

전산유체역학을 활용한 개수로형 UV소독장비의 해석기법 연구

황우철* · 박정규** · 김현수** · 이경혁*** · 조진수**†

Study on CFD Methodology for a Open Channel Type UV Reactor

Woochul Hwang*, Jeong-Gyu Bak**, Hyunsoo Kim**, Kunghyuk Lee***, Jinsoo Cho**†

Key Words : UV disinfection(자외선 소독), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Open Channel(개수로), UV reactor(자외선 반응기)

ABSTRACT

The performance of UV reactor which is used in water treatment is strongly affected by UV fluence rate and water flow in the UV reactor. Therefore, CFD tools are widely used in designing process of UV reactors. This paper describes the development of a computational fluid dynamics (CFD) methodology that can be used to calculate the performance of open channel type UV reactor used in wastewater treatment plant. All computations were performed using commercial CFD code, CFX, by considering three dimensional, steady, incompressible flow. The Eulerian-Eulerian multi-phase method were used to capture the water-air interface. The MSSS model, provided by UVCalc3D, was used to calculate the UV intensity field. The numerical predictions and calculated UV Dose were compared with experimental dataset to validate the CFD methodology. The reactor performance based on MS2 log reduction was well matched with measurements within 6%.

1. 서 론

인류의 생존을 위해 반드시 필요로 하는 물은 산업의 발전과 함께 오염도 심화되어가고 있는 상황이다. 산업발전으로 수자원(Water resource)의 활용범위가 다양해지면서 오염원인 또한 다양해져, 기존 수처리(Water treatment) 방식으로는 정화 할 수 없는 오염 물질 또한 발견되고, 이러한 오염된 물을 정화하는 과정에서 다시 2차 오염물질이 발생하는 등, 오염물질의 종류와 원인이 날로 복잡해지고 있다.⁽¹⁾

따라서 활용 가능한 수자원의 친환경적 보전과 수질의 오염을 제어할 수 있는 수처리 기술, 특히 소독(Disinfection) 기술에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 전통적으로 물의 소독에는 염소 등을 이용한 화학적 방법이 널리 사용되었으나, 최근에는 부산물(By-product)의 생성이 없고, 화학적 방법으로는 살균이 어려운 병원성 원생생물, 바이러스 등

의 살균이 가능한 자외선(Ultraviolet, UV) 소독이 널리 이용되고 있다.⁽²⁾ 자외선은 세포의 유전정보를 갖는 유전자인 핵산의 DNA를 손상시키는 것에 의해 소독력을 발휘한다. 이러한 자외선의 효과를 이용한 수처리 설비인 자외선 반응기(UV reactor)는 그 구조와 원리가 간단하지만, 반응기 내부의 자외선 강도 분포(UV fluence rate)와 내부 구조물에 의해 발생하는 난류 유동의 정량적 계산이 곤란하여, 반응기의 설계와 성능평가에 많은 어려움을 겪고 있다.⁽³⁾ 특히, 자외선 반응기의 성능평가를 위해 필수적으로 요구되는 생물학적 검증시험(Biodosimetry test)은 많은 비용이 요구되어, 반응기의 최적설계가 쉽지 않다. 그러나 최근 컴퓨터 발달에 힘입어 급속도로 발달한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 자외선 반응기 내부의 유동현상과 자외선 분포에 대해 신뢰성 있는 예측 결과를 제공할 수 있게 되었다.⁽⁴⁾ 그에 따라 CFD를 활용한 자외선 반응기 설계와

* (주)에코셋 기술연구소(R&D Center, ECOSSET CO.,LTD.)

