

지하대수층을 이용한 축열시스템의 설계(II) : 열해석

Design of an Aquifer Thermal Energy Storage System(II) : Thermal Analysis

이 관 수*, 이 태 희**, 송 영 길***
 K. S. Lee, T. H. Lee, Y. K. Song

Key words : Aquifer(지하대수층), Air Conditioning(공조), Energy Storage(축열), Energy Recovery Efficiency(에너지 회수 효율)

Abstract

The energy recovery efficiency(ERE) of an aquifer thermal energy storage system was calculated using curvilinear coordinate. The results of the calculation were compared with the experimental results, and agreed within 11% of the discrepancy. The variation of ERE was investigated as a function of the underground water natural velocity, the amount of the stored energy, and period of the energy recovery. The slower the natural velocity and shorter the recovery period, the higher ERE was yielded. Also it was found that increase in the amount of energy storage yields higher ERE, and carries out less influential ERE to the natural velocity. Reiterative usage of the aquifer as a thermal storage tends to gradually increase ERE. The result of this study implements that the aquifer thermal energy storage system is suitable for large cooling/heating loads, such as district cooling/heating.

기 호 설 명

A : 지하대수층의 평면적[m²]

a : 지하대수층의 단면적[m²]

C : 저장면적 계수

C_L : 지하수의 비열[kJ/kg·°C]

C_r : 암반의 비열[kJ/kg·°C]

\hat{C} : 지하대수층의 단위부피당의 비열[kJ/m³·°C]

D : 우물 쌍 간의 거리[m]

h : 지하대수층 내의 수두[m]

h_a : 지하대수층의 두께[m]

K : 지하대수층의 투수계수[l/day·m²]

k_L : 지하수의 열전도계수[W/m·°C]

k_r : 암반의 열전도계수[W/m·°C]

k : 지하대수층의 열전도계수[W/m·°C]

m : 주입/회수되는 지하수의 질량[kg]

N : 우물의 갯수

Q : 냉방부하[MJ/year]

q : 주입/회수되는 지하수의 유량[l/sec]

R : 회수정과 공급정 사이의 거리[m]

S : 수평방향의 단위 길이

s : 회수정과 공급정 사이의 최단시간을 갖는 유선

T : 온도[°C]

V : 지하수의 속도[m/year]

X : X방향 축방향 좌표

Y : Y방향 축방향 좌표

Z : Z방향 축방향 좌표

* 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 한국자동차부품종합기술연구소

상첨자

Δt : 시간 간격
 τ : 시간

하첨자

a : 지하대수층
 bt : 도달
 i : 임의의 우물, 임의의 격자
 inj : 주입
 L : 지하수
 n : 지하수의 자연현상
 p : 계산격자
 r : 압반
 rec : 회수
 s : 비(specific)
 tbt : 열적 도달
 X : X방향 축방향 좌표
 Y : Y방향 축방향 좌표
 Z : Z방향 축방향 좌표

그리스 문자

Δt : 시간 간격[sec]
 η : 축방향 좌표
 ξ : 축방향 좌표
 π : 원주율
 ρ : 지하대수층의 밀도[kg/m³]
 ρ_L : 지하수의 밀도[kg/m³]
 ρ_r : 암반의 밀도[kg/m³]
 τ : 시간[sec]
 ϕ : 지하대수층의 공극률

1. 서 론

화석 연료의 고갈과 대기 환경 보전 문제가 세계적으로 심각하게 대두되고 있는 요즘을 지하대수층(地下帶水層, aquifer)을 축열조로 이용하는 냉·난방시스템이 매우 흥미있는 연구의 대상으로 부각되고 있다. 경제적 측면에서의 연구 검토 결과 미국의 Karkheck¹⁾은 지하수를 이용한 냉·난방을

통해 최소한 50%의 냉·난방용 에너지를 절약할 수 있다고 하였으며, 또한 Anderson²⁾은 이 방법을 통해 미국 전체 에너지 소모량의 약 10%를 절약할 수 있다고 하였다. 이 시스템을 난방용으로 적용할 경우는 태양열 또는 공장이나 발전소의 폐열 등을 열원으로 이용할 수 있으며, 냉방의 경우는 겨울철의 차가운 대기를 에너지의 공급원으로 사용할 수 있다.

지하대수층을 이용한 축열 시스템은 지표와 지하대수층을 연결하는 몇 쌍의 공급정(supply well)과 회수정(recovery well)로 이루어져 있으며 이 시스템에 대한 개략도는 Fig.1과 같다. 연간 공조 부하에 따라 지하대수층에 저장되어야 할 지하수의 양이 결정되고, 계산된 양의 지하수는 공급정으로부터 끌어 올려져서 가열 또는 냉각등의 열처리가 가하여진 후 같은 지하대수층으로 연결된 회수정을 통하여 주입된다. 지하대수층에 주입된 지하수는 저장된 에너지를 필요로 할 때까지 저장된 후 회수정을 통하여 끌어올려져 열교환기에서 열교환을 하고 다시 공급정으로 재주입되거나 지반 침하의 우려가 없는 경우 농·공업용수 등으로 재활용된다. 시스템의 사이클은 열처리된 지하수의 주입, 저장, 및 회수의 과정들로 이루어진다.

