

CFD 기반의 순환 팬 배치 및 유속조절에 의한 식물공장의 에너지 효율 향상[☆]

Improvement of Energy Efficiency of Plants Factory by Arranging Air Circulation Fan and Air Flow Control Based on CFD

문 승 미¹ 권 속 연² 임 재 현^{1*}
Seung-Mi Moon Sook-Youn Kwon Jae-Hyun Lim

요 약

농업과 IT기술 융합이 가속화됨에 따라 식물공장 내 작물의 품질 및 생산성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 식물공장의 생산성을 최대화하기 위해서는 먼저 시설 내부의 특성을 고려하여 생육에 적합한 열 환경과 공기의 흐름을 제공하기 위한 고도의 성장환경 관리기술이 필요하다. 현재 운영되고 있는 식물공장은 특화된 공기유동장치의 설계 및 운영기술이 확립되지 않아 온도·기류 편차로 인한 불균일한 품질의 작물 생산, 재배기간 연장에 따른 에너지 소비 등의 문제점을 내포하고 있다. 이를 해결하기 위해서는 식물공장 시설의 설계 단계에서 전산유체역학 시뮬레이션을 이용한 공기유동장치의 배치 및 운영기술에 대한 최적화 과정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션을 이용한 순환 팬의 적정 배치 및 유속을 파악하여 식물공장 시설 내부의 각 지점별 온도 편차를 최소화하고 에너지소비를 절감한다. 시뮬레이션 조건은 순환 팬의 설치 위치 및 수량 그리고 유속변화에 따라 총 12가지의 Case로 구분하였으며 해석을 위한 경계 조건 변수는 동일하게 설정하였다. 시뮬레이션 결과, 2set의 순환 팬을 식물재배기 상단에 부착한 Case D의 제어 조건이 설정온도에 부합하는 296.33K의 평균온도를 유지하면서 식물생육에 적합한 0.51m/s의 기류분포를 보였다. 또한, 순환 팬의 유속을 변화시킨 결과, 출구 유속을 2.09/s로 설정한 Case D-3이 에너지 효율 측면에서 가장 우수한 결과를 보였다.

☞ 주제어 : 식물공장, 전산유체역학, 순환 팬 배치, 유속조절, 에너지 효율 향상

ABSTRACT

As information technology fusion is accelerated, the researches to improve the quality and productivity of crops inside a plant factory actively progress. Advanced growth environment management technology that can provide thermal environment and air flow suited to the growth of crops and considering the characteristics inside a facility is necessary to maximize productivity inside a plant factory. Currently running plant factories are designed to rely on experience or personal judgment; hence, design and operation technology specific to plant factories are not established, inherently producing problems such as uneven crop production due to the deviation of temperature and air flow and additional increases in energy consumption after prolonged cultivation. The optimization process has to be set up in advance for the arrangement of air flow devices and operation technology using computational fluid dynamics (CFD) during the design stage of a facility for plant factories to resolve the problems. In this study, the optimum arrangement and air flow of air circulation fans were investigated to save energy while minimizing temperature deviation at each point inside a plant factory using CFD. The condition for simulation was categorized into a total of 12 types according to installation location, quantity, and air flow changes in air circulation fans. Also, the variables of boundary conditions for simulation were set in the same level. The analysis results for each case showed that an average temperature of 296.33K matching with a set temperature and average air flow velocity of 0.51m/s suiting plant growth were well-maintained under Case 4 condition wherein two sets of air circulation fans were installed at the upper part of plant cultivation beds. Further, control of air circulation fan set under Case D yielded the most excellent results from Case D-3 conditions wherein air velocity at the outlet was adjusted to 2.9m/s.

☞ keyword : Plant Factory, CFD, Arrangement of Circulation Fan, Air Flow Control, Energy Efficiency Improvement

¹ Department of Multimedia Engineering, Kongju National University, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 331-717, Korea

² Green Energy Technology Research Center, Kongju National University, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 331-717, Korea

* Corresponding author (defacto@kongju.ac.kr)

[Received 31 August 2014, Reviewed 17 September 2014, Accepted 26 December 2014]

☆ 이 논문은 2009년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2009-0093825)

☆ 본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임(No. 2012H1B8A2026145)

☆ 본 논문은 2013년도 인터넷정보학회 추계학술발표대회 우수 논문 추천에 따라 확장 및 수정된 논문임.

1. 서 론

최근 작물의 품질 및 생산성 향상을 위해 농업 및 IT의 융합기술에 대한 연구가 빠른 속도로 진행되고 있다. 이러한 농업IT 융합기술의 발전은 차세대 농업생산시스템으로 각광 받고 있는 식물공장의 실용화에 대한 관심으로 이어지고 있다[1-4]. 식물공장이란 작물의 생육환경을 인공적으로 제어하여 계절 및 자연재해에 무관하게 연중계획생산이 가능한 시스템이다[5].

