에너지슬래브 지중열교환기의 성능 분석

최 종 민, 손 병 후^{†*}

국립 한밭대학교 기계공학과, *한국건설기술연구원 그린빌딩연구실

Performance Analysis of Energy-Slab Ground-Coupled Heat Exchanger

Jong Min Choi, Byonghu Sohn^{†*}

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

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

(Received March 5, 2012; revision received April 16, 2012)

ABSTRACT: Recently, utilization of building foundations as ground-coupled heat exchangers has attracted much attention because they reduce the cost and enhance the heat transfer. The objective of this study is to evaluate the performance of energy-slab ground-coupled heat exchanger installed in a commercial building. In order to demonstrate the energy transfer characteristics of the energy-slab, experiments were conducted from October 2010 to September 2011. The 1-year measurement results showed that the mean EWTs of brine returning from the energy-slab were 9.6°C in heating season and 24.9°C in cooling season, which were in a range of design target temperatures. In addition, the geothermal heat pump system with the energy-slab showed on-off operation according to the setting temperatures of secondary fluid in water storage tank. The results also showed that the energy-slab extracted heat of 198.6 kW from the ground and injected heat of 318.9 kW to the ground, respectively.

Key words: Energy-slab(에너지슬래브), Building foundation(건물 기초), Ground-coupled heat exchanger(지중열교환기), Geothermal heat pump(지열 히트펌프), Performance(성능)

기 호 설 명

하첨자

c_p : 비열 [J/kgK]
 EWT : 슬래브 순환수의 히트펌프 입구온도 [°C]
 LWT : 슬래브 순환수의 히트펌프 출구온도 [°C]
 $\dot{m}$: 에너지슬래브 순환수의 질량유량 [kg/s]
 Q : 열 교환량 또는 에너지 전달량 [kW]
 T : 온도 [°C]
 V : 에너지슬래브 순환수의 체적유량 [LPM]

c : 냉방
 ext : 에너지슬래브의 열 추출(extraction)
 h : 난방
 inj : 에너지슬래브의 열 방출(injection)
 l : 부하(load)
 s : 열원(source)

1. 서 론

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0495; fax: +82-31-910-0246

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

건물 신·재생에너지 설비로 많은 관심을 받고 있는 지열 히트펌프(geothermal heat pump) 시스템은

크게 지중열교환기와 히트펌프로 구성된 냉난방 겸용 시스템이다. 외기에 거의 영향을 받지 않는 지중의 항온성을 활용하기 때문에 효율이 높은 시스템이다.⁽¹⁾ 이 시스템은 다양한 형상의 지중열교환기를 이용할 수 있지만 국내에서는 주로 수직 밀폐형 지중열교환기를 적용하고 있다. 수직 밀폐형 지중열교환기는 건물의 냉난방 부하에 따라 다양한 깊이로 매설할 수 있지만, 초기 투자비가 상대적으로 큰 것이 단점이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 유럽과 중국 등에서는 건물 기초를 활용하기 위한 기술 개발⁽²⁻⁶⁾에 많은 투자를 하고 있으며, 최근 들어 국내에서도 이 기술의 적용가능성을 높이기 위한 연구⁽⁷⁻¹⁰⁾가 수행되었다.

건물 기초는 건물 지지를 목적으로 지반에 삽입한 인공 구조물을 의미하며 파일(pile)과 기초 슬래브(foundation slab) 등이 있다. 이중 기초 슬래브를 활용한 에너지슬래브(energy-slab)는 건물 기초매트 사이에 파이프를 수평으로 설치하여 지중열교환기로 활용하는 방식이다. 대형 건물의 지하 주차장과 지하 시설물의 바닥을 활용할 수 있고 또한 지하 시설물의 대형화 추세를 고려하면 활용도가 충분할 것으로 판단된다. 다만 건물에 적용되는 기초매트의 형태와 크기가 다르기 때문에 이러한 특성을 반영할 수 있는 설계 데이터와 시공기법 등을 구축할 필요가 있다.

