

<Short Note>

밀폐형 지열냉난방 시스템이 지하수에 미치는 영향: 사례연구

박영윤¹ · 목종구^{2,3} · 장범주³ · 이진용^{1,*} · 박유철²

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 지구물리학과

³(주)지오쓰리에코

요 약

이 연구는 2010년 5월부터 2013년 6월까지 지하수 수위, 수온 및 화학조성을 이용하여 밀폐형 지열 냉난방 시스템이 지하수에 미치는 영향을 평가하기 위해서 수행되었다. 평가결과 지하수 수위는 월강수량의 변화로 인해 3.03 m의 변동을 보였지만 지열 냉난방시스템의 영향은 거의 받지 않았다. 수온은 냉방모드 시 수온이 점차 증가하고 난방모드 시 점차 감소하는 경향을 보였다. 수온의 회귀직선의 기울기가 0.048°C/day로 지하수에 열 에너지가 축적되는 경향을 보였다. 지하수 수질은 다른 요인으로 인해 지표의 오염물질이 지하수로 유입되어 NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 농도가 크게 증가하였지만 지열 냉난방시스템의 영향은 거의 관찰되지 않았다.

주요어: 밀폐형 지열 냉난방시스템, 지하수, 수위, 수온, 화학 조성

Youngyun Park, Jong-Koo Mok, Bum-Ju Jang, Jin-Yong Lee and Yu-Chul Park, 2015, Influence of closed loop ground source heat pumps on groundwater: a case study. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 2, p. 243-251

ABSTRACT: This study was performed to evaluate influence of closed loop ground source cooling and heating system on groundwater by long-term monitoring of water level, temperature and chemical compositions from May 2010 to June 2013. The water level showed a fluctuation of 3.03 m caused by change in monthly precipitation. However, influence of closed loop ground source cooling and heating system on the water level was not observed. Although the water temperature fluctuated by 3.0°C during the operating period (cooling and heating) of the closed loop ground source system, it was quickly recovered during the non-operating period. However, the water temperature showed an increase of 0.048°C/day because thermal energy was accumulated in groundwater. Concentrations of NO₃⁻ and SO₄²⁻ increased highly in groundwater caused by inflow of contaminants from surface. However, the closed ground source cooling and heating system was not considered to affect the groundwater chemistry.

Key words: Closed loop ground source cooling and heating system, Groundwater, Water level, Water temperature, Chemical composition

(Youngyun Park and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea; Jong-Koo Mok and Yu-Chul Park, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea; Jong-Koo Mok and Bum-Ju Jang, Geo3eco Co., Ltd., Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea)

1. 서 론

신재생에너지는 화석에너지를 대체할 수 있는 에너지원으로 최근에 사용량이 크게 증가하고 있다. 신재생에너지 중에 지열은 기후의 영향을 거의 받

지 않고 에너지를 안정적으로 공급할 수 있다. 지열을 이용한 냉난방시스템은 친환경적이며 다른 열원 시스템과 비교하여 에너지 효율성도 매우 높다(USEPA, 1993; Lee, 2009). 지열 냉난방시스템의 설치유형은 지중열교환기의 종류에 따라 밀폐된 파이프에 유체

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

를 순환시키는 밀폐형(closed loop cooling and heating system)과 지하수 또는 지표수를 순환유체로 직접 이용하는 개방형(open loop cooling and heating system)으로 구분된다.

최근 20년 동안 지열 냉난방시스템은 독일, 스위스, 오스트리아, 스웨덴, 덴마크, 노르웨이, 프랑스, 미국, 캐나다, 네덜란드, 중국 등에서 빠르게 성장하였다(Sanner *et al.*, 2003; Lund *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2009; Abesser, 2010; Lund and Bertani, 2010; Bonte, 2013). 국내에서는 2000년대 초기부터 지열 냉난방시스템의 보급이 활발히 이루어졌으며 2014년까지 지열 냉난방시스템은 약 790 MW가 설치되었다(Song and Lee, 2015). 그러나 개방형 지열 냉난방시스템에 대한 이해의 부족으로 인해 개방형 지열 냉난방시스템보다는 밀폐형 지열 냉난방시스템이 주로 설치되었다. 2011년 현재 지열 냉난방시스템 중 75%가 수직밀폐형으로 설치되었다(Kwon *et al.*, 2012).

