

## 자외선 강도 산정 모델과 영향 인자에 관한 연구

### A Study on the UV Intensity Models and their Affecting Factors

김두일<sup>1</sup> · 최영균<sup>2</sup> · 김성홍<sup>3\*</sup>

Dooil Kim<sup>1</sup> · Younggyun Choi<sup>2</sup> · Sunghong Kim<sup>3\*</sup>

1 한국과학기술연구원, 2 대구대학교 환경공학과, 3 조선대학교 토목공학과

(2008년 4월 18일 접수 ; 2008년 7월 1일 수정 ; 2008년 7월 3일 채택)

#### Abstract

UV disinfection is widely used in water treatment facilities and wastewater treatment plant because of its effectiveness to removal of pathogen and Giardia which is resistant to traditional chemical disinfection. As a design and performance tool of UV disinfection system, 3 dimensional UV intensity models were composed and simulated to compare each other and to find affecting factors in this study. Reflection, refraction and absorption are important parameters in UV intensity model and MPSS and MSSS model can reflect these parameters while LSI model can not. Absorption is the most important parameters among the reflection, refraction, absorption and shadowing so, this should not be neglect. Based on this simulation, shadowing effect is negligible when the number of installed lamp is a few but, this effect can not be neglectable when the number of installed lamp is quite a few. The errors according to shadowing effect is increased as the number of lamp installed increased.

**Key words :** UV disinfection, UV intensity model, MPSS, MSSS, LSI

**주 제 어 :** 자외선 소독, 자외선 강도 모델, MPSS, MSSS, LSI

#### 1. 서론

자외선(Ultraviolet light, UV)은 상수처리에서 *Cryptosporidium*(Mackey 등, 2002; Linden, 2001)이나 *Giardia*(Linden 등, 2002) 혹은 다른 병원성 미생물을 살균하는데 일반 화학적 살균 방법보다 더 효과적인 것으로 알려져 있으며, 자외선 단독으로 혹은 오존이나 과산화수소수와 결합한 자외선/오존 또는 자외선/과산화수소수 등의 방

법으로 상수 및 하수 처리에 적용되기도 한다(Kowalska 등, 2004; Oh 등, 2007). 우리나라에서도 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*과 *Giardia*가 상수 원수에서 검출되었다고 보고된 바도 있기 때문에 장차 염소소독을 보완하거나 대체하는 방법으로서의 자외선 소독이 연구·제시되고 있으며, 하수의 2차처리 유출수에 대한 소독방법으로서 자외선 소독을 연구한 사례도 보고되고 있다(염 등, 2001; 염 등, 2003; 박 등, 2004).

자외선의 살균력은 자외선의 강도와 접촉시간의 곱으로

정의되는 자외선 주입율(UV dose)에 비례하는데, 화학적 처리에서 농도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 주입율(dose)과 같은 의미로 사용된다. 자외선 반응조의 살균 효율을 측정하는 직접적인 방법으로는, 미국 환경청(USEPA)의 규정에 따라 *Bacillus subtilis* 포자나 MS2 coliphage 등과 같은 대표 미생물(surrogate organisms)의 제거율을 측정하는 biosimetry test가 사용되고 있다(Fallon 등, 2007). 자외선의 강도는 자외선 램프에서 발생한 자외선이 반응조의 임의의 지점에 도달하여 직접적으로 살균에 작용하는 정도를 말하는 것으로, 램프의 동력과 자외선 발생 효율, 램프로부터의 거리, 굴절이나 반사, 흡수 등의 광학적 특성 등에 따라 달라지게 된다. 자외선의 강도는 실제로 자외선 램프를 설치하고 radiometer로 직접 자외선의 세기를 측정하기도 하는데, 물리적 한계로 인해 접촉조 안의 임의의 점에서의 강도를 모두 측정하거나 대표 강도(예를 들면 평균 자외선 강도)를 산출하는 것은 불가능하다. 또한, 램프나 빛의 특성 등을 고려한 수학적 모델을 구성하고 이의 모사를 통해 예측하는 방법이 있다. 이러한 컴퓨터 모사의 장점은 각종 영향 인자나 변수를 쉽게 바꾸어 가면서 모사하고 그 결과를 빠르게 예측하며, 그 결과를 이용해서 설계나 운전 조건을 다시 수정할 수 있는 것이다. 반응조 전체의 자외선 강도 분포를 예측하는 것은 그 자체로도 중요하지만 살균의 효율을 예측하는데도 매우 중요한 부분이다.

