

생물안전 3등급시설의 공기환경 예측 및 공조부하 절감에 대한 해석

홍진관[†], 박현진^{*}

가천대학교 건축설비학과, ^{*}한국특허정보연구원

An Analytical Study on the Prediction of Indoor Air Quality and the Reduction of Air Conditioning Load in Bio Safety Level 3 Laboratory

Jin Kwan Hong[†], Hyun Jin Park^{*}

Department of Building Equipment and System Eng, Gachon University, Sunghnam 461-701, Korea

^{*}Korea Institute of Patent Information, Seoul 135-980, Korea

(Received August 16, 2012; revision received October 21, 2012)

ABSTRACT: In this study, the multizone simulation for biosafety of BSL3 lab. and energy simulation are carried out simultaneously by using linked model of CONTAM and TRNSYS. In BSL3 lab., annual energy consumption is approximately five to ten times more than the magnitude of the office building. This is because required air change rate is extremely large and it is difficult to maintain room pressure difference efficiently. To maintain pressure difference between laboratory rooms through sealing condition of doors and proper airflow control is significant. In this study, to predict indoor environment of the BSL3 lab.(Influenza A research lab.), the multizone simulation for four kinds of biohazard scenario is also performed as part of risk assessment. Multizone and energy simulation results by using linked model show that these approaches are used as a tool for the energy efficient design and operation method for the safer BSL3 lab. facilities.

Key words: Bio safety level 3 lab., BSL3 lab.(생물안전 3등급 연구시설), Biohazard scenario(생물 재해 시나리오), Indoor air environment(공기환경), Energy consumption(에너지 소비량), Multizone simulation(멀티존 시뮬레이션)

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 유량 [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 유량 [m^3/s]
 ΔP_r : 압력차 [Pa]

[†] Corresponding author

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

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

- 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]
- η_j^α : 오염원 α 에 대한 필터 효율 [0~1]

1. 서 론

생물안전 3등급 연구시설(Bio Safety Level 3 Laboratory, BSL3 lab.)은 실험실의 생물안전을 위해서 전외기 급기 및 전배기를 해야 하고 실험실 내를 순차적으로 일정 대기압 이하로 유지하는 특수 음압 시설로 공기조화설비 시스템을 상시로 가동하고 있기 때문에 동일 규모 일반 사무소 건물에 비해 5~10배 더 많은 양의 에너지가 소비되는 것으로 알려져 있다.^(1, 2) 본 연구에서는 BSL3 lab.에서 설정된 실압을 유지하기 위한 멀티존 시뮬레이션을 위해서 CONTAM 2.4⁽³⁾와 이를 위한 공기조화설비에서의 에너지 소비량을 TRNSYS⁽⁴⁾와 연동하여 해석을 수행하였다. 이는 틈새바람과 환기의 영향에 따른 동적인 부하변동 해석이 가능하여 BSL3 lab.에서의 실내 음압유지를 위한 실간 틈새바람의 흐름까지 고려한 에너지 해석을 수행하기 위한 것으로 이러한 연구는 McDowell et al.⁽⁵⁾에 의해 처음 시도된 바 있으며, 공동주택에 대한 환기 및 에너지 해석⁽⁶⁾을 수행한 사례가 있다.

본 연구에서는 두 개의 프로그램을 연동하여 BSL3 lab.에서 전외기방식의 공조시스템으로 운전할 경우와 BSL3 lab.의 배기시스템에 현열교환기를 적용한 경우를 비교하여 열회수에 따른 에너지 절감효과를 알아보고자 하였다. 이를 통해서 최근 BSL3 lab.에서 문제로 대두하고 있는 과도한 외기부하의 증가에 따른 유지운영비 문제에 대응하면서 실험실 생물안전을 바탕에 둔 에너지 절약 설계 및 운전방안을 모색해보고자 하였다. 또한, BSL3 lab.에서 예기치 않은 바이오하자드(Biohazard)가 발생할 경우를 가상하여 실험실내에서의 미생물 오염원의 확산과 거동에 관한 연구를 수행하여 위해성평가(Risk Assessment)⁽⁷⁾측면에서 BSL3 lab.의 실험실 생물안전에 대한 평가를 수행하였다. 이러한 연구를 통해 BSL3 lab.의 생물안전(Biosafety)과 경제적인 관점에서 효율적인 시설의 운영방향을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

2. 모델 구성 및 오염발생 시나리오

2.1 BSL3 lab. 멀티존 환기해석 모델

본 연구는 국내에 설립된 BSL3 lab.을 대상으로 하였으며 대상 시설의 평면도는 Fig. 1과 같으며 화살표는 각 실의 입퇴실 동선을 나타내고 있다.

Fig. 1의 해석대상 BSL3 lab.을 멀티존 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM 2.4를 이용하여 Fig. 2와 같이 시뮬레이션 기본모델을 구성하였다.

본 연구에서 해석대상으로 선정한 BSL3 lab.은 고위험성 병원균을 다루는 시설로 실제 병원균 분사에 의한 실험은 보건위생상 불가능하므로 설정된 실간 실압 유지를 통한 병원균 확산에 대한 해석을 아래와 같은 가정 하에 수행하였다.