식물공장의 성공적인 운영을 위해서는 생산비의 절감뿐만 아니라 시설 내 특성을 고려하여 재배단마다 상이한 생육환경을 정밀하게 제어하는 관리기술이 필요하다 [6]. 식물공장의 제어대상이 되는 생육환경 요소로는 빛, 온도, 습도, CO₂, 양액 등이 있으며 작물생육은 특히 빛과 온도에 민감하게 반응한다. 수직 다단형태의 완전제어형 식물공장은 재배단마다 조명장치를 개별 부착하여 균일한 빛의 분포를 유지할 수 있으나 조명장치의 발열량과 공기유동장치의 부적합한 설치 위치 및 제어 방식 등에 의해 기타 재배환경의 편차를 발생시키는 문제점을 수반한다[7,8]. 이러한 온도, 습도, CO₂ 등 재배환경의 편차는 불균일한 품질의 작물 생산과 재배기간 연장에 따른 에너지 소비를 가중시킨다[9]. 따라서 시설 내부의 공기유동을 촉진시켜 온도, 습도, CO₂ 등의 환경요소를 균일하게 유지하고 대상 작물의 생육에 적합한 적정 기류를 제공하는 작물의 생산 품질 및 에너지 절감과 직접적인 연관이 있는 중요한 기술적 요소이다. 현재 식물공장의 공조설비는 재배환경에 특화된 설계방식과 운영기술이 확립되지 않은 이유로 경험 및 주관적인 판단에 의존하여 설계되었다. 시설 구조를 고려한 공조설비의 적정 배치 및 운영을 위한 설계 과정은 생산비 절감을 위해 반드시 선행되어야 하는 중요한 과정이나 고가의 계측장비 활용과 시간 및 비용 등의 발생으로 대부분 그 처리과정이 생략되었다[10-12]. 이러한 설계 비용 및 소요시간을 최소화하기 위해서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 기법을 이용한 공기유동장치의 적정 배치 및 운영기술에 대한 최적화 과정이 선행되어야 한다. CFD(전산유체역학)는 컴퓨터를 이용하여 수치해석적 방법으로 유체의 움직임을 해석하는 개념이다. 전산유체역학의 처리과정은 크게 세 가지로 구분된다. 첫 번째는 해석하고자 하는 대상의 형태 및 계산영역을 정의하는 전처리 과정(Pre-processing)이다. 두 번째는 재질의 물리적 특성 및 경계조건을 입력하여 해석하는 과정(Solving)이며 마지막으로 해석 결과를 추출 및 분석하는 후처리(Post-processing) 과정이다[13]. 이러한 일련의 과정은 시설 설

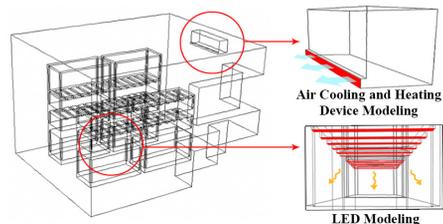
계에 소요되는 시간 및 비용 절감에 효과적이므로 온실 등의 작물재배시설에서 공기유동을 해석하기 위한 도구로 유용하게 활용하고 있다[14,15].

본 연구에서는 완전제어형 식물공장을 대상으로 CFD 시뮬레이션을 수행해 순환 팬의 적정 배치 및 유속을 파악하여 시설 내부의 각 지점별 온도편차를 최소화하고 에너지 소비 효율을 향상시킨다. 먼저 시뮬레이션 조건으로 순환 팬의 부착 위치 및 수량에 따라 4가지 Case로 구분하고, 그 중 가장 우수한 성능의 Case를 대상으로 팬의 유속을 8단계로 변경해가며 시설 내부의 온도 및 기류분포 변화를 분석한다. 이때 해석을 위한 각 Case별 경계 조건 변수 값은 동일하게 설정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Gambit을 이용한 대상 공간의 3D Modeling 및 Meshing 과정과 수치해석을 위한 경계조건에 대하여 설명한다. 3장에서는 순환 팬의 배치 및 유속에 따른 CFD 시뮬레이션의 해석 결과에 대하여 비교 분석하고, 4장에서는 결론 및 향후 연구방향에 대하여 기술한다.

2. 대상공간 모델링 및 경계조건

CFD를 이용하여 식물공장 내 공기 유동 및 온도분포를 분석하기 위해 먼저 대상공간의 기하학적태를 정의하는 Modeling과 계산영역의 격자를 생성하는 Meshing 등의 전처리(Pre-processing) 과정을 수행하였다. Modeling 및 Meshing 분할 처리를 위해 Gambit(ver 2.4)과 수치해석을 위한 메인 모듈로 상용 CFD 코드인 Fluent(ver 6.3)를 사용하였다. 본 연구에서는 모델링을 위해 지하공간에 위치한 가로 3.47m, 세로 4.35m, 높이 2.97m의 완전제어형 식물공장을 대상으로 하며, 시설 내부에는 식물재배기 4set와 온도 제어를 위한 냉난방장치, 그리고 싱크대 등이 배치되어 있다. 각 식물재배기는 2단 1열로 구성되며 재배단 상단에는 Bar Type으로 제작된 LED 조명장치가 6set씩 부착되었다. 공기조화를 위한 냉난방장치는 식물재배기 측면을 바라보는 방향으로 지면으로부터 2.54m 높이 벽면에 부착하였다.

