

수치 모델링 기법을 이용한 개별 대수층 축열 시스템 활용성 예비 평가

*김 종찬¹⁾, **김 형수²⁾, 이 영민³⁾

Preliminary Feasibility Study of Separated Aquifer Thermal Energy Storage System using Numerical Method

*Jongchan Kim, **Hyoungh-Soo Kim, Youngmin Lee

요약 : 개별 대수층에 냉수와 온수를 저장하여 수자원과 냉난방 열원으로 활용하는 방안에 대한 평가를 지열-지하수 부정류 모델링을 통해 수행하였다. 저장 및 회수 가동 시간이 증가함에 따라서 각각의 대수층 내에 온열과 냉열이 축열되는 현상이 확인되었으며, 지하수 유동에 의해 축열된 수체가 지하수 흐름방향으로 이동하는 현상을 확인 하여 지하수 유동이 축열 정도를 결정하는 요인이 될 수 있음을 확인하였다. 설정된 모델에 대하여, 두 개의 개별 대수층 사이의 열 간섭은 거의 없는 것으로 나타났다. 주입과 양수의 가동 횟수가 증가되면, 대수층 축열 효과는 증대되는 것으로 나타났다. 열-지하수 모델링을 통한 온도 예측은 실제 냉난방의 효율성을 결정짓는 수온을 정량적으로 계산할 수 있는 유용한 기술로 평가됨과 더불어, 수자원의 지하 저장을 통해 효율적으로 물을 확보하고 관리할 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Key words : Aquifer Thermal Energy Storage(ATES, 대수층 축열), Thermo-hydraulic modeling(지열-지하수 모델링), Geothermal Energy(지열 에너지), Heat Transfer(열 전달), Heating and Cooling(냉난방), Aquifer Storage and Recovery (ASR, 대수층 저장 회수)

1. 서론

대수층 축열 시스템(ATES)은 천부 지중열을 이용하여 대상 건물 등에 냉난방을 하는 지열 에너지 분야의 한 종류이다. ATES의 기본 원리는 시추공을 이용하여 여름에는 겨울에 축열한 냉열을 생산하여 건물에 냉방을 하고 반대로 겨울에는 여름에 축열한 온열을 생산하여 건물에 난방을 하는 시스템이다. ATES는 체적 열용량이 높은 지하수를 직접 이용하기 때문에 시스템 효율이 높으며, 열교환에 이용된 지하수는 곧바로 주입정을 통해 재주입 되므로 지하수 고갈에도 영향을 주지 않는다. 이러한 장점들 때문에 유럽에서는 이미 1980년대부터 ATES 에 관한 연구와 시공이 이루어지고 있으며^{1,2,3)}, 우리나라의 경우에는 최근에 ATES 에 대한 수치모델링과 시공이 이루어졌다^{4,5,6,7)}. 또한 대수층 저장 회수(ASR) 기술은 풍수기에 대수층으로 지표수를 저장한 후, 갈수기에 대수층으로부터 수자원을 공급받는 방식으로 미국을 비롯하여, 많은 국가에서 수자원의 새로운 활용과 관리 방안으로 활용되고 있다^{8,9)}. ATES와 ASR을 적절하게 활용할 경우, 수자원의 활용과 더불어 에너지를 효율적으로 이용할 수 있으며, 에너지의 활용은 천부 지열의 특성상 냉난방과 연계되어 활용될 수 있다. 일반적으로 지열 냉난방 시스템에 이용되는 heat pump의 효율은 시스템에 사용되는 지하수의 온도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 기존의 단일 대수층 축열 효과를 평가하는 방식

과는 달리 분리된 개별 대수층을 활용한 축열 시스템에 대한 지열-지하수 거동 모델링을 통하여 냉난방을 위한 온수와 냉수의 회수온도를 산출하는 방식을 수치적으로 평가하고자 한다.