지금까지 빛의 광학적 특성에 기초한 많은 수학적 모델들이 제시되어 왔는데, 램프를 n개의 동등한 광원으로 나누고 각 지점에 도달하는 자외선을 합산하여 계산하는 MPSS 모델(multiple points source summation)(Jacob과 Dranoff, 1970), 여기에 반사와 굴절을 더 보완한 MSSS 모델(multiple segment source summation)(Liu 등, 2004) 등이 있고, MPSS 모델의 수학적 해석 모델인 LSI 모델(line source integration)(Blatchley, 1997), DO 모델(Liu 등, 2004) 등이 있다. 본 연구에서는 이 중 가장 많이 사용되고 있는 MPSS, MSSS, LSI 모델을 선정하여 이 수학적 모델을 3차원으로 프로그램화하고, 이들의 모사를 통해 모델의 상호 비교 및 특성을 파악하고, 설계와 운전의 영향인자들에 대해 분석해 보고자 하였다.

## 2. 모델의 전개

### 2.1. 광학의 기초

#### • 굴절(Snell's Law)

자외선은 빛의 한 부분이기 때문에 빛과 같은 진행을 하는데, 빛 또는 방사 에너지가 서로 다른 굴절율을 가진 두 매질(media)을 통과할 때 굴절각도는 Snell's 법칙을 따르며,

다음과 같다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

수처리 자외선 시스템에서 자외선은 보통 물, 수정, 공기의 3개의 매질을 통과하게 되며, Snell's 법칙은 다음과 같게 된다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 \quad (2)$$

따라서, 굴절각은 다음과 같다.

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_3} \sin \theta_1 \right) \quad (4)$$

여기에서 n은 굴절율이며 매질의 물리적 성질로서, 온도에 따라 약간씩 달라지기는 하나 상온에서 공기는 1.000, 물은 1.333 그리고 수정은 1.458 정도이다. 첨자 1, 2, 3은 물, 수정 그리고 공기를 의미한다.

#### • 반사(Fresnel 공식)

반사는 서로 다른 두 매질 표면에서 파동의 방향이 바뀌는 것을 말한다. 굴절율과 굴절각이 각각  $n_1$ ,  $\theta_1$ 과  $n_2$ ,  $\theta_2$  인 두 매체에서 반사율(R)은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{2} [r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2] \quad (5)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1} \quad (6)$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1} \quad (7)$$

$r_{\parallel}$ 는 입사평면에 평행한 에너지 증폭계수이고,  $r_{\perp}$ 는 입사평면에 수직방향의 증폭계수이다.

#### • 흡수(Beer-Lambert 법칙)

빛이 매질을 통과할 때 그 매질이 흡수성이 있으면 빛의 세기는 줄어들게 된다. 흡수계수를  $\alpha(\lambda)(\text{cm}^{-1})$ 라 하면, 주어진 파장( $\lambda$ )이 길이 (l, cm)을 통과할 때 감소한 정도 (U)는 다음과 같다.

$$U = \exp[-\alpha(\lambda)l] \quad (8)$$

투과율은 흡수율과 반대의 개념으로 보통 10mm의 길이를 통과할 때의 투과율을 많이 사용한다.  $T_{10}$ '으로 표시하며 "10mm 투과율"이라고 한다. "10mm 투과율"  $T_{10}$ '을 %로

표시할 경우  $T_{10}'$  과 흡수계수 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$T_{10}' = 100 \cdot e^{-\alpha(d)} \quad (9)$$

## 2.2. 자외선 분포 모델

### • MPSS 모델

비흡수질의 매질에서 한 점 광원(동력 = P) 으로부터 r만큼 떨어진 곳의 강도는 역제곱법칙(inverse square law)에 따르며 다음과 같다.

$$E = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (10)$$

여기에서, E : 램프로부터 r 만큼 떨어진 지점의 자외선 강도 ( $W/cm^2$ ), P : 램프의 동력(W), r : 램프로부터 한 지점까지의 거리(cm)이다.