국내에서 개방형 지열 냉난방시스템의 설치 및 운영이 대수층에 미치는 영향에 대한 연구는 활발하게 이루어졌지만(Jo *et al.*, 2009; Mok *et al.*, 2011; Ahn *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2013), 밀폐형 지열 냉난방시스템의 설치 및 운영이 대수층에 미치는 영향에 대한 연구는 비교적 미흡한 상황이다. 밀폐형 지열 냉난방시스템의 경우 지하수를 직접 이용하지 않기 때문에 지하수의 수질오염에 대한 가능성은 매우 낮으나 관리부실 및 지중온도변화가 대수층에 영향을 줄 수 있으므로 이를 정량적으로 평가할 필요가 있다(Tenma *et al.*, 2007; Nam, 2013). Lee *et al.* (2008)은 밀폐형 지열냉난방시스템에서 천공 시 지열공을 통한 오염물질의 유입(USEPA, 1997, 1999), 냉매 및 열교환 유체 누출(Klotzbücher *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008), 그라우팅 물질에 의한 영향(Kim, 2003; Johnson *et al.*, 2006), 지하수 수온변화에 따른 수질특성 및 미생물종 변화(USEPA, 1997; Ahn *et al.*, 2012) 등의 오염을 초래할 수 있다고 보고하였다. 국내에서는 밀폐형 지열냉난방시스템에 의한 영향이 체계적으로 조사되지 않아 이러한 환경오염 사례가 충분히 보고되지 않았다. 이러한 환경오염은 지열냉난방시스템의 사용에 대해서 부정적인 생각을 가져올 수 있으며 또한 에너지 효율을 저하시킬 수 있다. 그러므로 지열냉난방시스템의 장점을 극대화하기 위해서는 국내에서 설치 및 운영되고 있는

밀폐형 지열냉난방시스템에 대한 모니터링이 지속적으로 이루어져야 하며 이들 시설에서 환경문제가 발생하였을 때에는 신속히 대처해야 한다.

밀폐형 지열 냉난방시스템은 지중환경, 규모 및 운영방법에 따라 다양한 환경변화를 초래할 수 있으나 이러한 환경변화는 매우 느리게 나타나기 때문에 환경변화에 대한 모니터링이 지속적으로 이루어져야 한다(Lee *et al.*, 2008; Jo *et al.*, 2009). 최근까지 국내에 설치된 밀폐형 지열 냉난방시스템에서 시스템의 운영에 따른 환경변화를 장기적으로 모니터링한 사례는 거의 없다. 그러나 밀폐형 지열 냉난방시스템은 지하에 대규모의 시설을 설치하므로 이들 시설로 인한 환경오염이 발생할 가능성을 완전히 배제할 수는 없다. 따라서 이들 시설에서 발생할 수 있는 환경오염을 예측하고 평가하기 위해서는 대수층의 수리지질학적인 특성에 대한 장기적인 모니터링이 필요하다. 이 연구는 지하수의 수온, 수위 및 화학조성의 장기모니터링 자료를 이용하여 밀폐형 지열 냉난방시스템이 대수층에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다.

2. 지열 냉난방시스템의 설치현황

국내에서 지열에너지는 냉난방, 농수산업, 온천, 건조 등 다양한 목적으로 이용되고 있지만 전체 지열에너지 중 94.8%는 냉난방시스템으로 이용되고 있다(Song and Lee, 2015). 국내 지열 냉난방시스템 설치현황에 대한 통계는 지속적으로 이루어지고 있지만(Lee, 2009; Kwon *et al.*, 2012; Song and Lee, 2015), 정부보조금이 에너지관리공단, 한국농어촌공사 등의 여러 기관을 통해 지원되고, 또한 정부보조금을 받지 않는 시설에 대해서는 체계적으로 관리가 되고 있지 않기 때문에 설치현황을 정확하게 파악하는데 어려움이 있다. 국내에서 지열 냉난방시스템은 2000년에 2개가 설치되었지만 2015년도까지 누적된 설치개수는 7,000개 이상으로 급격하게 증가하였다(Lee, 2009; Song and Lee, 2015). 이것은 연면적 1,000 m² 이상의 공공기관 건물을 신축 또는 증축할 때 산·재생에너지 설비를 10% 이상 설치해야하는 『신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법』과 정부의 보조금으로 인한 결과로 볼 수 있다(Lee, 2009; Song and Lee, 2015).

지열 냉난방시스템의 보급 초기에는 주로 공공 및 상업적인 시설에 설치가 되었지만(Lee, 2009), 점

차 수산업 및 농업 시설로 확대되어 이들의 비율이 점차 증가되었다(Kwon *et al.*, 2012; Song and Lee, 2015). 최근에는 소규모 시설인 가정용의 설치비용이 점차 증가하고 있다(KEMCO, 2014).

