

대수층 축열 에너지(ATES) 활용 시스템 모델의 설계인자 추정을 위한 시뮬레이션

심병완*

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Simulation for the Estimation of Design Parameters in an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Utilization System Model

Byoung Ohan Shim*

Groundwater & Geothermal Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

ABSTRACT

An aquifer thermal energy storage (ATES) system can be very cost-effective and renewable energy sources, depending on site-specific parameters and load characteristics. In order to develop the ATES system which has certain hydrogeological characteristics, understanding the thermohydraulic process of an aquifer is necessary for a proper design of an aquifer heat storage system under given conditions. The thermohydraulic transfer for heat storage was simulated according to two sets of simple pumping and waste water reinjection scenarios of groundwater heat pump system operation in a two-layered aquifer model. In the first set of the scenarios, the movement of the thermal front and groundwater level was simulated by changing the locations of injection and pumping wells in a seasonal cycle. However, in the second set the simulation was performed in the state of fixing the locations of pumping and injection wells. After 365 days simulation period, the shape of temperature distribution was highly dependent on the injected water temperature and the distance from the injection well. A small temperature change appeared on the surface compared to other simulated temperature distributions of 30 and 50 m depths. The porosity and groundwater flow characteristics of each layer sensitively affected the heat transfer. The groundwater levels and temperature changes in injection and pumping wells were monitored and the thermal interference between the wells was analyzed to test the effectiveness of the heat pump operation method applied.

Key words: Aquifer thermal energy storage (ATES), Groundwater source heat pump, Thermohydraulic, Heat conductivity

요 약 문

대수층 축열 에너지(ATES) 시스템은 지반의 특성과 이용량에 따라 매우 경제적인 새로운 대체에너지로 이용될 수 있다. 적절한 ATES 시스템 설계를 통하여 주어진 수리지질 특성에 적합한 ATES 시스템을 개발하기 위해서는 대수층내 수리열역학적 과정의 이해가 필수적이다. 본 논문에서는 지하수 양수 및 열펌프에 이용된 물을 재주입하는 방식의 지하수 열펌프 운영에 대한 두 가지 시나리오를 통하여 두 개의 층으로 이루어진 대수층 모델에 적용하여 대수층내 열 저장에 대한 수리열역학적 현상을 시뮬레이션하였다. 첫 번째 시나리오에서는 양수 우물과 주입 우물을 계절에 따라 서로 교대로 시스템을 운영한 경우에 열 거동에 의한 온도 분포와 지하수위를 시뮬레이션 하였으며, 두 번째는 주입과 양수 우물 위치를 고정하여 시뮬레이션 하였다. 356일 이후 주입 우물 주변의 온도 분포는 주입수의 온도와 주입점으로 부터의 거리에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 지표온도 분포는 30과 50 m 심도의 온도 분포에 비하면 미미한 변화만 나타났으며, 각 층에서의 열 거동은 공극률과 지하수의 유동 특성에 따라 매우 민감한

*Corresponding author : boshim@kigam.re.kr

원고접수일 : 2005. 1. 10 게재승인일 : 2005. 3. 4

질의 및 토의 : 2005. 10. 31 까지

것으로 나타났다. 그리고 양수와 주입우물에서의 지하수위와 온도변화를 모니터링하여 열펌프 운영 방식에 따른 효율성을 실험하고, 두 우물간의 열 간섭현상을 분석하였다.

주제어 : 대수층 축열 에너지(ATES), 지하수 열펌프, 수리열역학, 열전도도

1. 서 론

개회로형 지열펌프(open loop geothermal heat pump) 시스템의 일종인 지하수를 이용한 대수층 축열 에너지(aquifer thermal energy storage: ATES) 시스템은 폐회로형(closed loop) 방식들에 비하여 효율이 높고 대수층이 발달되어 있는 곳이면 이용이 가능하다(한정상 등, 2004). 국내에서는 산간지역을 제외한 일반적인 지역의 지하수위는 지하 10 m 전후에 분포하고 있으며(심병환 등, 2000), 대수층이 발달되어 있는 지역이 많으므로 ATES 시스템을 이용하는데 유리하다. 그러나 지하수 열펌프(groundwater heat pump) 시스템은 국내에서는 새로운 기술 분야로서 아직 거의 적용되지 않고 있으나, 미래에는 이 시스템을 이용한 천부 지열 활용 가능성이 매우 높다. 지하수는 심도가 깊어질수록 연중 온도가 거의 일정하므로 연중 기온 변화가 심한 대기와의 온도차를 이용한 지열펌프 이용이 가능하다. 지하수를 이용한 천부 지열활용 시스템은 대부분 지하 100 m 이내의 대수층 축열로 겨울에는 난방, 여름에는 냉방을 가능하게 한다. 국내에서 열펌프를 이용한 지열 활용은 1990년대 후반부터 상업화가 시작되었으나 초기 투자비 과다 문제로 아직까지 대중화가 미미하다. 그리고 국내 업체들이 미국이나 유럽으로부터 기기들을 도입하여 설치하고 있으나 국내 지질환경에 적합한 설계 기술이 매우 부족한 상태이며(송운호 등, 2004), 설계상에 정확한 지하의 열물성을 반영하기 힘들다. 이러한 문제점은 과다설계에 의한 비용 증가로 이어져 경제적이고 친환경적인 지열펌프 활용 시설에 대한 투자를 어렵게 할 수 있다.

