

## 딸기 고설재배시설에서의 이산화탄소 농도 유지를 위한 방풍막 설치 효과

김용희<sup>1</sup> · 이인복<sup>1\*</sup> · 전창후<sup>2</sup> · 황현섭<sup>1</sup> · 홍세운<sup>1</sup> · 서일환<sup>1</sup> · 유재인<sup>1</sup> · J.P. Bitog<sup>1</sup> · 권경석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학대학 농업생명과학연구원

<sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부

### Utilization of CO<sub>2</sub> Influenced by Windbreak in an Elevated Production System for Strawberry

Y.-H. Kim<sup>1</sup>, I.-B. Lee<sup>1\*</sup>, Changhoo Chun<sup>2</sup>, H.-S. Hwang<sup>1</sup>, S.-W. Hong<sup>1</sup>, I.-H. Seo<sup>1</sup>,  
J.-I. Yoo<sup>1</sup>, Jessie P. Bitog<sup>1</sup>, and K.-S. Kwon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Rural System Engineering and Research Institute for Agriculture and Life Sciences,  
College of Agricultural and Life Sciences, Seoul National University, Korea

<sup>2</sup>Department of Plant Science, College of Agriculture and Life Science,  
Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

**Abstract.** The influence of windbreak to minimize the ventilation velocity near the plant canopy of a greenhouse strawberry was thoroughly investigated using computational fluid dynamics (CFD) technology. Windbreaks were constructed surrounding the plant canopy to control ventilation and maintain the concentration of the supplied CO<sub>2</sub> from the soil surface close to the strawberry plants. The influence of no windbreak, 0.15 m and 0.30 m height windbreaks with varied air velocity of 0.5, 1.0 and 1.5 m/s were simulated in the study. The concentrations of supplied CO<sub>2</sub> within the plant canopy of were measured. To simplify the model, plants were not included in the final model. Considering 1.0 m/s wind velocity which is the normal wind velocity of greenhouses, the concentrations of CO<sub>2</sub> were approximately 420, 580 and 653 ppm ( $1 \times 10^{-9}$  kg/m<sup>3</sup>) for no windbreak, 0.15 and 0.30 m windbreak height, respectively. Considering that the maximum concentration of CO<sub>2</sub> for the strawberry plants was around 600-800 ppm, the 0.30 m windbreak height is highly recommended. This study revealed that the windbreak was very effective in preserving CO<sub>2</sub> gas within the plant canopy. More so, the study also proved that the CFD technique can be used to determine the concentration of CO<sub>2</sub> within the plant canopy for the plants consumption at any designed condition. For an in-depth application of this study, the plants as well as the different conditions for CO<sub>2</sub> utilization, etc. should be considered.

**Key words :** computational fluid dynamics (CFD), CO<sub>2</sub> utilization, elevated cultivation, greenhouse, Strawberry

## 서 언

시설재배는 온도뿐만 아니라 습도, 광, 가스농도 등 농작물의 생육에 필요한 조건들을 생산자가 임의로 조절할 수 있는 장점이 있다. 다양한 환경요인 중에서 이산화탄소는 무기염류 등과 같이 작물 생장에 필요한 필수 요소이며, 온도, 습도 등과 달리 광합성 과정에서

소모되는 성분이다. 이산화탄소는 일반적으로 대기 중에서 300~500 ppm 정도의 농도로 존재하고 있으나, 온실과 같은 밀폐된 공간에서 낮동안 광합성이 진행됨에 따라 농도가 급격히 감소하여 작물의 탄소동화작용이 저해된다. 따라서 시설재배의 경우 농도 저감에 대한 대책으로 별도의 시비를 통하여 공급하는 것이 보편화되어있다(Kim, 1997; Kim, 1995; Papadopoulos 등, 1997, Wang and Bunce, 2004). 동일 일사량 조건에서 이산화탄소 농도에 따른 작물 생산량은 작물별로 포화점이 존재하며, 일정 농도 이상에서는 오히려 생산

\*Corresponding author: alssa84@snu.ac.kr  
Received February 20, 2009; Revised March 2, 2009  
Accepted March 6, 2009

이 둔화되는 현상을 보인다. 또한 과도한 이산화탄소의 시비는 생산비 증가, 환경오염 등의 부작용을 가져오기 때문에 작물별 적정 수준의 시비량 조절이 필요하다 (Jeong 등, 1996).

근래에는 작물의 재배높이를 상승시키는 고설재배가 국내외적으로 널리 보급되어있다. 고설재배는 공중재배, 벤치재배, 배드재배 등으로 불리우는데, 작물을 토양에 직접 재배하는 방식이 아니라 벤치를 설치하여 토양과의 직접적인 접촉을 피하고 양액공급을 통한 농법을 의미한다. 고설재배는 토양염류에 의한 연작피해, 토양 전염병, 기생충 등을 예방할 수 있으며, 방제, 제초, 수확 등의 작업시 작물의 위치가 작업자의 눈높이에 가깝기 때문에 훨씬 수월하다. 또한, 배드 주위에 방풍막과 같은 보호시설 등의 설치가 쉽고 수식을 규격화 하기 때문에 수확물의 양과 질을 동시에 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

우리나라의 대표적 시설원예작물 중 하나인 딸기는 적정 온도에서만 재배가 가능한 계절작물로서 봄철의 선선한 환경에서만 재배되었지만 온실에서의 고설재배를 통한 생육환경의 제어로 거의 사계절 내내 생산되고 있다. 딸기는 품종에 따라 차이가 있지만 20 전후의 온도에서 최적 조건으로 재배가 가능하며, 광량과 온도 조절을 통한 최적의 광합성량 조건일 때, 1,000 ppm가량의 이산화탄소 농도에서 일부 당의 함량을 이산화탄소 미처리시의 3배까지 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다(Jeong 등, 1996; Sung and Chen, 1991; Lieten, 1997). 일반적인 온실 내의 조건에서 딸기의 경우 600~800 ppm의 이산화탄소 농도에서 최대의 생산량을 얻을 수 있고 그 이상의 이산화탄소 농도에서는 광합성량이 감소하는 현상을 보인다(Jeong 등, 1996, Wang and Bunce, 2004). 따라서 적정 이산화탄소 농도 유지가 생산성 향상에 중요하다고 할 수 있다. 딸기 재배 시설의 이산화탄소 농도를 증가시키기 위한 방법으로 다양한 시비법들이 이용되고 있으나 공급된 기체상태의 이산화탄소는 온실 내 환기 등으로 인한 유동에 의하여 작물 주변에 오래 머무르지 못하는 문제가 발생한다. 또한 대부분의 시비법은 온실 전체의 영역을 대상으로 하기 때문에 효율성이 떨어진다. 이를 보완하기 위하여 작물의 수직방향을 따라 설치한 파이프를 통해 이산화탄소를 공급하는 방법과 같이 국부적인 환경을 제어하는 기술이 사용되기도 한다. 이

경우 작물 재배 벤치 주위에 방풍시설을 설치하여 공급된 이산화탄소가 가급적 오랫동안 작물 주위에 머물도록 보완하는 것이 가능해진다. 고설재배용 벤치는 토양과 독립적으로 위치하고 있어 하중이 크지 않은 시설을 추가로 설치하는 것이 용이하다.

