

# Bioviolence Agents에 따른 건물내 미생물오염원의 효율적인 제거방안에 관한 연구

이 현 우, 홍 진 관<sup>\*†</sup>

한국설비연구(주), \*경원대학교 건축설비학과

## A Study on the Effective Removal Method of Microbial Contaminants in Building According to Bioviolence Agents

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

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

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

(Received September 15, 2010; revision received November 15, 2010)

**ABSTRACT:** As Influenza A virus(H1N1) has been spreading more rapidly around globe, the study on the airborne disease which is transmitted through the respiratory system is on the rise. In this study, the multizone simulation of the public building against bioviolence is performed in the case of unexpected spread of microbial contaminants, such as bioviolence agent, Influenza A, Smallpox, B. anthrax and transport and control characteristics of above three kinds of bioviolence agents are evaluated. Results suggest that Influenza A and Smallpox which has small mean diameter can be more removable than B. anthrax by using high UVGI grade condition and B. anthrax which has large mean diameter can be more removable than Influenza A and Smallpox by using high filter grade condition. Results also suggest that installing a combined air treatment system is more effective to reduce the damage and engineers will use immune building technology for removing the bioviolence agents effectively.

**Key words:** Bioviolence agent(미생물 제재), Building bioviolence(건물 미생물 공격), UVGI, ultra-violet germicidal irradiation(자외선 살균), Multizone simulation(멀티존 시뮬레이션), Immune building technology(면역건물기술), Influenza A(인플루엔자 A), Smallpox(천연두)

### 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]

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

$L$	: 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, [ $m^3/s$ ]
$\Delta P_r$	: 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, [ $kg/m^3$ ]
$\eta_j^\alpha$	: 오염원 $\alpha$ 에 대한 필터 효율, [0~1]

## 1. 서 론

세계 미래학회가 발표한 2010~2025년 미래전망 20을 보면 생명공학의 발달로 인해 유전자 연구로 유전질환의 정복을 예견하고 있지만, 첨단 과학이 악용돼 인류에 피해를 끼친다는 어두운 청사진도 있다. 이 보고서에서는 생명공학에 관한 지식이 일반인도 쉽게 활용할 수 있을 정도로 보편화할 날이 멀지않았으며, 이로 인해 테러리스트들은 휴대가 어렵고 보안검색대를 통과하기 어려운 폭탄 대신 박테리아와 바이러스를 이용한 치명적인 ‘바이오 공격(bioviolence)’에 주력할 것이라고 예측하고 있다. 즉 우리 일상생활에서 이러한 바이오 공격에 의한 바이오 폭력이 급격히 증가할 것으로 예상하고 있다는 것이다.

특히 생명공학에 관한 지식을 이용한 바이오 공격은 병원균만 구할 수 있다면 적은 지식으로도 매우 강력한 무기를 만들 수 있다는 것이 문제이며, 그 외형 또한 우리가 일반적으로 접할 수 있는 헤어스프레이 하나 정도면 충분히 대량 살상이 가능하다는 점에서 매우 위험한 특성을 가지고 있다. 바이오 공격을 방지하기 위하여 미국에서는 탄저균 등의 세균을 공중에 살포할 경우 이를 발견하고 경고하는 “바이오워치”를 미국 각지에 설치하는 등 국가적인 대책에 고심하고 있다.<sup>(1)</sup> 우리나라의 경우 상대적으로 바이오 공격에 대한 안전국가로 인식되고 있지만, 이와같은 종류의 위협에 완전히 자유로운 국가는 없다고 판단되므로 이에 대한 적절한 대책이 논의되어야 할 것이다.

본 논문에서는 이러한 바이오 공격이 건물을 대상으로 발생할 경우에 대하여 몇 가지 시나리오를 만들고 각 시나리오에 따라 건물내부에 퍼져나

미생물 제재(Bioviolence agents)의 효율적인 제거 방안을 해석적인 방법으로 파악해 보고자 하였다. 또한 이러한 바이오 공격에 대한 대책으로서 면역 건물기술(Immune Building Technology)<sup>(2)</sup>을 도입하여 방지 대책을 수립할 경우 건물내부에서 어느 정도 효과를 얻을 수 있을 지에 대하여 평가해 보고자 하였다.

## 2. 연구 수행 및 모델 구성

연구는 우선 건물에 대한 바이오 공격 시나리오를 구성하고, 해석 대상 건물에 대하여 이러한 시나리오를 적용하여 건물 내부에 미생물의 거동과 효율적인 제거방안을 파악해 보고자 하였다. 기존 연구를 통하여<sup>(3)</sup> 이러한 바이오 공격 시나리오의 적용은 실제 실험이 거의 불가능하기 때문에 시뮬레이션 기법을 도입하여 오염원 거동을 모사하도록 하였으며, 이에 대한 대책으로 면역건물기술에 대한 적용 효과를 예측해 보고자 하였으며 이를 위하여 멀티존 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM 2.4<sup>(4)</sup>를 사용하였다.

