

CFD 시뮬레이션을 이용한 연동형 온실 내 자연환기의 효율성 분석

이 인 북* · Short, Ted H.

Analysis of the efficiency of natural ventilation in a multi-span greenhouse using CFD simulation

Lee, In-Bok* · Short, Ted H.

Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering
The Ohio State University/Ohio Agricultural Research and Development Center

Abstract

Natural ventilation in a four and one-half span, double polyethylene commercial greenhouse was investigated with actual data collected at Quailcrest Farm near Wooster, Ohio. Moreover, a computational fluid dynamics (CFD) numerical technique, FLUENT V4.3, was used to predict natural ventilation rates, thermal conditions, and airflow distributions in the greenhouse. The collected climate data showed that the multi-span greenhouse was well ventilated by the natural ventilation system during the typical summer weather conditions. The maximum recorded air temperature difference between inside and outside the greenhouse was 3.5°C during the hottest (34.7°C) recorded sunny day; the air temperatures in the greenhouse were very uniform with the maximum temperature difference between six widely dispersed locations being only 1.7°C. The CFD models predicted that air exchange rates were as high as 0.9 volume per minute (A.C.·min⁻¹) with 2.5 m·s⁻¹ winds from the west as designed.

주제어 : 컴퓨터 유체 역학 시뮬레이션, 온실 환기, 연동형 온실, 자연환기

Key words : computational fluid dynamics (CFD) simulation, greenhouse ventilation, multi-span greenhouse, natural ventilation

* Corresponding author

서 론

온실내의 공기를 환기시키는 대표적인 방법으로는 자연환기와 강제환기가 있다. 강제환기에 비교해서, 자연환기는 적은 전기에너지와 설비 유지비를 요구하고 또한 훨씬 적은 소음으로 온실 내에서의 더 좋은 작업 환경을 제공함에도 불구하고, 많은 사용자들은 풍속이 매우 작고 고온인 경우들을 고려하여 자연환기에 대해 많은 부정적인 견해들을 가지고 있다. 또한 대부분의 자연환기식 온실을 설계할 때, 현재까지는 극히 미비한 엔지니어링의 지식과 경험에 의존하여 오는 경향이 많이 있다. 실제로 재배자들을 위해 많은 종류의 자연환기식 온실들이 추천되어지고 있으나, 정작 실제 자연환기량과 구조적인 특성들과의 관계들을 실제적인 수치들을 이용하여 심도 있게 비교, 제시한 예는 많지 않다.

1990년대 중반에 들어와서 농업구조물 내의 공기의 흐름과, 또한 공기의 질과 열적인 요소들을 분석하기 위해서 Computational fluid dynamics (CFD) numerical techniques를 이용하는 데 많은 관심들이 모아지기 시작하였다. 온실을 설계함에 있어서 현재까지 행하여져 온 "추측 이후 설계"방식을 탈피하여 CFD 시뮬레이션을 공기역학적으로 이용하여 자연환기식과 강제환기식 뿐만 아니라 다양한 온실의 구조적인 특성들과 환경 조건들에 대한 연구가 심도 있게 이루어지고 있다. 현재 CFD 모델의 타당성이 다각적으로 연구되고 있으며 많은 긍정적인 결과들이 발견되어지고 있다 (Lee, 1998; Al-helal, 1998).

온실의 자연환기량을 구하기 위하여 사용되어져 온 Tracer gas method (Bot, 1983; De Jong, 1990), Numerical wind-buoyancy effect model (Bruce, 1977; Timmon, 1990), Energy balance numerical model (Fernandez와 Bailey, 1992; Boulard와

Baille, 1995), Wind tunnel method (Kozai 등, 1980; Sase 등, 1984) 등의 전통적인 방법들에 비하여, CFD 시뮬레이션 방법은 실제적인 환경조건들이나 온실구조물의 특성 등을 다양하고 쉽게 시뮬레이션을 할 수 있으며, 매우 안정되고 공평한 환경조건들을 제공할 수 있다. 또한 자연환기에 많은 영향을 미치는 공기 흐름의 난류 현상을 심도 있게 분석할 수 있을 뿐만 아니라, 온실의 피복재에 따른 열전도, 태양에너지와 바람의 영향에 따른 온실내 부력의 효과 등도 다양하게 연구가 가능하다. Energy balance model과 Wind buoyancy effect model은 보통 온실 내 자연환기의 평균값만을 구할 수 있는 반면에 CFD 모델은 원하는 어느 곳이든지 Psychrometric condition과 공기의 흐름을 분석할 수 있다. 따라서, 실험포장에서 직접 실험을 하는 대신에 CFD 모델을 이용하면 비용, 시간, 그리고 노동력을 절감할 수 있다.

