

시설원예용 지열 및 태양열 이용 하이브리드 히트펌프 시스템의 난방성능에 관한 연구

Study on Heating Performance of Hybrid Heat Pump System Using Geothermal Source and Solar Heat for Protected Horticulture

전종길*† · 이동건** · 백이*** · 김형권*

Jeon Jong Gil*† , Lee Dong Geon** , Paek Yee*** and Kim Hyung Gweon*

(Received 08 October 2015; accepted 30 October 2015)

Abstract : In this study a hybrid heating system based on geothermal source and solar heat was developed in order to save energy for greenhouse heating and its field performance was evaluated. Developed system are composed of following parts: water tank, heat exchanger, heat pump, fan coil unit and heat storage unit. The working performance test was carried out in a greenhouse cultivating oriental orchids being managed by 23°C. Field performance test results showed that average heating coefficient of performance (COP_h) was 3.4 for the period from mid-January to mid-March 2013. Heating coefficient of performance (COP_h) of developed hybrid heat pump system was more sensitive to water tank temperature than outside air temperature. This study showed that developed hybrid heat pump system has a potential to save the heating costs up to 91% compared to conventional agricultural oil heaters.

Key Words : 시설원예(Protected horticulture), 히트펌프(Heat pump), 난방(Heating), 온실(Greenhouse)

기 호 설 명

| | | |
|-------|-------|---|
| | A_f | : 온실 바닥면적 (m ²) |
| | f_w | : 풍속에 의한 보정계수 (1.0) |
| Q | | : 최대난방부하량 (kcal/h) |
| | q_t | : 단위피복면적당 관류열 손실량 (kcal/m ² h) |
| A_s | | : 온실 피복면적 (m ²) |
| | q_w | : 환기에 의한 열손실량 (kcal/m ² h) |

*† 전종길(교신저자) : 농촌진흥청 시설원예연구소
E-mail : jjkfoc@korea.kr, Tel : 055-580-5540
**이동건 : ㈜티알엑서지
***백이 : 농촌진흥청 농업공학부
*김형권 : 농촌진흥청 시설원예연구소

*† Jeon Jong-Gil(corresponding author) : Protected Horticulture Institute, Rural Development Administration(RDA)
E-mail : jjkfoc@korea.kr, Tel : 055-580-5540
**Lee Dong-Geon : TR Exergy Company
***Paek-Yee : Department of Agricultural Engineering, RDA
*Kim Hyung-Gweon : Protected Horticulture Institute, RDA

- q_s : 단위면적당 토양전열량 (kcal/m²h)
- COP_h : 난방성능계수
- P_{HP} : 히트펌프의 소비전력 (kW)
- P_w : 열전달매체의 밀도 (kg/m³),
- V_w : 열전달매체의 유량 (m³/h),
- C_w : 열전달매체의 비열 (kcal/kg·°C),
- $T_{w,i}$: 응축기 입구열전달매체온도 (°C)
- $T_{w,o}$: 응축기 출구열전달매체온도 (°C)

1. 서 론

우리나라의 시설원에 경영비중 난방비가 차지하는 비중은 30~40%로 시설원에 선진국의 10~20%에 비해 높은 수준이다. 이와 같이 난방비가 차지하는 비율이 높기 때문에 농림수산식품부에서는 2010년부터 시설원에 지열보급사업을 추진하고 있으며, 많은 예산을 투입하여 난방에너지 비용 절감에 적극 대처하고 있다¹⁾. 지열히트펌프 시스템은 초기투자비용이 높다는 단점이 있으나, 투입된 에너지에 대해 방출된 에너지의 비가 크기 때문에 에너지 및 에너지비용을 절약할 수 있다는 장점 외에 1대의 장치로 냉방과 난방을 모두 할 수 있다는 장점이 있다.²⁾ 시설원예 분야에서 에너지 절감을 위하여 신재생에너지를 이용한 연구가 추진되어 왔는데 주로 지열, 수열, 공기열 등 단위열원 중심의 냉난방 연구가 진행되어 왔다고 할 수 있다. 최근 시스템의 안정성과 효율성을 높이기 위하여 지열, 태양열 등을 이용한 하이브리드 시스템 이용 기술이 주목을 받고 있다. 하지만, 태양열시스템은 외기에 의한 열손실로 인한 집열효율 저하, 집열시간과 이용시간의 불일치 등의 단점을 가지고 있고, 지열시스템은 지중온도 회복문제를 극복해야 한다.³⁾ 또한 태양열과 지열을 동시에 이용하는 하이브리드 시스템은 시공 및 설계 시 고려사

