

환경경도 바이옴 내의 온도 및 습도 제어 시뮬레이션

정 세 민*

조선대학교 선박해양공학과

NUMERICAL SIMULATION ON CONTROL OF HUMIDITY AND AIR TEMPERATURE IN THE GRADIENT BIOME

S.M. Jeong*

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun Univ.

The Gradient Biome is a unique and large greenhouse(length : 200 m, width : 50 m, height:40 m) in which the elements of the weather, such as temperature and humidity, are controlled and reproduced in such a way as to create a continuous gradient from the tropical to frigid zones along specified longitudinal or transvers lines on the earth. One of the main purposes of the Gradient Biome is to observe the possible responses of the ecosystems (mainly plants), which are to be corresponding to each test climate and be introduced in the Biome, to the expected global warming. As one of the expected responses is the shift of the ecosystem(s) toward the region of suitable environment, there should be no artificial obstacles, which can prevent the shift, inside the facility. However, it is important but not so easy to find the ways of how the temperature and humidity in the Biome could be reproduced since the environmental variables tends to be homogeneous. In this paper, numerical simulations were carried out to find the effective control methods for air temperature and humidity inside the real scale Biome. One of the contributed solvers of OpenFOAM, which is an open source physics simulation code, was modified and used for the simulations.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 생태계(Ecosystems), 환경제어(Environmental Control), 지구온난화(Global Warming), 환경경도 바이옴(Environmental Gradient Biome), 오픈 폼(OpenFOAM)

1. 서 론

사막화, 가뭄, 토양의 염분집적 등 다양한 지구환경의 악화가 생물생산성의 저하나 생물의 멸종을 야기하고, 인류의 생존과 생활을 위협하고 있다. 또한, 지구 온난화가 가속화되고 있고, 생태계의 파괴는 점점 심각화 되고 있다. IPCC 5차 보고서[1]에 따르면 최근 130년 동안 지구 표면의 평균 기온이 약 0.85(0.65 ~ 1.06)도 상승했다고 추정된다. 1도의 기온 차이는, 수평거리로 남북 100 km의 변화, 수직거리로는 해발고도 차이 200 m의 변화에 상당한다. 기후(기온 및 습도) 변화에 대하여 자연이나 인간은 이에 적응하면서, 동물도 식물도 적

합한 기후대로 이동하지만, 이동 속도가 0.1 ~ 2.0 km/year로 늦은 식물(=식생, vegetation)의 경우는 기후변동에 동반한 등온선의 이동 속도를 쫓아가지 못해 많은 종이 멸종될 수 있다는 우려가 제기되고 있다. 지구상에는 남북방향의 위도변화가 주가 되는 기온변화, 연안으로부터 내륙에의 경도변화가 주가 되는 습도변화가 존재한다. 또, 해발고도에 의해서도 기온이나 습도 등의 환경조건이 다르다. 이러한 환경경도(=구배)에 따라 각각 특색 있는 자연 환경이나 식생대를 가지는 공간이 형성되고 있으며, 이에 따르는 여러 가지 생태계가 연속해서 존재하고, 생태계간의 상호 관계가 존재한다. 환경변화에 대한 생태계의 응답을 조사하는 방법으로서, 종래는 필드 실험에 의해 조사가 수행되어 왔지만, 필드 실험에서는 온도, 습도, 입사량 및 CO₂농도 등의 환경변수를 제어하는 것이 곤란하여, 다시 말해 입력(input)이 불명확하여 결과(output)와의 인과관계의 해석에 애매함이 있어, 환경변수를 정밀하게 제어/측정할 수 있는 폐쇄 공간(돔, dome) 내에서의 연구가

Received: February 23, 2016, Revised: May 1, 2016,

Accepted: May 2, 2016.

* E-mail: smjeong@chosun.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.2.032>

© KSCFE 2016

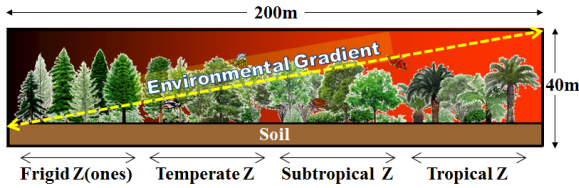


Fig. 1 The schematic view of the Gradient Biome

필요하다. 대표적인 대형 환경돔들로는 영국의 Eden project, 캐나다의 Biosphere, 2013년에 개원한 국내의 국립생태원 등을 들 수 있으나, 이런 환경돔들은 각 기후대를 개별적으로 재현하고 있어, 환경경도에 따르는 각 생태계의 상호작용에 대한 응답을 조사하는 것은 어렵다.

