

지중열원 열펌프 시스템의 난방성능 해석

우 정 선, 김 대 기*, 이 세 균**

한국에너지기술연구원, *충북대학교 기계공학과 대학원, **충북대학교 기계공학부

A Study on the Heating Performance of Ground Source Heat Pump System

Joung-Son Woo, Dae-Ki Kim*, Se-Kyoun Lee**

Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Mechanical Engineering Graduate School, Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea

(Received July 30, 2004; revision received October 20, 2004)

ABSTRACT: Installations of vertical boreholes for the ground source heat pump system are expensive to install. One way to reduce the initial cost is to increase the specific heat extraction rate of borehole system. However, as the specific heat extraction rate increases the temperature of borehole fluid decreases with the resultant lower Coefficient Of Performance in Heating (*COPH*) of heat pump system. The purpose of this study is to provide the basic informations about the performance of heat pump system with the specific heat extraction rate and soil thermal properties such as thermal conductivity and temperature. It is shown that the specific heat extraction rate is the most important parameter for the ground source heat pump system. To obtain the reasonable *COPH* value ($COPH > 3$) the heat extraction rate should be about 25 W/m or less. Accurate measurements of soil thermal properties are also very important to design the system properly. The effects of borehole thermal resistances are also examined in this study.

Key words: Ground source heat pump system(지중열원 열펌프 시스템), Borehole(보어홀), Specific heat extraction rate(비채열률), *COPH*(성능계수)

기 호 설 명

c : 지중토양의 비열 [J/kg·K]
 c_f : 보어홀 유체 비열 [J/kg·K]
COPH : 성능계수
 k : 지중토양의 열전도율[W/m·K]
 L : 보어홀 길이 [m]

Q : 채열률 [W]
 Q/L : 비채열률 [W/m]
 r : 반경방향 거리 [m]
 r_b : 보어홀 반경 [m]
 R_b : 보어홀 전열저항 [K/(W/m)]
 t : 시간 [s]
 T : 온도 [°C or K]
 T_b : 보어홀 벽면온도 [°C]
 T_f : 보어홀 유체온도 [°C]
 T_o : 지중토양의 초기온도 [°C]

† Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2446; fax: +82-43-263-2441

E-mail address: leesk@chungbuk.ac.kr

t_{total} : 총난방기간 [s or day]
 V_f : 보어홀 유체의 체적유량 [m^3/s]

그리스 문자

α : 지중토양의 열확산율 [m^2/s]
 γ : Euler 상수
 ΔT_{app} : 접근온도 [$^{\circ}C$]
 μ_f : 보어홀 유체 점성계수 [$kg/m \cdot s$]
 ρ : 지중토양의 밀도 [kg/m^3]
 ρ_f : 보어홀 유체의 밀도 [kg/m^3]

하첨자

av : 평균
 con : 응축기
 $evap$: 증발기
 i : 유입
 o : 유출

1. 서 론

지중열이란 지표면으로부터 약 200 m 정도의 비교적 얇은 지층 사이의 토양이 갖고 있는 열에너지(shallow geothermal resources)를 의미한다. 이러한 지중열의 특성을 보면 지표면에서 약 10~15 m까지는 지표면 온도의 변화에 따른 영향을 받지만 그 이하로 내려가면 지표면의 영향을 거의 받지 않으며 연중 약 13~15 $^{\circ}C$ 정도의 일정 온도를 유지한다. 이러한 지중열원은 보통 1 km 이상의 수직굴착을 통하여 약 100 $^{\circ}C$ 또는 그 이상의 온도를 갖는 지열수를 양수하는 심부지열원(deep geothermal resources)과는 구별된다. 보통 정상적인 지열경사(geothermal gradient)는 심도 100 m당 약 2.5 $^{\circ}C$ 정도이며 심부지열원의 개발은 이보다 지열경사가 월등히 높은 특별한 위치에서나 가능하므로 그 개발이 제한될 수밖에 없다. 그러나 지중열원은 토양이 있는 곳에서는 항상 존재하므로 어디서나 개발이 가능하여 대체에너지 자원으로 주목을 받기에 충분하다. 다만 지중열은 온도가 낮아 직접 이용은 어려우며 열펌프 기술과 접목하여야 유용한 에너지의 창출이 가능하다.