** 한양대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, HANYANG University)

*** 한국수자원공사 kwater연구원(Korea Institute of Water and Environment)

† 교신저자, E-mail : md03@ecoset.co.kr

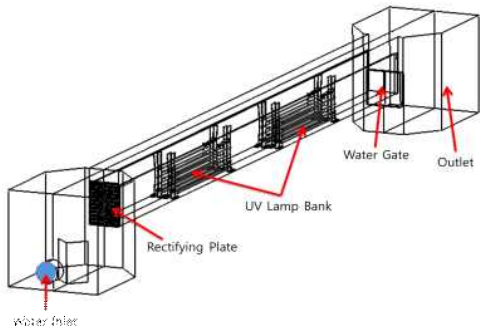


Fig. 1 The schematic view of open channel horizontal type UV reactor (2Bank, 32 lamp configuration)

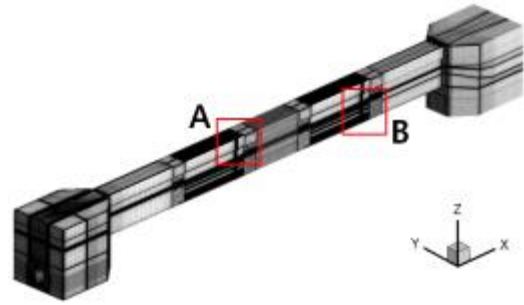


Fig. 2 The iso-view of computational mesh

성능평가에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 하지만 국내의 적으로 대용량 수처리 시설에서 사용되는 개수로형 자외선 반응기(Open channel type UV reactor)에 관한 연구는 매우 적게 수행되었다.^(5,6,7)

개수로형 자외선 반응기는 램프 배열 방향과 물의 방향에 따라 수직형(Vertical type)과 수평형(Horizontal type)으로 구분된다. 수평형은 램프의 방향이 물의 흐름과 동일하게 배열되고, 수직형은 물의 흐름과 램프의 방향이 수직하게 배열된다. 일반적으로 동일한 램프수를 가지는 반응기의 경우, 수평형이 자외선에 노출되는 시간을 크게 할 수 있으므로 수직형에 비해 더 나은 성능을 보인다. 수직형 반응기의 경우, 국외에서 몇몇의 연구자들에 의해 연구가 수행 되었으나, 수평형의 경우 Saha⁽⁶⁾의 연구 외에 현재까지 공개된 연구결과가 없는 것으로 알려져 있다.

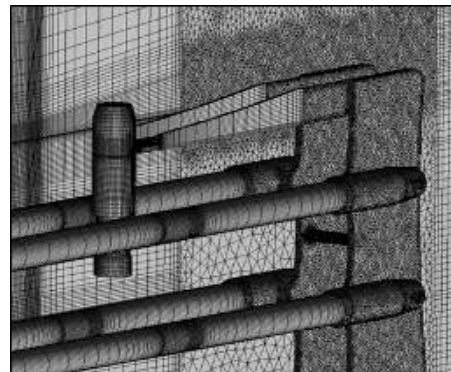
Saha는 개수로 수평형 자외선 반응기를 대상으로 CFD 해석을 수행하였으며, $k-\epsilon$ 난류모델과 레이놀즈 응력 난류모델을 사용하였다. 낮은 레이놀즈수(1.4×10^5)를 가지는 수로형 반응기의 특성 상, $k-\epsilon$ 난류모델로도 반응기의 성능을 신뢰성 있게 평가할 수 있음을 보였다. 그러나 Saha는 매우 단순화된 반응기 형상을 사용하였고, 비교적 정확도가 떨어지는 Discrete Ordinate (DO) 모델을 사용하여 자외선 강도를 계산하였다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 반응기 내부의 자외선 강도 분포를 보다 신뢰성 있게 예측할 수 있는 Multiple Segment Source Summation (MSSS) 모델⁽⁹⁾을 이용하고, 이의 계산 비용을 감소시키기 위한 별도의 서브루틴을 개발하였다. 또한 실제 국내의 수처리 플랜트에 적용된 개수로 수평형 자외선 반응기를 사용하여 CFD 해석 기법을 개발하고, 생물학적 검증시험 결과와 비교를 통해 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

