

## 연속형 천창을 가진 벤로형 온실의 자연환기 특성 분석

권진경<sup>1\*</sup> · 이성현<sup>1</sup> · 성제훈<sup>1</sup> · 문종필<sup>1</sup> · 이수장<sup>1</sup> · 최병민<sup>1</sup> · 김경자<sup>1</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

### Analysis of Natural Ventilation Characteristics of Venlo-type Greenhouse with Continuous Roof Vents

Jin Kyeong Kwon<sup>1\*</sup>, Sung Hyun Lee<sup>1</sup>, Jae Hoon Seong<sup>1</sup>, Jong Pil Moon<sup>1</sup>, Soo Jang Lee<sup>1</sup>,  
Byeong Min Choi<sup>1</sup>, Kyeong Ja Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science,  
Rural Development Administration, Suwon, 441-100, Korea

(Received: October 21<sup>th</sup>, 2011; Revised: November 11<sup>th</sup>, 2011; Accepted: November 18<sup>th</sup>, 2011)

#### Abstract

In this study the characteristics of natural ventilation of Venlo-type greenhouse with continuous roof vents were analyzed using commercial computational fluid dynamics (CFD) code. Developed CFD simulation model was verified by comparison with experimental data. Simulation errors were 1.9-46.0% for air velocity and 1.7-11.2% for air temperature at each measurement point. CFD simulations were conducted to estimate the effect of roof vents opening direction, opening angle, outside wind velocity and wind directions on ventilation rate and climate condition in greenhouse. The results of this study showed that ventilation rate of the present greenhouse was increased linearly in proportion to the increase of roof vent opening angle and outside wind velocity over 2.0 m/s. According to the analysis on the effects of different roof vent opening direction, simultaneous opening of wind and leeward vents showed the highest ventilation rate and lowest mean temperature in greenhouse.

**Keywords** : CFD simulation, Natural ventilation, Ventilation rate, Venlo-type greenhouse

#### 1. 서론

온실의 적절한 환기는 하절기의 과도한 온도상승과 동절기의 과습을 억제할 수 있으며 가스농도의 조절과 내부 공기기류의 조성에도 기여하므로 재배 농산물의 품질에 미치는 영향이 매우 크다. 온실의 환기율은 기상조건이나 온실구조, 작물 군락의 배치, 환기설비 등에 따라 달라지며 높은 환기율과 적절한 제어를 통해 외기와의 효율적인 열 및 물질전달에 의해서 최적의 작물 광합성 및 증산 조건을 조성할 수 있다. 그러나 대부분의 상업용 온실은 설비비와 운용비 문제로 인해 강

제한기보다 주로 자연환기에 의존하고 있으며 외부유동의 직접적 영향을 받는 자연환기는 강제환기에 비해 유동해석이 더 복잡하다. 자연환기는 압력차의 발생요인에 따라 온도차환기와 풍력환기로 대별되며 각각의 구동력은 온실 내외부의 온도차에 의한 열부력과 환기창 주변에 발생하는 풍압구배이다.

기존 연구에 의하면 외기 풍속이 2.0 m/s 이상인 경우 풍력환기가 지배적이며, 0.5 m/s 이하에서는 온도차환기가 지배적인 것으로 알려져 있다(Papadakis et al., 1996; Boulard et al., 1996; Fernandez and Bailey, 1992; Yang et al., 2009). 자연환기 온실의 환기창이나 온실내부의 속도벡터를 초음파 풍속계를 이용하여 직접 측정하고자 하는 시도가 있었으나 고가의 장비와 숙련된 운용기술이 요구되어 온실 환기와 관련한 기초연구에서만 적용되었다(Boulard et al., 1996; Wang

\*Corresponding author: Jin Kyung Kwon  
Tel: +82-31-290-1831; Fax: +82-31-290-1840  
E-mail: cen55@korea.kr

and Deltour, 1999). 또한 모형실험이 가능한 풍동을 이용하여 단동온실의 자연환기를 측정(Sase et al., 1980), 자연환기 온실의 유동분포 측정(Sase et al., 1984; Okushima et al., 1998), 온실표면의 풍압분포 측정(Moriyama et al., 2008) 등의 연구가 수행되었으나 풍동실험은 대기경계층이나 열 및 습도의 상사가 어려우며 비용이 많이 요구되는 단점이 있다. 자연환기에서 공기유동의 복잡성으로 인해 온실 환기창에서 출입유량을 정확히 측정하는 것은 매우 어려우므로 자연환기의 환기율을 추적가스법(Fernandez and Bailey, 1992; Kittas et al., 1995)이나 에너지평형법(Wang and Deltour, 1996)등을 이용하여 간접 측정하는 방법이 이용되었으나 이러한 방법은 특정 온실의 평균 환기율과 같은 개략적 정보만 제공하는 한계가 있다. 최근 열유동 해석용 상용수치해석 코드의 신뢰성이 높아짐에 따라 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 시뮬레이션이 다양한 농업시설의 열유동 해석에 이용되고 있으며, CFD 해석을 통해 다양한 형태의 온실조건과 경계조건이 온실의 자연환기에 미치는 영향을 경제적으로 분석할 수 있게 되었다. Mistriotis 등(1997)이 상용 CFD 패키지를 이용하여 온실의 자연환기를 시뮬레이션 한 이래, CFD는 자연환기와 온실구조 및 외기조건 간의 함수관계나 온실 내부 열유동장의 분석에 활발히 이용되어 왔으며 (Bartzanas et al., 2002; Boulard and Wang, 2002; Fatnassi et al., 2006), 국내의 경우 사용빈도가 높은 1-2W형 등 4가지 온실종류에 대한 자연환기 성능비교에 대한 CFD 해석연구가 수행되었으며(Hong et al., 2006), 온실내부의 작물군락의 CFD 모델링 기법에 관한 연구(Lee et al., 2006)가 수행되었다.