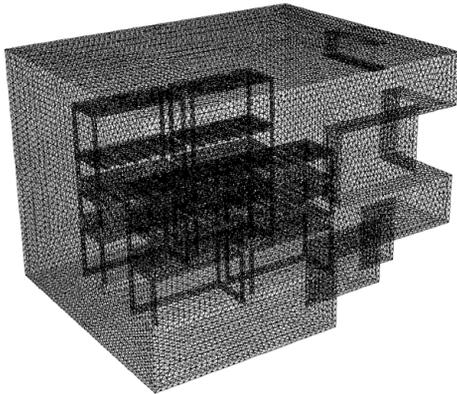


(그림 1) Gambit을 이용한 식물공장 3D 모델링
(Figure 1) 3D modeling for plant factory using Gambit

(표 1) 순환 팬의 수량 및 배치에 따른 시뮬레이션 조건
(Table 1) Simulation condition according to quantity and arrangement of air flow fan

Case	Circulation fan	
	Quantity	Arrangement
Case A	0	-
Case B	4	Top
Case C	4	Bottom
Case D	2	Top

그림 1은 Gambit을 이용하여 실험 대상공간을 3D 한 결과이다. 해석 결과의 정확성을 위해 시설 내부에서 실측한 데이터를 기반으로 기하학 형상을 단순화하여 Modeling 하였다. CFD 시뮬레이션을 위해 순환 팬의 수량 및 배치에 따라 표 1과 같이 총 4가지의 Case로 조건을 분류하였다. 각 Case 별로 Modeling 한 다음 그림 2와 같이 정의된 모델의 체적을 약 63만개의 Mesh로 분할하였다.



(그림 2) Gambit을 이용한 대상공간의 Meshing 분할
(Figure 1) Meshing division of space using Gambit

수치해석을 위한 시뮬레이션의 경계조건은 현장에서의 실측 데이터 및 선행연구에서 제시한 작물의 적정생육환경을 고려하였다. 선행연구에 따르면 엽채류의 생육 적온은 293.15~298.15K이고 생육에 적합한 평균유속은 0.3~0.5m/s이다[15,16]. 이를 기반으로 실내 초기온도를 297K로 설정하고 각 디바이스의 경계조건을 표 2와 같이 설정하였다. 즉, 식물재배용 LED 조명장치의 LED 총 발열 면적은 1.08m², 냉난방장치의 유속은 5m/s, 이때의 출구온도는 296K, 출구면적은 0.04m², 배출되는 기류 방향은 직각을 이룬다. 또한 순환 팬의 Intake 유속은 3.6m/s, Exhaust 유속은 4.7m/s로 경계 조건을 설정하였다.

(표 2) CFD 해석을 위한 각 디바이스의 경계 조건
(Table 2) Boundary conditions of each device for the simulation

Device	Boundary Conditions	Value	
LED	Temperature	300K	
	Area	1.08m ²	
Air conditioning and heating	Velocity	5m/s	
	Temperature	296K	
	Area	0.04m ²	
Air flow Fan	Velocity	Intake	3.6m/s
		Exhaust	4.7m/s
	Temperature	296K	

(표 3) CFD 해석을 위한 물리 모델 정의
(Table 3) Definition of Physical model for the simulation

Model	Settings
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	Standard k-epsilon model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Enabled

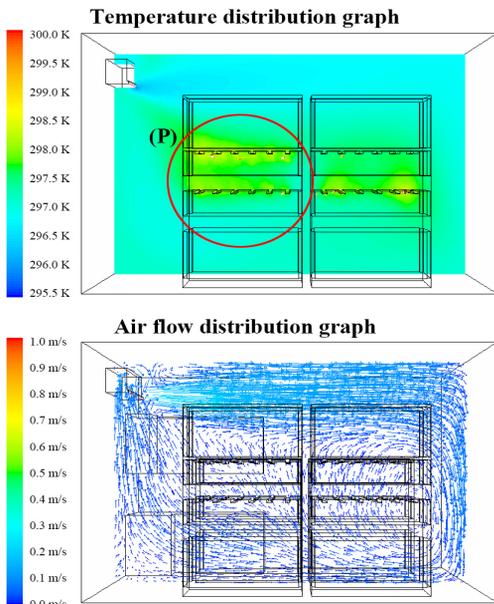
표 3은 수치해석을 위한 물리 모델을 정의 한 것이다. 3D 형태의 공간을 대상으로 시간의 흐름에 따른 온도 및 기류의 유동을 확인하기 위해 Unsteady state로 해석과정을 수행하였다. 난류모델은 농업시설 해석 시 비교적 높은 정확도를 보인 Standard K-epsilon turbulence model로 설정하고, 100%의 단열조건으로 외부 열 손실을 고려하지 않았다[11].

3. CFD 시뮬레이션 및 결과 분석

3.1 순환 팬의 수량 및 배치에 따른 시뮬레이션

본 장에서는 표 1의 4가지 Case에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. Case A는 순환 팬 가동을 배제한 채 LED와 냉난방장치만을 가동시킨 실험 조건이다. Case B는 지면으로부터 0.07m 높이의 식물재배기 하단에 4set의 순환 팬을 부착하고 취출 방향을 상단으로 배치하여 냉난방장치 및 LED조명장치와 동시 가동한 실험 조건이다. Case C는 지면으로부터

터 2.37m 높이의 식물재배기 상단에 4set의 순환 팬을 부착하고 취출 방향을 하단으로 배치하여 냉난방장치 및 LED 조명장치를 동시 가동한 조건이며, Case D는 순환 팬의 수량을 2set로 조절하여 Case C와 동일 위치에서 가동한 실험 조건이다. 그림 3~그림 6은 각 Case에 따라 변화하는 시설 내부의 온도 및 기류 분포이며 각 디바이스 가동 시점부터 10분 경과한 이후의 시뮬레이션 결과이다. 각 그래프에서 붉은 색상은 고온 또는 강한 유속을 나타내며 파란 색상은 저온 또는 약한 유속을 의미한다. 하단 그래프의 화살표는 각 지점의 기류 방향과 크기 그리고 전체적인 공기의 흐름을 나타낸다. 또한 각 Case별 성능 분석을 위해 평균온도 및 평균유속, 그리고 목표온도(296~297K)와 목표유속(0.3~0.5m/s)에 대한 불림비율을 활용하였다.

