

자외선 소독기 성능 예측을 위한 CFD 해석 기법 연구

김현수* · 박정규** · 이경혁*** · 조진수**** †

A Study on CFD Methodology of the Performance Prediction for the UV Disinfection Reactor

Hyunsoo Kim*, Jeonggyu Bak**, Kunghyuk Lee***, Jinsoo Cho**** †

Key Words : Ultraviolet disinfection(자외선 소독), Particle tracking method(입자 추적기법), Streamline(유선), UV-Reactor(자외선 소독기), Inactivation(불활성화), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

The disinfection method using UV has emerged as photodissociation in water disinfection. In order to predict performance for UV disinfection, CFD analysis was performed due to saving cost. Most CFD studies of UV reactor have used particle tracking method. However it demands additional analysis time, computing resource and phase besides working fluid. In this paper, pathogenic microorganisms' route is assumed to streamline of fluid to save computing time. the computational results are in good agreement with experimental results. The results of streamline method are compared with the particle tracking method. In conclusion, the effectiveness of streamline method for UV disinfection are confirmed.

1. 서 론

안전한 품질의 물은 생명의 생존에 필수불가결한 요소이다. 산업의 발달로 수자원의 활용범위가 더욱 다양화되므로, 기존의 수 처리 방법으로 정화할 수 없는 오염물질이 계속해서 발견되고 있다. 이러한 오염물질은 안전한 음용수 공급과 생태계 보전에 위협이 되고 있다. 또한 오염물질 정화를 위한 수 처리 과정에서 2차 오염물질이 발생하는 등 오염원의 종류와 원인도 복잡하고 다양화되고 있다. 따라서 활용 가능한 수자원의 친환경적 보존과 수질의 오염을 제거할 수 있는 수 처리 기술, 특히 상수원의 경우 소독(disinfection) 기술에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다.

전통적으로 물의 소독에는 염소 등⁽¹⁾을 이용한 화학적 방법이 사용되었으나, 최근에는 자외선(ultraviolet, UV)을 활용한 소독이 널리 사용되고 있다. 자외선은 미생물의 유전자 정보(DNA 및 RNA)를 파괴함으로써 미생물을 불활성

화(inactivation) 시키는 효과가 있다. 자외선 소독(UV disinfection)은 화학적 방법으로는 살균이 어려운 병원성 원생애물, 바이러스 등의 살균도 가능하고, 부산물(by-product)의 생성이 없다.⁽²⁾ 이러한 장점으로 인해 자외선을 이용한 수 처리 설비 연구와 그 시장 규모가 빠르게 확대되고 있다.⁽³⁾

수 처리에 이용되는 자외선 소독기는 그 구조와 작동원리가 단순하지만, 소독기 내부에 복잡한 난류유동 현상이 발생한다. 또한 해석적 방법으로는 계산이 곤란한 자외선을 이용하므로, 해석이 포함되지 않은 설계 방법으로는 소독기의 설계와 정확한 성능 예측이 어렵다. 이러한 단점 극복을 위해 최근에는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 활용하여 자외선 소독기를 설계하고 있다. 전산유체역학을 활용한 자외선 소독기 해석 방법으로는, 미생물을 입자(Particle)로 모델링하여 다수의 입자를 추적하는 기법인 라그랑지안(Lagrangian) 방법과 미생물의 양을 농도

* 한양대학교 대학원 기계공학과 (Dept. of Mechanical engineering, Graduate school of Hanyang University)

** 한양대학교 대학원 기계공학과 (Dept. of Mechanical engineering, Graduate school of Hanyang University)

*** 한국수자원공사 K-water 연구원 (Korea Institute of Water & Environment, K-water)

**** 한양대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Hanyang University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : jscho@hanyang.ac.kr

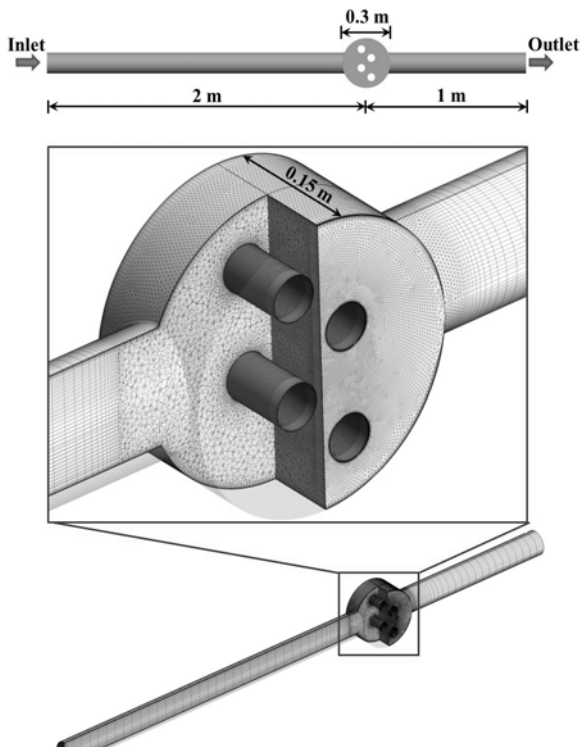


Fig. 1 Geometry and computational grid of the UV-Reactor

(concentration)로 모델링하는 오일러리안(Eulerian) 방법이 있다.

