

수치해석을 통한 저심도 유닛형 지중열교환기의 성능 검토

Performance Analysis of a Low-Depth Unit-Type Ground Heat Exchanger using Numerical Simulation

오진환(JinHwan Oh)¹, 서장후(JangHoo Seo)², 남유진(Yujin Nam)^{3*}

¹부산대학교 건축공학과 대학원, ²국민대학교 건축학부, ³부산대학교 건축공학과

¹Department of Architecture, Graduate School, Pusan National University, Busan 612-050, Korea

²School of Architecture, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

³Department of Architecture, Pusan National University, Busan 612-050, Korea

(Received December 9, 2014; revision received January 26, 2015; Accepted: January 30, 2015)

Abstract Recently, ground source heat pump (GSHP) systems have attracted much attention, according to the enhanced social demand of renewable energy. GSHP systems can achieve higher coefficient of performance than the conventional air-source heat pump systems by utilizing stable underground temperature. However, the initial cost of GSHP system is higher than that of the conventional systems, especially, in the small-size buildings. Therefore, it is necessary to develop small-size ground heat exchanger with low cost and quick installation. In this study, a unit-type ground heat exchanger was developed and heat exchange rate was calculated by the numerical simulation. As a result, 27.45 W/m of heat exchange rate was acquired in the condition of 0.5 m × 0.2 m × 2 m unit.

Key words Ground heat exchanger(지중열교환기), Numerical simulation(수치해석), Performance analysis(성능검토), Heat exchange rate(열교환량)

* Corresponding author, E-mail: namyujin@pusan.ac.kr

1. 서 론

지열 히트펌프 시스템은 연중 일정한 온도를 유지하는 안정적인 열원의 활용과 기존의 공기식 히트펌프 시스템에 비해 에너지 효율이 뛰어나 보급이 증가되고 있다. 하지만, 이러한 지열 시장의 현저한 성장에도 불구하고 일반 주택의 세대 냉난방이나 소규모 건물의 적용은 미흡하다. 지열시스템의 보다 획기적인 보급을 위해서는 저시공비로 용이하게 설치가 가능한 기술이 필요하다. 한편, 일반적인 수직밀폐형 지중열교환기 시스템은 천공비, 기기 반입비, 그라우팅비 등 높은 초기 투자비와 설치가 쉽지 않고 시공에 대한 신뢰성이 낮아 타 에너지 시스템과의 시장 경쟁력에서 불리한 조건을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 국·외에서 시뮬레이션과 실험을 통한 많은 연구들이 진행되고 있다. 국내에서는 Hwang et al.⁽¹⁾이 초기투자비 절감과 보급 및 실용화를 목표로 현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열교환기 시스템을 제안, 실험을 통한 시스템 성능검

증을 실시하였으며, Nam et al.⁽²⁾은 시뮬레이션을 활용한 심도, 파이프 간격, 유량의 변화에 따른 수평형 지열시스템의 채열성능 예측을 실시하였다. 그 결과, 매설 간격이 클수록 더 많은 채열이 가능하고 심도 2 m와 5 m의 채열량 차이는 약 25%로 나타남을 확인하였다. 또한, Hwang et al.⁽³⁾은 소규모 건축물에서의 지열 시스템 적용을 위한 매설파이프의 형태 및 길이에 대한 시뮬레이션을 실시하여 트렌치 길이가 짧은 Slinky 형태의 매설형태가 주거용에 적합하다고 판단하였으며, Hwang et al.⁽⁴⁾은 지중열교환기의 종류에 따른 열전달 성능평가를 실시하여 지중열교환기의 단위 길이당 열전달성능이 U-tube 방식보다 Double U-tube 방식이 13%, Coaxial 방식은 21% 증가하는 것을 확인하였다. Sohn et al.⁽⁵⁾은 시뮬레이션을 통한 상업용 건물에 대한 에너지파일 지열 히트펌프 시스템의 성능 분석을 실시하여 장기운전 시 에너지 파일의 단위 길이당 최대 열 추출량이 82.7 W/m로 나타남을 확인하였다.

