



비접촉식 자외선 반응조에서 자외선 강도 분포의 광학적 특성

Optical characteristics of the UV intensity distribution in a non-contact type UV photoreactor

전화봉 · 윤정원 · 김성홍*

Hwabong Jeon · Jungwon Yun · Sunghong Kim *

조선대학교 토목공학과

(2011년 11월 29일 접수; 2012년 2월 10일 1차수정; 2012년 4월 11일 2차수정; 2012년 4월 13일 채택)

Abstract

The concept of a non-contact type of UV disinfection system was introduced in this study. UV lamps and their quartz sleeves hang over the water surface and there is no interface between the sleeve and water. Obviously, there is no fouling. Based on optical laws and other UV distribution models, a detail mathematical model for a non-contact type UV disinfection system was developed in this study. Pathway length of UV light in a non-contact type photoreactor is longer than that in a submerged type photoreactor because the light is more refractive while passing through 3 interfaces of medium. But the pathway length passing through the water media is not significantly longer than that in a submerged type photoreactor so, the absorption of UV light by water is not significantly different from the other system. Due to the reflection effect, UV intensity is rapidly decreased as the horizontal distance from the light source is increased. The reflective attenuation in a non-contact type photoreactor is higher than that in a submerged type photoreactor. These mean that the short photoreactor is advantageous than the narrow-long photoreactor for the non-contact type photoreactor in an optical point of view.

Keywords : UV disinfection, non-contact UV lamp system, UV distribution model, UV intensity, fouling

주제어 : 자외선 살균, 비접촉식 자외선 램프, 자외선 분포 모델, 자외선 강도, 파울링

1. 서론

자외선(UV, Ultraviolet light)을 이용한 살균은 상수처리나 하수처리에서 많이 사용되는데 이는 자외선이 병원균 뿐만 아니라 크립토스포리디움(Cryptosporidium)이나 지아디아(Giardia)와 같이 비교적 염소 소독에 저항성이 강한 미생물의 불활성화에 효과적이기 때문이다(Linden 등, 2001). 2008년 기준으로 우리나라 하수처리장의 53%가 자외선 살균을

채택하고 있으며 점점 더 그 활용도가 높아지고 있다(환경부, 2009). 한편, 자외선 살균에서 운전상 가장 큰 어려움은 Fig. 1과 같이 자외선 램프를 둘러싸고 있는 슬리브가 물과 접촉됨으로 인해 슬리브 주위에 무기물 혹은 유기물이 침적하여 자외선을 흡수하므로 실제로 자외선 조사량이 감소하는 파울링 현상이 발생하는 점이다(Lin 등, 1999). 수질이나 램프의 출력, 형식 등에 따라 다르기는 하지만,

*corresponding author Tel:062-230-7079, E-mail:ksh7079@paran.com(S. H. Kim)

파울링은 운전 시작 후 수 시간 만에 발생하기도 하고, 며칠이 걸리기도 하는데 이로 인해 물 속의 자외선 강도는 수십분의 일 이하로 크게 감소하게 된다. 자외선 살균 시스템 제조회사에서는 이를 해결하기 위해서 기계식 혹은 화학식 슬리브 세척 장치를 고안하여 파울링 물질을 지속적으로 닦아주는 방법을 취하기도 하지만 물과 슬리브가 접촉하고 있는 한 근본적으로 파울링 문제를 해결할 수는 없다(USEPA, 2006).

이러한 파울링 문제에 대한 대안으로 비접촉식 자외선 조사 시스템을 구상하였다. Fig. 1과 같이 비접촉식 시스템은 램프 슬리브가 물과 접촉하지 않으므로 근본적으로 파울링이 발생하지 않는다. 본 연구에서는 비접촉식 자외선 조사 시스템에서의 자외선 강도 변화를 예측할 수 있는 광학 특성에 기초한 수학적 모델을 구성하였고, 시뮬레이션을 통해 각 영향인자의 효과를 분석하여 제시하였다. 실제로 비접촉식 자외선 조사 장치를 구성하고 미생물 반응이나 불활성화 정도를 측정하여 반응조의 거동을 예측하는 방법이 가장 직접적이기는 하지만, 시스템의 설계나 최적화 혹은, 운전인자의 변화에 따른 광반응조의 변동을 예측하는 도구로서 수학적 모델을 개발하고 및 이의 시뮬레이션 결과를 활용하는 것도 효과적인 방법이라 할 수 있을 것이다(최 등, 2009).

