



실증실험에 근거한 관정간 페어링 적용 개방형 지열 시스템의 난방성능 분석

Heating Performance Analysis of Open-loop Geothermal System Applying Pairing Technology Based on Verification Experiment

김홍교* · 배상무** · 이병호*** · 남유진****

Kim, Hongkyo* · Bae, Sangmu** · Lee, Byongho*** · Nam, Yujin****

* Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (ghdry4095@gmail.com)

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

*** Coauthor, Korea Groundwater and Geothermal energy Association, South Korea (bh5372@naver.com)

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

ABSTRACT

Purpose: Open-loop geothermal systems can be expected to have higher performance than a closed-loop geothermal systems. However, performance of open-loop geothermal systems are significantly affected by hydrogeological conditions such as porosity, permeability and groundwater temperature. In addition, clogging occurs due to floating particle in the well in case of long-term operation. Therefore, it is necessary to develop technology that ensure stable system performance and preserve hydrogeological conditions in the ground. **Method:** In this study, pairing technology between diffusion well and supply well was developed in order to maintain stable system performance and minimize the influence on the underground environment. In this paper, underground water level and temperature were calculated according to operation of system with the pairing technology. Performance of the system was compared to that of standing column well(SCW) geothermal system. **Result:** During heating operation of the system, groundwater level increased to depth of the pairing (- 1.5 m), but operation was not stopped. Finally, S.COP of two-well pairing system and SCW geothermal system was 2.71, 2.79 respectively.

© 2018 KIEAE Journal

KEYWORD

개방형 지열 시스템
페어링 기술
지하수위

Open-loop geothermal system
Paring technology
Groundwater level

ACCEPTANCE INFO

Received Mar 7, 2018
Final revision received Mar 29, 2018
Accepted Apr 2, 2018

1. 서론

건축에서 지중환경을 이용한 기술은 에너지 효율적 관점에서 공간의 구성 및 기후 변화에 대응하기 위한 요소 등의 다양한 형태로 이용되어 왔다. 특히, 지중 내부의 연중 일정한 지열 및 수온 유지하는 항온층(지표하 100~200m)을 이용하는 지열 히트펌프 시스템(GSHP, Ground Source Heat Pump)이 건물의 냉난방시스템으로 널리 보급되고 있다 [1].

지중환경을 구성하는 토양은 다공체로서 물, 공기 및 흡입자 3상(Phase)으로 형성된다. 토양을 구성하는 물은 토양 내부에 존재하는 토양수(Soil Water)와 지하수(Ground Water)로 구분된다. 그중, 지하수는 지중 내부 암석의 간극을 채우고 있으며, 중력 작용에 의한 유동성을 가진다. 이러한 지하수를 가지고 있는 투수성의 지층을 대수층(Aquifer)이라 한다 [2]. 한편, 대수층에 존재하는 지하수를 열교환 매질로 이용하는 개방형 지열 히트펌프 시스템은 열원과 직접적인 열교환을 통해 밀폐형 시스템보다 우수한 성능을 기대할 수 있다. 그러나 개방형 지열 히트펌프 시스템의 성능은 지하수의 수질과 지하수열과 같은 수리지질조건에 많은 영향을 받는다. 또한,

지하수 취수 및 주입에 따라 지하수위 저하와 지하수 고갈 및 온도 저하 등의 문제가 발생된다. 따라서 안정적인 시스템 성능을 확보하면서 지중 내부의 수리지질조건을 온전하게 보전할 수 있는 기술개발이 필수적으로 요구된다. 개방형 지열 시스템의 성능향상을 위한 최적설계수법 개발에 관한 연구나 시스템 이용에 따른 지중의 지질수문학적 고찰은 다양한 분야에서 수행되고 있다.

개방형 시스템의 최적설계수법 개발을 위해 기존 시스템의 설계 개선방법을 제안하거나, 시스템 운전에 따른 관정과 토양의 온도 프로파일 및 열적 거동을 분석한 연구는 주로 수치 해석 모델을 이용하여 수행되고 있으며 [3,4,5,6], 시스템 도입에 따른 지하수 회복 및 유동을 수치 해석 모델을 활용하여 분석하고 있다[7,8]. 또한, 개방형 지열 냉난방 시스템이 지하수의 지화학적 특성에 미치는 영향평가와 지하수의 온도, 지하수위 등의 대수층의 수리지질학적 특성에 관한 연구도 활발히 수행되고 있다 [9,10]. 이 외에도, 광산 등의 지열 에너지 포텐셜이 높고 다량의 지하수가 존재하는 특정지역에 개방형 지열 시스템을 도입하여 열회수 방법 제안이나 성능분석에 관한 연구가 수행되고 있다 [11,12].

이처럼, 개방형 지열 시스템의 성능향상을 위한 설계수법 제안이나 시스템 도입에 따른 수리지질학적 고찰에 관한 연구는 활발히 수행되고 있다. 그러나 시스템 장기운전 또는 연속운전에

도 안정적인 성능을 유지할 수 있는 설계수법을 개발한 연구는 드물다.

