

개방형 지열냉난방 시스템 사용에 따른 지하수의 지화학적 특성 변화

박영윤¹ · 권구상¹ · 김남주^{1,2} · 이진용^{1,*} · 윤진구¹

¹강원대학교 지질학과

²(주)지오엔지니어링

요 약

이 연구는 개방형 지열냉난방 시스템이 지하수의 지화학적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 수행되었다. 2012년 11월에 전국의 6개 지역에서 개방형에 사용 중인 지하수(6개)와 주변 지하수(2개)를 채취하였다. 대부분의 시설은 운영기간이 2년 미만으로 개방형에 사용된 지하수와 주변 지하수는 5.6~6.7°C의 수온 차이를 보였을 뿐 pH, Eh 및 화학조성은 거의 차이를 보이지 않았다. 지하수의 간이수질자료와 화학조성을 이용하여 탄산염 광물과 규산염 광물의 포화지수를 계산하였다. 모든 시료에서 탄산염 광물은 불포화 상태(SI=-4.26~-1.15)였고 규산염 광물은 대부분의 시설에서 포화 상태(SI=0.25~0.60)로 평가되었다. 연구대상 중에 약 7년 정도 개방형을 운영 중인 1개 시설에서 pH는 점차 감소하였고 NO₃⁻와 Cl⁻는 점차 증가하는 경향을 보였다. 지하수에서 pH는 NO₃⁻와 Cl⁻에 비해서 쉽게 변하기 때문에 pH가 1 감소하였을 때 포화지수를 예측하였다. 탄산염 광물들의 포화지수는 1.12~3.14 감소하는 반면에 규산염 광물의 포화지수는 거의 변화하지 않았다. 이 연구에서 개방형 지열냉난방 시스템에 의한 지하수의 수질특성 변화를 거의 관찰하지 못하였다. 그러나 개방형 지열냉난방 시스템이 장기간 사용되었을 때 지하수의 수질변화를 야기할 수 있는 가능성을 확인하였다.

주요어: 지하수, 개방형 지열냉난방 시스템, 화학조성, 산소와 수소 동위원소 조성, 포화지수

Youngyun Park, Koo-Sang Kwon, Namju Kim, Jin-Yong Lee and Jin-Gu Yoon, 2013, Change of geochemical properties of groundwater by use of open loop geothermal cooling and heating system. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 2, p. 289-296

ABSTRACT: This study was performed to evaluate the influence of open loop geothermal cooling and heating system on the geochemical properties of groundwater. Groundwaters (6 sites) used for the open loop geothermal cooling and heating system and the nearby groundwaters (2 sites) were collected in November 2012. Most of the systems have been operated for less than two years. While the temperatures between the groundwater used for the systems and the nearby groundwater differed by 5.6~6.7°C, both groundwaters showed no significant difference in pH, Eh and chemical compositions. The saturation indexes of carbonate and silicate minerals were calculated using field measurement data and chemical compositions of groundwaters. All groundwaters studied were undersaturated with respect to carbonate minerals, and most of them were oversaturated with respect to silicate minerals. In a system operated for approximately 7 years, pH gradually decreased with time whereas both NO₃⁻ and Cl⁻ continuously increased. In generally, change of pH in groundwater is easier than that of NO₃⁻ and Cl⁻. Therefore, supposing that pH decreased by a unit compared with the present condition, the saturation indexes of carbonate and silicate minerals were calculated. The saturation indexes of carbonate minerals decreased 1.12~3.14 but those of silicate minerals were maintained. In this study, change of water quality by operation of open loop geothermal cooling and heating systems were hardly observed. However, when the open loop geothermal cooling and heating systems are operated for an extended period of time, this study suggests that the geochemical properties of groundwater used for these systems will likely change over time.

Key words: Groundwater, Open loop geothermal cooling and heating system, Chemical compositions, Oxygen and hydrogen isotopic compositions, Saturation index

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

(Youngyun Park, Koo-Sang Kwon, Jin-Yong Lee and Jin-Gu Yoon, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; Namju Kim, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea and Geoengineering Co., Ltd., Hanam 465-736, Korea)

1. 서 론

최근 에너지 수급에 대한 불안정과 기후변화에 따른 온실가스 배출 억제 정책으로 인해 신·재생에너지에 대한 사회적인 관심이 증대되었다. 특히 지열은 다른 신·재생 에너지들에 비해서 기후와 계절에 의한 영향을 거의 받지 않고 안정적으로 사용할 수 있는 장점이 있다(Lee, 2009). 국내에서 지열은 히트펌프를 이용한 냉난방 시스템에 주로 사용되고 있다. 지열 냉난방 시스템은 지중열교환기의 종류에 따라서 밀폐형(closed loop system)과 개방형(open loop system)으로 나뉜다. 국내에서는 제도적인 문제점과 지하수의 직접 사용에 따른 지하수 오염 가능성으로 인해 개방형(16.4%)보다는 밀폐형(74.5%)이 주로 설치되었다(Kwon *et al.*, 2012).

