

## 생물안전 3등급(BSL3)시설의 생물재해 시나리오에 따른 실내 공기환경예측에 관한 연구

박 현 진, 홍 진 관<sup>\*†</sup>

경원대학교 대학원, \*경원대학교 건축설비학과

### A Study on the Prediction of Indoor Environment in Bio Safety Level 3 Laboratory According to Biohazard Scenario

Hyun Jin Park, Jin Kwan Hong<sup>\*†</sup>

Graduate School, Kyungwon University, Sunnam City 461-701, Korea

<sup>\*</sup>Department of Building Equipment and System Eng, Kyungwon University, Sunnam City 461-701, Korea

(Received July 5, 2010; revision received August 26, 2010)

**ABSTRACT:** Since the implementation of the LMO Law in Korea, the importance of the design qualification of BSL3 lab. is emphasizing. In this study, multizone simulation for three kind of biohazard scenarios using CONTAM is performed for design qualification of BSL3 lab. Also, in the case of unexpected spread of contaminants such as Influenza A virus(H1N1) in BL3 zone, the design qualification is carried out for diffusion and decontamination of contaminants according to differential pressure of BSL3 anteroom and door area of BSL3 lab. Also, in this study, appropriateness of laboratory room differential pressure and air flow rate to maintain pressure difference between laboratory rooms, and energy consumption due to air change rate variation according to door area in BL3 lab. Simulation results show that these approach methods are used as a tool for the design and verification of BL3 lab.

**Key words:** BSL3 : Biosafety level 3 lab.(생물안전 3등급 연구시설), Biohazard scenario(생물재해 시나리오), Influenza A : H1N1(인플루엔자 A), Multizone simulation(멀티존시뮬레이션), Energy consumption(에너지 소비량)

#### 기 호 설 명

$C_d$  : 방출율, [0~1]  
 $C_b$  : 유량계수, [0~1]  
 $C_i^\alpha$  : 존 i에서 오염원  $\alpha$ 의 질량비율, [0~1]  
 $C_j^\alpha$  : 존 j에서 오염원  $\alpha$ 의 질량비율, [0~1]

$F_{i \rightarrow j}$  : 존 i에서 j로 흐르는 공기유량, [kg]  
 $F_y$  : 폭  $W$ , 높이  $\Delta y$ 인 개구부의 유량, [kg]  
 $G_i^\alpha$  : 제어체적내의 오염물질 발생량, [kg]  
 $K^{\alpha, \beta}$  : 존 i에서 오염원  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 운동반응 계수, [0~1]  
 $L$  : 유효 누설 면적, [ $m^2$ ]  
 $m_i$  : 존 i에서 공기의 질량, [kg]  
 $m_i^\alpha$  : 존 i에서 오염원  $\alpha$ 의 질량, [kg]  
 $Q_r$  : 압력차  $\Delta P_r$ 에서 예상 풍량, [ $m^3/s$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-031-750-5306; fax: +82-031-750-5314

E-mail address: jkhong@kyungwon.ac.kr

- $\Delta P_r$  : 압력차, [Pa]
- $R_i^\alpha$  : 존 i에서 오염원  $\alpha$ 의 제거율, [0~1]
- $W$  : 개구부의 폭, [m]
- $\Delta y$  : 개구부의 단위 높이, [m]
- $\rho$  : 개구부를 지나는 공기의 밀도, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\eta_j^\alpha$  : 오염원  $\alpha$ 에 대한 필터 효율, [0~1]

