자원환경지질, 제34권, 제3호, 255-269, 2001
Econ. Environ. Geol., 34(3), 255-269, 2001

여수 북동부 화산암 지역 시추공 지하수의 지화학 특성

고용권* · 김경수 · 배대석 · 김천수 · 한경원
한국원자력연구소

Geochemistry of the Borehole Groundwater from Volcanic Rocks in the Northeastern Part of Yeosu Area

Yong Kwon Koh*, Kyeong Su Kim, Dae Seok Bae, Chun Soo Kim and Kyeong Won Han
Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 105, Yusung, Taejon 305-600, Korea

The geochemical studies on groundwater in the borehole, which is straddled by multi-packer (MP) system, were carried out from a volcanic terrain in the Yeosu area. The pH of groundwater collected from selected sections in the MP-installed borehole is much higher (up to 9.6) than that of the borehole groundwater (7.0~7.9) collected using conventional pumping technique. Hydrochemistry shows that the groundwater has a typical chemical change with increasing sampling depth, suggesting that the groundwater is evolved through water-rock interaction along the fracture-controlled flow paths. The groundwater from the deeper part (138~175 m below the surface) in borehole K1 is characterized by the Ca-Cl_2 type with high Ca (up to 160 mg/L) and Cl (up to 293 mg/L) contents, probably reflecting seawater intrusion. The groundwater also has high sodium and sulfate contents compared to the waters from other boreholes. These observed groundwater chemistry is explained by the cation exchange, sulfide oxidation, and mixing process with seawater along the flow path.

Key words: borehole groundwater, multi-packer, geochemistry, seawater mixing, water-rock interaction

여수 북동부 화산암지역에서 다중패커 시스템(Multi-packer system)을 이용하여 구간별로 시료 채취를 수행하고, 시추공 지하수에 대한 지화학 특성 연구를 수행하였다. MP system에 의해 구간별로 격리된 지하수의 pH(up to 9.6)는 기존 시료채취방법에 의해 측정된 pH(7.0~7.9) 보다도 매우 높은 값을 보여준다. 시추공 지하수의 수리화학자료는 구간별로 특징적인 화학조성을 나타낸다. 이는 지하수의 지화학적 특성이 단열체계특성에 의해 지배를 받는 지하수 유동로를 따라 진행되는 물-암석 반응에 의해 진화되었음을 지시한다. 특징적으로 시추공 K1 하부구간(심도 138~175 m)의 지하수는 높은 Ca 함량(up to 160 mg/L)과 Cl 함량(up to 293 mg/L)을 보이는 Ca-Cl_2 유형을 보여주며, Na 함량(up to 67 mg/L)과 SO_4 함량(105 mg/L) 역시 기타 구간에 비해 높은 값을 보여준다. 이러한 지하수의 지화학적 특성은 해수혼합, 양이온교환반응 및 황철석의 산화반응 등에 의해 진화된 것으로 해석할 수 있다.

주요어 : 시추공지하수, 다중패커, 지화학, 해수혼합, 물-암석반응

1. 서 론

강수는 토양층을 거쳐 지하수를 형성하게 되고 지하수는 유동로를 따라 유동하는 과정에서 주변매질과 반응하면서 다양한 화학조성을 갖게된다. 이러한 화학조성은 지하수의 체류시간, 유동속도, 지하매질의 조성 등에 의해 결정되게 된다. 즉, 지하수의 화학적 특성은 지하수의 유동체계에서 나타나는 화학적 결과물이라 할 수 있다. 국내에서는 이러한 지하수 유동 및 수문체계에 대한 이해를 높이고자 다수의 수리지질 관련 및 지화학적 연구가 수행되어 왔고(정찬호 등, 1995; Koh *et al*., 1998; 윤성택 등, 1998; 고용권 등, 1999), 이에 따라 국내 지하수체계에 대한 이해가 꾸준히 높아지고 있다. 그러나 지하수의 지화학적 특성을 이해하

*Corresponding author: nykkoh@kaeri.re.kr

기 위하여 그동안 수행된 국내 연구결과들은 대부분 기존 사용중인 시추공 지하수 또는 터널내 유출수를 대상으로 이루어 왔다(윤성택 등, 1998; Koh *et al*., 1998). 시추공 지하수의 시료채취는 대부분 사용중인 지하수공에서 이루어졌으며, 연구용 시추공이라 하더라도 나공(Open borehole)상태에서 시료채취가 이루어졌기 때문에(정찬호 등, 1995), 동일 시추공에서 심도에 따른 지하수의 지화학적 특성을 명확히 밝히기 어려웠다. 또한 터널 유출수의 경우는 굴착으로 인하여 유동경사를 크게 유발시키게 되어, 지하수의 유속 및 유량이 급속하게 증가하게 됨으로서, 터널내 유출수의 시료채취는 심도에 상응하는 자연상태의 지하수를 대표하는데 제한적일 수 있다.

결정질 암반에서는 단열대가 지하수의 주요 유동로 역할을 하게 되므로, 결국 지하수의 화학조성을 결정짓는 물-암석 반응은 단열대에서 진행되게 된다. 동일한 매질이라 하더라도 단열대를 따라 유동하는 지하수의 유속 및 체류시간의 차이에 의하여 심도와는 무관하게 지하수는 다양한 화학조성을 가질 수도 있다. 이러한 암반지하수의 지화학 연구를 위해서는 자연조건에서 심도에 따라 격리된 상태에서 지하수의 시료채취가 이루어져야 한다. 이러한 지하수 시료채취를 충족시키기 위해서는 시추공에서 특정구간에 대하여 패커 시스템(Parker system)을 이용하여야 하며, 심도별로 채취하기 위해서는 다중패커 시스템(Multi-packer system)을 적용하여야 한다. 그러나 Multi-packer system은 고가의 장비로서 그간 국내 지질환경의 지하수 특성연구에 적용하는데 어려움이 있었다. 국외의 경우 방사성폐기물 처분연구와 관련하여 지하수의 지화학 특성이 방사성핵종의 거동특성에 중요한 역할을 하게 되므로, 심부지질 환경에서 지하수의 유동로에 따른 지화학 특성조사를 위하여 Multi-packer system이 적용되고 있으며(Wikberg *et al*., 1987; Hartten and Genau, 1995), 최근에는 환경오염 등과 관련된 지하수 수질연구 및 터널링에 의한 지하수 유동 체계변화 모니터링연구 등에서 MP system이 확대적용되고 있다(Landin and Lauctes, 1995; Li *et al*., 1997).

본 논문에서는 최근 방사성폐기물처분연구의 일환으로 국내 심부지질환경에서 지하수의 지화학적 특성을 밝히고자 한국원자력연구소에서 도입된 MP system을 이용한 지하수의 시료채취방법을 소개하고 지하수의 심도별 지화학 특성을 제시하고자 하였다. 적용지역은 전남 여수반도의 북동부지역으로서 본지역 지하수의 유동특성연구와 관련하여 지표 단열체계 및 연구시추공에 대한 단열특성과 수리특성이 비교적 세밀하게 연구된 바 있다(김경수 등, 1999; 조성일 등, 1999).

2. 지질, 지질구조 및 수리지질

연구지역은 여수반도의 북측 해안에 위치하며 전남 여수시 낙포동 일대에 해당된다. 이 지역의 서쪽은 제석산(EL. 338 m)을 중심으로 독립된 산체를 이루고 있으며, 동측 사면은 완만한 경사를 이루고 있고, 남쪽은 오천동 고지(EL. 340 m)를 정점으로 동서방향의 산계가 발달한다(Fig. 1). 연구 지역의 지질은 크게 중생대 백악기의 유천층군 화산암류와 이를 관입한 알칼리 장석 화강암으로 구분할 수 있으며, 특히 시추조사 지점의 주변은 유천층군 화산암류에 해당하는 용결 라필리 응회암으로 구성되어 있다(조성일 등, 1999) (Fig. 1). 유천층군의 화산암류는 층서상 응방산층, 신성리층, 봉화산 용결응회암, 월래리 안산암 순으로 구성되며, 각 층간 관계는 정합적으로 놓인다. 북측 일부에 분포하는 화산쇄설성 퇴적암인 신성리층을 제외한 화산암류는 암석의 구성광물과 이에 포함되어 있는 암편의 크기와 종류가 다양하게 변화하고 있어 그 경계가 명확하지 않다. 야외 관찰에 의한 분류는 유문암질 응회암과 안산암질 응회암, 그리고 안산암으로 구별될 수 있으며, 이들에 포함되어 있는 암편들의 형태, 크기, 분급도 등에 따라 세분될 수 있다.

응방산층은 여수지역에 분포하는 화산암류의 최고기 지층으로 연구지역 동측의 해변가와 화강암과 라필리 응회암 경계부에 형성된 저지대에 분포하며, 암회색의 치밀 견고한 괴상 안산암과 렌즈상으로 분포하는 화산각력암을 포함한다. 괴상안산암에는 간혹 장석반정이 포함되기도 하며 석기는 주로 사장석으로 구성되어 있다. 이들은 녹염석화 작용을 받아 녹염석, 녹니석 등의 변질광물이 많이 관찰된다(장기홍 등, 1989).

봉화산 용결 응회암은 제석산과 오천동 고지를 중심으로 분포하며 응방산층 화산각력암 상위에 놓이며, 용결구조를 보이는 것이 특징적이고 유상구조(flow structure)가 나타나기도 한다. 기질은 유문암질에서 안산암질로, 하부는 암회색 안산암질 라필리 응회암으로 구성되나 점이적으로 변화한다. 구성광물은 사장석, 정장석, 석영 등이며 장석의 일부는 점토광물과 견운모화 되어 있다.

