

부산 남부지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리화학적 특성 비교

Comparison of Hydrochemical Characteristics of Groundwater in the Southern Area and the Northwestern Area, Pusan

함세영(Se-Yeong Hamm)* · 조명희(Myong-Hee Cho)* · 성의환(Ig-Hwan Sung)** ·
이병대(Byong-Dae Lee)** · 조병욱(Byong-Wook Cho)** · 심형수(Hyoung-Soo Shim)*

요 약 : 부산 남부지역 안산암질암지역의 지하수와 서북부지역 화강암지역의 지하수를 채수하여 주요성분과 미량성분을 분석하였다. 파이프 다이어그램에 의하면, 남부지역은 Ca^{2+} - HCO_3^- 형과 Ca^{2+} -(Cl^- + SO_4^{2-})형에 속하고, 서북부지역은 대부분 Ca^{2+} - HCO_3^- 형에 그리고 일부는 Na^+ - HCO_3^- 형에 속한다. 요인분석에 의하면, 남부지역은 두 개의 요인(요인 1과 요인 2)으로 특징지어진다. Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , EC과 NO_3^- 로 구성되는 요인 1은 사장석 및 방해석의 용해 그리고 인위적인 오염(가정하수 및 산업폐수)의 영향으로 대표된다. K^+ , Na^+ , SiO_2 , SO_4^{2-} , HCO_3^- 로 구성되는 요인 2는 주로 장석의 용해로 대표된다. 서북부지역은 세 개의 요인(요인 1, 2, 3)으로 특징지어진다. EC, pH, Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 과 NO_3^- 로 구성되는 요인 1은 사장석과 운모의 용해, 인위적인 오염 그리고 염수의 영향으로 대표된다. Ca^{2+} 과 HCO_3^- 로 구성되는 요인 2는 사장석의 용해로 설명된다. 요인 3은 Mg^{2+} 과 SiO_2 로 구성되며 규산염광물 그리고 오염의 영향으로 설명된다. Helgeson 외(1978)과 Bowers 외(1984)의 상평형도에 의하면, 남부지역과 서북부지역의 지하수 모두 카오리나이트 안정영역에 속한다. Cl^- 에 대한 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} 및 HCO_3^- 각각의 관계에 의하면, 남부지역과 서북부지역에서 모두 염수의 영향을 받고 있는 것으로 나타난다.

Abstract : Groundwater samples from the southern area composed of andesitic rocks and the northwestern area composed of granite in Pusan city, have been collected and analyzed. According to the Piper diagram, groundwater in the southern area belongs to Ca^{2+} - HCO_3^- and Ca^{2+} -(Cl^- + SO_4^{2-}) types, and that in the northwestern area mostly belongs to Ca^{2+} - HCO_3^- type and partly Na^+ - HCO_3^- type. Two factors (factor 1 and factor 2) were obtained from the result of the factor analysis in the southern area. Factor 1, consisting of Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , EC and NO_3^- is represented by the dissolution of Ca-plagioclase and calcite, and the influence of anthropogenic sources. Factor 2, consisting of K^+ , Na^+ , SiO_2 , SO_4^{2-} and HCO_3^- is mainly represented by the dissolution of feldspar. Three factors were obtained from the result of the factor analysis in the northwestern area. Factor 1, consisting of Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^- explains dissolution of plagioclase and mica, the influence of anthropogenic sources and salt water. Factor 2, consisting of Ca^{2+} and HCO_3^- explains the dissolution of Ca-plagioclase. Factor 3, consisting of Mg^{2+} and SiO_2 , explains the dissolution of silicate minerals, and contaminants. Based on the phase stability diagrams, groundwater both in the southern and in the northwestern areas is mostly in equilibrium with kaolinite. Cl^- with respect to Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , and HCO_3^- indicates that both the northwestern area and the southern area are influenced by the salt water.

서 론

물-광물 상호반응에 의해서 암석 중의 구성광물들은 선택적이고 다양하게 분해되는 화학적 풍화작용을 받게 된다. 지하수의 화학조성은 이와 같은 물-광물간의 반응 시간 및 암석의 화학조성에 의해 크게 좌우된다. 장석이 지하수에 비조화 용해를 하면, 수소이온이 소모되면서 pH가 상승하게 되고 이차광물인 점토광물이 만들어지면서 알칼리원소나 알칼리토금속원소들이 규산과 함께 지하수로 빠져 나오게 된다. 화성암지역 지하수의

주성분인 Na^+ , Ca^{2+} , 및 K^+ 는 주로 사장석과 정장석의 용해에, 그리고 Mg^{2+} 는 마그네슘을 포함하는 광물(각섬석, 흑운모 등)의 용해와 관련된다.

물-암석반응 모델링은 각 광물의 포화도와 이론적인 광물 상평형 관계를 이용하여 지하수의 용존성분을 이해하기 위한 것이다(Parkhurst, 1995). 그러나, 지하수 성분을 물-암석반응의 자연적인 과정에 의한 기원과 인위적인 기원으로 정량적으로 구별하는 것은 매우 어렵다. Pacheco and Weijden(1996)은 대도시 지하수 성분 중 물-암석반응에 의해서 유래하는 성분은 실리카와 HCO_3^- 로 한정하였고, 황철석과 같은 황화광물의 존재는 무시하고 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 등의 용존 음이온은 대기나 오염 기원으로 간주하였다.

부산은 우리 나라 6대도시(서울, 부산, 대구, 광주, 인천, 대

* 부산대학교 지구환경시스템과학부(Division of Earth and Environmental System Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

** 한국지질연구소 지구환경연구부(Division of Earth Environment Research, Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

전) 중 지하수 의존도가 가장 높으며, 다량의 지하수가 생활용수, 식수, 공업용수로 개발되고 있다. 이 연구에서는 부산광역시 남부지역의 안산암질암 및 서북부지역의 화강암에서 산출하는 지하수를 수질분석하여 기반암에 따른 수리화학적 특성을 파악함과 아울러 인위적인 오염의 영향을 밝히고, 이들 간의 수리화학적 특성을 비교하였다. 수질분석은 현장분석과 실내분석으로 나누어 실시하였다. 현장분석에서는 채수 후 지표환경에 노출되자마자 수심초내에 불안정해지는 온도, pH, 전기전도도(EC), 총고용물(TDS), HCO_3^- (중탄산이온), CO_3^{2-} (탄산이온)을 채수 즉시 현장에서 측정하였다. pH는 pH meter(Orion Model 250A), 수온은 디지털온도계(Sato Model SM-1250MC), EC와 TDS는 EC meter(Orion Model 115)를 사용하여 측정하였다. 그리고 HCO_3^- 와 CO_3^{2-} 는 메틸오렌지-페놀프탈레인을 이용한 산-중화 적정법으로 분석하였다. 부산광역시 남부지역의 안산암질암내 지하수는 사하구 내에 개발된 지하수 공(공유공 및 사유공) 중에서 공유공 69개공 중 17개공과 사유공 3개공에 대해서 1998년 9월에 지하수 시료를 채취하였다(Figure 1(a)). 지

하수 시료 번호는 각 동별 KJ(괴정동), GC(감천동), SP(신평동), DR(당리동), HD(하단동)로 구분하여 기재하였다. 시료 채취 지하수공의 심도는 대체로 100~200m이며 지하수위는 KJ8, DR1, HD2가 지표하 10m 미만이고 나머지 대부분은 15~20m 정도이다(Table 1).

부산광역시 서북부의 백악기 화강암지역에서는 금정구내 지하수 공유공(민방위공 및 비상급수공) 총 50개소 중에서 지하수 시료채취가 가능한 21개 공(흑운모화강암 6개, 아다멜라이트 7개, 미문상화강암 8개 지점)으로부터 1998년 6월에 지하수 시료를 채취하였다(Figure 1(b)). 또한 1998년 5월과 12월 그리고 1999년 4월의 3회에 걸쳐서 현장의 물리화학적 특성(수온, pH, 전기전도도)을 측정하였다(Table 2). 지하수 시료는 각 동별 NP(노포동), SN(선동), NS(남산동), CL(청룡동), JJ(장전동), GS(금성동), KS(구서동), DK(두구동), OL(오룡동), BK(부곡동)로 기재하였다. 지하수공의 심도는 대부분이 100~160m이다.

지질 및 수리지질

남부지역

이 지역의 지질은 백악기 유천층군에 속하는 퇴적암(다대포층)과 이를 관입 또는 분출한 유천층군 화산암류(안산암류, 안산암질화산각력암, 맥암, 그리고 제 4기 층적층으로 구성되어 있다(Figure 2(a); 신중주, 1997; 장태우 외, 1983). 다대포층은 적색층 및 화산암물질의 양에 따라 상부와 하부로 나누어지는데, 하부는 주로 적색 세일, 실트스톤과 회색 또는 녹회색의 세일, 사암 및 역암으로 구성된다. 다대포층의 주향과 경사는 다대포지역에서 N25°W, 25°NE이고, 송도지역에서는 N75-80°W, 20°NE이다(장태우 외, 1983).

유천층군 화산암류의 암편은 대부분이 세립안산암, 반상안산암, 현무암질안산암 등이 주이고, 세일, 사암, 화강암, 쳐어트, 규장암, 용회암 등의 암편은 소량으로 나타나며, 기질은 유리질 물질, 세립의 사장석, 견운모, 녹염석, 녹니석 등으로 이루어진다(장태우 외, 1983). 2차적인 변질광물은 대개 녹염석, 방해석, 견운모 등이다.

