

## 지하수류가 대수층 열저장 시스템의 성능에 미치는 영향(3)

한정상<sup>1\*</sup> · 이주현<sup>1</sup> · 김영식<sup>1</sup> · 이광진<sup>1</sup> · 홍경식<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)한서엔지니어링

<sup>2</sup>(주)넥스지오

## The Influence of Groundwater Flow on the Performance of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) System

Jeongsang Hahn<sup>1\*</sup> · Juhyun Lee<sup>1</sup> · Youngseek Kiem<sup>1</sup> · Kwangjin Lee<sup>1</sup> · Kyungsik Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hanse Engineering Inc.

<sup>2</sup>Nexgeo Inc.

### ABSTRACT

When a warm well located downgradient is captured by cold thermal plume originated from an upgradient cold well, the warm thermal plume is pushed further downgradient in the direction of groundwater flow. If groundwater flow direction is parallel to an aquifer thermal energy storage (ATES), the warm well can no longer be utilized as a heat source during the winter season because of the reduced heat capacity of the warm groundwater. It has been found that when the specific discharge is increased by  $1 \times 10^{-7}$  m/s in this situation, the performance of ATES is decreased by approximately 2.9% in the warm thermal plume, and approximately 6.5% in the cold thermal plume. An increase of the specific discharge in a permeable hydrogeothermal system with a relatively large hydraulic gradient creates serious thermal interferences between warm and cold thermal plumes. Therefore, an area comprising a permeable aquifer system with large hydraulic gradient should not be used for ATES site. In case of ATES located perpendicular to groundwater flow, when the specific discharge is increased by  $1 \times 10^{-7}$  m/s in the warm thermal plume, the performance of ATES is decreased by about 2.5%. This is 13.8% less reduced performance than the parallel case, indicating that an increase of groundwater flow tends to decrease the thermal interference between cold and warm wells. The system performance of ATES that is perpendicular to groundwater flow is much better than that of parallel ATES.

**Keywords :** Aquifer thermal energy storage, Warm well, Cold well, Free cold, Local groundwater temperature

### 1. 서 언

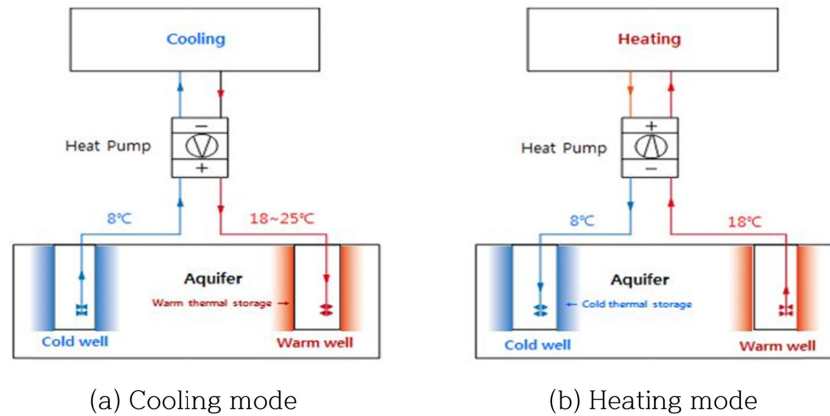
동절기의 냉열(cold heat)을 대수층과 지하수에 저장해 두었다가 하절기의 냉방열원으로 이용하고, 반대로 하절기의 온열(warm heat)을 대수층과 지하수에 저장해 두었다가 동절기의 난방열원으로 이용하는, 즉 대수층을 열에너지 저장 장치로 이용하는 시스템을 대수층 열에너지 저장 (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) 시스템이라 한다. 따라서 ATES 시스템은 외부 열원과 대수층간의 열전달 매체로 지하수를 이용하는 대수층 냉난방에너지 저장소를 포괄적으로 의미한다. 여기서 냉난방 에너지 열원으

로 동절기에는 찬 공기와 같은 무료 냉열원(free cold)과 하절기의 더운 공기도 이에 포함된다. 즉 동절기의 무료 냉열을 대수층에 저장해 두었다가 하절기에 저비용으로 공간 냉방 에너지원으로 사용하고 하절기에 방열되는 폐열(rejected waste heat)을 동일 또는 다른 대수층에 저장해 두었다가 동절기에 난방 에너지원으로 사용할 수도 있다. Fig. 1은 하절기와 동절기에 ATES의 전형적인 운전 방식을 도시한 그림이다. ATES는 Fig. 1과 같이 열에너지를 대수층에 주입 및 채수할 수 있는 온정(warm well)과 냉정(cold well)과 같은 최소 2조의 관정이 있어야 하며 대규모 시스템은 여러 조(set)의 군정(multiple well)을

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

Received : 2017. 1. 18 Reviewed : 2017. 2. 14 Accepted : 2017. 6. 23

Discussion until : 2017. 8. 31



**Fig. 1.** A typical (a) cooling mode and (b) heating mode for a well configuration for an ATEs system [a doublet system installed in an aquifer comprising several injection and pumping wells (or recovery and withdrawal wells)]. Transport processes in this configuration are affected by the advection of groundwater, thermodynamic dispersion, and thermal buoyancy.

사용한다. 대수층인 지중매체에 열에너지를 저장 및 비축하는 원리는 간단하다. 하절기의 냉방시에는 냉정에서 냉지하수를 채수하여 냉방부하를 충족시킬 수 있는 냉열원으로 사용한 후, 수온이 상승한 온지하수는 다시 온정을 통해 대수층으로 주입하여 온축열대(warm thermal energy storage)를 형성한다. 반대로 난방요구조건을 충족시키기 위해서는 온정에서 하절기에 대수층에 저장해 둔 온지하수를 채수하여 난방용 열원으로 사용한 후, 수온이 하강한 냉지하수는 다시 냉정을 통해 대수층으로 주입하여 냉축열대(cold thermal energy storage)를 형성하는 등 열에너지를 계절별로 지하 대수층에 비축해 두었다가 냉 및 온열원으로 이용하는 방법이다. 따라서 이 방법은 외기온도가 높은 하절기에 냉열에너지를 생성시키기 위한 냉각장치나 열펌프가 필요 없거나 냉각장치의 규모를 크게 축소시킬 수 있는 장점들이 있다. 일반적으로 냉각장치는 다량의 전력을 필요로 하나 대수층을 냉열 저장소로 이용하면 많은 양의 전력에너지를 절감시킬 수 있다. ATEs시스템은 기본적으로 대수층에 설치한 냉정과 온정들, 연결배관, 열교환기, 지하수 채수, 주입용 펌프 및 공간 냉난방장치로 구성된다. 또한 ATEs를 적용할 수 있는 수문지열학적인 조건은 투수성 사력으로 구성된 미고결 다공성 대수층이나 단열 암반대수층 등이다. 냉방용으로 사용한 초기의 대수층 열저장 시스템들은 대수층으로 주입한 비교적 높은 온도의 주입수로 인해 대수층이 점이적으로 축열되는 즉, 대수층의 온도가 점이적으로 상승하거나 하류구간에 소재한 대수층열 이용자에게 열 간섭현상을 일으켜 이를 지속적으로 사용하는데 장애요인이 되는 경우도 있었다.

따라서 ATEs 설계시 요구되는 중요한 수리지질 및 지질공학적인 특성들은 ATEs로서 적절한 대수층, 효율적인 생산 및 주입정, 충분한 지하수의 산출성, 적절한 지구화학적 특성, 양수 및 주입용 군정(multiple pumping and injection well) 시설, 대수층의 수리지질학적 및 열적인 특성과 에너지 요구량의 충족성, 부지의 가용성 및 열교환기 등이다. 여러 개의 군정으로 이루어진 ATEs의 경우에는 군정과 군정사이에 열 간섭 현상과 과도한 수위변화를 방지하기 위해, 양수용 군정(multiple wells for pumping)과 주입용 군정(multiple wells for injection) 사이의 거리는 설치할 관정의 개수와 주입 양수량에 따라 차이가 있으나 대체적으로 100~300 m이며, 군정을 이루고 있는 개별 관정간의 이격거리는 해당지역의 수리지질 및 열적 특성에 따라 50~100 m이다. 스위스는 열 간섭에 따른 지중 환경의 악영향을 방지하기 위해 UTES를 비롯한 ATEs의 주입 및 채수정으로부터 100 m 이내에 부존된 지하수의 연간 온도 변동 범위를 자연 지하수의 계절 변동에 비해 3°C 이하로 엄격히 규제하고 있다.

ATEs를 처음으로 실시한 나라는 중국으로 알려져 있으며(Tian Sang, 1980) 1940년대 말부터 지하열 저장시설에 관한 개념이 도입되기 시작하였다. Penrod 등(1949)은 열펌프를 이용한 지중열에너지의 이용가능성을 처음으로 제시하였고, Margen(1959)은 온수를 지하공동에 열에너지 형태로 저장할 수 있음을 제시한 바 있다. 특히 Meyer와 Todd(1974)는 우물(관정)을 이용하여 대수층에 열에너지를 저장할 경우에 사용 가능한 이론적인 모델을 개발하였다. 대다수의 ATEs 프로젝트들은 중국, 스웨덴, 네덜란드, 프랑스, 독일, 캐나다를 선두로 하여 미국 등에서 실시되

고 있으며, 독일은 지하대수층 주입계획에 의거하여 Stuttgart대학 구내에 1,000 m<sup>3</sup> 규모의 ATES를 설치하여 운영과 시험을 하고 있다(Wagner et al, 1988).

1990년대 초에 네덜란드와 스웨덴은 대수층을 이용한 냉열 저장시스템은 허용 가능한 기법으로 인식되기 시작하였고 2011년도에 미고결 사력 대수층을 이용한 1,000여 개소 이상의 ATES 프로젝트가 네덜란드에서 수행된바 있으며 그 결과 현재 네덜란드의 주요 도시지역들은 많은 수의 ATES들을 운영하고 있다. 스웨덴은 자체의 지질특성 때문에 남부의 일부 지역에서만 ATES가 적용되고 있는 하나 현재 운영 중인 ATES 수는 100여 개소에 이른다. 특히 투수성과 저유성이 양호한 esker(사력층으로 구성된 일종의 빙하퇴적층)와 단열 석회암 대수층에 Mw규모 용량의 ATES들을 운영하고 있다(Lihola, 1990). ATES 가동으로 인해 발생하는 온도변화는 대수층 내에서 서식하는 미생물 활동에 심각한 영향을 주기 때문에 열에너지 전달 및 저장에 의한 온도변화가 미생물은 물론 대수층 구성 매체나 지하수에 미치는 물리, 화학적 및 생화학적 영향을 반드시 파악해야 한다(Snijders, 1991). 주입-양수정을 비롯하여 대수층과 관련시설에서 발생할 수 있는 스케일링, 부식작용, 생화학적 막힘현상(biofouling) 등을 방지 내지 극소화 시킬 수 있는 여러 가지의 물처리 기술과 효율성을 분석할 수 있는 연구와 프로그램들이 개발 · 보급되고 있다(Willemsen, 1992).