따라서, 본 연구에서는 시스템의 안정적인 성능유지 및 수리 지질학적 조건에 미치는 영향을 최소화하기 위해 지하수를 제어할 수 있는 페어링 기술을 개발하였다. 본 논문에서는 페어링 기술을 적용한 개방형 지열 시스템을 대상으로 지하수위 및 지하수 온도를 측정하여 개발 시스템이 지중환경에 미치는 영향을 분석하고, 기존 개방형 지열 시스템인 SCW(Standing Column Well) 지열 시스템과의 성능을 비교하였다.

2. 개방형 지열 시스템의 지하수 연동제어 기술

2.1. 기존 개방형 지열 시스템의 문제점

개방형 지열 시스템은 지하수를 하나의 우물정으로 취수 및 주입하는 SCW(Standing Column Well) 지열 시스템과 취수와 주입의 역할이 분리된 복수정(Two-well) 지열 시스템으로 구분된다. SCW 지열 시스템은 채수한 지하수의 열에너지를 활용하기 위해 관정 내부에서 순환하는 지하수에 대해 주기적인 배출(Bleed)이 필요하다. 배출한 지하수를 지중으로 다시 주입하지 않고 다른 수체(Water Bod) 또는 지표로 방류시키기 때문에 지하수 고갈과 지하수위 저감 등의 문제가 발생한다 [1].

한편, 복수정 지열 시스템은 취수정과 주입정의 열간섭으로 인해 지하수 수온에 영향을 줄 수 있으며, 이를 방지하기 위해 양 관정 간 충분한 이격거리를 확보해야한다 [13]. 또한, 시스템 장기운전에 따라 지하수의 고갈, 지하수 온도변화 및 지하수위 저감 등의 수리학적 문제와 주입정에서 지하수가 토출되는 넘침현상(Overflow)이나 운전제한 등의 기술적 문제가 야기된다.

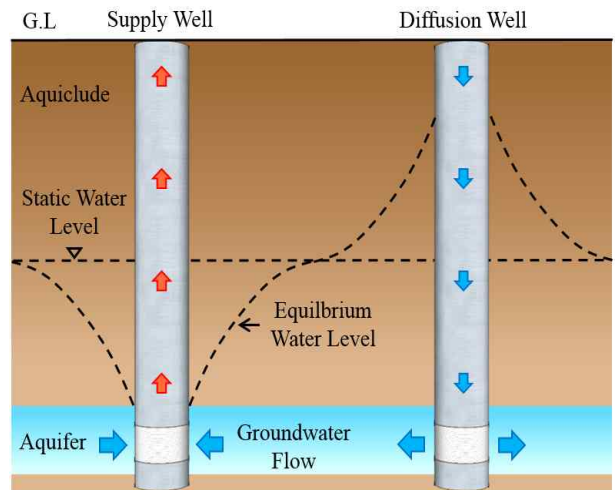
2.2. 지하수 연동 제어기술의 개요

본 연구에서는 복수정 지열 시스템 운전에 따른 지하수의 순환 장애요소를 최소화하고 대수층의 수리지질학적 특성보전과 더불어, 시스템 열교환 효율향상 및 연중 안정적인 성능확보를 위해 페어링(Pairing) 기술을 도입하였다.

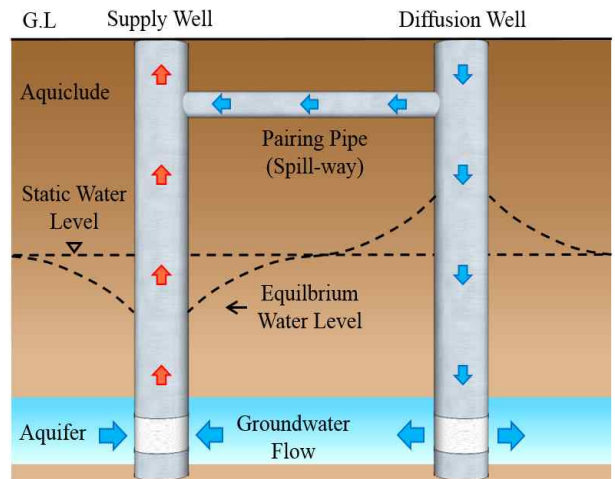
페어링 기술은 취수정과 주입정의 양 관정 사이에 순환수 이동이 가능한 도수통로를 설치하여, 관정 내부의 지하수위를 일정하게 제어하고 관정 간 지하수 불균형을 개선할 수 있다.

Fig. 1은 기존의 복수정 지열 시스템(a)과 복수정 페어링 지열 시스템(b) 운전에 따른 지하수위 변화를 나타낸다. 기존의 복수정 지열 시스템이 가동될 때 취수정에서는 지하수위의 저감, 주입정에서는 지하수위의 상승이 발생한다. 이 때, 주입정의 막힘 현상이 발생하거나, 지반 투수계수가 작을 경우에는 지하수위의 회복시간이 길어지며, 장기 운전시 운전제한의 문제가 발생한다. 반면, 페어링 기술을 적용한 복수정 지열 시스템은 관정 간 지하수위 제어를 통해 지하수위가 페어링 설치심도이상으로 상승하였을 때, 페어링을 통한 지하수의 유동이 발생한다. 이를 통해 지하수위의 기울기를 저감시키고, 시스템 가동으로 변화된 지하수위를 초기 지하수위로 회복하기 위한 시간을 단축시킬 수 있다.

