

온실 내외부 공기열의 선택적 축열에 의한 히트펌프 난방성능 개선

권진경^{1*} · 김승희¹ · 전종길² · 강연구¹ · 장갑열³

¹국립원예특작과학원 시설원예연구소, ²국립농업과학원 농업공학부, ³국립원예특작과학원 인삼특작부

Improvement of Heat Pump Heating Performance by Selective Heat Storage Using Air Heat of Inside and Outside Greenhouse

Jin Kyung Kwon^{1*}, Seung Hee Kim¹, Jong Gil Jeon², Youn Koo Kang¹, and Kab Yeol Jang³

¹Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 637-812, Korea

²Agricultural Safety Engineering Division, NAAS, RDA, Jeonju 560-500, Korea

³Mushroom Research Division, NIHHS, RDA, Eumsung 369-873, Korea

Abstract. In this study, the design and performance test of the air to water heat pump capable of producing hot water for greenhouse heating by using the surplus solar heat inside the greenhouse and the air heat outside greenhouse as the selective heat source were conducted. The heat storage operations using the surplus solar heat and the outside air heat were designed to be switched according to the setting temperature of the greenhouse in consideration of the optimum temperature range of the crop. In the developed system, it was possible to automatically control the switching of heat storage operation, heating and ventilation by setting 12 reference temperatures on the control panel. In the selective heat storage operation with the surplus solar heat and outside air heat, the temperature of thermal storage tank was controlled variably from 35°C to 52°C according to the heat storage rate and heating load. The heat storage operation times using the surplus solar heat and outside air heat were 23.1% and 30.7% of the experimental time respectively and the heat pump pause time was 46.2%. COP(coefficient of performance) of the heat pump of the heat storage operation using the surplus solar heat and outside air heat were 3.83 and 2.77 respectively and was 3.24 for whole selective heat storage operation. For the comparative experiment, the heat storage operation using the outside air heat only was performed under the condition that the temperature of the thermal storage tank was controlled constantly from 50 to 52°C, and COP was analyzed to be 2.33. As a result, it was confirmed that the COP of the heat storage operation using the surplus solar heat and outside air heat as selective heat source and the variable temperature control of the thermal storage tank was 39% higher than that of the general heat storage operation using the outside air heat only and the constant temperature control of the thermal storage tank.

Additional key words : coefficient of performance, electric power consumption, greenhouse climate, surplus solar heat, ventilation

서 론

원예산물의 소비가 고급화, 주년화됨에 따라 고부가가치 생산을 위한 가온재배 시설이 꾸준히 증가하는 추세이며 시설농업은 상당한 자본과 기술이 요구되는 에너지 소비산업으로 변모하고 있다. 국내 시설원예 가온면적은 2015년 기준 17,838ha로 전체의 32.5%를 차지하고 있으며, 최근 10년간 전체 시설면적이 2,782ha(5.3%) 증가하는 동안 가온면적은 5,105ha(40.1%) 급증하였다. 특히 면적감소를 겪고 있는 화훼와 달리 채소는 전체 면적과

가온재배 면적이 동기간 각각 3,952ha(8.1%), 5,903ha(59.2%) 증가하였으며 가온면적 비중 역시 화훼의 86.1%보다 낮은 30.2%로 증가의 여지가 있다(MAFRA, 2016a, b).

국내 시설원예 난방은 83.5%를 유류에 의존하고 있어 국제유가 변동성에 취약한 구조를 가지고 있으며, 지열 포함 신재생에너지의 비중은 1.4%로 미미한 수준이다. 최근 시설 난방에 전기를 사용하는 면적이 연간 약 20%씩 급증하고 있으며(MAFRA, 2016a, b), 이는 난방용 전기인 농사용 전력 ‘을’의 발열당당 가격이 면세등유 대비 50~60%에 불과한데 기인한다. 원예시설의 난방에 사용되는 전기난방기는 전기저항 발열을 이용하는 종류가 대부분으로 전기온풍난방기와 전기온수보일러가 주

*Corresponding author: cen55@korea.kr

Received August 17, 2017; Revised September 05, 2017;

Accepted September 08, 2017

로 사용되며 전열선, 면상발열체, 방열등 등의 발열체를 공간 또는 지중에 노출하는 형식이 보급되었다. 특히 열 및 전기적 전도성이 높고 내열성이 우수한 탄소섬유 발열체를 적외선등(Lim 등, 2009), 히팅파이프(Peak 등, 2011)의 형태로 적용한 연구가 수행되었다. 국내 농업업육성을 위해 발전단가보다 매우 낮은 요금으로 농사용 전기가 공급되고 있으나 최근의 원예시설 전기사용의 급등세와 탈원전 정책에 따른 국가 전력수급 등을 고려하면 시설농업의 난방용 전기사용의 효율성 제고가 요구된다.

전기히트펌프(EHP, Electric heat pump) 냉매의 상변화를 통해 주변 열원의 열을 흡수, 이동시킴으로써 공급 전기에너지의 수배의 열에너지를 생산할 수 있으며 냉방, 제습 등 복합 환경관리에도 적용이 가능한 다목적 공조기이다(Gracia 등, 1998; Willits와 Gurjer, 2004). 히트펌프의 원예시설 적용은 히트펌프 관련 기술선진국인 일본에서 활발하며 공기 대 공기 히트펌프와 유류난방기의 하이브리드 운용기술이 개발되어 재배에 적용되고 있다(Kawashima 등, 2008; Kawashima 등, 2011; Tong 등, 2011). 국내의 히트펌프의 시설원에 적용 관련 연구는 지열원 히트펌프에 집중되어 왔으며(Kang 등, 2007; Ryou 등, 2008), 지열원 히트펌프는 안정적 공조 성능에도 불구하고 높은 설치비가 보급의 걸림돌이 되어 왔다. 반면 공기열원 히트펌프는 설치비는 상대적으로 낮으나 냉난방 부하에 비례하여 성능이 저하되는 단점이 있다(Marsh와 Singh, 1994). 공기열원 히트펌프의 동절기 성능 개선을 위해 온실 난방부하의 20~100%에 달하는 환기로 버려지는 온실 태양잉여열(Suh 등, 2011)의 열원 이용 가능성에 대한 기초연구가 수행되었으며 태양잉여열 이용 축열운전 시 히트펌프의 성능계수 향상을 확인하였다(Kwon 등, 2013).

