

멀티존 시뮬레이션을 이용한 생물안전 3등급(BSL3)시설의 설계 검증에 관한 연구

이 현 우, 최 상 곤*, 홍 진 관**†

(주)한국설비연구, *유한대학 건축설비과, **경원대학교 건축설비학과

A Study on Verification for the Design of Bio Safety Level 3 Laboratory by using Multi-zone Simulation

Hyun woo Lee, Sang Gon Choi*, Jin Kwan Hong**†

*Hankook Engineering Co. Ltd, 426-5, World Meridien II-1310, Gasan-Dong,
Geumcheon-Gu, Seoul 153-759, Korea*

**Department of Building services, Yuhan College, Kyeonggi-do 422-749, Korea*

***† Department of Building Equipment & System Eng, Kyungwon University, Sungnam City 461-701,
Korea*

ABSTRACT: In Korea, since the implementation of the GMO Law, the interest of biosafety level 3(BL3) lab. is increasing. In this study, using CONTAM which is applying multizone modelling, the multizone simulation for design verification of BL3 lab. was performed. In BL3 lab., because required air change rate is greater than general estimated air-conditioning load and it is difficult to maintain room pressure difference efficiently, to maintain pressure difference between laboratory rooms is important through sealing condition of doors and proper airflow control of laboratory rooms. In this study, about BL3 lab.(M. tuberculosis research lab.), the multizone simulation for four kind of biohazard scenarios was performed in the case of unexpected spread of contaminants in the laboratory room, anteroom, corridor and inside of BSC. Multizone simulation results show that these approach methods are used as a tool for the design and verification of BL3 lab.

Key words: 생물안전 3등급 연구시설(Biosafety Level 3 Lab.), 생물안전작업대(Bio Safety Cabinet, BSC), 생물재해(Biohazard), 결핵균(M. tuberculosis)

기 호 설 명

C_d : 방출율, [0~1]

C_b : 유량계수, [0~1]

C_i^α : 존 i에서 오염원 α 의 질량비율, [0~1]

C_j^α : 존 j에서 오염원 α 의 질량비율, [0~1]

$F_{i \rightarrow j}$: 존 i에서 j로 흐르는 공기유량, [kg]

F_y : 폭 W , 높이 Δy 인 개구부의 유량, [kg]

G_i^α : 제어체적내의 오염물질 발생량, [kg]

$K^{\alpha, \beta}$: 존 i에서 오염원 α 와 β 의 운동반응 계수, [0~1]

L : 유효 누설 면적, [m^2]

m_i : 존 i에서 공기의 질량, [kg]

m_i^α : 존 i에서 오염원 α 의 질량, [kg]

Q_r : 압력차 ΔP_r 에서 예상 풍량, [m^3/s]

ΔP_r : 압력차, [Pa]

R_i^α : 존 i에서 오염원 α 의 제거율, [0~1]

W : 개구부의 폭, [m]

Δy : 개구부의 단위 높이, [m]

ρ : 개구부를 지나는 공기의 밀도, [kg/m^3]

† Corresponding author

Tel : +82-031-750-5306, FAX : +82-031-750-5314

E-mail : jkhong@kyungwon.ac.kr

η_j^α : 오염원 α 에 대한 필터 효율, [0~1]

1. 서론

최근 발생하는 조류독감 (avian influenza, AI), 돼지독감 (swine influenza, SI) 및 중증 급성 호흡기 증후군 (severe acute respiratory syndrome, SARS) 등 공기를 통하여 전파되는 질병들은 발생 초기에 빠른 대처가 무엇보다 중요하다. 그러나 국내에는 이러한 공기를 통하여 전파되는 질병들을 대상으로 연구할 수 있는 시설이 미비한 상태이었고, 이를 보완하기 위하여 ‘유전자변형생물체 국가간 이동 등에 관한 법률’⁽¹⁾이 2008년 1월에 시행되면서 2008년 2월에 국내 처음으로 생물안전 3등급 연구시설(BSL3)을 국가가 인증하고 사용을 허가하고 있다. 따라서 생물안전 3등급 연구시설에 대한 설계와 이에 대한 검증 및 시공에 관해 다양한 연구가 진행되어질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 생물안전 3등급 연구시설에서 중요하게 고려하여야 하는 공기를 통한 감염 방지와 이를 위한 압력 설계의 검증을 위하여 몇 가지 시나리오를 통해 위해성이 높은 병원균이 실험실에서 공기 중으로 방출되는 경우에 대해 병원균의 거동을 멀티존 시뮬레이션을 통하여 예측해보고자 하였다. 이를 통하여 향후 생물안전 3등급 연구시설의 설계 및 검증의 도구로 활용하고, 나아가 실험자의 안전 및 시설의 운용안전성을 제고하는 것을 목적으로 하였다.

