

온실 태양잉여열을 이용한 히트펌프시스템의 난방 성능평가에 관한 실증 연구

전병용¹ · 박윤철[†] · 고광수²

(Received July 27, 2016 ; Revised October 13, 2016 ; Accepted January 19, 2017)

Empirical evaluation of the heating performance by a heat pump system with surplus heat from a greenhouse

Byung-Yong Jeon¹ · Youn-Cheol Park[†] · Gwang-Soo Ko²

요약: 본 연구는 태양일사에 의하여 가열되는 온실상단에 고온의 태양잉여열을 축열조에 축열한 후 이를 이용하여 온실을 난방하는 히트펌프시스템의 실증연구에 관한 것으로 히트펌프시스템은 축열조를 구비하고, 각종 열교환을 위한 판형 열교환기, 팬코일유닛 그리고 부가적인 에너지원으로 태양일사를 직접 집열할 수 있는 태양집열기로 구성되어 있다. 히트펌프시스템은 R410a냉매를 사용하며 일반적인 히트펌프시스템과 마찬가지로 외기열원만으로도 운전될 수 있으며, 온실내부의 설정온도에 따른 제어로직에 따라 외부조작없이 온실상단열의 축열운전, 외기공기에 의한 외기열원 및 축열조의 온수를 히트펌프의 작동 없이 난방하는 다수의 운전방식이 자동적으로 운전되도록 하였다. 개발된 축열식 히트펌프의 현장평가 성능실험을 위하여 제주도 조천리에 있는 100 m² 크기의 온실에 설치하고 10월부터 12월까지 운전하였다. 실증연구 실험을 수행한 결과로써 외기열원을 이용하여 난방 할 경우 난방열량은 19.9 kW의 용량을 얻을 수 있었으며, 온실상단의 잉여열에 의하여 축열조의 온수로 히트펌프운전 없이 직접 난방 할 경우에 난방열량은 21.4 kW로 외기난방과 비슷한 난방용량을 나타내는 것을 알 수 있었다.

주제어: 실증연구, 히트펌프, 태양잉여열, 축열조, 복합열원

Abstract: This study evaluated the heating performance of a hybrid heat pump system. The system was installed in a 100-m² greenhouse to utilize surplus solar energy. A hybrid heat pump system was installed at Jocheon-ri, Jeju Island, for an empirical evaluation of the performance. The system consists of a heat storage tank and plate heat exchangers for several heat exchanges between the greenhouse and heat pump or storage tank. The system uses R410a as the working fluid and is controlled automatically by a defined set temperature of the greenhouse. This system incorporates two kinds of heat sources: outdoor air and a storage tank that collects heat from the topside of the greenhouse. The results showed that the heating capacity was 19.9 kW in the outdoor air source mode and 21.4 kW with direct heating from hot water in the thermal storage tank. These results are very similar to those of a previous study.

Keywords: Empirical study, Heat pump, Surplus solar energy, Heat storage tank, Hybrid heat source

1. 서론

우리나라의 시설원예인 온실의 경영비 중에서 난방비가 차지하는 비중은 30~40%로 선진국의 10~20%에 비하여 매우 높은 수준이다. 난방연료는 그 비중이 감소하고 있으나 아직도 약 90%가 석유류를 사용하고 있어 국제유가변동에 취약한 구조를 가지고 있으며, 농산물의 생산비 중에서 난방비의 비중이 높아 시설농가의 경영압박 요인으로 작용하고 있다[1]. 온실의 난방비 절감을 위한 일환으로 농림축산

식품부는 2010년부터 지열히트펌프를 농어촌 냉난방기 보급대상기종에 포함하여 설치 지원사업을 추진하고 있다[2]. 지열히트펌프 시스템은 초기투자비용이 높다는 단점이 있으나, 연료단가가 유류에 비하여 낮은 전기를 사용하며, 에너지 효율이 높기 때문에 농가의 에너지비용을 절감할 수 있는 장점과 신재생에너지의 이용이라는 환경적인 이점이 있다[3][4].

