

## 이류체 포그 냉방시스템의 제어알고리즘 개발

남상운<sup>1\*</sup> · 김영식<sup>2</sup> · 성인모<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지역환경토목학과, <sup>2</sup>상명대학교 식물식품공학과

### Development of Control Algorithm for Greenhouse Cooling Using Two-fluid Fogging System

Sang-Woon Nam<sup>1\*</sup>, Young-Shik Kim<sup>2</sup>, and In-Mo Sung<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Plant and Food Sciences, Sangmyung University, Cheonan 330-720, Korea

**Abstract.** In order to develop the efficient control algorithm of the two-fluid fogging system, cooling experiments for the many different types of fogging cycles were conducted in tomato greenhouses. It showed that the cooling effect was 1.2 to 4.0°C and the cooling efficiency was 8.2 to 32.9% on average. The cooling efficiency with fogging interval was highest in the case of the fogging cycle of 90 seconds. The cooling efficiency showed a tendency to increase as the fogging time increased and the stopping time decreased. As the spray rate of fog in the two-fluid fogging system increased, there was a tendency for the cooling efficiency to improve. However, as the inside air approaches its saturation level, even though the spray rate of fog increases, it does not lead to further evaporation. Thus, it can be inferred that increasing the spray rate of fog before the inside air reaches the saturation level could make higher the cooling efficiency. As cooling efficiency increases, the saturation deficit of inside air decreased and the difference between absolute humidity of inside and outside air increased. The more fog evaporated, the difference between absolute humidity of inside and outside air tended to increase and as the result, the discharge of vapor due to ventilation occurs more easily, which again lead to an increase in the evaporation rate and ultimately increase in the cooling efficiency. Regression analysis result on the saturation deficit of inside air showed that the fogging time needed to change of saturation deficit of  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  was 120 seconds and stopping time was 60 seconds. But in order to decrease the amplitude of temperature and to increase the cooling efficiency, the fluctuation range of saturation deficit was set to  $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and we decided that the fogging-stopping time of 60-30 seconds was more appropriate. Control types of two-fluid fogging systems were classified as computer control or simple control, and their control algorithms were derived. We recommend that if the two-fluid fogging system is controlled by manipulating only the set point of temperature, humidity, and on-off time, it would be best to set up the on-off time at 60-30 seconds in time control, the lower limit of air temperature at 30 to 32°C and the upper limit of relative humidity at 85 to 90%.

**Additional key words :** compressed air, fog generating nozzle, fogging cycle, low pressure, naturally ventilated greenhouse

## 서 론

우리나라의 시설원예 면적은 2000년대 초반까지 급격한 증가를 보였으나 그 이후 정체상태에 있다. 반면에 2007년 이후 2ha 규모의 상용화된 온실이 증가하고 있으며(Lee, 2013), 최근에는 시설 현대화와 농산물 수출 활성화를 위한 정부 정책에 힘입어 간척지 침단수출 원

예단지 등 시설의 대규모화 및 단지화 추세를 볼 수 있다. 이와 같은 대규모 시설의 안정적 경영을 위해서는 주년생산이 필수적이고, 이를 위해서는 겨울철 난방비 절감이 중요하지만 이에 못지않게 여름철 고온극복기술이 필요하다. 여름철 온실의 기온은 작물의 정상적인 생육이 불가능할 정도로 상승하므로 이 기간 동안 재배를 포기하고 휴경하는 경우가 많은데, 대규모 시설의 유효 이용이나 안정적 경영측면에서 바람직하지 못하므로 온실 냉방설비의 도입은 필수적이다. 지금까지 개발된 온실 냉방 방법 중 가장 효율적인 방법은 증발냉각 시스템으로 알려져 있으며, 팬 앤 패드 시스템과 포그 시스

\*Corresponding author: swnam@cnu.ac.kr

Received May 10, 2013; Revised May 20, 2013;

Accepted May 24, 2013

템이 가장 일반적으로 사용되고 있다(ASAE, 1997; Arbel 등, 1999, 2003). 우리나라의 여름철 기후 특성은 고온 다습하여 증발냉각에 불리한 조건이지만 남부 서해안과 남해안 등의 일부 지역을 제외한 대부분 지역에서 증발 냉각시스템의 적용성이 비교적 크다고 보고하였다(Nam, 1998).

