

대수층 축열 에너지(ATES) 시스템 모델에서 지하수 유동 영향에 의한 지반내 온도 분포 예측 시뮬레이션

심병완†

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Simulation of thermal distribution with the effect of groundwater flow in an
aquifer thermal energy storage (ATES) system model

Byoung Ohan Shim†

*Groundwater and Geothermal Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),
Daejeon 305-350, Korea*

Abstract

Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) can be a cost-effective and renewable geothermal energy source, depending on site-specific and thermohydraulic conditions. To design an effective ATES system having the effect of groundwater movement, understanding of thermohydraulic processes is necessary. The heat transfer phenomena for an aquifer heat storage are simulated by using FEFLOW with the scenario of heat pump operation with pumping and waste water reinjection in a two layered confined aquifer model. Temperature distribution of the aquifer model is generated, and hydraulic heads and temperature variations are monitored at the both wells during 365 days. The average groundwater velocities are determined with two hydraulic gradient sets according to boundary conditions, and the effect of groundwater flow are shown at the generated thermal distributions of three different depth slices. The generated temperature contour lines at the hydraulic gradient of 0.001 are shaped circular, and the center is moved less than 5 m to the direction of groundwater flow in 365 days simulation period. However at the hydraulic gradient of 0.01, the contour center of the temperature are moved to the end of east boundary at each slice and the largest movement is at bottom slice. By the analysis of thermal interference data between two wells the efficiency of the heat pump system model is validated, and the variation of heads is monitored at injection, pumping and no operation mode.

Keywords: ATES(aquifer thermal energy storage), Heat pump, Thermohydraulic, FEFLOW, Groundwater

† Corresponding author
Tel.: +82-42-868-3055, Fax: +82-42-863-9404
E-mail: boshim@kigam.re.kr

1. 서론

지하수를 이용하는 대수층 축열 에너지(Aquifer Thermal Energy Storage; ATEs) 시스템은 개회로형(open loop)으로서 효율이 높고 대수층이 발달되어 있는 곳이면 이용이 가능하다[1]. 특히 국내에서는 산간지역을 제외한 일반적인 지역의 지하수위는 지하 10 m 전후에 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며[2], 대수층이 발달되어 있는 지역이 많으므로 ATEs 시스템을 이용하는데 유리하다[3]. 그러나 국내에서는 새로운 기술 분야로서 아직까지 거의 적용되지 않고 있으나, 미래에는 이 시스템을 이용한 천부 지열 활용 가능성이 크며 대수층의 특성과 지하수의 이용량에 따라 경제적인 재생에너지원으로 이용될 수 있다. 일반적으로 지하수는 심도가 깊어질수록 연중 온도가 거의 일정하므로 연중 기온변화가 심한 대기와 온도를 이용한 지열펌프 이용이 가능하지만 지하수의 유동 특성에 따라 그 효율성에서 많은 차이가 나타날 수 있다[4].

지하수를 이용한 천부 지열활용 시스템의 효율을 보장하기 위해서는 그 지반의 열물성 뿐만 아니라 대수층내 지하수 부존 특성을 고려하여야 한다. 특히 지하수는 지질학적 특성 및 지형에 따라 그 유동 방향과 속도가 결정되는 경우가 많으며, 국내에서는 지역적으로 지하수의 유량이 풍부한 곳은 많으나 지질이나 지형의 변화가 심한 곳이 많으므로 그 분포특성도 매우 다양하다. ATEs 시스템을 활용하기 위한 양수 및 주입정에 적절한 양수 및 주입이 가능한지를 판단하기 위하여 기본적인 조사로서 대수층의 수리특성을 파악하기 위한 대수성 시험을 실시하여야 한다. 대수층은 크게 충전층 대수층과 같이 지표층을 통하여 강우가 바로 지하로 침투되는 자유면 대수층과 암반내 균열과 같이 여러 복잡한 경로를 통하여 지하수가 피압을 받고 있는 상태의 피압대수층으로 나눌 수 있다. 이러한 각 대수층내 지하수의 유동은 지형이나 수리경계에 따라 그 방향과 속도가 결정되므로 대상 지역의 지하수 위 분포와 수리경사를 파악하는 것이 중요하다.

