na-Cl영역에 위치하고 있다.

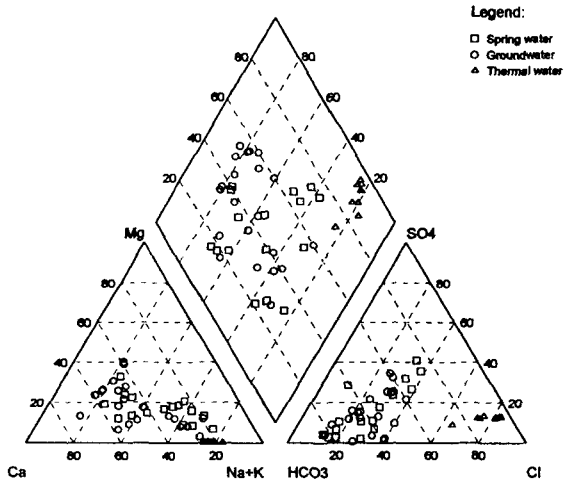
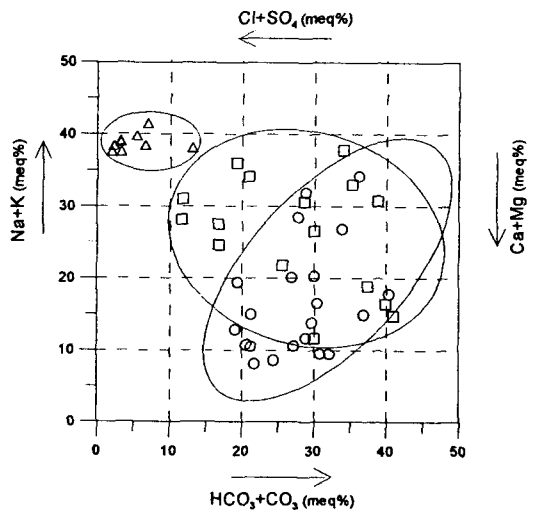


Fig. 3. Piper diagram of samples in the study area.



Legend □ Spring water ○ Groundwater ▲ Thermal water
Fig. 4. Langelier-Ludwig diagram of samples in the study area.

5. 염수의 영향

부산은 해안에 위치하고 있으므로 지하수 과잉양수로 인한 염수 침입이나, 담수와 염수의 경계부에서 염수의 영향을 받을 수 있는 환경에 있다. 본 연구 지역은 해안으로부터 비교적 떨어진 지역이지만, 해수의 직접적인 영향은 받지 않고 있더라도, 동래온천은 식염천¹⁹⁾에 속하므로, 염수의 영향을 검토하기 위해서 Cl⁻이온에 대한 Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻의 관계도를 작성하였다(Fig. 5).

Cl⁻와 Na⁺의 관계(Fig. 5)를 보면, 용천수와 지열수, 지열수의 상관계수가 0.605, 지하수는 0.679인 반면 지열수의 상관계수는 0.829이므로, 지열수에서 상대적으로 높은 상관성을 보인다. 이와 같이, 지열수에서는 염수와 나트륨의 상관계수가 높게 나타나고, 해수 희석선^{20,21)}에 가깝게 위치하고 있다. 고온의 지열수의 경우에는 마그마에서 유래하는 염수와 나트륨을 고려할 수 있으나, 본 연구지역은 비화산성 지열지대로서 마그마와 직접적인 관련을 지시하지 않는다.²²⁾ 따라서, 지열수의 대부분의 염소는 해수와 관련을 가지는 염수에서 유래할 가능성이 크며, 회귀직선의 경사가 해수희석선보다 완만한 것으로 볼 때, 나트륨은 염수 외에도 사장석으로부터도 유래하는 것으로 판단된다.

Cl⁻과 Ca²⁺이온간의 상관성을 보면(Fig. 5), 지열수, 지하수, 용천수의 순으로 낮아지며, 특히 용천수에서는 상

관성이 매우 낮다. 또한, 용천수, 지하수, 지열수의 모든 시료가 해수 희석선보다 위에 위치한다. 이것은 칼슘이온이 염수의 영향이 아닌 다른 요인에 지배되는 것을 지시한다. Ca²⁺이온은 Ca-사장석이나 시추코어에서 관찰되는 방해석 등으로 볼 때 이들의 용해로부터 유래하는 것으로 판단된다.

