

## 공기유동해석을 통한 온실내 식물군 미기상 분석기술 개발

### - (1) 풍동실험을 통한 토마토 식물군의 공기저항 연구 -

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> · 이승기<sup>5</sup> · 권순홍<sup>6</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>공주대학교 생물산업공학부, <sup>6</sup>부산대학교 바이오시스템공학부

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

### - (1) Study on Aerodynamic Resistance of Tomato Canopy through Wind Tunnel Experiment -

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>, Seung-Kee Lee<sup>5</sup>, and Soon-Hong Kwon<sup>6</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>Div. of Bio-industry Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

<sup>6</sup>School of Biosystems Engineering, Pusan National University, Mirang 627-706, Korea

**Abstract.** A computational fluid dynamics (CFD) numerical model has been developed to effectively study the ventilation efficiency of multi-span greenhouses with internal crops. As the first step of the study, the internal plants of the CFD model had to be designed as a porous media because of the complexity of its physical shapes. In this paper, the results of the wind tunnel tests were introduced to find the aerodynamic resistance of the plant canopy. The Seogun tomato was used for this study which made significant effects on thermal and mass exchanges with the adjacent air as well as internal airflow resistance. With the main factors of wind speed, static pressure, and density of plant canopy, the aerodynamic resistance factor was statically found. It was finally found to be 0.26 which will be used later as an input data of the CFD model. Moreover, the experimental procedure of how to find the aerodynamic resistance of various plants using wind tunnel was established through this study.

**Key words :** aerodynamic resistance, computational fluid dynamics (CFD), crop heterogeneity, greenhouse, tomato, wind tunnel

\*Corresponding author

## 서 언

사계절이 뚜렷한 우리나라에서 외부기상의 변화에 영향을 최소화하고 연중 고품질 농산물 생산을 안정적으로 유지하기 위하여 시설재배는 필수적인 방식으로 각광을 받고 있다. 최근에 자동화 및 생산성향상을 위하여 온실구조는 더욱 대형화되고 이로 인하여 내부

환경의 균일성, 안정성 및 적정성을 유지하는 것이 매우 어려워지고 있다. 환기는 시설재배에 있어 매우 중요한 요소이며, 특히 하절기 동안 대형 온실내 고온스트레스를 최소화하기 위한 환기구조개선에 대한 연구가 시급한 실정이다. 그러나 수행되고 있는 대부분의 연구들이 특정 온실에 국한된 실험이었고 단발성 연구로 끝나는 경우가 많아 효과적으로 환기를 개선할 수

있는 시설구조는 아직 개발되고 있지 않은 실정이다 (Lee *et al.*, 2005). 또한 현장실험에서는 기상조건 등 환경인자들을 인위적으로 제어할 수 없고 공기유동의 정량적인 데이터 확보가 매우 어려워서 체계적이고 효과적인 비교 연구가 매우 어렵다. 이러한 현장실험의 문제점들을 보완하고 정량적이고 체계적인 분석을 하기 위하여 전산유체역학을 통한 시뮬레이션을 함께 사용하는 연구들이 이루어지고 있다. 공기유동해석적 접근이 가능한 전산유체역학(Computational fluid dynamics)은 다양한 환경 및 시설 조건을 인위적으로 제어할 수 있고, 그에 따른 결과를 정량적으로 분석할 수 있는 이점을 제공함으로써 현장실험의 단점을 보완하고 연구결과의 신뢰도를 더욱 향상시킬 수 있다(Lee and Short, 2000; Lee *et al.*, 2000a; Lee *et al.*, 2000b).