본 연구에서는 작물재배 온실을 대상으로 온실외부 공기열과 온실내부 태양잉여열을 선택적 열원으로 활용하여 온실 난방용 온수를 생산하는 공기 대 물 히트펌프 난방시스템을 설계, 제작하였으며, 축열 및 난방 성능시험을 수행하여 외부 공기열 단일 이용 운전조건과 히트펌프 성능계수, 운전 특성, 온실 환경 등을 비교 분석하였다.

재료 및 방법

온실 내부 및 외부의 공기열을 열원으로 하여 난방용 온수를 생산하는 ‘태양잉여열-외기열 선택적 축열식 온실난방 시스템’을 Fig. 1의 전라남도농업기술원(나주) 시험포장에 위치한 장미재배 온실(35°1'30"북, 126°49'46"동, 표고 35m)을 대상으로 설계, 제작하였다. 온실은 폭 15.5m, 길이 39.4m, 둥고 6.0m, 측고 3.0m, 면적 610m²



Fig. 1. Experimental greenhouse in Naju.

의 트러스 골조 무기동 광폭비닐하우스로 PO필름 2중 피복이며, 부직포 보온커튼이 설치되어 있다. 해당 온실의 최대난방부하는 인근 광주광역시 위험률 2.5% TAC온도 -4.7°C(KSES, 2017), 난방 설정온도 19°C를 기준으로 계산한 결과 약 70kW로 분석되었다. 선행 연구(Kwon 등, 2013)에서 경기도 수원 소재 비닐온실의 경우, 주간의 온실 태양잉여열 및 외기열을 이용한 전축열 운전과 야간의 외기열을 이용한 부분축열 운전으로 온실 최대난방부하의 50% 난방 능력을 갖고 있는 축열식 공기열원 히트펌프로 온실난방이 가능하였으므로 본 연구에서는 난방능력 35kW급 공기 대 물 히트펌프(SG-AHP200, Segi Co., Gwangju, Korea)와 20톤 용량의 축열조를 조합하였다. 축열조는 직경 3.0m 높이 2.85m의 원통형으로 온도 성층화를 위해 직경 750mm의 디스크 3매로 구성된 디퓨저를 축열조 상하부에 설치하였다.

Fig. 2에는 재배온실에 설치된 선택적 축열식 온실난방 시스템의 개략도를 나타내었다. 온실의 북동쪽 1층과 2층 피복사이의 공간에 밀폐실을 배치하고 내부에 공기 대 물 히트펌프를 설치하였으며 밀폐실에는 온실내부의 태양잉여열을 이용한 히트펌프 운전과 온실 외부의 외기열을 이용한 축열 운전이 각각 가능하도록 총 4개의 전동식 댐퍼를 벽면에 설치하여 유로를 분리하였다. 히트펌프의 난방사이클 운전으로 생산된 열에너지는 축열펌프를 이용해 축열조에 저장하였으며 난방설정온도에 따라 방열펌프와 팬코일유닛을 제어하여 온실을 난방하였다. 온실의 하류측 마구리벽에 환기댐퍼와 환기팬을 설치하여 밀폐실의 흡배기 댐퍼와 연동하여 강제환기가 수행되도록 하였다.

Fig. 3에는 각 운전 조건에서 공조기에 의한 공기유동을 나타내었다. 온실 내부의 공기열을 이용하는 태양잉여열 축열운전 시 밀폐실의 온실측 벽체 상부의 내부흡

온실 내외부 공기열의 선택적 축열에 의한 히트펌프 난방성능 개선

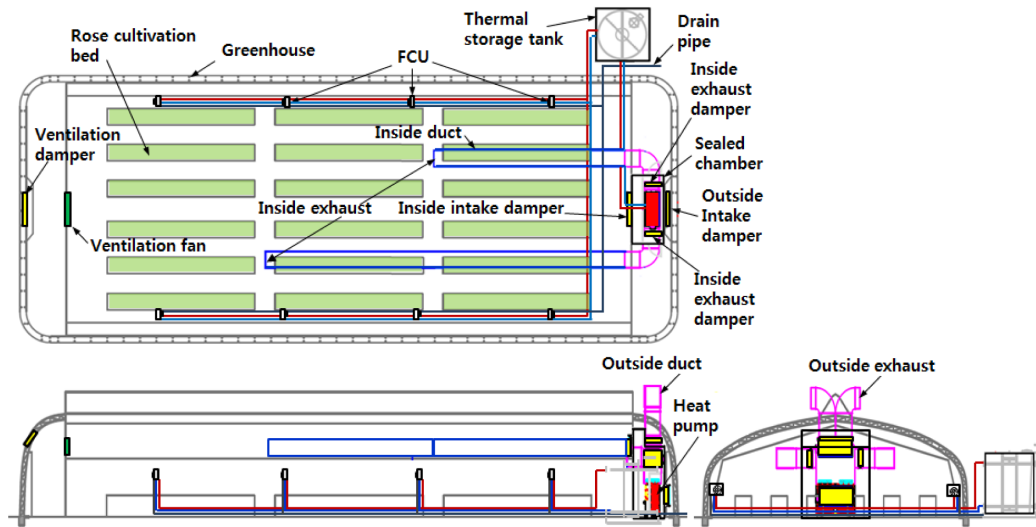


Fig. 2. Schematic of greenhouse heating system using surplus solar heat and outside air heat.

