

CFD 기법을 이용한 팬 앤 패드 냉방 온실의 온도경사 분석

남상운* · Gene A. Giacomelli¹ · 김기성¹ · Nadia Sabeh¹

충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

¹Arizona대학교 농업 및 생물시스템 공학과

Analysis of Temperature Gradients in Greenhouse Equipped with Fan and Pad System by CFD Method

Sang Woon Nam*, Gene A. Giacomelli¹, Kee Sung Kim¹, and Nadia Sabeh¹

Department of Bioresource Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

¹Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Controlled Environment Agriculture Center, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

Abstract. Evaporative cooling pad system is one of the main cooling methods in greenhouses and its efficiency is very high. However, it has some disadvantages such as greenhouse temperature distributions are not uniform and installation cost is expensive. In this study, a CFD simulation model for predicting the air temperature distribution in the fan and pad cooling greenhouse was developed. The model was calibrated and validated against experimental data and a good fit was obtained. The influence of different outside wind, fan and pad height, ventilation rate, shading, and greenhouse length, were then examined. In order to reduce the internal temperature gradients, it is desired that the prevail wind direction and the fan and pad heights are considered. The simulation indicates that high ventilation rates and shading contribute to reduce the temperature gradients in the fan and pad cooling greenhouse. In order to maintain the desired greenhouse temperature, the pad-to-fan distance should be restricted according to the design climate conditions, shading and ventilation rates. The developed CFD model can be a useful tool to evaluate and design the fan and pad systems in the greenhouses with various configurations.

Key words : CFD simulation, fan and pad system, greenhouse cooling, temperature gradients

*Corresponding author

서 언

여름철의 온실 내부 기온은 과다 상승하기 때문에 작물의 정상적인 생육이 불가능하므로 여름철에 온실에서 작물을 재배하기 위해서는 냉방이 필수적이므로 다양한 온실 냉방방법들이 제안되고 있다. 차광과 자연 환기가 가장 일반적인 온실냉방방법이지만 충분한 냉방효과를 거둘 수는 없다. 냉동기를 이용한 기계적인 냉방은 경제성이 없기 때문에 냉방부하가 작은 야간냉방이나 약광 작물의 재배에만 사용이 한정되고 있다. 증발냉각시스템은 지금까지 개발된 온실냉방 방법 중 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며 최근에는 잎과 과실 주변 또는 근권부 등의 국부냉방 방법도 시도되고 있다(Kim et al., 2001).

증발냉각시스템에는 여러 가지 방식이 있으나 최근에는 팬 앤 패드 시스템과 고압 포그 시스템이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그 중에서도 팬 앤 패드 시스템은 역사도 길고 온실냉방에서 비교적 많이 이용되고 있으며, 그 효율도 매우 높다. 하지만 이 방법은 온실의 온도분포가 불균일하고 설치비와 유지비가 많이 드는 단점이 있다(Arbel et al., 1999; Kittas et al., 2001).

CFD 시뮬레이션 기법은 실험하기 어려운 조건에 대한 시뮬레이션이 가능하고 실험에 대한 시간적 공간적 제약이 없으며 다양하고 실용적인 응용이 가능하다는 장점이 있어, 최근 온실의 공기유동과 관련된 연구에 많이 이용되고 있다. Okushima et al. (1989)에 의해 처음으로 CFD 시뮬레이션이 온실의 환기 연구에 적용

