

대수층 지질 및 온도에 따른 국내 지하수의 지구화학적 특징 - 화강암질암내 지하수와의 비교연구

Geochemical Characteristics of Groundwater in Korea with Different Aquifer Geology and Temperature - Comparative Study with Granitic Groundwater

이종운(Jong-Un Lee)* · 전효택(Hyo-Taek Chon)** · 전용원(Yong-Won John)**

요 약 : 국내 화강암질암내 지하수와의 대수층 지질 및 온도에 따른 지구화학적 특징 차이를 살펴보기 위하여 변성퇴적암류내 지하수와 온천수를 택하였다. 변성퇴적암류를 대수층으로 하는 지하수 내의 Na⁺ 함량은 화강암질암내에 비하여 통계적으로 낮다. 또한 화강암질암내의 지하수와는 달리 변성퇴적암류의 지하수는 심부에서도 방해석의 거동에 의해 지하수의 화학조성이 조절됨으로써 Ca²⁺-HCO₃⁻ 유형에 속한다. 이는 변성퇴적암류의 대수층 암석에 사장석의 함유량이 극히 적은 것에 기인한다. 요인분석 결과, 변성퇴적암류의 100~300 m 심도의 지하수는 1) 방해석 및 Mg-탄산염암의 용해, 2) 백운모의 용해에 의하여 kaolinite가 illite로 전환되는 반응, 3) 지표에서 유입된 형태로 존재하는 Na⁺ 등의 세 가지 요인으로 압축된다. 화강암질암과 변성퇴적암류에 대하여 도출된 판별함수는 약 81.8%의 판별력을 보였으며 이 판별식에 사장석이 주구성광물로 존재하는 화산암질 지하수를 적용한 결과 모두 화강암질암 그룹에 속하였다. 한편 온천수는 상대적으로 심도가 낮음에도 불구하고 화강암질암의 심부지하수와 유사한 화학적 특징을 보임으로써 고온으로 인해 주변 광물과의 반응이 활성화되었음을 나타낸다.

Abstract : Geochemistry of metasedimentary groundwaters and spar waters has been studied in comparison with that of granitic groundwaters in Korea. Metasedimentary groundwaters show Ca²⁺+HCO₃⁻ type at depth and low sodium concentrations compared with granitic groundwaters, which is due to the lack of plagioclase in their aquifer mineralogy and, therefore, the predominant reaction of calcite dissolution. According to factor analysis, metasedimentary groundwaters at 100~300 m depth are represented by 1) the dissolution of calcite and Mg-carbonates, 2) transformation of kaolinite to illite, and 3) the presence of sodium as not the product of plagioclase dissolution but a artificial pollutant. Discriminant function between the granitic and metasedimentary groundwaters shows a good discriminating ability with 81.8%, and groundwaters of volcanic aquifer, which has abundant plagioclase, are included in the granitic group by this function. Spa water samples show the result of active water-rock interaction due to high temperature.

서 론

현재 원자력발전소를 하고 있는 선진 각국은 향후 심각한 문제로 대두될 고준위 방사성폐기물의 영구처분에 지대한 관심을 갖고 연구개발을 시작했거나 계획하고 있으며 2020~2040년 경에는 본격적인 처분이 시작될 것으로 예상된다(이영엽, 1995). 반면 국내의 경우 운전중인 9기 및 추가건설 중인 5기의 원자력발전소에서 발생할 '사용후 핵연료(spent fuel)' 누적량이 2010년에 무려 14,297 MTU에 이를 것(원자력환경관리센터, 1992)으로 전망되는데 반해 아직 고준위 방사성폐기물 처분에

대한 기술개발 방향설정은 전혀 이루어지지 않고 있고 단지 중·저준위 폐기물에 대해서만 처분 프로그램을 수립 중에 있는 등 방사성폐기물 처분에 대한 전반적인 정책 및 기술확립의 측면에서 매우 낙후되어 있는 실정이다.

지질학적 매체를 방사성폐기물의 처분 장소로 채택하는 경우, 핵종 유출의 방벽(barrier)구축 시스템은 크게 공학적 방벽과 지질학적 방벽의 두 부분으로 나뉜다. Canister-overpack-backfill-sleeve로 대표되는 일차 공학적 방벽은 방사성 폐기물로부터의 핵종 유출을 완벽하게 차단하도록 설계되어 있다. 그러나 장기간에 걸친 지질학적 및 물리·화학적 변화에 노출되어 핵종이 공학적 방벽을 돌파하는 경우를 간과할 수 없으며 그러한 경우 이차 지질학적 방벽의 핵종 차단 역할이 기대되어진다.

지하수는 공학적 방벽의 부식 및 핵종 이동의 주요 매개로 작용하는 동시에 지질학적 방벽의 한 구성요소가 되기도 한다. 따

*노틀담대학 토목·지질과학과 박사후 연수과정(Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana 46556-0767, USA)

**서울대학교 자원공학과(Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

라서 안정적인 방사성폐기물 처분을 위해서는 처분 현장에 대한 수리지구화학적 연구가 반드시 필요하게 된다. 또한 처분장 부근의 수리지구화학적 특성은 처분장의 설계, 건설 및 운영과정에서 공정의 효율성을 저해하는 원인을 제공할 수 있다 (Gascoyne *et al.*, 1995).

이 연구는 국내 자연수의 화학분석 결과를 토대로 dataset을 구축한 후 다양한 심도의 국내 지하수의 수리지구화학적 특성을 파악하고 그 원인이 되는 물-암석반응을 규명하려는 이종운 등(1998)의 연구와 동시에 수행된 연구이다. 다만 이종운 등(1998)의 연구는 국내 화강암질암내 지하수를 대상으로 하는 반면, 이 연구는 국내 일부 변성퇴적암류내 지하수 및 온천수를 대상으로 한다는 점에서 차이가 있다. 이 연구의 목적은 현재 방사성폐기물 처분부지 대상으로 우선적으로 고려되고 있는 압중인 화강암질암과 비교하여 대수층의 지질과 온도가 다른 경우 지하수의 화학적 특성에 나타나는 변화의 특징과 그 원인을 밝히려는 것이다.

연구배경 및 방법

지하수는 주변의 암석과 계속 반응하므로 대수층의 지질에 따라 수리지구화학적 특성에 차이가 있을 것이다. 이러한 현상은 석회암이나 염기성암 등 광물·암석학적으로 화강암질암과 큰 차이를 보이는 대수층의 지하수에서 더욱 두드러질 것이다. 지하수에 비해 지질매체와 접하는 시간이 짧은 지표수의 경우도 기반암 종류에 따라 지구화학적 특성이 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(유재영 등, 1994).

이 연구에서는 대수층의 광물학적 특징이 화강암질암과 상이해 쉽게 지하수의 화학적 조성 차이를 유추할 수 있는 석회암 및 염기성암을 배제하고 화강암질암과 조암광물이 유사한 변성퇴적암류 지역을 연구지역으로 선택하였다. 화강암 지역의 지하수와 비교한 석회암 지역내 지하수의 수리지구화학적 특징은 연구된 바가 있으나(전효택 등, 1997), 국내 변성퇴적암류내의 지하수를 대상으로 한 심도있는 지구화학적 연구는 수행된 바가 없다. 이를 위하여 연구지역을 대상으로 지표수 및 지하수를 채수, 분석하여 화강암질암의 지하수와 수리지구화학적 특성 차이가 있는지를 파악하고 그러한 차이의 주요한 원인을 규명하였다.

