모니터링 및 시뮬레이션을 통한 SCW형 지열 시스템의 성능인자 분석에 관한 연구

이상준*, 남유진*[†]

*청주대학교 건축공학과

Study on the performance analysis of SCW geothermal system
by simulation and monitoring

SangJun Lee*, Yujin Nam*[†]

**Department of architectural engineering, Cheongju University, Cheongju, Korea*

Abstract

Recently, an interest in the use of renewable energy has been growing up due to the rise of raw material price, international oil price and depletion of fossil energy. Ground source heat pump system has a high efficiency by using the constant temperature of underground and various types of the systems have been installed and utilized in the building. there are few studies on the system performance factors in the SCW system. Furthermore, even though the performance of the system depends on the temperature of heat source, the research on their relationship is rare. In this research, in order to analyze the performance factor for the open-loop system the monitoring of the real building with the standing column well systems and the simulation with building model were conducted.

Key words: open type geothermal system(개방형 지열시스템), performance factor(성능인자), monitoring(모니터링)

기 호 설 명

k_l : 유체의 열전도율(W/m·K)
 k_s : 고체의 열전도율(W/m·K)
 k_{eff} : 유효 열전도율(W/m·K)
 V_i : 지하수 유속(m/s)
 n : 공극율(-)
 ρ : 밀도(kg/m³)

C_p : 열용량(J/kg·K)
 Q : 열원의 체적당 열량(W/m³)

하첨자

l : 유체
 s : 고체(포화상태 토양)

1. 서론

최근, 국제 유가 및 원자재 가격 상승, 화석 에너지의 고갈 등으로 인한 에너지 생산 비용 상승에 따라 에너지 절약과 더불어 대체에너지 이용 기술 개발을 위한 범국가적 노력이 요구되고 있

[†] Corresponding author
Tel.: +82-43-229-8479, Fax: +82-43-229-8475
E-mail: namyujin@cju.ac.kr
접수일: 2013년 4월 8일
심사일: 2013년 4월 25일
채택일: 2013년 5월 9일

으며, 건물 부분에서도 에너지 소비량을 감소시키기 위한 정책이 수반되고 있다. 정부에서는 2013년 연면적 1,000 m² 이상의 건축물에서도 예상 에너지 사용량에 대한 신·재생에너지 공급의무 비율을 11%로 증가 시켰으며 매년 점진적으로 증가시켜 2020년 20%까지 의무적으로 신·재생에너지를 공급하는 정책이 시행되고 있다.^[1] 다양한 신·재생 에너지 이용기술 중 지열히트펌프 시스템을 지중의 항온성을 이용함으로써 높은 효율성과 큰 열원 공급 능력을 확보할 수 있는 기술로 국내외 관련 기술 개발 및 보급이 활발하게 이루어지고 있다. 지열 히트펌프 시스템은 크게 밀폐형(Closed-loop)과 개방형(Open-loop)으로 나누어지며 각각 다양한 형식이 개발, 이용되고 있다. 국내에서는 주로 밀폐형에 관한 연구나 기술 개발은 많으나^[2-4], 개방형에 관한 연구는 실제 적용 건물에 대한 실증 연구^[5]나 단순 모델식을 이용한 해석^[6] 등이 있으나 밀폐형에 비해 관련 연구가 드물다. 하지만, 높은 공간 효율 및 시스템 효율과 막대한 지하수 이용 포텐셜을 고려하면, 개방형 지열시스템의 보급 가능성은 크다고 할 수 있다. 또한, 지하수 열오염이나 지반침하 등의 우려를 가지고 있는 개방형 지열시스템의 올바른 이용 및 보급을 위해서는 설계 및 시공 기준을 정립하기 위한 연구가 시급히 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 개방형 시스템 중 국내에서 가장 널리 이용되고 있는 SCW(Standing Column Well)형 지열시스템을 대상으로 시스템 성능인자를 분석하기 위해 실제 운영 중인 건물에서의 모니터링을 실시함은 물론, 시뮬레이션 툴을 이용한 케이스스터디를 실시하였다. 본 논문에서는 대학 캠퍼스 내에 설치된 개방형 지열시스템의 난방운전 모니터링 결과에 대해 분석하고, 상용프로그램인 GLHEPro를 이용한 성능인자 분석에 대한 결과를 보고한다.

