

부곡지열수의 지화학적 진화과정

고용권¹⁾, 김성용²⁾, 김천수¹⁾, 김건영¹⁾, 최현수¹⁾

1. 서론

경남 창원군에 소재한 부곡지열수는 국내에서 가장 높은 용출온도 (약 77°C)를 보이고, 지화학적으로는 Na-SO₄유형에 속하며, 높은 pH와 H₂S을 함유하고 있는 것으로 특징되어 진다. 기존 지화학 및 동위원소 연구결과 (Yun *et al.*, 1998)에 의하면, 부곡지열수는 심부열원에 의해 가열되었으며, 마그마 기원의 H₂S와 진동층에 함유되어 있는 황철석과의 산화반응에 의하여 다량의 SO₄를 포함하게 되었으며, 주변 모암과의 반응에 의하여 지화학적으로 진화된 것으로 해석하고 있다. 그러나, 이러한 결과는 높은 pH, 동위원소결과 및 지질환경 등과 부합되지 않아 기존 연구결과에 대한 재해석을 필요로 하고 있다. 본 연구에서는 기존 지화학 및 동위원소자료를 토대로 부곡지열수의 지화학적 진화과정을 재해석하였으며, 심부지장지의 지열온도계의 적용을 재검토하였다.

2. 연구방법

지열수와 주변지하수를 포함하여 부곡지열수 지역에서 총 28개의 대표적인 물시료가 2회에 걸쳐서 채취되었으며, 현장측정이 수반되었다. 지열수는 대부분 300~400m 심도를 가지며, 주변지하수는 15~500m 심도를 보여준다 (Yun *et al.*, 1998). pH, Eh, 온도, 전기전도도 및 알칼리도가 현장에서 측정되었고, 주요화합조성 및 동위원소조성 ($\delta^{18}\text{O}$, δD , Tritium, $\delta^{34}\text{S}$)이 분석되었다. 지화학자료에 대한 계산은 SOLVEQ (Reed, 1982)를 이용하였다.

3. 현장자료, 화학특성 및 동위원소 특성

시료채취위치, 온도 및 지화학자료로부터, 부곡지열수는 크게 세가지 유형으로 구분할 수 있다 (지열수 I, II, III형, Fig. 1). 지열수 I형과 지열수 II형은 유사한 온도 (55.2~77.2°C)를 보이며, 지열수 I형의 pH (평균 8.7)가 지열수 II형 (pH, 평균 8.4)에 비해 다소 높은 값을 보여준다 (Fig. 1). 지열수 중 산화-환원전위는 지열수 II형이 가장 높은 값을 보여주고 있고, SO₄함량이 가장 높은 값을 보이는 반면, 지열수 I형은 지열수 II형에 비해 상대적으로 낮은 산화-환원전위와 SO₄함량을 나타낸다. 즉, 지열수 I형과 II형의 화학적으로 가장 큰 차이를 보이는 SO₄함량은 산화-환원전위와 관련이 있는 것으로 사료된다. 지열수지역 중심부로부터 벗어난 지역에 위치하고 낮은 온도를 보이는 지열수 III형의 경우는 가장 높은 pH (up to 10)와 매우 낮은 산화-환원전위를 보이는 바, 이는 천부환경에 있는 유기물에 의한 산소소모반응이 이루어진 결과로 사료된다 (Fig. 1).

지열수 II형은 지열수 I형에 비해 높은 이온함량을 보여준다. Na와 K함량이 지열수 II형에 부화되어 있고, SO₄함량과 정의 관계를 나타낸다. 지열수 II형은 상대적으로 낮은 pH와 높은 SO₄함량을 보여주는 것으로 미루어, H₂S 또는 황철석의 산화반응이 pH를 낮추는 역할을 하며, 이로써 지열수 II형이 물-암석반응이 활발하게 진행되어 지열수 I형에 비해 높은 이온함량을 보이는 것으로 사료된다. 이와는 달리 물-암석반응시 반응온도조건에 따라 매우 다양하게 나타나는 SiO₂함량은 지열수 I형이 지열수 II형에 비해 높은 값을 보여주고 있다 (Fig. 1). 부곡지열수에 대한 화학지열온도계의 적용결과는 실리카지온계가 약120°C를 보이는 반면, Na/K지온계는 약 140~220°C로 매우 넓은 값을 보여준

다. 다성분계의 평형관계를 이용한 지온계로 부터 부곡지열수의 심부저장지의 온도를 추정한 결과 약 130°C 내외를 보여주었다.