페어링 파이프 내부에서 흐르는 지하수의 유량은 비압축성 유체에 대한 체적유량 공식(식1)을 통해 산출할 수 있다.



(a) Two-well Geothermal System



(b) Two-well Geothermal System using a Pairing

Fig. 1. Groundwater level variation with system operation

$$F = AV = \frac{\pi d^2}{4} V \dots \dots \dots (식1)$$

여기서, F 는 도수관 내부 유량 (m^3/s)이며, A 는 도수관 단면적 (m^2), d 는 도수관 직경 (m)을 나타낸다. V 는 도수관 내의 평균유속 (m/s)을 나타내며, 베르누이 방정식의 변형을 통해 (식2)와 같이 구해진다.

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{f_i + f_l \frac{l}{d} + f_o}} \dots \dots \dots (식2)$$

여기서, g 는 중력가속도 (m/s^2), H 는 주입정의 지하수위와 페어링 심도의 차 (m), l 은 도수관 길이 (m), f_i 는 유입손실계수, f_l 는 관 마찰계수, f_o 는 유출손실계수이다.

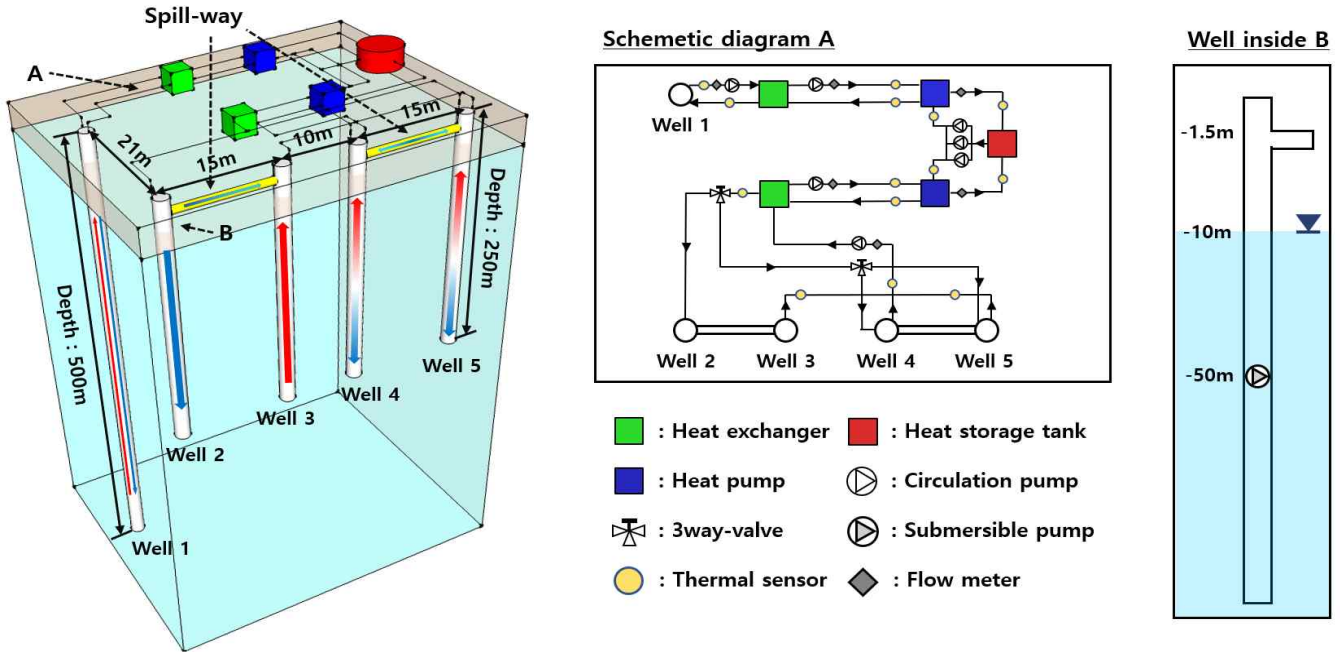


Fig. 2. Experimental equipment overview

3. 실험 개요 및 방법

3.1. 시스템 구성

Fig. 2은 시스템의 개요도를 나타낸다. 복수정 페어링 지열 시스템은 총 4개(Well 2 - Well 5)의 공으로 시스템을 구성하였다. 복수정 페어링 지열 시스템을 구성하는 지열정은 각각 직경 200mm, 깊이 250m이며, 양 관정을 연결하는 도수관은 Well 2와 Well 3 사이와, Well 4와 Well 5 사이에 설치하였다. 각각의 도수관은 직경 125mm, 길이 15m이다. 심정펌프는 Well 3 ~ Well 5의 심도 50m 지점에 설치하였다.

SCW 지열 시스템은 하나의 지열정(Well 1)으로 시스템이 구성된다. Well 1의 직경은 200mm이며, 깊이는 500m이다. 심정펌프는 심도 50m 지점에 설치하였다.

