



## 복수정 페어링 기술을 이용한 개방형 지열 시스템의 수리적 타당성 검토

### *Hydraulic feasibility study on the open-loop geothermal system using a pairing technology*

배상무\* · 김홍교\*\* · 김현우\*\* · 남유진\*\*\*

Bae, Sangmu\* · Kim, Hongkyo\*\* · Kim, Hyeon-woo · Nam, Yujin\*\*\*

\* Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (trapezeb@naver.com)

\*\* Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea

\*\*\* Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Groundwater heat pump (GWHP) system has high coefficient of performance than conventional air-source heat pump system and closed-loop type geothermal system. However, there is problem in long-term operation that groundwater raise at the diffusion well and reduced at the supply well. Therefore, it is necessary to accurately predict the groundwater flow, groundwater movement and control the groundwater level in the wells. In this research, in consideration of hydrogeological characteristic, groundwater level and groundwater movement were conducted analysis in order to develop the optimal design method of the two-well system using the pairing pipe. **Method:** For the optimum design of the two-well system, this research focused on the design method of the pairing pipe in the simulation model. Especially, in order to control the groundwater level in wells, pairing pipe between the supply well and diffusion well was developed and the groundwater level during the system operation was analyzed by the numerical simulation. **Result:** As the result of simulation, the groundwater level increased to -2.65m even in the condition of low hydraulic conductivity and high pumping flow rate. Consequently, it was found that the developed system can be operated stably.

© 2017 KIEAE Journal

#### KEYWORD

지하수 이용 히트펌프 시스템  
수리지질학적 특성  
복수정 페어링 파이프

Groundwater Heat Pump System  
Hydrogeological Characteristic  
Pairing Pipe

#### ACCEPTANCE INFO

Received May 16, 2017

Final revision received May 29, 2017

Accepted June 3, 2017

## 1. 서론

개방형 (Open-loop type) 지열 시스템은 동일한 관정 내에서 취수(pumping)와 주입(injection)을 연계시킨 SCW(Standing Column Well) 시스템과 취수정(Supply well)과 주입정(Diffusion well)을 구분하여 이용하는 복수정 시스템이 있다. 복수정 시스템은 지하수 수질이 좋고 대수층이 발달한 지역에서 이용되며, 취수정을 통해 양수 하고 지하수는 지상에서 열교환 후 동일 대수층 내에 설치된 주입정으로 재순환되는 지속가능한 시스템이다. 이러한, 복수정 지열 시스템은 미국에서 지난 20년 간 가장 성공적으로 적용되어온 지하수 이용 지열 히트펌프 시스템(Groundwater Heat Pump System, GWHPs)으로 대규모 빌딩, 학교 및 상업지역에서 냉난방 시스템으로 사용되고 있다.<sup>1)</sup>

복수정 지열 시스템은 지중의 지하수를 축열조 또는 열원으로 이용하기 때문에 기존의 공기열원 시스템이나 밀폐형 지열 시스템 (Closed-loop type)보다 우수한 성능을 기대할 수 있다. 그러나, 수리지질학적으로 대수층이 충분히 존재하는 지역에 설치해야하며 지하수의 수질에 의한 관정 내 스케일 발생, 지하수위 저감 등의 단점이 있다. 또한, 시스템 운전에 따라 취수정의 지하수위 저감과 주입정의 지하수 상승 현상으로 인해 시스템 운영에

제한이 발생된다. 따라서 복수정 지열 시스템 도입 시 지반 특성과 지하수의 수리조건을 고려한 시스템 설계수법과 성능향상을 위한 운전방법의 개발이 필요하다.

이러한 개방형 지열 시스템에 대한 연구는 다양한 분야에서 수행되고 있으며 시스템의 성능향상을 위한 설계수법 개발 및 설계인자 도출과 시스템 운영에 따른 주변 환경의 수리지질학적 영향도 분석에 관한 연구가 국내외로 다양하게 진행되고 있다. A. Sciacovelli et al.<sup>2)</sup>은 3D 시뮬레이션 모델을 통해 도시지역에 설치된 개방형 지열 시스템 운전에 따른 지하수 온도와 주변 환경에 미치는 영향을 분석하였다. Fei and Pingfang<sup>3)</sup>는 지하수 이용 히트펌프 시스템의 에너지 절약을 위해 에너지 및 엑서지 (Exergy) 분석 방법을 사용하여 시스템의 성능 인자를 조사하였다. 실험 결과로부터 얻은 설계인자를 통해 시스템 구성 요소의 특성을 분석하였다. 또한, Liang et al.<sup>4)</sup>은 베이징 평야의 수문 지질(hydro-geological) 분석을 통해 얇은 대수층의 단위 면적당 용량을 산출하였다. 산출 결과를 바탕으로 지하수 이용 히트펌프 시스템의 부하 용량과 성능을 평가하였다.

