Journal of KIAEBS Vol.14, No.6, December pp. 756-766

RESEARCH ARTICLE

환기장치를 대상으로 한 405 nm LED 모듈의 부유 및 표면 미생물 저감 성능 평가

방종일[1] · 김지희[2] · 최안섭[3] · 성민기[3*]

[1]세종대학교 건축공학과 석박사통합과정, [2]세종대학교 건축공학과 석사과정, [3]세종대학교 건축공학과 교수

Evaluation of Reduction Performance of 405 nm LED Module for Airborne and Surface Microorganisms on Ventilation System

Bang, Jong-Il[1] · Kim, Ji-Hi[2] · Choi, An-Seop[3] · Sung, Min-Ki[3*]

[1]Ph.D candidate, Department of Architectural Engineering, Sejong University, Seoul, Korea
[2]Master candidate, Department of Architectural Engineering, Sejong University, Seoul, Korea
[3]Professor, Ph D, Department of Architectural Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

***Corresponding author:** Sung, Min-Ki, Tel: +82-2-3408-4037, E-mail: mksung@sejong.ac.kr

ABSTRACT

Microbial damage and contamination in apartment buildings causes respiratory and skin diseases to occupants and may cause aesthetic damage to buildings. Remedying microbial damage in apartment buildings requires a lot of time and money, expertise and the process is complex. In this study, the possibility of microbial control was confirmed by applying the 405 nm LED module to the ventilation system for apartment buildings. The ventilation system has been used for one year, and the contamination condition was confirmed visually. A 405 nm LED module developed for ventilation systems was installed on the OA side to confirm the reduction effect of airborne microorganisms from outdoor air and the microbial contamination that may occur inside the ventilation system. The airborne microorganisms were sampled from the outside air and supply air diffuser. Also, the surface microorganisms were observed by sampling from the Pre, HEPA filter and the heat exchange element surface. In terms of the overall reduction rate, surface bacteria were reduced by 45% and surface mold by 90% after the LED was irradiated for 3 weeks. In the case of airborne microorganisms, both bacteria and mold were reduced by 71%. The heat exchange efficiency was 95% on average before and after LED module installation. Therefore, it was confirmed that microorganism control is possible with an LED module using 405 nm visible light, but long-term irradiation is required.

주요어 : 부유 및 표면 미생물, 405 nm LED 모듈, 저감성능, 환기장치

Keywords: Airborne and surface microorganisms, 405 nm LED module, Reduction performance, Ventilation system

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 December, 14(6): 756-766
https://doi.org/10.22696/jkiaebs.20200064

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: November 13, 2020
Revised: December 11, 2020
Accepted: December 13, 2020

Ⓒ 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

실내공기질과 관련하여 국내에서는 실내공기질 관리법을 통해 공기 중 오염물질 농도에 대한 권고 및 유지 기준 등을 제시하고 있다. 특히, 이러한 오염물질 중에서 미생물에 대한 주의와 대처 방안이 요구된다. 최근 발생한 코로나와 같은 감염균도 미생물의 한 종류로 볼 수 있으며 병원시설과 같은 의료기관에서는 적절한 대응 및 제어 방안, 가이드라인이 제시되어 있다. 앞서 언급한 실내공기질 관리법에서도 부유 곰팡이는 권고기준에 500 CFU/m^3 이하, 부유 세균은 유지기준에 800 CFU/m^3이하 로 제시되어있다. 하지만 이는 의료기관 및 어린이집과 같은 민감시설에만 적용되며 거주자가 생활, 휴식 및 수면을 취하는 공동주택을 대상으로는 별도의 기준이 없는 상태이다. 공동주택에서 발생하는 미생물 피해는 주로 곰팡이 피해로 공동주택 내 거주자의 생활 방식과 관련이 있다. 이러한 곰팡이 피해는 결로, 누수 등으로 인한 건물의 미관상 피해를 발생시키며 거주자에게는 호흡기 및 피부 질환을 야기하고, 피해를 인지하기까지의 시간도 많이 소요된다. Bang et al. (2017)에서 공동주택 내 곰팡이 피해는 빨래, 환기빈도, 공기청정기 유무와 같은 거주자의 생활패턴과 관련이 있으며 계절에 따른 실내외 부유 곰팡이 농도 비교를 통해 곰팡이 피해의 원인을 규명하였다. 또한 Bang et al. (2016)에서는 공동주택의 기밀성능 평가 결과에서 신축 공동주택은 준수한 기밀성능을 나타냈음에도 실내외 부유 곰팡이 농도 비교를 통해 외부에서 실내로 곰팡이가 유입되어 피해를 야기할 수 있음을 나타냈다. Hwang et al. (2015)에서는 공동주택에서 발생하는 미생물 피해 및 오염에 대해 환기설비 중 덕트 내부의 오염도 조사를 통해 부유 세균 및 곰팡이 현황을 나타냈고 공동주택 내 외벽, 천장, 바닥 등 실내 표면뿐만 아니라 환기장치 내부 미생물 관리의 필요성을 강조하였다. 이에 따라 곰팡이 피해 복구 전문 업체를 통한 복구공사, 피해 발생 부위 교체 등의 보수공사 및 항균·항곰팡이 자재 사용, 자외선을 통한 미생물 살균 등 여러 방안이 활용되고 있으나 이는 실제 거주자가 접근하기 어렵고 복잡하여 뚜렷한 대응 방안이 요구된다.

