

지열원 멀티 열펌프 시스템의 시설원에 적용 난방성능 특성 실증 연구

강 신 형, 최 중 민^{*†}, 문 제 명^{**}, 권 형 진^{**}
 건양대학교 기계공학과, ^{*}국립한밭대학교 기계공학과, ^{**}삼성전자 공조솔루션사업팀

Heating Performance of a Ground Source Multi-Heat Pump for a Greenhouse

Shin-Hyung Kang, Jong Min Choi^{*†}, Jemyung Moon^{**}, Hyungjin Kwon^{**}
Department of Mechanical Engineering, Konyang University, Chungnam 320-711, Korea
^{*}*Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*
^{**}*System Air Conditioning R&D Group, Samsung Electronics Co. Ltd., Suwon 442-742, Korea*

(Received February 16, 2010; revision received March 12, 2010)

ABSTRACT: Good plant-growth conditions can be achieved by means of using greenhouses. One of the main issues in greenhouse cultivation is energy savings through the development of high efficient heating and cooling system. GSHPs are one of the recommended systems to cope with this pending need. The aim of this study is to investigate the heating performance of ground source multi-heat pump system installed in a greenhouse under part load conditions. Daily average heating COP of the heat pump unit was very high by at least 7.4, because of relatively large condenser, evaporator, and mass flow rate through ground loop heat exchanger. However, the system COP, overall heating coefficient of the performance of the system with heat pump unit and GLHX, decreased drastically due to relatively large power consumption of circulating pump under part load condition. It is suggested that the technology to enhance the performance of the ground source multi-heat pump system for a greenhouse under part load conditions should be developed.

Key words: GSHP(지열원 열펌프), GLHX(지중열교환기), Greenhouse(비닐하우스), Multi-heat pump(시스템 열펌프), COP(성능계수)

기 호 설 명

COP_{HP} : 열펌프 유닛 성능계수
 COP_{sys} : 열펌프 시스템 성능계수
 C_p : 비열 [J/kg · K]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 Q_{id} : 실내기 난방 용량 [kW]

Q_{od} : 실외기 흡수 열량 [kW]
 T_i : 실외열교환기 입구 온도 [°C]
 T_o : 실외열교환기 출구 온도 [°C]
 W_{cp} : 열펌프 유닛 소비전력 [kW]
 W_{pump} : 지중 순환펌프 소비전력 [kW]

1. 서 론

지열은 건물의 냉·난방 에너지원으로 효과적으로 활용될 수 있는 자원이지만,⁽¹⁾ 국내에서 관심을 갖기 시작한 것은 최근의 일이다. 최근에는 시스템

† Corresponding author
 Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1462
 E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

설치가 해마다 증가하고 있지만, 대부분 정속형 물대물 열펌프 시스템을 중심으로 개발 및 보급되었으며, 물대공기 지열원 열펌프 시스템 개발 및 보급 성과는 미약한 실정이다.

국내의 시설원에 재배면적은 2006년 말 기준 98,885 ha이며, 농업용으로 공급되는 석유에너지의 60% 이상이 시설원에 등의 온실 난방에 소비되고 있다.⁽²⁾ 국제유가 상승에 따라 농가의 유가 부담률이 크게 증가하였으며, 환경규제 강화에 따라 화석에너지 사용의 어려움은 더욱 증가하고 있는 현 시점에서 청정에너지이며, 현존하는 최고효율의 냉난방 설비인 지열원 열펌프 시스템을 시설원에 냉난방 설비로 이용 필요성은 급증하고 있다.^(3,4)

Hepbasli⁽⁵⁾와 Hepbasli et al.⁽⁶⁾은 수직 밀폐형 지중 열교환기를 적용한 지열원 열펌프 시스템의 성능 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Zhao et al.⁽⁷⁾은 대체냉매를 적용한 지열원 열펌프 시스템의 성능에 관한 실험적 연구를 수행하였다. Lund⁽⁸⁾는 지열직접 이용 중 시설원에는 2005년 7.5%의 이용율을 보이며, 지열 열펌프는 33.2%를 차지한다고 보고하였다. 온실에 지열을 적용한 외국사례로 Ozener et al.⁽³⁾은 지열과 태양열을 결합한 온실난방시스템에 관하여 연구를 수행하였다.

