

Estimation of reservoir temperatures and subsurface environments for CO₂-rich springs in Kangwon Province

강원도 지역 탄산용출수에 대한 심부온도 및 심부환경의 추정

최현수, 고용권*, 윤성택, 배대석

고려대학교 지구환경과학과 · 한국원자력연구소 심부지질환경연구
isotope1@korea.com

<요약문>

강원도 지역의 대표적인 탄산용출수에 대한 수리지구화학적 연구를 통하여 심부 지열 저장지의 온도와 심부환경을 추정하였다. 탄산용출수는 공통적으로 약산성의 pH와 높은 이온함량으로 특징되지만, 화학적으로는 Na-HCO₃ 형, Ca-Na-HCO₃ 형, 그리고 Ca-HCO₃ 형으로 뚜렷이 구분된다. 심부에서 생성된 탄산용출수가 지표로 상승하는 도중에 수반된 지표수 혼합차이로 인해 이런 화학조성의 차이가 유발된 것으로 판단된다. Na-HCO₃ 형 탄산수는 화학 조성상 'mature water'의 특징을 보여주는 반면, 다른 두 유형의 탄산수들은 'immature water'에 해당하였다. Na-HCO₃ 형 탄산수에 대하여 실리카, Na-K 및 Na-K-Ca 지온계를 적용한 결과, 약 115~157도의 심부저장지 온도가 산출되었으며, 이 결과는 다성분 평형계를 이용한 추정 온도 (약 140~160도)와도 잘 일치하였다. 반면, Ca-HCO₃ 형 탄산수들은 지표수와의 혼합 때문에 상대적으로 낮고 넓은 범위의 추정 온도 (약 60~130도)를 나타내었다. 따라서 연구 지역 내 탄산용출수의 심부저장지 온도는 Na-HCO₃ 형에 대해서만 타당하게 적용될 수 있으며, 약 140~160도일 것으로 추정된다.

key words : 탄산용출수, 지온계, 다성분평형, 심부환경

1. 서론

심부저장지에서 지하수와 암석간에 화학적인 평형상태에 도달하였고 지하수가 상승하는 도중에 화학적 재평형이 일어나지 않았다고 가정한다면, 지표에서 채취한 유체의 화학조성에 대하여 여러 가지 지온계를 적용함으로써 심부저장지의 온도를 추정할 수 있다^{1,2,3}). 특히, 탄산용출수는 일반적으로 심부 순환하는 지하수로 알려져 있어 심부환경을 밝히기 위해 심부온도를 추정하는 것은 매우 의미있는 일이다. 하지만 탄산용출수가 지표로 상승하는 동안 일어나는 지표수와의 혼합은 원래의 화학조성 변화를 초래하며 따라서 탄산수에 지온계를 적용할때는 특별한 주의를 요한다⁴). 하지만 이런 문제점에도 불구하고

하고 탄산수의 심부온도를 추정하는 많은 연구가 수행되어 왔다^{4,5,6)}. 본 연구에서는 기존에 알려진 여러 이온지온계 뿐만 아니라 다성분평형계를 적용하여 탄산용출수의 심부저장지의 온도를 타당하게 추정하여 보았다.

2. 지질 개요

연구지역의 지질은 주로 선캠브리아기의 편마암류들과 중생대의 화강암류로 이루어져 있다. 선캠브리아기의 편마암류 중 호상흑운모 편마암이 연구지역에서 가장 넓게 분포하고 있다. 중생대 화강암류들은 저반형태로 편마암류들을 관입하고 있으며, 흑운모, 복운모 및 문상화강암으로 이루어져 있다. 주요 지질구조로는 상당한 연장을 보이는 북동방향의 단층들로 특징되는데, 탄산용출수는 이 단층들을 따라 자연용출된다.

