



[2016-10-GT-009]

지열시스템 적합지 맵 구축을 위한 시스템 성능의 영향 인자 분석

배상무¹⁾ · 남유진^{1)*} · 황석호²⁾

Sensitivity Analysis of Design Factor for the Suitable Map of Ground Source Heat Pump System

Sangmu Bae¹⁾ · Yujin Nam^{1)*} · Seok-Ho Hwang²⁾

Received 31 May 2016 Revised 28 June 2016 Accepted 28 June 2016

ABSTRACT The performance of ground source heat pump system significantly depends on ground properties such as thermal conductivity, underground water level, quality of underground water and groundwater flow. Therefore, in order to optimally design system, it is necessary to estimate thermal properties before the system design. On the other hand, fundamental survey for system design, such as thermal response test or pumping test, require cost more than 5,000 dollars. To simply consider GSHP systems as heat source system in building design, it is necessary to roughly grasp the feasibility of the system in the step of building basic planning. In this research, sensitivity analysis of design factors was conducted to develop a suitable map for a ground source heat pump system in Korea. This paper mainly describes the effect of ground thermal properties on the system performance. Numerical simulations with ground heat and groundwater transfer model was used for quantitative analysis. The result showed that thermal conductivity of soil and groundwater flow are very important factors and the differential of system performance according to them was a maximum of 29%.

Key words Geothermal energy(지열 에너지), Ground source heat pump system(지열 히트펌프 시스템), Suitable map(적합지 맵), Numerical Simulation(수치시뮬레이션), Sensitivity analysis(민감도분석)

1. 서론

최근, 화석 연료의 고갈 및 에너지 절약을 위해 신재생에너지 및 에너지절약에 관한 기술 개발이 세계적으로 큰 관심이 되고 있다. 자연 에너지를 사용하는 기술 중에서 지열 히트펌프 시스템은 지중의 온도차를 이용하는 에너지 기술이다. 이러한 지열 히트펌프 시스템은 연중 항온성을

지닌 지중의 열을 열원으로 사용하기 때문에 기존의 공기를 열원으로 사용하는 히트펌프보다 시스템의 성능이 비교적 효율적이고 건축물의 부하에 대해 안정적으로 대응할 수 있다. 그러나, 지열 히트펌프 시스템의 성능은 지중의 열적 특성 및 지하수 조건과 운전방법 등에 영향을 받는다. 또한, 지열 히트펌프 시스템 설계 시, 도입 지역의 시스템 성능에 대한 영향인자를 고려하지 않은 설계는 시스템의 성능저하로 이어지는 결과가 발생한다. 따라서, 지열 시스템의 최적설계를 위해서는 시스템의 성능에 영향을 미치는 설계인자를 정량적으로 분석하고, 설계인자 별 지중 채열량을 정확하게 예측하는 것이 필요하다.

1) Department of Architecture Engineering, Pusan National University
E-mail: namyujin@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-7652 Fax: +82-51-514-2230

2) Department of Architecture Engineering, Kyungnam University

지중의 열적·수리지질학적 설계조건에 따른 지열 히트펌프 시스템의 채열 성능에 관한 연구는 국내외에서 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 주로 시뮬레이션이나 실증 실험을 통한 방법들이 사용되고 있다. G.A Florides et al.^[1]은 지질 데이터를 통해 지중 온도 및 열적 특성을 고려한 지중열교환기의 최적설계에 대해 분석하였고, Hikari Fujii et al.^[2]은 수치 시뮬레이션을 사용하여 지하수 흐름 및 열전달 모델에 근거한 지열 히트펌프 시스템의 열교환 성능을 추정하고 시스템 설치 지역에 대한 적용 가능성을 검토하였다. 또한, Zhiwen Luo et al.^[3]은 영국 런던에서, 도시열섬효과 및 기후 변화가 지중온도에 미치는 영향을 분석하여 수평형 지열 히트펌프 시스템의 성능과 설치장소에 대한 적합성을 검토하였으며, Zhijian Liu et al.^[4]은 중국의 한랭 지역에 위치하고 있는 치치하얼, 심양, 베이징 세 개의 도시를 기반으로 하여 GSHP 시스템의 성능에 영향을 미치는 설계 파라미터들을 시뮬레이션을 통해 분석하고, 사무실 건물에 대한 GSHP 시스템의 타당성 검토를 수행하였다. 그 결과, 중국의 세 개의 도시 중 치치하얼에 대한 GSHP 시스템의 적용 가능성은 없다고 판단하였다.