팬 앤 패드 시스템은 온실냉방에서 비교적 많이 이용되고 있으며 효율도 매우 높지만 온실의 온도분포가 불균일하고 설치비와 유지비가 많이 드는 단점이 있다(Kittas 등, 2003; Nam 등, 2005). 이에 비하여 포그시스템은 온실의 온습도분포가 균일하고, 증발율이 높으며 설치비와 유지비도 적게 들어 상업용 온실에 많이 사용되고 있는 추세이다(Abdel-Ghany와 Kozai, 2006). 포그시스템은 작동압력에 따라 저압과 고압 포그시스템으로 구분되며 고압시스템이 저압시스템에 비하여 분무입경이 작아 더 빨리 증발하기 때문에 냉방효율이 높으나 설치비와 유지비가 훨씬 많이 들어가는 것으로 알려져 있다(Li와 Willits, 2008). 국내의 경우 팬 앤 패드시스템이 설치된 온실은 거의 없으며 포그시스템도 노즐의 막힘이 많고 설치비의 부담으로 널리 보급되지는 못하고 있다. 그러나 최근에 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 벤츄리 원리를 이용한 새로운 형태의 저압 분무식 이류체 포그노즐이 개발되었다(Lee와 Kim, 2011). 이 노즐은 입경이 비교적 크고 저압으로 작동하며 압축공기를 이용하여 분사하는 것으로써 2010년부터 국내에 보급이 시작되어 많은 농가에 설치되고 있다. Nam 등(2011)의 실태조사 결과 사용 만족도가 상당히 높은 것으로 나타났으나 설치기준과 제어방법 등에 대한 가이드라인의 부재로 운영에 많은 문제점을 내포하고 있는 것으로 보고되었다. Nam 등(2012)은 이류체 포그시스템이 설치된 토마토재배 온실에서 냉방실험을 통하여 제어방법별로 냉방효율을 분석한 결과 온도나 습도제어 방식에 비하여 타임제어 방식이 가장 높은 냉방효율을 보이는 것으로 나타났으며, 더 높은 냉방효율을 얻기 위한 최적의 분무사이클을 찾기 위해 다양한 조건의 추가실험이 필요하다고 하였다.

그동안 포그시스템에 관한 연구는 대부분 2~3개의 분무사이클을 정해놓고 냉방효과 또는 냉방효율을 검토하는 수준이었다(Kim 등, 2001; Abdel-Ghany와 Kozai, 2006). Handarto 등(2006)은 분무사이클을 240초로 고정하고 분무시간(on-time)을 환경조건으로부터 계산하는 방법으로 제어로직을 개발하여 고압 포그시스템에 적용한 결과 성공적으로 목표값을 달성하였다고 하였다. Li와 Willits(2008)은 고압 포그시스템과 저압 포그시스템의 제어알고리즘을 각각 제시하였으며 저압시스템은 증발율이 더 낮기 때문에 분무사이클을 짧게 하는 것이 좋다

고 하였다. 본 연구에서는 최근에 많이 보급되고 있는 저압 이류체 포그 냉방시스템의 효율적인 이용방안을 도출하기 위하여 이류체 포그 노즐을 설치한 토마토 재배 온실에서 다양한 조건의 분무사이클을 설정하여 냉방실험을 실시하고, 냉방효율 분석을 통하여 간편한 제어알고리즘을 개발하였다.

## 재료 및 방법

충남대학교 부속농장에 설치된 폭 5.6m, 길이 18m, 높이 3.5m의 단동 플라스틱 온실 2개동에서 실험을 수행하였다. 1개동은 냉방 온실, 다른 1개동은 대조구 온실로 사용하였고, 토마토를 재배하였다. 자세한 실험온실의 규격과 계측센서 및 이류체 포그노즐의 사양 및 배치는 본 연구팀의 선행연구와 동일하다(Nam 등, 2012). 제어조건은 선행연구의 실험결과와 일반 포그냉방 실험 문헌을 참고하여 다양한 조건의 타임제어로 설정하였다(Kim 등, 2001; Abdel-Ghany와 Kozai, 2006; Handarto 등, 2006; Li와 Willits, 2008; Nam 등, 2012). 각 제어조건별 이류체 포그 냉방시스템 가동조건은 Table 1과 같다. 분무사이클에서 분무해야할 시간이라도 실내온도가 25°C 미만이거나 실내습도가 95% 이상이면 분무하지 않도록 설정하였다.

실험은 2012년 6월 1일부터 9월 3일까지 수행하였다. 실험기간과 기후조건의 제한으로 분무시간 45초와 S-11에 대한 실험은 수행하지 못하였다. 단, 분무사이클과 분무비율에 대한 분석을 위해 45초 분무, 45초 정지 조건과 S-11은 선행연구의 데이터(Nam 등, 2012)를 사용하였다. 제어조건별로 1주일 동안 시험을 하였으며 비가 온 날은 냉방시스템을 가동하지 않았다. 비교분석에 사용한 데이터는 비교적 맑은 날로 동일한 자료수를 갖도록 제어조건별로 4일간의 데이터를 선별하였다. 이류체 포그 냉방시스템의 가동은 오전 9시부터 오후 6시까지 하였고, 분석에는 오전 10시부터 오후 5시까지 10분 간격으로 계측한 데이터를 사용하였다. 온실은 측창만 개방한 자연환기 온실이며, 풍속과 환기율의 변화를 고려하는 것은 어렵기 때문에 1일 평균과 제어조건별 평균을 기준으로 분석하여 비교하였다. 환기율의 지표가 되

**Table 1.** Experimental conditions for cooling performance by fogging cycles.

Fogging cycles		Off-time (s)			
		15	30	45	60
On-time (s)	15	S-1	S-2	S-3	S-4
	30	S-5	S-6	S-7	S-8
	60	S-9	S-10	S-11	S-12

