

275 nm UVC LED와 TIR 렌즈 장착 광원을 이용하는 물 살균장치 제작

카완 어닐[†]·유승희*·유승훈*·박준아*·신인식*·이승재*·김유빈*·
권용빈*·한동균*·유순재*·김희태**·박성배***

[†]선문대학교 전자공학과, **기초과학연구원 중이온가속기연구소, ***주식회사 디엠엘이디

Fabrication of a Water Sterilization System Utilizing a 275 nm-wavelength UVC LED and TIR Lens-equipped Light Source

Kawan Anil[†], Seung Hui Yu*, Seung Hoon Yu*, J. A. Park*, I. S. Shin*, S. J. Lee*, Y. B. Kim*,
Y. B. Kwon*, D. G. Han*, Soon Jae Yu*, Heetae Kim** and Seong Bae Park***

[†]Department of Electronic Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea,

**Institute for Rare Isotope Science, Institute for Basic Science, Daejeon 34000, Korea,

***DM LED Co., Ltd, Ansan 15421, Korea

ABSTRACT

A water sterilization system is developed utilizing a 275 nm-wavelength LED light source equipped with a TIR lens. The system's light source is constructed by combining a 275 nm-wavelength UVC LED, known for its germicidal properties, with a TIR lens having a direction angle of 6.8 degrees. The optical simulation software 'LightTools' is employed to design and optimize the intensity of deep ultraviolet sterilizing light irradiation, its distribution, and sterilization capacity. In the inactivation experiment with E. coli, the water sterilizer system achieved a sterilization rate of 78.92 % while maintaining a water flow capacity of 50 L/min. Compared to the conventional mercury lamp light source water sterilizer system, the UVC LED water sterilizer system addresses environmental concerns related to mercury usage and offers advantages in terms of lifespan and durability.

Key Words : Water Sterilization, UVC LED, Silicone TIR Lens, 275nm UVC LED, LightTools Simulation

1. 서 론

깊은 자외선 (UVC) 275 nm 파장 영역의 빛은 DNA/RNA의 물리적 파괴 및 단백질 산화작용 등의 살균작용으로 코로나 바이러스를 비롯 각종 세균 살균 특히 물 살균장치 기술에 응용되고 있다 [1]. 물 살균장치에서 종래에 광원으로 사용하던 수은등은 환경오염과 수은 규제 조약 등의 문제점이 있다. 또 살균선으로 유효한 265 nm ~ 275 nm 영역의 스펙트럼을 얻기 위해서는 많은 전력 소모가

필요하다 [2]. 이러한 문제점 들을 해결하고 또 최근에 중요한 이슈인 탄소중립 목표 달성을 위하여 수은등 광원을 LED 반도체 광원으로 교체는 매우 중요하다고 생각한다 [3]. 또 수명이나 내구성의 측면에서도 새로운 장수명의 광원을 이용하는 물 살균장치의 개발이 크게 기대되고 있다. 그러나 UVC LED를 물 살균장치에 사용하기 위해서는 낮은 출력 특성이나 렌즈 집속기술 등 응용상의 많은 기술적 어려움이 있다 [4]. 특히 종래에 LED 광원 렌즈 시스템에서 일반적으로 사용하던 에폭시나 실리콘 수지 재료기술은, 이 에너지 영역에서는 투과율이 현저히 감소하고 내구성 문제가 발생하기 쉽다 [5]. 따라서 UVC

[†]E-mail: kawan@sunmoon.ac.kr

영역의 LED 광원에서 고출력, 고밀도 특성 [6]을 얻기 위해서는 석영재료 렌즈 시스템을 이용하거나 또는 TIR (Total Internal Reflection/내부전반사) [7], 돔 (Dome) 형태의 [8] 렌즈를 제작하여 사용해야 하므로, 1,600°C 이상의 고온 성형기술이 필요하며 따라서 비용이나 제조 공정 상 어려움이 많다. 이러한 LED 광원부의 제작 문제는 또 살균 용량이나 유량을 늘리기 위해 광원의 고출력 대전력 구동이 필요로 하게 되고, 결국 LED 및 LED 광원부의 방열 특성 등 여러 가지 문제점 들을 개선해야 한다.

본 연구에서는 공정수 또는 하수 폐수 살균처리를 목적으로, 275 nm 파장 영역의 UVC LED 및 고지향 특성을 가지는 실리콘 재료 [9] TIR 렌즈를 제작하고, 이 광원을 이용하여 150 L/min 유량의 살균 특성을 가지는 물 살균장치 처음으로 제작하였다. 살균장치 반응관 구조는 광원부의 특성과 살균 처리 대상 용수의 UVC 투과율 특성을 고려하여 물의 흐름에 평행으로 조사되며, 비교적 긴 거리에서 살균이 이루어지도록 수평 반응관 구조로 하였다.

