



# 비접촉식 자외선 광반응조를 이용한 하수 대장균의 살균과 Log 불활성화율 지표

## Disinfection of E. coli from Wastewater using a Non-contact type UV Photoreactor and Log Inactivation Index

김성홍<sup>1</sup>·김경면<sup>1</sup>·김광일<sup>1\*</sup>·최재완<sup>2</sup>

Sunghong Kim<sup>1</sup>·Kyungmyun Kim<sup>1</sup>·Gwangil Kim<sup>1\*</sup>·Jaewan Choe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 토목공학과, <sup>2</sup>광주대학교 토목공학과

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chosun University, <sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Gwangju University

### ABSTRACT

Disinfection of microorganisms using UV light is widely used in the field of water supply and wastewater treatment plant. In spite of high germicidal effect and relatively clean by-product, UV disinfection has fundamental defeat that is accumulation of fouling materials at the interface of water and lamp sleeve. Non-contact type of UV photoreactor which can avoid this fouling generation was developed and the experimental performance evaluation of the system was carried out in this study. Log inactivation rate of E. coli was selected as a disinfection index. The concentration of E. coli of second clarifier effluent was  $8.2 \times 10^1 - 8.2 \times 10^3$  colony per mL and was well inactivated by the non-contact type of UV photoreactor. Under the UV intensity condition of 2.1 - 2.5mW/cm<sup>2</sup>, E. coli removal rate was observed in the range of 54 - 95% when the HRT was increased from 10 to 52 seconds. Experimental results showed that log inactivation of E. coli was proportional to UV dosage and 200mJ/cm<sup>2</sup> of UV dose is expected for the 2.0 log inactivation of E. coli from the second clarifier effluent. Between the two parameters of UV intensity and contact time which are consist of UV dose, UV intensity was 4 times more effective than contact time.

**Key words:** UV disinfection, non-contact type UV photoreactor, E. coli, log inactivation, wastewater disinfection

**주제어:** 대장균, 로그불활성화율, 비접촉식 자외선 광반응조, 자외선 소독, 하수 살균

## 1. 서 론

우리나라의 공공하수처리시설은 2013년 기준 3,770여개가 있으며 시설용량은 총 2,500만톤/일 규모이다. 이 중에서 자외선 또는 자외선과 다른 살균법을 혼용하는 방법으로 살균하는 처리장은 2,200여개소로서 총 980만톤/일 정도를 살균하고 있다. 자외선은 보통 중소규모 하수처리장에서 많이 사용되고 있기는 하지

만 최근에는 시설용량 만톤/일 이상인 처리시설에도 많이 적용되어 125개에 달한다. 500톤/일 미만의 규모인 공공하수처리시설은 총 3,200여개소가 있는데 이중 55%인 1,750여 처리시설에서 자외선으로 살균하고 있다(Ministry of Environment of Korea, 2014).

자외선(Ultraviolet light, UV)은 상수처리에서 *Cryptosporidium*이나 *Giardia*의 살균에 특히 효과적이다. 자외선은 DNA 및 RNA 핵산에 직접 흡수되고, 퓨린과 피리미딘을 손상시킴으로써 생물체의 복제를 불가능하게 한다(Kim, 2008). 자외선 단독으로 사용되기도 하고 오존이나 과산화수소수와 결합하여 상수 및

Received 9 December 2015, revised 25 February 2016, accepted 26 February 2016

\*Corresponding author: Gwangil Kim (E-mail: gochamp@chosun.ac.kr)

pp. 123-130

pp. 131-137

pp. 139-145

pp. 147-154

pp. 155-165

pp. 167-177

pp. 179-185

pp. 187-196

pp. 197-206

pp. 207-213

하수처리에 적용되기도 한다. 자외선은 살균력이 강하나 잔류성이 없는데 상수의 경우에는 잔류염소가 필요하므로 자외선 단독으로 사용하기 보다는 자외선/클로라민, 자외선/염소 등과 같이 화학적 살균과 결합하여 처리하는 것이 보통이다. 반면에, 하수처리수는 수역에 방류하게 되므로 잔류염소가 있어서는 안된다. 따라서, 자외선을 사용하게 되면 잔류염소의 누출에 따른 방류수역의 피해를 방지할 수 있으므로 오히려 장점이 된다(Kim et al., 2013).

