

일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 이용한 온실 냉방

남상운^{1*} · 김영식²

¹충남대학교 지역환경토목학과, ²상명대학교 식물산업공학과

Greenhouse Cooling Using Air Duct and Integrated Fan and Pad System

Sang-Woon Nam^{1*} and Young-Shik Kim²

¹Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Department of Plant Science and Technology, Sangmyung University, Cheonan 330-720, Korea

Abstract. The fan and pad evaporative cooling system is one of the main cooling methods in greenhouses. Its efficiency is very high, but it has some disadvantages as temperature gradient in greenhouse is large. This study was conducted to reduce the internal temperature gradients in the fan and pad cooling greenhouses. Experiments on cooling performance were carried out in a greenhouse equipped with air duct and integrated fan and pad system as an idea of this study. It showed that the cooling efficiency of an integrated fan and pad system was 75.7% in the first stage and 88.6% in the second stage. When this cooling system was operated for an unshaded and a shaded greenhouse, there were cooling effects of 5.7~7.6°C and 7.4~9.7°C to the control greenhouse, respectively. Maximum temperature differences in a cooling greenhouse, with a length of 18m, were 1.6~1.7°C for shaded conditions and 2.3~2.7°C for unshaded conditions. This greenhouse cooling method, with air duct and integrated fan and pad system, can reduce about 40~50% of the internal temperature gradients in the usual fan and pad cooling greenhouses.

Key words : air duct, greenhouse cooling, integrated fan and pad system, natural ventilation, temperature gradient

서 언

여름철의 온실 내부 기온은 과다 상승하기 때문에 작물의 정상적인 생육이 불가능하므로 여름철에 온실에서 작물을 재배하기 위해서는 냉방이 필수적이다. 다양한 온실 냉방방법들이 제안되고 있으며, 차광과 자연 환기가 가장 일반적인 온실의 고온극복 방법이지만 충분한 냉방효과를 거둘 수는 없다. 냉동기를 이용한 기계적인 냉방은 경제성이 없기 때문에 냉방부하가 작은 야간냉방이나 약광 작물의 재배에만 사용이 한정되고 있다. 증발냉각 시스템은 지금까지 개발된 온실 냉방 방법 중 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며 증발 냉각 시스템에는 여러 가지 방식이 있으나 최근에는

팬 앤 패드 시스템과 포그 시스템이 가장 일반적으로 사용되고 있다(Arbel 등, 1999, 2003; Kim 등, 2001a, 2001b; Lee와 Kim, 2011). 그 중에서도 팬 앤 패드 시스템은 역사도 길고 온실냉방에서 비교적 많이 이용되고 있으며, 그 효율도 매우 높다. 하지만 이 방법은 온실의 온도분포가 불균일하고 설치비와 유지비가 많이 드는 단점이 있다(Kittas 등, 2001; Nam, 2005). 우리나라 여름철 고온기의 온실 경작 실태조사에 의하면 21.6%의 시설재배 농가가 휴경하고 있고, 경작농가도 증발냉각 시스템을 설치하는 등 적극적인 냉방을 실시하는 농가는 거의 없으며 단지 경작 농가의 2.2%만이 팬 앤 패드 시스템을 설치하고 있는 것으로 보고하였다(Kim 등, 2001b). 시설 투자가 낮은 온실의 경우에는 여름철에 휴경하면서 토양소독 등을 실시하고 작기 전환으로 활용하여도 문제가 없지만 시설 투자가 높은 온실의 경우에는 주년안정생산을 목

*Corresponding author: swnam@cnu.ac.kr
Received July 19, 2011; Revised August 17, 2011;
Accepted August 25, 2011

표로 적극적인 냉방이 필요하다.