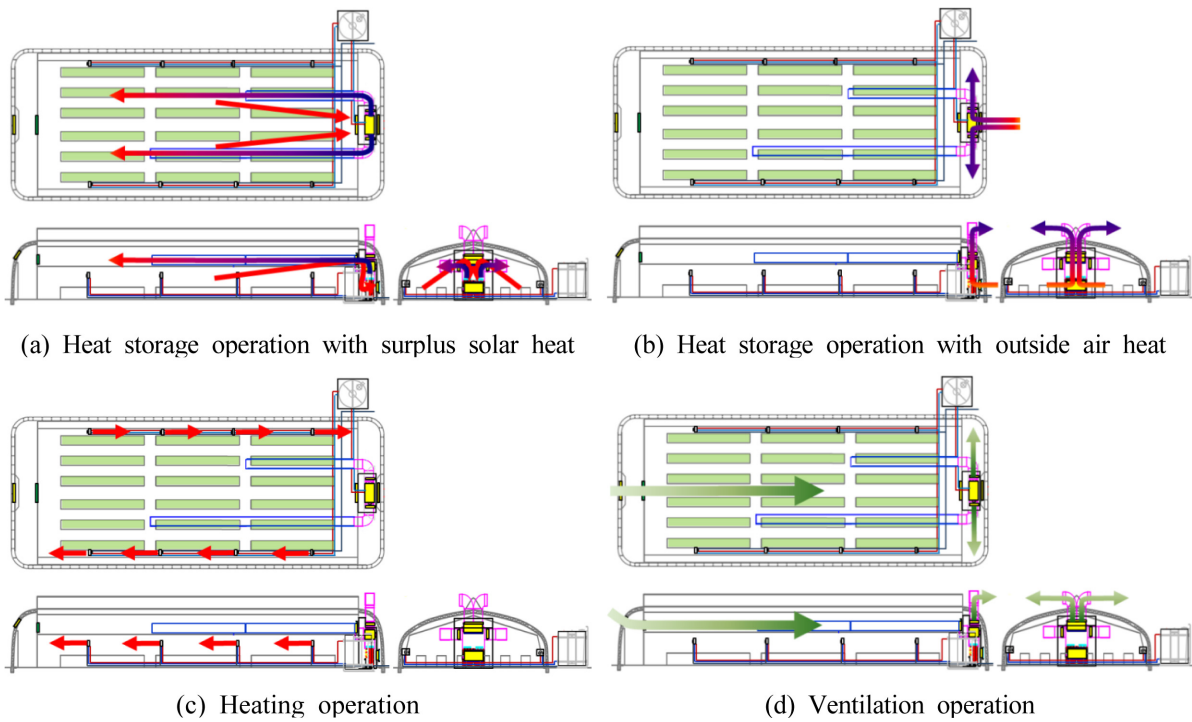


Fig. 3. Schematic of heat pump system operation and greenhouse climate control.

기 댐퍼와 밀폐실 양측의 내부배기 댐퍼가 개방된다. 주간의 태양복사열에 의해 온도가 상승한 온실 상부의 공기는 밀폐실 상부의 내부흡기 댐퍼로 유입되어 히트펌프 증발기, 내부배기 댐퍼, 내부덕트를 거쳐 온실 내부로 다시 배출된다. 농업용 PE필름 소재의 내부덕트는 직경 60cm로 온실 상부 4.0m 높이에 설치하였으며 길이는 각 12m와 21m로 상이하게 하여 히트펌프 증발기를 통

과한 저온 기류가 온실 하류영역에 집중되지 않도록 하였다. 온실 외부 공기열을 이용하는 외기열 이용 축열은 전으로 전환되면 내부흡기 댐퍼와 내부배기 댐퍼는 폐쇄되며 밀폐실 외부측 벽체 하부의 외부흡기 댐퍼와 밀폐실 상단의 외부배기 댐퍼가 개방된다. 외부흡기 댐퍼로 유입된 외부공기는 히트펌프 증발기와 외부덕트를 거쳐 다시 외부로 배출되어 일반 공기 대 물 히트펌프와 동

일조조건으로 운전된다. 태양잉여열 이용 축열운전과 외기열 이용 축열운전은 내외부 흡배기 댐퍼 개폐 설정온도에 따라 자동으로 상호 전환된다. 야간 및 조건에는 외기열 이용 축열운전으로 가동되며 일출 후 태양복사에 의해 온실 내부온도가 설정온도에 도달하면 태양잉여열 이용 축열운전으로 전환된다. 태양잉여열 이용 축열운전의 지속으로 온실 내부온도가 설정온도 이하로 하강하면 다시 외기열 이용 축열운전으로 전환되어 온실 내부온도는 상승하며 이와 같은 축열운전의 상호 전환 반복을 통해 동절기 주간의 작물생육 적온범위 유지와 히트펌프의 축열성능 향상이 가능하도록 하였다. 야간에는 난방상하한 설정온도에 따라 축열조의 방열펌프와 팬코일유닛을 제어하도록 하였으며 팬코일유닛은 방열능력 9.3 kW로 총 8대를 온실 측벽의 1.4m 높이에 반시계방향으로 배치하여 순환기류가 생성되도록 하였다. 주간의 태양잉여열 이용 축열운전에도 불구하고 온실내부의 온도가 작물생육 적온범위를 상회하면 온실 하류측 마구리벽 4.0m 높이의 1중 피복에 설치한 전동식 환기댐퍼를 개방하고 2중 피복에 설치한 환기팬을 가동시켜 강제환기를 수행하였다. 이 때 밀폐실의 내부흡기 댐퍼와 외부배기 댐퍼는 개방하고 내부배기 댐퍼와 외부흡기 댐퍼는 폐쇄하고 히트펌프의 배기팬을 가동하여 환기팬에서 유입된 외기가 온실내부를 지나 외부로 배출될 수 있도록 하였다. Fig. 4에는 상기의 설계안에 기초하여 제작한 ‘태양잉여열-외기열 선택적 축열식 온실난방 시스템’ 모델

을 장미재배온실에 설치한 상황을 나타내었다.

