

열에너지 활용 부유미생물 제어장치 설계 및 실험실 실내공기를 대상으로 한 성능측정에 관한 연구

김현건 · 황기병 · 이준현 · 이병욱*
건국대학교 공과대학 기계공학과 입자공학 및 생명공학 연구실
(2009년 4월 2일 접수, 2009년 8월 4일 채택)

A study of a thermal energy equipment for controlling airborne microorganisms in indoor laboratory environments

Hyun Geon Kim, Gi Byung Hwang, Jun Hyun Lee and Byung Uk Lee*
*Aerosol and Bioengineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering,
Konkuk University*

(Received 2 April 2009, accepted 4 August 2009)

Abstract

Airborne microorganisms, termed bioaerosols, are etiological agents of many respiratory and skin diseases. There are high demands of controlling the concentration of bioaerosols, specifically in indoor environments. Here, a new system for controlling indoor bioaerosols is designed and evaluated. An idea of a short time exposure to a thermal energy is used in the design of the equipment. The system was tested in laboratory environments. The experimental results show that the new system can reduce the concentration of viable bioaerosols of indoor laboratory environments.

Key words : Bioaerosols, Temperature, Thermal energy, Viability

1. 서 론

인터넷과 배달전송산업의 발달로 인해 사람이 실내에 머무르는 시간이 과거에 비해 증가된 것으로 조사되었다(Kang *et al.*, 2008). 현대인은 하루 중 80% 이상의 시간을, 사무실이나 학교, 집 등의 건물

내부, 지하상가, 지하철 등의 지하공간, 버스 등 차량 내부를 포함하는, 실내환경(indoor environments)에서 보내게 되면서 쾌적한 실내환경에 대한 관심이 증가하였다.

이에 따라 실내환경개선의 필요성이 증대되었고, 대한민국은 2003년에 지하생활공간 공기질 관리법을 개정한 다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법(Ministry of environment, 2003)을 제정하였다. 이 법의 실내 공기질 유지항목으로는 미세먼지(PM10), 이

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-450-4091, E-mail : leebu@konkuk.ac.kr

산화탄소(CO₂), 포름알데히드(HCHO), 일산화탄소(CO)와 총 부유세균이 있다.

그 중에서도 총부유세균 항목으로 규제되고 있는 부유미생물(airborne microorganism)은 호흡기, 피부 등에 부착하여, 알러지반응(allergic reaction), 독성반응(toxic reaction), 감염(infection) 등을 일으키며 각종 질환을 발생시킨다. 특히 병원 등의 의료환경에서는 부유 세균이 수술부위 및 환부, 혹은 의료도구에 낙하되어 이를 오염시켜 병원성 감염을 초래할 수 있는 것으로 알려지고 있다(Song *et al.*, 2007).

우리나라의 공기 중 부유미생물에 관한 규정은 현재 시작단계에 있는데, 의료기관과 보육시설, 산후조리원 등의 극히 한정된 장소에 총부유세균을 800 cfu/m³ 이하로 유지하라는 규정이 적용되고 있다. 그러나, 사람들이 많이 이용하는 영화관이나 노래방 등 규제가 적용되지 않는 시설을 조사한 결과, 조사한 시설 중 30~40%가 기준치를 초과한 부유세균이 검출되기도 하는 등(Ministry of environment, 2006), 이용객이 많은 시설들에 대한 규제의 확대에 대한 연구가 필요한 실정이다. 우리나라의 여름 기후는 고온다습하여 세균이 자라기에 좋은 조건을 갖추고 있으며, 특히 매년 중국에서 불어오는 황사에도 모래와 먼지뿐 아니라 미생물도 포함된 것으로 알려져 있음에 따라서(Yeo and Kim, 2002), 외국과는 다른 대한민국의 기후조건에 맞는 부유미생물에 대한 규제연구가 필요하다.