지금까지 대부분의 지열원 열펌프 시스템은 수직 밀폐형 지중열교환기를 채용한 정속형 물대물 지열 열펌프 시스템을 중심으로 사무공간용 냉난방 설비로 개발 및 보급되었다. 개별공조 시스템으로서 많은 장점을 갖는 멀티 열펌프 시스템은 첨단 차세대 공조

시스템으로 많은 연구 및 개발이 진행되고 있지만,⁽⁹⁾ 대부분 공기열원 시스템으로 개발되었으며 지열원을 이용한 물대공기 멀티 열펌프 및 시설원에 적용에 관한 연구성과는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 시설원에 설비의 난방 시스템으로 물대공기 방식의 복수의 실내기를 갖는 지열원 멀티 열펌프 시스템을 적용하여 부분부하에서의 난방 성능 및 시스템 용량 가변 특성에 관한 실증연구를 수행하였으며, 지열원 멀티 열펌프 시스템의 시설원에 적용 타당성과 신뢰성 확보를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실증 설비 및 성능 평가 방법

2.1 사이트 개요

지열원 물대공기 멀티 열펌프 시스템의 시설원에 적용 난방 성능분석을 위한 대상 설비는 진주에 소재한 식물조직 배양 연구소의 시설원예용 비닐하우스 온실이며, 모목 순화실로 사용된다. 이곳에서는 동서양란, 화훼류, 딸기, 임목류 등의 식물조직 배양묘를 전문적으로 생산하고 있다. 지열원 물대공기 멀티 열펌프가 설치되는 순화실은 식물 조직분할 후 인공영양분에 의하여 배양된 조직을 출하상태까지 성장시키기 위한 시설원에 온실이다. 순화실은 650 m²의 크기이며, 난방 부하량은 87.5 kW이다. Fig. 1은 본 사이트의 비닐하우스에 대한 항공사진과 내부 사진을 나타낸다.

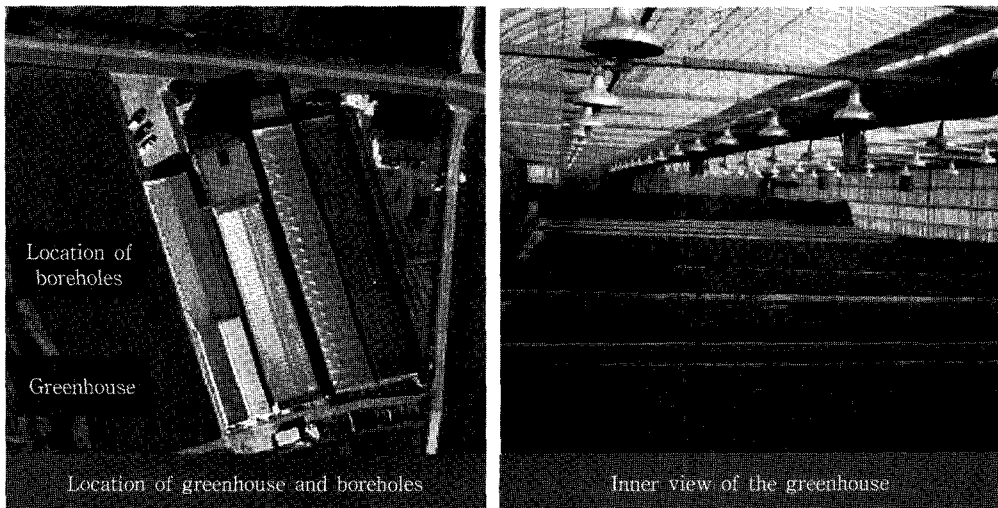


Fig. 1 Site view of the greenhouse.

