

# 생물안전밀폐시설에서 Multizone과 CFD 연동해석에 의한 실내기류 및 Influenza A 오염농도해석

## Applications of a Coupled Multizone and CFD Simulation to Validate Airflow and Influenza A Contaminant Dispersion in Biosafety Laboratory

황지현(Ji Hyun Hwang)<sup>1</sup>, 홍진관(Jin Kwan Hong)<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>가천대학교 대학원 건축설비학과, <sup>2</sup>가천대학교 건축설비학과

<sup>1</sup>Department of Building Equipment and System Eng, graduate school of Gachon University, Sunnam City 461-701, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Building Equipment and System Eng, Gachon University, Sunnam City 461-701, Republic of Korea

(Received March 12, 2014; revision received September 24, 2014; Accepted: October 6, 2014)

**Abstract** To maintain a negative pressure, the supply, exhaust airvolume are adjusted by setting volume damper and the infiltration through leakage area of the door between rooms in biosafety laboratory. Multizone simulation is useful way to predict room pressure, supply and exhaust air volume. But in a particular room, local change such as airflow and contaminants concentration distribution can not be evaluated unfortunately.

Through this study, a coupled multizone and CFD simulation was performed, indoor air flow and local contaminants concentration distribution in a particular room of BSL lab are predicted. The results show that all zones of BSL lab are well ventilated by unidirectional flow without local stagnation. In addition, in case that unexpected biohazard is occurred in BSL lab, multizone simulation results about the spread of pollutants along movement of the occupant also show that contaminants concentration is removing totally without the spread of the outside. In conclusion, a coupled multizone and CFD simulation can be applied to interpret differential pressure in room and local change of physical quantity in a particular room such as airflow and Influenza A contaminants concentration distribution. This simulation method is useful to enhance the reliability and accuracy of biosafety laboratory design.

**Key words** Biosafety laboratory, BSL lab.(생물안전 밀폐시설), Multizone smulation(멀티존 해석), CFD(전산유체역학), Coupled multizone and CFD simulation(멀티존\_CFD 연동해석), Airflow(공기유동), Influenza A contaminants concentration(인플루엔자A 오염농도)

\* Corresponding author, E-mail: [jkhong@gachon.ac.kr](mailto:jkhong@gachon.ac.kr)

### 기호설명

- $F_{i \rightarrow j}$  : 존 i에서 j로 흐르는 유량 [kg]  
 $\alpha_{ij}$  : 존 i에서 j 공기흐름 방향 [-1 or +1]  
 $c_{ij}$  : 유량계수 [0~1]  
 $\Delta P_{ij}$  : 압력차 [Pa]  
 $\eta_{ij}$  : 유량비율 [0~1]  
 $C_d$  : 유량계수 [0~1]  
 $A$  : 유효 누설 면적 [m<sup>2</sup>]  
 $P$  : 개구부를 지나는 공기의 압력 [Pa]  
 $\rho$  : 개구부를 지나는 공기의 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

### 1. 서 론

생물안전 밀폐시설(Biosafety Laboratory, BSL)이란, 연구원이 유전자조작 실험이나 감염성이 높은 물질을 다루는 실험을 수행하는 경우에 실을 음압으로 유지하여 오염원의 외부 확산을 차단하고, 생물안전 사고의 예방 및 생물재해를 방지하는 것을 목적으로 하는 밀폐 시설을 지칭한다. 특정 실험실을 음압으로 유지하기 위해서는 급배기 풍량을 조절하고 문에서의 틈새(Leakage area)를 통한 침기(Infiltration)를 이용하여야 한다. 음압을 설정하고 이를 검증하기 위해 멀티존 해석 프로그램