본 연구의 목적은 환기율 향상을 위해 연속형의 천창을 가진 베네토형 온실에 대해 상용 CFD코드(FLUENT 6.2, ANSYS, USA)를 이용한 수치해석을 수행하여 온실의 자연환기 특성을 분석하는데 있다. 이를 위해 실험 측정 데이터와의 비교, 검증 과정을 거친 CFD 모델을 사용하여, 외기 풍속 및 풍향 등 외기조건과 천창 개방방향 및 개방각도 등 환기창 조건이 온실의 자연 환기에 미치는 영향을 분석하였다.

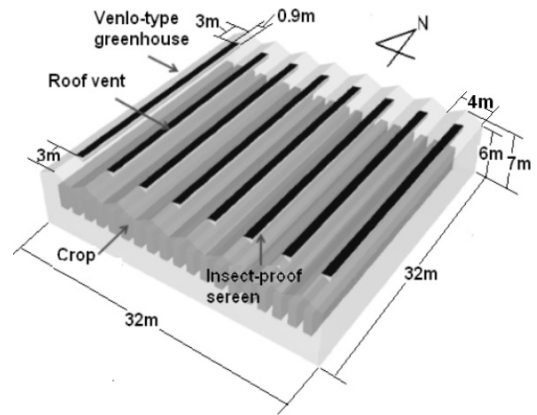


Fig. 1 Schematic of the studied venlo-type greenhouse.

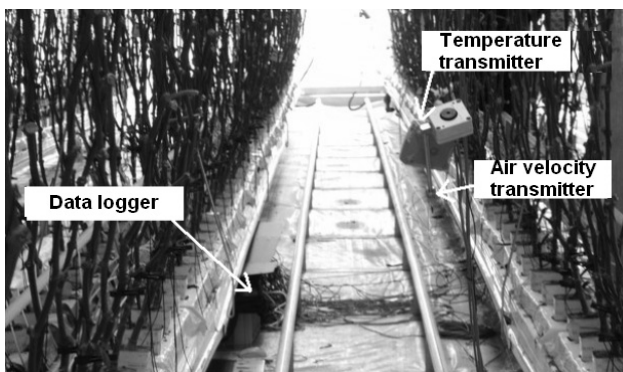
## 2. 재료 및 방법

### 가. 해석대상 온실

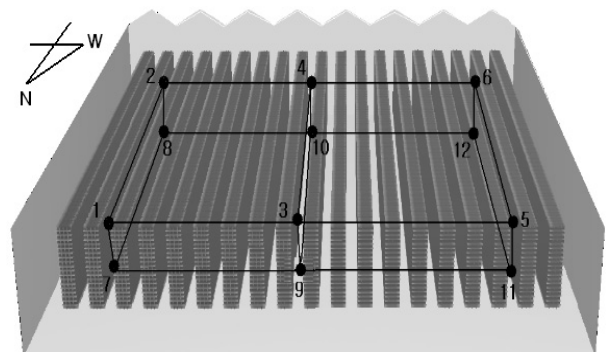
본 연구의 CFD 해석 대상온실은 그림 1과 같다. 온실은 전북 부안에 위치한 유리온실로 온실배치는 남북동이며, 바닥면적 1,024 m<sup>2</sup>(32.0 m × 32.0 m), 지붕폭 4.0 m, 측고 6.0 m, 용마루 높이 7.0 m의 4스팬 베네토형 온실이다. 천창은 폭 9.0 m, 길이 26.0 m의 수평 힌지식 연속형 환기창이며, 방충망이 설치된 천창은 한쪽 지붕 또는 양지붕 개폐가 가능하다. 온실 내부에는 북쪽에 폭 3.4 m의 작업로 공간, 동쪽 및 서쪽 측벽과 1.3 m, 남쪽 측벽과 0.8 m의 공간을 두고 파프리카 군락 19열이 바닥에서 50 cm 상부에 위치한 암면 슬라브에 정식되어 있다. 작물군락은 남북의 길이방향을 가지며 군락 간 거리는 0.7 m, 군락 높이는 4.6 m로, 바닥에서 2.0 m 높 이까지의 잎은 제거된 상태이다.

### 나. 측정방법

CFD 시뮬레이션 모델의 검증용 데이터 획득을 위해 자연 환기시의 온실내부 풍속과 온도분포를 측정하였다. 그림 2(a)



(a) Measurements and data acquisition system



(b) Measurement positions in the greenhouse

Fig. 2 Verification data measurement for CFD simulation model.

에는 측정에 사용된 무지향성 풍속센서(HD403TS, DeltaOHM, Italy), 온도센서(HD4817T, DeltaOHM, Italy)와 데이터로거(ALMEMO5690, AHLBORN, Germany)를 나타내었으며, 그림 2(b)에는 측정위치를 나타내었다. 측정센서는 동쪽에서 2, 3번째 군락사이, 9, 10번째 군락사이, 17, 18번째 군락사에 설치하였으며, 남쪽과 북쪽 측벽에서 각각 5.0 m 거리, 바닥에서 1.5 m 및 4.8 m 높이의 총 12개 지점에 대해 측정하였다. 경계조건용 데이터 획득을 위해 온실 북동쪽 모서리의 9.0 m 높이에 기상관측계(WS600, Lufft, Germany)와 일사량계(LPRAD01, DeltaOHM, Italy)를 설치하여 외기의 풍향, 풍속, 온습도 및 일사량을 측정하였다. 측정은 2010년 10월 22일, 14시 30분에서 16시 30분 사이에 수행되었으며, 검증용 온실내부 데이터로는 12개 지점의 풍속과 온도 측정치의 2시간 평균값을, 경계조건용 데이터로는 지상 9.0 m 상부에서 측정된 풍향, 풍속, 온도, 일사량 측정치의 평균값을 이용하였다. 검증용 수치계산의 풍향 경계조건으로 30초 단위로 측정된 풍향을 16방위로 분류한 빈도수로 판단하였으며 북북동풍이 50%, 북동풍이 21.4%, 북풍과 북북서풍이 각각 14.3%로 나타나 북북동풍을 풍향 경계조건으로 결정하였다. 속도, 온도 및 일사량의 경계조건으로는 외기 풍속, 외기온 및 일사량의 2시간 측정치 평균값인 2.37 m/s와 22.7°C, 223 W/m<sup>2</sup>를 각각 이용하였다. 측정기간 중 차광막이나 내부공조는 작동을 중지하였으며 천장은 양쪽 천장을 35도로 개방하였다.