지중 열 거동 모델링은 측정 자료나 실증 실험에 의한 시설 건설을 통한 여러가지 지열펌프 시스템의 성능 입증 을 위한 과정으로서 경제적인 설계를 위하여 필수적이다. 일반적으로 모델링에 의한 설계와 실제 시스템 운영에 대한 차이가 있을 수 있으나, 현장에 대한 실증실험과 시스템 운영 경험을 이용한다면 지열 활용 모델링은 최적화된 시스템을 구성하는데 매우 유용하다. 지열 활용을 위한 최적의 시스템을 설치하기 위해서는 이용 목적에 적절한 개념모델을 설정하고 대상 지역 전체의 물리적인 범위에 대한 이론적인 가정과 적용이 필요하다. 수치모델링은 지질, 지하수 부존 형태, 암석 및 토양의 물성 등에 의한 여러

가지 불확실성으로 발생하는 복잡한 문제에 대하여 다양하고 융통성 있는 해를 제공할 수 있다(Spitz and Moreno, 1996). 천부 지열 활용을 위한 열 거동 모델링은 지표와 인접한 포화대나 비포화대의 지열변화를 해석하기 위한 것으로서, 일반적으로 심부 지열 거동 모델링보다 정밀한 해석이 요구된다. 천부 지열 거동에 대한 시뮬레이션을 위한 프로그램은 심부와 천부의 지열 거동에 대한 기본 원리는 동일하므로 지중 열 거동 모델 코드(code)에서 격자 간격을 조밀하게 구성하여 이용하거나, 특정 목적에 맞게 개발된 여러 가지 프로그램을 이용한 연구가 1980년대 이후 본격적으로 이루어져 왔다(Claesson et al., 1994; Mirza et al., 1994; Palmer et al., 1992; Pruess, 1991; Warner and Alagn, 1984).

본 연구는 지열 자원 이용에 따른 지반의 열 거동 시뮬레이션을 통하여 대수층내 열 거동 특성을 추정하기 위한 것이다. 본 연구에서는 대수층 축열의 활용 형태를 시뮬레이션하기 위하여 FEFLOW 모델(Wasy software, 2003)을 이용하였다.

2. 지중 열 거동 모델링 이론

대수층 축열을 이용한 지하수 열펌프 활용에 의한 지반내 열 거동 해석을 위해서는 지하수의 부존 형태 및 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 열전도도와 열확산율은 매질의 함수율에 따라 크게 달라지며(한정상 등, 2004), 그에 따른 입력변수에 의하여 모델링 결과가 큰 차이를 나타낼 수 있다. 열 거동 현상은 지하수의 유동 특성과 지질학적 불균질성이나 층의 두께 등 여러가지 지질 형태에도 밀접한 관계를 가진다. 또한 수치 모델링에서 경계조건, 입력변수 및 지하수 열펌프 시스템의 운영 방식에 따른 다양한 지중 열 거동 현상을 추정할 수 있다.

일반적인 지반내 열 거동은 지하수 유동에 의한 대류(convection), 매질을 통한 전도(conduction), 그리고 매질의 불균질성에 의한 분산(dispersion)을 통하여 전달된다. 포화된 매질에서의 열유량 또는 열유속(heat flux, $J/(m^2 \cdot s)$)은 다음과 같다(Molson et al., 1992).

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

여기서, η 는 공극율(porosity), c_s , c_w 는 고체와 물의 비열

(specific heat, J/(kg-K)), v_i 는 지하수의 평균 속도 (average linear groundwater velocity vector, m/s), D_{ij} 는 수리동역학적 분산텐서 (hydrodynamic dispersion tensor, m²/s), ρ_w, ρ_s 는 물과 고체의 밀도(density, g/cm³) 그리고 T, T_0 는 온도(temperature, K)와 기준온도(reference temperature, K), λ 는 대수층의 열전도도(aquifer thermal conductivity, J/(m-s-K))이다. 포화된 매질에서 외부나 내부의 열 유입과 유출이 없는 $\partial v_i / \partial x_i = 0$ 인 경우, 지중 열 거동 지배방정식은 다음과 같다.

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

여기서, Q_h 는 유출량(discharge rate, m³/d), v_i/R 는 열 거동 전면(heat front)의 대류속도(convective velocity, m/s), $\lambda/c_s \rho_s$ 는 열전도 계수(heat conduction coefficient), D_{ij}/R 는 열분산 계수(heat dispersion coefficient) 그리고 $R = c_s \rho_s / \eta c_w \rho_w$ 는 열 지연계수(thermal retardation coefficient)이다.