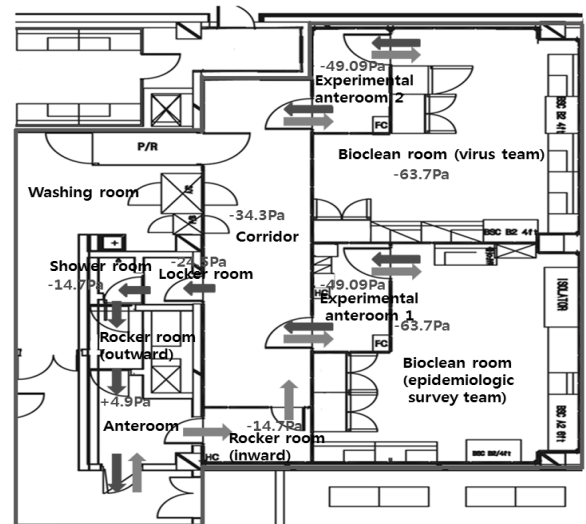


Fig 1 Floor plan of BSL3 lab.

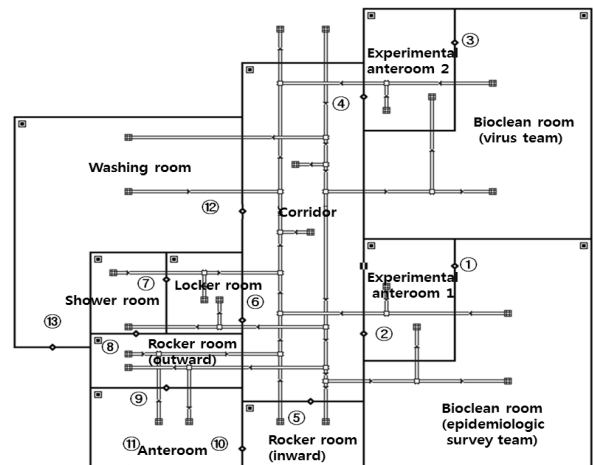


Fig. 2 Multizone base model of BSL3 lab.

- 1) BSL3 lab.은 완전히 밀폐된 것을 기본으로 하며, 출입문의 틈새만을 통하여 공기이동(Airflow)이 발생한다.
- 2) 시뮬레이션은 비정상상태 조건하에 급배기 장치에서 압력강하는 없으며 디퓨저에서의 공기유량은 항상 설정한 일정값이 유지된다.
- 3) 부하 및 실내조건에 영향을 미치는 열적환경은 초기설계 값을 유지하고 변화는 없다.
- 4) 각 실험실의 공조를 위한 모든 장치에서는 누기 및 압력강하는 없다.
- 5) 실험실과 덕트 내의 병원균의 침적은 없다.

연구시설 모델에 사용한 기본 입력값은 Table 1을 사용하여 Fig. 2와 같이 실제 연구시설 환경을 멀티존 모델로 구성하였다. BSC(Bio Safety Cabinet)가 가동되지 않은 경우의 급기량은 설계시의 실내 발열 부하에 따른 급기유량을 적용하였으며, BSC를 가동한 경우는 실제 시운전시 시험조정평가(T.A.B.)과정에서 측정된 값을 사용하였다.

본 연구에서는 실간 공기 이동통로들의 기밀도는 상시문 틈새에서 약 85 m³/h⁽⁸⁾의 공기가 실험실 내로 유입될 수 있도록 50 cm³/item을 적용하였다. 또

Table 1 Input data of multi-zone model

Zone	Temp. (°C)	Area	Volume	BSC Off	BSC On
		(m ²)	(m ³)	(m ³ /h)	(m ³ /h)
Bioclean room (virus team)	22±2	41	111	1,240	3,590
Experimental anteroom 2	22±2	7	19	140	210
Bioclean room (epidemiologic survey team)	22±2	42	114	1,240	4,300
Experimental anteroom 1	22±2	7	19	150	230
Corridor	22±2	30	82	1,600	1,750
Locker room	22±2	2	6	60	100
Shower room	22±2	2	5	60	100
Rocker room (outward)	22±2	3	7	90	170
Rocker room (inward)	22±2	5	14	170	150
Anteroom	22±2	7	18	180	270
Washing room	22±2	21	56	1,450	1,200
P/R	22±2	3	8	70	100
Total		169.8	458.4	6,450	12,170

한, 체중이 30 L/min의 호흡을 하는 70 Kg인 남자 연구원이 재실하고 있는 것을 가정하였다. 각 실에는 급배기를 위한 덕트가 설치되어 있으며, 실험실 용도에 따라 실험에 필요한 BSC 등의 실험장비가 설치되어 있다. 또한, 실내의 급배기 시 오염원 차단을 위하여 HEPA(High Efficiency Particulate Air) Filter가 장착된 기계환기장치에 의해 제거되는 것으로 가정하였다. 이러한 조건에서 BSL3 lab.에서 병원균 확산 및 제거효과를 예측, 평가할 수 있도록 BSL3 lab. 실간 압력과 공기 유량분포 등 대상모델의 실험실 환경 및 운전요소를 분석하고, 설계단계의 실험실 동선, 전실 계획 등 비상시 실험실 안전과 관련된 실간 구획 및 평면계획에 대한 멀티존모델을 구성하고, 4가지 바이오하자드 시나리오에 따른 병원균의 확산해석을 수행하였다.

해석모델의 공기 이동경로인 각 실험실 문은 일정량 Leakage area가 있는 문을 각각 적용하여 압력 및 공기유량 설계에 대한 비교가 가능하도록 하였다. 이때 유효 Leakage area는 다음 식(1)에 의해 계산되어진다.⁽⁹⁾

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

여기서, C_d 와 ΔP_r 은 일반적으로 $C_d = 1.0$ 과 $\Delta P_r = 4$ Pa로 쓰거나 $C_d = 0.6$ 과 $\Delta P_r = 10$ Pa로 사용되며, 본 연구에서는 $C_d = 1.0$ 과 $\Delta P_r = 4$ Pa의 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 적당하며 본 연구에서는 0.65를 사용하였다.

