

개방형 지열시스템의 효율적 설계를 위한 영향인자에 대한 연구

박병학 · 전원탁 · 이보현 · 이강근*

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

A Study on Significant Parameters for Efficient Design of Open-loop Groundwater Heat Pump (GWHP) Systems

Byeong-Hak Park · Won-Tak Joun · Bo-Hyun Lee · Kang-Kun Lee*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

Open-loop groundwater heat pump (GWHP) system generally has benefits such as a higher coefficient of performance (COP), lower initial cost, and flexible system size. The hydrogeological conditions in Korea have the potential to facilitate the use of the GWHP system because a large number of monitoring wells show stable groundwater temperatures, shallow water levels, and high well yields. However, few studies have been performed in Korea regarding the GWHP system and the most studies among them dealt with Standing Column Well (SCW). Because the properties of the aquifer have an influence on designing open-loop systems, it is necessary to perform studies on various hydrogeological settings. In this study, the hydrogeological and thermal properties were estimated through various tests in the riverside alluvial layer where a GWHP system was installed. Under different groundwater flow velocities and pumping and injection rates, a sensitivity analysis was performed to evaluate the effect of such properties on the design of open-loop systems. The results showed that hydraulic conductivity and thermal dispersivity of the aquifer are the most sensitive parameters in terms of performance and environmental aspects, and sensitivities of the properties depend on conditions.

Key words : Open-loop groundwater heat pump (GWHP) system, Ground source heat pump (GSHP), Sensitivity analysis, Groundwater

1. 서 론

대기 중 온실가스의 농도가 증가하여 인류는 기후 변화라는 전 세계적인 문제에 직면하게 되었다. 지구온난화를 일으키는 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 농도를 살펴보면, 산업혁명 이전 280 ppm에서 2010년 389 ppm으로 39%나 증가한 것으로 보고되었다(WMO, 2011). 대기 중 온실가스의 증가로 지구의 평균기온은 점점 증가하는 추세를 보이고 있으며, 이러한 변화는 폭염과 혹한 등의 기상 이변, 사막화, 해수면 상승 등의 문제를 야기하고 있다. 지난 100년간 한반도의 기온은 지구평균 기온증가율보다 높은 증가율을 나타낸 것으로 추정되며(Lee and Kang, 1997), 수도권 서울은 평균기온이 2.4°C 상승한 것으로 보

고되었다(Kim, 2010). 특히, 우리나라는 천연자원이 부족하여 에너지의 95.7%를 수입에 의존하고 있어(KEEI, 2015), 친환경적이며 지속 발전을 뒷받침할 수 있는 에너지의 안정적 공급이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 신재생에너지 분야가 화석연료에 대한 대안으로 주목받고 있다.

그 중 지하의 온도 보존성을 이용하는 천부 지열의 경우 지리적 제약 요건이 적다는 측면에서 다른 재생에너지에 비해 상대적으로 우리나라에 적용성이 뛰어난 것으로 평가되어왔다(Mok et al., 2010). 2004년 ‘신에너지 및 재생에너지 개발, 이용, 보급촉진법’이 제정된 이후로 공공기관 설치의무화 제도, 그린홈사업과 농어업에너지이용 효율화사업 등의 정부지원과 함께 설치개수와 설치용량이 꾸준히 증가하고 있다(KEMCO, 2011; Kwon et al.,

*Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr

Received : 2015. 4. 10 Reviewed : 2015. 7. 3 Accepted : 2015. 7. 3

Discussion until : 2015. 10. 31

2012; Lee, 2009). 국내 보급 현황을 살펴보면, 밀폐형과 수주지열정(SCW: Standing Column Well)이 각각 80%와 16.4%로 설치된 지열히트펌프의 대부분을 차지하고 있다(Kwon et al., 2012).

지하수열을 직접 이용하는 개방형은 밀폐형에 비해 효율이 높고, 초기투자비용이 적게 들며, 시스템설계가 유연하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 국내에는 연중 안정적인 온도와 낮은 심도의 지하수위를 가지며, 수량이 풍부하여 개방형을 설치하기에 유리한 지역들이 많다(Lee et al., 2006). 그러나 개방형에 대한 이해의 부족, 제도 및 기술 표준화의 미비 등으로 수직밀폐형에 국한되어 보급이 이루어지고 있다(Kim and Nam, 2013).

개방형 지열시스템 관련 연구로 환경적인 영향을 최소화하고 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구들이 진행되어 왔으며(Lo Russo et al., 2011; Zhou et al., 2013), 최근에는 개방형 시스템을 대규모 시설에 적용하기 위한 연구도 수행되었다(Al-Zyoud et al., 2014). 이러한 연구들은 대수층의 특성이 시스템의 설계에 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다. 하지만 국내에서 수행된 연구는 많지 않으며, 개방형의 경우에도 완전개방형으로 볼 수 없는 수주지열정(SCW)을 다루는 경우가 많다. 따라서 국내의 다양한 수리지질학적 환경에서의 완전개방형 지열시스템 관련 연구가 필요하며, 이러한 연구는 개방형 지열시스템의 설계 및 시공 기준을 정립해가는 데 기여할 것이라 판단된다.

본 연구에서는 수변 충적층에 위치한 연구지역에서 다양한 실험을 통해 추정된 수리지질학적, 열적 특성을 토대로 민감도 분석을 수행하여 이러한 특성들이 개방형 시스템의 설계에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 또한, 지하수 유속과 주입 및 양수량의 변화를 고려하여 4가지의 서로 다른 조건에서 변수들의 민감도가 어떻게 달라지는지를 분석하였고, 이를 통해 개방형 시스템 설계 시 보다 세밀한 고려가 필요한 설계 변수들을 추출하였다.