1. 서 론

2003년 2월 중국의 광둥성에서 발생한 중증급성 호흡기 증후군(Severe acute respiratory syndrome, SARS)나 2009년 4월 처음 발생된 신종 인플루엔자(H1N1)등은 비말감염, 곧 감염된 사람의 기침이나 재채기 등을 통하여 주로 사람 대 사람으로 감염자와 가까운 접촉자 사이에서 전파되는 것이 일반적인 경우로 알려져 있다. 이러한 공기를 통하여 전파되는 질병들은 발생초기에 빠른 대처가 무엇보다 중요한 것으로 알려져 있다. 그러나 국내에는 공기를 통하여 전파되는 질병들이나 위험성이 높은 새로운 미생물들을 대상으로 연구할 수 있는 시설이 미비한 상태로 2008년 1월에 ‘유전자변형생물체국가간이동 등에 관한 법률’<sup>(1)</sup> 시행되고 2008년 2월에 국내 처음으로 생물안전 3등급연구시설(BSL3 lab.)을 국가가 인증하고 사용을 허가하고 있다. 이에 2010년 5월 까지 13개소의 BSL3 실험실에 대해서 사용이 허가되어 있어,<sup>(2)</sup> 향후 생물안전 3등급연구시설에 대한 설계와 이에 대한 검증 및 시공에 관해 다양한 연구가 진행되어질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 생물안전 3등급연구시설의 설계검증(DQ : Design qualification)<sup>(3)</sup>을 위해서 3가지의 생물재해 시나리오를 설정하여 위험요소분석(Risk assessment)을 수행하였다. 이를 위해 인플루엔자 A 병원균이 실험실에서 공기중으로 방출되는 경우에 대해 실험실 전실의 압력차와 실험실 문의 Leakage area에 따른 병원균의 확산과 제거특성에 대해서 멀티존 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 설정된 실압을 유지하기 위해서 Leakage area에 따른 급배기 풍량과 그 변화로 인한 공조에너지 사용량에 대하여 파악해 보고자 하였다. 이와 같은 연구수행을 통하여 향후 생물안전 3등급연구시설의 설계 및 검증의 도구로서 활용하고, 나아가 실험자의 안전 및 시설의 운용안전성을 제고하는 데 기여하고자 하였다.

2. 모델 구성 및 오염발생 시나리오

2.1 모델 구성

본 연구는 국내 C지역에 설립된 생물안전 3등급 연구시설을 대상으로 멀티존 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM2.4<sup>(4)</sup>를 이용하여 모델을 구성하였다. Fig. 1은 각각 BSL3 실험실, 전실, 복도로 구성된 멀티존 시뮬레이션의 기본모델을 나타내었으며, 이와 같이 설정된 기본모델을 바탕으로 아래와 같은 해석조건을 가정하였다.

- 생물안전 3등급연구시설은 시설 특성상 완전히 밀폐된 것을 기본으로 하며 출입문의 틈새만을 통하여 공기이동(Airflow)이 발생한다.
- 시뮬레이션은 비정상상태 조건하에 덕트 및 급배기 장치에서 압력강하는 없는 것으로 가정하고 디퓨저에서의 풍량은 항상 설정한 일정 값이 유지된다.
- 부하 및 실내조건에 영향을 미치는 열적인 환경은 초기설계 값을 유지하고 변화는 없다.
- 각 실험실의 공조를 위한 모든 장치에서는 누기 및 압력강하는 없다.

해석모델의 공기 이동경로인 각 실험실 문의 leakage area는 ASHRAE에 의해 실험적으로 밝혀진 일반문(General door)의 기밀도인 0.31 cm<sup>2</sup>/lmc<sup>(5)</sup>가

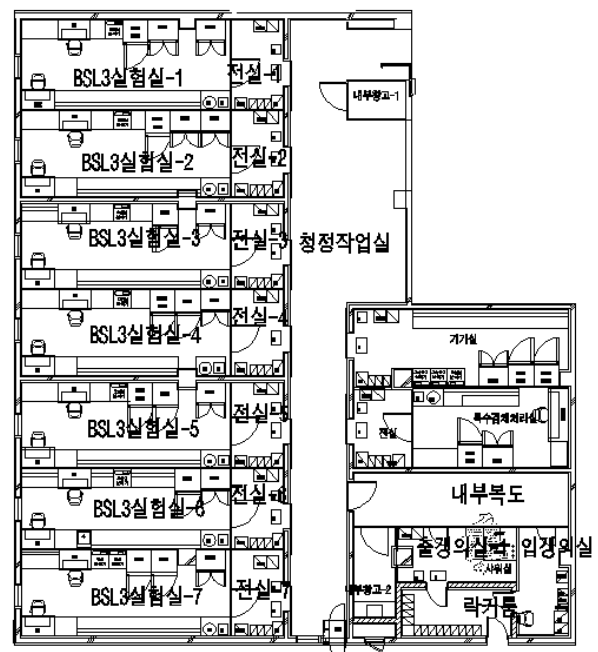


Fig. 1 Multi-zone base model.

