

부산지역 지열수의 기원과 진화: I. 가열된 해수-암석 반응과 지하수의 혼입에 따른 희석과 냉각의 증거

성규열¹⁾ · 박맹언¹⁾ · 고용권²⁾ · 김천수²⁾

1. 서언

최근 국내 지열수의 보존과 오염문제가 대두됨에 따라 국내 지열수에 대한 부존조사가 활발히 이루어지고 있으나, 지열수에 대한 조사는 수온, 수량 및 수질에 대한 단편적인 특성에만 국한되어 왔다. 그러나, 지열수 자원의 효율적인 활용과 보존을 위해서는 지열수를 부존하고 있는 심부환경에 대한 연구가 선행되어야 한다. 최근 일부 연구자들에 의해 몇몇 지열수의 생성과정과 물-암석 반응 관계에 대한 연구가 진행된 바 있으나, 아직은 초기 단계에 머물고 있으며 국내 지열수를 배태하고 있는 심부환경에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

부산지역 지열수는 높은 Na와 Cl의 농도로 인하여 식염천으로 구분되며, 수 십 개의 온천공이 개발되어 매일 수 천 톤의 온천수가 생산되고 있다. 金奎漢과 中井信之(1981)는 부산지역 지열수의 황($\delta^{34}\text{S}$) 안정동위원소 연구를 통하여 해운대는 해수 기원(동해)의 SO_4 가 혼합된 것으로, 동래는 황화광물과 해수의 혼합형으로 해석하였다. 또한, 이들 지열수는 생성된 후 해수 또는 염수(saltwater)의 영향을 받은 것으로 보고되어 있으나(김규한과 최현정, 1998; Han *et al.*, 1999; 심형수 등, 2000; 함세영 등, 2000), 그 기원과 진화에 대한 구체적인 해석이 부족한 상태이다.

이 연구는 해운대와 동래 지열수에 대하여 물리·화학적 및 동위원소 특성 파악과 물-암석 반응 경로모델에 의한 지열수의 기원과 지구화학적 진화에 대한 연구의 일환으로, 지열수의 지구화학적 특성과 용존 이온의 분포 및 거동 특성을 규명하고, 이들 자료를 근거로 하여 지열수를 배태하고 있는 심부 지구화학적 환경에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 시료의 채취와 분석

부산지역 지열수의 지구화학적 특성과 기원을 연구하기 위하여 1999년 10월과 11월에 걸쳐 해운대와 동래온천에서 현장조사와 함께 총 11개의 시료(지열수 10개, 해수 1개)를 채취하였다. 지열수는 각 온천탕으로 온천수를 공급하는 양탕장과 개인 온천공에서 채취하였으며, 해수는 해운대 해변에서 채취하였다. 온천공들은 케이싱이 이루어져 천부지하수로부터 비교적 잘 격리되어 있으며, 채수심도는 해운대 지열수가 150~275m, 동래 지열수가 110~150m이다.

온도, pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 등은 Orion사의 pH probe(9107WP), Combination redox electrode(9678BN), Conductivity cell (013010), DO probe electrode(083010) 등이 장착된 측정장비인 Multiparameter meter(Orion 1230)를 이용하여 현장에서 보정 후 채수와 동시에 측정하였으며, 알칼리도(alkalinity)는 산중화 적정법으로 측정하였다. 화학분석 및 동위원소 분석을 위하여 모든 시료는 간이 진공펌프를 이용하여 셀룰로스 질산염 막필터($0.45\mu\text{m}$)를 통과시켜 물 속에 존재하는 부유 물질을 제거하였으며, 이 중 양이온 분석을 위한 시료는 산화, 침전 및 흡착을 방지하기 위하여 농질산을 가해 pH를 2 이하로 유지하였다. 이 후 분석을 위해 폴리에틸렌 용기에 담아 운반해서 분석까지 냉장 보관하였다. 이 밖에 삼중수소, 탄소 동위원소, 용존 황산염의 황 동위원소 및 스트론튬 동위원소분석을 위한 시료도 각각 분석 목적에 맞게 채수하였다.

3. 지열수의 생성 온도

다양한 지질온도계를 이용하여 부산지역 지열수의 심부 저장지 온도를 추정하였다. 부산지역 지열수의 심부 저장지에 대한 실리카 지질온도계는 석영 지질온도계(95.3~118.9℃)가 칼세도니 지질온도계(64.9~90.4℃)보다 높게 나타나며, 일부 이온 지질온도계보다 낮은 값을 보여준다. 180~190℃ 이상의 계에서 실리카의 농도는 석영에 의해 지배되는 반면에, 낮은 온도에서는 옥수에 의해 실리카의 농도가 지배되므로, 다른 양이온 지질온도계로부터 계산된 값을 고려할 때, 석영 지질온도계가 더 타당할 것으로 여겨진다. 지열수내에 함유되어 있는 이온을 이용한 이온 지질온도계에 의해 계산된 심부 저장지의 온도는 대체로 실리카 지질온도계로부터 계산된 값보다 높은 값을 나타내나, 일부는 낮은 값을 나타내어 다양한 온도를 보이고 있다. 지열수의 화학조성을 이용하여 지열수와 변질 광물이 평형을 이루는 온도를 계산함으로써 지열 저장지의 온도를 추정하는 지질온도계는 지열계의 평형상태에 대한 유용한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 일부 이온들만을 고려한 이온 지질온도계보다 더 타당한 심부 저장지의 온도를 추정할 수 있다(Reed and Spycher, 1984). 다성분 평형상태를 계산하여 적용한 부산지역 지열수의 평형 온도는 해운대 지열수가 130~150℃, 동래 지열수가 150~160℃의 범위를 나타내고 있다. 이는 실리카 지질온도계보다는 높은 값이며, 이온 지질온도계를 적용한 온도와 유사한 범위를 보이고 있다.

