

## 지하수 부존지역에서 최적 지열에너지 활용방식 수치 모의

김진성<sup>1</sup> · 차장환<sup>2</sup> · 송성호<sup>1</sup> · 정교철<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원, <sup>2</sup>(주)지오그린21, <sup>3</sup>안동대학교 지구환경과학과

### Numerical Simulations for Optimal Utilization of Geothermal Energy under Groundwater-bearing Conditions

Jin-Sung Kim<sup>1</sup>, Jang-Hwan Cha<sup>2</sup>, Sung-Ho Song<sup>1</sup>, and Gyo-Cheol Jeong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

<sup>2</sup>GeoGreen21 Co., Ltd.

<sup>3</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

Received 10 November 2014; received in revised form 19 November 2014; accepted 21 November 2014

최근 지열에너지 활용 증가 추세와 더불어 지하수 부존량이 풍부한 지역에서 수직개방형의 효율이 더 높다는 연구결과가 제시됨에도 불구하고, 국내 지열냉난방시스템의 열교환 방식은 수직밀폐형 방식이 주를 이루고 있다. 따라서, 본 연구에서는 지하수 부존량이 풍부한 지역에서 수직개방형 방식의 효율성을 검증하기 위하여, 수리지질 및 열적 특성을 반영한 최적의 지열에너지 활용 방식을 수치 모의하였다. 1차 모의 결과, 지하수 부존량이 풍부한 지역에서 지열냉난방시스템을 활용하는 경우 수직밀폐형보다 지하수를 직접 이용하는 수직개방형이 더욱 효과적인 것으로 분석되었으며, 수직개방형 중에서는 SCW (standing column well)형 보다는 주입정과 추출정이 분리된 복수관정형에서 지반과 열교환을 통해 얻을 수 있는 주입수와 추출수의 온도차 ( $\Delta$ )가 커 더욱 효율적인 것으로 나타났다. 2차 모의에서는 수직개방형 지열에너지 공급방식인 단일관정형, SCW형, 복수관정형을 대상으로 열 이송, 이격거리 및 유량, 지하수 수리경사 등을 고려한 최적의 활용 방식을 검토하였으며, 이를 바탕으로 지열냉난방시스템의 지중 열교환 방식 선정 시 활용할 수 있는 흐름도를 제시하였다. 본 연구결과 제시된 다양한 선정 기준을 기초로 실제 선정 시에는 전체 지열냉난방 시스템에 대한 COP (coefficient of performance) 계산 및 세부적인 타당성 검토가 필요할 것으로 판단된다.

**주요어:** 지열에너지, 지열냉난방시스템, 열교환 방식, 수직개방형, 지하수

While the vertical open type of heat exchanger is more effective in areas of abundant groundwater, and is becoming more widely used, the heat exchanger most commonly used in geothermal heating and cooling systems in Korea is the vertical closed loop type. In this study, we performed numerical simulations of the optimal utilization of geothermal energy based on the hydrogeological and thermal properties to evaluate the efficiency of the vertical open type in areas of abundant groundwater supply. The first simulation indicated that the vertical open type using groundwater directly is more efficient than the vertical closed loop type in areas of abundant groundwater. Furthermore, a doublet system with separated injection and extraction wells was more efficient because the temperature difference ( $\Delta$ ) between the injection and extraction water generated by heat exchange with the ground is large. In the second simulation, we performed additional numerical simulations of the optimal utilization of geothermal energy that incorporated heat transfer, distance, flow rate, and groundwater hydraulic gradient targeting a single well, SCW (standing column well), and doublet. We present a flow diagram that can be used to select the optimal type of heat exchanger based on these simulation results. The results of this study indicate that it is necessary to examine the adequacy of the geothermal energy utilization system based on the hydrogeological and thermal properties of the area concerned, and also on a review of the COP (coefficient of performance) of the geothermal heating and cooling system.

**Key words:** geothermal energy, geothermal heating and cooling system, type of heat exchanger, vertical open type, groundwater

\*Corresponding author: jeong@anu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

우리나라는 여름철(23~27°C)과 겨울철(-6~7°C)의 기온 차이가 큰 반면 지하 70 m에서 지하수의 연평균 온도는 10~18°C로 거의 일정하므로(Lee, 2009), 계절에 따라 지열을 활용하기에 적합하다. 이러한 조건으로 1990년대 말부터 지열 히트펌프 보급 이래 2004년부터 관련 법의 개정에 따라(Song and Lee, 2006), 지열 히트펌프 설치개소수가 2000년 2개에서 2011년 11월에는 965개로 비약적으로 증가하였다(Kwon et al., 2012). 이에 따라 지열에너지 생산량도 2002년 122 TOE (ton of oil equivalent)에서 2012년 65,277 TOE로 약 535배가 증가하였다(KEMCO, 2014). 지열 히트펌프는 초기에 공공시설과 상업 시설에 많이 설치되었지만(Lee, 2009), 최근에는 수산업 및 농업·영농 시설에도 많이 설치되어 수산업이 29.5%, 농업·영농이 25.9%에 이르는 것으로 나타났다(Kwon et al., 2012).

지열냉난방시스템은 열교환 방식에 따라 지중에 설치된 배관 내에서 순환하는 물이나 순환수를 통해서 열교환을 하는 밀폐형(closed loop type)과 지하수를 직접 양수하여 열교환을 하는 개방형(open type)으로 나눌 수 있다(Kim et al., 2013). 밀폐형은 열교환 파이프 매설 방식에 따라 심도 1.5~3.0 m에 배관을 매설하여 열교환

을 하는 수평밀폐형(horizontal closed loop type)과 시추공 내에 열교환기용 배관을 설치하여 열교환을 하는 수직밀폐형(vertical closed loop type)으로 세분할 수 있다. 수평밀폐형은 배관 설치 심도가 얕아서 지표 온도에 영향을 받기 때문에 상대적으로 효율이 낮아 타 방식에 비해 넓은 면적이 필요하다. 또한, 개방형은 지열공에서 지하수를 양수하여 열교환을 한 뒤 버리는 방식인 단일관정형(single well), 한 공에서 지하수 양수와 주입이 이루어지는 스탠딩컬럼웰형(standing column well, SCW)과 주입공과 추출공을 따로 설치하여 운영하는 방식인 복수관정형(doublet or double well)으로 구분된다(Fig. 1).