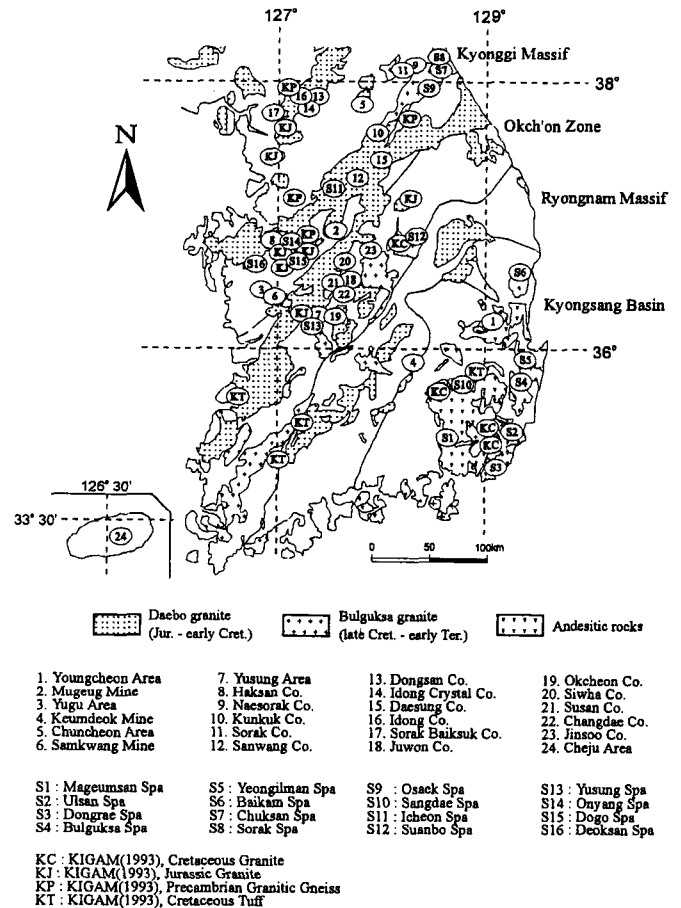
한편 국내 일부 온천수에 대한 지구화학적 자료를 구하여(김도희, 1993; 고용권 등, 1994) '일반적인' 지하수와와의 차이를 규명하였다. 특히 이 구분은 방사성폐기물을 처분한 후 부지 주변의 수리지구화학적 특성을 예측하는데 유용한 것으로 여겨진다. 심부에 방사성폐기물을 처분할 경우 방사능 붕괴열로 인해 주변 지하수의 수온은 상승하게 된다. 결정질암의 경우 수온이 20°C 상승하면 동수구배(hydraulic gradient)가 1% 상승하는 효과를 가져오며 결국 처분장소 상부에서는 지하수가 상향 이동하게 될 것이다(Commission of the European Communities, 1984). 이 연구에서는 온천수가 고온환경에서 주변의 광물과 반응하여 일반 지하수에 비하여 독특한 화학조성을 얻게 되는 지를 살펴보았다.

이 연구의 전체적인 연구방법은 이종운 등(1998)과 동일하다.

시료채취와 화학분석 및 문헌 조사 등을 통해 얻어진 자료 중 electroneutrality가 30%를 초과하거나 NO₃⁻ 함량이 45 mg/l를 초과하는 것은 dataset에서 제외하였다. 변성퇴적암류내 자연수는 대부분 직접 시료채취 및 화학분석을 수행하였으며 시료수는 66개이다. 온천수의 경우 문헌조사에 의하여 자료를 얻었으며 자료수는 22개이다. 변성퇴적암류내 자연수 및 온천수, 그리고 본문 중에 일부 언급된 화산암 지역내 자연수의 채수 및 인용 위치를 Figure 1에 나타내었다. 한편 본문에서 이들과 비교된 화강암질암내 자연수의 자료수는 233개이다.

심도에 따라 지하수를 3개의 그룹으로 구분하였던 화강암질암(이종운 등, 1998)과는 달리 변성퇴적암류 지역에서는 300 m 이상의 심도를 갖는 심부지하수를 거의 채수할 수 없었으므로 각각 지표수, 천부지하수(0~100 m 심도 지하수) 및 중간지하수(100~300 m 심도 지하수)로 구분하였다.

수집된 자료를 대상으로 심도에 따른 용존물질의 함량과 거동특성을 파악하여 화강암질암내 지하수와 지구화학적 차이를 규명하였으며 특히 각종 통계분석 기법을 도입하여 통계적 유의성을 확보하였다. 또한 지질 및 온도에 따라 상호 다른 특성을 보이게 하는 주된 물-암석반응의 원인을 파악하려 하였다. 이러한 연구를 통하여 방사성폐기물 처분장소로서 가장 가능성이 있는 화강암질암내의 지하수에 대한 수리지구화학적 특징을 더욱 확실하게 파악할 수 있을 것이다. 본문 중에서 언급한 화



강암질암 대수층의 수리지구화학적 특징은 다른 인공문헌을 별도로 기재하지 않은 한 모두 이종운 등(1998)을 참조한 것이다.

시료채취 및 분석방법

대수층 암석시료는 박편을 제작하여 편광현미경하에서 조암 광물과 조직을 관찰하였다.

지표수 시료는 연구지역 내 하천 등을 대상으로, 천부지하수 시료는 우물, 관정, 샘 등을 대상으로 하였으며 중간지하수 시료는 시추공을 대상으로 하여, 각 지점에서 폴리에틸렌 시료용기에 2 l 이상 채수하였다. 이온분석용 시료는 수동펌프를 이용, 동일 압력하에서 Micro Filtration Systems 사의 0.45 μm -pore 크기의 tortuous path 방식 cellulose nitrate membrane filter(직경 47 mm)에 통과시켜 부유물질을 제거하였다. 양이온 분석용 시료에는 농질산을 가해 pH를 2 이하로 조절하였으며 시료채수 이후 분석까지 모든 운반 및 저장은 아이스박스과 냉장고를 이용하여 저온상태를 유지하였다. 수소이온농도(이하 pH), 산화환원전위(이하 Eh), 온도, 전기전도도 등 지하수의 물리적 성분은 현장에서 채수 즉시 측정하였다.

각종 기기분석 및 적정법에 의한 각 이온의 정량분석은 이종운 등(1998)과 동일한 기기 및 방법으로 수행되었다. 총용존물질(total dissolved solids : 이하 TDS)의 산출은 증발법에 의한 직접 실험 대신 용존된 각 물질의 합으로 대신하였다.

결과 및 해석

변성퇴적암류 및 화강암질암내 지하수의 용존이온 거동 비교 연구의 대상이 된 변성퇴적암류는 주로 옥천대에 위치하며 흑운모편암, 녹니석편암, 사질천매암 및 규암 등으로 구성되어 있다. 석영, 백운모, 흑운모, 견운모 등이 주·부구성광물로, 녹니석, 방해석, 자철석, 규선석 등이 미량광물로 존재한다. 화강암질암과 광물학적으로 구별되는 가장 큰 차이는 장석류가 극히 결핍되어 있는 점이다.

변성퇴적암류를 대수층으로 하는 지표수 및 각 심도별 지하수의 중요한 물리적 성질 및 용존이온 함량의 기술통계 결과를 Table 1에 수록하였다.

각 심도별로 측정값의 크기 및 함량의 차이가 통계적으로 유의하게 나타나는지 파악하기 위하여 일원변량분산분석을 수행하였다. Table 1의 변수 중 pH, Eh, $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 를 제외한 모든 변수들의 분포는 양의 왜도(skewness)를 보이므로 자료가 정규분포를 형성하게 하기 위해 모두 상용대수값으로 변형시켜 분석에 이용하였다.

