

OpenFOAM을 이용한 대규모 환경재현 시스템 내에서의 환경변수 제어 시뮬레이션

정 세 민,¹ Kagemoto Hiroshi,² 박 종 천*¹

¹부산대학교 조선해양공학과

²동경대학대학원 신영역창성과학연구과 환경시스템학전공

NUMERICAL SIMULATION ON CONTROL OF ENVIRONMENTAL VARIABLES FOR ENVIRONMENT REPRODUCTION SYSTEM USING OPENFOAM

S.-M. Jeong,¹ H. Kagemoto² and J.-C. Park*¹

¹Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan Nat'l Univ.

²Dept. of Environment systems, Graduate School of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo

The feasibility of a unique greenhouse, named as Gradient Biome, is now being examined extensively in the University of Tokyo. It is a large chamber (length : 200m, width : 50m, height:40m) in which the weather, such as temperature and humidity, of the tropical zone through to that of the frigid zone on the earth is reproduced with continuous gradient. In the Gradient Biome, ecosystems (mainly plants) corresponding to each weather are introduced and the possible responses of this ecosystems to the expected global warming are to be observed. Since 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 Biome. This requirement is not so easy to be satisfied since the environment tends to be homogeneous. This paper presents the results of the numerical studies conducted to find the ways of how the temperature and humidity in the Gradient Biome could be reproduced. One of the contributed solvers of OpenFOAM, which is an open source physics simulation code, was modified and used for the numerical simulations.

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

1. 서 론

지구 온난화가 계속 진행되는 경우, 지구에서 다양한 악영향이 발생할 것이라고 예상되고 있고, 그 중의 하나가 식물에 의 영향이다. 기후변동에 대하여 자연이나 인간은 적응하면서, 동물도 식물도 적합한 기후대로 이동하지만, 이동 속도가 늦은 식물 생태계의 경우는 기후변동(등온선의 이동 속도)을 쫓아가지 못해 많은 종이 멸종될 수 있다는 우려가 제기되고 있다. 그러므로, 기후변동과 식물·생태계의 변화의 인과관계를

밝히고, 기후가 변화되는 것이 생태계에 어떤 영향을 주는 지를 예측해서 대처하는 것이 중요하다.

이에, 동경대학 신영역창성과학연구과에서는 길이 200 m, 폭 50 m, 높이 40 m의 거대한 챔버(chamber)내에, 식물의 이동 등에 방해가 되는 칸막이 등의 내부 장애물 없이, 지구상의 열대로부터 한대에 이르는 환경을 재현해, 각기후대에 대응하는 식물을 도입하여 지구 온난화에 대한 식물의 응답을 관찰·계측하는 것을 계획하고 있다(Fig. 1).

환경경도 바이옴과 같이 온도나 습도 등과 같은 환경변수에 경도(=구배)가 존재하면, 그 물리량은 확산이나 대류에 의해 균일(homogeneous)해지기 때문에 연속한 공간내에 안정적으로 경도를 주는 것은 상당히 어려우며, 확립된 기존 기술도 존재하지 않는다. 따라서 격벽이 없는 공간내에 필요한 환경 경도를 재현하는 기술을 확립하는 것은 환경경도 바이옴

Received: January 4, 2013, Revised: March 20, 2013,

Accepted: March 20, 2013.

* Corresponding author, E-mail: jcpark@pnu.edu

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.043>

© KSCFE 2013

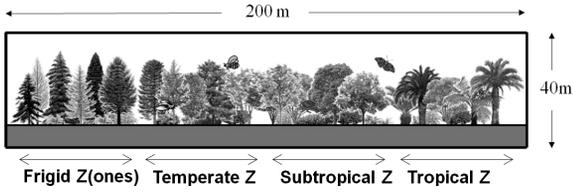


Fig. 1 The schematic view of the Gradient Biome

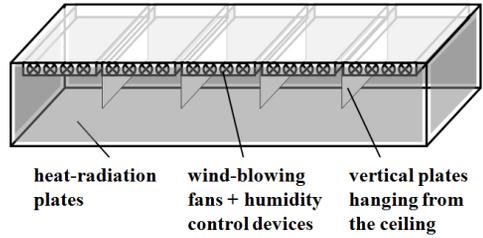


Fig. 2 The most effective way to control the temperature & humidity in the Biome

의 건설을 위해서 달성해야 하는 큰 요소기술의 하나이다. 환경경도 바이옴에 대한 환경조건의 필요한 사양은 아래와 같다.

