

# Barrette 파일을 이용한 지열시스템의 채열 성능 예측 및 경제성 분석에 관한 연구

## An Economic Analysis and Performance Prediction for a Ground Heat Pump System with Barrette Pile

채호병(Ho-Byung Chae)<sup>1</sup>, 남유진(Yujin Nam)<sup>1\*</sup>, 박용부(Yong-Boo Park)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>청주대학교 건축공학과, <sup>2</sup>토지주택연구원

<sup>1</sup>Department of Architecture Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

<sup>2</sup>Research Fellow, Land and Housing Institute, Deajeon 305-731, Korea

(Received July 26, 2013; revision received September 27, 2013)

**Abstract** Ground source heat pump systems (GSHP) can achieve higher performance of the system, by supplying more efficient heat source to the heat pump, than the conventional air-source heat pump system. But building clients and designers have hesitated to use GSHP systems, due to expensive initial cost, and uncertain economic feasibility. In order to reduce the initial cost, many researches have focused on the energy-pile system, using the structure of the building as a heat exchanger. Even though several experimental studies for the energy-pile system have been conducted, there was not enough data of quantitative evaluation with economic analysis and comprehensive analysis for the energy-pile. In this study, a prediction method has been developed for the energy pile system with barrette pile, using the ground heat transfer model and ground heat exchanger model. Moreover, a feasibility study for the energy pile system with barrette pile was conducted, by performance analysis and LCC assessment. As a result, it was found that the heat exchange rate of a barrette pile was 2.55 kW, and the payback period using LCC analysis was 8.8 years.

**Key words** Ground source heat pump system(지열이용 시스템), Numerical simulation(수치시뮬레이션), Building foundation(건물 기초), Economic analysis(경제성 분석)

\* Corresponding author, E-mail: [namyujin@cju.ac.kr](mailto:namyujin@cju.ac.kr)

### 기호설명

$C$	: 순환수의 비열 [W/kg °C]
$M$	: 순환수의 유량 [kg]
$\Delta T$	: 순환수의 온도차 [°C]
$PF$	: 비반복비용의 현재가치의 합 [Won]
$PA$	: 반복비용의 현재가치의 합 [Won]
$A$	: 연간 등가발생 비용 [Won]
$F$	: 미래가 [Won]
$P$	: 현가환산 [Won]
$I$	: 실적이자율 [%]
$n$	: 분석기간 [year]

### 1. 서 론

지열이용 시스템은 지중의 항온성을 활용하여 히트 펌프에 상대적으로 효율적인 열원을 공급함으로써 에

너지절약을 도모하는 온도차에너지 이용기술로, 최근 기술개발 및 보급이 활발하게 이루어지고 있다. 국내 지열시스템의 보급은 주로 수직밀폐형과 SCW형이 대부분을 차지하고 있다. 하지만, 이러한 시스템은 지중 열교환기의 설치를 위해 지하 100 m 이상 천공하게 되며 이때 발생하는 굴삭비용 및 초기 설치비 등은 본 시스템의 도입비용 증가 요인으로 작용한다. 이를 극복하기 위해, 최근 국내외 건설사를 중심으로 초기 투자비를 절감하기 위한 기술개발을 수행하고, 특히, 건물의 구조체를 지중열교환기로서 겸용하는 에너지파일 시스템에 대한 연구 및 개발이 이루어지고 있다. Hwang and Nam<sup>(1)</sup>은 현장타설형 건물 기초를 이용한 지중열공조시스템의 성능평가에 관한 연구를 수행하였으며, Min et al.<sup>(2)</sup>는 에너지 파일의 열교환 효율 및 열응력에 의한 역학적 거동에 대한 평가를 실시하였다. 또한, 국외에서는 Bozis et al.<sup>(3)</sup>가 매개변수에 따른 에너지파일의

열교환 성능에 대한 평가를 실시하였고, Gao et al.<sup>(4)</sup>은 말뚝 기초의 열교환기 형상에 따른 열교환 성능을 분석하였다. 하지만, 에너지파일 시스템의 채열 성능에 대한 실험적, 해석적 연구들은 있으나, 도입 경제성까지 분석한 연구는 드물고, 실제 적용을 위해 필요한 정량적 평가 자료가 부족한 것이 현실이다.