에너지파일의 설계나 성능분석 등과 관련된 연구는 수직형 지중열교환기 분야에 비해 비교적 최근에 주목받기 시작했다. Katsura et al.⁽¹¹⁾은 에너지파일을 포함한 수직형 지중열교환기의 성능을 분석하였으며, 이를 통해 기존 해석기법을 보완하였다. 최근 Wood et al.⁽¹²⁾은 21개의 에너지파일을 이용한 단독주택(72 m²)용 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능을 분석하였다. 난방 운전 중 에너지파일 순환수와 지중 온도 변화를 측정하였으며, 아울러 에너지파일의 열전달 성능과 시스템의 계간 난방성능 등을 분석하였다.

이렇듯 에너지파일과 관련한 연구 결과들은 최근 들어 많이 발표되고 있지만, 에너지슬래브와 관련한 연구는 미흡한 수준이다. Hwang et al.⁽¹³⁾은 주상복합 건물의 기초 슬래브에 설치된 수평형 지중열교환기의 계절별 성능을 평가하였다. 최근 Choi⁽¹⁴⁾는 에너지슬래브를 적용한 지열 히트펌프 시스템의 냉난방 성능을 분석하였다. 실측 데이터를 바탕으로 시스템의 일평균 난방 COP는 3.9에서 4.3의 범위에 그리고 일평균 난방 COP는 2.8에서 4.4의 범위에

있음을 보였다.

본 연구는 Choi⁽¹⁴⁾의 연구의 연장으로, 상업용 건물에 적용된 에너지슬래브 지중열교환기(이하 ‘에너지슬래브’)의 냉난방 성능을 분석하였다. 선행 논문⁽¹⁴⁾은 지열 히트펌프를 포함한 전체 시스템의 냉난방 성능 분석 결과를 언급하였기 때문에, 본 논문에서는 에너지슬래브의 열교환 성능에 초점을 맞추었다. Fig. 1(a)는 대상 건물을 나타낸 것이며 Fig. 1(b)는 에너지슬래브의 형상과 시공 과정을 나타낸 것이다.

2. 대상 시스템과 실험 방법

에너지슬래브의 열교환 성능을 분석하기 위해, 본 연구에서는 상업용 건물(리조트 클럽하우스, 충청북도 청원군 소재)에 지열 히트펌프 시스템을 설치하였다. 대상 건물은 지하 1층과 지상 2층 규모이며 지하 1층은 기계실과 직원 편의 시설로, 지상 1~2층은 로비와 이용객 편의 시설(식당·매장·탈의실 등)로 이용된다. 전체 공조 공간 중 지열 히트펌프 시스템은 지하 1층의 직원 편의시설(직원 식당과 휴게실)과 지상 1층의 일부(로비, 관리실 등)를 담당하며 면적은 1,294 m²다. 이때 냉난방 최대 부하는 각각 208.4 kW와 112.5 kW다.

(a) Aeroview of building

(b) Construction of energy-slab

Fig. 1 Aeroview of building and energy-slab ground-coupled heat exchanger.

Fig. 2 System layout and experimental setup.

Fig. 2는 대상 건물에 적용된 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 전체 시스템은 물 대 물 지열 히트펌프 유닛(KGH-0420 W, 공간코리아)과 에너지슬래브로 구성된다. 동일 용량의 지열 히트펌프 2대를 설치하였으며, 각각의 냉난방 정격용량(nominal capacity)은 140.5 kW와 140.2 kW다. 여기에 지중 순환수 펌프, 부하측 순환수 펌프, 냉·온수 저장 축열조, 시스템 제어장치와 성능 측정용 데이터 획득 장비 등으로 시스템을 구성하였다.

대상 건물 바닥과 이 건물에 바로 인접한 지하 주차장 바닥에 에너지슬래브용 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프를 매설하였다. 파이프의 총 길이는 21,000 m 이고 파이프 사이의 간격은 20 cm를 유지하였다. 매설 면적은 총 4,000 m²이며 상세 배치도는 선행 연구⁽¹⁴⁾에서 확인할 수 있다. 지면에서 슬래브 상단 표면까지 깊이는 약 10 m이고 콘크리트 슬래브의 두께는 20 cm다. 즉 파이프가 지면에서 10.2 m 깊이에 수평으로 매설된 형상(파이프를 바닥에 깔 후, 콘크리트 슬래브를 20 cm 두께로 타설)이다. Table 1은 시스템 사양에 대한 대표적인 값들을 정리한 것이다.

