Jour. Agri. Sci.
Chungnam Nat'l Univ., Korea
Vol.33(1) : 85~95 (2006)

CFD를 이용한 폐쇄생태계 내 토양표면의 열전달계수 분석

노상목[1] · 남상운[1]*

An Analysis of Heat Transfer Coefficient of Soil Surface in Closed Ecosystems Using CFD

Sang-Mok Roh[1] · Sang-Woon Nam[1]*

ABSTRACT

A model experiment has been performed to get the heat transfer coefficient on the soil surface in the closed ecosystem. The heat flux on the soil surface was measured and the heat transfer coefficient was derived in the following two cases with 5-stepped control of inside air current speed. One case was that heat flowed from air to soil and the other case was that heat flowed from soil to air. Three dimensional CFD model has been set to simulate thermal environment in the closed ecosystem including soil layers. The standard k-ε model of the CFD program was chosen for turbulence model and heating wire buried in the soil layers was set as heat source option to simulate the case when the temperature of soil surface was higher than that of inside air in the closed ecosystem. Between one case that heat flowed from air to soil and the other case that heat flowed from soil to air, there were big differences in the temperature distribution of soil layers and the heat transfer coefficient of the soil surface. The increasing rate of heat transfer coefficient on each case according to the increase of inside air current speed was similar to each other and it respectively increased linearly. But the heat transfer coefficient on the case that heat flowed from soil to air was much bigger than that of the other case. The model was validated by

[1] 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부(Division of Bioresources Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)
* 교신저자 : 남상운(E-mail: swnam@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-5794)

comparing simulated values of CFD model with measured values of the model experiment. Simulated and measured temperature of inside air and soil layers, and heat transfer coefficient of the soil surface were well accorded and the range of corrected R^2 was 0.664 to 0.875. The developed CFD model was well simulated in parts of the temperature of inside air and soil layers, the distribution of the inside air current speed, and heat transfer coefficient of the soil surface were able to be quantitatively analyzed by using this model. Therefore, the model would be applied and used for analysis of heat transfer coefficient between air and surface in various agricultural facilities.

Key words : CFD, Closed ecosystem, Heat flux, Model experiment, Soil surface

Ⅰ. 서 론

지중가온이나 지중냉각시스템을 설계하기 위해서는 지중난방부하와 지중냉각부하의 산정이 필요하고, 지중가온과 냉각시 온실 지상부의 열환경에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 토양과 지상부의 경계를 이루는 지표면에서의 열전달계수를 도출하여 토양으로부터 지상부 그리고 지상부로부터 토양으로 전류되는 열량을 정량적으로 파악할 필요가 있다. 그동안 온실의 환경을 예측하기 위한 수많은 수학적 모델들이 개발되어 왔으나, 대부분 실내 토양 표면의 열전달계수는 다양한 환경조건의 변화와 상관없이 상수값으로 취급하는 등 지상부와 근권부 사이에 상호 교환되는 열량에 대한 정량적인 분석 연구는 거의 없는 실정이다.

CFD 시뮬레이션 기법은 실험하기 어려운 조건에 대한 시뮬레이션이 가능하고 실험에 대한 시간적 공간적 제약이 없으며 다양하게 실용적인 응용이 가능하다는 장점이 있어, 최근 온실의 공기유동과 관련된 연구에 많이 이용되고 있다. 온실연구에서 CFD 이용 사례를 보면, Okushima 등(1989)에 의해 처음으로 온실환기 연구를 위해 사용되었으며, 이후 CFD 소프트웨어 패키지가 컴퓨터의 발달과 함께 급속히 발전하기 시작하였다. Bot 등(2001)은 홈통에 연속된 지붕 환기창이 있는 2-span 온실에서의 실험을 통해 환기창 부근에서의 평균 기류속도에 대해 CFD 결과와 잘 일치함을 보였고, Mistriotis 등(1997)은 Okushima와 함께 더 효과적인 온실구조와 환기창의 설계를 위해 많은 연구에서 CFD기법을 이용하였다. 또한 Woodruff(1997)는 CFD기법을 이용하여 자연환기 온실의 설계에 관한 연구를 수행하였으며, Al-Heral (1998)은 건조지역의 온실에서 자연환기를 연구하기 위해 CFD 모델을 이용하였다.

뿐만 아니라, 국내에서도 Lee(1998)는 자연환기시스템을 갖춘 상업용 연동온실에 CFD 시뮬레이션을 적용한 바 있으며, 윤(2000)은 CFD 시뮬레이션에 의해 아치형 연동온실에서의 자연환기 성능 및 공기유동 특성을 분석하였다. 권(2002)은 증발냉각 온실에서의 습도 분포를 시뮬레이션 하였고, 유 등(2002)은 CFD를 이용하여 포그냉방시스템을 가동한 유리온실에서의 열환경 분석을 수행하는 등 CFD를 이용하여 다양한 연구가 이루어져 왔다.

