

풍동실험을 통한 국화군락의 공기유동 저항 분석

유인호¹ · 윤남규² · 조명환¹ · 이인복^{3*}

¹원예연구소 시설원예시험장, ²농업공학연구소 시설자원공학과, ³서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학

Analysis for Aerodynamic Resistance of Chrysanthemum Canopy through Wind Tunnel Test

In Ho Yu¹, Nam Kyu Yun², Myeong Whan Cho¹, and In Bok Lee^{3*}

¹Protected Horticulture Experiment Station, NHRI, RDA, Busan 618-800, Korea

²Division of Agricultural Facilities and Resource Engineering, NIAE, RDA, Suwon 441-707, Korea

³Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. A wind tunnel test was conducted at Protected Horticulture Experiment Station of National Horticultural Research Institute in Busan to find the aerodynamic resistance and quadratic resistance coefficient of chrysanthemum in greenhouse. The internal plants of the CFD model has been designed as a porous media because of the complexity of its physical shapes. Then the aerodynamic resistance value should be input for analyzing CFD model that crop is considered while the value varies by crops. In this study, the aerodynamic resistance value of chrysanthemum canopy was preliminarily found through wind tunnel test. The static pressure at windward increased as wind velocity and planting density increased. The static pressure at leeward decreased as wind velocity increased but was not significantly affected by planting density. The difference of static pressure between windward and leeward increased as wind velocity and planting density increased. The aerodynamic resistance value of chrysanthemum canopy was found to be 0.22 which will be used later as the input data of Fluent CFD model. When the planting distances were 9×9 cm, 11×11 cm, and 13×13 cm, the quadratic resistance coefficients of porous media were found to be 2.22, 1.81, and 1.07, respectively. These values will be used later as the input data of CFX CFD model.

Key words : aerodynamic resistance, Chrysanthemum, computational fluid dynamics (CFD), greenhouse, porous media, wind tunnel

서 언

시설재배는 일반적으로 노지에서 작물이 생육하기 어려운 동절기나 이른 봄에 재배시기를 앞당겨 농산물을 조기 출하할 목적으로 하는 경우가 대부분이다. 그러나 최근에는 온실이 대형화되면서 활용도를 높이기 위해 온실 내에서 작물을 연중 재배하는 추세이다. 고품질 농산물을 연중 생산하기 위해서는 온실내 미기상 환경을 작물생육에 적합하도록 유지해 주어야 한다. 그러기 위해서는 온실 규모나 외부 기상여건의 변화로 인한 온실내 미기상환경 변화를 정확하게 예측하고 제

어할 수 있어야 한다. 기존의 온실 환경 관련 연구는 대부분 특정 온실에 국한되어 있고 단발성 연구로 끝나는 경우가 많다. 이는 자연 상태에서는 여러 요인들을 인위적으로 제어할 수 없어 체계적이고 효과적인 연구가 매우 어렵기 때문이다(Lee 등, 2006). 이를 보완할 수 있는 공학적 신기술이 1990년대 중반부터 공학분야에서 활발하게 이용되고 있는 공기유동해석적 접근이 가능한 전산유체역학이다. 전산유체역학(Computational fluid dynamics)이란 유체역학과 수치해석을 결합시켜 수학적으로 풀기 어려운 비선형 편미분 방정식들의 근사해를 구하는 학문으로 컴퓨터의 발달과 더불어 급속히 발전해 온 유체역학의 한 분야이다. CFD의 가장 큰 장점은 짧은 시간에 방대한 자료를 확보할 수 있을 뿐만 아니라 연구자가 원하는 지점 또는 부

*Corresponding author: iblee@snu.ac.kr
Received May 30, 2008; accepted June 11, 2008

분에서의 데이터를 확보할 수 있어 다차원적이고 세밀한 분석을 할 수 있다는 것이다(Lee와 Short, 1999; Lee와 Short, 2000). 또한 한번의 계산으로도 전 유동장내의 속도, 압력, 온도, 밀도 등의 분포를 알 수 있으며, 고온, 고속이나 유독한 환경 등 실험으로는 실현시키기 어려운 다양한 조건에서의 정성적 및 정량적 공기유동분석이 가능하다. CFD는 온실 내부 미기상 변화의 주 메커니즘인 공기 유동을 직접적이고 가시적으로 분석할 수 있어 기류의 복잡한 움직임을 해석하고 적절한 설계안을 도출해 내는데 유용하게 사용될 수 있다(Hong, 2008).

온실을 대상으로 CFD 모델을 설계하는데 있어서 어렵고도 중요한 점은 작물을 어떻게 구현하느냐는 것이다. 작물군락의 형상은 CFD 모델로 설계하기에 불규칙하고 복잡할 뿐만 아니라 작물의 영향을 수치적으로 표현하기가 어렵다. 그렇지만 온실내 작물은 공기유동에 대하여 저항체로 작용하여 유속, 운동량, 난류성 등의 특성을 변화시키기 때문에 실제와 가깝게 CFD 모델을 설계하기 위해서는 반드시 작물을 고려해야 한다. 그러나 온실을 대상으로 수행되어온 많은 연구들은 작물군락의 복잡한 기하학적 형상 때문에 온실 내에 작물이 없다는 가정 하에 이루어졌다(Lee 등, 2001). 최근 들어 Boulard 등(2002) 소수 연구자들만이 온실내 작물을 고려하여 CFD 모델을 설계하였다. Boulard 등(2002)은 상추가 재배되고 있는 소형 단동 하우스의 환경을 예측하는데 있어서 상추군락의 공기저항 특성 뿐만 아니라 상추군락과 시설내 대기환경 사이의 열적 및 질량적 교환에 의한 영향까지도 CFD 모델에 고려하였다. 이 등(2006)은 풍동실험을 통해 토마토의 재식밀도 및 풍속을 변화시켜 가면서 토마토군락의 항력계수를 산정하였다.