국내외적으로 온실의 환기개선을 위하여 수행되어 온 많은 연구들은 작물의 복잡한 기하학적 형상 때문에 온실내에 작물이 없다는 가정 하에 온실의 환기를 연구하였다(Lee *et al.*, 2001). 온실의 존재이유가 시설내 작물을 키우기 위함이며, 동시에 작물은 온실의 환기량 및 내부의 공기유동 등에 중요한 영향을 준다. 이러한 이유로 인하여 최근에 Boulard 등(2002)과 Kacira 등(2004)의 소수의 연구자들만이 온실내 작물이 존재하는 상황에서 CFD 환기연구를 수행하였다. 이들은 작물의 형상을 시뮬레이션에 적합하게 단순화하는 작업과 이에 따르는 작물군의 물리적 특성을 공학적 접근을 통하여 시뮬레이션화 하였다. 그러나, Boulard 등(2002)은 작물군 공기항력을 찾기 위하여 너무 소규모의 풍동에서 실험을 하였기 때문에 결과의 신뢰성이 높지 않았다. 또한 Kacira 등(2004)은 단지 작물군의 항력만 고려하고 작물군과 시설내 대기환경 사이에 열 및 질량적 교환에 의한 영향을 추가로 고려하지 않았다. 또한 작물군의 밀도 및 작물군 수를 한 가지 환경만 설정한 상태에서 풍동실험을 하였기 때문에 다른 유사한 연구에서 전혀 이용될 수 없었다. 또한 이들은 자연환기식 온실을 이용하여 CFD 타당성 실험을 하였기 때문에 불규칙하고 예측이 불가능한 자연 기상으로 실험한 결과의 신뢰도가 매우 낮은 것이 사실이다. 이러한 단점들을 보완하고 풍동을 이용한 새로운 항력계수 실험방법을 설계할 필요가 있으며, 또한 우리나라 기후와 대표적 작물을 대상으로 하는 온실 환기 연구가 절실하다.

본 연구의 목적은 온실의 환기연구를 위한 CFD 시뮬레이션 모델에 작물군을 설계하는 것이다. 즉 CFD 모델개발을 위한 작물군의 기하학적 형상 설계 및 이의 공기 항력계수를 찾는 것과 주위 공기와 작물군 사이의 질량적 및 열적 교류모델 설계 및 CFD모델에 접목하는 것이 목적이다. 본 연구에서는 이들 목적 중에 우선 전자에 대해자세하게 소개하고자 한다. 대상작물은 공기저항이 크고 또한 주위공기와 열적 및 질량적 교류가 활발한 큰 군락 형성의 대표적인 토마토를 선정하였고, 우리나라에 가장 많이 보급된 서건 품종을 이용하였다. 그리고 작물군의 공기항력계수는 농촌진흥청 농업공학연구소에서 보유하고 있는 대형풍동을 이용하여 구하였다. 이 연구는 2004년도에 체결된 한국·프랑스 국제공동연구의 일환으로 수행되었으며, 한국의 농업공학연구소(NIAE)와 프랑스측의 프랑스크립농업연구소(INRA)가 공동으로 연구를 수행하였다.

## 재료 및 방법

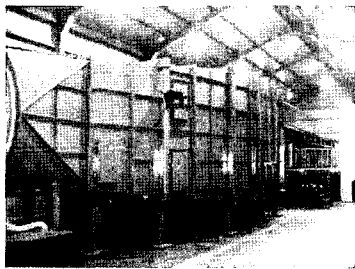
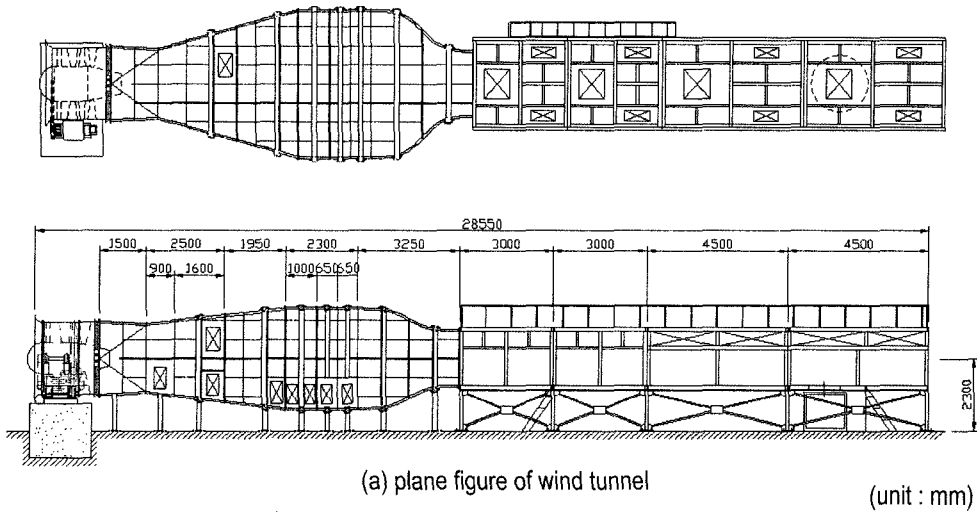
### 1. 풍동