온실은 태양의 복사에너지를 피복에서의 장파복사 등

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8055-182X>): Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Arail-dong, Jeju-si, Jeju-do, 690756, Korea, E-mail: Ycpark@jeju.ac.kr, Tel: 064-754-3626

¹ Faculty of Applied Energy System, Jeju National University, E-mail: jby9703@naver.com, Tel: 064-754-3606

² Faculty of Applied Energy System, Jeju National University, E-mail: gongvi1@msn.com, Tel: 064-754-3606

을 통하여 내부온도를 상승시켜 작물의 성장을 돕는 것을 목적으로 제작된 것으로 현재까지 작물의 성장에 태양에너지를 이용하는 가장 효율적인 방법으로 사용되고 있다. 최근에는 소극적인 방법으로는 온실의 기밀성 및 보온성이 높이는 온실피복 관련 연구가 다수 진행되고 있으며, 적극적인 방법으로는 다양한 신재생에너지를 히트펌프의 열원으로 사용하는 방안에 대한 연구를 진행하고 있다 [5][6].

온실난방을 위한 히트펌프에 관한 연구로 Nam and Gao [7]는 태양열과 지열을 복합적으로 열원으로 이용하는 히트펌프시스템의 성능예측을 위한 동적 에너지 시뮬레이션을 통해 시스템 성능해석을 하였다. 연구결과로써 축열조를 포함한 개별 시스템의 최적용량 설계와 열원 온도를 고려한 효율적인 운전방법이 시스템의 성능에 중요한 요소임을 제시하였다. 시설원예용 히트펌프의 축열운전과 난방운전이 가능한 히트펌프시스템을 개발한 Jo *et al.* [8]은 시설하우스의 용마루의 고온을 이용하기 위해서는 외기온도 15°C 및 일사량이 270 W/m² 이상이 되어야 한다는 결과를 제시하였다.

온실에 관한 연구로써 Kwon *et al.* [9]은 남부지역의 시설과채류 재배 온실의 보온 및 난방실태조사를 통하여 온실용 난방기는 경유를 이용한 온풍가온이 시설이 대부분이라는 조사결과를 보고하였다. Song *et al.* [10]은 축열과 관련된 연구를 통하여 PCM 축열조와 히트펌프시스템의 난방 효과에 의하여 50~60%의 에너지 절감효과와 이에 상응한 농업환경보존효과를 얻을 수 있다고 하였다.

난방장치에 관한 연구 중에서 태양열과 관련된 연구를 살펴보면 대부분이 집열기의 효율 향상과 관련된 연구이며, 온실구조상 태양열에 의하여 자연적으로 축적되는 열을 이용한다면 집열기의 설치면적 및 초기투자비용을 아낄 수 있다는 연구결과를 제시하였다[11].

본 연구는 이러한 연구결과를 바탕으로 온실 상단에 태양에너지에 의하여 온실내부의 평균보다 4-5°C 정도 높은 고온의 환경이 형성된 용마루의 열을 히트펌프를 이용하여 축열하고, 온실의 난방부하가 발생하였을 경우에 다시 공급하는 히트펌프시스템을 개발하고 이를 실제 온실에 설치하여 겨울철 동안에 운전성능을 현장에서 평가한 연구이다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 실증실험을 위한 히트펌프시스템은 Figure 1과 같으며, 태양에너지 축열을 위한 축열조(Heat storage tank), 온실의 공기와 온수의 열교환을 위한 팬코일유닛(Fan coil unit), 축열조의 중저온의 온수와 냉매의 열교환을 위한 판형 열교환기(Plate heat exchanger) 및 태양열 집열기로 구성되어 있으며, 열교환기 후단의 고온의 공기를 온실에 공급하기 위하여 터보팬을 설치하였다. 자세한 시스템 사양은 Table 1과 같다.