램으로 실간 순차적인 음압 유지<sup>(1)</sup>와 차압을 가상적으로 해석해야한다. 그러나 이와 같은 멀티존 해석방법은 각 실을 하나의 zone으로 설정하여 급배기 풍량, 실간 차압 및 환기량 해석에 적용하고 있으나 특정 실에서의 기류 정체 등의 국부변화를 예측할 수 없는 단점이 있다. 또한 생물안전에 문제가 없는지를 파악하는 위해성평가(Risk Assessment)의 한 방법으로 사용되는 멀티존 해석 프로그램은 실험실내에서 예기치 않은 생물재해(Biohazard)가 발생할 경우를 가상하여 시간에 따라 각 실별로 확산되는 미생물 오염원의 농도를 알 수 있으나 실내 오염원의 국부적인 농도분포는 알 수 없는 것이 단점이라 할 수 있다. 또한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics : CFD) 프로그램은 실내기류나 오염원의 국부적인 농도분포를 파악할 수 있으나 다수의 실로 구성된 생물안전 밀폐시설의 해석에 적용할 경우 계산량이 방대하여 많은 계산시간이 필요한 경제적인 문제를 안고 있다. 이에 본 연구에서는 각 실에서의 멀티존 해석과 동시에 특정 실에서의 물리량의 국부변화를 동시에 예측할 수 있는 연동해석법 Coupled Multizone and CFD Simulation)을 적용하여 각 실에서의 설정 실압, 환기해석 및 생물재해가 발생할 경우 위해성평가 차원에서 오염원의 확산에 대한 검증과 동시에 특정실험실에서 실내기류 분포 및 오염원 국부적인 농도분포를 예측하여, 경제적인 관점에서 신뢰성 있는 해석방안으로 생물안전 밀폐시설의 설계 및 검증에 활용하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 CONTAM\_CFD0 Program

본 연구에서 활용한 멀티존\_전산 연동해석(Coupled Multizone and CFD0) 프로그램은 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발되었으며, 멀티존 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM3.0<sup>(2, 3)</sup>과 전산유체역학 프로그램인 CFD0<sup>(4)</sup>(Computational Fluid Dynamics0)가 연동 해석되어 기존의 멀티존 시뮬레이션 결과에서 문제점을 보완하여 멀티존 시뮬레이션과 연동으로 특정실의 물리량의 국부변화의 예측<sup>(5, 6)</sup>을 가능하게 한다. 이러한 연구는 Wang, L. and Chen, Q.에 의해 3층 건물에서 비상시 대피전략의 결정과 오염원을 감지하는 오염센서(Contaminant sensors)의 설치 위치를 결정하는데 유용하게 적용된 바 있다.<sup>(7)</sup>

CONTAM 3.0 멀티존 모델에서 존 i에서 j로 이동하는 공기량은 다음 식(1)과 같다.

$$F_{i \rightarrow j} = \alpha_{ij} c_{ij} |\Delta P_{ij}|^{n_{ij}} \quad (1)$$

전산유체해석 프로그램에서의 급배기 공기량은 식(2)와 같다.

$$F = C_D A \sqrt{2 \Delta P / \rho} \quad (2)$$

전산해석에 사용된 지배방정식은 질량, 운동량, 물질 및 에너지 보존방정식이 사용되며, 멀티존 모델에서의 압력과 유량에 대한 기본 방정식은 아래 식(3)과 같으며, CFD에서 사용된 질량, 운동량, 물질 및 열확산방정식의 차분형 방정식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 난류모델의 기초방정식은 RANS(Reynolds Averaged Numerical Simulation)에 근거한 표준 K-ε 모델을 적용하였으며 지배방정식을 식(5), 식(6)으로 나타내었다.

$$\sum F_{ij} + F_j = \sum \alpha_{ij} c_{ij} |\Delta P_{ij}|^{n_{ij}} + F_j \quad (3)$$

$$\sum a_{\varnothing, nb} \varnothing_{nb} - a_{\varnothing, p} \varnothing_p + b_{\varnothing} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial U_j \kappa}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial X_j} + P_\kappa + G_{\kappa - \epsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \epsilon}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} + \frac{\epsilon}{\kappa} (C_{1\epsilon} P_\kappa - C_{3\epsilon} G_\kappa) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (6)$$

### 2.2 기류분포해석

#### 2.2.1 A Coupled Multizone\_CFD0 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 국내 K지역에 설립된 생물안전 밀폐시설을 해석대상으로 하였으며 대상 시설의 평면도는 Fig. 1과 같다.

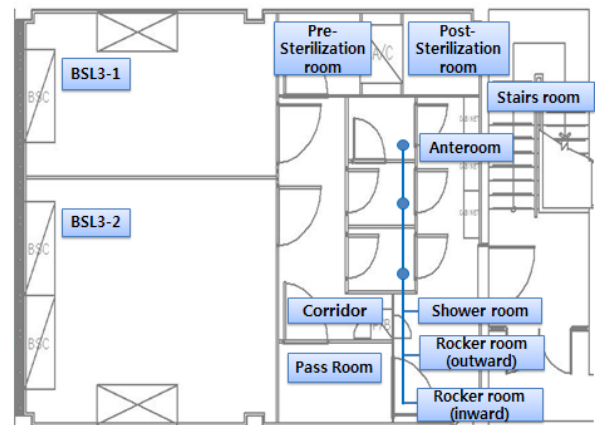


Fig. 1 Floor plan of BSL3 lab.