현재까지의 CFD 모델을 이용한 실험들은 단순히 건조한 공기만을 가지고 자연환기의 부동력원인 부력의 효과를 배제하고, 또한 식물이나 동물이 없다는 전제하에 농업 구조물에서의 환경을 분석하는 초보적인 단계이었다. 공기중의 수증기는 건조한 공기보다 밀도가 낮으므로 온실 안과 밖의 온도차이와 더불어 부력의 효과에 큰 영향을 미치기 때문에 (Short, 1996), Lee (1998)는 CFD 모델 영역 내로 들어가는 공기에 습도를 시뮬레이션 하였고, 자연환기식 연동형 온실 내에 식물군을 만들어서 식물로부터의 현열과 수분 증발을 시뮬레이션해서 태양 에너지와 바람의 영향에 따라 변화하는 부력의 효과들을 분석하였다.

본 논문에서는 실제 자연환기식 연동형 온실 내에서 자연환기식의 효율성을 분석하는데 목적으로 하였다. 이를 위하여 자연환기식 온실에서 직접 수집된 데이터들과 개발된 CFD 모델들에 의해 예측되어지는 결과들을 비교 분석하였다.

재료 및 방법

1. 실험 온실 및 데이터 수집

Ohio Agricultural Research and Development Center (OARDC) 내에 지상으로부터 약 6.5m에 설치되어진 정밀한 기상관측대에서 지난 5년 동안 측정된 기상 상태를 통계학적으로 분석하였다. 또한 1997년 하절기에 오하이오 중부(40° 47'N, 81° 55'W, 표고 310m)에 위치한 Quailcrest 농장 안에 있는 상업 연동형 온실에서 실제 자연환기 상태를 조사하기 위하여 광범위하게 데이터들을 수집하였고, 또한 계측된 수치들은 CFD 모델에 입력수치들로 이용되었다.

Fig. 1은 이번 실험에서 사용되어진 연동형 온실을 보여주고 있다. 서쪽바람에 적합하게 설계되어진 이 온실은 네 개의 스펠과 한 개의 작은 스펠으로 설계되었으며, 온실의 피복재는 이중 PE 필름이나 동쪽 벽에는 유리가 사용되었다. 북쪽과 남쪽의 벽들은 8mm PC판으로 되어있다. 온실내의 높은 온도 상승을 방지하기 위하여, 온실의 바깥쪽 피복재 위에는 하얀 색의 페인트로 도장함으로써 온실내로 들어오는 태양 에너지의 약 40%를 감소시켰다. 편의를 위해서, 서쪽에서 동쪽으로 스펠을 차례로 첫 번째, 두 번째, 세 번째, 그리고 네 번째 스펠이라고 명명하였다.

Fig. 1. A sketch of the four and one - half span commercial greenhouse in Quailcrest farm located near Wooster, Ohio.

온실 내에서는 공기의 건습구 온도가 여섯 곳에서 측정되었고 또한 식물의 엽온이 식물군의 상층부와 하층부에서 각각 측정되었다. 온실 내에서의 태양 에너지를 측정하기 위하여 전천 일사계 (Eppley black and white pyranometer, Model 8-48, the Eppley Laboratory, Inc.)를 온실내의 중앙에 처마와 같은 높이에 설치하였다.