이 시스템을 이용할 경우의 장점으로는 냉방 또는 난방의 에너지원인 지하수의 양이 년중 거의 일정하므로 에너지의 공급이 안정적이라는 것과, 지하대수층의 단열효과가 매우 좋아 저장한 에너지의 대부분을 회수할 수 있다는 것이다. 특히 냉방의 경우 대기중의 냉열을 얻기위하여 겨울철의 밤에 대부분의 전력이 소비되므로 일반 터어보식 냉동

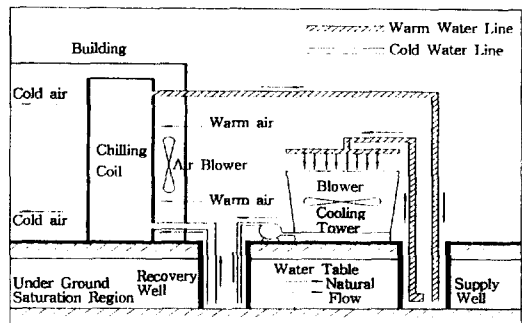


Fig.1 Schematic diagram of aquifer thermal energy storage system

기와 같이 최대 전력 소비 시간이 여름의 낮 시간이 아니라는 장점도 아울러 갖고 있다. 또한 대부분의 경우 지하에 지하대수층이 형성되어 있어 어디서나 이 시스템의 적용이 가능하기 때문에 매우 유력한 연구의 대상이 되고 있다.

지하대수층의 축열 성능을 수치적으로 예측하는 방법으로는 여러가지가 있으나, 대개 주입, 저장, 회수되는 한 사이클동안 지하수의 유동해석을 통하여 얻어지는 유량 회수 효율(Fluid Recovery Efficiency, FRE)과 한 사이클을 수행하는 동안 열의 출입과 그 효율을 계산하는 에너지 회수 효율(Energy Recovery Efficiency, ERE)이 대표적이다. 유량 회수 효율을 계산하는 방법과 조건 등에 관하여서는 송 영길 등³⁾에 의하여 이미 제시되었기 때문에, 이 연구에서는 축열 매체로 이용되는 지하대수층의 축열 성능을 예측하기 위한 방법으로 지하대수층에 주입된 에너지와 회수된 에너지의 양의 비로 정의되는 에너지 회수 효율을 수치 해석적으로 계산하는 방법을 개발하였다. 또한, 개발된 방법을 이용하여 공조부하와 지하수의 자연속도가 에너지 회수 효율에 미치는 영향과 지하대수층을 축열조로 반복하여 사용할 경우의 에너지 회수 효율의 변화를 각각 조사하였다.

2. 축열 시스템의 열해석

에너지 회수 효율에 영향을 미치는 인자는 공조부하, 지하수의 자연속도, 한 사이클의 수행 기간, 지하대수층의 지질학적 조건 등이 있다. 회수된 에너지의 양을 계산하기 위해서는 가열(또는 냉각)된 지하수가 주입, 저장, 회수의 과정을 거치는 동안 지하대수층 내부의 열유동 해석이 필수적이다. 이를 위해서는 먼저, 지하대수층에 존재하는 지하수의 유체 유동을 해석하여야 하며, 이 결과를 바탕으로 지하수의 열적 거동을 해석할 수 있다.

2.1 지하대수층 내에서의 열전달 현상과 지배 방정식

2.1.1 지하대수층 내에서의 유체 유동

지하대수층 내의 유체 유동장은 우물의 분포, 각 우물의 유량, 지하대수층 내 지하수의 자연속도와

공극율, 그리고 지하대수층의 두께 등의 함수로 표현된다.

지하수의 자연속도는 지하대수층의 압력 분포와 수리지리학적 특성에 따라 달라진다. 자연속도에 의한 지하수의 유량은 Darcy 법칙으로 알려진 아래의 식으로 나타낼 수 있다.⁴⁾

$$q = -K \cdot a \cdot \frac{dh}{ds} \quad (1)$$

비속도 V_s 는 q/a 로 정의되며, V_s 를 Darcy 속도라 한다. 또한 실제로는 공극에서만 지하수의 유동이 일어나므로 $\phi \cdot a$ 가 되어 어느 한 점에서의 지하수의 실제속도 V_n 은 다음과 같다.

$$V_n = \frac{q}{\phi \cdot a} = \frac{V_s}{\phi} \quad (2)$$

지하대수층과 연결된 N개의 우물을 통하여 가열(또는 냉각)된 지하수를 주입할 때 지하대수층 내의 임의의 점(X, Y)에서의 지하수의 속도 성분을 X-Y 좌표계에서 표시하면 다음과 같다.

$$V_x = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{2 \cdot \pi \cdot \phi \cdot h_a} \cdot \frac{X - X_i}{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} + V_{nx}$$

$$V_y = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{2 \cdot \pi \cdot \phi \cdot h_a} \cdot \frac{Y - Y_i}{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} + V_{ny} \quad (3)$$

여기서 X_i 와 Y_i 는 각 우물의 위치를 나타내고, V_{nx} 와 V_{ny} 는 지하수의 자연속도의 X방향성분과 Y방향성분을 각각 나타낸다. 지하수가 지하대수층에 주입될 때의 q_i 는 양의 값을 갖고, 지하대수층으로 부터 추출될 때는 음의 값을 갖는다. 그리고 ϕ 와 h_a 는 각각 공극율과 지하대수층의 평균 두께이다.

