

대보화강암과 불국사화강암지역 먹는샘물의 수리화학적 특성

Hydrochemical Characteristics of Natural Mineral Water in the Daebo and Bulguksa Granites

조 병 옥 (Byung Wook Cho)

성 익 환 (Ig Hwan Sung)

추 창 오 (Chang Oh Choo)

이 병 대 (Byung Dae Lee)

김 통 권 (Tong Kwon Kim)

한국자원연구소 지구환경연구부

한국자원연구소 지구환경연구부

한국자원연구소 지구환경연구부

한국자원연구소 지구환경연구부

한국자원연구소 지구환경연구부

요약/ABSTRACT

먹는샘물은 국민의 건강과 직결될 뿐 아니라 귀중한 지하수자원이라는 점에서 엄격한 품질기준과 사후 관리가 요구된다. 본 연구에서는 대보화강암(20개)과 불국사화강암(4개) 지역에 분포하는 먹는샘물 업체를 대상으로 원수의 수질특성을 수리화학적인 측면에서 해석하였다. 대보화강암과 불국사화강암 지역에 분포하는 먹는샘물 업체의 원수의 수질특성은 수리화학적으로 유사한 경향을 보이지만 상이한 부분도 있다.

수소이온농도, 전기전도도, 총고용물질, 경도, 양이온과 음이온의 함량은 대보화강암 지역이 불국사화강암 지역보다 높게 나타난다. 양이온 중에서 대부분은 $Ca > Na > Mg > K$ 의 순으로 함량비를 나타내며 음이온 성분의 함량은 $HCO_3 > SO_4 > Cl > F$ 의 순을 보인다. 화강암지역에서 $Ca-Na-HCO_3$ 유형이 가장 우세하며 Ca 함량이 가장 높은 현상은 화강암에 풍부하게 포함되어 있는 사장석류의 용해작용에 기인하기 때문인 것으로 보인다.

대보화강암 지역에서는 $Ca-HCO_3(0.84)$, $Mg-HCO_3(0.81)$, $SiO_2-Cl(0.74)$, $Na-HCO_3(0.70)$ 등이 비교적 높은 상관관계를 보이며, 불국사화강암 지역의 경우 $K-Mg(0.93)$, $K-HCO_3(0.92)$, $Mg-Cl(0.92)$, $Cl-HCO_3(0.91)$, $K-F(0.90)$ 등이 다소 높은 상관관계를 보인다. 실리카 상들을 제외한다면 대부분의 지하수는 방해석의 포화도에 가장 근접한 상태를 보여 주며 돌로마이트, 석고, 형석에 대하여는 불포화정도가 다소 큼을 나타낸다. 실리카의 활동도가 증가하는 동안 K , Na 같은 알칼리원소의 활동도와 pH는 크게 증가하지 않았는데 이는 장석류로부터의 용해작용 이외에 석영과 같은 실리카상들의 용해작용에 의하여 규산이 어느 정도 공급되었음을 의미한다. 전반적으로 보아 화강암 지역의 지하수가 암석내에 가장 풍부하게 존재하는 장석류에 대하여 아직도 불포화 상태에 있기 때문에 pH의 증가와 함께 장석류와의 반응이 계속 진행될 수 있을 것으로 예상된다.

주요어 : 먹는샘물, 대보화강암, 불국사화강암, 지하수

Groundwater quality of the natural mineral water was investigated in hydrochemical aspects in order to ensure that mineral water meets stringent health standards. There exist 20 mineral water plants in the Daebo granite and 4 mineral water plants in the Bulguksa granite, respectively. Both granite areas show some differences in water chemistry. The pH, EC, hardness, total ionic contents in groundwater of the Daebo granite area are higher relative to those of the Bulguksa granite area. The content of major cations is in the order of $Ca > Na > Mg > K$, while that of major anions shows the order of $HCO_3 > SO_4 > Cl > F$. The fact that the $Ca-Na-HCO_3$ type is most predominant among water types may reflect that the dissolution of plagioclase that is most abundant in granitic rocks plays a most important role in groundwater chemistry. Representative correlation coefficients between chemical species are variable depending on geology. In the Daebo granite area, $Ca-HCO_3(0.84)$, $Mg-HCO_3(0.81)$, $SiO_2-Cl(0.74)$, $Na-HCO_3(0.70)$ show relatively good correlations. In the Bulguksa granite area, fairly good correlations are found among some components such as $K-Mg(0.93)$, $K-HCO_3(0.92)$, $Mg-Cl(0.92)$, $Cl-HCO_3(0.91)$, and $K-F(0.90)$.

According to saturation index, most chemical species are undersaturated with respect to major minerals, except for some silica phases. Groundwater is slightly undersaturated with respect to calcite, whereas it is still greatly undersaturated with respect to dolomite, gypsum and fluorite. Based on the phase equilibrium, it is clear that groundwater is mostly in equilibrium with kaolinite and becomes undersaturated with respect to feldspars, evolved from the stability area of gibbsite during water-rock interaction. While the activity of silica increases, there is no remarkable increase in the activities of alkali ions and pH, which indicates that some amounts of silicic acid dissolved from silica phases as well as feldspars were provided to groundwater. It is concluded that chemical evolution of groundwater in granite aquifers may continue to proceed with increasing pH.

Key Words : Natural Mineral Water, Daebo Granite, Bulguksa Granite, Groundwater

서 론

먹는샘물 업체들은 양질의 수질과 많은 양의 취수량을 확보하기 위하여 대규모의 수계 분수령을 갖는 산악지역에 위치하고 있음이 특징적이다. 과거 생수로 불리어지던 먹는샘물은 80년대 부터 개발이 이루어지다가 90년대 들어서서 본격적인 개발붐이 일어났다. 1995년 5월 1일 '먹는 물 관리법'의 시행 이후 현재 먹는 샘물 제조업체가 70개소로 증가하였고, 판매량이 연간 113만톤(1997년)으로 크게 늘어남에 따라 먹는 샘물 수질의 안정성 보장을 통한 국민건강 보호와 무분별한 취수로 인한 지하수자원의 고갈가능성 등의 문제가 현안으로 제기되었다.

먹는 샘물은 양호한 수질과 오염으로부터 완벽한 격리가 필수적이므로 먹는샘물 제조업체들은 결정질암의 심부지하수를 개발, 사용하는 것이 일반적인 현상이다. 따라서 이들의 수질특성은 물-암석

과의 반응에 따른 화학적 진화와 더불어 대수층의 광물조성에 크게 지배를 받는다. 대수층의 화학조성의 차이는 지하수의 지구화학적 특성을 반영한다. 그렇지만 기반암의 광물조성은 지층의 경계면에서 처럼 비교적 짧은 거리에서도 상당히 달라질 수가 있어서 기반암의 수질특성은 국부적인 지역내에서도 매우 다양하게 나타나게 된다(Rogers, 1989).

본 논문에서는 대보화강암과 불국사화강암 지역에 분포하는 먹는샘물 업체를 대상으로 원수의 수질을 수리화학적 측면에서 다루고자 한다. 화강암지역에는 총 24개 먹는샘물 제조업체가 분포한다(Fig. 1). 참고로 전국의 70개 먹는 샘물 업체중 실제로 수질분석이 가능한 업체는 98년말 현재 60개인데 본 지역의 수질특성과 전국의 평균적인 수질특성과도 비교를 하고자 한다.