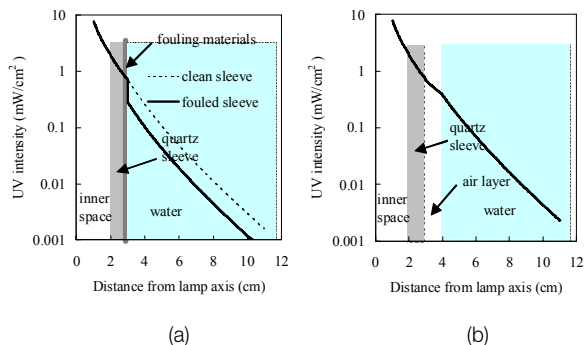


Fig. 1. A concept of (a) fouling on a quartz sleeve in a submerged UV lamp system and (b) non-contact UV lamp system.

2. 자외선 강도 산정 모델

2.1 접촉식 자외선 반응조

접촉식 자외선 살균 시스템에서 광반응조 안에서 자외선 강도 분포를 예측하는 모델로 Jacob과 Dranoff (1970)이 제시한 MPSS(multiple point source summation) 방법이 있다. 이 방법은 선 광원인 자외선 램프를 일련의 점 광원으로 간주하고, 어떤 한 지점(receptor point)에 도달하는 일련의 점 광원의 자외선 강도를 모두 누적하여 계산하는 방법이다. 접촉식 자외선 살균 시스템은 광원인 자외선 램프로부터 공기-수정슬리브-물의 3개의 매질층을 차례로 통과하며 진행한다. 매질을 통과하는 과정에서 빛은 감쇄하는데 감쇄 정도는 그 파장대 빛의 흡수율과 매질두께에 비례한다. 빛은 또한 굴절율이 서로 다른 매질을 통과할 때 굴절(refraction)과 반사(reflection)하는 특성이 있다.

자외선 빛의 강도는 광원에서 떨어진 거리에 비례하여 역제곱법칙(inverse square law)에 따라 감소하는데, P (Watt)의 점 광원으로부터 거리 d 만큼 떨어진 한 점에서의 자외선 강도 E 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$E = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (1)$$

여기에서 P 는 자외선 램프의 파워(Watt); d 는 램프와 한 지점까지의 거리(cm); E 는 그 지점에서 자외선 강도(W/cm^2)이다. 만약 자외선이 흡수성 매질을 통과하면 자외선은 감소하게 되는데, 자외선 감소율은 흡수율(α)과 거리의 곱에 대해 지수함수를 따라 감소한다. 흡수율과 반대되는 개념으로 많이 사용하는 것은 “10mm 투과율”인데 이것은 매질 10mm를 통과 후 측정된 자외선 강도로서, 흡수율과는 다음 관계가 있다.

$$\frac{T_{10}'}{100} = e^{-\alpha} \quad (2)$$

여기에서, α 는 그 매질의 자외선 흡수율; T_{10}'

는 “10mm 투과율”을 %로 나타낸 값이다.

3개의 매질을 통과하는 경우인 접촉식(침지형) 자외선 반응조에서 자외선의 굴절과 흡수, 반사를 고려한 자외선 강도 계산은 MPSS 모델에 기초한 여러 문헌에 비교적 자세히 제시되어 있다(김 등, 2008; Liu 등, 2004; Bolton, 2000). Fig. 2와 같이, 빛은 굴절율이 서로 다른 매질을 통과할 때 굴절하는데 굴절각(입사각)은 굴절계수(refractive index)와 관계가 있으며, Snell의 법칙에 따라 다음과 같다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 \quad (3)$$

첨자 1, 2, 3을 각각 공기, 수정, 물이라고 하면 굴절계수; $n_1 = 1.0$, $n_2 = 1.52$, $n_3 = 1.38$ 이다(Liu 등, 2004).