이에, 일본의 동경대학 신영역창성과학연구과에서는 연속한 공간 내에 지구규모의 다양한 환경경도를 재현하여 기후변동에 의한 식물 및 생태계의 응답을 관찰/예측하기 위한 목적으로, 환경경도 바이옴(Biome)이라는 대형 환경제어시설을 계획하고 있다. 환경경도 바이옴은 높이 40 m, 폭 50 m, 길이 200 m의 대형 설비로, 기후대를 구분하는 격벽이 없는 대형 챔버(chamber)내에 지구상의 임의의 라인에 따른 환경, 예를 들면 적도로부터 극지까지의(열대로부터 한대까지의) 연속적인 경도가 존재하는 환경조건의 재현이 가능한 시설이다(Fig. 1). 환경경도 바이옴은, 다양한 시간 스케일로 발생하는 지구 온난화에 의한 동식물체의 영향, 특히 온난화에 의한 식물의 이동 등의 응답을 보는 것을 최종 목적으로 하고 있기 때문에, 식물의 이동을 방해하는 격벽이 없는 연속 공간 내에 대류 및 확산에 의해 균일화 되려고 하는 온도나 습도의 경도를 만드는 제어법을 확립하는 것이 주요한 과제이다.

본 연구에서 대상으로 삼고 있는, 열대에서 한대까지의 경도선을 따르는 환경의, 지구온난화에 대한 생태계의 영향을 파악하기 위한 길이 200 m 정도의 대형 바이옴에서는 아래와 같은 환경의 재현을 목표로 한다.

- 온도 : 수평방향으로 열대(섭씨 40도 정도)부터 한대(섭씨 0도 정도)까지 가능한 한 일정하게 변하는 온도(지표면에서 천장까지의 연직방향의 온도차는 최대 섭씨 5도 정도.)
- 상대 습도 : 수평방향으로 고온지역에서 약 80% 정도로부터 한대지역에서 0% 가까이까지 가능한 한 일정하게 변하는 온도
- 챔버 내의 풍속 : 식물의 성장에 영향이 없는 범위의 값으로 가능한 한 낮은 속도[산들바람(gentle breeze): 3.4 ~ 5.4 m/s, 건들바람(moderate breeze: 5.5 ~ 7.9 m/s)]

관련된 연구로서, Jeong et al.[2]은 동경대학교 신영역창성

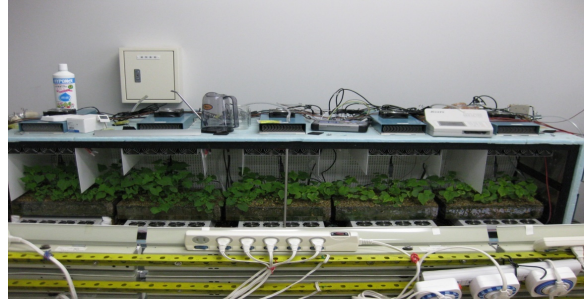


Fig. 2 Cultivation experiment in the 1:100 scale biome

과학과 지구환경공학연구실이 보유하고 있는 1:100 바이옴 모형을 이용한 실험 및 In-house 코드를 이용한 수치계산을 통해 바이옴 내부의 다양한 제어법에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 이 결과를 실험과 비교 검토하였고, 검토한 방법들 중 바이옴 내의 환경조건의 필요사항을 만족시키는 가장 유효한 제어법을 제시하였다. Bao et al.[3]은 이러한 제어법을 기반으로 실제 지구상을 종단 혹은 횡단하는 라인을 따르는 환경의 재현이 가능함을 모형실험을 통해 보인 바 있으며, 환경경도 바이옴의 응용 가능성에 대해서 검토·실증하기 위해, 재현된 환경하에서 식물재배실험도 수행하였다(Fig. 2).

Jeong et al.[4]은 지구 온난화에 대한 연구 이외의 연구, 예를 들면 식물의 효율적인 육종이나 품종개량, 자연광 이용이 효율적인 식물공장의 연구 등을 목적으로 하는 경우에 적합하다고 생각되는 길이 20 m 정도의 환경경도 바이옴(미니 바이옴)을 대상으로, 최근 다양한 CFD 응용 분야에서 활용되고 있는 오픈 소스 라이브러리인 OpenFOAM[5-8]을 기반으로 개발한 프로그램을 이용하여, 미니 바이옴 내부에 온도·습도의 선형적인 구배를 만들어 내기 위한 제어법을 수치계산을 통하여 검토하였고, 이러한 구배를 인공적으로 만들어 내는 것이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 지금까지의 연구결과를 바탕으로 얻어진 제어법이 실 스케일의 환경경도 바이옴에 적용가능한지를 수치 시뮬레이션을 통하여 검토하였다.