ATEs 시스템의 효율성을 예측하기 위한 대수층내 지열거동 모델링은 측정 자료나 실증 실험에 의한 시스템 설치를 통한 지열펌프 시스템의 성능 입증을 위한 예비 과정으로서 경제적인 설계를 위하

여 필요하다. 시스템의 효율을 파악하기 위하여 모델링에 의한 시뮬레이션 결과와 실제 시스템 운영에 대한 차이가 있을 수 있으나, 지하수의 유동을 고려한 최적화된 시스템을 구성하는데 매우 유용하다. 대수층내 온도분포 추정을 위한 수치모델링은 지질, 지하수 부존 형태, 암석 및 토양의 물성 등의 여러 불확실성에 의해 발생하는 복잡한 문제에 대하여 다양하고 융통성 있는 해를 제공할 수 있다[5].

지하수의 유동에 따라 지속적인 열적 변화를 예측하기 위한 모델링은 지표 및 인접한 포화대나 비포화대의 지열변화를 해석하기 위한 것으로서, 일반적으로 심부 지반내 열거동 예측보다는 정밀한 해석이 요구된다. 그러나 심부 지반과 천부 대수층내 지열 거동에 대한 기본 원리는 동일하며 경계조건에서만 다소 차이가 있으므로, 지열 거동 코드(code)에서 스케일을 목적에 맞게 구성하여 이용하거나 활용 분야의 특정 목적에 맞는 여러가지 코드를 이용하여 열적 거동을 해석할 수 있다[6~10].

대수층내 지하수 유동 속도에 따른 ATEs 시스템의 운영에 대한 효율을 예측하기 위하여 본 연구에서는 FEFLOW 모델[11]을 이용하여 두가지 지하수위 경계조건을 설정하여 지하수 유속의 변화에 따른 지반의 열적 거동 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 주입공과 양수정의 온도변화를 모니터링 하여 대수층내 축열을 활용할 수 있는 양을 추정하여 지하수 속도가 미치는 열적 거동 특성을 분석하였다.

2. 지열거동 모델링

지하수의 유속을 고려한 대수층 축열 시스템에서의 지반내 열거동 해석을 위해서는 대수층내 열물성, 지하수의 부존량 및 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 매질의 열전도도와 열확산율은 함수율에 따라 크게 달라지며[3], 그에 따른 입력변수에 의하여 모델링 결과가 큰 차이를 나타낸다. 그리고 대수층내 열적 거동은 지하수의 유동에 많은 영향을 받으며, 지질학적 불균질성이나 층의 두께 등의 지질 특성에도 밀접한 관계를 가진다[12].

2.1 이론

대수층내 열적 거동은 첫째, 지하수 유동에 의한 대류(convection), 둘째 매질을 통한 전도(conduction), 그리고 셋째, 매질의 불균질성에 의한 분산(dispersion)을 통하여 전달된다. 따라서 포화된 매질에서의 열 유량 또는 열 유속(net heat flux, $J/(m^2 \cdot s)$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$J_i = \eta c_w \rho_w v_i (T - T_0) - \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \eta c_w \rho_w D_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (1)$$

그리고 η 는 공극율(porosity), c_s , c_w 는 고체와 물의 비열(specific heat, $J/(kg \cdot K)$), v_i 는 지하수의 평균 속도(average linear groundwater velocity vector, m/s), D_{ij} 는 수리동역학적 분산텐서(hydrodynamic dispersion tensor, m^2/s), ρ_w , ρ_s 는 물과 고체의 밀도(density, g/cm^3) 그리고 T , T_0 는 온도(temperature, K)와 기준온도(reference temperature, K), λ 는 대수층의 열전도도(aquifer thermal conductivity, $J/(m \cdot s \cdot K)$)이다.

포화된 매질에서 내부의 열적 유입과 유출이 없는 $\partial v_i / \partial x_i = 0$ 인 경우, 열적 거동 지배방정식은 다음과 같다.