Cl⁻과 Mg²⁺의 상관성을 보면(Fig. 5), 용천수와 지열수에서는 거의 상관성이 나타나지 않으나, 지하수에서는 비교적 상관성(0.638)이 높다. 용천수에서는 물-광물반응에서 Mg이온의 생성이 활발하지 않음을 나타내며, 지열수에서는 물 속에 용해되어 있는 Mg²⁺이온이 녹니석, 운모, 몬모릴로나이트 등의 Mg를 포함하는 광물에 들어감으로써 농도가 급격히 감소하기 때문으로 보인다.¹⁵⁾ 반면에, 지하수에서는 광물(흑운모 등)의 용해와 함께 염수와 마그네슘의 함량이 늘어남을 나타낸다. 따라서, 이 지역의 용천수, 지하수 및 지열수에서 Mg²⁺이온과 염수의 연관성은 낮은 것으로 판단된다.

Cl⁻과 K⁺의 관련성을 보면(Fig. 5), 지열수의 상관성은 매우 높게 나타나며(상관계수 0.943), 용천수와 지하수의 상관성이 상대적으로 낮다. 또한, 용천수와 지하수는 대부분 해수 희석선보다 위에 위치하는 반면에 지열수는 이 보다 밑에 위치하고 있다. 따라서, 용천수와 지하수 중의 칼륨이온은 염수와 연관성이 작으며, 지열수의 경우에는 부분적으로 염수의 영향을 받는 것으로 판단된다.

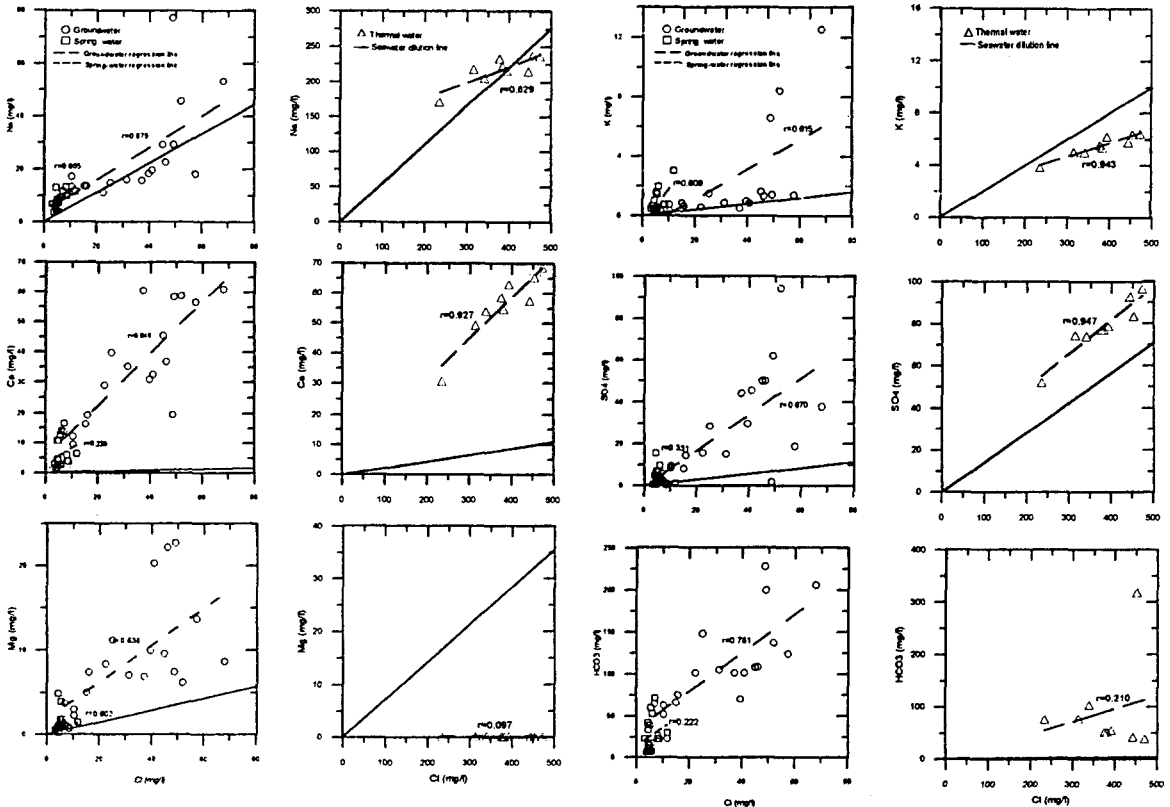


Fig. 5. Relation between Cl⁻ and other major ions (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻ and HCO₃⁻).

Cl⁻과 SO₄²⁻의 관계도에서는(Fig. 5), 용천수, 지하수, 지열수가 대부분 해수 회석선보다 위에 위치한다. 또한, 용천수와 지하수의 기울기는 해수 회석선보다 훨씬 높게 나타나지만, 지열수의 기울기는 해수 회석선과 비슷하다. 이는 지열수 중의 SO₄²⁻가 지하 심부의 물-광물반응과 염수로부터 유래함을 지시한다. 그러나, 지하수와 용천수 중의 SO₄²⁻는 암석과 반응이나 또는 부분적으로 인위적인 오염으로부터 유래함을 지시한다.

