

제습기를 이용한 온실 포그냉방시스템의 효율향상

남상운 · 김기성^{1*} · Gene A. Giacomelli¹

충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부, ¹Arizona대학교 농업 및 생물시스템 공학과

Improvement of Cooling Efficiency in Greenhouse Fog System Using the Dehumidifier

Sang Woon Nam, Kee Sung Kim^{1*}, and Gene A. Giacomelli¹

Department of Bioresources Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

¹Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Controlled Environment Agriculture Center, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

Abstract. In order to provide fundamental data on utilization of dehumidifier in greenhouses, a condensing type dehumidifier using ground water as a coolant was developed and tested dehumidification performance. The developed dehumidifier was applied to greenhouse with fog cooling system and effect of dehumidification on improvement of evaporative cooling efficiency was analyzed. Results of the dehumidifier performance test showed that dehumidification using ground water as a coolant was sufficiently possible in fog cooling greenhouse. When the set point temperature of greenhouse cooling was 32°C and as temperatures of ground water rose from 15°C to 18°C, 21°C and 24°C, dehumidification rates decreased by 17.7%, 35.4% and 52.8%, respectively. As flow rates of ground water reduced to 75% and 50%, dehumidification rates decreased by 12.1% and 30.5%, respectively. Cooling efficiency of greenhouse equipped with fog system was distinctly improved by artificial dehumidification. When the ventilation rate was 0.7 air exchanges per minute, dehumidification rates of the fog cooling greenhouse caused by natural ventilation were 53.9%~74.4% and they rose up to 75.4%~95.9% by operating the dehumidifier. In case of using the ground water of 18°C and flow rate of design condition, it was analyzed that whole fog spraying water can be dehumidified even if the ventilation rate is 0.36 exchanges per minute. As a utilization of dehumidifier, it is possible to improve cooling efficiency of fog system in naturally ventilated greenhouses.

Key words : fog cooling system, natural ventilation, dehumidification, evaporative cooling efficiency

*Corresponding author

서 언

우리나라의 기상조건상 여름철의 온실 내부 기온은 과다 상승하기 때문에 작물의 정상적인 생육이 불가능하므로 여름철에 휴경을 하는 곳이 많아 온실의 연간 이용률이 떨어진다. 시설의 유효이용이나 수익성의 측면에서 볼 때, 여름철에 온실 내부 환경의 적정화를 통한 주년재배의 달성은 시설원예의 중요한 과제 중의 하나이다. 지금까지 개발된 하절기의 온실 냉방방법 중에서 증발냉각시스템이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 몇몇 연구자들은 팬 앤 패드시스템이 가장 적합한 것으로 보고하고 있으나, 설치비가 많이 들고 패드

에서 팬 방향으로 온도경사가 생기는 단점을 지적하고 있다(Arbel et al., 1999; Kittas et al., 2003). 이에 비하여 포그시스템은 비교적 경제적이고 온·습도 분포가 균일한 장점이 있으나 분무된 수분이 계속 온실 내부에 누적되므로 적절한 환기가 필요하다(Arbel et al., 2003). 온실의 환기율은 포그시스템의 효율에 가장 큰 영향을 미친다. Kim et al.(2001)의 실험에 의하면 환기율이 분당 0.3회 이하인 경우, 포그시스템을 설치한 온실의 냉각효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 이에 따르면 자연환기 상태에서는 냉각효과를 기대하기 어려우므로 제습기를 이용한 추가적인 제습이나 강제환기 시스템의 도입이 필요하다. 강제환기 시스템의 도

입은 팬 앤 패드 시스템을 설치한 온실과 비슷한 설치비 및 유지비 증가를 초래한다.

또한, 겨울철에는 난방비 절감을 위해 온실의 보온이 필수적인데, 보온 커튼은 시설의 기밀성을 증가시키기 때문에 온실 내부는 다습한 환경이 만들어지게 된다. 다습한 환경에서 작물은 증산이 억제되며, 세균성 병해가 많이 발생하고 수량이 저하되는 문제가 발생한다. 이들 병해는 상대습도가 대략 90% 이상, 작물이 젖어있는 시간이 4.5시간 이상인 조건에서 많이 발생하므로 습도나 젖어있는 시간을 그 이하로 억제하면 완전히 방지될 수 있는 것으로 알려져 있다(Seginer and Kantz, 1989; Kwon, 2002). 그러나 국내에서 온실의 제습에 관한 연구는 많지 않으며, 관행적으로 이루어지고 있는 환기에 의한 제습 이외에 온실에서 제습장치를 이용하고 있는 경우는 거의 없는 실정이다.