Kim et al.<sup>5)</sup>은 기존의 개방형 지열 시스템 설계방법의 문제점에 대해 고찰하였으며 현행 설계방법의 문제점 개선을 위해 현장 열응답 시험의 수치해석을 통해 개선 전후 설계 결과를 비교 분석하였다. Park et al.<sup>6)</sup>은 개방형과 밀폐형 지열 시스템의 관측공에서 30개월 동안 수온, 지하수위 및 전기전도도를 측정하였다.

측정된 데이터를 통해 개방형과 밀폐형 지열 시스템이 지하수의 수리지질학적인 특성에 미치는 영향을 평가하였다. Kim et al.<sup>7)</sup>은 주택 및 소규모 건물에 적용할 수 있는 SCW 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 난방 성능을 평가하고, 시스템 성능에 영향을 미치는 설계인자를 분석하였다. 그 결과, 히트펌프의 평균 난방 성능계수는 5.9로 확인하였다. 또한, Park et al.<sup>8)</sup>은 주거용 건물에 실제 설치된 SCW 지열 히트펌프 시스템의 실험 데이터를 통해 매설 깊이에 따른 지중온도 변화 특성과 시스템 냉방성능을 평가하였다. 한편, Bae et al.<sup>9)</sup>은 개방형 지열 시스템 설계수법 개발을 위해 수치 시뮬레이션을 이용하여 시스템 운전에 따른 취수정 및 주입정의 관정 주변의 지하수위 및 지중 온도 환경을 검토하였다.

이처럼 실증 실험이나 시뮬레이션을 통해 개방형 지열 시스템의 성능향상을 위한 설계방법과 설계인자 도출, 시스템 운영에 따른 지중 환경 평가 등에 관한 연구는 활발히 수행되고 있다. 그러나, 복수정 지열 시스템의 장기운전에 따른 지하수 유동이나 지하수위 변화를 정량적으로 예측한 연구는 드물다. 복수정 지열 시스템은 연속적 또는 간헐적인 양수 및 취수를 장기적으로 수행하는 설비이므로, 그에 따른 지하수위 및 지중 환경 변화를 충분히 고려해야 한다. 본 시스템의 이용에 있어 장기적인 지하수 양수 또는 주입으로 인해 지하수위가 점차적으로 하강 또는 상승되게 되는데, 이로 인해 시스템 운전이 어려워지는 상황도 발생한다. 따라서 본 연구에서는 취수정과 주입정의 관정으로 페어링 파이프를 연결한 복수정 지열 시스템을 제안하고 이 기술의 실현 가능성과 효과에 대해 수리적 검토를 실시하였다. 본 논문에서는 페어링 기술을 적용한 복수정 지열 시스템의 해석 모델을 이용하여 장기운전에 따른 지하수 유동 및 지하수위 변화를 정량적으로 검토하였다.

## 2. 복수정 페어링 시스템

### 2.1. 복수정 페어링 개요

복수정 지열 시스템은 지하수를 직접 열원으로 이용하기 때문에 밀폐형 시스템 보다 상대적으로 효율이 높다. 그러나 장기운전 시 지하수 주입과정에서 주입정 측의 넘침 현상(Overflow)이 발생하여 에너지 효율 저감, 운전 제한과 같은 시스템 전체의 기술적 문제가 야기된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 해결 방안으로는 우물정의 단면을 증대시키거나 우물정 개수를 증가시키는 다공형 개방형 지열 시스템을 도입하였다. 그러나 설치비용 및 시공 난이도 상승과 용량 초과설계로 인한 경제성이 저하되는 단점이 있다.

본 연구에서는 페어링(Pairing) 기술을 이용하여 기존의 복수정 지열 시스템의 문제점을 획기적으로 해결하고자 하였다. 페어링 기술은 시스템 운전에 따른 주입정의 넘침 현상을 방지하고 취수정의 지하수위 저감을 조절을 통해 취수량과 주입량의 불균형을 제어하고 지하수열의 낭비와 지하수 순환장애요인을 개선하여 시스템 운영에 대한 안정성을 확보할 수 있다. 또한, 대수층

이 존재 하는 유효심도 내에서 지중의 수리 특성을 고려하여 취수정과 주입정의 상호 기능 전환이 가능하다. 이러한 복수정 페어링 기술을 이용한 개방형 지열 시스템은 지하수 순환을 결합, 제어함으로써 취수정 및 주입정 간 지하수위를 조절하고 우물정의 열교환 효율 및 에너지 이용 효율의 극대화로 시공비 절감효과와 시스템 성능을 향상을 시킬 수 있다.

