

실내 미생물 안전을 위한 실내부유 미생물 거동 예측을 위한 CFD 적용 연구

최 상 곤*

*유한대학교 건축설비과

A Study on CFD analysis of indoor microbe transport for microbiological safety

Sang-Gon Choi*

*Dept. of Bilding Services, Yuhan University ·

Abstract

The transmission of the world Installed in an Office occurs through the air. Preventing that transmission, especially in indoor environments like those in airplanes, schools and offices, is a major public health concern. in this study the real situation of lab which is consist of dilution, Ultraviolet-C based air sterilization system.

This model include indoor microbe transport which is generated human source. a computer simulation was performed to determine if such simulation can be used effectively to predict the more accurate, but difficult to perform, actual physical experiment. Result show that CFD can be modeled microbe transport effectively and it can be visualized microbe transport separation from flow streamline. also it make a good prediction of microbe transport.

Keywords : CFD, microbe transport

1. 서 론

최근 유행성 호흡기 질환자로 인한 2차 감염 사례나 중증 급성호흡기 증후군(SARS: severe acute respiratory syndrome)과 조류 독감의 세계적인 유행은 실내 미생물 안전을 위협 할 수 있다는 점에서 재실자의 안전한 환경을 유지하기 위한 중요한 고려대상이다.

실내 부유 미생물에 의한 질병의 확산은 질병에 감염된 재실자로 인한 2차 감염을 일으켜 그 확산 정도가 매우 광범위하고 빠르다. 따라서 이러한 실내 부유 미생물의 확산 방지에 대한 연구는 매우 다양한 방법으로 이루어지고 있으나, 실증 실험은 독성이 매우 높은 병원균이 대상이기 때문에 수행하기가 매우 어려운 형편이다. 이러한 이유로 국내에서도 미생물 거동의 예

측기술인 시뮬레이션을 이용한 연구가 수행되어졌다.

기존의 연구에서는 실험실내에서 부유미생물에 관한 실증 실험[1]을 바탕으로 2D Multi-zone 시뮬레이션 연구[2]를 수행하여 시뮬레이션으로 미생물의 발생과 사멸 및 제거의 예측이 가능하다는 것을 보였다. 이러한 Multi-zone 시뮬레이션은 실내의 구체적인 미생물의 유동을 나타내지 못하는 한계를 가지고 있다.

2010년의 연구[3]에서는 CFD(Computational Fluid Dynamic) 프로그램인 Airpak을 이용하여 3D particle trace를 보였다. 그러나 이 연구에서는 CFD를 결과값의 분석을 위한 보조도구로 사용하였으며, 실제 공기중 부유 미생물의 거동(Microbe transport)이라기보다는 공기유동(Air-streamline)을 따라 미생물미 움직인다는 가정을 가시화하여 나타낸 것이다.[4]

† 교신저자: 최상곤, 경기도 부천시 소사구 괴안동 185-34, 건축설비과

M · P: 010-2981-4949, E-mail: tool007@yuhan.ac.kr

2012년 7월 20일 접수; 2012년 8월 30일 수정본 접수; 2012년 8월 30일 게재확정

이러한 한계는 미생물의 주요 이동경로를 분석하지 못하는 문제로 인해 실내 미생물 안전을 위해 설치하는 각종 공기살균장치의 구체적인 위치선정에 어려움을 겪을 수 있다. 그러므로 실내에서 적절한 미생물유동의 예측은 매우 중요하다 할 것이며 이를 위해 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 CFX를 이용하여 실제 공기중 부유 미생물의 거동(Microbe transport)을 예측 할 수 있을 것인 가에 대하여 연구 하였다. 연구 결과의 효용성을 판단하기 위하여 기존 연구들에서 사용한 2D 시뮬레이션인 CONTAM 프로그램을 이용한 Multi-zone 모델[2][3]을 그대로 이용하여 결과를 확인 하도록 하였다. 기존의 Multi-zone 모델의 결과는 실험실에서 수행한 실험과 오차가 최대 약 2% 정도를 나타내어 실험을 대신하여 Multi-zone 모델의 결과 CDF 결과를 검증하는 비교대상으로 활용하도록 하였다.[1][2][3]

연구를 위하여 기존의 연구에서 모델로 하였던 연구실[1][2][3]을 그대로 CFD로 모델링 하여, 부유 미생물의 거동을 예측할 수 있는 모델 구축 가능성을 판단함과 동시에 향후 기존연구들에서 수행하였던 면역건물 기술에 대한 예측 모델들이 CFD로 구축 가능할 것인 가를 판단하였다.