구성된 모델에서 오염의 제거를 나타내기 위한 지배방정식은 식(3)와 같으며 각 시나리오에 따른 오염의 분포를 나타내도록 하였다.⁽⁹⁾

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

2.2 오염원의 이동 경로 해석 시나리오

대상 연구시설에서 실험자의 입퇴실 동선은 Fig. 1과 같이 전실을 경계로 일반동선(실험실 외부)과 오염동선(실험실 내부)을 명확히 구분하였다. 즉, 연구원의 이동 시 교차오염 및 재오염을 방지하기 위하여 출입동선을 분리시켰으며, 기류는 일반구역에서 오염구역으로의 일방향 흐름을 원칙으로 하고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 연구자의 경우 오염된 구역으로 입장의실을 통해 진입하며 퇴실 시에는 탈의실에서 오염된 실험복을 탈의하여 오염원을 일차적으로 제거하고 샤워 후 출장의실을 통해 퇴실하도록 하고 있다. 실험이 끝난 폐기물은 고압증기 멸균 또는 화학약품 처리 등 생물학적 오염원을 제거할 수 있는 시설을 설치하여 반출함으로써 잠재적인 오염원이 외부로 유출되지 않도록 한다. 또한, 실험실 소모품 및 검체는 안전한 포장 후 음압형 Pass Box를 통하여 BSL 3 실험실 구역으로 이동하도록 하여 실험실 외의 구역에서 유출되는 위험을 방지하였다.

본 해석에서는 대상 건물에서의 인플루엔자 병원균 확산에 대하여 아래의 4가지 경우에 대한 예상치 못한 바이오하자드 시나리오를 설정하고 각 경우에 인플루엔자 병원균 확산에 대하여 해석을 수행하였다. 시나리오 ①은 실험실 내부에서 예상치 못한 병원균의 확산이 발생하는 경우로 연구원이 BSL3 실험실에서 고위험균을 이용한 실험을 수행하는 경우이다. 이때, 병원균 실험은 각각 바이러스티움, 무균실과 역확조사팀 무균실에서 진행되며 실험 중에는 실험실 문은 닫혀있는 조건하에 시뮬레이션을 수행하였다. 시나리오 ②는 실험자가 실험실 내부에서 병원체 실험 중 다른 연구원이 실험실 내로 진입하여 실험실 문이 개폐되는 경우이다. 시나리오 ③은 실험실 검체는 음압형 Pass Box를 통하여 연구시설 내로 반입하여 실험복도를 거쳐 실험실 내부로 이동하도록 구성되어 있다. 이 경우, 반입 시 부주의로 인해 실험복도에서 검체의 병원균이 확산되는 경우를 설정하였다. 마지막으로 설정된 시나리오 ④는 바이러스티움 무균실에서 실험을 마친 연구원이 퇴실하는 경우로 연구원의 퇴실 과정에서 병원균 확산이 이루어지는가를 확인하기 위한 경우를 나타낸 것으로 아래의 Table 2에 오염물의 이동경로해석을 위해 설정된 시나리오를 나타내었다.

위의 4가지 시나리오의 경우에 인플루엔자 병원균 10,000 CFU/m³가 발생하는 것으로 가정하였으

Table 2 Simulation scenario

Scenario	Time (min. : sec.)	Movement
①	00 : 00	Researcher 1 is experimenting in the bioclean room(virus team)
	80 : 00	Researcher 2 is experimenting in the bioclean room(epidemiologic survey team)
②	00 : 00	Researcher 1 is experimenting in the bioclean room(virus team)
	30 : 00	Researcher 2 is entering into the bioclean room(virus team)
③	00 : 00	Researcher 1 is in the Corridor
	30 : 00	Influenza A virus is spreading in the Corridor
④	00 : 00	Researcher 1 is experimenting in the bioclean room(virus team)
	60 : 00	Researcher 1 is moving into the experimental anteroom 2
	63 : 00	→ corridor
	65 : 00	→ locker room
	70 : 00	→ shower room
	80 : 00	→ rocker room(outward)
	82 : 00	→ anteroom
82 : 00	Finally researcher 1 is leaving anteroom	

Table 3 Contaminant condition

Infection	Influenza A
Mean Diameter	0.098 μm
Filter	HEPA Filter(MERV 16) ⁽⁹⁾

며 급기 및 배기시스템에는 MERV 16등급⁽¹⁰⁾의 HEPA Filter가 설치된 것으로 하였다.

2.3 에너지 성능평가 모델의 구성

Fig. 3과 같이 실내 미생물 오염원 저감해석을 위해 CONTAM 2.4에서 개발된 모델은 TRNSYS 16의 멀티존 부하 모듈(Type 56, Building)에 의해 모델링 될 수 있다. 멀티존 부하모듈은 멀티존에 대한 각 구성요소를 TRNSYS 16의 보조도구인 TRNBuild에 의해 먼저 각 구성에 대한 입력값을 입력

하여 구성하여야 한다. TRNBuild에서 멀티존 구성을 위해 사용한 존의 체적과 공기유량의 입력값은 CONTAM 2.4에서 사용한 값을 사용하였으며, 존별 부하계산을 위한 자재구성 및 벽체의 열적 특성에 관한 값은 실제 시공된 설계값을 적용하였다.

