

지중열 이동 시뮬레이션을 이용한 수평형 지열시스템의 채열성능 예측

Prediction of the Heat Exchange Rate for a Horizontal Ground Heat Pump System Using a Ground Heat Transfer Simulation

남유진(Yujin Nam)[†], 채호병(Ho-Byung Chae)

청주대학교 건축공학과

Department of Architecture Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Republic of Korea

(Received February 14, 2013; revision received March 15, 2013)

Abstract The ground source heat pump (GSHP) system has attracted attention, because of its stability of heat production, and the high efficiency of the system. However, there are few studies on the prediction method of the heat exchange rate for a horizontal GSHP system. In this research, in order to predict the performance of a horizontal GSHP system, coupled simulation with a ground heat transfer model and a heat exchanger circulation model was developed, and calculation of heat exchange rate was conducted by the developed tool. In order to optimally design the horizontal GSHP system, the flow rate of circulation water, and the depth and buried spaces of heat exchangers were considered by the case study. As a result, the temperature of circulation water and the heat exchange rate of the system were calculated in each case.

Key words Ground source heat pump(지열 히트 펌프), Numerical simulation(수치 시뮬레이션), Case study(케이스 스터디), Horizontal heat exchanger(수평형 열교환기)

[†] Corresponding author, E-mail: namyujin@cju.ac.kr

기호설명

T	: 순환수 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
U	: 유속 [m/s]
P	: 유량 [L/s]
C	: 비열 [$\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$]
A	: 면적 [m^2]
h	: 순환수의 대류열 전달률 [$\text{J/sm}^2^{\circ}\text{C}$]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

연중 일정한 온도를 유지하는 지중 항온 특성을 이용하는 지열 냉난방 시스템은 최근 친환경 건축에 있어 고효율 에너지 절약형 기술로 큰 주목을 받고 있다. 이러한 지열 시스템은 지중 열교환 방식에 따라, 크게 밀폐형과 개방형으로 나뉘고 밀폐형은 다시 수직형과 수평형으로 분류된다. 그 중 국내에는 수직밀폐형과 반개방형(Semi-open)으로 불리는 SCW(Standing Column Well)

형이 주로 적용되어 있다. 하지만 일반적으로 이용되고 있는 수직 밀폐형 지열시스템은 지하 100 m 이상 천공을 하여야 하기 때문에 초기 굴삭 비용 및 공사기간에 대한 부담이 있으며, 이로 인해 지열 시스템이 높은 효율을 얻을 수 있는 기술임에도 획기적인 보급에는 이르지 못하고 있다. 한편, 수평형 지열시스템은 넓은 부지만 확보된다면 별도의 천공 없이 설치가 가능하여 학교 시설이나 지하 주차장 등의 효율적 활용이 가능할 것이다. 하지만, 국내외 연구 및 기술개발에서는 수직형이나 개방형 시스템 관련이 대부분이며, 수평형 시스템의 채열량 분석 및 설계에 관한 연구는 드물다. 국내에서는 Sohn⁽¹⁾이 수평형 지중열교환기의 뒤채움제인 토양의 열전도도 측정 결과와 기존 예측 모델에 의한 결과를 비교하였고, Park et al.⁽²⁾는 비닐하우스 온실에 수평형 지열원 히트펌프 시스템을 적용한 난방 실험을 실시하였다. 국외에서는 Tarnawski et al.⁽³⁾는 주거공간 및 농장시설에 수평형 지중열교환기의 적용가능성과 채열 성능평가를 시뮬레이션을 통해 수행

하였고, Inalli et al.⁽⁴⁾는 지중열교환기의 트렌치 깊이와 순환수 유량 설계법을 개발하기 위해 실증 실험을 통해 다양한 케이스의 열교환 성능을 평가하였다. 그러나 수평형 지열시스템에 필요한 단위 길이당 열교환량을 파악하기 어렵고, 설치간격이나 깊이에 따른 성능 변화에 대한 고려가 되어 있지 않아 실제 설계에 어려움이 있다.

수평형 지열시스템의 최적설계를 위해서는 사전에 토양으로부터 채열할 수 있는 열량을 정확하게 파악하는 것이 필요하고, 이를 위해서는 지표면 열이동에 대한 지중온도 변화와 순환수와 지중열교환기간의 열이동, 지중열교환기와 토양간의 열이동을 동시에 해석해야 한다. 따라서 본 연구에서는 수평형 지열시스템의 지중채열량 예측을 위해, 지중열 이동해석 모델과 열교환기 순환수 모델을 조합한 시뮬레이션 수법을 구축하고 장기 채열량 예측을 실시하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션의 개요와 해석결과에 대해 설명한다.

