

한랭지(몽골) 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능 분석

Heating Performance of Geothermal Heat Pump System Applied in Cold Climate Region(Mongolia)

손병후(Byonghu Sohn)^{1*}, 최재호(Jae Ho Choi)², 민경천(Kyung Chon Min)²

¹한국건설기술연구원 그린빌딩연구실, ²코텍엔지니어링(주) 기술연구소

¹Green Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

²Research Development Division, KOTEC Engineering, Anyang 431-767, Korea

(Received September 25, 2014; revision received October 3, 2014; Accepted: November 6, 2014)

Abstract Geothermal heat pump (GHP) systems have become an efficient alternative to conventional cooling and heating methods due to their higher energy using efficiency. These systems use the ground as a heat source in heating mode operation and a heat sink in cooling mode operation. The aim of this study is to evaluate the heating performance of the GHP system for a residential building (420 m²) in Ulaanbaatar, Mongolia. In order to demonstrate the feasibility of a sustainable performance of this system, we installed the water-to-water geothermal heat pump with ten vertical ground heat exchangers and measured operation parameters from October 19, 2013 to March 26, 2014. The results showed that the entering source temperature of brine from the ground heat exchangers was in a range of the design target temperature of -10°C for heating. For total values of the representative results, the ground heat exchangers extracted heat of 53.51 MWh from the ground. In addition, the GHP system supplied heat of 83.55 MWh to the building and consumed power of 30.27 MWh. Consequently, the average heating seasonal performance factor (SPF_h) of the overall system was evaluated to be 2.76 during the measurement period of the heating season.

Key words Geothermal heat pump system(지열 히트펌프 시스템), Heating performance(난방 성능), Residential building(단독주택), Cold climate region(한랭지), Mongolia(몽골)

* Corresponding author, E-mail: byonghu@kict.re.kr

기호설명

COP : 히트펌프 또는 시스템의 성능계수 [-]
 c_p : 비열 [J/kgK]
ELT : 부하측 순환수의 히트펌프 입구온도 [°C]
EST : 지중 순환수의 히트펌프 입구온도 [°C]
LLT : 부하측 순환수의 히트펌프 출구온도 [°C]
LST : 지중 순환수의 히트펌프 출구온도 [°C]
 \dot{m} : 지중 순환수의 질량유량 [kg/s]
 Q : 에너지 전달량 [kWh]
 \dot{Q} : 에너지 전달률 [kW]
SPF : 계간성능계수 [-]
 T : 온도 [°C]
 W : 총 소비전력 [kWh]
 \dot{W} : 순간 소비전력 [kW]

h : 난방
 hp : 히트펌프
 l : 부하(load)
 p : 순환펌프
 s : 열원(source)
 sys : 시스템

1. 서론

지열 히트펌프(geothermal heat pump) 시스템은 크게 지중열교환기(ground heat exchanger, GHE)와 지열 히트펌프로 구성된 냉난방 시스템이다. 기존 설비에 비해 냉난방 에너지를 크게 줄일 수 있는 대안으로 최근 들어 많은 관심을 받고 있다.⁽¹⁾ 아울러 공기 열원 히트펌프와 비교했을 때, 연중 냉난방 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 이는 히트펌프의 열원(heat source)과 히트싱크(heat sink)로 활용되는 지중이 연중 거의 일정

하첨자

ext : 지중열교환기의 열 추출(extraction)

한 온도를 유지하기 때문이다. 아울러 상대적으로 적은 에너지로 시스템을 구동하기 때문에 이산화탄소와 같은 온실효과 가스를 적게 배출하는 시스템이다.

최근 전 세계는 사용 가능한 화석연료의 고갈로 인한 에너지 위기를 극복하고, 온실가스에 의한 기후변화 문제를 해결하기 위해 다양한 방안들을 모색하고 있다. 아울러 저탄소형 사회 구현과 지속 가능한 발전이라는 두 마리 토끼를 동시에 잡기 위해, 전 세계적으로 신·재생에너지에 대한 관심이 집중되고 있다. 최근 들어 이러한 관심은 선진국진국뿐만 아니라 몽골과 같은 개발도상 국가에서도 확대되는 추세다.⁽²⁾

몽골에서는 경제가 활성화됨에 따라 수도인 울란바토르로 유입되는 인구가 급격히 증가하고 있다. 주로 유연탄과 화석연료를 난방과 취사용으로 사용하고 있어, 겨울철 심각한 대기 오염에 직면하고 있다.^(3, 4) 이러한 문제를 해결하기 위해, 태양광과 풍력을 비롯한 신·재생에너지 도입을 정부 차원에서 검토하고 있다. 하지만 몽골의 기술 수준이 상대적으로 낮기 때문에 선진국의 자본과 기술이 많이 유입되고 있다.⁽²⁾

국내 지열 냉난방 기술의 국외(몽골) 진출 타당성을 분석하기 위해 본 연구를 수행하였다. 우리와 비슷한 조건이나 비교적 저온인 환경에서 지열 히트펌프 시스템의 성능을 분석한 사례는 많다.⁽⁵⁻¹²⁾ 하지만 몽골과 같이 매우 열악한 환경에서 지열 히트펌프 시스템의 성능을 분석한 사례는 매우 드물다. 따라서 몽골 울란바토르와 같은 한랭지에 지열 히트펌프 시스템을 보급하기 전에, 적용 가능성과 기술적 타당성 등을 먼저 분석하였다. 이를 위해 Fig. 1의 단독주택에 지열 히트



Fig. 1 Photo of residential building, where the vertical GHP system is installed.