MPSS 모델은 선형의 자외선 램프를 가정하고, 이 램프를 램프 축을 따라 n 개의 등 간격으로 구분한 후 분할된 각 구획(segment, 이를 점원(point source)라 함)에서 동등한 동력이 방출된다고 간주하는 것이다. 각 점원의 출력은 P/n이 된다. 램프 밖의 한 점에서의 동력은 따라서 n개의 점원에서 방사되는 n개의 자외선 강도의 누적으로 계산된다. 각 점원에서 방사되어 임의의 한 점에 도달하는 자외선은 입사각이나 거리, 굴절이나 반사 등의 특성이 서로 다르므로 앞의 광학적 기초에 의거하여 각 점원으로부터의 굴절각이나 거리 등을 계산한 후 누적하게 된다.

$$I = (1-R_1)(1-R_2) \frac{P/n}{4\pi d^2} \exp(-\alpha_w d_w) \exp(-\alpha_q d_q) \quad (11)$$

여기에서 각 변수는 다음과 같다.

I : 한 점 광원으로부터 도달한 자외선의 강도 ( $W/cm^2$ )

$R_1$  : 공기/수정 경계면에서의 반사율 (-)

$R_2$  : 수정/물 경계면에서의 반사율 (-)

P : 자외선 램프의 총 출력 (W)

n : 분할한 구획(segment)의 수

d : 빛의 굴절을 고려하여 광원에서 한 점까지의 총 투과 길이 (cm)

$\alpha_w, \alpha_q$  : 각각 물과 수정의 흡수율 ( $cm^{-1}$ )

$d_w, d_q$  : 빛의 굴절을 고려하여 광원에서 한 점까지의 이르는 동안 물을 통과한 거리 및 수정을 통과한 거리 (cm)

### • MSSS 모델

Bolton 등은 램프를 일련의 점 광원으로 간주하고 누적하

므로써 계산하는 MPSS 모델이 특히 램프의 표면 가까이나 램프의 양 끝에서 특히 과다 예측되는 점을 발견하고 이를 보완하는 모델을 제시하였다(Liu 등, 2004에서 재인용)

$$I = (1-R_1)(1-R_2) \frac{P/n}{4\pi d^2} \exp(-\alpha_w d_w) \exp(-\alpha_q d_q) \cos \theta_1 \quad (12)$$

여기에서 다른 항목은 위 식(11)과 같으며,  $\theta_1$ 은 공기질(수정 sleeve 안쪽)의 굴절각이다.

### • LSI 모델

Blatchley(1997)는 MPSS 모델에서 불연속의 n 개의 광원을 간주하는데 반해 이를 연속적인 함수로 표현하고 수학적으로 계산한 LSI 모델을 제시하였고, 이 LSI 모델이 n이 무한대로 증가할 때 MPSS 모델과 수학적으로 같음을 보였다. LSI 모델은 굴절과 반사, 흡수를 고려할 수 없기 때문에 이들 인자의 영향이 상대적으로 적은 “공기 중에서의 자외선 살균” 같은 시스템의 모사에 사용될 수 있다.

$$I = \frac{P}{4\pi LR} [\tan^{-1}(\frac{L/2+H}{R}) + \tan^{-1}(\frac{L/2-H}{R})] \quad (13)$$

여기에서 다른 항들은 위 식과 같으며,

L : 램프의 길이 (cm)

R : 한 점에서 램프에 이르는 연직 길이 (cm)

H : 한 점에서 램프 중앙에 이르는 축(램프) 방향의 길이 (cm)

## 2.3. 모델의 구성과 검증

자외선 강도를 계산하는 3가지의 수학적 모델을 모의할 수 있는 프로그램을 구성하였다. 프로그램 언어는 광범위하게 쓰이고 있는 Microsoft Excel VBA를 사용하여 Microsoft Excel에서 바로 실행이 가능하도록 하였다. 3차원이며, 1개의 메인 모듈(module)과 1개의 유저폼(userform)으로 메인 프로그램을 구성하였고, 계산 결과를 그래픽으로 표시할 수 있는 2개의 유저폼으로 구성된 후속 프로그램으로 나누었다. 계산 프로그램의 특징은 다음과 같다.

