

## 공기유동해석을 통한 온실내 식물군 미기상 분석기술 개발

### - (2) 온실내 대기환경에 미치는 작물의 영향 분석을 위한 CFD 모델개발 -

이인복<sup>1\*</sup> · 윤남규<sup>2</sup> · Thierry Boulard<sup>3</sup> · Jean Claude Roy<sup>4</sup> · 이성현<sup>2</sup> · 김경원<sup>2</sup> · 홍세운<sup>1</sup> · 심시흥<sup>5</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학, <sup>2</sup>농촌진흥청 농업공학연구소 시설방제공학연구실

<sup>3</sup>프랑스 국립농업연구소 원예환경연구실, <sup>4</sup>프랑스 Franche-Comté 대학교, CREST,

<sup>5</sup>건국대학교 자연과학대학 생물산업기계공학

## Development of an Aerodynamic Simulation for Studying Microclimate of Plant Canopy in Greenhouse

### - (2) Development of CFD Model to Study the Effect of Tomato Plants on Internal Climate of Greenhouse -

In-Bok Lee<sup>1\*</sup>, Nam-Kyu Yun<sup>2</sup>, Thierry Boulard<sup>3</sup>, Jean Claude Roy<sup>4</sup>, Sung-Hyoun Lee<sup>2</sup>,  
Gyoeng-Won Kim<sup>2</sup>, Se-Woon Hong<sup>1</sup>, and Si-Heung Sung<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

<sup>2</sup>Agricultural Structures Engineering, National Institute of Agricultural Engineering, Suwon 441-707, Korea

<sup>3</sup>National Institute of Agricultural Researches, France

<sup>4</sup>FEMTO-ST, CREST, University of Franche-Comté, France

<sup>5</sup>Agricultural and Biosystems Engineering, Konkuk University, Chungju 380-701, Korea

**Abstract.** The heterogeneity of crop transpiration is important to clearly understand the microclimate mechanisms and to efficiently handle the water resource in greenhouses. A computational fluid dynamic program (Fluent CFD version 6.2) was developed to study the internal climate and crop transpiration distributions of greenhouses. Additionally, the global solar radiation model and a crop heat exchange model were programmed together. Those models programmed using C++ software were connected to the CFD main module using the user define function (UDF) technology. For the developed CFD validity, a field experiment was conducted at a 17 × 6 m<sup>2</sup> plastic-covered mechanically ventilated single-span greenhouse located at Pusan in Korea. The CFD internal distributions of air temperature, relative humidity, and air velocity at 1m height were validated against the experimental results. The CFD computed results were in close agreement with the measured distributions of the air temperature, relative humidity, and air velocity along the greenhouse. The averaged errors of their CFD computed results were 2.2%, 2.1%, and 7.7%, respectively.

**Key words :** climate heterogeneity, computational fluid dynamics (CFD), crop transpiration, greenhouse, tomato

\*Corresponding author

## 서 언

사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 온실은 낮은 원가와 간단한 구조, 쉬운 조작 등을 통하여 년중 농산물 생산 및 농촌의 소득 향상에 큰 기여를 하고 있다. 앞으로도 농촌 인구의 감소 등으로 인하여 시설은 더욱 대형화되어갈 것으로 예상되며, 이로 인한 시설내

환경조절이 더욱 중요하게 될 것이다(Lee 등, 2004). 특히 시설내 주요 환경인자들의 확산 및 교류를 위한 주메카니즘이자 동시에 측정의 어려움으로 인하여 최근까지도 연구가 부진하였던 공기유동에 대한 분석은 매우 중요하다. 공기유동이나 환기연구에 있어서 시설내 작물이 공기유동뿐만 아니라 온도, 습도 등 대기환경에 미치는 영향은 매우 중요하다. 관련 연구의 효율

성 및 결과에 대한 신뢰도를 향상시키기 위하여 최근에 전산유체역학(CFD)을 이용한 공기유동학적 접근이 활발하게 이루어지고 있다(Lee 등, 2005). 하지만, 지금까지 대부분의 온실의 환기연구는 작물의 복잡한 기하학적 형상 때문에 작물을 배제하고 이루어져 왔던 것이 사실이다. 결론적으로, CFD 모델개발 시 시설내 작물이 온도, 습도, 공기유동 등 기상환경과 환기효율성에 미치는 영향이 추가되어야 한다. 이를 통하여 개발되는 CFD 모델들을 현장의 문제점을 분석하고 현장에 적용할 수 있는 새로운 모델개발에 효과적으로 이용되어질 수 있기 때문이다.

Okushima 등(1989)은 자연환기식 온실안의 기상환경을 예측하기 위하여 처음으로 CFD 시뮬레이션 기술을 적용하였다. Mistriotis 등(1997), Boulard 등(1998, 1999), Kacira 등(1998), Wang와 Deltour(1999)도 작물이 없는 상태에서 환기연구를 위하여 CFD기술을 이용하였다. Lee와 Short(2000, 2001), Lee 등(2000, 2005), Kittas 등(2003), Kacira 등(2004)은 자연환기식 다연동온실의 환기연구를 위하여 CFD 모델을 개발하였으며 이들의 정확도 향상을 위하여 현장실험, 입자추적을 통한 대기장 측정기술(Particle image velocimetry, PIV) 실험 및 풍동실험 등을 수행하였다. Bartzanas 등(2002), Fatnassi 등(2002, 2003)도 방충망이 설치된 온실내의 공기유동, 온도 등을 예측하기 위하여 CFD 실험을 수행하였다. 유 등(2002), Kittas 등(2003), 남 등(2005) 등도 CFD모델을 이용하여 포그 냉방온실의 냉방효과를 연구하였다.