2. 지배방정식 및 무차원 계수

지배 방정식은 연속방정식, Boussinesq 근사를 사용한 Navier-Stokes(N-S)방정식, 온도의 이류·확산방정식이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} - g_i \beta (T - T_0) - F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (a_0 + a_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} \quad (3)$$

여기서, u 는 속도, t 는 시간, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 와 $\nu_t (= C_\mu k^2/\epsilon)$ 는 동점성계수와 와동점성계수, g 는 중력가속도, β 는 열팽창계수, T 와 T_0 는 온도 및 기준온도이며, $a_0 (= \nu_0/\text{Pr})$ 와 $a_t (= \nu_t/\sigma_\theta)$ 는 분자확산계수(molecular diffusivity)와 와동확산계수(eddy diffusivity)이다. 와동계수들에 사용된 프란틀 수(Prandtl Number, Pr)와 계수인 C_μ , σ_θ 는 각각 0.7, 0.09, 1.0[9]이다. $F_i (= C_{Dk} S_i |u|u_i)$ 는 계산영역 내에 수목이 존재할 경우, 이를 저항성분[10]으로 고려하기 위한 항으로, C_{Dk} 와 S_i 는 각각 수목의 i 방향 속도 성분에 대한 저항계수 및 옆면적밀도(LAD, Leaf Area Density[m²/m³])를 나타낸다.

바이옴내의 습도를 해석하기 위해서 수증기(비습, q)의 이류-확산 방정식[11]을 사용하였으며, 습윤공기의 프란틀 수는 약 0.72[12]로, 온도의 이류-확산방정식에 사용된 확산계수와 큰 차이가 없어 온도의 확산계수와 동일한 값을 사용하였다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(u_j q)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (a_0 + a_t) \frac{\partial q}{\partial x_j} \right\} \quad (4)$$

습윤공기의 밀도 ρ [13,14]와 온도 T K에서의 포화비습 $q_{sat}(T)$ [15]은 다음 식과 같다.

$$\rho = 1.293 \times \frac{273.15}{T} \left(1 - \frac{0.378e}{1013.25} \right) \quad (5)$$

$$q_{sat}(T) = \left(\frac{0.622e_{sat}}{1013.25 - 0.378e_{sat}} \right) \quad (6)$$

여기서 e_{sat} 는 포화수증기압으로 식 (7)[13,16]으로부터 구할 수 있으며, 상대습도 h 는 식 (8)과 같다.

$$e_{sat} = 6.1078 \times 10^\alpha, \quad \alpha = \frac{7.5T}{T + 237.3} \quad (7)$$

$$h = \frac{e}{e_{sat}} \quad (8)$$

열을 포함하는 유체해석 문제는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 온도차에 의한 부력이 원인이 되어서 유동이 발생하는 자연대류와, 주된 유동이 존재하고 이 유동에 열을 가하는 강제대류다. 바이옴의 경우, 공조장치로서 방열판만을 사용할 때가 전자, 에어컨을 사용할 때가 후자에 해당하고, 각각에 대하여 그라스호프 수(Grashof number, Gr)와 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)가 중요한 무차원계수가 된다.

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L_0^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu} \quad (10)$$

여기서, ΔT 는 온도차, U_0 와 L_0 는 각각 대표유속과 대표길이 나타낸다.

바이옴 내부에 온도구배를 만들기 위해서는 부력에 의해 발생하는 길이방향의 유동을 억제하는 것이 필요하다. 즉, 길이 방향에 대하여 수직방향으로 부력에 의한 유동 속도(v_b)와 비슷한 속도의 바람을 발생시키면 유동의 제어가 가능할 것이다. 자연대류에 의해 v_b 의 속도로 운동하는 유체입자의 체적당 운동에너지는 $1/2 \rho v_b^2$ 이며, 이는 단위체적당 위치에너지 변화인 $g \Delta \rho L_0$ 와 같다. 부지네스크 근사($g \Delta \rho = -g \beta \Delta T$)를 이용하면 자연대류시의 v_b 는 식 (11)과 같이 바이옴의 대표 길이의 1/2승에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$v_b = \sqrt{g \beta \Delta T L_0} \quad (11)$$

이를 바탕으로, 기존연구[2,4]에서는 방열판과 1 m/s의 풍속을 발생시키는(송풍기능만을 가진) 팬을 사용하여 1:100 스케일의 바이옴에서 온도와 습도의 제어가 가능하고, 동일한 제어법을 1:10 스케일의 미니 바이옴에 적용하여 3 m/s의 팬 풍속으로 제어가 가능함을 보인바 있다. 추가적으로 미니 바이옴의 폭(5 m)의 4%인 길이 0.2 m의 측면 칸막이 및 에어컨을 사용하면 에어컨의 풍속을 2 m/s까지 낮춰도 제어가 가능하다는 것을 보였다[4].

3. 수치 시뮬레이션

3.1 환경변수 제어법

제어장치로서는 미니 바이옴을 대상으로 한 기존 연구[4]에서 유효하다고 판단된 측면방열판과 일정 온도로 공기를 공급하는 에어컨 및 에어컨 위치에서 작동하는 가상 습도제

