

지하수류가 밀폐형 천공 지중열교환기 성능에 미치는 영향(1)

한정상^{1*} · 한 찬² · 윤운상³ · 김영식³

¹(주)한서엔지니어링

²(주)지오그린

³(주)넥스지오

An Influence of Groundwater Flow on Performance of Closed Borehole Heat Exchangers (Part-1)

Jeong Sang Hahn^{1*} · Chan Hahn² · Yun Sang Yoon³ · Young Seek Kiem³

¹Hans Engineering Co., Ltd (GDE)

²GeoGreen. Ltd.

³Nexgeo Inc.

ABSTRACT

To analyze the influence of various groundwater flow rates (specific discharge) on BHE system with balanced and unbalanced energy loads under assuming same initial temperature (15°C) of ground and groundwater, numerical modeling using FEFLOW was used for this study. When groundwater flow is increased from 1×10^{-7} to 4×10^{-7} m/s under balanced energy load, the performance of BHE system is improved about 26.7% in summer and 22.7% at winter time in a single BHE case as well as about 12.0~18.6% in summer and 7.6~8.7% in winter time depending on the number of boreholes in the grid, their array type, and bore hole separation in multiple BHE system case. In other words, the performance of BHE system is improved due to lower avT in summer and higher avT in winter time when groundwater flow becomes larger. On the contrary it is decreased owing to higher avT in summer and lower avT in winter time when the numbers of BHEs in an array are increased, Geothermal plume created at down-gradient area by groundwater flow is relatively small in balanced load condition while quite large in unbalanced load condition. Groundwater flow enhances in general the thermal efficiency by transferring heat away from the BHEs. Therefore it is highly required to obtain and to use adequate informations on hydrogeologic characteristics (K, S, hydraulic gradient, seasonal variation of groundwater temperature and water level) along with integrating groundwater flow and also hydrogeothermal properties (thermal conductivity, seasonal variation of ground temperatures etc.) of the relevant area for achieving the optimal design of BHE system.

Key words : BHE (borehole heat exchanger), Balanced energy load, Unbalanced energy load, avT (average geofluid or loop temperature), locT (local ground temperature)

1. 서 언

천공 지중열 교환기(Borehole heat exchanger, BHE, 지중열교환기)는 지열에너지 이용을 위한 가장 일반적인 시스템이다. BHE의 열교환과 열적효능은 지중매체인 수문지열계의 유효열전도도에 따라 좌우된다. 유효열전도도는 ① 전도성(conductive) 열전달을 나타내는 해당 수문지

열계의 용적 열전도도(bulk thermal conductivity)와 ② 지하수의 이류성(advective) 열전달을 등가(等價)의 열전도로 환산한 지하수류(advection or forced convection, 또는 地下水移流)에 의한 용적 열전도도와 같은 두 성분으로 이루어져 있으며(Johansen, 1977 and Sanner et al., 2005), 간혹 겉보기 열전도도(apparent thermal conductivity)라고도 한다(Banks, 2010). 지하수 유동량(이류)의

*Corresponding author : jshahn@jejunu.ac.kr

Received : 2016. 4. 11 Reviewed : 2016. 5. 23 Accepted : 2016. 6. 8

Discussion until : 2016. 8. 31

기본값으로 비배출량(specific discharge, Darcian velocity, q)을 사용하는데 이는 해당 수문지질계의 평균 수리전도도에 동수구배를 곱한 값이다(Hahn et al., 2000). 지하수의 유동은 BHE의 열전달능(heat transfer capacity)에 상당한 영향을 미치기 때문에 BHE의 설계심도와 설치비용을 절감시킬 수 있는 일종의 중요한 설계인자이다(Wang et al., 2013). 그럼에도 불구하고 대다수의 BHE 설계는 지하수 유동이 없다는 가정 하에 실시하기 때문에 이는 매우 불합리한 설계방식이다. 따라서 BHE 설계는 설계초기부터 해당지역의 지하수 유동특성을 면밀히 파악한 후 이를 BHE설계에 반영하여 시스템의 열적 및 경제적인 지속성을 확보할 수 있도록 해야 한다.

지하수가 유동하지 않는 곳에 설치된 단일 BHE의 경우에는 지하수유동에 의한 BHE 사이에 발생하는 열간섭 현상은 고려하지 않아도 되므로 설계단계에서부터 지하수 유동 영향이 이미 감안된 유효 열전도도를 사용해도 무방하다. 그러나 여러 개의 BHE로 구성된 다중 BHE [BHE 配列場(field)]의 경우에 단순한 유효열전도도를 사용하면, BHE 사이에 발생하는 열간섭 현상을 정확히 파악할 수 없고 특히 지하수의 이류와 그 유동방향에 따라 형성되어 변경되는 열운(熱雲, geothermal plume)의 규모와 열시스템의 성능변화 예측은 불가능하다.

BHE 사이의 이격거리는 열지질학(熱地質學, thermal geology)과 시스템의 특성에 따라 결정되는 변수로서 다중 BHE 사이에 발생하는 열적인 간섭현상은 장단기적으로 BHE 시스템의 열적성능을 저해하는 부(-)의 요인이 된다(He, 2012). 투수성이 양호한 수문지질계에서 비배출량은 유효 지중열전도도를 증가시키는 역할을 하기 때문에 지하수류에 의한 열이동량은 무시할 수 없는 요소이다(Chiasson et al., 2000).

Dehkordi et al., (2015)은 지하수유동은 BHE 배열형식에 비해 지중순환수 온도를 안정시키는데 상당히 큰 역할을 한다고 하였다. Ferguson(2015)은 밀폐형 지중열교환기 시스템에서 지하수의 유동은 지중열전달에 상당히 큰 영향을 미치기 때문에 지중열전달의 주 기작이 순수열전도인지 아니면 지하수의 이류에 의해 발생하는지를 선별하는 방법으로 해당 수문지질계의 Peclet 수와 비배출량을 사용하는 방법을 제시하였다.

Dehkorli and Schincariol(2014)등이 열적 및 수리지질학적인 지중매체 특성에 대한 민감도분석을 실시한 바에 의하면 BHE 운영기간 동안 BHE의 효율과 영향에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 지하수 유동량의 지시자인 비배출량(q)이며 동시에 지중온도를 차후에 회수(비배출량

$> 10^{-8}$ m/s)하는 경우에도 동일하다고 하였다. 지하수와 상호작용을 하는 다중 BHE의 경우에 BHE와 전체 시스템의 열적성능에 영향을 주는 열간섭 현상은 서로 밀접한 관련이 있다.

대다수의 건물들은 계절별 에너지 요구량이 다른 즉 냉난방부하가 서로 다른 불균형 열에너지 부하(unbalanced load)이다. 지중온도의 변화는 주변 환경과 생태계에 나쁜 영향을 미칠 수도 있기 때문에(Markle and Schincariol, 2007) 불균형 에너지 부하를 사용하는 경우, 밀폐형 다중 BHE 시스템의 열적부하를 인위적으로 균형 에너지 부하가 되도록 조절하면 지중순환수와 지중온도가 과도하게 교란될 수 있다.

이 논문은 지하수 유동과 BHE의 배열형식(수, 간격, 배치형식, 지하수 유동방향과의 각도)에 따라 발생하는 열적인 간섭현상 등이 천공과 다중 BHE 시스템의 전체 성능에 미치는 영향을 수치모델링을 실시하여 검토하였다.

2. 지하수류가 BHE 성능에 미치는 영향 규명을 위한 방법과 모의

열전도와 지하수의 이류에 의한 지중열 전달식을 이용하여 수문지질계 내에서 지중열에너지가 이동하는 열에너지 이동량을 수식으로 표현하면 아래 식과 같다.

$$-\nabla[-K \text{ grad } T + n c_f \rho_f T V] = \rho' c' \frac{\partial T}{\partial t}$$

위 식에서 K , n , ρ_f , c_f 가 일정하고 지하수의 흐름이 정류일 경우 ($\nabla \cdot V = 0$)에 지중에서 순수한 열전도와 지하수의 유동에 의해 열에너지가 이동되는 (열전도 + 지하수류) 모델의 지배 식을 1차원적으로 간단히 표현하면 다음 식 (1)과 같다

$$\frac{K}{\rho' c'} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{n \rho_f c_f}{\rho' c'} V_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서 왼쪽의 첫 항은 열전도에 의해 이동한 열에너지양을, 둘째 항은 지하수이류에 의해 이동한 열에너지양을 뜻한다. 이들 식들은 지중매체와 유동유체인 지하수 온도가 동일하다는 가정에 근거를 두고 있으며 식 (1)에서 V_x 는 x 방향의 지하수의 평균선형유속(average linear velocity)이고 비배출량(q)는 $q = nV$ 이며, $K/\rho' c'$ 는 열분산계수(thermal diffusivity, α)이다.

식 (1)에서 지하수 유속(V_x)이 0인, 즉 무흐름 영역에서 순수한 열전도에 의해 지열이 전달되는 열이동식은 다음

식과 같이 Fourier 법칙에서 규정하고 있는 순수한 열전도식이 된다.

$$\frac{K}{\rho'c'} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

수문지열학적인 관점에서 지중매체의 용적 열용량과 용적 열전도도(유효 열전도도)는 다음과 같이 표현한다(Hahn et al., 2010; Hahn and Hahn, 2015).

$$\rho'c' = n\rho_f c_f + (1-n)\rho_s c_s \quad (3)$$

$$K = nK_f + (1-n)K_s \quad (4)$$

여기서 수문지열계의 물리적인 특성이 온도와 관련이 있는 경우에 위 식에서 사용한 변수의 기호와 단위는 아래와 같다.

c : 비열용량 kcal/(kg · k)

c' : 용적비열용량 kcal/(kg · k)

n : 공극률

K : 열전도도 kcal/(m · hr · k)

K' : 용적열전도도 kcal/(m · hr · k)

V : 지하수 유속(공극 또는 평균선형유속) m/s

q : 비배출량(Specific discharge 또는 Darcian velocity) m³/s/m²; m/s : $q = n \times V$

ρ : 밀도 kg/m³

ρ' : 용적밀도 kg/m³

아래첨자 f : 지하수(fluid)

아래첨자 s : 매체(solid)인 수문지열계

본 연구에 사용한 전산프로그램은 완전 밀도류와 오염물질거동 및 지중열 거동코드이면서 3차원 유한요소법을 이용한 FEFLOW이다.

2014년에 개발 보급된 FEFLOW는 천공 지중 열교환기(BHE)에 사용하는 ①지중루프 파이프의 구경, 두께, 간격, 배열방식 및 열전도도, ②지중순환수(geofluid)의 각종 물성과 유량, ③BHE를 설치한 지중매체의 열물성과 공극률, ④수문지열계에서 이동하는 지하수의 열적 특성과 유동을 및 지하수 온도, ⑤지중매체의 지중온도 등을 모두 고려하여 BHE 주변 수문지열계에서 지하수류(advection)와 열전도(conduction)에 의한 열이동식의 해를 구하는데 사용할 수 있는 최신 지하수유동-지중열전달 전산프로그램으로서 여기서 사용한 BHE 해는 Eskilson and Claesson (1988)의 해석학적인 방법을 토대로 하여 Diersch et al. (2010), Diersch et al.(2011a), Diersch et al.(2011b)이

개발한 3차원 전산프로그램이다.