적용된 문과 본 연구에서 제안하는 일정량 Leakage area가 있는 유동문(Flowing door)을 각각 적용하여 압력 및 풍량 설계에 대한 비교가 가능하도록 하였다. 이때 유효 Leakage area는 다음 식(1)에 의해 계산되어진다.<sup>(6)</sup>

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

여기서,  $C_d$ 와  $\Delta P_r$ 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,  $n$ 은 실험적으로 구하게 되며, 실험적인 값이 없는 경우 일반적으로 0.6에서 0.7사이의 값을 적용하는 것이 적당하며 본 연구에서는 0.65를 사용하였다.

구성된 모델에서 오염의 제거를 나타내기 위한 지배방정식은 식(3)과 같으며 각 시나리오에 따른 오염의 분포를 나타내도록 하였다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{dm_i^\alpha}{dt} = \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_j^\alpha) C_j^\alpha + G_i^\alpha + m_i \sum_\beta K^{\alpha,\beta} C_i^\beta - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_i^\alpha - R_i^\alpha C_i^\alpha \quad (3)$$

또한, Leakage area에 따른 오염원의 확산과 제거속도를 알아보하고자 Leakage area에 따른 풍량 차이에 의한 공조에너지 소비량을 비교하였다. 공조

에너지 소비량은 BSL3 실험실의 경우 전외기 공조 방식이므로 설정 풍량값에 비열과 실내외 온도차의 곱으로 산정하였다.

## 2.2 오염발생 시나리오

생물안전 3등급연구시설에서는 병원균의 취급 및 실험 중 다양한 형태로 공기 중에 병원균이 확산될 가능성을 배제할 수 없다. 또한 숙주의 반입이나 이동 등에 따른 이동경로를 통하여 오염원이 퍼져나갈 수 있다. 따라서 공기를 통하여 감염되는 병원균을 주로 다루는 생물안전 3등급연구시설에서 예상치 못하게 병원균이 발생하는 경우를 아래의 대표적인 3가지 시나리오로 설정하여 병원균의 오염분포를 예측해 보고자 하였다.

- 시나리오 ① : 실험실 내부에서 예기치 않게 병원균의 확산이 발생하는 경우
- 시나리오 ② : 전실에서 예기치 않게 병원균의 확산이 발생하는 경우
- 시나리오 ③ : 다른 실험실과 접해 있는 청정작업실에서 예기치 않게 병원균의 확산이 발생하는 경우

시나리오 ①은 병원균을 배양하는 플라스크, 배지 또는 숙주 등을 실험실 바닥 또는 실험실 공간 중에 떨어트려 예기치 않는 상황에서 병원균이 누출되는 경우를 가정한 것이다. 시나리오 ②와 시나리오 ③은 운반이나 이동 중 건물 내부에서 원하지 않는 상황에서 병원균이 누출되는 경우이다. 이러한 시나리오를 통하여 생물재해(Biohazard) 발생시, BSL3 실험실 영역 내에서 병원균 오염전파방지 및 제거라는 관점에서 설계가 적절한지를 검증할 수

Table 1 Pressure differences results in the case of variation according to door leakage area

| Room                                 | BSL3                     |          |          | Anteroom                 |          |          | Between anteroom and BSL3 (Pa) | Leakage air (CMH) |     |
|--------------------------------------|--------------------------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|--------------------------------|-------------------|-----|
|                                      | Volume (m <sup>3</sup> ) | SA (CMH) | EA (CMH) | Volume (m <sup>3</sup> ) | SA (CMH) | EA (CMH) |                                |                   |     |
| General door                         | 82                       | 2400     | 2408     | 20                       | 300      | 300      | 13.13                          | 8                 |     |
| Flowing door (cm <sup>2</sup> /item) | 10                       | 82       | 2400     | 2420                     | 20       | 300      | 300                            | 13.13             | 20  |
|                                      | 20                       | 82       | 2400     | 2440                     | 20       | 300      | 300                            | 13.13             | 40  |
|                                      | 40                       | 82       | 2400     | 2480                     | 20       | 300      | 300                            | 13.13             | 80  |
|                                      | 80                       | 82       | 2400     | 2560                     | 20       | 300      | 300                            | 13.13             | 160 |

있도록 하였다.

## 2.3 연구 수행 방법

멀티존 기본모델에서는 앞서 언급한 바와 같이 모든 실의 문은 닫혀있는 것으로 실의 기밀이 유지된 상태에서 공기유동은 문을 통해서만 이루어진다는 가정 하에 멀티존 간의 압력차를 확인하였다.