지금까지 부유미생물을 제어하기 위해서 자외선(Elmira *et al.*, 2006)이나 열에너지(Lee and Lee, 2005)를 활용하는 방안이 연구되었다. 자외선은 에너지 소모가 적는데 반해, 오존 등의 불순물을 만들어 내는 단점이 있으며, 열에너지는 부산물의 발생이 없으나, 에너지 소모가 큰 단점이 있다. 본 연구에서는 열에너지를 활용한 기존의 연구(Lee and Lee, 2005)를 참조하여, 에너지 소비를 줄이면서 효율적으로 실내공간의 부유미생물을 제어할 수 있는 장치를 설계하였다. 이를 활용하여 실험실 실내환경에서 부유미생물 생명성 제거효율을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 그림 1과 같은 내부체적이 약 3,168

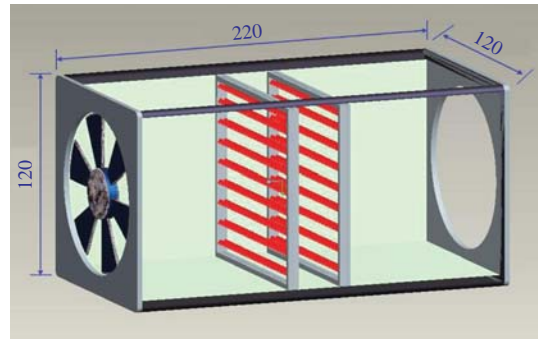


Figure 1. A schematic diagram of the bioaerosol control device using thermal energy.

cm³ (12 × 12 × 22 cm)인 박스형태의 제어장치를 설계 및 제작하였다. 장치의 한쪽 면과 그 반대쪽 면을 개방형으로 하고 팬(fan)을 장착해 연속유동이 가능하게 하였다. 제어장치 내부에는 코일형태의 열선을 입구에서 10 cm 지점과 15 cm 지점에 한곳에 두 겹씩 도합 4중으로 설치하여 이동중인 공기 중 부유미생물이 가능한 오래 열에너지의 영향을 받도록 하였다. 유동형성을 위해 사용된 팬은 최대 풍량이 120 CFM (=3,398 L/min)이면서 유량을 조절할 수 있는 DC팬을 사용하였으며, 이를 통해서 부유미생물이 열선부분을 통과하는 시간을 조절할 수 있게 하였다. 열선에 의한 내부온도는 최대 500°C까지 조절이 가능하며, 경로상에 여러 줄을 설치하여 단면상에 고른 온도분포를 가능하게 하였다.

그림 2는 본 실험에 사용된 전체 실험장치의 개략도이다. 실험은 24.7°C의 온도와 55.8%의 상대습도를 가지는 연구실에서, 실험 당시 연구실 부유미생물을 상대로 해서 이루어졌다. 컨트롤러의 열선 설정온도를 100°C와 150°C 조건으로 선택하여, 실험을 수행하였다. 각각의 설정조건에서 유속 0.8 m/s와 2.4 m/s로 두 가지 유속 변화를 주면서 실험을 수행하였으며 각 유속에서 부유미생물이 장치내부를 통과하는 시간은 약 0.275초와 0.092초이다. 각 조건들은 열에너지를 이용한 선행 연구(Lee and Lee, 2005)를 참고하여 설정하였다.

실험방법은 먼저 열선을 가열시켜 설정온도에 이를 때까지 기다린 후 팬을 가동시킨다. 그리고 장치 입구와 출구에 임팩터를 설치하고 5분간 가동 후 배지를 교체하는 방식으로 3회 반복 실험하였다.

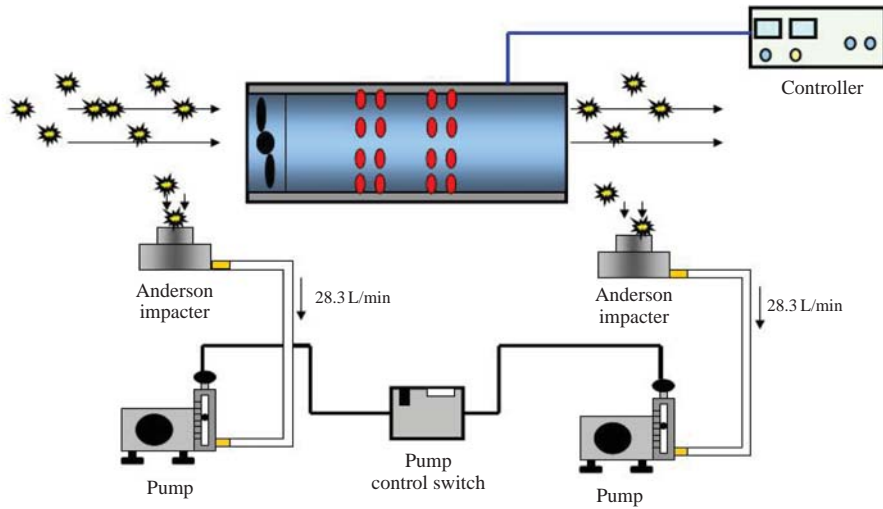


Figure 2. Experimental setup.