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

여기서, Q_h 는 유출량(discharge rate, m^3/d), v_i/R 은 열거동 전면(heat front)의 대류속도(convective velocity, m/s), $\lambda/c_s \rho_s$ 는 열전도 계수(heat conduction coefficient), D_{ij}/R 은 열분산 계수(heat dispersion coefficient) 그리고 $R = c_s \rho_s / \eta c_w \rho_w$ 는 열적 지연계수(thermal retardation coefficient)이다.

2.2 개념 모델 설정

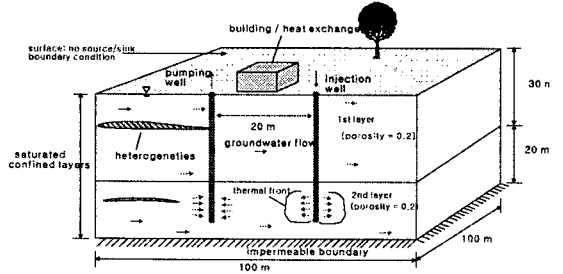


Fig. 1. An aquifer model with geothermal heat pump system for the utilization of aquifer thermal energy storage.

지하수를 이용한 지열펌프 이용시 지반내 열적 거동을 파악하기 위하여 대수층 모델을 설정하였으며(Fig. 1), 입력변수는 Table 1과 같다. 3차원 모델링을 실시하기 위한 시뮬레이션 구간은 $100(x) \times 100(y) \times 50(z)$ m 크기로서 두께가 각각 30 m, 20 m로 이루어진 2 개의 층으로 구성된 모델을 설정하였다. 상부와 하부층의 수리상수 및 대수층 열물성에는 같은 입력변수를 적용하였으며, 지표와 바닥에서는 유입과 유출이 0인 경계조건과 두 층의 초기 지하수위는 0 m이다. 수리지질조건은 2 개의 피압층 형태로서 20%의 공극률을 가지며 지하수의 양수와 주입은 하부층에서 이루어진다. 시뮬레이션 조건에 따라 좌측 경계면은 고정 지하수위로서 0 m를 설정하였으며, 우측 경계면에서는 -0.1 m와 -1.0 m를 설정함으로써 각각 0.001과 0.01의 수리경사를 가진다. 대수층 축열방식의 지열펌프 이용을 위한 서쪽과 동쪽 우물간 거리는 20 m이며, 스크린 구간은 아래 대수층인 표고 -30 ~ -50 m의 하부층 전체 구간이다. 열적 경계조건으로 대수층의 초기온도는 16°C이며, 주입 우물에서 여름에 35°C와 겨울에 5°C의 물을 주입하는 것으로 설정하였다. 그리고 대수층 모델의 심도가 얕으므로 지반의 지온경사도에 대한 영향을 무시하였으며, 지표에서 태양열에 의한 일변화를 없는 것으로 가정하였다.

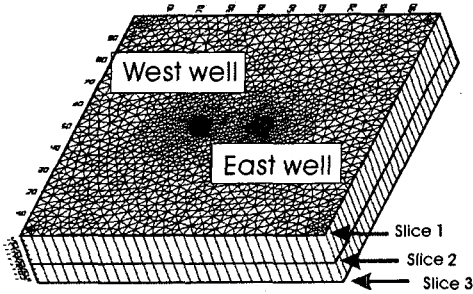


Fig. 2. Schematic diagram of finite element mesh and well locations for ATEs system simulation.

전체 시뮬레이션 구간은 6,272 개의 유한요소와 4,887 개의 격자점으로 구성되어 있으며, 삼각 프리즘 형태의 유한요소 형태를 이용하였다 (Fig. 2). 격자형태는 정밀한 계산을 가능하게 하고, 오차를 감소시키기 위하여 두 우물 주변의 격자 크기를 작게 세분화 하였다. 대수층 축열을 이용하는 경우 주입과 양수를 하나의 우물을 이용하는 경우와 여러 개의 우물을 이용하는 방식이 있으며, 비용면이나 효율면 또는 대수층의 특성에 따라 선정될 수 있다. 두 개의 우물을 이용하는 경우 첫째, 지하수를 양수하여 지열펌프에 순환시킨 후 이용된 물을 대수층에 재주입하는데, 계절별로 양수와 주입 우물을 바꾸어서 지열펌프를 운용하는 방법이 있다. 그리고 둘째, 계절과 상관없이 양수 우물과 주입 우물을 지정하여 지하수를 순환시키는 방식이 있다 (Fig. 3).