2. CFD 모델링

2.1 유동모델

[Figure 1]에 모델링을 위해 사용된 실험실을 계략도와 사진을 나타내었다. 모델링은 상용 CFD프로그램인 CFX를 이용하였다. 실내 공기유동 모델은 운동량 보존의 법칙(Navier-Stokes)을 기초로 한 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모델링 기법을 사용한다. RANS 모델링은 유속, 온도 등과 같은 각 파라미터들을 시간평균rsm(root-mean-square)로 나타내며, 부력이 있는 비압축성유체의 지배방정식은 다음과 같다.

(1) Continuity

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

(2) Momentum

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (v_{eff} \frac{\partial U_j}{\partial x_j}) + S_{U_j} \tag{2}$$

여기서, ρ : 공기밀도 [kg/m³]

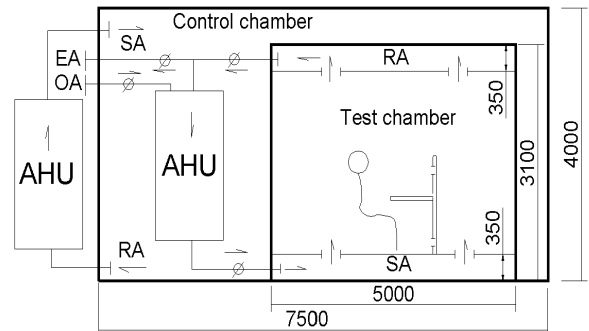
U_i : x_i 방향 평균속도 [m/s]

t : 시간[s]

v_{eff} : 점성계수 [Pa · s]

S_{U_i} : source term

본 연구에서는 난류모델을 위하여 RANS 모델에서 제공하는 여러 난류모델 중 Standard k-ε 모델을 적용하였다. Standard k-ε 모델로부터 와동점성(v_e :eddy viscosity)은 다음과 같으며,



[a] Diagram of chamber



[b] Picture of chamber

[Figure 1] Diagram of controlled environment chamber

$$v_e = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

C_μ 는 난류계수(Turbulence model coefficient), k 는 난류운동에너지(Turbulence kinetic energy), ε 은 소멸율(Dissipation rate)으로 가장 일반적으로 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서도 일반적인 사무실의 개인공간을 모사하는 것으로 하여 모델을 적용하였다.

[Figure 1]에 나타낸 바와 같이 급기는 공조기를 통하여 하부에 설치된 급기구를 통하여 바닥급기를 하도록 하였다, 급기구와 환기구는 원형으로 0.03144 m²의 면적을 가지며 바닥에 4군데 위치하도록 하고, 환기구는 3군데 위치하도록 하였다.

2.2 Particle transport 모델

Particle transport 모델을 구성하기 위하여 우선 Particle 모델은 부유세균을 모델링하기 위하여 구형이나 계란형, 짧은 막대형의 세균은 평균직경을 사용하여 구 형태로 가정함으로써 식 (5)과 같이 유효직경을 나타낼 수 있다.[5]

$$De = L \tag{5}$$

그러나, 종횡비가 3.5 보다 큰 경우의 수학적 접근은 Matteson과 Orr 이 1987년 실험적인 방법을 통하여 다음 식 (6) 과 같이 나타내었다.[6]

$$De = 0.285L \quad [Re < 2.0] \tag{6}$$

따라서 부유세균 모델은 $0.3\mu\text{m}$ 의 평균직경을 사용하였고, 밀도의 경우는 Bratbak and Dundas에 의해 제시된 $1,100 \text{ kg/m}^3$ 을 사용하도록 하였다.(4)

부유세균 모델이 구형의 평균직경 $0.3\mu\text{m}$ 로 밀도가 높지만 상대적으로 체적이 매우 작기 때문에 유동장내에서 질량을 가지는 Particle을 유동으로 정의 할 수 있다. 따라서 Particle의 이동 계산은 라그랑지안 기법(Lagrangian method)를 이용하여 수행 할 수 있다. Particle의 이동은 계산시간 δt 에 대하여 이동속도 $v_p = (dx_p/dt)$ 라 할 때 Particle의 이동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{p_i}^n = x_{p_i}^0 + v_{p_i}^0 \delta t \tag{7}$$

