



저작자표시-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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

2011年 8月
석사학위논문

강도측정에 의한 비접촉식 자외선
살균 모델의 보정

조선대학교대학원

토목공학과

김 맹 선

강도측정에 의한 비접촉식 자외선
살균 모델의 보정

Calibration of a Non-contact type UV Disinfection
Model by Intensity Measurement

2011년 8월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

김 맹 선

강도측정에 의한 비접촉식 자외선
살균 모델의 보정

지도교수 김 성 홍

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 5월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

김 맹 선

김맹선의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 박길현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김운중 (인)

위 원 조선대학교 교수 김성홍 (인)

2011년 8월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 고찰	3
2.1 자외선의 특징과 살균 원리	3
2.2 영향인자	5
2.3 비접촉식 자외선 살균 모델	14
2.3.1 광학이론	14
2.3.2 자외선 분포 모델	18
2.3.3 비접촉식 모델의 전개	20
2.3.4 시뮬레이션 모델의 구성	24
제 3 장 실험 재료 및 방법	27
3.1 fouling 발생 실험	27
3.2 비접촉식 모델의 보정 실험	31
3.3 보정 및 검증 방법	36

제 4 장 결과 및 고찰	38
4.1 fouling 발생 실험	38
4.2 모델의 보정	42
4.3 모델의 검증	54
제 5 장 결 론	59
부 록	60
참 고 문 헌	64
감사의 글	68

표 목 차

표 2.1 T'10w 와 T'10q의 투과율	8
표 2.2 수중에서 병원성미생물의 자외선 민감도	11
표 2.3 미생물에 따른 광회복 유무	13
표 3.1 방류수 수질	28
표 3.2 fouling 실험 재료 및 장치	29
표 3.3 보정실험의 실험 재료 및 장치	34
표 3.4 시뮬레이션에 사용된 Parameter 값	35
표 4.1 램프의 효율 및 물의 투과율 변화에 따른 평균 상대오차(%) ...	46
표 4.2 최적지점 1%간격 평균 상대오차 값	48

그림 목 차

그림 2.1 빛의 파장별 스펙트럼	4
그림 2.2 각종 액체의 자외선 투과율의 예	8
그림 2.3 접촉식 UV조사 시스템에서의 굴절과 반사의 개념	14
그림 2.4 그림자 효과	17
그림 2.5 비접촉식 UV 소독 시스템에서의 굴절과 반사의 개념	22
그림 2.6 입력 데이터 worksheet 화면	25
그림 3.1 Fouling 실험 개략도	30
그림 3.2 ADAM Viewer 프로그램 task화면	31
그림 3.3 ADAM Viewer 컨트롤 화면	32
그림 3.4 비접촉식 자외선 보정 실험 장치 개요도	35
그림 3.5 비접촉식 자외선 반응조 상세도	36
그림 4.1 수돗물의 시간의 경과에 따른 자외선 강도 변화	38
그림 4.2 방류수의 시간의 경과에 따른 자외선 강도 변화	39
그림 4.3 방류수의 시간의 경과에 따른 탁도 변화	40
그림 4.4 시간의 경과에 따른 수돗물 및 방류수 평균 자외선 강도 변화 ..	41
그림 4.5 비접촉식 모델 모의조건 효율 30%, 투과율 85%	42
그림 4.6 보정실험에서 xy 평면의 자외선 강도 분포	43
그림 4.7 보정실험에서 yz평면의 자외선 강도 분포	43
그림 4.8 보정실험에서 y축 방향의 자외선 강도	44
그림 4.9 보정실험에서 z축 방향의 자외선 강도	45
그림 4.10 램프의 효율 및 투과율 변화에 따른 평균 상대오차 변화 ..	47

그림 4.11	최적지점 1% 간격 모의 결과	49
그림 4.12	최적 모의조건에서 실측값과 계산값의 비교	50
그림 4.13	최적 모의조건에서 xy 평면의 자외선 강도	51
그림 4.14	최적 모의조건에서 yz평면의 자외선 강도 분포	51
그림 4.15	최적 모의조건에서 y축 방향의 자외선 강도	52
그림 4.16	최적 모의조건에서 z축 방향의 자외선 강도	53
그림 4.17	검증 - 최적 모의조건외 실측값과 계산값의 비교	54
그림 4.18	검증 - xy 평면의 자외선 강도 (z = 18cm 지점)	55
그림 4.19	검증 - yz 평면에서 자외선 강도 (x = 8cm 지점)	55
그림 4.20	검증 - y축 방향의 자외선 강도	56
그림 4.21	검증 - z축 방향의 자외선 강도	57

ABSTRACT

Calibration of a Non-contact type UV Disinfection Model by Intensity Measurement

Kim, Maeng Sun

Advisor : Prof. Kim, Sung Hong, Ph.D

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Now a days, disinfection of effluent from wastewater treatment facility is obligation in Korea. Ultraviolet(UV) disinfection is one of the useful alternative comparing 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 one of the most common and fatal deficit 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. Based on optical laws and other UV distribution models, a detailed mathematical model for a non-contact type UV disinfection system was developed. Optical properties of refraction, reflection and absorption of UV light were included in this model and reflection of ceiling wall was added. The purpose of this study is to calibrate and to verify the simulation model. Fouling on the quartz sleeve was investigated by conducting submerged UV disinfection system.

The followings were obtained as results. Fouling occurred in the submerged system whether the circulation is performed or not but the fouling rate was

high when the recirculation was not performed. Without recirculation, the UV attenuation by fouling was up to 56% for 7 days of operation. An experiment using lab-scale non-contact type of UV disinfection module was carried out to calibrate and verify the parameters using by the simulation model. Two parameters of UV lamp efficiency and UV transmittance of water were selected as calibration parameters. Based on the intensity measurements and simulation results, the calibrated values of two parameters which minimize the relative errors between the measuring intensity and simulation results are suggested in this study. The best fit UV lamp efficiency was 43% and while the UV transmittance of water was approximately 100%. The average relative error was 12.8% in this calibration. Verification was made by applying these calibrated values to the another design module which is different to that used in calibration experiment. The experimental data and the simulation results were also good correlated and the average relative error was 8.5% in this case.

Keywords : non-contact, fouling, UV lamp efficiency, UV Transmittance, calibration

제 1 장 서 론

최근 들어 병원성 미생물의 상수원 유입을 근원적으로 차단하기 위하여 하수처리 시설의 방류수 수질 기준에 대장균군수 항목이 신설되었다. 수중의 미생물을 살균하는 방법에는 염소(Cl_2), 클로라민(Chloramine), 이산화염소(ClO_2), 오존(O_3)등 화학약품을 이용한 처리 방법과 UV조사 및 분리막 공정을 이용한 물리적 방법이 있다. 정수처리 공정에서 가장 광범위하게 사용되던 방법은 염소 소독법으로 가격이 저렴하고 잔류성이 높은 특징을 가지고 있어 가장 대표적인 소독제로 사용되어 왔다. 하지만 수돗물의 바이러스 검출 사건 및 지아디아, 크립토스포리디움과 같은 병원성 원생동물들이 원수에서 검출됨에 따라 소독의 중요성은 날로 증가하고 있다. 특히 최근 발견되는 병원성 바이러스 및 원생동물은 기존의 염소 소독에 강한 내성을 가지고 있어 기존 공정에서 높은 소독 효율을 기대하기가 힘들었다. 염소 소독의 경우 먹는 물을 생산하기 위한 원료라고 할 수 있는 하천수와 같은 자연수중의 유기물(NOM, natural organic matter)과 반응하여 발암물질로 알려진 THMs(Trihalomethanes), HAAs (Haloacetic Acids)등 다양한 유해물질을 생성하는 문제점을 나타내었다. 또한 염소는 취급 및 저장이 용이하지 않고 사용상의 안전 문제가 존재하여 새로운 대체 살균 기술이 요구되어 왔다.

이후 염소를 주된 소독제로 사용해왔던 지역에서는 오존(O_3), 이산화염소(ClO_2), 클로라민(Chloramine), UV등 다양한 대체 소독법에 대한 사용성의 검토가 진행되었다. 오존(O_3)의 경우 강력한 산화력을 가지고 있지만 bromate라는 부산물을 생성하고 취급이 용이하지 않고, 클로라민은 살균력이 염소에 비해서 매우 낮아 사용이 상대적으로 적었다. 이산화염소의 경우 THM을 생성하지는 않지만 이산화염소의 생산과정에서 발생하는 chlorate가 문제가 되었다. 이렇게 염소이외의 소독제를 선택할 경우에도 유해한 부산물로부터 자유로울 수 없음이 밝혀졌다(이석현, 2002).

UV소독은 이미 19세기 말에 살균효과가 인정되었고 1901년에 Hewitt에 의해 수은 증기 램프와 석영을 이용한 자외선 발생장치가 개발되어 자외선 소독의 길이 열렸다. 그러나 안정성 및 비용, 염소의 등장으로 인해 그 실용화가 보류되어 왔으나 최근에 비교적 간단한 설비로 살균목적을 달성할 수 있어서 주목을 받기 시작하였다. 특히 하수처리 방류수의 UV에 의한 살균기술은 1980년 초 미국의 EPA가 중심이 되어 연구가 진행되어 1986년 UV에 의한 하수 방류수 살균에 대한 설계 지침서가 완성되면서 본격적인 상업화가 진행되었다.

국내의 경우 2008년 말 가동되는 53%의 하수처리 시설이 자외선 살균을 채택하고 있다(환경부, 2004~2008). 그렇지만 현재 가동되고 있는 하수처리시설에 설치되어 있는 자외선 소독장치를 살펴보면 단순히 자외선램프를 침지시켜 놓은 형태이거나, 관 내부에 밀폐형 구조로서 내부의 살균 정도를 파악하기 어렵게 설치되어 있다. 하수처리시설의 경우 상수와는 달리 많은 부유물과 미생물, 유·무기물이 혼재하기 때문에 침지형 자외선 소독장치는 램프의 표면이나 수정관 표면에 fouling이 발생하는 것은 피할 수가 없다.