3. 연구 결과

3-1. 이온지온계

세 유형의 탄산용출수는 Ca/Na, Mg/Na 및 Na/K 몰비에서 명확한 차이를 보여준다 (Fig. 1). 가장 이온함량이 높은 Na-HCO₃ 형 탄산수는 가장 높은 Na/K비 및 가장 낮은 Ca/Na와 Mg/Na 비를 보여 주어 지표로 상승하는 도중에 화학적 변화가 가장 적었음을 나타낸다. 반면에 다른 두 유형의 탄산수 (즉, Ca-Na-HCO₃ 형 및 Ca-HCO₃ 형)들은 Na에 비해 상대적으로 Ca와 Mg가 부화되어 있는데, 이는 지표수와의 혼합에 따른 이차적인 광물용해에 의하여 화학조성이 변하였음을 보여주었다³⁾. 탄산용출수들이 주변 광물들과 평형상태를 이루었는지, 그리고 이 때의 평형온도는 얼마였는지를 추정하기 위하여 Giggenbach가 제안한 triangular diagram³⁾에 도시하여 보았다. 그 결과, 대부분의 Na-HCO₃ 형 탄산수는 'partially equilibrated or mature' 영역에 도시된 반면, 다른 두 유형의 탄산수들은 'immature' 영역에 도시되었다 (Fig. 2). 따라서 Ca-HCO₃ 및 Ca-Na-HCO₃ 형 탄산수들에 대해서는 Na-K 또는 K-Mg 지온계 등을 적용하는 것은 다소 문제가 있을 수 있지만, 반면에 Na-HCO₃ 형 탄산수에 대하여는 어느 정도 신뢰를 가지고 지온계를 적용할 수 있었다.

실리카지온계 적용 결과, Na-HCO₃ 형 탄산수는 약 100~133도로서 72~122도의 온도범위를 나타낸 Ca-HCO₃ 형 보다는 상대적으로 좁고 높은 온도를 산출하였다. Na-HCO₃ 형 탄산수에 대한 Na-K 지온계는 약 42~202도의 온도 범위를 보여주었지만, Ca-HCO₃ 형 탄산수는 높은 Ca 함량 때문에 대부분

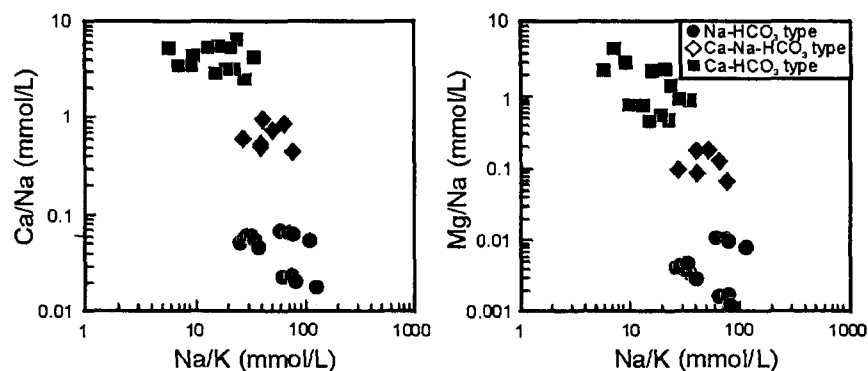


Fig. 1. Digrams showing the relationships between Na/K molar ratio and Ca/Na or Mg/Na molar ratios for various types of CO₂-rich springs in Kangwon district.

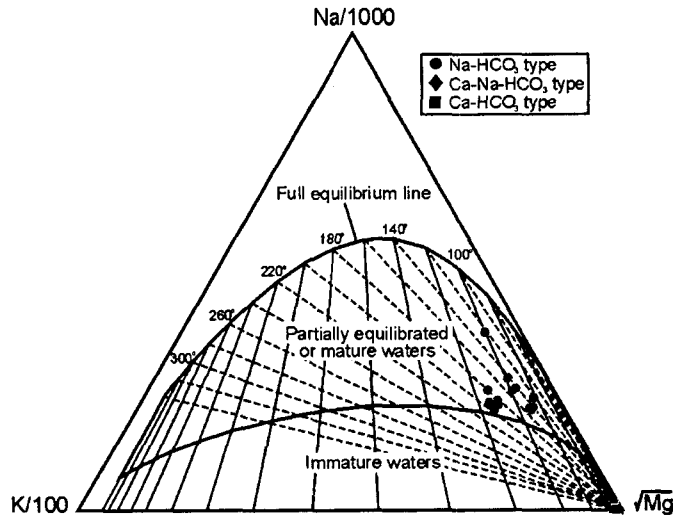


Fig. 2. Plots of the chemistry of various types of CO₂-rich springs on a Giggenbach's triangular diagram³⁾.