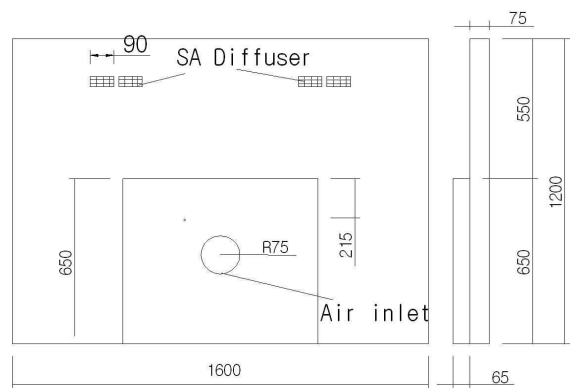
여기서, $x_{p_i}^0$ 는 초기위치, $v_{p_i}^0$ 은 초기속도이다. 전방통합(forward integration)에서 Particle 속도는 다음의 momentum 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_{all} \tag{8}$$

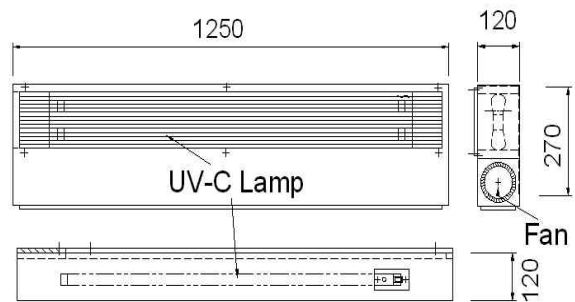
여기서, F_{all} 은 Particle에 걸리는 모든 종류의 작용힘(Forces acting)이다. 작용힘들은 항력(Drag force), 부력(Buoyancy force), 양력(Lift force)들이다. 본 연구에서는 부유세균 모델이 구형의 평균직경 $0.3\mu\text{m}$ 로 브라운 운동에 의해 발생하는 힘(Brownian force)은 무시할 수 있을 만큼 매우 작게 발생할 것이므로 적용하지 아니한다.[7]

2.3 재실자 및 컴퓨터 모델

재실자는 Figure 1 [b]에 나타난 사람모델을 바탕으로 형상화 하였다. 모델은 굴곡이나 옷 등에 대한 모사보다는 인체발열과 오염원의 소스로서의 역할을 위하여 단순화 하였다. 70kg인 성인을 대상으로 호흡량인 11 l/min 을 대상으로 초당 100개의 부유미생물을 입면적 0.005m^2 을 통하여 36.5°C 의 온도를 가진 공기와 함께 공기 중으로 방출하는 것으로 하였다. 앉아서 가벼운 사무를 하는 사람으로 인체발열량을 모델링 된 신체초면 면적에 대하여 81 W/m^2 을 Heat flux 형태로 방출하는 것으로 하였다.



[Figure 2] Diagram of desk



[Figure 3] Diagram of desk

컴퓨터는 본체와 모니터 양쪽을 모두 합하여 간단한 블럭모델로 구현하였다. 총표면적 0.72 m^2 에 대하여 759.72 W/m^2 을 Heat flux 형태로 방출하는 것으로 하였다.

2.4 책상 모델

[Figure 2]에 모델링을 위해 사용된 급기형 책상을 나타내었다. 책상의 상부에 급기구에서 공기조화기로부터 공급받은 신선환외기를 공급하는 것으로 하였다.

2.5 UVGI 모델

[Figure 3]에 모델링을 위해 사용된 UV장치를 나타내었다. UV장치는 장치최대 풍량 12ACH에서 99.9%을 살균율을 가지는 것으로 풍량을 조절할 수 있는 장치가 설치되어있다. 따라서 최대풍량 이하에서는 99.9% 이상의 살균능력을 발휘할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 UV장치에 의한 살균은 UV장치로 흡입되는 공기에 포함된 Particle이 제거되는 것 이외에 따로 고려하지 않는다. 다만 UV장치가 가동되어 도출구와 흡입구에서 발생하는 기류에 의해 실내 기류패턴에 영향을 주는 것으로 하였다.