2. 개별 대수층 축열 시스템 모델링

지열-지하수 거동 부정류 모델링은 상용 프로그램인 FEFLOW를 이용 하였다. 잘 알려진 바와 같이 지열-지하수 거동 모델링을 위한 열 유량(J_i) 또는 열 유속 방정식과 열 거동 방정식은 다음과 같은 식들로 표현된다.

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

여기서 n 는 공극율, c_s , c_w 는 고체와 물의 비열(J/(kg-K)), v_i 는 지하수의 평균 속도(m/s), D_{ij} 는 수리동역학적 분산텐서(m²/s), ρ_w , ρ_s 는 물

1) 한국지질자원연구원 국토지질연구본부
공주대학교 지질환경과학과
E-mail : geotherm01@gmail.com
2) 중원대학교 에너지자원공학부(발표자)
E-mail : hskim@jwu.ac.kr
Tel : (043)830-8622
3) 한국지질자원연구원 국토지질연구본부
E-mail : ymlee@kigam.re.kr

과 고체의 밀도(kg/m³) 그리고 T , T_0 는 온도(K)와 기준온도(K), λ 는 대수층의 열전도도(J/(m-s-K))이다.

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

여기서, Q_h 는 유출량(m³/d), v_i/R 은 열거동 전면의 대류속도(m/s), $\lambda/c_s \rho_s$ 는 열전도 계수, D_{ij}/R 은 열분산 계수 그리고 $R=c_s \rho_s/n C_w \rho_w$ 는 열적 지연계수이다.

모델영역은 4 km×4 km×0.5 km로 설정하였으며, 모델영역 내에는 두 개의 대수층(aquifer)과 세 개의 준대수층(aquitard)이 존재한다. 기본적인 지층은 층상 구조를 가지고 있는 것으로 단순화하였으며, 상부 대수층은 지하 146 ~ 168 m 구간, 하부 대수층은 지하 420 ~ 450 m 구간에 존재토록 설정하였다. 모델 영역 중심에는 온열과 냉열을 각각 축열 하기 위한 800 m의 이격거리를 갖는 두 개의 시추공을 설정하였다. 좌측 정호는 상부 대수층에 설치되었으며, 동절기에 냉수(6.1℃)를 주입하고 주입된 물을 하절기에 양수 할 수 있는 형태이며, 우측 정호는 하부 대수층에 온수(54.4℃)를 하절기에 주입하고, 동절기에 양수 할 수 있는 형태로 가정되었다. 시추공을 통해 주입/양수 되는 수량은 각각 5,500 m³/day, 8,000 m³/day로 설정하였으며, 이 값은 두 개의 정호에서 동일하다.

모델영역의 우측 방향으로의 지하수 유동을 위해서 초기 경계 조건에서 지하수의 수두구배를 0.001로 설정하였다. 설정된 모델의 최하부면에서는 유체의 입출이 없으며, 온도의 초기 조건은 모델 최하부면과 지표면에서 각각 30℃와 15℃로 항상 일정하게 유지하도록 설정하였다. 또한 지하 온도는 하부로 내려가면서 점진적으로 증가하는 방식으로 설정하였으나, 대수층 구간에 대해서는 일정온도가 유지되도록 하였다. 이때, 상부 대수층의 온도는 15.5℃, 하부 대수층의 온도는 29.4℃이다. 모델 영역 측면에서는 열의 입출입이 없도록 설정하였으며, 실제 관심 영역에 비해 모델 설정 영역이 5배 이상이므로 이러한 경계 조건은 결과에 큰 영향을 주지 않을 것으로 기대하였다. Table 1은 모델에 사용된 대수층과 준대수층(aquitard)의 수리지질학 물성과 열물성을 보여준다.