현재까지는 기술력의 부족으로 적정한 이산화탄소량의 공급과 유지가 이루어지고 있는지 알기 어려웠다. 그동안 온실 내의 이산화탄소량을 산정하는 방법으로는 공급량과 소모량, 온실 전체 영역에서의 환기량을 고려한 공식을 통하여 온실 전체 영역에서의 평균적인 농도를 계산하는 방식(김, 1997) 등이 있으나, 이 방법으로는 벤치에 설치된 파이프 등을 통해 작물 주변에서 이산화탄소를 공급할 경우에 작물 주변에 집중되는 이산화탄소의 농도를 알기가 힘들다. 또한 일반적으로 사용되는 센서만으로는 공기 중의 이산화탄소의 농도를 측정할 수 있는 방법이 마땅치 않다. 고체나 액체와 달리 공기 중의 기체는 눈으로 볼 수 없고, 거동이 불규칙하기 때문에 현장실험만을 통해서도 흐름상태의 파악이 어렵다. 또한 공기 중의 가스농도를 정밀하게 측정하기가 어렵고, 가능하더라도 한정된 위치의 점측정만이 가능하기 때문에 전 영역의 각 지점별 관찰이나 복잡한 구조의 국소 부위에서의 정밀한 관찰이 불가능하다. 최근에는 이를 극복하기 위하여 공기유동학적인 시뮬레이션 기술들이 다양하게 이루어지고 있으며, 관련 연구에 많은 기술적 도움을 주고 있다(Hong, 2008; Lee 등, 2002). CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)기술은 현장실험을 통해서도 측정하기 힘든 가스 농도나 각 지점에서의 풍속, 풍향 등을 정량적, 정성적으로 구현하는 것이 가능하다. 농업분야에서도 공기의 상태는 동, 식물의 생육에 직접적인 영향이 있기 때문에 온실이나 축사 등 시설 내의 환경 조절 연구에 다양하게 이용되고 있다(Hong, 2008). CFD는 실제로 시설을 갖추지 않고도 컴퓨터를 이용하여 가상으로 구현한 모델을 이용하여 분석하기 때문에 시간과 비용을 절약할 수 있으며, 다양한 실험을 수차례 수행할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 온실 내 딸기 고설재배 벤치에 공급된 이산화탄소가 작물 주변에 일정한 농도로 유지되도록 하기 위하여 벤치 양쪽에 방풍막을 설치하는 효과에 대하여 CFD 시뮬레이션을 적용하여 분석하였다.

이산화탄소 농도 보존이 잘 이루어지기 위해서는 방풍막 설치가 작물 근락(벤치 위 0.15 m 이내)에서의 풍속을 효과적으로 감소시켜야 한다. 방풍막 설치로 인하여 형성되는 공간은 환기 등에 의한 외부의 공기 유입이 작아지고, 그에 따라 희석되어 근락 밖으로 배출되는 이산화탄소량도 줄어들 것으로 예상하였다. 방풍막의 설치에 따른 작물 근락에서의 이산화탄소 보존 효과를 알아보기 위하여 온실과 벤치에 관한 CFD 시뮬레이션 모델을 설계하여 시설 내 평균 풍속과 이산화탄소 공급을 구현하였다. 그 후 풍속 변화와 방풍막의 높이 변화에 따른 작물 근락에서의 이산화탄소 농도를 비교하여 적당한 방풍막의 높이를 제시하는 기준을 마련하고자 하였다.

## 재료 및 방법

딸기 재배 벤치 위쪽에 공급된 이산화탄소의 농도를 분석하기 위하여 본 연구에서는 CFD 상용 소프트웨어 중에서 Fluent(ver 6.3, Fluent Inc, Lebanon, N.H, USA)를 이용하였다. 설계 재원은 일반적인 딸기 재배 온실의 규격 및 설계형태와 환경조건 등을 대상으로 하였다.

### 1. CFD 시뮬레이션

Fluent 프로그램은 비압축성영역에서부터 극초음속영역 전반에 걸친 모든 영역에 적용할 수 있는 범용 CFD 프로그램이다. 이는 향상된 수렴성을 갖는 멀티그리드 방법을 이용한 다양한 옵션들을 이용함으로써 광범위한 속도영역의 유동장 해석에 있어 최적의 효율성과 정확성을 제공한다. 이를 통해 난류유동, 비정상 상태 해석, 다양한 열전달 해석, 화학반응 유동, 다상 유동 등 매우 다양한 물리적 현상의 해석이 가능하다 (Fluent, 2007).

Fluent 프로그램은 계산 영역내의 모든 격자들에 대하여 Navier-Stokes 방정식을 계산한다. 유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다(공식 1~3).

$$\text{질량} : \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\text{운동량} : \frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{에너지} : & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3) \end{aligned}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\vec{v}$ 는 속력,  $p$ 는 정압,  $S_m$ 는 화학반응에 의한 질량 소스항,  $\gamma$ 는 응력 텐서,  $\vec{g}$ 는 중력,  $\vec{F}$ 는 외력,  $E$ 는 총 에너지,  $k_{\text{eff}}$ 는 유효 전도율,  $\vec{J}_j$ 는 물질 확산 플럭스,  $T$ 는 온도,  $\gamma_{\text{eff}}$ 는 유효 응력 텐서,  $S_h$ 는 화학반응이나 복사에 의한 엔탈피 증가이다.

Fluent 프로그램에서 제공하는 난류 모델 중 온실에서의 자연환기 유동 해석에 주로 사용되는 모델에는 standard k- $\epsilon$  모델, renormalization-group(RNG) k- $\epsilon$  모델, realizable k- $\epsilon$  모델, Reynolds stress model (RSM) 등이 있다(Fluent, 2007). 이 모델들의 기본 형태는 비슷하지만 점성으로 인한 난류를 계산하는 방법,  $k$ 와  $\epsilon$ 의 난류확산을 결정하는 프랜들 수, 난류 확산방정식에서의 생성 소멸 조건에의 차이가 있다. 본 연구에서는 작은 값의 레이놀드 수에 따른 점성효과 계산시 수렴이 잘 되어 정상상태의 파악이 쉬운 RNG k- $\epsilon$  모델을 선택하여 계산하였다(Lee 등, 2005).