분석 결과, 지표수 및 천부지하수에 비하여 중간지하수의 범위에서 값이 가장 크게 나타나는 항목은 pH와 F^- 이며, 지표수보다 높은 값을 보이거나 천부지하수와는 통계적으로 유의한 함량차이를 보이지 않는 항목은 전기전도도, TDS, $\text{SiO}_2(\text{aq})$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Sr 등이다. 한편 비료, 생활하수, 축산폐수 등에서 비롯되어 지표로부터의 오염지표가 되는 K^+ , Cl^- , NO_3^- 등은 천부지하수에서 가장 높은 함량을 보임으로써, 천부지하수가 오염의 영향을 많이 받은 토양층을 통과하여 함

양된 특징을 그대로 지니고 있는 것으로 나타났다. Eh와 CO_3^{2-} 등은 심도별로 크기의 차이를 보이지 않는다.

각 심도별 크기 및 함량의 범위를 300 m 심도까지의 화강암질암에서 나타나는 특징과 비교해 보면(Table 2) 다소간의 차이를 제외하고는 각 항목들이 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 지표수에 비하여 주변의 암석과 장기간에 걸쳐 반응한 지하수에서 용존된 각 물질의 함량이 높게 나타나는 일반적인 경향이 화강암질암뿐만 아니라 변성퇴적암류에도 적용되고 있다.

전체 양이온 총합량에 대한 주성분 양이온인 Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ 비의 평균과 음이온 총합량에 대한 주성분 음이온인 F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , DIC(dissolved inorganic carbon) 비의 평균을 각각 백분율로 나타낸 후(Figure 2) 이를 화강암질암내 지하수의 함량비와 비교하였다.

양이온의 경우, 지표수에서 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 로 존재하는 함량비의 순서가 천부 및 중간지하수의 심도까지 유지되는 경향을 보이며 이는 화강암질암과 동일하다. 이 때 Ca^{2+} 는 60.4%~60.9%의 함량비를 나타내는데 이는 화강암질암의 지표수~중간지하수 심도 범위에서 나타나는 45.6%~52.2%에 비하여 매우 높은 값이다. 반면 Na^+ 는 18.8%~23.5%의 함량비를 보이며 이는 화강암질암에서 나타나는 33.4%~41.1%보다 낮은 값이다. Ca^{2+} 와 Na^+ 에서 나타나는 이러한 변화는 대수층 지질의 차이에 기인한 것으로서, 화강암질암의 경우 사장석이 주요 조암광물로 존재하며 그 용해속도도 상대적으로 빨라 물 속으로 Na^+ 를 공급하는 반면 변성퇴적암류의 경우 사장석의 함량비가 극히 미미하여 Na^+ 의 용탈이 적게 일어나고 방해석의 용해가 주된 반응이 되기 때문이다. Mg^{2+} 는 11.4%~12.5%, K^+ 는 3.2%~9.0%의 함량비를 각각 나타낸다.

음이온의 경우, 지표에서 비롯된 오염물질인 NO_3^- 함량비가 지표수(9.3%)에서보다 천부지하수에서 더욱 높은 값을 보이며(21.1%) 중간지하수에서는 희석되어 3.4%로 급격히 감소한다. NO_3^- 를 제외한 다른 음이온의 함량순은 지표수에서 중간지하수에 이르기까지 $\text{DIC} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 로 나타나며 이러한 경향은 화강암질암과 동일하다. DIC는 48.7%~74.7%의 함량비를 보이고 있고, SO_4^{2-} , Cl^- , F^- 는 각각 13.6%~17.6%, 4.9%~12.1%, 0.3%~0.9%의 범위를 나타낸다.

군집분석을 통하여 특이한 조성을 나타내는 시료를 분리해낸 후 각 심도별로 일반적인 특징을 나타내는 시료를 대상으로 Piper's diagram에 도시한 결과(Figure 3), 지표수에서 천부지하수, 중간지하수, 심부지하수로 이동하며 용존이온의 조성에 변화가 발생함이 관찰되는 화강암질암과는 달리 심도에 관계없이 모두 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 유형에 도시되었다. 따라서 변성퇴적암류 지역의 300 m 심도까지의 지하수는 심부로 이동하더라도 지표수에서 나타나는 지구화학적 유형이 그대로 보존되고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 화강암질암에서 심도에 따라 다른 유형으로 나타나는 주요한 물-암석반응이 변성퇴적암류에서는 나타나지 않는다는 것을 말한다. 화강암질암에서는 천부~중간지하수의 심도 범위까지 방해석의 용해가 주된 반응이며 이 때의 지하수는 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 유형으로 나타나, 방해석이 침전되기 시작하

Table 1. Results of descriptive statistics of physical and chemical analyses for the water samples in the metasedimentary

	Temp. (°C)	pH	Eh (V)	Cond. (μ S/cm)	TDS (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Sr ²⁺ (mg/l)	
Surface water	Mean	9.3	7.46	0.188	103	76	8.98	11.33	1.31	2.05	3.64	0.177	5.16	4.52	6.67	31.74	0.01	0.035
	Median	9.9	7.50	0.228	109	76	8.08	12.01	1.17	2.16	3.05	0.075	4.28	4.00	6.20	30.87	nd	0.028
	Std.dev.	4.8	0.54	0.101	45	29	5.11	5.58	0.82	0.91	2.27	0.318	4.75	4.26	5.73	14.08	0.02	0.030
	Min.	-5.0	5.89	-0.089	30	25	0.28	1.58	0.19	0.51	1.26	nd	nd	nd	0.57	4.88	nd	nd
	Max.	17.9	8.48	0.279	231	154	21.59	31.45	4.24	4.67	12.72	1.677	27.63	15.79	31.29	64.54	0.10	0.113
No. of Samples	37	37	33	37	37	37	37	37	37	37	33	37	37	37	37	37	37	33
0~100 m groundwater	Mean	10.7	6.91	0.123	260	195	13.67	31.83	3.26	4.98	6.29	0.520	9.59	16.73	59.31	48.42	nd	0.093
	Median	12.3	6.65	0.157	158	121	17.63	17.63	1.99	3.29	4.98	0.042	9.16	14.88	6.73	33.67	nd	0.073
	Std.dev.	4.0	0.70	0.129	265	221	40.95	40.95	4.09	5.23	3.48	0.804	4.68	13.94	156.13	27.83	nd	0.075
	Min.	3.4	6.11	-0.078	94	76	7.06	7.06	0.92	1.57	3.19	nd	2.35	nd	1.37	16.84	nd	0.036
	Max.	15.5	8.10	0.257	904	779	138.12	138.12	13.75	18.65	13.74	2.126	17.25	40.88	475.54	98.21	nd	0.028
No. of Samples	9	9	9	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
100~300 m groundwater	Mean	14.2	7.86	0.161	182	140	17.02	20.29	0.99	4.24	7.28	0.660	3.72	2.43	18.75	64.04	0.14	0.128
	Median	14.2	7.96	0.150	171	132	16.10	20.68	0.81	3.34	5.42	0.635	3.24	1.28	9.20	58.93	nd	0.064
	Std.dev.	1.0	0.43	0.129	76	63	7.22	10.00	0.49	3.75	4.61	0.535	2.03	3.07	28.97	29.75	0.62	0.194
	Min.	12.6	6.81	-0.040	86	65	27.76	6.62	2.01	0.20	1.49	0.029	1.77	nd	1.85	25.25	nd	0.012
	Max.	16.5	8.48	0.458	331	306	20	47.93	20	14.93	19.20	1.663	9.69	10.17	134.23	131.01	2.76	0.904
No. of Samples	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

*Temp: Temperature, Cond.: Conductivity, nd: Not determined, Std.dev.: Standard deviation

Table 2. Comparisons of physico-chemical properties and chemical compositions of the water samples with depths in granitic and metasedimentary regions