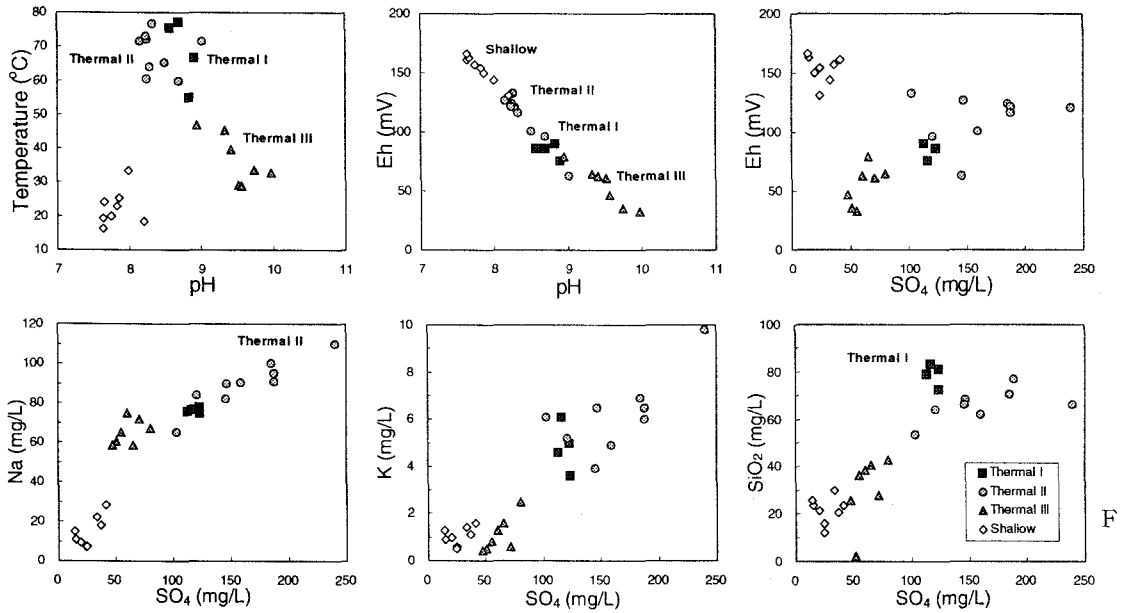


Fig. 1. Relationships between in-situ and chemical data of the water samples from the Bugok area.

산소 및 수소동위원소 결과는 각 유형의 지열수가 뚜렷한 값을 보여주며, 세계강우선 (Meteoric water line) 상에 도시된다 (Fig. 2). 동위원소 조성값은 지열수 I형 → 지열수 II형 → 지열수 III형 → 주변지하수 순으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 동위원소의 고도효과를 고려하면 각 유형의 지열수를 형성한 지하수의 함양지역은 서로 상이하였음을 보여준다. 삼중수소와 현상측정온도와의 상관관계는 부의 관계를 보이는 반면, 삼중수소와 산소동위원소는 정의 관계를 나타낸다. 이는 각 유형의 지열수의 심부에서 천부에 상승하는 과정에서 주변지하수와 혼합된 증거를 보여주는 것이다.

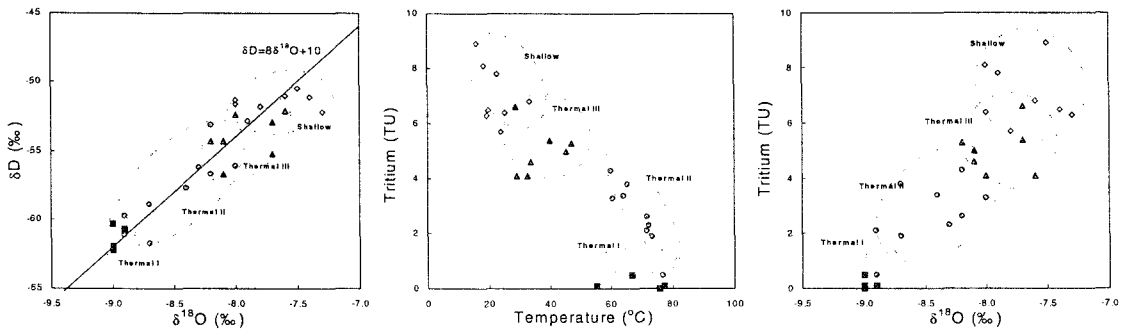


Fig. 2. The relationships between $\delta^{18}\text{O}$, δD , tritium and temperature of water samples from the Bugok area.

