

지하대수층을 이용한 축열시스템의 설계 (I) : 등온해석

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

송영길*, 이관수**, 이태희***, 김양현***
Y.K. Song, K.S. Lee, T.H. Lee, Y.H. Kim

Key words: Aquifer(지하대수층), Fluid Recovery Efficiency(유량회수효율), Energy Recovery Efficiency(열회복비), Isothermal Analysis(등온해석), Thermal Load(열부하)

Abstract

An isothermal analysis was conducted to develop the design tool of an aquifer thermal energy storage system. Taejeon aquifer was chosen for the analysis, and the variation of FRE(Fluid Recovery Efficiency) with respect to the aquifer natural velocity and thermal load were investigated. The analysis results were compared with those of ATESSS(Aquifer Thermal Energy Storage System Simulator) and agreed within 2% of discrepancy. It is recommended, based on the result of this study, that the system may be suitable for a large volume of hot or chill thermal energy storage system, such as for district heating or cooling.

기 호 설 명

A : 지하대수층의 평면적[m²]
 C : 저장면적계수
 C_p : 지하수의 정압비열[kJ/kg·K]
 c : 임의의 상수
 D : 우물쌍간의 거리[m]
 h : 지하대수층의 수두[m]
 h_a : 지하대수층의 평균수두[m]
 \dot{m} : 주입/회수되는 지하수의 질량[kg/year]
 Q : 냉방부하[kJ/year]
 q : 주입/회수되는 지하수량[m³/sec]
 R : 한 쌍의 우물 사이의 거리[m]
 s : 물입자와 Supply well사이의 최단거리[m]
 T : 온도[K]
 t : 시간[sec]

V : 지하수의 속도[m/sec]
 V_a : 지하대수층의 크기[m³/year]
 X : 축방향 좌표
 Y : 축방향 좌표

그리스 문자

η : 지하대수층의 열효율
 ρ : 지하수의 밀도[kg/m³]
 ϕ : 지하대수층의 공극율

하첨자

i : 임의의 우물
 inj : 주입기간
 n : 지하수의 자연 현상
 rec : 회수기간
 $stor$: 저장기간
 t : 시간
 X : 축방향 좌표

*한국자동차부품종합기술연구소
 **한양대학교 공과대학 기계공학과
 ***한양대학교 대학원 기계공학과

Y : 축방향 좌표

1. 서 론

열전도율이 다른 물질에 비하여 비교적 낮은 물과 진흙, 모래, 자갈등으로 이루어진 지하대수층(Aquifer)은 축열 매체로서 매우 적합하다. 년중 평균기온과 같은 온도를 유지하는 지하수는 대기의 기온에 변화를 거의 받지 않으므로 지하대수층에 저장된 에너지가 오래 지속될 수 있다.

지하대수층을 열저장 매체로 이용하여 건물을 냉난방하는 방법은 1960년대 중반 미국의 알라바마 주립대학에서 처음 제시되었다. 그후 미국과 유럽의 여러나라는 이 방법을 이용한 열저장 연구에 많은 관심을 기울여왔다. 이 방법은 대부분의 지표 지하에 분포하는 지하대수층의 높은 단열 효과를 이용하여 폐열이나 태양열등에 의해 가열된 지하수 또는 겨울철의 차가운 대기에 의해 냉각된 지하수를 일정한 기간 동안 저장하였다가 (냉)열에너지에 대한 수요가 있을 때 다시 사용하는 것이다.

가열 또는 냉각된 지하수가 지하대수층에 주입된 후 주위로 부터 받는 간섭현상은 크게 지하대수층의 상하층으로의 열전달에 의한 에너지 손실, 주입된 지하수와 기존하는 지하수사이의 열전달, 지하수의 자연흐름에 의한 주입된 지하수군의 위치변경과 주입된 지하수를 일정한기간동안 저장한 후 회수할 때 주의에 있던 지하수와 함께 회수되는 현상등이다. 지하대수층을 이용한 축열시스템의 효율은 이러한 현상들에 의하여 많이 좌우된다. 지하대수층을 이용한 축열시스템의 효율을 평가하는 방법으로 유량회수효율(FRE: fluid recovery efficiency)과 열회복비(ERF: energy recovery factor)를 사용한다. 유량회수효율은 지하수가 가열(또는 냉각)되어 저장된 후 다시 건물의 공조등과 같은 목적으로 펌핑되었을 때 주입된 총유량에 대한 회수된 총유량의 비를 나타낸다. 유량회수효율은 주입된 유체가 지하수의 자연속도등에 의하여 이동하는 것과 같은 유체역학적 현상들을 규명하는 등온해석(Isothermal Analysis)을 수행함으로써 예측 할 수 있다. 열회복비는 시스템이 한 싸이클을 수행하는 동안 주입된 지하수가 대류나 전도등의 열전달에 의하여 주위에 빼앗긴 열을 비율로 나타낸 것이다. 이러한 열전달 현상에 대한 수치해석적 기법을 비

등온해석(Non-isothermal Analysis)이라한다. 이 두가지 해석에 의한 결과는 실험치와 비교하는 등적당한 방법을 통하여 시스템의 유량회수효율과 열회복비를 예측하는데 중요한 도구로 사용된다.

