

UR-UVGI 시스템의 일반병실 목업 내 부유세균 제어효과 분석

Analysis of Airborne Bacteria Control Efficacy of UR-UVGI Systems in General Hospital Wards Mock-up

신동민* Sihm, Dongmin | 조예림** Jo, Yelim | 방종일*** Bang, Jong-Il | 성민기**** Sung, Minki

Abstract

Purpose: This study aimed to experimentally analyze the effectiveness of an Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UR-UVGI) system in reducing airborne bacteria in a mock-up of a multi-bed general ward. Multi-bed hospital wards pose a high risk of cross-infection via airborne pathogens. Since existing ventilation systems alone have limitations in infection control, evaluating the applicability of UR-UVGI systems is essential. **Methods:** The experiment was conducted by varying ventilation rates and UR-UVGI operation conditions. *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) was aerosolized from one bed using a nebulizer, and airborne bacteria were collected from the other beds and the HVAC terminal using an impact sampler. UV-C intensity was measured to evaluate its spatial distribution across the room. The quantified bacterial concentrations were used to calculate reduction rates and equivalent air change rates (eACR). **Results:** Operation of the UR-UVGI system significantly reduced airborne bacterial concentrations under all conditions. A correlation between UV-C intensity and bacterial reduction rates was observed. The equivalent air change rate (eACR) increased by up to 2.97 ACH. **Implications:** This study experimentally demonstrated that UR-UVGI systems can effectively complement existing ventilation systems as an infection control measure in multi-bed wards. These findings provide scientific evidence supporting the implementation of UR-UVGI systems in hospital settings and are expected to contribute to improved infection control and energy efficiency in healthcare facilities.

주제어: 상부공간 자외선 살균조사장치, 일반병실, 부유세균, 감염 제어

Keywords: Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation(UR-UVGI), General Ward, Airborne Bacteria, Infection Control

1. 서론

1.1 연구 배경

병원 내 감염은 입원 환자의 건강에 악영향을 미치고 의료 비용을 증가시키는 주요 요인으로 작용한다. 특히 일반병실은 환자 간의 공간을 공유하는 특성을 가지고 있고 불특정 다수의 환자와 보호자가 동일한 공간에서 생활한다. 이로 인해 호흡기 감염병(예: SARS-CoV-2, 결핵균)의 환자 간 전파 가능성이 있다.

선행 연구에 따르면 6인실에서의 병원 내 COVID-19 발병률이 1인실에 비해 약 12.7배 높은 것으로 나타났다.(Jo Hyeon Jae et al. 2024, 13.1: 95.) 따라서 병원 내 감염 관리의 핵심은 부유 세균의 농도를 효과적으로 저감하는 것이다.

기존 기계식 환기시스템(HVAC)은 실내 공기질 유지와 쾌적한 환경 조성에 기여한다. 하지만 환기만으로는 공기 중 병원체를 제거하는 데에는 한계가 있으므로, 추가적인 공기질 제어 방안이 필요하다. 미국 냉동공조학회(ASHRAE)에 따르면 일반병실의 최소 권장 환기횟수를 6 ACH(Air Change per Hour)로 규정하고 있는데(ASHRAE Standard 170-2017:), 이를 위해서는 고효율 필터 사용과 지속적인 팬 가동이 요구되어 에너지 소비량 증가로 이어진다. 이러한 에너지 비용 문제와 감염 제어의 상충되는 관계를 해결하기 위해, 추가적인 공기정화 시스템 도입이 필요하다.

* 회원, 석사과정, 건축공학과, 세종대학교
(주저자: eedhals805@gmail.com)

** 회원, 박사과정, 건축공학과, 세종대학교 (adeline0221@gmail.com)

*** 회원, 박사, 건축공학과, 세종대학교 (whddlf2650@naver.com)

**** 부회장, 교수, 건축공학과, 세종대학교
(교신저자: mksung@sejong.ac.kr)

이러한 한계를 보완하기 위해 Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation(UR-UVGI) 기술이 주목받고 있다. UR-UVGI는 실내 상부에 UV-C를 조사하여 공기 중 병원체의 DNA 또는 RNA를 손상시켜 비활성화 하는 기술로, 인간이 활동하는 하부 공간에 대한 직접적인 UV-C 노출 없이 감염원을 효과적으로 제어할 수 있다. 미국 질병통제예방센터(CDC)는 2023년 공식 지침에서 SARS-CoV-2를 포함한 호흡기 감염병의 노출을 줄이기 위한 방안 중 하나로 UR-UVGI의 도입을 권장하고 있다(CDC, 2023).