Eskilson and Claesson(1988)법에서 사용하고 있는 바와 같이 지표면 온도에 의한 영향은 무시하며, 평균 지중매체의 배경온도와 평균 지하수온도는 15°C로 가정하였다.

Table 1은 이 모델에 사용한 HDPE pipe로 이루어진 지중열교환기인 BHE의 특성과 기타 관련 변수(천공, 지중순환수, 지하수, 지중매체 및 그라우트제 등)들의 단위와 적용한 값들이다. 초기에 비배출량(q)이 0(지하수가 유동하지 않는 무흐름 조건)인 경우와 비배출량이 각각 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s(지하수가 유동하는 조건)일 때 균형 에너지 부하(balanced energy load)와 불균형 에너지 부하(unbalanced energy load)를 사용했을 경우, 단일 BHE로부터 도출된 결과를 다중 BHE 모의 결과와 비교하는 기준으로 사용하였다. 모델에서 지하수 유동장(flow field)은 균일하며 무흐름 경계($q=0$)에 직각방향으로 두개의 평행한 고정 수두경계(constant head boundary condition)를 설정하였다.

Fig. 1은 초기 첫해 동안 지중으로 방열 및 추출한 균형 및 불균형 에너지 부하를 경시별로 나타낸 것으로서 계절별로 적용한 이 형태의 열에너지 부하변동은 모의 기간인 20년 동안 매년 동일하게 반복토록 하였다.

균형 에너지 부하 모의시 1년 중 6개월간은 동일한 크기의 열추출과 열방열이 일어나도록 했으며, 불균형 에너지 부하 모의시에는 최악의 조건을 가산하여 1년 12개월 동안 지중열을 추출하는 것으로 가정하였다(Fig. 1). 상술한 균형 및 불균형 열에너지 부하를 지중에 주입 및 추출하는 경우에 최대 단위 m당 열추출/주입률은 60 W/m로 일정하게 적용하였다(Fig. 1).

BHE의 배열방식은 단일(1×1), (3×1) 및 (3×3) 형태의 3가지를 사용하였으며 상술한 3가지 배열방식에 따라 균형 및 불균형 에너지 부하 형태로 지중열에너지를 추출 및 방열할 경우에 비배출량(q)이 각각 0, 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s일 때의 5가지 경우별 결과를 모의하였고, 단일 BHE[(1×1)인 경우]로부터 도출된

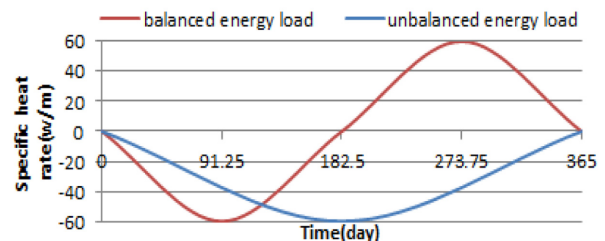


Fig. 1. The balanced and unbalanced energy loads applied to BHE field in the simulations.

Table 1. Values of BHE and ground material properties used in all models

Parameter		Unit	Value	Remarks
Bore hole	Depth	m	100	
	Diameter	m	0.15	6 in.
Loop pipe of BHE (HDPE)	Configuration	type	B	
	Spacing	m	0.075	Distance of BHE : 3 inch.
	Diameter (OD)	m	0.0334	SDR-11 dia. : 1¼ inch.
	Thickness	m	0.003	pipe (In) = Pipe (Out)
	Thermal K	J/(m · s · k)	0.39	
Geofluid (circulation loop fluid)	Dynamic viscosity	kg/(m · s)	0.52×10^{-3}	
	Thermal K	J/(m · s · k)	0.48	
	Volumetric heat capacity	J/(m ³ · k)	4.0×10^6	
	Density	kg/m ³	1,052	
	Flow rate	m ³ /d	25	
Ambient groundwater	Thermal K	J/(m · sk)	0.65	0.55 kcal/(mhk)
	Volumetric heat capacity	J/(m ³ · k)	4.2×10^6	602 kcal/(m ³ k)
	Temperature	°C	15	Annual mean
Ground materials	K	J/(m · s · k)	3	Fissured crystalline rocks
	Porosity		0.2	
	α L	m	5	Fissured crystalline rocks
	α T	m	0.5	"
Grout	Thermal K	J/(m · s · k)	1.5	20% + 40% qtz, Tgrout Lite
	Volumetric heat capacity	J/(m ³ · k)	2.52×10^6	
Initial ground temperature		°C	15	

결과를 다중 BHE 모의 결과와 비교하는 기준으로 사용하였다. 또한 BHE 사이에 발생하는 열간섭 현상을 파악하기 위해 지하수 유동방향과 천공배열의 장축방향이 같은 방향(평행하도록)이 되도록 설정하여 천공간의 열간섭 현상이 최대로 일어나도록 하였다. 모의시 사용한 BHE사이의 이격거리는 6m를 기준으로 했지만 천공간격에 따른 영향을 분석하기 위해 9m와 12m를 추가로 사용하였다.

모델영역의 규모는 500 m × 500 m인 장방형의 균질 등방매체로서 모델영역의 남북방향으로 고정수두경계를 설정하였고, 해당 지중매체의 평균 수리전도도와 평균 동수구배 및 비산출률은 각각 10^{-4} m/s, 0.001 및 0.2인 자유면 수문지열계로서 평균 두께는 100 m이며 초기수위는 EL 0 m이다. 지하수가 유동하지 않는 지역(순수한 열전도에 의해 열에너지가 전달되는 지역)에서 연중 지속적으로 평형 에너지 부하를 지중으로 가하는 경우에 연중 전체 열추출량과 열방열량은 이론적으로 동일하다. 따라서 각 BHE에서 측정된 연간 경시별 평균 지중순환수 온도(average geofluid or loop temperature, 이하 avT라 한다)의 변동은 동일한 형태로 반복된다. 그러나 지하수 유동 지역에서는 전지에 비해 연중 비교적 일정한 온도를 유지하는 지하수가 모의 영역내로 추가적으로 유입되므로 연

간 경시별 avT는 지하수의 무흐름지역과는 달리 다른 형태를 나타낸다. 즉 하절기에 지중으로 방열하는 다소 높은 온도의 지중순환수는 15°C의 일정한 온도를 유지하고 있는 지하수가 모의 영역 내에서 유입되므로 이의 영향을 받아 avT는 다소 하강하고 반대로 지중열을 추출하는 동절기에 저온의 지중순환수는 유동 지하수의 온도의 영향을 받아 avT 다소 상승하는 등, 전반적으로 지하수 유동은 무흐름지역에 비해 BHE 성능을 향상시키는 역할을 한다. 이러한 사실을 규명하기 위하여 BHE의 배열방식, 지하수류의 유류, 열에너지 부하의 방식 등이 지중순환수 온도변화에 미치는 영향을 연구하였다. 이 연구를 위해 Table 2와 같이 총 84종의 시나리오별로 모의를 실시하여 그 결과를 분석하였다.

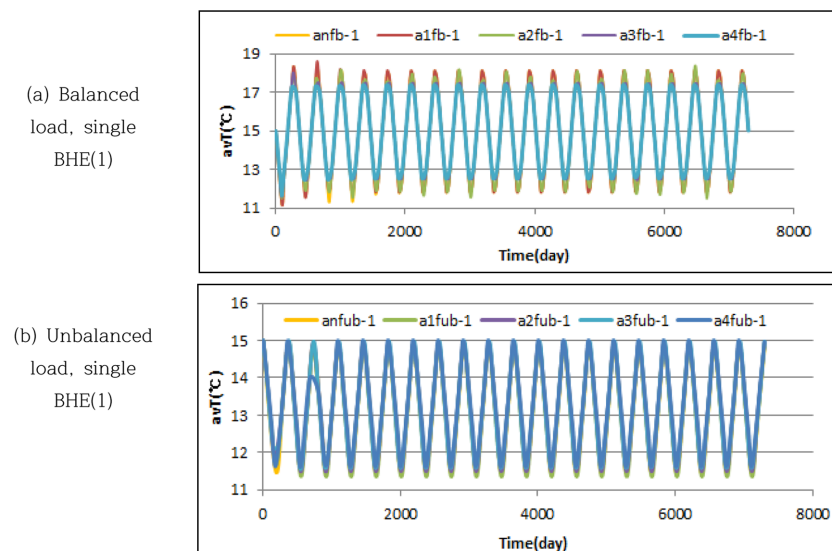
3. 모의결과 및 고찰

전술한 바와 같이 모의 영역에서 지하수의 유동량은 비배출량으로 표현하였고 비배출량은 무흐름, 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s 등 5가지 유동량을 사용하였다. 모델영역에서 지하수는 북쪽경계에서 남쪽경계 방향으로 즉 북에서 남으로 유동한다. 지하수 유동방향과

Table 2. Summary of simulation combinations (array type, specific discharge, spacing of BHE, direction of BHE array to ambient groundwater flow)

BHE array type	Specific discharge	BHE spacing	Thermal energy load	Array direction to groundwater flow	No. of scenarios	Symbols
(3 × 3)	5	3	2	par.	30	a3fb-60-(3 × 3)-6
(3 × 1)	5	3	2	par.	30	anfb-60-(3 × 1)-12
	5	1	2	per.	10	a2fub-60-(3 × 1)L-9
(1)	5	—	2	par.	10	anfub-1
Remarks	0, 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} , 4×10^{-7} m/s	6 m, 9 m, 12 m	Balanced, Unbalanced	par.:Parallel Per.:perpendicular	84	4 cases of different T_g and T_0

Note : a2fub-60-(3 × 1)L-9 means 2×10^{-7} m/s of specific discharge of groundwater (a2f) under unbalanced load (ub), with 60 W/m of thermal energy load (60) applied to (3 × 1) BHE array with 9 m spacing between BHEs. L indicates that BHE array is right angle to ambient groundwater flow direction.

**Fig. 2.** Average geofluid (loop) temperatures of single BHE (1) in balanced energy load (a) and unbalanced energy load (b) under various specific discharge conditions (0 , 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} and 4×10^{-7} m/s).

동일한 북에서 남쪽방향으로 3개의 BHE를 1열 형식으로 설치한 (3 × 1)배열의 BHE장(場, field)에서 BHE장의 최상류구간에 소재한 BHE공은 BHE-1, 중심부에 소재한 공은 BHE-2, 최하류 구간에 소재한 공은 BHE-3로 명명하였다. 또한 BHE-1공의 상류쪽으로 적정한 이격거리 (6~12 m)를 두고 설치된 관측지점은 OBS-1, BHE-3의 하류쪽에 적정한 이격거리를 두고 설치된 관측지점 (6~12 m)은 OBS-2로 명명하였다(단, 단일 BHE의 경우는 1개공 뿐이므로 이 공은 BHE-2에 해당한다). 모의에 사용한 BHE 설치간격은 6 m, 9 m 및 12 m를 사용하였다.

