시뮬레이션을 통한 에너지파일 적용 지열 히트펌프 시스템의 성능 예측

손 병 후[†], 최 종 민^{*}

한국건설기술연구원 그린빌딩연구실, ^{*}국립 한밭대학교 기계공학과

Performance Prediction of Geothermal Heat Pump(GHP) System with Energy Piles Using Simulation Approach

Byonghu Sohn[†], Jong Min Choi^{*}

Green Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received November 30, 2011; revision received December 21, 2011)

ABSTRACT: The aim of this study is to evaluate the performance of the GHP system with 150 energy piles for a commercial building. In order to demonstrate the feasibility of a sustainable performance of the system, simulations were conducted over 1-year and 20-year periods, respectively. The 1-year simulation results showed that the maximum and minimum temperatures of brine returning from the energy piles were 23.80°C and 7.90°C, which were in a range of design target temperatures. In addition, after 20 years' operation, these returning temperatures decreased slowly to 23.05°C and 6.98°C, and finally reached to stable state. The results also showed that the energy piles injected heat of 65.6 MWh to the ground and extracted heat of 96.0 MWh from the ground, respectively. Also, it is expected this GHP system with energy piles can operate with average SPF of more than 4.15 for long term.

Key words: Energy pile(에너지파일), Building foundation(건물 기초), Geothermal heat pump system(지열 히트펌프 시스템), Cooling and heating performance(냉난방 성능)

기 호 설 명

<i>COP</i>	: 히트펌프 또는 시스템 성능계수 [-]
<i>E</i>	: 에너지 전달량 [kWh] 또는 [MWh]
<i>EWT</i>	: 파일 순환수의 히트펌프 입구 온도 [°C]
<i>LWT</i>	: 파일 순환수의 히트펌프 출구 온도 [°C]
<i>Q</i>	: 시간대별 건물 부하 [kWh]
<i>SPF</i>	: 계간성능계수 [-]
<i>W</i>	: 히트펌프 소비 전력 [kW]

하첨자

<i>c</i>	: 냉방
<i>h</i>	: 난방

1. 서 론

건물 신·재생에너지 설비로 많은 관심을 받고 있는 지열 히트펌프(geothermal heat pump) 시스템은 크게 지중열교환기와 히트펌프로 구성된 냉난방 겸용 시스템이다. 외기에 거의 영향을 받지 않는 지중의 항온성을 활용하기 때문에 효율이 높은 시스템

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0495; fax: +82-31-910-0246

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

템이다.⁽¹⁾ 이 시스템은 다양한 형상과 용량의 지중열교환기를 이용할 수 있지만, 국내에서는 주로 수직 밀폐형 지중열교환기를 적용하고 있다. 수직 밀폐형 지중열교환기는 건물의 냉난방 부하에 따라 다양한 깊이로 매설할 수 있지만, 초기 투자비가 상대적으로 큰 것이 단점이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근 유럽과 중국 등에서는 열원 다변화 기술의 일환으로 건물기초(파일, pile)를 지중열교환기(에너지파일 지중열교환기, 이하 ‘에너지파일’)로 활용하기 위한 기술개발⁽²⁻⁴⁾에 많은 투자를 하고 있다.

파일은 건물 지지를 목적으로 지반에 삽입한 인공 구조물이다. 기성 콘크리트 파일(PHC pile) · 강관 파일(steel pile) · 현장 타설 콘크리트 파일(cast-in-place concrete pile) · 기초 슬래브(foundation slab) 등이 범주에 속한다. 여러 상황 등을 감안했을 때 기성 콘크리트 파일이나 강관 파일의 비어있는 내부에 U자관이나 2중 U자관을 삽입하거나 또는 W형상이나 코일 형상의 파이프를 삽입하여 지중열교환기로 활용할 수 있다.

에너지파일 적용 지열 히트펌프 시스템은 중 · 대형 건물에서 반드시 설치해야 하는 건물 기초(파일)를 활용하기 때문에, 지중열교환기 설치비를 절감할 수 있다. 아울러 수직 밀폐형에 비해 지중열교환기 시공기간도 단축할 수 있을 것으로 예상된다. 반면 대상 건물의 구조 안전성과 바닥 면적 등을 고려하여 파일을 설치하기 때문에 설계자가 에너지파일의 위치나 개수를 조절하는 것은 어렵다. 또한 일반적으로 파일은 암반층 출현 지점(약 15~30 m)까지 삽입되기 때문에, 에너지파일이 동일한 부지에서 획득할 수 있는 지열에너지는 수직 밀폐형에 비해 상대적으로 적다.