풍동(wind tunnel)은 공기가 흐르는 현상이나 공기의 흐름이 물체에 미치는 힘 또는 흐름 속에 있는 물체의 운동 등을 조사하기 위해 인공적으로 공기가 흐르도록 만든 장치이다. 풍동시험은 실물을 사용하여 직접 측정하는 것에 비하여 소형의 모형을 사용할 경우에는 모형을 계통적으로 변화시켜 측정결과를 해석할 수 있으므로 비용이 적게 들어 매우 경제적이며, 쉽고 안전하게 실험할 수 있을 뿐만 아니라 단시간에 막대한 양의 데이터를 축적할 수 있다. 그러나 모형과 실물 사이의 크기의 차, 속도의 차 등 여러 측정량의 차이가 측정결과에 큰 영향을 미치기 때문에 관련된 상사법칙들을 정확하게 적용하여야 한다.

농촌진흥청내 농업공학연구소에서 보유하고 있는 이 풍동(Fig. 1)에 대한 자세한 설명은 이 등(2003)에서 소개하고 있다. 이 풍동의 시험부 크기는 1.7H×2.0W×16.0L(m)이며 최대 가능풍속은 15m s<sup>-1</sup>이다. 풍동의 형식은 Eiffel type이며 측정부의 크기는 2.0W×1.7H×15.0L(m)이다.

### 2. 실험 방법

작물군의 복잡한 기하학적 형상을 CFD 모델로 설



(b) Overall view of wind tunnel



(c) Test section and control room

Fig. 1. General view of wind tunnel at National Institute of Agricultural Engineering, Rural Development Administration in Suwon.

계하는 것은 어려운 일이 아니다. 그러나, 기하학적 형상을 바탕으로 정확한 전산처리를 위하여 그 공간에 충분히 조밀한 격자(메쉬)수를 설계하기 위해서는 계산 영역에 엄청나게 많은 격자가 필요하게 된다. 현재 약 1,000,000개 정도의 메쉬를 소화할 수 있는 일반 데스크탑 컴퓨터로는 계산하기가 불가능하다. CFD 설계에 있어서 이러한 기하학적 한계를 극복하기 위하여 각각의 작물을 6면체의 공기투과성 매체(porous media)로 가정하였다.

작물의 저항력에 의한 모멘텀의 흡수는 식(1)의 Navier-Stokes 방정식의 공급기간  $S_\phi$ 로 나타낼 수 있다. 이 저항은 커버의 단위 부피로 나타내는데, 주로 사용되는 식은 다음과 같다 (Wilson, 1985).

$$S_\phi = -L_{ad} \cdot C_D \cdot v^2 \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 유속( $m \cdot s^{-1}$ ),  $LAD$ 는 엽면적밀도(Leaf

area density,  $m^2 \cdot m^{-3}$ )  $C_D$ 는 공기저항 계수이다. 이번 풍동실험으로 통하여 CFD모델의 토마토 작물군의 저항계수를 찾고자 하였다. 식물군락의 공기유동저항 실험을 위해 사용한 작물은 원숙토마토로 수확직후의 식물체를 뿌리째 채취하여 이용하였으며, 식물체의 높이는 풍동시험부의 높이와 같게 하였다. Fig. 2와 3에서와 같이, 실제 토마토를 이용하여 풍동실험을 수행하였으며, 풍동의 실험부내에 동일한 바닥면적 위에 다른 수의 토마토를 배치하여서 식물군의 밀도와 공기저항을 다양하게 시도하였다. 이와 함께 각각의 경우에 풍속을 바꾸어 가면서 작물군 전후에서의 공기유속과 정압을 측정하고자 실험을 하였다. 작물군을 중심으로 풍상측과 풍하측에 다점 미풍압측정계(PSI Model 19016, PSI사, 미국)를 각각 8개씩 설치하여 정압을 측정하였고(Fig. 2 & 3), 다점 유속계(Kanomax Model 6243, Kanomax사, 일본)도 풍상측과 풍하측에 각각 2개씩