2. 지하수 및 열 거동에 대한 수치모의

2.1. 연구지역의 위치 및 특성

연구지역인 한강물환경연구소는 환경부 국립환경과학원 산하 기관으로 북한강과 남한강이 합쳐지는 양수리 내에서 북한강에 인접한 위치에 자리하고 있다(Fig. 1). 한강에서의 오염물질 유출 및 수질변동 특성, 생태 환경에 관한 연구를 수행하고 있으며, 시설은 총 3개의 건물(연구소 본관, 실험 측정동, 전시관)로 이루어져 있다. 그 중, 지하수를 열원으로 하는 개방형 지열 시스템을 활용하기 위한 대상건물은 실험 측정동으로 공기열원 히트 펌프를 사용하여 건물의 냉난방에너지를 공급하고 있다. 현재 한강물환경연구소의 실험부지에는 총 22개의 관정(지열정 및 관측정)이 설치되어 있다(Fig. 1). 관정설치 당시의 시추자료를 살펴보면 연구지역의 대수층은 크게 3개의 다른 지층(실트질 모래, 자갈, 편마암)으로 구성되어 있다(Table

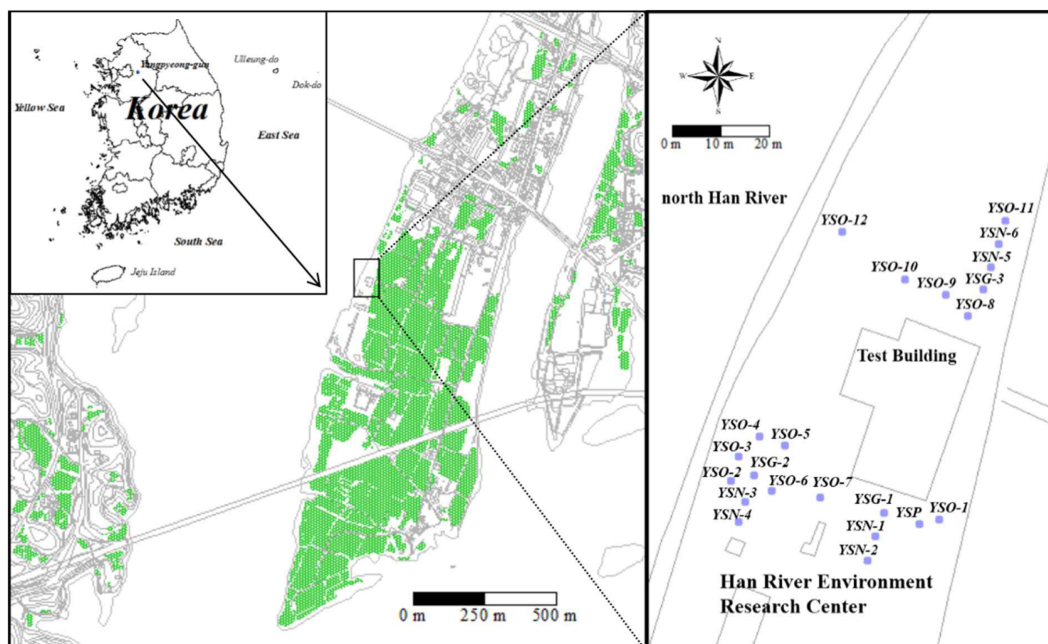
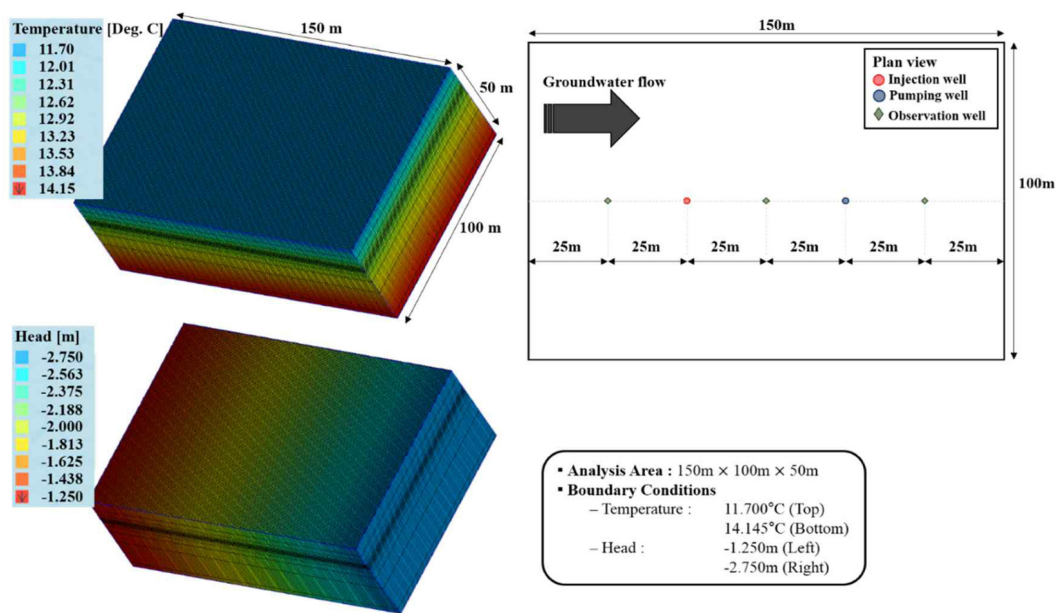


Fig. 1. Location of study area and array of wells.

