

# 405 nm 살균용 UV LED 등기구의 청색광 위해에 관한 연구

허현석<sup>1</sup>, 김충혁<sup>2</sup> , 남기호<sup>3</sup>, 김진사<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dt&C

<sup>2</sup> 광운대학교 인제니움학부

<sup>3</sup> 광운대학교 플라즈마바이오디스플레이학과

<sup>4</sup> 조선이공대학교 자동화시스템과

## Blue-Light Hazards of 405 nm Sterilization LED Lamps

Hyeon-seok Heo<sup>1</sup>, Chung-hyeok Kim<sup>2</sup>, Ki-ho Nam<sup>3</sup>, and Jin-sa Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dt&C, Yongin 17042, Korea

<sup>2</sup> Ingenium College, Kwangwoon University, Seoul 01890, Korea

<sup>3</sup> Department of Plasma Biodisplay Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01890, Korea

<sup>4</sup> Department of Automatic System, Chosun College of Science & Technology, Gwangju 61452, Korea

(Received February 10, 2023; Revised February 27, 2023; Accepted March 11, 2023)

**Abstract:** Recently, sterilization technology has received increasing interest due to the COVID-19 pandemic and required safety precautions. Particularly, sterilization devices using near ultraviolet (UV) with a 405 nm wavelength are also drawing attention. It has a UV-C wavelength and other sterilization effects. Its blue-colored light on the boundary between UV and visible light is used as a light-emitting diode (LED) lamp for 405 nm sterilization, owing to its longer wavelengths than UV rays. However, the 405 nm wavelength contains blue light that can damage the eyes and skin during prolonged exposures and affect the emotional and biological parts of the body. Currently, 405 nm sterilization LED light registers are circulating in the market. However, they have not undergone safety tests for blue-light hazards. Thus, with the active distribution of sterilization LED lights, solid safety standards and management systems are essential to protect users from blue-light hazards. Accordingly, in this study, we conducted spectral radiance and spectral radiative luminance tests on 405 nm sterilization LED registers available in the market by the measurement criteria of IEC 62471. Safety standards must be established to secure users' safety against blue light hazards at a time when 405nm sterilization LED lights are actively distributed due to COVID-19.

**Keywords:** Photobiological safety of lamps and lamp systems, Blue hazard, 405 nm LED

✉ Chung-hyeok Kim; [hyeokkim@kw.ac.kr](mailto:hyeokkim@kw.ac.kr)

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

LED 조명은 2009년 이후 그린에너지 사업의 성장동력으로 급부상하고 있다. 에너지 절감 요구에 따라 에너지 효율이 낮은 조명들에서 LED 조명으로 대체되고 있는 추세이다. 현재 LED 조명은 시대의 발전에 따라 시스템 LED 조명, 인간중심조명(human centric lighting), 살균기 등

다양한 분야에서 활용되고 있다.

지난 3년간 COVID-19가 기승을 부리는 가운데 살균기술을 접목한 제품에 이목이 집중되고 있으며 이 가운데 살균 효과가 뛰어난 UV-LED에 대한 관심이 높아지고 있다. UV-수은램프보다 친환경적이고 수명이 긴 것이 특징이며, 2016년에 발명한 Zika virus를 포함해 다수의 바이러스에 대한 99% 살균력이 검증되기도 했다 [1]. UV (자외선) 파장은 특성상 인체에 유해하므로 사용과정에서 주의를 요구하고 있다. 살균용 UV-LED는 모든 제품이 UV-C 파장을 활용하고 있으나, 파장이 짧으므로 소독하고자 하는 물체나 표면에 매우 가까이 위치해야 한다. 이러한 단점을 가지고 있는 UV-C LED를 대체해 최근 405 nm 파장의 Near UV를 활용한 살균용 LED가 화장실, 사무실, 복도, 폐기물 보관소, 회의실 등으로 보급이 활발히 이루어지고 있다.

405 nm는 자외선과 가시광선 경계의 청자색 빛으로 UV-C와는 다른 살균효능을 가지고 있다. 자외선보다 파장이 길어 살균할 수 있는 거리가 길고 피부에 무해하다는 장점이 있어 공간살균에 용이해 살균용 LED 등기구로 활용되고 있다. 현 상황으로는 COVID-19 보균자들을 발병 초기에 완벽하게 격리 및 치료할 수 없고, 온전한 백신 또한 개발되지 않았기 때문에 바이러스의 계속된 변이에 의하여 엔데믹은 쉽지않은 상황이다. 실내 소독, 살균, 방역이 지속적이고 안정적으로 이루어지기 위해서 405 nm 살균용 LED 등기구를 실생활에 적용하여 실내공간을 살균할 수 있다면 각종 바이러스의 공격으로부터 인류의 건강을 지킬 수 있을 것으로 판단된다.