D. A. Sozzi 등⁽⁴⁾은 입자 추적 기법을 이용한 라그랑지안 방법과 용량분석 기반의 오일러리안 방법을 이용하여 자외선 소독기의 성능을 예측하였다. 그 결과, 두 가지 방법 모두 실험값과 잘 일치함을 보였으나, 오일러리안 방법이 라그랑지안 방법에 비해 보다 많은 컴퓨터 계산자원이 필요함을 보였다. 따라서 일반적으로 전산유체역학을 이용한 자외선 소독기의 소독성능 평가에는 적용이 쉽고, 계산자원의 요구가 적은 라그랑지안 방법이 널리 활용되고 있다.

B. A. Wols 등^(5,6)은 자외선에 감응하는 염료를 사용하는 Lagrangian actinometry 시험방법을 이용하여 소독기의 성능을 측정하였다. 그 결과 라그랑지안 방법을 이용한 전산유체역학 해석결과가 시험값과 잘 일치함을 보였다.

일반적으로 수처리 시설에서 소독 대상이 되는 미생물의 크기는 매우 작아, 미생물이 가지는 운동량이 물의 흐름에 영향을 미치지 어렵다.^(7,8) 즉 미생물의 운동궤적을 물의 흐름에 완전히 의존한다고 가정할 수 있다. 또한 대단위 수처리 시설에서 이용되는 자외선 소독설비는 자유수면(free surface) 해석을 필요로 하며, 이 경우 미생물의 모델링을 위한 입자 추적기법은 추가적인 상(phase)을 계산하게 되어 계산비용이 크게 증가한다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 추가적인 상이 필요한 입자 추적기법을 대신하여, 미생물의 경로를 유선(streamline)으로 가정한 자외선 소독장비의 성능해석 기법을 제안하였다. 이를 통해 최소

한의 상(phase)으로 자외선 소독기의 성능평가가 가능함을 보였다. 최소한의 상으로 인해 해석의 단순화 및 계산 비용 감소가 확인되었다.

2. 해석방법

2.1 수치해석 모델

유선을 이용한 자외선 소독기의 해석기법 타당성 검증을 위해, Wols 등^(5,6)이 실험 및 전산유체역학 해석에 사용한 자외선 소독기를 수치해석 모델로 사용하였다. Fig. 1은 전산유체역학 해석에 사용된 계산영역(computational domain)과 격자(computational mesh)를 나타낸 것이다. Wols 등의 자외선 소독기는 4개의 자외선 램프가 유동방향에 수직으로 배열된 소독기로서, 소독기 챔버의 직경과 폭은 각각 0.3 m, 0.15 m이다. 물이 흐르는 파이프의 직경은 0.125 m이며, 소독기 챔버 내의 석영관(Quartz sleeve)의 직경은 0.1478 m이다.

완전발달유동(fully developed flow)을 얻기 위해 입구는 유로 직경의 16배 거리에 위치시켰으며, 출구는 유동이 안정화되는 거리(직경의 8배)에 위치시켰다. 관 입구에서의 평균 유속은 0.112 m/s 로서, 관 직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 약 $Re=14,000$ 이다. 따라서 관과 소독기 내의 유동은 완전 난류이다.

해석에 사용된 격자는 상용 전처리 프로그램인 Ansys ICEM-CFD를 이용하여 생성하였다. 소독기 내부는 사면체 격자로 구성하였으며, 벽면에서 점성에 의한 경계층 유동 모사를 위해 모든 벽면에 $y^+ \approx 1$ 이하의 프리즘 격자를 생성하였다. 소독기 상류와 하류의 파이프는 sweep mesh 방법을 이용하여 격자를 구성하였다. 해석에 사용된 격자의 수는 격자 의존성 시험(grid independence test)를 거친 후 약 200 만개를 사용하였다. 격자 의존성 시험결과는 3.1절에 나타내었다.

2.2 방사모델

소독기 내의 자외선 강도(UV intensity)를 계산하는 자외선 방사모델에는 multiple point source summation (MPSS), multiple segments source summation(MSSS), line source integration(LSI) 등⁽¹⁰⁾ 다양한 모델이 있다. 또한 열전달 해석에 사용되는 discrete ordinate(DO) 모델 등이 있으나, 본 연구에서는 MSSS 모델을 사용하는, Bolton Photoscience 社의 상용 프로그램인 UVCalc3D⁽¹¹⁾를 이용하여 계산하였다. Liu 등^(12,13)은 MSSS 모델은 램프 주변에서 보다 정확하게 자외선 강도를 예측할 수 있음을 보였다.

