

강화 석모도 지역 온천수와 지하수의 수리지구화학 및 동위원소 특성

정찬호^{1)*} · 정윤정²⁾ · K. Nagao³⁾ · 김규한²⁾ · Y. Yamamoto³⁾ · 최훈공³⁾ · 신선호¹⁾

1. 서 론

남한에 분포하고 있는 15곳의 전통적인 온천의 천온이 25℃~79℃내외이다. 비화산성온천인 남한의 온천은 주로 중생대 화강암류 분포지역에 위치하고 있으며 천온이 주로 40℃~60℃ 내외로 화산성온천에 비하여 온도가 낮다.

2002년 경기도 강화 석모도 지역에서 천온이 약 69℃나 되는 새로운 온천이 발견되어 현재 4개공에서 온천수가 용출되고 있다. 석모도 온천은 북한의 황해남도 지역 연안온천, 용진온천의 남쪽 연장상에서 발견되었다. 지리적으로 석모도 온천은 황해도 지역의 온천수와 지질 구조적 및 성인적으로 밀접한 관련성이 있을 것으로 추정된다.

최근 이승구 등(2006)에 의한 온천수의 Sr 동위원소비와 용출지역 기반암인 화강암의 Sr 동위원소비 분석연구에서 온천수의 Sr 동위원소비($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7145$)가 흑운모 화강암(132 Ma, 초생치 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7125$)과 유사한 점에서 온천수의 기원이 이들 화강암과의 관련성이 있음을 보고하였다. 또한 송윤호 등(2005)은 석모도 남쪽 온천 시추공에서의 물리검층 연구 결과 지온증가율이 45~46.7℃/km에 달하는 고온의 대수층이 존재함을 보고하였다.

본 연구에서는 석모도 지역에 분포하고 있는 주요 온천공의 온천수와 동일 지역의 지하수, 지표수를 대상으로 지화학 수질성분을 비교분석하였고, 열수-암석 반응 및 온천수와 지하수의 혼합 등에 따르는 온천수의 화학성분 특성을 검토하였다. 특히 온천수 내 헬륨가스와 같은 영축기체 동위원소 분석을 통해 온천수의 기원을 해석하고 온천수의 진화를 연구하였다.

2. 본 론

석모도 온천 지역에서 4개의 온천수 시료와 온천공 주변에서 21개의 지하수, 7개의 지표수, 1개의 해수 시료와 4개의 온천가스 시료에 대하여 현장측정과 화학성분, 안정 동위원소 비, 헬륨과 알곤 동위원소비를 분석하였다.

석모도 지역 온천수의 pH는 6.42~6.77 범위로 약산성의 특성을 보인다. 온천수의 온도는 43.3~68.6℃이다. 전기전도도는 60,200~84,300 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 비교적 높은 값을 나타내고 있다. 온천수의 화학적 유형은 Na-Cl형이며 주요 양이온인 Na와 Ca의 농도는 각각 5,365~7,154 mg/L, 3,677~4,860 mg/L 범위를 나타내고 있다. 주요 음이온인 Cl은 14,487~18,503 mg/L의 범위로 해수형의 특징을 나타내고 있다.

한편, 연구지역 지하수의 pH는 6.01~7.71 범위의 약산성을 보이며 시료채취시의 온도는 5.10~20.8℃의 범위이다. 전기전도도는 65.3~454 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 넓은 범위를 보인다. 지표수의 pH는 6.28~7.85 범위를 보이며, 온도는 0.60~27.5℃이다. 지표수의 전기전도도는 59.8~

주요어 : 석모도 온천, 화학성분, 안정동위원소, 헬륨 알곤 동위원소, 해수형 온천

1) 대전대학교 지반설계정보공학과 (chjeong@dju.ac.kr)

2) 이화여자대학교 과학교육과 (kyuhan@ewha.ac.kr)

3) 동경대학교 지각화학연구실 (nagao@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp)

839 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 넓은 범위를 보인다. 지하수와 지표수의 화학적 특성은 각각 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 형, $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 형에 속하고 있다.

연구지역 온천수의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값은 각각 $-4.41\sim-4.47\%$, $-32.0\sim-33.5\%$ 의 범위를 보이고, 지하수의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값은 각각 $-7.07\sim-8.55\%$, $-50.24\sim-59.6\%$ 의 범위를 보인다. 지표수의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값은 각각 $-7.89\sim-8.61\%$, $-51.54\sim-59.8\%$ 범위이다. 이들 온천수, 지하수, 지표수의 산소 수소 안정동위원소비는 모두 순환수 기원의 특성을 나타내고 있다.

