

수직형 U자 관 지중 열교환기를 갖는 지열원 열펌프의 동적 시뮬레이션

이 명 태, 김 영 일*, 강 병 하**

국민대학교 대학원, *서울산업대학교 건축학부, **국민대학교 기계·자동차 공학부

Dynamic Simulation of Ground Source Heat Pump with a Vertical U-tube Ground Heat Exchanger

Myung Taek Lee, Youngil Kim*, Byung Ha Kang**

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*School of Architecture, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

**School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received January 12, 2006; revision received March 15, 2007)

ABSTRACT: GHX (Geothermal Heat Exchanger) design which determines the performance and initial cost is the most important factor in ground source heat pump system. Performance of GHX is strongly dependent on the thermal resistance of soil, grout and pipe. In general, GHX design is based on the static simulation program. In this study, dynamic simulation has been performed to analyze the variation of system performance for various GHX parameters. Line-source theory has been applied to calculate the variation of ground temperature. The averaged weather data measured during a 10-year period (1991~2000) in Seoul is used to calculate cooling and heating loads of a building with a floor area of 100 m². The simulation results indicate that thermal properties of borehole play significant effect on the overall performance. Change of grout thermal conductivity from 0.4 to 3.0 W/(m°C) increases COP of heating by 9.4% and cooling by 17%. Change of soil thermal conductivity from 1.5 to 4.0 W/(m°C) increases COP of heating by 13.3% and cooling by 4.4%. Change of GHX length from 100 to 200m increases COP of heating by 10.6% and cooling by 10.2%. To study long term performance, dynamic simulation has been conducted for a 20-year period and the result showed that soil temperature decreases by 1°C, heating COP decreases by 2.7% and cooling COP decreases by 1.4%.

Key words: Geothermal heat exchanger(지열열교환기), Ground source heat pump(지열원 열펌프), Borehole(보어홀), Dynamic simulation(동적 시뮬레이션)

기 호 설 명

D : 직경 [m]

k : 열전도율 [W/m°C]

Q : 열량 [W]

Q : 단위 길이당 열량 [W/m]

r : 반경 [m]

T : 온도 [°C]

t : 시간 [s]

W : 동력 [W]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

그리스 문자

α : 열확산계수 [m^2/sec]
 β : 적분인자

하첨자

c : 응축기
 comp: 압축기
 e : 증발기; 유효
 g : 지중
 i, o : 내경, 외경
 p : 순환펌프

1. 서 론

일반적으로 지열원 열펌프 시스템은 기존의 냉난방 시스템과 비교할 때 수명이 길고 소음이 적으며 지구온난화의 원인이라 할 수 있는 이산화탄소의 배출이 적다. 또한 다른 대체에너지와 비교하여 냉·난방에 사용되는 에너지 비용과 보수, 유지비용이 적어 에너지 효율 측면에서 우수한 성능을 보이기 때문에 많은 각광을 받고 있다. 하지만 국내의 경우에는 최근에 도입되고 있는 시스템이기 때문에 이에 대한 인식과 설치 업체, 장비, 기술 등이 모두 열악한 상태이다. 또한 시스템의 핵심이라 할 수 있는 지중열교환기에 대한 기술과 정보를 외국에서 그대로 도입하고 있기 때문에 우리나라의 환경과 지질에 적합한 지중열교환기에 대한 연구가 필요한 실정이다.

Yavuzturk and Spitler⁽¹⁾는 라인소스이론을 이용하여 지중열교환기를 설계, 1시간 단위로 지중 온도와 건물 부하를 계산하여 시스템 성능을 분석하는 연구를 수행하였고, Yavuzturk and Chiasson⁽²⁾은 지중(ground) 열원 열펌프와 지하수 열원 열펌프를 대상으로 동적 시뮬레이션을 이용한 성능 분석 연구를 수행하였다. Bernier⁽³⁾는 실린더소스이론을 이용하여 지중열교환기를 설계한 후 동적 시스템 시뮬레이션을 수행하였다. 하지만 이들 연구는 대부분 지열원 시스템 각각을 구분하여 성능을 분석하였기 때문에 시스템 구성요소 변화에 따른 시스템의 성능변화에 대한 연구가 부족한 실정이다. 더욱이 국내의 경우에는 아직 지중열교환기의 구성요소인 그라우트, 파이프 등의 재료