### 2.1 Bioviolence 시나리오

먼저 예상치 못한 바이오공격 상황을 모사하기 위해서 현재 가장 잘 알려진 공기 중 전염되는 질병 중에 위험성과 빈도수가 높은 탄저균, 천연두 및 인플루엔자를 바이오공격 시나리오의 미생물 제재로 선정하여 해석에 적용하였다. 또한, 각각의 미생물 제재를 동일한 양으로 약 10 ml 배양액에  $1 \times 10^{10}$  개 정도로 배양하여 쉽게 접할 수 있는 최소형 헤어스프레이 통에 담아 방출하는 경우를 가정하였다. 이 경우 방출이 어려운 헤어스프레이의 특성을 고려하여 약 10분 동안에  $1 \times 10^9$ 개의 병원균을 방출하는 것으로 가정하였다. 미생물 발생장치로 헤어스프레이를 선정한 것은 폭발물이 아니고 내용물 또한 쉽게 분별할 수 없으며 누구나 여행 가방에 또는 주머니에 쉽게 담아 다닐 수 있기 때문이며, 간단히 가방에 담아 건물 어디나 쉽게 출입이 가능할 것이라는 가정을 하였다.

대상이 된 건물은 일반인이 쉽게 접근할 수 있는 공공건물을 대상으로 하였다. 공조방식은 각층에 개별 공조기로 제어하고, 전체 배기만 옥탑 층에서 이루어지며, 대공간이 있는 2~3층은 따로 개별 공

Table 1 Bioviolence scenario

	Scenario description
Scenario ①	Bioviolence agents spray is installed in the 1st floor-outside dry area for outdoor air intake.
Scenario ②	Bioviolence agents spray is installed in large space which is located on the second floor, event or ceremony is held sometimes and always crowded with people.
Scenario ③	Bioviolence agents spray is installed inside of the air handling unit which is located on each floor.

조기로 제어하는 방식이다. 미생물 제제에 의한 공격 시나리오는 Table 1에서 보는 것과 같이 크게 3가지로 구성하여, 일상적인 조건에서 공조 시스템이 운전되는 것으로 가정하였다.

## 2.2 대상 건물 모델링

해석대상 건물은 공공업무시설로 지하1층~지상 13층이고, 연면적은 약 35,000 m<sup>2</sup>이다. 또한 지하는 식당, 기타부대시설, 전기실 및 기계실로 구성되어 있고, 지상은 전시실, 세미나실, 대회의실 및 업무시설로 구성되어 있다. 각 층의 평면을 크게 업무 공간, 회의실, 수직통로가 포함된 코어부분, 화장실 등으로 존을 구분하였다. 각존의 온도, 바닥면적, 체적을 Table 2에 나타내었다. 실내온도는 사무실과 같은 공조실을 25℃, 계단과 같은 비공조실을 15℃로 실제건물의 공조상황 중 한계온도라 판단되는 온도를 선정하여 공조장치 뿐만 아니라 온도차에 의해 실과 실 사이에 기류이동이 발생하도록 하였다. Table

Table 2 Base source of multizone model

Floor/ Zone	Office		Lobby		Toilet		Core		Hall	
	Area (m <sup>2</sup> )	Temp. (°C)	Area (m <sup>2</sup> )	Temp. (°C)	Area (m <sup>2</sup> )	Temp. (°C)	Area (m <sup>2</sup> )	Temp. (°C)	Area (m <sup>2</sup> )	Temp. (°C)
B1	1386.825	25	180.05	25	33.7	15	127.8	15	-	-
1F	1130.25	25	672.75	25	90.9	15	192.3	15	-	-
2F	671.2	25	752.8	25	59.4	15	233.05	15	742.5	25
3F	717.25	25	826.3	25	59.4	15	216.55	15	742.5	25
4F	569.25	25	207.35	25	82.5	15	112.8	15	-	-
5F~11F	742.502	25	141.45	25	82.5	15	85.8	15	-	-
12F	736.5	25	141.45	25	82.5	15	91.8	15	-	-
13F	538.501	25	141.45	25	82.5	15	91.8	15	-	-

3에 외부(Ambt.)로부터 해석대상 건물 및 실 간의 공기이동통로를 각각 나타내었다. 사용된 공기이동통로는 ASHRAE에서 제공하는 각각의 기밀도<sup>(5)</sup>를 적용하도록 하였다. Table 3의 Leakage area 값은 ASHRAE에 의해 10Pa에서 75Pa 까지 압력을 변화시키는 동안 실험적인 방법으로 각각의 개구부에 대한 압력변동에 대한 침기량을 측정하여 산정된 값을 나타내고 있다. 유효 Leakage area는 다음 식(1)에 의해 계산되어진다.<sup>(4)</sup>

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

여기서, C<sub>d</sub>와 ΔP<sub>r</sub>은 일반적으로 C<sub>d</sub> = 1.0과 ΔP<sub>r</sub> = 4Pa로 쓰거나 C<sub>d</sub> = 0.6과 ΔP<sub>r</sub> = 10Pa로 사용되며, 본 연구에서는 C<sub>d</sub> = 1.0과 ΔP<sub>r</sub> = 4Pa의 값을 설정하였다. 이렇게 설정된 유효 Leakage area는 다음 식(2)에 의하여 유량계수로 변환이 가능하다.<sup>(4)</sup>