국외에서는 Naili et al.⁽⁶⁾이 실험을 통한 북부 튀니지의 더운 기후 조건에 대한 수평형 지중열교환기의 에너지와

엑서지 분석을 실시하여 에너지 효율은 52~18%, 엑서지 효율은 36~12%로 나타남을 확인하였으며, Park et al.⁽⁷⁾은 실험을 통한 코일 피치를 200 mm와 500 mm로 제작, 코일형 지중열교환기의 열교환율 테스트를 실시하여 피치 간격이 넓을 때가 좁을 때보다 더 높은 열교환율을 나타냄을 확인하였다. 또한, Park et al.⁽⁸⁾는 시뮬레이션을 활용하여 에너지파일 내 지중열교환기 배치가 W 및 3U형일 경우의 성능분석을 실시하여 3U형이 W형보다 15% 더 높은 채열성능을 나타냄을 확인하였으며, Gao et al.⁽⁹⁾은 시뮬레이션과 실험을 통하여 말뚝 기초형 지중열교환기 시스템에서 지중열교환기의 형상에 따른 성능평가를 실시하였다. 그 결과, W형상의 유형이 가장 효율적인 것으로 판단하였다.

이처럼, 건물구체 이용이나 수평형 시스템 등 다양한 형태의 실험적 연구들이 수행되고 있으나, 저심도의 유닛형 지중열교환기에 관한 연구는 드문 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 저시공비로 소규모 주택에 적용이 가능한 유닛형 지중열교환기를 개발하고 이에 대한 성능평가를 실시하였다. 본 논문은 개발 기술의 개요를 설명하고 수치 시뮬레이션을 이용한 채열량 예측 결과를 분석함으로써 유닛형 지중열교환기 개발에 있어 기초자료로 활용되고자 한다.

2. 개발 기술의 개요

2.1 유닛형 지중열교환기

Fig. 1은 유닛형 지중열교환기의 개요를 나타낸다. 본 기술은 저심도(2~5 m)의 지중에 직육면체의 열교환기를 설치하여 냉난방 열원으로 활용하는 기술로서 일반적인 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 비교적 효율은 낮으나 천공비 절감과 공기단축이 가능하며 보다 용이하게 채열 및 방열이 가능한 시스템이다. 본 논문

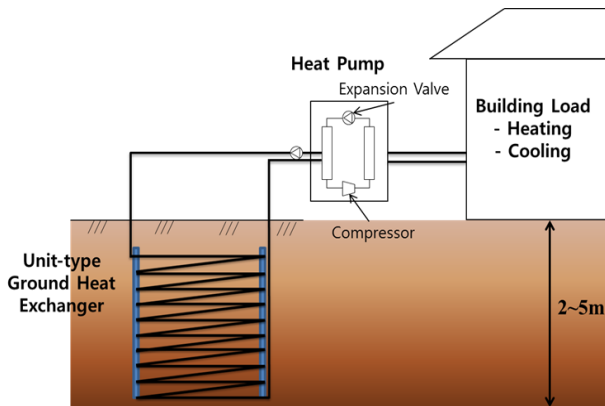


Fig. 1 Concept of development technology.

에서는 유닛형 지중열교환기를 모의한 시뮬레이션 모델을 작성하고 지중채열량 예측수법^(10, 11)을 이용하여 난방시의 채열 성능을 분석하였다.

3. 연구방법

3.1 시뮬레이션 개요

시스템 설계에 있어 용량산정은 매우 중요한 요소 중 하나이며, 용량 산정을 위해서는 정확한 채열량 예측이 필요하다. 본 연구에서는 지중열교환기와 순환수, 지중열교환기와 토양과의 열교환을 정확하게 해석하기 위해, 선행연구⁽¹⁰⁾에서 개발된 지중열이동 모델 및 지중열교환기 모델, 지표면열이동 모델을 연성한 시뮬레이션 수법을 응용, 3차원 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 해석 코드로는 유한요소법(FEM)에 근거한 독일 WASY사의 FEFLOW를 이용하였다. 해석수법 및 토양 열물성치 추정방법에 관해서는 선행연구⁽¹¹⁾에서 진행한 방법을 참고로 하여 실행하였다.