개방형은 열교환 유체로서 지하수를 직접 사용하는 방식으로 지하수의 수질변화와 오염가능성이 지속적으로 언급되고 있다(USEPA, 1997; Jung, 2006; Jo *et al.*, 2009; Mok *et al.*, 2011; Freedman *et al.*, 2012). 이러한 문제를 평가하고 개방형의 효율성을 개선하기 위해서 개방형의 설계, 설치, 운영 및 지열 환경 변화 관련된 연구들이 활발하게 이루어지고 있다(Hahn *et al.*, 2006; Jo *et al.*, 2009; Freedman *et al.*, 2012). 개방형에서 지하수의 재주입은 지하수의 수온 증가, 수압상승, 산화·환원환경 변화에 따른 물질들의 침전과 용해 등을 유발한다(USEPA, 1999; Mok *et al.*, 2011). 특히, 지열냉난방시스템의 사용에 따른 지하수의 수온변화는 일반적으로 약 4°C 관찰되지만 지역에 따라 물질들의 침전 또는 용해를 유발할 수 있다(USEPA, 1999). 이러한 변화들은 단 시간에 발현되는 것이 아니라 개방형을 장시간 운영하였을 때 주로 발현된다.

국외에서는 개방형이 오래 전부터 널리 보급되어 개방형에 의한 지하수의 지화학적 변화를 지속적으로 평가하는 연구들이 활발하게 수행되었지만 국내에서는 개방형의 보급기간이 10년 정도로 길지 않고 설치된 시설 또한 많지 않기 때문에 개방형이 지하수에 미치는 영향에 대한 평가가 충분하게 이루어

지지 않았다(Mok *et al.*, 2011). 국내에서 최근까지 비효율적으로 밀폐형의 보급이 활발하게 이루어진 것은 국내 대수층의 수리지열화학적 특성과 개방형이 지하수 지화학적 특성에 미치는 영향을 명확하게 이해하지 못 하였기 때문에 나타난 결과이기도 하다(Shim and Lee, 2010). 이러한 비효율성을 개선하기 위해서는 국내 대수층의 수리지질화학적 특성과 개방형이 지하수의 지화학적 특성에 미치는 영향을 명확하게 이해하는 것이 매우 중요하다. 이 연구는 국내 개방형에 사용되는 지하수의 화학 및 동위원소 조성을 이용하여 이들의 지화학적 특성을 이해하고 개방형이 지하수의 지화학적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 수행하였다.

2. 개방형 지열 냉난방 시스템의 설치현황

국내에서는 2004년 “신재생에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 제27조 제1항 3호”와 2011년 “신·재생에너지설비의 지원 등에 관한 기준” 및 “신·재생에너지설비의 지원 등에 관한 지침”을 통해 지열 냉난방 시스템이 활발하게 보급되고 있다. 2011년 11월까지 농어촌에너지이용효율화 사업과 그린홈 100만 가구 사업 등이 진행되면서 965개 시설에 450 Mwt 용량의 지열에너지 냉난방 시스템이 설치되었지만 대부분 밀폐형이었으며 약 16%만이 개방형이었다(Kwon *et al.*, 2012).

Lee (2009)와 Kwon *et al.* (2012)의 자료를 이용하여 2007~2012년까지 국내에 설치된 개방형의 현황을 그림 1에 나타내었다. 2007~2012년까지 국내에 24개 시설에 7,452 kw의 용량이 설치되었다. 개방형은 2010년까지 설치된 시설의 개수와 용량이 비례하는 경향을 보였지만 2011년에는 설치 개수에 비해 설치 용량이 크게 증가하였다. 이것은 최근에 개방형이 대용량 시설에 설치되었음으로 나타내는 것이다. 2007~2010년까지 시설당 설치용량이 220~280 kw이었지만 2011년에는 시설당 설치 용량이 800 kw로 이전에 비해서 약 3~3.5배가 증가하였다. 일반적으로 개방형은 지하수가 풍부한 지역의

대용량 시설에 적합한 것으로 알려져 있기 때문에 (Shim and Lee, 2010), 이러한 경향은 앞으로 더욱 두드러질 것이다.