현재 ATES 시스템들은 하절기의 냉방열에너지 저장시스템으로, 동절기에는 난방열에너지 저장시스템으로 대규모적으로 설계 및 시공되고 있다. 저장된 냉열에너지는 직접 냉방용으로 사용하는데 이 경우에 냉각기와 열펌프는 첨두시각(peak time)의 보조용으로 사용한다. ATES로부터 공급되는 냉방부하는 대체적으로 500 Kwt(142 RT)에서 2,000 Kwt(570 RT) 규모이다. 즉 1 RT의 냉방부하를 공급하는데 필요한 지하수량은 5.68 l/min(1.5 gpm) 규모이다. ATES시스템은 건물의 열부하 조건에 따라 단일열원(single or mono source), 이중열원(doublet heat source) 및 재순환시스템으로 구분한다. 추출정(양수정), 주입정, 열교환기와 열펌프시스템, 지하수와 열전달용 순환수의 유동방향 등 ATES시스템의 구조와 구성성분 등을 고려할 때, 이 시스템은 중규모 내지 대규모 열저장시스템으로 적합한 시설이다. ATES시스템의 열저장능은 지하수 유량 1 m<sup>3</sup>/h당 평균 10 Kwt(10~15 kwt) 규모이다. 예로, 독일의 Rostock에 설치된 ATES시스템은 아파트옥상에 1,000 m<sup>2</sup> 규모의 태양광 집열판과 함께 108동(7,000 m<sup>2</sup>)의 아파트 난방열에너지를 공급한다. ATES는 천부대수층에 30 m 정

도로 설치되어 있고 운영온도는 대체적으로 10~50°C 규모이며 45°C 이하의 공급온도와 열 방사기(radiator)를 연계시킨 저온 열시스템들이다. 또한 동절기에 필요한 난방 에너지를 효율적으로 공급하기 위해 하절기에 태양열에너지를 저장하여 사용한다. 이와 같은 장기적인 열저장시스템은 태양열 분담률을 최대 62%까지 올릴 수 있다. 공급수와 회귀수 사이의 온도차(온도경계)가 6~7°C 되는 냉각기와 연계된 ATES시스템의 COP는 4정도이고, ATES에서 자주 적용하고 있는 냉열(동절기의 찬공기나 폐열) 자체를 무료 냉방(free cooling) 열원으로 사용할 경우의 COP는 15~35 정도이며, ATES와 연계된 열펌프시스템의 COP<sub>h</sub>는 4.5~6.5 정도이다. 장기적인 관점에서 볼 때 ATES시스템은 전통적인 HVAC시스템에 비해 초기 및 천연가스 소비량을 약 50~60% 이상 절감시킬 수 있고 내구 연수가 20~25년이며, 운영비와 정비비가 매우 저렴한 효율적인 냉난방 시스템이다.

본 연구는 타 연구자들의 연구결과에 비해, 지하수 유동률이 ATES 성능 저하에 미치는 영향과 ATES의 배열방향이 지하수의 유동방향과 동일하거나 상이할 경우에 온정과 냉정 사이에서 발생하는 열간섭 현상은 물론 ATES 성능에 미치는 영향을 모의 연구하여 ATES의 설계시 고려해야할 수리지질학적인 최적조건을 제시하였다.

## 2. 지하수류가 ATES 성능에 미치는 영향분석을 위한 지배식과 모의 방법

### 2.1. 지배식과 사용한 전산 코드

ATES는 과거 수십 년간 성공적으로 수행 및 운영되어 온 전통적인 지하열 저장기법이다(Sanner et al., 2003). 복잡한 매질특성과 지층구조를 갖는 대수층계에 ATES를 설치할 경우에 온도차에 따른 부력의 영향이 감안된 전도성 및 이류성 열전도 기작, 적절한 경계조건, 지하수 유동에 관한 지식, 양수 및 주입시설, 대상 영역에 대한 상세하고 명확한 자료가 있어야 한다. 이에 부가해서 각종 물리, 화학 및 생물학적인 작용들은 ATES의 비용효과와 실행 가능성에 크게 영향을 미치는 요소이다. 이와 같이 복잡하고 불확실성이 많은 ATES를 정량적으로 분석 평가하고 설계하기 위해서는 수리지질, 관정의 구조, 지하수의 유동영역, 열에너지 부하와 같은 자료의 획득과 수치모델링은 필수적이다. 대수층의 성능에 영향을 미치는 주요 매개변수들은 대수층의 열전도도, 열용량, 수리전도도 등이다. ATES의 성능은 시간적으로 변하는 대수층의 온도에 따라 좌우된다. 실제로 대수층은 수리지질학적 및 열적특

성이 매우 다양한 물질로 구성되어 있고 지질구조 또한 복잡하기 때문에 대수층을 구성하고 있는 고체상태의 지층매체와 액상인 지하수의 특성에 따라 ATES의 성능이 달라진다. ATES의 열회수율은 1개 대수층에서 주변의 준 대수층이나 비포화대를 상향으로 통과하여 지표로 거동하는 열전달 형태에 따라 좌우된다. 열전달이 지하수계의 물리, 화학 및 생물학적인 특성에 미치는 환경적인 영향 등은 설계단계 이전에 모델링을 실시하여 예측 및 제시해야 한다. ATES 시스템은 심부 피압 대수층은 물론 천부 자유면 대수층에도 설치한다. 대체적으로 광역적인 지하수 유동률이 적은 대수층이나 저투수성층에 의해 피복되어 있어 상부로의 열손실이 거의 일어나지 않는 대수층, 자연적인 지열구배 때문에 초기 열영역이 높은 대수층인 경우에는 심부 피압 대수층이나 암반 대수층을 ATES 적지로 활용한다. 반면에 관정과 관측비용이 저렴하게 소요되는 대수층(이 경우에는 반드시 광역적인 지하수유동을 고려해야 한다)이나 온도가 비교적 낮은 영역 및 허용 가능한 열회수율을 확보할 수 있는 대수층인 경우에는 미고결 퇴적층(예 충적층이나 봉적층) 또는 두께가 두꺼운 결정 질암의 풍화대(예 화강암 풍화대)와 같은 천부 자유면 대수층을 ATES로 이용한다.

수문지열계에서 지하수 유동과 열전달 지배식들은 ① 유체 평형식(질량보존법칙) ② 액상 및 고상으로 구성된 다공질 매체의 열에너지 식(열역학 제1법칙) ③ 유체의 모멘텀 원리에 의거 다음 (1)식과 같이 표현한다(Diersch, 2014).

$$\begin{aligned}
 & sS_0 \frac{\partial h}{\partial t} + n \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q_h + Q_{hw} + Q_{EOB} \\
 & q = -k_r K f_\mu \cdot (\Delta h + \chi e) \\
 & ns(\rho C)_w + (1-n)(\rho C)_s \left] \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C)_w q \cdot \nabla T - \nabla \cdot (A \cdot \nabla T) \right. \\
 & : Q_T + Q_{Tw}(\rho C)_w(T - T_0)Q_h
 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 사용한 각종 기호와 내용은 Table 1과 같다. 이 논문에서 사용한 전산프로그램은 Diersch et al.(2010, 2011a)이 개발한 완전 밀도류, 오염물질 거동과 열에너지 전달을 동시에 처리할 수 있는 3차원 유한요소법의 FEFLOW이다.

일반적으로 ATES의 성능평가는 지하수가 유동하지 않는 순수 열전도모델에 의존하고 있다. 그러나 실제로 지층의 수문지열계는 지하수 유동이 모두 상이하고, ATES의 배열방향과 광역 지하수 유동방향이 서로 상이하기 때문에 순수 열전도 모델로 도출된 결과와는 상당히 다르다.

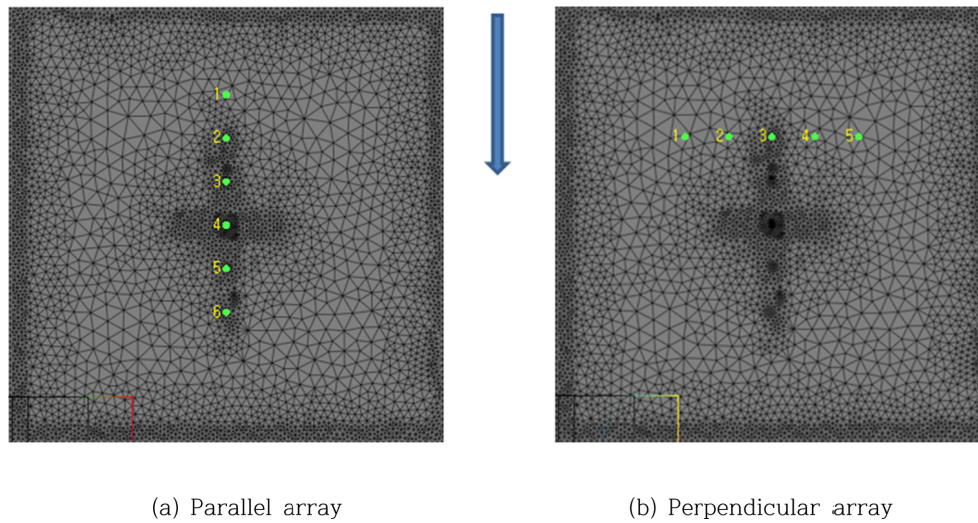
**Table 1.** Nomenclature of symbols used in governing equations

Symbol	Nomenclature
n	Porosity
s	Arc length of curve (L)
S <sub>0</sub>	Specific storage coefficient
q	Specific discharge/Darcy velocity (LT <sup>-1</sup> )
Q <sub>h</sub>	Supply term of flow (T <sup>-1</sup> )
Q <sub>hw</sub>	Specific fluid sink/source function of well (T <sup>-1</sup> )
Q <sub>EOB</sub>	Correction sink/source term of extended Oberbeck-Boussinesq approximation (T <sup>-1</sup> )
K	Tensor of hydraulic conductivity (LT <sup>-1</sup> )
k <sub>r</sub>	Relative permeability
f <sub>u</sub>	Viscosity related function of the fluid
T	Temperature (θ)
T <sub>0</sub>	Initial temperature (θ)
T <sub>w</sub>	Prescribed temperature at well x <sub>w</sub>
(gC) <sub>w</sub>	Effective heat capacity of fluid
(gC) <sub>s</sub>	Effective heat capacity of solid
Q <sub>Tw</sub>	Specific heat sink/source function of a well (ML <sup>-1</sup> T <sup>-3</sup> )
Q <sub>T</sub>	Overall heat sink/source term without well function (ML <sup>-1</sup> T <sup>-3</sup> )
Δ	Unit or identity matrix
×	Buoyancy coefficient: (ρ - ρ <sub>0</sub> ) / ρ <sub>0</sub>
∇	Vector operator

즉 지하수 유동량이 증가하면 열운으로 유입되는 지하수의 영향을 받아 열운의 길이는 확장되고 폭은 감소하며 냉정의 상류구간에 형성되는 냉열운은 상류에서 유입되는 자연 지하수의 영향을 받아 압축되어 그 규모가 감소된다. 지하수 비배출량이 1 × 10<sup>-7</sup> m/s씩 증가할 때마다 온축열대에서 ATES의 성능은 약 2.9%씩 감소하고 냉축열대에서 ATES의 성능은 약 6.5%씩 감소한다. 특히 동수구배가 잘 발달된 고투수성 수문지열계에서 ATES 배열방향이 지하수 유동방향과 동일한 경우에 지하수 유동량이 증가하면 냉정과 온정에 의해 형성된 냉열운과 온열운 사이에 심한 열간섭 현상이 발생하여 ATES의 성능에 지대한 악영향을 미친다.

## 2.2 모의 방법과 입력 조건

이 논문은 Part-I(Hahn et al., 2016)의 후속편으로서 지하수류가 ATES 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 사용한 모델영역은 Fig. 2와 같이 중형방향으로 1,000 × 1000 m인 장방형의 균질 등방매체이고 모델영역의 남북 경계면을 따라 고정수두경계(constant head boundary condition)를 설정하였다. 지하수유동이 ATES 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 ATES의 구성요소인 1개 냉



(a) Parallel array

(b) Perpendicular array

**Fig. 2.** Schematic diagram of cold and warm wells with observation points, aligned (a) parallel and (b) perpendicular to regional groundwater flow direction in the modeled domain (1000 m × 1000 m). Point #2 and point #4 in both arrays are the locations of the cold well and the warm well respectively. The groundwater flows from north to south, as indicated by the blue arrow.

**Table 2.** The required distance to eliminate thermal interference between cold and warm wells in a doublet system and the related analytical equations (Hahn and Hahn, 2016)

Name of estimation method	Relevant equation	Distance (m)
1. Radius of influence in doublet system (Theis)	$2Q_d/\pi Tl$	140
2. Minimum distance between cold and warm well to minimize thermal interference (Gringarten and Sauty)	$[2\Sigma tQ(\rho C)_w/3b(\rho C)_s]^{0.5}$	78
3. Optimum design distance between two Standing Column well (Staten Island, USA)	$0.271 \times (\text{Design load})^{0.5}$	82
4. The radius of Aquifer thermal storage to prevent thermal breakthrough (Sauty)	$(C_w/C_a) \times (Qt/\pi H)^{0.5}$	63
Range and average		$101.3 \pm 38.5 \approx 100$

정(cold well)과 1개 온정(warm well)을 Fig. 2의 (a)와 같이 지하수 유동방향과 평행방향으로 설치한 경우와 (b)와 같이 수직방향으로 설치한 2가지 경우를 모의하였다. 냉정과 온정은 자유면 대수층의 전체 두께에 스크린을 설치한 완전 관통정(fully penetrated well)으로써 공저 스크린의 구경(screen diameter of bottom hole)은 0.2 m이다.