월래리 안산암은 오천동 고지를 중심으로 소규모 분포하며, 특히 유상구조가 발달되어 있다. 반정은 안데신 성분의 사장석으로 구성되며 석기는 유리질과 미립

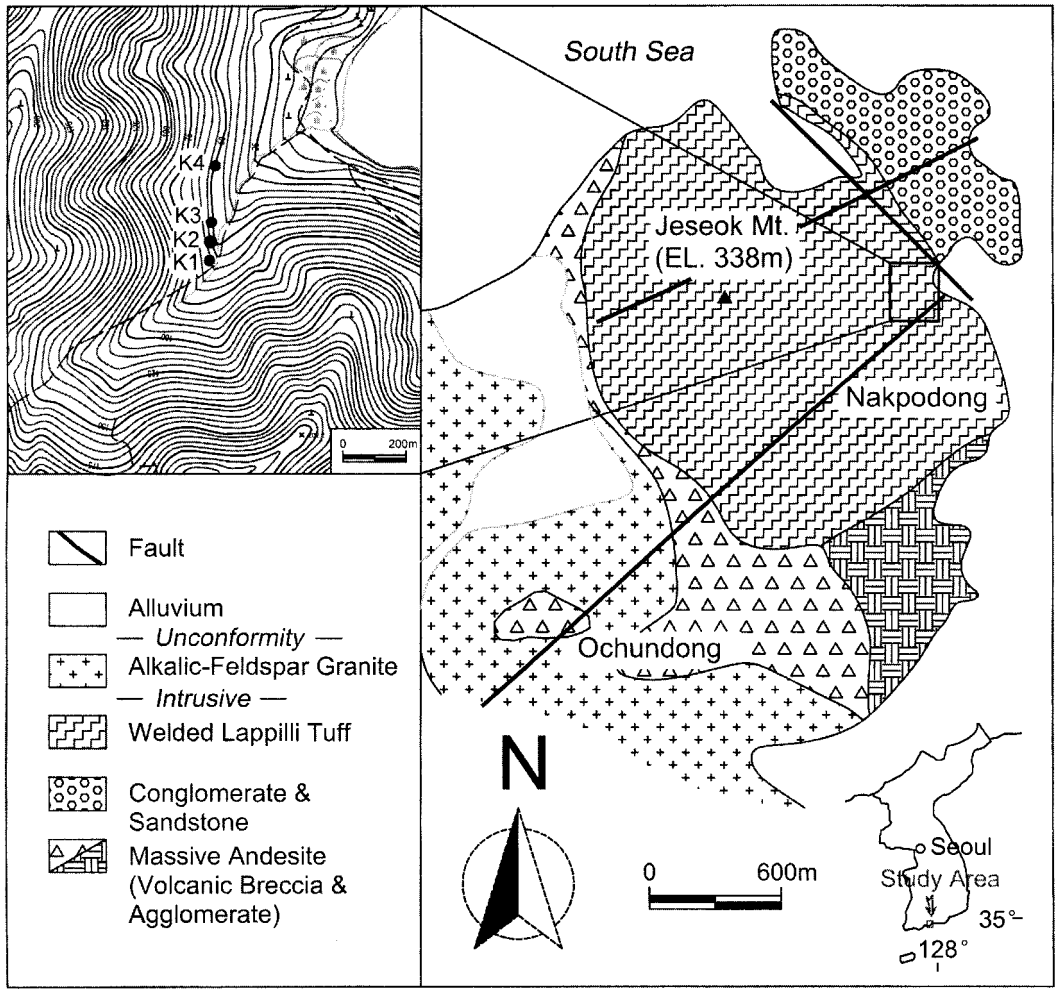

Fig. 1. Geologic map of the study area. Location of boreholes and sampling points are also shown.

내지 세립의 사장석으로 구성되어 있다. 이밖에 녹염석과 황철석이 석기의 전반에 산재해 있다. 알칼리 장석 화강암은 대상으로 분포하며 연구지역 중심을 가로지른다. 이 화강암은 소위 마산암으로 불리우는 암석으로 유천층군 화산암을 관입하고 있으며 비교적 관입암체 상부에서 냉각된 것으로 보인다(장기홍 등, 1989). 사장석은 알바이트 성분을 가지며 정장석과 석영으로 이루어진 미문상 석리가 발달하여 있다.

연구지역을 포함하는 광역적인 단열 분포특성과 부지규모 분포특성은 항공사진과 전산음영기복도를 이용하여 분석된 바 있다(김경수 등, 1999). 이에 따르면 연구지역의 단열체계는 규모에 따라 4개의 등급으로 나누어 해석하였으며, 선상구조는 동서와 북동계열 방향이 우세한 것으로 나타났다(Fig. 1). 동일 시추공에서 회수된 시추코아에 대한 Core logging과 텔레뷰어(Borehole Televiewer)를 이용한 시추공 검층을 통한 단열특성은 단열개폐에 따라 3가지 유형(open, semi-open, close)으로 구분하였고, 방향성을 기준으로 단열을 3 set로 분류한 바 있다. 또한 이들 단열특성과 수리전도도와의 상관관계를 제시한 바 있다(조성일 등, 1999).

3. 시료채취 및 분석방법

3.1. 시추공

연구지역의 시추공은 여수반도 북동부 해안의 제석산 동측사면에 위치하며, 시추공은 남북방향으로 4개소에 시추되었다(Fig. 1). 연구지역의 시추는 1998년

11월에 이루어졌으며, MP system은 1999년 6월에 설치되었다. 각 시추공(K1, K2, K3, K4)의 해발고도는 각각 61 m, 59 m, 57 m, 50 m E.L.이며, 각 시추공간의 직선거리는 각각 10 m(K1-K2), 25 m(K2-K3), 180 m (K3-K4)이다. K1공의 굴진심도는 194.9 m이며, K2공은 69.1 m까지 굴진하였다. K3와 K4공은 각각 50.1 m와 90.1 m까지 굴진하였으며, K4공은 10 W의 경사로 시추하였다(조성일 등, 1999). K1공에는 6개의 패커(40 m, 26 m, -3 m, -17 m, -77 m, -115 m E.L.)가 설치되어 7개구간에서 시료채취가 가능하였고, K2공에는 4개의 패커(36 m, 29 m, 14 m, 4 m E.L.)가 설치되어 5개의 시료채취가 수행되었다(Fig. 2). K3공과 K4공은 나공상태에서 시료채취를 하였다. 이후 설명을 용이하게 하기 위하여 측정구간을 상부로부터 하부까지 K1공의 경우 K1-1~K1-7으로 구분하였으며, K2공은 K2-1~K2-5으로 명명하였다(Fig. 2). 각 시추공에 패커를 설치전에 텔레뷰어 검층으로 단열특성이 확인된 바 있으며, 텔레뷰어 검층에 의한 K1공과 K2공의 단열분포와 개폐상태(Open and Close Fractures)를 Fig. 2에 함께 도시하였다(조성일, 1999). 이 밖에 K1공과 K2공 상부구간에 투수성 단열(Conductive Fractures)은 현장수리시험에 의해 확인된 바 있다(김

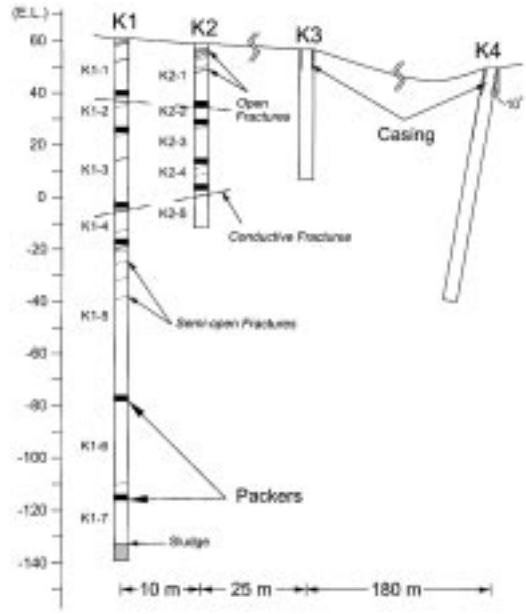

Fig. 2. Schematic diagram of boreholes in the Yeosu area. The depth of packers and fractures investgated (Kim *et al.*, unpublished data) are also shown.

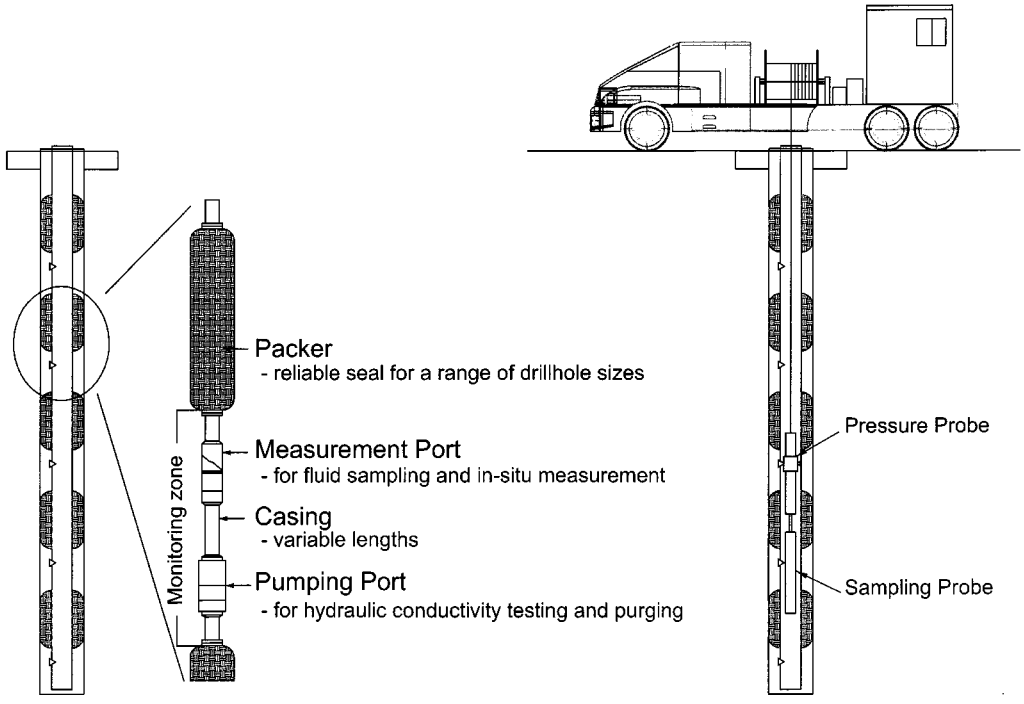

Fig. 3. Multi-packer system (Westbay, Ltd., Canada) showing sampling procedure.

