

한랭지(몽골) 지열 히트펌프 시스템의 모니터링과 성능 분석

최재호[†], 민경천, 손병후^{*}

코텍엔지니어링(주) 기술연구소, *한국건설기술연구원 그린빌딩연구소

1. 서론

지열 히트펌프 시스템은 크게 지중열교환기와 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 일정한 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 선진국뿐만 아니라 몽골과 같은 개발도상국에서도 확대되는 추세다.^[2]

몽골에서는 경제가 활성화됨에 따라 수도인 울

란바토르로 유입되는 인구가 급격히 증가하고 있다. 주로 유연탄과 화석연료를 난방과 취사용으로 사용하고 있어, 겨울철 심각한 대기 오염에 직면하고 있다.^[3] 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 환경에서 지열 히트펌프 시스템의 성능을 분석한 사례는 많이 있다. 하지만 몽골과 같이 매우 열악한 환경에서 지열 시스템의 성능을 분석한 사례는 거의 없다. 몽골 울란바토르와 같이 한랭지에 설치된 지열 시스템의 난방 성능 특성을 규명하기 위해 그림 1의 모델하우스에 지열 시스템을 설치하였다. 여기에 각종 센서와 데이터 획득 장비를 설치하여 데이터를 측정하였다. 이러한 분석 결과는 지열 시스템의 성능과 경제성을 확보하는데 필요한 기초 자료가 될 것이다.

2. 대상 건물과 데이터 측정 및 시뮬레이션

그림 1의 모델 하우스(단독주택)에 수직 밀폐



[그림 1] 모델하우스

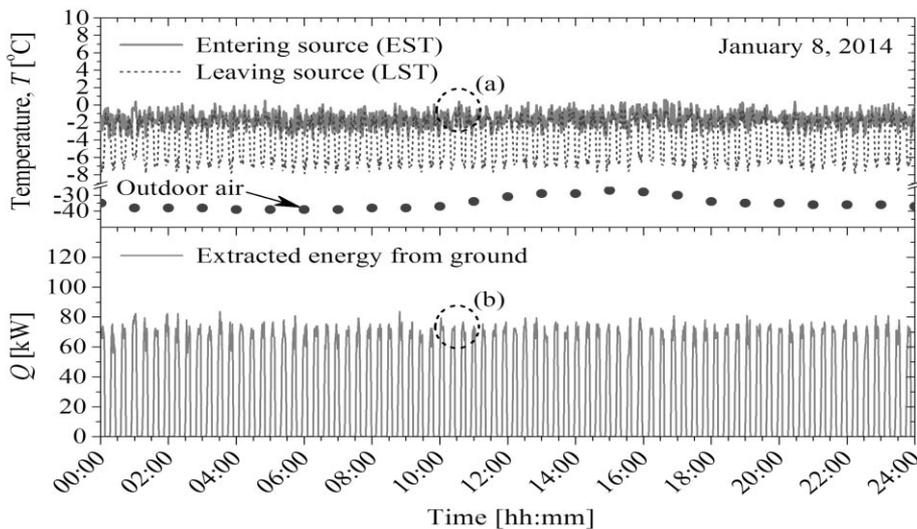
형 지열 히트펌프 시스템을 설치하였다. 대상 건물의 냉난방 면적은 420 m²(지상 1층과 2층 각각 192 m², 차고 36 m²)이다. 냉난방 피크부하는 각각 33.5 kW와 76.7 kW로 난방부하가 냉방부하보다 상대적으로 크다. 한랭지(몽골)에 적합한 국내 D사(40GWE)의 물 대 물 히트펌프를 설치하였다. 난방 시 히트펌프의 열원(지중 순환수)의 온도 범위는 -7.8℃~12.2℃이며 이때 난방 COP는 2.5~4.15다.

지중열교환기와 전체 시스템 설치에 앞서 열용

<표 1> 설계 사양

Parameter	Specifications
Building	
Conditioned area [m ²]	420
Peak cooling load [kW]	33.5
Peak heating load [kW]	76.7
Heat pump	
Total unit capacity [kW]	76.7
Heat pump cooling COP [-]	6.7
Heat pump heating COP [-]	3.1
Design EST* for heating [?]	-10
Ground heat exchanger(GHE)	
Configuration	Single U-tube
Number of GHEs [-]	10
Borehole diameter [m]	0.2
Pipe outer and inner diameter[mm]	33.4/27.3
Working fluid	20% EG
Ground, mean values	
Thermal conductivity [W/mK]	1.94
Thermal diffusivity [m ² /day]	0.093