지중열원은 동절기 열펌프의 열원으로서의 역할

뿐 아니라 하절기에 열펌프의 열싱크로도 사용이 가능하며 공기열원과 비교할 때 월등히 우수한 열원 또는 열싱크의 역할을 할 수 있다. 특히 국내에서 동절 혹한기에 자주 발생하는 증발기 착상문제 등이 여기서는 근원적으로 제외되므로 지중열 시스템은 우리의 실정에 알맞는 난방설비로 발전될 가능성이 충분하다. 그러나 이 시스템이 아직 국내에서 활성화되지 못하는 주요 원인은 지중열 교환기의 설치에 소요되는 초기투자비의 과다에 있다. 이 초기투자비를 감소시키는 한 방안으로 지중 채열률(heat extraction rate)을 높일 수는 있으나 그에 따른 열펌프의 성능계수 저하를 우려하지 않을 수 없다.

이와 같이 지중열원 열펌프 시스템은 지중열 교환기와 열펌프의 복합시스템으로 이루어지는 기술이나 지금까지의 연구동향을 보면 열펌프 관계 기술과 지중열 기술은 각각 독립적으로 연구되어 왔으며 이에 따라 두 분야가 서로 긴밀히 연계되어 있고 이러한 복합효과가 전체 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다는 사실이 흔히 간과되어 왔다. 본 연구에서는 지중 토양의 물성치와 지중 채열률이 열펌프의 성능에 미치는 영향을 조사함으로써 이 두 분야의 연계효과를 검토하고자 하며 이러한 연구결과는 지중열 난방시스템 설계시 보다 합리적인 설계방안을 제시하는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 지중열 시스템

Fig. 1에서는 국내에서 주로 사용되는 수직형 지중열 교환기인 보어홀(borehole)을 보이고 있다. 보어홀은 그림에서 보는 바와 같이 수직길이 L , 반경 r_0 로 이루어진다. 보어홀은 내부에 폴리에틸렌 U-튜브를 매설한 후 grouting 처리하여 일체의 지중오염 등 공해가 발생되지 않도록 설치하는 거의 반 영구적 지중시설이다. 매설된 튜브 내로 보어홀 유체를 순환시켜 지중 토양과 열교환을 하게 한다.

지중에 매설된 파이프와 토양 사이의 열전달에 관한 이론해는 Kelvin의 열이론으로부터 구할 수 있다.⁽¹⁾ 즉, 무한히 길고 열유속이 일정한 직선열원(line source)이 초기온도가 T_0 로 균일한 무한 매질(여기서는 토양) 속에 매설되어 있는 경우 토양온도에 관하여서 다음과 같은 해가 성립한다.

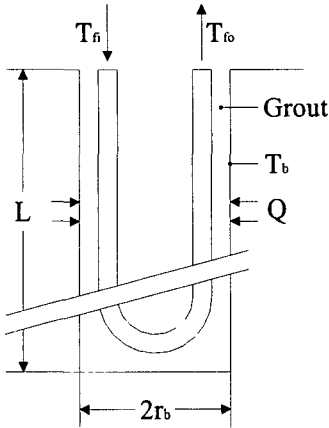


Fig. 1 Borehole system.

$$T_o - T(r, t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \quad (1)$$

식(1)의 $T(r, t)$ 는 열원으로부터의 거리 r , 시간 t 에서의 온도이며 k 는 토양의 열전도율(또는 유효 열전도율), Q 는 토양으로부터의 채열률(heat extraction rate), L 은 보어홀의 길이이며, 따라서 Q/L 은 단위길이당 채열률, 즉 비채열률(specific heat extraction rate)이 된다. 여기서 Q 는 채열의 경우 양의 값이 되나 보어홀로부터 열을 방출하는 경우라면 음의 값을 갖는다. 또 이 식에서 α 는 $k/\rho c$ 로 정의되는 토양의 열확산율(ρ 는 토양의 밀도, c 는 토양의 비열, 따라서 ρc 는 토양의 체적비열)이다. 여기서 열원은 무한히 긴 것으로 가정하였으므로 모든 열의 흐름은 열원에 직각, 즉 반경방향으로 이루어진다.

