

자연광 기반 적층형 식물공장의 열환경에 대한 수치해석 연구

Numerical Study on the Thermal Environment of a Natural Light Based Multi-layered Plant Factory

박 동 윤*
Park, Dong Yoon

장 성 택**
Jang, Seong-Teak

장 성 주***
Chang, Seong-Ju

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

Recent researches on plant factory system deal with the convergence of lighting technology, agricultural technology inclusive to the high-tech industries worldwide in order to respond to the decreasing crop harvest due to global warming and abnormal weather phenomena. However, the fundamental performance standard is not currently being introduced in the case of plants factory and its commercialization is not activated because of high initial investment and operating cost. Large portion of the initial investment and operating cost of a plant factory is ascribed to artificial light sources and thermal control facilities, therefore, innovation should be provided in order to improve the economics of the plant factory. As an alternative, new plant factory could harness solar thermal and geothermal systems for heating, cooling and ventilation. In this study, a natural light dependent multi-layer plant factory's thermal environment was analyzed with two-dimensional numerical methods to elicit efficient operation conditions for optimized internal physical environment. Depending on the supply air temperature and airflow rate introduced in the facility, the temperature changes around the crops was interpreted. Since the air supplied into the plant factory does not stay long enough, the ambient temperature predicted around the plating trays was not significantly different from that of the supplied air. However, the changes of airflow rate and air flow pattern could cause difference to the temperature around the planting trays. Increasing the amount of time of air staying around the planting trays could improve energy performance in case the thermal environment of a natural light based multi-layer plant factory is considered.

키워드 : 식물공장, 미시기후조절, 전산유체역학, 태양복사

Keywords : Plant factory, Microclimate control, Computational fluid dynamics (CFD), Solar radiation

1. 서론

최근 지구 온난화로 인한 이상기후 현상은 농산물의 가격 상승을 초래하고 식량자급률을 감소시키는 원인이 되고 있다. 또한 최근 10년간 국내 도시면적의 증대로 인해 전국 농지 면적의 10%인 20만ha가 감소하였으나 인구는 약 300만명이 증가되어 농산물의 생산량 증대와 안정적인 생산 방안에 대한 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 국내에서는 외부 기후에 대한 보호와 통제된 환경 조성을 위해 온실 또는 비닐하우스 등을 이용하고 있지만 에너지 효율이 낮고 강풍이나 폭설에 취약하며, 기후변화에 따라 생산성이 크게 달라질 수 있다. 이러한 변화에 대응하기

위해 전 세계적으로 농업기술과 첨단산업기술의 융합을 통한 식물공장시스템 건립 및 운영 계획을 세우고 있다. 식물공장이란 온도와 습도를 제어하고 인공광원으로 농작물을 재배하는 농업시설이며, 날씨와 계절에 관계없이 사철 농작물을 안정적으로 생산할 수 있을 뿐 아니라 비료나 농약 등의 사용을 줄일 수 있다. 또한 인공광원을 사용하기 때문에 농작물을 평면식 또는 입체식으로 배치하여 운영할 수 있다. 하지만 기존의 식물공장은 인공광원 및 환경제어시설 설치를 위한 초기투자비와 전력 및 양액 등을 포함한 운영비가 높고 생산단가가 높아 지속가능성과 경제성을 극대화한 농업용 시설의 상용화 방안이 필요하다.¹⁾ 식물공장 내 재배공간을 적층형으로 구축하는 경우 인공광원을 자연광으로 대체하게 되면 적층 구조로 인한 각 층 재배단에 암영대가 발생하여 농작물의 광합성을 저해하는 요인이 된다. 이에 식물공장에 자연광 적용을 위해서는 태양의 방위각 및 고도변화를 추적하여 자연광을 최대한 확보할 수 있는 광선반 설계가 중요하다. 그러나 자

* Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, South Korea (dypark@kaist.ac.kr)

** Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, South Korea (jangst@kaist.ac.kr)

*** Corresponding author, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, South Korea (schang@kaist.ac.kr)

연광을 최적으로 도입하기 위해 설계된 광선반 및 내부 구조가 식물공장 내 열환경에 영향을 미칠 수 있으며, 냉·난방 시스템에 대한 운영 특성이 달라지면 기존의 식물공장과는 다른 환경 설계가 필요하게 된다. 이를 위해 식물공장 시공하기 전 내부의 크기, 기하학적인 형상, 재배작물 등에 의한 열환경의 특성을 파악할 필요가 있다. 식물공장 내 열환경 특성을 해석하기 위한 연구는 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다.²⁾ 첫 번째 방법은 컴퓨터를 이용하여 식물공장 내 공기의 유동 및 열적 특성을 수치계산하는 방법이고, 두 번째 방법은 실제 실험을 통한 결과 값을 얻는 방법이다. 두 방법은 독립적으로 사용되기 보다는 상호 보완적으로 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 기존과 다른 새로운 모델을 설계하고 이에 따른 열환경을 예측하기 위해서는 수치적인 해석방법을 선행하여 식물공장 내 열유체 유동의 물리적 현상에 대한 모사(simulation)를 수행한다. 실험의 경우 유동구조, 경계조건, 여러 변수 등의 변화에 따라 다양한 결과를 얻을 수 있는데, 이러한 변화들을 광범위하게 다루기 위해서는 막대한 비용과 시간을 필요로 한다. 이 때문에 수치해석을 통해 새로운 식물공장 모델의 설계·개발 단계에서 구조, 형상, 운영방안 등의 최적값을 찾아내어 효율적인 설계방안을 제시할 수 있다.

이에 본 연구에서는 새롭게 제안된 자연광을 이용한 적층형 식물공장 모델의 냉·난방 시스템에 대한 열환경을 분석하기 위해 수치적인 방법으로 2차원 해석을 하였다. 연구 대상의 2차원 수치모델을 통해 식물공장 내로 유입되는 급기의 온도와 풍량, 그리고 외부온도의 변화에 따라 적층된 작물 주변의 온도 변화를 살펴보았다. 이를 통해 아직 설치된 시설이 없는 유형이어서 실제 실험이 불가능한 새로운 식물공장 모델의 열환경을 미리 예측하고 개선 사항을 도출하여, 향후 도입될 자연광 기반 적층형 식물공장의 효율적인 운영을 위한 설계에 반영하고자 하였다.

2. 연구 대상 및 범위

본 식물공장은 기후조건이나 설치 장소에 구애받지 않고 에너지 소비와 탄소 배출량을 극소화하는 방식으로 다양한 품종의 작물을 낮은 생산단가로 재배할 수 있는 첨단 정보기술로 제어되는 도농복합지역형 작물인공재배시설로 태양광 활용 적층형 밀식재배 생육설비, 수원 및 냉·난방 시스템 관로설비, 생육설비 연계 구조 및 외피설비로 구성된다. 기후변화, 실내 생육환경 변화, 투입자원의 변화에 적응 가능한 시설로 기후변화 대응 지원 가능형 시설 형태, 재료, 구조 및 어셈블리를 가지며 온도, 습도, 조도, CO₂, 공기 흐름 등의 미세한 조절이 가능하고 외부로부터의 에너지 및 공급물자 변동에 적용할 수 있다.

여기서는 태양 일주 및 연중운동을 고려한 지속적인 고 표준화된 자연광 공급설비와 다양한 작물을 수요에 맞추어 독립적으로 생산할 수 있는 가변형 양액공급설비 및 작물재배적용 공간을 받아, 파종, 생육, 수확으로 분할하고 생육설비 자동화를 통하여 적은 에너지와 노력으로 다양

한 작물을 효율적으로 생산할 수 있다.

기존 양액재배시설에서 절기별 봄, 가을은 상추의 적정 재배시기로 기존 시설 재배 시 추가적인 냉·난방 없이 재배가 가능하다. 여름철 고온기와 겨울철 저온기 재배 시설의 열환경 유지는 작물재배에 필수적 요소로 전기 냉방설비와 등유 난방설비에 주로 의존하고 있다.^{3,4)} 그러나 본 식물공장은 우수, 지하수, 상수도 설비를 통한 수원의 연중 일정수온 확보를 위해 수로식 수평형 지중 열교환 설비를 지하 3m 이상 깊이로 설치하여 안정된 양액온도와 실내 적정온도 유지를 위한 열원으로 활용하고 미스트, 팬 코일, 외부환기 유닛 및 CO₂ 설비의 동시제어를 통해 단일 지중기류관로를 통한 내부 환경 항상성 유지가 가능하다.

풍·설하중에 대처하고 내부공간 확보를 위해 생육설비의 구조프레임과 연계하여 효과적인 하중 분산설계를 통해 구조 단순화를 구현하고, 발수코팅 및 나노기술을 도입하여 채광효율을 확보하며 고효율 단열유리를 활용한 열손실 방지와 우수확보 및 제설, 설비관로 연계가 가능한 다기능 구조를 가진다.