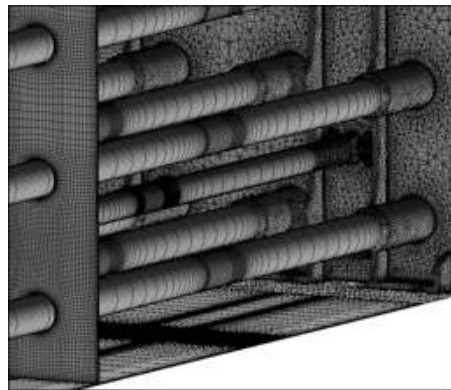
2. 수치해석 방법

2.1 수치해석 모델

본 연구에 사용된 자외선 반응기는 ㈜에코셋의 EOL-HM



(a)



(b)

Fig. 3 The close-up view of computational mesh

series로 Fig. 1에 반응기의 개략도를 나타내었다. EOL-HM series는 각 반응기 모듈 당 8개의 저압 아말감 자외선램프를 가지며, 2개의 모듈을 1개의 Bank로 구성하여 소독 시설의 처리 유량에 따라 Bank의 수를 조정하여 설치한다. 본 연구에서는 2개의 Bank(총 32개의 램프)를 가지는 반응기를 해석에 사용하였다. 반응기의 총 길이는 약 12 m 가량이며, 수로의 폭은 약 0.4 m 이다. 반응기 출구에는 수문이 설치되어 있으며, 처리 유량에 따라 수문 높이를 조절하여 일정한 수위를 유지하게끔 설계 되었다. 수위는 수로 바닥면으로부터 약 0.4 m 가량으로 처리 유량에 관계없이 일정하게 유지된다.

격자생성의 편의와 해석비용의 감소를 위해 자외선램프

모듈의 일부 구조물을 단순화 하였으며, 전원 공급선은 제거 하였다. 격자수 감소를 위해 자외선램프 모듈의 전단에 위치한 정류판은 Porous media로 모델링 하였다. 자유수면의 모사를 위해 수면이 형성되는 위치에 매우 세밀한 격자를 생성 하였으며, 수면 주위에 생성된 격자크기는 수로 내부 격자의 약 0.05배에 해당하는 크기로 구성하였다. 해석에 사용된 격자수는 약 7000만개 가량으로, 격자 의존성 시험을 거친 후 결정되었다.

격자 의존성 시험은 수면 높이의 변화가 0.5% 이하가 될 때까지 수행되었으며, 해석에 사용된 격자를 Fig. 2와 3에 나타내었다.

Fig. 2에는 전체 해석영역에 대한 표면격자를 나타내었으며, Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에는 Fig. 2의 A와 B영역을 각각 확대하여 나타내었다. 비교적 형상이 간단한 수로와 램프는 육면체 격자로 구성하였으며, 형상이 복잡한 램프 지지구조물은 사면체 격자를 이용하여 생성하였다. 육면체 격자와 사면체 격자는 CFX의 General Grid Interface (GGI) 기능을 이용하여 결합시켰다.

2.2 해석기 및 경계조건

본 연구에서는 해석기(Solver)로서 상용 CFD 프로그램인 Ansys CFX V14.5를 사용하여 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식의 해를 구하였다. 지배방정식의 이산화는 2차의 정확도를 제공하는 High-resolution scheme을 모든 항에 적용 하였다. 자유수면의 모사를 위하여 Eulerian-Eulerian 다상유동 해석 기법을 적용하였다. 계산 비용을 감소시키기 위해 Bank 중심부를 기준으로 하여 Symmetry 조건을 사용하였다.

작동유체는 표준 대기압 상태의 공기와 물을 사용하였으며, 수로 내부에서 발생하는 2차 유동의 모사를 위하여 k- ω SST 난류모델을 적용하였다. 입구에는 유량 조건을 적용하였으며, 물과 공기의 체적비율(Volume Fraction, VF)은 각각 1과 0으로 설정하였다. 수로 상단에는 Opening 조건을 사용하였으며, 물과 공기의 체적비율을 각각 0과 1로 설정하였다. 출구는 압력조건을 적용하였으며, 그 외에 모든 벽면에는 벽함수(Wall-function)⁽¹⁰⁾를 적용하였다. 해석에 사용한 경계조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3 UV 방사모델