하지만 405 nm 파장은 안구에 유해한 청색광을 포함하고 있어 장시간 노출될 경우 안구를 손상시키며 인체의 감성적, 생체적인 부분에도 영향을 미친다. COVID-19로 인해 405 nm 살균용 LED 등기구가 활발히 보급되는 이 시점에 사용자의 청색광 위해에 대한 보호를 위하여 확실한 안전기준과 관리체계 또한 반드시 필요한 상황이다.

본 연구에서는 405 nm 살균용 LED 등기구의 청색광 위해를 측정하기 위해 광생물학적 안전성 시험을 진행하였다. 시험 결과를 바탕으로 살균용 LED 등기구의 안전한 사용을 위한 안전관리 체계방안을 제시하고자 하였으며 안전기준을 심층적으로 고찰하였다.

### 1.1 405 nm LED

405 nm 파장 영역은 그림 1과 같이 자외선(100~400 nm)과 가시광선(400~800 nm)의 경계를 갖는 청자색 빛으로, 인체에 유해한 자외선과 달리 405 nm 파장은 피부

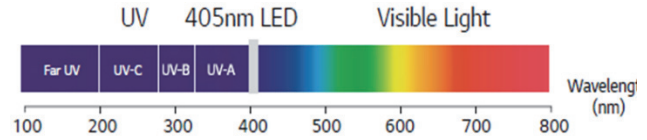


Fig. 1. 405 nm wavelength band.

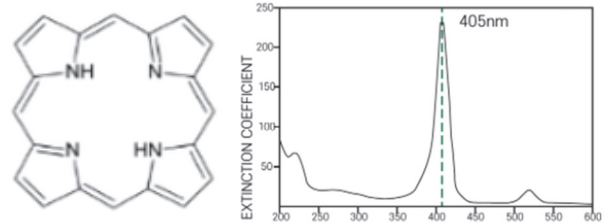


Fig. 2. Porphyrin molecular structure and absorption spectrum.

를 손상시키지 않으며 공기 중 부유한 바이러스를 파괴하는 안전한 파장이다.

우리가 알고 있는 대부분의 세균이나 박테리아는 산소를 운반하는 porphyrin이라는 분자 구조 물질이 존재한다 [2]. 가시광선 영역 중 405 nm 파장에서 활발히 반응하며 분자 구조 및 흡광도는 그림 2와 같다. 405 nm 파장을 조사할 때 반응분해가 일어나게 되며 활성 산소가 과다하게 생성되면 결국 과포화 상태가 되어 바이러스가 자연적으로 사멸하게 된다 [3,4].

하지만 405 nm 파장은 안구에 유해한 청색광을 포함하고 있어 장시간 노출될 경우 안구를 손상시키며 인체의 감성적, 생체적인 부분에도 영향을 미친다.

### 1.2 청색광 위해 사례

눈의 청색광 손상의 예로서 황반변성은 널리 알려져 있다. 황반변성은 눈의 망막 중심부에 위치한 황반 부위의 변화로 시력 장애를 일으키는 질환으로, 시력 감퇴의 주요 원인으로 알려져 있다 [5]. 특히 디지털 전자기기에서 방출되는 청색광이 망막에 영향을 주어 AMD(연령관련황반변성) 가속화와 황반 상의 광수용체 세포를 사멸시킨다 [6]. 이처럼 사멸된 광수용체 세포는 안구 상에서 다시 재생되지 않아 인체에 매우 치명적이다. 황반변성의 증상으로는 원거리든 근거리든 상관없이 중심 시력을 잃어 사물을 자세히 보는 능력을 점차 잃는다. 청색광은 황반 변성뿐만 아니라 인간의 생체리듬에도 영향을 미친다. 생체리듬이란 24시간을 주기로 일어나는 생체 내 과정을 나타낸다. 생체리듬은 단세포 생물부터 식물과 동물에 이르기까지 모든 생명체의 생화학, 생리학, 행동학적 흐름을 조절한다. 빛, 어둠,

기온과 같은 외부적인 요인들에 의해 환경에 조절되며 그 중 빛이 가장 큰 영향력을 미친다 [7]. 빛의 스펙트럼 중 청색광은 생체리듬을 조절하는 멜라토닌 호르몬에 큰 영향을 미친다. 망막의 제3 광수용체인 감광 신경절 세포 (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells)는 파장이 짧은 빛에 가장 민감하게 반응하는데, 특히 단파장의 청색광은 흔히 수면 호르몬인 멜라토닌의 분비를 억제하여 생체리듬을 파괴하여 수면장애를 유발한다.

### 1.3 청색광 위해 관련 규격

IEC 62471 규격은 2006년, IEC가 CIE S009:2002를 받아들여 IEC 62471을 발행하였으며 국내에서는 2008년 9월 KS C IEC 62471을 고시하였고, 2009년 8월에 전기용품 안전기준 KC 62471-1을 고시하였다.