제습방법에는 차가운 표면에 수분을 응축시켜서 제습하는 방법(Yun et al., 1998), silica gel 등의 건조제를 이용한 흡습식 제습장치(Brusewitz and Stone, 1987), 열교환기 방식(Yanadori and Hamano, 1994) 등이 있다. 차가운 표면에 수분을 응축시켜서 제습하는 방법은 효율이 떨어지기 때문에 효율을 높이기 위해서 히트펌프를 이용하게 되며, 이로 인하여 비용이 증가하게 된다(Boulard et al., 1989). 흡습식 제습장치를 이용하는 방법은 공업용으로는 가장 많이 이용되고 있으나 독성 있는 재료를 사용하므로 온실 환경에 위험하며, 재료의 재생을 위하여 큰 에너지가 필요하고 시스템이 복잡한 단점이 있다(Campen et al., 2003). Campen et al.(2003)은 실험을 통하여 3가지 제습방식을 비교해 본 결과 열교환기를 갖는 강제환기 시스템이 온실의 제습에 가장 효율적이며 경제적인 것으로 발표하였다.

본 연구에서는 온실에서의 제습장치 이용에 관한 기초 자료를 제공할 목적으로 지하수를 냉매로 하는 열교환기 방식의 제습기를 제작하여 제습 성능을 시험하

고, 포그냉방 시스템을 설치한 온실에 적용하여 제습이 증발냉각효율의 향상에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 제습기

열교환기 방식의 제습기는 냉매 가스를 이용하는 경우가 대부분이지만, 본 연구에서는 경제성을 고려하여 온실에서 많이 이용하고 있는 지하수를 냉매로 사용할 수 있도록 설계하였다.

제습요구량은 온실의 분당 환기회수가 0.3회 일 때 포그냉방 온실의 내부에 누적되는 수분량을 제거할 수 있도록 하였고, 팬의 용량은 1회의 포그 분무 후 분무 정지시간동안 제습공간의 공기를 1회 통과시킬 수 있는 유량으로 하였다(Kim et al., 2001).

팬을 통하여 유입된 공기는 제습기 내의 파이프 사이를 통과하면서 압력손실이 발생하는데 이 압력손실이 팬의 압력손실 값보다 크게 될 경우에는 공기가 파이프 사이를 통과하지 못하는 문제가 발생하므로 이를 고려하여 파이프의 간격을 결정하였다(Kwon, 2002).

열교환 파이프군(tube bank)에서의 전열전달계수, 수분응축량 및 열교환량은 열전달 이론에 따라 해석하였으며(Holman, 1990), 이로부터 필요한 파이프의 전열면적을 구하였다. 열교환기의 재질은 동파이프를 사용하였고, 설계 제작된 제습기의 제원은 Table 1과 같으며, 실험온실의 통로가 60 cm인 것을 고려하여 날개 길이가 35 cm(풍량 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)인 환기팬을 사용하고 같은 크기의 장치를 두 대 제작하였다. Fig. 1은 제습기의 구조를 나타낸 것이고, Fig. 2는 제작된 제습기의 외관을 나타낸 것이다.

2. 제습기의 성능 분석 방법

제습장치의 열교환기 표면에서 공기가 방출한 열량

Table 1. Specification of an experimental dehumidifier

| | | | |
|------------------|--|-----------------------------------|--|
| Fan capacity | $50 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ | Air and water temp. difference | 14°C |
| Fan pressure | 16 mmAq | Overall heat transfer coefficient | $1,028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ |
| Pipe diameter | 9.5 mm | Maximum heat exchange rate | 12 kW |
| Pipe thickness | 0.6 mm | Heat transfer area | 1.3 m ² |
| Longitude pitch | 20 mm | Maximum water flow rate | $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ |
| Horizontal pitch | 20 mm | Maximum condensation rate | $0.3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ |

제습기를 이용한 온실 포그냉방시스템의 효율향상

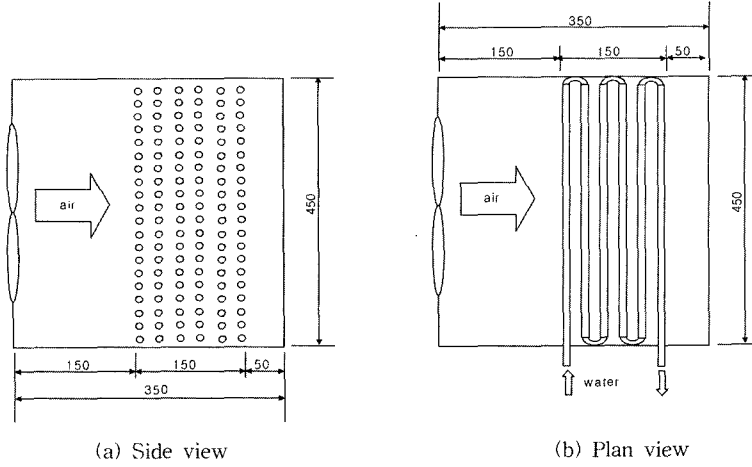


Fig. 1. Structure of dehumidifier (unit : mm).