된 이래 1990년대 복잡한 난류흐름을 처리할 수 있는 상업적인 CFD 프로그램의 발전에 따라 자연환기 및 강제환기 온실에서의 공기유동패턴, 온도분포, 각종 환경 영향인자들의 검토 등에 CFD 기법이 적용되었으며, 실험을 통한 검증이 많이 이루어졌다. 이들 연구를 통하여 환기시스템의 성능평가에 있어서 CFD 모델이 유용하다는 사실이 입증되었다(Mistriotis et al., 1997; Kacira et al., 1998; Lee and Short, 2001; Bartzanas et al., 2004). Jain and Tiwari (2002)와 Kittas et al. (2003)은 팬 앤 패드 냉방 온실의 온도분포를 수학적으로 모델링하고 실험을 통하여 검증한 바 있으며, Yu et al. (2002)은 포그 냉방 온실의 냉방효과 예측을 위하여 CFD 모델을 개발한 바 있으나 다양한 응용과 설계를 위한 CFD 기법을 팬 앤 패드 냉방 온실에 적용한 사례는 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 팬 앤 패드 시스템의 설계를 위한 자료를 제공할 목적으로 팬 앤 패드 시스템을 설치한 온실의 온도분포를 예측하기 위한 CFD 모델을 개발하고 실험을 통하여 검증하였으며, 팬 앤 패드 냉방 온실의 온도경사에 영향을 미치는 인자들을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 모델의 구성

본 연구에서는 모델의 형상과 격자 구성을 위하여 Gambit 1.3을 이용하였고, 모델 해석에는 상용 CFD 패키지인 Fluent 5.4를 이용하였다(Fluent Inc., 1998).

모델은 2차원으로 구축하였고, 해석기는 single-precision을 적용하였으며 작물은 고려하지 않았다. Fig. 1에서 보는바와 같이 온실의 좌우 각각 40 m, 상부 25 m를 모델의 외측경계로 설정하여 온실 내부는 조밀하게(셀 크기 0.2 m) 온실 외부로 멀어 질수록 느슨하게(외측 경계의 셀 크기 5 m) 격자를 작성하였

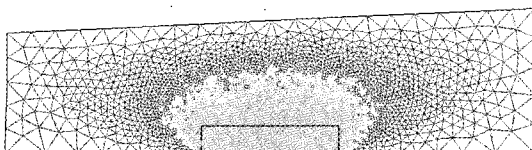


Fig. 1. Mesh of an experimental greenhouse for simulation.

으며 약 5만개의 삼각형 셀이 자동 생성되었다.

모델의 좌측 경계는 velocity inlet 경계조건으로 선택하고 여기에 외부기상 데이터를 입력하였다. 모델의 우측 경계는 pressure outlet 경계조건으로 선택하였으며 모델의 상부 경계(sky)는 wall 경계조건으로 선택하고 여기에 일사량 데이터를 입력하였다. 또한 모델의 하부 경계인 지표면과 온실 토양은 wall 경계조건으로 설정하였다. 온실의 지붕과 벽면은 wall 경계조건으로 설정하고 투명한 플라스틱이므로 transparency 옵션을 선택하였다.

패드의 경계조건은 porous media condition을 적용하였다. Porous media의 입력 자료는 α (permeability)와 C_2 (inertial resistance factor)인데, 패드를 통과하는 공기를 층류로 가정할 경우 Darcy의 법칙에 의해 C_2 는 0이 되고, 압력강하는 다음 식과 같이 유속에 비례하게 된다(Fluent Inc., 1998).

$$\nabla p = \frac{\mu}{\alpha} v \quad (1)$$

입력자료 α 는 150 mm 두께의 증발냉각용 패드에서 주어진 유속에 따른 압력강하 데이터(Val Products, 2005)를 이용하여 식(1)로부터 구하였다. 패드에서의 냉각효과를 모의하기 위하여 패드를 통과하는 습공기의 총열량 변화를 porous media 옵션의 energy source term에 마이너스로 고려하였다. 팬의 경계조건은 exhaust fan을 적용하였다. Table 1은 본 연구에서 선택된 기본 모델을 나타낸 것으로 에너지 방정식을 활성화 시키고 부력효과를 고려하였다. 난류모델은 온실의 공기유동 모델에서 일반적으로 사용하고 있는 standard k- ϵ model을 적용하였고(Molina et al., 2004),

Table 1. The basic components of the CFD model

Classification	Setting of Method
Solver	Segregated solver, 2-D space, Implicit formulation Absolute velocity, Steady state analysis
Energy equation	Activated
Viscous model	Standard k- ϵ model, Full buoyancy effects
Radiation model	Discrete Ordinates model
Buoyancy effect	Boussinesq model
Other options	Inactivated
Model parameters	Generally recommended values

