

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 2, 2006

지열 이용 히트펌프 시스템의 열성능 해석

신우철*, 백남춘**, 김옥중***, 고득용****

*대전대학교 건축공학과(shinuc@dju.ac.kr), **한국에너지기술연구원 태양열이용센터(baek@kier.re.kr),

***한국기계연구원 에너지기계연구센터(ojkim@kimm.re.kr),

****한국기계연구원 에너지기계연구센터(dykoh@kimm.re.kr)

Analysis of Thermal Performance of Ground-Source Heat Pump System

Shin, U-Cheul*, Baek, Nam-Choon**, Kim, Ook-Joong***, Koh, Deuk-Yong****

*Dept. of Architectural Engineering, Daejeon University(shinuc@dju.ac.kr),

**Korea Institute of Energy Research, Solar thermal Research Center(baek@kier.re.kr),

***Korea Institute of Machinery & Materials, Energy System Research Center(ojkim@kimm.re.kr)

****Korea Institute of Machinery & Materials, Energy System Research Center(dykoh@kimm.re.kr)

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.

Keywords : Borehole(보어홀), Ground-Source Heat Pump(지열 이용 열펌프), TRNSYS(TRNSYS)

1. 서론

지열 이용 히트펌프(Ground-Source Heat Pump: 이하 GSHP)는 냉난방 방식 중에서 효율이 월등히 높아 에너지 절감효과가 큰 것으로

알려져 있다. 따라서 이산화탄소 배출저감도 커서 최근 많은 국가들이 각종 보급지원정책을 통하여 보급 확대를 위해 노력하고 있다.^{1),2)} 국내에서도 공공건물 대체에너지설비 의무화제도의 시행과 더불어 현실적으로 건축물에 용이하게 적용할 수 있

접수일자:2006년 5월 22일, 심사완료일자:2006년 6월 20일

는 GSHP 냉난방 시스템에 대한 관심은 물론 보급도 크게 증가하고 있다. 그러나 지열히트펌프 시스템 성능을 최적화하기 위한 각종 엔지니어링 데이터가 충분치 않은 상태에서 단순히 외국의 기술과 데이터를 활용해서 설계되고 있는 상태이다. 특히 GSHP 시스템에서 지중열교환기의 물리적 특성(깊이, 간격 등)은 GSHP의 성능에 적지않은 영향을 미치는 중요한 요소 중에 하나로서 이에 대한 연구자료는 찾아보기 힘들 정도이다.

이에 따라 본고에서는 GSHP 시스템의 열성능 검토와 설계에 필요한 엔지니어링 자료, 특히 지중열교환기의 최적화 설치를 위한 데이터를 확보하기 위한 목적으로 50USRT 규모의 GSHP가 적용된 건물을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. GSHP 시뮬레이션 모델 개발과 해석을 위하여 TRNSYS³⁾를 사용하였으며, 주요 설계 변수에 따른 연간 동특성을 분석하였다.

2. 히트펌프 성능 모델링

2.1 히트펌프 열성능

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

① 난방성능

난방능력, Q_{des} (kW)

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

여기서

$$a_0 = 7.8719624E+01$$

$$a_1 = -3.2290354E-03$$

$$a_2 = -1.4920424E-03$$

$$a_3 = 2.4586390E+00$$

$$a_4 = 1.4671740E-02$$

$$a_5 = -1.1019171E-02$$

T_L = 부하측 유입수온도, °C

T_S = 열원측 열매체 유입온도(EWT), °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)와 열원측 열매체 유입온도(T_S)의 함수로서 다음 식과 같이 계산된다.