결과 및 고찰

는 측량 풍속은 평균 0.3~0.4m·s<sup>-1</sup>의 범위에 있어서 평균적으로 보면 냉방효과의 상대적인 비교는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

냉방효과는 기본적으로 대조구 온실과 냉방온실의 온도차로 비교하였다. 추가적으로 외기와 냉방온실의 온도차, 외기, 대조구, 냉방온실의 습도차를 비교하였다. 이론적으로 냉방 가능온도에 대한 냉방효율(E<sub>c</sub>)은 다음 식 (1)로 구하였다.

$$E_c = \frac{T_{unfog} - T_{fog}}{T_{unfog} - T_{WBfog}} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, T<sub>fog</sub>, T<sub>unfog</sub>, T<sub>WBfog</sub>는 각각 포그 냉방 온실의 건구온도(°C), 대조구 온실의 건구온도(°C), 포그 냉방 온실의 습구온도(°C)이다.

실험 결과로부터 타임제어를 위한 최적의 분무간격을 도출하였다. 또한 실내의 온도, 습도, 포차, 일사 등으로부터 증발효율이 현저히 낮아 포그 냉방이 불가능한 조건을 탐색하였다. 이를 바탕으로 이류체 포그 냉방시스템의 간편한 제어알고리즘을 제시하였다.

Table 2는 외부, 냉방온실 및 대조구 온실의 평균기온을 제어조건별로 나타낸 것이다. 이류체 포그 냉방온실의 기온은 실외기온 대비 2.9~6.3°C 상승하고, 대조구 온실 대비 1.2~4.0°C 낮게 유지되었다. Table 3은 외부, 냉방온실 및 대조구 온실의 평균습도를 제어조건별로 나타낸 것이다. 이류체 포그 냉방온실의 습도는 실외습도 대비 -12.5~4.7%의 범위를 보였고, 대조구 온실 대비 4.6~17.4% 높게 유지되었다.

Table 4는 대조구 온실과 비교한 이류체 포그 냉방온실의 제어조건별 냉방효과와 가습효과를 나타낸 것이다. 냉방효과는 평균 1.2~4.0°C, 최대 3.8~8.7°C를 보였고, 가습효과는 평균 4.6~17.4%, 최대 9.7~34.2%를 보였다. 60초 분무, 15초 정지(S-9) 조건이 가장 높은 냉방효과와 가습효과를 보이는 것으로 나타났고, 15초 분무, 60초 정지(S-4) 조건이 가장 낮은 냉방효과와 가습효과를 보이는 것으로 나타났다.

이류체 포그 냉방 온실의 온습도 균일도를 알아보기

**Table 2.** Average air temperature difference between the fogged and un-fogged greenhouses by fogging cycles.

Fogging cycles	Temperature (°C)			Difference (°C)	
	Outside(A)	Cooling(B)	Control(C)	B-A	B-C
S-1	30.5	34.7	37.1	4.2	-2.4
S-2	30.1	36.4	38.0	6.3	-1.6
S-3	32.0	37.3	39.1	5.3	-1.8
S-4	34.4	40.0	41.3	5.5	-1.3
S-5	31.7	35.8	39.4	4.1	-3.6
S-6	32.9	38.3	39.6	5.4	-1.3
S-7	30.9	35.2	36.7	4.3	-1.5
S-8	31.1	37.1	38.5	5.9	-1.5
S-9	34.3	37.3	41.2	2.9	-4.0
S-10	35.8	41.1	43.3	5.3	-2.2
S-12	37.9	42.6	44.7	4.6	-2.1

**Table 3.** Average relative humidity difference between the fogged and un-fogged greenhouses by fogging cycles.

Fogging cycles	Relative humidity (%)			Difference (%)	
	Outside(A)	Cooling(B)	Control(C)	B-A	B-C
S-1	36.6	35.1	26.3	-1.5	8.8
S-2	43.6	35.1	28.9	-8.5	6.2
S-3	38.5	33.1	27.7	-5.5	5.4
S-4	61.0	48.5	43.9	-12.5	4.6
S-5	52.3	51.6	35.9	-0.8	15.7
S-6	38.2	32.7	27.2	-5.6	5.5
S-7	51.6	53.1	44.1	1.5	9.0
S-8	42.6	35.6	29.7	-7.1	5.9
S-9	52.4	57.1	39.7	4.7	17.4
S-10	46.8	42.5	34.0	-4.4	8.5
S-12	40.9	37.3	31.8	-3.6	5.5