미생물 살균에는 자외선(Ultraviolet)이 더 효과적인 것으로 알려져 있으나(Kowalski, 2010) 자외선은 인체에 조사될 시 피부 및 안구 질환을 유발할 수 있으며 열화의 문제로 인해 사용성의 제한이 많다. UV-LED 또한 하나의 방안으로 제시되고 있으나 높은 비용이 들고, 실제 현장 적용에 대한 검증이 필요하다. 이에 따라 최근 미생물 살균에 405 nm 가시광 LED (Lighting Emitting Diode)를 활용하는 연구가 진행되고 있다. Murdoch et al. (2012)에서는 405 nm 가시광을 이용하여 Escherichia, Salmonella, mycobacterium 종별로 살균실험을 진행하였다. 균 종류별로 살균효과는 다양하였으나 자외선이 아닌 파장으로 살균하는 방식에 대해서 활용할 수 있는 잠재성을 높게 평가하였다. 또한, Maclean et al. (2009)의 연구결과에서는 11×9 배열로 고강도 405 nm LED 모듈을 사용하여 균 종류에 따른 살균성능을 실험하였다. 이를 기존 연구에서 진행한 UV-C 파장의 살균효과와 비교하였을 때 수치상 살균효과가 10^3배 정도 UV-C가 높게 나타났지만 UV-C에 비해 가시광 LED는 쉽게 다룰 수 있고 안정성이 우수하여 활용성을 높게 평가하였다. 405 nm LED를 이용한 살균은 개발단계이므로 UV만큼 효율을 기대하기는 어렵지만 추가적인 실험과 연구를 통해 식품, 표면, 공기, 의료 분야에 적용 가능할 것으로 사료된다. 현재까지 405 nm LED를 이용한 미생물 살균 검증은 배지에서 균 종류에 따라 진행되었

으나 실제 현장에서의 검증은 부족한 실정이다. Bang et al. (2019)과 Kim et al. (2019)에서는 각각 환기장치와 실제 공동주택 곰팡이 피해에 405 nm LED를 적용하여 살균효과를 분석하였다. 효과는 분명하였지만 단시간 조사를 통한 결과로써 장시간 조사에 대한 살균효과 검증이 요구된다. LED는 가시광선으로써 인체에 무해하며, 이는 조명 기구의 크기에 상관없이 협소한 공간에도 적용이 가능하다. 또한 조명환경 측면에서도 효율이 높고 실내에 사용되는 조명기구에 적용 시 디자인 및 실용성 측면에서도 활용 기대성이 높다고 볼 수 있다.

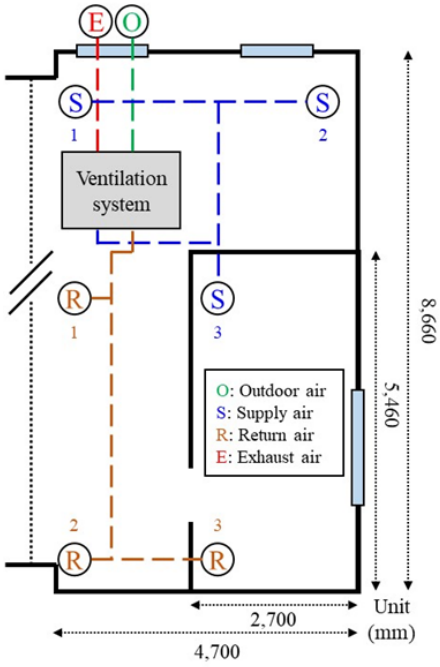
따라서 본 연구에서는 405 nm LED 모듈을 공동주택용 환기장치에 설치하여 환기장치 내부(필터 및 열교환 소자 표면)에 발생한 미생물 오염과 외부에서 유입되는 미생물에 대해 저감 성능을 평가하였다. 이는 실제 공동주택에서 발생하는 곰팡이 오염에 대한 제어 수단이 될 수 있으며, 복잡하고 어려운 과정의 복구 방안에 비해 기존 거주자에게 쉽고 접근성이 편리한 방안이 될 것이라 판단된다.

측정개요

실제 공동주택의 환기장치를 대상으로 한 오염도 조사는 사전연구(Bang et al., 2019)에서 확인되었다. 또한 사전연구에서 실험대상으로 사용한 환기장치는 새 제품이며, 실험을 위해 약 2주간 연속 가동한 상태에서 405 nm LED 모듈의 저감 성능 실험을 진행하였다. 2주간의 가동으로 작은 규모의 오염이 발생하였고, 이에 대한 405 nm LED 모듈의 단시간(1일, 2일) 가동에 따른 필터 표면의 미생물 저감 효과를 확인하였다. 하지만 가시광을 통한 미생물 저감 평가이기 때문에 장시간 조사를 통해 확인할 필요가 있으며, 새 제품이 아닌 실제 사용에 의한 오염을 제어할 수 있는지 확인이 필요하다. 이에 따라 환기장치 내부 필터 및 소자 표면뿐만 아니라 환기장치 가동을 통해 공기 중 미생물에 대해서도 저감 성능을 평가하고자 한다.