- 3차원 자외선 강도 분포 모델

- Microsoft Excel VBA를 사용하여 프로그래밍

- 1 모듈과 3 유저폼

- LSI, MPSS, MSSS 모델 선택 옵션

- 반사, 굴절, 그림자 효과 선택 옵션

- 한 개 혹은 여러개 램프, 반응조 길이보다 짧은 램프 가능

- 저압 램프(Low pressure UV lamp), 중압 램프(medium pressure UV lamp) 선택 옵션

- Band width 별 살균 효과 (germicidal effect)

- 반응성 물질의 시간적 변화(제거)

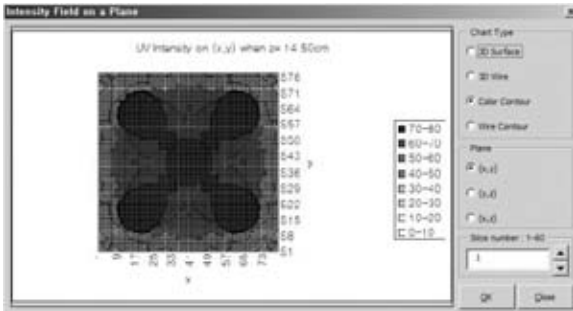


Fig. 1. 모의 결과의 예시.

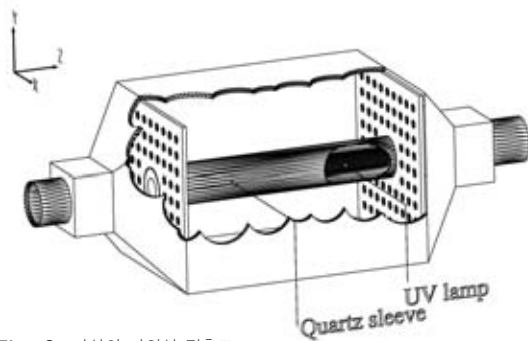


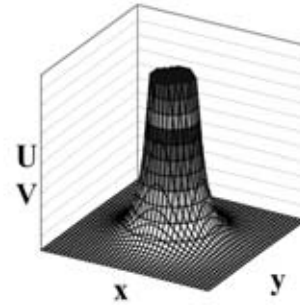
Fig. 2. 가상의 자외선 접촉조.

- 무제한의 element 크기와 수
- 계산 결과를 Excel chart로 저장
- Excel VBA를 사용하므로써 계산 속도가 느린 점이 단점이다.

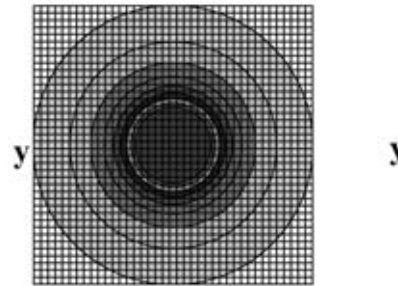
프로그래밍 후 기 보고된 데이터를 이용하여 검증을 실시하였다. Bolton(2000)은 가상의 자외선 접촉조 모의에서 물의  $T_{10}'$ 을 70%로 간주했을 때 평균 자외선 강도로서  $83.9\text{mW/cm}^2$ 를 제시하였는데, 본 연구에서 이와 동일하게 입력 자료를 구성하고 유사한 계수를 사용하여 모사한 결과는 MPSS 모델에서  $84.7\text{mW/cm}^2$ 로 계산되었다. 또한,  $T_{10}'$ 이 35%일 때와 100%일 때 Bolton(2000)의 결과는 각각  $30.6\text{mW/cm}^2$ ,  $259.7\text{mW/cm}^2$ 였는데, 본 연구의 결과는 각각  $30.6\text{mW/cm}^2$ ,  $266.2\text{mW/cm}^2$ 로 나타나 거의 유사하였다. 또한, Chiu 등(1999)은 그들의 파일럿 플랜트 모의 결과 자외선 강도가  $0.1 - 27\text{mW/cm}^2$  범위로 계산되었는데, 동일한 조건을 가정하고 모사한 본 연구에서도  $0.1 - 34\text{mW/cm}^2$  범위로 나타나 충분히 신뢰성이 있다고 판단하였다. Fig. 1에 계산 결과를 보여주는 후속프로그램의 사용 예를 표시하였다.