IEC 62471 규격은 조명기구, 램프와 램프장치의 광생물학적 안전성의 평가 지침을 규정하고 있다. 구체적으로는 노출 한계와 기준 측정법을 규정하고 있으며, 200~3,000 nm의 파장 범위에서 LED를 포함하여 모든 전동식 비간섭성 광대역 광학 복사원으로 인한 광생물학적 위해의 평가와 관리를 위한 분류 계획으로 규정되어 있다. 200~3,000 nm의 파장 범위에서 청색광 위해뿐만 아니라, 적외선 위해, 자외선 위해, 망막 열 위해 등 인체에 미치는 영향에 대하여 평가하는 시험 방법이다. 인체에 영향을 미치는 정도에 따라 제외군, 위험군 1, 2, 3의 4개 위험 등급으로 분류되어 레이저를 제외한 모든 광원의 위험군에 대한 라벨을 제품에 붙이도록 되어있으며 제외군은 라벨을 붙이지 않도록 되어있다.

## 2. 시험 방법 및 시험 장비

광생물학적 안전성 규격 IEC 62471에 제시된 시험 방법으로 복사조도는 한점을 포함하는 표면에 입사하는 방사속  $d\Phi$  을 표면의 성분  $dA$ 로 나눈 비율로 아래의 식 (1)과 같다

$$E_{\lambda} = \frac{d\phi(\lambda)}{dA \cdot d\lambda} \quad (1)$$

단위:  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$

스펙트럼 복사휘도란 특정점에서 특정방향으로 파장간격  $d\lambda$ 에 대해 해당 점을 관통하며 특정 방향의 입체각  $d\Omega$  내에서 전파되는 복사력  $d\Phi(\lambda)$ 대, 파장 간격  $d\lambda$ 와 특정점을 포함한 이 방향에 수직한 평면 위에 있는 빔 구간의 면

적( $\cos\theta dA$ )의 곱의 비율 및 입체각  $d\Omega$ 의 비율로 아래의 식 (2)와 같다.

$$L_{\lambda} = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA \cdot d\Omega \cdot d\lambda} \quad (2)$$

단위:  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$

만성적인 청색광 노출로 인해 망막의 광화학적 부상을 방지하기 위해, 청색광 위해 함수  $B(\lambda)$ 에 대해 가중된 광원의 적분 스펙트럼 복사휘도, 즉, 청색광 가중 복사휘도  $L_B$ 는 다음 식 (3)에 의해 정의된 수준을 초과하지 않아야 한다 [8].

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_{\lambda}(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10^6 \quad (3)$$

$(t \leq 10^4 \text{ seconds})$

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 100 \quad (4)$$

$(t \leq 10^4 \text{ seconds})$

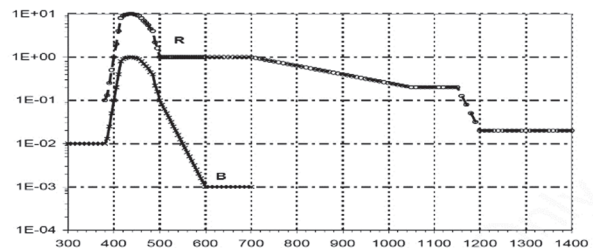


Fig. 3. Spectral weighting function for retinal damage:  $B(\lambda)$   $R(\lambda)$ .

Table 1. Spectral weighting function for evaluating retinal harm caused by broadband light sources.

nm	$B(\lambda)$	$R(\lambda)$
380	0.01	0.1
385	0.013	0.13
390	0.025	0.25
395	0.05	0.5
400	0.10	1.0
405	0.20	2.0
410	0.40	4.0
415	0.80	8.0
420	0.90	9.0
425	0.95	9.5
430	0.98	9.8
440	1	10.0

### 2.1 시험 장비

연구에서 사용하고자 하는 double monochromator는 IEC 62471에서 규정하는 200~3,000 nm 파장 범위를 포함하는 장비를 사용하였다. 높은 스펙트럼 분해가 빠르게 가능하며 USB 인터페이스를 갖춘 스펙트럼 분석계이다.



Fig. 4. Double monochromator.

D7 diffuser는 double monochromator와 함께 irradiance 측정 시 사용되며 교정을 통해 거의 완벽한 cosine response ( $f2 < 1\%$ ) 특성을 보인다. 석영 재질의 광섬유(1~2 M)를 통하여 double monochromator의 input slit에 연결하여 사용된다.



Fig. 5. D7 diffuser.

TEL309는 radiance 측정 시 double monochromator의 input optic으로 사용되며 PC로 제어하는 telescope이다. Stepping motor로 움직이면서 포커싱 및 심도(1.7 mrd, 11 mrd)를 선택할 수 있다. USB 카메라를 기반으로 하여 측정 장면을 사용자에게 보여주며, double monochromator 시스템에 석영 재질의 번들 광섬유를 통해 연결하여 사용된다.