자외선 살균 방법으로는 자외선 램프를 물 속에 설치하는 침지식과, 자외선 램프를 물 위에 설치하는 비접촉식이 있다. 침지식은 물과 거리가 가깝고, 방사형으로 자외선이 조사되므로써 효율적인 살균이 가능하다. 반면에, 물과 자외선 슬리브(sleeve) 접촉면에 유기물 및 무기물이 침적되어 파울링(fouling)이 발생하게 되고 빛을 차단하게 되어 점차 빛의 투과성이 떨어지게 되고 살균력은 저하된다. 수질이나 램프의 출력, 형식 등에 따라 다르기는 하지만, 파울링은 운전 시작 후 수 시간 만에 발생하기도 하고 며칠이 걸리기도 하는데 이를 해결하기 위해서 슬리브 세척이나 화학적 세정을 실시해야만 한다(Jeon et al., 2012).

이에 반해, 비접촉식 자외선 살균 방식은 물과 슬리브의 접촉이 없으므로 파울링이 근본적으로 발생하지 않으며 또한, 침수에 따른 누전 위험성이 없다. 반면에, 물과 거리가 멀어지므로 자외선 강도가 약해지는 단점이 있다.

본 연구에서는 파일럿 규모의 비접촉식 자외선 살균장치를 제작하고, 실제 하수처리장의 2차처리수를 유입수로 하여 다양한 자외선 강도와 체류시간에 대하여 대장균 살균실험을 실시하였다. 또한, 이미 개발한 비접촉식 자외선 살균 시스템의 자외선 강도 산정 모델을 이용하여 자외선 강도를 구하고 대장균 제거 동력학을 제시하여 앞으로 비접촉식 자외선 살균법이 실용화되는데 도움이 되도록 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

실험에 쓰인 비접촉식 자외선 광반응조는 Fig. 1과 같이, 폭 26cm × 길이 133cm의 장방형이고, 스테인리스 재질로 만들었다. 광반응조의 최대 높이는 24.7cm이며 상부에 최대 5개까지 수정관이 거치될 수 있도록 제작되었다. 광반응조 내부 유입부에는 유공 정류

벽을 설치하여 수위 동요를 최소화하였고, 유출부에는 높이 조절이 가능한 전폭위어를 설치하여 위어 높이를 변화시킴으로써 유출체적(V)을 가변할 수 있도록 하였다. 자외선 살균부는 실제로 자외선이 조사되는 내부 영역으로서 폭 20cm × 길이 930cm이다. 위어의 높이는 최소 5cm에서 최대 11cm까지 2cm 간격으로 바뀌서 실험하였다. 실제 수위는 위어의 높이보다는 높으며, 유량이 많을수록 월류 수위도 높아졌다. 유입펌프(PA630, 한일펌프사)에 의해 흡입된 물은 밸브와 디지털 유량계(SSW-40ER, DS water사)를 거쳐 광반응조로 유입된다.

자외선에 의한 살균에서 자외선 강도는 살균력에 직접적인 영향을 미친다. 자외선 램프는 Philips사의 상업용 40W 저압 수은 램프(모델명 TUV 36 T5)이며, 길이는 840mm이다. 수정관은 자외선 램프를 보호하는 관으로서 램프의 길이와 두께를 고려해서 지름 24.5mm, 두께 2.5mm, 길이 850mm를 사용하였다. 자외선 강도 변화는 자외선 램프를 1개를 켜는 경우와 3개를 켜는 경우의 2가지로 변화를 주었다.