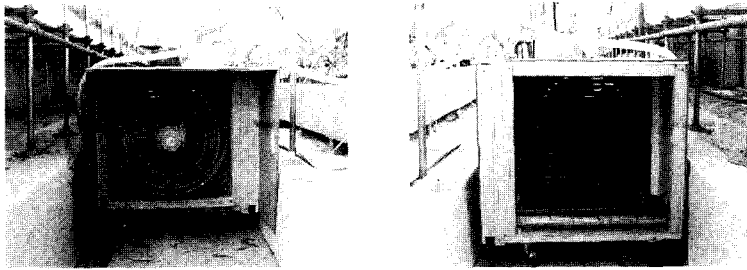


Fig. 2. Pictures of experimental dehumidifier.

$Q_a(W)$ 와 열교환기 내부를 흐르는 지하수가 흡수한 열량 $Q_w(W)$ 는 다음과 같다.

$$Q_a = m_a c_a \Delta t_a + 1000 \lambda m_d \quad (1)$$

$$Q_w = m_w c_w \Delta t_w \quad (2)$$

여기서, m 은 질량유량($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), c 는 비열($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), Δt 는 입구와 출구의 온도차(°C)로서 첨자 a 는 공기, 첨자 w 는 지하수를 나타낸다. m_d 는 수분응축량 즉, 제습량($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)이고, λ 는 물의 증발잠열($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)로서 다음 식과 같이 온도 t (°C)의 함수로 표시할 수 있다.

$$\lambda = 2501 - 2.42t \quad (3)$$

에너지 보존법칙에 의해 Q_a 와 Q_w 는 같아야 하므로 식(1)과 식(2)로부터 이론적인 제습량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$m_d = \frac{m_w c_w \Delta t_w - m_a c_a \Delta t_a}{1000 \lambda} \quad (4)$$

한편, 비등과 응축과정에서는 유체가 일정한 온도를 유지하거나 무한값의 비열을 갖게 되므로 Δt_a 와 용량비 $C(=mc_{\min}/mc_{\max})$ 는 0이 된다(Holman, 1990). 따라서 응축기에서는 물이 최소용량($mc_{\min}=m_w c_w$) 유체가 되고 식(4)는 다음과 같이 된다.

$$m_d = \frac{mc_{\min}}{1000 \lambda} \Delta t_w \quad (5)$$

또한 용량비가 0인 모든 열교환기의 효율과 전달단위수 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\varepsilon = 1 - e^{-N} \quad (6)$$

여기서, 효율 ε 은 열교환기 안에서의 최대온도차에 대한 최소용량 유체 온도차의 비로 정의되며, 실측값으

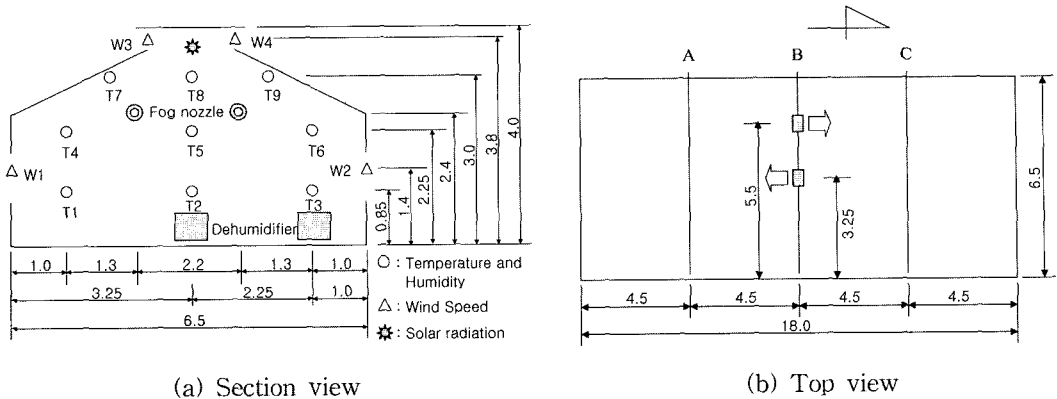


Fig. 3. Dimension of experimental greenhouse and layout of sensors (unit : m).

로부터 식(7)에 의해 구할 수 있다. N 은 전달단위수로 최소용량에 대한 전열전달계수 \times 열교환면적의 비(UA/mc_{min})인 무차원수로 정의된다.

$$\epsilon = \frac{\Delta t_w}{t_a - t_w} \quad (7)$$

3. 제습기의 성능 및 냉각효율 분석 실험

실험은 경기도 안성에 위치한 폭 6.5 m, 길이 18 m, 지붕높이 4 m의 양지붕형 단동 유리온실에서 2002년 6월부터 8월 사이에 실시하였다. 실험 온실의 제원 및 측정용 센서의 배치는 Fig. 3과 같다. 온실의 평균 광투과율은 약 63%였으며, 개폐식 알루미늄 스크린(차광율 70%)이 온실 바닥으로부터 2.3 m 높이에 설치되어 있었다. 온실 바닥면적의 1/2 정도에는 높이 1 m의 벤치 위에 국화가 포트재배 되고 있었으며, 나머지 1/2 정도에는 초장 2 m의 토마토가 암면재배 되고 있었다.