2.6 CFD 시뮬레이션 방법

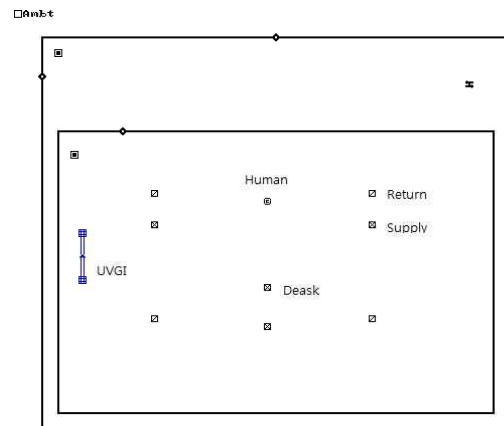
해석 모델을 설정하기 위하여 앞서 언급된 기법의 구체적인 내용과 매쉬 조건을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 것과 같이 사무실공간의 유동해석에 필요한 조건들을 기본적으로 적용하고 있다. 언급되지 않은 일사와 같은 조건들은 Particle motion에 크게 영향을 주지 않을 것이므로 모델의 특성상 생략하기로 한다. Table 2에 모델을 해석하기위한 바운더리 컨디션을 나타내었다.

<Table 1> Simulation condition

mesh	Tetra about 4200,000 cell min. size 2 mm max. size 50 mm
Fluid	Continuous fluid : Air (Ideal gas) Buoyancy : Standard k-ε density difference Buoyancy turbulence : Production and dissipation Heat transfer : Thermal energy
Particle	Coupling : Fully coupled (Buoyancy force, lift force) Momentum transfer : Drag force(Drg coefficient 0.44)
wall	Slip wall Standard wall function

<Table 2> Boundary condition

Inlet	Supply	5 ACH
	Desk	1 ACH
Outlet	UVGI	1 ACH
Heat	Mouth	11 ℓ/min Particle 100 EA 309.5 K
	Room	Initial temp. 293k
	UVGI	No gain
	Computer	759.72 W/m ²
	human	81.642 W/m ²
	Wall	Isolated



[Figure 5] CONTAM model

연구를 위하여 벽으로부터의 열취득은 무시하는 것으로하여 실내의 부하량을 계산하고 이 부하량에 적절한 급기 조건을 설정하였다. 바닥으로부터 급기된 공기와 책상으로부터 급기된 공기는 실내의 재질자의 쾌적성을 유지하기 위하여 실내를 순환하고 천정의 배기구를 통하여 빠져나가게 되며, UV살균장치는 실내의 공기를 흡기하여 다시 실내로 공급하는 순환장치로 가동되게 된다. Particle은 사람모델의 입에서 0.346m/s로 분출되어 실내를 순환하게 되고 UV살균장치와 배기로 실내에서 제거되는 것으로 하였다. 실내에 설치된 장치의 표면, 사람표면 또는 벽 등에 부착되는 것은 없는 것으로 가정하는 것으로 하였다.

2.7 Multi-zone 모델링

CFD 시뮬레이션의 결과를 확인하기 위하여 기존 연구에서 사용한 CONTAM을 이용한 Multi-zone 모델 [2]을 그대로 도입하여 Table 1, 2에서 보인 시뮬레이션의 조건을 이용하여 비교 결과를 도출하도록 하였다. 사용된 모델을 Figure 5에 나타내었다. Multi-zone 모델에서는 앞서 2.1~2.5에 언급된 모델들이 2D의 Multi-zone 모델 방식으로 구성되었다. 결과를 확인하기 위한 부유미생물의 멀티존 시뮬레이션을 수행하기 위한 CONTAM 2.4에서의 오염원에 관한 지배 방정식을 나타내었다.[9]

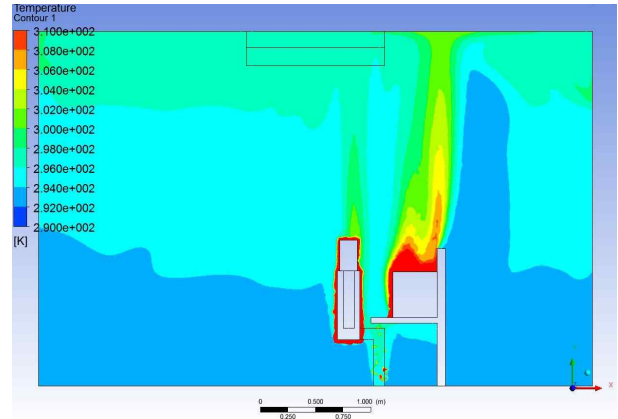
$$\begin{aligned} \frac{dm_{\alpha,i}}{dt} = & -R_{\alpha,i}C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j}C_{\alpha,i} \\ & + \sum_j F_{j,i}(1-\eta_{\alpha,j,i})C_{\alpha,j} \\ & + m_i \sum_{\beta} k_{\alpha,\beta}C_{\beta,i} + G_{\alpha,i} \end{aligned} \quad (9)$$

