

〈論 文〉

대수층 축열시스템의 열거동에 관한 실험적 연구

이세균* · 문병수* · 남승백** · 김기덕**

(1992년 3월 27일 접수)

An Experimental Study on the Thermal Behavior of Aquifer Thermal Energy Storage System

Se Kyoung Lee, Byung Soo Moon, Seung Baek Nam and Gi Duk Kim

Key Words : Aquifer Thermal Energy Storage System(대수층 축열 시스템), Buoyancy Flow(부유류), Recovery Factor(열회수율), Thermal Tilting(열경사)

Abstract

Experiments have been performed on the thermal behavior in a liquid saturated porous medium in a system to simulate a single well aquifer thermal energy storage system. The principal interests in this study are the combined effects of forced and natural convection. Significant buoyancy flow due to natural convection is developed quickly as the temperature difference between the injection and original aquifer temperature increases. Theoretical model under simplified assumptions (called simple buoyancy flow model in this study) has been developed. The results of this model agree well with the experiments. The effects of buoyancy flow on the recovery factor are also examined in this study.

1. 서 론

에너지의 수요와 공급의 불균형에서 오는 낭비를 줄이기 위해서는 효과적인 축열시스템이 필요하다. 지하 대수층을 축열시스템으로 활용하고자 하는 방안은 이미 1970년 초에 제안된 바 있는데 대수층이란 물을 함유하고 유통시키는 지층으로 지하 수 m에서 수 km 사이에서 흔히 발견된다. 특히 대수층의 상 하부가 불투수층(impermeable layer)으로 형성된 피압 대수층(confined aquifer)은 온수 형태의 열 에너지의 장기 저장에 적합하고 또 저장할 수 있는 양이 막대한데 Fig. 1에서 보는 바와 같이 지표로부터 굴착된 굴착정을 통하여 대수층내의 원

래 온도와 다른 온도의 물을 주입하여 저장하였다가 필요시 양수함으로써 축열 시스템으로서 활용할

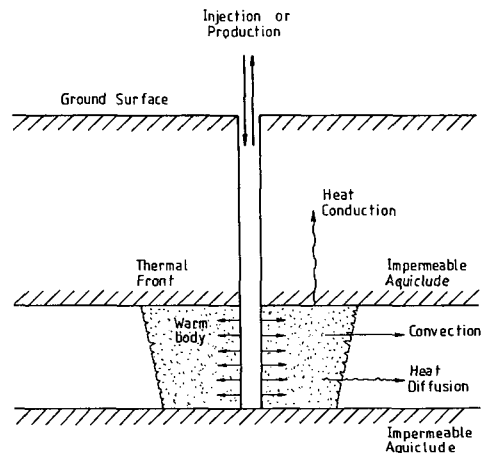


Fig. 1 Schematic of hot water storage system with a single well

* 정회원, 충북대학교 기계공학과
* 충북대학교 기계공학과 대학원

수 있다.

대수층내에서 서로 다른 온도의 물이 층내를 흐르게 되면 강제 및 자연대류, 수평 및 수직방향 열전도 등의 열전달 현상이 발생된다. 이러한 열전달 현상과 더불어 지층의 기하학적 형태의 복잡성, 층을 이루는 물질들의 물리적 성질 변화 및 비등방성(anisotropic character) 등을 다 고려한다면 대수층내의 온도 변화에 관한 계산은 대단히 어렵게 된다. 그러나 몇가지 단순화된 가정하에서 대수층의 온도 분포 및 축열성능을 수치 해석적인 방법으로 예측한 연구는 발표된 바 있다.^(1,2)

자연대류 현상은 해석이 쉽지 않아 단순화된 가정 하에서는 흔히 무시 된다. 투수율이 낮은 대수층에 저온수를 주입할 경우 또는 대수층 두께에 비하여 주입량이 많은 경우 등에는 자연대류의 전체 열거동에 미치는 영향이 적어서 이 현상의 무시가 정당화될 수도 있다. 그러나 일반적으로 자연대류의 이해는 대수층 축열시스템의 성능 예측에서 가장 중요한 요인중의 하나가 되며, 액체로 충전된 다공질 매체 내의 자연대류에 관한 많은 수치 해석적 연구가 발표되었고^(3,4) 이와관련된 실험적 연구로는 현장실험(field test)을 통한 연구^(5,6)가 수행된 바 있다.