2. 모니터링을 통한 성능검토

2.1 모니터링 개요

본 연구에서는 SCW형 지열시스템의 성능인자 검토를 위해 SCW형 지열 시스템이 시공, 운영되

Table 1 System summary

	Area(m ²)	Well Depth (Number)	RT	System
Building A	12,479	400m × 6	150/150	Storage/ Non-storage
Building B	2,753	400m × 3	80	Non-storage

Fig. 1 Ground heat exchanger.

고 있는 충북 소재 C대학의 건물을 대상으로 난방 운전 모니터링을 실시하였다. Table 1은 대상 건물의 시스템 개요를 나타낸다. C대학 캠퍼스에는 총 1,488RT의 지열시스템이 설치되어 있으며 이 중 두 개 건물을 선정하여 모니터링을 실시하였다. Fig.1은 대상 건물에 설치된 SCW형 지중 열교환기의 개요도를 나타낸다. 본 시스템은 관정 내의 지하수를 직접 양수하여 히트펌프의 열원으로 이용한 후 다시 같은 관정에 주입하는 방식으로 밀폐형에 비해 단일 관정당 열교환 성능이 우수하다. 본 연구에서는 열원측 순환수의 온도변화 및 시스템 성능 분석을 위해 모니터링을 실시하였다. Fig. 2와 3은 대상 건물의 측정 위치 및 계

Fig. 2 Measurement point(Building A).

Fig. 3 Measurement point(Building B).

통도를 나타낸다. 각 시스템의 열원측 및 부하측 출입구 온도, 히트펌프 소비전력, 순환수 유량 등을 측정하여 히트펌프 출입구 온도와 시스템 성능과의 상관관계를 분석하였다. 또한, 축열조를 보유한 타입 (Building A)과 지열시스템 단독으로 부하에 대응하는 타입(Building B)을 비교 분석하였다. 운전 모니터링은 2013년 1월 1일 ~ 2013년 2월 25일까지 실시하였다.

2.2 모니터링 분석 결과

Fig. 4와 5는 건물A와 건물B의 2013년 1월1일 ~ 2월 25일까지의 열원측 출입구 온도의 온도거동을 나타낸다. 건물A는 지중에서 채열한 열량을 바로 공급하지 않고 축열조를 거친 후 가동 스케줄에 맞게 열량을 공급해 비교적 안정적인 열원 온도를 유지하는 것을 확인하였다. 반면 건물 B는 별도의 축열 시스템을 사용하지 않기 때문에 2차측의 부하에 대응하여 히트펌프를 가동하며 히트펌프의 가동 여부에 따라 건물A 보다 큰 온도

Fig. 4 Temperature fluctuation of heat source(Building A).

Fig. 5 Temperature fluctuation of heat source(Building B).

변화 폭을 보였다. 이때 건물A의 운전 기간 평균 열원 온도는 13.6°C였고 열원측 히트펌프 출입구 온도차는 2.1°C였으며 건물 B의 운전기간 평균 열원 온도는 13.3°C였고 열원측 히트펌프 출입구 온도차는 2.4°C였다.

Fig. 6 Monitoring results of Building A.

Fig. 7 Monitoring results of Building B.