Table.1 Well specification

Well character	Well 1	Well 2	Well 3	Well 4	Well 5
System	SCW	Two-well			
Heat source	Groundwater				
Diameter (mm)	200				
Depth (m)	500	250			
Well connection	-	Connect		Connect	
Pairing diameter (mm)	-	125		125	
Pairing length (m)	-	15		15	

본 시스템에 적용된 열교환기(Heat exchanger), 히트펌프(Heat pump), 축열조, 심정펌프, 순환펌프의 계통도를 Fig. 2의 Schematic diagram A 부분에 나타냈다. 복수정 페어링 지열 히트펌프 시스템과 SCW 지열 히트펌프 시스템은 축열조 하나를 공유하여 사용하게 되며, 축열조에서의 부하발생시 각각의 시스템이 동시에 운전된다. 또한, 정량적 성능비교를 위해 열교환기, 히트펌프 및 심정펌프, 순환펌프는 동일사양의 제품을 사용하였다. 시스템을 구성하는 기기의 사양은 Table 2에 나타냈다.

Table.2 System configuration equipment specification

System parts		Specifications
Heat exchanger	Heat exchanger capacity	104.6kW
	Heating capacity	88.2kW
Heat pump	Cooling capacity	84.5kW
Heat Storage tank	Capacity	3094L
Circulation pump	Power	1.5kW
Submersible pump	Power	3.7kW

3.2. 실험방법

3.3.1. 시스템 운전방법

본 실험에서는 시스템 가동에 따른 지하수연동제어 기술의 지하수 위 조절 효과를 검증하고, 복수정 페어링 지열 시스템의 정량적인 성능을 분석하기 위해 SCW 지열 시스템을 대조군으로 설정하였다. Table 3은 실험의 운전조건을 나타낸 표이다. 복수정 페어링 지열 시스템과 SCW 지열 시스템은 축열조 설계온도 ($45^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$)에 따라 시스템의 운전과 정지를 반복한다. 이 때, 두 지열시스템은 같은 시간에 동일 유량조건으로 운전된다. 복수정 페어링 지열 시스템은 총 실험기간 (2017.10.01. ~ 2018.01.24) 동안 취수정 및 주입정을 변화시키는 방식으로 총 3가지의 운전방법(Mode 2 ~ Mode 4)으로 운전된다. 여기서, Mode 2는 Well 3의 심도 50m 지점에서 열원수를 취수하여 열교환기에서 열교환후 Well 2의 심도 250m 지점으로 주입하는 방식으로 운전된다. Mode 4는 Well 4에서 취수, Well 5에서 주입하며, Mode 5는 Well 5에서 취수, Well 4에서 주입하는 방식으로 시스템이 가동된다. SCW 지열 시스템은 실험기간 동안 Mode 1 방법으로 시스템이 운전된다. Mode 1 방식은 Well 1의 심도 50m 지점에서 지하수를 취수하고 열교환된 지하수를 다시 Well 1의 심도 500m 지점으로 주입하는 방식이다. 각 운전방법에 따른 가동시기는 Table 4에 나타내었다.

Table.3 Experiment condition

Element	Condition
Building type	Library
Temperature set	45°C
Deadbend set	3°C
Maximum heat exchanger flow set	300lpm
Maximum heat pump flow set	240lpm
Maximum load flow set	250lpm

Table.4 Experiment period by operation method

System	Operation Mode	Supply Well	Diffusion Well	Operation Period
SCW	Mode 1	Well 1	Well 1	2017.10.01. ~ 2018.01.24
Two-well pairing	Mode 2	Well 3	Well 2	2017.10.01. ~ 2017.11.31
	Mode 3	Well 4	Well 5	2018.01.01. ~ 2018.01.30
	Mode 4	Well 5	Well 4	2017.12.01. ~ 2017.12.31

3.3.2. 데이터 측정 및 분석방법

복수정 페어링 지열 시스템의 가동에 따른 지하수위 변화를 확인하기 위하여 심정내부에 다이버 장치를 설치하여 1분 간격으로 데이터 측정하였다. 10월 12일부터 10월 17일까지는 Well 2(주입정)의 지하수위를 관측하였으며, 1월 18일부터 1월 23일까지는 Well 5(주입정)의 지하수위를 관측하였다.

두 지열 히트펌프 시스템 성능측정을 위해 시스템 전체 소비전력 과 fig. 2에 도시한 지점에서 온도 및 유량을 측정하였다. 측정된 데이터는 데이터로거에 1분 단위로 기록된다. 복수정 페어링 지열 시스템과 SCW 지열 시스템의 성능 비교를 위해 히트펌프 입구온도(EWT, Entering Water Temperature) 및 시스템 성능 계수(S.COP, System. Coefficient Of Performance)를 비교하였다. 이 때, S.COP 산출에 필요한 부하량은 (식3)을 이용하여 산출하였으며, S.COP는 (식4)를 이용하여 계산하였다.

$$Q_i = F_i \times c_{water} \times (T_i - T_o) \dots\dots\dots (식3)$$

$$S.COP = \frac{\sum Q_i}{\sum W_{sys}} \dots\dots\dots (식4)$$

여기서, Q_i 은 히트펌프가 축열조에 가하는 열량 (kW), F_i 은 히트펌프에서 축열조로 이동하는 순환수 유량 (kg/s), c_{water} 은 물의 비열 (kJ/kg·K), T_i 는 히트펌프에서 축열조로 유입되는 순환수 온도(°C), T_o 은 축열조에서 히트펌프로 유입되는 순환수 온도(°C), W_{sys} 는 시스템 전체 소비전력 (kW)을 나타낸다.

