

에너지파일과 에너지슬래브 적용 지열원 열펌프 시스템의 일일 냉방 운전 특성 비교

최종민, 박용정*, 강신형**†

국립 한밭대학교 기계공학과, *(주)대한공조 기술연구소, **건양대학교 기계공학과

Daily Cooling Performance Comparison of a Geothermal Heat Pump System between Energy-Pile and Energy-Slab

Jong Min Choi, Yong-Jung Park*, Shin-Hyung Kang**†

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

*R&D Center, Daihan Climate Co. Ltd., Kyounggi-do 447-240, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Konyang University, Chungnam, 320-711, Korea

Abstract

Geothermal heat pump system has been spotlighted as an efficient building energy system, because it has great potentials for reducing energy in building air conditioning and reducing CO₂ emissions. However, higher initial cost is a barrier to the promotion of its use. Energy-pile and energy-slab are known as low cost ground heat exchangers comparing with conventional ground heat exchangers, because they utilize building structures as ground heat exchangers. This paper presents the daily cooling performance of a geothermal heat pump system with energy-pile and energy-slab. The energy-piles and the energy-slabs are connected to heat pump units in parallel. The cooling capacity of the system was nearly constant due to the stability of the ground heat exchangers. The stability of the energy-pile was a little higher than that of the energy-stab as a heat sink.

Key words: Geothermal heat pump(지열원 열펌프), COP(성적계수), Energy-Pile(에너지파일), Energy-Slab(에너지슬래브)

기 호 설 명

COP_{hp} : 열펌프 유닛 성적계수

COP_{sys} : 지열원 열펌프 시스템 성적계수

C_p : 비열 [kJ/kg·K]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Q : 냉방용량 [kW]

T_i : 실내열교환기 입구온도 [°C]

T_o : 실내열교환기 출구온도 [°C]

W_{hp} : 열펌프 유닛 소비전력 [kW]

W_{pump} : 지중 순환펌프 소비전력 [kW]

† Corresponding author

Tel.: +82-41-730-5602, Fax: +82-41-730-5765

E-mail: shkang@konyang.ac.kr

접수일 : 2012년 8월 10일

심사일 : 1차:2012년 8월 17일, 2차:2012년 8월 27일

채택일 : 2012년 8월 29일

1. 서론

삶의 질 향상에 따라 건물의 냉난방 에너지 소비량은 지속적으로 증가하고 있으며, 현재 국가 전체에너지소비량의 약 30%를 차지하고 있다. 지

열원 열펌프 시스템은 현존하는 최고효율의 냉난방 시스템으로서 기술개발 및 보급이 지속적으로 증가되고 있다. 하지만, 지열원 열펌프 시스템은 지중열교환기 설치에 따른 설치비용 증가로 초기 투자비가 크다는 단점을 가지고 있다^[1, 2]. 따라서 고효율의 지열원 열펌프 시스템의 보급 확산과 지열원 열펌프 시스템의 초기 투자비 감소를 위해 다양한 지중열교환기와 시스템 성능 향상을 위한 연구가 진행 되고 있다^[3].

Lee^[4]는 에너지파일을 지중열교환기로 사용하는 건물일체형 지열시스템의 경제성 분석에 관한 연구를 수행하였으며, Paksoy et al.^[5]은 대수층 지하수를 활용하여 연중 지중축열과 연계한 지열원 시스템의 성능 분석에 관한 연구를 통하여 운전비용 절감 및 시공비 절감 가능성을 평가하였다. Hamada et al.^[6]과 Yu^[7]는 건물 기초 말뚝에 열교환기를 설치한 에너지파일 적용 지열원 열펌프 시스템에 대한 성능을 평가하고, 시공비용 및 기간을 크게 단축할 수 있다는 연구 결과를 얻었다. 현재까지 대부분의 국내 지열원 열펌프 시스템의 연구 및 보급은 수직밀폐형과 SCW (Standing Column Well) 방식을 중심으로 진행되었다^[3]. 지열원 열펌프 시스템 시공비의 약 30~40%를 차지하는 지중열교환기의 고효율화 및 시공비 절감을 위한 지속적인 노력이 수행되고 있으나, 구체적인 성과는 매우 부족한 실정이다. 일부에서는 대수층 축열시스템과 복수정을 이용한 개방형 시스템에 대한 연구가 진행되었다^[8] 의.