국내에서 정영주^[5]는 TRNSYS를 활용하여 GSHP 시스템의 지중 순환수 유량제어에 따른 시스템 성능분석을 수행하였다. 그 결과, 시스템 COP는 설계유량의 20%~70%까지는 증가하였으나, 70%부터 감소함을 확인하였다. 또한, 박종일^[6]은 지중 열전도도, 보어홀 열 저항, 지중 초기온도 및 파이프의 관경 등의 다양한 설계 파라미터를 통해 지중열교환기의 길이와 설계조건과의 상관관계에 대해 분석하였다.

이처럼, 지열 히트펌프 시스템의 설계인자 및 지중 열 특성에 대한 접근을 통해 시스템의 성능분석에 관한 연구는 있으나, 지열 히트펌프 시스템의 최적설계를 위한 적합지 맵을 구축하고 시스템의 도입지에 대한 적합성 및 잠재량 분석에 대한 연구는 드물다.

본 연구에서는 설비시스템의 기본 계획 단계에서 이용 가능한 지열 히트펌프 시스템의 적합지 맵을 구축하기 위해 지중의 열적·수리지질학적 설계조건이 시스템의 채열 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 유한요소법에 근거한 지중열-지하수 이동 동시 해석 모델을 이용하여 지중 열물성 및 지하수 흐름이 지중채열량에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지열시스템의 적합지 맵

2.1 국내 지열 적합지 맵 현황

지열 에너지 포텐셜 맵은 다양한 에너지 자원에 대한 기초적인 자원지도 시스템 구축과 더불어 지열 히트펌프 시스템의 도입 적합성 판단에 중요한 역할을 한다. 국내 지열 자원 맵에 대해서는 이미 한국지질자원연구원에서 국토지질자원연구를 통해 국토의 기초 지질자료를 관측 및 수집하여 지질 상황을 도식화하는 작업을 수행하였다. 또한, GIS를 기반으로 지질정보검색시스템을 구축하여 지형정보, 지체구조도 및 지질도 등의 지질자원정보를 제공하고 있다. Fig. 1은 지질정보검색시스템의 지질도를 나타낸다. 본 시스템은 인터넷기반의 공간정보 서비스 시스템으로, 지질관련 전문 정보를 제공하여 다양한 응용분야에 적용이 가능한 시스템이다.^[7]

한편, 한국에너지기술연구원은 지질자원연구원과 공동 연구를 통하여 국내 지하자원에 대한 분석 및 평가가 가능한 데이터베이스를 구축하였다. 또한, GIS 기반의 분석도구를 바탕으로 자원지도시스템을 구축하였으며, 지하 열적 특성인, 지온경사, 지열류량, 열전도도 등과 같은 지열 정보를 제공하고 있다.^[8]



Fig. 1. Geologic Map of Korea^[7]

이러한, 지질정보 및 자원지도 시스템을 통해 지중 열물 성치 및 에너지 자원 현황을 분석하여 지열 히트펌프 시스템의 도입 적합성을 예측할 수 있으며 경제성 및 시장잠재량을 파악할 수 있다.