3. 연구지역 및 연구방법

3.1 연구지역

이 연구에서는 서울(DL), 구리(GR), 청평(CS), 청주(CJ), 영광(YG) 및 강진(GJ) 지역에 설치되어 있는 개방형 시설(6지점)을 연구대상으로 선정하였다(그림 2). CJ는 2005년부터 2011년까지 개방형 시설이 설치되었고 GR은 2007년에 준공되었으며 나머지 시설들은 2011년과 2012년에 설치되었다. 이들 시설들에는 모두 개방형 중에 스탠딩컬럼웰(standing column well, SCW) 방식이 적용되었다. 이들 시설에 45~1,980 kw의 용량이 설치되었으며 양식업(YG), 농업(GJ) 및 건물의 냉난방(DL, GR, CS 및 CJ)에 사용하고 있다. GJ를 제외한 대부분의 시설에서 개방형에 이용되는 관정들의 깊이는 400~500 m이며 펌프는 모두 지상으로부터 60 m 깊이에 설치되었다. GJ에서는 관정의 깊이가 200~250 m로 다른 시설들에 비해서 얇은 깊이임에도 불구하고 현재 개방형 시스템이 매우 잘 운영되고 있으며 지하수의 수온도 14℃로 매우 일정하게 유지되고 있었다. 이것은 GJ의 지하수량이 매우 많기 때문에 가능한 것이며 이와 같이 개방형 설치 지역의 수리지열학적인

특성을 명확하게 이해하면 개방형의 설치 및 운영의 효율성을 크게 향상시킬 수 있다.

3.2 시료채취와 화합 및 동위원소 분석

2012년 11월에 서울(DL), 구리(GR), 청평(CS), 청주(CJ), 영광(YG) 및 강진(GJ) 지역에서 개방형에 사용되고 있는 지하수를 채취하였다. 이 중에 YG와 GJ에서는 개방형 주변 지하수도 같이 채취하였다. 채취한 지하수는 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였고 여과된 시료의 일부는 진한 질산으로 산처리(pH≈2)를 하였다. 수온, pH, Eh 및 전기전도도(electric conductivity, EC)는 현장에서 간이수질측정기(호리바사의 D-54와 55 모델)를 이용하여 측정하였다. 또한 간이분광광도계(하치사의 DR-2600 모델)를 이용하여 Fe²⁺와 Mn²⁺의 농도도 현장에서 측정하였다. 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ 및 H₄SiO₄), 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 및 HCO₃⁻) 농도는 상지대학교 산학협력단 자연과학연구지원센터에서 각각 ICP와 IC로 분석하였고 지하수의 산소와 수소 동위원소비는 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 IRMS로 분석하였다. 분석된 산소와 수소 동위원소비는 표준평균해수(standard mean ocean water, SMOW)에 표준화한 δ값으로 표시하였다.

3.3 포화지수 계산

포화지수(saturation index, SI)는 지하수 환경에

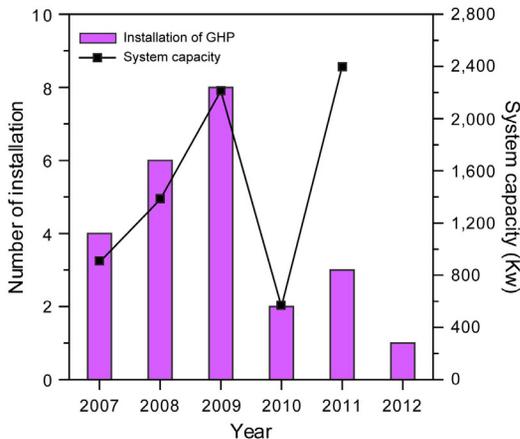


Fig. 1. Status of installation and system capacity of open loop geothermal cooling and heating system from 2007 to 2012 in Korea. Data from Lee (2009) and Kwon *et al.* (2012).

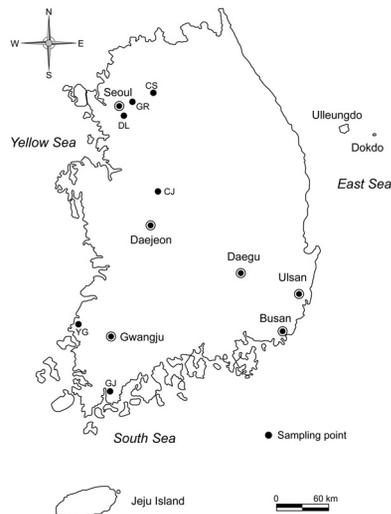


Fig. 2. Locations of sampling sites in this study.

