

실내 미생물오염 전파방지를 위한 멀티존 모델링에 관한 연구

최 상 곤*, 이 현 우*, 홍 진 관**†

경원대학교 대학원, *경원대학교 건축설비학과**

The 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 University, Sunnam City 461-701, Korea

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

ABSTRACT: In this study multi-zone modeling program CONTAM 2.4 which is developed by NIST is used for modeling the air disinfection system which is consist of dilution, filtration, ultra violet germicidal irradiation (UVGI) for removing the indoor microorganism such as bacteria and fungus. Developed models those protect occupants against indoor microorganism generated in our daily life are enable to use for immune building simulation tool. Also, results indicate that those models are enable to compute the real situation that is almost impossible of carrying out experiment and identify the disinfection rate with highly reliance. Results also suggest that engineers will use these models as a design tool for the immune building system.

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

기 호 설 명

d_p : 분진의 직경, [μm]
 D_f : 확산효율 보정계수
Dose : E_{eff} 와 Δt 의 곱, 조사량 [$\mu W \cdot s / cm^2$]
 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 보정 계수
 g_m : 가스의 물 크기, [0.003 μm]
 k : 미생물의 표준율 상수 [$cm^2 / \mu W \cdot s$]
 L_U : 포집 효율 보정 계수
 N_o : 조사전 미생물의 수
 N_t : t 시간후의 미생물의 수
 S : 섬유 투영면적, 무차원
 z : 계수 (= 1×10^{-1})

† Corresponding author

Tel : +82-031-750-5306

FAX : +82-031-750-5314

E-mail : jkhong@kyungwon.ac.kr

1. 서론

수많은 학자들이 머지 않는 미래에 인간은 페니실린이 발견되기 이전의 항생제가 없는 세상을 다시 겪을 것이라 경고하고 있다. 뿐만 아니라 공기를 통하여 전염되는 중증 급성 호흡기 증후군(SARS)과 조류독감(AD)의 등장은 이러한 예견을 간과할 수 없는 것으로 만들고 있다. 이러한 공기를 통한 감염은 전쟁이나 테러 등의 극단적인 상황이 아니라도, 호흡기 질환이 유행하게 되면 다른 병으로 병원에 방문하였다가 유행하는 질환에 감염이 되는 등 실생활에서도 이미 상당히 발생하고 있으며, 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 있다. 국내의 기술들은 가정용 공기청정기에 한정하여 개발 적용하고 있을 뿐이며, 직접적인 오염공간에 대한 살균기술이나, 2차오염 방지기술에 대해서는 개발 사례나 연구결과 등이 선진외국에 비해 미비한 실정이다. 본 연구에서는 실생활에서 이러한 공기 감염회 확산에 대한 적절한 대책으로서 면역건물(Immune Building)의 개념을 적용하기 위한 방안으로 기존연구⁽¹⁾에서 개발된 UVGI(Ultra Violet Germicidal Irradiation)를 이용한 2차감염 방지장치로서의 살균기와 여과 및 환기기술을 멀티존 해석 기법을 도입하여 실제 응용 가능한 모델들을 모사할 수 있도록 하였다. 멀티존 모델링 기법을 도입한 이유는 대상물이 직접적으로 체실자에게 해가 될 수 있는 미생물오염원들이기 때문에 아주 제한적인 실험실 연구를 제외하고는 실제 현장에서 직접적으로 실험을 수행할 수 없기 때문이다. 이러한 이유 때문에 향후 수행해야 하는 면역건물(Immune Building)기술의 적용에 대한 설계 및 평가의 도구로서 활용을 위하여 실내에서 미생물오염원을 저감할 수 있는 해석모델이 필요하며, 본 연구에서는 이를 위한 모델해석 방안을 제시해 보고자 하였다.

2. 연구 수행 및 모델 구성

2.1 기본 멀티존 모델

멀티존 모델을 구성하기 위하여 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 멀티존 Air flow의 시뮬레이션 프로그램으로서의 성능이 평가되었으며, CO₂, CO, VOC 등의 여러 화학적인 오염물질에 대한 모델들도 제공하고 있다. 본 연구에서는 CONTAM 2.4 에서 각종 병원균을 포함한 실내 미생물 오염원들을 모델링할 수 있도록 하였다. 실내미생물오염원을 제거하는 방안으로 필터와 UVGI를 각각 모델링하여 실내 미생물 오염원 저감을 위한 해석에 사용할 수 있도록 하였다. 각각의 모델은 변수조건에 따라 상황과 비교 평가하는 것이 바람직할 것이나 앞서 언급한 것과 같이 실제 실험을 할 경우 여러 가지 제한사항이 많기 때문에 실험실 단위로 구축된 항온·항습실에서 측정된 살균율을 해석결과와 비교하여 평가하였다. 이러한 평가를 통하여 본 연구에서 모사된 미생물 모델에 대한 신뢰도를 평가하도록 하였다. 또한 거주자가 감염되어 거주자가 미생물 오염원을 발생하는 경우에 대해 이를 저감하기 위한 필터와 UVGI의 살균효과를 파악하도록 하였다.