따라서, 본 연구에서는 CFD를 이용하여 토양수분을 고려한 토양 열전도 모델과 지상부 열환경 모델을 포함하는 폐쇄생태계내의 지표면 열류모델을 개발하고 실험을 통하여 검증한 후, 다양한 환경조건에 따른 지표면에서의 열전달계수를 도출하여 토양과 지상부 사이에 전류되는 열량을 정량적으로 파악함으로써, 에너지이용 효율 분석, 온실 지중가온과 지중냉각시스템의 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험장치 및 계측방법

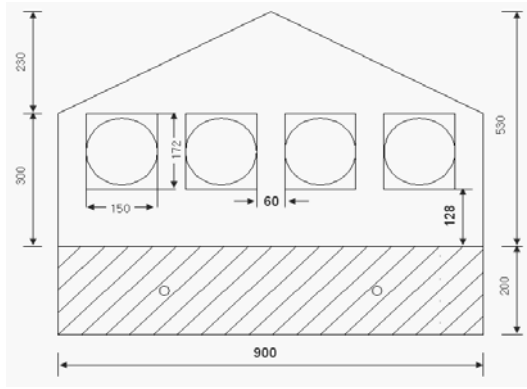
1) 실험장치

실험장치(Closed Ecosystem)는 농촌진흥청에서 제시한 표준형 단동 유리온실(3-1 S형)을 1/10로 축소한 크기로 제작하였다. 각목과 합판을 이용하여 뼈대구조를 만들고, 두께 30mm의 스티로폼을 사용하여 외부환경의 영향을 최소화할 수 있는 단열시스템으로 설계하였다.

Fig. 1은 실험장치의 정면도이며, 폭 900mm, 처마높이 300mm, 지붕높이 530mm 그리고 길이 1,800mm로 제작하였다. 바닥으로부터 흙을 채워 200mm 깊이의 토양층을 형성하였고, 한쪽 벽면에는 강제환기를 위한 4개의 소형팬을 설치하였으며, 반대쪽 벽면의 같은 위치에 팬과 동일한 크기로 4개의 환기창을 구성하였다.

2) 환경 및 열류량 계측

실험데이터는 Fig. 2와 같이 지상부, 토양표면 그리고 토양층의 3부분으로 나누어 각각의 열환경 인자(factor)를 계측하였다. 지상부에서는 온도, 습도 및 공기유속을 측정하였고, 지표면에서는 지상부와 토양층 사이에서 교환이 이루어지는 열류량을 계측하였으며, 토양층에서는 높이 및 위치에 따라 토양층의 온도를 측정하였다.



(Unit : mm)

Fig. 1. Front view of experimental apparatus

온습도 센서(Hobo, Onset Computer Corporation)를 실험장치 중앙 및 실외에 설치하여 30초 간격으로 실내외 온습도를 계측하였다. 그리고 열선풍속계(Series 640-0, Dwyer Instrument. Inc)를 팬의 중심축에 맞춰 실험장치 중앙에 설치하여 실내공기 유속을 계측하였다.

토양층에서의 온도는 열전대(T-type, 0.3㎜)를 Fig. 2와 같이 실험장치 중앙 및 전·후 1/4 지점에 각각 50, 100, 150mm 깊이로 매설하여, 총 9지점에서 각각의 토양온도를 계측하였다. 토양층의 지표면 중앙에 열류판(MF-140, EKO Instruments Trading Co. Ltd.)을 설치하여 토양표면에서의 열류량을 계측하였다. 또한 열류판 바로 옆의 토양표면에 열전대를 설치하여 토양표면온도를 계측하였다. 열선풍속계, 열전대 및 열류판의 계측값은 Data Recorder(KM-180, Konics)를 이용하여 10분 간격으로 기록하였다.

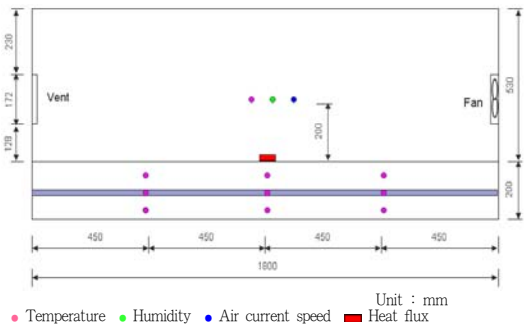


Fig. 2. Sensors arrangement for the model experiment

Table 1. Inside air current speed with the number of fan operated

Number of fans operated	0	1	2	3	4
Air current speed (m/s)	0.00	0.34	0.68	1.02	1.36