Fig. 6과 7은 건물A와 B의 모니터링 결과로서 지중채열량(Heat Exchange Rate, HER)[kwh], 소비전력량 (Electric Consumption, E.C.)[kwh], COP (Coefficient Of Performance)를 나타낸다. 축열조를 보유한 건물A 에서는 비교적 안정된 부하조건 및 운전조건으로 인해 일정한 소비전력 및 히트펌프 COP를 얻는 것으로 확인되었다. 건물A의 2월 기간 평균 열원 온도는 13.6°C로 나타

났다. 한편, 축열조 없이 지열시스템 단독으로 이용하고 있는 건물B의 경우 부하변동에 따른 소비 전력의 차이가 현저하게 나타나 히트펌프의 COP 변화폭도 컸다. 또한 건물B의 2월 기간 평균 열원 온도는 13.3℃로 나타났다.

각 건물의 운전 데이터를 종합해 본 결과, 건물 A 평균 COP가 3.9로 나타났으며 건물B 평균 3.3으로 나타났다. 축열조가 있는 건물A에서 건물B 보다 안정적인 COP변화를 확인하였으며, 건물B에서는 채열량의 변동에 따라 COP가 달라지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8 Temperature of secondary loop and HER(Building A).

Fig. 9 Temperature of secondary loop and HER(Building B).

Fig. 8과 9는 부하측 온도변화 및 채열량 계산 결과를 나타낸다. 건물A는 Fig. 8에서 보이는 것과 같이 축열조를 거쳐 난방을 하기 때문에 운전 개시 시간에 피크 부하가 가동시에 비해 높지 않은 것을 확인 할 수 있으며 야간에 축열하는 것을 확인 할 수 있다. 건물B는 Fig. 9에서 보이는 것과 같이 부하에 즉각적으로 대응하기 때문에, 운전 개시와 함께 높은 난방부하에 대응하나, 시간이

흐름에 따라 채열량이 서서히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 사용 전력량에 비해 채열량이 낮아 결과적으로 낮은 COP가 계산되었다.

3. 시뮬레이션을 통한 인자 검토

3.1 시뮬레이션 수치해석 모델분석

SCW형 지열시스템의 설계틀을 개발하기 위해서는 시스템 성능에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 현행 에너지관리공단 기준으로 이용되고 있는 수치해석 프로그램(GLHEPro)을 분석함과 동시에 케이스스터디를 통한 시스템 성능인자 분석을 실시하였다. SCW형 지열 시스템의 열교환 메카니즘은 크게 보어홀 내부의 열 이동과, 보어홀 주변 토양 및 지하수와 보어홀간의 열 이동으로 구분되며, 이것을 동시에 해석하는 것이 필요하다. 특히, Fig. 10과 같이 토양내 지하수의 대류, 전도, 부력 및 이류에 의한 열이동을 정확하게 해석하는 것이 중요하다.

J. D. Spitler et al.은 선행연구 및 ASHRAE 연구보고서^[7]에서 수치해석을 통한 SCW형 지열시

Fig. 10 Heat transfer mechanism of SCW system (ASHRAE 1119-RP R&D FINAL REPORT).

Fig. 11 Analysis procedure of FVM model.

시스템의 성능인자에 대한 분석을 실시하고 그 결과를 종합하여 GLHEPro를 완성하고 상용화하였다. 특히, FVM모델에 근거한 토양내 열이동 모델을 이용하여 지하수 및 지중열 이동을 해석하였다. Fig. 11은 해석 Flow를 나타낸다. 한편, 식 (1)과 (2)는 토양내 유효열전도율 및 열이동 지배 방정식을 각각 나타낸다.

$$k_{eff} = nk_l + (1-n)k_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [n\rho_l C_{pl} + (1-n)\rho_s C_{ps}] \frac{\partial T}{\partial t} \\ + \rho_l C_{pl} V_i \nabla T - \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) = Q \end{aligned} \quad (2)$$

토양 모델은 고체 영역과 유체 영역의 2상 모델로 구성하고 지하수 이동은 Darcy 법칙에 근거한 방정식으로 해석하였다.