Fig. 2에서 보듯이 지열 히트펌프와 에너지슬래브 사이에 주 공급헤더(main supply header)와 주 환수헤더(main return header)를 설치하고 에너지슬래브 순환수의 온도를 측정하였다. 아울러 주 공급헤더와 주 환수헤더에 각각 8개 총 16개의 부 헤더(sub-header)들을 연결하였으며, 각각의 부 헤더에

서도 온도를 측정하였다. 부 헤더에 연결된 파이프 길이를 최대한 같게 하여, 에너지슬래브 순환수가 균일한 유량으로 유동할 수 있게 하였다.

데이터 획득 시스템(MX100, Yokogawa)을 통해 유량(GF630/LF600, Toshiba), 온도(T형 열전대, $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$), 차압(DPT692 series, Huba Control) 등의 데이터를 2초 간격으로 취득한 후 에너지슬래브의 성능 분석

Table 1 Specifications of energy-slab system

Parameters	Specifications
Building	
Conditioned area[m ²]	1,294
Peak cooling load[kW]	208.4
Peak heating load[kW]	112.5
Water to water heat pump	
Total unit capacity[kW]	281
Nominal cooling COP[-]	4.96
Nominal heating COP[-]	3.89
Design EWT for cooling[°C]	30.0
Design EWT for heating[°C]	0
Energy-slab	
Configuration	Line-type
Total pipe length[m]	21,000
Pipe outer and inner diameter[mm]	26.7/21.8

에 이용하였다. 여기서 에너지슬래브의 지중 열 추출량(난방)과 방출량(냉방)은 각각 식(1)과 식(2)를 이용하여 계산하였다. 부하 측 순환수의 열교환량 계산에는 식(3)과 식(4)를 이용하였다.

$$Q_{ext} = \dot{m}_s c_p \Delta T_s = \dot{m}_s c_p (EWT - LWT) \quad (1)$$

$$Q_{inj} = \dot{m}_s c_p \Delta T_s = \dot{m}_s c_p (LWT - EWT) \quad (2)$$

$$Q_{c,l} = \dot{m}_l c_p \Delta T_l = \dot{m}_l c_p (T_{in,l} - T_{out,l}) \quad (3)$$

$$Q_{h,l} = \dot{m}_l c_p \Delta T_l = \dot{m}_l c_p (T_{out,l} - T_{in,l}) \quad (4)$$

식(3)과 식(4)에서 T_{in} 과 T_{out} 은 부하 측 순환수의 히트펌프 유입·유출 온도를 의미한다.

Kline⁽¹⁵⁾이 제안한 방법에 따라 에너지슬래브의 열교환 성능(Q) 분석 결과에 영향을 미치는 데이터의 편차들을 조합하여 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, 결과는 $\pm 5.32\%$ 였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난방 중 에너지슬래브의 일일 성능 변화

Fig. 3은 난방 대표일(2010년 12월 15일 오전 6시 ~ 2010년 12월 16일 오전 6시)에 대한 에너지슬래브의 성능특성을 나타낸 결과로 Fig. 3(a)는 에너지

슬래브 입·출구 온도와 체적유량 변화를 그리고 Fig. 3(b)는 온도차(EWT-LWT)와 에너지슬래브의 열 추출량(heat extraction rate) 변화 등을 보여준다. 그림에서 보듯이 본 시스템은 난방 부하가 큰 주간에는 주로 가동되었으며, 야간에는 축열조 온수의 온도를 유지하기 위해 부분 가동되었다. 이는 대상 건물의 이용 특성이 반영된 결과로 볼 수 있다. 그리고 축열조(heat storage tank)의 온수 설정 온도(44°C 가동/ 50°C 정지)에 따라 시스템 운전을 제어하였기 때문에, 가동과 정지를 반복(on-off 운전)하였다.

