

포그노즐을 이용한 온실냉방시스템 분석

Fog nozzle - Greenhouse Cooling System Analysis

김영중 · 유영선 · 윤진하 · 오권영 · 김승희

농업기계화연구소

Y. J. Kim, Y. S. Ryou, J. H. Yun, K. Y. Oh, S. H. Kim

National Agricultural Mechanization Research Institute

1. 서론

하절기 우리 나라의 온실내 온도는 40℃ 또는 그 이상으로 육박하고 있어서 작물 재배에 적합하지가 않다고 말한다. 채소류중에서 비교적 고온에서도 견딜 수 있는 가지과와 박과의 경우 생육 적기온은 20 ~ 28 ℃ 범위에 있으며 최고 한계 온도는 35℃ 정도이므로 여름철 온실내의 환경은 대체로 작물 재배에 적합하지가 않다고 할 수 있다²⁾. 또한, 고온으로 인한 재배작물의 품질저하도 고온기 작물생산에 심각한 문제점으로 지적되고 있다. 이에 따라 대부분의 온실 작물 재배 농가에서는 하절기에는 휴작을 하고 있는 실정이다. 이러한 하절기 온실에서의 고온 극복을 위해서 여러 가지 방법이 이용되고 있으며, 주요 방법으로는 차광막을 설치하여 일사량을 조절하거나 지붕살수, 팬 앤드 패드 및 이상의 방법을 조합하여 온실의 실내온도를 강하시키고 있다^{2,4)}. 유리 온실의 경우에는 천장과 측창에 흰색도료를 칠하여 일사량을 조절하고, 동시에 환기팬을 가동시켜 외부 공기를 유입하므로써 실내온도를 조절하고 있다. 표 1은 각 지역에서의 온도 강하 방법에 따른 베로온실의 실내외 온도의 차이를 나타낸 것이다.

Table 1. Temperature differences in venlo greenhouse in the different regions.²⁾

Region	Atmosphere Temperature	Greenhouse Temperature	Temperature Difference	Remark
Yangju	34.9	39.7	4.8	No window, curtain
Kwangyang	36.0	38.0	2.0	No window, curtain, water spraying on the roof
Pyeongchang	32.4	33.2	0.8	No window, curtain, water spraying on the roof
Eumsung	37.0	34.4	-2.6	Window, curtain, water spraying on the roof
Daejon	35.9	31.1	-4.8	Fan and pad, curtain, water spraying on the roof
Munhyung	35.4	41.5	6.1	No window, Curtain, no plant

표 1에서 보는 바와 같이 베로온실에서 실내의 온도를 강하시키기 위해서는 상당한 노력과 장치설비(지붕살수 + 차광막 + 팬 앤드 패드)가 필요하며, 외기온보다 4.8℃ 정도 낮출 수 있다고 보고 하였다²⁾. 그러나 지붕살수나 팬 앤드 패드의 시스템의 설치에는 많은 자본과

관리노력이 소요되어 그 경제적 효과에 의문이 생길 수 있다. 그러나 세무냉방시스템은 상대적으로 적은 비용과 관리노력으로 지붕살수나 팬 앤드 패드시스템 정도의 온도 강하 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다. 세무냉방은 적어도 $30\mu\text{m}$ 이하의 물입자를 실내의 뜨거운 공기에 분사시켜 물입자가 증발하면서 실내공기의 온도를 강하시키는 방식이다^{1,3)}. 습공기선도에서 보건대 어떤 온도, 상대습도에서 물을 분사시키면 온도는 이론적으로 포화습도(100%) 까지 저하시킬 수 있다. 그러나 이것은 이론적 수치로 실제의 온실에서는 일사량이 끊임없이 유입되고 또한 환기가 주기적으로 이루어지고 있기 때문에 대기온보다 최대 10°C 까지 저하 시킬 수 있다고 보고되었다^{5,6)}.