TRNBuild에서 멀티존 구성을 위해 존과 존이 마주하는 벽을 인접벽(Adjacent wall)로 정의할 수 있게 되어 있으며 이러한 인접벽에서 양쪽 존간에 흐르는 공기유동량에 대하여 부하계산을 하도록 구성된다. 또한, TRNBuild에서 멀티존을 구성할 때 존의 구성요소로서 냉방에 대한 설정을 할 수 있다. 이러한 냉방설정은 설정온도를 입력하면 자동으로 설정온도로 실내를 유지할 수 있도록 공급열량 제한없이 냉방하도록 설정하였다. 이렇게 TRNBuild에서 구성된 멀티존은 멀티존 부하모듈(Type 56, Building)에서 외부파일 형식으로 호출하게 된다. 멀티존 부하모듈에서 구성된 멀티존을 호출하게 되면 부하모듈의 입력조건에 각각의 존과 존간에 흐르는 공기유량을 입력받을 수 있는 탭이 자동생성되게 된다. 이렇게 생성된 입력조건의 연결을 위하여 CONTAM 2.4의 데이터와 연동하면 된다. CONTAM 2.4의 데이터를 연동하기 위하여 TRNSYS로 데이터를 넘겨줄 수 있는 연결점으로 .air의 확장자를 가지는 외부파일을 만든다. 이렇게 만든 외부파일을 CONTAM 2.4 호출모듈(CONTAM air flow model, Type 97)에서 호출하게 된다. 이렇게 CONTAM 2.4 호출모듈에서 Fig. 3에 보는 바와같이 CONTAM 2.4와 TRNSYS의 양방향 데이터 흐름을 만들게 된다.

에너지 해석은 실제 외기에 대한 부하변동에 따라 에너지 소비량을 계산할 수 있도록 외기 데이터 호출모듈(Boulder, type 89)에서 TRNSYS에서 제공하는 TMY 2(Typical Meteorological Years 2)을 사용하

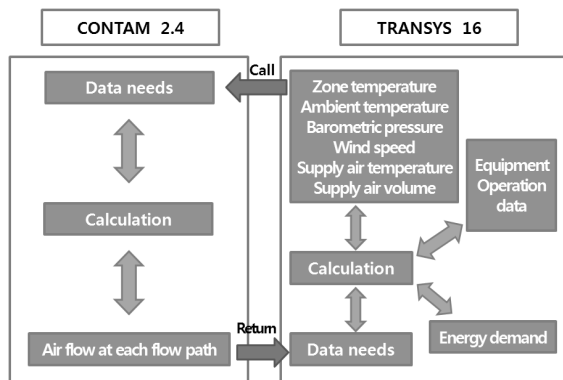


Fig. 3 Flow diagram of data flow in linked CONTAM 2.4 and TRNSYS 16.

여 6월~9월의 외기 데이터를 호출하여 사용하였다. 정확한 부하의 산정을 위하여 일사량 모듈(Solar radiation, type 16)을 통하여 우리나라 위도에서의 태양의 고도에 따른 일사량의 값을 계산할 수 있도록 하였다. 또한, 실제로 외벽에서는 상당외기온도에 따라 외벽온도가 선정되기 때문에 외기온도 모듈(Sky temperature, type 69)을 적용하여 상당외기온도를 적용하였다.

대상건물의 공조시스템은 Fig. 4와 같이 TRNSYS 해석 모델을 구성하였다. 시스템 구성을 살펴보면 배기의 경우 메인 실배기와 BSC외 장비배기는 단독으로 배기하도록 구성되어 있지만, 본 연구에서는 동일 배기팬을 사용하는 것으로 가정하였다. 이러한 시스템의 기본사양은 설계 시 적용된 값을 사용하였다. 이와 같이 BSL3 lab.은 전배기를 실시하고 있어 환기에 의한 외기의 도입이 냉방에너지 손실을 초래하여 배기와 급기의 열교환을 통한 냉방 에너지를 절약할 수 있는 현열교환 폐열회수 환기유닛(Heat Recovery Ventilator, HRV)를 적용하여 Fig. 5과와 같은 배기시스템의 열회수방식에 의한 에너지 절약방안에 대하여 고려하였다.

이를 위한 열교환기는 급배기가 혼합되지 않는 모듈(type 667)을 적용하였다. 이는 BSL3 lab.의 경우 교차오염을 방지하기 위해 실내 공기의 재순환을 방지하고 있으므로 배기열 회수시 알루미늄이나 플라스틱 재료로 이루어져 비교적 그 수명이 영구적인 현열교환 소자를 사용하여 열교환시 현열교환만

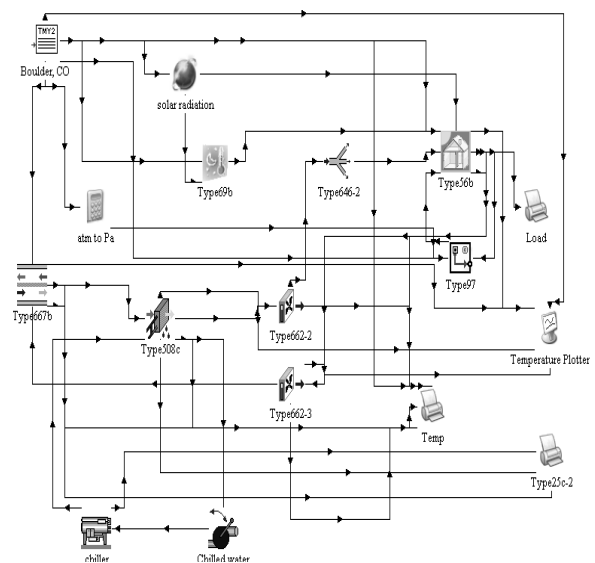


Fig. 4 Diagram of TRNSYS 16 model for energy simulation.

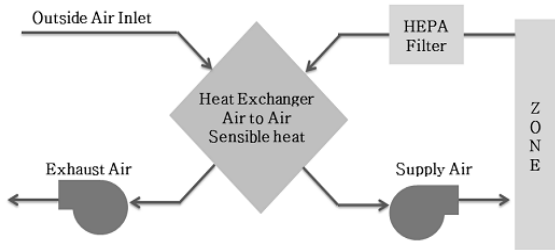


Fig. 5 Diagram of heat exchanger model.