Table 1. Model input parameters

Parameter	Unit	Value			
		0 m	-13 m	-16 m	-50 m
depth		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> </div>			
		Layer 1 (Silty sand)	Layer 2 (Gravel)	Layer 3 (Gneiss)	
K_h	10^{-4} m/s	0.3926	44.34	10^{-4}	
K_v	10^{-4} m/s	0.03926	4.434	10^{-5}	
S_y	—	0.2	0.2	0.02	
S_s	1/m	10^{-4}	10^{-4}	10^{-6}	
n	—	0.35	0.25	0.025	
λ^s	W/mK	1.844	2.9	2.9	
λ^f	W/mK	0.65	0.65	0.65	
$\rho^s C^s$	10^6 J/m ³ K	1.031	2.1	2.1	
$\rho^f C^f$	10^6 J/m ³ K	4.2	4.2	4.2	
α_L	m	0.4	0.4	0.4	
α_T	m	0.04	0.04	0.04	

**Fig. 2.** Model domain and boundary conditions.

1). 2013년 1월부터 정기적으로 수질검사를 하고 있으며, 대수층의 특성을 파악하기 위해 양수시험, 주입시험, 유량 유속시험, 단공주입양수시험 등 다양한 실험들이 수행되어 왔다. 현장실험을 통해 분석할 수 없었던 물성들의 경우, 시료를 채취하여 실험실에서 분석이 이루어졌다. Table 1은 연구지역의 수리지질학적·열적 특성들을 보여주며, 측정하지 못한 값들은 문헌을 참고하여 결정하였다 (Anderson and Woessner, 1992; Cha et al., 2007; Domenico and Schwartz, 1990; Fetter, 2001; Freeze and Cherry, 1979).

2.2. 모델의 초기 및 경계조건

본 연구에서 수치모의는 유한요소법에 기반한 Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System(FEFLOW)를 사용하여 수행하였다(Diersch, 2005). FEFLOW는 지하수의 흐름과 열 및 오염원의 거동을 다룰 수 있으며, 지열에너지 뿐 아니라 지하수 관리, 오염물 저장 등의 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 대수층의 특성, 지하수 유속, 주입 및 양수량을 고려한 민감도 분석을 위한 수치모델의 크기는 100 m × 150 m × 50 m로 경계조건을 고려하여 충분히 크게 설정하였다(Fig. 2). 지

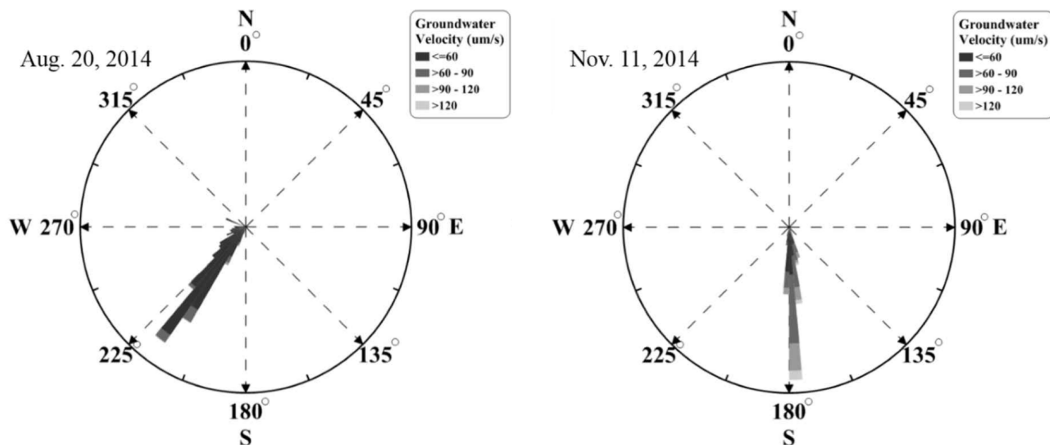


Fig. 3. Direction and velocity of groundwater measured at Well YSO-1 (15 m bls).

하수와 열의 거동에 대한 3차원 모의를 수행하기 전, 메쉬의 크기와 시간 간격을 달리하면서 예비모델링을 수행하였고, 그 결과로부터 공간 및 시간에 대한 분할을 0.5 m와 0.2 d로 결정하였다.

Table 1은 모델의 입력변수를 나타낸다. 앞 절에서 설명된 것처럼 실험을 통해 측정한 값들을 모델에 최대한 반영하였고, 측정하지 못한 값들은 문헌을 참고하여 결정하였다(Anderson and Woessner, 1992; Cha et al., 2007; Domenico and Schwartz, 1990; Fetter, 2001; Freeze and Cherry, 1979). 연구지역의 수위는 시간적으로 변화하지만, 관정에서 관측된 수위값을 바탕으로 해서 초기수위를 -2 m로 설정하였다. 측정한 수위자료만으로는 지하수의 유향과 유속을 추정하는데 불충분하다고 판단되어 수차례에 걸쳐서 Aquavision Colloidal Borescope(Geotech, 미국)를 이용하여 유향유속실험이 실시되었다. Fig. 3은 그 중 2014년 8월과 2014년 11월에 YSO-1 관정에서 약 15 m 심도에서 측정한 유향유속자료를 보여준다. 관측된 자료들로부터 유속이 상대적으로 빠를 때와 느릴 때가 존재함을 확인할 수 있었다. 그러한 지하수 흐름을 반영할 수 있도록 수리경사 값을 계산하여 도메인의 좌우에 Dirichlet 경계조건을 설정하였다. 지온구배는 다음과 같이 고려되었다. 현장에 대기압의 변화와 기온을 측정하기 위해 자동기록계(BaroDiver, Eijkelkamp)를 설치하였으나 측정기간이 짧아 연구지역의 기온변화를 살펴보는 데 충분하지 않다고 판단되었다. 양평지역에도 기상관측소가 존재하나 연구지역에서 약 17 km 떨어진 곳에 위치해 있으므로 기상청의 자료가 차이를 보일 수도 있다고 판단되어 현장에서 측정한 기온과 비교하였다(Fig. 4). 기상청의 자료는 측정한 기온과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었으며 현장의 기온을 충분히 대표할 수 있다고 판단된다. 따라