본 연구에서는 일반적으로 보편화된 2개의 우물에서 주입과 양수를 계절에 따라 바꾸어 실시할 수 있는 시스템을 설정하였으며, 지열펌프의 효율은 계절적인 운용방식에 따라 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 먼저 여름에 90일간 서쪽 우물에서 $50 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 물을 양수하여 지열펌프에 순환시켜 발생된 35°C 의 지하수를 동쪽 우물에 주입한 후, 주입과 양수를 90일간 중지시킨다. 그리고 겨울에 주입 우물과 양수 우물을 바꾸어 5°C 의 $50 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 물을 서쪽 우물에 90일간 주입하고, 다시 95일간 주입과 양수를 중지시킨 후 대수층내 온도변화를 시뮬레이션 하였다. 실제로는 계절적인 변화와 밤낮의 온도차에 따라 지열펌프를 이용하는 기간이 매우 변동적이며, 여러 가지 변수가 많으나 본 연구에서는 대수층 축열 에너지 이용의 효율성에 대한 지

하수 유동의 영향을 시뮬레이션하기 위하여 1년간 전체 작동단계를 단순화시킨 형태를 이용하였다.

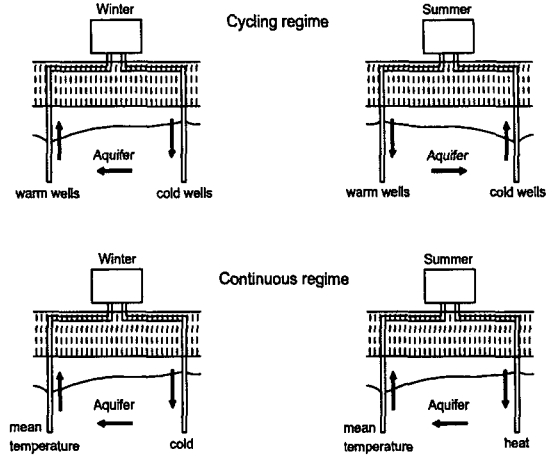


Fig. 3. Basic principles of aquifer thermal energy storage in the absence of groundwater flow[14].

2.3 입력변수

시뮬레이션 모델에서는 일반적인 충적층 대수층이 가질 수 있는 대표적인 수리지질 및 열물성 입력변수들을 이용하여 피압상태하의 지하수 유동과 지열 거동을 분석하는데 이용하였다. 실제 시스템의 모델에서는 여러 가지 수리 지질학적 실험에 의한 수리상수를 추정하고, 단위 샘플에 대한 열물성치를 측정하여 입력인자로 이용하여야 한다. 그러나 특히 수리지질인자와 열물성 특성은 대수층의 불균질성에 따라 평균적인 예측치를 추정하기가 어려운 경우가 많으므로, 대수층 모델을 여러 조건에서 시뮬레이션 작업을 수행하여 열적 거동 가능성을 추정하는 것이 요구된다.

지하수의 유동에 따른 지열 거동을 예측하기 위한 목적으로 대상영역을 단순화시켰으며, 이용된 입력변수는 Table 1에 있다. 그리고 열적 거동 현상을 분석하는데 이용되는 분산지수는 추적자의 이동 거리 및 대수층의 특성에 따라 그 값도 달라지므로[15], 대상지역의 추적자 시험 실시나 문헌 등을 참고하여 적절한 값을 선택하는 것이 요구된다.