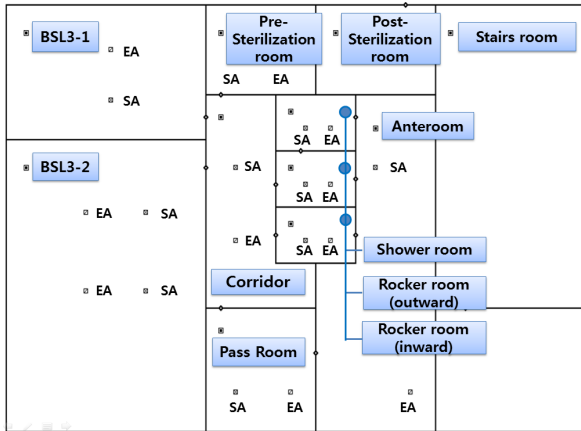


Fig. 2 Multizone base model.

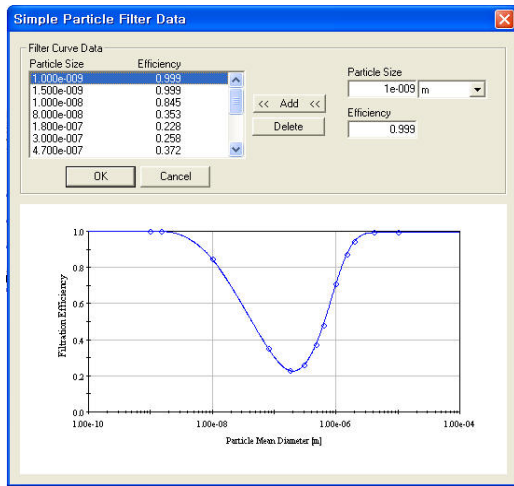


Fig. 3 Filter model for multizone analysis.

Fig. 2는 해석대상시설을 멀티존 시뮬레이션을 위해 모델링한 것이며, 해석대상 시설은 병원균을 취급하는 실험이 수행되는 BSL3\_1, BSL3\_2와 멸균전실(Pre-Sterilization room), 멸균후실(Post-Sterilization room), 전실(Anteroom), 샤워룸(Shower room), 탈갱의실(Rocker room)을 포함하여 총 11개의 존으로 구성되어 있다.

또한 생물안전 3등급연구시설(Biosafety Level 3 Lab. : BSL3)의 실압을 설정 음압으로 유지하기 위하여 총 풍량을 급기 3,400 m<sup>3</sup>/h, 배기 3,700 m<sup>3</sup>/h로 설정하였으며 실간 공기 이동 통로들의 Leakage area<sup>(8)</sup>를 25 cm<sup>2</sup>/item로 설정하여 해석을 수행하였다. 실험실의 급배기구에 적용된 필터는 ASHRAE standard 52.2<sup>(9)</sup>의 MERV 5~20등급 중 99.99%의 포집효율을 갖는 MERV17 등급의 고성능 HEPA Filter 모델을 적용하였다. 본 해석에서 적용한 HEPA Filter의 기본 모델은 필터모델을 커브피팅(Curve fitting)에 의한 모든 오염원의 직경에 대하여 반응하는 모델과 대상 오염원에 대한 단일 제거효율을 가지는 두

Table 1 Data base of BSL3\_1

Zone	Leakage area; 25 cm <sup>2</sup> /item			Air change rate(ACH)
	SA [m <sup>3</sup> /h]	EA [m <sup>3</sup> /h]	Volume [m <sup>3</sup> ]	
BSL3_1	700	1,010	54.54	12.83

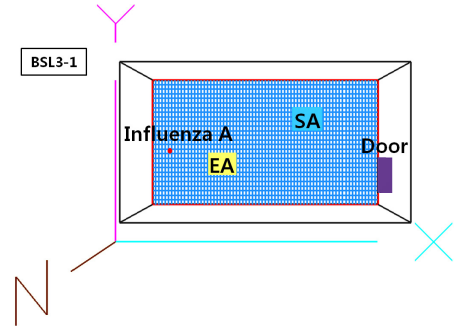


Fig. 4 Grid generation and CFD0 base model of BSL3\_1.