2.2 지열원 시스템 개요

본 연구에서는 지경부 고시 제 2008-232호의 신·재생에너지설비의 지원·설치·관리에 기준⁽¹⁰⁾ 중에서 지열원 열펌프 시스템 설치 및 설계 기준에 따라 상용 지중열교환기 설계프로그램인 GLD⁽¹¹⁾를 이용하여 지중열교환기를 설계하였으며, 천공깊이 150 m의 수직밀폐형 싱글 U-tube 방식 지중열교환기 8 개를 설치하였다. 이때, 지중열교환기 설계의 필수 자료인 지중열전도도는 지경부 고시 제 2008-232호⁽¹⁰⁾에 따른 절차 및 방법에 따라 측정하였다. 지열원 멀티 열펌프 유닛은 53.5 kW급 실외기와 복수의 6 kW 급 바닥상치형 실내기가 조합된 2개 세트로 구성된다. 각 세트의 실외기는 각각 실내기와 79%와 67%의 조합비를 가지며, 시설원에 비닐하우스 길이방향 중심부를 기준으로 좌우측면에 각각의 세트에 대하여 실내기를 지그재그 형태로 마주보도록 설치하였다. Fig. 2는 본 지열원 멀티 시스템의 계통도를 나타내며, Table 1은 지열원 열펌프 시스템 사양을 나타낸다.

2.3 실증 데이터 취득 및 처리

지열원 멀티형 열펌프 시스템의 비닐하우스 온실 적용 실증 성능 평가를 위하여 지경부 고시 제 2008-232호⁽¹⁰⁾에 따라 시스템의 주요 부위에 센서를 설치하였다. RTD(Pt 100 Ω)를 이용하여 지중 순환수의

실외열교환기 입·출구 온도와 지중 열교환기의 표면온도를 측정하였으며, RTD의 정확도는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이다. 시설원에 실증사이트 내부 실내 온도 분포 측정을 위하여 시설원에 온실 내부에 일정간격으로 12 개의 RTD를 설치하였다. 열펌프 유닛과 지중순환펌프의 소비전력은 각각 적산전력계(WT 2030, Yoko-gawa Co., 정확도 : $\pm 0.5\%$)로 측정하였으며, 지중 순환수의 유량은 전자유량계(DE41F, Oval Co., 정확도 : $\pm 0.5\%$)를 설치하여 측정하였다.

두 세트의 지열원 멀티 열펌프가 비닐하우스 내

Table 1 Specifications of GSHPs

| Parameters | | System |
|----------------|----------------------------|-------------------------|
| Heat pump unit | Type | Water to air multi |
| | OD unit | 53.5 kW×2 |
| | ID unit | 6 kW×7, 6 kW×6 |
| | Refrigerant | R410A |
| | Manufacturer | Samsung Electronics Co. |
| GLHX | Type | Single U-tube |
| | Borehole diameter | 150 mm |
| | Borehole depth | 150 m |
| | Distance between boreholes | 6 m |
| | No. of boreholes | 8 |
| | Tube diameter | 32 mm |

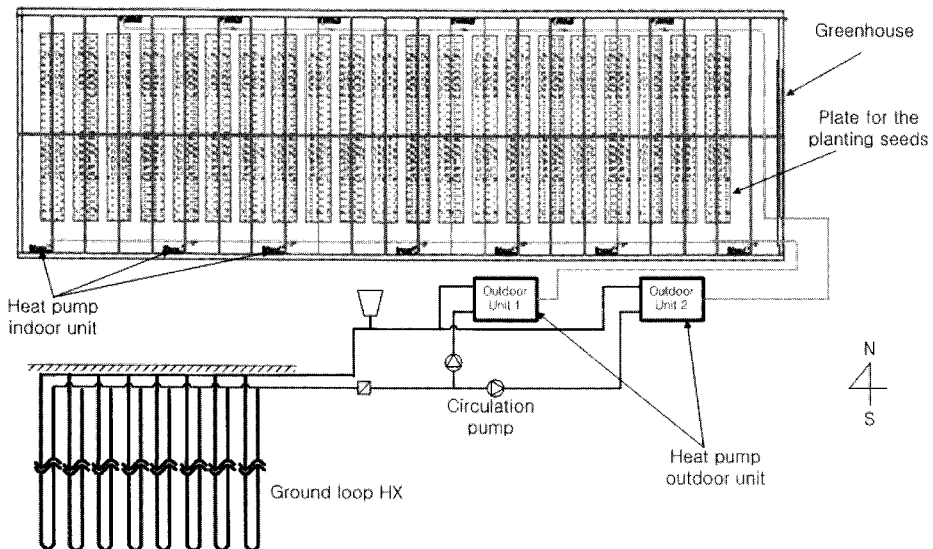


Fig. 2 Schematic diagram of ground source multi-heat pump system for the greenhouse.