본 연구에서는 유량회수효율을 예측하기 위한 등온해석법의 개발과, 개발된 방법을 이용하여 주입 및 회수되는 유량과 회수기간에 따른 유량회수효율의 변화를 조사하였다. 개발된 등온해석법은 냉방이나 난방을 목적으로 하는 축열시스템에 모두 적용될 수 있으나, 이해를 돕기위하여 지하대수층이 냉방을 목적으로 냉축열을 저장하는 경우만을 예로 하였다. 또한 개발된 수치해석적 방법에 의한 계산 결과의 정확도를 검증하기 위하여 같은 목적으로 미국의 PNL에서 1988년에 제작된 수치해석용 컴퓨터 프로그램인 ATESS(Aquifer Thermal Energy Storage System Simulator)와 결과를 비교하였다.

2. 지하대수층을 이용한 축열시스템

지하대수층은 지표면으로 부터 수십미터 또는 그 이하에 지하수가 존재하는 지층을 말한다. 지하대수층을 이루고 있는 돌, 흙, 모래, 또는 바위의 갈라진 틈새등에 존재하는 지하수는 대개 연간 1~2m에서 주간 1~2m의 자연속도로 근처의 하천이나 호수 방향으로 흐른다. 지하대수층 전체의 부피에 대한 공극의 부피로 정의되는 공극율(ϕ)은 지하대수층이 축열시스템으로 적합한지의 여부를 판가름하는 중요한 인자중의 하나이다. 공극율이 대략 25%~40%인 지하대수층이 축열시스템으로 적당한다.

지하대수층을 냉·난방용 축열시스템으로 이용할 경우에 대한 에너지 절약 효과에 관한 연구에서 미국의 Karkheck등⁽¹⁾은 지하수를 이용한 냉·난방을 통해 최소한 50%의 냉·난방용 에너지를 절약할 수 있다고 하였으며, 또한 Anderson등⁽²⁾은 이 방법을 통해 미국 전체 에너지 소모량의 약 10%를 절약할 수 있다고 하였다. 지하대수층을 축열 매체로 사용할 경우에 대한 잇점은 냉축열의 경우와 온축열의 경우로 나누어서 생각할 수 있다. 냉축열 매체로서 사용되어질 경우의 장점은 다음과 같다.

1. 기존의 터어보식 냉방기에 비하여 전력 소모량

이 약 $\frac{1}{2}$ 정도이다.

2. CFC의 사용이 없으므로 오존층 파괴의 둔화를 꾀한다.
3. 전력의 peak load가 여름에서 겨울로 이동되므로 발전소의 전력공급 부하가 그만큼 감하여진다.

온축열을 지하대수층에 저장할 경우에 대한 장점은 다음과 같다.

1. 태양열이나 폐열을 사용하므로 화석연료 사용으로 인한 CO₂의 발생으로 야기되는 지구온난화 현상이 둔화된다.
2. 시스템의 운전 비용이 기존 난방시스템에 비하여 경제적이다.
3. 기존 시스템은 한개의 열원(예를 들면 보일러)으로부터 난방용 열이 공급되나 지하대수층을 이용한 난방 시스템은 열을 함유하고 있는 지하수가 몇개의 우물(well)로부터 펌핑되므로 시스템 전체의 신뢰도가 향상된다.

지하대수층을 이용한 냉축열시스템에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다. 시스템은 여러개의 우물(well)을 포함한 지하대수층과 냉각탑, 그리고 열교환기의 세부분으로 이루어져 있다. 시스템의 구성에 있어서 냉매를 압축시키는 압축기가 없다는 것이 일반 냉방기와 비교된다. 지하수를 냉각하기 위하여 끌어올리는 우물을 Supply Well이라 하고, 냉각된 지하수를 지하대수층에 저장하기 위하여 주입하는 우물을 Recovery Well이라 한다. 대기온도가 임의의 온도 이하가 되면 지하수는 Supply Well로 부터 끌어올려져서 냉각탑을 통하여 냉각된 후 같은 지하대수층으로 연결된 Recovery Well을 통하여 주입된다. 지하대수층에 주입된 지하수는 저장된 에너지를 필요로 할 때까지 저장되었다 Recovery Well을 통하여 끌어올려져 열교환기에서 열교환을 한 후 다시 Supply Well로 재주입되거나 공업 용수등으로 재활용된다. 시스템의 사이클은 냉각된 지하수의 주입, 저장, 및 회수의 과정들로 이루어져 있다.

