

## 제습기능을 구비한 열펌프의 성능개선에 관한 연구

### A Study on the Performance Improvement of a Heat Pump System with a Dehumidification Function

고광수(Gwang-Soo Ko)<sup>1</sup>, 김태형(Taehyung Kim)<sup>1</sup>, 박운철(Youn Cheol Park)<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>제주대학교 기계공학과

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received May 28, 2014; revision received September 18, 2014; Accepted: September 19, 2014)

**Abstract** This research developed a hybrid heat pump system with the functions of dehumidification and heating, which uses simulated air that is like underground air, from an environmental chamber as a heat source. The system consisted of three evaporators and three condensers that were installed in series in the air passage, between the underground and load space. As results, the total amount of dehumidification was 2.726 kg/h, and the heating COP<sub>h</sub> was 1.84 at air intake temperature 17°C and relative humidity 70%, which is a similar condition to underground air. We found that the total amount of dehumidification also increased with the air temperature and humidity. The system COP<sub>s</sub> was reached at 2.5, if we include the latent heat of dehumidification in the conventional heat pump system's COP.

**Key words** Geothermal(지열), Heat pump(열펌프), Dehumidification(제습), Series evaporator(직렬증발기)

† Corresponding author, E-mail: [ycpark@jejunu.ac.kr](mailto:ycpark@jejunu.ac.kr)

#### 기호설명

$COP_h$	: 난방성능계수
$COP_s$	: 시스템성능계수
$D$	: 제습량 [kg/h]
$D_L$	: 물의 증발잠열 [kJ/kg]
$Q$	: 건조공기 풍량 [m <sup>3</sup> /h]
$Q_1$	: 가열량 [kW]
$Q_L$	: 제습열량 [kW]
$W$	: 전력량 [kW]
$\chi_1$	: 냉각코일 입구 공기의 절대 습도 [kg/kg]
$\chi_2$	: 냉각코일 출구 공기의 절대 습도 [kg/kg]

#### 그리스 문자

$\delta$  : 건조공기 비중 [kg/m<sup>3</sup>]

## 1. 서 론

최근 에너지 절약 및 대체 에너지 자원확보에 대한 관심이 증가하고 있으며 친환경적인 신재생에너지 개발이 필요함에 따라 정부는 저탄소 녹색성장을 제시하면서 다양한 정책을 수립하고 있으며, 신재생에너지의

보급목표도 매년 증가하는 추세이다.

신재생에너지 중에서도 지열은 2003년부터 체계적인 시스템을 도입하고, 기술 인력이 확보되면서 경쟁력을 바탕으로 한 시장 확보가 가능하게 되었다. 지열 냉난방 시스템의 보급은 연간 100% 이상의 지속적인 성장을 보일 정도로 시장이 확대되고 있다.<sup>(1)</sup>

제주도의 지열시스템의 경우는 다른 지역에 비해 시스템 이용에 한계를 보이고 있다. 이러한 이유 중 하나는 제주지역의 경우, 화산활동에 의해 생성된 지질구조로 토양의 공극이 많고 송이층이나 현무암과 같은 기공을 포함하고 있어 지열을 직접적으로 이용하기에는 타 지역에 비해 열전도 계수가 떨어지는 것이 일반적인 견해이다.<sup>(2)</sup> 따라서 제주도에서는 지하공기 이용의 적극적인 이용방안을 위하여 이에 맞는 히트펌프의 연구와 개발이 필요하다.

이와 관련된 기초적인 조사에 따른 지하 공기의 특성을 살펴보면, 제주도 소재의 애월읍에 위치한 시설원예농가에서 토출되는 지하공기의 온도는 18.8°C이고 습도는 85.5%이며, 다른 소재지인 구좌읍에 위치한 시설원예농가에서는 온도는 18.5°C이고 습도는 85.5%이다. 이를 통하여 제주도 전역의 지하공기 온도와 습도가 비슷한 것을 알 수 있다.<sup>(3)</sup>

지열 히트펌프 시스템은 크게 지중 열교환기, 히트펌프, 부하기기로 구분되어지며 무엇보다도 실제 적용 예정인 현장에서의 설치환경 및 운전 조건이 지열 히트펌프 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 특히 지중 열교환기는 히트펌프의 열원으로써 매우 중요한 요소이며 지열 히트펌프 성능에 큰 영향을 미친다.<sup>(4)</sup>