3) 환기량 및 열류 처리

환기량은 실내의 공기유동뿐 아니라 지표면의 열전달계수에 영향을 주는 요인이므로, 이를 변수로 주기 위해서 실험장치의 한쪽 벽면에는 4개의 소형팬(5915PC-22T-B30-B00, Minebea. Co. Ltd.)을 반대쪽 벽면에는 환기창을 설치하여 총 5단계로 환기량을 조절할 수 있도록 설계하였다. 모형실험이기 때문에 시설의 환기회수를 고려하지 않고, 실내유속을 기준으로 설계하였다. 작물생육에 적합한 실내유속은 0.5~0.75m/s 로 알려져 있으나, 어떤 연구 결과에 의하면 풍속이 1.5m/s 정도 되어야 한다고 하였다(김 등, 2002). 겨울철 밀폐된 온실의 경우 실내유속은 0.0m/s에 가깝고 여름철 개방온실의 경우에는 실내유속이 1m/s를 초과하므로 0~1.5m/s 범위내에서 실험이 이루어질 수 있도록 계획하였다. Table 1은 팬의 작동수에 따른 실내유속의 측정결과를 나타낸 것이다.

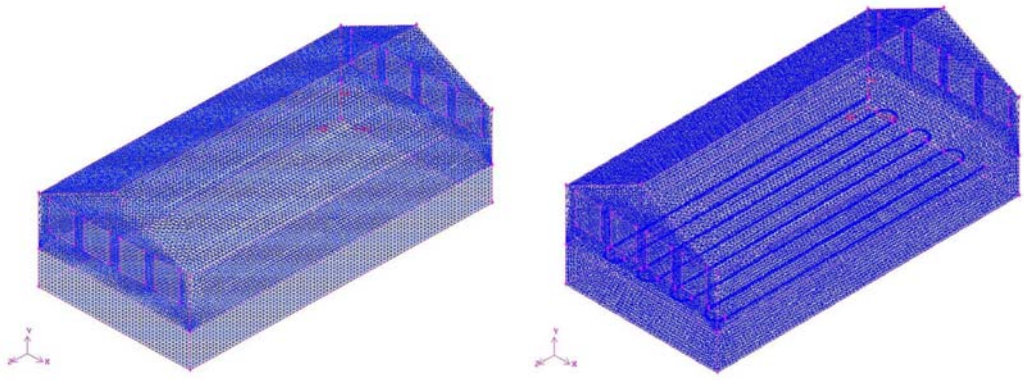
지표면 온도와 실내온도의 차이에 따라 열전달은 지표면온도가 실내온도보다 높은 경우(T_{air}<T_{surf})와 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우(T_{air}>T_{surf})의 2가지로 처리하여 실험을 수행하였다. 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우, 본 실험이 하절기에 이루어져 계절적 특성상 실내온도가 지표면 온도보다 높게 형성되어 아무런 처리를 하지 않은 상태에서 이루어졌다. 반면, 지표면온도가 실내온도보다 높은 경우에는 지표면온도가 실내온도보다 높게 형성되도록 하기 위해 토양층의 50mm 깊이에 전열선을 매설하고, 자동 온도조절기를 이용하여 토양 온도가 35~38℃까지 가열되도록 지중가온 처리를 하였다.

2. CFD 모델 구축

1) 격자망 구성

본 연구에서는 폐쇄생태계 내 토양표면의 열전달에 관한 CFD 시뮬레이션을 위해 상용 패키지인 Fluent (Version 6.1.1.2)를 사용하였다. 시뮬레이션에 앞서 기하학적 요소 및 계산 영역의 요소 분할을 위한 격자망 구성은 Gambit (Version 2.1.6) 프로그램을 이용하였다.

격자망의 구성은 계산시간 및 계산의 정확도에 영향을 미치게 되기 때문에 격자를 구성할 때 계산영역 내에서도 중요성을 판단하여 격자간의 간격을 적절히 조절해 줄 필요가 있다. 본 모델에서는 축소된 온실 모형 내에서 특히, 토양표면에서 이루어지는 열전달을 정밀하게 파악하기 위해서 토양표면에 가까울수록 격자망을 더 조밀하게 구성하였다. CFD 모델은 다음과 같이 크게 3부분으로 구성되며, 각각의 모델은 시뮬레이션 과정에서 하나로 통합되도록 하였다. ① 토양열전도 모델 : 토양수분을 고려한 3차원 열전도 모



(a) $T_{air}>T_{surf}$ (b) $T_{air}<T_{surf}$

Fig. 3. Mesh generation for CFD simulation of the closed ecosystem

델. ② 지상부 공기유동 모델 : 폐쇄생태계와 환기구 및 환기팬을 경계조건으로 하는 3차원 공기유동 모델. ③ 지표면에서의 열전달 모델 : 지표면과 지상부 공기 사이의 대류 열전달 모델.