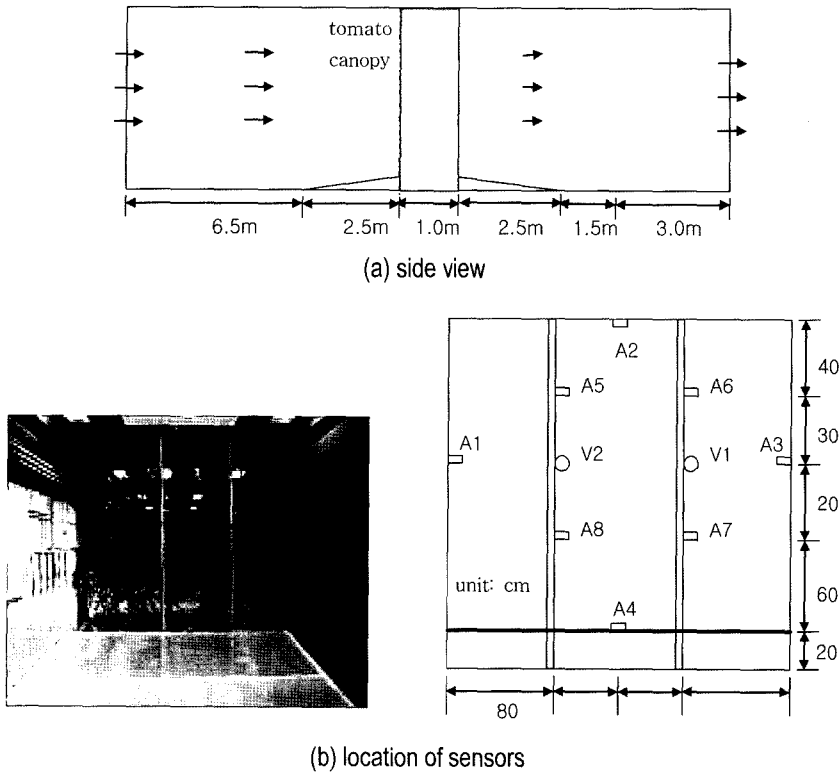


Fig. 2. Experimental schematic diagram of wind tunnel test.



Fig. 3. Measurements of micro-air pressure at the test section of wind tunnel.

설치하였다. 토마토 작물군은 일정한 형상을 유지하고 있지 않기 때문에 최대한 많은 센서를 고르게 설치하여 이들의 평균값을 이용하였다.

토마토 작물의 하부는 재배시 하엽을 제거하거나 자연적으로 낙엽되기 때문에 중간부위나 상부에 비해 잎이 적고, 근권부의 영향이 실질적으로 반영되지 않도록 하기 위해 식물군락의 전후면 바닥에 경사판을 설치(Fig. 2)하였다. 급격한 경사는 작물군 전후에 풍압장에 영향을 줄 수 있기 때문에 약 2.5m의 길이를 확보하여 경사판을 설계하였다. Table 1에서는 이번 풍동실

Table 1. Experimental conditions of plants and sensors

Contents	Value	Unit
Height of tomato	1.7	m
Floor area of plant canopy	2.0×1.02	m <sup>2</sup>
Leaf area	9183	cm <sup>2</sup> plant <sup>-1</sup>
Slope of plates	1:15	
Number of pressure sensor	Each 8 before and after plant canopy	
Number of anemometer	Each 2 before and after plant canopy	

**Table 2.** Experimental conditions of wind tunnel test.

Test	Floor area (m <sup>2</sup> )	Wind speed (m·s <sup>-1</sup> )	Number of plants
Test	12.0×1.02	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	2×5(10),3×8(24),4×11(44)
Test	22.0×1.02	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	2×5(10),3×8(24),4×11(44)
Test	32.0×1.02	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	2×5(10),3×8(24),4×11(44)

험에서의 실험 작물의 특성과 센서의 위치를 나타낸 것이다.

Table 2는 각 실험을 위한 풍속 및 작물군수를 나타낸 것이다. 실험은 풍동의 유속을 0.5m·s<sup>-1</sup>부터 2.5m·s<sup>-1</sup>까지 0.5m·s<sup>-1</sup>씩 5단계로 증가시켜가면서 수행하였다. 작물군의 밀도에 따른 공기유동저항을 측정하기 위하여 동일한 바닥면적에 작물체의 수량을 10, 24, 44주의 3단계로 작물군락의 밀도를 조절하여 수행하였다. 작물군의 바닥은 폭방향 2m, 길이방향 1.02m 로써 총 면적을 2.04m<sup>2</sup>으로 고정하였다. 작물군의 복잡하고 균일하지 않은 기하학적 형상으로 인하여 각 센서 위치에 따라서 측정값이 매우 불안정하였기 때문에 3번의 반복실험을 통하여 각각 5번의 반복측정을 통하여 평균값을 취하였다.