맥암은 여러 암층을 관입하고 있으며 관입 방향, 크기, 연장 등이 상당히 불규칙하다. 산성암맥 중에는 규장암이 가장 많고 석영반암도 분포한다. 중성암맥은 안산암, 안산반암 등으로 구성된다.

제4기 층적층은 낙동강 하구에 넓고 두껍게 퇴적되어 있고, 그 외 저 지대에 분포하고 있다. 낙동강 하구 지역에는 모래, 펄, 점토 등이 퇴적되어 있고, 기타 지역에는 자갈, 모래, 펄, 점토 등이 퇴적되어 있다.

서북부지역

본 역의 지질(Figure 2(b))은 백악기 유천층군의 화산암류(안산암류, 화산력용회암) 및 이를 관입한 불국사 화강암류(흑운모화강암, 화강섬록암, 각섬석 화강암, 아다멜라이트, 토날라이트, 미문상화강암 그리고 제4기 층적층으로 구성되어 있다(차문성과 윤성효, 1982; 손치무 외, 1978; 차문성, 1976). 지하수는 북서쪽(금정산줄기)으로부터 함양되어 지표의 층적층과 그

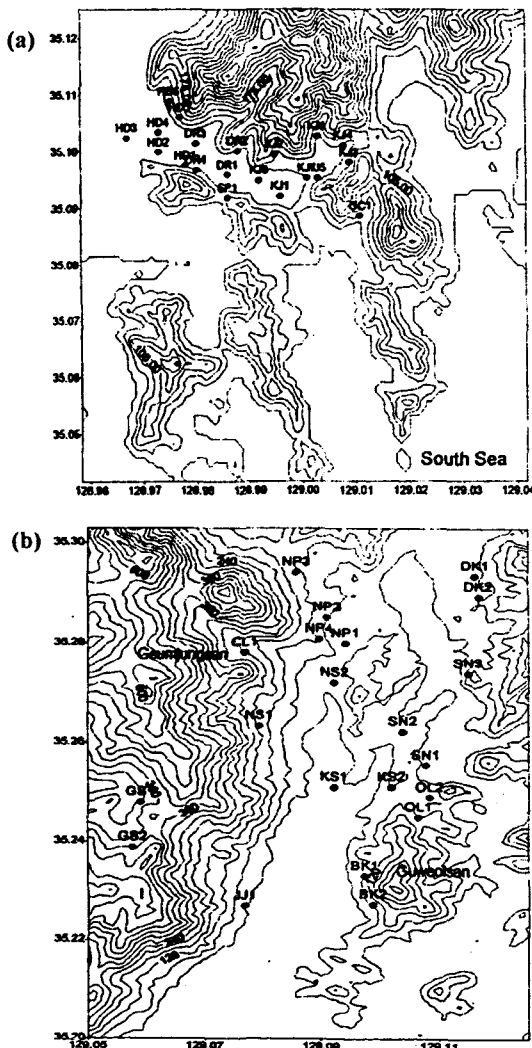


Figure 1. Sampling sites in (a) the southern area and (b) the northwestern area, Pusan.

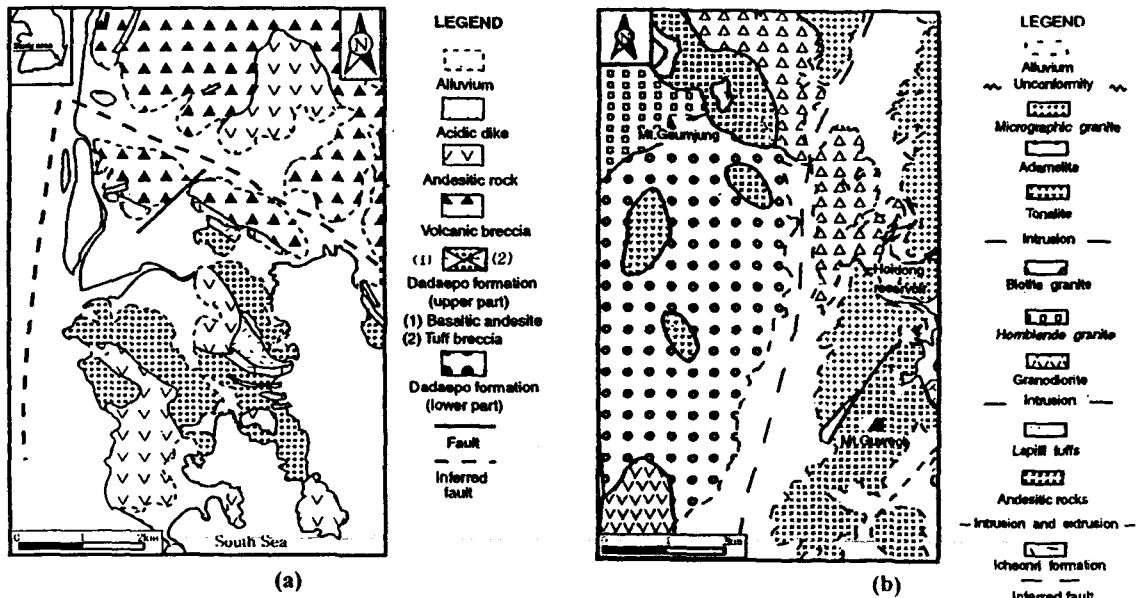


Figure 2. (a) Geological map of the southern area, Pusan (from Chang et al. (1983) and Shin (1997)) and (b) geological map of the northwestern area, Pusan (from Son, et al., 1978).

하부의 암석(화강암류)을 통과하여 동래구 및 금정구의 저지대 쪽으로 흐른다.

이 지역의 중앙으로는 북북동방향의 동래단층이 지나는데 층적층으로 피복되어 있어서 지표에서 단층의 증거를 찾을 수는 없다. 그러나, 인공위성사진에서는 선구조가 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 금정산줄기의 서편에는 양산단층이 역시 북동-남서 방향으로 달리고 있으며, 언양, 양산지역에서는 근년에 양산단층의 증거가 여러 곳에서 발견되고 있다(류충렬 외, 1997; 류충렬, 김인수, 1997). 동래단층과 양산단층은 동래온천의 발달과 연관되는 것으로 생각되며, 북동방향의 이차적인 단층이 신장 열화를 만들고 있으며, 이 이차적인 단층은 지하 심부(적어도 2 km)로 발달되어 있어서 지하수가 지하심부로 유입되어 다시 지표로 상승하여 지열수가 산출하고 있는 것으로 추정된다. 본 역의 암반지하수는 기반암(화강암)에 발달되어 있는 N60-80E 방향의 절리(최재우, 1984)와 그 밖의 절리를 따라서 흐르는 것으로 여겨진다.

화학적 성질

물리화학적 특성

남부지역내 지하수의 pH는 6.41~7.49의 범위(평균 7.04)를 보이는 반면(Table 1), 서북부지역내 지하수의 pH는 5.33~7.68(평균 6.80)로서(Table 2) 서북부지역의 평균값이 조금 낮게 나타난다. 남부지역의 지하수 온도는 16.2~22.3°C의 범위이고, 서북부지역의 지하수 온도는 10.3~20.5°C의 범위로서 서북부지역이 약간 낮게 나타난다. 이는 서북부지역에서는 1998년 12월의 온도 측정값이 포함되어 있기 때문이다.

강우가 지표에 도달한 후의 물의 전기전도도(EC)는 지하 심부로 가면서 충고용물의 증가와 함께 증가한다. 따라서, 지하수 유동을 설명할 수 있는 한 요인이 되며, 또한 인위적인 오

염 상태를 파악하는 데 이용되기도 한다. 남부지역의 EC는 137~4140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로서 HD3(4140 $\mu\text{S}/\text{cm}$)를 제외하고는 DR4, KJ4, KJ5 지점이 다른 지점보다 높다. 특히, HD3의 높은 EC 값은 염수의 영향일 가능성이 있다. 충고용물은 HD3(10,300 mg/l)를 제외하고는 110~502 mg/l이다. 서북부지역의 EC는 47~675 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 218.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이며 선동지역의 SN3에서 가장 높은 값을 보이고 있다(Table 2).

용존성분의 함량

Ca^{2+} 이온은 방해석, 백운석, 석고, 사장석, 각섬석, 휘석, 녹염석, 녹니석 등의 용해로부터 유래한다(이종운 외, 1997; Rosen and Jones, 1998). Mast et al.(1990)은 비록 암석내 방해석이 미량으로 들어있더라도 방해석의 활동도는 Ca^{2+} 이온과 HCO_3^- 이온을 만드는 가장 중요한 요인이라고 하였다. 방해석은 식생에 의해서 방출되는 토양내 CO_2 와 방해석으로 불포화된 강수에 의해서 더 잘 용해된다. 남부지역의 안산암질암내에는 방해석이 2차적인 변질광물로 들어있으며 이들이 Ca^{2+} 이온의 주요 공급원 역할을 하는 것으로 보인다. Ca^{2+} 이온함량은 8.69~375 mg/l(평균 49.92 mg/l)이며, HD3(375 mg/l)에서 특히 높게 나타난다(Table 1). 서북부지역에서 Ca^{2+} 이온함량은 2.61~55.9 mg/l(평균 20.36 mg/l)이다(Table 2). 따라서, 남부지역이 상대적으로 높은 Ca^{2+} 이온함량을 보이고, 이는 안산암질암속에 들어 있는 방해석의 용해 때문으로 판단된다.

