현장 타설 에너지파일을 적용한 지열 히트펌프 시스템의 성능 예측

손 병 후[†], 정 경 식^{*}, 최 항 석^{**}

한국건설기술연구원 그린빌딩연구실, ^{*}(주)에스텍건설팅그룹, ^{**}고려대학교 건축사회환경공학과

Performance Prediction of Geothermal Heat Pump(GHP) System Using Cast-in-Place Energy Piles

Byonghu Sohn[†], Kyung-Sik Jung^{*}, Hangseok Choi^{**}

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

^{*}S-Tech Consulting Group, Seoul 121-856, Korea

^{**}School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received October 31, 2012; revision received December 13, 2012)

ABSTRACT: The aim of this study is to evaluate the performance of the GHP system with 45 cast-in-place energy piles(CEP) for a commercial building. In order to demonstrate the feasibility of a sustainable performance of the system, transient 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 CEPs were 23.91°C and 6.66°C, which were in a range of design target temperatures. In addition, after 20 years' operation, these returning temperatures decreased to 21.24°C and 3.68°C, and finally reached to stable state. Annual average extraction heat of cast-in-place energy piles was 94.3 MWh and injection heat was 65.7 MWh from the 20 years of simulation results. Finally, it is expected this GHP system can operate with average heating SPF of more than 3.45 for long-term.

Key words: Cast-in-place energy pile(현장 타설 에너지파일), Ground heat exchanger(지중열교환기), Geothermal heat pump system(지열 히트펌프 시스템), Cooling and heating performance(냉난방 성능), Transient simulation(동특성 시뮬레이션)

기 호 설 명

COP	: 히트펌프 또는 시스템 성능계수 [-]	Q_L	: 시간대별 건물 부하 [kWh]
E	: 에너지 전달량 [kWh] 또는 [MWh]	Q_{cep}	: 에너지파일의 열전달량 [kW]
EWT	: 파일 순환수의 히트펌프 입구 온도 [°C]	q_{cep}	: 에너지파일 단위길이당 열전달량 [W/m]
LWT	: 파일 순환수의 히트펌프 출구 온도 [°C]	SPF	: 계간성능계수 [-]
		W_{hp}	: 히트펌프 소비 전력 [kW]

하첨자

[†] Corresponding author

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

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

c : 냉방

h : 난방

1. 서 론

지열 히트펌프 시스템(geothermal heat pump system)은 통상 지열 히트펌프(geothermal heat pump)와 지중열교환기(ground heat exchanger) 그리고 관련 부속 설비 등으로 구성된다. 지열 히트펌프 시스템의 열원(heat source, 난방)과 히트싱크(heat sink, 냉방)인 땅(ground)의 온도는 거의 일정하기 때문에, 시스템은 연중 안정적인 성능을 발휘한다. 특히 여름철 땅 속 온도는 외기 온도보다 낮고 반대로 겨울에는 높기 때문에, 공기열원 히트펌프보다 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 이러한 장점 때문에 지열 시스템은 건물 부문의 냉·난방(급탕) 에너지 소비를 줄일 수 있는 대안으로 많은 관심을 받고 있으며, 국내에서도 설치 사례가 꾸준히 증가하고 있다.

지열 히트펌프 시스템은 다양한 형상과 용량의 지중열교환기를 활용할 수 있지만, 국내에서는 수직 밀폐형 방식(vertical closed-loop type)을 주로 적용하고 있다. 하지만 수직 밀폐형의 초기 투자비가 수평형(horizontal closed-loop)이나 개방형(open type)보다 상대적으로 큰 것이 단점이다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 최근 들어 유럽과 중국 그리고 일본에서는 건물 기초(building foundation)를 지중열교환기로 활용하기 위한 기술 개발⁽¹⁻³⁾에 많은 투자를 하고 있다.