작물의 밀도와 공기 저항의 영향이 비례함을 이용하기 위해서 본 연구에서는 작물을 투과성 매체(porous medium)로 간주하고, Darcy-Forsheimer 방정식을 사용하였다. 본 연구를 통하여 Fluent CFD에서 공기투과성 매체의 설계공식인 식 (2)을 이용하였다.

$$\Delta P = \left( \frac{\mu}{\alpha} + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad (2)$$

- 여기서  $\alpha$  : 공기 투과성
- $C_2$  : 내부 저항 인자
- $\mu$  : 절대점성계수 (N s m<sup>-2</sup>)
- $v$  : 공기 유속 (m·s<sup>-1</sup>)
- $\rho$  : 공기 밀도 (kg·m<sup>-3</sup>)
- $\Delta p$  : 풍상측과 풍하측의 압력차 (Pa)
- $\Delta m$  : 공기투과성 매체의 두께 (m)

Fluent 프로그램에서 이용하는 공기투과성 매체의 대표식 (2)에서 우측항의 괄호 안에는 점성 감소 (Viscous loss term 혹은 Darcy term)와 내부에너지 감소(Inertial loss term)가 있다. 그리고 식 (2)에서 Darcy term은 5,000 이상의 높은 레이놀즈수를 보이

는 난류공기유동인 경우는 일반적으로 무시하기 때문에(Fluent, 2006), 본 연구에서도 작물군내 기류에서 난류가 매우 높다는 가정하에 Darcy term을 무시하였다. 풍동실험을 통한 공기투과성 매체 설계공식 (3) (Boulard 등, 2003)을 Darcy term을 무시한 식 (2)과 비교하여 C<sub>2</sub>/2와 L<sub>ad</sub>·C<sub>d</sub>의 상호관계를 찾아서 항력계수를 찾고자 하였다.

$$S_V = \frac{\Delta P}{\Delta x} = -L_{ad} \cdot \rho \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3)$$

- C<sub>d</sub> : 항력계수
- L<sub>ad</sub> : 엽면적지수
- v : 공기 유속 (m·s<sup>-1</sup>)
- $\rho$  : 공기 밀도 (kg·m<sup>-3</sup>)
- $\Delta p$  : 풍상측과 풍하측의 압력차 (Pa)
- $\Delta x$  : 공기투과성 매체의 두께 (m)

### 결과 및 고찰

Fig. 4는 토마토 작물군 전에서의 평균 정압 (a), 작물군 후에서의 평균 정압(b), 그리고 전후에서의 정압차(c)를 나타낸 것이다. 풍상측, 즉 작물군 전에서의 압력분포를 보면 풍속이 증가할수록 정압이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 단위면적당 작물의 수가 늘어날수록, 즉 엽면적밀도가 증가할수록 공기 정압이 증가하는 것을 보여주고 있다. 이것은 단위면적당 작물의 수가 증가함으로써 공기투과율이 감소하고 풍상측에 더욱 높은 대기 정압이 형성되기 때문이다. 그러나 풍하측에서는 풍속이 증가할수록 정압은 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 풍속이 증가할수록 작물 사이의 공간들을 통하여 높은 유속으로 공기가 풍하측에 도달하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 풍하측의 정압은 엽면적 밀도에 관계 없이 감소하는 경향을 나타내었다. Fig 4(c)에서는 풍상측과 풍하측 사이에서 발생하는 압력강소를 보여주고 있다. 풍속이 증가함에 따라서 압력강하