1.2 연구 목적

UV-C(200-280 nm) 파장대의 살균 효과는 오랜 기간 연구되어 왔으며, 최근 병원 환경에서의 적용 사례가 증가하고 있다. 선행 연구에 따르면 음압격리병실 1인실에서 UR-UVGI 가동 시 부유세균 살균 성능이 최대 35%로 나타나는 것을 확인했다(방종일 외., 2023, 43.2: 310-311). 또한 선행 연구에 따르면 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 분석 결과 UR-UVGI 시스템의 가동이 단순 환기횟수 증가 대비 더욱 우수한 바이러스 제거 효율을 나타냈다. (Yao, Guangpeng et al., 2024, 477: 135383.)

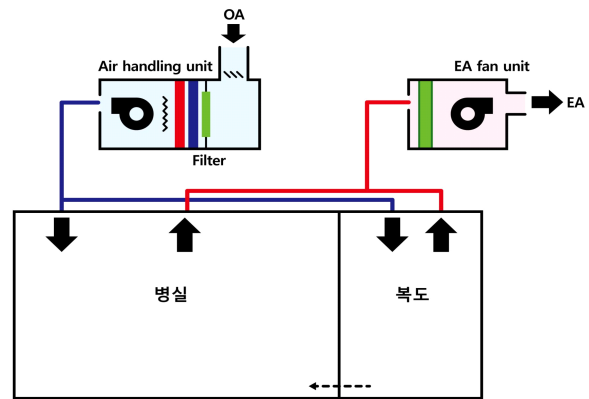
본 연구는 다인실 병동 환경에서 UR-UVGI 시스템의 공기 중 병원체 저감 효율을 평가하고, 병실의 환기량(2 ACH, 6 ACH)과 UR-UVGI 가동 대수(0대, 1대, 2대)의 최적 운영 전략에 대한 기반을 제시하는 데 있다. 병원 내 감염 관리의 핵심 과제인 공기 매개 전파를 차단하기 위해, UR-UVGI 시스템을 4인실 모형(mock-up)에 적용하여 부유세균 농도를 시간 경과에 따른 변화를 정량화하였다. 또한 상당환기횟수(equivalent Air Change Rate)의 개념을 도입해 UR-UVGI의 성능을 정량화하였다. 본 연구의 상당환기횟수 계산식은 1차 감소 모델을 기반으로 하며, 선행 연구에서 제시한 UR-UVGI의 성능 평가 방법을 참조하였다.(Clibe B. Beggs et al., 2020, 8: e10196.) UV-C의 강도를 측정하여 강도 분포를 분석함으로써 공간별 살균 효율에 대한 연관성 또한 확인하였다. 이를 통해 다인실 환경에서의 병상 배치와 UR-UVGI 설치 위치가 병상 간 감염 전파에 미치는 영향을 규명하고, 추후 연구 및 현장 적용을 위한 실증적 근거를 제시한다. 병원 설계 단계에서 UR-UVGI 용량과 설치 위치를 결정할 수 있는 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 단일 병상의 병실 또는 소규모 공간을 대상으로 한 기존 연구와는 달리, 4인실 일반 병실 모형(Mock-up)을 활용해 다인실 병동의 복합적인 환경을 재현하여 실험을 진행하였다. 실험적 접근법에서도 차별성을 확보하였다. UV에 내성이 강한 Bacillus subtilis(ATCC 6633)를 부유세균으로 발생시켜 실제 병원 환경에서의 병원체 제어를 검토하였다. 연구에 따르면, 해당 균주의 포자는 일반 세균에 비해 5-50배 높은 UV-C 저항성을 가지며(Setlow et al., 2001, 38.2-3: 97-104), 이는 병원 내 다른 병원체와 비교하여 보다 현실적인 데이터 산출에 기여하고, UR-UVGI 시스템의 실용적인 성능 평가를 가능하게 한다는 점에서 학술적 의의가 있다.

2. 연구방법

2.1 실험 환경

본 연구는 5.0 m(W) x 5.8 m(L) x 2.6 m(H) 크기의 4인실 일반 병실 모형을 구축하여 수행되었다. 병상 상부 천장에는 급기구와 배기구가 각 1개씩 총 8개가 설치되어 있다. 미생물을 활용한 실험이므로 공조기는 전배기로 설정하여 가동하였고, 필터는 미생물에 의한 오염을 방지하고자 제거하고 실험을 진행하였다. 실험 공간은 환기횟수, 실간 차압, 온도 및 습도를 제어할 수 있도록 구성하였다. 실험 공간은 온도 20 °C, 상대습도 50%로 설정하였고, 실간 차압은 미생물을 활용한 실험이기 때문에 실 외부로의 유출 방지를 위해 음압 조건을 유지하였다.