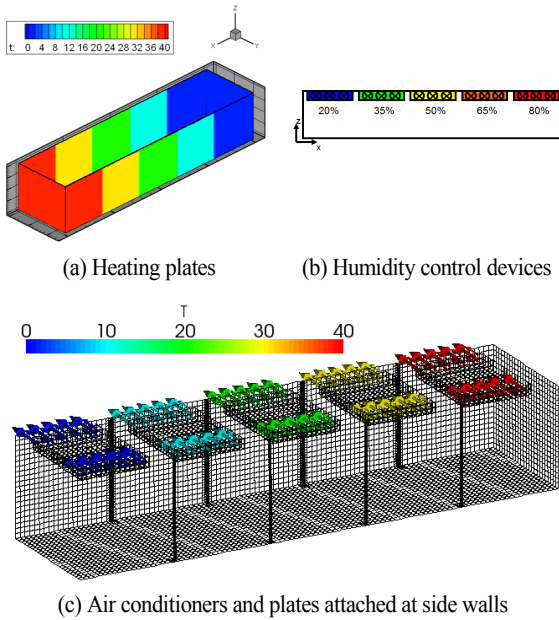


Fig. 3 Environment control devices

어장치, 측면 칸막이를 적용하였다(Fig. 3).

3.2 솔버의 선택 및 개조

OpenFOAM의 기본 솔버 중 하나인 simpleFoam에 Boussinesq 근사를 적용한 정상(steady) 비압축성 난류 열유동 해석용 개량 솔버인 boussinesqBuoyantSimpleFoam(http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib_boussinesqBuoyantSimpleFoam)에 식 (4)로 표현되는 수증기의 이류-확산 방정식을 추가하였다. 또한, 수목의 영향을 저항성분으로 고려하기 위하여 N-S 방정식 (2)와 다음 절에 설명할 $k-\epsilon$ 수송방정식 (12), (13)을 수정하였다.

3.3 해법 설정 및 난류모델

안정성 및 정도 검토를 통해 본 연구에서 사용한 대표적인 차분법과 알고리즘을 Table 1에 보이고 있다. 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 수목의 존재에 대한 효과를 고려하여 다음

Table 1 Used schemes & solvers

convection terms	TVD with van Leer Limiter
diffusion terms	second order central
matrix solver	Pressure: Multi-Grid with Gauss-Seidel Smother Others: PBiCG with DILU Pre-conditioner

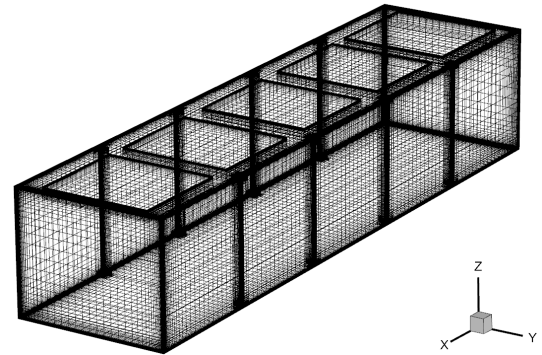


Fig. 4 Grid systems for simulations

과 같이 수정하였다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu_0 + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \epsilon + G_k + F_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu_0 + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\epsilon}{k} \left(C_1 P_k - C_2 \frac{\epsilon}{k} + C_3 G_k + C_{P_\epsilon} F_k \right) \quad (13)$$

여기서 $P_k (= \nu_t (\partial u_i / \partial u_j + \partial u_j / \partial u_i))$, $G_k (= g_i \beta a_i (\partial T / \partial x_i))$, $F_k (= u_j C_{Dj} S_j |u_j|)$ 는 각각 속도구배, 부력 및 수목의 저항에 의한 생성항을 나타내며, 사용된 계수는 σ_k , σ_ϵ , C_1 , C_2 , C_3 및 C_{P_ϵ} 는 각각 1.0, 1.3, 1.44, 1.92, 1.44와 1.8이다[9,10].

3.4 격자생성

격자는 OpenFOAM 내장 툴과 python등의 script language를 조합하여 벽면으로부터 첫 번째 격자까지의 거리가 $y+30$ 이하가 되도록 생성하였으며, 전체 격자수는 약 120만개이다. Fig. 4는 시뮬레이션에 사용한 대표적인 격자계를 보이고 있다.

3.5 경계조건

벽면에서의 속도는 no-slip 조건을, 온도 및 비습에 대해서는 Neumann 조건을 사용하였으며, 난류에너지 k 와 에너지소산율 ϵ 에 대해서는 벽함수를 사용하였다. 방열판에서는 온도를, 팬의 송풍(blowing)구에서는 유속을, 에어컨의 송풍구에서는 유속, 온도, 비습을 Dirichlet 조건으로 부여하였다. 송풍구에서의 난

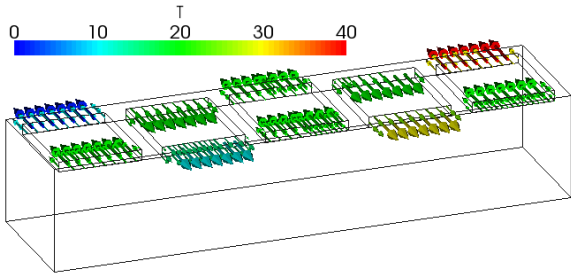


Fig. 5 Blowing directions of air-conditioners(case 10)

류에너지($k = 1/2(u'u')$)와 에너지소산율($\epsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.75}/l$)은 변동량이 전 방향 같다는 등방난류를 가정하였고, 변동량과 난류길이는 각각 송풍속도와 송풍구 길이의 5%로 하였다. 에어컨의 송풍구와 반대방향에 위치한 송출(suction)구에서는 속도는 Dirichlet을, 나머지는 Neumann 조건을 사용하였다.

