

지중 열 교환기 운영 효율의 최적화를 위한 단순화 모델의 개발

김 경호¹⁾, 신 지연²⁾, 김 성균³⁾, 이 강근⁴⁾

Development of a simplified model to maximize operating efficiency of heat exchanger

Kyung-Ho Kim¹⁾, Jiyoun Shin²⁾, Seong-Kyun Kim³⁾, Kang-Kun Lee⁴⁾

Key words : geothermal energy (지열 에너지), borehole heat exchanger (지중 열 교환기), optimization (최적화)

Abstract : Efficiency of geothermal heat exchanger operation has close relation with temperature variation of the aquifer where the exchanger is installed. In the case of long-term operation, temperature distribution of the aquifer would be similar to that of water circulating in the exchanger, which causes the decrease of heat exchange rate. Therefore, the operation period of the heat exchanger should be controlled so that the temperature distribution of the aquifer is recovered. We developed a model to determine the operation period to acquire the optimal efficiency under the given aquifer condition. With this suggested method, when we use closed-loop heat exchanger, the operation efficiency of the geothermal heat exchanger is expected to be maximized by determining the optimal operation period.

Nomenclature

Q : quantity of heat, cal
t : time, day
T : temperature, °C
λ : thermal conductivity, W/mK
E_{ex} : net output energy, cal
ΔA : grid area : m²
Δx, Δy : grid size of x, y direction, m
x_{in}, x_{out} : location vector
c : specific heat, J/kgK
v : water velocity, m/s

1. 서론

지열에너지는 공해가 없고 그 열원이 지구상에 사실상 무한하고 그 활용성이 높으므로 최근 각광 받고 있는 에너지이다. 지중 열 교환기는 지하 내의 온도가 연중 일정하다는 성질을 잘 활용한 지열 에너지 이용 방안 중의 한 가지로 최근 그 활용 폭이 크게 늘고 있는 실정이다.

그러나 지중 열 교환기를 무계획적으로 사용하게 되면, 지하 내에서 활용할 수 있는 축열 용량이 크게 줄어들게 되어 열교환 효율이 크게 떨어지게 된다. 따라서, 지중 열 교환기의 이용 효율을 극대화하여 최대한의 에너지를 활용하기 위해

서는 지중 열 교환기의 사용 기간을 잘 설정하여, 지열을 활용한 후 새로운 열이 비축될 시간을 주거나 지열을 직접 비축하여 열교환 효율을 극대화할 필요가 있다.

지중 열 교환기의 운영 효율 극대화를 위한 최적화 연구는 몇 개의 경우를 두고, 각 경우의 효율을 테스트한 수준에 그쳤고, 정확한 값을 제시하는 수준까지의 연구는 미비한 실정이다.¹⁾

이에 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 이용하여, 지중 열 교환기의 운영 효율의 극대화를 할 수 있는 함수를 개발하고 그 계산을 진행하면 더욱 높은 효율을 보일 수 있는 지중 열 교환기 운용 방안을 찾을 수 있을 것이다. 그러나 유전자 알고리즘을 통한 계산은 방대한 양의 계산을 필요로 한다. 지중 열 교환기와 그 주변의 지하수 거동, 온도 변화를 모사하기 위한 모델은 그 복잡성 때문에 방대한 양의 계산을 필요로 하게 되며, 유전자 알고리즘 또한 방대한 양의 계산을 반복하게 되기 때문에, 최적화 연구가 진행되기 힘든 상황에 있다.

이를 개선하기 위하여 이 연구에서는 지중 열 교환기의 구조를 일정한 온도를 가진 하나의 막대 구조로 가정하고, 그 가정을 통해 막대의 내외부로 출입하는 열량을 계산하고 도메인의 모양을 단순화하며, 격자의 수를 크게 줄임으로써 최소한의 계산만으로 상당히 정밀한 수준의 지중 열

교환기의 효율을 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. (Fig. 1)

