creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000241188

2011年 2月
석사학위논문

비접촉식 자외선 살균 모델의 개발과 설계인자에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

윤 정 원

비접촉식 자외선 살균 모델의
개발과 설계인자에 관한 연구

A Study on the Development of Non-contact Type
Ultraviolet Disinfection Model and its Design Factors

2011년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

윤 정 원

비접촉식 자외선 살균 모델의 개발과 설계인자에 관한 연구

지도교수 김 성 홍

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

윤 정 원

윤정원의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 박 길 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

2010년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론 1
1.1 연구의 배경 1
1.2 연구의 목적 및 방법 3

제 2 장 이론적 고찰 4
2.1 자외선 살균의 원리 4
2.2 영향인자 5
2.3 수처리 적용현황 및 문제점 분석 11
2.4 비접촉식 자외선 살균의 개발 배경 12

제 3 장 모델의 전개 15
3.1 광학이론 15
3.2 자외선 강도 분포 모델 19
3.3 비접촉식 모델의 전개 21
3.4 시뮬레이션 모델의 구성 25
3.5 모의조건 설정 28

제 4 장　결과 및 고찰 ········ 30
4.1 접촉식과 비접촉식의 분포 비교 ········ 30
4.2 비접촉식 반응조의 자외선 분포 ········ 31
4.3 설계인자 분석 ········ 33
4.3.1 램프의 위치 ········ 34
4.3.2 램프의 수 ········ 36
4.3.3 천정 반사율 ········ 38

제 5 장　결　론 ········ 40

참고문헌 ········ 41

감사의 글 ········ 45

표 목 차

표 2.1 자외선 램프의 종류에 따른 제원 비교 ········· 8
표 2.2 자외선에 대한 미생물의 감수성 비교 ········· 10
표 3.1 가상의 자외선 반응조 운전조건 ········· 28
표 4.1 램프 간격에 따른 평균 자외선 강도의 변화 ········· 35
표 4.2 램프 개수에 따른 평균 자외선 강도 ········· 36
표 4.3 천정 반사율에 따른 평균 자외선 강도 ········· 38

그 림 목 차

그림 2.1 시간에 따른 fouling 발생 효과 ··· 9
그림 2.2 과거 5년간 국내 하수처리시설의 UV소독현황 ··· 11
그림 2.3 현재 설치되어 시행중인 마을과 하수처리장의 자외선 살균 ··· 12
그림 2.4 기계식 세척시설을 갖춘 자외선 살균 장치 ··· 13
그림 3.1 접촉식 UV조사 시스템에서의 굴절과 반사의 개념 ··· 15
그림 3.2 그림자 효과 ··· 18
그림 3.3 비접촉식 UV 소독 시스템에서의 굴절과 반사의 개념 ··· 23
그림 3.4 입력 데이터 worksheet 화면 ··· 26
그림 3.5 시뮬레이션 계산결과 화면 예시 ··· 27
그림 3.6 가상의 자외선 반응조 ··· 29
그림 3.7 가상의 자외선 반응조 절단면도 ··· 29
그림 4.1 접촉식과 비접촉식의 평균 자외선 강도 분포 비교 ··· 30
그림 4.2 x-y 평면의 자외선 강도 분포 (z=42*cm* 위치) ··· 31
그림 4.3 y-z 평면의 자외선 강도 분포 (x=10*cm* 위치) ··· 32
그림 4.4 반응조보다 짧은 램프의 자외선 분포 ··· 33
그림 4.5 램프 간격과 최적의 램프위치 ··· 34
그림 4.6 램프 개수에 따른 평균 자외선 강도 ··· 36
그림 4.7 램프 수에 따른 자외선 분포 ··· 37
그림 4.8 천정 반사율에 따른 평균 자외선 강도 변화 ··· 39

ABSTRACT

A Study on the Development of Non-contact Type Ultraviolet Disinfection Model and its Design Factors

Yun, Jeong Won
Abvisor : Prof. Kim, Sung Hong, Ph.D
Department of Civil Engineering
Graduate School of Chosun University

Now a days, disinfection of effluent from wastewater treatment plant is obligation. Ultraviolet(UV) disinfection is one of the useful alternative compared to any other disinfection technology including chlorination. UV is easy to install and maintain. But the decrease of performance accompanied with fouling on the lamp of quartz sleeve is the most common and fatal defect of UV in water disinfection system. To overcome this fouling, non-contact type UV disinfection system which is fundamentally fouling-free is proposed in this study. The purpose of this study is verifying its feasibilities by simulating mathematical model. Based on optical laws and other UV distribution models, a detailed mathematical model for a non-contact type UV disinfection system was developed in this study. Optical properties of refraction, reflection and absorption of UV light were included in this model and reflection of ceiling wall was added. The followings were obtained as results. The average UV intensity of the water layer of the non-contact system is lower than that of the submerged system. The non-contact system required a 2 times more

powerful lamp or one that had 2 times longer exposure time. A high-reflective ceiling wall is of use for disinfection in a non-contact system. Depending on design, the high-reflective ceiling wall can increase UV intensity of the water layer as much as several tens of percent. Most submerged lamp system have a fundamental fouling problem and due to the absorption of UV light by fouling materials on the quartz sleeve, germicidal power of UV light is drastically diminished. Therefore, considering the fouling attenuation, non-contact type of UV disinfection system deserves to be practically considered.

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

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

수처리 공정에서 소독은 1900년대 초 미국의 정수장을 시작으로 염소를 사용한 방법이 주를 이루어 왔으며 현재 미국의 경우 대부분의 정수장에서 사용되는 소독제로 염소를 사용할 정도로 과거 100년간 수도 산업에서 소독은 염소에 의존해 왔다. 하지만 1970년대 정수에서 염소 소독 부산물인 THM(Trihalomethane)의 발견 이후 HAA(Haloacetic acid)의 추가 발견 및 1980년대부터 미국, 호주, 일본 등의 선진국을 중심으로 발생한 염소 내성 원생동물에 의한 수돗물의 감염 사고들을 계기로 기존 염소 소독 공정을 강화할 수 있는 대체 소독제의 개발이 선진국에서 시작되었다. 하지만 한국의 경우 수돗물에서 미생물에 의한 집단 발병사례가 보고되어 있지 않아 염소 대체 소독제 개발에 대한 관심이 상대적으로 적은 상황이다.

현재까지 알려진 음용수에 오염될 수 있는 대표적인 내성 원생동물로는 크립토스포리디움(Cryptosporidium)과 지아디아(Giardia)가 있다. 이 중 크립토스포리디움의 경우 자연환경에서 일반 병원성 미생물과 달리 상당한 저항성을 가지고 있어 온도의 경우 20℃에서는 약 6개월간 생존해 있을 수 있으며 60℃에서 5분, 70℃에서 5초 정도의 접촉으로 불활성화 될 수 있다. 또한 영하 5℃에서도 약 2개월까지 활성을 유지할 수 있어 추운 겨울에 지하수나 호소에서도 충분히 활성을 나타내며 생활할 수 있을 정도로 외부환경에 상당히 강한 원생동물이다. 이 밖에 정수장에서 일반적으로 사용하는 소독제인 염소에 대해서도 2-Log 불활성화에 필요한 CT값이 약 7,200 $mg/\mathrm{L} \cdot min$ 정도로 지아디아에 비해서도 상당히 높은 CT값을 요구한다. 더구나 7,200 $mg/\mathrm{L} \cdot min$ 정도의 높은 CT값은 현실적으로 정수장에서 유지하기는 불가능한 수준이다. 따라서 정수장에서 염소 소독공정만으로 크립토스포리디움에 대한 안정성을 확보하기는 어려운 실정이다.

크립토스포리디움의 음용수에서 감염사례가 최초로 보고된 것은 1984년 미국 텍사스주의 Braun Station 이었으며, 이 이후 1987년 미국 조지아주에서 6만 4천900명 중에 약 1만 3천명이 감염되는 사고가 발생하였으며 계속적으로 1993년 미국 밀워키에서 역사상

가장 대규모의 크립토스포리디움의 수돗물 감염 사고가 발생하였다. 그 이후 계속적으로 미국, 영국, 일본 등 각지에서 음용수에서 크립토스포리디움의 오염에 의한 감염 사고가 지속적으로 발생되고 있다.

국내에서는 아직까지 수돗물에 의한 크립토스포리디움 집단 발병 사고가 공식적으로 보고된 적은 없으나 감염 실태 조사 결과의 경우 특정 지역 거주민들에 대하여 보고된 사례가 있다. Chai(2001) 등에 의하면 전라남도 지역의 주민을 대상으로 한 역학 조사에서 서울 등 대도시의 크립토포리디움 감염율보다 약간 높은 10.6%의 감염율을 나타내었으며 특히 지방의 읍·면단위의 소도시인 H군 E면 지역의 경우 마을 주민의 40%가 크립토스포리디움에 감염되어 있음을 발견하였다. 이렇게 한국의 경우도 수돗물에 의한 크립토스포리디움의 감염 사고가 보고되지 않았을 뿐 실제 감염율이 존재한다는 점에서 안전하다고 할 수 없을 것이다.

크립토스포리디움에 대한 불활성화 방법으로 오존, UV 등과 같은 소독공정이 있다. 오존의 경우 수온 및 pH에 따른 불활성화율의 차가 커서, 수온 및 pH 변화에 따라 오존주입량을 조절하여 주입하여야 하며, 저수온에서는 특히 불활성화율이 낮아 겨울철에 높은 농도의 오존 주입이 요구된다. 이렇게 높은 농도의 오존 주입은 Bromate나 Aldehyde와 같은 오존 부산물의 생성을 가능하게 할 수 있으므로 세심한 주의가 요구된다.

이와 달리 UV 소독공정의 경우 화학적인 방법이 아닌 광학적 소독공정이므로 수온이나 pH의 변화에 따라 요구되는 UV 조사량이 변하지 않으며, 오존과 달리 소독 부산물이 생성되지 않는다. UV 소독공정은 경제성에 있어서도 오존이나 막여과 공정에 비하여 상당히 저렴한 운전비용이 요구되는 것으로 알려져 있다. 과거 하수처리장에서 소독 공정은 주로 염소 소독을 사용하였으나 잔류 염소에 대한 생태계의 영향 및 염소 소독 부산물의 생성측면에서 최근에는 염소 대체 공정으로 UV 공정에 대한 적용이 증가하고 있는 추세이다.

수처리 공정에서는 원수 내 염소 내성 미생물의 출현으로 인하여 미국의 경우 EPA에서 원생동물의 소독을 위해 LT2SWTR(Long Term 2 Surface water Treatment Rule)에서 대체 소독 공정의 한 방법으로 UV 소독 방법을 제시하고 있다. 특히, 원생동물 중 지아디아에 대한 규제 외에 크립토스포리디움에 대한 규제를 추진 중이다.

국내의 경우 환경부에서 정수처리에 관한 기준으로 지아디아에 대한 소독을 100,000 ㎥

/일 규모 이상의 정수장에서 3-Log 제거의 법적 규제를 2004년 7월부터 실시하고 있다. 또한, 시민의 수돗물에 대한 관심이 높아짐에 따라 환경부에서 '04. 10.～'07. 12.까지 지난 3년간 97개 정수장 취수원수를 대상으로 병원성 원생동물을 조사하였다. 조사결과에 의하면 국내 취수원수의 원생동물 검출농도는 미국 처리기준(LT2ESWTR)에 비해 낮으나, 수돗물의 안정성 확보를 위해 크립토스포리디움에 대한 정수처리기준과 중·소규모 정수장에 대한 원생동물 관리 확대방안을 마련하기로 하였다. 이 외에도 염소공정을 보완할 수 있는 소독에 대한 많은 연구가 진행 중에 있으며, 특히 자외선 소독방법은 크립토스포리디움이나 지아디아의 불활성화에 경제성과 효율성 면에서 우수한 것으로 알려져 있다. 한편, 국내에서도 2008년 1월 하·폐수 종말처리시설의 방류수 수질기준에 대장균군이 추가됨에 따라 하수처리수를 방류하기 전에 소독하여야 하며 여러 가지 소독방법 중에서 특히 자외선 소독은 폭넓게 활용이 증가되는 추세이다.

1.2 연구의 목적 및 방법

국내의 방류수 수질기준에 대장균군 함량이 3,000개/mL 이하로 규정되어 있으므로 어떤 형태로든 살균은 반드시 실시되어야 한다. 2008년 말 현재 우리나라에서 가동되고 있는 2,358개의 하수처리시설의 53%가 자외선 살균을 채택하고 있으며, 염소 소독은 그 다음으로 32%를 차지하고 있다. 그렇지만, 현재 설치되어 있는 자외선 소독장치의 경우를 살펴보면 단순히 자외선 램프를 침지시켜 놓은 형태이거나, 밀폐형 구조로서 내부의 살균 정도를 파악하기 어렵게 되어있다. 상수와 달리 많은 부유물과 미생물, 무기물이 혼재하는 하수처리수의 방류수의 경우 침지형 자외선 소독 장치는 램프의 표면이나 수정 sleeve 표면에 fouling이 발생하는 것은 불가피하다.

본 연구에서는 침지형 자외선 살균 시스템에서 필연적으로 나타나는 fouling 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 비접촉식 자외선 살균 시스템을 구성하였고, 이에 대한 설계 및 운전인자를 도출하기 위하여 광학모델에 기초한 비접촉식 자외선 살균 시스템의 수학적 모델을 개발하였다. 또한 개발한 모델의 시뮬레이션을 통해 비접촉식 자외선 살균 시스템의 특성을 규명하였고, 자외선램프의 개수나 위치, 반응조 형상 등의 영향을 알아봄으로써 반응조 최적화를 도모하였다.