작물이 고려된 CFD 모델 해석을 위해서는 작물군락의 공기저항값을 우선 결정하여야 하며, 이 값은 작물의 종류, 재식밀도 등에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 CFD 모델 해석에 필요한 국화군락의 공기저항값을 풍동실험을 통하여 결정하였다.

재료 및 방법

1. CFD 시뮬레이션

CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션은

유체를 포함하는 어떤 시스템에 대하여 유체의 흐름, 열전달 그리고 화학적 반응과 같은 일련의 물리·화학적 현상들을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 수치적 해를 구하는 분석 도구이다. 상용화된 CFD 프로그램은 수십 종에 이르고 있는데, 그 중 국내에 도입되어 많이 사용되고 있는 대표적인 소프트웨어로는 FLUENT, CFX, STAR-CD, CFD-ACE, PHOENIX 등이 있다. 이러한 소프트웨어들은 약간씩 차이가 있으나 대체로 전처리 모듈(Preprocessor), 해석 모듈(Solver), 후처리 모듈(Postprocessor) 등 세 부분으로 이루어져 있다. 전처리 모듈은 유동이 일어나는 공간의 형상 구현 및 격자를 형성하고 해석조건, 경계조건, 물성치 입력, 수치계산과 입출력을 위한 컨트롤을 지정해 주는 모듈이다. 해석 모듈은 전처리 모듈에서 정의된 여러 변수와 격자 등의 정보를 받아 계산을 수행하며 여러 경우에 대한 계산이 가능하도록 방대한 프로그램으로 구성되어 있다. 해석 모듈의 출력값은 속도, 압력, 온도, 밀도 등 유동 변수에 대한 값이며 후처리 모듈의 입력으로 사용된다. 후처리 모듈은 계산 결과를 가시화하는 모듈로서 속도벡터, 등온선, 등압선 등을 주어진 단면에서 영상처리하거나 원하는 지점에서의 데이터를 얻을 수 있도록 해주는 모듈이다. 온실을 대상으로 CFD 모델을 설계할 때 작물은 주로 6면체의 다공성 매체(porous media)로 가정이 되며, 전처리 모듈에서 다공성 매체의 특성값으로 공기저항값을 입력해 주어야 한다.

2. 작물군락의 CFD 설계에 대한 이론적 고찰

작물은 공기의 흐름을 방해하는 저항체로 작용하며, 이로 인하여 기류는 유속, 운동량, 난류성 등 그 성질이 변화하게 된다. 따라서 작물은 온실내 미기상 환경에 큰 영향을 미치게 되는데, 작물은 복잡하고 불규칙한 형상을 갖고 있기 때문에 형상을 구현하고 격자를 구성하는데 한계가 있다. 그러나 최근 CFD 설계에 있어서 작물을 6면체의 다공성 매체로 가정함으로써 이러한 한계점을 극복하였으며, 다공성 매체의 특성값을 찾기 위한 실험들도 진행되고 있다(이 등, 2006; Boulard와 Wang, 2002).

유체의 유동에 대한 물리적 특성을 나타내는 기본적인 법칙에는 연속(mass), 운동량(momentum), 에너지(energy) 보존법칙들이 있다. 유동에 따른 물질의 수송을 묘사하는 비압축성 유체의 정상상태 수송방정식은

다음과 같다.

$$\frac{\partial u\Phi}{\partial x} + \frac{\partial v\Phi}{\partial y} + \frac{\partial w\Phi}{\partial z} = \Gamma \cdot \nabla^2 \Phi + S_\Phi \quad (1)$$

여기서, u, v, w : 각 방향의 속도($m \cdot s^{-1}$), Φ : 수송되는 질량의 농도(mass fraction), Γ : 확산 계수($m^2 \cdot s^{-1}$), S_Φ : 발생 및 소멸에 관련된 항

기류에 대한 작물의 저항력은 주로 흐름을 지배하는 방정식에 모멘텀항을 추가하여 나타낸다. 현재 사용되는 간단한 방법은 경험적인 상수를 도입하여 유속의 거듭제곱으로 표현하는 방법이 있다.

$$S_\Phi = -C_0 |v|^{C_1} \quad (2)$$

여기서, v : 공기 유속($m \cdot s^{-1}$), C_0, C_1 : 경험적인 계수

이러한 떡법칙에 의한 산정은 그 형태가 간단하기는 하지만 이론적으로 다른 식들과 연계하는데 한계가 있다. 다공성 매체에 의한 모멘텀항을 표현하는 또 다른 방법으로는 점성 손실과 내부에너지 손실에 관한 두 개의 항으로 구성되는 Darcy-Forsheimer 방정식이 있다(Fluent manual, 2006).

$$S_\Phi = -\frac{\Delta p}{\Delta x} = -\left(\frac{\mu}{a}v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2\right) \quad (3)$$

여기서, Δp : 풍상측과 풍하측의 압력차(Pa), Δx : 다공성 매체의 두께(m), μ : 절대점성계수($kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$), a : 공기 투과성, C_2 : 내부 저항 인자, ρ : 공기밀도($kg \cdot m^{-3}$)

식 (3)에서 절대점성계수와 다공성에 관련된 항은 Darcy법칙에서 점성손실항으로 5,000 이상의 레이놀즈수를 보이는 난류 유동에 대해서는 무시할 수 있으며(Fluent manual, 2006), 작물군락내의 기류에서 난류성이 높다는 가정 하에 내부에너지의 손실에 대한 항만을 고려할 수 있다. 작물에 의해 발생하는 항력에 대해서는 Wilson(1985)의 식에 밀도를 곱하여 모멘텀 손실을 나타낼 수 있다.