Datalogger (21X micrologger, Cambell Scientific, Inc.)가 온실내의 데이터 수집에 사용되었으며, 온실 피복과 바닥표면의 온도들은 적외선 온도계 (Portable infrared gun sensor, Raynger II Data system)를 이용하여 측정하였다. 온실 밖의 기상상태를 측정하기 위하여 3.25m의 높이에 기상관측대를 설치하여서 공기의 건습구 온도, 일사량, 풍속과 풍향 등을 또 다른 Datalogger에 의해서 측정, 수집하였다. 온실 안과 밖의 Datalogger들에서 측정된 데이터들은 모뎀에 의하여 자료분석실의 컴퓨터로 전송되었다.

Table 1에서는 CFD 모델들에게 공통적으로 입력된 수치들을 보여주고 있다. 본 실험에서는 2 차원의 CFD 모델을 개발하였기 때문에 바람이 서쪽 혹은 동쪽에서 불어올 때 모든 출입문을 닫은 상태에서 측정된 데이터들을 모델의 입력 수치로 이용하였다. CFD 모델 영역으로 유입되는 공기의 습도, 밀도, 열전도 등은 Brazee와 Fox (1987)에 의해서 개발되어진 Psychrometric 프로그램을 이용하여 결정하였으며, 표면에서의 방사율들은 Oke (1987)과 Monteith (1990)의 결과를 참조하였다. 식물군의 공기 투과율은 온실 내에서 측정되어진 Canopy area index (CAI)에 의하여 20%로 가정하였다.

2. Fluent CFD 모델 개발

Fig. 2는 CFD 모델의 가장 기초가 되는 Geometry 파일을 보여주고 있다. Geometry 파일내에는 실험에서 사용되어진 연동형 온실을 2 차원으로 개발하였으며, 모델의 입구와 출구는 온실 구조로부터 각각 20m의 거리를 유지하였으며, 모델의 상층벽의 높이는 30m로 하였고 또한 상층벽은 Pressure outlet으로 프로그램하여 상층벽이 CFD 모델의 정확성에 영향을 미치는 것을 방지하였다.

Table 1. Constant input values for the case file of the two-dimensional CFD model.

Factor	Value	Unit
Roof vent opening (vertical)	0.76	m
Side vent opening (vertical)	0.91	m
Wind direction	West (left to right)	...
Polyethylene cover temperature	308.16	K
Glass wall temperature	309.16	K
Inside ground temperature	313.16	K
Outside ground temperature	309.16	K
Sky temperature	303.6	K
Temperature of inlet air	303.6	K
Relative humidity of inlet air	49	%
Density of inlet air	1.1477	kg m ⁻³
Viscosity of inlet air	1.85E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹
Thermal conductivity of inlet air	0.0263	W m ⁻¹ K ⁻¹
Specific heat of inlet air	1007	J kg ⁻¹ K ⁻¹
CO2 concentration of inlet air	350	μmol mol ⁻¹
Turbulence intensity	5	%
Turbulence length of greenhouse	3.5	m
Porosity of plants canopy	20	%
Sky emissivity	0.90	...
Cover emissivity	0.93	...
Glass emissivity	0.90	...
Outside ground emissivity	0.95	...
Inside floor emissivity	0.90	...

Fig. 2. Two-dimensional geometry file of a multi-span, double polyethylene covered greenhouse in the preBFC model.

컴퓨터의 계산시간은 Grid 파일의 크기에 의해 많은 영향을 받으므로, 파일내의 격자의 수를 최대한 줄이기 위하여 Node adjustment와 Density factor를 실행시켰다. Grid 파일을 만드는데 있어서, Cartesian coordinate grid 방식을 배제하고 Body-fitted non-orthogonal curvilinear coordinate (BFC) grid 방식을 채택하였으며, 최종 Grid 파일의 크기는 가로와 세로가 각각

271×84로 확정되었다. Geometry 파일에서의 연동형 온실의 구조가 복잡한 관계로, 최대한 정확한 결과를 얻기 위하여 Interpolated grid technique를 사용하여 Grid 파일을 매끄럽고 고르게 발전시켰다.

