



# LED 광원 UV에 의한 대장균(*E. coli*) 소독의 속도론 해석

## Kinetic analysis of *E. coli* disinfection using UV-LED

김경래·장인성\*

Kyeong-Rae Kim·In-Soung Chang\*

호서대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Hoseo University

pp. 379-387

pp. 389-403

pp. 405-415

pp. 417-424

pp. 425-436

pp. 437-454

pp. 455-463

pp. 465-476

pp. 477-487

pp. 489-496

pp. 497-505

pp. 507-516

pp. 517-531

pp. 533-544

### ABSTRACT

Water disinfection using UV-LED(Light emitting diode) has many advantages, such as smaller footprint and power consumption as well as relatively longer lifespan than those of conventional mercury-UV lamps. Moreover, UV-LED disinfection is considered an environmentally benign process due to its mercury-free nature. In this study, disinfection using an LED module emitting 275nm UV was carried out. 384 UV-LEDs were put into a cylinder tube with a capacity of 1.7 liters. The UV intensity of the UV-LED module was controlled from 1.7 to 8.4 mW/cm<sup>2</sup>. The disinfection efficiency for the model microorganism solutions(*E. coli*) was monitored. As the UV intensity(I) and contact time(t) varied, inactivation of the microorganisms from 2 to 4-log-removals(i.e., 99 to 99.99% of disinfection efficiency) was achieved. Disinfection using UV-LED was followed to 1<sup>st</sup> order reaction and the reaction rate constant, k was determined. In addition, the relationship between UV intensity(I) and contact time(t) in order to obtain 99.99% of disinfection efficiency was modeled:  $I^{1.2} \cdot t = 460$ , which indicates that the product of UV intensity and contact time requiring 4-log-removals is always constant.

**Key words:** Disinfection, *E. coli*, Kinetics, LED, UV

**주제어:** 소독, 대장균, 속도론, 발광 다이오드, 자외선

Received 16 November 2021, revised 9 December 2021, accepted 10 December 2021.

\*Corresponding author: In-Soung Chang (E-mail: [cis@hoseo.edu](mailto:cis@hoseo.edu))

• 김경래 (석사연구원) / Kyeong-Rae Kim (Master Student)

충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499  
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea

• 장인성 (교수) / In-Soung Chang (Professor)

충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 31499  
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea

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. 서 론

수처리를 위한 소독에는 염소 및 오존을 이용하는 화학적 방법과 자외선 또는 고전압 임펄스를 사용한 물리적 방법으로 구분할 수 있다. 염소 소독은 우수한 잔류성 및 경제성으로 인해 공공용수의 소독에 널리 사용되고 있다. 그러나 염소 소독은 트리할로메탄(trihalomethanes), 할로아세트산(haloacetic acids)과 같은 독성 소독 부산물을 생성할 수 있다 (Sun et al., 2009; Liu and Zhang, 2014). 오존은 강력한 산화력으로 소독 효율이 높으며 유기물질도 쉽게 산화시킬 수 있는 장점이 있으나, 브롬산염(bromate)과 같은 발암성 소독 부산물이 생성될 가능성이 있다. 따라서 염소나 오존을 이용한 화학적 소독은 독성 및 발암성을 가진 소독 부산물의 잠재적 생성에 항상 촉각을 곤두세워야 하는 문제점이 있다.

한편, 자외선(UV)에 의한 소독은 간편한 조사(irradiation)만으로 미생물을 효율적으로 제어할 수 있다. 특히, 화학약품의 사용하지 않기 때문에 소독 부산물을 생성하지 않는 장점이 있다 (Mori et al., 2007; Park et al., 2013; Song et al., 2016; Liu et al., 2019). 최근에는 화학약품의 생산, 이송, 저장 및 사용, 각 취급 단계에서 안전 및 보건에 관한 규제가 강화되고 있어서 화학약품의 사용하지 않는 공정의 구성이 큰 장점으로 인식되고 있다.

그러나 자외선 광원으로 광범위하게 사용되는 램프는 수은을 함유하고 있어 폐기 시 환경에 유해한 영향을 주며, 짧은 수명과 소형화 및 경량화에 어려움이 있다 (Li et al., 2019; Kim et al., 2020). 최근 수은 UV 램프를 LED(Light-emitting diode) 램프로 대체한 UV-LED 소독에 관한 관심이 증가하고 있다 (Wurtele et al., 2011; Li et al., 2017). LED는 수은 램프와 비교해 에너지 소비 및 유지 보수 비용이 적으며 오존 방출이 없다. 또한, 긴 수명 및 소형화와 휴대성이 편리하다는 장점이 있다 (Vilhunen et al., 2009; Zhang et al., 2014; Matafonova and Batoev, 2018). 따라서 여러 가지 장점을 가진 UV-LED를 소독에 활용하는 연구개발 및 실용화가 활발히 진행되고 있다.