본 연구에서는 대수층을 시뮬레이션한 실험장치를 통하여 온도분포를 관찰하고 자연대류에 관한 단순화된 이론적 모델을 개발하여 실험치와 비교 검토 하고자 한다.

2. 자연대류에 의한 열경사의 이론적 해석

본 연구에서 대상으로 한 대수층에 관한 가정은 다음과 같다.

(a) 대수층은 수평방향으로 일정한 두께를 갖고 있고 상 하부는 불투수층(impermeable layer)으로 형성된 피압 대수층(confined aquifer)이다.

(b) 대수층 내부는 균일하고 방향에 따른 성질의 변화가 없는 등방성(isotropic)이다.

(c) 굴착정은 대수층 두께를 완전 관통하고 있으며 굴착정을 중심으로 흐름 및 열거동은 반경방향으로 대칭이 된다.

(d) 대수층 내부는 온도 T_0 로 일정하며 시간 $t=0$ 로부터 굴착정에서 온도 T_i , 일정유량 Q 의 물이 분출된다. 암석편들과 물 사이에는 접촉면적이 많으므로 접촉부분의 온도는 항상 같다는 열적

순간평형(instantaneous thermal equilibrium)을 가정할 수 있다.

대수층 내부에서는 강제 및 자연대류, 수평 및 수직방향 열전도 등의 열전달 현상이 발생한다. 여러가지 열전달 현상에 의한 복합효과의 계산은 쉽지 않으나 이중 일부를 선택하여 해석하기는 비교적 용이하며 그 결과 또한 경우에 따라 상당한 타당성을 갖게 될 수 있다. 본 장에서는 위에 열거한 가정 이외에 대수층 내부의 열전도 현상을 무시할 수 있다는 가정을 추가하여 강제 및 자연대류의 영향만을 해석 하고자 하며 이 결과 또한 투수율이 높아 자연대류가 활발한 경우에는 상당한 정당성을 갖게 될 것으로 사료된다.

대수층 내부의 비정상 열거동에 관한 해석은 질량 및 에너지 이동에 관한 복합계산에 의한 해석이 가장 합리적이거나 본 연구에서는 자세한 온도분포의 규명보다 자연대류에 의한 부유류(buoyancy flow)의 열경사(thermal tilting) 및 축열성능에 미치는 영향을 검토하고자 복잡한 계산을 피하고 다소 단순한 방법을 택하여, 반경방향으로 대칭인 정상흐름을 가정하고 대수층 유로의 저항개념⁽⁷⁾을 도입하여 해석하였다. 열경사란 차가운 대수층에 온수를 주입하였을 경우 자연대류에 의하여 층의 상부에서 유속이 빨라지는 부유류 효과가 발생하므로 열전선(thermal front)이 Fig. 2에서 보는 바와 같이 기울어지는 현상을 말한다.

대수층 내의 j 번째 유로에서의 유체유동에 따른 손실수두 h_{Lj} 은 Darcy의 법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$h_{Lj} = \int_j \frac{V}{K} dl \quad (1)$$

위식에서 V 는 Darcy 속도, K 는 투수계수(hydrau-

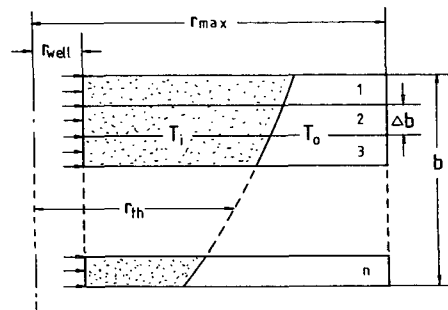


Fig. 2 Stream lanes of simple buoyancy flow model

lic conductivity)이며 l 은 유로의 길이이다. 투수 계수 K 의 원투수계수(intrinsic permeability) k 와외 관계는 물의 점성계수와 밀도를 각각 μ , ρ 라 하면 $K=k\rho g/\mu$ 의 관계를 가지며 g 는 중력 가속도이다. 유로 j 에서의 저항 R_j 는 손실수두를 그 유로에서의 유량 q_j 로 나눈 값으로서

$$R_j = \int_j \frac{V}{Kq_j} dl \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 식(1)에서는 속도 V 를 모르면 적분을 수행할 수 없으나 식(2)에서는 속도와 유량은 비례함으로 임의의 유량을 가정하여 그에 따른 V 를 구하고 적분을 수행할 수 있다.