Fig. 1은 본 연구의 대상인 자연광을 이용한 적층형 식물공장의 모습이다. 자연광을 이용한 적층형 식물공장은 태양광 활용 적층형 밀식재배 생육설비, 수원 및 냉난방 시스템 관로설비, 유리외피로 구성되어 있다. 광선추적기법

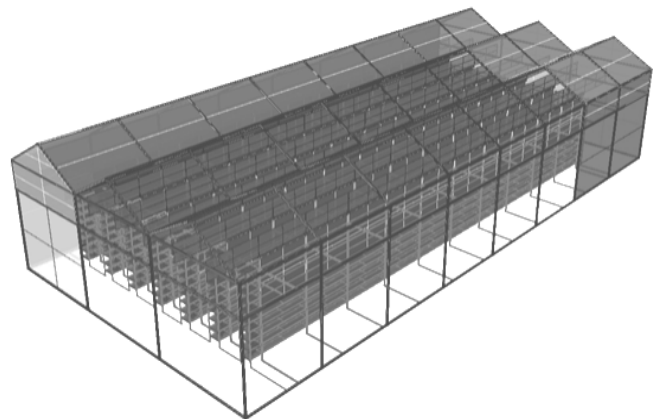


Fig. 1. 3D model of natural light based multi-layered plant factory

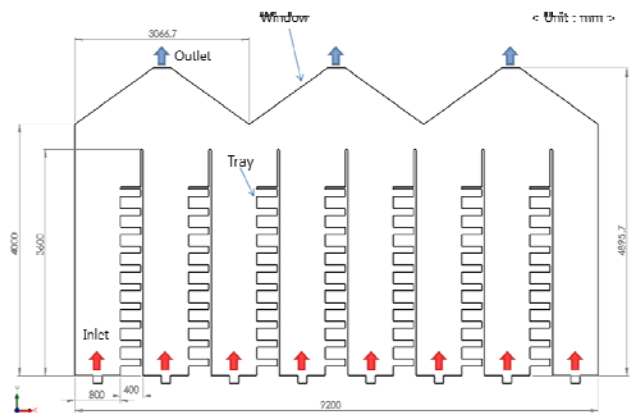


Fig. 2. Cross sectional plane of plant factory for numerical calculation

Table 1. Governing equations and model coefficients

Continuity equation	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$
Momentum equation	$\frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j u_i = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + S_{u_i}$
Energy equation	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{\sigma_t} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S_T$
Mass diffusion equation	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] + S_C$
Turbulent kinetic energy equation	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon$
Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \rho R$
	where, $\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$, $R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$ $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$, $S = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ $C_\mu = 0.085$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$ $\sigma_k = 0.719$, $\sigma_\varepsilon = 0.719$, $\sigma_i = 1.0$, $\sigma_t = 1.0$, $\beta = 0.012$, $\eta_0 = 4.38$

Table 2. Boundary conditions for numerical calculation

Inlet	: $k_{in} = \frac{3}{2}(u_{in} I)^2$, $\varepsilon_{in} = C_\mu^{3/4} k^{3/2} l$, $I = 0.1$, $l = 0.5D_h$
Outlet	: $\frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0$
Wall	: $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$
where D_h is the width of inlet.	

Table 3. Test cases for numerical calculation

	Outdoor temperature (°C)	Supply air temperature (°C)	Supply air flow rate (m ² /s)
Case 1	-5.9	18	0.8
Case 2	-5.9	23	0.8
Case 3	-5.9	28	0.8
Case 4	-5.9	23	0.2
Case 5	-5.9	23	0.4
Case 6	-5.9	23	0.6
Case 7	-5.9	23	1.0
Case 8	-5.9	23	1.2
Case 9	33.3	18	0.8