3.6 시뮬레이션 조건 및 결과

3.6.1 시뮬레이션 조건

계산영역을 5개의 구역으로 나누어, 0, 10, 20, 30, 40도의 온도로 설정된 방열판을 상하면을 제외한 각 면에, 각 구역의 천정부분에 길이와 높이가 각각 32.0 m와 3.6 m인 에어컨을 하나씩 위치시켰으며, 에어컨 송풍구의 온도는 에어컨이 위치한 영역의 방열판 온도와 같은 값으로 설정하였다. 에어컨의 위치에는 습도제어장치를 설치한 것으로 가정하였다.

에어컨 송풍구의 풍속의 경우, 방열판과 에어컨만으로 환경 구배를 만들기 위해서는 9 m/s(case 1) 이상이 필요할 것으로 예상되어 이에 대한 확인 계산과, 측면 칸막이를 같이 사용하여 낮은 풍속에서 제어가 가능함을 확인하기 위하여 5 ~ 7 m/s에 대한 계산도 수행하였다.

칸막이의 경우는 양측면에 각각 4개씩을 설치하였으며, 길이는 폭의 4%인 2 m(S1, case 2~4)와 8%인 4 m(S2, case 5~11)로 하였다.

Table 2 Leaf area densities(LAD), resistance coefficients(C_b) and occupied regions of the selected plants

Plants	LAD [m^2/m^3]	C_b [-]	x[m]	y[m]	z[m]
Magnolia kobus	5.73	0.78	P1: 5.0 ~ 45.0	5.0	0.0 ~ 30.0
			P2: 5.0 ~ 50.0		
Quercus myrsinifolia	5.59	0.59	P1: 55.0 ~ 95.0		
			P2: 50.0 ~ 100.0		
Camellia sasanqua	5.34	0.50	P1: 105.0 ~ 145.0		
			P2: 100.0 ~ 150.0		
Coral	7.10	0.67	P1: 155.0 ~ 195.0		
			P2: 155.0 ~ 200.0		

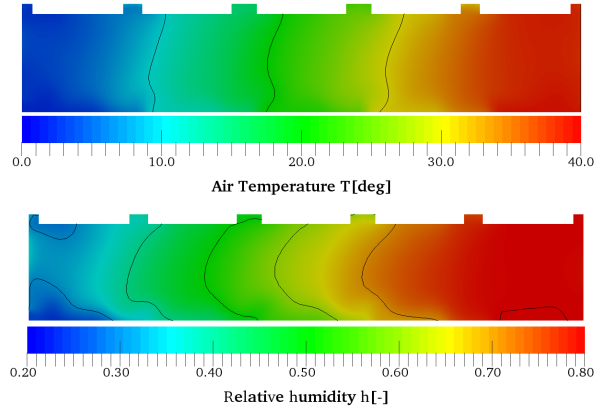


Fig. 6 Contour maps of temperature and relative humidity at y-center plane(case 1)

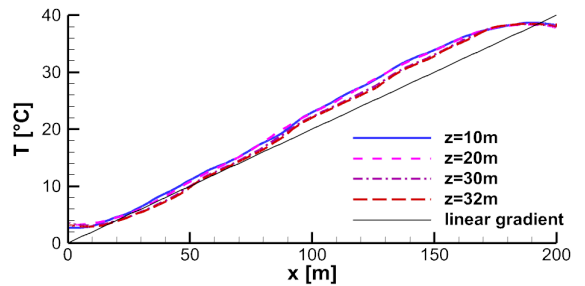


Fig. 7 Temperature distribution at y-center plane(case 1)

Case 7과 9은 Fig. 3(c)에 보이는 것처럼 5개의 에어컨의 송풍방향은 모두 같은 경우(W1)가 아닌, 인접 에어컨끼리 송풍방향을 반대로 한 경우(W2, Fig. 5)이다.

추가적으로, 수목이 존재하는 경우의 영향을 검토하기 위하여 대표적이라고 생각되는 수목들의 옆면적밀도와 항력계수[17]을 각 기후대사이에 10 m 정도의 간격을 두고 입방체 형태로 분포(P1)시킨 계산(case 8~10)을 수행하였으며, Case 11은 각 기후대 수목분포 사이에 빈 공간이 없도록(P2) 배치한 경우이다(Table 2).

3.6.2 시뮬레이션 결과

앞절에서 설명한 제어법을 조합하여 열유동해석을 수행하였으며, 수행한 시뮬레이션 조건과 결과를 Table 3에 요약하여 정리하였다. 표의 마지막 2열은 온도 및 상대습도의 선형 구배가 만들어졌는지를 정성적으로 판단한 결과이다.