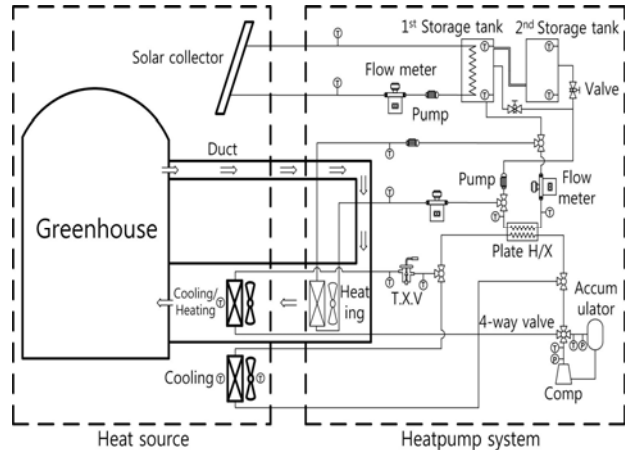


Figure 1: Schematic diagram of the hybrid heat pump system

Table 1: System Specifications

Components	Capacity
Compressor	2.2 kW
Plate heat exchanger	4.5 kW
Turbo Fan	2.5 kW
Heat storage Tank	1,200 Liter

히트펌프시스템의 용량은 3 RT이며, 작동유체는 R410a 냉매를 사용하였다. Figure 2는 실증현장에 설치된 히트 펌프시스템의 사진이며, 전체 크기는 높이가 2.95 m, 폭이 2.44 m 및 길이가 4.87m이다. 태양열 집열기의 면적은 4 m²이며, 집열기 출구의 온수와 축열조의 온수의 온도차이가 일정온도 이상이면 자동적으로 히트펌프와 독립적으로 축열이 이루어지도록 하였다.

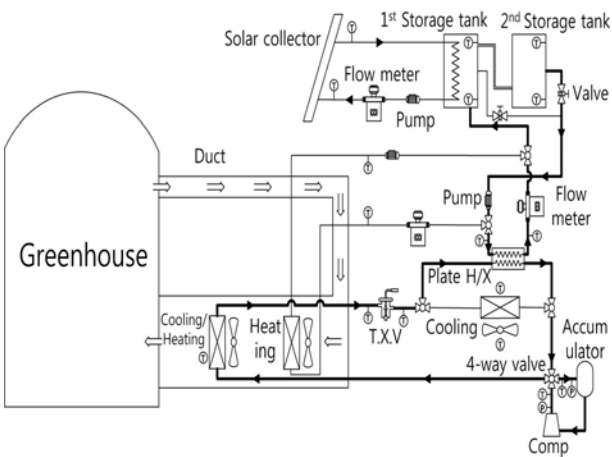


Figure 2: Picture of the system at the test green house

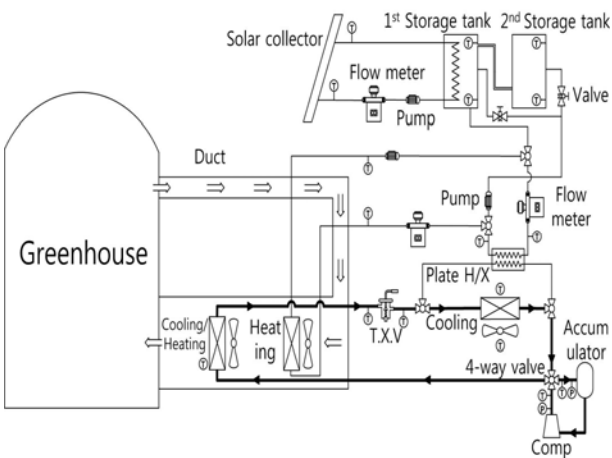
본 연구의 온실 히트펌프시스템은 태양에너지를 두 가지 방식으로 축열하는데 첫 번째는 온실 상단의 용마루에 발생하는 태양일사에너지를 히트펌프를 이용하여 축열조에 저장하는 방법이며, 두 번째는 히트펌프의 운전 없이 난방 시스템 상단에 설치된 태양열 집열기에서 직접 일사되는 태양에너지를 집열하고 차온제어기를 통하여 축열조에 축열하는 방법이다.

