

## 지하수류가 밀폐형 천공 지중 열교환기 성능에 미치는 영향(2)

한정삼<sup>1\*</sup> · 김영식<sup>1</sup> · 이주현<sup>1</sup> · 이병호<sup>2</sup> · 한 찬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(주)한서엔지니어링

<sup>2</sup>한국지하수지열협회

<sup>3</sup>(주) 지오그린21

### An Influence of Groundwater Flow on Performance of Closed Borehole Heat Exchangers (Part-2)

Jeongsang Hahn<sup>1\*</sup> · Youngseek Kiem<sup>1</sup> · Juhyun Lee<sup>1</sup> · Byoungcho Lee<sup>2</sup> · Chan Hahn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hans Engineering Co., Ltd.

<sup>2</sup>Korea Groundwater and Geothermal Energy Association

<sup>3</sup>Geogreen 21

#### ABSTRACT

An increase of groundwater flux in BHE system creates that ground temperature (locT) becomes lower in summer and higher in winter time. In other words, it improves significantly the performance of BHE system. The size of thermal plume made up by advection driven-flow under the balanced energy load is relatively small in contrast to the unbalanced energy load where groundwater flow causes considerable change in the size of thermal plume as well ground temperature. The ground temperatures of the up gradient and down gradient BHEs under conduction only heat transport are same due to no groundwater flow. But a significant difference of the ground temperature is observed between the down gradient and up gradient BHE as a result of groundwater flow-driven thermal interference took placed in BHE field. As many BHEs are designed under the obscure assumption of negligible groundwater flow, failure to account for advection can cause inefficiencies in system design and operation. Therefore including groundwater flow in the design procedure is considered to be essential for thermal and economic sustain ability of the BHE system.

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

#### 1. 서 언

천공 지중열교환기(Borehole heat exchanger, BHE)의 열교환과 열적성능은 지중매체인 수문지열계의 유효열전도도에 따라 좌우된다. 일반적으로 지하수류에 의한 열이동과 순수한 열전도에 의한 열이동 사이의 관계는 열적 Pecllet수로 평가한다. 즉 열적 Pecllet수는 지중매체에서 지하수의 이류에 의해 발생하는 열이동량을 지중매체 자체의 순수한 열전도에 의해 발생하는 열이동량으로 나눈 값이다(Chiasson et al., 2000). 따라서 Pecllet수는 지하수 유동량에 따라 좌우된다. 지하수 유동량(이류)의 기본값으

로 해당 수문지열계의 평균 수리전도도와 동수구배를 곱한 값인 비배출량(specific discharge, Darcian velocity)을 사용한다(Hahn and Hahn, 2015). 비배출량과 Pecllet수는  $L/\alpha$ 로 표현하며[여기서 L는 특성길이,  $\alpha$ 는 열확산계수(thermal diffusivity)] 이들 사이의 관계는 선형적이다. 밀폐형 지중열교환기 시스템에서 지하수의 유동은 지중열전달에 상당히 큰 영향을 미친다(Hahn et al., 2010). Ferguson(2015)은 지중열전달의 주 기작이 순수 열전도인지 아니면 지하수의 이류에 의해 발생하는지를 선별하는 방법으로 해당 수문지열계의 Pecllet수와 비배출량을 사용하는 방법을 제시하였다.

\*Corresponding author : jshahn@jejunu.ac.kr

Received : 2016. 10. 26 Reviewed : 2016. 12. 22 Accepted : 2016. 12. 23

Discussion until : 2017. 2. 28

지하수의 유동은 BHE의 열전달능(heat transfer capacity)에 큰 영향을 미치기 때문에 BHE의 설계심도와 설치비용을 절감시킬 수 있는 일종의 중요한 설계 인자이다(Wang et al., 2013). 지열펌프 시스템을 설계할 때 대다수 기술자들은 지하수 유동을 무시하거나 지하수 유동이 미미하다는 막연한 가정하에 보수적으로 설계를 한다. 그러나 연간 지하수위의 변동이 심하게 일어나는 지역은 바로 광역적인 지하수의 수직 흐름이 심하게 발생하고 있음을 의미하므로 지하수 함양률이나 지하수의 수직 침투능 등을 고려하여 비용 경제적인 설계를 해야 한다(Kavanaugh and Rafferty, 1997). 또한 현재 대다수의 지열교재와 연구논문들은 지하수류를 무시한 전도성(conductive) 열이동이 지배적인 지중조건하에서만 BHE의 원리나 설계방법 등을 취급하고 있다. 투수성이 양호한 지중매체에서 비배출량은 결국 유효 지중열전도도를 증가시키는 역할을 하기 때문에 지하수류에 의한 열이동량은 무시할 수 없는 요소이다(Chiasson et al., 2000). 따라서 BHE 설계는 설계 초기부터 해당지역의 지하수 유동특성을 면밀히 파악한 후, 이를 BHE 설계에 반영하여 시스템의 열적 및 경제적인 지속성을 확보해야 한다. 단일 BHE의 경우에는 BHE 사이에 발생하는 열간섭 현상은 고려하지 않기 때문에 설계단계에서부터 지하수 유동 영향이 이미 감안된 유효 열전도도를 사용해도 무방하나 여러 개의 BHE로 구성된 다중 BHE 배열장(配列場, field)의 경우에 단순한 유효 열전도도를 사용하면, BHE 사이에 발생하는 열간섭 현상을 정확히 파악할 수 없고 특히 지하수의 이류와 그 유동방향에 따라 형성되는 열운(熱雲, geothermal plume)의 규모와 열시스템의 성능변화를 예측할 수 없다. 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 음(-)의 요인이 된다(He, 2012).

Gehlin(2002)에 의하면 천공주위나 천공 내 지중온도는 지하수 유동상태에 따라 크게 영향을 받으며, Fujii et al. (2005)은 Peclet수가 0.1 이상(비배출량이  $10^{-3}$  m/s에 해당)인 지중매체에서는 열추출률은 커지고 지하수에 의한 이류적인 열전달(advective heat transfer)은 BHE 주변에서 지중온도 분포를 변화시켜서 지중온도는 단기간에 평형상태에 도달한다고 하였다.

Dehkordi and Schincariol(2014, 2015)가 열적 및 수리지질학적인 지중매체 특성에 대한 민감도분석을 실시한 바에 의하면 BHE 운영기간 동안 BHE의 효율과 영향(유

출량  $> 10^{-7}$  m/s)에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 지하수 유동량의 표시자인 비배출량이며 동시에 지중온도를 차후에 회수(유출량  $> 10^{-8}$  m/s)하는 경우에도 동일하다고 하였다. 지하수와 상호작용을 하는 다중 BHE의 경우에 BHE와 전체 시스템의 열적성능에 영향을 주는 열간섭 현상은 서로 밀접한 관련이 있다.

천부 지열에너지 이용은 화석연료 사용량 절감과 대기권으로 배출되는 이산화탄소량을 감소시키는데 크게 기여하는 혁신적인 방법이다. 그러나 지난 십여 년간 이에 대한 이론적인 연구에도 불구하고 친환경적이며 경제적으로 지속가능한 천부 지중열 에너지 이용을 보증할 수 있는 지열기작의 이해와 천부 지열에너지 시스템 지식에 대한 연구들이 지속적으로 필요한 실정이다. 아직까지도 최적의 비용경제적인 탐사기술이 가용하지 않아 국지적인 지열에너지의 부존 및 개발 가능성에 대한 사전 현장조사 없이 천부 지열에너지를 개발하고 있는 것이 우리의 현실이다 (Vienken, et al., 2015).

## 2. 지하수류가 BHE 성능에 미치는 영향 규명을 위한 방법과 모의

지하수류가 BHE성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 사용한 전산코드는 완전 밀도류와 오염물질 거동코드인 3차원 유한요소법의 FEFLOW이며, 천공 지중열교환기와 지중매체에 적용한 특성치들은 Table 1과 같다.

여기서 사용한 BHE 해는 Eskilson and Claesson (1988)의 해석학적인 방법을 토대로 하여 Diersch et al. (2010, 2011a, 2011b)이 개발한 3차원 전산프로그램이다.

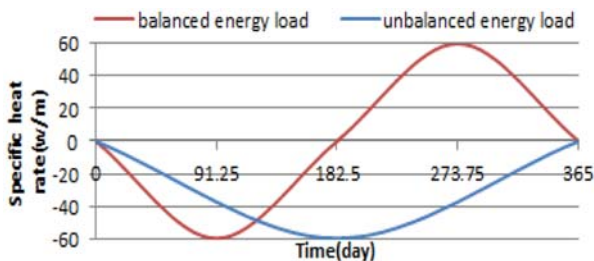
이 논문은 Part-1(Hahn et al., 2016)의 후속편으로서 지하수 유동과 BHE의 배열(수, 간격, 배치형식, 지하수유동, 지하수 유동방향과의 BHE의 배열방향)에 따라 발생하는 열적인 간섭현상 등이 천공과 다중 BHE시스템의 전체 성능에 미치는 영향을 수치모델링을 실시하여 검토하였다.