환기 과정은 기류분배, 온실에서의 작물 증산량과 환경의 불균질을 위한 추진력이기 때문에 CFD를 이용한 많은 온실의 환기연구가 이루어지고 있다(Bot, 1983; De Jong, 1990; Fernandez와 Bailey, 1992; Boulard 등, 1996). 내부의 태양 복사 에너지의 분배는 작물의 증발산을 위한 중요한 요소의 하나이다(Wang과 Boulard, 2000a). 최근엔, 태양의 경로와 온실의 형태, 투과량과 하늘의 환경조건에 의해서 온실 터널에서의 태양 복사의 이질성을 예측하는 복사에너지의 분배 모델이 개발되었다(Wang과 Boulard, 2000b). 하지만, 지금까지 전체 온실에서 작물 피복을 포함한 세부적인 환경의 이질성을 가진 연구는 실험적으로, 모델링으로 Boulard 등 (2002)만이 유일하게 기초적인 연구를 수행한 실정이다.

본 연구의 목적은 작물 증발산 모델과 태양 복사 에너지를 접목한 온실 환경조절, 특히 환기연구를 위한 3차원 CFD 모델을 개발하고자 함이다. 온실안의 토마토작물과 환경사이에서의 잠열과 현열의 교환을 기초로 하여 토마토 작물의 증발산을 시뮬레이션하고, 또한 실험적으로 얻은 온실내 온도, 습도, 및 풍속 분포와 비교함으로써 개발되는 CFD모델의 정확도 검증 및 이의 향상을 도모하고자 한다. 작물군의 공기저항은 이등(2006)의 결과를 적용하고자 한다. 이 연구는 2004년도에 체결된 한국·프랑스 국제공동연구의 일환으로 수행되었으며, 한국의 농업공학연구소(NIAE)와 프랑스 측의 프랑스국립농업연구소(INRA)가 공동으로 연구를 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. CFD 시뮬레이션

본 연구에서는 온실의 영역 내부에서의 각 메쉬에 대하여 Navier-Stokes 방정식의 Reynolds 이론 개념을 계산하는 CFD(Computational fluid dynamics) 기술을 사용하였다. 결과의 정확도를 향상시키기 위해서는 계산 영역 내부를 적절한 크기와 분포의 메쉬로 설계하여야 하며, 여기에는 Gambit(Ver. 2.2, Fluent Co. New Hampsher, USA)이 사용되었다. CFD 기술로 계산을 수행하는 메인 모듈로는 Fluent(Ver.6.2, Fluent Co. New Hampsher, USA)을 사용하였다. Fluent는 C 언어를 기반으로 만들어졌으며 동적인 메모리 할당 및 효율적인 데이터 구조와 유연한 계산 제어를 가능하게 제작된 CFD 기반의 컴퓨터 모델링 및 분석 툴이다.

유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다. 본 연구에서 사용된 Fluent 프로그램은 다음과 같은 방법으로 수치해석을 하게 된다. 먼저  $u$ ,  $v$ ,  $w$  방향의 운동량 보존방정식을 각각 계산한다. 이로부터 얻어진 속도는 질량보존을 만족하지 못할 수도 있으므로, 연속방정식으로부터 질량보존에 대한 계산을 수행하여 속도성분을 업데이트를 한다. 엔탈피와 각각의 공간을 계산하고, 난류(turbulence kinetic energy, eddy dissipation rate)에 대한 계산을 수행한 후 속도 성분을 업데이트한다.

유체의 property를 update한 후, 수렴성을 판단하여 수렴하였으면 계산을 끝내고, 수렴하지 않았으면 다시 상기에서 반복 계산한다.

시물레이션의 정확도를 높이기 위해서는 적절한 난류모델의 선택이 필요하다. 현재, 모든 종류의 문제에 대해 포괄적으로 사용할 수 있는 단일의 난류 모델은 존재하지 않는다. 따라서 각 모델에서의 물리적인 특성과 문제의 특성, 요구되는 정확도의 정도, 시물레이션에 소요되는 시간 등을 고려하여 난류 모델을 결정해야 한다. 본 연구에서는 Lee 등(2005)에 의해 정확도가 향상된 CFD 모델을 사용하였으며, 이에 는 RNG k-ε 모델이 사용되었다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (2)$$

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3)$$

$t$	시간 (sec)
$k$	난류운동에너지 ( $m^2 \cdot m^{-2}$ )
$\varepsilon$	난류확산율 ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )
$\rho$	밀도 ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$G_k$	평균 유속장에 의한 난류 동적 에너지의 생성 ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$G_b$	부력에 의한 난류 동적 에너지의 생성 ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$Y_M$	전체 확산율의 압축성 난류에서의 변동 팽창의 영향
$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$	각각 $k, \varepsilon$ 의 Prandtl 수의 유효성
$\mu_{eff}$	유효 점성 ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	일반 상수 (각각 1.42, 1.68, 0.0845)
$\eta = Sk/\varepsilon, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012, S$	소용돌이의 크기에 의한 변형 텐서의 스칼라

## 2. 작물군 증발산 이론모델 정립

온실내 대기층과 토마토작물의 열적 및 질량적 교류와

관련된 이론정립은 Boulard 등(1996, 2002)에서 자세하게 설명되어 있다. 기류 흐름에 대한 기초적인 계산은 질량, 모멘트, 에너지 보존 공식을 사용한 전산유체 동역학을 기초로 하였다. 비압축성 유체로서, 자유 대류를 기초로 정상 상태의 수송 현상을 묘사하기 위한 세 방향으로의 보존 공식(3차원 Navier-stokes Momentum)은 일반적으로 다음과 같다(Fluent manual, 2006).

$$\frac{\partial(U\Phi)}{\partial X} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial Y} + \frac{\partial(W\Phi)}{\partial Z} = \Gamma \cdot \nabla^2 \Phi + S_\Phi \quad (4)$$

$\Gamma$	확산 계수
$U, V, W$	각 방향의 속도장
$\Phi$	전이되는 질량의 농도 (ppm)
$S_\Phi$	발생원

이번 Fluent CFD 모델에 작물군의 열적 및 질량적 보존법칙의 기본 공식은 아래와 같다.