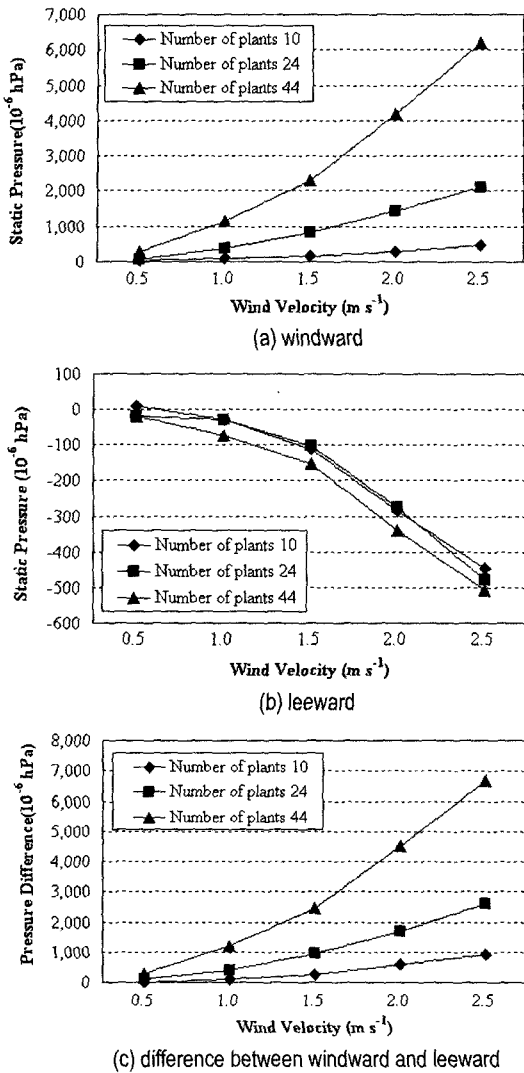


Fig. 4. Measurements of average static air pressures in windward and leeward as well as difference of static air pressure of leeward and windward.

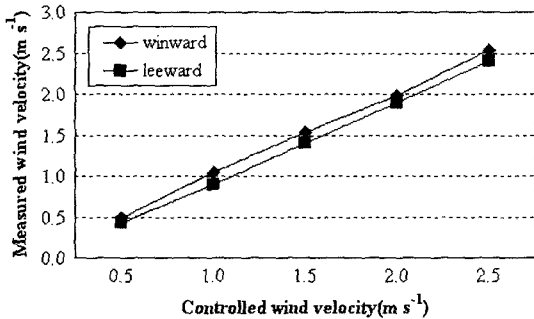


Fig. 5. Measurements of average air velocities at windward and leeward of the tomato plant canopy in the wind tunnel.

는 증가하고 또한 단위면적당 작물의 수가 많을수록 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5를 보면, 작물군 전과 후에서 풍속은 큰 차이는 보이지 않았지만, 각각의 풍속에서 대체적으로 균일한 차이를 보여주었다. 풍속이  $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 일 때, 3번의 반복실험을 통하여 풍상측에서의 평균풍속은  $0.49\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $0.50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $0.48\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 이 때 풍하측에서 평균 풍속은 각각  $0.43\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $0.34\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  및  $0.37\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. 바람의 세기가  $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 인 경우에는 풍상측에서  $2.54\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $2.48\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 그리고  $2.44\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 풍하측에서는  $2.41\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $2.38\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  및  $2.07\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 나타났다. 이것은 바람에 노출되어 있는 작물군의 형태가 균일하지 않았기 때문에 센서의 위치에 따라서 측정된 풍속의 값들은 불균일한 것으로 나타났다. 또한 작물의 잎들이 고정되어 있는 것이 아니라 바람에 따라서 움직이기 때문에 안정된 값을 찾는 것이 매우 어려웠다.

Fig. 6은 식 (2)와 (3)을 이용하여 구한 항력계수를 도사한 것이다. 풍속센서를 작물군 중앙과 작물군 사이에 각각 설치가 되었었기 때문에 본 연구에서는 이들

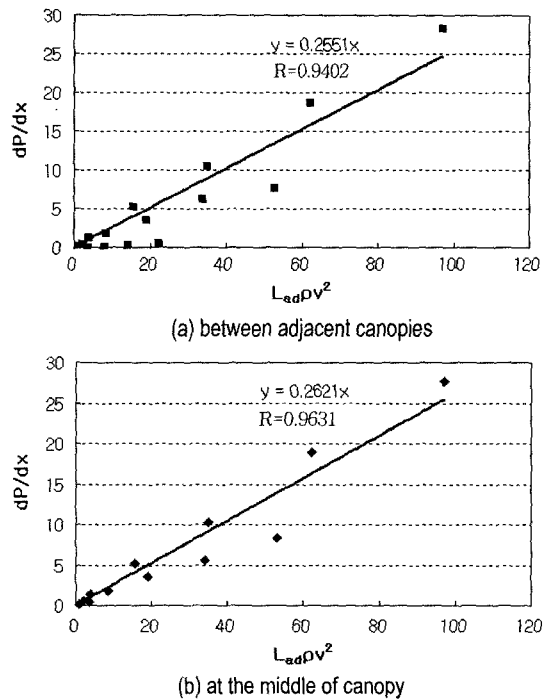


Fig. 6. Drag coefficient of tomato canopy found through wind tunnel tests.