### 2.2. 복수정 페어링 구축

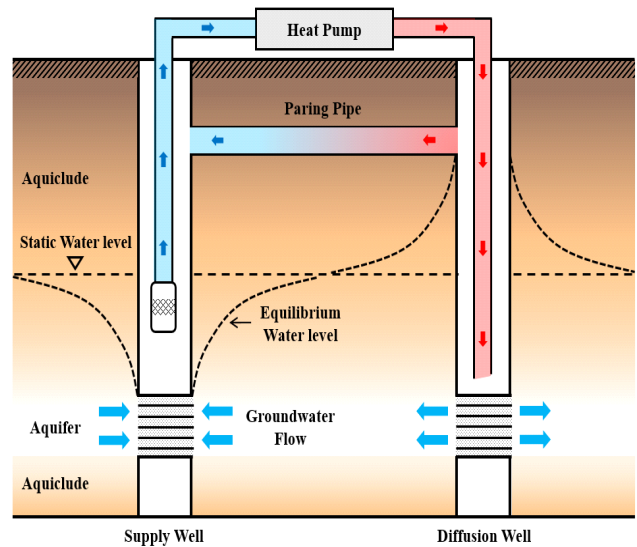


Fig. 1. GWHP system using a Pairing of Two-wells Overview

Fig. 1은 복수정 페어링(Pairing)을 이용한 지열 시스템의 개요도를 나타낸다. 초기 지하수위(Static Water level)는 시스템 운전에 따라 취수정 측에서는 관정을 중심으로 지하수위가 감소하고, 주입정 측은 반대로 지하수위가 상승 한다. 변화된 지하수위 기울기(Slope)를 초기 지하수위와 대등하게 회복시키기 위해 취수정과 주입정을 동기화시키는 도수통로(Spill way)를 구축하였다. 도수통로는 관정 간 지하수의 수두 차이를 통해 서로 순환이 가능하여 지하수위를 제어할 수 있는 시스템이다.

복수정 페어링 내부의 지하수 유동 해석방법은 다공성 매질을 투과하는 유체 이동의 경험식으로부터 유도된 Darcy의 법칙(1)에 의해 해석된다.

$$v = \frac{Q}{A} = k \cdot \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

식(1)을 이용하여 주입정과 취수정의 수두 차를 통해 페어링 내부의 지하수 유속을 산출할 수 있다. 여기서,  $v$ 는 지하수 유속(m/s),  $Q$ 는 페어링 내부의 유량( $m^3/s$ ),  $A$ 는 페어링 단면적( $m^2$ ),  $k$ 는 투수계수(m/s),  $\Delta h$ 는 페어링 양 끝의 수두차(m),  $l$ 는 페어링 길이(m)를 나타낸다.

한편, 복수정 지열 시스템의 설치지역이 지하수 수질이 우수하고, 투수계수가 높아 지하수의 유동이 원활한 수리지질 조건에서는 시스템 운전제한 등의 기술적인 문제점이 발생되기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 복수정 페어링을 이용한 개방형 지열 시스템의 설치지역은 국내 기반암인 화강암으로 투수계수가 낮고, 지하수의 유동이 다소 불리한 지질 조건이라 가정하였다.<sup>10)</sup>

### 3. 복수정 지열 시스템 해석방법

지하수를 양수함에 따라 대수층이 하강할 수 있는 수두의 한계가 있으므로 복수정 지열 시스템의 운전에 따른 대수층의 수두강하 예측이 필요하다. 이론적으로 대수층에서의 수위강하는 평행방정식인 Thiem 방정식(2)에 의해 도출될 수 있다.

$$Q = 2\pi kb \frac{h - h_w}{\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)} \quad (2)$$

여기서,  $Q$ 는 양수량( $m^3/d$ ),  $k$ 는 투수계수( $m/s$ ),  $b$ 는 우물정의 높이( $m$ ),  $h$ 는 임의 단면에서의 수두( $m$ ),  $h_w$ 는 반경  $r_w$  양수정의 수두( $m$ ),  $r$ 은 양수정으로부터 거리( $m$ ),  $r_w$ 는 관정의 반경( $m$ )을 나타낸다. 이 방정식은 양수시험을 이용한 투수계수 산출에 주로 이용되며, 양수에 따른 수두의 시간적 변화를 측정하여 대수층의 투수계수나 저류계수 값과 같은 수리인자(Hydraulic parameter)를 결정하는데 사용된다.<sup>11)</sup>

그러나 이러한 방정식을 이용하여 복수정 페어링 시스템의 관정 간 지하수위 변화, 페어링 내부의 지하수 유동과 지층의 지하수 흐름을 동시에 해석하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 양 관정 및 토양 내부에서 발생하는 수리적 변화와 페어링의 지하수 유동을 정확하게 재현하고자 선행연구<sup>12,13)</sup>에서 검증된 지중열-지하수 이동 동시 해석 프로그램(FEFLOW)을 이용하여 관정 주변 지하수 유동을 정량적으로 검토하였다.