**Table 4.** Effect of cooling and humidify in the fogged greenhouse by fogging cycles.

Fogging cycles	Cooling effect (°C)			Humidifying effect (%)		
	Average	Standard deviation	Maximum	Average	Standard deviation	Maximum
S-1	2.4	0.9	5.7	8.8	2.9	17.3
S-2	1.6	1.2	5.8	6.2	3.5	16.2
S-3	1.8	1.8	6.7	5.4	3.0	13.5
S-4	1.2	2.0	7.1	4.6	3.2	12.9
S-5	3.6	1.0	6.1	15.7	3.9	29.1
S-6	1.3	1.0	4.2	5.5	1.8	9.7
S-7	1.5	0.8	3.8	9.0	3.7	20.3
S-8	1.5	1.1	5.6	5.9	2.9	15.9
S-9	4.0	1.7	8.7	17.4	5.6	34.2
S-10	2.2	1.5	6.8	8.5	5.0	20.2
S-12	2.1	0.8	4.8	5.5	1.9	11.6

**Table 5.** Average difference of air temperature and relative humidity in the fogged greenhouses by fogging cycles.

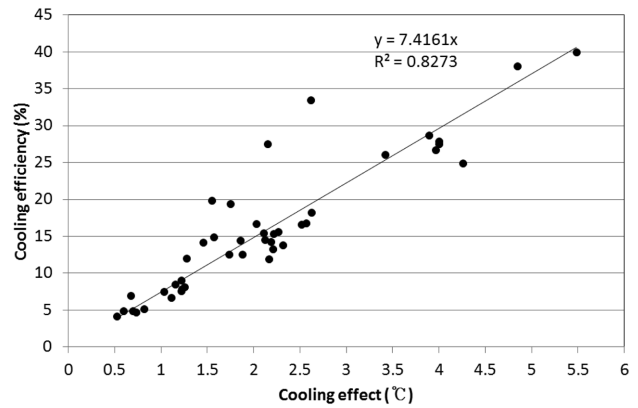
Fogging cycles	Temperature difference (°C)		Humidity difference (%)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
S-1	1.8	1.2	5.9	2.4
S-2	1.8	1.5	4.4	2.7
S-3	1.9	1.7	3.9	2.5
S-4	1.8	2.5	4.5	4.7
S-5	2.6	1.2	9.4	3.1
S-6	2.2	1.3	5.1	1.9
S-7	1.3	2.4	4.7	5.5
S-8	2.6	1.9	5.7	3.0
S-9	2.3	1.5	9.5	4.1
S-10	2.7	2.5	7.4	4.7
S-12	2.6	1.3	5.9	2.6

위하여 온실의 길이방향으로 계측한 5점의 온습도와 온실 중앙의 높이별로 계측한 3점의 온습도를 분석하여 편차를 구하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 온도편차는 수평방향으로 1.3~2.7°C, 수직방향으로 1.2~2.5°C를 나타냈다. 습도편차는 수평방향으로 3.9~9.5%, 수직방향으로 1.9~5.5%를 나타냈다. 온습도 편차는 제어조건별로 큰 차이점이나 뚜렷한 경향을 발견하지 못하였다. 온습도 편차가 팬 앤 패드 방식 보다는 훨씬 작게 나타났으나(Kittas 등, 2003; Nam 등, 2005) 보다 균일한 환경을 조성하기 위해 개선의 여지는 있는 것으로 판단된다. 유동팬을 도입하여 실내 공기를 유동시킴으로써 온습도 편차를 줄이고 냉방효율을 높일 필요가 있을 것으로 사료된다.

식(1)을 이용하여 제어조건별로 냉방효율을 구하여 평균한 것을 Table 6에 나타내었다. 냉방효율은 평균 8.2~32.9%로 나타나 미국에서 실험한 고압포그의 53%와 저압포그의 43%에 비하여는 매우 낮게 나타났으나(Li와

**Table 6.** Average cooling efficiency of the two-fluid fog system by fogging cycles.

Fogging cycles	T <sub>fog</sub> (°C)	T <sub>WBfog</sub> (°C)	T <sub>unfog</sub> (°C)	Cooling efficiency (%)	
				Average	Standard deviation
S-1	34.7	22.4	37.1	16.2	1.5
S-2	36.4	23.6	38.0	11.2	4.6
S-3	37.3	23.8	39.1	11.1	8.0
S-4	40.0	29.7	41.3	11.3	5.8
S-5	35.8	26.9	39.4	29.4	2.4
S-6	38.3	24.4	39.6	8.2	3.3
S-7	35.2	26.8	36.7	15.2	2.9
S-8	37.1	24.3	38.5	10.3	3.7
S-9	37.3	29.4	41.2	32.9	6.2
S-10	41.1	29.1	43.3	16.0	7.8
S-12	42.6	28.9	44.7	13.4	1.3



**Fig. 1.** Cooling efficiency vs. cooling effect in the fogged greenhouse.

Willits, 2008), 우리나라와 기후조건이 비슷한 일본에서 실험한 고압포그의 19.7~29.5%와는 비슷한 수준을 보였다(Abdel-Ghany와 Kozai, 2006). 이 결과로 볼 때 이류체 포그시스템의 경우 저압이지만 압축공기를 이용함으로써 고압 포그시스템과 비슷한 정도의 냉방효율을 얻을 수 있음을 알 수 있고, 노즐의 막힘 문제 등에서 유리할 수 있을 것으로 판단된다.