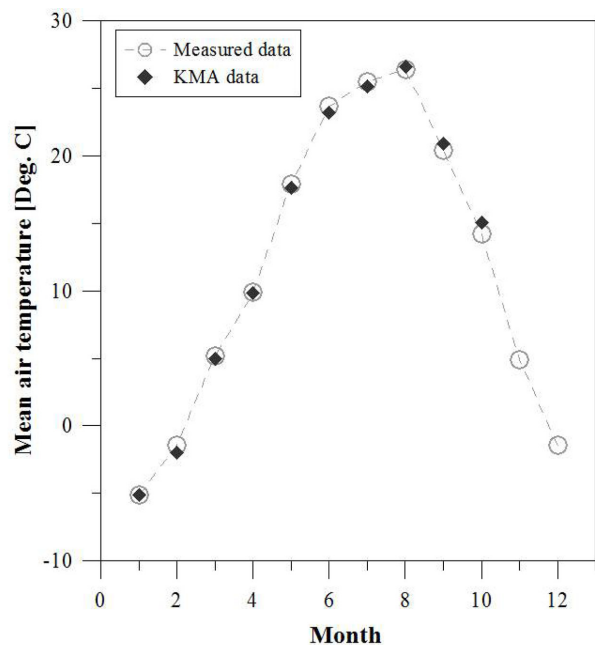


Fig. 4. Monthly mean air temperature measured at the study area and weather station of Yangpyeong-gun.

서 양평 기상관측소의 2004년부터 2013년까지 10년간의 자료를 이용하여 연평균 기온(11.7°C)을 계산하여 모델상부의 경계조건으로 설정하였다(KMA, 2015). 또한, 관정 YSO-1에 심도별 온도측정장비를 설치하여 2014년 1월부터 30분 간격으로 온도측정이 이루어지고 있다(Fig. 5). 심도별로 1년간 측정된 온도자료에 대한 선형회귀분석을 통해 50 m 심도에서의 온도를 추정하였고, 이를 모델 하부의 경계조건으로 설정하였다.

2.3. 민감도 분석

대수층의 특성, 지하수 유속, 주입 및 양수량이 지중 열

거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 두 개 이상의 관정을 사용하는 개방형 지열 시스템의 설계시에는 양수정을 상류에 설치하여 열간섭현상을

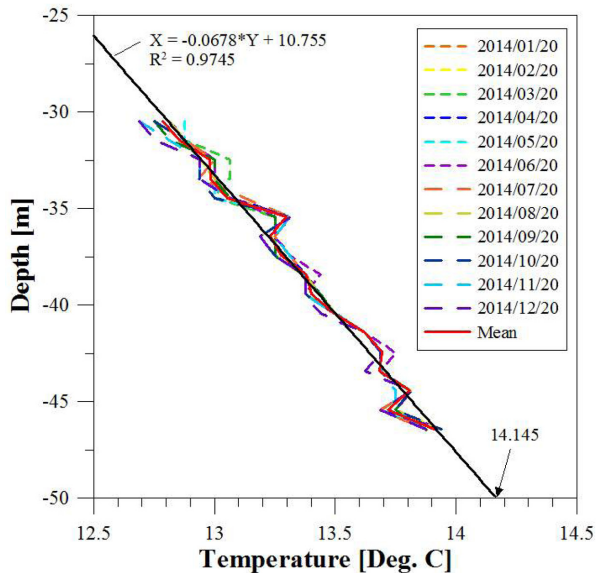


Fig. 5. Subsurface temperature logs with depth measured at Well YSO-1.

줄이는 것이 바람직하나, 본 연구에서는 영향의 정도를 파악하기 위해 주입정이 상류에 있다고 가정하였다. 주입정과 양수정 사이의 이격거리는 50 m이며, 주입 및 양수량은 두께 3 m의 주대수층 구간에 설정하였다. 주입은 지하수의 초기온도보다 약 10°C 높은 22.7°C의 물을 주입하는 것으로 가정하였다.

