

# 시추공 지하수의 심도별 지구화학적 특성

최현수<sup>1)</sup>, 고용권<sup>1)</sup>, 배대석<sup>1)</sup>, 한경원<sup>1)</sup>, 윤성택<sup>2)</sup>

## 1. 서론

결정질 암반에서는 단열대가 지하수의 주요 유동로 역할을 하게 되므로, 결국 지하수의 화학조성이 결정되는 물-암석반응은 단열대에서 진행되게 된다. 동일한 매질이라 하더라도 단열대를 따라 유동하는 지하수의 유속 및 체류시간의 차이에 의하여 지하수는 다양한 화학조성을 가지게 된다. 결국, 암반지하수의 지화학 연구를 위해서는 자연조건에서 유동로에 따른 격리된 상태에서 지하수의 시료채취가 이루어져야 한다. 이러한 지하수 시료채취를 충족시키기 위해서는 시추공에서 특정구간에 대해 패커시스템을 이용하여야 하며, 심도별로 채취하기 위해서는 다중패커시스템을 적용하여야 한다. 그러나 다중패커시스템은 고가의 장비로서 그간 국내 지질환경의 지하수 특성연구에 적용하는데 어려움이 있었다.

본 연구에서는 최근 방사성폐기물처분연구의 일환으로 국내 심부지질환경에서 지하수의 특성을 밝히고자 한국원자력연구소에서 도입한 MP system을 이용한 지하수의 시료채취방법을 소개하고, 시추공에서 심도에 따른 구간별 수리화학특성자료를 제시하고, 이의 결과를 해석하고자 하였다. 적용지역은 전남 여수 북동부지역으로서 지하수의 유동특성연구와 관련하여 지표 단열체계 및 연구 시추공에 대한 단열특성과 수리특성이 세밀하게 연구된 지역이기도 하다.

## 2. 연구방법

연구지역의 시추공은 여수반도 북동부 해안의 제석산 동측사면에 위치하며, 시추공을 남북방향으로 4개소에 설치하였다. K1공의 굴진심도는 200m이며, K2공은 70m 그리고 K3와 K4공은 각각 50m와 90m이다 (Fig. 1). K1공은 6개의 패커 (40m, 26m, -3m, -17m, -77m, -115 E.L.)가 설치되어 7개구간에서, 그리고 K2공에는 4개의 패커 (36m, 29m, 14m, 4m E.L.)가 설치되어 5개구간에서 시료채취가 수행되었으며, K3공과 K4공은 나공상태에서 시료를 채취하였다 (Fig. 1). 시추공에 패커를 설치하기 전에 텔레뷰어 검층으로 단열특성과 텔레뷰어 검층에 의한 K1와 K2공의 단열분포와 개폐상태를 확인한 후 이에 따라 패커를 설치하였다. 현장측정과 시료채취는 1999년 8월에서 2000년 5월 사이에 K1공은 3회, K2공은 2회 수행되었고, K3공과 K4공의 경우는 각 3회와 2회의 시료채취가 수행되었다.

## 3. 연구결과

K1공의 지하수는 상부구간 지하수의 pH보다는 하부구간이 전반적으로 높은 값을 보여주지만, 심도별로 pH가 증가되는 양상을 보여주지 않으며 구간별로 독특한 값을 갖는다 (Fig. 2). 또한 심도별 지하수의 pH가 시료채취시기에 따라 변화되는데 이는 시추 후 일정 기간동안에는 시추수와 시추공 주변 지하수의 혼합과정에서 나타나는 현상이며, 시추공내 지하수가 점차 지하수체계가 교란받기 이전 자연상태로 회복되었거나, 회복되고 있는 것으로 설명할 수 있다. K1공 최하부 구간은 패커 설치 후 1년 이상의 시간이 경과하였음에도 불구하고 지표수와 유사하게 낮은 pH값을 보인다. 이 구간은 텔레뷰어 검층에 의해 파쇄대가 인지되지 않았으며, 다른 구간에 비해 수리전도도가 매우 낮아서 시추 당시 주입된 시추수의 영향이 1년이 경과한 후에도 계속 잔류하고 있는 것으로 사료된다 (Fig. 2). K1공

에 대한 전기전도도 값은 대부분의 구간이 시기별 또는 심도별로 큰 차이를 보이지 않지만, K1-6 구간 지하수는 특이하게 매우 높은 전기전도도 값을 보인다 (Fig. 2). K1-6 구간의 지하수가 높은 전기전도도 값 (628~1,226  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 이상치를 보이는 것은 이 구간의 지하수가 물-암석반응에 의해 높은 전기전도도를 가지게 된 것이라기 보다는 상부 지하수와는 달리 단열대를 따라 다른 기원의 지하수가 유입되고 있는 것으로 사료된다. K2공의 심도별 지하수의 전기전도도 분포특성은 K1공과 유사하며, K3공과 K4공의 전기전도도는 각각 129~197  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 과 164~170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보여준다.