3.2 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 SCW형 지열시스템 대상으로 운전제어방법과 토양 조건이 지중 채열량 및 열원온도에 미치는 영향을 검토하기 위해, 동축 이중관방식의 SCW형 지중열교환기를 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. 건물의 냉난방 부하는 저

Table 2 Simulation condition

Ground Heat Exchanger	Concentric Tube	
	Borehole Diameter 210mm	
	InnerTube Diameter 130mm	
	OuterTube Diameter 205mm	
Flow Rate	Concrete Grouting ($\lambda = 1.5 \text{ W/mK}$, $C = 2.8 \text{ MJ/m}^3\text{K}$)	
	60L/min	
Heat Source Condition	Cooling	Below 35℃
	Heating	Above 5℃
Initial Temp	17℃	

Table 3 Operation condition for the temperature of heat source

Case	Heat Source Condition	
1	Cooling	Below 30℃
	Heating	Above 10℃
2	Cooling	Below 35℃
	Heating	Above 5℃
3	Cooling	Below 40℃
	Heating	Above 0℃
4	Cooling	Below 45℃
	Heating	Above -5℃

Table 4 Condition of ground properties

Case	Type	λ [W/mK]	C [MJ/m ³ K]
5	Rock	3.5	2.92
6	Rock1	2.4	2.34
7	Heavy Soil	1.3	2.02

자의 선행연구에서 얻은 표준주택 모델의 부하계산 결과를 참고하여 설정하였다. Heat pump는 Climate Master사의 Classic Model 30을 사용하여 1년간의 냉·난방 운전계산을 실시하여 각 케이스의 결과를 비교분석하였다. Table 2는 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 보어홀과 동축 2중관 사이에는 콘크리트(열전도율 : 1.5 W/mK, 열용량 : 2.8 MJ/m³K)를 충전하였고, 순환수의 초기 온도는 17℃, 지중열원 온도를 냉방시 45℃, 난방시 -5℃이상으로 제한하였다. 또한 지중열 교환기내 순환수량은 60L/min으로 하였다. Table 3, 4는 각 케이스별 열원온도 제한 및 토양조건을 나타낸다.

3.3. 시뮬레이션 결과

3.3.1 열원온도 제한의 영향

Fig. 12~16은 각 케이스의 계산 결과로써 토양의 조건은 Rock($\lambda=3.5[\text{W/mK}]$, $C=1.5[\text{MJ/m}^3\text{K}]$)이며 난방 및 냉방 기간의 평균 채열량 및 평균 열원온도를 나타낸다.

Fig. 12 Heat exchange rate in cooling.

Fig. 13 Heat exchange rate in heating.

Fig. 14 Capacity of heat exchanger and required depth of borehole.

지중 열원온도를 냉방시 30℃이하 난방시 10℃ 이상으로 제한한 Case1의 경우, 필요한 보어홀의 깊이는 499.7 m로 나타났고, 단위길이당 채열량은 최대 난방시 21.1 W/m, 냉방시 최대 61.8

W/m로 계산 되었다. 이 경우, 냉·난방시의 기간 평균온도는 16.9℃, 11.6℃로 나타나 가장 우수한 성능을 가지는 것으로 평가할 수 있으나 상대적으로 긴 길이의 열교환기를 필요하게 되어 공사비의 증가를 초래할 것으로 보인다.

Fig. 15 Average heat source temperature during cooling.

Fig. 16 Average heat source temperature during heating.

한편, 열원온도의 제한을 완화시킨 Case 4의 경우는 보어홀의 깊이가 Case1에 비해 1/2로 짧아져 공사비 절감이 가능하나, 냉·난방시의 기간 평균 열원온도는 18.5℃, 3.7℃로 상대적으로 시스템 성능저하 할 것으로 판단된다. 따라서 공사비와 시스템 성능의 Trade-off를 고려하여 적절한 운전수법을 결정하는 것이 필요하다.