본 연구에서는 저심도 유닛형 지중열교환기의 채열 성능 평가에 있어, 지표면 부근에서의 열교환이 채열량에 상당부분 영향을 미칠 것으로 판단하여 지중열교환기 모델과의 연성 계산을 실시하였다. 지표면 열플럭스는 시뮬레이션 모델 상부 전체에 적용되어 그 영향은 심도 5 m에 이르며 그 추정 방법은 선행연구⁽¹¹⁾에서 자세히 설명되었기에 생략한다.

3.2 시뮬레이션 해석 조건

Fig. 2는 시뮬레이션 모델 개념도를 나타낸다. 지중열교환기 사이 간격을 a , 지중열교환기 간 거리를 d , 깊이를 l 로 설정하여, 유닛형 지중열교환기의 한 부분의 채열량 분석을 실시하여 전체 채열 성능을 예측하였다.

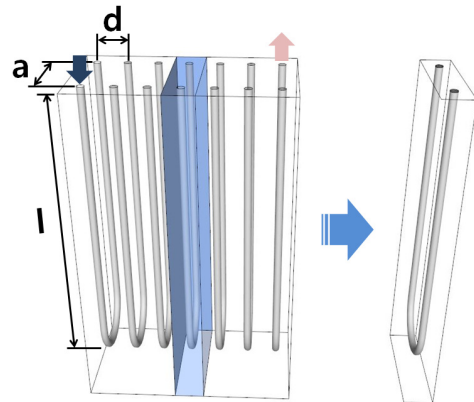


Fig. 2 Concept of simulation model.

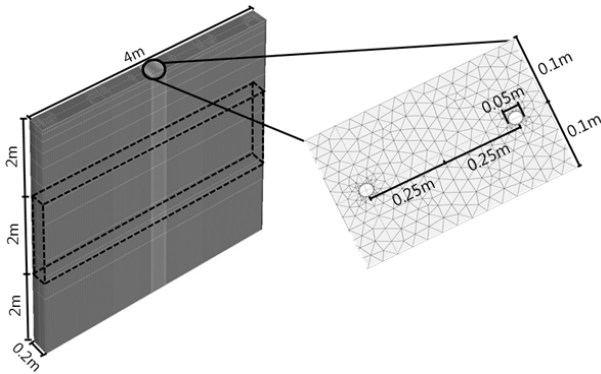


Fig. 3 Simulation model.

Table 1 Thermal properties of base case

	Porosity	Thermal Conductivity (W/mK)	Heat Capacity (MJ/m ³ K)
Granite	0.10	3.50	2.92
Concrete	0.001	1.50	2.80
U-tube	0.58	0.41	2.38

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 유닛형 지중열교환기를 모의한 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 4 m × 0.2 m × 6 m의 영역 심도 2 m 지점 중심에 지중열교환기(U-tube, 40A, 내경 44 mm, 외경 50 mm)를 설치하였다. 운전 기간은 동계 3개월(12~2월)간 09:00~18:00로 가정하였으며, 순환수 입·출구 온도는 장기운전 시, 과도한 채열로 인한 시스템 성능 저하를 방지하기 위하여 5℃로 제한온도를 설정하였다. 또한, 순환수의 유속은 0.292 m/s이며, 그라우팅재는 콘크리트(열전도율 : 1.5 W/mK, 열용량 2.8 MJ/m³K)로 삽입하였다. 한편, 지질 조건은 우리나라의 일반적인 화강암으로 가정하여 열전도율 3.50 W/mK으로 설정하였다.