세무냉방의 효율은 여러 문헌에서 이미 보고가 되었고, 미세입자를 생산할 수 있는 노즐이 시판되고 있다. 그러나 우리 나라 온실에서 분무입자 및 분무량에 따른 온도강하 효과에 대한 분석은 미흡한 실정이다. 세무냉방시스템은 최근에 선진외국에서 도입되어 일부 온실에 시공되고 있으나, 분무량, 분무입자에 관한 정확한 이해가 없이 시공업자의 판단으로 설치되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 미포그노즐을 사용하여 온실의 증발냉각시험을 수행하였으며, 증발냉각에 의한 온실의 냉방 효과를 분석하여 적정 설계 조건을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

(1) 노즐선정

본 시험에 사용된 노즐은 MEE FOG 노즐로서 70 kg/cm^2 이상의 압력을 낼 수 있는 고압 펌프용으로 미세한 입자를 생산할 수 있는 노즐이다.

(2) 분무특성조사

MEE FOG 노즐의 분무특성조사에서는 분당분무량과 분무입자분포 및 평균입자를 조사하였다. 분당분무량은 1분간 분무시켜 메스실린더에 수집하여 조사하였고, 분무압력의 변화에 따른 분무입자의 크기별 분포를 조사하기 위하여 Malvern 입자분석기를 이용하였다.

(3) 분무낙하량조사

분무낙하량조사는 본 연구소의 패트온실($290 \times 265 \times 700 \times 2400$, 747m^3)에서 실시하였으며, 한 개의 노즐에 대하여 조사하였다. 분무는 1분간 하였으며, 그림 1에서 보는 바와 같은 장치를 제작하여 분무전후의 흡수지 무게를 측정하여 그 차이를 낙하량으로 결정하였다. 낙하량 측정은 분무거리별(노즐끝으로 부터 50, 100, 150cm)로 하였으며, 반복수는 2회로 하여 평균값을 취하였다.

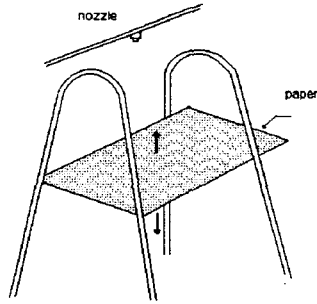


Fig. 1. Droplet collection apparatus.

(4) 세무냉방시험

세무냉방시험은 본 연구소의 패트온실(체적 747 m³)에서 그림 2와 같은 분무시스템을 구성하여 하절기에 실시하였으며, 분무시스템은 고압펌프, 미포그노즐 32개, 고압호스, 미세필터 2개, 양수펌프 1개, 물탱크, 타이머 등으로 구성하였다. 노즐은 간격을 1m로 하여 2줄로 설치하였고, 호스의 끝에는 압력계를 부착하였으며, 세무냉방시스템의 사양은 표 2에서 보는 바와 같다.

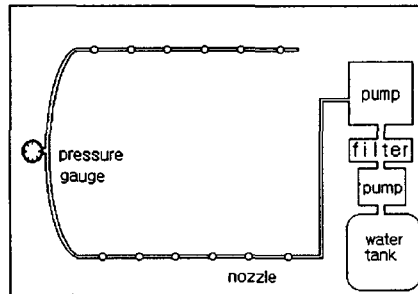


Fig. 2. Schematic diagram of fog misting system in the experimental greenhouse.

Table 2. Specifications of fog system.

Component	Specification
high pressure pump	2.5 hp, 0~150kg/cm ²
low pressure pump	0.5 hp, automatic pump
filter	less than 30 μm, 3/4"
water tank	10 l
control box	magnetic switch, timers
hose	pvc 10/6mm
nozzle	MEE fog nozzle

패트온실에서의 온습도는 TR-71, TR-72(한스시스템)의 디지털 온습도 측정기를 사용하였으며, 2초 간격으로 온습도 변화를 측정, 기록하였다. 분무시간은 콘트롤박스의 타이머로 조절하였다.