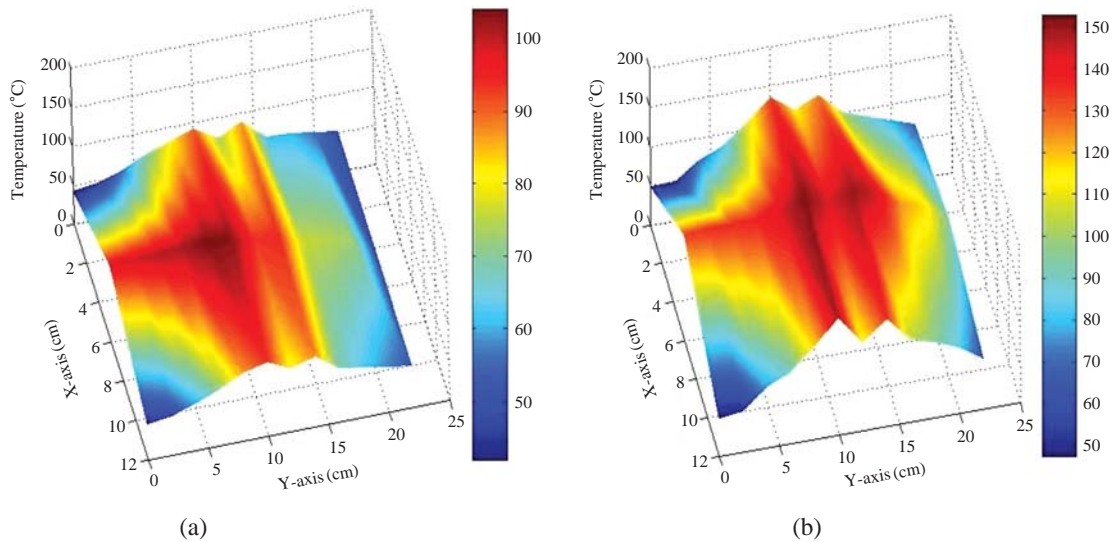


Figure 3. Temperature variation at the middle height of the control device, (a) (100°C, 0.8 m/s), (b) (150°C, 0.8 m/s).

그림 3은 설계한 제어장치 가동 중 내부의 온도분포를 나타내는데, 제어장치의 중간 높이, 즉 장치 내부 바닥에서 6 cm 떨어진 곳에서의 공기온도 측정치를 유동방향(Y-axis)과 너비방향(X-axis)에 따라 표현하였다. 이 온도분포는 제어장치 내부의 36군데의 온도를 디지털온도계 (sato, SK-1250MCIII α , Japan)를 사용하여 측정한 후, MATLAB 소프트웨어를 이

용하여 계산하였다. 그림 3에서 두 조건 모두 제어장치의 유동방향으로의 중간부위는 실험에서 설정한 설정온도에 근접한 온도분포를 보이나, 제어장치의 벽면으로 갈수록 온도가 낮아짐을 볼 수 있다. 이는 입구에 설치된 팬의 구조상, 팬의 날개들을 잡아주는 축 부위의 고정점 때문에, 제어장치 내부의 중심부위에 유동이 상대적으로 적어서, 열대류에 의한 열전달

량이 감소하여, 제어장치의 중앙부분의 유동의 온도가 상대적으로 높은 온도를 유지하기 때문인 것으로 설명된다.

2.2 측정장치

설계한 제어장치의 실험실 실내부유미생물 저감효과를 측정하기 위하여, 제어장치 입구와 출구에 앤더슨 임팩터(Andersen sampler)를 사용하여 부유미생물 농도를 측정하였다. 앤더슨 임팩터란 임팩터의 충돌판을 미생물 배지로 대체한 것으로, 공기중의 입자를 미생물 배지에 포집하여 배지를 배양하면 배지특성에 맞는 미생물만 콜로니(colony)를 형성하게 되는데, 형성된 콜로니의 개수와 사용한 유량측정을 통해서 공기 중 살아있는(culturable) 미생물의 농도를 계산하는 방식으로 활용되는 장치이다. 실험에 사용한 배지는 Malt Extract Agar를 사용한 배지로 주로 진균류의 배양에 사용되며 박테리아도 배양이 가능한 배지이다. 앤더슨 임팩터 측정실험에 사용한 펌프는 유량이 28.3 L/min인 정압펌프를 사용하였으며, 각 실험은 5분씩 진행하였다.