- 여기서, $m_{\alpha,i}$: 존 i에서 오염원 a의 질량 [kg]
- m_i : 존 i에서 공기의 질량 [kg]
- $R_{\alpha,i}$: 존 i에서 오염원 a의 제거율, [0~1]
- $C_{\alpha,i}$: 존 i에서 오염원 a의 질량비율, [0~1]
- $C_{\beta,i}$: 존 i에서 오염원 β 의 질량비율, [0~1]
- $F_{i,j}$: 존 i에서 존 j로 흐르는 공기유량 [kg]
- $F_{j,i}$: 존 j에서 존 i로 흐르는 공기유량 [kg]
- $K_{\alpha,\beta}$: 존 i에서 오염원 a와 β 의 운동반응 계수
- K_d : 낙하율 [1/h]
- $\eta_{\alpha,j,i}$: 존 i에서 존 j로 흐를 때 제거율, [0~1]

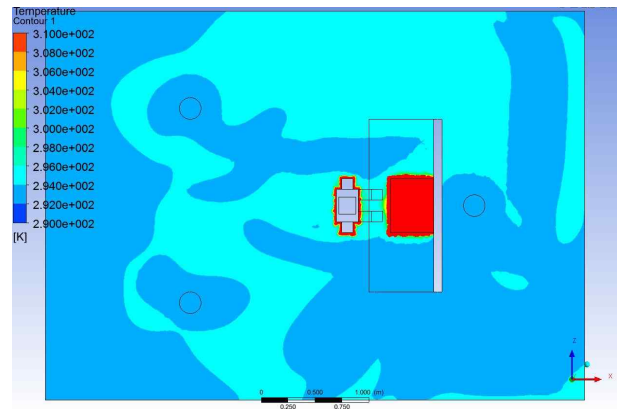
3. 결과 및 분석

우선 모델의 기본적인 결과를 확인하기 위하여 [Figure 6]에 속도분포 결과를 나타내었다. 입면인 [a]X direction의 결과는 해석공간의 중심부에서 수직으로 분포된 속도 콘터이다. 중심부에 설치된 바닥취출구 부분의 속도가 초기 입력조건인 5ACH 풍량을 각 취출구에서 토출하는 속도인 0.8m/s 부근에서 형성되며, 사람의 윗부분과 컴퓨터 윗부분은 부력에 의해 발생된 상향류(Up stream)에 의해 속도가 더해져 0.8m/s 부근에서 형성되는 것을 알 수 있다. [a]X direction의 결과는 책상에 부착된 취출구로부터 기류가 형성되어 0.1~0.4m/s 정도로 사람의 정면방향으로 기류가 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 또 두 결과에서 사람과 컴퓨터

이외의 주위공간에서는 0.08 ~ 0.2 m/s 부근에서 형성되어 쾌적조건에 안에서 속도조건이 분포되는 것을 확인 할 수 있다.[8]



[a] X direction



[b] Z direction

[Figure 7] Temperature result contour

[Figure 7]에 온도분포 결과를 나타내었다. 온도는 절대온도로 나타내었으며, 초기 실내온인 20°C(293 K) 부근에서 적절히 유지되는 것을 볼 수 있다. 사람의 체온인 36.5 °C(309.5 K)와 그 보다 높은 컴퓨터의 온도 또한 308 K~310 K 사이에서 적절히 나타나는 것을 알 수 있다. 사람과 컴퓨터 윗부분은 Heat flux에 의해 상부 공기가 덩어져서 298 K ~ 310 K 사이에서 분포되어 적절히 열환경이 해석된 것을 알 수 있다. [8]

[Figure 8]에 난류 결과를 나타내었다. 결과는 난류의 발생 및 소실율을 나타내는 것으로 Eddy dissipation을 나타냈다. 결과는 취출구에서 발생된 기류와 사람, 컴퓨터의 발생열로부터 생성된 상승기류에 의해 실내에 발생되는 Eddy dissipation이 0.7E-04 ~ 7.2E-03 m³/s³으로 나타나 상대적으로 기류유동이 큰

부분에서 난류의 발생과 소멸이 적절히 묘사되고 있음을 보여 준다.[8]

[Figure 9]에 기류에 의한 Stream line을 나타내었다.