이 Grid 정보는 프리-프로세서로부터 주 프로그램인 Fluent로 전환되어 물리적 모델들, 모델내의 유체와 물체의 특성들, 환경 조건 등을 추가적으로 입력되어서 Case 파일로 입력이 된다. Fluent에서는 현재까지 가장 많이 사용되어지고 있는 Standard k-ε turbulence model을 이용하였으며, 모델 영역 내로 유입되는 공기의 흐름은 비압축성, 모델 입구의 균일한 풍속, 그리고 정상 상태인 것으로 가정하였다. 20%의 공기 투과율을 가진 식물군들을 위하여 CFD 모델 내에 개발된 공기 투과성 매체들을 위하여 Fluent manuals (1995)에서 제시한 공식들에 따라서 Pressure drop factors와 Internal loss factors를 구하였다. 식물군으로부터의 현열과 수분 증발은 Fynn 등(1993)의 공식들을 이용하여 값을 구한 후 CFD 모델에 프로그램되었으며, 부력의 효과를 위하여 Boussinesq 옵션을 선택하였다.

각각 서쪽과 동쪽에서 바람이 불어올 때, 풍속을 0.0 m·s⁻¹에서 6.0 m·s⁻¹으로 변화하면서 자연환기량, 기온, 압력, 그리고 공기의 흐름 상태를 비교, 분석하였다. 또한 식물군과 벤취가 자연환기량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 식물군과 벤취가 있을 때와 없을 때의 CFD 모델의 결과들을 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 기상 데이터 분석

OARDC 내의 기상관측대에서 5년 동안 측정된 결과를 분석해 본 결과 바람이 없는 대부분의 경우는 기온이 23.9℃ 이하일 때 발생하는 것으로 나타났다. 최근의 5년간의 기상자료 분석결과 23.9℃와 26.7℃

사이에 약 한시간 동안 바람이 없었던 것으로 나타났다. 26.7°C 이상의 날씨에서는 99.5%의 바람이 0.5 m·s⁻¹ 이상인 것으로 나타났으며, 5년 평균 풍속은 약 2.5 m·s⁻¹인 것으로 나타났다. 하루중 풍속이 극히 낮은 경우는 주로 환기의 필요성이 낮은 이른 아침에 발생을 하였으며 아침에 태양 에너지가 점차 증가함으로 풍속 또한 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 만약 0.5 m·s⁻¹의 바람에서도 자연환기가 잘 이루어진다면 이는 매우 잘 설계되어진 구조물이며 더 높은 풍속에서 더 좋은 자연환기의 결과를 얻을 수 있다고 가정하였다.

2. 온실 시험

최고 기온이 35°C인 Ohio주의 대표적인 여름날씨 동안, 온실 내의 여섯 곳에서 측정된 기온의 최대범위는 1.7°C인 것으로 나타났으며, 모든 문들을 닫고 환기창들만 열어놓은 상태에서도 이 실험에 이용된 온실의 안과 밖의 기온 최대차는 3.5°C인 것으로 나타났다. 식물의 엽온은 온실내의 기온보다 평균 0.8°C 높은 것으로 나타났는데, 식물의 엽온은 태양 에너지와 식물에 공급되는 물의 양과 빛수에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

바람이 서쪽에서 불어올 때, 첫 번째 스펀에서 기온이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 온실내의 기온이 상승하는 것으로 나타났다. 대체로, 세 번째 스펀에서 기온이 가장 높은 것으로 나타났지만, 이른 오전 중에는 동쪽의 온실 유리벽을 통하여 들어오는 직달 일사 때문에 네 번째 스펀이 가장 더운 것으로 나타났다. 낮 평균 풍향과 기온이 서쪽과 28°C인 경우, 첫 번째, 두 번째, 세 번째, 그리고 네 번째 스펀에서의 평균 기온은 각각 29.1°C, 29.7°C, 30.7°C, 그리고 30.6°C인 것으로 나타났다. 바람이 동쪽에서 불어올 때, 네 번째 스펀에 있는 지붕창이 가장 활발한 공기 유입구 역할을 함으로써 네 번째 스펀이 가장 낮은 온도를

나타냈다. 바람이 남쪽에서 불어올 때, 남쪽벽에 설치되어진 문들은 자연환기를 위한 훌륭한 공기 유입구로서의 역할을 하였다.