2. 모델 구성 및 오염발생 시나리오

2.1 모델 구성

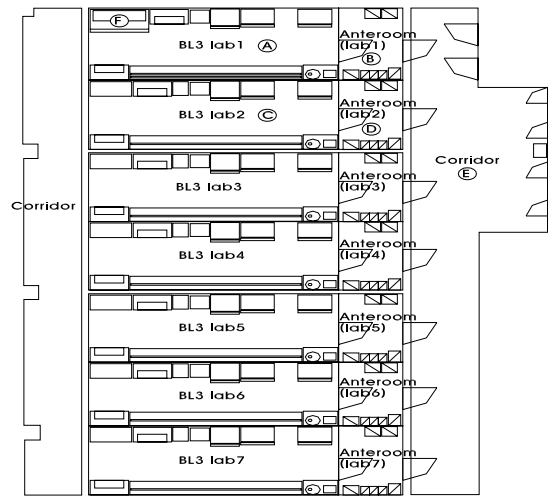


Fig. 1 Multi-zone base model

본 연구는 국내 C지역에 설립된 생물안전 3등급 연구시설을 대상으로 멀티존 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM2.4⁽²⁾를 이용하여 모델을 구성하였다. Fig 1은 각각 BSL3연구실, 전실, 복도로 구성된 멀티존 시뮬레이션의 기본모델을 나타내었으며, Table 1에는 실제로 설계된 BSL3 영역의 각 실험실의 면적, 급·배기 풍량과 생물안전작업대를 통한 배기풍량 조건을 나타내었다. 이와 같이 설정된 기본모델을 바탕으로 아래와 같은 해석조건을 가정하였다.

- 생물안전 3등급 연구시설은 시설 특성상 완전히 밀폐를 기본으로 하며 출입문의 틈새만을 통하여 공기이동(Airflow)이 발생한다.
- 시뮬레이션은 비정상상태 조건하에 덕트 및 급배기 장치에서 압력강하는 없는 것으로 가정하고 디퓨저에서의 풍량은 항상 설정한 일정값이 유지된다.

Table. 1 Base sources of multizone model

Room	Area (m ²)	Volume (m ³)	SA (CMH)	EA (CMH)	BSC EA (CMH)	Room	Area (m ²)	Volume (m ³)	SA (CMH)	EA (CMH)
BL3 lab 1	30.3	81.81	3300	800	2600	Anteroom(lab 1)	7.2	19.44	300	250
BL3 lab 2	28.8	77.76	3100	600	2600	Anteroom(lab 2)	7	18.9	300	250
BL3 lab 3	28.8	77.76	3100	600	2600	Anteroom(lab 3)	7	18.9	300	250
BL3 lab 4	28.8	77.76	3100	600	2600	Anteroom(lab 4)	7	18.9	300	250
BL3 lab 5	28.8	77.76	3100	600	2600	Anteroom(lab 5)	7	18.9	300	250
BL3 lab 6	26.9	72.63	3100	600	2600	Anteroom(lab 6)	6.6	17.82	300	250
BL3 lab 7	28.9	78.03	3100	600	2600	Anteroom(lab 7)	6.7	18.09	300	250
Corridor	70.3	189.81	3800	2250	-					

· 부하 및 실내조건에 영향을 미치는 열적인 환경은 초기설계 값을 유지하고 변화는 없다.

· 각 실험실의 공조를 위한 모든 장치에서는 누기 및 압력강하는 없다.

이러한 가정은 설계된 대상 시설의 도면만을 근거로 확인하여야하는 검증단계에서 개념설계의 효율성을 판단하고 신속한 해석결과를 도출하기 위해 필요한 가정이라 할 수 있다.

