

## <Technical Report>

# 개방형 지열냉난방시스템의 순환수에서 온도와 압력변화에 따른 탄산염 광물의 침전 가능성 평가

박영윤<sup>1,2,\*</sup> · 유재영<sup>1</sup> · 김남주<sup>1,3</sup> · 이진용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질 · 지구물리학과

<sup>2</sup>수자원협동조합

<sup>3</sup>(주)지오엔지니어링

### 요 약

이 연구에서는 국내 개방형 지열 냉난방시스템의 대부분을 차지하는 SCW형에 사용된 순환수에서 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하고 수온과 압력변화에 따른 탄산염 광물의 침전량을 산정하는 방법을 제시하였다. 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하기 위해서 포화지수, 랑겔리어 지수, 리즈나 지수 등이 널리 사용되고 있지만 탄산염 광물의 침전량을 산정하기에는 부적합하다. 국내에 설치된 SCW형 지열시스템의 운영 시 약 5°C의 수온변화와 50 MPa의 압력변화가 일어난다. 지열시스템에서 탄산염 광물이 포화된 순환수를 사용하였을 경우에 5°C의 수온 변화와 50 MPa의 압력 변화로 인해 순환수 1 m<sup>3</sup>에 각각 0.301과 0.145 cm<sup>3</sup> 부피의 탄산염 광물이 침전될 수 있는 것으로 계산되었으며 이들이 차지하는 면적은 각각 9.676×10<sup>-2</sup>와 5.946×10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>으로 계산되었다. 이러한 결과는 단순히 온도와 압력변화에 따른 탄산염 광물의 용해도 변화로부터 계산된 값이므로 실제로 운영되는 시설에서는 다른 양상을 보일 수도 있다. 그러나 이 연구결과는 각 시스템에서 사후관리의 주기를 정할 때 기초자료로서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

**주요어:** 개방형 지열냉난방시스템, 수온, 압력, 탄산염 광물, 침전

**Youngyun Park, Jae-Young Yu, Namju Kim and Jin-Yong Lee, 2015, Evaluation of possibility for precipitation of carbonate minerals by change of groundwater temperature and pressure in open loop geothermal cooling and heating systems. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 6, p. 623-628**

**ABSTRACT:** This study recognizes the possible carbonate precipitation and calculate the volume of the precipitated carbonate due to temperature and pressure change in groundwater used in SCW type geothermal system. A few indices, including a normal saturation index, Langelier saturation index, and Ryznar stability index, are now widely used for the evaluation of possible carbonate precipitation, but these indices can not tell the volume of the precipitated phase. SCW type operation can cause approximately 5°C temperature increase and 50 MPa pressure drop. If the groundwater maintains saturation against calcite, the calculation indicates that the temperature increase and pressure drop can precipitate 0.301 and 0.145 cm<sup>3</sup> calcite per 1 m<sup>3</sup> pumping, respectively, which will cover respectively about 9.676×10<sup>-2</sup> and 5.946×10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup> of the surface of the thermal exchange plate. The values given by this study are estimated values only with the calcite solubility change due to temperature and pressure. Other factors affecting the calcite precipitation may be observed in real operating facilities and one may see a big gap in calcite precipitation between the theoretical prediction and real operation. However, the results of this study will certainly help establish long term plan for operating SCW system.

**Key words:** Open loop geothermal cooling and heating system, Groundwater temperature, Pressure, Carbonate mineral, Precipitation

*(Youngyun Park, Jae-Young Yu, Namju Kim and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Youngyun Park, Water resources cooperative, Chuncheon 24383, Republic of Korea; Namju Kim, Geoengineering Co. Ltd., Namyangju 12226, Republic of Korea)*

\* Corresponding author: +82-33-250-8550, E-mail: [young-yun@nate.com](mailto:young-yun@nate.com)

## 1. 서 론

지열냉난방시스템은 2000년 초에 국내에 처음 도입된 이래로 2004년에 시행된 공공의무화사업과 정부의 활발한 보급 정책으로 인해 최근까지 사용이 크게 증가하였다(Lee, 2009; Kwon *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2015; Song and Lee, 2015). 2014년까지 국내에 설치된 지열냉난방시스템의 총 용량은 약 790 MW이며 비닐하우스와 수경재배 등의 농업분야에서 사용이 두드러지게 증가하였다(Song and Lee, 2015).