제작된 비접촉식 자외선 광반응조 실험 장치를 G시 하수처리장으로 이동, 설치하여 2차처리수를 유입수로 하는 대장균 살균 실험을 실시하였다. G시 하수처리장은 고도처리공법 중 하나인 NPR공법으로 운전되는 처리장으로서 시설용량은 60만톤/일에 연간 평균 하수처리량은 58만톤/일이다. 실험기간동안 2차처리수의 수질은 수온 26°C, 탁도 2NTU 미만, pH 6.8, BOD 3mg/L, TSS 2mg/L 수준이었다.

위어의 높이는 5~11cm까지 2cm 간격으로 변화시키고, 유입 유량을 26~122L/min까지 변화시킴으로써 자외선 조사시간에 변화를 주고자하였다. 위어 높이나 유량을 변화시킬 때마다 수심을 측정하였는데, 유량이 많을수록 월류 수심도 최소 1cm에서 최대 3.5cm까지 증가하여 수심은 6~13.8cm까지 변화하였다. 수심과

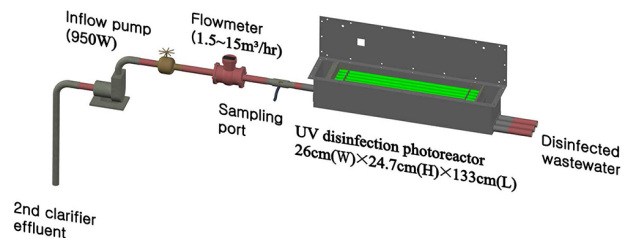


Fig. 1. Experimental photoreactor for the disinfection of second clarifier effluent



**Table 1.** Experimental conditions

Flowrate (L/min)	Weir height (cm)	Water depth (cm)	HRT (sec)	Remarks
26	5, 7, 9, 11	6~12	25.9~51.8	
52	5, 7, 9, 11	7~12.3	15.1~26.5	
74	5, 7, 9, 11	7.5~12.8	11.4~19.4	
91	7, 9, 11	9.5~13	11.7~16.0	
113	7, 9, 11	10.4~13.8	10.3~13.7	
122	7, 9	10.5~12.5	9.7~11.5	

- Height of the quartz sleeve bottom is 15cm.

- \*1 irradiation chamber volume divided by the flowrate.

반응조 면적 그리고 유량으로부터 계산한 체류시간은 최소 9.7초에서 최대 51.8초였다. 2차처리수의 자외선 살균 실험 조건은 Table 1과 같다. 대장균수의 측정은 동일 희석배수에서 복수 시료에 대해 평판집락법을 사용하였으며, 희석배율은 1배에서 10<sup>3</sup>배 까지 4단계로 실시하였으며, 살균 후 대장균 수가 검출되지 않은 실험은 분석에서 제외하였다.

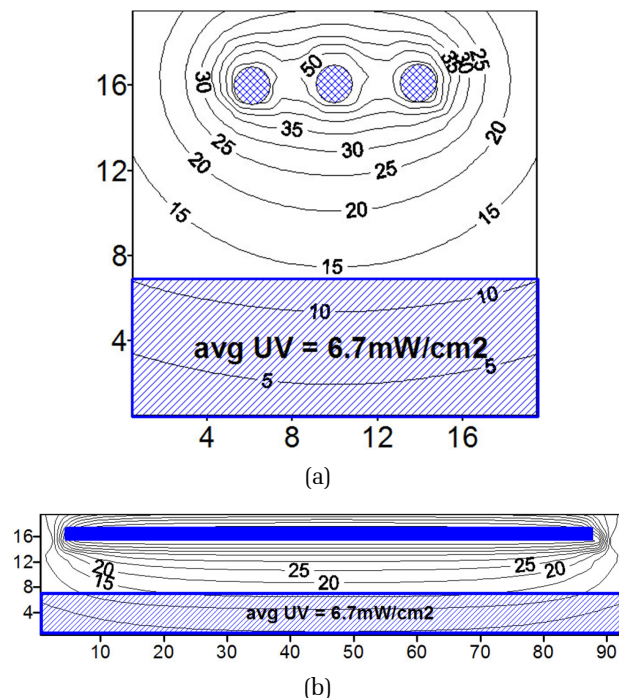
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자외선 강도 분포 해석

