

RESEARCH ARTICLE

시설원에 냉방을 위한 안개분무(포그) 결합 유동팬 구성방법 연구

손진관^{1†}, 임류갑^{2*†}, 박민정¹, 강태경¹, 윤성욱¹

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 에너지환경공학과

²한국농업기술진흥원 디지털농업본부

A Study on the Construction Method of Airflow Fan and Fog Combined System for the Cooling of the Greenhouse Facility

Jinkwan Son¹, Ryugab, Lim^{2*}, Minjung, Park¹, Taeyoung, Kang¹, Sungwook, Yun¹

¹Energy & Environmental Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju, Republic of Korea

²Department of Digital Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Iksan, Republic of Korea

*Corresponding author: limso@koat.or.kr

†These authors equally contributed to this study as first author.

Abstract

The Korean facility horticulture industry is on the rise. However, climate change and warming are making it more difficult to produce crops in the summer. Therefore, it is necessary to input a technology capable of reducing the cooling load. This study is a technology development that combines an air airflow fan and a fog spray device. This technology can effectively lower greenhouse temperatures. In addition, farmers can reduce installation costs. There are 126 farms using airflow fans in 426 farms in the facility horticultural greenhouse, accounting for 30%. A typical fan size is 30 cm. Up to 10 fog nozzles can be attached here. Dry-bulb, Wet-bulb, Controller, Inverter type pump, Water reservoir, and Fognozzles are required to operate the airflow fan and fog combined system. The control system allows the step and range to be set and the operation time to be input. As a result of wind velocity, it was confirmed that the left point was measured low and the distance decreased. Considering the wind distance, arrangement, orientation, and installation intervals should be adjusted so as not to affect the crop. The particle size increases as the distance increases. The attachment of less than 10 fog nozzles and the use of high pressure nozzles should be considered. It is necessary to find out the actual efficiency of the airflow fan and fog combined system through further research.

Keywords: agriculture; climate change; horticulture; nozzle, sustainable; warming



OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20220004>

Received: September 02, 2022

Revised: November 14, 2022

Accepted: November 15, 2022

Copyright: © 2022 Journal of Agricultural Machinery Engineering



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

연구의 배경 및 필요성

한국 농업 중 시설원에 산업은 많은 소득과 고부가가치를 창출하여 백색혁명으로 평가받았다(Son et al., 2019). 이러한 시설원예가 차지하는 비중은 전체 원예산업의 40% 이상으로 큰 비중을 차지하고 있고(Nam, 2003; Ko et al., 2013; MAFRA, 2014; MAFRA, 2015), 자동화에 따른 노동력 절감, 고품질 농산물 생산을 통한 고부가가치 창출이라는 장점으로 면적은 지속적으로 증가하는 추세이다(Jeoung and Park, 2003; MAFRA, 2017).

시설원에 작물 생산에 있어 필요한 환경조건은 광량, 온도, 습도, 수분, 비료, 양액, 시설, 배지 등의 다양한 요인이 있으며, 서로 유기적인 상호작용과 조건이 부합해야 안정적으로 원예작물을 생산할 수 있다(Kang et al., 2016).

우리나라의 뚜렷한 사계절은 겨울철 혹한과 여름철 폭서가 발생하며, 이에 따라 시설원에 운영에 난방, 환기, 가습, 제습 또는 냉방의 요구가 필요한 실정이다(Kang et al., 2016). 더불어 계절에 따라 일사량이 달라지기 때문에 이에 맞는 원예시설의 운용과 작물관리에 필요한 적절한 기술투입을 요구하고 있다(Son, et al., 2018). 이러한 이유로 시설원예에서 사용되는 에너지의 약 40% 정도를 온도관리에 사용할 만큼 가장 중요한 부분으로 여겨지며, 시설온실 생산 작물의 대부분이 약 10°C 이하와 30°C 이상일 때 가온과 냉방이 필요한 것으로 알려져 있다(Nicolas, 2013).

한편, NIMR(2009)의 A1B 시나리오에서는 한반도의 기후변화를 1971~2000(20세기말) 대비 2071~2100(21세기말)의 기온 변화를 한반도 전역에서 4°C, 남한 내륙지역에서 3.8°C 상승할 것으로 예측하였다(Kim et al., 2013). 이러한 기온상승과 밀접하게 연결되는 농업부문은 파종, 개화, 관개, 비료, 수확 등 작물생육 전분야에서 큰 영향과 변화를 동반하고 다양한 피해가 예상되어진다(Howden et al., 2007; KREI, 2009; 2015). 실제로 기온이 약 2°C를 넘게 상승하게 되면 농업 분야에서 곡물 생산량은 크게 감소할 것이라는 연구결과가 있다(Challinor et al., 2014).

여름철 기온상승으로 인한 열섬현상은 우리나라 농촌의 대표 토지이용인 논외의 경우 조절 기능이 뛰어나다고 평가되지만(Seo, 2005), 시설원예단지 조성은 온실이 해당지역의 열을 흡수하고 정체시켜 약 38°C 이상까지 상승되어 온실효과를 높이는 부정적인 공간이 될 수 있다(Son et al., 2018; 2019). 이러한 이유로 시설원예의 경우 여름철 고온기에 냉방을 투입하여 작물을 생산하는 것을 경제적으로 부담스러워하며(Arbel et al., 1999; Kitta et al., 2003; Choi et al., 2015), 냉방을 미투입하는 조건에서 작물생산 시 생산물이 고온 장해를 입어 생육에 문제가 발생할 수 밖에 없는 것이 현실이다(Choi et al., 2000; 2004). 여름철 높은 온도로 형성되는 시설원예단지의 온도를 조금이나마 저감시킬 수 있다면 재배 작물 생산에 다소 효과적일 수 있으므로 냉방에 필요한 다양한 기술개발은 중요한 연구과제라고 판단할 수 있다. 더불어 계속되는 온난화와 기후변화에 대응하기 위해서는 냉방부하를 줄일 수 있는 기술은 계속해서 개발될 필요성이 있다고 판단된다.

한국의 원예시설 작물 재배 기간은 보통 9월에 시작하여 이듬해 4-6월까지 진행된다. 이것은 여름철 약 35°C까지 치솟는 온도를 시설 내부에서 제어하기 어려워지게 되고 그로 인해 여름철 작물생산을 포기하는 원인이 된다. 평창, 철원, 삼척 등 일부 고산지역에서는 시설원예에서 여름철 작물생산이 가능하지만 해당지역도 여름철 온도관리를 위해 다양한 기술을 투입하고 어려움을 겪고있다(Jang et al., 2018). 시설원예에서 운용중인 냉방부하를 저감시키는 기술은 히트펌프, 차광, 환기팬, 유동팬, 안개분무 등이 있지만 냉방부하 요구도를 만족시키지 못하는 것이 현실이다. 더불어 앞서 제기한 온난화와 기후변화로 인해 지속적으로 대기온도가 상승하게 된다면 현재의 작물생산 주기보다 짧게 생산하게 될 수 있고, 현재 여름철 생산가능 지역 또한 위협받게 될 가능성도 있다.

이와 같이 기후변화로 인한 한반도의 온도상승은 시설온실의 냉방부하를 높아지게 하며, 현재의 기후상태에서도 냉방을 통해 시설 내부의 요구온도로 저감하기 어려운 실정으로 냉방효율이 높은 기술개발과 투입은 계속 진행될 필요가 있다고 요약할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시설원예 온실에서 운영하는 냉방부하 저감 장치를 알아보고 해당 장치 중 공기

유동팬과 안개분무 장치를 결합하여 온실 내 온도를 보다 효율적으로 저감 할 수 있는 방안을 알아보려고 하였다. 본 연구에서 제시하는 안개분무(포그) 장치 결합 유동팬은 현재 농가에서 운용중인 유동팬에 추가적으로 안개분무장치를 결합하는 방법으로 유동팬과 포그의 일반적인 효과는 연구동향 고찰에서 제시하였다.