### 2. 설계 제원

Fig. 1은 온실 내에 설치된 딸기 재배용 벤치의 사진이며, Fig. 2는 일반적인 방풍막의 설계 재원을 나타낸다. 일반적으로 벤치의 높이는 바닥에서부터 0.87 m 이고, 폭은 0.27 m이며, 길이 방향은 10.2 m이다. 벤치 중앙에 이산화탄소를 작물 근처에 직접 공급하기 위한 원형 단면의 파이프가 지나도록 설계했으며 파이프 위쪽으로 약 0.2 m 간격으로 노즐을 뚫어 이산화탄소가 분사되도록 하였다. 이번 연구에서는 풍속에 의하여 손실되는 이산화탄소량을 줄여 딸기에 공급되는 가스 농도를 증가시키기 위하여 벤치 위 양쪽에 폴리 에틸렌 재질의 방풍막을 설치하는 설계를 추가하였다.



Fig. 1. The bench for growing strawberry.

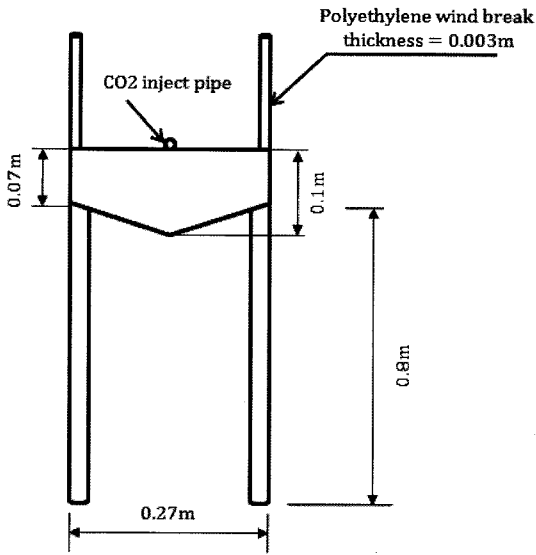


Fig. 2. Schematic of the bench with CO<sub>2</sub> injection pipe.

### 3. 실험 방법

CFD 시뮬레이션을 위한 구조를 구현하고 계산을 수행하기 위해서는 영역을 설정하고 해당 구조물을 모델 설계하는 작업과 계산 수행을 위한 각종 초기 조건들을 설정하는 단계가 필요하며, 설계된 영역 내에서의 수치 해석을 통하여 결과를 도출한다. 본 연구에서는 모델 설계 작업과 격자망 구성 작업에는 Gambit(ver. 2.3 Fluent Inc, Lebanon, N.H, USA)를 사용하였고, 각종 초기조건 설정과 계산수행은 Fluent 메인모듈을 사용하였다.

시뮬레이션이 실제 현상을 잘 구현하기 위해서는 구조가 실제의 형상을 잘 묘사할수록 정확도 향상에 유리하다. 하지만 구조가 복잡할수록 모델 설계 작업을 어렵게 하고, 계산 수행에 많은 시간을 소요한다. 본 시설은 한쪽 방향으로 긴 형태를 갖기 때문에 길이방향의 거동이 균일하다고 가정하여 모델 설계를 2차원 형태의 단순한 구조로 구현하였다. 본 연구는 방풍막의 높이에 따른 이산화탄소 보존 효율 파악에 관한 연구이므로 영역 내에 시설을 하나만 배치하여 다른 벤치나 온실 벽체 등의 영향을 받지 않도록 하였다. 작물의 불규칙한 형상을 모델링하기 어렵기 때문에 이번 연구에서는 벤치 위에 작물이 없는 것으로 가정하고 분석하였다. 벤치의 다리는 가시적으로는 존재하지만 시뮬레이션 연산에서는 존재하지 않는 것으로 가정하

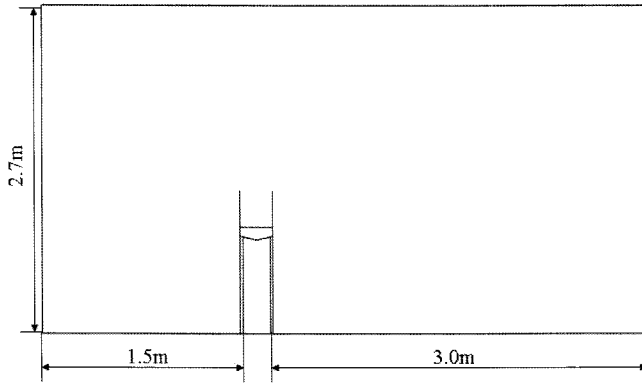
였다. 또한 실제로는 벤치위에 위치하는 이산화탄소 공급 파이프의 단면이 원형이지만, 곡면의 경우 사각형이나 삼각형 격자망의 품질이 떨어져 시뮬레이션 결과의 신뢰성이 떨어질 수 있기에 단면을 정사각형으로 가정하였다.

영역의 높이는 작업공간을 고려한 일반적인 온실의 높이인 2.7 m로 설계하였고, 풍상측과 풍하측의 여유 길이는 다리를 제외한 벤치높이와 방풍막높이의 약 4배, 8배인 1.5 m, 3.0 m로 설계하였는데(Fig. 3(a)), 이는 풍상측에서 공급되는 공기가 벤치에 영향이 없이 발생하여 다시 안정한 상태로 풍하측에 도달할 수 있도록 하여 유입구와 유출구 부근에서의 영역 내부로의 영향을 줄이고자 한 것이다. 설계상 지름이 1 mm인 이산화탄소 공급 노즐은 0.2 m 간격으로 간헐적으로 존재하기 때문에 2차원 모델 설계시 신중히 고려하여야 할 요인이다. 시뮬레이션 결과에서 농도의 분포가 뚜렷한 차이를 나타낼 수 있도록 노즐 지름과 공급 유속을 각각 5 mm와 0.3 m/s로 균일하게 공급되도록 임의로 가정하여 설계하였다. 노즐 지름을 5 mm 이하로 설정하면 노즐 부근의 격자망 설계시 그보다 더욱 작은 값으로의 구성을 필요로 하고, 더 많은 수의 격자를 필요로 하게되어 계산 시간이 길어지게 된다.