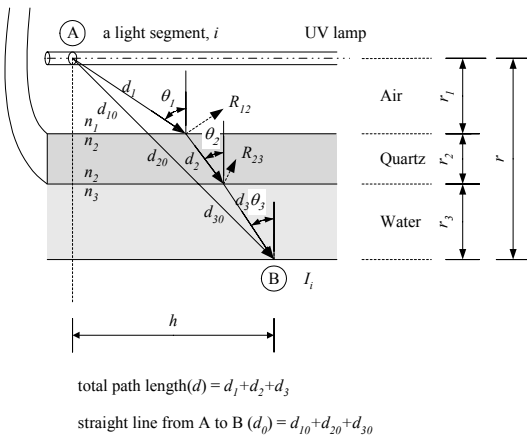


Fig. 2. UV light pathway in a submerged type UV photoreactor

접촉식의 경우 자외선은 공기/수정, 수정/물의 2개의 경계면을 지나게 된다. 각 경계면에서 앞의 식에 따라 굴절하면서 동시에 빛의 일부가 반사된다. 빛이 반사하면 반사된 빛은 더 이상 진행하지 않으므로 빛의 강도도 감소하는데 굴절율이 각각 n_i , n_j 이고 굴절각이 각각 θ_1 , θ_2 인 매질 i 와 j 의 경계면에서 반사율은 Fresnel의 법칙에 따라 다음과 같다.

$$R_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_j + n_j \cos \theta_i} \right)^2 + \left(\frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

MPSS 모델은 선 광원인 자외선 램프를 P/n 의

동력을 가진 n 개의 균일한 일련의 점 광원으로 간주한다. 그러므로, 한 점 B에 도달하는 한 개의 점 광원 i 에 의한 자외선 강도는 다음 식 (5)와 같고, 총합은 n 개의 서로 다른 위치의 점 광원에서 발생하는 자외선을 모두 합산하여 계산할 수 있다.

$$I_i = (1 - R_{12})(1 - R_{23}) \frac{P/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_3)} \exp(-\alpha_2 d_2) \exp(-\alpha_3 d_3) \quad (5)$$

여기에서, R_{12} 는 공기/수정 경계면에서의 반사율, R_{23} 는 수정/물 경계면에서의 반사율, d_1 , d_2 , d_3 는 각각 공기, 수정, 물 층의 진행거리, α_2 , α_3 는 각각 수정, 물 층의 자외선 흡수율을 말한다.

2.2 비접촉식 자외선 반응조

비접촉식 반응조의 경우는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 빛이 공기-수정슬리브-공기-물의 매질을 차례로 통과하며 진행한다. 접촉식의 경우와 마찬가지로 각 매질과 매질의 경계에서 빛은 굴절되고 또한 반사된다. 즉 물 속 임의의 지점에 도달하는 빛은 공기/수정, 수정/공기 그리고 공기/물의 경계면을 지나게 되는 것이다. 각 매질을 통과할 때의 굴절각은 앞의 Snell의 법칙과 같으므로 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있으며, 또한 각 경계층에서의 반사율 역시 Fresnel의 법칙을 따르므로 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다(Kim 등, 2011).

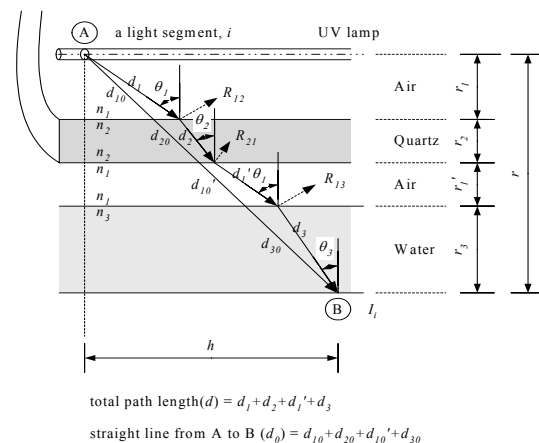


Fig. 3. UV light pathway in a non-contact type UV photoreactor

그림에서, 점 광원으로부터 수평방향으로 h , 연직방향으로 r 만큼 떨어진 지점에 도달하는 빛은 d_1, d_2, d_1', d_3 의 경로를 따르게 되는데, 각 매질의 두께 r_1, r_2, r_1', r_3 와 수평방향의 거리(h)는 서로 다음의 관계가 있다.

$$r_1 \tan \theta_1 + r_2 \tan \theta_2 + r_1' \tan \theta_1 + r_3 \tan \theta_3 = h \quad (6)$$