분석에 반영한 대수층의 특성은 수리전도도(K), 열분산도(α), 체적열용량(ρC), 열전도도(λ), 공극률(n), 비저류계수(S_s), 비산출률(S_y)의 총 7가지이며, 지하수 유속과 주입 및 양수량에 따라 4가지 Case로 나눌 수 있다(Table 2). 대수층의 물성은 Table 1에 있는 값을 기준으로 20%를 증감시켰다. 열분산도의 경우에는 매질에 따른 값의 범위를 알 수 없으며, 넓은 범위의 값을 가지는 것으로 보고 되었다(Stauffer et al., 2013). 따라서 Table 1의 값 외에 FEFLOW모델에서 제공하는 기본값에 대해서도 추가적으로 분석하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 지하수 유속이 상대적으로 빠를 때와 느릴 때가 있으며, 시설에 따라 주입 및 양수량은 달라지므로 각각에 대해 2가지로 나누어 분석하였다. 국내의 경우 냉방이 집중되는 기간이 7월부터 8월까지이므로 개방형 지열 시스템의 운영시간을 60

Table 2. Cases of the sensitivity analysis

Cases	Parameter									
	ΔT	i	Q	K	α	$\rho^s C^s$	λ^s	n	S_s	S_y
A-1	10	0.01	25	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—	—
A-2	10	0.01	25	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—
A-3	10	0.01	25	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—
A-4	10	0.01	25	—	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—
A-5	10	0.01	25	—	—	—	—	$\pm 20\%$	—	—
A-6	10	0.01	25	—	—	—	—	—	$\pm 20\%$	—
A-7	10	0.01	25	—	—	—	—	—	—	$\pm 20\%$
B-1	10	0.005	25	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—	—
B-2	10	0.005	25	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—
B-3	10	0.005	25	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—
B-4	10	0.005	25	—	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—
B-5	10	0.005	25	—	—	—	—	$\pm 20\%$	—	—
B-6	10	0.005	25	—	—	—	—	—	$\pm 20\%$	—
B-7	10	0.005	25	—	—	—	—	—	—	$\pm 20\%$
C-1	10	0.01	50	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—	—
C-2	10	0.01	50	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—
C-3	10	0.01	50	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—
C-4	10	0.01	50	—	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—
D-1	10	0.005	50	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—	—
D-2	10	0.005	50	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—	—
D-3	10	0.005	50	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—	—
D-4	10	0.005	50	—	—	—	$\pm 20\%$	—	—	—

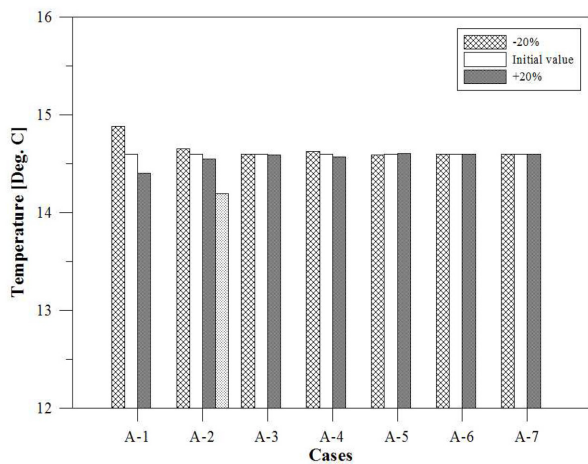


Fig. 6. Groundwater temperature at pumping well according to Case A ($i = 0.01$, $Q = 25 \text{ m}^3/\text{d}$).

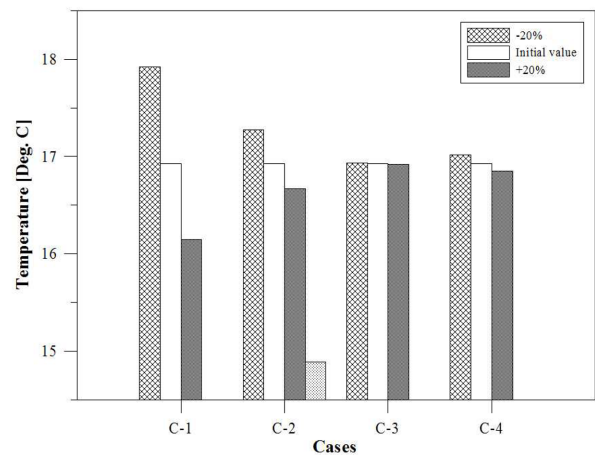


Fig. 8. Groundwater temperature at pumping well according to Case C ($i = 0.01$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{d}$).

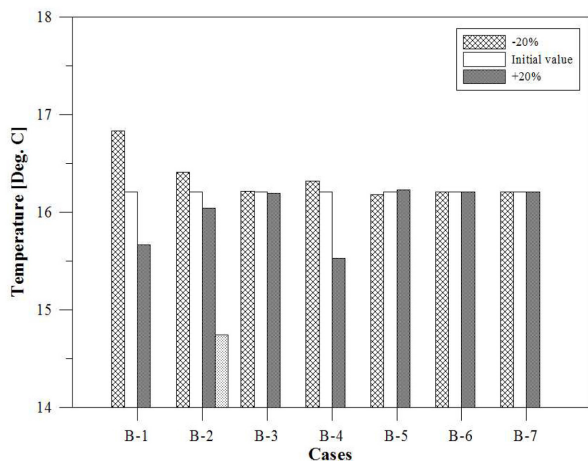


Fig. 7. Groundwater temperature at pumping well according to Case B ($i = 0.005$, $Q = 25 \text{ m}^3/\text{d}$).