그러나 UV-LED를 이용한 소독 공정을 설계하기 위해 반드시 필요한 속도론적 분석(kinetic analysis)에 관한 연구는 미흡한 편이다. 수은 램프를 이용한 소독과 UV-LED를 이용한 소독 속도론이 크게 다를 것으

로 판단되지는 않는다. 그러나 UV-LED 소독 공정을 구성하기 위해 필요한 UV 조사강도와 접촉시간에 따른 소독효율의 정량적 해석에 관한 연구는 활발히 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 UV-C 영역의 275 nm 파장을 발광하는 UV-LED 소독 장치를 제작하여 대장균(*E. coli*)을 소독하면서 UV-LED의 중요한 운전 인자인 자외선 조사강도(UV intensity)의 크기와 접촉시간(contact time)이 미생물 소독에 미치는 영향을 파악하고 이를 정량화하고 수식화하는 모델링을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 소독대상 미생물

UV-LED 장치의 소독효과를 알아보기 위해서 소독 대상 미생물로 대장균(*Escherichia coli*, ATCC8739)을 선정하여 사용했다. 대장균은 한국 미생물 보존센터(KCCM)에서 동결건조 앰플을 구매하여 종균으로 사용하였다. 초순수 1 L와 nutrient broth(BD Difco, USA) 8 g을 혼합한 액체배지에 균을 접종하였다. 배지는 멸균기에서 121°C에서 15분간 멸균시킨 후 사용했으며, 접종된 배지는 정온 배양기(ThermoStable IG-105, Daihan, Korea)에서 37°C, 24시간 동안 배양하였다. 대장균은 정기적으로 계대 배양하여 보존하며 실험할 때마다 적당한 농도로 희석하여 사용하였다.

### 2.2 미생물 균체 수 측정

UV-LED 소독 장치를 인가해 준 시료를 채취하여 희석용액(0.85%-NaCl)에 희석한 뒤 compact dry EC(Compact Dry, Nissui Pharmaceutical Co., Ltd., Japan)에 1 ml씩 분취하였다. 희석용액은 1 L 조제를 기준으로 NaCl(99%, Samchun, Korea) 8.5 g을 증류수 1 L에 녹여 만든 용액이며, compact dry는 대장균을 간편하게 배양하여 계수할 수 있도록 만들어진 건조배지로서 검출한계는 1~300 CFU/plate이다. 총 4개의 판(plate)이 한 세트에 구성되어 있어서 4세트의 평균값으로 균체 수를 정량하였다.

### 2.3 UV-LED 소독 장치

본 연구에 사용된 UV-LED 소독 장치는 1.7 L의 용



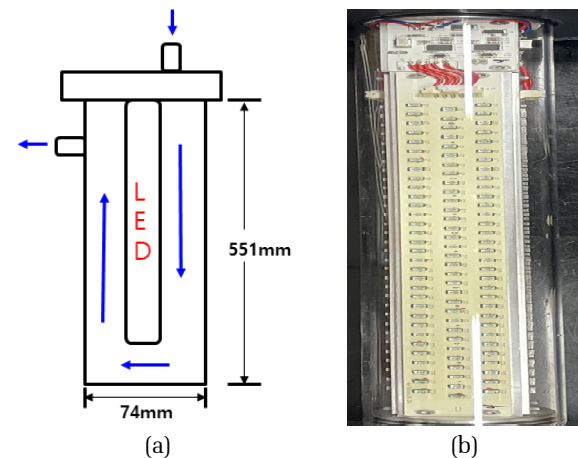
량을 갖는 모듈 내부에 총 384개의 UV-LED를 삽입하여 제작하였다. 96개의 UV-LED를 직각기둥 4개 면에 각각 부착하고 이를 원통형 석영으로 감싸서 물의 직접적 접촉을 막도록 제작하였다. 석영 원통 관의 내경은 46 mm이고 높이는 510 mm로 제작하였다. 반응기 덮개는 스테인리스 스틸(SUS303) 재질로 내경은 74 mm, 높이는 551 mm로 제작하였다 (Fig. 1).

UV-LED의 전류를 증감하여가며 UV 조사강도를 조절하였다. LED 칩 1개당 10~50 mA의 전류값을 갖도록 설계하였다. 본 연구에서는 자외선 조사강도(I)를 1.7, 5.1, 8.4 mW/cm<sup>2</sup>로 변화시키며 소독 실험을 수행하였다. UV-LED 모듈의 세부 사양을 Table 1에 요약하였다.

본 연구에서는 소독 속도에 관한 자료를 얻기 위하여 회분식으로 소독 실험을 수행하였다. 즉, UV-LED 모듈로 이송된 대장균 용액이 계속 순환하며 소독되는 구조를 택하였다. 배양된 대장균 용액을 담은 용기에 연동펌프(Masterflex L/S 7523-70, Cole-Parmer, USA)를 연결하여 제작된 UV-LED 모듈로 이송하고, 다시 용기로 순환되도록 시스템을 구성하였다 (Fig. 2).