2.2 포텐셜 맵

Fig. 2는 Nam et al.^[9]의 선행연구를 기본으로 한 국내 지열 히트펌프 시스템 최적 설계법 및 포텐셜맵 구축 흐름도를 나타낸다. 지열 히트펌프 시스템의 도입 가능성을 평가하기 위해 시스템 설치조건과 설계인자에 따른 영향도를 분석하고, 그 결과를 바탕으로 기존의 지중 열물성 데이터를 활용한 지열 히트펌프 시스템의 적합지 맵을 구축한다. 또한, 건물 기본 계획 단계에서 검토가 가능한 적합지 맵의 구축을 위해, 기존 맵 자료에 지반의 보링 데이터나 현장 샘플링 데이터로 보정하여 보다 상세한 맵을 완성한다. 이를 위해, 기존 Text로 이루어진 데이터를 가공하여 분석 가능한 형태로 변환한 후, 공간 데이터와 속성 데이터를 결합하여 GIS 데이터를 생성을 통해 지열에너지의 자원지도 데이터베이스를 구축한다.

한편, 지열 히트 펌프 시스템의 시장 잠재량 분석을 위해서는 기존의 지질데이터나 지중온도, 지열류량 등의 파악

도 중요하지만, 각각의 지중 열물성이 시스템 효율이나 지중채열량과 어떠한 관계에 있으며 채열 가능한 포텐셜이 어느 정도인지 정량적으로 파악할 수 있는 기술이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 지중 열물성 중 지중열전도율과 지하수 흐름 조건이 지중 채열량 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 지열 포텐셜 파악에 활용하고자 한다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 개요

지열 히트펌프 시스템의 채열 성능을 정확하게 예측하기 위해서는, 지중 열이동 및 지하수 흐름을 동시에 해석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 선행연구^[10]에서 개발한 수치해석 시뮬레이션을 사용하여 지중 열교환기 내의 순환수 이동 및 지중열이동을 동시 해석하였다. 수치 해석 해석을 위해 지중을 고체, 액체, 기체의 3상으로 구분하여 질량보존의 법칙(1) 및 운동량보존의 법칙(2), 에너지보존의 법칙(2)을 적용하여 각 상태에서 모두 상응할 수 있는 3차원 모델링을 구축하였다.^[11]

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_p^\alpha \tag{1}$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\epsilon_\alpha \mu^\alpha} \left(\frac{\delta \rho^\alpha}{\delta x_i} - \rho^\alpha g_i \right) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(J_{iT}^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \tag{3}$$

α : 물질의 상태(고체, 액체, 기체)

ϵ : 체적 비율($0 \leq \epsilon \leq 1$)

ρ : 밀도(kg/m^3)

v_i : 속도 벡터(m/s)

k_{ij} : 투수 텐서(m^2)

μ : 점성계수(kg/ms)

g_i : 중력 벡터(m/s)

E : 내부 열 에너지

Q_p, Q_T : 질량 및 열 발생량

J_{iT} : 열 플럭스

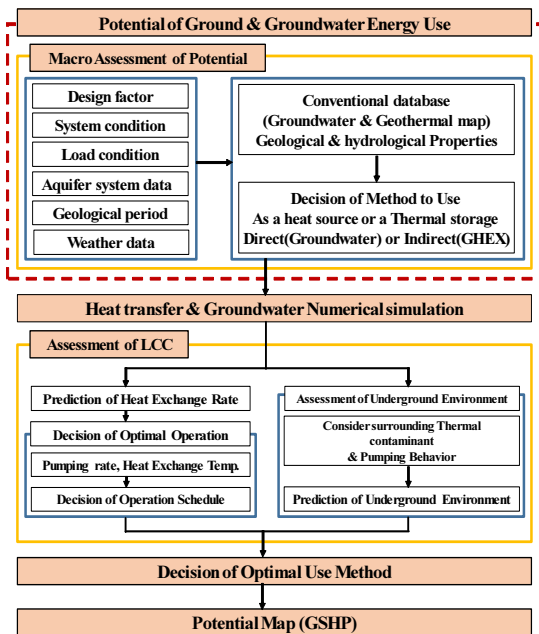


Fig. 2. Optimal design tool for potential map of GSHP^[9]

수치 해석 방법의 신뢰성 검토는 선행연구^[12]에서 실험 및 해석 결과의 비교 분석을 통해 검증하였다.