Fig. 3(a)는 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우($T_{air}>T_{surf}$)의 실험모델을 격자망으로 구성한 것이다. 격자망 구성은 먼저 면격자를 작성한 뒤, 공간격자를 구성하였다. 면격자는 총 22,210개의 격자로 구성되었으며, 면적이 넓은 실험장치의 벽면은 간격을 20mm로 하였고, 면적이 작은 팬과 환기창에 해당하는 부분은 간격을 10mm로 하여 구성하였다. 그러나 실험장치 벽면 중 팬과 환기창이 달려있는 전면과 후면은 5각형 모양이므로 격자 요소에 있어, 사각형 모양의 격자는 불가능하여 삼각형 모양의 격자를 이용하였으며, 나머지는 사각격자를 이용하여 구성하였다. 공간격자의 구성 역시 면격자와 같이, 육면체 모양의 토양층은 공간격자요소로 6면체 셀을 이용하였고, 칠면체 모양의 공기층은 격자요소로 4면체 셀을 사용하여 총 261,439개의 셀로 구성하였다.

그리고 지표면 온도가 실내온도보다 높은 경우

Table 2. Basic configuration of the CFD simulation model

Classification	Setting of model
Solver	segregated solver 3D simulation implicit formulation absolute velocity steady state analysis
Energy equation	activated
Viscous model	standard k-ε
Radiation model	inactivated
Species model	inactivated
Discrete phase model	inactivated
Multiphase model	inactivated
Pollutants	non-selected

($T_{air}<T_{surf}$)의 실험모델을 격자망 구성한 Fig. 3(b) 역시 면격자를 먼저 구성하고, 공간격자를 구성하였다. 그러나 지중가온 모델이기 때문에 토양층에 매설된 전열선을 고려하여 격자를 구성하였다. 전열선의 단면적은 작기 때문에 격자 간격은 5mm로 하여 사각격자로 구성하였다. 따라서, 전열선을 포함한 지중가온 모델은 총 61,290개의 면격자로 구성되었으며, 다른 면격자의 구

성은 T_{air}〉T_{surf}인 경우의 모델과 동일하게 구성되었다. 그러나 공간격자의 구성은 6면체 셀을 이용하여 토양층을 구성한 T_{air}〉T_{surf}의 모델과는 달리, 전열선이 매설된 토양층의 공간격자 구성은 육면체 셀이 불가능하기 때문에 공기층과 같은 4면체 셀을 이용하여 구성하였다. 따라서 지중가온 모델의 공간격자는 공기층에서 212,737개와 토양층에서 624,985개가 생성되어 총 837,722개의 공간격자로 구성되었다.

Fluent는 유한체적법(FVM)에 기초한 프로그램이기 때문에, 지표면의 온도가 실내온도보다 높은 모델의 토양층 실체적은 지표면의 온도가 실내온도보다 낮은 모델에 비해 줄어들지만, 공간격자의 수는 훨씬 증가하였다.

2) 모델해석을 위한 세부조건 설정

본 연구에서 모델의 해석기 선택은 일반적이고 계산이 빠른 분리해석법(segregated solver)을 적용하였으며, 일정한 시간에서 지표면에서의 열류량을 확인하기 위해 정상상태의 3차원 모델로 해석하였다. 공기유동상태를 위한 난류모델은 standard k-ε모델을 적용하였으며, 축소모형에서의 부력효과는 무시하였다. 복사모델은 온실과 같이 투명한 벽체를 사용하지 않고 단열벽으로 이루어져 있기 때문에 활성화시키지 않았다. 세부 해석 모델의 전체적인 구성 및 세부 설정사항들은 Table 2와 같다.

모델을 구성하는 공기, 토양, 합판, 단열재 등 재료의 물리적 특성값은 문헌의 자료(FLUENT Inc., 2001 ; Martinez, 2005)를 이용하여 상수로 취급하였다. 경계조건은 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 모델의 경우 실험장치를 이루고 있는 벽면과 지표면은 Wall로 설정하였으며, 환기창은 Pressure-Inlet, 팬은 Velocity-Outlet으로 설정하였다. 지표면 온도가 실내온도보다 높은 모델의 경우에는 토양층에 매설된 전열선을 Wall로 설정하여 Heat source option을 적용하였다.