	Granitic region	Metasedimentary region
Temperature	SW<GW1 and GW2	SW and GW1<GW2
pH	SW and GW1<GW2	GW1<SW<GW2
Eh	No Difference	Same as left
log Cond.	SW<GW1<GW2	SW<GW1 and GW2
log TDS	SW<GW1<GW2	SW<GW1 and GW2
SiO ₂ (aq)	SW<GW1 and GW2	Same as left
log Ca ²⁺	SW<GW1<GW2	SW<GW1 and GW2
log K ⁺	No Difference	SW and GW2<GW1
log Mg ²⁺	SW<GW2	SW<GW1 and GW2
log Na ⁺	SW<GW1 and GW2	Same as left
log F ⁻	SW and GW1<GW2	Same as left
log Cl ⁻	SW and GW2<GW1	Same as left
log NO ₃ ⁻	GW2<SW and GW1	GW2<GW1
log SO ₄ ²⁻	SW<GW2	Same as left
log HCO ₃ ⁻	SW<GW1<GW2	SW<GW2
log CO ₃ ²⁻	No Difference	Same as left
log Sr	SW and GW1<GW2	SW<GW1 and GW2

SW: Surface water, GW1: 0~100 m groundwater, GW2: 100~300 m groundwater, Cond.: Conductivity

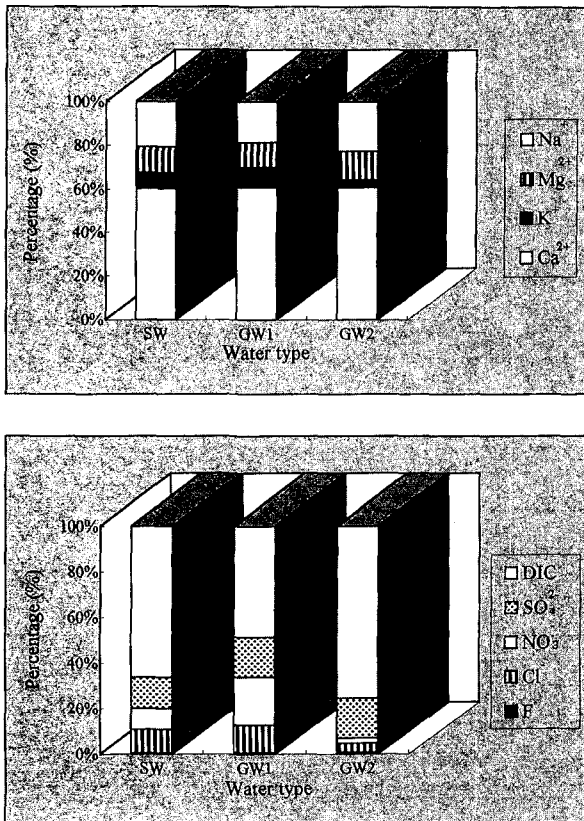


Figure 2. Relative chemical compositions of dissolved ions with depths in the metasedimentary region (unit in mg/l). SW : surface water, GW1: 0~100 m groundwater, GW2: 100~300 m groundwater, DIC: Dissolved inorganic carbon (bicarbonate+carbonate).

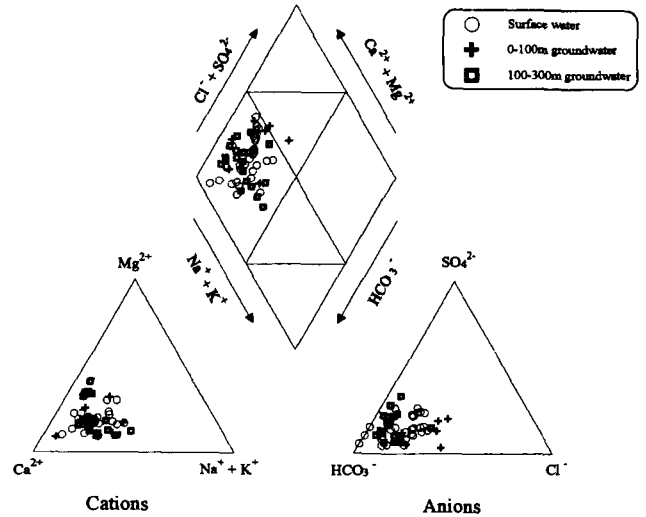


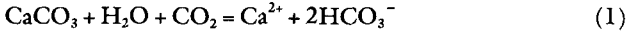
Figure 3. Plot of chemical compositions of the water samples in the metasedimentary region on the Piper's diagram.

는 중간지하수 범위부터는 사장석의 용해가 지하수의 조성을 조절하는 주된 반응으로 작용하여 점차 Na⁺-HCO₃⁻ 유형으로 전환한다. 그러나 변성퇴적암류의 경우, 조암광물의 대부분이 동역학적으로 물과 거의 반응을 하지 않는 석영으로 이루어져 있고 나머지 조암광물도 반응성이 극히 약한 백운모 및 견운모 등으로 이루어져 있기 때문에 전체 암석 중 반응속도가 이들에 비하여 상대적으로 신속한 사장석이 차지하는 비율이 화강암질암에 비하여 매우 적으므로 심부로 이동하며 용탈시킨 Na⁺의 함량은 적을 수밖에 없다. 변성퇴적암류에서 지하수의 화학적 조성에 가장 큰 영향을 미치는 광물은 간혹 박층으로 협재된 석회암층 내에 존재하거나 또는 열극을 충전하고 있는 물질로서 존재하는 방해석일 것으로 판단되며 이러한 방해석의 용해가 중간지하수의 범위까지 화학적 조성을 조절하는 유일한 반응이 될 것이다. 두 암종의 중간지하수에서 나타나는 TDS 함량은 차이가 없지만 TDS를 구성하는 이온에 있어 화강암질암에서는 Na⁺의 비율이 커지고 Ca²⁺는 작아지는 반면 변성퇴적암류에서는 여전히 Ca²⁺의 비율이 월등히 높은 것에서도 이를 확인할 수 있다.

심부지하수의 자료가 없는 관계로 이러한 경향이 심부까지 유지될지는 알 수 없으나, 지질을 구성하는 광물학적 조성의 변화가 없다면 300 m 이하의 심부에서도 Na⁺의 뚜렷한 부하는 나타나지 않을 것이다. 그리고 화강암질암에 비하여 보다 심부에 위치할 것으로 예상되는 방해석 포화 심도를 넘어서게 되면 별도의 공급원이 없는 한 용존 Ca²⁺의 함량도 감소할 것으로 예상된다.

Figure 4를 통해 변성퇴적암류의 지하수에 가장 풍부하게 용존되어 있는 Ca²⁺와 HCO₃⁻의 거동이 방해석의 용해에 의해 조절됨을 확인할 수 있다. 방해석의 포화지수를 TDS에 대해 도시한 결과, TDS가 증가함에 따라 점차 포화평형 상태로 접근해 가는 경향을 보이나 극히 일부의 중간지하수가 포화평형 상태에 있는 것 외에 대부분의 지표수 및 지하수는 방해석에 대해 불포화상태에 있는 것으로 나타났다. 따라서 방해석의 용해는

계속되어 용존 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 의 함량을 증가시킬 것으로 예측되며, 실제로 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 는 TDS가 많아짐에 따라 점차 그 함량이 증가하고 있는 모습을 보여 예측한 것과 잘 부합한다. pH의 경우, 방해석이 용해됨에 따라 중간지하수는 지표수 및 천부지하수에 비하여 높은 pH를 보이며 포화평형선에 근접하면서 거의 일정한 수준을 유지하는 경향을 보인다. TDS에 관계없이 Ca^{2+} 에 대한 HCO_3^- 의 몰비는 약 2의 값을 유지하고 있어 이들의 기원이 방해석의 용해에서 비롯되었음을 나타낸다(Eq.1).