본 실험에 사용된 계측장치는 온·습도 센서, 풍속 및 일사 센서, 데이터 수집장치로 구성되어 있다. 온실 내부의 온도와 상대습도는 온실을 Fig. 3의 (b)와 같이 길이방향으로 세 단면(A, B, C)으로 나누고 각 단면별로 상·중·하부로 나누어 온·습도 센서를 Fig. 3의 (a)와 같이 배치하여 10초 간격으로 데이터를 저장하였다. 온실 벽면 및 차광막, 바닥온도와 엽온은 중앙 단면인 B단면에 T형 열전대를 설치하여 측정하였다. 풍속은 B단면의 측창과 천창에 미풍속센서를 설치하여 온실의 길이방향에 수직으로 불어오는 바람에 대하여 일방향 풍속(x-velocity)을 측정하였다. 실내의 태양복사에너지는 온실 바닥으로부터 3.2 m 높이에 일사

센서를 수평으로 설치하여 측정하였다. T형 열전대, 미풍속 센서 및 일사센서에 의해 측정된 데이터는 디지털 다점 기록계를 이용하여 1분 간격으로 저장하였다. 외부 기상자료는 미기상 수집장치를 실험온실로부터 10 m 떨어진 위치에 설치하여 측정하였다. 또한 비교 분석을 위해 실험온실 바로 옆에 위치한 동일한 규모의 온실을 대조구로 선정하여 내부의 미기상환경을 측정하였다.

실험에 사용된 포그노즐은 분무압력 $70 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 일 때 분사거리 0.9 m, 최대 분사폭 0.75 m이고, 노즐의 개당 분무유량은 $0.094 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 이며, 분무입자의 크기는 $20 \mu\text{m}$ 정도이다. 노즐의 분사거리와 분사폭을 고려하여 온실 양쪽 측벽으로부터 2.3 m, 바닥으로부터 2.4 m 높이에 1 m간격으로 총 32개의 포그 노즐을 배치하였다. 분사방향은 수직 상향으로 하였으며, 포그시스템 가동시간은 오전 10시부터 오후 4시까지로 하였다. 포그시스템 가동조건은 무차광의 경우 분무시간 45초, 정지시간 45초, 차광의 경우 분무시간 25초, 정지시간 45초로 하였다(Kim et al., 2001).

제습기는 온실 내 B단면에 작업통로가 있는 부분인 온실 동쪽 벽에서 각각 3.25 m와 5.5 m인 위치에 2대를 설치하였다. 제습기의 공기 유입부와 유출부에도 온·습도센서를 설치하여 제습기 유입 전과 후의 공기의 온·습도 변화를 측정하였다. 또한 지하수가 흐르는 파이프의 유입부와 유출부에 T형 열전대를 설치하여 수온을 측정하였으며, 응축기 바닥에 물통을 설치하여 집적된 물을 1시간 간격으로 회수하고 전자저울을 이용하여 제습량을 측정하였다.

제습기에 관한 실험은 크게 두 가지로 나누어 수행하였다. 먼저 제습기에 유입되는 지하수량을 변화시키면서 제습기의 성능시험을 실시하였고, 그 다음은 제습이 포그 시스템의 냉방효율 향상에 미치는 영향을 실험하였다. 포그 냉방시 제습기의 효과는 차광과 무차광 상태로 나누어 실험을 실시하였다. 제습기의 지하수량은 설계시 $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 이었는데, 실험 온실에서 이용 가능한 최대유량이 $30 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 이었기 때문에 제습기 1대당 $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 씩 총 $30 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 으로 설정하였다.

결과 및 고찰

1. 제습기의 성능 분석

제습이 가능한 지하수 온도와 온실의 환경조건을 알아보기 위하여 건구온도와 상대습도에 따른 노점온도의 변화를 구해본 결과는 Fig. 4와 같다. 온실의 냉방 목표온도를 32°C 로 설정하고 18°C 의 지하수를 냉매로 사용할 경우, 상대습도 45% 정도까지도 수분응축이 일어나고, 상대습도 70% 정도에서는 냉매의 온도가

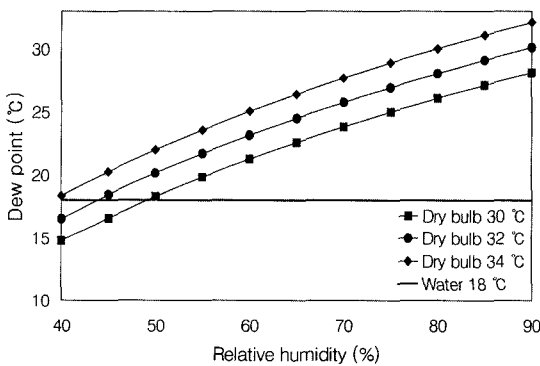


Fig. 4. Dew point temperatures according to dry bulb temperature and relative humidity.