에너지파일과 에너지슬래브는 건물 기초구조물에 설치하는 지중열교환기로 시공비용 절감이 가능한 시스템으로 알려져 있다. 에너지파일은 건물 구조물의 콘크리트 파일이나 강관 파일의 중공부에 PE 파이프를 수직으로 매설하는 지중열교환기이며, 에너지슬래브는 건물 하부 슬래브 구조체에 PE 파이프를 수평으로 설치하는 지중열교환기이다.

본 연구에서는 추가적인 대지나 천공이 필요 없어 설치비용 절감이 가능한 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기를 적용한 지열원 열펌프 시스템에 관한 실증연구를 수행하였다. 에너지파일과 에너지슬래브는 병렬로 동일 사이트에 설치되었으며, 본 연구를 통하여 건물 기초구조물 활용 지열원 열펌프 시스템의 국내 적용 타당성과

설계 및 신뢰성 확보를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실증시스템

2.1 현장개요

에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기 복합 적용 지열원 열펌프 시스템이 적용된 현장은 서울시 강서구의 복합 환승센터이다. 복합 환승센터는 지하 1층에서 지상 4층으로 구성되며 지하 1층은 기계실 및 주차장으로 사용되고, 지상 1층은 대합실, 충전/전산실, ATM관리실, 방재실, 상업시설, 로비 등으로 구성되어있다. 지상 2층에서 지상 4층은 주차장으로 구성된다. Fig. 1은 복합 환승센터 조감도를 나타내며, 에너지파일 및 에너지슬래브 적용 지열원 열펌프 시스템의 담당 공조공간은 지상 1층의 대합실로서 총 면적은 2,289 m²이며, 냉방부하량은 282 kW이다.

Fig. 2는 지열원 열펌프 시스템의 개략도를 나타낸다. 설치부지를 고려하여 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기를 함께 복합환승센터 건물하부에 설치하였다.



Fig. 1 Bird's-eye view of site.

에너지파일 지중열교환기는 건물 기초말뚝 중공부에 설치하였으며, 에너지슬래브 지중열교환기는 지하 주차장 하부 슬래브에 설치하였다.

지중열교환기는 Transpile^[10]로 설계하여 시공하였다. 에너지파일 지중열교환기는 13.8 m 깊이로 150개 중공말뚝에 설치되었으며, 에너지슬래브 지중열교환기는 620 m² 면적에 180 m의 직

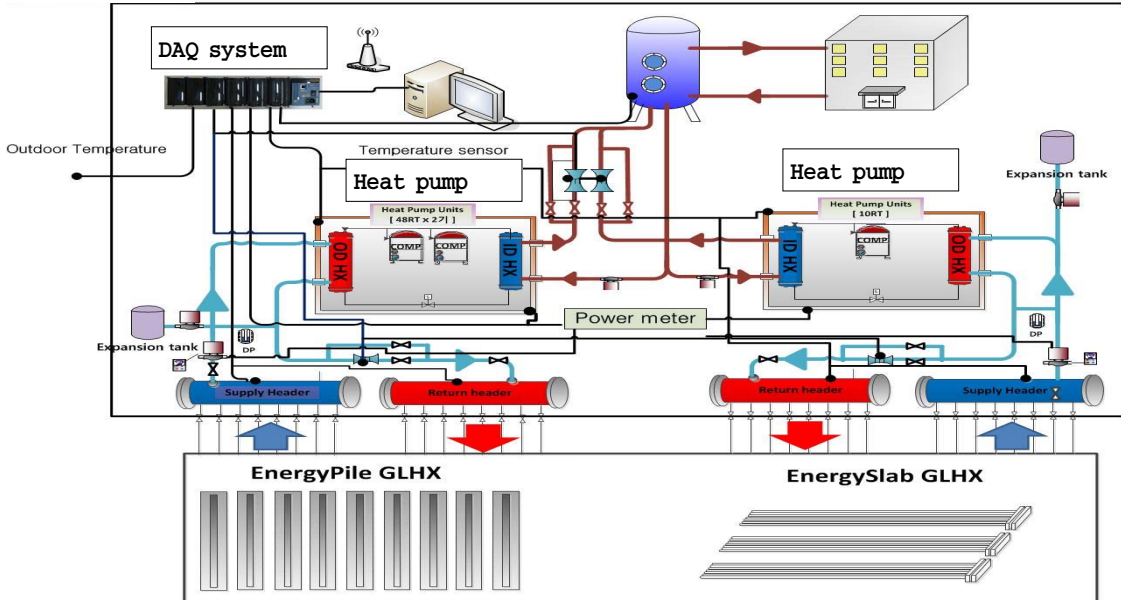


Fig. 2 Schematic diagram of the geothermal heat pump system.