따라서, 본 논문에서는 지중구조체인 Barrette 파일을 지중열교환기로 이용한 에너지파일의 지중채열성능을 검토하기 위해 지중열 이동 모델 및 지중열교환기 모델에 근거한 채열량 예측 시뮬레이션을 실시하고, LCC 분석에 근거한 도입 타당성 및 초기투자비 회수기간 분석을 수행하였다.

## 2. 대상 건물의 개요

본 연구에서는 지중구조체인 Barrette 파일을 지중열교환기로 이용한 에너지 파일을 사용하였을 경우, 채열성능을 예측하고 기존 공랭식 시스템과의 경제성 비교 평가 및 회수기간 분석을 실시하였다. Fig. 1은 대상 건물의 형태 및 Barrette 파일의 설치 위치를 나타낸다. 대상 건물은 오피스 빌딩으로 규모는 지상 8층, 연면적 6,600 m<sup>2</sup>, 공조면적은 4,840 m<sup>2</sup>으로서, 건물의 형태는 1층부터 8층까지 모두 동일한 구조이며, 각 층의 연면적은 826.6 m<sup>2</sup>이다. 선행연구<sup>(5)</sup>에서 동일모델로 연간 냉난방 부하 계산을 수행한 결과, 피크부하는 748 kW였으며 기기 용량은 775 kW였다. 본 연구에서는 기존의 공랭식 시스템이 담당하고 있는 부하의 일부를 에너지 파일을 이용한 지열 시스템이 담당한다고 가정하였을 경우에 대해 LCC 분석에 근거한 경제성 평가를 실시하였다.

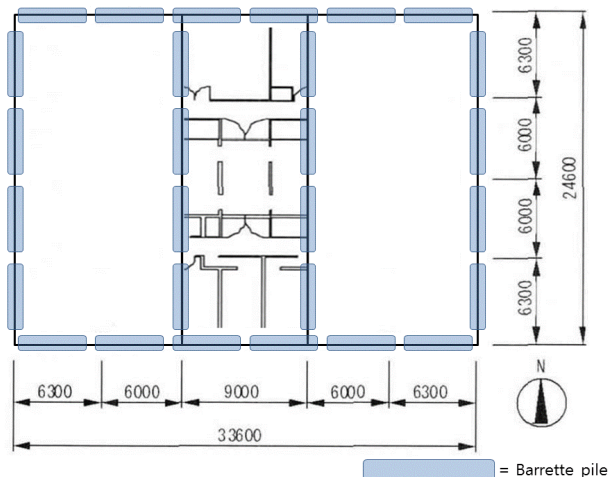


Fig. 1 Installation location of barrette pile.



Fig. 2 Construction situation of barrette pile.

## 3. 시뮬레이션 개요

### 3.1 시뮬레이션 대상

Barrette 파일은 타설 단면이 직사각형 형태로서 지중에 시공되는 콘크리트 피어의 일종이다. 이는 수직·수평하중에 저항하는 휨하중과 횡력에 강하므로 대규모 공사나 Top-Down 공사에 널리 이용되고 있다.<sup>(6)</sup>

Fig. 2는 Barrette 파일의 시공현장을 나타낸다. 철근케이지는 가로 5,400 mm, 세로 800 mm로 장변의 외주에 열교환 파이프가 결속되어 있다. 총 12개의 PB파이프가 직렬로 연결된 형상을 하고 있으며, 지표면으로부터 약 15 m 깊이까지 설치되었다. 또한 열교환 파이프의 외경 25 mm(허용오차 ±0.3 mm), 두께 2.3 mm(허용오차 ±0.4 mm)이고, 철근케이지 외부와 토양사이의 이격거리는 263 mm로 설치되었다.

### 3.2 해석개요

Fig. 3은 Barrette 파일의 해석모델의 개요도<sup>(7)</sup>를 나타낸다. 지중열교환 파이프는 U자관을 직렬로 연결한 방식으로 시공 시 파이프의 이격거리를 고려하여 작성하였다. Barrette 파일의 내부는 콘크리트 충전으로 설정하여 해석을 실시하였다.

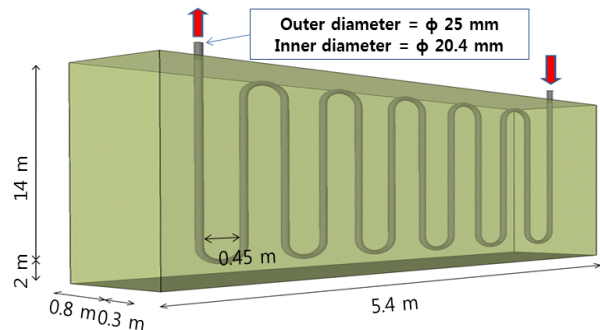


Fig. 3 Layout of a heat exchanger in barrette pile.