이 중 국내에서는 지열냉난방시스템 열교환 방식 중 80%가 수직밀폐형으로 추정되고 SCW형이 다음 순으로 보급되었으며(Shim and Lee, 2010), 2008년 9월부터 2011년 11월에 설치한 국내 지열냉난방시스템 중 수직밀폐형은 74.5%, SCW형은 16.4%, 수평밀폐형은 5.5%로 나타났다(Kwon et al., 2012). 그러나, 국내 지반환경은 결정질 암반 대수층이 주를 이루고 있어 SCW형이 수리지질 및 효율 측면에서 적합한 시스템이며(Lee et al., 2006; Shim and Lee, 2010), 특히 지하수가 풍부한 지역에서는 수직개방형의 효율이 더 높다(Hahn et al., 2006; Kim et al., 2006; Park et al., 2006; Kim

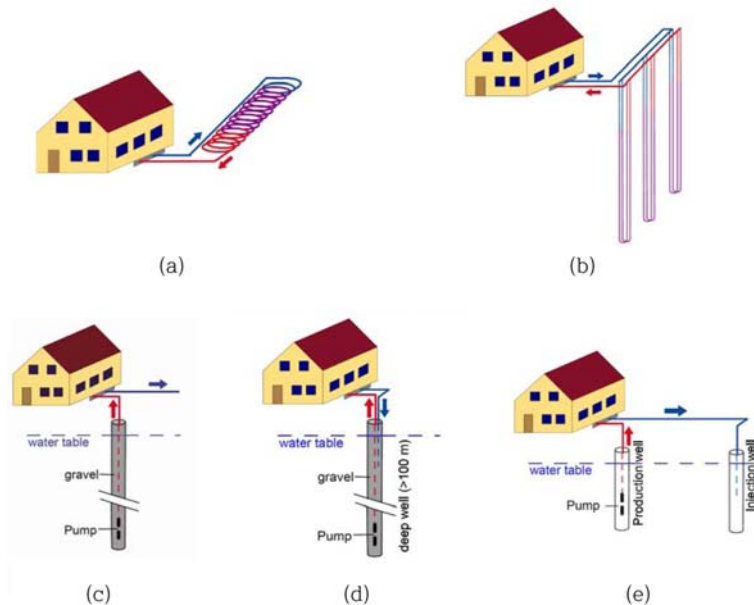


Fig. 1. Types of heat exchanger: (a) horizontal closed loop type, (b) vertical closed loop type, (c) single well, (d) SCW, and (e) doublet. (modified from EGE, 2009).

and Kong, 2011).

Nam (2011)은 지열시스템이 지반의 열적 특성이나 지하수의 조건 등에 의해 좌우됨에 따라, 대상지에 대한 적합한 이용 방법의 선정이 중요하다고 제시한 바 있다. 그러나, 지금까지 열교환 방식 선택 시 현장의 조건이나 수리지질학적 특성, 열물성 등에 대한 정보없이 선택하는 경우가 대부분이다.

따라서, 본 연구에서는 지하수 부존지역에서 수리지질학적, 열적 특성을 반영한 최적의 지열에너지 활용 방식을 수치 모의를 통하여 검토하였다. 이를 위하여 1차적으로 지하수 부존 지역에 적합한 열교환 방식을 모의하였으며, 세부적인 활용방식을 결정하기 위하여 2차적으로 최적의 지열에너지 활용방식을 모의하였다. 수치 모의에 사용된 수리지질학적, 열물성 자료는 유출 지하수로 인해 지하수가 풍부하다고 알려진 간척지에서 조사된 자료를 사용하였다(Kim et al. 2013).

### 지배 방정식

지하수 유동에 이용되는 지배방정식은 모의 영역이 포화대이고 대수층은 다공성 매질로 변형되지 않으며, 유체는 비압축성(incompressible)으로 지하수시스템은 등온 조건 하에 있다는 가정으로부터 도출된다.

이로부터 연속방정식과 Darcy's law를 통해 지하수 유동 방정식이 유도되며 이를 유한요소화하여 지하수 유동을 모의한다.

$$\frac{S\partial h}{b\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \pm Q_s \quad (1)$$

여기서,  $K_{ij}$ 는 수리전도도 텐서,  $h$ 는 동수두,  $Q_s$ 는 source 및 sink,  $S$ 는 저류계수, 그리고  $b$ 는 대수층 두께를 나타낸다.

열 이송에 대한 지배방정식은 포화된 매질에서 외부나 내부의 열 유입 및 유출이 없는  $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$  일 경우, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} - \left[ \left( \frac{\lambda}{c_s \rho_s} + \frac{D_{ij}}{R} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] = \frac{Q_h}{\lambda c_w \rho_w} \quad (2)$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $v_i$ 는 속도벡터,  $c_s$ 와  $c_w$ 는 고체와 물의 비열, 그리고  $\rho_s$ 와  $\rho_w$ 는 고체와 물의 밀도,  $Q_h$ 는 유출량을 나타낸다. 또한,  $\frac{\lambda}{c_s \rho_s}$ 는 열전도계수,  $\frac{D_{ij}}{R}$ 은 열

분산지수,  $R = \frac{c_s \rho_s}{\eta c_w \rho_w}$ 은 열지연계수를 나타낸다.

지하수 유동 및 열 이송 해석에 사용되는 프로그램은 이론 연구와 수치해석의 발전으로 인해 꾸준히 개발되고 있다. 개발된 프로그램 중 이용자가 모의 규모, 지질 매체의 특성, 현장 조건 그리고 모델링 목적에 따라 적절한 모델을 선택하여 사용할 수 있다. 현재 지하수 유동 및 열 이송 모의를 위한 프로그램은 여러 종류가 있으나, 본 연구에서는 상세설계가 가능한 FEFLOW (ver. 6.0)를 이용하였다(Nordic Energy Research, 2005).

### 지하수 부존량이 풍부한 지역에 대한 최적 열교환 방식 모의 : 1차 모의

본 연구의 1차 모의에서는 지하수 부존량이 풍부한 지역의 수리지질 및 지온 분포 특성과 열물성을 반영하여 최적의 열교환 방식을 결정하고자 하였다. 모의 결과는 동일한 조건에서 열교환 방식별로 추출되는 온도를 통하여 비교하였다. 즉, 동일한 지반에서 열교환을 통해 얻을 수 있는 주입수와 추출수의 온도차( $\Delta$ )가 크다면 더 많은 열량을 얻을 수 있어 효율이 우수한 방식이기 때문이다.

1차 모의에서는 수직밀폐형과 수직개방형 2가지 방식(SCW형 및 복수관정형)의 경우에 대하여 개념모델을 구축하고 수치모의를 수행하였다.

#### 개념모델 및 경계조건 설정

모델 구축 시 필요한 입력자료인 수리지질학적, 열적 특성 및 구성물질의 특성은 연구지역의 조사 및 분석 자료를 우선적으로 사용하였으며, 자료가 없는 경우 문헌자료를 인용하였다.

3차원 모델 영역은 3가지 경우의 열교환 방식을 동일한 조건에서 비교할 수 있도록 동일한 모의영역 및 경계조건을 적용하였다. 모의영역은  $25 \times 25 \times 180$  m ( $x \times y \times z$ )로 설정하였으며, 지하수 흐름 및 열적 이송에 대한 경계조건은 무흐름(no flow) 경계로 설정하였다. 모델은 17개의 층으로 구분하였고, 1층은 두께 20m의 토양 구간으로 설정하였으며, 하부 암반 구간은 10m 씩 16개의 층으로 구분하였다.