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

Table 3 Airflow path of multizone model

Air flow pass	Location	Leakage area (cm <sup>2</sup> /m)	Area (m <sup>2</sup> )
Door	General	0.31	1.8
	Ambt.~Office	0.26	1.8
	Ambt.~Hall	5.5	3.6
Ambt.~Core			
Window	Core~Hall	0.72	2.4
	Ambt.~Office		

여기서, n은 실험적으로 구하게 되며, 실험적인 값이 없는 경우 일반적으로 0.6에서 0.7사이의 값을 적용하는 것이 적당하며,<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 0.65를 사용하였다. 또 수직 공기통로인 계단실과 엘리베이터 샤프트 등은 각층과 문으로 구분되도록 하였으며, 수직통로의 상하층 사이는 하나의 공간이 되도록 설정하였다. 다음 주요 공기유동로인 창과 문이 개방되어 있는 경우는 Two-way flow model 중 One opening model을 사용하여 다음 식(3)에 의해 유동유량을 계산하도록 하였다.

$$F_y = C_d \sqrt{2\rho\Delta P} W \cdot \Delta y \quad (3)$$

여기서, W의 값은 실측한 값을 적용하였으며, Δy의 값은 실측에 의한 값을 등분하여 사용하도록 하였다. C<sub>d</sub>의 값의 경우는 일반적으로 0.7에서 0.8사이의 값을 적용하는 것이 적당하며,<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 0.78을 사용하였다.

다음으로 오염물질의 제거모델을 위하여, 일반적인 공조상황에서 공조기에는 중성능 필터에 해당하는 MERV 12 등급의 필터가 사용된다고 가정하였다. 미생물 공격에 대한 대책으로 공조기에 중성능 필터와 UVGI(자외선 살균장치)가 조합된 면역건물기술이 적용되는 경우를 가상하여 건물의 모든 공조기에 중성능 필터에 해당하는 MERV 12 등급<sup>(6)</sup>과 살균율 약 99%의 UVGI 16 등급<sup>(7)</sup>의 자외선 살균기를 설치하는 경우에 미생물 제제의 제거 성능을 해석하였다. 식(4)에 오염물질 확산과 제거를 위한 해석에 사용된 멀티존 모델의 지배방정식을 나타내었다.<sup>(4)</sup>

$$\frac{dm_i^\alpha}{dt} = \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_j^\alpha) C_j^\alpha + G_i^\alpha + m_i \sum_\beta K^{\alpha, \beta} C_i^\beta - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_i^\alpha - R_i^\alpha C_i^\alpha \quad (4)$$

**2.3 미생물 제제의 종류와 특성**

Table 4에 건물내에 발생할 수 있는 미생물 제제의 종류와 특성을 나타내었다. 인플루엔자(influenza)와 천연두(smallpox)는 평균직경이 0.3 μm이하로 바이러스에 속한다. 그리고 탄저균(bacillus anthrax)는 평균직경이 1 μm이상으로 진균에 속한다. 본 연구에서는 해석을 위하여 각각 인플루엔자, 천연두 그리고 탄저균을 미생물 제제 모델로 구성하기 위해서 평균직경을 사용하였고, 밀도의 경우는 Bratbak

and Dundas<sup>(8)</sup>에 의해 제시된 1,100 kg/m<sup>3</sup>을 사용하도록 하였다. 실내 측정시 총 부유세균량의 단위인 CFU/m<sup>3</sup>을 미생물 제제의 기본 단위로 이용하였다.

**2.4 Bio-attack 시나리오 시뮬레이션 조건**

앞서 언급한 ①, ②, ③의 시나리오에 대한 오염원 거동을 알아보기 위하여 실외 온도를 5℃로 설정하였다. 이는 균을 냉장 보관할 수 있는 온도로서, 겨울과 여름 조건에 비하여 외기에 의한 미생물 성장에 미치는 영향이 낮기 때문에 외란에 대한 변화를 배제하기 위하여 설정되었다. 즉 건물 외부에서 세균이 살포되더라도 증식되거나 사멸되는 균 없이 공조기를 통하여 빠져나가도록 하고, 또한 실내에서 헤어스프레이와 같이 냉장 또는 보냉이 되지 않는 장치를 사용할 경우에도 주변 환경에 의한 미생물 증식 및 사멸에 대한 영향을 배제하기 위해서이다. 따라서 초기에 발생된 미생물 전부가 공기를 통하여 전파한다고 가정하였다. 물론 세균이 공조기나 벽체 또는 바닥에 부착되어 장시간 장치는 실내에서 증식 또는 사멸할 수 있으나 장시간

Table 4 Characteristics of Bioviolence agents

Bioviolence Agents	B.anthrax	Influenza A	Smallpox
Group	Bacterial Spore	Virus	Virus
Type	Gram (+)	RNA	DNA
Incubation Period	2~3 Days	2~3 Days	-
Biosafety Level	Risk Group 2~3	Risk Group 2	Risk Group 4
Diameter (μm)	1.118	0.098	0.224
UVGI Rate Constant (cm <sup>2</sup> /μW · s)	0.000031	0.00119	0.001528