반응기 내의 자외선 강도 계산을 위한 방사모델로는 Multiple Point Source Summation(MPSS)⁽¹¹⁾, Line Source Integration(LSI)⁽¹²⁾, MSSS, DO 모델 등 다양한 모델이 있다. 본 연구에서는 비교적 계산 정확도가 높고 계산비용이 적게 소모되는 것으로 알려진 Bolton⁽⁹⁾의 MSSS 모델을 사용하였다. 그러나 Bolton의 MSSS 모델은 상용 프로그램인 UVCalc3D를 통해서만 제공되므로, 이를 CFX 내부의 계산 정보와 효과적으로 결합시킬 수 있는 별도의 서브루틴(Sub-routine)을 개발하였다. 서브루틴은 계산 정보의 결합 뿐 만 아니라, 자외선 강도 계산 횟수와 시점을 자유롭게 선택할 수 있는 기능을 제공한다.

일반적으로 유동장과 반응기내의 자외선 강도 분포 계산을 위해 해석기는 각 종속변수가 수렴될 때까지 수백회의 반복계산을 수행하고 있다. 그러나 자외선 강도 분포와 유동현상은 독립적인 관계에 있으므로, 자외선 강도 분포 계산은 1회의 계산만으로 충분하다.

따라서 본 연구에서는 서브루틴에 의한 자외선 계산 정보의 결합은 유동장 계산 시작 시 1회만 수행되게끔 설정하였으며, 이를 통해 계산비용을 효과적으로 단축시킬 수 있게 하였다.

반응기 내의 자외선 강도 분포는 자외선램프의 출력과 물의 UV Transmittance(UVT)에 밀접한 관련을 갖는다. 본 연구에서는 저압 아말감 램프를 사용하였으며, 램프의 입력 전원은 320 Watt이다. 실험과의 비교를 위하여 첫 번째 Bank에서만 자외선을 조사하였다. 물의 UVT는 72.6%, 67.6%, 52.6 %를 각각 해석에 적용하였다.

2.4 UV DOSE 및 RED 계산

UV dose는 미생물이 반응기 내부에서 자외선에 노출된 시간과 자외선 강도에 의존하며 식 (1)과 같이 계산된다.

$$D = \int U dt \approx \sum U \times \Delta t \quad [mJ/cm^2] \quad (1)$$

여기서, D 는 미생물이 받는 누적 dose 값이며, U 와 t 는 대상 미생물이 위치한 지점에서 UV 강도와 노출시간이다.

Table 1. Boundary conditions

Boundary condition	Type	Parameters
Inlet	Mass flow rate	$\dot{m}_{water} = 3000 \text{ ton/day}$, $\dot{m}_{air} = 0 \text{ ton/day}$
Outlet	Pressure	1 atm
Opening	Pressure	1 atm ($VF_{water} = 0$, $VF_{air} = 1$)
All other	Wall	scalable wall-function