Table 1은 Base Case의 토양 및 그라우트, U-tube의 열물성치를 각각 나타내며, Table 2는 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 또한, 본 연구에서는 Table 3과 같이 5개의 Case를 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 열교환기의 세로 깊이(l)는 2 m로 고정하여 열교환기의 폭(a)과 열교환기 간 이격 거리(d)를 변화시켜 케이스 스터디를 실시하였다. Case 1~3은 지중열교환기 간 거리를 각각 0.1, 0.2, 0.3 m로 설정하였고, Case 4는 열교환기 폭을 변화시킨 조건에서 계산을 실시하였다. Case 5는 지표면으로부터의 열손실을 최소화하고 지중으로부터의 열을 최대한 얻기 위해 Case 4의 조건을 베이스로 하여 심도 1.5 m 위치에 단열 시트를 설치한 것을 가정하여 채열량 분석을 실시하였다.

Table 2 Simulation conditions

Calculation Tool	FEFLOW + User subroutine
Ground Heat Exchanger(GHE)	Single U-tube 32 A Bore Hole Concrete Grouting
OperationCondition	Initial ΔT 10℃ Limitation Temp. 5℃
Domain	40 m × 40 m × 100 m
Operation	12/1~2/28. 3 months 09:00~18:00
Soil Condition	Granite(λ : 3.5 W/mK) Initial Temp. 16℃

Table 3 Case condition

	a (m)	d (m)	l (m)	Insulation sheet(m)	Pipe total length(m)
Case 1	0.5	0.1	2	none	90
Case 2	0.5	0.2	2	none	45
Case 3	0.5	0.3	2	none	27
Case 4	2	0.2	2	none	30
Case 5	2	0.2	2	1.5	30

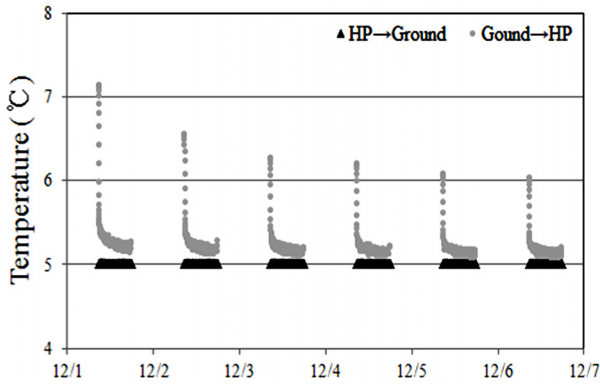
본 연구에서는 지중열교환기로부터 얻을 수 있는 채열량과 열원수 온도의 기간 평균치를 계산하여, 각 케이스의 성능 비교 분석을 실시하였다.

4. 결과 및 분석

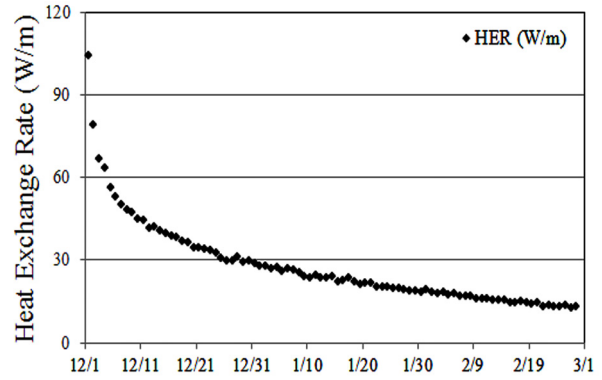
4.1 Base case 해석결과

Fig. 4의 a는 Base Case인 Case 2의 순환수 입·출구 온도 변화를 나타낸다. 출구 온도는 최초 7.13℃에서 채열이 진행됨에 따라 점차 감소하여 5.16℃를 나타냈으며, 그 다음날 6.54℃, 6.26℃, 6.19℃, 6.06℃, 6.01℃로 전날의 온도에 미치지 못함을 확인하였다. 이것은 오후 6시~다음날 오전 9시까지의 비운전 시간에 지중 온도 회복이 전날의 시작온도까지 이르지 못했다는 것을 의미하며, 지중 채열이 지속됨에 따라 지중온도가 점차 낮아지는 것을 시사한다.

Fig. 4의 b는 Case 2의 3개월 일평균 채열량(Heat Exchange Rate, HER) 변화를 나타낸다. 채열량 분석 결과, 3개월 일평균 채열량은 27.45 W/m로 나타났으며, 장기 운전에 따른 채열성능 감소를 확인하였다. 이것은 시스템 운전 시 열원 온도 감소에 따른 채열 성능 저하로 판단된다.