Nam(2005)은 냉각효율 측면에서 팬 앤 패드 시스템이 더 안정적인 것으로 보고하고 있으므로 온도 경사가 심한 단점을 개선하면 팬 앤 패드시스템의 도입도 적극적으로 검토할 수 있을 것으로 판단된다. ASAE(1997)와 Kittas 등(2003)에 의하면 패드와 팬 사이의 거리는 30~45m가 적당하고 60m를 넘으면 바람직하지 못한 것으로 제시하고 있으나, Nam 등(2005)의 실험에 의하면 28m 떨어진 경우의 온도차가 최대 10°C 정도로 나타나고 있으며 패드로부터의 거리에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 보고하고 있어 30~45m도 적당한 거리라고 하기에 무리가 있다. 환기율을 높이고 차광을 하면 온도경사를 줄일 수 있으나 환기를 증가는 한계가 있으며 차광은 작물에 따라 광합성을 저해하는 요인이므로 해결책이 될 수 없다.

따라서 온실의 한쪽 벽에 패드를 설치하고 반대쪽 벽에 팬을 설치하여 가동하는 팬 앤 패드시스템의 온도경사 문제를 극복하기 위한 목적으로 팬·패드 앤 덕트 시스템을 구상하였다. 온실의 외부에 일체형 팬 앤 패드 시스템을 갖추고 온실의 상부에 에어 덕트를 설치하여 냉각된 공기를 공급하면 온실 길이방향의 온도경사를 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 설치한 온실의 냉방 실험을 통하여 냉방성능을 분석하였다.

재료 및 방법

실험온실은 대전에 설치된 폭 5.6m, 길이 18m의 아치형 단동 플라스틱 온실로 측고 1.8m, 둥고 3.5m이다. 온실냉방은 일체형 팬 앤 패드 증발냉각기를 온실의 외부에 설치하고 온실 상부에 설치한 에어 덕트를 이용하여 온실 내부에 냉풍을 공급하도록 시스템을 구성하였다(Fig. 1). 에어 덕트는 광을 차단하지 않도록 직경 35cm의 투명 폴리에틸렌 필름 튜브를 이용

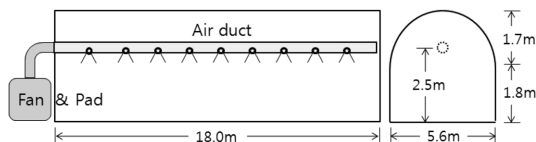


Fig. 1. A schematic of greenhouse cooling using air duct and integrated fan and pad system.



Fig. 2. An integrated fan and pad system for use in experiment.

하였으며 지상으로부터 2.5m의 높이에 설치하였다. 위치는 온실의 중앙 작물군락 상부에 설치가 편리한 높이를 택하였다. 송풍구는 덕트 중심에서 좌우 45도 각도로 직경 6cm의 원을 60cm 간격으로 뚫었다.

일체형 팬 앤 패드 증발냉각기는 H사에서 제작한 Hi-cool(KC-500)을 사용하였다. Fig. 2에서 보는바와 같이 정육면체 모양의 4측면에 0.5×0.5m의 패드를 장착하여 총 1.0m²의 패드 면적을 확보하고 상부에 팬을 장착하여 덕트로 송풍할 수 있도록 구성되어 있다. 증발냉각기의 펌프 유량은 20~50l·hr⁻¹이고 소비 전력은 250W이다. 증발냉각기의 팬은 2단으로 조절할 수 있게 제작되어 있으나 팬의 풍량은 제공되지 않아서 풍속계(Air velocity transmitter, Dwyer instruments Inc.)를 이용하여 덕트에서의 단면 풍속을 측정하여 풍량을 구하였다(Nam 등, 2008). 또한 외기 온습도(증발냉각기 입구의 온습도)를 측정하여 습구온도를 구하고, 증발냉각기 출구 온도를 측정하여 건습구 온도차와 냉각온도로부터 증발냉각기의 냉각효율을 구하였다(Albright, 1990).