Fig. 1은 초기 첫해동안 지중으로 방열 및 추출한 균형 및 불균형 에너지 부하를 경시별로 나타낸 것이며, 계절별로 적용한 이 형태의 열에너지 부하 변동은 모의 기간인 20년동안 매년 동일하게 반복토록 하였다.

Fig. 1에서 균형 에너지 부하 모의시, 1년 중 동절기 6개월 동안은 BHE 심도 1 m 당 60 W의 열에너지를 지중으로 부터 추출하고, 잔여 하절기 6개월 동안은 동일한 60 W/m의 열에너지를 지중에 방열하는 경우로 가정하였으며, 불균형 에너지 부하 모의시에는 최악의 경우를 가

**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 inch
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 conductivity	J/(m · s · k)	0.39	
Geofluid (circulation loop fluid)	Dynamic viscosity	kg/(m · s)	$0.52 \times 10^{-3}$	
	Thermal conductivity	J/(m · s · k)	0.48	
	Volumetric heat capacity	J/(m <sup>3</sup> · k)	$4.0 \times 10^6$	
	Density	kg/m <sup>3</sup>	1,052	
	Flow rate	m <sup>3</sup> /d	25	
Ambient groundwater	Thermal conductivity	J/(m · s · k)	0.65	0.55 kcal/(mhk)
	Volumetric heat capacity	J/(m <sup>3</sup> · k)	$4.2 \times 10^6$	602 kcal/(m <sup>3</sup> k)
	Temperature	°C	15	annual mean
Ground materials	Thermal conductivity	J/(m · s · k)	3	Fissured crystalline rocks
	Porosity		0.2	
	Longitudinal dispersivity	m	5	Fissured crystalline rocks
	Transverse dispersivity	m	0.5	"
Grout	Thermal conductivity	J/(m · s · k)	1.5	20%+40% qtz, Tgrout Lite
	Volumetric heat capacity	J/(m <sup>3</sup> · k)	$2.52 \times 10^6$	
Initial ground temperature		°C	15	

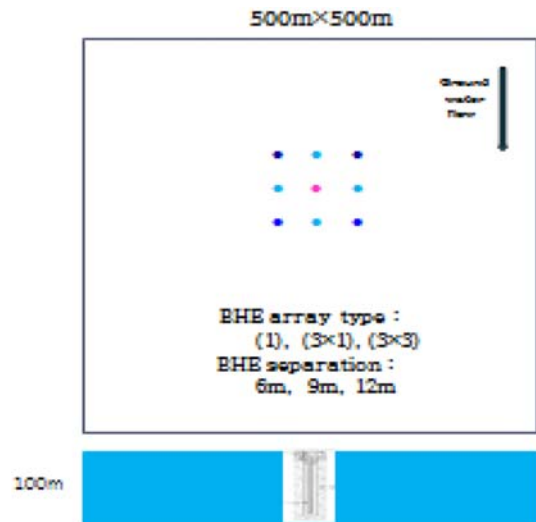


**Fig. 1.** The balanced and unbalanced energy loads applied to BHE field in the simulations.

상하여 1년 12개월 동안 60 W/m의 열에너지를 지중에서 추출하는 것으로 가정하였다. 즉 상술한 균형 및 불균형 열에너지 부하를 지중에 방열(주입) 및 추출하는 경우에 설치한 BHE의 최대 단위 길이(m)당 열 추출/주입률은 60 W/m로 일정하게 적용하였다.

Table 1은 HDPE 재질로 만들어진 BHE의 특성과 기타 관련 변수(천공, 지중순환수, 지하수, 지중매체 및 그라우트제 등)들의 단위와 적용한 값들을 요약한 표이다.

Fig. 2는 모의영역을 나타낸 그림으로서 모델영역은 중 횡방향의 길이가 각각 500 m인 장방향의 균질 등방매체이며 모델영역의 남북 경계면을 따라 고정수두경계



**Fig. 2.** Modeled domain with groundwater flow direction.

(Constant Head Boundary Condition)를 설정하였다. 또한 해당 지중매체의 평균 수리전도도, 평균 동수구배 및 비산출률은 각각  $10^{-4}$  m/s,  $10^{-3}$  및 0.2인 자유면 수문지 열계이고 평균 포화두께는 100 m인 1층 구조이며, 초기수위는 EL 0 m이다.

**Table 2.** Summary of simulation combinations (array configuration, 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
(3 × 1)	5	1	2	per.	10	a2fub-60-(3 × 1)L-9
(1)	5	-	2	par.	10	anfub-1
remarks	0, $1 \times 10^{-7}$ , $2 \times 10^{-7}$ , $3 \times 10^{-7}$ , $4 \times 10^{-7}$ m/s	6 m, 9 m, 12 m	Balanced, Unbalanced	par.:Parallel Per.:perpendicular	80	

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

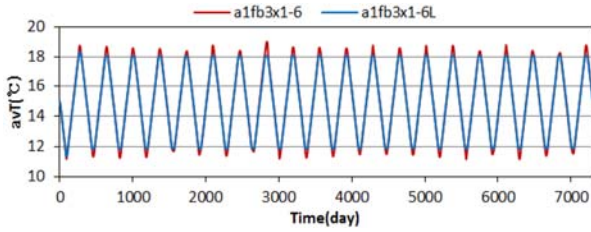
BHE의 배열방식은 1개 BHE로 구성된 단일(1 × 1)배열, 1열에 3개의 BHE가 설치된 (3 × 1)배열(총 BHE수: 3개) 및 3개열에 각 열별로 3개의 BHE가 설치된 (3 × 3)배열(총 BHE수: 9개) 등 총 3가지 배열을 사용하였으며 상술한 3가지 배열방식에 따라 균형 및 불균형 에너지 부하 형태로 지중열에너지를 추출 및 방열할 경우에 비배출량( $q$ )이 각각 0 일 때와  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s일 경우의 5가지 경우별 결과를 모의하였다. 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 BHE 사이의 이격거리는 6 m, 9 m와 12 m 등 3가지를 사용하였다(Table 2).

지하수가 유동하지 않는 지역(순수한 열전도 모델)에서 연중 지속적으로 평형 에너지 부하를 지중에 가하는 경우에 연중 전체 열추출량과 열방열량은 이론적으로 동일하다. 따라서 각 BHE에서 측정된 연간 경시별 평균 지중순환수 온도(average loop temperature, 이하 avT라 한다)의 변동은 동일한 형태로 반복된다. 그러나 지하수가 유동하는 경우에는 전자에 비해 연중 비교적 일정한 온도를 유지하는 지하수가 모의 영역내로 지속적으로 유입되므로 연간 경시별 avT는 지하수의 무흐름 지역과는 다른 형태를 나타낸다. 즉 하절기에 지중으로 방열하는 고온의 지중순환수는 연중 비교적 일정한 온도를 유지하고 있는 자연 지하수가 모의영역 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, 지하수

류의 유무, 열에너지 부하의 방식 등이 지중순환수 온도 변화에 미치는 영향을 연구하였다. 이 연구를 위해 Table 2와 같이 총 80종의 시나리오별로 모의를 실시하여 그 결과를 분석하였다. 지하수류가 BHE성능에 미치는 영향 규명을 위한 방법과 모의에 대한 구체적인 내용은 본 논문의 Part-1(Hahn et al., 2016)에 기술하였다.

### 3. 모의결과 및 고찰

모델영역에서 지하수는 북에서 남으로 유동한다. 지하수 유동방향과 동일한 북에서 남쪽방향으로 3개의 BHE를 1열로 설치한 (3 × 1)배열과 (3 × 3)배열의 BHE장에서 BHE장의 최상류구간에 위치한 BHE공은 BHE-1, 중심부에 소재한 공은 BHE-2, 최하류 구간에 소재한 공은 BHE-3로 명명하였다. 또한 BHE-1공의 상류쪽으로 적정한 이격거리(BHE 배열형식에 따라 BHE의 설치간격이 6 m일 경우에 이격거리는 BHE의 설치간격과 동일한 6 m를 사용하고, BHE의 설치간격이 각각 9 m 및 12 m일 경우에 이격거리는 각각 9 m와 12 m를 사용)를 두고 설치된 관측지점은 OBS-1, BHE-3의 하류쪽으로 동일한 형태의 이격거리를 두고 설치된 관측지점은 OBS-2로 명명하였다. 지중에 방열 또는 추출하는 열에너지의 부하방식과 BHE 배열형식에 따라 지하수가 전혀 유동하지 않는 무흐름( $q=0$ ) 상태의 순수열전도모델과 지하수가 유동하는 경우의 열전도-지하수이류 모델, BHE의 설치간격, BHE의 배열방향 등이 BHE시스템 성능에 미치는 영향과 지하수 유동량에 따른 각 관측지점별 지중온도, 지하수유동에 의해 형성되는 열운(thermal plume)의 형태와 규모 및 지중온도와 지하수 온도가 서로 다를 경우의 경시별 지중온도변동 특성 등을 모의를 통해 분석하였다.