기반으로 태양광을 온실내부로 유입·확산하는 광선반과 10개층의 재배 선반을 포함한 전체 3m 높이의 수직형 재배대들을 자연광의 전층도달을 위한 반사 및 확산각도 확보와 작업자 최소 통로폭을 동시에 고려하여 약 80cm 간격으로 병렬 설치한 후, 특히 동절기의 온풍 공급시 자연스러운 대류현상 유도를 위하여 바닥 급기 천장 배기 형식의 공조 시스템을 구축하여 향후 실제 적용시의 타당성을 최대한 확보하였다. Fig. 2는 연구 대상인 식물공장의 2차원 단면도이다. 본 연구의 대상인 식물공장의 총 높이는 약 4.9m이고, 너비는 약 9.2m이다. 식물공장의 옆면과 지붕은 모두 유리로 되어 있으며, 식물을 키우는 재배 선반은 10층으로 구성되고 총 7줄로 배열되어 있다. 각 선반의 윗부분에는 태양광 반사판이 설치되어 있고 급기는 각 재배 선반 사이의 바닥에서 이루어지며 지붕 위로 배기된다. 해석 대상인 식물공장은 단면의 형태가 일정하며 길이가 긴 구조로 이루어져 있기 때문에 본 연구에서는 식물공장의 단면에 대한 2D 시뮬레이션 해석을 진행하였다.

3. 식물공장 열환경 해석 방법 및 지배방정식

3.1. 지배방정식

자연광을 이용한 적층형 식물공장 수치해석 모델에서 공기의 유동특성을 기술하는 정상상태의 지배방정식은 Table 1에 나타내었으며 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류 운동 에너지 방정식, 난류 운동량 소산을 방정식이다. 본 연구에서는 표준 k-ε 난류모델을 사용하였으며, 온도

차에 의한 부력효과를 운동량 방정식의 소스항으로 포함시켰다. Table 2는 수치해석을 위한 경계조건을 나타낸 것이다. 지배방정식들을 풀기 위해 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+v4.04를 이용하였다. 지배방정식의 계산을 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며,⁵⁾ 반복 계산 시해의 수렴정도를 판단하기 위해 각 지배방정식 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 판단하였다. 수치해석 모델의 격자 수는 약 20만개의 비균일 격자로 구성하였다. 이는 격자수 조사를 통해 격자를 늘려가면서 결과값의 변화가 거의 일어나지 않는 최소한의 격자를 파악하여 적용한 것이다.

3.2. 수치해석 모델의 경계조건

본 연구에서는 외기온도와 급기온도 및 급기풍량에 따라 식물공장 내부의 온도 및 기류 분포를 분석하고 설계인자들의 수정방안을 제시하는 것이 목적이므로 외기온도는 여름과 겨울에 대해 극단적인 조건을 적용하였다. 이 때문에 유리외피에서의 온도구배 분석은 본 연구의 목적에 부합하지 않아 외기온도를 유리외피 내부 표면 온도에 대한 경계조건으로 정하였다.

식물공장의 수치해석을 위해서 총 9가지 경우에 대한 해석을 진행하였으며 각각의 경우에 대한 계산조건은 Table 3과 같다. 식물공장의 설계에 대한 개선사항을 도출하기 위해서 각 설계변수들을 비교하였다. 이를 위해 운영방안으로 계획하고 있는 Case 1을 기준으로 하여 각 케이스에 대해 설계인자를 하나씩 변화시켜 결과를 비교하였다. Case 1~8까지의 외기 온도는 2011년 중 대전에서 가장 온도가 낮은 날의 정오 온도를 적용하였으며, Case 9의 외기온도는 2011년 중 가장 온도가 높은 날의 정오 온도를 적용하였다. 태양고도 및 방위각은 기상청의 정보를 이용하였으며, 태양 복사량은 ASHRAE의 문헌을 참고하였다.⁶⁾ 본 연구에서의 식물공장은 자연채광을 기반으로

하기 때문에 유리외피는 태양 복사량을 모두 투과한다고 가정하였다. 급기온도는 상층의 적정 재배온도를 고려해 적용하였으며, 급기풍량은 본 해석이 2D로 진행되었기 때문에 단위 길이 당 풍량이므로 m^2/s 단위로 기술하였다.