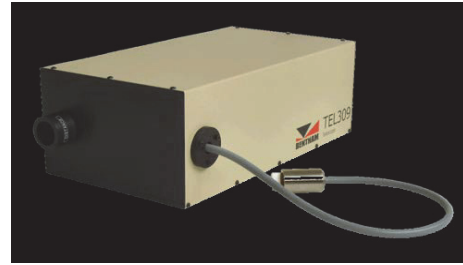


Fig. 6. TEL309.

광생물학적 안전성 측정 시스템의 구성으로 double monochromator, D7 diffuser, TEL309, prop, dark room, rail, PSL software 등의 다양한 장비와 보조장비의 구성으로 광생물학적 안전성 측정 시스템을 구성해야 한다. 측정 시스템에 대한 실제 구성도는 아래 그림 7과 같다.

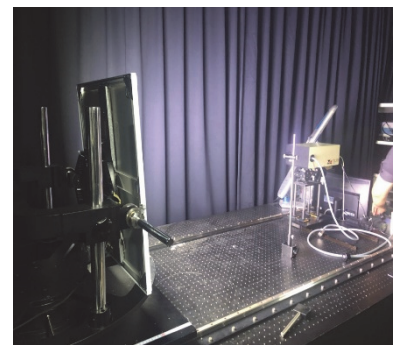


Fig. 7. Actual configuration of the photobiological safety measurement system.

### 2.2 시험 방법

IEC 62471에서는 GLS (general lighting service)와 Non-GLS (non-general lighting service)를 분류하여 시험 방법을 다르게 적용한다.

GLS란 공간을 비추도록 설계된 조명으로 학교, 공장, 사무실, 도로를 비추는 일상에 사용하고 있는 일반조명을 뜻하며 시험 방법으로는 광원에서 500 lx가 되는 지점에서 스펙트럼 복사조도와 스펙트럼 복사휘도를 측정하여 위험군이 결정된다.

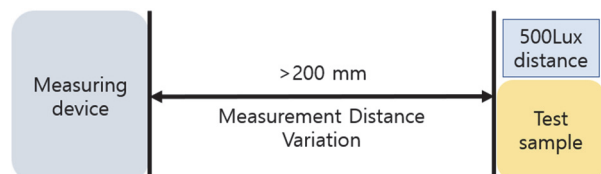


Fig. 8. GLS measurement method.

Non-GLS는 의료용이나 전문분야에 사용되는 조명으로 필름공정, 의료기기 등에 사용된다. Non-GLS은 의료기기나 필름 공정에 사용되어 작업자가 유심히 봐야 하는 경우가 다수이기 때문에 광원에서 200 mm 거리에서 스펙트럼 복사조도와 스펙트럼 복사휘도를 측정하여 위해군이 결정된다.

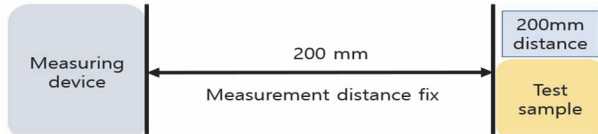


Fig. 9. Non-GLS measurement method.

### 3. 측정 결과

#### 3.1 시험 시료

시중에 판매되고 있는 표 2와 같은 사양의 시료를 채취하여 청색광 위해 정도를 파악하기 위하여 스펙트럼 복사조도와 복사휘도를 측정하였다.

Table 2. Test sample.

	Size [mm]	Lux [lx]	W [W]
A	600×199×66.5	2,600	60
B	565×200×60	2,600	60
C	1,200×200×65	5,200	60
D	400×400×60	3,000	60
E	400×200×60	1,600	60

#### 3.2 스펙트럼 복사조도

시료 A, B, C, D, E에 대해 GLS 측정 방법으로 각각 1,870, 1,800, 1,780, 1,720, 1,700 mm 거리에서 스펙트럼 복사조도를 측정하였다. 시료 A~E의 파장별 스펙트럼 복사조도 그래프는 그림 10~14에, 측정된 위해 값은 표 3~7에 각각 나타내었다. 측정된 각 위해값 모두 위험군 한계값을 초과하지 않아 제외군으로 분류되었다. 시료 A~C의 경우, 측정된 그래프에 대해 405 nm에서 피크 값을 보여주었고, 또한 각각 420~720, 430~700, 440~720 nm 범위에서 측정되었으나 위해별 측정값에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

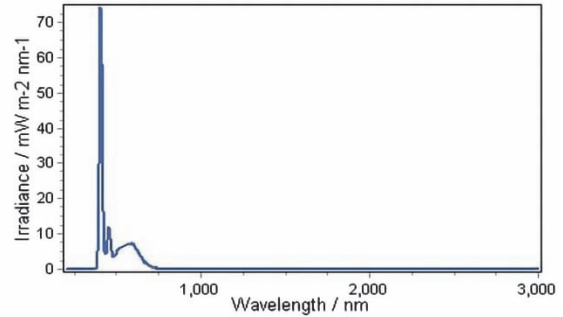


Fig. 10. Sample A spectrum irradiance measurement result graph.