- 온도에 대해서, 수평방향으로 최대 섭씨 40도부터 0도 정도까지의 경도를 재현할 수 있을 것.
- 지표면에서 천장까지의 연직방향에는 온도차는 될 수 있는 한 작을 것(최대 5K정도).
- 습도에 대해서는, 수평방향으로 상대 습도 100%로부터 0% 가까이까지의 경도를 재현할 수 있을 것.
- 챔버내의 바람은 도입한 식물의 이동에 영향을 미치는 씨앗의 확산에 크게 영향을 주므로, 길이 200 m의 챔버의 경우, 최대 5 m/s 정도 이하로 하되 방향성이 없을 것(자연계에 있어서의 바람의 특성을 될 수 있는 한 재현하는 것).

한편, 환경경도가 있는 연속 공간을 재현하는 챔버는, 지구 온난화 연구이외에도 식물의 효율적인 육종이나 품종개발, 자연광 이용이 효율적인 식물공장의 연구 등에도 응용할 수 있으며, 이러한 목적을 위해서는 길이 20 m 정도의 챔버(미니 바이옴)가 적당하다.

Yano[1]는 동경대학교 신영역창성과학과 지구환경공학연구소[2]이 보유하고 있는 1:100 바이옴 모형을 이용한 실험 및 수치계산을 통해 바이옴 내부의 온도·습도 제어법에 대한 연구를 수행했으나, 필요로 하는 사양을 만족시키는 제어법을 제시하지 못하였다. Jeong et al.[3]은 모형스케일에 대해서, Yano가 개발한 CFD 코드를 사용해 다양한 제어법에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 이 결과를 실험과 비교 검토하였고, 검토한 방법들 중 바이옴 내의 환경조건의 필요사항을 만족시키는 가장 유효한 제어법을 제시하였다(Fig. 2). Bao et al.[4]은 실제 지구상을 중단 혹은 횡단하는 라인을 따르는 환경경도 바이옴의 응용 가능성에 대해서 검토·실증하기 위해 이렇게 재현된 환경하에서 식물재배실험도 수행하였다.

바이옴과 같이 큰 온도구배가 존재하는 경우, 스케일이 커지면 유동장이 복잡해지고 계산이 불안정해지는 경향이 있으며, 이를 해결하기 위해서는 적절한 압력해법 및 차분법의 선택이 중요하지만, 다양한 알고리즘과 기법을 In-house 코드에

구현하기에는 많은 시간이 소모된다. 전술한 Yano의 프로그램은 이를 포함해, 격자생성, 계산가속화 등의 어려움이 있었다.

따라서 본 연구에서는 무료공개 소스코드인 OpenFOAM[5-9] 기반의 해석 프로그램을 개발하여, 건설될 가능성이 높은 미니 바이옴을 대상으로 환경조건을 만족시키기 위한 온도·습도의 제어법을 제안하였다.

2. 지배방정식 및 무차원 계수

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

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

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

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

여기서, u 는 속도, t 는 시간, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 와 ν_t 는 동점성계수와 와동점성계수, g 는 중력가속도, β 는 열팽창계수, T 와 T_0 는 온도 및 기준온도이며, a_0 와 a_t 는 분자확산계수(molecular diffusivity)와 와동확산계수(eddy diffusivity)이다.

또한, 바이옴내의 습도를 해석하기 위해서 수증기(비습, q)의 이류·확산 방정식을 사용하였다.

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

습윤공기의 밀도 ρ 와 온도 T_s 에서의 포화비습 $q_{sat}(T_s)$ 은 다음 식과 같다.