Table 5 Simulation conditions

Scenario	Bioviolence agents removal condition		
①	none	MERV 12	MERV 12 + UVGI 16
②	none	MERV 12	MERV 12 + UVGI 16
③	none	MERV 12	MERV 12 + UVGI 16

이후에는 발병으로 인해 간접오염에 대한 대책이 발효되어 인원 통제 및 오염제거가 될 것으로 가정하였다. 또한, 실내의 모든 문은 닫혀있으며 실내에 퍼진 미생물의 제거는 국소배기나 필터 및 UVGI에 의해서 제거되는 것으로 가정하였다. 최악의 상황을 모사하기 위하여 앞서 언급한 각각 ①, ②, ③의 시나리오에 대해서 공조기 입구 측에 필터가 전혀 설치되지 않을 경우를 살펴보고, 일반적인 중성능 필터에 해당하는 MERV 12 등급 필터를 설치한 경우, 중성능 필터와 UVGI(자외선 살균장치)가 조합된 면역건물기술이 적용된 경우에 대하여 Table 6에 시뮬레이션 조건을 나타내었으며, 필터는 각각의 공조기 입구 측에 설치하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션 시간은 총 24시간으로 하였으며, 각 시나리오에 따라 오전 9시부터 미생물 재제에 의한 바이오공격이 발생하는 것으로 가정하였으며, 이때 미생물 오염원의 효율적인 제거방안에 대하여 파악해보았다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

먼저 각각 ①, ②, ③의 시나리오 중 실내행사 등 일반인이 가장 많이 모일 수 있는 대공간(2F)에 헤어스프레이 통을 설치하는 경우인 시나리오 ②에 대해서 공조기에 필터를 설치하지 않은 경우, 중성능 필터인 MERV 12 등급의 필터를 설치하는 경우, MERV 12 등급의 필터와 UVGI 16 등급의 자외선 살균장치를 설치하는 경우에 대하여 인플루엔자, 천연두, 그리고 탄저균과 같은 미생물 제거가 제거되는 변화를 알아보았다.

Fig. 1은 시나리오 ②에서 미생물 제재를 인플루엔자로 할 경우 제거조건에 따른 인플루엔자의 변화량을 나타내었고, Fig. 2, Fig. 3은 시나리오 ②에서 미생물 제재를 천연두와 탄저균으로 할 경우 제거조건에 따른 각각의 변화량을 나타내었다.

Fig. 1에서 인플루엔자의 경우에는 헤어스프레이 통을 통하여 확산된 미생물 제재가 9시부터 10시까지 최대 약 9,000 CFU/m<sup>3</sup>가 발생하였고, 11시 이후에는 환기나 필터 그리고 UVGI 살균을 통하여 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 적용된 제거조건 중에서 중성능 필터인 MERV 12 등급을 사용한 경우는 필터가 없는 경우보다 조금 낮은 분포결과를 나타내고 있다. 이는 인플루엔자의 평균직경이 0.3 μm이하로 매우 작기 때문에 필터를 통하여 포집하기 어렵

기 때문으로 추측된다. 그러나 필터와 UVGI 살균 장치를 조합하였을 경우에는 2시간내 대부분 제거되는 것으로 나타났다. Fig. 2의 천연두의 경우도

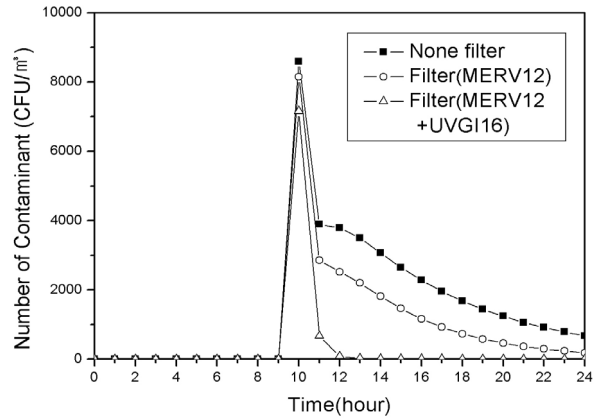


Fig. 1 Number of Influenza w.r.t. time (scenario②).

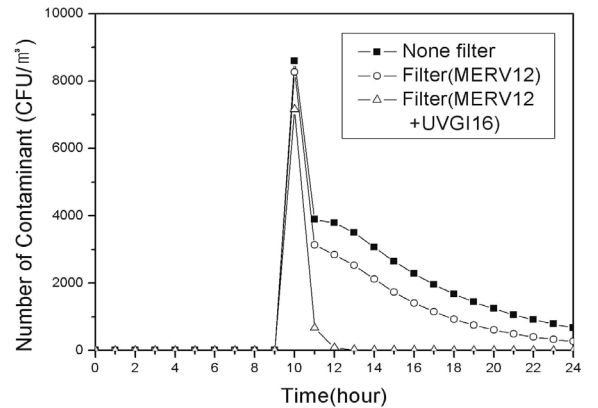


Fig. 2 Number of Smallpox w.r.t. time (scenario②).