3. 방 법

3.1 모델 및 경계조건

지하수 열펌프 시스템 이용시 지중 열 거동을 파악하기 위하여 가상의 대수층을 설정하였으며(Fig. 1), 입력변수는 Table 1과 같다. 3차원 모델링을 실시하기 위한 시뮬레이션 구간은 100(x)×100(y)×50(z) m 크기의 성질이 다른 두 개의 층으로 구성된 모델을 설정하였다. 상부와 하부 층의 입력변수에서 공극을 이외에는 같은 값을 적용하였으며, 두 층의 지하수위는 -5 m이다. 수리지질조건은 누수피압대수층 형태로서 상부는 1%의 낮은 공극률을 가진 30 m 두께의 층이며, 하부는 공극률 20%를 가진 20 m

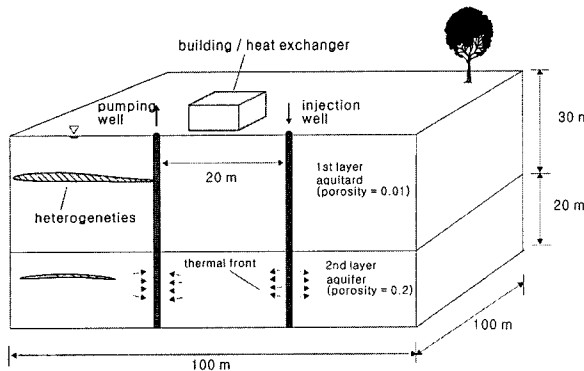


Fig. 1. A model of aquifer with groundwater heat pump system for the utilization of aquifer thermal energy storage.

Table 1. Input parameters for the fluid and aquifer materials

parameter	Unit	Assigner Value
x, y-hydraulic conductivity	m/s	0.0001
z-hydraulic conductivity	m/s	0.00001
storativity	1	0.001
volumetric heat capacity (fluid)	10 ⁶ J/(m ³ -K)	4.2
volumetric heat capacity (solid)	10 ⁶ J/(m ³ -K)	2.52
heat conductivity (fluid)	J/(m-s-K)	0.65
heat conductivity (solid)	J/(m-s-K)	3.0
longitudinal dispersivity	m	5
transverse dispersivity	m	0.5
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

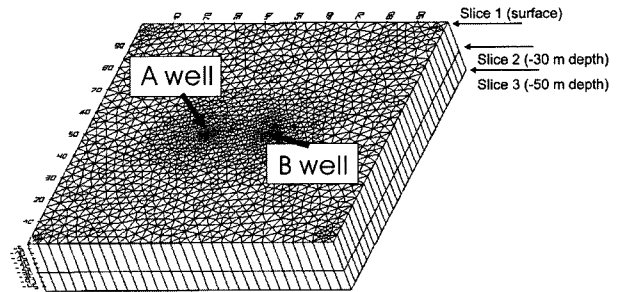


Fig. 2. Schematic diagram of finite element mesh and well locations for ATES system simulation. This figure is arbitrarily scaled.

두께의 대수층이다. 공극을 이외의 다른 입력변수는 동일한 두 층을 가정하여 온도 분포를 시뮬레이션함으로써 공극률에 따른 지하 열 거동의 민감도를 파악하는데 유용할 것으로 판단된다. 그리고 지표에서의 경계조건은 두 우물에서 같은 양의 주입과 양수 이외의 지하수 유출이나 유입은 없으며, 대수층 하부는 불투수층으로 가정하였다. 전체 시뮬레이션 구간은 6,272 개의 유한요소와 4,887 개의 격자로 구성되어 있으며, 삼각 프리즘 형태의 유한요소 형태를 이용하였다. 그리고 보다 정밀한 형태의 계산을 가능하게 하고, 오차를 감소시키기 위하여 우물에 가까울수록 격자 크기를 작게 설정하였다(Fig. 2). 대수층 축열방식의 지하수 열펌프 이용을 위한 A 우물과 B 우물간 거리는 20 m로 설정하였으며, 스크린은 지면으로부터 -30~-50 m 사이에 설치되어 있는 것으로 설정하였다. 열 경계조건으로 대수층의 초기온도는 16°C이며, 주입 우물에서 여름에 35°C 와 겨울에 5°C의 물을 주입하는 것으로 설정하였다.