지중에 방열 또는 추출하는 열에너지의 부하방식과

BHE 배열형식에 따라 지하수가 전혀 유동하지 않는 무흐름($q=0$) 상태일 경우의 순수열전도모델과 지하수가 유동하는 경우의 열전도-지하수이류 모델, BHE의 설치간격, BHE의 배열방향 등이 BHE 시스템 성능에 미치는 영향을 모의를 통해 분석하였다.

3.1. 지하수 유동이 BHE 시스템 성능에 미치는 영향

3.1.1. 단일(1) BHE 배열인 경우

단일(1) BHE는 천공 지중열교환기를 1개만 설치한 경우로서 주변에 인접한 BHE가 없기 때문에 인접 BHE에 의한 공간 열간섭이나 다른 BHE에 의해 생성된 열운에

Table 3. Mean values of avT in summer and winter time of balanced energy load and in winter time of unbalanced energy load under various specific discharges in case of single (1) BHE system

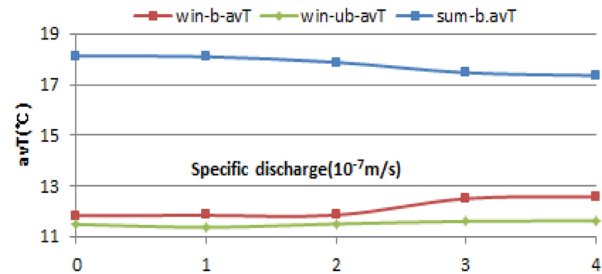
q (10^{-7} m/s)	b-sum-avT (°C)	b-win-avT (°C)	ub-win-avT (°C)
0	18.13	11.83	11.48
1	18.10	11.84	11.37
2	17.88	11.85	11.50
3	17.47	12.50	11.60
4	17.36	12.58	11.62
ΔT (°C)	-0.83	0.72	0.14
IP (%)	26.7	22.7	4.0

* IP : Increment of BHE performance

의한 열간섭 현상은 고려하지 않아도 된다. 따라서 순수한 지하수 유동이 BHE 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 단일 BHE를 이용하여 분석하는 것이 가장 효과적인 방법이다. Fig. 2는 Table 1에서 언급한 물성과 동일한 HDPE loop pipe를 설치심도가 100m인 단일 천공 지중열 교환기에 균형 및 불균형 에너지 부하를 20년간 가하는 경우, 비배출량이 각각 0 , 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s로 변환 때, 지하수 유동량 증가에 따른 단일(1) BHE의 지중루프 내에서 흐르는 지중순환수(geofluid)의 경시별 avT들을 모의한 결과이다. Fig. 2의 (a)는 균형 에너지 부하일 때의 avT이며 (b)는 불균형 에너지 부하일 때의 avT이다. 균형부하 시 비배출량이 증가하면 하절기의 avT는 하강하고, 동절기의 avT는 상승하여 BHE시스템의 성능은 향상된다. 불균형 부하시는 연중 지중열을 추출하는 경우로 가정했기 때문에 동절기의 avT는 Fig. 2의 (b)에서 나타난 바와 같이 비배출량이 증가하면 avT는 상승한다.

Table 3은 비배출량이 0에서 단계적으로 4×10^{-7} m/s까지 증가할 때, 평형 에너지 부하시 하절기와 동절기의 평균 avT와 불균형 에너지 부하시 동절기의 평균 avT를 Fig. 2에서 구하여 작성한 표이다. Fig. 3은 Table 3에 제시된 비배출량과 평균 avT 사이의 관계를 도시한 그림으로서 이에 의하면 균형 에너지 부하시 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 하절기 avT(b-sum)는 18.13°C에서 17.36°C로 약 0.83°C 정도 감소하고, 동절기의 avT(b-win)는 11.83°C에서 12.58°C로 약 0.72°C 정도 상승하며, 또한 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)는 균형 에너지 부하시의 avT 보다는 다소 낮은 11.48°C에서 11.62°C로 약 0.14°C 정도 상승한다.

이와 같이 비배출량이 증가하면 즉 지하수 유동량이 증

**Fig. 3.** Average geofluid temperatures (avT) in summer time (b-sum-avT) and winter time (b-win-avT) of balanced energy load and avT in winter season (ub-win-avT) of unbalanced energy load under various specific discharges.

가하면 BHE시스템의 성능은 향상된다. 모의 대상 지역의 평균 지중온도와 지하수온도를 15°C로 가정했기 때문에 균형 에너지 부하시 하절기에 지중방열을 통해 상승한 avT는 약 3.13°C(18.13-15)이고 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가할 경우에 하강한 avT는 0.83°C이다.

따라서 이 값을 단순히 BHE 시스템의 성능을 향상시킨 지시자로 사용하면 균형 에너지 부하시 하절기 시스템 성능은 약 26.7%(0.83/3.13) 정도 향상되고, 동절기에는 약 22.7%(0.72/(15-11.83)) 정도 향상되며, 불균형 부하시 동절기에는 약 4%(0.14/(15-11.48)) 정도 향상된다.

즉 단일 BHE 시스템에서 지하수 비배출량이 1×10^{-7} m/s 정도 증가될 때마다 BHE 시스템의 성능향상률은 균형 에너지 부하시 하절기에는 6.7%, 동절기에는 약 5.7%, 불균형 에너지 부하시 동절기에는 1% 향상되는 것으로 예측되었다.

3.1.2. 다중 BHE 배열 [(3 × 1)-6배열과 (3 × 3)-9배열]인 경우

Fig. 4는 Table 1에 제시한 물성과 동일한 HDPE loop pipe를 설치심도가 100m이며 BHE 사이의 공간 거리가 6m인 3개의 BHE를 1열로 설치한 (3 × 1)배열에서 균형 및 불균형 에너지 부하를 20년간 지중에 가하는 경우, 비배출량이 각각 0 , 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s로 증가할 때, 지하수 유동량이 증가함에 따라 (3 × 1)-6 BHE장의 중심에 위치한 (BHE-2)의 지중루프 내에서 흐르는 지중순환수의 경시별 avT를 나타낸 그림이다. Fig. 4에서 (a)는 균형 에너지 부하인 경우이고 (b)는 불균형 에너지 부하인 경우이다.

Fig. 5는 동일한 규격과 동일한 설치 심도를 갖는 HDPE loop pipe를 BHE 사이의 공간 거리가 각각 9m인 9개의 BHE를 장방형으로 설치한 (3 × 3)-9배열에서

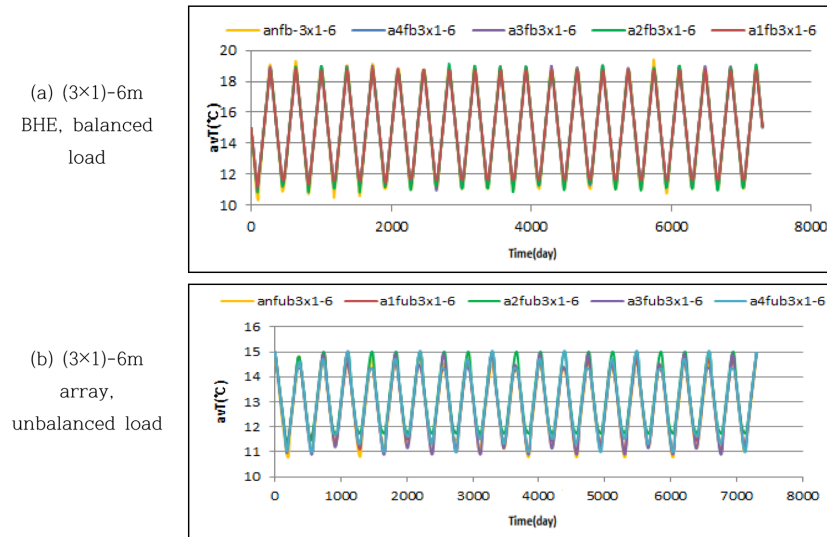


Fig. 4. Average geofluid temperatures (avT) of (3 × 1)-BHE array with 6 m separation in the balanced (a) and unbalanced energy load (b) under various specific discharge conditions (0 , 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} , and 4×10^{-7} m/s).

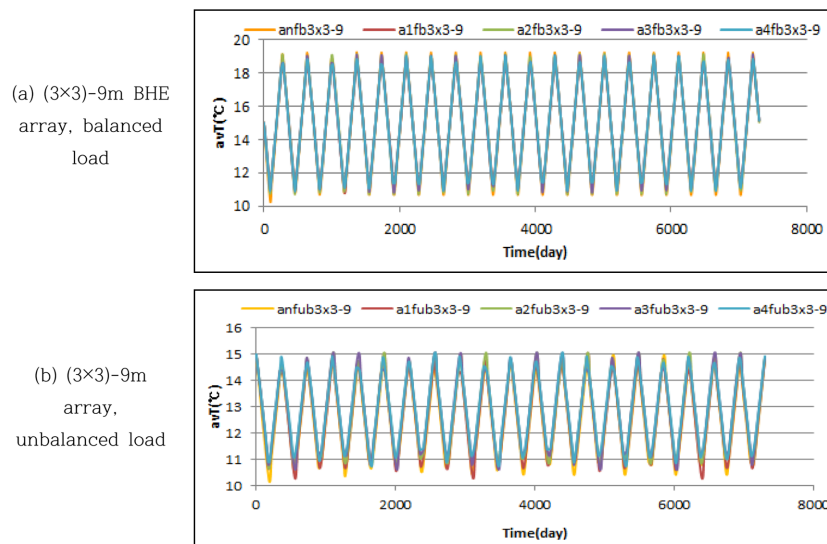


Fig. 5. Average geofluid temperatures (avT) of (3 × 3)-BHE array with 9 m spacing in the balanced (a) and unbalanced energy load (b) under various specific discharge conditions (0 , 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} , and 4×10^{-7} m/s).

균형 및 불균형 에너지 부하를 20년간 지중에 가하는 경우, 비배출량이 각각 0 , 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s로 증가할 때, 지하수의 유동량 증가에 따라 (3 × 3)-9 BHE장의 중심에 위치한 지점의 지중루프 내에서 순환하는 지중순환수의 경시별 avT이다.

Fig. 5에서 (a)는 균형 에너지 부하인 경우이고 (b)는 불균형 에너지 부하인 경우이다, Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)에서 균형 에너지 부하시 지하수의 비배출량이 증가하면 하절기의 avT는 하강하고, 동절기의 avT는 상승한다.

불균형 에너지 부하는 연중 지중열을 추출하는 경우

로 가정했기 때문에 동절기의 avT는 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서 나타난 바와 같이 비배출량이 증가할수록 avT는 상승한다. 이와 같이 다중 BHE 배열의 경우에도 전술한 단일(1) BHE와 마찬가지로 지하수의 비배출량이 증가하면 BHE 시스템의 성능은 향상된다.

Table 4는 비배출량이 0에서 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s까지 순차적으로 증가할 때, 평형 에너지 부하시 하절기와 동절기의 평균 avT와 불균형 에너지 부하시 동절기의 평균 avT를 Fig. 4의 (3 × 1)-6-BHE장에 제시된 경시별 avT로부터 선별하여 요약한 표이다.

