Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 11 pp. 7990-8000, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7990
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

다층 재배선반을 갖는 하이브리드 식물공장의 열유동 특성

윤지환[1], 유봉조[2*], 김영식[2]
[1](주)PDK, [2]한밭대학교 기계공학과

Thermal Flow Characteristics of a Hybrid Plant Factory with Multi-layer Cultivation Shelves

Ji-Hwan Yoon[1], Bong-Jo Ryu[2*], Youngshik Kim[2]
[1]PDK Co. LTD
[2]Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University

요 약 식물공장은 환경적 조건을 조절하여 계절이나 장소에 관계없이 농산물을 일정하게 생산하는 식물재배 시스템이다. 식물공장에 있어서 내부의 열 유동은 식물공장의 중요한 변수이다. 본 논문에서는 다층 재배선반을 갖는 하이브리드 식물공장 내의 열유동 특성을 수치 시뮬레이션을 통해 연구하였다. 열 유동 특성의 수치해를 얻기 위해 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하였다. 수치해석 모델에 있어서는 저 레이놀드수(low Reynolds number) $\kappa-\epsilon$ 난류모델을 이용하였으며, 해석방법으로는 비압축성 점성유동 영역과 압력경계 조건을 사용하였다. 수치해석에 있어, 3종류의 유입 공기속도와 재배선반의 위치변화에 따른 식물공장 내의 열유동 특성을 상용 프로그램인 Solid Works Flow simulation을 사용하였다. 수치해석을 통한 결론은 다음과 같다. 첫째, 송풍기를 통한 식물공장 내의 유입 공기속도를 1.6 m/s로 하였을 때, Case 3의 재배선반 배치가 비교적 균일한 온도 분포를 나타내었고, LED광만을 사용한 Case 1의 배치는 시험베드(test bed) TB2와 TB3 영역의 낮은 온도분포로 인하여 서큘레이터 등을 통한 추가적인 온도 제어가 필요할 것으로 판단되었다. 둘째, 식물재배 LED 인공광(DYLED47)의 청색광과 적색광의 비율을 1:1로 100% 구동 시, 재배선반의 평균 온도가 약 3℃ 증가하였다. 본 논문은 한국산학기술학회 논문지 심사용 투고요령입니다.

Abstract Plant factories are plant cultivation systems which produce farm products uniformly under the controlled environmental condition regardless of seasons and places. Thermal flow in the plant factory is an important parameter in cultivating plants. In this research, we study thermal flow characteristics for a hybrid plant factory with multi-layer cultivation shelves using computer simulation techniques. In order to obtain numerical solutions for thermal flow characteristics, a finite volume method was applied. We consider a low-Reynolds-number $\kappa-\epsilon$ turbulence model, incompressible viscous flows, and pressure boundary conditions for numerical simulation. Commercial software Solid Works Flow Simulation is then used to investigate characteristics of thermal flows in the plant factory applying several different inflow air velocities and arrangements of cultivation shelves. From numerical analysis results, we found that temperatures in cultivation shelves were uniformly distributed for Case 3 when the inflow air velocity was 1.6 m/s by using a blower in the plant factory. However in Case 1 lower temperature distributions were observed in test beds, TB2 and TB3, which indicated that additional temperature control efforts would be required. Average shelf temperature increased by 3℃ using artificial light source (DYLED47) with 50% blue and 50% red LED ratios. Korea Academia-Industrial cooperation Society.

Keywords : Hybrid plant factory, LED light, Multi-layer cultivation shelves, Sun light, Thermal flow characteristics,

1. 서론

최근 지구 온난화, 기후변화, 환경오염 등으로 인한 농작물의 피해가 갈수록 심각해지고, 농작물 생산량의 감소와 가격 급등으로 인해 식물공장 도입의 필요성과 중요성이 증대되고 있다. 식물공장이란 옥내외 시설 내

*Corresponding Author : Bong-Jo Ryu(Hanbat National University)
Tel: +82-42-821-1159 email: bjryu701@hanabat.ac.kr
Received October 20, 2015 Revised November 3, 2015
Accepted November 6, 2015 Published November 30, 2015

에서 광도, 온·습도, 이산화탄소 농도, 물, 배양액 등 식물 생육환경을 인공적으로 제어하여 농작물을 재배하는 시스템을 의미한다. 기존의 비닐하우스와 달리 LED, 환경제어시스템, 자동화시설 등이 융합된 형태로 차세대 농업으로서, 국외에서는 1957년 덴마크의 크리스텐센 농장에서 새싹 채소의 일종인 크레스를 컨베이어 시스템으로 재배한 것이 최초이며, 1960년대 미국에서 완전 제어용 식물공장 연구를 시작하였으며, 일본은 1970년대 식물공장 연구를 진행하여 현재 약 200여개 정도 운영을 하고 있다.

국내에서는 1990년대 초, 첨단기술농업의 기초 연구가 진행되어 현재 다수의 지자체들이 빌딩형 식물공장의 건립을 추진하고 있다. 일반적으로 식물공장은 초기 제작비용과 유지비용이 현재의 농업 시장에서는 경쟁력이 높지 않다. 식물공장에서는 식물 생장에 가장 중요한 광합성에 있어 LED나 인공광을 사용하게 되는데 전기비와 유지비가 실용적이지 못하다. 또한, 식물공장 시설은 더욱 더 자동화 및 대형화로 진행될 것이기 때문에 시설내의 환경조절이 더욱 중요하게 될 것이며, 특히, 공장내부의 공기 유동 뿐만아니라 온도, 습도 등의 조건이 중요하다. Johns와 Launder[1]는 난류의 2개 방정식 모델을 지닌 낮은 레이놀드수 현상을 연구하였으며, Lauder와 Sharma[2]는 회전 디스크 주변의 유동 계산에 난류에너지 확산 모델을 적용하였다. Okushima등[3]은 자연 환기식 온실 내의 기상환경을 예측하기 위하여 처음으로 CFD 시뮬레이션 기술을 적용하였다. Montero 등[4], Boulard[5], Kacira 등[6]은 작물이 없는 상태에서 환기 연구를 위하여 CFD기술을 이용하였다.

Lee와 Short[7], Kittas 등[8], Kacira 등[9]은 자연 환기식 다연동 온실의 환기 연구를 위하여 CFD 모델을 개발하였으며 이들의 정확도 향상을 위하여 현장실험, 입자추적을 통한 대기장 측정기술 및 풍동실험 등을 수행하였다.