**Table 1.** Specification of the UV-LED disinfection module

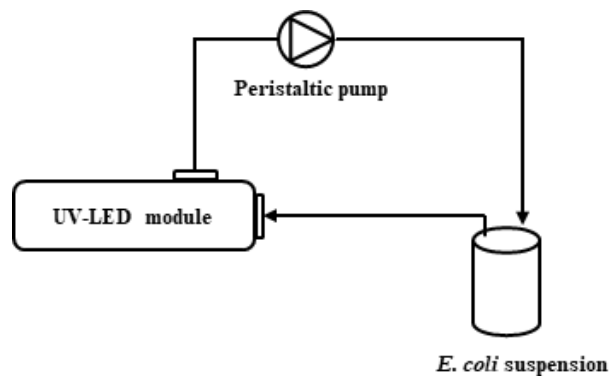
UV-LED	Unit	Values
Module volume	L	1.7
LED chips	ea	384
Wavelength	nm	275
Current	mA	10 ~ 50
UV intensity	mW/cm <sup>2</sup>	1.7, 5.1, 8.4



**Fig. 1.** Schematic of water-flow in the UV-LED module (a) and the photograph of the quartz cylinder protecting the UV-LED chips (b).

**Table 2.** Experimental conditions of batch type disinfection using the UV-LED module

Parameter	Unit	Values
Volume of the <i>E. coli</i> suspension	L	2
Recirculation flow rate	ml/min	500
UV intensity	mW/cm <sup>2</sup>	1.7, 5.1, 8.4
Initial number of <i>E. coli</i>	CFU/ml	101 ~ 106
Contact time	min	0, 3, 10, 20, 35, 60, 90
pH	-	7.5 ± 0.9



**Fig. 2.** Schematic of the batch-type UV-LED disinfection system.

자외선 조사강도가 다른 조건에서 접촉시간 0, 3, 10, 20, 35, 60, 90분에서 시료를 채취하여 소독 자료를 취득하였다. 상세한 소독 조건을 Table 2에 제시하였다.

### 2.4 미생물 소독의 속도론 해석

UV-LED 소독 공정의 중요한 운전 인자는 UV 조사강도(I)와 접촉시간(t)이다. UV-LED 조사를 통해 감소하는 미생물 균체수를 속도론 관점에서 해석하여, 특정한 소독효율을 얻는 데 필요한 조사강도와 접촉시간의 관계식을 얻고자 하였다. 미생물 균체수가 감소하는 속도(=dN<sub>t</sub>/dt)를 Chick-Watson의 1차 모델(Hijnen et al., 2006)로 놓으면 식 (1)을 얻는다.

$$\frac{dN_t}{dt} = -k' \cdot N_t \quad (1)$$

미생물 균체수 감소 속도에 영향을 미치는 조사강도(I)에 의한 영향을 고려하기 위해 임시반응 속도상

pp. 379-387  
pp. 389-403  
pp. 405-415  
pp. 417-424  
pp. 425-436  
pp. 437-454  
pp. 455-463  
pp. 465-476  
pp. 477-487  
pp. 489-496  
pp. 497-505  
pp. 507-516  
pp. 517-531  
pp. 533-544

수,  $k'$ 는 다음 식 (2)와 같이 반응속도상수  $k$ 와  $I^n$ 에 비례하는 것으로 식을 바꿀 수 있다.

$$k' = k \cdot I^n \quad (2)$$

$k'$ : Temporary reaction rate constant ( $\text{min}^{-1}$ )

$k$ : Reaction rate constant ( $\text{min}^{-1}$ )

$I$ : UV intensity ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

$n$ : Constant related with the UV intensity

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)을 얻는다.

$$\frac{dN_t}{dt} = -k \cdot I^n \cdot N_t \quad (3)$$

식 (3)에서 접촉시간을  $0 \sim t$ , 미생물 개체수는  $N_0 \sim N_t$ 로 적분하여 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다. 여기서  $N_0$ 는 접촉시간이 0일 때의 개체수이다.

$$\frac{1}{N_t} dN_t = -k \cdot I^n \cdot dt \quad (4)$$

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{1}{N_t} \cdot dN_t = -k \cdot I^n \int_0^t dt \quad (5)$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -k \cdot I^n \cdot t \quad (6)$$

$N_0$  : Initial number of microorganisms (CFU/ml)

$N_t$  : Number of microorganisms at contact time  $t$  (CFU/ml)

식 (6)의 양변에 자연로그,  $\ln$ 을 취하고 조사강도,  $I$ 에 관한 식으로 정리하면 식 (7)를 얻는다.

