



<Technical Report>

개방형 지열공의 페어링기술 적용을 위한 수리지질학적 연구

김남주¹ · 박재연^{1,2} · 김창훈¹ · 박영윤^{2,*}

¹(주)지오엔지니어링

²강원대학교 지질 · 지구물리학과

요 약

이 연구는 개방형 지열난방시스템에서 지하수 주입 시 발생하는 지하수 범람을 해결할 수 있고 열에너지 효율을 증대시킬 수 있는 페어링 기술이 적용된 지열난방시스템을 소개하고 이 시스템의 설치에 적합한 수리지질학적 특성을 검토하기 위해서 수행되었다. 병렬식 페어링 기술이 적용된 지열난방시스템을 삼육대학교에 설치하였다. 지열공의 적정 취수량은 60~400 m³/day로 지열공 마다 적정 취수량이 다르게 산정되었다. 수치모델링을 이용하여 시스템의 순환수량인 400 m³/day로 주입하였을 때 지하수위가 10 m까지 상승하는 것으로 예측되었으며 지하수위 상승 구간에 연통관을 설치하여 순환수 주입 시 범람하는 것을 예방할 수 있을 것으로 평가되었다. 에너지 부하량이 87.5 kW인 시설에서 27일 동안 냉방으로 시스템을 운영한 결과 SCW와 비교하여 약 26% 에너지 효율이 향상되었다. 그러므로 이 시스템은 지하수 순환 장애가 발생하는 지역에서 지열난방 시스템의 신뢰도를 향상시키는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

주요어: 개방형지열시스템, 병렬식 페어링, 수치모델링, 지하수 범람, 에너지 효율

Nam-Ju Kim, Jaeyoun Park, Chang-Hoon Kim and Youngyun Park, 2018, Hydrological study for groundwater source heat pump using a pairing of two wells. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 2, p. 205-213

ABSTRACT: Study was conducted to introduce system that can solve problem for groundwater over flow by recharge of groundwater in open loop groundwater source heat pump and improve thermal energy efficiency of the system using a pairing of two wells and to investigate hydrogeological properties suitable for installation of this system. Groundwater source heat pump using pairing of two wells was installed at Sahmyook University. The optimum yield of groundwater for well using in this system is 60~400 m³/day and was calculated differently at each well. It was predicted that groundwater level would rise to 10 m when circulation rate is 400 m³/day in this system using numerical modeling. Then, it was evaluated that it would prevent flooding of circulation water by installing a pairing of two wells in groundwater level rising section. The system was operated for 27 days in facility with an energy load of 87.5 kW and we find that an energy efficiency was improved approximately 26% compared to SCW. Therefore, This system will help improve reliability for groundwater source heat pump in areas where groundwater circulation is not good.

Key words: open loop geothermal system, spill way, numerical modelling, over flow, energy efficiency

(*Namju Kim, Jaeyoun Park and Changhun Kim, Geo Engineering Co., LTD., Namyangju 12226, Republic of Korea; Jaeyoun Park, and Youngyun Park, Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea*)

1. 서 론

2000년 초부터 국내에 설치된 지열난방시스템은 정부의 활발한 보급정책으로 인해 매년 꾸준히

보급되었으며 2016년까지 979,256 kW가 설치되었다(NERC, 2017). 설치유형별로 살펴보면 주로 공공기관(36.9%), 가정용(16.7%), 교육시설(15.8%) 및 기타시설(30.6%)에 설치되었으며 최근에 가정용 및 농

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: young-yun@nate.com

업시설에 설치되는 사례가 점차 증가하고 있다(Song and Lee, 2015; NERC, 2017).

지열냉난방시스템을 사용하는 사례가 증가함에 따라 이와 관련된 다양한 문제들이 발생되고 있다. 지열냉난방시스템 도입 초기에는 설계 오류, 부실관리 및 시공 등으로 인한 환경문제들이 발생하였지만 (Jo *et al.*, 2009), 최근에는 시스템의 종류와 설치부지의 적합성을 고려하지 않고 시스템을 설치 및 운영하여 열에너지 효율이 점차 감소하는 사례가 종종 보고된다(Park *et al.*, 2015a). 특히 개방형 설치 시 수리지질학적 특성 및 지하수 산출능력을 고려하지 않아 각 지열공에 대한 에너지 효율이 차이를 보이는 사례가 있었다(Bak, 2016). 이러한 장애요인들로 인해 지열냉난방시스템의 사용에 대한 신뢰성을 감소시킬 수 있으므로 이를 해결하기 위한 다양한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다(Bae *et al.*, 2017).

지열냉난방시스템 중에 개방형은 밀폐형에 비해 열효율이 좋고 좁은 지역에 설치할 수 있는 장점이 있는 반면에 지하수가 풍부한 지역에만 설치할 수 있다. 개방형의 장점을 살리기 위해서는 설치부지에 대한 수리지질학적인 특성이 매우 중요하며 수리지질학적 특성에 기초하여 시스템의 종류와 운영방법이 선택되어야 한다. 이를 위해서는 개방형 설

치부지의 수리지질학적 특성과 개방형 시스템의 상호관계를 규명하는 것이 매우 중요하다(Park *et al.*, 2008; Cho and Nam, 2015; Kim *et al.*, 2016; Bae *et al.*, 2017).