온실에 지열을 적용한 외국 사례로 Ozener et al.<sup>(5)</sup>은 지열과 태양열을 결합한 온실난방 시스템에 관하여 연구를 수행하였다. Hepbasli et al.<sup>(6, 7)</sup>은 수직 밀폐형 지중 열교환기를 적용한 지열원 히트펌프 시스템의 성능 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Zhao et al.<sup>(8)</sup>은 대체냉매를 적용한 지열원 열펌프시스템의 성능에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

제주도의 지하공기를 이용하기 위하여 Ko et al.<sup>(9)</sup>은 병렬증발 히트펌프 시스템에 관한 연구를 수행하였고, Ko et al.<sup>(10)</sup>은 직렬사이클로 구성된 히트펌프 시스템에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 제주도의 지하공기를 이용하기 위하여 제습기능을 구비한 히트펌프 시스템을 구성하는 과정에서 Ko et al.<sup>(10)</sup>의 3개의 어큐물레이터를 구비한 직렬증발 히트펌프 시스템의 제습량과 난방성능의 개선을 목적으로 연구를 수행하였다.

## 2. 이론관계식

냉동사이클을 이용한 냉각식 제습방법은 가장 일반적인 방법이며 통상적으로 냉각식 제습이라 하면 냉동사이클을 이용한 방법을 일컫는다. 여름철에 가정용 냉방기를 운전하면 실내기에서 응축수가 발생하게 되는데, 이는 실내 공기가 냉각코일을 통과하는 과정에서 실내 공기의 노점온도보다 낮은 냉각코일의 표면과 접촉하여 공기 중의 수분이 응축되기 때문이다.

실내 공기가 냉방기의 냉각코일을 통과하게 되면 초기에는 공기의 온도만이 강하되어 현열만 감소하게 된다.<sup>(11)</sup> 현열만 감소하는 과정을 거친 공기는 포화선을 따라 온도가 강하되면서 공기 중의 수분이 응축되어 현열과 잠열이 동시에 감소하는 과정이 진행된다. 이 과정에서의 실내 공기 중의 수분이 응축된 제습량 D는 식(1)과 같으며 제습열량  $Q_L$ 은 식(2)와 같다.

$$D = \delta \times Q \times (\chi_1 - \chi_2) \quad (1)$$

$$Q_L = D \times D_L \quad (2)$$

냉동기나 열펌프 성능은 성능계수로 표시하고 있다. 이 성능계수 COP(Coefficient of Performance)는 종래의 시험방법에서는 정격 조건에서 얻은 오직 하나만의 고정상수로 성능을 제시하는 방법이다. 동력(W)을 공급

받아 저열원으로부터 열을 흡수하여 고열원으로 방출하므로 열기관과 다르게 그 양부를 판단한다.<sup>(12)</sup> 하지만 냉동기는 열을 흡수함으로써 저열원의 온도를 내리게 하고, 열펌프는 고열원으로 열을 공급함으로써 온도를 높이는 장치의 성향을 띄고 있으며 일반적인 난방성능계수  $COP_h$ 에 대한 관계식은 식(3)과 같으며, 제습성능을 포함한 시스템 성능계수  $COP_s$ 는 식(4)와 같이 성립된다.

$$COP_h = \frac{Q_1}{W} \quad (3)$$

$$COP_s = \frac{Q_1 + Q_L}{W} \quad (4)$$

## 3. 실험장치 및 방법

히트펌프 시스템의 성능실험을 위한 환경을 모사할 수 있는 환경챔버에서 실험을 수행하였다.

열손실을 최소화하기 위하여 두께 150 mm의 단열재를 사용하였고, 챔버 내에 6 kW급 PTC(Positive Temperature Coefficient) 전기히터와 3 kW급 칠러(Chiller)를 설치하여 온도를 조절할 수 있도록 하였고 습도를 조절하기 위하여 가습기와 제습기를 설치하였다.