소독기 내의 자외선 강도에 영향을 미치는 요소로는 자외

Table 1 Parameter for the UV intensity

Lamp type	Hereaus NNI125 84KL (Low pressure)
Lamp arc length	0.79 m
Lamp output power	41 W
Water UVT	72.5 %, 79 %, 87 %
Quartz sleeve transmittance	96 %
Water refractive indices	1.54
Quartz refractive indices	1.33

Table 2 Boundary conditions of the UV-reactor

Boundary	Type	Value
Inlet	Mass flow rate	1.39 kg/s
Outlet	Pressure	0 Pa
The others	Wall	No-slip condition

선 램프의 출력과 물의 자외선 투과율(UV transmittance, UVT)⁽¹⁴⁾ 등이 있다. 본 연구에서는 Wols 등이 실험 및 전산 유체역학 해석에 사용한 동일한 조건을 사용하여 자외선 강도를 계산하였다. Table 1에 자외선 강도 계산에 사용된 파라미터를 나타내었다.

2.3 해석기 및 경계조건

본 연구에서는 해석기(solver)로 상용 전산유체역학 프로그램인 Ansys CFX 14.5를 사용하여 RANS(reynolds averaged navier-stokes) 방정식의 해를 구하였다. CFX는 pressure-based coupled solver로서, 전통적으로 CFD 해석에 널리 사용되는 segregated solver에 비해 해의 수렴이 빠른 특성이 있다. 지배방정식의 이산화는 2차의 정확도를 제공하는 high-resolution scheme을 모든 항에 적용하였다. 모든 지배방정식의 종속변수의 domain imbalance가 0.001 % 이하가 되도록 수렴시켰으며, 그 때의 RMS(root mean square) residual 값은 $1.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-5}$ 이다. Wols 등의 결과를 인용한 본 연구에서 수치해석 경계조건은 기본적으로 Wols 등의 해석 조건과 동일하게 적용하였다.

난류모델은 벽면에서 점성저층의 계산이 가능한 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 모델을 사용하였으며, 입구의 난류강도는 5%를 적용하였다. 입구 조건은 질량유량 1.39 kg/s 를 적용하였으며, 출구의 조건은 압력 조건을 사용하였다. 해석에 사용된 경계조건을 Table 2에 나타내었다.

2.4 자외선 Dose 및 불활성화

자외선 Dose는 미생물이 받는 자외선 조사량을 정량화한 것으로 미생물의 불활성화(inactivation)에 큰 영향을 미친

다. 미생물의 종류와 수질의 조건에 따라 불활성화율이 다르게 나타나나, 본 연구에서는 연구용 미생물로 널리 쓰이는 MS2 Phage⁽¹⁵⁾를 대상으로 불활성화율을 계산하였다. 자외선 Dose는 미생물이 자외선에 노출되는 시간과 자외선의 강도에 비례하며 식 (1)과 같이 계산된다.⁽¹⁴⁾

$$Dose = \int_s I_x dt \quad (1)$$

여기서 s 는 미생물이 소독기 내에서 움직인 특정 운동궤적을 나타내며, I_x 는 특정 위치에서의 자외선 강도, dt 는 자외선에 노출되는 시간을 나타낸다.

미생물이 운동궤적을 따라 움직이며 받는 자외선 Dose 값은 소독기 내의 유동과 자외선 강도 분포에 크게 의존한다. 본 연구에서는 유선을 이용하여 미생물의 운동궤적을 추출하였으며, 입자 추적기법(particle tracking method)과 비교하였다.

자외선 Dose로부터 미생물의 불활성화율 계산을 위한 Dose response curve는 Wols 등이 CBD(collimated beam device) 시험을 통해 얻은 실험식을 사용하였으며, 식 (2)와 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$\log I = -\log\left(\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} (k_1 + k_2(1 - \exp(-k_3 D_i)))\right) \quad (2)$$

여기서 D 는 Dose(mJ/cm²) 값을 나타내며, k 는 kinetic parameter로서 $k_1 = -3.43 \times 10^{-2}$, $k_2 = 10.9$, $k_3 = 6.05 \times 10^{-3}$ 이다. n_0 은 입자의 운동궤적 수로써 본 연구에서는 1,300개를 적용하였다. 입자의 운동궤적은 CFX-post 프로그램을 이용하여 유선과 입자 추적궤적을 추출하였으며, 자외선 Dose 계산은 상용 수치해석 프로그램인 Matlab을 이용하여 실시하였다.

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 격자 의존성

자외선 소독기의 성능은 자외선 소독기 내의 유동현상에 따라 달라진다. 본 연구에서는 전산유체역학 해석을 위한 격자구성의 타당성을 확인하기 위하여 자외선 소독기 격자구성의 조밀성을 coarse(격자수 : 약 100만개), midium(격자수 : 약 200만개), fine(격자수 : 400만개)로 구성하였다. 격자 구성에 대한 유동방향(flow direction)의 속도분포를 Fig. 2에 나타내었다.