시스템 운전 중 주 공급헤더에서 측정된 EWT는 일평균 9.6°C (최고 10.3°C , 최저 9.0°C)였으며, 주 환수헤더에서 측정된 LWT는 평균 6.5°C (최고 7.1°C , 최저 6.1°C)였다. 이때 에너지슬래브 순환수는 평균 929.7 LPM(최고 942.2 LPM, 최저 919.1 LPM)의 유량으로 순환하였다. 질량유량으로 환산했을 때 15.5 kg/s 였고, 히트펌프 입·출구 온도차는 평균 3.1°C 였다. 이상으로부터 에너지슬래브는 평균 200.5 kW(최고 216.8 kW, 최저 186.9 kW)의 에너지를 지중에서 추출하였으며 단위 길이당 열 추출량은 평균 9.6 W/m 인 것으로 분석되었다. 이때 순환수 펌프의 일평균 소비전력은 7.1 kW였다.

난방 부하 변동에 따른 에너지슬래브의 성능 변화를 고찰하고 아울러 앞선 Fig. 3의 결과와 정성적으로 비교하기 위해, 2011년 2월 특정일의 결과(2011

(a) EWT, LWT and volume flow rate of circulation water

(b) Mass flow rate, temperature difference and heat extraction rate

Fig. 3 Performance of energy-slab in typical heating days of Dec. 15, 2010 to Dec. 16, 2010.

Fig. 4 Performance of energy-slab in typical heating days of Feb. 15, 2011 to Feb. 16, 2011.

년 2월 15일~2011년 2월 16일)를 Fig. 4에 나타내었다. 에너지슬래브와 시스템 운전 경향(on-off 운전)은 Fig. 3의 결과와 유사하였다. 다만 가동-정지 주기는 늘고 하루 중 총 운전 시간은 상대적으로 줄었다. 이는 외기 온도 상승에 따라 난방 부하가 감소하였기 때문이다.

시스템 가동 중 에너지슬래브 순환수는 일평균 3.3°C(최고 3.9°C, 최저 2.9°C)로 유입되었다. 일평균 EWT가 앞선 12월 결과(9.6°C)에 비해 낮아진 것을 볼 수 있으며, 난방기간 중 지속적으로 에너지를 추출하였기 때문이다. 에너지슬래브 순환수는 평균 917.3 LPM(15.3 kg/s)의 유량으로 순환하였고 EWT와 LWT의 차이는 평균 2.4°C였다. 지중으로부터 평균 154.3 kW(최고 160.9 kW, 최저 145.5 kW)의 에너지를 획득하였으며 단위 길이당 열 추출량은 평균 7.4 W/m였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 난방기간 중 특정일에 대한 결과를 나타낸 것이다. 하루 중 시스템 가동 중의 데이터만 본다면 평균 EWT와 유량, 온도차(EWT-LWT) 그리고 열 추출량 등은 하루 24시간 동안에는 거의 일정하였다. 이는 본 시스템이 축열조를 적용한 물대물 방식이기 때문이며, 모든 난방 운전 일에서 동일한 경향을 보였다. 아울러 에너지슬래브 순환수의 히트펌프 출구 온도(LWT)는 히트펌프의 운전과 정지에 상응하여 변함을 볼 수 있다.

3.2 냉방 중 에너지슬래브의 일일 성능 변화

Fig. 5는 냉방 대표일(2011년 8월 15일 오전 6시~2011년 8월 16일 오전 6시)에 대한 에너지슬래브의 성능특성을 나타낸 결과다. 난방 운전과 마찬가지로 본 시스템은 축열조의 냉수 설정 온도(12°C 가동/7°C 정지)에 따라 히트펌프 유닛과 지중 순환수 펌프가 작동된다. 따라서 주간 냉방 부하를 감당하기 위해 시스템이 운전과 정지를 반복한 것을 볼 수 있다. 아울러 대상 건물의 이용 특성이 반영되어 냉방 부하가 큰 주간에 주로 가동되었으며, 야간에는 축열조의 온도를 유지하기 위해 부분적으로 운전되었다.