에 대한 기준이 정해져 있지 않기 때문에 이들의 열적특성 변화에 따른 시스템의 성능변화에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내 환경에 맞는 기상청에서 측정한 1991~2000년도의 서울지역 기상 데이터를 이용⁽⁴⁾하여, 지열원 열펌프 시스템 중에서 우리나라에 적합하고, 현재 많이 보급되고 있는 수직형 U자 관 지중열교환기를 갖는 열펌프 시스템을 대상으로 보어홀 구성요소인 토양(지중의 대부분은 암석으로 이루어져 있지만 본 논문에서는 지중 구성 물질을 토양으로 표기하였다.), 그라우트, 관의 열전도율과 지열열교환기의 길이 변화에 따른 시스템 성능 변화를 시뮬레이션을 통해 비교, 분석하였다. 시뮬레이션을 위해 시스템을 크게 지중열교환기, 건물, 열펌프로 나누었으며, 이에 대해 각각 모델링을 수행하였다. 시뮬레이션은 TRNSYS 프로그램을 사용하여 6분(360 sec) 간격으로 1년간 수행하면서, 지중의 온도(보어홀 벽면의 온도), 열펌프의 EFT(Entering fluid temperature), 시스템 성능 변화를 분석하였다. 또한 시스템을 20년 동안 운전한다고 가정하여 이 기간 동안의 지중온도, EFT 및 시스템의 성능 변화를 시뮬레이션하였다.

2. 시스템 구성요소 모델링

2.1 지중열교환기

Ingersoll et al.⁽⁵⁾은 Kelvin의 라인소스 이론을 이용하여 지중온도변화를 계산하는 모델을 제안하였다. 수직형 U자 관 지중열교환기의 경우 일반적으로 U자 관의 간격이 좁고, 길이가 길기 때문에 본 연구에서는 라인소스 이론을 사용하여 지중의 온도변화를 계산하였다. 지중의 물성치(열전도율, 밀도, 비열 등)가 일정하며 무한한 길이의 라인소스를 통해 투입되는 열량이 일정하다고 가정하면 지중 온도변화는 식(1)~식(3)을 이용하여 계산할 수 있다.^(5,6)

$$\Delta T = \frac{Q'}{2\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{Q'}{2\pi k} I(X) \quad (1)$$

$$X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (2)$$

$$I(X) = \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (3)$$

라인소스 이론을 이용한 지중온도변화 해석 모델을 이용할 경우, $at/r^2 > 20$ 인 영역에서 지중온도변화 예측 값이 약 0.2%의 오차를 보일 정도로 비교적 정확한 값을 갖는다고 알려져 있다.⁽³⁾ 식(3)의 $I(X)$ 는 시간에 따른 지중온도변화의 정도를 나타낸다.

2.2 건물

모사에 사용된 건물의 실내 공간은 100 m²(30 평)이며, 구조는 Fig. 1에 나타내었다.⁽⁴⁾ 부하 계산은 TRNSYS의 보조 프로그램인 PreBid⁽⁷⁾를 사용하여 아래의 가정에 의해 계산하였다.

- (1) 총괄열전달계수는 지붕 0.594 W/m²°C, 벽체 0.542 W/m²°C, 바닥 0.560 W/m²°C로 국내의 기준 조건과 유사한 값을 갖는다.
- (2) 환기횟수는 시간 당 0.6회이며, 외기와 일사량만의 영향을 고려하기 위하여 내부 부하가 없는 것으로 가정한다.
- (3) 실내온도 설정 조건으로는 겨울철 20°C, 여름철 24°C, 온도편차 1°C로 한다.
- (4) 기상데이터는 1991년부터 2000년까지 10년 동안 기상청에서 측정한 서울의 기상 데이터를 연중 평균하여 시간단위(1 hr)로 사용하였다.