펌프 시스템(이하 ‘한랭지형 지열 시스템’ 또는 ‘지열 시스템’)을 설치하였다. 아울러 데이터 획득 장비를 이용하여 성능 분석에 필요한 데이터를 측정하였다. 본 결과는 한랭지형 지열 시스템 보급에 필요한 기초 자료가 될 것이다.

2. 대상 건물과 데이터 측정

2.1 대상 건물과 지열 히트펌프 시스템

Fig. 1은 수직 밀폐형 지열 히트펌프 시스템이 설치된

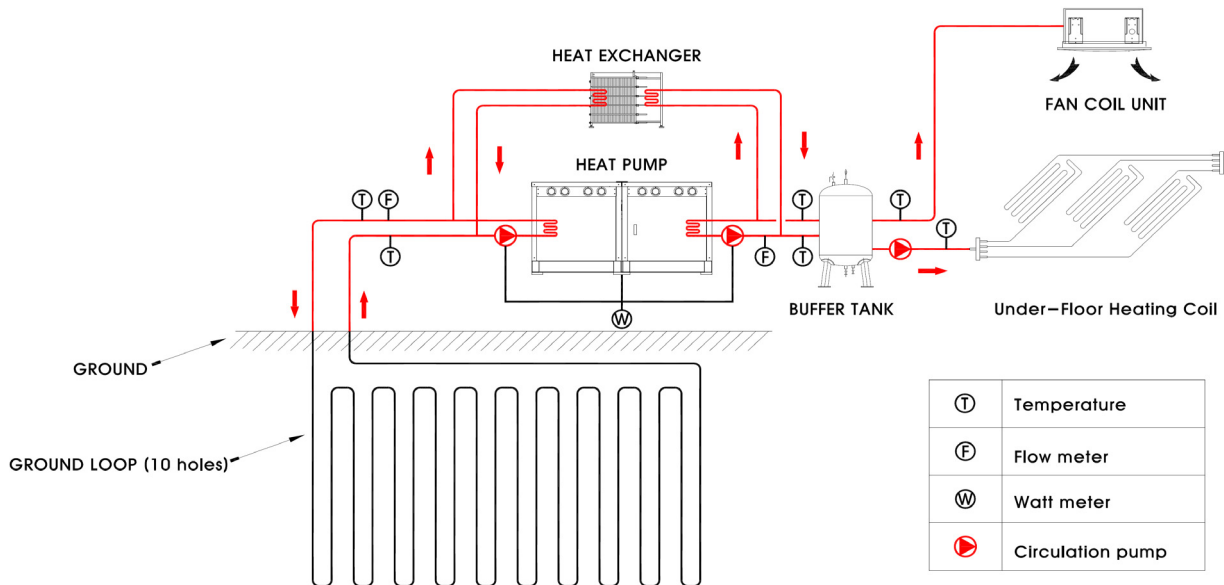


Fig. 2 Schematic diagram of geothermal heat pump system installed in residential building.

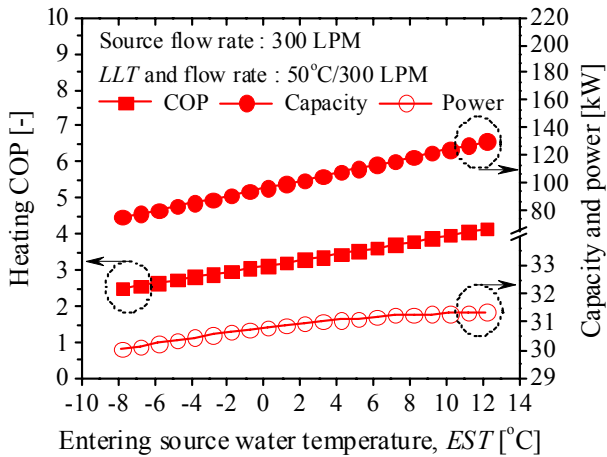


Fig. 3 Heating performance of geothermal heat pump unit installed in residential building.

대상 건물(단독주택)의 외관을 보여준다. 대상 건물의 냉난방 면적은 420 m²(지상 1층과 2층 각각 192 m², 차고 36 m²)이며 울란바토르의 겨울철 외기 온도를 감안하여 차고(garage)도 난방 대상인 것이 특징이다. 냉난방 첨두부하(peak load)는 각각 33.5 kW와 76.7 kW로, 난방부하가 냉방부하보다 상대적으로 크다.

한랭지형 지열 시스템의 구성도와 데이터 측정 지점 등을 Fig. 2에 도시하였다. 수직형 지중열교환기(ground loop) · 히트펌프(heat pump) · 실내 설비(FCU와 바닥 난방코일) · 순환 펌프(circulation pump) · 버퍼탱크(buffer tank) · 판형 열교환기(heat exchanger) 등으로 시스템을 구성하였다. 버퍼탱크(1,000 L)는 히트펌프가 생산한 냉 · 온수를 저장했다가 실내로 공급한다. 앞서 본 시스템을 한랭지형 지열 시스템이라고 명명하였지만 국내외에서 주로 설치되는 수직형 시스템과 본 시스템의 차이는 크게 없다. 다만 울란바토르의 여름철 지중 온도가 낮은 점을 감안하여 지중 순환수의 순환만으로 냉방부하의 일부를 감당할 수 있게 하였다. 이를 위해 지중열교환기와 버퍼탱크 사이에 판형 열교환기를 설치하였다.