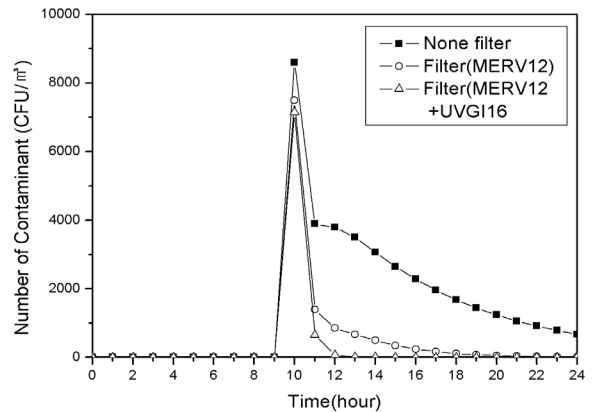


Fig. 3 Number of B.anthrax w.r.t. time (scenario②).

평균직경이 0.3  $\mu\text{m}$ 이하로 매우 작기 때문에 인플루엔자와 비슷한 결과를 나타냈다. Fig. 3에서 탄저균의 경우에는 헤어스프레이 통을 통한 미생물 제재의 확산정도는 인플루엔자와 비슷한 결과가 나타났다. 적용된 제거조건 중에서 중성능 필터인 MERV 12 등급을 사용한 경우와 필터와 UVGI 살균장치를 조합한 경우의 결과가 모두 2시간내 대부분 제거되는 것으로 나타났다. 이는 탄저균의 평균직경이 약 1  $\mu\text{m}$ 정도로 인플루엔자보다 크기 때문에 필터를 통하여 더 포집하기가 용이한 때문으로 판단된다.

또한, 실내 오염원 제거방안으로 MERV 필터와 UVGI 살균장치를 조합한 경우, 앞서 언급한 인플루엔자, 천연두 그리고 탄저균 모두 빠르게 제거되는 것을 알 수 있었다. 그래서 이번에는 각각의 MERV 필터와 UVGI 살균장치를 각각 분리하여 모든 미생물 제재에 대하여 제거되는 변화를 알아보려고 하였다.

먼저 실내행사 등 일반인이 가장 많이 모일 수 있는 대공간(2F)에 헤어스프레이 통을 설치하는 경우인 시나리오 ②에서 MERV 필터등급을 6, 8, 11, 13, 15<sup>(6)</sup>로 나누어 등급 변화에 따라 인플루엔자, 천연두 그리고 탄저균의 변화량을 다음에 나타내었다. Fig. 4, Fig. 5에 MERV 필터등급에 따른 인플루엔자와 천연두의 변화량을 나타내었다. 인플루엔자와 천연두는 필터등급에 따라 변화량이 거의 일치하는 것으로 나타났고, 바이오 공격이 발생하여 2시간이 지난 11시부터는 잘 제거되지 않는 것으로 나타났다. 이는 인플루엔자와 천연두의 평균직경이 0.3  $\mu\text{m}$ 이하로 매우 작기 때문에 변화량은 비슷하게 나타나고, 낮은 필터등급에서는 잘 포집되지 않는 것으로 판단된다. Fig. 6에 MERV 필터등급에 따른 탄저균의 변화량을 나타내었다. 탄저균은 MERV 15에서 바이오 공격이 발생하여 3시간이 지난 12시에 거의 대부분 제거되는 것으로, 탄저균은 필터등급이 높아질수록 빠르게 제거되는 것으로 나타났다. 이는 탄저균의 평균직경이 1  $\mu\text{m}$ 이상으로 인플루엔자와 천연두에 비해 상대적으로 크기 때문에 필터등급이 높으면 높을수록 잘 포집되기 때문으로 판단된다.

다음은 앞서 언급한 MERV 필터등급에 관한 시뮬레이션과 동일한 조건과 장소에서 실내 오염원 제거방안으로 UVGI 살균장치의 단위면적당 조사강도와 조사시간의 곱으로 표시되는 조사량(dose :  $\mu\text{W} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ )을 변화시켜 인플루엔자, 천연두 그리고 탄저균이 제거되는 변화를 알아보려고 하였다. UVGI

살균장치의 조사량(dose)은 살균장치에 대하여 가장 민감한 변화를 보이는 인플루엔자와 천연두를 기준으로 적용하였다. Fig. 7, Fig. 8에 UVGI 조사량

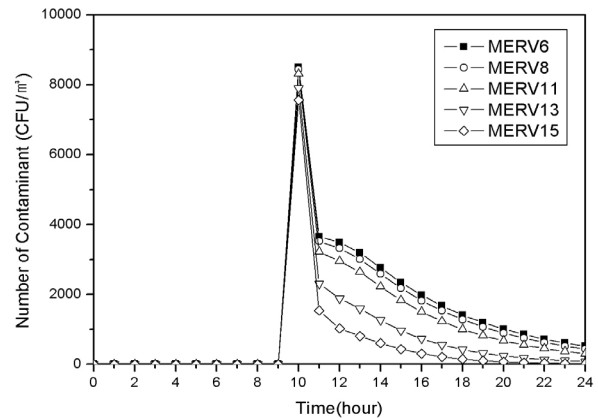


Fig. 4 Number of Influenza w.r.t. time (scenario②).