식 (3)에 주어진 매질의 굴절계수를 대입하면 θ_2 나 θ_3 는 θ_1 의 함수로 표현할 수 있고, 이것들을 식 (6)에 대입하면 다음의 식 (7)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} & (r_1 + r_1') \tan \theta_1 + r_2 \tan \left(\sin^{-1} \left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} \right) \right) \\ & + r_3 \tan \left(\sin^{-1} \left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_3} \right) \right) = h \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 단지 하나의 미지수; θ_1 을 가지고 있으므로 반복법과 같은 간단한 수치해법을 사용하여 쉽게 풀 수 있다. 또한, θ_1 이 얻어졌으므로 θ_2 나 θ_3 는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 각 매질을 통과하는 진행거리; d_1, d_2, d_1', d_3 는 Fig. 3에 따라 다음과 같다.

$$d_1 = r_1 / \cos \theta_1 \quad (8a)$$

$$d_2 = r_2 / \cos \theta_2 \quad (8b)$$

$$d_1' = r_1' / \cos \theta_1 \quad (8c)$$

$$d_3 = r_3 / \cos \theta_3 \quad (8d)$$

비접촉식 자외선 광반응조의 경우 반사는 3 경계면에서 발생하는데, 공기/수정 경계면에서의 반사율이나 수정/공기 경계면에서의 반사율은 서로 같으므로 반사에 의한 자외선 강도는 다음과 같이 줄어들게 된다.

$$I = (1 - R_{12})^2 (1 - R_{13}) I_0 \quad (9)$$

여기에서, R_{12}, R_{13} 는 각각 공기/수정 경계면, 공기/물 경계면에서의 반사율; I_0 는 반사를 고려하지 않을 때의 자외선 강도; I 는 반사를 고려할 때의 자외선 강도를 말한다. 그러므로, 비접촉식 광반

응조에서 자외선 강도는 식 (10)과 같이 전개된다.

$$I_i = (1 - R_{12})^2 (1 - R_{13}) \frac{P/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_1' + d_3)} \exp(-\alpha_2 d_2) \exp(-\alpha_3 d_3) \quad (10)$$

여기에서, R_{12} 는 공기/수정 경계면의 반사율, R_{13} 는 공기/물 경계면의 반사율, d_1' 는 수정슬리브와 물 층 사이의 거리이며, 다른 변수들의 정의는 앞의 식 (5) 및 Fig. 3에 표시된 바와 같다.

3. 모의조건의 설정

굴절과 반사의 효과로 인해 발생하는 접촉식 광반응조와 비접촉식 광반응조의 자외선 강도 분포를 비교하기 위하여 기하학적으로 비슷한 반응조를 가정하였다. 접촉식 광반응조는 Fig. 4의 (a)와 같으며, 광원 ①로부터 수정슬리브까지의 거리 1cm, 수정슬리브의 두께 0.2cm를 가정하였고, 수정슬리브 바깥면으로부터 수직방향으로 4cm 이격된 한 지점 ②를 선정하였다. 그리고 지점 ②가 수평방향으로 0 - 15cm까지 변화할 때의 굴절에 따른 진행거리, 반사율 및 자외선 강도의 변화를 계산하였다. 점 광원의 자외선 램프는 100W이었다. 비접촉식 광반응조는 (b)와 같으며, 마찬가지로 광원 ①로부터 수정슬리브까지의 거리 1cm, 수정슬리브의 두께 0.2cm를 가정하였다. 비접촉식의 경우 수정슬리브는 수면보다 1cm 높게 위치하는 것으로 간주하였고, 물 속 깊이 3cm되는 한 지점 ②를 선정하였다. 접촉식의 경우와 같이 지점 ②가 수평방향으로 0 - 15cm까지 변화할 때의 진행거리, 반사율, 강도 등의 변화를 계산하였고, 이를 접촉식의 계산 결과와 비교하였다. 모의 조건으로서 공기, 수정 및 물의 굴절계수는 각각 1.00, 1.52, 1.38을 사용하였고, 식 (7)의 풀이에는 이분법(bisection method)을 사용하였다. 계산 결과는 가급적 무차원화된 값으로 표시하였는데, 깊이(r)에 대한 수평방향의 길이(h)의 비, h/r 로 나타내었다. 접촉식 광반응조에서 파워링에 따른 감쇄는 고려하지 않았다. 공기의 10mm

자외선 투과율은 100%이며, 수정은 50%로 간주하였다. 물의 10mm 자외선 투과율은 수질에 따라 다르는데, 굴절과 반사의 영향을 분석할 때는 100%로 간주하였고, 물의 투과율에 따른 자외선 강도를 계산할 때는 투과율을 60%~100%까지 다양하게 변화시켰다.