시스템의 난방성능을 계측하기 위해 히트펌프의 응축기와 축열조 사이의 입출구 배관에 온도센서(PT100, Ahlborn, Holzkirchen, Germany)를 2지점, 출구 배관에 유량계(PVA915, Ahlborn, Holzkirchen, Germany)를 1지점 설치하였다. 축열조 내부에도 온도성층화 정도를 확인하기 위해 높이 0.45, 1.35, 2.25m 높이에 입출구 배관과 동일한 센서를 3지점 설치하였다. 온습도 측정을 위한 센서(FHA646, Ahlborn, Holzkirchen, Germany)를 내부 흡기 및 배기 댐퍼에 2개, 외부 흡기 및 배기 댐퍼에 2개, 온실외부 1개, 온실내부의 높이 1.5m 하류방향 12m 및 21m 지점에 2개를 설치하였다. 시스템의 에너지소비량 측정을 위해 기존온실에 신규 추가된 히트펌프, 축열 및 방열 펌프, 밀폐실 댐퍼 등이 연결된 별도의 전원부에 전력량계(CW240, Electric Co., Tokyo, Japan)를 설치하여 순간 및 적산 전력량을 기록하였다. 상기 온습도 및 유량 데이터는 5분 단위로 측정하였으며 전력량을 제외한 모든 데이터는 데이터 수집기((Almemo, Ahlborn, Holzkirchen, Germany)에 기록하였다.

시스템 난방 성능계수(COP, Coefficient of performance)는 상기의 소비전력량 계측값과 응축기 입, 출구의 물온도차이 및 유량을 이용하여 아래의 식 (1)과 같이 축열량과 소비전력량의 비로 계산하였다.

$$COP_h = \frac{\rho_w Q_w c_w (T_{w,o} - T_{w,i})}{P_{HP}} \quad (1)$$

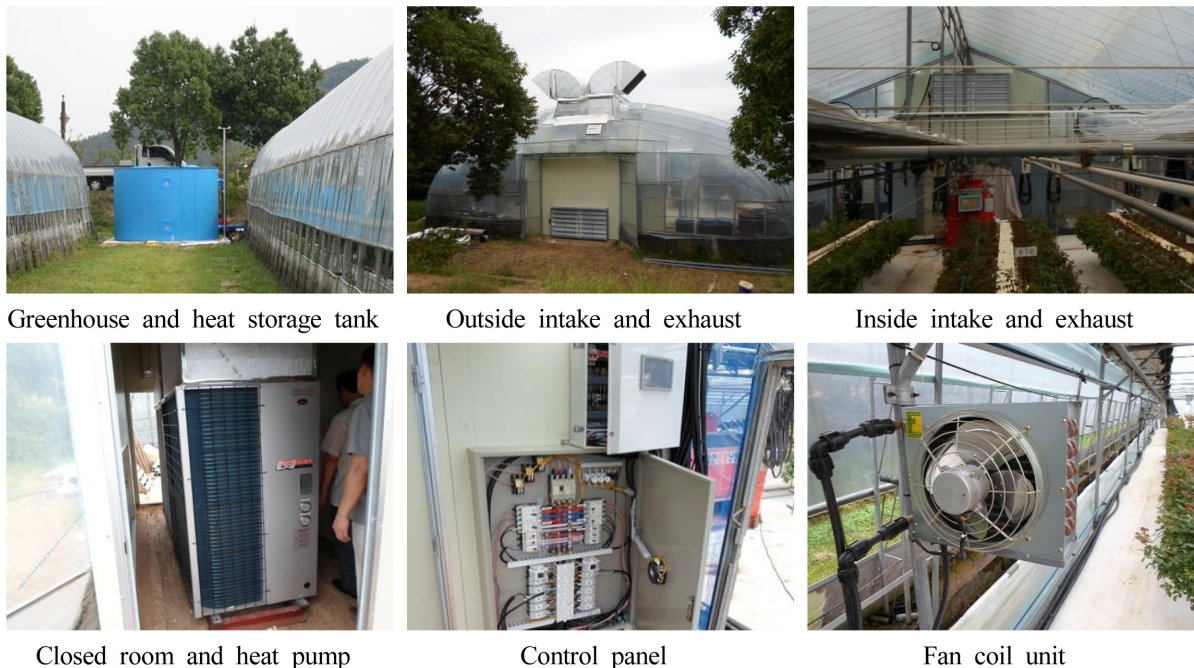


Fig. 4. Composition of present greenhouse heating system.

Table 1. Temperature setup for component operation.