지중열교환기 설치를 위해 총 10개(100 m 깊이 4홀과 150 m 깊이 6홀)의 보어홀(borehole)을 6 m 간격으로 천공하였다. 이때 보어홀 직경은 200 mm이다. 직경 32 mm의 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 파이프를 U관(U-tube) 형상으로 성형한 후 보어홀에 삽입하였다. 따라서 수평 트랜치 배관을 제외한 수직 U관의 전체 길이는 1,300 m다. 마지막으로 보어홀 내 빈 공간을 2.2 W/mK의 열전도도를 갖는 시멘트 그라우트로 마감하였다.

한랭지에 적합한 히트펌프를 제작하여 대상 건물의 기계실에 설치하였다. 히트펌프는 물 대 물 방식이며 작동유체(냉매)는 R22이다. 현장 설치에 앞서, 히트펌

Table 1 Design specifications of the system

Parameter	Value
Building	
Conditioned area [m ²]	420
Peak cooling load [kW]	33.5
Peak heating load [kW]	76.7
Heat pump, heating	
Rated heating capacity [kW]	70.0
Rated heating power [kW]	30.4
Rated heating COP [-]	2.3
<i>EST</i> ¹⁾ for rated test [°C]	-10.0
<i>LLT</i> ²⁾ for rated test [°C]	50.0
Ground heat exchanger(GHE)	
Configuration	Single U-tube
Number of GHEs/diameter [m]	10/0.2
Pipe outer/inner diameter [mm]	33.4/27.3
Working fluid	20% EG
Ground characteristics, mean values	
Thermal conductivity [W/mK]	1.94
Thermal diffusivity [m ² /day]	0.093

- 1) Entering source temperature to heat pump.
- 2) Leaving load temperature from heat pump.

프의 성능 특성을 실험실에서 분석하였다. Fig. 3은 열원 온도(*EST*)에 따른 히트펌프의 난방 용량, 소비전력, COP를 나타낸 것이다. 부하측 순환수의 히트펌프 입 · 출구 온도차를 6°C(44°C/50°C)로 고정된 후 열원의 온도를 변화(-10~12°C)시켰을 때 난방 COP는 2.3~4.2였다.

전체 시스템과 지중열교환기 설계에 상용 프로그램(GLD V7.5.14)⁽¹³⁾을 이용하였다. 설계에 앞서, 시험용 지중열교환기를 대상으로 열응답 시험(in-situ thermal response test)을 수행하였다. 이를 통해 지중 유효 열전도도(1.94 W/mK)와 지중 초기 온도(3.2°C)를 산정한 후 설계에 적용하였다. 참고로 열응답 시험에서 측정된 지중 초기 온도는 Han et al.⁽⁴⁾이 지하수를 이용하여 측정된 결과(3~6°C)와 유사하였다. 지중 순환수로 에틸렌 글리콜(20%)·물(80%) 혼합유체를 사용하였다. 순환수의 난방 설계온도(design target temperature), 즉 최저 운전 온도는 -10°C이다. 기타 사항들은 국내 기준과 동일하며 상세 설계 내용을 Table 1에 정리하였다.

2.2 데이터 측정과 분석

시스템의 난방 성능을 분석하기 위해 2013년 10월

Table 2 Parameters and uncertainties

Parameters	Uncertainty
Temperature, T	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
Mass flow rate, \dot{m}	$\pm 1.5\%$
Power, \dot{W}	$\pm 2.5\%$
Energy transfer rate, \dot{Q}	$\pm 2.14\% \sim \pm 5.22\%$
Heating SPF	$\pm 5.84\%$

19일부터 2014년 3월 26일까지 데이터를 측정하였다. Fig. 2에 표시한 지점에서 온도(T형 열전대)와 유량(Dualpulse, DP490)을 측정하였다. 또한 전력·전력량 변환기(LightStar, KTW-116A)로 시스템의 소비전력(W)과 전력량(Wh)을 측정하였다. 최종적으로 데이터로거(Han-young, GR100)를 이용하여 1초 간격으로 데이터를 저장한 후, 순간 또는 적산 값을 계산하였다.

Kline⁽¹⁴⁾이 제안한 방법에 따라 분석 결과에 영향을 미치는 데이터의 편차들을 조합하여 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, Table 2에 계산 결과를 정리하였다.

난방 모드에서 지중열교환기의 열 추출량(heat extraction) 계산에는 식(1)을 그리고 부하 측 순환수가 건물에 공급하는 열량 계산에는 식(2)를 이용하였다.

$$\dot{Q}_{ext} = \dot{m}_s c_p \Delta T_s = \dot{m}_s c_p (EST - LST) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{l,h} = \dot{m}_l c_p \Delta T_l = \dot{m}_l c_p (LLT - ELT) \quad (2)$$

식(1)에서 EST 는 지중 순환수의 히트펌프 입구 온

도, 즉 지중열교환기 출구 온도를 의미한다. 또한 LST 는 히트펌프 출구 온도, 즉 지중열교환기 입구 온도를 의미한다. 또한 식(2)에서 ELT 와 LLT 는 각각 부하 측 순환수의 히트펌프 유입·유출 온도를 의미한다. 즉 LLT 는 히트펌프에서 건물(버퍼탱크)로 나가는 온수의 온도다.