본 연구에서는 하수처리장 방류수 설비 내에 침지형 UV 램프를 설치할 경우 fouling 발생에 의한 자외선 강도 감소를 알아보기 위해 실험실 규모의 자외선 설비를 설치하고 실험을 실시하였다. 또한 비접촉식 자외선 살균 모델의 보정을 위하여 실험실 규모의 비접촉식 반응조를 제작하고 하고, 3차원의 자외선 강도를 측정할 수 있는 장치를 제작하고 각각의 포인트 마다 자외선 강도를 측정하였다. 측정된 결과를 광학 모델에 기초한 비접촉식 자외선 살균 시스템의 수학적 모델과 비교하고 보정 및 검증을 실시하였다. 보정을 위한 인자로서 자외선의 발생 효율 및 물속에서의 자외선 투과율을 사용하였다.

제 2 장 이론적 고찰

2.1 자외선의 특징과 살균 원리

자외선은 태양으로부터 지구에 도달하는 빛의 일부분으로서 가시광선보다는 짧은 파장을 갖고 있으며 X-선보다는 긴 파장을 갖고 있다. 자외선은 파장에 따라 UV-A, UV-B, UV-C, 진공자외선(Vacuum UV)으로 구분된다. UV-A선(315~400nm)은 Black Light 라고도 하며, 오존층에 흡수되지 않는다. 파장영역이 0.32~0.40 μ m에 해당하는 자외선 UV-A는 UV-B에 비하여 에너지량이 적지만 피부를 그을릴 수 있다. 피부를 태우는 주역은 UV-B이지만 UV-A는 피부를 별경게 만들 뿐 아니라 피부 면역 체계에 작용하여 피부 노화에 따른 장기적 피부 손상을 일으킬 수 있다. UV-B선(280~315nm)은 Dorno선이라고 부르며, 대부분은 오존층에 흡수되지만, 일부는 지표면에 도달한다. 지구에 극소량이 도달하는 UV-B는 파장영역이 0.28~0.32 μ m에 해당하는 자외선이다. UV-B는 동물체의 피부를 태우고 피부 조직을 뚫고 들어가며 때로는 피부암을 일으키는데, 피부암 발생의 원인은 대부분 태양 광선의 노출 및 UV-B와 관련이 있다. 또, UV-B는 피부에서 프로비타민 D를 활성화시켜 인체에 필수적인 비타민 D로 전환시킨다. Germicidal선이라고도 불리는 UV-C(200~280nm)선은 오존층에 완전히 흡수되며, 파장영역이 0.20~0.29 μ m인 자외선 중 UV-C는 염색체 변이를 일으키고 단세포 유기물을 죽이며, 눈의 각막을 해치는 등 생명체에 해로운 영향을 미친다. 다행히 UV-C로 알려진 이 범위의 자외선은 성층권의 오존에 의해 거의 모두 흡수된다. 진공자외선은 파장이 짧아 투과력이 극히 약하며 우주공간에서 존재하는 자외선이다. 자외선의 살균 효과는 자외선 파장 중에서도 주로 200~280nm사이의 UV-C영역에 의해 발생한다.

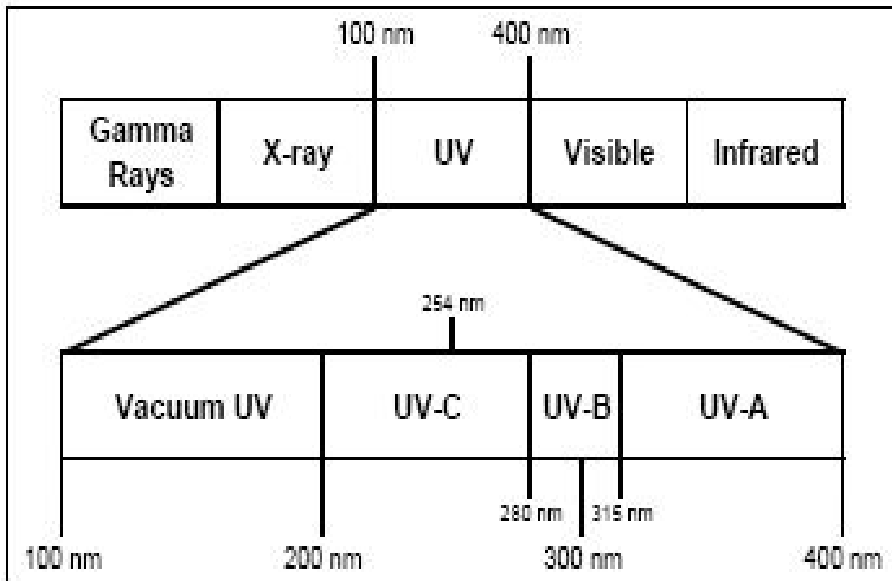


그림 2.1 빛의 파장별 스펙트럼 (EPA, 2006)

이러한 자외선램프에는 3가지 종류가 있는데 저압-저강도 자외선램프, 저압-고강도 자외선램프, 중압-고강도 자외선램프이다(장인성, 김준영, 2005). 저압-저강도 램프는 살균용 자외선 에너지 발생 장치로 주로 사용되며 또한 수은을 이용한 저압수은 램프이다. 수은 램프는 살균효과가 가장 높은 적정한 범위 (250~270nm)내의 파장인 253.7 nm에서 85% 정도의 광선출력을 내기 때문에 주로 사용되고 있다. 자외선 에너지를 생산하기 위하여 수증기가 들어 있는 램프들은 전기 아크를 일으키면서 방전한다. 램프 안에 있는 수은증기의 들뜬상태로부터 발생된 에너지에 의하여 자외선 광이 방출된다. 살균효과가 가장 좋은 파장대는 260nm부근으로 알려져 있으며 저압-저강도 자외선램프는 기본적으로 254nm의 단일 파장을 방출하는데, 수은-아르곤 램프가 UV-C 방출에 이용이 된다. 이 램프는 표면 온도 40℃, 내부 압력 0.007mmHg에서 최적으로 작동된다. 약 85~88%정도가 254nm의 단파장으로 방출되며 이는 살균에 있어 가장 좋은 효과를 나타낸다. 또한 이 램프는 산업에 가장 보편적으로 써왔던 램프로써 형광등보다 지름이 적고 효율은 높다.

산업화가 진행됨에 따라 자외선의 응용과 규모가 거대해지고 있다. 하·폐수 방류수 살균의 경우 하루 수십 만 톤의 방류수를 살균하기 위해서는 램프 1개의 용량과 효율

을 극대화할 필요성이 제기되었으며, 이러한 요구에 부응하여 개발된 램프가 저압-고강도 램프이다. 저압-고강도 램프는 수은 대신 수은-인듐 아말감을 사용한다는 것을 제외하고는 저압-저강도 자외선램프와 유사하며, 저압-저강도 램프에 비해 높은 전류와 0.001~0.01mmHg의 압력이 필요하다. 일반적으로 수은 아말감은 UV-C의 출력을 저효율 램프의 2~4배 정도 크게 할 수 있다.

중압-고강도 자외선램프는 지난 10년간 발달해 왔으며 다파장(185~600nm)이라는 특수성이 있으며, 600~800℃의 온도와 $10^2 \sim 10^4$ mmHg의 압력에서 운전된다. 전체 에너지의 약 27~44%정도가 살균력이 있는 UV-C 범위이며 출력의 7~15%만이 254nm의 파장을 방출한다. 그러나 전체 UV-C 출력은 저압-저강도 램프에 비해 약 50~100배 크다. 이 램프의 작용은 적은 램프 숫자와 접촉시간의 감소로 다량의 하수나 우수, 공간이 협소한 현장에서 사용된다. 그러나 램프의 수명이 짧고 에너지 손실이 크기 때문에 특수한 목적이 아니면 경제성이 떨어진다. 하지만 향후 램프 제조기술의 발달에 의해 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대 된다.

자외선은 세포의 유전정보를 갖는 유전자인 핵산의 DNA를 손상시키는 것에 의해 살균력을 발휘한다. DNA 대신에 RNA에서 생성되는 바이러스의 경우는 RNA에 작용하여 효과를 나타낸다. 자외선은 핵산(DNA, RNA)의 불포화 결합에 작용하는 것으로 알려졌다. 즉 핵산의 주요 구성성분인 아데닌, 시토신, 구아닌, 티민, 우라실의 4가지 염기성분을 연결해주는 이중결합에 자외선이 작용하는 것이다. 이들 염기의 이중결합에 자외선이 조사되면, 티민-티민, 티민-시토신, 시토신-시토신, 우라실-우라실과 같은 이중체를 형성시킨 결과 핵산이 갖는 복제 능력을 일게 하여 생물의 불활성화를 초래하게 되는 것이다.

2.2 영향인자

자외선 살균장치의 설계나 성능에 영향을 주는 인자로는 자외선 출력 및 밀도, 조사량 등의 기계적 특성과 탁도, SS, 자외선 흡광도와 같은 수질 특성이 있다. 특정 유기·무기 화합물은 254nm의 파장을 흡수하고 산란시키는 등 자외선이 미생물에 도달하는 것을 방해하는데 이렇게 처리수내의 탁도 유발물질과 자외선 흡광도는 자외선램프의 강도 및 자외선 살균 장치의 규모를 결정하는데 주요한 인자로 작용한다. 이외에 하수 살균에 있어서 자외선 조사에 따른 주요 영향 인자는 다음과 같다.

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^2 당 마이크로와트($\mu W/cm^2$) 또는 단위 cm^2 당 밀리과트(mW/cm^2) 등이다. 자외선의 강도는 역제곱 법칙(Inverse Square 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 $40 mJ/cm^2$ 의 자외선 주입률인 경우 대부분의 수인성 전염병균을 4-Log 까지 불활성화할 수 있다고 하였고, 아데노바이러스(adenovirus)는 자외선 살균에 대한 저항성이 강해서 $186 mJ/cm^2$ 의 주입률이 필요하다고 하였다. 일반적인 상수의 살균에서 자외선 주입률은 $4.0 \times 10^{-2} Ws/cm^2$ 정도이고 이 때 2-Log 정도의 살균력을 보인다.