3) 모델검증 방법

온실의 공기층과 토양층의 온도차로 인하여 일어나는 열전달 과정에서 토양표면에서의 정확한 열전달계수를 해석하기 위해 개발된 CFD 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 온실축소모형의 폐쇄 생태계를 제작하여 실험을 수행하고, 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

실험은 2005년 8월~9월에 걸쳐 5주 동안 실행되었고, 실험조건은 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우와 지표면 온도가 실내온도보다 높은 경우의 두 가지 환경조건에서 수행되었다. 벽면에 설치된 팬을 순서대로 작동시켜 실내유속을 조절하며 실내공기 온도, 토양온도 및 지표면에서의 열류량을 측정하여 모델검증을 위한 자료로 사용하였다. 실험데이터 중에서 실내유속 조건에 따라 각각 10세트의 데이터를 선별하여 열전달계수를 계산하였고, 그와 동일한 조건의 경계값을 입력자료로 사용하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 즉, 모델의 검증은 실내공기온도, 토양층의 온도 및 지표면에서의 열전달계수에 대한 실험값과 모델에 의한 예측값의 비교를 통해 이루어졌다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형실험 결과

1) 토양온도 분포

토양층의 온도분포는 지표면온도가 실내온도보다 낮은 경우와 지표면온도가 실내온도보다 높은 경우에 서로 다른 패턴을 보이는 것으로 나타났

다. 먼저 T_{air}〉T_{surf}의 경우, 깊이에 따라 토양온도가 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 그리고 작동하는 팬의 숫자를 증가시켜 실내 유속이 빨라지면, 토양표면과 유입된 공기간의 열전달에 의해 토양표면의 지온이 일정하고 균일하게 분포되는 것을 볼 수 있다. 한편, T_{air}〈T_{surf}의 경우는 토양층 온도분포가 뚜렷이 구분되며, 팬이 작동함에 따라 토양표면과 실내공기 사이의 열전달도 가속되어 토양층의 온도 분포 간격은 더욱 커지는 것을 볼 수 있었다.

2) 처리별 열류량 및 열전달 계수

지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우, 즉 하향열류가 있는 경우에 작동시킨 팬의 개수에 따라 각각 다른 실내유속 조건의 토양표면에서 발생하는 열류량과 그것으로부터 다음 식을 이용하여 열전달계수를 구하였다.

$$h = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q}{t_{air} - t_{surf}}$$

여기서, h는 대류열전달계수(W/m^2℃), q는 열류량(W/m^2), t_{air}는 실내공기온도(℃), t_{surf}는 토양표면온도(℃)이다.

팬을 작동하지 않은 경우, 즉 실내유속이 0.0m/s인 경우 열류량의 값이 거의 0에 가깝고 열류방향이 일정치 않아(+/-로 불규칙하게 변동함) 분석에서 제외하였다. 실내유속이 0.34 m/s인 경우, 대류열전달계수는 4.5~8.9×10^{-3}W/m^2℃의 범위였으며, 평균 6.4×10^{-3} W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 0.68m/s인 경우, 대류열전달계수는 11.6~14.1×10^{-3} W/m^2℃의 범위였으며, 평균 12.7×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 1.02m/s인 경우, 대류열전달계수는 17.8~23.9×10^{-3}W/m^2℃의 범위였으며, 평균 21.8×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 1.36m/s인 경우, 대류열전달계수는 21.9~27.1×10^{-3}W/m^2℃의 범위였으며, 평균 25.0×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속에 따른 평균열전달계수를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 대류열전달계수는 실내유속에 따라 거의 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다.

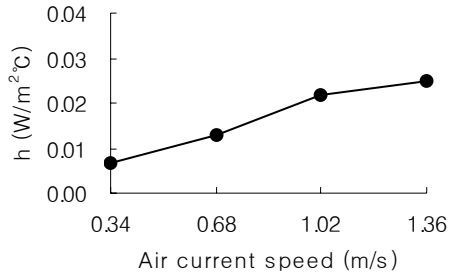


Fig. 4. Average heat transfer coefficient(h) according to the air current speed (T_{air}〉T_{surf})

지표면 온도가 실내온도보다 높은 경우, 즉 상향 열류가 있는 경우는 다음과 같다. 실내유속이 0.0m/s인 경우, 대류열전달계수는 19.9~47.6×10^{-3} W/m^2℃의 범위였으며, 평균 25.0×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 0.34m/s인 경우, 대류열전달계수는 26.4~30.3×10^{-3}W/m^2℃의 범위였으며, 평균 27.8×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 0.68m/s인 경우, 대류열전달계수는 37.6~43.0×10^{-3} W/m^2℃의 범위였으며, 평균 40.4×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 1.02m/s인 경우, 대류열전달계수는 41.1~46.6 ×10^{-3}W/m^2℃의 범위였으며, 평균 43.3×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. 실내유속이 1.36m/s인 경우, 대류열전달계수는 47.0~51.6×10^{-3} W/m^2℃의 범위였으며, 평균 49.4×10^{-3}W/m^2℃로 나타났다. Fig. 5는 실내유속에 따른 평균열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대류열전달계수는 지표면 온도가 실내온도보다

낮은 경우, 즉 하향 열류가 있는 경우와 마찬가지로 실내유속에 따라 거의 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다.