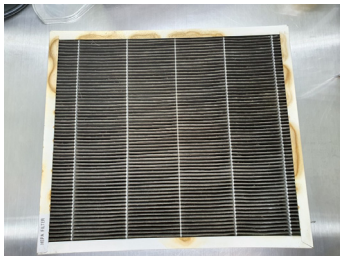
측정대상

본 연구에서는 실제 공동주택의 환경을 반영하기 위해 약 1년간 연속 가동한 환기장치(2019년 10월 설치)를 대상으로 실험을 진행하였다. 실험은 총 한 달간 진행되었으며, 405 nm LED 모듈 가동 전 control case를 시작으로 주 1회씩 실험을 진행하여 405 nm LED 모듈의 저감 성능을 평가하였다. 환기장치는 Figure 1(a)와 같이 실험실에 설치되었으며 실내에는 급기 디퓨저 3개(사무공간 2개, 내부 실 1개), 배기 디퓨저 3개(출입구 방향)가 배치되어있다. 해당 장치 사용 중에는 필터교체 등 별도의 보수작업은 진행되지 않았다. 실험 중에도 이전 사용과 동일하게 100% 외기도입 및 최대풍량으로 연속 가동하였다. 이때, 사무공간에서 실험을 진행했기 때문에 공동주택 내부와 유사한 환경을 조성하였으며, 실험실 내 장비의 발열 등을 고려하여 실내는 항상 일정한 온습도(평균 온도 25.2±1.9°C / 평균 습도 33.6±9.3%)를 유지한 상태였다. Figure 1(b), (c), (d)처럼 육안으로도 Pre, HEPA (High Efficiency Particulate Air) 필터와 열교환 소자의 OA면에서 심각한 오염이 확인되었다. 해당 필터들과 열교환 소자 표면에서 표면 미생물을 샘플링하고, 외기도입구와 급기 디퓨저에서 부유 미생물을 대상으로 샘플링을 진행하였다.

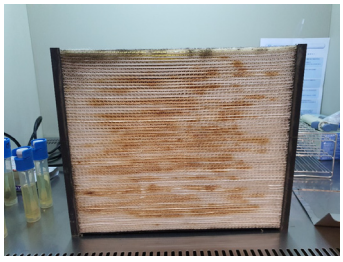


(a) plane of measurement field

(b) Pre filter



(c) HEPA filter



(d) Heat exchange element

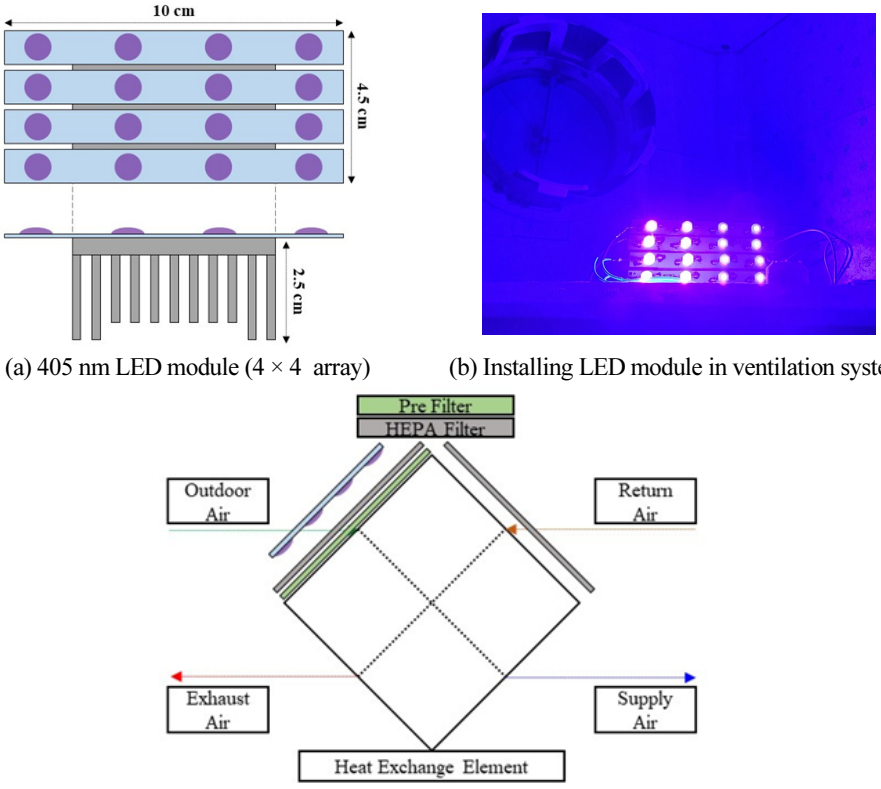
Figure 1. Plan of experiment space and measurement target