200도 이상의 높은 온도로 산출되었다. 높은 Ca 함량에 의한 영향을 보정하기 위하여 제시된 Na-K-Ca 지온계는 Na-HCO₃ 형 탄산수에 대해 94~149도의 온도를 보여 주어 실리카지온계와 일치된 결과를 나타냈다. 또한 Na-HCO₃ 형 탄산수 중 일부 시료는 실리카, Na-K 및 Na-K-Ca 지온계들에서 약 115~157도의 일치된 온도를 보여줌으로써, 이 온도 범위가 타당한 심부온도로 추정된다.

3-2. 다성분 평형계

최근 온도의 함수로서 특정 유체와 열수광물들간의 평형상태를 연속적으로 고려함으로써 심부온도를 최상으로 추정할 수 있음이 알려졌다^{7,8)}. 즉, 온도변화에 따라 각 광물들의 포화지수는 변하게 되는데, 이때 여러 광물들이 동시에 포화상태가 되는 온도를 산출하면 이는 지하 심부에서의 광물들과 유체 간의 평형온도로 간주할 수 있다. 이런 접근법은 평형상태의 유체와 비평형상태의 유체를 구분할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 온도에 따른 각 광물들의 포화지수를 계산하기 위해 SOLVEQ란 컴퓨터 코드를 이용하였다.

Fig. 3은 TDS 함량과 이온함량을 근거로 대표적인 Na-HCO₃ 형과 Ca-HCO₃ 형 탄산수를 선택하여 다성분평형계를 적용하여 온도에 따른 각 광물들의 포화지수의 변화를 나타낸 그림이다. Na-HCO₃ 형 탄산수 (Fig. 3a)에 대해서는 quartz, beidellite, K-feldspar, montmorillonite, pyrophyllite들은 약 140~

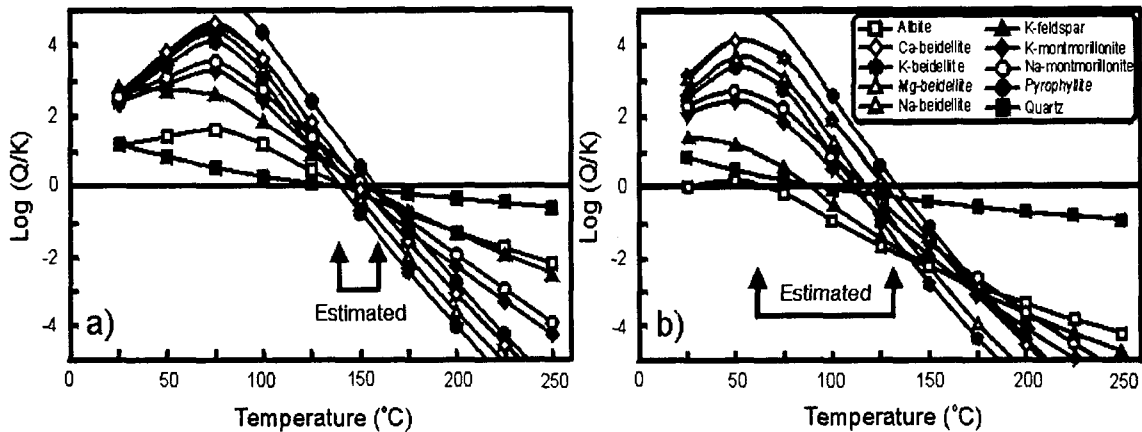


Fig. 3. Diagrams showing the change of calculated saturation indices (log Q/K) of various minerals as a function of temperature: (a) Na-HCO₃ type; (b) Ca-HCO₃ type.