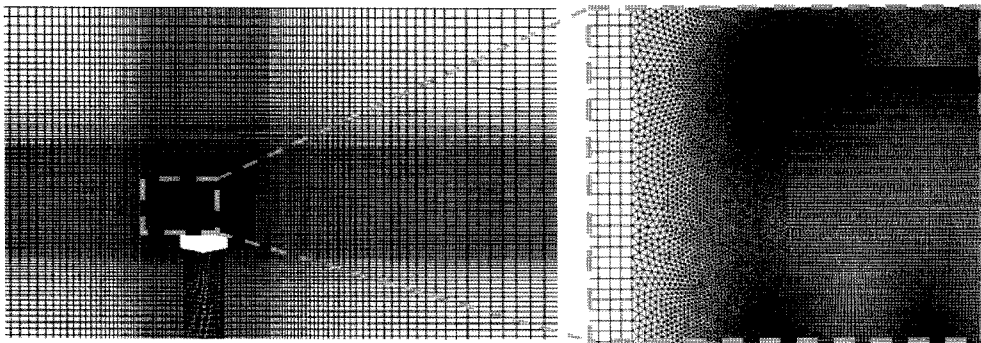
Fluent 프로그램에서의 계산 수행을 위해서 격자망을 설계하여야 한다. 본 구조에서의 격자망 구성시 어려웠던 점은 전체 영역 넓이에 비하여 작은 길이를 갖는 이산화탄소 공급 노즐이 있다는 것이었다. 유속이 유입되는 부분이 특히 유동해석상 중요한 거동을 나타내기 때문에 조밀하고 좋은 품질의 격자망 구성이 필요하였지만, 조밀한 격자망을 사용하여 전 영역의 격자를 구성하였다면 너무 많은 격자의 수로 인하여 계산 시간이 길어지게 되었을 것이다. 따라서 벤치 상단의 노즐을 포함한 처마 내부의 공간은 약 1 mm의 작은 크기의 사각형 격자를 사용하여 설계하였고, 바깥으로 갈수록 점차 조밀도가 낮아져 최종적으로 영역의 테두리 부분에서는 50 mm 가량의 격자크기가 되도록 모델을 설계하였다. 조밀한 격자와 성근 격자 사이에는 삼각형 격자를 이용하여 일종의 완충지역을 두어 격자망의 연결을 자연스럽게 하였다(Fig. 3(b)). Fig. 3은 Gambit에서 설계한 온실 내부구조와 격자망이다.

계산 수행에 사용된 난류 모델은 RNG k-ε 모델로 Lee 등(2005)의 연구에서 RNG k-ε 모델 사용 시 공

딸기 고설재배시설에서의 이산화탄소 농도 유지를 위한 방풍막 설치 효과



(a) Geometry of strawberry bench designed in Gambit.



(b) Mesh design using Gambit software.

Fig. 3. Geometry and mesh structure of 2-Dimensional CFD model for strawberry bench using Gambit.

Table 1. Design factor used in the simulation.

Factors	Values
Number of mesh	87,719
Type of mesh	Quad, triangular
Turbulence model	RNG k-ε
Injecting velocity of nozzle	0.3 m/s
Air velocity from windward	0.5, 1.0, 1.5 m/s
Air temperature	23°C
Concentration of CO <sub>2</sub>	Inlet : 400 ppm Injection pipe : 1000 ppm

기류속의 평균오차는 -7.6%로 높은 정확도를 보여, 온실 내 환기해석에 이 모델의 사용을 권장하였다. Table 1에 시뮬레이션에 사용된 환경조건 및 설계조건들을 나타내었다.

이산화탄소의 공급 풍속은 작물에 스트레스를 주지 않을 적절한 수준인 0.3 m/s로 제어하였다. 실내의 온

도는 일반적으로 알려진 딸기 적정 생육 온도인 23로 설정하였고, 일반적인 온실의 환경조건에 따라 풍상측에서 유입되는 풍속의 평균 이산화탄소 농도와 노즐에서 공급되는 농도는 각각 400 ppm, 1,000 ppm으로 설정하였다.

방풍막 설치 높이에 따른 이산화탄소 보존의 효과를 알아보기 위하여 시설내의 평균풍속과 방풍막 높이를 변화요인으로 주었다. 온실 내부의 환기 등으로 인한 평균 실내 풍속을 1.0 m/s로 가정하였으나, 환기구와 가까운 위치의 풍속은 높게 나타나고 온실 중심부의 풍속은 낮게 나타나는 등 위치적 편차를 고려하여 0.5 m/s 1.0 m/s 1.5 m/s의 풍속조건에서의 구조를 분석하였다. 설계한 방풍막의 높이는 방풍막을 설치하지 않은 경우(0 m)와, 0.15 m, 0.30 m 높이의 방풍막을 설치한 경우로 각각 나누어 총 9가지 환경조건에 대하여 정상상태로 계산을 수행하였다.

방풍막 설치 높이에 따른 이산화탄소의 보존효과를

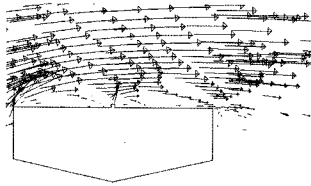
파악하기 위하여, 각각의 구조별로 시설 내부의 공기유동을 살펴보고 방풍막 설치에 따른 풍속 감소 효과를 알아보았다. 그 후 압력분포 분석을 통하여 일부 위치에서의 와류 생성 등 불균일한 공기유동에 대한 합리성을 판단한 후에 구현된 벤치 위에서의 이산화탄소 농도를 분석하였다. 그 후 이러한 결과를 바탕으로 딸기 생장에 필요한 이산화탄소의 적정 농도를 600~800

ppm으로 보고, 설계한 온실에서의 적정한 방풍막의 설치 높이를 제안하고자 하였다.

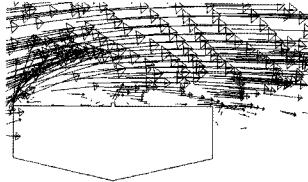
## 결과 및 고찰

### 1. 공기 유동장

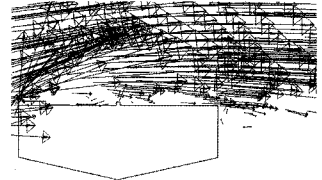
Fig. 4는 벤치 위의 풍속 분포를 나타낸다. 풍속의



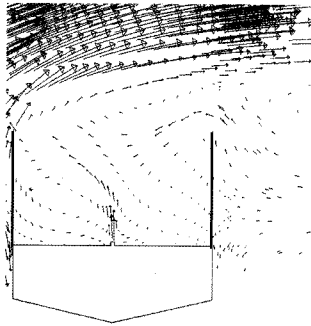
Wind Velocity = 0.5 m/s  
No wind break



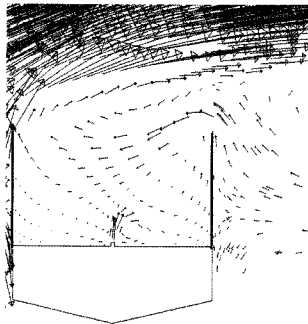
Wind Velocity = 1.0 m/s  
No wind break



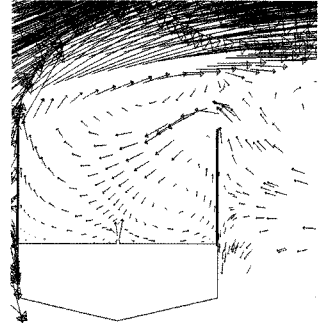
Wind Velocity = 1.5 m/s  
No wind break



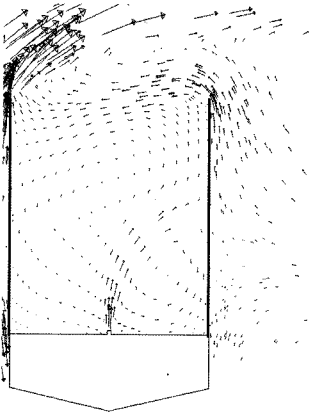
Wind Velocity = 0.5 m/s  
Height of wind break = 0.15 m