최근까지 개방형에서 수리지질학적인 특성을 이용하여 에너지 효율을 향상시키기 위한 기술개발은 주로 단일 지열공을 대상으로 이루어졌다. 그러나 개방형에 사용되는 다수의 지열공에서 지하수 산출 또는 유동능력이 개별 지열공마다 다르게 나타나는 경우가 있지만 이를 고려한 사례는 많지 않다. 특히 국내 암반대수층은 기반암에 2차적으로 형성된 질리를 따라 분포하여 각 지열공마다 지하수 산출량이 다른 사례가 있다(Bak, 2016). 따라서 각 지역공마다 에너지 산출량을 평가하고 평가 결과에 따라 지열공의 개발심도를 최적화하는 것이 필요하다.

이 연구는 서로 다른 수리지질학적 특성을 갖는 지열공을 병렬식 패어링공으로 연결하여 지하수 환수 시 지하수의 범람(overflow)현상을 방지하고, 지하수가 주변 기반암과 열교환을 할 수 있는 구간을 증가시킴으로써 열에너지의 회복능력을 증가시킬 수 있는 페어링 파이프로 연결된 병렬식 지열시스템을 제안하고 이 시스템을 설치하기에 적합한 수리지질학적인 특성을 검토하기 위해 수행되었다.

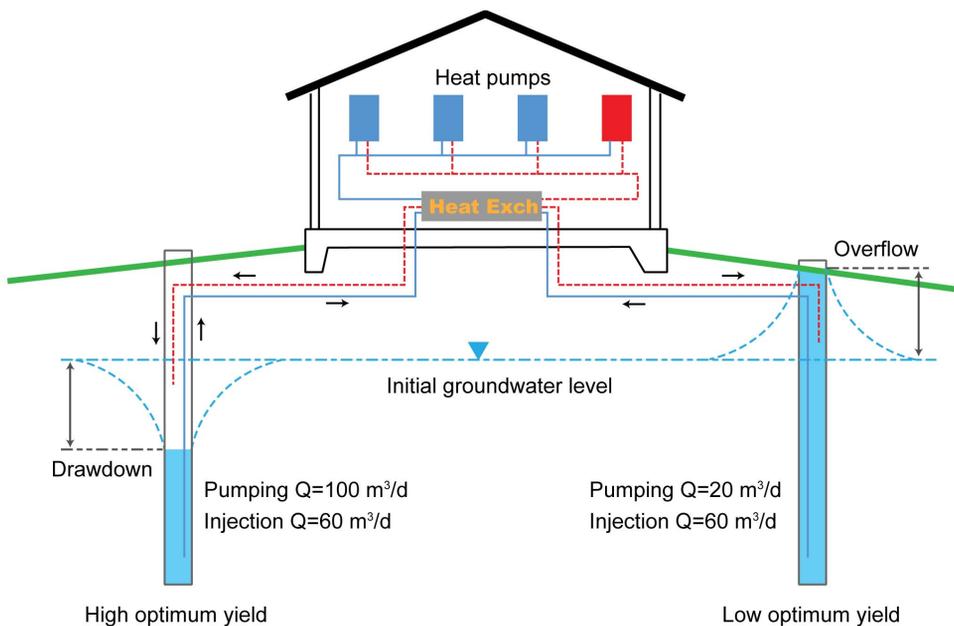


Fig. 1. Schematic diagram showing groundwater overflow by difference in hydraulic conductivity.

2. 병렬식 페어링 시스템

지하수를 사용하는 개방형 지열냉난방시스템(ground-water heat pump system, GWHP system)은 순환수로 지하수를 직접 이용하기 때문에 밀폐형에 비해서 에너지 효율이 높다. 그러나 열교환 후 지하수를 주입하는 과정에서 지하수의 범람이 발생할 수 있다(그림 1). 개방형에서 지하수 범람은 주변 지하수보다 수위가 높아졌거나 투수율이 낮은 지역에서 지하수를 무리하게 주입하는 경우에 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 주입정의 수를 늘리는 방법이 널리 사용되지만 설치비용이 증가하는 단점이 초래한다.

이 연구에서 소개하는 개방형 지열냉난방시스템은 지열공들을 이용하는 페어링(pairing) 기술을 이용하여 취수량과 주입량의 불균형을 제어할 수 있는 시스템이다(그림 2). 이 시스템은 개방형에서 자주 발생한 지하수 흐름 장애로 인한 지하수 범람을 해결할 수 있는 것이 장점이다. 또한 지열공의 페어링 기술은 지열공을 연결함으로써 기존의 지열공에 비해서 지중열교환기에서 열교환이 이루어지는 유효심도를 증가시킬 수 있다. 이로 인해 실제로 시공되는 시스템에서 500 m의 유효심도를 줄일 수 있으며 유효심도 내에서 시스템의 수리학적 특성, 시스템의

규모, 사용목적에 따라 취수정 및 주입정의 기능을 상호 전환이 가능하므로 설치비용을 절감하고 에너지 효율을 증대시킬 수 있다(Bae *et al.*, 2017).