지하대수층을 이용한 축열시스템의 구축에 있어서 제일 중요한 사항중의 하나는 지하대수층의 크기를 적절하게 설정하는 것이다. 크기를 설정하기 위해서는 먼저 대상 지역의 지하수 수력분포(head distribution), 공극율(porosity), 수력전도계수(hydraulic conductivity)등과 같은 수리지질학적 자료들과 저장된 에너지가 사용될 대상에 대한 열부하(thermal load)가 필요하다. 수리지질학적 자

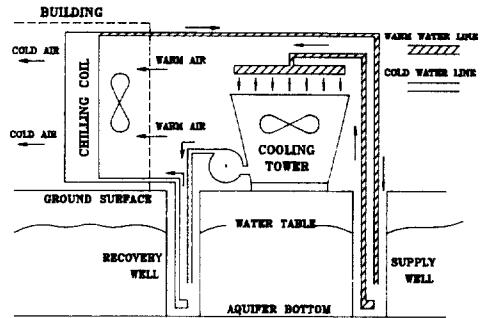


Fig. 1 Schematic drawing of a chill aquifer thermal energy storage system

료들은 우리나라 대부분의 지역에 널리 분포되어 있는 지하대수층을 대상으로 조사한 참고문헌⁽³⁾으로부터 얻을 수 있으며, 열부하에 의하여 저장될 에너지의 양이 계산된다. 이와같은 인자들에 의하여 유량회수효율과 열회복비와 같은 시스템의 효율이 예측된다. 예측된 시스템의 효율과 지하대수층에 주입될 유량에 의하여 축열매체로 사용될 지하대수층의 크기가 설정된다. 대체적으로 지하대수층을 이용한 축열시스템의 효율은 50% 정도인 것으로 알려졌으며⁽⁴⁾ 시스템의 열효율은 시스템을 장기간 사용할수록 증가하는 것으로 알려졌다.⁽⁵⁾

3. 시스템의 등온해석

지하대수층을 이용한 축열시스템의 유량회수효율을 계산하기 위한 등온해석법의 개발에 필요한 인자들로서는 Supply Well과 Recovery Well사이의 거리, 우물의 쌍수, 주입 유량등과 같이 임의로 주어지는 설계조건과 지하대수층의 공극율, 지하수의 자연속도, 지하대수층의 두께와 같은 지질학적 요소들이 있다. 이러한 인자들의 적절한 조합에 의하여 시스템의 유량회수효율을 최적화 할 수 있고, 따라서 시스템의 효율을 높일 수 있다. 여기에서는 등온해석의 주요 지배방정식들을 주입 및, 저장, 회수의 한 사이클을 중심으로 고찰하여보고 이들이 시스템의 설계에 이용되는 과정을 정리하였다.

3.1 등온해석의 지배방정식

지하대수층과 연결된 N개의 Recovery Well을 통하여 가열또는 냉각된 지하수를 q만큼 주입하였을 때 주입된 지하수가 임의의 점(X, Y)에서 갖는 수평 방향의 속도 성분을 X-Y 좌표계로 표시

하면 다음과 같다.

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

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

여기서 X_i 와 Y_i 는 각 우물의 위치를 나타내고, V_{nx} 와 V_{ny} 는 지하수의 자연속도의 X 방향성분과 Y 방향성분을 각각 나타낸다. 지하수가 지하대수층에 주입될 때의 a_i 의 값은 양의 값을 갖고, 지하대수층으로부터 펌핑될 때는 음의 값을 갖는다. 주입된 지하수의 어떤 물입자가 임의의 시간 (dt)동안 움직였을 때의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{t+dt} = V_x dt + X_t$$

$$Y_{t+dt} = V_y dt + Y_t \quad (2)$$

주입된 지하수는 자연속도의 영향을 받아 조개껍질과 같은 모양으로 확산된다. 초기에 Recover Well을 통하여 주입된 후 Supply Well방향으로 진행하는 물입자는 Supply Well까지 도달하는 최단 경로를 따라 진행하게 되고 가열 또는 냉각된 지하수의 주입이 계속될 경우 언젠가는 Supply Well에 도달하여 결국 주입되었던 물입자가 다시 끌어올려져 가열 또는 냉각되는 반복현상이 일어나게 된다. 초기에 주입된 물입자가 다시 Supply Well을 통하여 끌어올려질 때까지 걸리는 시간을 Break-through Time이라 하고 그 시간은 다음식에 의하여 구해진다.

$$t_{bt} = f_s \frac{ds}{\left| \sum_{i=1}^N V_i + V_n \right|} \quad (3)$$

여기서 s 는 주입된 물입자가 Supply Well까지 도달하는 최단거리를 나타낸다. 시스템의 Supply well과 Recovery well 사이의 거리를 결정하고자 할때 지하수가 가열 혹은 냉각되어 지하대수층에 주입되는 시간은 t_{bt} 보다 짧아야 한다. 만약 주입되는 시간이 t_{bt} 보다 긴 경우, 가열 또는 냉각되어 주입된 물입자가 다시 Supply well로부터 끌어올려지는 결과를 낳게된다.