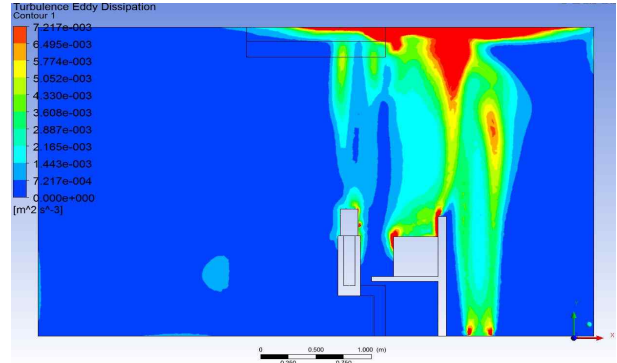
앞선 결과들로부터 적절한 열환경과 속도 분포 및 난류의 형성을 확인 할 수 있었으며, 이러한 결과로부터 절적인 Stream line을 묘사할 수 있음을 알 수 있다. 결과에서 보인 것과 같이 사람의 입에서 발생한 기류는 0.2 m/s의 속도 부근에서 실험실 전체로 유동하는 것을 알 수 있다. Stream line은 입에서 발생한 기류가 천정에 설치된 환기구의 풍량이 설치된 UV살균 장치의 풍량보다 상대적 5배정도 크고 측벽에 설치된 UV살균장치에서도 -Z 방향으로 기류가 형성되며, 사람 후면 부분에서 2개의 취출구에서 토출되는 급기 때문에 좌우측 부분의 환기구로 기류가 집중되고 있다. 이는 실제 설치된 실험실의 기류의 형태가 절적히 묘사되어 적당한 Stream line이 형성되는 것을 알 수 있다.

[Figure 10]에는 Particle track이 Stream line에서 적절히 분리되어 이동 할 수 있는 가를 알아보기 위한 결과를 나타내었다. 이를 위하여 기본적으로 셋팅된 시물레이션 조건에서 사람과 컴퓨터의 열전달과 부력항을 제거하여 사람의 체온과 컴퓨터의 발열에 의한 부력효과를 줄이여 Particle에 가해지는 Buoyancy force, lift force를 줄여 중력에 의해 쉽게 Stream line과 분리되도록 하고, Particle track의 trace line 길이를 짧게 하여 해석을 수행한 결과이다. 결과에서 나타난 진한색 선이 Particle transport 모델에 의해 구현된 Particle track line 이다. 결과에서 확인할 수 있는 것과 같이 이전의 Steam line을 따라 유동하는 것을 가정했던 모델들과는 다르게 Particle을 유동이 Steam line과는 별개로 묘사될 수 있음을 보여준다.

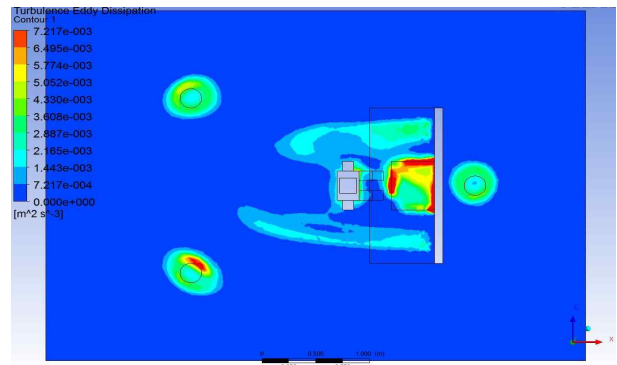
[Figure 5, 6, 7, 8]의 결과들은 Particle motion에 크게 영향을 미치는 기류속도, 부력, 열전달 등이 적절하게 묘사되었음을 나타낸다. 결과들로부터 각종 파라미터들과 초기의 조건들을 이용하여 수행한 시물레이션의 결과를 Figure 11에 나타내었다.

Figure 11에서는 입에서 토출되는 100개의 부유세균의 Particle track의 trace line를 모두 나타내었다. 결과는 100개의 모든 부유세균의 거동을 모두 추종할 수 있는 것으로 나타났으며, 이를 따로 각각의 개수를 정하여 출력할 수도 있는 것으로 나타나 향후 실내의 부유 미생물의 거동을 나타내는 효과 적인 도구로 활용할 수 있을 것을 사료된다.