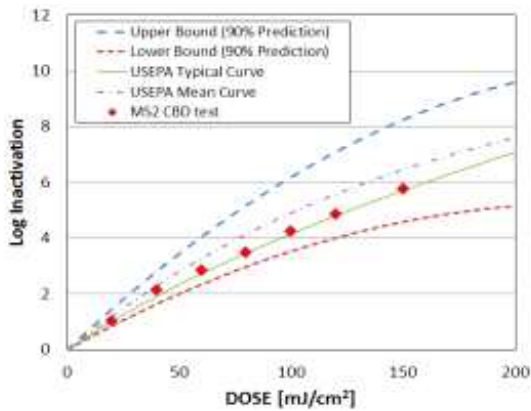


Fig. 4 MS2 Collimated beam results with USEPA dose delivery curve

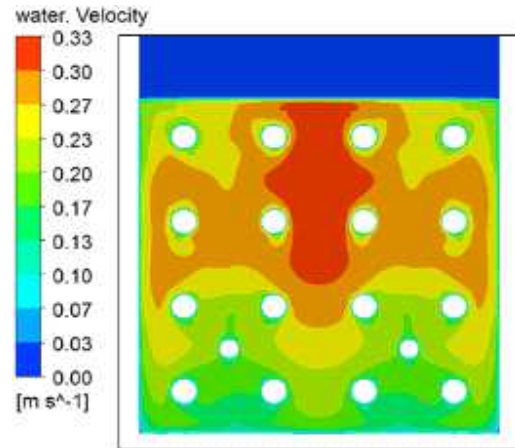


Fig. 5 water velocity contour at the 1st bank mid-plane

누적 Dose값의 계산을 위해서는, 각 미생물이 반응기 내부에서 움직이는 운동궤적의 추적이 필요하다.

기존의 연구에서는 Lagrangian particle tracking 방법을 사용하였으나, 본 연구에서는 계산 비용을 감소시키기 위해, 이를 유선(Streamline)으로 대체하였다. 즉 미생물의 질량이 매우 작으므로 유선을 따라 운동한다고 가정하였다. 총 4000개의 유선을 출력 후, 상용 수치해석 프로그램인 Matlab을 이용하여 각 유선에 누적된 dose값을 계산하였다. 누적 dose값으로 부터 반응기의 성능지표인 Reduction Equivalent Dose (RED)값을 도출하였다.

RED는 MS2 phage의 Dose delivery curve를 기준으로 계산하였다. Dose delivery curve는 생물학적 검증시험에 앞서 Collimated Beam Device (CBD)시험을 수행하여 도출하였으며, 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency, USEPA)⁽²⁾에서 제시하는 시험자료와 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 RED 값 도출을 위해 USEPA의 Typical dose delivery curve를 사용 하였으며, 식(2)와 같이 계산된다.

$$RED_{MS2} = 17.99 \times (\log I) + 1.44 \times (\log I)^2 \quad [mJ/cm^2] \quad (2)$$

여기서 $\log I$ 는 CFD 계산을 통해 얻은 MS2 phage의 평균 Log inactivation 값이다. $\log I$ 는 각 유선에 누적된 Dose값 으로부터 도출하였다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 유동 및 자외선 강도 분포 결과

Fig. 5와 6에 첫 번째 Bank 램프 주변의 유속 분포와 자외선 강도분포를 나타내었다. 자외선은 음영지역 없이 수로 전체에 걸쳐 비교적 균등하게 분포 되었다. 그러나 속도는 벽면

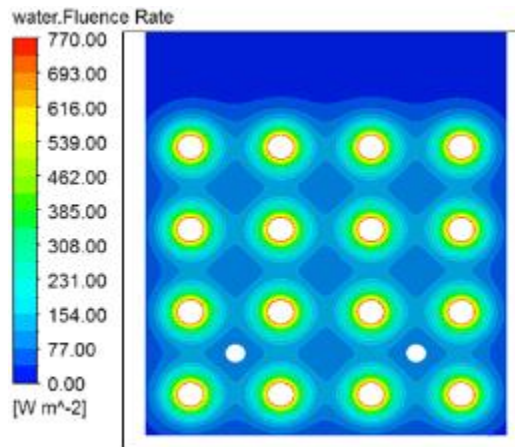


Fig. 6 UV fluence rate contour at the 1st bank mid-plane

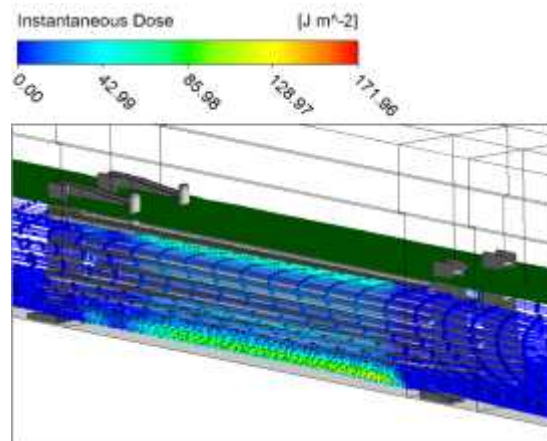


Fig. 7 Streamline distribution around the 1st bank

에 의한 경계층 발달로 인하여 수로 중심부에서 상대적으로 큰 값을 나타내고, 벽면 근처에서는 작은 값을 나타낸다.