Bartzanas 등[10], Fatnassi 등[11]도 방충망이 설치된 온실내의 공기유동, 온도 등을 예측하기 위하여 CFD 실험을 수행하였다. 최근 유동저항 문제나 자연대류 방열기의 방열 특성에 관한 연구들도 이루어지고 있다[12-13]. 그러나, 다층 재배선반을 갖고 태양광과 인공광을 병행한 식물재배 시스템의 열유동 해석에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 논문의 목적은 태양광과 인공광인 LED를 병행한 하이브리드 다개층 식물공장 내부의 열유동 특성(온도 및 공기속도 특성)을 유입 공기온도(inlet temperature), 유입 공기속도(inlet velocity) 및 재배선반의 배치변화에 따라 수치 해석적 연구를 하는데 있다.

2. 본론

2.1 하이브리드 다층 식물재배 시스템의 계산 모델 설정

본 논문에서는 식물공장 중 이동 설치와 시스템 결합에 적합한 시판 중인 컨테이너를 이용하여 Fig. 1과 같이 해석 대상으로 하였다. 재배 시스템의 온도와 습도를 유지하기 위하여 해석 공간의 좌측에 항온항습기를 설치하였으며, 우측 벽에는 지름 30cm의 유출구 2개를 상단에 배치하였다. 유입구(Inlet) 1에서는 항온항습기에서 묘삼 재배에 최적인 22℃ 온도의 공기를 유입구 단면에 수직하게 3가지 속도 (0.33, 1, 1.66)m/s로 유입하고, 유출구(Exit) 1~2로 나타낸 2개의 유출구에는 일반 대기압력의 외부 환기구로 단면에 균일 유지된다.

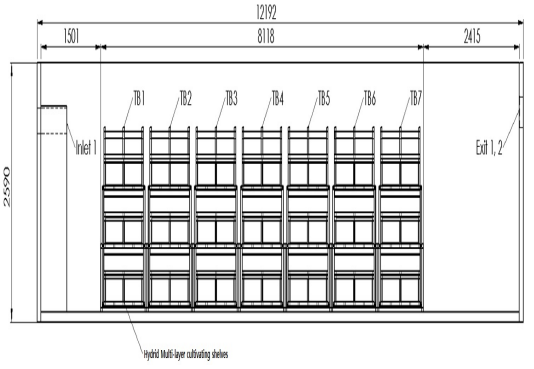


Fig. 1. A model of a hybrid plant factory with multi-layer shelves.

Fig. 2는 식물재배 시스템내의 재배선반(3단)을 모델링한 것으로 좌·우로 슬라이딩이 가능한데, 태양광을 이용할 경우는 슬라이딩 되어 재배 상자의 채광량을 최대한 높이게 되고, LED를 이용할 경우는 일직선 상태로 그대로 있게 된다. 해석 모델은 Fig. 3과 같이 컨테이너 내부의 좌우로 재배선반 7set 씩을 배치하였다. Case 1은 양단 모두 LED 인공광만을 사용하는 재배선반의 구성이고, Case 2는 한쪽 단은 LED 인공광을 사용하고 다

른쪽 반대 단은 태양광 분광을 사용한 재배 구성이다. Case 3는 양단을 모두 태양광 분광을 사용한 재배 구성이다.

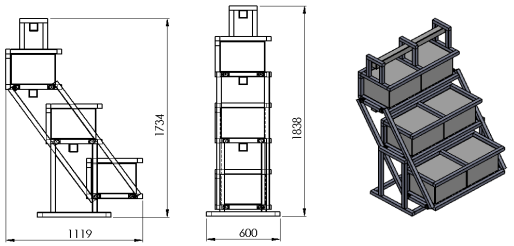
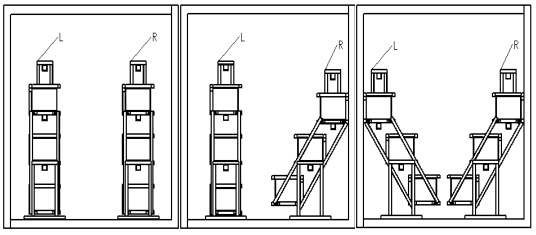


Fig. 2. Schematic diagram of a hybrid multi-layer cultivation shelf.



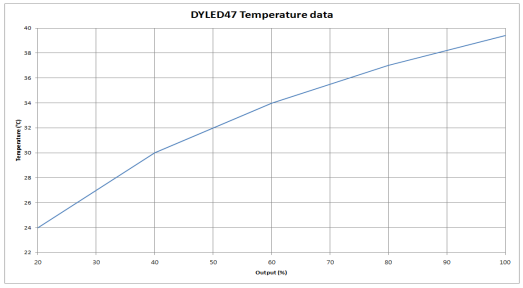
(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig. 3. Arrangement sketch depending on the position of cultivation shelves.

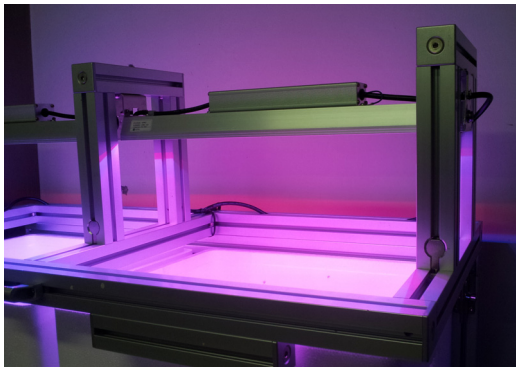
2.2 식물 LED 광원장치와 난류모델의 설정

Fig. 4에서와 같이 본 논문의 인공광원은 식물 LED 광원장치 중 묘삼 재배에 필요한 적색광과 청색광을 혼합하여 각각 0~100%로 가변 조절이 가능한 연구용 모델(DYLED47)을 사용하였다. 이는 고휘도 정밀 제어형으로 적색과 청색의 파장은 적(630nm), 청(460nm)의 파장으로 출력되며, 적색과 청색의 혼합 비율 제어는 전용 광량조절기(DYLED222)를 사용하여 제어하였으며, 시뮬레이션에서 사용할 방열 데이터는 적색 대 청색 비율을 1:1로 100% 출력 사용시 모듈 표면의 온도를 측정하여 사용하였다.