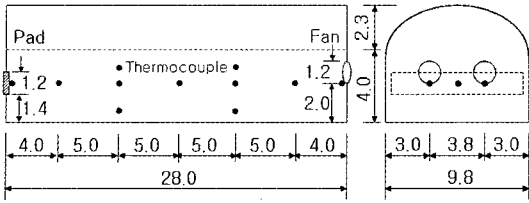


Fig. 2. Experimental greenhouse and sensor locations (unit ; m).

복사모델은 discrete ordinates model을 적용하였으며 모델의 파라미터들은 일반적으로 추천되는 값들을 사용하였다(Yu et al., 2002).

2. 실험온실 및 자료수집

모델의 검증을 위하여 University of Arizona의 CEAC(Controlled Environment Agriculture Center)에 위치한 PT(polytex)온실에서 2004년 7월부터 9월에 걸쳐 실험을 수행하였다. 실험온실의 체원과 온도센서의 배치는 Fig. 2와 같다. 실험 온실은 폭 9.8 m, 길이 28 m, 처마높이 4.0 m, 지붕높이 6.3 m의 아치형 플라스틱 경질판 온실로서 북측벽에 1.2 m × 8.5 m, 두께 150 mm의 패드가, 남측벽에 유량 11.9 m³ · s⁻¹의 배기팬 2대가 설치되어 있다.

온실 중앙과 팬 중심선을 따라 길이방향 3단면 및 높이 0.5, 2.0, 3.0 m에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 온도경사 모델의 검증은 패드에서 팬까지 일정간격으로 2 m 높이에 설치한 열전대로 측정된 온도 데이터를 이용하였다. 외부기상자료는 실험 온실로부터 500 m 떨어진 곳에 위치한 아리조나 기상관측소(AZMET) 데이터를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 모델의 검증

Fig. 3은 패드로부터의 거리에 따른 온도상승을 측정할 예로 도시한 것이다. 28 m 떨어진 팬과 패드사이의 온도차는 최대 10°C 정도로 나타나고 있으며 팬으로부터의 거리에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

모델의 보정을 위하여 실험기간 중에 평균적인 기후 조건을 갖는 2004년 8월 13일 12시의 실측 데이터를 선택하였으며 입력 자료는 Table 2와 같다. 개발된

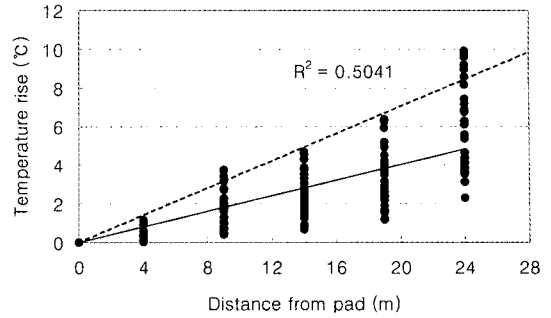


Fig. 3. An example of measurement for temperature gradients between fan and pad in greenhouse.

Table 2. Input conditions for the calibration of CFD model

Input variable (unit)	Values
Dry bulb temperature of outside air (°C)	34.0
Relative humidity of outside air (%)	33.1
Outside solar radiation (W · m ⁻²)	890
Wind speed of inlet air (m · s ⁻¹)	2.4
Wind direction (degree from x-axis)	0
Transmissivity of greenhouse cover (%)	75
Ventilation rate (air exchanges per min)	0.91
Efficiency of pad cooling system (%)	54.0

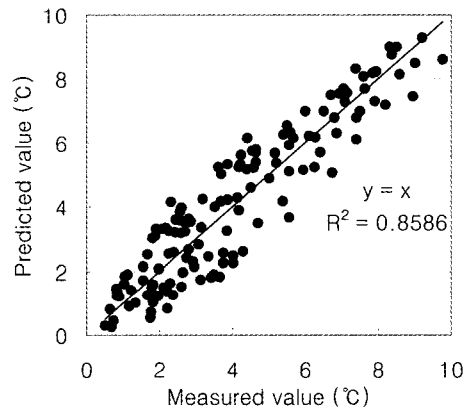


Fig. 4. Predicted and measured values for the temperature rise according to distance from pad.