Table 4. Mean values of avT in summer and winter time of balanced energy load and in winter time of unbalanced energy load under various specific discharges

Load type	Array	Time	Specific discharge (10^{-7} m/s)					ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	IP (%)
			0	1	2	3	4		
Balanced	(3×1) -6	Summer	19.06	18.98	18.93	18.87	18.3	-0.76	18.7
		Winter	11.00	11.15	11.25	11.30	11.35	0.35	8.7
	(3×3) -9	Summer	19.21	18.95	18.84	18.8	18.7	-0.51	12.1
		Winter	10.7	10.88	10.87	11.03	11.07	0.33	7.6
Unbalanced	(3×1) -6	Winter	11.10	11.15	11.50	11.20	11.30	0.20	5.1
	(3×3) -9	Winter	10.57	10.68	10.80	10.95	11.05	0.48	1.1

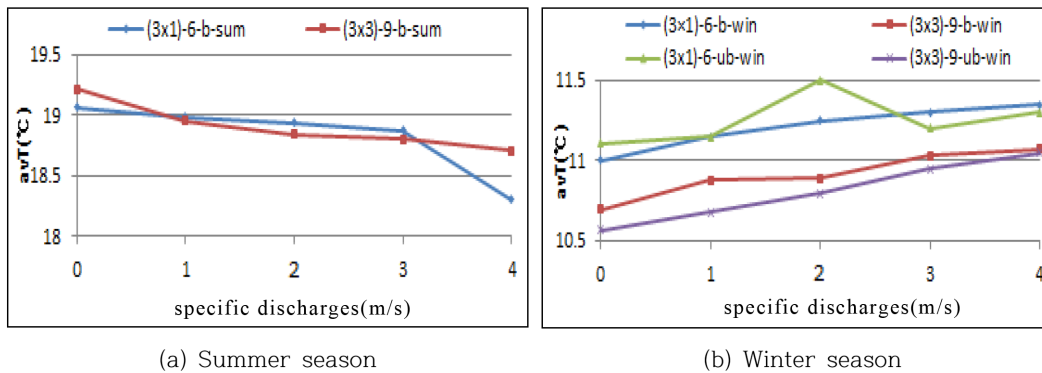
**Fig. 6.** avT in summer (b-sum) and winter time (b-win) of balanced energy load and one in winter time (ub-win) of unbalanced energy load under various specific discharges.

Fig. 6은 Table 4의 값을 이용하여 비배출량과 평균 avT사이의 관계를 도시한 그림이다. Fig. 6(a)는 균형 에너지 부하를 가하는 경우에, (3×1) -6배열과 (3×3) -9배열에서 하절기에 비배출량 증가에 따른 avT의 변동을 나타낸 곡선이다.

이에 의하면 비배출량이 증가하면 전반적으로 avT는 하강하기 때문에 환언하면 비배출량이 증가하면 BHE 성능은 향상된다. Fig. 6(b)는 (3×1) -6배열과 (3×3) -9배열에서 균형 에너지 부하시 동절기 avT(b-win)와 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)를 도시한 그림이다.

Table 4와 Fig. 6(a)와 (b)에 의하면 (3×1) -6배열인 경우, 하절기의 균형 에너지 부하시 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 avT(b-sum)는 19.06°C 에서 18.3°C 로 약 0.76°C 감소하고, 동절기의 avT(b-win)는 11.0°C 에서 11.35°C 로 약 0.35°C 상승하며, 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)는 11.1°C 에서 11.3°C 로 약 0.2°C 상승한다. 이와 같이 지하수 유동량인 비배출량이 증가하면 BHE 시스템의 성능은 향상된다.

(3×3) -9배열의 경우에, 하절기의 균형 에너지 부하시 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 avT(b-sum)는

(3×1) -6배열의 avT보다 다소 높은 19.21°C 에서 18.7°C 로 약 0.51°C 감소하고, 동절기의 avT(b-win)는 10.7°C 에서 11.07°C 로 약 0.33°C 상승하며, 또한 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)는 10.57°C 에서 11.05°C 로 약 0.48°C 상승한다. 이와 같이 비배출량이 증가하면 즉 지하수 유동량이 증가하면 BHE 시스템의 성능은 역시 향상된다.

비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가할 때, 하절기에 하강한 avT와 동절기에 상승한 avT를 이용하여 BHE 시스템의 성능향상 예측용 지시인자로 사용하면 비배출량 증가로 인한 BHE의 성능은 (3×1) -6배열인 경우에 균형 에너지 부하시 하절기에 약 18.7%, 동절기에 약 8.7%, 불균형 에너지 부하시 동절기에 약 12.1% 향상되며, (3×3) -9배열인 경우에 균형 에너지 부하시 하절기에 약 7.6%, 동절기에 약 5.1%, 불균형 에너지 부하시 동절기에 약 1.1% 향상되는 것으로 모의되었다.

이를 단위 비배출량 증가에 따른 BHE 시스템의 성능향상률로 표현하면 (3×1) -6 BHE 시스템인 경우, 지하수 비배출량이 1×10^{-7} m/s 증가될 때마다 BHE 시스템의 성능향상률은 균형 에너지 부하시 하절기에 4.7%, 동절기

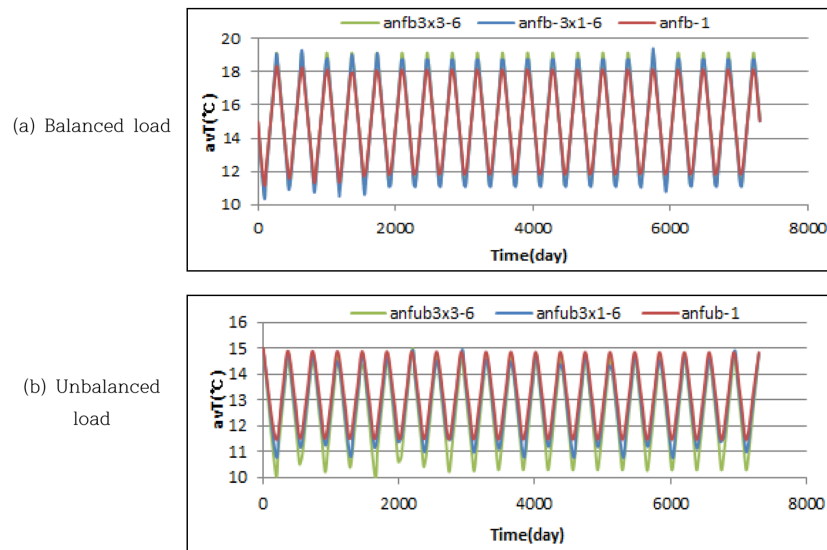


Fig. 7. Average geofluid temperatures (avT) in single (1), (3 × 1) and (3 × 3)-BHE array with 6 m BHE separation, under the balanced energy load (a) and the unbalanced energy load (b) and no groundwater flow ($q=0$).

Table 5. Mean avT in summer and winter season of balanced energy load and in winter season of unbalanced energy load under 3 array types along with differences of avT between multiple BHE array to single BHE array

Energy load	Season	Array type and avT (°C)			Difference between array (1) & others
		Single (1)	(3 × 1)-6	(3 × 3)-6	
Balanced	Summer	18.13	19.06	19.15	0.93/1.12
	Winter	11.83	11.0	11.28	-0.83/-0.55
Unbalanced	Winter	11.48	11.10	10.29	-0.38/-1.19

에 약 2.2% 그리고 불균형 에너지 부하시 동절기에 3%이며, (3 × 3)-9 BHE 시스템의 성능향상률은 균형 에너지 부하시 하절기에 1.9%, 균형 에너지 부하시 동절기에 약 1.3% 그리고 불균형 에너지 부하시 동절기에는 0.27%이다.

3.2. 순수 열전도 모델($q=0$)에서 BHE 수(BHE 배열형식)가 시스템 성능에 미치는 영향

$q=0$ 인 경우는 지하수가 유동하지 않는 무흐름 영역이므로 이 영역은 전적으로 지중매체의 열전도에 의해서만 열에너지가 전달되는 순수열전도 모델의 경우이다. 모의 결과 도출된 BHE-2의 평균 avT를 시스템 성능조건에 대한 일종의 지시자로 사용하였다. 초기 지중온도와 지하수 온도를 15°C로 설정했기 때문에 지중매체와 열에너지 부하 사이에 발생한 열교환은 지중매체에 전달된 에너지 부하로 재현된다. 일반적으로 하절기의 avT는 지중에 방열하는 열에너지 부하로 인해 상승하고, 동절기의 avT는 지중 열 추출로 인해 하강한다. 즉, 동일한 에너지 부하를 지중

매체에 가했을 때 초기 지중온도에 비해 avT는 서로 다르게 변동한다. 이러한 avT의 차는 전반적으로 시스템 성능이 감소되었거나 또는 성능이 개선되었음을 의미한다.

Fig. 7은 순수한 열전도($q=0$)에 의해서만 지중열에너지가 이동하는 지역에 단일(1) BHE, 3개공의 BHE로 이루어진 (3 × 1)-직선배열과 9개공의 BHE로 구성된 (3 × 3)-장방형 배열형식의 지중열교환기 시스템에서 20년간 균형 및 불균형 에너지 부하를 가했을 경우에 모의된 경시별 avT이며 Table 5는 이를 요약한 내용이다.

3.2.1. $q=0$, $d=6$ m인 경우, 단일(1), (3 × 1) 및 (3 × 3) 배열에서 균형 에너지 부하시

순수한 열전도($q=0$)에 의해 열에너지가 이동하는 지역에 상술한 3가지 배열형식의 지중열교환기 시스템에 20년간 균형 에너지 부하를 적용했을 경우에 모의된 avT를 토대로 BHE 시스템의 성능을 비교하였다. Fig. 7(a)은 BHE 간격이 모두 6 m이고, 지하수류가 없는 지역($q=0$)에 설치된 상술한 3가지 BHE 배열장(BHE field)에서 지중

열을 균형 에너지 부하 형식으로 20년간 지중에 방열 및 추출한 경우에 BHE 배열장 중심부에 소재한 BHE-2에서의 avT이다. 이에 의하면 BHE의 수가 많아질수록 하절기의 avT는 상승한다. 즉 지중열 방열시에 (3×3)배열의 중심점에 소재한 BHE-2에서 하절기의 avT는 주변에 소재한 인접한 BHE에 의해 열간섭을 받아 단일 BHE의 avT에 비해 1.12°C 상승하고, (31)배열인 경우에는 단일 BHE의 avT에 비해 0.93°C 상승한다. 즉 (3×3)배열은 단일 BHE에 비해 시스템 성능은 약 27% [$1.12/(19.15-15)$] 저하하고 (31)배열은 약 22.9% [$0.93/(19.06-15)$] 저하한다. 또한 균형 에너지 부하시 동절기의 지중열 추출 기간 동안에는 BHE의 수가 많아질수록 avT는 하강한다. 즉 지중열 추출시에 (3×3)배열의 중심점에 소재한 BHE-2에서 하절기의 avT는 주변에 소재한 인접한 BHE에 의해 열간섭을 받아 단일 BHE의 avT에 비해 평균 0.55°C 하강하고 (31)배열인 경우에는 단일 BHE의 avT에 비해 평균 0.83°C 하강하여 단일 BHE에 비해 시스템 성능은 각각 13.4%와 20% 저하한다.