Cont

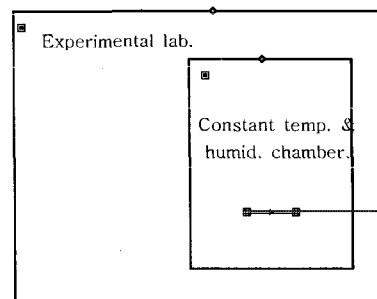


Fig. 1 Multi-zone base modeling for Indoor microorganism

Fig.1 에 미생물오염 모델과 필터 모델을 구성하기 위한 기본 모델로서 실험실내부의 항온·

향습실에 대한 멀티존 모델을 나타내었다. 향습실 내부는 실험실의 외부공간과 밀폐되도록 하고, 출입문만 공기유동통로(Air flow Path)로 설정하였다. 향습실은 3.5×4.5×3 (m³)의 규모로 공조장치를 가동하여 내부습도가 유지되면 정지한 후 밀폐하도록 하였다.

1) 미생물 모델

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

Table 1.에 실내조건에서 성장할 수 있는 미생물 오염원의 종류를 나타내었다. Table 1.에서 보는 바와 같이 실내에서는 많은 종류의 미생물이 자랄 수 있으나 실제 현장에서 측정하는 방법은 일반 세균과 일반 진균으로 구분하여 포집하거나 또는 총 부유세균을 포집하여 개수하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 해석을 위하여 총 부유세균량을 대상으로 할 경우의 모델을 수립하였다. 일반모델에서는 Table 1.에 나타난 미생물의 평균직경을 사용하였고, 밀도의 경우는 Bratbak and Dundas⁽⁵⁾에 의해 제시된 13,100 kg/m³을 사용하도록 하였다.

실내 측정시 총부유세균량의 단위인 CFU/m³을 이용하기 위하여 부유미생물의 개수를 입력하는 모델로 구성하였다.

2) 필터 모델

필터 모델은 ASHRAE standard 52.2 의 MERV 등급⁽⁶⁾를 따르도록 하였다. 일반적으로 필터의 포집 효율에 대한 수학적 표현은 (1)의 식과 같다.

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

위와 같이 정의하는 경우 모델을 시뮬레이션 하는 것에는 문제가 없으나 실제 측정데이터⁽⁷⁾와 비교하면 두 가지 문제점이 발생되는데, 첫 번째는 0.01 μm 정도의 작은 크기가 100% 제거되는 것으로 나타나게 되나 실제로는 그렇지 않다는 것과 두 번째는 5~10 μm 정도의 대형 분진은 중저성능의 필터에서는 실제로 100% 제거되지 않는 것이다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 수정된 필터모델이 식 (2)와 같이 제안되었다.⁽⁸⁾

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

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

식 (2)의 L_U 와 D_f로 인해 식(1)에서 나타나는 실제와는 다른 문제점이 수정될 수 있으며, ASHRAE standard 52.2 의 MERV 등급에 따라 MERV5 ~ MERV20 모델을 적용하였다.

3) UVGI 모델

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

$$\frac{N_t}{N_o} = \exp(-kE_{eff} \cdot \Delta t) = \exp(-k \cdot Dose) \quad (1)$$

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~UVGI14 까지 10등급으로 나누었으며, UVGI15는 살균율 99%를 UVGI16은 살균율 100%가 되도록 설정하였다.

2.2 필터 + UVGI 모델 및 보균자 모델

□ Unit

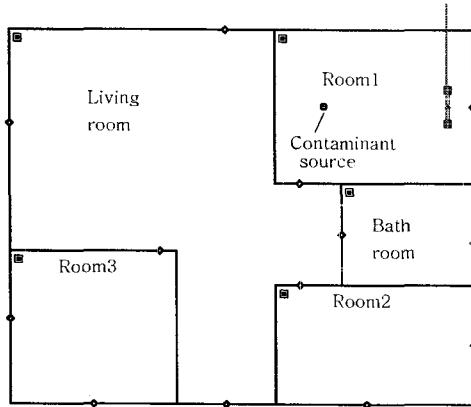


Fig. 2 Multi-Zone modeling for combination of filter and UVGI models

Fig.2 에 본 연구에 사용한 필터 모델과 UVGI 모델을 조합한 멀티존 모델을 나타내었다. Fig.2의 조합모델은 Fig.1에서 단일모델로 구성한 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 실내에 오염원으로 될 때 보균자의 제실상황에 따른 조합모델의 실제 효과에 대하여 판단하기 위하여 구성되었다.