$$\frac{dR(z)}{dz} = CAI \cdot \rho \cdot C_p \frac{T_l - T_a}{r_a} + CAI \cdot \rho \cdot \lambda \frac{w_f - w_a}{r_a - r_s} \quad (5)$$

$r_a$	외부저항 ( $s \cdot m^{-1}$ )
$r_s$	내부저항 ( $s \cdot m^{-1}$ )
$w_f$	잎의 절대습도 ( $kg \cdot kg^{-1}$ )
$w_a$	공기의 절대습도 ( $kg \cdot kg^{-1}$ )
$\lambda$	증발산의 잠열 ( $J \cdot kg^{-1}$ )
$C_p$	공기의 비열 ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$ )
$T_f$	잎의 온도 ( $^\circ K$ )

## 3. 현장실험

이번 연구를 위하여 내부공기유동 및 환기량에 큰 영향을 줄 수 있는 큰 작물군중에 하나인 토마토를 선택하였다. 이번 시물레이션 모델에 작물군 설계는 작물이 시설내 대기층과 열적 및 물질적 교류를 갖는다는 가정 하에 이루어졌다. 예측한 복사에너지와 대류의 이질성을 실험적 값과 비교하여 유효화시키고 시설내 작물과 환경 사이에서의 잠열과 현열의 교환을 기초로 한 토마토 작물의 증발산 모델을 시물레이션하였다. 또한 작물이 공기흐름에 미치는 영향을 설계하기 위하여 풍동실험을 통하여 작물군의 항력계수를 찾고자 하였다. 이렇게 개발된 CFD 시물레이션 모델의 정확도는 현장 실험 결과를 통하여 검증하고자 노력하였고, 현장실험

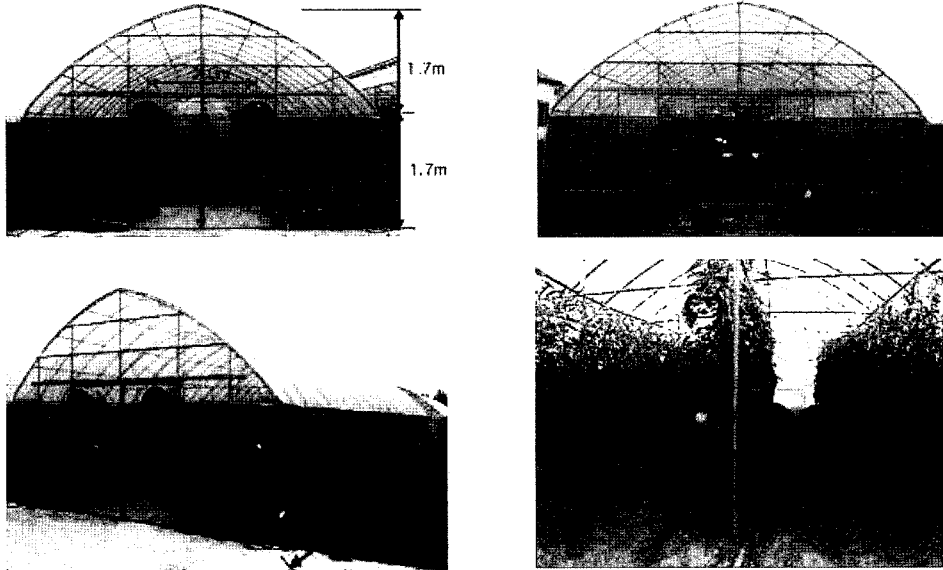


Fig. 1. Pictures of the experimental single-span greenhouse.

에서 측정된 데이터는 CFD의 입력자료로도 활용되었다.

현장실험은 원예연구소 부산원예시험장에 설치된 단동형 강제환기식 온실(Fig. 1)에서 2005년 7월 7일에 수행되었으며, 수원에 소재한 다른 유사한 온실에서 2006년 5월 20일부터 6월 1일까지 추가로 실험하였다. 이 현장실험은 이번 연구를 통하여 개발되는 전산유체역학 (CFD) 모델의 정확도 검증을 위하여 수행되었다. Fig. 1에서는 실험용 온실을 보여주고 있으며, Table 1

Table 1. Structural characteristics of experimental greenhouse and internal plants.

Contents	Value	Unit
Floor area of greenhouse	6W × 17L	m
Exhausted fan	4 (dia. 0.9144m)	
Sidewall height	1.7	m
Edge height	3.4	m
Inlet size	1.2W × 2.0H	m
Greenhouse cover	single-layer polyethelene	
Tamato		
plant length	179.5	cm
number of planted hills	30 plants/row × 3 row	90 plants
planting distance	40	cm
Width of plants	50~60	cm
Width of aisle	1.1	m

은 실험온실의 규격과 온실내 토마토 작물의 수치적 특성을 보여주고 있다. 온실내 작물에서 발생하는 증산량을 정확하게 분석하기 위하여 온실 내부의 바닥은 토양면의 수분증발을 막고자 검은색 필름으로 멀칭하였다. 온실의 한쪽 끝벽에 설치된 출입문을 통하여 외부공기가 유입되고 반대쪽 끝벽에 설치된 4개의 배기팬(직경 0.9144m)을 통하여 내부공기가 배기되었다.

이번 실험에서는 온실밖에 설치된 기상대(Weather station, Campbell com, USA)에서 외부기상의 풍향, 풍속, 온도, 습도 등이 측정되었으며, 온실내 미기상장은 온도와 습도(H08-007-02, Hobo Temp/RH, Hobo Com, USA), 그리고 공기유속(6243 Anemomaster, Kanomax Com, Japan)을 Fig. 2에서 표시된 위치에서 실시간으로 측정되었다. 또한 온실내에서의 광에너지(LI-200 Pyranometer, LI-COR, USA)와 피복 및 온실 바닥의 표면온도(TMC6-HA, Hobo External Temp., Hobo Com, USA)도 측정하였다. 대부분의 센서들은 지상으로부터 1m 높이에 설치되었으며, 이 데이터는 CFD로 계산된 결과들과 비교 분석되었다.