3. 결과 및 고찰

(1) 분무 입자 분포

고압펌프의 분무압력이 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우 MEE 포그 노즐에서 분무된 입자의 크기를 Malvern 입자분석기로 측정된 결과 그림 3에서 보는 바와 같이 포그 입자는 약 $200\sim 9\mu\text{m}$ 의 범위에 분포하였고, 전체입자의 52%가 $29.4\sim 10.5\mu\text{m}$ 의 범위에 분포하였으며, 평균값은 $27\mu\text{m}$ 로서 온실의 증발냉각에 충분히 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

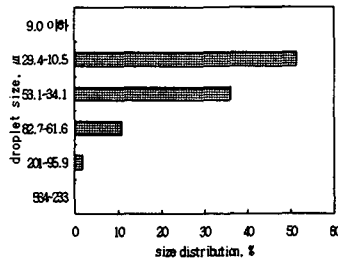


Fig. 3. Particle size distribution of the MEE fog nozzle.

(2) 압력에 따른 분무량과 분무 입자 크기

그림 4는 분무압력에 따른 분무량과 분무 입자의 크기를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 분무압이 증가할수록 분무량은 커지고, 분무입자는 작아진다. 그러나 분무량은 압력에 따라 거의 직선적으로 증가하였지만, 분무입자의 크기는 분무압의 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다. 분무압 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상에서 입자의 크기는 별다른 차이를 나타내지 않았지만 분무량은 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 계속적으로 증가됨을 알 수 있었다. 본 세무냉방시험에서의 시험조건인 분무압 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 분무량은 약 $100\text{ml}/\text{min}$ 이고, 분무 입자의 크기는 $27\mu\text{m}$ 로 나타났다.

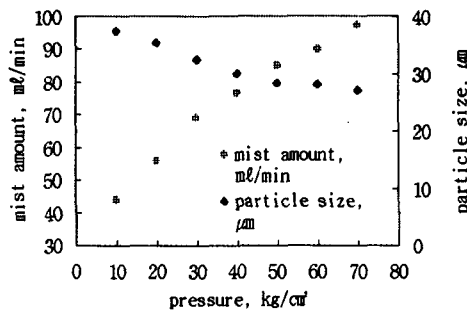


Fig. 4. Mist amount and particle size at the different pressure of the Mee fog nozzle.

(3) 분무 거리에 따른 낙하량

그림 5는 분무 압력 또는 입자의 크기에 따른 낙하량을 나타낸 것이며, 예상대로 입자가 작을수록 낙하율이 낮아지는 현상을 발견할 수 있었다. 이는 세무냉방시 입자 크기가 작아 야 공중에 부유하는 시간이 길어지게 되므로 될 수 있는대로 미세입자를 분사시켜야 할 것으로 사료된다. 분무압 70kg/cm², 분무입자 27 μ m에서 낙하율이 약 12%로서 최저값을 보였으며, 전체 분무량 중에서 약 12%가 지상 50cm에서 채취되었다(노즐은 지상 2m 위치에 설치). 이와 같은 결과로 미루어 보건대 적어도 분무량의 88% 이상이 공중에 부유하면서 온실의 증발 냉각에 이용되는 것으로 추정된다.

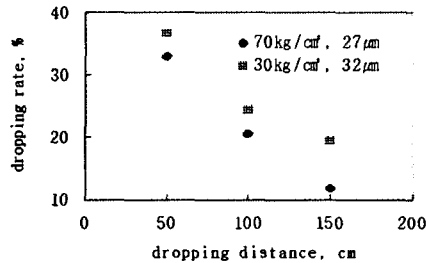


Fig. 5. Droplet collected rate at different distance and pressure.