$$\ln I = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right] \quad (7)$$

식 (7)의 좌변 즉,  $\ln(I)$ 를 y축으로 놓고, x축은  $\ln(t)$ 로 하여 실험자료를 그래프에 도시하여 직선을 얻는다면 직선의 기울기와 y-절편값을 읽음으로써 상수  $n$ 과  $k$ 를 구할 수 있다. 즉, 직선의 기울기는  $-1/n$ 이고 y-절편값은  $\frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$ 이다. 이렇게 얻어진  $n$ 과  $k$  및 감소한 개체수 정보,  $\ln \frac{N_t}{N_0}$ 를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (8)을 얻는다.

$$I^n \cdot t = constant \quad (8)$$

식 (8)은 일정한 소독효율 ( $\frac{N_t}{N_0}$ )을 얻기 위해 필요한 UV 조사강도( $I$ )의  $n$ 승과 접촉시간( $t$ )의 곱은 항상 일정함을 의미한다. 이 식을 이용하면 일정 소독효율을 얻기 위해 필요한 조사강도와 접촉시간 사이의 연관성을 쉽게 파악할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대장균 초기 균체량에 따른 사멸률 변화

UV 조사강도를 1.7, 5.1, 8.4  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 변화시키며 수행한 소독 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 조사강도를 1.7  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 고정하고 초기균체량이  $5.36 \times 10^6$ 과  $6.98 \times 10^6$  CFU/ml인 경우에 접촉시간 90분에서 각각 99.87과 99.85의 사멸률을 보였다 (Fig. 3a).

UV 조사강도를 5.1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 증가시킨 후, 초기균체량이  $10^1 \sim 10^6$  CFU/ml일 때 90분의 접촉시간 후에는 모두 99% 이상의 사멸률을 보였다 (Fig. 3b). 초기균체량이  $4.4 \times 10^1$ ,  $8.5 \times 10^2$  CFU/ml로 매우 낮은 경우에는 접촉시간 10분 내에 대장균이 모두 사멸하여 이후에는 대장균이 검출되지 않았다. 초기균체량이 각각  $5.38 \times 10^4$ ,  $1.94 \times 10^5$ ,  $3.04 \times 10^6$  CFU/ml로 비교적 높은 경우에 사멸률 99%(2-log removal)에 도달하는 시간은 각각 15분, 18분, 62분이었다. 즉, 초기균체량이 적을수록 99% 이상의 사멸률에 도달하는 데 걸리는 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 초기균체량이 높은 경우에 2-log 이상의 사멸률을 보기 위해서는 UV-LED의 조사강도의 크기가 중요한 변수로 적용할 것으로 판단된다.

조사강도를 8.4  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 으로 높인 경우(Fig. 3c) 초기균체량  $10^2 \sim 10^6$  CFU/ml의 범위에서 접촉시간 35분 이후에는 모두 99% 이상의 사멸률을 보였다. 앞선 실험 결과와 마찬가지로 초기균체량이 높을수록 사멸 속도가 지연됨을 알 수 있다. 또한, 사멸률이 2-log(99%) 이상 도달하는 데 걸리는 시간은 5.1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 일 때보다 단축되는 것을 확인할 수 있다. 즉, UV-LED의 중요한 운전인자인 조사강도( $I$ )와 접촉시간( $t$ )과 더불어 초기균체량이 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다.



pp. 379-387  
pp. 389-403  
pp. 405-415  
pp. 417-424  
pp. 425-436  
pp. 437-454  
pp. 455-463  
pp. 465-476  
pp. 477-487  
pp. 489-496  
pp. 497-505  
pp. 507-516  
pp. 517-531  
pp. 533-544

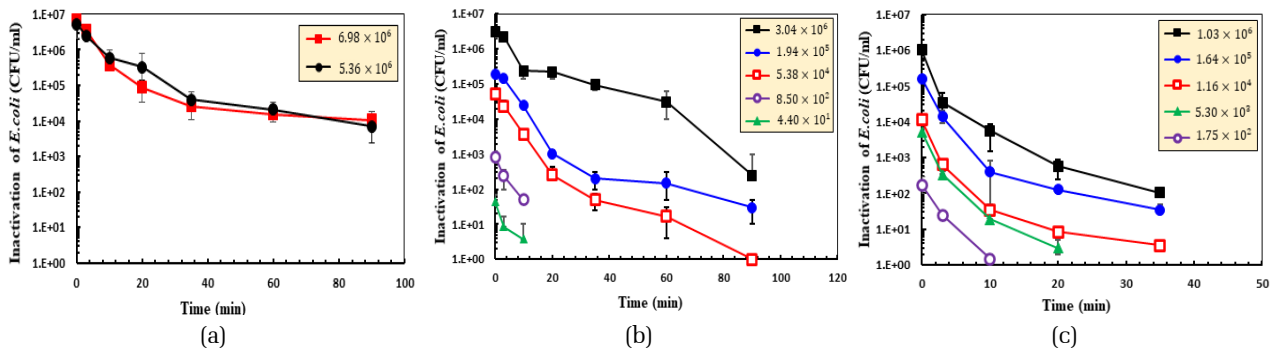


Fig. 3. Plots of inactivation as a function of contact time under different irradiation intensity of UV-LED: (a) 1.7 mW/cm<sup>2</sup>, (b) 5.1 mW/cm<sup>2</sup>, (c) 8.4 mW/cm<sup>2</sup>.