#### 2.4. 모의 조건의 설정

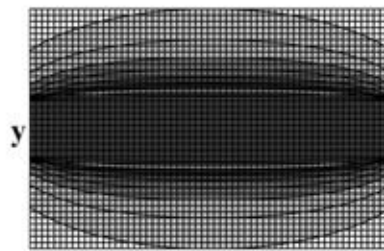
가상의 자외선 접촉조를 구성하여 영향인자 변화에 따른 자외선 강도 분포 변화를 예측하였다. 가상의 접촉조는 Fig. 2와 같이 장방형이며, 가로(x)와 높이(y)가 각각 20cm, 램프



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. 3차원의 자외선 강도 분포 (a) (x,y)평면의 평균 강도, (b) 한 (x,y) 평면 (c) 한 (y,z) 평면.

방향의 길이(z)가 30cm이다. 수정 sleeve는 지름이 4.9cm, 두께가 0.125cm이다. 자외선 램프는 저압 수은 램프로써 출력은 260W이며 자외선 효율은 30%를 가정하였다. 계산 단위인 Element의 수가 많을수록 계산의 정확도는 증가하나 반면에 계산에 소요되는 시간이 그만큼 증가한다. 여러 번의 반복 계산 결과, 계산 단위인 element의 크기를 1cm 이하로 하였을 때 변화가 많지 않았으므로 Element의 크기는 가로, 높이, 길이가 각각 0.5cm인 정육면체로 구성하였다. 따라서, 가상 접촉조의 Element 수는 64,000개이다.

#### 3. 결과 및 고찰

램프로부터 방사되는 자외선의 강도는 Fig. 3과 같이 입체

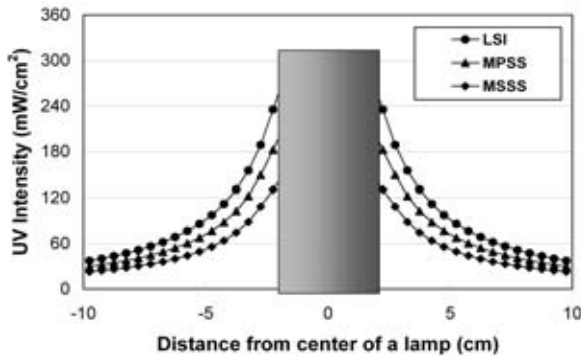


Fig. 4. 모델별 자외선 강도 산정 결과 비교.

형으로서 모델의 종류와 관계없이 수정 sleeve 표면에서 가장 높고, 램프를 중심으로 동심원을 그리며, 램프에서 멀어질수록 점점 작아진다. 또한, 램프의 형태가 긴 원통형이므로 램프의 길이방향의 중간 부근에서 가장 높고 램프의 양 끝 쪽으로 갈수록 점차 작아진다.

LSI, MPSS 그리고 MSSS 모델에서 램프 중심으로부터 거리에 따른 자외선 평균 강도 변화를 모사하여 Fig. 4에 표시하였다. 모든 경우에서 흡수에 의한 자외선의 감소는 고려하지 않았다. 세 모델 모두 자외선의 강도 및 평균 강도는 램프 중심으로부터의 거리에 반비례하였고, 평균 강도를 거리( $r$ )의 함수로 단순화할 경우 거듭제곱함수가 가장 적합하며, 그때의 차수는  $-1.2$ , 결정계수 값( $r^2$ )은  $0.99$  이상이었다.

$$I = \alpha \cdot r^{-1.2}$$

LSI 모델은 반사와 굴절, 흡수 등을 고려할 수 없으며, 평균 자외선 강도가 가장 높게 모사되었다. MPSS 모델과 MSSS 모델의 경우는 반사와 굴절을 고려할 수 있는데, 이들 인자의 고려 여부에 따라 평균 강도도 다르게 나타난다. 반사와 굴절을 고려하지 않는 경우에는 MPSS 모델과 MSSS 모델이 서로 같은 결과를 보이는데, 반사와 굴절을 고려하는 경우에는 MPSS 모델이 MSSS 모델보다 높게 모사되었다. 이는 MSSS 모델에서는 자외선이 원통형의 segment로부터 방사될 때 굴절각의 cosine 만큼 감소하여 방사되는 것으로 간주하기 때문이다.