3. 연구지역

중원대학교는 충청북도 괴산군에 위치하며 2009년에 본관과 기숙사동에 총 6,952 kW 용량의 수직 밀폐형 지열 냉난방시스템이 설치되었으며 현재까지 잘 운영되고 있다. 이 시설에는 150 m 깊이의 지열공이 245개 설치되었고 지열공 상부에는 골프장이 조성되어 있다(그림 1). 이 연구에서는 지열공 사이에 설치된 관측정(JW-1)에서 수온, 수위 및 전기전도도를 측정하였고 지하수 흐름방향의 하류에 위치한 관정(JW-2)에서 수온 및 수위를 측정하였다. 관측정에는 0~14 m 깊이에 165 mm 규격의 케이싱이 설치되어 있다. 연구지역의 수리전도도는 $2.10 \times 10^{-4} \sim 2.50 \times 10^{-4}$ cm/day, 투수량계수는 2.089~2.478 m²/day 이다(Mok *et al.*, 2011).

중원대학교 주변의 지질은 선캠브리아기의 변성

암류가 기반암을 이룬다. 이 변성암류를 주라기와 백악기의 화성암류들이 관입하였고 제 4기 충적층이 이들 암석들을 부정합으로 피복하고 있다(Lee and Kim, 1972). 지표로부터 14 m 하부까지는 주로 실트와 모래이며 소량의 점토와 자갈을 포함한다. 14 m 하부에서부터 기반암이 나타난다(Mok *et al.*, 2011).

괴산지역에는 기상관측소가 없기 때문에 괴산지역에서 가까운 충주지역의 기상자료를 이용하였다. 1981년부터 2010까지 기상자료에 따르면 연평균강수량은 1,212.6 mm이고 연강수량의 70%가 6월부터 9월까지 집중되며 특히 7월과 8월의 월강수량은 260 mm 이상이였다(KMA, 2015). 연평균 기온은 11.3℃이고 월평균 기온은 8월에 24.9℃ 가장 높았고 1월에 -4.2℃로 가장 낮았다(KMA, 2015). 연평균 습도는 71.9%이고 8월이 78.5%로 가장 습하고 4월이 60.4%로 가장 건조하였다(KMA, 2015).

4. 연구방법

4.1 지하수 수위와 수온

2010년 5월 19일부터 2013년 6월 14일까지 지열

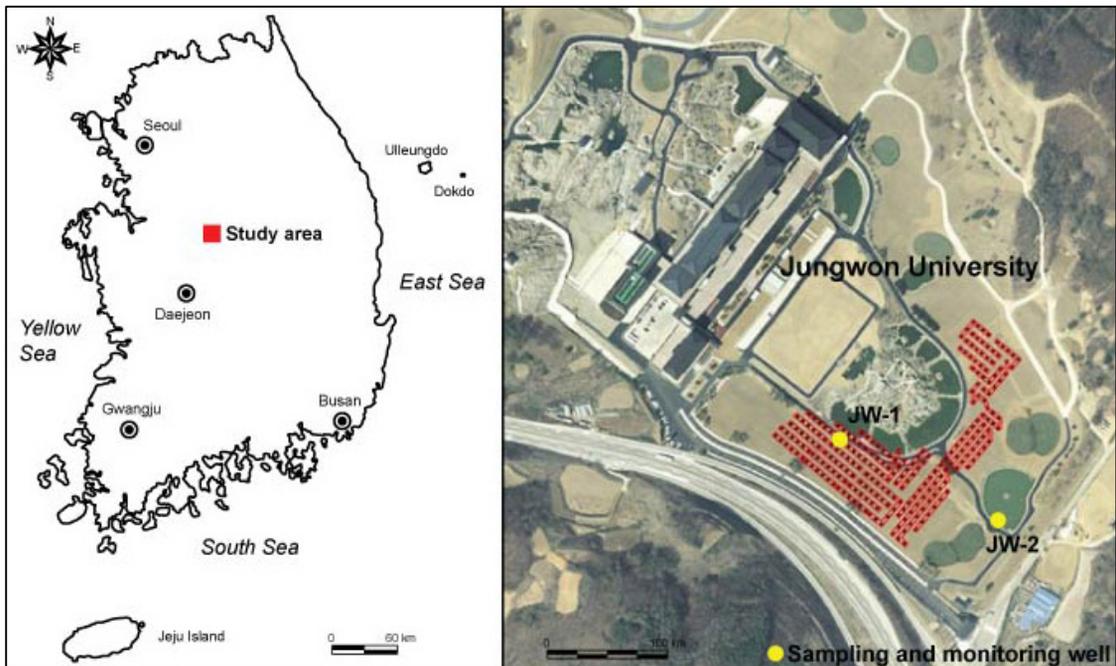


Fig. 1. Location of study area and layout of ground-heat exchanger and monitoring wells for water temperature, water level, electrical conductivity, and chemical compositions of groundwater.

Table 1. Statistics of water level and water temperature at JW-1, JW-2, and GG during the monitoring period.