항이 복잡하고 운전수법이나 지침이 확립되어 있지 않아 보급이 미진한 상황이다.³⁾ 시설원예분야에서 신재생에너지를 이용한 하이브리드 시스템에 관한 연구는 초기 단계이다. 그동안 지열 및 태양열을 이용한 히트펌프 시스템에 관한 연구로는 Nam et al.³⁾은 태양열과 지열을 통합하여 이용하는 히트펌프시스템의 성능예측을 위해 동적 에너지 시뮬레이션을 통한 시스템 성능해석을 실시하여 최적 설계 및 운전 수법 결정을 위해서는 축열조를 포함한 개별 시스템의 용량 설계와 열원 온도를 고려한 효율적 운전수법이 중요하다고 보고하였다. 또한 Jo et al.⁴⁾은 시설원예용 히트펌프의 축열운전과 난방운전이 가능한 히트펌프 시스템을 개발하여 시스템의 제어인자를 파악하기 위하여 성능시험을 수행한 결과 시설하우스의 폐열을 이용하기 위해서는 외기온도 15°C, 일사량 270 W/m² 이상이 되어야 한다는 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 지열, 태양열을 선택적 또는 복합적으로 이용할 수 있는 하이브리드형 히트펌프 난방시스템을 개발하고, 시설원예농가에 실증시험을 실시하여 난방성능을 검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

지열, 태양열 이용 하이브리드 냉난방 시스템은 일정한 용량의 저수탱크내에 열교환기가 설치되고, 지열은 지하수 상태로, 태양열은 축열된 온수가 저수탱크에 주입되면 열교환기, 히트펌프 등에 의한 냉매와 저수탱크의 물이 직접 열 교환하여 냉·난방하는 시스템이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 컴프레서, 증발기, 응축기, 물탱크, 태양열 집열기, 펌프 등으로 구성된다.

현장 실증연구를 위하여 고양시 일산동구의 동양란 재배온실에 난방을 위한 하이브리드 히트펌프 시스템을 Fig. 2와 같이 설치하였으며, Fig. 3은 열교환기가 설치된 동양란재배 시설하우스 전경이다. 온실 난방에 필요한 난방부하량 산정은 온실 피복면적, 바닥면적, 풍속보정계수 및 관류열손실량을 이용하여 산정하여 구하고 있다⁵⁾. 이는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 시험온실에 대한 최대난방부하량도 식(1)을 이용하여 산정하였다. 시험온실의 면적은 1,015 m²이며, 최저외기온은 최근 5년간 겨울철 온도를 고려하여 고양지역의 최저외기온을 -19.0℃로 하였다. 동양란을 재배하는 비닐하우스 내부 온도를 23.0℃를 설정하였을 때 온실 1,015 m²에 필요한 최대난방부하량은 156,006 kcal/h로 나타났는데, 실제 적용시에는 최대난방부하량을 히트펌프의 용량 등을 고려하여 151,200 kcal/h로 설계하였다.