지열냉난방시스템은 밀폐된 배관에 열교환 유체를 순환시키는 밀폐형(closed loop cooling and heating system)과 열교환 유체로서 지하수 또는 지표수를 직접 이용하는 개방형(open loop cooling and heating system)으로 구분할 수 있다. 2011년까지 국내에서는 개방형보다는 밀폐형이 주로 설치되었으며 설치된 지열냉난방시스템 중 75%가 밀폐형이었다(Kwon *et al.*, 2012). 이것은 개방형에서 지하수 또는 지표수를 직접 사용하기 때문에 이로 인한 수질오염, 수자원 고갈 등의 환경문제의 발생 가능성에 대한 우려 때문이며 이것에 대한 논쟁은 최근까지도 이루어지고 있다. 그러나 개방형이 밀폐형에 비해서 상대적으로 적은 설치비용과 높은 에너지 효율로 인해 대규모 시설에 적용되는 사례가 점차 증가하고 있다.

국내에 설치된 개방형 지열냉난방시스템은 대부분 Standing column well (SCW) 형이다. SCW형은 지열공에서 양수한 지하수를 열교환한 후에 다시 동일한 대수층으로 주입하는 방식이며 이 과정에서 순환수의 압력과 수온이 변화한다. 이로 인해 CO<sub>2</sub>의 탈기로 인한 pH의 상승, 용존산소의 증가로 인한 산화-환원환경 변화, 광물의 용해도 변화, 용존성분들의 흡착 및 탈착 등이 일어난다(Holm *et al.*, 1987; Brons *et al.*, 1991; Griffioen and Appelo, 1993; Hoyer *et al.*, 1994; Sowers *et al.*, 2006). 이와 같은 환경변화로 인해 탄산염 광물 및 철수산화물과 같은 침전물들이 형성될 수 있으며 이러한 침전물질들로 인해 에너지 효율이 크게 감소한다(ASHRAE, 1995; Rafferty, 1999; Abesser, 2010; Possemiers *et al.*, 2014). 철수산화물에 비해서 탄산염 광물이 개방형 지열냉난방시스템에서 침전물로서 자주 관찰된다(ASHRAE, 1995; Rafferty, 1999).

SCW형에서 사용되는 순환수로부터 탄산염 광물

의 침전을 예측하기 위해서 포화지수(Saturation index, SI), 랑젤리어 지수(Langelier Saturation Index, LSI), 리즈나 지수(Ryznar Stability Index, RSI) 등의 평가 방법들이 사용되고 있다(Rafferty, 1999; Park *et al.*, 2015). 이러한 방법들은 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하는데 매우 좋은 방법이지만 탄산염 광물의 침전량을 정량적으로 예측하기는 매우 어렵다(Chemcon, 2001). SCW형을 오랫동안 안정적으로 사용하기 위해서는 각 시설에서 탄산염 광물의 침전량을 예측하고 이를 기초로 하여 관리방안을 마련하는 것이 매우 중요하다. 이 연구에서는 SCW형에 사용된 순환수에서 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하고 수온과 압력변화에 따른 탄산염 광물의 침전량을 정량적으로 산정하였다.

## 2. 탄산염 광물의 침전가능성 평가

SCW형에 사용된 순환수로부터 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하기 위해서 SI, LSI 및 RSI 등이 많이 사용한다. 최근까지 국내에서 설치 및 운영되는 일부 SCW형 시설에서 탄산염 광물에 의한 에너지 효율이 저하된 사례가 있지만 체계적인 사후관리를 통해 시스템을 안정적으로 운영하고 있다. 최근까지의 연구결과에 따르면 SCW형의 설치 및 운영이 지하수의 수질에 뚜렷한 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2013, 2015). 그러나 SCW형에 사용되는 순환수는 강수, 지하수량, 잠재오염시설 등의 영향으로 수질이 변화할 수 있으므로 탄산염 광물의 침전 가능성은 주기적으로 평가되어야 한다.