자외선 램프에서 발생하는 자외선량이 일정하다고 하더라도 램프와의 거리에 따라 수용 지점의 자외선 강도는 다를 수 밖에 없다. 본 실험 조건은 유량 및 위어 높이에 따라 수심이 달라지므로 자외선 피폭 정도는 실험 조건별로 다를 수 밖에 없다. 뿐만 아니라 빛의 특성상 굴절, 반사, 흡수 현상이 발생하므로 물속 각 지점의 자외선 강도를 모두 다르며, 모든 지점에서 자외선 강도를 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 기 개발한 3차원의 비접촉식 자외선 살균 강도 모델(Jeon et al., 2012; Kim et al., 2011)에 본 실험 조건을 입력하여 자외선 강도를 산출하였다. 모의의 주요 매개변수로서 램프의 자외선 효율(Eu, 소비전력 대비 자외선 발생량)은 0.56을 사용하였는데 이 값은 본 연구에서 사용한 램프와 동일한 램프를 이용하여 직접 측정된 값이다. 물에서의 자외선 투과율은 탁도나 유기물, 무기물 등 물 속 성분 함량에 따라 다른데, 상수 원수나 수돗물은 97% 이상이고(Duran et al., 2010; Blatchley, 1997; Wait et al., 2007), 하수는 30~50% 수준이며 하수처리수는 약 90% 정도로 보고되고 있다(Gehr and Wright, 1998;

Gilboa and Friedler, 2008; Oh et al., 2007). 본 연구에서는 하수처리장 2차처리수이므로 90%로 가정하였다.

Fig. 2에 수심이 7cm이고 자외선 램프 3개가 켜졌을 때의 자외선 강도 분포를 시뮬레이션한 결과를 예시하였다. 계산은 MPSS(multiple point source summation) 방법을 사용하였는데 계산 단위는 3차원 각 방향 1cm씩의 단위(segment)로 분할하여 계산하였다(Jeon et al., 2012). 램프 역시 1cm 간격의 일련의 점광원으로 간주하여 계산하였다. 긴 원통형의 램프에서 자외선은 방사형으로 퍼져 나가므로 원주 방향으로 물의 자외선



**Fig. 2.** An example of UV intensity profiles in the irradiation chamber in case of 3 lamps are turned on and the water depth is 7cm. (a) cross sectional distribution and (b) longitudinal distribution.

pp. 123-130  
pp. 131-137  
pp. 139-145  
pp. 147-154  
pp. 155-165  
pp. 167-177  
pp. 179-185  
pp. 187-196  
pp. 197-206  
pp. 207-213

**Table 2.** Average UV intensities of underwater

Flowrate (L/min)	Weir height (cm)	Water depth (cm)	HRT <sup>*1</sup> (sec)	Average UV Intensity <sup>*2</sup> (mW/cm <sup>2</sup> )	
				1 lamp	3 lamps
26	11	12	51.8	2.3	6.6
	9	10	43.2	2.3	6.6
	7	8	34.5	2.3	6.6
	5	6	25.9	2.3	6.8
52	11	12.3	26.5	2.2	6.3
	9	10.8	23.3	2.3	6.8
	7	9	19.4	2.3	6.6
	5	7	15.1	2.3	6.7
74	11	12.8	19.4	2.4	6.9
	9	11.3	17.1	2.2	6.3
	7	9.5	14.1	2.4	7.1
	5	7.5	11.4	2.4	7.1
91	11	13	16	2.3	6.6
	9	11.3	13.9	2.2	6.3
	7	9.5	11.7	2.4	7.1
113	11	13.8	13.7	2.4	7.0
	9	12.2	12.1	2.2	6.4
	7	10.4	10.3	2.1	6.2
122	9	12.5	11.5	2.5	7.3
	7	10.5	9.7	2.5	7.1

Quartz sleeve bottom level is 15cm above the chamber bottom.