값의 평균값을 이용하였다. 작물군과 작물군 사이에서 측정된 값과 작물군 중앙부에서 측정되어진 값들을 분리하여 계산하여 본 결과, 항력계수  $C_d$  값은 각각 0.2551와 0.2621으로써 이들의 평균한 값은 0.26이었다. 이 평균값을 Fluent 프로그램내 작물군 공기투과성 매체의 공기 저항값으로 이용하였다. Boulard 등 (2003)의 실험에서의  $C_d$  값이 0.32이었던 점을 고려하면 본 연구에서 구한 항력계수  $C_d$  값은 Boulard 등 (2003)의 결과와 비교하여 약간 작은 것으로 나타났다. 이것은 우리나라에서 가장 보편적으로 보급된 “서건” 품종을 이용하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Boulard 등(2003)에서 이용한 풍동은 매우 작은 규모(단면적 크기  $0.8 \times 1.2\text{m}$ )인 반면에, 본 연구에서는 실물크기의 토마토 작물을 넣을 수 있는 충분히 큰 풍동(단면적 크기  $1.7 \times 2.0\text{m}$ )을 이용하였기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 풍동의 실험구역에서 각 4면의 마찰력으로 인하여 10m 길이당 각 면위에 약 0.1~0.15m의 경계층이 형성되기 때문에 풍동 실험부의 단면적 크기가 클수록 실험에서 발생할 수 있는 오차의 폭을 줄일 수 있다(Cook, 1997). 식 (3)에서 왼쪽 항과 오른쪽의 엽면적밀도, 공기밀도, 그리고 공기유속의 자승을 곱한 값 사이에 상관관계를 항력계수  $C_d$  값으로 설정되며, 이 값을 공기투과성 매체의 내부저항값으로 설정할 수 있다.

## 적 요

온실의 환기연구를 위한 CFD 시뮬레이션 모델에 토마토 작물을 설계함에 있어서 우선적으로 작물군의 기하학적 형상 설계 및 이의 공기 항력계수를 찾고자 하였다. 작물군 형상을 간단한 형태의 공기투과성 매체로 설계하고 이의 공기저항의 물리적 특성을 풍동실험을 통하여 구하였다. 토마토 작물군과 작물군 사이에서 측정된 값과 작물군 중앙부에서 측정되어진 값들을 분리하여 계산하여 본 결과 공기저항값인 항력계수  $C_d$  값은 각각 0.2551와 0.2621로 나타났다. 최종적으로 이들의 평균값인 0.26을 Fluent CFD 프로그램의 작물군 공기투과성 매체의 x, y, z축의 내부저항값으로 입력되었다. 이 실험결과를 이용하여 전산유체역학(CFD)을 이용한 시설내 작물군이 존재하는 경우의 온

실 환기연구를 효과적으로 수행할 수 있게 되었다. 또한 풍동을 이용한 작물의 공기저항 연구를 위한 실험 방법을 개발하여 앞으로 다양한 작물들을 대상으로 공기유동의 물리적 특성연구를 수행할 수 있게 되었다.

## 인 용 문 헌

1. Lee, In-Bok, K. H. Choi, C. J. Chon, and K. W. Kim. 2003. Wind tunnel technology in agriculture. Summer conference of Korean Society of Wind Engineering, 201-204.
2. 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.
3. Cook, N. 1997. The designer's guide to wind loading of building structures part 2. Butterworths Co. Croydon, UK.
4. Fluent. 2006. The manual of computational fluid dynamics (CFD), Version 6.3. Lebanon, N.H.: Fluent, Inc.
5. 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.
6. Lee, In-Bok, T. H. Short, S. Sase, and S. Lee. 2000a. Evaluation of computational fluid dynamics of aerodynamics in naturally ventilated multi-span greenhouses. 1(2):73-80.
7. Lee, In-Bok, T. H. Short, S. Sase, L. Okushima, and G. Y. Qiu. 2000b. Evaluation of structural characteristics of naturally ventilated multi-span greenhouses using computer simulation. Japanese Agricultural Research Quarterly, 34(4):245-255.
8. Lee, In-Bok and T. H. Short. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 43(3):745-753.
9. Lee, In-Bok and T. H. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamics temperature simulations in a full scale naturally ventilated greenhouse. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(1):119-127.
10. 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.
11. Wilson, J.D. 1985. Numerical studies of flow through a windbreak. Journal of Wind Engineering, 21:119-154.