화강암질암과 변성퇴적암류 지역의 중간지하수를 대상으로 물리적 측정 결과 및 주성분 용존이온에 대한 함량을 비교하기 위해서 일원변량분산분석을 수행한 결과, Na^+ 를 제외한 모든 항목이 두 지역에서 전혀 함량 차이를 보이고 있지 않는 것으로 나타났다. 이는 각 물리적 성질 및 용존물질이 두 지역에서 유사하게 거동하고 있는 결과와 부합한다. 또한 이 연구의 변성퇴적암류는 석회암이나 염기성암처럼 그 광물·암석학적 조성이 화강암질암과 확연히 틀린 암종이 아니므로 주성분 용존이온의 함량에 있어 큰 차이를 기대하기 어렵다. 그러나 Na^+ 의 함량은 화강암질암 지역의 지하수에서 변성퇴적암류 지역보다 높은 함량을 보이고 있는 것으로 나타났으며, 이러한 사실은 두 지역의 수리지구화학적 특성 차이의 원인이 변성퇴적암류에서 사장석의 용해 반응이 극히 미약하기 때문이라는 앞서의 관찰 결과를 직접적으로 나타내는 것이어서 특기할 만하다.

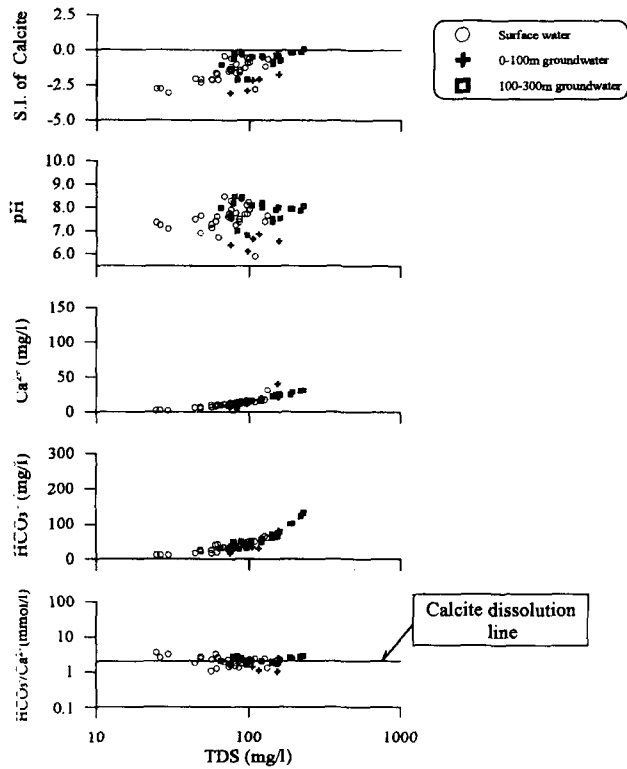


Figure 4. calcium and associated factors plotted against TDS concentrations for the water samples in the metasedimentary region. S.I. means saturation index.

변성퇴적암류 및 화강암질암내 지하수의 통계적 특성

화강암질암 및 변성퇴적암류의 중간지하수(100~300 m 심도)에서 나타나는 특성이 각 대수층 암석의 어떠한 요인에 의하여 영향을 받는 것인지를 알아보기 위하여 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 독립변수는 주성분 및 부성분인 SiO_2 (aq), Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 로 하였으며 이 때 SiO_2 (aq)를 제외한 다른 변수는 정규분포를 이루게 하기 위해 상용대수값을 투입하였다. 요인추출모델은 PCA(principal component analysis) 방식을, 요인수 결정은 1 이상의 아이겐값(eigenvalue)을 택하는 것으로 하였으며 요인의 해석에 중점을 두는 varimax 직각회전방식을 택하였다.

화강암질암의 요인분석 결과(Table 3), 요인 1은 Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} 함량으로, 요인 2는 Na^+ , F^- , SO_4^{2-} 함량으로, 요인 3은 SiO_2 (aq) 함량으로 대표된다.

요인 1을 구성하는 각 이온들은 TDS와의 상관관계가 좋으므로(Table 4) 이는 TDS를 설명하는 요인으로 판단된다. 그러나 요인 1의 각 이온들 간의 상관계수는 모두 높게 나타나는 것은 아니며 따라서 화강암질암에서 요인 1을 구성하는 이온들이 단일한 반응에 의해 조절되지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 요인 1에 가장 높게 적재되는 것으로 나타난 Cl^- 은 요인 3에, HCO_3^- 는 요인 2에도 각각 높게 적재되는 사실과 추출된 3개의 요인을 모두 합하여도 K^+ 는 약 65%, Ca^{2+} 는 약 59% 밖에 설명력이 없는 것으로 나타난 사실을 종합해 볼 때 요인 1을 구성하는 일부 이온들은 2개 이상의 반응을 고려해야 설명이 가능한 것으로 나타났다. 이는 화강암질암의 심부로 갈수록 방해석의 용해 및 침전, 사장석의 용해, kaolinite와 smectite의 형성 및 변화 등의 복잡한 반응이 동시에 지하수의 화학조성을 조절한다는 이중운 등(1998)의 연구 결과를 반영하는 것이라 하겠다. 각 이온들 간의 상관관계 및 communality를 고려하여 볼 때 요인 1은 ① Mg-탄산염 및 운모류의 용해(Mg^{2+} - HCO_3^- - K^+ - Cl^-)와 ② 이에 따른 smectite 및 illite의 형성(Ca^{2+} - K^+)으로 단순화

Table 3. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the groundwater samples from 100~300 m depth in the granitic region

Variable	Factor			Communality
	1	2	3	
log Mg^{2+}	0.876			0.8874
log K^+	0.803			0.6547
log Cl^-	0.769		0.510	0.9073
log HCO_3^-	0.742	0.495		0.8075
log Ca^{2+}	0.711			0.5928
log Na^+		0.840		0.7538
log F^-		0.838		0.7842
log SO_4^{2-}	0.435	0.614		0.6963
SiO_2 (aq)			0.960	0.9420
Eigenvalues	3.68	1.97	1.38	
Percent of variance explained by factor	40.8	21.9	15.3	
Cumulative percent of variance	40.8	62.8	78.1	

Factor loadings less than 0.4 are omitted.

Table 4. Matrix of correlation coefficients among TDS and chemical constituents for the groundwater samples from 100~300 m depth in the granitic region. The data values are expressed as logarithms of each variable except SiO₂ (aq)

	Ca ²⁺	Cl ⁻	F ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	SiO ₂ (aq)	SO ₄ ²⁻	TDS
Ca ²⁺	1.000									
Cl ⁻	0.651	1.000								
F ⁻	0.031	-0.006	1.000							
HCO ₃ ⁻	0.503	0.600	0.124	1.000						
K ⁺	0.355	0.570	-0.172	0.506	1.000					
Mg ²⁺	0.472	0.516	-0.345	0.572	0.673	1.000				
Na ⁺	0.102	0.398	0.527	0.657	0.174	-0.011	1.000			
SiO ₂ (aq)	0.127	0.369	-0.238	-0.198	-0.086	-0.255	-0.060	1.000		
SO ₄ ²⁻	0.589	0.222	0.376	0.576	0.253	0.249	0.416	-0.367	1.000	
TDS	0.675	0.745	0.195	0.910	0.538	0.514	0.701	-0.001	0.672	1.000

될 수 있는 것으로 판단되며 이러한 반응이 화강암질암내 중간 지하수의 TDS를 조절하는 것으로 보인다. 요인 1의 아이젠값은 약 3.68로서 3개의 변수 중 가장 큰 값을 나타내므로 전체 분산을 설명하는데 있어 가장 중요한 요인이다.