제 2 장 이론적 고찰

2.1 자외선 살균의 원리

자외선은 100～400nm의 파장대를 가진 모든 전자기적 방사에너지를 말하며, 주파수로는 $7.5 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{16}$Hz에 해당한다. 파장대 별로 구분하여 315～400nm 장파장대의 UV-A, 280～315nm의 UV-B, 그리고 그 보다 파장이 짧은 200～280nm의 UV-C로 나뉘는데, UV-C 영역의 자외선이 특히 미생물의 살균에 효과적이므로 상수나 하수, 기타 살균 목적으로 사용하는 자외선은 UV-C 영역이다. 이 보다 파장이 짧은 100～200nm의 자외선을 "진공자외선" 이라고 부르는데 대부분 공기에 의해 흡수되어 버리기 때문이다. 자외선 램프의 종류에 따라 저압 램프 (Low pressure), 저압 고출력램프(Low pressure high output)와 중압 램프(Medium pressure)로 나눈다. 저압 램프는 출력이 보통 40～100W 정도이고, 260nm 내외의 한 파장이 발생하는 것이며, 중압 램프는 풀력이 1～5kW 정도로서, 전 자외선 영역에 걸쳐 다양한 파장의 자외선이 발생하는 것이다. 저압 램프는 소규모 시스템에 적합하며, 대부분의 도시 수처리 시스템에서는 저압 고출력램프나 중압 램프를 사용한다.

모든 생물체의 대사와 복제는 핵산(Nuclein acid)이 담당한다. 핵산의 중요한 두 가지 형태는 DNA(Deoxyribonucleic acid)와 RNA(Ribonucleic acid)이다. DNA와 RNA는 뉴클리오타이드 배열이 단일 혹은 이중구조로 형성되어 있다. DNA에서 뉴클리오타이드는 퓨린(아데닌과 구아닌) 또는 피리미딘(티민과 시토신)으로 구성된다. RNA는 퓨린은 DNA와 같고, 피리미딘은 우라실과 시토신으로 구성된다. 뉴클리오타이드는 자외선의 200～300nm 파장을 흡수한다. DNA나 RNA가 자외선을 흡수하는 정도는 뉴클리오타이드의 구성에 따라 차이가 나는데 대략 260nm에서 최대 흡수율을 보인다.

DNA나 RNA 배열 구조에서 인접한 피리미딘들 사이에 공유결합이 존재할 때 피리미딘 2중 결합이 만들어지는데, 피리미딘 2중 결합에 의한 손상은 다른 손상 예를 들면, 나선 구조의 파괴, DNA와 DNA의 교차, 단백질과 DNA의 교차에 의한 손상보다 1000배나 흔히 나타나는 손상으로 알려져 있다.

피리미딘 2중 결합이나 다른 형태의 핵산 손상으로 인해 미생물은 복제가 불가능하고, 인체에 유입된다 하더라도 발병하지 못하게 된다. 그렇다고 미생물의 대사 작용까지 불가능하게 하지는 못한다. 다른 화학적 살균과 같이 세포 파괴나 산화를 통해 미생물을 사멸시키기 위해서는 핵산의 손상에 필요한 조사량의 수십 수백 배 많은 조사량이 필요하다. 미생물은 생물학적 회복(microbial repair)이나 광 회복(photorepair), 암실회복(dark repair) 등의 기능이 있어 일차 손상이 있더라도 회복하는 기능이 있다.

미생물의 종류에 따라 자외선에 대한 내성도 서로 다르다. 바이러스와 박테리오파아지의 자외선에 대한 민감도는 100배 이상 차이가 나며, 박테리아 안에서도 포자형성균이나 그람양성균은 그람음성균보다 자외선에 대한 저항성이 더 크다. 수도의 병원균 관점에서 보면 자외선 살균에 대해서 바이러스가 가장 저항성이 크고, 박테리아, 크립토스포리디움, 지아디아 순이다. 자외선에 살균력을 미치는 요소는 자외선 강고, 자외선 흡수율, 수온, pH 등이다.

2.2 영향인자

자외선의 강도는 자외선램프에서 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 달라진다.

자외선의 강도는 실제로 자외선램프를 설치하고 자외선량 측정기(radiometer)로 직접 자외선의 세기를 측정하기도 하는데, 물리적 한계로 인해 접촉조 안의 임의의 점에서의 강도를 모두 측정하거나 대표강도(예를 들면, 평균 자외선 강도)를 산출하는 것은 불가능하다. 이에 반해 램프나 빛의 특성 등을 고려한 수학적 모델을 구성하고 이의 모사를 통해 임의의 점에서의 자외선 강도를 예측하는 방법이 있다. 이러한 컴퓨터 모사의 장점은 각종 영향인자나 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. 자외선 살균의 영향인자로는 다음과 같은 것이 있다.

① 자외선 출력

자외선 출력(UV Output)은 램프에서 물로 전달되는 동력(파장 200～300nm 영역)으로 램프 당 와트(W)로 표시한다. 램프에서 나오는 동력은 수정이나 물을 통과하면서 감소하게 되며, 램프의 출력 역시 램프의 수명, 수온, 램프의 fouling 등에 따라 감소하게 된다. 램프의 소모 전력이 모두 자외선으로 전환되는 것은 아니며, 램프의 성능에 따라 다르지만 보통 소비전력의 40% 정도만이 자외선으로 전환된다.

② 자외선 강도

자외선 강도(UV Irradiance)는 자외선 에너지가 단위 면적당 입사하는 자외선 에너지를 말하며, 단위면적당 자외선 동력으로 표시한다. 즉, 단위 cm^2당 마이크로와트($\mu W/cm^2$) 또는 단위 cm^2당 밀리와트(mW/cm^2) 등이다. 자외선의 강도는 역제곱 법칙(Inverse Spuare Law)을 따르며, 광원으로부터 발생한 자외선이 방사형으로 발산하며 강도는 줄어들게 된다.

③ 자외선 주입률

자외선의 살균력은 자외선의 강도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 자외선 주입률(UV dose)에 비례하는데, 화학적 처리에서 농도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 주입률(dose)과 같은 의미로 사용된다. 주입된 에너지는 자외선 강도와 실제 노출시간의 곱으로 정량화할 수 있다.

$$\text{주입률}(mWsec/cm^2) = \text{UV강도}(mW/cm^2) \times \text{Time}(sec) \quad (1a)$$

$$\text{주입률}(mJ/cm^2) = \text{UV강도}(mW/cm^2) \times \text{Time}(sec) \quad (1b)$$

USEPA에서는 40 mJ/cm^2의 자외선 주입률인 경우 대부분의 수인성 전염병균을 4-Log까지 불활성화할 수 있다고 하였고, 아데노바이러스(adenovirus)는 자외선 살균에 대한 저항성이 강해서 186 mJ/cm^2의 주입률가 필요하다고 하였다. 일반적인 상수의 살균에서 자외선 주입율은 4.0 × 10^{-2} Ws/cm^2 정도이고 이 때 2-Log 정도의 살균력을 보인다.

④ 자외선 투과율

자외선 투과율(UV Transmittance)은 물의 자외선 통과 능력을 말한다. 물의 자외선 투과율은 보통 입사광선이 어떤 정해진 길이(L)을 통과하여 투과된 정도(T)를 퍼센트(%)로 표시한다. 일반적으로 흡광광도계는 고정된 투과길이(L)의 흡광도(A)를 표시한다. 그러므로 퍼센트 투과율과 흡광도 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$T(\%) = 100 \cdot 10^{-A/L} \qquad (2)$$

자연적으로 존재하는 유기물이나 무기물들은 UV파장의 에너지를 흡수하므로, 이들은 자외선의 투과율을 감소시키고, 자외선 소독 시스템에서 소독의 효율을 떨어드리는 결과를 초래한다.

⑤ 자외선램프

자외선램프는 크게 저압 램프와 중압 램프로 나뉘고, 저압 램프 중 출력을 크게 높인 저압 고출력램프가 있다. 저압 램프는 38～49℃에서 운전되며, 253.7nm의 단파장을 발생하다. 이 램프는 대체로 출력이 일정하여 0.2 W/cm 정도의 출력밀도를 가진다. 중압 램프는 고밀도이면서도 넓은 영역의 자외선 파장대를 발생시킨다. 200～300nm 범위가 미생물 살균 효과가 있는데, 최대출력은 약 255nm정도이고, 강도가 높기 때문에 운전온도도 높아 표면 온도는 600℃ 이상으로 올라간다. 출력밀도도 높아 5～30 W/cm 정도이다.

표 2.1 자외선램프의 종류에 따른 제원 비교

항 목	저 압	저압 고출력	중 압
살균 자외선 파장	254nm단파장	254nm단파장	200～300nm를 포함하여 다파장
수은 수증기압(Pa)	약 0.93	0.18～1.6	40,000～4,000,000
운전온도(℃)	약 40	60～100	600～900
전력량(W/cm)	0.5	1.5～10	50～250
자외선 발생량(W/cm)	0.2	0.5～3.5	5～30
자외선 발생 효율(%)	35～38	30～35	10～20
호의 길이(cm)	10～150	10～150	5～120
설치되는 램프의 수	많음	중간	적음
사용기간(hr)	8,000～10,000	8,000～12,000	4,000～8,000

- USEPA(2006)

⑥ 자외선 fouling

모든 자외선램프는 자외선뿐만 아니라 가시광선도 방출한다. 이 때문에 램프 주위에 조류(algal)가 서식하기 쉽다. 램프가 물속에 잠겨 있으면 물속에 존재하는 유기물이나 무기물 이온이 램프를 둘러싸고 있는 수정 sleeve에 침적되거나 생물막을 형성하게 되고, 이로 인해 UV의 조사량은 감소하게 된다. 이를 fouling이라 하며, 경도나 알칼리도, 수온 등 많은 요인들이 fouling에 영향을 미친다.

수정 sleeve를 세척하지 않는 경우에 fouling 발생은 필연적이며, 상수원수의 경우에도 fouling에 의해 8일 만에 자외선 조사량이 초기값의 30%로 감소한 사례도 보고되고 있다(그림 2.1).

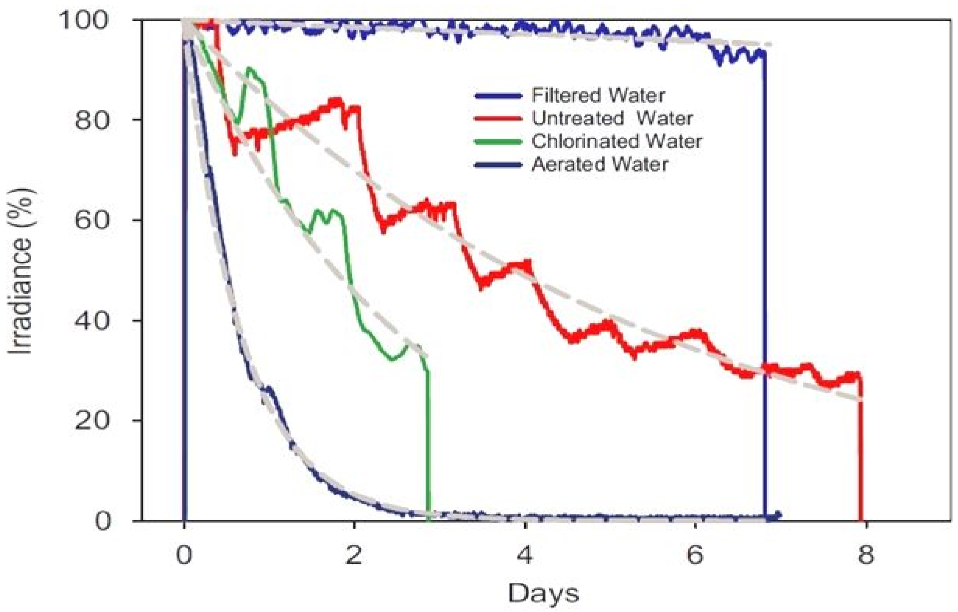


그림 2.1 시간에 따른 fouling 발생 효과 (Wait, 2007)

⑦ 미생물의 종류와 농도

미생물마다 자외선에 대한 내성이 다르므로 소독 효율에도 차이가 있다. 문헌상으로 보고되고 있는 자외선에 대한 미생물의 감수성은 표 2.2와 같다. 표 2.2로부터 알 수 있듯이 자외선에 대한 미생물의 감수성, 즉 일정 불활성화율을 달성하는데 요구되는 자외선 조사량이 각기 다르며 대부분의 세균과 바이러스는 상대적으로 적은 양의 자외선으로 불활성화되지만 protozoan cyst류는 다른 미생물보다 훨씬 더 큰 조사량을 필요로 한다.

미생물에 따라 자외선에 대한 내성이 다르므로 실제 장치를 설계하고 운전할 때는 어떤 미생물을 얼마만큼 사멸시킬 것인지 미리 정해둘 필요가 있다. 예로써, 하수 처리수에서 총 대장균군을 99.9% 불활성화시키는데 8,200 $\mu W \cdot s/cm^2$의 자외선 조사량이 필요한 것을 알 수 있다.