열교환 방식에 따른 개념모델 구축 시 입력된 자료는 Table 1에 정리하였다. 대수층은 연구지역의 시추조사 자료를 바탕으로 지표면 하부 20m에서 토양 구간과 암반 구간으로 구분하였으며, 수리전도도는 양수시험 결과

**Table 1.** Functional parameters and material properties used in the simulation.

Item	Soil	Rock	Grout	Pipe	Groundwater
Depth (m)	0~20	≤ 20	-	-	-
Hydraulic conductivity (cm/sec)	$K_{x,y}=4.83 \times 10^{-3}$ ( $K_{x,y}=10K_z$ , $K_z=0.1K_{x,y}$ )	$K_{x,y}=4.83 \times 10^{-4}$ ( $K_{x,y}=10K_z$ )	$1 \times 10^{-9}$ ( $K_{x,y}=K_z$ )	$1 \times 10^{-12}$ ( $K_{x,y}=K_z$ )	-
Porosity (%)	30	2	-	-	-
Longitudinal dispersivity (m)	5.15	5.15	-	-	-
Transverse dispersivity (m)	0.15	0.15	-	-	-
Volumetric heat capacity (J/m <sup>3</sup> /K)	$1.96 \times 10^6$	$2.52 \times 10^6$	$2.19 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6$	$4.2 \times 10^6$
Thermal conductivity (W/m-K)	1.317	2.878	0.74	0.04	0.6

**Table 2.** Specification of the experimental wells.

Item	Vertical closed loop		Open loop			
	Single U-tube		SCW		Doublet	
	Injection	Extraction	Injection	Extraction	Injection	Extraction
Well diameter (mm)	200		200		50	50
Depth (m)	150	150	40	150	150	150
Pipe inner diameter (mm)	42	42	75	50	50	50
Pipe thickness (mm)	4	4	4	4	-	
Flow rate (m <sup>3</sup> /d)	16.7		16.7		16.7	
Screen depth (m)	-		20~40	130~150	20~150	20~150
Circulating fluid	water		groundwater			

를 암반층의 투수성으로 적용하였다. 토양의 수리전도도는 암반구간의 투수성보다 10배 크게 설정하였으며, 그라우트 및 파이프의 투수성은 불투수성에 가까운 값으로 입력하였다. 또한, 토양 및 암반 구간은 일반적으로 지하수가 층류임을 감안하여, 수직 수리전도도를 수평 수리전도도의 1/10배로 설정하였으며, 그 외 그라우트 및 파이프의 수직 및 수평 수리전도도는 동일하게 설정하였다. 암반의 공극률은 실내실험 결과, 토양의 공극률은 기존 자료(Hahn, 1999)를 활용하였으며, 토양의 열용량 값 · 토양 및 암석의 열전도도값은 분석자료를 적용하였다. 또한, 파이프의 물성치는 생산업체에서 제시한 결과를 적용하였으며, 그라우트에 대한 자료는 문헌 자료를 참고하였다(Lee et al., 2010).

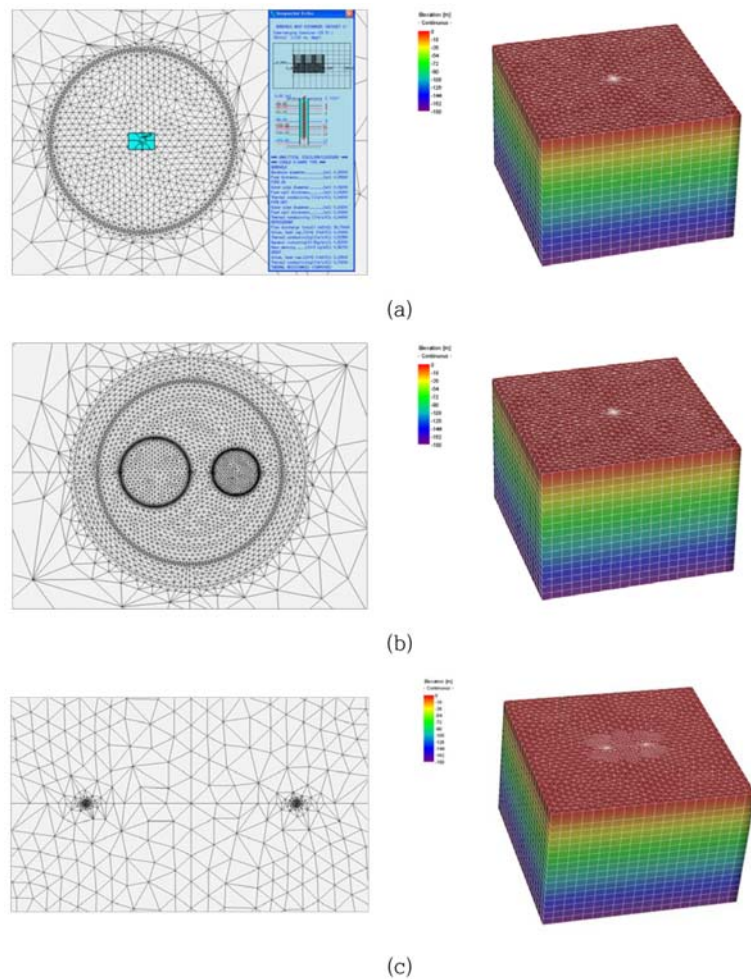
모델 구성 시 수직적 지온경사는 심도 80 m까지 온도 검층자료를 입력하였으며, 지표면 하부 80~180 m 구간의 지온경사는 한반도의 평균 지온경사인 25.1°C/km 로 설정하였다(Kim and Lee, 2007).

### 열교환 방식에 따른 모델설정

3가지 열교환 방식에 따른 관정 설계 제원은 Table 2 와 같다. 수직밀폐형은 시추공 심도 150 m, 직경 200

mm 내 U-tube가 설치되도록 설정하였으며 주입관과 추출관의 제원은 동일하게 설정하였다. 수직개방형의 경우 SCW형은 20~40 m 구간에서 주입하며, 하부 130~150 m 구간에 스크린 및 수중펌프를 설치하여 지하수를 추출하도록 설정하였다. 복수관정형의 경우에는 파이프의 영향은 무시하고 20~150 m 구간에서 주입/추출 되도록 설정하였다. 유량은 대부분 수직밀폐형에 적용되는 16.7 m<sup>3</sup>/day를 기준으로 각 방식별로 입력하였다. 수직개방형의 실제 유량은 일반적으로 이보다 훨씬 크지만, 동일 유량에서의 상대적인 비교를 위하여 수직밀폐형과 동일한 유량으로 설정하였다. 또한, 복수관정형의 관정 간 거리는 10 m로 설정하였다(Fig. 2).