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

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

여기서 e_{sat} 는 포화수증기압으로 식 (7)과 같이 구할 수 있으며, 상대습도 h 는 식 (8)과 같다.

$$e_{sat} = 6.1078^\alpha, \alpha = \begin{cases} \frac{7.5T_s}{T_s + 273.3} & (T_s \geq 0) \\ \frac{9.5T_s}{T_s + 265.3} & (T_s < 0) \end{cases} \quad (7)$$

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

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, 방열판만을 사용할 때가 전자, 에어컨을 사용할 때가 후자에 해당하고, 각각에 대하여 그라흐프 수(Grashof number, Gr)와 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)가 중요한 무차원계수가 된다.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL_0^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$Re = \frac{U_0L_0}{\nu} \quad (10)$$

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. 자연대류시의 v_b 는 식 (11)과 같이 바이옴의 대표 길이의 1/2승에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$v_b = \sqrt{g\beta\Delta TL_0} \quad (11)$$

3. 수치 시뮬레이션

3.1 해법의 선택 및 개요

OpenFOAM 1.5의 기본 솔버 중 하나인 simpleFoam에

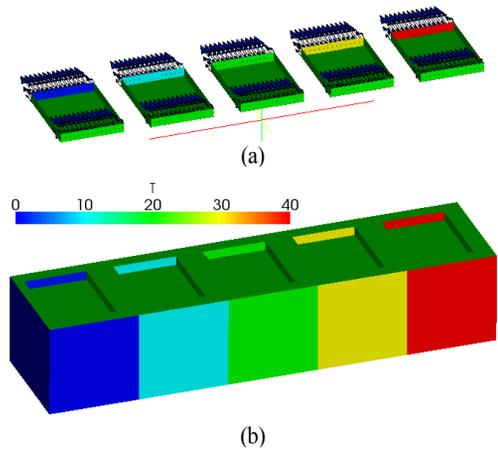


Fig. 3 Schematic view of (a) air conditioners and (b) heating plates

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 추가하였고 벽면에서 응결을 고려할 수 있도록 수정하였다.

3.2 해법 설정 및 난류모델

안정성 및 정도 검토를 통해 본 연구에서 사용한 대표적인 차분법과 알고리즘을 Table 1에 보이고 있다. 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다.

3.3 격자생성

격자는 OpenFOAM 내장 툴과 python등의 script language를 조합하여 생성하였다. 전체계산 영역은 blockMesh, 칸막이는 snappyHexMesh, 팬은 subSetMesh, createPatch, refineMesh등의 OpenFOAM 내부의 격자 생성 및 수정 툴을 사용하였다.

3.4 경계조건

벽면에서의 속도는 no-slip조건을, 이외에 물리량에 대해서는 Neumann 조건을 사용하였다. 방열판에서는 온도를, 팬의 송출구에서는 유속을, 에어컨의 송출구에서는 유속, 온도, 비습을 Dirichlet 조건으로 부여하였다. 송출구에서의 난류에너지와 에너지소산율은 등방난류를 가정하여 부여하였다.