CFD 모델에 의해 예측된 온도와 실험에 의해 측정된 온도가 잘 일치하도록 토양층의 두께, 각종 재료의 물성, 패드와 팬의 특성값 등 모델의 파라미터를 보정한 후, 외부기상조건에 따라 48회의 시뮬레이션을 수행하고, 각 측정에서의 실험값과 예측값 240쌍의 데

Table 3. Simulation conditions for application of the developed model

Input variable (unit)	Values
Dry bulb temperature of outside air (°C)	35.0
Relative humidity of outside air (%)	50.0
Outside solar radiation ($W \cdot m^{-2}$)	950
Wind speed of inlet air ($m \cdot s^{-1}$)	2.4
Wind direction (degree from x-axis)	0, 180
Transmissivity of greenhouse cover (%)	70
Ventilation rate (air exchanges per min)	1.0
Efficiency of pad cooling system (%)	75.0

이터를 이용하여 모델을 검증하였으며 Fig. 4는 모델의 검증 결과를 나타낸 것이다. 2004년 8월 12일부터 23일까지 오전 11시에서 오후 2시 사이에 측정된 데이터를 사용하였고, 패드를 통과한 습공기가 온실을 지나면서 발생하는 온도 상승에 대한 예측치와 측정치는 잘 일치하였으며 R²는 0.86이었다.

2. 모델의 응용

팬 앤 패드 냉방온실의 온도경사에 영향을 미치는 인자들을 평가하기 위하여 개발된 모델을 활용하였다. 외부풍속과 풍향, 팬과 패드의 높이, 환기율에 따른 실내 공기유속, 차광, 팬과 패드 사이의 거리 등이 온도경사에 미치는 영향을 개발된 모델을 이용하여 검토하였다. 모델의 응용을 위한 시물레이션 조건은 Table 3과 같다.

1) 외부풍속과 풍향이 온실내부의 온도경사에 미치는 영향

온실 외부의 풍속과 풍향이 팬 앤 패드 냉방온실의 실내 온도경사에 미치는 영향을 검토하기 위하여 4가지 조건에 대하여 시물레이션을 수행하였다. 조건 1은 팬과 같은 방향(순풍, tail wind)으로 부는 약풍($1.0 m \cdot s^{-1}$), 조건 2는 같은 방향의 강풍($4.0 m \cdot s^{-1}$), 조건 3은 팬과 반대방향(역풍, head wind)으로 부는 약풍($1.0 m \cdot s^{-1}$), 조건 4는 반대방향의 강풍($4.0 m \cdot s^{-1}$)으로 시물레이션 조건을 설정하였다. Fig. 5는 외부 바람의 영향에 대한 시물레이션 결과를 나타낸 것이다. 강한 역풍(조건 4)의 경우가 다른 경우에 비하여 온도경사가 크게 나타나고, 나머지 3조건은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 팬 앤 패드시스템을 설치할 때

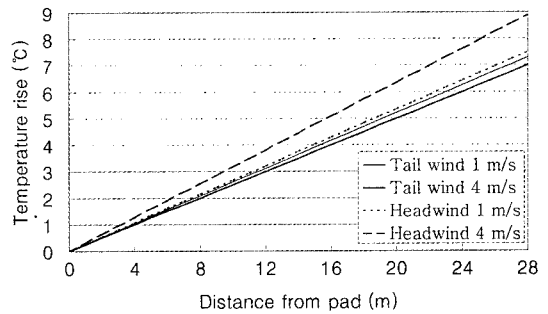


Fig. 5. Effect of outside wind on temperature gradients in the fan and pad cooling greenhouse.