Na^+ 이온의 가장 중요한 자연적인 기원은 조암광물인 사장석의 용해이다. 이외에도 염수와 근접한 지역에서는 지하로 침투한 염수의 영향을 받아 높은 Na^+ 이온 함량을 나타낼 수 있다. 남부지역에서는 9.5~1460 mg/l(평균 92.69 mg/l)를 보이며, 특히 HD3(1460 mg/l)지역은 염수의 영향을 받고 있는 것으로 추정된다(Table 1). 서북부지역에서는 5.7~38.1 mg/l(평균 17.07 mg/l)로서(Table 2), 남부지역에서 Na^+ 이온함량이 더 높게 나타난다.

Table 1. Physical and chemical components for groundwater samples in the southern area, Pusan (September, 1998).

Sample No.	KJ1	KJ2	KJ3	KJ4	KJ5	KJ6	KJ7	KJ8	GC1	SP1	DR1	DR2	DR3
Depth(m)	65	100	300	300	100	170	120	70	250	130	75	130	200
Temp(°C)	17.1	17.3	16.3	22.3	21.8	20.2	21.7	18.0	18.9	16.2	17.3	18.1	19.0
pH	7.02	7.28	6.70	7.10	7.07	7.45	7.40	6.60	7.49	7.47	6.43	7.25	7.24
EC(μs/cm)	456	252	147	558	532	137	480	358	325	373	440	360	216
SiO ₂ (mg/l)	30.10	23.70	15.50	26.90	29.00	24.10	34.40	35.00	21.20	25.60	15.70	37.00	41.90
Na ⁺ (mg/l)	21.10	16.20	9.55	20.20	20.60	15.00	25.20	20.30	14.30	17.30	42.80	18.50	14.80
Mg ²⁺ (mg/l)	19.00	7.09	2.52	20.80	15.60	2.82	15.30	12.60	5.31	15.70	12.30	15.40	6.28
Ca ²⁺ (mg/l)	47.50	24.50	18.70	54.10	60.40	8.69	45.20	29.50	43.50	36.90	29.40	31.60	19.00
K ⁺ (mg/l)	0.79	1.81	2.19	1.49	1.25	0.56	1.58	1.77	0.29	0.91	4.74	3.38	2.3
Fe (mg/l)	0.04	0.04	0.05	0.08	0.03	0.06	0.03	0.16	0.02	0.02	0.30	0.07	0.03
NH ₄ -N (mg/l)	0.07	0.04	0.02	0.14	0.08	0.02	0.05	0.05	0.02	0.07	0.11	0.08	0.02
Zn ²⁺ (mg/l)	0.698	0.338	0.014	0.008	0.012	0.010	0.170	0.228	0	0	0.330	0.244	0.202
Cu ²⁺ (mg/l)	0	0	0	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0
F (mg/l)	0.01	0.04	0	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04	0.25	0	0
Cl ⁻ (mg/l)	65.40	36.70	10.50	73.30	68.80	18.50	59.30	47.10	28.70	35.70	54.60	40.90	21.40
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	43.50	22.20	15.80	32.10	42.80	4.57	42.00	61.30	26.90	30.40	73.50	15.60	6.87
TDS	408	212	127	502	441	110	358	293	288	276	324	263	153
NO ₃ -N (mg/l)	1.75	2.44	3.64	16.55	9.71	1.89	7.54	2.98	10.32	6.62	4.49	2.69	2.26
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	150.8	67.73	52.33	107.8	129.30	52.33	110.80	55.41	86.20	135.5	89.28	147.8	95.43
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd ²⁺ (mg/l)	0	0	0	0.002	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0.002
Pb ²⁺ (mg/l)	0	0	0	0.008	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0
(+/-)	0.92	0.92	0.93	0.94	0.93	0.83	0.95	0.92	0.92	0.90	0.92	0.92	0.88

Sample No.	DR4	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5	HD6	Max	Min	Ave	Med	St.dev
Depth(m)	200	100	50	100	150	70	70	300	50	138	110	76
Temp(°C)	18.2	21.0	21.0	18.1	19.5	20.5	18.3	22.3	16.2	19.0	18.6	1.9
pH	6.97	6.41	6.84	7.31	6.71	6.82	7.14	7.49	6.41	7.04	7.09	0.34
EC(μs/cm)	594	327	491	4140	242	203	171	4140	137	540	359	859
SiO ₂ (mg/l)	23.30	25.40	14.10	25.80	6.20	42.70	42.50	42.70	6.20	27.01	25.70	9.93
Na ⁺ (mg/l)	23.20	22.40	53.80	1460	14.60	14.40	9.50	1460	9.50	92.69	19.35	322.00
Mg ²⁺ (mg/l)	16.50	8.72	7.71	173.00	3.79	4.78	4.05	173.00	2.52	18.46	10.51	36.83
Ca ²⁺ (mg/l)	58.40	27.40	31.50	375.00	18.30	19.00	19.80	375.00	8.69	49.92	30.50	77.89
K ⁺ (mg/l)	1.38	3.05	9.22	23.80	3.39	2.33	1.64	23.80	0.29	3.39	1.79	5.18
Fe (mg/l)	0.04	0.04	0.03	0.56	0.04	0.02	0.02	0.56	0.02	0.08	0.04	0.13
NH ₄ -N (mg/l)	0.09	0.05	0.09	1.57	0.04	0.01	0	1.57	0	0.13	0.05	0.34
Zn ²⁺ (mg/l)	0.394	0	0.006	0.028	0.004	0.008	0	0.698	0	0.135	0.013	0.19
Cu ²⁺ (mg/l)	0.012	0	0	0	0	0.018	0	0.018	0	0.002	0.00	0.00
F (mg/l)	0.04	0.03	0.04	0	0.09	0	0	0.25	0	0.03	0.02	0.06
Cl ⁻ (mg/l)	67.20	34.20	49.80	####	18.60	14.30	9.81	####	9.81	190.74	38.80	675.66
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	47.3	34.3	64.1	564	40.4	3.31	9.69	564	3.31	59.0	33.20	120.5
TDS	373	270	318	10300	162	172	137	10300	110	774	282	2245
NO ₃ -N (mg/l)	2.69	11.18	5.51	0.00	2.46	2.11	0.98	16.55	0.00	4.89	2.84	4.22
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	157.00	55.41	120.00	230.9	46.18	104.7	80.04	230.9	46.18	103.7	100.05	46.38
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
Cd ²⁺ (mg/l)	0	0	0.002	0	0	0	0	0.002	0	0.000	0.00	0.001
Pb ²⁺ (mg/l)	0	0	0	0	0.004	0	0	0.008	0	0.001	0.00	0.002
(+/-)	0.95	0.93	0.94	0.95	0.85	0.87	0.96					

K⁺ 이온은 K-장석이나 운모류의 용해로부터 유래하며, 그 외에도 K⁺ 이온은 비료의 주 구성요소이므로 농업활동에 의해서 물 속에 들어올 수 있다. 일반적으로, K⁺ 이온의 함량은 Na⁺와 Ca²⁺에 비해 낮은 값을 보이는데 그 이유 중의 하나는 K-장석의 용해(풍화)속도가 사장석보다 낮기 때문이다. 또한, K⁺ 이

온은 점토광물에 쉽게 흡착되며, 이것도 K⁺ 이온의 함량이 Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ 이온의 함량보다 낮은 이유가 된다. 남부지역에서 K⁺ 이온은 주로 K-장석이나 운모류의 용해로부터 유래하는 것으로 판단되며, K⁺ 이온함량은 0.29~23.8 mg/l(평균 3.39 mg/l)로서 HD3에서 가장 높게 나타난다(Table 1). 한편, 서북부지역에

Table 2. Physical and chemical components for groundwater samples in the northwestern area, Pusan (May and December, 1998 and April, 1999)