\*1 irradiation chamber volume divided by the flowrate

\*2 average UV intensities of underwater calculated from model simulation

흡수 만큼 변형된 원형을 이루고, 램프의 길이 방향으로는 중간에서 높고 램프 끝에서 낮아지는 형태가 나타나 있다. 이 조건에서 물 속의 자외선 강도는 평균 6.7mW/cm<sup>2</sup>로 계산된다.

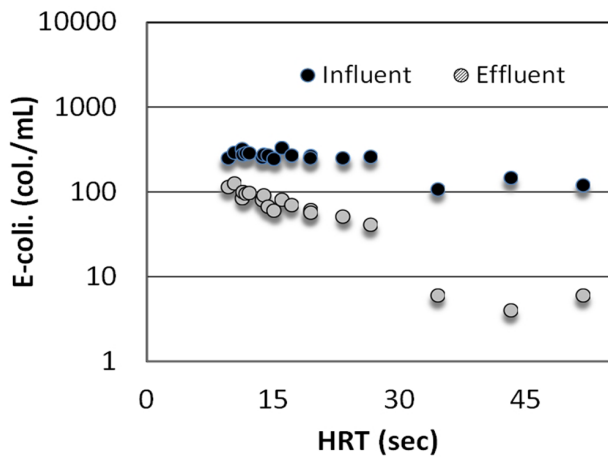
모든 실험 조건에서 평균 자외선 강도와 피폭시간을 계산하여 Table 2에 표시하였다. 수심이 6cm에서 13.8cm까지 변할 때 1개의 램프를 켜었을 때 평균 자외선 강도는 2.1~2.5mW/cm<sup>2</sup>의 분포를 보이고, 3개의 램프 하에서는 6.2~7.3mW/cm<sup>2</sup>, 5개의 램프 하에서는 9.7~11.3mW/cm<sup>2</sup>의 분포를 보이는 것으로 계산되었다. 물 속의 평균 자외선 강도는 수심의 변화에 따라 변하기는 하지만 그 차이는 크지 않았다.

### 3.2 대장균 제거율

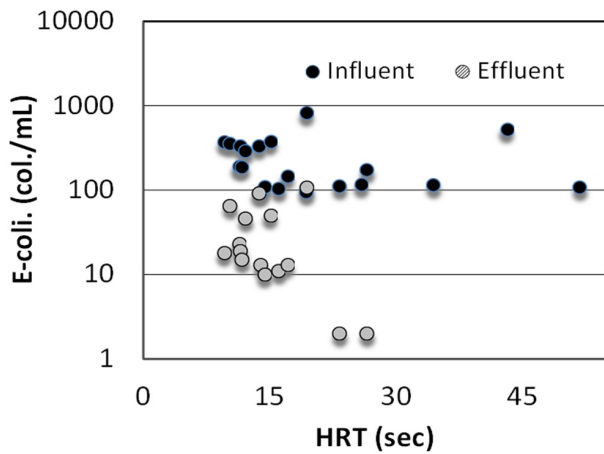
램프의 개수를 1개, 3개로 변화시키고 아울러 유입

유량과 율류위어의 높이를 서로 변화시켜가면서 다양한 자외선 강도 및 자외선 접촉시간에 대해 살균 실험을 실시하였으며 실험 결과를 Fig. 3에 표시하였다. 실험기간동안 유입수인 2차처리수의 대장균균 수는  $8.2 \times 10^1 \sim 8.2 \times 10^3$ 개/mL 범위로 분포하였으며 산술평균  $2.4 \times 10^2$ 개/mL에 표준편차는  $1.4 \times 10^2$ 개/mL로서 시기 별로 편차가 심하였다. 램프의 개수 즉, 자외선 강도가 증가함에 따라 대장균의 살균 효과는 증가하였는데 Fig. 3의 (a)는 1개의 램프, (b)는 3개의 램프를 켜고 운전했을 때의 대장균균 수 변화를 나타낸 것이다.