Fig. 6에서 보이는 바와 같이, 방열판과 9 m/s 풍속의 에어컨을 사용(case 1)하면 제어가 가능함을 알 수 있다.

폭 방향 중심면($y = 25.0$ m)에서 높이(z)별 온도의 분포를 나타내는 Fig. 7에서는, 저온과 고온부분에서 약간의 차이는

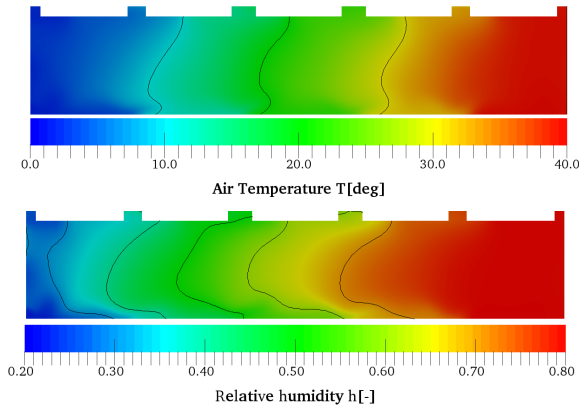


Fig. 8 Contour maps of temperature and relative humidity at y-center plane(case 6)

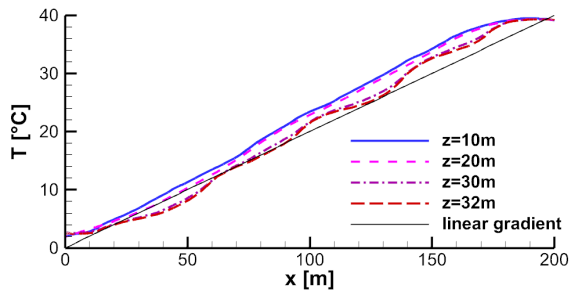


Fig. 9 Temperature distribution at y-center plane(case 6)

보이지만 전 영역 내에서 선형적인 구배가 얻어지며, 높이 변화에 의한 온도변화 또한 크지 않음을 알 수 있다.

영역 내에서 발생하는 최대 풍속을 최대한 낮추기 위해서 수행한 다른 계산 중에서는 방열판과 7 m/s 풍속의 에어컨,

Table 3 Summary of computational conditions and results

case	air conditioner		side plates (length [m])	plants *N.C.: Not Considered	gradient	
	blowing speed [m/s]	blowing direction			temperature	relative humidity
1	9.0	W1	Not used	N.C.	○	○
2	5.0	W1	S1(2.0)	N.C.	×	×
3	6.0	W1	S1(2.0)	N.C.	×	×
4	7.0	W1	S1(2.0)	N.C.	×	×
5	6.0	W1	S1(2.0)	N.C.	×	×
6	7.0	W1	S2(4.0)	N.C.	○	○
7	7.0	W2	S2(4.0)	N.C.	×	×
8	7.0	W1	S2(4.0)	P1	△	△
9	7.0	W2	S2(4.0)	P1	△	△
10	5.0	W1	S2(4.0)	P1	×	×
11	5.0	W1	S2(4.0)	P2	×	×

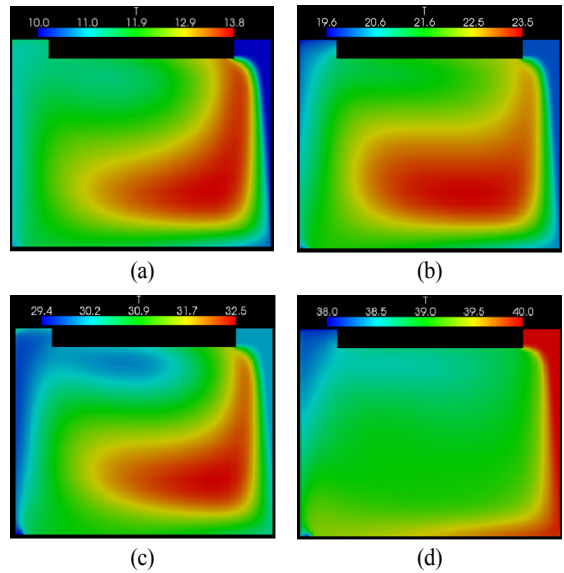


Fig. 10 Contour maps of temperature at constant x-planes (x = (a) 60, (b) 100, (c) 140 and (d) 180 m, case 6)

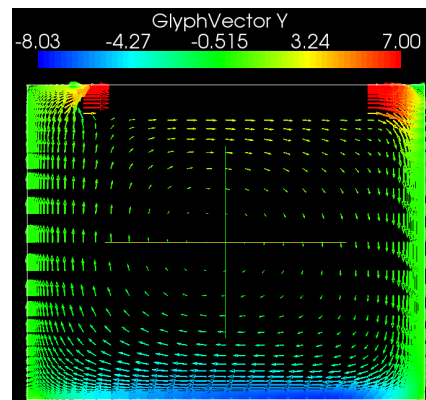


Fig. 11 Velocity vectors at x-center plane(case 6)