3. 결 과

그림 4는 각 조건에서의 부유미생물 저감효율을 나타낸다. 각각의 효율은 다음 식을 통해 계산하였다.

$$\text{Reduction ratio} = \left(1 - \frac{CFU_{out}}{CFU_{in}}\right) \times 100 (\%)$$

먼저 제어장치의 정확한 성능측정을 위해 열선을 가열하지 않은 상태에서 미생물농도를 측정하여 물리적 손실을 알아본 결과 약 3.03%의 물리적 손실이 있었다. 이 값은 3회 반복 실험한 결과를 평균한 것으로 입구와 출구에서 배지에 생성된 코로니는 평균 71개와 68개이다. 물리적 손실을 제외하면 150°C의 경우 80% 정도, 100°C의 경우 60% 정도의 제거율을 나타냈다. 부유미생물의 농도는 계절과 환기 및 환경조건에 따라 그 농도의 차이가 크다. 실험 당시 각 실험에서 배지에 나타난 콜로니가 입구의 경우 약 35개(247 CFU/m³)로 나타남에 따라, 각 실험마다 조금씩 차이는 있었지만 본 실험에선 약 35 CFU의 농도를 100% 농도로 설정하였다. 출구의 경우는 3~13

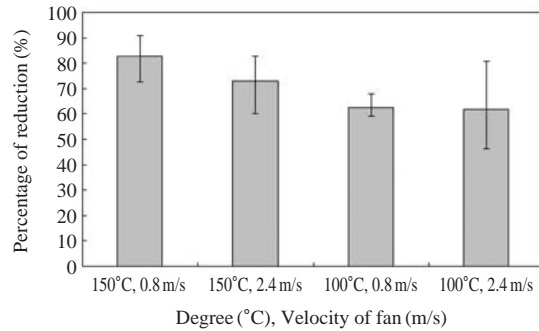


Figure 4. The CFU reduction of indoor laboratory airborne microorganisms by the control device.

개가 형성되었다. 이러한 콜로니의 숫자는 진균과 세균을 합한 숫자로서, 주로 진균이 나타났으나 소량의 세균도 포함되어 있어 진균과 세균이 모두 배양됨을 확인하였다.

온도에 따른 변화율을 살펴보면 100°C의 경우보다 150°C의 경우가, 부유미생물의 저감효율이 높음을 알 수 있다. 유속이 같은 경우에, 열선의 온도를 높게 유지한 실험조건에서, 저감효율이 더 높다는 것은, 고온일수록 보다 많은 부유미생물의 생명성을 제거할 수 있음을 나타낸다.

온도가 같은 경우에는, 유속이 느린 경우가 저감효율이 더 높다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해, 부유미생물 저감의 경우, 본 실험조건하에서는, 고온조건일수록, 노출시간이 길수록 생명성 저감효율이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

실험값의 편차는 3회 반복실험의 결과이며, 높은 유속에서는 편차가 40%까지 나타났고, 낮은 유속의 경우에는 편차가 20% 이하로 나타나서, 유속이 적을수록 실험값의 편차가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이는 본 실험조건에서 높은 유속의 경우, 실험장치 내부의 열선 등으로 인한 난류의 발생이 커져서, 부유미생물의 노출 정도의 변화가 심해져서, 편차가 심해진 것으로 설명할 수 있다. 참고로 케이스 내부의 레이놀즈 수는 유속이 0.8 m/s일 때 5800, 2.4 m/s일 때 17401이다. 즉 두 경우 모두 난류 발생영역이라고 할 수 있다.

다음으로 본 제어장치가 일반 실내환경에 설치되었을 경우, 실내공기의 온도를 상승시킬 가능성을 검토하기 위해서, 제어장치에서 열선에 의해 가열된 공

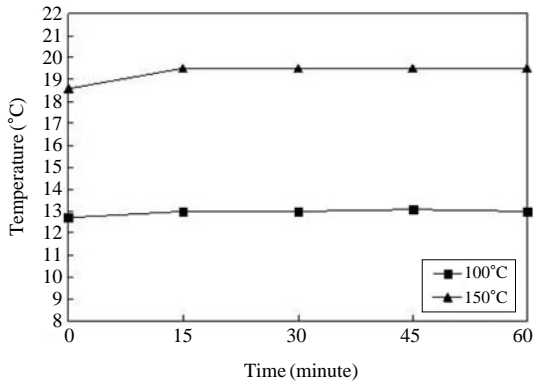


Figure 5. Temperature change in the room by the control device.