제어조건별 냉방효율은 냉방효과(대조구 온실과 냉방 온실의 온도차이)와 거의 같은 경향을 나타냈으며 냉방효율과 냉방효과 사이의 관계는 다음 식(2) 및 Fig. 1과 같았다.

$$E_c = 7.42\Delta T \quad (2)$$

여기서, E<sub>c</sub>는 냉방효율(%), ΔT는 냉방효과(°C)이다. 냉방효과와 냉방효율 사이에는 거의 직선적인 관계를 보였으며 효율을 계산하지 않고 온도 계측만으로 표시한 냉방효과로 냉방성능을 평가해도 문제가 없을 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 냉방효율을 중심으로 제어알고리즘 개발을 위한 각종 분석을 수행하였다. 외부기상조건(온도, 습도, 일사량, 포차)에 따른 냉방효율을 비교하였으나 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 대체로 맑은 날의 데이터를 선별하여 분석하였기 때문에 평균적으로 외부기상은 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

분무사이클, 분무시간, 정지시간에 따른 이류체 포그시스템의 냉방효율을 Fig. 2~Fig. 4에 나타내었다. 분무사이클은 분무시간과 정지시간을 같게 하고 각각의 지속시간만 다르게 설정한 것으로 일정시간 동안의 분무량은 동일하다. Fig. 2에서 보는데와 같이 90초(45초 on, 45초 off)일 때 가장 효율이 좋았다. Li와 Willits(2008)은 저압의 경우 짧은 사이클이 좋고, 고압은 긴 사이클이 더 좋다고 하였으며 저압 포그시스템의 경우 15초 on,

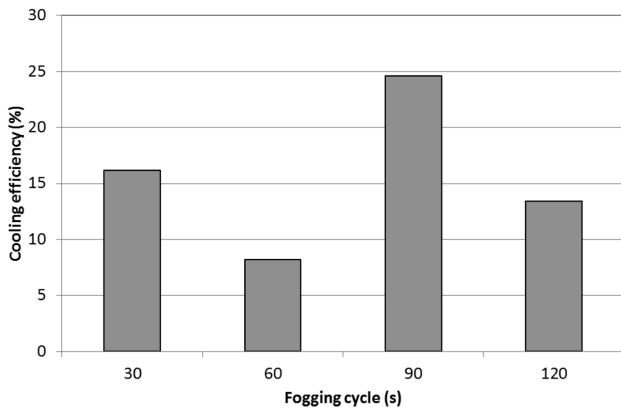


Fig. 2. Comparison of average cooling efficiency in the fogged greenhouse by fogging cycle.

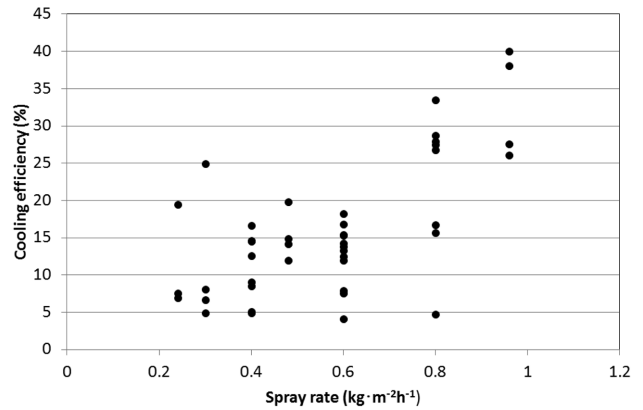


Fig. 5. Cooling efficiency of two-fluid fogging system by spray rate.

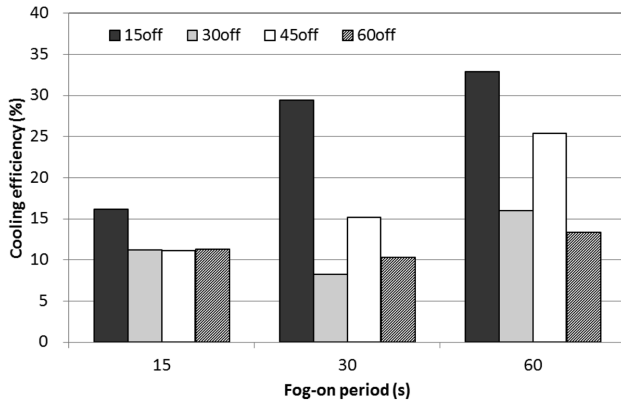


Fig. 3. Comparison of average cooling efficiency in the fogged greenhouse by fog-on period.

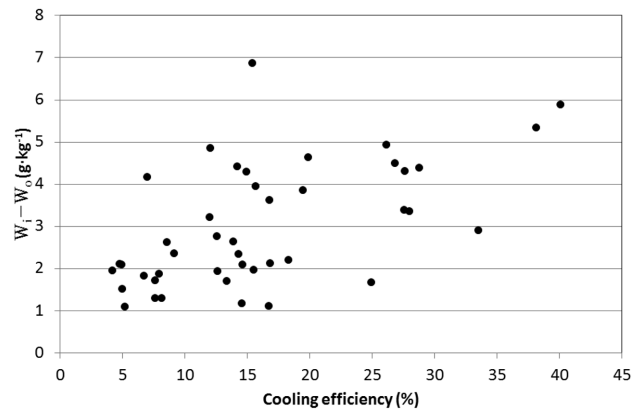


Fig. 6. Absolute humidity difference between inside and outside the fogged greenhouse with cooling efficiency.