지 질

지질은 지하수와 암석의 상호반응을 통하여 지하수의 화학적 특성을 결정할 뿐만 아니라 암석의 물리적인 특성에 따라서 지하수의 유동이 영향을 받기 때문에 지하수에 있어서 중요한 변수로 간주된다.

대보화강암은 대보변동에 의하여 삼척기-쥬라기에 형성되었으며 퇴적기원의 마그마로부터 유래된 것으로 알려져 있다. 입자는 중립질 내지 조립질로서 등립상의 현정질조직을 보여주며 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등으로 구성된다. 부성분광물로는 각섬석, 휘석, 불투명 광물 등이 포함된다. 알칼리장석과 석영의 미분상 조직이 관찰되며, 사장석은 알바이트 성분이 더 높으며 누대구조가 일부 관찰되기도 한다.

- Daebo granite(20)
- △ Bulguksa granite(4)

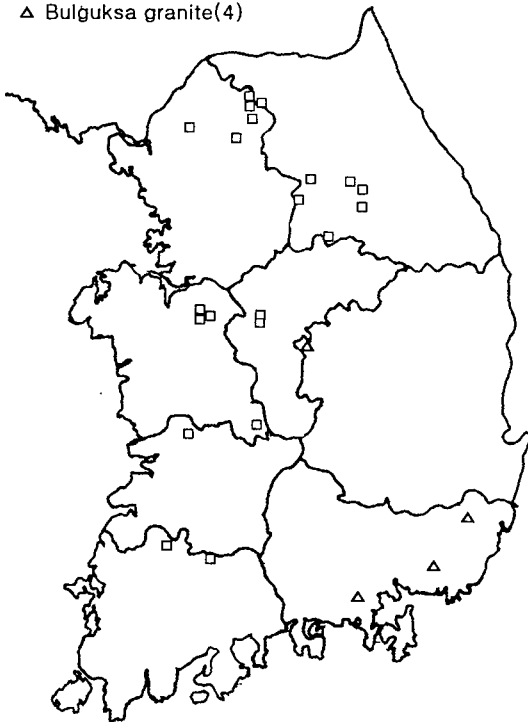


Fig. 1. Location map of the mineral water plants in granite regions.

불국사화강암은 백악기말기부터 신생대초에 형성되었으며 지각하부물질의 부분용융으로부터 유래된 것으로 알려져 있다. 본 암은 주로 경상분지에 분포하는데 중립질내지 조립질의 화강암으로서 주로 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등으로 구성된다. 부성분광물로는 각섬석, 휘석, 불투명광물 등이 포함된다. 알칼리장석과 석영의 미분상 조직이 관찰되며, 사장석은 알바이트 성분이 더 높으며 누대구조가 일부 관찰되기도 한다.

각 업체가 위치하는 지역의 지질특성은 현지조사와 취수정의 시추공 자료, 및 문헌조사를 통하여 결정되었다. 화강암지역에 분포하는 업체들은 총 24개소이며 구체적으로 보면 다음과 같다(Fig. 1). 쥬라기 대보화강암 지역에는 총 20개 업체가 분포하는데 이들은 오대산샘물, 태백산수음료, 오웰, 해태음료, 라이프음료, 한국청정음료, 산정오리엔탈음료, 포천음료, 포천그린, 이동음료, 88서울통상, 고려삼, 일화, 스파클, 목천산업개발, 샘이깊은물, 신송산업, 정산, 설송, 옥수(주)등이다. 한편 불국사화강암 지역에는 총 4개 업체가 분포하며 이들은 건영식품, 옥수음료, 가지산옥수, 정일산업 등이다.

수 질 분석

각 샘물업체의 취수정에서 충분히 양수한 지하수를 0.45 μ m membrane filter를 통과시켜 부유물을 제거한 후 1,000ml의 무균용기에 채수하였다. 시료 채수 후 즉시 아이스박스과 냉장고에 보관하여 실내에서 양이온과 음이온을 분석하였다. 지하수의 수소이온농도(pH)와 전기전도도(EC), 수온은 채수 즉시 현장에서 측정을 하였다. 알칼리도는 페놀프탈레인과 메틸오렌지를 이용하여 적정법으로 구한 후 중탄산(HCO₃)으로 환산하여 계산하였다. 분석된 항목은 K, Na, Ca, Mg, SiO₂, Al, Cl⁻, F⁻, NO₃, SO₄²⁻, HCO₃⁻, EC, pH 이다(Table 1). 이들 성분에 대한 화학분석은 한국자원연구소 분석부에서 이루어 졌으며 원자흡광분광분석기(AAS), 유도결합플라즈마(ICP-AES), 및 이온크로마토그래피(IC)를 이용하였다.

Table 1. Results of chemical and physical analyses of groundwater from Daebo granite and the Bulguksa granite.

	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Cl	SO ₄	F	NO ₃	Al	HCO ₃	EC ($\mu\text{S/cm}$)	pH
Daebo granite													
D-1	2.06	10.60	19.60	4.98	35.50	6.98	5.43	0.13	1.34	0.00	104.0	200.0	7.11
D-2	1.56	10.50	23.00	3.71	24.80	3.15	9.30	0.69	0.00	0.00	116.0	213.0	7.60
D-3	1.26	8.70	20.00	5.53	26.70	5.01	3.31	0.15	0.62	0.00	116.0	193.7	7.24
D-4	0.60	12.50	11.20	1.36	29.70	7.16	6.48	0.26	3.68	0.00	79.3	130.0	6.08
D-5	0.90	10.30	19.90	3.95	30.80	5.05	13.30	0.35	1.69	0.00	97.6	145.0	6.26
D-6	1.09	7.00	18.10	2.15	23.50	3.55	14.50	0.08	1.30	0.00	61.0	171.0	7.32
D-7	1.04	7.30	12.40	1.27	23.90	4.44	2.95	0.52	0.51	0.00	46.0	127.0	7.81
D-8	0.54	17.40	18.30	1.46	20.80	5.03	4.16	1.91	1.04	0.00	94.6	218.0	7.24
D-9	0.55	21.10	15.80	5.21	10.90	3.92	12.40	0.80	2.20	0.00	115.9	275.0	7.87
D-10	0.38	5.16	10.20	1.47	20.60	1.37	2.92	0.15	0.25	0.00	61.0	107.1	7.30
D-11	1.06	2.86	13.50	3.40	9.19	1.42	6.84	0.73	1.58	0.10	54.9	154.3	7.07
D-12	0.66	7.80	13.90	2.25	8.89	1.50	7.20	0.27	0.81	0.00	79.3	160.7	7.35
D-13	0.50	4.23	7.03	1.18	20.10	1.56	0.96	0.07	0.79	0.00	42.7	107.4	7.68
D-14	1.01	5.85	14.20	1.71	13.70	3.83	11.30	0.11	2.11	0.00	48.8	124.5	7.12
D-15	0.52	5.32	11.30	1.52	2.09	2.29	1.21	0.16	1.12	0.00	42.7	95.7	7.40
D-16	0.45	4.82	11.00	0.91	17.60	2.96	5.05	0.75	1.41	0.00	33.6	93.5	7.07
D-17	1.26	4.41	11.80	0.83	15.40	1.19	2.95	0.35	0.43	0.00	42.7	90.7	7.69
D-18	1.17	13.10	35.80	5.31	32.00	6.60	6.26	0.66	2.14	0.00	152.5	237.0	6.60
D-19	0.26	12.10	20.00	0.75	20.10	3.56	23.10	0.87	0.05	0.00	79.3	138.0	7.74
D-20	1.04	7.60	24.10	3.51	15.90	3.63	16.30	0.10	0.00	0.00	97.6	157.0	7.68
average	0.90	8.93	16.56	2.62	20.11	3.71	7.80	0.46	1.15	0.01	78.27	156.93	7.26
maximum	2.06	21.10	35.80	5.53	35.50	7.16	23.10	1.91	3.68	0.10	152.50	275.00	7.87
minimum	0.26	2.86	7.03	0.75	2.09	1.19	0.96	0.07	0.00	0.00	33.55	90.70	6.08
Bulguksa granite													
B-1	0.53	6.60	9.23	1.13	24.10	3.94	7.37	0.34	0.86	0.00	33.6	99.0	6.81
B-2	0.35	10.00	3.49	1.15	45.50	3.01	4.87	0.03	0.00	0.04	42.7	137.7	6.67
B-3	0.37	7.03	10.30	1.84	29.90	2.97	3.36	0.35	0.06	0.04	51.9	120.0	6.84
B-4	0.07	4.97	18.10	0.87	22.40	2.03	34.40	0.05	0.00	0.01	33.6	133.0	7.41
average	0.33	7.15	10.28	1.25	30.48	2.99	12.50	0.19	0.23	0.02	40.43	122.43	6.93
maximum	0.53	10.00	18.10	1.84	45.50	3.94	34.40	0.35	0.86	0.04	51.85	137.70	7.41
minimum	0.07	4.97	3.49	0.87	22.40	2.03	3.36	0.03	0.00	0.00	33.55	99.00	6.67