안개분무장치 활용 주요 기술 및 연구 동향 고찰

국내에서 보고된 안개분무장치 활용 연구는 터보팬과 2류체 노즐로 분무장치를 구성해 입자의 입경변화 및 온실의 냉각효과를 측정 한 Kim et al. (2012)의 연구에서 분무입자를 송풍에 의하여 공기중 비산 시간을 늘리고 증발속도를 높이면 83.8%가 증발하는 효과를 보고함으로써 포그(안개분무)노즐을 온실 냉방에 이용 시 송풍결합이 냉방효과에 유리한 환경임을 제시해 주었다. Kim et al.(2015)은 고온기 차광제와 이류체 포그시스템을 이용해 대조구에 비해 3~5°C 온도 하강 효과를 확인하였으며, 더불어 상대습도를 적절히 조절 가능함을 확인하였다. Nam et al.(2015)은 포그 시스템의 증발효율 실험을 통해 냉방부하 산정식을 구성하여 증발효율이 평균 0.67임을 제시하였다.

국외 연구에서는 안개분무장치 활용이 온실 고온 극복 방법으로서 활용 가능하다는 보고를 확인하였고(Albel et al., 1998; 1999; 2003; Ahmed et al., 2006; Villarreal-Guerrero et al., 2012; Ishigami et al., 2014), 온실내 온습도 편차로 인해 작물생육이 불균일하면 수량 및 품질이 떨어지는데(Bakker and Holstein, 1989; Yu et al., 1998) 환경요인들의 균일성을 개선하는 방법으로 환기를 포함한 공기유동기술이 가장 유효함을 확인하여(Goeijenbier, 1986; Fernandez and Bailey, 1994) 유동팬의 운용은 필수적임을 확인하였다. Sibata (2011)는 안개분무 노즐 수를 대폭 줄일 수 있는 공기순환팬과 분무 입경 30~40 μm 일류체 포그노즐을 결합하여 온도와 습도를 지표로 분사 제어를 수행하였으며, 온도를 외부온도 수준 또는 약간 낮은 온도로 강하시키는 효과를 확인했고 폭염이 있던 2년 동안의 토마토 수확율이 13, 15% 증가한다는 결과를 도출하였다. Arbel et al. (2006)는 온실 냉방을 위해 강제환기, 고압 포그시스템을 사용하여 온실 내부 온도와 상대습도를 설계 목표인 28°C, 80%를 유지 할 수 있음을 확인하였다.

이상의 국내외 연구 및 특허동향 분석 결과 본 연구에서 추진하고자 하는 안개분무 장치와 공기 유통팬 결합은 온실에서 분사되는 안개의 체류시간은 유동팬을 통해 지체시키고 더 넓은 범위의 공기와 접촉하므로 효율 증대를 확인할 수 있었다. 더불어 안개분무 장치는 고온기에 증발효율을 통해 온실의 열을 배출시키므로 필요성이 입증되었고 고온기 냉방효과 이외에도 습도를 조절하는 다기능 효과도 확인할 수 있었다. 따라서 농가에서 운용중인 유동팬에 안개분무장치를 추가한다면 여름철 온도를 하강시킬 수 있는 장치로 활용 가능하며, 농가입장에서는 설치비를 다소 줄일 수 있는 기술이라고 판단된다.

Materials and Methods

주요 사용 냉방장치 및 유동팬 분석

시설원에 온실에서 사용중인 유동팬의 현황을 조사하기 위하여 4개 대상 단지를 선정하였다.

연구대상지는 국내 운영 중인 시설원에온실 중 이용빈도가 높은 작물인 파프리카(Paprika), 토마토(Tomato), 오이(Cucumber), 딸기(Strawberry)를 중심으로 하였다. 연구대상지 온실은 Fig 1.과 같은 대상지 에서 조사 가능한 곳으로 총 426 개소를 대상으로 하였다.

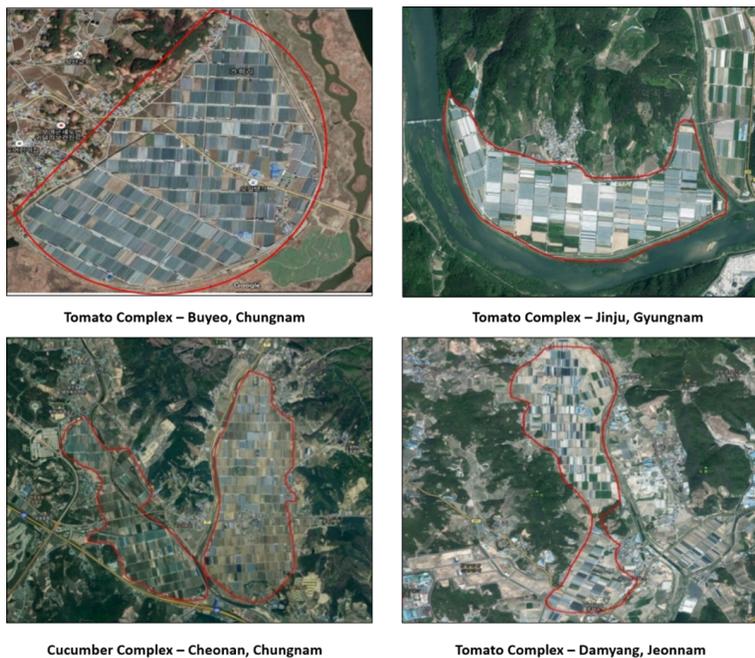


Fig. 1. The photography of study sites

주요 사용 유동팬의 풍속 도달거리 측정

국내 수경재배 운영 중인 시설원에 온실 조사결과를 중심으로 다수에서 사용되는 유동팬에 대해 풍속 도달 거리를 측정하였다. 시험에 사용한 유동팬은 총 6종으로 날개직경(Wings Size)를 기준으로 250 mm (250A~B, 2개), 300 mm (300A~B, 2개), 350 mm (350A~B, 2개)로 구분된다. 풍속 시험은 Fig 2.와 같이 연동형 온실에서 외부 교란이 없는 상태를 유지하여 시험하였다. 소비전력은 35~85 W로 회전수와 관계되는 요인으로 풍속 도달 거리와의 상관관계를 분석하고자 조사하였다.

풍속 측정은 AP471S2(DELTAOHM, PD Italy) 풍속 센서를 -0.5m(좌), 0(중앙), +0.5m(우), +1.0m(우)에 Fig 2의 B와 같이 각 설치하고 2, 4, 6, 8, 10m에서 Fig 2의 A와 같이 측정하였다.