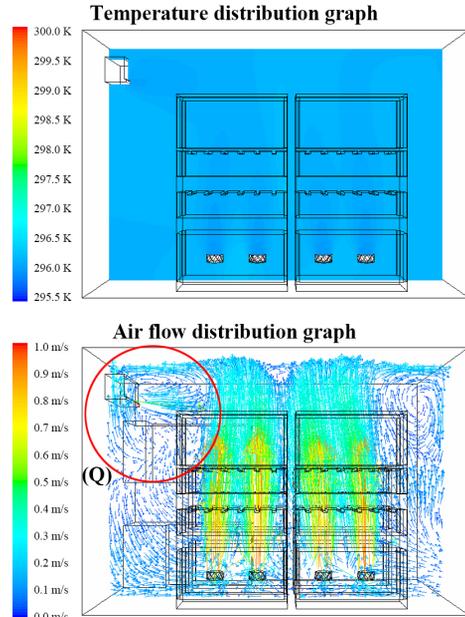


(그림 3) Case A 조건의 온도 및 기류 분포

(Figure 3) Distribution of temperature and air flow under condition of Case A

그림 3의 Case A에서는 지점 (P)에서 나타난 바와 같이 LED 조명장치에서 발생하는 열로 인해 공간 내부 온도가 점차적으로 상승하는 패턴을 보였다. 이때 평균온도는 목표온도 296K 보다 1.15℃ 높은 297.15K이며 최고온도는 311.17K이다. 각 구간별 분석 결과에 따르면 296~297K 구간에서 33.59%, 297~298K에서는 63.58%의 불균일한 온도분포를 보였다. 그 이유는 LED 발열과 냉난방장치의 취출 방향으로 인해 기류가 벽면을 따라 순환하

여 재배단 내부의 유속이 느리기 때문이다. 이때 평균유속은 0.32m/s며 목표유속인 0.3~0.5m/s 구간에 26.83% 분포하였다.

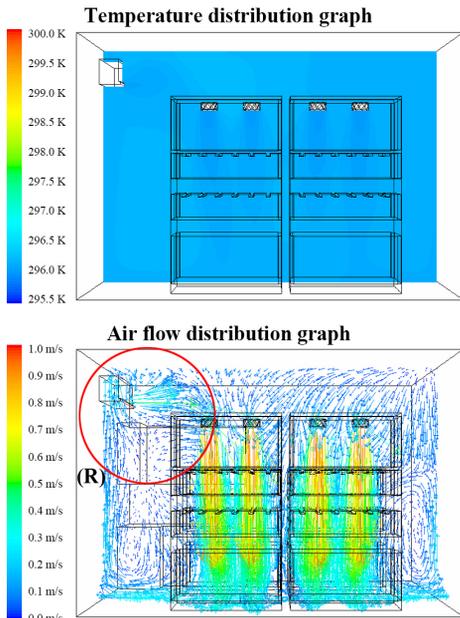


(그림 4) Case B 조건의 온도 및 기류 분포

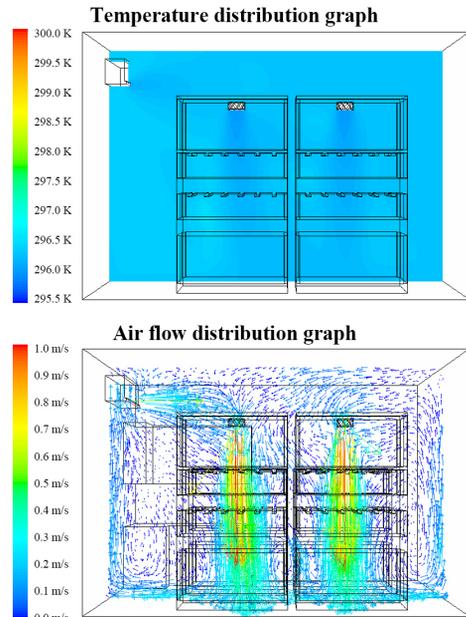
(Figure 4) Distribution of temperature and air flow under condition of Case B

Case B는 평균온도가 296.21K이며 99.73%가 목표온도(296~297K) 구간에 분포하는 매우 균일한 결과를 나타냈다. 평균유속은 0.96m/s으로 Case A와 비교할 때 약 3배 증가했으며 목표유속 구간의 불림비율은 16.58%로 다소 낮은 분포를 보였다. 또한 LED조명장치의 인접 영역에 정체된 기류는 개선되었으나 (Q)지점과 같이 냉난방장치에서 발생한 기류와 순환 팬의 기류가 취출 방향으로 인해 서로 상쇄되어 재순환 영역을 형성하였다.