$$S_\Phi = -L_{ad} \cdot \rho \cdot C_d \cdot v^2 \quad (4)$$

여기서, L_{ad} : 엽면적 밀도($m^2 \cdot m^{-3}$), C_d : 항력계수

Wilson의 식은 작물의 재식밀도, 항력계수, 유속을 모멘텀 손실의 영향인자로 고려하였으며, 이 식을 내부

에너지의 손실만을 고려한 식 (3)의 우변항과 비교할 경우, 내부저항인자(C_2)를 항력계수와 엽면적밀도 등 작물의 형상과 연관시킬 수 있다.

$$C_2 = 2 \cdot L_{ad} \cdot C_d \quad (5)$$

본 연구에서도 국화군락내 난류가 매우 높다는 가정 하에 Darcy term을 무시하였다. Fluent 프로그램에서 다공성 매체 설계공식인 식 (3)과 식 (5)를 연립하여 아래의 식 (6)에서 항력계수를 찾고자 하였다. 식 (6)에서 항력계수 C_d 를 제외한 나머지 값들은 풍동실험을 통해 구할 수 있다.

$$S_\Phi = -\frac{\Delta p}{\Delta x} = -L_{ad} \cdot \rho \cdot C_d \cdot v^2 \quad (6)$$

한편, CFX 프로그램에서는 다공성 매체의 특성을 quadratic resistance coefficient(K_Q)로 정의하는데, Fluent 프로그램과 마찬가지로 식 (3)에서 점성손실항을 무시하고 내부에너지 손실항만을 고려하며 그 관계식은 다음과 같이 표현된다(ANSYS CFX manual, 2007).

$$S_\Phi = -\frac{\Delta p}{\Delta x} = C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 = -K_Q v^2 \quad (7)$$

여기서, K_Q : quadratic resistance coefficient($kg \cdot m^{-4}$)

CFX 프로그램에서는 식 (7)에서와 같이 다공성 매체 전후의 압력차(p/x)를 유속의 제곱(v^2)으로 나눈 값을 다공성 매체의 특성값으로 이용한다.

3. 실험 방법

풍동(wind tunnel)은 공기가 흐르는 현상이나 공기의 흐름이 물체에 미치는 힘 또는 흐름 속에 있는 물체의 운동을 조사하기 위해 인공적으로 공기가 흐르도록 만든 장치이다. 풍동실험은 실물을 사용하여 직접 측정하는 것에 비하여 소형의 모형을 사용할 경우에는 모형을 계통적으로 변화시켜 측정 결과를 해석할 수 있으므로 비용이 적게 들어 매우 경제적이며, 쉽고 안전하게 실험할 수 있을 뿐만 아니라 단시간에 많은 양의 데이터를 얻을 수 있다(Lee 등, 2006).

풍동실험은 부산 시설원예시험장에 설치된 단동 유리온실(폭 9m×측고 3.7m×길이 37m)에서 2007년 8월 14일에 수행되었다. 유리온실 내에 폭 1.0m×높

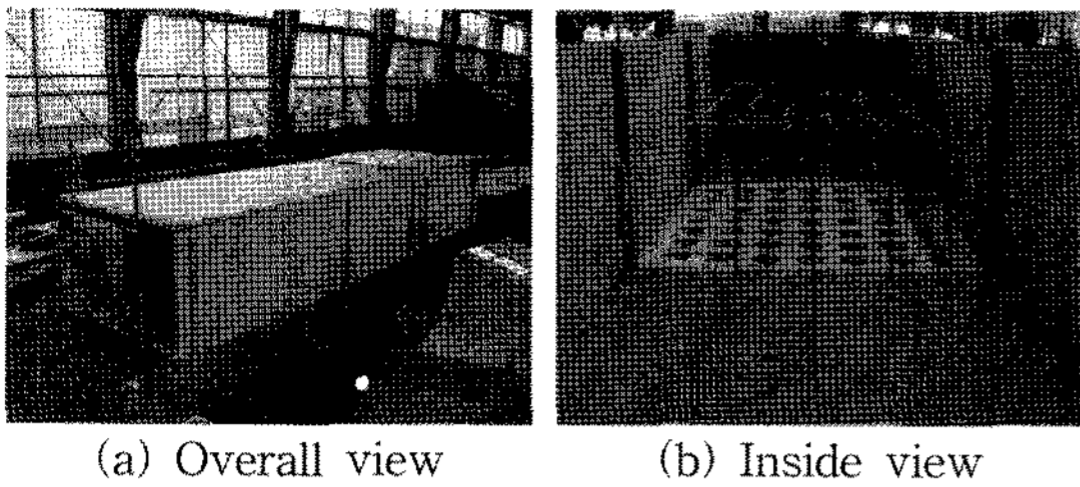


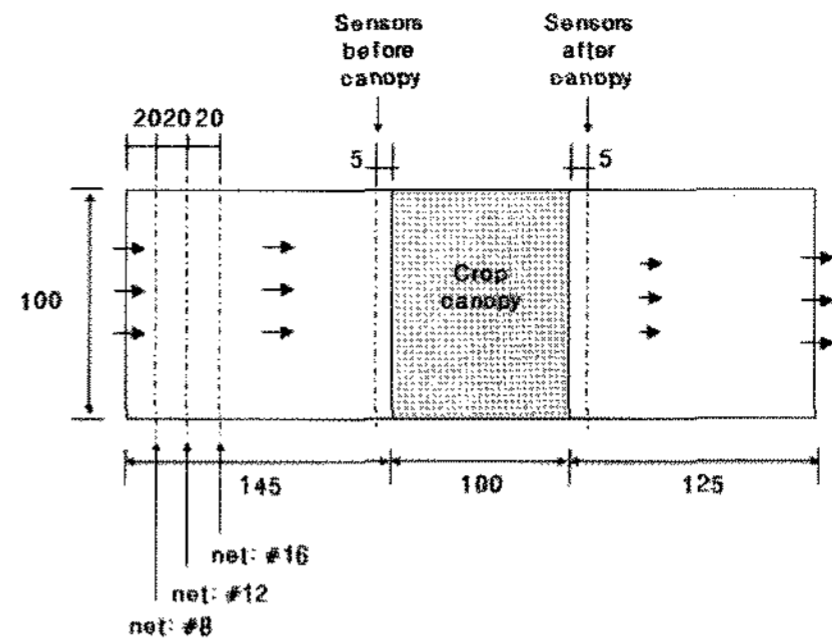
Fig. 1. General view of wind tunnel.