난류유동은 매우 불규칙하고, 비정상 3차원 거동을 하므로 난류유동과 관련된 유동현상을 수치적으로 정확하게 예측하거나 설명하기란 쉬운 일 은 아니다. Jones와 Launder[1]는 여러 복잡한 형상의 유동에 저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델(low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulent model)을 이용하여 계산한 수치해석 결과와 기존 실험결과가 잘 일치했음을 보고하고 있다. 본 논문에서는 유출구를 두기 위하여 공간 내부에 재배선반과 같이 유동 장애물을 설치한 경우에 모든 벽면에 벽면함수를 이용하여야 하는 기존의 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 채택하지 않고, 모든 벽면에서 k 와 ϵ의 값을 0으로 줄 수 있는 계산상의 장점을 가진 난류모델을 채택하였으며, Launder와 Sharma[2]가 제안한 $k-\epsilon$ 난류모델에 관한 식과 상수 값을 이용하되, 난류에너지 소산률의 벽면 값을 0이라고 준 것에 대한 보정 역할을 하는 추가 항들을 포함시켰다.



(a) Temperature data



(b) LED equipment

Fig. 4. DYLED47 temperature data and equipment.

3. 수치해석결과 및 고찰

본 논문에서 사용된 3차원 모델링에 있어서는 상용 소프트웨어인 Solid-Works를 사용하였고, 수치해석 상용 프로그램으로는 Flow-Simulation을 이용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 식물재배 해석공간을 volume으로 나누고 Fluid cells을 조합하여 형성하였다. 특히, 다층 재배선반 부분에서는 유동의 형태와 온도 분포를 보다 정확히 구현하기 위해 격자를 조밀하게 구성하였다. 본 연구의 해석대상 모델은 Y방향은 식물공장 폭 방향

이고, X방향은 식물공장 길이 방향을 나타내며, Z방향은 높이 방향이다. 각각의 Case에 격자수는 Table 1에 나타난 것과 같다.

Table 1. Total number of cells.

	Case 1	Case 2	Case 3
Cells	607,379	580,765	562,236
Fluid Cells	366,468	338,110	319,893
Solid Cells	50,419	54,607	54,340
Partial Cells	190,492	188,048	188,003
Irregular Cells	0	0	0

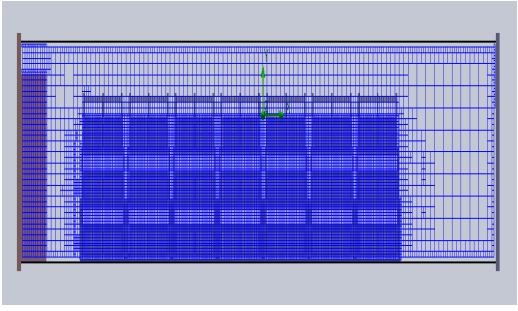
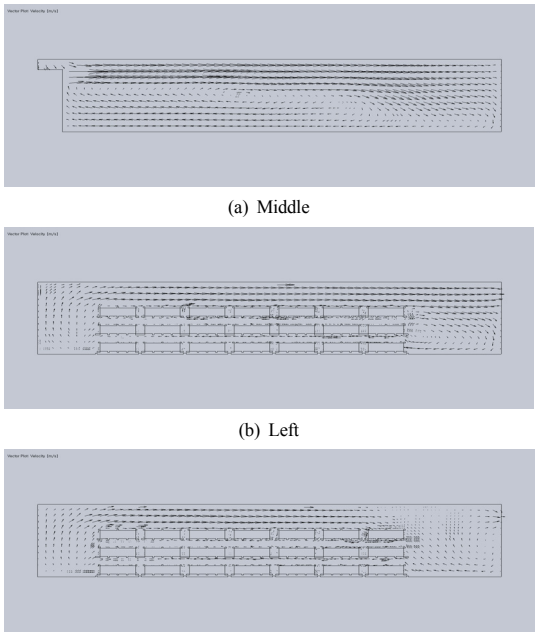


Fig. 5. Cell distribution of calculation domain.

3.1 식물공장 열유동 특성

본 논문에서 채택한 수치해석 방법에 의해 다음과 같은 계산조건으로 온도분포와 속도분포를 계산하였다. Fig. 1에서 보여준 해석공간에 대해 묘삼의 재배에 최적화 온도(22℃)와 3가지의 유입 공기속도 (0.33, 1, 1.66) m/s, 그리고 Fig. 3과 같이 3가지의 하이브리드 다층 재배선반 위치에 따른 Case 1~3의 경우에 대해 계산영역의 온도분포 및 속도분포를 계산하였다. Fig. 6~7은 Case 1의 재배선반 배치일 때, X-Y측면 양단 재배선반의 중심의 위치와 시스템 중심부분에서의 공기속도 벡터를 나타내고, Z측면에서 재배선반 1~3단층에서 묘삼이 화분에 심어지는 위치의 공기 속도벡터를 나타낸다. Case 1과 같은 재배선반 배치에서, 재배선반 위 5cm 부분의 1단과 2단 선반 사이에는 약 0.2m/s 기류의 속도분포를 나타내었고, 2단과 3단 선반사이에는 약 0.4m/s, 상단인 3단에는 약 0.7m/s 기류가 양쪽 재배선반에 비슷하게 분포되었다.

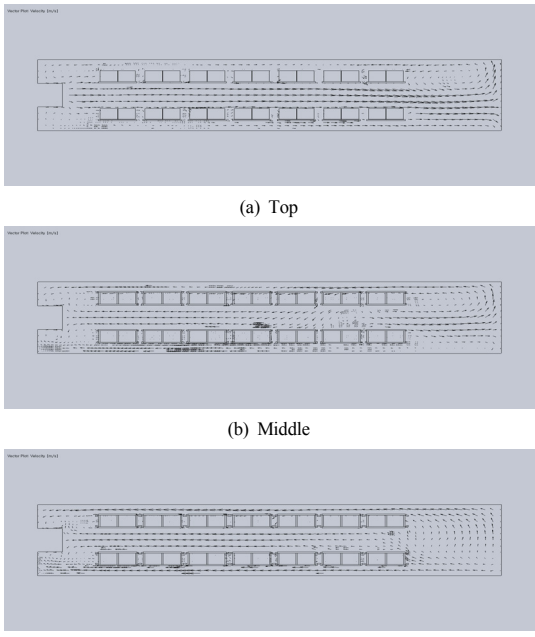


(a) Middle

(b) Left

(c) Right

Fig. 6. Velocity distributions within computation domains (Case 1, X-Y).