④ 자외선 투과율

자외선 살균에 가장 영향을 미치는 수질 항목은 자외선 투과율이다. 자외선 투과율이 나쁜 물의 경우, 조사된 자외선이 목표에 도달하기 전에 처리수 자체에 의해 감소되어 필요한 자외선 조사량을 얻을 수 없기 때문이다. 자외선 투과율은 수중의 부유물질, 철 이온과 같은 자외선 흡수성물질의 존재에 의해 변화한다. 그림 2.2에서 자외선 투과율과 액체의 깊이와의 관계는 Lambert-beers의 법칙에 의해 나타나고, 한 점에서의 측정에 의해 임의의 깊이에 있어서 도달자외선의 조사량을 예측할 수 있다.

$$\log_{10} I_0 / I = \epsilon cl \quad (2)$$

ϵ : 흡광계수

l : 광로길이

c : 용액의 농도

I_0 : 용액에 입사하는 빛의 강도

I : 용액을 통과한 빛의 강도

물의 자외선 투과율은 보통 입사광선이 어떤 정해진 길이(L)를 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.

$$T(\%) = 100 \cdot 10^{-A/L} \quad (3)$$

자연적으로 존재하는 유기물이나 무기물들은 UV과장의 에너지를 흡수하므로, 이들은 자외선의 투과율을 감소시키고, 자외선 소독 시스템에서 소독의 효율을 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 그림 2.2과 같이 자외선은 물속에서 투과율 및 깊이에 따라 UV의 조사율은 크게 달라진다. 문헌상에 나타난 자외선 투과율은 다음 표 2.1과 같이 사용하고 있다.

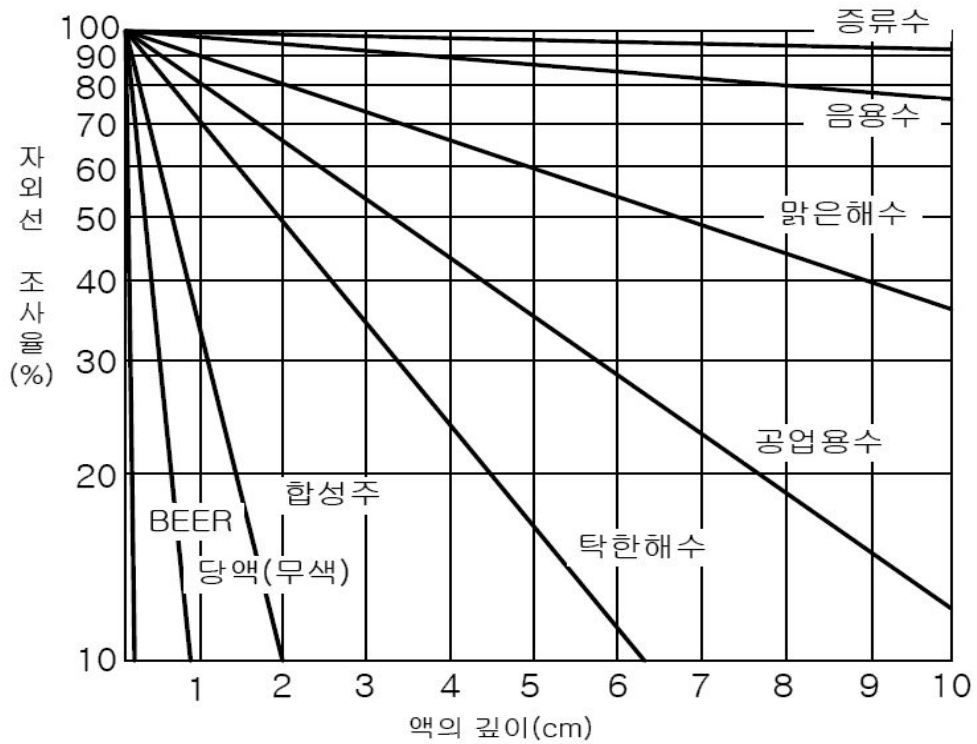


그림 2.2 각종 액체의 자외선 투과율의 예 (환경부, 2004)

표 2.1 T'_{10_w} 와 T'_{10_q} 의 투과율

T'_{10_w}	T'_{10_q}	references
65%	71%	1995. Blatchley
97.1%	-	1997. Blatchley
65%	50%	1999. chiu
91.4%	-	2005. Bohrerova

T'_{10_w} : 물의 자외선 투과율

T'_{10_q} : 수정의 자외선 투과율

⑤ 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 수정관에 침적되거나 생물막을 형성하게 되고, 이로 인해 UV의 조사량은 감소하게 된다.

무기물이 자외선 fouling에 영향을 미치는 것에 대해서 Lin 등(1999)은 다음과 같은 실험을 실시하였다. Lab 실험에서는 우물물을 순환하여 실험하였고, 두 번째 실험에서는 침전물 생성을 억제하기 위해 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 를 증가시킨 탈이온수를 순환시켰다. 현장실험은 4개의 하수처리장에서 실시되었는데 각각의 방류수는 고경도, 고알루미늄, 고철의 특성을 가지고 있다. Lab 실험은 10일간 진행하였고, 현장실험은 자외선이 최초의 40% 이하로 떨어질 때까지 진행하였다.

결과는 다음과 같았다. 원수는 Ca, Na, Mg이 주를 이루고 약간의 K이 있으며 Al과 Fe는 검출되지 않을 정도로 저 농도이었으나, fouling 물질을 보면 Ca 다음으로 Fe, Al 순으로 많이 축적되었다. 그러므로 Fe와 Al이 fouling 침전물을 형성하는데 충분한 것으로 나타났다.

Tipton 처리장의 예를 보면 fouling 물질이 축적된 양을 보면 자외선램프를 켜고 램프를 켜고 있을 때 보다 훨씬 많으며 자외선 조사가 무기물질의 fouling을 촉진하는 것을 알 수 있다. 이것은 대다수의 금속-리젠드 결합이 온도가 올라갈수록 용해도가 낮아지는데 자외선램프에서 발생하는 열에 의해 용해도가 낮아졌기 때문으로 보인다. DOC(용존유기탄소)는 7~10mg/L 정도를 보이고, Fe와 Al이 complex를 형성하는 것으로 보인다. 또한 Fe, Al이 인산염과 화합물을 만들고 침전물을 형성하는데, 이들이 탄산칼슘 침전물의 seed로 사용되어 침전물 형성을 촉진하는 것으로 생각된다.

인 제거를 위해 사용되는 Fe와 Al은 fouling을 촉진하며, 유체의 전단력은 콜로이드 입자의 퇴적에 영향을 주고 무기물의 fouling에 기여한다. 자외선 조사가 없을 때 수정관에는 유기물질 fouling이 빠르게 생성된다. 하지만 유기물질의 fouling은 무기물질과 비교해서, 수정관 표면에 약하게 부착되어 있다. 자외선을 조사하면 유기물 축적은 빠르게 감소하는 반면, 무기물의 fouling은 증가한다. 무기물질 fouling은 주로 열에 기인한(thermally-induced) 침전물로 보이며, fouling 반응속도는 0차 반응이었다. 특히, 수정관을 6등분하여 분석한 결과에서는 자외선이 없는 양쪽 끝 부분에 TOC(총유기탄소)

가 높게 나타나는 반면, 자외선이 방출되는 부분의 TOC(총유기탄소)는 낮게 나타나 자외선이 유기물 축적을 방해하는 것으로 나타났다. 별도로, 자외선램프 대신에 아르곤 램프를 설치한 실험에서는 무기물질의 fouling을 해석할 수 없을 정도로 미생물막이 매우 두껍게 형성되었다.

⑥ 미생물의 종류와 농도

미생물마다 자외선에 대한 내성이 다르므로 소독 효율에도 차이가 있다. 문헌상으로 보고되고 있는 자외선에 대한 미생물의 민감도는 표 2.2와 같다. 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. 한 예로 원생동물인 크립토스포리디움이나 지아디아의 경우 3-log 제거율인 99.9%일 때의 자외선 조사량은 다음과 같다. 크립토스포리디움과 지아디아의 경우 $6\text{mJ}/\text{cm}^2$ 이상 자외선을 조사해야 불활성화가 진행이 되었다.

표 2.2 수중에서 병원성미생물의 자외선 민감도

Microorganism	Type	UV Dose (mJ/cm ²) inactivation indicated			
		1-log	2-log	3-log	4-log
Aeromonas hydrophila	Bacteria	1.1	2.6	3.9	5
Campyobacter jejuni	Bacteria	1.6	3.4	4	4.6
Escherichia coli O157:h7	Bacteria	1.5	2.8	4.1	5.6
Legionella pneumophila	Bacteria	3.1	5	6.9	9.4
salmonella anatum	Bacteria	7.5	12	15	
salmonella enteritidis	Bacteria	5	7	9	10
salmonella typhi	Bacteria	1.8	4.8	6.4	8.2
salmonella typhimurium	Bacteria	2	3.5	5	9
Shigella dysenteriae	Bacteria	0.5	1.2	2	3
Shigella sonnei	Bacteria	3.2	4.9	6.5	8.2
Staphylococcus aureus	Bacteria	3.9	5.4	6.5	10.4
Vibrio cholerae	Bacteria	0.8	1.4	2.2	2.9
Yersinia enterocolitica	Bacteria	1.7	2.8	3.7	4.6
Adenovirus Type 40	virus	30	59	90	120
Adenovirus Type 41	virus	22	50	80	
Coxsackievirus B5	virus	6.9	14	21	
Hepatitis A HM 175	virus	5.1	14	22	30
Hepatitis A	virus	55	9.8	15	21
Hepatitis A HM 175	virus	4.1	8.2	12	16
Poliovirus Type1	virus	4.0	8.7	14	21
Poliovirus Type1	virus	6	14	23	30
Poliovirus Type1	virus	5.6	11	16	22
Poliovirus Type1	virus	5.7	11	18	13
Roliovirus SA11	virus	7.6	15	23	
Roliovirus SA11	virus	7.1	15	25	
Roliovirus SA11	virus	9.1	19	26	36
Cryptosporidium parvum	Protozoa	< 2	< 3	< 5	
Cryptosporidium parvum	Protozoa		< 3	< 6	
Giardia lamblia	Protozoa	< 1			< 2
Giardia lamblia	Protozoa	< 1	< 3	< 6	