모의영역에 적용한 제반 수리지질학적 및 열적 특성치를 이용하여 산정한 1개 지열정에서 열간섭 현상이 일어나지 않는 최소거리는 Table 2와 같이 약 100 m 정도 이므로 온정과 냉정을 운영하는 2정 시스템에서 적정 이격거리는 그 두 배인 200 m를 적용하였다.

Fig. 2와 같이 모의 영역 내에서 각 관측지점 사이의 거리는 100 m씩, 냉정과 온정사이의 거리는 200 m씩 이격시켰으며 지하수의 평균 온도와 평균 지중온도는 15°C로 가정하였다. Table 3은 냉정과 온정으로 구성된 ATES의 특성과 기타 관련 변수(스크린 경, 순환수와 지하수,

지중매체인 대수층 등)들의 단위와 제반 수리지질 및 열적 특성치들을 요약한 표이다. 즉 모의 대상 대수층의 평균 수리전도도와 비산출률은 각각  $10^{-4}$  m/s와 0.2인 자유면 수문지열계이며 평균 포화두께는 150 m이고, 초기수위는 EL 0 m인 1층 구조로 가정하였다. 이 대수층에 설치한 냉정과 온정에서 양수 및 주입량은 286 m<sup>3</sup>/d이다.

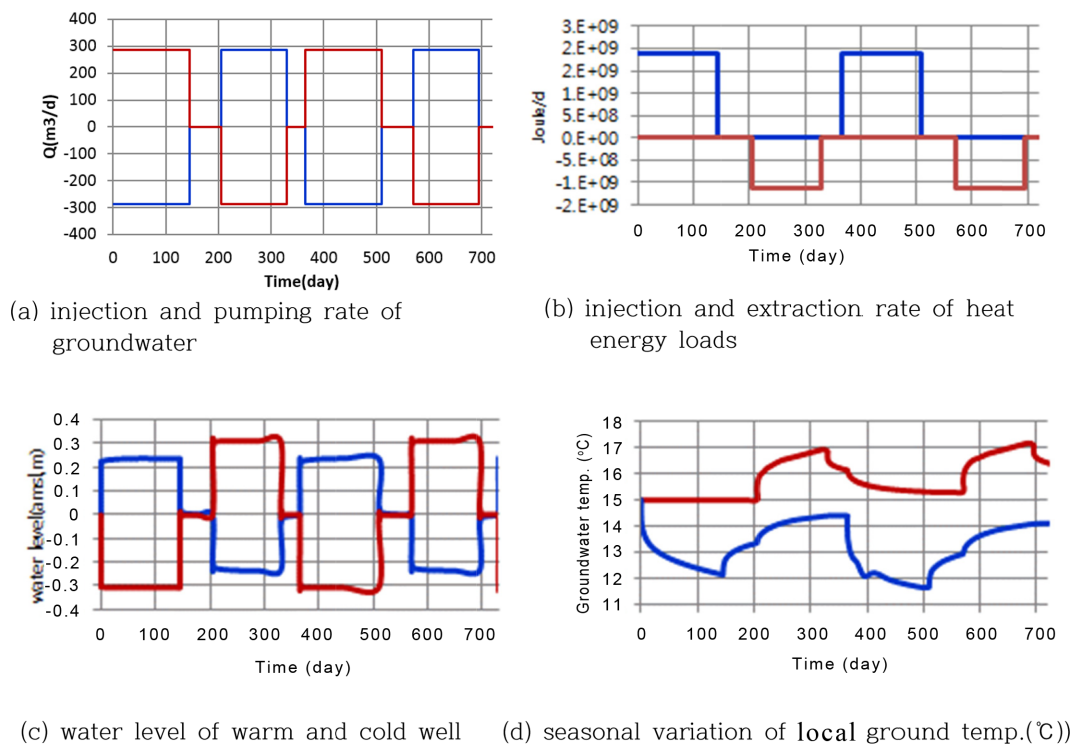
### 3. 모의 결과와 토의

#### 3.1. 초기 2년간의 단기 가동시 지하수류가 ATES의 성능에 미치는 영향

초기 2년 동안 동절기, 춘계-평형기, 하절기 및 추계-평형기에 온정과 냉정을 통해 대수층인 수문 지열계에서 양수 및 주입한 경시별 지하수 유량은 Fig. 3의 (a)와 같고 지중으로 추출 및 방열한 경시별 열 에너지 부하는 Fig. 3의 (b)와 같다. Fig. 3에서 적색은 온정을, 청색은 냉정

**Table 3.** Parameter values for the ATES system, groundwater properties and aquifer materials used for the model

Parameter		Unit	Value	Remarks
Cold & warm well	Well depth	m	150	
	Well diameter	m	0.2	8 inches
Ambient and circulating groundwater	Dynamic viscosity	kg/(m·s)	$0.52 \times 10^{-3}$	
	Density	kg/m <sup>3</sup>	1,0	
	Flow rate	m <sup>3</sup> /d	286	
	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>2</sup> k)
	Initial head	m(EL)	0	
	Initial temperature	°C	15	Annual mean
Hydrogeothermal system (aquifer)	Thermal conductivity	J/(m·s·K)	3	Fissured rocks
	Hydraulic conductivity	m/s	$10^{-4}$	
	Porosity		0.2	
	Volumetric heat capacity	J/(m <sup>3</sup> ·K)	$2.16 \times 10^6$	
	Longitudinal dispersivity	m	5	Fissured rocks
	Transverse dispersivity	m	0.5	Fissured rocks
Initial ground temperature		°C	15	



**Fig. 3.** (a) The injection and pumping rates of the groundwater; (c) water level of the warm and cold well; and (b) heat injection and extraction rates applied to the cold and warm well along with local ground temperature variation (d), during the first 2 years under no groundwater flow ( $q = 0$ ). Here, a – sign indicates the injection of groundwater and heat energy into the well and a + sign stands for the pumping of groundwater and absorption of heat energy from the well (red color: warm well, blue color: cold well).

을 나타낸다. Table 4의 (a)는 Fig. 3의 (a)와 (b)의 내용을 요약한 표이다. Fig. 3의 (a)는 동절기인 난방기에 온정에서 15°C의 일정한 온도를 유지하는 286 m<sup>3</sup>/d의 지하

수를 양수하여 열펌프에서 온열교환을 시킨 후, 온도가 하강한 286 m<sup>3</sup>/d의 저온의 냉지하수를 냉정에 주입시키고, 이와 반대로 하절기에는 냉축열대에 소재한 냉정에서 286



**Table 4.** (a) seasonal injection and extraction rates of groundwater, injection and absorption rates of heat energy from cold and warm wells (b) local ground temperatures (locT) near the warm and cold well in the first and second year

(a) injection and extraction rates of groundwater and heat energy from cold and warm well

Cycle	Period (day)	Pumping & injection rate (m <sup>3</sup> /d) of ATES		Absorption & injection rate of heat energy (Joule/d)	
		Cold well	Warm well	Cold well	Warm well
Winter (heating)	0 ~ 145	-286	+286	$1.89 \times 10^9$	0
Balanced	145 ~ 205	0	0	0	0
Summer (cooling)	205 ~ 330	+286	-286	0	$-1.13 \times 10^9$
Balanced	330 ~ 365	0	0	0	0
Remarks	(-) sign: injection of groundwater or heat energy (+) sign: pumping of groundwater or absorption of heat energy				

(b) simulated seasonal local ground temperature T in the first and second year at the warm and cold well

Cycle	1st Year (day)	Warm well in °C	Cold well in °C	2nd year (day)	Warm well in °C	Cold well in °C
Winter	0-145	15	12.15	365-510	15.31	11.65
Balanced	145-205	15	13.35	510-570	15.37	12.93
Summer	205-330	16.92	14.37	570-695	17.17	14.06
Balanced	330-365	16.25	13.94	695-730	16.69	14.07

m<sup>3</sup>/d의 냉지하수를 채수하여 열펌프에서 열교환을 시킨 후, 온도가 상승한 286 m<sup>3</sup>/d의 온지하수를 온정에 주입시키는, 즉 초기 2년 동안 계절별로 온정과 냉정에서 지하수를 양수 및 주입하는 경시별 양수-주입률을 나타낸 것이다. 춘계와 추계의 평형기에는 냉난방이 불필요한 시기이므로 열펌프를 가동하지 않는다. 특히 지하수가 유동하지 않는 무흐름 상태 [q=0로서 순수한 열전도(conduction only model)에 의해서만 지중열이 전달되는 경우]에서 온정과 냉정에서 지하수 양수에 따른 수위 강하와 지하수 주입에 따른 수위 상승의 변동 양태를 경시별로 모의한 결과는 Fig. 3의 (c)와 같다. 온정에서 동절기에 지하수를 양수할 경우에 지하수위는 0.31 m 정도 하강하며 하절기에 지하수를 주입할 경우에 수위는 0.31 m 정도 상승한다. 또한 냉정에서 동절기에 지하수를 주입할 때에는 수위가 0.23 m 정도 상승하고 지하수를 양수할 때에는 0.23 m 정도 하강한다. Fig. 3의 (b)는 동절기에 냉정에서 추출되는 즉 손실되는 열에너지는 약  $1.89 \times 10^9$  Joule/d이고 하절기에 열펌프를 통해 온정에 방열되는 즉 주입되는 열에너지는  $1.13 \times 10^9$  Joule/d임을 나타낸 그림이다. Fig. 3의 (d)는 Fig. 3의 (a) 및 (b)에서 제시한 온정과 냉정에서 지하수를 양수-주입하면서 동시에 폐열 에너지를 대수층에 주입 또는 추출하는 경우에 초기 2년간 동안 온정과 냉정 주위의 국지적인 평균 지중온도(local ground temperature, 이하 locT라 한다)를 모의한 결과인 경시별 locT 변동곡선이다(Table 4의 (b)).

3.1.1. 온정이 소재한 온축열체 주변 지하수의 초기 2년간의 경시별 수온변동(locT) 특성

Fig. 3 (d)와 Table 4(b)에 제시된 내용과 같이 계절별로 변동하는 온정과 냉정에서 모의된 지하수온도의 변동 내용을 요약하면 다음과 같다.

- ① 동절기(0~145일) : 1차년도의 동절기에는 전년도 하절기에 열펌프를 가동하지 않았기 때문에 온정주위에 온축열체가 형성되지 않은 상태이다 따라서 1차년도 동절기에는 온정에서 일정한 15°C의 온도를 유지하고 있는 자연 지하수를 채수하여 열펌프의 열교환기에서 열교환을 시킨 후, 생성된 온열에너지는 건물의 난방에너지원으로 사용하고, 온도가 15~12.15°C로 하강한 냉순환 지하수는 냉정을 통해 대수층으로 주입하여 냉정주위에 냉축열체를 형성시킨다. 따라서 동절기에 온정주위에 분포된 지하수의 온도는 15°C를 유지한다.
- ② 춘계 평형기(145~205일) : 이 시기는 열펌프를 가동하지 않기 때문에 동절기에 형성된 수위강하 구역인 영향추(cone of depression)구간에 형성된 국지적인 지하수의 동수구배를 따라 온정주위에 분포되어 있던 15°C의 자연 지하수가 지속적으로 영향추 내로 유입되어 온정주위의 locT는 15°C를 유지한다.
- ③ 하절기(205~330일) : 냉정주위에 형성된 냉축열체에서 온도가 최저 12.1°C까지 하강한 냉지하수를 채수하여 열펌프의 열교환기를 통과시킨다. 이때 생성된

냉열은 건물의 냉방에너지로 사용하고 이로 인해 온도가 상승한 16.9°C의 순환 지하수는 온정을 통해 지하 대수층으로 주입시켜 온축열체를 형성시켜 차기 동절기에 온열원으로 사용한다.