405 nm LED Module

본 연구에서 사용된 LED Module은 3W 405 nm LED 소자(Hontiey, China)를 사용하여 Figure 2(a)와 같이 4 × 4 배열로 방열판에 부착해 제작하였다. 해당 모듈의 파장 특성 및 강도는 Spectrometer (BLACK-Comet C-50, StellarNet, USA)를 이용하여 확인하였다. 해당 모듈의 specification은 Table 1에 나타냈다. 사전연구에서 사용한 모듈에 비해 출력은 강화되었으나 크기는 감소했다. 이는 외기 도입부에 설치되기 때문에 환기장치의 풍량 확보에 미치는 영향을 최소화하기 위함이다. LED 모듈은 Figure 2(b), (c)와 같이 외기 도입부에 설치하여 프리필터 방향(12 cm 이격)으로 405 nm 가시광이 조사되게 하였다.

Table 1. 405 nm LED module Specification

Measure	Value
Peak Wavelength (nm)	403.8
Centroid Wavelength (nm)	406.1
FWHM (Full Width at Half Maximum)	12.29
Intensity (W/m^2) at 10 cm	23.26
Dose (J/cm^2) for 7 days	1406.6



(a) 405 nm LED module (4 × 4 array) (b) Installing LED module in ventilation system

(c) Diagram of experiment

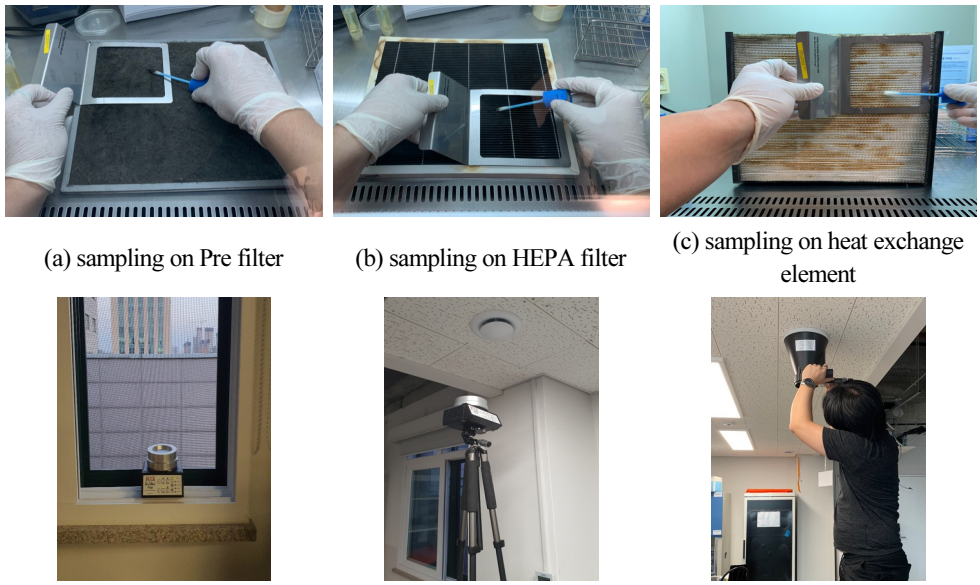
Figure 2. Design and installing of 405 nm LED module

측정방법

부유 세균은 TSA (Trypticase Soy Agar)배지, 부유 곰팡이는 PDA (Potato Dextrose Agar) 배지에 Buck Bio-Culture B30120 Sampler (A.P. Buck Inc., USA)를 이용하여 200 L/min의 유량으로 샘플링 하였다(ISO 16000-17, 2008; ISO 16000-18, 2011; ISO 16000-19, 2012). 샘플링 포인트는 Figure 1(a)에 표기된 것과 같이 OA(창문)에서 2회, SA 1~3에서 각 1회씩 측정(급기 디퓨저에서 20 cm 이격)하였다(Figure 3(e)). 또한 이전 샘플링의 영향을 줄이기 위해 각 샘플링 후 샘플러를 알코올 소독하여 측정을 진행하였다.

표면 미생물은 swab(면봉채취) 방식으로 샘플링하여 표면 세균은 AC (Aerobic Count) petri film, 표면 곰팡이는 YM (Yeast and Mold) pertri film에 분주하여 부유 미생물과 함께 배양 후 정량화 하였다(ISO 16000-17, 2008; ISO 16000-18, 2011; ISO 16000-19, 2012). 표면 미생물은 Pre 및 HEPA 필터와 열교환 소자를 OA에서 유입되는 방향에서 4등분 하여 상하좌우로 나누어 4개 영역(L1, L2, R1, R2)에서 샘플링을 진행하였다. 표면 미생물의 동정작업은 샘플링 원액과 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}배까지 희석한 용액을 사용하여 배양 및 계수하였다. 이때 세균은 35°C에서 1~2일, 곰팡이는 25°C에서 3~5일간 배양하였다(ISO 16000-20, 2014; ISO 16000-21, 2013).