경수 등, 미발표자료).

3.2. Multi-packer System

MP system은 크게 패커부분과 계측부분으로 나눌 수 있다(Fig. 3). 패커부분은 패커, 측정포트(Measuring Port), 케이싱 및 양수포트(Pumping port)로 구성되며, 계측부분은 공내측정기와 시료채취기로 나눌 수 있다(Fig. 3). 패커의 재질은 수명이 50년이상인 폴리우레탄이며, 각 패커는 설치심도에서 수압에 의해 개별적으로 내부압력을 조절함으로써 공벽에 밀착시킨다. 측정포트는 관측구간에서 공내측정기가 MP system 케이싱의 내부와 외부를 연결시켜주는 역할을 한다. 케이싱은 내경이 55 mm인 PVC로 구성되며, 관측구간에 따라 연결길이를 자유로이 조절할 수 있다. MP system 설치완료 후, 공내측정 및 시료채취시 공내측정기가 심도를 확인할 수 있도록 자석고리(Magnetic collar)를 설치하였다. 양수포트는 다량의 지하수위 상승 혹은 강하를 유도하여 간단한 수리시험을 할 수 있을 뿐만 아니라 다량의 지하수 시료채취 등 다양한 용도로 사용이 가능하다(http://www.westbay.com).

시료채취는 공내측정기와 시료채취기를 이용하여 관측구간에 설치된 측정포트에서 이루어진다. 공내측정기는 관측심도에서 지하수의 압력 및 온도 측정이 가능하도록 설치된 측정포트와 연결할 수 있도록 설계되어 있다. 측정기 하부로는 시료채취기를 연결할 수 있으며, 부착된 개폐밸브를 이용하여 관측구간의 지하수가 시료채취기로 유입하도록 고안되어 있다. 시료채취기는 지표에서 진공펌프를 이용하여 시료채취기 내부를 진공처리한 후 현장측정기와 함께 관측구간으로 이동되며, 시료채취기 1개당 채취가능한 양은 200 mL이고, 여러 개의 시료채취기를 연결하여 연구목적에 맞는 충분한 양의 지하수를 채취할 수 있다.

3.3. 시료채취, 현장측정 및 분석방법

현장측정과 시료채취는 1999년 8월에서 2000년 5월 사이에 K1공은 3회, K2공은 2회 수행되었고, K3공과 K4공의 경우는 각 3회와 2회의 시료채취가 수행되었다. 또한, 주변지표수와 인근 해수도 각 1회 시료채취가 이루어졌다. K1공과 K2공의 시료채취는 MP system을 이용하여 심도별로 이루어졌으며, 시료채취기의 용량이 200 mL이기 때문에 시료채취기를 10개를 연결하여 일회에 시료 2L를 채취하였다. 나공상태인 K3공과 K4공의 지하수는 Kemmerer Well Sampler(Model No. 1280, Wildlife Supply Company, USA)를 이용하여 시료를 채취하였다. MP system으로부터 각 시료채취 심도에서 지하수의 온도를 측정할 수 있어, K1공과 K2공의 온도는 이를 사용하였으며, 그 외 지하수의 온도는 시료채취 후 지표에서 곧바로 측정한 자료를 이용하였다.

채취된 물시료는 화학분석을 위하여 간이 진공펌프를 이용하여 셀룰로스 질산염 막필터(0.45 μm)를 통과시켜 부유물질을 제거하였다. 양이온 분석용 시료에 대해서는 유기작용과 금속 이온들의 침전 및 용기내 흡착을 막기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2이하로 유지하였으며, 실내분석을 위해 폴리에틸렌 용기에 담아 냉장 보관하여 실험실로 옮겨졌다. 온도, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC) 등 물리화학적 특성자료는 채수시 현장에서 Orion사의 pH probe(9107WP), Conductivity cell(013010)의 전극이 장착된 Multi parameter meter(Orion 1230)로 현장에서 보정한 후 채수와 동시에 측정하였으며, 알칼리도(alkalinity) 역시 현장에서 신속하게 산중화 적정법으로 측정하였다.

모든 시료의 주원소 및 미량원소 함량은 기초과학지원연구원에서 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, Shimadzu ICPS-11000 Ⅲ)와 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, FISONS PlasmaTrace)로 분석하였고, 음이온 함량은 한국원자력연구소에서 이온 크로마토그래피(IC, Dyonex 500)를 이용하여 분석하였다. 오차범위는 상대오차 ±5%이다. 자연수 시료 및 광물의 열역학적 계산은 SOLVEQ 컴퓨터 프로그램(Reed, 1982)의 코드를 이용하여 계산하였다.

4. 지화학특성

4.1. 현장측정자료

연구지역 심도별 시추공지하수, 지표수 및 해수에 대한 현장조사 자료는 Table 1에 정리되어 있다. 시추공지하수는 13.5~21.8℃ 온도범위를 보이며 시료채취시기에 따라 큰 차이를 보이지 않고, 심도가 깊어짐에 따라 온도가 증가하는 경향을 보인다(Table 1). K1공 시추공지하수는 12.9~21.5℃의 온도범위를 보이며, 1998년 6월에 MP system을 설치한 후, 처음으로 측정한 온도(1999년 8월)를 제외하면 심도 40 m 이하(K1-3구간)에서는 일정한 값을 보인다(Table 1, Fig. 4). 2000년 3월과 2000년 5월에 측정한 평균온도로부터 심도에 따른 지열구배는 0.25℃/10 m를 나타낸다(Fig. 4).

Table 1. Geochemical data of borehole groundwater, surface water and sea water from the Yeosu area.

Sample no.	Water type	Sampling date	Depth (m)	Temp. (°C)	pH	EC (μS/cm)	TDS (mg/L)	Alkalinity[a] (x10^3)	(mg/L) Na	K	Mg	Ca	SiO_2	Cl	SO_4	HCO_3[b]	CO_3[b]	NO_3	F	Al	Log Pco_2[b] (atm)
K1-1	Groundwater	99.8.19	17.5	21.5	7.9	149	151	0.84	12.9	0.72	1.40	17.1	27.2	13.6	7.7	50.1		8.9	0.8	0.007	-3.20
K1-2	(Borehole K1)	"	f0.5	20.5	8.5	168	161	0.87	20.9	0.89	0.85	13.9	19.3	12.4	14.2	50.6	0.8	1.2	1.0	0.024	-3.81
K1-3		"	40.0	20.0	8.8	125	122	0.70	19.5	0.48	0.25	7.2	17.5	10.4	6.3	39.6	1.2	2.9	2.5	0.062	-4.22
K1-4		"	74.0	18.7	8.2	150	138	1.05	18.3	0.91	0.75	12.7	20.0	11.7	8.4	51.3		<0.05	0.9	0.043	-3.51
K1-5		"	85.0	18.0	8.6	139	137	0.87	20.4	0.66	0.38	9.8	18.3	11.8	7.2	50.2	0.9	<0.05	1.9	0.044	-3.92
K1-6		"	171.5	18.8	8.2	628	372	0.25	38.5	1.10	0.88	84.5	17.8	175.0	54.1	14.3		0.5	1.6	0.029	-4.08
K1-7		"	180.0	18.8	7.5	168	115	0.56	9.4	1.13	2.15	13.7	13.2	10.0	18.0	33.7		11.8	0.2	0.015	-2.99
K1-1'	Groundwater	00.3.9	17.5	12.9	8.1	159	145	1.10	15.8	0.53	0.99	16.1	25.5	7.4	7.0	65.6		4.2	0.7	0.014	-3.31
K1-2'	(Borehole K1)	"	30.5	14.4	9.3	129	110	0.84	19.8	0.33	0.16	7.8	17.3	6.1	6.5	41.8	3.2	1.9	2.2	0.039	-4.67
K1-3'		"	40.0	14.9	9.3	125	107	0.80	19.6	0.22	0.03	7.5	17.9	6.1	5.9	39.4	3.5	1.6	2.0	0.067	-4.75
K1-4'		"	74.0	15.9	9.0	156	135	1.10	18.9	0.65	0.48	12.2	20.0	6.9	8.7	60.0	2.4	0.4	0.9	0.045	-4.21
K1-5'		"	85.0	16.2	9.6	129	110	0.83	19.7	0.44	0.11	7.0	18.5	9.4	5.2	33.2	6.7	<0.05	2.8	0.123	-5.16
K1-6'		"	171.5	18.2	8.9	1,143	613	0.66	57.7	0.88	0.61	151.0	17.5	255.0	92.0	30.3	11.9	0.1	2.4	0.025	-4.42
K1-7'		"	180.0	18.8	7.8	207	136	0.82	16.7	0.61	0.75	15.3	17.6	11.7	13.6	49.0		9.4	0.5	0.063	-3.15
K1-1"	Groundwater	00.5.22	17.5	16.5	7.9	141	135	0.95	12.5	0.37	1.26	16.1	26.8	6.3	6.5	57.1		6.3	0.5	0.009	-3.16
K1-2"	(Borehole K1)	"	30.5	15.5	9.1	128	110	0.86	20.9	0.27	0.21	8.3	17.1	5.6	6.1	45.9	2.4	1.2	2.2	0.034	-4.44
K1-3"		"	40.0	15.3	9.0	124	107	0.83	20.7	0.18	0.10	7.6	17.9	5.8	5.4	45.2	2.1	1.4	2.0	0.042	-4.40
K1-4"		"	74.0	16.0	8.6	162	143	1.20	20.4	0.57	0.56	12.9	20.4	6.7	8.6	69.6	1.2	<0.05	0.9	0.039	-3.76
K1-5"		"	85.0	16.4	9.5	123	113	0.91	21.0	0.36	0.15	7.0	19.7	7.0	4.3	41.2	5.4	<0.05	2.4	0.114	-4.87
K1-6"		"	171.5	18.3	8.9	1,226	676	0.55	67.1	0.56	0.44	160.0	16.0	293.0	105.0	23.7	1.1	1.5	2.3	0.026	-4.61
K1-7"		"	180.0	18.7	7.8	203	159	1.08	19.6	0.54	0.86	18.3	18.9	13.6	13.5	64.7		7.2	0.8	0.063	-3.04
K2-1	Groundwater	00.3.10	18.6	14.8	8.4	166	149	1.24	19.5	1.32	0.22	15.7	26.1	6.1	5.2	73.1		2.4	0.7	0.009	-3.56
K2-2	(Borehole K2)	"	26.1	14.9	8.7	183	166	1.54	21.4	0.57	0.82	16.7	25.5	6.5	4.7	87.3	2.1	0.1	0.1	0.012	-3.84
K2-3		"	35.0	15.2	9.1	137	116	0.90	19.7	0.16	0.07	7.4	17.2	5.3	4.8	48.7	2.4	1.4	2.5	0.040	-4.40
K2-4		"	51.6	15.5	9.0	146	121	0.85	18.4	0.29	0.41	11.6	18.3	5.3	10.0	46.3	1.9	4.4	1.6	0.069	-4.33
K2-5		"	58.0	15.3	9.0	135	117	0.90	19.7	0.18	0.87	8.8	22.5	6.7	7.9	48.3	2.3	<0.05	1.4	0.070	-4.38
K2-1'	Groundwater	00.5.23	18.6	21.8	8.5	151	145	1.26	19.2	0.15	0.41	16.3	25.7	6.4	5.8	73.3	1.1	3.5	0.8	0.011	-3.61
K2-2'	(Borehole K2)	"	26.1	16.9	8.5	172	163	1.45	22.0	0.55	0.83	17.6	26.3	6.8	5.8	84.5	1.2	2.0	0.7	0.008	-3.59
K2-3'		"	35.0	16.0	9.0	121	104	0.82	20.1	0.13	0.13	7.9	16.5	5.5	5.1	44.6	1.9	2.0	2.5	0.038	-4.36
K2-4'		"	51.6	15.8	8.7	135	122	0.93	19.0	0.25	0.38	11.3	17.2	5.5	8.5	53.3	1.1	3.8	1.4	0.051	-3.98
K2-5'		"	58.0	15.9	9.2	179	109	0.80	19.3	0.17	0.13	8.6	21.0	6.7	7.6	40.5	3.0	<0.05	1.4	0.064	-4.65
K3-1	Groundwater	99-8-26	15.0	18.3	7.0	129	137	0.65	11.2	0.49	1.85	14.2	24.0	14.8	14.9	39.6		1.5	0.3	0.002	-2.42
K3-2	(Borehole K3)	00.3.21	30.0	13.5	7.5	163	151	1.19	16.0	0.35	1.36	15.8	26.8	6.7	5.7	72.0		0.5	0.9	0.011	-2.69
K3-3		99-8-27	45.0	27.9	7.2	197	120	0.55	13.9	0.60	1.36	10.9	18.3	13.1	13.0	33.3		5.4	0.8	0.011	-2.64
K4-1	Groundwater	99-8-28	80.0	24.2	7.6	164	158	0.89	14.3	0.58	1.68	16.8	25.0	14.0	13.5	53.5		4.6	0.8	0.013	-2.86
K4-1'	(Borehole K3)	00.5.34	80.0	20.8	7.9	170	164	1.40	13.1	0.68	2.08	19.5	28.5	6.8	4.7	83.9		0.1	0.5	0.028	-2.94
K-S	Surface water	99-8-19	-	22.6	6.0	80	76	0.17	7.5	1.01	1.94	4.4	15.2	8.8	14.8	5.7		1.5	0.1	0.020	-2.26
K-Sea	Sea water	99-8-20	-	27.8	8.2	39,100	28,038	1.91	8076.0	309.00	1065.00	336.0	1.61	5588.0	2155.2	87.0		0.0	2.1	0.072	-3.40