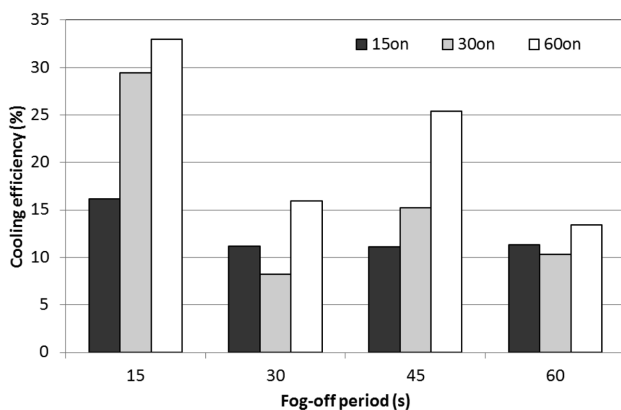


Fig. 4. Comparison of average cooling efficiency in the fogged greenhouse by fog-off period.

15초 off의 분무사이클이 적당하다고 보고하였다. 본 연구의 이류체 포그시스템은 압축공기를 이용하여 분사하므로 보통의 저압 포그시스템과는 특성이 상이한 것으로 판단된다. Fig. 3과 Fig. 4는 분무시간과 정지시간을 달

리하면서 냉방효율을 비교한 결과이다. 대체로 분무시간이 길수록, 정지시간이 짧을수록 냉방효율은 좋아지는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 분무량에 따른 냉방효율을 나타낸 것이다. 분무량이 많을수록 냉방효율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 냉방효율에 따른 실내공기와 실외공기의 절대습도차를 나타낸 것이다. 효율이 높으면 실내공기의 절대습도는 증가(포치는 감소)하게 된다. 그러면 실내와 실외의 절대습도차는 커지고  $W_i - W_o$ 가 커짐에 따라 환기에 의한 수증기 제거(배출)가 잘 되고, 그에 따라 다시 증발효율을 상승시키므로 냉방효율이 높아지는 순환구조를 갖게 되는 것으로 판단된다.

냉방효율과 뚜렷한 경향을 보이는 분무량 및 실내의 절대습도차와의 관계를 회귀식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_c = 1.81(W_i - W_o) + 19.11S_m \quad (3)$$

여기서,  $E_c$ 는 냉방효율(%),  $W_i$ 와  $W_o$ 는 실내 및 실외 절대습도( $g \cdot kg^{-1}$ ),  $S_m$ 은 분무량( $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )이다. 유의

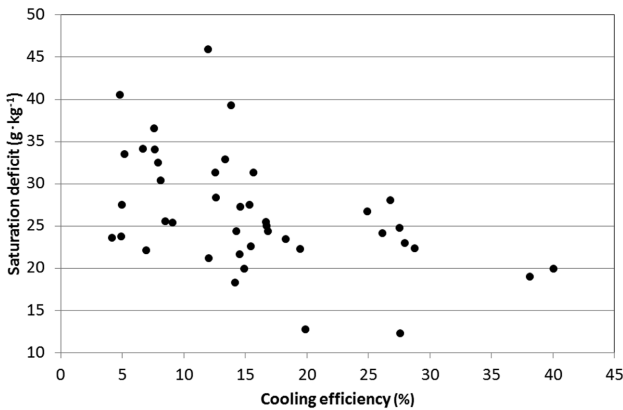


Fig. 7. Saturation deficit in the fogged greenhouse with cooling efficiency.

성은 회귀식( $p < 0.001$ ),  $W_i - W_o$ ( $p < 0.05$ ),  $S_m$ ( $p < 0.001$ )으로 매우 높게 나타났다.

Fig. 7은 냉방효율에 따른 실내공기의 포차(saturation deficit) 변화를 나타낸 것이다. 냉방효율이 높다는 것은 증발이 많이 일어난다는 것이므로 증발된 수증기로 인해 실내공기의 포차는 감소하게 된다는 것을 확인할 수 있었다. 실험구간 내에서 최대효율일 때 실내공기의 포차는  $10 \sim 20 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  이하로 나타났다. Fig. 5에서 분무량을 더 늘리면 냉방효율을 증가시킬 여지가 남아있는 것으로 생각되며, Fig. 7에서 추세선을 연장하면 포차가  $10 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  이하에서는 증발이 잘 일어나지 않을 것으로 판단되므로 이 때 분무를 멈추고, 포차가 어느 정도 회복된 후에 다시 가동해야 할 것으로 생각된다.