### 3.2 UV-LED 소독의 반응차수 해석

전통적인 염소 소독 이론에 의하면 미생물 사멸은 1차 반응을 따르는 것으로 알려져 있다 (Rennecker et al., 1999; Son et al., 2005). Fig. 3의 소독 자료를 이용하여 본 연구의 UV-LED 소독 장치를 활용한 소독의 반응차수를 살펴보았다. 조사강도 5.1 mW/cm<sup>2</sup>로 하여 초기균체량, 5.38×10<sup>4</sup> CFU/ml인 대장균을 90분 소독 하였을 때의 자료를 이용하여 미분법과 적분법 두 가지 방법으로 반응차수를 결정하는 작업(Tchobanoglous and Schroeder, 1985)을 수행하였다.

우선 미분법을 이용하여 반응차수를 결정하였다. 식 (9)와 같이 임의시간, t<sub>1</sub>과 t<sub>2</sub>에서의 균체수 (N<sub>1</sub>과 N<sub>2</sub>)와 균체수변화율 ( $\frac{dN_1}{dt}$ 과  $\frac{dN_2}{dt}$ )을 각각 계산하여 대입하면 반응차수 n을 구할 수 있다.

$$n = \frac{\log(-d[N_1]/dt) - \log(-d[N_2]/dt)}{\log[N_1] - \log[N_2]} \quad (9)$$

임의의 시간, t<sub>1</sub>과 t<sub>2</sub>를 각각 10분과 35분으로 설정 하고 식 (9)에 대입하여 계산하면 n은 1.1로 나타났다 (식 10). 즉, UV-LED 장치에 의한 소독은 1차반응과 유사하게 거동함을 확인할 수 있다.

$$n = \frac{\log(-7 \times 10^3) - \log(-1.95 \times 10^3)}{\log[2.6 \times 10^4] - \log[3.5 \times 10^3]} = 1.1 \quad (10)$$

적분법을 사용하여 반응차수를 재확인하였다. Fig. 3의 소독 자료를 활용하여 Fig. 4를 도시하였다. Fig. 4(a)는 0차 반응을 가정하여 x축은 접촉시간, y축은 N<sub>0</sub>-N<sub>t</sub>로 놓고 소독 자료를 정리하였고, Fig. 4(b)는 1차 반응을 가정하여 x축은 접촉시간, y축은  $-\ln \frac{N_t}{N_0}$ 로 자료를 정리하였다. Fig. 4(c)는 2차 반응을 가정하고 x 축은 접촉시간, y축은  $\frac{1}{N_t} - \frac{1}{N_0}$ 로 자료를 정리하였다.

Fig. 4(b)의 1차 반응을 가정한 자료가 직선에 가장 가까운 형태를 보였다 (r<sup>2</sup> = 0.95). 따라서 UV-LED 소독 장치의 미생물 사멸은 1차 반응으로 간주할 수 있

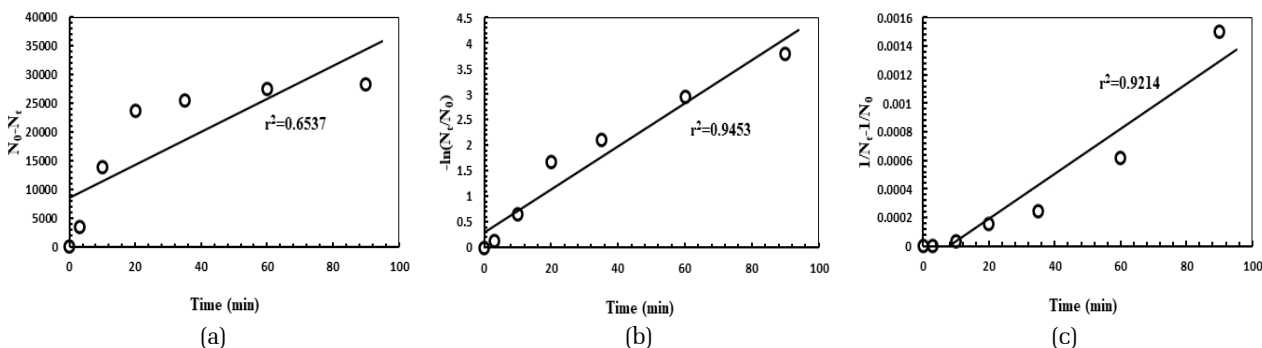


Fig. 4. Determination of reaction order of the disinfection using UV-LED with intensity of 29.6 μW/cm<sup>2</sup>. (a) zero order, (b) 1<sup>st</sup> order, (c) 2<sup>nd</sup> order.