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

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

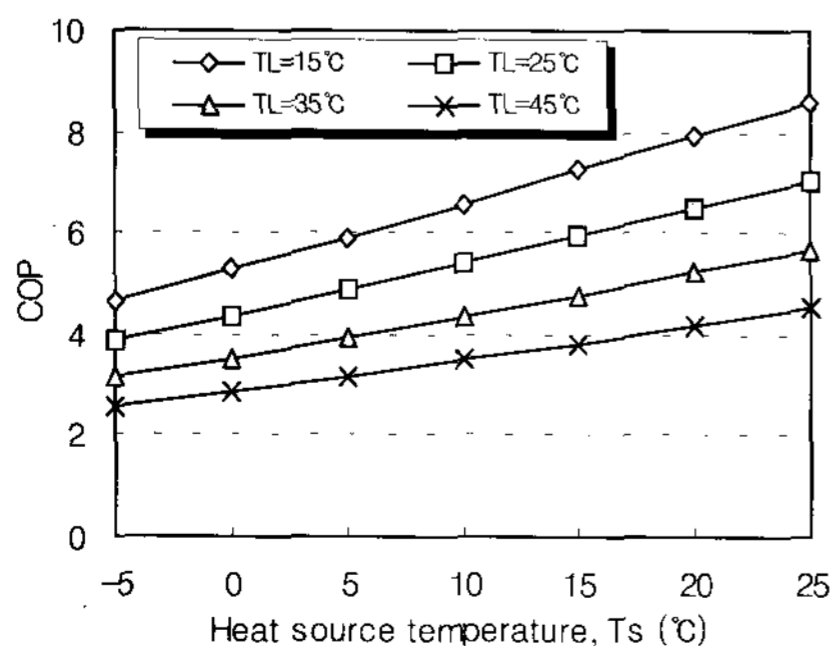


그림 1. GSHP의 난방 COP

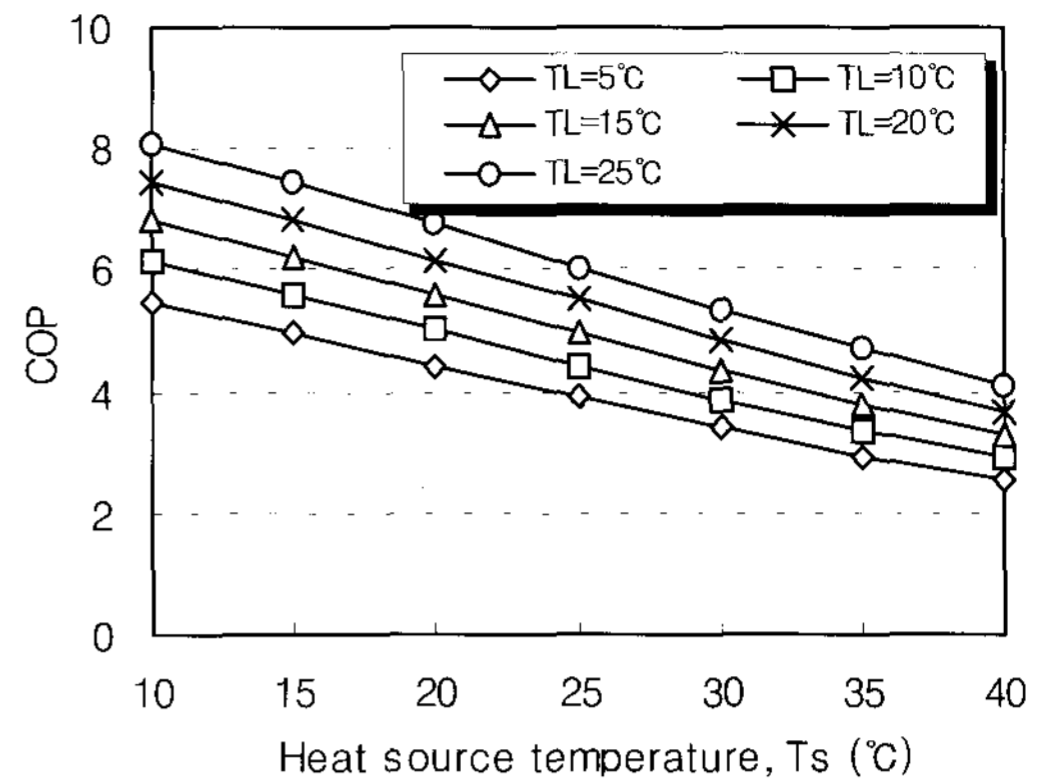


그림 2. GSHP의 냉방 COP

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 사용하였다. 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, 히트펌프(특정 타입), 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 연계시키게 된다.