3. 연구지역

서울에 위치한 삼육대학교의 중앙도서관 1층에 냉난방을 공급하기 위하여 지열공 페어링이 적용된 지역냉난방시스템이 설치되었다(그림 3). 이 지역의 기반암은 중생대 주라기의 대보화강암에 속하는 서울화강암으로(Won *et al.*, 1981), 지상으로부터 27~28 m까지 풍화대이며 풍화대 하부에 신선한 암반이 분포한다. Hahn *et al.* (2006)은 개방형 설치 시 지열공의 안정성을 확보할 수 있는 기반암으로 선캠브리아누대, 시생대 및 원생대의 화강편마암류와 변성암복합체, 중생대의 화강암류를 제시하였다. Hahn *et al.* (2006)이 제시한 기준에 따르면 연구지역의 기반암은 개방형 설치에 적합한 것으로 평가할 수 있다.

2000년부터 2017년까지 서울의 기후자료는 기상청의 국가기후데이터센터에서 수집하였다(NCDSS, 2018). 서울의 연강수량은 792~2,043 mm로 범위가 매우 넓었으며 연도별 편차가 매우 심했다. 특히 2013년부터 2015년까지 강수량이 급격하게 감소하다가 2016년부터 점차 증가하는 경향을 보였다. 연평균강

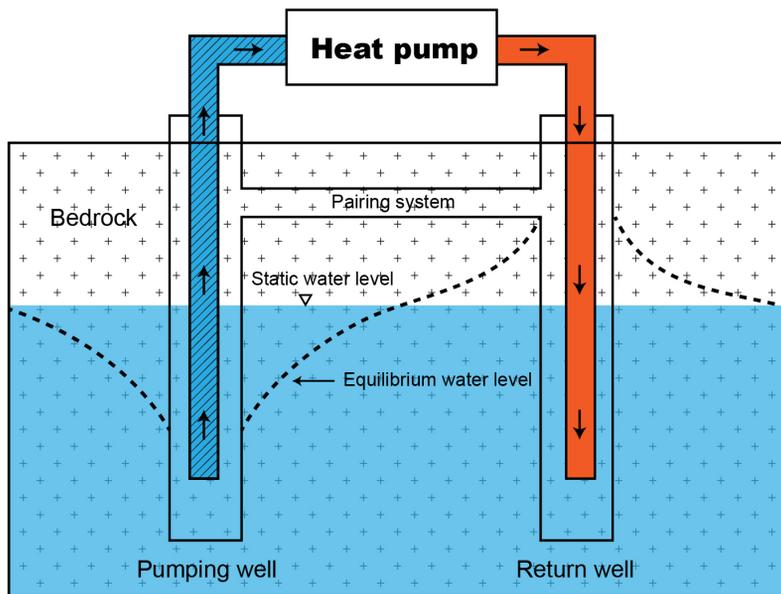


Fig. 2. Schematic diagrams of GWHP system using a pairing of two-wells modified from Bae *et al.* (2017).

수량은 1,422 mm였으며 연강수량의 73.9%가 6월부터 9월에 집중되었다. 연평균 기온은 12.8°C 이고 월평균 기온은 -3.1~26.6°C의 범위를 보였다. 냉방을 하는 6~9월의 월평균 기온은 21.0~28.0°C의 범위를 보였으며 난방을 하는 12~3월의 월평균 기온은 -7.2~7.9°C의 범위를 보였다. 연구부지의 지하수의 수온은 11.9~16.2°C의 범위를 보였다. 지하수의 수온과 기온과 10°C 이상 차이를 경우에 지열냉난방시스템에서 냉방 또는 난방을 사용할 수 있으므로 연구부지에서는 지열냉난방시스템을 냉방과 난방으로 사용하는 것이 가능하다.

4. 연구방법

4.1 지열공 설치

병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열냉난방 시스템을 설치하기 위해 삼육대학교 중앙도서관 주변에 5개의 지열공을 설치하였으며(그림 3), 설치된 지열공의 세부사항은 표 1에 정리하였다. 이번 연구에서 소개하는 지열냉난방시스템과 이전 SCW의 에너지 효율 및 시공비 비교를 위해 PW-1은 500 m를

굴착하여 SCW를 설치하였다. PW-2와 PW-3은 250 m 굴착하고 연통관(spill way)으로 연결된 시스템을 설치하였다.