Sample No.	NP1		NP2			NP3			NP4		SN1		SN2			
Depth(m)	100		100			100			155		150		210			
Temp(°C)	15.5	14.1	15.3	14.7	16.2	14.3	13.9	14.8	17.2	18.2	16.3	15.6	16.7	17.8	11.5	17.7
pH	6.84	6.73	6.91	6.81	6.95	6.41	6.02	6.29	6.73	7.68	5.33	6.30	6.39	6.42	7.27	7.22
EC(μs/cm)	198.1	146.1	100.8	103.6	132.6	155.8	117.3	135.2	155.8	194.8	488.0	360.0	317.0	131.3	210.0	172.6
SiO ₂ (mg/l)	21.10		36.10			16.90			30.50		17.90		44.00			
Na ⁺ (mg/l)	12.50		8.70			9.60			9.40		32.20		11.90			
Mg ²⁺ (mg/l)	4.09		2.12			29.50			3.63		14.00		1.29			
Ca ²⁺ (mg/l)	15.50		7.54			10.70			23.90		20.30		12.20			
K ⁺ (mg/l)	14.30		4.41			0.72			0.61		9.17		0.93			
Mn ²⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0		0			
Fe (mg/l)	0.00		0.13			0.04			0.02		0.00		0.00			
NH ₄ -N (mg/l)	0.02		0.02			0.00			0.02		0.23		0.00			
Zn ²⁺ (mg/l)	0.005		0.390			0.350			0.010		0.060		0.060			
Cu ²⁺ (mg/l)	0.015		0.018			0.052			0.013		0.016		0.017			
F ⁻ (mg/l)	0.07		0.07			0			0.14		0.07		0.03			
Cl ⁻ (mg/l)	16.60		7.40			9.65			11.40		49.00		6.70			
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	9.75		1.57			4.90			3.18		37.00		3.56			
NO ₃ -N (mg/l)	1.76		0.56			1.89			0.30		5.92		0.14			
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	76.97		61.57			123.14			144.69		18.47		98.51			
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0		0			0			0		0		0			
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0		0			0			0		0		0			
As (mg/l)	0		0			0			0		0		0			
Al ³⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0.16		0			
Cd ²⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0		0			
Pb ²⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0		0			
(+/-)	0.80		0.80			1.30			0.80		1.30		0.70			
Month	05/98	12/98	05/98	12/98	04/99	05/98	12/98	04/99	05/98	04/99	05/98	12/98	04/99	05/98	12/98	04/99
Sample No.	CL1		JJ1			GS1			GS2		KS1			KS2		
Depth(m)	100		280			155			150		150			126		
Temp(°C)	18.1	15.2	13.2	14.9	19.3	12.6	16.4	13.5	15.8	14.4	12.8	15.1	20.5	18.9	17.6	
pH	6.50	7.02	7.30	7.50	6.57	7.54	7.41	6.61	6.57	6.99	6.76	7.12	6.11	7.25	7.50	7.41
EC(μs/cm)	476.0	145.9	108.3	137.6	139.6	139.5	185.6	162.9	199.3	55.7	47.0	61.7	468.0	65.5	135.5	59.0
SiO ₂ (mg/l)	29.3		44.9			3.03			18.8		47.20			40.00		
Na ⁺ (mg/l)	9.10		14.70			13.80			5.70		28.90			7.50		
Mg ²⁺ (mg/l)	1.77		2.93			2.83			0.64		8.33			0.56		
Ca ²⁺ (mg/l)	13.30		11.50			16.70			2.92		41.30			3.10		
K ⁺ (mg/l)	0.45		0.34			0.88			0.31		2.10			0.36		
Mn ²⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0			0		
Fe (mg/l)	0		0.01			0.01			0.51		0.10			0.01		
NH ₄ -N (mg/l)	0.01		0.00			0.02			0.00		0.01			0.01		
Zn ²⁺ (mg/l)	0		0.010			0.040			1.500		0.270			0.170		
Cu ²⁺ (mg/l)	0.020		0.011			0.014			0.010		0.035			0.015		
F ⁻ (mg/l)	13.3		0.24			0.05			0.04		0.03			0.02		
Cl ⁻ (mg/l)	6.08		12.60			17.30			3.86		57.20			4.35		
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	9.10		9.83			7.40			2.40		34.90			2.60		
NO ₃ -N (mg/l)	0.40		0.69			0.94			0.04		2.26			0.05		
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	129.30		92.35			107.75			36.94		146.61			36.94		
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0		0			0			0		0			0		
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	29.3		0			0			0		0			0		
As (mg/l)	0		0			0			0		0			0		
Al ³⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0			0		
Cd ²⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0			0		
Pb ²⁺ (mg/l)	0		0			0			0		0			0		
(+/-)	2.60		0.70			0.70			0.70		0.70			0.70		
Month	04/99	05/98	12/98	04/99	05/98	12/98	05/98	12/98	04/99	05/98	12/98	04/99	05/98	12/98	04/99	05/98

Table 2. Continued

Sample No.	OL1		OL2		BK1		BK2		Max	Min	Ave	Med	St.dev			
Depth(m)	163		100		150		150		280	100	149	150	42			
Temp(°C)	15.4	17.6	15.4	16.2	17.4	15.7	16.5	15.2	17.7	16.3	10.3	20.5	10.3	15.9	16.3	2.0
pH	6.52	6.61	5.93	6.58	7.01	6.51	6.73	6.80	6.88	7.18	7.37	7.68	5.33	6.80	6.78	0.46
EC(μs/cm)	331.0	288.0	121.7	220.0	213.0	146.4	368.0	393.0	382.0	174.5	184.7	675.0	47.0	218.4	169.9	149.0
SiO ₂ (mg/l)	11.50		25.80		35.50		28.60		49.60	3.03	30.16	30.5	12.55			
Na ⁺ (mg/l)	9.60		14.10		24.70		11.70		38.10	5.70	17.07	13.8	9.65			
Mg ²⁺ (mg/l)	3.02		1.95		5.91		4.85		29.50	0.56	6.15	3.63	6.64			
Ca ²⁺ (mg/l)	2.61		8.68		31.4		17.00		55.90	2.61	20.36	15.5	16.75			
K ⁺ (mg/l)	4.56		2.24		1.21		0.74		14.30	0.31	3.46	1.21	4.32			
Mn ²⁺ (mg/l)	0		0		0		0		0	0	0	0	0			
Fe (mg/l)	0		0		0.02		0.04		0.51	0.00	0.07	0.02	0.13			
NH ₄ -N (mg/l)	0.01		0.02		0.02		0.02		0.23	0.00	0.03	0.02	0.05			
Zn ²⁺ (mg/l)	0.200		0.020		0.130		0.120		1.500	0	0.231	0.12	0.335			
Cu ²⁺ (mg/l)	0.021		0.018		0.019		0.019		0.052	0.01	0.022	0.019	0.011			
F (mg/l)	0		0.02		0		0.08		13.3	0	0.69	0.05	2.89			
Cl ⁻ (mg/l)	10.00		10.90		37.00		6.84		72.10	3.86	20.49	10.9	20.53			
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2.60		17.80		29.80		2.05		40.40	1.26	12.82	7.4	13.79			
NO ₃ -N (mg/l)	1.68		0.75		2.19		0.65		8.72	0.04	1.70	0.94	2.11			
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	15.4		55.4		120.1		147.8		218.5	15.4	103.4	107.75	55.2			
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0		0		0		0		0	0	0	0	0			
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0		0		0		0		29.3	0	1.40	0	6.39			
As (mg/l)	0		0		0		0		0	0	0.00	0	0			
Al ³⁺ (mg/l)	0		0.01		0		0		0.16	0	0.01	0	0.03			
Cd ²⁺ (mg/l)	0		0		0		0		0	0	0	0	0			
Pb ²⁺ (mg/l)	0		0		0		0		0	0	0	0	0			
(+/-)	1.3		0.8		0.8		0.7									
Month	12/98	04/99	05/98	12/98	04/99	05/98	05/98	12/98	04/99	05/98	12/98					

서는 0.31~14.3 mg/l(평균 3.46 mg/l)로서 남부지역과 비슷한 값을 보인다(Table 2).

Mg²⁺는 각섬석, 녹니석과 흑운모 등의 용해로부터 유래한다. 남부지역의 Mg²⁺ 이온 함량은 2.52~173 mg/l(18.46 mg/l)를 나타내며, HD3(173 mg/l)에서 특히 높게 나타난다(Table 1). 염수의 영향을 받는 것으로 생각되는 HD3를 제외하고는 암석과 화학반응으로 지하수에 용해된 것으로 판단된다. 서북부지역에서 Mg²⁺ 이온함량은 0.56~29.5 mg/l(평균 6.15 mg/l)로서 남부지역보다 낮게 나타난다(Table 2). 이와 같이 남부지역에서 Mg²⁺ 이온함량이 높은 것은 안산암질암내에 상대적으로 풍부한 마그네슘을 함유한 광물(각섬석, 녹니석 등)의 영향 또는 염수의 영향때문으로 해석된다.

암모니아성 질소(NH₄-N)는 대부분의 경우 기반암과의 반응에 의한 것이라기보다는 유기물의 부식, 생활하수나 축산 폐기물 등의 오염에 의하여 물 속에 존재하게 된다. 용존산소의 농도가 낮은 물일수록 암모니아성 질소의 함량이 높다(Rosen and Jones, 1998). 남부지역의 암모니아성 질소 함량은 0.0~1.57 mg/l(평균 0.13 mg/l)를 가지며, 최대값을 가지는 HD3에서는 암모니아성 질소의 먹는물 수질기준(0.5 mg/l)을 초과하고 있다(Table 1). 이는 HD3 지점이 염수의 영향뿐만 아니라 인위적인 오염의 영향도 받고 있음을 지시한다. 한편, 서북부지역에서는 0~0.23 mg/l(평균 0.032 mg/l)로서 질산성 질소 함량이 남부지역보다 낮다. 이는 남부지역의 지하수가 남부지역보다 덜 오염되어 있

다는 것을 지시한다.

HCO₃⁻는 주로 탄산염 광물의 용해에 의해 생성된다. 남부지역에서는 HCO₃⁻ 함량은 46.18~230.9 mg/l(평균 103.7 mg/l)를 보인다(Table 1). 한편, 서북부지역에서는 15.4~218.5 mg/l(평균 103.4 mg/l)로서 남부지역과 비슷하게 나타난다(Table 2).

Cl⁻ 이온의 함량은 지하심부에서 높게 나타나며, 그 원인은 과거 염수에 의한 침입에서 유래하거나, 내부적 기원으로서 규산염 광물(흑운모, 각섬석 등)의 수화반응 및 유체포유물로부터의 유출 등에서 유래한다(Nordstrom et al., 1989; 이중운 외, 1997). 또한 산업용 폐수, 하수, 동물의 배설물 및 제설제 등으로부터 지하수에 유입되기도 한다. 남부지역에서 Cl⁻ 함량은 9.8~3060 mg/l(평균 190.7 mg/l)를 보이고 있으며(Table 1) 특히 HD3(3060 mg/l)의 높은 Cl⁻ 함량은 염수의 영향으로 보인다. 한편, 서북부지역에서는 3.86~72.1 mg/l(평균 20.49 mg/l)로서 남부지역보다 낮게 나타난다(Table 2).

