

공기감염 전파방지를 위한 UVC 공기살균기 성능평가에 관한 연구

최 상 곤[†], 홍 진 관^{*}

경원대학교 대학원, *경원대학교 건축설비학과

The Study on the Performance Estimation of UVC Air Sterilizer for Preventing Transmission of Air Borne Contagion

Sang Gon Choi[†], Jin Kwan Hong^{*}

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

^{*}Department of Building Equipment & System Eng., Kyungwon University, Sungnam 461-701, Korea

(Received August 27, 2004; revision received April 8, 2005)

ABSTRACT: Recently, the use of UVGI system has been increasing in both medical and nonmedical buildings for the control of environmental microorganisms. In the present study, irradiance performance test of UVC lamp was carried out and indoor air sterilization effect of UV ray for preventing transmission of air borne contagion was investigated by using manufactured UVC air sterilizer. Experimental results show that the effective irradiance of UVC lamp is strongly dependent on air velocity and temperature in irradiance performance test. An individual microbiological killing effectiveness experiment also shows that the average kill rate of two microbiological samples such as bacteria and fungus is about 92% by using manufactured UVC air sterilizer. Additionally irradiance performance experimental results also show that the ballast is very important factor to keep up irradiance performance of UVC lamp.

Key words: UVGI(자외선 살균), Bacteria(세균), Fungus(진균), Air sterilizer performance(공기 살균기 성능), Air borne contagion(공기감염), Ballast(안정기)

기 호 설 명

K : 미생물의 표준율 상수 [$\text{cm}^2/\mu\text{W}\cdot\text{s}$]
 E_{eff} : 미생물이 받는 유효조사량 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
 $Dose$: E_{eff} 와 Δt 의 곱, 조사량($\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)
 N_0 : 조사전 미생물의 수

N_t : t 시간 후의 미생물의 수

1. 서 론

유행성 호흡기 질환이 전국적으로 유행하게 되면, 다른 병으로 병원에 방문하였다가 유행하는 질환에 감염이 되었다는 불평을 간혹 듣게 된다. 이러한 병원외 2차감염이 미국 등 선진국에서 사망순위 4위를 차지하는 등 사회문제로 대두되고 있고, 대다수 국민들이 인지하고 있지는 못하지만 국내에도 심각한 상황에 처해 있다.

[†] Corresponding author

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

E-mail address: tool007@lycos.co.kr

보건복지부는 산하 한국보건의료관리 연구원을 통해 최근 3개월간 국내 15개 종합병원(서울 12개, 지방 3개)에서 퇴원한 환자 85,547명을 대상으로 병원감염 발생률을 조사한 결과 3.74%인 3,164명이 세균에 감염되었으며, 이들 중 10.7%가 중환자실에서 치료를 받다가 2차감염된 것으로 밝혀졌다. 주된 감염균으로는 폐렴 등을 유발하는 포도상구균이 17.2%로 가장 많았고, 녹농균 14.4%, 대장균 12.3%, 폐렴간균 7.7% 등의 순으로 나타나고 있다.

특히 폐렴을 유발하는 포도상구균은 공기를 매개로 하여 전파되며, 보균자의 사소한 기침이나 호흡, 대화중에도 공기를 매개로 하여 주위의 재실자를 감염시킬 수 있다. 이러한 공기감염을 유발하는 2차감염균인 포도상구균, 대장균 등의 일반세균과 진균을 살균제거하기 위하여 연구를 진행하였다. 2차감염 방지장치의 설계를 위한 살균방안으로 UVC를 적용하였으며, 국내에서는 UVC의 성능 및 적용에 대한 기초연구와 적용실험 등이 미비한 관계로 UVC의 적용에 대한 조사성능실험을 먼저 수행하였다. 이러한 UVC의 조사성능실험을 바탕으로 2차감염 방지용의 UVC 공기살균기를 설계 제작하고 현장실험을 통하여 살균성능을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 UVC 조사성능 실험장치

공기의 온습도, 기류속도 등의 조건변화에 따른 UVC의 조사성능평가를 위해서 먼저 온습도를 조절할 수 있는 인공기후실을 제작하였다. 제작된 인공기후실은 항온항습기를 통하여 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 온도와 $\pm 1\%$ 의 상대습도를 유지할 수 있도록 하였다. 인공기후실은 상부의 토출구로부터 각각의 토출구의 풍량을 일정하게 유지하도록 하였으며, 인공기후실 내부의 실내 순환공기는 측벽을 통하여 항온항습기로 다시 유입되도록 하였다. 인공기후실 내부의 온도는 4개소에 T type 열전대를 설치하여 온도를 측정하였고, GHP-20T Type의 습도센서를 4개소에 설치하여 상대습도를 측정하였다. 조사성능실험에 사용된 UVC 램프(Lamp)는 일본 Sankyo사의 모델명 G35T로 출

력은 35 Watt이며 외경 15 mm, 길이 860 mm인 UVC 램프를 사용하였다.