2.3 열펌프

열펌프는 증발온도와 응축온도에 따른 용량과 동력에 대해 실제 실험데이터를 이용하여 식(4)~식(7)의 상관식을 이용하여 모델링 하였으며, 계수 $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ 는 Kim⁽⁴⁾의 값을 이용하였다. 열펌프의 실내측은 공랭식이며 순환펌프동력은 열펌프

동력의 10% 값을 갖는다고 가정하였다.

$$Q = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 A_{i,j} T_e^i T_c^j \tag{4}$$

$$W_{comp} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 B_{i,j} T_e^i T_c^j \tag{5}$$

$$COP_H = \frac{Q_c}{W_{comp} + W_p} \tag{6}$$

$$COP_C = \frac{Q_e}{W_{comp} + W_p} \tag{7}$$

2.4 시뮬레이션 조건

보어홀 구성 요소 각각의 열저항은 식(8)~식(10)로 표현되며,⁽²⁾ 수직형 U자 관 지중열교환기의 경우 식(11)과 같이 유효 관 직경(equivalent pipe diameter)으로 계산하였다. 여기서 D_o 는 관 직경, D_{oe} 는 관의 유효 직경, n 은 관의 수이다. Fig. 2는 단일, 이중 U자 관을 유효 관 직경으로 계산한 예를 나타낸다.

실제 U자 관의 경우에는 Fig. 2와 같이 각 관이 접해있지 않다. 그러나 지중열교환기 길이에 비해 관의 간격은 무시할 만큼 작기 때문에 유효 관 직경에 의한 계산은 유효하다고 할 수 있으며, 실제로 이러한 계산 방식은 지중열교환기의 설계에 많이 이용되고 있다.

$$R_{soil} = I(X)/2\pi k_{soil} \tag{8}$$

$$R_{pipe} = \frac{1}{2\pi k_{pipe}} \ln \left(\frac{D_{oe}}{D_o - D_i} \right) \tag{9}$$

$$R_{grout} = \frac{1}{2\pi k_{grout}} \ln \left(\frac{D_{bore}}{D_{oe}} \right) \tag{10}$$

$$D_{oe} = \sqrt{n} D_o \tag{11}$$

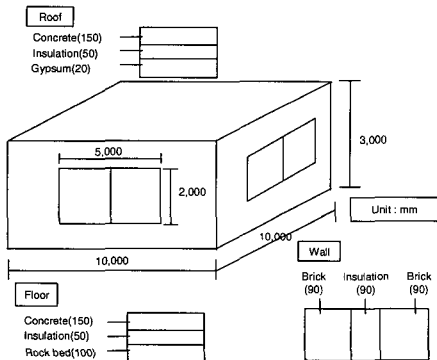


Fig. 1 Structure of the model building.

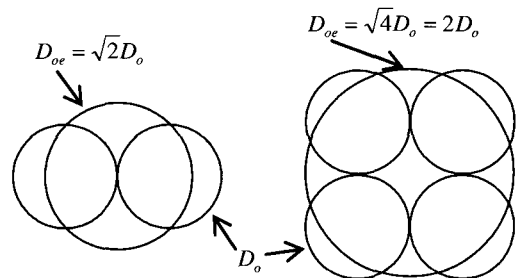


Fig. 2 Equivalent pipe diameter.

시뮬레이션을 위한 지중열교환기와 지중의 조건은 다음과 같다.

Undisturbed earth temperature : 13°C

Hole diameter : $D = 127$ mm

Soil : $k_{soil} = 1.5 \sim 4.0$ W/m°C

Pipe : $D_i = 25.4$ mm, $D_o = 28.4$ mm

$k_{pipe} = 0.4 \sim 3.0$ W/m°C

Grout : $k_{grout} = 0.4 \sim 3.0$ W/m°C

Length of borehole : 100~200 m

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 열펌프 성능

Fig. 3은 겨울철 20°C, 여름철 24°C의 실내온도를 유지하기 위해 열펌프에서 공급한 시간당 열량을 계산한 결과이다. 난방의 경우, U자 관 내의 작동유체가 지중으로부터 열을 흡수하기 때문에 지중 온도가 감소한다. 열원의 온도가 감소하면 열펌프의 능력은 감소한다. EFT 온도가 6°C 일 때 EFT 온도를 1°C 상승시키면 난방 COP는 2.5% 상승한다. 난방 후반기에는 부하가 감소하면서 지중온도의 회복이 빨라져 열펌프의 능력이 다시 증가한다. 냉방의 경우에는 지중으로 열을 방출한다는 것과 열펌프의 작동시간, 능력의 차이만 있을 뿐, 난방과 같은 경향을 보인다.