요인 2는 사장석의 용해를 의미한다. 한편 Na⁺가 TDS와도 높은 상관계수를 보이므로(0.701) 사장석의 용해반응도 TDS 증가에 크게 기여하는 것으로 판단된다. SO₄²⁻는 요인 2를 구성 하기는 하나 적재량이 작고(0.614) 동시에 요인 1에도 높이 적 재되고 있어 설명하기가 어렵다.

요인 3은 SiO₂(aq)의 거동을 의미하는 것으로써 SiO₂(aq)는 장석 및 운모류의 용해 및 점토류의 형성 등의 반응에 모두 참여하므로 이를 종합하면 다른 어떠한 요인에도 속하지 못하고 별도의 거동을 보이는 것으로 판단된다.

요인 1의 전체자료의 분산설명도는 40.8%, 요인 2는 21.9%, 요인 3은 15.3%로서 이들 3개의 요인으로서 설명되어질 수 있는 전체 분산은 78.1%에 달한다. 3개의 요인에 의해 각 변수의 분산이 설명될 수 있는 정도를 나타내는 communality는 Ca²⁺에서 가장 낮은 0.5928을 보임으로써 추출된 3개의 요인 외에 별도의 반응이 Ca²⁺의 거동을 약 41% 정도 조절하는 것으로 나타났는데 이 반응은 방해석의 용해 및 침전일 확률이 높다. 방해석의 용해 및 침전이 별도의 요인으로 구성되지 않은 이유는 이에 따르는 Ca²⁺와 HCO₃⁻의 거동이 일치하지 않기 때문이다. SiO₂(aq)는 가장 높은 0.9420의 communality를 보임으로써 3개의 요인으로 전체 SiO₂(aq) 거동의 약 94%가 설명될 수 있다.

변성퇴적암류의 요인분석 결과(Table 5), 요인 1은 HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ 함량으로, 요인 2는 SiO₂(aq), K⁺, F⁻ 함량으로, 요인 3은 Na⁺, Cl⁻ 함량으로 대표된다.

요인 1을 구성하는 각 이온들은 TDS와의 상관관계가 좋은 반면 요인 1에 속하지 않는 이온들은 TDS와의 상관계수가 낮으므로(Table 6) TDS의 대부분을 구성하는 주요 이온이 요인 1로 묶인 것으로 판단된다. 또한 요인 1을 구성하는 각 이온 사이에도 높은 상관관계를 보여 이들은 동일한 반응에 의해 조절되는 것으로 나타난다. 요인 1은 방해석 및 Mg-탄산염암의 용해로 설명된다. 이는 변성퇴적암류의 중간지하수에서 나타나는 가장 주된 반응이 방해석의 용해라고 한 앞서의 기술과 일치한다. SO₄²⁻의 거동은 설명하기가 어려우나 Ca²⁺, Mg²⁺ 및 HCO₃⁻와 매우 좋은 상관관계를 보여 이들을 포함하는 반응에 같이 수

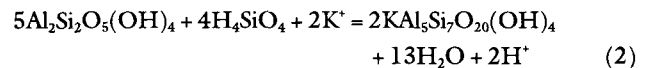
Table 5. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the groundwater samples from 100~300 m depth in the metasedimentary region

Variable	Factor			Communality
	1	2	3	
log HCO ₃ ⁻	0.931			0.9162
log SO ₄ ²⁻	0.922			0.9043
log Ca ²⁺	0.911			0.9585
log Mg ²⁺	0.902			0.9524
SiO ₂ (aq)		0.902		0.9236
log K ⁺		0.851		0.8785
log F ⁻		0.667	0.667	0.8903
log Na ⁺			0.905	0.9281
log Cl ⁻			0.836	0.7476
Eigenvalues	3.70	2.86	1.54	
Percent of variance explained by factor	41.1	31.7	17.1	
Cumulative percent of variance	41.1	72.9	90.0	

Factor loadings less than 0.4 are omitted.

반되고 있다.

요인 2는 kaolinite가 illite로 전환하는 반응을 나타낸다 (Eq.2).



상안정도에 도시한 결과, 대부분의 중간지하수는 kaolinite-illite 반응의 평형경계 주변 또는 illite 안정영역에 도시됨으로써 Eq.2가 가능함을 나타낸다(Figure 5). 이 때 공급되는 K⁺는 변성퇴적암류에서 석영 다음으로 많은 함유량을 보이는 백운모의 용해에 의해 지하수 중으로 용탈되었을 것이다. 한편 요인 2를 구성하는 F⁻는 거의 동일한 적재량으로 요인 3에도 속하는 등 뚜렷한 특성을 나타내지 않고 있다.

요인 3은 지표에서 유입된 물질을 의미하는 것으로 화강암 질암에서는 Na⁺-Cl⁻ 사이의 상관계수가 0.398임에 반하여 변성퇴적암류에서는 0.613으로 상관관계가 좋아 Na⁺가 Cl⁻과 동일한 기원, 예를 들면 NaCl 등의 용해에서 비롯되었음을 나타낸다. 이에 따르면 중간지하수의 범위에서도 Na⁺는 지질학

Table 6. Matrix of correlation coefficients among TDS and chemical constituents for the groundwater samples from 100~300 m depth in the metasedimentary region. The data values are expressed as logarithms of each variable except SiO₂ (aq)

	Ca ²⁺	Cl ⁻	F ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	SiO ₂ (aq)	SO ₄ ²⁻	TDS
Ca ²⁺	1.000									
Cl ⁻	0.245	1.000								
F ⁻	0.411	0.352	1.000							
HCO ₃ ⁻	0.912	0.170	0.153	1.000						
K ⁺	0.434	-0.144	0.405	0.137	1.000					
Mg ²⁺	0.668	0.073	-0.357	0.786	0.127	1.000				
Na ⁺	0.358	0.613	0.798	0.261	0.043	-0.248	1.000			
SiO ₂ (aq)	0.065	0.044	0.694	-0.189	0.635	-0.491	0.538	1.000		
SO ₄ ²⁻	0.849	0.025	0.135	0.801	0.480	0.756	0.150	0.026	1.000	
TDS	0.938	0.362	0.368	0.925	0.316	0.672	0.494	0.095	0.853	1.000

적인 반응에 의하기보다 인위적인 영향에 의하여 거동하는 것으로 나타나며 이는 대수층 지질에 사장석이 결핍된 것에 원인이 있다.

요인 1의 전체자료의 분산설명도는 41.1%, 요인 2는 31.7%, 요인 3은 17.13%로서 이들 3개의 요인으로서 설명되어질 수 있는 전체 분산은 90.0%에 달한다. 이는 화강암질암(78.1%)에 비해 매우 높은 값으로서 변성퇴적암류의 수리지구화학적 특성은 화강암질암에 비해 단순한 수 개의 반응으로 설명이 가능하다. 가장 낮은 communality는 0.7476으로 Cl⁻에서 나타나며 그 외에는 거의 모든 이온이 도출된 3개의 요인만으로 약 90% 이상 설명될 수 있는 것으로 나타났다.

두 지역에 대한 요인분석 결과 나타나는 차이는 화강암질암에 비하여 변성퇴적암류에 사장석이 결핍됨으로 인하여 야기되

는 것이며 이는 이온의 거동이나 일원변량분산분석을 통하여 관찰된 앞서의 결과와 일치하는 것이다.