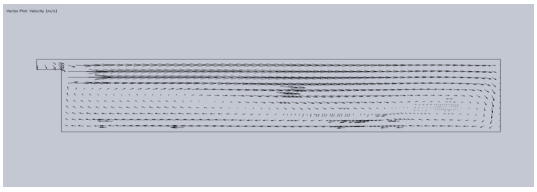


(a) Top

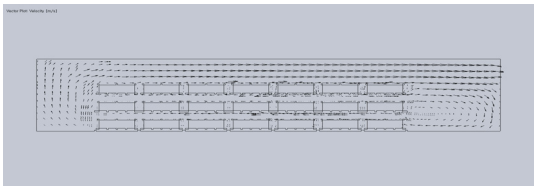
(b) Middle

(c) Bottom

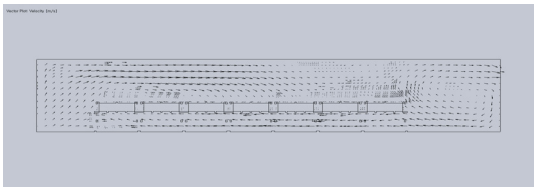
Fig. 7. Velocity distributions within computation domains (Case 1, Z).



(a) Middle

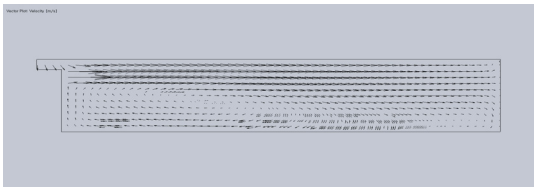


(b) Left

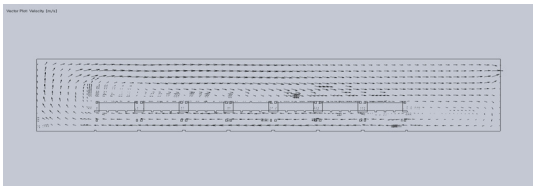


(c) Right

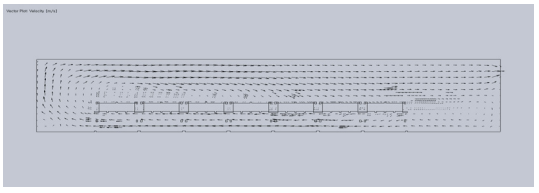
Fig. 8. Velocity distributions within computation domains (Case 2, X-Y).



(a) Middle

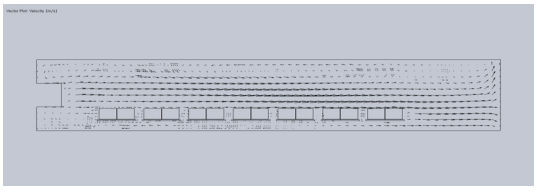


(b) Left

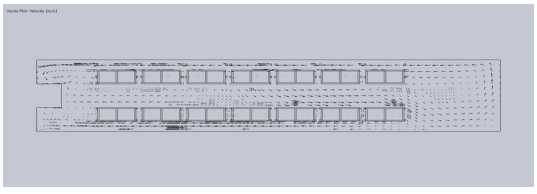


(c) Right

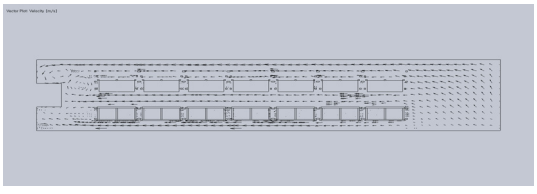
Fig. 10. Velocity distributions within computation domains (Case 3, X-Y).



(a) Top

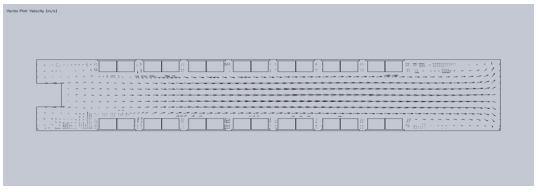


(b) Middle

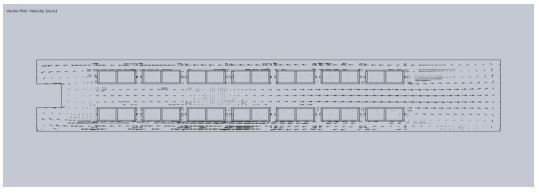


(c) Bottom

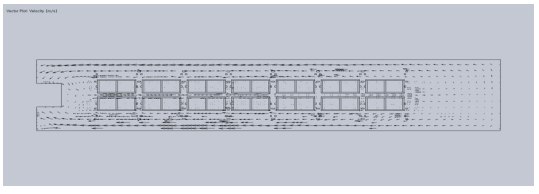
Fig. 9. Velocity distributions within computation domains (Case 2, Z).



(a) Top



(b) Middle

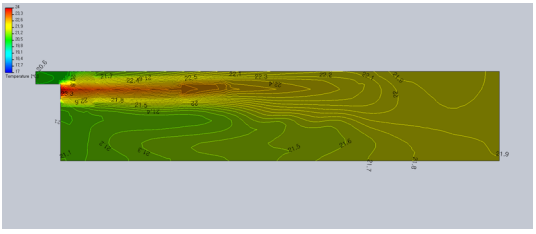


(c) Bottom

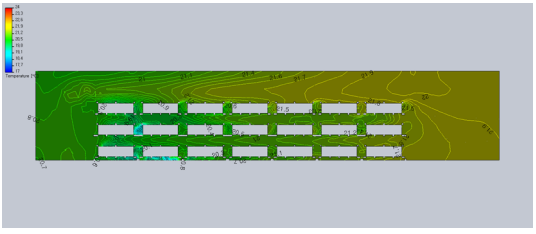
Fig. 11. Velocity distributions within computation domains (Case 3, Z).

Fig. 8~9는 Case 2와 같이 한쪽 재배선반을 슬라이딩 시켜 배치했을 경우의 공기 속도 벡터를 X-Y측면, Z측면 기준으로 나타내었다. 슬라이딩이 되지 않은 재배선반은 Case 1에 비해 각 층별로 약 0.1m/s 증가하였으며, 슬라이딩된 재배선반은 1단 0.4m/s, 2단 0.5m/s, 3단 0.6m/s으로 기류가 형성되었다.