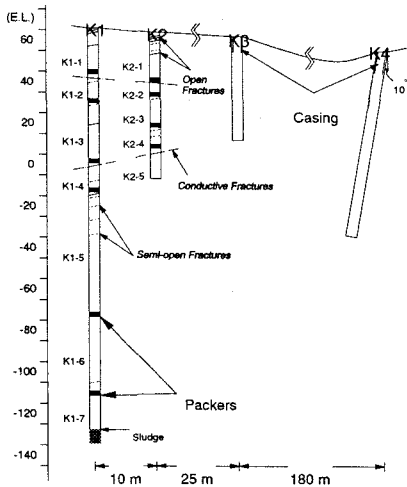


Fig. 1. Schematic diagram of boreholes in the Yeosu area.

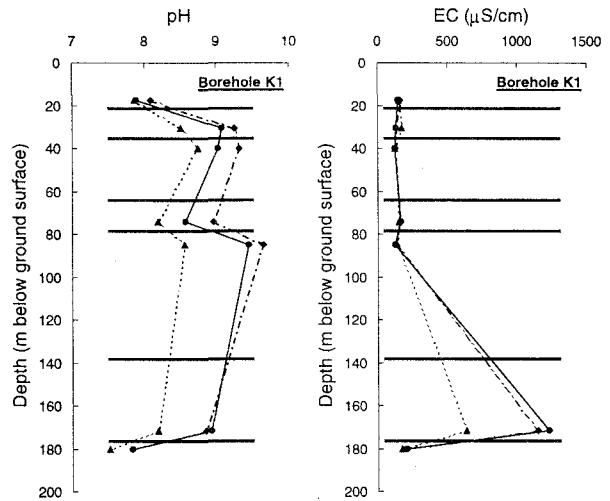


Fig. 2. pH and EC variations of each sampling sections of boreholes K1.

전기전도도 분포 특성에서도 확인되었듯이 도시된 이온들의 함량은 대부분 구간에서 시기별과 심도별로 거의 일정한 값을 보이는 반면 K1-6 구간에서 특이하게 높은 값을 보이고 있다 (Fig. 3). Na, Ca, Cl,  $\text{SO}_4$  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. 3). 이 역시 시추로 인하여 지하수체계가 교란된 이후 점차 자연상태로 회복되었거나 회복 중에 있는 것을 보여주고 있다.

$\text{NO}_3$ , Log  $\text{Pco}_2$ ,  $\text{HCO}_3$  및 F 함량은 Na, Ca, Cl,  $\text{SO}_4$ 와는 다른 양상을 보여준다 (Fig. 3).  $\text{NO}_3$  함량은 K1-1구간과 K1-7구간에서 가장 높은 값 (4.2~11.8 mg/L)을 보여준다. 연구지역이 주변환경에 의한 오염지역이 아니며  $\text{NO}_3$ 가 지표기원임을 고려할 때 K1-7구간 지하수는 시추당시 시추수의 영향이 희석되지 못하고 남아 있는 것으로 판단된다. 계산된 각 구간의 이산화탄소 분압 ( $\text{Pco}_2$ )도 역시 상기 구간에서 가장 높은 값 (10-3.3~10-3.0atm)을 보여 이를 뒷받침해주고 있고, 이러한 결과는 지하수의 pH 결과와도 잘 일치하고 있다 (Fig. 4). 기타 구간에서의 낮은 이산화탄소 분압 (10-5.2~10-3.5atm)은 지하수가 유동됨에 따라 물-암석반응에 의하여 수소소모반응이 진행됨으로써 이산화탄소에 대하여 열린계가 아닌 닫힌계에서 이산화탄소 분압이 감소하게 된 결과로서 설명할 수 있다. K1-4구간 지하수는 시추수인 지표수에 영향을 받은 K1-1구간과 K1-7구간을 제외하고 가장 높은 이산화탄소 분압 (10-4.2~10-3.5atm)을 보여준다 (Fig. 4). 이는 K1-4구간이 타구간에 비해 이산화탄소에 대하여 열린계에 가까운 환경에서 지하화반응이 진행되었음을 시사하는 것이다. K1-4구간이 이산화탄소에 대하여 열린계이었다면, 방해석 등 탄산염광물과의 반응이 수반되지 않는 환경에서 K1-4구간내 용존무기