식(1)은 무한히 긴 직선열원에서 적용되는 완전해이지만 실제로 Fig.1과 같은 보어홀 시스템에서는 큰 오차 없이 적용이 가능하다. 단, 이러한 보어홀은 단지 근사적인 직선열원이므로 시스템 가동 후 2~3일 정도의 충분한 시간이 경과되어야 시스템 주위의 온도분포가 직선열원 모델의 경우와 유사하게 나타난다. 실제로 사용되는 보어홀의 길이 L 은 약 100 m 정도이고 $r_b=0.075$ m 수준이므로 열원이 충분히 길고 열유속은 반경방향으로 이루어진다는 가정 역시 큰 오차 없이 적용될 수 있다.

Carslaw and Jaeger⁽²⁾에 의하면 식(1)은 다음

과 같이 근사화될 수 있다.

$$T_o - T(r, t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \quad (2)$$

식(2)는 식(1)의 근사식으로 $\alpha t/r^2 > 5$ 에서 최대 2%의 오차가 있는 것으로 알려지고 있다.⁽³⁾ 또 이 식에서 γ 는 Euler 상수로 0.5772의 값을 갖는다. 식(2)로부터 $r=r_b$ 인 보어홀 벽면의 온도 T_b 를 구하면

$$T_b = T_o - \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

Fig.1에서 보이는 보어홀 유체의 유출·입 온도 T_{fo} 와 T_{fi} 는 실제로 그 차이가 크질 않으며, 주위 토양과의 열전달 해석은 흔히 이 두 온도의 평균 온도인 T_f 를 통하여 하게 된다. 즉,

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (4)$$

이 평균 온도 T_f 와 벽면온도 T_b 사이에는 전열저항 R_b 를 다음과 같이 정의한다.⁽⁴⁾

$$R_b = \frac{T_b - T_f}{Q/L} \quad (5)$$

식(3)과 식(5)로부터

$$T_f = T_o - \frac{Q}{L} R_b - \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (6)$$

식(6)은 지중 토양 변수(T_o, k, α), 보어홀 변수(r_b, R_b, L), 그리고 가동변수(Q)로 이루어져 있으며 가동시간(t)에 따른 보어홀 유체의 온도(T_f)를 나타내고 있다. 지중 토양 변수 중 T_o 와 k 는 시스템 성능에 미치는 영향이 매우 큰 주요 변수들이다. 이 중 T_o 는 측정이 용이하여 큰 문

Table 1 Values of parameters of the system

Parameter	Value
T_o	8~20°C
k	1~5 W/m·K
ρc	2160000 J/m ³ ·K
r_b	0.075 m
R_b	0.1~0.3 K/(W/m)
L	100 m
Q/L	10~50 W/m

제가 되지 않으나 k 값은 측정이 용이하지 않으며, 따라서 정확한 k 값의 측정은 지중열 시스템 설계에서 주요 문제 중 하나로 부각되고 있다.⁽⁵⁾ Table 1에서는 본 연구에서 채택한 주요 변수들의 값, 또는 그 범위를 보이고 있다. 여기서 제시된 값들은 흔히 지중열 시스템에서 볼 수 있는 전형적인 값들이다. 본 연구에서는 총 난방기간 동안에 나타나는 T_f 의 변화를 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림은 지중열 시스템의 전형적인 온도변화 경향을 보여준다. 즉, 가동 초기에 급격한 온도강하를 보이며 이 온도강하는 비체열

물(Q/L)이 높을수록 더욱 급격해진다. 그러나 이러한 급격한 온도변화는 어느 정도의 시간이 지나면 안정상태를 회복하게 되며 이때부터는 온도강하는 대단히 완만해진다. 따라서 효과적인 지중채열을 위해서는 지중 토양의 열전도도를 정확히 파악하고 이에 따라 적절한 채열률로 가동해야 함을 알 수 있다. 또한 이 그림에서 보면 비체열률이 증가함에 따라 T_f 는 감소하는 것으로 나타나는데 이것은 지중채열량을 높이기 위해서는 T_f 가 낮아야 함을 의미한다. 즉, 낮은 온도의 유체를 순환시켜야 높은 온도경사를 이루어 열전달을 증가시킬 수 있기 때문이다.