비교결과 전체적인 격자구성에서 자외선 조사에 영향을 끼치는 관의 중심부 유동에서 적은 오차율이 보이며 midium

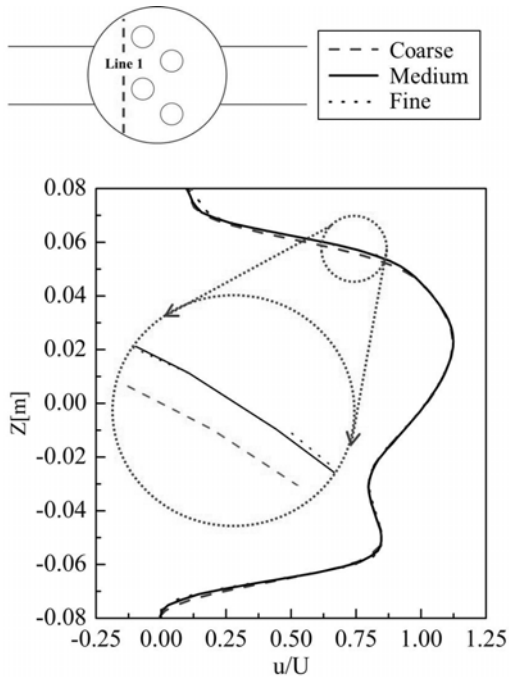


Fig. 2 Result of the mesh dependence test

조밀성의 격자와 fine 조밀성 격자가 풍속 값에서 차이가 거의 없는 것으로 분석되었다. 그러나 Intel(R) Core(TM) i7-2600k CPU @ 3.40 GHz 사양 컴퓨터의 CPU 4개 사용시, coarse는 약 1.5 Gbyte, midium은 3.0 Gbyte, fine 5.1 Gbyte의 memory를 사용함으로 차이가 거의 없는 midium의 조밀성을 가진 격자가 컴퓨터 자원을 절약할 수 있는 적절한 격자로 분석되었다.

3.2 자외선 강도 해석결과

자외선 소독기의 자외선 강도의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 자외선 강도는 자외선 투과율이 높을수록 자외선의 투과가 활발하여 자외선 투과율이 87%일 때 전파율이 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한 자외선의 분포가 자외선 램프를 따라 원형으로 고르게 분포하고, 램프 사이에서 자외선 강도가 높게 나타나는 것은 중첩되는 현상으로 분석되었다.

Wols 등의 시험결과와 비교를 위해 위치별 자외선 강도를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 측정위치는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 1번과 4번 램프의 교차 지점, 2번과 3번 램프의 교차 지점이다. Wols 등의 시험은 챔버의 중앙을 제외한 벽면에서 자외선 램프까지의 자외선 강도의 측정결과를 제시하였다. 비교결과 시험결과와 전산유체역학 계산결과가 같은 경향성과 작은 차이의 자외선 강도를 보이는 것으로 분석되었다.