이 0.58m×길이 3.7m의 풍동을 설치하였으며, 외부의 영향을 배제하기 위해 온실 환기창을 닫은 상태로 실험을 수행하였다(Fig. 1). 풍동실험에 사용된 팬의 날개는 3개, 직경은 350mm, 최대풍량은 33.44m³·min⁻¹, 최대 가능풍속은 1.5m·s⁻¹이었다. 풍동 내에서의 풍속 분포를 균일하게 하기 위하여 팬으로부터 20cm 떨어진 지점부터 눈의 크기가 다른 네트를 3단계로 설치하였다.

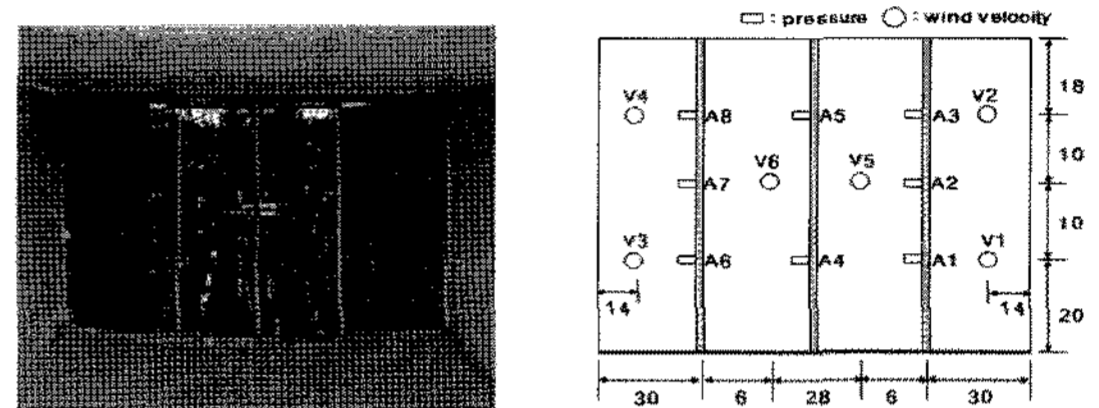
풍동실험에 사용된 국화(cv. sinma)는 직경 9cm 포트에서 재배되었다. 국화의 초장은 58cm였고, 엽면적은 1주당 456cm²였다. 국화군락의 재식밀도에 따른 공기유동 저항을 측정하기 위하여 풍동내 1m²의 바닥 면적에 9×9cm(124주), 11×11cm(81주), 13×13cm(49주)로 간격을 다르게 포트를 배치하였다(Table 1). 국화군락을 중심으로 풍상측과 풍하측에 다채널 미풍압측정계(PSI Model 9016, PSI사, 미국)를 각각 8개씩 설치하여 정압을 측정하였고, 다채널 유속계(Kanomax Model 6243, Kanomax사, 일본)도 풍상측과 풍하측에 각각 6개씩 설치하였다(Fig. 2). 국화군락은 일정한 형상을 유지하고 있지 않기 때문에 최대한 많은 센서를 설치하였다. 풍동의 유속은 0.3m·s⁻¹부터

Table 1. Experimental conditions of wind tunnel test.

Contents	Value	Unit
Height of Chrysanthemum	0.58	m
Floor area of plant canopy	1.0×1.0	m ²
Leaf area	456	cm ² ·plant ⁻¹
No. of pressure sensor	Each 8 before and after plant canopy	psi
No. of anemometer	Each 6 before and after plant canopy	m·s ⁻¹
Wind velocity	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5	m·s ⁻¹
Planting distance	9×9, 11×11, 13×13	cm



(a) Plan view



(b) Location of sensors

Fig. 2. Experimental schematic diagram of wind tunnel (unit : cm).

1.5m·s⁻¹까지 0.3m·s⁻¹씩 5단계로 증가시켜 가면서 수행하였다. 국화군락의 복잡하고 균일하지 않은 기하학적 형상으로 인하여 각 센서의 위치에 따라서 측정값이 매우 불안정하였기 때문에 3번의 반복 측정을 통하여 평균값을 취하였다.

결과 및 고찰

작물은 온실내 공기유동 및 미기상 환경에 큰 영향을 미치게 되므로 실제 CFD 모델 설계시 반드시 고려되어야 한다. 작물은 복잡한 기하학적인 형상을 단순화하기 위하여 6면체의 다공성 매체로 가정이 되며, 그 다공성 매체의 특성값을 CFD 모델에 입력해 주어야 한다. Fig. 3은 재식간격 11×11cm이고 풍속이 1.5m·s⁻¹이었을 때 국화군락 전과 후에서의 정압분포를 나타내고 있다. 군락 전에서의 정압은 한가운데가 20Pa, 평균 12.7Pa을 보였다. 단면의 네 모서리 쪽으로 갈수록 정압이 떨어지는 것으로 나타났는데, 이는 벽면에 가까워질수록 유속이 빠르게 나타났기 때문으로 판단된다. 군락 후의 정압은 군락 전의 정압에 비해 평균 3.95Pa 정도 낮게 나타났다. 국화 사이의 공간을 통하여 높은 유속으로 공기가 풍하측에 도달하기