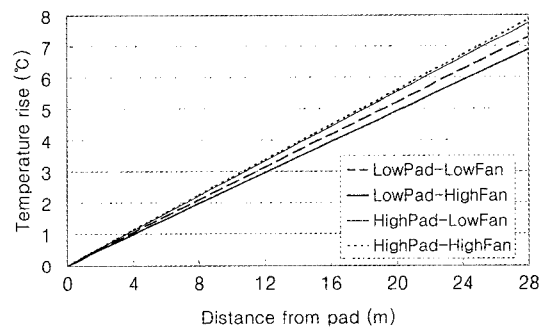


Fig. 6. Effect of fan and pad location on temperature gradients in the fan and pad cooling greenhouse.

에는 온실 설치 지역의 여름철 주풍향을 고려하여 배출공기의 방향과 주풍향의 방향이 일치하도록 팬과 패드를 설치하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

2) 팬과 패드의 높이가 온실내부의 온도경사에 미치는 영향

팬과 패드 높이의 영향을 검토하기 위하여 역시 4가지 조건에 대하여 시물레이션을 수행하였다. 조건 1은 팬과 패드를 모두 낮게(1.5m), 조건 2는 패드를 낮게(1.5m) 팬은 높게(3.0m), 조건 3은 팬과 패드를 모두 높게(3.0m), 조건 4는 패드를 높게(3.0m) 팬은 낮게(1.5m) 설치한 것으로 시물레이션 조건을 설정하였다. Fig. 6은 팬과 패드 위치의 영향에 대한 시물레이션 결과를 나타낸 것이다. 4가지 경우에서 조건에 따라 큰 차이는 없었으나 패드를 낮게 팬은 높게 설치한 경우(조건 2)가 온도경사는 가장 작았으며 다음으로는 팬과 패드를 모두 낮게 설치한 경우(조건 1)로 나타났다.

3) 환기율이 온실내부의 온도경사에 미치는 영향

환기율의 변화에 따른 실내의 공기유동 속도의 영향을 알아보기 위하여 환기율을 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 모델의 입력 자료인 환기율을 변화시키면서 모델에서 계산한 실내 평균유속이 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 $m \cdot s^{-1}$ 가 되도록 시뮬레이션 조건을 설정하였다. 실내유속은 작물과 공기사이의 현열 및 잠열교환과 밀접한 관련이 있으며, 작물 생육에 최적의 유속은 0.5~0.7 $m \cdot s^{-1}$ 이고, 1.0 $m \cdot s^{-1}$ 를 넘지 않는 것이 좋은 것으로 알려져 있다(Bartzanas et al., 2002). Fig. 7은 실내유속에 따른 온도경사를 시뮬레이션 한 결과이다. 환기율 증가에 의해 실내유속이 커짐에 따라 온도경사는 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 높은 환기율이 실내 온도경사 감소에 기여할 수 있는 것으로 생각된다. 그러나 유속이 너무 크면 지나치게 증산을 촉진시켜 수분스트레스를 유발할 수 있으며 작물체에 물리적인 손상을 일으킬 수도 있으므로 적당한 범위 내에서 유속을 증가시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

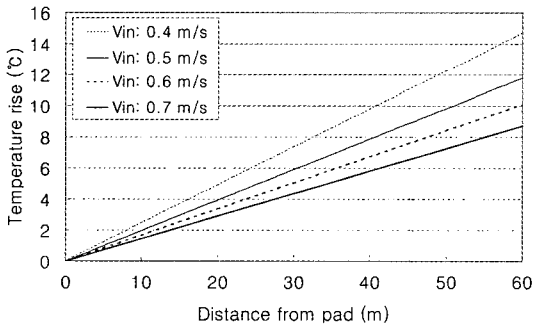


Fig. 7. Effect of inside air current speed on temperature gradients in the fan and pad cooling greenhouse.