선 광원인 경우의 시뮬레이션은 MPSS 모델을 이용할 수 있으며, Fig. 4의 (c), (d)와 같이 폭 10cm, 높이 10cm, 길이 50cm의 좁고 긴 장방향의 광반응조를 가정하였다. 자외선 램프는 100W에 40cm 길이이고, 수정슬리브는 외경 2.4cm에 두께 0.2cm를 가정하였다. 수정슬리브의 10mm 자외선 투과율은 50%로 간주하였고, 물의 투과율을 85%로 간주하였다. 선 광원은 MPSS에서 여러 개의 점광원으로 간주하는데 여기서는 40cm의 선 광원을 40개의 점광원으로 나누었다. 접촉식 광반응조는 수심 10cm로서 내부 전체에 물이 흐르고 있으며, 비접촉식 광반응조는 수심 5.8cm로서 수정슬리브와 수면 사이의 간격을 1cm로 가정하였다.

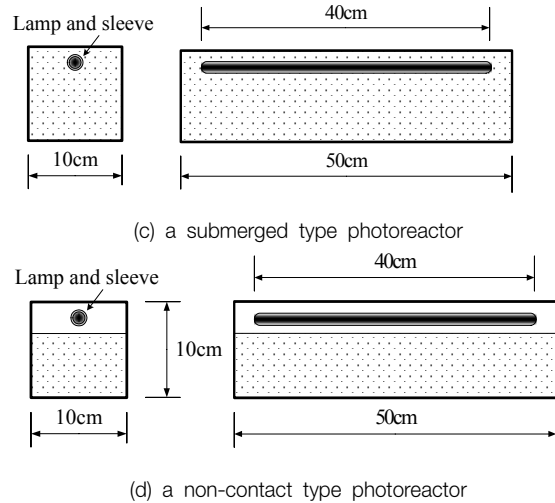
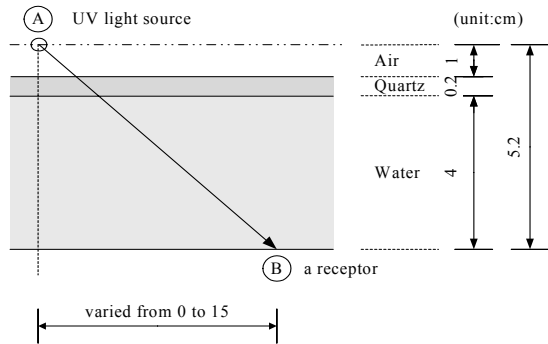


Fig. 4. Schematics of photoreactor for the numerical experiments.

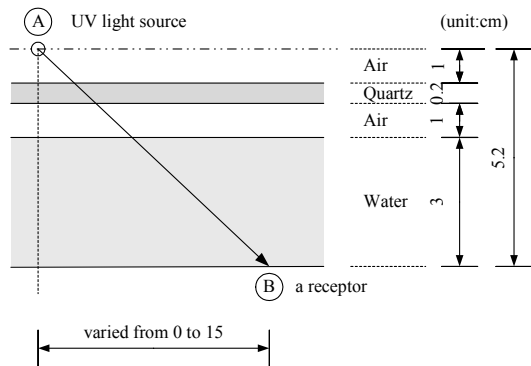
4. 결과 및 고찰

굴절의 효과

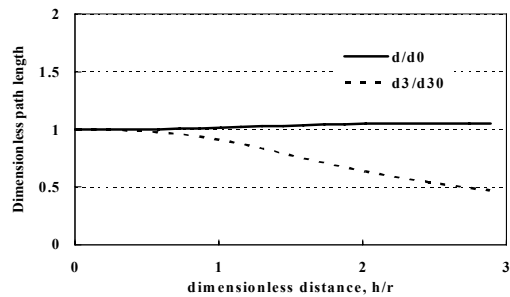
접촉식 광반응조와 비접촉식 광반응조에서 굴절 효과로 인한 자외선의 진행경로 변화를 계산하여 Fig. 5에 표시하였다. 점 광원과 도달점 사이에 가장 짧은 거리는 직선거리로서 d 에 해당한다. 하지만 굴절로 인해 점 광원으로부터 수평방향으로 거리가 멀어질수록 총 진행경로는 이보다 길어지는데, 접촉식의 경우 그 차이가 그다지 크지 않지만 비접촉식의 경우에는 직선거리의 약 1.8배까지 크게 증가함을 알 수 있다. 하지만, 물 층에서의 진행 경로는 오히려 짧아져서 d_3/d_{30} 값이 1보다 작게 나온다(그림 (a), (b)의 점선). 자외선은 물 층을 통과할 때 가장 많이 흡수되어 감소하므로 물 층의 진행 경로가 짧아지는 것은 그만큼 자외선이 먼 곳까지 도달할 수 있음을 의미한다.