식(3)을 이용하여 전체 시스템의 난방 COP를 계산하였다.

$$COP_{sys} = \frac{\dot{Q}_{hp,h}}{\dot{W}_{hp} + \dot{W}_p} \approx \frac{\dot{Q}_{l,h} [\text{kW}]}{\dot{W}_{hp} + \dot{W}_p [\text{kW}]} \quad (3)$$

마지막으로 식(4)와 식(5)를 이용하여 히트펌프와 시스템의 계간성능계수(seasonal performance factor, SPF)를 산정하였다.

$$SPF_{hp} = \frac{\sum Q_{hp,h} [\text{kWh}]}{\sum W_{hp} [\text{kWh}]} \quad (4)$$

$$SPF_{sys} = \frac{\sum Q_{l,h} [\text{kWh}]}{\sum (W_{hp} + W_p) [\text{kWh}]} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 일일 난방 성능

시스템의 전체적인 운전 특성과 난방 성능 등을 기술하기에 앞서, 특정일(2014년 1월 8일)에서 지중열교

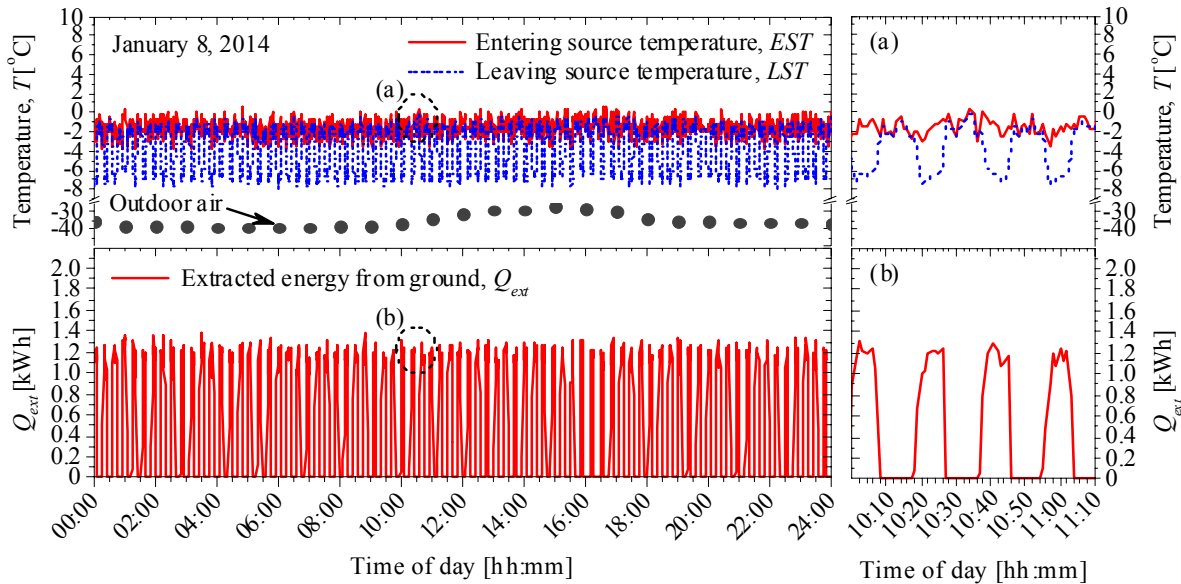


Fig. 4 Entering and leaving source temperatures and extracted energy from ground on Jan. 8, 2014.

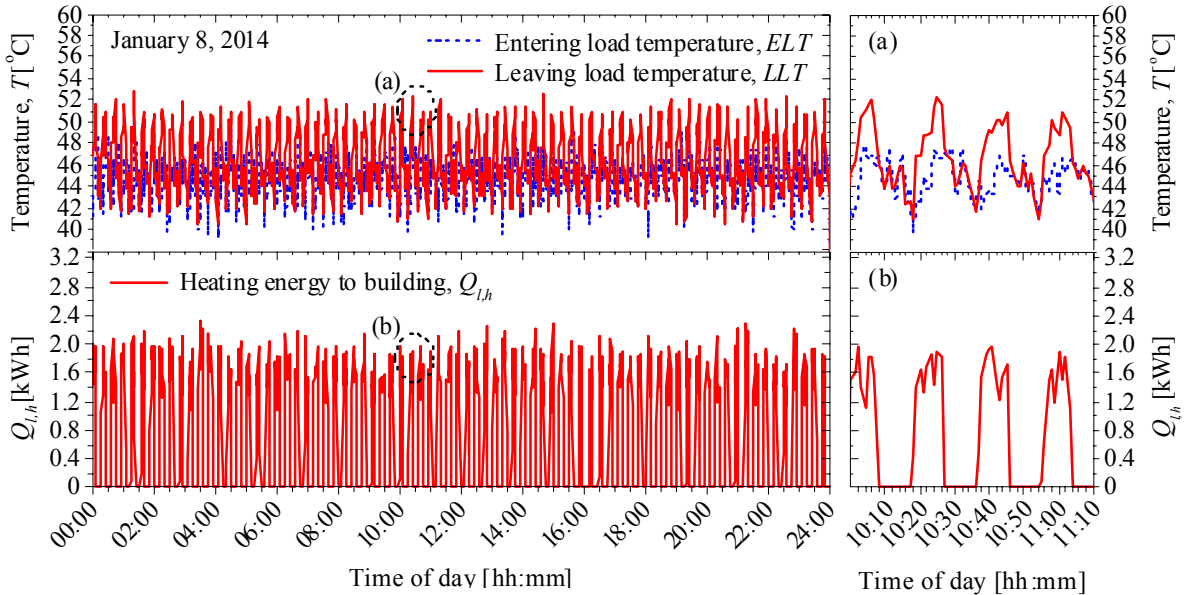


Fig. 5 Load side temperatures and heating energy to target building on January 8, 2014.