### 4. 수치 시뮬레이션

#### 4.1. 시뮬레이션 개요

Fig. 2는 본 연구에서 이용된 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 토양을 포함한 주입정 및 취수정 내 지하수 이동을 정확하게 해석하기 위해 포화 또는 불포화 상태의 토양을 고체, 액체, 기체의 3상(Phase)으로 구분하여 모델화하였다. 각 상에 대해 물질 및 에너지 이동은 아래의 질량 보존의 법칙(3), 운동량 보존의 법칙(4), 에너지 보존의 법칙(5)을 만족하도록 해석 모델을 구축하였다.<sup>14)</sup>

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_p^\alpha \quad (3)$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\epsilon_\alpha \mu^\alpha} \left( \frac{\delta p^\alpha}{\delta x_j} - \rho^\alpha g_j \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(j_{iT}^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 물질의 상태(고체, 액체, 기체),  $\rho$ 는 밀도( $kg/m^3$ ),  $v_i$ 는 각 상의 속도 벡터( $m/s$ ),  $Q_p$ 는 질량 발생항,  $k_{ij}$ 는 투수텐서( $m^2$ ),  $\mu$ 는 점성계수 ( $kg/m^2s$ ),  $p$ 는 압력( $N/m^2$ ),  $g_i$ 는 중력벡터( $m/s^2$ ),  $E$ 는 내부 에너지,  $J_{iT}$ 는 열 플럭스,  $Q_T$ 는 에너지 발생항을 나타낸다. 본 수치해석 수법은 유한요소법에 근거하였으며 유저 서브루틴(User Subroutine)에 의해 운전 조건들을 제어하도록 하였다.

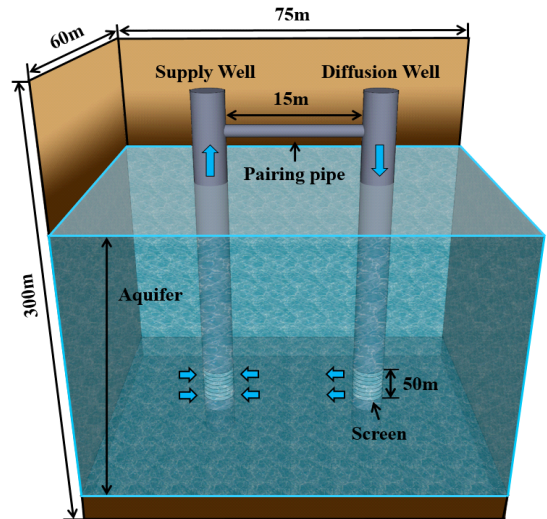


Fig. 2. Simulation model

Table 1. Simulation condition

Calculation Tool	FEFLOW
Domain	60m × 75m × 300m
Well Diameter	300mm
Pairing Pipe Depth	1m
Operation Time	24 hour
Operation Period	3 month
Hydraulic Conductivity	1×10 <sup>-6</sup> m/s (Base case)
Initial Water Level	-10 m

〈표1〉은 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 시뮬레이션 해석영역은 60m × 75m × 300m으로 관경 300mm의 주입정과 취수정을 설치하였으며, 관정 간 열적 간섭을 방지하고자 이격거리를 15m로 설정하였다. 또한, 지중으로부터 깊이 150m ~ 200 m 지점에 대수층이 흐른다고 가정하여 깊이 50m의 스크린(Screen)을 설치하였다. 두 개의 관정을 연결하는 페어링 파이프는 깊이 1m 지점에 설치하여 관정 내 지하수위를 조절하고자 하였다. 운전시간은 24시간으로 지속적인 운전을 통해 지하수위를 측정하고자 하였다. 토양의 초기 수리지질 조건은 시스템 운전에 따라 주입정의 넘침 현상을 의도적으로 발생시키기 위하여 초기 지하수위를 -10m, 지반 투수계수를 1×10<sup>-6</sup> m/s로 설정하여 토양 내 지하수의 이동이 어렵게 하였다.

Table 2. Case study condition

Case	Flow rate (m <sup>3</sup> /d)	Hydraulic conductivity (m/s)
1-1	1,000	1×10 <sup>-6</sup>
1-2		5×10 <sup>-7</sup>
1-3		1×10 <sup>-7</sup>
2-1	1,500	1×10 <sup>-6</sup>
2-2		5×10 <sup>-7</sup>
2-3		1×10 <sup>-7</sup>
3-1	2,000	1×10 <sup>-6</sup>
3-2		5×10 <sup>-7</sup>
3-3		1×10 <sup>-7</sup>

〈표2〉는 시뮬레이션 Case study 조건을 나타낸다. 양수량과 지반 투수계수의 두 가지 조건을 이용하여 페어링 파이프 설치에 따른 유용성을 판단하고자 하였다.

#### 4.2. 복수정 페어링을 이용한 지하수위 해석

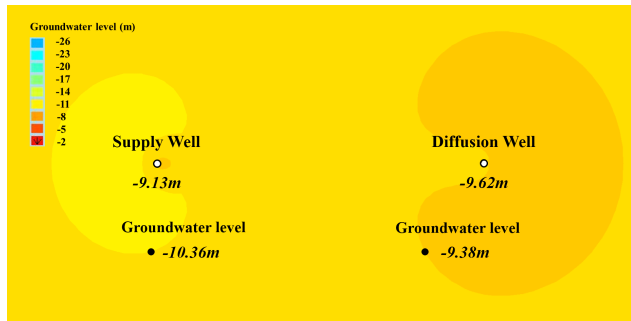


Fig. 3. Groundwater level of wells (Case 1-1,  $k:1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , 2/28)