[그림 1] 공조기 다이어그램

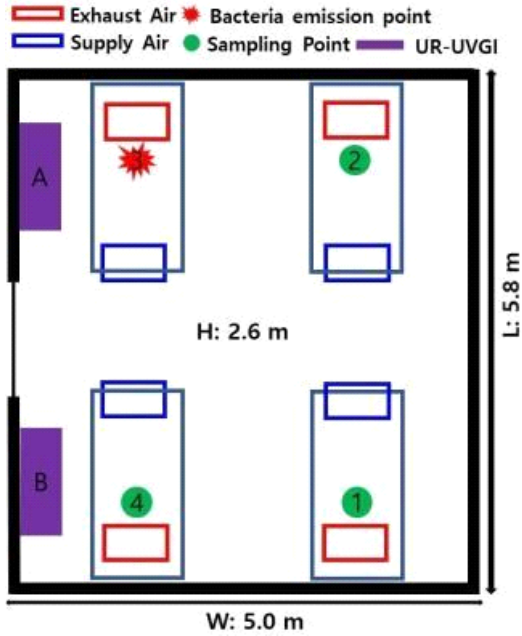
2.2 UR-UVGI 시스템

UR-UVGI 시스템은 2.4 m 높이에 경사각 없이 설치하였으며, 병실 상부 공간에 집중적으로 UV-C를 조사하도록 설치하여 환자의 생활 영역에는 UV-C가 노출되지 않도록 하였다. 램프로는 PL-L 36 W(UV-C 출력 12 W, 254 nm)를 사용하였다.

2.3 부유세균 발생 및 농도 측정

부유세균은 Bacillus subtilis 고체균주 1개를 9 ml Saline (0.85% NaCl) 멸균 용액에 현탁하여 사용하였다. 6-jet 네블라이저를 이용하여 12 L/min의 유량으로 20분간 3번 병상에서 발생시켰고, 부유세균의 발생 유량은 에어로졸 생성 시 입자 크기 분포 및 장시간 안정성에 관한 연구를 참고하여 설정하였다(Ibrahim et al. 2025, 29.6: 1142-1148).

부유세균의 농도 정량화를 위한 공기시료 샘플링은 발생 병상을 제외한 나머지 세 병상과 공조기 RA(Return Air) 말단 점검구에서 진행하였다. 샘플링은 Buck Bio-Culture 충돌식 샘플러를 이용하여 TSA(Tryptic Soy Agar)배지에 100 L/min의 유량으로 5분간 진행하였다. 초기 농도의 안정화를 위해 부유세균 발생을 종료한 직후 5분씩 12번, 총 60분간 샘플링을 진행하였다. 부유세균의 발생위치와 샘플링 지점, UR-UVGI의 설치 위치는 [그림 2]에 나타내었다. 실험의 진행단계는 [그림 3]에 나타내었다.



[그림 2] 실험 구성의 개략도



[그림 4] 4인실 일반병실 목업내부(Mock-up)

[표 1] Case별 설정 조건

Case	환기량	UR-UVGI 가동 조건
Case 1-0		UR-UVGI 미가동
Case 1-1	2 ACH	UR-UVGI A만 가동
Case 1-2		UR-UVGI A, B 가동
Case 2-0		UR-UVGI 미가동
Case 2-1	6 ACH	UR-UVGI A만 가동
Case 2-2		UR-UVGI A, B 가동

시간(분)	0	20	40	60	80	100	120	140
실험단계								
공조기 가동 및 기류 안정화		■						
부유세균 바탕농도 측정				■				
부유세균 발생				■				
UR-UVGI 가동						■		
부유세균 샘플링						■		

[그림 3] 실험 진행 단계

샘플링된 시료는 35 °C에서 13시간 배양 후 균집 형성 단위 (Colony Forming Unit, CFU)를 계수하여 부유세균의 농도를 정량화하였다. 모든 실험은 조건별로 3회 반복 수행되었으며, 농도의 결과는 반복 수행한 결과의 평균을 사용하였다. 실험 Case 는 [표 1]과 같다. 정량화한 부유세균 농도를 [수식 1]을 사용하여 상당환기횟수를 산출하고, Case별 부유세균 저감 효과를 확인하였다.

