

자외선램프를 이용한 유수처리장치 설계 시뮬레이션

(Simulation Method for the Flowing Water Purification with UV Lamp)

정병호* · 이강연**

(Byeong-Ho Jeong · Kang-Yeon Lee)

요 약

자외선 살균기술을 바탕으로 한 수처리 분야에 대한 관심이 최근 증가하고 있다. 수처리분야에서 살균처리방식의 효율은 유체 살균챔버나 살균강도 그리고 미생물의 불활성역학에 따라 수처리 성능이 결정된다.

광산화법에 이용되는 빛은 주로 자외선이 이용되며 매우 깨끗하고 높은 에너지를 가지고 있어 화학살균방법에 비해 잔류물이 없고 높은 안정성으로 최근 관심이 높아지고 있다. 그러나 자외선살균방식은 조사시간과 조사량에 직접적인 영향을 받아 이를 위한 최적의 설계가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 유수살균장치의 챔버 내의 자외선 램프와 유수에 대한 3D-CFD discrete ordinates model 모델을 제시하고 이를 시뮬레이션을 통해 설계방식의 최적화 여부를 검증하고 향후 유수형 자외선살균방식의 시뮬레이션방법을 제안하고자 한다.

Abstract

Interest in application of ultraviolet light technology for primary disinfection of potable water in drinking water treatment plants has increased significantly in recent years. The efficacy of disinfection processes in water purification systems is governed by several key factors, including reactor hydraulics, disinfectant chemistry, and microbial inactivation kinetics. The objective of this work was to develop a computational fluid dynamics(CFD) model to predict velocity fields, mass transport, chlorine decay, and microbial inactivation in a continuous flow reactor. The CFD model was also used to evaluate disinfection efficiency in alternative reactor designs. In a typical operation, water enters the inlet of a UV lamp and flows through the annular space between the quartz sleeve and the outside chamber wall. The irradiated water leaves through the outlet nozzle.

In this paper, it describe the how to design optimal ultraviolet disinfection device for ground water and rainwater. To search the optimal design method, it was performed computer simulation with 3D-CFD discrete ordinates model and manufactured prototype. Using proposed design method, performed simulation and proved satisfied performance.

Key Words : UV Disinfection, 3D-CFD, Flowing Water Purification

* 주저자 : 남부대학교 의료공학과

** 교신저자 : 조선대학교 전기공학과

Tel : 062-230-7863, Fax : 062-230-7256, E-mail : space122@hanmail.net

접수일자 : 2009년 8월 3일, 1차심사 : 2009년 8월 10일, 2차심사 : 2009년 9월 3일, 심사완료 : 2009년 9월 17일

1. 서 론

수처리분야의 살균방법은 열, 약품, 방사선, 오존, 자외선을 이용한 다양한 방법들이 수행되고 있다. 이 중에서 광산화법에 이용되는 빛은 주로 자외선으로서 매우 깨끗하고 매우 높은 에너지를 가지고 있기 때문에 다른 수처리기술로는 처리가 불가능하거나 처리효율이 낮은 유기화합물의 분해·제거를 위해 적용되었다[1].

자외선살균램프를 이용한 수처리 살균기술은 수처리 대상이 되는 물에 광원을 직접 침수하여 살균하는 직접 침수형구조의 수중점등방식이 대부분으로 현재 시판중인 일부 정수기와 일부 수처리분야에서 활용하고 있다. 또한 자외선의 조사방법에 따라 물위점등(외조식), 수중점등(내조식) 및 자외선투과 유리관 또는 석영관 속의 유수를 그 바깥쪽에서 조사하는 등의 방식이 있다. 침수형 살균구조는 설치비가 싸고 보수가 쉬우며, 또 불순물이 있는 물을 살균하는데도 적당하고, 설비를 소형화할 수 있는 장점이 있다[2]. 이에 비해 유수형 살균방식은 처리유량, 장치의 부피, 처리속도등의 측면에서 침수형 살균방식보다 우수한 성능을 가지고 있으나 챔버의 형태나 자외선 조사량에 대한 설계방식에 따른 살균 성능이 크게 좌우된다. 유수처리용 자외선 살균장치는 자외선램프의 점등시간, 투과력, 자외선 조사시간, 조사면적 등의 다양한 파라미터에 의해 살균성능 자체가 결정되며 이러한 다양한 요소에 대한 해석과 분석이 요구된다[3].