표 2.2 자외선에 대한 미생물의 감수성 비교

미 생 물 종 류	자외선 조사량($\mu W \cdot s/cm^2$)	
	90%불활성화(S=-1 log)	99.9%불활성화(S=-3 log)
Bacteria		
Bacillus megatherium(spores)	2,730	5,200
Bacillus subtilis(spores)	1,200	22,000
Clostridium tetani	1,200	22,000
Escherichia coli	3,000	6,600
Legionella pneumophila	380	2,760
Mycobacterium tuberculosis	5,400	10,000
Pseudomonas aeruginosa	5,500	10,500
Salmonella typhi	2,500	-
Salmonella enteritis	4,000	7,600
Shigella dysenteriae	2,200	3,400
Shigella paradysenteriae	1,700	3,400
Shigella plexneri	1,700	-
Shigella sonnei	3,000	-
Spirillum rubsum	4,400	6,160
Staphylococcus aureus	4,950	6,600
Streptococcus viridans	2,000	3,800
Vibrio cholerae	3,400	-
Total coliforms(하수처리수)	-	**8,200**
Viruses		
Adenovirus Type Ⅲ	-	4,800
Coliphage	3,600	6,600
Coxachie A 2	-	4,800
Hepatis A virus	3,700	12,000
Influenza	3,600	6,600
Poliovirus 1	5,000	21,000～29,000
Qβ	-	40,800
Reovirus 1	-	45,000
Rotavirus SA 11	8,000	25,000
Tobacco mosaic	240,000	440,000

- 박재형(1997)

2.3 수처리 적용현황 및 문제점 분석

2004년부터 2008년까지의 하수도 통계를 살펴보면 하수처리시설 개소는 매년 증가를 보이고 있으며, 그 가운데 UV를 사용한 방류수 소독시설의 개소 또한 매년 증가를 하고 있다. 2004년도에 전체 1,421개의 하수처리시설 가운데 24%인 341개소가 자외선 소독을 실시하였는데, 이후 하수처리시설의 수 및 자외선 소독의 시설수도 꾸준히 증가하여 2008년도에는 전체 2,358개 처리시설의 53%가 자외선 소독을 채택하였다.

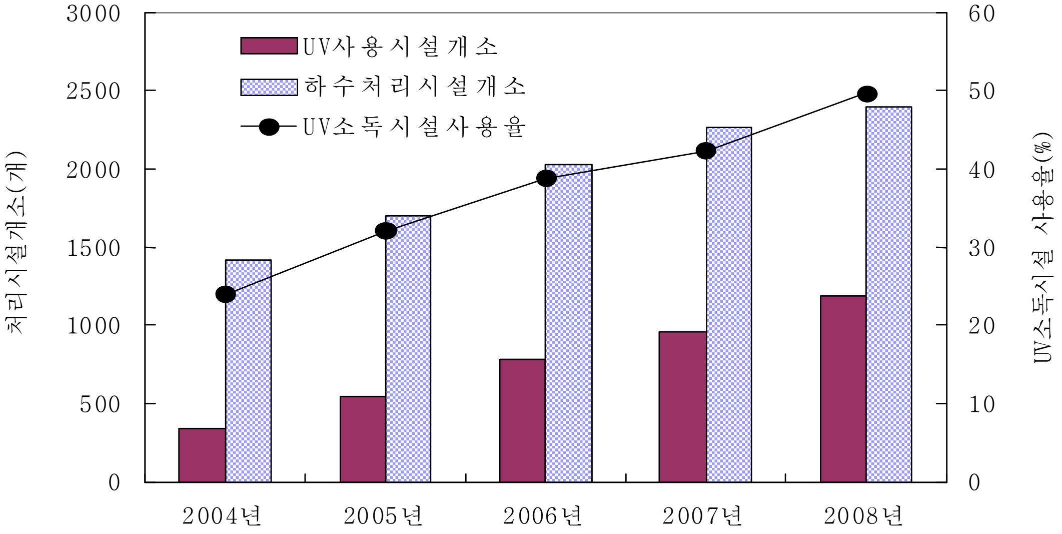


그림 2.2 과거 5년간 국내 하수처리시설의 UV소독현황(환경부, 하수도통계)

그렇지만 자외선 소독의 급속한 증가에도 불구하고, 가동되고 있는 자외선 반응조는 그림 2.3에서 보는바와 같이 방류수 맨홀에 자외선램프를 담가놓은 형태이거나, 원통형의 자외선 반응조에 자외선램프 및 수정 sleeve를 설치하였으나 별도의 fouling 세척장치가 없어 시간이 경과함에 따라 자외선이 대부분 수정 sleeve 외벽 fouling 물질에 흡수되어 버리고 실질적인 살균은 기대할 수 없는 (b)형태를 보이고 있다.

참고로, 침지형의 경우 그림 2.4와 같이 수정 sleeve 주위에 발생하는 fouling 물질을 제거하기 위해 링 타입의 세척시설을 갖추고 주기적으로 세척하는 것이 있으나 이는 상수처리와 같이 불순물이 거의 없는 환경에서 많이 사용하는 방식이며 가격 또한 고가이기 때문에 하수도용으로 적합하지 않다.

(a) Y시 마을하수도 방류수 맨홀에 설치된 자외선 램프

(b) K읍 중소규모 하수처리장에 설치된 자외선 접촉조

그림 2.3 현재 설치되어 시행중인 마을과 하수처리장의 자외선 살균

2.4. 비접촉식 자외선 살균의 개발 배경

모든 자외선램프는 자외선뿐만 아니라 가시광선도 방출한다. 이 때문에 램프 주위에 조류(algal)가 서식하기 쉽다. 즉, 램프가 물속에 잠겨 있으므로 인해서 fouling이 일어나는 것이다. 물속에 존재하는 유기물이나 무기물 이온이 램프를 둘러싸고 있는 수정 sleeve에 침적되거나 생물막을 형성하게 되고, 이로 인해 자외선의 조사량은 감소하게 된다. 경도나 알칼리도, 수온 등 많은 요인들이 fouling에 영향을 미친다. 예측 가능한 fouling의 원인으로는 다음과 같은 것이 있다.

① 수온이 올라갈수록 용해도가 감소하는 물질 예를 들면, $CaCO_3$, $CaSO_4$, $MgCO_3$, $FePO_4$, $FeCO_3$, $Al_2(SO_4)_3$의 농도가 높으면 fouling이 일어나기 쉽다. 이러한 fouling은 운전 온도가 높은 중압램프에서 더 잘 일어난다.

② 광화학반응

③ 용해도가 낮은 $Fe(OH)_3$, $Al(OH)_3$ 등의 물질

④ 램프 슬리브 표면에 침전될 수 있는 입자상 물질

⑤ 자외선 반응기를 오랫동안 쓰지 않으면서 물에 잠겨 놓은 경우 유기물에 의한 fouling 발생

⑥ 무기물질의 산화와 침전

Fouling이 발생한 자외선 소독 장치는 화학적 방법이나 기계적 방법으로 세척을 실시함으로서 처음 상태로 유지할 수 있다. Off-line 화학적 세척을 실시하는 경우 보통 3시간 정도가 소요되기 때문에 월간 또는 년간 단위로 청소를 실시한다. On-line 세척방법에는 기계적 방법(OMC, on-line mechanical cleaning)과 기계-화학적 방법(OMCC, on-line mechanical-chemical cleaning)이 있다(그림 2.4 참조).

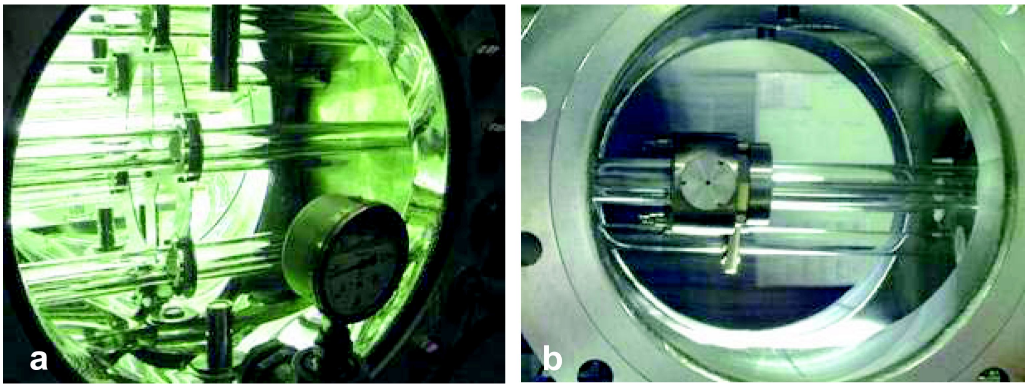


그림 2.4 기계식 세척시설을 갖춘 자외선 살균 장치 (USEPA, 2006)

이 방법은 램프 슬리브에 도우넛 형태의 와이퍼를 설치하고, 이 와이퍼가 램프 슬리브를 따라 수직 이동하면서 물리적으로 슬리브 표면을 닦아주는 것이다. 와이퍼 내부에 화

학약품 공급 장치가 되어 있어 세정제를 이용하면 기계-화학적 방법인 OMCC가 된다. On-line의 세척 빈도는 시간당 1 - 12 주기 정도이다. 그렇지만, 기계식 세정 장치를 부착한 자외선 살균 시스템은 매우 고가이고, 관리에도 특별한 주의가 필요하기 때문에 중소규모 하수처리장에는 적합하지 않으며, 자외선 살균에 대한 이해가 부족한 일반 관리자가 자외선 소독 장치를 분해하거나 화학약품을 주입하여 화학적 세정을 실시하기도 곤란하다. 이러한 이유로 비교적 단순하면서도 램프 sleeve 주위에 fouling 발생 염려가 없는 비접촉형 자외선 살균 시스템을 고안하게 되었다.

비접촉식 자외선 살균 장치는 접촉식의 침지형 장치와 달리 물과 수정 sleeve가 직접 접촉하지 않으므로 scale이나 fouling이 발생하지 않은 큰 장점이 있다. 이로 인해 sleeve 세척기를 부착하지 않으므로 살균장치의 크기가 작아지고, 기기설비 비용이 절감되며, 그에 따른 전력소비도 줄어들게 된다. 그리고 자외선램프의 교체만으로 유지관리가 용이하며, 운반 및 설치가 간단해진다. 또한, 램프가 물과 접촉하지 않으므로 누전의 위험성이 매우 낮다.

제 3 장 모델의 전개

3.1 광학이론

① 굴절

빛 또는 방사에너지가 서로 다른 굴절율을 가진 두 매질(media)을 통과할 때 굴절각도는 Snell's 법칙을 따르며, 다음과 같다.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \tag{3}$$

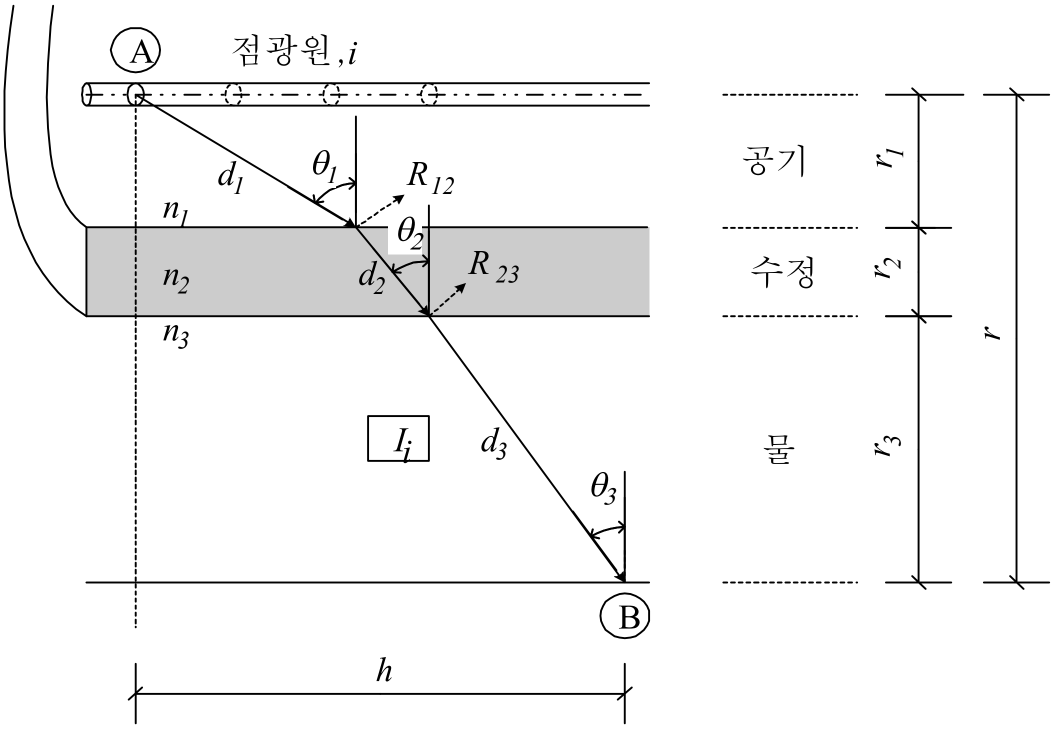


그림 3.1 접촉식 UV조사 시스템에서의 굴절과 반사의 개념

수처리 자외선 시스템에서 자외선은 보통 물, 수정, 공기의 3개의 매질을 통과하게 되며, 다음과 같다(그림 3.1 참조).

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3 \quad (4)$$

따라서, 굴절각은 다음과 같다.

$$\theta_2 = \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2} sin\theta_1) \quad (5a)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_3} sin\theta_1) \quad (5b)$$

여기에서 n은 굴절율이며 매질의 물리적 성질로서, 온도 등에 따라 약간씩 달라지기는 하나 상온에서 공기는 1.00, 물은 1.33 그리고 수정은 1.46 정도이다. 첨자 1, 2, 3은 물, 수정, 공기를 의미한다. 굴절각, 조사거리와 수평거리간의 관계는 식 (6)과 같다.

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

식 (5a)와 식 (5b)를 사용하여 θ_2와 θ_3는 θ_1으로 나타낼 수 있고, 식 (6)에 식 (5a)와 식 (5b)을 적용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

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

식 (7)은 θ_1의 단일변수만 있으므로 반복법과 같은 수학적 방법을 사용하여 풀 수 있다. 모든 굴절각을 알고 있기 때문에, 각 매질에서 빛의 통과거리는 다음과 같이 계산될 수 있다.