[Figure 12]에는 CFD시물레이션을 수행하여 얻은 측 방향의 Particle 분포농도 (Particle concentration)를 나타냈다. 이 결과에서는 사람의 입이 있는 부분의 높이

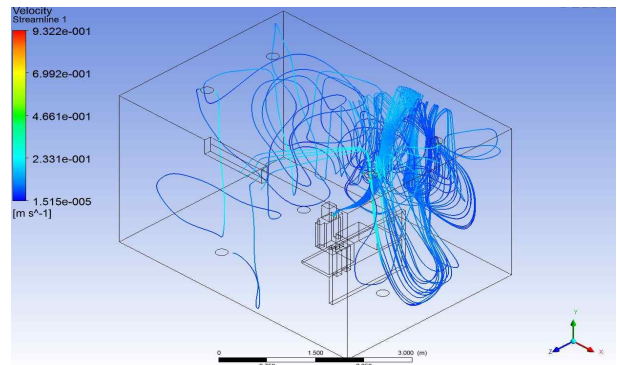


[a] X direction

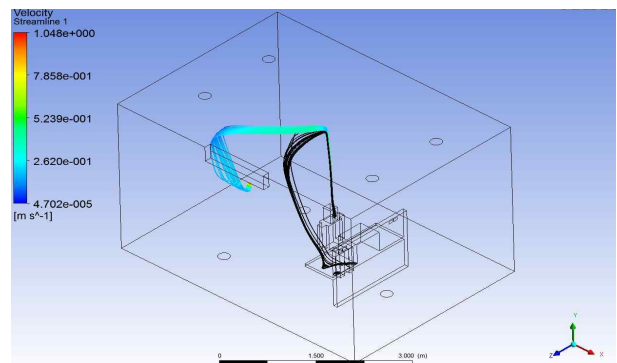


[b] Z direction

[Figure 8] Turbulence eddy dissipation result contour



[Figure 9] Result of stream line



[Figure 10] Separation particle track from stream line

인 1m 부근에서 $1.04E-14$ m³/m³의 체적비의 농도가 나타났으며, $2.0E-15 \sim 7.0E-15$ m³/m³의 농도가 높이에 따라 나타나며 공간전체에 대하여서는 $5.22E-14$ m³/m³의 체적비 농도를 보인다. 높이에 따라 낮은 곳은 상대적으로 높은 농도를 나타내고 높은 곳은 상대적으로 낮은 농도를 나타내어 농도분포 또한 적정하게 나타나는 것을 알 수 있다.

[Figure 13]에는 Multi-zone 시뮬레이션을 결과를 나타내었다. 멀티존 시뮬레이션의 결과는 실험실의 평균 체적비 농도를 시간에 따라 나타내었다. 결과에 알 수 있듯이 시간이 지나면 $5.15E-14$ m³/m³에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 CFD의 공간 평균 체적비 농도의 결과 $5.22E-14$ m³/m³이므로 평균 약 $0.1E-14$ m³/m³의 농도차가 나는 것을 알 수 있다.

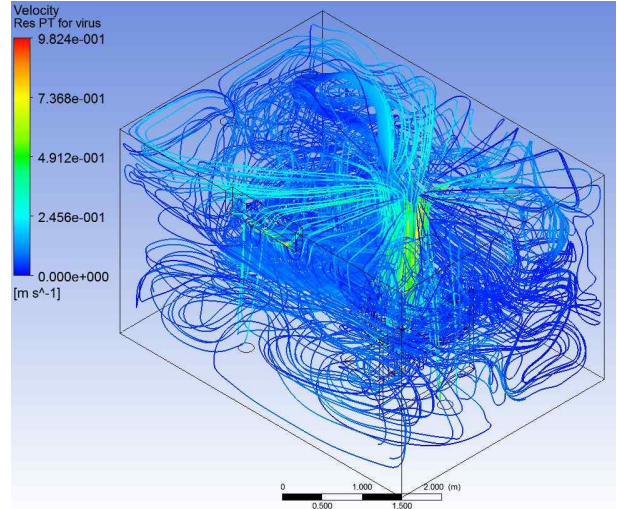
4. 결론

본 연구는 실내미생물 안전을 위하여 미생물의 거동을 예측하여 가시화하기 위해 CFD 상용프로그램인 CFX를 이용하여 Particle transport 모델을 적용하고 이의 유효성을 판단하여 기존연구들에서 수행하였던 면역건물기술에 대한 예측 모델들이 CFD로 구축 가능할 것인가를 판단하기 위하여 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