2.4 UV-C 강도 측정

UV-C 강도는 2.45 m의 높이, 총 50개의 지점에서 측정하였다. 사용된 장비는 ILT사의 ILT-5000과 XRD140T254 Low Profile Germicidal Probe를 조합하여 사용하였다. 측정 지점은 너비 방향으로 0.5 m 간격으로, 길이 방향으로는 UR-UVGI 설치 위치로부터 0.5 m 떨어진 지점에서 측정한 후 이후 지점은 1 m 간격으로 설정하였다. 이러한 측정 방법은 장치 주변의 UV-C 강도 구배를 정밀하게 파악하고, 공간 전체의 UV-C 분포 특성을 분석하기 위함이다.

$$n = - \frac{\ln(C_o) - \ln(C_x)}{t_x - t_o}$$

n = 상당환기횟수(eACR)

C_o = 부유세균 초기 농도(CFU/m³)

C_x = x시간 후의 부유세균 농도(CFU/m³)

t = 시간(h)

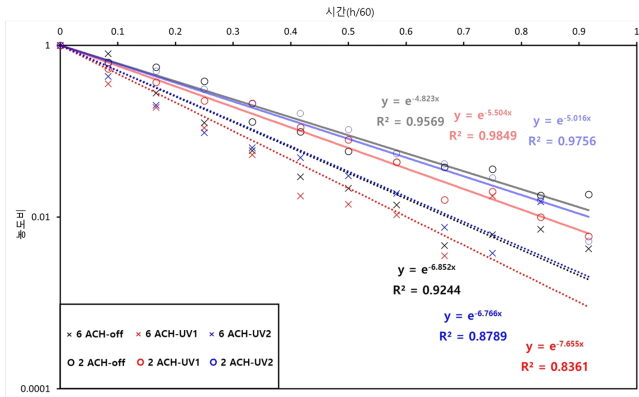
[수식 1] 상당환기횟수(eACR) 산정 식

3. 연구 결과

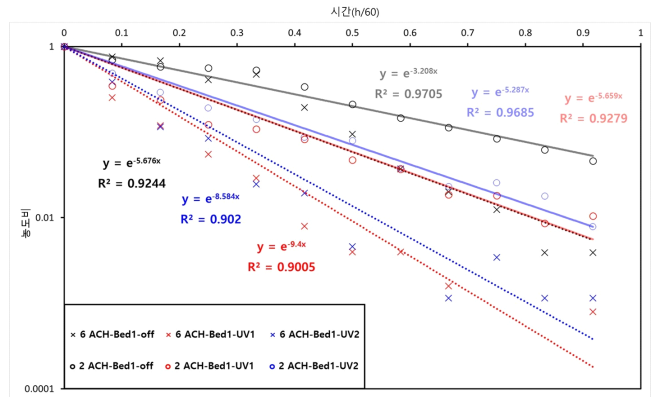
3.1 부유세균 농도 및 감소율

본 연구에서는 환기횟수(2 ACH, 6 ACH)와 UR-UVGI 가동 조건(미가동, 1대 가동, 2대 가동)에 따른 병실 내 부유세균 농도 변화를 분석하였다. 모든 실험 조건에서 시간 경과에 따라 부유세균 농도가 지속적으로 감소하는 경향을 확인하였으며, 부유세균 배양사진은 [표 2]에 제시하였다. [표 2]의 가로축은 UV-C 조사 시간으로 각각 0분, 30분, 60분에서 샘플링을 진행 후 배양을 진행한 사진이다. 측정 위치별 부유세균 저감율은 [그림 5]에 제시하였다. [그림 5]의 그래프는 부유세균 농도에 자연로그를 취하여 시간에 따른 감소를 보여주며, 각 그래프의 기울기는 상당환기횟수를 나타낸다.

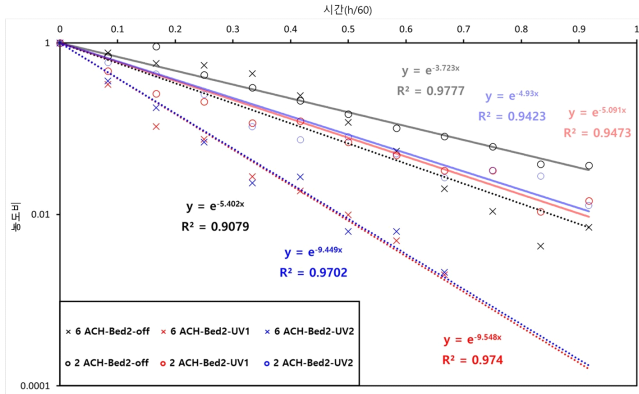
환기량 2 ACH의 조건에서의 초기 부유세균 농도는 위치에 따라 차이를 보였다. Case 1-0의 경우, 공조기 말단은 597 CFU/m³, Bed1 1,489 CFU/m³, Bed2 1,075 CFU/m³, Bed4 1,425 CFU/m³로