2. 수평형 시스템의 지중 채열량 해석개요

일반적인 수직형 지열시스템은 지하 150 m 이상 천공하여 일정한 온도의 지중열원을 이용할 수 있으나, 수평형 지열시스템은 3~5 m 깊이에서 열교환이 이루어지므로 외기온, 일사량 등에 영향을 받는다. Fig. 1은 수평형 지열시스템과 지표면 열교환 메카니즘의 개요를 나타낸다. 본 연구에서는 태양으로부터의 장파복사(R_{sky}) 및 단파복사(R_{sol}), 지표면 장파복사(R_{surf}), 잠열이동(L_{surf}) 및 대류열전달(H_{surf})의 지표면 열이동과 수평형 지중열교환기와 지중 토양의 열이동을 동시에 해석하는 모델을 개발하였다. 수평형 지열시스템은 지표면으로부터의 열이동에 의해 지중열교환기의 채열 및 방열에 대한 효율은 상대적으로 낮으나, 천공비용 및 설치비용은 절감할 수 있는 이점을 가지고 있다. 한편, Fig. 2는 수평형 지열시스템의 다양한 설치 형태⁽⁵⁾를 나타낸다. 수평형 시스템은 트렌치의 깊이, 폭, 간격에 따라 설치 형태가 다양하며, 본 연구에서는 트렌치당 2개의

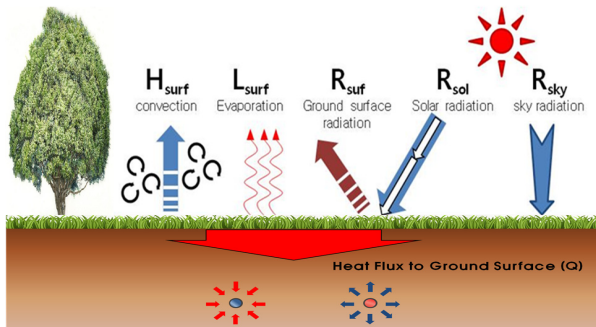


Fig. 1 Surface heat transfer model.

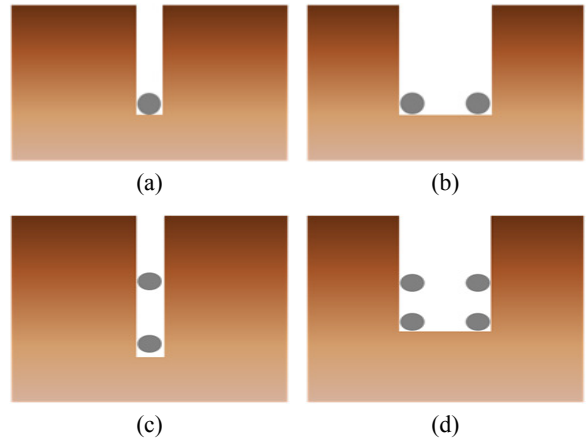


Fig. 2 Horizontal ground loop configurations.⁽⁵⁾

배관(Fig. 2(b))을 대상으로 채열량 예측을 실시한다.

3. 시뮬레이션 개요

3.1 수평형 지중 채열량 예측 모델

본 연구에서는 수평형 지중열교환기와 열교환기 내 순환수와의 열이동을 정확하게 해석하기 위해, 선행연구⁽⁶⁾에서 개발된 연성 시뮬레이션 수법을 응용하여, 수평형 채열량 모델을 구축하였다. 토양내 지중열 및 수분 이동에 대해서는 유한요소법에 근거한 FEFLOW를 이용하였다. 이 코드는 지하수의 흐름이나 토양오염의 해석에 널리 이용되는 해석코드로서, 토양내 고체상, 액체상 기체상의 열, 물질 및 에너지 보존법칙을 모두 만족시키는 모델로 구성되어 있다. 한편 수평형 지중열교환기 모델은 1차원 이류확산방정식에 근거하였고, 열교환기 파이프 내벽과 순환수의 열교환량을 계산하여, 각 지점의 순환수 온도와 지중으로 방출하는 열유량을 동시에 산출하는 비정상 계산을 실시하였다. 식(1)