부에 설치되었으나, 실내기가 동일공간에 남북으로 대칭형태로 설치되어 실내기가 비닐하우스 남쪽 측면에 설치된 하나의 열펌프 세트에 대해서만 성능 데이터를 취득하였다. 본 실증 시스템의 지열원 열펌프는 물대공기 멀티형 열펌프로 다수의 실내기 용량을 현장에서 직접 측정하는 것은 현실적으로 불가능하였다. 따라서, 지중순환 수의 실외열교환기 입출구 온도와 유량을 측정하여 실외열교환기 용량을 산출하고(식(1)), 열펌프의 소비전력을 이용하여 실내기 용량을(식(2)) 계산하였다.⁽¹²⁾ 식(3)을 이용하여 열펌프 유닛의 COP를 계산하였으며, 지중 순환펌프의 소비전력을 고려한 전체 시스템의 COP 계산에는 식(4)를 적용하였다.

$$Q_{od} = \dot{m} C_P (T_i - T_o) \quad (1)$$

$$Q_{id} = Q_{od} + W_{cp} \quad (2)$$

$$COP_{HP} = Q_{id} / W_{cp} \quad (3)$$

$$COP_{sys} = Q_{id} / (W_{cp} + W_{pump}) \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

지열원 멀티 열펌프 시스템을 실증 사이트에 설치 및 시운전 후, 사용자의 설정온도 세팅에 따른 시스템 제조사의 운전 제어 알고리즘에 따라 운전하며 데이터를 측정하였다. 본 연구에서는 기존에 널리 사용되어온 정속형 물대물 지열원 열펌프 시스템과 달리 용량가변형 압축기가 채용된 지열원 멀티 열펌프 시스템의 부분 부하에 따른 시설원에 적용 성

능을 분석하고자 난방부하량이 다소 작은 2009년 3월의 주요일자별 성능을 분석하였다.

Fig. 3은 식물조직 배양을 위한 시설원에 비닐하우스에 설치된 지열원 멀티 열펌프가 가동되고 있는 2009년 3월 11일 오전 10시부터 익일 오전 10시 까지의 비닐하우스 내부 평균온도와 외기온도 변화를 나타낸다. 시스템은 오후 5시 39분경부터 익일 오전 8시 25분까지 운전되었다. 시스템 가동시간 동안 내부평균온도는 19.4℃를 나타냈으며, 위치에 따른 최고온도와 최저온도는 2.1℃의 차이를 나타냈다. Fig. 3의 2009년 3월 11일 이외의 3월 운전기간 동안 비닐하우스 내부의 일일 온도 변화는 3월 11일과 유사한 변화를 나타냈다. 2009년 3월 중에 시스템이 가동되지 않는 기간과 가동된 야간 시간의 비닐하우스 내부 위치에 따른 최고온도와 최저온도와의 최대 차이는 각각 12.2℃와 3.4℃를 나타내어 지열원 멀티 열펌프 시스템은 우수한 온도제어 성능을 나타냈다.

Fig. 4는 시간의 변화에 따른 물대공기 지열원 멀티 열펌프 시스템의 난방용량을 나타낸다. 시스템 가동 중의 일일 평균 난방부하는 13.2 kW였으며, 최대 난방부하는 34.9 kW를 나타냈다. 일 최대 난방부하는 실외기 용량 대비 65.2%의 용량이며, 실내기 조합을 대비 83%이다. 시스템은 기존에 널리 사용되어온 정속형 물대물 시스템과 달리 용량 가변형 압축기를 채용하고 있으므로, 부하변동에 따라 용량 가변이 빈번하게 일어났다.

Fig. 5, Fig. 6은 3월 11일의 난방 운전 시에 시간의 변화에 따른 지열원 열펌프 유닛의 소비전력과 냉매의 고압 및 저압측 압력변화를 나타낸다. 난방 부하가 시스템 용량대비 작아서 압축기의 용량가변에 따라 소비전력과 냉매측 고압 및 저압의 변화가

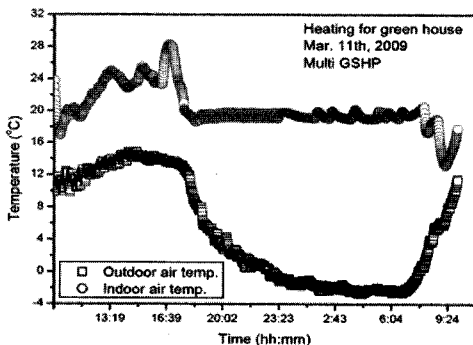


Fig. 3 Variation of indoor and outdoor temperature with time.