- ④ 추계 평형기(330~365일) : 이 시기는 춘계 평형기와 마찬가지로 열펌프를 가동하지 않기 때문에 온도가 16.92°C까지 상승한 지하수는 온정 주위에 분포된 15°C의 자연지하수의 영향을 받아 지하수온은 16.25°C까지 다소 하강한다.
- ⑤ 2차년도(365~730일) 동절기에 온정에서 지하수를 채수하여 난방에너지의 열원으로 이용한 경우에 열펌프의 초기 입구온도(entrance water temperature, EWT)는 15.31°C가 되고 2차년도 하절기에 온정에서 채수하는 지하수의 초기 온도는 1차년도 보다 다소 높은 17.17°C로 상승한다(Fig. 3(d)와 Table 4(b)). 2차년도의 계절별 수온 변동형태는 지하수 유동률에 따라 차이가 있긴 하나 차 후 20년 동안 거의 유사한 형태로 변동한다.

### 3.1.2. 냉정이 소재한 냉축열체 주변 지하수의 초기 2년 간의 경시별 수온변동(locT) 특성

- ① 동절기(0~145일) : 1차년도 동절기에 온정에서 일정한 15°C의 온도를 유지하고 있는 286 m<sup>3</sup>/d의 자연 지하수를 채수하여 열펌프의 열교환기에서 열교환을 시킨 후, 생성된 온열에너지는 건물의 난방에너지원으로 공급하고, 이로 인해 최저 온도가 12.15°C로 하강한 냉순환 지하수는 냉정을 통해 대수층으로 주입하였기 때문에 냉정주위에는 냉축열체가 형성된 상태이다.
- ② 춘계 평형기(145~205일) : 이 시기는 열펌프를 가동하지 않기 때문에 대수층에 지하수를 주입하거나 양수는 물론 폐열을 주입하거나 추출하지 않기 때문에

최저 수온이 12.15°C까지 하강한 1차년도의 냉축열체는 그 주위에 분포되어 있는 15°C의 자연 지하수의 영향을 받아 냉축열체의 지하수온도는 13.35°C까지 상승한다

- ③ 하절기(205~330일) : 춘계 평형기에 13.35°C까지 상승한 냉축열체에서 냉지하수를 채수하면 이로 인해 생성된 수위강하 구간인 영향추 방향으로 주변의 15°C의 자연지하수가 서서히 유입되어 냉축열체의 온도는 최대 14.37°C까지 상승한다.
- ④ 추계 평형기(330~365일) : 이 시기는 춘계 평형기와 동일하게 열펌프를 가동하지 않는 시기이기 때문에 14.37°C까지 상승한 냉축열체의 지하수는 13.94°C까지 다소 하강한다.
- ⑤ 2차년도(365~730일) : 2차년도 동절기에 온정에서 지하수를 채수하여 난방에너지의 열원으로 이용하고 최저 수온이 11.65°C까지 하강한 냉지하수는 냉정을 통해 대수층으로 주입시켜 냉축열체를 형성한다. 또한 하절기에 냉정에서 채수하는 냉지하수의 초기 온도는 1차년도 보다 다소 낮은 14.06°C로서 이는 하절기 열펌프의 초기 입구온도(EWT)가 된다(Fig. 3(d)와 Table 4(b)). 2차년도의 계절별 수온 변동형태는 온정의 경우와 대동소이하게 지하수 유동률에 따라 차이가 있지만 이 후 20년 동안 거의 유사한 형태로 변동한다.

### 3.2. ATEs를 20년간 장기 가동시 지하수류가 ATEs 성능에 미치는 영향

전술한 바와 같이 모의 영역내에 분포된 자유면 대수층의 열적 및 수문지질학적인 특성들은 Table 3과 같고, 이 대수층에 설치한 냉정과 온정에서 계절별 지하수의 양수 및 주입율과 열에너지의 추출 및 방열량은 각각 Fig. 3의 (a)와 (b)와 같다.

**Table 5.** Summary of simulation combinations (array configuration, specific discharge, spacing of cold and warm well, direction of ATEs array to ambient groundwater flow)

Array direction to groundwater flow	Specific discharges (ea)	well spacing (m)	Thermal energy load	No. of scenarios	Symbols
Parallel	6	200	2	12	aT(nT)3F-locT
Perpendicular	6	200	2	12	aT(la)2F-locT
Remarks	0, $0.5 \times 10^{-7}$ , $1 \times 10^{-7}$ $2 \times 10^{-7}$ , $3 \times 10^{-7}$ $4 \times 10^{-7}$			24	

Note: aT(nT)0.5F - locT : 1) "aT(nT)" indicates that the Dirichlet (1st type) thermal boundary condition is not applied and the ATEs array is parallel to the main groundwater flow direction and that "0.5F" means  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s of specific discharge of groundwater and locT stands for the 20-year average of the local ground temperature at the observation point. In the case of aT(la)2F-locT, "la" indicates that the ATEs array is at a right angle (perpendicular) to the ambient groundwater flow direction and that 2F means  $2 \times 10^{-7}$  m/s of specific discharge.



ATES를 20년간 장기 가동할 경우에 ATES의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 전술한 온정과 냉정에서 지하수의 양수 및 주입율과 열에너지의 추출 및 주입량의 형태는 20년간 Fig. 3의 (a)와 (b)와 동일하게 반복되도록 하였다. 이와 같은 형태로 ATES를 20년간 장기간 운영하는 경우에 광역적인 지하수 유동률 즉 비배출량( $q$ , specific discharge or Darcian velocity)이 각각  $0 \text{ m/s}$ 에서  $0.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  및  $4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 로 증가할 경우와 ATES의 배열방향이 지하수 유동방향과 동일한 평행배열인 경우(Fig. 2(a))와 수직배열인 경우(Fig. 2(b))에 주입정과 양수정간에 발생하는 열간섭 현상은 물론 지하수 유동률이 ATES의 성능에 미치는 영향을 Table 5와 같이 총 24종의 시나리오별로 모의 분석하였다.

### 3.2.1 ATES가 지하수 유동방향과 평행하게 배열된 경우

(1) ATES를 20년간 가동시 지하수류가 ATES성능에 미치는 영향

모델 영역에서 남북방향의 중심선을 따라 총 6개소의 관측지점을 Fig. 2의 (a)와 같이 설정하였다. 즉 #1 관측지점은 모의 영역의 최북단 경계( $0 \text{ m}$ )에서 남측  $200 \text{ m}$  지점에 소재하며, 그 외 #2(냉정), #3, #4(온정), #5 및 #6 관측지점들은 #1 관측지점으로 부터 각각 남측으로  $100 \text{ m}$ 씩 이격된 지점에 소재한다. 즉 냉정(#2지점)은 북측경계에서 남측으로  $300 \text{ m}$  지점에, 온정(#4)은 남측으로  $500 \text{ m}$  지점에 소재한다. Fig. 4는 전절에서 언급한 열적 및 수리지질학적인 입력조건 하에서 ATES를 20년간 연속적으로 가동할 때, 비배출량이  $0 \text{ m/s}$ 에서,  $0.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  및  $4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 로 순차적으로 증가할 경우에, ATES의 구성요소인 온

정과 냉정에서의 경시별 국지적인 평균 지하수온도( $\text{locT}$ )를 모의한 결과이다. Fig. 4에서 상단의 6개 변동곡선은 온정에서 예측한 6종의 비배출량에 따른 경시별- $\text{locT}$ 이고, 하단의 6개 변동곡선은 냉정에서 예측한 6종의 비배출량에 따른 경시별- $\text{locT}$ 이다. Fig. 4에 의하면 비배출량이 동일한 경우에 온정 주위의  $\text{locT}$ 는 시간이 경과함에 따라 다소 증가하는데 반해 냉정 주위의  $\text{locT}$ 는 다소 감소한다. 이는 시간이 지남에 따라 온층열대에서는 온열에너지가 소규모이긴 하나 서서히 축적되고 냉층열대에서는 냉열에너지가 점이적으로 축적되고 있음을 시사한다. 초기 5년 쯤까지는 온도 상승 및 하강률이 다소 급하게 변하지만 그 이후부터는 완만하게 변하다가 일정한 온도를 유지한다. 예를 들면 비배출량이  $0 \text{ m/s}$ 인 지하수가 유동하지 않는 경우에 온정 주위의 최고  $\text{locT}$ 들은 ATES 운전개시 330일 후에  $18.3^\circ\text{C}$ , 2,480일 후에  $19.5^\circ\text{C}$  그리고 7,190일 후에는  $19.9^\circ\text{C}$ 로 상승한다. 또한 냉정 주위의 최저  $\text{locT}$ 는 ATES 운전개시 330일 후에  $13.7^\circ\text{C}$ , 2,480일 후에  $11.5^\circ\text{C}$ 에서 7,190일 후에  $9.77^\circ\text{C}$ 로 하강한다.

이에 비해 Fig. 4와 같이 비배출량이 증가하면 온정 주위의  $\text{locT}$ 는 하강하고 반대로 냉정 주위의  $\text{locT}$ 는 상승하여 결과적으로 지하수량 증가는 ATES의 성능을 저하시키는 역할을 한다. 특히 지하수량이  $4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 로 증가하면 동절기에 온정 주위의 최저  $\text{locT}$ 는  $15^\circ\text{C}$ 까지 하강한다. 이는 모의 지역의 배경 지하수 온도를  $15^\circ\text{C}$ 로 가정했기 때문이다. 예를 들어 지하수량이 크게 증가하여 온정과 냉정 주위의  $\text{locT}$ 가  $15^\circ\text{C}$ 에 접근하게 되면 이 ATES는 지하수열펌프 시스템으로 바뀌게 되어 ATES의 축열이점을 완전히 상실하게 된다.

Fig. 5는 비배출량이 각각  $0 \text{ m/s}$ (무흐름)과  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 일 때, 온정과 냉정을 통해 20년간 열에너지를 Fig. 3

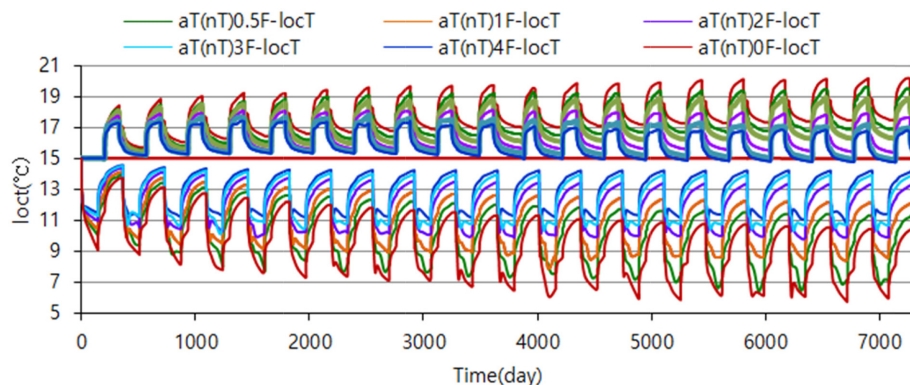
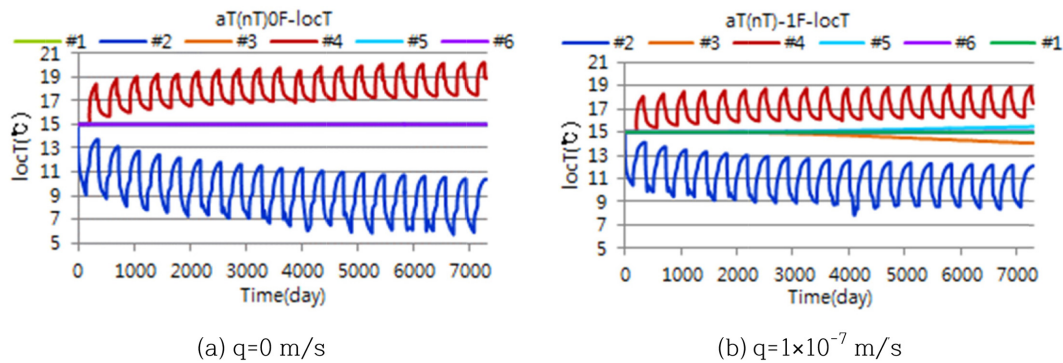


Fig. 4. Time series-local ground temperature  $T$  in  $^\circ\text{C}$  near the warm and cold well with an array parallel to the groundwater flow direction under various specific discharges (the upper six curves are for the warm well and the lower six curves are for the cold well).



**Fig. 5.** Time series-local ground temperature  $T$  in  $^{\circ}\text{C}$  at six observation points with a separation distance of 100 m each with an array parallel to the groundwater flow direction under the condition of no flow and  $1 \times 10^{-7}$  m/s of specific discharge (red color: warm well, blue color: cold well).

