

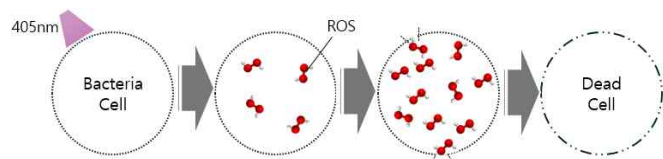
남동호*, 정민재*, 서대현*, 박혜리*, 조상수**
 동아대*, ㈜엘이디소프트**

Study on the bacterial reduction effect of visible light germicidal lighting

Dongho Nam*, Minjae Jung*, Daehyun Seo*, Herie Park*, Sangsu Jo**
 Dong-A University*, LEDSOFT Co.,Ltd.**

Abstract - Recently, there has been growing demand for safe and sustainable disinfection technologies in healthcare settings. This study evaluated the bactericidal and virucidal efficacy of a high-intensity 405nm visible light LED against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and the COVID-19 virus. Experiments by Korea Conformity Laboratories and KR BIOTECH showed over 99.9% inactivation of *S. aureus* and a 96.8% reduction of the virus. These findings validate that visible light disinfection, unlike conventional UV-C, offers strong antimicrobial performance while remaining safe for human exposure, highlighting its potential in high-risk environments such as hospitals, long-term care facilities, and public transportation.

Species)를 과다 생성한다. 이때 생성된 활성 산소가 미생물의 세포막 지질에 산화반응을 일으켜 세포막을 손상시키며 세포 내용물을 유출하게 함으로써 세포의 증식을 억제하거나 사멸시키는 효과가 있다. 그림 2에서 그 메커니즘을 도식화하였다.



<그림 2> 405nm 파장 조사 시 살균 과정

인체에 직접적인 악영향(홍반, DNA 손상, 광각막염, 오존 생성으로 인한 호흡기 자극 등)을 주는 기존의 자외선(265 - 285nm) 살균 방식과 달리 405nm 파장대의 가시광선은 살균 효율은 낮지만, 인간이 생활하는 환경에서 안전하게 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다[1].

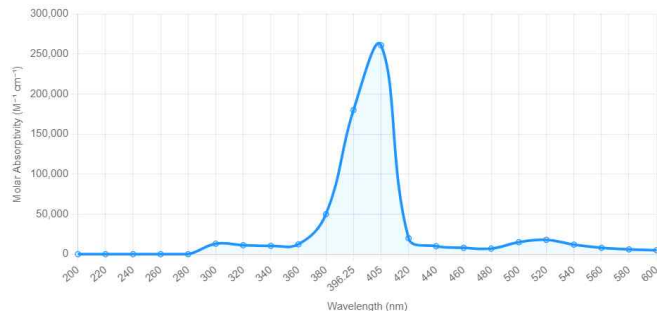
1. 서 론

감염성 질환의 확산은 의료기관뿐만 아니라 생활 전반에 심각한 위협을 가한다. 특히 병원 환경에서는 항생제 내성균의 등장과 교차 감염의 위험성으로 인해, 환경 표면에 존재하는 병원성 미생물의 효과적인 제거가 필수적이다. 본 연구는 405nm 파장대의 가시광선 LED 조명의 병원 내 환경 표면에 존재하는 병원성 미생물(세균 및 바이러스) 제거 성능을 검증하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 공인 시험기관을 통해 405nm LED 조명의 미생물 살균 효과를 정량적으로 평가한 결과를 제시하고, 가시광 살균조명이 감염성 질환 위험을 줄이는 데 있어 기존 UV-C 기반 기술의 한계를 극복할 수 있는 안전하고 지속 가능한 대안임을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 405nm 파장 기반의 살균 메커니즘

박테리아 내 존재하는 포피린은 405nm 파장에 대해 높은 흡광도를 보이며 이로 인해 405nm 파장은 박테리아 내 포피린에 흡수된다(그림 1).