### 2.1 포화지수(SI)

탄산염 광물의 SI는 물과 광물의 평형과 포화상태를 나타내는 지수로서 수환경에서 탄산염 광물의 침전과 용해반응을 예측하는데 주로 사용한다. 탄산염 광물들의 SI는 수온, pH, Eh (또는 pe) 및 화학조성을 이용하여 Minteq (Allison *et al.*, 1991)와 Phreeqc (Parkhurst and Appelo, 1999) 같은 열역학적 모델링 프로그램을 이용하여 계산한다.

$$SI = \log \left( IAP / K_{sp} \right) \quad (1)$$

여기에서 IAP (ionic activity products)와 K<sub>sp</sub>

**Table 1.** Interpretation for Langelier Saturation Index (CACC, 1965).

Value	Indication
>2.0	scale forming but noncorrosive
0.5 ~ 2.0	slight scale forming and corrosive
0.0 ~ 0.5	balanced but pitting corrosion possible
-0.5 ~ 2.0	slightly corrosive but non-scale forming
<-2.0	serious corrosion

(평형상수)는 각각 수용액 내 이온들의 활동도의 곱과 평형상태에서의 용해도 곱을 나타낸다. 탄산염 광물의 SI=0 일 때, 평형상태로 탄산염 광물의 용해속도와 침전속도가 같아 실제로는 침전 또는 용해가 일어나지 않는 것처럼 보인다. SI<0 일 때에는 불포화상태로 탄산염 광물의 용해반응이 일어나고 SI>0 일 때에는 포화상태로 탄산염 광물의 침전반응이 일어난다.

SCW형에서 사용되는 순환수에서 탄산염 광물의 SI<0 일 때에는 탄산염 광물이 불포화 상태이므로 SCW형의 순환수에서 탄산염 광물의 침전에 의한 영향을 고려하지 않아도 된다. 그러나 탄산염 광물의 SI>0 일 때에는 SCW형의 열교환기, 배관 등의 부분에 탄산염 광물의 침전될 수 있다는 것을 나타낸다.

**2.2 랭겔리어 지수(LSI)**

LSI는 개방형 지열냉난방시스템의 내부 부품에 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하기 위해서 사용하고 있으며(Rafferty, 1999), 다음과 같이 계산할 수 있다(Rafferty, 2004).

$$LSI = pH - pH_s \tag{2}$$

여기에서 pH는 SCW형에서 사용되는 순환수의 측정값이고 pH<sub>s</sub>는 LSI를 계산하기 위해 CACC (1965)가 제안한 것으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \tag{3}$$

여기에서 A, B, C 및 D는 다음과 같이 계산할 수 있다(CACC, 1965).

**Table 2.** Interpretation for Ryznar Stability Index (CACC, 1965).

Value	Indication
4.0 ~ 5.0	heavy scale
5.0 ~ 6.0	light scale
6.0 ~ 7.0	little scale or corrosion
7.0 ~ 7.5	corrosion significant
7.5 ~ 9.0	heavy corrosion
>9.0	corrosion intolerable

$$A = (\text{Log}[TDS] - 1) / 10 \tag{4}$$

$$B = -13.12 \text{Log}({}^{\circ}C - 237) + 34.55 \tag{5}$$

$$C = \text{Log}(HD) - 0.4 \tag{6}$$

$$D = \text{Log}(alk) \tag{7}$$

여기에서 TDS (total dissolved solid)는 총용존고형물, °C는 수온, HD는 경도, alk는 알칼리도를 나타낸다. LSI 값의 범위가 나타내는 의미는 표 1에 정리하였다.

**2.3 리즈나 지수(RSI)**

LSI와 같이 RSI도 개방형 지열냉난방시스템의 내부에 탄산염 광물의 침전 가능성을 평가하는데 많이 사용하는 지수이다. RSI는 국내 신재생에너지 설비의 지원 등에 관한 지침에서 부식과 스케일링에 주는 영향을 조사하는 분석방법으로도 제시하고 있다. RSI는 다음과 같이 계산할 수 있다(Rafferty, 2004).

$$RSI = 2pH_s - pH \tag{8}$$

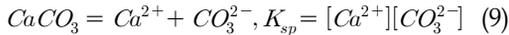
여기에서 pH<sub>s</sub>는 식 4, 5, 6 및 7로부터 계산할 수 있다. RSI 값의 범위가 나타내는 의미는 표 2에 정리하였다. LSI와 RSI의 결과는 서로 비슷하게 나타나므로 LSI와 RSI 중에 하나만 선택해서 사용하면 된다 (Park et al., 2015). 국내에 운영 중인 SCW형에 사용된 순환수의 LSI와 RSI를 이용하여 탄산염 광물의 침전 가능성을 예측한 사례가 있다(Park et al., 2015).

**3. 수온과 압력변화에 따른 탄산염 광물의 용해도적 변화**

개방형 지열시스템에서 LSI와 RSI는 탄산염 광물

의 침전 가능성을 평가하는 지표이며 탄산염 광물의 침전량을 예측할 수는 없다. 지열시스템을 운영할 때 높은 에너지 효율을 유지하기 위해서는 탄산염 광물의 침전량을 예측하여 지열시스템 내부 부품의 청소 또는 교체주기를 결정하는 것은 매우 중요하다.