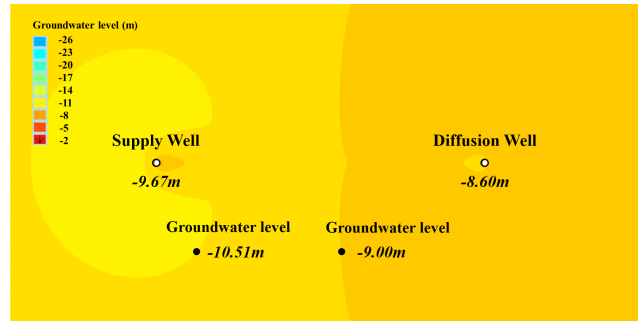


Fig. 6. Groundwater level of wells (Case 2-1,  $k:1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , 2/28)



Fig. 4. Groundwater level of wells (Case 1-2,  $k:5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 2/28)



Fig. 7. Groundwater level of wells (Case 2-2,  $k:5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 2/28)

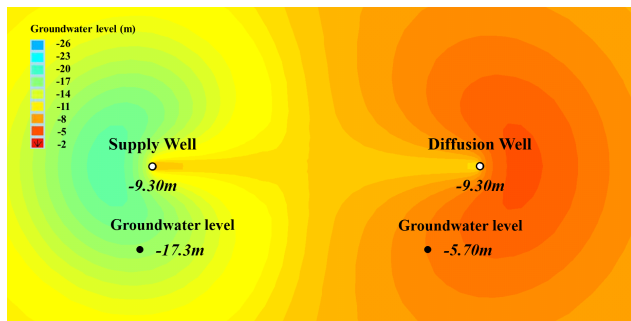


Fig. 5. Groundwater level of wells (Case 1-3,  $k:1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 2/28)

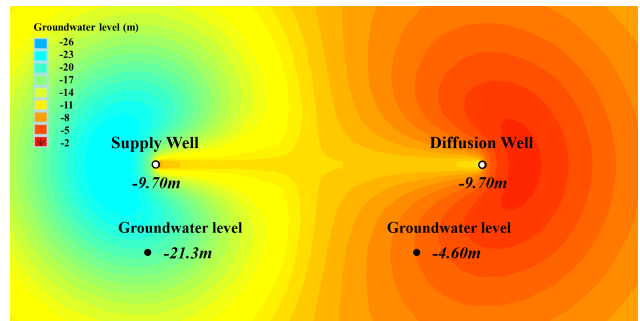


Fig. 8. Groundwater level of wells (Case 2-3,  $k:1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 2/28)

Fig. 3에서 Fig. 5는 동일한 양수량 1,000 m<sup>3</sup>/d의 조건에서 지반 투수계수 변화에 따른 지하수위를 나타낸다. Case 1-1 ( $k:1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ) 취수정의 지하수위는 -9.13m, 주입정의 지하수위는 -9.62m으로 확인되었다. 주입정의 지하수위는 초기 지하수위보다 0.38m, 취수정의 지하수위는 초기 지하수위 보다 0.87m 증가하였다. 또한, Case 1-3( $k:1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) 취수정 및 주입정의 지하수위는 -9.30m으로 Case 1-1에 비해 취수정은 0.17m 감소하고, 주입정은 0.32m 증가하였다. 지반 투수계수 변화에 따른 관정 간 지하수위 변화는 거의 없는 것으로 확인 되었으나 관정 주위의 수위 차가 크게 발생되었다. Case 1-1과 Case 1-3의 주입정 주위의 수위 차는 3.68m, 취수정 주위의 수위 차는 6.94m로 확인되었다. Case 1-3은 관정과 관정 주변의 수위차가 크지만 취수정과 주입정의 지하수위는 동일한 것으로 나타났다. 이를 통해, 낮은 지반 투수계수로 인해 지하수의 이동이 어려운 토양 조건은 관정과 관정 주위의 수위차가 증가하기 때문에 페어링 파이프 내 수두차를 이용하여 초기 지하수위와 비슷한 양상의 수위를 유지하는 것을 확인하였다.

Fig. 6에서 Fig. 8은 양수량 1,500 m<sup>3</sup>/d 조건에서 지반 투수계수 변화에 따른 지하수위를 나타낸다. 취수정과 주입정의 지하수위 양상을 Case 1-1에서 Case 1-3과 동일한 양상을 보인다.

Case 2(Q:1,500 m<sup>3</sup>/d)는 Case 1(Q:1,000 m<sup>3</sup>/d)과 결과비교를 통해 양수량에 따른 관정 간 지하수위 변화를 분석하고자 하였다. Case 2-1(k:1×10<sup>-6</sup> m/s)의 취수정 지하수위는 -9.67m, 주입정의 지하수위는 -8.60m로 Case 1-1에 비해 양 관정 간 수두차가 증가하였으며 주입정 주위의 지하수위도 0.38m 증가하였다. 또한, 양수량의 증가에 따른 페어링 파이프의 관정 간 지하수위 조절 및 이용성 검토를 위해 토양 내 지하수 이동이 어려운 Case 1-3(Q:1,000 m<sup>3</sup>/d)과 Case 2-3(Q:1,500 m<sup>3</sup>/d)을 비교한 결과, 취수정 및 주입정 지하수위는 양수량이 많은 Case 2-3이 초기 지하수위와 대등한 값을 나타냈다.