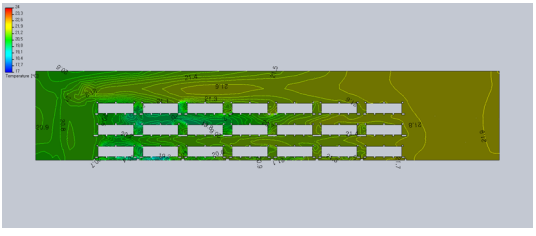
Fig. 10~11은 재배선반의 양단이 모두 슬라이딩된 경우로서, 1단 0.8m/s, 2단 0.9m/s, 3단 0.6m/s으로 기류가 형성되었다. 평균적으로 Case 3의 재배선반 위의 기류 속도가 빠르게 분포되었으며, Case 1의 경우가 가장 느리게 분포되었다. 이는 Case 1의 경우 항온 항습기의 공기가 중앙으로 이동시, 양단의 일직선으로 배치되어 있는 재배선반의 저항으로 인하여 전체적인 속도가 느려진 것으로 판단된다. Case 3의 경우는 양쪽으로 재배선반이 슬라이딩 되어서 저항이 적어진 만큼 평균적으로 속도가 증가된 것으로 판단된다.



(a) Middle

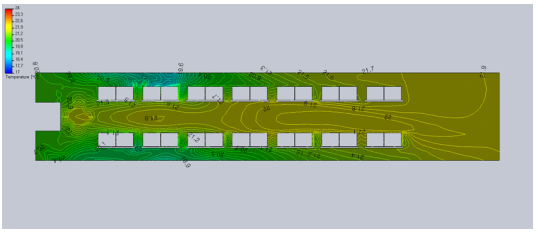


(b) Left

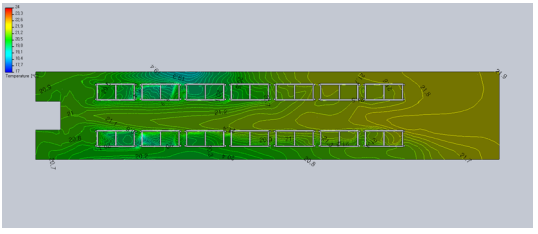


(c) Right

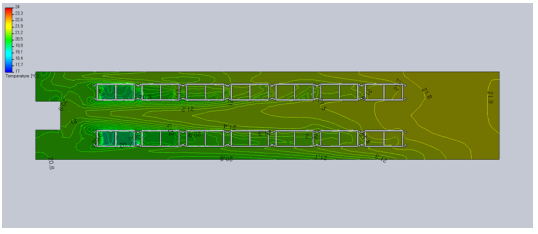
Fig. 12. Temperature distributions within computation domains(Case 1, X-Y).



(a) Top



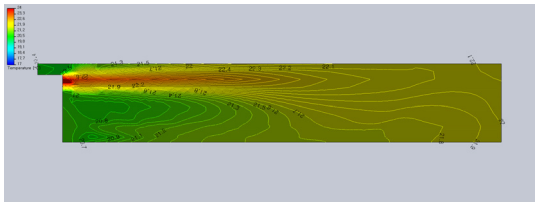
(b) Middle



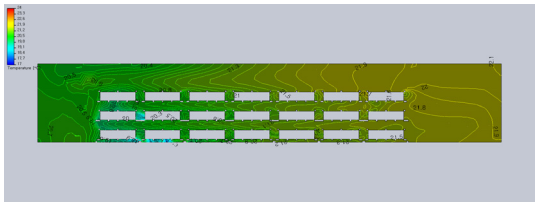
(c) Bottom

Fig. 13. Temperature distributions within computation domains(Case 1, Z).

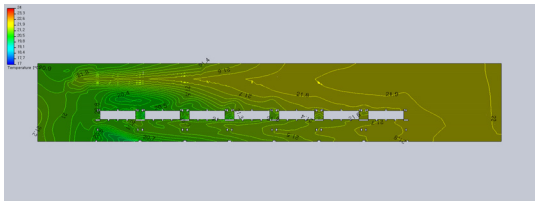
Fig. 12~13은 유입 공기속도가 약 1.6m/s이고 재배온도 22℃ 공기가 유입될 때, Case 1의 온도분포를 X-Y 측면 양단 재배선반의 중심의 위치와 식물공장 중심부분에서 나타낸 것이고, Z측면에서 재배선반의 1~3단 층의 묘삼이 화분에 심어지는 위치에서의 공기 온도분포를 나타낸다. 다른 재배선반은 균일하게 온도가 분포되었지만, 2단과 3단의 TB2, TB3의 온도는 평균 온도보다 적게 분포되었다. 이는 항온 항습기에서 공급된 기류가 반대쪽 벽에 충돌 후 뒤쪽의 재배선반을 지나면서 온도와 속도의 손실이 있어 낮게 분포되었다고 사료된다. 이러한 기류의 저항은 LED 인공광 재배 시에 유입 공기의 유입구 각도를 조절하거나 서큘레이터를 추가로 구동하면 효과적일 것으로 판단된다.



(a) Middle

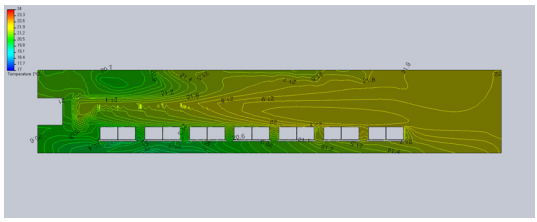


(b) Left

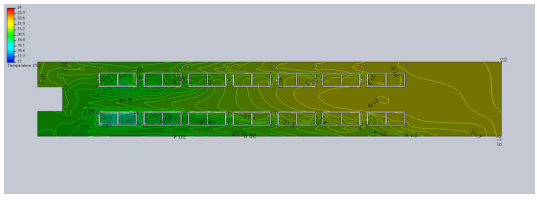


(c) Right

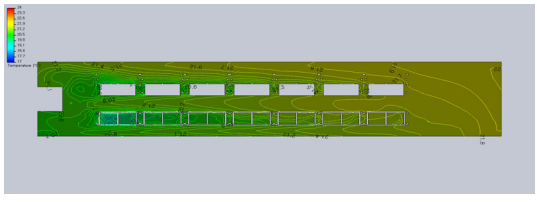
Fig. 14. Temperature distributions within computation domains(Case 2, X-Y).



(a) Top



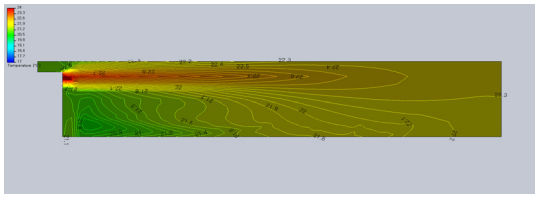
(b) Middle



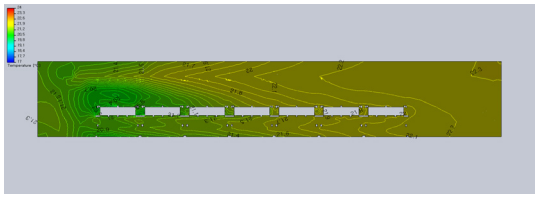
(c) Bottom

Fig. 15. Temperature distributions within computation domains(Case 2, Z).