건물 기초는 건물 하중을 지지하기 위해 지반에 삽입한 인공 구조물을 의미한다. 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. 이때 PHC 파일이나 현장 타설 콘크리트 파일에 복수(double) 또는 다수의 U자관을 삽입하거나 또는 W형상이나 코일(coil) 형상의 파이프를 삽입하여 지중열교환기로 활용할 수 있다.⁽⁴⁾ 이러한 에너지파일은 중대형 건물에서 반드시 설치해야 하는 건물 기초(파일)를 활용하기 때문에, 지중열교환기 설치비를 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다. 아울러 수직 밀폐형에 비해 지중열교환기 시공기간도 단축할 수 있을 것으로 예상된다. 반면 대상 건물의 구조 안전성과 바닥 면적 등을 고려하여 기초 파일을 설치하기 때문에 지열 시스템 설계자가 에너지파일의 위치를 조절하는 것은 어렵다.

건물 기초를 지중열교환기로 활용하려는 시도는

1980년대 중반 유럽에서 시작되었으며, 최근 들어 다시 주목받고 있다.⁽⁵⁾ Katsura et al.⁽⁶⁾은 다수의 에너지파일에 대한 열전달 성능을 원통열원 모델(cylinder source model)을 적용하여 분석한 후, 기존 해석기법을 보완하였다. Wood et al.⁽⁷⁾은 21개의 에너지파일을 이용한 단독주택(72 m²)용 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능을 실험을 통해 분석하였다. 난방 운전 중 에너지 파일 순환수와 지중 온도 변화를 측정하였으며, 아울러 에너지 파일의 열전달 성능과 시스템의 계간 난방성능(SPF_h)을 분석하였다.

최근 에너지파일의 설계에 필요한 해석기법과 관련하여 다양한 연구들^(8, 9)이 수행되었으며, 국내에서도 에너지 파일 이용에 대한 관심이 증가하면서 일부 연구들⁽¹⁰⁻¹²⁾이 수행되었다. 대표적으로 Sohn and Choi⁽¹²⁾는 상업용 건물에 적용된 PHC 에너지파일 이용 지열 히트펌프 시스템의 성능을 분석하였다. 성능 분석을 통해 PHC 에너지파일과 시스템의 장단기 열전달 성능을 예측하였다. 이렇듯 국내에서는 PHC 에너지파일과 관련된 연구가 주로 수행되었으며, 현장 타설 에너지파일(cast-in-place energy pile, 또는 ‘에너지파일’)의 열전달 성능과 이를 적용한 시스템의 장단기 성능 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 Fig. 1의 상업용 건물에 현장 타설 에너지파일과 지열 히트펌프를 설치하는 것으로 가정한 후, 동특성 시뮬레이션을 통해 시스템 성능을 분석하였다. 이를 위해 서울의 2009년 외기 데이터를 적용하여 대상 건물의 최대 냉난방 부하와 시간대별 에너지 부하를 계산하였다. 이를 바탕으로 에너지파일 순환수의 온도 변화와 에너지파일의 열전달 성능 그리고 시스템의 냉난방 COP 등을 예측하였다.

Fig. 1 Target building for this simulation.⁽¹²⁾

2. 시스템 설계 및 동특성 시뮬레이션

본 논문에서는 동특성 시뮬레이션에 필요한 입력 변수 중 일부(대상 건물의 냉난방 부하와 히트펌프 성능 특성 등)를 선행연구⁽¹²⁾에서 차용하였다. 대상 건물은 지하 1층과 지상 3층 규모이며, 전체 공조 면적은 2,289 m²이다. 이중 지열 히트펌프 시스템이 지상 1층(1,210 m²)의 냉난방을 감당한다. 지상 1층은 사무실과 입주 상가로 이용되며, 나머지 지하층과 지상 2, 3층은 기계실과 주차장으로 활용된다.