가열 또는 냉각되어 지하대수층에 저장된 지하수

는 그 에너지를 필요로 할 때까지 지하대수층에 보관된다. 이 때 저장된 지하수는 지하대수층에 기존하는 지하수의 자연속도에 의하여 이동하게 된다. 저장기간 동안의 시간을 t_{stor} 라 할 때 자연속도에 의하여 이동된 지하수의 거리는 자연속도가 시간에 대하여 독립적이므로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{stor} = V_{nx} \cdot t_{stor} + X$$

$$Y_{stor} = V_{ny} \cdot t_{stor} + Y \quad (4)$$

지하대수층에 저장된 에너지를 필요로할 때 지하수는 Recovery Well을 통하여 회수되며 이 때 회수되는 지하수의 임의의 위치 (X, Y)에 대한 속도는 식(1)과 같다. 다만 회수되는 유량 q_i 의 방향은 음의 방향이 되고 q_i 의 값도 주입될 때와는 다른 값을 갖으며 식(1)에서의 X 와 Y 는 각각 식(4)에서 계산된 X_{stor} 와 Y_{stor} 로 대치된다.

회수기간중 Recovery Well하류에 분수령과 같은 수두극점(Branch point of the drawdown curve)이 발생한다. 이 극점의 형성에 대하여 Fig. 2에 도시하였다. 이 수두극점은 Recovery Well로 회수되는 지하수의 유입속도와 자연속도에 영향을 받아 형성되며 유량회수효율을 계산하는데 매우 중요한 역할을 한다. 지하수면의 수두극점을 수치해석적으로 찾기 위하여 다음과 같은 알고리즘을 이용하였다. 즉, 주입된 지하수와 지하대수층에 있던 지하수의 경계면에 존재하는 물입자의 임의의 stream line 상에서의 초기위치 (X_1, Y_1)으로 설정하고 이 곳에서의 수두 h_1 을 식(5)와 같이 구한다. 또한 이 물

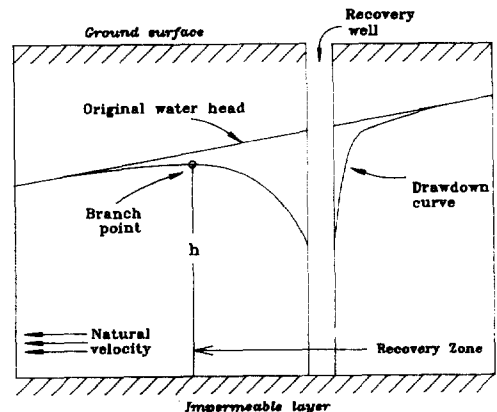


Fig. 2 Effect of the natural velocity on the drawdown curve(recovery period)

입자가 Δt 시간 만큼 전에 있었던 위치를 (X_2, Y_2) 라 하고 식(2)를 이용하여 구한 후 이에 대한 수두 h_2 를 식(5)에 의하여 계산한다. (X_2, Y_2) 의 위치는 (X_1, Y_1) 의 위치보다 결국 Recovery Well에서 더 가깝고 또한 같은 stream line 상에 위치한다. 식(5)를 이용하여 구해진 h_1 과 h_2 를 비교하여 $h_2 < h_1$ 이 될때 까지 증가탐색법(Incremental search method)를 적용하여 (X_1, Y_1) 과 (X_2, Y_2) 를 계산한다. $h_2 < h_1$ 이 만족되는 경우 (X_1, Y_1) 은 Fig. 2에 나타난 Recovery zone내에 존재한다고 판단된다.

$$h(X, Y) = \int V_x(X, Y) dX + c_1(Y) \\ = \int V_y(X, Y) dY + c_2(X) \quad (5)$$

유량회수효율을 구하기 위하여 주입지하수의 회수량이 계산되어야 한다. 유량회수효율을 계산하는 방법을 설명하기 위하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. 주입된 지하수는 Recovery well을 중심으로 Fig. 3과 같이 분포하게되며 물입자의 궤적을 나타내는 Stream line을 점선으로 표시하였다. 회수가능한 주입지하수의 범위는 실제로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 폐곡선 모양이나 수치해석을 위하여 각각의 Stream line 상에 존재하는 수두극점들을 연결한 다각형으로 이루어져 있다고 가정하여 계산한다. 이 다각형은 Recovery Well과 다각형의 인접한 두 개의 꼭지점으로 구성된 삼각형들로 분할한 후 그 면적을 계산한다. 회수가능한 유량은 계산된 면적에 지하대수층의 평균두께와 공극율이 곱해져 산출되고, 유량회수효율은 주입유량에 대한 회수가

능한 유량의 비로 나타난다.

3.2 수치해석

지하대수층에 주입된 지하수의 유동현상을 해석하여 유량회수효율을 계산하기 위한 수치적 방법으로 유한차분법을 사용하였다. 수치해석을 수행함에 있어서 지하대수층의 지질학적 특성등을 입력하였고, 이를 바탕으로하여 위에서 언급한 바와 같이 주입기간, 저장기간, 및 회수기간의 3단계로 나누어 유체입자를 추적하므로 유량회수효율을 결정하는 인자들을 도출하였다.