- 환경부 (2004)

⑦ 조사량(UV dose)

살균효과는 미생물에 의해 흡수되는 에너지양으로 결정이 된다. 자외선 소독의 경우 이 에너지양은 자외선 조사량(UV dose)이며, 다음과 같이 자외선 강도와 조사시간의 곱으로 나타낸다.

$$D = I \cdot t \quad (4)$$

여기서, D : 자외선 조사량($\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 또는 $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 또는 J/m^2)

I : 자외선 평균강도($\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 또는 mW/cm^2)

t : 조사시간(s)

조사량에 대한 미생물의 제거율은 초기 농도에 대한 자외선 조사후의 농도비, 즉 생존율(S)로서 나타내는 경우가 많으며 생존 미생물의 절대치를 측정하는 것에 비하여 소독시스템 제어와 다른 시스템과의 비교가 간단해진다는 이점이 있다. 보통 이 값은 상용로그 값으로 표현하는 경우가 대부분이다.

$$S = \log \frac{[\text{자외선 조사후 생존 미생물 농도}]}{[\text{자외선 조사전 초기 미생물 농도}]} \quad (5)$$

⑧ 광회복(photoreactivation)

광회복이란 자외선 조사에 의하여 일단 손상을 입은 미생물이 근자외선 또는 가시광선에 일정시간 노출된 경우 다시 복체능력을 회복하여 증식하게 되는 현상을 말한다. 이 현상은 1949년에 Kelner이 자외선을 조사한 후 *Streptomyces griseus*가 510nm 이하 파장의 가시광선에서 활성이 회복되는 것을 발견한 것이 최초였다. 그 이후 E.coil (대장균)을 시작으로 여러 가지 미생물에서 광 회복현상이 인정되고 있다. 이러한 현상은 자외선 살균의 기본적 메커니즘이 ‘파괴’가 아니고 미생물의 ‘불활성화’인 것에서 초래한다. 단 이 회복은 효소반응에 의하고 효소를 필요로 한다. 바이러스에서는 그와 같은 효소를 스스로 합성 할 수 없기 때문에 광 회복현상은 볼 수 없다. 다만 숙주세포가 광회복을 하게 되면 바이러스가 그 세포내에서 증식하고, 바이러스가 외관상의 광회복을 한다고 볼 수 있다. 광회복이 일어나지 않게 하려면 충분한 자외선을 조사하여

야 한다. 하지만 광회복은 모든 미생물에서 일어나는 것은 아니라고 보고되어 있으며 이를 표 2.3에 나타내었다.

광회복 정도는 보통 광회복 비율을 상용로그로 나타낸 값을 사용한다.

$$\log\left[\frac{\text{광회복후의 미생물수}}{\text{광회복전의 미생물수}}\right] \quad (6)$$

Tchobanoglous 등(1991)의 보고에 의하면 Haris 등(1987)의 측정법에 따라 대장균이 3.4, 분변성 연쇄구균이 2.4, 총대장균군수 2.0, 분변성 대장균군수가 1.5였다고 한다. 광회복 정도는 미생물에 따라 다르며 일반적으로 자외선 조사량과 수온 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 처리수 수질 및 방류수 수역의 조건과 기후조건 등과 밀접한 관련이 있다. 광회복 역시 자외선 조사와 마찬가지로 광회복에 필요한 광선이 얼마나 미생물에 흡수되는냐에 따라 다르므로 깨끗하고 수심이 얕으며 흐름이 빠른 수역에서 더 활발할 것이다.

표 2.3 미생물에 따른 광회복 유무

광회복이 일어나는 미생물	광회복이 일어나지 않는 미생물
① Streptomyces 屬	① Haemophilus influenza
② Escherichia coli	② Diprococcus pneumoniae
③ Saccharomyces 屬	③ Bacillus subtilis
④ Aerobacter	④ Micrococcus rdiodurans
⑤ Micrococcus	
⑥ Erwinia 菌	
⑦ Proteus 屬	
⑧ Penicillum	
⑨ Neuerospora	

-박재형(1997)

2.3 비접촉식 자외선 살균 모델

2.3.1 광학이론

① 굴절

분포는 빛의 광학적 특성으로 해석될 수 있으며 다음과 같다(윤정원, 2011). 빛 또는 방사에너지가 서로 다른 굴절률을 가진 두 매질(media)을 통과할 때 굴절각도는 Snell's 법칙을 따르며, 다음과 같다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (7)$$

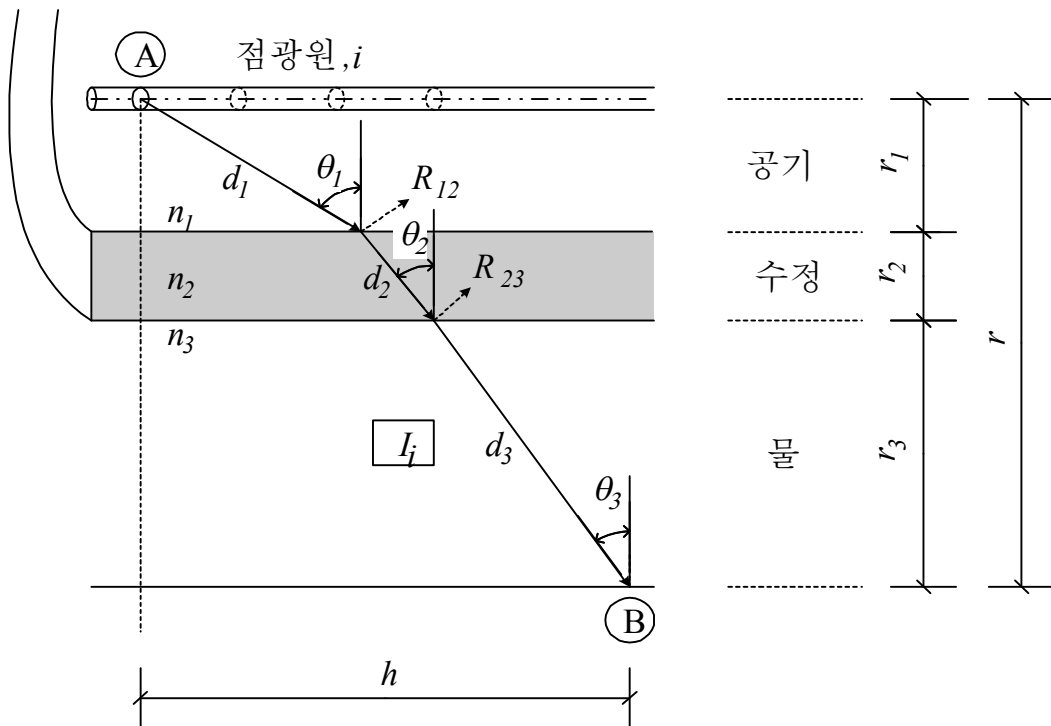


그림 2.3 접촉식 UV조사 시스템에서의 굴절과 반사의 개념 (윤정원, 2011)

수처리 자외선 시스템에서 자외선은 보통 물, 수정, 공기의 3개의 매질을 통과하게 되며, 다음과 같다(그림 2.3 참조).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 \quad (8)$$

따라서, 굴절각은 다음과 같다.

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (9a)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_3} \sin \theta_1 \right) \quad (9b)$$

여기에서 n 은 굴절률이며 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 (10)과 같다.

$$r_1 \tan \theta_1 + r_2 \tan \theta_2 + r_3 \tan \theta_3 = h \quad (10)$$

식 (9a)와 식 (9b)를 사용하여 θ_2 와 θ_3 는 θ_1 으로 나타낼 수 있고, 식 (10)에 식 (9a)와 식 (9b)를 적용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$r_1 \tan \theta_1 + r_2 \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} \right) \right\} + r_3 \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_3} \right) \right\} = h \quad (11)$$

식 (11)은 θ_1 의 단일변수만 있으므로 반복법과 같은 수학적 방법을 사용하여 풀 수 있다. 모든 굴절각을 알고 있기 때문에, 각 매질에서 빛의 통과거리는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$d_1 = r_1 / \cos\theta_1 \quad (12a)$$

$$d_2 = r_2 / \cos\theta_2 \quad (12b)$$

$$d_3 = r_3 / \cos\theta_3 \quad (12c)$$

② 반사

반사는 서로 다른 두 매질의 경계면에서 파동의 방향이 바뀌는 것을 말한다. 굴절율과 굴절각이 각각 n_1, θ_1 과 n_2, θ_2 인 두 매질에서 반사율(R)은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{2} [r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2] \quad (13a)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_2 + n_2 \cos\theta_1} \quad (13b)$$

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \quad (13c)$$

r_{\parallel} 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)를 통과할 때 감소한 정도 (U)는 다음과 같다.

$$U = \exp[-\alpha(\lambda) L] \quad (14)$$

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.