이는 지하수흐름이 무흐름상태인 경우에 BHE의 수가 많아질수록 인접 BHE의 열추출로 인한 부(-)의 열간섭을 받기 때문이다. $q=0$ 인 무흐름상태에서 균형 에너지 부하를 장기간 지중에 가하는 경우에는 BHE의 성능은 단일 BHE가 가장 양호하고 BHE의 수가 많아질수록 저하된다. 대체적으로 단일 BHE의 경시별 avT는 균형 에너지 부하시 하절기에 약 18.13°C 범위를 유지하며, 동절기에는 약 11.83°C를 유지하면서 매년 거의 같은 형태로 반복 변동하고, 배열별 온도변동은 빠르게 정상상태에 도달한다.

3.2.2. $q=0$, $d=6$ m인 경우, 단일(1), (3×1) 및 (3×3) 배열에서 불균형 에너지 부하시

Fig. 7(b)는 $q=0$ 이고 $d=6$ m인 3가지의 BHE 배열장에 불균형 에너지 부하를 20년간 지중에 가한 경우, 각 배열 형식 별로 BHE배열 중앙에 소재한 BHE-2지점에서 모의한 경시별 avT이다.

불균형 에너지 부하는 연간 지중열을 추출하는 경우로만 가정했기 때문에 BHE-2의 avT는 지중열 추출로 인해 모두 연평균 지중온도인 15°C 이하로 하강하며 BHE의 수가 증가할수록 배열별 최저 avT는 하강하는 경향을 보여 시스템 성능이 저하함을 잘 나타내고 있다. 즉 동절기에 (3×3)배열의 avT는 단일 BHE의 avT에 비해 평균 1.19°C 더 하강한다. Fig. 7의 (a)와 (b)를 비교해 보면 전반적으로 지중에 불균형 에너지 부하를 가하는 경우에는 균형 에너지 부하에 비해 avT는 설치한 BHE의 개수

에 따라 차이가 있긴 하지만 (3×3)배열인 경우에 하절기에는 19.15°C에서 15°C 미만으로 약 4°C 이상 하강하고, 동절기에는 11.28°C에서 10.29°C로 약 0.99°C 하강한다.

Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 동절기에 (3×1)배열의 avT는 (3×3)배열의 avT보다 높아 (3×3)배열에 비해 양호한 시스템 성능임을 나타내고 있다. 이러한 문제는 (3×3)배열의 BHE 간격을 6 m 이상으로 넓혀 주면 이를 해소할 수 있을 것이다.

3.2.3. $q=0$, $d=6$ m, 에너지 부하 방식과 BHE 배열형식이 시스템 성능에 미치는 영향

지하수가 유동하지 않는 지역에서 균형 및 불균형 열에너지 부하를 가하는 경우에 BHE의 수가 증가하면, 인접 BHE의 개수 증가로 인해 발생하는 열간섭 영향 때문에 하절기에는 avT가 상승하고 동절기에는 avT가 하강하여 시스템 성능은 저하한다. 그러나 BHE의 경시별 avT의 변동은 매년 거의 일정한 형태로 반복한다(Fig. 7).

불균형 열에너지 부하시 20년간 시스템을 가동하면, 동절기에 (3×1)배열의 avT는 단일 BHE에서의 avT에 비해 약 0.38°C 하강하는데 비해, (3×3)배열은 전반적으로 약 1.19°C 하강한다(Fig. 7(b)와 Table 5). 환언하면 BHE의 수가 증가하면 avT도 하강한다. 즉 준 평형상태에 도달하는 시간은 길어지며 시스템 성능은 감소한다.

이들 모의 결과에 의하면 BHE의 초기 천공간격이 6 m 일 때, 에너지 부하 형식에 무관하게 BHE 시스템은 BHE 사이에 발생하는 열적간섭 현상을 받아 시스템의 성능은 저하한다. 이와 같은 효율성 감소는 BHE수를 변경하던가 BHE 배열방식을 변경시키므로 줄일 수 있다. 천공간의 열간섭 현상을 감소시키기 위해서는 천공간격을 넓히거나 BHE의 설치심도를 증가시키는 방법 등이 있다.

3.3. BHE 배열형식과 지하수유동이 시스템 성능에 미치는 영향

지하수가 유동하는 지역에서 지하수 유동량인 비배출량이 각각 0에서 1×10^{-7} , 2×10^{-7} , 3×10^{-7} 및 4×10^{-7} m/s로 증가하는 경우에 지중 에너지 부하 방식과 BHE 배열형식 등이 avT에 미치는 영향을 분석하였다. 이전의 연구조사 결과들을 살펴보면 avT에 가장 명확하게 영향을 주는 기본적인 초기 비배출량은 1×10^{-7} m/s이다 (Ferguson, 2015).

Choi et al.(2013)에 의하면 BHE 배열방향을 지하수 유동방향과 동일하게 직선형으로 설치하면 장방형 BHE 배열에 비해 보다 민감한 반응을 보인다고 하였다. 이 연

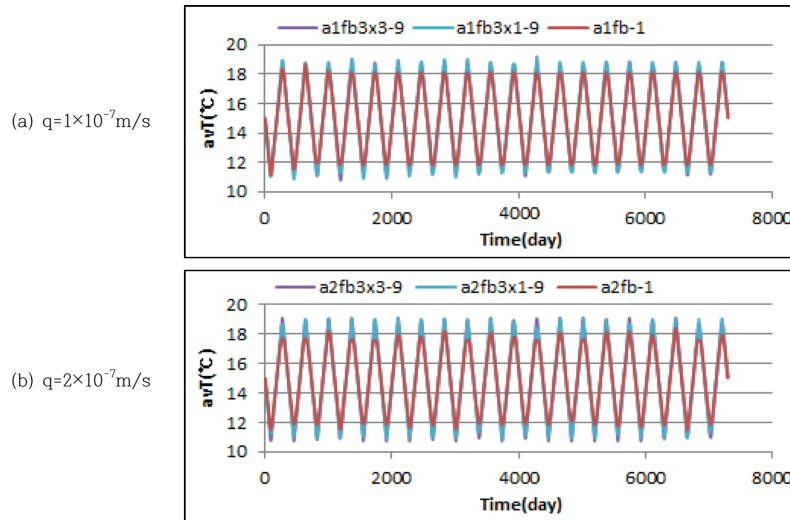


Fig. 8. Average geofluid temperatures (avT) in 3 types of BHE array, under the balanced energy load with 9 m BHE separation and various specific discharges.

구에서 사용한 지하수 유동방향은 장방향 배열인 경우에는 장축방향과 동일하게, 그리고 직선형 배열인 경우는 직선 배열방향과 동일하게 설정하여 열간섭 영향을 가장 많이 받는 최악의 상태를 가정하였다. 그러나 지하수 유동방향이 BHE 배열방향과 직각인 경우에는 지하수 유동에 의해 형성되는 열운(geothermal plume, 熱雲)에 의한 BHE간의 열간섭 현상은 발생하지 않는다. 지하수 유동과 냉난방 부하 사이의 관계를 알아보기 위해 비배출량이 1×10^{-7} m/s일 경우에 균형 에너지 부하와 불균형 에너지 부하 상태에서 단일 BHE에 미치는 영향을 모의한 후, 비배출량이 0일 때의 결과와 비교하여 BHE 배열이 각각 (3×1) 과 (3×3) 형식인 경우에 미치는 영향을 검토하였다. 이 경우에도 지하수 유동과 연계해서 BHE 배열방식이 시스템의 성능에 미치는 영향을 비교할 때 단일 BHE의 모의 결과를 비교기준으로 사용하였다. 본 모의를 위해 BHE사이의 공간 거리(d)는 9 m를 사용하였으며, 단일(1), (3×1) 과 (3×3) 배열 등 3가지의 배열에서 비배출량이 각각 0에서 4×10^{-7} m/s로 5단계 증가하는 경우에 균형 및 불균형 에너지 부하별로 모의된 경시별 avT 곡선에서 하절기와 동절기의 평균 avT를 구하여 도표화한 결과는 Table 6과 같다. 상술한 5가지의 비배출량 가운데 대표적인 비배출량으로 1×10^{-7} m/s과 2×10^{-7} m/s을 선택하여 균형 에너지 부하와 불균형 에너지 부하시의 경시별 avT를 도시한 결과는 각각 Fig. 9와 Fig. 10과 같다. Fig. 11은 Table 6에 제시된 avT를 이용하여 비배출량 증가에 따른 균형 및 불균형 에너지 부하시 계절별 avT의 변동 특성과 시스템 성능분석을 위해 작성한 관계도이다.

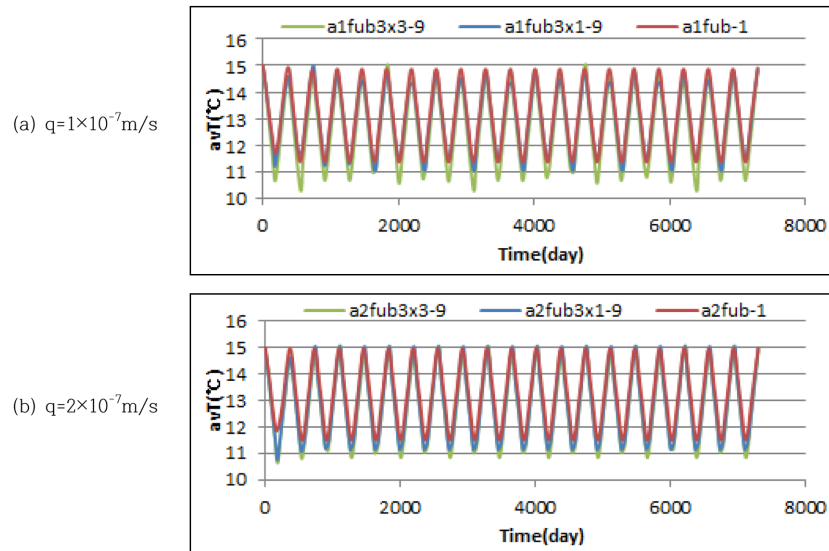
3.3.1. 균형 에너지 부하

Fig. 8은 단일(1), (3×1) 및 (3×3) 배열에서 BHE 간격이 9 m이며, q가 각각 1×10^{-7} m/s 및 2×10^{-7} m/s 일 때, 균형 에너지 부하를 지중에 가한 경우에 BHE장 중심 부에 소재한 BHE-2에서 모의된 avT이다.