관 10개가 설치되었다. 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기는 별도의 헤더로 48 RT급 열펌프와 10 RT급 열펌프 유닛과 각각 연결되어 지중측은 별도 운전된다. 부하측은 각각의 열펌프 유닛 출구가 하나의 축열조에 연계되어 생성 열량을 함께 동일 축열조에 저장하고, 축열조로부터 부하측에 필요 열원을 공급하도록 되어있다. 축열조는 2,000 Liter 이며, 축열조의 설정온도에 따라 지열원 열펌프 시스템이 단속운전된다.

2.2 데이터 취득 및 처리

에너지파일과 에너지슬래브 적용 지열원 열펌프 실증 시스템의 성능 평가를 위하여 지경부 고시 제2009-332호의 신·재생에너지설비의 지원·설치·관리에 관한 기준에 따라 시스템의 주요 부위에 온도 센서와 유량계 등을 설치하였다^[11].

성능 계산을 위하여 열펌프 유닛 각각의 입출구 순환수의 온도를 RTD 센서(Watlow(U.S.A.), Pt 100Ω, 정확도±0.15°C)를 이용하여 측정하였다. 열펌프 유닛의 소비전력은 적산전력계(Yokogawa Instrument(Japan), WT230, 정확도±0.5%)로 측

정하였으며, 지중순환수 및 부하측 순환수 유량은 마그네틱 체적유량계(Toshiba(Japan), GF630, 정확도±2%)를 설치하여 측정하였다. 시스템 주요 위치에 T형 열전대(Watlow(U.S.A.), T-type, 정확도±0.2°C)를 설치하여 온도를 측정하였다.

데이터 로거(Yokogawa Instrument(Japan), MX100)와 센서로 구성된 데이터 취득 시스템을 구성하고, 데이터를 2초 간격으로 취득하여 컴퓨터에 자동 저장하였다.

본 연구에서는 측정된 데이터를 이용하여 지열원 열펌프 시스템의 성능을 계산하였다. 냉방용량은 열펌프 유닛의 실내열교환기 입출구 온도와 축열조로의 순환수 유량을 이용하여 계산하였다(식 (1)). 식 (2)를 이용하여 열펌프 유닛의 COP를 계산하였다. 각각의 열펌프 유닛에 연결된 지중 순환펌프의 소비동력을 고려하여 지열원 열펌프 시스템의 COP는 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$Q = \dot{m} C_p |T_o - T_i| \quad (1)$$

$$COP_{hp} = Q / W_{hp} \quad (2)$$

$$COP_{sys} = Q / (W_{hp} + W_{pump}) \quad (3)$$

3. 실증시스템 성능 분석 결과 및 고찰

에너지파일 및 에너지슬래브 적용 지열원 열펌프 시스템은 2011년 9월초 시공 완료 되었으나, 각 공조공간 내부 공사가 지연되어 본 연구에서는 별도의 발전기를 추가 설치하여 일일 연속운전이 가능하였던 9월 8일에 대한 냉방 성능을 분석하였으며, 향후 장기적인 성능분석을 수행할 예정이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 오전 9시 30분부터 오후 5시 30분까지 개화역 복환환승센터의 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기 적용 시스템의 냉방 용량 변화를 나타낸다.

에너지파일 시스템은 20분에서 30분 간격으로 단속 운전되어 냉방용량이 빈번하게 변화되었으며, 시스템 정지 시에도 냉방용량이 나타났다. 이는 열펌프 유닛 정지 후 일정기간 순환펌프는 운전되며, 열펌프 유닛 순환 냉매가 압축기 정지 후에도 관성에 의하여 다소 순환하며 열펌프의 지중 측 실내열교환기의 온도가 낮아서 부하측 순환수로의 열전달이 일어났기 때문이다. 정상상태 운전 중의 냉방용량은 약 150 kW를 나타내었으며 일일 운전 기간 중에 유사한 값을 나타냈다. 에너지슬래브 시스템의 운전 중 냉방 용량은 약 30 kW였으며, 시스템 운전 시간이 지속됨에 따라 다소 용량이 감소하는 경향을 나타냈다.