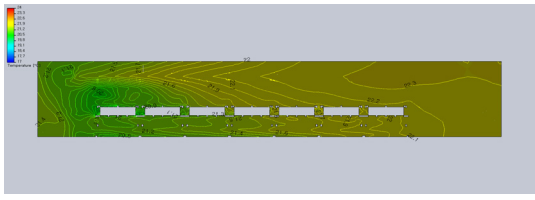
Fig. 14~15는 유입 공기속도가 약 $1.6m/s$이고 재배 온도 22℃ 공기가 유입될 때, 재배선반의 위치 Case 2의 온도 분포를 나타낸 것으로 Case 1보다 조금 더 균등한 온도 분포를 나타낸다. 왼쪽 재배선반인 LED 인공광의 TB1과 TB2 사이에서 온도가 낮아지는 구간이 발생하였지만 재배선반의 측면 구간이고 Case 1과 같이 큰 분포가 아니므로 재배 작물에 영향은 적을 것으로 판단된다.



(a) Middle

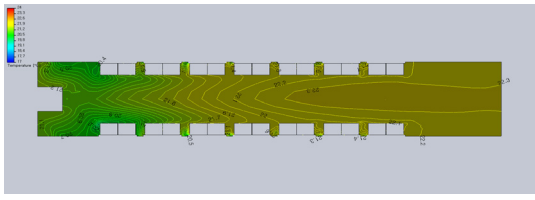


(b) Left

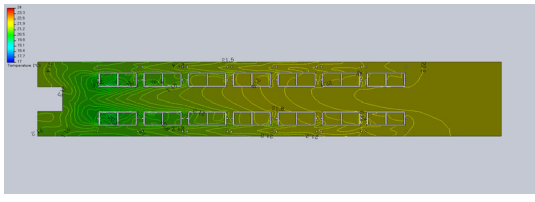


(c) Right

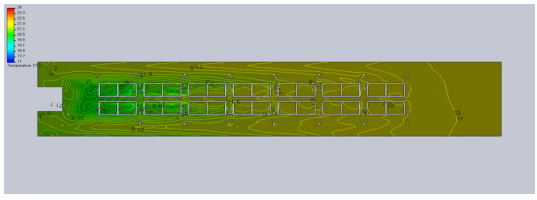
Fig. 16. Temperature distributions within computation domains(Case 3, X-Y).



(a) Top



(b) Middle

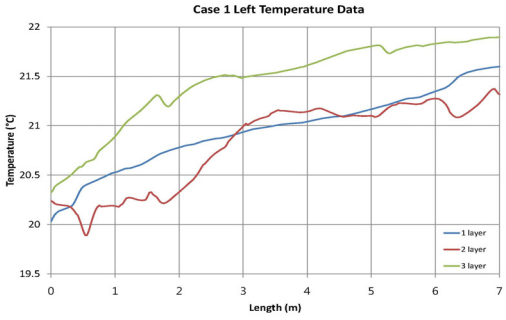


(c) Bottom

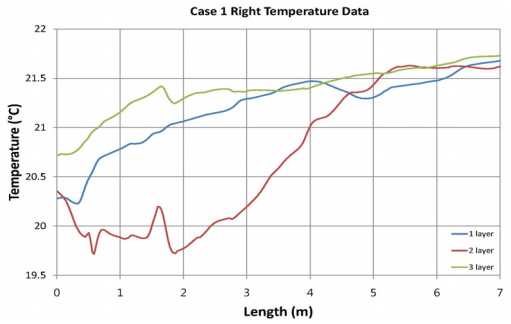
Fig. 17. Temperature distributions within computation domains(Case 3, Z).

Fig. 16~17은 유입 공기속도가 $1.6m/s$이고 재배온도 22℃ 공기가 유입될 때의 Case 3의 온도분포를 나타낸 것으로 재배선반 배치의 3가지 유형 중, 가장 고른 온도 분포를 보였다. 양쪽의 재배선반이 슬라이딩되면서 항온항습기에서 공급되는 기류의 저항이 적은 재배선반 배치로 인하여 효율적인 재순환 유동이 형성되어 온도 분포가 고르게 분포된 것으로 판단된다.

Fig. 18은 Case 1의 양쪽의 재배선반 상자위 5cm 지점의 온도분포를 그래프로 나타낸 것이다. 항온항습기 쪽의 TB1의 온도가 가장 낮으며, TB7로 갈수록 온도가 증가 하는 것으로 확인 되었다. 환기구 벽에 충돌한 공기가 항온항습기 방향으로 이동하는 순환영역(circulation region)이 형성 되면서 갈수록 온도가 낮아져 TB1이 가장 낮은 온도가 형성된 것으로 판단된다. 양단의 최상층인 3단에서 가장 높은 온도가 분포되었고, 2단의 경우에서 가장 낮은 온도가 분포 되었다. 이 경우에는 식물공장 재배동 내부의 순환기류 형성으로 3단에는 항온항습기에서 공급되는 빠른 기류가 1단에는 다시 복귀하는 기류가 형성되고 중간층인 2단에는 정체 기류가 형성되어 낮은 온도가 분포한 것으로 판단된다. Case 1의 경우 가장 낮은 온도는 오른쪽 2단 재배선반의 TB2 구간이 19.7℃ 이고 왼쪽 3단의 TB7 구간이 21.8℃ 로 가장 높았다.

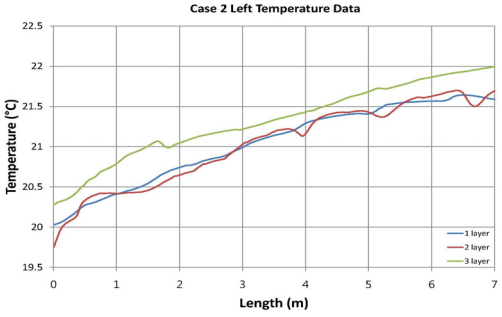


(a) Case 1 Left temperature

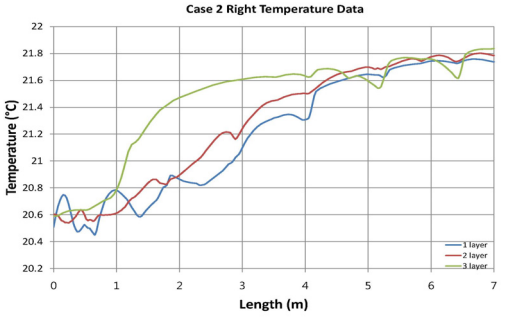


(b) Case 1 Right temperature

Fig. 18. Temperature curves in case 1 for $T_{in} = 22℃$.