<그림 1> 포피린 흡광도 곡선

이때 포피린은 광화학 반응을 통해 들뜬 상태로 전이되고, 이 상태에서 주변 산소와 반응해 활성 산소(ROS: Reactive Oxygen

2.2 시험 장치 및 방법

2.2.1 시험 장치 및 조건

본 연구에서는 405nm 가시광선의 병원성 미생물 제거 성능을 평가하기 위하여 100mW 이상의 고출력을 가지는 405nm LED 조명(RB360X360)을 장치로 사용하였다. 시험 온도와 광원의 조사 거리 및 노출 시간은 균의 종류에 따라 표1과 같이 설정하였다. 광원의 조사 거리는 천정에서 사람 혹은 물체까지의 대략적인 거리를 측정하여, 일반 균에 대하여 1m, COVID-19 바이러스에 대하여 0.3m로 하였다.

<표 1> 시험 조건

항목	시험 조건
광원 파장	405nm
시험 온도	균: 37°C (± 1°C) / COVID-19: 20°C
조사 거리	균: 1m / COVID-19: 0.3m
노출 시간	균: 24h / COVID-19: 30, 60, 90min

2.2.2 시험 대상 및 방법

405nm LED 조명의 미생물 살균 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 일반 균(황색포도상구균, 대장균), COVID-19 바이러스를 시험 대상으로 선정하였다. 일반 균에 대해서는 한국건설생활환경시험원에 공식 의뢰하여 시험 장치 광원에 노출된 균과 노출되지 않은 균의 24시간 후 생존율을 측정하여 항균 효과를 평가하였다. 또한, COVID-19 바이러스에 대해서는 KR BIOTECH에 공식 의뢰하여 균을 배지에 접종한 후 광원 노출 여부에 따른 일정 시간 경과 뒤의 균의 생존율을 측정하였다. 미생물의 종류(일반 균과 COVID-19 바이러스) 별로 표준화된

조건에서 조명 노출 전후의 생균 수(CFU: Colony-Forming Unit)과 세포 배양 조직의 50%에서 감염을 유발할 수 있는 바이러스의 양(TCID₅₀: Tissue Culture Infective Dose 50%)을 각각 측정하여 세균의 가시광 조명 노출에 따른 살균 효과를 비교하고 평가하였다.

2.3 시험 결과

2.3.1 일반 균 시험 결과 분석

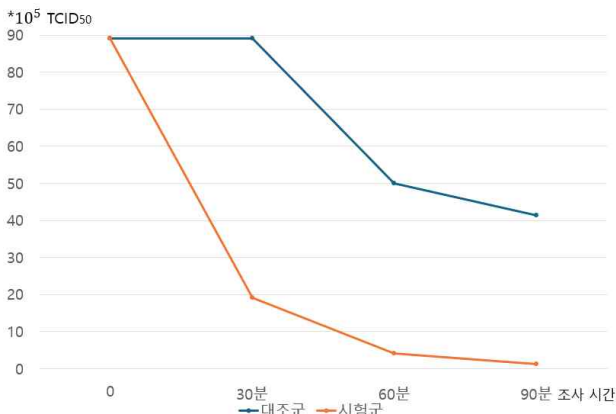
일반 균(황색포도상구균, 대장균) 항균 시험 결과는 표 2와 같다. 먼저 무처리군(BLANK)에서는 24시간 후에도 균의 농도에 변화가 거의 없었다. 농도는 각각 1.2×10^4 CFU/mL, 1.1×10^4 CFU/mL로 유지되었다. 반면, 시험군에서는 황색포도상구균의 농도가 10 CFU/mL 미만으로 감소하여 초기 농도 대비 99.9%의 감소율을 기록하였다. 대장균의 초기 농도 대비 24시간 후 농도 또한 약 20%의 감소율을 보였다. 이로써 자외선에 비해 안전하게 사용할 수 있는 가시광 파장대(405nm) 조명을 이용하여 유의미한 항균력을 보일 수 있음을 확인하였다[4].