동위원소결과와 Cl과 F함량과의 상관관계로부터 지열수내 Cl과 F의 기원을 추정할 수 있다. Cl함량은 삼중수소 또는 산소동위원소조성이 증가할수록 같이 증가하는 경향을 보여준다. 즉, 지열수내 Cl함량은 심부기원이나 물-암석반응이 기원이 아닌 천부 또는 오염기원으로 설명할 수 있다. 반면에 F함량은 삼중수소와 부의 관계를 보여주고 있어, 지열수내 F의 기원은 물-암석반응에 의한 것으로 고려할 수 있다.

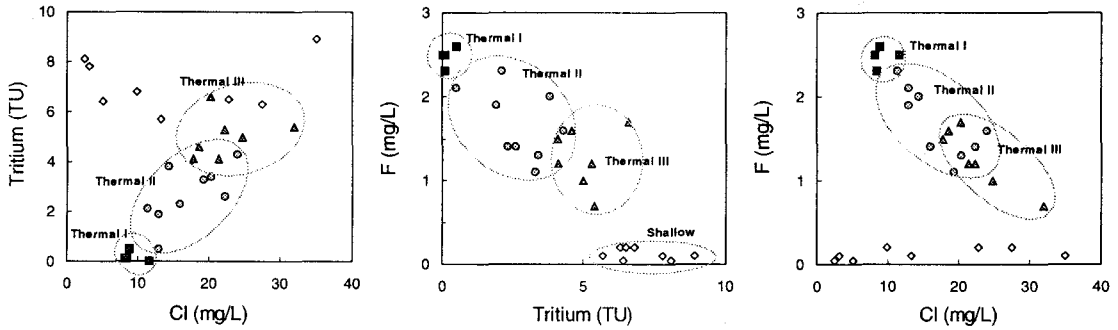


Fig. 3. The relationships between tritium, Cl and F of water samples from the Bugok area.

황동위원소를 이용하면 지하수내 용존하여 있는 SO_4 의 기원을 밝힐 수 있다. 그러나 부곡지열수의 경우는 SO_4 기원의 해석이 단순하지 않다. 우선 부곡지열수의 경우 SO_4 의 기원으로서 1) 마그마기원의 H_2S 의 산화반응, 2) 퇴적암에 함유된 황철석의 산화반응, 3) 퇴적암에 분포하는 황산염광물 (eg. gypsum or anhydrite)의 용해를 고려할 수 있다. 마그마기원에 의한 H_2S 가 부곡 지열수내 SO_4 의 기원이라 한다면, 9 ppm까지 함유되었다고 보고된 H_2S 함량이 쉽게 설명된다. 그러나 이와 같은 반응은 지열수가 강한 산성을 보여주어야 하며, 이에 따른 산성변질작용이 관찰되어야 한다. 오히려 부곡지열수는 pH가 모두 8.0 이상인 알칼리성을 보여주고 있다. 또한 지열수 I형의 황동위원소조성은 높은 값 (>13‰)을 보여주고 있어 H_2S 기원으로 해석하기 어렵다. 두 번째의 경우로 퇴적암에 포함된 규산염 및 탄산염광물의 용해작용과 함께 황철석의 산화반응을 고려할 수 있으나, 이는 부곡지열수가 H_2S 를 함유하는 것과 높은 황동위원소조성을 보인다는 점을 설명할 수 없다. 이와는 달리 황산염광물의 용해는 부곡지열수의 H_2S 존재, 높은 pH, 높은 SO_4 함량에 대해 매우 타당한 해석을 가능하게 해준다. 즉, 황산염광물의 용해에 따라 다량의 SO_4 함량이 지하수에 포함되었으며, 지열수가 환원환경에 있는 심부환경으로 순환하는 과정에서 황산염환원반응이 진행되어, H_2S 를 형성하고 pH는 상승한 것으로 설명할 수 있다. 또한, 이러한 해석은 지열수 I형의 황동위원소조성이 높은 사실과도 잘 일치한다.

