

스크린설치높이 · 공기유입량 차이에 따른 벤로형 유리온실 미기상 CFD 유동해석

양원모*

순천대학교 원예학과

CFD Analysis for Microclimate of Venlo Type Glasshouse with the Screen Height and Air-inflow Quantity

Won Mo Yang*

Department of Horticulture Suncheon National University, Suncheon Chonnam 57922, Korea

Abstract. The natural change of winter night temperature from 00:00 to 04:30 O'clock with the different height of thermal screen in a venlo type glasshouse (W59×L68×H5.9 m) was studied using computational fluid dynamics (CFD). At the early stage of CFD analysis, the room temperature decrease of glasshouse with the 5.9 m height of thermal screen were faster than it with the 4.1 m height of thermal screen, but at 2 hr after analysis it was slower than in it with the 4.1 m, the temperature difference was 0.6°C after 4 hr. If we consider that turn on the heater when the temperature were decrease below 13°C at 1hr after CFD analysis, it is good for energy saving in the glasshouse with the 4.1 m height of thermal screen rather than in it with the 5.9 m height, because of the temperature decrease were slow during 2 hrs after analysis. The airflow at the height of 2 m which were grown tomato were fast and wide in the glasshouse with the 5.9 m height thermal screen rather than in it with the 4.1 m, the speed difference was 0.034 m·s⁻¹ at 1hr after CFD analysis. The effect of temperature decrease in summer season were compared with the different height of shading screen from 12:00 to 14:30 O'clock. The height of shading screen were 5.7, 3.9 m, the gap of it were 30%. The air-inflow quantity by the fan with duct at lower part of venlo glasshouse was 0.67 m³·s⁻¹ until 1hr and to increase 3 times of it from 1hr after analysis. The roof window were open 100%. Until 1hr of CFD analysis, the temperature in the 30% open of shading screen was 0.9°C higher than in the none shading screen. From 13:00 O'clock when the air-inlet quantity to increase 3 times, the temperature in case 30% gap of shading screen were decreased compare with the none shading screen, the temperature difference was 0.5°C at 14:30 O'clock. The temperature on the floor surface in case 30% gap of shading screen were lower with it's height increase, the temperature difference was 8°C compare with none shading screen. The relative humidity difference were insignificant by the height and gap of shading screen.

Additional key words : computational fluid dynamics, energy saving, greenhouse cooling, screen height, ventilation effect, wind direction

서 론

겨울철 혹한으로 인하여 증가하는 온실 난방에너지와 이에 따른 에너지 절감 기술 및 여름철 고온다습한 기후와 강한 햇빛으로 인하여 높아지는 온실의 온도를 적정온도로 낮추는 냉방기술은 온실 경영의 핵심과제이다. 온실 냉난방과 보온성능 개선 연구를 위하여, CAD 데이터 수정을 통한 형상조절의 용이성과 다양한 환경 및 시설조건 설정의 용이성 및 실험 측

정의 한계성을 보완하고 연구결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술이 적절하게 이용되고 있다. 최근 컴퓨터 성능개선과 CFD 기법의 발달, 자동 격자 생성기법의 발전으로 복잡한 형상을 가진 모델도 해석할 수 있게 됨으로써 좀 더 다양한 문제에 접근할 수 있는 상용 프로그램으로 발전하였다(Lee 등, 2005; Boulard 등, 2010; Bartzanas 등, 2013).

요즈음 온실의 동고가 높아지면서 냉·난방체적의 변화에 따른 겨울철 난방에너지 증가 및 여름철 냉방효율 개선문제에 대한 관심이 커졌다. 이 연구는 벤로형 온실에서 보온스크린 설치 높이, 차광스크린 개폐도 및 온실하부공기유입덕트를

*Corresponding author: ywm@sunchon.ac.kr

Received February 08, 2019; Revised November 06, 2019;

Accepted January 16, 2020

통한 공기유입량 차이에 따른 동계 에너지절감 효과, 하계 냉방효율 및 이러한 조건하에서의 온실 내 수직, 수평 위치별 온도 습도 변화양상을 파악하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

해석대상 벤로형 유리온실의 전체 형상은 Fig. 1과 같으며, 유리온실의 크기, 천창 및 스크린의 구조는 Figs. 2, 3과 같다. 해석에 사용된 격자는 Fig. 4와 같이 유리온실 내부 공간 및 외부 공간을 비정렬 삼각형 격자를 이용하여 전체 격자계를 구성하였다. 온실 벽면 근처 및 주요 부위에 조밀한 격자를 밀집 시킴으로써 복잡한 유동의 특성을 잘 계산해 낼 수 있도록 하였다. 또한 유리온실의 각 경계에는 벽에 가깝게 격자를 밀착시켜 벽 근처의 열 유동 특성을 잘 모사할 수 있도록 구성하였다.

상용 CFD (Computational Fluid Dynamics 전산유체역학) 코드는 FLUENT 16.2를 사용하였다. 열유동해석을 위하여 질량보존, 운동방정식 3개와 함께 Discrete Ordinates 복사모델을 포함한 에너지방정식을 풀고, 태양의 모사를 위해 Solar load 모델을 사용하였다. 유동은 비압축성 유동으로 전 영역에 대하여 난류흐름으로 계산하였으며, 난류모델은 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 해석에 사용한 기준온도는 전라북도 전주시(위도 35.82°, 경도 127.15°)를 기준으로 1년 중 가장 추운 날인 1월(소한)과 가장 더운 날인 7월(대서)의 최근 5년간 기상청 데이터를 사용하였다. 겨울철은 1월 중 가장 낮은 온도인 -7.9°C로 설정하였고, 여름철은 7월 중 가장 높은 온도인 32.4°C로 설정하였다. 이 때, 온실 내부의 초기온도는 겨울철은 난방을 고려하여 17°C로 하였고, 여름철은 38.4°C로 설정하였다. 외부 환경조건 중 바람의 영향인자인 풍속은 최근 5년간 기상청 데이터를 바탕으로 겨울철은 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이고, 여름철은 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다. 외부 풍속분포는 자연풍의 연직방향 분포를 고려하여 모델링하여 입구 경계조건에 적용하였으며 평균풍속을 적용하는 기준높이는 기상청 기준인 10m, 대기 경계층의 두께를 100m로 정의하였다(Davide, 2012).