Table 1. Airflow fan of major used in greenhouse farm for wind velocity distance reaching test

Classification	Wings Size (mm)	Power Consumption (W)
250A	250	65
250B	250	35
300A	300	75
300B	300	60
350A	350	85
350B	350	80

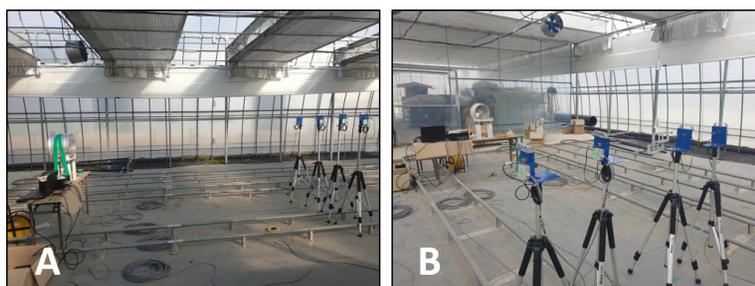


Fig. 2. Photo of wind velocity distance reading experiment (A : Airflow fan installation, B : wind velocity sensor installation)

유동팬과 안개분무 노즐 결합 및 운용 방법 설계

국내 수경재배 운영 중인 시설원에 온실을 중심으로 조사한 유동팬 현황을 근거로 팬 날개직경 30cm의 유동팬에 안개분무 노즐을 결합하는 방법을 설계안으로 제시하고자 하였다. 시스템 운용을 위해 필요한 재료를 구성하였으며, 운용을 위한 단계별 운용 및 제어 방법을 예시로 구분하여 현장 상태 및 농가 사정에 따라 변동할 수 있도록 설정방법을 제안하였다.

저압 안개분무(포그) 노즐 결합 공기유동팬 분무입경 시험측정

저압 안개분무(포그) 노즐 결합 공기유동팬의 분무 입경을 측정하였다.

시험 장치는 분무입자측정기(Malvern spraytec, UK)를 사용하여 Fig. 3과 같이 포그결합 유동팬을 가동한 상태에서 측정하였다. 측정 시 실험실의 조건은 온도 23.3 °C, 습도 64 %, 압력 8 kgf/cm²의 상태를 동일하게 유지한 상태에서 진행하였으며, 앞선 풍속 실험 결과를 반영하여 유동팬은 300A제품을 선정하여 활용하였다.

노즐은 일류체 노즐 오리피스 직경 0.01 mm제품을 장착하였으며, 유동팬에 결합이 용이하도록 원주 방향으로 결합하였다. 실험은 1 m (Fig. 3A), 2 m, 3 m (Fig. 3B)로 3회 실시하여 측정하였으며, 각 시험 지점 당 3점의 데이터를 취득하여 평균하였다.

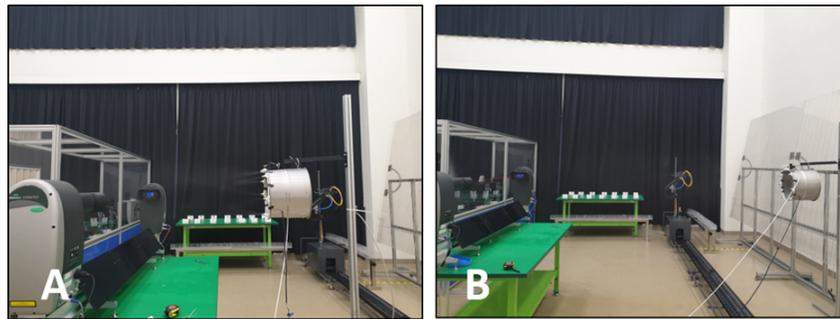


Fig. 3. Spray particle diameter measurement test (A : 1m distance, B : 3m distance)

Results and Discussion

시설원에 농가 주요 냉방장치 및 유동팬 분석

본 연구에서 조사한 시설원에 농가의 주요 냉방부하 저감 장치로는 Table 1과 같이 차광(Shielding), 천창개폐(Roof vent, Roll-up), 측창개폐(Side vent, Roll-up), 공기유동팬(Airflow fan), 강제환기팬(Forced ventilation fan), 안개분무(Fog)로 구분하였다.

토마토(Tomato) 주산단지인 충남 부여군 세도면 가회리의 157개 온실에서 조사한 결과, 온실 형태는 단동(Single-span)이 115개소로 73%, 연동(Multi-span)이 42개소로 27%로 구분되었다. 단동온실의 주요 시설은 차광 91.3%, 측창개폐 96.5%, 공기순환팬 19.1%로 구분되고 전체 농가 중 3개소에서 포그분무 장치를 선형으로 운용중인 것으로 조사되었다.

파프리카(Paprika) 주산단지인 경남 진주시 대곡면 덕곡리 53개 온실은 단동이 6개소(11.4%), 연동이 47개소(88.6%)로 구분되었다. 연동형 온실에서 사용중인 주요 냉방 시설은 47개소 중 차광 93.6%(44 개소), 공기순환팬 36.2%(17개소), 강제환기팬 27.7%(13 개소)로 조사되었다.

오이(Cucumber) 주산단지인 충남 천안시 동남구 목천읍 동평리 일대의 온실 형태는 단동이 77.5%(83 개소)이며, 주요 냉방 시설은 측창개폐 98.8%(82 개소), 공기순환팬 9.6%(8 개소), 강제환기팬 3.6%(3 개소)로 조사되었다. 연동형 온실 24개소 중 측창개폐는 100%로 조사되었지만 유동팬 운용은 2곳에 불과하였다.

딸기(Strawberry) 주산단지인 전남 담양군 수북면 수북리 일대에서 설치된 109개 온실의 형태는 단동이 107 개소(98.1%)이며, 주요 냉방 시설은 차광 60.7%(65 개소), 측창개폐 100%(107 개소), 공기순환팬 52.3%(56 개소)로 조사되었다.

전체 426개 농가에서 유동팬 사용 농가는 총 126개소로 30%에 해당되어 유동팬에 결합하는 안개분무 장치의 수요 농가는 충분히 확보되었다고 할 수 있다.

주요 사용 유동팬의 풍속 도달거리 측정시험 결과

국내 수경재배 운영 중인 시설원에 온실 조사결과를 중심으로 다수에서 사용되는 유동팬에 대해 풍속 도달 거리를 측정하였다. 시험에 사용한 유동팬은 날개직경을 기준으로 250 mm, 300 mm, 350 mm로 구분하여 실험하였다. 풍속 시험 결과 팬 풍향 기준 좌측(L, Left)-0.5m 지점은 중앙에 비해 월등히 풍속이 낮게 측정되었다. 250A와 250B의 경우 2m지점에서도 0.30 m/s, 0.60 m/s정도로 중앙지점 대비 절반 이하의 풍속이 측정되었으며, 날개직경과 소비전력이 가장 큰 350A에서도 0.37 m/s로 중앙 풍속 대비 10%도 미치지 못하는 풍속이 측정되었다. 포그결합 유동팬 구성 시 지점을 착안하여 좌측부에 미치지 못하는 것을 고려하여 설치방향을 선택해야 할 것으로 판단된다.

우측(R, Right)의 경우 좌측에 비해 비교적 유동이 가능하지만 이것 또한 +1.0 m지점이 되면 미약한 풍속으로 저감되므로 유동팬의 제원에 따라 배치, 방향, 거리 등을 조절해야 할 필요가 있다고 판단된다.