2. 실험 방법

UVC LED 광원부는 고출력, 고밀도 특성을 얻기 위해 고 집속 평행광 특성을 가지는 TIR 렌즈를 사용하였다. ‘LightTools’ 광학 시뮬레이션을 이용하여 UVC LED 사양, 렌즈 및 광원부를 설계하였다.


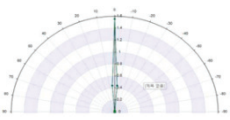
Lens Shape	
Light Distribution	
Diameter (O/I)	16/4 mm
Efficiency	77.5 %
Height (O/I)	8/4 mm
Angle	6.77°

Fig. 1. TIR lens design and results of optical simulation.

Fig 1에 설계한 렌즈의 도면과 사양을 나타냈다. 렌즈는 LED 칩의 크기와 수 및 목표 조사면에서의 UVC 광 조사 분포의 균일성을 고려하여, 1X1 mm² 크기의 칩에 장착할 때 외형 직경 16 mm 높이 8 mm 크기에서 77.5%의 렌즈효율과 6.77°의 지향각을 가지도록 설계되었다.

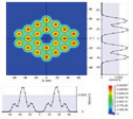
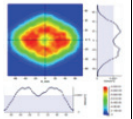
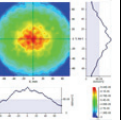
Receiver Distance (mm)	4.0	122.5	425.0
Illuminance Distribution			
Maximum Intensity (mW/cm ²)	24.6	12.08	7.58
Minimum Intensity (mW/cm ²)	0	0	0
Average Intensity (mW/cm ²)	3.87	3.85	3.02

Fig. 2. Measurements of irradiation intensity on surface area at three different distances.

설계한 TIR 렌즈를 장착한 UVC LED 광원을 직경 150 mm 크기의 광원부에 설치하고 경통 구조의 모형을 만들어 광원부에서 일정한 거리만큼 떨어뜨려, 거리를 달리하는 3개 영역에서 각각 조사밀도가 15 mW/cm² 이상이 되도록 UVC LED 광원부를 설계하였다.

Fig 2에 경통 구조 한쪽에 TIR 렌즈를 장착한 44개 LED를 Array로 설치하고 광원에서 일정한 4.0 mm에서 425.0 mm까지 일정한 거리만큼 떨어진 3개의 조사면에서 각각 시뮬레이션 강도를 나타냈다. 광원부에서 떨어진 거리에 따라 UVC 조사분포의 균일성과 최대 조사밀도 값이 서로 반비례하여 나타나는 점을 알 수 있다.

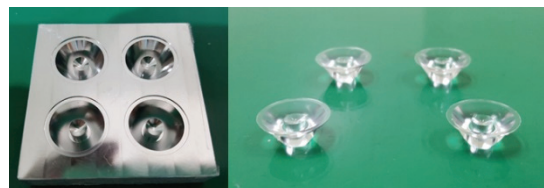


Fig. 3. Photograph of the fabricated TIR lenses and aluminum mold for casting.

Fig 3에는 제작한 TIR 렌즈의 사진과 금형을 나타낸다. 제작한 TIR 렌즈를 0.75X0.75 mm² 크기의 UVC LED 칩에 장착하여 광학특성을 측정한 결과, 집속효율 96%, 15°의 지향특성을 나타냈다.

Fig 4에 150 L/min 살균 용량을 가지는 물 살균장치의 측면 대략도를 나타냈다. 광원부는 UVC LED 칩 44개를 플립칩 형태로 어레이 배치 실장하고 TIR 렌즈를 장착하여 구성하였다. 광원부는 자연 공랭방식의 방열판과 반응관

을 통과하는 시료 물에 의하여 냉각될 수 있도록 하였다. 이 때 UVC LED 광원을 동작시켜 근시야상 전체 면에서 균일한 조사밀도를 얻을 수 있도록 하였다. 제작한 물 살균장치에서 반응관 내부의 광원부로부터 일정거리 떨어진 조사면 영역에서 조사밀도를 측정하였다. 근시야상 중앙부에서, 4.0 mm, 122.5 mm 및 425.0 mm 떨어진 거리에서 각각 12.3 mW/cm², 5.9 mW/cm², 3.3 mW/cm²로 나타났다. 이때 소비전력은 54.7 W를 나타낸다. 반응관은 외경 165 mm, 최대 외경 205 mm, 길이 737 mm로 내부 광원모듈은 외부 방열판에 연결된다. 또 내부에 라미나플로우 물의 흐름이 될 수 있도록 살균구조 형태의 가이드가 물 유입부에서 100mm 거리 떨어진 위치에 설치되었다.