1) 필터 + UVGI 모델

필터와 UVGI의 조합은 각각 필터와 UVGI가 살균기내의 상류부와 하류부에 각각 다른 장치로 구분되어 설치되어 있을 경우와 하나의 장치에 조합되어 있을 경우를 설정하였다.

2) 보균자 모델

보균자는 70kg의 남자를 대상으로 호흡량이 13.33 ℓ/min 인 경우, 감염으로 인해 세균을 100 CFU/min으로 방출할 경우를 가정하여 모사하였다. 보균자의 제실에 따른 실내오염 특성변화를 확인하기 위하여 하루 종일 제실공간에서 움직이지 않는 경우와 각각의 실에서 4시간씩 제실하는 경우를 모사하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 미생물 및 UVGI 모델 고찰

Fig.3와 Table.2에 UVGI 동작 이전의 포집한 세균의 상태를 나타내고 있다. 미생물 모델과 UVGI 모델의 실제 적용시 신뢰성을 확인하기 위하여 실제 실험실에서 측정된 총부유세균량을 초기 오염량으로 하고 24시간 동안 시뮬레이션을 하였다. 비교를 위한 실험은 8시간 동안 4시간 간격으로 실내의 공기를 포집하여 배양 후 개수하도록 하였다.



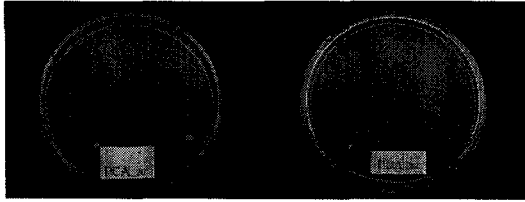
(a) PCA Ager (b) PDA Ager

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

Table.2 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

Fig.4 와 Table.3에 살균기 동작 이후의 포집한 세균의 상태와 양을 나타내고 있다. 4시간 이후에는 약 75.2% 살균율을 보이고 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, CONTAM해석에서 실내 미생물오염원 저감을 위해 설정된 미생물 모델과 UVGI 모델은 실제 상황과 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.



(a) PCA Ager (b) PDA Ager

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

Table.3 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

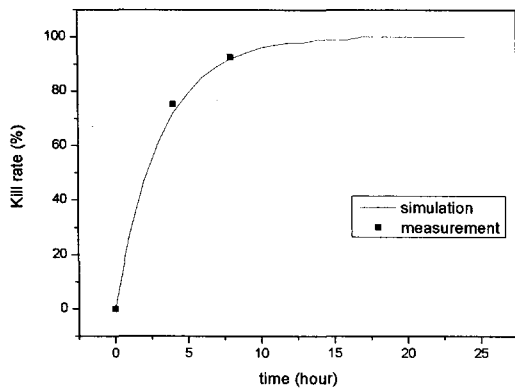


Fig.5 Kill rate w.r.t. time

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 통합설치 하여도 각각 별도로 설치하는 모델과 동일한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

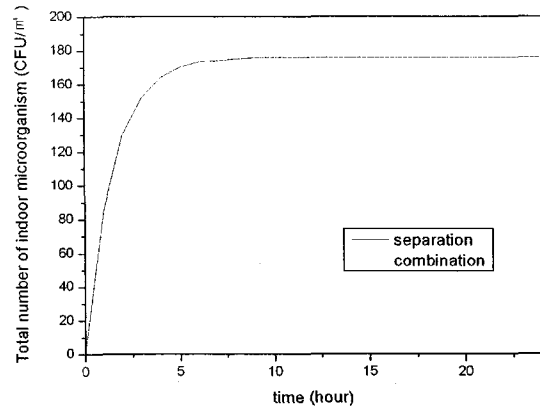


Fig.6 Simulation result in case of varying the filter and the UVGI location

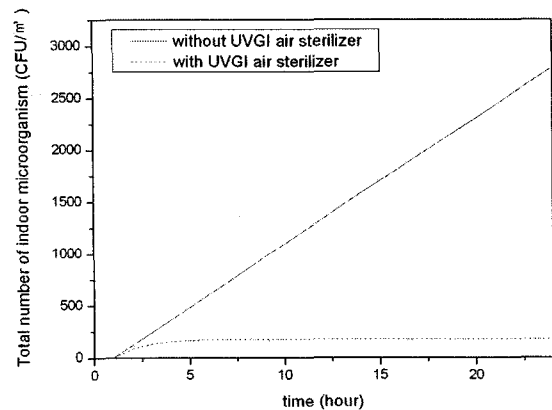


Fig. 7 Total number of indoor microorganism w.r.t. time in case of using and non-using UVGI air sterilizer with human contaminant source