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

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

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

② 반사

반사는 서로 다른 두 매질의 경계면에서 파동의 방향이 바뀌는 것을 말한다. 굴절율과 굴절각이 각각 n_1, θ_1과 n_2, θ_2인 두 매질에서 반사율(R)은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{2}\left[r_{II}^2 + r_{\perp}^2 \right] \quad (9a)$$

$$r_{II} = \frac{n_1\cos\theta_1 - n_1\cos\theta_2}{n_1\cos\theta_2 + n_2\cos\theta_1} \quad (9b)$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1\cos\theta_1 - n_2\cos\theta_2}{n_1\cos\theta_1 + n_2\cos\theta_2} \quad (9c)$$

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

③ 흡수

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

$$U = \exp[-\alpha(\lambda) L] \qquad (10)$$

투과율은 흡수율과 반대의 개념으로 보통 10mm의 길이를 통과할 때의 투과율을 많이 사용한다. T_{10}'으로 표시하며 "10mm투과율"이라고 한다.
"10mm투과율" T_{10}'을 o/o로 표시할 경우 T_{10}'과 흡수계수 $\alpha(\lambda)$와 사이에 다음의 관계가 성립한다.

$$T_{10}' = 100 \cdot e^{-\alpha(\lambda)} \qquad (11)$$

④ 그림자 효과

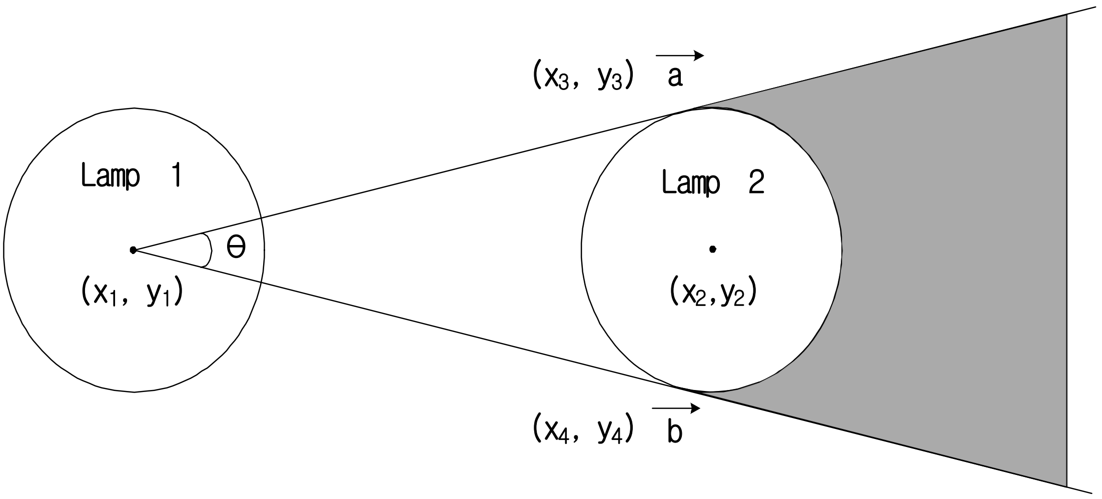


그림 3.2 그림자 효과

그림자 효과(shadowing effect)는 2개 이상의 램프 설치되었을 경우 한 램프의 자외선이 다른 램프의 이면에는 도달할 수 없음으로 인해 자외선의 강도가 감소하는 것을 말한다. 단독 램프 시스템에서는 그림자가 생기지 않아 이 효과가 필요하진 않으나, 2개 이상의 램프인 경우에서는 그 차이가 뚜렷이 나타난다. 실제 반응조의 경우에도 마찬가지로

램프가 2개 이상의 경우 램프에 가려 자외선이 도달하지 못하는 경우 자외선의 살균력에 영향을 미치므로 반응조의 설계에서 고려해야 하는 중요 설계인자이다.

$\vec{a}$ 와 $\vec{b}$ 사이의 각은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\tan\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \tag{12}$$

$\vec{a} = \{(x_3 - x_1), (y_3 - y_1)\}$, $\vec{b} = \{(x_4 - x_1), (y_4 - y_1)\}$ 에 위치한다.

3.2 자외선 강도 분포 모델

① MPSS 모델

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

$$E = \frac{P}{4\pi r^2} \tag{13}$$

MPSS모델은 선형의 자외선램프를 가정하고, 이 램프를 램프 축을 따라 n개의 등간격으로 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 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.

$$I = (1-R_1)(1-R_2)\ \frac{P/n}{4\pi d^2}\ \exp(-\alpha_w d_w)\ \exp(-\alpha_q d_q) \qquad (14)$$

I : 한 점 광원으로부터 도달한 자외선의 강도(W/cm^2)

P : 자외선램프의 총 출력(*Watts*)

R_1 : 공기/수정 경계면에서의 반사율(-)

R_2 : 수정/물 경계면에서의 반사율(-)

n : 분할한 구획(segment)의 수

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

α_w , α_q : 각각 물과 수정의 흡수율(cm^{-1})

d_w , d_q : 빛의 굴절을 고려하여 광원에서 한 점까지 이르는 동안 물을 통과한 거리 및 수정을 투과한 거리(*cm*)

② MSSS 모델

Bolton(2000) 등은 램프를 일련의 점 광원으로 간주하고 누적함으로써 계산하는 MPSS 모델이 특히 램프의 표면 가까이나 램프의 양 끝에서 특히 과다 예측되는 점을 발견하고 이를 보완하는 모델을 제시하였다.

$$I = (1-R_1)(1-R_2)\ \frac{P/n}{4\pi d^2}\ \exp(-\alpha_w d_w)\ \exp(-\alpha_q d_q)\cos\theta_1 \qquad (15)$$

여기에서 다른 항목은 위 식과 같으며, θ_1 : 공기질(수정 sleeve안쪽)의 굴절각을 말한다.

③ LSI 모델

Blatchley(1997)는 MPSS 모델에서 불연속의 n개의 광원을 연속적인 함수로 표현한 LSI 모델을 제시하였고, 이 LSI 모델이 n이 무한대로 증가할 때 MPSS 모델과 수학적으로 같음을 보였다. LSI모델은 굴절과 반사, 흡수를 고려할 수 없기 때문에 이들 인자의 영향이 상대적으로 적은 "공기 중에서의 자외선 살균" 같은 시스템의 모사에 사용될 수 있다.

$$I = \frac{P}{4\pi LR}\left[\tan^{-1}\left(\frac{L/2+H}{R}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{L/2-H}{R}\right)\right] \qquad (16)$$

L : 램프의 길이(cm)

R : 한 점에서 램프에 이르는 연직 길이(cm)

H : 한 점에서 램프 중앙에 이르는 축(램프) 방향의 길이(cm)

3.3 비접촉식 모델의 전개

접촉식 자외선 소독 시스템에서 자외선 빛은 공기와 수정, 물의 3가지 매질을 통과한다. 그러나 비접촉식 자외선 시스템에서 자외선은 공기와 수정, 공기 다음에 물의 4가지 매질을 통과한다. 굴절각과 지수사이의 관계는 3가지의 매질이 변하지 않으므로 Snell's 법칙과 같다. 그러나, 그림 3.3에서 굴절각, 조사거리와 수평거리 사이의 관계는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$r_1\tan\theta_1 + r_2\tan\theta_2 + r_1'\tan\theta_1 + r_3\tan\theta_3 = h \qquad (17)$$

그러므로, 앞의 식 (7) 또한 다음과 같이 정의된다.

$$(r_1 + r_1^{'})\tan\theta_1 + r_2\tan\left\{\sin^{-1}\left(\sin\theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_2}\right)\right\} + r_3\tan\left\{\sin^{-1}\left(\sin\theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_3}\right)\right\} = h \quad (8)$$

식 (7)과 같이 식 (18)은 다음의 식을 사용하여 각각의 매질에서 빛의 통과 거리가 계산될 수 있다.

$$d_1 = r_1/\cos\theta_1 \quad (19a)$$

$$d_2 = r_2/\cos\theta_2 \quad (19b)$$

$$d_1^{'} = r_1^{'}/\cos\theta_1 \quad (19c)$$

$$d_3 = r_3/\cos\theta_3 \quad (19d)$$

이 경우에서, 공기/수정, 수정/공기, 공기/물의 3개의 경계면이 생기기 때문에 3번의 반사가 발생한다. 3개의 경계면을 통과하는 동안, 공기/수정의 경계면과 수정/공기에서의 경계면 반사율이 동일하기 때문에 빛의 강도는 $(1-R_{12})^2(1-R_{13})$만큼 감소한다. 결과적으로, 비접촉식 자외선 조사시스템에서 점광원 (i)로부터 발생되는 한 점에서의 빛의 강도는 다음 식으로 계산되어질 수 있다.

$$I_i = (1-R_{12})^2(1-R_{13})\frac{P/n}{4\pi d^2}\exp(-\alpha_2 d_2)\exp(-\alpha_3 d_3) \quad (20)$$

R_{12} , R_{13} : 각각 공기/수정, 공기/물 경계면에서의 반사율

d : 자외선 통과거리의 합$(d_1 + d_2 + d_1^{'} + d_3)(cm)$

램프를 수면 위에 배치할 때 반응조 천정은 빛을 반사할 수 있다. 비록 반사율이 천정 표면의 재질에 따라 다르며, 반사된 빛의 통과거리가 광원에서 직접 조사되는 거리보다 더 길다 할지라도 충분히 고려할 가치가 있다. 천정의 반사는 그림 3.3에서 보이는 것처럼 설명될 수 있다. 점광원 A 나온 빛은 2가지 방법으로 점광원 B에 도달된다.

한 방법은 $d_1 + d_2 + d_s' + d_3$의 경로를 따라 도달되는 것이다. 위에서 상기한 바와 같이, 각각의 통과거리는 식 (19a)~(19d)를 사용하여 계산되어 질 수 있으며, 식 (20)을 이용하여 자외선 강도(I_i)를 계산할 수 있다.

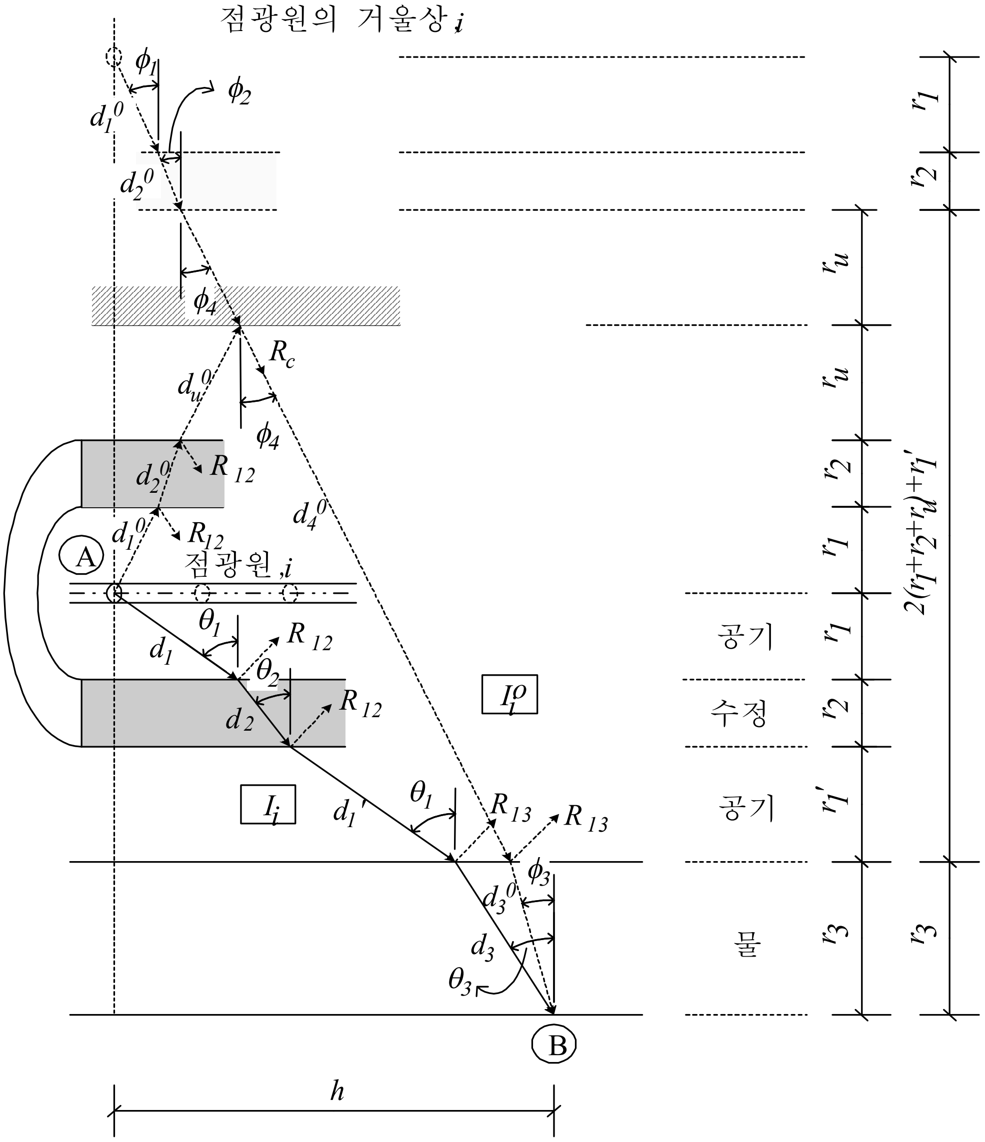


그림 3.3 비접촉식 UV 소독 시스템에서의 굴절과 반사의 개념

다른 방법은 천정벽을 경유하는 것이다. 이 경우, 자외선 강도 (I_i^O)는 가상적인 광원으로 가정하여 추측할 수 있다. 그림 3.3에서 보이는 바와 같이, 반사되는 빛은 d_1^0, d_2^0, d_u^0, d_4^0, d_3^0의 경로를 따른다. 굴절각과 지수사이의 관계는 식 (4)와 같으며, 굴절각과 조사거리, 수평거리의 관계는 식 (21)과 같다.

$$r_1 \tan\phi_1 + r_2 \tan\phi_2 + \left\{2(r_1 + r_2 + r_u) + r_1'\right\}\tan\phi_4 = h \tag{21}$$