유체의 체적 열용량과 열전도도는 각각 4.2×10⁶ J/m³K, 와 0.65 W/mK으로 설정하였다. 모델링 가동조건은 Table 2와 같다. 지하수의 주입은 4개월 동안 진행된다. 즉, 상부 대수층에는 겨울철에 주입이 이루어지고, 하부 대수층에는 여름철에 주입이 이루어진다. 반대로 냉난방을 위한 생산은 3개월 동안 진행이 된다. 즉, 상부 대수층에서는 여름철에 양수가 이루어지고, 하부 대수층에서는 겨울철에 양수가 이루어진다. 위의 가동조건을 이용하여 이 연구에서는 예비적으로 2년 동안의 지열-지하수 거동 부정류 모델링을 수행하여 그 결과를 고찰하였다.

Table 1 Hydrogeological and thermal properties of the aquifer and the aquitard

Property	Values	
	aquifer	aquitard
Porosity	0.3	0.2
Vol. Heat capacity (J/m ³ K)	1.84×10 ⁶	1.0×10 ⁶
Thermal conductivity (W/mK)	1.63	2.04
Longitudinal dispersivity (m)	5	5
Transverse dispersivity (m)	0.5	0.5
Hydraulic conductivity (m/s)	1.0×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻⁹

Table 2 System operation conditions

Time (month)	Cold aquifer	Hot aquifer
1	Injection	Production
2	Injection	No operation
3	Injection	No operation
4	No operation	No operation
5	Production	No operation
6	Production	Injection
7	Production	Injection
8	No operation	Injection
9	No operation	Injection
10	No operation	No operation
11	No operation	Production
12	Injection	Production

3. 모델링 결과 및 토의

두 개의 개별 대수층에 대한 축열 시스템에서의 지열-지하수 거동 부정류 모델링을 2년에 걸쳐서 수행하였다. 상부 대수층에 냉열을 축열 한 좌측 정호 주변의 온도 분포는 Fig. 1과 2에 도시하였다. 그림에서 I, N, 그리고 P는 각각 Injection, No operation 그리고 Production을 의미한다. 온도 범위는 0℃에서 17℃까지이다. Fig. 1과 2에서 보면 주입이 시작되면 지층 내 온도변화가 주입정을 중심으로 확산되고, 생산이 시작되면 원위치로 회복되는 것을 볼 수 있다. 생산이 끝난 뒤에도 여전히 냉열이 지층 내 분포하는 현상도 확인 할 수 있다. 이러한 축열 현상은 가동이 더 진행된 Fig. 2에서 뚜렷하게 나타난다. 따라서 수년의 장기적 운영이 이루어질 경우, 상부 대수층의 온도는 활용 측면에서 유리한 저온을 지속적으로 유지할 수 있을 가능성이 높다고 판단된다.

Fig. 3과 4는 하부 대수층에 온열을 축열한 우측 정호 주변의 온도분포를 나타낸다. 온도 범위는 25℃에서 60℃까지이다. 이 그림 역시 상부 대수층과 마찬가지로 주입이 시작되면 주입정 주변으로 온도가 확산되고, 생산이 시작되면 원위치로 회복되는 것을 확인 할 수 있다. 시간이 지남에 따라 대수층 내 온열이 축열 되는 현상은 Fig. 4를 통해 명확하게 확인 할 수 있다.