$$T_{10}' = 100 \cdot e^{-\alpha(\lambda)} \quad (15)$$

④ 그림자 효과

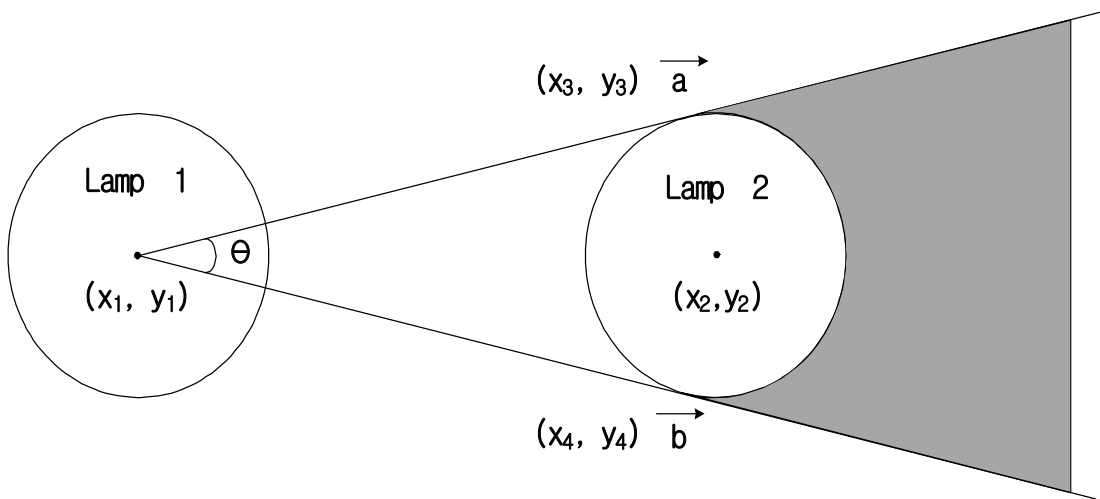


그림 2.4 그림자 효과 (윤정원, 2011)

그림자 효과(shadowing effect)는 2개 이상의 램프 설치되었을 경우 한 램프의 자외선이 다른 램프의 이면에는 도달할 수 없으므로 인해 자외선의 강도가 감소하는 것을 말한다. 단독 램프 시스템에서는 그림자가 생기지 않아 이 효과가 필요하진 않으나, 2개 이상의 램프인 경우에는 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.

$$\tan\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \quad (16)$$

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

2.3.2 자외선 분포 모델

① MPSS 모델

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

$$E = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (17)$$

MPSS모델은 선형의 자외선램프를 가정하고, 이 램프를 램프 축을 따라 n 개의 등간격으로 구분한 후 분할된 각 구획(segment, 이를 점원(point source)라 함)에서 동등한 동력이 방출된다고 간주하는 것이다. 각 점원의 출력은 P/n 이 된다. 램프 밖의 한 점에서의 동력은 n 개의 점원에서 방사되는 n 개의 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.

$$I = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{P/n}{4\pi d^2} \exp(-\alpha_w d_w) \exp(-\alpha_q d_q) \quad (18)$$

I : 한 점 광원으로로부터 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 통과한 거리(cm)

② MSSS 모델

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

$$I = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{P/n}{4\pi d^2} \exp(-\alpha_w d_w) \exp(-\alpha_q d_q) \cos\theta_1 \quad (19)$$

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

③ LSI 모델

Blatchley(1997)는 MPSS 모델에서 불연속의 n 개의 광원을 연속적인 함수로 표현한 LSI 모델을 제시하였고, 이 LSI 모델이 n 이 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.

$$I = \frac{P}{4\pi LR} \left[\tan^{-1} \left(\frac{L/2 + H}{R} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{L/2 - H}{R} \right) \right] \quad (20)$$

L : 램프의 길이(cm)

R : 한 점에서 램프에 이르는 연직 길이(cm)

H : 한 점에서 램프 중앙에 이르는 축(램프) 방향의 길이(cm)

2.3.3 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 2.6에서 굴절각, 조사거리와 수평거리 사이의 관계는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$r_1 \tan \theta_1 + r_2 \tan \theta_2 + r_1' \tan \theta_1 + r_3 \tan \theta_3 = h \quad (21)$$

그러므로, 앞의 식 (7) 또한 다음과 같이 정의된다.

$$(r_1 + r_1') \tan \theta_1 + r_2 \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} \right) \right\} + r_3 \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_3} \right) \right\} = h \quad (22)$$

식 (11)과 같이 식 (22)는 다음의 식을 사용하여 각각의 매질에서 빛의 통과 거리가 계산될 수 있다.

$$d_1 = r_1 / \cos\theta_1 \quad (23a)$$

$$d_2 = r_2 / \cos\theta_2 \quad (23b)$$

$$d'_1 = r'_1 / \cos\theta_1 \quad (23c)$$

$$d_3 = r_3 / \cos\theta_3 \quad (23d)$$

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 발생하는 한 점에서의 빛의 강도는 다음 식으로 계산되어질 수 있다.

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

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 (23a)~(23d)를 사용하여 계산되어질 수 있으며, 식 (24)를 이용하여 자외선 강도(I_i)를 계산할 수 있다.

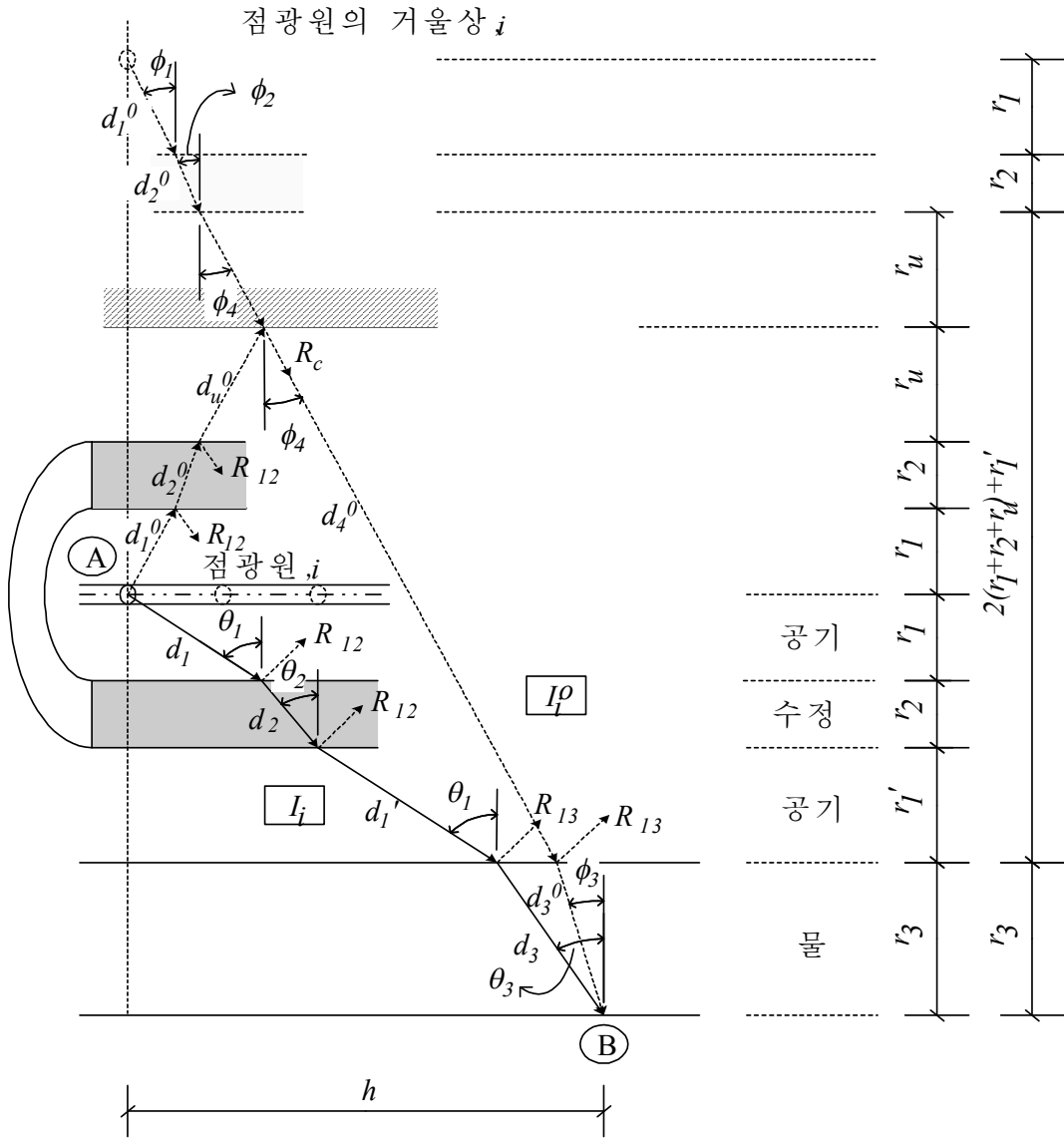


그림 2.5 비접촉식 UV 소독 시스템에서의 굴절과 반사의 개념 (윤정원, 2011)

다른 방법은 천정벽을 경유하는 것이다. 이 경우, 자외선 강도 (I_i^0)는 가상적인 광원으로 가정하여 추측할 수 있다. 그림 2.5에서 보이는 바와 같이, 반사되는 빛은 d_1^0 , d_2^0 , d_u^0 , d_4^0 , d_3^0 의 경로를 따른다. 굴절각과 지수사이의 관계는 식 (8)과 같으며, 굴절각과 조사거리, 수평거리의 관계는 식 (25)와 같다.

$$r_1 \tan \phi_1 + r_2 \tan \phi_2 + \{2(r_1 + r_2 + r_u) + r_1'\} \tan \phi_4 = h \quad (25)$$

각 ϕ_4 는 ϕ_1 과 같으므로, 식 (25)는 식 (26)으로 나타낼 수 있다.

$$\{r_1' + 2(r_2 + r_u) + 3r_1\} \tan \phi_1 + r_2 \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\sin \phi_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} \right) \right\} + r_3 \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\sin \phi_1 \cdot \frac{n_1}{n_3} \right) \right\} = h \quad (26)$$

각각의 매질에서 통과거리는 식 (27a)~(27d)를 사용하여 계산되어질 수 있다.

$$d_1^0 = r_1 / \cos \phi_1 \quad (27a)$$

$$d_2^0 = r_2 / \cos \phi_2 \quad (27b)$$

$$d_4^0 = \{r_1' + 2(r_1 + r_2 + r_u)\} / \cos \phi_1 \quad (27c)$$

$$d_3^0 = r_3 / \cos \phi_3 \quad (27d)$$

반사되는 빛의 반사는 4개의 경계면에서 이루어지며, $(1 - R_{12})^2(1 - R_{13})R_c$ 만큼 감소된다. R_c 는 천정벽면에서의 반사율을 말한다. 그러므로 점광원 A에서 발생하여 점광원 B에 도달하는 반사 자외선 강도는 식 (28)과 같이 예상되며, B에서 전체적인 강도는 식 (24)와 식 (28)의 합이다.

$$I_i^0 = (1 - R_{12})^2(1 - R_{13})R_c \frac{P/n}{4\pi(d^0)^2} \exp(-\alpha_2 d_2^0) \exp(-\alpha_3 d_3^0) \quad (28)$$

$$\text{총 강도 } I = I_i + I_i^0 \quad (28)$$

$d^0 = d_1^0 + d_2^0 + d_3^0 + d_4^0$: 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 (24)와 같다.

