

동절기 대향류형 환기장치의 온실 내 습도 조절 효과 분석

이태석¹ · 강금춘^{2*} · 장재경¹ · 백이¹ · 임류갑³

¹국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사, ²국립농업과학원 에너지환경공학과장,

³국립농업과학원 에너지환경공학과 책임연구원

Analysis on the Effect of Greenhouse Humidity Control by Counter-flow Ventilator in Winter

Taeseok Lee¹, Geumchoon Kang^{2*}, Jaekyung Jang¹, Yee Paek¹, and Ryugap Lim³

¹Researcher, Division of Energy & Environmental Ecultural Science, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea

²Manager, Division of Energy & Environmental Ecultural Science, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea

³Researcher, Division of Energy & Environmental Ecultural Science, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea

Abstract. In this study, the humidity control effect of a counter-flow ventilator was analyzed in a greenhouse with high relative humidity at night in the winter season. A case of the counter-flow ventilator was $0.96 \times 0.65 \times 0.82$ (W × D × H, m) and there were heat transfer element and two fans for air supply and exhaust in the counter-flow ventilator. Two counter-flow ventilators were used in this study and the setting humidity of the ventilators was 80%. The temperature and relative humidity at night (18:00-8:00) in the greenhouse were measured. In a greenhouse without a counter-flow ventilator, the average temperature and humidity was 14.9°C, 82.8%, respectively. When the counter-flow ventilator was operated, the corresponding averages were 15.1°C, 79.9%. The independent sample t test of monthly temperature and relative humidity showed no difference in temperature, and a significant difference in relative humidity with 1% of the significance level. Therefore, using the counter-flow ventilator helps to control relative humidity in greenhouse and increase yield. And further research considering the pros and cons of using the counter-flow ventilator is needed.

Additional key words : Air temperature, Environment, Ventilation

서 론

2018년 우리나라 시설원에 면적은 약 53,109ha 이며, 그 중 난방장치를 사용하는 가온재배 면적은 17,399ha로써 시설원에 면적의 약 33%를 차지하고 있다(MAFRA, 2019). 시설원의 주요 환경관리 요인은 온도, 습도, CO₂ 등으로 온도는 작물 생육에 가장 큰 영향을 미친다. 종자의 발아에서부터 영양생장, 저장기관 발달, 개화, 성숙 등 온도에 따라 여러 가지 반응을 보이며 작물의 광합성에도 영향을 준다(Lee 등, 2004). 따라서 시설원의 환경관리와 관련된 연구는 주로 온도를 조절하기 위한 난방, 보온, 환기 방법 등에 관한 것이 많았다.

습도 조절에 관한 연구는 주로 여름철 냉방 효율을 높이기

위한 제습 방법에 관한 것으로 증발냉각법의 냉방효율을 높이기 위해 온실 내부에 냉수파이프를 설치하거나 제습장치를 설치하여 제습을 수행한 연구(Yun 등, 1998; Nam 등, 2005), 냉각과 제습을 동시에 실시하기 위해 팬앤패드 방식에 리튬브로마이드 용액을 적용하여 냉각 및 제습 시스템을 구축한 연구(Lee 등, 2014)가 대표적이다. 한편, 낮은 외부 온도로 환기 시 찬 공기가 온실 내부로 유입되어 작물의 냉해 피해가 우려되고, 온실 내 열손실 등의 문제가 발생하여 환기 및 습도 조절이 어려운 겨울철의 습도 관리에 관한 연구는 적은 편이다.