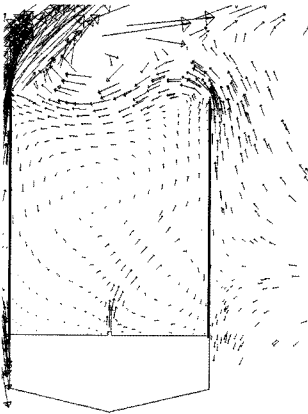
Wind Velocity = 1.0 m/s  
Height of wind break = 0.15 m



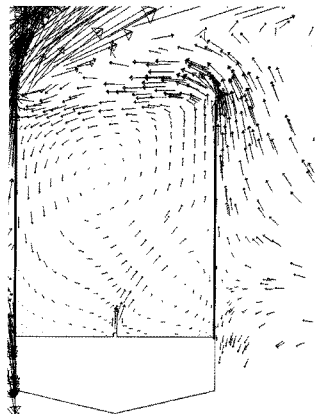
Wind Velocity = 1.5 m/s  
Height of wind break = 0.15 m



Wind Velocity = 0.5 m/s  
Height of wind break = 0.30 m



Wind Velocity = 1.0 m/s  
Height of wind break = 0.30 m



Wind Velocity = 1.5 m/s  
Height of wind break = 0.30 m

**Fig. 4.** Velocity vector near the bench according to the inlet air velocity and the height of the windbreak. (The range of the air velocity was from 0 m/s to 2 m/s)

상대적인 비교를 위하여 표시되는 벡터 크기의 범위를 0~2 m/s로 일정하게 설정하였고, 범위를 넘는 풍속은 2 m/s로 표시하였다. 방풍막 설치로 인한 풍속 변화를 벡터의 길이를 통해 살펴보면, 방풍막의 설치가 작물이 위치하는 공간 주변의 풍속 감소에 일반적으로 큰 효과가 있는 것으로 나타났음을 알 수 있었다.

Fig. 4에서 0.15 m 높이의 방풍막을 설치한 구조들을 비교하면 0.5 m/s 풍속조건에서는 노즐에서 분사되는 공기가 원편으로 향하는데 비하여 1.0, 1.5 m/s 풍속조건에서는 노즐에서 분사되는 공기가 오른쪽으로 향하였다. 그 원인은 풍하측에서의 유동이 방풍막 위로 유입되어 벤치 위로 향하는 유속 차이에 있다. 시뮬레이션에서 계산된 벤치 위쪽으로 유입되는 공기의 평균 풍속은 0.5 m/s 풍속조건의 경우 0.09 m/s이고 1.0 m/s 풍속조건에서는 0.18 m/s, 1.5 m/s 풍속조건에서는 0.30 m/s로 나타났다. 유입된 공기가 노즐에서 분사되는 속도인 0.30 m/s와 충돌할 때 우위에 있는 풍속이 어느 풍향이나에 따라 다른 방향의 진행을 보여 주었다. 0.5 m/s 풍속조건의 경우 유입공기가 노즐에서 분사되는 속도에 비하여 작아 오른쪽으로 떨어졌고, 1.0, 1.5 m/s 풍속조건의 경우는 노즐 분사 공기를 이겨낼 정도의 풍속으로 유입되어 분사구 원편을 향하여 유동을 하는 모습을 보였다. 따라서 풍속 변화에 따라 이산화탄소의 분사 방향이 다르게 나타남을 알 수가 있었다.

0.30 m 높이의 방풍막을 설치한 구조들의 경우에서도 풍하측의 방풍막 위로 유입되는 유동이 존재하나, 유입되는 공기가 직접 벤치에 도달하지 않고 와류를 일으켜 풍속이 감소된 형태로 벤치 주변 공기와 노즐에서 분사되는 이산화탄소의 유동에 영향을 주었다. 따

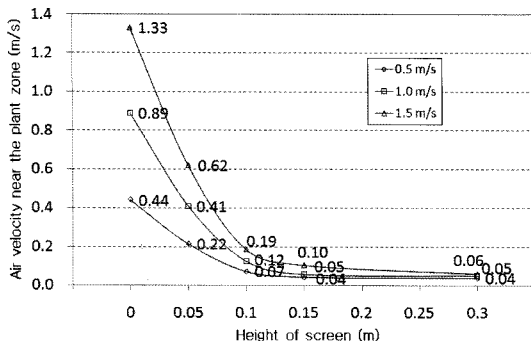


Fig. 5. Average air velocity in the plant canopy. (Inner section from bench bottom to 0.15 m, unit : m/s)

Table 2. Comparison of air velocity as affected by wind-break height. (unit : %)

Air Velocity (m/s)	Height of windbreak (m)				
	0	0.05	0.10	0.15	0.30
0.5	100	50	20.5	9.1	9.1
1.0	100	46.1	13.5	5.6	5.6
1.5	100	46.6	14.3	7.5	4.5
Average	100	47.6	16.1	7.4	6.4

라서 0.30 m 높이의 방풍막 설치가 0.15 m 높이의 방풍막 설치에 비해 벤치 위쪽의 이산화탄소 보존효과가 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 5에 각 구조에 따른 벤치 위 0~0.15 m 내 구간의 평균풍속을 나타내었다. 방풍막 높이에 따른 풍속 감소의 경향을 좀 더 정확하게 파악하기 위하여, 0.05 m와 0.10 m 높이의 방풍막을 설치한 구조에 대하여 추가적으로 분석하였다. 같은 풍속의 구조에서 방풍막 높이가 증가함에 따라 벤치 위의 풍속이 기존 풍속과 비교하여 최대 94%의 풍속이 감소됨을 확인할 수가 있었다.

풍속의 변화를 정량적으로 비교하기 위하여 각각의 구조마다 풍속별 방풍막 미설치 경우에 대한 백분율로 유속감소효과를 Table 2에 나타내었다. 표의 가장 아래줄은 하나의 방풍막 높이의 유속감소효과의 평균값이다. 평균적으로 방풍막 설치높이 0.05 m에서는 방풍막 미설치에 비하여 약 52%의 풍속 감소 효과를 보였고, 설치높이 0.10 m에서는 약 84%의 풍속 감소를 보였다. 0.15 m에서는 기존에 비하여 약 93%의 풍속 감소 효과를 보였고, 설치높이 0.30 m에서는 약 94%의 효과를 보여 방풍막 설치가 벤치 위에서 풍속 감소에 상당히 효과적임을 보여주었다.