Fig. 3과 Table 1은 본 연구에서 이용된 시뮬레이션 해석 모델 및 조건을 나타낸다. 지중열교환기(Single U-tube, 32A 내경26mm, 외경 32mm)와 콘크리트(열전도율 1.5 W/m·K, 열용량 2.8MJ/m³·K)로 그라우팅 된 직경 0.2m의 보어홀을 20m × 20m × 100m 모델 영역 중심에 설치하였다. 지중 초기 온도는 16°C로 설정하였고 운전기간은 동계 3개월(12~2월)로 하여 장기운전 시의 채열량 변화 및 지중온도변화를 분석하였다. 운전시간은 오피스 건물 적용을 가정하여 9:00~18:00으로 9시간을 운전한다고 설정하였다. 한편, 지열 시스템의 장기운전으로 인한 채열 성능

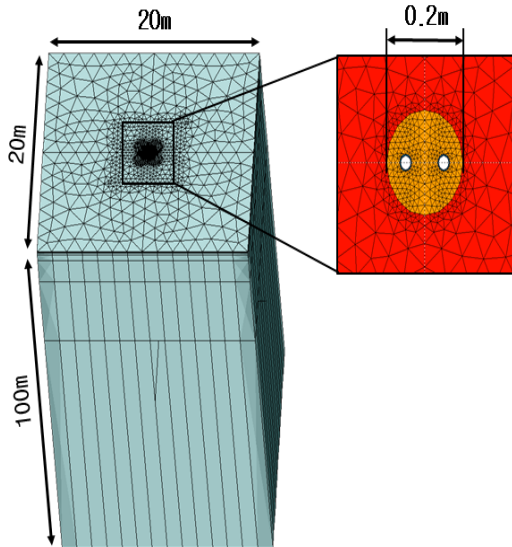


Fig. 3. Simulation model

Table 1. Simulation conditions

Calculation Tool	FEFLOW + User subroutine
Ground Heat Exchanger (GHE)	Single U-tube 32A Bore Hole Concrete Grouting
Domain	20 m × 20 m × 100 m
Operation Condition	Limited temp. 5°C Initial ΔT 10°C
Operation Period	3 month, 12/1~2/28

g : 중력 벡터(m/s)
E : 내부 열 에너지
Q_b, Q_r : 질량 및 열 발생량
J_{IT} : 열 플럭스

지하를 방지하기 위해 순환수의 입·출구 온도를 5°C이상으로 제한하여, 기존 공기열원 시스템과 비교하여 우수한 시스템 성능이 유지되는 수준에서의 지중 채열량 검토를 실시하였다.^[13] 지중채열량(Q)은 지중열교환기 내 순환수의 출입구 온도차(ΔT)와 유속(v)에 의해 다음 식과 같이 계산된다.

$$Q = \frac{CpvA\Delta T}{d} \quad [W/m] \quad (4)$$

- Q = 채열량(W/m)
- C = 비열(J/kg·°C)
- ρ = 밀도(kg/m³)
- v = 유속(m/s)
- A = 파이프의 단면적(m²)
- ΔT = 순환수 출입구 온도차(°C)
- d = 지중열교환기 길이(m)

3.2 시뮬레이션 조건

Table 2는 각 케이스의 조건을 나타내며, 지중 열전도율 및 지하수 유속을 주요 변수로 설정하였다. Case1-1은 Base Case로 국내 지질 조건을 고려하여 지중 열전도율 3.5W/m·K의 화강암으로 가정하였으며, 지하수 흐름이 없는 조건으로 설정하였다. Case 1-1부터 Case 1-4까지 각각 지중 열전도율을 3.5W/m·K, 2.5W/m·K, 1.5W/m·K, 1.0W/m·K로 설정하여 지중 열전도율에 따른 채열성능을 분석하고자 하였으며, Case 2-1과 2-2는 지하수 흐름에 따른 시스템의 채열 성능을 분석하기 위하여 지하수 유속 10m/year, 100m/year로 각각 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