4. 설계인자에 따른 식물공장 내 열환경 분석

본 연구에서는 주로 확인하고자 하는 열환경 영역은 식물재배 적층선반 부근 영역이다. 이는 식물과 가까이에서 접촉하는 공기가 식물의 생장에 영향을 미치기 때문이다. Fig. 3은 수치해석을 통해 얻은 케이스별 식물공장 내 평균온도와 적층 선반 근처의 평균온도를 나타낸 것이다. 각 케이스 별 식물공장 내 평균 온도는 급기 온도와 거의 비슷하며, 적층선반 주변의 평균 온도는 급기 온도보다 약 $0.7\sim 3.1^\circ C$ 정도 높다. 온도 변화량이 작은 이유는 전체적으로 식물공장 내로 공급된 급기가 내부에 오래 머물지 못하고 곧바로 출구로 빠져나가는 경향이 있기 때문이다. 이는 태양복사에 의해 내부 온도가 상승하는 시간보다 공급된 공기가 배기될 때까지의 시간이 더 빠르기 때문이다. Fig. 3에서 Case 1, 2, 3을 보면 적층선반 주변의 온도와 식물공장 전체의 평균온도가 급기온도와 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. Fig. 4의 Case 1, 2, 3에서도 알 수 있듯이 식물공장의 바닥에서 공급된 급기는 적층선반을 타고 상승하여 지붕의 배기구로 빠져나가는 이동경로를 보이고 있다. 급기가 피스톤 유동(Piston flow)처럼 공기가 배기구를 향해 밀고 나가는 형태를 갖기 때문에 식물공장 내부에서 뚜렷한 재순환 영역이 형성되지 않는다. 이는 태양복사에 의해 전달되는 열량이 식물공장 내부 공기의 온도를 상승시키기에는 급기가 배출되는 시간이 짧기 때문으로 판단된다. Fig. 5의 Case 1, 2, 3에서도 급기온도의 변화에 따른 식물공장 내 전체적인 온도분포가 달라지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3에서 Case 2, 4, 5, 6, 7, 8을 보면 각 케이스별 식

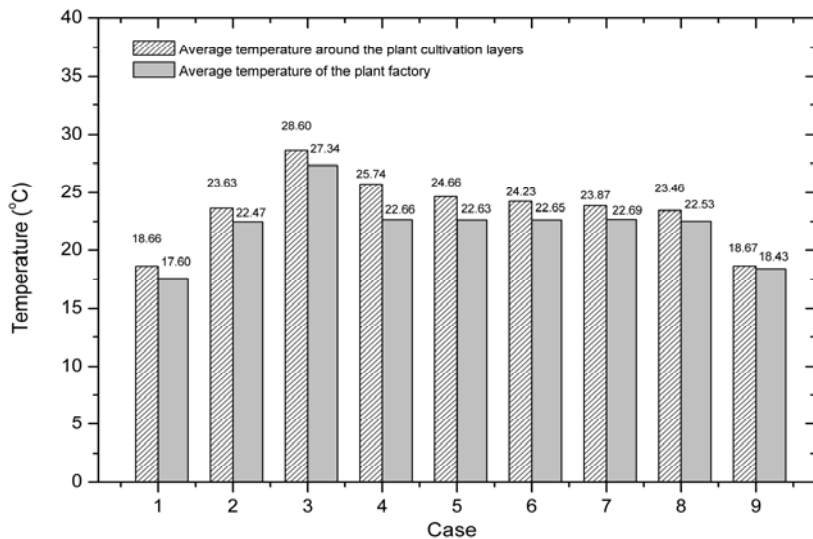


Fig 3. Average temperatures around the plant cultivation layers and of the plant factory in each cases