**Table 6.** Local ground temperature in  $T$  in of six observation points with an array parallel to the groundwater flow direction under no flow and  $1 \times 10^{-7}$  m/s of specific discharge

OB point and $q$ (m/s)	Groundwater temperature in Celsius					
	#1	#2 (cold well)	#3	#4 (warm well)	#5	#6
0	15.0	13.5~5.93	15.0	15.0~19.9	15.0	15.0
$1 \times 10^{-7}$	15.0	13.9~8.63	14.1	15.0~19.0	15.08	15.0
Affected	not	Yes, by cold thermal plume		Yes, by warm thermal plume		

(b)와 같이 계절별로 주입 및 추출할 경우에, 지하수 유동 방향과 평행하게, 거리를 100 m씩 이격시켜 배열시킨 6개 관측지점에서의 경시별  $\text{locT}$ 이다. 여기서 #4번은 온정, #2번은 냉정의 위치이다. 비배출량이 0 m/s이란 순수한 열전도(conduction only)에 의해 냉열과 온열이 지중에서 전달되는 전도성 열전달을 의미한다. Table 6은 비배출량이 0 m/s와  $1 \times 10^{-7}$  m/s일 경우에 각 관측지점에서의  $\text{locT}$ 와 비배출량에 따라 형성된 온축 및 냉축열운(warm and cold thermal plume)에 의해 주변 지하수에 미치는 영향을 간단히 요약한 표이다.

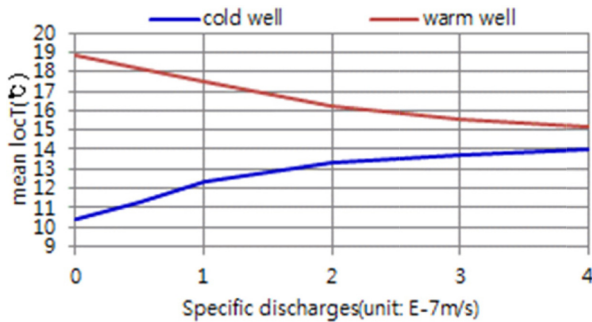
비배출량이 0 m/s인 경우에 냉정을 통해 주입한 저온의 냉지하수의 온도는 최고  $13.5^{\circ}\text{C}$  ~ 최저  $5.93^{\circ}\text{C}$ 이고, 온정에서 주입한 온지하수의 온도는 최고  $19.9^{\circ}\text{C}$  ~ 최저  $15^{\circ}\text{C}$ 이다. 그러나 #4(온정)과 #2(냉정)에서 각각 100 m씩 순차적으로 떨어져 있는 #1, #3, #5 및 #6 관측지점의  $\text{locT}$ 는 모두 자연 지하수의 배경온도와 동일한  $15^{\circ}\text{C}$ 를 나타내고 있어 온정과 냉정에서 주입한 온열 및 냉열부하의 영향을 전혀 받지 않는다. 즉 대수층으로 주입 및 추출한 열부하가 주변 환경에 영향을 미치는 거리는 100 m 이내로서 이는 모든 관측지점들이 전술한 바와 같이 영향권 밖에 소재해 있음을 잘 나타내고 있다. 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s인 경우, 동절기에 냉정을 통해 주입한

$13.9^{\circ}\text{C}$ ~ $8.63^{\circ}\text{C}$ 의 저온 지하수의 영향으로 냉정하류 100 m 지점에 소재한 #3 관측지점의 지하수온도는  $14.1^{\circ}\text{C}$ 로 하강하며, 온정에서 100 m 하류지점에 소재한 #5 지점의 지하수는 하절기에 온정을 통해 주입한  $15.19^{\circ}\text{C}$ 의 온지하수의 영향을 받아  $15.08^{\circ}\text{C}$ 로 상승한다. 그러나 200 m 하류구간에 소재한 #6 지점은 전혀 영향을 받지 않는다. 지하수 유동률이 0 m/s에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 온축열대에 위치한 #4(온정) 주위의 지하수는  $19.9^{\circ}\text{C}$ 에서  $19.0^{\circ}\text{C}$ 로 하강하고, 냉축열대에 소재한 #2(냉정) 주위의 지하수는  $5.93^{\circ}\text{C}$ 에서  $8.63^{\circ}\text{C}$ 로 상승하여 ATEs의 성능은 저하한다.

Fig. 6은 냉정(#2)과 온정(#4)에서 비배출량 증가에 따라 변동하는 20년간의 평균  $\text{locT}$ 를 도시한 그림이다. 비배출량이 0인 무흐름영역에서 온축열대에 소재한 온정의 20년간 평균  $\text{locT}$ 는  $17.9^{\circ}\text{C}$ 이나 비배출량이  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 평균  $\text{locT}$ 는  $15.8^{\circ}\text{C}$ 로 약  $2.1^{\circ}\text{C}$  정도 하강한다. 상술한  $\text{locT}$ 는 동절기에 열펌프의 입구온도(EWT)가 되기 때문에 입구온도의 감소는 ATEs의 성능저하를 의미한다. 즉 지하수 무흐름상태에 비해 지하수의 비배출량이  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 ATEs의 성능은 11.7% 저하한다. 즉 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s씩 증가할 때마다 ATEs의 성능은 약 2.9%씩 감소한다. 냉축열대의 경우에

도 비배출량이 0 m/s인 무흐름상태에서 냉정의 평균 locT는 9.73°C이지만 비배출량이  $4 \times 10^{-7}$  m/s으로 증가하면 locT는 13.2°C로 약 3.47°C 상승하여 ATES의 성능은 약 26.2% 저하한다. 즉 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s씩 증가할 때마다 ATES의 성능은 약 6.5%씩 감소한다.

투수성이 양호하고 동수구배가 잘 발달된 수문지열계에 서 ATES 배열방향이 지하수유동 방향과 평행한 경우에

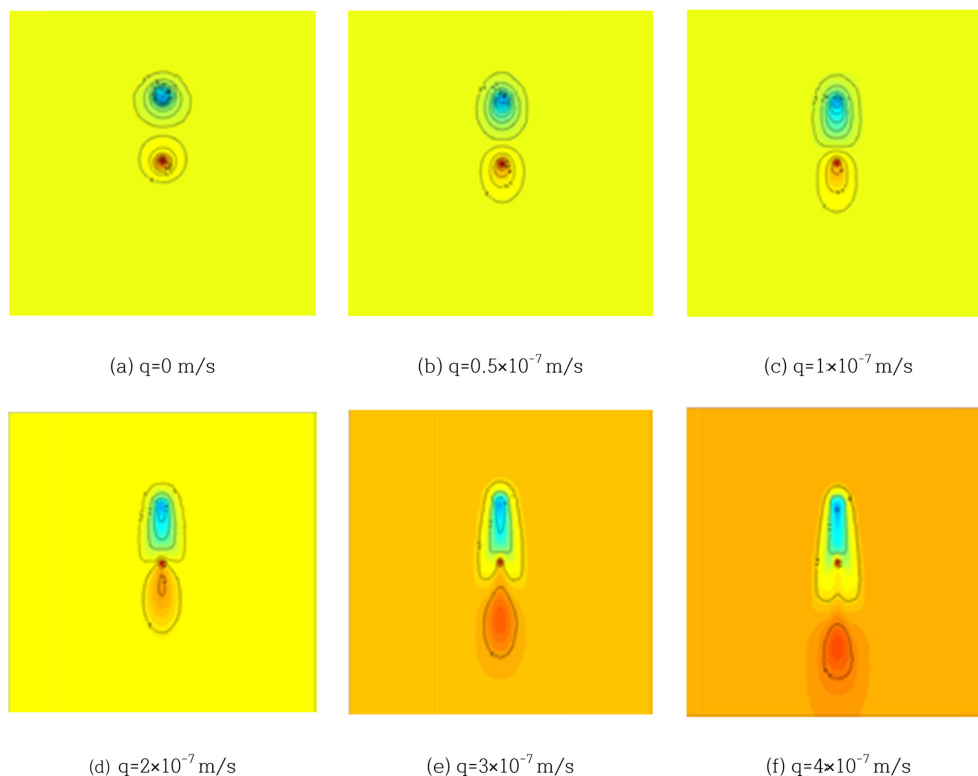


**Fig. 6.** The decrease of the ATES system performance of the warm well and cold well by an increase of specific discharge during 20 years of operation of ATES system (relation between average local ground temperature  $T$  in °C and specific discharges).

비배출량이 증가하면 냉정과 온정에 의해 형성된 냉열운(cold thermal plume)과 온열운(warm thermal plume)사이에 심한 열간섭 현상이 발생하여 이로 인해 동절기에 ATES의 성능은 최대 26.2%까지 저하한다. 즉 지하수유동량이 증가하면 ATES는 냉축열체로서의 기능을 완전히 상실하여 일반 지하수열펌프 시스템과 같이 된다. 따라서 ATES의 구성요소인 주입정과 양수정의 역할을 하는 냉정군(cold well field)과 온정군(warm well field)을 설치할 때, 특별히 고려해야할 점은 이들 냉정군과 온정군의 배열방향이 지하수 유동방향과 동일한 즉 평행한 방향으로 설치되지 않도록 해야 한다.

(2) ATES를 20년간 가동시 비배출량 변동에 따른 열운의 규모와 거리별 locT변동 특성

Fig. 7은 ATES를 20년간 지속적으로 가동하는 경우에 지하수 유동량인 비배출량에 따라 냉정과 온정 주위에 형성되는 냉열운과 온열운을 모의하여 도시한 것이다. Fig. 7(a)에 의하면 전도성 열전달이 지배하는 지역( $q=0$  m/s)에서 ATES를 20년간 지속적으로 가동한 후, 형성된 열운 가운데 수온이 14.9°C보다 낮은 구간은 냉정을 중심으로



**Fig. 7.** Cold and warm thermal plumes created by injection and abstraction of groundwater and heat energy at cold and warm wells, located at 300 m and 500 m, respectively, from the northern boundary of the model domain, with a an array parallel to the regional groundwater flow direction under various specific discharges (units:  $10^{-7}$  m/s) after 20 years (blue: cold thermal plume and red: warm thermal plume).

**Table 7.** Minimum and maximum local ground temperature  $T$  in  $^{\circ}\text{C}$  of the hot spots, migrated distance (m) of the hot spots from cold and warm well (down-gradient), and the extent (width  $\times$  length in meter) of the thermal plumes under various specific discharges after 20 years operation of the ATES (north to south direction)

$q$ ( $10^{-7}\text{m/s}$ )	Cold thermal plume			Warm thermal plume			
	Hotspot- Min $T$ in $^{\circ}\text{C}$	Migrated distance of the hot spot from cold well (m)	Areal extent lower than $14.9^{\circ}\text{C}$ (length $\times$ width) (m)	Hotspot- Max $T$ in $^{\circ}\text{C}$	Migrated distance of the hot spot from warm well (m)	Areal extent higher than $15.1^{\circ}\text{C}$ (length $\times$ width) (m)	2nd Thermal plume higher than $15.1^{\circ}\text{C}$ (m)
0	10.4	0	182 $\times$ 182	18.9	0	164 $\times$ 164	—
0.5	11.3	1	216 $\times$ 156	18.2	0	190 $\times$ 132	—
1	12.1	4	238 $\times$ 150	17.5	1	216 $\times$ 127	—
2	13.1	16	252 $\times$ 127	16.3	2	272 $\times$ 117	—
3	13.7	24	307 $\times$ 107	15.6	2.5	344 $\times$ 107	494~518(15.6) 560~838(15.3)
4	14.0	34	388 $\times$ 88 (246~492) (518~834)	15.3	3	432 $\times$ 93	436~512(15.3) 682~928(15.2)

반경이 91.0 m 정도 되는 원형의 냉열운을 이루며, 반대로 수온이  $15.1^{\circ}\text{C}$ 보다 높은 구간은 온정을 중심으로 반경이 약 82 m인 온열운을 형성한다. 이는 전절에서 언급한 영향반경이 100 m 이내임을 잘 나타내고 있다. Table 7은 Fig. 7의 모의 결과를 요약한 표이다. 즉 비배출량의 변동에 따라 ATES 운전개시 20년 후에 형성되는 냉열운과 온열운 가운데 최저온과 최고온(이하 hot spot라 한다), 최저 및 최고온 출현지점이 하류구배구간으로 거동한 거리, 냉열운 가운데 수온이  $14.9^{\circ}\text{C}$  미만인 열운의 규모(길이와 폭)와 온열운 가운데 수온이  $15.1^{\circ}\text{C}$  이상인 열운의 규모(길이와 폭) 및 지하수유입에 따라 하류구간에 형성된 제2열운(secondary thermal plume)의 발달 분포지점들을 나타낸 표이다. Table 7과 Fig. 7에 의하면 지하수 유량이 증가하면 열운으로 유입되는 지하수의 영향을 받아 열운의 길이는 확장되고 폭은 감소한다. 특히 냉정의 상류구간에 형성되는 냉열운은 상류에서 유입되는 자연 지하수의 영향을 받아 압축되어 그 규모가 감소된다.

