

실내 미생물오염 전파방지를 위한 멀티존 모델링에 관한 연구

최 상 곤, 이 현 우, 홍 진 관[†]

경원대학교 대학원, *경원대학교 건축설비학과

A Study on the Multizone Modeling for Preventing Transmission of Air Borne Contagion

Sang Gon Choi, Hyun woo Lee, Jin Kwan Hong[†]

Department of Building Equipment & System Eng., Graduate School of Kyungwon Univ., Sungnam 461-701, Korea

*Department of Building Equipment & System Eng., Kyungwon Univ., Sungnam 461-701, Korea

(Received May 31, 2006; revision received October 13, 2006)

ABSTRACT: In this study multi-zone modeling program CONTAM 2.4 developed by NIST is used for estimating the air disinfection rate of the interior of a room which is set up the indoor air disinfection system with filter and ultra violet germicidal irradiation (UVGI). Developed models those enable to predict the transmission of air borne contagion such as bacteria and fungus generated in our daily life are useful model for designing air cleaning & ventilation system of building. Also, results indicate that these models are enable to compute the real situation that is almost impossible of carrying out experiment in an actual condition due to biohazard problems and suggest that engineers will use these models as a design tool for the future immune building system.

Key words: Air borne contagion(공기감염), Air sterilizer performance(공기살균기 성능), Bacteria(세균), Fungus(진균), Immune building(면역건물), Multizone modeling(멀티존 모델링), UVGI(자외선 살균)

기 호 설 명

$C_{\alpha,i}$: 존 i 에서 오염원 α 의 질량비율 [0~1]
 $C_{\beta,i}$: 존 i 에서 오염원 β 의 질량비율 [0~1]
 D_f : 확산효율 보정계수
 $Dose$: E_{eff} 와 Δt 의 곱, 조사량 [$\mu W \cdot s/cm^2$]
 d_p : 분진의 직경 [μm]
 E : 필터 포집효율 [0~1]
 E_D : 단일 섬유 확산효율 [0~1]
 E_{eff} : 미생물이 받는 유효조사량 [$\mu W/cm^2$]

E_R : 단일 섬유 차단효율 [0~1]
 f : 섬유 보정계수
 $F_{i,j}$: 존 i 에서 존 j 로 흐르는 공기유량 [kg]
 g_m : 가스의 몰 크기 [0.003 μm]
 $G_{\alpha,i}$: 존 i 에서 오염원 α 의 발생량 [kg]
 k : 미생물의 표준율 상수 [$cm^2/\mu W \cdot s$]
 $k_{\alpha,\beta}$: 존 i 에서 오염원 α 와 β 의 운동반응계수 [0~1]
 L_U : 포집효율 보정계수
 m_i : 존 i 에서 공기의 질량 [kg]
 $m_{\alpha,i}$: 존 i 에서 오염원 α 의 질량 [kg]
 N_o : 조사 전 미생물의 수
 N_t : t 시간 후의 미생물의 수
 $R_{\alpha,i}$: 존 i 에서 오염원 α 의 제거율 [0~1]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5306; fax: +82-31-750-5314

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

S : 섬유 투영면적, 무차원
 z : 계수 ($=1 \times 10^{-1}$)

그리스 문자

η_f : 필터에 의한 오염원 제거율 [0~1]
 η_i : 총 오염원 제거율 [0~1]
 η_{uv} : UVGI에 의한 오염원 제거율 [0~1]
 $\eta_{\alpha,i,j}$: 존 i 에서 존 j 로 흐를 때 오염원 α 에 대한 필터 효율 [0~1]

1. 서 론

최근 보고되고 있는 공기를 통하여 전염되는 중증 급성 호흡기 증후군(SARS)과 조류독감(AI)의 등장은 공기 중 오염원으로서의 미생물오염원에 대한 관심을 고조시키는 계기를 제공하고 있다. 이러한 공기를 통한 미생물오염원의 감염은 테러 등에서 극단적인 미생물오염원을 인위적으로 무기화하여 이용하는 상황이 아닌 일상생활에서도 호흡기 질환의 유행이나 병원에 갔다가 공기를 통한 2차감염이 되는 등 실생활에서도 이미 상당히 발생하고 있으며, 항생제에 내성을 가지는 슈퍼박테리아의 발생과 환경에 따라 계속 변이를 하는 병원균들이 증가하면서 우리의 건강을 위협하는 일들이 자주 발생되고 있다.