3.2 보어홀 구성 요소 변화에 따른 시스템의 성능 변화

Fig. 4는 토양, 그라우트, 관의 열전도율이 각

각 3.0, 2.0, 0.8 W/m°C이고 지중열교환기의 길이가 150 m인 시스템의 시뮬레이션 결과이다.

실내온도를 유지할 위해 열펌프가 작동하고 이에 따라 지중으로 열이 유·출입되며 지중온도, EFT가 각각 변화하는 것을 볼 수 있다. 이 조건들을 기준으로 각각의 구성요소(보어홀 구성요소들의 열전도율, 지중열교환기 길이)들을 하나씩 변화시키며 시스템 성능 변화 시뮬레이션을 수행하였다.

국내의 일반 주거건물의 경우, 난방 부하가 냉방 부하보다 상대적으로 크며, 공기 열원인 경우 겨울철 실외기 부분에 착상이 일어나는 등 많은 문제점이 주로 난방기간에 일어나기 때문에 지중과 EFT의 온도변화는 난방기간만 표기하였으며, 시스템의 성능은 냉난방 모두 표기하였다.

3.2.1 그라우트 열전도율의 영향

Fig. 5는 그라우트 열전도율 변화에 따른 지중온도, EFT, 시스템 COP의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 열전도율이 0.4에서 3.0 W/m°C로 변할 경우 시스템의 성능이 난방 9.4%, 냉방 17%가 상승하였다.

본 연구에서는 U자 관 안의 작동유체로 물을 사용했기 때문에 동파를 방지해야 하는데, 혹한기인 1월 4일~2월 10일 동안에도 최소 EFT는 0°C 이상으로 유지됨을 알 수 있다. 그라우트의 열전도율이 커질수록 보어홀 열저항은 작아지므로 지중과 보어홀의 열전달량이 증가하게 된다. 따라서 지중의 온도는 그라우트의 열전도율이 커질수록 감소하고 EFT의 온도는 증가하게 된다. 그러나 그라우트의 열전도율 증가에 따른 지중의 온도와 EFT의 변화량은 줄어드는 것을 볼 수 있는

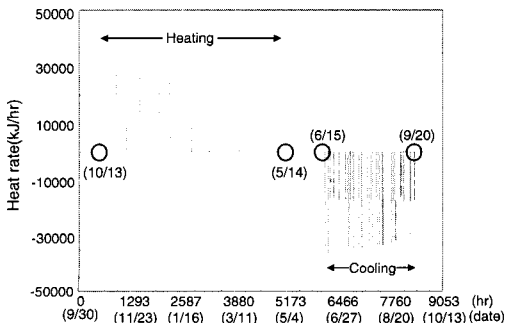


Fig. 3 Heat pump capacity.

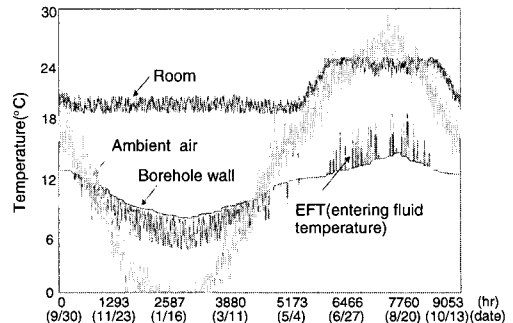
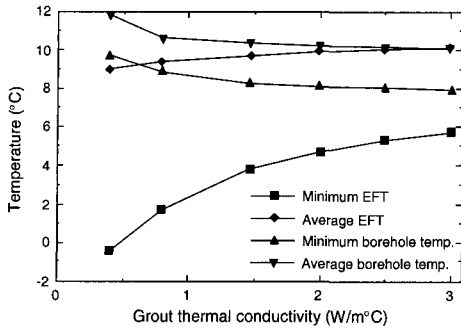
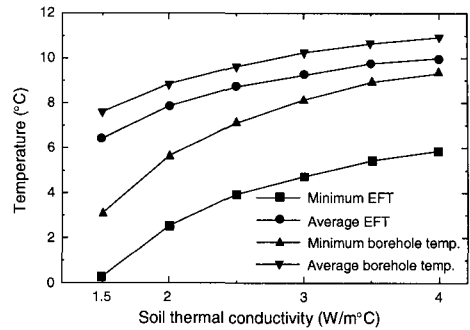