가동 중 주 공급헤더에서 측정된 EWT는 일평균 30.3°C였으며, 29.0°C에서 31.3°C 범위에 있었다. 주 환수헤더에서 측정된 LWT는 평균 34.8°C(최고 35.8°C, 최저 33.3°C)였으며, 일평균 997.7 LPM(16.6 kg/s)의 유량으로 순환하였다. LWT와 EWT의 차이는 평균 4.5°C였다. 따라서 에너지슬래브는 평균 315.4 kW의 에너지를 지중으로 방출하였고, 일평균 15.1 W/m의 열교환 성능을 보였다.

난방 성능 분석과 마찬가지로, 냉방 부하 변화에 따른 에너지슬래브의 냉방 성능 변화를 비교하기 위해, 2011년 9월 특정일의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 앞선 8월 결과와 비교했을 때, 냉방 부하가 감

Fig. 5 Performance of energy-slab in typical cooling days of Aug. 15, 2011 to Aug. 16, 2011.

Fig. 6 Performance of energy-slab in typical cooling days of Sep. 15, 2011 to Sep. 16, 2011.

소함에 따라 단속운전 주기는 늘어난 반면, 운전 시간과 지중으로 방출하는 에너지의 총량은 감소하였다. 하지만 시스템 가동 중의 데이터만 놓고 보면, 일평균 EWT와 LWT에서만 차이를 보일뿐 에너지슬래브 순환수의 유량과 지중 방출량 등은 거의 유사하였다.

시스템 가동 중 에너지슬래브 순환수는 일평균 26.4°C(최고 26.6°C 최저 26.1°C)와 996.2 LPM(최고 1005 LPM, 최저 988 LPM)으로 유입되었다. 앞선 8월 15일 결과(30.3°C)와 비교했을 때 EWT는 다소 감소한 수치다. 또한 LWT와 EWT의 차이는 평균 4.6°C였고, 평균 317.5 kW(최저 256.7 kW, 최고 335.7

kW)의 에너지를 지중으로 방출하였다. 에너지슬래브의 단위 길이당 열 방출량은 평균 15.1 W/m였다. 이때 지중 순환수 펌프와 히트펌프의 일평균 소비 전력은 각각 7.3 kW와 49.8 kW였다.

3.3 일별 냉난방 성능 분석 결과

Fig. 7은 난방 기간(2010년 10월 1일~2011년 4월 30일)에 대하여 에너지슬래브 순환수의 온도 변화와 유량 변화 그리고 에너지 전달량 등, 에너지슬래브의 난방 성능을 일평균 값으로 도시한 결과다. 그림에서 보듯이 시스템이 운전됨에 따라 EWT는 지

속적으로 감소하였다. 난방 부하가 커지면서 에너지슬래브와 히트펌프의 가동 시간도 길어지고, 이로 인해 에너지슬래브 주변의 토양 온도가 감소하였기 때문이다. 이는 에너지슬래브의 지중 열 추출량 감소를 초래하였다. 하지만 난방 부하가 감소하는 2월 중순부터 다시 증가하는 것을 볼 수 있다.

난방 기간 중, 에너지슬래브 순환수의 일평균 유량과 온도차는 각각 933.7 LPM(15.6 kg/s)과 3.1°C였다. 아울러 에너지슬래브의 일평균 열 추출량은 난방 초기(10월 5일) 293.9 kW에서 154.3 kW(2월 15일)까지 감소하다가 난방 종료 시점(4월 25일)에서는 203.7 kW까지 다시 증가하였다. 에너지슬래브

(a) EWT, LWT, and volume flow rate

(b) Mass flow rate and heat extraction rate

Fig. 7 Daily averaged heating performance characteristics of energy-slab ground-coupled heat exchanger.

(a) EWT, LWT, and volume flow rate

(b) Mass flow rate and heat extraction rate

Fig. 8 Daily averaged cooling performance characteristics of energy-slab ground-coupled heat exchanger.

의 단위 길이당 열교환량 역시 동일한 경향을 보였으며, 평균 9.5 W/m였다.

