온실 포그냉방시스템의 냉방효과 예측을 위한 CFD 모델의 개발

Development of CFD Model for Estimation of Cooling Effects of Fog Cooling System in Greenhouse

유인호* · 김문기 · 권혁진

서울대학교 농공학과

Yu, I.H. · Kim, M.K. · Kwon, H.J.

Dept. of Agricultural Eng., Seoul National University, Suwon, 441-744

서론

포그냉방시스템에 관한 연구는 대부분 VETH선도 등을 이용하여 온실 환경이 전체적으로 동질이라는 가정하에서 환기량 및 전체 분무수량 등을 계산하는 정도였으나, 1990년대 중반에 들어서면서 CFD 기법을 이용하여 온실 환경을 보다 정확하게 해석할 목적으로 CFD 기법을 이용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구에서는 온실 포그냉방시스템의 냉방효과 예측을 위한 Fluent CFD 모델을 개발하고, 차광과 무차광상태의 온실에서 직접 수집한 온습도 데이터와 개발된 모델에 의해 예측된 값들을 비교하여 모델의 적합성을 검증하고자 한다.

재료 및 방법

1. Fluent CFD 모델의 구성

CFD 시뮬레이션을 위해 상용 CFD해석 패키지인 Fluent (version 5.4)를 사용하였으며, 기하학적 요소 및 계산 영역의 요소 분할 등은 GAMBIT(version 1.3)을 이용하였다. Fluent는 Fluent사에서 개발한 프로그램으로 C언어로 되어 있다.

가) 격자망 생성

CFD 시뮬레이션을 위한 격자망을 구성하기 위하여 Gambit 프로그램을 이용하였다. 온실 내부의 온습도 환경을 예측하기 위한 시뮬레이션이기 때문에 온실 내부의 격자는 조밀하게 하고 온실 외부로 갈수록 성기게 구성하였다. 모델의 외부 단면은 온실 구조로부터 20m 거리를 유지하도록 구성하여 외부 단면이 시뮬레이션의 정확성에 영향을 미치는 것을 방지하였고, 외부공기 흐름의 빠른 수렴을 위해 온실 위쪽의 경계면을 약간 경사지게 만들었다.

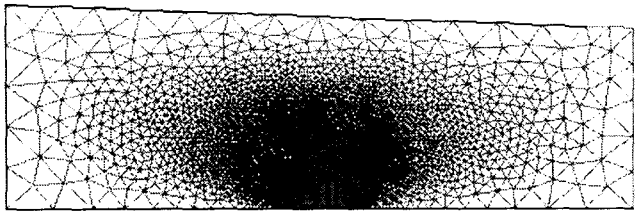

그림 1. 시뮬레이션을 위한 격자망 구성

나) 모델의 구성

지배방정식은 유체해석을 위한 기본적인 3개의 방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 이외에 난류의 해석을 위한 realizable k-ε 난류모델, 태양복사 및 복사열전달의 해석을 위한 DO 복사모델, 포그분무 입자의 해석을 위한 Discrete Phase 모델을 추가로 선택하였다.

비선형 형태인 이들 미분방정식들을 선형화하기 위해서 분리해석법(segregated solver)을 적용하고, 포그노즐이 분사하는 시간 중에는 비정상상태로 해석하였다.

공기의 비열, 전도열전달 계수, 점성계수 등의 값은 문헌의 자료를 이용거나 Fluent 프로그램에서 제공하는 기본값을 사용하여 상수로 취급하였다. 모델에 입력된 각 재료의 물리적 특성값은 표 1과 같다.

표 1. 모델에 입력된 재료들의 물성치

재료 / 물성치	Aluminum	Soil	Glass	Wood	PE	Concrete
밀도 (kg/m3)	2719	1900	2700	700	960	2100
비열 (J/kg/℃)	871	2200	840	2310	2090	880
전도열전달계수 (W/m2/℃)	202.4	2.0	0.78	0.173	0.33	1.4
흡수계수	0.3	0.5	0.1	0.1	0.2	0.6
산란계수	0	1	0	0.5	0.5	1
굴절계수	1	1	1	1	1	1
방사계수	0.1	0.89	0.87	0.5	0.1	0.71

2. 온실 실험

실험에 사용된 온실은 경기도 안성시 한경대학교 내에 위치한 단동 유리온실로 폭 6.5m, 길이 19m, 높이 4m이다. 실험 온실의 제원 및 센서의 배치는 그림 2에 나타낸 바와 같다. 온실의 왼쪽에는 높이 1m의 벤치 위에 국화가 포트재배되고 있었으며, 오른쪽에는 초장 2m의 토마토가 암면재배되고 있었다.

온실 내부의 온도 및 상대습도, 온실 벽면 및 차광막, 바닥온도와 지하수 온도, 엽온, 풍속, 실내 일사량 등을 측정하였으며, 외부 기상자료의 수집을 위해 미기상 수집장치(CR10x, Campell)를 실험온실 측벽으로부터 10m 떨어진 위치에 설치하였으며, 외부 온도 및 상대습도, 풍속 및 풍향, 일사량 등을 측정하였다.