지하대수층에 주입된 지하수는 주입 및 추출과 자연속도의 영향을 받아 회수정을 중심으로 조개껍질과 같은 모양으로 확산된다(Fig2). 회수정을 통하여 주입된 에너지를 함유하고 있는 지하수의 일부는 공급정을 향하여 진행하게 되고, 가열(또는 냉각)된 지하수의 주입이 계속될 경우 언젠가는 공급정에 도달하여 결국 주입되었던 물입자가 다시

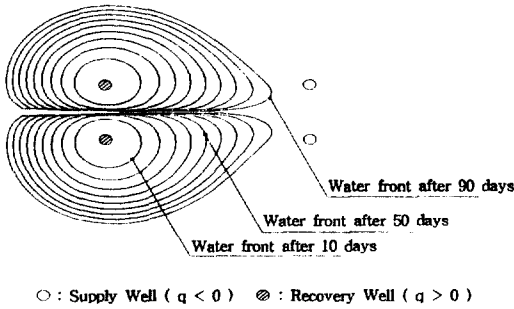


Fig.2 Schematic of the water front progression

끌어올려져 가열(또는 냉각)되는 현상이 일어나게 된다. 회수정으로 주입된 물입자가 다시 공급정을 통하여 끌어올려질 때까지 걸리는 시간을 도달 시간(breakthrough time : τ_{br})이라 하며, 다음 식으로부터 구할 수 있다.³⁾

$$\tau_{br} = \int_s \frac{ds}{\left| \sum_{i=1}^N V_i + V_n \right|} \quad (4)$$

여기서 s는 주입된 물입자가 공급정까지 도달하는 데 소요되는 최단 시간을 갖는 유선(streamline)을 나타낸다.

주입된 지하수에 함유된 에너지가 유선 s를 따라 공급정으로 이동되는 속도는 지하수의 이동 속도 보다는 느리다. 이 주입된 에너지가 공급정까지 도달하게 되는 시간을 열적 도달 시간(thermal breakthrough time : τ_{th})이라하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$\tau_{th} = \frac{(\rho \cdot C_p)_L \cdot \phi + (\rho \cdot C_p)_r \cdot (1-\phi)}{(\rho \cdot C_p)_L \cdot \phi} \cdot \tau_{br} \quad (5)$$

열적 도달 시간은 지하대수층을 이용한 축열 시스템의 설계에서 매우 중요한 인자로서 가열(또는 냉각)된 지하수의 최대 주입기간을 제한하는 요인이 된다. 즉 지하수의 최대 주입기간은 τ_{th} 보다 작아야 하고, 만약 주입 기간이 τ_{th} 보다 큰 경우 주입된 에너지를 함유한 지하수가 다시 가열(또는

냉각)되는 현상이 일어난다.

가열(또는 냉각)되어 지하대수층에 저장된 지하수는 그 에너지를 필요로 할 때까지 지하대수층에 보관된다. 이 때 저장된 지하수는 지하대수층의 자연속도에 의하여 이동하게 된다. 저장기간 동안의 주입된 지하수의 유동장은 자연속도에 의하여 결정되며 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_x = V_{nx}$$

$$V_y = V_{ny} \quad (6)$$

지하대수층에 저장된 에너지를 필요로할 때 지하수는 회수정을 통하여 추출되며 이 때 지하수의 임의의 위치(X, Y)에 대한 속도는 식 (3)과 같다. 다만 펌핑되는 유량 q_i 의 부호와 그 크기가 주입기관과는 달라진다.

2.12 지하대수층 내에서의 에너지 전달

지하대수층으로 주입되는 열에너지는 암반 부분과 그 사이의 공극을 메우고 있는 지하수에 저장된다. 지하대수층 내의 암반부분에 대한 에너지 방정식은 유동이 없으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_r \cdot C_r \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = k_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (7)$$

여기서 ρ_r , C_r 그리고 k_r 은 각각 암반의 밀도, 비열, 열전도 계수이다. 또한 지하대수층 내의 지하수에 대한 에너지방정식은 유동을 고려해야하므로 다음과 같다.

$$\rho_L \cdot C_L \cdot \frac{DT}{D\tau} = k_L \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (8)$$

여기서 ρ_L , C_L 그리고 k_L 은 각각 지하수의 밀도, 비열, 열전도 계수이다. 식 (7)과 (8)을 지하대수층의 공극율에 대하여 계산하고, 수평 방향의 전도열전달은 대류열전달에 비하여 매우 작으므로 무시한다는 가정^{6,7)}과 수직방향의 유동은 없다는 가정을 도입하면 다음과 같은 지하대수층의 에너지방정식을 얻을 수 있다.

$$\hat{C} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \phi \hat{C}_L \left(V_X \frac{\partial T}{\partial X} + V_Y \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (9)$$

여기서, $\hat{C} = \phi \rho_L C_L + (1 - \phi) \rho_r C_r$, $k = \phi k_L + (1 - \phi) k_r$, $\hat{C}_L = \rho_L C_L$ 이다. 또한 식 (9)의 V_X , V_Y 는 주입기간, 저장기간, 회수기간의 유동을 표현하는 식 (3)과 (6)에서 구할 수 있다.