순환 팬을 상단에 배치한 Case C는 평균온도가 296.18K이며 목표온도(296~297K) 구간에 99.80%를 차지하여 Case B보다 균일한 온도분포를 보였다. 평균유속은 0.85m/s로 Case B보다는 다소 느리나 목표유속구간의 불림 비율이 20.24%로 더욱 적합한 조건임을 확인하였다. 이때 공기의 흐름을 살펴보면 냉난방장치에서 발생한 차가운 기류가 순환 팬을 통해 재배단으로 빠르게 이동하여 그림4의 (Q)지점에서 발생한 재순환 영역에서 정체되었던 기류가 그림 5의 (R)과 같이 개선되었다.



(그림 5) Case C 조건의 온도 및 기류 분포
(Figure 5) Distribution of temperature and air flow under condition of Case C



(그림 6) Case D 조건의 온도 및 기류 분포
(Figure 6) Distribution of temperature and air flow under condition of Case D

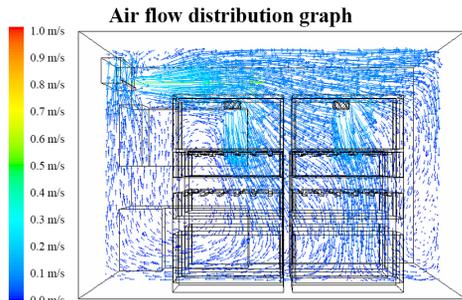
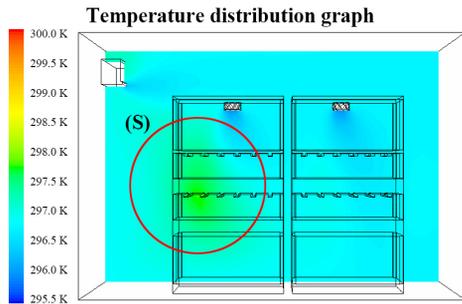
Case D의 평균온도는 296.33K로 Case C보다 소폭 상승하였으며 296~297K 구간에서 99.09%를 차지하였다. 기류분포는 Case C의 해석 결과와 유사하나 순환 팬 수량이 2set로 감소함에 따라 평균유속이 0.51m/s의 낮은 수치를 보였다. 그러나 Case D의 평균유속은 열채류 생육에 적합한 적정 기류인 0.3~0.5m/s 에 부합하며 목표유속구간에서 29.21%의 비율을 차지하므로 현재 실험공간에 가장 적합한 설치 조건임을 확인하였다.

3.2 순환 팬의 유속변화에 따른 시뮬레이션

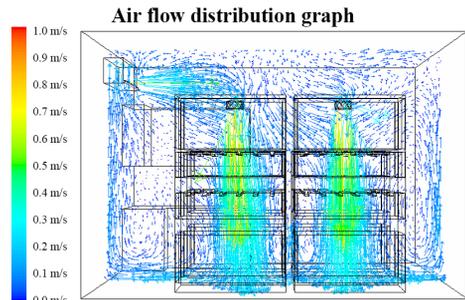
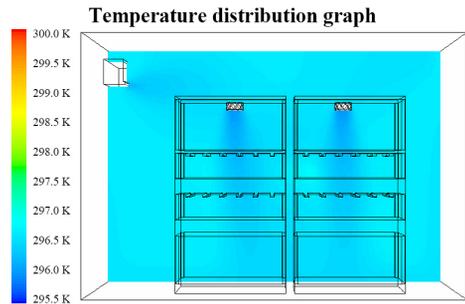
본 장에서는 시설 내부에 부착한 순환 팬의 적정유속을 파악하기 위하여 3.1장에서 가장 우수한 성능을 보인 Case D를 대상으로 순환 팬의 유속변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 0.98m/s, 1.6m/s, 2.09m/s, 2.51m/s, 3.22m/s, 3.79m/s, 4.28m/s, 4.73m/s의 총 8가지 출구유속변화에 대하여 Case D-1 ~ Case D-8의 시뮬레이션 조건으로 분류하였으며 유속을 제외한 기타 경계조건은 동일하게 설정하였다. 또한 각 디바이스를 가동한 시점에서 1분이 경과된 후의 시뮬레이션 결과를 대상으로 표 4의 분석 결과를 도출하였다. 이때 Temperature Avg는 시설 내부의 평균온도, Temperature Ratio는 목표온도구간인 296~297K 구간의 볼륨비율, Velocity Avg는 시설 내부의 평균 유속, Velocity Ratio는 목표유속 구간인 0.3~0.5m/s 구간의 볼륨비율을 의미한다. 해석 결과의 특징을 기반으로 Case D-1, Case D-4, Case D-6, Case D-8의 조건만을 분석하였다.

(표 4) 순환 팬의 속도조절에 따른 온도 및 유속
(Table 4) Temperature and air flow by velocity control of air flow fan

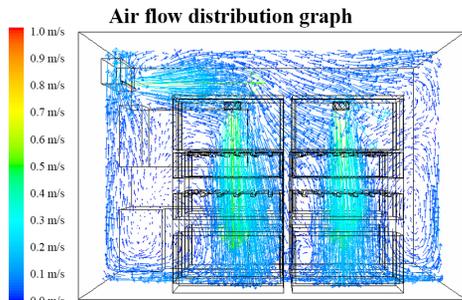
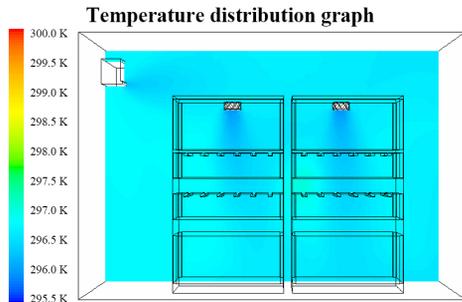
Case	Fan Exhaust [m/s]	Temperature		Velocity	
		Avg [K]	Ratio [%]	Avg [K]	Ratio [%]
D-1	0.98	296.91	81.53	0.25	14.19
D-2	1.6	296.85	90.88	0.28	19.37
D-3	2.09	296.79	94.51	0.31	21.00
D-4	2.51	296.75	95.59	0.34	22.86
D-5	3.22	296.68	97.12	0.39	24.53
D-6	3.8	296.63	97.82	0.43	26.15
D-7	4.29	296.58	98.33	0.46	27.05
D-8	4.73	296.55	98.76	0.49	27.60