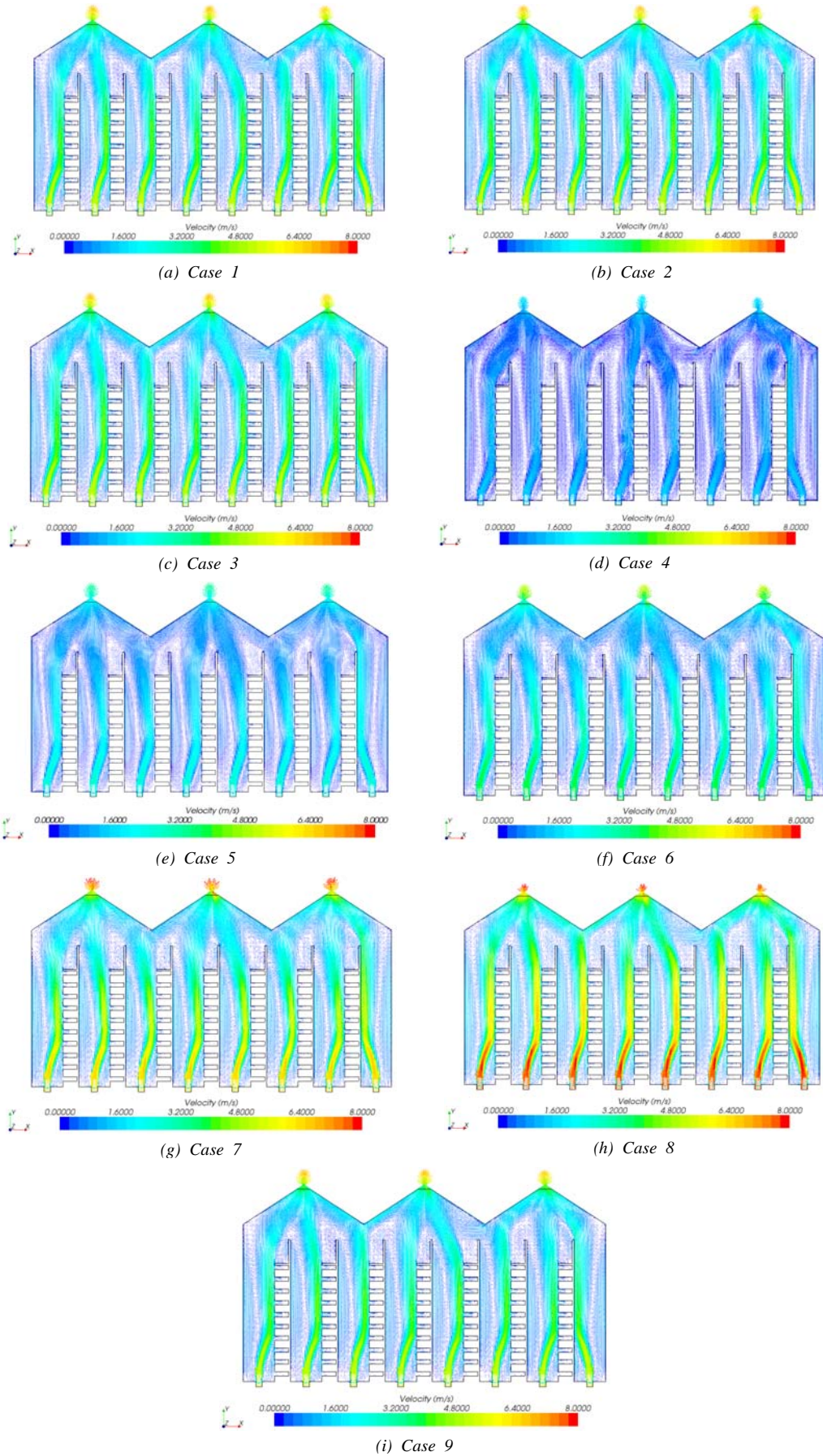


Fig 4. Air velocity distributions of Case 1-9

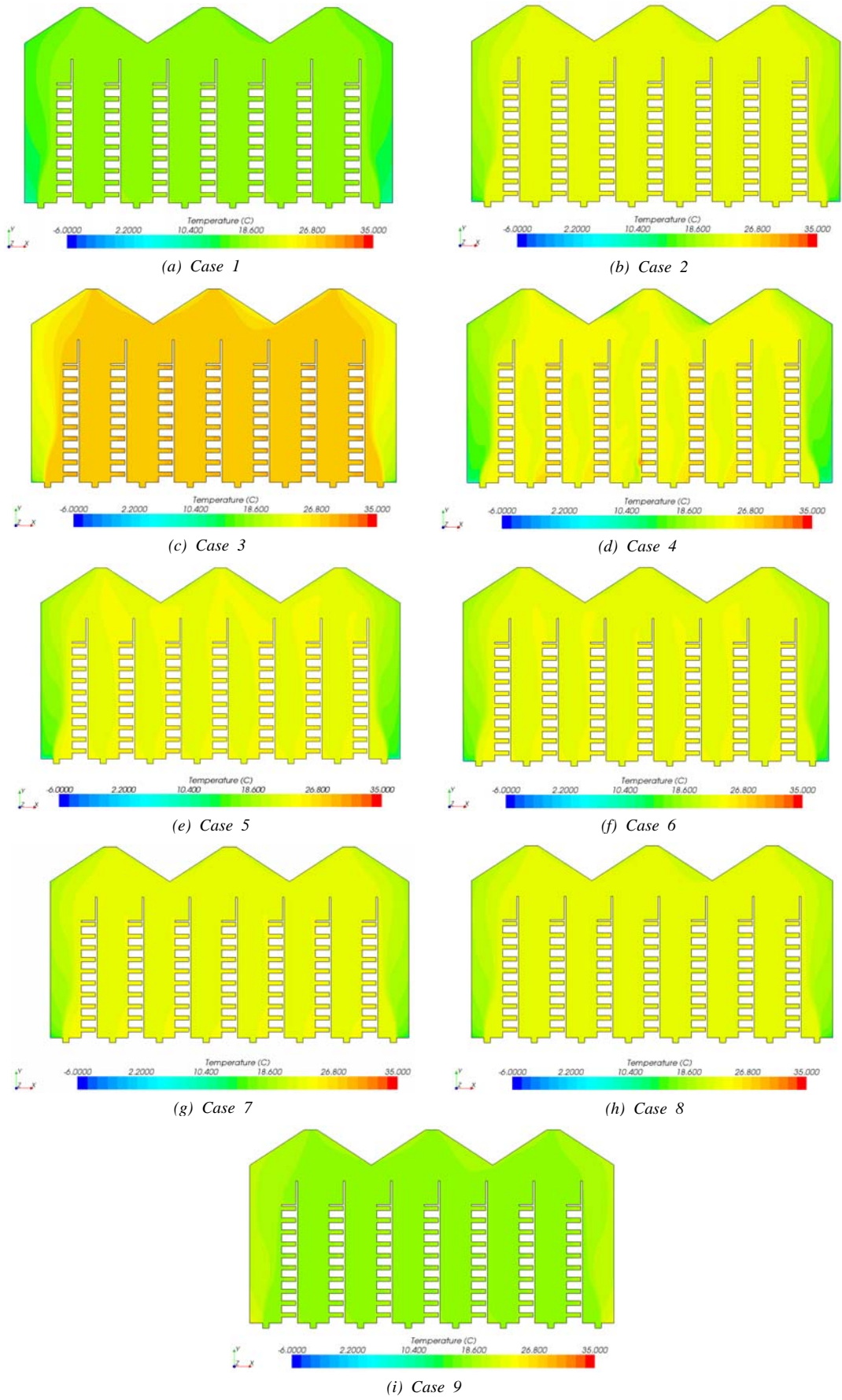


Fig. 5. Air temperature distributions of Case 1-9

물공장 내 평균온도들은 급기온도인 23°C에 가까우며, 각각의 값들은 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 적층선반 주변의 평균온도는 급기풍량이 작을수록 높았으며, 급기풍량이 가장 작은 케이스인 Case 4에서 25.74°C로 높은 값을 나타내었다. 이는 급기풍량이 크면 기류속도가 빨라 적층선반 사이에 급기가 충분히 공급되기 어렵기 때문이다. Fig. 4에서 Case 2, 4, 5, 6, 7, 8을 보면 급기풍량이 작아질수록 피스톤 유동 형태가 사라지며 특정 구역에서는 재순환 영역을 형성하는 것을 볼 수 있다. 이는 공급되는 급기의 속도가 느리면 외피 근처에서 공기온도에 따른 부력차가 급기의 이동경로에 영향을 미치지 않기 때문으로 보인다. Fig. 5의 Case 2, 4, 5, 6, 7, 8에서도 급기풍량이 작을수록 식물공장 내 온도분포 차가 커지는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 적층선반 주변의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 결국 같은 급기온도라도 급기풍량과 식물공장 내부 기류형태의 변화가 적층선반 주변의 온도에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