Fig. 7(c)와 같이 비배출량이  $1 \times 10^{-7}\text{m/s}$  일 때 냉열운 가운데  $14.9^{\circ}\text{C}$  등온선의 남측경계는 냉정에서 200 m 남측에 소재한 온정지점까지 확장되고 비배출량이  $3 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 일 경우에는 냉열운의  $14.9^{\circ}\text{C}$  등온선은 온정을 완전히 포획한다. 전술한 바와 같이 지하수의 흐름이 무흐름상태에서 수온이  $14.9^{\circ}\text{C}$  미만인 냉열운은 반경이 91.0 m 정도인 원형을 이루지만, 비배출량이  $1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 로 증가하면 냉열운은 길이와 폭은 각각  $238\text{ m} \times 150\text{ m}$ 인 타원형으로 바뀌고, 비배출량이  $3 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 로 증가하면 냉열운은 길이와 폭이 각각  $307\text{ m} \times 107\text{ m}$ 인 하트형 타원체로 바뀌어

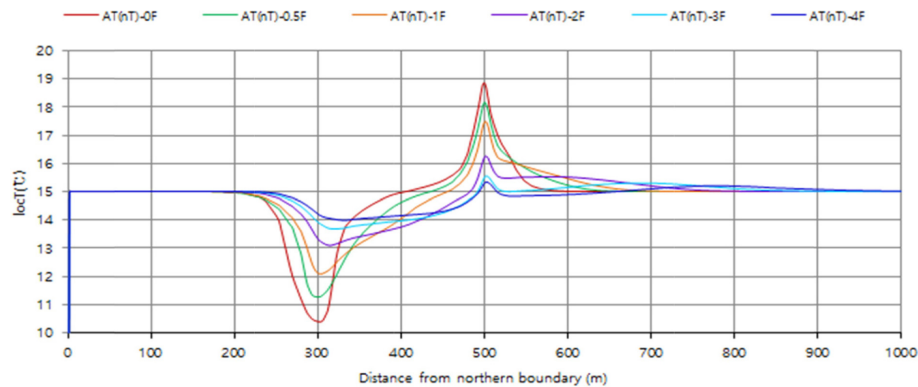
냉열운의 길이는 1.7배 확장되고 폭은 0.59배 감소한다.

이러한 현상은 온열운의 경우에도 유사하게 나타난다. 순수한 열전도에 의해서만 지중열이 전달(conduction only)되는 즉 비배출량이 0 m/s인 상태에서 냉열운의 최저온도는  $10.4^{\circ}\text{C}$ 이다(냉정에서). 그러나 비배출량이  $0.5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 에서  $1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ,  $2 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ,  $3 \times 10^{-7}\text{m/s}$  및  $4 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 로 점차적으로 증가하면 최저온도는 각각  $11.3^{\circ}\text{C}$ ,  $12.1^{\circ}\text{C}$ ,  $13.1^{\circ}\text{C}$ ,  $13.7^{\circ}\text{C}$  및  $14.0^{\circ}\text{C}$ 로 상승하고 최저온 출현지점은 냉정으로부터 각각 1 m, 4 m, 16 m, 24 m 및 34 m씩 하류구간으로 이동한다. 이는 기존의  $15^{\circ}\text{C}$ 의 일정한 수온을 유지하고 있는 지하수량의 증가가 기존의 냉축 열체의 온도를 상승시켰음은 물론 지하수유동에 의해 최저온 출현지점이 지하수 유동방향으로 이동하기 때문이다. 이러한 현상은 온축열체에서도 동일하게 발생한다.

온열운에서 비배출량이 0 m/s인 경우와  $0.5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 인 경우에 최고온은 각각  $18.9^{\circ}\text{C}$ 와  $18.2^{\circ}\text{C}$ 이며 그 출현 구간은 온정주위에 고착되어 있으나 비배출량이 각각  $1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ,  $2 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ,  $3 \times 10^{-7}\text{m/s}$  및  $4 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 로 점차적으로 증가하면 최고온도는 각각  $17.5^{\circ}\text{C}$ ,  $16.3^{\circ}\text{C}$ ,  $15.6^{\circ}\text{C}$  및  $15.3^{\circ}\text{C}$ 로 하강하고 그 출현지점은 온정으로부터 각각 1 m, 2 m, 2.5 m, 및 3 m씩 하류구간으로 이동한다.

특히 온열운에서 비배출량이  $3 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 인 경우에는 최저온도가  $15.6^{\circ}\text{C}$ 되는 1차 온열운이 북측 경계에서 494~518 m되는 구간에 형성되고, 그 하류에 2차 오염운은 북측경계에서 560~838 m(길이 약 278 m)에 형성되어 전체적으로 지하수 유동방향을 따라 2개의 온열운이 형성된다. 이러한 현상은 비배출량이  $4 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 인 경우에도





**Fig. 8.** Distance-local ground temperature profiles of the ATES system with a parallel array to regional groundwater flow direction under various specific discharges (units:  $10^{-7}$  m/s). Six observation point of #1, #2 (cold well), #3, #4 (warm well), #5 and #6 are located from 200 m to 700 m from the northern boundary (0 m) of model domain, respectively with a distance interval of 100 m each. The cold well is located at 300 m and warm well at 500 m (see Fig. 2(a)).

1 및 2차 냉열운과 온열운이 생성된다(Table 7).

이와 같이 ATES배열이 지하수 유동방향과 평행한 경우, 하류구간에 소재한 온정은 냉열운에 의해 완전히 포획되거나 또는 온열대는 하류구간으로 밀려나기 때문에 결과적으로 온정은 차기 동절기에 온지하수 채수가 불가능하게 되어 온정으로서의 기능을 완전히 상실한다. 즉 지하수유동은 온축열대와 냉축열대의 성능에 지대한 악영향을 미친다.

Fig. 8은 모델 영역에서 남북방향의 중심선을 따라 총 6개소의 관측지점을 Fig. 2의 (a)처럼 설정하고, 전절에서 언급한 조건으로 ATES를 20년간 운전할 때, 비배출량이 0 m/s에서,  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s,  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s으로 순차적으로 증가할 경우에, ATES 운영개시 후, 7300일째 되는 날의 최북단 경계선(0 m 지점)에서 거리별로 모의한 locT 단면도이다. 지하수량이 증가하면 냉축열체의 온도 중심점은 북측경계에서 남측으로 300 m에 소재한 냉정에서 하류방향으로 이동하고 냉축열체의 상류구간은 지하수 유입량 증가로 인한 압축현상을 받아 냉열운의 규모는 축소되며 냉축열체로 15°C의 일정한 온도를 유지한 지하수의 유입에 의해 냉축열체의 온도는 상승한다. 이에 비해 북측경계에서 남측으로 500 m에 지점에 소재한 온정을 중심으로 형성된 온축열체는 하절기에 대수층으로 방열한 열부하로 인해 지하수의 배경온도(15°C)보다 높은 온도를 유지하나 온축열체로 유입되는 15°C의 배경 지하수와 상류구간에 발달된 저온의 냉열운이 하류구간으로 이동하여 온축열체의 온도는 지하수량이 증가함에 따라 하강하여 배경 지하수온도인 15°C에 접근한다. 이와 같이 지하수량이 증가하면 온축열대의 locT는 점차 감소하고 냉축열대의 locT는 점차 상승

하여 결국 지하수량 증가는 ATES의 성능을 저하시키는 요인이 된다.

### 3.2.3. ATES가 지하수 유동방향과 직각방향으로 배열된 경우

(1) ATES를 20년간 가동시 지하수류가 ATES성능에 미치는 영향

Fig. 2의 (b)는 모델 영역에서 냉정과 온정을 위시한 총 5개소의 관측지점을 지하수 유동방향인 남북방향과 직각인 동서방향으로 설정한 경우이다. 즉 #1 관측지점은 모의 영역의 최서단 경계(0 m)에서 동측 300 m 지점에 소재하며, 그 외 #2(cold well), #3, #4(warm well) 및 #5 관측지점들은 #1 관측지점으로 부터 각각 동쪽방향으로 100 m씩 이격된 지점에 소재한다. 즉 냉정(#2지점)은 서측경계에서 동측으로 400 m 지점에, 온정(#4)은 동측으로 600 m 지점에 소재한다.

Fig. 9는 지하수 유동방향과 직각방향으로 설치된 ATES를 20년간 연속적으로 운전할 경우, 비배출량이 0 m/s에서,  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s,  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s으로 순차적으로 증가할 때, ATES의 구성요소인 온정과 냉정에서의 경시별 locT를 모의한 결과이다. Fig. 9에서 상단의 6개 변동곡선은 온정에서 예측한 6종의 비배출량에 따른 경시별-locT이고, 하단의 6개 변동곡선은 냉정에서 예측한 6종의 비배출량에 따른 경시별-locT이다. Fig. 9에 의하면 비배출량이 동일한 경우에 온정부근의 locT는 시간이 지남에 따라 소규모씩 증가하며 반대로 냉정주위의 locT도 점차 감소하는데 이는 시간이 경과함에 따라 온축열대에서는 온열에너지가 서서히 축적되고 냉축열대에서는 냉열에너지가 서서히 비

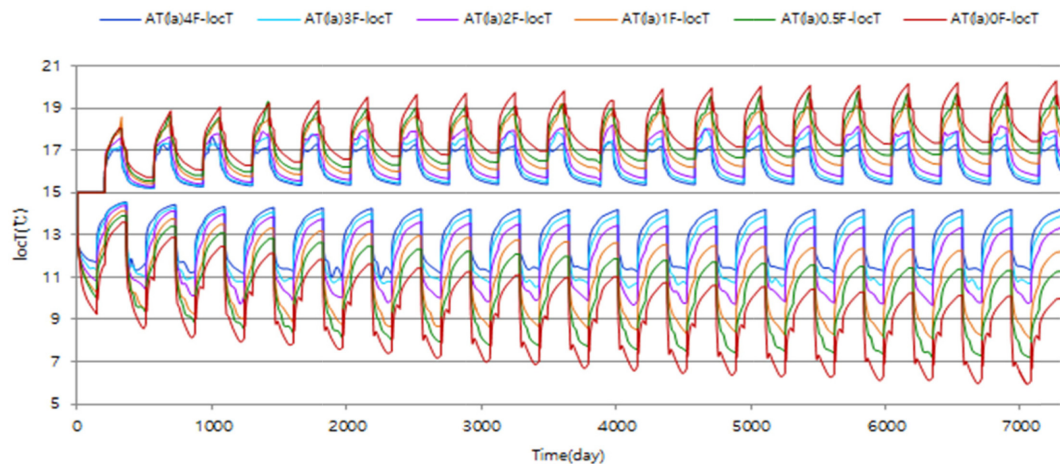


Fig. 9. Time series-local ground temperature  $T$  in  $^{\circ}\text{C}$  near the warm and cold wells with an array perpendicular to the groundwater flow direction under various specific discharges (the upper six curves are for the warm well and lower six curves are for the cold well).

축되기 때문이다.