각ϕ_4는 ϕ_1과 같으므로, 식 (21)은 식 (22)로 나타낼 수 있다.

$$\left\{r_1' + 2(r_2 + r_u) + 3r_1\right\}\tan\phi_1 + r_2 \tan\left\{\sin^{-1}\left(\sin\phi_1 \cdot \frac{n_1}{n_2}\right)\right\} + r_3 \tan\left\{\sin^{-1}\left(\sin\phi_1 \cdot \frac{n_1}{n_3}\right)\right\} = h \tag{22}$$

각각의 매질에서 통과거리는 식 (23a)~(23d)을 사용하여 계산되어질 수 있다.

$$d_1^0 = r_1/\cos\phi_1 \tag{23a}$$

$$d_2^0 = r_2/\cos\phi_2 \tag{23b}$$

$$d_4^0 = \left\{r_1' + 2(r_1 + r_2 + r_u)\right\}/\cos\phi_1 \tag{23c}$$

$$d_3^0 = r_3/\cos\phi_3 \tag{23d}$$

반사되는 빛의 반사는 4개의 경계면에서 이루어지며, $(1-R_{12})^2(1-R_{13})R_c$만큼 감소된다. R_c는 천정벽면에서의 반사율을 말한다. 그러므로 점광원 A에서 발생하여 점광원 B에 도달하는 반사 자외선 강도는 식 (24)와 같이 예상되며, B에서 전체적인 강도는 식 (20)과 식 (24)의 합이다.

$$I_i^0 = (1-R_{12})^2(1-R_{13})R_c \frac{P/n}{4\pi(d^0)^2}\exp(-\alpha_2 d_2^0)\exp(-\alpha_3 d_3^0) \tag{24}$$

총 강도 $I = I_i + I_i^O$ (25)

$d^0 = d_1^0, + d_2^0 + d_3^0 + d_4^0$: 총 통과거리

d_2^0 , d_3^0 : 수정과 물의 매질을 통과하여 반사되는 빛의 경로 길이

R_c : 천정벽의 반사율

$\phi_1 \sim \phi_4$는 굴절각이며, 다른 기호들은 식 (20)과 같다.

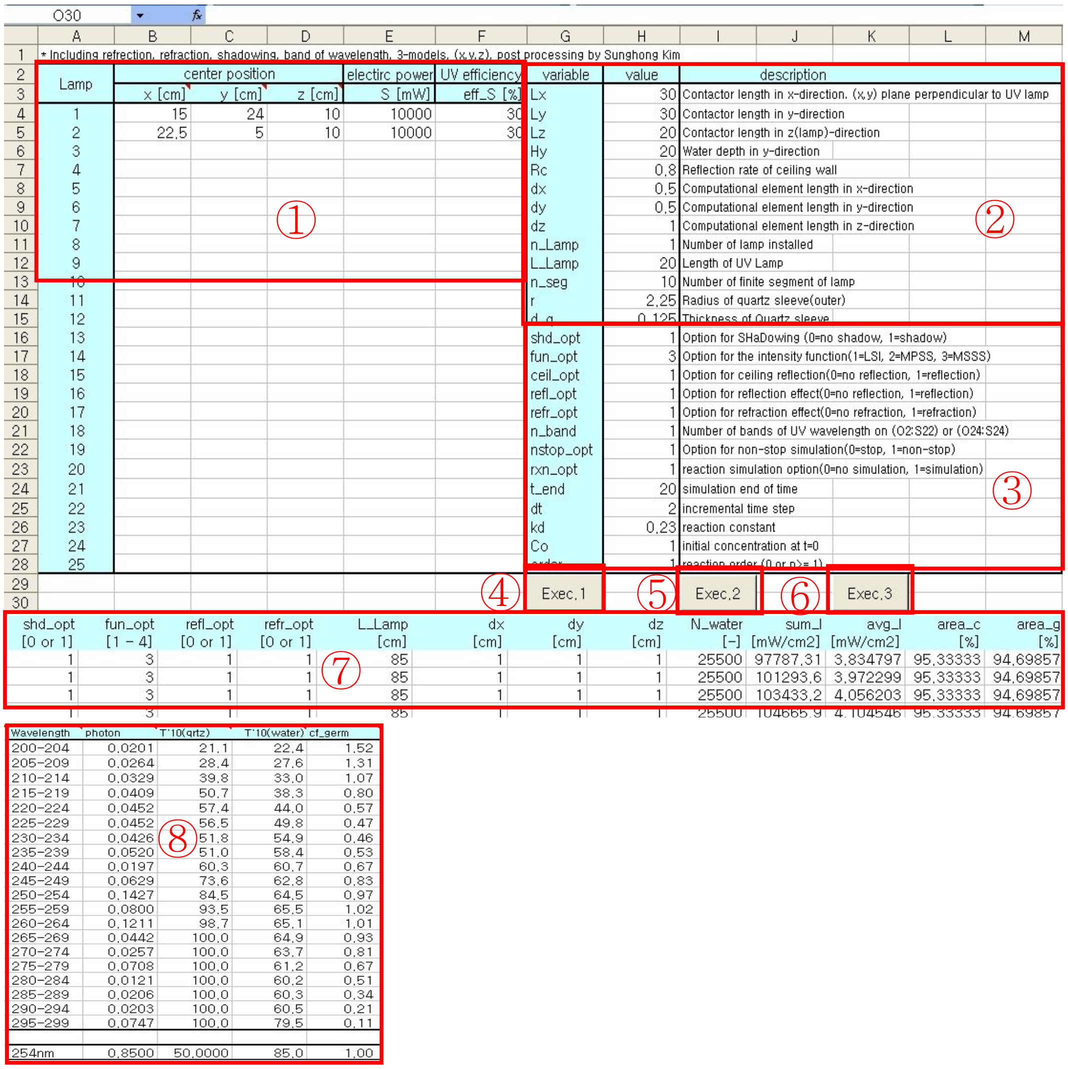
3.4 시뮬레이션 모델의 구성

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
- 천정(ceil)반사 효과 선택 옵션
- 한 개 혹은 여러 개 램프, 반응조 길이보다 짧은 램프 가능
- 저압 램프, 중압 램프 선택 옵션
- Band width 별 살균 효과 (germicidal effect)
- 반응성 물질의 시간적 변화(제거)
- 무제한의 element 크기와 수
- 계산 결과를 Excel chart로 저장
- Excel VBA를 사용하므로써 계산 속도가 느린 점이 단점이다.

계산 프로그램에 필요한 반응조 제원, 램프의 위치, 자외선 동력 등의 입력 자료는 Excel의 worksheet상에 직접 입력하도록 구성되어 있고, 마찬가지로 수학적 모델의 선택, 굴절, 반사 등의 선택 여부를 옵션으로 처리하여 같은 worksheet상에 입력하도록 하였다. 그림 3.4에 입력 데이터 worksheet를 예시하였다.



Lamp	center position x [cm]	y [cm]	z [cm]	electirc power S [mW]	UV efficiency eff_S [%]
1	15	24	10	10000	30
2	22.5	5	10	10000	30
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

variable	value	description
Lx	30	Contactor length in x-direction. (x,y) plane perpendicular to UV lamp
Ly	30	Contactor length in y-direction
Lz	20	Contactor length in z(lamp)-direction
Hy	20	Water depth in y-direction
Rc	0.8	Reflection rate of ceiling wall
dx	0.5	Computational element length in x-direction
dy	0.5	Computational element length in y-direction
dz	1	Computational element length in z-direction
n_Lamp	1	Number of lamp installed
L_Lamp	20	Length of UV Lamp
n_seg	10	Number of finite segment of lamp
r	2.25	Radius of quartz sleeve(outer)
d_q	0.125	Thickness of Quartz sleeve
shd_opt	1	Option for SHaDowing (0=no shadow, 1=shadow)
fun_opt	3	Option for the intensity function(1=LSI, 2=MPSS, 3=MSSS)
ceil_opt	1	Option for ceiling reflection(0=no reflection, 1=reflection)
refl_opt	1	Option for reflection effect(0=no reflection, 1=reflection)
refr_opt	1	Option for refraction effect(0=no refraction, 1=refraction)
n_band	1	Number of bands of UV wavelength on (O2:S22) or (O24:S24)
nstop_opt	1	Option for non-stop simulation(0=stop, 1=non-stop)
rxn_opt	1	reaction simulation option(0=no simulation, 1=simulation)
t_end	20	simulation end of time
dt	2	incremental time step
kd	0.23	reaction constant
Co	1	initial concentration at t=0
order	1	reaction order (0 or n>= 1)

shd_opt [0 or 1]	fun_opt [1 - 4]	refl_opt [0 or 1]	refr_opt [0 or 1]	L_Lamp [cm]	dx [cm]	dy [cm]	dz [cm]	N_water [-]	sum_I [mW/cm2]	avg_I [mW/cm2]	area_c [%]	area_g [%]
1	3	1	1	85	1	1	1	25500	97787.31	3.834797	95.33333	94.69857
1	3	1	1	85	1	1	1	25500	101293.6	3.972299	95.33333	94.69857
1	3	1	1	85	1	1	1	25500	103433.2	4.056203	95.33333	94.69857
1	3	1	1	85	1	1	1	25500	104665.9	4.104546	95.33333	94.69857

Wavelength	photon	T'10(qrtz)	T'10(water)	cf_germ
200-204	0.0201	21.1	22.4	1.52
205-209	0.0264	28.4	27.6	1.31
210-214	0.0329	39.8	33.0	1.07
215-219	0.0409	50.7	38.3	0.80
220-224	0.0452	57.4	44.0	0.57
225-229	0.0452	56.5	49.8	0.47
230-234	0.0426	51.8	54.9	0.46
235-239	0.0520	51.0	58.4	0.53
240-244	0.0197	60.3	60.7	0.67
245-249	0.0629	73.6	62.8	0.83
250-254	0.1427	84.5	64.5	0.97
255-259	0.0800	93.5	65.5	1.02
260-264	0.1211	98.7	65.1	1.01
265-269	0.0442	100.0	64.9	0.93
270-274	0.0257	100.0	63.7	0.81
275-279	0.0708	100.0	61.2	0.67
280-284	0.0121	100.0	60.2	0.51
285-289	0.0206	100.0	60.3	0.34
290-294	0.0203	100.0	60.5	0.21
295-299	0.0747	100.0	79.5	0.11
254nm	0.8500	50.0000	85.0	1.00

그림 3.4 입력 데이터 worksheet 화면

① 램프의 기하학적인 위치와 출력, UV 효율성 입력화면

② UV반응조의 규격, 수정, 램프의 수, Element의 크기 등의 입력화면

③ 그림자효과, 강도기능, 계산모델 선택, 반사, 굴절 등의 옵션 선택화면

④ 시뮬레이션 시작 버튼

⑤ 포스트 데이터 처리 버튼

⑥ 반응결과 처리버튼

⑦ 결과의 요약

⑧ UV의 파장, 투과율, 살균력의 입력데이터

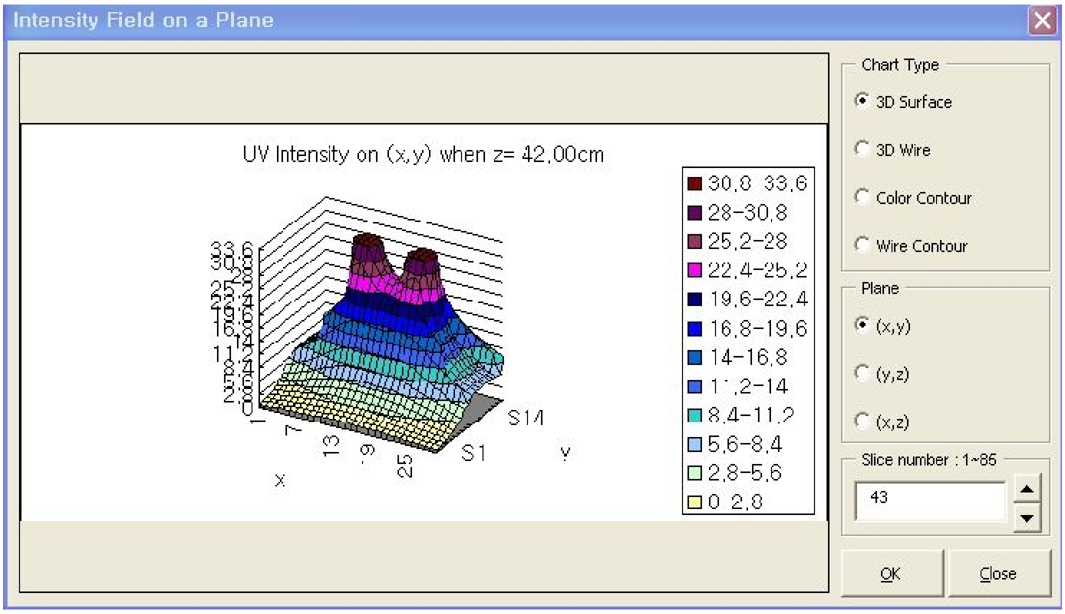


그림 3.5 시뮬레이션 계산 결과 화면 예시

계산 결과는 데이터 파일로 저장되는데, 평균 자외선 강도, 옵션 등의 중요한 결과는 입력 데이터 worksheet상에 시뮬레이션 종료와 함께 보이도록 하였다. 저장된 결과 데이터 파일은 후속 유저폼에서 읽어 들여 Excel chart 형식으로 보여주거나 저장할 수 있다. 그림 3.5에 후속 유저폼으로 계산 결과를 보여주는 것을 예시하였다.