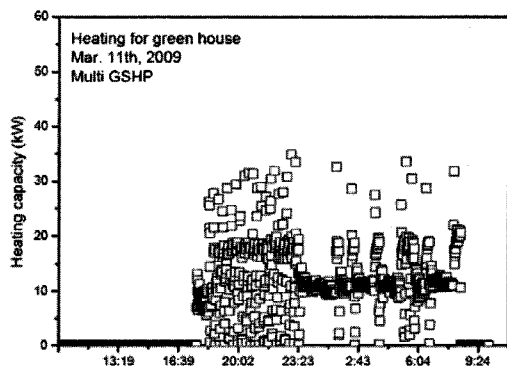


Fig. 4 Variation of heating capacity with time.

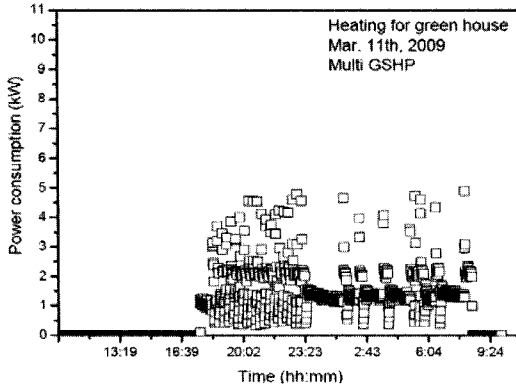


Fig. 5 Variation of power consumption with time.

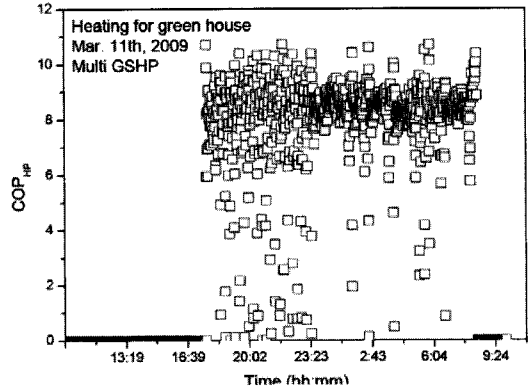


Fig. 7 Variation of unit COP with time.

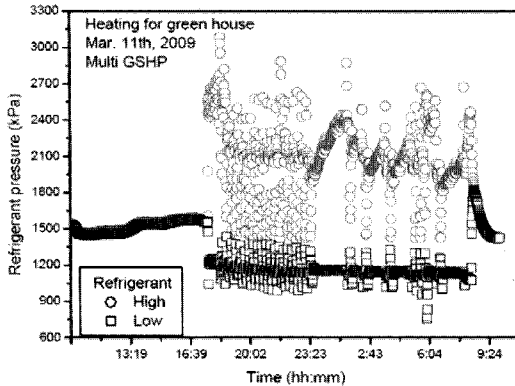


Fig. 6 Variation of suction and discharge pressure with time.

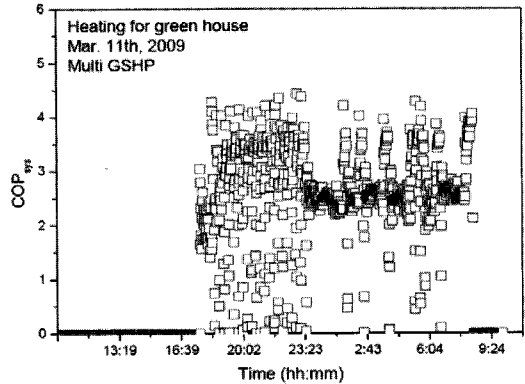


Fig. 8 Variation of system COP with time.