Table 2. Cooling and ventilation systems in use at the study site

Classification		Sample (Farms)	Shielding	Roof vent (Roll-up)	Side vent (Roll-up)	Airflow fan	Forced ventilation fan	Fog
Tomato	Single-span	115	105	1	111	22	8	1
	Multi-span	42	30	20	37	19	6	2
	Mid-Total	157	135	21	148	41	14	3
Paprika	Single-span	6	4	1	6	0	0	0
	Multi-span	47	44	47	30	17	13	0
	Mid-Total	53	48	48	36	17	13	0
Cucumber	Single-span	83	16	4	82	8	3	0
	Multi-span	24	18	19	24	2	3	0
	Mid-Total	107	22	23	106	10	6	0
Strawberry	Single-span	107	65	0	107	56	19	0
	Multi-span	2	2	2	2	2	0	0
	Mid-Total	109	67	2	109	58	19	0
Total	Single-span	311	190	6	306	86	30	1
	Multi-span	115	94	88	93	40	22	2
	Total	426	284	94	399	126	52	3

중앙부에서 측정된 풍속을 기준으로 날개직경과 소비전력간의 상관관계를 Regression을 통해 알아보았다. 날개직경과 2m지점에서 측정된 풍속은 Regression 1로 R²=0.8760의 높은 상관관계가 인정되었으며, 소비전력도 Regression 2에 나타난 바와 같이 R²=0.6402 정도로 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

$$\text{Regression 1 } y = 30.575x + 212.81 \quad (R^2 = 0.8760)$$

$$\text{Regression 2 } y = 10.563x + 36.544 \quad (R^2 = 0.6402)$$

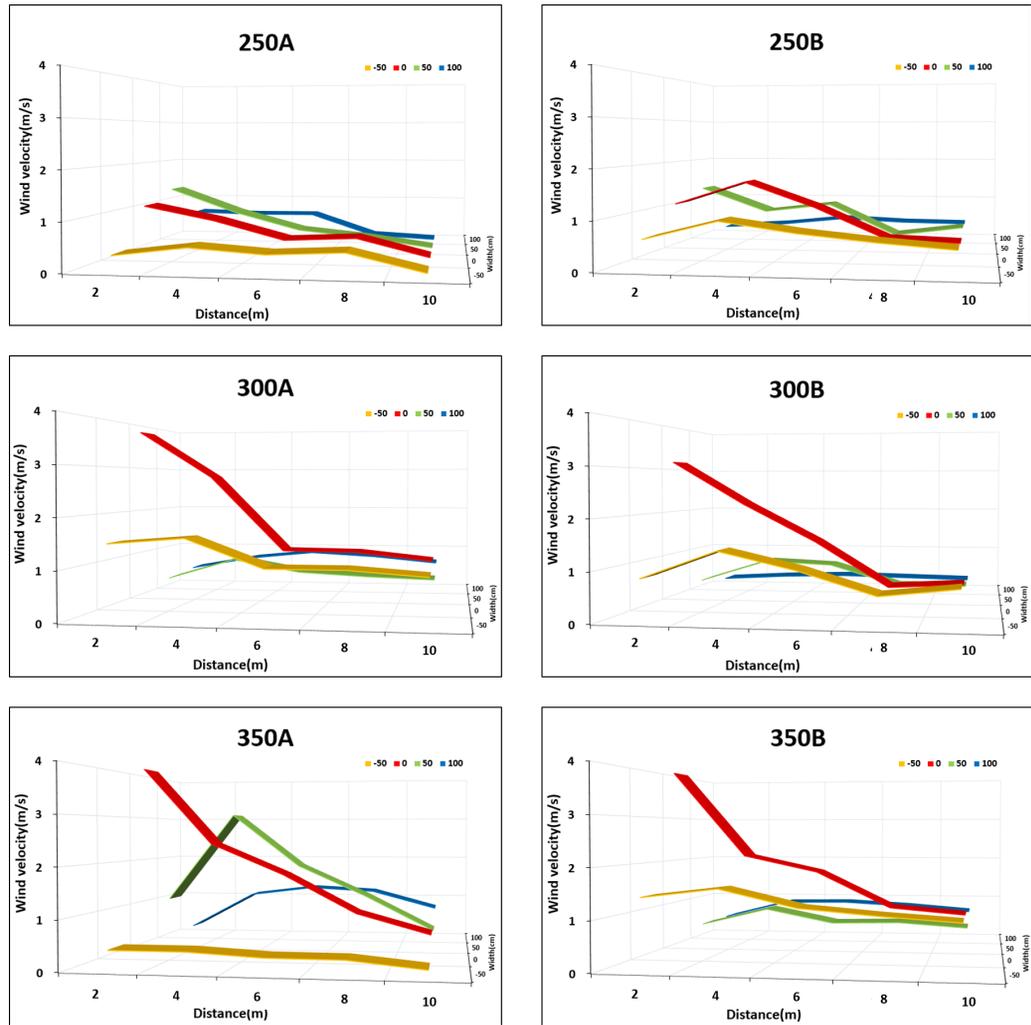


Fig. 4. The result of the airflow fan wind velocity distance reading test

소비전력과 관계 있는 회전수가 풍향에 영향을 미치므로 작물영향과 공기유동, 온도저감, 습도조절 등 다양한 목적 중 명확한 목적을 염두해두고 유동팬을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서 추진중인 포그결합형 유동팬의 경우 온도저감이 목적이므로 포그 입자가 최대한 공기와 마찰할 수 있도록 멀리 보내주는 것이 유리하지만 풍속이 작물에 영향을 미치지 않도록 주의할 필요가 있다.

6가지 유동팬 종류별 중앙부에서 측정된 풍속을 거리별로 저감 정도를 측정하였다. 대부분 10m지점에서는 0.5 m/s 정도의 풍속으로 평가되지만 안개형태의 분무입자를 공기중에 마찰시키기 위해서는 30 cm 정도의 날개직경을 갖는 풍속은 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용하게 될 안개분무(포그)장치 결합을 위한 유동팬의 날개직경은 30 cm로 선택하여 연구를 수행하였다.

Table 3. The result of the airflow fan wind velocity distance reading test (m/s)

Width (m)	Fan type	Distance (m)				
		2	4	6	8	10
-0.5 (L)	250A	0.30	0.49	0.38	0.45	0.09
	250B	0.60	0.98	0.77	0.62	0.50
	300A	0.42	0.87	0.60	0.52	0.47
	300B	0.83	1.38	1.03	0.57	0.73
	350A	0.37	0.37	0.29	0.28	0.13
	350B	1.41	1.59	1.24	1.11	1.01
0 (C)	250A	1.12	0.83	0.43	0.50	0.12
	250B	1.15	1.64	1.11	0.45	0.40
	300A	3.72	2.77	1.24	1.22	1.06
	300B	3.12	2.23	1.45	0.52	0.60
	350A	4.08	2.41	1.77	0.97	0.55
	350B	3.92	2.17	1.84	1.11	0.98
+0.5 (R)	250A	1.37	0.84	0.44	0.29	0.08
	250B	1.33	0.84	1.02	0.33	0.52
	300A	1.48	1.60	1.04	1.04	0.93
	300B	1.09	3.04	1.88	1.20	0.43
	350A	0.39	0.86	0.79	0.34	0.35
	350B	0.51	0.88	0.58	0.61	0.51
+1.0 (R)	250A	0.66	0.62	0.63	0.13	0.05
	250B	0.25	0.35	0.50	0.44	0.42
	300A	0.48	0.75	0.90	0.82	0.68
	300B	0.23	0.31	0.35	0.32	0.29
	350A	0.25	1.07	1.26	1.18	0.78
	350B	0.51	0.89	0.91	0.83	0.71