환기의 운전 특성을 Fig. 4에 그리고 부하 측 운전 특성을 Fig. 5에 도시하였다. 외기 온도를 제외한 나머지 값들을 1분 간격으로 표시하였으며, 이때 지중 열 추출량(Q_{ext})과 공급 열량($Q_{l,h}$)은 1분 동안의 적산 값이고 온도는 평균값이다.

Fig. 4에서 보듯이 지중열교환기는 운전(on)과 정지(off)를 반복한다. 이는 실내 설정 온도(24°C)와 버퍼탱크 내 온수 설정 온도(50°C)에 따라 시스템이 구동되기 때문이다. 이날 EST 는 최저 -3.8°C와 최고 0.4°C 사이에서 변화였다. 외기 온도(-39.8~-27.2°C, 평균 -34.6°C)를 감안하면 매우 안정적이라고 할 수 있다. 결국 시스템의 운전 방식(on/off 운전) 때문에 지중 순환수가 비교적 일정한 온도를 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 이는 Yang et al.⁽¹⁵⁾의 결과와 유사하다. Yang et al.⁽¹⁵⁾은 운전 방식(간헐 또는 연속 운전)이 시스템의 성능과 지중 온도 회복(soil temperature recovery)에 미치는 영향을 분석하였으며, 간헐 운전이 장기간에 걸친 성능 확보와 지중 온도 회복에 유리하다고 밝혔다. 하지만 잦은 간헐 운전은 히트펌프 등 중요 기기의 수명에 영향을 미칠 터이다. 따라서 시스템 성능과 내구성을 모두 만족하는 최적 운전 시간에 대한 연구가 더 필요하다. 마지막으로 일평균 EST 와 LST 는 각각 -1.8°C와 -5.9°C였고, 일일 총 열 추출량은 665.6 kWh였다.

Fig. 5에서 보듯이, 부하 측 운전 특성 역시 열원인 지중열교환기의 운전 특성과 유사하다. 하루 동안 시스템은 총 691분(11.5시간), 매시간 평균 28.8분 가동되었다. 가동 회수로 보면 총 77회, 매시간 평균 3.2회 운전되었으며 이때 1회 운전 시간은 평균 9분이었다. 전체

적으로 매우 낮은 외기 온도에도 불구하고 시스템은 매우 안정적으로 가동되었다. 총 1,002.4 kWh의 난방열을 공급하였으며, 총 360.6 kWh의 전력을 소비하였다. 따라서 일일 난방 SPF는 2.78이었다. 아울러 일평균 ELT 와 LLT 는 각각 44.3°C와 48.4°C였다.

지중열교환기와 히트펌프의 시간대별 운전 특성을 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. 두 그래프는 앞선 특정일을 포함한 3일 동안(2014년 1월 7일~1월 9일)의 원(raw) 데이터를 시간당 평균(T , SPF) 또는 적산(Q , W) 값으로 변환한 결과다. Fig. 6에서 시간대별 EST 는 -2.2~-0.6°C 사이에서 그리고 지중 열 추출량은 16.2~35.3

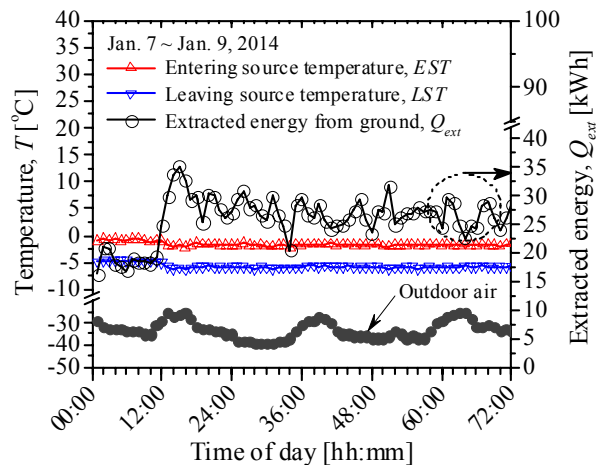


Fig. 6 Hourly variations of EST , LST , and Q_{ext} on typical heating days.