지열시스템에서 스케일링을 형성하는 주요 물질인 탄산염 광물의 용해반응과  $K_{sp}$ 는 다음과 같이 표현한다.



여기에서  $[Ca^{2+}]$ 와  $[CO_3^{2-}]$ 는 각각  $Ca^{2+}$ 와  $CO_3^{2-}$ 의 몰농도를 나타낸다. 식 9의 반응식에서 자유에너지와 평형상수와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta G_{rxn}^0 = -RT \ln K_{sp} \quad (10)$$

여기에서 R은 기체상수, T는 절대온도를 나타낸다. 식 10은 깁스자유에너지의 변화로부터  $K_{sp}$ 를 계산할 수 있으며 또한 이로부터 용해도를 계산할 수 있다는 것을 나타낸다. 탄산염 광물의 용해 또는 침전 반응에 대한 깁스자유에너지는 온도와 압력에 따라 변하므로 온도와 압력 변화에 따라 탄산염 광물의 용해도는 변화된다. 단위 용해반응에서 온도와 압력 변화에 따른  $K_{sp}$ 의 변화량은 SUPCRT92 (Johnson *et al.*, 1992) 프로그램으로 계산하였다(그림 1).

### 3.1 수온변화에 따른 탄산염 광물의 용해도적 변화

탄산염 광물들의 용해도는 수온과 반비례 관계를 보이므로 수온이 상승하면 탄산염 광물의 용해도는 감

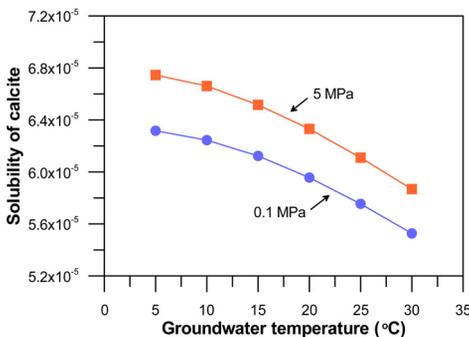


Fig. 1. Solubility of calcite with variations of groundwater temperature and pressure using thermal data from SUPCRT92 (Johnson *et al.*, 1992).

소하고 수온을 감소하면 탄산염 광물의 용해도는 증가한다(그림 1). 개방형 지열시스템에서 열교환 전후의 수온 변화는 약 5°C이다. 특히 냉방모드 시 열교환 후 지하수의 수온이 약 5°C 상승하며 이로 인해 탄산염 광물의 용해도가 감소한다. 따라서 탄산염 광물이 포화된 지하수를 사용하는 지열시스템에서는 수온상승으로 인해 탄산염 광물이 침전될 가능성이 매우 높아진다.

15°C 수온의 지하수를 이용하여 냉방모드로 운영하였을 때 지하수의 수온이 약 5°C 증가하며 탄산염 광물의 용해도는  $6.123 \times 10^{-6}$  (0.1 MPa, 15°C 일 때)에서  $5.309 \times 10^{-6}$  (0.1 MPa, 20°C 일 때)로 감소한다(그림 1). 따라서 탄산염 광물이 포화된 지하수를 냉방모드에서 사용하였을 때  $8.147 \times 10^{-6}$  mol/L의 방해석이 침전될 수 있고 방해석 1몰의 부피가  $36.934 \text{ cm}^3$ 이므로 지하수 1 m<sup>3</sup>에 침전되는 방해석의 부피는 약  $0.301 \text{ cm}^3$ 로 계산된다. 그림 2a에 지하수 사용량에 따른 방해석의 침전부피를 나타내었으며 지하수 사용량의 증가함에 따라 방해석의 침전부피는 0.301 ( $r^2=1.000$ )의 기울기로 증가하였다. 방해석은 능면체를 이루지만 입자의 크기가 작고 쉽게 계산하기 위해서 정육면체를 이룬다고 가정하면 1 m<sup>3</sup>에서 침전하는 방해석에 의해서 피복되는 면적은  $9.676 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 으로 계산된다. 이 넓이는 방해석의 단일 입자가 수평으로 피복되는 면적이다. 지하수 사용량과 탄산염 광물의 스케일링이 형성되는 면적과의 상호관계를 그림 2b에 나타내었으며 회귀직선의 기울기는 0.039 ( $r^2=0.991$ )이었다. 개방형 지열냉난방시스템 내부에 탄산염 광물에 의한 스케일링이 형성될 때 스케일링이 발생하는 면적이 시스템의 규모에 따라서 다르게 나타나므로 스케일링에 의한 영향을 평가할 때, 시스템 규모에 적합하게 고려되어야 한다.