* L : left, C : Center, R : Right

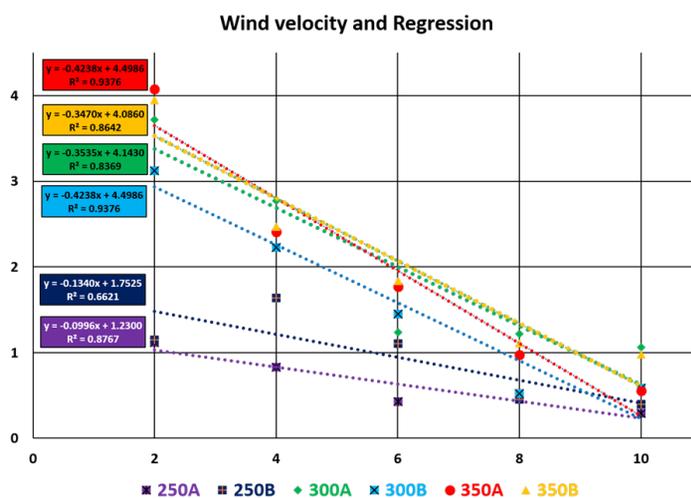


Fig. 5. Wind velocity and regression of center (0) by airflow fan types according to distance

유동팬과 안개분무(포그) 노즐 결합 및 운용 방법 설계

국내 수경재배 운영 중인 시설원에 온실을 중심으로 조사한 유동팬 현황을 근거로 Fig. 6와 같이 포그노즐을 공기유동팬에 결합하는 방법을 제시하였다. 기본적으로 결합된 공기유동팬은 온실 내부의 온도와 습도에 기초하여 제어되며 공기유동팬, 포그노즐을 각각 별도로 운영할 수 있어 농가 측면에서 고압 노즐과 공기유동팬을 분리하여 설치하였을 때에 비해 부대장치 비용과 설치 공간을 줄일 수 있다. 또한, 분무 입자가 공급되면서 팬이 함께 작동하여 입자가 온실 내에서 퍼질 수 있어 포그의 증발효과를 높일 수 있는 장점이 있어 용이하게 활용이 가능하다. 팬 날개 크기 30 cm의 유동팬에 안개분무 노즐을 결합 시 노즐과 결합부위 연결 등으로 노즐을 최대 10개까지 부착 가능한 것으로 조사되었다.

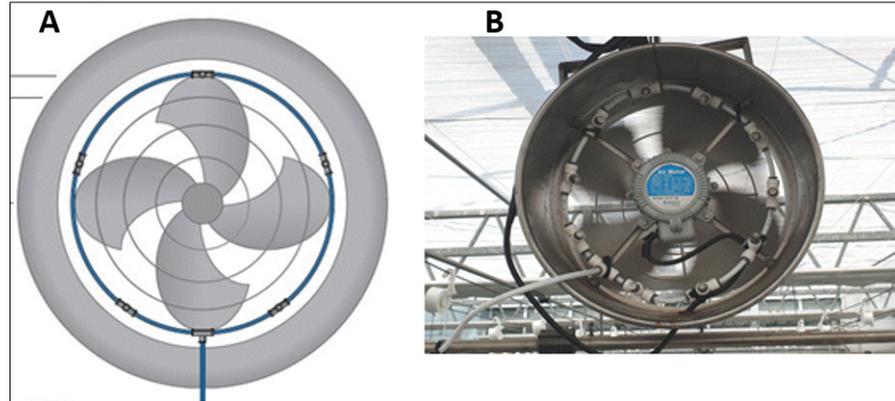


Fig. 6. Combination method of fog spray device of airflow fan for farm use (A: schematic diagram; B: combination photo)

세부적인 구성은 Fig. 7과 같이 시설 내의 온습도를 측정하기 위한 온습도 센서(Dry-bulb, Wet-bulb), 온습도 센서의 결과값에 기초하여 포그가 분사되는 양을 제어하는 제어시스템(Controller), 노즐로 물을 제공하는 가압펌프(Inverter type pump), 포그에서 사용되는 물을 저장하는 탱크(Water reservoir), 포그를 분사시키는 저압노즐(Fog nozzles)과 분사된 포그의 순환 기능을 증가시키는 유동팬(Airflow fan)으로 구성된다. 시설내부 온도와 습도를 상시 측정하고 설정한 온도 범위보다 높게 측정되면 콘트롤러를 통해 펌프에 전달하여 포그와 유동팬이 작동하는 원리이다.

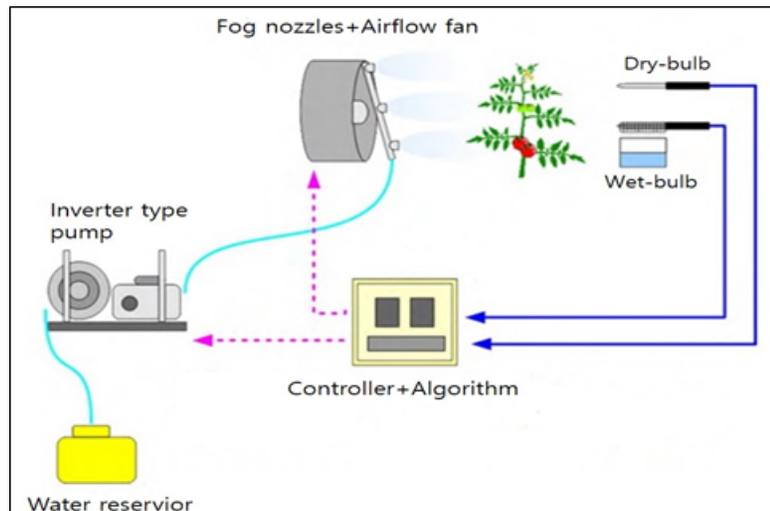


Fig. 7. Airflow fan and fog combined system material and operation diagram

기존의 고압 포그 노즐을 이용한 포그 시스템은 노즐의 막힘이 많고 노후에 의한 파열시 보수가 원활하지 못하며, 포그 입자의 공기 중 체류시간이 짧다는 점 등의 단점이 있고(Lee and Kim, 2011) 결합장치, 고압배관, 펌프 등 부대장치 비용이 많이 발생하기 때문에 저압 노즐을 활용하였다. 제어시스템은 온실 현장에서 실시간으로 변화하는 환경조건에 가장 적합하게 조절할 수 있도록 온도에 따른 정지 및 가동, 습도 구간별로 포그 간헐적 분무가 가능하도록 구성하였다. 제어시스템의 세부적인 방법을 보면 시설 내 환경에서 온도 및 습도의 유지범위인 한계 값을 설정하고 제어단계를 구분하여 구분된 제어 단계별로 토출량인 시간을 설정한 후 공기유동팬과 포그의 가동여부를 선택 해줌으로써 시설 내 온도 및 습도에 따라 단계별로 기존 설정된 가동을 수행하게 되어있다.

Fig. 8는 제어시스템의 간단한 알고리즘을 도식화 하였다. 온도 값에 의해 시작되는 제어시스템은 상세하게는 습도 범위에 따른 단계별(Step) 구간(Range)을 가지고 있으며, 단계의 수와 단계별 습도 값은 사용자의 입력 값에 따라 범위가 설정되고 작동(Operation)되는 시간(Time)을 입력할 수 있도록 하였다.