겨울철 난방기 중지 후 스크린의 높이에 따른 유리온실 내부 온도 감소 변화량을 해석하기 위해 Case1과 Case2로 구분하여 비정상상태 해석(Transient Analysis)을 수행하였다. Case1의 경우 차광스크린과 보온스크린이 각각 5.7m, 5.9m 높이에 위치하고, Case2의 경우 차광스크린과 보온스크린이 각각 3.9m, 4.1m 높이에 위치하는 조건이다. 이 때, 2개 Case 모두 외부공기가 유입되지 않는 상태로 가정하였다. 해석은 0시부터 04시까지 4시간 진행하였다. 여름철 태양에너지에 의해 유리온실 내 온도가 올라갈 때, 차광스크린의 유무와 높이에 따른 내부온도와 유동변화를 살펴보기 위해 Case3, Case4,

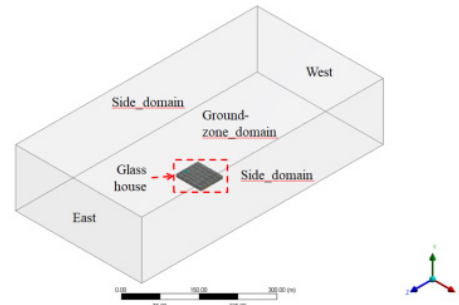


Fig. 1. Modeling of Venlo type glasshouse for CFD analysis.

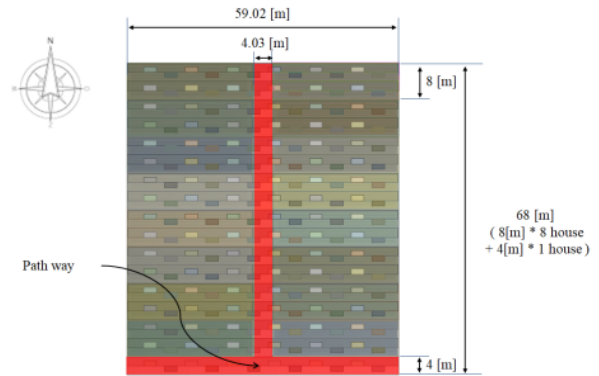


Fig. 2. Schematic over view of venlo glasshouse.

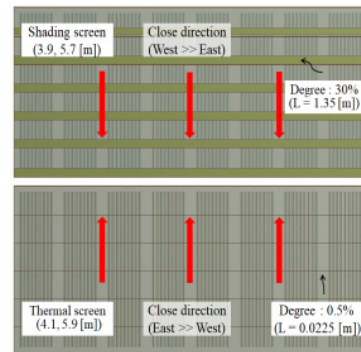


Fig. 3. Moving direction and open degree of screen.

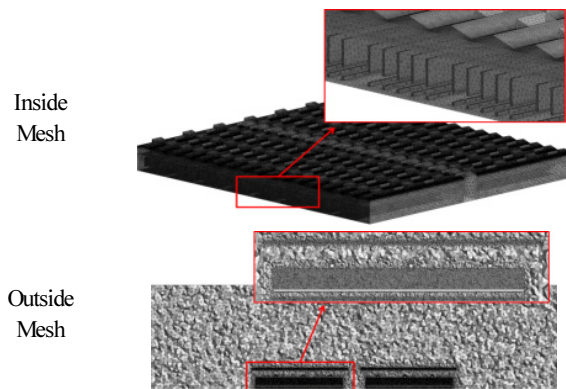


Fig. 4. Mesh for airflow analysis.

Case5로 구분하였다. Case3의 경우 차광스크린 5.7m 높이에 30% 열려있고, Case4의 경우 차광스크린 3.9m 높이에 30% 열려있는 조건이다. Case5의 경우는 무차광 조건으로 수행하였다. 이 때, 3개 Case 모두 천창은 열려있고, 유동팬(대륜산업 BF30BSA, 대한민국)은 8m 간격으로 48개 설치하였으며, 온실하부공기유입덕트(공기유입량 $0.67\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 직경 30cm, 토출구 직경 3cm, 간격 1m)를 통하여 외부공기가 유입되는 조건으로 하였다. 해석은 12시부터 14시 30분까지 2시간 30분간 수행하되 13시부터는 온실하부덕트 외부 공기유입량을 3배로 증가시켰다(Table 1).

유리온실 내부 1층 차광스크린과 측면스크린은 Table 2와 같은 물성값을 적용하고, 2층 보온스크린은 다른 2개의 스크린 물성값 성분 함유량만큼 Shell conduction 조건을 가정하였으며, 48% Polyolefin, 52% Polyester 재질로 두께는 0.2mm 이므로 Polyolefin 두께를 0.096mm, Polyester 두께를 0.104mm로 설정하였다. 해석대상 벤로형 유리온실의 천창, 유동팬, 덕트, 스크린의 단면, 크기, 위치, 높이는 Figs. 5, 6과 같다. 내부 온도변화와 유동특성의 비교분석을 위한 데이터 추출위치는 X축 5개, Y축 9개 그리고 Z축 6개로 총 270개 위치였으며, 해석이 진행되면서 매 Time step마다 온도, 유속 테

Table 1. Case for CFD analysis.

Season		Winter		Summer		
Case Name		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Height of shading screen	3.9 m	×	○	×	△	
	5.7 m	○	×	△	×	
Height of thermal screen	4.1 m	×	○	×	×	×
	5.9 m	○	×			
Measuring time		00:00 ~ 04:00		12:00 ~ 14:30		
Air-inlet duct fan (40 m ³ /min)		Off		On (3 times increase of inlet air after 60 minute)		
Roof window		Close		Open		
Air moving fan				On		

Note ; ○ : 100% Close, △ : 70% Close, × : None screen

Table 2. Material property of screen.

Item	Density [kgm ⁻³]	Conducti-vity [Wm·k]	Heat Capacity [J/kg·k]	Trans-mita-nc e	Thick-ness [mm]	note
Shading screen	1800	0.5885	1090	28%	0.2	Polyester
Side screen	990.5	0.8005	1500	0.1%	0.4	Polyolefin
Thermal screen		0.2 mm (Polyolefin 0.096 mm,+ Polyester 0.104 mm (estimate))				