Cl⁻과 HCO₃⁻의 관계도(Fig. 5)를 보면, 용천수와 지열수에서는 상관성이 매우 낮게 나타나지만, 지하수에서는 비교적 높게(상관계수 0.781) 나타난다. 또한, 용천수, 지하수, 지열수의 회귀직선의 기울기는 염수 회석선보다 훨씬 크다. 따라서, HCO₃⁻이온의 기원은 염수와 무관함을 지시한다. 특히, 염소와 중탄산의 상관성이 높다는 것은 물-광물 반응이 이들 이온이 형성되는 반응임을 지시한다.

위와 같이 염소와 나트륨, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 황산염, 중탄산간의 관계로부터 볼 때, 지열수는 염수의 영향을 받고 있으나, 용천수와 지하수는 염수 영향을 받을 가능성이 낮은 것으로 판단된다.

6. 물-암석 반응

물-암석반응 모델링 프로그램인 PHREEQC²³⁾를 이용하여, 연구지역 용천수, 지하수, 지열수의 물-암석 반응을 연구하였다. 장석류의 풍화반응을 깁사이트(Al(OH)₃)를 형성하는 반응으로 가정하고, 깁사이트-카올리나이트, 미사장석-카올리나이트, 미사장석-백운모, 백운모-카올리나이트, 백운모-깁사이트, 알바이트-카올리나이트의 관계식을 이용하여 광물 상평형관계를 알아보았다.^{24,25)} 지하심부 지열수층(100°C 이상의 고온)의 상평형 관계에서 활동도계수와 이온활동도는 온도 변화에 따라 그렇게 많이 영향을 받지 않는으나, [H₄SiO₄]는 광물들의 안정영역 경계에 의해서 상당히 크게 영향을 받을 수도 있다.²⁶⁾ 본 연구에서는 25°C, 1기압에 대해서 [Ca²⁺]/[H⁺]², [Mg²⁺]/[H⁺]², [Na⁺]/[H⁺], [K⁺]/[H⁺] 그리고 [H₄SiO₄]의 대수값을 각각 종축과 횡축으로 하는 각 광물의 안정영역에 용천수, 지하수 및 지열수시료를 도시하였다(Fig. 6). 여기서 []는 각 이온의 활동도를 의미한다.

K₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계(Fig. 6(a))에서는, 용천수와 지하수의 경우에는 거의 대부분이 카올리나이트 안정영역에 위치하는 반면 지열수는 미사장석(K-장석) 안정영역에 위치한다. 용천수와 지하수를 비교하면 지하수가 미사장석 영역쪽에 더 가깝게 위치한다. 이는 용천수에서 지하수로 그리고 지하수에서 지열수로 지화학적 진화가 진행됨에 따라 카올리나이트에서 미사장석 안정영역 쪽으로 이동함을 나타낸다.

Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계(Fig. 6(b))에서는, 용천수, 지하수, 지열수 모두가 카올리나이트 안정영역에 속하지만, 용천수, 지하수, 지열수의 순으로 알바이트 안정영역 쪽에 가깝게 위치한다. 이는 용천수에서 지하수로 그리고 지하수에서 지열수로 물-광물반응이 진행됨에 따라 카올리나이트에서 알바이트 안정영역 쪽으로 이동함을

나타낸다. 따라서, 물-광물반응이 진행됨에 따라 알바이트와 평형상태를 이루게 됨을 나타낸다.

MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계(Fig. 6(c))에서는, 용천수, 지하수, 지열수 모두가 카올리나이트 안정영역에 속하나, 전체적으로 지열수, 지하수, 용천수의 순서로 녹니석 안정영역에 약간 더 가깝게 나타나고 있으나, 그 경향성이 뚜렷하지는 않다. 또한 대부분의 시료가 피로필라이트 안정영역 쪽에 몰려있는 경향성을 보이며, 카올리나이트에 가까운 경향성은 용천수가 가장 낮고 다음은 지하수, 지열수의 순이다. 따라서, 물-광물반응이 상대적으로 많이 진행된 지열수에서는 마그네슘이온의 소모로 녹니석이 형성되면서 녹니석 안정영역에 가까워짐을 나타낸다.

CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계(Fig. 6(d))에서는, 용천수, 지하수, 지열수 모두가 카올리나이트 안정영역에 속하지만, 지열수, 지하수, 용천수의 순으로 로몬타이트 영역에 더 가깝게 위치한다. 이는 지하 심부로 갈수록 로몬타이트가 안정해지며, 카올리나이트를 형성하는 경향성이 낮다는 것을 나타낸다.

K₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계, Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계, MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계, CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O계의 상안정도에 의하면, 용천수, 지하수, 지열수의 대부분의 시료가 카올리나이트 안정영역에 놓인다. 그러나, 지열수는 지하심부로부터 유래하므로 용천수나 지하수와는 달리 천부 환경의 평형상태에 도달하고 있지 않음을 보여주고 있다.

7. 요인분석

요인분석의 요인추출 모델은 PCA(Principal Component Analysis)방식을, 공통인자 수의 결정은 1이상의 고유치(eigenvalue)를 택하였으며, varimax 직각 회전방식을 택하여 자료의 분산을 가장 잘 설명할 수 있는 방향으로 회전하였다.

용천수의 경우 요인분석의 변수는 EC, SiO₂, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻로 하였다. 요인분석 결과 세 개의 요인이 추출되었으며, 요인 1은 SiO₂, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, 요인 2는 EC, K⁺, Na⁺, Cl⁻, NO₃⁻, 그리고 요인 3은 Mg²⁺, SO₄²⁻로 대표된다(Table 2, Fig. 7). 전체 자료에 대한 기여율은 각각 41.4%, 22.0%, 16.8%이며 요인 1의 고유치가 4.14로서 요인 2와 요인 3의 고유치인 2.2와 1.7보다 크므로 전체 분산을 설명하는데 있어서 요인 1이 더 높은 비중을 차지한다. 요인 1에 속하는 성분들은 사장석이 용해되어 카올리나이트가 만들어지는 과정에서 또는 방해석이 용해되어 형성되며, 요인 2에 속하는 성분들은 염수의 영향을 받고 있다는 증거가 없으므로 유체포유물내의 소금 또는 인위적인 오염(NO₃⁻의 존재)에서 유래하는 것으로 설명된다. 요인 3에 속하는 Mg²⁺와 SO₄²⁻간의 상관계수(0.5)가 높지 않은 것으로 보아 이들은 서로 다른 거동을 보이는 것으로 판단된다.

지하수의 경우 요인분석의 변수는 EC, SiO₂, K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, 해발고도로