Operational component	Setup value(°C)
Thermal storage tank upper limit 09:00~17:00/17:00~22:00/22:00~09:00	52/50/48
Thermal storage tank lower limit 09:00~17:00/17:00~22:00/22:00~09:00	50/48/35
Inside intake/exhaust damper open	27
Outside intake/exhaust damper open	23
FCU and heat radiation pump ON	19.5
FCU and heat radiation pump OFF	20.5
Ventilation fan ON, Damper open	32
Ventilation fan OFF, Damper close	29

여기서 COP_{HP} : 시스템 난방성능계수, P_{HP} : 시스템 소비 전력(kW), ρ_w : 열전달매체 밀도(kg/m³), Q_w : 열전달매체 유량(m³/s), c_w : 열전달매체의 비열(kcal/kg·°C), $T_{w,i}$, $T_{w,o}$: 각각 응축기 입, 출구 열전달매체 온도(°C)

‘태양잉여열-외기열 선택적 축열식 온실난방 시스템의 축열, 난방, 환기를 위한 시스템 온도 설정값을 Table 1에 나타내었다. 히트펌프와 축열펌프는 축열조 상한온도에서 정지, 하한에서 가동되며 히트펌프의 성능계수 향상과 축열량 확보를 위해 축열조 축열온도를 변온설정 하였다. 태양잉여열의 이용이 가능한 09~17시에는 축열조 상/하한 온도를 52/50°C로 설정하여 히트펌프 운전성능을 향상시키고 충분한 열량을 확보하도록 하였으며, 외기온이 강하하기 시작하는 17~22시에는 축열온도를 50/48°C로 설정하여 축열조 온도를 유지하며 난방 초기의 부하에 대응하도록 하였다. 외기온이 낮은 22~09시에는 48/35°C로 설정하여 성능계수가 낮은 시간대의 히트펌프 운전을 최소화하며 축열조 축열량을 소진하여 태양잉여열을 이용한 축열운전에 대비하도록 하였다. 재배작목인 장미의 생육적온과 히트펌프 축열 성능을 고려하여 태양잉여열 이용 축열운전을 위한 내부 흡기/배기 댐퍼 개방 및 외부 흡기/배기 댐퍼의 폐쇄 기준 온도는 온실내부 상, 하류 온도센서의 평균값 27°C, 외부 흡기/배기 댐퍼 개방 및 내부 흡기/배기 댐퍼 폐쇄 기준 온도는 평균값 23°C로 설정하였다. 팬코일유닛과 방열펌프의 ON/OFF 기준온도는 19.5/20.5°C로 설정하였으며, 강제환기를 위한 환기팬 가동 및 환기댐퍼 개방 온도는 32°C, 환기팬 정지 및 댐퍼 폐쇄는 태양잉여열 이용 축열운전의 개시 온도와의 간섭을 고려하여 29°C로 설정하였다. 태양잉여열-외기열 선택적 축열식 온실난방 시스템은 상기의 각 운전 조건별 설정값 12개를 제어반에 입력함으로써 축열운전의 전환, 난방, 환기가 모두 자동제어 될 수 있도록 제어반을 제작하였다.

결과 및 고찰

Fig. 5에는 태양잉여열-외기열 선택적 축열식 온실난방 시스템의 축열 및 난방 성능시험 결과를 나타내었으며, 2014년 3월 7일 06시~3월 10일 06시의 3일간의 히트펌프 축열운전 모드, 시스템 난방성능계수, 전기소비량, 응축기토출열량, 댐퍼유로 온도, 축열조 상하부 온도, 온실 내외부 온도, 응축기 입출구 온도차를 각각 나타내었다. 시험기간 중 평균 외기온은 3.7°C, 평균 상대습도는 61%였다. 각 축열운전 모드별 운전시간은 태양잉여열 이용 축열운전은 16시간 40분으로 전체시간의 23.1%, 외기열 이용 축열운전은 22시간 5분으로 전체의 30.7%, 히트펌프 휴지시간은 33시간 15분으로 전체의 46.2%를 차지하였으며 난방시간은 45시간 20분으로 일평균 약 15시간의 난방이 이루어졌다. 태양잉여열 이용 축열 시간은 외기열 이용의 75.5%로 주간의 태양복사로 온실온도가 상승하면 5~7시간 정도 지속하였으며, 히트펌프 휴지는 17시 이후 3시간, 22시 이후 8시간 정도 지속되어 저온시간대의 히트펌프 운전을 제한하는 것이 가능하였다.

축열운전의 거동은 3월 7일 9시 20분까지 외기열 이용 축열이 지속되었으며, 외기온이 -0.5°C에서 5.0°C까지 상승하는 동안 응축기 토출열량은 24.6kW에서 32.3kW까지 증가하여 난방성능계수 역시 2.6에서 3.5까지 상승하였다. 흡기 댐퍼와 외부배기 댐퍼의 흡, 배기 온도차는 평균 2.3°C였으며 응축기 입출구의 수온차는 평균 3.5°C로 나타났다. 난방으로 인한 열량유출로 축열조 온도는 35°C로 유지되었으며 축열조 상, 하부간 온도상승화는 나타나지 않았다.

일출 후 온실 내부온도가 27°C에 도달하여 10시 10분부터 태양잉여열 이용 축열운전이 시작되어 4시간 55분 동안 지속되었으며, 평균 난방성능계수는 3.95로 직전의 외기열 이용 축열의 2.95에 비해 34% 증가하였다. 내부 흡기 댐퍼와 내부배기 댐퍼의 흡배기 온도차는 평균 17.2°C로 히트펌프 증발기를 통과한 10°C 전후의 저온 기류가 내부덕트를 통해 온실로 재유입 되어 온실내부 상류는 최고온도 35°C, 하류는 최고온도 28°C 이내로 온도상승을 억제하였다. 응축기 입출구 수온차가 평균 5.4°C로 일정하였으므로 응축기 토출열량 역시 평균 39.8kW로 일정하게 나타났으며, 외기열 이용 축열의 평균 토출열량 28.1kW 대비 41.6% 증가하여 열생산 능력이 향상되었다. 응축기의 토출열량 증가로 축열조의 유입 열량이 증가하였으며 이는 다시 축열조 상, 중, 하부를 각각 43.4, 42.3, 41°C의 평균온도로 상승화시켜 축열성능 향상에 기여한 것으로 분석되었다. 태양열 이용 축열 시의 전기소비율이 9.3kW에서 11kW로 시간에 따라 증가한 것은 같은 시간 응축기 입구온도가 34.7°C에