유통위어의 높이와 유입유량을 다양하게 변화시켜서 체류시간을 다르게 실험하였는데, 체류시간이 증가할수록 대장균균의 제거율은 높아졌다. 즉, 1개의 램프를 켜 경우 체류시간이 10초부터 52초까지 변할 때 대장균균 제거율은 54%에서 95%까지 점차 증가하였다.



(a) 1 lamp turned on



(b) 3 lamps turned on

**Fig. 3.** Disinfection of 2nd clarifier effluent using a non-contact type UV photoreactor.

3개의 램프를 켜올 경우는 살균력이 증가하여, 체류시간 10초에서 약 25초까지 증가하는 동안 대장균군 제거율은 72%에서 98%까지 증가하였으며, 이보다 긴 체류시간에서는 처리수에서 대장균군이 검출되지 않았다. 별도로, 램프를 5개 켜는 경우의 실험도 수행하였는데 HRT가 가장 짧은 10초의 조건에서도 유출수의 대장균군이 검출되지 않아서 제거율 100%의 완전한 살균이 이루어졌다.

### 3.3 대장균 제거 동력학적 해석

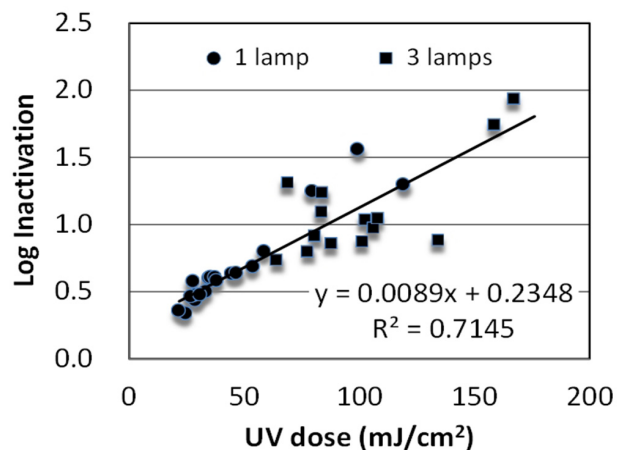
설치된 램프의 수가 1개에서 3개로 늘어났다고 해서 물 속 자외선 강도가 3배가 되는 것은 아니다. 자외선은 빛의 한 종류로서 빛처럼 직진하지만 물이나 공기와 같은 서로 다른 매질을 통과할 때는 굴절, 반

사, 흡수의 특성을 보인다. 따라서 물 속 자외선의 분포는 램프와 물 표면까지의 거리, 물의 깊이, 램프의 설치 위치 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 자외선 강도의 정확한 계산이 필요하다. 본 연구진은 이 실험과 같은 형태의 비접촉식 자외선 광반응조의 자외선 강도를 계산하는 모델을 개발하고 검증한 바 있으며 (Lee et al., 2014) 본 실험에서 사용한 파일럿 반응조 규격을 모델에 입력하여 반응조 내부 물 속 자외선 강도 분포를 3차원으로 계산하였고, 아울러 물 속의 평균 자외선 강도를 계산하였다. 계산 결과는 Table 2에 나타난 바와 같은데, 램프의 수가 많아질수록 평균 자외선 강도는 커지지만, 동일한 램프 개수일 때는 평균 자외선 강도는 수심과 별 상관없이 없었다.