#### 4. CFD 시뮬레이션 설계

CFD 시뮬레이션 개발을 위하여 우선적으로 Gambit을 이용하여 메쉬파일을 설계하였다. 총 메쉬수는

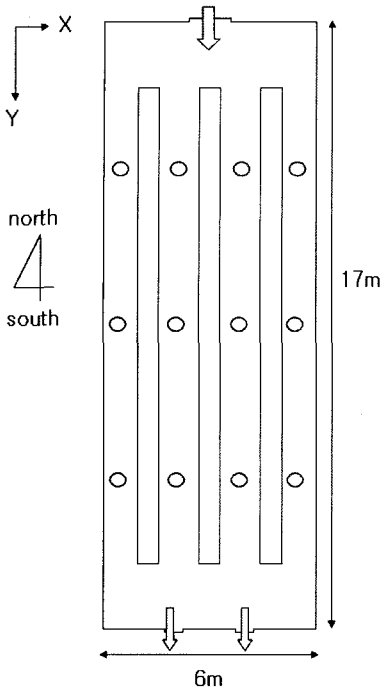


Fig. 2. Location of the sensors at 1m height in the experimental greenhouse.

467,800개이었으며, 작물군과 주위 공기간의 질량 및 열적 교류를 더욱 정확하게 추측하기 위하여 작물군에 더욱 조밀한 메쉬를 설계코자 노력하였다. 3차원 메쉬 형상의 질적 형상을 4면체(tetrahedron)보다는 가능한 한 6면체(hexahedron)를 이용하였다. Lee 등(2005)에서 가장 정확한 난류모델로 입증된 RNG k-ε 모델을 이용하였다. Table 2에서는 이번 CFD 모델에서의 기본 설계값들을 보여주고 있다. 온실의 벽들에 열적 수치들과 각 팬의 풍량, 그리고 대기 중의 습도 및 온도값들은 현장실험을 통하여 측정된 데이터들을 이용하였다.

CFD는 정상상태로 계산을 수행하였으며, 온실내 1m 높이에서의 온도, 습도 및 공기유속을 현장실험을 통하여 확보한 결과들과 비교분석하였다. 이를 통하여 개발된 CFD모델의 정확도를 분석하였고, 또한 이 정확도를 최대한 향상시키기 위하여 메쉬설계, 난류모델, 환경조건 등을 다양하게 시도하였다. 현장실험을 통하여 환기량을 분당 0.5번으로 설정하였다. 분당 1번 교체되는 대신에 0.5번으로 설정한 이유는 가능한 한 온실의 길이방향으로 온도, 습도 등의 구배가 크게 나타나

Table 2. Constant input values for the case file of CFD model.

Contents	Value	Unit
Viscous model	RNG k-ε model	
Near-wall	Standard wall fuction	
Thermal conductivity	0.062	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Viscosity	1.85e-05	Kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>
Mass diffusivity	2.55e-05	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>
Internal solar radiation		W m <sup>-2</sup>
Operating pressure	101,325	Pa
Buoyancy effect	activated	
Gravitational acceleration	-9.81	m·s <sup>-2</sup>
Heat flux of wall	100	W·m <sup>-2</sup>
Heat flux of floor	74	W·m <sup>-2</sup>
Fan-up-1 velocity	4.09	m·s <sup>-1</sup>
Fan-up-2 velocity	4.77	m·s <sup>-1</sup>
Fan-down-1 velocity	4.32	m·s <sup>-1</sup>
Fan-down-2 velocity	4.19	m·s <sup>-1</sup>
Inlet air temperature	26.8	
Inlet air humidity	44.0	%
Characteristic length for stems	7.5e-2	m
Minimal stomatal resistance	10 (temp.), 30 (hum.)	
Volumetric leaf array density	1.5	
Height of the crop	1.8	
Latent heat of water evaporation	2500000	
Radiation absorption coefficient	0.75	

게 함이었다. 이에 따라서 CFD 설계에서도 온실의 내부체적과 온실 내로 유입되는 공기질량을 고려하여 분당 내부 체적이 0.5번 교체되도록 설계하였다.

$$AER = \frac{\sum v_i A_i}{V} \times 60 = \frac{\sum v_{i0} A_{i0}}{V} \times 60 \quad (6)$$

AER 환기량 (min<sup>-1</sup>)

v<sub>i0</sub> 각각 입기구와 배기구에서의 공기유속 (m s<sup>-1</sup>)

A<sub>i0</sub> 입기구와 배기구의 크기 (m<sup>2</sup>)

V 온실의 내부체적 (m<sup>3</sup>)

CFD 모델 설계시 식물군락은 공기투과성 매체로 설정하고, 이의 발생원으로 식물의 증산에 의한 공기와의

열 및 질량 교환작용을 C++ 언어로 작성한 UDF (user define function) 프로그램으로 설계하였다. 토마토 식물군락의 실내공기와의 질량교환을 해석하기 위한 Fluent의 UDF 프로그램에 사용된 상대습도의 질량 차원(Mass fraction) 전환공식은 다음의 공식 (7)~(9)과 같다.

$$P_{vsat} = 6.11 \exp\left(\frac{17.25T}{237.8 + T}\right) \quad (7)$$

$$\Delta = P_{vsat} \frac{17.25(237.8 + T) - 17.25T}{(237.8 + T)^2} \quad (8)$$

$$r = 622 \left( \frac{(RH/100)P_{vsat}}{1013 - (RH/100)P_{vsat}} \right) \quad (9)$$

$r$  습도비 ( $g \cdot kg^{-1}$  of dry air)

$P_{vsat}$  포화수증기압 (hPa)