에너지파일의 설계나 성능분석 등과 관련된 연구는 수직 밀폐형 지중열교환기 분야에 비해 비교적 최근에 주목받기 시작했다. Katsura et al.⁽⁵⁾은 에너지파일을 포함한 수직형 지중열교환기의 성능을 분석하였으며, 이를 통해 기존 해석기법을 보완하였다. 최근 Wood et al.⁽⁶⁾은 21개의 에너지파일을 이용한 단독주택(72 m²)용 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능을 분석하였다. 난방 운전 중 에너지파일 순환수와 지중 온도 변화를 측정하였으며, 아울러 에너지파일의 열전달 성능과 시스템의 계간 난방성능(SPF_h)을 분석하였다.

최근 에너지파일의 설계에 필요한 해석기법과 관련하여 다양한 연구들^(7, 8)이 수행되었으며, 국내에서도 에너지파일 이용에 대한 관심이 증가하면서 일

부 연구들⁽⁹⁻¹²⁾이 수행되었다. 하지만 국내에서 수행된 연구는 주로 에너지파일의 열전달 성능 분석에 한정되어 있으며, 전체 시스템에 대한 성능 분석이나 해석과 관련된 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 상업용 건물에 적용된 에너지파일 이용 지열 히트펌프 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 예측하였다. Fig. 1(a)는 성능 분석 대상 건물의 조감도를 나타낸 것이며, Fig. 1(b)는 기성 콘크리트 파일(PHC pile)에 2중 U자관을 삽입한 에너지파일의 실제 형상을 나타낸 것이다. 성능 예측을 위해 대상 건물의 최대 냉난방 부하와 시간대별 또는 월별 에너지 요구량(에너지부하)을 계산한 후, 이에 상응하는 히트펌프 용량을 선정하였다. 이를 바탕으로 에너지파일 순환수의 온도 변화와 에너지파일의 열전달 성능 그리고 시스템의 에너지 소비량 등을 분석하였다.

2. 대상 시스템과 시뮬레이션 방법

Fig. 2는 대상 건물의 최대 냉난방 부하와 시간대별 에너지 사용량 등을 산정하기 위해 적용한 서울의 2009년 외기 온도와 계산 결과를 도시한 것이다. 대상 건물은 지하 1층과 지상 3층 규모이며, 지하철

(a) Aeroview of building

(b) Energy piles

Fig. 1 Aeroview of building and energy piles in this simulation approach.

(a) Ambient air temperature

(b) Hourly cooling and heating loads

Fig. 2 Ambient air temperature and hourly building loads.

역사와 연계된 환승 건물로 활용된다. 지상 1층의 사무실과 입주 상가들을 제외한 나머지 지하층과 지상 2, 3층은 주로 기계실과 주차장으로 활용된다. 건물의 전체 공조 면적은 2,289 m^2 이며, 이중 1,210 m^2 의 공간을 지열 히트펌프 시스템이 담당한다.

Fig. 3은 히트펌프를 포함한 전체 시스템의 개략도와 에너지파일의 사양을 도시한 것이다. 에너지파일을 적용하기 위해, 본 건물의 수직 기초(pile) 중 150개를 선정하여 2중 U자관을 삽입하였다. 에너지파일의 평균 깊이와 지름은 각각 13.8 m와 0.4 m이며, 파일 사이의 평균 간격은 5 m다. 아울러 그림에

서 보듯이 파일 주변 토양은 3개의 토양층(ground layer)으로 구성되어 있으며, 각각의 토양층에 대한 열물성 값들을 시뮬레이션에 적용하였다. Table 1은 시스템 설계와 시뮬레이션에 필요한 입력 정보 중 대표적인 데이터를 정리한 것이다.

Fig. 4는 대상 건물에 설치된 히트펌프의 성능 특성을 나타낸 것이며, 시스템 성능 예측에도 이를 적용하였다. 일반적으로 히트펌프의 성능 특성은 열원(여기서는 에너지파일 순환수)의 히트펌프 유입 온도(EWT)의 함수로 나타낼 수 있으며, 식(1)에서 식(4)와 같다.