본 모의에서는 지열냉난방시스템 운영 시의 난방과 냉방을 모두 고려하였는데 청문 조사 시 시설원에 농가의 운영 조건은 지역별, 재배작물별, 지반 조건 등에 따라 다르게 나타났다. 냉난방 시기는 냉난방시스템을 가동하는 농가의 운전조건과 냉난방 시 주입수 온도(난방 시 2~7°C, 냉방 시 27~35°C)를 기준으로, 난방 시의 최소값과 냉방 시의 최대값을 적용하여 온도 변화를 극대화하였다. 또한, 지표의 온도변화는 없고 모델영역 내에서 깊이에 따른 지하수의 수직적 온도 분포가 일정하



**Fig. 2.** Grid domain used in the FEFLOW simulator. On the left is a 2D finite element mesh and on the right a 3D finite element mesh for: (a) vertical closed type, (b) SCW, and (c) doublet.

다고 가정하였으며, 난방은 11월부터 다음해 4월까지 6개월 동안 2°C의 주입수를 주입하며, 냉방은 7~8월의 2개월 동안 35°C의 주입수를 주입하여 열교환을 수행하도록 설정하여 10년간 모의하였다.

#### 모의 결과

수직밀폐형에서 난방 운영에 따른 2°C의 순환수를 16.7 m<sup>3</sup>/day (11.6 LPM)로 순환시키는 경우, 추출온도가 4.2°C로 나타남에 따라 2.2°C의 온도가 상승하는 것으로 모의되었다. 반면 냉방 운영 시에는 35°C의 순환수가 순환 시 2.9°C의 온도가 하강하여 32.1°C로 추출되는 것으로 나타났다. 이때 추출정의 추출온도는 난방 시 온

도가 상승하며 냉방 시 온도가 하강하는 주기적인 경향을 나타낸다. SCW형의 경우 추출관을 통해 시추공 하부에서 16.7 m<sup>3</sup>/day의 유량으로 양수를 하고 동시에 추출관 주변으로 20~40 m 심도에서 양수된 물을 전부 주입하였다. 모의 결과, 난방과 냉방 운영에 따라 추출되는 온도는 초기에는 지하수의 온도로 추출되다가 대수층 하부에 주입되는 열에너지의 영향으로 일정 시간 뒤에는 한정된 범위에서 변동하는 것으로 예측되었다. 난방 시에는 4.6°C가 토출되어 2.6°C의 온도차이가 나타나며, 냉방 시에는 29.4°C가 나타나 5.6°C의 온도차를 보였다. 복수관정형 모의 결과, 냉난방에 따른 온도의 변화 없이 지하수 온도인 15.9°C로 추출되었다. 따라서,

**Table 3.** Comparison of simulation results obtained from different heat exchanger types.

Item		Injection temperature (°C)	Extraction temperature (°C)	Temperature differential (°C)
Vertical closed loop	Heating	2	4.2	2.2
	Cooling	35	32.1	2.9
SCW	Heating	2	4.6	2.6
	Cooling	35	29.4	5.6
Doublet	Heating	2	15.9	13.9
	Cooling	35	15.9	19.1

**Table 4.** Well design specified in the simulation model.

Item	Open type				
	Single well	SCW		Doublet	
	Extraction	Injection	Extraction	Injection	Extraction
Well diameter (mm)	200	200		200	200
Depth (m)	100	40	100	100	100
Screen depth (m)	20~100	20~40	80~100	20~100	20~100

난방 시에는 13.9°C, 냉방 시에는 19.1°C의 온도차가 나타났다. 이는 일반적으로 사용하는 복수관정형의 유량이 아닌 수직밀폐형의 유량을 적용하여 지중에서 충분한 열교환이 이루어져 주입공과 추출공의 열간섭 현상이 없거나 지하수 영향범위를 벗어나는 것으로 판단된다(Table 3).

3가지 열교환 방식의 모의 결과, 상대적으로 수직밀폐형보다 수직개방형의 온도변화가 크게 나타나 효율이 더 우수한 것으로 모의되었으며, 이 중 복수관정형의 효율은 더욱 뛰어난 것으로 모사되었다. 따라서, 지하수 부존 지역에서 수리지질학적 특성과 열물성을 고려한 지열냉난방시스템의 열교환 방식은 수직개방형이 적합한 것으로 판단된다.

#### 지하수 부존량이 풍부한 지역에 대한 최적 지열에너지 활용방식 모의 : 2차 모의

1차 모의 결과, 지하수 부존 지역에서 지열에너지 열교환 방식은 수직개방형이 적합한 것으로 판명되어, 2차 모의에서는 수직개방형의 최적 이용방식에 대하여 모의하였다. 본 모의에서는 수직개방형의 3가지 열교환 방식에 대하여 개념모델을 구축하고 유한요소 모델을 이용한 지하수 유동 및 열 이송 모의를 통하여 지하수 부존 지역에서 최적의 지열에너지 활용방식을 도출하고자 하였다.

#### 개념모델 및 경계조건 설정

모델영역은 모델의 효율성을 위해 최소화해야 하지만, 수직개방형 3가지 열교환 방식에서 주입/추출에 따른 영향범위를 고려하여야 한다. 영향범위 산정은 지열냉난방 시스템 운영기간에 맞추어 250 m<sup>3</sup>/day의 양수량으로 10년간 모의 시, 단일관정형, SCW형, 복수관정형에서 수평적인 모의영역은 900 × 900 m 이상이 유효할 것으로 판단되며, 수직영역은 관정 설정 심도(100 m)의 두 배 규모로 설정하였다. 이에 따라 모의영역은 1,000 × 1,000 × 200 m (x × y × z)로 설정하였다.

열교환 방식에 따른 개념모델 구축 시 입력 자료와 수직적인 지온경사는 1차 모의 시 자료와 동일하다(Table 1).

#### 열교환 방식에 따른 모델영역 설정

수직개방형 3가지 열교환 방식에 따른 관정 제원은 Table 4와 같다. 단일관정형의 경우 지표면 하부 20~100 m 구간에서 지하수가 양수되도록 추출정을 설정하였다. SCW형은 하부 80~100 m 구간에 스크린 및 수중펌프를 설치하여 지하수를 추출하고 20~40 m 구간에 주입하도록 설정하였으며, 복수관정형은 20~100 m 구간에서 주입 및 추출이 되고 관정간 이격 거리는 10 m로 설정하였다(Fig. 3).