화강암질암과 변성퇴적암류 지역의 중간지하수를 보다 정량적으로 구분하기 위하여 판별분석(discriminant analysis)을 수행하였다. 판별분석을 통하여 화강암질암과 변성퇴적암류를 각각 대수층으로 하는 중간지하수의 수리지구화학적 차이를 보다 정량적으로 구분하는 판별함수를 도출하고, 판별함수에 크게 작용하는 용존이온을 파악하여 두 암종의 광물학적 차이가 화학 조성에 미치는 영향을 규명하려 하였다.

판별분석에 투입한 변수는 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, F⁻, Cl⁻, HCO₃⁻ 및 SiO₂(aq)이며 이를 설정한 기준은 변수투입 방식으로서 동시 투입방식(direct method)을 택하여 여러 이온의 조합을 투입하여 본 후 이 중에 판별력을 최대로 하는 조합을 택한 것이다. 이 결과 널리 쓰이는 단계별투입방식(stepwise method)에 비하여 약 4% 정도 향상된 판별력을 얻을 수 있었다. 단계별투입방식을 사용하면 유의성이 없는 변수를 제거하여 주는 효과가 있지만 이 연구에서는 보다 높은 판별력을 획득하는 것이 중요하고 또한 투입한 변수들은 일반적인 수리지구화학적 연구에서 필수적으로 분석되어지는 이온들이므로 동시투입방식을 취하였다.

판별분석 결과, 표준화된 판별함수(standardized canonical discriminant function)와 비표준화된 판별함수(unstandardized canonical discriminant function)를 하나씩 도출하였고 이들의 유의수준은 0.0006으로써 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 표준화된 판별함수 Z_{st}는 Eq.3과 같다.

$$Z_{st} = 1.0568 \log F^- + 0.7457 \log Mg^{2+} + 0.8567 \log SiO_2(aq) + 0.4638 \log HCO_3^- - 1.0287 \log Na^+ - 0.4167 \log Ca^{2+} - 0.2965 \log Cl^- \quad (3)$$

표준화된 판별함수에 의하면 투입된 변수 중 두 지역을 구분하는데 있어 중요한 순서는 F⁻, Na⁺, SiO₂(aq), Mg²⁺, HCO₃⁻, Ca²⁺, Cl⁻인 것으로 나타나 F⁻, Na⁺, SiO₂(aq) 등의 물질들이 두 지역을 구분하는데 중요하게 작용하는 것으로 나타났다. 연구 대상인 변성퇴적암류의 경우, F⁻의 기원은 주요 조암광물로 존재하는 흑운모의 용해에 의해 지하수 중으로 용탈된 것으로 판단된다(이준용 등, 1998).

비표준화된 판별함수는 자료의 단위에 관계없이 측정된 값을 직접 대입하여 쉽게 판별점수를 구할 수 있는 식으로서 판별함

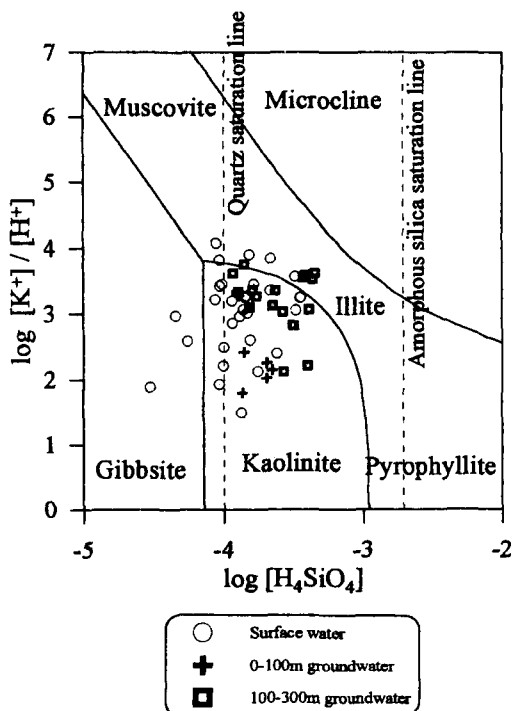


Figure 5. Stability relationships among some minerals in the system K₂O-Al₂O₃-H₂O at 298 K and 1 atm.

Table 7. Results of descriptive statistics of physical and chemical analyses for some spa water samples

	Temp. (°C)	pH	Eh (V)	Cond. (μS/cm)	TDS (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
Mean	38.5	8.32	-0.038	301	284	11.71	1.57	0.67
Median	41.0	8.30	-0.036	288	220	9.76	1.07	0.25
Std.dev.	9.5	0.60	0.016	136	184	10.73	1.81	1.26
Min.	22.4	7.60	-0.061	90	116	0.74	nd	nd
Max.	57.8	9.57	-0.018	550	796	39.68	7.82	4.56
Number of samples	22	22	6	22	22	22	22	22

	Na ⁺ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Sr ²⁺ (mg/l)
Mean	73.15	4.593	61.07	2.16	40.63	87.77	2.57	0.278
Median	52.36	3.720	20.37	1.58	33.70	83.00	2.70	0.123
Std.dev.	57.21	3.225	107.00	2.49	34.26	43.99	1.50	0.299
Min.	25.40	0.700	2.38	nd	6.00	26.00	nd	0.026
Max.	237.71	12.570	333.65	7.96	147.00	202.00	4.30	1.046
Number of samples	22	22	22	22	22	22	6	16

Temp.: Temperature, Cond.: Conductivity, nd: Not determined, Std.dev.: Standard deviation.

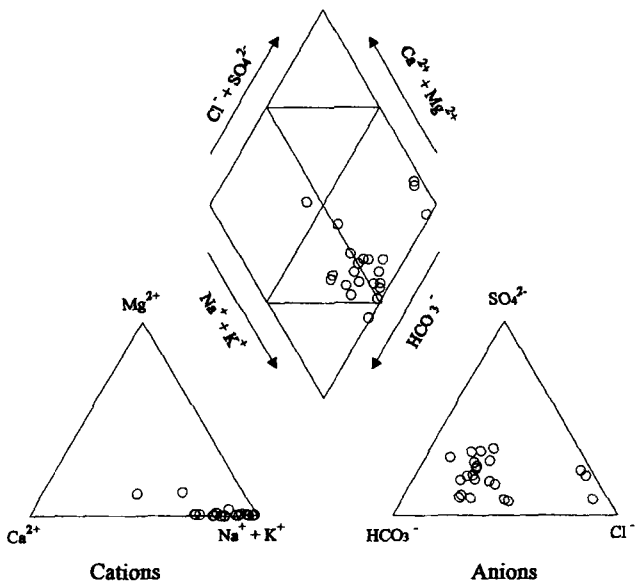


Figure 7. Plot of chemical compositions of some spa water samples on the Piper's diagram.

대한 고려가 있어야 할 것이다.

화강암질암의 일반적인 심부지하수와 온천수의 물리적 특성 및 용존물질 함량 차이를 일원변량분석을 통해 조사한 결과, 두 종류의 지하수에서 통계적으로 유의한 함량 차이가 나는 주성분이온은 Mg²⁺, Na⁺, F⁻, SO₄²⁻, Sr 등인 것으로 밝혀졌다. 화강암질암에서 심부로 갈수록 함량이 증가하는 경향을 보이고 있는 Na⁺, F⁻, SO₄²⁻ 및 Sr 등은 온천수에서 더욱 높은 함량을 보이고 있는 반면, 함량이 감소하는 특징을 보이고 있는 Mg²⁺는 온천수에서 더욱 감소한 함량을 나타낸다(Figure 8).