국내에서는 공기감염 병원균들에 대한 적절한 대응책이 미흡한 상태라 할 수 있으며, 주로 가정용 공기청정기에 한정하여 개발 적용하고 있을 뿐이며, 직접적인 오염공간에 대한 살균기술이나, 2차오염 방지기술에 대해서는 개발사례나 연구결과 등이 선진외국에 비해 미미한 실정이다. 본 연구에서는 실생활에서 이러한 공기감염 기회 확산에 대한 적절한 대책으로서 면역건물(Immune Building)의 개념을 적용하기 위한 방안으로 UVGI(Ultra Violet Germicidal Irradiation)를 이용한 2차감염 방지장치로서의 공기살균기⁽¹⁾를 설치한 재실공간에 대해서 미생물오염원의 제거 특성을 파악하고자 하였으며, 특히 멀티존 해석기법을 도입하여 실제 응용 가능한 해석모델들을 제시하고자 하였다. 멀티존 모델링 기법을 도입한 첫번째 이유는 대상으로 하는 한 개의 실이 아니라 전체 건물을 거시적으로 모사할 수 있는 장점과 이와 같은 모델을 향후 실제 건물에 확장 적용할 수

있기 때문이라 할 수 있다. 두번째 이유로는 직접적으로 재실자에게 해가 될 수 있는 미생물오염원들이기 때문에 아주 제한적인 실험실 연구를 제외하고는 실제 현장에서 직접적으로 실험으로 그 오염 특성을 파악하기 어렵기 때문이다. 이러한 이유 때문에 향후 미생물오염원에 대한 대응 방안으로 선진국에서 제시되고 있는 면역 건물(Immune Building)의 설계와 시공 및 평가를 위하여 실내에서 미생물오염원의 거동을 파악할 수 있는 이론적인 해석모델이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 이를 위해 미생물오염원 살균 및 여과와 환기 등이 존재하는 재실공간에서 미생물오염원의 거동 특성을 알기 위해서 필터와 UVGI 및 보균자 모델 등의 단위구성모델을 적용한 멀티존 시뮬레이션을 수행하였으며, 제안된 단위구성모델들의 적합성 및 신뢰성을 판단하도록 하였다. 이와 같이 함으로써 향후 면역건물기술의 설계 및 평가에 적용할 수 있는 멀티존 시뮬레이션의 기초를 마련하고자 하였다.

2. 연구수행 및 모델구성

2.1 기본 멀티존 모델

멀티존 모델은 미국국립표준연구소(NIST)에서 개발되어 환기해석에 적용되고 있는 시뮬레이션 프로그램인 CONTAM 2.4⁽²⁾를 사용하도록 하였다. CONTAM 2.4는 Lorenzetti⁽³⁾와 Li⁽⁴⁾ 등에 의해 그 성능이 평가되었으며, CO₂, CO, VOC 등의 여러 화학적인 오염물질에 대한 해석모델들도 제공하고 있다. CONTAM 2.4는 멀티존에 대한 해석을 위해 CFD에서 하나의 존이 수백 혹은 수천 개의 격자를 가지는 것에 비해서 각각의 존은 단일성질을 가지며 이 격자점에서 각 성질의 질량 평형은 만족되는 하나의 격자로 가정한다. 즉, 단일존의 온도, 습도, 압력, 오염농도 등은 계산간격마다 존 내부에서 완전혼합(well-mixed)되는 것으로 가정한다. 온도의 경우는 각 존의 온도를 초기 조건으로 입력하고 이것이 시뮬레이션 전체에 걸쳐서 유지되는 것으로 하기 때문에 존 내의 미시적인 열전달현상은 다루지 않는다. 전체 존들 간의 물질유동은 존 간의 각각의 조건에 의해 발생하는 압력차에 의한 질량유량에 의하여 발생하게 된다. CONTAM 2.4는 각각의 존 내의 공

기유동통로를 통한 질량유량과 각각의 존의 압력을 결정하기 위하여 격자로 모사된 모든 존의 공기에 대한 질량평형을 계산한다. 즉, 두 존 간을 흐르는 질량유량은 두 존 간의 압력차에 대한 함수로 표현 가능하며, 이때의 공기유동통로 양단의 밀도차, 높이차, 바람 등에 의한 양단의 압력은 베르누이방정식에 의해 주어지게 된다. 또한 모든 존에서 질량보존의 법칙을 만족하기 위하여 뉴턴랩슨법(Newton-Rahpson method)을 통하여 비선형 대수방정식을 계산하여 압력과 질량유량을 구하게 된다.