이전의 자외선 살균방식을 도입한 유수처리장치의 설계에 대한 연구는 시뮬레이션 모델의 선정과정이나 효과적인 살균챔버의 설계와 같은 방식을 통해 정확한 살균능력을 확보하고자 하는 목적으로 제안되었다. 이 중 충류흐름방식을 유도하기 위한 U자형 챔버를 적용한 유수형 살균방식은 5[W] 자외선램프를 U형 챔버의 양단에 설치하여 직경 35[mm]의 스텔레스 관로를 적용한 유수형 챔버를 설계 및 적용하였다[4-5]. 이러한 방식의 챔버 설계를 통해 장염 비브리오팀(Vibrio parahaemolyticus)의 제균에 적용하였으며 이러한 변형된 살균챔버의 설계방식은 흐름율(Flow rate)에 대한 의존도가 높고 특정 균종

에 대한 살균을 목적으로 하는 등의 설계상의 단점을 갖는다. 3D-CFD모델을 이용하여 유수형 살균 챔버를 설계하는 방식은 식수에 대한 유수형살균장치를 목적으로 한다[6-12]. 이러한 모델은 CFD, 분산 예측, 램덤 순시 모델을 이용한 분산된 위상 분자궤도에 의해 생성되고 미생물 불활성과 등가조사의 감소의 예측에 도달하기 위한 미생물 불활성 동력학 모델에 의한 생성된다. 이 모델은 챔버의 출력단에서 충류흐름을 갖는 풀스케일, 다중 램프중압 자외선 램프 살균챔버에 적용될 수 있으나 이러한 실제 이 방식을 통한 시뮬레이션 상에서 지하수나 빗물을 살균하는데 적용하기 어려운 점은 프리필터의 적용 여부, 탁도, 용존성분의 종류등에 대한 구체적인 해석과 적용이 일반적이지 않아 실질적인 적용이 어렵다는 점이다.

본 논문에서는 자외선을 이용한 유수처리형 살균장치의 설계방식을 3D-CFD를 통한 Discrete Ordinates Model을 정립하고 이를 시뮬레이션을 통해 자외선 조사량을 확보하고 다양한 구성요소를 복합적으로 고려한 살균챔버의 설계기준을 제시하고자 한다. 자외선을 이용한 유수처리형 살균장치의 최적의 설계를 위한 모델링을 통해 시제품을 제작, 실험하여 정확한 설계데이터를 확보함으로써 향후 자외선 유수처리분야의 고품질의 안정적인 살균시스템의 성능구현에 일조하고자 한다.

2. 자외선 유수살균장치의 설계

2.1 자외선 조사량과 살균특성

자외선 살균에 대한 메카니즘은 자외선의 조사에 의해 세포안의 핵산(DNA)이 변하여 신진대사에 장애를 초래하여 증식능력을 잃어 감소하는 특징이 있다고 알려져 있다. 이러한 자외선의 조사에 따른 살균성능은 [cm]당 100[μW]의 강도를 가진 자외선을 1분간 조사하면 대장균, 디프테리아균 및 이질균이 99[%]가 사멸된다[13].

광산화법에 적용되는 에너지가 높은 빛에너지인 자외선이 높은 에너지를 방사하여 살균을 목적으로 할 때, 요구되는 에너지는 식 (1)의 자외선 조사량에

대한 정의와 같이 표현된다.

$$E_{\lambda} = \frac{hC}{\lambda_w} A_w \quad (1)$$

여기서 E_{λ} 는 주어진 파장 λ_w 에서 방사에너지, [KJ/einstein], C는 광속 $3 \times 10^8 m/s$, h는 플랑크 상수 $6.625 \times 10^{-32} J \cdot s$, λ_w 은 파장, A_w 는 Abogadro의 수 $6.023 \times 10^{23} photons/einstein$ 이다.

여기서 254[nm]의 파장에서 방사에너지가 472 [KJ/einstein]이다. 광활성에서 1[einstein]은 1 mole로 표기하고 이는 472[KJ/einstein] 또는 472 [KJ/mole]보다 더 큰 에너지가 살균장치에 공급되어야 함을 의미한다.