다. Fig. 4(b)의 직선의 기울기가 반응속도 상수, k가 되며 그 값은  $k = 0.042 \text{ min}^{-1}$  로 계산되었다.

### 3.3 자외선 조사강도(I)와 접촉시간(t)에 따른 소독 인자 모델링

UV-LED 조사과정에서 중요한 변수인 조사강도(I)와 접촉시간(t)이 소독 속도에 미치는 영향을 정량화하기 위해 조사강도에 따른 미생물 사멸자료를 정리하여 Fig. 5에 도시하였다. 서로 다른 세 개의 조사강도 조건에서 미생물 사멸률( $N_t/N_0$ )이 99.99%, 즉 4-log removal이 되는 지점에서 x축에 수직으로 선을 긋고 만나는 지점의 접촉시간 자료를 얻어서 Table 3에 정리하였다.

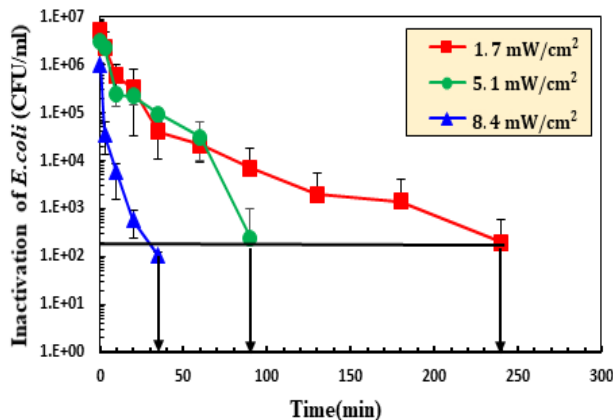


Fig. 5. Determination of the contact times needed to obtain 4-log removal (=99.99% inactivation) under different UV intensity.

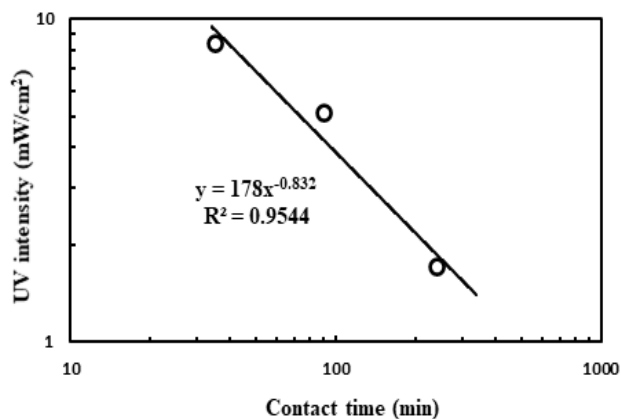


Fig. 6. Plot of UV intensity(I) vs. contact time(t) needed to obtain 4 log removal.

Table 3. The pairs of UV intensity(I) and contact time(t) needed to obtain 4-log removal: the initial number of *E. coli* =  $10^6$  CFU/ml

I (UV intensity). mW/cm <sup>2</sup>	t (contact time), min
1.7	240
5.1	90
8.4	35

Table 3의 자료를 토대로  $\ln(I)$  vs.  $\ln(t)$  플롯하면 Fig. 6을 얻는다. 직선의 추세식은  $y = 178x^{-0.832}$ 을 갖는다. 양변에 로그를 씌워 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\ln y = -0.832 \ln x + \ln 178 \quad (11)$$

식 (11)은 식 (7),  $\ln I = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$ 과 같은 식이기 때문에 식 (12)와 같이 n을 구할 수 있다.

$$-\frac{1}{n} \ln t = -0.832 \ln x$$

$$\frac{1}{n} = 0.832, \therefore n = 1.2 \quad (12)$$

또한, 식 (7)의  $\frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right] = \ln 178$ 이다. 이때 식 (7)의  $\ln(N_t/N_0)$ 는 99.99% 사멸이므로  $\ln \frac{N_t}{N_0} = \ln \frac{1}{10,000} = \ln 0.0001$ 이다.

$$\ln 178 = \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$$

$$n(\ln 178) = \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln 0.0001 \right) \right]$$

$$1.2(5.18) = \ln \frac{1}{k} (9.21) \quad (13)$$

식 (13)의 양변에 밑이 e인 지수를 취하면 식 (14)와 같이 k를 구할 수 있다.

$$e^{6.2} = \frac{1}{k} (9.21), \therefore k = 0.02 \quad (14)$$

이렇게 얻은 n과 k를 식 (7),  $\ln I = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$ 에 대입하여 정리하면 식 (15)를 얻는다.