Table 1. Input parameters for the fluid and aquifer materials

Parameter	Unit	Assigned Value
porosity	l	0.2
x, y-hydraulic conductivity	m/s	0.0001
z-hydraulic conductivity	m/s	0.00001
storativity	l	0.0001
volumetric heat capacity (fluid)	$10^6 J/(m^3-K)$	4.2
volumetric heat capacity (solid)	$10^6 J/(m^3-K)$	2.16
heat conductivity (fluid)	$J/(m-s-K)$	0.65
heat conductivity (solid)	$J/(m-s-K)$	2.6
longitudinal dispersivity	m	1
transverse dispersivity	m	0.1
source(+)/sink(-) of fluid	$J/(m^2-d)$	0
source(+)/sink(-) of solid	$J/(m^2-d)$	0
In-transfer rate	$J/(m-d-K)$	0
Out-transfer rate	$J/(m-d-K)$	0

3. 결과

3.1 수리경사에 따른 열적 거동

대수층내 수리경사로 0.001과 0.01의 두가지 경계 조건을 설정하여 각 slice에서의 평균 지하수 유속을 계산한 결과, 지하수 평균 유속은 Table 2에 나타난 것과 같이 거의 비슷한 값을 나타내었다. 각 slice에서 하루로 갈수록 지하수 온도 분포의 최대 값이 증가하며, 최대와 최소 온도의 차는 주입과 양수가 이루어진 하부층에서 크게 나타났다.

Table 2. Average groundwater velocity and temperature range at each depth slice according to two hydraulic gradients 0.01 and 0.001 at the end of the simulation period

hydraulic gradient	average groundwater velocity (m/day)			temperature (°C)					
	slice 1	slice 2	slice 3	slice 1		slice 2		slice 3	
				Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
0.001	0.0087	0.0086	0.0087	14.59	17.04	9.013	21.94	8.22	27.40
0.01	0.0858	0.0859	0.0860	12.12	18.46	12.13	19.94	9.17	26.12

Fig. 4에서는 0, -30, -50 m 심도의 평면을 각각 slice 1, slice 2, slice 3으로 설정하여 온도분포를 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 양수와 주입 우물

의 교환 방법 (cycling regime)에 따른 365일간 시뮬레이션 결과 주입과 양수 우물 사이에서 지하수 위 변화와 유속의 간섭현상이 남아 있으나, 전반적인 지하수위 분포는 시뮬레이션 시작후 수 일 내에 수렴하며 큰 차이가 나지 않는다.

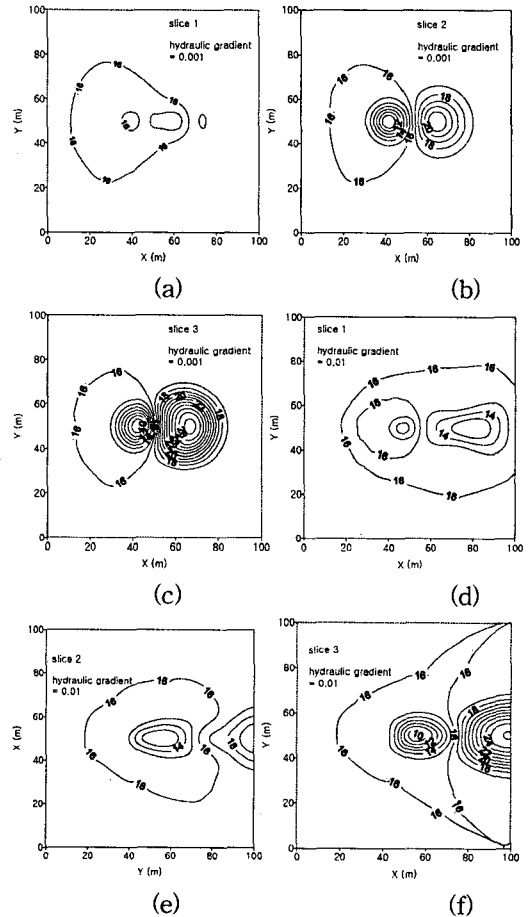


Fig. 4. Simulated temperature distributions at each depth slices after 1 year operation with cycling regime according to the hydraulic gradient 0.001 (a, b, c) and 0.01 (d, e, f) in the ATEs system operation having the effect of groundwater flow.