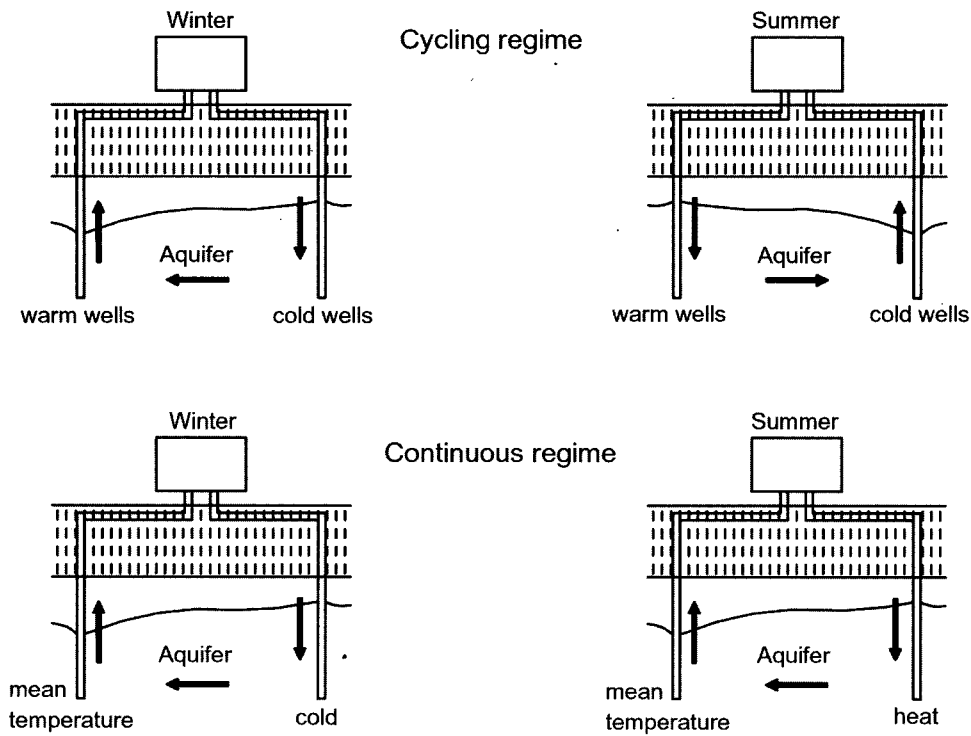


Fig. 3. Basic principles of aquifer thermal energy storage (Sanner, 1999).

3.2 지하수 열펌프 이용방식에 따른 경계조건

대수층 축열을 이용한 지하수 열펌프 시스템의 효율은 운용방식에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다. 일반적인 방법으로 대수층에서 두 개의 우물을 이용하는 경우, 지하수를 양수하여 열펌프에 순환시킨 후 이용된 물을 대수층에 재주입하는 방식으로서, 계절별로 양수와 주입 우물을 교환하여 지하수 열펌프 시스템을 운영하는 방식과 계절과 상관없이 각각 양수 우물과 주입 우물을 고정하여 운영하는 방식이 있다(Fig 3). 본 연구에서는 Fig. 3에서 소개된 두 가지 방식을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 첫 번째 운영 방식은 먼저 여름에 90일간 A 우물에서 50 m³/day의 물을 양수하여 열펌프에 순환시켜 발생된 35°C의 지하수를 B 우물에 주입한 후, 주입과 양수를 90일간 중지시킨다. 그리고 겨울에 주입 우물과 양수 우물을 바꾸어 5°C의 50 m³/day의 물을 90일간 주입하고, 다시 95일간 주입과 양수를 중지시킨 후 대수층내 온도변화를 시뮬레이션하였다. 실제 봄과 가을동안에는 지하수 열펌프 시스템을 이용한 급탕과 난방 등 여러 가지 변수가 많으나 본 연구에서는 대수층 축열 에너지 이용을 위한 기본적인 모델을 시뮬레이션하기 위하여 1년간 전체 지하수 열펌프 작동단계를 단순화시킨 형태를 이용하였다. 두 번째 방식에서는 처음 180일간 첫 번째 방법과 동일한 운

영 방식을 이용하였으나, 그 이후에는 주입 우물과 양수 우물을 고정시켜 이전과 동일한 양의 5°C 물을 90일간 주입하고 다시 95일간 주입과 양수를 중지시킨 후 대수층내 온도분포를 시뮬레이션하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 방식 1

Fig. 4는 3.2장에서 소개된 첫 번째 방식에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 공극율이 매우 작은 지표(slice 1)와 30 m 깊이(slice 2) 사이의 상부층에서 열 거동이 매우 느리게 확산되고 있는 것을 알 수 있으며, 30 m 깊이(slice 2)와 50 m 깊이(slice 3)에서는 A 우물과 B 우물주변의 온도분포가 비교적 큰 대조를 보이고 있다. Slice 1에서는 온도변화가 매우 미미하게 나타나며, slice 2와 slice 3을 비교하면 부분적으로 약간 역전된 형태의 온도분포를 보인다. 이것은 열 거동이 상부의 난대수층을 통과하는데 따르는 시간이 매우 큰 것으로 추정된다. 하부대수층에서 주입수에 의한 열 거동이 크게 나타나는 것은 대수층내 열수와 냉수의 주입이 하부대수층에서 이루어지며, 대수층내 공극율이 상부층과 매우 큰 차이를 나타내기 때문이다. 그리고 대수층내 함수비에 따라 열전도