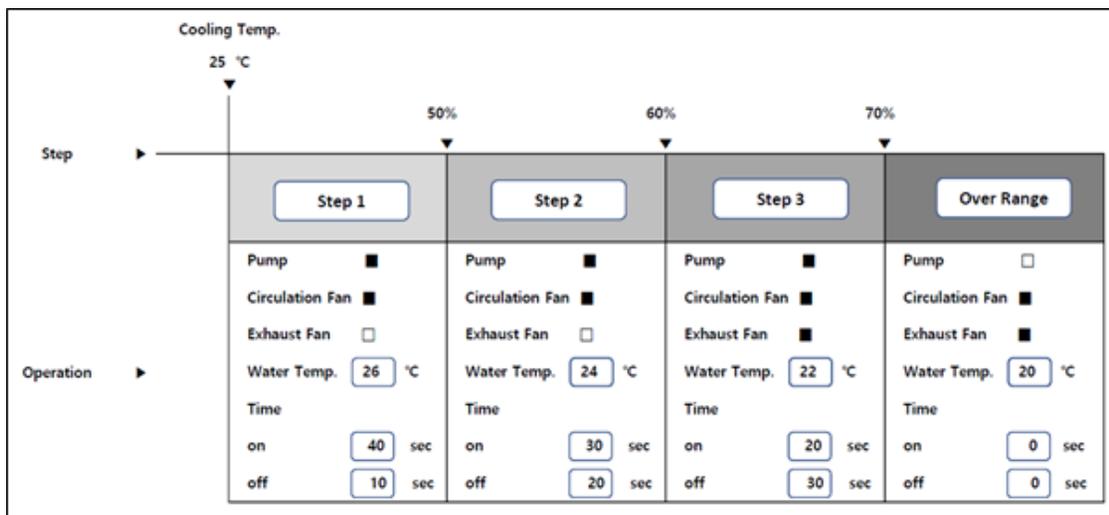


Fig. 8. Airflow fan and fog combined system operation diagram

설정을 입력할 수 있는 범위(Step)는 3단계로 구분하고, 각 단계별 습도 값을 50, 60, 70%로 설정(예시)한 결과를 도식화 하였으며, 시설 내 습도가 최종단계 값인 70% 이상을 초과구역으로 설정하여 대상 작물이 과습 상황에서 보호 받을 수 있도록 안개분무(Pump)는 정지하고 유동팬(Airflow fan)과 배기팬(Exhaust Fan)을 작동시켜 습도를 외부로 배출하고자 하였다.

습도는 현장 상황 및 농가의 운용 노하우에 따라 설정할 수 있도록 하였다. 단계 및 습도에 의해 구분되어진 구간을 1단계, 2단계 등으로 구분하고 구분되어진 구간별로 사용자는 어떤 설비를 적용하여 가동할 것인지 여부와 특히, 포그 분무에 있어 간헐적 분무가 될 수 있도록 분무시간(On)과 휴지시간(Off)을 지정하여 구간별로 다르게 작동함으로써 효율적인 냉방 관리가 가능하다.

저압 안개분무(포그) 노즐 결합 공기유동팬 분무입경 시험측정 결과

앞서 선택된 날개직경 30 cm 유동팬에 포그(안개분무) 노즐을 결합하여 거리별 분무 입경을 측정하였다. 노즐은 일류체 노즐 오리피스 직경 0.01 mm제품을 장착하였으며, 유동팬에 결합이 용이하도록 원주 방향으로 10개를 결합하였다.

Fig. 9와 Table 4에 제시한 바와 같이 실험결과 1 m 지점에서 평균 $62.69 \pm 0.27 \mu\text{m}$ 의 크기로 분석된데 반해 2 m 지점은 $69.65 \pm 0.49 \mu\text{m}$, 3 m 지점은 $79.03 \pm 1.82 \mu\text{m}$ 로 거리가 멀어질수록 입자가 커지는 경향을 확인할 수 있다. 이것은 분무된 입자가 서로 결합되어 나타나는 현상으로 안개분무 유동팬 운용 시 분무와 풍향 방향이 서로 겹치지 않게 할 필요성이 있다는 것을 확인할 수 있는 결과이다.

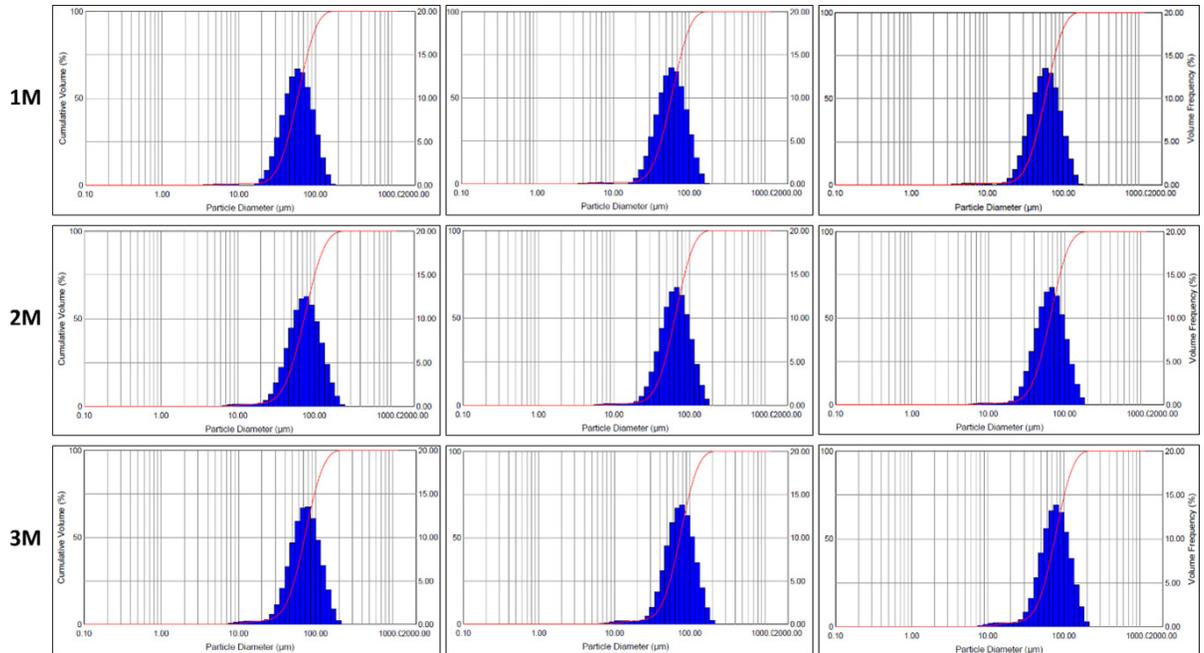


Fig. 9. Results of spray particle diameter measurement (3 repeated tests)

Table 4. Analyses result of spray particle diameter measurement

Classification		1 m	2 m	3 m
VMD (μm)	1회	62.91	70.20	77.34
	2회	62.76	69.26	78.79
	3회	62.39	69.49	80.96
Mean		62.69	69.65	79.03
S.D		0.27	0.49	1.82

안개분무(포그)의 입자는 작고 공기마찰이 높을수록 증발효율이 높고(Nam et al., 2005; 2012), 분무입자가 $50 \mu\text{m}$ 미만으로 분사되는 고압노즐이 효율이 좋은 것으로 평가되어 왔다(Abdel-Ghany and Kozai, 2006). 본 연구에서 추진한 저압 노즐 결합 안개유동팬의 평균 입자는 선행연구에서 제시한 고효율의 입자크기 이상이지만 공기마찰력을 높이는 유동팬과 결합하였으므로 냉방효율을 기대할 수 있다고 판단한다. 하지만 유동거리가 길어질수록 입자크기가 커지는 경향을 보완하기 위한 노즐 결합방법을 10개에서 그 미만으로 하는 추가적인 연구가 필요하고 설치비와 유지비 부담으로 추진하지 않은 고압 노즐과 펌프를 적용한 추가 연구도 필요하다고 판단된다.