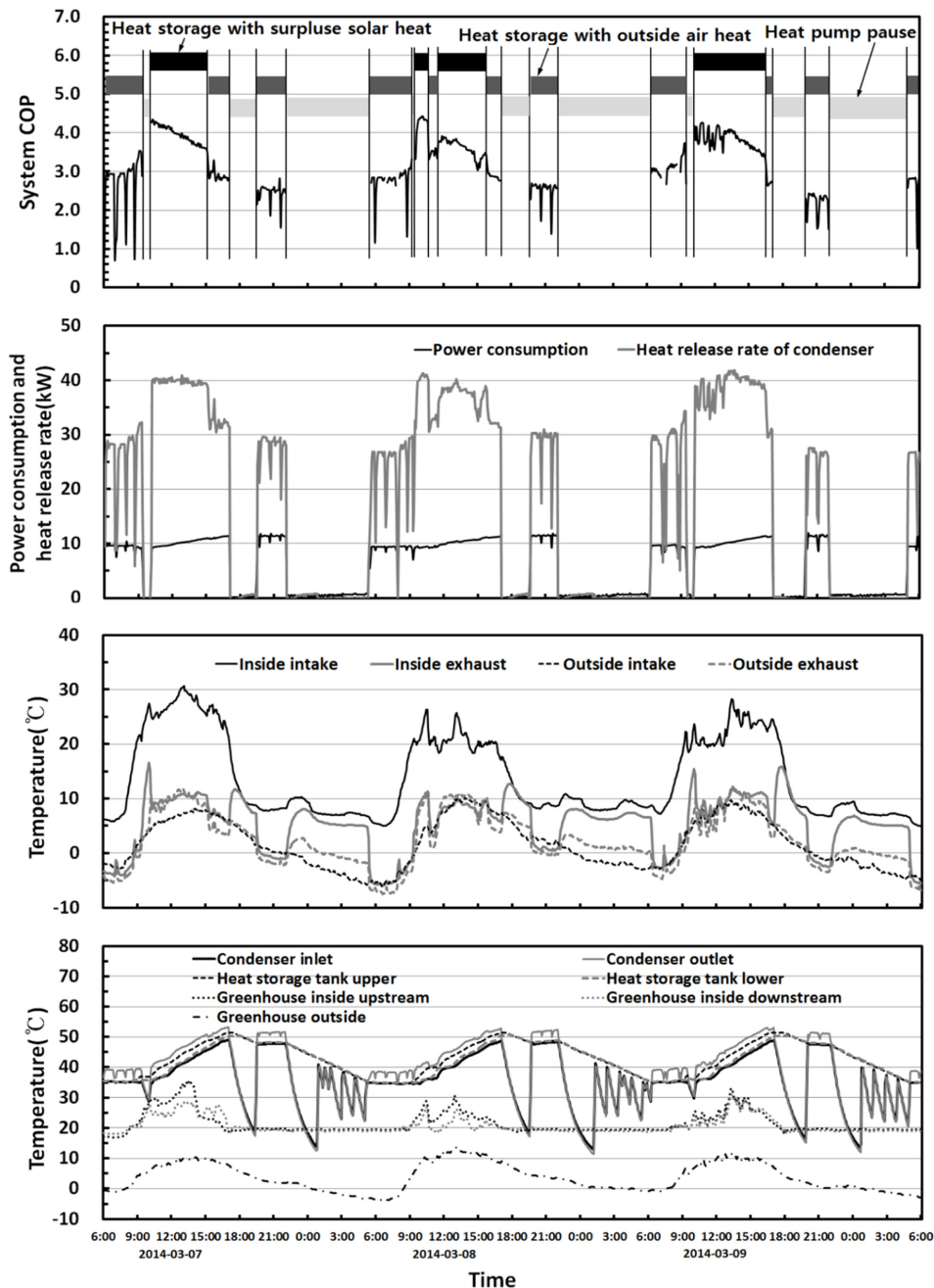


Fig. 5. Heating performance greenhouse climate of operation using surplus solar heat and outside air heat

서 45.7°C까지 상승했기 때문에, 응축기의 열교환 감소로 인한 압축기의 압축부하 증가가 전기소비량을 증가시켰기 때문이다. 상기와 같이 전기소비량은 증가한 반면 응축기 토출열량은 일정하였으므로 난방성능계수는 시간에 따라 감소한 것으로 분석되었다.

태양잉여열 이용 축열은 15시 5분에 온실 내부온도가 23°C로 하강하여 다시 외기열 이용 축열로 전환되어 1시간 45분간 지속되었으며, 이때의 평균 난방성능계수는

2.89로 직전의 태양잉여열 이용 축열보다 1.06 감소하였으며 외부의 저온 공기열을 열원으로 이용함으로써 응축기 토출열량이 39.8kW에서 32.6kW로 약 18.1% 감소했기 때문이다. 이 때 외부흡기 댐퍼와 외부배기 댐퍼의 온도차는 평균 2.7°C였으며 응축기 입, 출구 온도차는 4.2°C였다. 평균 난방성능계수가 상기의 9시 20분까지의 외기열 이용 축열의 3.02보다 낮은 것은 응축기 토출열량은 유사한데 반해 전기소비량이 18% 증가하였기 때문

이다. 이와 같은 전기소비량의 증가는 축열조 온도가 13.8°C 더 높아 응축기 열교환 저하가 압축부하를 증가시킨 효과와 외부 평균기온이 8.3°C 더 높아 증발기의 열교환 증가가 압축부하를 증가시킨 효과가 중첩되었기 때문으로 판단되었다.