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

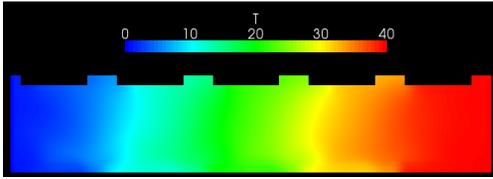


Fig. 4 Contour maps of temperature at y-center plane

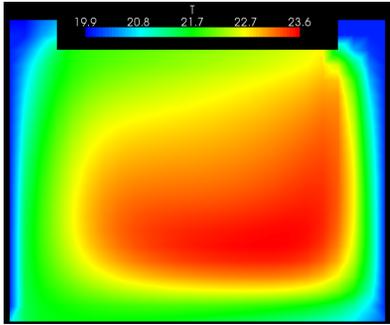


Fig. 5 Contour maps of temperature at x-center plane

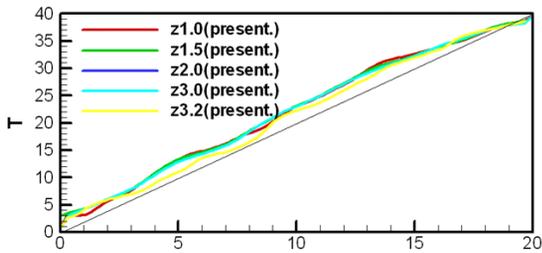


Fig. 6 Temperature distribution at y-center plane

3.5 시뮬레이션 결과

3.5.1 온도제어

모형 스케일의 계산으로부터 얻어진 결과에 근거하여, 온도제어를 시도했다. 계산영역을 5개의 구역으로 나누어, 0, 10, 20, 30, 40도의 온도로 설정된 방열판을 상하면들 제외할 각 면에, 각 구역의 천정부분에 팬이나 에어컨을 하나씩 위치시켰으며, 에어컨 송출구의 온도는 에어컨이 위치한 영역의 방열판 온도와 같은 값으로 설정하였다(Fig. 3). 2장에서 설명한 바와 같이, 부력에 의해 발생하는 유속은 대표길이의 1/2 승에 비례하고, 기존연구에서 1 m/s의 팬의 풍속으로 온도구배를 만드는 것이 가능했으므로, 대표길이가 10배로 커진 미니 바이옴 내에 온도구배를 만들기 위해 필요한 팬이나 에어컨의 송출구에서의 풍속은 3 m/s 정도일 것으로 예상되나, 확인을 위해 1 m/s의 계산도 수행하였다.

계산결과, 방열판과 3 m/s 풍속의 에어컨을 사용하는 경우

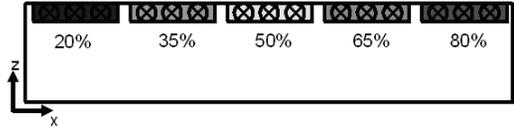


Fig. 7 Relative humidity set at the blowing holes of air conditioners

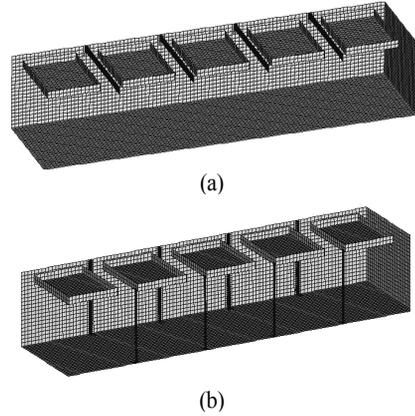


Fig. 8 Plates attached on (a) top and (b) side walls

에만 원하는 온도구배를 얻을 수 있었다(Fig. 4-6). Fig. 5는 길이방향 중앙단면(x=10 m)에서의 온도분포를 보이며, 최대 온도차는 약 3.7도 정도로 나타난다. 폭방향 중심면(y=2.5 m)에서 높이(z)별 온도의 분포를 나타내는 Fig. 6에서는, 약간의 진동은 보이지만 전 영역내에서 원하는 구배가 얻어짐을 알 수 있다.

3.5.2 온도·습도제어 및 최대풍속의 억제(에어컨 및 칸막이)

실제의 스케일에서는 1:10 스케일보다 3배 정도의 에어컨의 풍속이 필요할 것으로 예상되므로, 전질에서 제시한 방법을 실스케일에 적용하면 풍속이 10 m/s에 육박하여 바이옴의 요구사항을 충족시키지 못하게 된다. 이에, 가능한 풍속을 낮게 하면서 온도와 습도 모두 요구되는 구배를 만들 수 있는 방법을 모색하였다.

풍속은 1.0 m/s~3.0 m/s로 설정했으며, 공통 조건은 측면 방열판과 길이 2.8 m, 높이 0.4 m의 송풍구를 가지는(Q1) 에어컨을 사용하는 것으로, 에어컨의 위치에 습도제어장치를 설치한 것으로 가정하였다(Fig. 7).

칸막이의 경우는 천장과 양측면에 설치하는 경우를 고려하였다. 종래의 연구에서 제안된 칸막이의 길이는 챔버 높이의 반(미니 바이옴의 경우는 2 m)이었지만, 본 연구에서는 0.4 m로 설정하였으며, 측면의 경우는 0.2 m로 하였다(Fig. 8).