실험온실과 대조구 온실의 내외부 기상환경을 온습도기록계(HTR10, Hans system)와 일사센서(LI200X, Campbell scientific Inc.)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였다. 실험온실의 온습도 편차를 분석하기 위하여 온습도기록계는 온실의 길이방향으로 온실 중앙을 따라 단부 1.8m 지점부터 3.6m 간격으로 5점에 덕트의 하단 높이(2.4m)와 중간 높이(1.2m)에 각각 1대씩 총 10대를 설치하였다.

실험은 2009년 6월 11일부터 8월 9일까지 60일간 실시하였다. 30일간은 무차광 상태에서 30일간은 30%의 차광하에서 실험을 수행하였으며 기상여건에 따라 증발냉각기를 1단 또는 2단으로 가동하였다. 증발냉각기의 가동은 오전 9시부터 오후 6시까지 하였으며 데이터 분석은 오전 10시부터 오후 5시까지의 측정치를 사용하였다. 무차광 1단을 Case N1, 무차광 2단을 Case N2, 차광 1단을 Case Y1, 차광 2단을 Case Y2로 하여 4가지 경우로 나누어 분석하였다. 실험 기간 중에 비가 내린 날이 13일로 이 때는 증발냉각기 가동을 중단하였고, 센서 점검, 전지 교환, 차광망 설치 작업 등으로 5일간의 데이터는 사용할 수 없었으며, 분석에 사용한 데이터는 Case N1 6일치, Case N2 18일치, Case Y1 8일치, Case Y2 10일치였다. 실험온실과 대조구 온실은 측량만 설치된 자연환기 온실이다.

결과 및 고찰

온실의 냉방 실험에 사용한 일체형 팬 앤 패드 증발냉각기의 냉각효율을 분석하였다. 1단, 2단 가동시의 풍량과 냉각효율을 실험한 결과는 Table 1과 같다. 증발냉각기의 효율은 유입구의 건습구 온도차에 대하여 냉각온도의 백분율로 표시되며 잘 설계된 증발냉각기의 경우 냉각효율은 80~85% 정도이다(Albright, 1991; Nam 등, 2008). 본 연구에 사용한 증발냉각기의 효율은 1단 가동시 75.7%, 2단 가동시 88.6%로 나타났다. 외기온이 32°C, 습도 57% 조건에서 1단 가동시와 2단 가동시 냉각온도는 0.9°C 정도 차이가

있었다. 1단 가동시의 효율은 약간 떨어지지만 대체로 양호한 편이며 2단 가동시의 효율은 우수한 것으로 판단된다.

일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 설치한 온실의 냉방성능을 실험한 결과는 Table 2 및 Table 3과 같고, 각각의 Case에 대하여 냉방 온실, 대조구 온실 및 외기온의 변화를 나타내면 Fig. 3~6과 같다. 먼저 Table 2에서 대조구 온실과 비교한 온도 차이를 보면 무차광 1단 가동시(Case N1) 5.7°C, 무차광 2단 가동시(Case N2) 7.6°C의 냉방효과가 있었고, 차광 1단 가동시(Case Y1) 7.4°C, 차광 2단 가동시(Case Y2) 9.7°C의 냉방효과가 있었다. 외기온과 비교하면 무차광 1단 가동시 5.4°C, 무차광 2단 가동시 5.3°C의 온도 상승이 있었고, 차광 1단 가동시 2.5°C, 차광 2단 가동시 1.9°C의 온도 상승이 있었다. 즉, 외기온 30.8~31.7°C에서 대조구 온실(냉방을 실시하지 않은 측량만의 자연환기 온실)은 40.7~44.3°C까지 상승하였으나 냉방 온실(일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 설치한 온실)은 33.3~37.1°C까지 상승하여 5.7~9.7°C 정도의 냉방효과가 있었다. 특히 무차광의 경우 36.7~37.1°C, 차광의 경우 33.3~33.4°C로 실내 온도를 유지할 수 있었으며, 외기온과 대비하여 무차광시 5.3~5.4°C, 차광시 1.9~2.5°C 이내로 유지할 수 있었다. Table 3에서 보는 바와 같이 습도 차이도 온도 차이와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 온실의 증발냉각 시스템은 건조한 기후 지역에서 발달한 방식으로 온실의 냉방 목표온도를 32°C 정도로 설정하고 있으며(Kittas 등, 2003), 미국의 애리조

Table 1. Cooling efficiency of an integrated fan and pad system.