Fig. 4a, d는 지하수의 수리경사에 따라 slice 1의 열적 거동을 비교한 것으로서 지하수의 수리경사가 큰 대수층에서 다소 확산속도가 크게 나타났으며, 하부 slice 2, 3과 비교하면 등온선 중심과 외곽부의 온도차가 매우 적다. 이것은 대수층내 열적 분포가

지하수의 직접 주입 및 양수되는 하부층에서 다소 열이 빠르게 확산되고 있으며, 상부층에는 직접 주입이 없으므로 대부분이 대수층의 열전도와 느린 열적 확산에 의하여 표층까지 열적 변화가 전달되는 것으로 판단된다. 수리경사에 따른 각 심도별 온도분포가 다르게 나타나는 것은 각 층의 지하수 유속이 다르므로 각 심도별 등온선들이 동쪽으로 이동한 거리와 열적 확산 정도가 차이를 보이기 때문이다.

slice 2와 slice 3에서는 서쪽 우물과 동쪽 우물주변의 온도분포가 배경온도 16°C를 기준으로 비교적 큰 대조를 보이고 있지만 지하수의 유속이 큰 대수층에서는 등온선 중심이 동쪽 모서리 부근으로 상당히 이동한 것으로 나타났다. 이것은 대수층을 통과하는 지하수 유동의 영향에 의해 열거동이 좌우된 것으로서 하부대수층에서 주입수에 의한 열적 거동이 크게 영향을 받기 때문이다. 시뮬레이션 결과 slice 2와 3에서 수리경사가 큰 조건에서 대수층내 온도범위가 보다 작게 나타나는 것은 지하수 유속에 비례하여 주입된 열수와 냉수의 분산도 커지기 때문이다. 그러나 slice 1에서는 주입수에 의한 열이 확산에 의하여 지표까지 나타나는 데 상당한 시간이 요구된다. 따라서 수리경사가 큰 조건에서 만들어진 온도분포도의 온도범위는 크게 나타나며, 상부 대수층은 직접적인 주입수의 영향을 받는 하부층과는 열 거동 속도에서 많은 차이를 가진다.

3.2 지하수 분포 및 모니터링 분석

Fig. 5a, b는 365일간 ATES 시스템 모델을 수리경사가 0.001인 경우 시뮬레이션한 주입과 양수 우물내 각각의 수위와 온도변화이며, Fig. 5c, d는 수리경사가 0.01인 경우를 설정하여 나타낸 것이다. Fig. 5a에서 35°C 열수를 동쪽 우물에 주입후 순간적으로 약 0.1 m 정도 수위가 상승한 것으로서, 시간에 따라 점차 완만하게 낮아져 0.07 m의 수위를 형성하며, 90일 후 주입을 중단하였을 때 급격히 -0.041 m로 지하수위가 하강하는 것으로 나타났다. 180일 후에는 서쪽 우물에서 주입을 시작하여 약 0.17 m 정도의 급격한 수위상승과 함께 점진적으로 0.19 m 까지 수위가 상승하는 것으로 나타났다. Fig. 5b는 시간에 따른 두 우물내 온도변화를 나타

낸 것으로서 각 우물에서 열수나 냉수의 주입이 시작되는 순간 급격한 온도 변화를 보이며, 주입이 중지될 때까지 지온온도를 유지하게 된다. 주입을 중지후 점진적인 온도변화가 나타나지만, 다른 공에서 주입이나 양수를 시작하였을 때 열적 간섭 현상에 의하여 그래프에 직접적인 영향이 나타난다. 이것은 두 공의 거리가 20 m 정도의 가까운 위치에 있으며 대수층의 공극율이 20%로서 지하수가 잘 유동할 수 있는 조건을 가지기 때문이다.

지하수의 유동이 서에서 동으로 유동하기 때문에 동쪽 주입 우물에 주입된 열이 확산에 의하여 서쪽으로 이동하는 것이 매우 느리므로 서쪽 양수정에서는 그 열적 간섭현상도 매우 느리게 나타난다. 그러나 서쪽우물에서 5°C의 낮은 냉수를 주입한 경우 동쪽 우물에서는 급격한 온도하강 현상을 보이며, 냉수의 주입 중지시에도 꾸준한 온도하강이 나타나지만 270일 이후 서쪽 우물에서의 온도 상승은 매우 느린 회복속도를 보인다. 두 우물간 온도차가 시간에 따라 14 ~ 30°C로 지속적으로 나타내며, 서쪽과 동쪽 우물의 최종 온도는 9.0과 23.0°C로서 약 14.0°C의 온도차가 나타난다. 따라서 다음 주기의 운영 사이클에서는 여름철 냉방을 위하여 초기에는 기준온도인 16°C 보다 7°C 낮은 지하수를 대수층 축열 에너지로 이용한 지열펌프를 이용할 수 있다.