(4) 온실의 세무 냉방 효과

그림 6은 미포그노즐을 사용하여 세무냉방시험을 수행하고, 온실의 온습도변화를 나타낸 것이다. 분무는 타이머를 세팅하여 1분 분무후 1분 환기를 하는 방법으로 20분간 연속적으로 온실 냉방 시험을 수행하였고, 그때 외기조건은 온도 34 $^{\circ}$ C, 상대습도 57%였다. 분무시작 후 패트온실내의 상대습도는 급격하게 증가되어 80%에 육박하였고, 온실온도는 40 $^{\circ}$ C에서 32 $^{\circ}$ C로 강하되어 외기온 보다 2 $^{\circ}$ C 낮게 나타났다. 여름철 작물재배시 가지과, 박과의 최고 한계기온이 35 $^{\circ}$ C라는 것을 감안하면, 온실온도 32 $^{\circ}$ C는 작물재배에 큰 지장이 없을 것으로 사료된다. 문제는 세무냉방으로 인한 상대습도의 증가인데, 이는 작물의 고온스트레스를 주기적으로 해소시켜야 한다는 연구 결과에 근거하여 주기적으로 분무를 수행하고 환기를 통하여 작물이 장시간 높은 상대습도에 노출되는 상황을 제거 한다면 큰 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

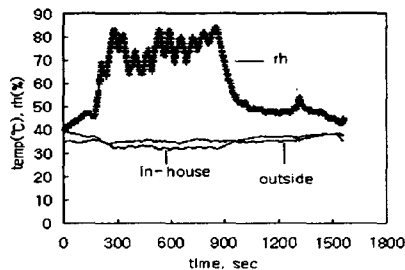


Fig. 6. Temperature and relative humidity changes by the fog misting system on a certain time.

(5) 온실의 규모에 따른 적정 노즐갯수 결정

온실크기에 따른 노즐갯수를 결정하기 위하여 본 시험의 분무조건(분무량 100ml/min, 분무입자 27 μ m)에서 5분 동안 분무냉방시험을 수행하였으며(그림 7), 분무량에 따른 냉방효과를 패트온실내의 온습도 변화로서 관측하기 위하여 외기의 유입을 가능한 한 차단하였다. 본 시험에서는 실제로 온실내의 공기가 보유하고 있는 열에너지가 물방울 입자를 증발시키면서 공기의 온도를 얼마나 강하시킬 수 있는지를 구명하고자 하였다. 따라서, 시험수행중 각 시점에서의 온도와 습도를 측정하였고, psychrometric equation을 이용하여 온실 내의 공기가 함유하고 있는 수분의 변화량을 계산할 수 있었다(그림 8). 이를 회귀식으로 나타낸 것이 식 (1)이며, 식 (1)에서 온실내의 하절기 최고온도값을 대입하여 2차방정식을 풀면 X_1 값, 즉 공기의 절대습도비를 구할 수 있다. 같은 방법으로 식 (2)에서 목표온도값(T_2)을 대입하면 X_2 값을 구할 수 있으며, 최종적으로 식 (3)으로 온도강하시 필요한 증발량을 정할 수 있게 된다. 분무량은 증발량을 증발율로 나눈 값으로 이는 입자의 크기 및 주위온습도, 시스템의 성능 및 기타 요인에 따라 결정될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 식 (4)를 이용하여 증발율을 계산하였으며, 증발율은 약 0.6으로 산출되었다. 이 증발율로서 한국형 표준온실 1-2W형(상면적 1,008 m^2 , 체적 8,350 m^3)과 3-2G형(상면적 1,350 m^2 , 체적 10,330 m^3)에서 기준온도, 40 $^{\circ}C$ 에서 목표온도로 강하시키는 데 필요한 분무량을 제시하였다(표 3). 따라서, 포그시스템을 설계할 때 필요한 포그노즐갯수는 분무입자의 증발율을 산정하여 증발량으로 나눈 값, 즉 분무량으로 포그노즐의 분당분무량으로 나눈 값으로 결정할 수 있다. 대표적 한국형 온실 1-2W(상면적 1,008 m^2 , 체적 8,350 m^3)와 3-2G-3S(상면적 1,350 m^2 , 체적 10,330 m^3)에서 기준온도 40 $^{\circ}C$ 에서 30 $^{\circ}C$ 로 강하시키고자 할 때 필요한 포그노즐(분당분무량 100ml, 분무입자 μ m, 3분 분무기준)의 수는 각각 270, 330개로 산정된다.