식(1)은 멀티존 시뮬레이션을 수행하기 위한 CONTAM 2.4에서의 지배방정식을 나타내고 있다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \frac{dm_{\alpha,i}}{dt} = & -R_{\alpha,i} C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j} C_{\alpha,i} \\ & + \sum_j F_{j,i} (1 - \eta_{\alpha,j,i}) C_{\alpha,j} \\ & + m_i \sum_{\beta} k_{\alpha,\beta} C_{\beta,i} + G_{\alpha,i} \end{aligned} \quad (1)$$

본 연구에서는 CONTAM 2.4에서 각종 병원균을 포함한 실내 미생물오염원들을 모델링할 수 있도록 하였다. 실내 미생물오염원을 제거하는 방법으로 필터와 UVGI를 각각 모델링하여 실내 미생물오염원 저감을 위한 해석에 사용할 수 있도록 하였다. 각각의 모델은 변수조건에 따라 실제의 재실공간을 대상으로 한 실제상황과 비교하는 것이 바람직할 것이나 앞서 언급한 것과 같이 실제 실험을 할 경우 여러 가지 제한사항이 많기 때문에 단위 실험실 차원으로 구축된 향온·향습실에서

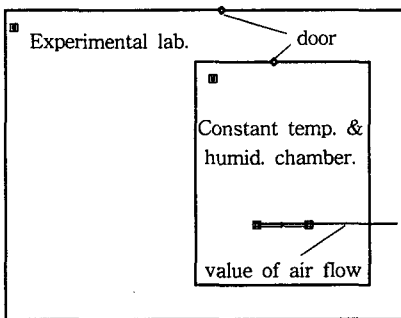


Fig. 1 Multi-zone base modeling for Indoor microorganism.

측정한 살균율을 시뮬레이션 결과와 비교하여 평가하였다. 이러한 해석과 실험의 비교평가를 통하여 본 연구에서 모사된 미생물 모델에 대한 신뢰도를 확인하고자 하였다. 또한 거주자가 감염되어 거주자가 재실공간에서 미생물오염원을 발생하는 경우에 대해 보균자 모델을 설정하고 이를 저감하기 위한 필터와 UVGI의 살균효과를 파악하기 위해서 미생물 모델에 필터 모델과 UVGI 모델의 각각의 단위모델의 경우와 이들 단위모델이 2개 이상 설치된 경우와 조합되어 있는 경우인 필터+UVGI 및 보균자 모델에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 1에 미생물오염 모델과 필터 모델을 구성하기 위한 기본 단위모델로서 실험실 내부의 향온·향습실에 대하여 설정한 멀티존 모델을 나타내었다. 멀티존 시뮬레이션을 위해서 전체 실험실을 외부공간으로 하고, 내부에 설치된 단일 공간인 향온·향습실을 미생물오염 모델과 필터 모델의 단위모델을 구성하기 위한 용도로 설정하였다. 향온·향습실 내부는 실험실의 외부공간과 밀폐되도록 하고, 출입문만 공기유동통로(Air flow Path)로 설정하였다. 향온·향습실은 3.5×4.5×3 (m³)의 규모로 공조장치를 가동하여 내부온습도가 유지되면 정지한 후 밀폐하도록 하였다.

2.1.1 미생물 모델

Table 1에 실내조건에서 성장할 수 있는 미생물오염원의 종류를 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 실내에서는 많은 종류의 미생물이 자랄 수 있으나 실제 현장에서 측정하는 방법은 이와 같은 미생물 모두를 동정하는 것이 불가능하므로 편의상 일반 세균과 일반 진균으로 구분하여 포집하거나 또는 총 부유세균을 포집하여 개수하는 것이 일반적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 멀티존 시뮬레이션을 위하여 총 부유세균량을 대상으로 할 경우의 모델을 수립하였다. 따라서 해석시 Table 1에 나타난 미생물의 평균 직경을 사용하였고, 밀도의 경우는 Bratbak and Dundas⁽⁶⁾에 의해 제시된 1,100 kg/m³을 사용하도록 하였다. 실내 측정시 총 부유세균량의 단위인 CFU/m³을 이용하기 위하여 부유미생물의 개수를 입력하는 모델로 구성하였다.