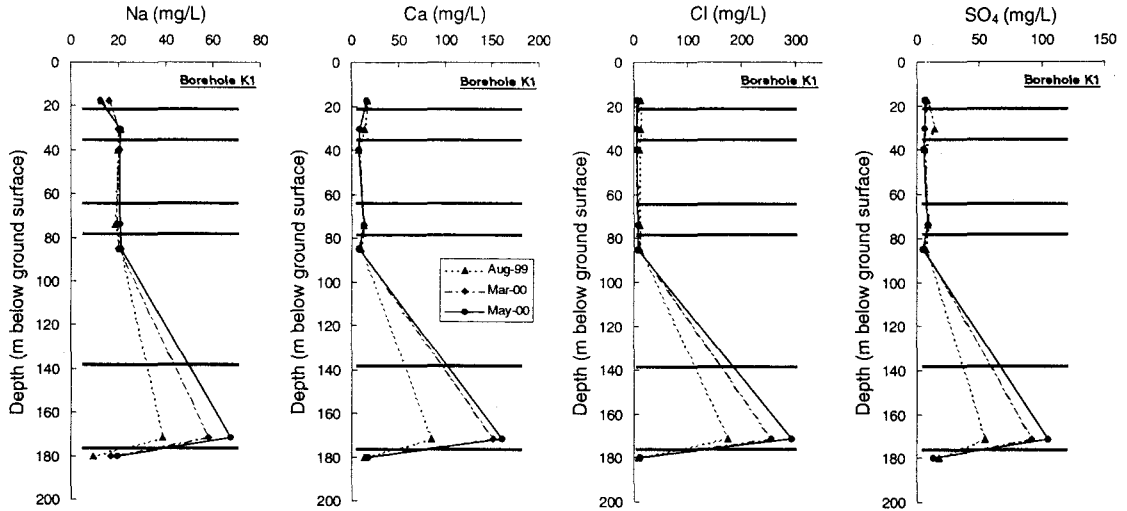


Fig. 3. Variations of Na, Ca, Cl and SO<sub>4</sub> concentrations of borehole K1.

탄소 (DIC) 함량이 가장 높은 값을 보여주어야 한다. 수리시험결과에 따르면 상기구간에서 가장 높은 수리전도도를 보여주어 이러한 사실을 뒷받침해주고 있다. 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 (Fig. 4). 일반적으로 지하수의 F기원은 주변 암석층 형석과 같은 F가 주성분인 광물이 없을 경우, 규산염광물층 운모류의 OH를 치환한 F가 용해되는 것으로 알려져 있으며, 따라서 K1-4구간 지하수의 낮은 F함량은 타구간에 비해 물-암석반응 정도가 낮은 것으로 해석할 수 있다. 이는 낮은 pH와 상대적으로 높은 이산화탄소분압 및 수리전도도가 높은 특성과 일치하는 해석 결과이다

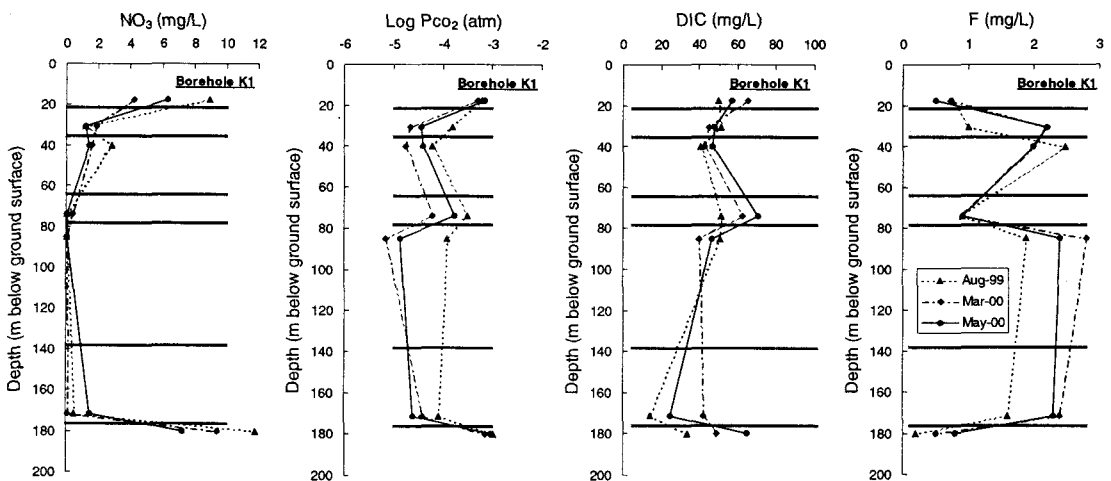


Fig. 4. Variations of NO<sub>3</sub>, Pco<sub>2</sub>, DIC and F concentrations of borehole K1.