Fig. 2는 대상 건물의 시간대별 에너지 부하를 도시한 것이다. 부하 계산에 필요한 건물 각 부위(외벽 · 내벽 · 바닥 · 지붕 · 창호 등)의 두께와 열전도도 그리고 열관류율 등은 현행 국내 건축법에 명기된 값들을 적용하였다. 또한 환기량, 인체 발열량, 기기와 조명 발열량 등은 기존 연구결과⁽¹³⁾에 제시된 값들을 적용하였다. 시스템 용량 선정에 필요한 냉난방 설계 일(design day)은 8월 16일과 1월 23일이었으며, 따라서 최대(peak) 부하는 각각 171.1 kW(냉방)와 126.5 kW(난방)로 계산되었다. 아울러 에너지부하는 54.1 MWh/y(냉방)와 133.1 MWh/y(난방)인 것으로 계산되었다.

Fig. 3은 히트펌프를 포함한 전체 시스템의 개략도와 에너지파일의 사양을 도시한 것이다. 에너지파일을 적용하기 위해, 대상 건물의 전체 기초 파일 중 45개의 파일을 선정하였다. 여기에 파일당 4개의 U자관(U-tube)을 삽입하는 것으로 가정하였다. 에

Fig. 2 Hourly cooling and heating loads.⁽¹²⁾

너지파일의 평균 깊이와 지름은 각각 20 m와 1.5 m이며, 파일 사이의 평균 간격은 5 m로 하였다. 아울러 그림에서 보듯이 파일 주변 토양은 3개의 토양층(ground layer)으로 구성되어 있으며, 각각의 토양층에 대한 열물성 값들을 시뮬레이션에 적용하였다.

Fig. 4는 대상 건물에 설치된 히트펌프의 성능 특성을 나타낸 것이며, 시스템 성능 분석에도 이를 적용하였다. 히트펌프 성능은 에너지파일 순환수의 히트펌프 유입 온도(EWT)에 따라 변하며, 식(1)에서 식(4)와 같다.

Fig. 3 System layout and enlargement of cast-in-place energy piles.

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

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

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

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

시스템 시뮬레이션은 TRNSYS의 수직형 지중열 교환기 해석 모듈(duct storage model, DST)을 수정한 TRNVDSTP 모델⁽¹⁴⁾을 이용하였다. 기존 DST 모델은 토양층의 평균 열물성만을 고려한다. 반면, 본 모델은 에너지파일 주변의 각각의 토양층에 대한 열물성과 지하수 유동까지 고려한다. 아울러 지하층의 수평배관에 의한 열손실 등을 감안한 후, 외재적 유한차분법(explicit FDM)을 적용하여 순환수와 지중 토양 사이의 열전달량을 계산한다. 다음으로 에너지파일의 열전달량과 히트펌프의 성능 특성을

조합하여 에너지파일 순환수의 히트펌프 입구 온도(EWT)와 출구 온도(LWT) 그리고 히트펌프의 소비전력(W) 등을 계산한다.

Table 1은 시스템 설계와 시뮬레이션에 필요한 입력 데이터 중 대표적인 값들을 정리한 것이다. 현장 타설 에너지파일의 직경 · 길이 · 개수 · 간격 등의 조건과 파일 주변 3개 토양층의 열전도도(1.2, 1.5, 3.1 W/mK)와 지하수 흐름(1.16×10^{-6} m/s) 등의 지반 조건 그리고 히트펌프의 냉난방 성능 특성을 입력 변수로 하였다. 또한 각각의 에너지파일 출구부터 히트펌프까지 연결된 수평 배관의 길이는

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, source side[°C]	30.0
Design EWT* for heating, source side[°C]	5.0
Design LWT** for cooling, load side[°C]	7
Design LWT** for heating, load side[°C]	45
Cast-in-place energy pile	
Configuration	4 U-tubes in a pile
Pile number/diameter[m]	45/1.5
Pile depth[m]	20
Pipe outer and inner diameter[mm]	33.4/27.3
Ground characteristics, mean values	
Thermal conductivity[W/mK]	2.02
Thermal diffusivity[m ² /s]	8.1×10^{-7}
Volumetric heat capacity [kJ/m ³ K]	2,497

* Entering Water Temperature to heat pumps.