이후 16시 50분에 축열조의 온도는 상한 설정온도 52°C에 도달하여 축열운전은 2시간 40분 동안 중단되고 히트펌프는 정지되었다. 히트펌프 휴지 개시와 거의 동시에 온실 내부온도는 난방설정온도 19.5°C에 도달하여 난방을 개시하였으며 19시 30분에 축열조 온도가 17시~22시의 축열조 설정 하한온도인 48°C에 도달하여 축열운전이 개시되었다. 이때 온실 내부온도가 외부 흠배기 댐퍼 개방 기준온도 23°C보다 낮은 19.7°C이므로 외기열 이용 축열모드로 운전되었다. 2시간 30분간 축열운전을 지속한 후 22시~9시까지의 축열조 설정 상한온도 48°C 조건에 따라 22시부터 축열조 온도가 35°C까지 하강하는 3월 8일 5시 35분까지 히트펌프는 휴지하였다.

상기와 같은 태양잉여열-외기열 선택적 축열식 온실난방 시스템의 운전 사이클은 3월 8일과 9일에도 반복되었다. 3월 8일은 5시 35분부터 3시간 35분간 외기열 이용 축열운전이 지속되었으며 외기온이 상대적으로 높아 9시 25분에 온실 내부의 온도가 27°C에 도달하여 태양잉여열 이용 축열운전으로 전환되었다. 1시간 20분 동안의 축열시간 동안 히트펌프에 의한 냉기류 재순환으로 10시 45분에 온실 내부온도가 23°C로 하강하여 외기열 이용 축열운전으로 전환되었다. 온실 내부온도는 11시 25분에 27°C로 다시 상승하여 태양잉여열 이용 축열운전으로 4시간 15분간 운전한 후 15시 40분부터 1시간 20분간, 19시 45분부터 2시간 15분간 외기열 이용 축열운전이 이어졌다. 22시부터 3월 9일 6시 20분까지 8시간 20분 동안 히트펌프 휴지가 지속되었으며 난방은 17시 20분부터 3월 9일 8시 35분까지 14시간 55분간 지속되었다.

2014년 3월 7일 06시~3월 10일 06시의 태양잉여열-외기열 선택적 축열 및 난방 시험에서 온실은 야간에 난방 설정온도를 잘 유지하였으며 최대 난방성능계수는 4.4, 평균 난방성능계수는 3.24로 분석되었다. 또한 태양잉여열 이용 축열운전 시의 평균 난방성능계수는 3.83으로 외기열 이용 축열의 2.77에 비해 38.3% 더 높은 것으로 분석되었다.

태양잉여열-외기열 선택적 축열과 성능비교를 위해 외기열 이용 축열만 단독으로 운전한 축열 및 난방 시험을 수행하였으며, 2014년 4월 4일 06시~4월 6일 06시의 3일간의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험기간 중 평균 외기온은 9.6°C, 상대습도는 59%였으며 태양잉여열-외기열 선택적 축열운전 기간 대비 평균 외기온이 5.9°C 더 높은 조건이었다. 외기열 단독 이용 축열운전은 일반적

인 공기 대 물 히트펌프의 운전을 모사하며 난방, 환기 등의 온도 설정값은 태양잉여열-외기열 선택적 축열운전과 동일하게 설정하였다. 히트펌프의 운전은 축열조 상/하한 설정온도(52/50°C)로 제어하였으며 태양잉여열을 이용하지 않으므로 충분한 난방열량 확보를 위해 축열조의 변온관리는 하지 않았다. 운전시간은 외기열 이용 축열운전은 29시간 5분으로 전체시간의 40.4%, 히트펌프 휴지시간은 42시간 55분을 차지하였으며 난방시간은 43시간 5분으로 나타났다.

외기열 단독 이용 축열운전은 난방 시작 약 1시간 경과 후 개시되어 2시간 정도 가동 후 휴지하며, 외기온이 낮아지는 22시 정도에 다시 1시간~2시간 30분 정도 가동한 후 휴지하였다. 이 후 외기온이 최저온도에 근접하며 축열조의 온도하강 속도가 빠른 약 3시부터 익일 아침의 난방 종료 또는 종료 후 1~2시간 경과 후까지 다시 가동하여 축열운전은 3일간 총 9회 가동 하였다. 외기열 단독 이용 축열 시의 응축기 입, 출구 온도차는 평균 3.7°C, 응축기 토출열량은 평균 25.4kW로 태양잉여열-외기열 선택적 축열운전의 외기열 이용 축열의 평균 응축기 입, 출구 온도차 3.9°C보다 0.2°C 작고 평균 응축기 토출열량 28.4kW보다 3.0kW 작았다. 이는 외기열 단독 이용 축열 시 평균 외기온이 6.5°C로 태양잉여열-외기열 선택적 축열운전의 외기열 이용 축열운전 시의 2.6°C보다 3.9°C 높았음에도 열생산 능력이 낮았음을 의미하며 이는 축열조 설정온도가 높았기 때문으로 판단되었다. 외기열 단독 이용 축열의 평균 응축기 입구온도는 46.7°C, 평균 입출구 온도차는 3.7°C이었으며 잉여열-외기열 선택적 축열운전의 외기열 이용 축열운전은 각각 41.6°C, 3.9°C로 나타나 응축기 열교환의 저하가 발생한 것으로 판단되었다. 따라서 외기열 단독 이용 축열 시의 축열 성능향상을 위해서는 시간별 난방부하를 고려한 축열조 변온관리가 필요한 것으로 판단되었다. 태양잉여열 이용 축열운전이 없으므로 온실내부의 온도는 4월 4일 9시 25분, 14시 50분 및 4월 6일 9시 30분, 13시 10분에 강제환기 상한온도인 32°C에 도달하였으며 환기댐퍼 개방과 환기팬 가동으로 환기가 수행되었다.