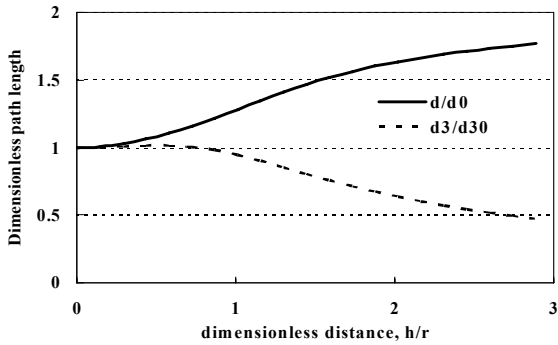
(a) a receptor position in a submerged type photoreactor



(b) a receptor position in a non-contact type photoreactor



(a) Submerged type photoreactor

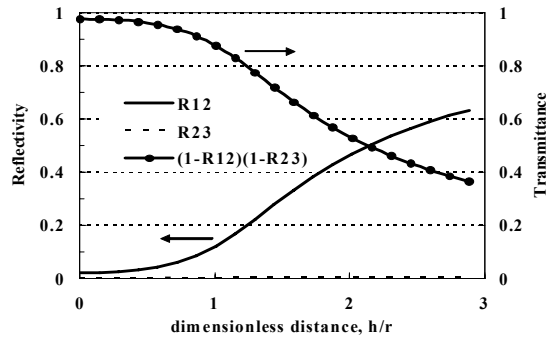


(b) Non-contact type photoreactor

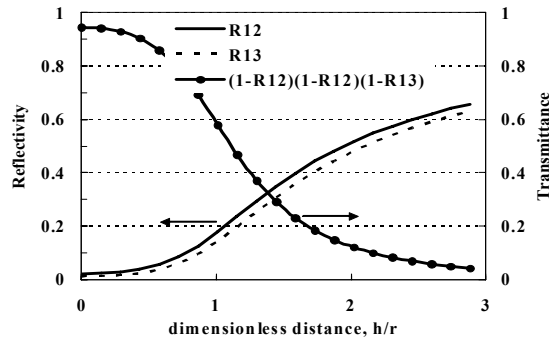
Fig. 5. Total pathway length(solid line) and water media pathway length(dotted line).

반사의 효과

자외선의 일부는 경계면에서 반사하는데, 접촉식의 경우 2개의 경계면에서 반사가 일어나는 반면, 비접촉식은 3개의 경계면에서 반사가 일어난다. 각 경계면에서의 반사율은 Fresnell의 법칙을 따라 굴절각과 밀접한 관계가 있다. Fig. 6의 (a)와 (b)에는 각각 접촉식과 비접촉식 광반응조에서 일어나는 반사율이 표시되어 있다. 공기/수정층 사이에서의 반사율(R12)은 두 경우에서 서로 큰 차이가 없다. 반면에 접촉식에서는 수정/물층 사이에서 반사가 발생(반사율 = R23)하는 반면, 비접촉식에서는 공기/물층 사이에서 반사(반사율 = R13)가 발생한다. 그런데, R23는 매우 미미하지만(그림 (a)의 점선), R13는 R12와 비슷한 정도를 보인다(그림 (b)의 점선). 즉, 접촉식의 수정/물층 경계에서의 반사는 무시할 수 있는 반면, 비접촉식의 공기/물층 경계에서의 반사는 무시할 수 없는 것이다. 반사의 효과를 Fig. 6에 함께 표시하였는데, 접촉식의 경우 2번의 반사로 인해 h/r이 약 3일 때 자외선의 투과량은 36%까지 줄어든다. 비접촉식의 경우는 이 보다 훨씬 커서, 3번의 반사로 인해 자외선의 96% 정도가 반사되고 투과량은 4% 정도이다. 이것은, 광원에서 멀어질수록 접촉식보다 비접촉식에서 반사에 의한 자외선 손실이 더 크다는 것을 의미한다.



