

# 지하수 유동 영향에 따른 지하수 이용 열펌프 시스템의 대수층 온도 변화 예측 모델링

심 병완<sup>1)</sup>, 송 윤호<sup>2)</sup>

## Simulation of aquifer temperature variation in a groundwater source heat pump system with the effect of groundwater flow

Byoungohan Shim, Yoonho Song

**Key words** : Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), heat pump, thermohydraulic, FEFLOW, groundwater velocity

**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 influenced by groundwater movement, understanding of thermohydraulic processes is necessary. The heat transfer phenomena for an aquifer heat storage are simulated 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 groundwater flow direction 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 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.

### 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<sup>1)</sup>. 특히 국내에서는 산간지역을 제외한 일반적인 지역의 지하수위는 지하 10 m 전후에 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며<sup>2)</sup>, 대수층이 발달되어 있는 지역이 많으므로 ATES 시스템을 이용하는데 유리하다<sup>3)</sup>. 그러나 국내에서는 아직까지 거의 적용되지 않고 있으나, 미래에는 이 시스템을 이용한 천부 지열 활용 가능성이 크며 대수층의 특성과 지하수의 이용량에 따라 경제적인 대체에너지로 이용될 수 있다. 일반적으로 지하수는 심도가 깊어질수록 연중 온도가 거의 일정하므로 연중 기온변화가 심한 대기와의 온도차를 이용한 지열펌프 이용이 가능하지만 지하수의 유동 특성에 따라

그 효율성에서 많은 차이가 나타날 수 있다<sup>4)</sup>. 지하수를 이용한 천부 지열활용 시스템의 효율을 보장하기 위해서는 그 지반의 열물성 뿐만아니라 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.

- 
- 1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
E-mail : boshim@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)863-9404
  - 2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
E-mail : song@kigam.re.kr  
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)863-9404

## 2. 지열거동 모델링

지하수의 유속을 고려한 대수층 축열 방식의 지열펌프 활용을 위한 지반내 열거동 해석을 위해서는 대수층내 열물성, 지하수의 부존량 및 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 매질의 열전도도와 열확산율은 함수율에 따라 크게 달라지며<sup>3)</sup>, 그에 따른 입력변수에 의하여 모델링 결과가 큰 차이를 나타낸다. 그리고 대수층내 열적 거동은 지하수의 유동에 많은 영향을 받으며, 지질학적 불균질성이나 층의 두께 등과 같은 지질 특성에도 밀접한 관계를 가진다<sup>5)</sup>. 본 연구에서는 유한 요소 격자를 이용한 FEFLOW 모델<sup>6)</sup>을 이용하였으며 각 우물 주변은 조밀한 격자를 만들어 수렴 오차를 감소시켰다.

### 2.1 경계조건

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)×100(y)×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 지하수 양수와 주입은 하부층에서 이루어진다. 시뮬레이션 조건에 따라 좌측 경계면은 고정 지하수위로서 0 m로 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.

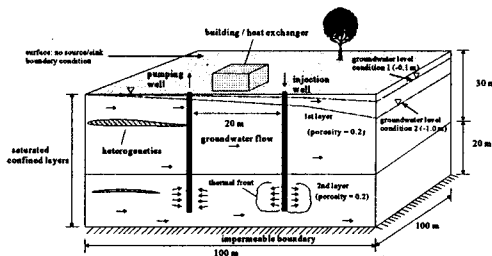


Fig. 1 An aquifer model with geothermal heat pump system for the utilization of aquifer thermal energy storage.