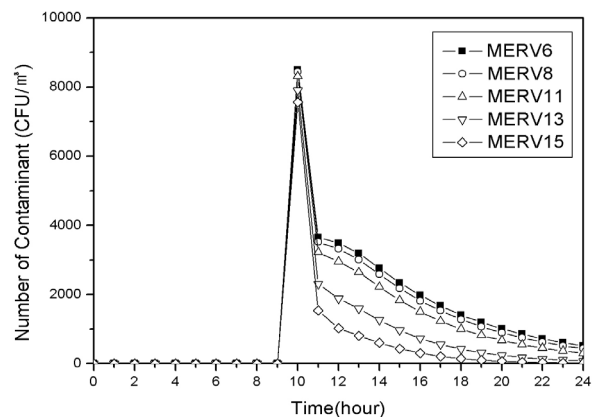


Fig. 5 Number of Smallpox w.r.t. time (scenario②).

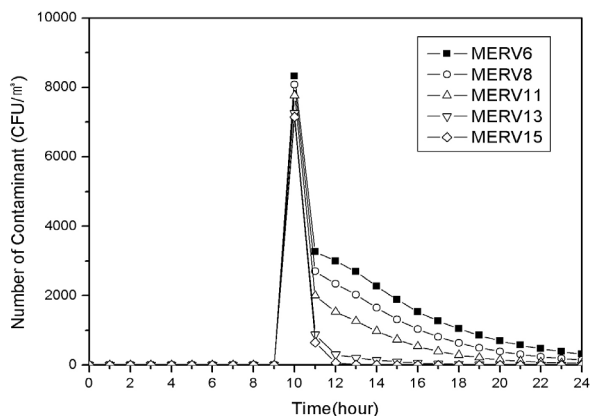


Fig. 6 Number of B.anthrax w.r.t. time (scenario②).

(dose)에 변화에 따른 인플루엔자와 천연두의 변화량을 나타내었다. 필터등급에 따른 변화와 마찬가지로 인플루엔자와 천연두는 오염원이 제거되는 형태가 거의 일치하는 것으로 나타났고, 바이오 공격이 발생하여 2시간이 지난 11시부터는 조사량이 높아질수록 빠르게 제거되는 것으로 나타났다. 이는 인플루엔자와 천연두의 경우 바이러스이므로 UVGI 살균장치에 대한 반응이 민감하기 때문으로 판단된다. Fig. 9에 UVGI 조사량(dose)에 변화에 따른 탄저균의 변화량을 나타내었다. 탄저균은 바이오 공격이 발생하여 2시간이 지난 11시부터 조사량이 많아지더라도 제거되는 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 탄저균의 경우 진균이라 바이러스인 인플루엔자와 천연두에 비해 상대적으로 살균장치에 대한 저항이 큰 때문으로 판단된다.

Table 6에 보는바와 같이 미생물 제재로 천연두 (smallpox)를 사용할 경우 공격 1시간 이후와 2시간 이후의 해석결과를 나타내었다. 앞서 설정한 시나리오①, ②, ③에 대해서 공조기에 필터를 설치하지 않은 경우, 중성능 필터인 MERV 12 등급의 필터를 설치하는 경우, MERV 12 등급의 필터와 UVGI 16 등급의 자외선 살균장치를 설치하는 경우에 대하여 1시간 이후와 2시간 이후의 오염원의 분포를 각 층의 준별로 정리한 것이다. 본 해석결과는 기존에 탄저균(Bacillus anthrax)에 대해서 수행되었던 Lee, et al.<sup>(9)</sup>의 연구결과로 정성적인 경향은 일치하나 준별 오염원의 전과값은 조금 다른 값을 가지는 것을 알 수 있다.

가장 광범위한 미생물 오염의 전파는 1층에 있는 건물 외부측에 설치한 외기 도입용 드라이 에어리어(Dry area)에 헤어스프레이 통을 설치하는 경우인 시나리오 ①로 나타나고 있다. 1층에서 접근 가능한 저층 공조기의 외기 도입구에 미생물을 살포할 경우 지하 1층부터 지상 15층까지 건물 전 층에 미생물 오염을 전파하는 것으로 나타나고 있다. 또한 필터가 없는 경우와 중성능 필터만을 사용하는 경우 코어부분을 통하여 11층까지 약 140 CFU/m<sup>3</sup>의 오염을 이동시키는 것을 알 수 있다. 그러나 각각의 공조기 입구 측에 필터와 자외선 살균장치 등의 면역건물기술을 도입하는 경우는 외기 도입시에 1차적으로 공조기에서 살균이 되고 건물 전체적으로 살균 시스템이 동작하게 되어 건물 전체적으로 오염원이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 몇 개 층에서 심각한 오염농도를 보이는 것은 실내행사 등