시설원에 온실은 재배 특성상 관수 및 방제작업이 잦아 상대 습도가 높아지기 쉬우며, 주간에는 환기를 통해 온도와 습도를 조절한다. 그러나 보온과 난방을 하는 야간에는 피복자재의 밀폐도가 높아 상대습도 90% 이상의 다습한 환경이 만들어지기도 하며, 이 때 온실 내 온도가 노점온도 이하로 내려가면서 작물체 표면에 결로가 생기고 작물이 5시간 이상 젖어있

*Corresponding author: kangch@korea.kr

Received April 17, 2020; Revised June 18, 2020;

Accepted June 20, 2020

으면 세균성 병해가 발생하기 쉽다(Euh 등, 2012; Kang 등, 2007; Seginer and Kantz, 1989; Kwon, 2002). 이 외에도 습도가 작물체에 미치는 영향을 조사한 시험에 따르면 상대습도가 40% 이하인 조건에서는 광합성이 억제되고 20% 이하에서는 엽면 증산량이 증가하여 심할 경우 고사하게 된다. 반면 상대습도 80% 이상의 고습 조건에서는 광합성 장애가 발생하고 식물체의 내병성도 저하하게 된다(Kang 등, 2007). 따라서 작물 생육 환경을 개선하고 작물 생산성을 높이기 위해서는 온실 내 온도 및 습도 등 적절한 환경을 만들어주는 것이 중요하다.

이에 Kang 등(2007)은 냉각식 제습기를 호접란 재배온실에 사용하여 습도 제어 효과, 곰팡이병 발병을 저감 효과를 확인한 바 있으며, Lim 등(2017)은 절화장미 재배온실에 제습기를 설치하여 온실 내 습도 저감 효과와 그로 인한 절화장미의 수명 및 질 향상 효과를 확인하였다.

본 연구에서는 겨울철 온실 내 습도를 조절하기 위해 대향류형 환기장치를 이용하였다. 전라북도 완주군 봉동읍에 위치한 토마토 재배 연동온실에 대향류형 환기장치를 설치하고 겨울철 야간에 운용하여 온실 내 습도 조절 및 작물 생육 환경 개선 효과를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 시험온실 및 재배작물

본 연구의 시험은 전라북도 완주군 봉동읍에 위치한 연동형 비닐온실(타포린 바닥재)에서 수행하였다. 온실은 중앙통로를 기준으로 두 구역으로 나누어져 있으며 서쪽은 4연동 동쪽은 5연동이었다. 온실의 길이는 95m, 폭은 9.6m, 측고 2.4m, 동고 6m였으며 PE 필름 1중 피복에 차광스크린 1층, 다겹보온커튼 1층으로 차광 및 보온하였다. 재배작물은 완숙토마토(그린벨트)로 2018년 9월 26일, 2019년 9월 20일에 각각 정식하였다. 작물은 동별로 6개의 양액베드에 2.4주/m²의 밀도로 총 7,000주를 재배하였다. 온실 내 난방장치는 전기보일러(240kWh)로 월별로 야간 온도는 다르게 하여 11월에는 16°C, 12월과 1월에는 14°C로 관리하였다. 시험은 먼저 일주일 단위로 대향류형 환기장치 사용여부를 달리하여 온실 온습도 변화를 비교해보았다. 2019년 11월 1일부터 7일까지는 대향류형 환기장치를 사용하지 않고 난방기만 운영한 온실의 환경을 측정하였고, 11월 8일부터 14일까지는 난방 시 환기장치도 가동한 온실의 환경을 측정하여 비교, 분석하였다. 또한, 보온과 난방에만 의존했던 2018년과 기존 보온 및 난방에 대향류형 환기장치를 추가로 운용한 2019년의 온실 내 온습도 데이터를 비교하였으며, 환기장치를 사용한 11월 8일부터 다음해 1월 31일까지의 온습도 데이터를 분석하였다.

2. 대향류형 환기장치 특성 및 운용 조건

대향류형 환기장치는 크기 0.96×0.65×0.82(W×D×H, m)의 케이스에 크기 0.54×0.4×0.75(W×D×H, m)의 PE소재의 열교환소자와 급기와 배기를 위한 송풍팬(풍량 6,800m³/h, 소비전력 1.7kW) 2대가 내부에 있는 형태다. 환기장치는 온실 길이 방향으로 온실 벽면에 2대를 설치하였다. 대향류형 환기장치는 실내외의 공기가 열교환소자에서 섞이지 않고 열만 교환하도록 하여 실내의 덥고 습한 공기는 밖으로 내보내고(RA→EA) 외부의 차고 건조한 공기는 따뜻하면서 건조한 공기로 바꾸어 실내로 들여보낸다(OA→SA). Fig. 1은 대향류형 환기장치의 내부모습과 작동원리를 그림으로 표현한 것이다.