압력차의 확인은 BSL3 실험실의 적정 필요환기량인 15ACH를 적용한 경우에 대하여 기존 설계에 적용된 일반문의 기밀도인  $0.31 \text{ cm}^3/\text{lmc}$ 가 적용된 문과 Table 1과 같이 문 1개 당 10, 20, 40, 80  $\text{cm}^3/\text{item}$ 으로 일정량 Leakage area가 있는 문을 설치한 경우에 대하여 기본모델을 구성하였다. Fig. 2는 Table 1에서 설정된 문의 Leakage area가 변화함에 따라 설정된 실간차압을 유지하기 위해서 배기풍량이 증가하게 되며 그에 따라 연간 공조에너지 사용량도 증가하고 있음을 나타내고 있다. 이 기본모델을 바탕으로 본 연구에서는 인플루엔자A(Influenza A)를 해석 대상균으로 선정하고 앞서 설정한 3종류의 생물재해 시나리오에 대하여 인플루엔자 A가 각 발생장에서 실험자가 입실 5분 후부터 5분 간 10,000개의 병원균이 공기 중으로 확산된다는 가정 하에 실시하였다. 본 연구에서 사용한 인플루엔자A(Influenza A)의 평균직경은  $0.098 \mu\text{m}$ 이며, CONTAM2.4<sup>(4)</sup>의 라이브리러리에 제시된 값들을 적용하였다. 발생되는 병원균은 공기감염균이라는 특성을 살리기 위하여 공기 중에 방출되면 낙하하거나 부착에 의한 제거는 없는 것으로 가정하였다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

먼저 해석대상 시설의 압력설계 검토를 위하여 기존 설계값으로 일반문의 기밀도인  $0.31 \text{ cm}^3/\text{lmc}$ 을 시뮬레이션에 적용한 결과 압력차가  $300 \sim 1000 \text{ Pa}$ <sup>(7)</sup>로 일반적인 실간 설정 압력차  $12.5 \text{ Pa}$ <sup>(8)</sup>에 비해서 매우 높은 압력차가 나타났다. 이렇게 과도하게 실간 압력차가 발생할 경우 침기에 의한 소음발생 뿐만 아니라 송풍기에 대한 과도한 부하발생과 구조체에 무리한 압력을 지속적으로 가하는 문제를 유발할 수 있으며, 이로 인해 불필요한 에너지 소비가 발생하므로 적절한 실간 압력분포를 유지하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 적정 실간 압력분포에서 오염원의 확산 및 제거효과를 멀티존 시뮬레이션을 이

용한 대상건물 표준화 작업을 통하여 알아보았다.

우선 BSL3 실험실의 적정 실간 압력차  $12.5 \text{ Pa}$ 에 근접하는  $13.1 \text{ Pa}$ 정도를 유지할 수 있도록 설정하고 이 경우 Leakage area가 있는 유동문을 설치한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 Table 1에 나타내었다.

여기서 일반문의 기밀도인  $0.31 \text{ cm}^3/\text{lmc}$ 가 적용된 문을 사용하는 경우 실간 압력차  $13.1 \text{ Pa}$ 정도를 유지하기 위해서는 실의 급기량  $2,400 \text{ CMH}$ 의 약 0.3% 정도인  $8 \text{ CMH}$ 를 더 배기하면 되는 것을 알 수 있다. 이때 실간 압력차 유지를 위해 실제 현장에서 송풍기 조절에 의해 압력차를 유지하는 것은 매우 어려울 것으로 판단된다. 따라서 일정량의 Leakage area가 있는 문을 설치하여야 하며 이 연구에서는 일정량 Leakage area가 있는 유동문을 적용하여 실시하였다. 이렇게 실간 압력차를 설정한 후, Fig. 2~Fig. 5에 3종류의 생물재해시나리오에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 2에서 시나리오 ①의 경우 실험실에서 발생한 병원균은 약 10분 정도가 지나면 오염된 병원균이 제거되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 실간 압력분포에 따라 병원균이 발생하는 실험실 외 다른 실로의 확산은 없는 것을 확인할 수 있다.