Table 4 Operation conditions of simulation

Case No.	Operation conditions	
Case 1	BSC On	HRV Off
Case 2	BSC On	HRV Off
Case 3	BSC On	HRV On
Case 4	BSC Off	HRV Off

이루어져 교차오염을 방지할 수 있는 현열교환효율이 70%인 현열교환기 모듈을 적용하였다. 실험실의 공조부하는 현열부하와 잠열부하 모두를 고려하였고, 교차오염 방지를 위한 현열교환은 공조부하에서 주된 비중을 차지하는 냉방시즌을 중심으로 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 BSC 가동에 따른 에너지 소비량 증가와 배기열 회수에 따른 에너지 감소를 확인하기 위하여 Table 4에서의 운전조건을 고려하여 해석을 수행하였다. BSL3 lab.에 설치된 BSC 가동시 열교환에 따른 에너지 소비량을 분석하였으며, 이때 열교환기에서의 열교환은 존의 메인 배기만을 열교환한 경우(case 2)와 존의 메인 배기와 BSC 배기를 포함하여 전체를 열교환한 경우(case 3)로 나누어 해석하여 BSL3 lab. 공조시스템의 적절한 운전방안을 모색해 보고자 하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 BSL3 lab.의 실내 설정 음압의 유지여부와 그에 따라 연구자가 안전하게 실험할 수 있는 환경인가의 여부를 알아보기 위하여 CONTAM 2.4 프로그램을 이용하여 멀티존 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, BSL3 lab.은 실험실내의 공기환경의 안전성을 유지할 위하여 전외기 급기 및 전배기를 해야 하는 특수 음압시설로서

공기조화설비 시스템을 상시로 가동하고 있기 때문에 TRNSYS 16을 이용한 에너지해석을 수행하여 연중가동에 따른 에너지 소비량을 파악하고자 하였다.

3.1 멀티존 시뮬레이션 해석 결과

Fig. 6은 BSL3 lab.의 평면에 대해서 멀티존 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있다. Fig. 6에서 선의 길이는 실간 압력차의 크기와 방향을 나타내고 있다. Fig. 6에서 보는바와 같이 실험을 준비하는 일반구역에서 오염구역으로 공기흐름이 일방향으로 유지되고 있음을 나타내고 있다. 이와같은 결과를 좀더 자세히 분석하기 위해서 해석모델에서 설정한 Fig. 6의 Airflow Path No.①~⑫에 대해서 실간차

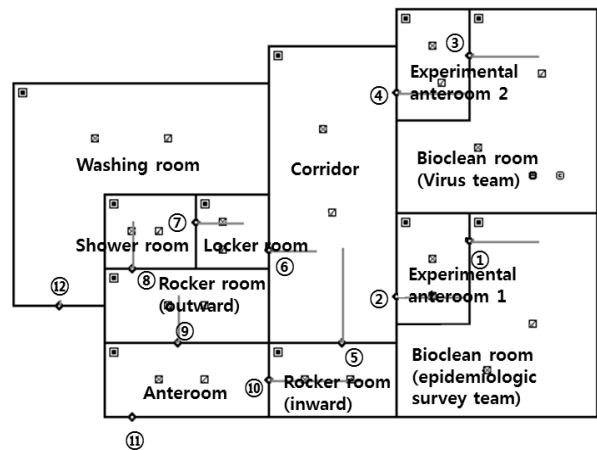


Fig. 6 Air flow and differential pressure of airflow path number in Fig.7 of BSL3 lab.

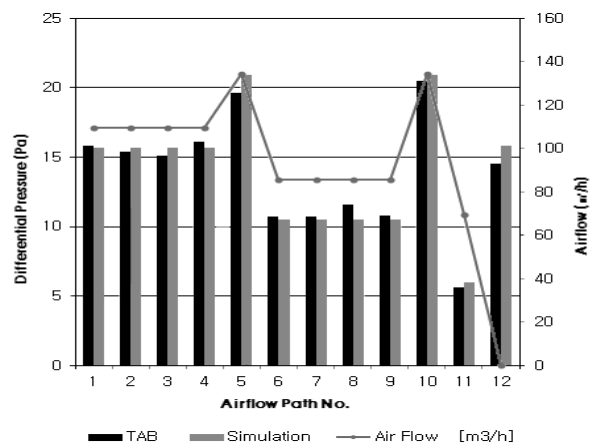


Fig. 7 Air flow and differential pressure of BSL3 lab.

압과 공기유동량의 결과를 T.A.B. 수행시 얻어진 실측치와 본 해석결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 T.A.B. 수행시 얻어진 실간 차압의 실측치와 해석값이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 실간차압을 유지하는 경우 Fig. 6의 경우 ①~⑫로, Fig. 7의 경우 1~12로 표시된 BSL3 lab.의 Airflow Path에서 발생하는 공기유동량의 해석값을 실선으로 나타내고 있다. 해석결과로 나타난 바와 같이 BSL3 lab.의 각각의 Airflow Path에서 발생하는 공기유동량에 대하여 실간차압이 실험을 준비하는 일반구역에서 오염구역으로 점점 더 순차적으로 음압(약 -63.7 Pa)이 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 위와 같이 실간 설정압력차를 유지하여 일방향의 공기흐름을 가진 실험실에서 인플루엔자를 사용하여 실험하는 경우 병원균 외부유출에 따른 위해로부터 생물안전성을 확인하기 위하여 앞서 언급한 바와 같이 4가지 경우의 바이오 하자드 시나리오를 설정하여 인플루엔자 병원균 확산에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 8~Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 8은 BSL3 실험실에서 연구원이 실험중인 경우로 실험이 진행되는 동안 일정하게 기계환기를 하였다. 이때 병원균의 농도는 일정 수준까지 증가된 후 그 상태가 유지되는 것을 알 수 있다. 또한, 설정 음압이 유지되는 실험실에서 인플루엔자로 실험을 수행하는 경우 실험실 외부; 실험복도, 세정실, 인접실험실(역학조사팀 무균실)로의 병원균 확산은 없는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 시나리오②에서 바이러스팀 무균실에서 실험자가 실험을 하는 도중에 다른 연구원이 실험실에 진입하는 경우로 연구원이 진입하는 30분에 문의 개폐로 인하여 병원균의 농도가 일시적으로