또한, 2차 모의에서의 냉방과 난방 조건도 1차 모의

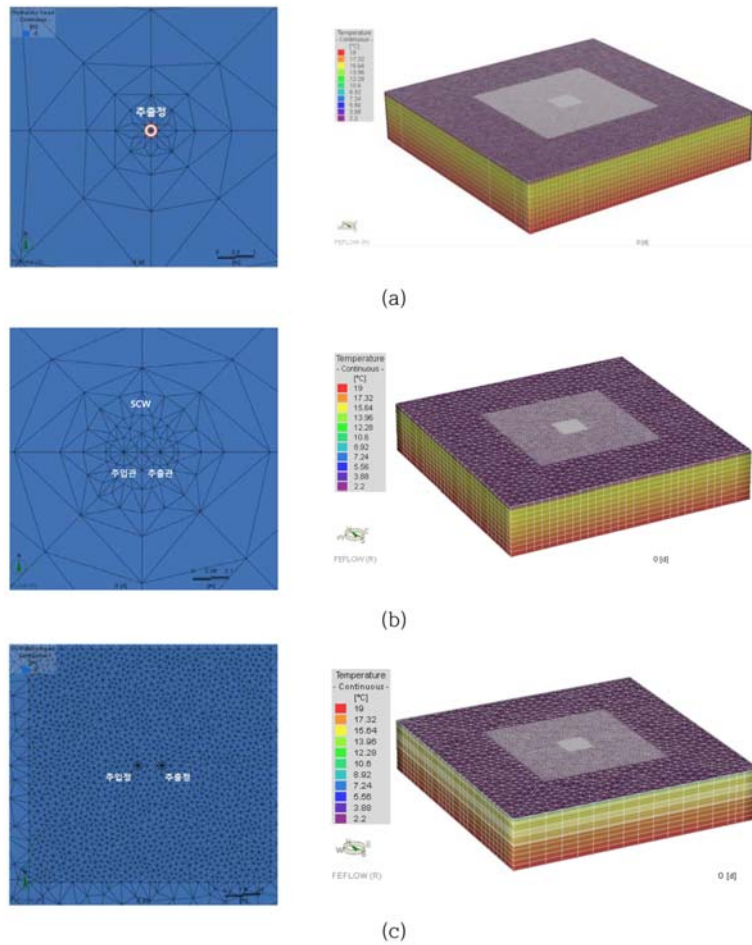


Fig. 3. Grid domain for the open type used in the FEFLOW simulator. On the left is a 2D finite element mesh and on the right a 3D finite element mesh for: (a) single well, (b) SCW, and (c) doublet.

에서의 동일하게 난방은 11월부터 다음해 4월까지 6개월 동안 2°C의 주입수를 주입하고, 냉방은 7~8월의 2개월 동안 35°C의 주입수를 지속적으로 주입하여 열교환이 이루어지도록 설정하여, 10년간 모의하였다.

**모의 결과**

2차 모의에서는 수직개방형의 3가지 방식에 대한 모의를 수행하였는데, 최적 이용방식을 찾기 위하여 열이송, 이격거리 및 유량, 지하수 수리경사에 대한 모의를 수행하고 결과를 비교해 보았다.

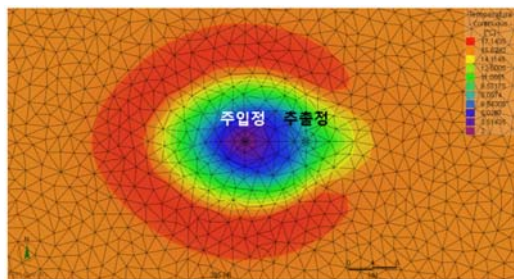
**열 이송 결과**

열교환 방식 중 단일관정형의 모의결과, 단일정의 추

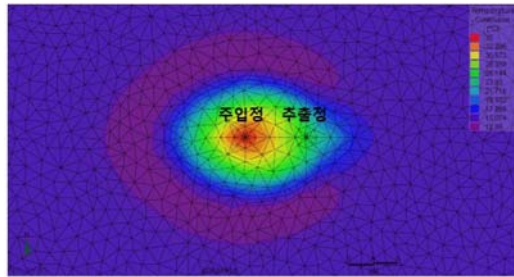
출온도는 지하수 온도인 15.3~15.9°C의 범위로 일정한 온도를 유지하며 양수되는 것으로 모의되었다. 향후 10년간 단일관정형 지열시스템을 운영할 경우 추출정의 온도변화는 1°C 미만으로 거의 일정한 것으로 나타났다. SCW형에 대한 모의 결과 난방모드의 경우 주입온도가 2°C일 때, 추출온도는 4.4°C로 지하수의 온도차는 2.4°C로, 냉방모드의 경우 주입온도가 35.0°C일 때, 추출온도는 30.4°C로 주입수와 추출수의 온도차는 4.6°C로 나타났다. 복수관정형에 대한 모의 결과 난방모드의 경우 주입정에서 2°C로 주입수를 주입할 때 추출정에서의 추출온도는 6.9°C로서 온도차는 4.9°C로, 냉방모드의 경우 주입정에서 35°C의 물을 주입할 때 추출정에서 추출온도는 22.8°C로서 온도차는 12.2°C로 모사되었다. 따라

**Table 5.** Comparison of simulation results obtained from the different well configurations.

Item		Injection temperature (°C)	Extraction temperature (°C)	Temperature differential (°C)
Single well	Heating	-	15.3~15.9	-
	Cooling	-	15.3~15.9	-
SCW	Heating	2	4.4	2.4
	Cooling	35	30.4	4.6
Doublet	Heating	2	6.9	4.9
	Cooling	35	22.8	12.2



(a)



(b)

**Fig. 4.** Simulation results of the doublet type model showing temperature distribution at 60 m depth: (a) heating mode (after 395 days) and (b) cooling mode (after 807 days).

서, 열 이송 면에서는 지하수의 온도가 그대로 추출되는 단일관정형의 효율이 가장 우수하며, 복수관정형, SCW형 순으로 나타났다. 그러나, 단일관정형은 지속적인 지하수 사용에 따른 지하수 고갈에 대한 우려가 제기된다 (Table 5).

Fig. 4는 복수관정형의 심도 60m에서 시간의 경과에 따른 지온 분포 평면도이다. Fig. 4(a)는 395일이 경과된 난방모드로서 주입정에 2°C의 지하수가 주입되었으므로 주입정에서 온도가 가장 낮으며, 이러한 순환수의 영향으로 주변의 온도가 낮아진 것으로 나타났다. 또한, 주입정의 영향을 벗어나 주변보다 높은 온도를 보이는 말발굽 모양의 온도 분포 영역은 여름에 냉방 시 주입

된 열이 남아 있기 때문에 생긴 결과이다. Fig. 4(b)는 807일이 경과된 냉방모드로서 주입정과 추출정을 중심으로 보면 주입정은 35°C의 지하수가 주입되었으므로 온도가 높은 반면, 추출정은 지속적인 양수로 인하여 상대적으로 온도가 낮으며 주변의 온도도 높지 않은 것으로 분석된다.