모든 구조에서 방풍막 미설치 경우에 비하여 높이 0.15 m의 방풍막을 설치한 경우 풍속이 평균 93% 정도 감소하여 설치의 효과가 뛰어났지만 0.30 m의 방풍막을 설치한 경우에는 0.15 m높이로 설치한 경우에 비하여 평균적으로 약 1%가 추가로 감소하고 있어 설치하는 비용에 대한 효과가 점차 감소한다. 이는 방풍막 설치 높이에 따른 효과가 선형적으로 증가하지 않기 때문에 설치비용 등을 고려한 적정 수준의 설치 높이를 선택하여야 한다는 것을 의미한다. 하지만 풍속이 높은 구조일수록 0.15 m 방풍막 설치효과에 대한

0.30 m 방풍막의 효과는 높아지고 있기 때문에 각각의 온실별로 평균 풍속을 고려한 후에 방풍막의 높이를 선정하여야 할 것이다. 본 연구에서 가정된 온실 내의 평균 풍속이 1.0 m/s이기 때문에 0.15 m 방풍막 설치와 0.30 m 방풍막 설치의 경우 각각 94%와 95%의 효과를 예상할 수 있어서 0.30 m 방풍막 설치가 0.15 m 방풍막 설치에 비하여 벤치 주변의 유속 감소에 큰 효과를 보여주지 못하고 있다.

## 2. 압력 분포

Fig. 4의 유동장 분포에서의 풍하측에서 발생하는 유입공기의 원인을 살피기 위하여 벤치 주변의 공기압력 분포를 분석하였다. 각각의 구조에서의 벤치 주변 공기압력 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 상대적인 비교를 위하여 표시되는 압력 분포의 범위를 최소 -2.0 Pa에서 최대 2.0 Pa로 지정하였다. 시설 내 평균풍속이 증가할수록, 방풍막 설치 높이가 증가할수록 풍상측

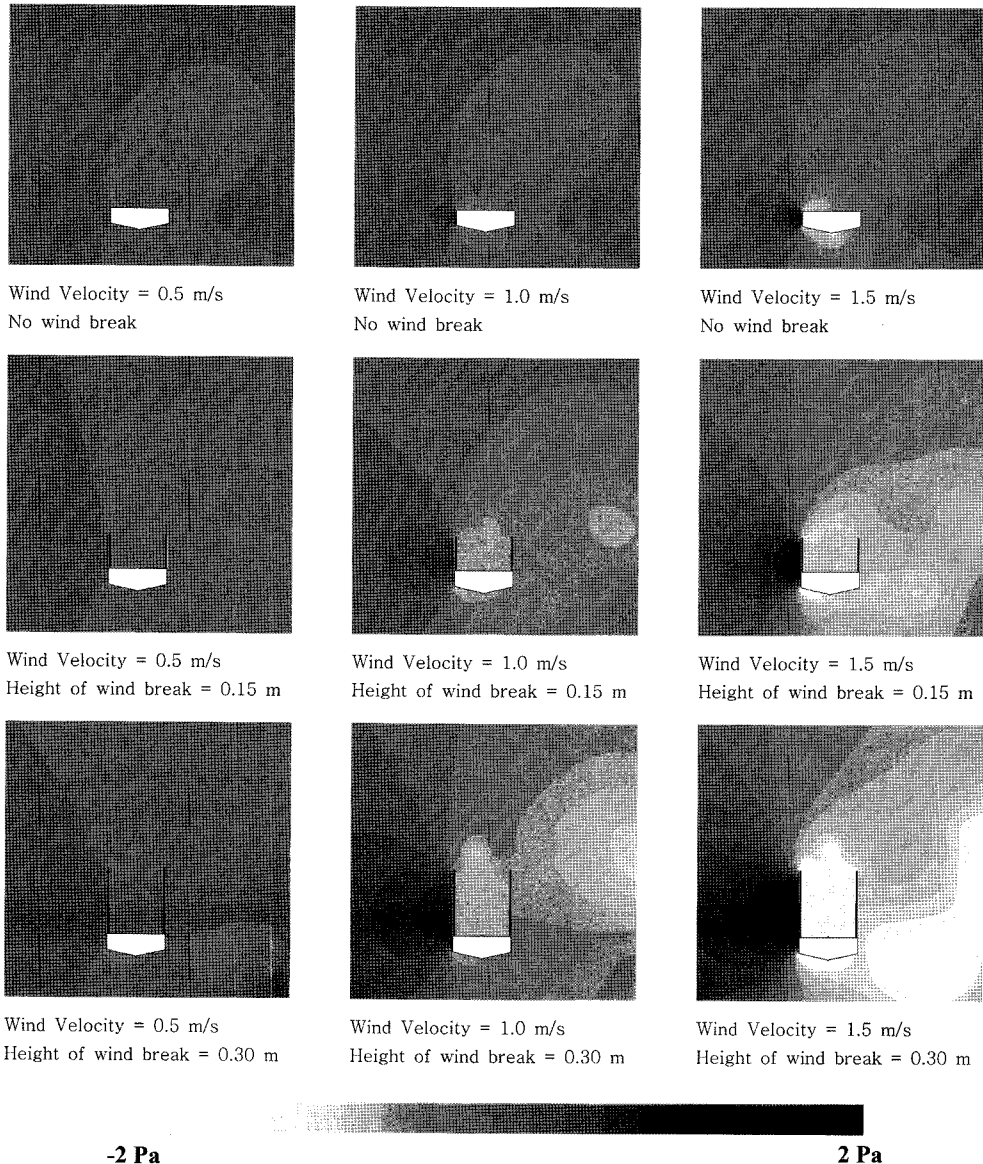


Fig. 6. Air pressure distribution according to windbreak height and inlet air velocity. (The air pressure in the computational domain ranges from -2 Pa to 2 Pa)



딸기 고설재배시설에서의 이산화탄소 농도 유지를 위한 방풍막 설치 효과

부근의 방풍막과 벤치의 벽면에 작용하는 압력이 커지는 것을 확인하였다. 이와 동시에 벤치 위쪽의 가상의 균락 위치에 작용하는 압력은 상대적으로 감소하여 풍하측에서의 공기 유입이 발생하는 것으로 판단하였다. 그에 따라 각각의 구조에 따라 다른 형태의 유동이 발생하게 된다. 0.15 m 높이의 방풍막 설치와 0.5 m/s의 풍속조건이 주어진 구조는 같은 높이의 방풍막을 설치하고 다른 풍속조건이 주어진 구조에 비하여 방풍막 안쪽 영역과 외부의 압력차가 크지 않다. 따라

서 풍하측에서 유입되는 공기의 유속이 다른 구조에 비하여 작고, 노즐에서 분사되는 공기의 속도를 이기지 못하여 오른편으로 흘러 내리는 양상으로 진행된다. 앞에서 제시한 공기 유동장에 나타난 현상들이 오류가 없이 발생한 것임을 확인하였고, 수행된 시뮬레이션의 결과가 합리적이라 판단하였다.