또한 405 nm LED 모듈의 설치가 환기장치의 열교환 성능에 영향을 미치는지 알아보기 위해 OA, SA, RA, EA측에 온습도계(HOBO, USA)를 배치하여 온도와 습도를 로깅하였으며 LED 모듈 설치 전후 풍량은 Testo 417 vane 풍속계를 사용하여 측정하였다(Figure 3(f)).



(a) sampling on Pre filter (b) sampling on HEPA filter (c) sampling on heat exchange element

(d) sampling at OA (e) sampling at SA (f) measuring for air flow rate

Figure 3. Sampling for surface / airborne microorganisms and air flow rate

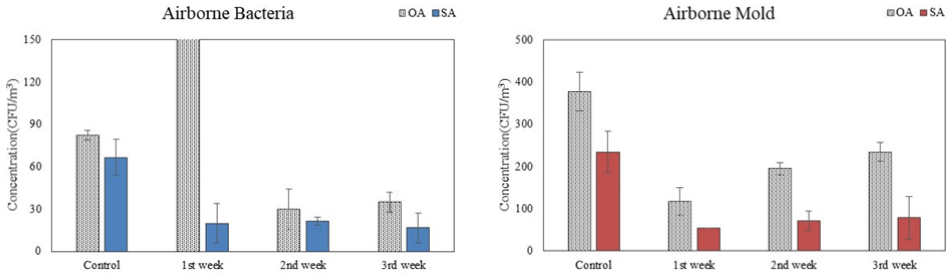
결과 및 토의

부유 미생물 제거율

환기장치 내 405 nm LED 모듈 가동 후 3주간의 실험결과는 다음과 같다. 우선 부유 미생물의 결과는 Table 2, Figure 4(a), (b), Figure 5와 같으며, Table 2는 각 측정 case에서 OA대비 SA측 부유 미생물을 농도로 표현한 수치이다. 실험에 사용된 환기장치는 약 1년간 가동한

Table 2. Reduction rate of airborne microorganisms according to experiment

reduction rate (%)	bacteria	mold
control case	19	38
1st week	99 (OA-TNTC)	53
2nd week	28	63
3rd week	52	67



(a) concentration of airborne bacteria (b) concentration of airborne mold

Figure 4. Concentration of airborne microorganisms according to experiment

상태였으며, 필터교체 등과 같은 별도의 보수작업은 하지 않았다. 그러므로 control case에서의 저감률은 오염된 상태의 필터로 유입되는 부유 미생물을 필터링한 것으로 볼 수 있다. 405 nm LED 모듈 가동 1주일 후 부유 세균은 OA에서 TNTC (Too Numerous To Count)로 나타났으며 수치상으로는 99%의 저감률을 나타냈다. 외기의 부유 세균 농도가 높은 영향도 있으나 SA에서 검출된 부유 세균은 control case 대비 70% 감소하였다. 2주차 결과에서 부유 세균은 1주차 결과와 급기구에서 검출된 부유 세균 농도와 유사하였다. 또한 부유 곰팡이의 경우, 저감률은 증가하였으나 1주차 대비 SA의 부유 곰팡이 농도가 높아지는 것으로 나타났다. Control case를 제외하고 405 nm LED를 가동시킨 기간 동안 SA에서의 부유 미생물 농도는 유사한 농도로 검출되었다. 세균은 평균 19 CFU/m^3, 곰팡이는 평균 68 CFU/m^3으로 나타났고 세균과 곰팡이 모두 control case의 SA 농도 대비 71% 저감되었다. 이는 기존 필터의 저감 성능 대비 LED 모듈을 통한 저감 효과로 판단할 수 있다.