25°C 일 때에도 수분응축이 일어나므로 지하수를 이용한 제습은 충분히 가능한 것으로 판단된다.

Table 2는 지하수 유량 변화에 따른 제습기 성능을 실험한 결과이다. 제습기의 열교환 효율은 지하수 유량 $10 \sim 15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 에서 62.7~69.9%로 나타났다. 지하수 유량 $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 에서의 실측 제습량은 평균 $0.162 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 로서 이론적인 제습량에 대하여 87.1%의 제습율을 보였고, 지하수 유량 $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 에서는 평균 $0.093 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 로서 80.4%의 제습율을 보였다. 실험에 사용한 지하수 온도가 $21.7 \sim 23.0^\circ\text{C}$ 로서 제습기의 출구에서는 $24.9 \sim 25.7^\circ\text{C}$ 로 계속되어 수분응축이 일어나지 않는 조건도 일부 발생하였을 것으로 생각되며, 실험조건외의 제한으로 인하여 설계조건인 지하수 유량 $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 에 대한 실험은 할 수 없었으나 대체로 이론적인 분석과 유사한 결과를 보이는 것으로 판단되었다.

Fig. 5는 지하수 유량 및 제습기를 통과하는 공기와 제습기에 공급되는 지하수의 온도차에 따른 제습량의 변화를 이론적으로 분석한 결과이다. 냉방 온실의 기온을 32°C 로 설정하고 지하수 온도 18°C 일 때의 제습

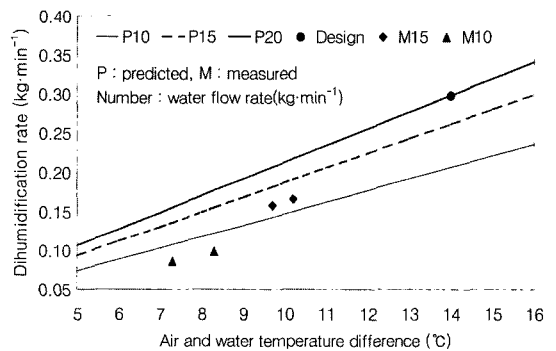


Fig. 5. Change of dehumidification rate according to water flow rate and temperature difference between air and ground water.

Table 2. Comparison of the predicted and measured dehumidification rate

| $m_w c_w$ ($\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) | t_a ($^\circ\text{C}$) | t_w ($^\circ\text{C}$) | Δt_w ($^\circ\text{C}$) | N | ε of heat exchanger | | m_d ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$) | | Remark |
|---|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------|---------------------------------|-----------------------|---|----------|--------|
| | | | | | predicted ^a | measured ^b | predicted ^c | measured | |
| 1,400 | 32.0 | 18.0 | 8.6 | 0.954 | 0.615 | - | 0.298 | - | design |
| 1,050 | 31.4 | 21.7 | 6.1 | 1.272 | 0.720 | 0.629 | 0.181 | 0.158 | 87.3% |
| 1,050 | 32.1 | 21.9 | 6.4 | 1.272 | 0.720 | 0.627 | 0.191 | 0.166 | 86.9% |
| 700 | 29.9 | 22.6 | 5.0 | 1.909 | 0.852 | 0.685 | 0.108 | 0.086 | 79.6% |
| 700 | 31.3 | 23.0 | 5.8 | 1.909 | 0.852 | 0.699 | 0.122 | 0.099 | 81.1% |

note) a : equation (6), b : equation (7), c : equation (5)

량을 100%로 가정할 때 지하수 온도가 21°C, 24°C로 높아지면 제습량은 각각 78.5%, 57.4%로 줄어드는 것으로 나타났다. 반면에 15°C의 지하수를 냉매로 사용할 경우에는 121.5%로 증가하는 것으로 나타나 지하수 온도가 제습기의 성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 한편, 지하수 유량을 75%, 50%로 줄이면 제습량은 각각 87.9%, 69.5%로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 이용 가능한 지하수량이 제한될 경우에는 유량을 반으로 줄이고 제습기를 2대 사용하는 것이 더 유리할 것으로 판단되며, 이용 가능한 지하수 유량과 온도가 제습기의 설계에 중요한 인자가 됨을 알 수 있다.

2. 제습이 포그시스템의 냉각효율에 미치는 영향

Table 3은 차광 및 무차광 상태에서 제습이 포그시스템의 냉각효율에 미치는 영향을 실험한 결과를 요약

한 것이다. Fig. 6은 무차광 조건하에서 포그냉방 시스템과 제습기를 함께 가동한 경우의 실험온실 내부 및 외부, 대조구 온실의 온습도 변화를 나타낸 것이고, Fig. 7은 제습기를 가동하지 않고 포그냉방 시스템만 가동한 경우의 변화를 나타낸 것이다.