#### 다. 수치적 방법

온실 내, 외부의 공기유동은 비압축성의 정상상태, 3차원, 난류유동으로 가정하였으며, 열전달은 전도, 대류 및 복사를 고려하였다. 계산 대상 열유동장의 규모가 크며, 조건에 따른 계산의 경우가 많으므로 수렴시간을 고려하여 열부력 효과는 Boussinesq 모델을, 난류모델로는 Standard  $k-\epsilon$  모델을 적용하였으며, 벽면근처의 유동장은 표준벽함수 모델로 처리하

였다. 본 연구의 CFD 시뮬레이션에 적용된 비압축성, 정상상태, 3차원 유동조건에서 지배방정식들의 일반형은 다음과 같다.

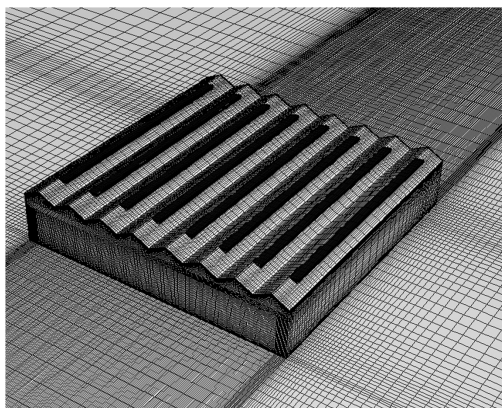
$$\frac{\partial(U\Phi)}{\partial X} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial Y} + \frac{\partial(W\Phi)}{\partial Z} = \Gamma \cdot \nabla^2\Phi + S_\Phi \quad (1)$$

위 식에서  $\Phi$ 는 수송되는 물리량들의 농도를 의미하며 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식에서 각각 질량, 운동량의 3차원성분, 엔탈피, 난류운동량, 난류운동량소산율을 의미한다. U, V, W는 속도벡터 성분이며  $\Gamma$ 는 확산계수,  $S_\Phi$ 는 각 보존방정식에서 질량, 운동량, 에너지, 난류운동량, 난류운동량소산율의 생성항이다. 복사모델로는 유리와 같은 반투광성 물질에 적합한 DO모델을 사용하였으며 복사열전달 방정식을 복사강도에 대해 나타내면 다음과 같다.

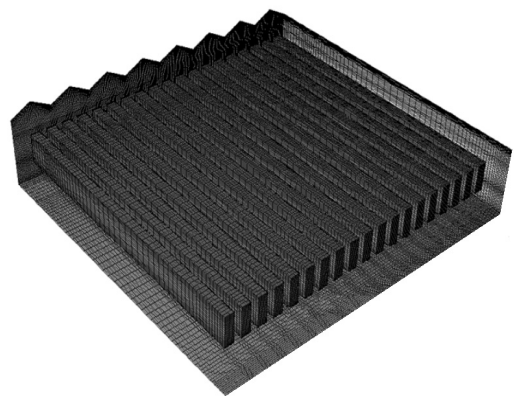
$$\begin{aligned} \nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s} + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})) \\ = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s}, \vec{s}')d\Omega' \end{aligned} \quad (2)$$

위 복사열전달 모델에 대한 상세한 설명은 참고문헌(FLUENT 6.2, 2005)에 잘 나타나 있으므로 설명은 생략하였다. 온실의 자연환기 해석을 위해 열유동장에 대한 연속방정식, 운동방정식 3개, 난류모델 방정식 2개와 함께 복사 모델을 포함한 에너지 방정식을 동시에 풀어야 한다.

그림 3에는 본 CFD 해석에 적용된 온실 내, 외부에 대한 계산격자를 나타내었다. 격자생성에는 Gambit 2.2 소프트웨어를 이용하였으며 계산의 효율성을 위해 거터 등 재배장치나 순환팬, 온수배관 등 공조장치는 해석 대상에서 제외하였다. 사용된 격자개수는 약 480만개로, 예측 정밀도를 향상시



(a) Outer domain of greenhouse



(b) Inner domain of greenhouse

Fig. 3 Applied meshes for present CFD analyses.

**Table 1** Physical properties for present CFD simulations

Parameter (Unit)	Material	Values
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Soil	1,900
	Glass	2,700
Specific heat (J/kg·°C)	Soil	2,200
	Glass	840
Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> ·°C)	Soil	2.0
	Glass	0.78
Absorption coefficient	Soil	0.5
	Glass	0.1
Scattering coefficient	Soil	1.0
	Glass	0
Refractive index	Soil	1.0
	Glass	1.0
Emissivity	Soil	0.89
	Glass	0.90
Face permeability (m <sup>2</sup> )	Insect screen	2.04×10 <sup>-10</sup>
Inertial resistance factor (m <sup>-1</sup> )	Insect screen	2.59×10 <sup>5</sup>
	Paprika crop	1.08

키기 위해 정렬 육면체 격자를 이용하였으며 온실의 벽면 근처와 모서리 부분 및 천창 주변 등 유동변수의 구배가 급격히 발생할 것으로 예상되는 영역에는 격자밀도를 증가시켰다.

표 1에는 검증용 계산과 환기조건별 계산에서 적용된 재료의 열적, 유체역학적 물성치를 나타내었다. 유리와 토양의 열적 물성치인 비열, 밀도, 열전도계수, 흡수계수, 산란계수, 방사율 등은 일반적인 건축물에 적용되는 값을 사용하였으며 (Bennet and Myers, 1995), 방충망과 파프리카 군락의 투과도와 관성저항계수는 3장의 수치모델링을 통해 계산된 값이다.

본 논문에서는 대상온실과 작물군락 및 방충망을 수치적으로 모델링하여 CFD 시뮬레이션을 수행한 결과를 실제 온실에 대한 측정치와 비교하여 모델 검증의 과정을 거친 후, 검증모델을 이용하여 환기조건별 수치해석을 수행하였다. 환기조건별 해석에서는 외기 풍속 및 풍향 등 외기 조건과 천창 개방방향 및 개방각도 등 환기창 조건을 변화시켜가며 각 조

건이 온실의 자연환기율과 내부의 열유동장에 미치는 영향을 분석하였다.