$$\ln I = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$$

$$n \ln I + \ln t = \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{N_t}{N_0} \right) \right]$$

$$1.2 \ln I + \ln t = \ln \left[ \frac{1}{0.02} \left( -\ln 0.0001 \right) \right]$$

$$1.2 \ln I + \ln t = 6.13$$

$$\ln (I^{1.2} \cdot t) = 6.13$$

$$\therefore I^{1.2} \cdot t = 460 \quad (15)$$

식 (15)의 의미는 UV-LED의 소독에 따른 미생물 개체수( $N_t$ )가 99.99% 감소할 때 필요한 접촉시간(t)와 조사강도(I) 사이의 상관관계이다. 즉, 조사강도(I)의 n승과 접촉시간(t)의 곱은 항상 일정(constant)함을 표현하고 있다. 마치 전통적인 염소소독에서 염소농도(C)의 n승과 접촉시간(t)의 곱은 항상 일정하다는 Chick-Watson 식,  $C^n \cdot t = constant$ 과 같은 모양임을 알 수 있다. Barhmi et al. (2010)은 UV를 이용한 2차처리수의 소독에서 부유물질의 농도가 소독효율에 미치는 영향을 연구한 논문에서 얻은 속도식,  $\ln(N/N_0) = \ln(0.003) - 0.0229(I t)$ 을 보고한 바 있다. 이 식의  $\ln(N/N_0)$ 값을 대입하고 상수를 정리하면 식 (15)와 같이 정리될 수 있다. 물론 소독대상 물질과 온도 등이 다르므로, 본 연구에서 얻은 상수값과 다른 것은 당연하다.

또한, n의 값은 일반적인 소독공정에서는 소독제의 주입농도와 접촉시간의 중요도를 판단하는 지표로 사용된다. 만약  $n > 1$ 이면 염소 농도가 접촉시간보다 중요하고,  $n < 1$ 이면 접촉시간이 염소 농도보다 미치는 영향이 큼을 의미한다. 본 연구에서는 조사강도(I)의 세기가 소독제 염소 농도(C)를 대신하고 있다. 따라서

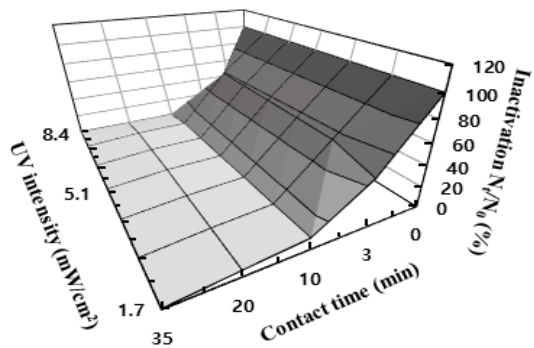


Fig. 7. A 3D plot showing how to affect the UV intensity(I) and contact time(t) on the inactivation( $\frac{N_t}{N_0}$ ).

위에서 구한 n 값이 1보다 크기 때문에 조사강도의 세기가 접촉시간보다 미생물 사멸률에 미치는 영향이 큼을 의미하고 있다.

위 모델식을 이용하여 초기균체량  $10^6$  CFU/ml에서의 조사강도와 접촉시간이 미생물 농도 감소에 미치는 영향을 입체적으로 볼 수 있도록 그래프로 나타내었다 (Fig. 7). x축은 접촉시간, y축은 조사강도이고 z축은 미생물 개체수의 감소 ( $\frac{N_t}{N_0}$ )를 %로 나타내었다. 즉, 초기균체량  $10^6$  CUF/ml에서 UV-LED의 중요한 운전 인자인 조사강도(I)와 접촉시간(t)이 증가할수록 미생물 농도가 감소하는 경향을 입체적으로 볼 수 있도록 그려진 것이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 UV-LED 소독 장치를 활용하여 미생물 농도 감소에 미치는 영향을 파악하고 이를 수식화하였다. 특히, UV-LED 소독 장치를 운영하는데 중요한 운전변수인 자외선 조사강도(I)와 접촉시간(t)의 영향을 정량적으로 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 초기 균체량이  $10^6$  CFU/ml일 때 사멸률이 2-log 이상 도달하기 위해서는 조사강도  $1.7 \text{ mW/cm}^2$ 에서는 90분,  $5.1 \text{ mW/cm}^2$ 에서는 60분,  $8.4 \text{ mW/cm}^2$ 에서는 35분이 소요되었다. 즉, UV-LED의 조사강도가 증가할수록 99% 이상의 충분한 사멸을 얻는데 필요한 접촉시간이 단축됨을 정량적으로 확인하였다.
- 2) UV-LED에 의한 대장균 사멸률이 99% 이상이 되는데 필요로 하는 접촉시간은 초기 균체량이 적을수록 단축됨을 확인하였다.
- 3) 미생물 농도를 감소시키기 위해 요구되는 UV-LED의 조사강도(I)와 접촉시간(t) 사이의 상관 관계식을 도출하였다. 미생물의 초기균체량  $10^6$  CFU/ml에서  $I^{1.2} \cdot t = 460$ 이었다. 이 식의 의미는 UV-LED의 소독으로 미생물 개체수( $N_t$ )가 99.99% 감소할 때 요구되는 접촉시간(t)과 조사강도(I)의 상관관계이다. 즉, 조사강도(I)의 n승과 접촉시간(t)의 곱은 항상 일정하다는 것이다. 일정 사멸률을 얻기 위해서 접촉시간이 증가하면 그만큼 조사강도를 감소시켜도 되며, 반대로 조사강도가 증가하면 그만큼 접촉시간을 감소시켜도 됨을 정량적으로 표현하고 있다.