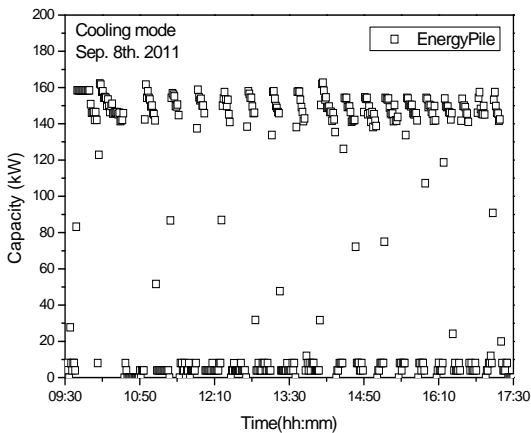


Fig. 3 Cooling capacity of energy-pile system.

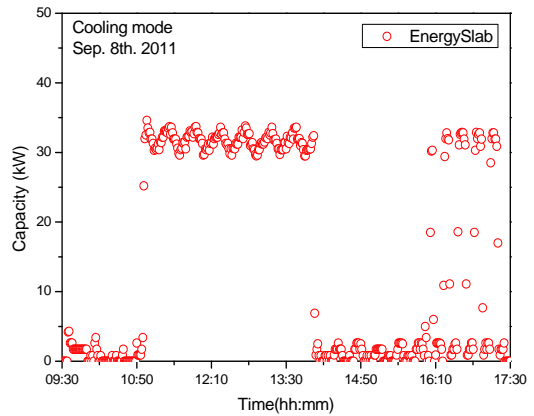


Fig. 4 Cooling capacity of energy-slab system.

Fig. 5와 Fig. 6은 시스템 냉방 가동 시간 동안의 에너지파일 시스템과 에너지슬래브 시스템의 열펌프 유닛 실외열교환기 입출구 온도 변화를 나타낸다. 에너지파일 시스템의 실외열교환기 입구온도는 시스템 가동 기간 동안 외기온도보다 약 5°C 낮은 온도 범위 내에서 변화되었으며, 실외 열교환기 입구온도의 변화량이 2.5°C 이내로 변화되어 에너지파일의 지중열교환기의 열적 안정성은 비교적 우수하였다. 에너지슬래브 시스템에서는 시스템 가동 직후에 열펌프의 실외열교환기의 입구온도가 에너지 파일에 비해 급격히 상승하였으며, 지속적인 운전 시에 다소 증가하였다. 에너지슬래브는 에너지파일 시스템보다 가동율이 낮음에도 불구하고 실외열교환기 입구온도 변동폭은 크게 나타났다. 이는 에너지슬래브가 지표면에 수평으로 설치되어, 기존의 수평형 시스템과 같이 순간적인 지중열용량이 에너지파일보다 작기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 에너지파일 시스템과 에너지슬래브 시스템의 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP 변화를 나타낸다. 두 시스템 모두 시스템의 단속 운전으로 COP가 빈번하게 변동되었다. 에너지파일 시스템의 열펌프 유닛 최고 COP와 시스템 최고 COP는 각각 7.1과 5.5로 높게 나타났다. 또한, 일일 동안의 열펌프 유닛 평균 COP와 시스템 평균 COP는 각각 6.1과 4.8로 매우 우수한 것으로 나타났다. 에너지슬래브 시스템의 가동 중 열펌프 유닛 최고 COP와 시스템 최고 COP는 각각 6.8과

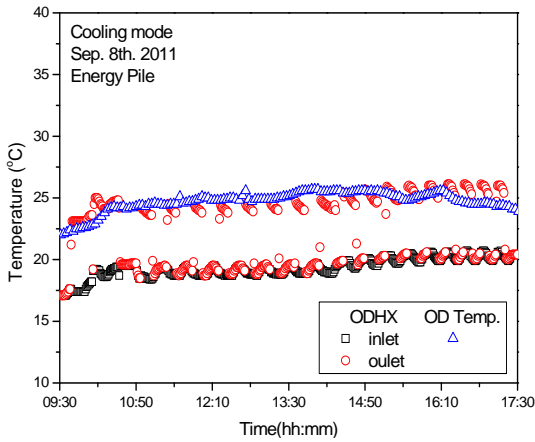


Fig. 5 Inlet and outlet temperature of the outdoor heat exchanger of energy-pile system.

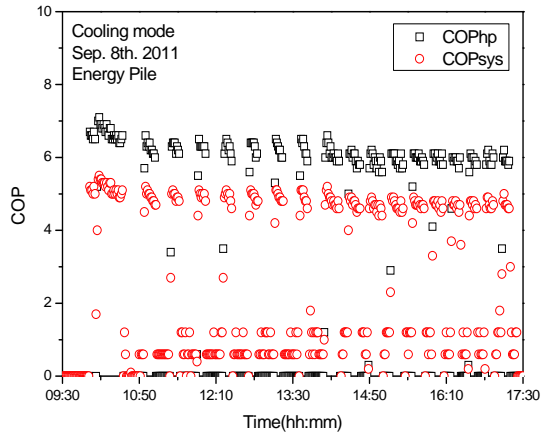


Fig. 7 COP of energy-pile system.