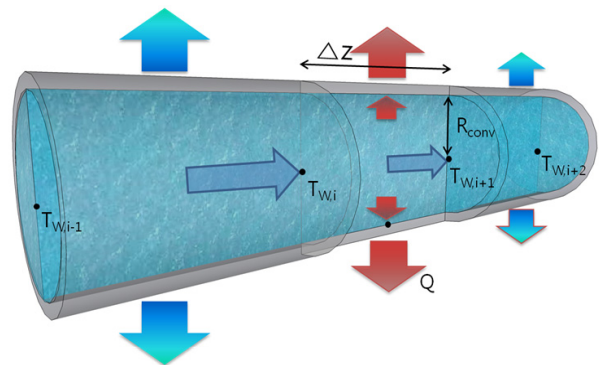


Fig. 3 Ground heat exchanger model.

은 본 해석 모델에서 이용된 순환수 모델의 계산식을 나타낸다. Fig. 3은 수평형 지중열교환기 모델의 개념도를 나타낸다.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = -\frac{\lambda_w}{\rho_w C_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{hP_w}{\rho_w C_w A_w} (T_1 - T_w) \quad (1)$$

또한, 지표면에서 토양의 열플럭스(Q)는 식(2)와 같은 지표면 열평형식에 의해 계산되었다. 본 계산식은 선행연구⁽⁶⁾에서 소개하고 있으므로, 본 논문에서는 상세설명을 생략한다.

$$Q = R_{sol} + R_{sky} - R_{surf} - H_{surf} - L_{surf} \quad (2)$$

3.2 해석 개요

Fig. 4는 수평형 지열시스템의 채열량 예측을 위한 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 기본 케이스의 수평형 열교환 파이프는 0.8 m×100 m×12 m의 영역 내부에 지표면으로부터 깊이 2 m, 간격 0.4 m로 설치되어 동계 채열 및 하계 방열을 하는 것으로 가정하였다. 수평면에서 연속적으로 반복되는 열교환기의 채열성능을 해석하기 위해, 양쪽 측면 경계면을 단열조건으로 하여 무차원화 시켰다. 한편, 정확한 채열량 예측을 위해 Tetra Mesh를 이용한 파이프 형상 재현을 실시하였다. 또한, 모델상부에는 기상데이터를 활용하여 계산된 지표면 열플럭스를 입력하였고, 지중열교환기 외벽에는 순환수

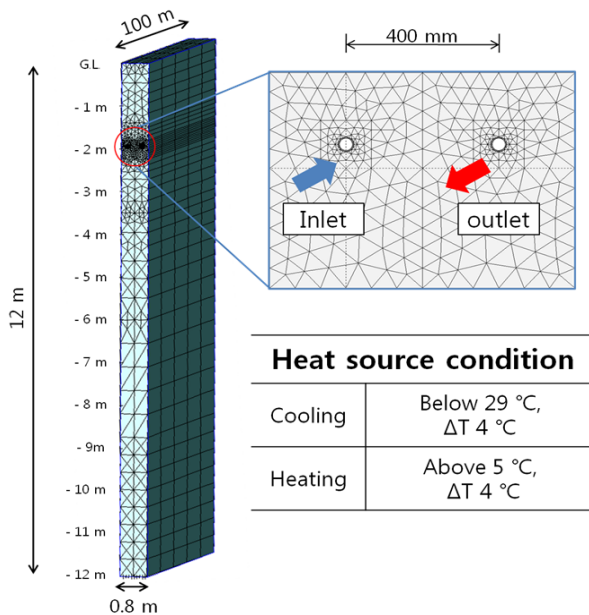


Fig. 4 Prediction simulation model of base case.

Table 1 Simulation condition of base case

Ground heat exchanger	Out Diameter 32 mm Inner Diameter 27 mm
Domain	0.8 m×12 m×100 m
Ground condition	Granite (3.0 W/mK, 0.3%)
Operation	Cooling 6/1~8/31 Heating 12/1~2/28
Initial temp	15 °C

Table 2 The condition of cases

Case	Depth	Width	Flow rate
1	2 m	400 mm	9.5 L/min
2	2 m	400 mm	6.7 L/min
3	2 m	400 mm	11.4 L/min
4	2 m	300 mm	9.5 L/min
5	5 m	300 mm	9.5 L/min

와 토양의 온도차 및 대류열전달율에 의해 계산된 열플럭스를 입력하였다. 파이프 내 순환수의 온도입력 조건으로 출입구 온도차를 4 °C로 설정하고, 지열원이 공기열원에 대한 비교우위를 가지는 온도대를 고려하여, 냉방에서는 29 °C 이하, 난방에서는 5 °C 이상이 되도록 채열 및 방열량에 제한을 두었다.