이와 같은 보어홀 유체의 온도변화 특성을 고려할 때 총 난방기간(t_{total}) 중의 평균 온도 $T_{f,av}$ 를 다음과 같이 정의하여 사용하면 편리하다.

$$T_{f,av} = \frac{1}{t_{total}} \int_0^{t_{total}} T_f dt \quad (7)$$

Fig. 3에서는 이렇게 정의된 $T_{f,av}$ 를 k 와 Q/L 의 함수로 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3를 비교해

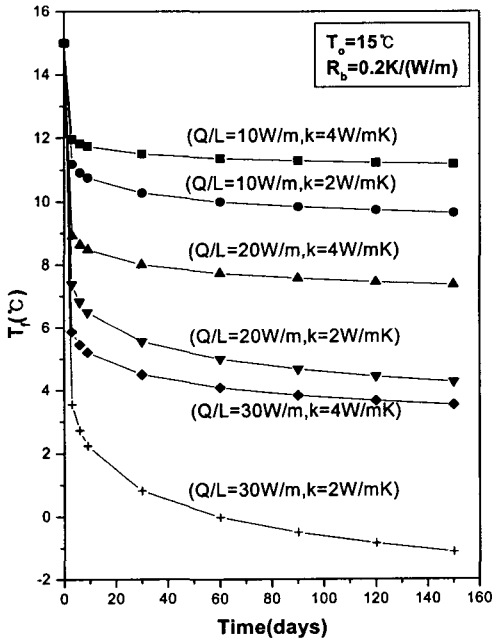


Fig. 2 Temperature of borehole fluid with time.

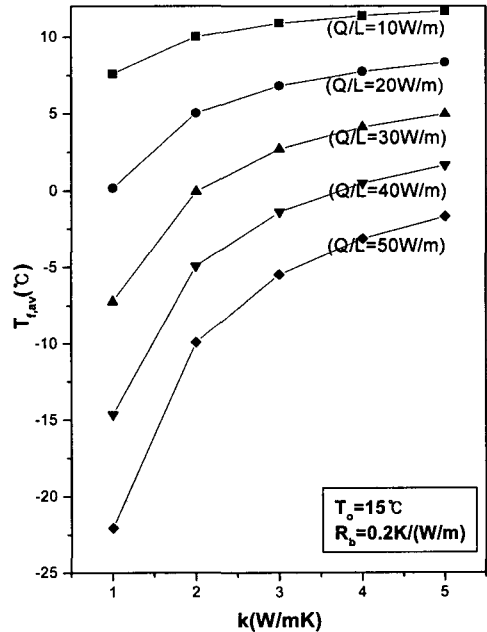


Fig. 3 Average temperature of borehole fluid as a function of k for given values of Q/L .

보면 이 평균 온도는 Fig. 2의 완만한 변화영역의 온도와 유사하며 따라서 이 평균 온도는 보어홀 유체온도의 근사적인 대표값으로 생각할 수 있다.

이상의 두 그림을 통하여 불 때 주어진 보어홀의 채열률을 높이려면 이에 따른 온도저감이라는 불이익을 감수해야 함을 알 수 있다. 더욱이 보어홀 유체의 온도는 열펌프의 열원으로 활용되므로 온도저감에 따른 불이익은 그대로 열펌프의 성능감소로 나타나게 된다. 또한 비채열률을 증가시킬 경우 지중 토양이 갖는 열전도도의 역할이 주요해짐을 알 수 있다. 즉, $k=1\text{ W/m}\cdot\text{K}$, $Q/L=20\text{ W/m}$ 인 경우 $T_{f,av}=0^\circ\text{C}$ 이나 $k=3.5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 라면 Q/L 을 40 W/m 로 증가시켜도 동일한 유체온도 0°C 를 얻을 수 있다.

보어홀의 유출·입 온도인 T_{fo} 와 T_{fi} 도 T_f 와 같은 변화경향을 가지므로 여기서도 평균 온도의 개념으로 생각하면 편리하다. 단, 유출·입 온도차는 보어홀 유체의 종류에 따라 약간씩 달라지므로 먼저 보어홀 유체의 종류를 규정하여야 한다. 본 연구에서는 보어홀 유체로 25% 메타놀 ($\rho_f=960\text{ kg/m}^3$, $c_f=4,000\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, 빙점 $=-20^\circ\text{C}$, $\mu_f=0.004\text{ kg/m}\cdot\text{s}$)을 선택하였다. 보어홀 유체의 유량은 순환펌프 동력을 고려할 때 작을수록 좋으나 열전달 성능면에서 보면 적어도 난류영역에 있어야 한다. 본 연구에서 선택한 폴리에틸렌 U-튜브(외경 : 0.025 m , 내경 : 0.0204 m)에서는 보어홀 유체의 체적유량을 $V_f=0.0002\text{ m}^3/\text{s}$ 로 정하면 $Re=2996$ 이 되어 가동 초기에는 층류와 난류 사이의 천이영역이 되나 가동시간이 경과되면서 난류영역으로 발전될 수 있다. 이에 따른 평균 유입 및 유출 온도인 $T_{fi,av}$ 와 $T_{fo,av}$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$T_{fi,av} = T_{f,av} - \frac{Q}{2\rho_f c_f V_f} \quad (8)$$