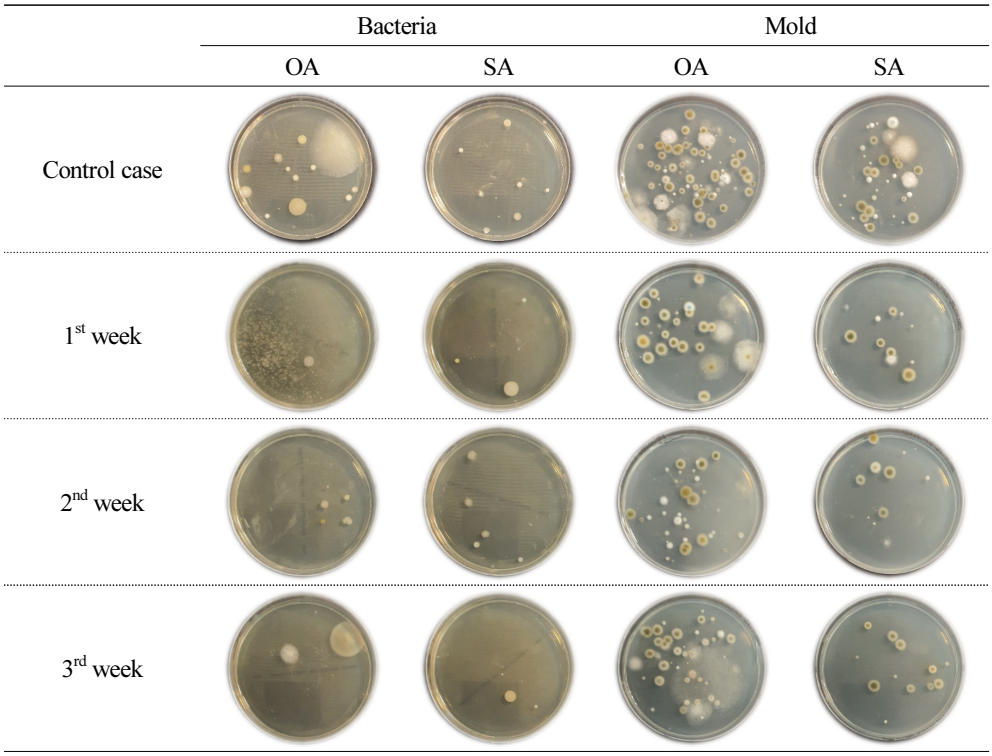
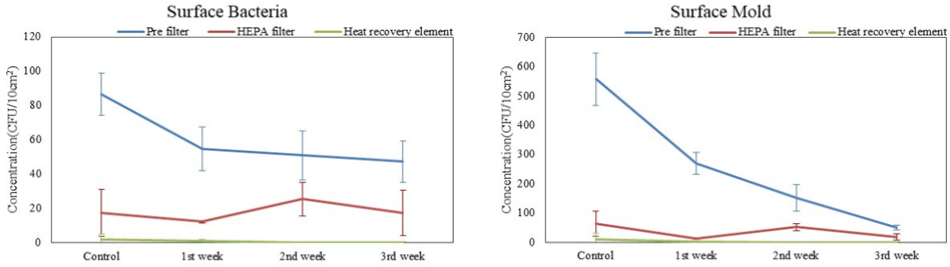


Figure 5. Airborne microorganisms according to experiment

표면 미생물 제거율

표면 미생물에 대한 405 nm LED 모듈의 저감 효과는 Figure 6, 7과 같다. 표면 미생물은 Pre 및 HEPA 필터, 그리고 열교환 소자 표면을 상하좌우로 4등분한 영역(L1, L2, R1, R2)에서 샘플링하였고, 농도는 4개 면의 평균값으로 산출하였다. Control case의 결과로는 열교환 소자에서는 거의 검출되지 않았으나 Pre 및 HEPA 필터에서는 오염을 확인하였다. 1주차 결과로 표면 세균은 control case 대비 Pre 필터에서 37%, HEPA 필터에서 29% 저감되는 것으

로 나타났다. 표면 곰팡이는 Pre 필터에서 52%, HEPA 필터에서 79% 저감되는 것으로 나타났다. 표면 세균과 곰팡이 모두 일주일간 405 nm LED 조사를 통해 저감되는 것을 확인하였으며, 열교환 소자 표면에서는 수치상으로 높은 저감률이 확인되었으나 소량 검출되었다. 2주차 결과에서도 열교환 소자 표면에서는 수치상으로는 높은 저감률을 나타냈으나 소량 검출되었다. 2주차 저감률 또한 control case 대비 Pre 필터에서 표면 세균은 41%, 표면 곰팡이는 72% 저감되는 것으로 나타났으나, HEPA 필터에서 세균과 곰팡이 모두 증가하였다. 이는 2주차 기간 중 2일(주말)간 정전이 있었으며 측정 직전까지 환기장치와 LED 모듈이 가동되지 않았고 동절기기간으로 일교차가 커 급격한 외기 온도의 변화에 의한 영향인 것으로 추정된다. 3주차 결과 또한 소자 표면에 대한 표면 미생물은 거의 검출되지 않았다. 3주차 결과도 control case 대비 표면 세균은 Pre 필터 45%, HEPA 필터에서는 바로 직전인 2주차 대비 32% 감소하였으나 control case와 농도가 유사하게 나타났다. 표면 곰팡이는 Pre필터에서