자외선 살균에서 미생물 사멸율은 자외선 강도(I)와 자외선 접촉시간(t)의 곱에 지수적으로 비례하는 것으로 간주한다. 자외선 강도의 단위는  $mW/cm^2$ 이며 여기에 접촉시간 초를 곱하면  $mJ/cm^2$ 인데 이것을 염소 소독에서 염소주입율과 유사한 개념으로 보아 자외선 주입율(dose)이라고도 한다.

$$UV\ dose\ (mJ/cm^2) = HRT(sec) \times UV\ intensity\ (mW/cm^2) \quad (1)$$

대장균의 불활성화율을 Log 불활성화율로 표시하기도 하는데, 이것은 식 (2)와 같이 살균 전후의 대장균 수의 변화량을 Log값으로 표시한 것을 말한다. 보통 2.0Log라고 하면 로그 단위로 2 즉, 1/100 감소한 것을 말하며, 99% 제거율과 같은 의미이다. 참고로,



**Fig. 4.** Log inactivation of E. coli from the effluent of 2nd clarifier by UV disinfection.

pp. 123-130

pp. 131-137

pp. 139-145

pp. 147-154

pp. 155-165

pp. 167-177

pp. 179-185

pp. 187-196

pp. 197-206

pp. 207-213

**Table 3.** UV dose requirement for disinfection of the effluent of 2nd clarifier

Target Pathogens	Log Inactivation					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
E. coli	30	90	150	200	260	320

- UV dose unit : mJ/cm<sup>2</sup>

상수의 살균에서는 *Cryptosporidium*을 2.0Log까지 불활성화하는데 5.6mJ/cm<sup>2</sup>, Virus를 2.0Log까지 불활성화하는데는 100mJ/cm<sup>2</sup>의 자외선 주입율이 필요한 것으로 제시하고 있다(EPA, 2006).

$$\text{Log Inactivation} = \text{Log}_{10} \frac{N_0}{N} \quad (2)$$

여기에서, N<sub>0</sub> = 자외선 조사 이전의 대장균 수  
N = 자외선 조사 이후의 대장균 수이다.

본 연구에서 얻어진 결과를 자외선 주입율에 대한 Log 불활성화율로 표시하면 Fig. 4와 같고, 대장균의 Log 불활성화율에 필요한 자외선주입율을 계산하면 Table 3과 같다. 2차처리수의 성상이나 탁도, 대장균 농도 등 조건과 자외선 투과율에 따라 다르기는 하겠지만 실험 결과를 볼 때 1.0Log 이상의 불활성화율을 얻기 위해서는 약 90mJ/cm<sup>2</sup>의 자외선 주입율이 필요하며, 자외선 주입율이 200mJ/cm<sup>2</sup> 이상이면 대장균의 불활성화율은 2.0Log 이상을 얻을 수 있음 의미한다.

앞에서 설명한 바와 같이 대장균 불활성화율에 미치는 영향인자를 체류시간(t)과 자외선 강도(mW/cm<sup>2</sup>)의 곱인 자외선 주입율로 단순화하여 계산하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 두 변수간의 기여도를 평가하기 위하여 대장균 불활성화율을 종속변수로 놓고, 체류시간과 자외선 강도를 각각 독립변수로 간주하여 다중회귀분석을 실시하였다.

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (3)$$

여기에서, y는 대장균 Log 불활성화율, x<sub>1</sub>은 체류 시간, x<sub>2</sub>는 평균 자외선 강도이다.

최소제곱추정법으로 추정하면 결정계수(r<sup>2</sup>) 값은 0.729이고, β<sub>1</sub> = 0.030, β<sub>2</sub> = 0.119이며 중회귀식은 다음과 같다.

$$y = -0.191 + 0.030x_1 + 0.119x_2 \quad (4)$$

이것은 x<sub>2</sub>의 기울기가 x<sub>1</sub>의 기울기보다 훨씬 크며 β<sub>2</sub>/β<sub>1</sub> = 3.94이다. 이것은 자외선 강도(x<sub>2</sub>)의 영향이 체류시간(x<sub>1</sub>)의 영향보다 약 4 배 더 크다는 것을 의미한다.

## 4. 결 론

파일럿 규모의 비접촉식 자외선 살균 장치를 제작하고 하수처리장의 2차처리수를 대상으로 살균 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 자외선 살균 장치와 램프 조건에 따른 물 속 자외선 농도를 계산한 바, 램프 1개를 켜는 때는 평균 2.3mW/cm<sup>2</sup>, 램프 3개를 켜는 때는 평균 6.7mW/cm<sup>2</sup>로 계산되었으며, 유량 변화 및 월류 위어 높이 변화에 따라 수심도 변화하였으나 수심에 따른 평균 자외선 강도 변화는 그다지 크지 않았다.