가지의 모델을 구성할 수 있도록 구성되어 있다. Fig. 3에서 실제로 CONTAM 3.0에서 구성된 MERV 등급을 가지는 필터모델을 보이고 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 분진의 직경에 대한 포집효율을 입력하면 하단부에 자동으로 커브피팅하여 모델을 구성할 수 있다. 본 해석에서는 W. J. Kowalski and William Bahnfleth<sup>(10)</sup>에 의해 제공되는 라이브러리 데이터를 사용하였다. 본 연구에서는 실질적으로 병원균을 취급하는 실험이 수행되는 BSL3\_1을 해석공간으로 설정하고 연동해석을 수행하였다. 연동해석을 위해 BSL3\_1존에 설정한 기본 입력 값은 Table 1과 같다. Fig. 4는 전산유체역학 해석을 위해 대상 시설인 BSL3\_1를 모델링한 것을 나타내고 있다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 해석대상 공간에 대한 격자수(Grid Number)를 X, Y, Z 축에 따라 60 × 33 × 27으로 설정하였으며, 실제 시설의 설계와 같이 BSL3\_1, 해석존의 크기는 6 m × 3.3 m × 2.7 m이고 BSL3\_1, 존에 급기구(SA), 배기구(EA)를 각각 1개씩 설치하였으며, 좌측 중앙에 Influenza A 오염원의 위치를 나타내었다.

### 2.2.2 A Coupled Multizone\_CFD0 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 Fig. 2에서 설정한 해석대상시설에 대해서 멀티존 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있다. 급배기량의 조절을 통해 BSL3\_1, BSL3\_2의 압력이 각각 -58.4 Pa로 생물안전 밀폐시설 설치 시 요구되는 조건에 맞는 -24.5 Pa 이상의 음압으로 실험실 압력이 유지되었으며, 청정구역(Anteroom)에서 오염구역(BSL3)까지의 압력차가 최소 -12.5 Pa 이상 유지되어 적절한 실간 압력분포<sup>(11, 12)</sup>를 나타내주고 있다. 또한 전실에서 실험실로 순차적인 음압을 형성하며 공기흐름이 일방향으로 유지되고 있음을 알 수 있었다.

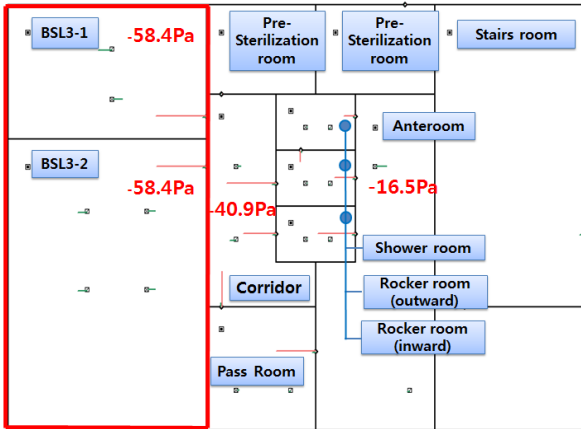


Fig. 5 Air flow and differential pressure of multizone model.

그러나 이와 같은 멀티존 해석방법은 급배기구와 문을 통해 들어오는 공기의 기류 정체 등의 국부변화를 예측할 수 없는 문제점이 있다. 이에 각 실의 멀티존 해석과 동시에 특정실험실(BSL3\_1)의 물리량의 국부변화를 동시에 예측할 수 있도록 CFD0 프로그램을 적용하여 멀티존 해석과 연동해석을 수행하였다. Fig. 6~Fig. 9에서는 연동해석 결과를 각각 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 Y = 2.1 m, X = 4 m 단면에서 본 BSL3\_1의 급기구쪽 단면의 공기유동을 나타내고 있으며, Fig. 8과 Fig. 9는 Y = 1.6 m, X = 2.1 m인 배기구쪽 단면의 공기유동을 나타내고 있다. 초기 입력 공기유속 (m/s)은 급기구와 배기구의 면적과 풍량으로 평균속도를 구하여 설정하였다. Fig. 5의 멀티존 해석결과에서 나타낸 바와 같이 실험실(BSL3\_1)의 음압이 -58.4 Pa, 청정복도(Corridor)의 음압이 -40.9 Pa로 되어 청정복도에서 실험실(BSL3\_1)로 순차적으로 형성된 높은 차압 (-17.5 Pa)과 실험실(BSL3\_1)의 음압(-58.4 Pa)로 인해 Fig. 8에서와 같이 문에서부터 기류가 밀려들어오고 있음을 알 수 있으며, Fig. 6과 Fig. 7과 같이 급기구에서 급기공기가 유입되고 있으며, Fig. 8와 Fig. 9에서와 같이 배기구에서 유출되면서 해석대상인 실험실(BSL3\_1)에서 기류분포가 정체 없이 유동되고 있음을 확인할 수 있다.