서 물과 광물의 평형 및 포화상태를 나타내는 지수로서 수온, pH, Eh (또는 pe)와 화학조성을 이용하여 Minteqa (Allison *et al.*, 1991)와 Phreeqc (Parkhurst and Appelo, 1999) 같은 열역학적 모델링 프로그램을 이용하여 계산한다. 이번 연구에서는 Phreeqc를 사용하여 포화지수를 계산하였다. 포화지수는 수환경에서 광물의 침전 및 용해반응을 예측하는데 주로 이용되며(Choo *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2008), 다음과 같이 정의된다(Parkhurst and Appelo, 1999).

$$S.I = \log \left(\frac{IAP}{K_{sp}} \right) \quad (1)$$

여기에서 IAP(ionic activity products)는 수용액 내 이온들의 활동도의 곱이며 K_{sp} 는 평형상태에서의 용해도 곱을 나타낸다. 광물의 포화지수가 0일 때에는 평형상태를 의미하고 광물의 포화지수가 0보다 큰 경우에는 과포화(oversaturated) 상태로 광물이 침전될 가능성이 있다는 것을 나타낸다. 광물의 포화지수가 0보다 작은 경우에는 불포화(undersaturated) 상태로 광물의 침전이 일어나지 않고 용존상태로 존재할 가능성이 매우 높으며 주변 암석과의 반응시간이 충분히 주어지면 이 광물이 용해될 가능성이 있음을 나타낸다. 탄산염 광물들과 규산염광물들은 개방형 시스템 내부에 침전물로 나타날 수 있으며 또한 산화-환원 환경 변화에 매우 민감하게 용해와 침전이 일어나기 때문에 개방형에 사용되는 관정의 안정성에도 영향을 줄 수 있다(Nordstrom *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 2008). 따라서 이번 연구에서는 지열 냉난방 시스템에 효율성 및 관정의 안정성에 영향을 줄 수 있는 탄산염 광물들(아라고나이트, 방해석 및 백운석)과 규산염 광물들(석영 및 옥수)의 포화지수를 계산하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 화학조성

개방형 시설에서 지하수의 수온은 시설에서 사용하는 냉난방 부하의 영향을 많이 받기 때문에 8.4~17.0°C로 매우 넓은 범위를 보였다. YG과 GJ에서는 시료채취 당시 난방용을 사용되고 있었으며 주변 지하수보다 각각 6.7와 5.6°C 낮은 값을 보였다. pH는 6.7~7.8의 범위를 보였으며 Eh는 351~383 mV의

범위를 보였다. YG와 GJ에서 pH와 Eh는 주변 지하수와 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 이것은 YG와 GJ가 각각 2011년과 2012년에 설치되어 운영기간이 1년 미만으로 매우 짧기 때문에 아직까지 개방형에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았기 때문이다. EC는 118~628 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 매우 넓은 범위를 보였다. YG의 EC는 주변 지하수보다 454 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 높았고 GJ의 EC는 주변 지하수보다 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 낮았다. 이것은 수온과 달리 EC에 영향을 줄 수 있는 요인이 개방형뿐만 아니라 주변 지질 및 오염원의 분포 등으로 지역적인 영향을 더 많이 받기 때문에 나타난 결과이다. 또한 YG와 GJ의 EC가 주변 지하수와 차이를 보이는 이유를 이번 연구에서 명확하게 밝히지 못 하였다. 이러한 원인을 밝히기 위해서는 YG와 GJ 주변의 추가적인 조사가 필요하다.

지하수에서 Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 는 주로 환원환경에서 검출되는 용존 성분들로서 이번 연구에서는 개방형에 사용된 모든 지하수에 검출이 되었다. Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 의 농도는 각각 0.02~0.14와 0.03~0.18 mg/L의 범위를 보였고 YG과 GJ에서 Fe^{2+} 는 각각 0.02와 0.06 mg/L, Mn^{2+} 는 각각 0.04와 0.13 mg/L이었다. 그러나 주변 지하수에서는 Fe^{2+} 와 Mn^{2+} 가 검출되지 않았다. 이것은 개방형의 영향으로 지하수의 산화-환원 환경이 바뀔 수 있음을 나타내는 것이며 용존 산소가 유입되면 철과 망간 수산화물이 침전되어 지열의 효율성을 저해시킬 수 있다(USEPA, 1997, 1999).

대부분의 지하수에서 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 및 Cl^- 가 우세하여

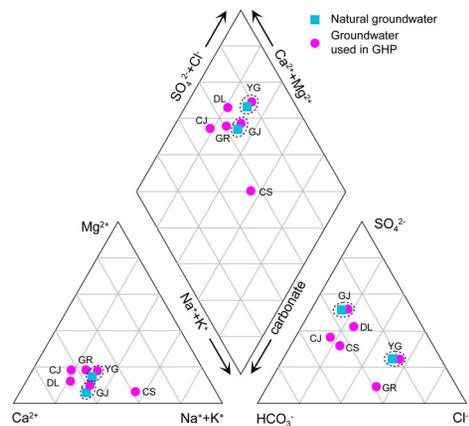


Fig. 3. Chemical compositions of groundwater used in open loop geothermal systems and groundwater around the systems.