Table 1은 기본 케이스의 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 초기토양온도는 15 °C, 운전시간은 9 : 00부터 18 : 00까지 운전을 실시하였다. 또한 토양은 화강암(토양 교체 부분 열전도율 : 3.0 W/mK, 공극률 : 0.3%)으로 설정하였다. 본 계산에서는 난방 3개월(12월, 1월, 2월), 냉방 3개월(6월, 7월, 8월)의 장기운전을 실시하여 순환수 출입구의 온도변화를 검토하였다.

한편, 본 연구에서는 순환수의 유량 및 매설 깊이, 파이프 간격에 따른 수평형 시스템의 지중 채열 특성을 분석하기 위해, 각 인자들을 변경한 케이스 스터디를 실시하였다. Table 2는 각 Case의 설정 조건을 나타낸다.

4. 해석결과

4.1 Case 1의 해석결과

Fig. 5는 설치 깊이 2 m, 파이프 간격 400 mm로 설정한 Case 1의 해석 결과로서 난방기간의 지중 열교환기 내 순환수의 출입구 온도 및 채열량 변화를 나타낸다. 순환수 온도는 운전개시와 동시에 지중채열로 인

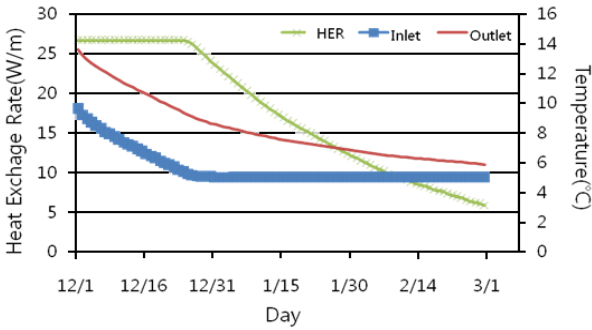


Fig. 5 The change of circulation water temperature and daily heat exchange rate(Heating).

한 지중온도 저하로 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동결방지를 위한 제한온도(5°C) 설정으로 운전개시 약 25일까지는 약 27 W/m의 일정량의 채열이 가능하며, 그 이후에는 지중 채열량(HER)이 점차 감소하는 양상을 확인하였다. Case 1의 전체 난방기간의 결과를 분석한 결과, 기간평균 순환수 출구온도는 8.2°C였고, 채열량은 17.5 W/m로 계산되었다.

Fig. 6는 Case 1의 하계 냉방기간의 지중 열교환기 내 순환수 출입구 온도 및 채열량 변화를 나타낸다. 순환수 온도는 운전개시와 함께 지중 방열로 인한 지

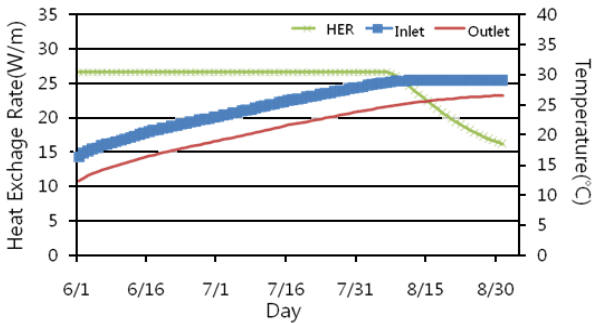


Fig. 6 The change of circulation water temperature and daily heat exchange rate(Cooling).

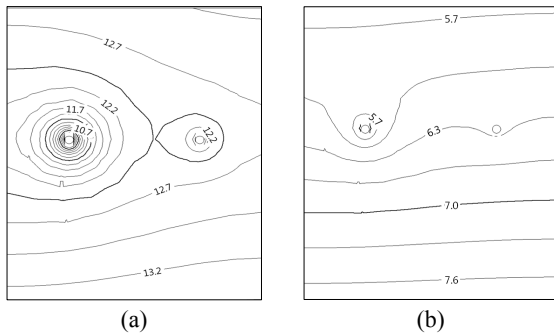


Fig. 7 The change of ground temperature.