(a) concentration of surface bacteria (b) concentration rate of surface mold

Figure 6. Reduction rate of surface microorganisms according to experiment

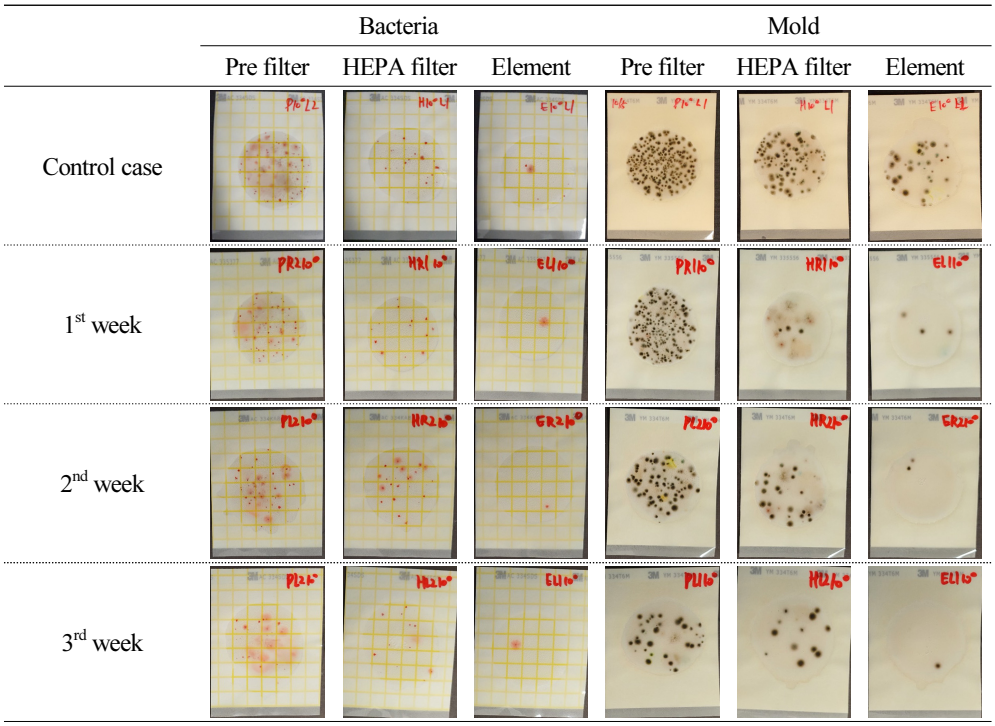


Figure 7. Surface microorganisms according to experiment

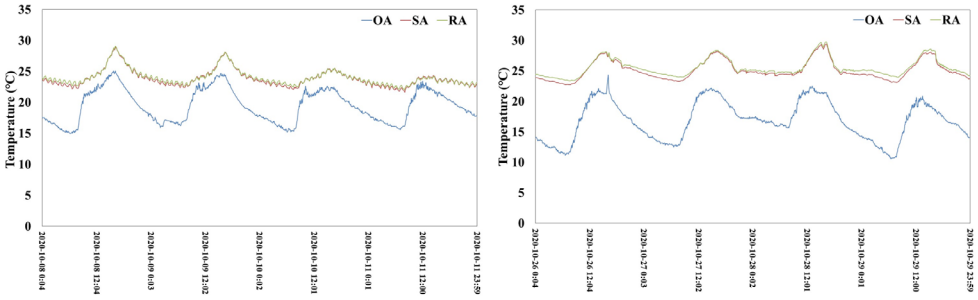
91%, HEPA필터에서 72% 저감되었다. 종합적으로는 소자 표면에서 가시적으로 얼룩이 확인되었으나 표면 미생물은 소량 검출되었으며, 405 nm LED 가동에 따라 감소하였다. 가장 오염이 심한 Pre 필터의 경우에는 직접적으로 405 nm LED가 조사되었기 때문에 큰 감소폭을 나타냈다. 하지만 HEPA 필터의 경우에는 외기조건과 가동문제로 인해 상승하는 경향을 보였으나 장시간 조사를 통해 저감되는 것을 확인하였다.

환기장치의 열교환 효율

405 nm LED 모듈의 설치 및 발열이 열교환 환기장치의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 LED 모듈의 설치 전후로 풍량과 온습도를 확인하였다. 풍량은 Table 3과 같이 나타났으며 설치 전후 간의 풍량 차이는 크지 않았다. 즉, LED 모듈을 소형으로 제작하여 실제 공동주택 내 환기장치에 설치하여도 풍량 확보에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 측정된 온도를 바탕으로 열교환 효율을 확인하였다. 해당 장치는 약 1년간 사용되었으며 별도로 누설률 등은 확인하지 못했기 때문에 열교환 효율은 OA, SA, RA에서 측정한 건구온도만을 가지고 환산하였다. Figure 8과 같이 LED 모듈 가동 전후 기간 동안의 온습도 변화가 관측되었으며, 열교환 효율은 LED모듈 설치와 상관없이 92.1 ~ 94.8% 사이로 큰 차이를 보이지 않았다. SA와 RA 유사하게 나타나 열교환 효율이 높게 나타났으나 OA측 온도의 변화는 있었다. 외기온도 대비 OA측 온도의 결과로 LED 설치 후, 평균 약 4°C 높아지는 것으로 나타났다. 해당 실험의 결과로 LED 모듈의 구성이나 세기에 따라 발열이 달라질 수 있기 때문에 이를 통해 상황에 따라 열교환 효율과도 연관하여 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Table 3. Air flow rate of ventilation system by installing 405 nm LED module (before/after)

Diffuser	Airflow rate (m^3/h)
S1	58.3 / 57.9
S2	38.1 / 38.5
S3	44.8 / 44.3
E1	71.2 / 71.7
E2	58.2 / 57.8
E3	50.1 / 49.8



(a) before the operating LED module (b) after the operating LED module

Figure 8. Air temperature of ventilation system during experiment

결 론

본 연구에서는 환기장치를 대상으로 부유 및 표면 미생물에 대한 405 nm LED 모듈의 저감 성능 실험을 진행하였다. 약 1년간 사용한 열교환 환기장치를 대상으로 하였으며 실험 전 오염도를 확인하였다. 표면 미생물은 Pre, HEPA 필터 및 열교환 소자 표면에서 샘플링하여 모니터링 하였고, 부유 미생물은 외기와 급기 디퓨저에서 샘플링하여 모니터링 하였다.