그림 3은 GSHP 시스템에 대한 TRNSYS 구성 사례를 TRNSEDO로 나타낸 것이다. 표 1은 본 시뮬레이션에서 사용된 주요 컴포넌트를 정리한 것이다. GSHP 컴포넌트는 2항의 “히트펌프 모델링”에서 기술한 히트펌프의 이론해석을 본 연구를 통해 부프로그램으로 만든 “Type 700”을 사용하였으며, 수직 U자 관 지중열교환기(U-tube ground heat exchanger) 모델은 TESS에서 TRNSYS용으로 개발한 “Type 557”을 채택하였다. 한편 기상자료는 각 지역 20년 월평균 외기온 및 일사량을 근거로 TRNSYS의 Type 54 (Weather data generator)를 사용하여 생성하였다.

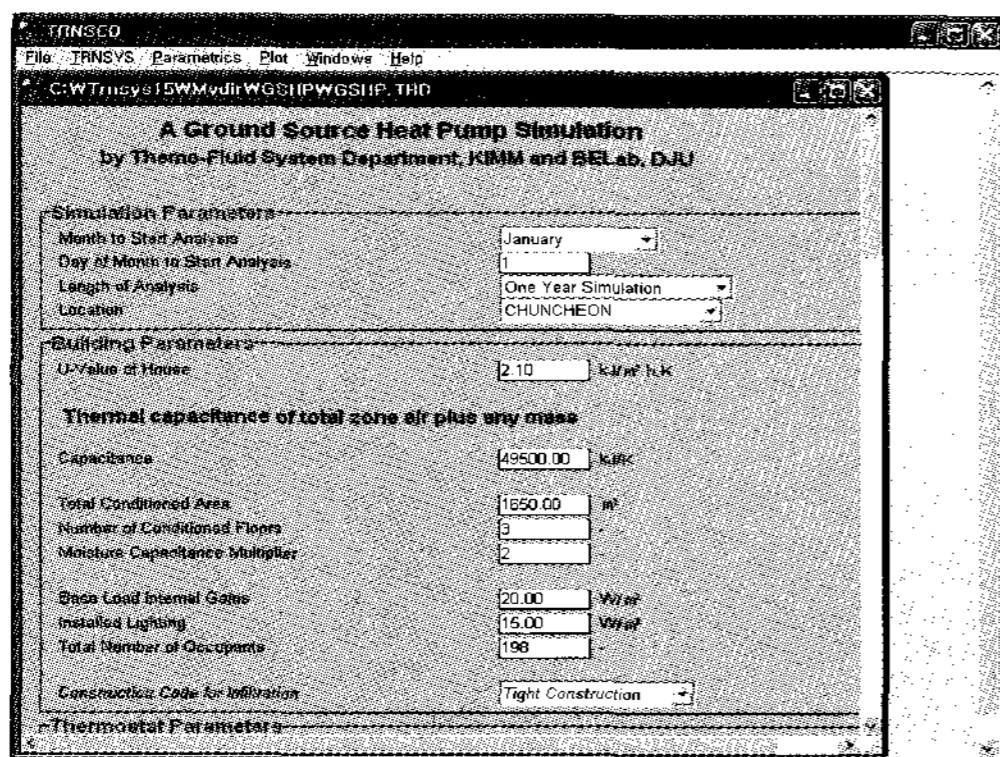


그림 3. TRNSEDO에 의한 TRNSYS 입력

표 1. 시뮬레이션 변수

Parameters	Components
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 표 2와 같다. 여기서 GSHP의 정격 난방 COP는 부하측 유입

표 2. 시스템 설계변수

Building	U-value of building	5.1kJ/m ² hK
	Total conditioned area	1700m ²
	Occupants	205
	Construction code for infiltration	Tight construction
	Internal heat gain (Lighting & Equipment)	35W/m ²
GSHP	Heating Capacity	75.6kW
	Heating Power	26.6kW
	Nominal COP	2.8
	Cooling Capacity	86.8kW
	Cooling Power	18.7kW
	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	1.3W/m ² °C
	Soil Thermal Conductivity	0.46W/m°C
Ground Heat Exchanger	Number of Borehole	25
	Depth of Horizontal Buried Pipe	0.91m
	Depth of the Vertical Ground Heat Exchangers	120m
	Diameter of Each Borehole	0.1080m
	Distance Between U-Tube Pipes	0.0635m
	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	3m

수온과 열원측 열매체 유입온도가 각각 45°C와 0°C를 기준으로 하며, 정격 냉방 COP는 각각 12°C와 25°C를 기준으로 한다.