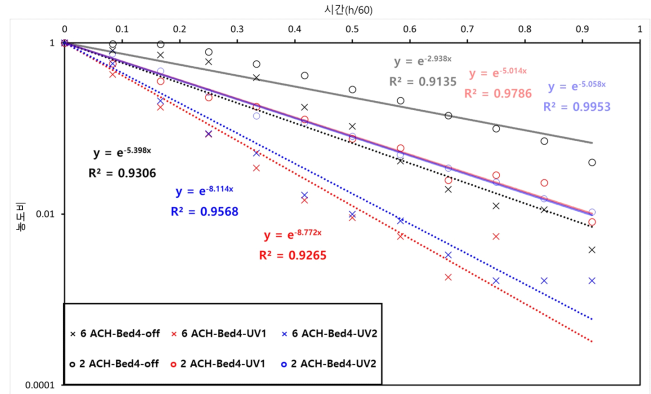
<공조기 말단>



<Bed 1>



<Bed 2>



<Bed 4>

[그림 5] 샘플링 위치별 부유세균 감소율

측정되었으며, Bed1, Bed4의 위치에서 가장 높은 농도를 나타냈다. Case 1-1 및 Case 1-2에서도 Bed1과 Bed4에서 가장 높은 농도가 관찰되었다. 환기량 6 ACH 조건에서는 Case 2-0의 초기농도가 모든 위치에서 TNTC(Too Numerous To Count)로 나타나, 2 ACH 조건에 비해 높았다. TNTC는 배지에 집락이 너무 많이 자라 개별적으로 정확히 계수할 수 없는 상태를 말하며, 미생물 오염도가 매우 높음을 의미한다. UR-UVGI를 가동한 Case 2-1, Case 2-2에서는 2 ACH 조건에 비해 초기농도가 감소한 모습을 확인하였다. 그래프에서 TNTC는 보정 수식에 의한 최대치인 2,477 CFU/m³로 환산하여 적용하였다. UR-UVGI의 가동에 따른 부유세균 농도 감소 효과는 모든 실험 조건에서 뚜렷하게 관찰되었다. 2 ACH의 조건에서 UR-UVGI 미가동 시(Case 1-0) 최종 농도는 공조기 말단에서 11 CFU/m³, Bed1 69 CFU/m³, Bed2 40CFU/m³, Bed4 57 CFU/m³로 측정되었으나, 2대 가동 시(Case 1-2)에는 공조기 말단에서 1 CFU/m³, Bed1 10 CFU/m³, Bed2 7 CFU/m³, Bed4 14 CFU/m³로 크게 감소하였다. 6 ACH 조건에서는 UR-UVGI 가동 효과가 더욱 증대된 것으로 확인되었다. 1대 가동 시(Case 2-1)와 2대 가동 시(Case 2-2) 모두 최종 측정 시점에서 0~1 CFU/m³의 매우 낮은 농도를 나타냈다.

각 Case별 부유세균 감소율을 분석하였으며, 결과는 [표 3]에 제시하였다. [표 3]에서의 부유세균 감소율은 발생 종료 10분 후를 초기 농도로 30분 후의 농도를 최종 농도로 설정하여 산출하였다. 이는 Case 2-1에서 초기 농도가 TNTC였기 때문에 정량화가 불가능했고, 대부분의 Case에서 60분 후 농도가 0 CFU/m³ 근처로 수렴하여 감소율의 왜곡 가능성이 있기 때문이다.

2 ACH 조건에서 UR-UVGI 미가동 공조기 말단의 감소율은 84.4%, 병실 평균 59.7%로 나타났다. UR-UVGI 1대 가동 시 각각 79.1%, 76.0%로 감소율이 증가하였으며, 2대 가동 시 각각 73.5%, 84.6%로 추가적인 개선 효과를 확인하였다.

6 ACH의 경우, UR-UVGI 미가동 시 감소율은 공조기 말단에서는 96.5%, 병실 평균 72.4%로 측정되었으나, UR-UVGI 1대 가동 시 95.0%, 95.9%로 급격한 감소율 향상을 보였다. 하지만 2대 가동 시에는 다소 저감효과가 줄어드는 양상이 관찰되었다.