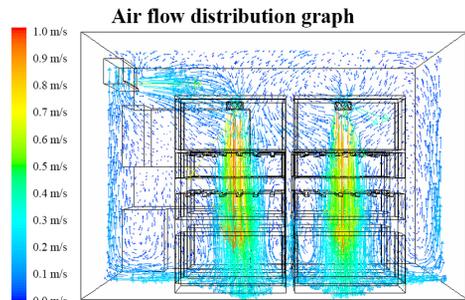
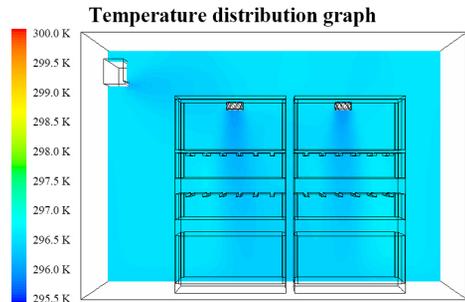
(그림 7) Case D-1 조건의 온도 및 기류 분포
(Figure 7) Distribution of temperature and air flow under condition of Case D-1



(그림 9) Case D-6 조건의 온도 및 기류 분포
(Figure 9) Distribution of temperature and air flow under condition of Case D-6



(그림 8) Case D-4 조건의 온도 및 기류 분포
(Figure 8) Distribution of temperature and air flow under condition of Case D-4

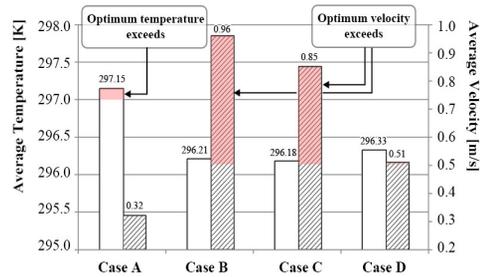


(그림 10) Case D-8 조건의 온도 및 기류 분포
(Figure 10) Distribution of temperature and air flow under condition of Case D-8

팬의 출구유속을 0.98m/s로 설정한 Case D-1 조건의 해석 결과는 그림 7과 같다. 냉난방장치에서 발생하는 유속에 비해 순환 팬의 유속이 느린 이유로 기류의 방향이 오른쪽으로 선회하여 (S)구간에 충분한 기류가 형성되지 않았다. 이때 평균온도는 296.91K이며 구간별 볼륨비율은 296~297K에서 81.53%, 297~298K는 17.22%의 불균일한 온도분포를 보였다. 출구유속을 2.51m/s로 설정한 Case D-4의 평균온도는 296.75K이며 296~297K 구간의 볼륨 비율은 95.59%로 Case D-1에 비해 약 14.06% 상승하였다. 또한 시설 내부의 평균유속은 0.34m/s이며 목표유속인 0.3~0.5m/s 구간에서 22.86%를 차지함으로써 Case D-1(평균유속 0.25 m/s, 목표유속구간 볼륨비율 14.19%) 보다 향상된 결과를 보였다. 그림 8은 순환 팬의 유속증가에 따라 기류의 방향이 수직 하강하는 패턴을 보이는 Case D-4의 시뮬레이션 결과이다. 그림 9는 순환 팬의 출구유속을 3.80m/s 로 조절한 Case D-6의 시뮬레이션 결과이다. 평균 온도는 296.63K이며 목표온도구간인 296~297K의 볼륨비율은 97.82%로 매우 균일한 온도분포를 보였으며, 평균유속은 0.43m/s, 목표유속구간의 볼륨 비율은 27.04%였다. Case D-8에서 순환 팬의 출구유속은 4.73m/s으로 평균온도 296.55K, 목표온도구간의 볼륨 비율은 98.76% 이며 Case D-6과 비교할 때 1% 미만의 미미한 차이를 보였다. 또한 평균유속은 0.49m/s 이며 목표유속구간의 볼륨 비율은 27.6%로 가장 우수한 결과를 보였으나, 에너지 측면만을 고려하면 Case D-3이 본 실험환경에 가장 적합한 조건이었다. 그러나 순환 팬의 유속은 하드웨어 성능에 따라 에너지 소비량이 상이하므로 재배작물의 생육특성과 함께 이를 고려하여 적절하게 조절되어야 한다.