Fig.7 에 보균자가 실내에 있는 경우 UVGI와 필터가 조합된 모델을 적용한 경우와 조합된 모델을 적용하지 않은 경우를 비교하였다. 결과에서도 보는 바와 같이 필터와 UVGI를 적용하지 않으면 제실자에 의해서 계속적으로 미생물오염원이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 UVGI air sterilizer을 사용하게 되면 계속 증가하는 미생물 오염량이 살균되어 일정 수준에서 유지되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 UVGI air sterilizer을 사용하면 계속 발생하는 미생물 오염에도 대처할 수 있다는 것을 나타낸다. 실제 보균자가 호흡을 통하여 계속적인 미생물오염원을 발생시킬 경우

에 오염원을 제거하는데 적합한 것을 알 수 있다.

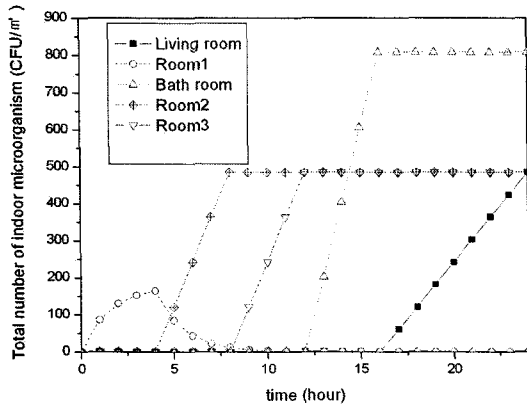


Fig.8 Simulation result in case of moving the human contaminant source

Fig.8 에 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 4시간째에 급격히 오염이 감소하는 것을 알 수 있다. Room2와 다음 4시간을 보내는 Room3에서는 재실과 동시에 증가하는 오염이 다음실로 이동하는 순간 바로 멈추게 되고, 오염원을 제거할 수 있는 수단이 설치되어 있지 않기 때문에 오염원 그대로 유지되는 것을 알 수 있다. Bath room의 경우는 다른 실과는 다르게 면적이 작기 때문에 오염 정도가 심한 것을 알 수 있으며 Living room의 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, 재실 시간 등에 부합하는 결과를 향후 실제 적용 모델에서도 도출할 수 있을 것이라 판단되고 있다.

4. 결론

환기해석프로그램인 CONTAM 2.4 를 사용하여 향후 현장실험이 어려운 실내 미생물 오염문제와 이를 방지하기 위한 면역건물(Immune Building)기술의 적용에 대한 설계 및 평가의 도

구로서 활용하기 위하여 실내미생물오염 전과방지를 위한 해석방법으로 멀티존 모델에 관한 연구를 진행하여 다음의 결과를 얻었다.

1. 실험실에서 진행된 미생물 오염원 살균실험과 멀티존모델을 이용한 시뮬레이션 결과는 살균율이 서로 잘 일치하였다.

2. 필터와 UVGI의 조합 모델은 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 모사할 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 오염문제와 오염원제거 및 미생물오염원의 이동에 따른 환기설계 활용 등 현장에서는 직접 실험하기 어려운 상황을 시뮬레이션으로 신뢰성 있게 해석할 수 있다고 판단되며, 이와 같은 멀티존 모델링기법이 면역건물(Immune Building)기술의 실제적용에 대한 설계 및 평가의 도구로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) S. G. Choi, J. K. Hong, 2005, "The study on the performance estimation of UVC air sterilizer for preventing transmission of air borne contagion", v.17n.6. , Journal of SAREK
- (2) CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation. , NISTIR 7251
- (3) DM. Lorenzetti., 2002, "Assessing multizone airflow simulation software", 267-271, Indoor Air
- (4) Li. H, M., 2002, "Validation of three multizone airflow models", MS, thesis, Concordia University.
- (5) Bratbak, G. A., Dundas, I. 1984. "Bacterial dry matter content and biomass estimations." Appl. Environ. Microbiol., 48,