결과 및 고찰

1. 지하수의 물리화학적 특성

수온은 13-16°C의 범위를 보이는데 본 역 뿐만 아니라 전국적으로 보아도 지질에 따른 수온의 차이는 뚜렷이 나타나지 않는다.

pH의 경우 대보화강암 지역은 6.08~7.87 범위를 보이며 평균 7.24를 나타낸다. 불국사화강암 지역은 6.67~7.68 범위를 보이며 평균 7.08이다.

국내업체 전체의 전기전도도는 43.9~314 $\mu\text{S/cm}$ 범위에서 평균 151.4 $\mu\text{S/cm}$ 를 보인다. 대보화강암 지역에서는 90.7~275 $\mu\text{S/cm}$ 범위에서 평균 156.9 $\mu\text{S/cm}$ 를 나타내며 불국사화강암 지역에서는 99~157 $\mu\text{S/cm}$ 범위에서 평균 129.3 $\mu\text{S/cm}$ 를 보인다.

경도(hardness)는 일반적으로 Ca와 Mg의 합을 meq/l, 또는 CaCO₃/l로서 표시한다. 국내 먹는 샘물의 전체적인 평균경도는 57.9이다. 대보화강암

지역은 50.9, 불국사화강암 지역은 41.8로서 전국평균보다는 낮다(Table 2).

분석된 원소의 이온전하 균형(ionic charge balance)은 양이온과 음이온의 당량전하간의 차이를 말하는데 보통 5% 이하이면 분석의 신뢰도가 매우 높은 것으로 간주된다. 그러나 분석되지 않는 이온의 함량이 원래 높든지 또는 분석오차 등으로 인하여 더 큰 전하불균형이 발생할 수 있다. 먹는 샘물 업체의 지하수에서는 본 조사에서 분석된 양, 음이온 이외에 기타 다른 원소들의 존재는 사실상 무시할만 하다. 그러므로 이온전하균형의 차이가 비교적 크게 나는 경우 지질화학적 요인에서 그 원인을 찾아야 할 것이다. 지질특성상 지하수에 양이온이 과다하게 용존되어 있거나 또는 용존되어 있던 음이온들이 과포화상태에 도달하여 재침전되는 광물속으로 결합하거나 또는 물-암석과의 반응이 충분히 이루어지지 않은 경우가 이에 해당될 것이

대보화강암과 불국사화강암지역 먹는샘물의 수리화학적 특성

다. 예를 들면 장석의 경우 Ca, Na, K 등과 같은 양이온의 선택적인 용해작용에 의하여 용탈된 양이온이 지하수에 존재한다면 지하수에는 상대적으로 음이온의 결핍현상이 나타날 수 있다. 본 조사에서 분석된 지하수의 이온간 전하불균형은 참고로 국내 전체 업체(분석가능한 업체는 60개소임)는 평균 5.1%이다. 한편 화강암 분포지역에서 대보화강암 지역의 경우는 0.5~16.3% 범위에서 평균 5.9%, 불국사화강암 지역은 0.4~10.9%범위에서 평균 4.8%의 전하불균형을 보인다.

Table 2. Water types and hardness of groundwater.

sample	type	hardness
Daebo granite		
D-1	Ca-Na-Mg-HCO ₃	69.4
D-2	Ca-Na-HCO ₃	72.6
D-3	Ca-Mg-HCO ₃	72.6
D-4	Ca-Na-HCO ₃	33.5
D-5	Ca-Na-HCO ₃	65.9
D-6	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	54.0
D-7	Ca-Na-HCO ₃	36.2
D-8	Ca-Na-HCO ₃	51.7
D-9	Na-Ca-HCO ₃	60.9
D-10	Ca-Na-HCO ₃	31.5
D-11	Ca-Mg-HCO ₃	47.7
D-12	Ca-Na-HCO ₃	43.9
D-13	Ca-Na-HCO ₃	22.4
D-14	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	42.5
D-15	Ca-Na-HCO ₃	34.4
D-16	Ca-Na-HCO ₃	31.2
D-17	Ca-Na-HCO ₃	32.9
D-18	Ca-HCO ₃	111.2
D-19	Ca-HCO ₃	74.6
D-20	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	53.0
Bulguksa granite		
B-1	Ca-Na-HCO ₃	27.7
B-2	Na-Ca-HCO ₃	13.4
B-3	Ca-Na-HCO ₃	33.3
B-4	Ca-SO ₄ -HCO ₃	48.7

2. 주요 양이온의 함량분포

지질별로 지하수에서 존재하는 Ca, Na, K, Mg 와 같은 주요 양이온의 함량비는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 이들 4가지 양이온의 총합량은 대보화강암 지역이 불국사화강암 지역보다 약간 높다. 대부분의 업체의 지하수의 양이온 중에서 Ca의 함량

이 가장 높으며 Ca>Na>Mg>K의 순으로 함량비를 나타내지만 대보화강암 지역의 1개 업체에서는 Mg가 Na보다 함량이 높아 Ca>Mg>Na>K의 함량순서를 보인다. 특히 양이온 중에서 Na가 가장 높은 함량을 보이는 경우도 있는데 대보화강암 지역 2개 업체, 불국사화강암 지역 1개 업체가 이에 해당된다. 그러나 양이온 중에서 Mg나 K의 함량이 가장 높은 경우는 관찰되지 않는다. 화강암질암 지역에서 Ca가 가장 높은 함량을 보이는 경우는 사장석의 용해작용에 기인하여 Ca가 가장 풍부하게 용존되는 현상과 잘 일치한다. 그리고 화강암질암 지역 내에서 Na가 Ca보다 더 용존되는 경우는 지하수가 방해석 등에 대하여 이미 과포화 상태에 도달하여 방해석이 침전될 때 지하수로부터 Ca가 제거되어 그 함량이 감소하였든지, 또는 암질을 구성하는 사장석의 알바이트의 성분이 월등히 높아 이런 사장석이 지하수에 용해된다면 이와 같은 특성을 보일 가능성이 있다. 각 양이온의 구체적인 함량범위는 다음과 같다.