부가적으로, 방열판의 온도설정을 Fig. 3과 같이 설정한 경

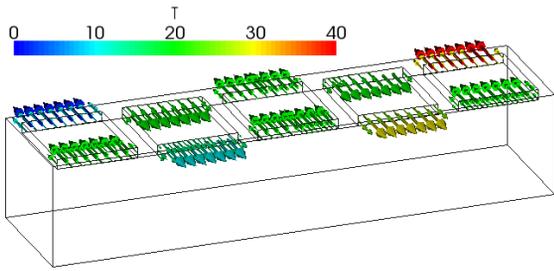


Fig. 9 Blowing directions of air-conditioners (case 10)

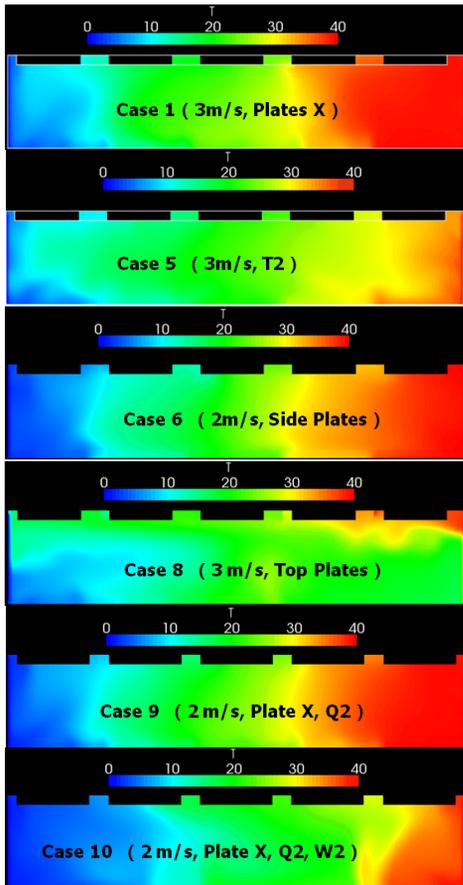


Fig. 10 Contour maps of temperature at y-center plane

우(T1) 외에 길이방향으로 선형적으로 변화하는 경우(T2)도 고려하였다. Case 9와 10의 경우는, 송풍구의 길이를 3.2 m로 늘려 풍량을 증가시킨 경우(Q2)이며, Case 10은 Fig. 3에 보이는 것처럼 5개의 에어컨의 송풍방향이 모두 같은 경우(W1)가 아닌, 인접 에어컨끼리 송풍방향을 반대로 한 경우(W2, Fig. 9)이다. 계산 조건과 결과를 Table 2에 정리하였다.

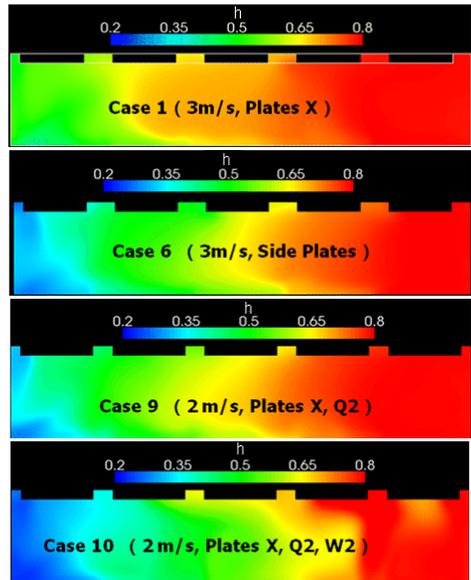


Fig. 11 Contour maps of relative humidity at y-center plane

에어컨 송출구의 풍속이 2 m/s 미만일 때는 모든 경우에 대해서 온도구배를 만들 수 없었다. 풍속이 3 m/s일 때, 방열판의 온도를 구역별로 설정한 case1에선 온도구배가 만들어졌지만, 선형적으로 변화하도록 설정한 case5에서는 만들어지지 않았다. 풍속이 2 m/s일 때에는, 0.2 m의 측면부착 칸막이를 사용하는 경우인 case 6에서는 온도·습도 모두 구배를 만드는 것이 가능했으나, 천장에 0.4 m의 길이의 칸막이를 붙인 case 8의 경우에는 온도구배를 만들 수 없었다. 이는 에어컨 송출구에서 발생된 유동이 벽에 부딪힌 후 하강할 때, 측면칸막이와 비교하여 쉽게 다른 구역으로 퍼져 운동량을 잃고, 온도 또한 상대적으로 쉽게 확산하기 때문이다. 이를 근거로, 온도 제어에는 측면부착의 칸막이가 유효하다고 볼 수 있다.