수치해석모델의 검증용 계산과 자연환기 조건별 계산에 사용된 외기 조건 및 환기창 조건을 표 2에 나타내었다. 계산 영역의 입구조건에서 외부 바람은 Richard와 Hoxey(1993)가 제안한 2차원 대기경계층으로 모델링 하였으며, 이 모델에 의하면 지면에서 높이가 증가할수록 유속은 대수적으로 증가하고, 난류운동에너지소산율은 대수적으로 감소하는 구배를 가지게 된다. 이하에서 외기 풍속이라 함은 기상관측계가 설치된 지상 9.0 m를 기준높이로 하여 이 지점에서의 풍속을 의미한다.

본 CFD 해석의 수치계산 방법으로 연속방정식의 압력수정식에는 SIMPLE 알고리즘을 적용하였으며 압력항의 이산화는 다공매체모델을 고려하여 PRESTO 기법을, 나머지 항들의 이산화에는 2차 상류차분기법을 적용하였다. 해의 수렴 기준은 반복계산에 따른 유수의 합과 연속된 종속변수들의 상대오차가 모두 10<sup>-3</sup> 이하로 될 때로 하였으며, 반복계산에 따른 상대오차의 변화가 더 이상 없을 때에도 해는 수렴한 것으로 간주하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 작물군락과 방충망의 수치 모델링

온실 내부의 파프리카 군락과 천창의 방충망은 각각 다공매체모델과 다공점프모델로 모델링 되었으며 Navier-stokes 방정식에 추가되는 등방성 다공매체 내의 운동량손실은 Darcy-Forchheimer 방정식에 기초하여 일반적으로 다음과 같이 점성 및 관성 손실항의 합으로 나타낸다.

$$S_i = -\left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_i \right) \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 투과도,  $C_2$ 는 관성저항계수,  $v_{mag}$ 는 유속이다. 방충망의 다공점프 모델링을 위한 방충망의 공극률은 제조사

**Table 2** Boundary conditions and roof vents configurations for present CFD simulations

Parameter (Unit)	Values	
	Validation	Case studies
Outside wind temperature (°C)	22.7	29.5
Outside wind velocity at 9.0 m height (m/s)	2.37	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0
Outside wind direction	NNE	N, NW, W
Outside solar irradiation (W/m <sup>2</sup> )	223	889
Roof vents opening direction	East/west vents open	Windward, Leeward, Wind/Leeward
Roof vents opening angle (degree)	35	15, 25, 35, 45

의 정보를 이용하여 다음 식으로 계산하였다(Miguel, 1998).

$$\gamma = \frac{L \times W}{(L+d)(W+d)} \quad (4)$$

여기서  $L$ 은 메쉬 길이,  $W$ 는 메쉬 폭,  $d$ 는 와이어 직경이며, 설치된 방충망은  $L=0.4 \text{ mm}$ ,  $W=0.45 \text{ mm}$ ,  $d=0.6 \text{ mm}$  이므로  $\gamma=0.171$ 이다. 투과도와 관성저항계수는  $0.04 < \gamma < 0.9$ 의 범위에 대해 Miguel (1998)에 의해 제시된 아래의 실험식에 기초하여 계산하였다.

$$\alpha = 3.44 \times 10^{-9} \gamma^{1.6}, C_2 = \frac{2}{\sqrt{\alpha}} \frac{4.3 \times 10^{-2}}{\gamma^{2.13}} \quad (5)$$

계산의 의하면 투과도,  $\alpha = 2.04 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 이며 관성저항계수,  $C_2 = 2.59 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ 이다. 파프리카 균락은 등방성 다공매체로 모델링 되었으며 관성저항계수는 Bruse (1998)에 의해 제시된 아래의 실험식에 기초하여 계산되었다.

$$C_2 = 2 I_{LAV} C_d \quad (6)$$

여기서  $I_{LAV}$ 는 엽면적밀도이며,  $C_d$ 는 작물균락의 항력계수이다. 엽면적 밀도는 실측값으로  $1.8 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이며, 파프리카 균락의 항력계수는 측정값이 없어 기존 연구의 토마토균락에 대한 풍동 실험값  $C_d = 0.32$ (Haxaire, 1999),  $C_d = 0.26$ (Lee et al., 2006) 및 국화균락에 대한 실험값  $C_d = 0.22$ (Yu et al., 2008) 등을 참고로 하여 0.3으로 결정하였다. 따라서 파프리카 균락의 다공매체 모델에서 사용되는 관성저항계수,  $C_2 = 1.08 \text{ m}^{-1}$ 이다.

#### 나. CFD모델의 검증

CFD 모델의 타당성 검증을 위해 수치계산을 통한 예측치와 실제 온실에 대한 실측치를 비교하였다. 그림 4(a)는 그림 2(b)에 나타난 12개의 센서위치에서 온실내부 기류유속의 CFD 예측치와 실측치의 비교 결과를 보여준다. 내부 유속의 예측치와 실측치의 상대오차는 위치별로 1.9~46.0%, 평균 20.8%로 나타났으며 온실 상부보다 하부에서 크게 나타났다. 오차가 비교적 큰 것은 내부 유속자체가 미풍속이므로 오차가 상대적으로 크게 부각된 면이 있으며, 하부에서의 오차가 큰 것은 계산의 효율성을 위해 하부의 재배장치나 난방배관 등을 해석대상에서 생략한 것이 주요 원인으로 판단된다. 그림 4(b)는 온도분포의 비교결과로서 상대오차는 위치별로 1.7~11.2%, 평균 6.0%로 유속의 상대오차에 비해 작게 나타났다. 열부력 모델의 한계로 온실 상, 하부의 온도차는 실측치보다 예측치가 더 작게 나타난 것으로 판단된다. 예측치와 실측치 간의 오차는 본 CFD 해석에 사용된 수치모델의 물리적 한계에서 발생하기도 하나, 외기의 조건이 시간에 따라 변화하는 실제의 비정상 자연환기 열유동장을 평균값의 경계조건을 이용한 정상상태로 해석한 것에서도 기인한 것으로 판단된다. 이상의 CFD 모델의 검증에서 일부 위치에서 예측치와 실측치의 상대오차가 비교적 큰 경우도 있으나 전체적인 유속 및 온도분포의 경향성은 잘 일치하는 것으로 판단하여 본 CFD 모델을 자연환기 조건별 열유동 수치해석에 이용하였다.

