

지열 이용 열펌프 시스템의 열성능 해석

김 옥 중[†], 고 득 용, 신 우 철^{**}, 백 남 춘^{***}

[†]한국기계연구원 에너지기계연구센터, ^{**}대전대학교 건축공학과, ^{***}한국에너지기술연구원 태양열연구센터

Analysis of Thermal Performance of Ground-Source Heat Pump System

Ook Joong Kim[†], Deuk Yong Koh^{*}, U-Cheul Shin^{**}, Nam-Choon Baek^{***}

ABSTRACT: The purpose of this study is to present the simulation results and an overview of the performance assessment of the Ground-Source Heat Pump(GSHP) system. The calculation was performed for two design factors: the spacing between boreholes and the depth of the vertical ground heat exchangers. And the simulation was carried out using the thermal simulation code TRNSYS with new model of water to water heat pump developed by this study. As a result, it was anticipated that the yearly mean COPs of heat pump for heating and cooling are about 3.7 and 5.8 respectively and the heat pump can supply 100% of heating and cooling load all the year around.

Key words: Ground-Source Heat Pump(지열 이용 열펌프), TRNSYS(TRNSYS)

1. 서 론

지열 이용 히트펌프(Ground-Source Heat Pump: 이하 GSHP)는 냉난방 방식 중에서 가장 효율이 높은 것으로 알려져 있으며 이산화탄소 배출절감 방안 중에서 가장 경제적이고 효과적인 방법으로 인식되어 많은 국가들이 각종 지원을 통하여 보급을 확대하기 위해 노력하고 있다.^(1,2) 또한 국내에서도 공공건물 대체에너지설비 의무화제도의 시행과 더불어 현실적으로 건축물에 가장 쉽게 접근할 수 있는 지열 이용 냉난방 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다.

본고에서는 국내에서 점차 보급이 확산되고 있는 GSHP 시스템의 열성능 검토와 설계 자료를 확보하기 위한 목적으로 50 USRT 규모의 GSHP가 적용된 건물을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. GSHP 시뮬레이션 모델 개발과 해석

을 위하여 TRNSYS⁽³⁾를 사용하였으며, 주요 설계 변수에 따른 연간 동특성을 분석하였다.

2. 히트펌프 모델링

2.1 히트펌프 열성능

본 연구에서 검토한 지열 히트펌프는 물-물(Water to water) 방식으로서 특정 제작회사(C사)의 발표 자료(카탈로그 자료)를 근거로 히트펌프의 성능을 예측하였으며, 시뮬레이션을 위해서 다음과 같이 성능곡선으로 표시하였다.

① 난방성능

난방능력, Q_{ds} (kW)

$$Q_{ds} = a_0 + a_1 T_L + a_2 \cdot T_L^2 + a_3 \cdot T_S + a_4 \cdot T_S^2 + a_5 \cdot T_L \cdot T_S \quad (1)$$

여기서

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7326; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: ojkim@kimm.re.kr

$a_0 = 7.8719624E+01$
 $a_1 = -3.2290354E-03$
 $a_2 = -1.4920424E-03$
 $a_3 = 2.4586390E+00$
 $a_4 = 1.4671740E-02$
 $a_5 = -1.1019171E-02$
 $T_L =$ 부하측 유입수온, $^{\circ}\text{C}$
 $T_S =$ 열원측 열매체 유입온도(EWT), $^{\circ}\text{C}$

난방동력, P_{des} (kW)

$$P_{des} = a_0 + a_1 T_L + a_2 \cdot T_L^2 + a_3 \cdot T_S + a_4 \cdot T_S^2 + a_5 \cdot T_L \cdot T_S \quad (2)$$

여기서

$a_0 = 1.206698173913E+01$
 $a_1 = 1.083165356274E-01$
 $a_2 = 1.044157921267E-03$
 $a_3 = 7.894712444321E-02$
 $a_4 = 5.792658300883E-03$
 $a_5 = -1.361013548780E-03$

② 냉방성능

냉방능력, Q_{des} (kW)

$$Q_{des} = a_0 + a_1 T_L + a_2 \cdot T_L^2 + a_3 \cdot T_S + a_4 \cdot T_S^2 + a_5 \cdot T_L \cdot T_S \quad (3)$$