4. 실험 결과

4.1. 지하수연동제어에 따른 지하수위 및 지하수 온도

Fig. 3은 2017년 10월 12일부터 18일까지의 복수정 페어링 지열 시스템의 Well 2(주입정)의 지하수위 및 Well 3(취수정)의 온도분포의 결과를 나타낸다. 이 때, 온도측정은 관정에서 판형열

교환기로 이동하는 배관 내부에서 실시하였다. 따라서, 시스템의 비 가동시에는 지하수 온도가 아닌 배관 내부의 공기온도가 측정된다. 시스템 가동시 Well 2의 지하수위는 페어링 심도 (-1.5 m)를 넘어 최대 -0.8 m까지 상승한다. 하지만 주입정의 지하수가 페어링을 통해 취수정으로 이동하여 주입정의 넘침은 발생하지 않았다. Well 3(취수정)의 온도는 시스템 가동시 온도 변화가 최대 17.1°C에서 최소 14.1°C로 나타났다. 시스템 가동시의 평균온도는 15.6°C로 나타났다.

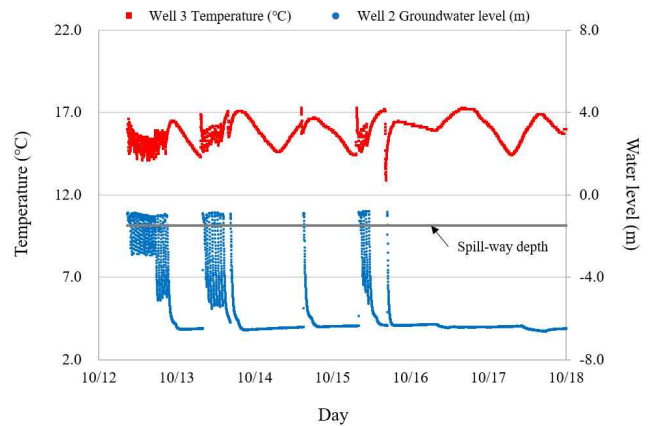


Fig. 3. Groundwater temperature distribution and ground water level during Mode 2 operation

Fig. 4는 2018년 1월 18일부터 23일까지의 복수정 페어링 지열 시스템의 운전에 따른 Well 5(주입정)의 지하수위 및 Well 4(취수정)의 온도분포의 결과를 나타낸다. 시스템 가동에 따른 지하수위는 최대 -3.84 m까지 상승하지만, 페어링 심도 (-1.5 m)를 넘어서지 않았다. 즉 페어링을 통한 지하수의 이동은 발생하지 않았다. 시스템 가동시 Well 4의 온도는 최대 15.0°C, 최소 12.8°C사이로 확인되었으며, 시스템 가동시 평균온도는 13.6°C로 나타났다.

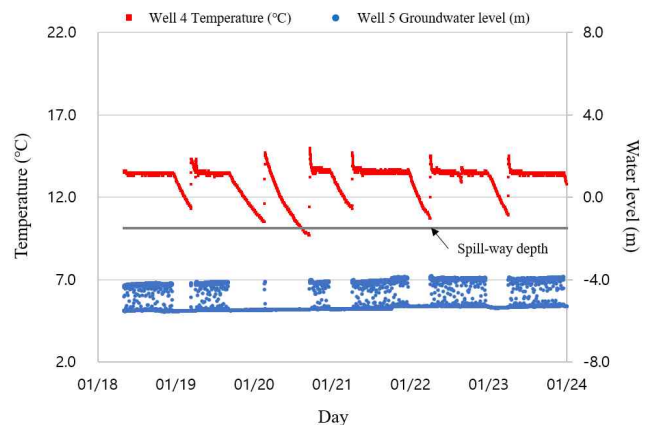


Fig. 4. Groundwater temperature distribution and ground water level during Mode 3 operation

페어링을 통한 지하수의 유동이 발생한 경우에는 시스템 가동에 따른 온도의 변화가 최대 3.0°C로 나타났으며, 변화하지 않은 경우 최대 2.2°C로 확인되었다. 이는 페어링을 통한 주입정의 지

하수 이동에 의해 취수정의 온도에 영향을 준 것으로 판단된다. 하지만, Well 2의 주입정에서 지하수가 토출되는 현상을 발생하지 않았다. 이를 통해, 페어링 기술이 복수정 지열 시스템의 장기 운전시 안정성을 유지 시켜주는 것으로 확인되었다. 한편, 시스템 비가동시에는 지하수위가 원상태로 회복하여 지하수 고갈 및 지하수위의 포텐셜 저하 문제는 발생하지 않았다.

4.2. 시스템 성능 분석

Fig. 5은 2017년 11월 1일부터 31일까지 Mode 2로 운전한 복수정 지열 시스템과 SCW 지열 시스템의 EWT와 S.COP를 나타낸다. 주변의 열간섭이 발생하지 않는 경우, 일반적인 복수정 지열 시스템은 가동에 따른 EWT 변화가 나타나지 않는다[13]. 하지만, 복수정 페어링 지열 시스템의 EWT는 시스템 가동시 온도의 증감을 반복하는 양상을 나타낸다. 이는 복수정 페어링 지열 시스템 가동시 주입정 측의 지하수가 페어링을 통해 취수정 측으로 이동하여 EWT에 열간섭이 발생한 것으로 판단된다. 한편, SCW 지열 시스템의 관정 깊이가 깊어 지하수 초기온도가 높아 EWT와 S.COP는 SCW 지열 시스템이 전반적으로 높게 나타났다.