답 시험을 수행하였으며, 이를 통해 1.94 W/mK의 지중 열전도도를 산정하였다. 겨울철 울란바토르의 외기와 지중 온도 그리고 히트펌프 운전 온도 등을 고려하여 에틸렌글리콜과 물을 혼합하여 지중 순환수로 사용하였다. 지중열교환기



[그림 2] 냉온수 입출구 온도 및 땅으로부터 추출된 에너지

그라우팅 재료로 시멘트 혼합물을 주입하였다. 국내에서 몽골 울란바토르에 수직 밀폐형 지열 시스템을 설치한 사례는 거의 없다. 따라서 이 점과 안전을 등을 고려하여 난방 설계 온도 (design EST)를 -10°C 로 하였다. 기타 사항들은 국내 기준과 동일하며, 상세 내용은 표 1에 정리하였다.

모델 하우스에 설치된 지열 시스템의 난방 성능 분석은 2013년 10월 19일부터 2014년 3월 26일까지 측정된 데이터를 이용하였다. 시스템 운전 시 지중 순환수의 히트펌프 입·출구 온도와 유량 그리고 부하 측 순환수의 히트펌프 입·출구 온도와 유량을 등을 1초 간격으로 측정하였다. 아울러 전력량계를 이용하여 소비전력을 측정하였으며, 이를 이용하여 시스템과 히트펌프의 난방 COP를 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

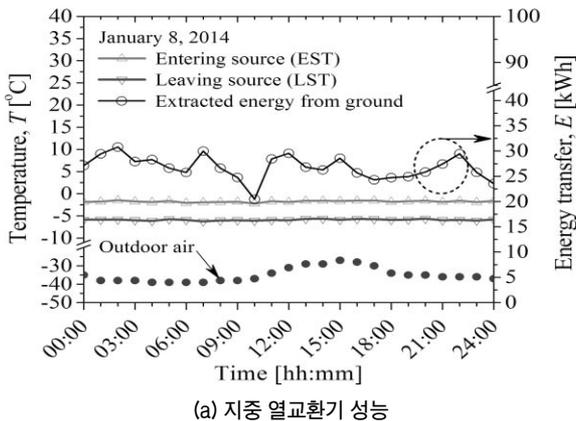
그림 2는 2014년 1월 8일의 데이터 중, 지중 순환수의 온도변화와 지중열교환기의 열 추출량 (extracted energy from ground)을 1분 간격으로 나타낸 것이다. 지중열교환기의 열 추출량은 순환수의 온도 차이와 유량으로 계산하였다. 본 지열 시스템은 실내 난방부하(부하 측 온수 설정

온도)에 따라 운전(on)과 정지(off)를 반복한다. 이에 따라 지중 순환수 역시 운전-정지를 반복함을 볼 수 있다. 아울러 일평균 외기온도가 -34.6°C 임에도 EST는 거의 일정하였다. 일평균 EST와 LST는 각각 -1.75°C 와 -5.89°C 였으며 일일 열 추출량은 641.8 kWh였다.

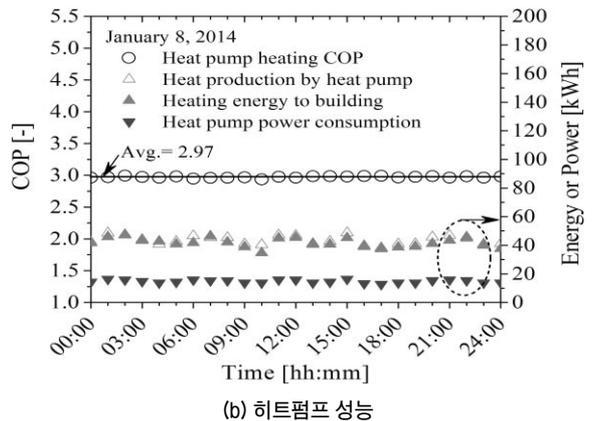
그림 3은 앞선 그림 2의 원 데이터(raw data)를 시간대별 평균 또는 적산 값으로 나타낸 것이다. 히트펌프 유닛의 일평균 난방 COP는 2.97이었으며, 일일 적산 소비전력은 352.95 kWh이었다.