[a]Alkalinity=molality of H^+ equivalents calculated from in-situ measurement.

[b]Calculated from measured alkalinity and pH data, using computer code SOLVEQ (Reed, 1982).

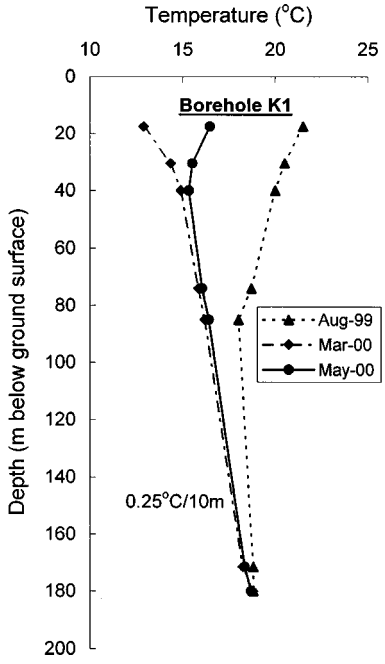

Fig. 4. Temperature (°C) variation of borehole K1. Each point shows the temperature of groundwater collected from each section divided by packers. The geothermal gradient (0.25°C/10 m) is also shown.

K1공과 K2공에서 1999년 8월에서 2000년 5월에 걸쳐 측정된 지하수의 심도별 pH의 변화는 Fig. 5에 도시되었다. 일반적으로 강수가 토양층을 거쳐 지하수를 형성하는 과정에서의 pH 변화를 살펴보면, 강수의 pH는 대기중 이산화탄소(0.03%)와 반응하여 이론적으로 5.6의 값을 갖게 된다($CO_2+H_2O=H^++HCO_3^-$). 이러한 강수가 유기물분해 및 식물의 호흡작용으로 다량의 이산화탄소(1,000-100,000 ppmv)를 함유하고 있는 토양층에서 pH는 4.4~5.4로 더욱 낮아지게 된다 (Appelo and Postma, 1994). 형성된 지하수는 이후 지하수 유동로를 따라 유동하면서 지하매질과 반응하게 된다. 지하매질은 대부분 결정질 암반에서 규산염광물(K-장석, 사장석, 운모류 등)로 구성되어 있고, 이들 광물과의 반응으로 수소소모반응이 진행되어 지하수의 pH는 증가하게 된다. 즉, 지하수가 규산염광물로 구성된 결정질암에서 체류시간이 길거나 또는 심부로 유동할수록 지하수의 pH가 증가되는 양상을 기대할 수 있다.

그러나, Fig. 5에서 보는 바와 같이 K1공의 지하수는 비록 최상부 지하수(K1-1)의 pH 보다는 하부구간이 전반적으로 높은 값을 보여주지만, 심도별로 pH가 증가되는 양상을 보여주지 않고, 구간별로 독특한 값

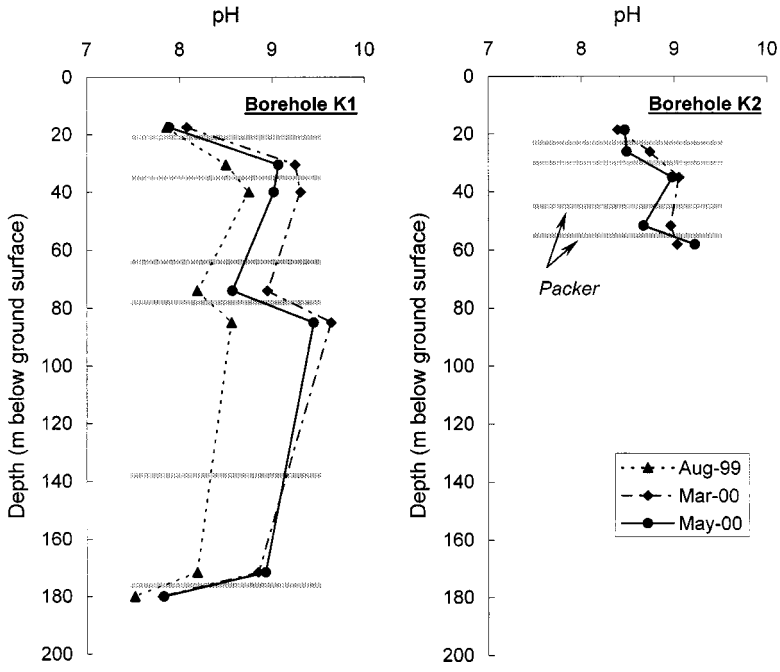

Fig. 5. pH variation of boreholes K1 and K2. Each point shows the pH of groundwater collected from each section divided by packers.

을 갖는다. 심도증가에 따라 상기 pH가 증가되는 일반적인 변화양상은 지표수 → 천부지하수 → 심부지하수로 유동되는 광역적인 지하수시스템에서 적용될 수 있는 것으로서, 연구지역과 같은 천부환경에서는 지하수의 pH는 각 구간에 나타나는 지하수의 유동 즉, 단열대의 분포 특성에 따른 지하수 유동체계에서 나타나는 물-암석 반응의 정도 차이에 의한 결과인 것으로 사료된다.