$$T_{fo,av} = T_{f,av} + \frac{Q}{2\rho_f c_f V_f} \quad (9)$$

3. 열펌프 난방시스템

본 연구에서는 다음과 같은 조건 하에 열펌프 난방시스템의 성능을 검토하고자 한다.

- (1) 난방기간은 150일이다.
- (2) 난방기간중 난방부하 및 지중 채열률은 일정하다.
- (3) 난방기간중 열펌프는 정상상태로 가동된다.
- (4) 보어홀 유체의 열펌프 증발기 유출·입 온도는 각각 식(8) 및 (9)에서 주어진 상태로 일정하다. 보어홀 유체의 체적유량 또한 $V_f=0.0002\text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정하다.

실제로 난방부하는 변화되고 이에 따라 열펌프의 on-off 제어, 또는 부하경감 제어 등의 방법이 사용되고 있으며, 따라서 위에서 언급한 일정부하 또는 정상상태 가동 등의 조건은 상당히 이상화된 가정들이다. 그러나 실제 가동시의 평균 부하를 본 연구의 일정부하로 근사적으로 생각할 수 있다. 지중 채열률 역시 실제로 변동되나 평균 채열률을 고려하여 본 연구의 일정 채열률로 근사화하여 생각해 볼 수 있다.

4. 열펌프의 성능계수

Reistad and Means⁽⁶⁾는 지열용 열펌프의 성능 해석과정에서 실제 열펌프의 성능계수(COPH)를 응축온도 T_{con} 과 증발온도 T_{evap} 로 표현되는 Carnot 열펌프 성능계수의 약 1/2로 표현하면 폭넓은 온도범위에 걸쳐 비교적 정확한 표현이 될 수 있음을 발견하였다. 즉, 다음과 같은 성능계수의 표현이 가능하다.

$$COPH = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{con}}{T_{con} - T_{evap}} \right) \quad (10)$$

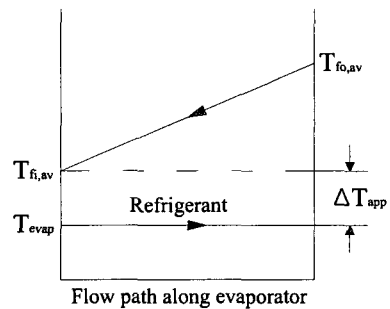


Fig. 4 Temperature profile in the evaporator (Superheat and pressure drop of refrigerant are neglected).

식(10)의 표현은 단순하면서도 실제로 지열원 열펌프의 성능평가에서 주요 역할을 수행한 바 있으며^(7,8) 본 연구에서도 이 식을 이용하고자 한다.

Fig. 4에 의하면 증발온도 T_{evap} 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$T_{evap} = T_{fi,av} - \Delta T_{app} \quad (11)$$

여기서 접근온도 ΔT_{app} 는 4°C로 가정한다. 또한 응축온도 T_{con} 은 50°C의 온수생산을 고려하여 54°C(327.15 K)로 고정한다.

5. 성능해석

Figs. 5, 6는 지중온도 $T_o=15^\circ\text{C}$, 보어홀 전열저항 $R_b=0.2\text{ K/(W/m)}$ 에서 작성된 그림들이다. 지중온도 15°C는 국내에서 흔히 발견되는 값이며, 보어홀 전열저항은 대부분 0.1~0.3 K/(W/m)의 범위에 있어⁽⁵⁾ 0.2 K/(W/m)를 평균값으로 볼 수 있기에 여기서는 이 두 값을 기준으로 하였고 이 값들의 변화에 따른 영향은 Figs. 7, 8에서 검토하였다. Fig. 5는 식(10)으로 표현된 열펌프의