풍량을 증가시킨 case 9나 풍향을 인근 에어컨과 반대 방향으로 한 case10에서는 칸막이를 사용하지 않고도 구배를 만

Table 2 Summary of computational conditions and results

case	air conditioner				plates (partitions)	results	
	flow rate	blowing speed (m/s)	blowing direction	heating plates		T	h
1	Q1	3.0	W1	T1	×	○	△
2	Q1	1.5	W1	T1	×	×	×
3	Q1	1.0	W1	T1	×	×	×
4	Q1	1.0	W1	T2	×	×	×
5	Q1	3.0	W1	T2	×	×	×
6	Q1	2.0	W1	T1	side	○	○
7	Q1	1.5	W1	T1	side	×	×
8	Q1	2.0	W1	T1	ceiling	×	×
9	Q2	2.0	W1	T1	×	○	○
10	Q2	2.0	W2	T1	×	△	○

드는 것이 가능하였다. Fig. 10에 몇 가지 경우에 대한 폭방향 중앙단면에서의 온도분포를, 온도구배가 만들어진 계산조건에 대한 상대습도분포를 Fig. 11에 나타내었다.

추후 정량적인 비교평가를 수행해야겠지만, case 6, 9, 10에서 습도의 구배를 만드는 것이 가능했다. 본 연구에서는 열대로부터 한대까지의 상대 습도의 차이를 0.6으로 매우 크게 했으나, 현실의 분포와 비슷하게 설정하면 보다 용이하게 습도 구배를 만들 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 OpenFOAM을 기반으로 개발된 프로그램을 이용하여, 1:10 스케일의 환경경도 바이옴(미니 바이옴) 내부에 온도·습도의 선형적인 구배를 만들어 내기 위한 제어법을 수치계산을 통하여 검토하였고, 이러한 구배를 인공적으로 만들어 내는 것이 가능함을 보였다. 개발한 프로그램과 제시한 환경제어법은 대규모 공간내에서의 공조문제나 식물공장처럼 여러 환경변수를 인위적으로 조절해야 하는 문제 등 다양한 분야에 응용 가능할 것이라 기대된다.

후 기

본 연구는 “치바현·동경대학 카즈사 국제 지구환경 연구거점형성 프로젝트”에 근거하여, 치바현, 재단법인 카즈사 DNA 연구소와 연계하여 동경대학교에서 2008년 수행한 위탁연구 보고서(제목: 지구환경의 유지에 관한 생물학적 기능 및 환경 제어기술의 연구)의 일부 내용을 포함하고 있음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 2004, Yano, J., "Research on the environmental control of heat and humidity in the gradient BIOME," Master thesis at University of Tokyo (in Japanese), pp.27-173.
- [2] <http://geelhome.k.u-tokyo.ac.jp/>
- [3] 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)," *Eco-Engineering* (in Japanese), Vol.24, No.1, pp.1-11.
- [4] 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.
- [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] 2010, Park, J.K. and Kang, K.H., "Review on OpenFOAM - An Open Source Software," *Journal of the Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Vol.15, No.3, pp.46-53.
- [7] 2011, Kim, T., Oh, S. and Yee, K., "Verification of the Open Source Code, OpenFOAM to the External Flows," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.39, No.8, pp.702-710.
- [8] 2012, Park, S. and Rhee, S.H., "CFD Code Development Using Open Source Libraries for Shipbuilding and Marine Engineering Industries," *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol.49, No.2, pp. 43-49.
- [9] 2012, Joh, M., Han, H., Kim, S.K. and Choi, H.S., "Flow Analysis of the Oxidizer Manifold for a Liquid Rocket Combustor using OpenFOAM," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.40, No.9, pp.781-788.