반사와 굴절의 영향을 알아보기 위하여 MPSS 모델에서 평균 자외선 강도를 계산하여 Fig. 5에 표시하였다. 반사와 굴절을 모두 고려할 경우 평균 자외선 강도는  $10.9\text{mW/cm}^2$ 로 계산된다. 반면 굴절은 자외선 강도를 증가시키는 방향으로 작용하고, 반사는 평균 자외선 강도를 감소시키는 방향으로 작용하여 굴절만을 고려할 경우는  $8.3\%$  정도 증가하고, 반사만을 고려할 경우는  $10.4\%$  정도 감소한다. 반사와 굴절을 모두 고려하지 않는 경우는 이들 두 요소가 서로 상쇄하여 전체적으로는 약  $4.9\%$  정도 낮게 예측된다.

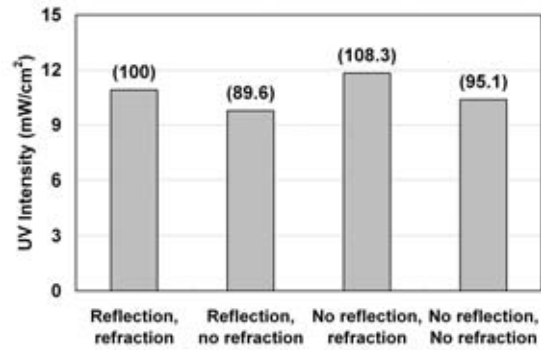


Fig. 5. 반사와 굴절의 영향(MPSS 모델, 괄호 안은 상대적인 값의 퍼센트).

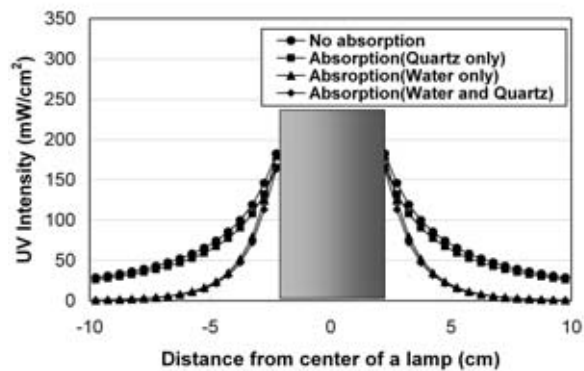


Fig. 6. 흡수의 영향(MPSS 모델, 투과율로서 물의  $T_{10}'$ 은  $65\%$ , 수정의  $T_{10}'$ 은  $50\%$ 를 가정함).

Passantino 등(2004)은 자외선에 의한 상수의 소독에서  $6\text{ NTU}$  정도의 저탁도에서도 자외선의 투과율은  $80\%$  정도까지 낮아진다고 하였다. 즉, 물 속에서 자외선은 탁도나 조류 등의 불순물에 의해 흡수되며 감쇄하는데, 흡수되는 자외선의 비율은 불순물의 농도에 비례한다. 수정 슬리브를 통과하면서도 자외선은 흡수되는데 수정의  $254\text{nm}$  영역의 자외선에 대한  $T_{10}'$ 은 약  $50\%$  정도로 알려져 있다(Chiu 등, 1999). 물과 수정의 자외선 흡수의 영향을 Fig. 6에 표시하였다. 물과 수정의 흡수를 모두 고려하면 평균 자외선 강도는  $10.9\text{mW/cm}^2$ 로 계산된다. 수정의 흡수는 고려하지 않고 물의 흡수만을 고려하는 경우는 이보다  $10\%$  정도 증가한  $12.0\text{mW/cm}^2$ 로 예측되며, 반대로 수정의 흡수는 무시하고 물의 흡수만을 고려하는 경우는  $290\%$  정도 증가한  $42.4\text{mW/cm}^2$ 로 예측되어 상당한 차이를 보인다. 수정과 물의 흡수를 모두 무시하여 고려하지 않는 경우 평균 자외선 강도는  $46.7\text{mW/cm}^2$ 로 나타나 가장 높게 예측되었고 이는 상대오차  $330\%$  해당한다. 따라서, 물과 수정의 흡수는 반드시 고려해야 할 요소이며, 특히 수정 보다는 물의 흡수가 더 영향을 미치는 요소라 할 수 있다.