pp. 379-387

pp. 389-403

pp. 405-415

pp. 417-424

pp. 425-436

pp. 437-454

pp. 455-463

pp. 465-476

pp. 477-487

pp. 489-496

pp. 497-505

pp. 507-516

pp. 517-531

pp. 533-544

## 사 사

본 연구는 중소벤처기업부의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: S2712599).

## References

- Brahmi, M., Belhadi, N.H., Hamdi, H. and Hassen, A. (2010). Modeling of secondary treated wastewater disinfection by UV irradiation : Effects of suspended solids content, *J. Environ. Sci.*, 22(8), 1218-1224.
- Hijnen, W.A.M., Beerendonk, E.F. and Medema, G.J. (2006). Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review, *Water Res.*, 40, 3-22.
- Kim, B.S., Lee, H.S. and Kim, Y.K. (2020). Analysis of microbial sterilization based on ultraviolet LEDs for smart farm, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, 34(4), 11-16.
- Li, G.O., Park, Y.S., Huo, Z.Y., Lu, Y. and Hu, H.Y. (2017). Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: photoreactivation and dark repair of *Escherichia coli*, *Water Res.*, 126, 134-143.
- Li, X., Cai, M., Wang, L., Niu, F., Yang, D. and Zhang, G. (2019). Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems, *Sci. Total Environ.*, 659, 1415-1427.
- Liu, L., Xing, X., Hu, C., Wang, H. and Lyu, L. (2019). Effect of sequential UV/free chlorine disinfection on opportunistic pathogens and microbial community structure in simulated drinking water distribution systems, *Chemosphere*, 219, 971-980.
- Liu, J. and Zhang, X. (2014). Comparative toxicity of new halophenolic DBPs in chlorinated saline wastewater effluents against a marine alga: halophenolic DBPs are generally more toxic than haloaliphatic ones, *Water Res.*, 65, 64-72.
- Matafonova, G. and Batoev, V. (2018). Recent advances in application of UV light-emitting diodes for degrading organic pollutants in water through advanced oxidation processes: A review, *Water Res.*, 132, 177-189.
- Mori, M., Hamamoto, A., Takahashi, A., Nakano, M., Wakikawa, N., Tachibana, S., Ikehara, T., Nakaya, Y., Akutagawa, M. and Kinouchi, Y. (2007). Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED, *Med. Bio. Eng. Comput.*, 45, 1237-1241.
- Park, B.J., Ryu, J.H. and Park, J.B. (2013). The development of cleaning and monitoring system for pipeline type UV sterilizer, *JKAIS*, 14(12), 6434-6440.
- Rennecker, J.L., Marinas, B.J., Owens, J.H. and Rice, E.W. (1999). Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone, *Water Res.*, 33(11), 2481-2488.
- Son, H., Cho, M., Kim, J., Oh, B., Chung, H. and Yoon, J. (2005). Enhanced disinfection efficiency of mechanically mixed oxidants with free chlorine, *Water Res.*, 39, 721-727.
- Song, K., Mohseni, M. and Taghipour, F. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review, *Water Res.*, 94, 341-349.
- Sun, Y.X., Wu, O.Y., HU, H.Y. and Tian, J. (2009). Effect of bromide on the formation of disinfection by-products during wastewater chlorination, *Water Res.*, 43, 2391-2398.
- Tchobanoglous, G. and Schroeder, E.D. (1985). *Water quality, characteristics, modeling, modification*. Pearson Education Inc., USA, 235-241.
- Vilhunen S., Sarkka, H. and Sillanpaa, M. (2009). Ultraviolet light-emitting diodes in water disinfection, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 16, 439-442.
- Wurtele M.A., Kolbe, T., Lipsz, M., Weyers, M., Kneissl, M. and Jekel, M. (2011). Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes - UV LEDs - for water disinfection, *Water Res.*, 45, 1481-1489.
- Zhang, J., Zivic, N., Dumur, F., Xiao, P., Graff, B., Fouassier, J.P., Gimes, D. and Lalevee, J. (2014). UV-violet-blue LED induced polymerizations: specific photoinitiating systems at 365, 385, 395 and 405 nm, *Polymer*, 55, 6641-6648.