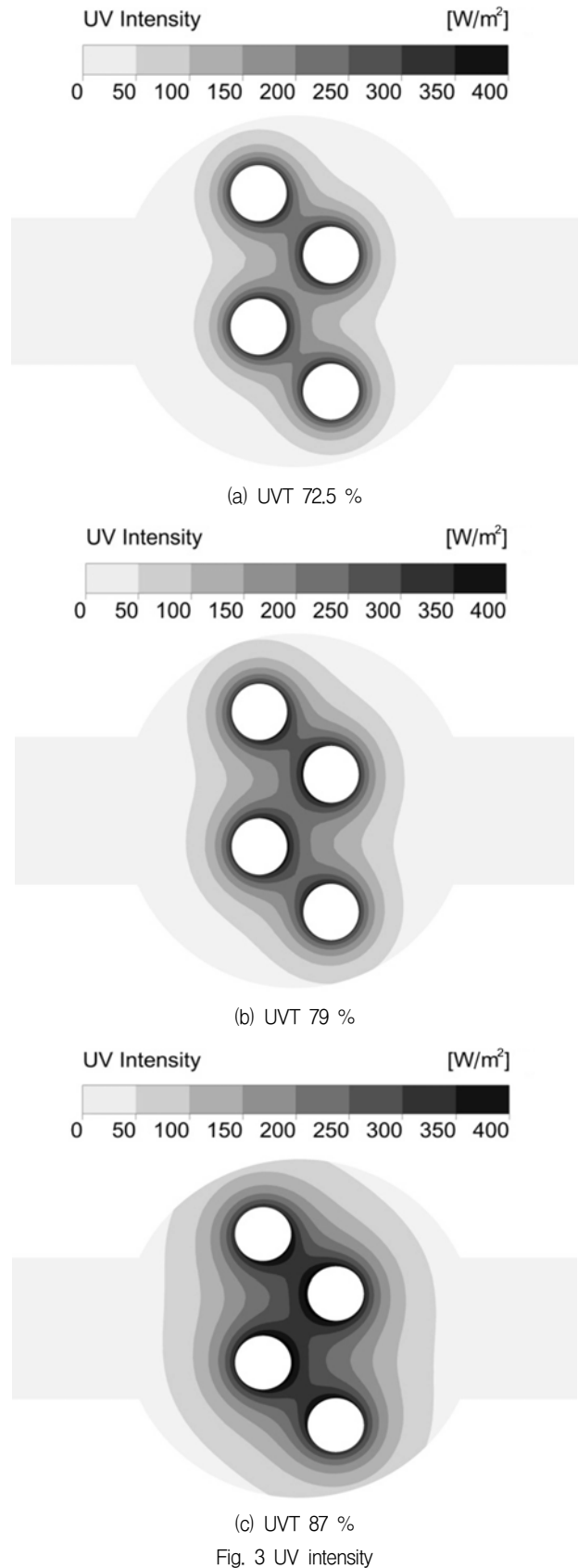


Fig. 3 UV intensity

3.3 유동해석 결과

자외선 소독기의 중앙 단면 유동해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 자외선 소독기의 속도분포 분석 결과 입구영역을 지나 챔버 전까지 좌우 대칭인 완전발달유동이 확인되었다.

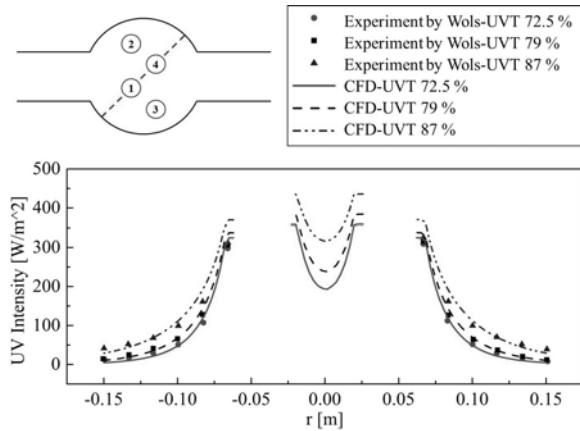


Fig. 4 UV intensity distribution on section 1-4

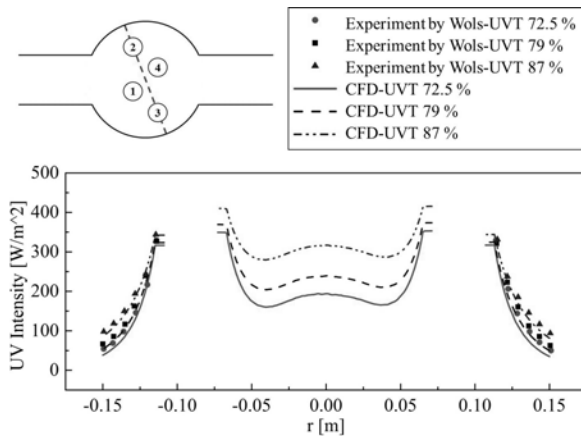


Fig. 5 UV intensity distribution on section 2-3

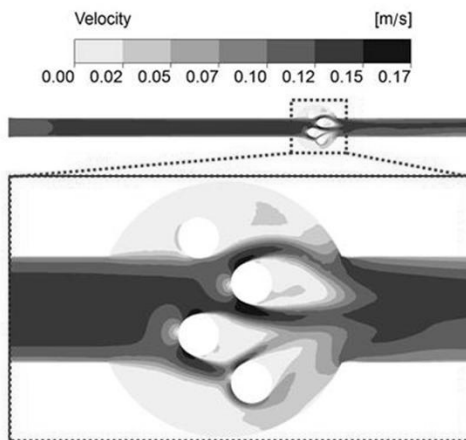


Fig. 6 Velocity distribution of UV Reactor

Wols 등의 유동해석 결과와 비교하기 위해 위치별 속도분포를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 측정위치는 자외선 램프 전과 후에 두어 유선방향 유속(streamwise velocity)과 유선방향의 수직방향 유속(vertical velocity)을 측정하여 시험결과와 비교하였다.