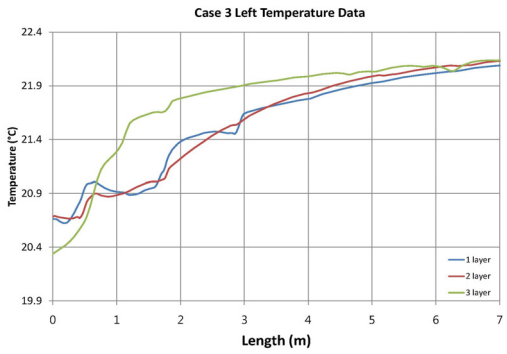
(a) Case 2 Left temperature



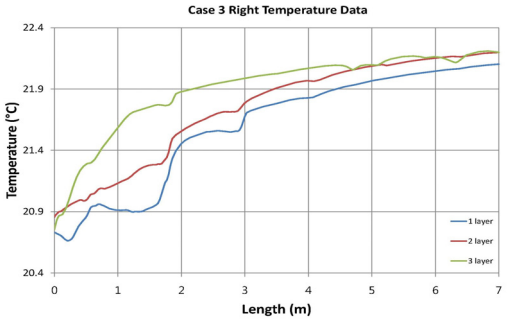
(b) Case 2 Right temperature

Fig. 19. Temperature curves in case 2 for $T_{in} = 22℃$.

Case 2의 배치에서도 Fig. 19와 같이 TB1 구간이 낮은 온도 19.7℃ 분포를 보이고 TB7로 갈수록 온도가 증가 하는 22℃ 의 분포를 보였다. 슬라이딩된 왼쪽의 재배 선반의 경우 각 상자에 저항 구간이 없어서 모든 단에서 균일한 분포의 온도를 보인 반면 슬라이딩이 되지 않은 오른쪽 재배선반은 3단의 온도가 평균적으로 높게 분포되었다.



(a) Case 3 Left temperature



(b) Case 3 Right temperature

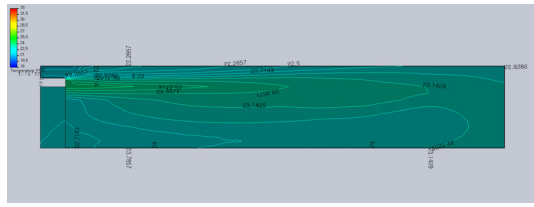
Fig. 20. Temperature curves in case 3 for $T_{in} = 22℃$.

Fig. 20의 Case 3는 양단이 균등하게 온도가 분포되었으며 3단의 온도가 1, 2단의 온도보다 높게 분포 되었다. 3가지 모델중 Case 3가 가장 열 확산이 균등하게 분포하는 것으로 판단되었고, Case 1의 모델이 가장 온도차가 심하여 작물 재배에는 Case 3가 가장 양호한 모델로 판단된다. Case 1의 모델은 서큘레이터 등의 제어가 필요한 것으로 판단된다.

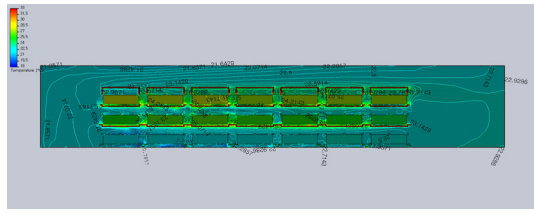
3.2 식물생산 시스템 LED 광원장치 방열 유동특성

Fig. 21~22는 유입 공기속도가 약 $1.6m/s$이고 재배온도 22℃ 공기가 유입될 때, 각 재배선반의 인공광 LED 광원장치의 적, 청색 광량 비율을 100%로 동작 시, 광원 장치의 표면온도 39.4℃의 방열을 고려하고 Case 1의 인공광을 이용한 재배배치로 온도분포를 X-Y 측면 양단 재배선반의 중심의 위치와 시스템 중심부분에서 나타내고, Z측면에서 재배선반의 1~3단 층의 묘삼이 화분에 심어지는 위치 공기의 온도 분포를 나타낸다. LED 광원장치의 방열을 적용 후 재배 시스템의 전체온도는 약 3℃ 증가하였으며 각 재배선반의 온도도 약 3℃ 증가한 분포를 나타내었다. 인공광 LED 광원장치의 방열로 인하여 재배선반 2단과 3단의 TB2, TB3의 낮은 온도분포가 균등하게 변화되어 묘삼 재배에 적합한 온도 분포가 형성되었다.

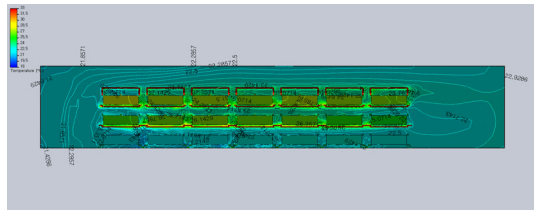
Fig. 23은 Fig. 21의 온도분포 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 시스템 내의 낮은 온도의 공기분포로 인하여, 1단 재배선반 쪽이 가장 낮은 온도분포 결과가 도출되었고, 재배선반과 선반사이의 온도 증가는 LED 광원장치의 방열로 인하여, 온도가 높아진 공기의 상승 기류로 평균보다 높은 온도가 측정되었다.



(a) Middle

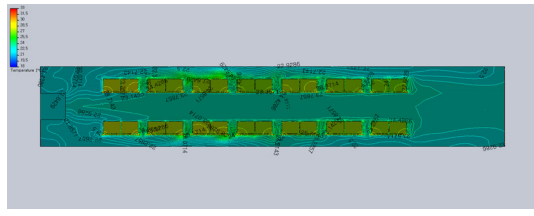


(b) Left

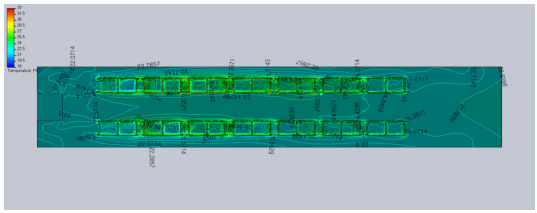


(c) Right

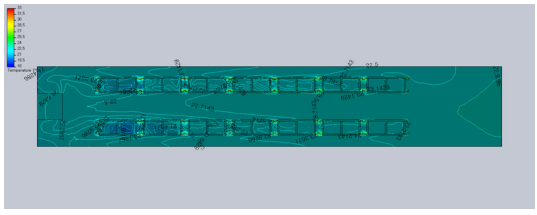
Fig. 21. Temperature distributions in case 1(LED output, X-Y).