2.2 지배방정식의 해법

지하대수층 내에서의 에너지 방정식을 수치해석적으로 풀이하고자 할 때 당면하는 어려움은 다음과 같다. 첫째로, 해석영역의 각 경계에서 경계조건이 주어져야 하는데, 실제의 경우 물리적으로 정확한 경계조건은 회수정에서만 주어지고 나머지 경계조건들은 임의로 가정되어야 한다. 둘째로, 해석영역 내에서 질량의 생성과 소멸이 지하수의 주입 및 회수에 의하여 발생한다는 것이다. 직각 좌표계(X, Y, Z 좌표계)를 이용하여 식(9)를 풀이할 경우 물리적으로 정확한 경계조건은 각각의 회수정을 포함하는 위치의 격자점에서만 주어지고, 회수정에서 발생하는 질량의 생성과 소멸을 처리하는 데에 어려움이 따른다. 그러므로 에너지 방정식의 풀이에서 필요한 경계조건의 정확한 설정이 곤란하고, 질량보존의 법칙을 적용하기가 곤란하다.

2.2.1 격자생성

이 연구에서는 경계조건 설정에 있어서의 어려움과 회수정에서 일어나는 질량의 생성(주입 기간)과 소멸(회수 기간)로 인한 어려움을 피하기 위하여 지하대수층을 Fig.3의 (a)에 나타낸 바와 같이 회수정을 잇는 선을 중심으로하여 좌우의 두 영역(Region I, Region II)으로 나누고, 각 영역에서 Fig.3의 (b)와 같이 곡면 좌표계(ξ, η, Z 좌표계)를 설정하여 격자계를 형성하였다. 이 때, ξ, η, Z 좌표계는 격자계의 연속성과 직교성을 얻기 위하여 다음의 식으로 주어지는 타원형 방정식을 풀이하여 생성하였다.

$$\begin{aligned} aX_{\xi\xi} - 2bX_{\xi\eta} + cX_{\eta\eta} &= 0 \\ aY_{\xi\xi} - 2bY_{\xi\eta} + cY_{\eta\eta} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

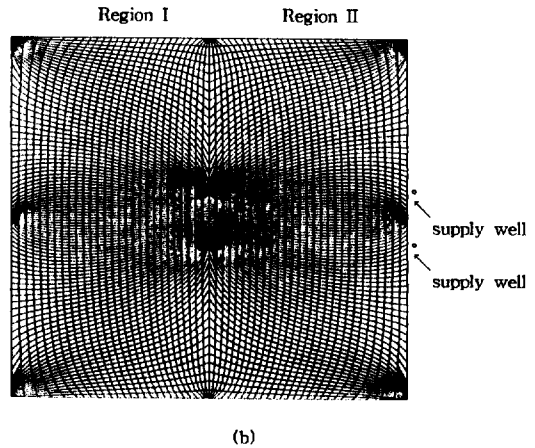
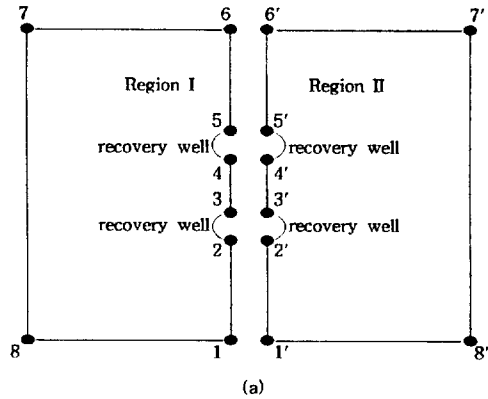


Fig.3 Grid system for the analysis of aquifer thermal energy storage system

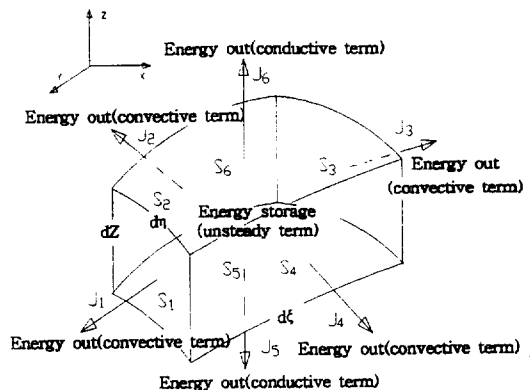


Fig.4 Energy balance in a control volume

$$a=X_{\xi}^2+Y_{\xi}^2, \quad b=X_{\xi}X_{\eta}+Y_{\xi}Y_{\eta}, \quad \text{그리고,} \quad c=X_{\xi}^2+Y_{\xi}^2$$

2.2.2 지배방정식의 차분화

지하대수층 내에서의 열전달 현상을 곡면좌표계에서 수치적인 방법으로 해석하기 위해서는 편미분방정식으로 주어지는 지배방정식을 유한체적법을 적용하여 ξ, η, Z 좌표계 내의 차분 방정식으로 이산화시켜야 한다. 즉, Fig4에서 보여주는 바와 같이 ξ, η, Z 좌표계에서의 $d\xi, d\eta$ 그리고 dZ 로 이루어진 임의의 검사 체적에 대하여 에너지 보존의 법칙을 적용한 차분방정식을 유도하여야 한다. 이를 위하여 식(9)를 다음과 같이 표현하였다.