3.3 지중열교환기 이론해석의 타당성 검토

그림 4는 2005년 12월 29일 대전지역 K연구원에서 실시된 실험결과를 근거로 직선열원(Line source) 이론^{4,5)}에 따른 지중열교환기의 TRNSYS 결과와 비교한 것이다. 지중열교환기는 관경 25A(내경 25mm)의 수직 U자 관으로서 보어홀의 깊이는 100m이다. 입구온도에 따른 이론해석의 출구온도는 실험결과에 비해 최대 0.7°C 정도 낮은 온도분포를 보이고 있으나 열적 거동은 거의 동일한 것을 알 수 있다.

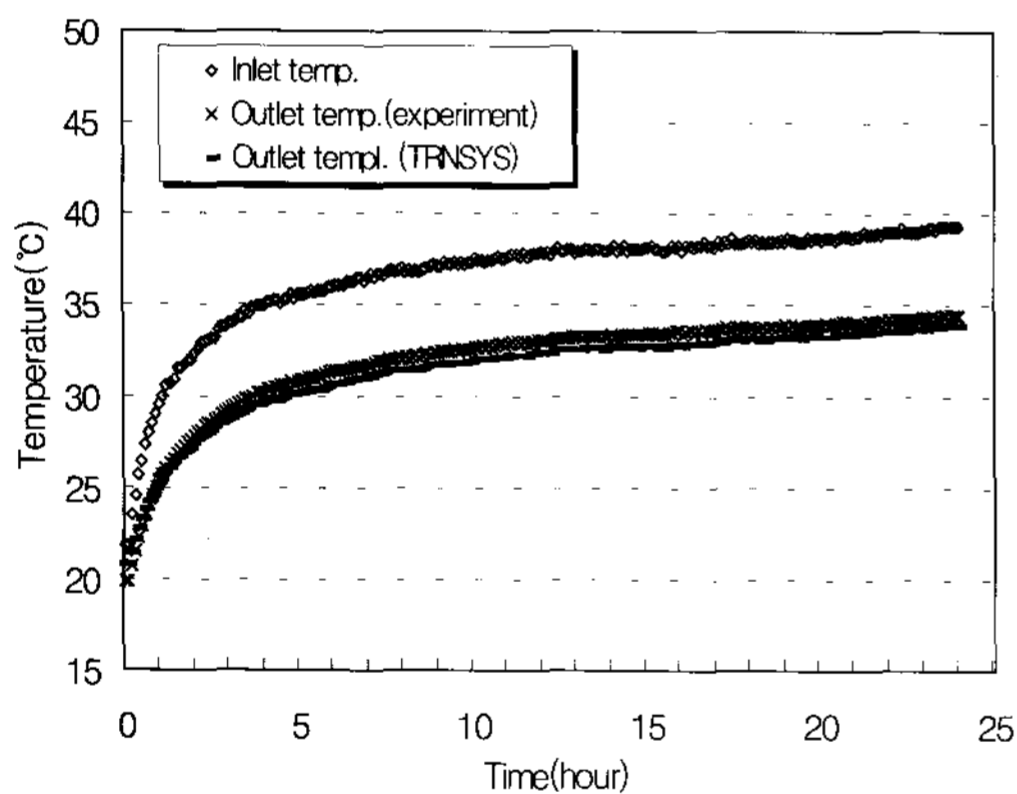


그림 4. 지중열교환기의 입출구 온도분포

4. 열성능 분석

재실자 205명을 갖는 연 면적 1700 m²의 사무실 건물을 대상으로 냉난방 시스템의 에너지 분석을 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 냉방은 5월 1일부터 9월 30일까지 5개월간으로 하였으며, 나머지 기간은 난방기간으로 가정하였다.

그림 5는 TRNSYS의 Type 54(Weather data generator)에 의해 생성된 대전지방의 연간 외기온과 수평면 일사분포를 나타낸 것이다. 20년 평

균 일일 외기온과 수평면 일사량은 각각 12.8°C와 13800 kJ로서 기상청 실측 20년 평균치 12.3°C와 13000 kJ에 비해 다소 많은 것으로 나타났다.