**Fig. 3.** Average loop temperatures (avT) of (3 × 1) BHE array with 6m spacing aligned to parallel and perpendicular against the groundwater flow direction under specific discharge of  $1 \times 10^{-7}$  m/s and balanced energy load.

**3.1. 지하수 유동방향과 BHE 배열방향이 지중순환수 온도에 미치는 영향**

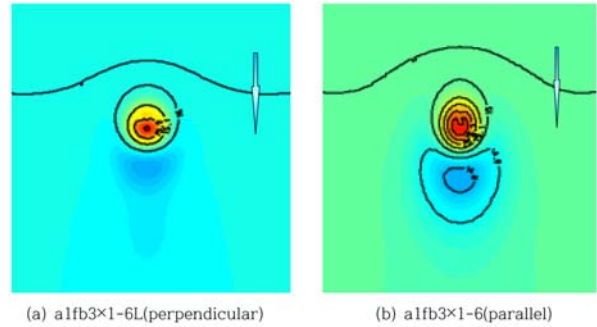
3.1.1. (3 × 1)-6배열에서 지하수 유동방향이 BHE 배열 방향과 평행일 경우와 직각인 경우 시스템 성능에 미치는 영향

Fig. 3은 지하수 유동량이  $q=1 \times 10^{-7}$  m/s이고 BHE설치 간격이 6m이며 균형 에너지 부하시, (3 × 1)형 BHE장의 주 배열방향이 지하수의 유동방향과 평행일 경우 (a1fb3 × 1-6)와 직각인 경우(a1fb3 × 1-6L)의 avT이다. BHE 배열방향이 지하수 유동방향과 직각인 경우는 평행인 경우에 비해 하절기의 지중열 방열시에 avT는 평균  $(0.7 \pm 0.3)^{\circ}\text{C}$  낮아지고, 반대로 동절기의 지중열 추출시에는  $(0.5 \pm 0.3)^{\circ}\text{C}$  높아진다. BHE 배열의 장축방향을 지하수 유동방향과 교차하는 즉, 직각방향으로 설치하면 평행으로 설치할 경우에 비해 BHE의 성능은 향상 및 개선되고 동일한 방향으로 설치하면 그 성능은 저하한다.

Fig. 4는 20년간 지하수 유동량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, BHE의 주 배열방향이 지하수 유동방향과 수직일 경우(a)와 평행일 경우(b)에, BHE 장을 포함한 BHE 주변 지중매체에 형성된 지중온도 분포를 나타내는 등온선도와 열운이다.

Fig. 4(a)와 같이 GHE 배열방향이 지하수 유동방향과 직각이고, 지하수 유동량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, 기존의 BHE장을 중심으로 그 인근에 온도범위가 14.9~15.3°C인 타원형의 저열운대가 형성된다. 타원형 저열운의 폭은 54 m, 길이는 64 m이며, 열운의 중심점은 지하수유동에 의해 BHE-2 지점에서 약 10 m 하류구간에 소재한다. 타원형 저열운의 하류구간에 온도가 14.85~14.92°C 범위에 속하는 저운의 저열운대가 폭 49 m, 길이 32 m로 형성되며 잔여 구간의 지중온도는 모두 15°C이다.

Fig. 4(b)와 같이 BHE 배열방향이 지하수 유동방향과 평행하고, 지하수 유동량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, 기존의



**Fig. 4.** Isothermal map including geothermal plume of (3 × 1) BHE array (6 m spacing) aligned to perpendicular and parallel against the groundwater flow direction under specific discharge of  $1 \times 10^{-7}$  m/s and balanced energy load (arrow indicates ground water flow direction).

BHE장을 중심으로 그 인근에 온도범위가 14.77~15.46°C인 타원형 저열운대가 형성된다. 타원형 저열운의 폭은 49 m, 길이는 69 m이며, 저열운의 중심점은 지하수유동으로 인해 BHE-2 지점에서 약 15 m 하류구간에 소재한다. 타원형 저열운 하류구간에 온도가 14.77~14.95°C 범위에 속한 저열운대가 폭 43 m, 길이 88 m로 형성된다. 일반적으로 평행배열인 경우는 수직배열인 경우에 비해 타원형 저열운의 폭은 좁고 길이는 길어지나 전반적으로 하류구간에 미치는 열간섭 현상은 확대된다.

3.1.2. BHE의 주 배열방향이 지하수 유동방향과 직각인 (3 × 1)-6L배열에서 균형 에너지부하시 지하수 유동량이 BHE 성능에 미치는 영향

Fig. 5는 BHE의 주 배열방향이 지하수의 유동방향과 직각인 (3 × 1)-6L 배열에서  $q=0$ ,  $q=1 \times 10^{-7}$  m/s, 및  $q=2 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, 균형 에너지부하시 지하수 유동량이 BHE 성능에 미치는 영향을 나타낸 경시별 avT이다. 지하수 유동량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s 일 때 성능이 가장 양호한 것으로 예측되었고, 무흐름 상태(순수 열전도 모델)에 비해 동절기에는 avT가 0.8°C 정도 상승하여 시스템 성능은 약 20%(0.8/(15-11)) 증가한다.

3.1.3. BHE의 주 배열방향이 지하수 유동방향과 평행인 (3 × 1)-6 배열에서 균형 에너지부하시 BHE의 지하수 유동량이 BHE 성능에 미치는 영향

Fig. 6는 BHE의 주 배열방향이 지하수의 유동방향과 평행인 (3 × 1)-6 배열에서  $q=0$ ,  $q=1 \times 10^{-7}$  m/s 및  $q=2 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, 균형 에너지 부하를 20년간 BHE장에 가할 경우, 지하수 유동량에 따라 BHE 배열 중심부에

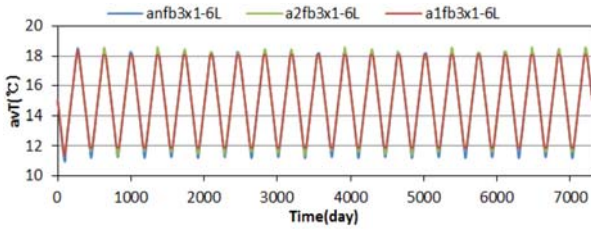


Fig. 5. Average loop temperatures (avT) of (3 × 1) BHE array with of 6m spacing, aligned perpendicular to the groundwater flow direction under various specific discharges (0,  $1 \times 10^{-7}$  and  $2 \times 10^{-7}$  m/s).

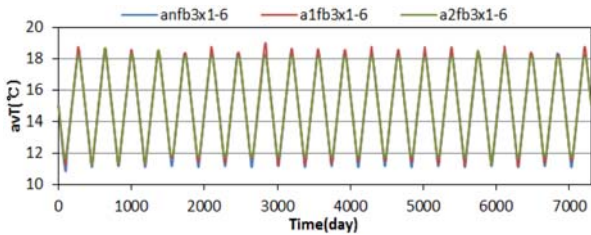


Fig. 6. Average loop temperatures of (3 × 1) BHE array with of 6m spacing, aligned parallel to the groundwater flow direction under balanced energy load with various specific discharge conditions (0,  $1 \times 10^{-7}$  and  $2 \times 10^{-7}$  m/s).

서 변동하는 avT를 나타낸 그림이다. 이에 의하면 전술한 바와 같이 지하수 유동량이 증가할 수록 하절기에는 avT가 다소 낮아지고, 반대로 동절기에 avT가 다소 상승하여 결과적으로 BHE의 성능은 향상된다.