### 2.3 미생물 오염원의 농도분포 해석

#### 2.3.1 A Coupled multizone\_CFD0 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 연구원이 실험실(BSL3-1)에서 Influenza A 바이러스를 취급하는 실험을 수행하는 동안 예상하지 못한 병원균의 확산이 발생하는 생물 재해 상황을 가정하여 위해성평가(Risk Assessment)<sup>(12, 13)</sup> 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 Influenza A 바이러스의 특성치는 Table 2와 같으며, Influenza A 바이러스 0.1 kg/s 을 10분 동안 발생하는 것으로 가정하였다.

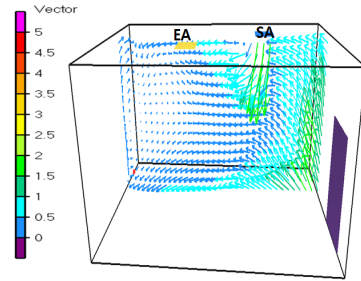


Fig. 6 Supply air flow of BSL3\_1(Y = 2.1 m).

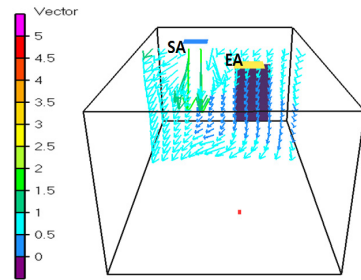


Fig. 7 Supply air flow of BSL3\_1(X = 4 m).

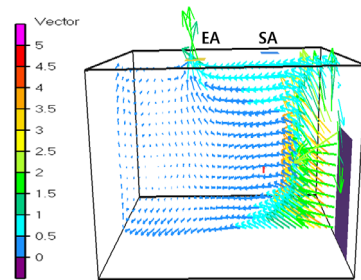


Fig. 8 Exhaust air flow of BSL3\_1(Y = 1.6 m).

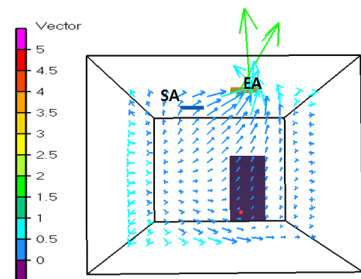


Fig. 9 Exhaust air flow of BSL3\_1(X = 2.1 m).

Table 2 Contaminant condition<sup>(8, 9)</sup>

Infection	Influenza A
Mean diameter	0.098 $\mu\text{m}$
Effective density	1,100 $\text{kg/m}^3$
Diffusion coefficient	$0.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Filter	HEPA Filter(MERV 17)

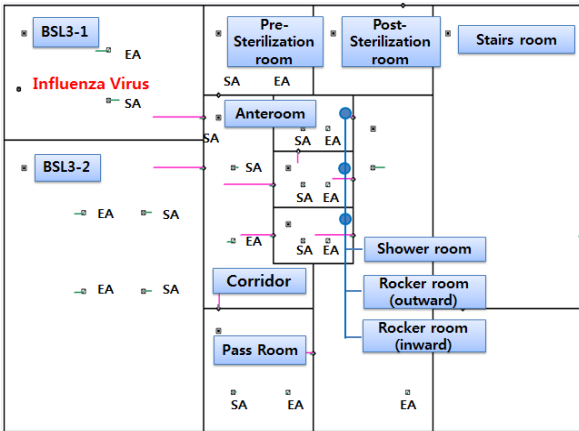


Fig. 10 Risk Assessment modeling in multizone.