** Leaving Water Temperature from heat pumps.

(a) Cooling performance

(b) Heating performance

 Fig. 4 Cooling and heating performance of a heat pump unit used in this simulation.⁽¹²⁾

약 3,000 m를 적용하였다. 이상에서 언급한 각종 입력 데이터를 이용하여, 에너지파일 순환수의 온도 변화와 에너지파일 지중 열교환기의 열전달 성능 그리고 히트펌프의 성능과 에너지 소비량 등을 분석하였다. 이때 분석기간을 단기(1년)와 장기(20년)로 구분하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단기(1년) 성능 분석

Fig. 5는 단기간(1년)에 걸친 에너지파일 순환수의 히트펌프 입구 온도와 출구 온도 변화를 나타낸 것이다. 에너지파일 순환수의 히트펌프 입·출구 온도는 대상 건물의 시간대별 냉난방 부하에 따라 변할 것이며, 이는 Fig. 5에서도 확인할 수 있다. 난방 중 최저 EWT는 6.66°C 이고, 난방 중 최고 EWT는 23.91°C 인 것으로 계산되었다. 따라서 시스템 설계 EWT인 5°C 와 30°C 사이에 있음을 확인할 수 있다. 이때 최저 LWT와 최고 LWT는 각각 4.82°C 와 30.80°C 이었다

Fig. 5 EWT and LWT variation of geothermal heat pump system using cast-in-place energy piles during 1st year.

Fig. 6은 앞선 Fig. 5의 결과를 부하가 집중적으로 걸리는 1, 2월(난방, 60일)과 7, 8월(냉방, 65일)로 구분하여 나타낸 것이다. 본 분석에서는 건물 특

Fig. 6 Simulated variation of EWT and LWT in typical heating and cooling seasons.

성을 고려하여 오전 8시부터 오후 10시(14시간)까
 지 시스템이 가동(간헐 운전 또는 on-off 운전)되는
 것으로 가정하였다. 따라서 Fig. 6(a)에서 보듯이,
 시스템 가동 여부에 따라 EWT는 감소와 회복 과
 정을 반복하였다. 또한 1월과 3월 결과를 비교했을
 때, 난방부하가 상대적으로 큰 1월의 온도 변화폭이
 3월보다 크게 나타났다. 아울러 시간이 지남에 따라
 일별 최저 EWT는 감소하였으며, 이는 시스템 가동
 시간(14시간)을 정지 시간(10시간)보다 길게 설정하
 였기 때문이다. 즉, 열원인 지중온도의 감소율이 정
 지 시 회복률보다 큰 것으로 판단된다. 만약 시스템
 이 24시간 연속 운전될 경우, EWT의 감소율은 14
 시간 운전 때보다 더 클 것이다. 따라서 시스템 설
 계 시, 에너지파일의 열전달 성능과 함께 열원의 회
 복 능력까지 고려할 필요가 있다.

Fig. 6(b)에서 시스템 운전 시간과 냉방 에너지부
 하 변동에 따른 에너지파일 순환수의 온도 변화 그
 리고 월별 부하의 상대적 크기에 따른 온도 변화
 경향은 앞선 난방 경향과 유사하였다. 또한 7월에서
 8월로 냉방 부하가 증가함에 따라 일별 최고 EWT
 도 다소 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 에너지파일의 열전달 특성을 나타낸 것
 이다. 대상 건물의 부하 변동에 따라 에너지파일의
 열전달 특성 역시 변화하였다. 본 시뮬레이션에 적용
 된 에너지파일의 최대 열 추출량(난방)과 방출량

Fig. 7 Heat extraction or injection of cast-in-place energy piles during 1st year.

(냉방)은 각각 74.8 kW와 211.8 kW로 계산되었다.
 이때 에너지파일의 단위 길이당 최대 열 추출량은
 83.3 W/m 그리고 최대 방출량은 236.4 W/m이었다.