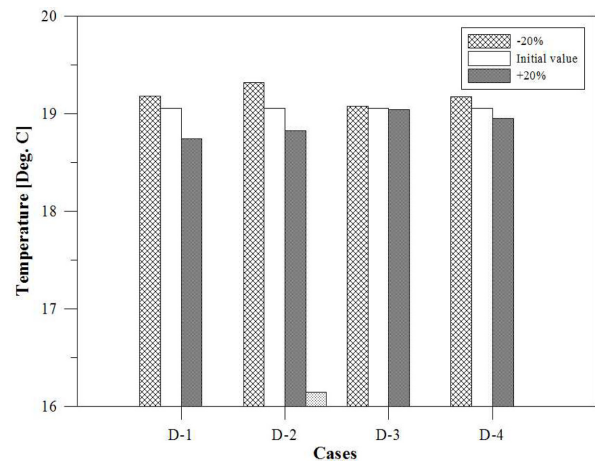


Fig. 9. Groundwater temperature at pumping well according to Case D ($i = 0.005$, $Q = 50 \text{ m}^3/\text{d}$).

일로 설정하였다. 그러나 지하수 유속이 상대적으로 빠른 Case A와 Case C의 경우 30일 이후로 온도 변화가 거의 없어 정상상태에 도달한 것으로 볼 수 있으며, 연산효율을 위해 운영시간을 30일로 설정하였다. Case A와 Case B를 분석한 후, 영향이 없다고 판단되는 변수(n , S_s , S_y)는 이후의 분석에서 제외하였다.

3. 수치모의 결과

Figs. 6-9는 Case별로 변수들의 값을 20% 증감했을 때 관측되는 양수온도의 변화를 보여주며, Fig. 10은 Case별로 양수정에서 온도변화가 나타나는 시간(또는 열플룸이 도착하는 시간)을 나타낸다. 이때 도착시간은 초기온도보다 약

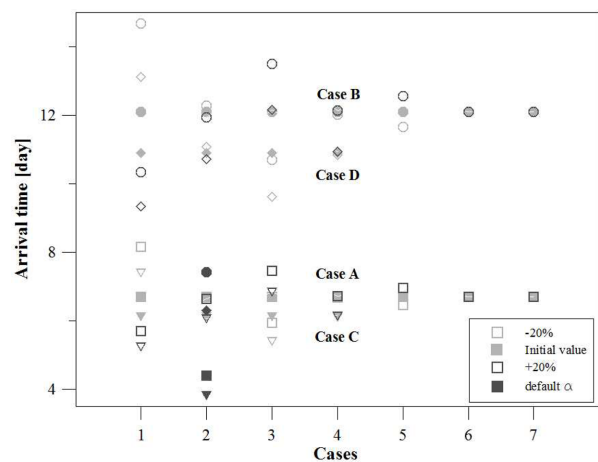


Fig. 10. Observed arrival time of thermal plume at pumping well according to pre-set cases (Case A: square, Case B: circle, Case C: triangle, Case D: diamond).

Table 3. Final temperature change at pumping well according to pre-set cases

Case		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
T [°C]	-20%	14.880	14.654	14.598	14.625	14.589	14.595	14.595
	-	14.595	14.595	14.595	14.595	14.595	14.595	14.595
	+20%	14.400	14.546	14.591	14.567	14.601	14.595	14.595
	(default)		(14.197)					
ΔT [°C]		0.479	0.108 (0.456)	0.007	0.058	0.013	0.000	0.000
Case		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
T [°C]	-20%	16.832	16.413	16.215	16.323	16.181	16.206	16.206
	-	16.206	16.206	16.206	16.206	16.206	16.206	16.206
	+20%	15.666	16.042	16.197	15.529	16.232	16.206	16.206
	(default)		14.741					
ΔT [°C]		1.167	0.371 (1.672)	0.018	0.794	0.051	0.000	0.000
Case		C-1	C-2	C-3	C-4			
T [°C]	-20%	17.923	17.273	16.937	17.016			
	-	16.929	16.929	16.929	16.929			
	+20%	16.148	16.672	16.921	16.848			
	(default)		14.888					
ΔT [°C]		1.776	0.600 (2.385)	0.016	0.168			
Case		D-1	D-2	D-3	D-4			
T [°C]	-20%	19.183	19.322	19.074	19.176			
	-	19.059	19.059	19.059	19.059			
	+20%	18.743	18.825	19.044	18.949			
	(default)		16.147					
ΔT [°C]		0.439	0.497 (3.175)	0.030	0.226			

0.1°C 높은 12.8°C를 기준으로 하여, 수치모의결과를 Spline 3차 보간법을 이용하여 계산하였다. 온도변화와 도 착시간은 또한 Table 3과 4에 수치적으로 제시되어 있다.

3.1. 대수층의 열적 · 수리지질학적 특징

지하수 유속이 빠르고 주입 및 양수량이 적은 경우 (Case A)에는 대체적으로 온도변화가 크지 않다(Fig. 6과 Table 3). 대수층의 수리전도도(A-1)가 시스템의 성능에 가장 큰 영향(0.479°C)을 미치며, 열분산도(A-2)와 열전도도(A-4) 또한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다른 변수 들은 매질에 따른 범위를 알 수 있지만, 열분산도의 경우 많은 정보가 없기 때문에 추가적으로 모델의 기본값을 넣어 분석하였다. 이 경우 열분산도의 영향이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 지하수 유속의 영향

지하수 유속이 다른 경우에도 변수들의 영향이 동일한

지를 살펴보기 위해 수리경사를 변경하며 수치모의를 수행하였다(Case B). 냉방운전에서 수리경사가 낮아지는 경우 모든 온도가 상승하는 것이 관측되었으며, 배경지하수 유속이 빠른 경우(Case A)가 시스템 성능에 유리하게 작용함을 알 수 있다. 지하수 유속이 느린 경우에도 수리전도도(B-1)와 열분산도(B-2)의 영향이 큰 것을 확인하였다. 열전도도의 경우, 지하수 유속이 빠른 경우에는 영향(0.058°C)이 크지 않으나 지하수 유속이 느린 경우에는 영향(0.794°C)이 큰 것으로 나타났다. 이는 열전도도의 경우 지하수 조건에 따라서 설계시 중요도가 달라질 수 있음을 암시한다.