3. 이산화탄소 농도 분포

시뮬레이션의 결과를 이산화탄소의 농도분포로 나타

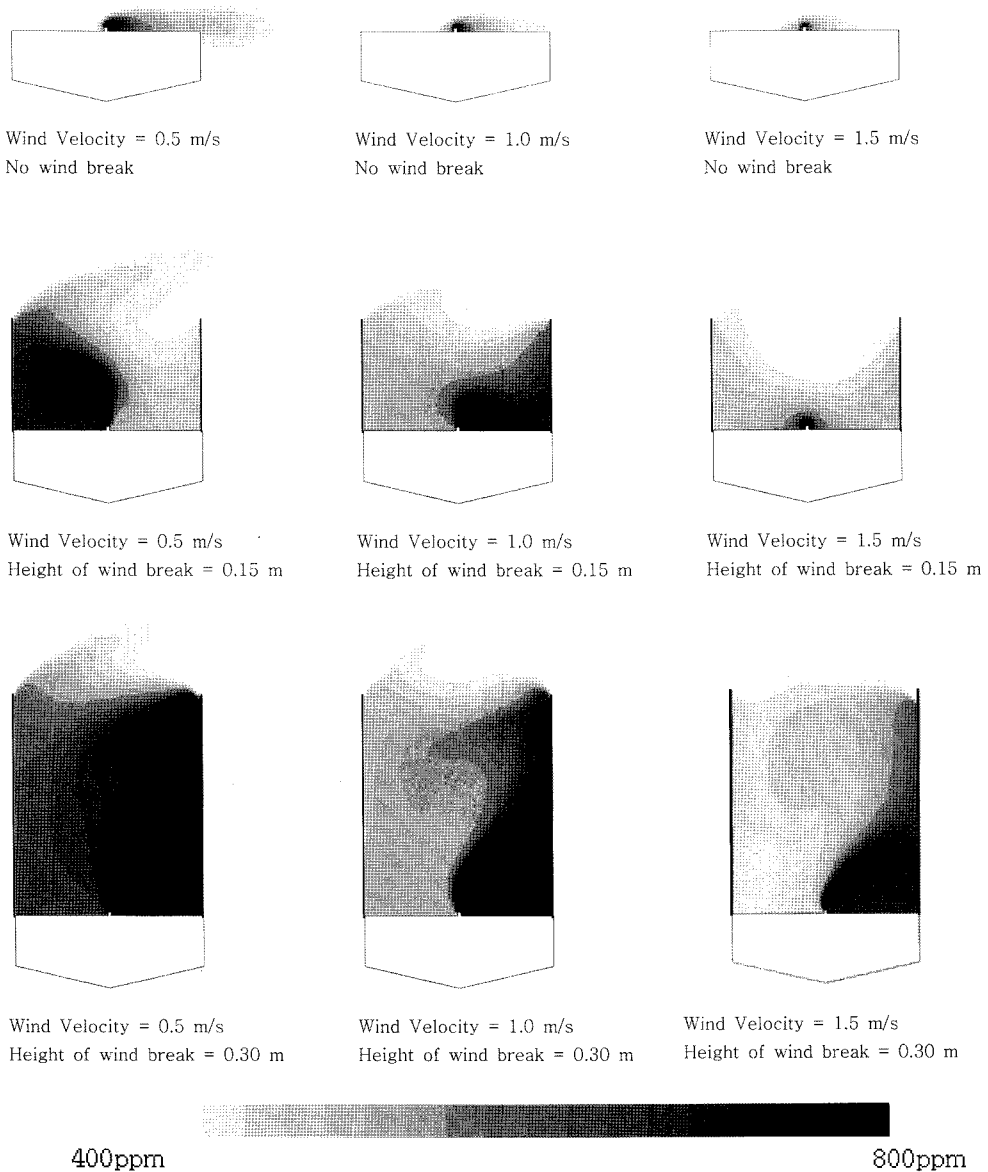


Fig. 7. Contour plot of CO<sub>2</sub> concentration.

내면 Fig. 7과 같다. 이산화탄소 농도의 분명한 변화를 살펴보기 위하여 농도분포의 표시 범위를 400 ppm에서 800 ppm으로 조정하였고, 그 범위 이상의 이산화탄소농도는 800 ppm과 같은 색으로 나타내었다.

각 구조의 초기조건(방풍막 높이, 시설 내 평균풍속) 변화에 따른 이산화탄소 농도의 보존은 방풍막 높이가 높아짐에 따라 증가하고, 풍속이 빨라짐에 따라 감소하였다. 같은 풍속의 구조끼리 비교하면 방풍막 높이가 증가함에 따라 벤치 위의 이산화탄소 농도가 점점 짙게 나타남을 확인할 수가 있었다. 같은 방풍막 높이에서 풍속이 증가함에 따라 벤치 위의 이산화탄소 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 풍속의 증가가 이산화탄소의 확산을 증가시켜 벤치 위에서의 농도를 더욱 급격히 감소시키는 것으로 볼 수 있었다. 방풍막 설치로 인한 이산화탄소 농도보존의 효과를 정량적으로 비교하기 위하여 작물이 위치할 것으로 가정한 벤치 위 0.15 m까지 영역의 이산화탄소 평균 농도를 Fig. 8에 나타내었다. 온실 내 이산화탄소 농도를 400 ppm으로 설정하였기 때문에 그래프 세로축의 이산화탄소 농도의 최소값을 400 ppm으로 표시하였다.

평균적으로 0.15 m 높이의 방풍막 설치시에는 방풍막 미설치시에 비하여 약 10배 이산화탄소 농도의 증가효과가 있었고, 설치높이 0.30 m에서는 미설치시에 비하여 약 18배의 증가효과가 있었다. 같은 방풍막 높이에서 1.0 m/s와 1.5 m/s의 풍속조건일 때의 차이가 앞에서 살펴본 공기유동장의 변화에서는 2% 정도로 크게 두드러지지 않았던 것에 비하여, 보존된 이산화탄소 농도를 비교하였을 때에는 보존효과 상승이 80% 정도로 보다 확연하게 나타났다. 딸기의 경우 일반적으

로 같은 일사량 조건에서 이산화탄소 농도가 600-800 ppm일 때 광합성이 최대로 일어난다고 알려져 있기 때문에 본 연구에서 가정한 평균 실내 풍속이 1.0 m/s인 온실 내에서는 이산화탄소 농도를 650 ppm 가량 보존할 수 있는 0.30 m의 방풍막 설치가 적당한 것으로 나타났다. 본 시뮬레이션 실험에서는 모델링상의 편의를 위하여 균락내 작물이 존재하지 않는 것으로 가정하였으나, 실제 현상에서는 균락 내에 작물이 존재한다. 그에 따라 균락의 공기 유동량이 저하 할 가능성이 있으며, 동시에 정제하는 이산화탄소의 농도가 높아질 것으로 예상된다. 따라서, 방풍막을 설치하지 않은 구조에서도 위의 결과보다 높은 이산화탄소 보존이 일어났을 것이라고 예상되기 때문에 10배, 18배 이상의 증가효과를 기대할 수는 없으나, 방풍막 설치가 이산화탄소 농도보존에 상당히 효과적임을 알 수 있다.