4.2 현장수리시험

지열공에서 대수층 특성에 따른 대수층에서의 수두손실을 평가하여 적정 취수량을 산정하기 위해 단계대수성시험을 수행하였다. 단계대수성시험은 4~5 단계로 취수량을 단계적으로 증가시키고 이에 따른 안정수위를 확인하는 시험방법으로 일반적으로 정호의 효율과 대수층의 적정 취수량을 파악하기 위해 실시한다. 단계대수성시험 시 단계별 수위강하량을 이용하여 아래의식으로 적정 취수량을 산정하였다 (Jacob, 1947).

$$Sw = BQ + CQ^2 \tag{1}$$

Sw는 지열공의 수위강하, B는 대수층손실계수, C는 우물손실계수, Q는 양수량이다. 식(1)에서 취수량에 따른 수위강하가 급격히 발생하는 한계취수량을 보이는 구간을 적정 취수량으로 산정하였다.

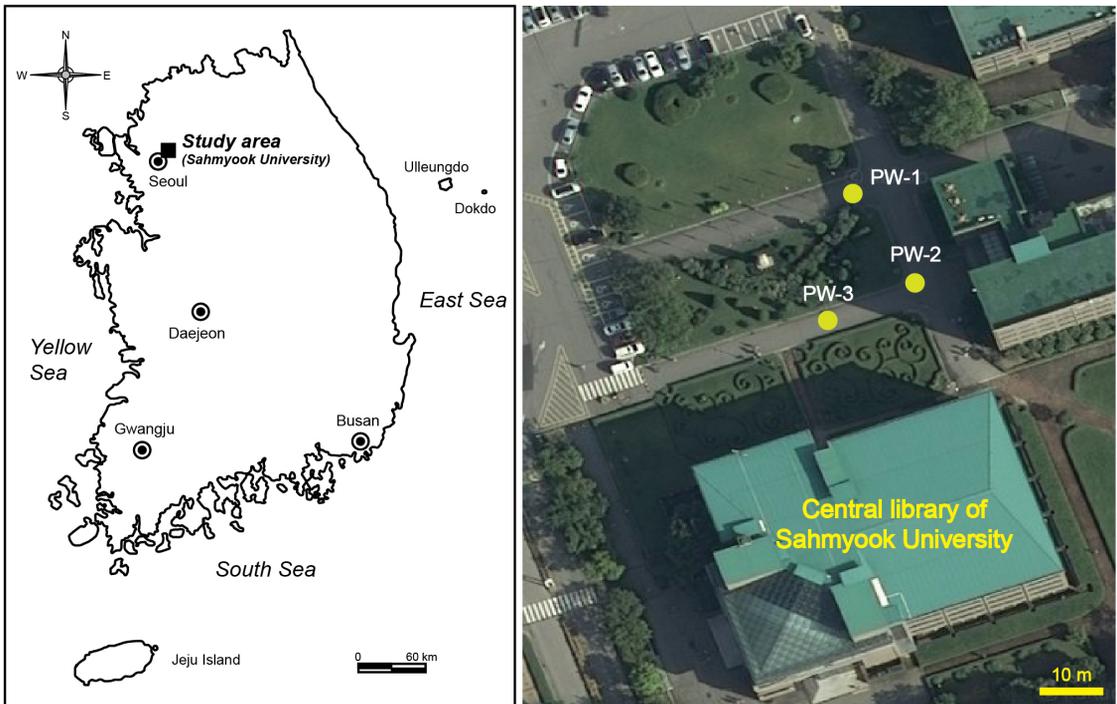


Fig. 3. Location of study area and distribution of wells using GWHP system.

Table 1. Specification of wells used in GWHP using pairing two-wells.

Well No.	Well depth (GL-m)	Casing depth (GL-m)	Groundwater level (GL-m)
PW-1	500	29	8.90
PW-2	250	27	9.09
PW-3	250	27	8.94

Table 2. Step drawdown test from SCW at test bed.

Well No.	Groundwater level (EL, m)	Pumping rate (Q, m ³ /day)					Drawdown water level (Sw, m)					Optimum yield (m ³ /day)
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	
PW-1	9.28	150	200	250	300	-	-1.2 1	7.05	7.48	7.92	-	300<
PW-2	9.35	40	50	60	70	-	13.2	18.1	24.6	41.5	-	60
PW-3	9.41	70	80	90	100	-	10.6	12.7	15.3	18.1	-	100<

EL: elevation level

이번 연구에서는 PW-1~PW-3에 5 hp 의 수중모터펌프를 심도 100 m에 설치하여 단계대수성시험을 수행하였다. 4~5단계로 취수량을 변경하였으며 각 단계에서 60분씩 취수하였다(표 2). 취수량 산정은 적산유량계를 사용하여 일정한 양수율을 유지하는 정율채수법을 사용하였다.