### 3.2. 천공간격이 지중 순환수 온도(avT)와 BHE 성능에 미치는 영향

#### 3.2.1. 동일한 지하수 유동량과 동일한 배열에서 BHE 간격이 BHE 성능에 미치는 영향

Fig. 7은 지하수 무흐름 상태하에 있는 영역에 설치된 (3 × 3) 형식의 BHE장에 균형 에너지 부하를 20년간 가했을 때, BHE 간격(d)을 6 m, 9 m, 12 m로 증가시킨 경우에 예측한 BHE 중심점에서의 avT이다. 전반적으로 보아 12 m 간격을 갖는 BHE는 6 m의 간격을 갖는 BHE에 비해 하절기에는 avT가 낮아지고 동절기에는 다소 높이가 진다. 즉 동일한 지하수 유동량에서는 BHE 사이의 설치간격이 넓을수록 시스템 성능은 향상된다.

Fig. 8은 지하수의 유동율이 비배출량이  $2 \times 10^{-7}$  m/s인 영역에 설치된 (3 × 3) 형식의 BHE장에 불균형 에너지 부하를 20년간 지속적으로 추출했을 경우, BHE 간격을 6 m, 9 m, 12 m로 변경시켰을 때의, BHE 중심점에서의 avT이다. 이 경우도 균형 에너지 부하와 동일하게 12 m

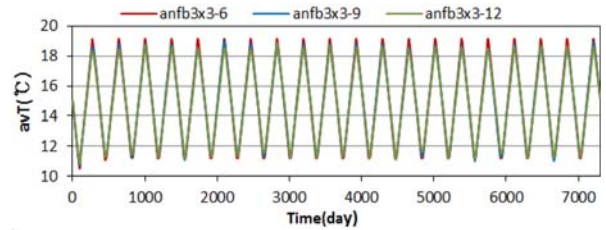


Fig. 7. Average loop temperatures in a (3 × 3) BHE array with various BHE separations (6, 9 & 12 m) under balanced energy load with no groundwater flow.

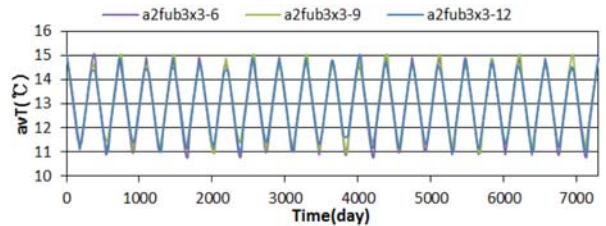


Fig. 8. Average loop temperatures in a (3 × 3) BHE array with various BHE separations (6, 9 & 12 m) under unbalanced energy load with specific discharge of  $2 \times 10^{-7}$  m/s.

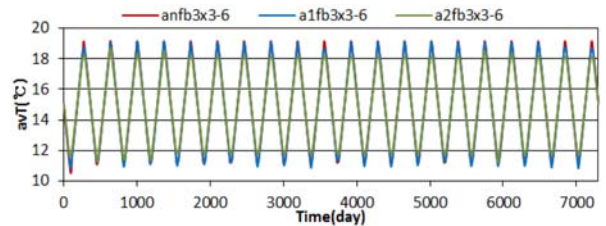
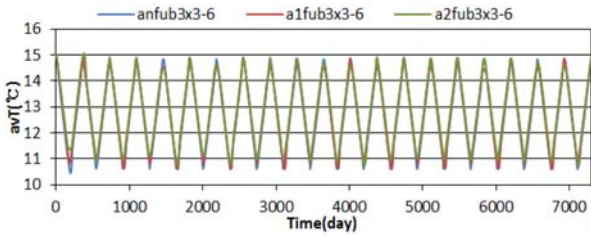


Fig. 9. Average loop temperatures in a (3 × 3) BHE array with 6m separations under balanced energy load with variable specific discharges (0,  $1 \times 10^{-7}$  and  $2 \times 10^{-7}$  m/s).

간격을 갖는 BHE는 6 m나 9 m의 간격을 갖는 BHE에 비해 하절기에는 avT가 낮고 동절기에는 다소 높다. 즉 BHE 사이의 설치간격이 넓을수록 시스템 성능은 향상된다.

#### 3.2.2. 동일한 배열과 동일한 BHE 간격에서 지하수 유동량에 따른 영향(6 m 간격)

Fig. 9는 BHE의 주 배열방향이 지하수의 유동방향과 평행하며 BHE 간격이 6 m인 (3 × 3) BHE 배열에서 비배출량이 0에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s 및  $2 \times 10^{-7}$  m/s로 증가될 경우에 균형 에너지 부하를 지중에 20년간 지속적으로 가했을 때, 지하수 유동량이 BHE 성능에 미치는 영향을 나타낸 경시별 avT이다. 하절기와 동절기 모두 지하수 유동량이 증가할수록 시스템 성능은 향상되는 것으로 모의되었으며, 특히 비배출량이  $2 \times 10^{-7}$  m/s 일 때 하절기의



**Fig. 10.** Average loop temperatures in a (3 × 3) BHE array with 6 m separations under unbalanced energy load with variable specific discharges ( $0,1 \times 10^{-7}$  and  $2 \times 10^{-7}$  m/s).

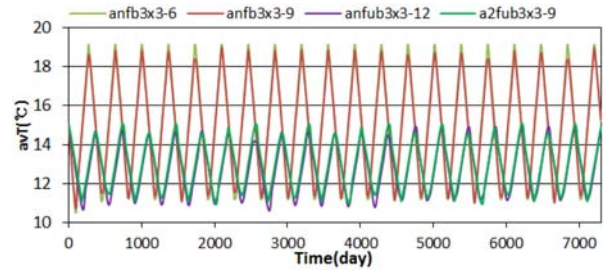
avT는 무흐름 상태인 경우에 비해 최소 0.5°C에서 최대 1.2°C까지 하강한다. 즉 이는 무흐름 상태에 비해 하절기에는 시스템 성능이 최소 12.5%에서 최대 28% 정도 ( $1.2/(19.2-15)$ ) 향상됨을 의미한다.

Fig. 10은 BHE의 주 배열방향이 지하수의 유동방향과 평행하며 BHE 간격이 6m인 (3 × 1) BHE 배열에서 비배출량이 0에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s 및  $2 \times 10^{-7}$  m/s로 증가될 경우에 불균형 에너지 부하를 지중에 20년간 지속적으로 가했을 때, 지하수 유동량이 BHE 성능에 미치는 영향을 보여 주는 경시별 avT이다. 하절기와 동절기 모두 지하수 유동량이 증가할수록 시스템 성능은 향상되는 것으로 예측되었으며, 특히 비배출량이  $2 \times 10^{-7}$  m/s일 때 동절기의 avT는 무흐름 경우에 비해 최소 0.5°C에서 최대 1°C까지 상승한다. 즉 이는 지하수가 유동하지 않는 무흐름 상태에 비해 동절기의 시스템성능은 최소 12.5%에서 최대 25% 정도 ( $1.0/(15-11)$ ) 향상됨을 뜻한다.

3.2.3. q=0일 경우, 에너지 부하와 천공간격이 avT에 미치는 영향

Fig. 11은 천공간격이 avT에 미치는 영향을 파악하기 위해 균형 에너지 부하를 지중에 가하는 경우에, (3 × 3) 배열에서 천공간격을 9m에서 6m로 3m 단축시키고, 불균형 에너지 부하시에는 9m에서 12m로 3m 증가시킨 후 모의한 경시별 avT 결과도이다. 두 경우 모두, 초기부터 BHE의 간격을 변경시키면 avT에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 균형 에너지 부하시 BHE 간격을 9m에서 6m로 좁히면 시스템 성능은 다소 감소(하절기에 간격을 9m에서 6m로 감소시키면 avT는 다소 상승) 하지만 시간이 지남에 따라 안정되어 장기적인 지속성을 유지하는데 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

반면에 불균형 에너지 부하시에 BHE 간격을 9m에서 12m로 증가시키면 시스템 성능은 다소 개선(12m 경우는 9m인 경우에 비해 avT가 다소 높다)되고 안정되는



**Fig. 11.** Average loop temperatures in a (3 × 3) BHE array with various BHE spacings (6, 9 & 12 m) under balanced and unbalanced energy load with no groundwater flow.

기간도 단축된다. 따라서 많은 수의 BHE를 사용하는 대규모 시스템을 설계할 경우에는 반드시 천공간격과 천공심도와 같은 변수들은 시스템의 에너지 부하 특성에 맞게 적용해야 한다. BHE의 설치간격과 설치심도 등에 관한 설계요인들을 현재 관습적으로 적용하고 있는 일반적인 관행(예, 심도는 1RT당 50 m, 공간간격은 5 m 등)이나 부정확한 계산에 따라 결정하면 장기 가동시 큰 누적 오차를 초래하게 된다.

Fig. 12는 BHE 배열이 (3 × 3)이고, 천공간격이 9m인 BHE에서, q=0인 경우에 균형 및 불균형 에너지 부하를 20년간 장기적으로 지중에 주입 및 추출한 경우에 모의된 지중온도의 등온선도이다. 균형 에너지 부하와 불균형 에너지 부하시 형성되는 지중온도분포는 현격한 차이를 보인다.