Stage of fan	Air flow (m ³ · min ⁻¹)	Inflow air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Outflow air temperature (°C)	Cooling efficiency (%)
1st	8.1	32	57	26.7	75.7
2nd	11.8	32	57	25.8	88.6

Table 2. Average temperature differences between the control and cooling greenhouse.

Case	Condition		Temperature (°C)			Difference (°C)	
	Shading	Stage	Outside (A)	Cooling (B)	Control (C)	B-A	B-C
N1	No	1st	31.7	37.1	42.8	5.4	-5.7
N2	No	2nd	31.4	36.7	44.3	5.3	-7.6
Y1	Yes	1st	30.8	33.3	40.7	2.5	-7.4
Y2	Yes	2nd	31.5	33.4	43.1	1.9	-9.7

Table 3. Average relative humidity differences between the control and cooling greenhouse.

Case	Relative humidity (%)			Difference (%)	
	Outside (A)	Cooling (B)	Control (C)	B-A	B-C
N1	49.7	39.1	30.6	-10.6	8.5
N2	49.3	41.0	30.3	-8.3	10.7
Y1	61.0	59.0	39.9	-2.0	19.1
Y2	50.3	49.4	30.2	-0.9	19.2

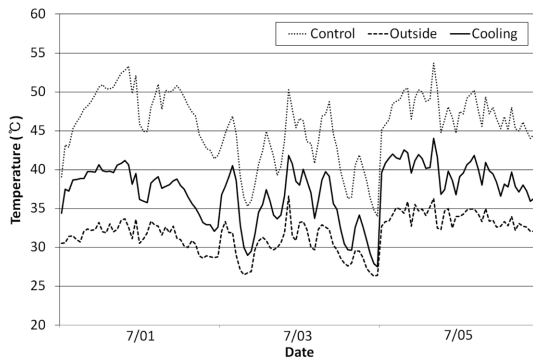


Fig. 3. Variations for temperature of the control and cooling greenhouse in Case N1.

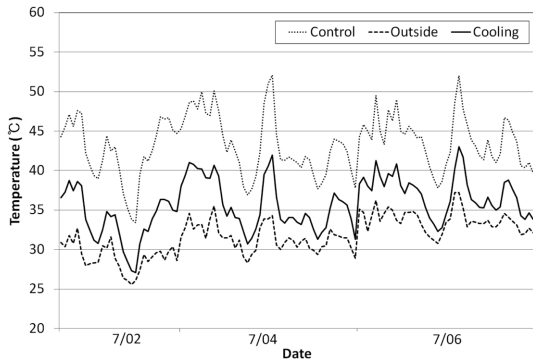


Fig. 4. Variations for temperature of the control and cooling greenhouse in Case N2.

나에서 실험한 결과를 보면 외기온 34.5~39.5°C, 습도 12.3~29.1%의 조건에서 실내온도 27.1~31.6°C까지 냉방을 할 수 있는 것으로 나타나고 있다(Nam, 2005). 이와 비교하면 외기의 평균 상대습도가 49.3~61.0%로 높아 증발냉각 시스템을 적용하기에 불리한 여건이지만 실험 결과로 보면 상당한 냉방효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다. 본 시스템을 적용할 경우 여름

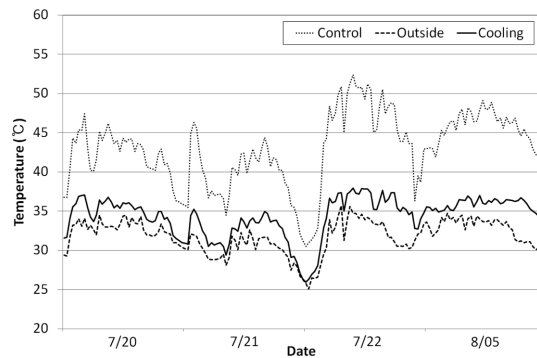


Fig. 5. Variations for temperature of the control and cooling greenhouse in Case Y1.