$$\hat{C} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \text{div}(\vec{J}) = 0 \tag{11}$$

여기서,

$$\vec{J} = J_x \vec{i} + J_y \vec{j} + J_z \vec{k}$$

$$J_x = \phi \hat{C}_L V_x T, \quad J_y = \phi \hat{C}_L V_y T, \quad J_z = -k \frac{\partial T}{\partial Z}$$

식(11)을 ξ, η, Z 좌표계의 임의의 검사 체적(Fig4)에 대하여 적분하면 다음 식과 같다.

$$\hat{C} \frac{\partial T}{\partial \tau} \Delta V + \sum_{i=1}^6 J_i = 0 \tag{12}$$

여기서 ΔV 는 검사체적의 부피이고, ξ 와 η 방향의 단면을 통하여 전달되는 에너지 J_i ($i=1, 2, 3, 4$)는 다음과 같이 주어지고,

$$j_i = \int_{S_i} (\vec{J} \cdot \vec{n}) dS = \phi \hat{C}_L \left(\int_{S_i} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \right) T_i \tag{13}$$

Z 방향의 단면을 통한 열전달률 J_i ($i=5, 6$)는 전도에 의한 열전달만이 고려되므로 다음과 같이 주어진다.

$$J_i = -k \cdot S_i \cdot \frac{\Delta T_i}{\Delta Z_i} \tag{14}$$

식(12)에서 시간에 대한 미분에 명시도식(explicit scheme)을 적용하여 유한 차분화하면 다음과 같다.

$$\hat{C} \frac{T_b^{i+\Delta\tau} - T_b^i}{\Delta\tau} \Delta V + \left[\sum_{i=1}^6 J_i \right] = 0 \tag{15}$$

그러므로 식(15)는 곡면 좌표계상의 차분화된 지배방정식이 되고, 이 식을 풀이하기 위한 초기조건과 경계조건이 정의되면 지하대수층 내의 에너지 유동에 대한 수치해석이 가능해진다.

2.2.3 초기 조건

비정상 상태의 열전달 현상을 해석하기 위해서는 초기의 온도분포가 필요하다. 그 초기 온도는 지하대수층을 처음 사용하는 경우와 그렇지 않은 경우의 두가지로 구별된다. 지하대수층이 처음으로 축열조로 사용되는 경우에는 지하대수층의 상단과 하단은 각각 일정한 온도를 갖는다고 가정 하고 상단의 온도와 하단의 온도차를 선형 보간(linear extrapolation)함으로써 지하대수층 전체의 초기값을 취한다. 지하대수층이 축열조로 반복하여 사용되는 경우에는 이전의 축열 사이클을 수치 모사한 결과를 초기치로 취하면 된다.

2.2.4 경계 조건

(1) 주입 기간

Fig3의 (a)에서 선 2-3과 선 4-5(Region I, 반경 0.5m의 반원), 그리고 선 2'-3'과 선 4'-5'(Region II, 반경 0.5m의 반원)로 나타나는 recovery well의 온도는 주입되는 지하수의 온도 T_{inj} 와 같다. 선 1-2와 선 1'-2', 선 3-4와 선 3'-4', 그리고 선 5-6과 선 5'-6'는 서로 같은 위치이므로, Region I의 선 1-2(또는 선 3-4, 선 5-6)의 왼쪽과 접하고 있는 격자를 해석할 경우 선 1'-2'(또는 선 3'-4', 선 5'-6')의 오른쪽과 접하고 있는 격자와 연결하여 차분 방정식을 풀이하였으며 Region II의 선 1'-2'(또는 선 3'-4', 선 5'-6')의 오른쪽과 접하고 있는 격자를 해석할 경우 선 1-2(또는 선 3-4, 선 5-6)의 왼쪽과 접하고 있는 격자와 연결하여 차분 방정식을 풀이하였다. 선 6-7-8-1과 선 6'-7'-8'-1'은 주입된 지하수의 영향이 없도록 해석 범위를 충분히 크게 하였으며, 주입된 지하수의 영향을 받을 경우 유동의 상류의 온도를 가지도록 하였다. 해석 영역의 상하단 경계는 지하수가 존재하는 지하대수층의 두께에 각각 20m씩을 더한 범위를 설정하였으며 상단 경계 온도와 하단 경계 온도는 주입된 온수 또는 냉수의 영향이 무시 될

수 있을 정도로 작다는 가정에서 등온조건을 적용하였다.

(2) 저장기간 및 회수기간

저장 및 회수기간 동안의 경계조건은 회수정을 제외하면 주입기간과 같다. 저장기간 동안 회수정의 온도는 회수정으로 유입되는 지하수의 온도를 평균하여 설정하였다. 회수기간 동안 회수된 에너지의 양을 계산하는데, 이 양은 회수정으로 유입되는 지하수의 평균 온도와 유량을 기준으로하여 계산한다.

2.3 수치해석

이 연구를 통하여 개발된 수치해석용 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 미국의 알라바마 주립 대학교에서 실행된 실험치와 본 연구의 수치해석에 의한 결과, 그리고 미국 DOE(Department Of Energy)산하의 PNL에서 개발된 컴퓨터 프로그램인 ATESSS의 결과를 Table 1에 각각 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 실험치에 대한 오차는 ATESSS의 경우 26-29%의 오차를 갖는 반면, 이 연구의 수치해석 결과의 상대 오차는 11% 이내의 값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 본 연구를 통하여 개발된 수치해석 방법의 의한 결과가 종래의 것보다 더 정확한 예측도를 가짐이 증명되었다.