대향류형 환기장치의 운용 조건은 재배 작물인 토마토의 특성을 고려하여 설정하였다. 토마토는 토양수분이 충분하고 공중 습도가 낮은 건조기후에 적합한 작물로 재배에 적합한 공기습도는 65~80% 이므로(Lee 등, 2004), 열교환 환기장치는 습도가 80% 이상일 때 작동하도록 하였다. Fig. 2는 시험 온실 내 대향류형 환기장치를 설치한 모습이며 Fig. 3은 온실 내 대향류형 환기장치와 온습도 센서의 위치를 평면도로 나타낸 것이다.

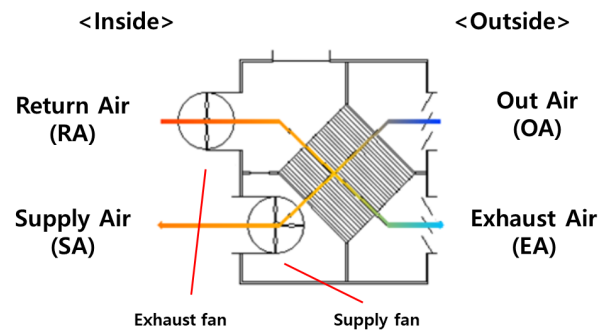


Fig. 1. The inside of the counter-flow ventilator and operating principle.



Fig. 2. Counter-flow Ventilator in greenhouse.

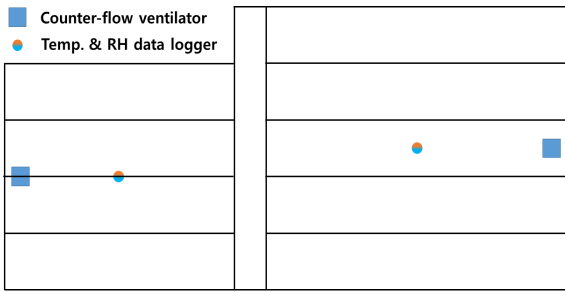


Fig. 3. The location of counter-flow ventilators and data logger in greenhouse.

3. 온실 내외부 환경측정

온실 내외부 환경은 온실 내부 온도 및 습도, 온실 외부 온도를 측정하였다. 온실 내부 온도 및 습도는 4연동 구역과 5연동 구역 각각 중앙 2m 높이에 온습도 데이터로거(HOBO MX 1101, Onset Computer Corp., USA)를 설치하여 1분 간격으로 측정하였으며, 온실 외부의 온도는 온실 밖 2m 높이에 복사막이를 부착하여 서미스터 온도 센서(DS103F, DSC Electronics Co., Korea)를 설치하여 1분 간격으로 측정하였다. 온실 외부 습도는 전주지역의 기상자료(KMA, 2019)를 수집하여 이용하였으며 온실 내외부 데이터는 대향류형 환기장치를 이용한 시간(18시~익일 8시)의 데이터를 분석하였다.

결과 및 고찰

Fig. 4는 대향류형 환기장치를 사용하지 않은 온실, Fig. 5는 대향류형 환기장치를 운용한 온실의 야간 평균 온습도 그래프다. 먼저 환기장치를 사용하지 않은 11월 2일의 온실 온습도를 살펴보면, 난방기 가동 여부에 따라 온도가 변하였고 그에 따라 상대습도도 함께 변화하여 상대습도는 최저 84.0%에서 최고 90.1%까지 오르고 내림을 반복하였다. 환기장치를 사용한 11월 13일 온실 내부 온도는 난방기 사용으로 오르내림을 반복하였으나 온실 내부 습도는 환기장치 사용으로 인해 점차 감소하여 93.9%였던 오후 6시의 온실 상대습도는 80%까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 대향류형 환기장치가 작동하여 상대습도가 높은 실내 공기는 밖으로 내보내고 열교환을 통해 온도는 상승하고 상대습도가 낮아진 외부 공기가 유입되었기 때문이다. 11월 13일 야간 외부 습도는 평균 65.6%로 실내 평균 습도 84.3%보다 20% 가량 낮았으며 외부 공기가 실내로 유입 시 온도 상승으로 인해 습도가 더 낮아지게 되어 실내의 습도는 떨어지게 된다. 그러나 실내로 유입되는 공기의 온도는 실내 온도보다 낮기 때문에 온도를 유지하기 위해서는 난방을 더 많이 해야 한다. 따라서 온실 내 온도가 상승하는 시