UVC 조사성능 실험장치는 온습도를 조절할 수 있는 인공기후실 내부에 직경 800 mm, 살두께 5 mm인 아크릴 원통을 지면에서 1.2 m 높이에 설치하고 입구와 출구에 공기흡입용 팬과 단면 기류속도를 균일하게 하기 위해서 3단의 천공판과 허니컴을 직렬로 연결하였다. 기류속도는 팬을 회전수를 제어하여 실험조건 1~3m/sec 범위 내에서 조절할 수 있도록 하였으며 아크릴 원통의 중심에 실험용 UVC 램프를 축방향으로 설치하고 표면으로부터 수직이격거리에 따른 자외선 조사강도를 측정할 수 있도록 자외선 조사강도 센서의 수광부를 이동하기 위한 정밀한 수직이송장치를 설치하였다. 인공기후실 실내의 온도를 변화시켰을 경우 약 1시간 정도 지나면 온도와 습도가 완전히 안정화되고, 인공기후실 내에 설치된 UVC 조사성능 실험장치의 풍속을 변화시켰을 경우 약 20분의 시간이 지나면 기후실 내의 온도와 습도가 완전히 안정화하는 것을 예비실험을 통해 확인하였다. 그러므로 온도변화시는 1시간을 풍속변화시는 경우 약 20분을 정상상태에 도달하도록 안정기를 거친 후 실험을 수행하였다.

UVC 공기살균기의 설계를 위해 먼저 제작에 사용할 UVC 램프의 조사성능을 파악하기 위한 성능평가실험을 UVC 조사성능 실험장치로 수행하였다. 실험조건은 기후실 내부의 온도를 15°C 에서 30°C 까지 변화시키면서, 각각의 실내부온도에서 UVC 램프 주위의 통과 기류속도를 1m/s에서 3m/s까지 변화시킬 경우 각각의 조건에서 UVC 램프의 표면에서 수직으로 0.2 mm에서 210 mm 떨어진 곳까지 10 mm 간격으로 UVC의 조사강도를 측정하였다.

2.1.2 2차감염 방지기 제작

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

$$\frac{N_t}{N_0} = \exp(-kE_{eff} \cdot \Delta t) = \exp(-k \cdot Dose) \quad (1)$$

위와 같이 정의하는 경우 시간 t 후의 미생물의 사멸률은 $(1 - N_t/N_0)$ 으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 공기살균기를 설계하는 대상 병원성 미생물로 녹농균(*Pseudomonas aeruginosa*)을 선정하였으며, 그 이유는 포도상구균(*Staphylococcus aureus*), 대장균(*E. coli*)의 경우를 비교해 볼 때 공기 중에서 녹농균의 UVC 조사강도에 대한 저항이 앞서 열거한 다른 균에 비해 상대적으로 큰 것으로 알려져 있기 때문이다. 즉 녹농균을 대상으로 99% 이상의 살균성능을 발휘할 수 있도록 설계하면 앞서 열거한 포도상구균이나 대장균의 경우에는 모두 그 이상의 살균성능을 만족할 수 있을 것으로 예상할 수 있기 때문이다.⁽¹⁾

공기살균기 내부에 UVC 램프 2개를 병렬로 설치하고, UVC의 반사성능을 최대한 높일 수 있도록 살균기의 내부 표면에 알루미늄 전해연마판을 설치하였다. 실험자가 내부팬 속도를 조절하여 살균기를 통과하는 풍량을 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였다. 제작된 장치는 상부에 팬을 설치하고, 프리필터를 통하여 UVC 램프를 지나 하부의 그릴을 통하여 배기하여, 거주역의 공기를 효과적으로 포집하여 살균할 수 있도록 하였다.