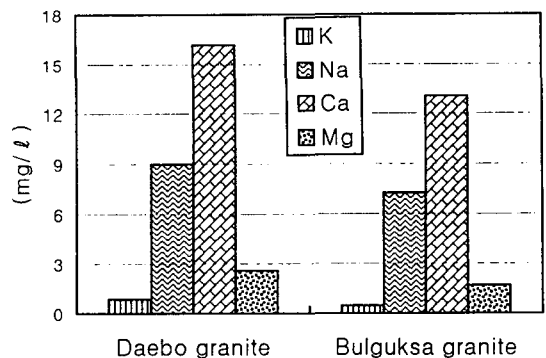


Fig. 2. Relative chemical contents of major cations dissolved in groundwater.

K의 경우 국내업체 전체적인 평균은 1.01mg/l이다. 대보화강암 지역에서는 0.26~2.06mg/l 범위에서 평균 0.89mg/l를 나타내며 불국사화강암 지역에서는 0.07~1.04mg/l 범위에서 평균 0.47mg/l를 보인다.

Na의 경우 국내업체 전체평균은 7.35mg/l이다. 대보화강암 지역에서는 2.86~21.1mg/l 범위에서 평균 9.0mg/l을 나타내며 불국사화강암 지역에서는 4.97~10.0mg/l 범위에서 평균 7.24mg/l를 보인다.

전국에서 Na의 함량이 가장 높은 곳은 대보화강암 지역에서 관찰된다.

Ca의 경우 국내업체 전체평균은 17.36mg/l이다. 대보화강암 지역에서는 7.03~35.8mg/l 범위에서 평균 16.16mg/l을 나타내며 불국사화강암 지역에서는 3.49~24.1mg/l 범위에서 평균 13.04를 보인다.

Mg는 국내업체 전체의 평균은 3.55mg/l이다. 대보화강암 지역에서는 0.75~5.53mg/l 범위에서 평균 2.58을 나타내며 불국사화강암 지역에서는 0.87~3.51mg/l 범위에서 평균 0.87mg/l을 보인다.

SiO₂는 국내업체 전체의 평균은 18.41mg/l이다. 대보화강암 지역에서는 2.09~35.5mg/l의 범위에서 평균 20.33mg/l을 나타내며, 불국사화강암 지역에서는 15.9~45.5mg/l의 범위에서 평균 27.56mg/l을 보인다.

Al은 대부분의 먹는샘물 지하수에서는 검출이 되지 않으나 대보화강암 지역 1곳, 불국사화강암 지역 3곳에서 미량으로 함유되어 있지만 모두 음용수 기준에 적합하다.

3. 음이온의 함량분포

인위적 오염에 의한 성분인 NO₃를 제외한 음이온 성분의 함량은 HCO₃⁻→SO₄²⁻→Cl⁻→F⁻의 순을 보인다. 음이온도 양이온의 경우처럼 대보화강암 지역이 전체적으로 불국사화강암 지역보다 높은 함량순서를 보인다.

HCO₃⁻의 경우 국내업체 전체평균은 77.42mg/l을 보인다. 대보화강암 지역에서는 33.55~152.5의 범위에서 평균 77.25mg/l를 나타내며 불국사화강암 지역에서는 33.55~97.6mg/l의 범위에서 평균 51.86mg/l을 보인다.

Cl⁻은 1.06~15.1mg/l의 범위에서 국내 업체 전체평균은 4.1mg/l이다. 대보화강암 지역에서는 1.19~7.16mg/l의 범위에서 평균 3.71mg/l을 나타내며 불국사화강암 지역에서는 2.03~3.94mg/l의 범위에서 평균 3.12mg/l을 보인다.

SO₄²⁻은 일반적으로 해수의 영향, 황화물의 산출, 및 인위적인 오염에 의하여 나타난다. SO₄²⁻는 국내업체 전체평균은 10.05mg/l을 보인다. 대보화강암 지역에서는 0.96~23.1mg/l의 범위에서 평균 7.35mg/l를 나타내며 불국사화강암 지역에서는 3.36~34.4mg/l의 범위에서 평균 13.26mg/l을 보인다.

F⁻의 함량은 매우 낮은데, 국내업체 전체평균은 0.36mg/l을 보인다. 대보화강암 지역에서는 0.07~1.91mg/l의 범위에서 평균 0.47mg/l을 나타내며 불국사화강암 지역에서는 0.03~0.35mg/l의 범위에서 평균 0.17을 보인다.

NO₃는 국내업체 전체평균은 0.87mg/l을 보인다. 대보화강암 지역에서는 0~3.68mg/l의 범위에서 평균 1.21을 나타내며 불국사화강암 지역에서는 0~0.86mg/l의 범위에서 평균 0.18을 보인다. 이같은 함량분포는 지질특성에 좌우된다기 보다는 먹는샘물 업체의 개별적인 주변환경과 관련되는 것으로 생각된다.

4. 수질유형

지하수의 수질특성을 구분하기 위하여 분석치를 Piper 다이아그램상에 도시하였다(Fig. 3). Piper 다이아그램은 수질의 8대 원소에 대하여 양이온과 음이온을 epm(equivalent per million)으로 계산하여 삼각다이아그램에 표시하여 수질의 조성비와 특성을 파악하기 위한 방법이다. 대부분의 수질유형은 양이온은 Ca-우세형, 음이온은 HCO₃⁻ 우세형을 보인다. 그리고 삼각다이아그램상에서는 양이온은 산재한 형태이지만 음이온은 불국사화강암 1곳을 제외하면 대체로 밀집의 형태를 나타낸다. Table 2는

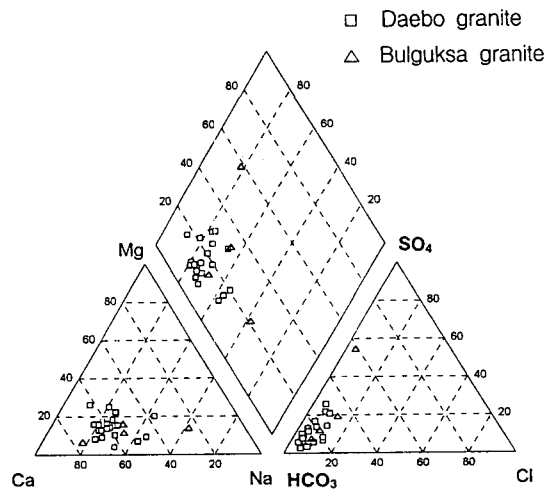


Fig. 3. Trilinear plot of groundwater on Piper diagram showing typical water types.

수질의 유형을 나타낸 것인데 경도와는 특별한 상관관계를 보이지 않는다.