상향열류와 하향열류시 실내유속 증가에 따른 열전달계수의 증가 기울기는 거의 유사하게 나타났다. 그러나 열전달계수는 상향열류의 경우가 하향열류시보다 21.5~27.7×10^{-3}W/m^2℃(평균 24.0×10^{-3}W/m^2℃)정도 더 큰 것으로 나타났다.

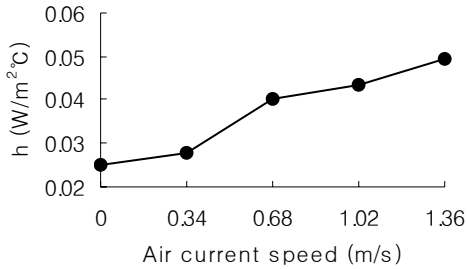


Fig. 5. Average heat transfer coefficient(h) according to the air current speed (T_{air}<T_{surf})

2. CFD 시뮬레이션 결과

1) CFD 모델의 검증

폐쇄생태계내의 기온 계측값과 CFD 모델의 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 실험치와 예측치는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 회귀분석 결과 조정된 R^2값은 0.875이고, 유의성 검정 결과 고도로 유의한 것으로 나타났다(p<0001).

폐쇄생태계내의 토양온도 계측값과 CFD 모델의 시뮬레이션 결과를 층별로 비교한 결과도 실험치와 예측치는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 회귀분석 결과 조정된 R^2값은 토양깊이에 관계없이 모두 0.874였고, 토양깊이 50, 100, 150mm에서 모두 고도로 유의한 것으로 나타났다(p<0.001).

상향열류와 하향열류시 열전달계수값은 큰 차이를 보이기 때문에 열전달계수의 모델검증은 열류방향별로 나누어서 분석하였다. Fig. 6은 하향열류시 폐쇄생태계내 토양표면의 열전달계수 값과 CFD 모델의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 실험치와 예측치는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 회귀분석 결과 조정된 R^2값은 0.664이고, 유의성 검정 결과 고도로 유의한 것으로 나타났다(p<0.001).

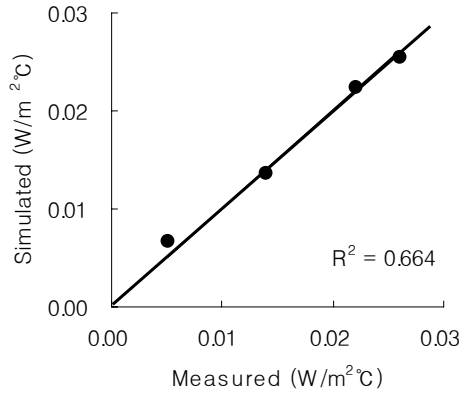


Fig. 6. Simulated and measured heat transfer coefficient of soil surface in the closed ecosystem (T_{air}>T_{surf})

Fig. 7은 상향열류시 폐쇄생태계내 토양표면의 열전달계수값과 CFD 모델의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 실험치와 예측치는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 회귀분석 결과 조정된 R^2값은 0.699이고, 유의성 검정 결과 1% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다(p<001).

전체적으로 실내기온과 토양온도에 비하여 열전달계수의 조정된 R^2값이 작게 나왔으나, 유의성 검정 결과 0.1~1% 유의수준에서 모두 유의성이 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 모델은 농업시설의 열전달해석에 활용이 가능한 것으로 판단된다.

2) 실내온도 및 유속분포 시뮬레이션 결과

폐쇄생태계내의 실내온도 및 유속분포에 대한 CFD 시뮬레이션을 위한 입력자료는 앞의 모형실험 조건과 같다. 먼저 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우의 실내온도 분포를 살펴보면 작동시킨 팬의 개수에 따라 실내유속이 변하면서 다소의 온도차는 있지만 거의 유사한 온도분포를 나타내었다.

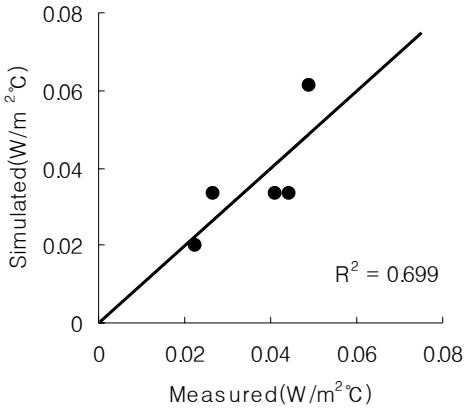
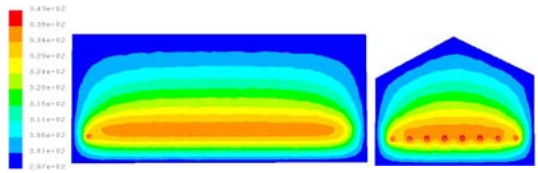