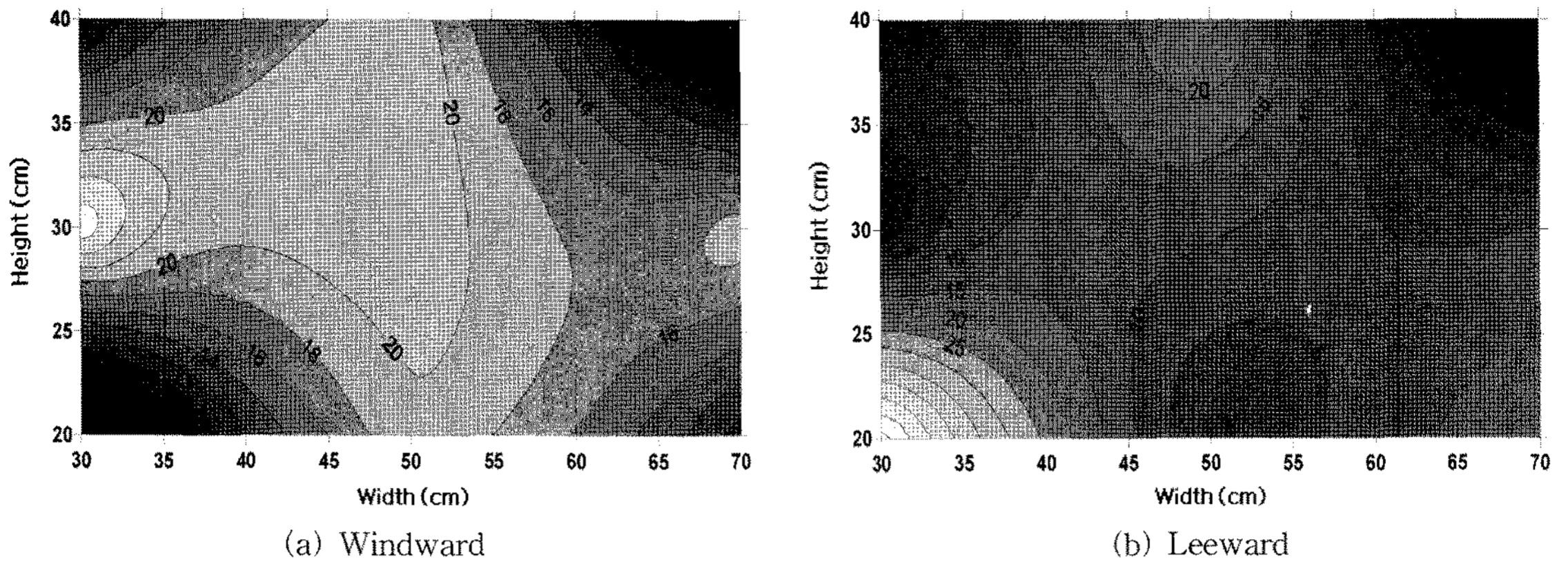
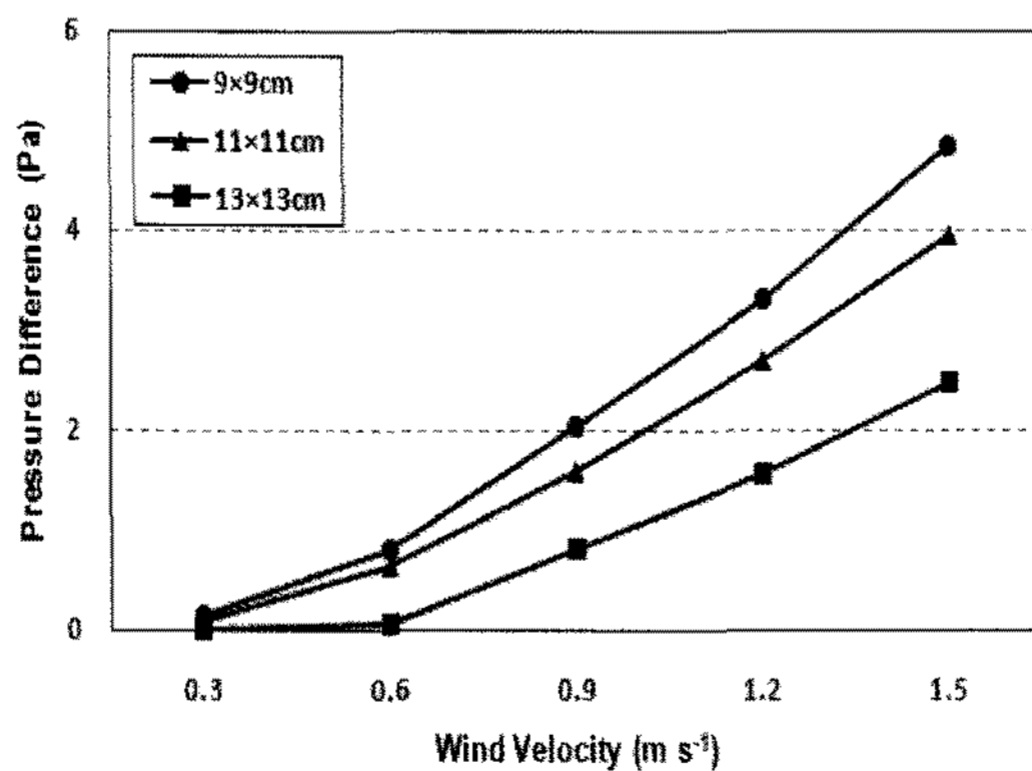
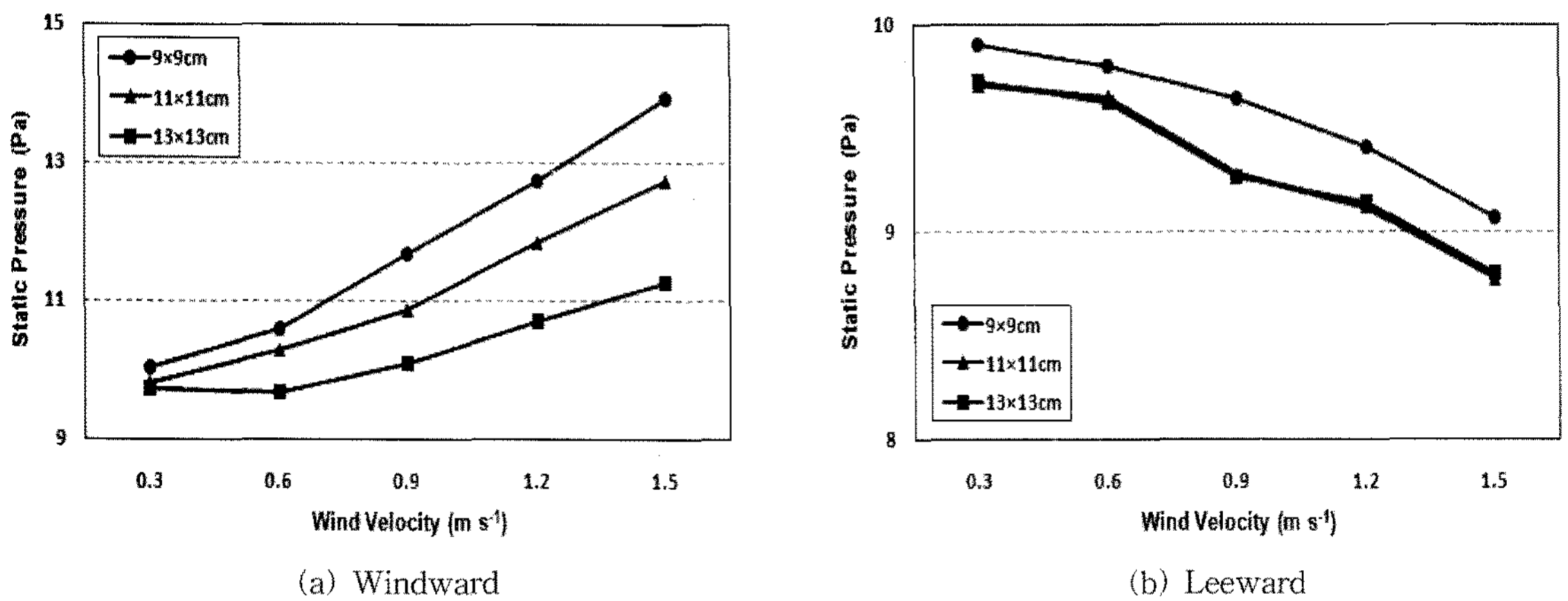