전반적으로 UR-UVGI 시스템이 부유세균 저감에 효과적임을 보여주며, 환기량 증가보다 UR-UVGI 가동이 저감효과 향상에 더 큰 기여를 하는 것으로 분석되었다. 다만, 실제 미생물을 활용한 실험이기 때문에 편차가 존재하며, 병실 내 풍량의 불규칙도 관찰되었다. 향후 연구에서 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

[표 2] UV-C 조사 시간에 따른 공조기 말단에서의 Bacillus subtilis 균락 수

Irradiation Time Case	0min	30min	60min
Case 1-0			
CFU/m ³	597	59	11
Case 1-1			
CFU/m ³	335	37	2
Case 1-2			
CFU/m ³	256	41	1
Case 2-0			
CFU/m ³	TNTC	71	11
Case 2-1			
CFU/m ³	189	3	0
Case 2-2			
CFU/m ³	176	9	0

실험 결과의 통계적 신뢰도를 평가하기 위해 독립표본 t-검정을 수행하였으며, 유의수준은 0.05로 설정하였다. UR-UVGI를 가동하지 않았을 때와 가동했을 때 모든 샘플링 지점에서 통계적으로 유의함($p < 0.05$)을 확인했다. 하지만 UR-UVGI를 1대 가동했을 때와 2대 가동했을 때는 통계적으로 유의하지 않음($p > 0.05$)을 확인하였다. 이는 UR-UVGI의 가동 조건에서 부유세균 발생위치 상부의 UR-UVGI는 가동된 상태로 유지되었기 때문으로 판단된다. 따라서 UR-UVGI 가동 위치에 따른 성능 변동성을 확인하기 위해 추가 검증이 필요하다.

[표 3] Case별 부유세균 감소율

감소율(%)	Case 1-0	Case 1-1	Case 1-2
공조기 말단	84.4	79.1	73.5
병실 평균	59.7	76.0	84.6

감소율(%)	Case 2-0	Case 2-1	Case 2-2
공조기 말단	96.5	95.0	88.6
병실 평균	72.4	95.9	94.8

3.2 상당환기횟수

부유세균 농도를 정량화한 후 [수식 1]을 통해 병실 내 상당환기횟수를 도출하였다. 공조기 말단은 덕트 내 손실을 고려하여 계산에 포함하지 않았다. 상당환기횟수는 자연 감쇠법을 통해 산출하며, 초기농도와 최종 농도의 로그 차이를 기반으로 한다. Case 2-0은 초기 부유세균 농도가 TNTC로 나타나 농도 정량화가 불가능하여 수식에 대입이 불가능하였다. Case 2-1, 2-2의 경우 40분이 지난 시점에 부유세균 농도가 0 CFU/m³에 수렴하지만 다른 Case의 경우 0에 수렴하지않거나 최종농도만 0에 수렴한다. 이를 수식에 대입할 경우 상당환기횟수 결과에 왜곡 가능성이 있기 때문이다. 따라서 계산의 통일성과 실험 결과의 정확성을 위해 발생종료 이후 5분부터 40분까지 35분간의 부유세균 농도를 활용하여 상당환기횟수를 도출하였으며, 결과는 [표 2]에 제시하였다.

2 ACH 조건에서의 상당환기횟수는 Case 1-0(UR-UVGI 미가동), Case 1-1(UR-UVGI 1대 가동), Case 1-2(UR-UVGI 2대 가동)에서 평균 2.87, 3.87, 4.41 ACH로 나타났다. Case 1-1은 Case 1-0 대비 상당환기횟수가 1.00 ACH (35% 증가) 증가하는 결과를 보였다. Case 1-2는 1.54 ACH (53.6% 증가) 증가하는 결과를 보였다.

6 ACH 조건에서의 상당환기횟수는 Case 2-0(UR-UVGI 미가동), Case 2-1(UR-UVGI 1대 가동), Case 2-2(UR-UVGI 2대 가동)에서 각각 4.85, 7.27, 7.82 ACH로 나타났다. Case 2-1은 Case 2-0 대비 상당환기횟수가 2.42 ACH (49.8% 증가) 증가하는 결과를 보였고, Case 2-2는 2.97 ACH (61.2% 증가) 증가하는 결과를 보였다.

UR-UVGI시스템의 가동에 따라 상당환기횟수가 증가하는 것을 확인했다. 또한 병실의 환기횟수가 높을수록 UR-UVGI의 효과가 더욱 개선됨을 확인하였다. 하지만 UR-UVGI 미가동 조건과 1대 가동 조건 간의 상당환기횟수 증가율이 1대 가동 조건과 2대 가동 조건 간의 증가율보다 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 UR-UVGI의 설치 위치와 부유세균 발생원의 상대적 위치 관계에 기인한 것으로 판단된다.