MPSS 모델에서 램프의 길이 방향으로 자외선 강도의 분포를 산정하여 Fig. 7에 표시하였다. 한 지점으로부터 자외선 램프까지의 거리가 멀수록 자외선의 강도는 약해지게 되

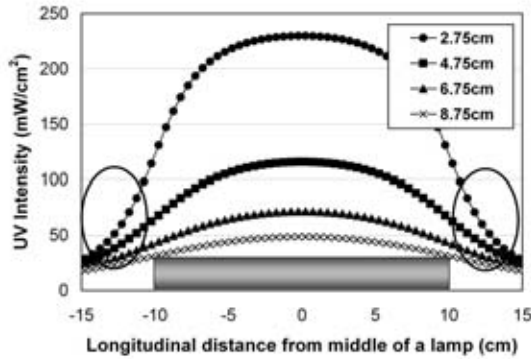


Fig. 7. 램프 길이 방향의 자외선 분포(MPSS모델, 굴절, 반사, 흡수는 고려하지 않음).

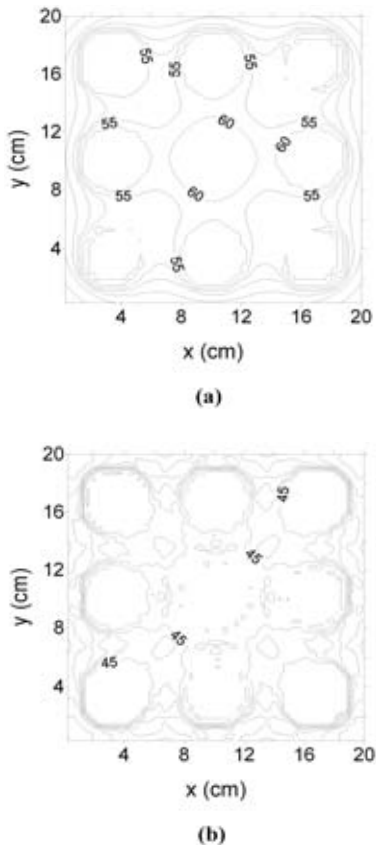


Fig. 8. 그림자 효과의 영향(MPSS모델, 굴절, 반사 및 흡수 고려함) (a) 그림자 효과 미고려시 (b) 그림자 효과 고려시.

는데 이는 자외선의 강도가 거리에 반비례하기 때문이다. 또한 한 지점의 자외선 강도는 램프의 모든 부분에서 방사되는 자외선이 서로 중첩, 누적되는데, 도달거리는 중앙에서 짧고 상대적으로 양 끝에는 증가하므로 자외선의 강도는 램프의 중앙 지점에서 가장 높고, 램프의 양 끝으로 갈수록 약하게 나타나게 된다. 램프의 축 방향으로 램프를 벗어나는 영역(그림의 타원으로 표시한 부분)은 자외선의 강도가 급격히

약해지게 된다.

그림자 효과는 2개 이상의 램프가 설치되었을 때 한 램프의 자외선이 다른 램프의 이면에는 도달할 수 없으므로 인해 감소하는 것을 말한다. 램프의 간격이 멀 경우 어떤 지점의 자외선 강도는 상대적으로 가까이 있는 램프에 의해 압도되어 그림자 효과를 고려하지 않더라도 그 차이는 별로 없겠으나, 램프가 서로 가까이 위치할 경우에는 그 영향을 무시할 수 없을 것이다. 한 접촉조에 같은 파워(130W)를 가진 2개의 램프를 설치했을 경우 그림자 효과를 고려하지 않을 경우 평균 자외선 강도는 21.3mW/cm<sup>2</sup>로서 그림자 효과를 고려했을 때의 20.9mW/cm<sup>2</sup> 보다 다소 크게 나타나지만 상대오차 1.5%로서 그 차이는 그다지 크지 않다. 그렇지만, 설치된 램프의 수가 많아질수록 그림자 영역이 증가하게 됨으로서 그 차이는 점점 증가하게 되는데 모의 결과 램프의 수가 4개인 경우는 상대오차 4.1%, 9개인 경우는 상대오차 10.0%로 각각 증가하였다(Fig. 8 참조). 따라서 한 접촉조 내에 여러 개의 램프를 설치하는 경우에는 그림자 효과를 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

자외선 강도를 계산하는 대표적인 3가지의 모델을 구성하고 모의 접촉조의 모사를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

LSI, MPSS, MSSS 모델 모두 평균 자외선의 강도를 연직 방향의 거리의 함수로 단순화하는 경우 거듭제곱함수가 가장 적합하며, -1.2의 차수를 갖는다.