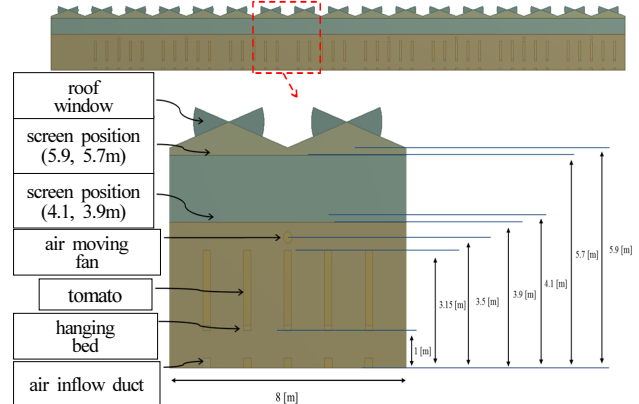
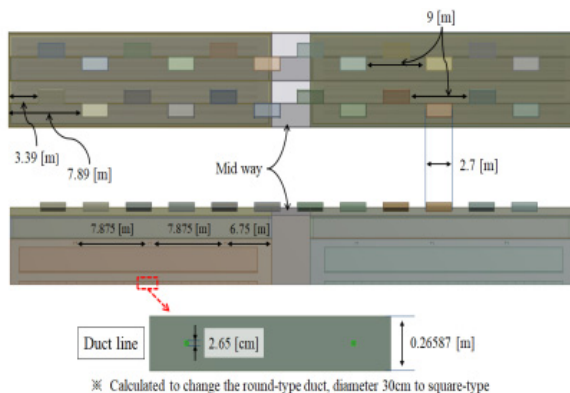


Fig. 5. Schematic view of roof window, air moving fan and air inflow duct. **Fig. 6.** Side view for item position and height.

이터를 추출하였다(Figs. 7, 8, Table 3). X축은 가로(동서)단면으로서 정면으로부터 12, 32, 52m, Y축은 바닥면을 기점으로 위로 2, 4.8, 5.8m. Z축은 세로(남북)단면으로서 중앙통로를 기점으로 좌우에 15.77m의 측정단면의 온도와 속도 데이터를 정성적으로 해석하였다. 또한 Y=2m 일 때 X, Z축의 단면이 겹치는 부분에 Table 3과 같이 총 6개의 포인트를 생성하였다. 생성된 6개의 포인트는 Y축으로는 토마토 생육의 중심 위치이고 X, Z축으로는 동쪽(풍상방향)구역과 서쪽(풍하방향)구역의 중심 위치이기 때문에 정량적인 데이터 확인에 유용한 위치로서, 각 포인트 마다 온도와 속도 데이터를 추출하여 정량적으로 비교하였다.

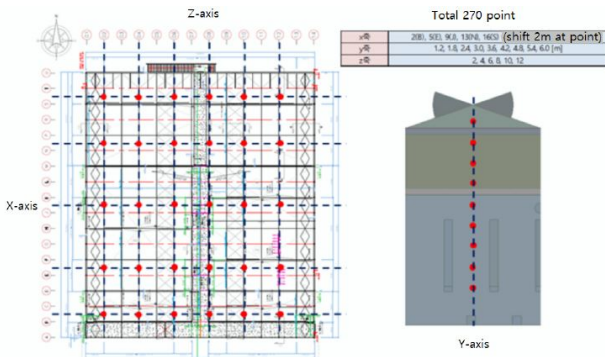


Fig. 7. Data collection position of room temperature and velocity.

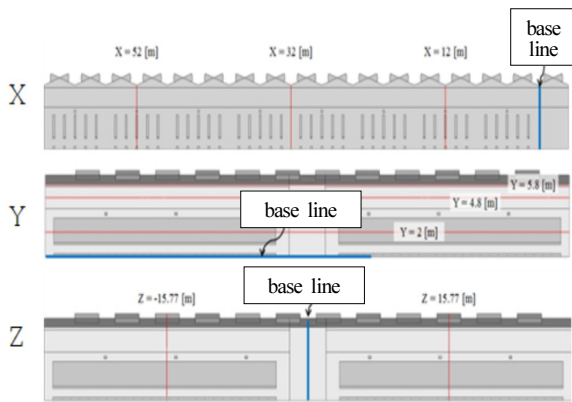


Fig. 8. Aspect section for temperature and airflow analysis.

Table 3. The position of data extraction (m).

	X	Y	Z
Point 1	12	2	15.77
Point 2	32	2	15.77
Point 3	52	2	15.77
Point 4	12	2	-15.77
Point 5	32	2	-15.77
Point 6	52	2	-15.77

결과 및 고찰

1. 겨울철 벤로형 유리온실 보온스크린 높이 차이에 따른 내부온도와 유동 특성

벤로형 유리온실의 겨울철 보온스크린 높이를 5.9m와 4.1m로 달리 한 2개의 Case에 대해 시간 경과에 따른 유리온실 내부 온도변화와 유동특성을 비교 분석하였다.

1.1 내부 온도변화

유리온실 내부에 특이한 영향이 없이 외부온도에 대한 전도현상과 내부의 대류현상으로 변화되는 온도를 파악하고자 하였다. 해석결과는 초기 00시부터 04시까지 30분 간격으로 각 구간에 대해 각 포인트의 온도 평균값과 전체 포인트에 대한 평균값 변화를 Table 4, Fig. 9에 정량적으로 나타냈다. 두 Case에서 시간 경과에 따라 온도가 감소하는데 시간이 흐를수록 감소율이 작아졌으며, 스크린 상부에 비해 스크린 하부에서의 온도가 상대적으로 적게 감소하고, 외부공기가 동쪽에서 서쪽으로 움직이는 조건에서 외부공기의 영향을 상대적으로 크게 받는 동쪽(풍상측)구역에서 상대적으로 빠르게 감소하였다. Lee와 Short (2001)도 풍향이 자연환기에 미치는 영향을 보고한 바 있다.

또한 초기에 상대적으로 난방체적이 커서 외부접촉면이 큰 보온스크린 높이 5.9m (Case1)에서 난방체적이 상대적으로 작은 보온스크린 높이 4.1m (Case2)보다 낮은 온도를 나타냈으나, 시간이 경과함에 따라 오히려 높은 온도를 보였다. 구체적으로 약 2시 00분 이후부터 Case1이 높은 온도를 나타내고 04시에는 Case1이 Case2에 비해 약 0.6°C 높은 온도분포를 나타냈다. 이러한 현상은 동쪽(풍상측)구역과 서쪽(풍하측)구역에서 유사한 경향이었으며 04시에 동쪽구역은 약 0.5°C, 서쪽구역은 약 0.7°C로 약간의 차이를 나타냈다. 즉, 보온스크린 높이가 높은 경우에서 낮은 경우에 비해 일정 시간까지는 온도 감소가 빠르지만 이후에는 온도 감소율이 낮아 온도가 상대적으로 높게 유지되었다. Majdoubi 등 (2009)도 온실의 풍상측 끝부분의 토마토 수관부위 즉 풍하측 1/3지점부터 풍하측의 끝 부분에서 강한 유동이 형성되어 천장을 통해 더운 공기와 습한 공기가 배출된다고 하였다.