### 3.2 압력변화에 따른 탄산염 광물의 용해도적 변화

국내에 적용된 개방형 지열시스템은 주로 SCW 형으로 500 m 깊이의 지열공에서 열교환이 이루어진다. 500 m 깊이에서 정수압을 계산하면 약 5 MPa이며 500 m 깊이의 지하수를 지상으로 끌어올리면 압력이 약 0.1 MPa로 감소한다. 15°C의 지하수가 이와 같은 과정으로 압력이 감소하였을 때, 탄산염 광물의 용해도는  $6.516 \times 10^{-6}$  (5 MPa, 15°C 일 때)에서  $6.124 \times 10^{-6}$  (0.1 MPa, 15°C 일 때)으로 감소한다(그림 1). 따라서 탄산염 광물이 포화된 지하수를 지상으

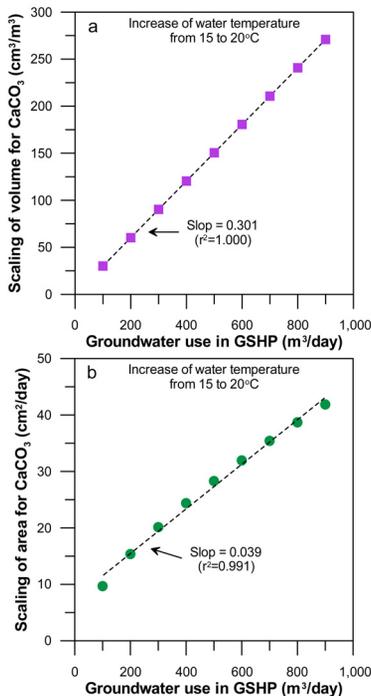
로 끌어올렸을 때  $3.928 \times 10^6$  mol/L의 방해석이 침전될 수 있으므로 지하수 1 m<sup>3</sup>에 침전되는 방해석의 부피는 약 0.145 cm<sup>3</sup>로 계산된다. 이러한 결과에 근거하여 지하수 사용량에 따른 방해석의 침전부피를 그림 3a에 도시하였으며 회귀직선의 기울기는 0.145 ( $r^2=1.000$ )로 5°C 수온변화 시 지하수 사용량에 따른 방해석의 침전부피의 증가율(0.301)에 비해서 상대적으로 낮은 기울기를 보였다. 방해석은 능면체를 이루지만 입자의 크기가 작고 쉽게 계산하기 위해서 정육면체를 이룬다고 가정하면 1 m<sup>3</sup>에서 침전하는 방해석에 의해 피복되는 면적은  $5.946 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>으로 계산된다. 이 넓이는 방해석의 단일 입자가 수평으로 피복되는 면적이다. 지하수 사용량에 따른 방해석의 피복면적을 그림 3b에 나타내었으며 회귀직선의 기울기는 0.024 ( $r^2=0.991$ )이었다.

지금까지 살펴본 대로 개방형 지열냉난방시스템에서 탄산염 광물에 의한 스케일링의 양을 평가할 때에는 온도변화뿐만 아니라 압력변화도 같이 고려하여야 한다. 이번 연구에서 계산된 탄산염 광물의

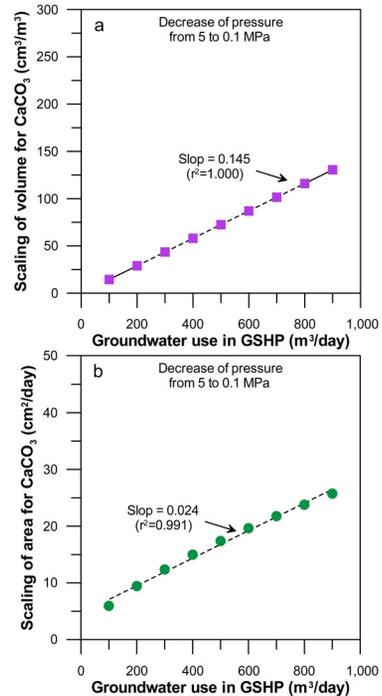
침전량은 이론적인 침전반응으로부터 계산된 값이며 실제로 운영되는 시스템에서는 지하수의 유속, 지체시간, 용존성분들의 상호작용 등에 의한 영향도 같이 고려해야 된다.