병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열냉난방 시스템 설치부지의 수리특성을 평가하기 위해 장기대수성시험을 수행하였다. 장기대수성시험 시 5 hp 수중모터펌프를 100 m 깊이에 설치하고 적정 취수량으로 20시간 동안 취수하였다. 취수량은 단계대수성시험에서와 동일하게 정율채수법을 사용하였다. 안정수위 도달 후 취수를 중단하고 수위회복시험을 수행하였다. 현장수리시험 동안에 지하수위 변동은 자동수위측정기를 이용하여 1분 간격으로 측정하였다. 현장수리시험 결과분석은 상용프로그램인 AqteSolv V.4.0 (HydroSOLVE, US)을 사용하였으며 수리상수 값은 Theis (1935)와 Cooper and Jacob (1946)의 방법을 이용하였다.

4.3 수온관측

지열시스템에서 지열을 안정적으로 사용하고 에너지 효율을 평가하기 위해 수온을 측정하는 것은 매우 중요하다. 이 연구에서는 2017년 9월 1일부터 9월 27일까지 SCW와 병렬식 페어링 기술이 적용된 시스템을 냉방으로 운전하는 동안에 PW-1과 PW-2

의 30 m 깊이에 수온을 자동으로 측정되는 센서를 설치하고 1분 간격으로 수온을 측정하였다. 또한 지열시스템으로 유입 및 유출되는 순환수(지하수)의 수온도 1분 간격으로 측정하였다. 측정된 수온은 에너지 효율성 평가에 사용되었다.

4.4 화학분석

연구부지 내 개방형지열시스템을 설치 시 수질의 적합성을 확인하기 위해 지열공 착공 시 생활용수 기준의 수질항목(일반오염물질 4개와 특정유해물질 15개)으로 (주)피엘아이환경기술연구소에서 지하수를 분석하였다. 병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열냉난방시스템은 지하수를 순환수로 직접 사용하고 양수된 지하수를 다시 주입하는 시스템이기 때문에 시스템 운영이 지하수의 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 2016년 5월, 2017년 9월, 11월 및 12월 총 4회 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 상지대학교 자연과학연구지원센터에서 주요 양이온과 음이온을 분석하였다. 용존성분 중에 HCO₃⁻는 알칼리도가 모두 용존탄산중에 의해서 결정된다고 가정하고 측정된 알칼리도로부터 농도를 계산하였으며 알칼리도는 그 방법으로 측정하였다.

4.5 수치모델링(MODFLOW)을 이용한 수위 변동 예측

병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열냉난방 시스템은 개방형에 지하수를 재주입하는 경우에 발

Table 3. Input data for groundwater level rise prediction in MODFLOW.

Content	Input data
Configuring a mesh net	50×50×300 m
Size of cell	0.5 m
Type of aquifer	confined/unconfined variable S, T
Distance of observation well	15 m
Pumping rate (m ³ /day)	pumping rate : 400 m ³ /day injection rate : 400 m ³ /day

Table 4. Long term pumping test from SCW at test bed.

Well No.	Ground water level (EL, m)	Depth of well (m)	Diameter of well (mm)	Thickness of aquifer (m)	Distance of observation well (m)	Pumping rate (m ³ /day)	Hydraulic characteristic			Sol. Meth.	
							SPC	T (cm ² /sec)	K (cm/sec)		S
PW-1	9.81	500	200	490.19	13 (OB-1)	300	4.13	9.17	1.87E-04	3.90E-03	Theis
								10.11	2.06E-04	2.90E-03	C&J
								23.12	4.72E-04		Reco.
								14.13	2.88E-04	3.40E-03	Average
PW-2	9.36	250	200	240.64	0.3 (Single)	50	0.27	0.19	7.90E-06	1.10E-03	Theis
								0.16	6.65E-06	1.90E-03	C&J
								0.07	2.91E-06		Reco.
								0.14	5.82E-06	1.50E-03	Average
PW-3	9.44	250	200	240.56	10 (PW-4)	90	0.59	11.82	4.91E-04	2.86E-04	Theis
								14.18	5.89E-04	9.30E-05	C&J
								15.03	6.25E-04		Reco.
								13.68	5.69E-04	1.90E-04	Average

EL: elevation level

C&J: Cooper and Jacob (1946)

Reco.: recovery test

생하는 지하수 범람을 효과적으로 해결할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해서는 지하수 주입 시 지하수 수위의 상승폭을 예측하고 이를 설계에 반영해야 한다. 이를 위해서 유한차분 근사식을 이용한 3차원 지하수 유동모델 프로그램인 MODFLOW Pro V.3.5를 이용하였다.

이번 연구에서 지하수 수위 변동을 모사하는 모델영역이 좁고 현재까지 수집된 자료가 한정적이어서 수위변동 모델을 최대한 단순화시켰다. 경계조건으로 모사지역의 좌우측에 일정수두(constant head) 경계, 함양패키지(recharge package), 관정패키지(well package)를 적용하였다. 모델격자의 총 크기는 모델영역 전체인 50×50×300 m로서 격자의 간격은 세밀한 모의를 위하여 0.5 m로 설정하였고 수직적인 층은 1개 층으로 구성하였다. 또한 각각의 취수정과

주입정간의 간격은 15 m로 설정하였다. 취수정에서 취수되는 유량은 지열시스템의 순환수량인 400 m³/day을 입력 조건으로 설정하였으며, 동일한 양이 주입정으로 주입되는 것으로 설정하였다(표 3).