Fig. 3 System layout and enlargement of energy pile ground heat exchanger.

Table 1 Design parameters and specifications

Parameters	Specifications
Building	
Conditioned area[m ²]	1,210
Peak cooling load[kW]	171.1
Peak heating load[kW]	126.5
Heat pump	
Total unit capacity[kW]	171.2
Heat pump cooling COP[-]	4.54
Heat pump heating COP[-]	3.67
Design EWT* for cooling[°C]	30.0
Design EWT* for heating[°C]	5.0
Energy pile heat exchanger	
Configuration	double U-tubes in a pile
Pile number/diameter[m]	150/0.4
Pipe outer and inner diameter[mm]	33.4/27.3
Ground characteristics, mean values	
Thermal conductivity[W/mK]	1.49
Thermal diffusivity[m ² /day]	0.59
Volumetric heat capacity[kJ/m ³ K]	2,202

Note) * Entering brine temperature to heat pumps.

$$W_c = 1.9877 + 0.0302EWT + 0.00078EWT^2 \quad (1)$$

$$COP_c = 7.369 - 0.154EWT + 0.0009EWT^2 \quad (2)$$

$$W_h = 4.1416 + 0.0197EWT - 0.00026EWT^2 \quad (3)$$

$$COP_h = 2.724 + 0.074EWT - 0.0008EWT^2 \quad (4)$$

시스템 시뮬레이션은 TRNSYS의 수직형 지중열

교환기 해석 모듈(duct storage model, DST)을 수정한 TRNVDSTP 모델⁽¹³⁾을 이용하였다. 기존 DST 모델은 토양층의 평균 열물성을 적용하는 반면, TRNVDSTP 모델은 에너지파일 주변 토양층 각각에 대한 열물성과 지하수 유동 그리고 수평 배관에 의한 열손실 등을 고려한 후 외재적 유한차분법(explicit FDM)을 적용하여 순환수와 지중 토양 사이의 열전달량을 계산하게 된다.

성능 시뮬레이션 시, 에너지 파일의 직경 · 길이 · 개수 · 간격 등의 조건과 파일 주변 3개 토양층의 열전도도(1.0, 1.5, 3.0 W/mK)와 지하수 흐름(1.16×10^{-6} m/s) 등의 지반 조건 그리고 히트펌프의 성능 특성 등을 입력 변수로 하였다. 아울러 각각의 에너지파일 출구부터 히트펌프까지 연결된 수평 배관의 길이는 실제 시공 길이인 3,194 m를 적용하였다. 먼저 단기간(1년, 8760시간) 동안 에너지파일 순환수의 히트펌프 입 · 출구 온도 변화와 열전달량 그리고 시스템 에너지 소비량 등을 분석하였으며, 동일한 입력 변수를 적용하여 최대 50년까지 성능을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에너지파일 순환수의 온도 변화

Fig. 5는 에너지파일을 적용한 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 1년 동안의 성능을 분석한 결과 중, 에너지파일 순환수의 시간대별 온도 변화를 도시한 것이다. 그림에서 에너지파일 순환수의 히트펌프 입 · 출구 온도는 시간대별 부하 변동에 상응하여 변

(a) Cooling performance

(b) Heating performance

Fig. 4 Cooling and heating performance of a heat pump unit used in this simulation.

Fig. 5 EWT and LWT variation of energy piles during 1st year.

하였다. 아울러 에너지파일 순환수의 히트펌프 입구 온도(EWT)는 설계 온도인 5°C(난방)와 30°C(냉방) 사이에 있음을 볼 수 있으며, 최고·최저 온도는 각각 23.8°C(8월 16일)와 7.9°C(2월 20일)로 계산되었다. 냉방 성능만 본다면 에너지파일이 다소 과하게 설치된 것으로 보이지만, 난방 성능까지 고려하면 적절한 용량의 에너지파일이 설치된 것으로 판단된다.