여기서

$a_0 = 6.616149318601E+01$
 $a_1 = 2.473650191219E+00$
 $a_2 = 1.802050760464E-02$
 $a_3 = -1.414281576504E-01$
 $a_4 = -4.269559950870E-03$
 $a_5 = -1.804543473536E-02$

냉방동력, P_{des} (kW)

$$P_{des} = a_0 + a_1 T_L + a_2 \cdot T_L^2 + a_3 \cdot T_S + a_4 \cdot T_S^2 + a_5 \cdot T_L \cdot T_S \quad (4)$$

여기서

$a_0 = 1.206698173913E+01$
 $a_1 = 1.083165356274E-01$
 $a_2 = 1.044157921267E-03$
 $a_3 = 7.894712444321E-02$
 $a_4 = 5.792658300883E-03$
 $a_5 = -1.361013548780E-03$

GSHP의 성능계수(COP)는 부하측 유입수온(T_L)과 열원측 열매체 유입온도(T_S)의 함수로서 다음과 식에 따라 계산된다.

$$COP = \frac{Q_{des}}{P_{des}} \quad (5)$$

Fig 1과 Fig 2는 성능데이터를 근거로 GSHP의 난방 성능 및 냉방성능을 나타낸 것이다.

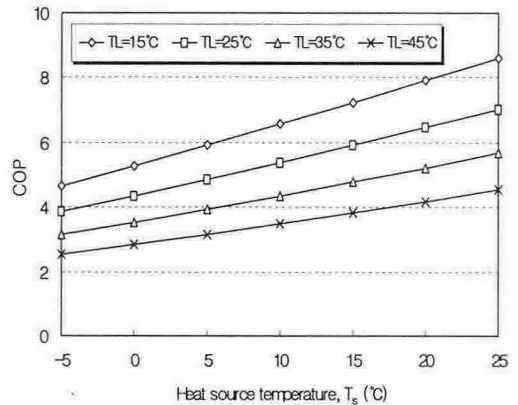


Fig. 1 COP of GSHP for heating.

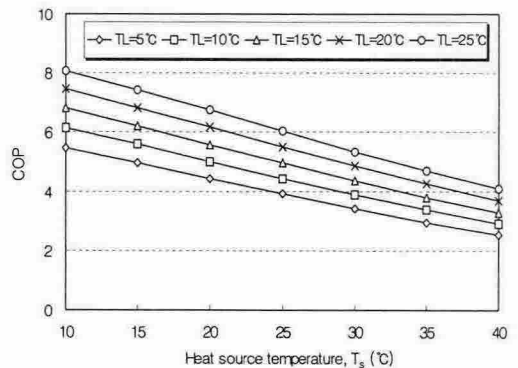


Fig. 2 COP of GSHP for cooling.

2.2 히트펌프 모델링

GSHP의 부분부하 특성을 고려한 실제 냉·난방 출력과 COP는 다음과 식에 따라 계산된다.

$$PLF = \frac{Q_{nor}}{Q_{des}} \quad (6)$$

$$P_{nor} = P_{des} \times \eta(PLF) \quad (7)$$

$$COP = \frac{Q_{nor}}{P_{nor}} \quad (8)$$

여기서,

PLF Part-load factor

P_{des} nominal power consumption

P_{nor} power consumption

Q_{des} nominal capacity

Q_{norm} normal capacity

η part-load efficiency

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션의 개요

본 연구에서는 GSHP 시스템 성능해석을 위한 시뮬레이션 도구로서 TRNSYS(A Transient System Simulation Program)를 채택하였다. TRNSYS는 미국 Wisconsin대학의 SEL에서 개발되어 각종 에너지 시스템의 동적열전달 해석에 많이 사용되고 있는 모듈구조의 상용프로그램으로서, 메인 프로그램과 컴포넌트(component)라고 불리는 서브루틴(subroutine)으로 구성되어 있다. 이와 같은 컴포넌트는 건물, 냉동기, 보일러, 펌프나 송풍기, 제어장치 등과 같은 각종 시스템 구성요소 등을 수치 모델화한 것으로 사용자는 이들 컴포넌트를 연결하여 실제 모델의 시스템을 구현하게 되며, 메인 프로그램은 시뮬레이션을 실행시키고 컴포넌트 사이의 온도, 풍량 및 에너지 전달률 등과 같은 입·출력 자료를 상호 연계 시키게 된다.