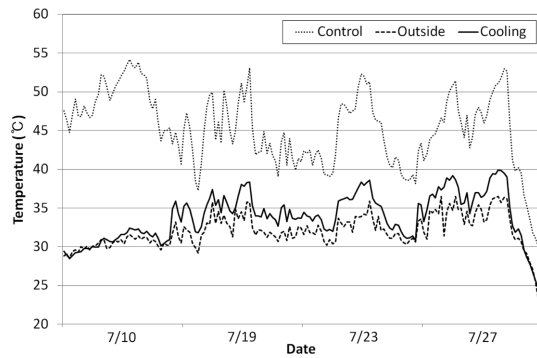


Fig. 6. Variations for temperature of the control and cooling greenhouse in Case Y2.

철 온실의 최고기온을 37°C 이하로 또한 외기온 대비 5°C 이내로 유지할 수 있으며, 적절한 차광을 실시할 경우에는 33°C 이하에 2°C 이내로 유지하는 것이 가능하여 고온기 작물재배에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

Fig. 3 및 Fig. 4에서 보는 바와 같이 무차광 조건에서 온실 냉방 시스템을 가동할 경우 외기온 대비 5°C 정도 이내로 실내기온을 유지할 수 있으며 대조구 온실에 비해서는 6~8°C 정도의 냉방효과가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5 및 Fig 6에서 보는 바와 같이 차광 조건에서는 외기온 대비 2°C 정도 이내로 실내기온을 유지할 수 있으며 7~10°C 이상의 냉방효과가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4는 일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 설치한 냉방 온실의 최대 온도 편차와 습도 편차를 나타낸 것이다. 본 시스템은 일체형 증발냉각기에서

Table 4. Maximum differences of temperature and relative humidity at duct and middle height in the cooling greenhouse.

Case	Temperature (°C)		Relative humidity (%)	
	H_duct	H_middle	H_duct	H_middle
N1	2.9	2.3	6.9	3.8
N2	2.7	2.7	5.1	3.6
Y1	2.4	1.6	5.2	4.7
Y2	2.2	1.7	9.2	3.6

냉각된 공기를 에어 덕트를 통하여 온실의 상부에 공급하고 에어 덕트의 구멍을 통하여 온실의 하부로 뿜어져서 온실을 냉방하도록 되어 있다. 덕트 높이에서의 온도편차는 2.2~2.9°C, 중간 높이에서의 온도편차는 1.6~2.7°C였다. 습도 편차는 덕트 높이에서 5.1~9.2%, 중간 높이에서 3.6~4.7%로 나타났다. 팬의 가동 단수에 따른 온도 편차는 큰 차이는 없으나 2단이 1단보다 작게 나타났으며 차광 조건에서 무차광 보다 작게 나타났다. 또한 지상 1.2m인 중간 높이에서의 편차가 덕트 높이에서의 편차보다 작은 것을 볼 수 있다. 이는 일체형 팬 앤 패드 시스템에서 덕트를 따라 이동할 때 보다 실내로 뿜어진 이후에 실내 공기와의 혼합과정에서 편차가 줄어드는 것으로 생각된다. Kittas 등(2003)은 부분 차광한 온실에서 실험 한 결과 35°C, 25%의 조건에서 60m 떨어진 패드와 팬 사이의 온도차가 9~10°C인 것으로 보고하고 있으며, Nam 등(2005)의 실험에서는 28m에 최대 10°C의 온도차가 발생하고 거리에 따라 선형적으로 증가하며, 35°C, 50%의 조건에서 시뮬레이션을 실행한 결과 28m의 거리에서 7~9°C의 편차가 발생하는 것으로 보고하였다. 이들의 결과를 종합하면 18m 떨어진 거리에서 팬 앤 패드 시스템의 온도 편차는 차광 조건에서 2.7~3.0°C 정도, 무차광 조건에서 4.5~5.8°C 정도인 것으로 볼 수 있다. 본 실험에서 차광시 1.6~1.7°C, 무차광시 2.3~2.7°C인 것과 비교하면 차광 조건에서 40.7~43.3%, 무차광 조건에서 48.9~53.4%의 온도 편차 개선 효과가 있는 것으로 생각된다. 즉, 본 연구에서 구상한 일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 이용한 온실 냉방시스템은 기존의 팬 앤 패드 냉방 온실의 최대 단점인 온도 편차를 40~50% 정도 개선할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 냉각기의 팬을 1단과 2단