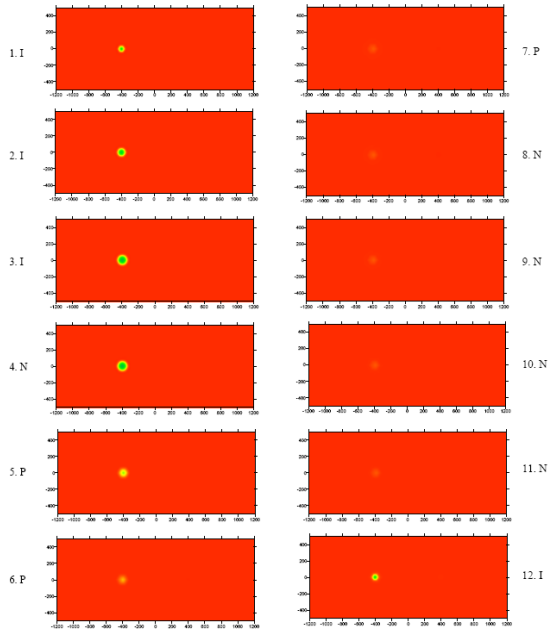


Fig. 1 Temperature distributions in upper aquifer after one-year operation

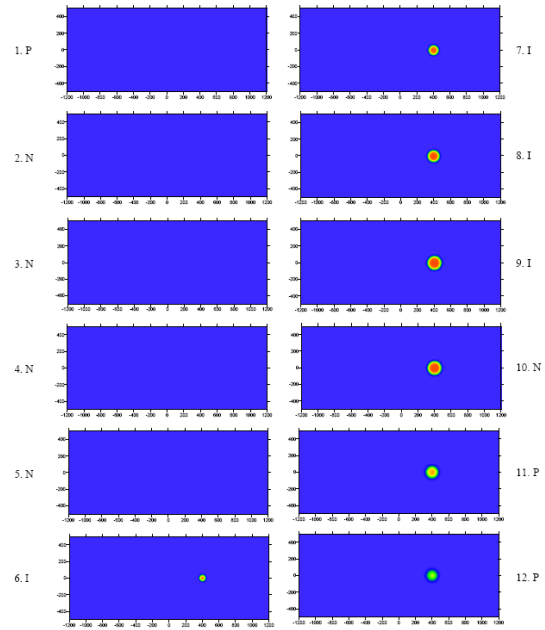


Fig. 3 Temperature distributions in lower aquifer after one-year operation

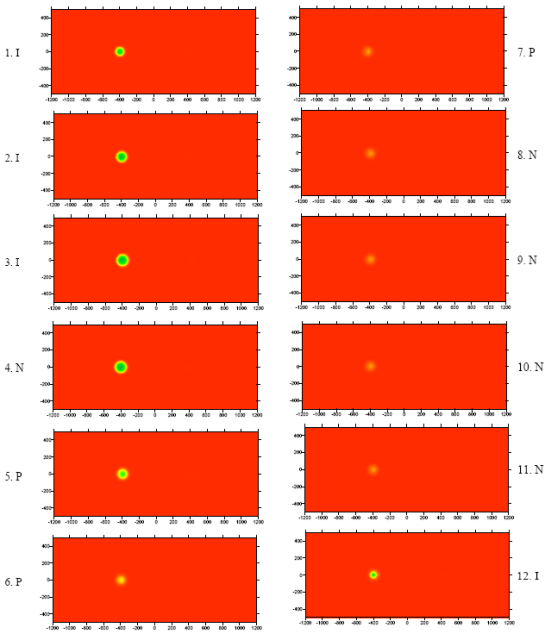


Fig. 2 Temperature distributions in upper aquifer after two-year operation

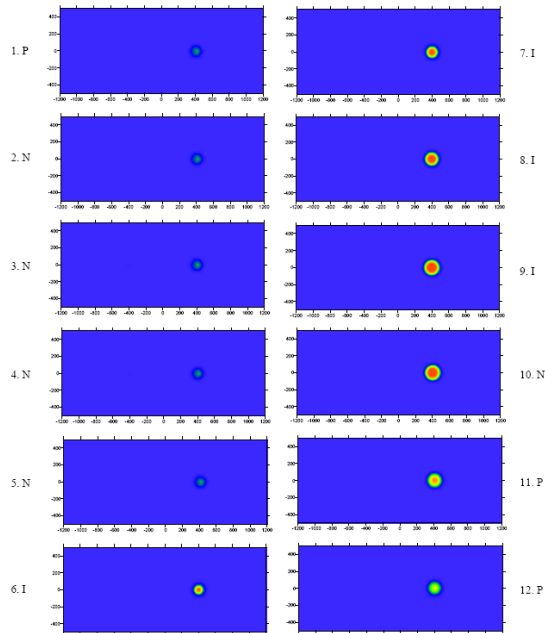


Fig. 4 Temperature distributions in lower aquifer after two-year operation

시간에 따른 대수층내 축열 상태를 확인 하기 위해서 아래의 Fig. 5 와 6을 도시 하였다. Fig. 5 는 상부 대수층 내 시간에 따른 시추공 주변의 온도 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 시간이 경과함에 따라서 대수층의 온도가 전반적으로 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 시추공을 중심으로 지하수 유동 하류 방향에서 관측된 대수층 내 온도가 상류 방향에서 관측된 온도 보다 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