Fig. 3은 GSHP 시스템에 대한 TRNSYS 구성 사례를 TRNSEd로 나타낸 것이다. Table 1은 본 시뮬레이션에서 사용된 주요 컴포넌트를 정리한 것이다. GSHP 컴포넌트는 새로 개발한 Type 700을 사용하였으며, 기상자료는 각 지역 20년 월평균 기온 및 일사량을 근거로 TRNSYS의

Type 54(Weather data generator)를 사용하여 생성하였다.

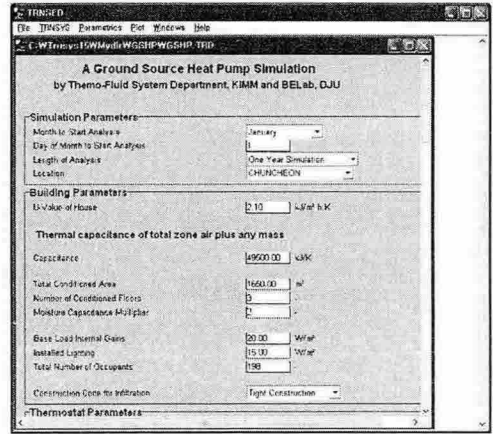


Fig. 3 TRNSYS input in the TRNSEd.

Table 1. Simulation parameter

Parameter	Component
Climatic data	Weather data generator, Type 54
Building models	Lumped capacitance building, Type 88
Ground heat exchanger	Vertical U-tube ground heat exchanger, Type 557
Control	Three stage room thermostat, Type 8
GSHP	Water to Water type, Type 700

3.2 시스템 설계

시스템의 설계조건을 정리하면 Table 2와 같다. 여기서 GSHP의 정격 난방 COP는 부하측 유입수온과 열원측 열매체 유입온도가 각각 45℃와 0℃를 기준으로 하며, 정격 냉방 COP는 각각 12℃와 25℃를 기준으로 한다.

Table 2. Design parameters of system

Building	U-value of building	5.1 kJ/m ² hK
	Total conditioned area	1700 m ²
	Occupants	205
	Construction code for infiltration	Tight construction
	Internal heat gain (Lighting & Equipment)	35 W/m ²

Table 2 (continued)

GSHP	Heating Capacity	75.6 kW
	Heating Power	26.6 kW
	Nominal COP	2.8
	Cooling Capacity	86.8 kW
	Cooling Power	18.7 kW
	Nominal COP	4.6
Soil	Soil Annual Mean Temperature	13.3°C
	Amplitude of Surface Soil Temperature	29.4°C
	Phase Constant	151days
	Soil Thermal Diffusivity	1.3 W/m ² °C
	Soil Thermal Conductivity	0.46 W/m°C
Ground Heat Exchanger	Number of Borehole	25
	Depth of Horizontal Buried Pipe	0.91 m
	Depth of the Vertical Ground Heat Exchangers	120 m
	Diameter of Each Borehole	0.1080 m
	Distance Between U-Tube Pipes	0.0635 m
	Borehole Fill Material	Concrete
	Conductivity of Gap Between Pipe and Fill	4.6730 kJ/mh°C
	Gap Thickness Between Pipe and Fill	-
	Length of Piping Between Heat Exchangers	3 m

4. 열성능 분석

재실자 205명을 갖는 연 면적 1700 m²의 사무소 건물을 대상으로 냉난방 시스템의 에너지 분석을 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 냉방을 위한 하절기는 5월 1일부터 9월 30일까지 5개월간 설정하였으며, 나머지 기간은 난방을 위한 동절기로 가정하였다.

Fig. 4는 TRNSYS의 Weather data generator에 의해 생성된 대전지방의 연간 외기온과 수평면 일사분포를 나타낸 것이다. 연평균 일일 외기온과 수평면 일사량은 각각 12.8°C와 13800 kJ로서 기상청 실측 20년 평균치 12.3°C와 13000 kJ

에 비해 다소 많은 것으로 알 수 있다.