$T$  공기온도 ( $^{\circ}C$ )

$RH$  상대습도 (%)

$\Delta$  포화수증기압의 편차 ( $hPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ )

## 결과 및 고찰

### 1. 현장실험

측정기간 총 4시간동안 평균풍속은  $2.1m \cdot s^{-1}$ 이었고, 이번 실험을 위한 온실이 강제환기식이었기 때문에 시설의 환기에 외부의 풍속이 미치는 영향은 없었다고 가정하였다. 외부 온도는 오후 1시 50분까지 꾸준히 증가하는 것으로 나타났으며, 온실내의 공기온도도 같은 경향을 나타내며 증가하였다. 온실 안과 밖의 평균 온도차이는 총 12군데의 센서위치에서 측정된 값을 기준으로 하여 약  $2.8^{\circ}C$ 가 발생하였으며, 입기구로부터 배기팬의 위치까지 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 온실안과 밖의 온도차는 점점 증가하는 것으로 나타났다. 온실내 1m 높이의 총 12군데에서 측정된 내부 기온의 평균 편차는 약  $3.2^{\circ}C$ 인 것으로 나타났다. 온실의 길이가 남북 방향이었으며, 온실내에서 동쪽 방향의 온실내 공기온도가 서쪽 지역보다 더 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 온실내 동쪽 방향의 바닥온도가 오전동안 복사에너지를 더 받고 또 온실내 바닥에 저장되었던 열에너지가 12시 이후부터 방열하였기 때문에 온도가 더 높게 나온 것으로 판단되었다. 반면에 다른 지역들은 토마토의 큰 군락에 의하

여 만들어진 그늘 때문에 상대적으로 바닥온도는 더 낮았던 것으로 판단된다. 온실내에서 동쪽에 있는 측창 옆에 통로와 반대쪽에 있는 통로 사이의 바닥에서의 평균온도는 약  $1.4^{\circ}C$  정도 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

온실내 습도도 외부 습도의 변화 형태와 유사하게 나타났으며, 외부보다 평균 1.4% 높은 것으로 나타났다. 배기구 가까이에는 측정 센서가 설치되지 않아서 그곳에서의 온도와 습도는 측정되지 않았지만, 측정된 온도와 습도보다 훨씬 더 높았을 것으로 판단되었다. 온실내 습도도 입구로부터 배기구까지 일정하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 풍속은 가운데 두 통로에서의 풍속이 양쪽 측벽 옆에 있는 통로에서보다 더 높게 나타났다. 이는 입기구가 온실 한쪽 끝벽의 중앙에 위치하고 있기 때문인 것으로 판단되었다. 공기유속은 배기구쪽으로 갈수록 작물군의 공기저항으로 인하여 급속히 감소하는 것을 느낄 수 있었다. 이 때의 환기량은 온실의 내부 체적을 고려하여 1분당 0.5번 교체될 수 있도록 팬의 회전수(RPM)를 조절하였다. 왼쪽 위의 배기팬을 기준하여 시계방향으로 각 팬의 측정된 풍속은  $4.09m \cdot s^{-1}$ ,  $4.77m \cdot s^{-1}$ ,  $4.19m \cdot s^{-1}$ , 그리고  $4.32m \cdot s^{-1}$ 이었다. 환기량은 실험 기간동안 일정하게 유지하였으며, 한쪽 끝벽에 있는 출입문을 통하여 공기가 유입되고 반대쪽 끝벽에 설치된 총 4대의 음압식 배기팬을 통하여 공기가 배출되도록 하였다. 이 때 모든 측창과 지붕에 설치된 배기창들은 완전히 밀폐시

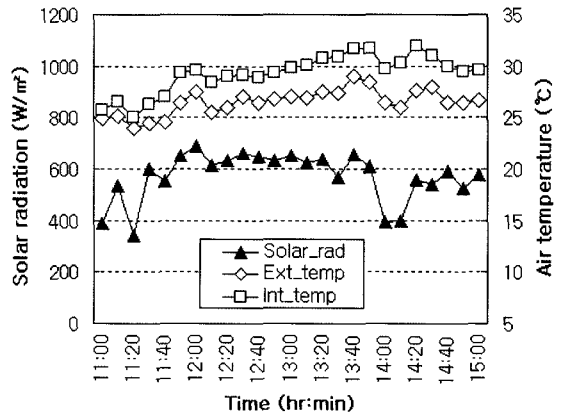


Fig. 3. The averaged external and internal air temperatures of the greenhouse with the external solar radiation during data collection.

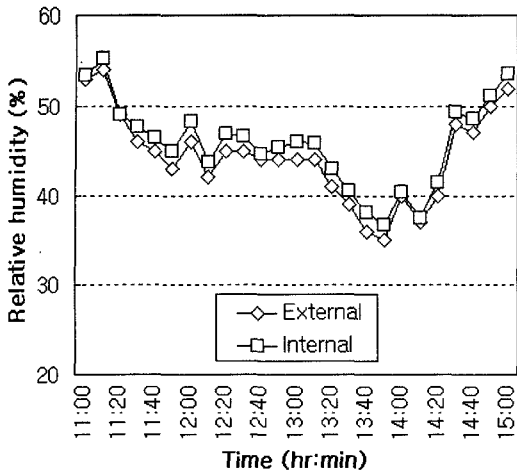


Fig. 4. The averaged external and internal relative humidities during data collection.

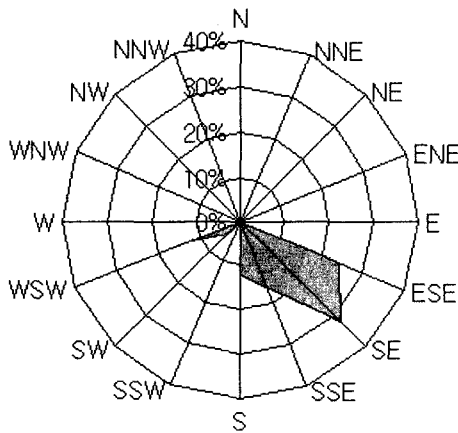


Fig. 5. The wind direction during data collection.