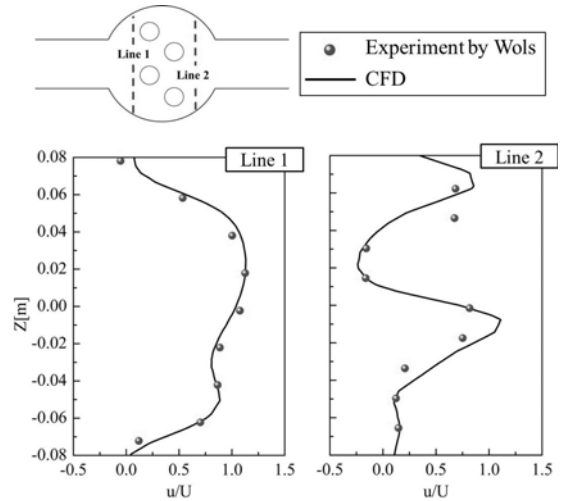


Fig. 7 Streamwise velocities in UV reactor

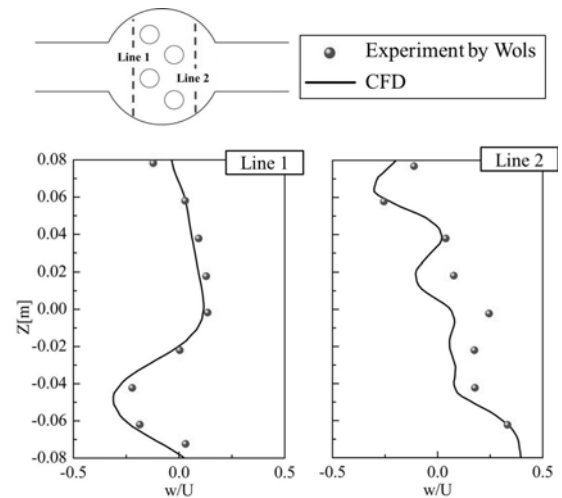
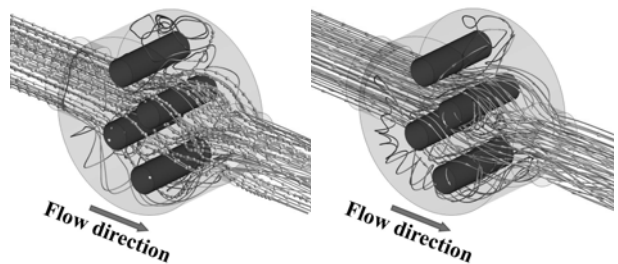


Fig. 8 Vertical velocities in UV reactor



(a) Particle

(b) Streamline

Fig. 9 Flow of particle and streamlines in UV Reactor

분석 결과 자외선 램프 전과 후에서 Wols 등의 시험결과와 같은 경향성과 작은값의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

입자와 유선의 챔버 내의 흐름을 Fig. 9에 나타내었다. 분석 결과 입자의 흐름과 유선의 흐름의 대부분이 챔버의 중앙에 위치하는 2개의 자외선 램프를 거쳐 흐르는 것으로 분석되었다. Fig. 3과 비교하여 분석한 결과 입자와 유선이 동일하게 자외선 강도가 강한 곳 주변으로 흐르는 것으로 분석되었다.

유동해석 계산시간 분석결과를 Table 3에 나타내었다. 반복계산 400회를 기준으로 계산시간 분석결과, 입자추적기법은 작동유체와 입자 두 개의 상을 사용하여 276분이 소요되었고, 유선기법은 작동유체 한 개의 상을 사용하여 258분이 소요되므로 약 6.5%의 계산시간 단축이 분석되었다.

3.4 Dose 및 불활성화 분석결과

자외선 강도와 입자 및 유선의 시간별 위치를 바탕으로 자외선 Dose를 계산하였다. 식 (1)과 (2)를 통해 미생물의 조사량과 불활성화를 계산하였다.

Wols 등의 시험결과, 입자 추적기법(CFD), 본 연구의 입자 추적기법, 유선기법 비교결과를 Fig. 10에 나타내었다. 또한 Wols 등과 본 연구의 입자 추적기법 불활성화 오차율, 본 연구의 입자 추적기법과 유선기법 불활성화 오차율, Wols 등의 시험결과와 본 연구와 유선 기법 불활성화 오차율을

Table 3 Calculation Time of flow analysis in UV Reactor

	Particle	Streamline
Phase	Water, Particle	Water
Calculation time (Iteration calculation - 400)	276 min	258 min
Difference	6.5%	

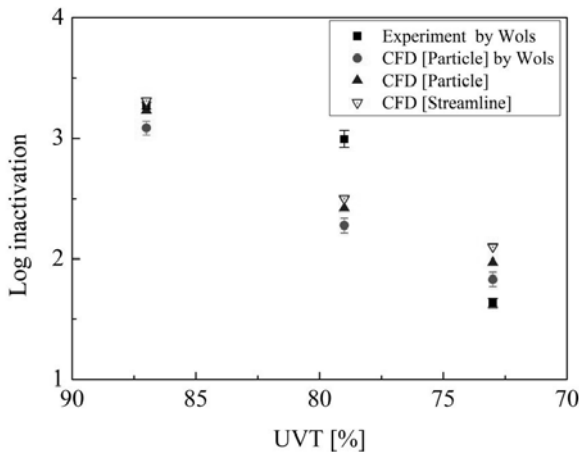


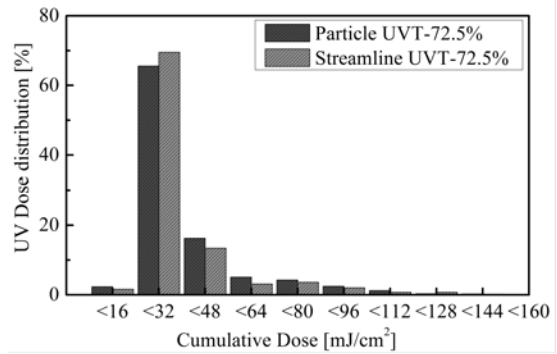
Fig. 10 Configuration for compressor modeling

Table 4에 나타내었다.