2.1.2 필터 모델

필터 모델은 ASHRAE standard 52.2의 MERV

Table 1 Communicable respiratory pathogens

Airborne pathogen	Diameter (μm)
Adenovirus	0.08
Arenavirus	0.18
Coronavirus	0.11
Coxsackievirus	0.027
Echovirus	0.028
Morbilli virus	0.12
Influenza	0.1
Parainfluenza	0.22
Paramyxovirus	0.23
Parvovirus B19	0.022
Reovirus	0.075
Respiratory syncytial virus	0.22
Rhinovirus	0.023
Togavirus	0.063
Varicella-zoster	0.16
Chlamydia pneumoniae	0.3
Mycobacterium tuberculosis	0.86
Yersinia pestis	0.75

등급⁽⁷⁾을 따르도록 하였다. 일반적으로 필터의 포집효율에 대한 수학적 표현은 식(2)와 같다.

$$E = 1 - e^{-(E_D + fE_R)S} \quad (2)$$

위와 같이 정의하는 경우 모델을 시뮬레이션 하는 것에는 문제가 없으나 실제 측정데이터⁽⁸⁾와 비교하면 두 가지 문제점이 발생되는데, 첫번째는 $0.01 \mu\text{m}$ 정도의 작은 크기가 100% 제거되는 것으로 나타나게 되나 실제로는 그렇지 않다는 것과 두번째는 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 정도의 대형 분진은 중·저성능의 필터에서는 실제로 100% 제거되지 않는 것이다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 수정된 필터 모델이 식(3)과 같이 제안되었다.⁽⁹⁾

$$E = L_U (1 - e^{-(D_f E_D + fE_R)S}) \quad (3)$$

$$D_f = 1 - z^{(d_p - g_m)^{3/4}} \quad (4)$$

식(3)의 L_U 와 D_f 로 인해 식(2)에서 나타나는 실제와는 다른 문제점이 수정될 수 있으며, ASHRAE standard 52.2의 MERV 등급에 따라 MERV5~MERV20등급의 필터 모델을 적용하였다.

2.1.3 UVGI 모델

단일 미생물의 군집에 대한 자외선 조사(UVGI)의 살균성능은 아래와 같이 식으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{N_t}{N_o} = \exp(-kE_{eff} \cdot \Delta t) = \exp(-k \cdot Dose) \quad (5)$$

위와 같이 정의하는 경우 시간 t 후의 미생물의 살균율은 $(1 - N_t/N_o)$ 으로 나타낼 수 있다.

UVGI 모델은 제거 대상이 되는 미생물에 대하여 일정한 효율을 나타내는 고정 살균율 모델로 하였다. 대상균에 대한 살균율이 50~95%를 5% 단위로 UVGI5~UVGI14까지 10등급으로 나누었으며, UVGI15는 살균율 99%를 UVGI16은 살균율 100%가 되도록 설정하였다.

2.2 필터+UVGI 모델 및 보균자 모델

Fig. 2에 본 연구에 사용한 필터 모델과 UVGI 모델을 조합한 멀티존 시뮬레이션을 위한 모델을 나타내었다. Fig. 2의 조합모델은 Fig. 1에서 단위 모델로 구성된 기본모델이 실제 멀티존 모델에서 조합되어 적절하게 동작할 것인가, 또 실제로는 필터와 UVGI가 하나의 장치에 포함되게 되고, 이 경우 각각의 단위모델의 조합은 가능한가에 대하여 판단하기 위한 것이다. 여기에 추가하여 보균자가 대상 재실공간인 실내에 오염원으로 될 때 보균자의 재실상황에 따른 조합모델의 실제 효

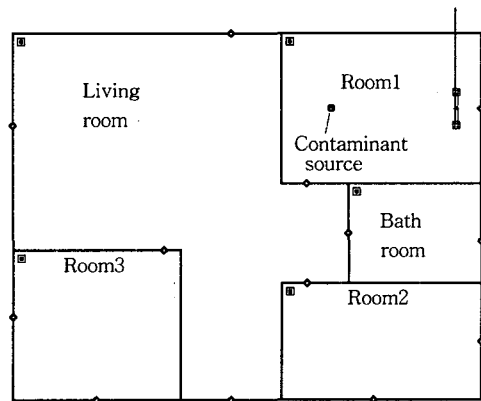


Fig. 2 Multi-Zone modeling for combination of filter and UVGI models.