살균장치의 설계 시에 고려해야 할 중요한 3가지 파라미터가 있다. 첫 번째는 germicidal wave-lengths로 220[nm]에서부터 280[nm]의 자외선 출력이다. 두 번째로 투수량계수로 수온 약 16[°C], 수두 경사 1 : 1에서 대수층 전체의 두께에 미치는 단위 폭의 단면적을 통과하는 수량으로 정의되는 투수성의 척도이며 임의의 함유물은 자외선의 효과적인 통과를 억제한다. 따라서 투수량계수는 가능한 가장 좋지 못한 상황을 가정하여 계산한다. 세 번째로 살균챔버의 구조적 형상에 따라 살균특성이 변화하므로 살균챔버의 내부로 최대 유량이 흐르는 것을 가정하여 설계하여야 한다. 살균챔버 내의 자외선의 조사량은 식 (2)과 같다.

$$Dose, D = I \times t [mJ/cm^2] \quad (2)$$

여기서 I는 챔버의 Worst 위치에서 강도, t는 유체가 살균챔버를 통과하는데 걸리는 정체시간이다.

2.2 자외선 살균램프

자외선살균 램프의 유리관은 자외선을 효율적으로 투과시키는 특수한 재질을 사용하고 램프 양 끝에는 텅스텐 필라멘트코일이 있으며 코일에는 에미터가 장착되어 있다. 램프내부는 진공상태로 적정 압력으로 알곤가스 또는 다른 불활성 가스와의 혼합 가스와 적당량의 수은을 주입되어 있다. 자외선의

발생을 위해 자외선램프의 전극에 전류를 흘려 예열하고 에미터에서 열전자를 방출시키면 알곤가스를 매개로 하여 방전이 일어나게 된다. 방전에 의해 관로에 흐르는 전자는 포화상태의 수은열기와 급격히 충돌하여 수은 공명선인 253.7[nm]을 발생한다. 자외선 살균은 253.7[nm] 파장의 자외선이 갖는 살균 작용을 이용하는 것으로 관내에서 발생한 자외선을 자외선 투과율 높은 특수유리 또는 투명석영초자를 사용하며 이것을 효율적으로 관내에 전달시키는 것이다.

표 1은 시물레이션에 적용된 75[W] 자외선 살균 램프의 사양이고 그림 1은 외형규격이다.

표 1. 75[W] 자외선 살균램프의 사양
Table 1. 75[W] 자외선 lamp specification

Electrical capacity (W)	Dimension(mm)		Lamp Current	Ultraviolet Output (W)	Irradiance values (1m Distant) ($\mu W/cm^2$)	Average Useful Life (h)
	Length	Diameter				
75	1199.4	28	0.84	26.0	220	8,000

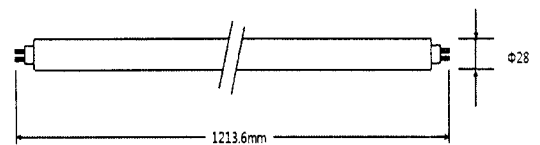


그림 1. 자외선 램프의 외형
Fig. 1. 자외선 Lamp Outward Form

자외선램프는 사용시간이 증가 할수록 자외선의 방사량이 줄어들며 열선이 증대한다. 이는 공조 시스템 및 주변 대기 상태 등 영향을 받으며, ON/OFF의 횟수, 그리고 안정기(Ballaster)에서 안정된 전력의 공급여부에 많은 영향을 받는다. 살균시스템 설계 시에 이에 적절한 수명을 감안하여 설계하는 것을 원칙으로 한다. 본 설계에서는 살균성능이 초기 80[%]를 유지하는 수준으로 설계를 수행하였다. 상대적으로 80[%]이하에 자외선 방사량을 나타내면 램프를 교체하여 살균성능을 유지하도록 해야 한다.

