

온실 미기상해석을 위한 CFD 모델 개발

Development of a CFD simulation model for the analysis of greenhouse micro-climate

윤남규*	이인복**	이성현*	김경원*	강창호*
정희원	정희원	정희원	정희원	정희원
N.K.Yun	I.B.Lee	S.H.Lee	K.W.Kim	C.H.Kang

1. 서론

최근 온실의 환경설계 및 해석과 관련하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기법을 이용한 공기유동 및 열전달 해석에 관한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 비록 컴퓨터관련 하드웨어 및 상업용 소프트웨어 툴의 발전속도가 빠르다고 하더라도 해석대상인 온실의 환경을 정확하게 모델링할 수 없다면 그 해석결과 또한 신뢰성이 떨어지게 된다. 온실의 환경해석 모델링에 있어서 가장 어려운 점은 막대한 태양복사에너지의 작용을 사실적으로 규정하기 까다로운 문제와 내부 작물조건이 다양하여 작물에 의한 영향을 모델링하기 어려운 점 등을 들 수 있다. 특히, 작물의 영향을 정확히 모델링하는 작업은 전산유체역학의 궁극적인 해석 목적이 작물의 생육환경을 최적화하기 위한 것이기 때문에 필히 연구되어야 하는 부분이다. 온실의 공기유동 및 환경 해석에 있어 또 한 가지 중요한 사항은 식물체 및 식물군락이 공기의 유동에 미치는 영향과 실내 공기와의 상호작용을 고려하는 것인데, 이를 위한 기초연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 이것은 온실환경해석에 있어 전산유체역학적 접근이 활발하게 시도되면서 그 필요성이 중요하게 대두되어 선진국을 중심으로 최근 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 농업공학연구소의 풍동시험장치 등 농업시설의 풍환경 해석 및 시험을 위한 첨단 시험장비들이 도입되어 CFD 기법을 이용한 농업시설의 환경 및 환기 해석과 설계의 정확도를 향상시키기 위한 연구들이 본격적으로 추진되고 있다.

본 연구에서는 기존의 CFD 모델링 및 시뮬레이션 방법에 식물군락의 공기유동저항, 작물과 실내 환경과의 상호작용 등을 추가하여 보다 사실적인 모델로써 해석 결과의 정확성을 향상시키기 위한 온실 미기상 해석 CFD 모델의 개발을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 온실의 미기상해석을 위한 CFD 툴로서 Fluent Inc.사의 범용 CFD 패키지인 FLUENT ver. 6.2를 사용하였다. CFD 모델 설계시 식물군락은 porous media로 설정하고, 이 porous media의 Source term으로 식물의 증산에 의한 공기와의 열 및 질량 교환작용을 C++ 언어로 작성한 UDF 프로그램으로 설계하였다. 토마토 식물군락의 실내공기와의

* 농촌진흥청 농업공학연구소

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부

질량교환을 해석하기 위한 FLUENT의 UDF 프로그램에 사용된 상대습도의 Mass fraction 전환공식은 다음의 (Eq. 1)~(Eq. 3)과 같다.

$$P_{vsat} = 6.11 \exp\left(\frac{17.25T}{237.8 + T}\right) \quad (\text{Eq. 1})$$

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

$$r = 622 \left(\frac{(RH/100)P_{vsat}}{1013 - (RH/100)P_{vsat}} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서,

r : Mass fraction ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of dry air)

Pvsat : Saturation vapor pressure (mbar)

T : air temperature ($^{\circ}\text{C}$)

RH : Relative humidity (%)

Δ : Derivative of saturation vapor pressure ($\text{mbar} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Table 1. Design conditions of the CFD Model.