(a) Submerged type photoreactor



(b) Non-contact type photoreactor

Fig. 6. Reflectivity and transmittance reduction due to the reflectivity. R12, R23 and R13 were defined in equation (5) and (10).

Fig. 7에 굴절과 반사에 의해 줄어드는 자외선의 강도를 비교하여 함께 표시하였다. 광원에서 멀어질수록 자외선의 강도도 감소하는데, 접촉식의 경우가 비접촉식의 경우보다 강도의 저하가 더 완만하여 먼 곳까지 도달할 수 있는 반면, 비접촉식은 이보다 훨씬 더 급격함을 알 수 있다.

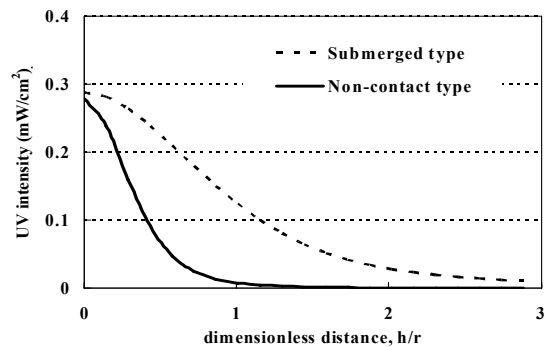
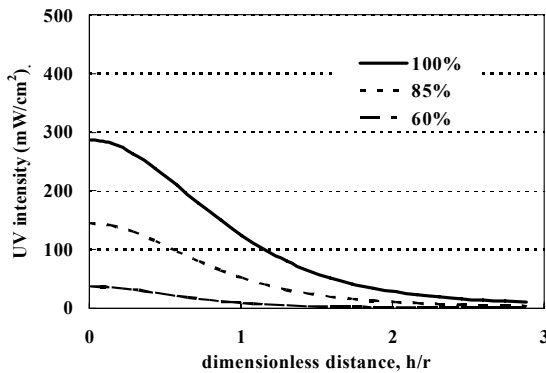


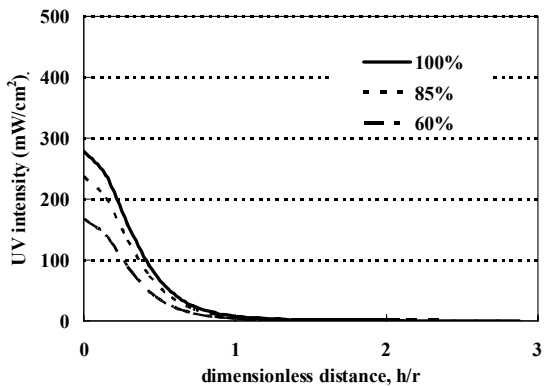
Fig. 7. The reduction of UV intensity due to the refraction and reflection.

흡수의 효과

자외선 광반응조에서 자외선의 감소는 특히 물층에서의 흡수에 의해 일어난다. 물층의 흡수는 물의 자외선 투과율과 밀접한 관계가 있는데, 이 투과율을 100%, 85%, 60%로 가정했을 때 수평거리 변화에 따른 자외선 강도 변화를 Fig. 8에 표시하였다. 흡수에 의해 자외선 강도는 ‘거리×흡수율’ 값에 1차반응식(지수함수)을 따라 감소하므로 거리가 멀어질수록 강도는 지수적으로 떨어지게 된다. 다만, Fig. 6에서 보는 바와 같이 광원에서 멀어질수록 자외선 강도도 급속히 감소하는데 비접촉식의 경우가 접촉식의 경우보다 훨씬 더 급격함을 알 수 있다. 이는 비접촉식의 경우 흡수의 영향도 매우 크지만, 굴절과 반사의 효과도 무시할 수 없는 중요한 변수가 됨을 의미한다.



(a) Submerged type photoreactor



(b) Non-contact type photoreactor

Fig. 8. The attenuation of UV intensity due to the transmittance reduction of water.

Fig. 9는 실제의 자외선 램프인 원통형의 선 광원일 경우 접촉식과 비접촉식에서 램프의 길이 방향에 대한 자외선 강도의 분포를 나타낸 것이다. 점 광원의 누적으로 인해 램프의 중간 지점에서 가장 높은 강도를 보이고 있고, 램프의 양 끝에서는 자외선 강도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 램프로부터 4cm 이격된 위치에서의 자외선 강도는 접촉식의 경우보다 비접촉식의 경우가 더 높게 나타나고 있다. 이것은 비접촉식의 경우 수정슬리브와 수면 사이에 공기층이 존재하여 그만큼 흡수에 의한 자외선 감소가 없었기 때문이다.