		JW-1	JW-2	GG
Water level (m, DTW)	Minimum	2.52	2.24	0.37
	Maximum	5.55	62.2	4.82
	Average	3.71	24.7	2.60
	Range	3.03	60.0	4.45
Water temperature (°C)	Minimum	13.3	12.8	13.1
	Maximum	16.3	14.7	13.6
	Average	15.2	14.0	13.4
	Range	3.0	1.9	0.5

DTW represents depth from surface to water table

공으로부터 3.5 m 떨어진 JW-1에서 자동측정센서(Levellogger, Solinst, Canada)를 이용하여 30분 간격으로 지하수의 수위, 수온 및 전기전도도를 측정하였다. 또한 2011년 7월 6일부터 2013년 6월 14일까지 JW-2에서 자동측정센서(Levellogger, Solinst, Canada)를 이용하여 30분 간격으로 지하수의 수위와 수온을 측정하였다. 각 관정에 대기압보정을 위해서 기압관측센서(Barologger, Solinst, Canada)를 설치하여 매시간 기압을 측정하였으며 측정된 기압을 이용하여 수위를 보정하였다. JW-1과 JW-2에서 측정된 지하수의 수위 및 수온과 비교하기 위해서 국가지하수관측망 중 괴산-괴산(GG)에서 2010년 5월 19일부터 2012년 12월 31일까지 측정된 지하수의 수위 및 수온 자료를 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)에서 수집하였다. GG는 충청북도 괴산군 괴산을 서부리에 위치하며 심도는 72 m로 1999년에 설치되어 운영되고 있다.

4.2 시료채취 및 화학분석

2010년 6월 17일부터 2013년 9월 3일까지 JW-1과 JW-2에서 연간 4~5회 지하수 시료를 채취하였다. 채취한 지하수는 0.45 µm 멤브레인 필터로 여과하였고 여과된 시료의 일부는 진한 질산으로 산처리하였다. 현장에서 간이수질측정기를 이용하여 수온, pH, 산화환원전위(oxidation reduction potential, ORP), 전기전도도를 측정하였고 시료채취 후 24시간 이내에 알칼리도를 측정하였다. 측정된 알칼리도로부터 HCO₃⁻ 농도를 계산하였다. 주 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)과 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)는 상지대학교 산학협력단 자연과학연구지원센터에서 각

각 ICP와 IC로 분석하였다.

5. 결과 및 토의

5.1 수리적 특성

JW-1에서 수위는 2.52~5.55 m 범위를 보였고 JW-2에서는 2.24~62.2 m의 범위를 보였다(표 1). JW-1의 수위는 강수량에 의한 영향만을 받았기 때문에 건기와 우기에 3.03 m의 차이를 보였다. 그러나 JW-2에서는 지하수의 직접 사용으로 인해 수위가 60 m 이상 크게 변하였기 때문에 이번 연구에서 JW-2의 수위의 변동요인은 고려하지 않았다. GG에서도 JW-1에서처럼 강수량에 의한 영향만을 받았기 때문에 건기와 우기에 4.45 m의 차이를 보였다. 연구기간 동안에 일강수량은 0.1~167 mm의 범위를 보였고 수위는 강수량에 따라 뚜렷한 증가를 보였다(그림 2). 연구기간 동안에 JW-1에서 측정된 수위의 회귀직선 기울기는 -0.0038 m/day로 다소 감소하는 경향을 보였다. 이것은 Park *et al.* (2013)이 보고한 기울기(-0.00001 m/day)보다는 더 많이 감소하는 경향이다. 이번 연구의 관측기간은 Park *et al.* (2013)이 수위를 관측한 기간보다 6개월 연장되었지만 수위가 크게 증가하는 2013년도 우기(6월~9월)의 자료가 대부분 포함되지 않았기 때문이다. GG에서 수위의 회귀직선 기울기는 0.00163 m/day로 다소 증가하는 경향을 보였다. 불투수층 내 함양특성의 차이로 인해 GG의 회귀직선 기울기가 JW-1과 다른 경향을 보인 것으로 평가되었다. 이번 연구에서 JW-1의 수위에서 수직밀폐형 지열시스템의 지중 설비에 의한 영향이 관찰되지 않았지만 시간이 경과

됨에 따라 지열시스템의 지중설비가 수위에 영향을 줄 수 있으므로 지속적인 수위관측이 필요하다.