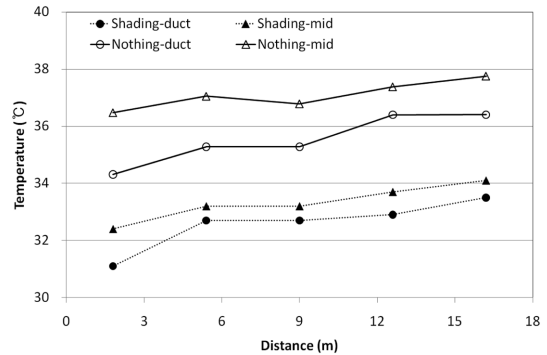


Fig. 7. Variations for average temperature along the greenhouse length at duct and middle height in the 1st stage.

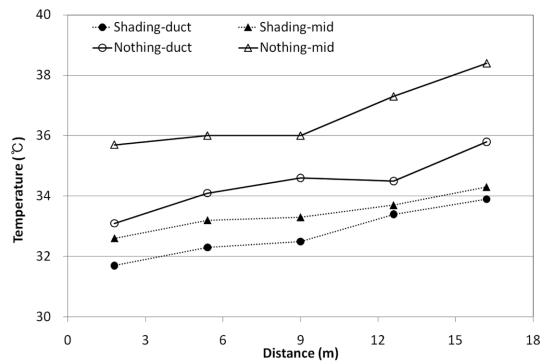


Fig. 8. Variations for average temperature along the greenhouse length at duct and middle height in the 2nd stage.

으로 가동했을 때 덕트와 중간 높이에서 측정된 온실 단부로부터의 거리에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 모든 경우에 거리에 따라 온도가 증가하는 것을 볼 수 있으나 기존의 팬 앤 패드 냉방 온실과 같이 직선적으로 증가하지는 않고 약간 불규칙한 온도 경사를 보이는 것으로 나타났다. 이는 기존의 팬 앤 패드 냉방 온실의 경우 밀폐된 온실에서 시스템에 부착된 팬에 의해 강제환기가 이루어지므로 기류의 방향이 패드에서 팬 쪽으로 일정한데 반하여, 본 시스템의 경우에는 측창을 개방한 자연환기 상태에서 냉방이 이루어지므로 기류의 방향이 불규칙하기 때문으로 판단된다. 한편, Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 측정점 1.8m 위치에서 덕트 하단의 온도가 31~34°C 정도로 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 일체형 증발냉각기 출구에서 온실 상부에 설치한 에어 덕트 시점까지의 연결 덕트 길이가 2.5m로 이곳에서 많은 열 획득이 일어나기 때

문으로 생각되며 실제 온실 냉방에 적용할 때에는 철저한 단열이 필요할 것으로 판단된다. 에 의해 이루어진 것임.