Contents	Value	Unit
Viscous model	RNG k- ϵ model	
Near-wall	Standard wall function	
Thermal conductivity	0.062	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{K}^{-1}$
Viscosity	1.85e-05	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Mass diffusivity	2.55e-05	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Operating pressure	101,325	Pa
Buoyancy effect	activated	
Gravitational acceleration	-9.81	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Heat flux of wall	15	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Heat flux of floor	74	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Fan-up-1 velocity	10.2	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fan-up-2 velocity	10.6	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fan-down-1 velocity	9.6	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fan-down-2 velocity	9.3	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Inlet air temperature	30.7	$^{\circ}\text{C}$
Inlet air humidity	54.8	%

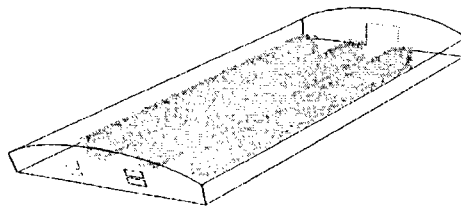


Fig. 1. Geometric modelling and mesh generation of tomato community.

토마토 식물군락은 Fig. 1과 같이 직육면체의 porous media로 형상을 단순화하여 모델링하였고, 격자설계의 오류 방지와 계산속도의 개선, 수렴성 향상을 위해 팬의 형상을 본래의 원형단면과 동일한 단면적의 정사각형으로 변경하였다. 토마토 식물군락은 porous media로 설계가 되었으며, 이들의 격자 크기는 0.1 비율로 설계되었으며, 해석모델의 전체 격자수는 467,800개로 설계 되었다.

본 연구에서 개발된 온실 미기상해석을 위한 CFD 모델의 기타 조건들은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

토마토 식물군락의 공기유동저항을 표현하는 항력계수 C_d 값은 풍동시험을 통하여 0.17로 결정되었다.

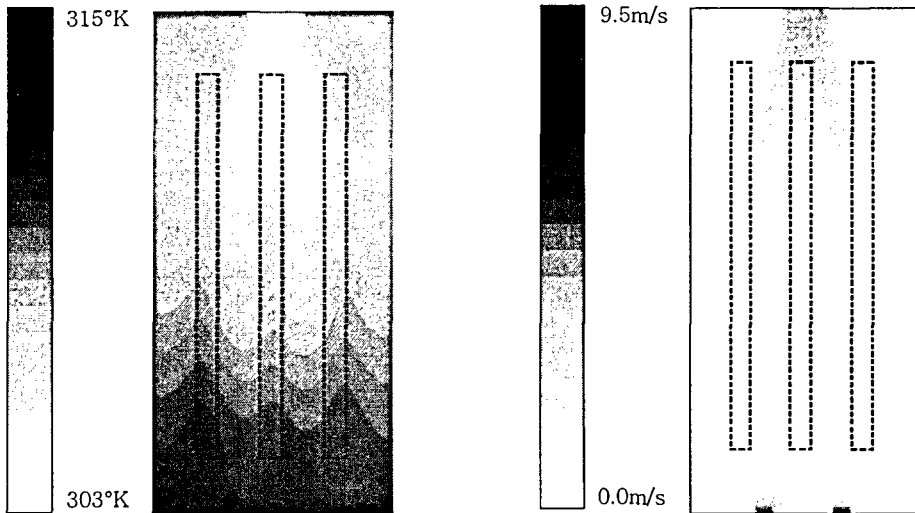


Fig. 2. The air temperature and wind velocity at 1m high by CFD simulation.

토마토 온실의 미기상해석 CFD 시뮬레이션 결과로 온실내 기온의 분포와 공기유속의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 그리고, 현장 실측결과와 시뮬레이션 결과를 Fig. 3에 비교하여 나타내었다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 폭 6m, 길이 17m의 아치형 단동온실에서의 실험 및 CFD 시뮬레이션 결과 온도분포는 상층부와 유출구(팬)쪽이 하층부와 입기구쪽에 비해 높게 나타났고, 유속은 길이방향으로 중간부위에서 가장 낮은 분포를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 3에서 공기유속의 경우 예측값과 측정값의 편차는 최대 $0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 평균 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 정확하게 예측된 반면, 실내 기온은 예측값과 측정값의 편차가 최대 -6.0°C , 평균 -2.2°C 로 상대적으로 크게 예측되었다. 시뮬레이션에 의한 온도값이 실측값보다 작은 이유는 실제 상황에서 복사 및 틈새환기 등의 이유로 내부의 공기교환이 적어 기온상승이 된 것을 정확하게 반영하지 못했기 때문으로 판단되었다. 이러한 정확도의 보완은 온실에서 태양복