Fig. 5는 대상 건축물의 냉난방 부하를 나타낸 것이다. 연간 총 난방부하는 117.0 GJ로서 총 냉방부하 113.1 GJ에 비해 4% 정도 많은 것으로 분석되었다.

Table 3은 월별 에너지 분석 결과를 나타낸 것이다. 난방 및 냉방용량이 각각 75.6 kW와 86.8 kW인 히트펌프가 감당하는 연간 열부하는 거의 100%로 나타났다. 히트펌프에서 공급되는 연간 난방 및 냉방에너지는 각각 119.8 Gcal와 110.5 Gcal인 것으로 예측되며, 히트펌프를 가동하는데 소요되는 연간 전기동력(부하 및 열원측 순환펌프 동력은 제외)은 각각 32.6 GWh와 19.3 GWh로 나타났다. 한편 히트펌프의 평균 난방 및 냉방 COP는 3.7과 5.7로서 정격 COP 2.8과 4.6과를 비교할 때 우수한 성능을 보이고 있다.

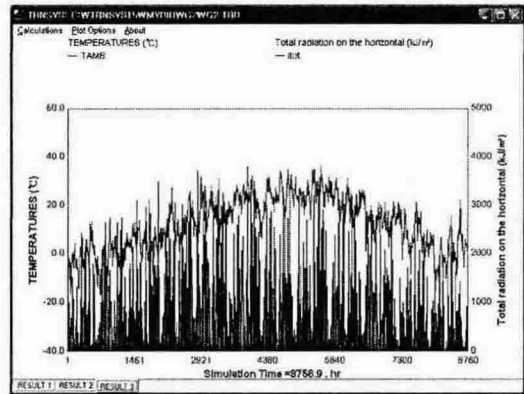


Fig. 4 Ambient temperature and global radiation on the horizontal.

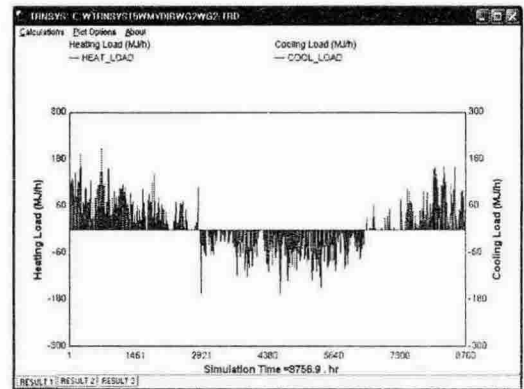


Fig. 5 Heating and cooling load distribution.

Table 3 Monthly thermal performance of system

	Heating Load (MJ)	Heating Energy (MJ)	Cooling Load (MJ)	Cooling Energy (MJ)	Power (MJ)	COP
1	32,450	32,380			8,810	3.7
2	24,820	24,540			6,786	3.6
3	15,980	15,230			4,254	3.6
4	4,617	4,560			1,273	3.6
5			13,430	12,530	2,075	6.0
6			21,470	21,050	3,584	5.9
7			29,340	29,030	5,078	5.7
8			30,410	30,010	5,375	5.6
9			18,410	17,880	3,224	5.5
10	2,192	2,236			580	3.9
11	13,030	13,210			3,475	3.8
12	27,030	27,610			7,378	3.7

Fig. 6은 지중 열교환기 열매체의 주간별 입·출구 최저 및 최고 온도를 나타낸 것으로 히트펌프의 작동범위를 확인할 수 있다. 동절기 지중 열교환기를 거쳐 히트펌프로 공급되는 열매체의 최저온도(MINLWT)는 7°C 이상으로 나타났으며, 하절기 최고온도(MAXEWT)는 20°C 이하에서 작동하는 것을 알 수 있다. 히트펌프의 정격용량 출력 시 열매체의 온도조건(난방 0°C와 냉방 25°C)과 비교할 때 작동여건이 우수한 것을 알 수 있다. 이로 인해 앞에서 언급한 바와 같이 히트펌프의 연평균 평균 난방 및 냉방 COP가 정격에 비해 상당히 높은 값을 보임을 알 수 있다.