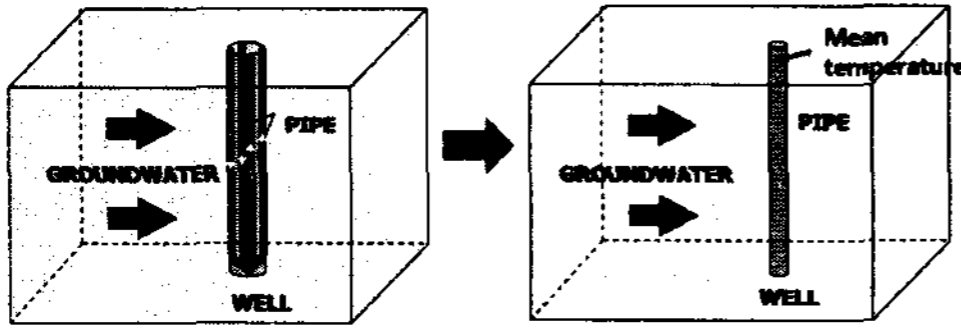


Fig. 1 Concept of simplified model.

2. 본론

지중 열 교환기에서 냉매의 출입구에서의 온도 변화는 일반적으로 거의 선형에 가까운 형태로 나타남이 알려져 있다.⁴⁾ 열 교환기의 내부가 U 튜브 형태로 구성이 되었다고 가정하면 U 튜브를 출입하는 냉매의 온도의 평균값은 거의 일정함을 알 수 있다(Fig. 2). 따라서 만일 U 튜브를 하나의 막대로 본다면 막대의 온도 분포는 U 튜브를 출입하는 냉매의 온도의 심도별 평균 값으로 가정할 수 있으며, 그 평균치는 깊이에 따라 거의 차이가 없으므로 일정한 온도로 두어도 계산상 그 오차의 크기는 미미하다. 하나의 막대로 본 U 튜브는 동일한 온도를 가진 막대로 두고, 그 막대의 주변부와의 온도 차를 이용하면 식 (1)과 식 (2)를 통해 막대의 내부와 외부 사이에서 출입한 열량을 계산할 수 있다.

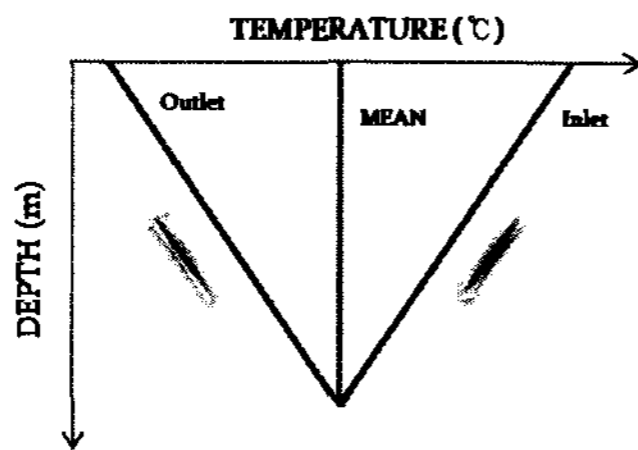


Fig. 2 Temperature distribution through depth.

막대 내외부 사이에 출입한 열량은 U 튜브를 출입하는 냉매가 획득하거나 손실하게 되는 에너지의 양과 동일하게 된다.

$$\frac{\Delta Q(x)}{\Delta t} = -\lambda \Delta A \frac{\Delta T(x)}{\Delta x} = -\lambda \Delta A \frac{T_{out}(x_{out}) - T_{in}(x_{in})}{|x_{out} - x_{in}|} \quad (1)$$

$$E_{ex} = \iint_A \frac{dQ(x)}{dt} dA dt = \int c \frac{dq}{dt} (T_{out} - T_{in}) dt \quad (2)$$

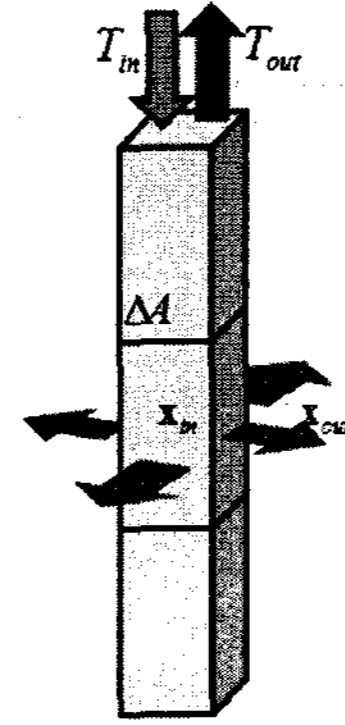


Fig. 3 Energy exchange of borehole.