Fig. 8은 지열 히트펌프의 냉·난방 COP와 히트
 펌프의 소비전력 변화에 대하여 전체 시뮬레이션
 결과 중 1, 2월과 7, 8월 결과만 선택하여 도시한 것
 이다. 전체적으로 대상 건물의 냉난방 부하 변동에
 따라 히트펌프의 소비전력과 공조 공간으로 공급
 또는 공조 공간에서 제거하는 에너지량(Q_L)이 변화

Fig. 8 Heat pump COP, heat supplied or removed to/from building, and power consumption.

는 것을 볼 수 있다. 평균 냉·난방 COP는 각각 5.13과 3.77인 것으로 분석되었으며, 냉·난방 운전 시 히트펌프의 평균 소비전력은 각각 22.64 kW(냉방)와 16.48 kW(난방)이었다. 아울러 냉방 시 평균 115.09 kW의 부하를 건물에서 제거하며, 난방 시에는 평균 62.12 kW의 에너지를 건물에 공급하는 것으로 분석되었다.

3.2 장기(20년) 성능 분석

Fig. 9는 20년이 되는 해의 온도 변화를 도시한 것이다. 전체적인 변화 경향은 앞선 1년 동안의 계산 결과(Fig. 5)와 유사하였으며, 최고·최저 EWT 출현 시점도 동일하였다. 다만 시스템이 장기간 운전됨에 따라 최저 EWT는 6.66°C(1년)에서 3.68°C(20년)까지 감소하였으며, 이 때문에 최고 EWT도 23.91°C(1년)에서 21.24°C(20년)까지 감소하였다. 본 대상 건물의 예상 냉난방 에너지 사용량 차이 때문에 이와 같은 결과가 예측된 것으로 판단된다. 아울러, 앞서도 기술하였듯이, 열원인 지중온도의 회복 능력이 부하 불균형에 따른 지중온도 감소율보다 작은 것 또한 하나의 원인으로 볼 수 있다.

Fig. 10은 장기간에 걸친 EWT와 LWT의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 연도별 최고·최저 EWT와 LWT 변화 경향을 나타낸 것으로, 20년 이후에는 모든 온도가 거의 안정적으로 유지되었다. 이러한 결과는 월별 최고·최저 LWT 변화를 도시한 Fig.

Fig. 9 EWT and LWT variation of geothermal heat pump system using cast-in-place energy piles during 20th year.

10(b)에서도 확인할 수 있다. 다만 10년을 전후로 감소율이 다르게 나타남을 볼 수 있다. 즉 최저 EWT는 1년에서 10년까지 -39.5% 감소(6.66°C에서 4.03°C)한 반면, 이후 50년까지는 -9.7%(4.03°C에서 3.64°C) 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 최고 EWT는 처음 10년 동안 -9.9%(23.91°C에서 21.54°C) 감소하며 이후 -2.4%(21.54°C에서 21.03°C) 감소하는 것으로 분석되었다. 아울러 5년까지는 최저 EWT가 설계 온도(5°C) 범위를 거의 만족(4.53°C)하지만, 이후 점차 감소하여 범위를 벗어나는 것으로 예측되었다. 하지만 전체 시스템의 성능에 미치는 영향은 거의 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 20년 동안의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 지중열교환기의 열전달 성능과 시스템의 계간성능계수(SPF) 등을 월별로 나타낸 것이다. 그림에서

(a) EWT and LWT during 50 years

(b) Monthly maximum and minimum LWT

Fig. 10 Long-term simulation results of EWT and LWT variation.

Fig. 11 Monthly average energy transfer and SPF variation from 20 years of simulation results.

1월 결과를 보면, 부하(34.60 MWh)를 감당하기 위해 24.11 MWh의 에너지를 지중에서 추출하고 이때 10.49 MWh의 전력을 소비하는 것으로 계산되었다. 또한 8월에는 30.43 MWh의 에너지를 지중으로 방출하는 것으로 예측되었다. 전체적으로 본 시스템은 대상 건물의 난방 부하(133.1 MWh)를 위해 20년 동안 평균 94.3 MWh의 에너지를 지중에서 추출하며, 이때 38.7 MWh의 전력을 소비하는 것으로 계산되었다. 또한 냉방 기간(54.1 MWh) 중 총 65.7 MWh의 에너지를 지중으로 방출하며, 11.5 MWh의 전력을 소비하는 것으로 분석되었다.