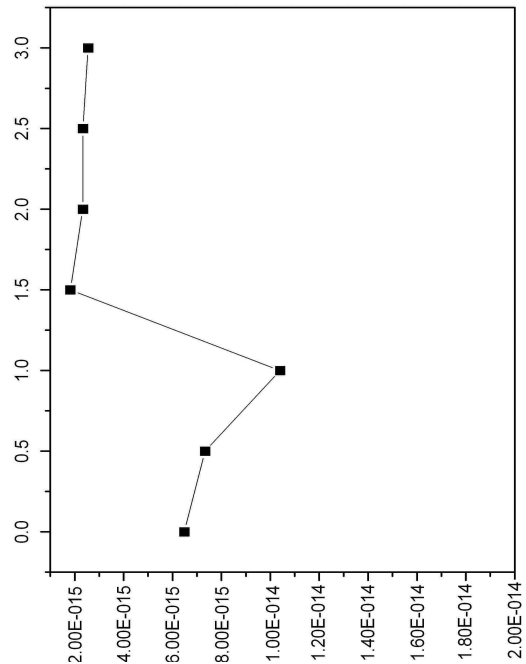
- 1) CFD를 이용한 실험실 모델의 열, 속도, 난류 등의 기본적인 물리량들은 적정하게 나타났다.
- 2) Particle track이 Stream line에서 적절히 분리되어 Particle transport 모델이 적절하게 Particle의 거동을 나타낸다.
- 3) Multi-zone 모델의 결과와 CFD 모델에 의해 나타난 농도결과를 비교한 결과 평균 약 $0.1E-14$ m³/m³의 농도차가 발생하여 1.94%의 오차가 발행한다.

따라서, CFD 모델을 이용하면 향후 실내미생물 안전을 위한 면역건물기술의 적용에 있어 살균장치 및 공조장치의 위치를 결정하는 등의 실내안전 유지를 위한 주요 도구로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

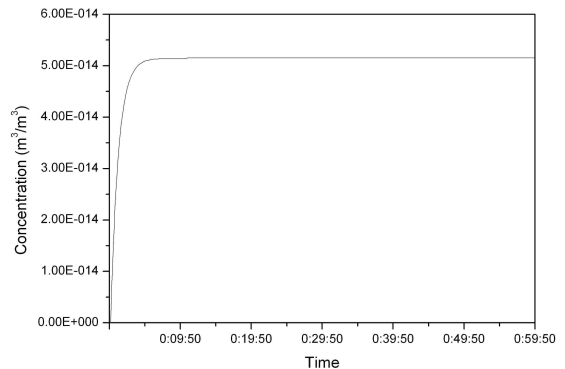
좀 더 나아가 CFD에서도 UVGI 조사에 의한 살균을 좀 더 구체적으로 모사하게 된다면 좀 더 폭넓은 상황에 대한 예측 및 실내안전 유지를 위한 중요한 도구로서 활용될 가능할 것으로 사료되며 이를 위한 연구가 좀 더 수행 되어져야 할 것으로 판단된다.



[Figure 11] Result of particle track



[Figure 12] Result of particle concentration



[Figure 11] Result of particle track

6. 참 고 문 헌

- [1] S. G. Choi, J. K. Hong, 2005, The study on the performance estimation of UVC air sterilizer for preventing transmission of air borne contagion ,v.17n.6. , Journal of SAREK
- [2] K. b. Jeong, S. G. Choi, 2009, UV Immune System of Personalized Space, v.21n.01 , Journal of SAREK
- [3] G. Choi, 2009, A Study of air Sterilization System in Personalized Office Using Simulation , v.22n.06 , Journal of SAREK
- [4] Fluent Inc., Airpak 3.0 Uer's Guide, 2007, Fluent Inc
- [5] Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., Whittam D. L., Severin, B.F., Whittam,T.S,. Mathematical modelling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection, Quantitative Microbiology 2, 249-270, 2000.
- [6] Bratbak, G. A., Dundas, I. 1984. Bacterial dry matter content and biomass estimations. Appl. Environ. Microbiol., 48, 755-757.
- [7] ANSYS Inc., CFX Uer's Guide, 2011, ANSYS Inc
- [8] ASHRAE Inc. 2009 ASHRAE Hand book-Fundamental, 2009, ASHRAE Inc.
- [9] NIST, CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation. , NISTIR 725

저 자 소 개

최 상 곤



경원대학교 건축설비과 학사, 석사, 박사 취득. 현재 유한대학교 건축설비과 교수로 근무 중.
관심분야 : 공기조화, 실내 공기 미생물 환경, UVGI, 신재생 에너지, 플랜트 설비 등

주소: 경기도 부천시 소사구 괴안동 185-34, 유한대학교 건축설비과