히트펌프시스템은 난방부하가 주로 발생하는 야간에는 히트펌프의 작동 없이 주간에 축열조에 저장된 고온의 온수를 온수온도가 40℃까지 감소하는 동안에 직접 팬코일 유닛을 통하여 온실에 공급하는 직수 난방운전을 한다. 이후에 축열조의 온수의 온도가 40℃가 되어 직접난방이 비효율적인 온도에 도달하면 **Figure 3 (a)**에 온수와 냉매의 흐름을 진한 실선으로 나타낸 바와 같이 40℃이하의 온수를 히트펌프의 열원으로 사용하는 축열조열원 난방운전 그리고 **Figure 3 (b)**에 나타낸 바와 같이 일반적인 외부 공기열원 히트펌프운전이 가능한 복합운전 히트펌프시스템이다.

Figure 3 (a)의 축열조열원 난방운전의 경우에 대한 히트펌프 시스템의 냉매흐름을 살펴보면 압축기에서 토출된 고온·고압의 냉매는 덕트에 설치된 Heating Coil에서 온실에서 순환하는 공기와 열교환을 통하여 고온의 공기를 온실에 공급하면서 응축된 냉매는 팽창밸브를 거쳐 판형열교환기로 흐른다. 판형열교환기에서 냉매는 축열조에서 공급되는 온수에서 열을 획득하고 다시 압축기로 순환하게 된다.



(a) Thermal storage heat source



(b) Outside air heat source

Figure 3: Cycle diagram of the heat pump operation

실증연구용 히트펌프시스템은 제주특별자치도 제주시 조천읍 조천리의 높이 3 m, 폭 5 m 및 길이 22 m의 블루베리 온실에 설치하였으며, 10월 30일부터 12월 20일까지 약 두 달 동안 실험을 수행하였으며, 모든 실험자료는 일평균 값을 사용하였다.

히트펌프시스템 배관내부에 전자식 압력센서, T-type의 열전대를 설치하여 구성요소들의 압력 및 온도를 측정하였으며, 실내 온도는 시설하우스의 중간지점인 11 m 및 높이 2m 위치를 평균위치로 선정하여 측정하였다. 시스템의 소비전력은 전력변환기를 사용하였으며, 모든 측정값들을 데이터 로거(Data logger)를 통해 컴퓨터에 자동 저장하였으며 저장된 결과가 원격으로 현장에서 전송되어 연구실에서 자료의 확인이 가능하도록 하였다.

실증용 온실에는 농작물로 블루베리가 생육중이며, 최적의 생육온도인 15℃로 실내온도를 설정하여 온도가 15℃ 이상이 되면 온실용마루에 흡입구가 설치된 덕트를 통하여 고온의 공기를 흡입하여 축열운전을 수행하고, 15℃이하가 되면 난방운전이 수행되도록 제어기를 설정하였다. 장거리의 온실의 공기분배를 위하여 사용한 터보팬의 풍량은 50 m³/min로 일정하게 고정하였다.

히트펌프시스템의 난방열량과 시스템 효율인 COP는 식 (1)과 식 (2)로부터 계산하였다. Q_h 는 난방열량, T_{ducti} 는 덕트입구온도, T_{ducto} 는 덕트출구온도, γ_a 는 공기 비중량, c_p 는 공기 비열 및 q_w 는 팬풍량을 나타낸다.

$$Q_h = (T_{ducti} - T_{ducto}) \times \gamma_a \times C_p \times q_w \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q_h (kW)}{P (kW)} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

히트펌프 시스템을 실증용 온실에 설치한 후 일사가 우수한 임의의 날에 대한 온실내부의 온도변화와 일사량의 변화를 살펴보면 **Figure 4**와 같다. 측정일자는 2015년 10월 31일이며, 오전에는 일사의 태양의 위도변화와 따라서 포물선의 형태로 일정하게 증가하다가 오후 2시경에 최대일사를 나타낸 이후 일사량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대일사를 기록한 이후에는 구름의 영향으로 시간에 따른 일사량의 변화가 매우 크게 나타나지만 일사량의 변화경향은 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 실내온도의 변화는 태양이 뜨기 직전에 낮은 온도를 보이다가 일사가 발생한 이후에 일사량의 변화와 같은 경향으로 서서히 증가한 후 일사량이 최대인 시간이 최고치를 나타낸 후에 감소하지만 태양이 진 이후에도 여열이 장시간 지속되는 것을 알 수 있다.