히트펌프에 모사된 공기를 유입시키기 위하여 5 kW급 모터를 이용하여 덕트를 통해 공기를 흡입하였고 Cord Tester 내에 있는 노즐을 이용하여 유입되는 공기의 상태량과 풍량을 측정하였다. Fig. 1은 지하공기를 모사하고 측정하기 위한 환경챔버의 개략도이다.

온도, 습도 센서를 설치하여 유입되는 공기의 상태를 측정하고 실제 지하공기의 특성을 모사할 수 있게 조절하였고 또한 각각의 응축기와 증발기로 통과하는 공기의 온도, 습도를 측정하였다.

$COP_h$ 에 대한 오차 해석은 센서의 정확도를 기준으로 풍량은 노즐 차압센서가  $\pm 2.0\%$ , 온도는  $\pm 0.5\%$ , 압력은  $\pm 0.5\%$ , 건·습구 온도센서는  $\pm 5.0\%$ , 소비전력은  $\pm 2.5\%$ 를 적용하였을 때  $COP_h$ 오차는 1.2%이다. 본 논문에서 난방성능은 식(3)을 사용하여 계산하였으며, 측정오차는 식(5)와 식(6)에 나타난 바와 같이 1.2%의 오차를 갖는 것으로 계산되었다.

$$COP_{error} = \left( \frac{\dot{Q}_{cond}}{P_{comp}} \right) = (m_{ref} \cdot (h_{cond,out} - h_{cond,i})) / P_{comp} = \bar{X} \quad (5)$$

$$\bar{X} = \frac{\sqrt{(\pm 2.0)^2 + (\pm 0.5)^2 + (\pm 0.5)^2 + (\pm 2.5)^2 + (\pm 5.0)^2}}{5} = 1.2\% \quad (6)$$

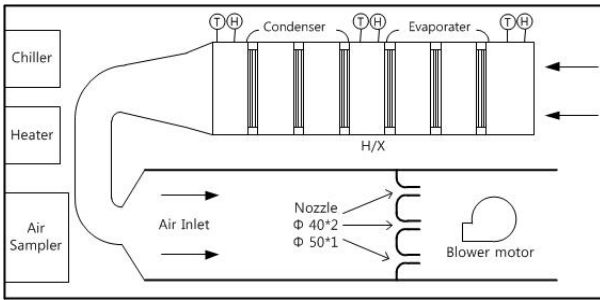


Fig. 1 Schematic diagram of environmental chamber.

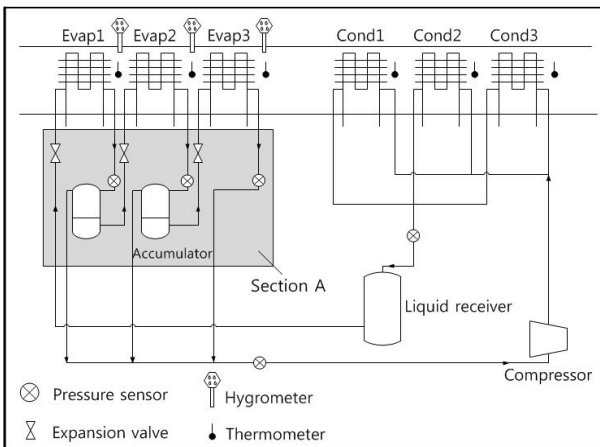


Fig. 2 Schematic diagram of heat pump system.

히트펌프 시스템의 사이클 압력을 측정하기 위하여 압력센서를 냉동사이클의 각각 요소의 배관 내에 삽입하였다. 또한 성능 평가를 위하여 소비전력량을 측정하였고 계측기를 통해 측정된 값들은 30채널의 자료수집시스템(Data logger)을 이용하여 컴퓨터와 네트워크 연결을 통해 실시간으로 데이터를 모니터링하고 저장할 수 있도록 하였다.

제습기능을 구비한 히트펌프 시스템은 지하에서 유입되는 공기의 이슬점온도 및 상태량을 파악하고 냉매의 증발압력을 조절함으로써 증발기에서 제습과정을 거치고, 제습과정 중 온도가 감소한 공기를 응축기로 다시 통과시킨 후 난방에 필요한 온도까지 상승시켜 최대한의 제습과정을 거쳐 실내로 공기를 유입시키는 시스템이다.