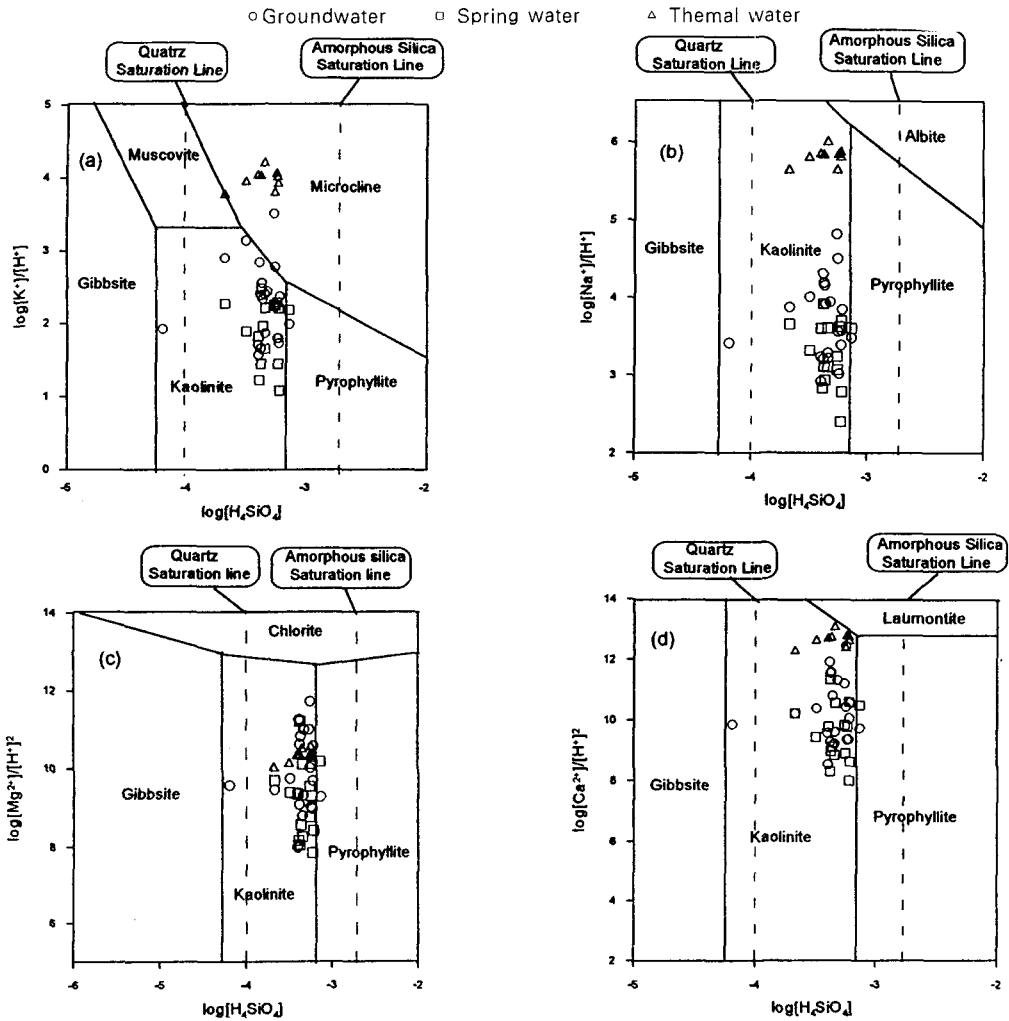


Fig. 6. Phase stability diagram of some minerals by Helgeson et al.(1978) and Bowers et al. (1984) in (a) the system $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, (b) the system $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, (c) the system $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ and (d) the system $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ at 298K and 1 atm.

Table 2. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the spring water

Variable	Factor1	Factor2	Factor3	Communality
EC	0.4829	0.5011	0.4544	0.6907
SiO ₂	0.8968	-0.0030	-0.2601	0.8719
Ca	0.8761	0.1829	0.2323	0.8549
K	0.2853	0.4927	0.1838	0.3580
Mg	0.6632	0.0267	0.6864	0.9103
Na	0.4133	0.7698	-0.2710	0.8369
Cl	0.0401	0.8302	-0.0770	0.6967
NO ₃	-0.2310	0.9314	0.1427	0.9413
SO ₄	-0.1289	-0.0264	0.9277	0.8779
HCO ₃	0.9826	0.1158	0.0278	0.9796
Eigenvalue	4.14	2.20	1.68	
Percent of variance explained by the factor	41.35	22.03	16.80	
Cumulative percent of variance	41.35	63.38	80.18	

하였다. 요인분석 결과, 세 개의 요인이 추출되었으며, 요인 1은 EC, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, 해발고도 및 NO₃⁻로, 요인 2는 K⁺, Na⁺, 및 HCO₃⁻로, 그리고 요인 3은 NH₄⁺, SiO₂로 대표된다(Table 3, Fig. 7). 전체 자료에 대한 기여율은 각각 52.7%, 16.0%, 11.0%이며 요인 1의 고유치가 약 6.3으로서 요인 2와 요인 3의 고유치인 1.9와 1.3보다 훨씬 크므로 전체 분산을 설명하는데 있어서 요인 1이 더 높은 비중을 차지한다. 요인 1에 속하는 NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ 중에서 NH₄⁺와 NO₃⁻는 자연적인 지하수에는 일반적으로 들어있지 않으므로 오염의 영향으로 판단되고, SO₄²⁻은 물-광물 반응이나 또는 부분적으로 인위적인 오염으로부터 유래하고(3. 물리화학적 성질, 용존성분의 함량 및 오염물질의 영향과 5. 염수의 영향을 참조), Cl⁻은 염수의 영향보다는 오염의 영향으로 설명될 수 있다(3. 물리화학적 성질, 용존성분의 함량 및

오염물질의 영향과 5. 염수의 영향을 참조). Ca^{2+} , Mg^{2+} 는 시추 코어에서의 방해석의 존재로 볼 때 주로 방해석의 용해로부터 유래함을 지시한다. 요인 2를 구성하는 K^+ , Na^+ 와 HCO_3^- 는 정장석과 사장석의 풍화산물인 카오리나이트가 만들어지면서 물 속에 용해된다. 요인 3을 구성하는 NH_4^+ , SiO_2 는 상관성이 낮으며(상관계수 0.06) 서로 다른 거동을 보인다.

Table 3. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the groundwater

Variable	Factor1	Factor2	Factor3	Communality
EC	0.6972	0.4120	0.4334	0.8436
SiO ₂	-0.0007	-0.0594	0.6926	0.4832
Ca	0.8466	0.2758	-0.0829	0.7997
K	0.0466	0.8760	-0.3658	0.9033
Mg	0.8667	0.0983	0.2807	0.8397
Na	0.1045	0.9589	0.1450	0.9514
Cl	0.7372	0.6013	-0.0745	0.9106
NO ₃	0.8125	-0.0076	-0.4198	0.8364
SO ₄	0.9279	0.0471	0.1090	0.8750
HCO ₃	0.4485	0.8165	0.2228	0.9174
NH ₄	0.5249	0.4483	0.5124	0.7390
Altitude	-0.6175	0.2494	-0.1235	0.4587
Eigenvalue	6.32	1.92	1.32	
Percent of variance explained by the factor	52.66	15.99	11.00	
Cumulative percent of variance	52.66	68.55	79.65	

지열수의 경우 요인분석의 변수는 EC, SiO₂, Na⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁻, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, HCO₃⁻, F⁻로 하였다. 요인분석 결과 세 개의 요인이 추출되었으며, 요인 1은 EC, Na⁻, Ca²⁺, K⁻, F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻로, 요인 2는 NH₄⁺, NO₃⁻ 및 SiO₂로, 그리고 요인 3은 Mg²⁺, HCO₃⁻로 대표

Table 4. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the thermal water.