2) 체류시간이 증가할수록 대장균 제거율도 증가하였는데 램프를 1개만 켜는 경우, 체류시간이 10초에서 52초로 변하는 동안 대장균 제거율은 54%에서 97%까지 증가하였다. 램프를 3개 켜는 경우에는 체류시간이 10초에서 25초까지 변하는 동안 제거율은 72%에서 98%까지 증가하였으며, 이보다 긴 체류시간에서는 완전한 살균이 가능하였다.

3) 체류시간과 자외선 강도의 곱인 자외선 주입율과, 대장균 불활성화율을 분석한 결과 Log 불활성화율은 자외선 주입율에 선형으로 비례한다. 2차처리수의 살균에서 2.0Log 대장균을 제거하기 위해서는 200mJ/cm<sup>2</sup>의 자외선 주입율이 필요하다.

4) 대장균 Log 불활성화율에 대하여 체류시간과 자외선 강도를 각각의 독립변수로 보고 중회귀분석을 행한 결과 자외선 강도가 체류시간보다 약 4배 더 영향력이 크게 나타났다.

## 사 사

본 연구는 2015년도 조선대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.



## References

- Kim K.M., Lee I.H., Kim S.H. and Park G.G. (2013). Disinfection of secondary effluent by pilot scale non-contact type UV photoreactor, *2013 KSWW and KSWQ Conference*, P-84.
- Kim S.H. (2008). A study on the ultraviolet disinfection in a water treatment plant, *J. of Adv. Eng. and Technol.*, 1(2), 1-6.
- Jeon H.B., Youn J.W., Kim S.H. (2012). Optical characteristics of the UV intensity distribution in a non-contact type UV photoreactor, *J. of KSWW*, 26(2), 257-264.
- Ministry of Environment (2014). *2013 Statistics of Sewage*, Ministry of Environment
- Blatchley III E.R. (1997). Numerical modelling of UV intensity : Application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems, *Water Res.*, 31(9), 2205-2218.
- Duran J.E., Taghipour F. and Mohseni M. (2010). Irradiance modeling in annular photoreactors using the finite-volume method, *J. Photoch. Photobio. A*, 215, 81-89.
- Gehr R. and Wright H. (1998). UV disinfection of wastewater coagulated with ferric chloride: Recalcitrance and fouling problems, *Water Sci. Technol.*, 38(3), 15-23.
- Gilboa Y. and Friedler E. (2008). UV disinfection of RBG-treated light greywater effluent: Kinetics, survival and regrowth of selected microorganisms, *Water Res.*, 42, 1043-1050.
- Kim S.H., Choi Y.G. and Kim D.I. (2011). Development of UV distribution model for the non-contact type UV disinfection system, *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, 9, 1-17.
- Lee W.H., Choi Y.G. and Kim S.H. (2014) Calibration of an ultraviolet distribution model by precise measurement of underwater ultraviolet intensities, *Korean J. Chem. Eng.*, 31(10), pp.1780-1785.
- Oh B.S., Park S.J., Jung Y.J., Park S.Y. and Kang J.W. (2007). Disinfection and oxidation of sewage effluent water using ozone and UV technologies, *Water Sci. Technol.*, 55(1-2), 299-306.
- USEPA (2006). *Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule*, Office of water, Washington DC, USA.
- Wait I.W., Johnston C.T. and Blatchley III E.R. (2007). The influence of oxidation reduction potential and water treatment processes on quartz lamp sleeve fouling in ultraviolet disinfection reactors, *Water Res.*, 41, 2427-2436.

pp. 123-130

pp. 131-137

pp. 139-145

pp. 147-154

pp. 155-165

pp. 167-177

pp. 179-185

pp. 187-196

pp. 197-206

pp. 207-213