SO₄²⁻ 이온은 황화광물(황철석, 황동석)의 산화작용 및 용해에 의해서 또는 대기중의 SO₂로부터도 유래한다(이인호 외, 1997). 남부지역에서 SO₄²⁻ 이온 함량은 3.31~73.5 mg/l(평균 59 mg/l)이며, 음용수 기준인 200 mg/l 이내에 속하고 있다(Table 1). 한편, 서북부지역의 SO₄²⁻ 이온함량은 1.26~40.4 mg/l(평균 12.82 mg/l)로서 남부지역보다 낮다(Table 2). 따라서, SO₄²⁻ 이온에 의한 오염의 가능성은 서북부지역이 남부지역보다 낮은 것으로 보인다.

질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 대부분 생활하수와 축산 폐기물의 오염에 의해 생성된다. 남부지역에서 질산성 질소는 0.0~16.55 mg/l(평균 4.89 mg/l)이다. 특히, KJ4, GC1, HD1에서는 음용수 수질기준(10 mg/l)을 넘으며, 이것은 인위적인 오염의 영향으로 보인다(Table 1). 한편 서북부지역에서는 0.04~8.72 mg/l(평균 1.70 mg/l)이며, 음용수 기준을 초과하는 지점은 없다. 따라서, 서북부지역이 남부지역보다 인위적인 오염이 덜한 것으로 추정된다(Table 2).

지하수 중의 $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 는 암석(특히, 화강암질 암석)에서 규산염 광물의 분해로부터 유래한다. 남부지역에서 $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 는 6.2~42.7 mg/l(평균 27.01 mg/l)이며(Table 1), 서북부지역에서는 3.03~49.6 mg/l(평균 30.16 mg/l)이다(Table 2). 따라서, 서북부 화강암지역이 풍부한 장석의 용해로 인해서 $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 함량이 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

불소의 경우에는 남부지역이 0.0~0.25 mg/l(평균 0.03 mg/l)이고, 서북부지역은 0.0~13.3 mg/l(평균 0.69 mg/l)로서 CL1을 제외하고는 음용수기준치(1.5 mg/l)를 초과하는 곳은 없다.

중금속이온함량을 보면, 남부지역에서는 DR1과 HD3에서 철의 음용수 기준치(0.3 mg/l)를 초과하는 것을 제외하고는 음용수 기준치보다 낮다(Table 1). 서북부지역에서는 GS2에서 아연의 음용수 기준치(1.0 mg/l)를 초과하는 것을 제외하고는 모든 지점에서 음용수 기준치이내에 있다(Table 2). 이것은 두 지역에서 현재까지는 중금속에 의한 지하수 오염의 영향은 거의 없음을 지시한다.

수질의 유형

Piper diagram에서 남부지역 안산암지하수는 대부분 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 와 $\text{Ca}^{2+}\text{-(Cl}^-\text{+SO}_4^{2-})$ 형의 영역에 속하나(Figure 3), 서북부지역 화강암지하수는 대부분은 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 형에 그리고 일부는 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 형의 영역에 속한다(Figure 3). 이와 같이 음이온 중에서 HCO_3^- 가 우세한 것은 사장석의 용해나 CO_2 가스의 영향을 받고 있음을 지시한다. 화강암질암내 지하수는 심부로 갈수록

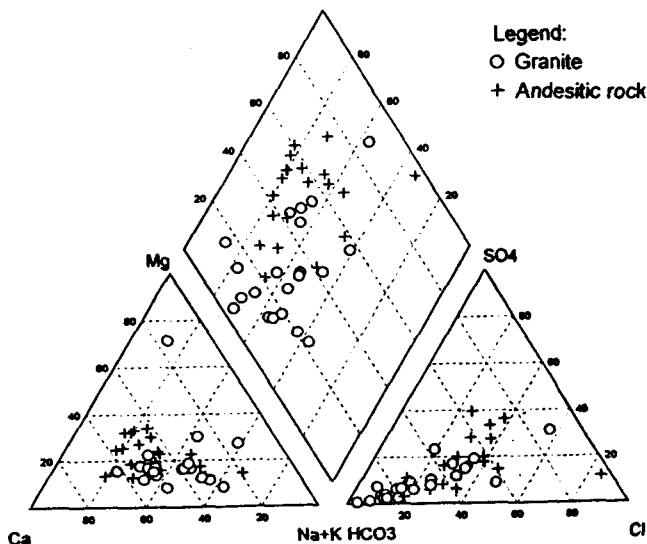


Figure 3. Piper diagram of groundwater samples in the study area.

$\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 에서 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 로 변해간다(이종운 외, 1997). 따라서, 본 지역의 지하수도 지하수의 유동심도에 따라 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 형 또는 $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 형에 속하는 것으로 판단된다.

염수의 영향

부산은 바다에 연하고 있으므로 지하수 과잉양수로 인한 염수 침입이나, 담수와 염수의 경계부에서 염수의 영향을 받을 수 있는 환경에 있다. 염수의 영향을 살펴보기 위해서 Cl^- 이온에 대한 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- 의 관계도를 작성하였다(Figure 4).

Cl^- 와 Na^+ 의 관계도를 보면(Figure 4), 남부지역에서는 염소 함량과 나트륨함량간에 상관성이 상대적으로 낮고($r=0.508$), 서북부지역에서는 상관성이 비교적 높다($r=0.816$). 그러나, 남부지역에서도 흩어져 있는 두 지점을 제외하면, 상관성이 더 높아진다. 또한, 두 지역의 회귀직선의 기울기는 해수 회석선(seawater dilution line)의 기울기보다 약간 더 작으나, 해수 회석선 가까이 위치하고 있다. 이는 남부지역과 서북부지역에서 염수의 영향을 간접적으로 받고 있음을 지시한다.

Cl^- 과 Ca^{2+} 이온의 관계도를 보면(Figure 4), 남부지역과 서북부지역 모두 해수 회석선(Goldberg, 1963; Howard and Lloyd, 1983)보다 훨씬 크다. 이는 Ca^{2+} 이온이 염수의 영향보다는 다른 요인에 더 지배되는 것을 지시한다. Ca^{2+} 의 생성요인으로는 Ca-사장석 및 방해석의 용해에서 유래하는 것이 중요한 부분을 차지하는 것으로 보인다.

Cl^- 과 Mg^{2+} 의 관계도를 보면(Figure 4), 남부지역이 서북부지역보다 높은 상관성을 보이고, 회귀직선의 기울기도 더 크다. 또한, 두 지역 모두 해수 회석선보다 약간 높은 회귀직선의 기울기를 보인다. 이는 Mg^{2+} 이온과 해수간의 연관성이 약간 있음을 지시한다.

Cl^- 과 K^+ 의 관계도를 보면(Figure 4), 남부지역과 서북부지역에서 모두 상관성이 낮게 나타나고 있다. K^+ 이온과 염수간의 연관성이 없음을 지시한다.

Cl^- 과 SO_4^{2-} 의 관계도를 보면(Figure 4), 남부지역과 서북부지역의 회귀직선의 기울기가 서로 비슷하며, 해수 회석선보다 크다. 이는 SO_4^{2-} 가 염수가 아닌 인위적인 오염원 또는 암석으로부터 유래함을 지시한다. 그러나, SO_4^{2-} 가 어디로부터 주로 유래하는지를 밝히기 위해서는 앞으로 이 지역에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

Cl^- 과 HCO_3^- 의 관계도를 보면(Figure 4), 남부지역에서는 상관성이 비교적 높게 나타나지만($r=0.611$), 서북부지역은 상관성이 낮다. 그러나, 이들 지역의 회귀직선의 기울기는 해수 회석선보다 훨씬 크며, 이는 HCO_3^- 이온의 기원이 염수와 무관함을 지시한다.

물-암석 반응

광물에 대한 포화지수

물-암석반응 모델링 프로그램인 PHREEQC(Parkhurst, 1995)를 이용하여 남부지역 지하수의 특정한 광물에 대한 포화지수 값을 구해보면, 석영과 옥수에 대해서만 과포화 상태에 있고,