Variable	Factor1	Factor2	Factor3	Communality
EC	0.9122	-0.3484	0.0648	0.9576
SiO ₂	0.5474	-0.6305	0.1303	0.7142
Ca	0.9367	-0.2466	0.1581	0.9633
K	0.9288	-0.2920	0.1344	0.9660
Mg	0.0525	-0.2912	0.6358	0.4918
Na	0.9507	0.1132	0.1451	0.9377
F	0.8021	-0.3639	-0.4545	0.9823
Cl	0.9311	-0.3129	0.0468	0.9670
NO ₃	-0.1735	0.8876	-0.2855	0.8994
SO ₄	0.8929	-0.3075	-0.0749	0.8973
HCO ₃	0.1384	-0.0006	0.8074	0.6710
NH ₄	0.4947	-0.5939	-0.4796	0.8275
Eigenvalue	7.47	1.68	1.13	
Percent of variance explained by the factor	62.21	13.98	9.44	
Cumulative percent of variance	62.21	76.19	85.63	

된다(Table 4, Fig. 7). 전체 자료에 대한 기여율은 각각 62.2%, 14.0%, 9.4%이며 요인 1의 고유치가 7.47로서 요인 2의 고유치(1.68)과 요인 3의 고유치(1.13)보다 훨씬 크므로 전체 분산을 설명하는데 있어서 요인 1이 가장 높은 비중을 차지하고 요인 2와 요인 3의 비중은 상당히 낮다. 요인 1에 속하는 Ca^{2+} 와 K^+ 를 보면, 지열수가 지하 심부로부터 유래하므로, Ca^{2+} 의 경우에는 사장석, 그리고 K^+ 의 경우에는 정장석과 운모에서 유래하는 것으로 판단된다. Na^+ , Cl^- 은 염수의 영향을 지시하며, SO_4^{2-} 이온은 물-광물반응과 염수의 영향을 동시에 받고 있는 것으로 판단된다(5. 염수의 영향 참조). 요인 2를 구성하는 NH_4^+ 와 NO_3^- 는 자연적인 지하수에서는 유래하지 않으므로 오염의 영향으로 판단된다. 앞에서 살펴본 바와 같이, Mg^{2+} 이온과 염수와의 관련성이 크지 않고, 오염에 의한 영향도 미약한 것으로 나타났으므로, 요인 3을 구성하는 Mg^{2+} 와 HCO_3^- 는 주로 방해석으로부터 유래하는 것으로 판단된다.

8. 결 론

금정산-백양산 지역 및 주변지역의 용천수, 지하수 그리고 지열수의 수질 특성을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) pH는 용천수의 경우에 6.21~7.73, 지하수는 6.15~7.71 지열수는 7.65~8.07로서 모두 지하수의 음용수 기준치 범위 (5.8-8.5)내에 있다. 용천수의 EC는 41~224 $\mu S/cm$, 지하수는 121~623 $\mu S/cm$, 지열수는 1044~1767 $\mu S/cm$ 로서, 지열수의 EC가 지하수와 용천수보다 높게 나타나며, 이는 지열수가 오랜 시간 동안 지하 심부에서 암석과의 반응으로 암석내의 광물 성분이 용해되었기 때문이다.

2) 주요 이온의 함량을 비교하면, Mg^{2+} 와 HCO_3^- 제외하고는 지열수의 용존이온 함량이 가장 높게 나타난다. 이는 대부분의 용존이온은 물과 암석의 반응시간이 길수록 증가하기 때문이며, Mg^{2+} 이온은 지하 심부에서 다시 Mg^{2+} 를 포함하는 광물 속으로 들어가기 때문으로 보인다. 그리고 HCO_3^- 이온이 천부 지하수에서 풍부한 이유는 천부의 토양과 풍화대에 풍부한 CO_2 가스의 영향 때문으로 판단된다.

3) Piper diagram 과 Langelier-Ludwig diagram에 의하면, 용천수 수질형은 $Ca^{2+}-HCO_3^-$ 형과 $Na^+-HCO_3^-$ 형이 각각 반을 차지하고, 지하수는 대부분이 $Ca^{2+}-HCO_3^-$ 형에 속하는 반면, 지열수는 Na^+-Cl^- 형에 속한다. 또한, 용천수와 지하수는 비교적 천부 기원 그리고 지열수는 심부 기원을 나타낸다.

4) 염소와 나트륨, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 황산염, 중산탄산의 관계로부터 볼 때, 지열수는 염수의 영향을 받고 있으나, 용천수와 지하수는 염수 영향을 받을 가능성이 낮은 것으로 판단된다.