무차광 상태에서 제습기를 가동하고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 동안 온실 내부의 평균온도가 30.3°C이고, 외부의 평균온도는 31.2°C, 대조구 온실의 평균온도는 35.2°C인 것으로 나타났다. 냉방시간 동안 온실 내부의 평균습도는 61.9%, 외부의 평균습도는 60.5%인 것으로 나타났다. 이때의 외부 일사량과 풍속은 각각 $706 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다. 제습기를 가동하지 않고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 동안 온실 내부의 평균 온도가 31.0°C이고, 외부의 평균온도는 30.2°C, 대조구 온실의 평균온도는 33.5°C인 것으로 나타났다. 냉방시간 동안 온실 내부의 평균습도는

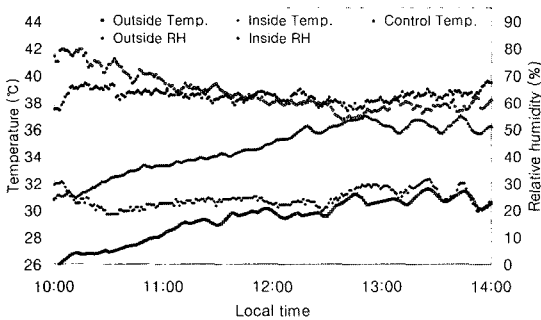


Fig. 6. Change of temperature and humidity in the fog cooling greenhouse with dehumidification.

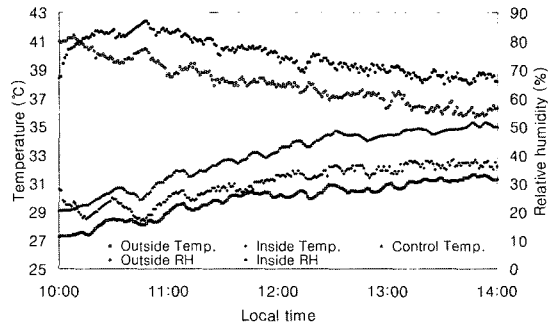


Fig. 7. Change of temperature and humidity in the fog cooling greenhouse without dehumidification.

Table 3. Summary of experimental results on greenhouse fogging with dehumidification

| Shading | | No | | Yes | |
|--|------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|
| Fogging | | 45 seconds ON - 45 seconds OFF | | 25 seconds ON - 45 seconds OFF | |
| Dehumidification | | Yes | No | Yes | No |
| Solar radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | | 706 | 758 | 700 | 758 |
| Wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | | 0.8 | 1.0 | 0.4 | 0.8 |
| Average temperature (°C) | Outside | 31.2 | 30.2 | 31.3 | 31.2 |
| | Cooling(a) | 30.3 | 31.0 | 31.1 | 31.5 |
| | Control(b) | 35.2 | 33.5 | 34.4 | 35.9 |
| | (b)-(a) | 4.9 | 2.5 | 3.3 | 4.4 |
| Average humidity (%) | Outside(c) | 60.5 | 62.7 | 62.5 | 54.7 |
| | Cooling(d) | 61.9 | 73.4 | 63.1 | 59.6 |
| | (d)-(c) | 1.4 | 10.7 | 0.6 | 4.9 |

73.4%, 외부의 평균습도는 62.7%인 것으로 나타났다. 이때의 외부 일사량과 풍속은 각각 $758 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다.

제습기를 가동한 경우, 온실의 내부 기온이 대조구 온실에 비하여 4.9°C 낮았고, 외부 기온 보다 0.9°C 낮게 나타났다. 제습기를 가동하지 않았을 때는 대조구 온실보다 2.5°C 낮았고, 외부 기온 보다 0.8°C 높게 나타나 제습기에 의하여 온실내 기온 하강의 효과가 있었음을 알 수 있다. 습도의 경우는 제습기를 가동하였을 때 온실 내부의 습도가 외부의 습도 보다 1.4% 높은 것으로 나타났고, 제습기를 가동하지 않았을 경우에는 온실 내부의 습도가 외부 습도 보다 10.7% 높은 것으로 나타났다. 외기의 습도가 두 실험 간에 큰 차이가 없다는 것을 고려하면 제습기에 의하여 온실 내부 습도가 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 제습기를 사용하지 않은 실험에서 온실 내부 온도는 시간이 지날수록 점점 증가하는 현상을 보이고, 습도는 외기의 습도 보다 상당히 높은 수준으로 유지되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 제습기를 사용한 경우에는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 온실 내부 온도가 거의 일정하게 나타나고, 습도도 거의 일정한 수준으로 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 제습기를 이용하여 온실의 습도를 일정수준으로 조절할 수 있으며, 제습에 의하여 포그 시스템의 냉방 효율을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