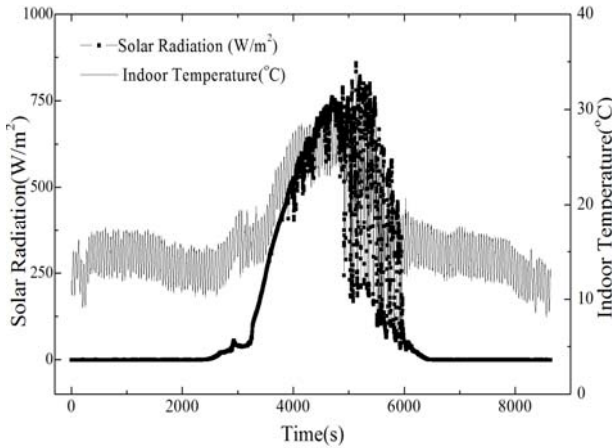


Figure 4: Variation of solar radiation and indoor temperature during a day

3.1 외기열원 히트펌프 운전

온실의 난방부하가 발생하여 온실외부의 공기에서 열을 획득하고 히트펌프를 이용하여 온실에 공급하는 외기난방 운전의 경우에 외기온도의 변화에 따른 온실내부의 온도변화는 Figure 5에 나타난 바와 같다. 이때 전체 운전기간동안의 평균온도를 계산하면 외기평균 온도는 11.2°C이며, 온실의 실내의 평균온도는 15°C로 설정온도를 유지하는 것으로 나타났다. 하지만 x축상의 외기온도에 따른 y축의 실내온도를 살펴보면 외기온도가 10.1°C 이하일 때는 실내온도가 설정온도보다 낮음을 알 수 있으며 이것은 설계된 히트펌프시스템의 난방용량이 부족하였다는 것을 알 수 있다. 이것은 히트펌프시스템의 설계용량에 맞는 면적의 실증용 온실을 선정하지 못하였기 때문이며, 본 연구와 같이 히트펌프시스템 개발을 선행 한 후에 현장평가를 진행할 실증온실을 선택할 경우에 다양한 제약조건이 수반되기 때문이다.

이 경우에 대한 히트펌프시스템의 난방용량과 시스템의 효율인 COP를 살펴보면 Figure 6과 같다. Figure 6에서 난방용량과 COP를 외기온도에 대하여 평균값을 취하였을 때 난방열량은 평균 19.9 kW이고, COP는 6.2이다. 난방열량은 외기온도가 가장 낮은 4.4°C부터 가장 높은 13.9°C까지 최대 30%차이가 났으며, 외기온도의 변화에 따른 히트펌프시스템의 성능변화가 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 겨울철 외기온도가 0°C이하로 낮아질 경우에 히트펌프시스템의 충분한 난방열량의 공급이 이루어지지 않을 수 있다는 것을 알 수 있다.

외기온도 변화에 따른 히트펌프시스템의 사이클 변화와 온실에 공급되는 난방공기의 온도를 살펴보면 Figure 7과 같다. 외기온도가 높을수록 난방공급 온도도 상승하고, 냉매의 고압도 상승하는 것을 알 수 있다. 외기온도가 낮아지면 난방열량의 공급이 감소하고 토출되는 공기의 온도도 하강하여, 온실의 실내온도가 설정치 이하로 강하하면서 냉매의 저압과 고압이 동시에 떨어지게 된다. 이때 외기온도가