3.2 단기 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 난방 기간 중, 1월과 3월의 대표적인 난방 주간(14일)에 대하여 대상 건물의 시간대별 에

너지 부하량과 에너지파일 순환수의 온도 변화를 나타낸 것이다. 본 분석에서는 건물특성을 고려하여 오전 8시부터 오후 10시(14시간)까지 시스템이 운전되는 것으로 가정하였다. 따라서 건물의 에너지 부하량과 운전 시간에 따라 EWT는 감소와 회복 과정을 반복하였다. 난방 기간 중 시스템이 24시간 연속 운전될 경우, EWT는 지속적으로 감소할 것으로 예상된다. 연속 운전과 비교했을 때 비록 감소율에서는 차이가 있을 것으로 예상되지만, Fig. 6(a)에서 보듯이 난방부하가 증가함에 따라 일별 최저 EWT가 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 1월과 3월 결과를 비교했을 때, 난방부하가 상대적으로 큰 1월의 온도 변화폭이 3월보다 크게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 7월과 8월의 대표적인 냉방 주간에 대하여 대상 건물의 에너지 부하량과 에너지파일 순환수의 온도 변화를 시간대별로 나타낸 것이다. 시스템 운전 시간과 냉방 에너지부하 변동에 따른 에너지파일 순환수의 온도 변화 그리고 월별 부하의 상대적 크기에 따른 온도 변화 폭에 대한 경향은 앞선 난방 경향과 유사하였다. 또한 7월에서 8월로 냉방 부하가 증가함에 따라 일별 최고 EWT도 증가하였다.

Fig. 8은 1년 동안의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 지중열교환기의 열전달 성능과 시스템의 계간성능계수(SPF) 등을 월별로 나타낸 것이다. 그림에서 1월 결과를 보면, 부하(34.60 MWh)를 감당하기 위해 24.14 MWh의 에너지를 지중에서 추출하고 이때 10.46 MWh의 전력을 소비하는 것으로 계산되었다. 또한 8월에는 30.39 MWh의 에너지를 지중으

(a) January

(b) March

Fig. 6 Simulated variation of EWT, LWT, and heating loads in typical heating season.

Fig. 7 Simulated variation of EWT, LWT, and cooling loads in typical cooling season.

Fig. 8 Monthly energy transfer and SPF variation of a GHP system during 1st year.

로 방출하는 것으로 예측되었다. 전체적으로 본 시스템은 난방 부하(133.1 MWh)를 감당하기 위해 96.11 MWh의 에너지를 지중에서 추출하며, 이때 36.97 MWh의 전력을 소비한다. 또한 냉방 기간(54.1 MWh) 중 총 65.68 MWh의 에너지를 지중으로 방출하며, 11.60 MWh의 전력을 소비하는 것으로 분석되었다.

3.3 장기 시뮬레이션 결과

Fig. 9는 20년이 되는 해의 에너지파일 순환수의 온도 변화를 도시한 것이다. 전체적인 변화 경향과 최고·최저 EWT 출현 시점 등은 앞선 1년 동안의 계산 결과와 유사하였다. 또한 최고·최저 온도는 각각 23.05°C와 6.98°C로 계산되었으며, 이 역시 설계 EWT인 5°C와 30°C 사이에 있음을 확인할 수

Fig. 9 EWT and LWT variation of energy piles during 20th year.

있다. 다만 난방 에너지 부하가 냉방 부하보다 상대적으로 크기 때문에, 최고·최저 EWT는 시간이 경과함에 따라 다소 감소하는 것으로 예측되었다.

Fig. 10은 에너지파일 지중열교환기의 월별 에너지 전달량과 연도별 최고·최저 EWT를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 보듯이 본 시스템에 적용된 에너지파일은 장기간에 걸쳐 안정적인 성능을 보이는 것으로 예측되었다. 또한 Fig. 10(b)에서 보듯이, 50년 운전 후 최고·최저 EWT는 약 1°C 감소하였다. 시간 경과에 따른 EWT의 저하는 난방 성능 감소로 이어지는 반면, 냉방 성능에는 유리하게 작용한다. 하지만 본 시뮬레이션을 통한 온도 저하는 무시할만한 수준인 것으로 판단된다.

(a) Energy transfer of energy piles

(b) Maximum and minimum EWT variation

Fig. 10 Long term simulation results of energy pile ground heat exchanger.