그리고 측면 칸막이의 길이를 폭의 8%인 4 m로 한 case 6에 서만 원하는 온도 및 습도구배를 얻을 수 있었다(Fig. 8). 폭 방향 중심면(y = 25 m)에서 높이(z)별 온도의 분포를 나타내는 Fig. 9에서는, 약간의 진동은 보이지만 전 영역 내에서 원하는 구배가 얻어짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 몇몇 길이(x)방향 단면들에서의 온도분포를 보이며, 최대 온도차는 약 3.9도 정도로 나타나서 설계 목표치인 5도 이하를 만족한다. 영역 내에 발생하는 바람은 에어컨 송풍의 영향으로 경계면에서 4 m 정도 떨어진 영역까지 비교적 높은 풍속을 나타냈으나, 이외에 영역에서는 산들 바람보다 낮은 풍속을 보였다(Fig. 11). 같은 조건에서 인접 에어

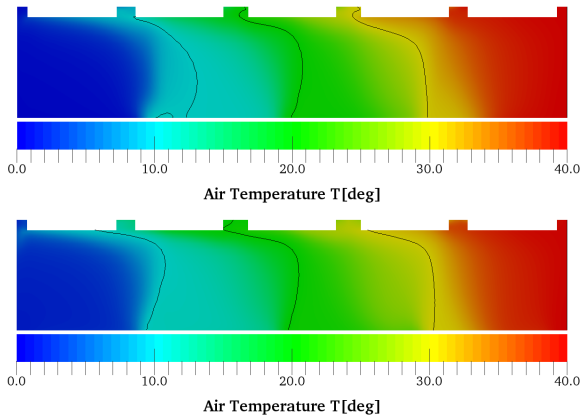


Fig. 12 Contour maps of temperature at y-center plane (upper: case 8, lower: case 9)

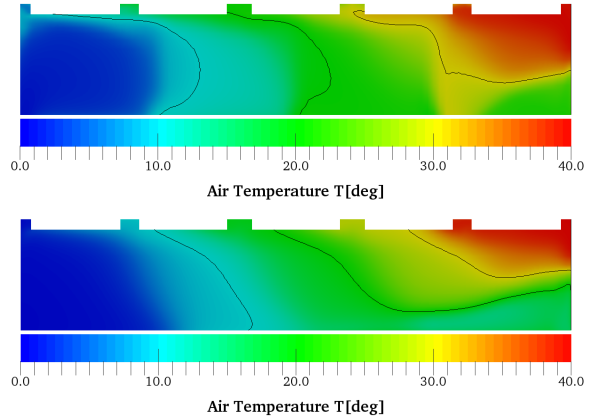


Fig. 14 Contour maps of temperatures at y-center plane (upper: case 10, lower: case 11)

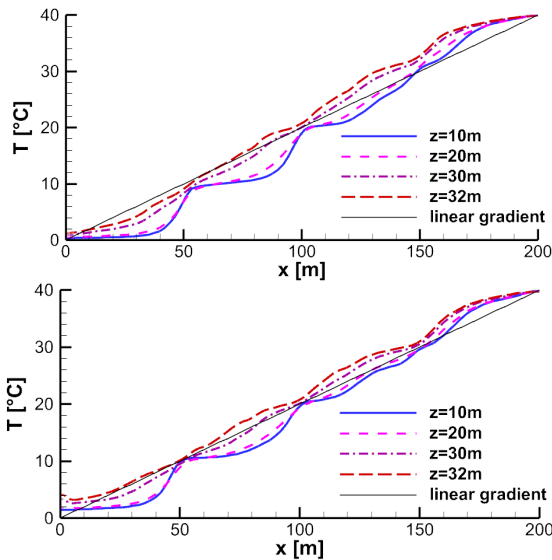


Fig. 13 Temperature distribution at y-center plane (upper: case 8, lower: case 9)

킨의 송풍방향을 반대로 한 case 7에서는 온도와 습도의 구배가 만들어지지 않았다.

Fig. 12와 13을 보면, 수목의 영향을 저항으로 고려한 case 8의 경우는 온도 분포가 수목을 배치시킨 영역별로 계단식이 되었고, 각 영역에서의 연직방향 최대 온도차 또한 7도 정도이다. 이는 수목을 입방체 형태로 분포시킨 것과 수목이 존재하지 않는 상부에서 부력에 의해 발생하는 길이 방향의 운동량을 줄이지 못한 것이 원인이라고 생각된다. Case 7처럼 인접 에어킨의 풍향을 반대 방향으로 한 case 9의 경우에는 계단 모양의 분포가 완화되고 각 영역에서의 상하 최대 온도차

가 5도 정도로 낮아짐을 알 수 있다.

에어킨의 풍속을 5 m/s로, 각 기후대사이에 간격을 둔 경우(case 10)와 그렇지 않은 경우(case 11)에는 특정 구간에서는 온도구배가 생성되었으나, 전체적으로는 그렇지 못하였다(Fig. 14).