5) $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 계, $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 계, $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 계, $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 계의 상안정도에 의하면, 용천수, 지하수, 지열수의 대부분이 카오리나이트 안정영역에 놓인다. 그러나, 지열수는 지하 심부로부터 유래하므로 용천수나 지하수와는 달리 천부

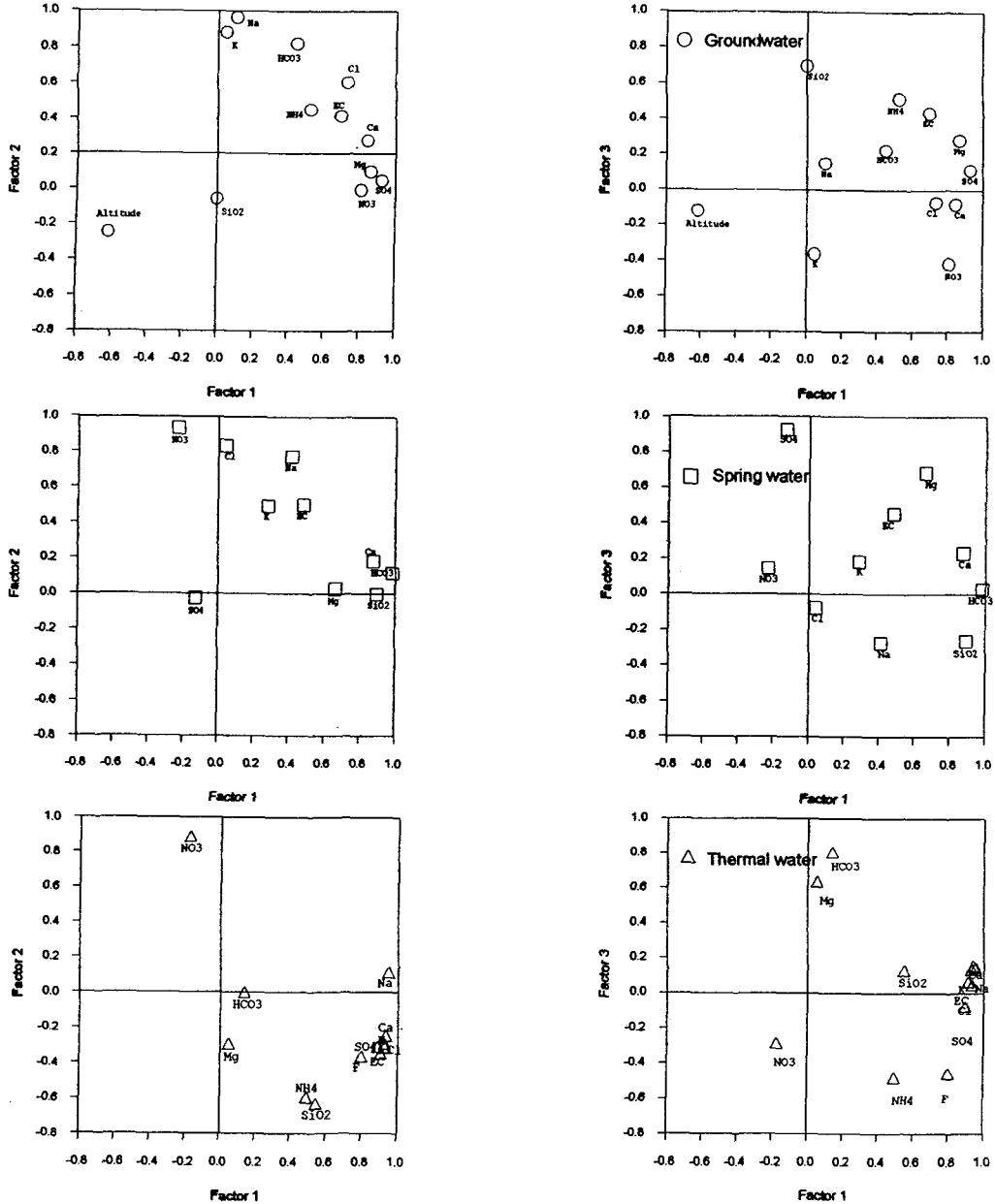


Fig. 7. Plot of factors 1 vs. 2 and factors 1 vs. 3 for spring water, groundwater and thermal water

환경의 평형상태에 도달하고 있지 않음을 보여주고 있다.