2.3.4 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 2.6에 입력 데이터 worksheet를 예시하였다.

Lamp	center position			electric power	UV efficiency	variable	value	description				
	x [cm]	y [cm]	z [cm]	S [mW]	eff_S [%]							
1	8	20	37.5	40000	30	Lx	16	Contactor length in x-direction, (x,y) plane perpendicular to UV lamp				
2						Ly	25	Contactor length in y-direction				
3						Lz	75	Contactor length in z(lamp)-direction				
4						Hy	16	Water depth in y-direction				
5						Rc	0	Reflection rate of ceiling wall				
6						dx	2	Computational element length in x-direction				
7						dy	2	Computational element length in y-direction				
8						dz	2	Computational element length in z-direction				
9						n_Lamp	1	Number of lamp installed				
10						L_Lamp	75	Length of UV Lamp				
11						n_seg	75	Number of finite segment of lamp				
12						r	1,225	Radius of quartz sleeve(outer)				
13						d_g	0,125	Thickness of Quartz sleeve				
14						shd_opt	0	Option for SHaDowing (0=no shadow, 1=shadow)				
15						fun_opt	2	Option for the intensity function(1=LSI, 2=MPSS, 3=MSSS)				
16						ceil_opt	0	Option for ceiling reflection(0=no reflection, 1=reflection)				
17						refl_opt	1	Option for reflection effect(0=no reflection, 1=reflection)				
18						refr_opt	1	Option for refraction effect(0=no refraction, 1=refraction)				
19						n_band	1	Number of bands of UV wavelength on (O2:S22) or (O24:S24)				
20						nstop_opt	1	Option for non-stop simulation(0=stop, 1=non-stop)				
21						rxn_opt	0	reaction simulation option(0=no simulation, 1=simulation)				
22						t_end	20	simulation end of time				
23						dt	2	incremental time step				
24						kd	0,23	reaction constant				
25						Co	1	initial concentration at t=0				
						order	1	reaction order (0 or n>= 1)				
						Exec. 1		Exec. 2		Exec. 3		
shd_opt	fun_opt	refl_opt	refr_opt	L_Lamp	dx	dy	dz	N_water	sum_L	avg_L	area_c	area_g
[0 or 1]	[1 - 4]	[0 or 1]	[0 or 1]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[mW/cm2]	[mW/cm2]	[%]	[%]
0	2	1	1	75	2	2	2	2072	1009,311	0,487119	100	98,82141
0	2	1	1	75	2	2	2	2072	1291,311	0,62322	100	98,82141
0	2	1	1	75	2	2	2	2072	1702,488	0,821664	100	98,82141
0	2	1	1	75	2	2	2	2072	2321,419	1,120376	100	98,82141

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 2.6 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

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.

제 3 장 실험 재료 및 방법

3.1 fouling 발생 실험

접촉식 UV 살균장치에서는 수정관과 물이 항상 접촉하고 있으므로 수정관 표면에 유·무기물질의 침적 및 fouling 발생은 피할 수 없다. 하수처리장 방류수 설비 내에 UV를 적용할 경우 fouling 발생을 알아보기 위해 실험실 규모의 장치를 설치하고 fouling 실험을 실시하였다. 실험은 총 2회로 진행되었으며, fouling 실험의 예비실험으로 수돗물을 사용하여 시간의 경과에 따른 자외선 강도 변화를 측정하였다. 예비 실험은 총 일주일간 실시하였으며, 하루에 한번 씩 자외선 강도를 측정하였다. 자외선 강도 측정은 햇빛에 의한 강도 측정 값 오차를 줄이기 위해 실험실 규모의 암실을 제작하여 실험을 실시하였다. 예비 실험 이후에 G하수처리장 방류수를 대상으로 하여, 자외선 강도 변화를 측정하였다. 방류수 fouling 실험을 실시하기 전 방류수에 대한 수질 실험을 실시하였다. 수질 실험은 탁도, pH, BOD, SS, CODmn, CODcr, NH₃-N, NO₃-N, TP, PO₄-P 총 10가지의 실험을 실시하였으며, 탁도의 경우 실험 당일부터 2일에 한번씩 측정을 실시하여 탁도 감소의 변화를 측정하였다. 방류수 수질은 다음 표 3.1과 같다. fouling 실험에 쓰인 반응조의 경우 55cm(W) × 45cm(L) × 95cm(H) 장방형이며, 자외선램프(FNSTECH(주))는 저압 수은 램프로서 40W, 85cm 길이의 램프를 사용하였다. 수정관(FNSTECH(주))의 경우 지름 2.45cm에 두께 0.125cm, 길이 85cm이며 형태는 튜브형이다. 예비 실험 결과 램프의 상부와 하부의 fouling 발생 정도가 달랐으며, 본 실험에서는 방류수의 유·무기 물질 및 부유물질들이 반응조 바닥면에 침적되는 걸 방지하기 위하여 반응조 바닥면에 수중펌프(영일, YI-200)를 설치하여 연속적으로 순환하도록 하였다. 또한 순환 라인에 유량계(cole-parmer사)를 설치하여 순환 유량을 14L/min으로 고정하였다. 자외선 강도 측정의 경우 1회 측정시 4곳의 강도를 측정하였는데 램프의 바닥면과 20cm, 40cm, 60cm의 높이에서 강도를 측정하였다.

표 3.1 방류수 수질

성분		측정값
탁도		21.9NTU
pH		7.1
BOD		4.56mg/L
SS	TSS	2.4mg/L
	FSS	15mg/L
	VSS	9mg/L
CODmn		48mg/L
CODcr	TCODcr	19.8mg/L
	SCODcr	20.5mg/L
N	NH ₃ -N	2.37mg/L
	NO ₃ -N	3.46mg/L
P	TP	2.0mg/L
	PO ₄ -P	0.6mg/L

실험의 정확성을 높이고 편의성을 위해서 반응조에 강도 측정기가 움직이지 않게 bar를 설치하였으며 자외선 강도 측정기에 눈금을 표시하여 매회 눈금 표시 부분을 측정할 수 있도록 하였다. 측정은 램프 표면에서 1cm 떨어진 곳을 측정하였다. 자외선 강도는 radiometer(Solar Light Company사, LM 100)를 사용하여 측정하였다. 측정기의 경우 램프의 처음 강도에서 줄어드는 강도를 백분율로 표시되기 때문에 실험 시작 단계에서 자외선 강도(mW/cm^2)측정하여 radiometer의 백분율과 비율을 맞추었으며, fouling 실험은 15일간 진행되었다. 침지형 UV 반응조 fouling 실험에 쓰인 실험 장치와 재료는 다음과 같다.

표 3.2 fouling 실험 재료 및 장치

	구분	제원
실험 1	반응조 크기	55cm(W) × 45cm(L) × 95cm(H) 장방형
	시료	수돗물
	자외선램프	85cm(L), 40W, FNSTECH(주)
	수정관	2.45cm(OD) × 0.125cm(T) × 85cm, 튜브형, FNSTECH(주)
	살균 방식	회분식(정치식)
	실험 기간	7일
실험 2	반응조 크기	55cm(W) × 45cm(L) × 95cm(H) 장방형
	시료	G 하수처리장 방류수
	자외선램프	85cm(L), 40W, FNSTECH(주)
	수정관	2.45cm(OD) × 0.125cm(T) × 85cm, 튜브형, FNSTECH(주)
	살균방식	회분식(강제 순환 방식)
	수중펌프	영일 나이아가라 YI-200, 220V, 양정 5m, 토출량 70L/min
	유량계	FLOWMETER 4-36LPM, cole-parmer
	실험 기간	15일