일반인이 가장 많이 모일 수 있는 대공간에 헤어스프레이 통을 설치하는 경우인 시나리오 ②로 실내 대공간에 직접 세균이 방출되는 경우로 필터가 없

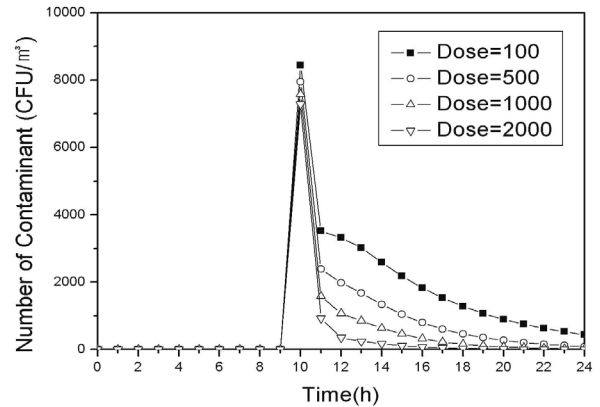


Fig. 7 Number of Influenza w.r.t. time (scenario 2).

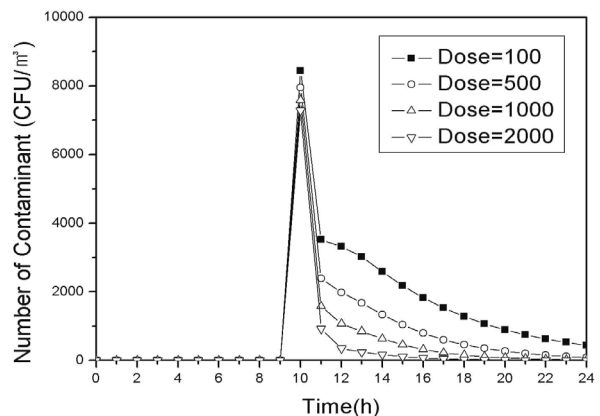


Fig. 8 Number of Smallpox w.r.t. time (scenario 2).

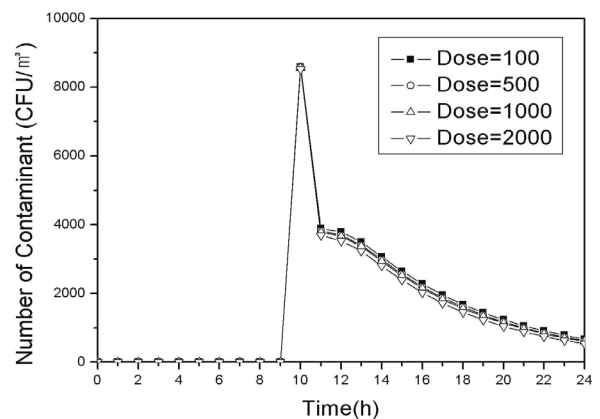


Fig. 9 Number of B. anthrax w.r.t. time (scenario 2).





는 경우 2F Toilet에서 최대 약 9,740 CFU/m<sup>3</sup>로 매우 심각한 오염이 나타나고 있다. 그러나 시나리오 ②의 경우는 설계조건이 대공간에 대한 공조기가 따로 동작하고 상대적으로 코어부분으로 유입되는 오염량이 적기 때문에 대공간에 직접 연결된 1, 2, 3층을 제외하면 5,6F의 core에서 최대 약 217 CFU/m<sup>3</sup>로 시나리오 ①에 비하여 코어부분에서 낮은 오염 농도를 보이고 있다.

또한 코어부분의 기류가 상층부로 발달하게 됨으로 지하 1층의 경우는 코어와 공조기를 통한 오염이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 필터와 UVGI를 설치하는 경우, 공기가 미생물에 오염된 후 전량의 공기가 공조기를 통과하는 시나리오 ①에서는 건물내부로 오염이 전혀 전파되지 않는 것에 비하여, 대공간의 공기가 직접 오염되어 확산된 이후 공조기에 의해 처리되는 시나리오 ②의 경우는 필터와 UVGI16의 고성능 미생물오염원 제거장치를 설치하여도 동일 공조 존인 2~3층에서 일정 수준의 미생물오염 확산은 방지할 수 없으며, 연결 통로가 있는 1층에도 비슷한 오염수준으로 오염이 확산되는 것을 알 수 있다. 또한 코어부분은 일단 미생물 오염원이 침입하게 되면 코어내부 미생물오염을 제거할 장치가 없기 때문에 코어 전체로 오염이 확산되지만, 각층의 공조기에 필터와 UVGI16을 설치하여 사무공간에는 오염확산을 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 층별 설치되어 있는 공조기 내부에 헤어스프레이 통을 설치하는 경우인 시나리오 ③의 경우는 공조기 내부에 균을 방출하게 됨으로 필터가 없는 경우 7F Toilet에서 최대의 오염량인 약 12,600 CFU/m<sup>3</sup>로 나타나지만 설계된 공조기가 층별 공조기이고 코어부분이 방화문, 엘리베이터문 등으로 잘 구획되어 있어 상층부로 더 이상 오염의 전달은 없는 것으로 나타났다.