이러한 유속의 불균일함은 각 미생물이 유선을 따라 움직이며 받는 누적 Dose 값의 차이를 야기한다. 즉 유속이 느린 영역을 운동하는 미생물은 상대적으로 오랜 기간 동안 자외

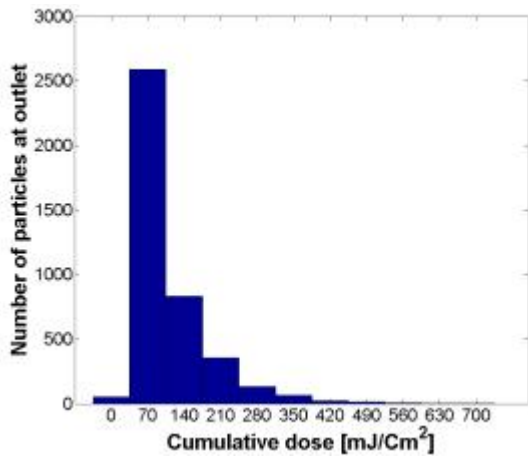


Fig. 8 Cumulative dose histogram at reactor outlet

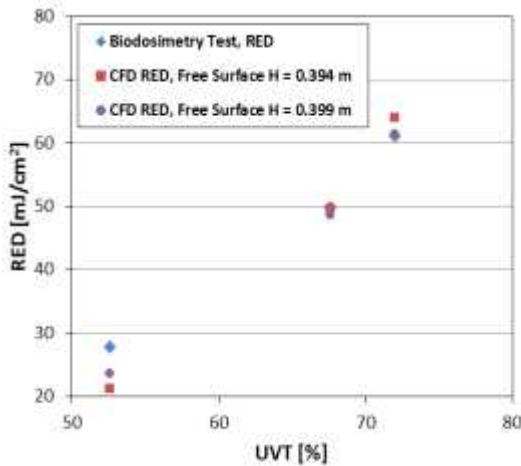


Fig. 9 CFD RED value based on MS2 phage

선을 조사받고, 유속이 빠른 영역을 운동하는 미생물은 짧은 시간 동안 자외선을 조사받는다. 이는 결과적으로 특정 미생물을 사멸시키는데 필요 이상의 자외선이 조사되거나, 또는 부족할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 7에 램프 주변에서 유선과 이를 따라 운동하는 미생물을 나타내었다. 수면과 벽면 주위에서 유속이 낮음에 따라 미생물이 받는 순간 Dose값이 높음을 알 수 있다. 따라서 벽면과 램프 모듈간의 간격 등을 고려한 설계가 요구됨을 알 수 있다.

3.2 UV dose 및 RED 계산 결과

Fig. 8에 반응기 출구의 Dose 분포 히스토그램을 나타내었다. 계급의 구간은 70 mJ/cm²이다. 약 70%에 해당하는 미생물이 70~140 mJ/cm²의 Dose를 받는 것으로 계산되었다. 일반적으로 MS2 phage를 99.99% (4 log reduction) 사멸시키는데 71 mJ/cm² 이 필요한 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ 따라서 본 해석에 사용한 경계조건에서는 약 30%에 해당하는

미생물이 자외선에 과다하게 노출된 것으로 판단할 수 있다.

각 유선에서 미생물이 받는 Dose값을 기준으로 MS2 phase의 RED값을 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 수면이 높이(0.4 m)가 실험값과 유사할 때 UVT 72%와 67%에서는 매우 잘 일치하는 결과를 보여 주었으나, UVT 53%일 때는 실험값보다 약 17% 낮게 예측하였다. 이러한 차이는 Bolton의 MSSS 방사모델의 특성에 기인한 것으로 판단된다. Bolton의 MSSS 모델은 램프주변에서 다른 방사모델에 비해 자외선 강도를 비교적 정확하게 예측하지만, 램프와 거리가 멀어짐에 따라 다소 낮게 예측하는 특성이 있다.⁽⁸⁾ 따라서 UVT가 낮은 경우, 램프와 거리가 멀어질수록 자외선 강도 예측 오차는 더 커지며, 이 구간을 지나서 미생물이 받는 누적 Dose값과 이를 바탕으로 계산한 RED 값은 실제보다 작게 예측된다.