수치해석을 수행하기 위하여 년 평균기온이 15°C 인 대전지역의 지하대수층이 년간 공조부하가 $3 \times 10^6 \text{kJ}$ 인 건물을 냉방하기 위한 냉축열 시스템으로 사용된다고 가정하였다. 대전지역에 위치한 가상의 건물을 냉방하기 위한 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 동력자원연구소에서 조사한 대전지역의 지질학적 인자들을 중심으로하여 지하수의 자연속도(Natural Velocity)와 공극율(Porosity: ϕ)이 도출되었다.⁽³⁾ 동력자원연구소에서 조사한 대전지역의 지하수의 자연속도는 8.77 m/year이나 지하수의 자연속도가 저장된 지하수를 회수하는데 미치는 영향을 조사하기 위하여 임의의 자연속도(2, 5, 10, 15, 20 m/year)를 입력하였다. 건물의 냉방부하를 $Q/3, Q,$ 및 $3Q$ 의 세가지 경우로 나누어 생각하였고 냉방부하가 Q 인 경우에 대하여 회수기간을 60, 90, 120일로 설정하여 수치해석하므로 회수기간과 주입 및 회수되는 유량이 지하수의 자연속도에 따라 유량회수효율에 미치는 영향을 조사하였다.

건물의 년간 냉방부하를 만족시키기 위한 냉열을 저장하는 지하대수층의 크기를 결정하기 위하여 먼저 지하대수층에 주입 및 회수되는 년간 유량이 계산 되어져야 한다. 냉방부하를 Q 라 할때 회수하는데 필요한 년간 유량 \dot{m}_{rec} 는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\dot{m}_{rec} = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} \quad (6)$$

여기서 C_p 는 지하수의 비열, ΔT 는 공조기 2차공 일에서의 입수온도와 출수온도의 차를 나타낸다.

회수유량 \dot{m}_{rec} 를 만족시키기 위하여 저장해야할 년간유량 \dot{m}_{inj} 를 계산하기 위하여 앞절에 언급된 유량회수효율과 열회복비가 조화된 지하대수층의 효율 η 를 고려해야한다. 그러나 시스템의 설계에

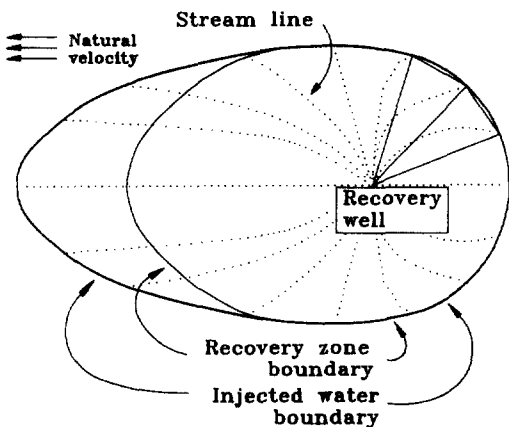


Fig. 3 Methodology on the calculation of the energy recovery efficiency

있어서 η 를 한번의 시물레이션으로 결정할 수 없으므로 임의의 값으로 부터 시행착오법(Try and Error Method)을 이용하여 그 값을 줄여간다. 지하대수층의 열효율을 η 라 할 때 냉방부하 Q 를 만족하기 위하여 지하대수층에 저장하여야 하는 열량은 Q/η 가 되고 이에 따른 연간 주입량 \dot{m}_{inj} 는 다음과 같다.

$$\dot{m}_{inj} = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T \cdot \eta} \quad (7)$$

여기서 ΔT 는 지하수를 냉각시키는 냉각탑에서의 입수온도와 출수온도의 차이다.

계산된 양의 지하수를 저장하기 위한 지하대수층의 크기 V_a 는 지하수의 밀도를 ρ_w 라 할때 다음 식에 의하여 얻어질 수 있다.

$$V_a = \frac{\dot{m}_{inj}}{\rho_w \cdot \phi} \quad (8)$$

식(8)에서 구해진 지하대수층의 크기는 평면적 A 에 지하대수층의 바닥에서 부터 지하수표면(Piezometric Surface)까지의 거리 h_a 의 곱으로 표현될 수 있다.

$$V_a = A \cdot h_a \quad (9)$$

지하대수층의 평균두께로 표시되는 h_a 는 지형의 특성에 의한 것이므로 임의로 바꿀 수가 없으나 축열매체로 사용될 지하대수층의 넓이 A 는 시스템의 설계에 따라 그 모양이 변화될 수 있다. Schaetzle 등⁽⁶⁾은 Supply Well과 Recovery Well 사이의 거리 R , 우물쌍간의 거리 D , 그리고 지하대수층의 면적 A 사이의 관계를 다음식과 같이 나타내었다.

$$A = C \cdot R \cdot D \quad (10)$$

여기서 C 는 저장면적계수(Storage Area Coefficient)로서 우물의 쌍수와 R 및 D 의 함수로써 표현된다.