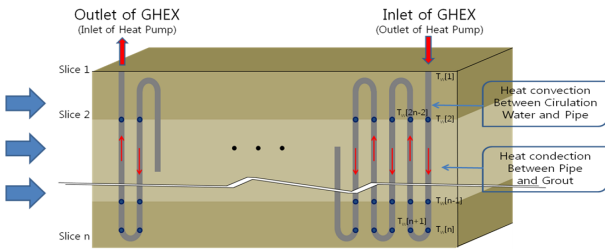


Fig. 4 Overview of simulation calculation.

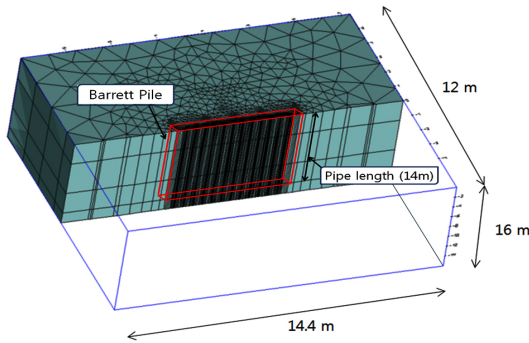


Fig. 5 Simulation model.

Fig. 4는 시뮬레이션의 계산 개요를 나타낸다. 본 연구에서는 선행연구<sup>(8)</sup>에서 개발된 순환수 모델을 이용하여 파이프 내 순환수 온도변화 및 채열량 예측을 실시하였다. 지중 채열 및 방열에 의한 온도변화를 정확하게 해석하기 위해, 지하수-지중열 이동 해석툴(FEFLOW)을 사용하여 연성계산을 실시하였다.

한편, Fig. 5는 해석코드(FEFLOW)를 이용하여 작성한 해석모델을 나타낸다. 유한요소법을 바탕으로 한 Triangle Mesh를 이용하여 지중열교환기 및 보어홀의 형상을 구체적으로 형상화하였다. 해석영역은 가로 14.4 m × 세로 12 m × 깊이 16 m로 하였고, 지중열교환기와 파이프의 길이는 14 m로 설정하였다. 지중채열량 해석은 건물 난방을 위한 채열운전을 대상으로 실시하였고, 운전패턴을 고려하여 오전 9시~오후 6시까지 9시간 동안 운전을 실시하였다. 또한, 순환수 온도 제어는 시스템 COP 저하를 방지하기 위해 5°C 이상 유지하도록 난방부하량을 조절하였다. 순환수의 유량은 열교환 효율 및 유속에 따른 펌프 소비전력을 고려하여 3.0 L/min로 설정하였다. Table 1은 본 시뮬레이션의 기본 조건을 나타낸다.

시뮬레이션의 열물성치 설정에서 지중열교환파이프는 PB 재질의 일반적인 열전도율 0.54 W/mK로 설정하였다. 한편, 토양은 일반적인 토양 조건을 고려하여 열전도율 3.0 W/mK, 공극율 0.3으로 가정하였고, 천공내부는 콘크리트(열전도율 : 1.5 W/mK, 열용량 : 2.8 MJ / m<sup>3</sup>K)를 충전하는 것으로 설정하였다. 파이프는 지하수위 아래 설치되어 있는 것으로 가정(포화조건)하고, 지하수흐름을 없는 것으로 설정하였다. 본 논문에서는 지중열교환

Table 1 Condition of barrette pile

Ground heat exchanger	Outer diameter : 25 mm Inner diameter : 20.4 mm (Grout : concrete)
Domain	14.4 m × 12 m × 16 m
Heat source condition	above 5°C, ΔT 10°C
Operation condition	1/1 ~ 1/31(heating), 9:00 ~ 18:00
Initial temperature	16°C

(채열 및 방열) 중 보다 열악한 환경인 난방기간의 시뮬레이션을 실시하고, 동일한 열량을 하계에 방열하는 것으로 가정하고 성능 평가를 실시하였다.