그림 6은 대상 건축물의 냉난방 부하를 나타낸 것이다. 연간 총 난방부하는 117.0 GJ로서 총 냉방부하 113.1 GJ에 비해 4% 정도 많은 것으로 분석되었다.

표 3은 월별 에너지 분석 결과를 나타낸 것이다. 난방 및 냉방능력이 각각 75.6 kW와 86.8 kW인 히트펌프가 감당하는 연간 열부하는 거의 100%로 나타났다. 히트펌프에서 공급되는 연간 난방 및 냉방에너지는 각각 119.8 GJ와 110.5 GJ, 그리고 히트펌프 구동에 소비된 연간 전기량(부하 및 열원측 순환펌프 동력은 제외)은 각각 32.6 GWh와 19.3 GWh로 나타났다. 한편 히트펌프의 평균 난방 및 냉방 COP는 3.7과 5.7로 나타났다. 이 결과는 카달로그 상의 성능(난방 0°C와 냉방 25°C인 수열원 사용시)(이하 표준성능)인 COP 2.8과 4.6과를 비교할 때 상당히 높은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 참고로 지열히트펌프 COP는 일별 작동시간이 짧을수록, 그리고 1회 작동시간이 짧을수록 지중 열교환기 주변의 본래의 지중온도에 가깝기 때문에 COP가 높아지게 된다.