1.2 내부 유동변화

겨울철 유리온실 내부 유동데이터를 비교하여 온실내부 유동팬에 의한 강제대류와 외부와의 온도 차이에 의한 자연대류의 영향을 파악하고자 하였다. 유동팬에서 나오는 유동은 내부를 주로 순환하는 유동으로 생성되고 전체적으로 직진성을

Table 4. Temperature fluctuation in Case 1 and 2 under the thermal screen (°C).

Time	East (windward) Area		West (leeward) Area		Average±SE (n=6)	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
	00:00	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
00:30	15.6	15.9	15.7	15.9	15.7±0.04	15.9±0.02
01:00	13.1	13.4	13.4	13.6	13.3±0.06	13.5±0.05
01:30	10.6	10.7	11.0	11.1	10.8±0.10	10.9±0.08
02:00	8.3	8.3	8.9	8.8	8.6±0.13	8.5±0.10
02:30	6.4	6.2	7.0	6.7	6.7±0.14	6.5±0.11
03:00	4.7	4.4	5.3	4.9	5.0±0.14	4.7±0.12
03:30	3.2	2.8	3.9	3.3	3.6±0.15	3.1±0.11
04:00	2.0	1.5	2.6	1.9	2.3±0.14	1.7±0.09

Note; Case1: 5.9m height of thermal screen, Case2: 4.1m height of thermal screen

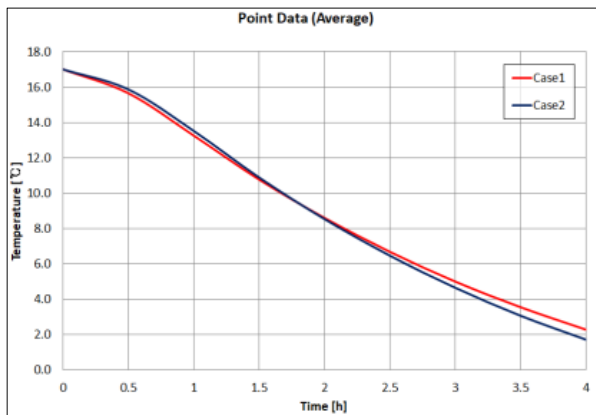


Fig. 9. The difference of temperature variation in Case 1 (5.9 m) with Case 2 (4.1 m height of thermal screen).

가진 유동으로 형성되었다. 온도 차이에 따른 자연대류는 그 속도가 느리고 약해 유동흐름에 대한 영향이 미미하였다. 전체적으로 두 개의 Case 모두 내부유동이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었고 토마토가 자라는 온실내부 중심보다 온실벽면에서 빠른 유동이 형성되었다. 또한 토마토가 생육하는 지면높이(Y=2m)에서의 유동은 스크린높이 5.9m인 Case1에서 상대적으로 넓고 빠른 유속분포를 보였다. 이러한 현상은 정량적인 데이터에서도 확인할 수 있듯이, 스크린높이 5.9m인 Case1에서 스크린높이 4.1m인 Case2에 비해 빠른 유속분포를 나타내고 약 0.021~0.041m·s⁻¹ 차이를 보였다 (Table 5, Fig. 10). 특이한 점은 해석시작 30분까지 Case1의 유속 상승속도가 Case2보다 빨랐으며, 정점에 이른 후 30분간 유속이 하강하였는데 Case2에서 빨랐으며, 0.020m·s⁻¹까

Table 5. Difference of airflow fluctuation at Y=2m in Case 1 with 2 under the thermal screen (m·s⁻¹).

Time	East (windward) Area		West (leeward) Area		Average±SE (n=6)	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
	00:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00:30	0.066	0.049	0.060	0.034	0.063±0.0085	0.042±0.0067
01:00	0.051	0.020	0.058	0.019	0.054±0.0083	0.020±0.0034
01:30	0.054	0.019	0.068	0.021	0.061±0.0075	0.020±0.0050
02:00	0.050	0.023	0.054	0.023	0.052±0.0066	0.023±0.0052
02:30	0.045	0.022	0.051	0.028	0.048±0.0066	0.025±0.0046
03:00	0.043	0.021	0.049	0.033	0.046±0.0066	0.027±0.0054
03:30	0.041	0.024	0.047	0.032	0.044±0.0067	0.028±0.0047
04:00	0.039	0.029	0.044	0.025	0.042±0.0068	0.027±0.0049

Note; Case1: 5.9m height of thermal screen, Case2: 4.1m height of thermal screen

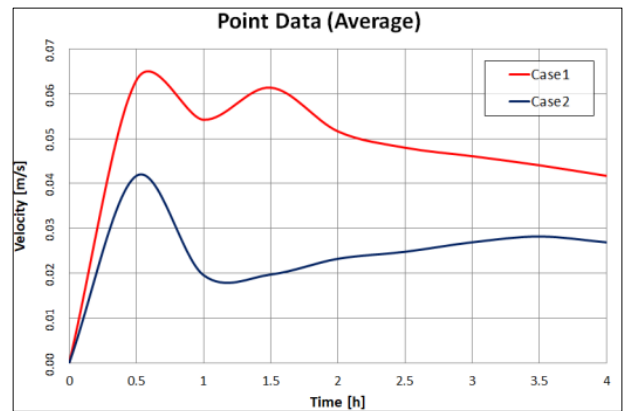


Fig. 10. The change of airflow fluctuation at Y=2 m in Case 1 (windward area) with 2 (leeward area) as time passed.

지 느려진 후 서서히 상승하는 경향으로 4시간 후 0.047m·s⁻¹를 나타내었다. 반면 해석시작 1시간 후 Case1의 유속은 다시 상승하여 0.061m·s⁻¹로 정점에 이른 후 다시 서서히 하강하는 경향으로 4시간 후 0.042m·s⁻¹를 나타내어 스크린높이가 높은 경우가 낮은 경우 보다 전반적으로 빠른 유속분포를 보였다. 한편, 동쪽(풍상)구역에서의 Case1의 유속이 Case2보다 0.010~0.035m·s⁻¹ 빨랐으나, 서쪽(풍하)구역에서는 Case1의 유속이 Case2보다 0.015~0.041m·s⁻¹ 빨라서 서쪽(풍하)구역에서의 유속차이가 동쪽(풍상)구역에 비해 크게 나타났다. Hong과 Lee (2014)는 자연환기에 의한 미기상 예측모델 연구에서 기존의 센서 실측에 기반을 둔 대부분의 환경조절제어시스템의 경우에는 측정값에 따른 피드백에 의해 환경제어가 동작하므로 온실내부의 기온이 상승한 이후에 환경제어를

시작하게 되지만, 모델기반의 환경조절제어시스템을 도입하면 3분~20분 정도의 시간을 사전에 고려하여 적정환경을 제어할 수 있도록 해야한다고 하였는데, 이 연구에서도 CFD 해석초기 30분간의 데이터에서도 같은 현상을 보였다.