성능계수(COPH)가 비채열율(Q/L)에 따라 어떻게 변하는지를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 비채열율을 높이면 성능계수는 급격히 감소되어 나간다. 에너지 이용의 타당성 관점에서 합리적 열펌프의 성능계수를 3으로 본다면 그림에서 보는 바와 같이 비채열율을 25 W/m 이하로 제한하는 것이 바람직하다. Fig. 6에서는 k값에 따른 성능계수의 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 k값의 성능계수에 미치는 영향은 적지 않으며 비채열율이 높을수록 그 영향은 커짐을 알 수 있다. 특히 k값이 2 W/mK 이하로 낮은 경우 비채열율 설정 역시 20 W/m 이하로 낮추는 것이 바람직하다. 따라서 지중 토양이 갖는 k값의 정확한 측정은 지중열 시스템 설계시 매우 중요한 요인이 됨을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 지중온도에 따른 COPH의 변화를 검토하였다. 그림에서 보는 바와 같이 지중온도의 영향은 적지 않다. 지중온도는 물론 높을수록 좋으나 낮을 경우 비채열율 역시 상당히 낮추어야 합리적인 성능계수의 확보가 가능하다. 지중온도 10°C 이하에서는 비채열율을 10 W/m 혹은 그 이하로 대폭 감소시킬 필요가 있음을 이 그림에서 알 수 있다.

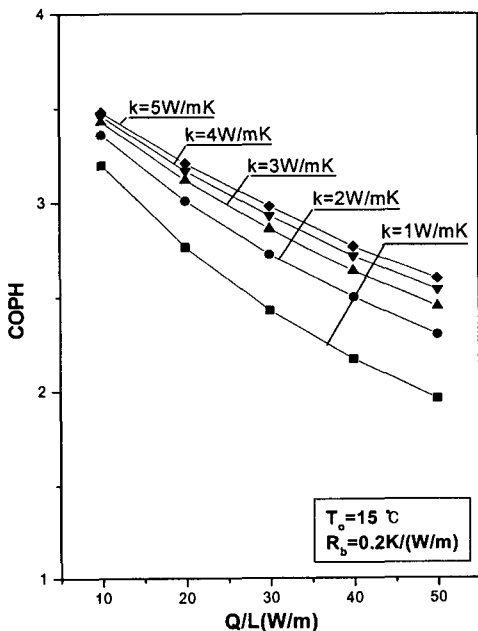


Fig. 5 COPH vs. Q/L.

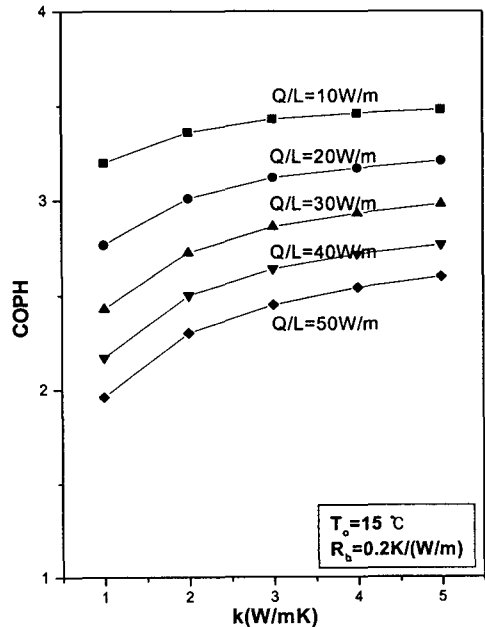


Fig. 6 COPH vs. k.

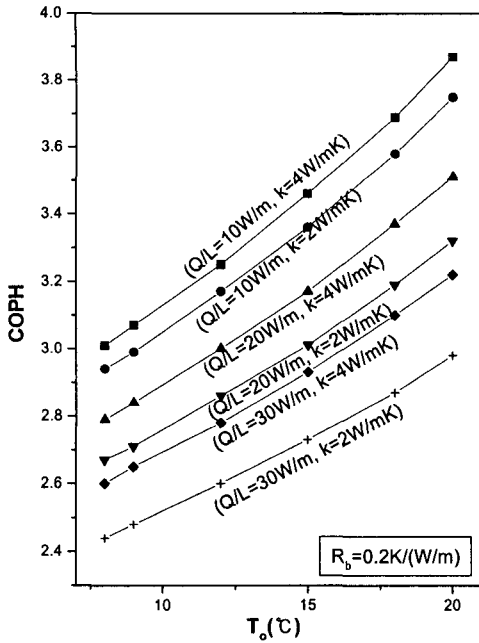


Fig. 7 COPH vs. T_o .