Conclusion

한국 시설원에 산업은 지속적으로 증가하는 추세이며, 다양한 환경조건을 유기적으로 부합하도록 많은 기술이 개발 보급되고 있다. 우리나라의 여름철 폭서기는 냉방의 요구가 필요한 수준이지만 에너지 투입의 부담으로 작물생산을 포기하는 농가가 많으며, 기후변화와 온난화는 여름철 작물관리를 더욱 어렵게 하고 있다. 따라서 냉방부하를 줄일 수 있는 기술 투입은 미래 시설원에 산업의 필수적인 요소로 히트펌프, 차광, 환기팬, 유동팬, 안개분무 등이 있지만 농가의 요구를 만족시키지 못하는 것이 현실이다. 그중 안개분무 장치는 농가에 많이 보급되지 않은 냉방 기술이며, 유동팬은 온실 환기 및 냉방에 필수적인 요소로 평가받는다. 따라서 본 연구에서는 시설원에 온실에서 운영하는 냉방부하 저감 장치를 알아보고 해당 장치 중 공기유동팬과 안개분무 장치를 결합하여 온실 내 온도를 저감 할 수 있는 방안을 알아보고자 하였다. 농가에서 사용중인 유동팬에 안개분무장치를 추가한다면 여름철 온도를 하강시킬 수 있는 장치로 활용 가능하며, 농가입장에서는 설치비를 다소 줄일 수 있는 기술이라고 판단된다.

시설원에 온실에서 사용중인 유동팬의 현황을 조사하기 위하여 파프리카(Paprika), 토마토(Tomato), 오이(Cucumber), 딸기(Strawberry) 주산단지를 중심으로 426개 농가를 조사하였다. 시설원에 농가의 주요 냉방부하 저감 장치로는 차광(Shielding), 천창개폐(Roof vent, Roll-up), 측창개폐(Side vent, Roll-up), 공기유동팬(Airflow fan), 강제환기팬(Forced ventilation fan), 안개분무(Fog)로 구분되었고, 전체 426 농가에서 유동팬 사용 농가는 총 126개소로 30%에 해당되어 유동팬에 결합하는 안개분무 장치의 수요 농가는 충분히 확보되었다고 할 수 있다.

더불어 사용중인 유동팬 현황을 근거로 팬 날개 크기 30cm의 유동팬에 안개분무 노즐을 결합하는 방법을 제시하였으며, 팬 날개 크기 30cm의 유동팬에 안개분무 노즐을 결합 시 노즐과 결합부위 연결 등으로 노즐을 최대 10개까지 부착 가능한 것으로 조사되었다. 세부적인 구성은 온습도 센서(Dry-bulb, Wet-bulb), 제어시스템(Controller), 가압펌프(Inverter type pump), 탱크(Water reservoir), 저압노즐(Fog nozzles), 유동팬(Airflow fan)으로 구성된다. 제어시스템의 간단한 알고리즘을 도식화하였으며, 단계별(Step) 구간(Range)을 가지고 사용자의 입력 값에 따라 범위가 설정되고 작동(Operation)되는 시간(Time)을 입력할 수 있도록 하였다. 설정을 입력할 수 있는 범위(Step)는 3단계로 구분하고, 각 단계별 습도 값과 초과구역을 설정하여 과습 상황을 보호 받을 수 있도록 하였다. 현장 상황 및 농가의 운용 노하우에 따라 설정할 수 있도록 분무시간(On)과 휴지시간(Off)을 지정하여 구간별로 다르게 작동함으로써 효율적인 냉방 관리가 가능하다.

국내 수경재배 운영 중인 시설원에 온실 조사결과를 중심으로 다수에서 사용되는 유동팬에 대해 풍속 도달 거리를 측정하였다. 풍속 시험 결과 팬 풍향 기준 좌측 지점은 중앙에 비해 월등히 풍속이 낮게 측정되므로 이것을 고려하여 설치방향을 선택해야 할 것으로 판단된다. 중앙에서 측정한 풍속은 거리가 멀어질수록 급격히 풍속이 저감 됨을 알 수 있으므로 농가의 여건에 따라 포그결합 유동팬 운용 시 풍속도달 거리를 고려해 작물에 영향이 없도록 배치, 방향, 거리 등을 조절해야 할 필요가 있다고 판단된다. 본 연구에서 사용하게 될 안개분무(포그)장치 결합을 위한 유동팬의 날개직경은 30cm로 선택하여 연구를 수행하였다.

앞서 선택된 날개직경 30 cm 유동팬에 포그(안개분무) 노즐을 결합하여 거리별 분무 입경을 측정하였다. 실험결과 거리가 멀어질수록 입자가 커지는 경향을 확인할 수 있다. 이것은 분무된 입자가 서로 결합되어 나타나는 현상으로 안개분무 유동팬 운용 시 분무와 풍향 방향이 서로 겹치지 않게 할 필요성이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 연구에서 추진하는 유동팬 결합방법 또한 10개에서 그 미만으로 하는 연구와 고압노즐의 경우를 고려한 추가 연구도 필요하다고 판단하였다.

본 연구에서 제시한 기존 냉방 기술인 유동팬에 포그노즐을 결합한다면 더 넓은 범위의 증발을 기대할 수 있으므로 추가 연구를 통해 유동팬에 결합된 포그노즐의 실제 효율을 알아볼 필요가 있다고 판단된다. 이러한 연구는 시설원에 온실에서 에너지 소비량을 줄일 수 있어 탄소배출 저감에 이바지하는 연구이며, 지속되는 온난화 등의 기후변화에 대응하는 연구로 다양한 분야에 활용 가능하다고 기대한다.

Acknowledgements

본 연구는 2022년 농촌진흥청 국립농업과학원 연구사업(PJ01510403)에 의해 이루어진 것임.

References

- Ahmed, M., Abdel-Ghany, G. E. and T. Kozai. 2006. Evaporation characteristics in a naturally ventilated fog-cooled greenhouse. *Renewable Energy*, 31(14): 2207–2226.
- Arbel A., Yekutieli O., Barak M., Performance of a fog system for cooling greenhouses, 1998, *J. Agric. Engng Res.*, 72,129-136.
- Arbel, A., Yekutieli, O. and Barak, M., 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2): 129-136.
- Arbel, A., M. Barak, and Shklyar, A. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering*, 84(1): 45–55.
- Arbel, A., Shklyar, A. and Barak, M., 2006. Simulation model for bouyancy-driven ventilation for a greenhouse cooled by a fogging system. *Acta Hort. (ISHS)*, 719: 417-426.
- Abdel-Ghany, A. M., and Kozai, T. 2006. Cooling efficiency of fogging systems for greenhouses. *Biosystems Engineering* 94(1): 97-109.
- Bakker, J. C. and van Holstein, G. P. 1989. Horizontal temperature distribution in heated glasshouses : causes and effects. *Acta Horticulturae*. 245, 226-231.
- Challinor A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R., and Chhertri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4: 287-291. <http://doi:10.1038/nclimate2153>.
- Choi, Y.H., Lee, J.H., Park, D.K., Kwon, J.K. and Um, Y.C. (2000). Effect of Greenhouse Cooling Method on the Growth and Yield of the Tomato cv. Momotaro in Warm Season. *Journal of Bio-Environment Control*, 9(1), pp. 60-65.
- Choi, K.Y., Jang, E.J., Rhee, H.C., Yeo, K.H., Choi, E.Y., Kim, I.S. and Lee, Y.B. (2015). Effect of Root Zone Cooling Using the Air Duct on Temperatures and Growth of Paprika During Hot Temperature Period. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(3), pp. 243-251.
- Choi, Y.H., Kwon, J.K., Lee, J.H., Kang, N.J., Cho, M.W. and Son, B.G. (2004). Effect of Cooling Method on Growth and Yield of Tomato and Pepper Grown in Summer Season Greenhouse Culture. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 22(4), pp. 388-392.
- Goeijenbier, P. 1984. Using fans to limit temperature differences. *Naaldwijk Consultancy Service*, 52-55.
- Fernandez, J. E. and Bailey, B. J. 1994. The Influence of Fans on Environmental Conditions in Greenhouses. *J. agric. Engng. Res.*, 58, 201-210.
- Howden, S.M., Soussana, J.F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. and Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 19691-19696, <http://doi:10.1073/pnas.0701890104>.
- Ishigami, Y., Tetsuka, T. and Goto, E. 2014. Analysis of the Aerial Environment of a Tomato Greenhouse Equipped with Difference Fog Cooling System. *Journal of Agricultural Meteorology*, 70(2), 127-131.
- Jang, D.C.; Choi, K.Y.; Heo, J.Y.; Kim, I.S. The Effect of Transplant Age on Growth and Fruit Yield in Winter-Planted PaPrika Cultivation. *Horticultural Science and Technology*. 2018, 36, 470-477. doi: 10.12972/kjhst.20180047.