포그 노즐은 온실 양쪽 측벽으로부터 2.3m, 온실 바닥으로부터 2.4m 위치에 설치된 2개의 급수라인에 길이방향 1m간격으로 1개씩 총 32개(2×16)가 배치되었다. 분무압은 70kg/㎠이었고, 분무입자의 크기는 20㎛였다. 포그시스템 가동조건은 무차광의 경우 분무시간 45초에 정지시간 45

초로 하였으며, 차광의 경우 분무시간 25초에 정지시간 45초로 하였다. 분사방향은 온실 바닥면에 수직방향 위로 하였다.

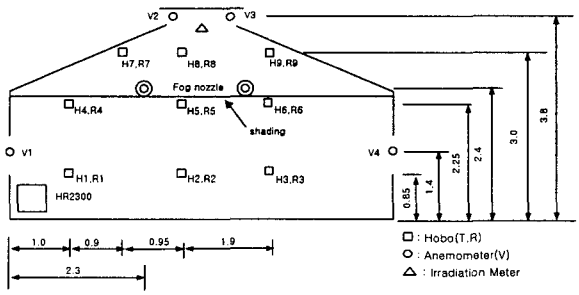

그림 2. 실험온실의 제원 및 센서 배치도 (단위:m)

결과 및 고찰

1. 외부기상자료 및 입력값 선정

표 2. 선정된 외부기상자료 및 입력값

입력값(단위)	무차광	차광
외부온도(K)	303.85	305.46
외부습도(%)	58.9	50.3
외부일사(W/㎡)	678	902
외부풍속(m/s)	0.44	0.93
외부풍향(degree)	272	87.5
포화수증기압(Pa)	4430	4840
습구온도(K)	298.35	298.05
수온(K)	297.45	297.35
분무시간(sec)	45	25
정지시간(sec)	45	45
분무량(kg/sec)	0.00157	0.00157
증발률(%)	70.8	76.3
분무입자크기(㎛)	20	20

Fluent CFD 모델의 시뮬레이션에 필요한 외부 기상자료 및 입력값은 차광조건과 무차광조건으로 나누어서 선택을 하였으며, 풍향은 온실의 길이방향에 수직이고, 일사가 높으면서 거의 일정한 시간대의 자료를 선택하였다.

2. 모델의 검증

표 3과 4는 온실 내부의 각 측점별 온·습도에 대한 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 결과를 각각 나타낸 것이다. 온도의 경우 무차광 조건에서는 0.5~4.4%, 차광 조건에서는 0.6~4.1%의 오차를 보였다. 상대습도의 경우 무차광 조건에서는 0.6~9.6%, 차광 조건에서는1.3~15.6%의 오차를 보였다.

표 3. 실측치와 예측치의 온도 비교

실험조건 / 측점	무차광			차광		
	실측치 (℃)	예측치 (℃)	오차 (℃)	실측치 (℃)	예측치 (℃)	오차 (℃)
1	32.0	30.8	1.2(3.8)	33.2	33.4	0.2(0.7)
2	30.8	29.4	1.4(4.4)	31.5	30.7	0.8(2.6)
3	30.1	30.2	0.1(0.5)	31.9	31.1	0.9(2.7)
4	32.8	32.2	0.6(1.7)	36.1	35.3	0.7(2.0)
5	30.9	29.9	1.0(3.3)	32.7	32.9	0.2(0.7)
6	30.8	31.3	0.5(1.5)	34.5	33.6	0.9(2.7)
7	31.1	31.8	0.7(2.2)	39.2	37.6	1.6(4.1)
8	29.2	30.1	0.9(3.0)	31.9	32.1	0.2(0.6)
9	33.8	32.7	1.1(3.3)	39.8	37.5	2.3(5.7)

주) 오차항목에서 ( )안의 값은 상대오차(%)임.

표 4. 실측치와 예측치의 상대습도 비교

실험조건 / 측점	무차광			차광		
	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)
1	60.3	66.1	5.8(9.6)	51.2	53.6	2.4(4.7)
2	72.5	72.0	0.5(0.7)	58.3	62.8	4.5(7.8)
3	72.5	67.2	5.3(7.3)	59.5	61.9	2.4(4.1)
4	58.0	57.7	0.3(0.6)	50.9	47.7	3.2(6.3)
5	66.1	69.5	3.4(5.2)	55.6	56.3	0.7(1.3)
6	66.6	60.6	6.0(9.0)	48.2	54.8	6.6(13.8)
7	63.3	58.8	4.5(7.1)	41.1	42.0	0.9(2.2)
8	70.7	65.7	5.0(7.0)	68.2	57.6	10.6(15.6)
9	55.3	55.7	0.4(0.7)	37.6	43.1	5.5(14.5)

주) 오차항목에서 ( )안의 값은 상대오차(%)임.