#### 다. 천장 조건에 따른 환기율 변화

풍하측 천창개방, 풍상측 천창개방, 풍상/풍하측 천창 동시개방의 3가지 천창 개방방향에 대해 온실의 자연환기를 해석하였다. 외기온도는 부안의 최고기온 30년 평년값 중 7월, 8

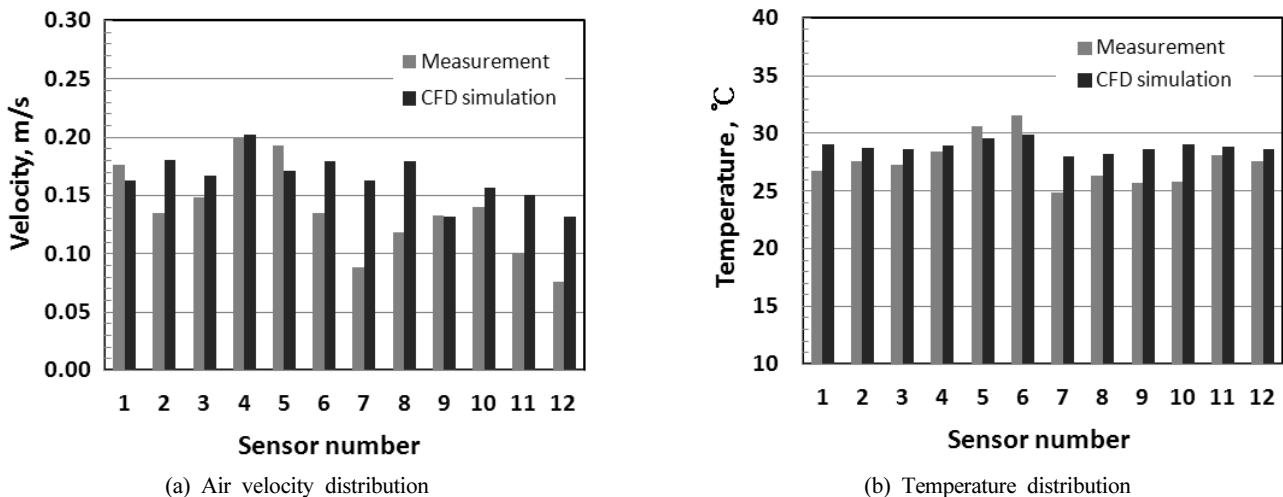


Fig. 4 Comparisons between measured and simulated values at sensor positions in greenhouse.

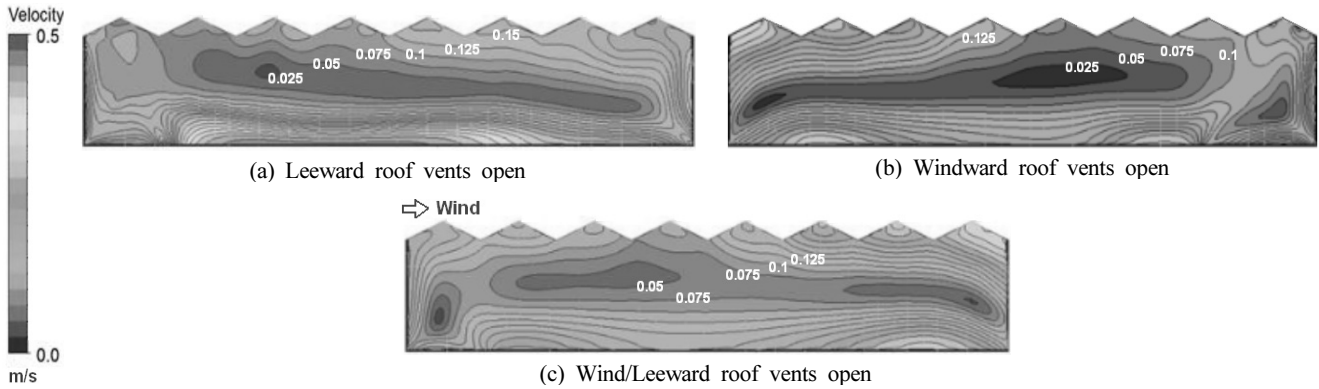


Fig. 5 Air velocity distributions on central W-E plane for different opening direction of roof vents.

Table 3 Mean climate conditions and ventilation rate for different opening directions of roof vents

Roof vents open direction	Crop inside		Crop outside		Ventilation rate (AE/min)
	Mean velocity(m/s)	Mean temperature(°C)	Mean velocity(m/s)	Mean temperature(°C)	
Leeward	0.075	44.17	0.147	43.59	0.0188
Windward	0.077	42.40	0.146	41.89	0.0239
Wind/Leeward	0.082	40.67	0.150	40.20	0.0265

일의 평균값인 29.5°C를 이용하였으며, 외풍속은 2.0 m/s, 천창개방각도는 모두 35도이다. 일사량은 임의의 지점의 위도, 시간각, 태양적위를 이용하여 맑은 날의 일사량을 산출할 수 있는 FLUENT 12.1에서 제공하는 Solar load 모델로 계산하였다. 해당 온실의 위치인 북위 35도 46분, 동경 126도 40분와 기준시각 7월 30일 정오에 대해 계산한 수직입사 태양복사는 약 889 W/m<sup>2</sup>로서 이를 일사량 경계조건으로 이용하였다. 그림 5에는 서풍에 대해 남북동 온실의 (a) 풍하측인 동쪽 천창을 개방한 경우, (b) 풍상측인 서쪽 천창을 개방한 경우, (c) 양쪽 천창을 모두 개방한 경우의 온실 내부 유속분포를 온실중심 동-서 평면에 대해 나타내었다. (a)의 경우, 온실 지붕 상부를 따라 하류방향으로 갈수록 압력이 상승하는 역압력구배가 생성되므로 외기는 대부분 온실 하류의 천창을 통해 유입된다. 유입된 기류는 온실 하부를 지나 상, 중류의 천창을 통해 유출되며 이로 인해 온실내부에는 시계방향의 저속 순회류가 형성된다. (b)의 경우는 역압력구배 효과보다 온실 상류의 풍상측으로 개방된 천창들을 통해 직접 유입되는 기류의 운동량 효과가 크므로, 외기는 주로 온실 상류의 천창을 통해 유입된 후 온실내의 상부를 지나 일부는 중, 하류의 천창으로 유출되고 일부는 하부로 내려가 시계방향의 순회류를 형성하게 된다. (c)의 양쪽 천창을 개방한 경우에도 온실 상부의 하류방향으로의 역압력구배로 인해 (a)와 유사한 유동장이 형성되나 복잡한 천창구조와 간섭으로 인해 역압력구배의 정도가 약하여 외기가 유입되는 하류 천창의 범위가 상대적으로 넓게 나타났다.