Ca-SO₄형과 Ca-Cl형으로 구분되었다(그림 3). YG와 GJ는 각각 Ca-Cl형과 Ca-SO₄형으로 주변 지하수와 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. CJ를 제외한 나머지 개방형 시설들의 운영기간이 1년 내외로 매우 짧아 아직까지 지열에 의한 영향을 많이 보이지는 않은 것으로 판단하였다. Lee *et al.* (2008)은 부실시공으로 인해 외부로부터 오염물질이 유입되지 않았을 경우에 개방형의 영향으로 인한 수질변화는 각 시설마다 다른 양상을 보이는 것을 확인하였다. 그러므로 이번 연구대상 시설에서 개방형의 영향을 평가하기 위해서는 보다 장기적인 모니터링과 개방형의 영향을 명확하게 평가할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

4.2 동위원소 조성

산소와 수소 동위원소 조성은 각각 -9.4~-6.8과 -70~-50‰로 매우 넓은 범위를 보였다(그림 4). 이것은 이 연구에서 고려한 시설들이 전국적으로 분포되어 있기 때문이며 동위원소의 위도효과에 의해서 지역에 따른 동위원소 조성의 차이가 명확하게 관찰되었다. 위도가 가장 낮은 GJ과 위도가 가장 높은 CS의 동위원소 조성 각각 -6.8과 -9.4‰로서 2.6‰의 차이를 보였다. 산소와 수소 동위원소 조성에 대한 회귀직선은 $\delta D = 7.7\delta^{18}O + 3.1$ (n=8, R²=0.995)로서 세계순환수선(global meteoric water line, GMWL) ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, Craig (1961))의 기울기와 y절편에서 조금 차이를 보였다. 또한 Lee and Lee (1999)가 남

한 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성으로부터 보고한 지역순환수선은 $\delta D = 8.15\delta^{18}O + 16.3$ (n=299, R²=0.92)로 이번 연구결과의 기울기와 y절편 또한 조금 차이를 보였다. 이러한 차이들이 증발작용 또는 다른 수체의 공급을 의미하는 것이 아니다. 산소와 수소 동위원소 조성은 이들 시설에서 사용된 지하수가 대부분 강수로부터 공급되었으며 개방형의 사용으로 인한 증발작용이 일어나지 않았음을 나타낸다. 또한 YG과 GJ의 산소 동위원소 조성은 각각 -7.5와 -6.8‰로 주변의 지하수의 산소 동위원소 조성과의 비슷하였다.

4.3 포화지수

개방형에 사용된 지하수의 수온, pH, pe 및 화학 조성을 이용하여 탄산염광물들(아라고나이트, 방해석 및 백운석)과 규산염 광물들(석영 및 옥수)의 포화지수를 계산하였다(그림 5). 아라고나이트(CaCO₃), 방해석(CaCO₃) 및 백운석(CaMg(CO₃)₂)의 포화지수는 각각 -1.87~-1.30, -1.72~-1.15 및 -4.26~-2.9로 아라고나이트와 방해석의 포화지수는 거의 비슷하였고 백운석의 포화지수는 이들보다 더 낮았다. 이것은 탄산염 광물들이 개방형에 사용된 모든 지하수에서 불포화 상태인 것을 나타낸다. 또한 YG (SI_{aragonite}=-1.53, SI_{calcite}=-1.37 및 SI_{dolomite}=-3.32)와 GJ (SI_{aragonite}=-1.87, SI_{calcite}=-1.72 및 SI_{dolomite}=-4.26)는 YG와 GJ 주변 지하수에서 탄산염 광물들의 포화지수(각각 SI_{aragonite}=

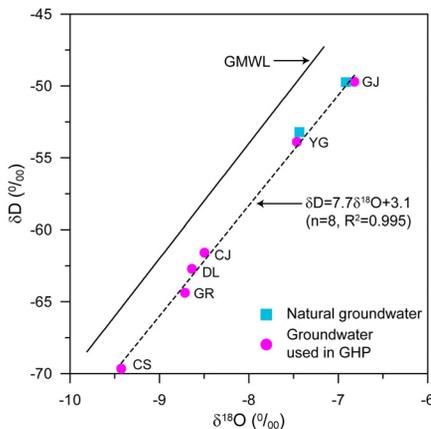


Fig. 4. Isotopic compositions of groundwater used in open loop geothermal systems and groundwater around the systems. GMWL represents global meteoric water line from Craig (1961).

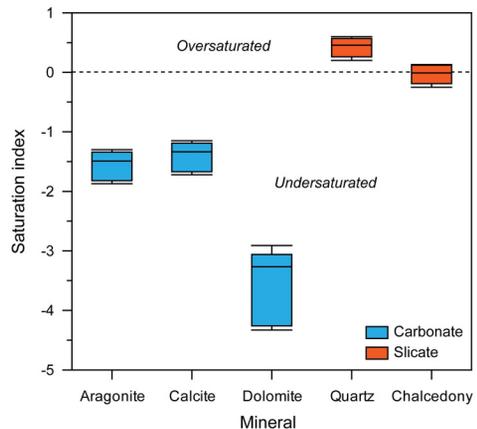


Fig. 5. Comparison of saturation indexes for carbonate and silicate minerals calculated by Phreeqc using temperature, pH, pe and chemical compositions of groundwater used in open loop geothermal systems.