Fig. 8은 전체 냉방 기간(2011년 6월 1일~2011년 9월 30일)에 대한 일별 분석결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 난방 결과와 반대의 경향을 보였다. 즉 시스템이 운전됨에 따라 EWT는 지속적으로 상승하였으며, 냉방부하가 감소하는 8월 중순부터 다시 감소하였다. 시스템 가동 중 에너지슬래브 순환수의 유량과 히트펌프 입·출구에서 온도차는 평균 989.6 LPM(16.5 kg/s)과 평균 4.6℃로 거의 일정하였다. 냉방 기간 중 에너지슬래브는 평균 318.9 kW의 에너지를 지중으로 방출하였고, 일평균 단위 길이당 열 교환량은 15.2 W/m였다.

(a) Heating season

(b) Cooling season

Fig. 9 Daily averaged energy transfer rate of energy-slab system.

Fig. 9는 시스템의 에너지 전달량 변화를 일별 평균값으로 나타낸 것이다. 전체적인 변화 경향은 앞선 Fig. 7이나 Fig. 8의 결과와 유사하였다. 전체 난방 기간 중 에너지슬래브는 평균 198.6 kW의 에너지를 지중에서 추출하였으며, 이때 히트펌프에 투입한 에너지(압축기 소비 전력)는 평균 73.2 kW였다. 따라서 에너지슬래브와 히트펌프가 2차 유체(축열조 순환수)에 전달한 에너지는 평균 271.8 kW로 계산된다. 참고로 축열조 순환수의 히트펌프 입·출구 온도차와 유량 등으로 계산한 열 교환량은 평균 274.3 kW였다. 반면 냉방 기간 중 에너지슬래브가 지중으로 방출한 에너지는 평균 318.9 kW였으며, 여기에는 48.8 kW의 히트펌프 평균 소비 전력이 포함된 값이다. 따라서 위 두 값의 차이로부터 계산한 에너지 전달량은 270.1 kW였지만, 축열조 순환수 측에서 측정한 데이터를 이용하여 계산한 결과는 230.4 kW로 평균 10.1%의 차이를 보였다.

앞서도 언급하였듯이, 본 논문의 주된 관심은 에너지슬래브 지중열교환기의 장기간에 걸친 열전달 성능 변화다. 물론 지중열교환기의 성능은 히트펌프를 포함한 전체 시스템의 거동에 크게 영향을 받는다. 에너지슬래브를 적용한 시스템의 냉난방 성능분석 결과는 선행 연구⁽¹⁴⁾에 상세히 설명되었기 때문에, 주요 결과들만 월별 평균값으로 하여 Table 2에 정리하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 상업용 건물에 적용된 에너지슬래브 지중열교환기의 열교환 성능을 분석하였다. 이를 위해 물 대 물 방식의 지열 히트펌프 유닛과 에너지슬래브 지중열교환기 그리고 데이터 획득 장비 등으로 시스템을 구성하였다. 1년에 걸쳐 데이터를 취득한 후, 냉방과 난방 운전 시 에너지슬래브 지중열교환기의 성능 변화를 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 에너지슬래브를 포함한 전체 시스템은 냉난방 부하가 큰 주간에 주로 가동되었으며, 야간에는 축열조 냉·온수의 온도를 유지하기 위해 부분 가동되었다. 아울러 주간에는 축열조의 설정 온도에 따라 가동과 정지를 반복하였다.

(2) 난방 기간 중 시스템이 지속적으로 운전됨에 따라 EWT는 감소하였고 이로 인해 에너지슬래브의 열 추출량 또한 감소하였다. 반면, 냉방 운전 중

Table 2 Monthly mean values of representative analysis results for energy-slab and heat pump