켰다.

이 실험기간 중에 풍향, 풍속 특히 광에너지가 안정된 기간인 12시 40분부터 13시 00분 사이의 데이터를 평균하여 CFD 검증에 위한 자료로 활용하였다. 이 기간동안 온실 피복의 온도는 33°C이었고 바닥을 완전히 덮도록 설치된 검은색 멀칭 필름의 온도는 42°C이었다. 이 기간동안의 외부와 내부의 복사에너지를 비교하여 본 결과, 피복의 복사에너지 투과율은 평균 73.7%인 것으로 나타났다.

## 2. CFD 모델 설계 및 이의 타당성 조사

강제환기식 단동형 실험온실을 3차원 CFD 모델화하

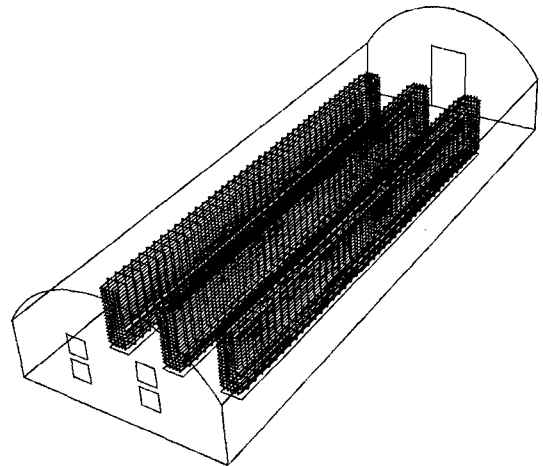


Fig. 6. 3-dimensional CFD model of a single-span mechanically ventilated greenhouse including 3-lines tomato crops.

기 위하여 이번 연구에서는 Fluent CFD 프로그램을 이용하였다. 작물군은 공기투과성 매체로 설계가 되었으며, 이들의 매쉬 크기는 0.1(10×10×10cm)비율로 설계하여 작물군으로부터 열적 및 질량적 발생과 공기저항을 최대한 정밀하도록 설계하고자 노력하였다. Fluent CFD설계에서 식물군의 형태를 공기투과성 매체로 설정한 이후에 이 식물군에 발생영역(Source term)으로 열적 및 질량적(중산작용) 공식들을 UDF용 C++ 프로그램을 이용하여 설정을 하였다. 이를 통하여 Fluent 메인모듈에서 계산 시 이 공식들이 실시간으로 동시에 계산되어 계산 수렴 후에 관련 결과들을 취할 수 있었다. 또한 공기투과성 매체로 설정하여 이의 공기저항(Inertial resistance factor)을 풍동실험을 통하여 계산된 0.26으로 설정함으로써 식물군의 공기저항력을 설계하고자 하였다. Fig. 6에서 완성된 3차원 CFD 모델을 보여주고 있다. 실제적으로는 4대의 배기용 팬들의 형상이 원형이지만, 6면체(hexahedron) 매쉬설계를 용이하게 하고, 또한 계산속도의 개선 및 수렴성 향상을 위하여 팬의 형상을 동일한 위치, 동일한 단면적의 정사각형으로 변경하였다.

아래 등고선 그림들(Fig. 7a, 7b, 7c)은 온실내 1m 높이에서 CFD에 의하여 계산된 풍속, 온도, 및 습도 분포를 2차원 단면으로 보여주고 있다. 온실에서 측정된 데이터들에서도 보여 주었듯이, 입기구인 출입문으로부터 배기팬이 설치된 배기구까지 공기가 흘러가면서 온실내 온도와 습도가 상승하는 것을 알 수 있었

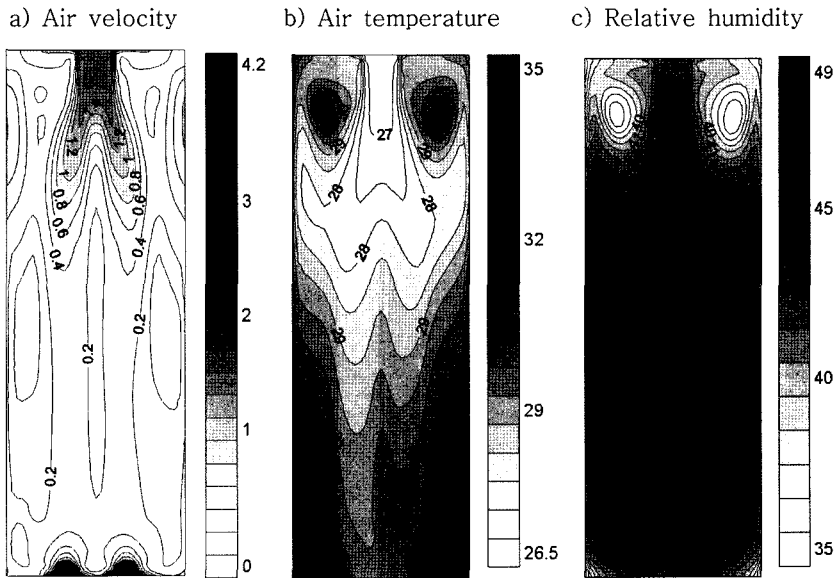


Fig. 7. The CFD computed horizontal distributions of air velocity (a), air temperature (b), and relative humidity (c) at 1m height in the greenhouse.

Table 3. CFD computed (parenthesis) and measured air velocities, air temperatures, and relative humidities at 1m height in the greenhouse.