5.2 지하수의 물리적 특성

연구기간 동안에 충주지역의 기온은 -15.4~30.4℃의 범위를 보였다(KMA, 2015). 기온에 따라 지열시스템을 난방 또는 냉방모드로 사용하고 이것은 지하수 수온에 영향을 준다(Park et al., 2013). JW-1, JW-2 및 GG의 수온을 표 1에 정리하였다. JW-1에서 수온은 13.3~16.3℃의 범위를 보였다. JW-2와 GG에서 수온은 각각 12.8~14.7℃와 13.1~13.6℃의 범위를 보였다. JW-1의 수온은 JW-2 및 GG에 비해서 넓은 범위를 보였다. JW-2에서는 뚜렷한 계절 변화가 관찰되지 않았지만 JW-1과 GG에서는 계절 변화가 관찰되었다. JW-1과 GG에서 수온과 기온은

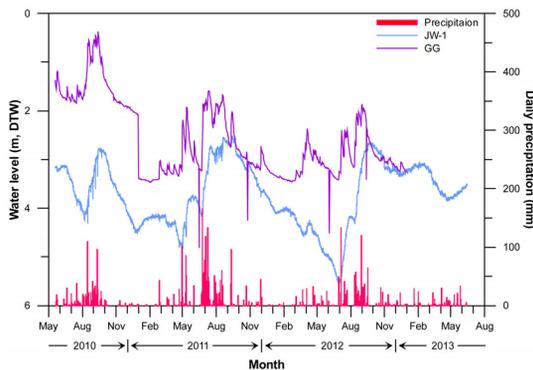


Fig. 2. Temporal variations of groundwater levels at JW-1 and GG and precipitation in Chungju. GG represents Goesan-Goesan station of national groundwater monitoring network.

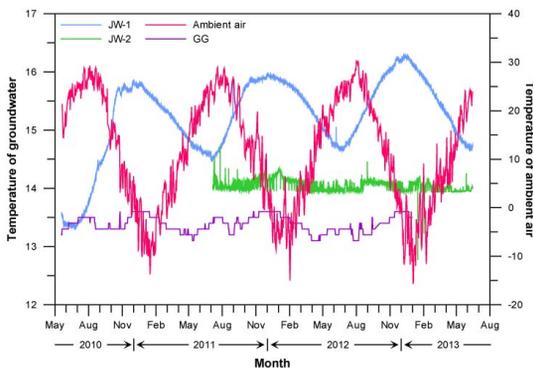


Fig. 3. Temporal variations of temperature of ambient air in Chungju and groundwater at JW-1, JW-2, and GG.

비슷한 변동경향을 보였다. 그러나 GG에서는 기온에 바로 반응을 하였지만 JW-1에서는 약 4~5개월의 위상차를 보였다(그림 3). 기온 및 JW-2와 GG의 수온의 회귀직선의 기울기는 각각 -0.0057, -0.0096, -0.00004℃/day로 다소 감소하는 경향을 보였다. 그러나 JW-1에서는 지열 냉난방시스템의 운영으로 인해 대수층에 열이 축적되어 회귀직선의 기울기가 0.048℃/day로 다소 증가하는 경향을 보였다.

JW-1에서 pH는 6.0~7.8의 범위를 보였고 JW-2에서는 6.4~8.2의 범위를 보였다. JW-1의 ORP는 16~222 mV의 범위를 보였고 JW-2에서는 13~174 mV의 범위를 보였다. JW-2보다 JW-1에서 pH는 낮았지만 ORP는 높았다. 그러나 JW-1과 JW-2 모두 Garrels and Christ (1965)가 분류한 전이환경(transitional environment)과 대기와 직접 접하지 않는 환경(environment isolated from the atmosphere)에 도시되었다. 이것은 JW-1과 JW-2의 산화-환원환경이 동일하다는 것을 나타낸다.

JW-1의 상부에서 측정된 전기전도도는 120~428 μS/cm의 범위를 보였고 지상으로부터 30 m 깊이의 하부에서는 230-290 μS/cm의 범위를 보였다(그림 4). 상부에서 전기전도도는 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 경향을 보였고 강수가 내리면 전기전도도가 증가하였다. 반면에 하부에서는 전기전도도가 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보였고 강수가 내리면 전기전도도가 감소하는 경향을 보였다. 이것은 JW-1의 상부와 하부가 서로 혼합되지 않았으며 다른 수질을 보일 수 있는 가능성이 있다는 것을 의미한다. 또한 지표의 영향을 덜 받는 하부의 전

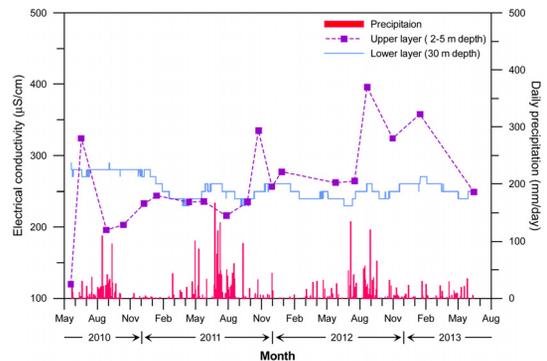


Fig. 4. Temporal variations of electrical conductivity of upper and lower layer of groundwater at JW-1 and precipitation in Chungju.