중온도 상승의 영향으로 서서히 상승하는 양상을 보였고, 약 70일 이후에 제한온도에 수렴하는 것을 확인했다. 한편, 지중 방열량은 난방채열 시와 동일한 양상으로, 운전개시에는 약 27 W/m의 일정한 방열량을 유지하다가 순환수 온도가 제한온도에 도달하는 순간부터 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하계 방열량 계산결과 기간평균 순환수 출구온도는 21.1°C였고, 채열량은 25.0 W/m로 나타났다.

한편, Fig. 7는 난방채열 시의 지중열교환기 주변 지중 온도분포로서, (a)는 운전 개시 후 10일경과 시의 12시경의 온도분포를, (b)는 운전개시 후 80일 경과 시 12시경의 온도분포를 나타낸다. (a)에서는 파이프와 지중의 온도차가 크게 나타나며 지중채열이 활발하게 진행되고 있으나, 80일이 경과한 (b)에서는 지중열교환기 주변 지중온도가 약 6~7도까지 낮아져있어 상대적으로 적은 채열을 하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 유량 변화에 따른 채열량 변화

Fig. 8과 Fig. 9는 난방 및 냉방 시 유량 변화에 따른 채열량의 변화를 보여준다. 유량이 증가함에 따라 순

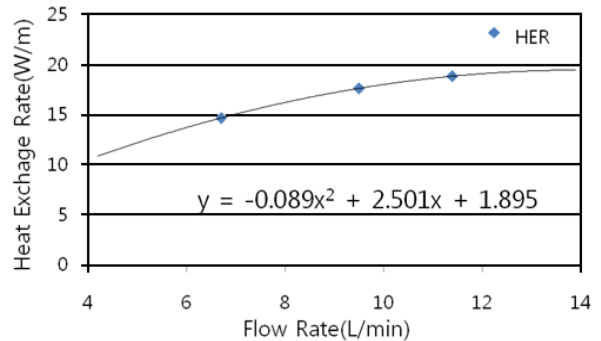


Fig. 8 The change of heat exchange rate according to the flow rate(Heating).

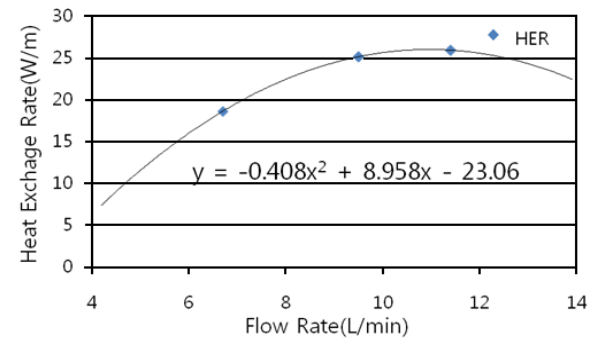


Fig. 9 The change of heat exchange rate according to the flow rate(Cooling).

환수와 파이프 내벽의 대류열전달률이 증가하여 채열량의 크기는 증가하지만, 순환 펌프 동력을 고려할 때, 본 조건에서는 약 11 L/min 부근에서 최적의 유량 조건임을 확인하였다.

4.3 매설 간격에 따른 채열량 변화

Fig. 10은 지중열교환기의 매설 간격을 400 mm(Case 1)와 300 mm(Case 4)로 하였을 시의 채열량 비교 결과로서 기간 평균 출입구 온도 및 채열량을 나타낸다. 채열량의 경우, 상대적으로 좁은 매설 간격의 Case 4가 열교환기간의 열간섭이 커져서 Case 1에 비해 약 11% 적은 채열을 하는 것으로 나타났다.

4.4 매설 깊이에 따른 채열량 해석결과

Fig. 11은 매설 깊이에 따른 채열량 변화의 결과로서, 깊이 2 m(Case 1)와 5 m(Case 5)의 기간 평균 순환수 출입구 온도와 채열량을 나타낸다. 매설 깊이 5 m

Table 3 Calculation results in heating

Case	Heating(°C)		HER (W/m)
	HP → G	G → HP	
1	5.6	8.2	17.5
2	6.1	9.2	14.6
3	5.4	7.8	18.9
4	5.4	7.8	15.5
5	5.8	9.0	21.8

Table 4 Calculation results in cooling

Case	Cooling(°C)		HER (W/m)
	HP → G	G → HP	
1	24.9	21.1	25.0
2	23.5	19.5	18.6
3	27.2	24.0	26.0
4	25.9	22.4	23.3
5	23.0	19.0	26.6