( ): CFD computed values

Y (m)	X (m)	0.5	2.15	3.85	5.5
	Air velocity (m·s <sup>-1</sup> )				
3.5		0.39 (0.50)	1.05 (1.16)	1.01 (1.15)	0.40 (0.50)
8.5		0.13 (0.06)	0.35 (0.32)	0.32 (0.33)	0.10 (0.05)
13.5		0.20 (0.18)	0.30 (0.30)	0.28 (0.26)	0.18 (0.16)
Air temperature (°C)					
		외기 26.8°C			
3.5		27.8 (28.12)	27.4 (27.68)	27.2 (27.72)	27.9 (28.47)
8.5		29.6 (29.59)	29.3 (28.54)	29.1 (28.56)	31.1 (29.95)
13.5		31.6 (31.13)	30.4 (29.71)	30.8 (30.05)	33.0 (31.20)
Relative humidity (%)					
		외기 44%			
3.5		44.1 (43.20)	44.3 (43.45)	44.1 (43.29)	43.8 (42.13)
8.5		45.3 (46.52)	46.1 (46.18)	45.9 (46.08)	44.5 (45.96)
13.5		47.5 (45.89)	47.9 (47.15)	47.6 (47.00)	46.1 (45.06)

다. 또한 작물들의 공기저항 등으로 인하여 풍속은 점점 감소하는 것으로 나타났다.

Table 3, Table 4, 그리고 Table 5에서는 온실 중앙에서 입기구로부터 길이별로 현장에서 측정된 값들과 CFD 계산값들을 비교하여 보여주고 있다. 변화무쌍한 기상변화가 실험의 정확도에 미치는 영향을 최대한 줄일 수 있도록 강제환기식 온실에서 실험을 하였

고, 또한, 대체적으로 크지 않은 온실에서의 실험으로 인하여 오차를 크게 줄일 수 있었다. 온실내 1m 높이에서의 공기유속 분포는 온도분포와 상대습도의 결과와는 달리 오차가 높게 나타났다. CFD와 현장실험 결과를 비교하여 본 결과, 온실내 1m 높이에서의 평균 풍속이 각각 0.42m·s<sup>-1</sup>과 0.39m·s<sup>-1</sup>으로써 CFD의 지점별 오차의 평균값은 7.7%로 나타났다. Y8.5m



지점에서 가장 큰 오차가 발생하였는데, 최대 오차는 -53.8%로 나타났다. 가장 큰 이유로는 온실 길이방향에서 중간지점인 Y8.5m에서 풍속이 매우 작기 때문에 소숫점 2번째 자리의 차이라고 해도 큰 오차로 나타나는 것을 알 수 있었다. 1m 높이에서의 공기유속 분포를 보면, 입기구 역할을 하는 한쪽 끝벽에 있는 문에서 최대풍속을 보여주고 있으며, 배기용 팬이 설치된 다른 끝벽으로 갈수록 공기유속이 작아짐을 알 수 있었다. 작물군내의 유속은 매우 낮은 것으로 나타났으며, 중앙에 있는 통로 2곳에서 상대적으로 높은 유속이 감지되었다.

온도분포에서는 위치별 오차의 평균값은 2.2%가 발생하였으며, 위치별 최대오차는 5.5%를 보여주었다. Fig. 2에서 오른쪽으로 나타나는 동쪽 방향에서 대체적으로 큰 오차가 발생하였다. 오전에 태양의 위치로 인하여 온실내 서쪽 지역보다 동쪽 지역에 복사에너지를 더 많이 받게 된다. 이는 실험시간동안 바닥에 저장된 열에너지가 공기 중으로 방열이 되므로 서쪽지역보다 공기온도가 더 높게 나오는 것으로 판단된다. 반면에 CFD모델에서는 바닥에서의 열발생량을 균일하게 설계하였기 때문에 현장실험에서 측정된 공기 온도와 차이가 발생한 것으로 판단된다. CFD 입력 데이터로 활용하기 위하여 수행된 현장실험에서 바닥의 표면온도는 정중앙 통로에서만 길이방향으로 측정을 하였기 때문에 바닥 표면온도를 균일하게 설정할 수 밖에 없었다. 온실내 공기온도는 입기구로부터 배기구에 가까이 갈수록 높아지는 것을 알 수 있었으며, 공기유동과 같이 작물군의 공기 저항성이 온실내 온도분포에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 외기온도가 26.8°C인 동안에 CFD와 현장실험에서의 온실내 평균온도는 각각 29.2°C와 29.6°C인 것으로 나타났으며, 온실 내외의 평균 온도편차가 각각 2.4°C와 4.2°C인 것으로 나타났다.

외기 상대습도는 44%이었다. 이 때 CFD와 현장실험에서의 온실내 평균 상대습도는 각각 45.1%와 45.6%로 나타났다. 습도분포에서 지역별 오차의 평균값은 2.1%가 발생하였으며, 최대오차는 온실내 X5.5m-Y3.5m 지점에서 -3.8%가 발생하였다. 일반적으로 Y3.5m 지점과 Y13.5m에서 마이너스 오차가 발생하였고 Y8.5m 지점에서는 플러스 오차가 발생하였다. 온실내 1m 높이에서의 습도균일성을 보면, CFD와 현장

실험의 결과에서 최대편차는 각각 5.0%와 4.1%인 것으로 나타났다.