기전도도가 매우 좁은 범위를 보이는 것은 수직밀폐형 지열 냉난방시스템을 약 7년 정도 사용을 하였지만 아직까지는 지하수 수질에 뚜렷한 영향을 주지 않았다는 것을 의미한다. 그러나 수온증가로 인해 지하수 수질이 변할 수 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하다. JW-2에서는 JW-1보다 높은 303~510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보였다. 이것은 JW-2가 JW-1에 비해서 지하수 흐름의 하류방향에 위치하여 물-암석반응 및 주변 환경의 영향을 더욱 많이 받았기 때문에 나타난 결과이다.

5.3 지하수의 화학적 특성

JW-1에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ 의 농도는 각각 3.87~45.2, 3.32~14.5, 0~11.9, 2.57~5.92 mg/L의 범위를 보였고 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 의 농도는 각각 6.00~13.0, 0~4.58, 10.0~44.0, 46.4~127 mg/L의 범위를 보였다. JW-2에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ 의 농도는 각각 65.1~81.2, 13.6~16.6, 11.6~14.6, 6.15~9.76 mg/L의 범위를 보였고 Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 의 농도는 각각 7.82~11.2, 0~11.9, 65.6~172 mg/L의 범위를 보였다. JW-2에서 NO_3^- 는 측정되지 않았다(0 mg/L). JW-1과 JW-2는 모두 Ca- HCO_3 형으로 분류되었다(그림 5). 파이퍼다이어그램에서 JW-1과 JW-2 모두 양이온은 매우 좁은 범위에 도시되었지만 음이온은 넓은 범위에 도시되었다. 이것은 시료를 채취한 시기에 따라서 양이온의 기여도는 거

의 변화가 없지만 음이온의 기여도는 크게 변화되었다는 것을 의미한다.

JW-1에서 대부분의 용존성분들은 JW-2보다 더 낮은 농도를 보였지만 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 농도는 JW-2보다 JW-1에서 더 높았다. 특히 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 농도는 시간이 지남에 따라 점차 증가되었으며 이들의 농도증가로 인해 JW-1 상부의 전기전도도가 하부보다 높은 값을 보였던 것으로 판단되며 이를 명확하게 규명하기 위해서는 JW-1 내 용존성분들의 수직적인 농도변화를 살펴봐야 할 것이다. 또한 이것은 지열 냉난방시스템의 영향을 평가할 때 시료채취의 위치가 중요하다는 것을 나타낸다. NO_3^- 와 SO_4^{2-} 는 비료로부터 공급될 수 있는 성분들로 지열 냉난방시스템 상부에 조성된 골프장의 영향으로 판단할 수 있으며 이들 성분들의 영향이 점차 커지고 있음을 알 수 있다. JW-2에서 대부분의 성분들의 농도가 JW-1보다 높았지만 특히 Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 HCO_3^- 에서 이러한 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이들 성분들은 탄산염 광물들의 용해반응과 관련이 있는 성분들로 JW-1보다 JW-2에서 물-암석반응의 영향을 더 많이 받은 결과로 해석할 수 있다. 그러나 JW-1의 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 농도가 JW-2에서 유지되거나 증가되지 않은 것은 골프장 주변 지역에서 유입된 지하수로 인해 이들의 농도가 희석된 것으로 판단되나 이를 명확하게 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

결과적으로 연구지역 내 지하수의 수질변화는 수직밀폐형 지열 냉난방시스템의 운영의 영향이 아니라 지표 내 성분들이 지하수로 유입되면서 나타난 것이며 JW-1의 수질이 연구지역 주변의 넓은 범위에까지 영향을 주지는 않은 것으로 평가되었다.

6. 결론

이 연구에서는 2010년 5월부터 2013년 6월까지 측정된 지하수 수위, 수온, 전기전도도 및 화학조성을 이용하여 수직밀폐형 지열 냉난방시스템이 대수층에 미치는 영향을 평가하였다. 연구기간 동안에 지하수 수위는 약 3.03 m의 수위변화를 보였으며 이것은 월강수량의 변화로 인해 나타난 결과이며 지열 냉난방시스템의 영향은 거의 없었다. 지하수 수온은 지열 냉난방시스템 영향으로 인해 냉방모드와 난방모드로 운영 시 최대 3.0°C 변화가 있었지만 시스템

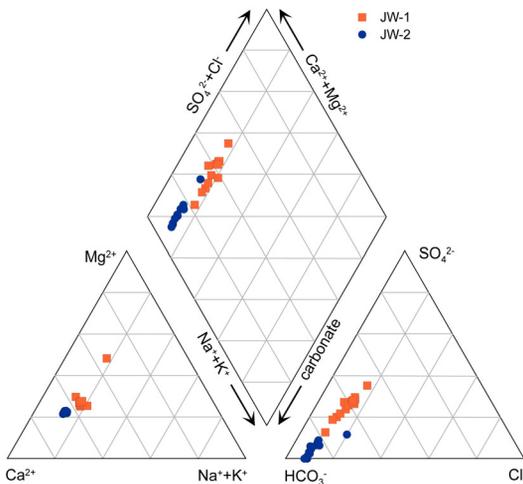


Fig. 5. Chemical compositions of groundwater at JW-1 and JW-2.