따라서 전체 U 튜브 시스템의 에너지 총 출입량은 식 (3)과 같이 파이프의 냉매를 통한 출입량과 파이프 내부와 외부 사이의 열전도를 통한 출입량으로 표현할 수 있게 되며, 이 식을 정리하면 식 (4)와 같은 형태로, U 튜브의 입수구에서의 온도를 통해 출수구에서의 온도를 추정할 수 있는 추정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta Q_{total} &= \sum_i \left(-\lambda \Delta A \frac{T(x_{out}) - T(x_{in})}{|x_{out} - x_{in}|} \right) \Delta t \\ &= c \rho_{water} v \Delta x \Delta y (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (3) \end{aligned}$$

$$T_{out} = \frac{1}{c \rho_{water} v \Delta x \Delta y} \sum_i \left(-\lambda \Delta A \frac{T(x_{out}) - T(x_{in})}{|x_{out} - x_{in}|} \right) + T_{in} \quad (4)$$

식 (4)의 추정식을 이용하여 제시된 단순화 모델을 통하여 U 튜브를 통해 나오는 냉매의 온도를 계산해 보았다. Fig. 4는 도메인의 형태를 나타낸다. 200 m × 200 m × 50 m 크기의 도메인의 중심에 0.5 m의 직경을 갖는 막대 형태의 파이프를 두었다.

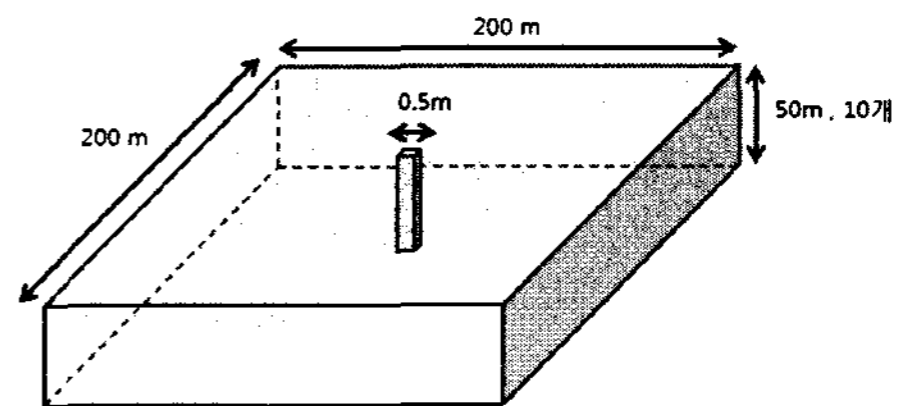


Fig. 4 Domain of simplified model.

Fig. 5는 도메인에 설정한 격자의 분포를 나타내며, 계산의 양을 최소화하기 위하여 격자의 수를 가장 줄이기 위해 중심의 파이프 주변의 격자의 크기는 촘촘하게 두고 파이프에서 멀어지는 지점의 격자는 성기게 두어 그 계산량을 줄였다.

깊이 50m 지점의 바닥 경계는 15 °C의 등온 경계로 두었으며, 상부면의 경계는 Fig.6과 같이 1년을 주기로 시간에 따라 5 °C ~ 25 °C 사이에서 사인 곡선의 형태로 변화하는 형태로 두었다. Table 1은 단순화 모델에 입력한 물성치를 나타내며, 냉매는 물로, 파이프와 외부 매질 사이의 열 전도도는 두 영역의 조화 평균을 사용하였다.