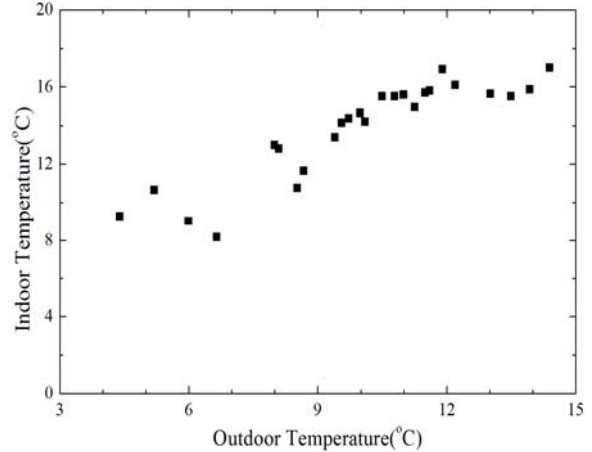


Figure 5: Variation of indoor air temperature with outdoor air temperature

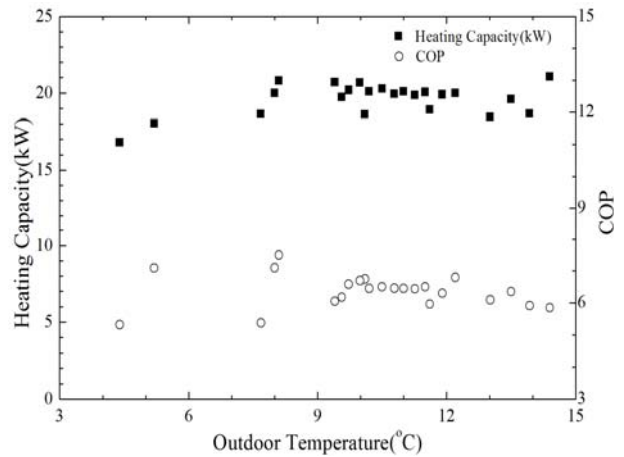


Figure 6: Variation of heating capacity and COP with outdoor air temperature

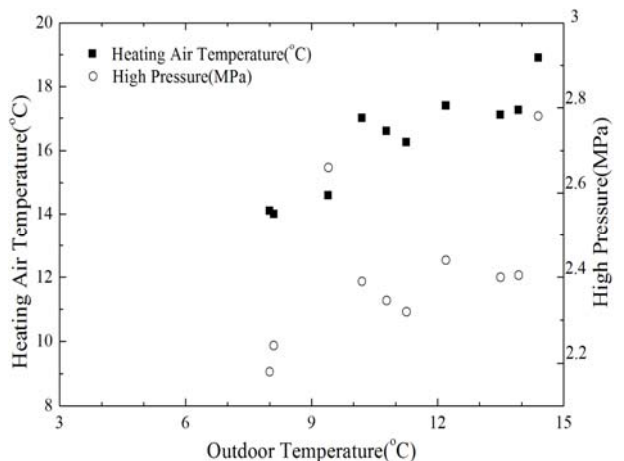


Figure 7: Variation of air temperature and high pressure of the system with outdoor air temperature

강하하면 히트펌프시스템의 COP는 감소하여야 하나 고압측의 압력이 동시에 감소하고 이때 저압측의 압력감소보다 고압측의 압력감소가 더 크게 나타난다. 따라서 저압과 고