3.3. 주입과 양수량의 영향

개방형은 시스템 규모에 따라 주입과 양수량이 달라지게 된다. 이러한 변화가 설계변수에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위해 주입 및 양수량을 50 m³/d로 증가시킨 Case C와 Case D가 수행되었다. 주입 및 양수량을 증가

Table 4. Arrival time change at pumping well according to pre-set cases

Case	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	
t	−20%	8.16	6.76	5.93	6.67	6.45	6.70	
	−	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	
	+20%	5.69	6.64	7.46	6.72	6.95	6.70	
	(default)		(4.40)					
Δt	2.47	0.12 (2.36)	1.53	0.05	0.50	0.00	0.00	
Case	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	
t	−20%	14.68	12.28	10.70	12.02	11.65	12.10	
	−	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	
	+20%	10.34	11.94	13.50	12.14	12.55	12.10	
	(default)		(7.42)					
Δt	4.34	0.34 (4.86)	2.80	0.12	0.90	0.00	0.00	
Case	C-1	C-2	C-3	C-4				
t	−20%	7.40	6.20	5.40	6.10			
	−	6.12	6.12	6.12	6.12			
	+20%	5.23	6.05	6.83	6.14			
	(default)		(3.81)					
Δt	2.17	0.15 (2.39)	1.43	0.04				
Case	D-1	D-2	D-3	D-4				
t	−20%	13.12	11.08	9.62	10.83			
	−	10.89	10.89	10.89	10.89			
	+20%	9.34	10.71	12.15	10.94			
	(default)		6.29					
Δt	3.78	0.37 (4.79)	2.53	0.11				

시켰을 때 배경지하수 흐름이 느린 경우와 마찬가지로 양수정에서의 온도가 모두 상승했으며, 배경지하수 흐름이 느린 경우 상승폭이 좀 더 큰 것으로 나타났다(Figs. 8, 9). 배경지하수의 흐름이 빠른 경우(Case C)에는 Case A와 마찬가지로 수리전도도와 열분산도(모델기본값 포함)가 가장 큰 영향을 미치며 열전도도의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

지하수 유속이 느린 경우(Case D)에는 수리전도도의 영향(0.439°C)이 감소한 반면에 열분산도의 영향은 주입 및 양수량의 증가와 함께 더욱 증가한 것(3.175°C)으로 나타났다. 열전도도는 주입과 양수량이 많은 경우에 지하수 유속에 상관없이 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.4. 도착시간의 변화

체적 열 용량은 양수 온도에는 영향을 미치지 않으나 도착시간에는 큰 영향(1.43~2.53 d)을 미치는 것으로 나타났다. 지하수 유속이 느린 경우(Case B와 Case D)에

지연되는 시간이 커지는 것으로 나타났다. 공극률의 경우 도착시간에 영향을 주나 다른 변수들(K, α , ρC)의 영향에 비해 크지 않은 것을 알 수 있다. 수리전도도와 열분산도는 온도변화뿐 아니라 도착시간에도 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 열물질의 영역으로 살펴본 선행연구와 잘 일치한다(Lo Russo et al., 2012).

4. 토 의

대수층의 수리전도도와 열분산도의 경우 모든 Case에서 양수온도와 도착시간에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 개방형 지열 시스템의 효율이나 환경적 영향을 평가하는 데 고려되어야 함을 의미한다. 수리전도도는 같은 매질내에서도 넓은 범위의 값을 가지므로 양수시험 등의 현장수리실험 및 결과해석에 세심한 주의가 필요하다. 열분산도의 경우 문헌을 통해 값을 추정하기 어려우므로 현장실험을 통한 평가가 수행되어야 한다. 열분산도는 열추적

자시험을 통해 평가되어 왔으나 실제사례는 많지 않으며, 향후 현장실험 및 해석방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 열전도도는 조건에 따라 민감도가 다르게 나타났다. 지하수 유속이 느리고 양수량이 적은 경우(Case B-4)에는 열전도도가 시스템의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이 때, 같은 값의 변화임에도 기준값보다 작은 경우보다 큰 경우에 변화가 심하게 나타나므로 주어진 조건에서 영향이 나타나는 경계값이 존재하는 것으로 보인다. 배경지하수의 유속이 빠르거나 시스템의 규모가 큰 경우에는 열전도도의 영향을 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 체적열용량은 양수온도에는 영향을 주지 않지만, 열의 이동속도와 관련되어 영향범위를 변화시키며, 지하수 유속이 느린 경우에 더 중요해짐을 확인하였다. 공극률은 영향범위를 변화시킬 수 있으나 다른 변수들에 비해 그 영향이 크지는 않은 것으로 나타났으며, 비저류계수와 비산출률은 거의 영향이 없으므로 문헌의 값을 참고해도 충분할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내의 수리지질학적·열적 특성을 반영하여 개방형 지열 시스템을 설계하기 위해 수변 층적층에 위치한 연구지역에서 수리시험, 열추적자시험, 유황유속시험 등의 다양한 실험을 수행하여 현장 대수층의 특성을 파악하였다. 대수층의 열적·수리지질학적 특성을 나타내는 7개의 변수들을 선정하여, 이러한 변수들이 시스템의 설계에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 지하수 유속의 변화와 주입 및 양수량을 분석에 포함하여 서로 다른 환경에서의 변수들의 민감도를 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 수리전도도와 열분산도는 시스템 성능과 환경적인 영향을 분석하는 데 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 두 변수는 넓은 범위의 값을 가지므로 현장실험 및 결과해석에 세심한 주의가 필요하다.