인플루엔자(influenza)를 사용할 경우 해석결과는 천연두(smallpox)와 유사한 것으로 나타났는데 이는 인플루엔자와 천연두가 바이러스이며 평균직경이 비슷하기 때문으로 판단된다. 이를 종합해보면 시나리오 ①에 대하여 바이오 공격시 중성능 필터인 MERV 12 등급의 필터를 설치하는 경우, 진균인 탄저균에 비해서 바이러스인 인플루엔자와 천연두의 제거율이 낮은 것으로 나타났고, MERV 12 등급의 필터와 UVGI 16 등급의 자외선 살균장치를 설치하는 경우에 대하여 거의 대부분 제거되는 것으로 나타났다. 이는 인플루엔자, 천연두 그리고 탄저균의 평균직경이 서로 다르기 때문에 필터 등급이나

자외선 살균율에 따라 그 제거특성이 달라지기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 바이오 공격에 따른 실내 미생물 오염의 거동과 미생물 제제의 종류에 따른 효율적인 제거방안을 알아보기 위하여, 공공건물에 대하여 멀티존 모델을 구성하고 ①, ②, ③의 공격 시나리오에 따라 시뮬레이션 연구를 진행하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 1층 외기 도입구에서 바이오공격이 발생하는 시나리오 ①의 경우, 필터가 없거나 중성능 필터만을 설치하면 코어를 통하여 건물 전체에 가장 광범위하게 오염이 확산되지만, 필터와 UVGI16의 고성능 미생물오염원 제거장치를 설치하면 외기 도입구 동시에 미생물오염원이 제거되어 건물에는 미생물 오염이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

2) 바이오 공격이 2~3층에 걸쳐있는 대공간에 발생하는 시나리오 ②의 경우, 필터가 없거나 중성능 필터만을 설치하면 동일 공조 존인 2~3층과 직접 연결 통로가 있는 1층의 모든 실에 오염이 확산된 후, 시나리오 ①과 같이 코어를 통하여 건물 전체에 미생물오염이 확산되었다. 이를 방지하기 위해 필터와 UVGI16의 고성능 미생물오염원 제거장치를 설치하여도 동일 공조 존인 2~3층과 직접연결 통로가 있는 1층의 모든 실에 오염이 확산되는 것은 방지할 수 없지만, 각층 공조기에 설치된 필터와 UVGI16으로 인해 상층부의 사무공간에 대한 오염확산은 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

3) 상·하층으로 직접 연결통로가 없는 7층 공조기 내부에서 미생물공격이 발생하는 시나리오 ③의 경우 공조구획이 되어있고 직접 연결통로가 없어, 코어부분으로의 오염확산이 없기 때문에 7층 공조기에 의해 다른 층으로의 확산없이 미생물오염이 제거되는 것으로 나타났다.

이상의 결과들로 부터 필터와 UVGI16의 고성능 미생물오염원 제거장치를 설치하면 효과적으로 미생물오염의 확산을 방지할 수 있는 시나리오 ①과 시나리오 ③에 비하여 시나리오 ②의 경우에 1~3층의 미생물오염은 방지할 수 없는 것으로 나타나 가장 치명적인 것으로 나타났다. 따라서 면역건물 기술 도입으로 건물 외부에서 발생한 시나리오 ①, 구획된 독립공간 내부에서 발생하는 시나리오 ③의

경우는 효과적으로 미생물오염의 확산을 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 시나리오 ②와 같이 직접 실내공간에 미생물오염을 방출하는 경우에 먼 역건물기술을 도입하여도 직접 연결된 공간내부의 오염은 방지할 수 없으므로 미생물오염원 확산방지를 위하여 선진국의 바이오위치와 같은 미생물오염의 신속하게 발견가능한 장치의 개발 및 실내공간에서 이미 오염된 공기에 대한 빠른 시간에 미생물오염을 처리할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. U. S. Department of Homeland Security, Science and Technology.
2. Kowalski, W. J. and P. E., Ph. D., 2002, Immune Building System Technology, Chapter 11, pp. 269-285.
3. Choi, S. G., Lee, H. W. and Hong, J. K., 2006, A study on the multizone modeling for preventing transmission of air borne contagion, Journal of SAREK, Vol. 18, No. 11, pp. 933-940.
4. Walton, G. N., 2005, CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation, NIST, I. 7251.
5. ASHRAE, 1997, ASHRAE Handbook, American Society Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, G, Chapter 25.
6. Kowalski, W. J. and Bahnfleth, W. P., 2002, MERV filter models for aerobiological applications, Air Media, Summer.
7. Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., Witham, D., Serverin, B. F. and Witham, T. S., 2000, Mathematical modeling of UVGI for air disinfection, Quant. Microbiol, Vol. 2, No. 3, pp. 249-270.
8. Bratbak, G. A., Dundas, I., 1984, Bacterial dry matter content and biomass estimations, Appl. Environ. Microbiol., Vol. 48, pp. 755-757.
9. Lee, H. W., Choi, S. G. Hong, J. K., 2008, A Study on the Microbial Contaminant Transport and Control Method According to Government Building Bio-Attack, Journal of SAREK, Vol. 20, No. 4, pp. 252-259.