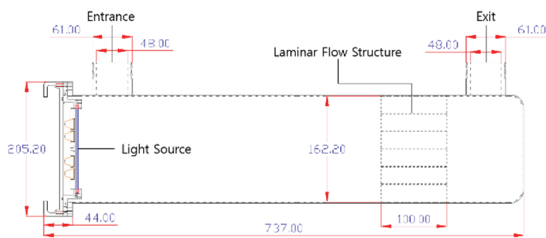


Fig. 4. Schematic drawing of the designed water sterilizer's reaction tube.

제작한 물 살균장치는 살균 용량을 측정하기 위해 170 L/min 양수용량을 가지는 펌프를 순환장치에 연결하여 동작 시험하였다. 이 때 장치의 살균 용량은 UVC LED 광원의 출력에 대하여 반응관을 통과하는 유량에 따른 E-콜리 대장균 제거 사멸 정도를 측정하여 계산하였다.

배양한 E-콜리 대장균을 펌프와 순환장치에 연결된 물통에 희석 방류하여, 물을 150 L/min 속도까지 순환시키면서 살균장치를 가동하였다.

이 때 가동시간은 초 단위로, 물 살균장치 통과 횟수는 회로 계산된다. 사멸한 E-콜리 대장균의 수는 물 살균기 장치를 통과한 물 시료에서 E-콜리 대장균 수를 카운트하여 계산하였다. 여기서 대장균의 일정한 개체 수를 확보하기 위하여 대장균을 접종시킨 Nutrient Broth 배지를 0.85 % Narco를 이용하여 10⁸~10⁹ 배까지 희석하여 Compact Dry EC 배지에 접종 시킨 후, 다시 정온 배양기에서 배양한 뒤 배지에 생성된 대장균의 콜로니 수를 카운트하였다.

3. 결과 및 고찰

275 nm 파장 영역 UVC LED 및 TIR 렌즈를 장착한 광원을 이용하는 물 살균장치를 제작하고, E-콜리 대장균을 희석한 물을 방류하여 장치의 살균용량 특성을 조사하였다.

E-콜리 대장균을 희석 방류한 물을 50 L/min, 100 L/min 및 150 L/min 유량으로 순환시키면서 살균장치를 가동하여, 각각의 유량에 대하여 물 시료를 채취하고 대장균 E-콜리의 수를 카운트하여 처음 살균장치를 통과하기 전 E-콜리 대장균을 희석 방류한 상태의 물에서의 대장균 E-콜리 수와 비교하여 사멸률을 계산하였다.

Sterilization flow rate			
Initial	150 L/min	100 L/min	50 L/min

Fig. 5. E. coli removal according to the flow rate of sterilizing water in samples.

Fig 5에 물 살균장치에서 반응관을 통과하여 순환하는 각각의 유량에 대하여, 배지의 E-콜리 대장균 수를 나타내는 사진을 나타냈다. 순환펌프의 유량을 감소시키기에 따라 UVC LED 및 TIR 렌즈 광원부가 설치된 반응관을 통과하는 물 시료의 속도가 느려지고, 물 시료에 조사되는 UVC 조사밀도가 증가하게 된다. 따라서 E-콜리 대장균에 UVC 조민도가 증가하게 되고 사멸에 따라 개체수의 감소가 현저히 나타남을 알 수 있다. 물 살균장치의 반응관 통과에 대한 대장균 E-콜리 개체수의 사멸 감소 관계를 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Change in the number of E. coli for four samples according to the water sterilizer flow rate

Flow rate (L/min)	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4
Initial state	100,500	105,000	81,500	89,000
50	21,500	17,500	23,000	12,050
100	32,100	18,700	27,500	12,750
150	35,000	39,500	65,000	26,200

반응관을 통과하기 전 단계에서 대장균 E-콜리의 개체 수는 샘플 1의 시료에서 100,500 마리, 150 L/min에서 35,000 마리, 또 100 L/min 및 50 L/min에서 각각 32,100마리, 21,500 마리로 유량이 감소함에 따라 단계적으로 감소됨을 알 수 있다.