사 모델의 정확성 향상과 틈새 환기에 의한 공기유동의 변화 등을 보다 정확하게 해석할 수 있는 모델링 기술의 추가적인 연구를 통해 가능해질 것으로 판단된다.

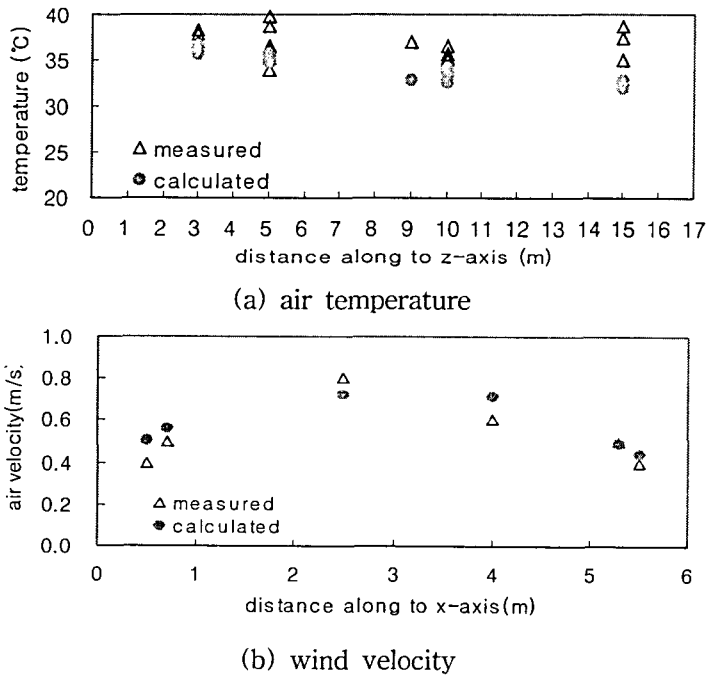


Fig. 3. Comparison of the result between by measurement and by simulation.

4. 요약 및 결론

1. 아치형 단동온실에서의 실험 및 CFD 시뮬레이션 결과 온도분포는 상층부와 배기구 쪽이 하층부와 입기구 쪽에 비해 높게 나타났고, 유속은 길이방향으로 중간부위에서 가장 낮은 분포를 보이는 것으로 나타남.
2. CFD 모델의 온실내 공기유속은 측정값에 비해 평균 12.6%의 편차가 발생하였으며, 형상의 복잡성이 매우 높은 작물군의 영향을 고려할 때 이 오차범위는 매우 양호한 것으로 판단됨.
3. 실험온실의 환기회수가 분당 2.3회로 커서 시뮬레이션상의 실내 기온값이 측정값에 비해 다소 낮게 예측됨.
4. 식물군의 공기유동저항, 식물군의 수분 및 열평형 모델을 추가하여 보다 사실적인 CFD 모델을 설계하였음.

5. 참고문헌

1. 윤남규 · 이성현 · 김경원 · 강창호 · 이재한. 2005. 강제환기 온실의 기온 및 유속 분포에 관

- 한 연구. 한국생물환경조절학회 발표논문집 14(2): 123-126.
2. 윤남규, 이인복, 이성현, 김경원, 강창호. 2006. 풍동실험에 의한 식물군락의 공기유동저항 연구. 한국농업기계학회 동계학술대회논문집 11(1): 323-326.
 3. T. Bartzanas, T. Boulard, 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.
 4. H. Fatnassi, T. Boulard, L. Bourden. 2003. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology* 118: 97-111.