#### 4. 결론

개방형 지열냉난방시스템에서는 에너지 효율을 저하시키는 주요 원인 중에 하나가 탄산염 광물에 의한 스케일링 형성이다. 이로 인해 최근까지 주로 포화지수, 랑겔리어 지수, 리즈나 지수 등을 이용하여 탄산염 광물에 의한 스케일링 형성 가능성을 평가하였으나 탄산염 광물의 침전량을 산정하기에는 어려움이 있었다. 이 연구에서는 온도와 압력변화에 따른 탄산염 광물의 침전량을 이론적으로 계산하였다. 실제로 운영되는 개방형 지열시스템에서는 다른 인자들의 상호작용으로 인해 이론적으로 계산된 탄산염 광물의 침전량과 다를 수도 있지만 사후관리의 주기를 결정하는데 기초자료로서 활용이 가능하다.



**Fig. 2.** Relationship between groundwater use and scaling of (a) volume and (b) area for calcite with increase of groundwater temperature from 15 to 20°C in groundwater used in open loop geothermal heat pumps.



**Fig. 3.** Relationship between groundwater use and scaling of (a) volume and (b) area for calcite with decrease of pressure from 5 to 0.1 MPa in groundwater used in open loop geothermal heat pumps.

## 사 사

이 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지기술개발사업(No. 20123040110010)과 환경부 “토양·지하수오염방지기술개발사업(2014000530001)”에서 지원을 받아 수행되었습니다. 이 논문을 위해서 검토해 주시고 유익한 조언을 해 주신 차장환 박사님과 신우진 박사님께 깊이 감사드립니다.

## REFERENCES

- Abesser, C., 2010, Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current application, regulations and problems. Energy Geoscience Programme Open Report OR/10/045, British Geological Survey, Nottingham, 24 p.
- 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.
- ASHRAE, 1995, 1995 ASHRAE Handbook-HVAC Application. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 742 p.
- Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J. and Zehnder, A.J.B., 1991, (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Research*, 25, 729-736.
- CACC (Carrier Air Conditioning Company), 1965, Handbook of air conditioning system design. McGraw-Hill book company, New York, 780 p.
- Chemcon, J.A.W., 2001, Calcium carbonate precipitation potential. *Journal of the Swimming Pool and Spa Industry*, 2, 23-29.
- Griffioen, J. and Appelo, C.A.J., 1993, Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Applied Geochemistry*, 8, 161-176.
- Holm, T.R., Eisenreich, S.J., Rosenberg, H.L. and Holm, N.P., 1987, Groundwater geochemistry of short-term aquifer thermal energy storage test cycles. *Water Resources Research*, 23, 1005-1019.
- Hoyer, M., Hallgren, J., Eisenreich, S. and Sterling, R., 1994, Fieldtest results of Aquifer Thermal Energy Storage at St. Paul, Minnesota. *Journal of Energy Engineering*, 120, 67-85.
- Johnson, J.W., Oelkers, E.H. and Helgeson, H.C., 1992, SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bar and 0 to 1000°C. *Computers & Geosciences*, 18, 899-947.
- 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.
- Park, Y., Kim, N. and Lee, J.Y., 2015, Geothermal properties of groundwater affected by open loop geothermal heat pump systems in Korea. *Geosciences Journal*, 19, 515-526.
- Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Park, Y.C. and Lee, J.Y., 2013, Influence of open and closed loop geothermal cooling and heating systems on hydrological properties. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 649-659 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Possemiers, M., Huysmans, M. and Batelaan, O., 2014, Influence of aquifer thermal energy storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 20-34.
- Rafferty, K., 1999, Scaling in geothermal heat pump system. United States Department of Energy, Washington DC, 60 p.
- Rafferty, K.D., 2004, Water chemistry issues in geothermal heat pump systems. *ASHRAE Transactions*, 110 (Pt. 1), 550-554.
- Song, Y. and Lee, T.J., 2015, Geothermal development in the Republic of Korea: Country update 2010-2014. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, April 19-25*, 1-8 p.
- Sowers, L., York, K.P. and Stiles, L., 2006, Impact of thermal buildup on groundwater chemistry and aquifer microbes. *Proceedings of Ecostock 2006, Pomona, May 31-June 2*, p. 1-7.

---

Received : December 16, 2015

Revised : December 27, 2015

Accepted : December 28, 2015