3. CFD 모델 시험

서쪽에서 2.5 m·s⁻¹의 바람이 불어오고 온실 내에 식물이 없을 때, 각각 90%와 10%의 공기가 서쪽벽의 측면창과 첫 번째 지붕창을 통하여 온실 내로 들어오는 것으로 예측되었다. 각 환기창으로 공기가 유출되는 비율은 첫 번째 지붕창으로 3%, 두 번째 지붕창으로 13%, 세 번째 지붕창으로 30%, 그리고 네 번째 지붕창으로 54%인 것으로 나타났다.

2.5 m·s⁻¹의 바람이 동쪽에서 오는 경우에는 95%의 유입되는 공기가 네 번째 지붕창을 통하여 들어오고 각각 4%와 1%가량이 세 번째와 두 번째 지붕창을 통하여 온실내로 들어오는 것으로 예측되었다. 공기가 각 환기창을 통하여 유출되는 비율은 세 번째, 두 번째, 첫 번째 지붕창과 측면창을 통해 각각 2%, 7%, 41%, 그리고 50%인 것으로 나타났다. 온실의 추천되어지는 환기율 0.75 - 1.0 회/분 (ASAE Standard, 1995)을 고려하면, CFD 모델은 서쪽과 동쪽에서 불어오는 풍속이 각각 2.12 m·s⁻¹와 3.51 m·s⁻¹ 이상일 때 이 연동형 온실은 적절한 자연환기량을 취할 수 있다고 예측하였다.

CFD 모델에서의 온실 안과 밖의 압력 분포를 분석한 결과, 서쪽에서 불어오는 바람에 의해서 지붕창들 주위에 낮은 압력대가 형성되어서 측면창을 통한 공기 유입을 원활하게 하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3은 온실 내에 식물이 없을 때, 온실의 작은 스펀과 첫 번째 스펀에서의 공기 흐름의 분포를 벡터 이미지로써 보여주고 있으며, 환기창을 통해 유입되는 강한 바람에 의하여 발생하는 공기의 소용돌이들은 지붕창들의 효율성에 많은 영향을 미치는 것으로 예측되었다.

Fig. 3. Two-dimensional CFD predicted vectors of the multispan greenhouse without plants when the wind of $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ came from west.

Fig. 4. Two-dimensional CFD predicted vectors of the multispan greenhouse with plants when the wind of $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ came from west.

Fig. 4 의 CFD 모델의 결과를 보면, 측면창 바로 옆에 위치한 식물군과 벤취에 의해 측면창을 통한 자연적인 공기의 유입이 방해받기 때문에, 바람이 서쪽에서 불어올 때 식물군이 없을 때보다 평균 12%의 환기량의 감소 결과를 가져오는 것으로 예측되었으며, 유입되는 공기흐름의 방향이 바뀌어서 첫 번째 지붕창의 공기 배출구로서의 효과가 증대된 것을 보여주고 있다. 온실에서의 실측 수치들과 CFD 모델을 통한 예상 결과들은 온실내의 매우 고른 기온 분포를 보여주었다. CFD 모델에서의 온도 분포를 분석한 결과, 온실의 환기 회수가 0.9 회/분 이상일 때 실내 공기가 외부 기온을 2.8°C 이상 초과하는 경우는 없었던 것으로 예측되었다.

식물의 손상을 막기 위해 최고 $0.5 - 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 풍속이 요구됨으로 공기의 유입창의 위치보다 약간 낮은 곳에 식물군이 위치하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 반면에, 바람이 불어오는 쪽의 측면창을 너무 높이 설치하면 측면창을 통해 유입되는 공기중 많은 양이 가장 근접한 지붕창을 통해 대부분이 배출되기 때문에 연동형 온실에 있어서 다른 스펠들의 공기환기가 매우 저조한 것으로 나타났다. 연동형 자연환기식 온실에 있어서 바람이 불어오는 쪽의 측면창들과 바람의 반대쪽을 향한 지붕창들의 혼합형이 가장 효율적인 온실 설계인 것으로 예측되었다.