이는 대수층 내 지하수 흐름 때문으로 판단되지만, 지하수의 유동이 상대적으로 느려 그 효과가 매우 뚜렷하지는 않다. Fig. 6은 하부 대수층 내 시간에 따른 시추공 주변의 온도 변화를 보여준다. 하부 대수층의 온도는 시간이 경과함에 따라서 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 시추공을 중심으로 유동 하류방향에서 관측한 온도가 상류방향에서 관측한 온도 보다 높은 경향을 보인다.

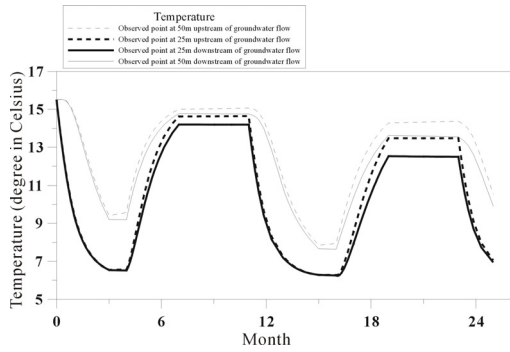


Fig. 5 Temperature variations near borehole in upper aquifer

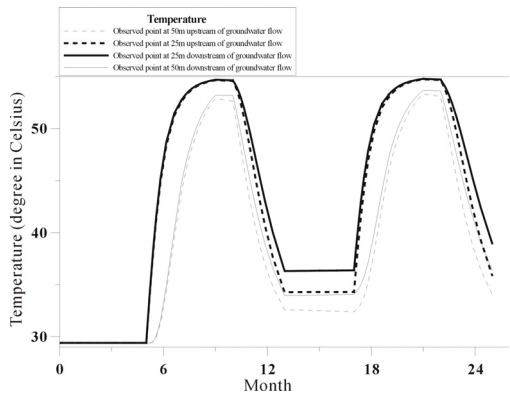


Fig. 6 Temperature variations near borehole in lower aquifer

모델 영역의 중심지점에서의 대수층 내 시간에 따른 온도변화는 없는 것으로 확인 하였다. 이 결과로부터 두 대수층에 저장된 축열체 사이의 열 간섭은 전혀 없는 것을 알 수 있다.

대수층 내에서 온열과 냉열이 전달되는 정도는 Fig. 7 과 8로부터 확인이 가능하다. Fig. 7은 4개월 동안 냉열의 주입이 끝나고 한 달 동안 시스템이 가동 되지 않은 상태 즉, 온도가 가장 많이 전달되는 시기에 대해서 상부 대수층 내 냉열의 전달 정도를 도시화 하였다. 그림에서 보듯이 냉열은 시추공을 중심으로 약 반경 100 m 정도 전달되는 것을 알 수 있으며, 지하수 유동에 따라 지하수 하류 방향으로 영향이 좀 더 많은 것을 알 수 있다. 반대로 Fig. 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 온열이 전달되는 정도를 보여준다. 온열은 냉열보다 전달 정도가 약 10 m 정도 더 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 대수층의 온도와 주입 온도의 차이가 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