2.3 살균챔버 재료 및 규격

자외선 살균을 위한 챔버는 STS304소재를 가정

자외선램프를 이용한 유수처리장치 설계 시뮬레이션

한다. STS304의 조성은 18[%]Cr, 8[%]Ni, 74[%]Fe이다. 내식성 및 가공성이 우수하기 때문에 주방기기에서 우주선 등 첨단 분야에 이르기 까지 광범위하게 사용되고 있다. 반사율이 우수한 재료를 사용하는 것은 살균선을 효과적으로 이용하는 하나의 수단으로 전해연마된 STS304의 반사율은 30[%] 이상이다. 제작된 STS304의 최대 사용압력 8.62[bar]이다. 입수와 출수의 위치는 초기 수압에 의해 석영관이 영향을 받을 수 있어 아래에서 위로 유수하도록 하는 구조를 갖도록 하였다. 그림 2는 유수형 자외선 살균챔버의 형태를 나타낸다.

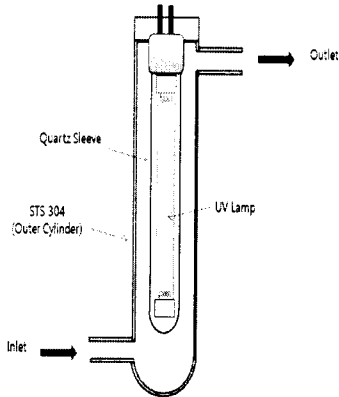


그림 2. 실험에 적용된 자외선 살균 챔버의 구조
Fig. 2. 자외선 disinfection chamber structure

2.4 석영관

석영관은 고순도(99.99[%] 이상)재질의 무수규산(SiO₂)으로 가스함유량이 적고 화학적으로 안정화되고 있어 고온에서도 안정성을 확보할 수 있으며 연화점이 1,683[°C]이다. 또한 열팽창 계수가 적어 급냉, 급열에서도 잘 견딘다. 열팽창 계수 5×10^{-7} [cm/°C]이고 빛 투과성이 뛰어나 자외선 파장의 영역은 물론 적외선 파장의 빛도 잘 투과시킨다. 전기절연성이 높고 내산성이 매우 높아 자외선 램프의 보호에 적절하다.

2.5 수온 조건

최적의 설계를 위한 환경조건 중 수온은 2-40[°C]

로 제한하여 적용한다. 또한 자외선 유수살균장치를 통과한 물에 대한 특성은 Iron < 0.3[ppm](0.3[mg/L]), Hardness < 7[gppt](120[mg/L]), Turbidity < 1[NTU], manganese < 0.05[ppm](0.05[mg/L]), Tannins < 0.1[ppm](0.1[mg/L]), Tannins < 0.1[ppm](0.1[mg/L]), 자외선 transmittance > 75[%]과 같은 파라미터 조건을 설정한다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션을 위한 해석 모델

본 연구에서 자외선램프를 이용한 유수 살균을 위한 장치 모델의 구성은 입구와 출구 노즐을 포함한 튜브와 자외선을 생성하는 주요 부분인 자외선램프, 자외선램프와 유수를 분리역할 하는 투명 석영 유리관 등으로 구성되어 있다. 해석은 유동과 자외선을 조사할 수 있는 통합 환경을 지원하는 해석 소프트웨어 FLUENT 6.3을 사용하였으며, 총 800,000여개의 유체 유동 격자로 구성하여 계산을 수행하였다.

지배방정식 및 경계조건을 획득하기 위한 연속 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_k} = 0 \quad (3)$$

운동량 방정식 식 (4)과 같다.

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - u_i u_k \right) \quad (4)$$

난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 난류 운동에너지 k 와 난류 운동에너지 소멸율 ϵ 에 대한 방정식은 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + P + G - \epsilon \quad (5)$$

$$U_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1(P+G) - C_2\epsilon) \quad (6)$$

지배방정식과 난류방정식을 일반형으로 표시하면

식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) + S_\phi \quad (7)$$

여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며, S_ϕ 는 생성항이다. $\phi=1$ 인 경우는 연속방정식을 나타내고, $\phi=U_i$ 인 경우는 운동량 방정식, $\phi=k$ 와 ϵ 인 경우는 난류방정식을 나타낸다. 생성항 S_ϕ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다.