적 요

오하이오 중부에서 풍속이 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 인 경우는 매우 드물었으며, 5년 평균 풍속은 약 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. 최고 기온이 35°C 인 오하이오주의 대표적인 여름에 온실 내의 여섯 곳에서 측정된 기온의 최대범위는 1.7°C , 온실 내외 기온의 최대차는 3.5°C 인 것으로 나타났다. CFD 모델에서의 온도 분포를 분석한 결과, 온실의 환기 회수가 0.9 회/분 이상일 때 실내 공기가 외부 기온을 2.8°C 이상 초과하는 경우는 없었던 것으로 예측되었다. 풍향과 풍속에 따라서 각각의 환기구들의 효율성이 영향을 받는 것으로 나타났으며, 특히 환기창을 통해 유입되는 강한 바람에 의하여 발생하는 공기의 소용돌이들은 지붕창들의 효율성에 많은 영향을 미치는 것으로 예측되었다. CFD model 은 서쪽에서와 동쪽에서 불어오는 바람이 각각 $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상일 때 이 연동형 온실은 적절한 자연 환기량을 취할 수 있다고 예측하였다. 측면창 바로 옆에 위치한 식물군과 벤취에 의해 측면창을 통한 자연적인 공기의 유입이 방해받기 때문에, 바람이 서쪽에서 불어올 때 식물군이 없을 때보다 평균 12%의 환기량의 감소 결과를 가져오는 것으로 예측되었다. 식물군은 공기의 유입창의 위치보다 약간 낮은 곳에 위치하여야 하며, 유입창을 너무 높이 설치하면 측면창을 통해 유입되는 공기는 가장 근접한 지붕창을 통해 대부분이 배출되는 것으로 예측되었다. 연동형 자연환기식 온실에 있어서 바람이 불어오는 쪽의 측면창들과 바람의 반대쪽을 향한 지붕창들의 혼합형이 가장 효율적인 온실 설계인 것으로 예측되었다.

인 용 문 헌

1. Al-helal, I.M. 1998. A computational fluid dynamics study of natural

- ventilation in Arid Region greenhouses. Ph.D. Thesis. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering, The Ohio State University, Ohio.
2. ASAE Standards. 1995. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI 49085.
 3. Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
 4. Boulard, T. and A. Baille. 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *J. Agricultural Engineering Research* 61:27-36.
 5. Brazee, R.D. and R.D. Fox. 1987. Operation of the psychrometric program PSYCHRO. Special Circular 113 Application Technology Research Unit, USDA-ARS in cooperation with OARDC/OSU, Wooster, OH44691.
 6. Bruce, J.M.. 1977. Natural ventilation Its role and application in the bio-climatic system. *Farm Building R & D Studies*, February 1977, p. 1-8.
 7. De Jong, Taeke. 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands
 8. Fernandez, J.E. and B.J. Bailey. 1992. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58 : 229-245.
 9. Fluent company, 1995, *The manual of Computational Fluid Dynamics (CFD)*, Version 4.3, Lebanon, NH 03766.
 10. Fynn, R.P., A. Al-shooshan, T.H. Short and R.W. McMahon. 1993. Evapotranspiration measurement and modeling for a potted chrysanthemum crop. *Transactions of the ASAE*, 36(6) : 1907-1913.
 11. Kozai, T, S. Sase and M. Nara. 1980. A modeling approach to greenhouse environmental control by ventilation. *Acta Hort.* 106 : 125-136.
 12. Lee, In-Bok. 1998. Fluid dynamic simulation and validation of a naturally ventilated multispan greenhouse. Ph.D. Thesis. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering, The Ohio State University, Ohio.
 13. Monteith, J.L.. 1990. *Principles of Environmental physics*. Routledge, Chapman and Hall, Inc., New York.
 14. Oke, T. R.. 1987. *Boundary layer climates*, 2nd ed. Routledge, Chapman and Hall, Inc., New York.
 15. Sase, S., T. Takakura and M. Nara. 1984. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Hort.* 148 : 329-336.
 16. Short, Ted H.. 1996. Selecting the greenhouse structure your crop needs. *Grower Talks*, Summer Issue. 1996:8-9.
 17. Timmon, M.B.. 1990. How does natural ventilation work and why? *American Society of Agricultural Engineers*, Paper No. 90-4551, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