과에 대하여 판단하기 위하여 구성되었다.

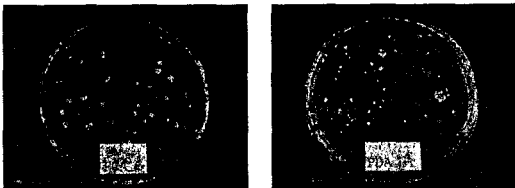
2.2.1 필터+UVGI 모델

필터와 UVGI가 조합된 모델은 자외선 살균램프와 필터로 구성된 공기살균기를 모사한 모델로 각각 필터와 UVGI가 재실공간에 설치된 공기순환덕트의 상류부와 하류부에 각각 다른 장치로 구분되어 설치되어 있을 경우와 하나의 장치 내에 조합되어 있을 경우를 설정하였다. 상류부와 하류부에 각각 다른 장치로 구분되어 설치되어 있을 경우는 각각의 오염제거 성능을 가지는 두 장치가 각각 동작하지만, 필터와 UVGI가 조합된 경우는 하나의 장치로 통합된 성능을 나타내는 것으로 모사하였다. 필터와 UVGI가 조합된 경우 오염원제거 성능에 대한 수학적 표현은 식(6)과 같다.

$$\eta_t = 1 - (1 - \eta_f)(1 - \eta_{uv}) \quad (6)$$

2.2.2 보균자 모델

보균자는 70 kg의 남자를 대상으로 호흡량인 13.33 L/min인 경우, 감염으로 인해 세균을 100 CFU/min으로 방출할 경우를 가정하여 모사하였다. 보균자의 재실에 따른 실내오염 특성변화를



(a) PCA Ager (b) PDA Ager

Fig. 3 Photographs of test result in the case of non-running UVGI air sterilizer.



(a) PCA Ager (b) PDA Ager

Fig. 4 Photographs of test result in the case of 8 hours running UVGI air sterilizer.

Table 2 Occupant schedule

Time	Zone	Occupancy time (hour)
00:00~04:00	Room1	4
04:00~08:00	Room2	4
08:00~12:00	Room3	4
12:00~16:00	Bath room	4
16:00~24:00	Living room	8

확인하기 위하여 하루 종일 재실공간에서 움직이지 않는 경우와 각각의 실에서 4시간씩 재실하는 경우를 모사하였다. Table 2에 재실 스케줄을 나타내었다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 미생물 및 UVGI 모델 고찰

Fig. 3와 Table 3에 UVGI 동작 이전의 포집한 세균의 상태를 나타내고 있다. 미생물 모델과 UVGI 모델의 실제 적용시 신뢰성을 확인하기 위하여 실제 실험실에서 측정된 총 부유세균량을 초기 오염량으로 하고 24시간 동안 시뮬레이션을 하였다. 비교를 위한 실험은 8시간 동안 4시간 간격으로 실내의 공기를 포집하여 배양 후 개수하도록 하였다. Fig. 4와 Table 4에 살균기 동작 이후의 포집한 세균의 상태와 양을 나타내고 있다. 4시간 이후에는 약 75.2% 살균율을 보이고

Table 3 Test result in the case of non-running UVGI air sterilizer

Strain	Ager	Sampling air flow rate (L/min)	Number of colonies (CFU/m ³)
Bacteria	PCA	100	570
Fungus	PDA	100	410

Table 4 Test result in the case of 8 hours running UVGI air sterilizer

Strain	4 hours average kill rate (%)	8 hours average kill rate (%)
Bacteria	75.3	92.6
Fungus	75.1	92.7

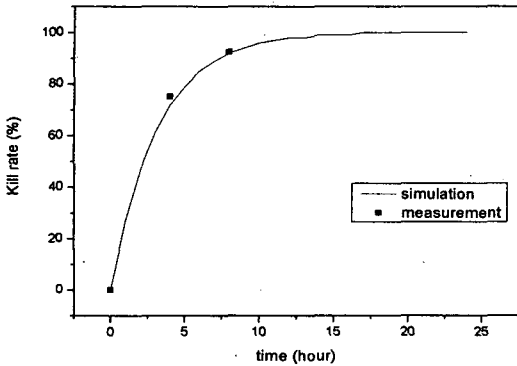


Fig. 5 Kill rate w.r.t. time.