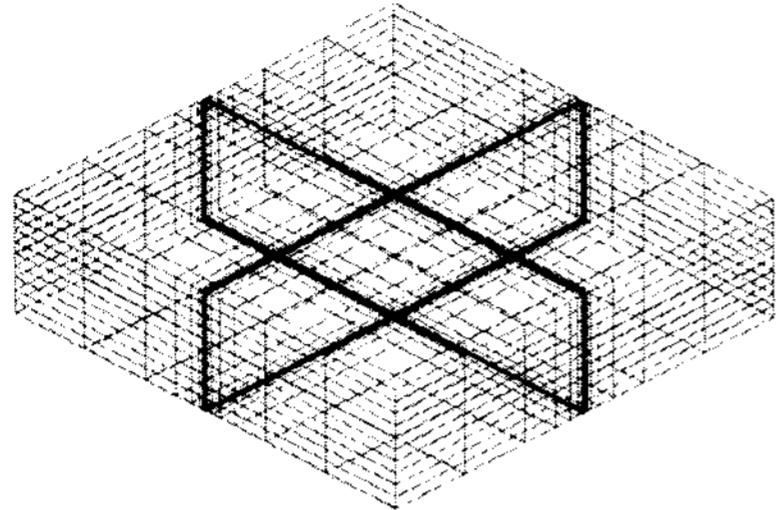


Fig. 5 Mesh of simplified model.

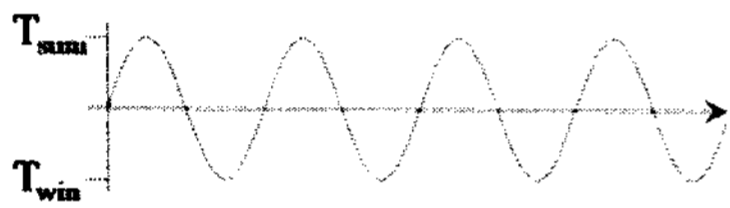


Fig. 6 Temperature change of upper boundary of the domain.

Table 1. Parameters and the values

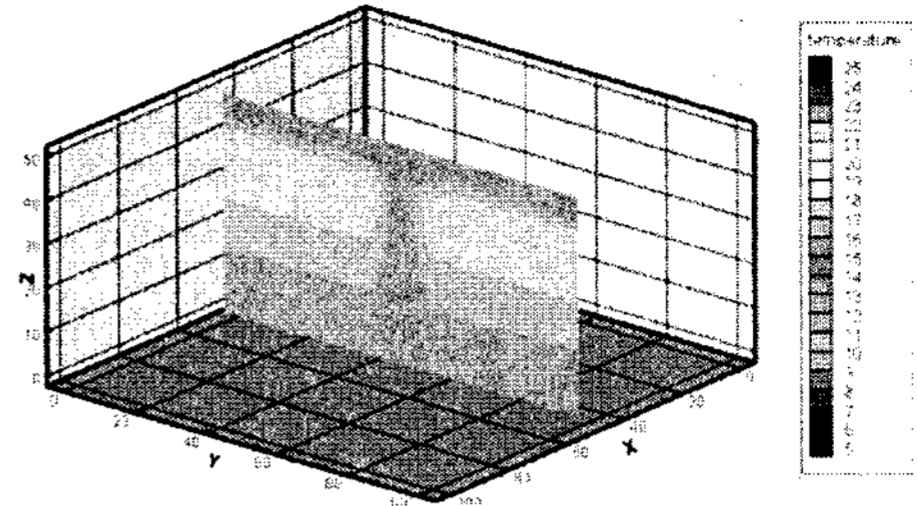
λ	1.00 W/mK
c	4.18 J/gK
ρ_{water}	$9.998 \times 10^5 \text{ g/m}^3$
v	0.07 m/s
ΔA	1.25 m ²
Δx	0.25 m

도메인 전체는 포화대로 두고, 지하수의 거동은 없는 상태에서 지중 열 교환기를 작동시킬 경우, 입수구로 들어가는 냉매의 온도는 대기의 온도와 동일하다고 가정하였다. 주어진 조건 하에서 10년간 지중 열교환기의 가동이 없었다고 가정하고, 상부의 변온경계조건을 주어 도메인의 초기 온도를 안정화 시킨 후, 지중 열교환기를 작동시킨 상황에서의 관정 주변부의 온도 변화를 관찰하였다. 계산은 TOUGH2를 이용하여 수행되었다.^{2),3)} 그 결과는 Fig. 8과 같이 계절에 따른 온도 변화를 보였다.