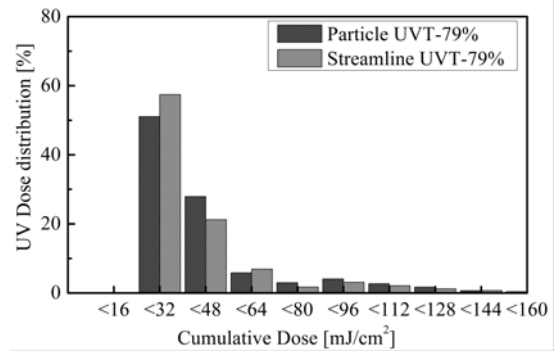
본 연구와 Wols 등의 전산유제역학 계산결과 값 타당성 확인을 위해 입자 추적기법을 비교한 결과 자외선 투과율

Table 4 Difference of log inactivations

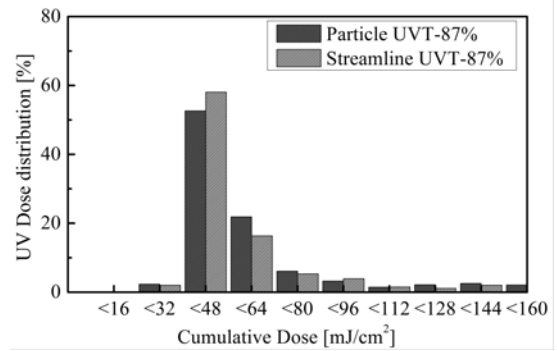
	UVT 72.5 %	UVT 79 %	UVT 87 %
Particle by Wols VS particle	7.7 %	6.1 %	4.5 %
Experiment by Wols VS streamline	28.8 %	16.4 %	1.2 %
Particle VS streamline	6.6 %	3.3 %	2.5 %



(a) UVT - 72.5%



(b) UVT - 79%



(c) UVT - 87%

Fig. 11 Cumulative Dose at outlet

72.5%에서 최대 오차율 약 7.7%을 보였으며, 높은 자외선 투과율에서는 7.7%보다 낮은 오차율을 보였다.

유선기법의 타당성을 확인하기 위해 Wols 등의 시험결과와 비교한 결과, 최대 오차율은 자외선 투과율 72.5%에서 약 28.8%의 오차율을 보이지만, 자외선 투과율 79%에서 Wols의 시험결과와 전산유체역학 해석의 차이는 61.2%의 차이를 보이므로, 본 연구의 최대 오차율 28.8%는 잘 맞는 것으로 분석되었다.

최종으로 본 연구에서 기법 전환의 타당성 확인을 위해 입자 추적기법과 유선 기법을 비교한 결과, 자외선 투과율 72.5%에서 최대 오차율 약 6.6%을 보였으며, 높은 자외선 투과율에서는 6.6%보다 낮은 오차율을 보였다.

본 연구의 입자 추적기법과 유선기법의 누적 자외선 Dose를 Fig. 11에 나타내었다. 입자는 1,300개, 유선은 1,000개로 누적 자외선 Dose량의 계산 결과를 Wilson 등⁽¹⁶⁾이 제시한 MS2 phage의 1 Log inactivation 기준으로 분석하였다. MS2 phage의 1 Log inactivation은 Dose 값이 16 mJ/cm² 이상인 미생물이 사멸하는 기준이다. 분석 결과 자외선 투과율 72.5%에서 최대 분포 구역인 16 ≤ 누적 자외선 Dose < 32에서 입자 추적기법과 유선기법이 각각 66%, 70%, 자외선 투과율 79%에서 최대 분포 구역인 16 ≤ 누적 자외선 Dose < 32에서 입자 추적기법과 유선기법이 각각 51%, 57%, 자외선 투과율 87%에서 최대 분포 구역인 32 ≤ 누적 자외선 Dose < 48에서 입자 추적기법과 유선기법이 각각 53%, 58%로 분석되었다. 두 기법의 누적 자외선 Dose는 최대 6%로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유선을 활용한 자외선 소독장비의 성능 예측기법을 제안하였다. 검증모델로는 Wols 등이 시험 및 전산유체역학 해석에 사용한 자외선 소독기 모델을 사용하였다.

자외선 소독기의 성능의 예측을 위한 전산유체역학 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 검증모델의 결과와 본 연구의 입자추적기법 결과를 불활성화 값으로 비교하였다. 불활성화 값은 검증모델과 본 연구의 입자 추적기법이 최대 약 7.7% 차이를 나타내므로 전산유체역학 해석의 타당성을 확인하였다.