$$Q = [A_s (q_t + q_w) + A_f q_s] f_w \quad \dots (1)$$

Table 1에서 보는 바와 같이 시험온실에 설

치한 히트펌프의 난방능력은 최대 175.8 kW이며, 이는 히트펌프의 냉동톤으로 환산하면 50RT가 된다. 따라서 히트펌프는 Table 2에서 보는 바와 같이 50RT를 25RT의 2대로 제작하여 난방부하의 변화에 따라 가동용량을 변화시킬 수 있도록 하였다. 히트펌프의 난방능력은 냉매 증발온도 -5℃, 냉매 응축온도 50℃, 응축기 입구 물온도 40℃, 응축기 출구 물온도 45℃인 조건에서 설계하였으며, 난방능력은 냉매 증발온도 0℃, 냉매 응축온도 40℃, 증발기 입구 물온도 12℃, 증발기 출구 물온도 7℃인 조건에서 설계하였다. 히트펌프의 증발기와 응축기를 통과하는 유체의 유량과 펌프동력은 Rhees 등(2004)의 보고에 따르면 물-물 히트펌프에서 응축기 또는 증발기를 통과하는 열매체의 온도차 설계기준은 일반적으로 3.0~5.0℃ 정도이며⁶⁾, 본 연구에서는 열매체 온도차를 5.0℃로 하여 열매체 유량을 결정하였다. Table 3은 열매체 온도차를 5.0℃로 하였을 때 50RT 히트펌프의 증발기 및 응축기측 열매체 유량과 펌프동력 설계값을 나타내고 있다.

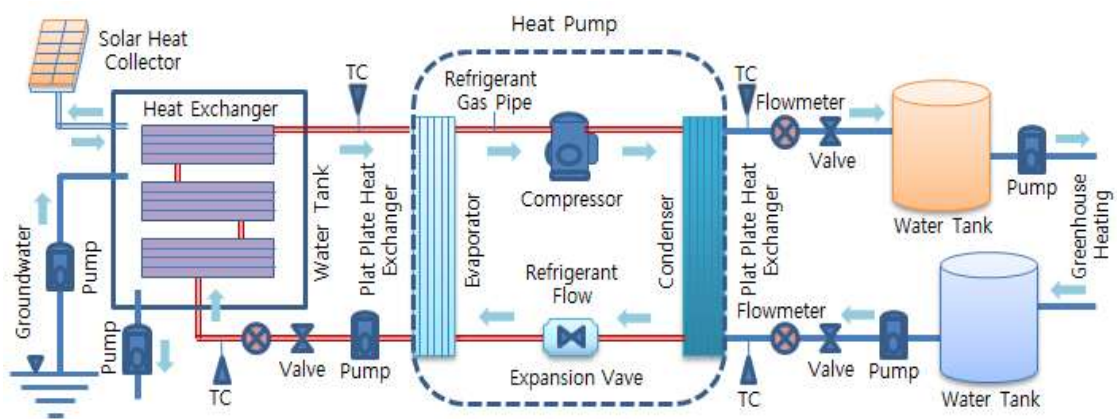


Fig. 1 Schematic diagram of a water-to-water heat pump system with heat exchanger in water tank using geothermal source and solar heat



Fig. 2 System installation view



Fig. 3 Oriental orchids cultivation view

Table 1 Design factors to determine maximum greenhouse heating load

| Lowest outside air temp.(°C) | Greenhouse set temp.(°C) | Greenhouse heating area(m ²) | Maximum heating load of experimental greenhouse(kcal/h) | Maximum heating load of experimental greenhouse(kW) | Heating load per unit area(W/m ²) |
|------------------------------|--------------------------|--|---|---|---|
| -19.0 | 23.0 | 1,015.0 | 156,006.0 | 175.8 | 173.2 |

※ 1kW = 860kcal/h, Maximum heating load of experimental greenhouse: 156,006kcal/h ⇒ 151,200kcal/h, Heat Pump Capacity: 175.8kW ≈ 50RT(1.0RT=3.52kW)

Table 2 Heating and cooling capacity of heat pump system

| Heat pump capacity(RT) | Heating mode | | Cooling mode | | Remarks |
|------------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|---------|
| | Capacity (kcal/h) | Capacity (kW) | Capacity (kcal/h) | Capacity (kW) | |
| 50 | 151,200 | 175.8 | 125,000 | 145 | 25RT*2 |

Table 3 Determination of water flow rate and pump power of heat pump system at 5.0°C difference of inlet and outlet water temperature passing through evaporator & condenser

| Heating pump capacity(RT) | Condenser | | | Heat pump capacity(RT) | Evaporator | | |
|---------------------------|-----------------------|----------|-----------------|------------------------|-----------------------|----------|-----------------|
| | Water flow rate (LPM) | Head (m) | Pump power (kW) | | Water flow rate (LPM) | Head (m) | Pump power (kW) |
| 151,200 kcal/h(50RT) | 500 | 14 | 3 | 125,000cal/h(41RT) | 417 | 14 | 3 |