적 요

온실의 한쪽 벽에 패드를 설치하고 반대쪽 벽에 팬을 설치하여 가동하는 팬 앤 패드 냉방 온실의 온도경사 문제를 극복하기 위한 목적으로 일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 설치한 온실의 냉방 실험을 통하여 냉방성능을 분석하였다. 일체형 팬 앤 패드 증발냉각기의 효율은 1단 가동시 75.7%, 2단 가동시 88.6%로 나타나 대체로 우수한 냉각효율을 보이는 것으로 판단된다. 온실의 냉방성능 실험 결과 무차광 조건에서 온실 냉방 시스템을 가동할 경우 대조구 온실에 비해서 5.7~7.6°C 정도의 냉방효과가 있으며 차광 조건에서는 7.4~9.7°C 정도의 냉방효과가 있는 것으로 나타났다. 본 시스템을 적용할 경우 여름철 온실의 최고기온을 37°C 정도로써 외기온 대비 5°C 이내로 유지할 수 있으며, 적절한 차광을 실시할 경우에는 33°C 정도에 2°C 이내로 유지하는 것이 가능하며 고온기 작물재배에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다. 한편, 본 냉방 실험에서 온실의 온도 분포를 분석한 결과 18m 길이의 온실 내 최대 온도 편차는 차광시 1.6~1.7°C, 무차광시 2.3~2.7°C 정도로 나타났다. Kittas 등(2003)과 Nam 등(2005)의 자료와 비교한 결과 본 연구에서 구상한 일체형 팬 앤 패드 시스템과 에어 덕트를 이용한 온실 냉방시스템은 기존의 팬 앤 패드 냉방 온실의 최대 단점인 온도 편차를 40~50% 정도 개선할 수 있는 것으로 나타났다. 본 시스템은 자연환기 상태에서 가동할 수 있으므로 단동 온실에 적용하기가 쉬우며, 일체형 증발냉각기 출구로부터 온실 내 에어 덕트 시점까지의 연결 덕트 부분을 철저히 단열하면 냉방성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 에어덕트, 온도경사, 온실냉방, 일체형 팬 앤 패드 시스템, 자연환기

인 용 문 헌

1. Albright, L.D. 1990. Environment control for animals and plants. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.31-32.
2. Arbel, A., O. Yekutieli, and M. Barak. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. J. Agric. Engng Res. 72:129-136.
3. Arbel, A., M. Barak, and A. Shklyar. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. Biosystems Engineering 84(1): 45-55.
4. ASAE Standards. 1997. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.663-670.
5. Kim, M.K., K.S. Kim, and H.J. Kwon. 2001a. The cooling effect of fog cooling system as affected by air exchange rate in natural ventilation greenhouse. Journal of Bio-Environment Control 10(1):10-14 (in Korean).
6. Kim, M.K., K.S. Kim, and S.W. Nam. 2001b. Efficient application of greenhouse cooling systems. Ministry of Agriculture and Forestry. pp.186-188 (in Korean).
7. Kittas, C., T. Bartzanas, and A. Jaffrin. 2001. Greenhouse evaporative cooling: measurement and data analysis. Transactions of the ASAE 44: 683-689.
8. Kittas, C., T. Bartzanas, and A. Jaffrin. 2003. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. Biosystems Engineering 85:87-94.
9. Lee, H.W. and Y.S. Kim. 2011. Application of low pressure fogging system for commercial tomato greenhouse cooling. Journal of Bio-Environment Control 20(1):1-7 (in Korean).
10. Nam, S.W. 2005. Comparative analysis of evaporative cooling pad and fog systems in greenhouses. Proceeding of Bio-Environment Control 14(2):109-113 (in Korean).
11. Nam, S.W., G.A. Giacomelli, K.S. Kim, and N. Sabeh. 2005. Analysis of temperature gradients in greenhouse equipped with fan and pad system by CFD method. Journal of Bio-Environment Control 14(2):76-82 (in Korean).
12. Nam, S.W., W.M. Seo, Y.C. Yoon, S.K. Lee, I.B. Lee, H.W. Lee, and B.K. Cho. 2008. Bio-environment control engineering. Cheongsol Pub. Daegu. p.28-68 (in Korean).

사 사

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원