[표 4] Case별 상당환기횟수

2 ACH	Case 1-0	Case 1-1	Case 1-2
Bed 1	2.69	3.86	4.40
Bed 2	3.32	3.88	4.19
Bed 4	2.61	3.89	4.65

6 ACH	Case 2-0	Case 2-1	Case 2-2
Bed 1	5.08	7.12	9.28
Bed 2	4.43	7.20	6.93
Bed 4	5.04	7.48	7.26

단위: 환기횟수(ACH)

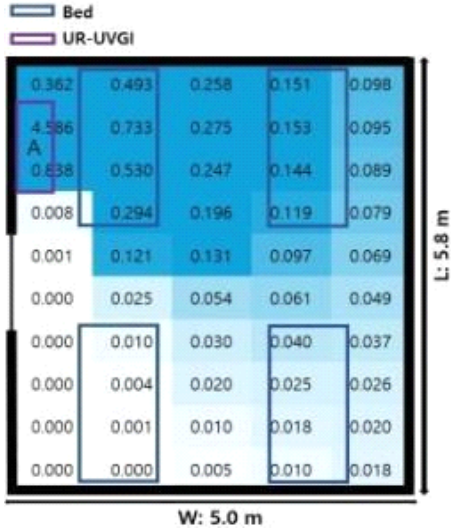
3.3 UV-C 강도

본 연구에서는 일반병실 내 UR-UVGI 시스템의 가동에 따른 UV-C 강도 분포를 정량화하기 위해 측정을 진행하였다. 각 지점별 강도값을 W/m² 단위로 환산하여, 2.45 m 높이의 기구 중심 평면에서의 분포를 분석하였다.

[그림 6]은 UR-UVGI 1대 가동 시 병실 내 UV-C 강도 분포를 나타낸다. 1대 가동 시, 병상 부분에서의 최대 강도는 UR-UVGI 인근을 제외하고 Bed3의 상부에서 0.493 W/m² 이상으로 나타났으며, Bed4 인근 벽면과 병실 모서리 근처에서는 0.098 W/m² 이하로 강도가 급격히 감소하는 경향을 보였다.

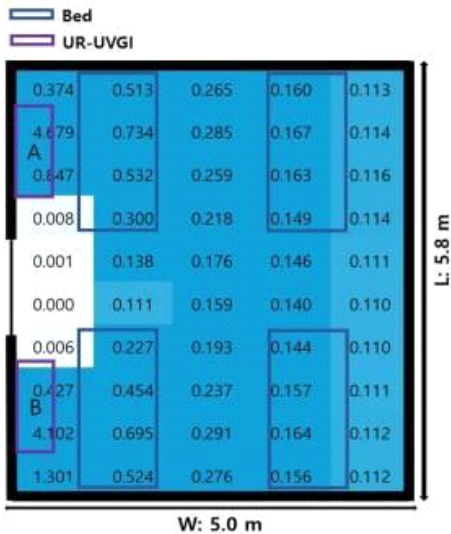
[그림 7]은 UR-UVGI 2대 가동 시 병실 내 UV-C 강도가 전반적으로 증가하였으며, 병실 전체에 더욱 균일한 분포를 형성함을 보여준다. 또한 병실 모서리 근처에서도 강도가 0.110 W/m² 이상으로 측정되었다.

UR-UVGI 2대 가동 시 병실 내 UV-C 강도 분포가 더욱 균일해지고 평균 강도가 향상되어 부유세균 저감 효과가 증가함을 확인하였다. 또한, 재실 영역의 UV-C 노출 여부를 확인하기 위해 높이 1.5 m에서 병실의 좌우 양측면과 중앙에서 측정을 실시하였으며, UV-C가 검출되지 않음을 확인하였다.



단위: W/m²

[그림 10] UR-UVGI 1대 가동 시 UV-C강도



단위: W/m²

[그림 11] UR-UVGI 2대 가동 시 UV-C강도

4. 연구 결론

본 연구는 다인실 병동 환경에서 UR-UVGI 시스템의 부유세균 저감효과를 실험적으로 규명하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 실제 임상 환경에 가까운 4인실 병동 모형을 사용하여, 다인실 특유의 복잡한 기류 패턴과 병상 간 상호작용이 감염 제어에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

실험 결과, UR-UVGI 시스템의 가동은 환기량에 관계없이 부유세균 저감율과 상당환기횟수를 유의미하게 증가시키는 것으로 나타났다. 특히 2 ACH의 환경에서 UR-UVGI 2대 가동 시 상당환기횟수가 4.75 ACH까지 상승하여, 환기횟수가 6 ACH 단독

운전 시와 유사한 수준의 부유세균 저감효과를 달성하였다. 이는 기존 환기 시스템의 한계를 보완하는 에너지 효율성을 유지할 수 있는 경제적인 대안임을 시사한다. 실험 결과를 바탕으로 산출한 상당환기횟수는 병원체 제거에 특화된 지표로, 악취, 휘발성 유기화합물, 미세먼지 등 복합적 공기질 관리에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 UR-UVGI 가동과 병실 환기량 조절은 감염 제어 성능과 쾌적성 유지 간의 균형을 위한 핵심과제이며, 환자와 보호자의 안전한 생활환경 조성에 직결된다.