천창 개방방향별로 온실내 작물군락 내/외부의 평균유속,

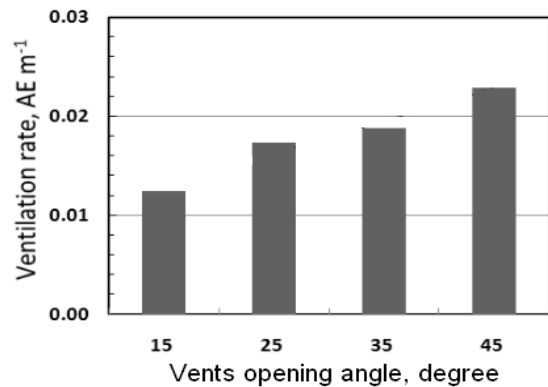


Fig. 6 Ventilation rates for different opening angles of roof vents.

평균온도와 환기율을 표 3에 나타내었다. 환기율은 풍상/풍하측, 풍상측, 풍하측 천창 개방의 순서로 나타났으며 풍상/풍하측 개방의 경우가 풍하측 개방보다 환기율이 약 41% 높은 것으로 나타났다. 온실내부의 평균유속은 환기율과 같은 경향성을 나타내며 풍상/풍하측 개방이 풍하측 개방보다 군락내부에서 9.3%, 군락외부에서 2.0% 높게 나타났다. 평균온도는 환기율과 반대의 경향을 나타내며 풍상/풍하측 개방이 풍하측 개방보다 군락내부에서 7.9%, 군락외부에서 7.8% 낮게 나타났다. 실제 벤로형 온실의 천창제어는 대부분 강풍에 의한 파손을 우려하여 풍하측 천창을 우선 개방하고 있으나, 강풍지역이 아닌 경우는 하절기 온도관리를 위해서 풍상/풍하측 천창을 모두 개방하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

천창의 개방정도가 환기율에 미치는 영향을 분석하기 위해 풍하측 천창개방 조건에 대해 천창의 개방각도를 15, 25, 35,

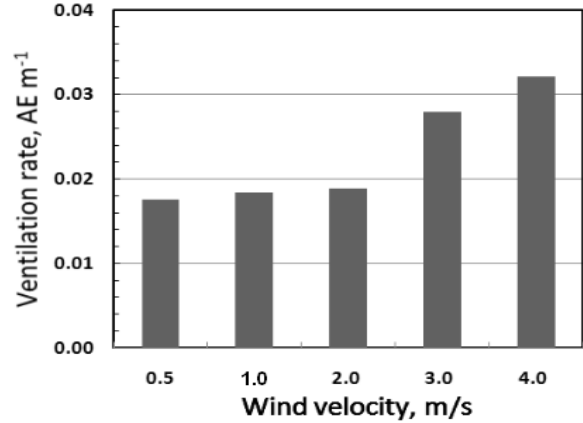
**Table 4** Mean climate conditions for different opening angles of roof vents

Roof vents open angle(°)	Mean velocity (m/s)	Mean temperature (°C)
15	0.114	46.32
25	0.125	45.56
35	0.134	43.69
45	0.157	42.00

45도로 변화시킨 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 풍속 및 일사량 등 해석에 적용된 경계조건은 앞의 천창 개방방향 별 계산에서와 동일하다. 온실의 자연 환기율은 그림 6에 나타난 바와 같이 천창의 개방각도가 10도씩 증가할수록 약 26%씩 거의 선형관계로서 비례하며 증가하는 것으로 나타났으며 온실내부의 평균유속과 평균온도는 표 4에 나타난 바와 같이 각각 평균 11.3% 및 3.2%씩 거의 선형적으로 증가 또는 감소하는 경향을 나타내었다.

**라. 풍속, 풍향에 따른 환기율 변화**

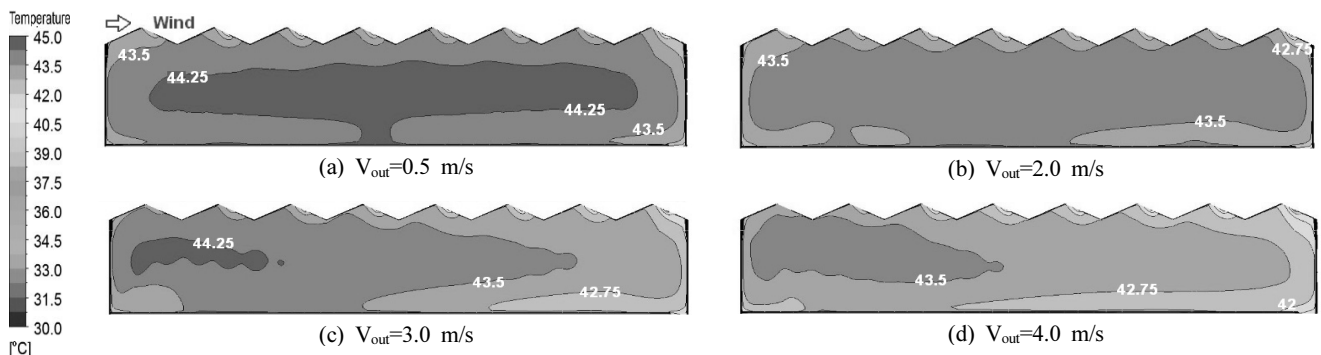
외기 풍속이 온실의 자연환기 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 풍하측 천창을 35도 개방한 조건을 대상으로 외기 풍속을 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 m/s로 변화시킨 경우에 대한 해석을 수행하였다. 외기 풍속을 제외한 경계조건은 앞의 계산들과 동일하며, 그림 7에는 외기 풍속별 환기율의 계산 결과를 나타내었다. 외기 풍속 2.0 m/s 이상에서는 외기 풍속과 환기율이 거의 선형 비례하는 풍력환기의 특성이 나타났으나, 그 이하의 풍속에서는 이러한 경향성이 확인되지 않았다. 이는 선행 연구(Papadakis et al., 1996; Boulard et al., 1996; Fernandez and Bailey, 1992; Yang et al., 2009)의 내용과 일치하는 경향으로 외기 풍속 2.0 m/s 이하에서는 온실의 자연환기 구동력에서 열부력이 차지하는 비중이 높아지기 때문으로 판단된다. 그림 8에는 외기 풍속별 온실내부의 온도분포를 온실중심 동-서 평면에 대해 나타내었다. 외기 풍속 0.5 m/s와 2.0 m/s의 경우는 하류의 천창에서 유입되는 외기가