을 운영하지 않을 때 평균값으로 빠르게 회복되었다. 그러나 모니터링기간동안에 대수층에 열에너지가 축적되면서 0.048°C/day로 점차 증가하는 경향을 보였다. 향후 지하수의 수온은 일정 수준까지 계속 증가할 것으로 예측된다. 지하수 수온의 증가는 시스템의 에너지 효율을 낮출 수 있으므로 시스템의 에너지 효율을 현재 상태로 유지하거나 또는 에너지 효율을 높이기 위해서 대수층에 주는 영향을 최소화할 수 있는 운영방안이 모색되어야 할 것이다. 지하수의 수질은 지열 냉난방시스템의 영향을 거의 받지

않았지만 지열공 상부에 조성된 골프장의 영향으로 인해 NO₃⁻와 SO₄²⁻의 농도가 점차 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 수질변화가 중원대학교의 수직 밀폐형 지열 냉난방시스템 사용에 큰 영향을 주지는 않겠지만 지하수의 오염방지 및 수자원을 확보하기 위해서 적절한 골프장 관리방안을 모색해야 될 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발

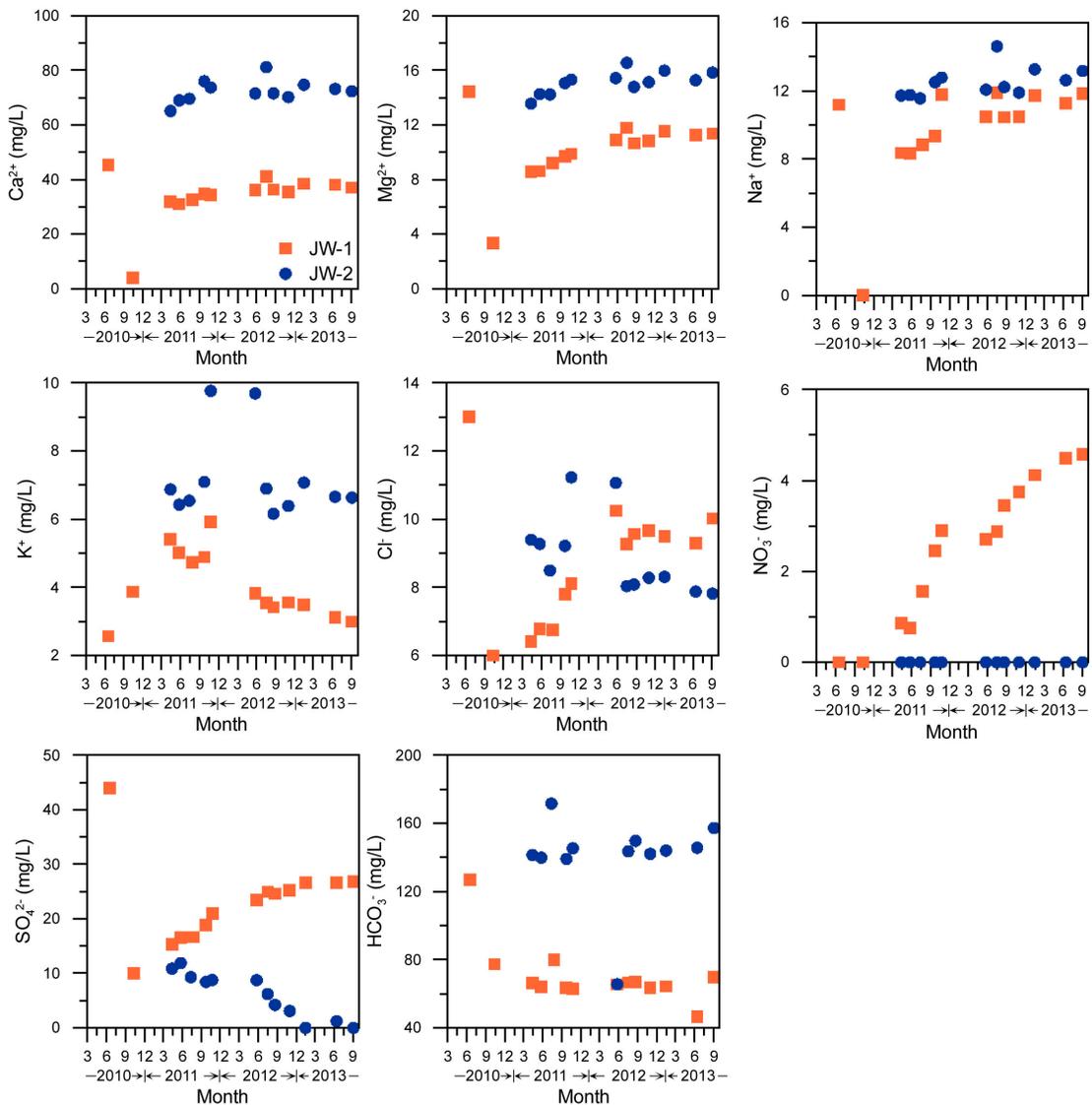


Fig. 6. Temporal variations of major ions in groundwater at JW-1 and JW-2.

사업(2014000530001)에서 지원을 받아 수행되었습니다. 이 논문을 위해서 세심히 검토해 주시고 유익한 조언을 해 주신 한국지질자원연구원 이태중 박사님과 익명의 심사위원께 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.
- Ahn, C.M., Han, J.S., Kim, C.G., Park, Y.C., Mok, J.K. and Jang, B.J., 2012, Monitoring of geothermal systems wells and surrounding area using molecular biological methods for microbial species. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 23-32 (in Korean with English abstract).
- Bonte, M., 2013, Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality-a hydrochemical and geo-microbial study on the effects of ground source heat pumps and aquifer thermal energy storage. Ph.D. thesis, VU University Amsterdam, Amsterdam, 175 p.
- Gao, Q., Li, M., Yu, M., Spittler, J.D. and Yan, Y.Y., 2009, Review of development from GSHP to UTEs in China and other countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1383-1394.
- Garrels, R.M. and Christ, C.I., 1965, *Solutions, minerals, and equilibria*, Harper & Row, New York, 450 p.
- 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).
- Johnson, Jr., R.C., Kurt, C.E. and Dunham, Jr., G.F., 2006, Well grouting and casing temperature increases. *Ground Water*, 18, 7-13.
- KEMCO, 2014, *New & renewable energy Statistics 2013*. New & Renewable Energy Center of Korea Energy Management Corporation, Seoul, 141 p (in Korean).
- Kim, K., 2003, Long-term disturbance of groundwater chemistry following well installation. *Ground Water*, 41, 780-789.
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K.L. and Haderlein, S.B., 2007, Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in bore-hole heat exchangers. *Geothermics*, 36, 348-361.
- KMA, 2015, <http://www.kma.go.kr> (February 10, 2015).