LSI 모델은 MPSS나 MSSS 모델보다 높게 계산되며, 반사와 굴절을 고려하지 않는 경우 MPSS 모델과 MSSS 모델이 서로 같게 계산되고, 반사와 흡수를 고려하는 경우는 MSSS 모델이 MPSS 모델 보다 낮게 계산된다.

수정과 물의 자외선 흡수를 고려하는 경우와 비교하여 고려하지 않는 경우는 4.3배 만큼 크게 예측되고, 물의 흡수를 무시하는 경우에도 3.9배 만큼 크게 예측된다. 물의 흡수는 고려하고 수정의 흡수를 무시하는 경우에는 약 10% 정도 크게 예측된다. 따라서, 흡수는 매우 중요한 영향인자이며, 특히 물의 흡수는 무시해서는 안되는 영향인자라 할 수 있다.

접촉조 내에 여러 개의 램프를 설치하는 경우 상호 만들어 내는 그림자 효과에 의해 평균 자외선 강도는 감소한다. 램프의 수가 많을수록 또 램프가 서로 가까이 위치할수록 그림자 효과는 더 커지므로, 실제의 접촉조 설계나 운전시에는 그림자 효과를 고려하여 계산하는 것이 타당하다.

## 감사의 글

본 연구는 2006년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 염철민, 김도겸, 정광열, 유양수, 조창현 (2003) 국외 먹는 물 자외선 소독 법규, *상하수도학회지*, 17(6), pp.741-747
2. 박기영, 맹승규, 김기팔, 이석현, 권지향, 안규홍 (2004) 물 재이용을 위한 하수처리장 방류수 색도의 자외선처리에 미치는 과산화수소의 영향, *상하수도학회지*, 18(3), pp.377-384
3. 염철민, 조순행, 전해웅, 정현미, 윤제용 (2001) 하수소독을 위한 자외선의 *Bacillus subtilis* spore 불활성화 특성, *상하수도학회지*, 15(4), pp.293-301
4. B.S. Oh, S.J. Park, Y.J. Jung, S.Y. Park and J.W. Kang (2007) Disinfection and oxidation of sewage effluent water using ozone and UV technologies, *Water Science and Technology*, 55(1-2), pp.299-306
5. E. Kowalska, M. Janczarek, J. Hupka and M. Gryniewicz (2004) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV enhanced degradation of pesticides in wastewater, *Water Science and Technology*, 49(4), pp.261-266
6. E.D. Mackey, T.M. Hargy, H.B. Wright, J.P. Malley Jr, R.S. Cushing (2002) Comparing *Cryptosporidium* and MS2 bioassays - implications for UV reactor validation, *American Water Works Association Journal*, 94(2), pp.62-69
7. E.R. Blatchley III (1997) Numerical modelling of UV intensity: Application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems, *Water Research*, 31(9), pp.2205-2218
8. E.R. Blatchley III, W.L. Wood and P. Schuerch (1995) UV pilot testing: Intensity distributions and hydrodynamics, *Journal of Environmental Engineering*, 121(3), pp.258-262
9. K. Chiu, D.A. Lyn, P. Savoye and E.R. Blatchley III (1999) Integrated UV disinfection model based on particle tracking, *Journal of Environmental Engineering*, 125(1), pp.7-16
10. K.S. Fallon, T.M. Hargy, E.D. Mackey, H.B. Wright and J.L. Clancy (2007) Development and characterization of nonpathogenic surrogates for UV reactor, *American Water Works Association, Journal*, 99(3), pp.73-82
11. K.G. Linden, G. Shin and M.D. Sobsey (2001) Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water, *Water Science and Technology*, 43(12), pp.171-174
12. K.G. Linden, G.A. Shin, G. Faubert, W. Cairns and M.D. Sobsey (2002) UV Disinfection of *Giardia lamblia* Cysts in Water, *Environmental Science and Technology*, 36, pp.2519-2522
13. L. Passantino, J. Malley Jr., M. Knudson, R. Ward and J. Kim (2004) Effect of low turbidity and algae on UV disinfection performance, *American Water Works Association Journal*, 96(6), pp.128-137