현장 성능시험은 2013년 1월 15일부터 3월 14일까지 2개월간 난방시험을 실시하였다. 이때 난방시스템의 용량은 저수탱크 40 m³에

히트펌프 151,200 kcal/h 용량을 사용하였으며, 난방성능계수(COP)는 아래 식을 이용하여 산정하였다.

$$COP_h = \frac{P_W \cdot V_W \cdot C_W \cdot (T_{W,O} - T_{W,i})}{P_{HP}} \dots (2)$$

대조구 하우스(1,020 m²)에서는 경유 온풍난방기 150,000 kcal/h 용량을, 처리구 하우스(1,015 m²)에서는 하이브리드 히트펌프 난방시스템을 각각 설치하여 난방성능계수(COP_h) 등을 조사하였다. 이때 온도센서는 백금저항온도계(PT 100Ω)를, 연료소모량은 미소유량계(SSO-8) 및 전자식 전력량계(OMWH-121-A)를 사용하였다. 유류비 산정에 있어 면세 경유 1리터당 가격은 농협중앙회 농협조사월보의 면세경유 공급 동향자료를 근거로 하여 2013년 1~2월 평균 가격인 1,100원을 적용하였다. 일반적으로 농업용 면세경유는 경유 가격의 약 60%를 면세경유 가격으로 책정하고 있는데, 산정방법은 부가가치세 10%, 교통세 375원, 주행세는 교통세의 26%, 교육세는 교통세의 15%로 계산하며, 지역에 따라 면세경유 가격은 다소 차이가 나고 있다. 농업용 전기요금은 기본료(1,150원)에 부가가치세(10%)와 전력기금(3.7%)를 합하여 책정하는데, 농업용 ‘을’의 경우 1kW당 단가는 39.1원이나 기본료 등을 포함하여 kW당 48원을 적용하였다. 월원별 에너지 생산비율은 총에너지 생산량에서 지열의 경우 일일 지하수 사용량과 온도로 산출하였으며, 이때 지하수 사용량은 유량계(DY-MWN-80A)를, 온도는 백금저항온도센서(PT 100Ω)와 온도기록계(YOKOGAWA, MV1024-1-4-4-1-1F)를 이용하였다. 히트펌프에 의한 에너지 생산량은 일일 사용 전력량으로 계산하였으며, 전력은 전자식 전력량계(OMWH-121-A)를 사용하였다. 태양열 사용량은 총에너지 생산량에서 지열과 히트펌프를 제외한 에너지량으로 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난방성능계수(COP_h)

시설원예농가에서 겨울철 2개월간 난방 시험 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 히트펌프에서 생산된 난방 평균 열량이 111,347 kcal/h이었으며, 난방 운전기간 소비전력을 환산한 열량은 32,749 kcal/h으로 나타나 평균 난방 성능계수(COP_h)는 3.4로 나타났다. Fig. 4는 2013년 2월 10일에서 11일의 외기 온도, 온실 내 온도, 히트펌프 COP 등을 나타내는 그래프이다. 이때 외기온이 -15.2℃까지 내려갔을 때 하이브리드 난방시스템이 설치된 난재배 온실의 내부 온도는 21~23℃가 유지되는 것으로 나타났다. 이를 통하여 불 때 시스템의 설계가 적정한 것으로 판단되며, 시스템의 성능 또한 우수한 것으로 나타나 시설원예농가의 작물재배에 도움을 줄 것으로 기대된다.