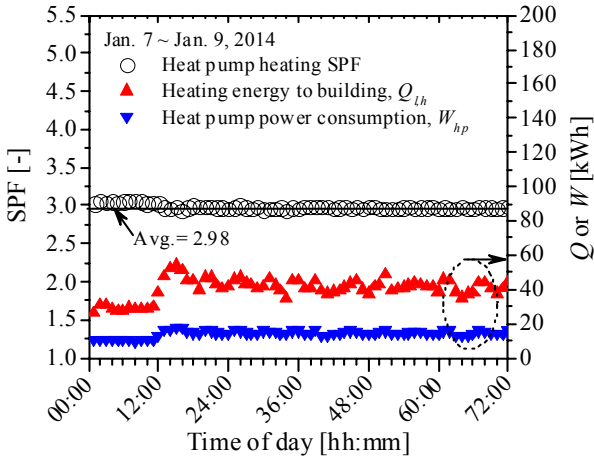


Fig. 7 Hourly heating performance of geothermal heat pump unit on typical heating days.

kWh 사이에서 변화했다. 또한 Fig. 7에서 히트펌프 유닛의 시간당 생산열량(Q_{Lh}) 변동 폭은 26.3~54.1 kWh였다. 이때 히트펌프는 9.7~17.4 kWh의 전력을 소비하였다. 따라서 히트펌프 유닛의 시간대별 난방 SPF는 2.94~3.07(평균 2.98)이었다. 열악한 환경임에도 히트펌프는 안정적인 성능을 발휘한다고 할 수 있다.

3.2 일별 난방 성능

Fig. 8과 Fig. 9는 전체 측정 기간(2013년 10월 19일~2014년 3월 26일)에 대해 시스템의 일별 난방 성능 변화를 도시한 그래프다. 앞선 Fig. 6이나 Fig. 7과 마찬가지로 온도는 일평균 값이고 에너지 전달량(Q)과 소비 전력(W)은 일일 적산 값이다. 또한 그래프에서 38

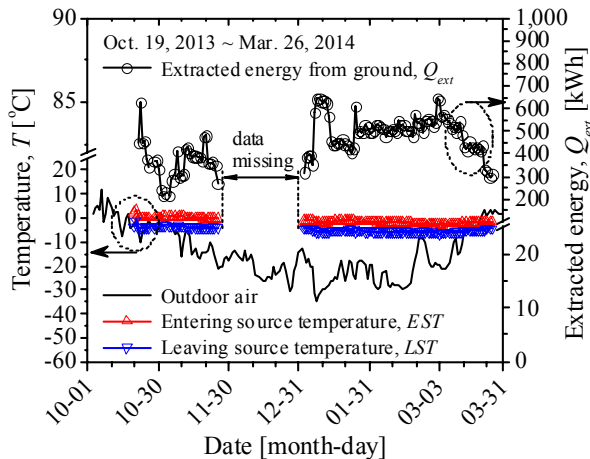


Fig. 8 Daily heating performance of ground heat exchanger in measurement period.

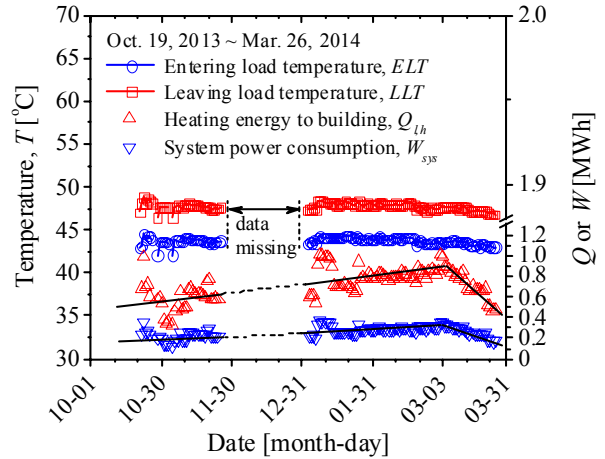


Fig. 9 Daily heating performance of system in measurement period.

일(2013년 11월 26일~2014년 1월 2일)의 데이터가 누락되었는데, 이는 현지 운영자의 데이터 저장 오류에서 기인한 것이다.

측정 기간 중, 일평균 EST 는 3.3°C(2013년 10월 20일, 23분 가동)와 -2.7°C(2014년 3월 2일, 690분 가동) 사이에서 변화했다. 참고로 측정 시작일(2013년 10월 19일)의 일평균 EST 와 가동 시간은 각각 2.4°C와 73분이었다. 처음 이틀(2013년 10월 19일~10월 20일)은 시스템과 데이터 획득 장비의 가동 상태를 점검하는 기간이었다. 따라서 전체적인 결과 분석에서 두 결과는 제외하였다. 실질적으로, 일평균 EST 는 0.9°C(2013년 10월 21일)에서 -2.7°C까지 점차 감소하다가 이후 난방 부하가 감소(외기 온도 상승)함에 따라 -1.3°C(2014년 3월 26일)까지 상승하였다. 지중열교환기의 일일 열 추출량 변동 폭은 212.4~665.6 kWh였고, 변화 경향은 EST 의 경향과 유사하였다.