Table 7은 온도와 습도에 따른 포차를 나타낸 것이다. 포차  $10 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 를 기준으로 할 경우 온도  $32^\circ\text{C}$  이하에서는 상대습도 70%,  $33 \sim 35^\circ\text{C}$ 에서는 75%,  $36^\circ\text{C}$  이상에서는 80%가 넘으면 가동을 멈춰야 할 것으로 판단된다. 포차  $5 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 를 기준으로 할 경우에는  $32^\circ\text{C}$  이하에서 85%,  $33^\circ\text{C}$  이상에서는 90%가 넘으면 분무를 정지하는 것이 적당할 것으로 판단된다. Fig. 7에서 냉방효율이 비교적 높은 경우의 포차는 대체로  $30 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  이하로 나타나고 있으므로 포차가  $30 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  정도까지 회복되기 전에 분

Table 7. Saturation deficit with air temperature and relative humidity (unit :  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

Relative humidity (%)	Air temperature ( $^\circ\text{C}$ )						
	32	33	34	35	36	37	38
70	9.5	10.1	10.7	11.4	12.1	12.9	13.7
75	7.9	8.4	9.0	9.5	10.1	10.8	11.4
80	6.4	6.8	7.2	7.7	8.1	8.7	9.2
85	4.8	5.1	5.4	5.8	6.1	6.5	6.9
90	3.2	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6

무를 시작하면 될 것으로 생각된다.

실내공기의 포차에 의한 제어를 수행하기 위해서는 컴퓨터 제어시스템을 도입해야 한다. 그러나 현재 보급되고 있는 이류체 포그시스템의 제어장치는 온도하한, 습도상한, on-off시간만 설정할 수 있으므로 보다 간편한 제어 알고리즘을 개발할 필요가 있을 것으로 판단된다.

이상의 분석결과로부터 판단할 때 실내공기의 포차를 기준으로 이류체 포그시스템을 제어하는 것이 가장 합리적인 것으로 생각된다. 그러나 현재의 이류체 포그시스템 제어장치와 같은 간편제어를 고려할 때는 습도상한 및 적절한 분사시간과 정지시간을 찾는 것이 중요하다.

다음은 분무시간 및 정지시간과 실내공기 포차 사이의 회귀분석 결과이다.

$$S_d = 22.18 - 0.04S_{on} + 0.12S_{off} \quad (4)$$

$$S_d = 27.49 - 0.095S_{on} \quad (5)$$

$$S_d = 19.61 + 0.184S_{off} \quad (6)$$

여기서,  $S_d$ 는 실내공기의 포차( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $S_{on}$ 은 분무시간(s),  $S_{off}$ 는 정지시간(s)이다. 회귀식(4)의 유의성은  $p < 0.01$ , 식(5)의 유의성은  $p = 0.08$ , 식(6)의 유의성은  $p < 0.01$ 로 나타났다. 분무시간에 대한 회귀식(5)의 유의성은 약간 떨어지지만 나머지 회귀식의 유의성은 매우 높았다. 분석인자 중에 회귀계수의 유의성은 분무시간에 비하여 정지시간이 훨씬 높게 나타났다. 이류체 포그시스템의 가동이 멈춘 후 실내에 증가된 수증기가 환기에 의해서 제거되는 속도가 일정한 것으로 판단된다.

식(6)의 기울기로부터 환기에 의해  $10 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 의 수증기가 제거되는 데는 약 54초의 시간이 필요하다. 수증기가 충분히 제거된 후에 다시 포그를 분사하려면 60초 이상의 정지시간이 필요할 것으로 판단된다. 식(5)의 기울기로부터 분무에 의해 가습되어  $10 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 의 포차가 감소하는데 걸리는 시간은 약 105초가 된다. on-off 시간을 120-60초로 설정하면 약  $11 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 의 포차 변동 범위에서 제어가 가능할 것으로 판단된다. 그러나 정지시간을 60초로 제어할 경우 온도상승에 따른 진폭이 커질 것으로 예상되므로 온도편차를 줄이기 위해서는 정지시간을 30초로 하여 60-30초로 설정하는 것이 더 적당할 것으로 판단된다. 본 실험에서는 60-15초가 가장 효율이 높았으며 그 다음으로 30-15초가 높았다. 분무시간을 45~120초까지 설정했던 2011년도의 실험에서도 비교적 높은 효율을 보였지만 60-15초, 30-15초의 경우 보다는 낮았다(Nam 등, 2012).

따라서 이류체 포그시스템의 드레인 시간 등을 고려하여 60-30초가 가장 적당할 것으로 판단된다. 그러나 온도의 진폭을 어느 정도 허용하고, 시스템의 공기압축기

용량이 충분하지 못할 경우에는 120-60초로 설정하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 이상의 결과를 종합하여 이류체 포그시스템의 제어 알고리즘을 다음과 같이 유도하였다.