4. 결론

개수로 수평형 자외선 반응기의 성능 해석을 위한 CFD 해석 기법을 개발하고, 이를 생물학적 시험 결과와 비교하여 해석기법을 검증하였다. 다상유동 해석에 따른 계산비용을 감소시키고, 누적 Dose 계산의 편의를 위해 유선을 이용하는 방법을 제안하였다. 미생물이 유선을 따라 이동하며 누적된 Dose 값을 계산하였으며, 이를 바탕으로 자외선 반응기의 성능 지표인 RED를 계산하였다. 그 결과, CFD 해석을 통해 예측된 RED 값은 UVT 67%와 72%에서는 매우 잘 일치하였으나, UVT 53%에서는 약 17% 낮게 예측하였다. UVT 53%에서 상대적으로 큰 오차는 Bolton의 MSSS 방사모델 특성에 기인한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 CFD 해석기법을 이용하여, 향후 개발되는 수로형 반응기의 성능해석 시 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

향후, 지속적인 연구를 통하여 CFD 프로그램과 결합된 독자적인 자외선 방사모델을 개발하여 해석의 신뢰성을 높일 예정이다.

References

- (1) UNEP, 2012, Global Environment Outlook5 : Environment for the future we want, Progress Press Ltd, Valletta, Malta.
- (2) US EPA, 2006, Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule, Washington, DC.
- (3) Hwang, W., Lee, K., Kim, H., and Cho, J., 2013, "Bioassay Validation Test of Open Channel UV-Reactor," Proceeding of KSME annual fall Conference, Jeongsun.
- (4) Wols, B., 2011, Computational Fluid Dynamics in Drinking Water Treatment, IWA Publishing

- (5) Saha, R. K., 2013, Numerical Simulation of an Open Channel Ultraviolet Waste Water Disinfection Reactor, M.S. Thesis, The University of Western Ontario, Canada.
- (6) Lyn, D. A., and Blatchley E. R., 1999, "Numerical Modeling of Flow and Disinfection in UV Disinfection Channels," *Journal of Environment Engineering*, Vol. 125, No. 1, pp. 17 ~ 26.
- (7) Lyn, D. A., 2004, "Steady and Unsteady Simulation of Turbulent Flow and Transport in Ultraviolet Disinfection Channels," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, pp. 762 ~ 770.
- (8) Liu, D., 2004, Numerical Simulation of UV Disinfection Reactors: Impact of Fluence Rate Distribution and Turbulence Modeling, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- (9) Bolton, J. R., 2000, "Calculation of Ultraviolet Fluence Rate Distribution in an Annular Reactor: Significance of Refraction and Reflection," *Water Research*, Vol. 34, pp. 3315 ~ 3324
- (10) Wilcox, D. C., 2004, *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd editions, DCW industries, California.
- (11) Jacob, S. M., and Dranoff, J. S. 1970, "Light Intensity Profiles in a Perfectly Mixed Photoreactors," *A.I.C.H.E.J.*, Vol. 16, pp. 359 ~ 363..
- (12) Blatchley, E. R., 1997, "Numerical modeling of UV intensity: application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems," *Water Research*, Vol. 31, pp. 2205 ~ 2218.
- (13) Wilson, B. R., Roessler, P. F., Van Dellen, E., Abbaszadegan, M., and Gerba, C. P., 1992, "Coliphage MS2 as a UV Water Disinfection Efficacy test Surrogate for Bacterial and Viral Pathogens," *Proceedings of the Water Quality Technology Conference*, Toronto, pp. 219 ~ 235.