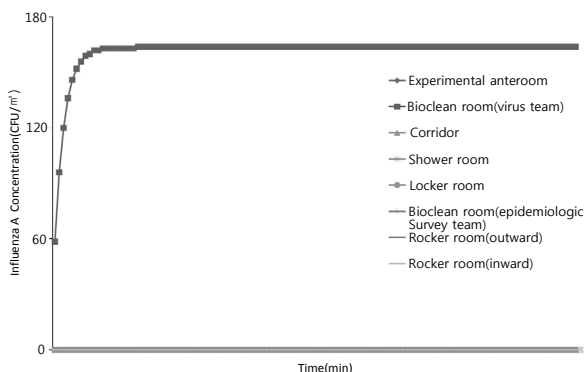


Fig. 8 Influenza A concentration in case of scenario ①.

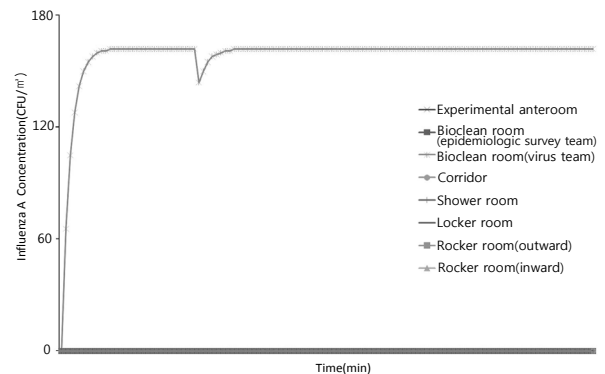


Fig. 9 Influenza A concentration in case of scenario ②.

감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험실 문이 열리는 경우 전실에서 실험실로 공기흐름이 발생되기 때문에 실험실 내부의 환기 횟수가 증가하여 병원균 농도가 감소되는 것으로 판단된다. 또한, 실험 전실, 샤워실, 탈의실 등 실험실 문의 개폐에도 설정된 실간 압력차에 의해서 공기흐름이 실험전실에서 실험실로 발생하여 병원균의 외부 확산은 방지되는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 실험검체인 인플루엔자 병원균이 연구시설내로 반입 시 실험복도 내에서 확산되는 시나리오 ③에 대한 것으로 실험복도에서 확산된 인플루엔자는 설정된 실간 압력차에 의해 실험복도에서 실험전실, 바이러스팀 무균실과 역학조사팀 무균실 내부로 확산되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 실험복도에 비하여 상대적으로 양압인 탈의실, 샤워실, 입출강의실과 전실로는 확산되지 않는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 11은 BSL3 lab.에서 실험을 마친 연구원이 퇴실하는 경우인 시나리오 ④에 대한 것으로 연구

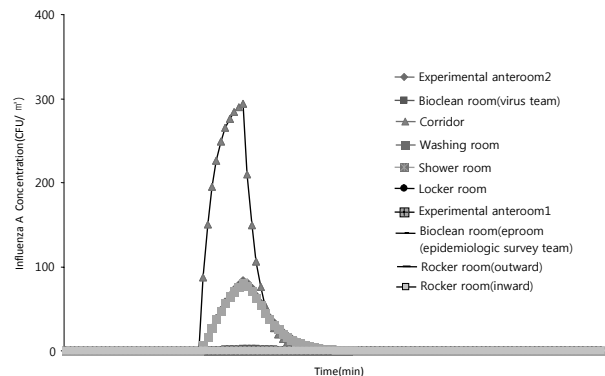


Fig. 10 Influenza A concentration in case of scenario ③.

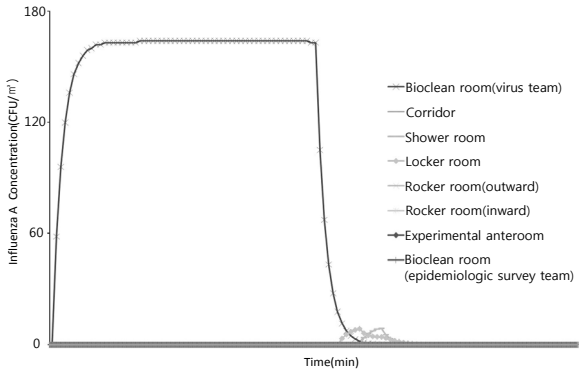


Fig. 11 Influenza A concentration in case of scenario ④.

원의 퇴실 과정에서 병원균의 외부확산 여부에 따른 BSL3 lab.과 동일 건물에 상주하는 사무실 직원들의 안전성을 확인하기 위한 것이다.

실험실에서 60분간 인플루엔자 실험을 한 연구자는 앞서 언급한 퇴실동선에 따라 퇴실하고 있다.