굴착정으로부터 반경방향의 유로를 Fig. 2에서와 같이 n 개로 나누고 유로와 유로사이에 열 및 물질 전달이 없다고 가정하면 유로 j 를 통과하는데 필요한 수두 h_j 는 흐름에 따른 손실수두 h_{Lj} 와 온도차에 따른 밀도차에 의하여 발생하는 수두 h_{Bj} 의 합으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$h_j = h_{Lj} + h_{Bj} \quad (3)$$

또한 $r = r_{max}$ 에서의 수두가 같다고 하면 r_{weu} 과 r_{max} 사이의 필요한 수두는 유로에 관계없이 같으므로

$$h_1 = h_2 = \dots = h_n \quad (4)$$

의 관계가 성립한다. 또한

$$h_{Bj} = h_{B1} + (j-1) \Delta h_B \quad (5)$$

이며

$$\Delta h_B = \beta \Delta b (T_i - T_0) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 위 식에서 Δb 는 유로간의 수직거리, T_i 는 주입수의 온도, T_0 는 대수층의 원온도이며 β 는 물의 열팽창 계수로서 다음과 같이 온도의 선형함수로 나타낼 수 있다.

$$\beta = (0.0642 T - 16.82) 10^{-4} \quad (7)$$

위 식에서 온도 T 는 절대온도 K 의 단위가 되며 β 는 $1/K$ 의 단위를 갖는다.

열전도 현상을 무시한다는 것을 대수층 내부의 온도가 강제대류에 의하여 T_i 와 T_0 의 두 부분으로 분리됨을 의미하며 따라서 유로 j 에서의 저항 R_j 는 다음식으로 계산된다.

$$R_j = \int_{r_{weu}}^{r_{in}} \frac{V}{K_i q_j} dr + \int_{r_{in}}^{r_{max}} \frac{V}{K_o q_j} dr \quad (8)$$

위 식에서 r_{in} 는 굴착정중심으로부터 열전선까지의 거리로서 그 사이는 온도 T_i 로 가열되어 있어 가열반경이라 부르며 K_i, K_o 는 각각 온도 T_i, T_o 에서의 투수계수이다. 각 유로에서의 저항이 계산되면 대수층 내에서의 손실수두 h_L 는 $h_{Lj} = R_j q_j$ 로 계산되며 따라서 식(3), (4)와 결합하면 다음과 같다.

$$R_1 q_1 - R_j q_j = (j-1) \Delta h_B \quad (9)$$

또한

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = Q \quad (10)$$

가 되며 Q 는 굴착정으로부터 주입한 체적유량이다.

주어진 유로 j 에서 시간 Δt 사이의 가열반경의 변화량 $\Delta r_{th, j}$ 는 에너지 보존개념을 적용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(r_{th, new})^2 - (r_{th, old})^2 = \frac{\rho_w C_w q_j \Delta t}{\rho_A C_A \pi \Delta b} \quad (11)$$

위 식에서 $r_{th, new}$ 와 $r_{th, old}$ 는 각각 Δt 시간 이후와 이전의 가열반경이며 $\rho_A C_A$ 는 대수층의 체적비열로서 물과 암석편의 체적비열을 각각 $\rho_w C_w, \rho_m C_m$, 대수층의 공극율(porosity)을 ϕ 라 하면

$$\rho_A C_A = \phi \rho_w C_w + (1 + \phi) \rho_m C_m \quad (12)$$

로 산출되는 값이다.

본 장의 해석은 열전도를 무시하고 대수층 내부를 두 온도구간으로 단순분리한 해석이므로 층 내부의 온도분포를 정확히 알려주는것은 아니나 식(3)~(12)에 의하여 각 유로의 가열반경이 구해지면 열경사의 윤곽이 결정되며 축열성능에 미치는 영향 또한 평가될 수 있다. 본 연구에서는 실험을 통하여 실제 대수층 내부의 온도분포를 측정하고 본 장의 이론결과와 비교, 검토하였다. 또한 이 이론해석을 본 연구에서는 단순 부유류 모델(simple buoyancy flow model)이라 부르고자 한다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 원통형을 4등분한 형태로 제작하여 양옆과 하부에는 0.05 m의 단열재를 부착하고 내부에는 평균입도 1.5 mm인 모래를 채웠다. 또한 그림에서 보는 바와