160도에서 포화상태를 보여주어, 이 온도가 심부저장지에서 유체가 평형상태에 도달한 온도를 지시하는 것으로 가정할 수 있다. 반면에 Ca-HCO₃ 형 탄산수에서는 광물들이 평형상태를 나타내는 포화지수가 0인 지점에서 만나지 않으며, 또한 Na-HCO₃ 형에 비해 상대적으로 낮고 넓은 온도범위(60~130도)를 보여 주었다 (Fig. 3b). 이런 경향은 Ca-HCO₃ 형 탄산수가 비평형상태의 유체임을 나타내며, 이는 지하에서 지표로 상승하는 동안 일어난 지표수와의 혼합 때문으로 판단된다.

Na-HCO₃ 형 탄산수 중 일부 대표 시료에 대하여 다성분평형계를 적용하여 추정된 지열저장지 온도는 약 140~160도로서 석영지온계 (133도), Na-K 지온계 (137~147도) 및 Na-K-Ca 지온계 (149도)의 적용 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구지역 탄산수의 심부저장지의 온도는 140~160도로 평가된다.

4. 결론

강원도 지역에 산출되는 탄산수 중 Na-HCO₃ 형은 수리화학적으로 'mature water'에 해당하는 반면 다른 두 유형 탄산수 'immature water'에 해당함으로써, Na-HCO₃ 형 탄산수만이 지온계를 적용할 수 있었다. Na-HCO₃ 형 탄산수에 대하여 실리카, Na-K, Na-K-Ca 지온계를 적용한 결과, 각각 100~133도, 115~157도, 141~149도의 온도범위를 보여주었다. 또한 다성분평형계를 적용하여 심부온도를 추정한 결과, quartz, albite, beidellite, K-feldspar, montmorillonite 및 pyrophyllite가 약 140~160도 근처에서 거의 동시에 포화되었으며, 특히 이 온도는 여러 이온지온계를 적용한 추정 온도와의 잘 일치하였다. 반면, Ca-HCO₃ 형 탄산수에 대하여 다성분평형계를 적용한 결과, 약 60~130도에 이르는 상대적으로 낮고 넓은 온도 범위를 보여주었다. 상기한 추정 온도는 한반도 지열 부존에 대한 이해는 물론 활용 방안 수립에도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

1. Fournier, R.O., and Truesdell, A.M., "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters", *Geochimica Cosmochimica Acta*, 43, pp. 1543-1550 (1973).
2. Arnórsson, S., "Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems. Implications for chemical geothermometry investigations", *Geothermics*, 12, pp. 119-128 (1983).
3. Giggenbach, W.F., "Geothermal solute equilibria: derivation of Na-K-Ca-Mg geothermometers", *Geochimica Cosmochimica Acta*, 48, pp. 2693-2711 (1988).
4. Fouillac, C., "Chemical geothermometry in CO₂-rich thermal waters. Example of the French Massif Central", *Geothermics*, 12, pp. 149-160 (1983).
5. Pauwels, H., Fouillac, C., Goff, F., and Vutaz, F.D., "The isotopic and chemical composition of CO₂-rich thermal waters in the Mont-Dore region (Massif-Central, France)", *Applied Geochemistry*, 12, pp. 417-427 (1997).
6. Pastorelli, S., Marini, L., Hunziker, J.C., "Water chemistry and isotope composition of the Acuarosa thermal system, Ticino, Switzerland", *Geothermics*, 28, pp. 75-93 (1999).
7. Reed, M.H., and Spycher, N.F., "Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution", *Geochimica Cosmochimica Acta*, 48, pp. 1479-1492 (1984).
8. D'Amore, F., and Mejia, J.T., "Chemical and physical reservoir parameters at initial conditions in Berlin geothermal field, El Salvador: a first assessment", *Geothermics*, 28, pp. 45-73 (1988).