Fig. 3. Average static pressures at windward and leeward when planting distance was $11 \times 11 \text{ cm}$ and wind velocity was $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Unit : Pa).



(c) Difference of static pressure between windward and leeward

Fig. 4. Average static pressures at windward and leeward as well as difference of static pressure between windward and leeward.

때문으로 판단된다.

Fig. 4는 국화군락 전에서의 평균 정압(a), 후에서의 평균 정압(b), 그리고 전후에서의 정압차(c)를 나타내고

있다. 팬의 바람이 불어오는 쪽인 풍상측, 즉 군락 전에서의 압력을 보면 풍속이 증가할수록 정압이 증가하였다. 또한 재식간격이 좁아질수록, 즉 재식밀도가 높

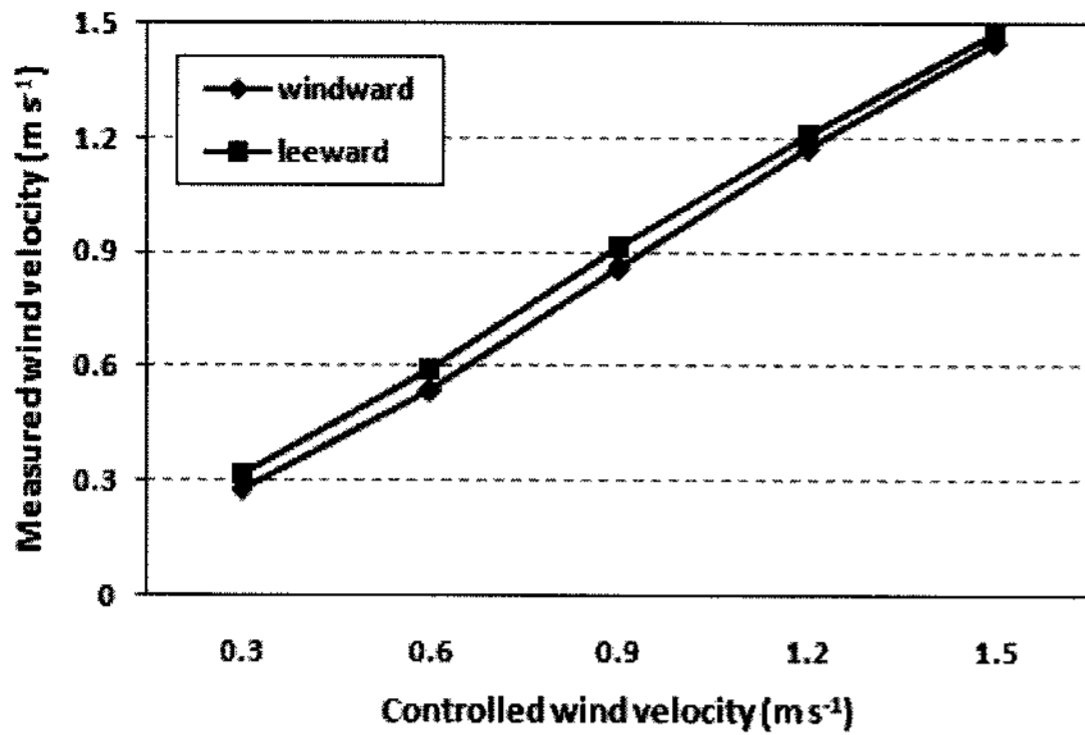


Fig. 5. Average wind velocities at windward and leeward.