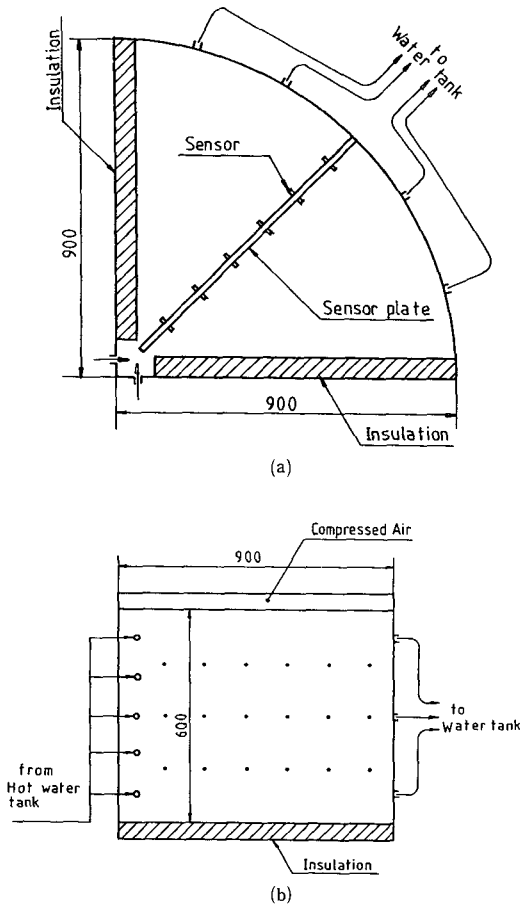


Fig. 3 (a) Sand tank (top view)
(b) Thermocouple grid in the sand tank (side view)

같이 모서리 부분에 설치된 10개의 온수주입 튜브는 대수층 두께를 관통한 굴착정의 기능을 담당하게 되며 원주부분에 균일하게 설치된 12개의 배출 튜브로 주입한 양만큼 나가게 되어 있다. Fig. 4에서는 본 실험장치의 전반적인 구성도를 보이고 있다. 그림의 화살표는 주입시의 경우이며 양수시는 흐름이 반대방향이다. 실험은 먼저 물을 충분히 주입하여 탱크내가 일정온도로 된 다음 온수탱크에서 전기 히터로 가열시킨 온수를 원심펌프로 주입시키며 유량계와 발프로 유량을 조절한다. 온수주입으로 발생하는 탱크내의 비정상 온도분포는 Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같이 중앙부분의 센서판에 설치된 18개의 thermocouple(CA sensor) grid에서 관찰되며 UCAM-5BT data logger에서 일정시간 간격으로 기록된다. 실험은 일정유량을 일정시간 유지시켜 축열한 후 일정시간 정지하였다가 다시 같은 유량으로 일정시간 역으로 유동시켜 양수한다.

본 실험에서는 압력탱크 내부로부터 data logger까지의 선 연결시 수밀 유지를 시켜야 하는 어려움이 있으며 이를 위하여 실리콘 고무판을 여러장 겹쳐 구멍을 뚫어 선을 통과시킨 뒤 고무판을 볼트로 조여서 성공적으로 수밀유지를 할 수 있었다. 또한 온수주입 튜브와 배출튜브에서의 균일한 유속유지를 위하여 각 튜브에 교축장치와 염료주입 장치를 설치하여 염료의 이동 속도로부터 유속을 측정하고 적절히 교축시켜 튜브내의 유속을 균일하게 조절한다. 각 튜브는 모래층과 연결되어 있어 부분적으로 막히는 등 불확실성이 늘 존재하므로 매 실험시마다 22개의 튜브의 유속조절을 하여야 하는 어려움이 있다.

본 실험에서 특히 어려웠던 점은 탱크 내부의 압력수가 모래층 내부로 균일하게 흐르지 않고 탱크의 상부판을 밀면서 그 사이에 유로를 형성시켜 흐르는 채널효과(channeling effect)가 발생한다는 점이다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 3(b)에서 보는바와 같이 탱크 상부에 약 20 kPa의 압축공기를 유지시켜서 물이 모래층 위로 흐르지 못하도록 억제시키는 방법을 사용하였다. 온도 감지부분이 18개만 설치된 것은 다소 부족한 감이 있으나 각 위치에서의 측정치를 신중히 보간함으로써 대수층 내부의 비정상 온도분포 및 그 변화의 양상을 이해하는데 큰 부족함은 없었다.