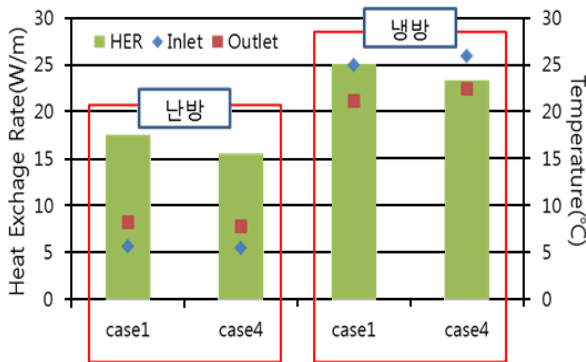


Fig. 10 Analysis on heating and cooling according to the width of heat exchanger.

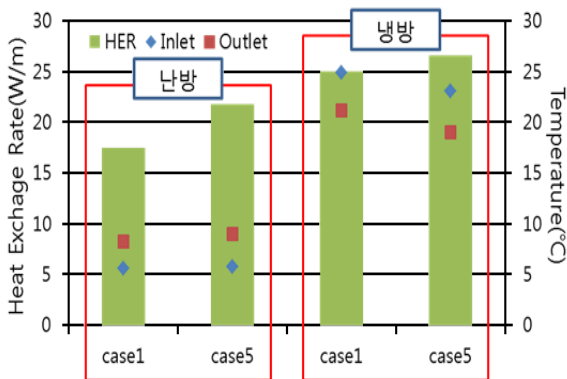


Fig. 11 Analysis on heating and cooling according to the depth of heat exchanger.

에서는 매설 깊이 2 m에 비해 약 25% 더 많은 채열이 가능함을 알 수 있었다. 이 결과를 통해, 매설 깊이가 깊을수록 향온층에 가까운 토양과 열교환을 할 수 있어 더 많은 채열이 가능함을 확인하였으나, 깊은 심도의 수평형 지중열교환기의 설치에는 터파기나 되매우기 등의 공사비가 추가적으로 발생하므로 향후 종합적인 판단이 요구된다.

한편, Table 3과 Table 4는 본 연구에서 실시한 전 케이스의 순환수 출입구 온도와 채열량의 냉난방 기간 평균을 종합하여 각각 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 수평형 지열시스템의 성능을 예측하기 위해 지중 열전달 모델과 열교환기 순환모델을 연성한 시뮬레이션을 개발하였다. 또한 개발 해석 수법을 이용하여 설치조건 및 순환수 유량에 따른 지중 채열량 예측을 실시하였다. 그 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 수평형 지중열교환기의 설치 깊이 2 m, 간격 400 mm로 설치한 경우, 난방 기간 평균 채열량은 약 17.5 W/m로 계산되었다. 또한, 이 때의 최적 유량은 약 11 L/min임을 확인할 수 있었다.

(2) 열교환기 매설 간격에 의한 채열량 분석을 실시한 결과, 매설 간격이 클수록 더 많은 채열이 가능하며 간격 300 mm와 400 mm의 차이는 약 11%임을 정량적으로 확인하였다.

(3) 열교환기 매설 깊이 2 m와 5 m의 채열량 차이는 약 25%로 나타났으나, 타당성 분석을 위해서는 공사비 및 설치 환경 등의 추가적 분석이 필요할 것으로 판단된다.

향후, 개발된 수치시뮬레이션의 타당성 검토와 함께, 토양 물성치 및 열교환기 형상에 따른 채열량 변화 등을 검토하여 수평형 지열시스템의 최적 설계 수법을 정립할 것이다.

참고문헌

1. Sohn, B., 2012, Performance analysis of ground-coupled heat pump system with slinky-type horizontal ground heat exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 230-239.
2. Park, Y. J. and Kim, K. H., 2006, A study on Horizontal Ground Source Heat Pump Systems, Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 160-165.
3. Tarnawski, V. R., Leong, W. H., Momose T., and Hamada, Y., 2009, Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan, Renewable Energy, Vol. 34, pp. 127-134.
4. İnallı, M. and Esen, H., 2004, Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system, Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 2219-2232.
5. Sanaye, S. and Niroomand, B., 2010, Horizontal ground coupled heat pump : Thermal-economic modeling and optimization, Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp. 2600-2612.
6. Nam, Y., Ooka, R., and Hwang, S., 2008, Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 2133-2140.
7. Nam, Y. J., 2011, Numerical analysis for the effect of ground and ground water conditions on the performance of ground source heat pump systems, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigerating Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 327-341.