온천수의 황 동위원소비($\delta^{34}\text{S}$)는 $23.1\%\sim 23.5\%$ 의 범위이다. 석모도 지역해수의 황 동위원소비는 20.2% 로 세계 기타지역 해수의 황 동위원소 값과 유사하다. 석모도 온천수 중의 황산염(SO_4^{2-})의 황의 기원은 해수기원임을 나타내고 있다.

온천수 내에 용존되어 있는 온천가스 중 영족기체 헬륨 동위원소 비($^3\text{He}/^4\text{He}$)는 $1.243\times 10^{-6}\sim 1.299\times 10^{-6}$ 의 범위로 대기-지각 혼합선보다 대기-맨틀 혼합 특성을 나타내어 온천수 중의 헬륨이 맨틀에서 유래하고 있음을 의미하고 있다. 또한 석모도의 모든 온천수가 유사한 헬륨가스 기원을 보임에도 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 값의 차이가 있다. 이는 대기기원의 헬륨가스를 많이 함유하고 있는 천부기원 지하수와 맨틀기원 헬륨가스를 함유하고 있는 온천수의 혼합 정도의 차이 때문으로 해석된다. 즉, 높은 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 비의 온천수 중의 영족기체 가스는 심부 열 원으로부터의 비율이 높은 것을 의미한다.

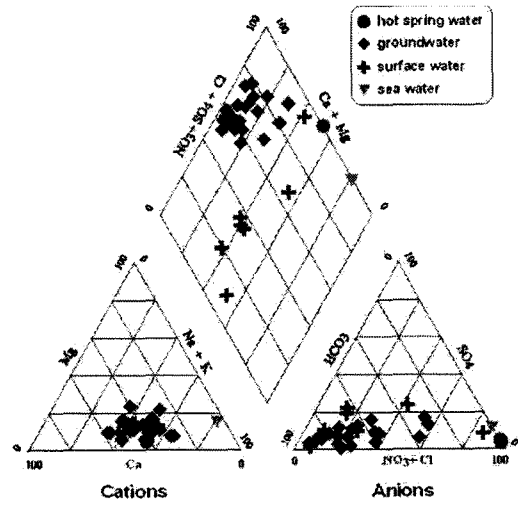
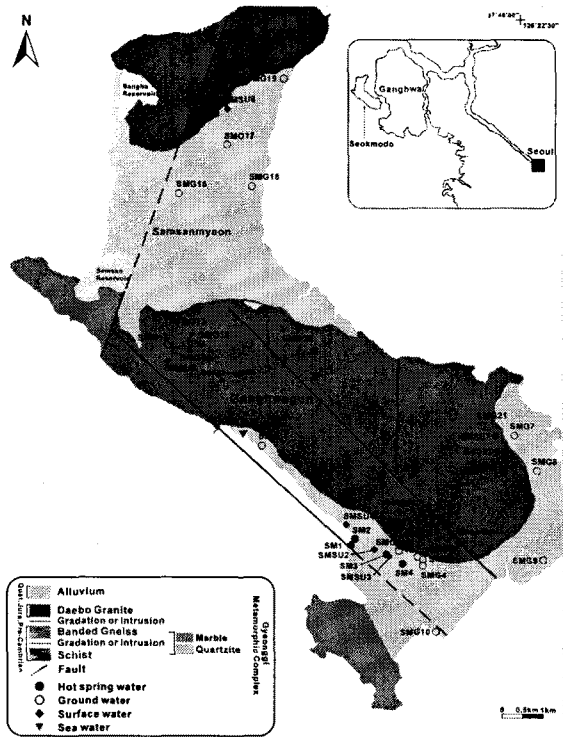
3. 결 론

(1) 석모도 지역 온천의 온천수는 약산성 온천수(pH 6.42~6.77)이다. 온천수의 온도는 $43.3\sim 68.6^\circ\text{C}$ 로 경기 지역에서 가장 수온을 보인다. 온천수는 높은 전기전도도와 환원성 환경의 특성을 보이며, 화학적 유형은 $\text{Na}-\text{Cl}$ 형에 속한다. 지하수는 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 형, 지표수는 $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 형의 상이한 수질특성을 보인다. 온천수에 다량 용존하고 있는 Na, Ca, Mg 등은 주로 해수에서 유래된 것으로 해석된다.