심도별 지하수의 pH가 시료채취시기에 따라 변화되는 것은 시추 후 일정기간동안에는 시추수와 시추공 주변 지하수의 혼합과정에서 나타나는 현상이며, 시추공내 지하수는 점차 지하수체계가 교란받기 이전 자연상태로 회복되었거나, 회복되고 있는 것으로 설명할 수 있다. 1998년 11월 시추당시 시추수는 pH가 7.0내외의 값을 보여주는 주변지표수를 사용하였다. 시간이 경과함에 따라 지하수의 pH가 변화되고 있지만 심도별로 전반적인 변화양상은 유사하게 나타내고 있다. 심도에 따른 지하수의 pH를 살펴보면, 최상부(K1-1) 구간과 최하부(K1-7)구간을 제외하고, 2000년 3월과 5월에 채취한 지하수의 pH는 9.0내외로 높은 값(8.6~9.5)을 보여주고 있다(Table 1; Fig. 5). 특히 일반적으로 천부지하수로 분류되는 심도 100 m 이내의 상부지하수의 pH가 9.0에 가까운 값을 갖는다는 것은 주목하여야 할 사항이다. 그동안 이루어진 국내 지하수의 지화학 조사자료에 의하면 결정질암에서의 지하수의 pH는 대부분 8.0이하인 것으로 보고되고 있다(이종운 등, 1997; 윤성택 등, 1998; 고용권 등, 1999; 고용권 등, 2000; 김건영 등, 2000). 또한 K1공과 K2공 주변에 위치한 K3공과 K4공을 대상으로 나공(Open borehole)상태에서 각각 심도 45 m와 80 m에서 채취한 지하수시료의 pH는 8.0이하의 값(7.0~7.9)을 보여주고 있다(Table 1). 이러한 나공상태에서의 pH 자료는 심도별로 채취한 지하수 시료의 결과이지만, 심도에 따라 구간을 격리시키지 않고 나공상태에서 시료채취가 이루어졌기 때문에 상부지하수와의 혼합현상을 고려하여야 할 것이다. K1공 최하부(K1-7)구간은 패커 설치 후 1년 이상의 상당한 시간이 경과하였음에도 불구하고 지표수와 유사하게 낮은 pH값을 보인다. 이 구간은 텔레뷰어 검층에 의하면 파쇄대가 확인되지 못하였으며(Fig. 3), 다른 구간에 비해 수리전도도가 매우 낮아서(김경수 등, 미발표자료) 시추 당시 주입된 시추수의 영향이 1년이 경과한 후에도 계속 잔류하고 있는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 현장측정자료 뿐만 아니라 다음에 기술한 수리화학 분포특성에서도 잘 확인된다. 2000년 3월과 2000년 5월에 채취한 K2공의 경우 지하수 pH(8.3~9.1)는 시기별로 큰 차이를 보이지 않고 심도별로 대체로 증가되는 양상을 보여주며, K1공

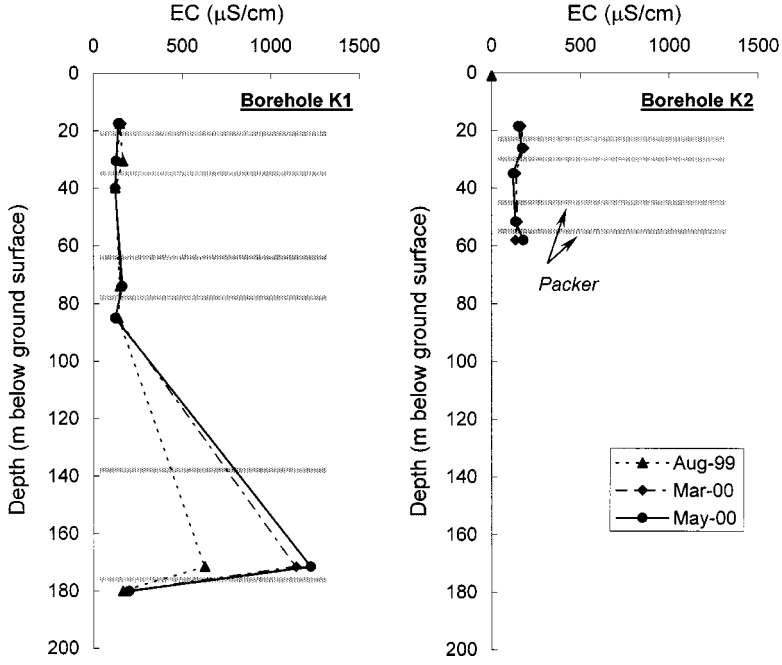

Fig. 6. Electical conductivity variation of boreholes K1 and K2. Each point shows the EC of groundwater collected from each section divided by packers.

에 상응하는 구간 지하수와 유사한 값을 보여주고 있다 (Table 1; Fig. 5).

K1공에 대한 전기전도도(EC) 변화를 살펴보면, 대부분의 구간이 시기별 또는 심도별로 큰 차이를 보이지 않지만, K1-6 구간 지하수는 특이하게 매우 높은 전기전도도 값을 보여준다(Fig. 6). 시기별 차이에 있어서도 패커 설치 후 처음(1999년 8월) 측정된 값이 가장 낮고 이후(2000년 3월과 5월) 측정치는 어느

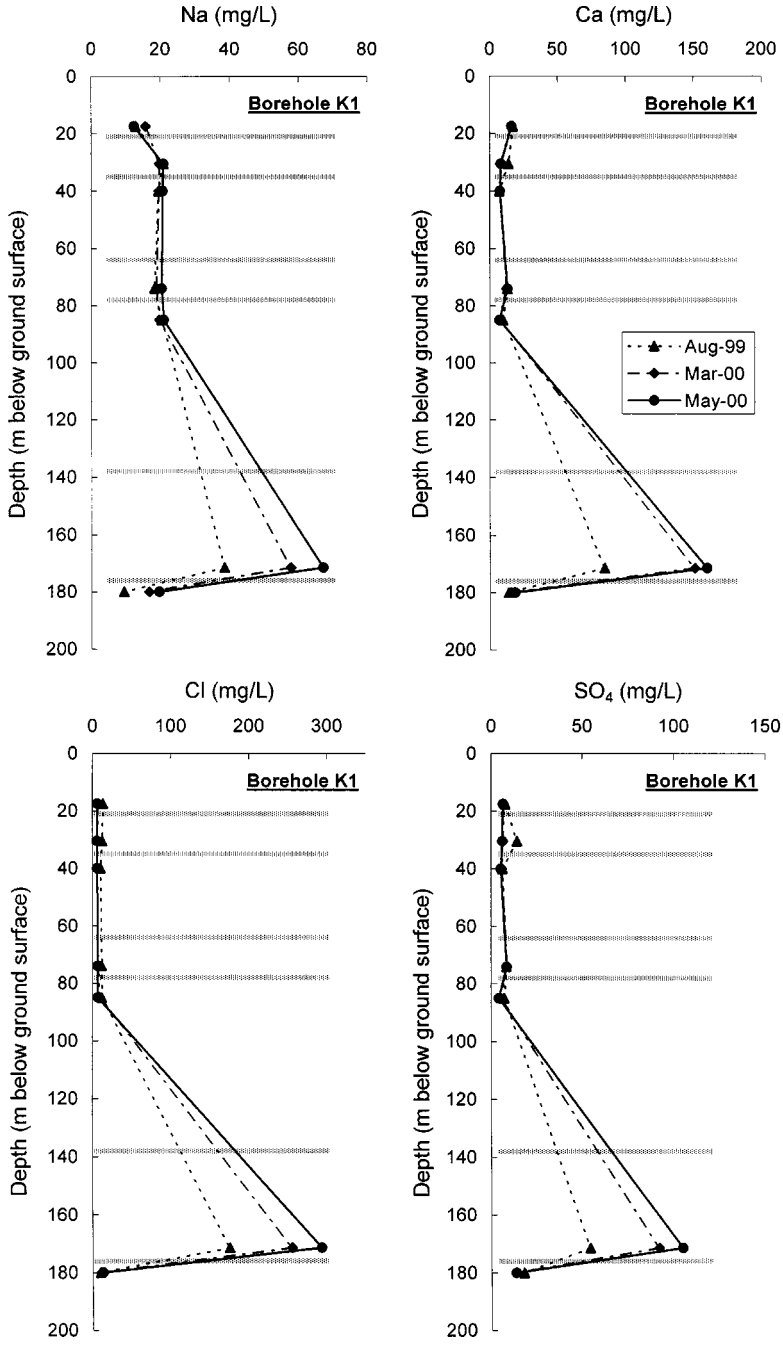

Fig. 7. Variations of Na, Ca, Cl and SO_4 concentrations in borehole K1.

정도 증가하여, 초기(1999년 8월) 측정결과는 시추수에 의한 영향인 것으로 사료된다. 이처럼 K1-6구간의 지하수가 이상적으로 높은 전기전도도 값(628~1,226 μS/cm)을 보이는 것은 상기 구간의 지하수가 물-암석 반응에 의하여 높은 전기전도도를 가지게 된 것이라기보다는 상부 지하수와는 달리 단열대를 따라 다른 기원의 지하수가 유입되고 있는 것으로 사료된다. 이에 대한 자세한 설명은 후술하였다. 심도별 전기전도도 변화 양상이 점이적이지 않고 단속적이고 급격하게 구간별로 나타나는 것은 결정질 암반에서 예상되는 지하수