Table 2에 물 살균장치의 반응관 통과 유량을 50 L/min, 100 L/min 및 150L/min로 하여 각각 48초, 24초 및 16초 동안 가동하면서 평균 대장균 E-콜리 수의 감소량과 사멸률을 나타낸다. 여기에서 시간은 대장균이 희석된 40 L의 물을

각각의 유량으로 흘려 보낸 시간이다. 표에서 알 수 있듯이 100 L/min 유량에서 24초 가동할 때 77.17 %, 50 L/min에서 48초 가동할 때 78.92 %로 사멸률을 나타냄을 알 수 있다. 275 nm 파장 영역 LED를 사용하는 UVC 광원이 작동하는 반응관 물살균 장치를 이용하여, 반응관을 통과하는 물 시료의 유량의 감소나, 각각의 유량에서 조사시간에 해당하는 가동 시간에 따라 사멸률이 증가함을 알 수 있다.

Table 2. Change in the number of E. coli according to the water sterilizer flow rate

Flow rate (L/min)	Operation Time (s)	E. Coli 수 (Average)	Removal Rate (%)
Initial state	0	94,000	0
50	48	19,813	78.92
100	24	21,463	77.17
150	16	41,425	55.93

공정수 또는 하수 폐수처리 장치에서 종래에 사용하던 수은등의 환경오염 및 규제, 에너지효율 감소에 따른 탄소중립 문제 등의 중요한 해결방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

275 nm 파장 영역의 UVC 깊은 자외선 LED 광원을 사용하여 TIR 구조 렌즈를 제작 장착하여 물 살균장치를 제작하였다. 물 흐름과 같은 수평방향으로 광 조사특성을 가지도록 반응관 구조와, TIR 렌즈를 이용하는 고출력 고밀도 특성의 광원부를 구성하고, 'LightTools'을 이용하여 조사거리에 따라 시뮬레이션 하여 반응관내 균일한 조사분포를 가지도록 제작하였다. 물 살균장치는 대장균 E-콜리 살균을 시험으로, 50 L/min 유량에서 48초 가동하여 78.92 %, 150 L/min 유량에서 16초 가동하여 55.9 %의 사멸률의 살균 특성을 가지는 것으로 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 한국산업기술진흥원 (KIAT) 과 교육부 부처협업사업 반도체전공트랙사업 (P0022203) 의 지원으로 수행하였다. 또한 렌즈 광원 시스템 설계와 E-콜리배양 물 살균장치 시험에 도움을 주신 한국산업기술대학교 정미숙 교수님과 호서대학교 장인성 교수님께 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. P. Jarvis, O. Autin, E. H. Goslan, and F. Hassard, Application of Ultraviolet Light-Emitting Diodes (UV-LED) to Full-Scale Drinking-Water Disinfection, *Water* 11, 1894 (2019).
2. S. W. Rhee, H. S. Park, Mercury Distribution of major Components from 3-banded and General Spent Fluorescent Lamp, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 30, 265 (2013).
3. D. Morita, M. Yamamoto, K. Akaishi, K. Matoba, K. Yasutomo, Y. Kasai, M. Sano, S. I. Nagahama, and T. Mukai, Watt-Class High-Output-Power 365 nm Ultraviolet Light-Emitting Diodes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 5945 (2004).
4. S. J. Yu, D. H. Kim, Y. S. Choi, and H. Kim, Development of a Very Small LED Lamp with a Low-Thermal-Resistance Lead Frame for an LCD Backlight Unit, *J. Inf. Disp.*, 10, 49 (2009).
5. J. H. Seo, J. S. Lee, S. Y. Kim, Y. J. Jeong, H. J. Park, D. Y. Nam, and M. S. Jung, Design of a Bar-type TIR Lens Having a Freeform Surface for Forming a Line Beam Using an LED Light Source, *Korean Journal of Optics and Photonics*, 28, 295 (2017).
6. M. A. Würtele, T. Kolbe, M. Lipsz, A. Külberg, M. Weyers, M. Kneissl, M. Jekel, Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes –UV LEDs– for water disinfection, *Water Res.*, 45, 1481 (2011).
7. J. H. Sung, S. J. Yu, K. Anil, and M. S. Jung, Fabrication of 365 nm Wavelength High Transmittance Sil-icone Resin TIR Lens and High Directivity Light Source Module for Exposure System, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, 31, 267 (2018).
8. C. C. Liao, H. X. Lin, C. L. Chien, C. M. Chang, and C. P. Hsu, Dispensed dome lens validation through optical simulations for high irradiance UV LED module, 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP) (pp. 676-679) (2014).
9. T. Takano, T. Mino, J. Sakai, N. Noguchi, K. Tsubaki, and H. Hirayama, Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency, *Appl. Phys. Express.*, 10, 031002 (2017).

접수일: 2024년 2월 21일, 심사일: 2024년 3월 15일,
 게재확정일: 2024년 3월 20일