모델의 공기 이동경로인 각 실험실 문의 Leakage area는 ASHRAE에 의해 실험적으로 밝혀진 일반문의 기밀도인 $0.31\text{cm}^2/\text{lmc}^{(3)}$ 가 적용된 문과 본 연구에서 제안하는 일정량 leakage area가 있는 문을 각각 적용하여 압력 및 풍량 설계에 대한 비교가 가능하도록 하였다. 이때 유효 Leakage area는 다음 식(1)에 의해 계산되어진다.⁽⁴⁾

$$L = Q_r \frac{\sqrt{\rho/2\Delta P_r}}{C_d} \quad (1)$$

여기서, C_d 와 ΔP_r 은 일반적으로 $C_d=1.0$ 과 $\Delta P_r=4\text{Pa}$ 로 쓰거나 $C_d=0.6$ 과 $\Delta P_r=10\text{Pa}$ 로 사용되며, 본 연구에서는 $C_d=1.0$ 과 $\Delta P_r=4\text{Pa}$ 의 값을 설정하였다. 이렇게 설정된 유효 Leakage area는 다음 식(2)에 의하여 유량계수로 변환이 가능하다.

$$C_b = LC_d \sqrt{2} (\Delta P_r)^{1/2-n} \quad (2)$$

여기서, n은 실험적으로 구하게 되며, 실험적인 값이 없는 경우 일반적으로 0.6에서 0.7사이의 값을 적용하는 것이 적합하며 본 연구에서는 0.65를 사용하였다.

구성된 모델에서 오염의 제거를 나타내기 위한 지배방정식은 식(2)와 같으며 각 시나리오에 따른 오염의 분포를 나타내도록 하였다.

$$\frac{dm_i^\alpha}{dt} = \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_j^\alpha) C_j^\alpha + G_i^\alpha + m_i \sum_\beta K^{\alpha,\beta} C_i^\beta - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_i^\alpha - R_i^\alpha C_i^\alpha \quad (2)$$

2.2 오염발생 시나리오

생물안전 3등급 연구시설에서는 병원균의 취급 및 실험 중 다양한 형태로 공기 중에 병원균이 확산될 가능성을 배제할 수 없다. 또한 숙주의 반입이나 이동 등을 통하여 이동경로를 따라 오염원이 퍼져나갈 수 있다. 따라서 공기를 통하여 감염되는 병원균을 주로 다루는 생물안전 3등급 연구시설에서 예기치 않게 병원균이 BSL3 영역에서 발생하는 경우를 대표적으로 3가지의 시나리오로 단순화 하였다.

·시나리오① : 실험실 내부에서 예기치 않게 병원균의 확산이 발생하는 경우

·시나리오② : 실험실 내부에서 예기치 않게 생물안전작업대(B2 Type⁽⁵⁾)에서 병원균의 확산이 발생하는 경우

·시나리오③ : 다른 실험실과 접해 있는 복도에서 예기치 않게 병원균의 확산이 발생하는 경우

·시나리오④ : 전실에서 예기치 않게 병원균의 확산이 발생하는 경우

시나리오①은 병원균을 배양하는 플라스크, 배지 또는 숙주 등을 실험실 바닥 또는 실험실 공간 중에 떨어트려 예기치 않는 상황에서 병원균이 누출되는 경우를 가정한 것이다. 시나리오②는 실험실내부에 설치된 생물안전작업대에서 실험 또는 준비과정을 위한 미생물 조작 중 원하지 않는 상황에서 병원균이 누출되는 경우를 가정한 것이다. 시나리오③은 운반이나 이동 중 건물 내부에서 원하지 않는 상황에서 병원균이 누출되는 경우이다. 이러한 시나리오를 통하여 생물재해(Biohazard)가 발생시, BSL3 실험실 영역내에서 병원균 오염 전파방지 및 제거라는 관점에서 설계가 적절한지를 검증할 수 있도록 하였다.

3 연구 수행 방법

먼저, 모든 실의 문은 닫혀있는 것으로 하고 앞서 언급한 것과 같이 실험실은 기밀이 유지되는 상황에서 단지 문만을 통하여 공기유동이 이루어지고 이 부분에서 압력차를 확인하였다.

압력차의 확인은 기존의 설계값을 그대로 해석 모델에 입력한 경우를 우선 확인하도록 하였다.