Month/Year		Energy-slab				Heat pump ⁽¹⁴⁾			COP _{sys} ⁽¹⁴⁾ [-]
		$Q^{(1)}$	$W_p^{(2)}$	$\Delta T^{(3)}$	$q^{(4)}$	$Q^{(5)}$	$W_{hp}^{(2)}$	COP _{hp}	
		[kW]	[kW]	[°C]	[W/m]	[kW]	[kW]	[-]	
Heating season (Oct. 1, 2010 ~ Apr. 30, 2011)	10/2010	278.17	7.19	4.16	13.25	355.82	77.65	4.78	4.37
	11/2010	229.71	7.12	3.49	10.94	304.31	74.61	4.37	3.99
	12/2010	202.10	7.11	3.11	9.62	275.29	73.18	3.99	3.64
	1/2011	161.69	7.10	2.53	7.70	233.92	72.23	3.22	2.93
	2/2011	156.56	7.10	2.45	7.46	227.91	71.35	3.12	2.84
	3/2011	165.51	7.12	2.56	7.88	236.76	71.25	3.25	2.96
Cooling season (Jun. 1, 2011 ~ Sep. 30, 2011)	4/2011	196.16	7.20	2.98	9.34	268.03	71.88	3.40	3.09
	6/2011	326.18	7.29	4.78	15.53	282.43	43.74	4.71	4.04
	7/2011	318.84	7.29	4.63	15.18	270.14	48.70	4.83	4.20
	8/2011	315.66	7.30	4.54	15.03	263.23	52.43	4.59	4.03
	9/2011	315.12	7.31	4.54	15.01	264.76	50.36	4.78	4.18

Note) 1) Heat extraction rate in heating season and injection rate in cooling season.

2) Power consumptions, W_p for circulating water pump and W_{hp} for heat pump compressors.

3) Temperature difference of circulating water, EWT-LWT for heating and LWT-EWT for cooling.

4) Heat extraction or injection rate per unit length of energy-slab.

5) Heating or cooling capacities of heat pump unit in load side.

시스템의 지속적인 가동은 에너지슬래브의 열 방출량 증가와 EWT 상승으로 이어졌다.

(3) 일일 운전 특성을 분석하였을 때, 외기 온도 변동에 상관없이 에너지슬래브 순환수의 유량과 히트펌프 입·출구에서 온도 차이는 거의 일정하였다.

(4) 난방 기간 중 에너지슬래브는 평균 198.6 kW의 에너지를 지중에서 추출하였으며, 이때 히트펌프에 투입한 에너지는 평균 73.2 kW였다. 아울러 냉방 기간에는 평균 318.9 kW의 에너지를 지중으로 방출하였으며, 여기에는 48.8 kW의 히트펌프 평균 소비 전력이 포함된 값이다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20093040110010).

참고문헌

- Sohn, B. H., 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.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, S. 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.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., and Ochifuji, K., 2007, Field performance of an energy pile system for space heating, Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 517-524.
- Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L., 2006, Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 30, pp. 763-781.
- Zhang, X., Liu, J., Gao, J., and Li, K., 2008, Research on ground temperature restoration characteristics of large-scale ground source heat pump system, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 16, No. 4, pp. 109-116.
- Man, Y., Yang, H., Diao, N., Liu, J., and Fang,

- Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J. and An, H. J., 2005, Cooling and heating performance evaluation of a GSHP system, Korean Journal

- Z., 2010, A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2593-2601.
7. Baek, S. K., An, H. J., and Lim, S. K., 2007, Development of ground heat exchangers installed in building foundation, *Proceedings of the SAREK*, pp. 277-282.
8. Yu, H. K. and Bae, S. H., 2010, Performance monitoring study of building integrated geothermal system in winter, *Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 6, No. 1, pp. 23-28.
9. Min, S., Lee, C., Park, M., Koh, H., and Choi, H., 2010, Numerical study of heat transfer efficiency, performance and mechanical behavior induced by thermal stress of energy pile, *Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 6, No. 2, pp. 9-13.
10. Sohn, B. and Choi, J. M., 2012, Performance prediction of geothermal heat pump(GHP) system with energy piles using simulation approach, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 155-163.
11. Katsura, T., Nagano, K., and Takeda, S., 2008, Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1995-2004.
12. Wood, C. J., Liu, H., and Riffat, S. B., 2010, An investigation of the heat pump performance and ground temperature of a piled foundation heat exchanger system for a residential building, *Energy*, Vol. 35, pp. 4932-4940.
13. Hwang, K. I., Woo, S. W., Kim, J. H., Shin, S. H., and Kim, Y. S., 2007, A study on the seasonal performances evaluation of the horizontal-type geothermal heat exchanger installed in the foundation slabs of complex building, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 27, No. 2, pp. 11-17.
14. Choi, J. M., 2012, Heating and cooling performance of a ground coupled heat pump system with energy-slab, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 196-203.
15. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, *J. Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.