Fig. 10은 해석대상 실험실에 Influenza A 바이러스의 생물 재해 상황의 위해성평가를 위해서 멀티존 시뮬레이션 프로그램으로 모델링 한 것을 나타내고 있다.

2.3.2 Coupled Multizone\_CFD0 시뮬레이션 결과

Influenza A 바이러스를 사용하여 실험하는 경우에 위해성평가 차원에서 생물재해 시나리오를 설정하여 재실자의 이동 동선에 따라 해석대상 실험실(BSL3\_1)에서의 병원균 확산에 대해 해석한 결과는 다음 Fig. 11 ~ Fig. 12과 같다.

Fig. 11은 정상상태에서 Y축 단면에서 본 CFD0 program에 의한 연동 해석결과로, Influenza A 바이러스의 확산에 따른 농도분포를 파악하기 위하여 실험대 위치인 Z = 0.7 m에서 Influenza A 바이러스의 오염이 발생된 경우 발생된 높이 Z = 0.7 m에서의 오염원의 농도 분포 해석 결과를 나타내고 있다.

Fig. 12는 실험대 위치인 Z = 0.7 m에서 Influenza A 바이러스의 오염이 발생된 경우 남녀 실험자의 신장을 고려하여 중간 호흡높이인 Z = 1.6 m에서 바이러스 농도 분포를 나타내고 있다.

Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 바이러스 발생시점에서 오염원의 농도분포가 높은 것을 알 수 있으며, Fig. 12에서 호흡선의 위치에서 Influenza A 바이러스 농도는 급배기에 의한 기류와 실간 문의 차압에 의해 외부 실로의 이동확산은 발생되지 않으며 오염원이 발생된 실험실(BSL3\_1) 내부(Z = 0.7 m)에서도 국부적인 확산이 일어나지 않으며, 중간 호흡높이인 Z = 1.6 m에서는 농도가 전량 제거됨으로 실험자의 안전을 검증할 수 있었다.

Fig. 13은 위해성평가를 위한 시간의 경과에 따른 바이러스 분포상황을 확인할 수 있는 비정상상태 해석인 멀티존 시뮬레이션 결과로, Influenza A 바이러스 오염 발생 10분 경과 후 최고농도에 도달한 후 바이러

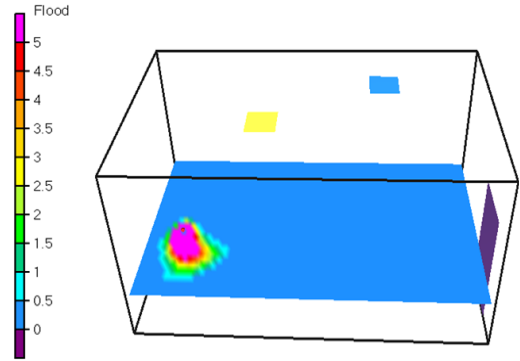


Fig. 11 Influenza A concentration in CFD0 program (Z = 0.7 m).

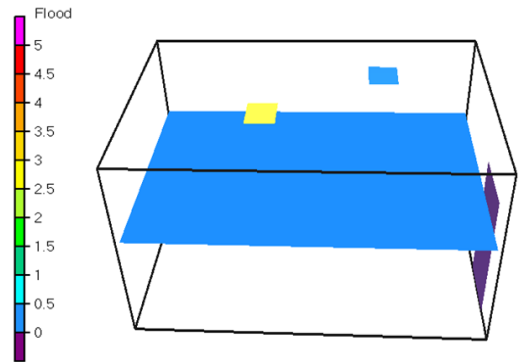


Fig. 12 Influenza A concentration in CFD0 program (Z = 1.6 m).

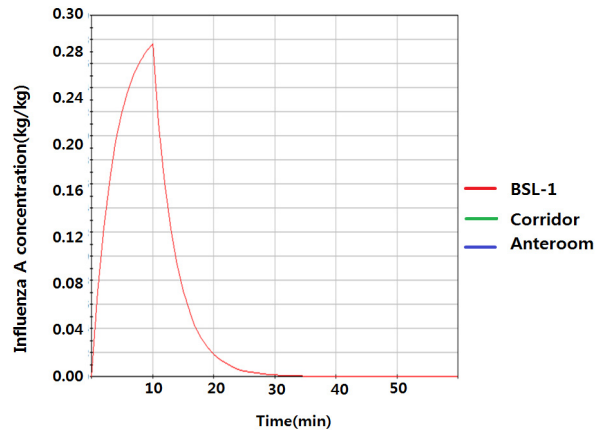


Fig. 13 Influenza A concentration in multizone model.