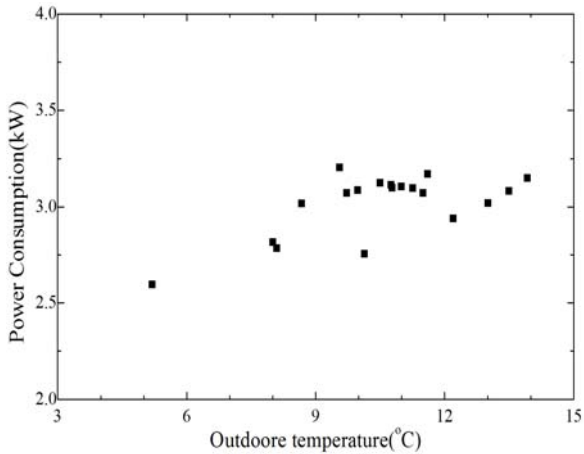


Figure 8: Variation of power consumption with outdoor air temperature

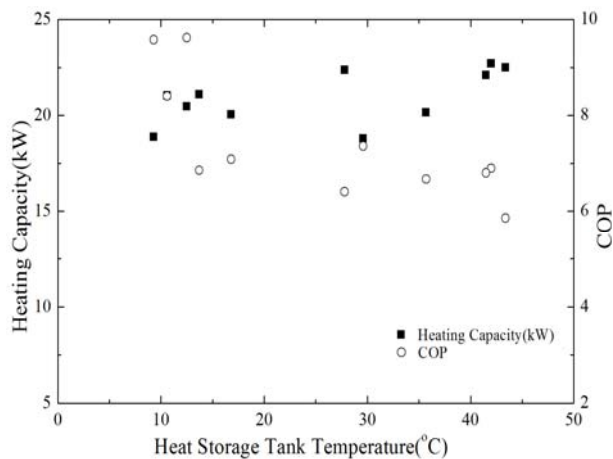


Figure 9: Variation of Heating capacity and COP with heat storage temperature

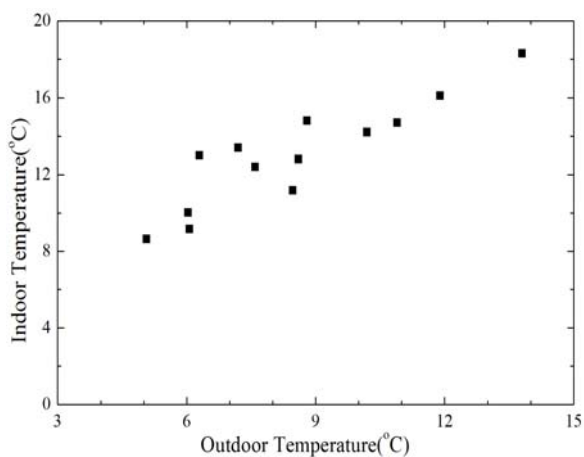


Figure 10: Variation of green house indoor temperature with outdoor air temperature

압의 압력차이가 감소하고 시스템의 난방용량은 감소함에
도 불구하고 Figure 8에 나타난 바와 같이 압축기의 소비동
력의 감소가 더 크게 발생하여 히트펌프시스템의 COP는

오히려 증가한다.

Figure 8의 외기온도가 가장 낮을 때는 2.6 kW, 가장 높
을 때는 3.4 kW의 전력을 소비하며, 운전구간에서의 평균
소비동력은 3.1 kW이다.

3.2 축열조열원 히트펌프 운전

축열조에 저장된 온수를 히트펌프의 열원으로 사용하여
온실을 난방하였을 경우에 시스템의 성능을 살펴보면
Figure 9와 같다. 축열조의 온수의 온도가 높을 경우에 히트
펌프의 냉매사이클에 있어서 고압이 높게 되어 히트펌프시
스템의 COP는 축열조온도가 낮을 경우보다 작게 나타난
다. 이때 평균 COP는 7.4로써 외기열원 열펌프의 6.2보다
높게 나타나며, 평균 난방열량은 21.4 kW로써 외기열원 히
트펌프 운전의 19.9 kW보다 약간 높게 나타났다.