3.5 모의조건 설정

가상의 자외선 반응조를 구성하여 영향인자 변화에 따른 자외선 강도 분포 변화를 예측하였다. 가상의 반응조는 그림 3.6과 같이 장방형이며, 가로(x)와 높이(y)가 각각 30*cm*, 20*cm*이며, 램프 방향의 길이(z)가 85*cm*이다. 수정 sleeve는 지름이 4.5*cm*, 두께가 0.125*cm*이다. 자외선램프는 저압 고출력 램프로서 출력은 120*W*이며 자외선 효율은 30%로 가정하였다. 수심은 수정 sleeve의 지름을 고려하여 10*cm*로 가정하였다. 계산 단위인 Element의 수가 많을수록 계산의 정확도는 증가하나 반면에 계산에 소요되는 시간이 그만큼 증가한다. 여기서는 Element의 크기를 가로, 세로, 높이의 길이가 각각 1*cm*인 정육면체로 구성하였다. 따라서 가상 접촉조의 Element 수는 30*cm* × 10*cm* × 85*cm* = 22,500개이다. 본 연구에서 사용된 가상의 자외선 반응조의 모형을 아래의 그림에 표시하였다.

표 3.1 가상의 자외선 반응조 운전조건

제 원	운전조건
반응조 크기	30*cm* W × 20*cm* H × 85*cm* L, 장방형
자외선램프	85*cm* L, 120*W* (UV=36*W*)
수정 sleeve	4.5*cm* OD × 0.125*cm* T × 85*cm*, 원통형
계산 element 단위	1*cm* W × 1*cm* H × 1*cm* L

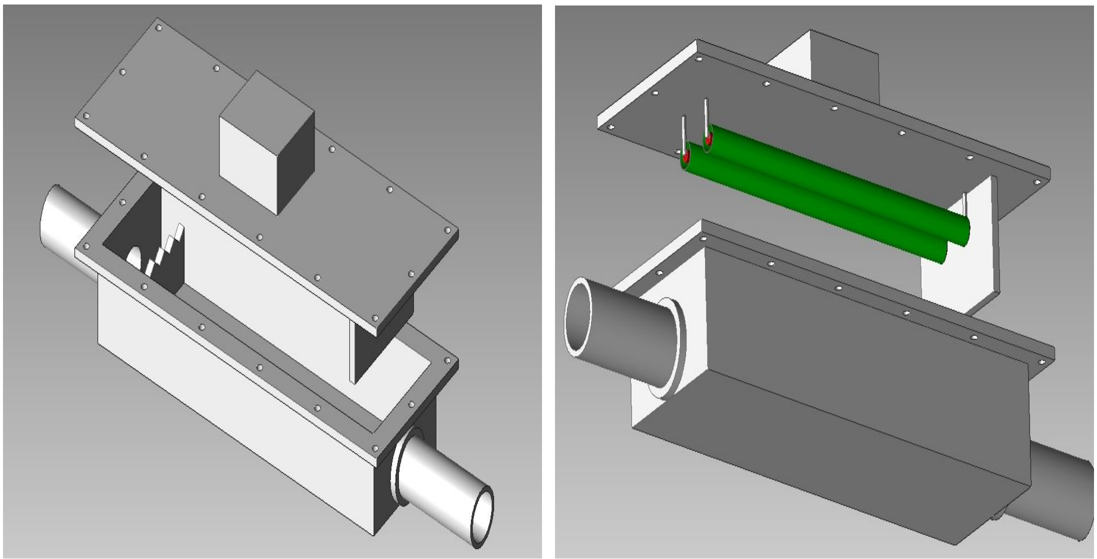


그림 3.6 가상의 자외선 반응조

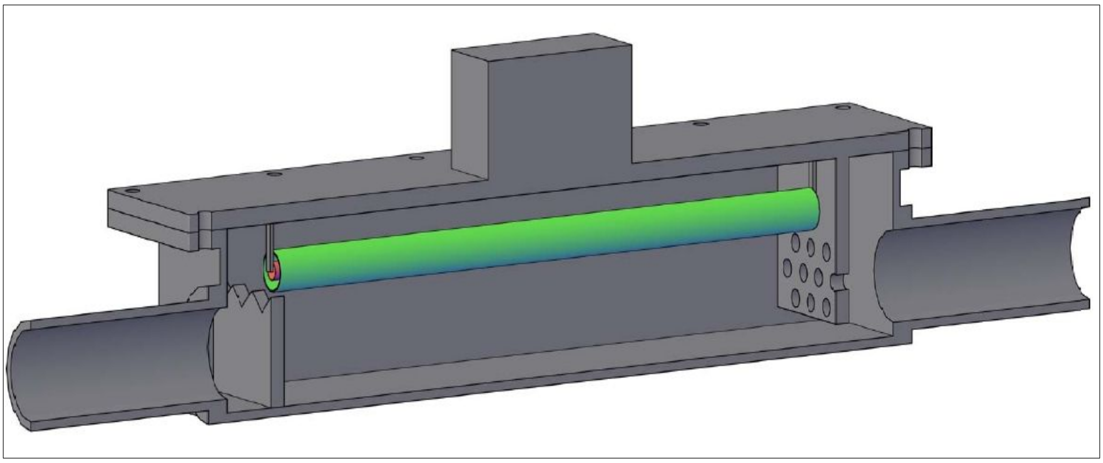
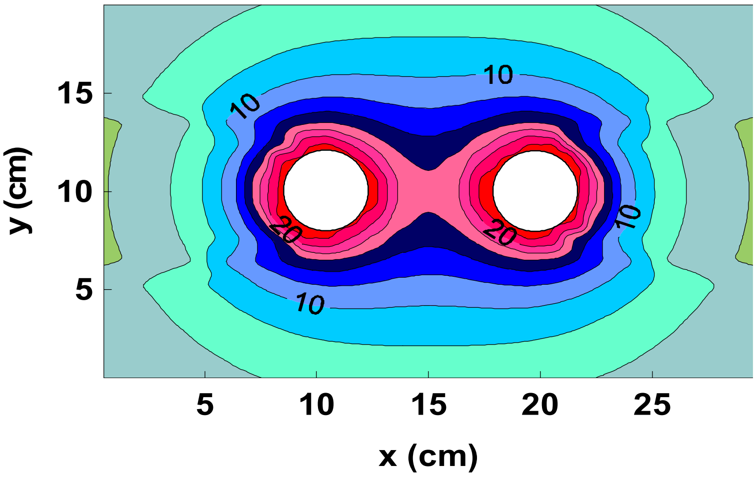


그림 3.7 가상의 자외선 반응조 절단면도

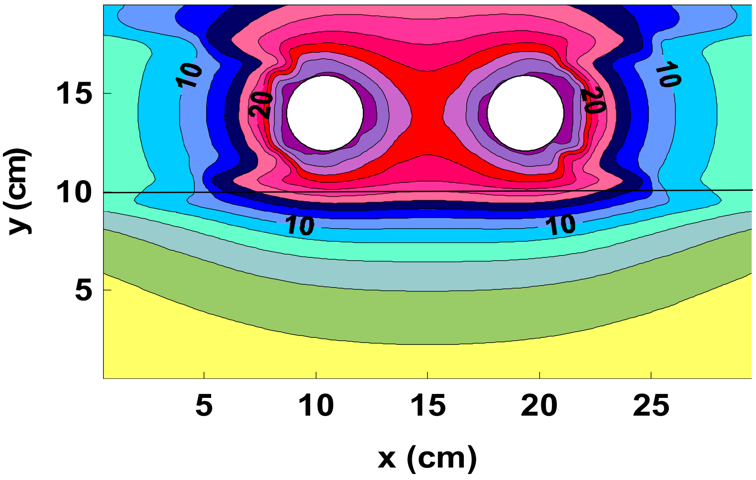
제 4 장 결과 및 고찰

4.1 접촉식과 비접촉식의 분포 비교

그림 4.1에 접촉식과 비접촉식 반응조에서 각각 2개의 램프를 설치하였을 때의 x-y평면의 평균 자외선 강도를 계산하여 표시하였다.



(a)접촉식



(b)비접촉식

그림 4.1 접촉식과 비접촉식의 평균 자외선 강도 분포 비교

접촉식의 경우 램프 및 수정 sleeve가 물속에 잠겨 있음으로 인해 자외선은 자외선램프를 중심으로 상하 대칭인 분포를 보인다. 반면에 비접촉식의 경우 자외선램프가 공중에 설치되어 있고 램프 아래쪽에 물 표면이 있으므로 물을 투과하면서 자외선은 굴절, 반사, 흡수되고 공기층과는 서로 다른 분포를 보이게 된다.

접촉식 반응조에서 물속의 평균 자외선 강도는 8.395 mW/cm^2였으며, 비접촉식 반응조에서의 평균 자외선 강도는 4.109 mW/cm^2였다. 평균 자외선 강도 면에서는 접촉식 반응조가 비접촉식에 비해 약 2배가량 강도가 높았다. 하지만, 시간이 지남에 따라 접촉식에서는 수정 sleeve에 fouling이 발생하게 되므로 점차 비접촉식보다 자외선 강도는 낮아지고 살균력은 저하될 것으로 예상된다.

4.2 비접촉식 반응조의 자외선 분포

비접촉식 자외선 살균 반응조의 자외선 강도 분포를 계산하여 그림 4.2~4.3에 표시하였다.

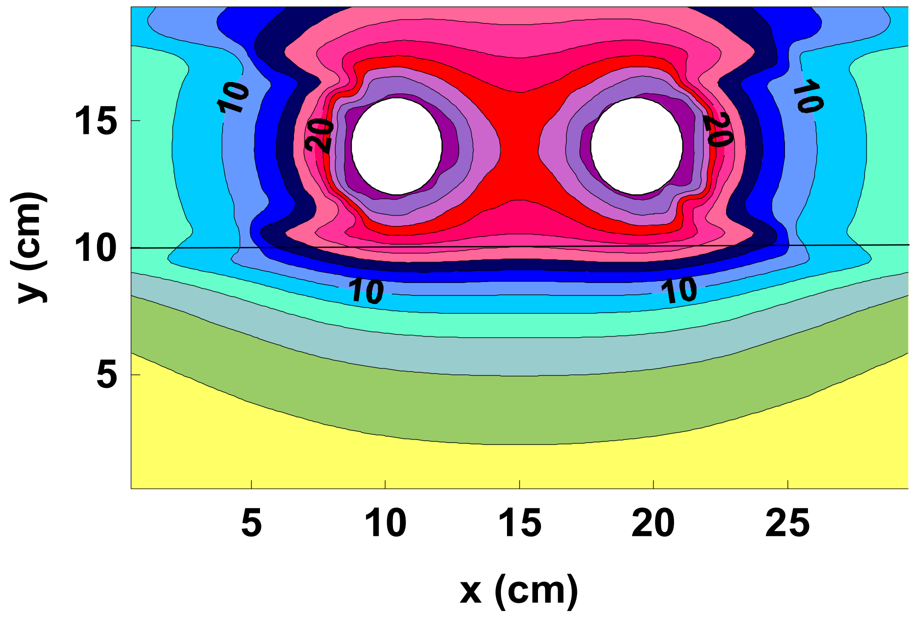


그림 4.2 x-y 평면의 자외선 강도 분포 (z=42 ㎝ 위치)

x-y평면, 즉 램프길이 방향과 수직인 평면에서의 자외선 분포는 램프의 중심을 최대로 하는 동심원을 나타내며 램프에서 거리가 멀어질수록 자외선 강도가 약해지는 전형적인 분포를 보이고 있다. 두 램프 사이는 자외선이 서로 중첩되는 관계로 가장 높게 나타나고, 그 반대로 램프의 바깥쪽은 그림자 효과로 인해 강도가 줄어드는 현상이 잘 묘사되어 있다.

자외선램프가 물위에 설치되어 물과 접촉하고 있지 않음으로 인해 램프 위쪽, 즉 공기중에서 자외선의 분포보다 램프 아래쪽, 즉 물속에서 자외선 분포는 급격히 감소함을 알 수 있는데 이는 물에 의한 자외선 흡수 때문이다.

램프로부터 방사되는 자외선의 강도는 수정 sleeve 표면에서 가장 높게 나타나고, 램프에서 멀어질수록 점점 작아진다. 그림 4.2~4.3을 보면 한 지점으로부터 자외선램프까지의 거리가 멀수록 자외선의 강도는 약해지게 되는데 이는 자외선의 강도가 거리의 제곱에 반비례하기 때문이다.

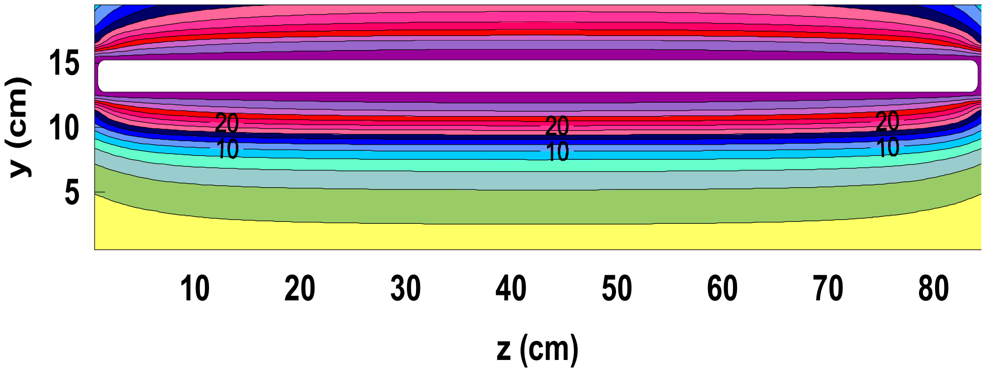


그림 4.3 y-z 평면의 자외선 강도 분포 (x=10 cm 위치)

또한, 램프의 형태가 긴 원통형이므로 램프의 길이방향의 중간부근에서 자외선 강도가 가장 높고 램프의 양 끝점으로 갈수록 점차 작아진다. 그림 4.4에 반응조보다 짧은 램프가 설치되었을 때의 자외선 분포를 시뮬레이션하여 표시하였는데 한 지점의 자외선 강도는 램프의 모든 부분에서 방사되는 자외선이 서로 중첩·누적되는데, 도달거리는 중앙에서 짧고 상대적으로 양 끝에는 증가한다. 따라서 자외선의 강도는 램프의 중앙 지점에서

가장 높고, 램프의 양 끝으로 갈수록 약하게 나타나게 된다. 램프의 양 끝단보다 더 먼 곳은 자외선의 강도가 급격히 감소하는 영역이 나타나는데 Blatchley(1995)는 이를 'end-effect'라 한 바 있다.