시나리오 ②의 경우 Fig. 3에서 보는바와 같이 전실 3에서 확산된 병원균은 BSL3 실험실 3내로 확산되어 실험실로 유입된 병원균은 발생 후 15~20분 이후에 제거되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 병원균은 발생된 전실 3에 인접한 BSL3 실험실 3외의 다른 BSL3 실험실로는 확산되지 않은 것을 알 수 있는데 이는 전실 3보다 상대적으로 양압인 청정작업실로의 병원균 확산이 없기 때문에 다른 BSL3 실험실로는 확산되지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 시나리오 ③의 경우 청정작업실에서 발생한 병원균의 확산은 실간 압력계획에 따라 청정작업실 → 전실 → BSL3 실험실로 5~6% 정도의 병원균 확산이 일어났으며, 유입된 미량의 병원균은 약 15~20분 정도 지난 후 각 실에서 제거되는 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 5과 같이 시나리오 ③에 대하여 문의 Leakage area에 따른 병원균 확산과 제거속도를 알아보았다. 문의 Leakage area가  $80 \text{ cm}^3/\text{item}$ 인 경우 5분 간 병원균 발생 후 5~6분 후면 병원균이 완전히 제거되는 반면, Leakage area가 적은 경우는 15~20분 정도가 지나야 병원균이 제거되는 것으로 나타났다. Leakage area가  $80 \text{ cm}^3/\text{item}$ 인 경우 확산

된 오염원의 제거가 빠르게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 Table 1로부터 문의 Leakage area가 증가하면 문을 통한 공기이동이 증가하여 실간 설정차압 13.1 Pa을 유지하기 위한 배기풍량이 커지기 때문으로 판단된다.

또한, 배기풍량이 변화에 따른 공조에너지 사용량을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와같이 Leakage area가 증가할수록 실간 설정차압 13.1Pa을 유지하기 위한 배기풍량 증가로 공조에 필요한 에너지 사용량도 증가하는 것을 알 수 있다.

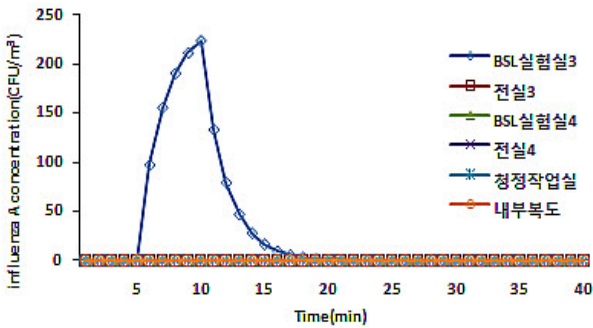


Fig. 2 Contaminants of influenza A in case of bursted in BSL3 lab 1(Scenario ①).

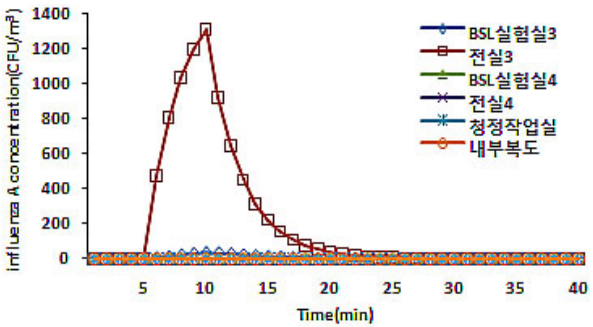


Fig. 3 Contaminants of influenza A in case of bursted in anteroom 1(Scenario ②).

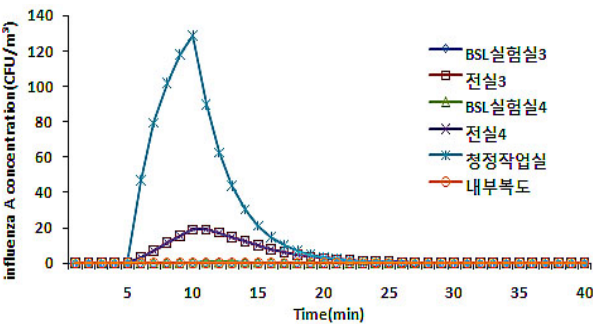


Fig. 4 Contaminants of influenza A in case of bursted in corridor(Scenario ③).