## 2.2 입력변수

대수층내 열거동 시뮬레이션 모델에서는 일반적인 층적층 대수층이 가질 수 있는 대표적인 수리지질 및 열물성 입력변수들을 이용하여 피압상태하의 지하수 유동과 지열 거동을 분석하는데 이용하였다. 실제 시스템에서는 여러 가지 수리지질학적 실험에 의한 수리상수를 추정하고, 단위 샘플들에 대한 열물성치를 측정하여 입력인자로 이용하여야 한다. 그러나 특히 수리지질인자와 열물성 특성은 대수층의 불균질성에 따라 평균적인 예측치를 추정하기가 어려운 경우가 많으므로, 대수층 모델을 여러 가지 조건에서 시뮬레이션 작업을 수행하여 평균적인 열적 거동 가능성을 추정하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 지하수의 유동에 따른 지열 거동 예측을 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<sup>7)</sup>, 대상지역의 추적자 시험을 실시하거나 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 <sup>6</sup> J/(m <sup>3</sup> -K)	4.2
volumetric heat capacity (solid)	10 <sup>6</sup> J/(m <sup>3</sup> -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 <sup>2</sup> -d)	0
source(+)/sink(-) of solid	J/(m <sup>2</sup> -d)	0
In-transfer rate	J/(m-d-K)	0
Out-transfer rate	J/(m-d-K)	0

## 3. 결과

### 3.1 수리경사에 의한 변동

Fig. 2에서는 0, -30, -50 m 심도의 평면을 각각 slice 1, slice 2, slice 3으로 설정하여 온도분포를 시뮬레이션 하였다. 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 지하

수의 유속이 큰 대수층에서는 등온선 중심이 동쪽 모서리 부근으로 상당히 이동한 것으로 나타났다. 이것은 열적거동이 대수층을 통과하는 지하수 유동의 영향에 의한 것으로서 하부대수층에서 주입수에 의한 열적거동이 크게 영향을 받기 때문이다. 시뮬레이션 결과 나타난 온도범위는 수리경사가 큰 조건에서 대수층내 온도범위가 보다 작게 나타나는 것은 지하수 유속에 비례하여 주입된 열수와 냉수의 분산도 커지기 때문이다. 따라서 수리경사가 큰 조건에서 만들어진 온도분포도의 동일 온도범위가 크게 나타나며, 직접적인 주입수의 영향을 받는 다른 층들과 많은 차이를 보인다.

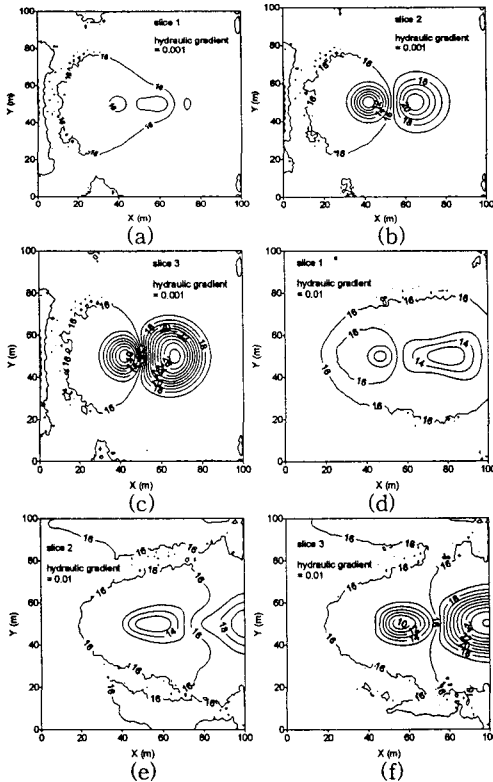


Fig. 2 Simulated temperature distributions at each depth slices according to the hydraulic gradient 0.001 (a, b, c) and 0.01 (d, e, f).

### 3.2 모니터링 분석

Fig. 3a, b는 365일간 ATEs 시스템 모델을 수리경사가 0.001인 경우로 시뮬레이션한 주입과 양수 우물내 각각의 수위와 온도변화이며, Fig. 3c, d는 수리경사가 0.01인 경우를 설정하여 나타난 것이다. Fig. 3a에서 35°C 열수를 동쪽 우물에 주입후 순간적으로 약 0.1 m 정도 수위가 상승한 것