4. 지열수의 기원과 진화

해운대와 동래에서 산출되는 부산지역 지열수는 Na-Cl형으로서 다른 지역에서 산출되는 지열수에 비해 전기전도도와 총용존고체함량이 비교적 높은 것이 특징이다. 지열수와 해수 및 주변 지하수는 총용존고체함량에 의해 뚜렷이 구분되며, 지하수의 SiO₂ 함량만이 총용존고체함량과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않을 뿐 각 유형별 자연수는 고유한 영역내에서 정의 상관관계를 보이고 있다. 지열수의 이온 함량은 Mg를 제외하면 주변 지하수와 비슷하거나 높은 함량을 나타내며, 해운대 지열수의 Ca를 제외한 다른 이온함량은 해수보다 낮은 값을 나타낸다. 부산지역 지열수와 주변 지하수의 SiO₂ 함량은 서로 유사한 범위를 가지며 해수보다 상당히 부화되어 있어, 규산염 광물과의 활발한 반응이 진행되었음을 알 수 있다.

온도와 주요 이온들간의 상관관계를 살펴보면, 해운대 지열수의 주요 이온들은 온도와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 반면, 동래 지열수는 Mg를 제외한 주요 이온들이 온도가 증가함에 따라 농도가 대체로 증가하는 약한 정의 상관관계를 보여주고 있다. 해운대와 동래 지열수는 함량의 차이는 있으나 동일한 이온 함량 특성을 보이고 있으며, 해수와 지하수는 지열수와는 다소 상이한 이온 함량 특성을 보이고 있다(Fig. 1). 해수 중의 주요 양이온의 함량은 Na>Mg>Ca>K의 순으로 감소하나, 지열수는 Na>Ca>K>Mg의 순으로 Ca가 해수성분에 비해 부화되어 있고 Mg가 결핍되어 있는 특징을 보여주고 있다. 지하수는 Ca>Na>Mg>K의 순으로 물-암석 반응의 결과를 반영하고 있으며, 지열수에 비해 Mg가 상대적으로 부화되어 있는 특징을 보인다. 해운대와 동래 지열수의 Br함량은 모두 해수보다 낮은 값을 보이며, 온도가 증가함에 따라 두 지열수 모두 증가하는 정의 상관관계를 보인다(Fig. 2). 이러한 특징은 부산지역 지열수가 단순한 해수의 혼합이 아닌 다른 지구화학적 환경에 의해 형성되었음을 시사하며, 주변 지하수의 혼입에 의해 염농도와 수온의 감소가 일어났을 가능성을 시사한다.

상기의 지구화학적 특성을 종합하면, 부산지역 지열수는 심부로 순환하는 해수(?)가 물-암석 상호반응에 의해 높은 염농도의 지열수가 형성된 후 상승하는 동안 저온의 주변 지하수와 혼합에 의해 기원되었음을 시사한다. 만약, 부산지역 지열수의 염농도가 심부로 순환하는 해수와의 반응에 의해 증가되

었다면, 현생 해수뿐만 아니라 고기해수(paleo- seawater)에 의한 영향도 고려되어야 한다. 그러나, 부산지역 지열수의 지구화학적 특성만으로는 이러한 가능성을 확정하기는 어려우며, 부산지역 지열수의 기원과 진화를 정확히 규명하기 위해서는 현재 수행 중인 동위원소 연구와 함께 부산지역 지열수의 전체 지구화학계에 대한 물-암석 반응 모델링이 수행되어야 할 것이다.

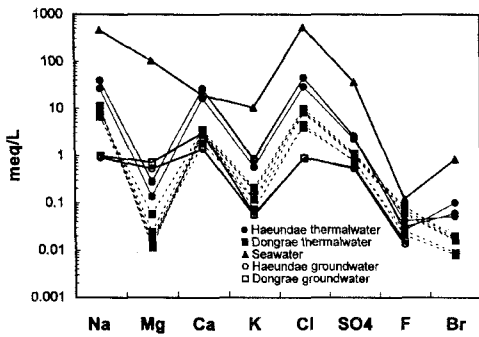


Fig. 1. Fingerprint diagram of water samples from the Busan area. Groundwater data used average values and are from Shim *et al.* (2000) and Hamm *et al.* (2000).

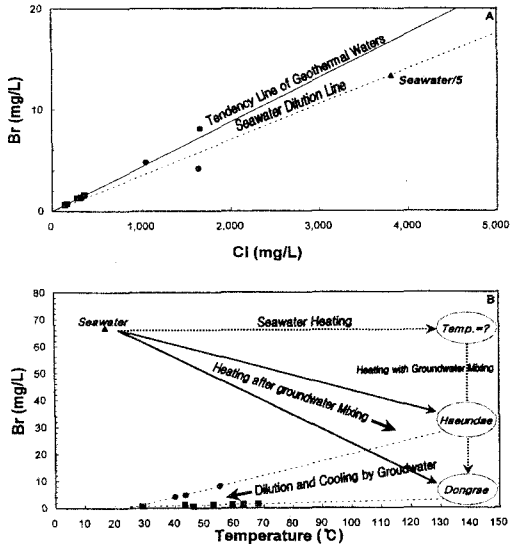


Fig. 2. Diagram of A) Cl (mg/L) versus Br (mg/L) and B) temperature (°C) versus Br of geothermal water and seawater from the Busan area. Symbols are the same as in Fig. 1.

주요어 : 지열수, 가열된 해수-암석반응, 지하수혼입, 냉각과 희석, 반응경로모델링

- 1) 부경대학교 환경지질과학과
- 2) 한국원자력연구소