부산 남부지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리화학적 특성 비교

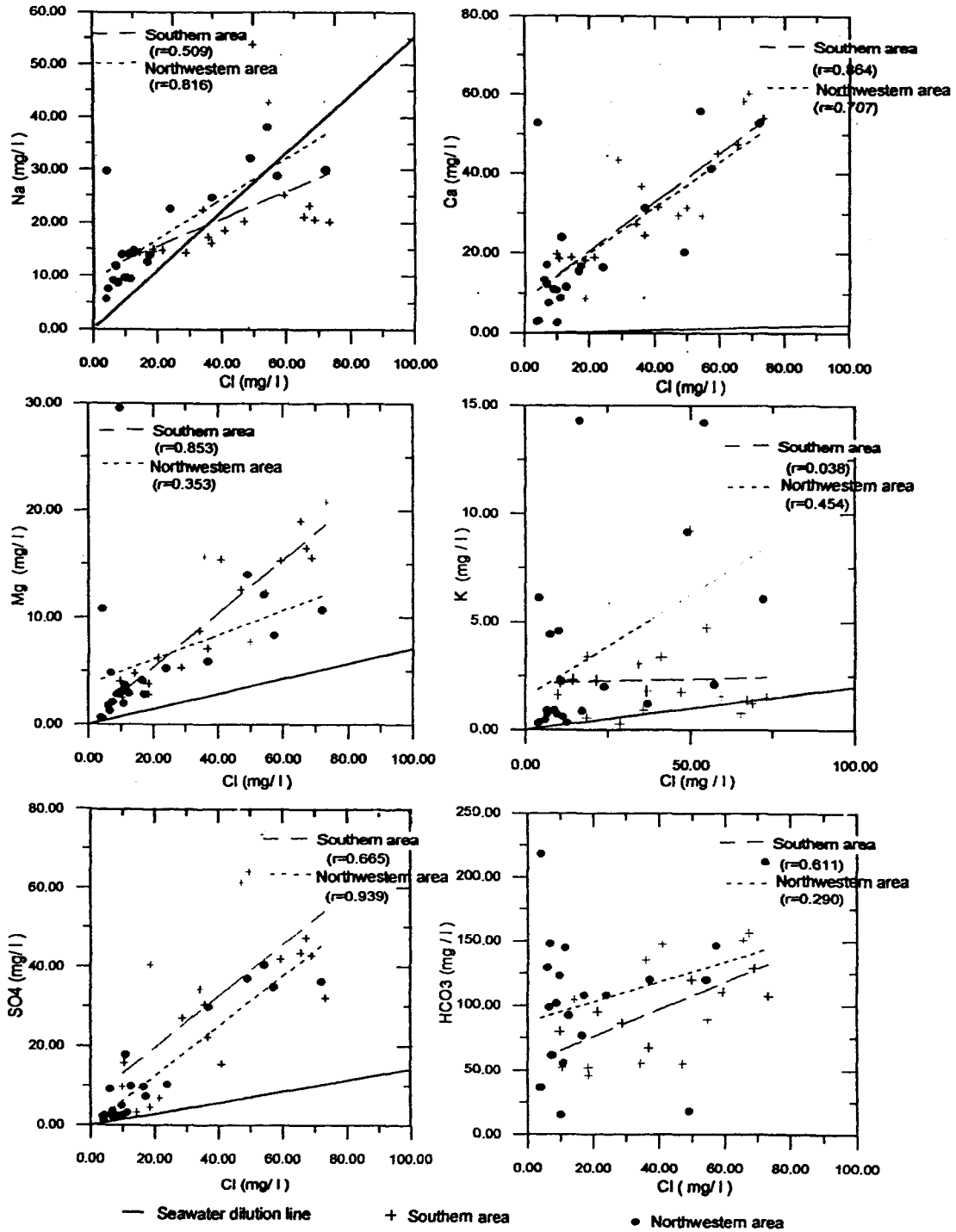


Figure 4. Relation between Cl⁻ and other major ions (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻ and HCO₃⁻).

비정질 실리카, 돌로마이트, 시테라이트, 석고, 경석고, 아라곤 나이트. 방해석에 대해서는 불포화 상태에 있다. 특히, 남부 안산암질암내에 함유된 방해석의 용해로 Ca²⁺ 이온의 용해가 계속 일어날 수 있음을 의미한다(Table 3(a)).

서북부지역 지하수의 경우에는, 비정질 실리카, 녹니석, 알바이트, 아노르사이트, K-장석, 일라이트, 황철석에 대해서는 불포화상태에 있으나, 석영, 카오리나이트, 운모, 깃사이트, 적철

석에 대해서는 과포화 상태를 나타내고 있다(Table 3(b)). 따라서, 서북부지역에서는 비정질 실리카, 아노르사이트, K-장석 등의 용해로 SiO₂, Ca²⁺, K⁺ 이온이 물 속에 계속 용해될 수 있음을 의미한다.

광물 상평형 관계

광물 상평형 관계에서는 장석류의 풍화반응을 일단 깃사이

Table 3(a). Saturation indices of some minerals in the southern area, Pusan.

SiO ₂ (aq)	Quartz	Dolomite	Siderite	Gypsum	Anhydrite	Argonite	Calcite	CO ₂ (g)	Chalcedony
-0.64	0.69	-1.55	-1.61	-2.08	-2.33	-0.85	-0.70	-1.90	0.23
-0.74	0.58	-2.31	-1.73	-2.55	-2.79	-1.16	-1.01	-2.5	0.12
-0.92	0.41	-4.25	-2.15	-2.75	-3.00	-1.95	-1.80	-2.02	-0.05
-0.73	0.56	-1.36	-1.37	-2.18	-2.41	-0.78	-0.63	-2.10	0.12
-0.69	0.60	-1.37	-1.73	-2.01	-2.24	-0.69	-0.55	-1.99	0.16
-0.76	0.54	-2.83	-1.77	-3.59	-3.83	-1.46	-1.31	-2.75	0.10
-0.62	0.67	-0.96	-1.82	-2.11	-2.34	-0.05	-0.40	-2.39	0.23
-0.58	0.74	-3.56	-1.75	-2.09	-2.33	-1.87	-1.72	-1.90	0.29
-0.92	0.40	-3.59	-1.49	-2.04	-2.29	-1.87	-1.72	-1.53	-0.05
-0.55	0.76	-1.27	-1.21	-2.65	-2.89	-0.76	-0.61	-2.13	0.31
-0.51	0.80	-2.15	1.73	-3.14	-3.88	-1.12	-0.97	-2.29	0.35
-0.76	0.56	-1.55	-1.63	-1.97	-2.21	-0.78	-0.63	-1.83	0.11
-0.71	0.61	-4.12	-2.53	-2.34	-2.58	-2.08	-1.93	-1.71	0.16
-1.00	0.30	-2.50	-1.92	-2.06	-2.30	-1.24	-1.09	-1.79	-0.14
-0.70	0.62	0.53	-0.43	-0.76	-1.00	0.15	0.30	-2.10	0.17
-1.34	-0.04	-4.08	-2.26	-2.39	-2.63	-1.98	-1.83	-2.07	-0.48
-0.51	0.79	-2.95	-2.11	-3.45	-3.68	-1.47	-1.32	-1.82	0.34
-0.50	0.82	-2.68	-2.00	-2.95	-3.19	-1.28	-1.13	-2.27	0.37
-0.80	0.50	-1.53	-2.05	-2.26	-2.50	-0.59	-0.44	-2.60	0.06
-0.70	0.63	-0.94	-1.77	-2.30	-2.55	-0.55	-0.40	-2.40	0.17

Table 3(b). Saturation indices of some minerals in the northwestern area, Pusan

Sample	SiO ₂ (aq)	Quartz	K-feldspar	K-mica	Albite	Anorthite	Gibbsite	Kaolinite	Chlorite	Illite	Hematite	Pyrite
NP1	-0.78	0.56										
NP2	-0.54	0.79									14.67	-93.05
NP3	-0.86	0.48									10.31	-84.51
NP4	-0.63	0.69									11.95	-91.25
SN1	-0.85	0.47	-1.85	5.99	-3.75	-7.78	1.14	4.01	-26.72	-0.30		
SN2	-0.48	0.84										
SN3	-0.80	0.52									9.62	-80.97
NS1	-0.58	0.74									11.30	-94.87
NS2	-0.57	0.75									13.26	-85.90
CL1	-0.63	0.70										
JJ1	-0.48	0.83									10.68	-88.66
GS1	-1.63	-0.30									15.15	-101.48
GS2	-0.82	0.52									16.27	-92.98
KS1	-0.47	0.83									10.15	-79.73
DK1	-0.48	0.84									13.83	-91.06
DK2	-0.42	0.91									13.04	-85.72
OL1	-1.04	0.29										
OL2	-0.69	0.64	-0.18	8.84	-1.84	-4.29	1.73	5.53	-17.49	2.37		
KS2	-0.52	0.80									15.05	-102.81
BK1	-0.56	0.77									11.83	-89.14
BK2	-0.65	0.68									15.16	-98.20

트(Al(OH)₃)를 형성하는 반응으로 가정하고, 깁사이트-카오리 나이트, 미사장석-카오리나이트, 미사장석-백운모; 백운모-카오리 나이트, 백운모-깁사이트, 알바이트-카오리나이트의 관계식을 이용하였다(Helgeson et al., 1978; Bowers et al., 1984). 이와 같은 방법으로 [Ca²⁺]/[H⁺]², [Mg²⁺]/[H⁺]², [Na⁺]/[H⁺], [K⁺]/[H⁺] 그리고 [H₄SiO₄]의 대수값을 각각 중측과 횡측으로 하는 각 광물의 안정영역에 지하수 시료를 도시하였다(Figure 5. 여기서

[]는 각 이온의 활동도를 의미한다).

[K⁺]/[H⁺]와 [H₄SiO₄]의 그래프에서 보면, 남부지역의 경우에는 거의 대부분의 시료가 카오리나이트 안정 영역에 위치한다 (Figure 5(a)). 서북부지역의 경우에도 거의 대부분의 시료가 카오리나이트 안정 영역에 위치하나, 남부지역보다는 상대적으로 [K⁺/H⁺] 비가 약간 더 낮다. 그러나, 서북부지역에서는 K-장석의 용해와 함께 [K⁺/H⁺] 비가 증가할 것으로 예상된다.