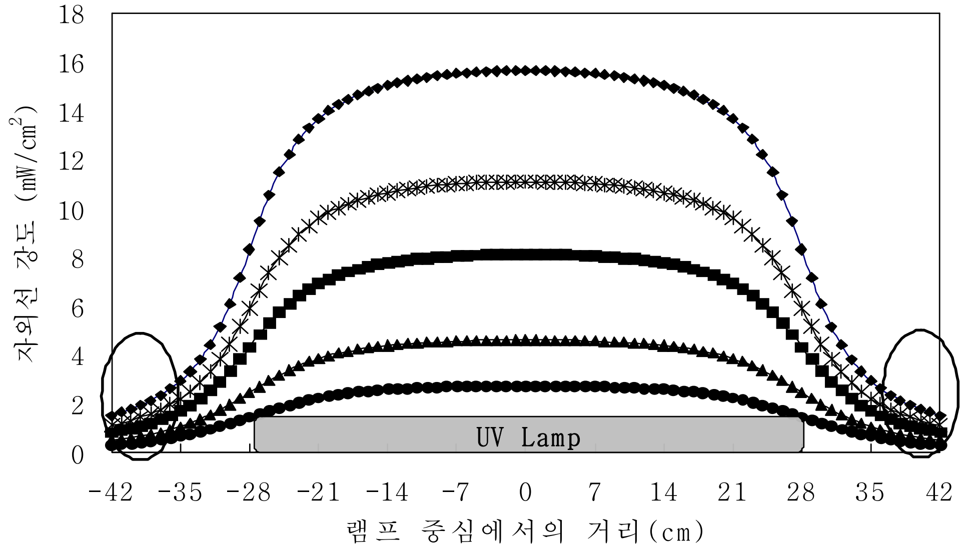


그림 4.4 반응조보다 짧은 램프의 자외선 분포

4.3 설계인자 분석

비접촉식 자외선 반응조를 설계함에 있어 동일한 램프 출력이라 하더라도 램프의 위치나 램프의 개수, 반응조 천정의 반사율 등에 따라 자외선 조사량을 최대화 할 수 있는 최적 설계조건이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이와 같은 3가지 조건에 대해 모의 수치 실험을 실시함으로서 최적 조건을 도출하고자 하였다. 먼저, 램프의 위치에 따른 변화를 알아보았다. 2개의 램프를 설치하는 경우를 가정하여 램프 간격 변화에 따른 물의 평균 자외선 강도 변화를 모의하였는데, 램프의 개당 출력은 120W로 고정하였다. 천정의 반사율은 100%로 하였으며, 수정

sleeve의 반경 2.25*cm*를 고려하여 2개 램프의 최소 간격을 4.5*cm*, 최대 간격을 25.5*cm*로 하여 1*cm* 간격으로 좌우 0.5*cm*씩 변화시키면서 계산을 실시하였다.

4.3.1 램프의 위치

시뮬레이션 결과를 표 4.1에 표시하였고, 그림 4.5에 그림으로 표시하였다. 램프 사이의 간격이 가장 가까운 4.5*cm*일 때 평균 자외선 강도는 3.835 mW/cm^2를 기록하였고 점차 그 값이 증가함을 보이다가 간격이 9.5*cm*일 때 가장 높은 4.109 mW/cm^2를 보였으며, 이후에는 점차 평균 자외선 강도의 값이 낮아짐을 보이고 있다. 평균 자외선 강도가 가장 높은 9.5*cm*일 때 반응조의 램프 사이의 거리와 x축 길이의 비는 L_{12}/L_X=0.32로서 최적의 램프의 위치는 반응조의 벽면으로부터 각각 1/3, 2/3 정도 되는 지점임을 알 수 있다.

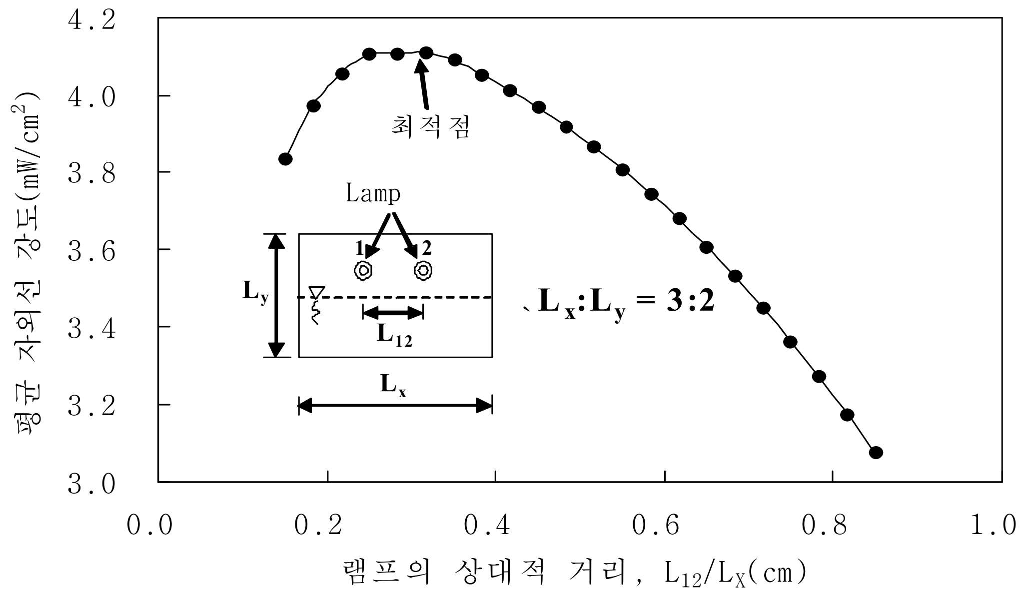


그림 4.5 램프 간격과 최적의 램프 위치

표 4.1 램프 간격에 따른 평균 자외선 강도의 변화

램프 중심 좌표(cm)		램프 사이의 간격 (cm)	평균 자외선 강도 (mW/cm^2)	L_{12}/L_x
L_1	L_2			
12.75	17.25	4.5	3.835	0.15
12.25	17.75	5.5	3.972	0.18
11.75	18.25	6.5	4.056	0.22
11.25	18.75	7.5	4.105	0.25
10.75	19.25	8.5	4.107	0.28
10.25	19.75	9.5	4.109	0.32
9.75	20.25	10.5	4.089	0.35
9.25	20.75	11.5	4.052	0.38
8.75	21.25	12.5	4.012	0.42
8.25	21.75	13.5	3.967	0.45
7.75	22.25	14.5	3.918	0.48
7.25	22.75	15.5	3.865	0.52
6.75	23.25	16.5	3.808	0.55
6.25	23.75	17.5	3.746	0.58
5.75	24.25	18.5	3.679	0.62
5.25	24.75	19.5	3.607	0.65
4.75	25.25	20.5	3.531	0.68
4.25	25.75	21.5	3.449	0.72
3.75	26.25	22.5	3.363	0.75
3.25	26.75	23.5	3.271	0.78
2.75	27.25	24.5	3.175	0.82
2.25	27.75	25.5	3.075	0.85

4.3.2 램프의 수

램프 수의 영향을 알아보기 위해 램프의 총 출력을 120W로 고정한 상태에서 램프의 수를 1개부터 6개까지 변화시키면서 자외선 강도의 변화를 알아보았다. 동일한 전력을 사용하더라도 램프의 개수에 따라 자외선의 조사량은 달라질 수 있다.

표 4.2 램프 개수에 따른 평균 자외선 강도

램프 개수	개당 램프 출력 (W)	램프 설치위치(cm)	평균 자외선 강도 (mW/cm^2)
1	120	15	2.13
2	60	10, 20	2.05
3	40	7.5, 15, 22.5	1.95
4	30	6, 12, 18, 24	1.84
5	24	5, 10, 15, 20, 25	1.73
6	20	2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5	1.61

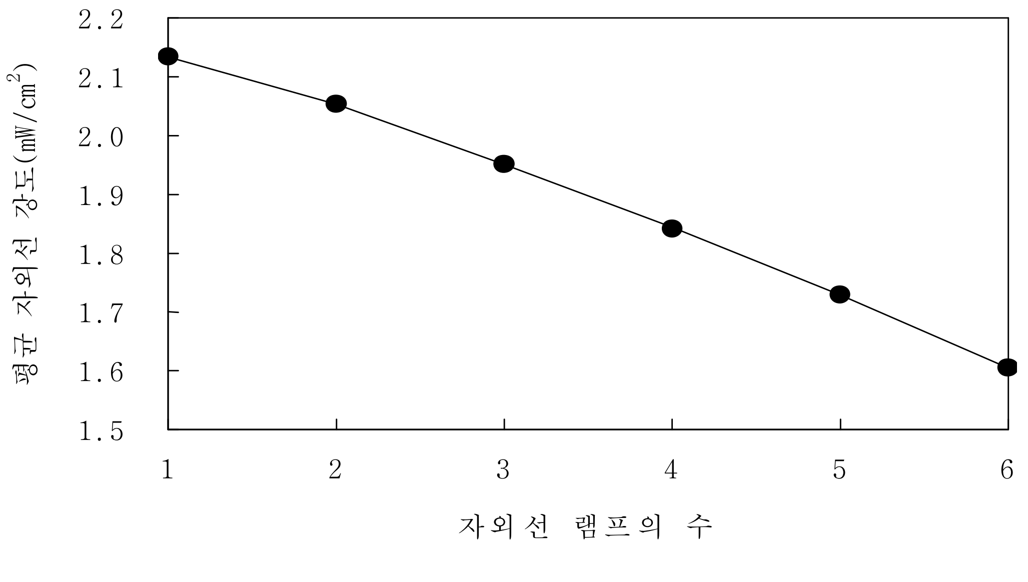
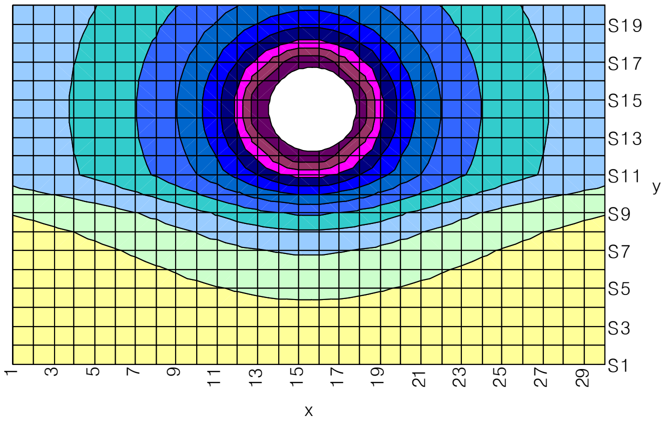
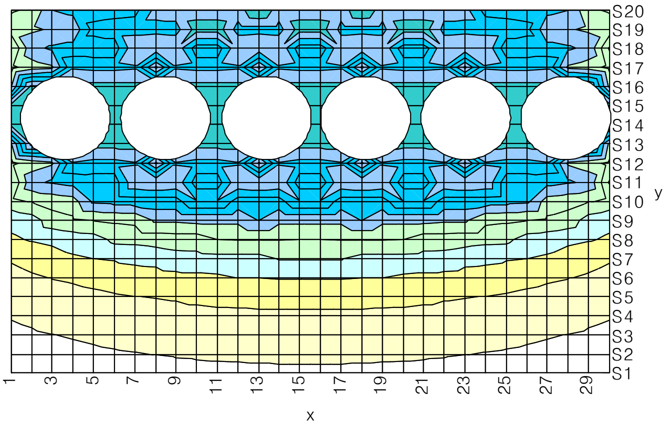


그림 4.6 램프 개수에 따른 평균 자외선 강도

그림 4.6~4.7에 반응조 내에 자외선램프가 1개 설치되었을 때와 6개 설치되었을 때의 자외선 분포를 비교하여 표시하였다.



(a) 1개의 램프 설치



(b) 6개의 램프 설치

그림 4.7 램프 수에 따른 자외선 분포

120W 출력의 자외선램프 1개를 사용하였을 때 평균 자외선 강도는 2.133 mW/cm^2으로 가장 높게 나타났고, 램프의 수가 증가할수록 평균 자외선 강도도 점차 감소하여 20W 출

력의 램프 6개를 사용하였을 때 평균 자외선 강도는 1.607 mW/cm^2로 가장 낮게 예측되었다.

이는 그림자 효과로 인해 반응조 내에 설치된 램프의 개수가 많아질수록 빛이 가려지는 부분이 늘어나게 되어 실제 물에 조사되는 총 자외선 량이 줄어들었기 때문으로 생각된다. 따라서 동일한 전력 조건에서는 여러 개의 저출력 램프를 설치하는 것 보다는 1개의 고출력 램프를 설치하는 것이 더 효과적이다.

4.3.3 천정 반사율

접촉식의 경우 반응조 벽면에서 반사되는 자외선은 그 강도가 약하여 큰 영향이 없을 것이나 비접촉식의 경우 자외선램프의 상부 즉, 반응조 내부 천정에서의 반사로 인해 자외선 조사량은 증가할 것으로 예상된다.