먼저 수치계산을 수행함에 있어서 에너지 회수 효율에 영향을 주는 지하대수층의 지질학적 특성들(지하수의 자연속도, 지하대수층의 두께, 공극율)이 고려되었고, 주입기간, 저장기간, 및 회수기간의 3 단계로 나누어 유동장과 에너지 방정식을 계산함으로써 에너지 회수 효율을 결정하는 인자들의 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 지하대수층이 여름에 건물을 냉방하는데 필요한 냉열(chill energy)을 저장하는 축열조로 이용될 경우에 대하여

계산된 결과만을 비교하였다.

입의의 건물에 대한 공조 부하가 결정되면 그에 따른 주입 또는 회수되어야 할 지하수의 총량이 계산되고 이 결과로부터 지하수를 저장하기 위한 지하대수층의 부피를 산출할 수 있다. Schaetzle⁹⁾는 지하대수층의 두께를 알고있을 때 공급정과 회수정 사이의 거리 R, 공급정과 회수정을 한 쌍으로하는 우물쌍간의 거리 D, 그리고 축열을 위한 지하대수층의 면적 A 사이의 관계를 다음 식과 같이 나타내었다.

$$A=C \cdot R \cdot D \quad (16)$$

여기서 C는 저장면적계수(storage area coefficient)로서 우물의 쌍수와 R 및 D의 함수로써 표현된다. 강철식⁸⁾은 R과 D의 비율이 3:1일때 우물 쌍수와 거의 무관하게 가장 안정적인 효율을 얻을 수 있다고 제안하였다. 그러므로 본 연구에서는 R과 D를 비를 3, 회수정과 공급정이 각각 두 개씩 있는 두 쌍의 우물로 구성된 시스템을 선정 하였으며, Schaetzle⁹⁾가 제시한 도표에 의하여 저장면적계수 C는 2로 하였다.

본 연구의 수치계산에 사용된 입력 자료를 Table 2와 같이 정리하였다. 지하대수층의 초기 온도는 대전 지역의 평균 온도인 15°C로 설정하였다.

동력자원연구소에서 조사한 대전지역의 지질학적 인자들을 중심으로하여 지하수의 자연속도와 공극율을 도출하였다.⁹⁾ 동력자원연구소에서 조사한 대전지역의 지하대수층의 두께는 20m, 지하수의 자연속도는 8.77m/year였으나 지하수의 자연속도가 저장된 에너지를 회수하는데 미치는 영향을 조사하기 위하여 입의의 자연속도(2, 5, 10, 15, 20m/year)를 입력하여 각각의 경우에 대한 에너지 회수 효

Table 1 Comparison of predicted ERE, with measured ERE.

ATES year	86-87	87-88	88-89
Measured ERE(%) [7]	76.0	70.2	86.9
Predicted ERE(%) (ATESSS)[7]	54.8	51.9	61.1
Error of predicted ERE (ATESSS) (%)	27.9	26.1	29.7
Predicted ERE(%) (this study)	69.3	68.4	78.0
Error of Predicted ERE (this study) (%)	8.8	2.6	10.2

율의 변화를 알아보았다.

대전지역에 위치한 임의의 건물에 대한 연간 공조부하를 계산하여 이를 냉방에너지량(Q)로 나타내었으며, 냉방부하의 변화 즉, 냉방에너지량의 변화에 따른 에너지 회수 효율의 영향을 조사하기 위하여 냉방에너지량을 Q/3, Q, 3Q의 경우로 나누어 수치계산을 수행하였다. 임의의 건물의 냉방부하를 기초로 계산된 연간 냉방 에너지량 Q = 726,335 Mcal/year로 계산되었다. 회수 기간을 60, 90, 120 일로 하여 회수 기간과 회수되는 유량이 에너지 회수 효율에 미치는 영향도 조사하였다. 또한, 지하대수층을 이용한 축열 시스템의 성능의 사용 횟수에 따른 변화를 조사하기 위해 냉방부하는 Q, 자연속도는 10m/year인 경우를 선택하여 각각 90일 동안의 주입기간, 저장기간, 그리고 회수기간을 거친 지하대수층이 90일 후 다시 사용될 경우의 에너지 회수 효율의 변화를 계산하였다.

Table 2에서 표기한 인자들을 중심으로 한 사이클을 수행하는 동안 주입 및 회수되는 에너지의 양(E_{inj} , E_{rec})을 아래의 식과 같이 계산하였다.

$$E_{inj} = \int_{injection\ period} \dot{m}_{inj} C_L (T_{inj} - T_{rf}) d\tau$$

$$E_{rec} = \int_{recovery\ period} \dot{m}_{rec} C_L (T_{rec} - T_{rf}) d\tau \quad (17)$$

여기서, 에너지의 양을 산출하는 기준온도(T_{rf})와 지하대수층의 초기 온도는 대전 지역의 연 평균 온도인 15°C로 하였다. 따라서, 에너지 회수 효율은 식(17)의 결과를 토대로하여 다음과 같이 계산된다.