빈번하게 나타났다. 용량가변형 지열원 멀티 열펌프 시스템이 가동을 시작한 초저녁과 새벽에 소비전력과 압력의 변동율이 심야시간에 비하여 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 일몰 후 초저녁에는 주간에 지중에 축열된 열이 비닐하우스로 방출되고, 일출 후 새벽에는 태양 복사열로 심야보다 난방부하량이 작아서 압축기의 용량 가변이 빈번하였기 때문이다.

Fig. 7은 시간의 변화에 따른 열펌프 유닛의 COP 변화를 나타낸다. 시스템 가동 시간 동안의 평균 열펌프 유닛 COP는 8.2로서 매우 높게 나타났다. 이는 시스템이 일일 평균 18.8%의 부하로 대부분 부분 부하 운전됨에도 불구하고, 지중순환수 펌프는 단속 운전되도록 설계되어 지중순환수가 최대용량으로 실외열교환기를 흐르고 상대적으로 시스템 용량대비 증발기와 응축기가 크기 때문이다. 시스템 가동 시간동안에 열펌프 유닛의 COP는 0.8에서 10.7

의 큰 변화폭을 나타냈는데, 이는 시스템 용량 가변시에 압축기 소비전력 대비 난방용량은 열지연 현상을 갖기 때문이다.

Fig. 8은 지열원 멀티 열펌프 시스템의 가동 중 일일 시스템 COP 변화를 나타낸다. 시스템 COP도 열펌프 유닛 COP와 같이 시간에 따른 변화가 빈번하였는데, 이는 시스템 가변에 따른 난방용량과 압축기 소비전력 변화가 빈번하였기 때문이다. 평균 시스템 COP는 열펌프 유닛 COP 대비 67%의 큰 성능 감소가 있었는데, 이는 열펌프 유닛이 정격 용량 대비 18.8%의 부분부하로 운전되었지만, 순환펌프는 일정속도로 운전되었기 때문이다. 특히, ASHRAE⁽¹³⁾에서는 시스템 COP는 열펌프 유닛 COP 대비 13% 이내의 성능을 갖도록 설계할 것을 권장하고 있다. 따라서, 물대 공기 지열원 멀티 열펌프 시스템을 시설원에 설비에 적용하여 실질적인 에너지절감을 이루기 위해서는 부분부하 운전조건에서의 성능향상 기술 개발이 절실히 요구된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 3월중의 주요 일자별 시스템의 일일평균 난방용량과 외기온도를 나타낸다. 일일 지열원 멀티 열펌프 가동 기간 중의 평균 외기온도와 시스템 난방 용량이 일치하지는 않았다. 즉 외기온도가 낮은 경우에 항상 난방 부하가 크게 발생하지는 않았다. 일례로 2009년 3월 4일은 외기 평균온도가 10.4°C로 3월 11일의 0.4°C보다 높게 나타났으나, 일일 평균 난방용량은 23.7 kW로 3월 11일의 13.2 kW보다 크게 나타났다. 이는 본 지열 시스템이 설치된 시설원에 비닐하우스는 일반 공조 건물과 달리 주간에 태양 복사열을 지중에 축열하고, 야간에 지중에 축열된 열량을 비닐하우스 내부로 방출하는 부하 특성과 비닐하우스의 외기 침입효과 때문인 것으로 분석된다. 즉, 주간에 날씨가 흐려서 비닐하우스 내부로의 주간 태양 복사열의 축열량이 작은 경우에는 야간에 외기온도가 높아도 주간에

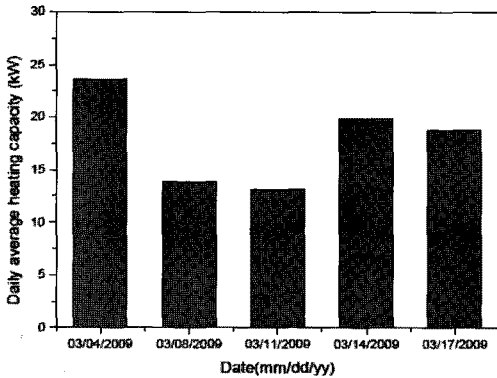


Fig. 9 Variation of daily average heating capacity with date.