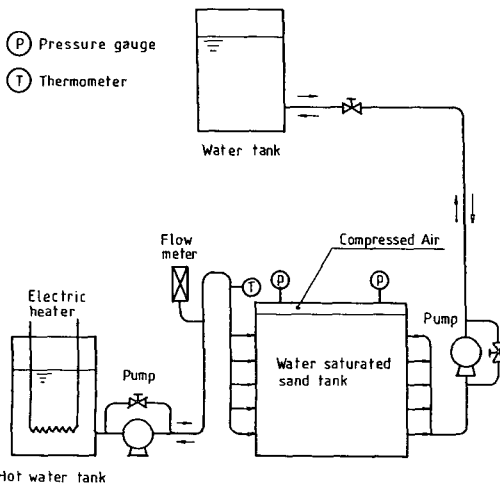


Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

3.2 실험결과 및 고찰

실험의 결과는 탱크내의 모래를 압력수로 포화시킨 후 온수를 일정시간 주입, 저장, 양수하면서 탱크내의 온도분포를 측정한 것이다. 본 연구에서는 온도를 무차원화시켜 무차원 온도 T_D 로 결과를 정리 하였으며 T_D 의 정의는 다음과 같다.

$$T_D = \frac{T - T_0}{T_i - T_0} \quad (13)$$

본 실험에서 다공질 매체로 선정된 모래의 성질 및 실험시 사용한 실험조건들이 Table 1과 Table 2에 나타나 있다. Table 2의 실험조건에 보이는 유량과 작동시간 등은 단순히 제작된 실험장치와 측정의 편의를 위하여 채택된 값이다.

대수층 내의 Darcy의 법칙이 성립하는 영역은 Reynolds 수가 1보다 적은 층류구역으로 Reynolds 수 Re 는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (14)$$

위 식에서 특성길이 D 의 값으로는 보통 다공질 매체의 평균입도를 사용하며 본 실험장치의 경우 온수 주입튜브 부근의 유속이 빠른 일부 구간을 제외하고는 대부분의 구간은 층류구간이 된다.

Table 1 Properties of sand used in the experiments

Mean grain size (m)	1.5×10^{-3}
Porosity	0.35
Permeability (darcies)	3529
Volumetric specific heat (kJ/m ³ °C)	2700

Fig. 5에서는 실험 T2에서의 결과를 보여주고 있다. 실험결과는 주입이 끝난 시점인 20분, 저장이 끝난 시점인 40분, 양수가 끝난 시점인 60분이 경과된 시점에서의 탱크 내부의 등온선을 나타내고 있으며 온도는 식(13)에 의해 무차원화시켜 무차원 등온선 0.8, 0.6, 0.4를 선정하여 나타내었다. 본 그림에서는 등온선과 등온선 사이의 간격을 볼 수 있다. 이 현상은 수평 열전도율과 열분산 효과(thermal dispersion effect)⁸⁾에 의한 유효 열전도율의 상승효과에 의하여 나타난다. 또한 본 그림에서 뚜렷이 나타나는 것은 자연대류에 의한 부유류의 영향으로 등온선이 우측으로 기울어져 있는 열경사(thermal tilting)의 현상이다. 특히 양수기간중에 이 열경사는 급격히 증가하는데 그 이유는 굴착정과외의 거리에 반비례해서 유속과 열전선의 속도가 증가하기 때문이다. 본 그림에 같이 나타나 있는 점선으로 구분된 어두운 부분과 밝은 부분은 제2장에서 제시된 단순 부유류 모델에 의하여 계산한 결과이다. 여기서는 전도 현상을 무시하였으므로 대수층 내부는 두 온도 구간으로 단순 분리되며 어두운 부분의 온도는 T_i , 밝은 부분의 온도는 T_0 가 된다. 이 계산을 위해서는 식(8)에 보이는 굴착정의 반경 r_{well} 을 결정하여야 하며 본 실험장치의 경우에는 온수 튜브근처의 약 10 cm 이내에서는 분사된 물이 위, 아래로 원활히 혼합된다고 보아 r_{well} 을 10 cm로 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 단순 부유류 모델과 실험결과 사이의 열전선의 경사면에서는 상당한 일치를 보이고 있으며 이론계산의 열전선은 대략 실험결과의 무차원 등온선 0.4와 0.6 사이에 있음을 알 수 있다.