Fig. 8(a)는 q가 1×10^{-7} m/s일 경우이고, Fig. 8(b)는 q가 2×10^{-7} m/s일 경우로서 기타 조건들은 모두 q가 1×10^{-7} m/s의 경우와 동일한 조건이다. Table 6는 균형 에너지 부하시의 경시별 avT 곡선인 Fig. 8의 계절별 평균 avT와 불균형 에너지 부하시의 경시별 avT 곡선인 Fig. 9의 계절별 평균 avT를 추출하여 요약한 표이다. 모의 결과에 의하면 지중에 열을 방열하는 하절기에 비배출량이 1×10^{-7} m/s 일 때 단일 BHE와 (3×1) 배열 및 (3×3) 배열의 중심점의 avT는 Table 6과 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 각각 18.1°C, 18.82°C 및 18.95°C로 증가하며 동절기의 avT는 각각 11.84°C, 11.15°C 및 10.88°C로 감소한다. 비배출량이 2×10^{-7} m/s인 경우는 Table 6과 Fig. 8(b)와 같이 단일 BHE, (3×1) 배열 및 (3×3) 배열의 중심점에서 하절기의 avT는 각각 17.88°C, 18.80°C과 18.84°C로 증가하고, 동절기의 avT 각각 11.85°C, 11.17°C 및 10.89°C로 감소한다. BHE의 개수가 가장 많은 (3×3) 배열의 avT가 다른 두 배열의 avT에 비해 하절기에는 높고 동절기에는 낮아 시스템 성능은 가장 불량하다. 이는 BHE수가 증가하면 지하수의 유동으로 형성된 열운과 인접 BHE간에 발생한 공간 열간섭 현상으로 인해 BHE 시스템 성능은 저조해지는 현상을 잘 재현하고 있다(Table 6). 균형 에너지 부하시, 동절기의

Table 6. Simulated avT (°C) relevant to types of BHE array with 9 m BHE separation under balanced and unbalanced load conditions and various specific discharges after 20 years operation

Load	Array	Season	Specific discharge (10^{-7} m/s)					ΔT (°C)
			0	1	2	3	4	
Balanced	(1)	Summer	18.13	18.10	17.88	17.47	17.36	-0.77
	(1)	Winter	11.83	11.84	11.85	12.53	12.58	0.75
	(3 × 1)-9	Summer	19.00	18.82	18.80	18.71	18.60	-0.40
	(3 × 1)-9	Winter	11.10	11.15	11.17	11.30	11.41	0.31
	(3 × 3)-9	Summer	19.21	18.95	18.84	18.80	18.70	-0.51
	(3 × 3)-9	Winter	10.70	10.88	10.89	11.03	11.07	0.37
Un-balanced	(1)	Summer	14.88	14.87	14.96	14.98	14.99	-
	(1)	Winter	11.48	11.37	11.50	11.60	11.66	0.18
	(3 × 1)-9	Summer	14.65	14.60	14.96	14.74	14.46	-
	(3 × 1)-9	Winter	11.20	11.30	11.15	11.20	10.93	0.27
	(3 × 3)-9	Summer	14.56	14.60	14.75	14.68	14.74	-
	(3 × 3)-9	Winter	10.57	10.68	10.80	10.85	11.05	0.48

**Fig. 9.** Average geofluid temperatures (avT) in various BHE array types with 9 m BHE separation under the unbalanced energy load and various groundwater flow.

avT는 BHE의 배열형식이 단일 BHE에서 (3 × 1)배열과 (3 × 3)배열로 감에 따라 즉 BHE의 개수가 증가함에 따라 비배출량이 1×10^{-7} m/s일 때는 11.84°C, 11.15°C 및 10.88°C로 하강하고 비배출량이 4×10^{-7} m/s일 때는 12.58°C, 11.41°C 및 11.07°C로 감소하여 BHE장을 구성하고 BHE의 수가 증가할수록 BHE의 성능은 저하된다. 그러나 동일한 BHE 배열에서 지하수 유동량인 비배출량이 증가하면 시스템의 성능은 양호해 진다.

즉 균형 에너지 부하를 지중에 가하는 경우에 비배출량이 1×10^{-7} m/s에서 4×10^{-7} m/s으로 증가하면 하절기의 avT는 배열형식에 따라 차이가 있긴 하지만 약 0.40~

0.77°C 감소하고 동절기의 avT는 0.31~0.75°C 상승하여 시스템의 성능은 개선된다(Table 6).

현재 BHE 설계에 적용하고 있는 기존의 이론들은 대 다수가 순수한 전도형 열전달을 토대로 하고 있다. 균형 에너지 부하이면서 비배출량이 1×10^{-7} m/s 미만인 경우에는 지하수류에 의해 형성된 열운이 하류구간에 소재한 BHE 지점에 미치는 열간섭 영향은 크지 않으므로 이를 BHE 설계에 적용해도 큰 무리는 없다.

3.3.2. 불균형 에너지 부하

Fig. 9는 단일(1), (3 × 1) 및 (3 × 3)배열에서 BHE간격

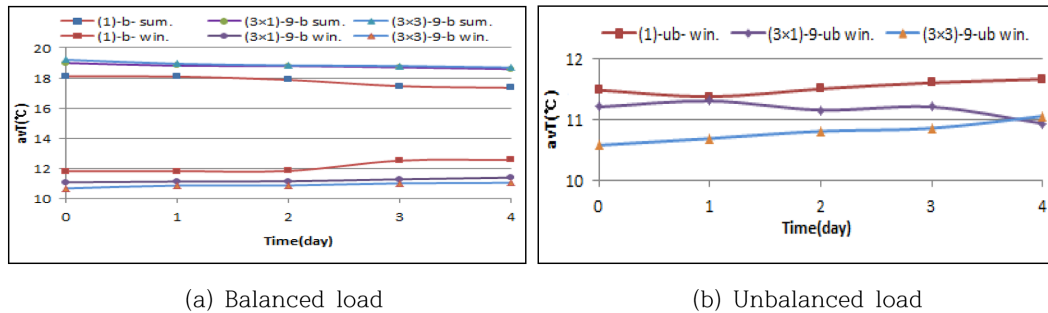


Fig. 10. Average geofluid temperatures (avT) at summer time (b-sum) and winter time (b-win) in balanced energy load and avT at winter time (ub-win) in unbalanced energy load under various specific discharges.

이 9m이며, 비배출량이 각각 1×10^{-7} m/s 및 2×10^{-7} m/s일 때, 불균형 에너지 부하를 지중에 가한 경우, BHE 장 중심부에 소재한 BHE-2에서 모의된 avT이다. Fig. 9에서 (a)는 q 가 1×10^{-7} m/s일 경우의 경시별 avT 곡선이고, (b)는 q 가 2×10^{-7} m/s일 경우이다.

Table 6과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 불균형 에너지 부하를 적용하는 시기는 연중 지중열을 추출만하는 최악의 경우로 가정했기 때문에 하절기의 avT는 동절기에 난방원으로 추출된 지중열이 영역내로 유입되는 15°C의 지하수와 15°C의 지중온도로 인해 회복되는 시기이다. 따라서 이 시기에 영역내로 유입되는 지하수의 비배출량이 $1 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7}$ m/s일 경우에 하절기의 avT는 15°C에 근접한 (14.78 ± 0.21)°C를 유지한다. 동절기는 지중열을 추출하는 시기이므로 이 시기에 단일 BHE의 avT는 비배출량에 따라 11.48~11.66°C로 하강하며, 9개의 BHE로 구성된 (3x3)배열의 avT는 단일 BHE의 avT보다 더 낮은 10.57~11.05°C로 하강하여 BHE의 수가 많아질수록 시스템 성능은 저하한다. 그러나 불균형 에너지 부하시에 도 동일한 배열을 사용하는 경우에 지하수 유동량이 증가할수록 avT는 상승하여 시스템 성능은 향상된다.

이들 두 모의결과에 의하면 지하수가 유동하는 영역 즉 열전도와 지하수 이류가 동시에 열전달을 지배하는(열전도+지하수류) 모델에서 하절기의 avT는 영역내로 유입되는 지하수의 영향을 받아 모두 평균 지하수온도인 15°C에 근접한 온도를 유지한다. 이에 비해 동절기의 avT는 설치된 BHE의 개수가 많아질수록 avT는 하강한다. 즉 비배출량이 1×10^{-7} m/s일 때, (3x3)배열의 avT는 단일 BHE와 (3x1)배열의 avT에 비해 가장 낮은 10.68°C의 온도를 유지한다. 그러나 일반적으로 지하수 유동량이 증가하면 Fig. 6과 Fig. 9와 같이 동절기의 avT는 상승한다.

Fig. 10(a)는 균형 에너지 부하시, 단일 BHE와 (3x1)-6배열 및 (3x3)-9배열에서 하절기와 동절기에 비배출량

증가에 따른 avT의 변동 곡선이다. 이에 의하면 비배출량이 증가하면 하절기에는 전반적으로 avT는 하강하고 동절기에는 상승하기때문에 환언하면 비배출량이 증가하면 BHE 성능은 향상된다. Fig. 10(b)는 단일 BHE와 (3x1)-9배열 및 (3x3)-9배열에서 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)를 도시한 그림이다.

Table 6와 Fig. 10(a)와 (b)에 의하면 ① 단일 배열인 경우, 하절기의 균형 에너지 부하시 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 avT(b-sum)는 18.13°C에서 17.36°C로 약 0.77°C 감소하고, 동절기의 avT(b-win)는 11.83°C에서 12.58°C로 약 0.75°C 상승하며, 또한 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)는 11.48°C에서 11.66°C로 약 0.18°C 상승한다. 이와 같이 지하수 유동량인 비배출량이 증가하면 BHE시스템의 성능은 향상된다. ② (3x1)-9배열인 경우, 하절기의 균형 에너지 부하시 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 avT(b-sum)는 19.0°C에서 18.6°C로 약 0.4°C 감소하고, 동절기의 avT(b-win)는 11.1°C에서 11.41°C로 약 0.31°C 상승하며, 또한 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)는 다소 불규칙하게 변동하나 11.2°C에서 11.3°C로 약 0.1°C 상승한다. 이와 같이 지하수 유동량인 비배출량이 증가하면 BHE시스템의 성능은 향상된다. ③ (3x3)-9배열의 경우에, 하절기의 균형 에너지 부하시 비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 avT(b-sum)는 3.1.2에서 언급한 바와 같이 약 0.51°C 감소하고, 동절기의 avT(b-win)는 약 0.37°C 상승하며, 또한 불균형 에너지 부하시 동절기의 avT(ub-win)는 약 0.48°C 상승한다. 이와 같이 비배출량이 증가하면 즉 지하수 유동량이 증가하면 BHE 시스템의 성능은 향상된다.

비배출량이 0에서 4×10^{-7} m/s로 증가할 때, 하절기에 하강한 avT와 동절기에 상승한 avT를 이용하여 BHE 시스템의 성능향상 예측용 지시인자로 사용하면 비배출량

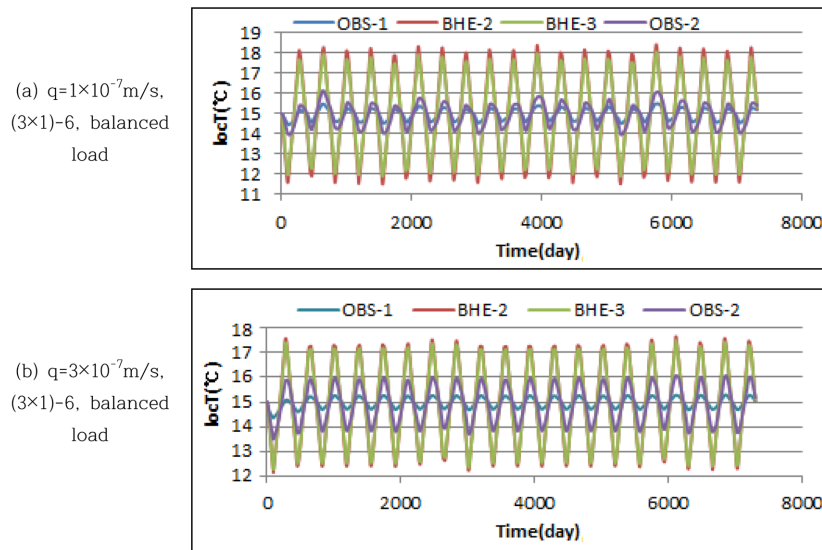


Fig. 11. Average local ground temperatures (locT) in (3×1) -6 BHE array with 6 m separation, under specific discharge of 1×10^{-7} m/s(a) and 3×10^{-7} m/s(b) at the time of the balanced energy load condition.