초기 5년째까지는 온도 상승 및 하강률이 다소 급하게 변하지만 그 이후부터는 완만하게 변하다가 일정한 온도에 수렴한다. 예를 들면 비배출량이  $0\text{ m/s}$ 인 경우에 온정주위의 최고 locT들은 ATES 운전개시 365일 후에  $17.0^{\circ}\text{C}$ , 2,460일 후에  $19.1^{\circ}\text{C}$  그리고 7,170일 후에는  $19.4^{\circ}\text{C}$ 로 상승한다. 또한 냉정주위의 최저 locT는 ATES 운전개시 365일 후에  $13.6^{\circ}\text{C}$ , 2,460일 후에  $11.0^{\circ}\text{C}$ 에서 7,170일 후에  $9.23^{\circ}\text{C}$ 로 하강한다. 즉 비배출량이 증가하면 온정주위의 locT는 하강하고 냉정주위의 locT는 상승하여 지하수량 증가는 ATES의 성능을 저하시키는 역할을 하나 모의 지역의 배경 지하수온도를  $15^{\circ}\text{C}$ 로 가정했기 때문에 지하수량이 증가하더라도 온정주위의 locT는  $15^{\circ}\text{C}$  이하로 하강하지 않으며 냉정주위의 locT도 최대  $15^{\circ}\text{C}$  이상은 초과하지 않는다.

Fig. 10은 ATES의 배열이 지하수유동 방향과 직각일 때, 영역의 서측경계선 가운데 (0,500) 지점을 기점으로 하여 서동방향으로 각각 400 m와 600 m 지점에 소재한 냉정(#2)과 온정(#4)에서 지하수의 비배출량에 따라 변동하는 20년간의 평균 locT를 도시한 그림이다. 온정주위에서 비배출량이 증가하면 평균 locT는  $17.8^{\circ}\text{C}$ 에서  $16.0^{\circ}\text{C}$ 로 하강하고, 냉정주위에서는 최저  $9.56^{\circ}\text{C}$ 에서  $13.2^{\circ}\text{C}$ 로 상승하여 결과적으로 지하수 유출량 증가는 ATES의 성능을 저하시키는 역할을 한다. 또한 온정 주위에서 지하수 비배출량이  $0\text{ m/s}$ 인 경우에 온정주위의 20년간 평균 최대 locT는  $17.8^{\circ}\text{C}$ 이지만 비배출량이  $4 \times 10^{-7}\text{ m/s}$ 로 증가하면 평균 최대 locT는  $16.0^{\circ}\text{C}$ 로서 약  $1.8^{\circ}\text{C}$  하강한다. 즉 동절기에 최소  $1.8^{\circ}\text{C}$ 의 온도 하강으로 인해 ATES의

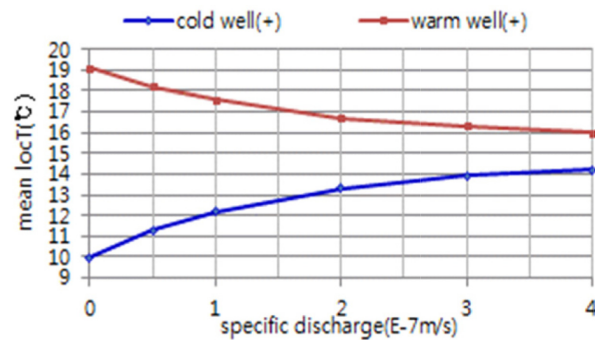


Fig. 10. The decrease in ATES performance through the increase in specific discharges during 20 years of operation of the ATES system (the relationship between the average local ground temperature ( $T$  in  $^{\circ}\text{C}$ ) and specific discharges).

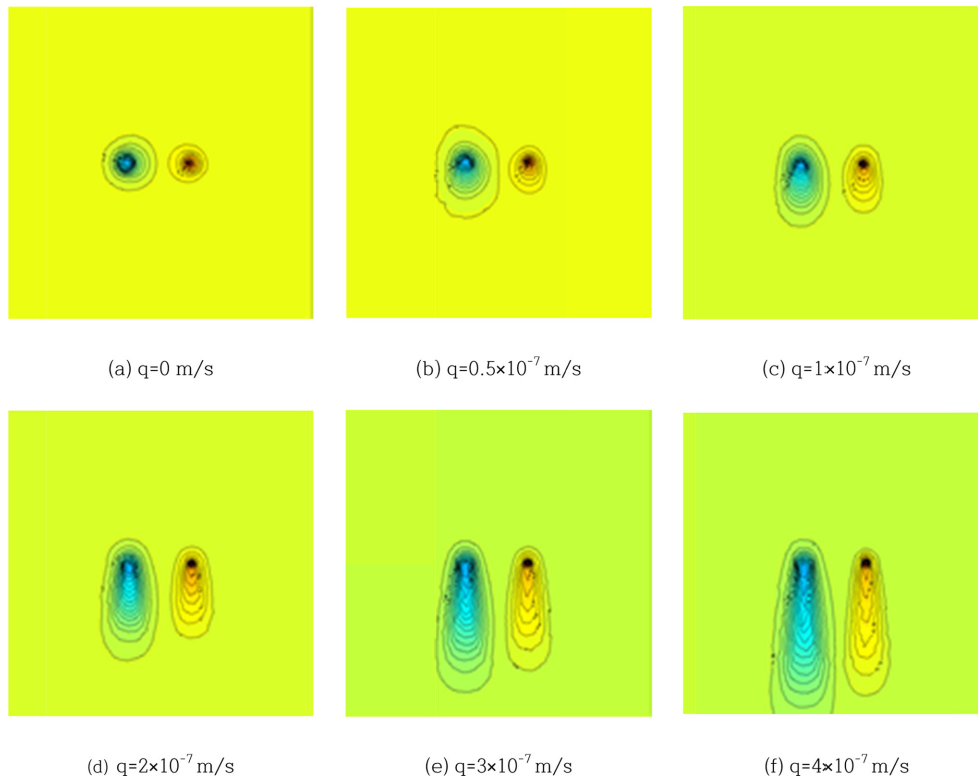
성능은 10% 저하하며 비배출량이  $1 \times 10^{-7}\text{ m/s}$  증가할 때마다 ATES의 성능은 약 2.5%씩 감소한다.

ATES배열이 직각배열인 경우는 평행배열과 동일하게 비배출량이 증가하면 ATES의 성능은 저하한다. 즉 투수성지역으로서 동수구배가 잘 형성된 영역은 ATES의 적지가 아니다. 그러나 동일한 수리지질학적인 조건을 구비하고 있는 영역에서 직각배열은 평행배열에 비해 locT의 최저 및 최고온도 출현구간이 하류구배구간으로 이동하지 않으며 냉정과 온정사이에 발생하는 열간섭 현상이 평행배열에 비해 소규모적이고 비배출량 증가에 따른 ATES의 성능감소율도 소규모적이다.

(2) ATES를 20년간 가동시 비배출량에 따른 열운과 거리별 locT

Fig. 11은 ATES를 20년간 연속적으로 가동하는 경우에





**Fig. 11.** Cold and warm thermal plumes created by the injection and abstraction of groundwater and heat energy at the cold and warm well, located at 400 m and 600 m, respectively from the western boundary of the model domain, with an array perpendicular to the regional groundwater flow direction under various specific discharges (units:  $10^{-7}$  m/s) after 20 years. (Blue: cold thermal plume and red: warm thermal plume).

지하수의 비배출량에 따라 냉정과 온정 주위에 형성되는 냉열운과 온열운의 형태를 모의하여 도시한 그림이다. Fig. 11(a)에 의하면 전도성 열전달이 지배하는 지역(비배출량=0 m/s)에서 ATES를 20년간 지속적으로 가동한 후, 형성된 열운 가운데 수온이  $14.9^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 구간은 냉정을 중심으로 하여 반경이 92.5 m의 원형 냉열운을 이루며, 반대로 수온이  $15.1^{\circ}\text{C}$ 보다 높은 구간은 온정을 중심으로 반경이 약 82 m의 온열운을 형성한다.

Table 8은 Fig. 11의 모의 결과를 요약한 표이다. 비배출량의 변동에 따라 ATES 운전개시 20년 후에 형성되는 냉열운 및 온열운 가운데 최저온과 최고온, 최저온과 최고온의 출현지점이 하류구배구간으로 거동한 거리, 냉열운 가운데 수온이  $14.9^{\circ}\text{C}$  미만인 열운의 규모(길이와 폭)와 온열운 가운데 수온이  $15.1^{\circ}\text{C}$  이상인 열운의 규모(길이와 폭) 등을 요약한 표이다. Table 8과 Fig. 11에 따르면 지하수 유량이 증가하면 남북방향으로 확장되는 열운의 크기는 열운으로 유입되는 지하수의 영향을 받아 열운의 길이는 확장되고 폭은 감소한다. 지하수의 비배출량이 0 m/s인 경우에 냉열운의 폭과 길이는 각각  $185\text{ m} \times 185$

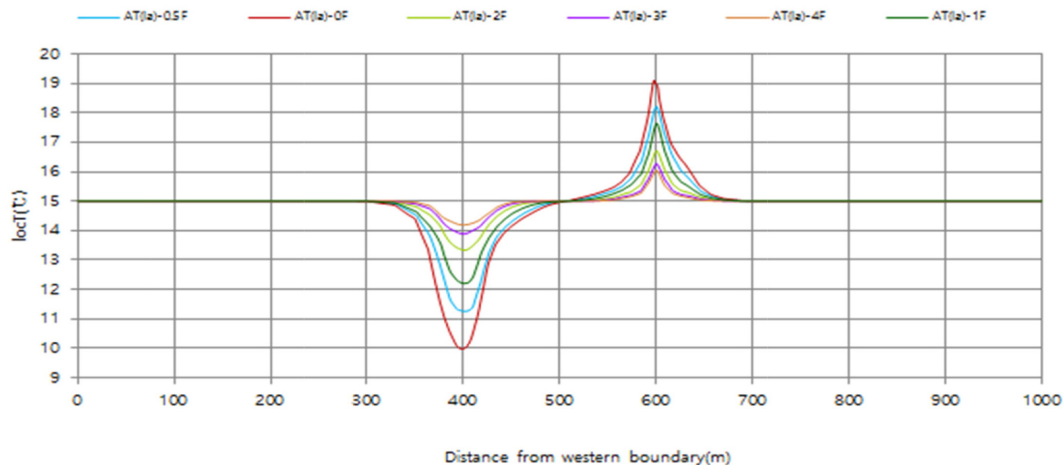
m(영향반경은 폭의 1/2인 92.5 m)이고, 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s에서  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 냉열운의 길이는 260 m에서 491 m로 확장되지만, 냉열운의 폭, 즉 동서방향으로 소재한 냉정의 영향반경은 각각 79 m에서 48 m로 축소되어 200 m의 이격거리를 갖는 냉정과 온정사이에 미치는 열간섭은 일어나지 않는다.

온열운의 경우에도 비배출량이 0 m/s에서  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 이때 생성된 온열운의 길이는 164 m에서 420 m로 2.56배 확장되지만 동서방향으로 소재한 온정의 영향반경은 오히려 각각 82 m에서 42 m로 축소되어 200 m 이격되어 있는 주변 냉정에 미치는 영향은 전무하다. ATES의 배열이 지하수유동 방향과 직각인 경우에 냉정에 의해 생성된 냉열운이 냉정과 200 m 이격되어 소재한 온정에 의해 생성된 온열운에 미치는 열간섭 현상은 발생하지 않는다.

Fig. 12는 모델 영역에서 서동방향의 중심선을 따라 총 5개소의 관측지점을 Fig. 2의 (b)처럼 설정하고, 전절에서 언급한 조건으로 ATES를 20년간 운전할 때, 비배출량이 0 m/s에서,  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s,  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times$

**Table 8.** Minimum and maximum local ground temperatures ( $T$  in  $^{\circ}\text{C}$ ) of the hot spots, migrated distance (m) of the hot spots from the cold and warm wells (down-gradient), and the extent (width  $\times$  length in meters) of thermal plumes under various specific discharges after 20 years of operation of the ATEs (west to east direction)

$q$ ( $10^{-7}$ m/s)	Cold thermal plume			Warm thermal plume		
	Hot spot- Min $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Migrated distance of the hot spot from cold well (m)	Areal extent lower than $14.9^{\circ}\text{C}$ (length $\times$ width) (m)	Hot spot- Min $T$ in $^{\circ}\text{C}$	Migrated distance of the hot spot from warm well (m)	Areal extent higher than $15.1^{\circ}\text{C}$ (length $\times$ width) (m)
0	10	0	$185 \times 185$	19.1	0	$164 \times 164$
0.5	11.3	0	$210 \times 174$	18.2	0	$190 \times 152$
1	12.2	0	$260 \times 158$	17.6	0	$223 \times 138$
2	13.3	0	$335 \times 134$	16.4	0	$280 \times 116$
3	13.9	0	$420 \times 114$	16.3	0	$353 \times 100$
4	14.2	0	$491 \times 96$	16.0	0	$420 \times 84$



**Fig. 12.** Distance-local ground temperature profiles for the ATEs (along the West to East direction) with an array perpendicular to the regional groundwater flow direction under various specific discharges (unit:  $10^{-7}$  m/s). Six observation points of #1, #2 (cold well), #3, #4 (warm well), #5 and #6 are located from 300 m to 800 m, respectively from the western boundary of the model domain with a distance interval of 100 m each. The cold and warm wells are located at 400 m and 600 m from western boundary, respectively, as shown in Fig. 2(b).