히트펌프 시스템은 1 RT급 용량의 증발기 및 응축기를 각각 3개씩 갖춘 시스템을 자체적으로 제작하였고 응축기는 병렬로 연결하였으며 증발기는 직렬로 연결하였다.

직렬증발 히트펌프 시스템을 구성함에 있어 과도한 어큐뮬레이터 사용과 관로의 마찰손실로 인하여 냉매의 흐름에 부하가 발생할 수 있으므로 3번 증발기에는 어큐뮬레이터를 설치하지 않았다. 히트펌프 시스템의 개

Table 1 Experimental conditions.

Inlet air temp (°C)	Relative humidity (%)	Air flow rate (m <sup>3</sup> /min)
15	60/70/80	
17	60/70/80	8.5
20	60/70/80	

략도는 Fig. 2와 같으며, Section A 부분이 Ko et al.<sup>(10)</sup>의 직렬증발 히트펌프 시스템에서 제습량 및 난방성능의 개선을 위해 어큐뮬레이터 1개를 설치하지 않도록 변경된 부분이다.

추출되는 지하공기의 온도가 평균적으로 15~18°C 인 것을 감안하고 날씨변화에 따른 습도의 변화를 고려하여 Table 1과 같은 조건으로 환경챔버 내에서 흡입공기의 건구온도와 습도를 변화·유지시키면서 지하공기를 모사하였다. 실제의 지하 공기 토출시스템의 풍량 범위인 8.5 m<sup>3</sup>/min으로 풍량을 설정하였고 Cord Tester의 내의 있는 2개의 40 mm 노즐과 1개의 50 mm 노즐을 이용하여 풍량을 측정하였고 인버터를 이용하여 풍속을 조절할 수 있도록 하였다.

실험을 수행하기 전에 1~2시간 정도 시스템을 가동하여 정상상태를 유지한 후 실험을 하였고 10분 동안의 평균값으로 데이터를 취득하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 흡입공기온도 및 습도별 제습량

흡입공기온도가 15°C이고 상대습도가 60%일 때 총 제습량은 1.686 kg/h이고 상대습도가 70%일 때 총제습량은 약 52.3% 증가한 2.569 kg/h이다. 또 상대습도가 80%일 때는 60%일 때에 비해 약 63.6% 증가한 2.758 kg/h이다.

흡입공기온도가 17°C이고 상대습도가 60%일 때 총 제습량은 1.807 kg/h이고 상대습도가 70%일 때 총제습량은 약 50.8% 증가한 2.726 kg/h이다. 또 상대습도가 80%일 때는 60%일 때에 비해 약 58% 증가한 2.853 kg/h이다.

흡입공기온도가 20°C이고 상대습도가 60%일 때 총 제습량은 2.238 kg/h이고 상대습도가 70%일 때 총제습량은 약 22.7% 증가한 2.746 kg/h이다. 또 상대습도가 80%일 때는 60%일 때에 비해 약 40% 증가한 3.136 kg/h이다.

흡입공기온도 17°C이고 상대습도가 70%일 때 병렬 증발 히트펌프 시스템에 비해 제습량이 29.4% 증가하였고, 3개의 어큐뮬레이터를 구비한 직렬증발 히트펌프 시스템에 비해 제습량이 20% 증가하였다.

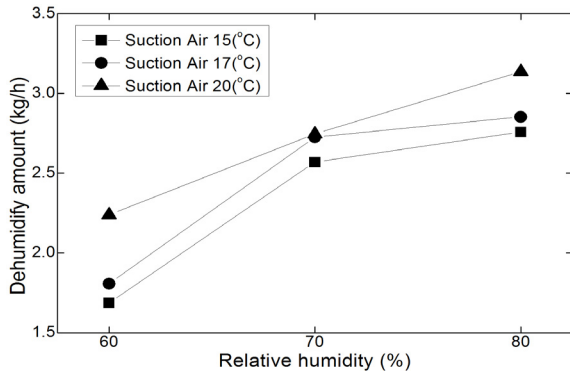


Fig. 3 Total dehumidification amount with the relative humidity variation at each suction air temperature.