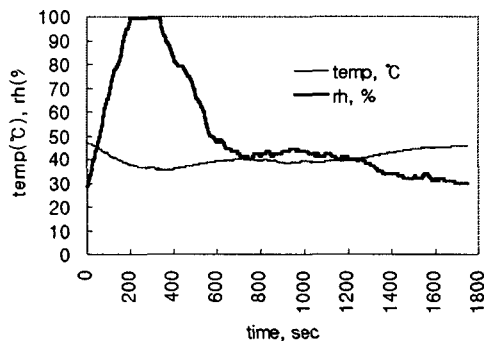


Fig. 7. Temperature and relative humidity change during five minutes water fogging.

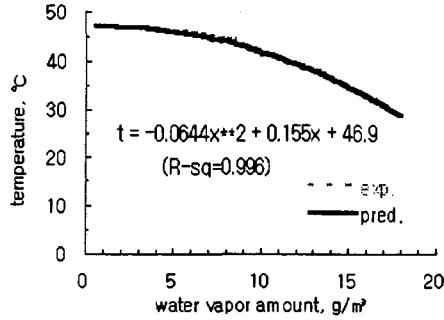


Fig. 8. Actual and predicted water vapor in the greenhouse by five minutes water fogging

$$T_1 = -0.064456 X_1^2 + 0.1551165 X_1 + 46.966714 \quad (1)$$

$$T_2 = -0.064456 X_2^2 + 0.1551165 X_2 + 46.966714 \quad (2)$$

$$X = X_1 - X_2 \quad (3)$$

여기서, T_1 = 온실내의 여름온도(°C)

X_1 = 온도 T_1 에서의 절대습도 (kg/kg')

T_2 = 목표온도 (°C)

X_2 = 온도 T_2 에서의 절대습도 (kg/kg')

$X = X_1 - X_2$ 온실체적에 따른 증발량(g/m')

$$\alpha = (W_f - W_i) / (W_m / V) \quad (4)$$

여기서, W_f = 분무후의 온실단위체적에서의 건공기 1kg당 수증기량, kg/kg

W_i = 분무전의 온실단위체적에서의 건공기 1kg당 수증기량, kg/kg

W_m = 노즐에서의 분무량(kg)

V = 온실의 체적(m')

Table 3 Required water fogging amounts in the 1-2W and 3-2G-3S type standard Korean greenhouse when cooling begins at 40°C to the various temperature levels.

°C From indoor temperature of 40	Evaporation amount (g/m')	Spraying amount (ml/m')	Spraying amount 1-2W(8,350m')	Spraying amount 3-2G-3S(10,330m')
38°C	1.39	2.3	19.3 l	23.9 l
36	2.63	4.4	36.6	45.3
34	3.77	6.3	52.4	64.8
32	4.82	8.0	67.0	82.9
30	5.80	9.7	80.7	99.9
28	6.73	11.2	93.6	115.8

참고문헌

1. 서원명, 민영봉, 박중춘. 1994. 온실의 냉방관리를 위한 기화냉각시스템 도입. 시설원예연구 Vol. 1. 경상대학교 농과대학부설 시설원예연구소
2. 첨단시설원예. 1995. '95 농촌지도공무원 전문교육교재. 농촌진흥청
3. 서원명, 윤용철, 박중춘, 손영걸. 1995. 우리나라 온실의 냉방시스템 도입검정. 경상대 시설원예연구. Vol. 2. 경상대학교 농과대학부설 시설원예연구소.
4. 우영희, 남윤일, 송천호, 김형준, 김동억. 1994. 하절기 효율적인 하우스 온도 습도 관리에 관한 연구. 생물생산시설환경. 제3권. 제 1호
5. Bottcher, R.W. and G.R. Baughman. 1990. Analysis of misting and ventilation cycling for broiler housing. Transactions of the ASAE. Vol 33(3)
6. Bottcher, R.W., G.R. Baughman, R.S. gates and M.B. Timmons. 1991. Characterizing efficiency of misting systems for poultry. Transactions of the ASAE. Vol 34(2)