#### 이격거리 및 유량에 따른 결과

복수관정형의 경우, 주입정과 추출정의 이격거리가 멀수록 열에 의한 영향이 줄어들어 지중 열교환 효율은 증대될 것으로 예상된다. 또한, 주입/추출되는 유량에 따라 열교환 능력과 수위 변화 등 대수층에 미치는 영향이 다를 것으로 판단된다. 따라서, SCW형에서는 기존 유량 250 m<sup>3</sup>/day에 100, 150, 200 m<sup>3</sup>/day의 경우를 추가로 설정하여 모의를 수행하였다. 복수관정형은 공간격도 고려하여 이격 거리 10, 20, 30m에서 유량 100, 150, 200, 250 m<sup>3</sup>/day의 경우를 각각 설정하여 지열냉난방시스템 운영에 따른 모의를 수행하였다.

SCW형의 유량에 따른 모의결과, 유량이 증가함에 따라 주입수 및 추출수의 온도 차이는 냉방모드일 경우 6.0°C에서 4.6°C로 감소하였으며 난방모드의 경우 3.2°C에서 2.4°C로 감소하였다. 또한, 주입정과 추출정이 10m 이격된 복수관정형에 대한 모의결과, 유량이 증가함에 따라 냉방모드의 경우 16.3~12.2°C의 차이를 보이며 난방모드는 6.8~4.9°C로 온도변화 폭이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 유량이 증가함에 따라 추출정에서 주입수의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 이격거리 20m의 경우, 냉방모드 시 온도 차이는 유량이 증가함에 따라 18.2~16.4°C의 값을 보이며 난방모드의 경우 10.4~8.4°C의 온도차를 보인다. 주입정과 추출정이 30m 이격된 모델에서는 냉방모드와 난방모드에서 각각 19.0~18.3°C, 11.7~10.3°C의 온도 차이를 보인다. 즉, 복수관정형에서는 이격 거리가 증가할수록 온도차가 증



**Table 6.** Simulation results showing the effects of the flow rate and the distance between the injection and extraction wells on extraction temperature.

Item	Distance (m)	Rate (m <sup>3</sup> /day)	Heating		Cooling		Temperature differential (°C)	
			Injection temperature (°C)	Extraction temperature (°C)	Injection temperature (°C)	Extraction temperature (°C)	Heating	Cooling
SCW	-	100	2.0	5.2	35.0	29.0	3.2	6.0
		150		4.8		29.7	2.8	5.3
		200		4.6		30.3	2.6	4.7
		250		4.4		30.4	2.4	4.6
Doublet	10	100	2.0	8.8	35.0	18.7	6.8	16.3
		150		7.9		20.5	5.9	14.5
		200		7.3		21.8	5.3	13.2
		250		6.9		22.8	4.9	12.2
	20	100	2.0	12.4	35.0	16.8	10.4	18.2
		150		11.6		17.4	9.6	17.6
		200		10.9		18.0	8.9	17.0
		250		10.4		18.6	8.4	16.4
	30	100	2.0	13.7	35.0	16.0	11.7	19.0
		150		13.1		16.2	11.1	18.8
		200		12.7		16.4	10.7	18.6
		250		12.3		16.7	10.3	18.3

**Table 7.** Simulation results showing the effects of the flow rate and the hydraulic gradient on extraction temperature.

Item	Rate (m <sup>3</sup> /day)	Hydraulic gradient	Heating		Cooling		Temperature differential (°C)	
			Injection temperature (°C)	Extraction temperature (°C)	Injection temperature (°C)	Extraction temperature (°C)	Heating	Cooling
SCW	100	0	2.0	5.2	35.0	29.0	3.2	6.0
		0.01		5.5		28.8	3.5	6.2
	250	0	2.0	4.4	35.0	30.4	2.4	4.6
		0.01		4.6		30.3	2.6	4.7
Doublet (distance: 20 m)	100	0	2.0	12.4	35.0	16.8	10.4	18.2
		0.01		12.9		15.4	10.9	19.6
	250	0	2.0	10.4	35.0	18.6	8.4	16.4
		0.01		10.8		18.4	8.8	16.6

가해서 효율이 높아지며, 같은 이격거리의 100, 150, 200, 250 m<sup>3</sup>/day의 유량에서는 유량이 적을수록 온도차가 증가하는 것으로 모의되었다(Table 6).

#### 지하수 수리경사의 영향

2010년 9월~2012년 8월까지 연구지역에서 관측한 수위자료를 검토한 결과, 0.01의 수리경사가 있음을 확인하였다. 이러한 지하수 수리경사에 의한 영향을 파악하

기 위하여, 수리경사가 0.01인 경우를 모의하여 기존의 수리경사가 0인 경우와 비교하였다.

경계조건은 수리경사가 0.01이 되도록 지하수위를 0~10 m로 설정하였으며, 수리경사 방향은 주입정-추출정과 직각이 되도록 북쪽에서 남쪽 방향으로 흐르도록 설정하였다. 이는 지하수 흐름방향과 수직이 되도록 관정을 배열하는 것이 최적이라는 연구 사례를 적용한 것이다(Kim, 2011).

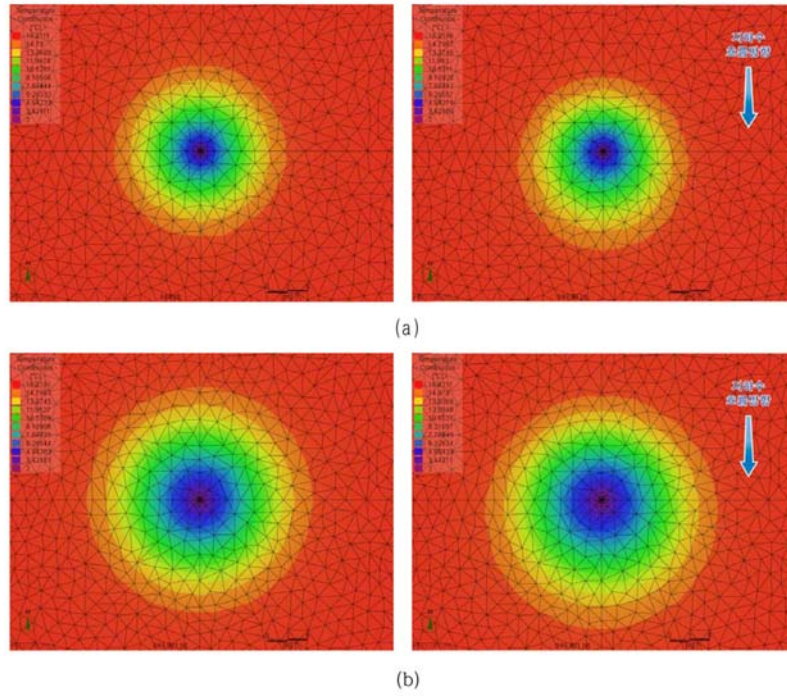


Fig. 5. Simulated temperature distribution at 60 m depth for the SCW model with a hydraulic gradient of 0 (left) and 0.01 (right): (a) flow rate 100 m<sup>3</sup>/day, (b) flow rate 250 m<sup>3</sup>/day (heating mode, after 850 days).