(a) Top

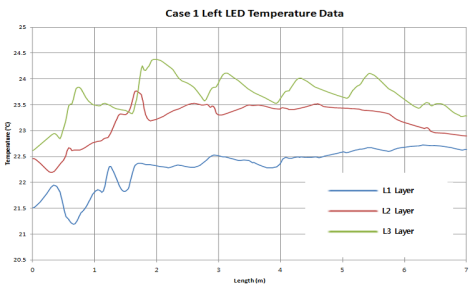


(b) Middle

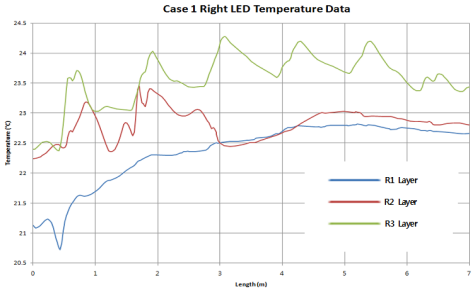


(c) Bottom

Fig. 22. Temperature distributions in case 1(LED output, Z).



(a) Left LED Output temperature



(b) Right LED Output temperature

Fig. 23. LED Output temperature in case 1 for $T_{in} = 22℃$

4. 결론

다층 재배선반을 갖고 태양광과 인공광을 병행한 하이브리드 식물공장의 유동 및 열환경 특성에 대해 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 식물공장 내의 공기를 순환시키기 위해 송풍기의 유입 공기속도를 $1.6m/s$로 하였을 때, 태양광만을 사용한 Case 3의 재배선반 배치가 비교적 균일한 온도분포를 나타내었고, LED 인공광만을 이용한 Case 1의 재배선반 배치는 시험베드(test bed) TB2와 TB3 영역의 낮은 온도분포로 인하여 서큘레이터 등을 통한 추가적인 온도 제어가 필요할 것으로 판단되었다.

(2) 식물재배 LED 인공광(DYLED47)의 청색광과 적색광의 비율을 1:1로 100% 구동 시, 재배선반 대류의 평균 온도가 약 3℃ 증가하였다.

References

[1] W. P. Jones and B. E. Launder, "The calculation of low-Reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, No. 6, pp. 1119-1130, 1973.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(73)90125-7

[2] B. E. Launder and B. I. Sharma, "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, No. 2, pp. 131-138, 1974.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0735-1933(74)90024-4

[3] L. Okushima, S. Sase and M. Nara, "A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics", Acta Horticulture, Vol. 248, No. 13, pp. 129-136, 1989.
DOI: http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.248.13

[4] J. I. Montero, P. Munoz and A. Anton, "Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens", Acta Horticulture, Vol. 443, No. 8, pp. 71- 77, 1997.
DOI: http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.443.8

[5] T. Boulard, M. A. Lamrnai, J. C. Roy, A. Jaffrin and L. Bouirden, "Natural ventilation by thermal effect in a one-half scale model mono-span greenhouse", Transactions of ASAE, Vol. 41, No. 3, pp. 773-781, 1998.
DOI: http://dx.doi.org/10.13031/2013.17214

[6] M. Kacira, T. H. Short, and R. R. Stowell, "A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span sawtooth greenhouses", Transactions of ASAE Vol. 41, No. 3, pp. 833-836, 1998.
DOI: http://dx.doi.org/10.13031/2013.17222

[7] I. Lee, and T. H. Short, "Verification of computational fluid dynamics temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse", Transactions of ASAE, Vol. 44, No. 5, pp. 1717-1726, 2001.

[8] C. Kittas, T. Bartzanas and A. Jaffrin, "Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads", Biosystems Engineering, Vol. 85, pp. 87-94, 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.13031/2013.17803

[9] M. Kacira, S. Sase and L. Okushima, "Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant

canopy ventilation rates under wind-induced ventilation", Transactions of ASAE, Vol. 47, No. 6, pp. 2059-2067, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.13031/2013.17803

[10] T. Bartzanas, T. Boulard, and C. Kittas, "Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the opening", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 34, pp. 207-221, 2002.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00188-0

[11] H. Fatnassi, T. Boulard, H. Demrath, L. Bouirden and G. Sappe, "Ventilation performance of a large Canarian-type greenhouse equipped with insect-proof nets", Biosystems Engineering, Vol. 82, No. 2, pp. 97-105, 2002.
DOI: http://dx.doi.org/10.1006/bioe.2001.0056

[12] S. K. Sung, "Heat Emission Characteristics on Natural Convection Radiator with Various Aspect Ratios in Heating Space", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 11, No. 1, pp. 37-42, 2010.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.1.037

[13] H. C. Lee and J. U. Cho, "Study of the Shape of Car Body Affecting Flow Resistance of Air Flowing Near Car", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 15, No. 8, pp. 4707-4712, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.4707

윤 지 환(Ji-Hwan Yoon) **[정회원]**

- 2011년 2월 : 한밭대학교 기계설계공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 한밭대학교 대학원 기계설계공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 ~ 2014년 8월 : 한국광학기계(주) 대리
- 2015년 2월 ~ 현재 : (주)PDK계측기 사업부

<관심분야>
진동, 광학분야, 계측기 신호처리 등

유 봉 조(Bong-Jo Ryu) **[정회원]**

- 1983년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1988년 2월 : 연세대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1988년 3월 ~ 1989년 2월 : 연세대학교 산업기술연구소
- 1989년 7월 ~ 현재 : 한밭대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
구조물 진동/제어, 구조해석

김 영 식(Youngshik Kim) **[정회원]**

- 2003년 5월 : University of Utah, 대학원 기계공학과 (석사)
- 2008년 8월 : University of Utah, 대학원 기계공학과 (박사)
- 2009년 11월 ~ 2011년 1월 : DGIST 선임연구원
- 2011년 2월 ~ 현재 : 한밭대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
로보틱스, 제어