### 3.3 해석결과

운전 개시 후, 지중으로부터의 채열로 인해 첫 번째 파이프의 주변온도부터 하강하기 시작하여 30일 이후에는 전체 파이프주변의 지중온도가 하강하는 양상(Fig. 6~Fig. 7)을 나타내고 있다. Fig. 8은 지중채열량 예측 시뮬레이션 결과로서 동계 채열시 지중열교환기내 순환수의 출입구 온도변화를 나타낸다. 순환수의 출입구 온도차는 운전개시 1주일까지 일정하게 유지되나, 순환수의 평균온도는 0.6°C 정도 하강하였다. 이것은 난방시 채열에 의한 지중온도 하강의 영향으로 볼 수 있으나, 일반적인 Single-U튜브 방식에 비해 운전시 열원온도 하강속도가 느린 것으로 보아 운전초기에는 설정온전보다 더 많은 채열을 할 수 있는 것으로 고려된다.

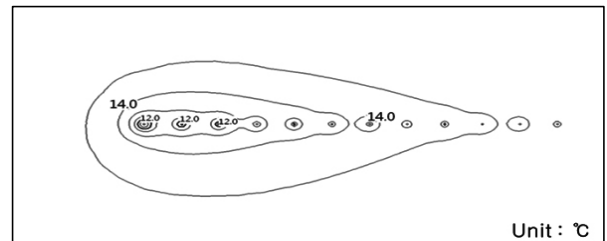


Fig. 6 Temperature distribution around heat exchanger (15th day, 18:00).

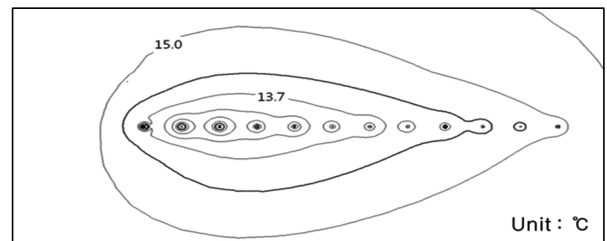


Fig. 7 Temperature distribution around heat exchanger (30th day, 18:00).

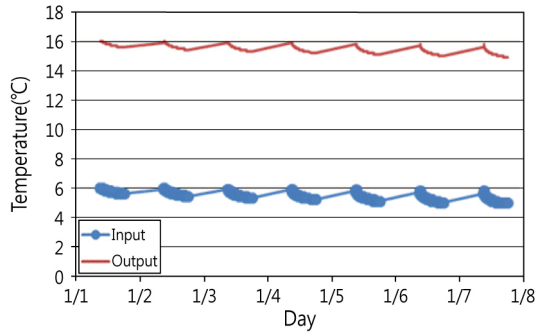


Fig. 8 Change of circulation water temperature.

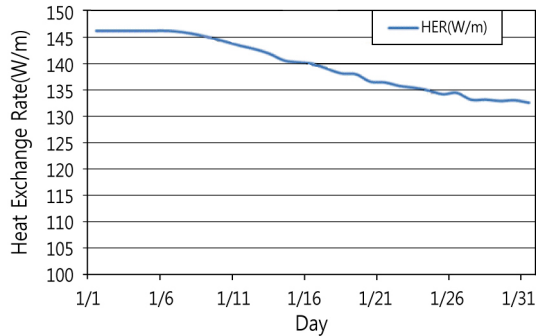


Fig. 9 Change of the daily heat exchange rate.

한편, Fig. 9는 1개월 운전시의 일평균 지중채열량 변화를 나타낸다. 지중채열량은 순환수의 비열 및 유량, 출입구온도차의 곱으로 아래와 식(1)과 같이 계산하였다.

$$Q = C \times M \times \Delta T \quad (1)$$

그 결과, 운전개시와 함께, 채열량 2.1 kW의 채열이 가능하였으나 7일 운전 이후, 순환수 출입구의 온도차가 점차 줄어들어, 1개월 운전 후의 채열량은 1.90 kW로 나타났다. 본 계산 결과를 토대로 Barrette 파일을 이용한 지중 열교환 시스템의 평균 채열량은 2.06 kW로 예측되었다.

한편, 해석 대상으로 고려한 파이프의 총 길이는 168 m로서 파이프 단위 길이당 채열량을 계산하면, 12.26 W/m로 계산된다. 이것을 이용하여, 실제 시공한 파이프 총길이(208 m)에 대한 채열량으로 계산하면, 본 Barrette 파일의 지중채열량은 2.55 kW로 예상된다.