Fig. 12(a)와 같이 (3 × 3) 배열에서 균형 에너지 부하를 지중에 지속적으로 가하는 경우에 20년 후의 온도간섭은 크게 일어나지 않으나, Fig. 12(b)와 같이 불균형 에너지 부하인 경우에 20년 후의 지중온도의 변화는 상당히 큰 범위로 발생한다. 즉, 약 1°C 정도의 지중온도의 차이가 나는 14°C 등온선까지의 거리는 BHE장 중심부로부터 50 m 정도까지 확장된다. 환언하면 불균형 에너지 부하시에는 인접 구간에 설치된 BHE의 성능에 악영향을 미칠 수 있음은 물론 주변의 지하수체나 잠재적인 생태계에게 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 대규모 BHE 시스템에서 지하수류에 의해 형성되는 열운, 즉 지하수의 이류에 의한 열이동은 하류 구배 구간에 열적 및 환경적인 영향을 미치며 그 영향은 시간이 지남에 따라 증가한다. 지하수 유동이 열운을 분산시키고 하류구간에서 온도 차이를 감소시키기는 하지만 열운은 지하수 유동율과 유동방향에 따라 더 분산되고 불확실성을 증대시키기도 한다(Casasso and Sethi 2014). 따라서 해당지역의 지하수 동수구배의 변동상태를 파악할 수 있도록 충분한 기간 동안의 가용한

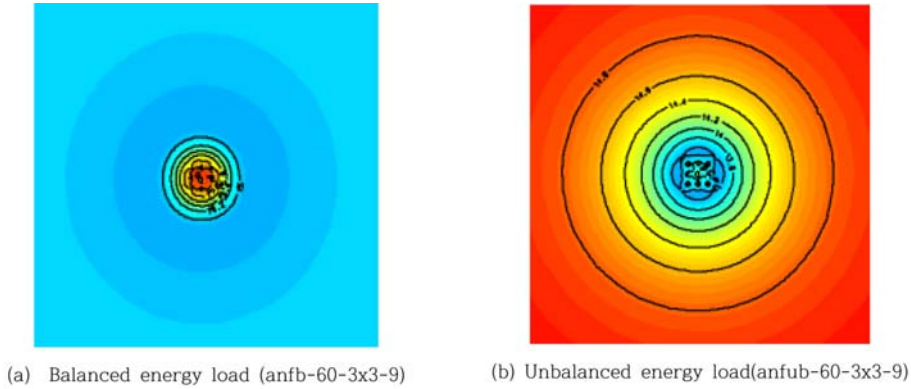


Fig. 12. Isothermal map of balanced (a) and unbalanced (b) energy loads without groundwater flow after 20 years operation in case of (3 × 3) BHE array with 9m BHE separation (arrow indicates groundwater flow direction).

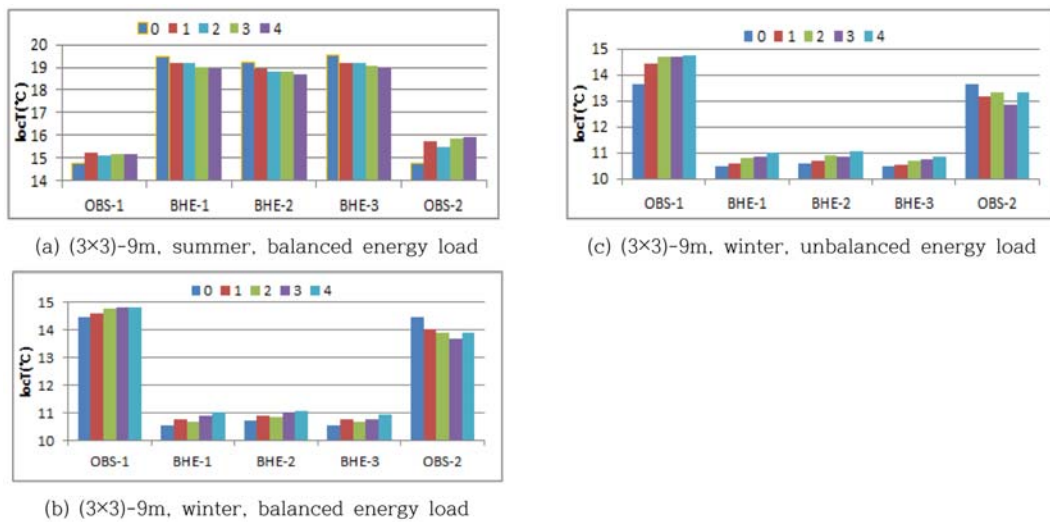


Fig. 13. Time-average local ground temperatures (locT) in (3 × 3) BHE array with 9 m separation at summer (a) and winter season (b) of balanced energy load and winter season (c) of unbalanced energy load under various specific discharges.

수리지질자료를 충분히 수집 분석한 후에 설계를 해야만 대규모 다중 BHE 시스템의 성능을 최적상태로 유지시킬 수 있다. 뿐만 아니라 주변에 설치된 BHE 시스템 사이의 열간섭 현상을 방지하고 주변의 지표수와 지하수 자원의 보호는 물론, 관련된 생태계 보호를 합리적으로 수행할 수 있다. 여러 가지 시나리오별로 모델링을 실시하여 BHE 설계의 신뢰성을 제고시킴과 동시에 주변환경에 영향을 줄 수 있는 제반 악영향을 예측해 보아야 한다.

### 3.3. (3 × 3)-9 배열에서 지하수 유동량(q)에 따른 관측지점별 국지적인 지중온도(locT)의 변동특성

Fig. 13은 BHE 사이의 설치간격이 9m이며 9개의 BHE로 구성된 (3 × 3)-9 형식의 BHE 배열장에 20년간

균형 및 불균형 에너지를 가하는 경우에 비배출량이 각각 0에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가할 경우, BHE-1의 상류 9 m 지점에 위치한 OBS-1 지점과 BHE-3에서 하류 9 m 지점에 소재한 OBS-2 지점 그리고 BHE장 내부의 중앙열에 위치한 BHE-1, BHE-2 및 BHE-3에서의 국지적인 지중온도 (locT)를 나타낸 그림이다. 이 중 (a)는 균형 에너지 부하시, 하절기의 각 관측지점에서 예측한 비배출량에 따른 locT이고, (b)는 균형 에너지 부하시, 동절기에 예측한 비배출량별 locT이며 (c)는 불균형 에너지 부하시, 동절기의 예측한 비배출량별 locT이다. Table 3은 Fig. 13에서 나타난 에너지 부하형식과 비배출량에 따른 각 관측지점에서 locT를 계절별로 요약 정리한 내용이다.



**Table 3.** modeled locTs at two (2) observation points situated at 9 m up and down gradient and three (3) BHE located within (3 × 3) BHE array with 9 m separation under various specific discharge

q (10 <sup>-7</sup> m/s)		OBS-1	BHE-1	BHE-2	BHE-3	OBS-2	OBS1-OBS2
(3 × 3)-9m, Balanced energy load							
0	summer	14.75	19.47	19.21	19.52	14.75	0
	winter	14.45	10.54	10.70	10.53	14.45	0
1	summer	15.27	19.20	18.95	19.20	15.75	0.48
	winter	14.61	10.78	10.88	10.78	14.04	-0.57
2	summer	15.14	19.18	18.84	19.18	15.48	0.34
	winter	14.76	10.67	10.87	10.69	13.89	-0.87
3	summer	15.16	19.00	18.80	19.04	15.87	0.71
	winter	14.80	10.90	11.03	10.78	13.68	-1.12
4	summer	15.15	18.95	18.70	19.03	15.93	0.76
	winter	14.82	11.03	11.07	10.94	13.91	-0.91
(3 × 3)-9 m, Unbalanced energy load							
0	summer	14.08	14.65	14.56	14.68	14.08	0
	winter	13.65	10.50	10.57	10.50	13.65	0
1	summer	14.65	14.63	14.60	14.65	13.85	-0.80
	winter	14.43	10.60	10.68	10.54	13.17	-1.26
2	summer	14.94	14.79	14.75	14.76	14.60	-0.34
	winter	14.67	10.77	10.88	10.69	13.33	-1.34
3	summer	14.98	14.72	14.68	14.69	14.77	-0.21
	winter	14.69	10.84	10.85	10.73	12.86	-1.83
4	summer	14.99	14.72	14.74	14.72	14.59	-0.40
	winter	14.74	11.00	11.05	10.87	13.30	-1.44

비배출량이 0이라 함은 지하수가 유동하지 않는 상태에서, 순수한 열전도에 의해서만 지중온도가 전달되는 경우이다. 따라서 지하수가 유동하지 않는 경우에 BHE장을 중심으로 그 상류와 하류에 소재하는 OBS-1지점과 OBS-2지점의 locT는 동일하다. 즉 Fig. 13과 Table 3에서 비배출량이 0인 경우에, 균형 에너지 부하시, 하절기의 OBS-1 지점과 OBS-2 지점의 locT는 모두 동일한 14.75°C이고 동절기의 OBS-1 지점과 OBS-2 지점의 locT는 모두 14.45°C이다. 이와 마찬가지로 불균형 에너지 부하시, 하절기와 동절기의 locT도 각각 14.08°C와 13.65°C로 동일하다. 그러나 지하수가 유동하는 경우에는 BHE장에서 지중열의 방열 또는 추출로 인해 계절에 따라 냉 및 온축열체의 열운이 형성되고 이 열운이 자연 지하수흐름에 따라 하류구간으로 이동하기 때문에 OBS-1 지점과 OBS-2 지점 사이의 locT는 현저히 달라진다.