2.2 현장 살균 성능평가 실험

현장에서의 성능평가를 위해 상용된 장비의 사양을 Table 1에 나타내었다. 현장 성능평가는 제작된 공기살균기를 가동하지 않은 상태에서 약 5개의 샘플링 위치를 선정하고 각 위치에서 공기를 샘플링하였다. 또 공기살균기가 실내 부유세균의 분포에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 공기살균기를 동작시킨 후 8시간이 지난 상태에서 살균기 토출구로부터 각각 20, 30, 40, 50 cm 이격된 위치에서 샘플링을 실시하였다.

시험에 사용된 배지는 일반 세균용으로 PCA (Plate Count Agar, USA, Difco)를 진균용으로 PDA (Potato Dextrose Ager, USA, Difco)를 사용하였다. 각각의 배지는 Air Sampler가 포집한

공기 100 L에 대한 공기 중의 부유세균을 포집한 것으로 하여 72시간의 배양을 거치도록 하였다. 배양이 완료된 배지에 대하여 집락수를 개수하고 각각의 개소에 대하여 합산 후 평균을 내는 방식으로 세균과 진균에 대한 오염도를 측정하였다.

측정된 샘플의 오염도는 공기 100 L당 오염 정도를 나타내고 있으므로 단위체적에 대하여 CFU/m³으로 나타낼 수 있도록 환산하였으며, 이때 Air Sampler에 대한 보정값을 사용하여 오염도를 보정할 수 있도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 UVC 조사 성능평가 결과

Fig. 1은 램프로 부터의 수직이격거리 0.2 mm 인점에서 주위 공기온도와 속도변화에 대한 조사강도의 변화를 나타내고 있다. 주위온도가 낮을수록 일정 풍속(1.0 m/s) 이상에서 조사량의 값이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 30℃일 경우 풍속이 증가함에 따라 상대적으로 램프 표면의 냉각이 원활하여 자외선 조사강도가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 실험결과에서 램프

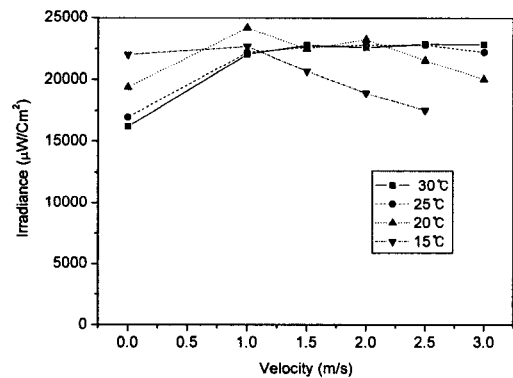


Fig. 1 Irradiance w.r.t. air velocity for values of temperature.

Table 1 Specification of experimental instrument

Instrument	Maker	Specification
Sampl' air (mK ²)	France AES	Flow rate 100 L/min, Tolerances ±5% Innner diameter 90 mm Temperature tolerances 0~20℃ ±0.1, 20~50℃ ±0.2 Pan counter, resister counter, 220 V
Petri dish	Korea, SPL	
Incubator	Korea, Balmann Tech.	
Colony counter	Korea, Chang Shin	

표면의 온도가 45°C 부근에 도달할 때 조사강도가 최대가 됨을 알 수 있었다. 또한, 램프 주위 공기온도가 변화할 경우에 대하여 램프 발열에 대한 생각이 적절한 경우 조사강도가 최대가 되며, 특히 주변온도가 15~20°C 낮아질 경우에는 통과풍속이 증가함에 따라 램프 표면을 과냉각시켜 오히려 자외선 강도가 낮아지는 램프 특성을 갖는 것을 알 수 있는데 이와 같은 결과는 Varnosdell and Foarde의 실험결과⁽²⁾와 Hong의 실험 결과에서도 유사한 경향으로 나타나고 있다.⁽³⁻⁴⁾

Fig. 2와 Fig. 3은 인공기후실 온도 20°C, 통과풍속 3 m/s로 UVC 램프 조사성능 실험장치를 20°C 조건에서 충분히 순환시킨 후 UVC 램프 조사성능 실험장치의 송풍기를 정지시켜 통과풍속을 0 m/s인 정지상태에서 인공기후실온도를 15°C로 저하시켰을 경우 램프 주위의 온도와 전압 및 전류의 변화를 나타내었다.