증가로 인한 BHE의 성능은 단일 BHE인 경우에 균형 에너지 부하시 하절기에 약 24.6%(0.77/(18.13-15)), 동절기에 약 23.6%(0.75/(15-11.83)), 불균형 에너지 부하시 동절기에 약 5%(0.18/(15-11.48)) 향상되며, (3×1) -9배열인 경우에는 균형 에너지 부하시 하절기에 약 10%, 동절기에 약 8%, 불균형 에너지 부하시 동절기에 약 7.1% 향상되는 것으로 예측된다. (3×3) -9배열인 경우는 3.1.2에서 설명한 바와 같이 균형 에너지 부하시 하절기에 약 7.6%, 동절기에 약 5.1%, 불균형 에너지 부하시 동절기에 약 1.1% 향상되는 것으로 모의되었다.

3.4. BHE장 내외부 구역에서 지하수 유동량에 따라 변하는 지중온도(locT)의 변동특성과 열문에 의한 온도 간섭현상

천공 지중열교환기 모의(Borehole heat exchanger simulation)용 패키지는 지중열교환기 에 인접한 유출 지배 경계구간(adjacent flux-occupied boundary section)에서 지중순환수의 평균 온도(avT)와 상술한 경계조건과는 무관한 일반 관측지점에서 평균 지중온도를 계산하는 추가 옵션들이 있다. 여기서 후자에 속하는 평균 지중온도를 국지적인 지중온도(local ground temperature)라 하며 약자로 locT라 한다. BHE 내에서 흐르는 지중순환수는 하절기에 건물에서 추출한 온열을 BHE 주변에 분포된 지중매체로 방열하고, 동절기에는 반대로 저온의 지중순환수가 비교적 높은 온도를 유지하고 있는 지중매체인 대열층(帶熱層, aestifer)의 지중열을 흡수하기 때문에 지중순환수의 평균온도인 avT와 BHE와 인접구간에 분포된

대열층의 국지적인 지중온도(locT)와는 다소 차이가 있다. Table 4에 제시된 (3×1) -6배열의 BHE에서 균형 및 불균형 에너지 부하시 하절기와 동절기에 지하수 유량별 avT와 Table 7과 8에 제시된 바와 같이 동일한 (3×1) -6배열에서 동일한 BHE 주변의 지중온도(locT)를 서로 비교해보면, 대체적으로 균형 에너지 부하시 하절기의 지중온도(locT)는 지하수 유동량에 따라 avT보다 약 0.84~1.40°C 낮으며 반대로 동절기에는 약 0.55~1.20°C 높다. 불균형 에너지 부하시에 하절기의 avT는 locT와 비슷하지만 동절기의 locT는 지하수 유동량에 따라 avT보다 약 1°C 높다. 이러한 현상은 균형 에너지 부하시 하절기에 BHE 인근의 지중 온도(locT)는 동절기를 지나면서 다소 하강하기 때문에 신규로 BHE로 유입되는 다소 높은 온도의 avT에 비해 저온상태이고 반대로 동절기에 BHE 인근의 지중 온도(locT)는 하절기를 경과하면서 상승하여 신규로 BHE로 유입되는 저온의 avT에 비해 다소 높은 온도를 유지하기 때문이다.

3.4.1. (3×1) -6배열에서 균형 에너지 부하시 BHE장 주변 지중온도의 분포 특성

Fig. 11은 비배출량이 각각 1×10^{-7} m/s과 3×10^{-7} m/s인 지역에서 6 m 간격의 BHE를 (3×1) -6의 배열형식으로 설치 후, 20년간 균형 에너지 부하를 BHE장에 가했을 때, BHE-1지점에서 상류 6 m 지점에 소재한 OBS-1 지점과 BHE-3지점에서 하류구간의 6 m 지점에 소재한 OBS-2 지점 및 BHE장 내부에 소재하는 BHE-2와

Table 7. Simulated locTs at BHE-2 and BHE-3 point located within (3×1) BHE array with 6 m separation and other 2 observation points situated 6 m up and down stream when specific discharges are 1×10^{-7} m/s and 3×10^{-7} m/s respectively

Simulated locT at the designated observation points when $q=1 \times 10^{-7}$ m/s, balanced load							
OB.point	Summer			Winter			ΔT (°C)
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	
OBS-1	15.46	15.18	15.20	14.60	14.46	14.53	0.77
BHE-2	18.41	17.86	18.14	11.90	11.50	11.70	
BHE-3	18.05	17.47	17.76	12.25	11.86	12.06	
OBS-2	16.12	13.96	15.50	14.25	13.95	14.10	1.40
$\Delta T = \text{OBS1-OBS2}$			0.30			0.43	
Simulated locT at the designated observation points when $q=3 \times 10^{-7}$ m/s, balanced load							
OB.point	Summer			Winter			ΔT (°C)
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	
OBS-1	15.30	15.11	15.26	14.73	14.38	14.70	0.56
BHE-2	17.66	17.27	17.46	12.62	12.14	12.40	
BHE-3	17.50	17.10	17.30	12.71	12.25	12.50	
OBS-2	16.10	15.90	15.95	13.90	13.50	13.82	2.13
$\Delta T = \text{OBS1-OBS2}$			0.69			0.88	

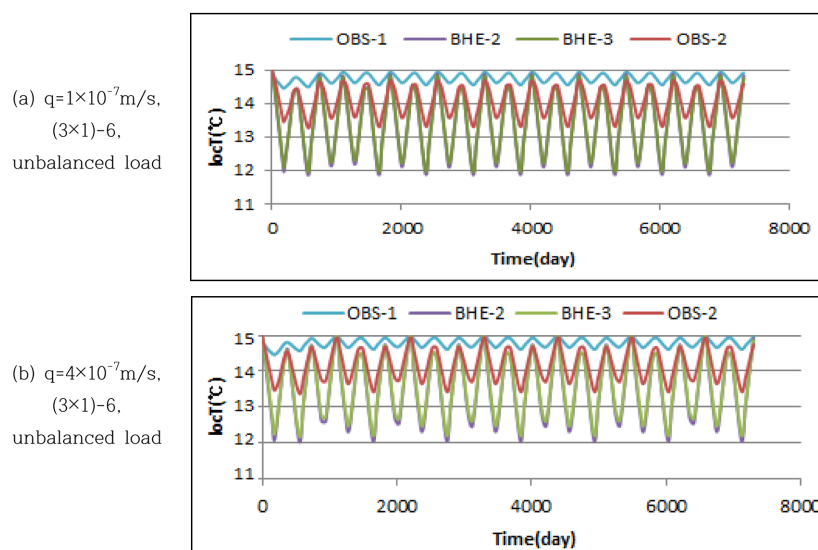


Fig. 12. Average local ground temperatures(locT) in (3×1) -6 BHE array with 6 m separation under the unbalanced energy load with specific discharge of 1×10^{-7} m/s(a) and specific discharge of 4×10^{-7} m/s(b).

BHE-3의 주변 지중매체에서 예측한 국지적인 평균 지중 온도(locT)이다. Fig. 11의 (a)는 비배출량이 1×10^{-7} m/s 일 때, BHE장 상류와 하류 구간에 소재한 2개 관측지점 (OBS-1과 OBS-2)과 BHE장에 소재한 BHE-2 와 BHE-3 인근 지중매체의 경시별 locT이고 (b)는 비배출량이 3×10^{-7} m/s일 경우의 동일한 지점들에서의 경시별 locT 이다.

Table 7은 비배출량이 각각 1×10^{-7} 와 3×10^{-7} m/s 일

때, 균형 에너지 부하를 20년간 지중에 가하는 경우에 상술한 4개 지점에서 모의된 하절기와 동절기의 최대 및 최저 locT와 20년간 하절기와 동절기의 평균 locT를 요약한 것이다.

균형 에너지 부하시 비배출량이 1×10^{-7} m/s이고 하절기에 BHE장에서 지중방열을 하는 경우에 상류구간에 소재한 OBS-1지점에서 예측된 하절기의 평균 locT와 동절기의 평균 locT는 각각 15.2°C 와 14.53°C 인데 반해, 하

Table 8. Simulated locTs at BHE-2 and BHE-3 located within (3×1) array with 6 m separation and other 2 observation points situated at 6 m up and down stream when specific discharges are 1×10^{-7} m/s and 4×10^{-7} m/s respectively under unbalanced load condition

Simulated locT at the designated observation points when $q=1 \times 10^{-7}$ m/s, unbalanced load							
Ob. point	Summer			Winter			ΔT (°C)
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	
OBS-1	14.88	14.67	14.70	14.27	14.08	14.16	0.54
BHE-2	14.90	14.32	14.55	12.46	11.90	12.18	
BHE-3	14.86	14.26	14.56	12.39	11.80	12.12	
OBS-2	14.62	14.20	14.40	13.60	13.08	13.34	1.06
$\Delta T = \text{OBS1-OBS2}$			0.30			0.82	
Simulated locT at the designated observation points when $q=4 \times 10^{-7}$ m/s, unbalanced load							
Ob.point	Summer			Winter			ΔT (°C)
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	
OBS-1	15.00	14.78	14.91	14.68	14.45	14.64	0.27
BHE-2	14.88	14.40	14.70	12.60	12.00	12.30	
BHE-3	14.99	14.50	14.73	12.71	12.15	12.45	
OBS-2	14.93	14.64	14.79	13.74	13.37	13.55	1.09
$\Delta T = \text{OBS1-OBS2}$			0.12			1.09	

류구간에 소재한 OBS-2지점에서 하절기의 평균 locT는 OBS-1보다 0.3°C 높은 15.5°C 이고, 동절기의 평균 locT는 OBS-1보다 0.43°C 낮은 14.1°C 이다(Table 7).

또한 Fig. 11(a)와 같이 OBS-1지점과 OBS-2 지점에서 하절기와 동절기의 locT 변동폭은 각각 0.77°C 와 1.4°C 로서 하류구간에 위치한 OBS-2지점의 locT 변동폭이 상류구간에 소재한 OBS-1지점의 locT 변동폭보다 약 2배 정도 크다. 이는 3개의 천공 지중열교환기(BHE)로 구성된 (3×1) -6-BHE장을 통해 20년간 지속적으로 균형 에너지 부하를 지중에 가함으로서 생성된 하절기의 온축열체(溫築熱體)와 동절기의 냉축열체를 통과한 후, 하류구간으로 흐르는 자연 지하수류에 의해 하류구간에 소재한 OBS-2지점과 그 인근 대열층에 열간섭 현상을 일으켰기 때문이다.