2. 여름철 유리온실 차광스크린 높이 차이에 따른 내부온도와 유동 특성

벤로형 유리온실의 해석 조건 중 여름철에 대해 총 3개의 Case가 진행되었다. Case 3과 4는 차광스크린 70%닫힘 조건에서 차광스크린의 높이가 각각 5.7m, 3.9m로 차이가 있을 때 시간경과에 따른 내부의 온도변화와 유동특성을 비교 분석하였다. 또한 Case5는 무차광으로서 스크린의 유무가 유리온실 내부온도 변화와 유동특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2.1 내부 온도변화

유리온실 내부로 태양에너지가 유입되고 외부공기유입덕

트가 작동하고 있을 때 유리온실 내부온도 변화를 파악하기 위하여, 12시부터 14시 30분까지 30분 간격으로 해석을 하되 온도의 변화량이 클 것으로 예상되는 12시 15분과 13시 15분 데이터를 포함하였다. 그리고 동쪽(풍상측)구역과 서쪽(풍하측)구역의 각 포인트의 온도 평균값과 전체 포인트에 대한 평균값 변화를 분석하였다(Fig. 11, Table 6).

해석초기 12시부터 약 15분간 유동팬과 온실하부 공기유입에 의해 온도가 하강되었으나 공기유입량을 3배로 증가시키기 이전 13시까지는 다시 온도가 상승하였으며. 풍하측구역보다 풍상측구역에서 높았고, 스크린이 3.9m로 낮은 Case4에서 스크린높이 5.7m인 Case3보다 높았으며 Case5 (무차광)에서 가장 낮았다, 그러나 온실하부 공기유입덕트 공기유입량을 3배로 증가시킨 13시 이후 부터는 Case3 (5.7m, 70% 닫힘)과 Case4 (3.9m, 70%닫힘)에서는 더 이상 온도가 상승하지 않았으나 무차광 Case5의 경우 온도가 서서히 상승하여 14시 30분에는 Case3과 4에 비하여 약 1°C 높아졌다. 14시 30

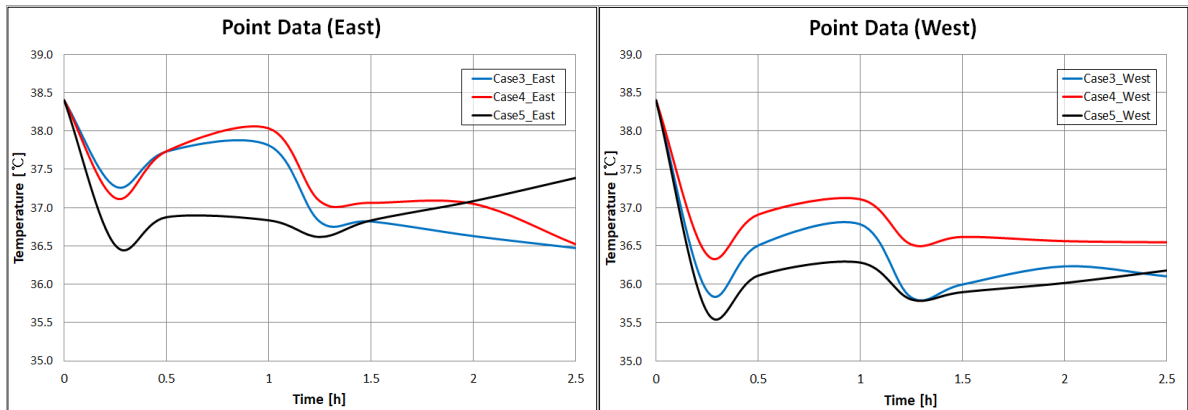


Fig. 11. The change of temperature fluctuation between east area (left, windward) and west area (right, leeward) in Case 3 (5.7 m, 70% close), 4 (3.7 m, 70% close) and 5 (none shading screen) as time passed.

Table 6. The change of temperature by the height and close level of shading screen (°C).

Time	East (windward) Area			West (leeward) Area			Average		
	Case 3	Case 4	Case 5	Case 3	Case 4	Case 5	Case 3	Case 4	Case 5
12:00	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4
12:15	37.3	37.1	36.5	35.9	36.4	35.6	36.6	36.8	36.1
12:30	37.7	37.7	36.9	36.5	36.9	36.1	37.1	37.3	36.5
13:00	37.8	38.0	36.8	36.8	37.1	36.3	37.3	37.6	36.6
13:15	36.8	37.1	36.6	35.8	36.5	35.8	36.3	36.8	36.2
13:30	36.8	37.1	36.8	36.0	36.6	35.9	36.4	36.8	36.4
14:00	36.6	37.0	37.1	36.2	36.6	36.0	36.4	36.8	36.5
14:30	36.5	36.5	37.4	36.1	36.5	36.2	36.3	36.5	36.8

(Note1) Case3: 5.7 m height of shading screen, 70% close, Case4: 3.9 m height of shading screen, 70% close, Case5: none shading screen (Note2) 3 times of air-inflow quantity at 13:00 o'clock

분 서쪽(풍하측)구역에서 Case3 (5.7m)의 온도는 Case4 (3.9m)에 비해 약 0.5°C 낮았다. 이는 온실하부 외부공기유입덕트의 유량이 적고 차광스크린이 70% 닫혀 있는 조건에서는 차광효과과는 있지만 내부 뜨거운 공기를 외부로 원활하게 배출하기 어렵기 때문에 온도감소효과가 미흡하여 온실 내부온도가 상승하게 되지만 같은 조건에서 온실하부 외부공기유입덕트의 유량이 증가하면 내부의 뜨거운 공기를 외부로 원활하게 배출하므로 차광효과가 뚜렷하였다. 이러한 현상은 동쪽(풍상)구역에서 서쪽(풍하)구역보다 커서 동쪽구역의 온도가 상대적으로 높았다.