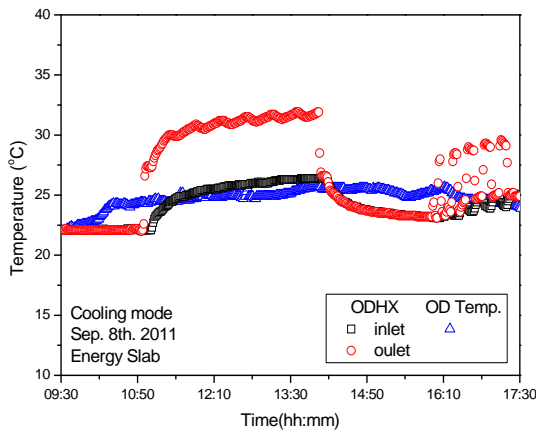


Fig. 6 Inlet and outlet temperature of the outdoor heat exchanger of energy-slab system.

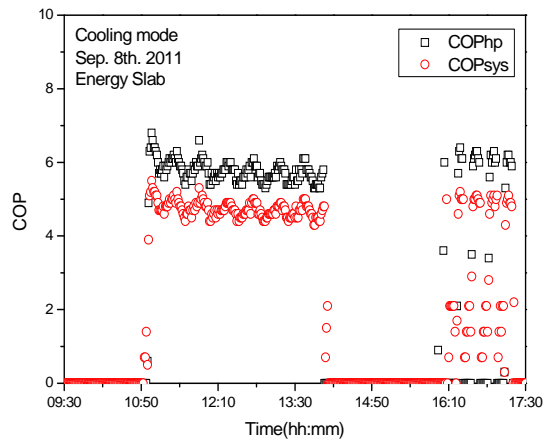


Fig. 8 COP of energy-slab system.

5.5를 나타냈으며, 일일 평균 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP는 각각 5.8과 4.7로 양호한 성능을 나타냈다. 지속적인 운전에 따른 에너지슬래브 시스템의 COP 감소폭은 에너지파일 시스템보다 크게 나타났다. 에너지파일 시스템의 일일평균 시스템 COP는 열펌프 유닛 COP 대비 21.3% 감소하여 에너지슬래브 시스템의 18.9%보다 크게 나타났다. 이는 에너지파일 지중열교환기가 수직 설치되는 구조이어서 에너지슬래브시스템보다 수두손실이 크기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기의 메인 서플라이헤더와 메인 리턴

헤더의 온도변화를 나타낸다. 시스템 가동 후에 에너지파일의 메인헤더 온도가 에너지슬래브의 메인헤더 온도보다 낮게 나타났다. 이는 에너지파일 지중열교환기는 수직으로 설치되어 지중열교환기의 대부분이 지표로부터 3 m 이하이어서 외기온도 및 태양복사에 의한 지표 온도의 영향이 미비하지만, 에너지슬래브 지중열교환기는 수평형과 같이 지표면에 가깝게 설치되어 지표온도의 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다. 시스템 운전 중에 두 시스템 모두 메인 헤더의 입·출구 온도차는 약 5°C로 일정하게 나타났다. 그러므로 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기에서 총

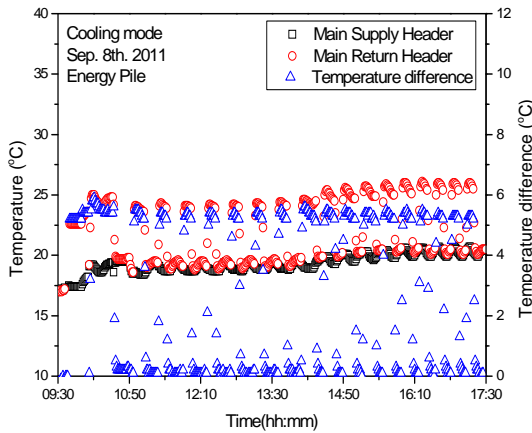


Fig. 9 Main header temperature of energy-pile system.