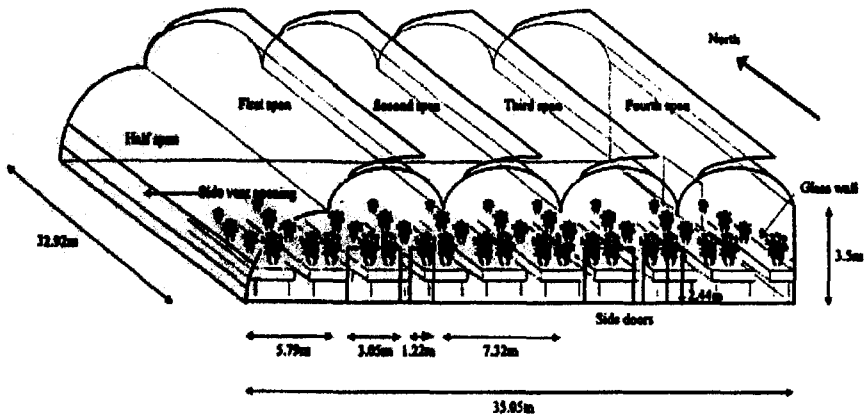


Fig. 1 A sketch of the four and one-half span commercial greenhouse in Quailcrest farm located near Wooster, Ohio.

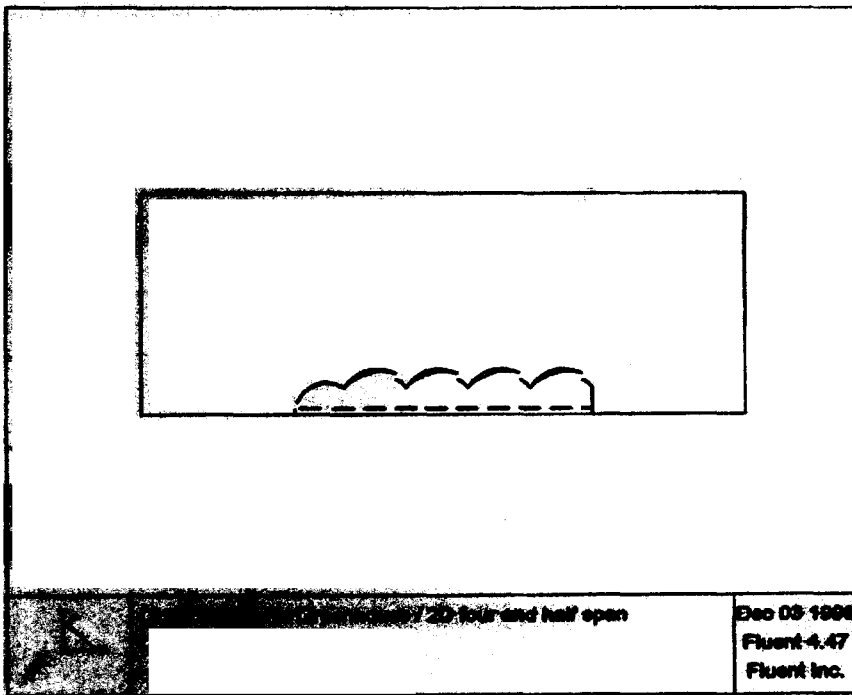


Fig. 2 Two-dimensional geometry file of a multi-span, double polyethylene covered greenhouse in the preBFC model.