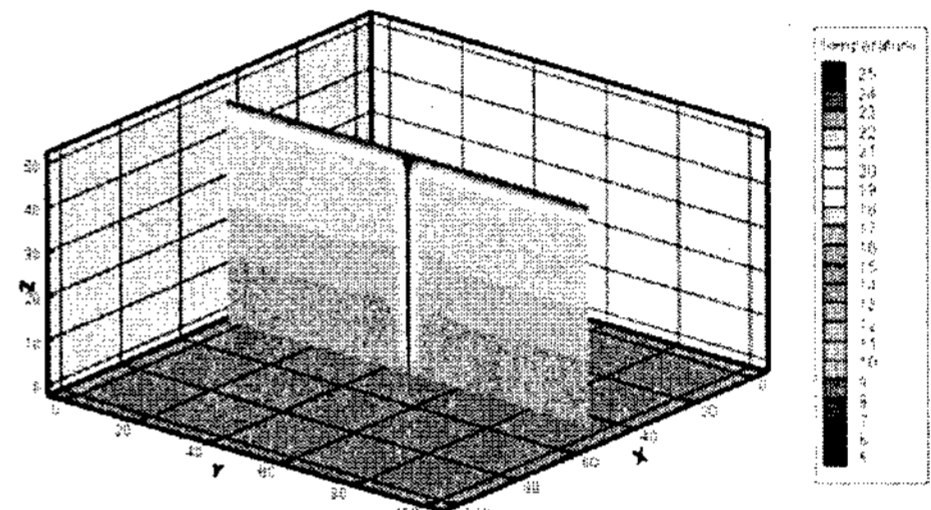
개발한 단순화 모델을 통해 1년 간 입수구와 출수구로 출입한 냉매의 온도는 Table 2와 같으며, 여름철과 겨울철에 약 0.4 ~ 0.5 °C의 온도 변화를 나타내었다. 이러한 온도 변화는 U 튜브를 그

대로 계산한 결과와 큰 차이가 없는 수치로 단순화 모델을 통한 계산 결과가 큰 오차 없이 활용할 수 있음을 보여준다.

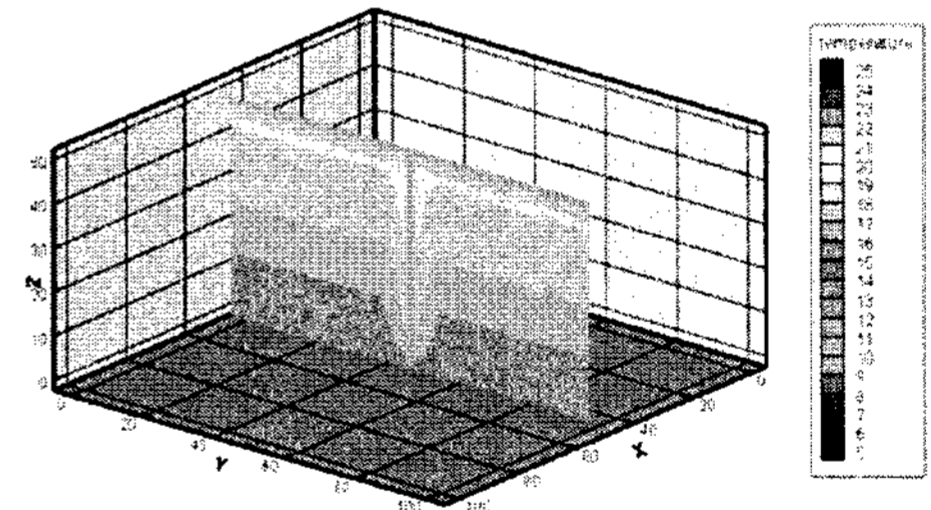
(a)



(b)



(c)



(d)