자외선 Radiation은 Discrete Ordinates Model을 사용하였으며 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial I_{s_i}}{\partial x_i} + (a + \sigma_s) I(r, s) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \Phi(s, s') d\Omega' \quad (8)$$

좌변의 두번째항은 흡수율, 우변의 초항은 방사를, 둘째항은 산란을 나타낸다. 속도와 온도에 대한 경계조건은 입구와 벽면에서 작업유체의 조건은 물, 작업유체의 압력은 $2.5[kg/cm^2]$, 입구에서의 경계조건은 질량 유동을 $0.1767[kg/s]$, 입구온도 $288[K]$, 이므로 식 (9)와 같다.

$$u = 1m/s, v = 0, k = 0.5\% \quad (9)$$

벽면에서의 경계조건은 식 (10)과 같다,

$$u = v = 0 ; \text{ wall function} \quad (10)$$

자외선램프에서의 열유속 조건은 $q = 75W$ 이다. 유한체적법(FVM ; Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (11)의 차분방정식을 구하면 식 (11)과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i A_i \phi_i + S_c \quad (11)$$

데이텀 포인트 좌표계는 일반 X-Y좌표계를 사용하고, 대류항의 계산은 Power-law 설계를 사용하여 해석을 수행하였다. 계산격자는 대략 800,000개를 사용하였으며, 해의 수렴판정은 속도, 압력 각각에 대

하여 계산 영역 전체의 잔류항의 총합이 10^{-6} 이하가 되는 시점으로 하였으며, 수렴조건에 이르기까지는 6,000~7,000회의 반복 계산이 필요하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 계산영역 및 계산격자에 대한 설정이 필요하다. 그림 3은 본 실험에 따른 계산영역을 나타냈다. 계산영역의 전체 길이는 1,000[mm]이며, 구성은 입구 노즐직경 15[mm], 출구 노즐직경 15[mm] 이고, 튜브와 자외선을 생성하는 주요 부분인 형광등의 직경은 25[mm], 길이 1,000[mm] 이고, 자외선 형광등을 보호하기 위한 석영관은 직경이 30[mm] 로 구성된다. 계산격자는 그림 2에 나타나 있으며 전체 계산격자수는 800,000[Cell]로 구성하였다.

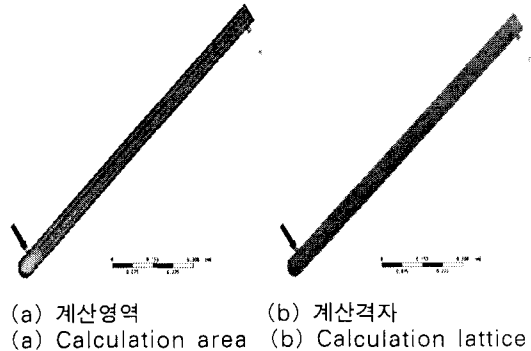


그림 3. 계산영역 및 계산격자
Fig. 3. Calculation area and lattice

그림 4는 입구로부터 출발한 유체의 streamline을 보여주고 있다. 입구로부터 1[m/s]의 속도로 출발한 유체는 외벽에 부딪혀, 일부는 STS304 외벽을 타고 아래쪽으로 흐르고, 일부는 출구방향으로 빠져나간다. 특히 아래쪽 방향으로 향한 유체는 와류를 형성하여 회전하는 유동을 만들며, 이 유체가 출구방향으로 향할 때 유체가 외벽을 타고 회전하는 흐름을 형성하게 된다. 회전력이 떨어진 유체는 점차 안정화되어 Fully developed된 유체 흐름을 나타내게 되며, 이때 유속은 0.1-0.2[m/s] 정도이다. 질량 유동을 토대를 고려한 유체 흐름을 고찰하면, 인입구 측

자외선램프를 이용한 유수처리장치 설계 시뮬레이션

속도가 1[m/s]면 입구에서의 질량 유동율은 0.1767 [kg/s]이며, 석영관과 SUS304 실린더 사이에 흐르는 유속은 연속방정식($\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$)으로부터 구하면 0.15[m/s] 정도이며, 유체가 입구로부터 출구로 빠져나가는 시간은 대략 7-8초 정도 될 것으로 판단되며, 이는 전산해석 결과와도 잘 부합한다.