이를 통해, 양수량의 증가는 페어링을 이용하여 초기 지하수위와 대등한 수위로 회복시키고 관정 간 수두차가 증가하는 것을 확인 하였으며 이러한 수두 차는 페어링 파이프 내 지하수의 이동에 영향이 있다는 것을 확인하였다.

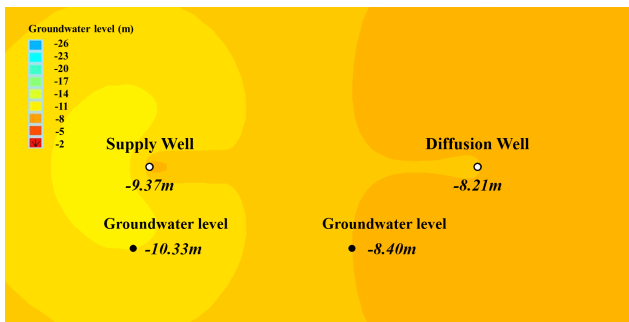


Fig. 9. Groundwater level of wells (Case 3-1,  $k:1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , 2/28)

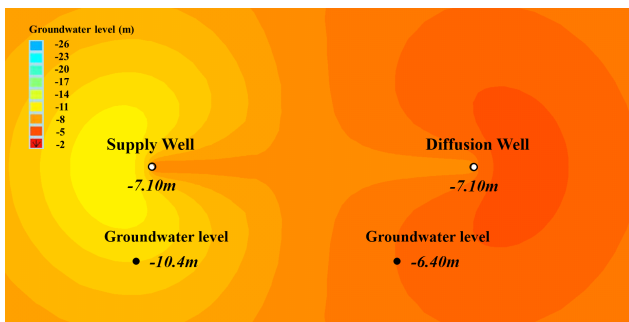


Fig. 10. Groundwater level of wells (Case 3-2,  $k:5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 2/28)

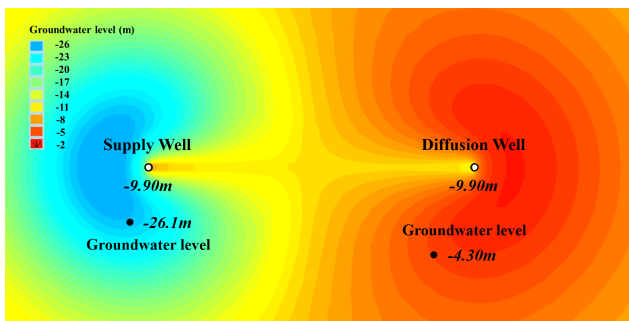


Fig. 11. Groundwater level of wells (Case 3-3,  $k:1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 2/28)

Fig. 9에서 Fig. 11은 양수량 2,000 m<sup>3</sup>/d의 조건에서 지반 투수계수 조건 변화에 따른 주입정과 취수정의 지하수위를 나타낸다. 양 관정의 지하수위는 Case 1(Q:1,000 m<sup>3</sup>/d)와 Case 2(Q:1,500 m<sup>3</sup>/d)의 양상과 동일하게 나타났다. 그러나 양수량의 증가로 인해 Case 3-2(k:1×10<sup>-7</sup> m/s, Q:2,000 m<sup>3</sup>/d)의 취수정 주위의 수위는 -26.1m, 주입정 주위의 수위는 -4.30m로 지하수위 차이가 가장 크게 확인되었다.

Case study를 통해 양수량이 크고 지반 투수계수가 낮을수록 취수정 및 주입정 주위의 수위 차는 증가하였으나 양 관정은 페어링 파이프를 통해 지하수위를 조절하여 초기 지하수위와 동등한 수위를 나타냈다.

#### 4.3. 설계인자에 따른 지하수위의 영향도 분석

양수량과 지반 투수계수는 복수정 지열 시스템 운전 시 토양, 관정의 지하수 유동 및 지하수위를 결정하는 중요한 설계인자이다.

본 연구에서는 복수정 페어링 기술을 이용한 개방형 지열 시스템의 도입 적합여부를 판단하기 위해 양수량과 지반 투수계수 조건을 통해 관정 주변의 지하수위에 대한 영향도를 정량적 검토를 실시하였다.