대보화강암 지역에서는 (Ca, Na)-HCO₃ 유형이 가장 우세한데 이는 화강암지역에서 가장 풍부하게 포함되어 있는 사장석의 선택적인 용해작용에 기인하는 것으로 보인다. 불국사화강암 지역에서는 (Ca, Na)-(HCO₃, SO₄) 유형으로 나타난다. 특히 Ca-SO₄-HCO₃ 유형이 나타나는 지역의 경우는 화강암과 성인적으로 관련있는 황화물이나 황화철의 산화, 용해작용에 영향을 받은 것으로 보인다.

화강암 지역의 전체적인 수질의 유형비는 (Ca, Na)-HCO₃가 가장 우세한데, 그 이유로는 화강암내에 풍부한 광물인 장석류가 용해작용에 의하여 Ca, Na를 방출하는 데 주로 기인하는 것으로 보인다. 특히 전국적으로 보면 화강암 지역 이외에서도 이와 같은 현상이 관찰된다. 예를 들면 화강편마암이 우세하게 포함되는 선캄브리아기 변성암 지역에서도 (Ca, Na)-HCO₃가 가장 우세한 유형이다(성익환 등, 1998). 이러한 수질특성은 화강암질 암석내에 가장 풍부하게 존재하는 장석류의 선택적인 Ca, Na 용해작용의 결과로 해석할 수 있다. Chebotarev (1955)는 지하수의 화학적인 진화경로를 통계적 결과를 바탕으로 관찰하였는데, 지하수는 시간과 깊이에 따라서 음이온은 중탄산(HCO₃⁻)으로부터 황산이온(SO₄²⁻)을 거쳐 Cl⁻이 풍부한 해수의 조성으로 점진적으로 진화해 간다고 한다. 그렇지만 규산염광물이 풍부한 화강암질 암석에서는 Cl⁻과 SO₄²⁻가 미량으로 존재하기 때문에 지하수가 화학적인 진화를 거치더라도 Cl⁻이나 SO₄²⁻이 우세한 수리화학적 상(hydrochemical facies)으로 발전되는 것은 어려운 것으로 보인다(Freeze and Cherry, 1979). 한편 이종운 등(1997)에 의하면 국내 화강암내 심부지하수의 경우 심부로 갈수록 Ca-(Cl+SO₄)로부터 시작하여 Ca-HCO₃를 거친 후 점차 Na-HCO₃나 Na-(Cl+SO₄)형으로 진화한다고 한다. 본 역의 먹는샘물 지하수는 수질의 유형 뿐만 아니라 취수공의 평균 심도가 200m 내외인 것을 감안한다면 수리화학적으로 많이 진화한 상태는 아닌 것으로 보인다.

5. 주요 이온들의 화학적 관련성

화강암 분포지역의 지하수는 대체로 장석류의

용해작용에 의하여 영향을 받은 것으로 보인다. 주요 원소별 상관계수(correlation coefficients)는 Table 3에 나타난 바와 같다. 대보화강암 지역에서는 Ca-HCO₃가 0.84로서 가장 높으며 Mg-HCO₃(0.81), SiO₂-Cl(0.74), Na-HCO₃(0.70)도 비교적 높은 상관관계를 보인다. 불국사화강암 지역의 경우 시료수가 적어서 신뢰도가 높은 통계데이터를 얻는 것은 어렵지만, 주요 원소들간의 관련성을 단순히 비교해 보면 상관계수가 높은 편이다. K-Mg가 0.93으로 가장 높고 K-HCO₃(0.92), Mg-Cl(0.92), Cl-HCO₃(0.91), K-F(0.90), Cl-F(0.89), Ca-HCO₃(0.88), Mg-F(0.87), Na-HCO₃(0.85), Na-K(0.85), Na-Cl(0.83), F-HCO₃(0.83), Na-Mg(0.83) 등이 다소 높은 상관관계를 보인다.

지하수에 존재하는 이온들은 일차적으로 특정한 광물의 용해작용에 의하여 방출된 원소들이 지하수에 용존된 것이다. 이들 원소들은 독립적으로 거동하거나 여러 화학종들이 함께 거동하기도 한다. 따라서 상관계수 이외에도 원소들의 화학적인 특성을 통하여 지하수내 존재하는 화학종들의 거동을 유추할 수 있다.

Ca는 주로 Ca사장석의 선택적인 용해작용에 의하여 공급되는 것으로 보인다. Ca는 Na와 함께 사장석과 같은 규산염광물이 분해될 때 쉽게 방출되지만 수화된 칼슘이온은 양성자를 주는 성질이 약하고 착이온을 만드는 경향도 적기 때문에 자연수에서는 Ca²⁺로 존재한다. 화학적으로 칼슘이온의 전하밀도는 다른 금속보다 적으므로 물과 강한 결합을 하지 않는다. 그러나 Ca는 HCO₃⁻의 농도가 높아지면 Ca²⁺-HCO₃⁻의 짝이온으로 존재하게 된다. 따라서 대부분의 업체에서 수질유형은 양이온은 Ca-우세형, 음이온은 HCO₃⁻-우세형으로 관찰되는 것이다.

Na와 K는 규산염광물내에서는 서로 동형치환을 일으키며 비슷한 용해도를 가지지만 지구화학적 거동은 상이하다. 이들은 장석과 같은 규산염광물이 용해작용이나 변질작용에 의하여 분해되면 빠르게 용탈된다. 용탈된 K는 음전하를 띠는 점토광물이나 유기성 콜로이드입자에 Na보다 훨씬 강하게 흡착되거나 광물의 구조내에 쉽게 치환되어 들어간다. 따라서 지하수에서는 K의 농도가 Na보다 훨씬 낮게 된다.

Table 3. matrix of correlation coefficients among chemical components.

Daebo granite	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Cl	F	HCO ₃	SO ₄
K	1.00	-0.07	0.43	0.57	0.46	0.34	-0.25	0.36	-0.08
Na		1.00	0.44	0.41	0.28	0.59	0.56	0.70	0.31
Ca			1.00	0.65	0.46	0.53	0.20	0.84	0.40
Mg				1.00	0.34	0.45	-0.07	0.81	0.10
SiO ₂					1.00	0.74	-0.03	0.50	0.04
Cl						1.00	0.13	0.60	0.13
F							1.00	0.22	0.06
HCO ₃								1.00	0.26
SO ₄									1.00
Bulguksa granite	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Cl	F	HCO ₃	SO ₄
K	1.00	0.85	0.72	0.93	0.14	1.00	0.90	0.92	-0.53
Na		1.00	0.53	0.83	0.61	0.83	0.59	0.85	-0.57
Ca			1.00	0.87	-0.28	0.74	0.72	0.88	0.15
Mg				1.00	0.10	0.92	0.87	1.00	-0.34
SiO ₂					1.00	0.10	-0.19	0.14	-0.55
Cl						1.00	0.89	0.91	-0.48
F							1.00	0.83	-0.48
HCO ₃								1.00	-0.30
SO ₄									1.00

F는 형석(CaF₂)에서 주성분으로 들어 있지만 운모류, 각섬석류, 인회석 등의 광물에서 O나 OH⁻를 치환하여 존재하기도 한다. 그런데 대보화강암 지역에서 Ca와 F간의 상관계수는 0.20이므로 형석의 용해작용에 의한 가능성은 희박하다. 반면에 불국사화강암 지역에서는 Ca-F간의 상관계수는 0.72인데 형석의 용해작용에 의한 영향이 상대적으로 다소 큼을 나타낸다. 이 지역에서 F는 K, Ca, Mg, Cl, HCO₃ 등과도 상관관계가 잘 성립되는데 운모류나 탄산염광물의 용해와 더불어 함량이 증가하는 것으로 보인다. 그러므로 F의 함량은 여러 요소들이 복합적으로 작용한 결과로 생각할 수 있다.