-1.62와 -1.82, $SI_{\text{calcite}}=-1.47$ 과 -1.67 및 $SI_{\text{dolomite}}=-3.52$ 와 -4.33)와 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

석영(SiO_2)과 옥수(SiO_2)의 포화지수는 각각 0.20 ~ 0.60 및 -0.25 ~ 0.13의 범위를 보였다. 이것은 석영이 개방형에 사용된 모든 지하수에서 포화 상태인 것을 나타낸다. 반면에 옥수는 CJ ($SI_{\text{chalcedony}}=0.01$), GJ ($SI_{\text{chalcedony}}=0.13$) 및 YG ($SI_{\text{chalcedony}}=0.06$)에서 포화 상태로 나타났고 CS ($SI_{\text{chalcedony}}=-0.25$), DL ($SI_{\text{chalcedony}}=-0.16$) 및 GR ($SI_{\text{chalcedony}}=-0.19$)에서는 불포화 상태로 나타났다. YG와 GJ 주변 지하수에서는 석영과 옥수의 포화지수가 각각 $SI_{\text{quartz}}=0.43$ 과 0.57 및 $SI_{\text{chalcedony}}=-0.03$ 과 0.12로 GJ와는 거의 차이를 보이지 않았다. 반면에 YG에서는 개방형의 사용에 의해서 옥수가 불포화 상태에서 포화 상태로 변화였다.

이것은 YG에서 개방형 사용이 지속되면 시스템 내에 옥수가 침전될 가능성이 있음을 나타내며 또한 지하수의 화학조성도 변화될 수 있음을 나타내는 것이다. 향후 YG에서 옥수의 침전이 일어나면 개방형의 효율성을 떨어뜨릴 수 있으므로 지속적인 모니터링을 통해 옥수의 침전 여부를 확인할 필요가 있다.

4.4 지열시스템의 영향

CJ에서 2006, 2010 및 2012년도에 수행한 수질검사 항목 중에 pH, NO_3^- 및 Cl^- 의 평균과 표준편차 비교하였다(그림 6). 이 기간 동안에 pH의 평균은 각각 7.7, 7.0 및 6.7로 생활용 수질기준($pH=5.8 \sim 8.5$)을 만족하지만 점차 줄어드는 경향을 보였다. 또한 이 기간 동안에 NO_3^- 의 평균은 각각 10.5, 19.9 및

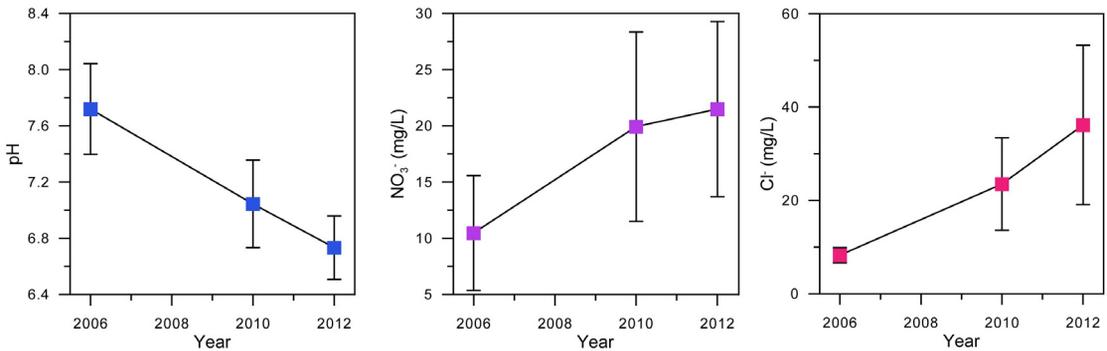


Fig. 6. Comparisons of levels of pH, NO_3^- and Cl^- measured at CJ (see Fig. 1) in 2006, 2010 and 2012.