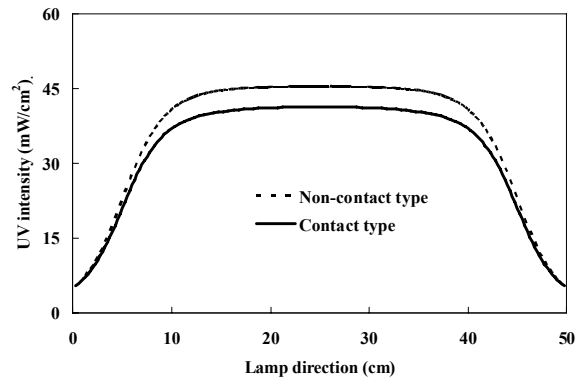


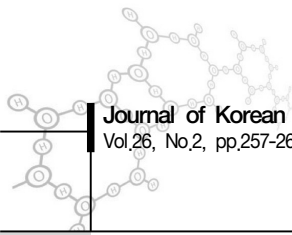
Fig. 9. UV intensity profile at the receptor point 4cm apart from a UV lamp.

5. 결론

접촉식과 비접촉식 자외선 광반응조의 자외선 분포 모델의 수립과 모의 수치계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

비접촉식 광반응조 시스템은 3개의 매질층을 통과하면서 굴절에 의해 자외선의 진행경로는 접촉식의 경우보다 훨씬 더 길어진다. 그렇지만, 자외선이 주로 흡수되는 물층의 진행경로는 서로 큰 차이가 없었다.

점 광원에서부터 수평거리가 멀어질수록 반사의 효과는 점차 커지고, 이로 인한 자외선 감쇄는 비접촉식의 경우가 접촉식의 경우보다 훨씬 크다. 이것은 접촉식에서 수정/물 경계면에서의 반사에 의



한 감쇄는 무시할 수 있을 정도로 작은 반면, 비접촉식에서 공기/물 경계면에서의 반사나 공기/수정 경계면에서의 반사는 모두 무시할 수 없을 만큼 크기 때문이다.

수평거리가 멀어질수록 접촉식 시스템보다 비접촉식 시스템에서 자외선은 더 급격히 감소한다. 이는 굴절과 반사의 효과가 거리에 비례하여 더 커지기 때문이다. 따라서, 비접촉식 광반응조를 구상할 때는 가급적 좁고 긴 형태보다는 수평거리가 짧은 형상이 더 유리할 것이다.

사사

이 연구는 2010년도 조선대학교 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김두일, 최영균, 김성홍 (2008) 자외선 강도 산정 모델과 영향인자에 관한 연구, 상하수도학회지, 22(4), pp.421-427.

최영균, 김두일, 김성홍 (2009) 광학모델을 이용한 자외선 접촉조 최적 설계에 관한 연구, 한국물환경학회지, 25(4), pp.547-552.

환경부 (2008) 2008 하수도통계, 서울, pp.670-920.

Bolton J.R. (2000) Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: Significance of refraction and reflection, Water Research, 34(13), pp.3315-3324.

Jacob S.M. and Dranoff J.S. (1970) Light intensity profiles in a perfectly mixed photoreactor, AIChE J, 16(3), pp.359-363.

Kim SH, Choi YG and Kim DI (2011) Development of UV Distribution Model for the Non-contact Type UV Disinfection System, International Journal of Chemical Reactor Engineering, 9, A57. pp.1-17.

Lin L., Johnston C.T. and Blatchley III E.R. (1999) Inorganic fouling at quartz : water interfaces in ultraviolet photoreactors - I. Chemical characterization, Water Research, 33(15), pp.3321-3329.

Linden K.G., Shin G. and Sobsey M.D. (2001) Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of Cryptosporidium parvum oocysts in water, Water Science and Technology, 43(12), pp.171-174.

Liu D., Ducoste J., Jin S. and Linden K. (2004) Evaluation of alternative fluence rate distribution models, J Water Supply Res Technol-Aqua, 53(6), pp.391-408.

USEPA (2006) Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule, Office of Water, Washington DC, USA, pp.2-27 - 2-28.