4. 지열수의 진화과정

상기 지질, 지화학 및 동위원소자료의 해석으로부터 부곡지열수의 지화학적 진화과정을 Figure 4와 같이 도시할 수 있다. 이를 간단하게 3가지 단계로 요약하여 설명하면, 첫째, 높은 지형에서 함양된 지하수가 심부로 순환하게 되면서, 진동층 하부의 황산염광물을 함유하고 있는 함안층내에서 물-암석반응을 통하여 다량의 SO_4 를 함유하게 된다. 이때 낮은 온도조건과 규산염광물의 용해속도를 고려한다면 지하수의 화학적 유형은 Ca- SO_4 형으로 추정할 수 있다. 둘째, 계속 심부로 순환하는 과정에서 환원환경에 접하게 되어 H_2S 가 생성되고, 심부 열원에 의하여 약 130°C까지 가열되어 규산염광물과의 반응정도가 높아진다. 이때 pH는 상승하고 SO_4 함량은 감소하게 되며, 방해석이 침전조건에 놓이게

됨으로써 결국 지열수는 Na-SO₄형을 띠게 된다. 이것이 지열수 I형에 해당된다. 셋째, 이렇게 형성된 지열수가 유동로를 따라 상승하는 과정에서 지열수 I형을 형성시킨 지하수 보다 덜 깊게 순환하는 지하수와 혼합과정을 거치게 되어, 지열수 II형을 형성하게 된다. 혼합된 지하수는 함안층 상층부인 진동층을 대부분 순환하는 지하수로서 황화광물과의 반응에 의해 상대적으로 낮은 pH와 높은 SO₄함량을 갖는 것으로 추정할 수 있다. 지열수 III형은 이렇게 형성된 지열수 I형과 II형이 계속 상승하면서 천부환경의 지하수와 혼합된 결과로 해석될 수 있다. 이때 부곡지역 천부지하수 환경은 탄산염광물과 유기물에 의해 높은 pH와 낮은 산화-환원전위를 가지는 것으로 사료된다.

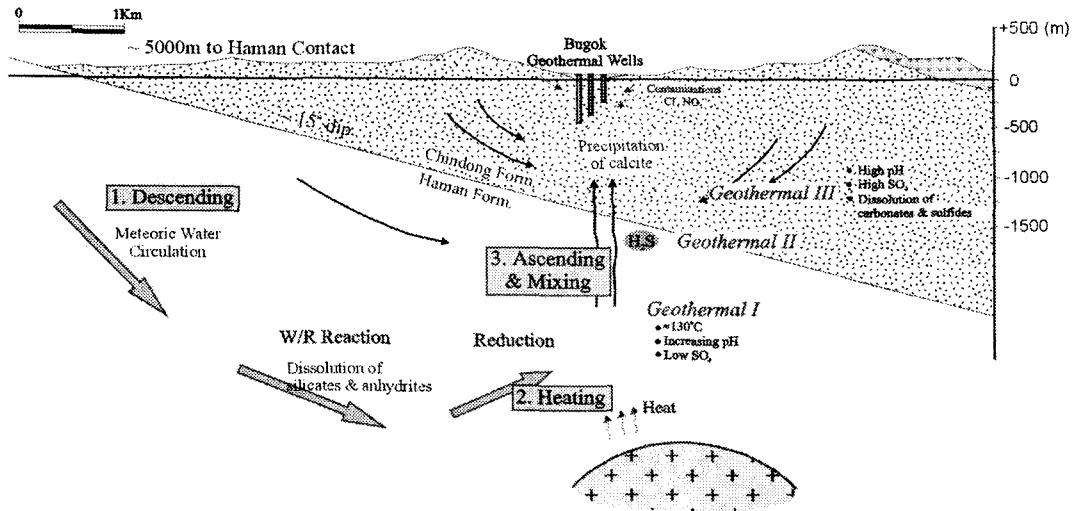


Fig. 4. Schematic cross-section showing the probable evolution of the Bugok geothermal water in depth.

5. 참고문헌

- Yun, S. T., Koh, Y. K., Kim, C. S. and So, C. S., 1998, Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics I. Bugok area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 31, p. 185-199.
- 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.

주요어: 부곡, 지열수, 지온계, 지구화학, 동위원소

- 1) 한국원자력연구소
- 2) 한국과학재단