차광 상태에서 제습기를 가동하고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 중 온실 내부의 평균 온도가 31.1°C 이고, 외부의 평균온도는 31.3°C , 대조구 온실의 평균온도는 34.4°C 인 것으로 나타났다. 냉방시간 중 온실 내부의 평균습도는 63.1%, 외부의 평균습도는 62.5%인 것으로 나타났다. 이때의 외부 일사량과 풍속은 각각 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다. 제습기를 가동하지 않고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 중 온실 내부의 평균 온도가 31.5°C 이고, 외부의 평균온도가 31.2°C , 대조구 온실의 평균온도가 35.9°C 인 것으로 나타났다. 냉방시간 중 온실 내부의 평균습도는 59.6%, 외부의 평균습도는 54.7%인 것으로 나타났다. 이때의 외부 일사량과 풍속은 각각 $758 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다.

제습기를 가동하였을 경우, 온실 내부의 온도가 대조구 온실의 온도보다 3.3°C 낮게 나타났고, 외부 온

도보다는 0.2°C 낮은 것으로 나타났다. 반면, 제습기를 가동하지 않았을 경우는 대조구 온실의 온도보다 4.4°C 낮았고, 외부온도보다는 0.3°C 높은 것으로 나타나 제습기를 가동하였을 경우 온도하강 효과가 있었다고 판단되지만 무차광 조건에 비해서 큰 차이를 보이지 않았다. 습도의 경우에는 제습기를 사용하였을 경우에 온실 내부의 습도는 외부보다 0.6% 높은 것으로 나타났고, 제습기를 사용하지 않았을 경우의 온실내부 습도는 외부보다 4.9% 높은 것으로 나타났다. 두 실험 조건 사이에 외부 기온이 비슷하고, 제습기를 가동하지 않은 경우에 풍속이 더 높아서 환기가 더 잘 되었다는 것을 고려하면 제습기에 의해 냉방효율이 높아진 것으로 판단된다.

제습기와 포그 시스템을 갖춘 온실에서의 수분평형은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho V \frac{dw_i}{dt} = S + ET - \frac{m}{60} \rho V (w_i - w_o) - m_d \quad (8)$$

여기서, ρ 는 공기의 밀도($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V 는 온실의 용적(m^3), w_i 와 w_o 는 온실 내부 및 외부의 습도비($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S 는 분무량($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), ET 는 증발산량($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), m 은 환기회수(회 $\cdot \text{min}^{-1}$), m_d 는 제습량($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)이다.

온실 내부 기온을 32°C 로 설정하고, 외부 습도 55%, 분무 조건은 무차광 실험 조건과 동일하게 45초 분무, 45초 정지, 증발산량과 제습량은 없는 것으로 가정하고, 초기조건으로 내외습도차를 각각 0, 5, 10%로 설정하여 식(8)을 시뮬레이션 하였다. Fig. 8은 시뮬레이션 결과 환기에 의한 제습율(환기제습량/분무량)을 내외습도차와 환기율의 변화에 따라 나타낸 것이다.

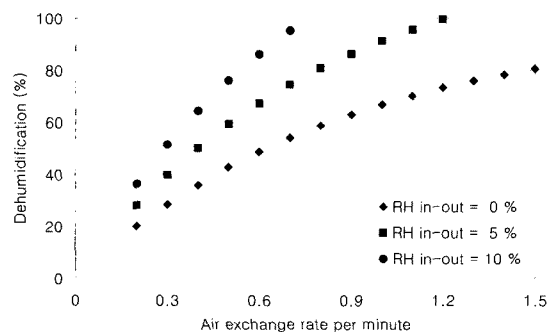


Fig. 8. Dehumidification possibilities according to ventilation rate and humidity difference between inside and outside.

Hellickson and Walker(1983)는 단동 온실에서 풍속이 0.6~0.9 m·s⁻¹일 때 환기율이 0.68~0.75 회·min⁻¹ 정도인 것으로 보고하였다. 본 실험에서도 비슷한 풍속이므로 최대 환기율을 0.7 회·min⁻¹ 정도로 가정하고, 내외습도차를 0~5%로 유지할 경우 환기에 의한 제습율은 53.9~74.4% 정도로서 완전한 제습이 이루어지지 못하게 된다. 더욱이 환기율이 이보다 낮아 0.3 회·min⁻¹에서는 제습율이 28.4~39.8% 정도밖에 되지 않아 환기에 의한 제습을 기대할 수 없으므로 포그냉방 온실의 습도는 계속 높아지고, 냉방효율은 계속 떨어질 수 밖에 없다. 환기율이 0.3 회·min⁻¹ 이하에서 포그 시스템의 냉방효과는 거의 없다고 한 Kim et al. (2001)의 실험결과가 이를 뒷받침 한다. 이를 극복하기 위해서는 강제환기 시스템의 도입이 필요하고, 이는 팬 앤 패드 시스템의 경우와 비슷한 비용 증가를 초래한다(Arbel et al., 2003). 본 실험 조건에서 45초 분무, 45초 정지시 가습량은 2.256 kg, 제습량은 0.486 kg으로 제습기에 의한 제습율은 21.5%였다. 이는 자연환기 상태에서 53.9~74.4% 정도인 포그냉방 온실의 제습율을 제습기를 사용함으로써 75.4~95.9% 정도까지 높인 것으로 생각할 수 있다.