즉, 여름철 스크린의 차광효과가 발휘되기 위해서는 내부의 뜨거운 공기가 원활하게 외부로 배출될 수 있도록 설계 및 운용되어야 하며 특히 외부공기 유입량을 증가시키는 것이 중요하다. Jorge 등(2014)은 강제환기 상태에서 천창 닫음, 천창 30% 열림, 천창 100% 열림 조건과 온실길이를 28, 50, 75, 100m로 달리한 비교실험에서 팬 단독환기에 비해 천창환기 병용의 경우 환기율이 22% 개선되었고 균일성도 양호하였으며, 온실의 길이가 길어질수록 자연환기에 의한 환기율이 커진다고 하였다. He 등(2015)도 환기창의 크기와 위치 및 개폐 정도가 온습도 및 제습시간에 영향을 미친다고 하였으며, Liu 등(2005)은 풍속이 최소한 3.2m·s⁻¹ 이상일 때 천창환기의 점진적인 효과가 있다고 하였다. Campen (2006)은 외부의 풍향, 풍속 및 창문의 크기와 위치에 따른 여름철 환기율 연구에서 창문의 개도에 따른 환기율의 차이가 크며 특히 측창환기는 풍속 5m·s⁻¹일 때 풍상과 풍하 양방향으로 여는 것 보다 풍상측의 창을 여는 경우가 유리하다고 하였다. Nam 등(2013)도 온실의 환기성능을 극대화하기 위해서는 온실의 측고는 높이고, 지붕 환기창의 위치는 곡부가 아니라 용마루에 설치하며, 반드시 측창을 설치하고, 연동수는 10연동 내외로 제한하는 등의 구조개선이 필요하다고 하였다.

2.2 내부 유동변화

여름철 유리온실내부 유동팬에 의한 강제대류와 온도 차이에 의한 자연대류의 영향을 파악하기 위하여 내부온도를 해석할 때와 동일한 시간에 각 구간에 대해 유동해석을 하였다. Table 7의 정량적 유동속도의 평균값에서 보는 바와 같이 유동해석 초기에는 Case5 (무차광)에서 평균 0.14, 0.12, 0.15m·s⁻¹로 유속이 빨랐지만 외부공기 유입량을 3배로 늘린 1시간 이후(13시)부터는 Case3 (높이 5.7m, 70% 닫힘)에서 유속이 점차 증가하여 2시간 후에는 가장 빠른 유속을 나타내었고, 14시 30분에는 0.51m·s⁻¹로 Case5 0.36m·s⁻¹, Case4 0.29m·s⁻¹에 비해 각각 0.22m·s⁻¹, 0.15m·s⁻¹ 빠른 유동속도를 보였다. 또한 전체적으로 동쪽(풍향측)구역 온실의 유속이 빨랐으며, 유속을 3배로 증가시키기 이전에는 케이스별 유속차이가 적었으나 이후 차이가 커졌으며 특히 Case4 (차광스크린높이 3.9m, 70% 닫힘)에서 현저히 낮았으며, 유동해석 2시간 후인 14:00에는 0.14m·s⁻¹로 Case3 (차광스크린높이 5.7m, 70% 닫힘) 0.52m·s⁻¹, Case5 (무차광) 0.58m·s⁻¹에 비해 현저히 느렸다. 한편 서쪽(풍하측)구역에서의 Case5의 경우 점진적으로 속도가 빨라지는 경향이었으며 Case4와 5의 경우 시간 진행에 따른 속도의 진폭이 Case3에 비해 컸다. 특이한 점은 Fig. 12에서 보듯이 동쪽(풍상)구역과 서쪽(풍하)구역의 유속분포 변화양상 차이였는데, 온실 하부덕트의 외부공기유입량을 3배로 증가시킨 후 동쪽(풍상)구역의 유속이 서쪽(풍하)구역에 비해 빠르게 상승하였으며, Case3과 5에서는 일정하게 유속이 유지되었으나 스크린 높이가 상대적으로 낮은 Case4에서는 급격하게 유속이 하강하였다. 서쪽(풍하)구역에서는 Case3의 경우 유동속도의 변화가 적은 반면 서서히 상승하는 경향을 보여, 외부공기 공기흐름의 방향이 온실내부 유동속도에 미치는 영향을 확인할 수 있었다(Fig. 13). Hong 등(2008)도 다

Table 7. The difference of airflow fluctuation in Case 3, 4 and 5 under the shading screen (m·s⁻¹).

Time	East (windward) Area			West (leeward) Area			Average		
	Case 3	Case 4	Case 5	Case 3	Case 4	Case 5	Case 3	Case 4	Case 5
12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12:15	0.11	0.06	0.14	0.04	0.13	0.15	0.08	0.10	0.14
12:30	0.13	0.09	0.09	0.07	0.11	0.14	0.10	0.10	0.12
13:00	0.12	0.10	0.12	0.14	0.11	0.19	0.13	0.11	0.15
13:15	0.55	0.63	0.57	0.31	0.45	0.40	0.43	0.54	0.49
13:30	0.52	0.44	0.53	0.25	0.30	0.47	0.38	0.37	0.50
14:00	0.52	0.14	0.58	0.30	0.14	0.13	0.41	0.14	0.36
14:30	0.65	0.24	0.54	0.37	0.34	0.18	0.51	0.29	0.36

(Note1) Case3: 5.7 m height of shading screen, 70% close, Case4: 3.9 m height of shading screen, 70% close, Case5: none shading screen (Note2) 3 times of air-inflow quantity at 13:00 o'clock

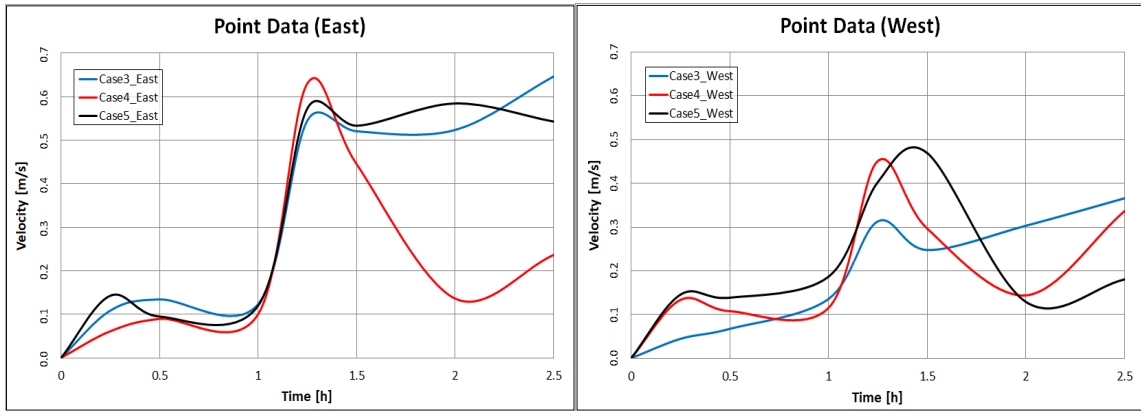


Fig. 12. The change of airflow fluctuation between east area (left, windward) and west area (right, leeward) in Case 3 (5.7 m, 70% close), 4 (3.7 m, 70% close) and 5 (none shading screen) as time passed.