- Jeoung, J. H., Park, S. K., 2003, Calculation of Pumping Rate Considering the Change of Groundwater Level, *KCID Journal*, 10(1), 64-72. DOI : <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200373606655493.page>
- Kang, D.H.; Lee, S.Y.; Kim, J.K.; Choi, H.K.; Park, M.J.; Yeon, J.S.; Son, J.K. The Meteorological themes selection for the site selection of protected horticulture complex in Saemanguem. *Prot. Hortic. Plant Fact.* 2015, 24, 287–295. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2015.24.4.1>.
- Kang, D. H.; Lee, S.Y.; Kim, J.K.; Choi, H.K.; Park, M.J.; Yun, S.W.; Son, J.K. Suitability site selection by meteorological factors for the protected horticulture complex in Saemanguem. *Prot. Hortic. Plant Fact.* 2016, 25, 1–8. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2016.25.1.1>.
- Kim, MK. (1997). Design Standard for Greenhouse Environment (II). Korea Rural Community and Agriculture Corporation. 149-163.
- Kim, S. J., Kim, S. M., and Kim, S. M. (2013). A Study on Development of Vulnerability Assessment Criteria for Agricultural Infrastructure According to Climate Change. *Institute of Agriculture & Life Science*, 47 (1) : 205-213.
- Kittas, CT, Bartzanas and Jaffrin, A (2003). Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering*, 85(1), pp. 87-94.
- Kim, T. K., Min, Y. B., Kim, D. W., Kim, M. K., Moon, S. D. and Chung, T. S. 2012. Cooling Effect of Air in Greenhouse Using A Fog Sprayer Consisted of Two-fluid Nozzle with Turbo Fan. *Journal of Agriculture & Life Science* 46(3) pp.119-127.
- Kim, S. E., Lee, J. E., Lee, S. D., Kim, H. S., Chun, H., Jeong, W. R., Lee, M. H. and Kim, Y. S. 2015. Optimum Management of Greenhouse Environment by the Shading Coat and Two-fluid Fogging System in Summer Season. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(1), 34-38. <http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2015.24.1.034>
- Korea Rural Economic Institute (KREI). (2009). Impact Analysis and Response Strategies of Agriculture in Climate Change. ISBN 978-89-6013-137-8.
- Korea Rural Economic Institute (KREI). (2015). Basic Study for Development of Economic Impact Analysis Model of Agriculture in Climate Change.
- Ko, D. K., Kwon, J. K., Lee, E. H., 2013, Starting and development of the horticulture in dustry, Korea. *Korean society for Horticultural Science*, Separate, 458-489. DOI :https://scholar.google.co.kr/scholar?hl=ko&as_sdt=0%2C5&q=Starting+and+development+of+the+horticulture+in+dustry&btnG=
- Lee, H. W., Kim, Y. S., 2011. Application of Low Pressure Fogging System for Commercial Tomato Greenhouse Cooling. *Journal of Bio-Environment Control*, 20(1):1-7, (2011)
- Nam, S. W., Giacomelli, G. A., Kim, K. S. and Sabeh, N. 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, SW., Kim, YS., Sung IM and Ko, GH. 2012. Cooling Efficiency of Low Pressure Compressed Air Fogging System in Naturally Ventilated Greenhouses. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 49-55 (in Korean).
- Nam, S. W., Seo, D. W. and Shin, H. H. 2015. Analysis on the Evaporation Efficiency of Two-fluid Fogging Systems for Greenhouse Cooling. 2015 Spring Conference of Korean Society for Agricultural Machinery & The Korean Society for Bio-Environment Control, 358-386.

- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA), 2014, 2013 Greenhouse Status and Vegetable Production Performances, Sejong, Korea. DOI :<https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/71/304119/artclView>
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2015, 2014 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI :<https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/65/234413/artclView>
- Ministry of Agricultural Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017, 2016 Greenhouse Status and Vegetable Production Performance. DOI :<https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/131/276221/artclView>
- Nam, Y. I. 2003, Present Status and Developmental Strategy of Protected Horticulture Industry in Korea, KCID journal, 10(2): 15-23. DOI : <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NO DE09657133>
- Nicolas Castilla and Esteban Baeza. 2013. Greenhouse site selection In “Good agricultural practices (GAPs) principles for greenhouse vegetable production in the Mediterranean Region”, FAO publications, Rome, 21-33.
- SAREC. 2011. Handbook of facilities engineering. Airconditioning Vol. 2. The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea. p.1-8 (in Korean).
- Seo, M.C. (2005). The quantitative evaluation of environmental conservation function at paddy farming in Korea. Graduate School of Korea University, Doctorate thesis.
- Son, J.; Kong, M.; Choi, D.; Kang, D.; Park M.; Yun S.; Lee, S.; Lee, S.; A Characteristics and Improvement of Thermal Envi-ronment in Summer of Protected Horticulture Complex Using CFD Simulation. J. Korean Soc. Rural. Plan. 2018, 24, 73–86. [Http://Dx.Doi.Org/10.7851/Ksrp.2018.24.3.073](http://Dx.Doi.Org/10.7851/Ksrp.2018.24.3.073).
- Son, J.; Kong, M.; Choi, D.; Kang, D.; Park, M.; Yun, S.; Lee, S.; Lee, S. The Maximum Temperature Distribution and Im-provement Plan of Protected Horticulture Planning Area in Saemanguem Using CFD Simulation. J. Korean Soc. Rural Plan. 2019, 25, 115–128. <http://dx.doi.org/10.7851/Ksrp.2019.25.3.115>.
- Son, J. K., Choi, D. K., Kong, M. J., Yun, S. W., Park, M. J., Kang, D. H. 2019. The Water Quality and Purification Load Assessment of Drain Water of Facility Horticulture Areas. Journal of Environmental Science International, 28(12), 1225-1234. DOI : <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.12.1225>
- Villarreal-Guerreroa, F., Kaciraa, M., Fitz-Rodríguez, E., Kubotab, C., Giacomellia, G.A., Linkerc, R. and Arbeld, A. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging. Scientia Horticulturae 134 (2012) 210–221. <http://10.1016/j.scienta.2011.10.016>
- Yu, I. H., Kim, M. K. and Yun, N. K. 1998. Effects of Air Circulation Fan on Thermal Environments in Greenhouse. Proceeding book of 1998 The Korean Society of Agricultural Engineering, 250-254.