부유 미생물의 경우에는 각 case 마다 OA 대비 SA에서 부유 세균은 20~50% 저감되었으며, 부유 곰팡이는 40~67% 저감되었다. 405 nm LED 가동 전후로 SA에서의 농도를 기준으로 한다면 부유 세균과 곰팡이 모두 71% 저감되었다.

표면 미생물의 경우에는 표면 세균과 곰팡이 모두 열교환 소자에서는 소량 검출되었으며 LED 가동에 따라 점차 감소하였다. Pre 필터와 소자 사이에 위치한 HEPA 필터에서는 LED 가동에 따라 점차 감소하다가 2주차에 증가하는 경향을 나타내었는데, 이때는 실험 중 발생한 정전의 영향으로 2일정도 환기장치 및 LED가 가동되지 않아 발생한 현상으로 판단된다. LED 가시광이 직접적으로 조사되며 OA측의 가장 앞에 위치한 Pre 필터는 높은 농도의 오염 상태였으나 LED 가동에 따라 감소하였다. 수치적으로는 표면 세균의 경우 45%, 표면 곰팡이의 경우 90% 저감되는 것으로 나타났다. 표면 미생물의 경우, 실험 대상인 환기장치가 장기간 사용되었으며 오염이 많이 된 상태였음에도 높은 저감 효과를 나타냈다. 또한 LED 모듈의 설치는 환기장치의 풍량 확보나 열교환 성능에도 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 실제 환기장치에서의 405 nm 가시광 LED의 적용 가능성을 파악하였다. 제작된 모듈은 시험용으로 장시간 405 nm LED 가시광 조사를 통해 일정수준의 저감 효과를 확인하였으나 모듈의 규격화 등이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 규격화 된 모듈을 기준으로 UVGI, UVC-LED 등의 다른 수단의 대상들과도 비교검증이 진행되어야 한다. LED의 사용성 및 접근성을 토대로 모듈을 제작하여 보급한다면 거주자들 또한 사용이 용이할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2020년도 국토교통과학기술진흥원 연구비 지원(과제번호: 20RERF-B082204-07)에 의한 결과의 일부임.

References

1. Bang, J.I., Kim, G.H., Jo, S., Sung, M. (2017). Investigation to establish guideline for diagnosis of mold contamination in apartment buildings. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 11(1), 45-51.
2. Bang, J.I., Kim, J.H., Sung, M. (2019). Analysis of the Microorganism Sterilization Effects of 405nm LED on the Heat Recovery Ventilation System. Journal of the Korean Society of Living Environmental System, 26(6), 851-858.

3. Hwang, I.T., Kim, H.G., Kim, M.Y., Ann, T.K., Park, J.C. (2015). A survey on the contamination of ventilation duct in apartment houses. Architectural Institute of KOREA Planning & Design, 31(8), 113-120.
4. Kim, J.H., Bang, J.I., Choi, A., Sung, M. (2019). An Analysis on the Effect of Mold Sterilization in Apartment Using 405 nm Visible Light LED. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building System, 13(6), 590-598.
5. Maclean, M., MacGregor, S.J., Anderson, J.G., Woolsey, G. (2009). Inactivation of bacterial pathogens following exposure to light from a 405-nanometer light-emitting diode array. Applied and environmental microbiology, 75(7), 1932-1937.
6. Murdoch, L.E., Maclean, M., Endarko, E., MacGregor, S.J., Anderson, J.G. (2012). Bacterial effects of 405 nm light exposure demonstrated by inactivation of Escherichia, Salmonella, Shigella, Listeria, and Mycobacterium species in liquid suspensions and on exposed surfaces. The Scientific World Journal, 2012, 137805.
7. Bang, J.I., Kim, G.H., Jo, S.M., Sung, M. (2016). Experimental analysis on the infiltration of airborne mold and particulate matter in newly-built apartment, 2016 Autumn conference, Architectural Institute of KOREA, Busan, 1302-1303.
8. Kowalski, W. (2010). Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection. Berlin: Springer science & business media.
9. ISO 16000-17. (2008). Detection and enumeration of moulds: Culture-based method.
10. ISO 16000-18. (2011). Detection and enumeration of moulds: Sampling by impaction.
11. ISO 16000-19. (2012). Sampling strategy for moulds.
12. ISO 16000-20. (2014). Detection and enumeration of moulds: Determination of total spore count.
13. ISO 16000-21. (2013). Detection and enumeration of moulds: Sampling from materials.