Fig. 7은 보어홀(borehole) 사이의 거리에 따른 COP의 변화를 나타낸 것이다. 동절기의 경우 보어홀 간격에 따른 성능변화가 없는 반면, 하절기에는 보어홀의 간격이 좁아짐에 따라 점차 성능이 감소하고 있다. 그러나 보어홀의 간격이 2 m 이상일 때 시스템의 성능변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 보어홀의 깊이에 따른 시스템의 월별 성능계수를 비교한 것이다. 동절기는 성능변화가 거의 없으나, 하절기 보어홀의 깊이가 낮을수록 점차 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다.

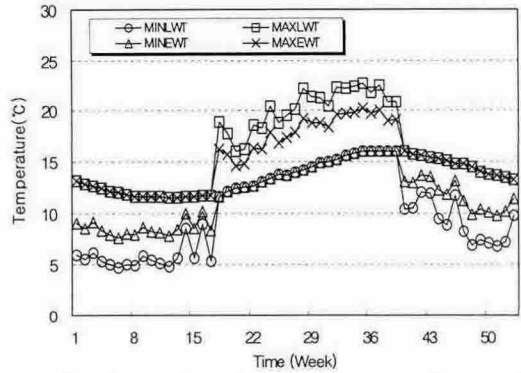


Fig. 6 Inlet and outlet temperature of ground heat exchanger.

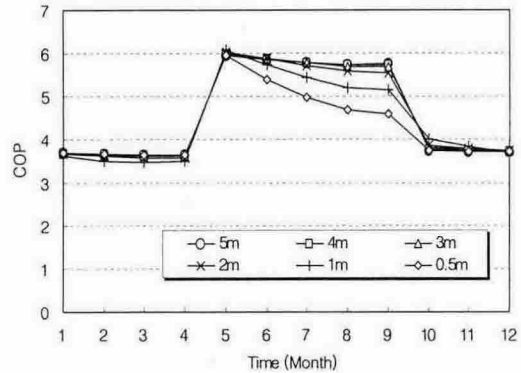


Fig. 7 Variation of COP according to the spacing between boreholes.

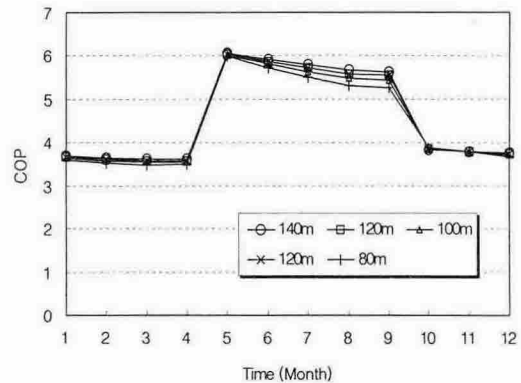


Fig. 8 Variation of COP according to the depth of borehole.

5. 결론

본 연구에서는 지열 이용 히트펌프 시스템의 열성능 검토와 설계자료를 확보하기 위한 목적으로 50 USRT 규모의 GSHP가 적용된 연면적 1700 m²인 건물을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. GSHP 시스템 열성능 해석을 위하여 물대 물 방식의 새로운 히트펌프 모델이 적용된 TRNSYS를 사용하였다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 히트펌프의 연평균 난방 및 냉방 COP는 3.7과 5.7로서 정격 COP 2.8과 4.6에 비해 우수한 성능을 나타냈으며, 히트펌프가 감당하는 연간 열부하는 거의 100%인 것으로 나타났다.
- 2) 동절기의 경우 보어홀 간격에 따른 성능변화가 거의 없는 반면, 하절기에는 보어홀의 간격이 좁아짐에 따라 점차 성능이 감소하였다. 그러나 보어홀의 간격이 2 m 이상일 때 시스템의 성능변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

3) 보어홀의 깊이에 따라 동절기에는 성능변화가 거의 없으나, 하절기에는 보어홀의 깊이가 낮을수록 점차 성능이 감소하였다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 R&D 본부의 지원으로 이루어진 것으로 관계자들에게 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

1. J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis and G. Hellström, 2003, Ground-source Heat Pumps - A World Overview, Renewable Energy World, pp. 218-227.
2. J. Warnelov, Ground-Coupled Heat Pump Market and Prospects in Europe, 2002, 7th IEA Heat Pump Conference, Beijing.
3. University of Wisconsin-Madison, 1996, TRNSYS 14.2 Reference manual.