Table 2. Simulation conditions of cases

	Thermal conductivity (W/m·K)	Velocity of flow (m/year)	Operating time (hour)
Case 1-1	3.5	0	09:00~18:00
Case 1-2	2.5		
Case 1-3	1.5		
Case 1-4	1.0		
Case 2-1	3.5	10	09:00~18:00
Case 2-2		100	

3.3 시뮬레이션 결과

Fig. 4는 지중 열전도율을 변화시킨 케이스 스터디 결과로서 지중채열량 및 순환수 출구온도의 기간평균을 나타낸다. 지중 열전도율에 의한 시스템의 지중 채열량은 지중 열전도율 $\lambda = 1.0\text{W/mK}$ 부터 $\lambda = 3.5\text{W/mK}$ 까지 각각 24.20 W/m, 27.62W/m, 31.80W/m, 34.26W/m로 나타났다. 지중 열전도율에 의한 시스템의 채열량 차이는 최대 10.07 W/m로 약 29%의 차이를 나타냈다. 또한, 지중 열전도율에 의한 회귀식은 다음 식과 같이 계산된다.

$$y = -0.2808x^2 + 3.9488x + 20.639 \quad (5)$$

$y =$ 채열량(W/m)
 $x =$ 지중 열전도율(W/mK)

이를 통해 지중 열전도율이 높을수록 지중 열 이동이 원

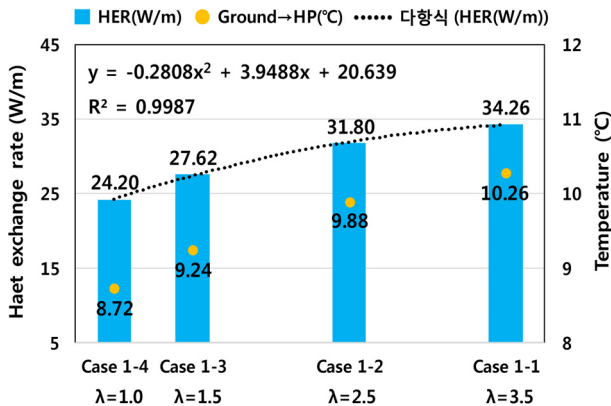


Fig. 4. Heat exchange rate according to thermal conductivity

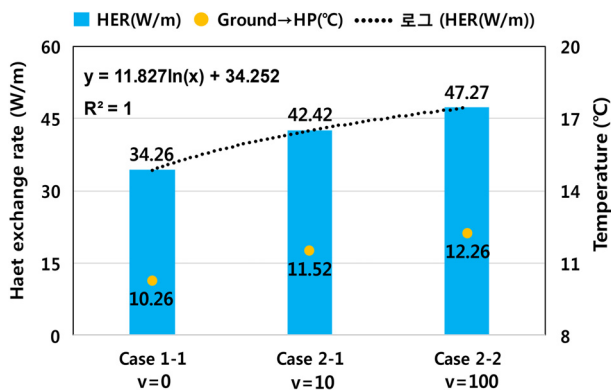


Fig. 5. Heat exchange rate according to Groundwater flow

활하게 이루어지기 때문에 토양과 지중열교환기 사이에 비교적 많은 열이 교환될 수 있어 시스템의 채열 성능이 향상하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 지열 히트펌프 시스템의 지하수의 유속을 변화시킨 케이스 스터디 결과로서 지중채열량 및 순환수 출구온도의 기간평균을 나타낸다. 지하수의 유속에 따른 시스템의 채열량을 분석한 결과 지하수의 유속 $v = 0\text{m/year}$ 부터 $v = 100\text{m/year}$ 까지 각각 34.26W/m, 42.42W/m, 47.27W/m로 나타났다. 지하수의 유속에 의한 시스템의 지중 채열량 차이는 13.01W/m로 약 38% 더 많은 채열이 가능함을 확인하였다. 또한, 지하수의 유속에 의한 회귀식은 다음 식과 같이 계산된다.