아질수록 정압이 증가하였다. 이것은 재식밀도가 증가 함으로써 공기투과율이 감소하고 풍상측에 더욱 높은 정압이 형성되기 때문으로 판단된다. 그러나 바람이 부는 반대쪽인 풍하측에서의 정압은 풍속이 증가할수록 낮아졌다. 이것은 풍속이 증가할수록 국화 사이의 공간을 통하여 높은 유속으로 공기가 풍하측에 도달하기 때문으로 판단된다. 풍하측의 정압은 재식밀도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. Fig. 4(c)에서는 풍상측과 풍하측 사이에서 발생하는 압력 감소를 보여 주고 있다. 풍속이 증가할수록 또한 재식밀도가 높아질수록 압력 강하가 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 국화군락 전후의 풍속을 나타내고 있다. 국화 잎들이 고정되어 있는 것이 아니라 바람에 따라 움직이기 때문에 안정된 값을 얻기가 매우 어려웠다. 또한 바람에 노출되어 있는 군락의 형태가 균일하지 않았기 때문에 센서의 위치에 따라서 측정된 풍속값들은 불균일한 것으로 나타났다. 그래서 3번의 반복 측정을 통해 평균 풍속값을 사용하였다. 국화군락 전후에서 풍속은 큰 차이는 보이지 않았지만, 각각의 풍속에서 대체적으로 균일한 차이를 보였다. 팬의 풍속이 $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 일 때, 풍상측 6개 지점에 대한 평균 풍속은 $0.31, 0.25, 0.27\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 풍하측 6개 지점에 대한 평균 풍속은 $0.32, 0.33, 0.31$ 로 측정되었다. 풍속이 $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 일 때, 풍상측에서의 평균 풍속은 $1.38, 1.46, 1.52\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 풍하측에서의 평균 풍속은 $1.34, 1.50, 1.58\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 나타났다.

항력계수 C_d 는 식 (6)에서 좌변항($\Delta p/\Delta x$)을 우변항($L_{ad}\cdot\rho\cdot v^2$)으로 나눈 값으로 Fig. 6에서 직선의 기울기를 의미한다. 풍동실험을 통해 구한 국화군락의 항력계수 C_d 값은 0.22이며, 이 값을 Fluent 프로그램의 공기

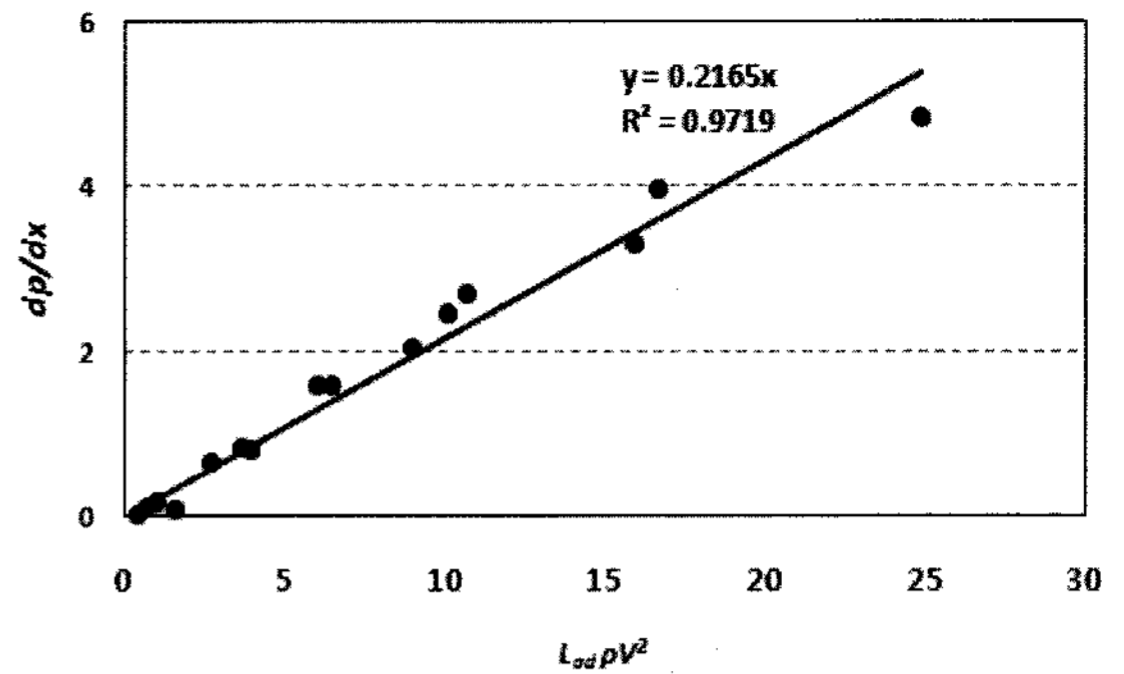


Fig. 6. Drag coefficient of chrysanthemum canopy in wind tunnel test.