이 결과를 바탕으로 BSL3 실험실의 적정 필요환기량인 15ACH를 적용한 경우에 대하여 기존 설계에 적용된 일반문의 기밀도인 0.31cm²/lmc가 적용된 문과 이 연구에서 제안하는 일정량 leakage area가 있는 문을 설치한 경우에 대하여 압력, 침기량, 급기에 대한 배기의 비율 등을 분석할 수 있도록 하였다.

이 연구에서는 결핵균(M.tuberculosis)을 해석대상균으로 선정하여 앞서 언급한 세가지 시나리오에 대해서 결핵균을 각 발생장소에서 시뮬레이션 시작 5분 후 순간적으로 10,000개의 병원균이 공기 중으로 확산시키는 것으로 가정하였다. 이는 일반적으로 실험실에서 병원균이 배양 등을 통하여 매우 높은 농도로 다루어지고 있지만, 그 형태가 액체, 고체 배지에 혼입되거나, 숙주에 몸속에 존재하는 경우가 발생하기 때문에 액체나 고체의 낙하 또는 숙주의 호흡 등을 통한 상대적으로 적은 양이 일시에 방출되는 경우를 모사할 수 있도록 하기 위한 설정을 하였다. 또한 발생하는 병원균은 공기 감염균이라는 특성을 살리기 위하여 공기 중에 방출되면 낙하하거나 부착에 의한 제거는 없는 것으로 가정하도록 하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

먼저 생물안전 3등급 연구시설의 압력설계 검토를 위하여 Table 1에 나타낸 기존의 설계 값과 일반문을 적용한 압력차 결과를 Table 2에 나타내었다. 결과에서 보는 것과 같이 기존 설계풍량과 일반문의 기밀도인 0.31cm²/lmc가 적용된 문을 해석조건으로 입력한 경우는 압력차가 300~1000 Pa로 매우 높은 실간 압력차를 나타내어 압력설계가 잘못 된 것을 확인할 수 있다. 이러한 과도한 실간 압력차는 실제 시공된 현장에서 침기에

Table. 2 Pressure differences results in case of using pre-designed data

Room	Between Anteroom and BL3 lab#(Pa)	Between Anteroom and corridor(Pa)
BL3 lab 1	1000	400
BL3 lab 2	900	300
BL3 lab 6	1000	400

의한 소음발생 및 송풍기에 대한 과도한 부하발생 뿐만 아니라 구조체에 무리한 압력을 지속적으로 가하는 단점을 유발할 수도 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 기존 설계풍량을 BSL3 실험실의 적정 환기량인 15ACH⁽⁶⁾와 적정 실간 압력차인 12.5Pa를 유지할 수 있도록 재설정하고 이 경우 일반문의 기밀도인 0.31cm²/lmc가 적용된 문과 이 연구에서 제안하는 일정량 leakage area가 있는 문(flowing door)을 설치한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 Table 3에 나타내었다.

우선 환기량 15ACH와 일반문의 기밀도인 0.31cm²/lmc가 적용된 문을 사용하는 경우 실간의 압력차 12.5Pa를 유지하기 위하여서는 급기량의 약 0.3% 가량만 더 배기하면 되는 것으로 나타났다. 이 경우 실제 현장에 설치된 송풍기를 조절하여 적정 압력차를 유지하기 위하여서는 매우 높은 정밀도가 요구된다. 따라서 일반적인 경우 실제 현장에서는 거의 압력차를 유지하는 것이 어려울 것으로 판단된다.

침기량 또한 BSL3시설에 적정한 170CMH~255CMH⁽⁷⁾사이의 값을 유지하여야 하지만 5CMH로 매우 적게 나타나는 것을 알 수 있다.

이 연구에서는 일정량 leakage area가 있는 문을 설치한 경우 적정 압력차와 적정 침기량을 유

Table 3 Pressure differences results in case of using post-designed data

Room	BL3 lab			Anteroom			Between Anteroom and lab3 (Pa)	Leakage air (CMH)
	Volume (m ³)	SA (CMH)	EA (CMH)	Volume (m ³)	SA (CMH)	EA (CMH)		
general door	82	1250	1255	20	305	300	12.5	5
flowing door	82	1250	1420	20	470	300	12.5	170

지하기 위한 leakage area가 $90\text{cm}^2/\text{item}$ 으로 산출되었으며 이를 적용한 결과 압력차 12.5Pa, 침기량 170CMH를 보여 적절하게 실압차를 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