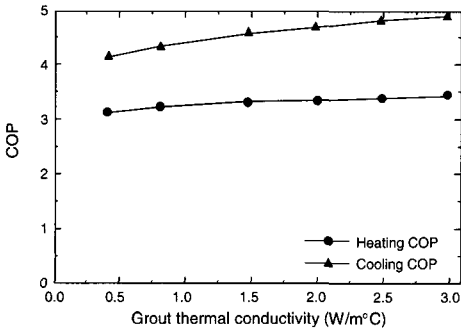
Fig. 4 Yearly temperature variation.



(a) Variation of EFT and ground temperature during heating season

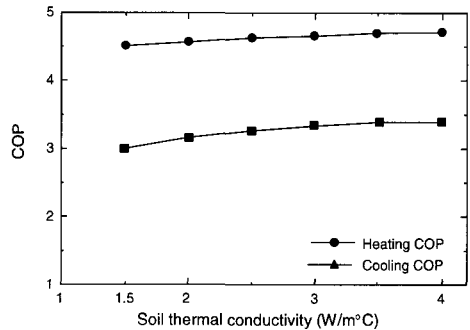


(a) Variation of EFT and ground temperature during heating season



(b) Variation of COP

Fig. 5 Effect of grout thermal conductivity.



(b) The variation of COP

Fig. 7 Effect of soil thermal conductivity.

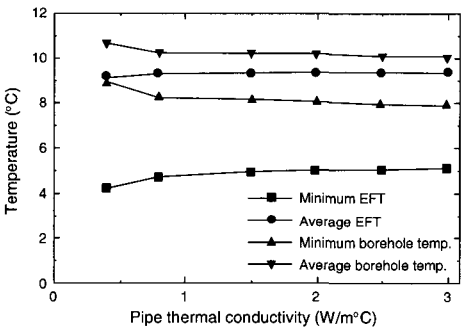


Fig. 6 Effect of pipe thermal conductivity.

데 이는 지중으로부터 공급받을 수 있는 열량이 지중의 열적 특성에 의해 제한되기 때문이다.

3.2.2 관 열전도율의 영향

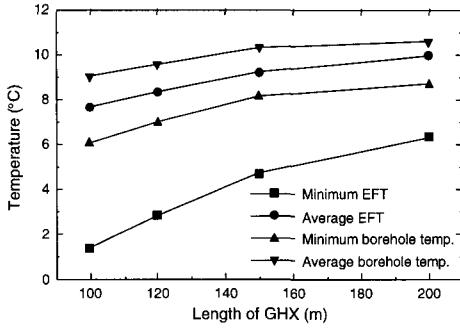
전체 보어홀 열저항에서 관이 차지하는 부분은 상대적으로 작기 때문에 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 관의 열전도율이 지중의 온도와 EFT에 미치

는 영향이 적은 것을 알 수 있다.

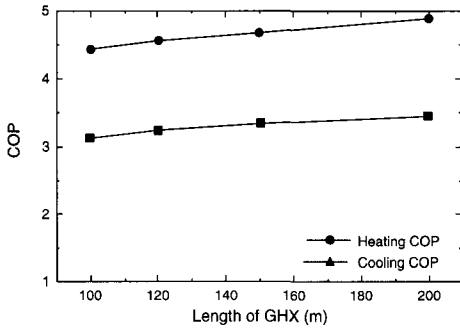
현재 일반적으로 수직형 U자 관 지중열교환기에서 많이 사용되는 것은 HDPE(High-Density PolyEthylene)이며, 열전도율은 약 0.4 W/m²C이다. 하지만 시뮬레이션 결과 0.8 W/m²C 이상일 경우에, EFT가 약간 증가하였다.