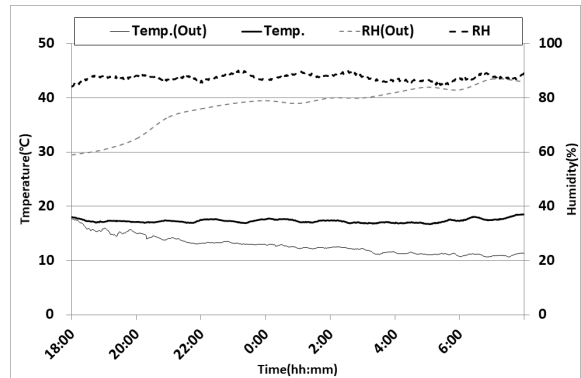


Fig. 4. Temperature and RH in greenhouse without counter-flow ventilator (2019.11.2.).

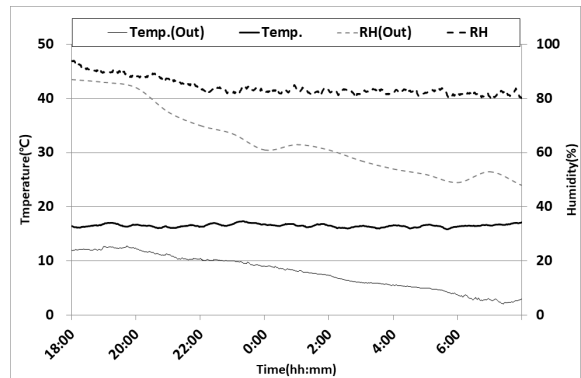


Fig. 5. Temperature and RH in greenhouse with counter-flow ventilators (2019.11.13.).

간을 난방 시간으로 가정하여 비교 분석한 결과 11월 2일의 난방 시간은 204분, 11월 13일의 난방 시간은 230분으로 환기장치를 사용했을 때 26분간 난방기가 더 가동되었다.

Fig. 6은 대향류형 환기장치의 운용 여부를 일주일 간격으로 달리하여 측정한 온실 내부 온도 및 습도 그래프다. 온실 내부 온도는 대향류형 환기장치를 운용하지 않았을 때(2019.11.1.~11.7.)와 운용했을 때(2019.11.8.~11.14.) 각각 평균 16.6°C, 16.3°C로 유사하였다. 그러나 환기장치를 운용하지 않았을 경우 온실 내 상대습도는 평균 86.6%, 최대 89.5%로 높게 나타났다. 환기장치를 사용했을 경우 온실 내 평균 상대습도는 81.6%로 대향류형 환기장치를 사용하지 않았을 때보다 상대습도를 5% 낮았으며 이는 위와 마찬가지로 환기장치의 작동원리에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 11월 8일부터 1월 31일까지 주간(8시~18시) 및 야간(18시~익일 8시) 온실 평균 온도 및 습도 그래프이다. 2018년 동절기(11월~2019년 1월)와 2019년 동절기(11월~2020년 1월)의 주간 온도는 모두 일출 후 약 오후 1시까지 상승하였다가 다시 떨어지는 경향을 보였으며, 2018년의 주간 최고 온