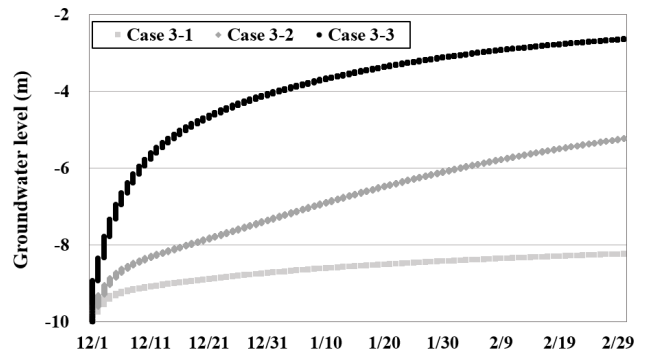


Fig. 12. Change of groundwater level by hydraulic conductivity

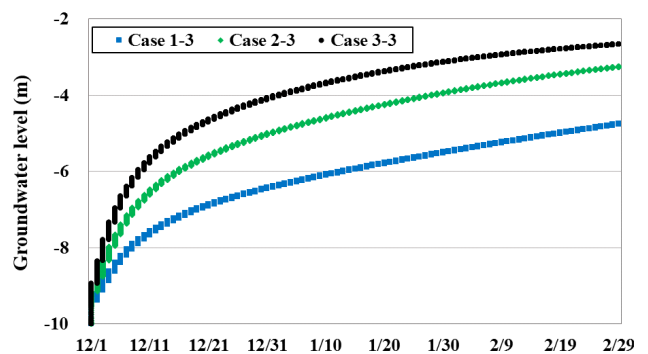


Fig. 13. Change of groundwater level by pumping flow rate

Fig. 12은 지반 투수계수 조건에 따른 지하수위의 변화를 나타낸다. 지하수위 측정은 주입정 중심으로부터 1.5m 이격 지점으로 설정하였으며 비교 케이스 조건은 Case 3-1(k:1×10<sup>-6</sup> m/s), Case 3-2(k:5×10<sup>-7</sup> m/s), Case 3-3(k:1×10<sup>-7</sup> m/s)으로 하였다. 지반 투수계수가 가장 낮은 Case 3-3 조건에서 지하수위는 -2.56m까지 상승하였다. 지하수위가 가장 낮은 Case

3-1은 -8.19m 까지 상승하였다. 지반 투수계수 조건에 따라 지하수위차이는 최대 5.63m로 확인되었다. 지반 투수계수가 낮은 지반조건에서는 지하수위의 기울기 변화는 급격히 증가하였다.

Fig. 13은 양수량 조건에 따른 지하수위 변화를 나타낸다. 지하수위는 지반 투수계수와 동일한 지점에서 측정하였으며, 투수계수는  $1 \times 10^{-7}$  m/s으로 토양 내 지하수 유동이 어려운 지반 조건으로 케이스 조건은 Case 1-3(Q:1,000 m<sup>3</sup>/d), Case 2-3(Q:1,500 m<sup>3</sup>/d), Case 3-3(Q:2,000 m<sup>3</sup>/d)으로 설정하였다. 양수량이 높을수록 지하수위는 변화폭이 증가하였으며 -2.56m 까지 상승하였다. 양수량이 낮은 Case 1-3 조건에서 지하수위는 -4.54m로 나타났으며 양수량이 높은 조건과 비교하였을 때 1.98m의 수위차를 확인하였다.

복수정 지열 시스템의 다양한 설계인자 중에서 양수량과 투수계수는 지하수의 유동 및 수위를 결정하는 중요한 요소임을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 취수정 및 주입정의 지하수위 조절 및 지속가능한 운전수법 개발을 위해 복수정 페어링 시스템을 구축하였다. 또한, 양 관정 내 지하수의 유동에 따른 지하수위를 수치 시뮬레이션을 이용하여 검토하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 동일한 투수계수 조건에서는 양수량이 클수록 관정 주위의 지하수 수두차가 커졌다. 가장 열악한 조건인 Case 3-3 ( $k:1 \times 10^{-7}$  m/s, Q:2,000 m<sup>3</sup>/d)에서, 취수정 주위의 지하수위는 -26.1m, 주입정 주위의 지하수위는 -4.30m로 확인되었으며 주입정과 취수정의 수두차는 최대 21.8m로 나타났다.

(2) 동일한 양수량 조건(Q:2,000 m<sup>3</sup>/d)에서 투수계수가 가장 작은 Case 3-3 ( $k:1 \times 10^{-7}$  m/s)의 지하수위는 -2.65m까지 상승하였으며, 가장 큰 Case 3-1 ( $k:1 \times 10^{-6}$  m/s)의 지하수위는 -8.19m로 확인되었다.

(3) 양수량이 크고, 지반 투수계수가 작아 토양 내 지하수 유동이 어려운 조건에서는 페어링 시스템을 통한 수위 조절 효과가 큰 것으로 확인되었다. 따라서, 페어링 파이프를 적용한 개방형 지열 시스템은 수리적 조건이 다소 불리한 지반에서도 장기운전이 가능할 것으로 판단된다.

향후, 복수정 페어링을 이용한 지열 시스템의 최적설계수법 개발을 위해 다양한 수리지질학적 설계인자에 따른 시스템 성능을 분석하고 본 기술의 도입 타당성을 검토할 예정이다.