Table 4 Average COP_h of test period

| Item | Heating |
|----------------------------|---|
| Test period | 2013. 1. 15. ~ 2013. 3. 14 (2months) |
| Consumption Electricity | 32,749 kcal/h ▷heat pump power (32,078 kcal/h) + agitator pump (671 kcal/h) |
| Circulation flow | 200 L/min(12 ton/h) |
| Production energy | 111,347 kcal/h |
| Average COP of test period | 3.4 |

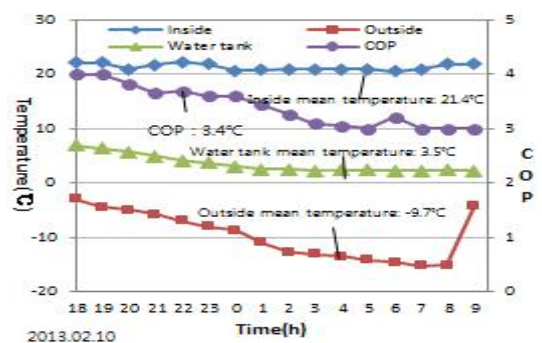


Fig. 4 Temperature graph of experiment greenhouse and COP graph of heat pump on February 10, 2013

3.2 외기온도와 저수탱크 온도에 따른 성능계수

개발된 하이브리드 히트펌프 난방시스템의 난방성능계수(COP_h)에 영향을 줄 수 있는 요인은 저수탱크의 수온, 일사량 및 외기온도 등 이라고 사료된다. 여기서, 저수탱크의 수온은 높을수록 증발기의 열교환량 증가가 압축기의 압축부하 증가를 수반하기 때문에 전기사용량은 증가하나 응축기의 토출열량이 더 크게 증가하므로 전체적으로 난방성능계수(COP_h)는 더 상승하게 하는 요인이 된다. 또한 일사량의 증가와 외기온도의 상승도 태양열 집열기에 의한 저수탱크의 수온을 높이기 때문에 난방성능계수(COP_h)를 높이는 요인으로 작동하게 된다. 본 연구에서는 일사량은 측정 데이터값의 에러로 분석에서 제외하고, 저수탱크의 수온과 외기온도에 대한 난방성능계수(COP_h) 변화에 대하여 분석하였다. Fig. 5는 외기온도에 따른 난방성능계수(COP_h) 관계 그래프이며, Fig. 7은 저수탱크의 수온에 따른 난방성능계수(COP_h) 관계 그래프이다. 분석한 결과 Fig. 6과 8에서와 보는 바와 같이 난방성능계수(COP_h)는 외기온도에 따른 영향보다 저수탱크의 수온에 의한 영향이 약간 높게 나타났다. 외기온도는 인위적으로 관리할 수 없지만 저수탱크의 수온은 관리가 가능하므로 에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 저수탱크 수온을 적정하게 관리하는 것이 중요한 것으로 판단된다. 저수탱크 수온 관리는 낮 동안에 태양열 집열기 또는 온실 내부의 태양 잉여열을 물탱크로 축열시키거나, 지하수를 이용해서 저수탱크에 에너지를 저장하는 방법으로 저수탱크의 온도를 관리할 수 있을 것으로 사료된다.