Fig. 13과 Table 3에 나타난 바와 같이 균형 에너지 부하시 비배출량이 1 × 10<sup>-7</sup> m/s인 경우, 하절기에는 BHE장에서 방열하는 열에너지로 인해 OBS-2의 locT는 OBS-1의 locT에 비해 0.48°C 높으며 동절기에는 BHE장

에서 열추출로 인해 OBS-2의 locT는 OBS-1의 locT보다 0.57°C 낮다. 비배출량이 4 × 10<sup>-7</sup> m/s인 경우에는 하절기의 OBS-1과 OBS-2 지점 사이의 locT치는 비배출량이 1 × 10<sup>-7</sup> m/s인 경우에 비해 다소 큰 0.76°C 증가하며 동절기에는 0.91°C 증가한다. 즉 비배출량이 증가하면 OBS-1 지점과 OBS-2 지점 사이의 온도차는 상대적으로 커진다.

Fig. 13의 (a)와 같이, 균형 에너지 부하시 하절기에 BHE장에서 열을 방열하는 경우에 OBS-1 지점의 locT는 비배출량에 따라 (15.2 ± 0.07)°C의 범위를 보이며, BHE장(BHE-1, BHE-2 및 BHE-3 관정이 설치된 구역)에서의 locT는 (18.95 ± 0.15)°C이고, 하류구간에 소재한 OBS-2 지점의 locT는 온열대를 이루고 있는 BHE을 관류한 지하수의 영향을 받아 OBS-1 지점의 locT보다 약 0.34~0.78°C가 높은 (15.7 ± 0.23)°C를 유지한다. 이러한 형태의 온도변동은 동절기의 균형 에너지 부하시에도 동일하게 재현된다. 즉 동절기에 OBS-1 지점의 locT는 14.61~14.82°C를 유지하나, BHE장의 locT는 (10.87 ± 0.20)°C의 냉열대를 형성하고, OBS-1 지점에서 냉열대를

지나 하류구간으로 유동하는 지하수의 영향을 받아 OBS-2 지점의 locT는 OBS-1 지점의 locT보다 약 0.87°C 낮은 13.68~14.04°C를 유지한다.

균형 에너지 부하시, 하절기에 BHE장과 BHE장의 온 및 냉열대의 영향을 거의 받지 않는 상류구간에 소재한 OBS-1 지점의 locT는 지하수의 비배출량이 증가하면 전반적으로 하강한다(Fig. 13의 (a)와 Table 3). 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s에서  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하는 경우에 OBS-1의 locT는 15.27°C에서 15.15°C로 하강하고, BHE-1 지점은 19.20°C에서 18.95°C로, BHE-2 지점은 18.95°C에서 18.70°C로, BHE-3 지점은 19.20°C에서 19.03°C로 하강한다. 그러나 OBS-2의 locT는 온축열체에서 생성된 열운의 영향을 받아 15.57°C에서 15.93°C로 오히려 상승한다.

Fig. 13의 (c)와 Table 3에 의하면 불균형 에너지 부하시, 하절기에 BHE장(BHE-1, BHE-2 및 BHE-3)의 locT 범위는 모의 대상 지역의 평균 지하수 온도와 지중온도인 15°C에 근접한 ( $14.68 \pm 0.11$ )°C를 유지하며, 동절기에는 ( $10.78 \pm 0.28$ )°C를 유지한다. 불균형 에너지 부하시, 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, 동절기의 OBS-1 지점과 BHE장 및 OBS-2 지점의 locT는 각각 14.43°C, ( $10.61 \pm 0.08$ )°C 및 13.17°C이다. 즉 OBS-2 지점의 locT는 ( $10.61 \pm 0.08$ )°C의 저온 냉축열체를 형성하고 있는 BHE장을 관류하는 지하수의 영향을 받아 OBS-1(14.43°C)에 비해 1.26°C 낮은 13.17°C로 하강한다. 비배출량이  $3 \times 10^{-7}$  m/s 일 때, 동절기의 OBS-1 지점과 BHE장 및 OBS-2 지점의 locT는 각각 14.69°C, ( $10.79 \pm 0.05$ )°C 및 12.86°C이다. 즉 OBS-2 지점의 locT는 OBS-1 지점에 비해 1.83°C 낮은 12.86°C로 감소하는데 이는 전술한 바와 같이 동절기에 BHE장에 형성된 냉열대의 BHE장을 관류하는 지하수류의 영향 때문이다. 불균형 부하시 동절기에 BHE장에서 지중열을 추출만 하는 경우에 OBS-1지점의 locT는 비배출량의 용량에 따라 14.43~14.74°C의 범위를 보이며, BHE 장내에 설치된 BHE-1, BHE-2 및 BHE-3의 locT는 10.54~11.05°C의 범위를 보이고, 하류구간에 소재한 OBS-2 지점의 locT는 상류구간에 소재한 OBE-1에 비해 평균 1.47°C 낮은 12.86~13.33°C를 나타내고 있어 지하수류에 의한 열운의 거동이 하류구간에 소재한 지중열 분포에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다. 전반적으로 보아 지하수의 유동율인 비배출량이 증가하면 하절기의 locT는 하강하고[Fig. 13의 (a)], 동절기의 locT는 상승하여[Fig. 13의 (b)와 (c)] 지하수유동량 증가는 BHE 성능을 향상시키는 역할을 한다.