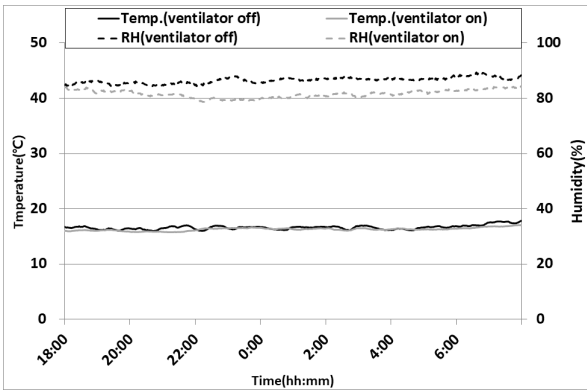
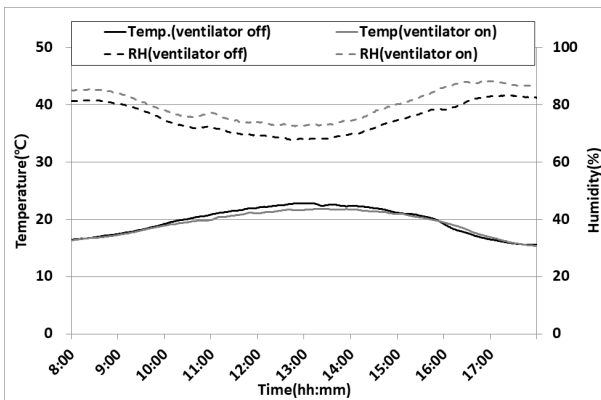
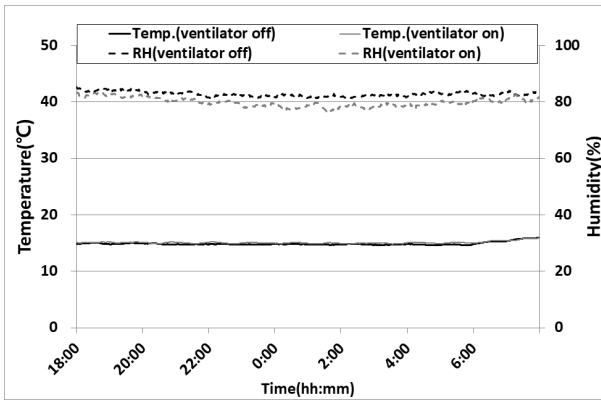


Fig. 6. Weekly average temperature and RH in greenhouse without ventilator (2019.11.1.~11.7.) and with ventilators (2019.11.8.~11.14.).



(a) day time



(b) night time

Fig. 7. Average temperature and RH in greenhouse without ventilator (2018.11.8.~2019.1.31.) and with ventilators (2019.11.8.~2020.1.31.).

도는 22.8°C, 2019년의 주간 최고 온도는 21.8°C로 환기 설정 온도 23°C를 넘지 않았다. 습도 또한 두 기간에서 비슷한 경향을 보여 오후 1시까지는 감소하였다가 다시 증가하였고, 2019년에서 상대습도가 전체적으로 높게 나타났다. 주간 온습도를 평균값으로 비교해보면 2018년은 19.7°C, 75.2%, 2019년

은 19.4°C, 79.9%로 온도는 0.3°C, 습도는 약 5% 정도 차이가 났다. 야간 온도는 2018년과 2019년 모두 약 15°C 정도를 유지하는 것으로 나타났으며 이는 난방장치를 이용하여 온도 관리를 했기 때문이다. 습도는 2018과 2019년 모두 난방기 가동 여부에 따라 변동하는 경향을 보였고 2019년의 상대습도가 전체적으로 낮게 나타났다. 야간 온습도를 평균값으로 비교해보면 2018년 14.9°C 82.8%, 2019년 15.1°C, 79.9%로 온도는 0.1°C, 습도는 약 3% 차이가 났고, 환기장치 사용으로 인해 2019년의 온실 내 습도가 더 낮았던 것으로 판단된다.