스가 급격히 감소, 25분~30분 후 전량이 제거되며 다른 실로의 확산은 없는 것을 알 수 있다. 이와 같이 오염원이 발생하는 초기상태에서의 중간 호흡높이인 Z = 1.6 m에서 Influenza A 바이러스 농도는 다른 실로 확산되지 않고 시간의 경과에 따라 제거된다는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구는 생물안전 밀폐시설을 대상으로 하였으며, Coupled multizone and CFD 프로그램으로 실내 기류분포와 오염원 분포를 연동 해석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 시설 전체를 대상으로 멀티존 해석을 수행한 결과 전실에서 실험실로 순차적 음압을 형성하고 있으며, BSL3\_1, BSL3\_2에서 외부로의 병원균 확산을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 멀티존 해석과 동시에 연동해석을 수행하여 특정 실험실(BSL3\_1)의 실내기류분포와 Influenza A 바이러스 농도 분포를 예측해 본 결과, 국부적인 정체 없이 일방향의 유동에 의해 전체적으로 환기(ventilation)가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 또한 Influenza A 바이러스를 취급하는 실험을 수행하는 경우 예상치 못한 생물재해 시나리오를 설정하여 재실자의 이동 동선에 따라 특정 시간에서의 정상상태해석인 CFD연동 해석과 시간의 경과에 따른 비정상상태 해석인 멀티존 프로그램을 통한 해석대상 시설에서의 병원균 확산을 동시에 수행해 본 결과, 외부 실로의 확산은 발생되지 않고 있으며, 실험실 내부에서도 국부적인 확산이 일어나지 않는 상태에서 농도가 낮아지며 전량 제거되어 실험자의 안전을 검증할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 실간 순차적인 음압과 차압 등의 해석과 동시에 특정 실험실(BSL3\_1)의 물리량 국소변화 예측이 가능하여 기류침체 등의 환기로 인한 문제점을 미리 예측할 수 있어 특수음압시설 설계의 신뢰성과 정확성을 높여 줄 수 있을 것으로 판단된다.

### References

1. McDowell, T. P., Thornton, J. W., Emmerich, S., and Walton, G., 2003, Integration of airflow and energy simulation using CONTAM and TRANSYS, ASHRAE transaction, Vol. 109, No. 2, kc-03-10-2.

2. National Technical Information Service U. S., Department of Commerce Springfield, VA 22161.
3. McDowell, T. P., Thornton, J. W., Emmerich, S., and Walton, G., 2003, Integration of airflow and energy simulation using CONTAM and TRANSYS, ASHRAE transaction, Vol. 109, No. 2, kc-03-10-2.
4. Wang, L., 2010, CONTAM 3.0 Tutorial.
5. Liangzhu Wang, 2007, Coupling of Multizone and CFD Programs for Building Airflow and Contaminant Transport Simulations, Thesis of Ph.D, pp. 31-56.
6. Wang, L. and Chen, Q., 2007, Validation of a coupled multizone and CFD program for building airflow and contaminant transport simulations, HVAC&R Research, pp. 267-281.
7. Wang, L. and Chen, Q., 2008, Applications of a coupled multizone and CFD model to calculate airflow and contaminant dispersion in built environment for emergency management, HVAC&R Research.
8. Walton, G. N., 2005, CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation, NISTIR 7251.
9. ASHRAE Standard 52.2-2012, Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012.
10. Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., and Whittam, T. S., 1999, Filtration of Airborne Microorganisms Modeling and prediction, ASHRAE Transaction, Vol. 105, No. 2, pp. 4-17.
11. Park, H. J. and Hong, J. K., 2010, A Study on the Prediction of Indoor Environment in Bio Safety Level 3 Laboratory According to Biohazard Scenario, Journal of SAREK, Vol. 22, No. 11, pp. 745-750
12. Hwang, J. H. and Hong, J. K., 2013, A Study on the Risk Assessment and Reduction of Initial Construction Cost in a Biosafety Laboratory According to Improvement of Supply and Exhaust Method, Journal of SAREK, Vol. 25, No. 10, pp. 534-539.