균형 에너지 부하시 비배출량이 3×10^{-7} m/s인 경우에도 BHE장에서 생성된 온 및 냉축열체를 통해 하류구간으로 유동하는 자연 지하수류에 의해 하절기에 OBS-2 지점의 평균 locT는 OBS-1 지점에 비해 0.69°C 높아지고, 동절기에는 0.88°C 낮아진다(Fig. 11(b)).

Fig. 11의 (a), (b)와 같이 비배출량이 1×10^{-7} m/s에서 3×10^{-7} m/s으로 증가하면 OBS-1 지점과 OBS-2 지점에서 평균 locT의 변동진폭은 거의 2배로 증가한다. BHE장 내에 소재하는 BHE-2의 경우에도 비배출량이 1×10^{-7} 에서 3×10^{-7} m/s으로 증가하면 하절기의 평균 locT는 18.14°C 에서 17.46°C 으로 약 0.68°C 정도 감소하고, 동절기에는 11.70°C 에서 12.4°C 로 약 0.7°C 증가한다. 또한

하절기에 BHE-3의 평균 locT는 17.76°C 에서 17.30°C 로 약 0.46°C 정도 감소하고 동절기에는 12.06°C 에서 12.5°C 로 0.44°C 정도 상승한다. 이는 15°C 의 일정한 열용량을 보유한 지하수의 유동량이 증가하면 방열기간인 하절기에는 유동하는 지하수가 locT를 하강시키는 역할을 하고 반대로 열 추출기간인 동절기에는 locT를 상승시키는 역할을 하여 BHE의 시스템성능을 향상 개선시킨다.

3.4.2. (3×1) -6배열에서 불균형 에너지 부하시 BHE장 주변 지중온도의 분포 특성

Fig. 12의 (a)와 (b)는 비배출량이 각각 1×10^{-7} m/s과 4×10^{-7} m/s인 지역에서 6 m 간격의 BHE를 (3×1) -6의 배열방식으로 설치한 다음, 20년간 불균형 에너지 부하를 지중에 가했을 때, BHE-2와 BHE-3에 접한 지중매체와 BHE장의 상류구간 6 m 지점에 소재한 OBS-1지점과 하류구간 6 m에 소재한 OBS-2지점에서 예측한 경시별 locT이다. Fig. 12의 (a)와 (b)에 제시된 경시별 locT를 각 관측지점에서 하절기와 동절기의 평균 locT로 구분하여 정리하면 Table 8과 같다. 이에 의하면 불균형 에너지 부하 형식으로 20년간 지열을 추출하는 경우에 하절기에 2개 관측지점과 2개 BHE의 locT는 모두 모의 지역의 평균 지중온도와 지하수 온도는 15°C 미만이다.

비배출량이 1×10^{-7} m/s이며 불균형 에너지 부하시 하절기에 상류구간에 소재한 OBS-1 지점에서 예측된 평균 locT는 14.7°C 인데 비해, 하류구간에 소재한 OBS-2 지

점의 평균 locT는 OBS-1 보다 0.3°C 낮은 14.4°C이고, 동절기에 상류구간에 소재한 OBS-1지점에서 예측된 평균 locT는 14.16°C인데 반해, 하류구간에 소재한 OBS-2지점의 평균 locT는 OBS-1지점 보다 0.82°C 낮은 13.34°C이다(Table 8). 또한 비배출량이 4×10^{-7} m/s이며 불균형 에너지 부하시 동절기에 상류구간에 소재한 OBS-1지점에서 예측된 평균 locT는 14.64°C인데 반해, 하류구간에 소재한 OBS-2지점에서 평균 locT는 OBS-1보다 1.09°C가 낮은 13.55°C이다. 이는 (3×1) 형식의 BHE장에서 20년간 지속적으로 불균형 에너지 부하를 지중에 가함으로서 동절기에 $(12.28 \pm 0.16)^{\circ}\text{C}$ 정도의 낮은 온도를 유지하는 저온의 냉축열체가 형성되고 이를 관류하는 자연 지하수류에 의해 열운이 하류구간으로 이동하여 하류구간에 소재한 OBS-2 지점과 그 인근 대열층에 열간섭 현상을 일으켰기 때문이다.

비배출량이 1×10^{-7} m/s에서 4×10^{-7} m/s로 증가하는 경우에, 동절기에 BHE-2 주변지점의 locT는 12.18°C에서 12.30°C로 증가하며 또한 BHE-3 주변지점의 locT도 12.12°C에서 12.45°C로 증가한다. 즉 지하수 유동량의 증가는 동절기에 BHE 시스템의 성능을 향상시키는 역할을 한다(Fig. 12의 (a)와 (b) 및 Table 8).

4. 결 론

1) 균형 에너지 부하시 지하수의 비배출량이 1×10^{-7} 에서 4×10^{-7} m/s로 증가하면 단일(1) BHE의 경우에 BHE 시스템의 성능은 하절기에 26.7%, 동절기에는 22.7%정도 향상되며, 다중 BHE의 경우에 BHE시스템의 성능은 BHE의 배열방식과 수에 따라 하절기에 12.1~18.7%, 동절기에는 7.6~8.7% 향상된다. 즉 지하수의 비배출량이 매 1×10^{-7} m/s씩 증가할 때 마다 BHE 시스템 성능은 하절기에 최소 3~6.7%, 동절기에 최소 1.9~5.7% 향상된다.

2) 순수 열전도모델($q=0$)에서 균형 에너지 부하시에는 BHE 수가 많아질수록 인접 BHE간의 열간섭을 보다 심하게 받아 BHE 성능은 저하한다. BHE성능은 단일(1) BHE가 가장 양호하고 BHE의 수가 많아질수록 저하한다. 불균형 에너지 부하시에는 지중열 추출로 인해 평균 지중순환수 온도(avT)는 연평균 지중온도 (T_0) 이하로 하강하며, BHE 수가 많아질수록 배열별 avT는 하강하여 시스템 성능이 저하한다. BHE 성능저하를 감소시킬 수 있는 방안으로는 BHE 수와 배열방식을 변경시키거나, 천공간격 확장 및 BHE 설치심도를 증가시키는 방법이 있다.

3) BHE 배열형식과 지하수유동이 시스템 성능에 미치는

영향을 요약하면 다음과 같다.

- BHE 수가 많아질수록 하절기 avT는 상승하고, 동절기 avT는 하강하여 시스템성능은 저하한다.
- 지하수 유동량이 증가할수록 하절기 avT는 감소하고, 동절기 avT는 증가하여 시스템 성능은 향상된다.
- 균형 에너지 부하시 $q < 1 \times 10^{-7}$ m/s 인 경우에 지하수류에 의해 형성된 열운이 하류구간에 소재한 BHE 지점에 미치는 열간섭 영향은 그리 크지 않으므로 이 경우에는 지하수류에 의한 영향은 고려치 않아도 무방하다

4) 추후 BHE 설계시 개선되어야 할 내용

- 해당 수문지열계의 지하수유동방향, 수리지질특성(수리전도도, 저류계수, 동수구배, 유동률 등), 열적특성(열전도도, 지온), 계절별 지하수온과 수위의 변동특성 자료를 반드시 파악해야 한다.
- 이 조사는 일반적으로 지열교환기 설치와 설계 시 거의 실시되지 않고 있어 이와 같은 관행은 추후 반드시 개선되어야 한다.
- 지하수유동 때문에 형성되는 열운은 균형 에너지 부하시에는 소규모적이거나, 불균형 에너지 부하시에는 매우 광범위하게 형성된다.
- 향후, 다중 BHE 배열장(multiple BHE field)에서 지하수 유동방향과 BHE 배열방향과의 상관관계, 천공간격, BHE장을 구성하는 BHE의 개수 등이 시스템 성능에 미치는 영향과 ATEs(aquifer thermal energy storage)의 경우에 지하수류가 시스템성능에 미치는 영향 등에 관한 연구들이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화 연구단’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Banks, D., 2010, *An introduction of thermogeology : Ground source heating and cooling*, 2nd Edition. Wiley-Blackwell Publishing.
- Chiasson, A.d., Rees, S.J., and Spitter, J.D., 2000, Preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed loop

- ground-source heat pump system, *ASHRAE Transactions* **106**(1), 380-393.
- Choi, J.C., Park, J., and Lee, S.R., 2013, Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole exchanger arrays, *Renewable Energy*, **52**, 230-240.
- Dehkordi, S.E. and Schincariol, R.A., 2014, Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed loop geothermal heat pump systems, *Hydro. J.*, **22**(1), 189-203.
- Dehkordi, S.E., Schincariol, R.A., and Oloffson, B., 2015, Impact of groundwater flow and energy load on multiple borehole heat exchangers, *Groundwater*, **53**(4), 558-571.
- Diersch, H.J.G., Bauer, D., Ruhakk, W., Heaidmann, W., and Schatzl, P., 2010, Finite element formulation for borehole heat exchangers in modeling geothermal heating systems by FEFLOW. FEFLOW white papers, Vol.V, *DHI-WASY GmbH*, Berlin, Germany.
- Diersch, H.J.G., Bauer, D., Ruhakk, W., Heaidmann, W., and Schatzl, P., 2011a, Finite element modeling of borehole heat exchangers systems: Part 1, Fundamentals, *Comput. Geosci.*, **37**(8), 1122-1135.
- Diersch, H.J.G., Bauer, D., Ruhakk, W., Heaidmann, W., and Schatzl, P., 2011b, Finite element modeling of borehole heat exchangers systems: Part 2, Numerical simulation, *Comput. Geosci.*, **37**(8), 1136-1147.
- Eskilson, P. and Claesson, J., 1988, Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes, *Numerical Heat Transfer*, **13**(2), 149-165.
- Ferguson Grant, 2015, Screening for heat transport by groundwater in closed geothermal systems, *Groundwater*, **53**(3), 503-506.
- Hahn et al., 2000, *Groundwater Environ. and Contamination*, PakyongSa Publishing Co., Ltd, Seoul, Korea.
- Hahn, J.S., Han, H.S., and Hahn, C., 2010, *Geothermal energy : Low enthalphy geo thermal heating and cooling system and geothermal power plant*, Hanlimwon Pub. Co., Ltd, Seoul, Korea, (14), 11-18.
- Hahn, J.S. and Hahn, C., 2015, *Ground water management and it's application*, Naeha Publishing Co., Ltd, Seoul, Korea, 422-423.
- He, M., 2012, Numerical modeling of geothermal borehole exchangers system. PhD thesis, *Institute of Energy and Sustainable Development*, De Monfort University, Leicester, UK.
- Johansen, O., 1977, Thermal conductivity of soils. Hanover, NH: Corps of Engineers, U.S. Army, *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*.
- Markle, J.M. and Schincariol, R.A., 2007, Thermal plume transport from sand and gravel pits- Potential thermal impacts on cool water systems, *J. Hydrol.*, **388**(3-4), 174-195.
- Sanner B., Hellstrom, G., Spitleret, J., and Gehlin, S., 2005, Thermal response test Current status and worldwide application. In *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, April 24-29, Antalya, Turkey.
- Wang, H.B., Xie, Y.J., and Qi, C., 2013, Thermal performance of borehole heat exchangers in different aquifers:A case study from Shouguang, *IJLCT*, **7**(4), 253-259.