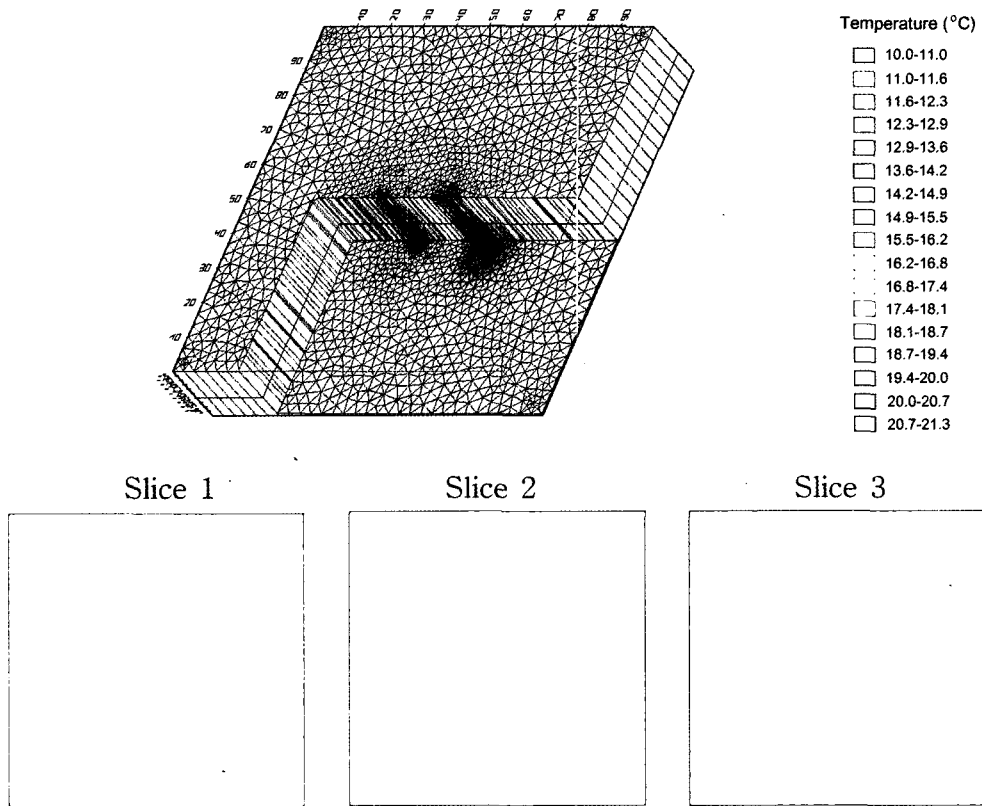


Fig. 4. Simulated temperature distributions according to the ATEs system operation with the cycling regime method.

도와 열확산계수가 급격히 달라지기 때문에 열 거동은 대수층의 특성과 조건에 따라 많은 차이를 나타낼 수 있다 (Warner and Alagn, 1984). 시뮬레이션 결과 나타난 온도 범위는 약 10.0~21.2°C 사이로서 대수층의 초기조건 16°C와는 밀로 5°C에서 위로는 7°C의 차이를 보인다. 그리고 하부대수층에서 각각 주입 우물 주변의 온도 분포가 주입수의 온도에 따라 지배적인 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 이와같이 장기간 대수층내 온도가 유지되는 것은 공극내 지하수의 비열이 크기 때문에 지표와 가까운 비포화대의 암석이나 토양처럼 태양복사열에 의하여 쉽게 온도변화가 급격히 나타나지 않기 때문이다.

Slice 3에서는 B 우물에 먼저 35°C의 열수를 주입하여 대수층내 온도가 상승한 영향이 주입후 275일이 지나도 선명하게 나타나고 있으며, A 우물도 5°C의 냉수를 90일간 주입한 영향으로 낮은 온도분포를 나타낸다. A 우물과 B 우물 사이의 중심 구간은 열수와 냉수가 혼합되는 형태를 나타내고 있으며, 나중에 주입된 냉수의 영향이 다소 우세한 온도분포를 보인다. 그러나 각 우물 중심에서 가장자리 방향으로 20 m 이외의 부근에서부터 온도변화가 급격히 감소하므로, 대수층내 지하수 유속이 미미한 지역

에서는 주입 및 양수 우물 주변에 온도가 국부적으로 높을 것으로 추정된다.