마지막으로 열 펌프 활용 냉난방 효율에 가장 큰 영향을 미치는 회수 온도를 산출하였다(Fig. 9). 가동 첫 해의 냉열과 온열의 회수 온도범위는 각각 약 6.1~14℃ 와 약 38~54.4℃ 이며, 가동 두 번째 해의 냉열과 온열의 회수 온도범위는 각각 약 6.1~12℃ 와 약 40~54.4℃ 로 나타났다. 따라서 시스템 가동이 진행됨에 따라서 냉열과 온열이 지층 내 더 많이 축열이 되므로 시스템의 효율은 시간이 경과함에 따라서 더 좋아질 것으로 예상된다.

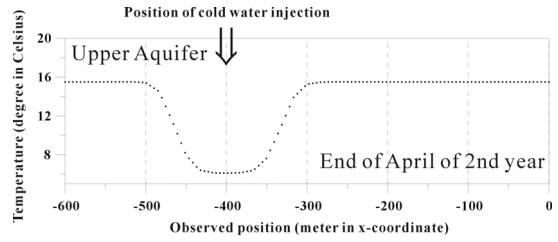


Fig. 7 Temperature profile of upper aquifer at the time of one month after second year injection

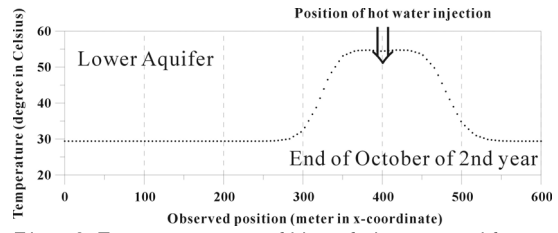


Fig. 8 Temperature profile of lower aquifer at the time of one month after second year injection

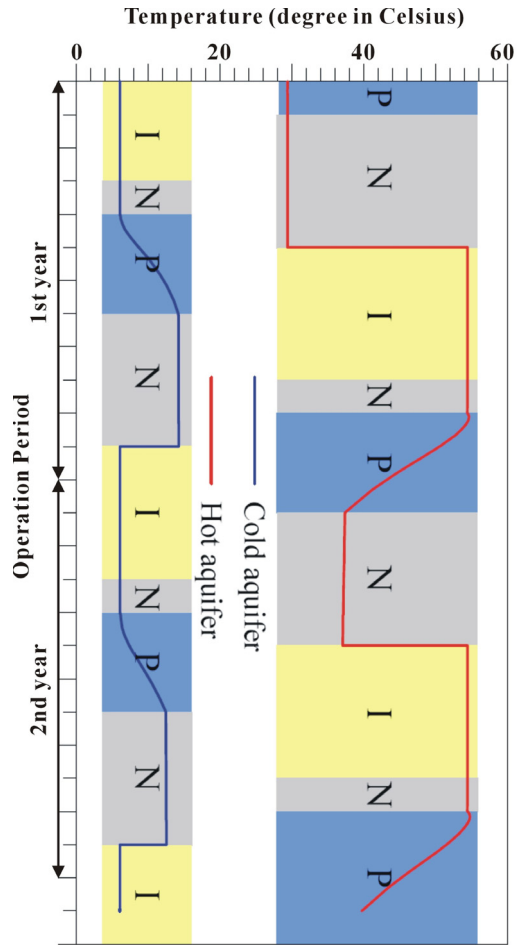


Fig. 9 Temperature in Wells (left : upper aquifer well, right : lower aquifer well, I : injection, N : No operation, P : production)

4. 결론 및 의견

개별 대수층 축열 시스템의 활용성을 평가하기 위해서 지열-지하수 거동 부정류 모델링을 2년 동안 수행하였다. 모델링 결과로부터 다음과 같은 현상들을 확인 하였다.