## 적 요

변화무쌍한 기상변화가 실험의 정확도에 미치는 영향을 최대한 줄일 수 있도록 강제환기식 온실에서 실험을 하였고, 또한 대체적으로 크지 않은 온실에서의 실험으로 인하여 CFD모델결과의 오차를 크게 줄일 수 있었다. CFD와 현장실험 결과를 비교하여 본 결과, 온실내 1m 높이에서의 평균풍속이 각각  $0.42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 과  $0.39\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로써 CFD의 지점별 오차 평균값은 7.7%로 나타났다. Y8.5m 지점에서 가장 큰 오차가 발생하였는데, 최대 오차는 -53.8%로 나타났다. 이의 가장 큰 이유로는 온실 길이방향에서 중간지점인 Y8.5m에서 풍속이 매우 작았기 때문에 소숫점 2번째 자리의 차이라고 해도 큰 오차로 나타났다. 작물형상의 기하학적 복잡성이 매우 큰 것을 고려한다면 오차범위는 매우 양호한 것으로 판단된다. 온실내 1m 높이에서 평균온도의 CFD 평균오차는 2.2%로 나타났고, 최대편차는 5.5%이었다. 온실내 바닥으로부터의 복사열 발생량의 차이로 인하여 온실내 동쪽 지역에 상대적으로 큰 오차가 발생하였다. 외기 상대습도가 44%일 때, CFD 상대습도의 오차는 2.1%이었으며, 최대 오차는 -3.8%이었다. 식물군의 공기유동저항, 식물군의 수분 및 열평형 모델을 추가하여 보다 사실적인 CFD 모델을 설계하였다. CFD 모델의 설계방법이 정립되었기 때문에, 추후에 온실내 다른 작물의 미기상 및 이의 온실내 기상에 미치는 영향 등을 정량적으로 분석할 수 있게 되었다. 또한 작물의 적정생육환경에 주요 대상이면서도 동시에 센서설치의 어려움 등으로 인하여 연구에 어려움이 많았던 작물군내 미기상을 연구할 수 있는 토대를 마련하였다.

## 인 용 문 헌

1. Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas. 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Computers and electronics in agriculture*, 34:207-221.
2. Bot, G.P.A. 1983. *Greenhouse climate: from physical*

- process to a dynamic model. Ph.D. Thesis. Agri. Univ. Wageningen. The Netherlands.
3. Boulard, T., J.F. Menezes, M. Mermier, and G. Papadakis. 1996. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. for. Meteorology* 79:61-77.
  4. Boulard, T., M.A. Lamrni, J.C. Roy, A. Jaffrin, and L. Bouirden. 1998. Natural ventilation by thermal effect in a one-half scale model mono-span greenhouse. *Trans. of ASAE* 41(3):773-781.
  5. Boulard, T., R. Haxaire, M. Lamrani, J. Roy, and A. Haffrin. 1999. Characterisation and modeling of the airflows induced by natural ventilation in a greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 74(1):135-144.
  6. Boulard, T. and S. Wang. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agric.* 34:173-190.
  7. De Jong, T. 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph.D. Thesis. University of Nice Sophia Antipolis, France.
  8. Fatnassi, H., T. Boulard, H. Demrath, L. Bouirden, and G. Sappe. 2002. Ventilation performance of a large Canarian-type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Biosystem Eng.* 82(2):97-105.
  9. Fatnassi, H., T. Boulard, and L. Bouirden. 2003. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agric. and Forest Meteorology* 118(1):97-111.
  10. Fernandez, J.E. and B.J. Bailey. 1992. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agri. For. Meteorology* 58:229-245.
  11. Fluent. 2006. The manual of computational fluid dynamics (CFD), Version 6.3. Lebanon, N.H.: Fluent, Inc.
  12. Kacira, M., T.H. Short, and R.R. Stowell. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span sawtooth greenhouses. *Trans. of ASAE* 41(3):833-836.
  13. Kacira, M., S. Sase, and L. Okushima. 2004. Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind-induced ventilation. *Transactions of ASAE*, 47(6):2059-2067.
  14. 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.
  15. Lee, I. and T. H. Short. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Trans. of ASAE* 43(3):745-753.
  16. Lee, I., T. H. Short, S. Sase, L. Okushima, and G. Y. Qiu. 2000. Evaluation of structural characteristics of naturally ventilated multi-span greenhouses using computer simulation. *Japanese Agric. Res. Quarterly* 34(4):245-255.
  17. Lee, I. and T. H. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamics temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse. *Trans. ASAE* 44(1):119-127.
  18. Lee, I., C. Kang, S. Lee, G. Kim, J. Heo, and S. Sase. 2004. Development of vertical wind and turbulence profiles of wind tunnel boundary layers. *Trans. ASAE* 47(5):1717-1726.
  19. Lee, In-Bok, S. Lee, G. Kim, J. Sung, S. Sung, and Y. Yoon. 2005. PIV verification of greenhouse ventilation air flows to evaluate CFD accuracy. *Transactions of ASAE* 48(5):2277-2288.
  20. Lee, In-Bok, N.K. Yun, T. Boulard, J.C. Roy, S.H. Lee, K.W. Kim, and S.W. Hong. 2006. Development of an aerodynamic simulation for studying microclimate of plant canopy in greenhouse-Study on aerodynamic resistance of tomato canopy through wind tunnel experiment. *Journal of Bio-Environment Control* (in review).
  21. Mistriotis, A., G. Bot, P. Picuno, and G. Searascia-Mugnozza. 1997. Discharge coefficients of greenhouse windows with insect screens. *Acta Horticulture* 443:71-77.
  22. Nam, Sang-Woon, G.A. Giacomelli, Kee-Sugn Kim, and Nadia 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.
  23. Okushima, L., S. Sase, and M. Nara. 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. *Acta Horticulture* 248:129-136.
  24. Wang, S. and T. Boulard. 2000a. Predicting the microclimate in a naturally-ventilated plastic house under Mediterranean climate. *Journal of Agricultural Engineering Researches*, 75:27-38.
  25. Wang, S. and T. Boulard. 2000b. Measurement and prediction of solar radiation distribution in full scale greenhouse tunnel. *Agronomie* 20:41-50.
  26. Wang, S. and J. Deltour. 1999. Airflow patterns and associated ventilation function in large scale multi-span greenhouses. *Trans. of ASAE* 42(5):1409-1414.
  27. Yu, In-Ho, M.K. Kim, H.J. Kwon, and K.S. Kim. 2002. Development of CFD model for estimation of cooling effect of fog cooling system in greenhouse. *Journal of Bio-Environment Control* 11(3):93-100.