기가, 제어장치 외부의 실내공기온도에 미치는 영향을 알아보았다.

그림 5는 제어장치를 가동하는 동안의 실내온도 변화를 나타낸다. 실험은 약 143 m³ (6.5×8.8×2.5 m)의 넓이를 가지는 밀폐된 방 안에서 이루어졌다. 방 안에는 1인용 책상 9개 이외의 가구 등은 없었으며 온도 측정을 위한 사람 1명만 자리하였다. 이로 인한 온도상승이 있을 수 있으므로 장치 가동 전 30분 가량 온도를 체크하여 변화가 없음을 확인 후 실험을 시작하였다. 제어장치는 지면에서 0.7 m 높이의 책상 위에 설치하였고 책상은 방 한가운데에 위치하였다. 온도는 제어장치에서 1 m 떨어진 같은 높이의 사방(四方)에서 측정한 값을 평균한 것이다. 100°C의 경우 온도상승 폭이 0.3°C 정도였으며, 150°C의 경우 0.9°C 정도로 측정되었다. 온도상승폭이 그리 크지 않아 겨울에는 무시할 수 있을 정도이나 여름에는 냉방 효율에 어느 정도 영향을 미칠 것이라 생각된다.

4. 고 찰

본 연구에서는 열에너지를 활용하여 실험실 실내 부유미생물의 생명성(culturability)을 저감 시킬 수 있는 부유미생물 제어장치를 설계 및 제작하였다. 설계하는데 있어 에너지 소모를 줄이기 위해 Heat plate 나 적외선 램프 같은 전력소모가 큰 시스템은 지양하고 코일 형태의 열선을 발열장치로 선택하였다. 기

존장치 보다 사이즈를 줄이는 것 또한 에너지 소모를 줄이는 결과를 가져왔다.

제어장치 자체의 성능을 알아보기 위하여 기존의 여러 방식의 공기청정기의 성능평가 데이터(Na et al., 2005)와 비교해 본 결과, 본 연구의 제어장치가 비슷하거나 약간 더 높은 효율을 가진 것으로 보인다.

본 연구에서는 불특정 다수의 실험실 부유미생물을 대상으로 하였는데, 각 부유미생물 별로 생명성이 저감되는 온도 및 노출시간이 다를 가능성이 있으므로, 이를 추후에 조사하여, 존재하는 부유미생물의 종류별로 적합한 온도 범위 및 노출시간을 설정하기 위한 실험과 실내 부유미생물의 농도가 높을 때나 낮을 때 본 제어장치가 같은 저감효율을 나타낼 수 있는지에 대한 추가실험을 하여 실내환경 중의 부유미생물을 보다 효과적으로 제거하는 장치의 설계 및 제작 연구를 시행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 서울시 기술기반 구축(핵심)사업 지하역사 및 터널의 인공지능형 공기 질 제어 및 관리시스템개발에서 연구비 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

Elmira, K., Fatimah, M., Cody, J.H., Mark, H., and Shelly, L.M. (2006). UV air cleaner and upper-room air ultraviolet germicidal irradiation for controlling airborne bacteria and fungal spores, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3, 536-546.

Indoor air quality control in public use facilities. (2003). Ministry of environment, Republic of Korea.

Indoor air quality research in exceptional facilities. (2006). Ministry of environment, Republic of Korea.

Kang, N.J., Lee, J.H., and Oh, H.K. (2007). Change of the time use pattern by internet use: Analysis on the Korean time use survey, *Korean Journal of Communication and Information*, 41, 145-180.

Lee, B.U., and Lee, Y.H. (2005). Usage of the heating tube to control E. coli bacteria bioaerosols, *Particle and Aerosol Research*, 1, 39-45.

Na, K.H., Son, J.S., Sung, K.J., and Jang, Y.K. (2005). Com-

- parative efficiency evaluation of air cleaner for improving indoor air quality, *Environmental Impact Assessment Review*, 14, 109-115.
- Song, J.H., Min, J.Y., Jo, K.A., Yoon, Y.H., and Paik, N.W. (2007). A study on airborne microorganisms in hospitals on Seoul, Korea, *Korean Journal of Environmental Health*, 33, 104-114.
- Yeo, H.G., and Kim, J.H. (2002). SPM and fungal spores in the ambient air of west Korea during the Asian dust (Yellow sand) period, *Atmospheric Environment*, 36, 5437-5442.