$$ERE[\%] = \frac{E_{rec}}{E_{inj}} \times 100 \quad (18)$$

3. 결과 및 고찰

공조부하와 자연속도가 에너지 회수 효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Table 2에 나타난 것과 같이 세가지의 서로 다른 냉방부하를 갖는 경우에 대하여 에너지 회수 효율을 계산하였으며 그 결과를 Fig5에 도시하였다. 낮은 자연 속도에서는 냉방부하가 작을수록 에너지 회수 효율은 크게 나타났다. 이러한 것은 자연속도가 작을수록 에너지 주입량의 다소(多少)에 따른 유량회수 효율의 차이가 작기 때문이고,⁽³⁾ 주입되는 양이 적을수록 주입되는 지하수의 확산 속도가 작아져 전체 에

Table 2 Input parameters used for the thermal analysis.

Natural Velocity (m/year)	x	-2	-5	-10	-15	-20
	y	0	0	0	0	0
Flow Rate* (1/sec)	Injection	Recovery				
		Number of Days of Recovery Period				
		60	90	120		
	A	4.448×2	6.672×2	4.448×2	3.336×2	
B	13.344×2	20.016×2	13.344×2	10.008×2		
C	40.032×2	60.048×2	40.032×2	30.024×2		
Porosity	30%					
System Size* (m)		D		R		
	A	31		93		
	B	54		162		
	C	93		279		
Period (days)	Injection	Storage		Recovery		
	90	90		60, 90, 120		

* Cooling load A : Q/3, B : Q, C : 3Q

너지에 대한 대류 열손실이 줄어들기 때문이다. 그러나, Fig.5에서 알 수 있듯이 상대적으로 적은 양의 지하수가 주입, 회수될 수록 에너지 회수 효율은 자연속도에 대하여 민감하게 변화한다. 이것은 주입된 지하수의 양이 적을 수록 지하대수층 내부의 자연흐름에 의하여 유실되는 주입지하수의 비율이 증가하기 때문이다. 그러므로 자연속도가 작은 영역에서는 주입, 회수되는 지하수의 양이 적을수록 높은 에너지 회수 효율을 보이나 자연속도가 증가할 수록 효율은 급격히 감소하게 된다. Fig.5에서 볼 수 있듯이 냉방부하가 큰 건물에 대하여 설계된 시스템일 수록 그 시스템은 안정된 에너지 회수

효율을 가지며 자연속도가 크더라도 비교적 높은 효율을 갖는다. 그러므로 지하대수층을 이용한 축열시스템을 구축하고자 할 경우 지역 냉방 혹은 지역 난방과 같이 비교적 큰 열부하를 만족시키기 위한 시스템에 사용하는 것이 바람직하다.

회수기간의 변화에 따른 에너지 회수 효율의 변화를 조사하기 위하여 90일간 지하수를 주입하고, 90일간의 저장기간을 거친 후, 회수 기간을 60일 90일 그리고 120일로 하였을 때의 에너지 회수 효율을 각각 계산하고 그 결과를 Fig.6에 나타내었다. 회수 기간이 짧을 수록 에너지 회수 효율이 더 크게 나타났다. 회수기간이 길 수록 자연 속도에 의한

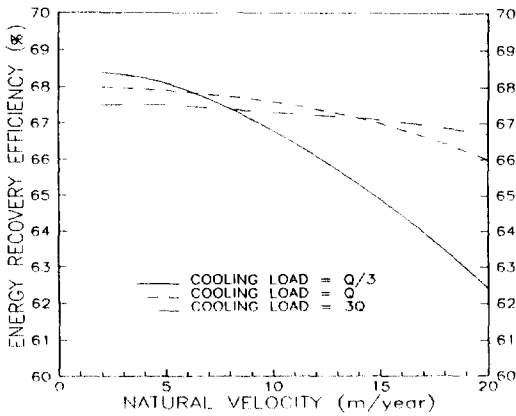


Fig.5 The variation of ERE as a function of natural velocity with different cooling loads

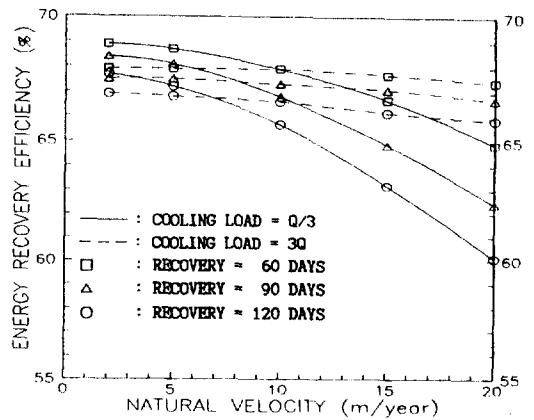


Fig.6 The variation of ERE as a function of natural velocity with different recovery periods

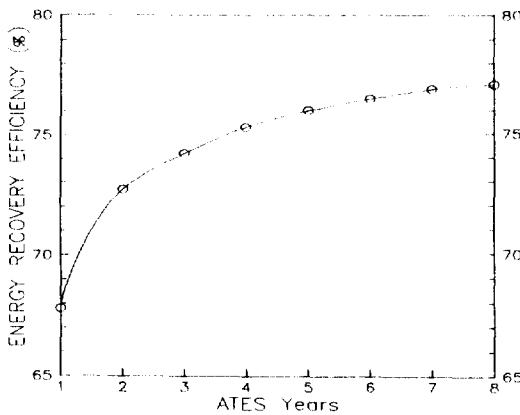


Fig.7 The variation of ERE with respect to ATES years for cooling load Q and natural velocity 10m/year