**Fig. 7** Ventilation rates for different outside wind velocities.

적어 온실 내부에 약한 선회류가 만들어지며 열부력의 영향이 상대적으로 크므로 온실 내부에는 상, 하류에 방향으로 대칭적 온도분포가 형성되었다. 그러나 외기풍속 3.0 m/s와 4.0 m/s의 경우는 온실 하류의 천창에서 유입되는 외기의 유량이 증가하여 온실 내부에 상대적으로 강한 선회류가 형성되며 외기의 영향을 직접적으로 받는 온실 하류가 상류보다 낮은 온도분포를 보였다.

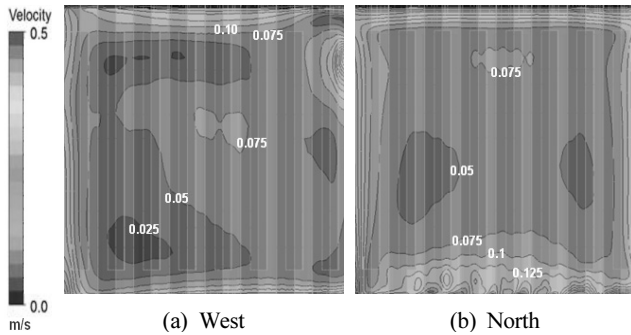
외기 풍향이 온실의 자연환기에 미치는 영향을 분석하기 위해 남북동 온실의 풍하측 동쪽 천창을 35도 개방한 조건에 대해 외기 풍향이 서풍, 북서풍, 북풍인 경우에 대한 해석을 수행하였다. 풍속은 모두 2.0 m/s이며 나머지 경계조건은 앞의 계산들과 동일하다. 표 5에는 외기 풍향별로 온실내부의 작물군락 내/외부의 평균유속 및 평균온도와 환기율을 나타내었다. 환기율은 북서풍, 북풍, 서풍의 순서로 높게 나타났으며 북서풍은 서풍에 비해 약 14.9% 높은 환기율을 나타내었으나 북풍과의 차이는 2.9%로 작게 나타났다. 온실 내부의 평균유속도 환기율과 유사한 경향성을 나타내었으나 평균온도는 환기율과 직접적인 상관관계를 보이지 않고 북풍, 서풍, 북서풍의 순서로 낮게 나타났다. 그림 9에는 온실 측고의 중간높이인 3.0 m 높이의 평면에 대해 외기 풍향이 서풍과 북풍인 경우의 내부 속도분포를 나타내었다. 작물 군락의 길이



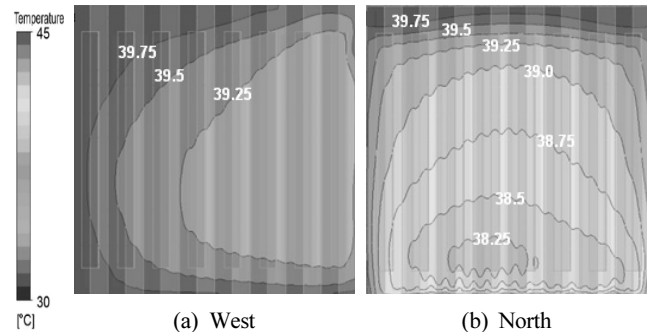
**Fig. 8** Temperature distributions on central W-E plane for different outside wind velocities.

**Table 5** Mean climate conditions and ventilation rate for different outside wind directions

Outside wind direction	Crop inside		Crop outside		Ventilation rate (AE/min)
	Mean velocity (m/s)	Mean temperature (°C)	Mean velocity (m/s)	Mean temperature (°C)	
West	0.075	44.17	0.147	43.59	0.0188
North-West	0.080	44.56	0.156	43.99	0.0216
North	0.079	43.24	0.155	42.67	0.0210



**Fig. 9** Air velocity distribution on 3.0 m height plane for different outside wind directions.



**Fig. 10** Temperature distribution on 3.0 m height plane for different outside wind directions.

방향이 남북방향이므로 북풍의 경우 내부 선회유동이 유동저항이 작은 균락사이의 공간을 원활히 흐르게 되어 전체적인 유속이 서풍의 경우보다 높게 나타났다. 그림 10에는 그림 9와 동일한 평면에 대해 온도분포를 나타내었으며, 내부 선회유동이 상대적으로 원활한 북풍의 경우가 전체적인 온도분포도 서풍의 경우보다 낮게 나타났다. 파프리카와 같이 균락이 높고 배열 방향을 가지는 경우 온실의 자연환기는 외기조건과 천창조건 뿐 아니라 작물의 상대적 배열방향도 중요한 역할을 하므로 각 요인이 자연환기 특성에 미치는 영향을 구명하기 위해서는 다양한 조건의 조합에 대한 추가적 연구가 요구된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연속형 천창을 가진 벨로형 온실의 자연환기 특성을 분석하기 위해 상용 CFD 코드(FLUENT 6.2, ANSYS, USA)를 이용하여 열유동 수치해석을 수행하였다. CFD 모델의 타당성 검증에 위해 실측 데이터와의 비교분석 과정을 거쳤으며 외기조건인 풍속, 풍향과 환기창 조건인 천창 개방방향, 개방각도별로 수치계산을 수행하여 각 조건이 온실 자연환기 특성과 환기율에 미치는 영향을 구명하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) CFD 모델의 검증결과 CFD 예측치와 실측치의 상대 오차는 유속의 경우 위치별로 1.9~46.0%, 평균 20.8%, 온도의 경우 위치별로 1.7~11.2%, 평균 6.0%로 나타났다. 유속과 온도분포의 경향성은 비교적 잘 일치하

는 것으로 나타났다.