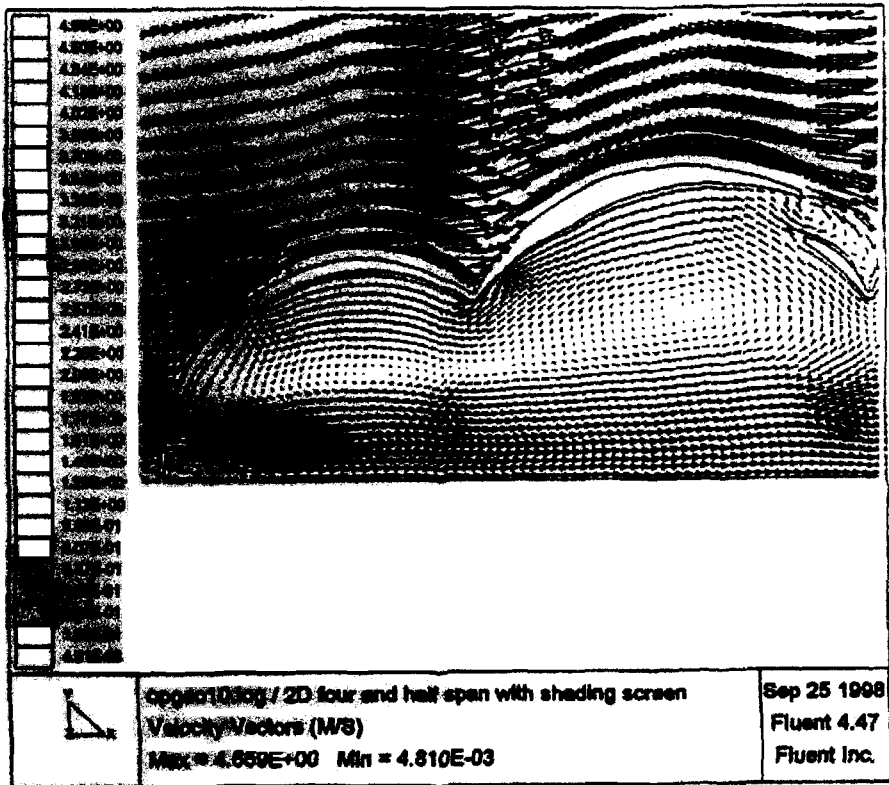


Fig. 3 Two-dimensional CFD predicted vectors of the multispan greenhouse without plants when the wind of $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ came from west.

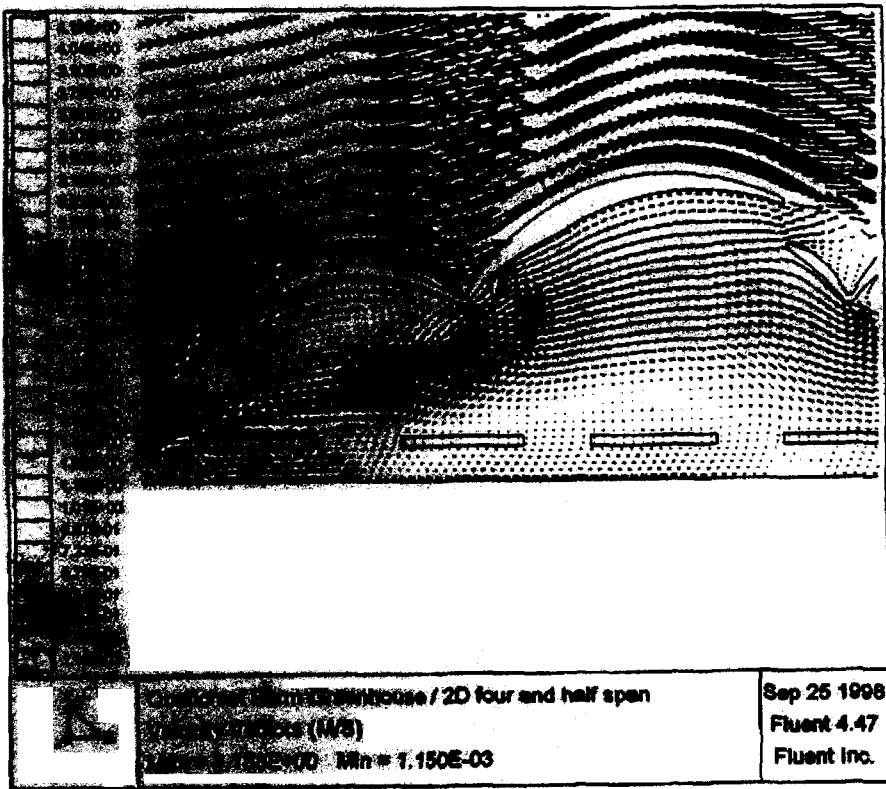


Fig. 4. Two-dimensional CFD predicted vectors of the multispan greenhouse with plants when the wind of $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ came from west.