Table 3. Sample A spectrum irradiance measurement results.

Hazard	Measured value	Resulting risk group	Risk group limit value
Actinic UV	5.88E-02	Exempt	1
Near UVA	2.54E-01	Exempt	10
IR eye	1.65E-02	Exempt	100
Thermal skin	2.78E+00	Pass	3.56E+03

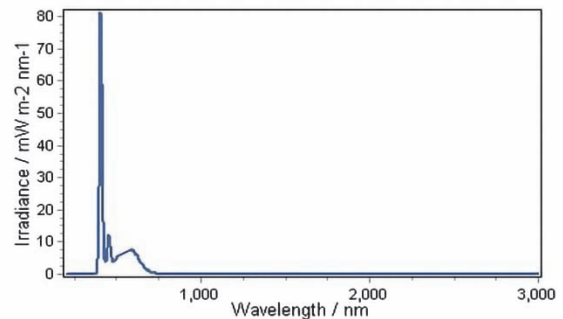


Fig. 11. Sample B spectrum irradiance measurement result graph.

Table 4. Sample B spectrum irradiance measurement results.

Hazard	Measured value	Resulting risk group	Risk group limit value
Actinic UV	1.1E-02	Exempt	1
Near UVA	2.85E-01	Exempt	10
IR eye	7.34E-03	Exempt	100
Thermal skin	2.89E+00	Pass	3.56E+03

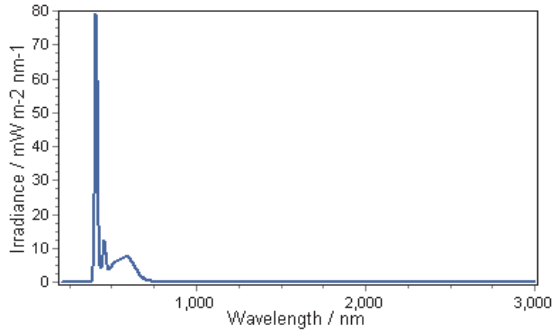


Fig. 12. Sample C spectrum irradiance measurement result graph.

Table 5. Sample C spectrum irradiance measurement results.

Hazard	Measured value	Resulting risk group	Risk group limit value
Actinic UV	1.04E-02	Exempt	1
Near UVA	2.76E-01	Exempt	10
IR eye	5.63E-03	Exempt	100
Thermal skin	2.86E+00	Pass	3.56E+03

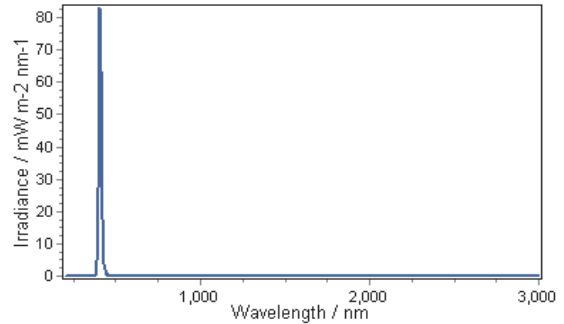


Fig. 14. Sample E spectrum irradiance measurement result graph.

Table 7. Sample E spectrum irradiance measurement results.

Hazard	Measured value	Resulting risk group	Risk group limit value
Actinic UV	1.1E-02	Exempt	1
Near UVA	2.89E-01	Exempt	10
IR eye	5.61E-03	Exempt	100
Thermal skin	1.5E+00	Pass	3.56E+03

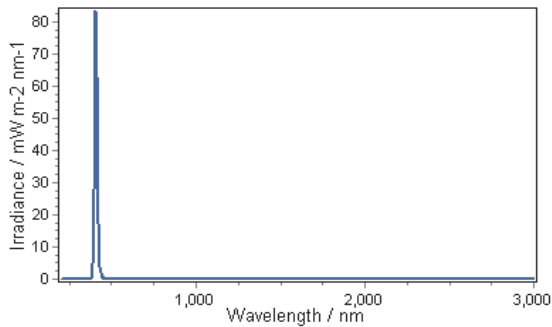


Fig. 13. Sample D spectrum irradiance measurement result graph.

Table 6. Sample D spectrum irradiance measurement results.