(a) Fluctuation of circulatory water temperature



(b) Daily average of heat exchange rate

Fig. 4 Simulation result(Case 2).

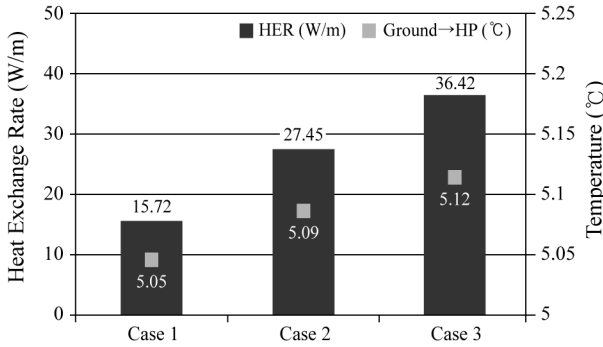


Fig. 5 Comparison of HER and heat source temperature (Case 1, 2, 3).

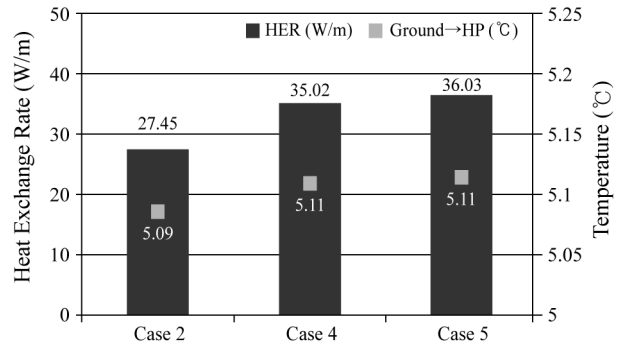


Fig. 6 Comparison of HER and heat source temperature. (Case 2, 4, 5).

4.2 기간 평균 순환수 온도 및 채열량 분석

Fig. 5는 지중열교환기 사이 거리를 변화시킨 Case 1, 2, 3의 3개월간 일평균 채열량 및 출구온도를 나타낸다. 기간 평균 채열량은 Case 1부터 3까지 각각 15.72 W/m, 27.45 W/m, 36.42 W/m로 나타났으며, 거리가 멀수록 채열성능이 높게 나타났다.

Fig. 6은 Base case인 Case 2와 상부 단열조건을 변화시킨 Case 4, 5의 3개월간 일평균 채열량 및 출구온도를 나타낸다. 기간 평균 채열량은 Case 2, 4, 5순으로 각각 27.45 W/m, 35.02 W/m, 36.03 W/m로 나타났다. 상부 단열 조건을 삽입한 Case 5가 Case 4보다 채열 성능이 높게 나타났으나, 그 차이는 미미하였다.

4.3 결과고찰

Table 4는 시뮬레이션 결과를 종합하여 나타낸 것으로서 각 Case의 기간 평균 채열량을 나타낸다. 지중열교환기 간 거리에 따른 단위길이 당 평균 채열량은 0.1 m

의 15.72 W/m에서 0.3 m의 36.42 W/m로 증가하여, 약 57%의 차이를 나타냈다.

심도 1.5 m 위치에 단열 조건의 삽입에 따른 단위길이 당 평균 채열량은 단열 조건이 없을 시 35.02 W/m, 단열 조건이 있을 시 36.03 W/m로 단위길이 당 1 W/m의 차이를 나타내, 중간 단열조건이 채열 성능에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다.