Table 1은 야간 월별 온실 내 평균 온도 및 상대습도를 나타낸 표이다. 대향류형 환기장치 운용에 따른 월별 온실 내 온도 및 상대습도를 비교해보면 평균 온도는 유사하지만 평균 습도는 환기장치를 운용했을 때 더 낮게 나타났다. 대향류형 환기장치가 없었던 18년 11월의 온실 온도 및 습도는 16.3°C, 84.2% 였고, 환기장치를 사용한 19년 11월에는 온도 16.4°C, 습도 80.5% 로 온도는 0.1°C 높았고, 습도는 약 4% 낮았다. 12월의 온실 내부 온도는 대조구, 시험구 각각 14.0°C, 14.3°C로 0.3°C 차가 있었으며 상대습도는 대조구 81.1%, 시험구 79.6% 로 시험구가 1.5% 낮게 측정되었다. 1월은 대조구 온습도 14.3°C, 83.1%, 시험구 온습도 14.3°C, 79.6% 로 다른 월과 마찬가지로 온실 평균 온도는 차이가 크지 않았으며 상대습도는 시험구가 3.5% 낮게 나타났다.

이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 대향류형 환기장치를 사용함으로써 온실 외부의 건조한 공기가 온실 내부로 들어오면서 온실 내의 습도가 낮아지는 것이다. 또한, 두 시험기간의 평균 난방 시간을 비교해본 결과 2018년은 247분, 2019년은 290분으로 환기장치를 사용했을 때 43분간 난방기가 더 가동되었다. 따라서 대향류형 환기장치의 사용은 온실 내 습도는 낮추는 반면, 온도 유지를 위한 난방기 가동 시간은 길어지게 한다.

두 기간의 야간 온도 및 습도를 단순히 평균값으로 비교했을 때 온도는 최대 0.3°C, 습도는 최대 3.5% 차이가 났으나 이러한 차이가 유의미한 지 판단하기는 어렵다. 따라서 독립표본 t검정을 통해 두 기간의 온습도가 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 검증해 보았다. 독립표본 t검정은 1분 단위로 측정된 월별 온도 및 습도 데이터를 시간별 평균값으로 계산하여 수행하였고, 유의수준은 1%로 하였다. Tables 2, 3은 월별 온습도의 독립표본 t검정 결과이다. 11월 온도의 경우 t값 -1.32, p값 0.2로 유의수준 0.01을 기준으로 귀무가설이 채택되어 '두 기간의 온도 차이는 없다'고 할 수 있다. 반면 습도의 경우 t값 -8.24, p값 0.0로 유의수준 0.01을 기준으로 유의미한 차이가 있다고 판단된다. 12월과 1월의 온도별 독립표본 t검정 결과는 각각 p값 0.026, 0.423으로 나타나 유의수준 0.01을 기준으로 차이가 없는 것으로 판단된다. 습도는 12월과 1월의 독립표본 t검정 결

Table 1. The monthly average temperature and RH in experimental greenhouses.

	Without counter-flow ventilator		With counter-flow ventilator	
	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)
November	16.3	84.2	16.4	80.5
December	14.0	81.1	14.3	79.6
January	14.3	83.1	14.4	79.6

Table 2. The T-test results of monthly temperature.

	N	Temperature		t (p)
		Average (°C)	Variance	
November	2018	16.3	0.05	-1.32 (0.200)
	2019	16.4	0.07	
December	2018	14.0	0.10	-2.35 (0.026)
	2019	14.3	0.04	
January	2018	14.3	0.09	-0.81 (0.423)
	2019	14.4	0.05	

Table 3. The T-test results of monthly relative humidity.

	N	Relative humidity		t (p)
		Average (%)	Variance	
November	2018	84.2	1.15	8.24 (0.000)
	2019	80.5	1.72	
December	2018	81.1	1.59	2.90 (0.008)
	2019	79.6	1.84	
January	2018	83.1	0.14	5.85 (0.000)
	2019	79.6	4.93	

과는 각각 p값 0.008, 0.000으로 나타나 11월과 마찬가지로 유의수준 0.01을 기준으로 유의미한 차이가 있다고 판단된다.