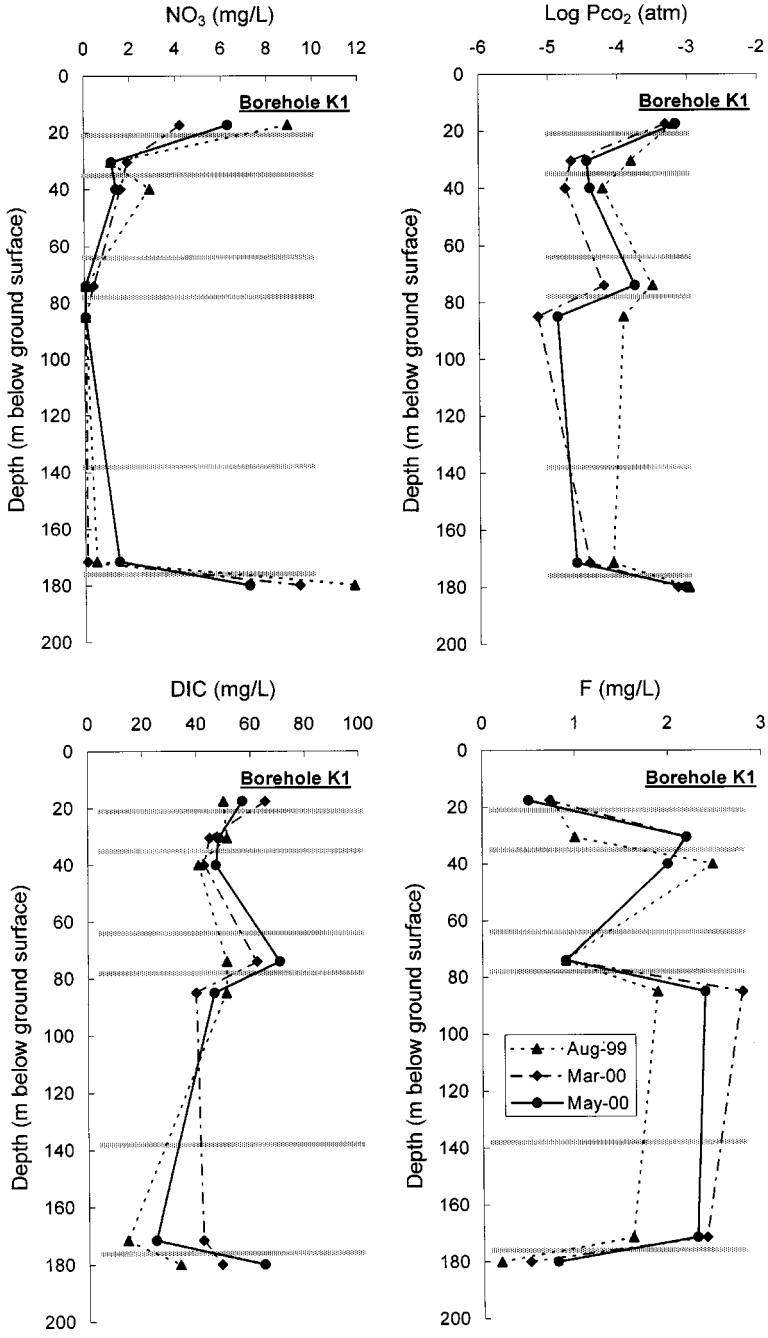

Fig. 8. Variations of NO_3, Pco_2, DIC and F concentrations in borehole K1.

유동로가 국지적인 단열대에 의해 지배를 받고 있음을 지시하는 것이다. K2공의 심도별 지하수의 전기전도도 분포 특성은 K1공과 유사하다(Fig. 6). K3공과 K4공의 전기전도도는 각각 129~197 μS/cm과 164~170 μS/cm 범위를 보여준다(Table 1). 지표수와 해수에 대한 온도는 각각 22.5, 27.8°C이며, pH와 EC는 각각 6.0과 8.2, 80 μS/cm와 39,100 μS/cm 이다(Table 1).

4.2. 수리화학

연구지역의 시추공지하수, 지표수 및 해수에 대한 화학조성은 Table 1에 정리되어 있다. 지하수의 총용존고체함량 (TDS)은 K1공에서 K1-6구간을 제외하고 수리전도도에서 확인된 바 와 같이 심도별 또는 시추공에 따라 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. K1공의 Na, Ca, Cl 및 SO_4에 대한 시기별 및 심도별 분포 특성은 Fig. 7에 도시되었다. 전기전도도 분포 특성에서도 확인되었듯이 도시된 이온들의 함량은 대부분 구간에서 시기별과 심도별로 거의 일정한 값을 보이는 반면 K1-6 구간에서 특이하게 높은 값을 보이고 있다. Na, Ca, Cl, SO_4 함량이 모두 K1-6 구간에서만 높은 값을 보일 뿐만 아니라, 시기별 특성 역시 시추공이 설치될 당시 시추수가 주입된 이후 점차적으로 상기 이온함량이 증가되는 경향을 보여준다(Fig. 7). 이 역시 시추로 인하여 지하수체계가 교란된 이후 점차 자연상태로 회복되었거나 회복중에 있는 것을 보여주고 있다. K2공에 대한 Na, Ca, Cl 및 SO_4에 대한 시기별과 심도별 변화 특성은 큰 차이를 보이지 않고 상기 이온들은 모두 낮은 값을 보이며, 시기별 또는 심도별로 K1공과 상응하는 심도의 지하수와 유사한 값을 보여주고 있다 (Table 1).

K1공 지하수의 K와 Mg 함량은 최상부(K1-1구간)과 최하부(K1-7구간)에서 다소 높으나, 전반적으로 시기별과 심도별로 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 또한 K2공 지하수의 K와 Mg함량 역시 K1공과 같은 양상을 보여준다(Table 1). NO_3, Log Pco_2, HCO_3 및 F함량은 Na, Ca, Cl, SO_4와는 다른 양상을 보여준다(Fig. 8). NO_3함량은 K1-1구간과 K1-7구간에서 가장 높은 값(4.2~11.8 mg/L)을 보여준다. 연구지역이 주변환경에 의한 오염지역이 아니며 NO_3가 지표기원임을 고려할 때 K1-7구간 지하수는 시추당시 시추수의 영향이 희석되지 못하고 남아 있는 것으로 판단된다. 또한 K1-7구간이 비교적 심부조건이지만, 탈질산화작용(denitrification)이 진행되지 않았음을 지시한다. 계산된 각 구간의 이산화탄소 분압(Pco_2)도 역시 상기 구간에서 가장 높은 값($10^{-3.3}$~$10^{-3.0}$ atm)을 보여 이를 뒷받침해주고 있고, 이러한 결과는 지하수의 pH 결과와도 잘 일치하고 있다(Fig. 8). 기타 구간에서의 낮은 이산화탄소 분압($10^{-5.2}$~$10^{-3.5}$ atm)은 지하수가 유동됨에 따라 물-암석 반응에 의하여 수소소모반응이 진행됨으로써 진화되는 현상으로 사료된다. 즉, 물-암석 반응이 이산화탄소에 대하여 열린계(Open system)에서 진행된 것이 아니라 닫힌계(Close system)에서 이산화탄소 분압이 감소하게 된 결과로서 설명할 수 있다 (Freeze and Cherry, 1979). 자연환경에서의 지하수계는 이산화탄소에 대하여 극단적으로 열린계 또는 닫힌계에 속하기 보다는 부분적인 열린계(Partial open system)에서 지화학반응이 진행되는 것으로 알려져 있다(Clark and Fritz, 1994). K1-4구간 지하수는 시추수인 지표수에 영향을 받은 K1-1구간과 K1-7구간을 제외하고 가장 높은 이산화탄소분압($10^{-4.2}$~$10^{-3.5}$ atm)을 보여준다 (Table 1; Fig. 8). 이는 K1-4구간이 타구간에 비해 이산화탄소에 대하여 열린계에 가까운 환경에서 지화학반응이 진행되었음을 지시하는 것이다. K1-4구간이 이산화탄소에 대하여 열린계이었다면, 방해석 등 탄산염광물과의 반응이 수반되지 않는 환경에서 K1-4구간내 용존무기탄소(DIC)함량이 가장 높은 값을 보여주어야 한다. 수리시험결과에 따르면 상기구간에서 가장 높은 수리전도도를 보여주어 이러한 사실을 뒷받침해주고 있다(김경수 등, 미발표자료). 즉, K1-4구간은 다른 구간에 비해 지하수의 유동이 빨라서 천부지하수의 유입이 용이하여 지표기원의 이산화탄소의 공급이 상대적으로 원활한 것으로 사료된다. 따라서, 타구간에 비해 지하수의 체류시간이 짧은 것으로 고려할 수 있다. 이밖에 F 함량 역시 K1-1구간과 K1-7구간을 제외하고 K1-4구간에서 낮은 값(0.9 mg/L)을 보여주고 있다(Table 1; Fig. 8). 일반적으로 지하수의 F기원은 주변 암석중 형석과 같은 F가 주성분인 광물이 없을 경우, 규산염광물중 운모류의 OH를 치환한 F가 용해되는 것으로 알려져 있으며, 따라서 K1-4구간 지하수의 낮은 F 함량은 타구간에 비해 물-암석 반응 정도가 낮은 것으로 해석할 수 있다. 이는 낮은 pH와 상대적으로 높은 이산화탄소분압 및 수리전도도가 높은 특성과 일치하는 해석 결과이다.

조사된 지하수의 화학적 유형을 분류하기 위하여 Piper diagram에 화학분석결과를 도시하였다(Fig. 9). 대부분 지하수들은 Na-Ca-HCO_3형으로 분류되며, 일부 Ca-Cl_2유형으로 도시되는 지하수가 있음을 알 수 있다. 이들은 K1-6구간에서 채취된 높은 TDS값을 보이는 지하수로서 타구간에 비해 Na 및 기타 이온함량

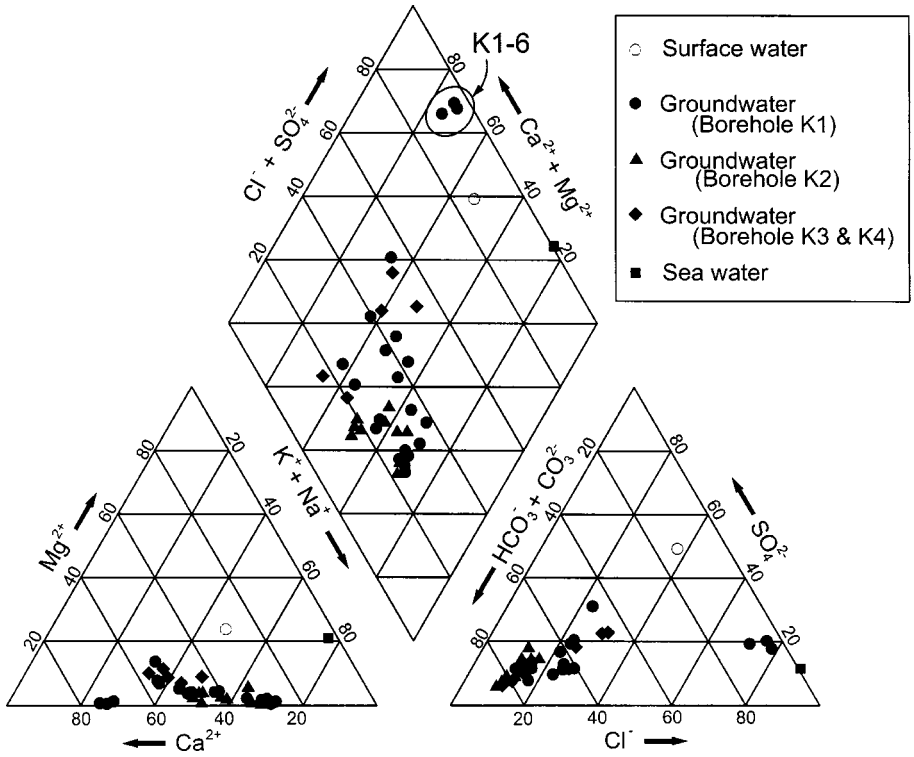

Fig. 9. Piper's diagram showing chemical compositions of water samples from the Yeosu area. The groundwater from the borehole K1-6 is chemically characterized by Ca-Cl_2 type.