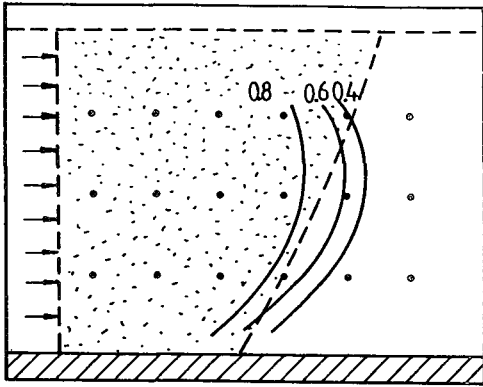
주입온도를 증가시키면 자연대류는 더욱 활발할

Table 2 Test conditions

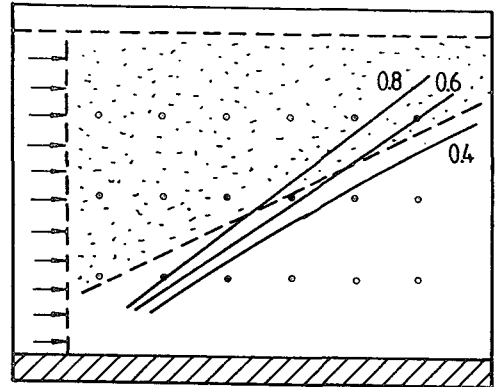
Test number	T_0 (°C)	T_i (°C)	Flow rate (m ³ /sec × 10 ⁵)	Time (min)
				Injection-Storage-Production
T1	12.1	60.0	10.0	20-20-20
T2	18.2	44.0	10.0	20-20-20
T3	18.2	59.0	10.0	20-20-20
T4	18.4	85.0	10.0	20-20-20
T5	12.1	32.0	10.0	20-20-20
T6	12.0	59.0	10.0	20-0 -20
T7	12.1	45.0	10.0	20-0 -20
T8	18.2	47.2	5.0	40-0 -0

것이 예상되며 이 현상은 온도차 66.6°C 의 경우인 실험 T4와 이 결과를 나타낸 Fig. 6에서 볼 수 있다. 자연대류가 활발해짐에 따라 열경사는 급격히 발달하고 있으며 거의 직선화하고 있고 이론결과와도 상당히 일치하고 있다. 부유류의 활동은 물의

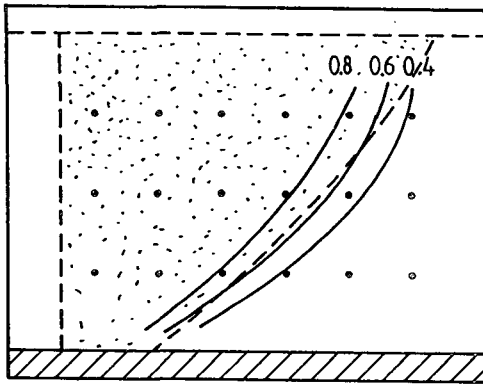
열팽창 계수 뿐만 아니라 점성계수와도 관계되며 점성계수는 온도가 낮음에 따라 높아짐으로 주입온도와 원온도 사이의 온도차뿐만 아니라 원온도 T_0 를 낮추면 또한 감소된다. Fig. 7에서는 원온도 및 온도차를 각각 12.1°C , 19.9°C 로 한 경우(실험 T5)