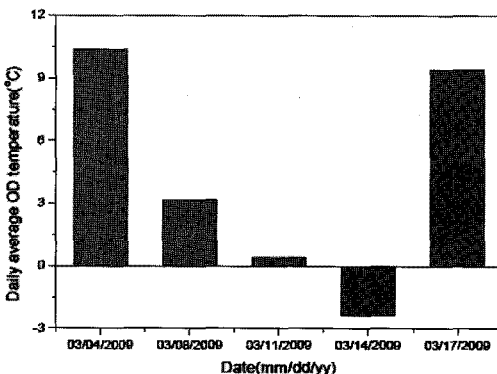


Fig. 10 Variation of daily average outdoor temperature with date.

축열된 지중 열량의 절대량이 감소하여 난방 부하가 크게 요구된다. 또한, 일일 평균 외기온도가 높은 경우에도 비닐하우스 주변의 풍속이 큰 경우에는 비닐하우스의 구조상 외기침입량이 많고 단열상태가 나쁘므로 외부로의 열손실이 많아서 큰 난방부하가 발생하게 된다. 현재까지는 대부분 시설원에 설비의 부하량 산정시에 면적과 외기온도만을 단순히 이용하고 있는데,⁽¹⁰⁾ 이에 대한 보완을 위한 연구 및 기술개발이 필요하다고 평가된다.

Fig. 11은 3월의 주요일자별 지열원 멀티 열펌프 시스템의 가동 시간 동안의 평균 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP를 나타낸다. 열펌프 유닛 COP는 모두 7.4 이상의 우수한 성능을 나타냈으나, 시스템 COP는 열펌프 유닛 COP 대비 53% 이상 감소하였다. 이는 열펌프 실외기의 정격용량은 53.5 kW이나 Fig. 9에서 보여진 바와 같이 각 일자별 평균 난방용량이 25 kW 이하로 열펌프 유닛의 실외기 정격용량대비 50% 이하의 부분 부하 조건에서 시스템이 가동되지만, 순환펌프는 정격 운전됨에 따라 시스템 COP 산정시의 총 소비동력이 최적 조건 대비 매우 크기 때문이다. 궁극적으로 본 연구의 지열원 멀티 열펌프 유닛의 구조적 장점인 다수의 실내기 채용에 따른 개별 공조 특성과 압축기 용량 가변에 의한 부분 부하 대응 우수성을 활용하여 시설원에 적용 난방시스템에서의 연간에너지 소모량 감소를 이루기 위해서는 다양한 부분부하 조건에서의 열펌프 유닛 용량 가변에 따른 지중순환수의 최적 유량 선정과 함께 시스템 성능을 극대화하기 위한 순환펌프 최적 제어 알고리즘 개발이 필요하다.

Fig. 12는 각 주요 일자별 지중열교환기 150m 지

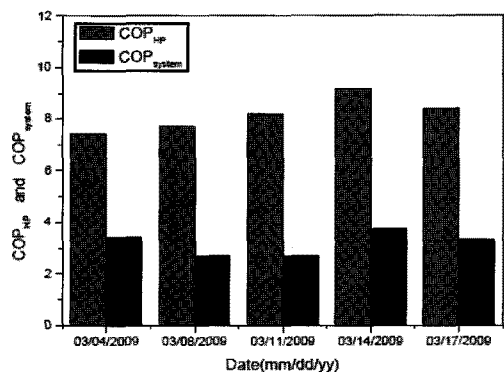


Fig. 11 Variation of daily average unit COP and system COP with date.

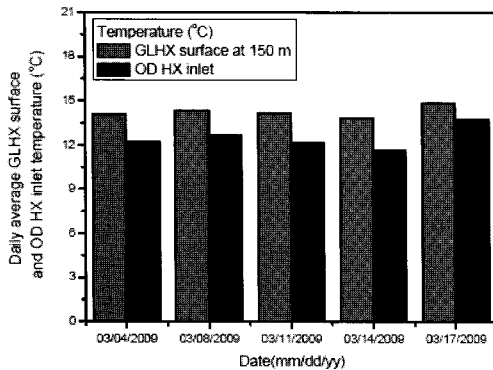


Fig. 12 Variation of daily average surface temperature of GLHX and inlet temperature of OD HX with date.