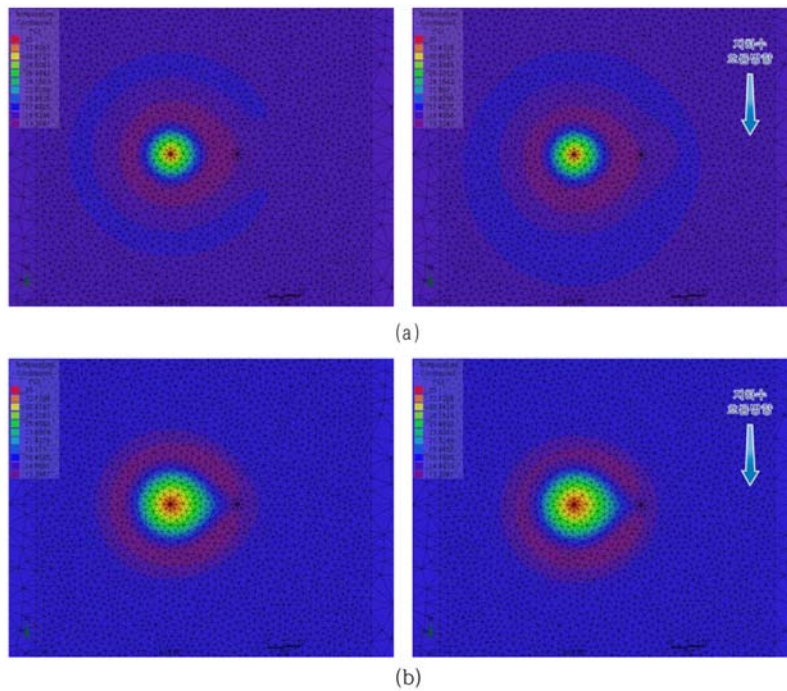


Fig. 6. Simulated temperature distribution at 60 m depth for the doublet model with a hydraulic gradient of 0 (left) and 0.01 (right): (a) flow rate 100 m<sup>3</sup>/day, (b) flow rate 250 m<sup>3</sup>/day (cooling mode, after 605 days).

모의 결과, SCW형 모의에서 유량이 100 m<sup>3</sup>/day인 경우 수리경사가 0.01일 경우를 0일 경우와 비교해 보면, 냉방모드 및 난방모드에서 추출온도의 변화는 0.2~0.3°C 효율이 증가하였다. 또한, 유량이 250 m<sup>3</sup>/day인 경우, 냉방모드 및 난방모드에서 추출온도의 변화는 0.1~0.2°C로 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 복수관정형의 경우, 수리경사가 없는 경우와 0.01일 경우의 주입/추출 온도차의 변화는 0.2~1.4°C로 수리경사가 있을 때 효율이 더욱 높은 것으로 나타났다. 그리고, 유량이 250 m<sup>3</sup>/day일 경우보다 100 m<sup>3</sup>/day일 경우에 수리 경사에 대한 효율이 더 높은 것으로 모의되었다(Table 7).

Fig. 5는 SCW형 난방모드의 심도 60m에서 수리경사에 따른 지온분포 평면도이다. 열교환에 따른 지온의 영향 범위는 양수시험에서 지하수 유량이 증가 시 영향 반경이 늘어나는 것과 같이 지온경사에서도 유량이 100 m<sup>3</sup>/day일 때보다 250 m<sup>3</sup>/day일 때 영향 범위가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 수리경사가 0일 경우는 지반과의 열교환에서 온도 분포가 등방성을 가지나, 수리경사가 0.01인 경우에는 지하수 흐름 방향으로 열적인 흐름도 발생하여 흐름방향으로 영향범위가 더 커지고 반대 방향으로로는 작아진 것으로 모의되었다. 복수관정형 난방모드의 수리경사에 따른 지온분포를 보여주는 Fig. 6에서도 동일하게 지하수 유량이 증가 시 영향 반경이 더 크게 나타나며, 수리경사에 따른 열적 흐름이 발생하는 것으로 모의되었다.

따라서, 지하수 수리경사는 열교환에 영향을 미쳐 지하수 흐름이 있는 곳에서는 효율이 더 높아지는 것으로 판명되었다. 이 결과는 지열공의 수직적인 흐름이 상대적으로 매우 큰 상태에서 나타난 결과이므로, 냉난방을 중단할 때에는 수직적인 흐름이 없으므로 효율이 더 커질 것으로 예상된다.

## 토의 및 결론

동일한 물성을 가지고 있는 지반에서 최적의 지열에너지 활용방식을 찾기 위하여 수치 모의를 수행하였다. 1차 모의 시 지하수 부존 지역에서 지열냉난방시스템을 활용할 때 수직밀폐형보다 지하수를 직접 이용하는 수직개방형이 더욱 효과적인 것으로 판명되었으며, 수직개방형 중에서는 SCW형 보다는 주입정과 추출정이 분리된 복수관정형이 더욱 효율적인 것으로 모의되었다.

2차 모의에서는 수직개방형 지열에너지 공급방식인 단일관정형, SCW형, 복수관정형을 대상으로 열 이송, 이

격거리 및 유량, 지하수 수리경사에 대한 모의를 수행하였다. 그 결과, 단일관정형은 물의 주입 없이 지중의 일정한 온도를 가진 지하수를 그대로 추출하므로 열적 효율은 가장 우수한 것으로 나타났으나 지하수를 양수함에 따라 수위강하가 발생하고 개발가능량을 초과하여 양수할 경우 지하수위 저하로 인한 지하수고갈, 지반침하 등의 문제를 야기할 우려가 있으므로 지하수 양수능력을 고려해야 한다. 또한, SCW형과 복수관정형 분석 결과, SCW형보다 복수관정형의 효율이 더 우수한 것으로 나타났다. 그리고, SCW형과 복수관정형에서 100, 150, 200, 250 m<sup>3</sup>/day으로 유량이 증가함에 따라 주입정과 추출정의 온도 차는 작아졌으며 복수관정형의 이격거리 10, 20, 30 m에서 거리가 멀수록 온도차가 크게 나타났다. 유량이 증가함에 따라 주입/추출되는 물의 온도차가 줄어드는 것은 수직적인 지하수의 흐름이 더욱 빨라지므로 지하매질과 열교환이 일어날 수 있는 시간이 단축되기 때문인 것으로 판단되고, 공간 이격거리가 멀어질수록 온도차가 크게 나타나는 것은 열간섭 현상이 줄어들어 효율이 높아진 결과로 판단된다.

지하수 흐름에 따른 지중 열교환 방식 모의 결과, 수리경사 0.01의 영향으로 0.1~1.4°C의 온도를 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 지하수 흐름이 존재할 경우, 지하수 흐름에 의한 이류(advection) 효과로 지중온도의 회복이 빠르게 나타나는 Nam (2011)의 결과와 일치한다.