Cl은 Na-Cl의 비례관계가 잘 성립하지 않는다면 물-암석 반응의 결과로 볼 수 있다(Banks et al., 1995). 심부 화강암 지하수에서 염도는 주로 광물로부터 유래하기 때문에 Cl이 Na보다 훨씬 함량이 높다. 본 화강암 지역에서는 염화물의 농도가 크게 높지 않으므로 Cl의 근원을 화강암내에 흔하게 존재하는 흑운모같은 광물격자내에 미량으로 존재하는 염화물로 볼 수 있다. 즉 물-암석비가 낮은 경우 규산염광물의 가수분해에 의하여 물분자가 제거

되면 잔류 지하수에서 염화물이 농집될 수 있다. 또한 Na가 이차변질광물과 결합하여 제거되면 잔류지하수에도 상대적으로 Cl이 증가하게 된다. 일반적인 염수의 Na/Cl비는 1인데 반하여 심부화강암질 지하수에서 관찰되는 염수 지하수의 특징중 하나는 Cl에 비하여 Na가 결핍되어 있다는 점이다(Edmunds and Salvage, 1991). 결정질암의 염화물의 기원에 관하여 여러 가설이 있는데 그 중에서 Kraynov and Ryzhenko(1997)은 내인적 요인, 외인적 요인, 및 이 둘이 혼합된 요인으로 구분하였는데 대부분의 결정질암석에서 염화물의 배경농도는 50-250mg/l이며 이보다 높으면 맨틀기원이거나 인접한 퇴적분지로부터 유입된 경우라고 하였다. 또 다른 가능성으로는 증발암이나 염의 용해, 인위적 기원, 유체포유물로부터 공급을 들 수 있다(Rogers, 1989). 먹는샘물 지하수는 결정질암 대수층의 심부 지하수이므로 특히 유체포유물에 의한 가능성을 고려할 수 있는데 Cl은 유체포유물의 함량과 유체포유물 내의 구성성분에 영향을 받게 된다. 그러나 이들의 함량과 염화물성분도 적다면 이들에 의한 영향은 무시할 만하다. 본 지역에서는 염화물의 함

대보화강암과 불국사화강암지역 먹는샘물의 수리화학적 특성

량은 낮으며 Na/Cl 비가 염수보다 높고 심부화강암 질암에서 흔히 관찰되는 염수지하수의 경우와도 성인적으로 차이를 보인다. 화강암지역의 먹는샘물 지하수에서 관찰되는 이같은 특징은 주로 장석류의 용해작용에 영향을 받은 것으로 보인다.

6. 광물의 포화도

지하수에 용존되어 있는 화학종은 활동도, pH, 온도, Eh 등과 같은 물리화학적 요소에 따라서 가장 안정한 상으로 존재한다. 특정한 환경하에서 화학종은 광물로서 재침전되든지 또는 광물에 대하여 불포화 상태를 유지하기 때문에 지하수의 수리화학적 특성을 좌우하게 된다. Table 4는 지하수에 존재하는 주요 화학종들의 특정한 광물에 대한 포화지수(saturation index)를 나타낸 것이다. 모든 화학종들은 석영을 제외한 주요 광물에 대하여 불포화상태를 유지하고 있다. 따라서 암석 내에 이러한 광물들이 존재한다면 지하수에서 계속 용해작용이 진행될 수 있음을 의미한다. 대부분의 지하수는 실리카 상들을 제외한다면 방해석의 포화도에 가장

근접한 상태를 보여 주며 돌로마이트, 석고, 형석에 대하여는 불포화정도가 다소 큼을 나타낸다. 그러나 석고, 경석고, 형석에 대하여는 불포화정도가 다소 큼을 나타낸다. 즉 물-암석과의 반응이 조금 더 진행된다면 탄산염광물은 곧 포화상태에 도달하게 되어 더 이상 지하수의 수질화학에 영향을 주지 못하게 된다. 그러나 석고나 경석고와 같은 황산염 광물들은 상대적으로 계속 용해될 수 있어서 이들이 지하수의 수질에 더 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 따라서 지하수에 존재하는 SO4²⁻ 이온은 주로 석고와 경석고의 용해작용 결과 공급되고 있음을 알 수 있다.

한편 규산염광물의 용해는 광물의 구조와 조성에 따라서 매우 다양한데 가장 느리게 용해되는 규산염광물은 망상구조형(tectosilicates)이다. 그 중에서 지하수에서 장석의 표면은 점차 Na, K, Ca가 용탈되는 데 장석의 용해속도는 심지어 비정질의 실리카보다도 빠른 것으로 나타났다(White and Brantley, 1995). 자연수와 같은 pH 5-8 범위에서 수행한 장석의 용해실험결과에 따르면 Ca장석의

Table 4. Saturation index of groundwater from the Daebo granite and Bulguksa granite.

Daebo granite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Anhydrite	Fluorite	SiO _{2(a)}	Chalcedony	Quartz
D-1	-0.95	-2.15	-3.22	-3.44	-3.21	-0.63	0.21	0.64
D-2	-0.36	-1.16	-2.93	-3.15	-1.70	-0.79	0.05	0.48
D-3	-0.77	-1.75	-3.43	-3.65	-3.08	-0.76	0.08	0.51
D-4	-2.46	-5.63	-3.33	-3.58	-2.70	-0.63	0.25	0.71
D-5	-1.98	-4.47	-2.81	-3.06	-2.20	-0.60	0.28	0.74
D-6	-1.00	-2.58	-2.80	-3.02	-3.65	-0.81	0.03	0.46
D-7	-0.78	-2.19	-3.61	-3.83	-2.15	-0.81	0.03	0.46
D-8	-0.89	-2.53	-3.35	-3.57	-0.89	-0.86	-0.02	0.41
D-9	-0.26	-0.65	-2.97	-3.19	-1.74	-1.15	-0.31	0.12
D-10	-1.24	-2.97	-3.70	-3.92	-3.32	-0.87	-0.03	0.40
D-11	-1.41	-3.08	-3.23	-3.45	-1.84	-1.22	-0.38	0.05
D-12	-1.08	-2.73	-3.20	-3.44	-2.59	-1.16	-0.29	0.16
D-13	-1.32	-3.21	-4.31	-4.56	-3.99	-0.79	0.09	0.55
D-14	-1.39	-3.35	-2.99	-3.21	-3.46	-1.04	-0.21	0.22
D-15	-1.25	-3.02	-4.03	-4.25	-3.21	-1.86	-1.02	-0.59
D-16	-1.69	-4.12	-3.42	-3.64	-1.88	-0.94	-0.10	0.33
D-17	-1.07	-3.07	-3.62	-3.86	-2.40	-0.92	-0.05	0.41
D-18	-1.19	-3.00	-2.94	-3.19	-1.45	-0.60	0.27	0.73
D-19	-0.56	-2.31	-2.57	-2.81	-1.44	-0.81	0.06	0.51
D-20	-0.45	-1.49	-2.66	-2.90	-3.25	-0.91	-0.05	0.41
Bulguksa granite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Anhydrite	Fluorite	SiO _{2(a)}	Chalcedony	Quartz
B-1	-2.19	-5.09	-3.32	-3.57	-2.50	-0.71	0.17	0.63
B-2	-2.48	-5.10	-3.91	-4.13	-5.17	-0.52	0.32	0.75
B-3	-1.87	-4.23	-3.63	-3.87	-2.51	-0.65	0.22	0.67
B-4	-1.18	-3.33	-2.43	-2.65	-4.06	-0.83	0.01	0.44