도 높지만 상대적으로 Ca와 Cl 함량이 매우 높은 것(84.5~160.0 mg/L Ca, 175.0~293.0 mg/L)이 특징이다. 이와 같이 지하수내 높은 함량의 Na와 Ca의 기원으로서 사장석과 방해석의 용해 뿐만 아니라 시추공의 위치가 해안에 인접하기 때문에 해수의 영향을 고려할 수 있다. 우선 Ca의 기원으로서 방해석의 용해반응을 제외시킬 수 있다. K1-6구간 지하수의 pH는 8.9로서 높은 값을 보이므로 이러한 pH 조건에서는 방해석에 대하여 과포화환경으로 방해석이 용해될 수 있는 조건이 아니라 침전되는 조건이다. 각 조사된 현장자료와 화학분석결과로부터 연구지역 지하수의 대표적인 광물에 대한 포화지수 값을 Table 2에 정리하였다. 또한 사장석의 용해로부터 Ca가 공급되었다 하더라도 지하수내 용해된 Ca 역시 높은 pH 조건으로 인하여 지하수내 존재하지 못하고 침전된다. 따라서 Ca와 함께 사장석으로부터 용출되는 Na가 지하수내 점차적으로 증가되어 Na가 우세한 지하수를 형성하게 된다. 결국 사장석의 용해반응으로부터 Ca가 우세한 K1-6구간 지하수의 화학조성을 설명할 수 없다. 결국 상기구간의 높은 Ca 함량의 기원으로서 해수유입을 고려하는 것이 타당한 것으로 사료된다. K1-6구간 지하수는 Ca와 함께 높은 Cl와 SO_4 함량(54.1~105.0 mg/L)을 나타내어 해수 유입에 의한 혼합 가능성을 뒷받침해주고 있다. Cl의 자연적인 기원으로서는 광물이 형성될 당시 포획된 유체포유물과 운모류에서 OH기를 치환한 Cl을 고려할 수 있다(Nordstrom *et al.*, 1989). 그러나 상기 구간의 높은 Cl 함량이 유체포유물과 운모류로 부터 기인하였다면, K1공에서 확인된 화산암류가 비교적 균질하게 분포하고 있는 점을 고려할 때, 심도에 따라 지하수의 Cl 함량이 높게 나타나거나, 점이적인 변화특성을 보여주어야 한다. 결국, K1-6구간의 Ca-Cl_2형의 지하수를 형성하는 기원으로서는 지하수와 지하매질과의 반응이라기 보다는 인위적인 오염이 없다면 연구지역의 여건을 고려할 때 해수에 의한 혼합 현상으로 해석하는 것이 더 타당한 것으로 사료된다.

5. 토의 및 결론

5.1. pH

연구지역 시추공지하수에 대하여 MP system를 이

Table 2. Saturation index with respect to representative minerals for borehole groundwater, surface water and sea water from the Yeosu area.

Sample no.	albite	anor-thite	beide-Ca	beide-Na	calcite	Clchlo re	illite	kaolin-ite	lau-mon-tite	K-feld-spar	Ca-Mont	Na-Mont	musco-vite	Nont-Ca	Nont-Na	quartz
K1-1	4.1	4.7	11.0	10.5	-0.5	12.3	8.8	11.9	13.1	5.7	9.2	8.7	16.4	12.9	12.4	0.7
K1-2	4.3	5.4	10.2	9.7	-0.1	18.0	8.8	11.1	13.5	5.9	8.9	8.5	16.2	12.4	12.0	0.6
K1-3	4.6	5.9	10.8	10.4	-0.2	16.8	9.2	11.7	13.9	6.0	9.1	8.8	16.9	12.4	12.0	0.5
K1-4	1.8	0.1	5.2	4.8	-0.4	8.2	3.5	7.0	8.4	3.5	5.0	4.6	9.5	11.4	11.0	0.7
K1-5	4.7	5.9	11.3	10.9	-0.1	15.7	9.7	12.2	14.1	6.3	9.5	9.1	17.5	12.9	12.4	0.6
K1-6	4.8	6.3	11.7	11.2	-0.2	13.6	9.7	12.5	14.5	6.2	9.6	9.2	17.8	12.9	12.4	0.6
K1-7	3.5	4.7	11.8	11.3	-1.2	9.4	9.4	13.0	12.7	5.6	9.1	8.6	17.9	12.2	11.7	0.5
K1-1'	5.0	5.7	12.6	12.2	-0.4	12.5	10.6	13.2	14.7	6.7	10.5	10.1	18.4	14.2	13.7	0.9
K1-2'	4.6	5.6	10.0	9.6	0.3	18.1	8.8	11.0	13.9	5.9	8.8	8.4	16.1	12.7	12.3	0.6
K1-3'	4.8	6.0	10.3	9.9	0.3	15.4	8.8	11.3	14.3	5.9	8.8	8.5	16.4	12.7	12.3	0.5
K1-4'	4.9	6.1	11.0	10.6	0.3	18.7	9.7	11.8	14.5	6.5	9.6	9.2	17.2	13.1	12.7	0.7
K1-5'	4.5	6.1	9.6	9.2	0.5	21.0	8.8	10.7	14.0	5.9	8.5	8.2	16.2	11.8	11.5	0.4
K1-6'	4.7	6.3	10.1	9.7	0.9	17.4	8.6	11.0	14.4	5.9	8.8	8.4	16.1	12.6	12.2	0.5
K1-7'	4.8	6.3	13.2	12.7	-0.7	11.3	10.7	13.9	14.6	6.3	10.3	9.9	19.3	12.9	12.4	0.6
K1-1"	4.6	5.2	12.1	11.6	-0.6	11.7	9.7	12.8	14.0	6.1	10.0	9.5	17.5	13.7	13.1	0.8
K1-2"	4.6	5.5	10.2	9.8	0.2	17.4	8.7	11.2	13.8	5.7	8.8	8.5	16.1	12.7	12.3	0.6
K1-3"	4.8	5.7	10.6	10.2	0.1	15.6	8.9	11.5	14.1	5.7	9.0	8.7	16.4	12.9	12.5	0.6
K1-4"	5.0	6.1	11.8	11.3	0.1	16.2	10.1	12.5	14.6	6.5	9.9	9.6	17.9	13.3	12.9	0.7
K1-5"	4.8	6.3	10.3	9.9	0.4	20.5	9.2	11.2	14.4	6.1	9.0	8.7	16.7	12.4	12.0	0.5
K1-6"	4.6	6.2	9.8	9.3	0.9	17.1	8.2	10.7	14.2	5.5	8.5	8.1	15.6	12.4	12.0	0.5
K1-7"	4.9	6.5	13.3	12.8	-0.5	11.7	10.8	14.0	14.8	6.4	10.5	10.1	19.4	13.1	12.6	0.6
K2-1	4.8	5.2	11.3	10.8	0.0	11.6	9.6	12.0	14.1	6.7	9.5	9.1	17.3	13.8	13.3	0.8
K2-2	4.8	5.4	10.7	10.3	0.4	17.4	9.3	11.5	14.2	6.3	9.5	9.1	16.5	13.6	13.2	0.8
K2-3	4.7	5.6	10.5	10.1	0.1	15.0	8.7	11.4	14.0	5.6	8.9	8.5	16.2	12.8	12.4	0.6
K2-4	5.0	6.4	11.3	10.9	0.2	18.6	9.8	12.1	14.7	6.2	9.7	9.3	17.4	13.1	12.6	0.6
K2-5	5.2	6.4	11.5	11.1	0.2	21.1	9.9	12.2	15.0	6.3	10.1	9.8	17.3	13.4	12.9	0.7
K2-1'	4.3	5.0	10.2	9.7	0.2	14.5	7.8	11.0	13.3	5.1	8.8	8.4	15.0	12.7	12.2	0.7
K2-2'	4.6	5.0	10.6	10.2	0.2	15.4	8.9	11.4	13.7	6.0	9.3	8.9	16.1	13.4	13.0	0.8
K2-3'	4.6	5.6	10.4	10.0	0.1	15.8	8.5	11.4	13.8	5.4	8.8	8.5	16.0	12.7	12.3	0.6
K2-4'	4.9	6.1	11.6	11.1	0.0	16.0	9.7	12.4	14.5	6.0	9.7	9.3	17.5	13.1	12.7	0.6
K2-5'	4.9	6.2	10.7	10.2	0.3	18.2	9.1	11.5	14.5	5.9	9.3	8.9	16.5	12.9	12.5	0.6
K3-1	3.5	3.5	11.8	11.2	-1.7	3.9	8.6	12.8	12.0	5.1	9.0	8.6	16.7	12.9	12.4	0.8
K3-2	4.9	5.4	13.4	13.0	-0.9	8.4	10.7	14.1	14.4	6.3	10.7	10.3	18.9	14.1	13.6	0.9
K3-3	3.3	4.2	11.2	10.7	-1.5	7.1	8.2	12.4	11.8	4.8	8.5	8.1	16.6	11.4	10.9	0.5
K4-1	4.1	5.1	11.8	11.2	-0.8	11.0	9.1	12.6	13.2	5.6	9.5	9.0	17.1	12.5	12.0	0.7
K4-1'	4.8	6.0	12.8	12.2	-0.3	13.9	10.4	13.3	14.5	6.5	10.5	10.0	18.5	13.3	12.7	0.8
K-S	0.9	0.0	0.0	1.7	0.0	1.6	0.0	-0.8	19.3	2.8	2.2	6.5	3.5	2.0	9.5	-0.4
K-Sea	3.8	0.0	0.0	10.7	0.0	10.8	0.0	0.4	8.9	5.5	8.9	12.6	5.6	9.1	16.9	0.7

Beide=beidelite; Clchlore=clinochlore; Mont=montmorillonite; Nont=Nontronite.