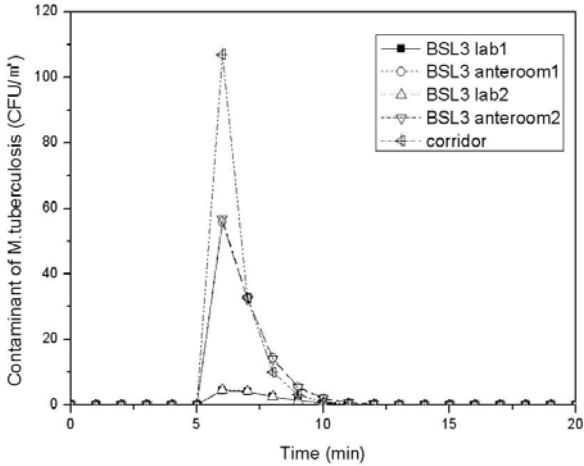


Fig. 2 Contaminants of M.tuberculosis in case of anteroom maintained negative pressure

Fig. 2에 기존 설계와 같이 전실이 음압으로 유지되는 경우에 복도에서 병원균이 발생하는 시나리오③의 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있는 것과 같이 전실이 음압으로 유지되면 복도와 연결된 모든 실험실로 오염이 확산되는 것을 알 수 있다. 따라서 복도에 연결된 전실은 양압을 유지하여야 복도의 오염이 확산되는 것을 방지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

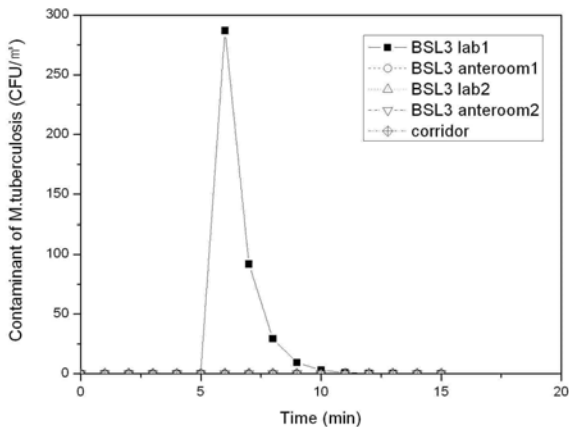


Fig. 3 Contaminants of M.tuberculosis in case of bursted in BL3 Lab 1

Fig. 3 ~ Fig. 6에는 앞선 결과들로부터 얻어진 설계 제안 값인 환기량 15ACH와 leakage

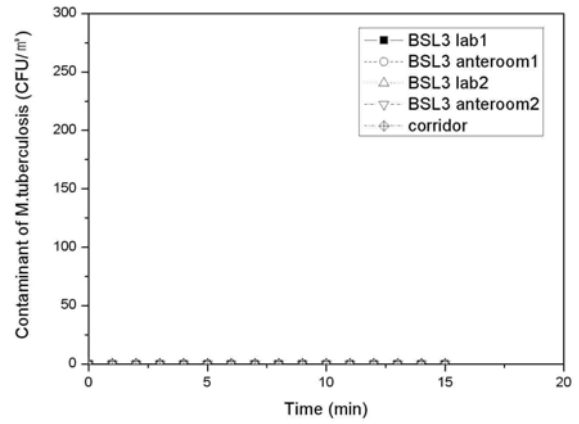


Fig. 4 Contaminants of M.tuberculosis in case of bursted in BSC (B2 Type)

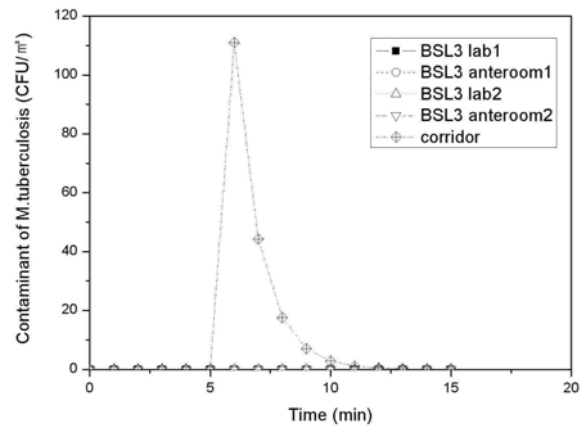


Fig. 5 Contaminants of M.tuberculosis in case of bursted in corridor

area $90\text{cm}^2/\text{item}$ 의 일정량 leakage area가 있는 문 (flowing door)을 사용하고 전실을 양압으로 유지하는 경우 오염발생 시에 대한 적절한 대처가 이루어질 것인지 알아보기 위한 결과를 나타내었다. Fig. 3 ~ Fig. 6의 결과는 각각 시나리오① ~ 시나리오④의 시뮬레이션 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 모든 시나리오에서 오염 발생 후 5분에서 6분 정도면 모든 장소에서 오염이 전량 제거되는 것을 알 수 있다.