모델링에 입력된 수리상수 값은 현장시험에서 분석된 수리상수값을 활용하여 입력하였다. 실제 시스템에서는 17~42분의 짧은 가동시간을 유지하고 야간에는 시스템을 가동하지 않았으나 모델링에서 이와 같이 짧은 시간으로 반복되는 양수와 주입의 모사가 거의 불가능하고 시스템의 과부를 고려하여 지속적인 양수와 주입을 수행하는 것으로 모사하였다.

4.6 에너지 효율성 평가

연구부지 내 PW-1에 SCW를 설치하고 PW-2와 PW-3에 병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열

냉난방시스템의 에너지 효율성을 평가하였다. 지열 냉난방시스템에서 에너지 효율은 주로 전체 시스템의 COP(Coefficient Of Performance)를 이용하여 평가한다. 시스템의 COP는 다음과 같이 계산한다.

$$COP = \frac{\text{발생열량}(kW)}{\text{필요전력량}(kW)} \quad (2)$$

식 (2)에서 시스템의 발생열량(ΔQ)은 식(3)으로부터 계산될 수 있으며, 필요전력량은 시스템 운영 시 사용된 총전력량을 의미한다.

$$\Delta Q = q(m^3/min) \times c(kW/kg) \times 0.00116 (W1 - W1')_{average} (kW/min) \quad (3)$$

여기서, q 는 순환수의 유량, c 는 물의 비열(0.00116 kW/kg), $(W1 - W1')$ 는 유입수와 유출수의 수온차를 의미한다.

이번 연구에서는 PW-1에 설치된 SCW와 PW-2와 PW-3에 설치된 병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열냉난방시스템을 2017년 9월 1일부터 9월 27일까지 냉방으로 가동한 자료를 이용하여 각각의 에너지 효율을 계산하였으며 이 자료에 기초하여 두 시스템의 에너지 효율을 비교하였다.

5. 결과 및 토의

5.1 수리특성

단기대수성시험으로부터 PW-1, PW-2, PW-3의 적정 취수량은 각각 >300, 60, >100 m³/day로 산정되었다(표 2). 또한 장기대수성시험을 통해 대수층의 수리특성 값인 투수계수(K), 투수량계수(T), 저류계수(S)를 표 4에 나타내었다. PW-1과 PW-3에서 투수량계수는 각각 14.13과 13.68 cm²/sec이었으나 PW-2의 투수량계수는 0.14 cm²/sec로 다른 지열공들보다 작았다. 또한 PW-1과 PW-3에서 투수계수 역시 2.88×10⁻⁴와 5.69×10⁻⁴ cm/sec의 값을 보였지만 PW-2의 투수계수도 5.82×10⁻⁶ cm/sec로 다른 지열공들에 비해서 작았다. 저류계수는 1.90×10⁻⁴ ~ 3.40×10⁻³의 범위를 갖는다. PW-2를 제외한 PW-1, PW-3에서 수리특성이 비슷하게 평가되었지만 적정 취수량이 상대적으로 작은 PW-2의 수리상수들도 작은 값

을 보였다. 병렬식 페어링 기술을 적용한 개방형 지열냉난방시스템은 이러한 지역에 적합한 시스템으로 연통관 설치를 통해 지하수 주입 시 지하수가 범람하는 것을 방지할 수 있다.

5.2 수질특성

환경부의 「지열 설비의 설치·운영 등에 관한 환경관리 요령」에서 「지하수 수질보전 등에 관한 규칙」[별표 4]의 생활용수 수질기준에 적합한 경우에 개방형의 설치가 가능하도록 규정하고 있다. 연구부지에 설치된 지열공 내 지하수의 pH=6.4~7.0, NO₃-N=4.9~5.9 mg/L, Cl⁻=21.2~38.3 mg/L의 범위를 보였으며 나머지 16개 항목은 검출되지 않았다. 불검출을 제외한 항목의 생활용수 수질기준은 pH=5.8~8.5, NO₃-N<20 mg/L, Cl⁻<250 mg/L이므로 설치된 지열공의 수질은 환경부의 수질기준을 만족하였다.