Fig. 5c, 5d는 우측 경계면의 지하수위가 -1.0 m로서 -0.1 m인 경우 보다 지하수 유동 속도가 약 10 배 정도 빠른 조건에서의 수위와 열적 변화를 모니터링한 것이다. 주입과 양수를 중지시 수리경사에 의하여 두 우물에서의 안정수위 차는 Fig. 5a에 나타난 결과보다 크며, 전체적인 지하수위도 0 m 이하에서 변동되는 것으로 나타났다. 서쪽 우물에서 35°C의 열수 주입기간 후 시간에 따른 급속한 온도하강을 보이며, 5°C의 냉수 주입 후에도 각 우물의 온도 변화 곡선의 기울기가 큰 회복곡선을 가지는 것으로 나타난다. 지하수 유속 영향으로 주입과 양수에 따른 두 우물간 온도간섭 현상을 거의 파악하기 어려우며, 서쪽에서 주입된 냉수의 영향으로 약 302 일 이후부터는 서쪽과 동쪽 우물간 온도가 역전된 형태를 보인다. 서쪽과 동쪽 우물의 최종 온도는 각각 15.3과 11.0°C로서 약 4.3°C의 온도차가 나타나며, 두 우물의 온도가 시간에 따른 지속

적인 큰 차이가 없으므로 계절에 따른 대수층 이용에 어려움을 가질 것으로 판단된다. 또한 다음 주기의 운영 사이클에서 주입과 양수정을 바꾸어 운영하는 것보다 그대로 주입과 양수를 실시하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 이것은 지하수의 유동 방향과 주입과 양수 우물의 배열에 따라 열적 간섭 현상이 큰 차이를 나타내는 것으로 ATES 시스템 계획시 지하수의 유동 특성을 파악하는 것이 효율적이라는 것을 보여준다.

직접적인 주입수의 영향을 받는 하부 대수층이 상부층과는 많은 열 저동 속도의 차이를 가진다.

수리경사가 0.001일 경우 모니터링 결과 서쪽과 동쪽 우물의 최종 온도는 9.0과 23.0°C로서 약 14.0°C의 온도차가 나타난다. 따라서 다음 주기의 운영 사이클에서는 여름철 냉방을 위하여 초기에는 기준온도인 16°C 보다 7°C 낮은 지하수를 대수층 축열 에너지로 이용한 지열펌프를 이용할 수 있는 것으로 나타났다.

수리경사가 0.01일 경우 서쪽과 동쪽 우물의 최종 온도는 각각 15.3과 11.0°C로서 약 4.3°C의 온도차가 나타나며, 두 우물의 온도가 시간에 따른 지속적인 큰 차이가 없으므로 계절에 따른 대수층 이용에 어려움을 가질 것으로 판단된다. 따라서 수리경사에 의한 영향으로 다음 주기의 운영 사이클에서 주입과 양수정을 바꾸어 운영하는 것보다 그대로 주입과 양수를 실시하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

이것은 지하수의 유동방향과 주입과 양수 우물의 배열에 따라 열적 간섭현상이 큰 차이를 나타내는 것으로 ATES 시스템 계획시 지하수의 유동 특성을 파악하는 것이 효율적이라는 것을 보여준다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업 '지열 자원 부존특성 규명 및 활용기반 기술 연구' 및 에너지 관리공단 에너지·자원 기술 개발 과제 '국내 지하 열자원 활용기술개발의 중장기 계획'의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Kavanaugh, S. P., and Rafferty, K., *Ground-source heat pump: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., pp. 167.
2. 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강·섬진강 유역의 지하수 데이터베이스