### 3.4. 지하수 유동에 의해 형성되는 열운의 규모와 형태 및 영향

#### 3.4.1. (3x1)-6m 배열인 경우

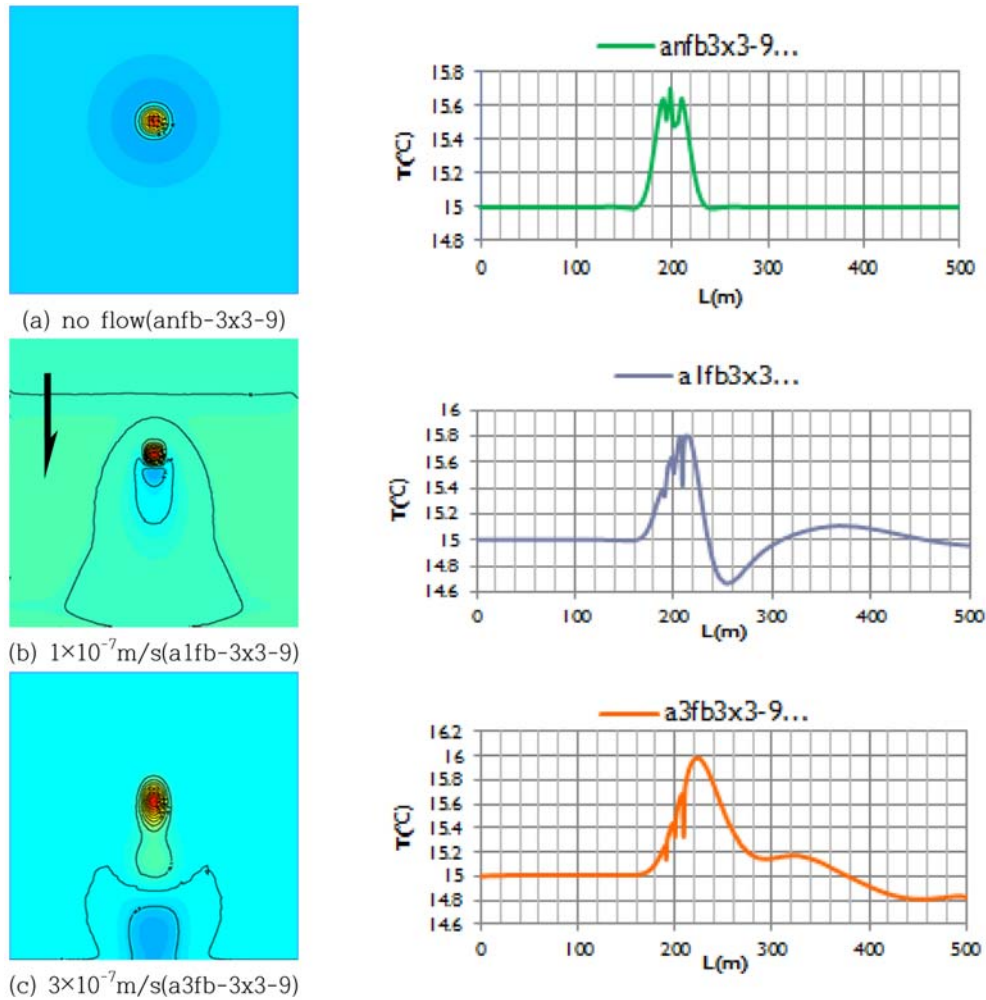
BHE 설치간격이 6 m이고 BHE 배열이 (3×1)인 BHE장에서 비배출량이 0에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s 및  $2 \times 10^{-7}$  m/s로 변할 때, 균형 에너지 부하를 20년간 BHE장에 가할 경우, 지하수 유동량에 따라 BHE 배열장 중심부에 소재한 BHE-2의 경시별-avT는 전술한 Fig. 6과 같다. 이에 의하면 지하수 유동량이 증가할수록 하절기에는 avT가 19.06°C에서 18.93°C로 낮아지고, 반대로 동절기에 avT가 11.0°C에서 11.25°C로 상승하여 결과적으로 BHE의 성능은 향상된다. 즉 동일한 간격으로 BHE를 설치한 BHE 배열장에서 지하수 유동량이 증가하면 시스템의 성능은 향상된다.

또한 위와 같은 조건에서 불균형 에너지 부하를 20년간 BHE장에서 지열을 추출하는 경우, 지하수 유동량에 따라 BHE배열 중심부인 BHE-2에서 변동하는 avT는 전술한 바와 같이 Fig. 10과 같다. 지하수 유동량이  $2 \times 10^{-7}$  m/s 일 때 지하수가 보유하고 있는 열용량은 유동량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s인 경우에 비해 약 2배 정도 크다. 불균형 에너지부하 형식으로 BHE장에서 연속적으로 지열을 추출하는 경우에 BHE장의 avT는 시간이 경과함에 따라 점차 하강한다. 그러나 Fig. 10과 같이 연중 15°C의 일정한 온도를 유지하면서 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s보다 큰  $2 \times 10^{-7}$  m/s의 지하수가 BHE장으로 지속적 유입되는 경우에 지하수 유동량이 많아질수록 하절기의 avT는 영역내로 유입되는 지하수 온도의 영향을 받아 유입지하수의 온도와 비슷한 15°C에 근접한다. 특히 동절기에 비배출량이 0 및  $1 \times 10^{-7}$  m/s 일 때의 avT는 각각 11.1°C와 11.15°C 인데 비해 비배출량이  $2 \times 10^{-7}$  m/s일 경우의 avT는 11.5°C로서 지하수의 유동량이 증가하면 avT도 상승하여 시스템 성능은 향상된다. 즉 지하수 유동량 증가는 BHE 시스템 성능을 개선시키는 역할을 한다.

#### 3.4.2. (3×3)-9 m 배열인 경우

Fig. 14와 Fig. 15는 20년 동안 3가지의 지하수 유동 조건에서 균형 및 불균형 에너지 부하를 지중에 가하는 경우, (3×3)-9 m의 BHE장을 포함한 BHE 주변 지중매체에서 20년 후, 지중온도 분포상태를 나타낸 등온선도를 포함한 열운과 북측경계선에서 남측경계선까지의 거리별 지중온도 단면도이다.

Fig. 14(a)와 Fig. 15(a)와 같이 지하수가 유동하지 않는 순수 열전도모델에서는 (3×3) 배열의 중심에 소재한



**Fig. 14.** Isothermal maps including geothermal plume created by groundwater flow conditions ( $q = 0$ ,  $q = 1 \times 10^{-7}$  and  $q = 3 \times 10^{-7}$  m/s) under the balanced energy load after 20 years operation in case of (3 × 3) BHE array with 9m BHE separation (arrow indicates groundwater flow direction).

BHE-2공의 성능은 그 주변에 소재한 BHE-1과 BHE-3공의 시스템 성능에 비해 저조하다. 이러한 현상은 Fourier 법칙이 Darcy법칙과 이론적으로 유사하기 때문에 지하수 수리학에서 널리 이용하는 중첩원리로 설명이 가능하다.

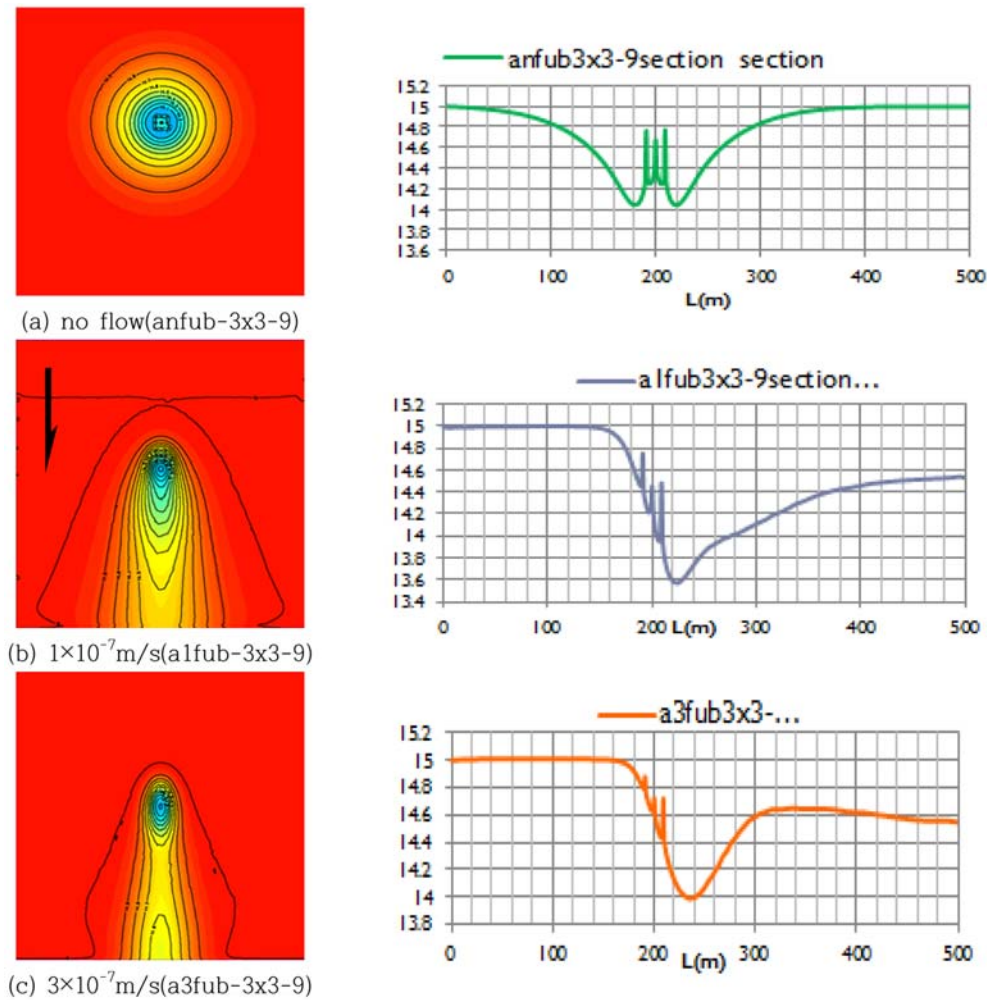
균형 에너지 부하시 비배출량이 0인 경우[Fig. 14의 (a)와 온도 단면도]에 지중온도가 15°C 이상 되는 온열운의 구간(영향반경)은 BHE-2에서 약 37.5 m 구간이다. 균형 에너지 부하시 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s인 경우[Fig. 14의 (b)와 온도 단면도]에 열운의 온도범위는 14.7~15.76°C로서 기존의 BHE장 인근에는 온열대와 BHE장 하류에는 냉열대가 형성된다.