부하 측 순환수(ELT 와 LLT)의 일평균 온도 변화와 시스템의 난방 성능 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 측정 기간 중 일평균 LLT 의 변동 폭은 최저 46.5°C, 최고 48.9°C였고 ELT 는 최저 42.1°C, 최고 44.5°C였다. 시스템의 일일 난방 용량과 소비 전력은 327.3~1,008.9 kWh(평균 704.4 kWh)와 114.9~360.6 kWh(평균 255.5 kWh)였으며, 이 두 결과도 정점(2014년 3월 2일)을 기준으로 증가하다가 점차 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 10은 시스템의 일일 난방 성능을 외기 온도의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에 일일 난방 용량(Q_{Lh})과 소비 전력(W_{sys})을 그리고 Fig. 10(b)에 시스템과 히트펌프의 일평균 계간성능계수(SPF)와 가동 시간을 도시하였다. 일일 난방 용량과 소비 전력 그리고 가동 시간은 외기 온도가 상승(난방 부하 감소)함에 따라 감소하지만, 시스템과 히트펌프의 난방 SPF는 거의 일정

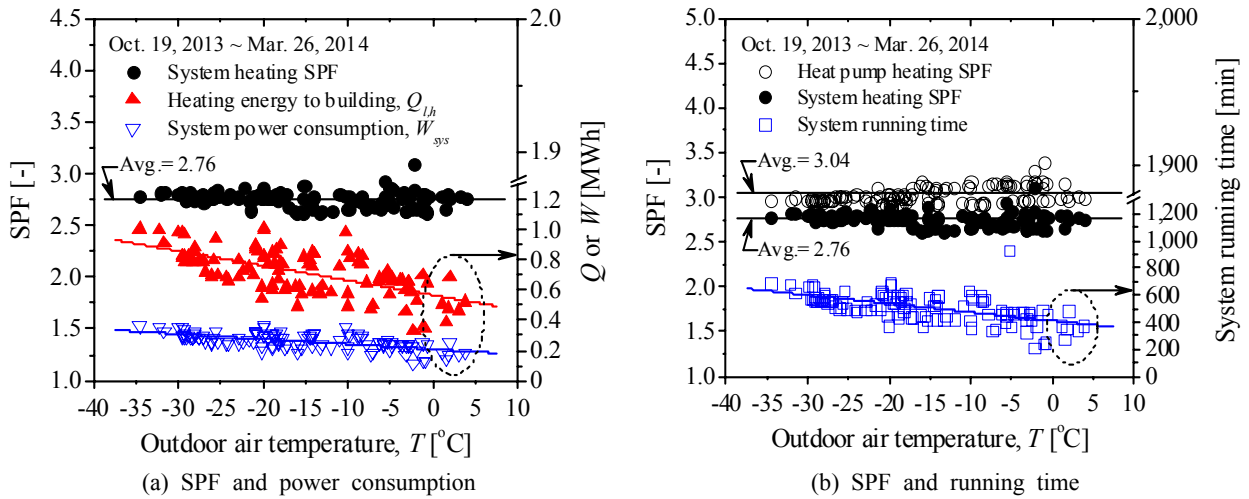


Fig. 10 Daily averaged heating performance of GHP system with outdoor air temperature.

하였다. 이는 외기 온도, 즉 대상 건물의 난방 부하에 따라 시스템 가동 시간에서 차이가 있기 때문이다.

Table 3은 성능 분석 결과를 월별 적산 값(Sum)과 평균값(Avg.)으로 정리한 것이다. 표에서 월별 평균값들은 일일 결과를 평균한 수치다. 측정 기간 중 총 53.51 MWh의 에너지를 땅에서 추출하였으며, 총 83.55 MWh의 난방 에너지를 건물에 공급하였다. 또한 시스템은 총 30.3 MWh의 전력을 소비하였으며 따라서 난방 SPF는 2.76이다. 전체 측정 기간에 대해 평균 EST는 -0.97°C 였고, 표에는 표시하지 않았지만 평균 LLT는 47.54°C 였다.

대상 건물에 설치한 지중열교환기(1,300 m)의 최대 용량은 54.6 kW(42.0 W/m)였다. 이는 지중 열 추출량(53.51 MWh)을 총 가동 시간(980.2시간)으로 나눈 값이며, 또한 어림산정(rule-of-thumb) 방법(50 m/RT 또는 70.4 W/m)으로 계산한 용량인 91.5 kW와 차이를 보인다.

이는 실제 지중열교환기(100 m/4홀, 150 m/6홀, 총 1300 m)를 130 m/10홀로 볼 때, 약 780 m(130 m/6홀)까지 줄일 수 있다는 것과 같은 의미다. 하지만 이 결과는 본 현장에만 한정할 수 있으며, 일반화를 위해 장기간의 성능 측정과 시뮬레이션 분석이 더 필요하다.

4. 결 론

몽골 울란바토르와 같은 한랭지에 지열 히트펌프 시스템을 보급하기 위해, 적용 가능성과 기술적 타당성 등을 분석하였다. 이를 위해 수직 밀폐형 지열 시스템을 단독 주택에 설치한 후, 데이터 획득 장비를 이용하여 성능 분석에 필요한 데이터를 측정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 시스템은 실내 온도와 온수 설정 온도에 따라 온전(on)과 정지(off)를 반복하였다. 이러한 운전 방식

Table 3 Monthly summed or averaged values of representative results for GHP system; measurement period of from Oct. 19, 2013 to Mar. 26, 2014