Hazard	Measured value	Resulting risk group	Risk group limit value
Actinic UV	1.18E-02	Exempt	1
Near UVA	2.92E-01	Exempt	10
IR eye	8.44E-03	Exempt	100
Thermal skin	1.51E+00	Pass	3.56E+03

### 3.3 스펙트럼 복사휘도

시료 A, B, C, D, E에 대한 GLS 측정 방법으로 측정 거리 1,870, 1,800, 1,780, 1,720, 1,700 mm에서 스펙트럼 복사휘도를 측정하였다. 시료 A~E의 파장별 스펙트럼 복사휘도는 그림 15~19에, 측정된 스펙트럼 복사휘도 위해값은 표 8~12에 각각 나타내었다. 시료 A~C의 경우 청색광 위해값이 각각 1.01E+02, 1.42E+02, 1.04E+02로 제외군 한계값을 초과하여 심도를 변경하여 재측정하였다. 재측정 결과 시료 A, B, C의 청색광 위해값은 1E+02, 1.26E+03, 1.09E+03이고 망막 열 위해값은 9.11E+03, 1.27E+04, 1.09E+04로 측정되었다. 측정된 청색광 위해값은 위험군 1 한계값을 초과하지 않아 위험군 1로 분류되었으며, 망막 열 위해값은 위험군 한계값을 초과하지 않아 제외군으로 분류되었다. 시료 D와 E의 경우, 측정된 청색광 위해값과 망막 열 위해값이 모두 한계값을 초과하지 않아 제외군으로 분류되었다.

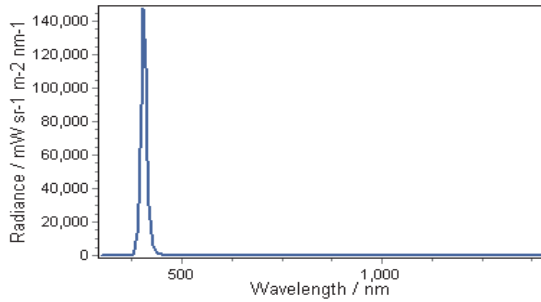


Fig. 15. Sample A spectrum radiance measurement result graph.

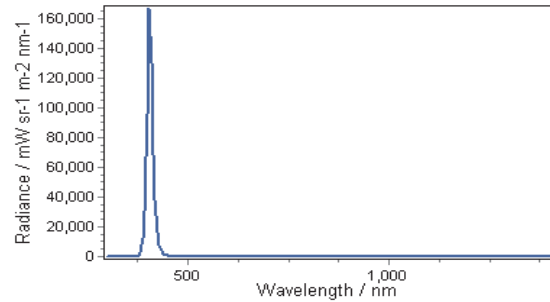


Fig. 17. Sample C spectrum radiance measurement result graph.

Table 8. Sample A spectrum radiance measurement results.

Hazard	Measured value	Risk group limit value	Risk group tested	Pass/Fail
Blue-light hazard 100 mrad FOV	1.01E+02	100	Exempt	Fail
Blue-light hazard 11 mrad FOV	9.1E+02	1E+04	Group 1	Pass
Blue-light hazard 1.7 mrad FOV	n/a	n/a	Group 2	n/a
Retinal Thermal 11 mrad FOV	9.11E+03	2.81E+05	Exempt	Pass

\*FOV = field of view

Table 10. Sample C spectrum radiance measurement results.

Hazard	Measured value	Risk group limit value	Risk group tested	Pass/Fail
Blue-light hazard 100 mrad FOV	1.04E+02	100	Exempt	Fail
Blue-light hazard 11 mrad FOV	1.09E+03	1E+04	Group 1	Pass
Blue-light hazard 1.7 mrad FOV	n/a	n/a	Group 2	n/a
Retinal thermal 11 mrad FOV	1.09E+04	2.81E+05	Exempt	Pass

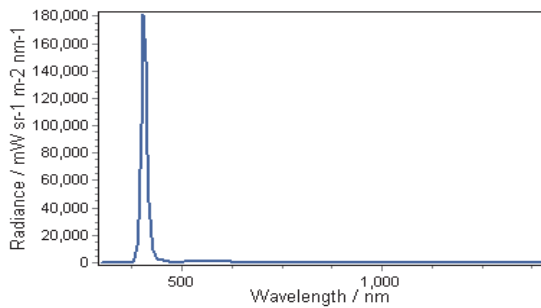


Fig. 16. Sample B spectrum radiance measurement result graph.

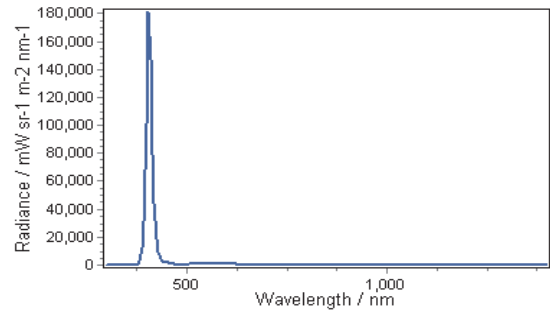


Fig. 18. Sample D spectrum radiance measurement result graph.