- ① 컴퓨터 제어시스템을 사용하는 경우
  - 비가 오는 날은 포그 분사를 중단한다.
  - 외부 일사량이  $100W \cdot m^{-2}$  이하일 때는 포그 분사를 중지한다.
  - 외기 상대습도가 80%를 초과하면 포그 분사를 중지한다.
  - 실내공기의 포차가  $5g \cdot kg^{-1}$  이하일 때는 포그 분사를 중지한다.
  - 설정온도를 초과하고 위의 중지조건에 해당되지 않을 때의 분무 사이클은 60초 on, 30초 off로 유지한다.

② 간편 제어시스템(온도하한, 습도상한, on-off시간만 설정)을 사용하는 경우

- 공기압축기 용량이 충분하고 온도편차가 작은 온실에서는 분무 사이클을 60초 on, 30초 off로 설정하고, 온도하한은 30~32°C, 습도상한은 85~90%로 설정한다.
- 공기압축기 용량이 불충분하고 온도편차가 비교적 큰 온실에서는 분무 사이클을 120초 on, 60초 off로 설정하고, 온도하한은 32~34°C, 습도상한은 75~80%로 설정한다.

## 적 요

최근 국내에 많이 보급되고 있는 이류체 포그 냉방시스템의 효율적인 제어알고리즘을 개발하기 위하여 다양한 조건의 분무사이클을 설정하여 토마토재배 온실에서 냉방실험을 실시하였다. 냉방효과는 평균 1.2~4.0°C를 보였고, 냉방효율은 평균 8.2~32.9%로 나타났다. 분무간격에 따른 실험에서 90초 분무사이클의 냉방효율이 가장 높았고, 대체로 분무시간이 길수록, 정지시간이 짧을수록 냉방효율이 높게 나타났다. 이류체 포그시스템의 분무량이 증가할수록 냉방효율이 높아지는 경향을 찾을 수 있었다. 그러나 분무량을 증가시키더라도 내부공기가 포화상태에 가까워지면 더 이상 증발이 일어나지 않으므로 내부공기가 포화상태에 도달하기 전까지 분무량을 증대시키는 방법으로 냉방효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 냉방효율이 증가함에 따라 실내공기의 포차는 감소하였고 실내외 절대습도 차이는 증가하는 경향을 보였다. 포그의 증발량이 증가할수록 실내외 절대습도 차이는 커지고, 이에 따라 환기에 의한 수증기 배출이 잘 되어 다시 증발효율을 상승시키므로 냉방효율이 높아지는 순환구조를 갖게 되는 것으로 판단된다. 분무

시간과 정지시간에 따른 실내공기의 포차변화를 회귀분석한 결과  $10g \cdot kg^{-1}$ 의 포차 변화에 필요한 분무시간은 120초, 정지시간은 60초로 나타났다. 그러나 온도의 진동폭을 줄이고 냉방효율을 높이기 위해서는 포차의 변동 범위를  $5g \cdot kg^{-1}$ 로 설정하여 60초 분무, 30초 정지가 더 적당할 것으로 판단된다. 이류체 포그시스템의 제어 방식을 컴퓨터 제어시스템과 현재 보급되고 있는 간편 제어시스템으로 분류하여 제어알고리즘을 유도하였다. 자연환기 온실에서 간편 제어시스템을 사용한다면 분무 사이클을 60초 on, 30초 off로 설정하고 온도하한은 30~32°C, 습도상한은 85~90%로 설정할 것을 제안한다.

**추가 주제어 :** 자연환기온실, 분무사이클, 압축공기, 저압, 포그노즐

## 사 사

본 연구는 농림축산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.

## Literature Cited

- Abdel-Ghany, A.M. and T. Kozai. 2006. Cooling efficiency of fogging systems for greenhouses. *Biosystems Engineering* 94(1):97-109.
- Arbel, A., O. Yekutieli, and M. Barak. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* 72:129-136.
- Arbel, A., M. Barak, and A. Shklyar. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering* 84(1):45-55.
- ASAE Standards, 1997. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASAE. St. Joseph, Michigan. p.663-670.
- Handarto, M. Hayashi, K. Ohyama, H. Toida, E. Goto, and T. Kozai. 2006. Developing control logic for a high-pressure fog cooling system operation for a naturally ventilated greenhouse. *Environ. Control Biol.* 44(1):1-9.
- 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. *Journal of Bio-Environment Control* 10(1):10-14 (in Korean).
- 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.
- 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).
- Lee, J.H. 2013. Introduction of commercial crop production system and techniques in state-of-the-art greenhouse horticulture. *Proceeding of the KSAM & KSBEC 203 Spring*

- Conference. p.27-29 (in Korean).
- Li, S. and D.H. Willits. 2008. Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses. *Biosystems Engineering* 101:69-77.
- 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).
- Nam, S.W., Y.S. Kim, I.M. Sung, and G.H. Ko. 2011. Operation status and improvements of low pressure air fog nozzles installed in greenhouses. *Proceeding of Bio-Environment Control* 20(2):210-211 (in Korean).
- Nam, S.W., Y.S. Kim, I.M. Sung, and G.H. Ko. 2012. Cooling efficiency of low pressure compressed air fogging system in naturally ventilated greenhouses. *J. of the KSAE* 54(5):49-55 (in Korean).