Fig. 5는 A와 B 우물내 수위와 온도변화를 나타낸 것이다. 대수층의 특성에 따라 지하수위는 시스템의 효율에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 장기적인 변화를 분석하는 것이 중요하다. Fig. 5a에서 B 우물에 35°C 열수 주입후 순간적으로 약 0.15 m 정도 수위가 상승하였으나, 시간에 따라 점차 완만하게 낮아지는 형태를 보이고 있다. 그리고 90일 후 주입을 중단하였을때 급격히 초기수위로 하강하는 것으로 나타났다. 그러나 180일 후 A 우물에서 주입을 시작후, 약 0.2 m 정도의 급격한 수위상승과 함께 점진적으로 수위가 상승하는 것으로 나타났다. A 우물의 주입시 점진적인 수위 상승은 B 우물의 양수에 의한 영향과 함께 상부층이 주입과 양수에 의한 영향을 동시에 받아 수위가 상승하는 것으로서, 양수시에도 상부층의 영향과 함께 주입정과의 거리가 20 m로 가까우므로 직접적인 수위 간섭현상을 나타낸다. Fig. 5b에서 우물내 온도변화는 주입 우물에서 열수나 냉수의 주입이 정지되는 순간 급격한 온도 변화를 나타내었으나, 그 후 안정화되면서 시간에 따른 점진적인 온도변화를 보였다. 그리고 양수와 주

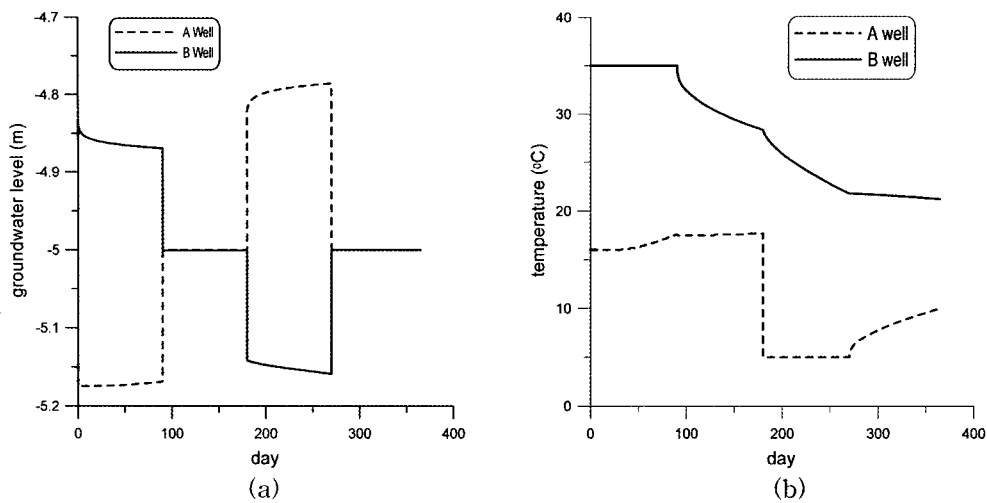


Fig. 5. Monitored groundwater levels (a) and temperature (b) changes in A and B wells during 365 days with the cycling regime method.

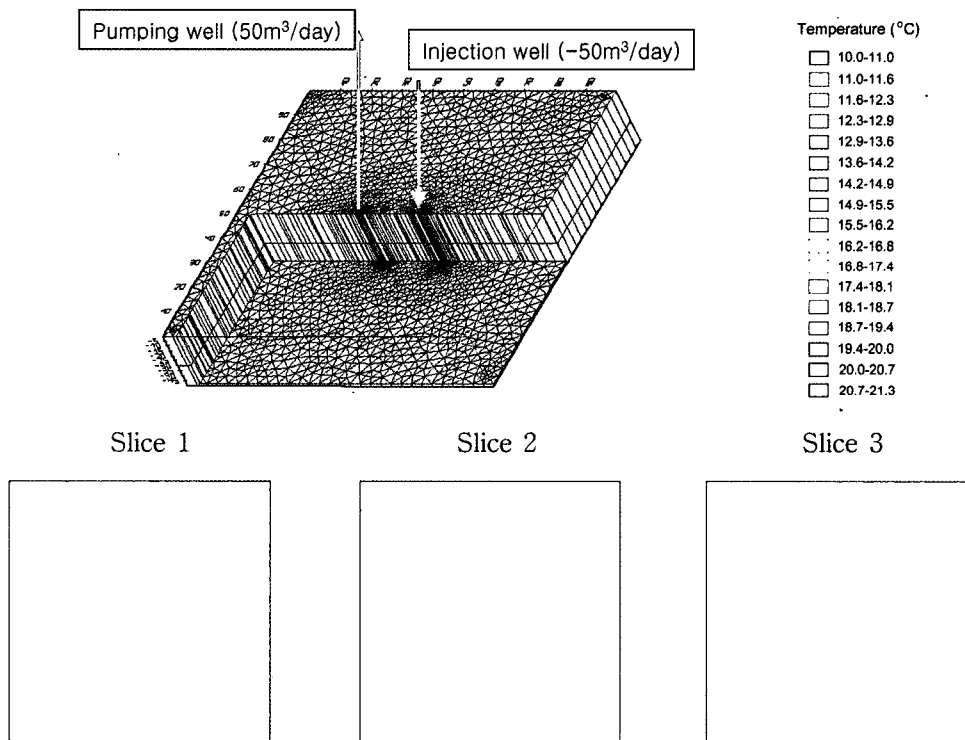


Fig. 6. Simulated temperature distributions according to the ATES system operation with continuous regime method.