으로서, 시간에 따라 점차 완만하게 낮아져 0.07 m의 수위를 형성하며, 90일 후 주입을 중단하였을 때

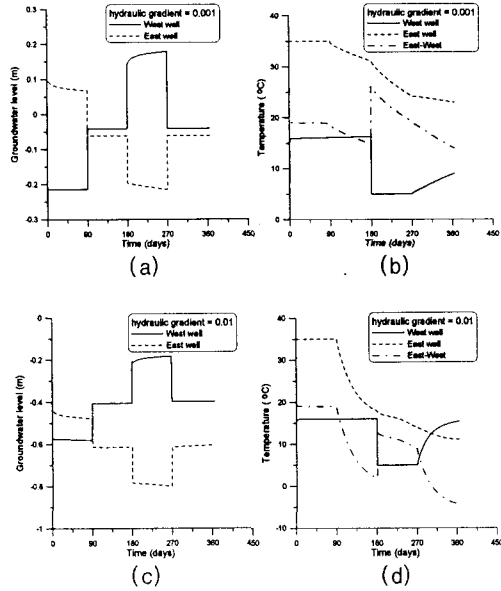


Fig. 3 Monitored groundwater levels and temperature changes at the west and east well during 365 days with cycling regime method in the condition of hydraulic gradients of 0.001 (a, b) and 0.01 (c, d), respectively.

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. 3b는 시간에 따른 두 우물내 온도변화를 나타낸 것으로서 각 우물에서 열수나 냉수의 주입이 시작되는 순간 급격한 온도 변화를 보이며, 주입이 중지될 때까지 지정온도를 유지하게 된다. 주입을 중지한 후 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. 반면 양수정에서는 지하수의 유동이 서에서 동으로 유동하기 때문에 동쪽 주입 우물에 주입된 열이 확산에 의하여 서쪽으로 이동하는 것이 매우 느리므로 그 열적 간섭현상도 매우 느리게 나타난다. 서쪽우물에서 5°C의 낮은 냉수를 주입한 경우 동쪽 우물에서는 급격한 온도하강

현상을 보이며(Fig. 3b), 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. 3c, d는 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. 3a에 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. 지하수의 빠른 유속에 의하여 주입과 양수에 따른 두 우물간 온도 간섭 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 지속적인 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 유동방향과 주입과 양수 우물의 배열에 따라 열적 간섭현상이 큰 차이를 나타내는 것으로 ATES 시스템 계획시 지하수의 유동 특성을 파악하는 것이 효율적이라는 것을 보여준다.

#### 4. 결론

국내에서는 지하수가 풍부한 대수층이 발달되어 있는 지역이 많으므로 대수층 축열 시스템을 구축하는데 매우 유리하다. 그러나 이러한 지역에서 시스템을 고효율로 유지하기 위해서는 대수층 내 지하수 유동 특성에 대한 파악이 필요하다. 국내에서는 층적층 및 암반대수층의 수리적 특성이 매우 다양하여 실제 ATES 시스템의 경제적인 설계와 구축을 위해서는 현장실험이나 열펌프 운영 경험 등과 함께 지하의 온도 변화 예측을 위하여 본 연구와 같은 지열 거동 모델링 기술이 요구된

다. 그리고 지열펌프의 운영 시나리오를 이용하여 임의의 대수층내 지하수 유동의 영향에 따른 열적거동을 해석함으로써, 시스템 효율을 분석하는데 중요한 것으로 판단된다.

지하수 유속이 상대적으로 큰 조건에서 주입수에 의한 대수층내 열적 유동과 확산이 크게 나타나는 것은 열적 분산이 지하수의 유동 속도와 거의 비례하기 때문이다. 두 지하수위 경계조건을 설정하여 지하수의 평균유속을 변화시킨 뒤 두 우물에서의 수위와 열적 변화를 시뮬레이션한 결과, 계절별로 양수와 주입 우물을 바꾸어서 지열펌프를 운용하는 방법 등의 ATES 시스템 모델의 효율성이 지하수의 유속에 따라 크게 차이를 보인다.

#### References

- [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. 167.
- [2] 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학, Vol 10, No 2, 131-142.
- [3] 한정상, 한규상, 한력상, 한찬, 2004, 친환경 대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템, 한림원.
- [4] Chiasson, A. D., 1999, Advances in modeling of ground-source heat pump systems, Master thesis of Oklahoma State Univ., 155.
- [5] 한국지질자원연구원, 2004, 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구, 123.
- [6] Diersch, H. J. G., 2004, FEFLOW 5.1 User's manual, Wasy GmbH, 168.
- [7] Neuman, S. P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, Water Resour. Res., Vol. 26, 1749-1758.