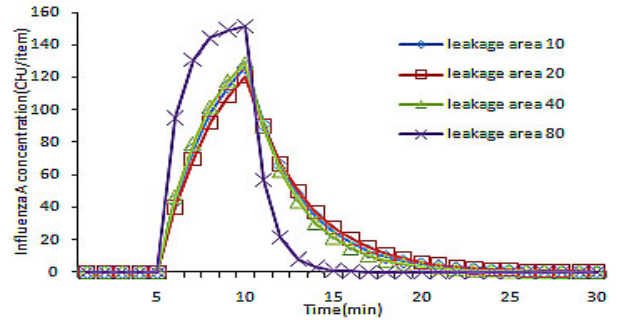


Fig. 5 Contaminants of influenza A in case of busted in corridor according to door leakage area(Scenario ③).

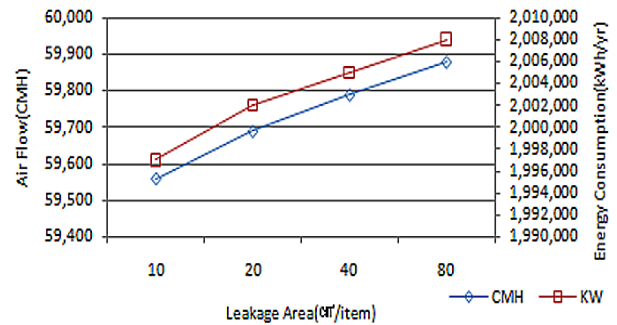


Fig. 6 Air flow and energy consumption according to door leakage area.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 생물안전 3등급시설의 설계 검증을 위해 멀티존 시뮬레이션을 통하여 실험실 실간의 압력차를 확인하였다. 또, 3가지의 생물재해 시나리오에 따른 병원균 확산과 실험실문의 Leakage area별 배기풍량과 공조에너지 사용량을 파악하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 3가지의 시나리오에서의 오염전파 방지를 확인한 결과 Influenza A 병원균은 실내설정 압력에 따라 음압영역으로 확산되어 일정시간 후 제거되는 것을 알 수 있다.

2) 문의 Leakage area에 따라 병원균의 확산과 제거정도의 차이가 있음을 확인하였다. Leakage area가 커질수록 오염확산된 병원균 제거시간이 단축된다는 것을 확인할 수 있었다.

3) 또한, Leakage area 커질수록 실간 설정압력 13.1 Pa을 유지하기 위한 실배기풍량이 증가하여, 이로 인한 공조에너지 소비량이 증가되는 것을 알 수 있다.

이상의 결과들로부터 병원균의 전파방지를 위해 서 적정 실압유지를 위한 각 실의 설계 급배기 풍량과 Leakage area가 있는 유동문의 선정 등을 고려하여야 하며, 이를 통한 설계의 적정성의 검토는 환기로 인한 공조에너지 소비를 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 위험성분석(Risk assessment)관점에서 대상건물의 연구시설에 관한 설계 적정성 평가인 DQ(Design qualification)가 필요하다. 생물안전 3등급실험실의 특성상 설정된 실압유지로 생물안전성이 최우선시 되어야 하므로 실험실의 안전성을 유지하면서 이에 수반되는 공조에너지 소비량을 줄일 수 있는 에너지 절약적인 실험실 설계기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Korea Center for Disease Control and Prevention, According to between nations transfer of living Modified Organisms etc of Law, 2008.
2. Hong, J. K., 2010, A Case Study on the Validation of BL3 Laboratory and Engineering Cost Evaluation of BL3 Laboratory, Design, Construction and Validation Workshop of BL3 Laboratory, pp. 229-253.
3. Hong, J. K., 2010, Design Simulation for BL3 Laboratory, Design, Construction and Validation Workshop of BL3 Laboratory, pp. 61-87.
4. National Technical Information Service U.S. Department of Commerce Springfield, VA 22161.
5. ASHRAE Handbook, 1997, American Society Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc, Atlanta, GA. Chapter, Vol. 25, p. 18.
6. Walton, G. N., 2005, CONTAM2.4 User Guide and Program Documentation, NISTIR, Vol. 7251, p. 215.
7. Lee, H. W., Choi, S. G. and Hong, J. K., 2009, A Study on Verification for the Design of Bio Safety Level 3 Laboratory by using Multi-zone Simulation, Journal of SAREK, Vol. 21, No. 12, pp. 671-677.
8. ARS Manual-242 2002, Facilities Design Standards, pp. 180-181.