미생물의 사멸을 판단하기 위한 자외선 Dose는 유선기법과 입자 추적기법이 최대 약 6.6%의 차이를 나타내므로 기법 전환의 타당성을 확인하였다. 또한 유선기법과 입자 추적기법의 계산시간 차이는 약 6.5%로 유선기법이 시간을 절약할 수 있는 기법으로 분석되었다.

본 연구에서 사용된 해석기법을 이용하여 최소한의 상(Phase)을 통해 자외선 소독기 설계 시 계산 자원을 절약하

고 후처리 과정을 단축할 수 있는 UV-전산유체역학 해석 기법을 구축하였다. 이를 통해 향후 대단위 수 처리 설비의 전산유체역학 해석 시 자원을 절약할 수 있는 기법으로 활용이 기대된다.

후 기

본 연구는 K-water중소기업 기술혁신 지원사업의 연구지원(과제번호 : 201200000002799)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) 오석영, 2008, “수 처리 공정과 설비 기능향상 방안”, 유체기계저널, 제11권, 제3호, pp. 56~63.
- (2) J. W. Choi, S. S. Kim, N. S. Park, Y. J. Lee and S. H. Chae, 2013, “UV Dose Predictions for Ultra Violet Flowing Water Purification of the Exit by CFD”, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol. 26, No. 4, pp. 521~533.
- (3) 이진영, 김영태, 이태제, 2005, “국내하수처리장 자외선소독조 운영실태 및 기술동향”, 유체기계공학회 유체기계연구개발 발표회 논문집, pp. 126~132.
- (4) D. A. Sozzi and F. Taghipour, 2006, “UV Reactor Performance Modeling by Eulerian and Lagrangian Method”, Environ. Sci. Technol., 40, pp. 1609~1615.
- (5) B. A. Wols, C. H. M. Hofman-Caris, D. H. H. Harmsen, E. F. Beerendonk, J. C. van Dijk, P. S. Chan and E. R. Blatchley, 2012, “Comparison of CFD, Biodosimetry and Lagrangian Actinometry to Assess UV Reactor Performance”, Ozone : Science & Engineering, 34, 81~91.
- (6) B. A. Wols, L. Shao, W. S. J. Uijttewaal, J. A. M. H. Hofman, L. C. Rietveld and J. C. Van Dijk, 2010, “Evaluation of experimental techniques to validate numerical computations of the hydraulics inside a UV bench-scale reactor”, Chemical Engineering Science, 65, pp. 4491~4502.
- (7) S. E. Dowd, S. D. Pillai, S. Wang and M. Y. Corapcioglu, 1998, “Delineating the Specific Influence of Virus Isoelectric Point and Size on Virus Adsorption and Transport through Sandy Soils”, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 64, No. 2, pp. 405~410.
- (8) J. J. Ducoste, D. Liu and K. Linden, 2005, “Alternative Approaches to Modeling Fluence Distribution and Microbial Inactivation in Ultraviolet Reactors : Lagrangian versus Eulerian”, Journal of Environmental Engineering, 131, pp. 1393~1403.
- (9) N. G. Wright and D. M. Hargreaves, 2001, “The use of CFD in the Evaluation of UV Treatment Systems”, Journal of Hydroinformatics, pp. 59~70.

- (10) C. Buchner, 2006, "Modelling of UV disinfection reactors by means of Computational Fluid Dynamics", Ph.D. thesis, Tuwien University.
- (11) J. R. Bolton, 2000, "Calculation of Ultraviolet Fluence Rate Distributions in an Annular Reactor : Significance of Refraction and Reflection", *Wat. Res.*, Vol 34, No.13, pp. 3315~3324.
- (12) D. L. Liu., C. Wu, K. Linden and J. Ducoste, 2007, "Numerical simulation of UV disinfection reactors: Evaluation of alternative turbulence models", *Applied mathematical modelling*, 31, pp. 1753~1769.
- (13) C. Buchner, 2002, "Modeling of UV Disinfection Reactors by Means of Computational Fluid Dynamics", Ph.D Thesis, TU Wien Univ.
- (14) US EPA(U.S. Environmental Protection Agency) 2006, "Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule", pp. 1-1~3-39
- (15) C. H. Wick and P. E. McCubbin, 1999, "Characterization of Purified MS2 Bacteriophage by the Physical Counting Methodology used in the Integrated Virus Detection System(IVDS)", *Edgewood Chemical Biological Command*, Vol. 9, No. 4, pp. 245~252.
- (16) B. R. Wilson, P. F. Roessler, M. Abbaszadegan, C. P. Gerba and E. V. Dellen, 1992, "Coliphage MS2 as a UV water disinfection efficacy test surrogate for bacterial and viral pathogens", *American water works association water quality technology conference*, Toronto, Ontario, Canada, pp. 219~236.