온도에 따라 제습량은 다르지만 온도와 습도가 상승할수록 제습량이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 흡입공기 온도별 상대습도에 따른 총제습량을 나타낸 그래프이다.

#### 4.2 흡입공기온도별 토출 공기온도 변화 및 난방 능력

히트펌프 시스템의 난방능력을 계산하기 위하여 흡입공기와 토출공기의 온도를 측정하였다.

흡입공기온도 15°C의 경우, 상대습도가 60%일 때 토출온도는 28.44°C이고 상대습도가 70%일 때 토출온도는 28.74°C이며 상대습도가 80%일 때 토출온도는 29.08°C로 측정되었다. Fig. 4는 흡입공기온도가 15°C일 때 각 단계에서 상대습도별 토출온도 그래프이다.

흡입공기온도 17°C의 경우, 상대습도가 60%, 70% 및 80%일 때 토출온도는 29.82°C, 31.57°C 및 32.29°C이다. Fig. 5는 흡입공기온도가 17°C일 때 각 단계에서 상대습도별 토출온도 그래프이다.

흡입공기온도 20°C의 경우, 상대습도가 60%, 70%, 및 80%일 때 토출온도는 33.79°C, 35.79°C 및 37.93°C로 측정되었다. Fig. 6은 흡입공기온도가 20°C일 때 각 단계에서 상대습도별 토출온도 그래프이다.

1번 증발기의 온도가 2번 증발기의 온도보다 높아 2번 증발기에서 제습이 많이 이루어진 것으로 보인다. 또한 3번 증발기의 온도가 2번 증발기의 온도보다 높으므로 습공기의 상태변화에 따라 습공기가 가열되면 절대습도는 불변이고 상대습도는 떨어지므로 제습량이 극히 적을 것으로 보여진다.

흡입공기의 온도와 습도가 증가할수록 각각의 열교환기 온도과 토출공기의 온도가 증가하는 것을 알 수 있다.

$COP_h$ 를 살펴보면 흡입공기온도가 15°C일 때 난방성능계수는 1.82이고 17°C일 때는 1.84이며 20°C

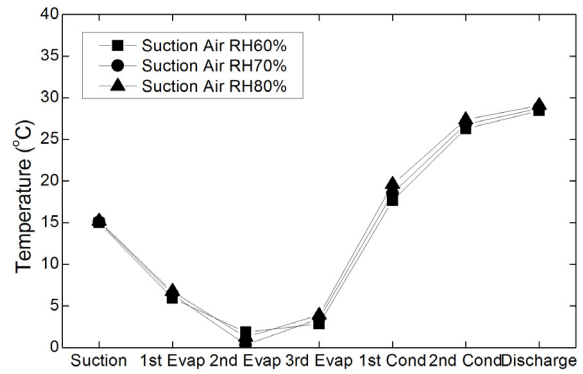


Fig. 4 Air temperature variation that is passing through each heat exchanger(Temperature = 15°C).

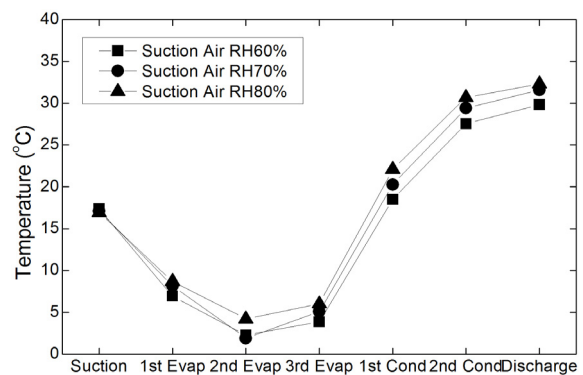


Fig. 5 Air temperature variation that is passing through each heat exchanger(Temperature = 17°C).

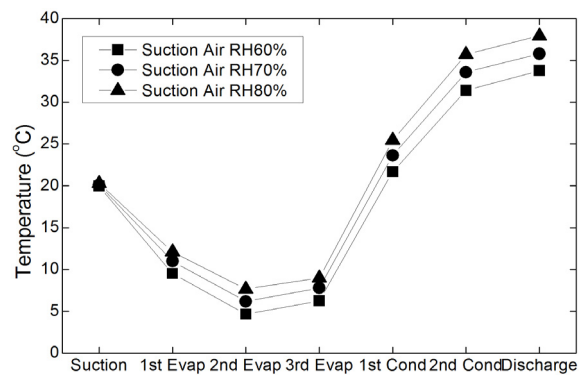


Fig. 6 Air temperature variation that is passing through each heat exchanger(Temperature = 20°C).