Fig. 7. Simulated and measured heat transfer coefficient of soil surface in the closed ecosystem (T_{air}〈T_{surf})

팬이 작동하지 않는 경우에는 실내유속이 없기 때문에 공기 유동은 없으나, 실험장치내 공기의 밀도차와 부력효과로 인해서 공기층의 온도수직분포가 뚜렷이 나타났다. 그러나 팬이 작동하여 실내유속이 증가한 경우에는 환기에 의하여 실내공기가 외부공기로 치환됨으로써 실험장치내 실내공기의 온도분포는 거의 균일하게 나타났다.

실내공기와는 반대로, 토양층에서는 팬이 작동하지 않는 경우에 토양온도가 균일하고, 팬이 작동한 경우에는 토양표면에서 열교환이 왕성하게 일어남에 따라 토양층의 온도분포가 뚜렷이 형성된 것을 볼 수 있었다.

팬의 작동수에 따른 실내유속분포는 작동하는 팬의 수가 증가함에 따라 실험장치내의 실내유속이 증가하고, 유속분포는 환기창과 팬의 중심선을 따라 크게 발달하고, 토양표면과 벽면에서는 감소하는 것으로 나타났다. 유입구와 유출구의 유속이 작은 경우에는 실내유속분포가 비교적 균일하고 난류의 발달도 미약하지만, 유속이 증가함에 따라 난류가 크게 발달하고, 모서리 부분에서는 소용돌이가 발생하는 것을 볼 수 있었다.



(a) Side view (b) Front view

Fig. 8. A sample of simulated temperature distribution in the closed ecosystem when all fans are off (T_{air}〈T_{surf})

지표면 온도가 실내온도보다 높은 경우로써, Fig. 8은 팬을 작동시키지 않은 경우, 즉 실내유속이 0.0m/s일 때의 실내온도 분포를 나타낸 것이다. 팬이 작동하지 않는 경우에는 실내유속이 없기 때문에 공기 유동은 없으나, 토양층에 매설된 전열선에서 공급되는 열량이 상하층으로 전도되고, 다시 지표면에서 실내공기로 대류열교환을 통하여 전류되면서 지상부와 토양층 모두 온도수직분포가 뚜렷이 나타났다. 그러나 팬이 작동하여 실내유속이 증가한 경우에는 환기에 의하여 실내공기가 외부공기로 치환됨으로써 실험장치내 실내공기의 온도분포는 거의 균일하게 나타났으며, 실내유속 증가에 따라 토양표면에서의 열교환이 급격히 커지면서 토양층에서의 온도분포도 거의 균일해지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 3대의 팬을 작동시킨 경우의 실내유속분포를 vector로 나타낸 것이다. 지표면 온도가 실내온도보다 낮은 경우와 마찬가지로 유속이 증가함에 따라 난류의 발달이 커지는 것을 알 수 있었다. 하향열류에 비하여 상향열류의 경우에는 지표면으로부터 열이 공급됨에 따라 난류 발달과 소용돌이의 발생이 더 커지는 것으로 나타났다.

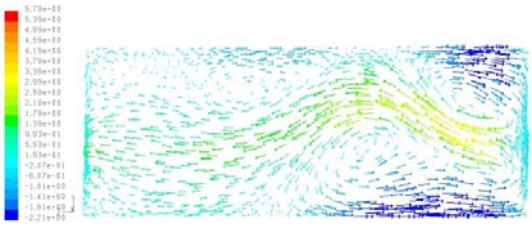


Fig. 9. A sample of simulated velocity vector for air flow in the closed ecosystem when three fans are on (T_{air}<T_{surf})

이상과 같이 개발된 CFD 모델은 폐쇄생태계내의 공기온도와 유속분포 및 토양층의 온도분포를 잘 시뮬레이션 하는 것으로 나타났으며, 이 모델을 활용하여 토양표면에서의 열전달계수를 정량적으로 분석할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 모델을 약간만 수정보완하면 다양한 형태의 농업시설에 적용하여 실내공기와 표면사이의 열전달계수를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

다양한 환경조건에 따른 지표면에서의 열전달계수 도출, 토양과 지상부 사이에 전류되는 열량의 정량적 파악, 에너지이용 효율 분석 및 지중가온과 지중냉각시스템의 설계를 위한 기초자료 제공을 목적으로 CFD를 이용하여 토양수분을 고려한 토양 열전도 모델과 지상부 열환경 모델을 포함하는 폐쇄생태계 내의 지표면 열류 모델을 개발하고 실험을 통하여 검증하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