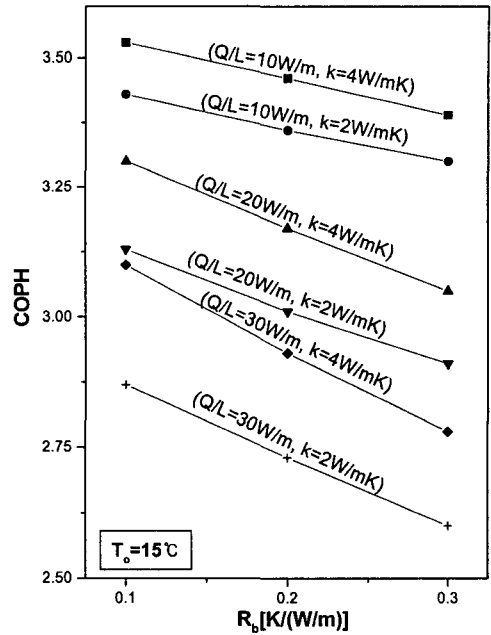


Fig. 8 COPH vs. R_b .

Fig. 8에서는 보어홀 전열저항의 COPH에 미치는 영향을 검토하였다. 그림에서 보는 바와 같이 비채열률이 낮을 경우 R_b 의 영향은 크지 않으나 비채열률이 높아질수록 R_b 의 영향은 커진다. 따라서 지중채열률이 높을수록 R_b 값을 최소화하는 보어홀 설계는 중요해진다.

6. 결론

지중열원 열펌프 난방설비는 공기열원에 비하여 성능이 우수하나 보어홀 설비에 소요되는 초기 투자비가 높은 것이 결점이다. 보어홀 설치비를 줄이기 위해서는 지중채열률을 높여야 하나 이 경우 열펌프의 성능이 감소됨을 고려해야 한다. 본 연구에서는 비채열률과 지중 토양의 열전도도, 그리고 지중온도와 보어홀 전열저항의 열펌프 성능계수에 미치는 영향을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 특히 비채열률은 성능계수에 가장 큰 영향을 미치며 따라서 적절한 비채열률의 설정이 매우 중요하다. 비채열률 25 W/m 이상에서는 합리적인 열펌프 성능계수 ($COPH=3$)를 기대하기 쉽지 않다.

(2) 지중온도 10°C 이하의 경우에는 비채열률을 10 W/m 이하로 충분히 감소시키는 것이 바람직하다.

(3) 비채열률이 20 W/m 이상이 되면 R_b 의 영향이 급격히 커지므로 R_b 값을 최소화하는 보어홀 설계는 매우 중요해진다.

본 연구에서는 $L=100$ m로 고정하였으나 보어홀 길이가 다르더라도 본 연구의 결과는 큰 오차 없이 적용이 가능하다. 또한 본 연구의 결과는 열펌프 시스템의 정상가동이라는 이상화된 조건에서 얻어진 것이나 실제 지중열 난방설비에서는 부하제어 등에 따른 손실, 순환수 펌프 및 fan 동력 등을 고려해야 하며, 따라서 열펌프의 난방기간중 총성능계수인 계간성능계수(seasonal performance factor in heating)는 본 연구의 결과보다 더욱 낮아질 수 있다.

참고문헌

- Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, ASHVE Transactions, Vol. 47, pp. 119-122.

2. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford.
3. Eklof, C. and Gehlin, S., 1996, TED-A Mobile Equipment for Thermal Response Test, Master's Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
4. Claesson J. and Eskilson P., 1988, Conductive heat extraction to a deep borehole: Thermal analysis and dimensioning rules, Energy, Vol. 13, No. 6, pp. 509-527.
5. Kavanaugh, S. P., 2000, Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Fields Tests, ASHRAE 1118-TRP.
6. Reistad, G. M. and Means, P., 1980, Unitary water-source heat pumps for geothermal applications: Availability, performance and design, Geothermal Resources Council, Transactions, Vol. 4, pp. 601-604.
7. Reistad, G. M., Yao, B. and Gunderson, M., 1978, A thermodynamic study of heating with geothermal energy, ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 100, pp. 503-510.
8. Lee, S. K. and Reistad, G. M., 1985, Thermodynamic analysis of geothermal energy systems with forced recovery from aquifers, ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 107, pp. 113-121.