용하여 심도별 지하수와 주변 시추공에 대하여 나공상태에서의 지하수의 지화학특성를 해석하고 비교분석하였다. MP system을 이용한 지하수의 지화학연구 결과는 천부환경이라 하더라도 높은 pH환경에 이를 수 있으며, 심도에 따라 지하수의 화학조성이 점이적이지 않고 단열분포특성에 따라 단속적인 변화를 보여주는 것이 특징이다. 그러나 30 m 심도 내외에서 지하수의 pH가 9이상으로 나타나는 것은 이례적인 현상으로 이러한 특성을 국내 결정질암 지하수계에 그대로 적용하기 앞서 기타 화강암 및 변성암지역에서 MP system

을 설치한 구간별 특성 분석결과와 비교하여 해석되어야 할 것이다. 또한 지하수의 높은 pH에도 불구하고 낮은 TDS함량을 보이고 있는데, 이는 그동안 국내 지하수에 대한 지화학연구결과(윤성택 등, 1998; 고용권 등, 1999, 고용권 등, 2000)에서는 확인될 수 없었던 현상이다. 더욱이 본 논문에서 제시된 지화학자료는 1998년 11월 시추이후에 2000년 5월까지 3회(1999년 8월, 2000년 3월, 2000년 5월)에 걸친 자료로서 지하수의 pH가 조사시기에 따라 계속 증가되는 양상만을 보이는 것이 아니기 때문에 시추수의 영향으로부터 자연상태로 회복되는 과정에 있는 것인지 혹은 지하수의 pH 변화가 계절에 의한 영향인지에 대한 지속적인 관측이 요구된다.

5.2. 해수혼합

K1공 K1-6구간 지하수가 화학적으로 특이하게 Ca-Cl_2형을 보이는 현상은 해수의 혼합과정으로 설명될 수 있으나, 해수가 혼합되었다면 K1-6구간지하수내 Na/Ca비 역시 높은 값을 보여야 하고, K와 Mg 함량등도 해수유입에 따라 높은 값을 나타내어야 한다. 그러나, Na/Ca비는 해수에 비해 낮은 값을 보이고, K와 Mg는 기타 구간의 지하수와 유사한 값을 보여준다. 또한 해수의 Cl/SO_4의 비가 상기 구간 지하수의 Cl/SO_4와 불일치하고 있어 K1-6구간의 지화학적 이상치를 해수혼합으로 해석하기 위해서는 이에 대한 설명이 뒤따라야 한다.

우선 Na/Ca비가 적게 나타나는 요인으로서는 해수의 영향을 받은 지하수가 지하수 유동로를 따라 유동하게 되면, 유동로내에 생성되어 있던 2차광물과 양이온교환반응(Na-Ca치환)으로 지하수내 높은 Na/Ca비는 점차적으로 낮은 Na/Ca비를 가질수 있다(Fig. 10A). 이러한 이온교환반응이 진행되기 위해서는 단열대내 양이온교환반응 특성이 우세한 스멕타이트 같은 2차점토광물이 존재하여야 한다. K1공으로부터 직접적으로 스멕타이트를 확인할 수 없었지만, K1-6 구간 외에도 지하수의 화학조성으로부터 열역학적으로 계산된 스멕타이트계열에 대한 포화지수 값(Table 2)이 높은 양의 값을 보여주고 있어, 지하수내 Na/Ca비의 변화에 대한 가능성을 보여주고 있다. 즉, 해수혼합에 의해 높은 Na/Ca비를 갖는 지하수가 단열대에 분포하는 2차점토광물에 의해 이온교환반응($2Na+Ca\text{-}clay \rightarrow Na_2\text{-}clay + Ca^{2+}$)을 통하여 지하수의 화학조성은 점차 Ca가 우세한 지하수로 변화될 수 있다. 이러한 현상은 일반지하수 지역에서 나타나는 해수침투의 일반적으로 나타

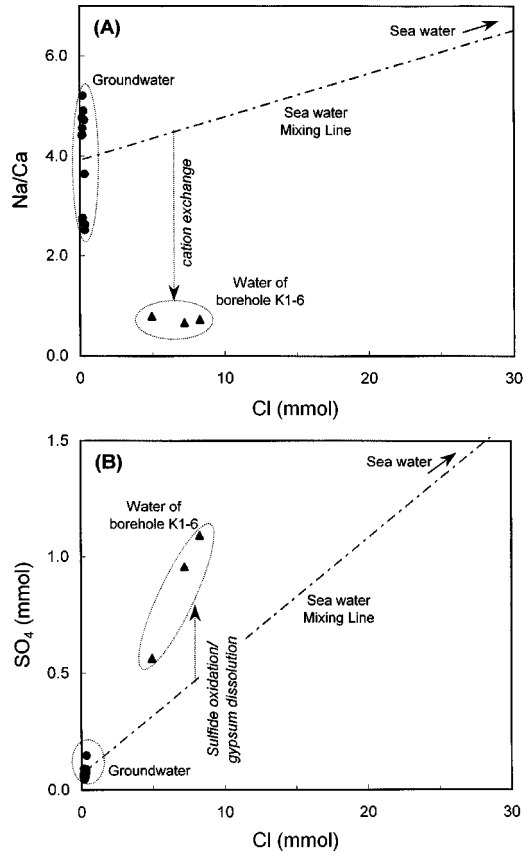

Fig. 10. (A) A plot of Na/Ca ratio versus Cl for groundwater and sea water of the study area. (B) A plot of SO_4 versus Cl for groundwater and sea water of the study area. The mixing path assumes that the chemistry is maintained during mixing process.

나는 현상(Appelo and Geirnaert, 1991)으로 지하수의 화학조성은 Ca-Cl_2형을 띠게된다. 이와 마찬가지로 해수혼합에 의해 지하수내 증가된 K와 Mg 함량도 점토광물과의 양이온교환반응으로 지하수로부터 제거된 것으로 해석될 수 있다.

해수와 지하수의 SO_4/Cl함량비를 살펴보면 해수에 비해 지하수가 높은 값을 보이고 있다(Table 1). 즉, K1-6구간 지하수의 SO_4는 Cl 함량과 비교하여 해수의 혼합으로 설명될 수 있는 함량보다 높은 값을 보이고 있다(Fig. 10B). 지하수내 SO_4함량을 증가시킬 수 있는 요인으로서는 석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)의 용해작용과 황철석의 산화작용으로 설명할 수 있다. 일반적으로 화산암지역에서는 황철석이 확인되는 바 K1-6구간 지하수의 상대적으로 높은 SO_4는 해수의 혼합과 더불어 황철석의 산화반응에 기인하였을 가능성이 높다. 그러나

이에 대하여는 황동위원소의 결과가 추가되어야 할 것이고, 황철석이 화산암내 분포한다 하더라도 타구간에서는 높은 SO_4 함량이 확인되지 않는다는 점과 SO_4 함량이 Cl 함량에 대하여 정의 관계를 보여준다는 점 (Fig. 10B)은 해결하여할 문제이다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기연구개발과제의 일환으로 수행되었는 바 이에 감사한다.

참고문헌

고용권, 김천수, 배대석, 이동익 (2000) 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구. 자원환경지질, 33권, p. 469-489.

고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영 (1999) 중원지역 탄산수의 지구화학적 진화. 자원환경지질, 32권, p. 469-483.

김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언 (2000) 유성지역 지열수의 지구화학적 특성연구. 지하수환경, 7권, p. 32-46.

김경수, 이은용, 김천수 (1999) 여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성. 지질공학, 9권, p. 31-43.

윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병영, 이병호, 김성용 (1998) 풍기지역 지하수의 수리지구화학 및 환경동위원소 특성연구. 지하수환경, 5권, p. 177-191.

이종운, 전효택, 전용원 (1997) 국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성. 지하수환경, 4권 p. 199-211.

장기홍, 이영길, 김규한 (1989) 남해. 서상 지질도폭 설명서 (1:50,000). 한국동력자원연구소, 39p.

정찬호, 고용권, 김수진, 김천수 (1995) 삼광광산 편마암에서의 수리지구화학 및 물-암석 상호반응. 지질학회지, 31권, p. 91-105.

조성일, 송무영, 김경수, 이은용 (1999) 여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와의 관계. 지질공학, 9권, p. 227-241.

Appelo, C.A.J. and Geirnaert, W. (1991) Processes accompanying the intrusion of salt water. In: deBreuk, W. (ed.), Hydrogeology of Salt Water Intrusion. International Assoc. of Hydrologeologists International Contributions to Hydrology, v. 11, p. 291-304.

Appelo, C.A.J. and Postma, D. (1994) Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 536p.

Clark, I.D. and Fritz, P. (1997) Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Pub., NY, 328p.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall, Inc Englewood Cliffs, N.J., 604p.

Hartten, A.S. and Genau, R.B. (1995) Deep bedrock hydrogeologic characterization through the use of multiport monitor wells. Ground Water, v. 33, p. 832-859.

Li, H., Horie, Y., Ishii, T. and Shimada, J. (1997) Development of an apparatus to measure groundwater qualities in situ and to sample groundwater using boreholes. Environmental Geology, v. 32, p. 17-22.

Koh, Y.K., Kim, C.S., Bae, D.S., Yun, S.T. (1998) Geochemical modeling of groundwater in granitic terrain: the Yeongcheon area. Jour. Korean Soc. Groundwater Environ., 5, p. 192-202.

Landin, B.K. and Lauctes, B. (1995) The use of the multi-port monitoring wells for aquifer characterization and plume delineation in a thick alluvial aquifer. Ground Water, v. 33, p. 832-859.

Nordstrom, D.K., Ball, J.W., Nonaho, R.J. and Whitemore, D. (1989) Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 8, p. 153-160.

Reed, M.H. (1982) Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 46, p. 513-528.

Wikberg, P., Axelsen, K., Fredlund, F. (1987) Deep groundwater chemistry. SKB Tech. Rep. 87-07, Swdish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm. 33p.

2001년 2월 9일 원고접수, 2001년 6월 15일 게재승인.