결과를 다시 한 번 정리하면, 방열판과 9 m/s 풍속의 에어킨을 사용한 case 1과 방열판과 7 m/s 풍속의 에어킨, 그리고 폭의 8%인 4 m의 길이를 가지는 측면 칸막이를 사용한 case 6에서 원하는 온도 및 습도구배를 얻을 수 있었다. 추후 정량적인 비교평가를 수행해야겠지만, 수목의 존재로 인한 길이 방향의 유속의 감소는 쉽게 예상 가능하므로, 목적에 맞게 칸막이의 길이 및 에어킨의 송풍구 면적을 조절하면 보다 낮은 풍속에서도 제어가 가능할 것으로 예측된다. 습도의 경우, 본 연구에서는 열대로부터 한대까지의 차이를 0.6으로 매우 크게 했으나, 현실의 분포와 비슷하게 설정하면 보다 용이하게 습도구배를 만들 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 실 스케일의 환경경도 바이옴의 내부에 인공적으로 온도-습도의 선형적인 구배를 만들어 내기 위한 제어법을 수치 시뮬레이션을 통하여 검토하였고, 이러한 구배를 인공적으로 만들어 내는 것이 가능함을 정성적으로 보였다.

추후, 현재의 OpenFOAM 기반의 솔버를 바탕으로 토양의 열 및 수분 확산 모델, CO₂ 순환 모델 등을 포함한 연성 솔버를 개발할 예정이며, 식물공장이나 바이옴처럼 여러 환경변수를 인위적으로 조절하는 다양한 분야의 문제에 있어서 보다 정도 높은 해석이 가능해지고 그 응용성 또한 높아질 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2015학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- [1] 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC).
- [2] 2012, Jeong, S.M., Bao, G., Kuramochi, Y., Kagemoto, H., Akutsu, Y. and Moriya, T., "A Feasibility Study on the Environmental Control in the Gradient BIOME (Part 1: Numerical and Model Experiments on the Control of Air Temperature and Humidity)," (in Japanese) *Eco-Engineering*, Vol.24, No.1, pp.1-11.
- [3] 2012, Bao, G., Ohno, Y., Moriya, T., Kagemoto, H. and Akutsu, Y., "A Feasibility Study on the Environmental Control in the Gradient BIOME (Part 2: Reproduction of the Temperature and Humidity on the Earth in a Model Chamber and Plant-growth Experiment)," *Eco-Engineering*, (in Japanese) Vol.24, No.2, pp.35-41.
- [4] 2013, Jeong, S.M., Kagemoto, H. and Park, J.C., "Numerical Simulations on Control of Environmental Variables for Environment Reproduction System Using OpenFOAM," (in Korean) *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.18, No.1, pp.43-48.
- [5] 2009, Hrvoje, J., "Opensource CFD in research and industry," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.1, No.2, pp.89-94.
- [6] 2013, Kim, S.W. and Kim, S.K., "Analysis of Inverse Heat Conduction Problem Using OpenFOAM and VisualDoc," (in Korean) *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.41, No.6, pp.429-439.
- [7] 2014, Park, S. and Rhee, S.H., "Numerical Diffusion Decrease of Free-surface Flow Analysis Using Source Term in Volume Fraction Transport Equation," (in Korean) *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.19, No.1, pp.15-20.
- [8] 2014, Kim, S.H., Yee, K.J. and Oh, S.J., "Numerical Investigation of Shock-Buffet on Transport Aircraft with Changing the Position of Nacelle/Pylon," (in Korean) *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.19, No.3, pp.69-76.
- [9] 2000, Murakami, S., Computational environment design for indoor and outdoor climates, (in Japanese) *University of Tokyo Express*, Tokyo, Japan, p.41.
- [10] 2008, Mochida, A., Tabata, Y., Iwata, T. and Yoshino, H., "Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level," *Journal of Wind Engineering*, Vol.96, pp.1667-1677.
- [11] 2002, Boulard, T., Kittas, C., Roy, J.C. and Wang, S., "SE -Structures and Environment: Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 2: Determination of the Distributed Greenhouse Climate," *Biosystems Engineering*, Vol.83, No.2, pp.129-147.
- [12] 2008, Tsilingiris, P.T., "Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 C," *Energy Conversion and Management*, Vol.49, No.5, pp.1098-1110.
- [13] <http://physics.holsoft.nl/physics/ocmain.htm>
- [14] 1986, Weast, R.C., *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press Inc., 67th edition, Boca Raton, Florida, USA, pp.F-8.
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Humidity#Specific_humidity
- [16] 1993, Elliott, W.P. and Gaffen, D.J., "Effects of conversion algorithms on reported upper-air dewpoint depressions," *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.74, No.7, pp.1323-1325.
- [17] 2004, Kamiyama, K., Ohasi, M. and Narita, K., "Wind Tunnel Experiments on Drag Coefficient of Trees with the Leaf Area Density as a Reference Area," (in Japanese) *Journal of Environmental Engineering*, Vol.578, pp.171-77.