3.2.3 토양 열전도율의 영향

Fig. 7은 토양의 열전도율 변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 토양의 열전도율이 증가함에 따라 지중 온도, EFT가 증가하고, 시스템의 성능이 향상되는데, 이는 토양의 열전도율이 높을수록 주위로부터 빼앗긴 열에 대해 회복이 빨리 일어나기 때문이다. 열전도율을 1.5에서 4.0 W/m²C로 변화시키면 난방 13.3%, 냉방 4.4%의 성능이 상승하였다. 토양은 그라우트나 관과 달리 재료에 의한 선택이 아니라 지반 구성 성분에 의해 결정되며 토양의 수분흡수율, 지하수 유동에 의한 대류열전달 영향 등에 의해 달라진다.



(a) The variation of EFT and ground temperature during heating season



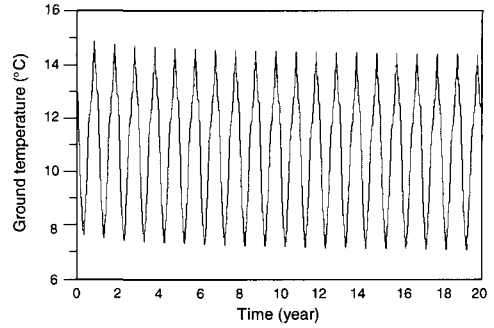
(b) The variation of COP

Fig. 8 Effect of length of GHX.

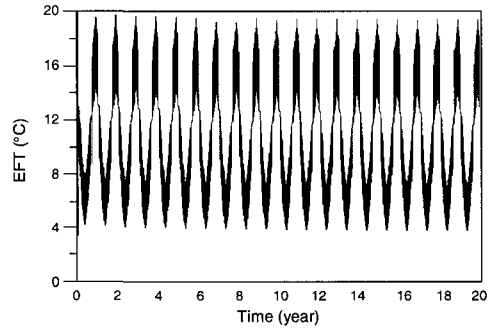
토양의 열적 특성이 유리한 지역은 지중으로 투입/제거되는 열량에 대한 회복이 상대적으로 빠르기 때문에 동일한 시스템 성능에 대한 지중열교환기의 길이를 줄일 수 있으며, 그라우트 재료의 열전도율 대한 선정의 폭이 넓어진다.

3.2.4 지중열교환기 길이의 영향

Fig. 8은 토양, 그라우트, 관의 열전도율이 각각 3.0, 2.0, 0.8 W/m°C일 때, 지중열교환기의 길이를 변화시키며 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 길이를 100에서 200 m으로 변화시킨 경우 시스템의 성능은 난방 10.6%, 냉방 10.2% 증가하였다. 길이의 변화에 의한 시스템의 성능변화는 토양의 열전도율에 의한 것과 유사하다. 이것은 지중열교환기가 길어질수록 지중으로부터 받을 수 있는 열량이 많아지기 때문이다. 본 지열원 열펌프에서는 열매체로 물을 사용하므로 동파를 방지하기



(a) Yearly ground temperature variation in Seoul



(b) Yearly EFT variation in Seoul

Fig. 9 Yearly variation of ground temperature and EFT in Seoul.

위하여 EFT 온도가 0°C 이상으로 유지되어야 한다. Fig. 8(a)에서 100 m 열교환기에 대한 해석 결과를 보면, 최소 EFT는 1.3°C로 이 조건을 만족시키며, 실내 온도도 설정 범위를 만족시킨다. 따라서 30평형의 건물의 경우 100 m 열교환기로도 충분히 난방 시스템을 운전할 수 있다.