Fig. 11은 시스템의 장기간에 걸친 에너지수지 (energy balance)를 나타낸 것이다. 시스템의 냉난방 계간성능계수는 각각 4.68과 3.59인 것으로 예측되었다. 난방부하를 감당하기 위해 연간 96.0 MWh의 에너지를 지중에서 추출하며, 냉방을 위해 연간 65.6 MWh의 에너지를 지중으로 방출하는 것으로 분석되었다. 아울러 시스템의 연간 소비전력은 48.6 MWh로 예측되었다. Table 2는 에너지파일의 단위 길이당 열전달 성능과 연간 에너지 전달량 그리고 시스템 성능에 대한 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 에너지파일 이용 지열 히트펌프

시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 이를 위해 대상 건물의 최대 냉난방 부하와 시간대별 에너지 부하를 계산한 후, 이에 상응하는 히트펌프를 선정하였다. 각종 입력변수를 바탕으로 에너지파일 순환수의 온도 변화와 에너지파일의 열전달 성능 그리고 시스템의 에너지 소비량 등을 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 분석 기간에 상관없이 에너지파일 순환수의 히트펌프 입·출구 온도는 시간대별 부하 변동에 상응하여 변화하였으며, 단기간(1년)에 걸친 시뮬레이션에서 최고·최저 EWT는 각각 23.8°C와 7.9°C로 계산되었다.

(2) 난방(133.1 MWh)을 위해 96.11 MWh의 에너지를 지중에서 추출하며, 36.97 MWh의 전력을 소비한다. 또한 냉방(54.1 MWh) 중 65.68 MWh의 에너

Fig. 11 Averaged energy balance of the system with 20 years of prediction time.

Table 2 Simulation results

Categories		1st year	20 years, mean
Maximum heat injection or extraction rate[W/m]	cooling	101.9	102.4
	heating	36.1	35.7
Annual injected or extracted energy[kWh/m · year]	cooling	31.8	32.3
	heating	46.0	45.8
Annual EWT-LWT(cooling) or LWT-EWT(heating)[°C]	cooling	6.77	6.74
	heating	2.06	2.01
Injected over extracted energy ratio[%]		68.0	67.8
Seasonal performance factor of the system[-]	cooling	4.69	4.68
	heating	3.60	3.59
Average annual power consumption[kWh/year]		48,570	48,635

지를 방출하며, 11.60 MWh의 전력을 소비하는 것으로 분석되었다.

(3) 본 건물의 난방 부하는 냉방보다 상대적으로 크기 때문에 최고·최저 EWT는 시간이 경과함에 따라 다소 감소하는 것으로 예측되었다.

(4) 본 건물에 적용된 에너지파일과 지중 간의 에너지 전달은 장기간에 걸쳐 안정적으로 이루어지는 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20093040110010).

참고문헌

- Brandl, H., 2006, Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Geotechnique*, Vol. 56, No. 2, pp. 81-122.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, S. K., and Yang, J., 2008, Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers : a case study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 2295-2304.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., and Ochifuji, K., 2007, Field performance of an energy pile system for space heating, *Energy and Buildings*, Vol. 39, pp. 517-524.
- Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L., 2006, Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile, *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30, pp. 763-781.
- Katsura, T., Nagano, K., and Takeda, S., 2008, Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1995-2004.
- Wood, C. J., Liu, H., and Riffat, S. B., 2010, An investigation of the heat pump performance and ground temperature of a piled foundation heat exchanger system for a residential building, *Energy*, Vol. 35, pp. 4932-4940.
- Zhang, X., Liu, J., Gao, J., and Li, K., 2008, Research on ground temperature restoration characteristics of large-scale ground source heat pump system, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 16, No. 4, pp. 109-116.
- Man, Y., Yang, H., Diao, N., Liu, J., and Fang, Z., 2010, A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2593-2601.
- Yoo, G. S., Park, I. M., Choi, J. H., and Shin, H. J., 2009, Performance evaluation of large borehole ground-loop heat exchanger, *Proceedings of the SAREK*, pp. 58-63.
- Yu, H. K., 2008, Development and performance evaluation of ground heat exchanger uti-

- lizing PHC pile foundation of building, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 5, pp. 56-64.
11. Baek, S. K., An, H. J., and Lim, S. K., 2007, Development of ground heat exchangers installed in building foundation, Proceedings of the SAREK, pp. 277-282.
12. Baek, S. K. and An, H. J., 2004, A study on heat transfer or pile heat exchangers, Proceedings of the SAREK, pp. 1329-1333.
13. Pahud, D., Fromentin, A., and Hadorn, J. C., 1996, The duct ground heat storage model (DST) for TRNSYS used for the simulation of heat exchanger piles-user manual, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, pp. 1-16.