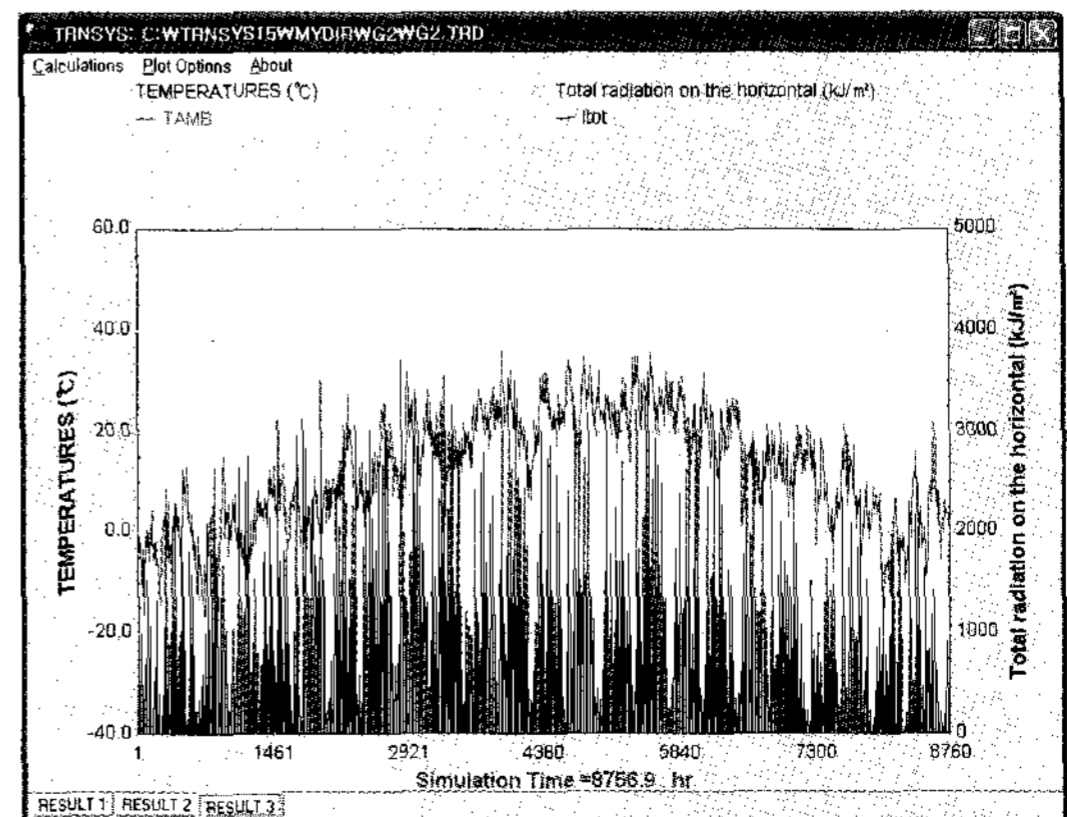


그림 5. 외기온 및 수평면 전일사량 분포

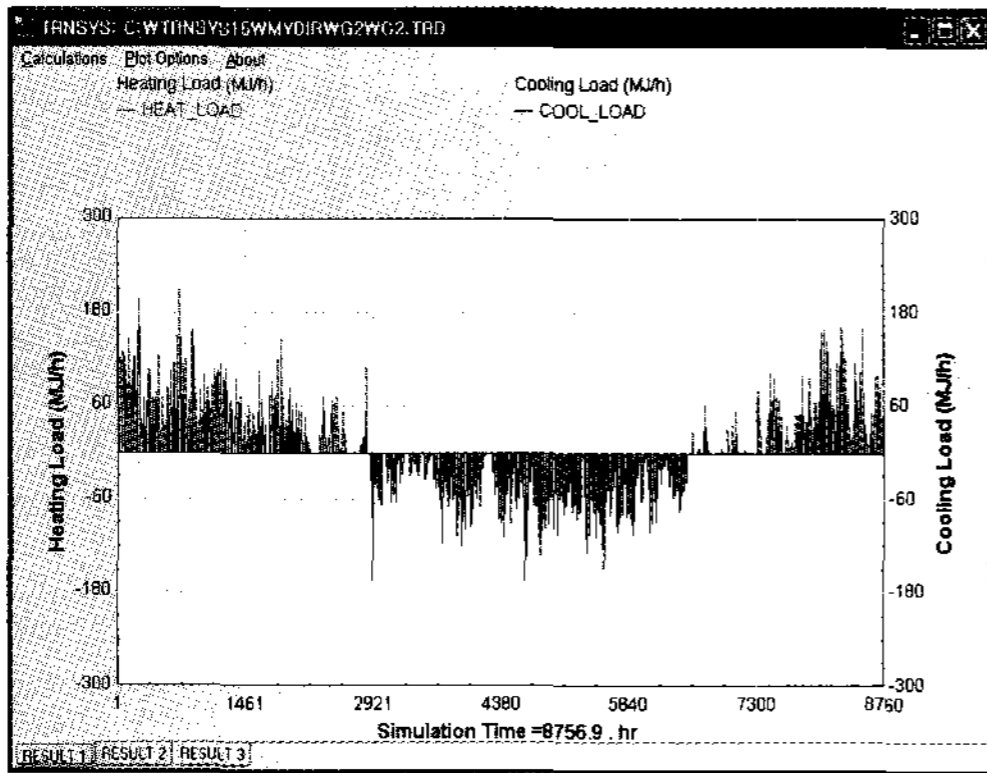


그림 6. 냉난방 부하분포

표 3. GSHP 시스템 월별 분석결과

Mon	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
합계	120,119	119,766	113,060	110,500	51,892	

그림 7은 1년동안 지중 열교환기 열매체의 주간별 입·출구 최저 및 최고 온도를 나타낸 것으로 히트펌프로 공급되는 열원의 온도범위를 예상할 수 있다. 지중 열교환기를 거쳐 히트펌프로 공급되는 열매체의 온도(MINLWT)는 동절기에는 7°C 이상, 하절기에는 20°C(MAXEWT) 이하가 됨을 알 수 있다. 이것이 바로 지열히트펌프가 외

기를 열원(열싱크)으로 하는 히트펌프에 비해 성능이 크게 높아지게 되는 원인이라고 볼 수 있다. 그림 8은 보어홀(borehole) 간격에 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. 이것은 물론 일평균 작동시간 및 작동 패턴에 따라 다소 차이가 있을 것으로 예상되며, 일일 작동시간이 길 수록 이 보어홀 간격은 커질 것으로 사료된다.

그림 9는 보어홀의 깊이에 따른 시스템의 월별 성능계수를 비교한 것이다. 동절기는 성능변화가 거의 없으나, 하절기 보어홀의 깊이가 낮을수록 점차 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다.