UR-UVGI의 가동 대수가 증가할수록 병실 내 UV-C 강도 분포가 더욱 균일해져, 부유세균 저감 효과가 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 1대에서 2대로 추가 가동 시 효과 증가는 0대에서 1대로의 증가에 비해 다소 제한적으로 나타났는데, 이는 UR-UVGI의 설치 위치와 부유세균 발생원의 상대적 위치에 의한 영향으로 판단된다.

병실 모든 영역에서 30분 이내에 90% 이상의 부유세균 감소율을 달성하였다. 이는 UR-UVGI 시스템이 다른 병원체가 존재하는 실제 병원 환경에서도 충분한 감염 제어 효과를 기대할 수 있음을 시사한다. 특히, 다인실처럼 환자와 보호자가 공간을 공유하는 환경에서 UR-UVGI의 적용은 병상 간 교차 감염 위험을 효과적으로 줄일 수 있는 실질적 대안임을 확인하였다.

다인실 환경에서 UR-UVGI의 부유세균 저감율은 UR-UVGI 배치, 실내 병상위치, 환기횟수 등 다양한 운영 변수에 따라 성능이 크게 좌우될 수 있음을 확인하였다. CFD 시뮬레이션을 통해 UR-UVGI 시스템의 성능은 실내 기류분포와 UV-C 조사 영역 배치에 크게 영향을 받을 것으로 예상된다. 특히, 급기·배기구의 배치나 가동 방식이 감염원 주변의 공기 정체 구역을 최소화함으로써 감염제어 효율을 극대화할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 추후 연구에서는 실험 데이터와 CFD 시뮬레이션을 통해, 여러 변수를 입력한 해석을 진행하고 최적의 운영전략을 도출하고자 한다.

한편, 본 연구는 병실 모형에서의 실험 결과이므로 실제 임상 환경에서의 적용에는 한계가 있다. 의료진과 환자의 이동, 출입문 개폐, 의료행위와 실내 구조물에 의한 UV-C의 반사 등 여러 요소가 반영되지 않았다. 또한 실험에 사용된 균주 외에 바이러스, 결핵균 등 다양한 병원체의 거동에 대한 추가 검증이 필요하다. 아울러, 에너지 소비량 비교, UR-UVGI 장기 운영에 따른 유지관리 방안 등도 추후 연구에서 다룰 예정이다.

사사: 본 연구는 2025년도 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: RS-2021-KP002461 / 본 연구는 2025년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: RS-2024-00333462

참고문헌

- 방종일, 성민기, 2023, "음압격리병실 챔버를 이용한 환기횟수에 따른 UR-UVGI 살균 성능 실험", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 43.2
- ASHRAE, 2017, "ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017: Ventilation of Health Care Facilities", Atlanta, GA: ASHRAE
- Bang, J. I.; Park, J.; Choi, A.; Jeong, J. W.; Kim, J. Y.; Sung, M., 2018, "Evaluation of UR-UVGI system for sterilization effect on microorganism contamination in negative pressure isolation ward", Sustainability, 10(9), 3192
- BEGGS, Clive B.; AVITAL, Eldad J., 2020, "Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: a feasibility study", PeerJ, 8: e10196
- CDC, 2023, "Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines", https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation/uvgi.html
- Ibrahim, E.; Harnish, D.; Kinney, K.; Heimbuch, B.; Wander, J., 2015, "An experimental investigation of the performance of a Collision nebulizer generating H1N1 influenza aerosols", Biotechnology & Biotechnological Equipment, 29(6), 1142-1148
- Jo, H. J.; Choe, P. G.; Kim, J. S.; Lee, M.; Lee, M.; Bae, J.; Lee, C. M.; Kang, C. K.; Park, W. B.; Kim, N. J., 2024, "Risk of nosocomial coronavirus disease 2019: comparison between single-and multiple-occupancy rooms", Antimicrobial Resistance & Infection Control, 13(1), 95
- SETLOW, Peter, 2001, "Resistance of spores of Bacillus species to ultraviolet light", Environmental and molecular mutagenesis, 38.2-3: 97-104
- Yao, G.; Liu, Z.; Liu, H.; Jiang, C.; Li, Y.; Liu, J.; He, J., 2024, "Air disinfection performance of upper-room ultraviolet germicidal irradiation (UR-UVGI) system in a multi-compartment dental clinic", Journal of Hazardous Materials, 477, 135383



접수 : 2025년 5월 16일
1차 심사완료 : 2025년 5월 27일
게재확정일자 : 2025년 5월 27일
3인 익명 심사 필

www.kci.go.kr