영역의 북측경계에서 약 200 m 지점인 기존의 BHE장을 중심으로 45 m × 45 m 규모의 장방형 온열대(지중온도는 15~15.76°C)가 형성되며, 북측 경계에서 남측으로

237.5 m 지점을 중심으로 하여 약 62.6 m × 100 m 규모의 냉열대(지중온도는 15°C 이하)가 형성된다.

또한 비배출량이  $3 \times 10^{-7}$  m/s인 경우[Fig. 14의 (c)와 온도 단면도], 열운의 온도범위는 14.81~16.0°C이며 기존의 BHE장과 그 인근에는 온열대가, BHE장 하류에는 냉열대가 형성된다. BHE장을 중심으로 그 인근에 형성된 15°C 이상의 팽공형 열운은 폭이 60 m, 길이가 175 m이며 열운의 중심점은 지하수 유동에 의해 BHE-2에서 25 m 하류구간(북측경계에서 225 m 지점)에 소재한다. 영역 북측경계에서 남측으로 450 m 구간에 82 m × 120 m 크기의 저열운대가 남측경계면까지 형성된다.

불균형 에너지 부하시 비배출량이 0인 경우[Fig. 15의 (a)와 온도 단면도]에 BHE장을 중심으로 냉열운이 광범위하게 형성되며 그 온도범위는 13.85~15.0°C이다. 지중



**Fig. 15.** Isothermal maps including geothermal plume created by groundwater flow conditions ( $q = 0$ ,  $q = 1 \times 10^{-7}$  and  $q = 3 \times 10^{-7}$  m/s) under the unbalanced energy load after 20 years operation in case of (3 × 3) BHE array with 9m BHE separation (arrow indicates groundwater flow direction).

온도가 15°C 이하로 하강한 구간은 BHE-2를 중심으로 반경 160 m 구간이다. 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s인 경우 [Fig. 15의 (b)와 온도 단면도]에 냉열운의 온도범위는 13.57~15.0°C이며 지중온도가 13.57~14.6°C로 하강한 냉열운의 크기는 기존의 BHE장을 포함하여 95 m × 150 m 규모에 이르며 냉열운의 중심점은 지하수의 유동으로 인해 BHE-2에서 25 m 남측에 소재한다. 영역 남측경계에서 지중온도가 14.9°C 이하인 구간의 폭은 약 215 m이다. 또한 비배출량이  $3 \times 10^{-7}$  m/s인 경우 [Fig. 15의 (c)]에 냉열운의 온도범위는 14.0~15.0°C이며 기존의 BHE장과 그 인근에는 2조의 냉열대가 형성된다. BHE장을 중심으로 그 인근에 형성된 제 1 냉열운은 폭이 45 m, 길이가 105 m이고 냉열운의 중심점은 지하수 유동에 의해 BHE-2에서 35 m 하류구간에 소재한다. 이에 비해 남측에 소재

하는 제 2 냉열운의 폭은 35 m이고 길이는 남측경계선을 초월한다. 영역 남측경계에서 지중온도가 14.9°C 이하인 구간의 폭은 약 140 m이다.

동일한 개수의 BHE를 사용하는 경우에 지하수 유동에 의한 열간섭 현상은 직선형 배열이 장방형 배열보다 더 심하게 받는다. Fig. 14와 Fig. 15의 (b)와 (c)에 의하면 지하수가 유동하는 경우에 BHE가 설치되어 있는 BHE장 주변 구간에서 온도 간섭영향은 크지 않으나 하류방향으로 광범위한 열운이 형성된다. 따라서 지중열교환기의 조사와 설계시, 최적의 BHE 배열방식과 설치방향을 결정할 때, 해당지역 수문지열계의 지하수 유동방향, 유동률, 지하수의 계절별 변동특성과 수리지질 특성자료 파악이 중요하다. 이러한 정보들은 현장 수리지질조사를 실시하여 취득할 수 있으나 이 조사는 현재 일반적으로 지열교환기

설치와 설계시 거의 실시하지 않고 있어 이와 같은 관행은 추후 반드시 개선되어야 할 것이다. 지하수 유동 때문에 형성되는 열운은 균형 에너지 부하시에는 비교적 소규모적이거나 불균형 에너지 부하시에는 매우 광범위하게 형성된다.

#### 4. 결 론

1. 지하수가 유동하지 않는 지역 즉 순수열전도 모델 지역에서 BHE장을 중심으로 그 상류에 소재하는 관측지점과 하류에 소재하는 관측지점의 지중온도(locT)는 동일하다.
2. 지하수 유동량이 증가하면 하절기의 locT는 하강하고 동절기의 locT는 상승한다. 즉 지하수 유동량 증가는 BHE 성능을 향상시키는 역할을 한다.
3. 지하수가 유동하는 지역에서 BHE장을 중심으로 그 상류에 소재 하는 지점과 하류에 소재하는 지점에서의 locT의 변동특성과 지하수류가 지중온도에 미치는 영향을 모의한 결과, BHE장에서 지중열의 방열 및 추출로 인해 계절에 따라 냉 및 온축열체의 열운이 형성되고 이 열운이 지하수 유동에 따라 하류구간으로 이동하여 BHE장 상 하류 지점의 locT는 많은 차이를 보인다. 즉 균형 에너지 부하시, 하절기에는 자연 지하수가 BHE장에서 방열로 생성된 온축열체를 관류한 후 하류로 유동하므로 하류구간의 지중온도는 상류구간의 지중온도 보다 높으며, 불균형 에너지 부하시, 동절기에는 자연 지하수가 BHE장에서 열 추출로 생성된 냉축열체를 관류한 후, 하류로 유동하므로 하류구간의 지중온도는 상류구간의 지중온도보다 낮아진다.
4. 동일한 개수의 BHE를 사용하는 경우에 지하수 유동에 의한 열간섭 현상은 직선형배열이 장방형배열보다 더 심하게 받는다. 지하수유동 때문에 형성되는 열운은 균형 에너지 부하시에는 비교적 소규모적이거나 불균형 에너지 부하시에는 매우 광범위하게 형성된다.
5. 이 연구결과에 의하면 지하수 유동량, 인접 BHE 간의 설치간격, 냉난방 기간 동안 지중에 가하는 에너지 부하 형식, BHE 배열방향과 지하수 유동방향과의 관계들은 BHE 사이에 발생하는 열간섭과 BHE 시스템의 열적인 성능에 직접 영향을 미치는 요인이다. 우리나라는 다소 산출률의 차이는 있으나 대체적으로 어느 곳이든 천부지하수가 부존 및 산출되기 때문에 추후 천부 지중열을 냉난방에너지원으로 이용하기 위해 지중열교환기를 설계할 때에는 반드시 해당지역의 수문지열학적인 특성과 더불어 수리지질학적인 특성조사가 동시에 이루어져야만 최적의 지중열교환기 설계가 가능할 것이다.

#### 사 사

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

#### References

- Casasso, A. and Sethi, R., 2014, Efficiency of closed loop geothermal heat pumps, A sensitivity analysis. *Renewable Energy* **62**, 737-746
- 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.
- 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., Heaidmann, W., Ruhakk, 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., Heaidmann, W., Ruhakk, 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., Heaidmann, W., Ruhakk, 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.
- Fujii, H., Itori, R., Fujii, J., and Uchida, Y., 2005, Optimizing the design of large scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling. *Geothermics*, **34**(3), 347-364.

- Gehlin, S., 2002, Thermal response test method development and evaluation, Doctoral thesis, *Lulea University of technology*, Lulea, Sweden.
- Hahn, J.S., Han, H.S., and Hahn, C., 2010, *Geothermal energy : Low enthalphy geothermal heating and cooling system and geothermal power plant*, Hanlimwon Publishing Co., Ltd, Seoul, Korea, (14), 10-18.
- Hahn, J.S., and Hahn, C., 2015, *Groundwater management and it's application*, Naeha Publishing Co., Ltd, Seoul, Korea, 422-423.
- Hahn, J.S., Hahn, C., Yoon, Y.S., and Kiem, Y.S., 2016, An influence of groundwater flow on performance of closed borehole heat exchangers(Part-1), *J. Soil Groundw. Environ.*, **21**(3), 64-81.
- He, M., 2012, Numerical modeling of geothermal borehole exchangers systems. PhD thesis, *Institute of Energy and Sustainable Development*, De Monfort University, Leicaster, UK.
- Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K., 1997, Gound Source-Heat Pumps: Design of geothermal systems for commercial institutional buildings, *ASHRAE*, 49-50.
- Vienken, T., Schelenz, S., Rink, K., and Dietrich, P., 2015, Sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface - a critical view on the Status Qud, *Groundwater*, **53**(3), 356-361.
- 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.