$10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 순차적으로 증가할 경우에, ATEs 운영개시 후, 7300일째 되는 날의 최서측 경계선(0 m 지점)에서 최동측 경계선(1000 m)까지 거리별로 모의한 거리별-locT 단면도이다. Fig. 12에서 #1 관측지점은 모의 영역의 최서단 경계(0 m)에서 동측으로 300 m 지점에 위치하며, 그 외 #2(cold well), #3, #4(warm well) 및 #5 관측지점들은 #1 관측지점으로 부터 각각 100 m씩 이격된 지점에 위치한다.

Fig. 11과 Fig. 12 및 Table 8에 나타난 바와 같이 모의영역 내에 지하수유동 방향과 직각방향인 서동방향으로 설치된 ATEs배열에서 지하수의 비배출량에 따른 냉축열대의 최저온도는 지하수가 무흐름 상태인 경우(순수한 열전도 모델)에는  $10^{\circ}\text{C}$ 이다(냉정 위치지점). 그러나 지하수

의 비배출량이  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 냉열운의 최저온도는 각각  $11.3^{\circ}\text{C}$ ,  $12.2^{\circ}\text{C}$ ,  $13.3^{\circ}\text{C}$ ,  $13.9^{\circ}\text{C}$  및  $14.2^{\circ}\text{C}$ 로 상승한다. 이는 자연 지하수의 온도가  $15^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 자연 지하수의 유동량이 증가하면 냉축열대의 온도가 상승하기 때문이다. 온축열대에서 순수한 열전도에 의해 온열이 전달되는 경우에 최고온도는  $19.1^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하나 지하수의 비배출량이 각각  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s에서  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 온열운의 최고온도는 각각  $18.2^{\circ}\text{C}$ ,  $17.6^{\circ}\text{C}$ ,  $16.7^{\circ}\text{C}$ ,  $16.3^{\circ}\text{C}$  및  $16.0^{\circ}\text{C}$ 로 하강하는데 그 원인은 온축열대의 온도보다 낮은  $15^{\circ}\text{C}$ 의 배경 지하수 유동량이 증가하기 때문이다.

ATES 운영 후 20년째 말인 7,300일 후의 냉온열운의 최저 및 최고온도 출현구간은 하류구간으로 이동하지 않고 냉정과 온정주위에 머물러 있다. 그러나 비배출량이 증가하면 열운의 길이는 점차 확장되어 길어지고 폭은 좁아진다. 대체적으로 온열운의 폭은 냉열운의 폭의 87.7% 규모로 축소되고 냉열운의 길이는 온열운의 길이보다 114% 증대된다. 지하수의 비배출량에 따른 냉열운의 최저온도는 비배출량이 증가 할수록 냉열운으로 유입되는 15°C의 자연 지하수의 영향을 받아 점차 증가한다. 즉 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s만큼 증가할 때마다 냉열운의 최저온도는 약 1.05°C씩 상승한다. 반대로 온열운의 최고온도는 비배출량이 증가 할수록 온열운의 최고온도에 비해 저온인 15°C의 자연 지하수의 영향을 받아 점차 하강하여 배경지하수의 온도인 15°C에 접근한다. 전술한 바와 같이 냉열운과 온열운의 길이는 비배출량이 증가하면 냉열운의 길이는 이에 비례하여 확장된다. 즉 지하수가 유동하지 않는 경우 냉열운과 온열운의 길이는 각각 185 m와 164 m 규모이다. 비배출량이  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s에서  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 냉열운의 길이는 210 m에서 491 m로 확장되고 최저온도는 11.3°C에서 14.2°C로 상승한다. 이에 비해 온열운의 길이는 190 m에서 420 m로 증가하고 최고온도는 18.2°C에서 16.0°C로 하강한다(Table 8). Fig. 12와 Table 8에서 명확히 나타난 바와 같이 모의 영역에서 동서방향으로 200 m 거리를 두고 설치된 냉정과 온정에서 비배출량이 0 m/s일 때의 영향반경(동서방향)은 각각 92.5 m와 82 m였으나 비배출량이  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s,  $1 \times 10^{-7}$  m/s,  $2 \times 10^{-7}$  m/s,  $3 \times 10^{-7}$  m/s 및  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가할 경우에, 냉정과 온정의 영향반경은 각각 87 m와 76 m, 79 m와 60 m, 67 m와 58 m, 57 m와 50 m 및 48 m와 42 m로 축소된다. 즉 비배출량이 증가 할수록 냉정과 온정사이의 열간섭 현상은 감소된다.

#### 4. 결 론

(1) 지하수의 비배출량이 동일한 경우에 온정 부근의 locT는 시간이 경과함에 따라 다소 증가하는데 반해 냉정 주위의 locT는 다소 감소한다. 이는 시간경과에 따라 온축열대에서는 온열에너지가 서서히 축적되고 냉축열대에서는 냉열에너지가 서서히 저장되기 때문이다.

(2) 지하수 유량이 증가하면 열운으로 유입되는 지하수의 영향을 받아 열운의 길이는 확장되고 폭은 감소한다. 특히 냉정의 상류구간에 형성되는 냉열운은 상류에서 유입되는 자연 지하수의 영향을 받아 압축되어 그 규모가

감소된다.

(3) 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s씩 증가할 때마다 온축열대에서 ATES의 성능은 약 2.9%씩 감소하고 냉축열대에서 ATES의 성능은 약 6.5%씩 감소한다.

(4) 동수구배가 잘 발달된 고투수성 수문지열계에서 ATES 배열방향이 지하수유동 방향과 동일한 경우에 비배출량이 증가하면 냉정과 온정에 의해 형성된 냉열운과 온열운사이의 심한 열간섭 현상이 발생하여 동절기에 ATES의 성능은 최대 26.3%까지 저하한다. 즉 지하수유동량이 증가하면 ATES는 축열체로서의 기능을 거의 상실하여 일반 지하수열펌프 시스템과 같이 되어 지하수 유동은 ATES의 성능에 지대한 악영향을 미친다. 따라서 ATES에서 냉정군(cold well field)과 온정군(warm well field)을 설계할 때, 반드시 고려해야할 사항은 냉정군과 온정군의 배열방향이 지하수 유동방향과 동일한 즉 평행한 방향으로 설치되지 않도록 해야한다.

(5) ATES 배열이 직각배열인 경우에 비배출량이 증가하면 온정주위의 locT는 하강하고 냉정주위의 locT는 상승하여 지하수유량 증가는 평행배열과 마찬가지로 ATES의 성능을 저하시키는 역할을 한다. 그러나 냉정에 의해 생성된 냉열운이 인접한 온정에 의해 생성된 온열운에 열간섭 현상을 주지는 않는다.

(6) 온정주위에서 지하수 비배출량이 0 m/s인 경우에 20년간 평균 최대 locT는 17.8°C이지만 비배출량이  $4 \times 10^{-7}$  m/s로 증가하면 평균 최대 locT는 16.0°C로서 약 1.8°C 하강하여 이로 인해 ATES의 성능은 10% 저하하며 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s 증가할 때마다 ATES의 성능은 약 2.5%씩 감소한다.

(7) 동수구배가 잘 발달된 고투수성 지역은 ATES의 적지가 아니다. 그러나 동일한 수리지질학적인 조건을 구비하고 있는 영역에서 직각배열은 평행배열에 비해 locT의 최저 및 최고온도 출현구간이 하류구배구간으로 이동하지 않으며 냉정과 온정사이에 발생하는 열간섭현상이 평행배열에 비해 소규모적이고 비배출량 증가에 따른 ATES의 성능감소율도 소규모적이다.

(8) ATES배열이 직각배열인 경우에 온열운의 폭은 냉열운의 폭의 87.7% 규모로 축소되고 냉열운의 길이는 온열운의 길이보다 114% 증대된다. 지하수의 비배출량에 따른 냉열운의 최저온도는 비배출량이 증가 할수록 냉열운으로 유입되는 15°C의 자연 지하수의 영향을 받아 점차 증가한다. 즉 비배출량이  $1 \times 10^{-7}$  m/s만큼 증가할 때마다 냉열운의 최저온도는 약 1.05°C씩 상승한다. 반대로 온열운의 최고온도는 비배출량이 증가 할수록 온열운의 최고

온도에 비해 저온인 15°C의 자연 지하수의 영향을 받아 점차 하강하여 배경지하수의 온도인 15°C에 접근한다.

(9) 본 연구 결과에 의하면 추후, ATES시스템을 설계하고 운영시 추가적으로 반드시 고려해야할 사항으로는 ① 온도변화에 따른 지하수 수질 변화 ② 추출정과 주입정에서 발생하는 (특히 온정에서) 스케일링 문제 ③ 열교환기 표면에서 조류, 병원균, 곰팡이 및 박테리아의 서식과 성장에 따른 수리지구화학적 문제 ④ 열교환기와 열펌프에서 발생하는 마찰수두손실에 따른 양수량과 양수동력의 penalty ⑤ 지하수위의 변동과 같은 수문지열학적인 현상들이다. 따라서 이와 같은 수문 지열학적인 현상을 사전에 면밀히 파악하고 그 대비책을 수립해야 할 것이다.

## 사 사

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

## References

- 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, p.86-95.
- 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., 2014, FEFLOW-Finite Element Modeling of Flow, Mass and Transport in Porous and Fracturing Media, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, p.39-148.
- Hahn, J.S. and Hahn, C., 2016, Hydrogeology and Groundwater Modelling, Naeha Publishing Co., Ltd, Seoul, Korea, p.440-445.
- Hahn, J.S., Hahn, Chan., Yoon, Y.S., and Kiem, Y.S., 2016, An influence of groundwater flow on performance of closed borehole heat exchangers (Part-1), *J. Soil Groundwater Environ.*, **21**(3), 64-81.
- Iihola, H., 1990, *ATES in Finland, Report to ATES Water Well Workshop*, Univ. of Alabama, Tuscaloosa, Nov. Ed., p.57-59.
- Margen, P.H., 1959, Thermal Storage in Rock Chamber, Nuclear Engineering (Great Britain), 4, p.259.
- Meyer, C.F. and Todd, D.K., 1974, Heat storage wells - An answer to energy conservation and thermal pollution, *Water Well Journal*, **25**, 35-41.
- Penrod, E.B., Gard, O.W., Jones, C.D., Collier, H.E., and Batey, R.N., 1949, *Earth Heat Pump Research*, Univ. Kentucky Bulletin 14, December, Lexington, KY.
- Sanner, C., Karytsas, D., Mendrinis and Rybach, L., 2003, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, **32**(6), 579-588.
- Snijders, A.L., 1991, IEA Energy Storage Programme, Annex VI, Environmental and Chemical Aspects of ATES and Research and Development of Water Treatment Methods, *Proc. 5th Int. Conf. Energy Storage Thermastock 91*, NOVEM, Utrecht, The Netherlands, 4, p.131-137.
- Tian Sang, 1980, *Underground Water Storage Introduced in Chinese Cities*, STES Newsletter, 2, p.3.
- Wagner, R., Koch, M., and Adinolfi, M., 1988, Chemische und Biologische Prozesse in Aquifer Warmespeichern, Stuttgart Ber. Siedlungswasserwirtschaft, No. 10, p.1.
- Willemsen, A., 1992, PHREEQM-2D: A Computer Model to Calculate Geochemical Reactions During Transport of Groundwater; Model Description and Application of the Utrecht University ATES, *Proc. 27th IECEC*, San Diego, CA, USA, p.115-124.