3.3 20년간 시뮬레이션 결과

Fig. 9는 서울의 기상데이터를 적용한 지열원 시스템의 지중 온도와 EFT에 대한 20년 동안의 시뮬레이션 결과이다. 냉·난방의 부하가 서로 다른 경우, 지중 온도는 연간 상승 또는 감소하게 된다. Yavuzturk and Chiasson⁽²⁾은 20년간 지열원 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 냉방 부하가 난방보다 큰 Tulsa, Oklahoma 지역의 경우 연간 지중 온도가 상승하였다. 그리

나 서울의 경우의 지중 온도는 20년 경과 후 약 1°C 감소하였고, EFT는 거의 변화가 없었다. 이는 우리나라의 경우, 냉방 및 난방 부하가 적은 봄과 가을의 중간기가 있어 지중온도의 회복기간이 있기 때문이다. 20년 경과 후 시스템의 성능은 난방 2.7%, 냉방 1.4% 감소하였다.

4. 결 론

보어홀 구성요소의 열전도율과 지중열교환기의 길이 변화 그리고 20년간 시스템의 시뮬레이션을 수행하면서 EFT, 지중온도, COP의 변화에 대해 규명하였다.

그라우트는 관내 작동유체와 지중과의 열전달률을 결정하는 매개체이기 때문에 EFT 변화에 미치는 영향이 가장 크다. 열전도율이 0.4~3.0 W/m°C로 변할 경우 시스템의 성능이 난방시 9.4%, 냉방시 17% 상승하였다. 관의 두께는 1.5 mm로 매우 작아 관의 열저항은 전체 보어홀 열저항과 비교하여 상대적으로 작기 때문에 시스템에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 따라서 관에 대한 설계는 재료의 열적 특성보다는 관의 재질과 작동유체유동에 의한 순환펌프 동력과 열저항 변화에 중점을 두어야 할 것이다.

토양의 열전도율은 지중의 온도변화에 대한 회복시간을 결정하는 요소이기 때문에 지중열교환기 매설지역에 대한 사전의 열적 특성 파악을 통해 그 길이를 결정해야 한다. 열전도율을 1.5에서 4.0 W/m°C로 증가시키 시뮬레이션을 실행한 결과 난방 13.3%, 냉방 4.4%의 성능이 상승하였다. 지중열교환기의 길이를 100에서 200 m으로 증가시키면 난방 10.6%, 냉방 10.2% 성능이 증가하였다. 토양, 그라우트, 관의 열전도율이 각각 3.0, 2.0, 0.8 W/m°C이고 지중열교환기의 길이가 150 m인 시스템에 대해 20년간 시뮬레이션을 수행한 결과 지중의 온도는 약 1°C 감소하였으며, EFT의 변화는 거의 없었다. 20년 경과 후 시스템의 성능은 난방 2.7%, 냉방 1.4% 감소하였다.

본 연구에서는 직접 실험을 수행하면 너무 많은 경비와 시간이 소요되는 지열원 열펌프 시스템을 모델링을 통한 시뮬레이션으로서 결과를 예측하였다. 시뮬레이션 결과의 경향과 물리적 해석에 오류가 없다고 판단되므로, 본 연구는 유사한 지열원 열펌프 시스템에 대하여 실험을 수행하지 않고 결과를 예측할 수 있는 기법을 제시하고 있다.

참고문헌

1. Yavuzturk, C. and Spitler, J. D., 1999, A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers, ASHRAE Transaction, Vol. 105, No. 2, pp. 475-485.
2. Yavuzturk, C. and Chiasson, A. D., 2001, Performance analysis of U-tube, concentric tube and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach, ASHRAE Transaction, Vol. 108, No. 1, pp. 925-938.
3. Bernier, M. A., 2003, Ground-coupled heat pump system simulation, ASHRAE Transaction, Vol. 107, No. 1, pp. 605-616.
4. Kim, Y., 2003, Simulation of air/geothermal /ground water source heat pump, KARSE Journal, Vol. 20, No. 7, pp. 92-100.
5. Ingersoll, L. R., et al., 1954, Theory of earth heat exchangers for the heat pump, heating, piping and air conditioning, 22 : 5 (May), Design/Data Manual for Closed-Loop, Ground-Coupled Heat Pump Systems by Bose, J. E., et al., ASHRAE.
6. Jang, Y. S., 2003, Geothermal heat exchanger, KARSE Journal, Vol. 20, No. 7, pp. 101-108.
7. Solar Energy Laboratory, 2004, TRNSYS Reference Manual, University of Wisconsin at Madison.