6) 요인 분석에 의하면, 용천수, 지하수, 지열수에서 모두 세 개의 요인(요인 1, 2, 3)이 나타나며, 용천수와 지하수는 주로 장석과 방해석의 용해, 인위적인 오염원(생활하수와 산업폐수), 그리고 지열수는 염수의 영향, 장석, 운모 및 방해석의 용해, 그리고 부분적으로 인위적인 오염의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비(과

제번호: 1998-15-D00279)에 의하여 지원되었으며, 연구비를 지원하여 주신 관계기관에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 이준운, 1997, 방사성폐기물의 지하심부 처분을 위한 국내 심부지하수의 수리지구화학적 특성 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 247p.
- 2) 조병욱, 성익환, 추창모, 이병대, 김통권, 1998, 대보화강암과 불국사 화강암지역 먹는샘물의 수리화학적 특성, 지질공학, 8(3), 247~259.

- 3) 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 대수층 지질 및 온도에 따른 국내 지하수의 지구화학적 특징-화강암질암내 지하수와와의 비교연구, 지하수환경, 4(4), 212~222.
- 4) 한석중, 1999, 부산 동래지역 지열수와 지하수의 수리 지구화학적 특성 연구, 부산대학교 석사학위 논문, 102p.
- 5) 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월내도폭(1:50000) 및 설명서, 자원개발연구소.
- 6) 차문성, 1976, 부산지역의 불국사 산성화강암류의 암석학적 연구, 광산지질, 9(2), 85~106.
- 7) 차문성, 윤성효, 1982, 부산시 일원의 백악기 화산활동-특히 장산 칼데라 잔존구조에 대하여, 부산대학교 자연과학논문집, 34집, 377~390.
- 8) 류충렬, 김근수, 이준동, 1997, 양산시 동부일원의 파쇄구조 : 양산단층 좌향이동의 증거? 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회 요약집, 16~17.
- 9) 류충렬, 김근수, 1997, 양산 통도사 일원의 파쇄구조 : 양산단층대 우향이동의 증거, 대한자원환경학회 제30차 학술발표회 발표논문 요약집, 18.
- 10) 최재우, 1984, 부산 금정산 남부지역에 분포하는 화강암체의 절리면에 대한 지반 역학적 연구, 부산대학교 지질학과 석사학위 논문, 3~16.
- 11) 石生志郎, 1985, 한국의 지열, 지질뉴스, 제366호, 50~57.
- 12) 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수환경, 4(4), 199~211.
- 13) Rosen, M. and S. Jones, 1998, Controls on the chemical composition of groundwater from alluvial aquifers in the Wanaka and Wakatipu basin, Central Otago, New Zealand, Hydrogeology Journal, 6, 264~281.
- 14) Mast, M. A., J. I. Drever and J. Baron, 1990, Chemical weathering in the Loch Vale Watershed, Rocky Mountain National Park, Colorado, Water Resour. Res., 26, 2971~2978.
- 15) Muffler, L. J. P. and D. E. White, 1969, Active metamorphism of Upper Cenozoic sediments in the Salton Sea geothermal field and the Salton Trough, southeastern California, Bull. Geol. Soc. Amer., 80, 157.
- 16) Nordstrom, D. K., J. W. Ball, R. J. Donahoe and D. Whittemore, 1989, Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa, Geochim. Cosmochim. Acta, 53, 1727~1740.
- 17) 이인호, 이재영, 김통권, 1997, 대구시 지하수의 수질에 대한 지화학적 연구, 자원환경 지질, 30(4), 327~340.
- 18) Langelier, W. F. and Ludwig, H. F., 1942, Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters, J. Am. Water Works Assoc., 34, 335~352.
- 19) 임정용, 이동영, 김연기, 최영섭, 엄병우, 이종민, 1992, 부산 동래지구 온천부존량조사보고서, 한국자원연구소 온천조사보고서 92-6(No. 88), 234p.
- 20) Goldberg, E. D., 1963, Chemistry-the oceans as a chemical system, In Hill, M. N., Composition of Seawater, Comparative and Descriptive Oceanography of the Sea, Interscience, N. Y.
- 21) Howard, K. W. F. and J. W. Lloyd, 1983, Major ion Characterization of coastal saline ground waters, Ground Water, 21(4), 429-437.
- 22) Nicholson, K., 1993, Geothermal fluids, Springer-Verlag, 263p.
- 23) Parkhurst, D. L., 1995, User's guide to PHREEQC -A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport and inverse geochemical calculations U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 95-4227, 135-143.
- 24) Helgeson, H. C., V. H. Delany, W. T. Nesbit and D. K. Brid, 1978, Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals, Amer. J. Sci., 278-A, 1~229.
- 25) Bowers, T. S., Jackson, K. J. and H. C. Helgeson, 1984, Equilibrium activity diagram, Springer-Verlag, Berlin, 397.
- 26) Mutlu, H., 1998, Chemical geothermometry and fluid-mineral equilibria for the Omer-Gecek thermal waters, Afyon area, Turkey, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 80, 303~321.