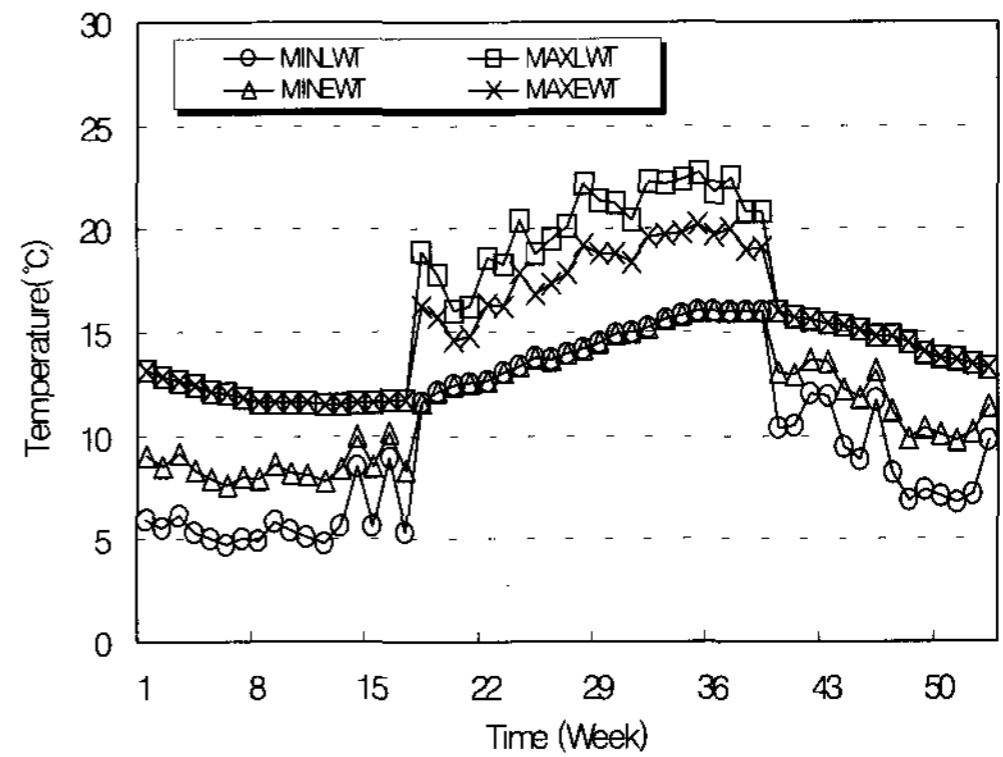


그림 7. 지중열교환기의 입출구 최저 및 최고온도

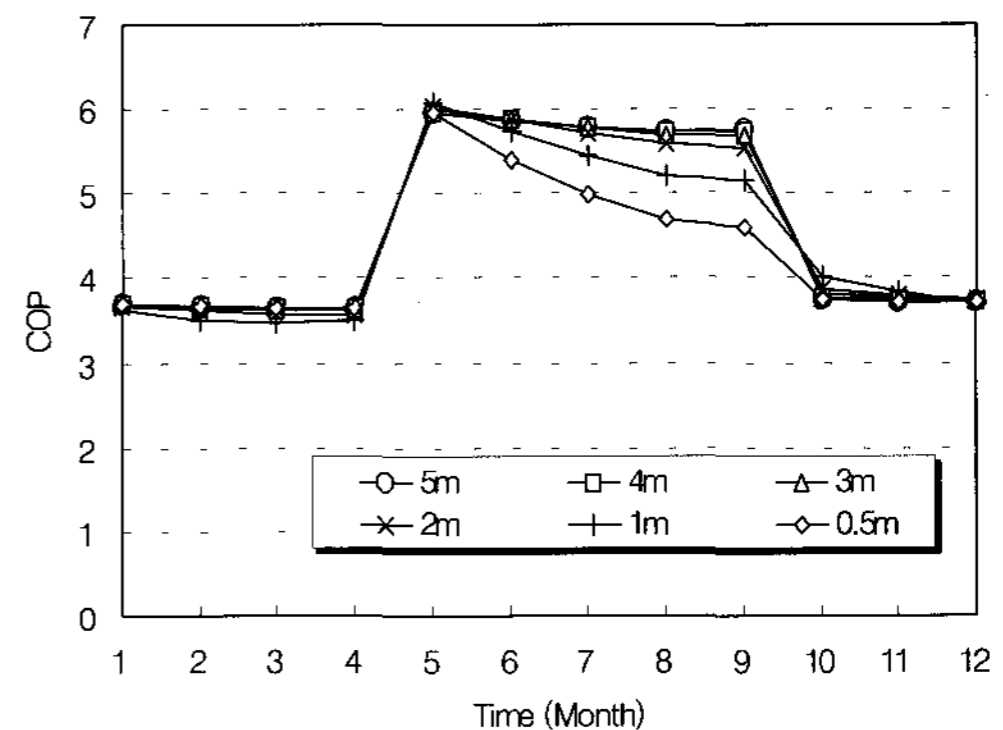


그림 8. 보어홀 간격에 따른 COP 변화

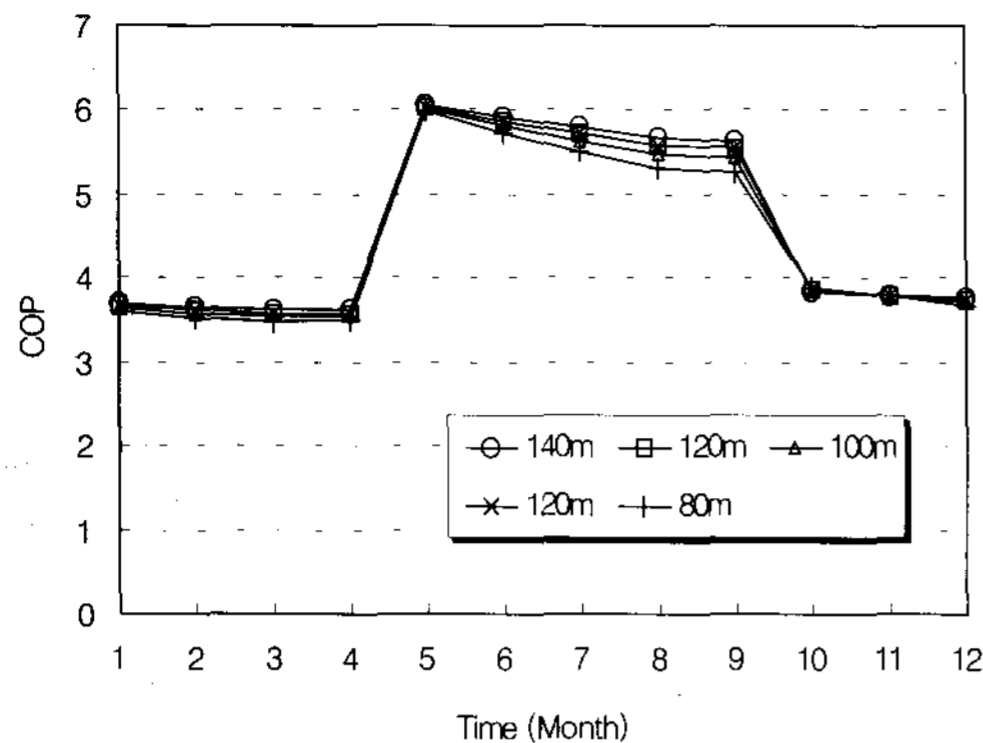


그림 9. 보어홀 깊이에 따른 COP 변화

5. 결 론

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

- 1) 히트펌프의 연평균 난방 및 냉방 COP는 3.7과 5.7로 상당히 높거나 타났으며 (heat source 온도 0°C와 heat sink 온도 25°C인 물을 사용한 경우 COP는 2.8과 4.6 임)에 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 감소하

였다. 그러나 보어홀의 간격이 2m 이상일 때 시스템의 성능변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

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

참 고 문 헌

1. J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis and G. Hellström, Ground-source Heat Pumps - A World Overview, Renewable Energy World, pp. 218-227, 2003
2. J. Warnelov, Ground-Coupled Heat Pump Market and Prospects in Europe, 7th IEA Heat Pump Conference, Beijing, 2002
3. University of Wisconsin-Madison, TRNSYS 14.2 Reference manual, 1996
4. 이세균, 김대기, 우정선, 박상일, "1차원 모델에 의한 지중열교환기의 열거동 해석", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 25, No. 1, pp. 97-104, 2005.
5. A. Murugappan, Implementing Ground Source Heat Pump and Ground Loop Heat Exchanger Models in the Energyplus Simulation Environment, M.S. These, Oklahoma State University, 2001