(2) 온천수의 산소 동위원소비($\delta^{18}\text{O}=-4.41\sim-4.47\%$)와 수소 동위원소비($\delta\text{D}=-32.0\sim-33.5\%$)는 순환수 기원의 특성을 나타내고 있다. 이 지역 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 δD 값은 각각 -1.89% , -16.5% 이다.

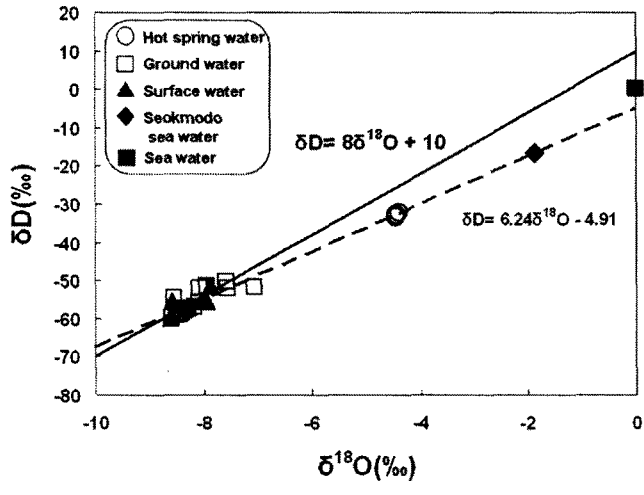
(3) 온천수에 용존하고 있는 황산염 이온(SO_4^{2-})의 황 동위원소비($\delta^{34}\text{S}$)는 $23.1\sim 23.5\%$ 의 범위로 이 지역 해수 중의 황산염의 황 동위원소비($\delta^{34}\text{S}=20.2\%$)와 대단히 유사하다. 이는 석모도 온천수 중의 SO_4^{2-} 의 황이 이지역의 해수에서 유래되고 있음을 의미하고 있다.

(4) 온천가스의 영족기체 동위원소비 분석 결과 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비는 $1.243\times 10^{-6}\sim 1.299\times 10^{-6}$ 범위이다. 온천수의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 동위원소비는 대기의 1.4×10^{-6} 값보다 낮은 값을 보이지만 온천수의 He 가스는 맨틀기원 He이 혼입되어 있음을 나타내고 있다. 석모도 지역 온천수의 헬륨 동위원소비($^3\text{He}/^4\text{He}$)는 유사함에도 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 값은 다소 차이가 있다. 이는 천부기원 지하수와 온천수의 혼합 정도의 차이 때문으로 해석된다. 온천수 내 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 동위원소비는 298.25×10^{-6} 과 300.57×10^{-6} 로 대체로 대기 기원의 값과 유사하나 맨틀기원의 알콘의 징후를 보이고 있다.

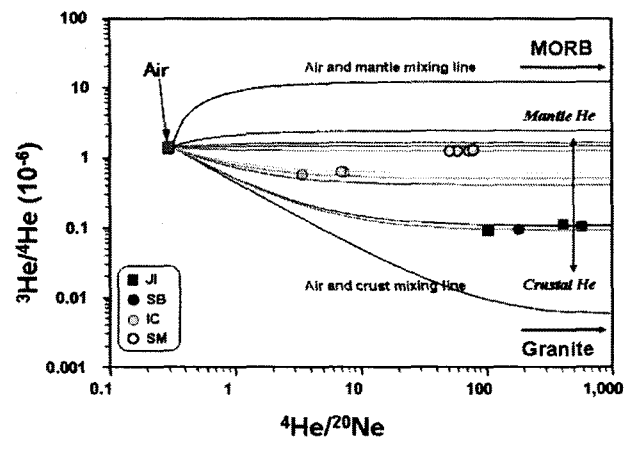


<석모도 온천수의 화학특성을 나타내는 파이퍼다이아그램>

<석모도 온천 지역의 지질도 및 시료채취 위치도>



<석모도 온천수, 지하수, 지표수의 산소수소 안정동위원소비>



<석모도 온천가스의 영족기체동위원소비 (JI:포천제일유황온천, SB:신북온천, IC:이천온천, SM:석모도온천)>