3.3.2 토양 열전도율의 영향

Fig. 17~21은 토양 상태에 따른 냉·난방 기간의 채열량 및 평균 열원온도를 나타낸 그림이다. 열전도율이 3.5[W/mK]인 Case5의 경우, 최대 냉방 방열량은 44.5 W/m, 난방 채열량 147.1 W/m로 나왔다. 반면 열전도율이 1.3 W/mK인 Case 7의 최대 냉방 방열량은 21.8 W/m, 난방 채열량

Fig. 17 Heat exchange rate in cooling.

Fig. 20 Average heat source temperature during cooling.

Fig. 18 Heat exchange rate in heating.

Fig. 21 Average heat source temperature during heating.

Fig. 19 Capacity of heat exchanger and required depth of borehole.

71.5 W/m로 계산되어 열전도율이 높은 Case 5에 비해, 방열량 및 채열량이 약 50% 감소를 나타냈다.

또한 Fig. 20, 21는 냉방 기간 동안의 입구온도는 열전도율에 따라 미소한 변화를 가지나 난방 기간 동안의 평균 열원온도는 열전도율이 높을수록 낮아져 시스템 성능이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 SCW형 시스템의 성능인자를 분석하기 위해 실제로 시공, 운영되고 있는 챔퍼

스 내 건물의 모니터링을 실시하였다. 또한 운전 제어방법과 토양 조건에 따른 채열량 및 열원온도의 변화를 검토하기 위해, 동축 이중관방식의 지중열교환기를 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축열조를 가진 건물 A와 축열조 없이 지열 시스템이 직접 부하에 대응하는 건물 B의 열원 온도를 모니터링 한 결과, 2개월간의 난방운전 기간에도 거의 일정한 열원 온도를 유지하였다.
- (2) 축열시스템을 가진 건물 A는 축열시스템이 없는 건물 B보다 안정적인 COP보이는 것을 확인했다.
- (3) 시스템 성능인자 검토를 위한 시뮬레이션 결과, 난방시 열원온도를 높게 제한할수록 채열량은 적어지나 평균 열원수온도는 높아지는 것을 확인하였다.
- (4) 토양 조건에 따른 채열량의 변화를 검토한 결과 토양에 비해 암석이 약 2배 높은 채열이 가능한 것으로 나타났다.

향후, 본 연구를 통해 도출한 SCW 지열시스템의 인자들을 영향도 분석을 통해 최적설계를 개발에 이용할 수 있는 방법을 모색할 것이다.

후 기

본 논문의 일부는 2012년도 한국지열에너지 학회 춘계학술발표대회에서 발표되었음.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20123040110010).

참고문헌

1. 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법, 2013, 제15조 신 재생 에너지 공급의무 비율, 국가 법령 정보 센터, <http://www.law.go.kr/>
2. Nam Y. J., 2011, Numerical Analysis for the Effect of Ground and Groundwater Conditions on the Performance of Ground Source Heat Pump Systems, Journal of the SAREK, Vol. 23 No. 5, pp. 321-326.
3. Shin U. C., Baek N. C., Kim O. J. Koh D. Y., 2006, Analysis of Thermal Performance of Ground-Source Heat Pump System, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 2, pp. 95-101.
4. Lee M. T., Kim Y. I., Kang B. H., 2007, Dynamic Simulation of round Source Heat pump with a Vertical U-tube Ground Heat Exchanger, journal of the SAREK, Vol. 19, No. 5, pp.372-378.
5. Lee W. H., Kim J. Y., Hong W. H., Ahn C. H., A Study on Recovery Time of Ground Water Temperature of Small Scale GWHP Using Standing Column Well in Case of Heating Journal of the Architectural institute of korea, Vol. 24, no. 7, pp. 223-230.
6. Park J. S., Park D. H., 2012, A Evaluation of Long-term Operating of SCW System Considering Density Variation of Groundwater, Korean Geo-Environmental Society Conference/ September 21, pp. 153-158.
7. J.D. Spitler, S.J. Rees, Z. Deng, A. Chiasson, C.D. Orio, C. Johnson, 2002, R&D Studies Applied to Standing Column Well Design, ASHRAE Final Report