4. 결 론

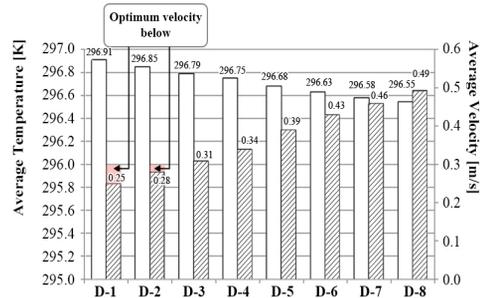
본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 이용하여 밀폐된 식물 공장 시설 내부의 온도편차를 최소화하고 에너지 소비 효율을 향상시키기 위한 순환 팬의 적정 배치 및 유속을 파악하였다. 그림 11은 Case A ~ Case D의 시뮬레이션 결과로 시설 내부의 평균온도 및 평균유속을 나타낸 것이다. Case A의 평균온도는 297.15K로 기타 조건에 비해 약 1K 높고 상대적으로 불균일한 온도분포를 보였다. 이는 냉난방장치와 순환 팬의 동시 가동은 냉난방장치만을 가동한 조건보다 시설 내부의 온도 분포를 균일하게 유지시키는데 효과적임을 의미한다.



Average Temperature[K]	297.15	296.21	296.18	269.33
296~297K[%]	33.59	99.73	99.80	99.09
Average Velocity[m/s]	0.32	0.96	0.85	0.51
0.3~0.5m/s[%]	26.83	16.58	20.24	29.21

(그림 11) 순환 팬 배치에 따른 평균온도 및 평균유속 해석 결과

(Figure 11) Average temperature and average air flow analysis results by arranging air circulation fan



Average Temperature[K]	296.91	296.85	296.79	296.75	296.68	296.63	296.58	296.55
296~297K[%]	81.53	90.88	94.51	95.59	97.12	97.82	98.33	98.76
Average Velocity[m/s]	0.25	0.28	0.31	0.34	0.39	0.43	0.46	0.49
0.3~0.5m/s[%]	14.19	19.37	21.00	22.86	24.53	26.15	27.05	27.60

(그림 12) 순환 팬의 속도조절에 따른 평균온도 및 평균유속의 해석 결과

(Figure 12) Average temperature and average air flow analysis results by velocity control of air flow fan

Case B와 Case C의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 평균온도 및 평균유속은 유사하지만 순환 팬이 하단에 설치된 Case B의 경우, 공기유동장치의 취출 방향으로 인해 기류 흐름이 원활하지 못하여 좌우 모서리에 국부적인 재순환 영역이 생성되었다. 공기의 흐름이 정체되는 이러한 특정 영역의 생성을 방지하기 위해서는 냉난방장치와 순환 팬의 취출 방향을

고려하여 설치 위치를 적합하게 선정해야 한다. 또한 Case D와 Case B, 그리고 Case C를 비교해보면 동일한 경계 조건 하에서 시설 내부에 설치한 순환 팬의 수량이 증가할수록 더욱 균일한 온도분포를 보였음을 알 수 있다. 순환 팬의 수량을 절반으로 줄인 Case D의 평균유속은 Case B, Case C보다 약 40~47% 감소하였으나 식물생육에 적합한 기류인 0.3~0.5m/s에 가장 부합하였고 평균온도는 0.03K의 매우 미미한 차이를 보였다. 즉 2set의 순환 팬을 식물재배기 상단에 부착한 Case D가 적은 양의 에너지를 소비하면서 설정온도에 부합하는 296.33K의 평균온도 및 식물생육에 적합한 0.51m/s의 기류분포를 보여 대상공간에 가장 적합한 시뮬레이션 조건임을 확인하였다.

그림 12는 Case D에서 순환 팬의 유속을 총 8단계(0.98m/s, 1.6m/s, 2.09m/s, 2.51m/s, 3.22m/s, 3.79m/s, 4.28m/s, 4.73m/s)로 분류하여 평균온도 및 유속을 해석한 결과이다. 그래프에 나타난 바와 같이 순환 팬의 출구유속이 D-1에서 D-8로 점차 증가할수록 평균온도(Average Temperature[K])는 감소하고 균일도(296~297K[%])는 향상되었다. 온도 및 기류 분포의 균일성은 순환 팬 속도를 최대 가동시킨 Case D-8에서 가장 우수한 성능을 보였으나, Case D-3~Case D-8의 시뮬레이션 조건 모두 목표온도 및 적정기류를 만족하였다. 이때 에너지 측면만을 고려하면 Case D-3이 약 55.81%의 높은 에너지 절감률을 보였다. 그러나 순환 팬의 하드웨어 성능에 따라 에너지 소비량이 상이하므로 이를 고려하여 적절한 순환 팬의 유속이 결정되어야 할 것이다.

향후에는 식물공장의 체적, 구조 등을 다양화하여 순환 팬의 용량, 배치 파악을 위한 일반화된 수식을 도출하고, 실측 과정을 통해 해석 결과에 대한 정확성을 입증하기 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌 (Reference)