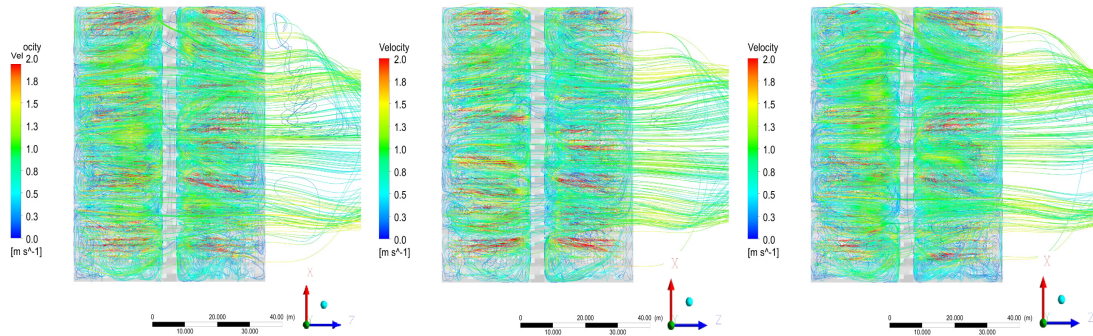


Fig. 13. The change of airflow fluctuation among case3 (left: 5.7 m, 70% close), 4 (middle: 3.7 m, 70% close) and 5 (right: none shading screen) at 2 hr after for analysis.

연동온실의 형태와 환경에 따른 자연환기 해석에서 풍향과 천창개도에 따른 환기율의 차이를 제시한 바 있다.

2.3 내부 차광스크린 효과

여름철 차광스크린의 고온억제 효과를 비교하기 위해 온실 바닥면의 온도분포를 Fig. 14에 나타내었다. 차광 스크린을 70% 닫은 Case3, Case4의 경우 스크린 설치높이에 비례하여 바닥면의 온도가 차광하지 않은 Case5에 비하여 낮게 나타났으며, 토마토가 위치한 바닥면에서는 약 8°C 이상의 온도 차이가 발생하였다. 추가적으로 차광스크린에 의해 토마토 생육 위치에서의 열량이 어느 정도 감소하는지 파악하기 위해 차광스크린이 없을 때 대비 차광스크린이 있을 때, 높이 2m에서의 상대적인 열분포 해석 결과, 차광스크린에 의해 토마토가 받는 열량의 감소는 차광스크린이 없을 때에 비하여 Case3 (차광스크린 높이 5.9m, 70% 닫힘)에서는 평균 $-0.251 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, Case4 (차광스크린 높이 3.7m, 70% 닫힘)에서는 평균 $-0.299 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 를 보였다(Table 8).

요약하면 차광스크린은 토마토가 받는 열량을 감소시키고

바닥면 온도도 낮추어서 토마토 생육에 유리한 환경을 조성하지만, 내부공기의 흐름과 교환이 원활하지 않으면 그 효과가 발휘되지 못한다는 점이 데이터에 의해 확인되었다

2.4 상대습도 변화

여름철 유리온실 내부 상대습도를 확인하기 위하여 토마토 전체영역에 대한 상대습도 분포가 초기 100%라고 가정하고 이후 감소하는 양을 분석하였다(Fig. 15). 상대습도의 분포는 온도분포와 유사하게 초기 12시부터 13시까지는 Case5 (무 차광)에서 71.71 ~ 65.32%로 Case3 (차광스크린높이 5.7m, 70%닫힘) 68.87 ~ 63.24%와 Case4 (차광스크린높이 3.9m, 70%닫힘) 67.74 ~ 62.56%보다 높았으며, Case3과 Case4의 차이는 1.13%이하로 미미하였다. 13시 이후로 세 Case간의 차이가 줄어들기 시작하였고 14시 30분에는 Case3 64.96, Case4 64.32, Case5 64.15%로 그 차이가 1%미만으로 미미하였다. 즉, 여름철의 경우 전체적으로 고온이고 13시 이후 외부공기유입량을 3배로 증가시켰으므로 각 케이스간의 온도차가 2°C미만으로 상대습도의 차이가 크지 않았다. 따라서 여

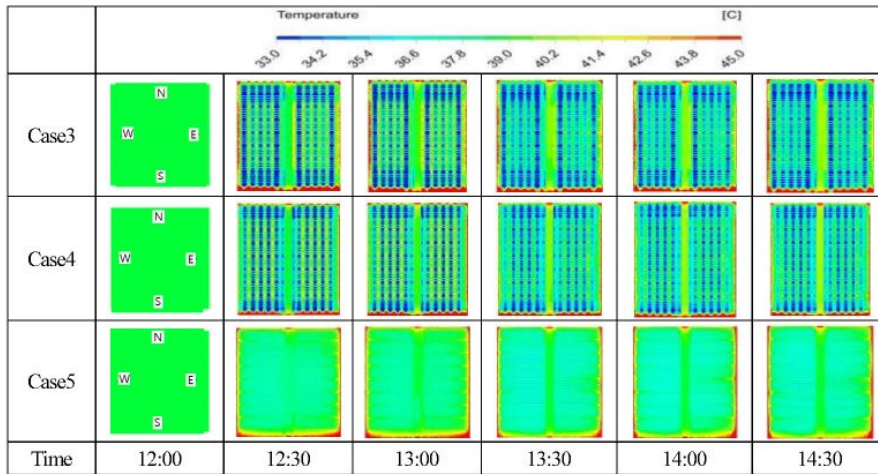


Fig. 14. The temperature fluctuation by Case 3 (5.7 m, 70% close), 4 (3.7 m, 70% close) and 5 (none shading screen) as time passed at the floor of glasshouse.

Table 8. The change of relative heat as time passed in Case 3 and 4 under the shading screen ($W \cdot m^{-2}$).