이러한 결과로 보아 대향류형 환기장치의 사용이 지속적으로 온실 내부의 습공기를 밖으로 배출하고 외부의 건조공기를 온실 내부로 유입시켜 온실 내부 습도가 높아지는 것을 막아주고 온실의 습도를 관리하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 그러나 대향류형 환기장치의 사용은 온실 내 온도 하강, 온도 유지를 위한 난방 시간 증가 등 손실적 요소도 있기 때문에 습도 관리에 따른 생산성 향상, 수확량 증대 등 이익적 요소와 손실적 요소를 종합적으로 고려한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구에서는 겨울철 보온으로 인해 야간 및 새벽에 상대습도가 높아지는 온실에 대향류형 환기장치를 설치하고 그 효과

를 분석하였다. 대향류형 환기장치는 크기 0.96×0.65×0.82(W×D×H, m)의 케이스에 크기 0.54×0.40×0.75(W×D×H, m)의 PE소재의 열교환 소자와 급기와 배기를 위한 송풍팬(풍량 6,800m³/h, 소비전력 1.7kW) 2대가 내부에 있다. 환기장치는 총 2대를 이용하였으며 토마토의 적정 생육 환경을 고려하여 설정 습도를 80%하고 18시부터 익일 8시까지 온실 내 온도 및 습도를 측정하고 분석하였다. 관행 온실에서 야간 평균 온도 및 습도는 14.9°C, 82.8%, 시험구 온실에서 야간 평균 온습도는 15.1°C, 79.9%로 측정되어 온도는 0.1°C, 습도는 약 3% 차이가 났다. 온실 평균 온도 및 습도를 월별로 비교하고 독립표본 t검정을 통해 분석해 본 결과, 유의수준 1%에서 각 월의 온도는 차이가 없는 것으로 나타났으며 습도는 차이가 있다고 판단된다. 따라서 대향류형 환기장치의 사용이 온실의 습도를 관리하고 작물 생육에 적합한 환경을 조성하여 작물 생산성 향상에 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 이 외

에도 환기장치 사용에 따른 난방비 증가와 같은 손실적 요소와 이익적 요소를 복합적으로 고려한 추가적인 연구도 필요할 것으로 사료된다.

추가 주제어: 온도, 환경, 환기

사 사

본 연구는 2020년도 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제번호: PJ013633)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Euh S.H., J.B. Lee, J.C. Woo, S.M. Kang, and D.H. Kim. 2012. The study on dehumidification for greenhouse with lithium-bromide (LiBr)solution. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*. 24:24-29 (in Korean).
- Kang, G.C., K.S. Yon, Y.S. Ryou, Y.J. Kim, Y. Paek, and Y.K. Kang. 2007. Effects of humidity environmental control in greenhouse using refrigeratory-based dehumidifier. *J. Bio-Env. Con.* 16:149-153 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration. 2019. <https://data.kma.go.kr/data/gmd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>
- Kwon H.J. 2002. Development of CFD model to control humidity in greenhouse. M.S. thesis. Seoul National University (in Korean).
- Lee, B.I, W. Moon, and J.I. Son. 2004. *The Facility Cultivation*. Publishing Department of Korea National Open University (in Korean).
- Lee S.Y., C.G. Lee, S.G. Euh, K.C. Oh, J.H. Oh, and D.H. Ki. 2014. Dehumidification and temperature control for green houses using lithium bromide solution and cooling coil. *Protected Hort. Plant Fac.* 23:337-341 (in Korean).
- Lim J.H., H.W. Choi, S.T.T. Ha, and B.C. In. 2017. Greenhouse dehumidification extends postharvest longevity of cur roses in winter season. *Journal of Horticulture Science and Technology*. 35:737-746.
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA). 2019. *2018 Vetgetable Greenhouse Status and Vegetable Production*. Sejong, Korea (in Korean).
- Nam S.W., K.S. Kim, and G.A. Giacomelli. 2005. Improvement of cooling efficiency in greenhouse fog system using the dehumidifier. *J. Bio-Env. Con.* 14:29-37 (in Korean).
- Seginer, I. and D. Kantz, 1989. Night time use of dehumidifiers in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 44:141-158.
- 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.* 7:237-245 (in Korean).