- Kwon, K.S., Lee, J.Y. and Mok, J.K., 2012, Update of current status on ground source heat pumps in Korea (2008-2011). *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 193-199 (in Korean).
- Lee, C.H. and Kim, J.H., 1972, Geological report of Goesan. Geological survey of Korea. 47 p (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.G., Kim, J.W. and Kim, C.G., 2008, Study of influence of ground source heat pump systems on soil and groundwater. Ministry of Environment, Sejong, 240 p (in Korean).
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R. and Hellström, G., 2004, Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *Geo-Heat Center Bulletin*, 25, 1-10.
- Lund, J.W. and Bertani, R., 2010, Worldwide geothermal utilization 2010, Geothermal Resources Council Annual Meeting 2010, Sacramento, Oct. 24-27, p. 182-185.
- 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).
- Nam, Y., 2013, Numerical analysis of the effect of ground source heat pump systems on the underground temperature. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 25, 427-431 (in Korean with English abstract).
- Park, Y., Kwon, K.S., Kim, N. and Lee, J.Y., 2013, Change of geochemical properties of groundwater by use of open loop geothermal cooling and heating system. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 289-296 (in Korean with English abstract).
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinis, D. and Rybach, L., 2003, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32, 579-588.
- 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.
- Tenma, N., Yasukawa, K., Uchida, Y., Ohtani, T. and Mori, K., 2007, Numerical simulation of subsurface temperature change caused by geothermal heat pump systems: study on the subsurface thermal structure at the Sendai Plain 2nd paper. *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*, 29, 13-23.
- USEPA, 1993, *Space Conditioning: The Next Frontier-The Potential of advanced Residential Space Conditioning Technologies for Reducing Pollution and Saving*

Customers Money. USEPA, Washington, 5-13 p.
 USEPA, 1997, Manual on environmental issues related to geothermal heat pump systems. USEPA, Washington, D.C., 95 p.
 USEPA, 1999, The Class V Underground Injection Control Study. Volume 19, Heat pump and air conditioning re-

turn flow wells. USEPA, Washington, D.C., 60 p.

Received : February 26, 2015
 Revised : March 25, 2015
 Accepted : March 25, 2015