위에서 언급한 바와 같이 건물의 냉방에 필요한 냉열을 공급하기 위해 저장되는 지하수의 양은 결국 지하대수층의 η 및, ϕ , h_a , 그리고 A 에 따라 좌우된다. 그러나 ϕ 와 h_a 는 지하대수층의 수리지질학적 특성에 의한 것이므로 시스템의 설계에 있어서는 상수로 존재하게 되고, η 는 시물레이션의 결과와 입력값 \dot{m}_{inj} 와를 비교하며 시행착오법으로 해결해야 한다. 식(7)에서 지하대수층의 열효율은 임의로 50%인 것으로 가정하였다.^(4,6) 식(10)의 면

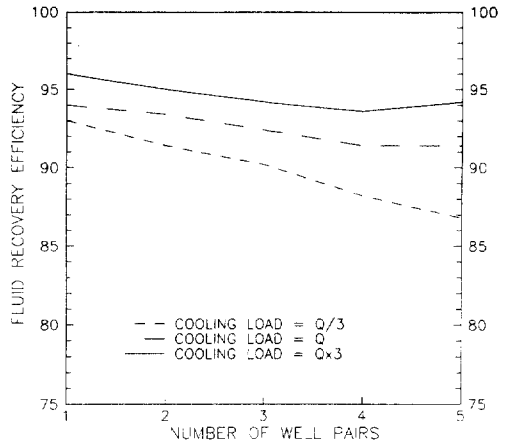


Fig. 4 Variation of the fluid recovery efficiency with respect to the number of well pairs

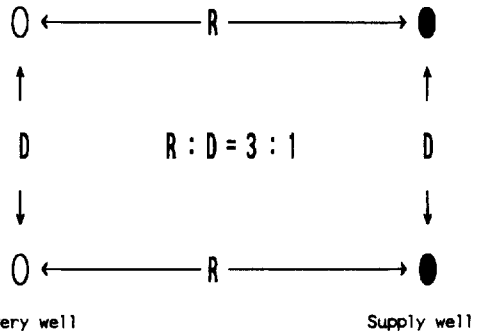


Fig. 5 Configuration of the well system used for the isothermal analysis

적 A 를 결정하기 위한 방법에 있어서 강 철식⁽⁷⁾은 R 과 D 의 비율이 3:1일때 가장 안정적인 효율을 얻을 수 있다고 제안하였다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 R 과 D 의 비율을 3:1로 하였을 경우라도 우물의 쌍수가 증가함에 따라 오히려 유량회수 효율이 떨어짐을 감안할 때, 축열매체로 사용되는 지하대수층의 면적 A 에 될수록 적은 우물의 쌍수를 설계함이 경제적인을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 R 과 D 의 비를 3, Supply Well과 Recovery Well이 각각 두 개씩 있는 두 쌍의 우물로 Fig. 5와 같이 정의 하였으며, Schaetzle 등의 제시한 도표에 의하여 저장면적계수 C 는 2.0으로 나타냈다.⁽⁷⁾ 본 연구를 통해 필요한 결과를 도출해내기 위하여 수행한 수치해석의 입력자료를 Table 1과 같이 정리하였다.

Table Input Parameters for the Isothermal Analysis

Regional Velocity (m/year)	X	-2	-5	-10	-15	-20
	Y	0	0	0	0	0
Flow Rate (l/sec)		injection	recovery			
			recovery period (day)			
			60	90	120	
	A	4.45×2	6.67×2	4.45×2	3.34×2	
B	13.34×2	20.02×2	13.34×2	10.01×2		
C	40.03×2	60.05×2	40.03×2	30.02×2		
Porosity	30%					
Period (day)	Injection	Storage	Recovery			
	90	0	60, 90, 120			

*Cooling Load for A=Q/3, B=Q, C=3×Q (Q=3×10⁹ kJ/yr)

4. 결과 및 고찰

수치계산은 Table 1에 있는 바와 같이 세가지 경우의 다른 냉방부하에 대하여 다섯가지의 자연속도를 각각 적용시켰다. 수치계산의 정확성을 확인하기 위하여 이와 유사한 수치계산용 컴퓨터 프로그램인 ATESSS(Aquifer Thermal Energy Storage System Simulator)와 그 결과치를 비교하였다. ATESSS는 미국 DOE(Department Of Energy) 산의 Battelle Pacific Northwest Laboratory (PNL)에서 지하대수층을 이용한 축열시스템을 설계하기 위한 도구로써 개발되었다. 이 프로그램은 등온해석과 비등온해석의 두부분으로 구성되어 있으며, 구조적인 면에서 주입기간에 대한 계산과 회수기간에 대한 계산의 두 부분으로 나누어져 있다. ATESSS는 본 연구에서와 같은 저장기간 동안에 대한 계산이 프로그램 구성상 없으므로 본 연구에서도 저장기간에 대한 해석을 적용하지 않고 수치계산 하였다.