Fig. 6는 2017년 12월 2일부터 31일까지의 두 지열 시스템 EWT 및 S.COP를 비교한 그래프이다. 측정기간 동안 복수정 페어링 지열 시스템은 Mode 4로 운전되었다. 복수정 페어링 지열 시스템의 EWT 변화 양상은 11월 난방기간의 EWT 변화 양상과 달리 일반적인 복수정 지열 시스템과 비슷한 양상을 나타냈으며, 이는 페어링을 통한 지하수의 유동이 발생하지 않음을 시사한다. 하지만, 복수정 페어링 지열 시스템의 EWT는 주입정의 지하수열이 토양을 통해 취수정으로 열 간섭이 발생하여 지속적으로 감소하였다. 측정시작 시점인 12월 2일과 종료시점인 12월 31일의 EWT는 1.8°C의 차이를 보였다. S.COP는 12월 13일을 기점으로 복수정 페어링 지열 시스템이 SCW 지열 시스템보다 높게 나타났다.

Fig. 7는 2018년 1월 1일부터 31일까지의 두 지열 시스템 EWT 및 S.COP를 비교한 그래프이다. 측정기간 동안 복수정 페어링 지열 시스템은 Mode 5로 운전되었다. 12월의 주입정(Well 4)이 1월에 취수정으로 이용되었다. 이로 인해 1월 1일 EWT 평균 10.8°C로 12월 31일 EWT 평균 11.8°C에 비해 1.0°C 감소하였다. 한편, 복수정 페어링 지열 시스템의 EWT 및 S.COP는 SCW 지열 시스템보다 전반적으로 높게 나타났다.

Fig. 8는 두 지열 시스템의 EWT와 S.COP의 월 평균값을 나타낸 그래프이다. SCW 지열 시스템은 시간이 지남에 따라 EWT 온도가 감소하였다. SCW 지열 시스템의 11월 EWT 평균은 13.4°C로 1월의 EWT 평균인 11.1°C에 비해 2.3°C 감소하였다. 반면, 복수정 페어링 지열 시스템은 취수정과 주입정의 분리 및 가변적인 열원 이용으로 11월 EWT 평균은 12.0°C, 12월 EWT 평균은 12.4°C, 1월 EWT 평균은 11.4°C로 확인되었다.

S.COP는 11월과 12월에는 SCW 지열 시스템이 복수정 페어링 지열 시스템보다 높게 나타났다. 하지만, 1월에는 복수정 페어링 지열 시스템이 높게 나타났다. 측정기간 전체의 S.COP 평균은 SCW 지열 시스템이 2.79, 복수정 페어링 지열 시스템이 2.70으로 확인되었다. 하지만, 선행연구[14]에서 난방기간 동안의 S.COP는 복수정 페어링 지열 시스템이 4.3, SCW 지열 시스템이 3.4로 나타났다. 따라서, 난방기간과 난방기간의 종합적인 COP는 복수정 페어링 지열 시스템이 더 높을 것으로 판단된다.

한편, 일반적인 지열 시스템의 경우 난방기간에서 EWT가 높을수록 S.COP가 더 높게 나타난다[15]. 하지만, SCW 지열 시스템의 EWT는 시간에 따라 점차 감소하지만, S.COP는 점차 증가하였다.