인공기후실 내의 공기온도가 15°C로 변화되고 있는 상태에서 램프의 표면온도 약 54°C에서 약 63°C까지, 전압 76 V에서 70 V까지 급격히 변화하였다가 인공기후실의 온도가 점차 15°C로 하강함에 따라 램프의 표면온도, 전압, 전류가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 온도변화 초기에는 통과풍속이 0 m/s가 되면서 램프 주위공기가 정체됨에 따라 주위공기의 온도가 상승하게 됨과 동시에 램프 표면온도도 동반 상승하게 되고, 이때 램프의 전압은 상대적으로 하강하게 되어 램프의 작동을 안정시켜 주는 것을 알 수 있다. 또한 램프 표면온도가 점차 안정되어 감에 따라 안정기 이후의 램프 입력전압과 전류는 더욱 하강하는 것을 볼 수 있으며, 램프가 안정되면 안정기 이후의 램프 입력전압과 전류가 최소값에 도달하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 통과풍속을 0 m/s에서 1 m/s

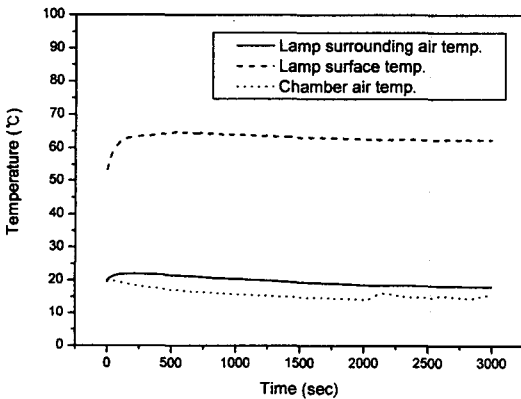


Fig. 2 Temperature variation w.r.t. time.

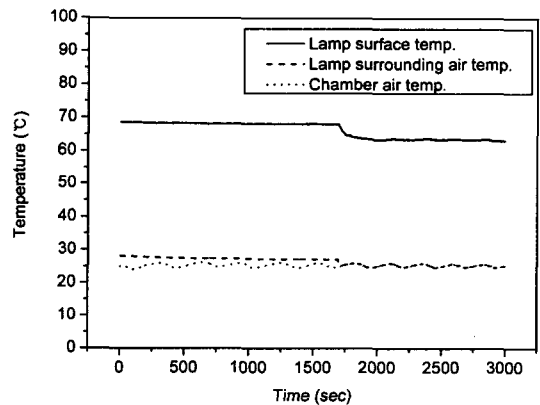


Fig. 4 Temperature variation w.r.t. time.

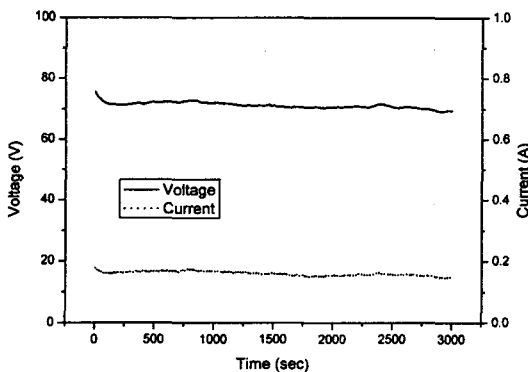


Fig. 3 Lamp blaster inlet voltage and current variation w.r.t. time.

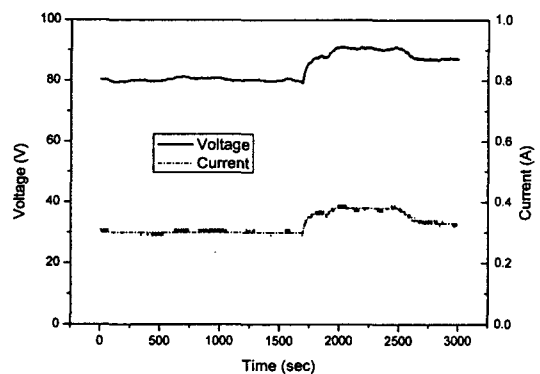


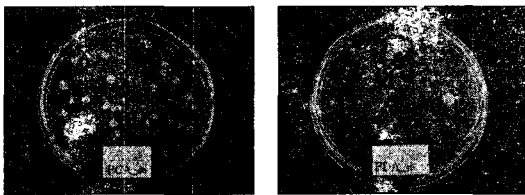
Fig. 5 Lamp blaster inlet voltage and current variation w.r.t. time.