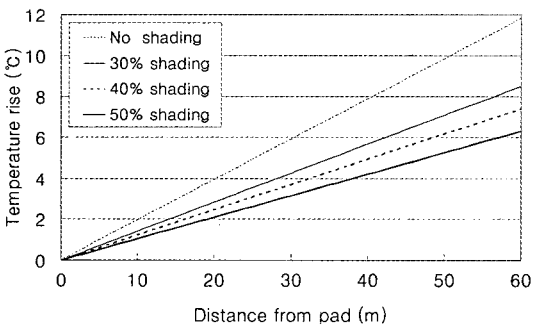


Fig. 8. Effect of shading on temperature gradients in the fan and pad cooling greenhouse.

4) 차광이 온실내부의 온도경사에 미치는 영향

차광에 따른 태양복사 에너지 감소의 영향을 알아보기 위하여 무차광과 차광율 30, 40, 50%에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3의 일사량 입력자료를 100, 70, 60, 50%로 설정하여 무차광과 30, 40, 50%의 차광율을 모의하였다. Fig. 8은 차광율에 따른 온도경사를 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 차광율이 증가함에 따라 온도경사는 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 높은 차광율이 실내 온도경사 감소에 기여할 수 있는 것으로 생각된다. 그러나 지나친 차광은 작물의 정상적인 생육을 방해하므로 작물의 적정 광강도를 기준으로 차광율을 결정해야 한다. Kim et al. (2001)은 우리나라 냉방 설계용 일사량 수준을 880~1,017 $W \cdot m^{-2}$ 범위로 보고 강광 작물은 30~40%, 중광 작물은 50~60%가 적정 차광율인 것으로 제시한 바 있다.

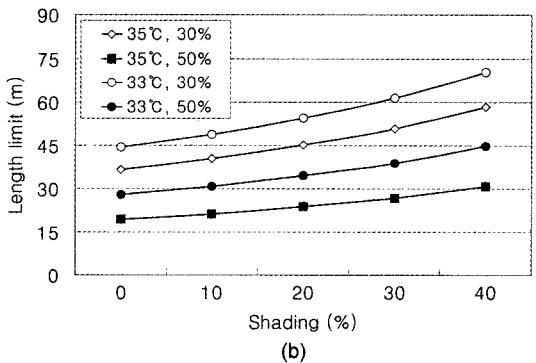
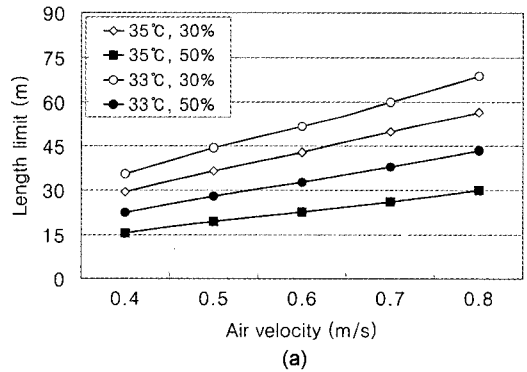


Fig. 9. Length limit between fan and pad in order for the greenhouse temperature to be maintained below 32°C; (a) according to inside air velocity by ventilation without shading and (b) according to shading rate in the air velocity of 0.5 $m \cdot s^{-1}$.

5) 팬과 패드사이의 거리가 온실내부의 온도경사에 미치는 영향

일반적으로 여름철 온실의 냉방 설정온도는 30~32°C를 넘지 않는 것으로 추천되고 있다(Kittas et al., 2003). 온실의 실내기온을 32°C 이하로 유지하기 위하여 패드와 팬을 설치한 온실의 제한길이를 계산해 보았다. 환기율에 의해 결정되는 실내유속에 따른 제한길이는 Fig. 9(a), 차광율에 따른 제한길이는 Fig. 9(b)와 같이 나타났다. 예를 들면 외기온 35°C, 습도 30%, 실내유속 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 무차광의 경우에 Fig. 9(a)에서 팬과 패드 사이의 온실길이는 37m로 제한되어야 한다. 이와 동일한 조건에서 차광율을 30%로 할 경우 Fig. 9(b)에서 팬과 패드 사이의 온실길이는 51m로 제한되어야 한다. 즉, 차광시 제한길이는 무차광에 비하여 더 길어지고, 차광은 팬 앤 패드 냉방온실의 실내 온도경사의 감소에 기여할 수 있는 것을 알 수 있다. 패드와 팬 사이의 거리는 30~45m가 적당하고, 60m를 넘으면 바람직하지 못한 것으로 제시하고 있으나(ASAE, 1997), 그 값은 온실 설치지역의 기상조건과 차광 및 환기율에 따라 달라져야 할 것으로 판단된다.