<표 2> 항균 시험 결과

시험 대상	시험 결과			
	초기농도 (CFU/mL)	24시간 후 농도 (CFU/mL)		감소율(%)
		무처리군	시험군	
황색포도상구균	1.2×10^4	1.2×10^4	< 10	99.9
대장균	1.1×10^4	1.1×10^4	8.8×10^3	20

2.3.2 COVID-19 바이러스 시험 결과 분석

COVID-19 바이러스 시료를 405nm 광원에 노출하지 않은 대조군 시료와 노출한 시험군 시료로 나누어 시험을 진행하였다. 405nm 광원을 조사하고 30분 후, 60분 후, 90분 후에 측정된 TCID₅₀ 값은 <그림 3>과 같다. 대조군의 경우, 30분 경과 후 측정된 TCID₅₀ 값이 초기 TCID₅₀ 값과 거의 유사하였고, 60분, 90분 경과 후 측정된 TCID₅₀는 초기값 대비 감소하였음을 확인하였다. 바이러스가 건조한 공기에 30분 이상 노출될 시, 자연 소멸을 시작하므로 이 결과는 자연 소멸에 의한 감소로 사료된다. 시험군의 TCID₅₀는 초기값(8.91×10^6 TCID₅₀/μl)을 기준으로 30분, 60분, 90분 후 각각 1.92×10^6 , 4.14×10^5 , 1.31×10^5 TCID₅₀/μl로 감소하였음을 확인하였다. 즉, 자연 소멸 시 보다 높은 불활성화율을 보였고, 최종적으로는 96.8%라는 유의미한 바이러스 불활성화율을 보였다.



<그림 3> 405nm LED 조사 시간에 따른 TCID₅₀ 변화

3. 결 론

본 연구를 통해 고출력 405nm 가시광선 조명이 병원성 세균 및 바이러스에 대해 우수한 살균 성능을 지남을 확인하였다. 일반 균을 광원에 24시간 노출한 결과, 황색포도상구균의 CFU 감소율은 99.9%, 대장균의 CFU 감소율은 20%에 달하였다. COVID-19 바이러스의 TCID₅₀는 광원 조사 유무에 따라 달라졌으며, 광원 조사 시 세균의 자연 소멸보다 더 높은 수준의 불활성화를 확인할 수 있었다. 해당 기술은 자외선 조사 살균 방식보다 안전하면서도 정량적으로 평가 가능한 유의미한 살균력을 제공할 수 있으므로 병원, 요양시설, 교통시설 등에서 활용하는 경우 위생 환경 개선에 기여할 수 있을 것이다. 향후 실사용 환경인 병원 중환자실에서의 장기 성능평가를 통한 실증 연구와 다양한 파장대 조합을 통한 최적화 연구 등을 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Caitlin F. Stewart, Rachael M. Tomb, Heather J. Ralston, Jack Armstrong, John G. Anderson, Scott J. MacGregor, Chintamani D. Atreya, Michelle Maclean, "Violet-blue 405-nm Light-based Photoinactivation for Pathogen Reduction of Human Plasma Provides Broad Antibacterial Efficacy Without Visible Degradation of Plasma Proteins", Photochemistry and photobiology, vol.98 no.2, pp.504 - 512, 2022
- [2] Jonathan B Gillespie, Michelle Maclean, Martin J Given, Mark P Wilson, Martin D Judd, Igor V Timoshkin, Scott J MacGregor, "Efficacy of Pulsed 405-nm Light-Emitting Diodes for Antimicrobial Photodynamic Inactivation: Effects of Intensity, Frequency, and Duty Cycle", Photomed Laser Surg, vol.43 no.3, pp.150 - 156, 2016
- [3] Raveen Rathnasinghe, Sonia Jangra, Lisa Miorin, Michael Schotsaert, Clifford Yahnke & Adolfo Garcia-Sastre, "The virucidal effects of 405 nm visible light on SARS-CoV-2 and influenza A virus", Scientific Reports, vol.11 Issue.1, Article number 19470, 2021
- [4] LEDSOFT Co.,Ltd., CT22-121238K, KCL, ,2023