지열공 내 용존성분들 중에 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻의 농도는 연구기간 동안에 거의 일정한 값을 보였던 반면에 HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻는 시기별로 변화를 보였다(그림 4). HCO₃⁻ (46.0~113 mg/L), Cl⁻ (17.2~57.8 mg/L), NO₃⁻ (15.5~37.4 mg/L)는 시스템 주변의 토양으로부터 공급될 수 있는 성분들이며 넓은 범위를 보였다. 개방형이 지하수 수질에 영향을 주는 경우는 수온변화로 인한 광물들이 용해도 변화로 인한 용해 또는 침전이 발생하여 수질을 변화하는 경우가 있다(Park *et al.*, 2015b). 이번 연구에서 탄산염 광물종의 용해 또는 침전과 관련이 있는 Ca²⁺, Mg²⁺의 농도가 각각 24.6~60.9와 3.54~6.56 mg/L로 변화를 보이는 하였지만 이러한 변화를 지열시스템에 의한 영향으로 평가하기는 어려우며 향후 지속적인 관측을 통해 이를 명확하게 규명할 필요가 있다.

5.3 지하수 주입에 따른 수위변동 특성 평가

이번 연구에서 지열공의 단방향과 양방향 페어링 기술을 적용한 지열시스템의 수위 변동을 예측하기 위해 수치모델링을 수행하였다. 단방향 페어링 기술을 적용한 지열시스템은 PW-3에서 취수하고 PW-2에 주입하는 방식이다. 초기 자연수위를 GL-9.0 m로 설정하였으며, PW-3에서 400 m³/day로 취수하면서 동시에 PW-2에 400 m³/day로 주입되는 경우에 지하수위 변화를 모사하였다. PW-3에서 취수 시 지하수위는 점차 하강하여 1일경과 시 약 0.90 m의

수위가 강하하고 이후에 점차 안정수위에 도달하는 것으로 예측되었다. 이 때 PW-2에서는 주입과 동시에 지하수위가 상승하기 시작하여 주입 후 1일 경과 시 약 10 m 까지 지하수위가 상승하여 지하수가 범람하는 것으로 모사되었다(그림 5).

지하수의 취수 및 주입에 따른 지하수위변동은 지열시스템을 설치하는 지역의 수리특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 복수형 페어링 기술을 적용한 지열시스템을 설치하기 위해서는 위에서 제시한 방법처럼 수치모델링을 통해 수위변동 특성을 확인한 후에 연통관의 설치심도를 결정할 필요가 있으며 연구부지의 경우에는 지하수위 상승 구간인 지하수면으로부터 상부 10 m 사이의 구간에 설치해야 될 것으로 평가되었다.

5.4 에너지 효율 평가

PW-1에 설치된 SCW와 PW-2와 PW-3에 설치된 병렬식 페어링 기술이 적용된 지열냉난방시스템을

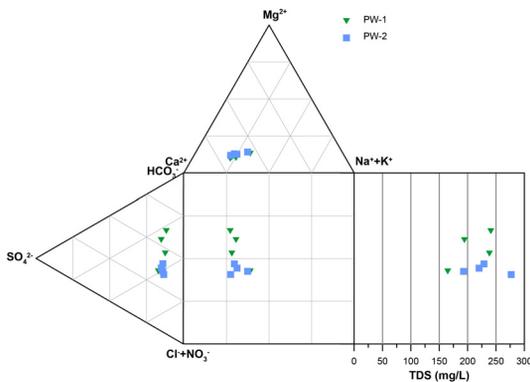


Fig. 4. Durov diagram showing water chemistry of wells using GWHP system.

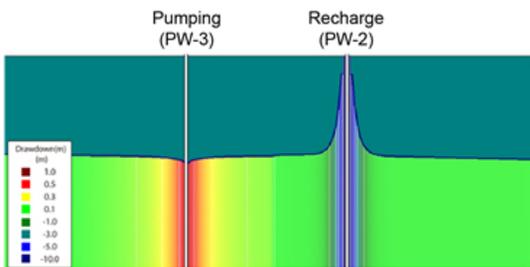


Fig. 5. Results of numerical modeling for groundwater level variations as pumping and recharge at well of GWHP system.

에너지 부하량이 87.5 kW인 시설에서 28일 동안 냉방으로 운영하였다. SCW에서 유입수와 유출수의 수온은 각각 8.2~20.5°C와 9.7~20.8°C의 범위를 보였다. 이로부터 계산된 발생열량은 41.1~410 kW이고 소비된 전력량은 12.7~111 kW이었다. 병렬식 페어링이 적용된 시스템에서 유입수와 유출수의 수온이 각각 8.0~20.1°C와 9.7~19.7°C의 범위를 보였다. 이 시스템에서 발생된 열량은 46.3~473 kW의 범위로 계산되었으며 11.7~99.5 kW가 소비되었다. SCW와 병렬식 페어링이 적용된 시스템의 COP는 각각 3.24~3.73 (평균=3.63)과 3.94~4.82(평균=4.59)로 계산되었다(그림 6). 이것은 병렬식 페어링이 적용된 지열시스템의 에너지 효율이 SCW에 비해서 약 26% 향상된 것을 보여준다. 또한 병렬식 페어링이 적용된 지열시스템의 지열공의 심도는 250 m이며 2개의 지열공을 설치한 비용은 500 m를 굴착해야 하는 SCW에 비해서 약 10% 감소되었다. 이것은 동일한 에너지 부하에서 병렬식 페어링이 사용된 지열시스템이 SCW보다 적용성이 더욱 높다 것을 의미한다.