적 요

팬 앤 패드 시스템은 국내외적으로 온실냉방에서 많이 이용되고 있으며, 그 효율도 매우 높지만 온실 내부의 온도분포가 불균일하고 설치비와 유지비가 많이 드는 단점이 있다. 본 연구에서는 팬 앤 패드 시스템의 설계를 위한 자료를 제공할 목적으로 팬 앤 패드 시스템 설치온실의 온도분포를 예측하기 위한 CFD 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 실험 데이터를 이용하여 검증한 결과 실험치와 예측치가 잘 일치하여 모델의 응용이 가능할 것으로 판단되었다. 개발된 모델을 이용하여 온실 외부의 풍속과 풍향, 팬과 패드의 높이, 환기율에 따른 실내유속, 차광율 및 온실의 길이가 팬 앤 패드 냉방온실의 실내 온도경사에 미치는 영향을 검토하였다. 실내 온도경사를 감소시키기 위하여는 온실 설치 지역의 주풍향을 고려하고 팬과 패드의 높이가 적절해야 할 것으로 판단되었다. 시뮬레이션 결과 높은 환기율과 차광율은 팬 앤 패드 냉방 온실의 온도경사를 감소시키는데 기여할 수 있는 것으로 나타났다. 팬 앤 패드 냉방 온실의 온도를 적정 수준으로

유지시키기 위해서는 외부기상조건, 차광 및 환기율에 따라 온실의 길이를 제한해야 할 것으로 판단되었다. 개발된 CFD 모델은 다양한 조건에서 팬 앤 패드 냉방온실의 설계와 평가에 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 온도경사, 온실냉방, 팬 앤 패드 시스템, CFD 시뮬레이션

인 용 문 헌

1. Arbel, A., O. Yekutieli and M. Barak. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* 72:129-136.
2. ASAE. 1997. Heating, ventilating and cooling greenhouses. *ASAE Standards* 1997:663-670.
3. 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.
4. Bartzanas, T., T. Boulard and C. Kittas. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering* 88:479-490.
5. Fluent Incorporated. 1998. *FLUENT 5 user's guide*. Lebanon, NH 03766.
6. Jain, D. and G.N. Tiwari. 2002. Modeling and optimal design of evaporative cooling system in controlled environment greenhouse. *Energy Conservation and Management* 43:2235-2250.
7. Kacira, M., T. Short and R. Stowell. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses. *Transactions of the ASAE* 41:833-836.
8. Kim, M.K., K.S. Kim and S.W. Nam. 2001. Efficient application of greenhouse cooling systems. Ministry of Agriculture and Forestry. pp.186-188 (in Korean).
9. Kittas, C., T. Bartzanas and A. Jaffrin. 2001. Greenhouse evaporative cooling: measurement and data analysis. *Transactions of the ASAE* 44:683-689.
10. 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.
11. Lee, I. and T.H. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamic temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse. *Transactions of the ASAE* 44:119-127.
12. Molina, F.D., D.L. Valera and A.J. Alvarez. 2004. Measurement and simulation of climate inside Alme-

- ria-type greenhouse using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* 125:33-51.
13. Mistrinous, A. G., G.P.A. Bot, P. Picuno and G. Scarascia-Mugnozza. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* 85: 217-228.
 14. Okushima, L., S. Sase and M. Nara. 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. *Acta Horticulturae* 248:129-136.
 15. Val Products, Inc. 2005. <http://www.valproducts.com/Air/EvapRec.html>.
 16. Yu, I.H., 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* 11:93-100 (in Korean).