- [1] J. W. Lee, J. H. Hwang, Y. Hyun, "Trends and Future Direction of Agricultural ICT Convergence Technology", Journal of The Korean Institute of Communication Sciences, Vol. 31, no.5, pp.54-60, May. 2014.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/3459581>
- [2] Woo-Soo Jeong, Sa-Hyuk Kim, "An Analysis of the Economic Effects on the Project to Construct Smart Network", Journal of Internet Computing and Services(JICS), Vol. 12, no.4, pp.61-71, Aug. 2011.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/1510108>
- [3] Woong-Sik Kim, Jong-Ki Kim, "The Implementation of Remote Machine Health Monitoring System using Internet", Journal of Internet Computing and Services(JICS), Vol. 14, no.6, pp.19-23, Dec. 2013.
<http://dx.doi.org/10.7472/jksii.2013.14.6.19>
- [4] Bup-Ki Min, Yongjin Seo, Hyeon Soo Kim, Seunghak Kuk, Yonghwan Jung, Chumsu Kim, "Dynamic Reconfigurable Integrated Management and Monitoring System for Heterogeneous Distributed Environments", Journal of Internet Computing and Services(JICS), Vol. 13, no.6, pp.64-74, Dec. 2012.
<http://dx.doi.org/10.7472/jksii.2012.13.6.63>
- [5] Jae Whune Kim, "Trend and direction for plant factory system", J Plant Biotechnol, Vol. 37, no.4, pp.442-455, 2010.
<http://dx.doi.org/10.5010/JPB.2010.37.4.442>
- [6] Dong-Yoon Park, Seong-Teak Jang, Seong-Ju Chang, "Numerical Study on the Thermal Environment of a Natural Light Based Multi-layered Plant Factory", Journal of the Korea institute of ecological architecture and environment, Vol. 13, no.5, pp.43-50, Oct. 2013.
<http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2013.13.5.043>
- [7] G. I. Lee, J. K. Kwon, D. E. Kim, "Forced Ventilation Characteristic of the Vertical Plant Factory using CFD Simulation", Vol. 18, no.1, pp.221-222, 2013.
<http://www.riss.kr/link?id=A99829723>
- [8] Sang-Woon Nam, Young-Shik Kim, "Analysis on the Uniformity of Temperature and Humidity According to Environment Control in Tomato Greenhouses", Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 18, no.3, pp.215-224, Sep. 2009.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/1100044>
- [9] Boulard. T, Papadakis. G, Kittas. C, Mermier. M, "Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse", Agricultural and forest meteorology, Vol. 88, no. 1-4, pp.111-119, 1997.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00043-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00043-9)
- [10] Hankyoung KIM, "Design of Test-Effort Estimation Model", Journal of Internet Computing and Services(JICS), Vol. 14, no.1, pp.23-30, Feb. 2013.
<http://dx.doi.org/10.7472/jksii.2013.14.23>
- [11] Yun N.K., "Design and Analysis Technique for Greenhouse Environment Using CED Simulation -Design and Analysis for Natural Ventilation-", Controlled Horticulture Research Vol. 15, no.1, pp.20-26, Sep. 2002.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/880544>

- [12] In-Bok Lee, Nam-Kyu Yun, Thierry Boulard, Jean Claude Roy, Sung-Hyoun Lee, Gyoeng-Won Kim, Se-Woon Hong, Si-Heung Sung, "Development of an Aerodynamic Simulation for Studying Microclimate of Plant Canopy in Greenhouse - (2) Development of CFD Model to Study the Effect of Tomato Plants on Internal Climate of Greenhouse -", Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 15, no.4, pp.296-305, Dec. 2006.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/916217>
- [13] H. K. Myeong, "Introduction to CFD", Munundang, 2008.
- [14] Kyung-jin Yim, Hong-jip Kim, Sang-min Lee, Kyoung-Sub Park, "CFD Analysis on the Flow Uniformity of a CO₂ Enrichment System", Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 22, no.2, pp.123-130, Jun. 2013.
<http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2013.22.2.123>
- [15] In-Ho Yu, Myeong-Wan Cho, Si-Young Lee, Hee-Chun, In-Bok Lee, "Effects of Circulation Fans on Uniformity of Meteorological Factors in Warm Air Heated Greenhouse", Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 16, no.4, pp.291-296, Dec. 2007.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/917141>
- [16] You Heo, So-Hee Kim, Eun-Gi Park, Beung-Gu Son, Young-Wan Choi, Yong-Jae Lee, Young-Hoon Park, Jeong-Min Suh, Jae-Hwan Cho, Chang-Oh Hong, Sang-Gye Lee, Jum-Soon Kang, "The Influence of Abnormally High Temperatures on Growth and Yield of Hot Pepper(Capsicum annum L.)", Journal of Agriculture & Life Sciences, Vol. 47, no.2, pp.9-15, 2013.
<http://db.koreascholar.com/article.aspx?code=280266>

● 저 자 소 개 ●



문 승 미 (Seung-Mi Moon)

2013년 공주대학교 컴퓨터공학부 멀티미디어공학전공(공학사)
 2013~현재 공주대학교 멀티미디어공학과 석사과정
 관심분야 : 상황인식, 모바일 서비스, 인터넷 기술
 E-mail : syoongk@kongju.ac.kr



권 속 연 (Sook-Youn kwon)

2000년 한국방송통신대학교 컴퓨터학과(이학사)
 2002년 공주대학교 대학원 전자계산학과(이학석사)
 2014년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2014년~현재 공주대학교 그린에너지기술연구소 연구교수
 관심분야 : 상황인식, 건물에너지관리, 상황조명, 식물공장, USN Service
 E-mail : sookyoun@kongju.ac.kr



임 재 현 (Jae-Hyun Lim)

1986년 중앙대학교 전산계산학과(이학사)
 1988년 중앙대학교 대학원 전자계산학과(이학석사)
 1998년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
 1988년~현재 공주대학교 컴퓨터공학부 교수
 관심분야 : 상황인식, 건물에너지관리, 상황조명, 식물공장, 모바일 서비스, USN Service
 E-mail : defacto@kongju.ac.kr