Table 9. Sample B spectrum radiance measurement results.

Hazard	Measured value	Risk group limit value	Risk group tested	Pass/Fail
Blue-light hazard 100 mrad FOV	1.42E+02	100	Exempt	Fail
Blue-light hazard 11 mrad FOV	1.26E+03	1E+04	Group 1	Pass
Blue-light hazard 1.7 mrad FOV	n/a	n/a	Group 2	n/a
Retinal thermal 11 mrad FOV	1.27E+04	2.81E+05	Exempt	Pass

Table 11. Sample D spectrum radiance measurement results.

Hazard	Measured value	Risk group limit value	Risk group tested	Pass/Fail
Blue-light hazard 100 mrad FOV	6.74E+01	100	Exempt	Pass
Blue-light hazard 11 mrad FOV	n/a	n/a	Group 1	n/a
Blue-light hazard 1.7 mrad FOV	n/a	n/a	Group 2	n/a
Retinal thermal 11 mrad FOV	1.44E+04	2.81E+05	Exempt	Pass

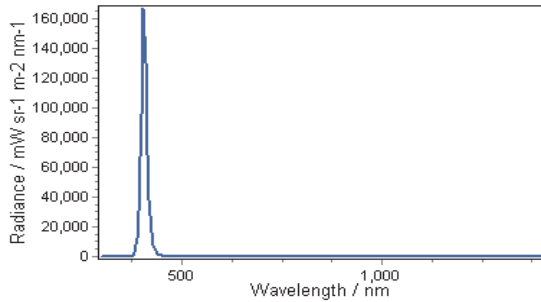


Fig. 19. Sample E spectrum radiance measurement result graph.

Table 12. Sample E spectrum radiance measurement results.

Hazard	Measured value	Risk group limit value	Risk group tested	Pass/Fail
Blue-light hazard 100 mrad FOV	6.8E+01	100	Exempt	Pass
Blue-light hazard 11 mrad FOV	n/a	n/a	Group 1	n/a
Blue-light hazard 1.7 mrad FOV	n/a	n/a	Group 2	n/a
Retinal thermal 11 mrad FOV	1.14E+04	2.81E+05	Exempt	Pass

#### 4. 결과 고찰

IEC 62471 시험 방법을 적용하여 스펙트럼 복사조도 및 스펙트럼 복사휘도를 측정하였다. 405 nm의 파장이 400 nm로 시프트 될 경우를 고려해 스펙트럼 복사조도 그래프를 세심히 확인하였고 근자외선 위해 측정값을 비교해 본 결과 제외군의 한계값을 초과하지 않은 것을 확인하였다. A, B, C 시료에서는 405 nm에서 peak 값을 보였으나 420~720 nm 범위에서도 스펙트럼 복사조도가 측정되었다. 시료가 PCB사이에 405 nm LED를 부착하여 구성된 형태로 구동되어 405 nm 외의 파장도 같이 측정된 것으로 판단되었으나 시험 결과로부터 이러한 구성으로 인해 각 위해별 측정값에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. D, E 시료는 405 nm LED로만 구성된 살균용 LED 등기구로 405 nm에서 peak 값을 보였으며 다른 파장은 측정되지 않음을 시험 결과로부터 확인하였다. 스펙트럼 복사조도 시험에서는 5개의 시료 모두 측정값이 제외군 한계값을 초과하지 않아 광생물학적 안전성 위해 평가등급은 제외군으로 사용자의 인체에 위해를 미치지 않는 것을 확인하였다. IEC 62471 기준으로 시험한 결과에 따라 모두 제외군으로 제품에 위해 위험군 라벨을 부착하지 않아

도 되었다.

스펙트럼 복사휘도 시험에서는 A, B, C 시료에서 청색광 위해 측정값이 제외군 한계값을 초과해 심도를 변경하여 재측정하였고 청색광 위해 위험군 1으로 사용자의 안전에 미흡한 것을 확인하였다. D, E 시료에서는 청색광 위해 측정값이 제외군 한계값을 초과하지 않아 제외군으로 분류되어 사용자의 인체에 위해를 미치지 않는 것을 확인하였다. 위험군 1은 정상적인 행동 제한 아래서는 광생물학적 위해가 없으나 비정상적으로 장시간 조사할 경우 인체에 위해를 미칠 수 있다. 청색광 위해 위험군 1으로 분류된 A, B, C 시료는 양 PCB 사이에 405 nm LED를 부착한 형태로 구성되어 있어 LED 면조명과 405 nm LED의 회로를 분리하고 개별 컨버터와 재실감지 센서를 구성하여 실내 공간의 재실 여부에 따라 405 nm LED를 구동하여 살균을 진행해야 안전할 것으로 판단된다. 또한, 실생활에 적용 시 등기구로부터 실내 바닥까지의 거리가 설치공간마다 다를 것으로 추정되며 동일한 수준의 살균력을 구현하기 위해서는 405 nm LED의 표준출력값을 도출해 내는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 청색광 위해 규제가 미비한 상황에서 사용자의 안전이 확보되지 않은 405 nm 살균용 LED 등기구가 무분별하게 시장에 유통되고 있는 것으로 확인되었다. 405 nm 살균용 LED 등기구에 대한 청색광 위해에 관한 안전기준이 없어 사용자의 안전에 위해가 발생할 수 있음을 확인하였다.