## 4. 에너지 파일의 성능분석

### 4.1 Barrette 파일의 COP 산출

Fig. 10은 열원수 온도에 따른 수열원 히트펌프의 성능

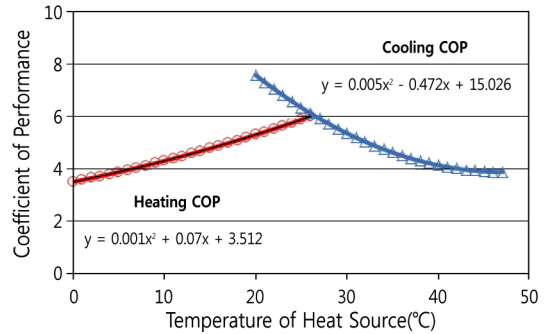


Fig. 10 Performance curve of heat pump.

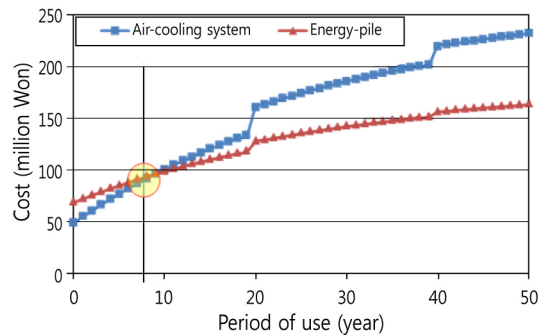


Fig. 11 Life cycle cost of systems during operation period.

곡선<sup>(9)</sup>으로 2차측 온도조건이 냉방에서 7~12°C, 난방에서 40~45°C일 때의 히트펌프 COP(Coefficient of Performance)를 나타낸다. 수열원 히트펌프의 성능곡선을 이용하여 Barrette 파일의 히트펌프 COP를 산출한 결과, Barrette 파일의 COP는 4.75(난방)로 나타났다. 또한 실의 온도 변화에 따른 공랭식 히트펌프의 시스템의 성능 특성<sup>(10)</sup>을 이용하여 공랭식 시스템의 연평균 COP를 도출하였다.

## 5. 경제성 분석

### 5.1 초기투자비 및 운전비용 산출

본 시스템의 초기투자비용 산출은 에너지관리공단 신재생에너지 월별 기준단가(Table 2 참조), 사단법인 한국물가정보, 다수의 지열전문 업체의 견적서를 참고하여 산정하였다. 그 결과, 공랭식 시스템과 Barrette 파일의 초기투자비는 각각 4,850만 원, 6,833만 원으로 계산되어, 지열 시스템의 초기 투자비가 공랭식에 비해 1.4배정도 높은 것을 알 수 있었다. 한편, 운전시의 소비전력은 본 시스템이 담당하는 부하량 78 kW에 대해 제 3장에서 산출한 히트펌프 평균 COP의 비로 산출하였고, 운전비용 분석에 있어서는 냉난방 각각 4개월로 9시부터 18시까지의 운전기간을 설정하여 한국전력공사 요금 산정 기준에

Table 2 Standard cost of geothermal equipment

Classify		Cost
Commercial Building	Closed-vertical type	1,260/kW
Housing	Closed-vertical type	below 10.5 kW
		above 10.5 kW
		~ below 17.5kW
		1,690/kW

(Unit : thousand-won)

Table 3 Life cycle cost of energy pile systems

Classify	Air-cooling system	Energy pile
Maintenance Cost	1,000	300
Initial Cost	48,500	68,326
Operation Cost	5,302	3,348
Decommissioning cost	15,000	15,000
Period of use	20 (years)	50 (years)
		(heat pump : 20 years)

(Unit : thousand-won)

근거하여 계산하였다. 그 결과, 공랭식 시스템과 Barrette 파일의 운전비용은 각각 5,302천원/년, 3,348천원/년으로 나타났다. 해체폐기비용의 경우, 비용의 추계가 힘들고 실례가 없기 때문에 지열전문 업체를 통한 예상 비용으로 추정하였다. Table 3은 개발 시스템과 기존 공랭식 시스템의 경제성 분석 결과로서 초기투자비, 운전비, 유지관리비용 및 해체폐기비용 등을 나타낸다.