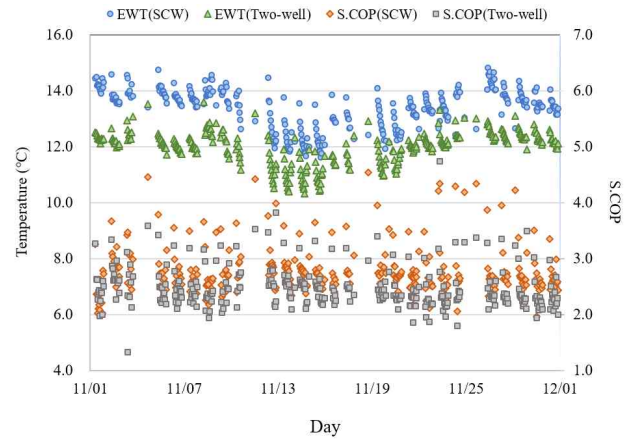


Fig. 5. EWT and S.COP of SCW and two-well pairing system in November

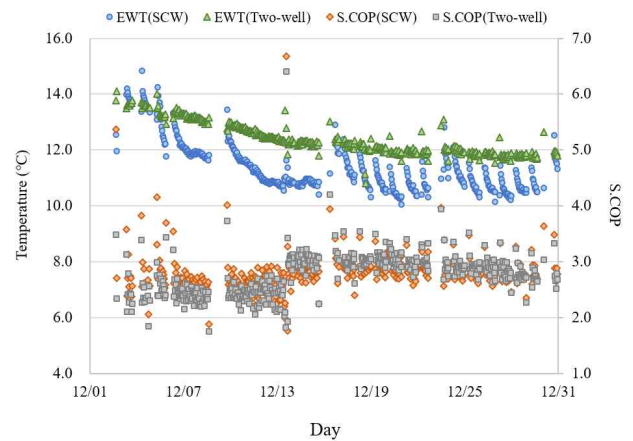


Fig. 6. EWT and S.COP of SCW and two-well pairing system in December

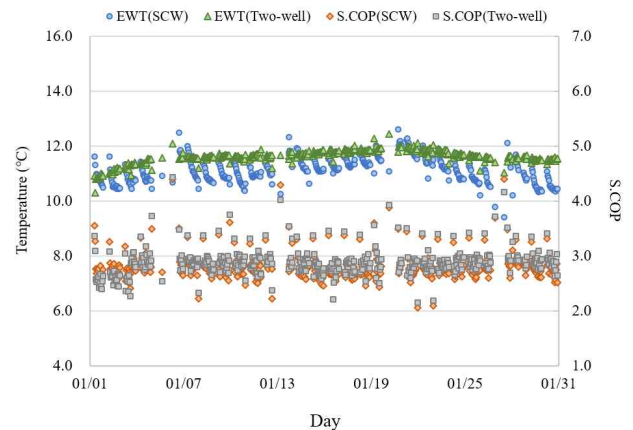


Fig. 7. EWT and S.COP of SCW and two-well pairing system in January

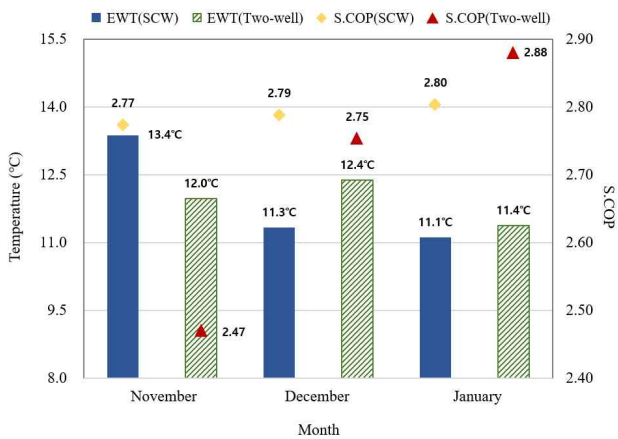


Fig. 8. Monthly mean value of EWT and S.COP during the experiment period

5. 결론

본 연구에서는 복수정 지열 시스템의 장기운전에 따른 운전제한 문제 및 시스템 성능 저하문제를 해결하기 위해 페어링 기술을 개발하였다. 본 논문에서는 개발 시스템의 지하수 제어 효과를 검증하고, 복수정 페어링 지열 시스템과 SCW 지열 시스템과의 EWT 및 S.COP를 산출하여 성능을 비교하고자 하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 복수정 페어링 지열 시스템 가동시 페어링을 통한 유동이 발생하였을 때, 취수정 측의 지하수 온도변화는 최대 3.0°C, 유동이 발생하지 않았을 때는 최대 2.2°C로 확인되었다. 즉, 페어링을 통한 유동 발생시 열원온도의 변화로 시스템 성능이 저하가 야기된다. 하지만, 11월 실험기간 동안 지하수의 토출로 인한 운전제한 문제는 발생하지 않았다. 이는 페어링 기술이 시스템 장기 운전시 수위 안정성을 유지 시켜주는 것으로 나타났다.

(2) SCW 지열 시스템은 단일관정으로 운전하여 시간이 지남에 따라 EWT가 지속적으로 감소하였다. 반면, 복수정 페어링 지열 시스템은 취수정과 주입정의 분할 및 운전모드 변환을 통해 가변적인 지하수 열원의 확보 가능하여 EWT의 지속적인 감소가 나타나지 않았다. 따라서, 12월의 EWT 평균은 12.4°C로 11월과 1월에 비해 가장 높게 나타났다.

(3) 복수정 페어링 지열 시스템의 2017년 12월(Mode 4)에서 2018년 1월(Mode 3)으로 전환시 EWT가 1.0°C 감소하였다. 이는 12월의 주입정으로 이용했던 관정을 1월에 취수정으로 이용하여 EWT의 감소가 나타났다. 하지만, 냉방과 난방기간이 바뀌는 시점에 운전모드의 변화가 이루어진다면 효율적인 열원 이용으로 시스템 성능이 증가할 것으로 판단된다.

(4) SCW 지열 시스템의 EWT는 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하는데 반해 S.COP는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 1월의 난방부하가 11월의 난방부하보다 높아 부하율에 따른 성능차이로 판단된다. 향후, 개방형 지열 시스템의 부하율을 고려한 최적운전 방법에 대한 고찰이 필요하다.

(5) 11월의 S.COP는 SCW 지열 시스템이 복수정 페어링 지열 시스템보다 0.30 높게 나타났다. 하지만, 1월 S.COP는 복수정 페어링 지열 시스템이 SCW 지열 시스템보다 0.08 높게 나타났

다. 이는 S.COP가 동일 유량조건에서 EWT의 영향을 받은 것으로 판단된다.