Table 4 Simulation results

	a (m)	d (m)	l (m)	Insulation sheet (m)	Average HER (W/m)	Total HER (W)
Case 1	0.5	0.1	2	none	15.72	1414.80
Case 2	0.5	0.2	2	none	27.45	1235.25
Case 3	0.5	0.3	2	none	36.42	983.34
Case 4	2	0.2	2	none	35.02	1050.60
Case 5	2	0.2	2	1.5	36.03	1080.90

5. 결 론

본 연구는 지열 시스템의 시장 경쟁력 저하 원인 중 하나인 초기투자비 절감과 소규모 주택에서의 보급에 있어 기초자료로서 활용되고자 유닛형 지중열교환기 시스템을 개발, 지중열 및 지하수 이동 시뮬레이션 이용하여 지중 채열량 예측을 실시하였다. 특히, 지중열교환기 사이 간 거리와 상부 단열 조건에 따른 채열 성능 분석을 실시하여 개발된 시스템의 최적 설계법 구축에 기여하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지중열교환기 사이 거리가 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m의 변화에 따른 3개월간 일평균 채열량 분석 결과, 가장 높은 사이 거리 0.3 m가 가장 낮은 사이거리 0.1 m보다 약 57% 더 높은 채열성능을 나타냈다.
- (2) 심도 1.5 m에 상부 단열조건 삽입에 따른 Case 4와 5의 3개월간 일평균 채열량 분석결과 상부 단열 조건을 삽입한 Case 5의 채열량이 더 높게 나타났으나, 그 차이는 미미함을 확인하였다.
- (3) 각 Case의 채열특성 분석결과 지중열교환기 사이 거리(d)의 차이가 지중열교환기 사이간격(a)의 차이보다 채열량에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다.
- (4) 본 해석 대상인 유닛형 지중열교환기를 실용화할 경우, 각 Case의 채열량과 파이프 전체 길이의 곱으로 채열 가능 용량이 결정되며, 이 때 Case 1이 가장 많은 채열량(1414.80 W)을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

향후, 보다 다양한 Case study를 실시하여 최적 설계 수법을 개발할 예정이며, 실증 실험과의 비교 분석을 실시하여 시뮬레이션의 타당성 검증을 실시할 예정이다. 또한, 초기투자비 검토를 통한 시스템 도입가능성에 대한 평가도 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 지원을 받아 수행된 연구(NO. 2008-0061908) 및 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(NO. 20133030110900).

References

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, pp. 641-647.
2. Nam, Y. J. and Chae, H. B., 2013, Prediction of the

Heat Exchange Rate for a Horizontal Ground Heat Pump System Using a Ground Heat Transfer Simulation, *Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, pp. 297-302.

3. Hwang, Y. H., Lee, K. H., and Cho, S. W., 2012, Ground-Pipe Type and Length for Applicability of Geothermal Heat Pump in Small Residential Houses, *Journal of KIAEBS*, Vol. 6, pp. 216-221.
4. Hwang, S. H. and Song, D. S., 2010, A study on the heat transfer performance according to ground heat exchanger types, *Journal of KIEAE*, Vol. 10, pp. 75-80.
5. Sohn, B. H., Jung, K. S., and Choi, H. S., 2013, Performance prediction of geothermal heat pump(GHP) system using cast-in-place energy piles, *Journal of SAREK*, Vol. 25, pp. 28-36.
6. Naili, N., Hazami, M., Kooli, S., and Farhat, A., 2015, Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia, *Geothermics*, Vol. 53, pp. 270-280.
7. Park, S. W., Lee, D. S., Choi, H. J., Jung, K. S., and Choi, H. S., 2014, Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete pile : Coil-type GHEX(ground heat exchanger), *Energy*, pp. 1-11.
8. Park, H. K., Lee, S. R., Yoon, S., and Choi, J. C., 2013, Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile : field experiments and numerical simulation, *Applied Energy*, pp. 12-24.
9. Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Shan, 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.
10. Nam, Y. J., 2011, Numerical analysis for 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.
11. Nam Y. J., Ooka, R., and Hwang, S. H., 2008, Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 2133-2140.
12. Sohn, B. H., 2012, Performance analysis of ground-coupled heat pump system with slinky-type horizontal ground heat exchanger, *Journal of SAREK*, Vol. 24, No. 3, pp. 230-239.
13. Gonzalez, R. G., Verhoef, A., Vidale, P. L., Main, B., and Gan, G., 2012, Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump, for a domestic site in the UK, *Renewable Energy*, Vol. 44, pp. 141-153.