#### 4. 결론

MP system을 이용한 지하수의 지화학 연구결과는 천부환경이라 하더라도 높은 pH환경에 이를 수 있으며, 심도에 따라 지하수의 화학조성이 점이적이지 않고 단열분포특성에 따라 구간적인 변화를 보여준다. 그러나 30m 심도내외에서 지하수의 pH가 9이상으로 나타나는 것은 이례적인 현상으로 이러한 특성을 국내 결정질암 지하수계에 그대로 적용하기에 앞서 기타 화강암 및 변성암지역에서 MP system을 설치하여 구간별 특성분석 및 해석이 이루어져야 한다. 또한 지하수의 높은 pH에도 불구하고 낮은 전기전도도 값을 보이고 있는데, 이는 그동안 국내 지하수에 대한 지화학 연구결과들에서는 없었던 현상이다.

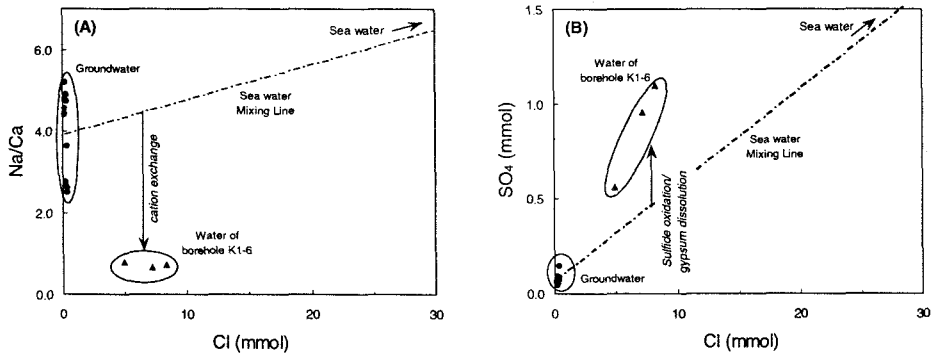


Fig. 5. Plots of Na/Ca ratio and  $SO_4$  versus Cl for groundwater and sea water of the study area.

K1-6구간 지하수가 특이하게  $Ca-Cl_2$ 형을 보이는 현상은 해수 혼합과정으로 설명될 수 있으나, 해수가 혼합되었다면 K1-6구간 지하수내 Na/Ca비 역시 높은 값을 보여야 한다. 그러나 Na/Ca비는 해수에 비해 낮은 값을 보여준다. Na/Ca비가 낮게 나타나는 요인으로서, 해수의 영향을 받은 지하수의 유동과정에서 유동로내에 생성되어 있던 2차광물과의 양이온교환반응으로 지하수내 높은 Na/Ca비는 점차적으로 낮은 Na/Ca비를 가질 수 있다 (Fig. 5). 이러한 이온교환반응이 진행되기 위해서는 단열대내 양이온교환반응 특성이 우세한 스�멕타이트같은 점토광물이 존재해야 한다. K1공으로부터 직접적으로 스�멕타이트를 확인할 수 없었지만, 지하수의 화학조성으로부터 열역학적으로 계산된 스�멕타이트계열에 대한 포화지수 값이 높은 양의 값을 보여주고 있어 이에 대한 가능성을 뒷받침해준다.

K1-6구간 지하수의  $SO_4$ 는 Cl 함량과 비교하여 해수의 혼합으로 설명될 수 있는 함량보다 높은 값을 보이고 있다 (Fig. 5). 지하수내  $SO_4$ 함량을 증가시킬 수 있는 요인으로서 경석고의 용해작용과 황철석의 산화작용으로 설명할 수 있다. 일반적으로 화산암지역에서는 황철석이 확인되는 바 K1-6구간 지하수의 상대적으로 높은  $SO_4$ 는 해수의 혼합과 더불어 황철석의 산화반응에 기인하였을 가능성이 높다.

주요어: 여수, 시추공, 지하수, 다중패커시스템, 지구화학

- 1) 한국원자력연구소
- 2) 고려대학교 지구환경과학과