입에 따라 상대 우물의 온도 변화 곡선의 기울기가 커지는 것으로 나타나며, 주입과 양수에 따라 두 우물간 온도 간섭현상이 거의 같은 시기에 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 두 우물간 거리가 가깝고 대수층의 공극율이 크기 때문인 것으로 판단된다. A와 B 우물의 최종 온도는 10.0과 21.2°C로서 약 11.2°C의 온도차가 나타나며, 두 우물의 온도가 시간에 따른 지속적인 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 다음 주기의 운영 사이클에서는 여름철 냉

방을 위하여 초기에는 기준온도인 16°C 보다 6°C 낮은 지하수를 대수층 축열 에너지로 이용한 지하수 열펌프를 이용할 수 있다.

4.2 방식 2

Fig. 6은 3.2장에서 소개된 두 번째 방식을 이용하여 나타난 대수층내 열 거동 특성으로서 각 slice의 온도 분포가 원형 형태로 나타났다. Slice 2와 slice 3에서는 중심

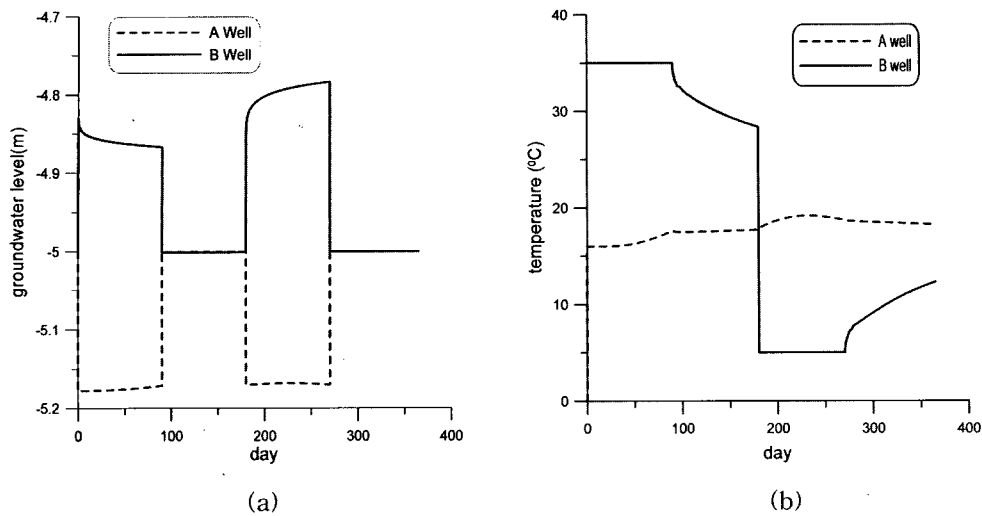


Fig. 7. Monitored groundwater levels (a) and temperature (b) changes in A and B wells during 365 days with the continuous regime method.

원상의 온도분포가 나타났으며, 먼저 주입된 35°C 열수의 영향이 가장자리에 나타나고 있으며, 나중에 주입된 5°C 냉수의 영향이 중앙에 나타난다. Slice 2의 온도분포는 열수의 영향이 나중에 주입된 냉수의 영향에 의하여 많이 감소된 형태를 보이고 있으나, slice 3에서는 중앙의 냉수와 그 주변의 열수 영향이 다소 뚜렷하게 구분되어 나타난다. 그리고 전체적으로 열 거동에 의한 온도변화 분포가 Fig. 4보다 넓게 나타나고 있는 것은 고정된 주입과 양수 우물을 설정함으로써 열 거동이 지하수의 유동에 의하여 B 우물에서 다소 넓게 확산된 것으로 판단된다.

Fig. 7은 두 우물에서 시간에 따른 수위와 온도 변화를 나타낸 것으로서 주입과 양수에 따른 두 우물간 지하수위 변화나 온도의 영향을 추정할 수 있다. A와 B 우물에서 열수나 냉수의 주입이 정지된 시점에서 급격한 온도 변화를 나타내었으나, 그 후 안정화되면서 시간에 따른 점진적인 온도변화를 보였다. B 우물에서 35°C 열수의 주입을 정지시킨 후 90일이 지난 뒤 28.3°C까지 온도가 하강하였으며, 다시 같은 주입 우물에 90일간 5°C의 냉수를 주입 후, 90일간 열펌프 정지 이후에 우물내 지하수 온도가 12.3°C까지 상승하였다. A 우물에서는 초기온도 16°C에서 B 우물의 주입수에 의한 최초 열 간섭을 받는데 약 33일이 소요되는 것으로 나타나며 그 반응속도도 매우 느리게 나타난다. 90일 주입기간 이후 17.3°C의 온도를 나타내며, 그 후 90일 열펌프 정지후 17.8°C의 온도로서 주입이 없는 동안에는 0.5°C의 미미한 온도 상승만 나타났다. 그리고 주입 우물을 바꾸지 않고 지속적으로 주입과 양수를 실시한 경우에도 이전 시나리오와 같이 하부대수층내

우물의 주변 온도가 주입수의 온도에 절대적인 영향을 받는 것을 알 수 있다.