용해속도는 Na사장석이나 K장석보다 훨씬 빠르기 때문에 Ca사장석의 함량이 높을수록 용해가 쉽게 일어난다(Lasaga, 1984). 따라서 Ca사장석의 함량이 높을수록 지하수와 반응성이 좋으며 실리카의 용해가 많이 일어난다고 볼 수 있다. 그렇지만 실리카의 용해도가 포화상태에 도달하면 실리카의 용존상태는 침전되는 광물상에 따라서 영향을 받게 된다. 지하수에서 Al의 농도는 매우 낮는데 이는 중성의 pH에서 Al의 용해도가 극히 낮을 뿐만 아니라 규산염광물들이 비조화 용융을 하여 이차광물이 침전하기 때문인 것으로 보인다.

7. 지하수의 진화와 상평형

상안정 다이어그램(phase stability diagram) 또는 활동도 다이어그램(activity diagram)은 열역학적으로 안정한 광물상간의 영역을 나타내는 것이다. 지하수내에 용존되어 있는 화학종들의 활동도를 광물의 안정영역과 비교해 보면 화학종들과 광물상과의 상평형 관계를 알 수 있다(Aagaard and Helgeson, 1982 ; Drever, 1988 ; Rogers, 1989). 그러나 점토광물 특히 혼합층상광물이나 일라이트와 같은 광물들에 대한 열역학적 자료의 부족(Aja and Rosenberg, 1992 ; Ransom and Helgeson, 1993 ; Essene and Peacor, 1995 ; Essene and Peacor, 1997)과 자연계에 산출되는 대부분의 광물의 화학조성은 단성분(end-member)의 이상치를 갖지 못하기 때문에 상안정 다이어그램은 광물상의 안정영역을 실제로는 완벽하게 표현하지 못한다. 그렇지만 지하수 계의 화학적인 진화나 상평형관계를 해석하는 데는 별 무리가 없다. 따라서 본 논문에서는 혼합층상광물이나 일라이트 같은 광물상을 제외한 단순한 광물상들의 안정영역만 표기하였다. 상평형 계산은 Helgeson et al. (1978)의 자료를 이용하였다.

열역학적으로 상평형관계를 이용하면 지하수의 진화경로를 유추할 수 있다. 장석이 지하수와의 화학반응을 통하여 비조화 용해를 하면 수소이온은 점차 소모되면서 pH가 상승하며 이차광물로는 점토광물이 형성되며 알칼리원소나 알칼리토금속원소들이 규산과 더불어 지하수로 빠져 나오게 된다. K장석과 Na사장석이 비조화용해로 깁사이트를 형성시키면서 점차 실리카와 K^+/H^+ , Na^+/H^+ 의 비는 증가하게 되고, 지하수의 조성은 카올리나이트 영역

으로 진화해 간다. 이 영역에서는 장석류는 비조화 용해를 하면서 카올리나이트를 형성한다. 그리고 계속 장석류가 용해반응을 겪게 되면 지하수의 화학조성은 점차 장석류에 대해서 평형상태를 이루려는 방향으로 진행된다. 마지막에는 지하수는 정장석, 사장석과 평형상태를 이루게 되고 더 이상 장석류의 용해작용은 일어나지 않게 되는 것이다.

Figure 4는 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 계에서 지하수에 용존되어 있는 화학종들이 특정한 광물상의 안정영역에 대하여 평형상태를 유지하고 있는지를 보여주고 있다. 대보화강암의 한 시료는 깁사이트(gibbsite)의 안정영역에 놓인다. 이 시료는 지하수와 장석과의 반응이 초기 단계에 있음을 지시하는 것으로서 물-암석반응이 별로 진행되지 않았음을 나타낸다. 대보화강암과 백악기화강암 지역의 대부분의 시료는 카올리나이트의 안정영역에 놓이는데, 앞서 언급한 하나의 시료를 제외하고는 석영에 대하여 포화상태에 도달해 있다. 대부분의 화성암 지

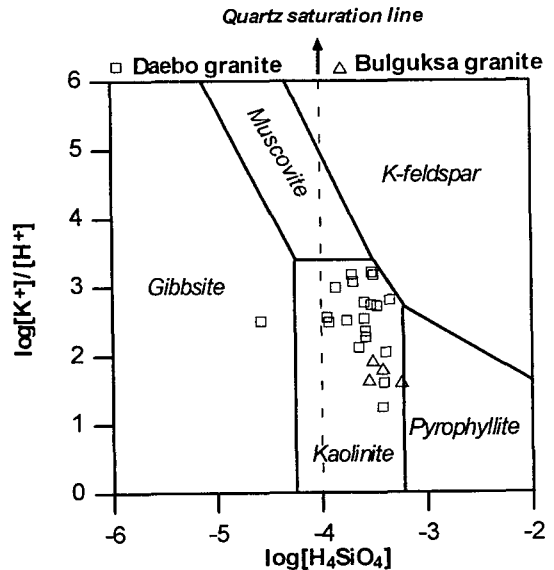


Fig. 4. Phase stability diagram in the system $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ at 298K and 1 bar. Most water samples are located in the kaolinite field. One sample from the Daebo granite area lies in the gibbsite stability field and undersaturated with respect to quartz.

역에서는 지하수는 카올리나이트 안정 영역에 놓이는 것이 일반적인 현상이다(Garrels and Mackenzie, 1967; Tardy, 1971). 대보화강암 지역 지하수의 K^+/H^+ 활동도비는 다양한 범위를 보이며, 대체로 불국사화강암 지역 지하수의 K^+/H^+ 활동도 비보다는 약간 높다. 전반적으로 보아 화강암 지역의 지하수의 경우 아직도 정상석으로부터 K가 지하수로 빠져 나올 수 있음을 보여 주고 있다. 즉 화강암 지역의 지하수는 정상석과 반응하면서 초기의 깁사이트 형성단계를 지나서 카올리나이트 영역까지 진화하였지만 아직도 화학적인 진화가 충분히 진행되지 않았음을 보여 준다. Figure 5는 $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 계에서 지하수에 용존되어 있는 화학종들과 광물상간의 상평형광계를 보여 주고 있다. 대보화강암의 한 시료는 깁사이트의 안정 영역에 놓인다. 이 시료는 지하수와 사장석과의 반응이 초기단계에 있음을 지시하는 것으로서 물-암석반응이 별로 진행되지 않음을 나타낸다. 마찬가지로

대부분의 화강암지역의 시료는 카올리나이트의 안정영역에 놓이는데 전술한 한 시료를 제외하고는 석영과 포화상태에 도달해 있다. 그리고 Na의 활동도는 낮아서 아직도 사장석으로부터 상당량의 Na가 지하수로 빠져 나올 수 있음을 보여 주고 있다. 즉 화강암지역의 지하수는 사장석과 반응하면서 초기의 깁사이트 형성단계를 지나서 카올리나이트와 평형상태를 이루고 있지만 아직도 진화가 많이 진행되지 않았음을 보여 준다.