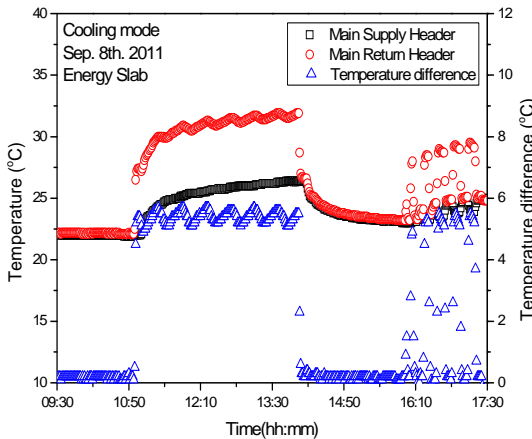


Fig. 10 Main header temperature of energy-slab system.

분한 열교환이 이루어진 것으로 분석되며 냉방운전 중의 열방출 성능은 비교적 양호한 것으로 분석된다. 따라서, Transpile^[10]에 의해 국내에서는 처음 설계 및 시공된 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기의 적용성은 매우 우수하다고 평가된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 시스템 대비 시공비용 저감이 가능한 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기 적용 지열원 열펌프 시스템의 국내 적용 타당성 평가를 위하여 Trampile 프로그램을 이용하여 에너지파일과 에너지슬래브 지중열교환기를

설계하였다. 설계에 따라 서울시 강서구 개화동에 위치한 복합 환승센터에 실증플랜트를 시공하고 냉방 실증 데이터 취득 및 성능 분석을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

시스템 가동 후 지속적인 운전 시에 에너지슬래브 시스템의 냉방용량 감소폭이 에너지파일 시스템에 비하여 다소 크게 나타났으며, 이는 에너지슬래브 시스템의 열펌프 유닛 실외열교환기 입구온도가 에너지파일 시스템의 실외열교환기 입구온도보다 증가하여 열펌프 성능이 감소하였기 때문이다.

에너지파일 시스템의 일일 평균 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP는 각각 6.1과 4.8로 에너지슬래브 시스템의 5.8과 4.7보다 높게 나타났으나, 열펌프 유닛 COP 대비 시스템 COP 감소폭은 에너지파일 시스템이 21.3%로 에너지슬래브 시스템의 18.9%보다 크게 나타났다.

에너지슬래브 지중열교환기는 지표면에 근접하여 설치되어 에너지파일 지중열교환기보다 지표온도의 영향을 다소 크게 받지만, 지중열교환기 입출구온도는 두 시스템 모두 약 5°C로 일정하여 국내에 처음 설계 및 적용된 에너지파일 및 에너지슬래브 지열원 열펌프 시스템의 적용성은 매우 우수한 것으로 분석되었다. 하지만, 에너지파일과 에너지슬래브 시스템의 장기 운전에 따른 신뢰성 평가를 위한 보다 장기적인 성능 분석이 향후 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ0084132012)의 지원에 의해 이루어진 것입니다. 또한, 본 논문의 일부는 2012년 한국지열에너지학회 학술대회 등에 발표된 내용입니다.

참고문헌

- Gao, Q., Li, M., Yu, M., Spitler, J.D., and Yan, Y.Y., 2009, Review of development from GSHP to UTES in China and other countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 6, pp. 1383 -1394.

2. Lee, J.Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 6-7, pp. 1560-1568.
3. KEMCO, 2010, New and renewable energy statistics 2010, Report of Korea Energy Management Corporation, KEMCO, Yongin, Korea.
4. Lee, J.U., 2010, Performance Evaluation of BIGS(Building Integrated Geothermal System) in Summer and Economic Analysis, Vol 30, No. 2, pp. 1-534
5. Paksoy, H.O., Gürbüz, Z., Turgut, B., Dikici, D., and Evliya, H., 2004, Aquifer thermal storage(ATES) for air-conditioning of a supermarket in Turkey, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1991-1996.
6. 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.
7. Yu, H.K., 2008, Development & performance evaluation of ground heat exchanger utilizing PHC pile foundation of building, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol 5, pp. 56-64.
8. NexGeo Co., 2010, Aquifer thermal energy storage heating and cooling systems development, Final Report of Ministry of Knowledge Economy, 2007-N-GE01-P-01-0- 000.
9. Geo-Tech Co., 2006, Research of two-well type ground water heat pump system, Final Report of Ministry of Knowledge Economy, 2004-N-GE11-P-02.
10. enercret.com
11. Ministry of Knowledge Economy, 2009, Standards of support, installation, and management for new and renewable energy system, Ministry of Knowledge Economy Announcement 2009-332.