6. 결론

국내에 설치된 개방형 지열냉난방시스템에서 지하수 순환장애로 인해 지하수 주입 시 지하수 범람이 발생하는 사례가 발생하며 이로 인해 개방형의 설치가 제한되는 경우가 종종 있었다. 이것은 개방형지열시스템을 설치하는데 있어 수리지질학적 특성 및 지하수 산출능력을 고려 않아 발생하는 문제이다. 이 연구는 개방형에서 지하수 주입 시 발생하는 지하수 범람을 해결할 수 있는 병렬식 페어링 기

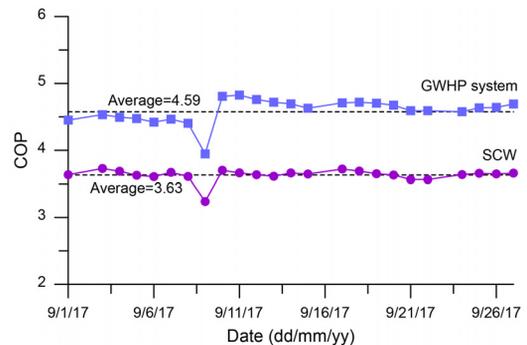


Fig. 6. Temporal variations of COP for cooling mode in GWHP system and SCW.

술이 적용된 지열시스템을 소개하고 이 시스템을 설치하기에 적합한 수리지질학적 특성을 검토하기 위해서 수행되었다.

삼육대학교 내에 3개의 지열공(PW-1~PW-3)을 설치하였다. 지열공의 적정 취수량은 60~300 m³/day로 넓은 범위를 보였고 투수계수도 5.82×10⁻⁶~5.69×10⁻⁴ cm/sec로 매우 넓은 범위를 보였다. 병렬식 페어링 기술이 적용된 지열시스템 설치 시 수치모델링을 이용하여 수위변동 구간을 결정하고 지하수위 상승 구간을 고려하여 연통관 설치 심도를 결정해야 된다. 병렬식 페어링 기술이 적용된 지열시스템을 27일 동안 냉방으로 운영한 결과 SCW에 비해서 에너지 효율이 약 26% 향상된 것으로 확인하였다.

따라서 개방형 지열공의 페어링기술 적용되면 지하수 순환능력이 크지 않은 곳에서도 개방형을 설치하는 것이 타당하고, 지하수 범람이 발생하는 문제에 효율적으로 대처할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업(17CTAP-C11 6546-02)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문을 심사하는데 도움을 주신 분들과 논문의 질이 향상될 수 있도록 좋은 의견을 주신 익명의 심사위원들께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

Bae, S., Kim, H., Kim, H. and Nam, Y., 2017, Hydraulic feasibility study on the open-loop geothermal system using a pairing technology. *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 17, 119-124 (in Korean with English abstract).

Bak, H.M., 2016, Estimation of yield capacity of fractured rock aquifer for multi-well groundwater heat pump system. M.S. thesis, Chonnam National University, Gwangju, 37 p (in Korean with English abstract).

Cho, J.H. and Nam, Y.J., 2015, A study on the characteristics of heat source temperature for two-well geothermal system using numerical simulation. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 27, 207-212 (in Korean with English abstract).

Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions, American*

Geophysical Union, 27, 526-534.

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.

Jacob, C.E., 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian wells. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 112, 1047-1064.

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).

Kim, W., Lee, S., Jeon, J., Kim, M., Kim, M. and Jeon, Y., 2016, Improved design method of open loop geothermal system and its applications. *New & Renewable Energy*, 12, 122-130 (in Korean with English abstract).

NCDSS (National Climate, Data Service System), 2018, <http://sts.kma.go.kr> (March 26, 2018).

NREC (New and Renewable Energy Center), 2017, New and renewable energy statistics 2016. *New and Renewable Energy Center*, 180 p (in Korean).

Park, J.H., Kim, J.Y., Hong, W.H. and Ahn, C.H., 2008, Research on the cooling performance evaluation of groundwater heat pump system for residence house. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 24, 273-280 (in Korean with English abstract).

Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Lee, J.Y. and Park, Y.C., 2015a, Influence of closed loop ground source heat pumps on groundwater: a case study. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 243-251 (in Korean with English abstract).

Park, Y., Yu, J., Kim, N. and Lee, J.Y., 2015b, 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*, 51, 623-628 (in Korean with English abstract).

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.

Theis, C.V., 1935, The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions of the American Geophysical Union*, 16, 519-524.

Won, C.K., Paik, K.H., Chi, J.M., Goo, M.O. and Ahn, H.R., 1981, Explanation text of the geological map of Ddug Seom sheet. *Korea Institute of Energy and Resources*, 10 p.

Received : March 28, 2018
 Revised : April 19, 2018
 Accepted : April 19, 2018