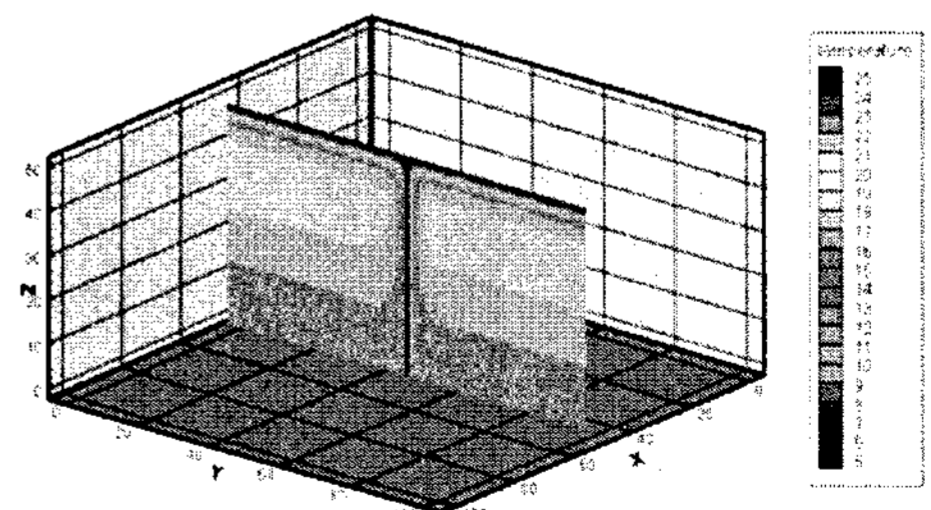


Fig. 8 Groundwater temperature variation through the season. (a) Spring, (b) Summer, (c) Autumn, (d) Winter.

Table 2. Result of the simplified modeling.
(Unit : °C)

Season (Day)	T _{in}	T _{out}
Spring (10th)	15.818	15.943
Summer (100th)	24.937	24.582
Autumn (190th)	16.348	16.308
Winter (280th)	5.124	5.618

3. 결론

지중 열 교환기의 운용 효율의 최적화를 도출하기 위해서는 방대한 양의 계산을 통한 최적화 기법을 활용하는 것이 필수적이다. 그러나 지중 열 거동과 지하수의 거동을 동시에 모사하는 과정은 매우 복잡하고 방대한 양의 계산을 동반하기 때문에 이를 수행하는 데에는 많은 시간이 필요하다. 이 연구에서는 이를 개선하여 적은 양만의 계산으로 필요한 정보를 도출할 수 있는 단순화 모델을 개발하였으며, 이를 통하여 매우 적은 양의 계산만으로도 상당히 정확한 수준의 지중 열 교환기의 운용을 통한 주변부의 온도 분포와 지중 열 교환기의 출수구에서 얻을 수 있는 냉매의 온도 분포를 계산할 수 있었다. 계산된 수치는 지중 열 교환기를 사용하여 냉매가 여름철과 겨울철에 약 0.4 - 0.5 °C의 온도에서의 이득을 보였다. 이 수치는 지중 열 교환기의 깊이가 얕고, 지하수의 흐름이 없는 상태로 지중 열교환기의 열 교환 효율이 매우 낮은 상태이기 때문에 적은 값으로 나타난 것이다. 향후 이러한 단순화 모델을 통한 계산이 이러한 단순화 가정에 입각하지 않은 일반적인 모델과의 결과 비교 연구를 통해 좀 더 그 타당성을 확보한다면, 향후 지중 열 교환기의 운용 효율의 최적화를 위한 연구에 적은 계산만으로 방대한 양을 정확하게 계산해 낼 수 있기 때문에 다방면으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업자원부 에너지자원기술개발사업의 일환으로 에너지관리공단의 연구비 지원과 교육인적자원부 두뇌한국21(BK21) 사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Fujii, H., Itoi, R., Fujii, J. and Uchida, Y., Optimization the design of large-scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling, Geothermics Vol. 34, pp. 347-364, 2004.
- [2] Hellström, G., Sanner, B., EED: Earth Energy Designer. User manual, Version 2.0., 2000

- [3] Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., TOUGH2 User's Guide, Version 2.0., 1999

- [4] Signorelli, S., Geoscientific Investigations for the Use of Shallow Low-Enthalpy Systems. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, for the degree of Doctor of Science., 2004