본 연구에서 냉방부하의 변화에 따른 유량회수효율의 변화에 대하여 수행한 수치계산의 결과를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6은 냉방부하를 만족시

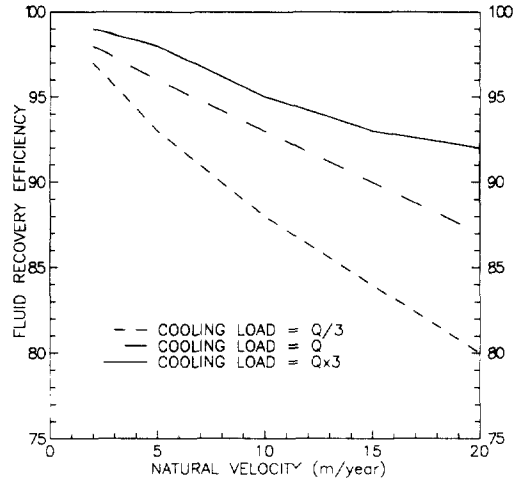


Fig. 6 Simulation results of the fluid recovery efficiency for the three different cooling loads

키기 위하여 냉각된 지하수가 90일 동안 주입되었다가 저장기간을 거치지 않고 바로 90일 동안 회수된다는 가정하에 냉방부하가 유량회수효율에 미치는 영향을 자연속도의 변화에 대하여 보여주고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 상대적으로 작은 냉방부하에 대하여 계산된 지하수가 주입, 회수될수록 유량회수효율은 자연속도에 대하여 민감하게 변화함을 보여주고 있다. 이것은 주입된 지하수의 양이 적을수록 주입된 지하수가 점유하는 체적의 자연속도에 의한 이동률이 커지고 따라서 회수되는 지하수의 양이 그만큼 적어지기 때문이다. 또한 많은 양의 지하수가 주입되었다가 회수 될수록 유량회수효율은 증가하며 지하수의 자연속도가 클수록 유량회수효율은 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 주입된 지하수를 회수할 때 단위 시간당 회수되는 지하수의 양이 많아짐에 따라 평평에 의한 원추모양(cone shape drawdown curve)의 크기가 커지고, 따라서 회수영역의 경계가 되는 수두의 극점이 Recovery Well로 부터 멀리 떨어진 곳에 형성되기 때문에(Fig. 2참조) 주입된 지하수의 손실량이 줄어들기 때문이다. 이를 증명하기 위하여 같은 냉방부하 Q에 대하여 회수기간을 각각 60일, 90일, 120일로 하였을 때 회수되는 유량의 변화가 유량회수효율에 미치는 영향을 수치해석하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 임의의 자연속도에 대하여 단위 시간당 회수량이 커질수록 유량회수효율은 증가하는 것으로 나타났으며 유량회수효율의 변화추세는

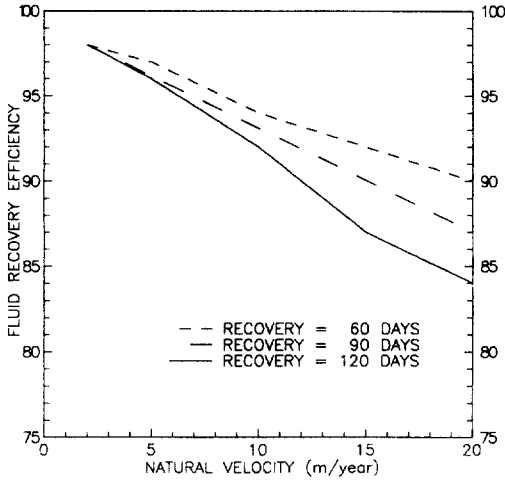


Fig. 7 Simulation results of the fluid recovery efficiency for the three different recovery periods

Fig. 6과 흡사하다. 자연속도에 대한 유량회수효율의 변화는 지하수의 자연속도가 10m/year보다 작은 범위 내에서는 90%이상의 유량회수효율을 보여주고 있다. 이는 Midkiff등과^(8,9) Song등이⁽¹⁰⁾ 10 m/year (30ft/year)이내의 자연속도를 가진 지하대수층이 축열 시스템으로 가장 적당하다는 주장과 일치함을 보여주고 있다.