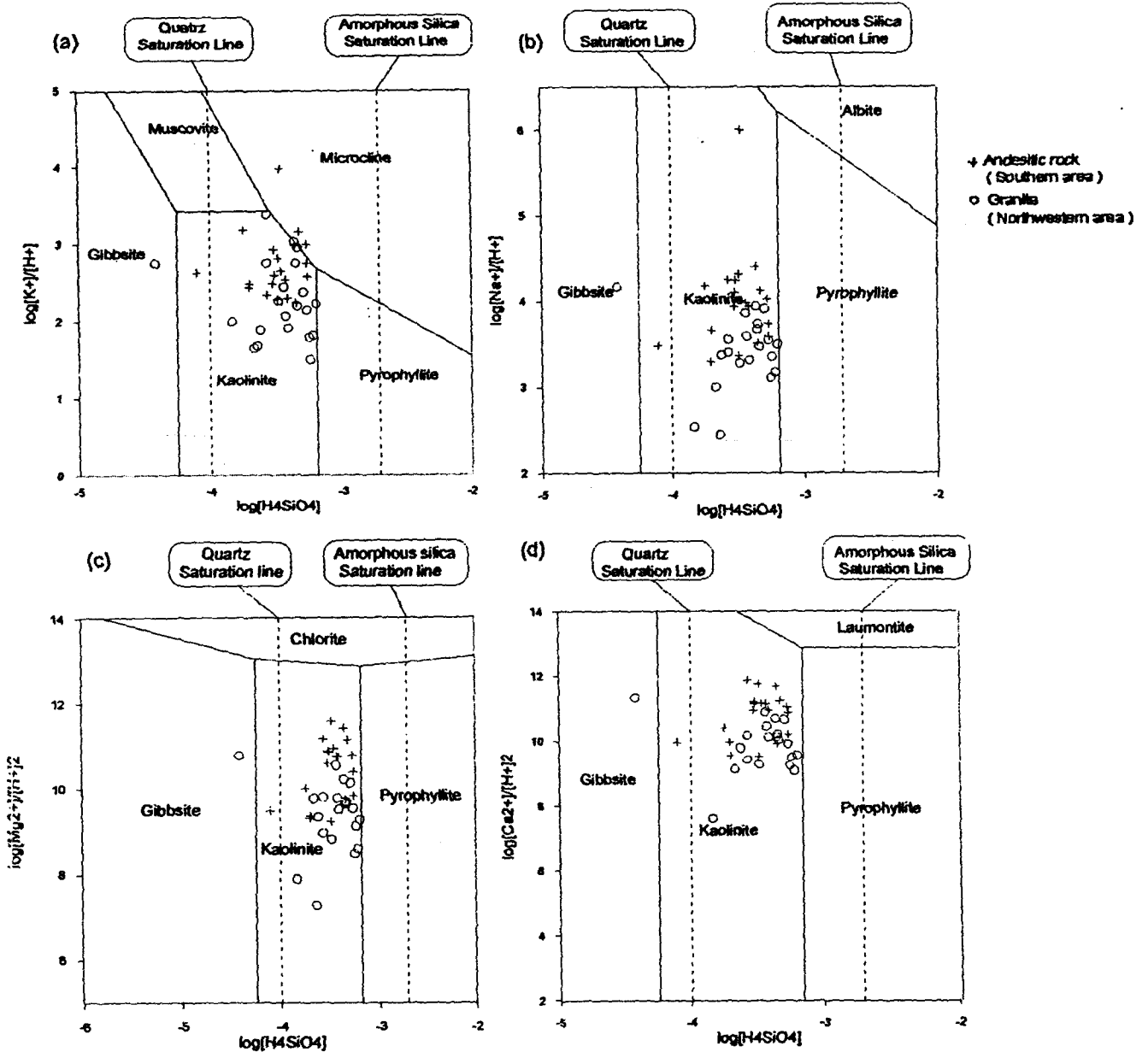


Figure 5. Phase stability diagram of some minerals by Helgeson et al. (1978) and Bowers et al. (1984) in (a) the system $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, (b) the system $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, (c) the system $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ and (d) the system $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ at 298 K and 1 atm.

$[Na^+]/[H^+]$ 와 $[H_4SiO_4]$ 의 그래프에서도 남부지역과 서북부지역의 모든 시료가 카올리나이트 안정 영역에 위치하나, 서북부지역이 남부지역보다는 $[Na^+]/[H^+]$ 비가 약간 더 낮다(Figure 5(b)). 그러나, 서북부지역에서 알바이트의 용해와 함께 $[Na^+]/[H^+]$ 비가 증가할 것으로 예상된다.

$[Mg^{2+}]/[H^+]^2$ 와 $[H_4SiO_4]$ 의 그래프에서도 남부지역의 모든 시료와 서북부지역의 거의 모든 시료가 카올리나이트 안정 영역에 위치하나, 남부지역이 서북부지역보다 상대적으로 녹니석 영역에서 더 가깝게 위치한다(Figure 5(c)). 이는 남부지역 안산암질암내에 존재하는 녹니석이 카올리나이트로 변하면서 $[Mg^{2+}]/[H^+]^2$ 비가 높게 나타나기 때문으로 보인다.

$[Ca^{2+}]/[H^+]^2$ 와 $[H_4SiO_4]$ 의 그래프를 보면, 남부지역과 서북부지역 시료 모두 카올리나이트 안정 영역에 위치하나 남부지역이 상대적으로 로몬타이트 영역에 더 가깝게 위치한다(Figure 5(d)). 이는 남부지역이 로몬타이트의 용해에 의해서 $[Ca^{2+}]/[H^+]^2$ 가 더 높게 나타나기 때문으로 보인다.

요인분석

요인분석은 다변량 분석(multivariate analysis)방법 중의 하나로 변수들간의 상호 의존구조를 나타내는 상관 행렬에서 공통요인(common factor)을 추출하고 인자회전 및 인자식별

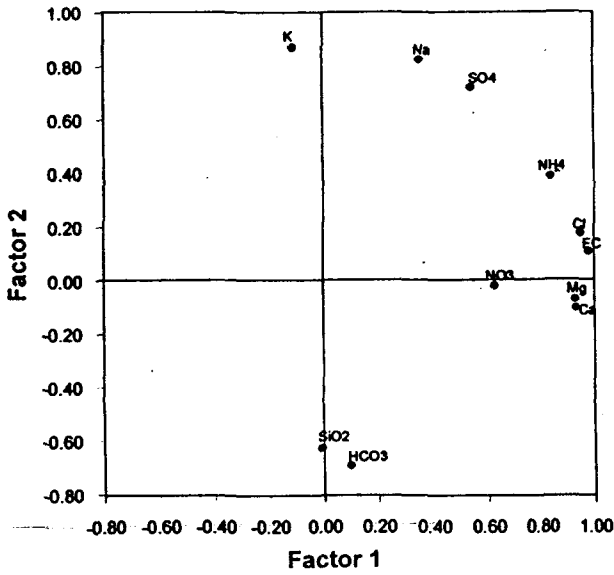


Figure 6. Plot of factors 1 vs. 2 for the southern area, Pusan.

을 통해 변수들간의 복잡한 구조를 단순화시키는 기법의 하나이다(Joreskog et al., 1976). 본 연구에서는 남부지역과 서북부지역의 지하수의 용존성분들간의 상관 행렬로부터 용존 성분들간의 공통요인을 추출하였으며, 이를 토대로 물-광물 반응이나 인위적인 오염 그리고 염수의 영향 등을 알아보고자 하였다.

남부지역

요인분석의 요인추출 모델은 PCA(Principal Component Analysis) 방식을, 공통인자 수의 결정은 1 이상의 고유치(eigenvalue)를 택하였으며, varimax 직각 회전방식을 택하여 자료의 분산을 가장 잘 설명할 수 있는 방향으로 회전하였다. 요인분석의 변수는 EC, SiO₂, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻로 하였다. 요인분석 결과, 두개의 요인이 추출되었으며, 요인 1은 Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, NH₄⁺, EC, NO₃⁻ 함량으로 요인 2는 K⁺, Na⁺, SiO₂, SO₄²⁻, HCO₃⁻ 함량으로 대표된다(Figure 6). 요인 1은 방해석, 장석, 각섬석 및 녹니석의 용해(EC, Ca²⁺, Mg²⁺) 및 오염이나 염수의 영향(NH₄⁺, NO₃⁻, EC, Cl⁻)과 관련되는 것으로 보인다.

요인 2에 속하는 이온 중 K⁺, Na⁺, SO₄²⁻는 양의 값을 가지며, 이 중에서 K⁺, Na⁺는 장석과 운모의 용해로 인한 가능성이 더 크다고 판단된다(Figure 6). 그러나, SO₄²⁻는 오염의 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 또한 HCO₃⁻와 SiO₂는 서로 가까이 위치하고 있으나 별도의 거동을 보이는 것으로 생각된다. 즉, HCO₃⁻는 방해석의 용해에 기인하는 것으로 보이고, SiO₂는 장석 및 운모류의 용해 및 점토류의 형성 등으로부터 기인하는 것으로 보인다.