#### 5. 결론

본 연구를 통해 살균용 LED 등기구의 청색광 위해에 관한 현황 및 인체에 미치는 영향에 대하여 조사를 실시하였다. UV-C의 위해성과 짧은 살균 거리를 대체해 시장에 유통 중인 405 nm 살균용 LED 등기구에 대한 청색광 위해성을 측정하기 위하여 광생물학적 안전성 규격인 IEC 62471의 측정방법을 적용하여 스펙트럼 복사조도 및 스펙트럼 복사휘도 시험을 진행하여 분석하였다. 연구 결과 스펙트럼 복사조도 시험에서는 A, B, C 시료에서 405 nm 파장 외의 다른 파장도 측정되었으나 위해별 측정값에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었으며, 5개의 시료 모두 제외군으로 사용자의 인체에 위해를 미치지 않는 것을 확인하였다. 스펙트럼 복사휘도 시험에서는 3개의 시료에서 청색광 위해 위험군 1로 사용자의 안전에 미흡한 것을 확인하였다. 위험군 1은 정상적인 행동 제한 아래서는 광생물학적 위해성을 미치지 않으나 가까운 거리에서 조사하

거나 장시간 조사할 경우 인체에 광생물학적 위해를 미칠 수 있는 것으로 파악되었다.

IEC 62471의 적용 범위로 노출 시간은 근로자가 하루에 작업하는 평균 시간인 30,000초(8시간 30분) 이내 지정되어 있으나 대다수 근로자들의 경우 업무시간이 지켜지지 않고 있다. 이러한 이유로 사용자에게 청색광에 관한 안전성 문제가 발생할 수 있다고 판단된다. 이와 같은 안전에 대한 문제로 청색광 위해 관련 규격이 반드시 적용되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 시중에 유통 중인 405 nm 살균용 LED 등기구 5개 제품에 대하여 광생물학적 안전성 시험을 진행하여 결과를 도출하였다. 스펙트럼 복사휘도 시험에서 5개의 시료 중 3개의 시료가 청색광 위해 위험군 1로 사용자의 안전에 취약한 것을 확인하였다. COVID-19로 인해 405 nm 살균용 LED 등기구가 활발히 보급되는 이 시점에 청색광 위해에 대한 사용자의 안전성 확보를 위해 안전기준이 반드시 확립되어야 함을 광생물학적 안전성 시험을 통해 확인하였다.

#### ORCID

Chung-hyeok Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2694-0431>

#### 감사의 글

The present research has been supported by the Research Grant of Kwangwoon University in 2021.

#### REFERENCES

- [1] S. Kang, Y. Meng, X. Cheng, J. Tu, D. Guo, Y. Xu, S. Liang, X. Xia, and C. Shi, *Front. Microbiol.*, **10**, 1907 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01907>]
- [2] S. Banfi, E. Caruso, L. Buccafurni, V. Battini, S. Zazzaron, P. Barbieri, and V. Orlandi, *J. Photochem. Photobiol., B*, **85**, 28 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2006.04.003>]
- [3] J. H. Kim, J. I. Bang, A. S. Choi, and M. K. Sung, *J. Korean Inst. Archit. Sustainable Environ. Build. Syst.*, **13**, 590 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.22696/JKIAEBS.20190051>]
- [4] K. McKenzie, M. Maclean, M. H. Grant, P. Ramakrishnan, S. J. MacGregor, and J. G. Anderson, *Microbiology*, **162**, 1680 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.000350>]
- [5] R. D. Jager, W. F. Mieler, and J. W. Miller, *New Engl. J. Med.*, **358**, 2606 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMra0801537>]
- [6] C.M.G. Cheung, E. S. Tai, R. Kawasaki, W. T. Tay, J. L. Lee, H. Hamzah, and T. Y. Wong, *Arch. Ophthalmol.*, **130**, 480 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2011.376>]
- [7] T. Kozaki, S. Koga, N. Toda, H. Noguchi, and A. Yasukouchi, *Neurosci. Lett.*, **439**, 256 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.05.035>]
- [8] International Electrotechnical Commission, IEC 62471 Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems, 2006.