축열조열원 히트펌프운전의 경우에 온실의 실내온도를
외기온도에 대하여 살펴보면 Figure 10에 나타난 바와 같이
온실의 평균온도는 외기열원 히트펌프의 경우와 마찬가지로
15℃를 유지할 수 있으나, 축열조열원 히트펌프 운전의
경우에도 외기온도가 10℃이하로 떨어지게 되면 온실의 실
내온도도 15℃이하가 되어 설정온도를 유지하지 못하는
것으로 나타났다. 본 실험의 경우에 평균외기온도는 9.9℃이
며, 외기열원 히트펌프실험의 경우가 11.2℃이었으므로 거의
비슷한 외기조건에서 실험이 이루어 졌다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 제주도 조천읍 조천리에 위치한 시설원예용 온
실에 복합열원 히트펌프시스템을 설치하여 난방 성능평가에
관한 실증 연구를 진행하였다. 실내온도는 15℃로 설정하여
운전하였고, 외기열원 히트펌프운전 및 축열조열원 히트펌
프운전을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 외기열원 히트펌프운전의 경우 외기온도가 평균 11.2℃
일 때 실내온도는 평균 15℃로 설정온도와 동일하며, 외기
온도가 10.1℃ 이하일 때는 실내온도가 설정온도보다 낮음
으로 난방용량이 부족하며, 평균난방열량은 19.9 kW, COP
는 6.2로 나타났다.
- (2) 축열조열원 히트펌프운전의 경우 히트펌프시스템의 열
원으로 고온의 축열된 온수를 이용하기 때문에 히트펌프
시스템의 평균 COP는 7.4로써 약 20%정도 높게 나타나며,
평균난방열량도 21.4 kW로 약 4%정도 높게 나타났다.
- (3) 본 실증연구에 있어서 현장평가를 실시한 온실에 비하
여 설계된 히트펌프시스템의 용량이 부족하여 온실의 설정
온도를 유지하지 못하였으나, 다양한 열원을 이용하여 온
실난방이 가능함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2016학년도 제주대학교 교원성과지원사업에
의하여 연구되었음.

References

- [1] J. H. Youn, Greenhouse Energy Reduction Guide Book, RDA, 2008 (in Korean).
- [2] Y. S. Ryou, Y. K. Jang, J. K. Kim, Y. H. Kim, J. G. Kim, and G. C. Kang, "Heat exchanger design of a heat pump system using the heated effluence of thermal power generation plant as a heat source for greenhouse heating," *Journal of Bio-Environment Control*, vol. 21, no. 4, pp. 372-377, 2012 (in Korean).
- [3] Y. K. Kang, Y. S. Ryou, J. G. Kim, Y. H. Kim, and J. K. Jang, "Analysis on cooling effects of the vertical type geothermal heat pump system installed in a greenhouse for raising seedling," *Protected Horticulture and Plant Factory*, vol. 22, no. 1, p. 19, 2013 (in Korean).
- [4] J. H. Lim, "Study on the evaluation on the energy and energy performance of heat pump heating and cooling system," *Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 12-16, 2012 (in Korean).
- [5] G. L. Morrison, I. Budihardjo, and M. Bhnia, "Water in glass evacuated tube solar water heaters," *Solar Energy*, vol. 76, no. 1-3, pp. 135-140, 2004.
- [6] S. B. Riffat, X. Zhao, and P. S. Doherty, "Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat pipe solar collector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 5-6, pp. 899-915, 2005.
- [7] Y. J. Nam and X. Y. Gao, "Study on the performance prediction simulation of the heat pump system using solar and geothermal heat source," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 34, no. 3, pp. 75-81, 2014.
- [8] K. H. Jo, Y. C. Park, and G. S. Ko, "A study on the performance evaluation of heat pump system using waste heat in greenhouse," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 335, no. 4, pp. 35-41, 2015 (in Korean).
- [9] J. K. Kwon, Y. H. Choi, D. K. Park, J. H. Lee, K. Y. Kang, and Y. C. Um, "Survey on insulation and heating of greenhouse grown fruit vegetables in southern region," *Korean Society for Horticultural Science*, vol. 17, no. 2, p. 218, 1999 (in Korean).
- [10] H. K. Song, J. G. Ro, J. K. Park, Y. K. Kang, and H. C. Kim, "A study on the heat pump - Latent heat storage system for the greenhouse heating," *Proceeding of Korean Society for Agricultural Machinery*, pp. 113-120, 1997 (in Korean).
- [11] S. A. Kalogirou, "The potential of solar industrial process heat applications," *Applied Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 337-361, 2003.