로 변화시켰을 경우에 대해서 램프의 표면온도와 램프 주변공기온도 및 램프 입력전압과 전류의 변화를 나타내고 있다. 주위공기의 온도와 기류의 상태에 따라 램프의 발열량은 상당히 큰 변화를 나타내며, 주변조건의 변화에 따라 앞서 설명한 바와 같이 항상 최적운전조건인 45℃로 램프가 작동될 수는 없기 때문에 램프의 조사강도는 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 주위공기온도와 속도에 따라 다른 조사강도 특성을 보여주고 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 동일한 온도 조건에서 0 m/s에서 1 m/s로 통과풍속이 상대적으로 증가할 경우 속도증가에 따른 냉각으로 표면온도가 상대적으로 낮아질 것으로 예상되며 이 경우 표면온도가 일정해져서 램프가 안정될 수 있도록 입력전압과 전류가 반대로 상승하여, 램프 표면에서 일어나는 열전달량만큼 보상하여 주는 것을 알 수 있다.

따라서 램프의 작동시 입력전압과 전류를 적절히 조절하는 역할을 하는 안정기가 자외선 조사강도를 일정한 수준으로 높게 유지하는 데 중요한 요소임을 확인시켜 주는 실험결과로 생각된다.

3.2 공기살균기 현장 살균 성능평가 결과

Fig. 6은 공기살균기 가동 전 현장에서 포집한 부유세균을 배양한 사진을 나타내고 있다. 포집된 세균량에 대한 실험결과를 Table 2에 정리하



(a) PCA ager (b) PDA ager

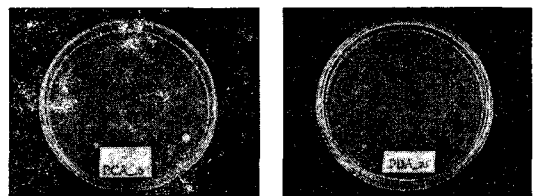
Fig. 6 Photograph of test result in the case of non-running UV-C air sterilizer.

Table 2 Test result in the case of non-running UVC air isticilizer

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

었다. Table 2에서와 같이 실내의 부유세균의 평균치는 공기 전염성 일반 부유세균이 570 CFU/m³으로 나타났으며, 일반 진균은 410 CFU/m³으로 나타났다. 이는 대상 실험공간에서 포집한 모든 균의 수를 배양접시(Petridish)의 수로 나누어 평균을 한 값이다. 또한 Air Sampler는 공기를 1분 동안 100 L를 흡입하여 배양접시에 충돌시키는 방법으로 세균을 포집하므로 낙하법에 의한 경우보다 일반적으로 더 많은 양의 세균 수가 포집되게 되는데 이것은 공기 중의 낙하되지 않는 부유균을 흡입하여 배지에 충돌시켜서 포집하는 Air Sampler에 의한 세균포집의 특성으로 볼 수 있다.

Fig. 7은 시험제작된 공기살균기 가동 8시간 이후에 현장에서 포집한 세균을 배양한 사진을 나타내고 있다. 또한, 살균기 가동 8시간 경과 후의 포집한 세균량에 대한 실험결과를 Table 3에서 보여주고 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 측정공간에서 시험제작된 공기살균기에 의한 살균 성능평가를 위하여 살균기의 공기 토출구로부터 20 cm로부터 10 cm 간격으로 50 cm 위치까지 측정된 결과를 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 살균기에서 이격거리가 20 cm인 살균기의 출구 바로 앞에서는 세균과 진균의 평균 살균율은 약 96.2% 보이고, 이격거리가 30 cm일 경우는 약 89.4%, 40 cm일 경우 89.6%, 50 cm인 경우 95.5%



(a) PCA ager (b) PDA ager

Fig. 7 Photograph of test result in the case of 8 hours running UV-C air sterilizer.