$$y = 11.827\ln(x) + 34.252 \quad (6)$$

$y =$ 채열량(W/m)
 $x =$ 지하수의 유속(m/year)

시뮬레이션 결과를 통해, 지중 열전도율 및 지하수의 유속에 따른 시스템의 채열 성능을 확인하였다. 이를 통해, 지중 열 특성 및 지하수의 조건이 파악되면 지열 히트펌프 시스템의 지중 채열량이 예측된다.

4. 결론

본 논문에서는, 지열 히트펌프 시스템의 운전방법 및 지하수의 조건, 지중 열적 특성에 대한 시스템 채열 성능을 측정하기 위해, 수치 시뮬레이션을 이용한 민감도 분석을 실시하였다. 시뮬레이션 결과에서 빠른 지하수의 흐름과 높은 지중 열전도율이 지중에서 토양과 지중열교환기와의 열교환이 우수하여 시스템 성능을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

향후, 지열 히트펌프 시스템의 최적 적합지 분석을 위해 지질 특성에 대한 데이터를 수집하고 다양한 지역에서 높은 신뢰성 가진 시스템 성능 측정을 통한 적합지 맵을 구축할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(No. 2015R 1D 1A3A01020132).

References

- [1] G.A. Florides, P.D. Pouloupatis, S. Kalogirou, V. Messaritis, I. Panayides, Z. Zomeni, G. Partasides, A. Lizides, E. Sophocleous, K. Koutsoumpas, 2010, "The geothermal characteristics of the ground and the potential of using ground coupled heat pumps in Cyprus", *Energy*, 36, 5027-5036.
- [2] Hikari Fujii, Tadasuke Inatomi, Ryuichi Itoi, Youhei Uchida, 2007, "Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models", *Geothermics*, 36, 459-472.
- [3] Zhiwen Luo, Chirstina Asproudi, 2015, "Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change", *Applied Thermal Engineering*, 90, 530-537.
- [4] Zhijian Liu, Wei Xu, Cheng Qian, Xi Chen, Guangya Jin, 2015, "Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China", *Renewable Energy*, 84, 89-96.
- [5] Jung, Young-Ju, Jo, Jae-Hun, Kim, Yong-Shik, Cho, Young-Hum, 2014, "A Study on the Geothermal Heat Pump System Performance Analysis according to Water Flow Rate Control of the Geothermal Water Circulation Pump", *The Korean Solar Energy Society*, 34(6), 103-109.
- [6] Jong Il Park, Kyung Soon Park, 2013, "Study on Capacity Alteration of Geothermal Heat Exchanger by Changing Design Condition", *Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, 9(4), 8-13.
- [7] KIGAM, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, "지질정보 시스템", <http://www.kigam.re.kr/>
- [8] Korea Institute of Energy Research, "Geothermal, Renewable Energy Resource Atlas", <http://kredc.kier.re.kr/eBookFile/GEO/GEO.HTML>
- [9] Yujin Nam, Ryoza Ooka, 2011, "Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and the application to Tokyo", *Energy and Buildings*, 43, 677-685.
- [10] Yujin Nam, Ryoza Ooka, Suckho Hwang, 2008, "Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system", *energy and Buildings*, 40, 2133-2140.
- [11] WASY GmbH, 2002, *FEFLOW Reference manual*, pp. 16-18.
- [12] Yujin Nam, Ryoza Ooka, 2010, "Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment", *Energy and Buildings*, 42, 69-75.
- [13] Yujin Nam, Jin-Hwan Oh, 2014, "Study on the characteristic of heat exchange for vertical geothermal system using the numerical simulation", *Journal of the Korean Solar energy Society*, 34(2), 66-72.