본 연구는 딸기 고설재배시 공급하는 이산화탄소가 방풍막에 의해 보존되는 효과를 CFD 시뮬레이션을 이용하여 분석하는 것이 가능함을 보였다. 이를 통해 현장실험에서 측정하기 곤란한 방풍막 설치에 따른 공기의 유동 변화 및 이산화탄소의 보존 농도를 다양한 구조에 대하여 적은 노력과 비용만으로 정량적으로 살펴볼 수 있었다. 본 시뮬레이션에서는 모델링과 계산상의 이점을 위하여 모델을 2차원으로 설계하였고, 환기 조건, 실내풍속 조건, 작물 배치 상태, 방풍시설의 다양한 조건 및 이산화탄소 공급 조건 등을 간편하게 가정하였으므로 추후 연구에서는 이와 같은 조건들을 정밀하게 고려한 시뮬레이션을 수행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

## 적 요

딸기 재배용 온실 내 재배 벤치에서 생산량을 높이기 위하여 벤치 주위에서 이산화탄소를 공급하는 경우 환기 등에 의한 풍속으로 인하여 작물 주변의 적정 가스 농도가 유지되지 못하는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 이산화탄소를 보존시키고자 벤치 주변에 방풍막을 설치하는 방안에 대하여 분석하였다. 온실 내 벤치와 방풍막을 2차원 CFD 시뮬레이션으로 모델링하고 온실 내 공기의 풍속과 이산화탄소의 공급을 구현하여 보존되는 이산화탄소의 농도 분포를 살펴보았다. 또한 이를 통하여 설계한 온실의 환경조건에서의 적정

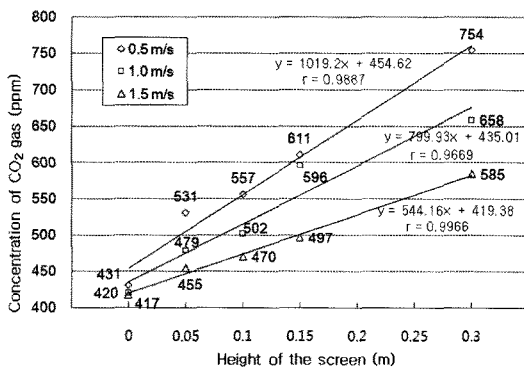


Fig. 8. Concentration of CO<sub>2</sub> gas at inner section from bench bottom to 0.15 m. (unit : ppm)

한 방풍막 설치 높이를 제안하고자 하였다. 시뮬레이션에서 구현한 온실 내 풍속조건은 0.5, 1.0, 1.5 m/s이고, 방풍막의 높이는 미설치, 0.15, 0.30 m이고, 각 조건에서의 이산화탄소 농도를 측정하였다. 설계상의 편의와 시뮬레이션의 간소화를 위하여 벤치위의 작물은 없는 것으로 가정하였다. 일반적인 온실 내의 풍속조건은 1.0 m/s로, 시뮬레이션 결과 이 때 벤치 위의서의 평균 이산화탄소 농도는 방풍막 미설치 시 420 ppm, 방풍막 설치 높이 0.15 m일 때 580 ppm, 0.30 m일 때 653 ppm으로 나타났다. 딸기의 최대 생산량을 위한 적정 생육 이산화탄소 농도가 600~800 ppm 정도인 것을 고려하여, 이와 같은 환경조건에서의 방풍막의 설치 높이는 0.30 m가 적당할 것으로 판단하였으나 이산화탄소 공급조건, 작물의 배치 등의 조건 변화에 따른 상황에서의 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다. 이처럼 방풍막의 설치가 온실 내에 시비한 이산화탄소를 작물 주변에 머무르게 하는 효과가 상당함을 알 수 있었으며, 설계한 환경조건에서 작물별로 적절한 수준의 이산화탄소량이 공급되고 있는지를 판단하기 위하여 CFD 기술이 이용될 수가 있음을 보였다.

**주제어** : 고설재배, 공중재배, 딸기, 온실, 이산화탄소 시비, 전산유체역학

## 인 용 문 헌

1. Fluent. 2007. Fluent user guide. Fluent Inc., ver 6.3.26. Lebanon, N.H., USA.
2. 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. *ASABE-51(4)*: 1417-1432.
3. Jeong, C.S., Y.R. Yeoung, I.S. Kim, S.S. Kim, and D.H. Cho. 1996. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the net photosynthesis, yield, content of sugar and organic acid in strawberry fruits. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 37(6): 736-740 (in Korean).
4. Kim, M. 1997. Design standards for greenhouse environment (II), Rural Research Institute, Korea Rural Corporation (in Korean).
5. Kim, Y.-S. 1995. Study on the CO<sub>2</sub> fertilization and its media in greenhouse. Sangmyung Univ. Industrial Science Research Institute. Vol.3:37-45 (in Korean).
6. Lee, I., S. Sase, L. Okushima, A. Ikeguchi, and W. Park. 2002. The accuracy of computational simulation for naturally ventilated multi-span greenhouse. *ASAE Annual International Meeting*. Paper number : 024012.
7. Lee, I., S. Lee, G. Kim, J. Sung, S. Sung, and Y. Yoon. 2005. PIV Verification of greenhouse ventilation air flows to evaluate CFD accuracy. *ASAE* 48(5):2277-2288.
8. Lieten, F. 1997. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment on greenhouse grown strawberry, *Acta horticulturae* no.439 2:583-588 ISHS.
9. Papadopoulos, A.P., S. Pararajasingham, J.L. Shipp, W.R. Jarvis, and T.J. Jewett. 1997. Integrated management of greenhouse vegetable crops. *Horticultural Reviews*, Volume 21. John Wiley & Sons, Inc.
10. Sung, F.J.M. and J.J. Chen. 1991. Gas exchange rate and yield response of strawberry to carbon dioxide enrichment. *Scientia Horticulturae*, 48:241-251.
11. Wang, S.Y. and J.A. Bunce. 2004. Elevated carbon dioxide affects fruit flavor in field-grown strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 84(12):1464-1468.