Table 3 Test result in the case of 8 hours running UVC air sterilizer

Strain	Distance (cm)				Average kill rate (%)
	20	30	40	50	
Bacteria (CFU/m ³)	30	80	50	10	92.6
Kill rate (%)	94.8	86.0	91.3	98.2	
Fungus (CFU/m ³)	10	30	50	30	92.7
Kill rate (%)	97.6	92.7	87.9	92.7	

를 보이고 있다. 이것은 살균기 출구에서는 살균이 된 공기의 양이 상대적으로 높게 분포되기 때문이다. 다시 말하면 살균기의 출구에서 형성된 기류에 의해 주위의 공기가 유인될 때 살균기의 출구에서 나오는 살균공기의 양이 상대적으로 많은 곳인 20 cm가 이격된 위치의 살균율이 높고, 주위공기가 유인되어 혼합되는 정도가 큰 30 cm, 40 cm 이격된 위치의 살균율이 89.6%로 상대적으로 낮아지게 되며, 살균기를 통과한 출구공기의 영향이 많이 미치지 않는 50 cm 이격된 위치의 살균율이 95.5%로 다시 높아지는 것을 알 수 있다. 이것은 살균기의 작동에 의해 실내의 살균이 된다는 사실뿐만 아니라 살균기에 의하여 발생되는 기류가 실내의 유동에 영향을 주게 되어, 전체 실내의 공기가 정체하지 않고 살균기를 통과하는 공기가 주위의 공기를 유인하게 됨으로써 공기 중의 인접한 부유세균이 유동하게 하고 이렇게 유동된 부유세균은 살균기에 의해 살균되도록 유도되는 것을 알 수 있다. 따라서 살균기를 설치하는 위치에 따라 시간경과에 따른 살균공기의 공간적 분포는 다소 달라질 수 있으며, 오랜 시간이 경과되면 실 전체의 살균에 도달할 수 있음을 알 수 있다. 본 현장실험에서도 초기에 공간에 따른 살균 성능의 차이는 있었으나 시간이 24 시간 이상 경과될 경우 목표치 99% 이상의 살균 성능을 가짐을 확인할 수 있었고 이 경우에는 측정대상실의 환기횟수에 해당하는 풍량범위에서 목표로 하는 살균율(99%)을 얻기 위해서 요구되는 UVC 램프의 조사강도의 범위를 살균 대상균의 종류에 따라 다르게 설정해야 한다는 사실과 살균 대상균의 종류와 UVC 램프의 조사강도, 풍량범위 등 공기살균기 제작에 필요한 주된 설계인자의 상관관계를 파악할 수 있었다.

4. 결 론

시험용으로 제작된 2차감염 방지용 공기살균기에 있어 UVC 램프의 사양에 따른 안정기의 역할이 중요한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 국내 벤처기업에서 개발한 안정기를 사용한 외산 UVC 램프에 대한 조사강도 측정실험을 수행하였다. 다양한 UVC 램프와 안정기의 조합에 의한

실험결과 UVC 램프에 부합되는 안정기에 대한 사양과 선택이 공기살균기의 성능을 유지하기 위해서 반드시 선결되어야 할 부분으로 판단된다.

또한 동일한 풍량조건에서 공기살균기를 통과하는 공기가 살균기 내부에서 정체하는 시간을 늘려 주는 것이 살균기의 성능에 미치는 효과를 것으로 예상되어 정체되는 시간을 증가시키는 구조로 하는 것이 검토되어야 할 것으로 판단된다. 실험결과를 보면 2차감염 방지용 공기살균기는 실험대상 공간에 대하여 온도와 습도 및 기류조건에 따라 달라진다. 특히 살균대상 실의 온도 25℃, 상대습도 50%, 공기살균기 통과풍속 1 m/s에서 동작시간을 증가할 경우 99% 이상의 공기살균력을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 향후 다양한 대상공간에서의 다양한 주위공기의 온도와 기류조건이 주어지는 실내 공기환경에서 2차감염 방지용 공기살균기 설계에 대한 기본적인 설계자료로서의 가치가 있다고 생각된다.

참고문헌

1. Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P., Whittam, D. L., Severin, B. F. and Whittam, T. S., 2000, Mathematical modelling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection, *Quantitative Microbiology*, Vol. 2, pp. 249-270.
2. Vanosdell, D. and Foad, K., 2002.11, Defining the effectiveness of UV lamps installed in circulating air ductwork, *Final Report ARTI-21CR/610-40030-01*.
3. Hong, J. K., 2004, Experimental study on the irradiation and surface sterilization effect of ultra violet ray in air conditioning system, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 250-257.
4. Hong, J. K., 2002, Development of anti-bacterial and deodorization air-conditioning system by using UV light, *Industry University Cooperation Final Report of Seong Nam City*.