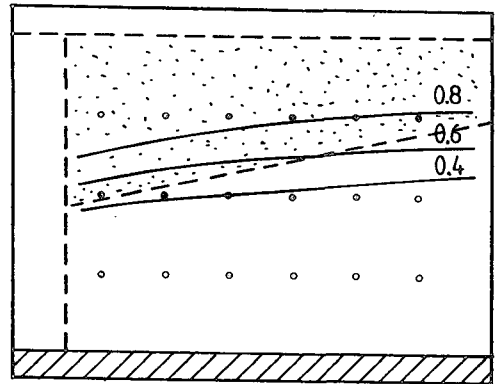
(a) 20 min



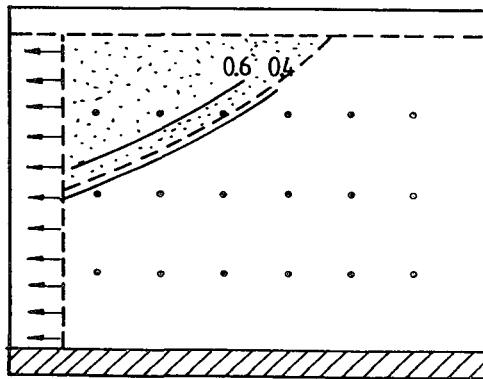
(a) 20 min



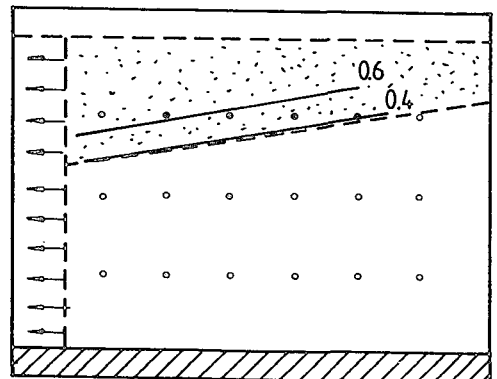
(b) 40 min



(b) 40 min



(c) 60 min



(c) 60 min

Fig. 5 Positions of dimensionless isotherms as a function of elapsed time (T2 case)

Fig. 6 Positions of dimensionless isotherms as a function of elapsed time (T4 case)

의 저장기간이 끝난 시점에서의 등온선을 보이고 있으며, 실험 T2, T4와 비교하여 보면 열전선은 거의 수직에 가까움을 알 수 있다.

축열시스템의 축열성능을 나타내는 계수로써는 다음과 같이 정의되는 열회수율(recovery factor) η_R 이 있다.

$$\eta_R = \frac{\text{양수시 회수 에너지}}{\text{축열시 주입 에너지}} \quad (15)$$

위 식에서 에너지는 대수층의 원온도 T_0 를 기준하여 계산하는 것이 보통이다. Fig. 8에서는 열회수율의 온도차에 따른 변화를 보여주고 있다. 그림에서 실선은 단순 부유류 모델에 의한 계산결과이다. 실선들중 아랫선은 운전시간 20-20-20 분에 $T_0=$

18.2°C의 경우이며 중간선은 같은 운전시간에 $T_0=12^\circ\text{C}$ 의 경우이고 제일 윗선은 $T_0=12^\circ\text{C}$ 에 저장시간을 갖지 않고 주입과 양수만 각각 20분씩 한 경우이다. 그림에는 또한 실험결과를 동시에 나타내어 이론치와 비교하고 있다. 실험 T2, T3, T4는 제일 아랫선과 운전조건이 일치하고 T1, T5는 중간선, T6, T7은 제일 윗선과 운전조건이 일치한다.

그림에서 알수 있듯이 제 2 장의 단순 부유류 모델이 정확한 열회수율 값을 제시하지는 못하지만 근사적인 경향은 알려주고 있으며 부유류 효과가 활발한 경우에는 상당히 정확한 결과를 보여주고 있다. 대부분의 이론결과가 실험결과보다 높은 이유는 단순 부유류 모델에서는 열전도 현상을 무시하였으므로 열전도에 따른 손실이 계산되지 않은 때문이며 온도차가 커서 부유류가 활발해지면 단순 부유류 모델에서 계산된 열회수율값이 실험 T4와 의 비교에서처럼 오히려 낮아지는 결과가 나타난다. 즉 이 경우는 열경사가 커지며 따라서 열전도는 수평방향보다 수직방향으로 더 많이 일어나고 전도에 의해 이동되는 열량이 상당부분 회수되기 때문이다. 또한 본 그림에서 온도조건이 같은 실험 T1, T5와 T6, T7을 (또는 제일 윗선과 중간 실선을) 비교함으로써 20분간의 정지기간이 열회수율에 미치는 영향을 검토할 수 있는 바 약 10~15%의 성능감소를 주는것으로 나타났다.

실험 T8에서는 유량을 반으로 줄여서 40분간 계속 주입하면서 온도분포 현황을 검토하여 보았다. Fig. 9은 이 경우 40분 경과시의 온도분포로서 비슷한 온도조건에 유량이 두배인 실험 T2의 결과를

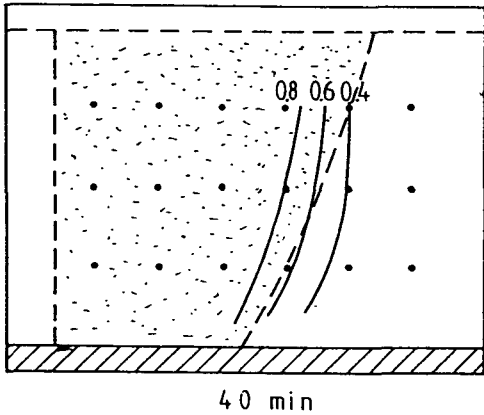


Fig. 7 Positions of dimensionless isotherms at the end of storage (T5 case)