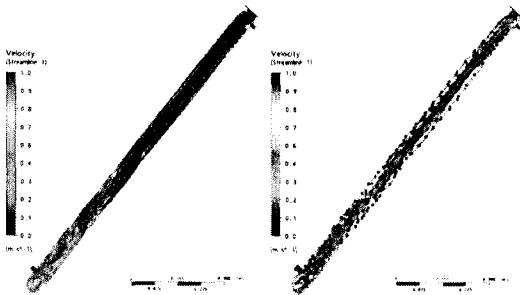


그림 4. 스트림 라인
Fig. 4. Stream line

그림 5에서는 전체 유동장에 대한 속도분포가 나타나 있다. 특히, 오른쪽 그림은 유체의 인입구면을 확대한 그림으로 와류의 발생형태를 모니터할 수 있다. 그림 4와 그림 5에서 유추하여 보면, 자외선이 유수에 조사되면 와류가 발생하는 영역에서 좀 더 많은 양의 자외선이 조사될 수 있으리라 판단된다.

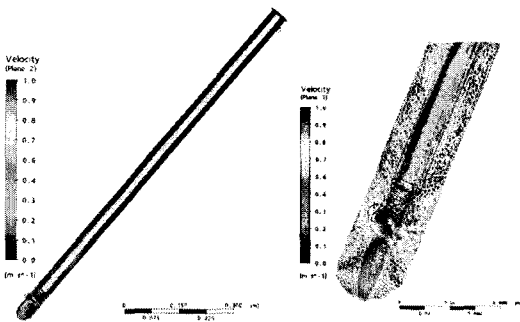


그림 5. 속도분포
Fig. 5. Velocity distribution

자외선 살균장치에 대한 온도분포가 그림 6과 같다. 실험모델인 75[W] 자외선램프는 석영 유리관에 삽입된 형태로 램프의 표면온도가 상승하여 내부공기를 가열하여 최대 온도가 291.7[K]까지 올라가지

만 살균챔버내부를 통과하는 유체의 온도에 영향을 미치기는 어려운 것으로 판단된다. 그 이유는 에너지 balance를 고려하여 보면 자외선램프로부터 방출되는 총 열에너지 50[W]가 물의 온도를 높인데 사용하면, $Q = m\dot{C}\Delta T$ 로부터 계산 하면, 물의 상승온도는 0.1[K]도 되지 않기 때문이다.

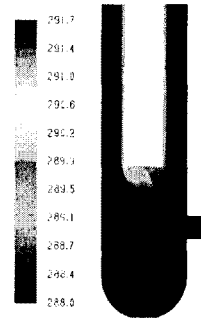


그림 6. 온도분포
Fig. 6. Temperature distribution

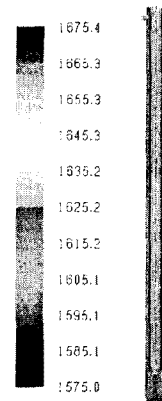


그림 7. 조사강도
Fig. 7. Radiation Intensity

자외선 복사에너지 조사량이 그림 7에 나타나 있다. 형광등 표면에서 자외선 량은 1675[W/m²]이며, 이를 단위환산하면 167.5[mW/cm²]가 된다. 형광등과 석영 보호관 사이의 공기 중에서 조사 강도가 약간 감소 하지만 전반적으로 160[mW/cm²]를 균일하게 유지하는 것을 알 수 있다. 따라서 유체가 입구로부터 출구까지 걸리는 시간이 7-8초이고, 자외선 조사강도가 160[mW/cm²]라면, 이 시간동안 총 조사량은 1.1-1.28[W/cm²]임을 알 수 있다.

4. 결 론

자외선 살균방식은 내염소성 세균에 대한 대안과 물부족현상으로 인해 지하수나 빗물의 사용의 증가는 수인성 세균에 대한 대책, 또는 염소 잔유물에 의한 식수오염의 우려를 종식시킬 수 있는 대안이다. 또한 유지인터페이스의 측면에서도 화학살균 방식보다 안전하고 적용이 용이하며 잔류물이 없어 자외선 살균방식에 대한 친환경성이 대두되면서 관심이 증가하고 있다.

본 논문에서는 자외선 살균램프를 적용한 우수처리기를 위한 최적의 설계방식을 제안하기 위해 살균 챔버와 자외선 램프를 프로토타입에 맞게 설정하여 시뮬레이션을 수행하기 위해 3D-CFD를 통한 Discrete Ordinates Model을 적용하였다.