있으며, 8시간 이후에는 92.7%의 살균율을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 시뮬레이션의 결과와 실제 측정의 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션에서는 4시간 후에 72%의 살균율을 보이고, 8시간에는 후에는 92%로 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로 모델과 실제 상황이 상당히 근접한 결과 나타내는 것을 알 수 있으며, CONTAM 해석에서 실내 미생물 오염원 저감을 위해 설정된 미생물 모델과 UVGI 모델은 실제상황과 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 필터+UVGI 모델 및 보균자 모델 고찰

Fig. 6에 필터와 UVGI의 설치 위치에 따른 결과를 나타내었다. 결과에서 보는 것과 같이 장치에서 필터와 UVGI가 분리되어 설치하는 것과 조합되어 설치하는 것은 동일한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 필터 모델을 구성할 경우 하나의 유닛에 필터와 UVGI를 통합설치하여도 각각 별도로 설치하는 모델과 동일한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에 보균자가 실내에 있는 경우 UVGI와 필터가 조합된 모델을 적용한 경우와 조합된 모델을 적용하지 않은 경우를 비교하였다. 결과에서도 보는 바와 같이 필터와 UVGI를 적용하지 않으면 재실자에 의해서 계속적으로 미생물오염원이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 UVGI 공기살균기(air sterilizer)를 사용하게 되면 계속 증가하는 미생물오염량이 살균되어 일정 수준에서 유지되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 UVGI

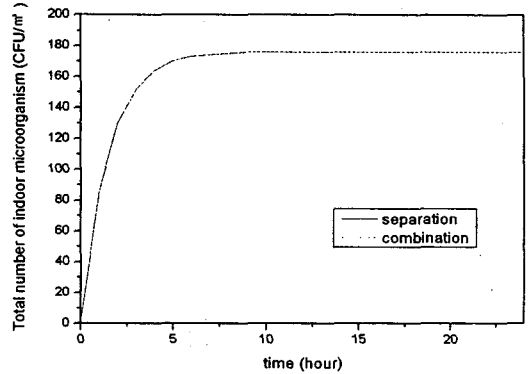


Fig. 6 Simulation result in case of varying the filter and the UVGI location.

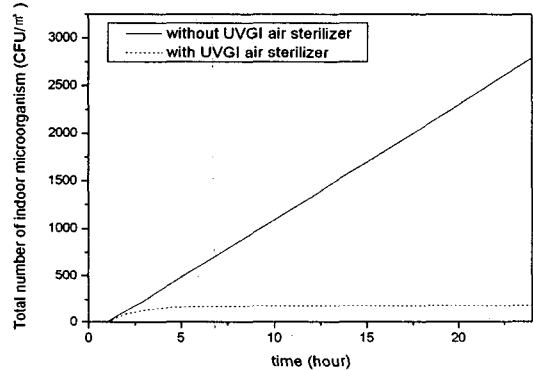


Fig. 7 Total number of indoor microorganism w.r.t. time in case of using and non-using UVGI air sterilizer with human contaminant source.

공기살균기를 사용하면 계속 발생하는 미생물오염에도 대처할 수 있다는 것을 나타낸다. 실제 보균자가 호흡을 통하여 계속적인 미생물오염원을 발생시킬 경우에 오염원을 제거하는데 적합한 것을 알 수 있다.

Fig. 8에 Table 2에서와 같은 보균자가 재실 스케줄에 따라 움직일 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 보균자는 Room1에서 처음 4시간을 보내고 Room2로 이동한다. 모델에서 Room1에서는 UVGI air sterilizer가 동작하고 있기 때문에 일정량 미생물이 증가하다가 이동하는 4시간만에 급격히 오염이 감소하는 것을 알 수 있다. Room2와 다음 4시간을 보내는 Room3에서는 재실과 동시에 증가하는 오염이 다음 실로 이동

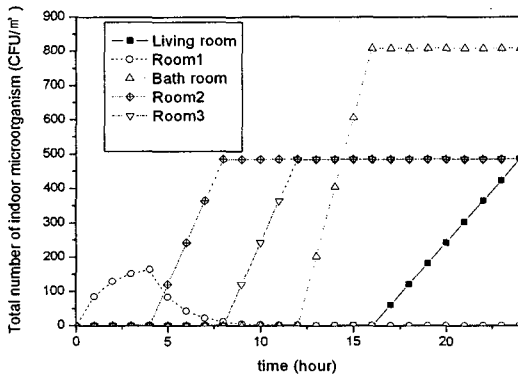


Fig. 8 Simulation result in case of moving the human contaminant source.