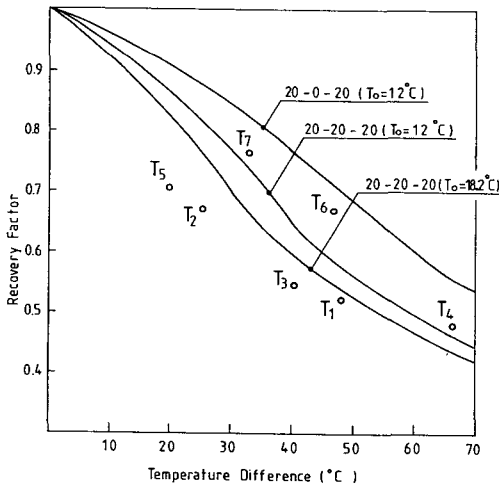


Fig. 8 Recovery factor versus temperature difference between injection and original temperatures

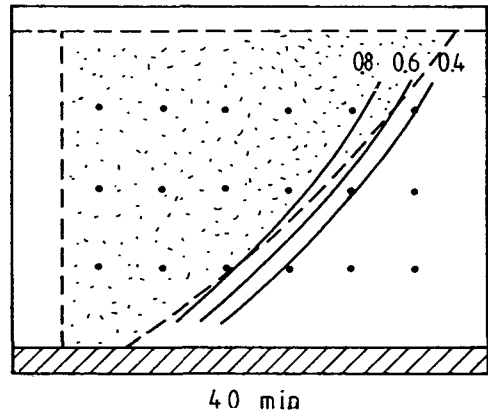


Fig. 9 Positions of dimensionless isotherms at the end of injection (T8 case)

나타낸 Fig. 5와 비교하여 보면 큰 변화를 볼수 없으며 따라서 온도조건, 전체 주입량, 경과시간 등이 같으면 온도분포 현상은 대략 비슷함을 알수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다공질 매체내의 강제 및 자연대류 열전달에 관한 실험을 수행하였고 이론 모델을 개발하여 실험결과와 비교 검토하였다.

본 실험에서는 주로 온도변화에 따른 자연대류와 열회수율 관계를 검토하였으며 실험에서 검토된 범위 내에서 보면 온도차가 클수록 부유류가 활발해지고, 이 효과는 또한 열회수율의 감소로 나타났다. 보다 더 많은 파라미터들의 다양한 변화와 이에 따른 결과들을 얻기 위해서는 새로운 실험기법의 개발이 필요하다고 느끼며 그렇게 되면 이 분야의 연구는 획기적으로 발전 되리라고 생각된다.

후 기

본 연구는 1988년도 한국과학재단 연구비(881-0903-023-2) 지원하에 이루어졌으며 동재단 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Doughty, C., Hellstrom, G. and Tsang, C.F., 1982, "A Dimensionless Parameter Approach to the Thermal Behavior of an Aquifer Thermal

Energy Storage System," *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 571~587.

(2) Sauty, J.P., Gringarten, A.C., Menjoz, A. and Landel, P.A., 1982, "Sensible Energy Storage in Aquifers 1. Theoretical Study," *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 245~252.

(3) Elder, J.W., 1967, "Steady Free Convection in a Porous Medium Heated From Below," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 29~48.

(4) Combarnous, M.A. and Bia, P., 1971, "Combined Free and Forced Convection in a Porous Media," *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 399~405.

(5) Molz, F.J., Melville, A.D., Parr, D.A. King and Hopf, M.T., 1983, "Aquifer Thermal Energy Storage: A Well Doublet Experiment at Increased Temperatures," *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 1, pp. 149~160.

(6) Sauty, J.P., Gringarten, A.C., Fabris, H., Thierry, D., Menjoz, A. and Landel, P.A., 1982, "Sensible Energy Storage in Aquifers 2. Field Experiments and Comparison With Theoretical Results," *Water Resources Research*, Vol. 18, No.2, pp. 2, pp. 253~265.

(7) Davis, S.N. and Dewiest, R.J.M., 1966, *Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, pp.247~252.

(8) Scheidegger, A., 1960, *The Physics of Flow Through Porous Media*, 2nd ed., Macmillan, pp. 256~259.