폐쇄생태계내 토양표면의 열전달계수를 구하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 실험장치는 지표면 온도가 실내온도보다 높은 경우와 낮은 경우의 2가지 처리 및 5단계로 조절된 실내유속 하에서 지표면 열류량을 계측하여 열전달계수를 구하였다. 토양층을 갖는 폐쇄생태계의 열환경을 시뮬레이션 할 수 있는 3차원 CFD 모델을 구축하였다. 난류모델은 standard k-ε모델을 선택하였으며, 환기구는 pressure-inlet으로 팬은 velocity-outlet으로 경계조건을 설정하고, 지표면 온도가 실내온도보다 높은 경우를 모의하기 위하여 토양층에 매설된 전열선은 heat source option으로 처리하였다.

지상부에서 토양층으로 열이 이동하는 경우와 반대로 토양층에서 지상부로 열이 이동하는 경우에 있어서 토양층 온도 분포 및 토양표면의 열전달계수는 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 실내유속 증가에 따른 열전달계수의 증가율은 거의 비슷하였고, 직선적으로 증가하였으나 상향열류시가 하향열류시 보다 상당히 큰 값으로 나타났다. 모형실험의 계측값과 CFD 모델의 시뮬레이션 값의 비교를 통하여 모델을 검증한 결과, 실내온도, 깊이별 토양층의 온도 및 토양표면에서의 열전달계수에 대한 실측값과 시뮬레이션 값은 비교적 잘 일치하였으며, 조정된 R^2값은 0.664~0.875의 범위로 나타났다.

개발된 CFD 모델은 폐쇄생태계내 공기온도와 유속분포 및 토양층의 온도분포를 잘 시뮬레이션 하는 것으로 나타났으며, 이 모델을 활용하여 토양표면에서의 열전달계수를 정량적으로 분석할

수 있었다. 따라서, 본 모델은 다양한 형태의 농업시설에 대하여 실내공기와 표면사이의 열전달계수 분석에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

1. 권혁진. 2002. 온실내 수분제어를 위한 CFD 모델 개발. 서울대 대학원 석사학위논문.
2. 김문기, 남상운, 서원명, 윤용철, 이석건. 2002. 생물환경조절공학. 도서출판 청솔.
3. 유인호, 김문기, 권혁진, 김기성. 2002. 온실 포그 냉방시스템의 냉방효과 예측을 위한 CFD 모델의 개발. 생물환경조절학회지 11(2) : 93-100.
4. 윤남규. 2000. CFD 시뮬레이션에 의한 온실의 자연환기 및 공기유동 특성. 서울대 대학원 박사학위논문.
5. Al-helal, I. 1998. Computational fluid dynamics study of natural ventilation in arid region greenhouse. Ph. D. Dissertation. The Ohio State University.
6. Bot, G. P. A. 2001. Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. Computers and Electronics in Agriculture 30: 151~165.
7. Boulard, T., G. Papadakis, C. Kittas and M. Mermier. 1997. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology 88: 111-119.
8. Chen W. and W. Liu. 2004. Numerical and experimental analysis of convection heat transfer in passive solar heating room with greenhouse and heat storage. Solar Energy 76: 623~633.
9. Clarke, T. G. and W. D. Reynolds. 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. Soil & Tillage Research 47: 125-132.
10. Fernandez, M. D., M.R. Rodriguez, F. Maseda, R. Velo and M.A. Gonzalez. 2005. Modelling the transient thermal behaviour of sand substrate heated by electric cables. Biosystems Engineering 90: 203-215.
11. Fluent Inc. 2001. FLUENT6 Users Guide.
12. Gauthier, C., M. Lacroix and H. Bernier. 1997. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses. Solar Energy 60: 333-346.
13. Kurpaska, S., Z. Slipek, B. Bozek and J. Fraczek. 2004. Simulation of heat and moisture transfer in the greenhouse substrate due to a heating system by buried pipes. Biosystems Engineering. 90: 63-74.
14. Lee, I. B. 1998. Fluid dynamic simulation and validation of a naturally ventilated multispan greenhouse. Ph. D. Thesis. The Ohio State University.
15. Martinez, I. 2005. http://imartinez.etsin.upm.es/dat1/eSol.htm
16. Mistriotis, A., C. Arcidiacono, P. Picuno and G. P. A. Bot. 1997. Computational analysis of ventilation in greenhouse at zero- and low-wind-speeds. Agricultural and Forest Meteorology 88: 121-135.
17. Okushima, L., S. Sase and M. Nara. 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. Acta Hortic. 248: 129-136.
18. Woodruff, V. I. 1997. Analysis of vent designs for naturally ventilated gutter-connected greenhouses using FLUENT. M. S. Thesis. The Ohio State University.