일 때는 1.89로 측정되었다.

17°C를 기준으로 비교했을 때 병렬증발 히트펌프 시스템에 비해  $COP_h$ 가 33.7% 감소하였고, 3개의 어큐뮬레이터를 구비한 직렬증발 히트펌프 시스템에 비해  $COP_h$ 가 3.4% 증가하였으나 이는 거의 동등한 수준이라 볼 수 있다. 직렬증발 히트펌프 시스템의 경우 첫

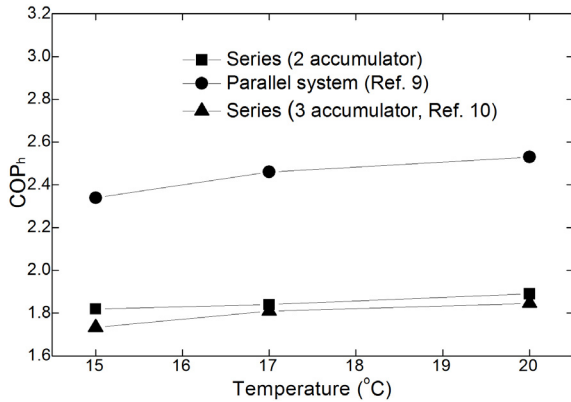


Fig. 7 The average heating  $COP_h$  with variation of suction air temperature.

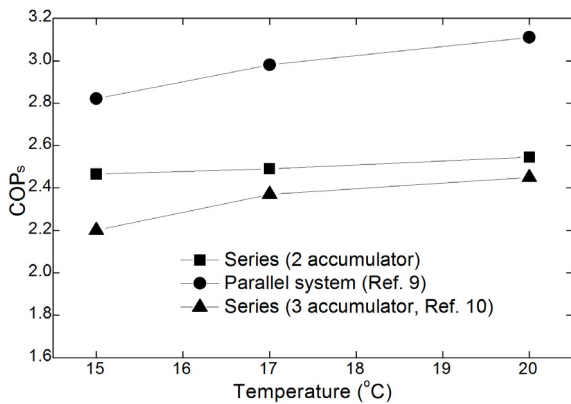


Fig. 8 The average total  $COP_s$  added to the dehumidification performance with variation of suction air temperature.

번째와 두 번째 증발기까지는 액상냉매의 유입이 확실하게 이루어진 반면 세 번째 증발기에 액상냉매의 유입이 이루어지고 있지 않아 병렬증발 히트펌프 시스템의 비해 난방능력이 낮은 것으로 사료된다.

이는 일반적인 난방장치의 난방능력이지만 여기에 제습시스템의 효율까지 더해진다면 일반적인 난방장치의 난방능력보다 높을 것으로 생각되며 난방능력은 흡입공기의 온도가 상승할수록 증가함을 보여주고 있다. Fig. 7은 흡입공기온도별 난방성능계수 그래프이다.

제습능력이 포함된  $COP_s$ 의 경우, 흡입공기온도가 15°C 일 때 평균  $COP_s$ 는 2.47이고 17°C일 때는 2.49이며 20°C 일 때는 2.57로 측정되었다. 이는 일반적인 난방성능계수보다 약 35% 증가한 값이다. 따라서 제습시스템이 전체 시스템의 약 35% 성능을 발휘함을 알 수 있다. Fig. 8은 흡입공기온도별로 제습능력이 포함된  $COP_s$ 를 나타낸 그래프이다.