이 경우, 실험실에서 퇴실한 시점인 60분까지 10,000 CFU/m³의 인플루엔자가 발생하고 있는 실험실에서는 기계환기에 의하여 9,836 CFU/m³의 인플루엔자가 제거되어 164 CFU/m³의 농도를 유지하고 있다. 실험을 마친 연구자가 퇴실하는 경우, 연구자는 실험전실, 실험복도, 탈의실, 샤워실을 거쳐 퇴실하고 있다. 연구자의 동선에 따라 실험전실, 실험복도, 탈의실, 샤워실 순으로 인플루엔자 농도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 여기서 실험복도의 농도가 이동동선상 실험복도 이후로 예상되는 탈의실이나 샤워실 낮게 나타나는 것은 병원균의 농도에 비해 실험복도의 체적이 넓기 때문에 체적당 병원균의 농도가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

이와 같은 시뮬레이션을 통하여 BSL3 lab.의 압력이 일정하게 유지될 때 실험실내에서 고위험성 병원균을 취급하는 실험이 진행되는 경우에도 외부로의 병원균 확산은 없을 것으로 예상된다. 단, 이 경우 연구자가 오염되는 경우와 그의 이동에 따른 병원균의 확산이 예측되기 때문에 연구자는 정확한 수칙에 따라 이동하여야 할 것이며 이에 대한 표준 운영방안(SOP)을 수립하여 BSL3 lab.을 운영해야 할 것으로 판단된다.

3.2 에너지 시뮬레이션 해석 결과

지금까지의 해석결과로 살펴본 BSL3 lab.의 생물안전성 유지와 더불어 이와 같은 실험실 공기환경을

유지하기 위하여 소비되는 에너지 소비량을 예측하기 위하여 앞서 설명한 방법으로 에너지 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 앞서 설명한 Table 4의 Case 1과 Case 4에 대한 냉방 에너지 소비량을 비교한 것을 나타내고 있다. 배기와 급기의 열교환을 통한 냉방에너지를 절약할 수 있는 현열교환 폐열회수 환기유닛(HRV)을 가동하지 않을 경우, BSC를 가동하는 경우에 비해서 가동하지 않을 경우 약 47%의 에너지 소비량이 감소하는 것을 알 수 있다. 실제로 BSL3 lab.에서 BSC의 가동으로 인한 외기부하의 증가는 대단히 큰 비중을 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 Table 4의 Case 1, Case 2, Case 3에 대한 냉방 에너지 소비량을 비교한 것을 나타내고 있다. 세 경우 모두 BSC를 가동하는 경우에 HRV를 가동하지 않은 경우인 Case 1과 HRV를 가동한 상태에서 메인 배기 공기유량만 열교환하는 경우인 Case 2, 메인 배기 공기유량과 BSC 배기 공기유량을 합쳐서 열교환하는 경우인 Case 3의 냉방 에너지

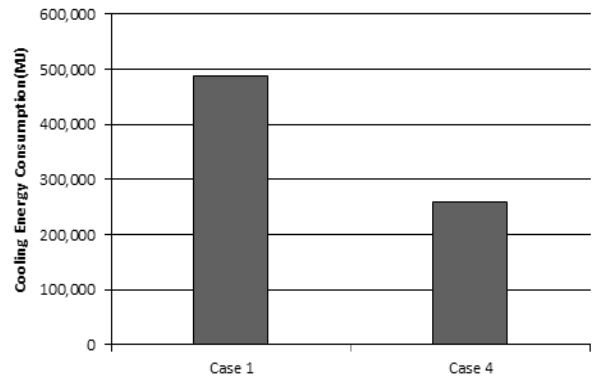


Fig. 12 Cooling energy consumption(BSC on/off condition).

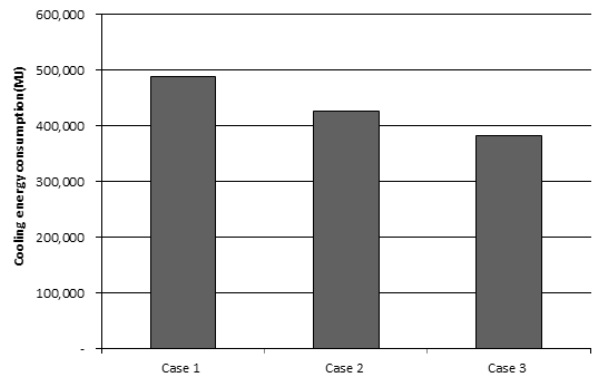


Fig. 13 Cooling energy consumption(heat recovery condition).

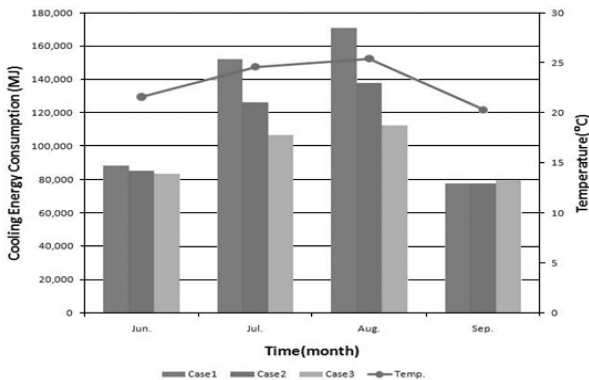


Fig. 14 Cooling energy consumption(heat recovery condition).