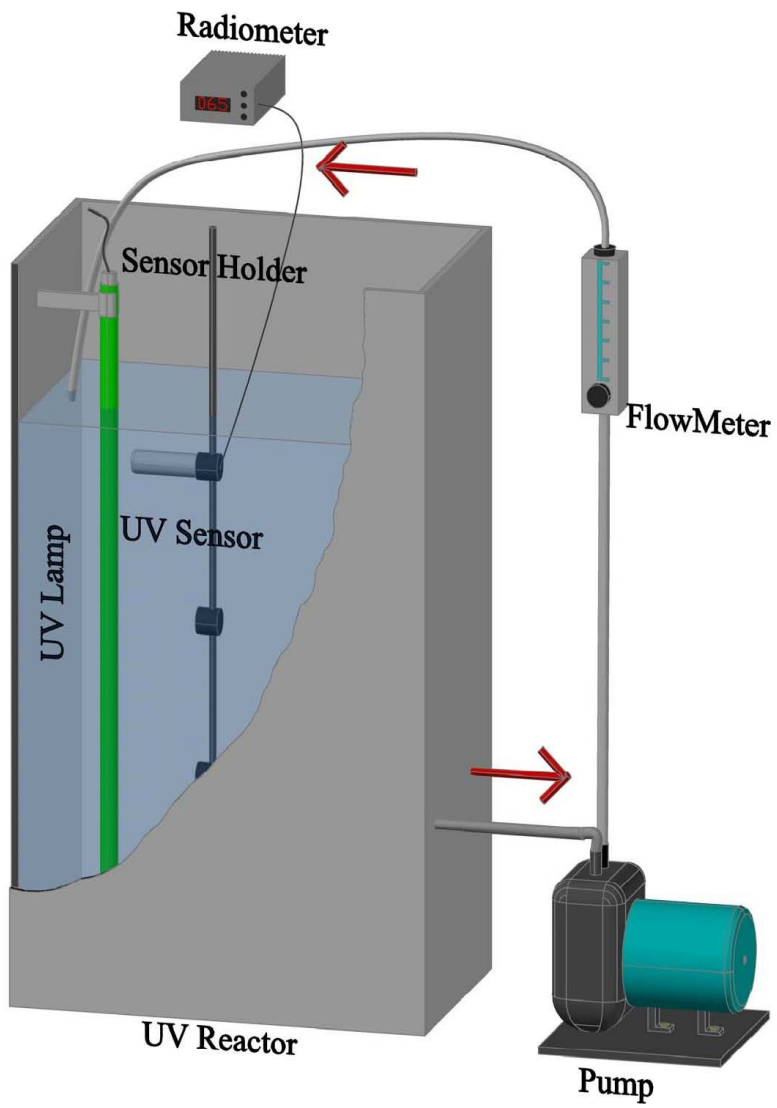


그림 3.1 Fouling 실험 개략도

3.2 비접촉식 모델의 보정 실험

자외선 살균 시스템 모델의 활용을 위해 보정 실험 및 검증을 실시하였다. 보정 방법으로는 먼저 실험실 규모의 비접촉식 자외선 조사 장치를 구성하고, radiometer와 UV 센서를 이용하여 일정한 간격으로 직접 수중의 자외선 강도를 측정하였다. 또한, 일반적으로 사용하는 매개변수 값을 사용하여 모델링한 결과 값과, 실측값을 비교하였으며, 매개변수 값을 점차 변화시켜 가면서 실측값과 가장 근접하게 계산하는 매개변수 값을 추적하였다. 실측 실험은 다음과 같다. 실험은 총 2회에 걸쳐 실험을 실시하였는데, 우선 수정관 수면의 높이를 3cm를 이격시켜 자외선 강도를 측정하였다. 비접촉식 자외선 반응조의 경우 크기가 16cm(W), 35cm(H), 75cm(L)의 장방형 아크릴제 반응조이다. 램프는 Philips(Model-TUV 36 T5 SP)사에서 제조한 공칭 효율 40W에 길이 85cm(L)를 사용하였으며, 수정관의 경우 동일한 회사 제품으로 지름 2.45cm에 두께 0.125cm, 길이 90cm를 사용하였는데, 램프와 소켓을 연결한 길이보다 길게 되어있어서 수정관을 램프의 길이에 맞게 잘라 사용을 하였다.. 자외선램프의 점등을 위한 안정기로는 BesTec사의 40W UV 전용 안정기를 사용하였다. 자외선 조사 실험은 안정성을 위해서 clean bench 안에서 이루어졌으며, 편의성과 정확도 향상을 위해서 ADAM사의 remote I/O 시스템(ADAM 4520, 4019+, 4068)을 사용하였고 동일한 회사 제품인 ADAM Viewer를 사용하여 컨트롤 프로그램을 작성하였다.

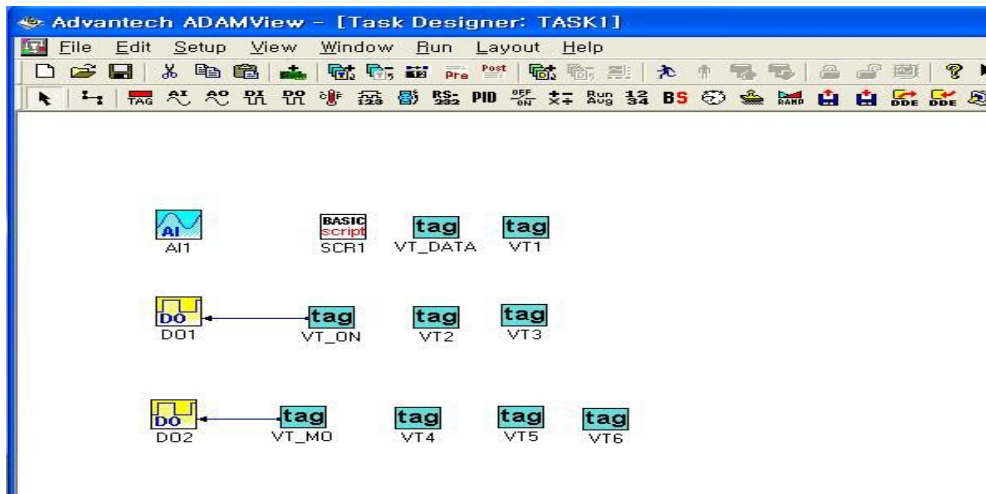


그림 3.2 ADAM Viewer 프로그램 task화면



그림 3.3 ADAM Viewer 컨트롤 화면

프로그램 작성은 ADAM Viewer를 사용하여 BS Script를 만들어 사용을 하였고, 프로그래밍 한 BS Script 부록에 첨부하였다. 실험에 쓰인 강도 측정기는 fouling 실험에서 사용된 Solar Light Company - Model LM 100 제품을 사용하였으며, 이 측정기의 정확도 및 Display resolution은 $\pm 0.1\%$ 와 1% 로 나타난다. 강도 측정기의 경우 강도가 백분율로 표시되기 때문에 이를 자외선 강도의 단위인 mW/cm^2 로 나타낼 필요가 있었다. 이를 위해 UVX Digital UV Intensity Meter(제조사:Cole-parmer, Model : EW-97651-10, Intensity Range : 0 to $20mW/cm^2$, 0 to $2000\mu W/cm^2$, and 0 to $200\mu W/cm^2$, Accurate : $\pm 5\%$)를 이용하여 램프의 표면에서 100% 일 때의 강도를 측정하고, 자외선 강도 측정기의 100%를 맞추어 보정한 후 비례식으로 계산식을 만들고 이를 BS Script에서 계산식으로 만들어 강도 값을 mW/cm^2 로 나타내었다. 실험에서 측정 포인트는 x, y, z 방향으로 각각 2cm 간격으로 측정을 실시하였다. 반응조가 장방형이라 x방향 및 z 방향으로는 자외선이 서로 대칭 분포하므로 측정은 전체의 1/4 영역에서만 실시하였으며, 측정시 자외선 강도 센서가 지름 3cm, 길이 10cm여서 반응조의 벽면과 바닥면은 측정을 할 수 없었다. 그래서 벽면의 경우 센서의 윗부분 중앙에 강도를 측정할 수 있는 부분이 있기 때문에 각각의 포인트 사이를 측정하였고, 바닥면의 경우 센서의 길이 및 선의 길이를 생각하여 바닥에서 15cm 떨어진 곳을 기준으로 잡고 위로 측정을 하였다. 정확한 측정 범위

는 다음과 같다. 측정 범위는 x방향으로 총 16cm중 0 ~ 8cm, y방향으로 총 35cm중 15 ~ 29cm, z방향으로 총 75cm 중 0 ~ 36cm까지 측정을 실시하였다. 반응조 1/4 각각의 좌표의 개수 x, y, z는 4, 8, 18로서 총 측정 포인트 개수는 576포인트였다. 반응조 내에 시료는 수돗물을 사용하여 강도 측정을 하였다. 강도 측정은 ADAM 기기와 컴퓨터를 이용하여 측정을 하였다. ADAM 4019+와 강도 측정기를 연결하여 Analog data를 받아들였으며, 이 Analog data를 ADAM 4520을 이용하여 컴퓨터와 연결을 하였다. 컴퓨터와의 연결은 RS - 232 통신 케이블을 이용하였다. 자외선램프는 ADAM 4068을 이용하여 컨트롤 프로그램과 연동, On/Off를 컴퓨터에서 관리 할 수 있게 하였다. 자외선 측정은 수동으로 움직이지 않고 DC 모터(DC 24V 직류모터, 경일 모터)를 이용하여 자동화를 하였는데 BS Script를 작성하여 data 저장과 센서이동을 동시에 하였다. 센서 이동은 25초 cycle로 움직이는데 10초 동안 data를 수집하여 평균을 내어 data를 txt 파일로 저장을 하고 10초 동안 센서를 이동 하였다. 이때의 이동거리는 2cm로서 포인트 간 거리와 똑같다. 그리고 움직인 후 수면의 안정화와 센서 값의 안정화를 위해 5초간 정지 시간을 주었다. 측정 순서는 다음과 같다. x축과 y축을 고정시키고 z축 방향으로 18포인트를 움직이며 강도 측정을 실시하고, 완료한 후 x축을 고정시킨 후 y축을 2cm 이동하여 z축을 18포인트 이동을 하였다. y 축을 8포인트까지 측정을 한 후 x축을 1포인트 이동을 하여 위와 동일한 작업을 실시하였다. 이렇게 측정을 하여 총 576 포인트를 측정을 하였다. 실험은 y축이 9 포인트 까지 측정을 하여야 하지만 램프와의 거리가 너무 가깝고 수면 위로 센서가 노출이 되기 때문에 균일한 센서 값을 위해서 y축 마지막 9포인트는 제거하고 실시하였다. 비접촉식 모델의 보정 실험인 수면높이 3cm 실험을 한 후 검증 실험을 위해서 수면높이 5cm일 때의 실험을 실시하였다. 검증 실험은 다음과 같이 진행 되었다. 실험은 보정 실험인 수면높이 3cm일 때와 동일하며 측정 포인트는 다음과 같다. x, y, z좌표는 4, 7, 18이며 이때의 총 좌표 개수는 504개였다. 보정 및 검증은 다음과 같이 진행되었다. Excel VBA를 이용하여 프로그램을 작성하고 3cm의 실측값과 비접촉식 모델의 모의 값을 비교하였다. 비접촉식 모델의 경우 자외선 효율은 30%, UV 투과율은 85%일 때를 기본 값으로 잡고 모의 값을 시뮬레이션 하였다. 비접촉식 모델의 보정 실험에 사용된 실험 재료 및 기기는 다음 표 3.3와 같다. 그리고 비접촉식 모델의 시뮬레이션에 사용된 매개변수 값은 표 3.4의 값과 같다.