Fig. 3의 Case 1과 9는 외피의 온도를 각각 여름과 겨울의 조건으로 다르게 적용한 경우이다. 식물공장 내 평균온도는 Case 1이 0.8°C 낮으며 적층선반 주변의 평균온도는 거의 비슷하다. 이는 두 경우 모두 급기풍량이 충분하며, 이것이 외피온도의 영향을 크게 받지 않는 원인이 되었기 때문이다. Fig. 4에서 Case 1과 9를 비교하면 기류의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5의 Case 1과 9를 보면 외피 주변 이외의 구역에서 나타나는 온도분포에도 두 경우에 큰 차이가 보이지 않는다. 외피의 온도가 크게 다른 경우라도 공기의 속도 및 이동경로가 비슷한 이유는 외피온도에 의해 발생하는 부력차가 기류속도에 크게 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 파악할 수 있다. 이는 급기풍량이 커서 식물공장 내에 충분히 머물지 못하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 새롭게 제안된 자연광을 이용한 적층형 식물공장의 모델에 대한 열환경을 예측하고 설계인자에 대한 개선사항을 도출하기 위해 수치적인 방법으로 2차원 해석을 하였다. 연구 대상의 2차원 수치모델을 통해 식물공장 내로 유입되는 급기의 온도와 풍량에 따라 적층된 작물 주변의 온도 변화를 살펴보았으며, 그에 대한 연구 수행 결과는 다음과 같다.