Time	Case 3	Case 4
12:00	0	0
12:15	-0.258	-0.303
12:30	-0.262	-0.307
13:00	-0.266	-0.311
13:15	-0.253	-0.303
13:30	-0.248	-0.299
14:00	-0.241	-0.290
14:30	-0.227	-0.278
Average	-0.251	-0.299

Note; Case3: 5.7 m height of shading screen, 70% close, Case4: 3.9 m height of shading screen, 70% close

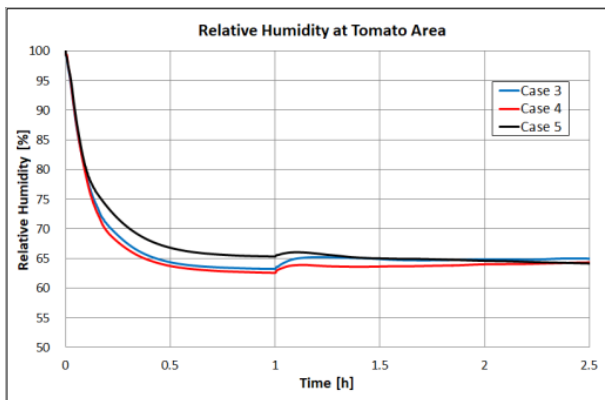


Fig. 15. Changes of relative humidity by the Case 3 (5.7 m, 70% close), 4 (3.7 m, 70% close) and 5 (none shading screen) as time passed at Y=2 m.

름철 온실 내 상대습도는 커튼을 30% 이상 개방하는 조건에서는 문제가 없으며, 온실 내 시설조건보다는 외부 환경조건의 영향에 따른 내부관리가 더 중요하였으며 특히 외부공기유입량의 증대와 원활한 공기순환이 상대습도에 크게 작용하는 것으로 확인되었다. 따라서 여름철 온실 습도관리를 위해서는 야간의 외부공기유입량과 공기순환에 특히 유념하여야 할 것으로 생각되었다(Kim 등, 2008).

적 요

겨울철 벤로형 유리온실(W59×L68×H5.9m) 보온스크린 높이의 차이에 따른 실내온도 변화를 파악하기 위하여 00시부터 04시까지 30분 간격으로 열유동해석을 하였다. 초기에는 상대적으로 난방 외부접촉면적이 큰 보온스크린 설치높이 5.9m에서 보온스크린 설치높이 4.1m에 비해 온도감소가 빨라 낮은 온도를 나타냈으나 해석 2시간 이후부터는 상대적으로 온도감소가 느렸고 04시에는 0.6°C 높았다. 그러나 해석 시작 1시간 후 실내온도가 약 13°C까지 내려가고, 그 이전에 난방기가 작동해야 된다고 볼 때, 해석 2시간 동안 온도감소가 상대적으로 느렸던 보온스크린 설치높이 4.1m에서 5.1m에 비해 난방에너지 절감에 유리할 것으로 판단되었다. 토마토가 자라는 지면 2m 높이에서의 유동은 보온스크린 설치높이 5.9m에서 4.1m에 비해 상대적으로 넓고 빨랐으며 유동해석 1시간 후인 01시의 평균차이는 0.034m·s⁻¹였다.

여름철 차광스크린 설치높이를 5.7m와 3.9m로 달리하되 70%닫힘 조건에서 12시부터 13시까지는 온실하부덕트 외부 공기유입량 0.67m³·s⁻¹ 상태 그 후부터는 외부 유입공기를 3배로 증가하여 냉방효과를 비교하였다. 초기 12시부터 13시

까지는 차광스크린 70% 닫힘 상태에서 무차광에 비해 오히려 평균 약 0.9°C 높았지만 외부공기유입량이 증가하는 13시 이후 부터는 차광스크린 70% 닫힘 조건에서 온도가 감소하였고 14시 30분에는 무차광에 비해 0.5°C 낮았다. 차광스크린 70% 닫힘 조건에서 바닥면의 온도분포는 스크린 설치높이와 개방 정도에 비례하여 낮았으며 무차광에 비해 8°C 이상 낮았다. 온실 내 상대습도는 차광스크린을 30% 개방하는 조건에서는 차광스크린의 높이나 개방 정도에 따른 차이가 미미하였다.

추가 주제어: 스크린높이, 온실냉방, 환기효과, 풍향, 에너지 절감, 전산유체역학

Literature Cited

- Bartzanas, T., M. Kacira, H. Zhu, S. Karmakar, E. Tamimi, N. Katsoulas, I.B. Lee, and C. Kittas. 2013. Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 93: 151-167.
- Boulard, T., J.C. Roy, H. Fatnassi, A. Kichah, and I-B. Lee. 2010. Computer fluid dynamics prediction of climate and fungal spore transfer in rose greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture* 74:280-292.
- Campan, J.B. 2006. Ventilation of small multispan greenhouse in relation to the window openings calculated with CFD. *ISHS 2006 Acta Hort.* 718:351-356.
- Davide P. 2012. Analysis of night-time climate in plastic-covered greenhouses. *Tesi Doctoral.*, Universitat Politecnica de Catalunya. p. 6-17, 48-79, 80-109.
- He, K.S., D.Y. Chen, L.J. Sun, Z.L. Liu, and Z.Y. Huang. 2015. The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses during summer and winter seasons. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 9(1):399-410.
- Hong, S-W., I-B. Lee, H-S. Hwang, I-H. Seo, J.P. Bitog, J-L. Yoo, K-S. Kim, S-H. Lee, K-W. Kim and N-K. Yoon. 2008. Numerical simulation of ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouses in Korea. *Amer. Soc. of Agricultural and Biological Engineers.* 51(4):1417-1432.
- Hong, S.W and I.B. Lee. 2014. Predictive model of micro-environment in a naturally ventilated greenhouse for a model-based control approach. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23(3):181-191 (in Korean).
- Kim, K., J.Y. Yoon, H.J. Kwon, J.H. Han, J.E. Son, S.W. Nam, G.A. Giacomelli, and I.B. Lee. 2008. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering* 100:245-255.
- Lee, I., S. Lee, G. Kim, J. Sung, S. Sung and Y. Yoon. 2005. PIV verification of greenhouse ventilation air flows to evaluate CFD accuracy. *Amer. Soc. of Agri. Engineers* 48(5): 2277-2288.
- Lee, I.B and T.H. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamic temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse. *Amer. Soc. of Agri. Engineers* 44(1): 119-127.
- Liu, S.Z., Y. He, Y.B. Zhang, and X.W. Miao. 2005. Prediction and analysis model of temperature and its application to a natural ventilation multi-span plastic greenhouse equipped with insect-proof screen. *Journal of University Science* 6(B)(6):523-529.
- Majdoubi, H., T. Boulard, H. Fatnassi, and L.C. Bouirden. 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology* 149:1050-1062.
- Nam, S.W., Y.S. Kim and D.U. Seo. 2013. Evaluation of natural ventilation performance for multi-span plastic greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 22(1):7-12.(in Korean)