① 가동시간이 증가함에 따라서 개별 대수층 내에 온열과 냉열의 축열이 진행되는 현상을 확인 하였다. ② 지하수 유동에 의해 축열체가 지하수 흐름방향으로 이동하는 현상을 확인 하였으며 지하수 유동이 축열 정도를 결정하는 중요 요인임을 확인 하였다. ③ 설정된 모델에 대하여, 두 개의 개별 대수층 사이의 열 간섭은 없는 것으로 나타났다. ④ 냉방을 위해 동절기에 6.1°C로 주입된 냉수의 하절기 회수 온도는 첫 해에 약 6.1~14°C, 두 번째 해에 약 6.1~12°C를 보인다. 마찬가지로 하절기에 54.4°C로 주입된 온수의 경우, 첫해에 약 38~54.4°C, 두 번째 해에 약 40~54.4°C의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 가동 시간이 늘어나면서 나타난 온도 분포는 시간이 지날수록 개별 대수층 축열이 냉난방에 뚜렷한 효과를 보여줄 것으로 예측하게 한다. 이 결과로부터 가동시간이 경과할수록 축열이 진행되어 냉열체는 상대적으로 차가워지고, 온열체는 상대적으로 뜨거워지는 것을 확인 할 수 있다. ⑤ 지열-지하수 모델링을 통한 대수층내의 온도 예측은 실제 냉난방의 효율성을 결정짓는 수온을 정량적으로 계산할 수 있는 유용한 기술로 평가된다.

향후, 개별적인 대수층에 필요한 에너지를 저장하는 축열 기술에 대한 수치 모델링 평가 기법은 실제 현장 여건을 반영하여 활용될 수 있을 것이다. 이러한 실제 현장에 대한 평가는 실제 관련 사업의 에너지 절감에 대한 경제적 타당성을 정량적으로 평가하여 줄 뿐 아니라, 대수층 저장 회수(ASR; Aquifer Storage and Recovery) 기법과 연계 활용 될 경우, 추가적인 수자원 확보가 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 에너지관리공단 과제 “대수층 축열 시스템 개발을 위한 수리지질/지열학적 조사연구”의 일환으로 수행되었다. 개별 대수층 축열 시스템 개념 모델을 위한 기초 정보는 미국 GSI Watersolutions사가 제공하였으며, 학술 논문 발표 관련 비용은 중원대학교의 학술 활동 지원에 의해 이루어졌다. 연구 지원을 해준 관련 기관들에 감사드린다.

참고문헌

- [1] Paksoy, H. O., 2005, "Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design", pp. 447. Springer.
- [2] Hall, S. H., and Raymond, J. R., 1992, "Geohydrologic characterization for aquifer thermal energy storage", Intersociety energy conversion engineering conference.
- [2] Griffioen, J., and Appelo, C. J. A., 1993, "Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage", Applied Geochemistry, Vol. 8, pp. 161-176.
- [4] 한혁상, 한규상, 2005, "대수층을 축열체로 활용한 지열원펌프(GSHP) 시스템", 지열에너지 저널, 제1권 제1호, pp.61-68.
- [5] 심병완, 2005, "대수층 축열 에너지(ATES) 시스템 모델에서 지하수 유동 영향에 의한 지반 내 온도 분포 예측 시뮬레이션", 한국지열에너지학회논문집, Vol. 1, No. 1, pp. 1-8.
- [6] Lee, K. S., 2008, "Performance of open borehole thermal energy storage system under cyclic flow regime", Geosciences Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 169-175.
- [7] 김종찬, 이영민, 윤운상, 구민호, 김영석, 2009, "대수층 축열 시스템의 열 간섭 모델링", 한국신재생에너지학회 2009 춘계학술대회 초록집, pp. 101
- [8] 김형수, 한찬, 류정아, 1999, "지하수 함양 및 활용증대 방안 연구", 한국수자원공사 연구보고서 WRRI-GG-991-1, p. 210.
- [9] Pyne, R. David G. 1995, "Groundwater Recharge and Wells", CRC Press.