본 연구의 모의 결과를 바탕으로 지열냉난방시스템의 지중 열교환 방식 선정 시 정성적인 기준에 대한 흐름도를 Fig. 7과 같이 제시하였다. 우선적으로 설치부지가 넓고 필요한 부하용량이 낮은 경우에는 수평밀폐형, 필요한 부하용량이 높은 경우에는 수직형 열교환 방식이 상대적으로 효과적인 것으로 판단된다. 또한, 수직형 열교환 방식 중에서는 대수층의 투수성 및 저류성이 낮은 경우 수직밀폐형이 상대적으로 적합하고, 보통인 경우는 SCW형이 효과적인 것으로 판단된다. 이와 더불어 대수층의 투수성 및 저류성이 높지만 지하수량이 작은 경우에는 복수관정형이 효과적이며 지하수 고갈, 지반침하 등의 우려 없이 지하수량이 풍부한 경우에는 단일관정형이 효과적인 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시된 선정 기준을 근거로 실제 선정 시에는 전체 지열냉난방시스템에 대한 COP (coefficient of performance) 계산 및 세부적인 타당성 검토가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한, 지열냉난방시스템은 지반과 열교환을 하면서 지반 및 지하수의 온도를 상승, 하강시켜 광물질의 용해, 집적 등 화학적인 변화와 미생물의 변화 등을 초

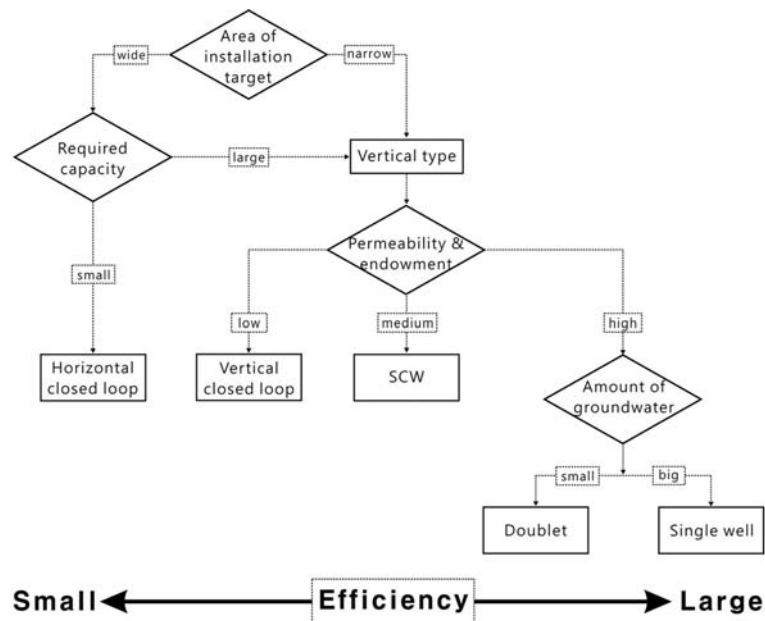


Fig. 7. Selection criteria according to heat exchange type for geothermal heating and cooling systems.

래할 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면 지열은 환경의 변화 없이 지속적으로 사용가능한 청정에너지가 될 것이다.

## 사 사

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(과제번호 114049-2)에 의해 이루어진 것임.

## References

- European Geothermal Energy Council (EGEC), 2009, Geothermal heat pumps - ground source heat pumps, Retrieved from <http://egec.info/wp-content/uploads/2011/01/EGEC-Brochure-GSHP-2009.pdf>.
- Hahn, J. S., 1999, Groundwater environment and contamination, Pakyoungsa, 85p (in Korean).
- Hahn, J. S., Hahn, H. S., Hahn, C., Kim, H. S., and Jean, J. S., 2006, Design guidelines of geothermal heat pump system using standing column well, *Economic and Environmental Geology*, 39(5), 607-613 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. C. and Lee, Y. M., 2007, Heat flow in the Republic of Korea, *Journal of Geophysical Research*, 112, B05413, doi:10.1029/2006JB004266.
- Kim, H. S., 2011, Optimal well array for high performance system design of ATEs, MSc Thesis, Kongju National University, 45p (in Korean with English abstract).
- Kim, J. H., Park, J. H., Kim, Y. Y., Park, S. Y., Kim, Y. H., and Lee, J. M., 2006, A practical study on the ground heat pump with standing column well, Ministry of Commerce Industry and Energy, 2004-N-GE11-P-01, 124-147 (in Korean).
- Kim, J. S. and Kong, H. J., 2011, Overview of ground heat exchanger on standing column well type, *Geothermal Energy Journal*, 7(1), 6-12 (in Korean).
- Kim, J. S., Song, S. H., and Jeong, G. C., 2013, Thermal conductivity from an in-situ thermal response test compared with soil and rock specimens under groundwater-bearing conditions, *The journal of Engineering Geology*, 23(4), 389-398 (in Korean with English abstract).
- Korea energy management corporation (KEMCO), 2014, 2014 Energy statistics handbook, 130-131 (in Korean).
- 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(2), 193-199 (in Korean with English abstract).
- Lee, C. H., Park, M. S., Min, S. H., Choi, H. S., and Sohn, B. H., 2010, Evaluation of performance of grouts and pipe sections for closed-loop vertical ground heat exchanger by in-situ thermal response test, *The journal of Korean Geotechnical Society*, 26(7), 93-106 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1560-1568.
- 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, *Geoscience Journal*, 10(1), 91-99.
- Nam, Y. J., 2011, 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*, 23(5), 321-326 (in Korean with English abstract).
- Nordic Energy Research, 2005, Ground source cooling, EU Commission SAVE Programme & Nordic Energy Research, 21p.
- Park, S. G., In, N. S., Song, Y. S., Oh, J. N., Jeon, B. K., Lee, S. I., and Yang, D. J., 2006, Research of two-well type ground water heat pump system, Ministry of Commerce Industry and Energy, 2004-N-GE11-P-02, 73-105 (in Korean).
- Shim, B. O. and Lee, C. W., 2010, Status of underground thermal energy storage as shallow geothermal energy, *Economic and Environmental Geology*, 43(2), 197-205 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. H. and Lee, Y. M., 2006, Status and outlook of geothermal energy exploitation technologies, The Korean Society for New And Renewable Energy 2006 Fall conference, 20-23 (in Korean with English abstract).

**김진성**

한국농어촌공사 농어촌연구원  
426-908 경기 안산시 상록구 해안로 870  
Tel: 031-400-1851  
Fax: 031-400-1616  
E-mail: gwater@ekr.or.kr

**차장환**

(주)지오그린21  
152-719 서울 구로구 디지털로 33길 55  
Tel: 02-6330-2546  
Fax: 02-6330-2557  
E-mail: jhcha9364@gmail.com

**송성호**

한국농어촌공사 농어촌연구원  
426-908 경기 안산시 상록구 해안로 870  
Tel: 031-400-1723  
Fax: 031-400-1794  
E-mail: shsong@ekr.or.kr

**정교철**

안동대학교 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-822-5467  
E-mail: jeong@anu.ac.kr