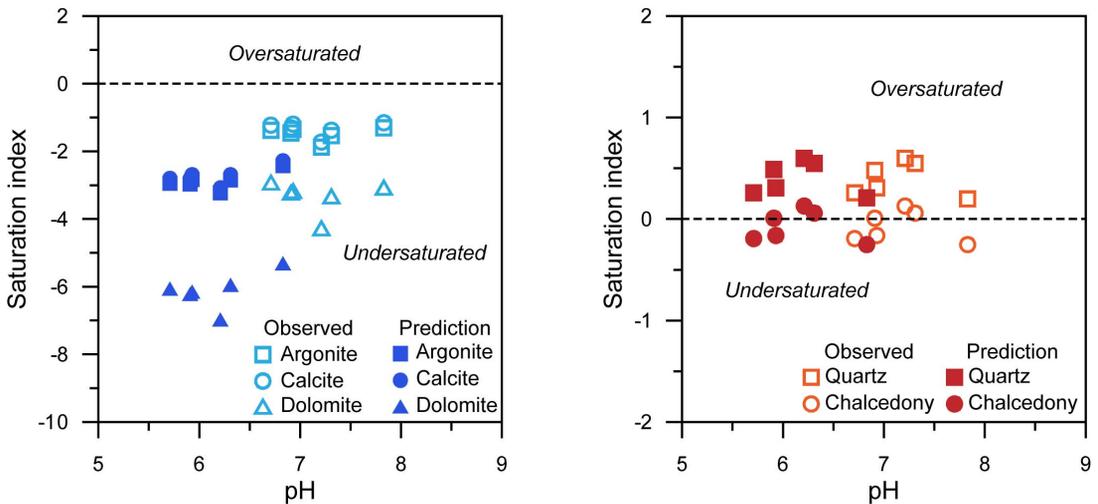


Fig. 7. Variations of saturation indexes for carbonate and silicate minerals with decrease of pH. The saturation indexes were calculated by Phreeqc program (Parkhurst and Appelo, 1999).

21.5 mg/L이었고 Cl⁻의 평균은 각각 8.28, 23.5 및 36.2 mg/L이었다. NO₃⁻와 Cl⁻의 생활용 수질기준은 각각 약 88.6와 250 mg/L 이하로 CJ는 생활용 수질 기준은 만족하고 있지만 점차 증가하는 경향이 관찰되었다. NO₃⁻와 Cl⁻는 지하수에서 대표적인 오염물질들로서 이러한 오염물질의 증가가 개방형에 의한 것인지 또는 주변 환경변화에 의한 것인지 정확한 평가가 이루어져야 할 것이다. 그러나 현재 개방형에서 수질 기준의 만족 여부만을 평가할 뿐 증가 또는 감소 경향은 고려되지 않고 있다. 이러한 경향이 모든 시설에서 관찰되지는 않을 수 있지만 이러한 경향성을 평가를 통해 수질기준을 초과하기 이전에 지하수 수질을 보전하고 개선하는 방안을 마련하여 개방형을 안정적으로 사용할 수 있는 환경을 만드는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 외부로부터 오염물질이 유입되지 않았을 때 NO₃⁻ 및 Cl⁻의 농도 변화는 쉽게 예측할 수 없다. 그러나 pH의 경우에는 산화-환원환경의 변화 또는 강수의 유입 등에 의해서 상대적으로 쉽게 변할 수 있는 항목이며 또한 CJ의 경우를 고려해서 pH가 현재보다 1 감소하였을 때 포화지수의 변화를 예측하였다(그림 7). 탄산염 광물의 포화지수는 모든 시료에서 1.12~3.14 감소하였으며 백운석의 포화지수가 다른 탄산염 광물들에 비해서 상대적으로 큰 폭으로 감소하였다. 반면에 규산염 광물의 포화지수는 거의 변화하지 않았다. 이것은 규산염 광물들에 비해서 탄산염 광물의 용해도가 pH에 민감하게 반응하기 때문이며 이전 연구에서도 동일한 경향이 관찰되었다(Kim *et al.*, 2008). pH 감소에 따른 탄산염 광물의 포화지수 감소는 관정 주변 암석 내 분포하는 탄산염 광물들의 용해도를 증가시킬 수 있음을 나타내는 것이다. 이것은 개방형에 사용되는 관정의 안정성에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 지하수 화학 조성에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

5. 결론

국내 개방형 6개 시설에서 사용 중인 지하수를 채취하였으며 영광과 강진에 위치한 시설에서는 주변 지하수도 같이 채취하였다. 대부분의 시설들의 운영 기간이 2년 미만으로 매우 짧았다. 그럼에도 불구하고 개방형에 의한 영향으로 수온이 5.6~6.7°C의 차