그림 4는 전체 난방 분석 기간(2013년 10월 19일~2014년 3월 26일)에 대해 분석 결과를 일평균 값으로 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 일평균 난방 성능 분석 결과를 일별로 도시한 것이며, 그림 4(b)는 일별 분석 결과를 외기 온도의 함수로 나타낸 것이다. 참고로 본 시스템은 지금도 운전되고 있으며, 본 논문의 분석기간 이후의 결과와 냉방 성능은 다른 지면에서 언급하기로 한다.

분석 기간 중, 평균 426.57 kWh의 에너지를 땅에서 추출하였으며, 669.23 kWh의 에너지를 모델 하우스에 공급하였다. 시스템은 평균 242.66 kWh의 전력을 소비하였으며, 난방 COP는 2.76이었다. 아울러 평균 EST와 LST는 각각 -0.89°C 와 -4.84°C 이었으며, ELT와 LLT는 43.46°C 와 47.54°C 이었다. 표 2는 난방 성능분석 결과를 월

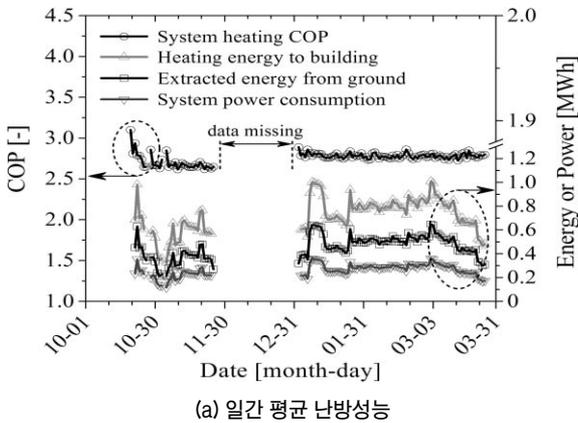


(a) 지중 열교환기 성능

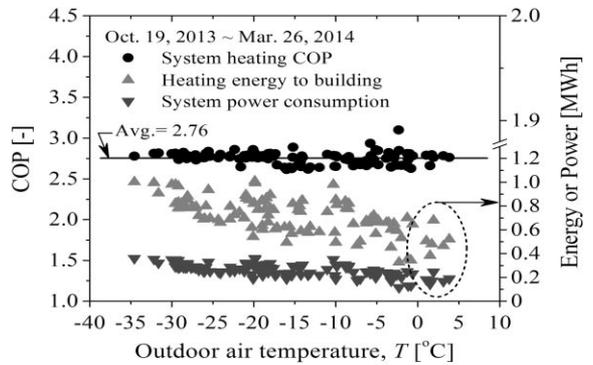


(b) 히트펌프 성능

[그림 3] 지열 히트펌프 시스템의 시간당 난방 성능



(a) 일간 평균 난방성능



(b) 외기가 없는 난방성능

[그림 4] 지열 히트펌프 시스템의 일간 난방성능

<표 2> 지열히트펌프의 월간 성능

Month	OAT [°C]	EST [°C]	LST [°C]	W [kWh]	Q [kWh]	COP [-]
10	-0.58	0.76	-3.70	180.17	497.23	2.78
11	-11.45	0.19	-3.83	207.82	553.67	2.67
1	-23.13	-1.39	-5.30	268.93	750.08	2.79
2	-23.44	-1.97	-5.82	291.61	809.64	2.78
3	-8.36	-2.06	-5.54	264.75	735.55	2.78

별 평균값으로 정리한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 몽골 울란바토르에 설치된 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능을 분석하였다. 이를 위해 모델하우스에 수직 밀폐형 지열 시스템을 설치하였으며, 데이터 획득 장비를 이용하여 성능 분석에 필요한 데이터를 측정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 시스템은 실내 난방부하에 따라 운전(on)과 정지(off)를 반복하였다. 아울러 매우 열악한 조건에도 지중 순환수의 온도 변화는 작았다.
- (2) 분석 기간 중, 평균 426.57 kWh의 에너지를 땅에서 추출하였으며, 669.23 kWh의 에

너지를 모델 하우스에 공급하였다.

- (3) 시스템은 평균 242.66 kWh의 전력을 소비하였으며 평균 난방 COP는 2.76이었다.
- (4) 평균 EST와 LST는 -0.89°C 와 -4.84°C 이었으며, ELT와 LLT는 43.46°C 와 47.54°C 이었다.

참고문헌

1. 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, pp. 3088-3096.
2. Energy Charter Secretariat, 2011, In-depth review of energy efficiency policies and programmes: Mongolia, Energy Charter Secretariat, Brussels, Belgium.
3. Hahn, J., 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.