하는 순간 바로 멈추게 되고, 오염원을 제거할 수 있는 수단이 설치되어 있지 않기 때문에 오염원 그대로 유지되는 것을 알 수 있다. 화장실의 경우는 다른 실과는 다르게 면적이 작기 때문에 오염 정도가 심한 것을 알 수 있으며 거실의 경우에는 면적이 크기 때문에 오염되는 속도가 상대적으로 느린 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 보균자의 이동에 따라 각각의 존에서 오염의 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 실의 크기, 재실시간 등에 부합하는 결과를 향후 실제 적용모델에서도 도출할 수 있을 것이라 판단하고 있다.

4. 결 론

환기해석 프로그램인 CONTAM 2.4를 사용하여 향후 현장실험이 어려운 실내 미생물오염 문제와 이를 방지하기 위한 면역건물기술의 적용에 대한 설계 및 평가의 도구로서 활용하기 위하여 실내 미생물오염 전파방지를 위한 해석방법으로 멀티존 모델에 관한 연구를 진행하여 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 실험실에서 진행된 미생물오염원 살균실험과 멀티존 모델을 이용한 시뮬레이션 결과는 살균율이 서로 잘 일치하였다.
- (2) 필터와 UVGI의 조합모델은 각각의 모델을 따로 설치할 필요 없이 하나의 유닛으로 통합하여 설치할 수 있음을 모델해석을 통하여 확인하였다.
- (3) 보균자 모델은 재실공간에서 재실자가 공기 전염성 병에 오염되었을 경우를 근사적으로 모사

할 수 있음을 알 수 있다.

(4) 실의 크기 및 재실시간 등의 변화에 대한 멀티존 모델에 의한 오염원제거 특성은 재실 스케줄에 따라 각 실에 확산되는 오염원에 대해 비교적 잘 부합되는 결과를 도출할 수 있었다.

이러한 결과 향후 본 연구에서 모델링한 각종 해석 모델들을 이용하여, 재실공간에서의 미생물 오염 문제와 오염원제거 및 미생물오염원의 이동에 따른 환기설계 활용 등 현장에서는 직접 실험하기 어려운 상황을 시뮬레이션으로 신뢰성 있게 해석할 수 있다고 판단되며, 이와 같은 멀티존 모델링기법이 면역건물기술의 실제적용에 대한 설계 및 평가의 도구로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Choi, S. G. and Hong, J. K., 2005, The study on the performance estimation of UVC air sterilizer for preventing transmission of air borne contagion, Journal of SAREK, Vol. 17, No. 6, pp. 581-587.
2. Walton, G. N., 2005, CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation, NISTIR 7251.
3. Lorenzetti, D. M., 2002, Assessing multizone airflow simulation software, Indoor Air, pp. 267-271.
4. Li, H. M., 2002, Validation of three multizone airflow models, MS thesis, Concordia University.
5. Stuart, W. D., 2001, A tool for modeling airflow & contaminant transport, ASHRAE Journal, March 2001, pp. 35-42.
6. Bratbak, G. A. and Dundas, I., 1984, Bacterial dry matter content and biomass estimations, Appl. Environ. Microbiol, pp. 755-757.
7. Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size, ASHRAE Standard 52.2-1999.
8. Ensor, D. S., Viner, A. S., Hanley, J. T., Lawless, P. A., Ramanathan, K., Owen, M. K., Yamamoto, T. and Sparks, L. E., 1988, Engineering solutions to indoor air problems,

- IAQ88/Engineer Solutions to Indoor Air Problems Atlanta.
9. Kowalski, W.J. and Bahnfleth, W.P., 2002, MERV filter models for aerobiological applications, Air Media, Summer, pp.13-17.
 10. 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(3), pp 249-270.