서북부지역

요인분석의 변수는 pH, EC, SiO₂, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, HCO₃⁻로 하였다. 요인분석 결과, 세개의

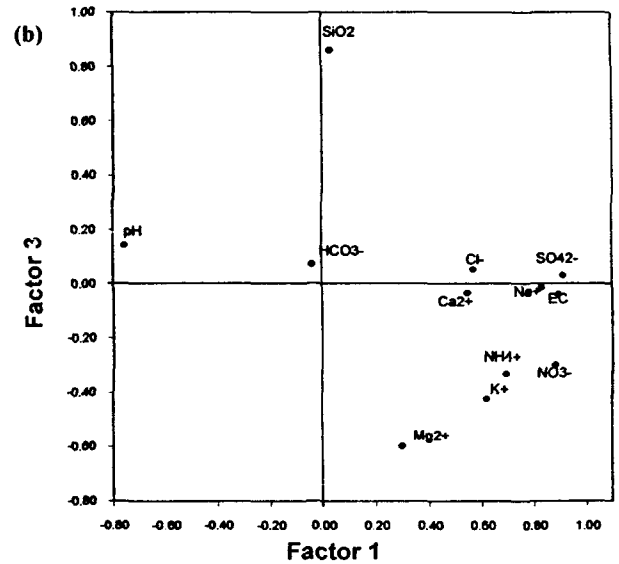
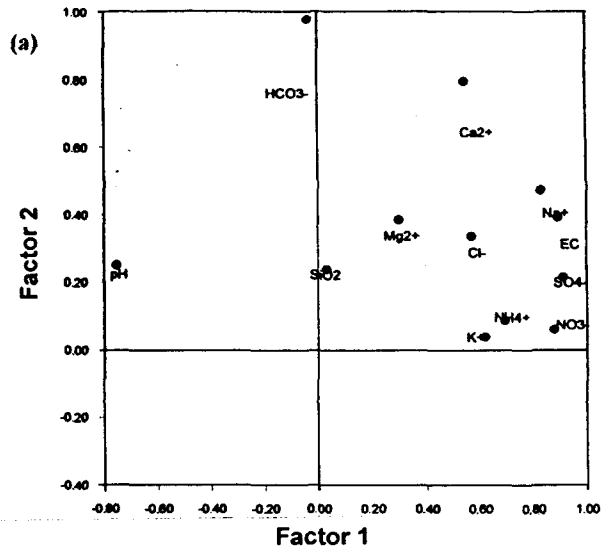


Figure 7. Plot of (a) factors 1 vs. 2, and (b) factors 1 vs. 3 for the northwestern area, Pusan.

요인이 추출되었으며, 요인 1은 pH, EC, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 및 NO₃⁻ 함량으로, 요인 2는 Ca²⁺ 및 HCO₃⁻ 함량으로, 그리고 요인 3은 Mg²⁺, SiO₂로 대표된다(Figure 7).

요인 1에 속하는 성분 중 pH를 제외하고는 모두 양의 값을 가진다. 이 중에서 NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻ 성분은 오염의 영향을 그리고 K⁺는 정장석과 운모류의 용해를 지시한다. 그리고 Na⁺, Cl⁻ 이온은 염수의 영향을 지시하는 것으로 보인다. 그러나, pH는 모든 성분의 화학반응과 모두 관련되므로 독자적인 양상을 나타내는 것으로 보인다.

요인 2를 구성하는 Ca²⁺와 HCO₃⁻는 주로 사장석의 용해로부터 유래하는 것으로 판단된다.

요인 3을 구성하는 Mg²⁺와 SiO₂는 각각 음의 값과 양의 값을 가지므로 서로 독자적으로 거동할 가능성이 높다. 즉, Mg²⁺는 Mg²⁺를 포함하는 광물(각섬석, 운모 등) 또는 염수로부터

주로 유래하며, SiO₂는 장석 등의 광물의 용해로부터 유래하는 것으로 판단된다.

결 론

1. 주요성분(Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻), pH, 전 기전도도(EC)는 남부지역이 서북부지역보다 높은 경향성을 보인다. 그러나, SiO₂(aq) 함량은 풍부한 장석의 용해로 인해서 서북부지역에서 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

2. 오염을 지시하는 질산성 질소와 암모니아성 질소는 남부 지역에서 더 높게 나타난다. 이는 남부지역 지하수가 서북부지역보다 더 오염되어 있음을 암시한다. 그밖에 두 지역에서 중 금속 오염은 높지 않은 것으로 나타났다.

3. Piper diagram에 의한 지하수형은 남부지역에서는 Ca²⁺-HCO₃⁻형이 가장 우세하고, 다음은 Ca²⁺-(SO₄²⁻+Cl⁻)형에 속한다. 한편, 서북부 지역은 거의 대부분이 Ca²⁺-HCO₃⁻형에 속하지만, 일부는 Na⁺-HCO₃⁻형에 속한다.

4. 상관분석과 요인분석을 실시한 결과, 남부 안산암질암지역에서는 요인수가 2개이며 요인1에 속하는 Ca²⁺, Mg²⁺는 방해석의 용해 및 장석의 용해를, 요인2에 속하는 K⁺, Na⁺는 장석의 용해 및 염수 영향의 가능성을 보여준다. 서북부 화강암지역에서는 요인수가 3개이며 요인 1에 속하는 성분인 NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻ 성분은 오염의 영향을 그리고 K⁺는 정장석과 운모류의 용해를 지시한다. 그리고 Na⁺, Cl⁻ 이온은 염수의 영향을 지시하는 것으로 보인다. 그러나, pH는 모든 성분의 화학반응과 모두 관련되므로 독자적인 양상을 나타내는 것으로 보인다. 요인 2를 구성하는 Ca²⁺와 HCO₃⁻는 주로 사장석의 용해로부터 유래하는 것으로 판단된다. 요인 3을 구성하는 Mg²⁺와 SiO₂는 서로 독자적으로 거동하며, Mg²⁺는 Mg²⁺를 포함하는 광물(각섬석, 운모 등) 또는 염수로부터 주로 유래하며, SiO₂는 장석 등의 광물의 용해로부터 유래하는 것으로 판단된다.

5. 각 광물에 대한 포화도와 광물 상평형 관계를 살펴본 결과, 남부 지역은 석영과 운수에 대해서 과포화 상태에 있고 비정질 실리카, 돌로마이트, 석고, 경석고, 아라고나이트, 방해석 등에 대해서는 불포화 상태로 있다. 서북부지역 지하수의 경우에는, 비정질 실리카, 녹니석, 알바이트, 아노르사이트, K-장석, 일라이트, 황철석에 대해서는 불포화상태에 있으나, 석영, 카오리나이트, 운모, 깁사이트, 적철석에 대해서는 과포화 상태를 나타내고 있다. 두 지역의 주요 화학종의 활동도계수를 도시한 결과, 거의 모든 시료가 카오리나이트의 안정 영역에 위치한다.

6. Cl⁻ 이온에 대한 Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻의 관계도에 의하면, 남부지역과 서북부지역에서 모두 Na⁺는 염수와 연관성이 비교적 큰 것으로 나타나며, Mg²⁺는 약한 연관성을 보인다. 그러나, Ca²⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻는 염수와 연관성이 매우 낮거나 무관한 것으로 나타난다.

사 사

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비(과제번호 : 1998-15-D00279)에 의하여 지원되었으며, 연구비를 지원하여

주신 관계기관에 감사드린다.

참고문헌

- 류충렬, 김근수, 이준동, 1997, 양산시 동부일원의 파쇄구조 : 양산 단층 좌향이동의 증거? 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회 요약집, p. 16-17.
- 류충렬, 김근수, 1997, 양산 통도사 일원의 파쇄구조 : 양산단층대 우향이동의 증거, 대한자원환경학회 제30차 학술발표회 발표논문 요약집, p. 18.
- 신중주, 1997, 부산 다대포분지의 형성 및 구조지화사에 관한 연구, 부산대학교 대학원 이학석사학위논문.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월내도폭 (1:50000) 및 설명서, 자원개발연구소.
- 이인호, 이재영, 김동권, 1997, 대구시 지하수의 수질에 대한 지화학적 연구, 자원환경지질, 30(4), p. 327-340.
- 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수 환경, 4(4), p. 199-211.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 부산·가덕도폭 (1:50000) 및 설명서, 한국동력자원연구소.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사 산성화강암류의 암석학적 연구, 광산지질, 9(2), p. 85-106.
- 차문성, 윤성효, 1982, 부산시 일원의 백악기 화산활동-특히 장산 칼데라 잔유구조에 대하여, 부산대학교 자연과학논문집, 34집, p. 377-390.
- 최재우, 1984, 부산 금정산 남부지역에 분포하는 화강암체의 절리면에 대한 지반 역학적 연구, 부산대학교 지질학과 석사학위 논문, p. 3-16.
- Bowers, T. S., Jackson, K. J. and Helgeson, H. C., 1984, Equilibrium activity diagram, Springer-Verlag, Berlin, p. 397.
- 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.
- Helgeson, H. C., Delany, V. H., Nesbit, W. T. and Brid, D. K., 1978, Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals, Amer. J. Sci., 278-A, p. 1-229.
- Howard, K. W. F. and Lloyd, J. W., 1983, Major ion characterization of coastal saline ground waters, Ground Water, 21(4), p. 429-437.
- Joreskog, K. G., Klován, J. E. and Reymont, R. A. 1976, Geological factor analysis, p. 127-142.
- Mast, M. A., Drever, J. I., Baron, J., 1990, Chemical weathering in the Loch Vale Watershed, Rocky Mountain National Park, Colorado, Water Resour. Res., 26, p. 2971-2978.
- Nordstrom, D. K., Ball, J. W., Donahoe, R. J. and Whittemore, D., 1989, Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa, Geochim. Cosmochim. Acta, 53, p. 1727-1740.
- Pacheco, F. and Weijden, C. H., 1996, Contributions of water-rock interactions to the composition of groundwater in areas with a sizable anthropogenic input: A case study of the waters of the Fundao area, central Portugal, Water Resour. Res., 32, p. 914-923.
- Parkhurst, D. L., 1995, User's guide to PHREEQC-A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport and inverse geochemical calculations report 95-4227, 135-143.
- Rosen, M. and Jones, S., 1998, Controls on the chemical composition of groundwater from alluvial aquifers in the Wanaka and Wakatipu basin, Central Otago, New Zealand, Hydrogeology Journal, 6, p. 264-281.