- (1) 각 케이스별 적층선반 주변의 평균온도는 급기온도보다 0.7~3.1°C 정도 높다. 이는 식물공장 내로 공급된 급기가 재배 선반 주변에서 머물지 못하고 곧바로 상승하여 피스톤 유동과 같이 배기구를 향해 밀고 나가는 형태를 갖기 때문에 재순환 영역이 형성되지 않아 태양복사에 의해 전달되는 열량이 식물공장 내부 공기의 온도를 상승시키기에는 급기의 배출시간이 짧기 때문이다.
- (2) 급기풍량이 작을수록 재순환 영역의 형성으로 인해 식

물공장 내 온도분포 차가 커지는 것을 확인할 수 있으며 동시에 적층선반 주변의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 결국 급기온도가 같더라도 급기풍량과 식물공장 내부 기류형태의 변화가 이루어지면 적층선반 주변의 온도도 변할 수 있어 식물의 생장에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

- (3) 여름과 겨울의 경우에도 급기의 양이 충분하면 외피온도에 의해 발생하는 부력차가 기류속도에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

위의 결과를 종합하면 새롭게 제안된 자연광을 이용한 적층형 식물공장의 내부 열환경은 태양복사량, 급기온도, 계절보다 급기풍량에 크게 의존적인 것을 알 수 있다. 적층선반 주변의 온도가 식물의 최적생장온도 범위 안에 들어오기 위해 식물공장의 부하를 고려하여 실제보다 낮거나 높은 온도의 급기를 공급하지 않아도 급기풍량을 조건에 맞게 제어한다면 제안된 식물공장 냉·난방 시스템의 에너지 소비량을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 이는 급기의 온도가 태양복사에 의해 상승하는 것을 고려하여 급기가 식물공장 내에 머무는 시간을 조절하면 가능할 것으로 여겨지며, 급기풍량을 줄이거나 배기구를 여닫는 방법을 통해 제어할 수 있다. 그러나 이는 식물공장 내의 온도분포를 불균일하게 만들기 때문에 내부 온도분포에 민감한 식물을 재배하는 경우에는 급기풍량을 크게 하여 온도차가 커지지 않도록 유지하는 것이 필요하다.

이처럼 제안된 식물공장의 내부 열환경은 급기풍량의 영향을 크게 받는다. 본 식물공장의 경우 주 재배식물은 엽채류이므로 급기온도는 태양복사량, 외피온도 등 다른 영향을 크게 고려하지 않고 엽채류의 최적 성장에 맞는 15~20°C로 적용해도 급기풍량이 0.2m²/s 보다 크면 최적의 온도를 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 엽채류 이외에도 식물공장에서 재배하려는 식물의 종류와 특성에 따라 태양복사 여부를 판단하여 재배하려는 식물의 최적생장온도 범위 내에서 급기온도를 설정 후 급기풍량의 정밀한 제어가 이루어진다면 향후 새롭게 도입될 자연광 기반 적층형 식물공장의 열환경 최적화를 이룰 수 있을 것이다.

Acknowledgements

This research was supported by a grant(11 RTIP D06) from Regional Development Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government and financially supported by Korea Minister of Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) as U-City Master and Doctor Course Grant Program.

References

- [1] S. J. Jang, D. U. Lee, J. H. Hong(2011), A Basic Study on the Plant Factory - Improvement of Indoor Air Quality using Photo synthesis, Proceedings of Architectural Institute of Korea, 31(1), pp.61-62.
- [2] N. K. Yun(2002), Design and Analysis Technique for Greenhouse

Environment Using CED Simulation - Design and Analysis for Natural Ventilation, Journal of Bio-Environment Control, 15(1), pp.20-26.

- [3] Rural Development Administration(2007), Standard Agriculture Textbook - Lettuce Cultivation.
- [4] B. Mun, I. H. Cho(2002), Growth analysis of leaf lettuce in different average daily temperatures, Proceedings of Korean Society for Bio-Environment Control, pp.262-269.
- [5] Suhas V. Patankar(1980), Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor & Francis.
- [6] ASHRAE(2009), ASHRAE Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering.

Received March 13, 2013;

Final revision received September 4, 2013;

Accepted October 28, 2013