지표지질상으로는 연구대상인 온천수가 위치하는 암종은 화강암질암 이외에도 매우 다양하며, 그 중에는 사상석이 결핍되어 지하수 중으로의 Na⁺ 공급이 빈약한 암종도 일부 존재한다. 그러나 이러한 경우에도 대부분의 연구 대상 온천지역의 주변에는 화강암체가 존재하며, Na⁺가 매우 부화되어 있는 사실로 볼 때 온천수는 지표지질상에 존재하는 비화강암체 내에서만

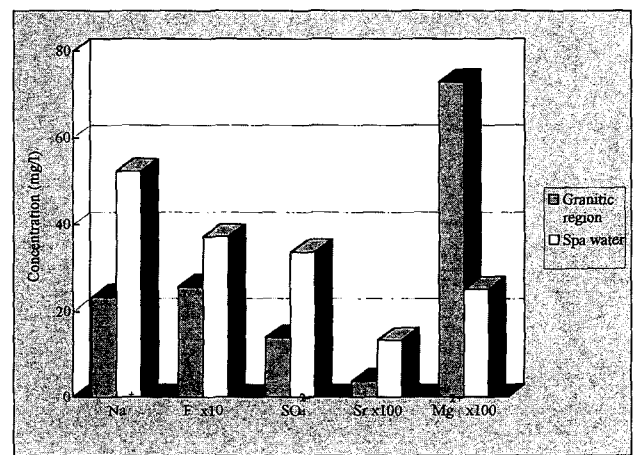


Figure 8. Median concentrations of some dissolved ions for the groundwaters from depth deeper than 300 m in the granitic region and some spa waters.

이동한 것이 아니고 보다 심부의 화강암체를 통과한 물이거나 또는 그러한 물이 혼입되는 등의 영향을 받았음을 알 수 있다. Na⁺의 부화 외에도 국내 일부 온천수에서 나타나는 지구화학적 인 특징은 영국과 프랑스에서 Hot Dry Rock에 인위적으로 물을 주입시킨 후 물-화강암 반응을 거쳐 배출된 열수를 화학분석한 결과와도 대부분 일치한다(Richards *et al.*, 1992; Pauwels *et al.*, 1992). 국내 온천수의 열원은 Hot Dry Rock으로 존재하는 화강암체이거나 단순히 지온 증가에 의한 것일 수도 있으나, 어느 경우이건 이러한 열원은 부근 지하수에 고온을 제공함으로써 일반적인 온도 범위를 갖는 주변 지하수와 동수구배의 차이를 야기시킴으로 대수층에서의 지하수 이동을 더욱 활발하게 하였을 것이다.

온도가 상승함에 따라 화강암질암의 심부로 갈수록 부화되는 비율보다 더 큰 폭으로 증가하는 일부 이온의 거동은 방사성폐기물 처분장의 설계시에 감안되어야 할 것으로 생각된다. 특히 SO₄²⁻의 경우, 황환원세균에 의하여 전자수용체로 이용되어 혐기조건 하에서는 미생물의 번식을 촉진시킬 수 있으며 미생물

의 대사에 의하여 발생하는 H_2S 는 폐기물을 보관하는 canister의 부식을 촉진할 수 있다.

결 론

변성퇴적암류의 중간지하수는 Na^+ 함량이 결핍되고 지표수 및 천부지하수와 동일한 $Ca^{2+}-HCO_3^-$ 유형에 위치하는 점에서 화강암질암과 구별된다. 이는 두 대수층의 지질학적인 특성에 의한 것으로 변성퇴적암류의 구성광물에는 Na^+ 를 다량 공급할 수 있는 사장석이 결핍되어 있기 때문이다. 따라서 심도가 증가하여도 변성퇴적암류의 지하수 조성은 방해석의 거동이 조절한다. 요인분석 결과, 변성퇴적암류의 중간지하수는 ① 방해석 및 Mg-탄산염암의 용해, ② 백운모의 용해에 의하여 kaolinite가 illite로 전환되는 반응, ③ 지표에서 유입된 물질의 존재라는 세 가지 요인으로 압축된다. 화강암질암과 변성퇴적암류에 대한 판별함수 결과, $Z_{\text{max}} = 1.0918 \log F^- + 1.5120 \log Mg^{2+} + 0.1523 \log SiO_2(aq) - 0.8888 \log HCO_3^- - 3.1341 \log Na^+ - 1.3482 \log Ca^{2+} - 0.9657 \log Cl^- - 0.4851$ 의 비표준화된 판별함수를 도출하였으며 판별력은 약 81.8%를 보였다. 이 판별식에 사장석이 주구성광물로 존재하는 화산암류 지역의 자연수를 대입한 결과 모두 화강암질암 그룹에 속함으로써 두 지역 지하수의 구분 기준은 사장석의 포함 여부에 의한 것임을 확인하였다.

한편 이 연구에서 설정한 중간지하수의 심도범위에 해당하는 온천수는 화강암질암의 심부지하수와 동일한 화학적 유형을 보여 고온으로 인해 주변 광물과의 반응이 활성화되었음을 나타낸다. 또한 화강암질암의 심부지하수에 부화된 Na^+ , F^- , SO_4^{2-} , Sr 함량은 화강암질암내 심부지하수에 비하여 더욱 부화되어 있고, 반대로 화강암질암 심부지하수에 결핍된 Mg^{2+} 함량은 더욱 결핍되어 있는 특징을 보인다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 94-0703-06-01-3)의 일부로서 연구비를 지원하여 준 재단측에 감사하며 화학분석에 협조하여준 한국과학재단 지정 전략광물자원연구센터에 감사드립니다.

참고문헌

- 고용권, 윤성택, 안종성, 1994, 국내 지열수의 환경동위원소 및 수 문화학적 연구 : 유성온천 지역, 한국자원공학회지, 31, p. 388-399.
- 김규한, 1991, 동위원소지질학, 민음사, 서울, 552p.
- 김도희, 1993, 우리나라 주요 온천의 수질특성과 유형분류에 관한 연구, 건국대학교 교육대학원 석사학위논문, 61p.
- 원자력환경관리센터, 1992, 방사성폐기물 관리사업 종합보고서 (1986-1991), KAERI-NEMAC/GP-1/92, 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터, 315p.
- 유재영, 최인규, 김형수, 1994, 춘천 지역의 기반암 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성, 지질학회지, 30, p. 307-324.
- 이영엽, 1995, 고준위 방사성폐기물 처분 기술개발 현황, 자원환경지질, 28, p. 279-286.
- 이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천도수터널 주변 지하수의 수리지구화학, 한국자원공학회지, 33, p. 211-225.
- 이종운, 전효택, 전용원, 1998, 국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수환경, (심사중).
- 전효택, 이희근, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1997, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(2) - 수리지구화학적 고찰, 지하수환경, 4, p. 27-40.
- 한국자원연구소, 1993, 지질환경에서 유해원소들의 지구화학적 분산 연구(I), KR-93(T)-10, 과학기술처, 464p.
- Commission of the European Communities, 1984, Geological disposal of radioactive waste, OECD/NEA, Paris, 116p.
- Gascoyne, M., Stroes-Gascoyne, S. and Sargent, F. P., 1995, Geochemical influences on the design, construction and operation of a nuclear waste vault, Applied Geochem., 10, p. 657-671.
- Pauwels, H., Fouillac, C. and Criaud, A., 1992, Water-rock interactions during experiments within the geothermal Hot Dry Rock borehole GPK1, Soultz-sous-For ts, Alsace, France, Applied Geochem., 7, p. 243-255.
- Richards, H. G., Savage, D. and Andrews, J. N. 1992, Granite-water reactions in an experimental Hot Dry Rock geothermal reservoir, Rosemanowes test site, Cornwall, U.K., Applied Geochem., 7, p. 193-222.