A와 B 우물에 대한 시뮬레이션 결과 최종 온도는 18.2°C와 12.3°C로서, A 우물은 B 우물의 영향에 의한 열 간섭에 의하여 2.2°C의 온도가 상승한 것으로 나타났다. 두 우물간 최종 온도차는 5.9°C이며, 대수층 초기온도 조건 16°C와는 약 2~4°C 정도의 차이를 보인다. 따라서 대수층 축열을 이용한 두 가지 방식에서 주기적으로 주입 우물과 양수 우물을 교환하여 이용한 방식이 대수층 축열 에너지의 회수율이 높게 나타났다.

5. 결 론

하부대수층에 주입된 열이 공극율이 작은 상부층을 통과하는데 공극율이 상대적으로 큰 하부대수층의 열 거동 형태와 비교하여 많은 시간이 소요되었으며, 하부 대수층은 95일간 지하수 열펌프의 운영 중지 이후에도 이전의 주입수 온도에 지배적인 영향을 받고 있으며, 주입 방식에 따른 온도 분포 형태도 많은 차이가 나타났다.

지하수 열펌프 시스템 운영에 따른 두 우물에서의 수위와 열 변화를 1년간 시뮬레이션한 결과, 대수층에서 양수 우물과 주입 우물을 설정하여 계절별로 바꾸어 지하수 열펌프를 운용하는 방식에서는 두 우물에서 최종적으로 약 11.2°C의 온도차가 나타났다. 그리고 계절과 상관없이 각각 양수와 주입 우물을 지정하여 양수된 지하수를 열펌프에 이용후 순환된 물을 대수층으로 재주입하는 방식에서는 두 우물간 최종 온도차는 5.9°C이며, 대수층의 초기조

건 16°C와는 약 2~4°C 정도의 차이를 보인다. 따라서 주기적으로 주입과 양수 우물을 교환하여 이용하는 것이 대수층 축열 에너지의 회수율을 높일 수 있는 것으로 나타났다. 다음 주기의 운영 사이클에서는 여름철 냉방을 위하여 기준온도인 16°C 보다 약 6°C 낮은 지하수를 대수층 축열 에너지로 초기에 이용할 수 있다.

공극율에 따라 대수층의 열전도도와 열확산계수가 급격히 달라지기 때문에 시뮬레이션 결과와 같이 열 거동은 대수층의 특성과 조건에 따라 많은 차이를 보일 수 있는 것으로 판단되며, 또한 양수와 주입 방식에 따라 지하수 열펌프의 효율도 크게 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

국내에서는 지하수가 풍부한 지역이 많으므로 대수층 축열시스템을 구축하는데 매우 유리하며, 저비용으로 지하수 열원을 이용한 냉난방 시스템을 활용할 수 있다. ATES 시스템의 경제적인 설계와 구축을 위해서는 현장 실험이나 지하수 열펌프 운영 경험 등과 함께 지하의 온도 변화 예측을 위한 지중 열 거동 시뮬레이션 기술이 요구된다. 본 연구는 지하수 열펌프의 운영 시나리오를 이용하여 임의의 대수층내 열 거동을 해석함으로써, 실제 경제적인 시스템을 개발하는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 “지열자원 부존특성 규명 및 활용기반 기술 연구”와 부분적으로 에너지 관리공단의 “지중열 거동 통합 시뮬레이션 기술 개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다. 그리고 논문을 세심하게 검토하여 질을 높여 주신 익명의 심사자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

송윤호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이성곤, 이종철, 이병태, 박인화, 이태종, 이철우, 문상호, 김연기, 이병대, 임현철, 2004,

지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-04(연차)-08, 국무총리실, p. 123.

심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강 · 섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학, 10(2), 131-142.

한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 친환경, 2004, 대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템, 한림원.

Claesson, J., Hellstöm, G., and Probert, T., 1994, Simulation models for ATES, *International symposium of aquifer thermal energy storage*, Univ. of Alabama, p. 131-136.

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, p. 97-106.

Molson, J.W., Frind, E.O., and C.D. Palmer, 1992, Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 2. Model development, validation and application, *Water Resources Research*, 28, 2857-2867.

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 Resources Research*, 28, 2845-2856.

Pruess, K., 1991, TOUGH2 A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow, Lawrence Berkeley Laboratories, LBL-29400.

Sanner, B., 1999, A different approach to shallow geothermal energy-underground thermal energy storage (UTES), *International summer school on direct application of geothermal energy course note*, Institute of Applied Geosciences, Justus-Liebig-Univ., German, p. 12.

Spitz, K. and Moreno, J., 1996, A practical guide to groundwater and solute transport modeling, John Wiley & Sons Inc., p. 461

Warner, D.L. and Alagn, U., 1984, Thermal impact of residential ground-water heat pump, *Ground Water*, 22(1), 6-12.

Wasy software, 2003, FEFLOW white papers, 1. p. 366.