한편, 11월부터 1월까지의 S.COP 전체평균은 복수정 페어링 지열 시스템이 2.70, SCW 지열 시스템이 2.79로 SCW 지열 시스템이 0.09 높았다. 하지만, 냉방기간에는 관정의 심도가 깊은 SCW 지열 시스템의 성능이 복수정 페어링 지열 시스템에 비해 불리할 것으로 사료되며, 향후, 냉방기간과 난방기간의 종합적인 성능분석을 실시할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(17CTAP-C116546-02)에 의해 수행되었습니다.

Reference

- [1] 한정상, 한력상, 한찬, 지열 에너지(지열냉난방·지열발전), 한림원, 2010
- [2] Soki Yamamoto, 地下水 水文學, 圖技術, 1998
- [3] 김우진, 이승래, 전준서, 김민준, 김민섭, 전운수, 개방형 지열 시스템 설계 방법의 개선 및 적용, 신재생에너지, 제 12권 제 4호, 2016, pp.122~130 // (Kim, Woojin, Lee, Seungrae, Jeon, Junseo, Kim, Minseop, Jeon, Yoonsoo, Improve Design Method of Open Loop Geothermal System and its Applications, New & Renewable Energy, Korea, Vol.12, No.4, pp.122~130)
- [4] B.S. Tilley, T. Baumann, On Temperature Attenuation in Staged Open-loop Wells, Renewable Energy, Vol.48, 2012, pp.416~423
- [5] Kevin Woods, Alfonso Ortega, The Thermal Response of an Infinite Line of Open Loop Wells for Ground Coupled Heat Pump Systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.54, 2011, pp.5574~5587
- [6] 배상무, 김홍교, 김현우, 남유진, 개방형 지열 시스템 설계법 개발을 위한 관정 주위 지중 온도 환경 검토, 한국지열에너지학회논문집, 제 13권 제 1호, 2017, pp.14~20 // (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, Vol.13, No.1, 2017, pp.14~20)
- [7] Giovanni Pietro Beretta, Gabriele Coppola, Lucio Della Pona, Solute and Heat Transport in Groundwater Similarity: Model Application of a High Capacity Open-loop Heat Pump, Geothermics, Vol.51, 2014, pp.63~70
- [8] 배상무, 김홍교, 김현우, 남유진, 복수정 페어링 기술을 이용한 개방형 지열 시스템의 수리적 타당성 검토, 한국생태환경건축학회 논문집, 제 17권 제 3호, 2017, pp.119~124 // (Bae, Sangmu, Kim, Hongkyo, Kim, Hyeon-Woo, Nam, Yujin, Hydraulic Feasibility Study on the Open-loop Geothermal System using a Pairing Technology, The International Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Korea, Vol.17, No.2, pp.119~124)
- [9] 박영운, 권구상, 김남주, 이진용, 윤진구, 개방형 지열냉난방 시스템 사용에 따른 지하수의 지하학적 특성 변화, 지질학회지, 제 49권 제 2호, 2013, pp.289~296 // (Park, Youngyun, Kwon, Koo-Sang, Kim, Namju, Lee, Jin-Young, Yoon, Jin-Gu, Change of Geothermal Properties of Groundwater by Use of Open Loop Geothermal Cooling and Heating System, Journal of the Geological Society of Korea, Korea, Vol.49, No.2, 2013, pp.289~296)
- [10] 박영운, 목종구, 장범주, 박유철, 이진용, 개방형과 밀폐형 지열냉난방시스템이 수리지질학적 특성에 미치는 영향, 지질학회지, 제 49권 제 6호, 2013, pp.649~659 // (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, Korea, Vol.49, No.6, 2013, pp.649~659)
- [11] Andrew Hall, John Ashley Scott, Helen Shang, Geothermal Energy Recovery from Underground Mines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.15, 2011, pp.916~924.

- [12] Anup P Athresh, Amin Al-Habaibeh, Keith Parker, Innovative Approach for Heating of Buildings using Water from a Flooded Coal Mine through an Open Loop Based Single Shaft GSHP System, Energy Procedia, Vol.75, 2015, pp.1221~1228
- [13] 조정흙, 수치해석법을 이용한 개방형 지열 시스템의 최적 설계법에 관한 연구, 석사학위 논문, 부산대학교, 대한민국, 2016 // (Cho, Jeong-Heum, Study on the Optimum Design Methods of Open-loop Geothermal System using Numerical Simulation, Master Thesis, Pusan National University, Korea, 2016)
- [14] 김홍교, 최진한, 실증실험을 통한 복수정 페어링 지열 시스템의 냉방 성능 분석, 학사학위 논문, 부산대학교, 대한민국, 2018 // (Kim, Hongkyo, Choi Jinhan, Analysis of Cooling Performance of Two-well pairing geothermal system by Real-scale Experiment, Bachelor Thesis, Pusan National University, Korea, 2018)
- [15] 남유진, 토양 및 지하수 조건이 지열공조시스템의 성능에 미치는 영향에 관한 수치 해석적 연구, 설비공학논문집, 제 23권 제 5호, 2011, pp.321~326 // (Yujin, Nam, Numerical Analysis for the Effect of Ground and Groundwater Conditions on the Performance of Ground Source Heat Pump Systems, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Korea, Vol.23, No.5, 2011, pp.321-326)