시뮬레이션을 통한 실험은 우수형 자외선살균 챔버의 설계를 수행했고 그 결과 NSF/EPA에서 제시한 기준보다 우수한 조사량으로 살균성을 확보할 수 있는 우수처리장치를 고안할 수 있음을 결과를 통해 확인하였다. 또한 입구단의 와류에 의해 체류 시간을 확보한다면 더욱 높은 살균특성을 나타남을 확인함으로써 챔버구조에서 와류를 발생시키는 구조를 통해 더욱 우수한 성능의 우수형 자외선 살균 장치를 구성할 수 있는 결과를 확인하였다.

향후 자외선램프 조사량 모니터를 위한 센서, 또는 타이머를 이용한 살균챔버 모니터링 및 자외선 살균진행 알람, 내부세정, 물온도 표시장치등의 부가 기능을 갖춘 수처리장치의 구현을 통해 보다 안정된 성능의 살균처리장치를 고안하고자 한다.

References

- [1] Eugen Nisipeanu and Muhammad Sami, "Computer Simulation Optimizes Design of 자외선 Disinfection Reactors", Water Conditioning & Purification, February 2004 62-64.
- [2] NWR. 2000. Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse, National Water Research Institute and American Water Works Association, Research Foundation, Fountain Valley, CA.
- [3] C Shan, Assessment of Deficiency of Fish Tank Water 자외선 Disinfection and Remedial Measures, Research Fund for the Control of Infectious Diseases, 06 2007.
- [4] 임현수, 김승모, 최명락, 최춘순, 공홍신, 김정희, "수조수

살균을 위한 고성능 관형 자외선 살균장치", Food Engineering progress. Vol.3, No. 3, pp. 164-169, 1999.

- [5] Alex Munoz, Stephen Craik, and Suzanne Kresta, "Computational fluid dynamics for predicting performance of ultraviolet disinfection sensitivity to particle tracking inputs", Journal of Environ. Eng. Sci. 6, pp 285-301, 2007.
- [6] D. A. Lyn, K. Chiu and E. R. Blatchley, "Numerical Modeling of Flow and Disinfection in 자외선 Disinfection Channels", Journal of environmental engineering, pp. 17-26, January 1999.
- [7] Dennis J. Greene, Charles N. Haas, Bakhtier Farouk, Computational Fluid Dynamics Analysis of the Effects of Reactor Configuration on Disinfection Efficiency, Drexel E-Repository and Archive (IDEA) September 2006 909-919.
- [8] Christoph Reichl, Christoph Buchner, Georg Hirschmann, Regina Sommer, Alexander Cabaj, "Development of a simulation method to comparison to biosimetric measurements", Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06) The 13th International Conference on Fluid Flow Technologies Budapest, Hungary, September 6-9, 2006.
- [9] Guo Liu, An investigation of 자외선 disinfection performance under the influence of turbidity & particulates for drinking water applications, A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Civil Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, 2005.
- [10] 박영규, "수돗물 소독방법의 최근 동향", 제 22차 국제 환경문제 심포지움, Vol. 19, No. 2, 2, 2002pp. 153-170.
- [11] 신동호, 김진현, 김정민, 고승민, 모효원, 이용택, "하수 방류수의 자외선 살균을 위한 설계인자 최적화에 관한 연구", 응용화학, Vol. 8, No. 2, Oct. 2004, 697-700.
- [12] Bolton, James R. "Advanced Oxidation 자외선 Treatment of Organic Pollutants in Drinking Water" "International Ultraviolet Association (I자외선A) News. Vol.4/ No.3 2002. P. 16-17.
- [13] Hequet, V. et. al. "Photochemical Processes for Atrazine Degradation: Methodological Approach" Water Resources. March 15, 2001.

◇ 저자소개 ◇

정병호 (鄭炳浩)

1971년 5월 28일생. 2006년 조선대학교 대학원 전기공학 학과(박사). 2006~2009년 (주)기영미다스 선임연구원. 2009년~현재 남부대학교 전임강사.

이강연 (李康淵)

1970년 3월 2일생. 2005년 조선대학교 대학원 전기공학 학과 졸업(박사). 현 조선대학교 전기공학과 겸임교수.