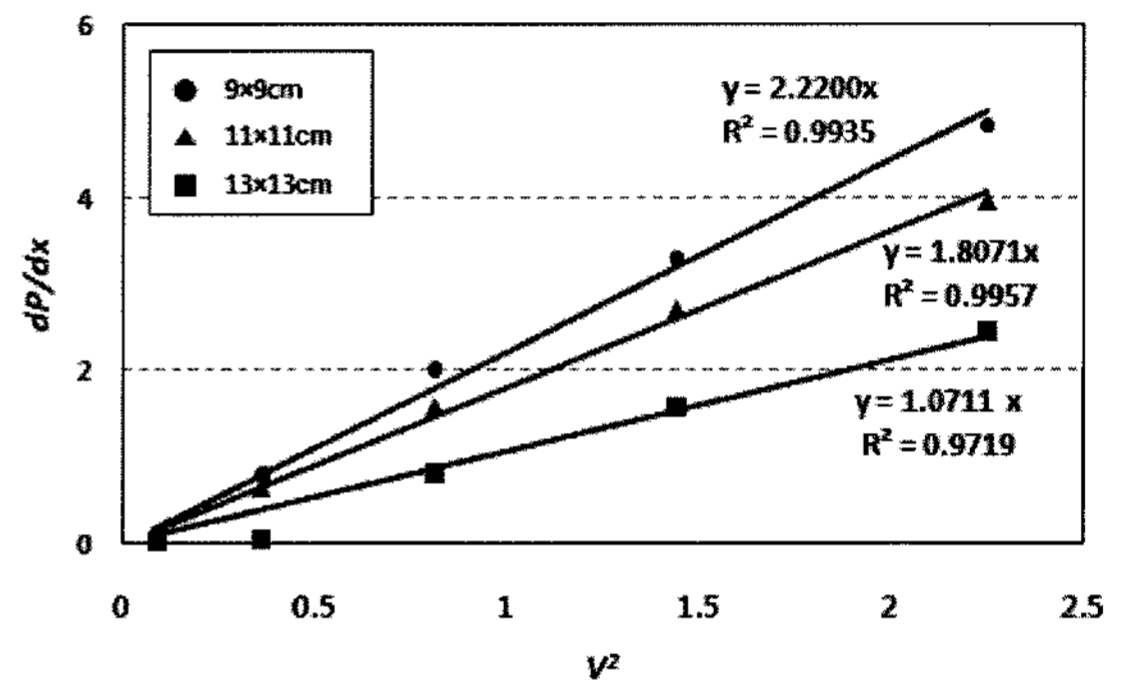


Fig. 7. Quadratic resistance coefficient of chrysanthemum canopy in wind tunnel test.

저항계수로 이용한다. 토마토를 대상으로 한 Lee(2006)의 실험에서의 C_d 값 0.26에 비해 다소 작은 값을 나타냈다. 이는 국화는 토마토에 비해 엽면적밀도가 낮아서 공기유동에 저항을 적게 주기 때문인 것으로 판단된다. 한편, CFX 프로그램에서 필요로 하는 다공성 매체에서의 특성값 K_0 는 재식간격 $9\times 9\text{cm}$ 일 때 2.22, $11\times 11\text{cm}$ 일 때 1.81, $13\times 13\text{cm}$ 일 때 1.07이었으며, Fig. 7은 K_0 값을 나타낸 그래프이다. 이 값을 CFX 프로그램의 quadratic resistance coefficient로 입력한다.

적 요

작물은 복잡한 형상 때문에 CFD 모델에서 다공성 매체로 설계된다. 작물이 고려된 CFD 모델 해석을 위해서는 작물군락의 공기저항값을 입력하여야 하며, 이 값은 작물에 따라 달라진다. 본 연구에서는 풍동실험을 통해 국화군락의 공기저항값을 구하였다. 풍상측에서는

풍속과 재식밀도가 증가할수록 정압이 증가하였다. 풍하측에서는 풍속이 증가할수록 정압이 낮아졌으나 재식밀도의 영향은 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 풍속과 재식밀도가 증가할수록 풍상측과 풍하측의 압력차가 커지는 것으로 나타났다. 국화군락의 공기저항값인 항력계수 C_d 값은 0.22였으며, Fluent 프로그램의 공기저항 계수로 이용한다. CFX 프로그램에서 필요로 하는 다공성 매체의 특성값 K_0 는 재식간격 9×9 cm일 때 2.22, 11×11 cm일 때 1.81, 13×13 cm일 때 1.07이었으며, 이 값을 CFX 프로그램의 quadratic resistance coefficient로 입력한다.

주제어 : 공기저항, 국화, 다공성 매체, 온실, 전산유체역학, 풍동

인 용 문 헌

1. ANSYS CFX. 2007. The manual of ANSYS CFX, Version 11.0. ANSYS Inc., PA, USA.
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 Agriculture 34:173-190.
3. Fluent. 2006. The manual of computational fluid dynamics(CFD), Version 6.3. Fluent Inc., Lebanon, N.H.
4. Hong, S.W. 2008. Analytical comparison on ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouses and development crop modeling using CFD technology. Thesis. Seoul National Univ. p. 19-27 (in Korean).
5. Lee, I.B. and T.H. Short. 1999. Analysis of the efficiency of natural ventilation in a multi-span greenhouse using CFD simulation. J. Bio-Env. Con. 8(1):9-18 (in Korean).
6. Lee, I.B. and T.H. Short. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. Transactions of ASAE. 43(3):745-753.
7. Lee, I.B. and T.H. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamics temperature simulations in a full scale naturally ventilated greenhouse. Transactions of ASAE. 44(1):119-127.
8. Lee, I.B., N.K. Yun, T. Boulard, J.C. Roy, S.H. Lee, K.W. Kim, S.K. Lee, and S.H. Kwon. 2006. Development of an aerodynamic simulation for studying microclimate of plant canopy in greenhouse. J. Bio-Env. Con. 15(4):289-295 (in Korean).
9. Wilson, J.D. 1985. Numerical studies of flow through a windbreak. Journal of Wind Engineering 21:119-154.