(2) 열전도도는 지하수 유속이 느리고 양수량이 적은 경우에 시스템의 성능에 영향을 미칠 수 있으며, 이 경우 열전도도가 높을수록 설계에 유리하게 작용한다.

(3) 체적열용량은 도착시간에 영향을 미치며, 지하수 유속이 느린 경우에 영향이 커진다.

(4) 공극률은 영향반경을 변화시킬 수 있으나, 다른 변수들(수리전도도, 열분산도, 체적열용량)에 비해 크지 않으며, 비저류계수와 비산출률은 시스템 설계에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그러나 이러한 결과들은 어디까지나 현장매질의 특성 내에서 얻어진 것이므로 일반화하기에는 무리가 있으며, 조건에 따라 달라지는 변수들의 중요성을 평가하기 위해서 좀 더 넓은 범위에서 연구가 수행될 필요가 있다. 향후, 국내의 다양한 수리지질학적·열적 특성을 반영하여 더 많은 조건을 고려한 추가적인 연구가 수행될 예정이다.

사용문자의 정의 및 단위

i	: hydraulic gradient [-]
K_h	: horizontal hydraulic conductivity [m/s]
K_v	: vertical hydraulic conductivity [m/s]
S_y	: specific yield [-]
S_s	: specific storage [1/m]
n	: porosity [-]
λ^s	: thermal conductivity of the solid [W/m-K]
λ^f	: thermal conductivity of the fluid [W/m-K]
$\rho^s C^s$: volumetric heat capacity of the solid [10 ⁶ J/m ³ -K]
$\rho^f C^f$: volumetric heat capacity of the fluid [10 ⁶ J/m ³ -K]
α_L	: longitudinal thermal dispersivity [m]
α_T	: transverse thermal dispersivity [m]
Q	: pumping/injection rate [m ³ /d]

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 두뇌한국(BK21) 서울대학교 지구환경과학사업단의 지원을 받아 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- Al-Zyoud, S., Rühaak, W., and Sass, I., 2014, Dynamic numerical modeling of the usage of groundwater for cooling in north east Jordan - A geothermal case study, *Renew. Energ.*, **62**, 63-72.
- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*, Academic Press Inc, San Diego, CA, 381 p.
- Cha, J.-H., Myoung, D.-W., Koo, M.-H., Song, Y.H., and Kim, H.C., 2007, Analysis for the thermal properties by rock type in South Korea, 2007 annual fall meeting, the Korean Society for

- New and Renewable Energy (KSNRE), 493-496.
- Diersch, H.-J.G., 2005, FEFLOW Reference Manual, WASY GmbH, Berlin, Germany, 292 p.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, Inc, NY, 824 p.
- Fetter, C. W., 2001, Applied Hydrogeology, 4th Edition, Prentice-Hall, Inc, NJ, 598 p.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Inc., NJ, 604 p.
- KEEI (Korea Energy Economics Institute), 2015, Yearbook of energy statistics 2014.
- KEMCO (Korea Energy Management Corporation), 2011, New and Renewable Energy RD&D Strategy 2030 [Geotherm], KEMCO, Yongin.
- Kim, E.S., 2010, Statistical Interpretation of Climate Change in Seoul, Korea, over the Last 98 Years, *J. Ecol. Field Biol.*, **33**(1), 37-45.
- Kim, J.S. and Nam, Y.J., 2013, A study of the influence of groundwater level on the system performance of open loop geothermal system, *Kor. Soc. Geotherm. Energy Eng.*, **9**(3), 1-10.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2015, Home page, <http://www.kma.go.kr>, Last accessed 3 April, 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), *J. Geol. Soc. Korea*, **48**(2), 193-199.
- Lee, J.-Y., Won, J.-H., and Hahn, J.-S., 2006, Evaluation of hydrogeologic conditions for groundwater heat pumps: analysis with data from national groundwater monitoring stations, *GeoSci. J.*, **10**(1), 91-99.
- Lee, J.-Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1560-1568.
- Lee, M.-I., and Kang, I.-S., 1997, Temperature variability and warming trend in Korea associated with global warming, *J. Kor. Meteorol. Soc.*, **33**(3), 429-443.
- Lo Russo, S., Taddia, G., Baccino, G., and Verda, V., 2011, Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building: Impact on subsurface and primary energy consumption, *Energy Build.*, **43**, 347-357.
- Lo Russo, S., Taddia, G., and Verda, V., 2012, Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis, *Geothermics*, **43**, 66-74.
- 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, *J. Eng. Geol.*, **21**(1), 35-43.
- Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina-Giraldo, N., and Kinzelbach, W., 2013, Thermal Use of Shallow Groundwater, CRC Press, 287 p.
- WMO (World Meteorological Organization), 2011, The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2010, Greenhouse Gas Bulletin No. 7, Geneva.
- Zhou, X., Gao, Q., Chen, X., Yu, M., and Zhao, X., 2013, Numerically simulating the thermal behaviors in groundwater wells of groundwater heat pump, *Energy*, **61**, 240-247.