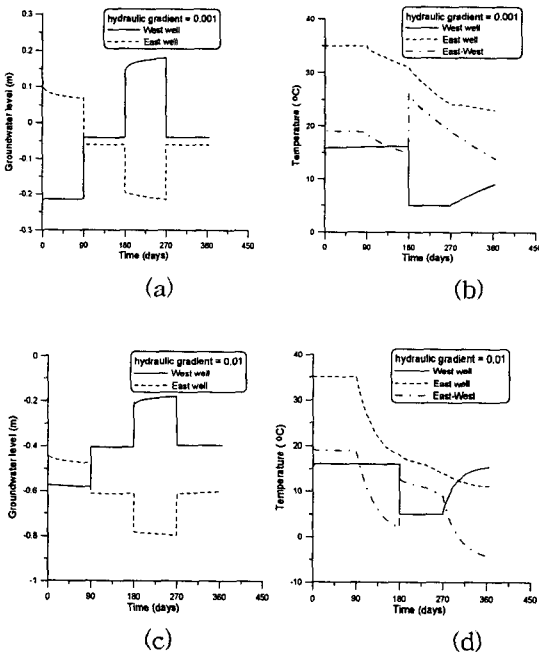


Fig. 5. Monitored groundwater levels and temperature changes at the west and east well during 365 days with cycling regime method in the condition of hydraulic gradients of 0.001 (a, b) and 0.01 (c, d), respectively.

4. 결론

시뮬레이션 결과 수리경사가 큰 조건에서 대수층 내 온도범위가 보다 작게 나타나는 것은 지하수 유속에 비례하여 주입된 열수와 냉수의 분산도 커지기 때문이다. 따라서 수리경사가 큰 조건에서 만들어진 온도분포도의 온도범위가 크게 나타났으며,

- 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학, Vol 10, No 2, pp. 131-142.
3. 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2004, 친환경 대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 난방 시스템, 한림원.
 4. Chiasson, A. D., 1999, *Advances in modeling of ground-source heat pump systems*, Master thesis of Oklahoma State Univ., pp. 155.
 5. Spitz, K., and Moreno, J., 1996, *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*, John Wiley & Sons Inc., pp. 461.
 6. Claesson, J., Hellström, G., and Probert, T., 1994, Simulation models for ATES, *International symposium of aquifer thermal energy storage*, Univ. of Alabama, pp. 131-136.
 7. Mirza, C., Goutama, M. W., and Lau, K. C., 1994, Developing an expert system for aquifer thermal energy storage, *International symposium of aquifer thermal energy storage*, Univ. of Alabama, pp. 97-106.
 8. Palmer, C. D., Blowes, D. W., Frind, E. O., and Molson, J. W., 1992, Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 1. Field injection experiment, *Water Resour. Res.*, Vol. 28, pp. 2857-2867.
 9. Pruess, K., 1991, *TOUGH2: A general purpose numerical simulator for multiphase Fluid and heat flow*, Lawrence Berkeley Lab., LBL-29400.
 10. Warner, D. L., and Alagn, U., 1984, Thermal impact of residential ground-water heat pump, *Ground Water*, Vol. 22, No. 1, pp. 6-12.
 11. Diersch, H. J. G., 2004, *FEFLOW 5.1 User's manual*, Wasy GmbH, pp. 168.
 12. 송운호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이성곤, 이종철, 이병태, 박인화, 이태종, 이철우, 문상호, 김연기, 이병태, 임현철, 2004, 지열자원 부문특성 규명 및 활용기반기술 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-04(연차)-08, 국무총리실, pp. 123.
 13. Molson, J. W., Frind, E. O. and Palmer, C. D., 1992, Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 2. Model development, validation and application, *Water Resour. Res.*, Vol. 28, pp. 2857-2867.
 14. Sanner, B., 1999, A different approach to shallow geothermal energy-underground thermal energy storage (UTES), *International summer school on direct application of geothermal energy*, Institute of applied geosciences, Justus-Liebig-Univ., German, pp. 12.
 15. Neuman, S. P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, *Water Resour. Res.*, Vol. 26, pp. 1749-1758.