특히 Fig. 4의 생물안전작업대(B2 Type)에서 오염이 발생하는 시나리오②의 결과는 생물안전 작업대에서 바로 배기가 되기 때문에 병원균은 외부 전혀 확산되지 않아 생물안전 작업대에서 작업하는 경우 오염의 확산에 대한 우려 없이 안정적으로 실험에 임할 수 있을 것으로 판단된다. 그

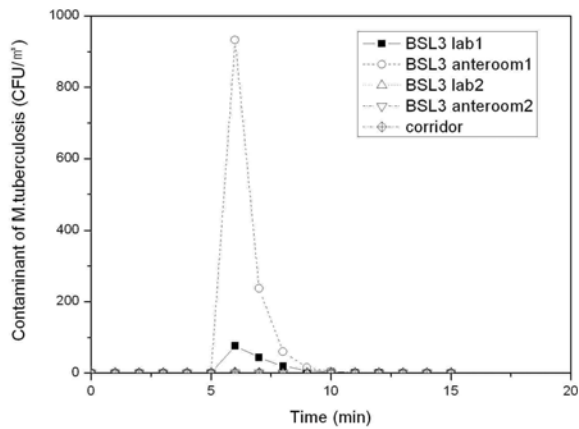


Fig. 6 Contaminants of M.tuberculosis in case of bursted in BSL3 anteroom 1

러나 Fig. 6의 시나리오④, 전실에서 오염이 발생하는 경우에는 실험실 쪽으로 소량의 오염전파가 이루어지지만 오염 발생 후 5분에서 6분 정도면 모든 장소에서 오염이 전량 제거되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 생물안전 3등급 시설의 설계 검증에 위해 멀티존 시뮬레이션을 통하여 실험실 간의 압력차를 확인하고, 이를 바탕으로 제안된 설계를 적용하여 4가지의 오염발생 시나리오를 통한 설계의 적정성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 기존 설계 값은 실간 압력차가 최대 1000Pa로 너무 높고 배기량을 급기의 0.3% 정도만 더 배기하면 되어 현실상 적절하지 않은 것으로 나타났다.
2. 적정 설계 풍량인 15ACH와 적정 압력차인 12.5Pa를 유지하기 위하여서는 일정량 leakage area가있는 문을 사용하여야 하며 이 연구에서는 90cm²/item 정도의 leakage area가 적정하였다.
3. 오염전파 방지를 위하여 기존 설계인 전실의 음압유지는 복도에서 발생하는 병원균을 다른 실험실에 까지 전파시키므로 전실의 경우 양압으로 유지하여야 복도와 연결된 다른 실험실로의 오염전파를 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

이상의 결과들로부터 기존의 설계 값이 아닌 본 논문에서 제안된 설계치로 변경하는 경우 효과적으로 각각의 시나리오에서 발생하는 오염의 전파를 방지하는데 유용하다는 것을 알 수 있다. 따라서 적정한 설계 풍량의 선정, leakage area가 있는 문의 선정, 전실의 양압 선정 등에 멀티존 해석을 이용하여 적정한 설계검증이 가능하다는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Korea Center for Disease Control and Prevention, According to between nations transfer of living Modified Organisms etc of Law, 2008
2. National Technical Information Service U.S. Department of Commerce Springfield, VA 22161.
3. ASHRAE Handbook 1997. American Society Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc, Atlanta, GA. Chapter 25. 18.
4. Walton, G.N., 2005, CONTAM2.4 User Guide and Program Documentation, NISTIR 7251.
5. ASHRAE Handbook 1995. American Society Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc, Atlanta, GA. Chapter 13. 6.
6. ARS Manual-242 2002, Facilities Design Standards, pp. 180-181.
7. ARS Manual-242 2002, Facilities Design Standards, pp. 220-225.