이와 같은 결과는 화강암 지역의 지하수가 암석 내에 가장 풍부하게 존재하는 장석류에 대하여 아직도 불포화 상태에 있기 때문에 pH의 증가와 함께 장석류와의 반응이 계속 진행될 수 있음을 의미한다. 한편 실리카의 활동도가 증가하는 동안 알칼리원소의 활동도와 pH는 크게 증가하지 않음을 보인다. 이는 장석류로부터의 용해작용 이외에 석영과 같은 실리카상들의 용해작용에 의하여 규산이 어느 정도 공급되고 있음을 의미한다.

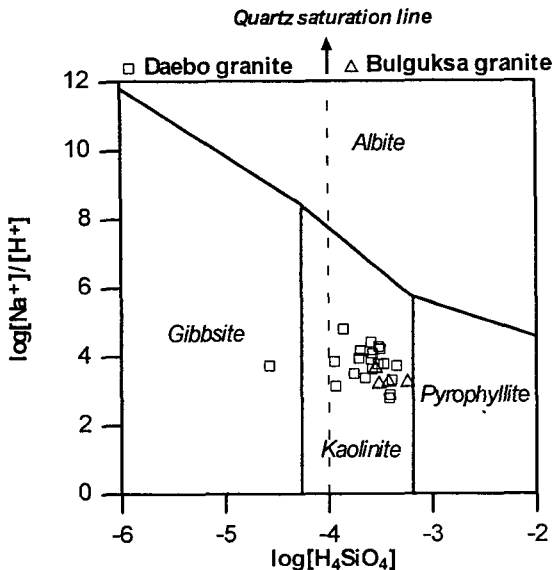


Fig. 5. Phase stability diagram in the system $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ at 298K and 1 bar. Most water samples are located in the kaolinite field. Groundwaters are far from equilibrium with albite.

결론

대보화강암과 불국사화강암 지역에 분포하는 먹는샘물 업체의 원수의 수질특성은 수리화학적으로 유사한 경향을 보이지만 상이한 부분도 있다. pH와 전기전도도, 총용물질, 경도, 양이온과 음이온의 함량은 대보화강암 지역이 불국사화강암 지역보다 높게 나타난다. 양이온 중에서 대부분은 $Ca > Na > Mg > K$ 의 순으로 함량비를 나타내며 음이온 성분의 함량은 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > F^-$ 의 순을 보인다. 화강암절암 지역에서 Ca가 가장 높은 함량을 보이는 경우는 사장석의 용해작용에 기인하여 Ca가 가장 풍부하게 용존되는 현상과 잘 일치한다. 대보화강암 지역에서는 Ca-Na- HCO_3 유형이 가장 우세한데 이는 화강암에 많이 포함되어 있는 사장석류의 용해작용에 기인하기 때문인 것으로 보인다.

실리카 상들을 제외한다면 대부분의 지하수는 방해석의 포화도에 가장 근접한 상태를 보여 주며 돌로마이트, 석고, 형석에 대하여는 불포화정도가 다소 큼을 나타낸다. 실리카의 활동도가 증가하는 동안 K, Na같은 알칼리원소의 활동도와 pH는 크게

증가하지 않았는데 이는 장석류로부터의 용해작용 이외에 석영과 같은 실리카상들의 용해작용에 의하여 규산이 어느 정도 공급되고 있음을 의미한다. 전반적으로 보아 화강암 지역의 지하수가 암석내에 가장 풍부하게 존재하는 장석류에 대하여 아직도 불포화 상태에 있기 때문에 pH의 증가와 함께 장석류와의 반응이 계속 진행될 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 한국자원연구소가 수행한 '먹는샘물 관리시스템 구축연구'의 일부결과임을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- 성익환, 추창오, 조병욱, 이병대, 김통권, 1998, 선캄 브리아기 변성암지역 먹는샘물의 수리화학적 특성, 지하수환경학회지 (인쇄중).
- 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내화강암질암 내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수환경학회지, 4, 199-211.
- Aagaard, P. and Helgeson, H. C., 1982, Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among mineral and aqueous solutions. I. Theoretical considerations, Am. Jour. Sci., 282, 237-285.
- Aja, S. U. and Rosenberg, P. E., 1992, The thermodynamic status of compositionally variable clay minerals: A Discussion Clays Clay Miner, 40, 292-299.
- Banks, D., Reimann, C., Royset, O., Skarphagen, H. and Saether, O. M., 1995, Natural concentrations of major and trace elements in some Norwegian bedrock groundwaters, Appl. Geochem. 10, 1-16.
- Chebotarev, I. I., 1955, Metamorphism of natural waters in the crust of weathering, Geochim. Cosmochim. Acta 8, 22-48.
- Drever, J. I., 1988, The Geochemistry of Natural Waters, Prentice Hall. 437p.
- Edmunds, W. M. and Salvage, D., 1991, Geochemical characteristics of groundwater in granites and related crystalline rocks. In: R. A. Downing and W. B. Wilkinson (editors), Applied Groundwater Hydrology 266-282.
- Essene, E. J. and Peacor, D. R., 1995, Clay mineral thermometry—a critical perspective, Clays Clay Miner. 43, 540-553.
- Essene, E. J. and Peacor, D. R., 1997, Illite and smectite: metastable, stable or unstable? further discussion and a correction, Clays Clay Mineral. 45, 116-122.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, 604p.
- Garrels, R. M. and Mackenzie, F. T., 1967, Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. Equilibrium Concepts in Natural Water Systems, Am. Chem. Soc. Adv. Chem. Ser. 67, 222-242.
- Helgeson, H. C., Delany, J. M., Nesbitt, H. W. and Bird, D. K., 1978, Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals, Am. Jour. Sci., 278-A, 1-229.
- Kraynov, S. P. and Ryzhenko, B. N., 1997, Origin of chloride groundwaters and brines in crystalline massifs: evidence from thermodynamic modeling of geochemical processes in water-granite systems, Geochemistry International, 35, 913-933.
- Lasaga, A. C. 1984, Chemical kinetics of water-rock interactions, J. Geophys. Res. 89, 4009-4025.
- Ransom, B. and Helgeson, H. C., 1993, Compositional endmembers and thermodynamic components of illite and dioctahedral aluminous smectite solid solutions, Clays. Clay Miner. 41, 537-550.
- Rogers, R. J., 1989, Geochemical comparison of ground water in areas of New England, New York, and Pennsylvania, Ground Water, 27, 690-712.

- Tardy, Y., 1971, Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs, *Chem. Geol.* 7, 253-271.
- White, A. F. and Brantley, S. L., 1995, Chemical weathering rates of silicate minerals : An overview. In : A. F. White and S. L. Brantley (editors), *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, *Reviews in Mineralogy*, 31, 1-22.

조병욱, 성익환, 추창오, 이병대, 김통권
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
한국자원연구소 지구환경연구부
Tel : 042-868-3083
e-mail : cbw@rock25t.kigam.re.kr