점의 지중열교환기 표면과 실외열교환기 유입 지중순환수의 온도를 나타낸다. 시스템 가동 중의 평균 일별 외기온도가 -2.4°C 에서 10.4°C 로 다양하게 나타났지만, 실외열교환기 유입 지중순환수 온도는 2.3°C 이내의 변화폭을 나타냈으며, 지중열교환기 표면온도는 일자별 0.6°C 이내의 차이를 나타냈으므로 본 시스템은 공기열원 시스템 대비 매우 안정적인 것으로 분석된다.

4. 결론

시설원에용 지열원 멀티 열펌프 시스템 일일 난방성능 실증 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

지열원 멀티 열펌프 시스템을 조직 배양용 시설원에 비닐하우스의 난방 설비로 적용하였을 때, 2009년 3월 중에 시스템 가동 중의 비닐하우스 내부 위치에 따른 최고온도와 최저온도는 3.4°C 의 차이를 나타내어 우수한 온도제어 성능을 나타냈다.

시설원에 비닐하우스는 일반 공조 건물과 달리 주간에는 태양 복사열을 지중에 축열하고, 야간에 지중에 축열된 열량을 비닐하우스 내부로 방출하는 부하 특성을 갖고, 비닐하우스의 외기 침입효과가 일반 건물보다 크게 나타났다. 이로인해 시설원에 비닐하우스의 난방부하는 외기온도가 낮을수록 난방부하가 증가하는 일반적 건물 공조 부하 특성과 항상 동일한 경향성을 나타내지는 않았다.

2009년 3월중의 일일 평균 지열원 멀티 열펌프 유닛 COP는 모두 7.4 이상의 우수한 성능을 나타냈다. 하지만, 일자별 평균 난방용량이 실외기 정격용량대비 50%

이하의 부분 부하 조건에서 열펌프 유닛이 운전되지만, 순환펌프가 정격 운전됨에 따라 순환펌프 소비동력이 과대하여 시스템 COP는 크게 감소하였다.

본 연구의 지열원 멀티 열펌프 유닛을 시설원에 난방 시스템으로 적용하여, 연간에너지 소모량 감소를 이루기 위해서는 다양한 부분 부하 조건에서 열펌프 유닛 용량 가변에 따른 지중순환수의 최적 유량 선정과 함께 시스템 성능을 극대화하기 위한 순환펌프 최적 제어 알고리즘 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 (주) 삼성전자의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Ozgener, L., Hepbasli, A. and Dincer, I., 2007, A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications, *Renew Sustainable Energy Rev.* Vol. 11, pp. 1675-1697.
- Park, Y. and Kang, S., 2007, Performance analysis of the horizontal ground source heat pump for greenhouse, *Proceedings of the SAREK 2007 Winter Annual Conference*, pp. 447-451.
- Ozgener, O. and Hepbasli, A., 2005, Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system, *Energy and Buildings*, pp. 101-110.
- Inall, M. I. and Esen, H., 2004, Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system, *Applied thermal engineering*, Vol. 24, pp. 2219-2232.
- Hepbasli, A., 2002, Performance evaluation of a vertical ground-source heat pump system in Izmir, Turkey, *Int. Journal of Energy Res.*, Vol. 26, pp. 1121-1139.
- Hepbasli, A., Akdemir, O. and Hancioglu, E., 2003, Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 527-548.
- Zhao, P. C., Zhao, L., Ding, G.L. and Zhang, C. L., 2002, Experimental research on geothermal heat

- pump system with non-azeotropic working fluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, No. 15, pp. 1749-1761.
8. Lund, J. W., 2005, World-wide direct uses of geothermal energy 2005, *World Geothermal Congress*.
 9. Song, I. S., Choi, J. M., Joo, J. J., Chung, H. J., Kang, H. and Kim, Y., 2008, The performance of a simultaneous heat and cooling heat pump at various charging conditions, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 7, pp. 492-499.
 10. Ministry of Knowledge Economy, 2008, Standards of support, installation, and management for new and renewable energy system, Ministry of Knowledge Economy Announcement, 2008-232.
 11. Thermal Dynamics, 2008, GLD™ Premier Final 2008 Edition for Windows, Gaia Geothermal.
 12. Choi, J. M., Lim, H., Kang, S., Moon, J. and Kim, R., Daily heating performance of a ground source multi-heat pump at heating mode, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 527-535.
 13. Bose, J. E., Parker, J. D. and McQuiston, F. C., 1995, Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump systems, ASHRAE.