각 축열운전 조건별 난방성능계수를 분석한 결과 외기열 단독 이용 축열운전의 평균 난방성능계수는 2.33으로 태양잉여열-외기열 선택적 축열운전 시 성능계수 3.24의 72%(태양잉여열 이용 축열운전 시 성능계수 3.83의 60%, 외기열 이용 축열운전 시 성능계수의 2.77의 84%) 수준인 것으로 분석되었다.

적 요

본 연구에서는 장미 재배온실을 대상으로 온실 내부의

태양잉여열과 외부의 공기열을 선택적 열원으로 이용하여 온실난방용 온수를 생산할 수 있는 공기 대 물 히트펌프의 설계와 성능시험을 수행하였다. 태양잉여열 이용 축열운전과 외기열 이용 축열운전은 작물의 생육적온을 고려한 온실내부의 설정온도에 따라 자동전환 되도록 설계하였다. 제어반에 12개의 기준온도를 설정함으로써 축열운전 전환, 난방, 환기를 자동제어하며, 태양잉여열-외기열 선택적 축열운전에서 축열조의 온도는 축열능력과 난방부하에 대응하여 35~52°C로 3단계 변온제어 하였다. 태양잉여열-외기열 선택적 축열에서 태양잉여열 이용 축열은 전체 시간의 23.1%, 외기열 이용 축열은 30.7%, 히트펌프 휴지시간은 46.2%를 차지하였으며, 난방성능계수는 태양잉여열 이용 축열 시 3.83, 외기열 이용 축열 시 2.77, 전체 3.24로 평가되었다. 비교시험을 위해 축열조 온도를 50~52°C로 항온제어 하는 조건에서 외기열 단독 이용 축열 시험을 수행하였으며 이때의 난방성능계수는 2.33으로 분석되었다. 결과적으로 공기 대 물 히트펌프의 열원으로 온실내부 태양잉여열과 외부 공기열을 병용하고, 축열조 온도를 변온제어 한 결과 일반적인 외기열 이용 축열운전과 축열조 항온제어에 비해 난방성능계수가 39% 향상됨을 확인하였다.

추가 주제어 : 성능계수, 온실환경, 전기소비량, 태양잉여열, 환기

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01195701)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Gracia, J.L., De la Plaza, L.M. Narvas, R.M. Benavente and L. Luna. 1998. Evaluation of the feasibility of alternative energy sources for greenhouse heating. *J. Agric. Engng Res.* 69:107-114.
- Kang, Y.K., Y.S. Ryou, G.C. Kang, Y. Paek, and Y.J. Kim. 2007. Heating performance of horizontal geothermal heat pump system for protected horticulture. *J. of Biosystems Eng.* 32(1):30-36 (in Korean).
- Kawashima, H., M. Takaichi, M. BaBa, K. Yasui and Y. Nakano. 2008. Effects of energy saving and the reduction of carbon dioxide emissions with a hybrid-heating system using an air-to-air heat pump for greenhouse heating. *Bulletin of the National Institute of Vegetable and Tea Science* 7:27-36 (in Japanese).
- Kawashima, H., M. Takaichi and K. Yasuba. 2011. Performance of air-to-air heat pump for tomato greenhouse cooling and reduction of night-cooling load by mulch to control soil heat flux. *Bulletin of the National Institute of Vegetable and Tea Science* 10:95-104 (in Japanese).
- Korean Solar Energy Society(KSES). 2017. Korean standard weather data. http://www.kses.re.kr/data_06/list_hi.php (in Korean).
- Kwon, J.K., G.H. Kang, J.P. Moon, Y.K. Kang, C.K. Kim, and S.J. Lee. 2013. Performance Improvement of an Air Source Heat Pump by Storage of Surplus Solar Energy in Greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 22(4):328-334 (in Korean).
- Lim, M.Y., H.K. Chung, M.S. Son, S.B. Lee, G.J. Kim, B.S. Kim, Y.B. Kim, and B.R. Jeong. 2009. Effect of heating by nano-carbon fiber infrared lamp on growth and vase life of cut roses and heating cost. *Journal of Bio-Environment Control* 18(1):1-8 (in Korean).
- Marsh, L.S. and S. Singh. 1994. Economics of greenhouse heating with a mine air-assisted heat pump. *Trans. of the ASAE* 37(6):1959-1963.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA). 2016a. Greenhouse status for the vegetable grown in facilities and the vegetable productions in 2015. ed. Sejong, Korea (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA). 2016b. Cultivation status of floricultural crop in 2015. ed. Sejong, Korea (in Korean).
- Peak, Y., J.G. Jeon, and N.K. Yun. 2011. Energy saving effect of carbon nano heating pipe for heating of greenhouse. *Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology* 13(3):107-111 (in Korean).
- Ryou, Y.S., Y.K. Kang, G.C. Kang, Y.J. Kim, and Y. Paek. 2008. Cooling performance of horizontal type geothermal heat pump system for protected horticulture. *Journal of Bio-Environment Control* 17(2):90-95 (in Korean).
- Suh, W.M., Y.H. Bae, Y.S. Ryou, S.H. Lee, H.T. Kim, Y.J. Kim and Y.G. Yoon. 2011. Estimation of surplus solar energy in greenhouse(II). *Journal of Bio-Environment Control* 20(2):83-92 (in Korean).
- Tong, Y., T. Kozai, N. Nishioka, and K. Ohyama. 2011. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient performance(COP). *Biosystems Engineering* 106:405-411.
- Willits, D.H. and Y.R. Gurjer. 2004. Heat pumps for the heating and night-cooling of greenhouse crops: a simulation study. *Trans. of the ASAE* 47(2):575-584.