### 5.2 LCC 분석

본 연구에서는 생애주기비용과 회수기간을 구하기 위해 한국은행 기준금리의 10년간 평균 할인율인 3.66%를 적용하여 현가법으로 계산하였다. 초기비용 및 해체폐기비 등의 비반복 비용은 식(2)을 이용하였고, 운전비용 및 유지관리비 등의 반복 비용은 식(3)를 이용하였으며, 두 계산치의 합(식(4))으로 건물 생애기간 총비용을 산출하였다.

$$P_F = F \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2)$$

$$P_A = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (3)$$

$$P = P_F + P_A \quad (4)$$

### 5.3 생애주기비용 계산

대상 건물의 사용기간을 50년이라 가정하였을 경우, 생애주기 기간 동안 공랭식 시스템은 321,997천원, 에너지 파일은 163,080천원의 비용이 발생하였다. 또한 LCC 분석을 통해 초기투자비 회수기간을 계산한 결과, 8.8년으로 나타나, Barrette 파일을 이용한 에너지 파일 시스템의 경제성을 확인하였다. Fig. 11은 LCC 분석 결과로서 경과년수에 따른 생애주기 비용을 나타낸다.

### 6. 결론

본 논문에서는 지중구조체인 Barrette 파일을 지중열교환기로 이용한 에너지파일의 지중채열성능을 검토하기 위해 지중열 이동 모델 및 지중열교환기 모델에 근거한 채열량 예측 시뮬레이션을 실시하였고, LCC 분석을 통하여 도입 타당성 및 투자비 회수기간에 대하여 분석을 수행하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Barrette 파일의 파이프 단위 길이당 평균채열량은 12.26 W/m였다. 또한 이때의 평균열원 수 온도는 14.66℃로 비교적 높은 온도를 유지할 수 있었다.
- (2) 지중열교환 파이프 208 m를 설치한 실제현장 Barrette 파일 한 개의 지중채열량은 2.55 kW로 계산되었다.
- (3) 건물의 총 생애기간 동안 초기투자비, 운전비용, 유지관리비, 해체폐기비 등을 고려한 결과 에너지 파일을 사용할 경우, 약 68,917천원을 절약할 수 있다.
- (4) LCC 분석을 통해 초기투자비 회수기간을 계산한 결과, 8.8년으로 나타났다.

향후 보다 다양한 조건에서의 케이스 스터디를 실시하여 본 시스템의 최적설계수법을 확립할 예정이다.

### Reference

1. Hwang, S. H. and Nam, Y. J., 2010, A study on development of a ground-source heat pump system utilizing cast-in-place concrete pile foundation of a building, Journal of SAREK, Vol. 22, No. 9, pp. 641-647.
2. Min, S. H., Lee, C. H., Park, M. S., Koh, H. S., and Choi, H. S., 2010, Numerical study of heat transfer efficiency, performance and mechanical behavior induced by thermal stress of energy pile, Journal of KSGEE, Vol. 6, No. 2, pp. 9-13.
3. Bozidis, D., Papakostas, K., and Kyriakis, N., 2011, On the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles, Energy and Build-

- dings, Vol. 43, No. 4, pp. 1020-1029.
4. Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. S., and Yang, J., 2008, Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchanger : A case study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 17, pp. 2295-2304.
  5. Ryoza, O., Nam, Y. J., and Hwang, S. H., 2007, Ground-source heat pump system utilizing pile foundation of a building, *Journal of Geothermal Energy*, Vol. 3, No. 1, pp. 51-60.
  6. Land and Housing Institute, 2012, Development of design and construction criteria for underground heat exchangers utilizing building foundation.
  7. Chae, H. B. and Nam, Y. J., 2010, Study on the prediction method of heat exchange rate for the ground heat pump system with energy-pile, 2010, Fall conference of KIAEBS, pp. 215-218.
  8. 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, No. 12, pp. 2133-2140.
  9. Nam, Y. J., 2011, Numerical analysis of the effect of ground and groundwater conditions on the performance of ground source heat pump system, *Journal of SAREK*, Vol. 23, No. 5, pp. 321-326.
  10. Jun, C. H., Lee, H. S., Kim, J. D., and Yoon, J. I., 2006, Performance characteristics of air-cooling heat pump system using hydrocarbon refrigerants according to variation of outdoor temperature, *Journal of SAREK*, Vol. 18, No. 3, pp. 218-224.