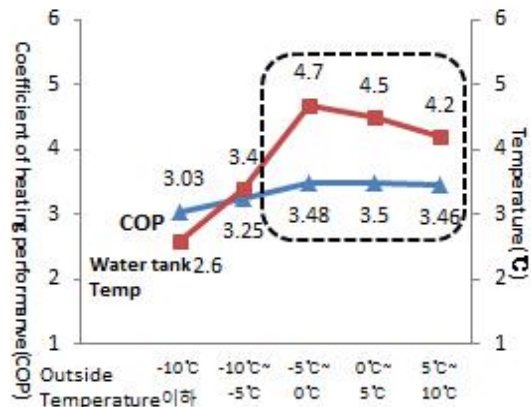


Fig. 5 COP graph according to outside temperature

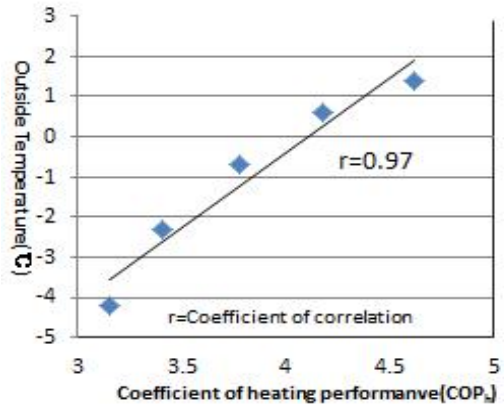


Fig. 6 Coefficient of correlation to COP and outside temperature

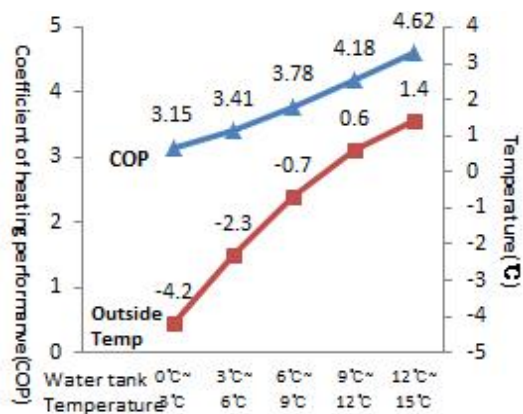


Fig. 7 COP graph according to water tank temperature

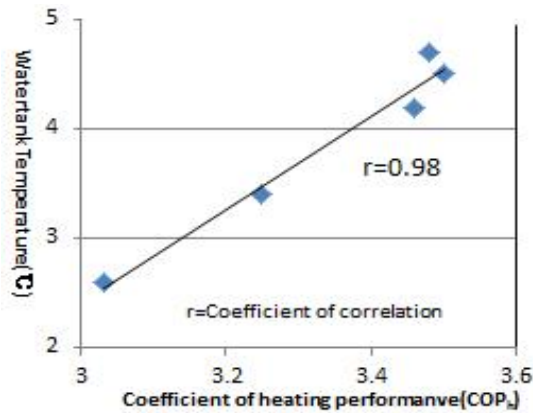


Fig. 8 Coefficient of correlation to COP and water tank temperature

3.3 연료소모량

시험구별 연료소모량은 유류 난방기가 설치된 대조구에서는 면세경유 13,245 L와 830 kW의 전력이 소모됐으며, 개발시스템이 설치된 처리구에서는 26,206 kW의 전력이 소비돼 이를 난방비로 환산한 결과 10a당 대조구에서는 14,609천 원, 처리구에서는 1,258천 원으로 약 91%의 난방비가 절감되는 것으로 나타났다. 이는 고양지역의 겨울철 평균 외기온이 낮고, 난 재배하우스의 난방 관리온도가 23℃로 높기 때문에 난방비 절감효과가 크게 나타난 것으로 사료된다.

Table 5 Fuel consumption of control and treatment plot (Unit : 10a)

| Classification | Control plot (Hot air heater, A) | | Treatment plot (Prototype, B) |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | Fuel Consumption (L) | Electric Consumption (kW) | Electric Consumption (kW) |
| Energy Consumption (L, kW) | 13,245 | 830 | 26,206 |
| Heating cost(1,000Won) | 14,569 | 40 | 1,258 |
| Total (1,000Won) | 14,609(A) | | 1,258(B) |
| Note(B/A) | 0.09 | | |

3.4 기간별 지열과 태양열에 의한 에너지 생산비율

지열, 태양열을 열원으로 하는 하이브리드 히트펌프 난방시스템은 겨울철 시험기간 동안 Fig. 9와 같이 기간에 따라 지열과 태양열에 의한 에너지 생산비율은 큰 차이를 보였다. 1월 중순경에는 지열에 의한 에너지 생산비율이 60% 이상을 차지하다가 3월 초·중순에는 약 15%로 줄어들었다. 반대로 태양열에 의한 에너지 생산비율은 1월 중순경에는 7%에서 3월 초·중순에는 49%로 증가하였다. 이를 통해 볼 때 하이브리드난방 시스템은 계절별로 지열과 태양열에 의한 생산비율이 크게 차이날 것으로 사료된다.