제습기 설계값과 같은 유량과 18°C의 지하수를 사용할 경우 제습율은 39.6%까지 높아질 수 있다. 이 경우 내외습도차를 10%로 유지하면 환기율이 0.36 회·min⁻¹정도에서도 포그시스템에 의한 분무량을 완전히 제거할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 제습기를 이용하여 자연환기 온실에서의 포그 냉방 효율을 충분히 높힐 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 온실에서의 제습장치 이용에 관한 기초 자료를 제공할 목적으로 지하수를 냉매로 하는 열교환기 방식의 제습장치를 제작하여 제습성능을 시험하고, 포그냉방시스템을 설치한 온실에 적용하여 제습이 증발냉각효율의 향상에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

제습기 성능실험 결과 지하수를 냉매로 이용할 경우 포그냉방시스템을 적용한 온실의 제습은 충분히 가능한 것으로 확인되었다. 냉방 온실의 기온을 32°C로 설정할 때 냉매인 지하수의 온도가 15°C에서 18, 21,

24°C로 높아지면 제습량은 각각 17.7%, 35.4%, 52.8% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지하수 유량을 75%, 50%로 줄이면 제습량은 각각 12.1%, 30.5% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 지하수를 이용한 제습기의 설계에 있어서 이용 가능한 유량과 온도가 중요한 인자임을 알 수 있다. 포그냉방 온실에 제습기를 설치함으로써 뚜렷한 냉방효율 개선을 확인할 수 있었다. 환기율 0.7 회·min⁻¹ 정도의 자연환기 상태에서 포그냉방 온실의 환기에 의한 제습율은 53.9~74.4%였으며, 제습기를 가동할 경우 75.4~95.9%까지 높아졌다. 제습기 설계유량과 18°C의 지하수를 사용할 경우 0.36 회·min⁻¹ 정도의 환기율에서도 포그시스템 작동으로 인하여 발생하는 분무량을 완전히 제거할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 제습기를 이용하여 자연환기 온실에서의 포그 냉방 효율을 충분히 높힐 수 있을 것으로 판단되었다.

주제어 : 포그냉방시스템, 자연환기, 제습, 증발냉각효율

인 용 문 헌

1. Arbel, A., O. Yekutieli and M. Barak. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* 72:129-136.
2. Arbel, A., M. Barak and A. Shklyar. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering* 84(1): 45-55.
3. Boulard, T., A. Baille and J. Lagier. 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *J. Agric. Engng Res.* 44: 191-204.
4. Brusewitz, G.H. and M.L. Stone. 1987. Microcomputer controlled desiccant dehumidifier. *Transactions of the ASAE* 30(2):459-463.
5. Campen, J.B., G.P.A. Bot and H.F. de Zwart. 2003. Dehumidification of greenhouses at northern latitudes. *Biosystems Engineering* 86(4):487-493.
6. Hellickson, M.A. and J.N. Walker. 1983. Ventilation of Agricultural Structures. *American Society of Agricultural Engineers.* p.323-344.
7. Holman, J.P. 1990. Heat transfer seventh edition. McGraw-Hill Pub. Co. pp. 493-596.
8. Kim, M.K., K.S. Kim and H.J. Kwon. 2001. The cooling effect of fog cooling system as affected by air exchange rate in natural ventilation greenhouse. *J. Bio-Env. Con.* 10(1):10-14 (in Korean).

9. Kittas, C., T. Bartzanas and A. Jaffrin. 2003. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering* 85(1):87-94.
10. Kwon, H.J. 2002. Development of CFD model to control humidity in greenhouse. M.S. thesis. Seoul National University (in Korean).
11. Seginer, I. and D. Kantz. 1989. Night time use of dehumidifiers in greenhouses. *J. Agric. Engng. Res.* 44 :141-158.
12. Yanadori, M. and M. Hamano. 1994. Dehumidification in the greenhouse by the ventilation type dehumidifier with heat-flow controllable heat exchanger. *Solar energy* 53(1):117-123.
13. Yun, N.K., M.K. Kim and S.W. Nam. 1998. Dehumidification and evaporative cooling efficiency by water pipes in greenhouse. *J. Bio. Fac. Env.*, 7(3):237-245 (in Korean).