앞선 Fig. 11이 20년 동안의 결과를 월 평균 값으로 정리한 것이라면, Table 2는 20년 평균값들을 정리한 것이다. 대표적으로, 본 시스템에 적용된 에너지파일의 단위 길이당 최대 열 추출량은 82.7 W/m

그리고 최대 방출량은 235.8 W/m인 것으로 분석되었다. 아울러 전체 시스템의 냉·난방 계간성능계수(SPF)는 각각 4.72와 3.45인 것으로 예측되었다. 여기서 계간성능계수는 히트펌프와 순환펌프의 소비전력을 모두 고려한 평균 개념으로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상업용 건물에 현장 타설 에너지파일과 지열 히트펌프를 설치하는 것으로 가정 한 후, 동특성 시뮬레이션을 통해 시스템의 성능을 분석하였다. 대상 건물의 최대 냉난방 부하와 시간대 별 에너지 부하 그리고 각종 지중 열물성 데이터를 적용하여 에너지파일 순환수의 온도 변화와 에너지파일의 열전달 성능 그리고 시스템의 냉난방 성능 등을 예측하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 대상 건물의 냉난방 에너지부하량 차이 때문에, 최저 EWT와 최고 EWT는 시간이 지남에 따라 감소하였다.

(2) 장기간(20년) 시뮬레이션 결과에서 현장 타설 에너지파일의 단위 길이당 최대 열 추출량은 82.7 W/m 그리고 최대 방출량은 235.8 W/m인 것으로 분석되었다.

(3) 대상 건물의 난방 에너지부하(133.1 MWh)를 감당하기 위해 20년 동안 평균 94.3 MWh의 에너지를 지중에서 추출하며, 냉방 에너지부하(54.1 MWh)를 감당하기 위해 65.7 MWh의 에너지를 지중으로 방출하는 것으로 분석되었다.

(4) 시스템의 20년 평균 냉·난방 계간성능계수는 각각 4.72와 3.45인 것으로 예측되었다.

(5) 현장 타설 에너지파일의 열전달 성능이나 건

Table 2 Simulation results of cast-in-place energy pile system during 20 years

Categories		1st year	20th year	During 20 years, mean
Maximum heat injection(cooling) or extraction(heating) rate, W/m	cooling	236.4	231.1	235.8
	heating	83.3	78.8	82.7
Annual injected or extracted energy, kWh/m · year	cooling	73.2	72.8	73.2
	heating	107.1	103.9	105.3
Annual EWT-LWT(cooling) or LWT-EWT(heating), °C	cooling	6.89	6.77	6.83
	heating	1.84	1.68	1.76
Injected over extracted energy ratio, %		69.8	69.2	69.3
Seasonal performance factor(SPF) of the system	cooling	4.71	4.76	4.72
	heating	3.64	3.42	3.45
Average annual power consumption, kWh/year		48,808	50,689	50,250

물 부하와 시스템 운전 시간에 따른 순환수의 온도 변화 등은 에너지파일 시스템을 설계하는 데 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20113030110010).

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Brandl, H., 2006, Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Geotechnique*, Vol. 56, No. 2, pp. 81-122.
5. Bozis, D., Papakostas, K., and Kyriakis, N., 2011, On the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1020-1029.
6. 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.
7. 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.
8. Li, M. and Lai, A., 2008, Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers, *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 451-458.
9. 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.
10. 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.
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. Sohn, B. and Choi, J. M., 2012, Performance prediction of geothermal heat pump(GHP) system with energy pile using simulation approach, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 155-163.
13. Hwang, J. S. and Kim, K. S., 2012, Energy performance evaluation of a office building using DOE-2 simulation program, *Proceedings of the KIAEBS 2009 Autumn Annual Conference*, pp. 238-243.
14. 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.