표 4.3 천정 반사율에 따른 평균 자외선 강도

반사율(R_C, %)	평균자외선강도(mW/cm^2)
0	2.78
10	2.91
20	3.05
30	3.18
40	3.31
50	3.44
60	3.58
70	3.71
80	3.84
90	3.98
100	4.11

천정 반사율의 영향을 알아보기 위해 천정의 반사율에 따른 평균자외선 강도를 알아보기 위해 반사율을 0%~100%까지 10%씩 증가시키며 모의실험을 실시하였다. 램프의 개수는 2개이고, 출력은 120*W*로 하였으며, 램프의 위치는 최적의 위치인 램프의 간격이 9.5*cm*일 때의 위치 즉, x좌표 10.25*cm*와 19.75*cm*를 각각 선정하였다.

천정반사율에 따른 평균 자외선 강도를 계산하여 표 4.3에 표시하였으며 이를 그림 4.8에 도시하였다. 반사율(R_C)가 높을수록 평균 자외선 강도의 값은 커졌으며, 반사를 고려하지 않았을 경우인 R_C=0 일 때의 값과 비교해서 R_C=100일 때는 평균 자외선 강도가 약 48% 증가함을 알 수 있다.

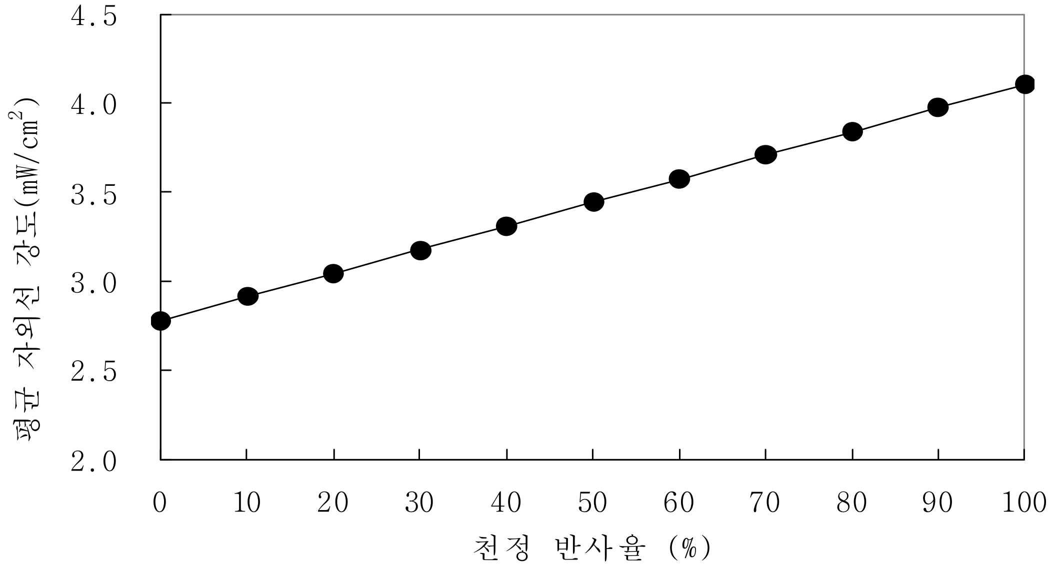


그림 4.8 천정 반사율에 따른 평균 자외선 강도 변화

제 5 장 결 론

접촉식 자외선 살균 시스템에서 필연적으로 발생하는 fouling 문제를 해결하기 위한 방법으로 비접촉식 자외선 살균 시스템을 구상하고, 이에 대한 설계 및 운전인자를 도출하기 위해 수학적 계산 모델을 개발하였다. 모델을 이용한 수치 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수정 슬리브의 fouling이 없고, 동일한 출력의 램프를 사용하는 경우 접촉식 자외선 살균 시스템의 자외선 강도는 비접촉식 시스템에 비해 2배 정도 높게 나타나 접촉식이 비접촉식보다 더 효율적이었다. 즉 fouling이 발생하지 않는다면 접촉식이 비접촉식보다 더 유리하다.

2. 2개 이상의 램프를 사용하는 경우에 자외선 강도가 최대가 되는 최적의 램프 위치가 존재한다. 2개의 램프를 사용할 때의 최적의 위치는 수평방향으로 각각 1/3 및 2/3 지점이며, 반응조 벽으로부터 등간격으로 설치할 때가 최적 위치가 된다.

3. 총 전력사용량이 일정한 조건에서 램프의 수에 따라 물속의 자외선 강도는 달라지는데 모의 결과 여러 개의 저출력 램프를 설치하는 것 보다 한 개의 고출력 램프를 설치하는 것이 평균 자외선 강도 면에서 더 효과적이다.

4. 비접촉식 자외선 살균 시스템의 경우 반응조 천정 벽면의 반사에 의해 물속으로의 자외선 조사량은 증가한다. 모의 조건에 따라 다르겠지만 본 연구에서는 천정의 반사로 인해 평균 자외선 강도는 최대 48% 가량 증가하여 살균에 더 효과적이었다.

참 고 문 헌

1. 김두일, 최영균, 김성홍(2008) 자외선강도 산정 모델과 영향인자에 관한 연구, 상하수도학회지, 22(4), pp.421～427

2. 김성홍(2008) 자외선을 이용한 먹는 물 소독 방법에 관한 고찰, J. of Advanced Engineering and Technology, 1(2), pp.321～326

3. 박재범, 김자겸, 김주현, 오해진, 이경혁(2009) 자외선 공정효율 평가를 통한 최적 소독능 인증기준 제시, 물환경학회지, 2009, pp.337～338

4. 박재형(1997) 자외선을 이용한 하수처리수의 소독효율에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교

5. 신동호, 김진현, 김정민, 고승민(2004) 하수방류수의 자외선 살균을 위한 설계인자 최적화에 관한 연구, Applied Chemistry, 8(2), pp.697～700

6. 염철민, 김도겸, 정광열, 유양수, 조창현(2003) 국외 먹는물 자외선 소독 법규, 상하수도학회지, 17(6), pp.741～747

7. 염철민, 조순행, 전해웅, 정현미, 윤제용(2001) 하수소독을 위한 자외선의 Bacillus subtilis spore 불활성화 특성, 상하수도 학회지, 15(4), pp.293～301

8. 이경혁, 임재림(2006) 국내 자외선 소독공정 도입방안, 환경관리 연구소, 첨단환경기술, 12(3), pp.2～7

9. 이석헌(2002) 수처리를 위한 자외선 소독기술의 현황과 전망, 대한상하수도학회, 공동춘계학술발표회논문집, pp.33～35

10. 환경부 상하수도종합정보시스템(푸르누리) 하수도 통계 과거자료(2004~2008) www.info.waternow.go.kr

11. Battigelli. D. A, Sobsey. M. D, Lobe. D. C(1993) The Inactivation of Hepatis A Virus and Other Model Viruses by UV Irradiation, Water Science Technology, 27(3-4), pp.339~342

12. Blatchley Ⅲ E.R(1997) Numerical modelling of UV intensity : Application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems, Water Research, 31(9), pp.2205~2218

13. 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

14. Chai. J. Y, Kim. N. Y, Guk. S. M, Park. Y. K, Seo. M, Han. E. T and Lee. S. H (2001) High Prevalence and Seasonality of Cryptosporidiosis in a Small Rural Village Occupied Predominalty by Aged People in the Republic of Korea, Am. J. Trop. Med. Hyg., 65(5), pp.518~522

15. Linden. K. G, Shin. G. A, Faubert. G, Cairns. W and Sobsey. M. D(2002) UV disinfection of Giardia lamblia Cysts in Water, Environmental Science and Technology, 36, pp.2519~2522

16. Loge. F. J, Emerick. R. W, Heath. M, Jacangelo. J, Tchobanoglous. G and Darby. J. L (1996) Ultraviolet disinfection of secondary wastewater effluents : prediction of performance and design, Water Environment Rersearch, 68(5) pp.900~916

17. Mackey. E. D, Hargy. T. M, Wright. H. B, Malley. J. P. Jr., Cushing. R. S(2002) Comparing Cryptosporidium and MS2 bioassays - implications for UV reactor validation, American Water Works Association Journal, 94(2), pp.62～69

18. Passantino. L, Malley. J. Jr., Knudson. M, Ward. R and Kim. J(2004) Effect of low turbidity and algae on UV disinfection performance, American Water Works Association Journal, 96(6), pp.128～137

19. Sobsey. M. D(1989) Inactivation of health-related microorganisms in water by disinfection process, Water Science Technology, 21(3), pp.227～231

20. Tobin. R. S, et al(1983) Methods for Testing the Efficacy of Ultraviolet Light Disinfection Devices for Drinking Water, Journal AWWA, 75(9), pp.481～484

21. U.S.EPA(2003) Equipment verification testing plan for ultraviolet radiation technologies for inactivation of microbiological contaminants, Washington DC, USEPA

23. U.S.EPA(2003) Ultraviolet Disinfection Guidance Manual, EPA 815-D-03-007, pp.335～340

24. U.S.EPA(2006) Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the final Long term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule, Washington DC, USEPA

25. Wait. I. W, Johnston. C. T, Blatchley. E. R(2007) The influence of oxidation reduction potential and water treatment processes on quartz lamp sleeve fouling in ultraviolet disinfection reactors, Water Research, 41(11), pp.2427～2436

26. Wiedenmann. A, Fischer. B, Straub. U, Wang. C.-H, Flehmig. B, Schoenen. D(1993) Disinfection of Hepatis A Virus and MS-2 Coliphage in Water by Ultraviolet Irradiation : Comparison of UV-Susceptibility, Water Science Technology, 27(3-4), pp.335~338

감사의 글

석사 생활 내내 부족한 점이 많은 저에게 아낌없는 관심과 크나큰 배려를 보여주신 지도교수님이신 김성홍 교수님께 큰 감사를 드립니다. 교수님을 대학 1학년에 처음 뵈었을 때가 생각이 납니다. 모두가 어려워하는 과목을 항상 쉽게 설명을 해주시고 학생들이 좋아하는 1순위 교수님. 그런 교수님이 좋아 교수님께 칭찬을 받고 싶었던 저. 이제는 석사생과 지도교수님으로 새로운 관계에서 2년을 보내며 더욱 교수님을 우러러 보게 되었습니다. 2년 동안 교수님의 지식을 배우려고, 채우려고 노력을 많이 했지만 아직도 1/100도 얻지 못했습니다. 하나를 배우면 또 새로운 하나가 생기게 되었습니다. 그런 교수님은 저의 영원한 Mentor이자 정신적 지주이십니다. 항상 끊임없이 학문연구에 몰두하시는 모습 제 가슴속에 평생을 두고 새겨 배우고 또 실천하여 교수님을 본받도록 노력하겠습니다.

또한, 조선대학교 토목공학과를 발전을 위해 후진양성에 힘쓰신 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 바쁘신 와중에도 항상 학생들은 위해 아낌없는 조언과 격려를 해주시고 언제나 아버지처럼 인자하게 제 이름을 부르시면서 많은 말씀을 해주신 박길현 교수님, 밝은 미소를 항상 지으시며 모르는 것은 알 때까지 지도해주신 김운중 교수님, 그리고 지금은 외국에서 연구하시고 계시는 박정웅 교수님, 늦은 밤까지 항상 홀로 연구실 불은 밝히시며 연구하시는 김대현 교수님, 그리고 측량을 새로이 맡으신 이원희 교수님께 깊은 마음으로 감사드립니다.

그리고 2년간 실험실에서 욱하는 성질 참아내며 묵묵히 지켜봐주고 도와준 맹선이 항상 고맙다. 나보다 더 늦게 시작한 공부 열심히 해야죠~ 길룡이형, 12층을 지키고 있는 말 안 듣는 광기, 경호! 길룡이형 말 잘 따르고 성격 좋은 형 옆에서 고생했어. 잘 보이지 않았던 대영이도 어딘가에서 묵묵히 일하며 공부했을 거라고 생각한다. 나와 시작과 끝을 함께하는 승엽이도 어디서든 지금보다 더 열심히 하는 멋진 사람이 되길 바란다. 그리고 먼저 석사를 졸업한 나의 소중한 친구 장석인, 윤준현 내가 힘들 때 항상 옆에서 도와주고 고민도 들어주고 너무 고맙다.

늦게 시작하여 항상 부족하기만 한 제가 2년의 시간이 흘러 여기까지 오게 되었습니다. 제 곁의 친구들이 2년 동안 항상 했던 소리가 있습니다. “네가 석사를?”하며 항상 웃던 친구들입니다. 그런 친구들에게 저는 말했습니다. “공부는 때가 있다. 때를 놓치면 더 정

진해서 배워라." 배우면 배울수록 더 많은 것이 궁금해지는 것이 배움의 길이라고 생각됩니다. 늦게 시작한 공부 헛되이 되지 않도록 항상 배움의 자세를 잃지 않는 사람이 되겠습니다.

끝으로 사랑하는 아버지, 하늘에 계신 어머니, 큰누나, 매형, 작은누나, 막둥이, 이쁜 조카들, 사랑하는 가족이 있기에 석사과정을 마치게 되었습니다. 아들로서, 동생으로서, 오빠로서, 삼촌으로서 더 열심히 해서 크게 웃으며 살겠습니다. 이 논문을 마치기까지 옆에서 지켜봐주시고 도와주신 모든 분들께 다시 한 번 머리 숙여 감사의 말씀을 드리며, 앞으로 더욱 더 발전하는 사람, 부지런하고 후회하지 않는 사람이 되도록 노력하겠습니다.

저작물 이용 허락서

학 과	토목공학과	학 번	20097271	과 정	석사
성 명	한글 : 윤 정 원 　 한문 : 尹 廷 元 　 영문 : YUN, JEONG WON				
주 소	광주광역시 서구 화정동 삼익아파트 5-512호				
연락처	E-mail : yyjw38@nate.com				
논 문 제 목	(한글) 비접촉식 자외선 살균 모델의 개발과 설계인자에 관한 연구				
	(영어) A Study on the Development of Non-contact Type Ultraviolet Disinfection Model and its Design Factors				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

\- 다 　 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 　 반대(　)

2011년 2월

저작자 : 윤 정 원 　 (인)

조선대학교 총장 귀하