실제로 계산결과를 검증하기 위해서는 실험값과의 비교가 효과적이겠으나 유량회수효율만을 비교

할 수 있는 실험값을 찾아 비교하기에는 여러가지 곤란한 점이 있다. 그러므로 계산결과와 정확도를 검증하기 위하여 같은 조건하에서 ATESSS를 이용하여 계산하였으며 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 8을 비교하여 볼 때 상호간에 약간의 편차(discrepancy)는 있으나 대체적으로 유량회수효율의 예측도가 $\pm 2\%$ 내에서 일치함을 볼 수 있다. 수치해석을 수행하는 시간에 있어서 본 연구를 통하여 제작된 프로그램은 입력인자의 변화에 관계없이 거의 일정한 시간이 -80387 Math coprocessor를 내장한 IBM PC 80386호환기종에서 약 80초 소요되었으나, 같은 조건하에서 ATESSS를 통하여 수치해석을 수행하는 시간은 길게는 4.5배에서 짧게는 2.5배 더 많은 시간을 요하였으며 냉방부하와 자연속도가 커질수록 유량회수효율을 구하기 위한 수치해석 수행시간이 길어졌다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 지하대수층을 이용한 축열시스템을 설계하고자 할 경우 냉방부하가 큰 건물에 대한 시스템의 설계일 수록 시스템의 유량회수효율은 증가하는 것으로 예상되며, 난방용 축열 시스템의 설계에 있어서도 같은 결론에 이를 것으로 사료된다. 그러므로 지하대수층을 이용한 축열시스템을 구축하고자 할 경우 지역 냉방 혹은 지역 난방과 같이 비교적 큰 열부하를 만족시키기 위한 시스템에 사용하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

축열매체로 이용되는 지하대수층에 대한 등온해석을 수행한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 시스템의 열부하가 클 수록 유량회수효율은 증가하므로 지하대수층을 이용한 축열시스템의 설계는 지역 냉·난방과 같은 대단위 축열시스템에 적합하다.

(2) 일정한 열부하를 만족시키기 위하여 주입된 지하수에 대한 단위 시간당 회수되는 지하수의 양이 증가 할수록 지하수의 자연속도에 의한 영향은 감소하고 유량회수효율은 증가한다.

(3) 본 연구를 통하여 개발된 수치해석용 컴퓨터 프로그램은 같은 목적으로 이용되고 있는 범용 컴퓨터 프로그램인 ATESSS와 그 결과치가 $\pm 2\%$ 의 편차내에서 일치한다. 그리고 계산시간 면에서 비교하여 볼때, 본 프로그램이 ATESSS보다 2.5~4.5배 빨리 수렴한다.

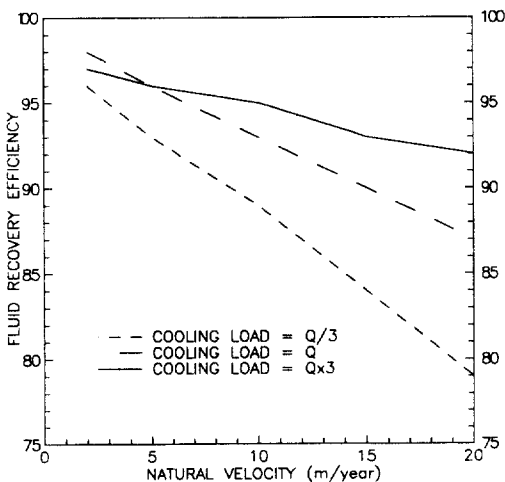


Fig. 8 Simulation results of the fluid recovery efficiency for the three different cooling loads using ATESSS

참고문헌

- (1) Karkheck, J., Dowell, J. and Beardsowordh, E., 1977, "Prospects for district heating in the United States," Science, Vol. 195(March), pp. 948 ~955.
- (2) Anderson, M. R. and Weijo, R., 1988, "Potential energy savings from aquifer thermal energy storage," Pacific Northwest laboratory, Richland, Wa, PNL-6588 UC-204.
- (3) 동력자원연구소, 1988, "국토이용 지질조사 연구." KR-88-1B, 진명사.
- (4) Song, Y., 1990, "Air-conditioning system based on seasonal aquifer chill energy storage." Ph. D. Thesis, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL.
- (5) Kannberg, L., 1985, "Aquifer thermal energy storage in the United States," Proceedings of the international conference on the energy storage for building heating and cooling, September 22-26, 1985, Public Works Canada, Toronto, Canada, pp. 3~8.
- (6) Schaetzle, w., Brett, C., Grubbs, D., and Seppanen, M., 1980, "Thermal energy storage in aquifer," Pergmon Press Inc., New York.
- (7) 강 철식, 1991, "지하대수층을 이용한 축열 시스템의 최적 설계에 관한 연구," 석사학위논문, 한양대학교.
- (8) Midkiff, K., Brett, C., Song, Y. and Schaetzle, W., Proceedings of Thermal Energy Storage Research Activities Review, New Orleans, LA, pp. 294~331.
- (9) Midkiff, K., Song, Y. and Brett, C., 1991, "thermal Performanceand Challenges for a Seasonal Chill Energy Storage Based Air-conditioning System," ASCE 91-HT-29.
- (10) Song, Y., Midkiff, K., Schaetzle, W. and Brett, C., 1989, "Control of Aquifer Flow for Improved Aquifer Thermal Energy Storage System Performance," Proceedings of the 24th IECEC, Washington D. C., pp. 1833~1838.