이를 보였으며 pH, Eh 및 화학조성은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 간이수질자료와 화학조성을 이용하여 계산된 탄산염 광물과 규산염 광물의 포화지수로부터 모든 시설에서 탄산염 광물들의 불포화 상태를 확인하였고 석영은 포화 상태로 평가되었다. 대부분의 시설에서 옥수는 불포화 상태였으며 일부 시설에서 포화상태로 평가되었다. 이것은 석영과 옥수가 개방형 시설 내에 침전될 수 있을 가능성이 있다는 것을 나타낸다. 그러나 개방형 주변 지하수에서도 동일한 결과가 나왔기 때문에 개방형에 의한 영향으로 이러한 결과가 나온 것은 아닌 것으로 평가하였다. 이번 연구의 대상 시설들 중에 약 7년 정도 개방형을 운영한 시설이 1개 있었으며 이 시설의 지하수에서 pH는 점차 감소하고 NO₃⁻와 Cl⁻는 점차 증가하는 경향이 관찰되었다. pH는 NO₃⁻와 Cl⁻에 비해서 상대적으로 쉽게 변화되는 항목이므로 현재의 조건에서 pH가 1 낮아졌을 때 탄산염 광물들의 포화지수는 감소하고 규산염 광물들의 포화지수는 거의 변화하지 않는 것으로 예측되었다. 이것은 개방형에 의해 pH가 낮아졌을 때 개방형 관정 내 탄산염 광물들이 용해를 가속시킬 수 있는 가능성이 있음을 나타내는 것이다. 결론적으로 현재까지 개방형의 운영에 따른 지하수의 지화학적 변화는 뚜렷하게 관찰되지 않았지만 향후 개방형에 의해 지하수의 지화학적 특성이 변화될 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서 개방형을 안정적으로 사용하기 위해서는 지하수의 지화학적 특성변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

사 사

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20123040110010). 이 논문을 위해 세심한 검토와 유익한 조언을 주신 김현수 교수님과 정훈영 교수님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Allison, J.D., Brown, D.S. and Novo-Gradac, K.J., 1991, MINTEQA2. A geochemical assessment data base and test cases for environmental system: Verse. 3.0 user's manual. USEPA, Athens, 77 p.

- Choo, C.O., Lee, J.K. and Cho, H.G., 2004, Formation of alunite and schwertmannite under oxidized condition and its implication for environmental geochemistry at Dalseong mine. *J. Miner. Soci. Korea*, 17, 37-47 (in Korean with English abstract).
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Freedman, V.L., Waichler, S.R., Mackley, R.D. and Horner, J.A., 2012, Assessing the thermal environmental impacts of a groundwater heat pump in southeastern Washington State. *Geothermics*, 42, 65-77.
- Hahn, J., Han, H., Hahn, C., Kim, H.S. and Jeon, J.S., 2006, Design guidelines of geothermal heat pump system using standing column well. *Economic and Environmental Geology*, 39, 607-613 (in Korean with English abstract).
- Jo, Y.J., Lee, J.Y., Lim, S.Y. and Hong, G.P., 2009, A review on potential effects of installation and operation of ground source heat pumps on soil and groundwater environment. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14, 22-31 (in Korean with English abstract).
- Jung, H.I., 2006, Development of geothermal energy and contamination of soil and groundwater. *Korea Journal of Geothermal Energy*, 2, 31-43 (in Korean).
- Kim, G.Y., Bae, D.S., Choi, B.Y., Oh, S.J. and Koh, Y.K., 2008, A study on the geochemical clogging for the assessment of the hydrological safety of the underground oil storage cavern. *J. Miner. Soci. Korea*, 21, 139-159 (in Korean with English abstract).
- Kwon, K.S., Lee, J.Y. and Mok, J.K., 2012, Update of current status on ground source heat pumps in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 193-199 (in Korean).
- Lee, J.Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1560-1568.
- Lee, J.Y., Lee, J.K., Kim, J.W., Kim, K.G., Yun, J.G., Song, S.H., Kim, J.W., Jo, Y.J. and Choi, H.M., 2008, Study on influence of geothermal system on soil and groundwater. Ministry of Environment, Sejong, 244 p (in Korean).
- Lee, K.S. and Lee, C.B., 1999, Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation and river waters in south Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 73-84 (in Korean with English abstract).
- Mok, J.G., Lim, H.G., Jang, B.J., Park, Y.C. and Lee, J.Y., 2011, Time series analysis of the effect of ground-source heat pumps on groundwater characteristics. *The Journal of Engineering Geology*, 21, 35-43 (in Korean with English abstract).
- Nordstrom, D.K., Ball, J.W., Donahoe, R.J. and Whitemore, D., 1989, Groundwater chemistry and water-rock interaction at Strip. *Goechimica et Cosmochimica Acta*, 53, 1727-1740.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999, User's guide to PHREEQC (version 2) - a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. United State Geological Survey, Denver, 312 p.
- Shim, B.O. and Lee, C.W., 2010, Status of underground thermal storage as shallow geothermal energy. *Economic and Environmental Geology*, 43, 197-205 (in Korean with English abstract).
- USEPA (United State Environmental Protection Agency), 1997, Manual on environmental issues related to geothermal heat pump systems. USEPA, Washington, D.C., 95 p.
- USEPA (United State Environmental Protection Agency), 1999, The Class V Underground Injection Control Study. Volume 19, Heat pump and air conditioning return flow wells. USEPA, Washington, D.C., 60 p.

투 고 일 : 2013년 3월 18일

심 사 일 : 2013년 3월 19일

심사완료일 : 2013년 4월 28일