Month/Year	OAT ¹⁾ [°C]	EST [°C]	GHE, Q_{ext} ²⁾		Power, W_{sys} ³⁾		Heating, $Q_{l,h}$ ⁴⁾		Time, OP ⁵⁾		SPF [-]
			Sum [MWh]	Avg. [kWh]	Sum [MWh]	Avg. [kWh]	Sum [MWh]	Avg. [kWh]	Sum [hour]	Avg. [hour]	
10/2013	-0.58	0.76	3.84	426.4	2.16	232.6	5.97	641.0	65.6	7.03	2.76
11/2013	-11.45	0.19	8.68	377.2	4.99	212.4	13.29	565.9	158.0	6.73	2.66
1/2014	-23.13	-1.39	14.47	499.0	8.07	276.1	22.50	769.7	264.7	9.05	2.79
2/2014	-23.44	-1.97	14.29	510.2	8.17	291.6	22.67	809.6	266.2	9.51	2.78
3/2014	-8.36	-2.06	12.24	470.8	6.88	264.8	19.12	735.6	225.7	8.68	2.78
Total or Avg.	-14.62	-0.97	53.51	456.7	30.27	255.5	83.55	704.4	980.2	8.20	2.76

1) Monthly mean outdoor air temperature in Ulaanbaatar; 2) Amount of heat extraction by ground heat exchanger;

3) System power consumption; 4) Heating energy to building; 5) System operation time(or running time).

은 지중 순환수가 비교적 일정한 온도를 유지하는데 기여하였다.

- (2) 대상 지역의 외기 온도를 감안했을 때, 지중열교환기를 포함한 전체 시스템은 안정적인 성능을 발휘하였다.
- (3) 측정 기간 중 일평균 *EST*는 0.9℃(2013년 10월 21일)에서 -2.7℃(2014년 3월 2일)까지 감소하다가 이후 외기 온도가 상승함에 따라 -1.3℃(2014년 3월 26일)까지 상승하였다.
- (4) 일일 난방 공급량은 327.3~1,008.9 kWh(평균 704.4 kWh) 그리고 소비 전력은 114.9~360.6 kWh(평균 255.5 kWh)였다. 이 두 결과도 정점(2014년 3월 2일)을 기준으로 증가하다가 점차 감소하였다.
- (5) 일일 난방 용량과 소비 전력 그리고 가동 시간은 외기 온도가 상승함에 따라 감소하지만, 시스템과 히트펌프의 난방 SPF는 측정기간 내내 거의 일정하였다.
- (6) 측정 기간 중 지중열교환기는 총 53.51 MWh의 에너지를 땅에서 추출하였다. 시스템은 총 83.55 MWh의 난방열을 공급하였으며, 총 30.27 MWh의 전력을 소비하였다. 따라서 난방 SPF는 2.76이다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 중소기업 현장에 로기술 지원사업과 기술 개도국 진출 기획사업의 지원을 받아 수행한 결과입니다. 또한 본 논문의 일부는 (사)대한설비공학회의 2014년도 하계학술발표대회에서 발표한 내용입니다.

References

1. Zhai, X. Q., Qu, M., Yu, X., Yang, Y., and Wang, R. Z., 2011, A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 6, pp. 3133-3140.
2. Energy Charter, 2011, In-depth review of energy efficiency policies and programmes : Mongolia, Energy Charter Secretariat, Brussels, Belgium.
3. Guttikunda, S. K., Lodoysamba, S., Bulgansaikhan, B., and Dashdondog, B., 2013, Particulate pollution in Ulaanbaatar, Mongolia, *Air Quality, Atmosphere and Health*, Vol. 6, No. 3, pp. 589-601.
4. Hahn, J. S., Yoon, Y. S., Yoon, K. S., Lee, T. Y., and Kim, H. S., 2012, A study on development potential of shallow geothermal energy as space heating and cooling sources in Mongolia, *Transactions of the*

- Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 8, No. 2, pp. 36-47.
5. Sohn, B., Cho, C. S., Shin, H. J. and An, H. J., 2005, Cooling and heating performance evaluation of a GSHP system, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-81.
6. Sohn, B., Choi, J. M., and Choi, H. S., 2011, Performance simulation of ground-coupled heat pump (GCHP) system for a detached house, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 392-399.
7. Montagud, C., Corberan, J. M., Montero, A., and Urchueguia, J. F., 2011, Analysis of the energy performance of a ground source heat pump system after five years of operation, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 12, pp. 3618-3626.
8. Bakirci, K., 2010, Evaluation of the performance of a ground-source heat pump system with series GHE (ground heat exchanger) in the cold climate region, *Energy*, Vol. 35, Vol. 7, pp. 3088-3096.
9. Bakirci, K., Ozyurt, O., Comakli, K. and Comakli, O., 2011, Energy analysis of a solar-ground source heat pump system with vertical closed-loop for heating applications, *Energy*, Vol. 36, No. 5, pp. 3224-3232.
10. Ozyurt, O. and Ekinici, D. A., 2011, Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 4, pp. 1257-1265.
11. Wu, W., Wang, B., You, T., Shi, W., and Li, X., 2013, A potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions : Ground source absorption heat pump, *Renewable Energy*, Vol. 59, pp. 39-48.
12. GEFCF, 2012, Replacement of coal-fired boiler by geothermal heat pump for heating, Report of Feasibility Study on New Mechanism Project, Global Environment Centre Foundation (GEFCF), Japan.
13. Gaia Geothermal, 2012, Ground loop design geothermal design studio user's manual, Gaia Geothermal.
14. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.
15. Yang, J., Xu, L., Hu, P., Zhu, N., and Chen, X., 2014, Study on intermittent operation strategies of a hybrid ground-source heat pump system with double-cooling towers for hotel buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 76, pp. 506-512.