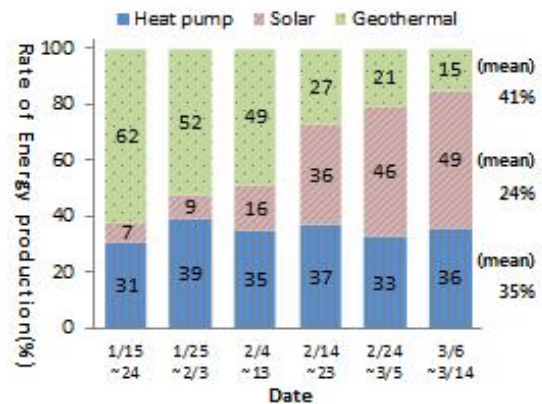


Fig. 9 Energy production rate on test period

Table 6 Energy production rate by geothermal source and solar heat according to weather (Unit : %)

| Classification | Weather | Geo-thermal source | Solar source | Heat pump | Total |
|----------------|----------------|--------------------|--------------|-----------|-------|
| 2013.01.29 | Heavy cloud | 63 | 0 | 37 | 100 |
| 2013.01.31 | cloud | 46 | 20 | 34 | 100 |
| 2013.02.24 | a little cloud | 16 | 50 | 34 | 100 |
| 2013.03.10 | sunny day | 0 | 67 | 33 | 100 |

Table 6에서 보는 바와 같이 구름이 많은 날에는 대부분 지열원에 의해 에너지를 생산하다가 맑은 날에는 태양열에 의한 에너지 생산비율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 온실의 난방 에너지절감을 목적으로 지열, 태양열을 이용하는 하이브리드 난방시스템을 설계 제작하고, 시스템의 성능을 검토하기 위하여 시설원예농가에 실증시험을 실시하였다. 현장 시험결과, 1월 중순부터 3월 중순까지 평균 난방성능계수(COP_h)는 3.4로 나타났으며, 외기 기온이 -15℃ 이하에서 온실 내부 설정온도 23℃에서 온실 내 온도는 21~23℃로 나타났다. 외기 기온과 저수탱크의 수온에 따른 난방성능계수(COP_h)는 외기 기온보다 저수탱크의 수온에 의해 더 민감하게 영향을 받는 것으로 나타나 저수탱크의 수온을 적정하게 관리하는 것이 중요할 것으로 사료된다. 난방비 절감효과에서는 일반적으로 사용되고 있는 유류 난방에 비해 약 91% 난방비가 절감되는 것으로 나타났다. 기간별 지열과 태양열에 의한 에너지 생산비율은 1월 중순경에는 지열에 의해 생산된 에너지 비율이 크게 높았으나 3월 초·중순에는 태양열에 의해 생산되는 에너지 비율이 높게 나타나 태양열을 효율적으로 이용하면 시설작물 재배에 크게 도움을 줄 것으로 사료된다. 시험장소와 지역별 재배작물에 따라 차이가 있겠으나 지열, 태양열을 이용하는 하이브리드 난방시스템은 유류 난방기에 비해 난방비 절감 효과가 크고, 난방성능계수가 우수한 것으로 나타나 시설원예농가의 에너지절감에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ010243022015)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

Reference

1. Y. S. Ryou, Y. K. Kang, J. K. Jang, Y. H. Kim, J. G. Kim, and G. C. Kang, Heat Exchanger Design of a Heat Pump System Using the Heated Effluent of Thermal Power Generation Plant as a Heat Source for Greenhouse Heating, *Journal of Bio-Environment Control*, 21(4), pp. 372-377, 2012 (In Korean).
2. 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).
3. Nam Yu-Jin and Gao Xin-Yang, Study on the Performance Prediction Simulation of the Heat Pump System using Solar and Geothermal Heat Source, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 34(3), pp. 75-81, 2014 (In Korean).
4. Kihyun Jo, Youn Cheol Park and Gwang-Soo Ko, A Study on the Performance Evaluation of Heat Pump System Using Waste Heat in Greenhouse, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 35(4), pp. 35-41, 2015 (In Korean).
5. Y. Paek, J. G. Jeon, H. K. Kim, and N. K. Yun, Development of the Available Energy Model for Regional Resource in Greenhouse, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 16, No. 2, p. 1388, 2014 (In Korean)
6. Rees, S. J., J. D. Spitler, Z. Deng, and C. D. Orio, A study of geothermal heat pump and standing column well performance, *ASHRAE Transactions* 109(1), pp. 3-11, 2004