- (2) 풍하측, 풍상측, 풍상/풍하측의 천창 개방방향별로 자연환기를 해석한 결과, 환기율은 풍상/풍하측 동시개방, 풍상측 개방, 풍하측 개방의 순서로 나타났으며 풍상/풍하측 개방의 경우가 풍하측 개방보다 환기율이 약 41% 높은 것으로 나타났다.
- (3) 환기창 개방각도별로 자연환기를 해석한 결과, 환기율 및 내부평균풍속은 천창개방각도와 거의 선형비례 관계를, 내부평균온도는 선형반비례 관계를 나타내었다.
- (4) 외기 풍속별로 자연환기를 해석한 결과, 외기풍속 2.0 m/s 이상에서는 환기율과 외기 풍속이 선형비례하는 풍력환기의 특성이 나타났으나, 그 이하의 풍속에서는 온도차환기의 기여도가 높아지며 선형적 경향성은 나타나지 않았다.
- (5) 외기 풍향별로 자연환기를 해석한 결과, 환기율과 온실 내부 평균유속은 북서풍, 북풍, 서풍의 순서로, 내부 평균온도는 북서풍, 서풍, 북풍의 순서로 높게 나타났다.

#### 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ006607)의 지원에 의해 이루어진 것임.

#### 참고 문헌

1. Bartzanas, T., T. Boulard and C. Kittas. 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a



- wind tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in openings. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 207-221.
2. Benet C. O. and J. E. Myers. 1995. *Momentum, Heat and Mass transfer*. McGraw-Hill. New York. USA.
  3. Boulard, T., J. F. Meneses, M. Mermier and G. Paradakis. 1996. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouse. *Agric. For. Meteorol* 79:61-77.
  4. Boulard, T. and S. Wang. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture* 34:173-190.
  5. Bruse, M. 1998. Development of numerical model for the simulation of exchange processes between small scale environmental design and microclimate in urban areas. Ph. D. Thesis. University of Bochum, Germany.
  6. Fatnassi, H., T. Boulard, C. Poncet and M. Chave. 2006. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 3(93):301-312.
  7. Fernandez, J. E. and B. J. Bailey. 1992. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agric. For. Meteorol* 58:229-245.
  8. FLUENT 6.2 2005. User's Guide FLUENT inc. New Hampshire, USA.
  9. Haxaire, R. 1999. Caractérisation et Modélisation des écoulements d'air dans uneserre. Ph.D. Thesis. Université de Nice, Sophia Antipolis, France.
  10. Hong, S. W., I. B. Lee, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. P. Bitog, J. I. 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. *Transaction of the ASABE*. 51(4):1417-1432.
  11. Kittas, C., B. Draoui and T. Boulard. 1995. Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening. *Agric. For. Meteorol* 77:95-111.
  12. Lee, I. B, N. K. Yun, T. Boulard, J. C. Roy, S. H. Lee, G. W. Kim, S. K. Lee and S. H. Kwon. 2006. 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. *J. Bio-Env. Con.* 15(4):289-295. (In Korean)
  13. Miguel, A. F. 1998. Airflow through porous screens from theory to practical consideration. *Energy and Building*. 28: 63-69.
  14. Mistriotis, A., G. P. A. Bot, P. Picuno and G. Scarascis Mugnozza. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* 85: 217-228.
  15. Moriyama, H., S. Sase, Y. Uematsu and T. Yamaguchi. 2008. Wind pressure coefficient of a pipe-framed greenhouse and influence of the side gable opening using a wind tunnel, *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan* 38(4): 237-248. (In Japanese)
  16. Okushima, L., S. Sase, T. Maekawa and A. Ikeguchi. 1998. Airflow patterns forced by wind effect in venlo type greenhouse. *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan* 29(3): 159-167. (In Japanese)
  17. Papadakis, G., M. Mermier, J. F. Meneses and T. Boulard. 1996. Measurements and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. Agric. Eng..* 25(9):127-133.
  18. Richard, P. J. and R. P. Hoxey. 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 46&47:145-153.
  19. Sase, S., T. Kakakura and M. Nara. 1984. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulture* 148:329-336.
  20. Sase, S., T. Kozai, M. Nara and H. Negishi. 1980. Ventilation of greenhouse. I. Wind tunnel measurement of pressure and discharge coefficients for a single-span greenhouse. *J. Agr. Met.* 36(1):3-12.
  21. Wang, S. and J. Deltour. 1996. An experimental ventilation function for large greenhouses based on a dynamic energy balance model. *J. Agric. Eng.* 5(3&4):103-112.
  22. Wang, S. and J. Deltour. 1999. Airflow patterns and associated ventilation function in large-scale multi-span greenhouses. *Trans. of the ASAE* 42(5):1409-1414.
  23. Yang, D. K. Nakano, D. Derano, H. Yan, S. Ohashi and Q. Chen. 2009. Numerical analysis on microclimate inside single-span naturally ventilated greenhouse under various wind speeds and directions using CFD. *J. SASJ.* 40(2): 133-142.
  24. Yu, I. H, N. K. Yun, M. W. Cho and I. B. Lee. 2008. Analysis for aerodynamic resistance of chrysanthemum canopy through wind tunnel test. *J. Bio-Env. Con.* 17(2): 83-89. (In Korean)