소비량을 비교한 것을 나타내고 있다. Case 2의 경우 Case 1보다 약 12.7%의 에너지 소비량이 감소하는 것을 알 수 있다. 또, Case3의 경우 382,090 MJ 이 소비되어 Case 1보다 21.8%의 에너지가 절약되는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 월별 에너지 소비량을 비교하여 나타내고 있는데 HRV를 가동한 상태에서 메인 배기 공기유량만 열교환하는 Case 2의 경우 HRV를 가동하지 않은 Case 1보다 6월에는 약 3.5%, 7월에는 17.1%, 8월에는 19.3%가 절약되었으며, 9월에는 오히려 0.2% 더 많은 에너지가 소비되는 것을 알 수 있다. 이는 9월의 평균 외기온도는 20.3°C로 실내 설정 온도보다 낮은 시간대가 많아 온도차에 의한 외기 냉방제어를 하지 않은 시뮬레이션 조건에서는 Pre-heating 되는 구간이 늘어나서 열교환기를 사용하지 않은 Case 1보다 에너지 소비량이 많이 나타난 것으로 판단된다. 동일한 기준으로 메인 배기 공기유량과 BSC 배기 공기유량을 합쳐서 열교환하는 경우인 Case 3을 살펴보면, 6월에는 약 5.2%, 7월에는 29.9%, 8월에는 34%가 절약되었으나 9월에는 2.5% 더 많은 에너지가 소비되는 것을 알 수 있다. 이는 Case 3의 경우 Case 2보다 열교환하는 공기유량이 크기 때문에 Pre-heating 되는 열도 많기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

BSL3 lab.의 음압환경이 실내 병원균 확산에 미치는 영향을 살펴보고, 여기서 취급하는 고위험성 병원균의 외부 확산을 방지하고, 더불어 실험자의 안전성을 확인하고자 멀티존 시뮬레이션을 수행하여 실험실의 생물안전성을 평가하였다. 또한, 이러한 실험실의 경우 연중 전외기방식으로 운영되며 환기횟수

가 많기 때문에 동일규모의 일반 사무소 건물 대비 에너지 소비량이 많은 것으로 알려져 있어, BSL3 실험실에 적합한 환경에서의 에너지 소모량을 저감하기 위한 에너지 시뮬레이션을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 설정된 음압이 유지되는 경우, BSL3 lab.에서 취급하는 고전염성 인플루엔자 병원균을 대상으로 4가지의 바이오하자드 시나리오를 설정하고 인플루엔자 확산에 대한 해석을 수행한 결과, 연구시설 외부로의 확산은 일어나지 않았으며 시설이 포함된 건물 내 상주하는 재실자들의 안전성도 확인할 수 있었다.

2) BSL3 lab.은 실험실의 생물안전을 위해서 전외기 급기 및 전배기를 해야 하는 특수 음압시설로 공기조화설비 시스템을 상시로 가동하고 있기 때문에 동일 규모 일반 사무소 건물에 비해 5~10배 더 많은 양의 에너지가 소비되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 특히, 여름의 경우 외기를 냉방하기 위한 냉방에너지 소모가 크기 때문에 외기부하를 줄인다면 열원시스템의 용량을 감소시킬 수 있을 것이라 판단된다. 에너지해석 결과 BSL3 lab.에서 BSC를 가동하는 경우 BSC의 배기는 전배기하고, 존의 메인 배기만을 열교환하는 경우, HRV를 사용하지 않는 경우에 비해서 약 12.7%의 에너지가 절감되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 배기 공기유량의 약 47%를 차지하는 BSC의 배기열까지 포함하여 열회수하는 경우 HRV를 사용하지 않는 경우 보다 약 21.8%의 에너지가 절감되는 것을 알 수 있었다.

지금까지 살펴본 바와 같이 BSL3 lab.의 경우, 실험실 생물안전을 최우선 운영 목표로 하는 시설로서 전외기 급기 및 전배기를 해야 하는 공조시스템으로 구성되어 있으며, 또한, 이와같은 공조시스템이 연중 가동되어야 하는 특징을 가지고 있다. 최근 이와같은 시설에서의 유지운영비를 줄이기 위한 관심과 노력이 필요한 시점에 와 있다. 열회수기술의 적용과 열펌프기술등 다양한 에너지 저감기술의 적용 연구를 통하여, BSL3 lab.의 실험실 생물안전을 보장하고 그와 동시에 운전에너지 소비를 절감하는 방안을 강구하는 것은 바이오 산업의 경쟁력강화에 도 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Laboratories for the 21st Century, An Introduction to Low-Energy Design, U. S. Environmental Protection Agency Office of Adminis-

- tration and Resources Management, 2000.
2. Hong, J. K., 2010, A Case Study on the Validation of BSL3 Laboratory and Engineering Cost Evaluation of BSL3 Laboratory, Design, Construction and Validation Workshop of BSL3 Laboratory, pp. 229-253.
 3. National Technical Information Service U. S. Department of Commerce Springfield, VA, Vol. 22161.
 4. TRNSYS, 1994, Solar Energy Lab. Rep., University of Wisconsin-Madison.
 5. McDowell, T. P., Thornton, J. W., Emmerich, S., and Walton, G., 2003, Integraton of airflow and energy simulation using CONTAM and TRNSYS, ASHRAE transaction, Vol. 109, No. 2, kc-03-10-2.
 6. Hong, J. K. and Choi, S. G., 2007, The Study on the Disinfection performance of Indoor Microorganism using Energy Consumption Analysis through the Linked Model of CONTAM and TRNSYS, International Conference on Sustainable Building Asia, pp. 855-860.
 7. Park, H. J. and Hong, J. K., 2010, A Study on the Prediction of Indoor Environment in Bio Safety Level 3 Laboratory according to Bio-hazard Scenario, Journal of SAREK, Vol. 22, No. 11, pp. 745-750.
 8. NIH, Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories, 4th Edition, 1999.
 9. Walton, G. N., 2005, CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation, NISTIR, Vol. 7251.
 10. ASHRAE Standard 52.2-1999, Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2000.