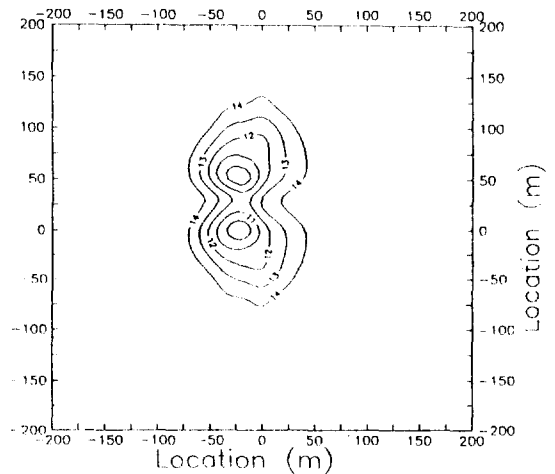


Fig.8 Energy distribution before injection period of 2nd ATES year

유체 이동이 커지므로 대류에 의한 열손실량이 증가하게 되고 추출 속도가 상대적으로 감소하여 하류 방향에 있는 유체선단이 회수정으로 접근하는 속도가 줄어들게 되며 수직방향으로의 전도 열손실량도 증가하게 된다. 즉 회수기간이 길 수록 대류 열손실량과 전도 열손실량의 증가로 인하여 에너지 회수 효율은 감소하게 된다. 따라서, 주입되어 저장된 에너지는 빠른 시간안에 회수하여 사용하는 것이 효율면에서 유리하다고 판단된다.

지하대수층을 축열조로 반복사용함에 따른 에너지 회수 효율의 변화를 Fig.7에 나타내었다. 지하수의 주입을 시작하는 시기부터 다시 지하수를 주입하는 시기까지의 시간을 ATES(Aquifer Thermal Energy Storage) year라 정의한다. Fig.7은 지하대수층을 이용한 축열 시스템의 성능을 연도별로 산출하기 위해서 ATES year에 따른 에너지 회수 효율을 도시한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 지하대수층을 축열조로 거듭 사용할 수록 에너지 회수 효율은 증가하였다. 그 이유는 한 사이클을 마치고 난 후에도 지하대수층 내에 주입되었던 에너지가 전부 회수되지 못하고 잔류하고 있기 때문이다. Fig.8은 한 사이클을 마친 후 두번째 사이클이 시작되기 직전 지하대수층 내의 온도분포를 보여준다. 즉 사용을 거듭함에 따라 전(前) 단계의 사이클에서 회수되지 못한 잔류 에너지 양은 증가하게 되고 그로 인하여 사용을 거듭함에 따라 지하대수층의 성능이 증가하게 된다.

4. 결 론

지하대수층을 이용한 축열시스템의 열해석을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 본 연구를 통하여 개발된 수치해석 방법은 기존의 수치해석 방법보다 더 정확하게 시스템의 성능을 예측하였다.

2) 지하대수층을 이용한 축열시스템은 공조부하가 클 수록 자연속도에 의한 영향과 거의 무관하게 안정된 에너지 회수 효율을 얻을 수 있으므로 지역 냉방 혹은 지역 난방과 같이 비교적 큰 열부하를

만족시키기 위한 시스템에 사용하는 것이 바람직하다.

3) 지하대수층을 이용한 축열시스템은 사용을 거듭할수록 그 성능이 향상된다.

참 고 문 헌

1. Karkheck, J., J. Dowell, and E. Beardsoworeh, 1977, "Prospects for district heating in the United States", Science 195(March) : 948-955.
2. Anderson, M. R., and R. O. Weijo, 1988, "Potential energy savings from aquifer thermal energy storage", Richland, WA : Pacific Northwest Laboratory, PNL-6588 UC-204.
3. 송영길, 이관수, 이태희, 김양현, 1993, "지하대수층을 이용한 축열시스템의 설계(I) : 등온 해석", 공기조화냉동공학회 논문집, Vol.5, No.2, pp.102-110.
4. Todd, David K., 1980, *Groundwater Hydrology*, 2nd ed.. New York : John Wiley & Sons., pp.64-67.
5. Schaetzle, Walter. J., C.E. Brett, D.M. Grubbs, and M.S. Seppanen, 1980, *Thermal energy storage in aquifer*, New York : Pergamon Press Inc., pp.37-40.
6. Song, Yeong K., 1990, "Air-conditioning system based on seasonal aquifer chill energy storage", Ph. D Thesis, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL.
7. Vail, Lance. W., L. D. Kannberg and C. T. Kincaid, 1988, "Aquifer Thermal Energy Storage System Simulator(ATESSS) : User's manual and report", Richland, WA : Pacific Northwest Laboratory, DOC/DE-AC06-76RL0 1830.
8. 강철식, 1991, "지하대수층을 이용한 축열 시스템의 최적 설계에 관한 연구", 석사학위논문, 한양대학교.
9. 동력자원 연구소, 1988, "국토 이용 지질조사 연구", KR-88-1B.