3개의 어큐물레이터를 구비한 직렬증발 히트펌프 시스템의 경우 두 번째 증발기까지만 제습이 이루어졌으며 그 이유는 과도한 어큐물레이터 사용과 관로의 마찰손실로 인하여 사이클의 부하가 크기 때문이다. 따라서 제습량이 가장 많은 본 연구의 2개의 어큐물레이터를 구비한 직렬증발 히트펌프 시스템이 제습성능을 포함하였을 때 성능이 가장 많이 상승하였다. 따라서 어큐물레이터 1개를 제거함으로써 난방성능은 미미하게 증가하였지만 제습성능이 증가하여 전체적인 성능이 상승함을 알 수 있다

## 5. 결론

지하공기를 열원으로 이용할 때 공기 중의 습도를 제거하고 동시에 난방을 목적으로 하는 직렬증발 히트펌프 시스템을 개발하여 제습량과 난방능력에 대한 실험을 수행하였다. 흡입공기온도와 상대습도에 따른 제습량과 난방능력에 대하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 직렬증발시스템에 유입되는 공기를 지하공기와 가장 유사한 조건인 흡입공기온도 17°C, 상대습도가 70%일 때 총 제습량은 2.726 kg/h이며 온도와 습도가 증가할수록 제습량도 증가함을 알 수 있다.
- (2) 세 개의 증발기에서 제습과정을 거친 공기는 하류의 세 개의 응축기를 지나면서 선형적으로 온도가 상승하며, 직렬증발 히트펌프 시스템의  $COP_h$ 는 흡입공기온도에 따라서 큰 변화는 없으며, 약 1.85의 성능계수를 나타내고 있다.
- (3) 본 연구에서 개발한 직렬증발 히트펌프 시스템을 흡입공기온도 17°C 및 상대습도가 70%에서 병렬증발 히트펌프 시스템과 성능을 비교하였을 때 제습량은 29.4% 증가하였으며, 3개의 어큐물레이터가 설치된 직렬증발 히트펌프 시스템과 비교하였을 때의 제습량은 20% 증가하였다.
- (4) 흡입공기온도가 17°C일 때 병렬증발 히트펌프 시스템과 성능을 비교하면  $COP_h$ 는 33.7% 감소하나, 3개의 어큐물레이터를 구비한 직렬증발 히트펌프 시스템과는 3.4% 정도 차이로 거의 동등의 수준을 나타낸다.
- (5) 제습기능과 난방능력을 포함한 시스템  $COP_s$ 는 흡입공기온도에 따라서 큰 변화는 없으며, 약 2.51의 성능계수를 나타내고 있다.

## 후 기

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제명 : 공기

열, 태양열 등 복합열원 이용 시설원예용 히트펌프 시스템개발, 세부과제번호 : PJ010019)의 지원을 받아 수행되었음.

## References

1. Ko, J. W., Park, Y. C., and Ko, G. S., 2012, The performance evaluation of a ground air source heat for an air conditioning system, Proceedings of the SAREK 2012 Summer Annual Conference, pp. 781-784.
2. Park, Y. C. and Park, S. K., 2008, In-situ performance evaluation of a ground source heat pump for an air conditioning system, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 66-72.
3. Ko, D. G., 2010, A study on heating system applied ground source heat pump(GSHP) for the agriculture, MS thesis, Graduate School of Jeju National University.
4. Kim, J. Y., Jang, J. C., Kang, E. C., Chang, K. C., and Lee, E. J., 2009, A study on analysis of horizontal GSHP system operating for greenhouse, Proceedings of the KSME 2009 Autumn Annual Conference, pp. 2-3.
5. Ozgener, O. and Hepbasli, A., 2005, Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system, Energy and Buildings, Vol. 37, No. 1, pp. 101-110.
6. Hepbasli, A., 2002, Performance evaluation of a vertical ground-source heat pump system in Izmir, Turkey, International Journal of Energy Research, Vol. 26, No. 13, pp. 1121-1139.
7. 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, No. 4, pp. 527-548.
8. 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.
9. Ko, J. W., Park, Y. C., Ko, G. S., 2014, An experimental study on a heat pump with dehumidification function to utilizing underground air heat, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 55-61.
10. Ko, W. B., Ko, J. W., and Park, Y. C., 2014, Study on the development of heat pump system with a multi-stage dehumidification and heating function, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 6, pp. 609-614.
11. Song, Y. H., 1998, Dehumidification by refrigeration, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 548-552.
12. Hong, S. E., 1997, Refrigeration engineering, Sejinosa, pp. 58-59.