## Acknowledgements

This research was supported by a grant(16CTAP-C116566-01) from Technology Advancement Research Program (TARP) Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government

## Reference

- [1] 한정상, 한혁상, 한찬, “지열에너지(지열냉난방-지열발전)”, 한림원, 2010 // (Hahn, Jeong-Sang, Han, Hyok-Sang, Hahn, Chan, Geothermal Energy, hanrimwon, 2010)
- [2] A. Sciacovelli, E. Guelpa, V. Verda, "Multi-scale Modeling of the Environmental Impact and Energy Performance of Open-loop Groundwater Heat Pumps in Urban Areas" Applied Thermal Engineering, Vol.71, Issue 2, 2014
- [3] Lei Fei, Hu Pingfang, "Energy and Exergy Analysis of a Ground Water Heat Pump System" Physics Procedia, Vol.24, Issue 11, 2012
- [4] Ji Liang, Qingchun Yang, Licai Liu, Xuyong Li, "Modeling and Performance Evaluation of Shallow Ground Water Heat Pumps in Beijing Plain, China" Energy and Buildings, Vol.43, Part A, 2012
- [5] 김우진, 이승래, 전준서, 김민섭, 김민준, 전운수, “개방형 지열 시스템 설계 방법의 개선 및 적용”, 신재생에너지, 제 12권 제 4호, 2016 // (Kim, Woojin, Lee, Seungrae, Jeon, Junseo, Kim Minjun, Kim Minseop, Jeon Yoonsoo, "Improved Design Method of Open Loop Geothermal System and its Applications" New & Renewable Energy, Vol.12, No.4, 2016)
- [6] 박영은, 목종구, 장범주, 박유철, 이진용, “개방형과 밀폐형 지열냉난방시스템이 수리지질학적 특성에 미치는 영향”, 지질학회지, 제 49권 제 6호, 2013 // (Park, Youngyun, Mok, Jong-Koo, Jang, Bum-Ju, Park, Yu-Chul, Lee, Jin-Yong, "Influence of Open and Closed loop Geothermal Cooling and Heating Systems on Hydrogeological Properties" Journal of the Geological Society of Korea, Vol.49, No.6, 2013)
- [7] 김주화, 김주영, 홍원화, 안창환, “지하수 이용 지열 히트펌프 시스템의 주거용 건물 적용시 난방성능 특성에 관한 연구”, 한국주거학회 논문집, 제 19권 제 5호, 2008 // (Kim, Ju-Hwa, Kim, Ju-Young, Hong, Won-Hwa, Ahn, Chang-Hwan, "A Study on the Heating Performance of SCW Type Geothermal Heat Pump System for Residential House" Journal of the Korean Housing Association, Vol.19, No.5, 2008)
- [8] 박정환, 김주영, 홍원화, 안창환, “주거용 건물에 적용된 지하수 이용 지열 히트펌프 시스템의 냉방성능에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집-계획계, 제 24권 제 3호, 2008 // (Park, Jeung-Hwan, Kim, Ju-Young, Hong, Won-Hwa, Ahn, Chang-Hwan, "Research on the Cooling Performance Evaluation of Groundwater Heat Pump System for Residence House" Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol.24, No.3, 2008)
- [9] 배상무, 김홍교, 김현우, 남유진, “개방형 지열 시스템 설계법 개발을 위한 관정 주위 지중 온도 환경 검토”, 한국지열에너지학회논문집, 제 13권 제 1호, 2017 // (Bae, Sangmu, Kim, Hongkyo, Kim, Hyeon-Woo, Nam, Yujin "Study on the Underground Thermal Environment around Wells for a Design Method of Open-Loop Geothermal System" Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol.13, No.1, 2017)
- [10] Richard E. Goodman, Introduction to Rock Mechanics, Second Edition, WILEY, 1989
- [11] 성현정, 김용제, 이철우, 김구영, 우남철, “균열암반에서의 양수시험 자료 해석과 일반 방사상 유동모델의 적용성 연구”, 자원환경지질, 제 38권 제 2호, 2005 // (Seong, Hyeon-jeong, Kim, Yongje, Kim, Kue-Young, Woo, Namchil, Lee, Chulwoo, "Analysis of Aquifer Test Data in Fractured Aquifers and the Application of the Generalized Radial Flow" The Korean Society of Economic and Environmental Geology, Vol.38, No.2, 2005)
- [12] Yujin Nam, Ryoza Ooka, Suckho Hwang, "Development of a Numerical Model to Predict Heat Exchange Rates for a Ground Source Heat Pump System" Energy and Buildings, Vol.40, Issue.12, 2008
- [13] Yujin Nam, Ryoza Ooka, "Numerical Simulation of Ground Heat and Water Transfer for Groundwater Heat Pump System Based on Real-scale Experiment" Energy and Buildings, Vol.42, Issue.1, 2010
- [14] H.-J.G. Diersch, FEFLOW Reference Manual, WASY GmbH, 2002