표 3.3 보정실험의 실험 재료 및 장치

구분	제원
반응조 크기	16cm(W) × 35cm(H) × 75cm(L) 장방형 총용적 : 42L, 실용적 : 37.2L 물 충전 높이 : 3cm 10T 아크릴
시료	수돗물
자외선램프	85cm(L), 40W, Philips
수정관	2.45cm(OD) × 0.125cm(T) × 85cm(L), Philips
안정기	전자식 전용 안정기(BesTec, 40W, 1등용)
자외선 측정	1. radiometer -제조사 : Solar Light Company -Model LM100, Solar Light Company 2. UV sensor -제조사 : Cole parmer -Model EW-97651-10 -intensity ranges: 0 to 20 mW/cm ² , 0 to 2000 μW/cm ² , and 0 to 200 μW/cm ²
remote I/O 모듈	ADAM4520, 4019+, 4068 (Adventech)
센서의 이동방법	DC모터 : 24V 직류 모터, 경일모터, 감속기

표 3.4 시뮬레이션에 사용된 매개변수 값

매개변수	Value	비고
UV Efficiency	30%	램프 효율
T10 (water)	85%	물의 투과율
T10 (quartz)	50%	수정의 투과율
n_1 (air)	1	공기의 굴절률
n_2 (water)	1.38	물의 굴절률
n_3 (quartz)	1.52	수정의 굴절률
Reflection rate of ceiling wall	0%	천장 반사율
Shadow Efficiency	0%	그림자 효과

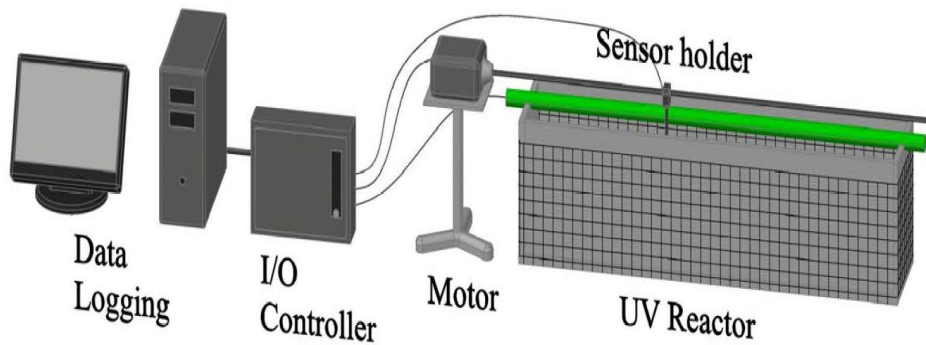


그림 3.4 비접촉식 자외선 보정 실험 개략도

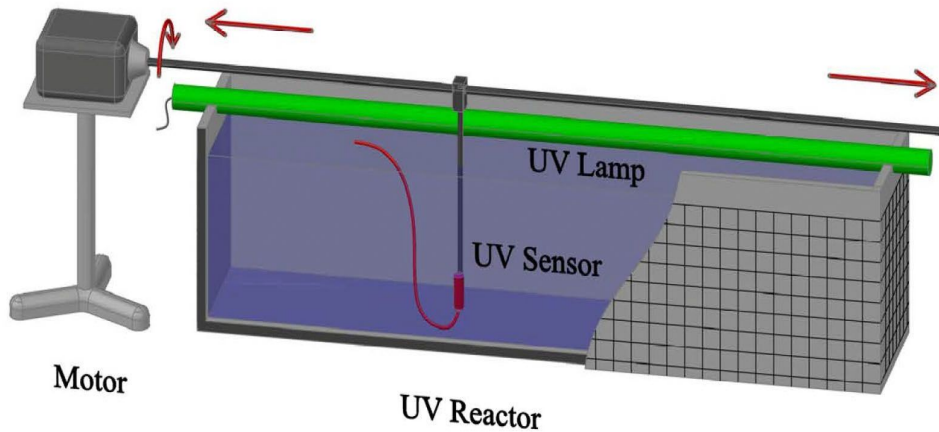


그림 3.5 비접촉식 자외선 반응조 상세도

3.3 보정 및 검증 방법

실측값과 계산 값은 이론적으로는 서로 일치해야하나 여러 가지 제약으로 인해 대부분의 경우에 서로 상이하게 된다. 특히 본 실험과 같이 3차원의 각 지점에서 모두 일치하도록 시뮬레이션 하기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 이와 같은 실측값과 계산 값의 불일치를 최소화하는 방향으로 보정을 실시하고, 보정을 위한 인자로서 비교적 불확실성이 높은 램프의 자외선 효율 및 물에서의 자외선 투과율의 두 가지 인자를 선정하였다.

보정 방법으로서 우선 3차원의 576지점의 자외선 강도 실측값을 참값으로 보고, 비접촉식 자외선 모델의 영향인자 중 램프의 자외선 효율은 10%에서 100%까지 10%씩, 물의 투과율 역시 10%에서 100%까지 10%씩 증가시키면서 누적 상대오차를 계산 하였다. 누적 상대오차를 다시 전체의 지점 수로 나누면 평균 상대오차가 얻어지는데 다음 식(29)와 같다. 상대오차가 작을수록 계산 값과 측정값이 서로 잘 일치하는 것이므로 평균 상대오차가 작을 때가 최적 모의조건이 될 것이다.

$$RE_{ijk} = \frac{\sqrt{(Z_m(ijk) - Z_c(ijk))^2}}{Z_m(ijk)} \quad (29)$$

$$\overline{RE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^{18} RE_{ijk} \quad (30)$$

$Z_m(i, j, k)$ = i, j, k 지점의 실측값

$Z_c(i, j, k)$ = i, j, k 지점의 계산값

N = 총 측정지점 수, $N = 576$

RE = 상대오차

\overline{RE} = 평균 상대오차

최적모의조건 근처에서는 영향인자 즉, 자외선 효율과 자외선 투과율을 1% 씩 변화시키면서 미세한 보정을 실시하였다. 최적 모의조건에서의 영향인자 수치 및 조건을 대입한 후 얻어진 시뮬레이션 결과와, 물과 램프의 간격이 더 떨어진 조건 즉, 이격 거리가 5cm일 때의 실측결과를 비교하므로써 검증을 실시하였다. 실측 지점은 앞에서 설명한 바와 같이 504지점이며, 보정 방법과 마찬가지로 평균 상대오차 값을 계산하므로써 검증하고자 하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 fouling 발생 실험

수돗물을 이용한 예비 실험에서 시간에 따른 자외선 강도의 변화를 그림 4.1에 표시하였다.

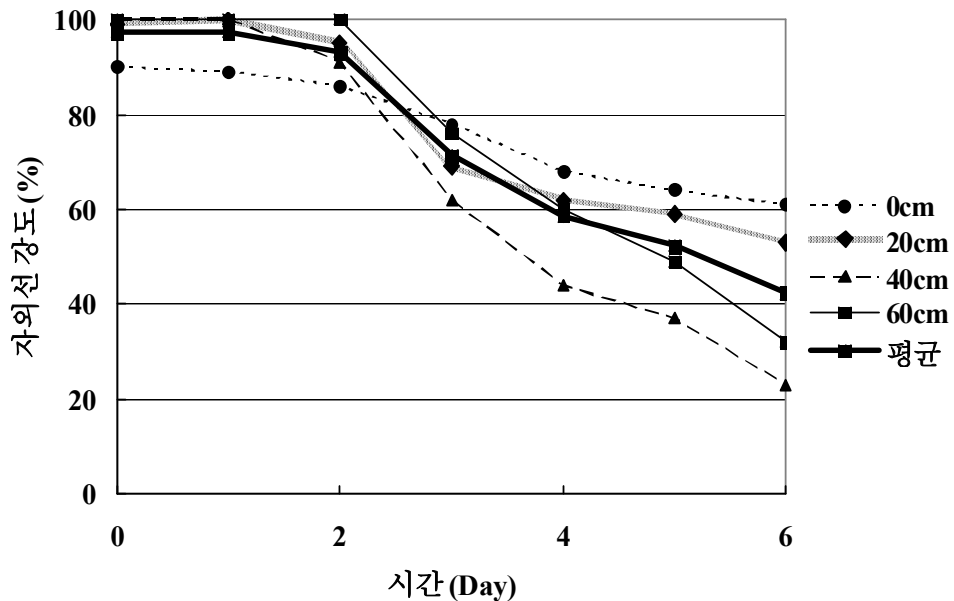


그림 4.1 수돗물의 시간의 경과에 따른 자외선 강도 변화

수돗물에서 자외선 강도 변화는 처음 3일간은 변화가 거의 없었으나, 4일째부터는 강도가 급격히 떨어지기 시작하였다. 3일째 자외선 평균 강도는 93%이었고, 4일째의 자외선 평균 강도는 71%로 3일째보다 4일째 평균 강도는 21% 감소하였으며, 실험 마지막 날인 7일째에는 42%로 평균 강도는 58%가 감소하였다. 자외선 평균 강도의 감소는 램프의 전부분에서 나타났지만, 가장 많이 감소하는 부분은 주로 램프 중간 부분에서 나타났으며 가장 많이 떨어진 측정구간 40cm의 경우 마지막 날인 7일째에 23%까지 감소하는 모습을 보였다.

하수처리장 방류수를 대상으로 접촉식 자외선 살균 실험을 한 결과 시간 경과에 따

른 자외선 강도의 변화를 그림 4.2에 표시하였다.

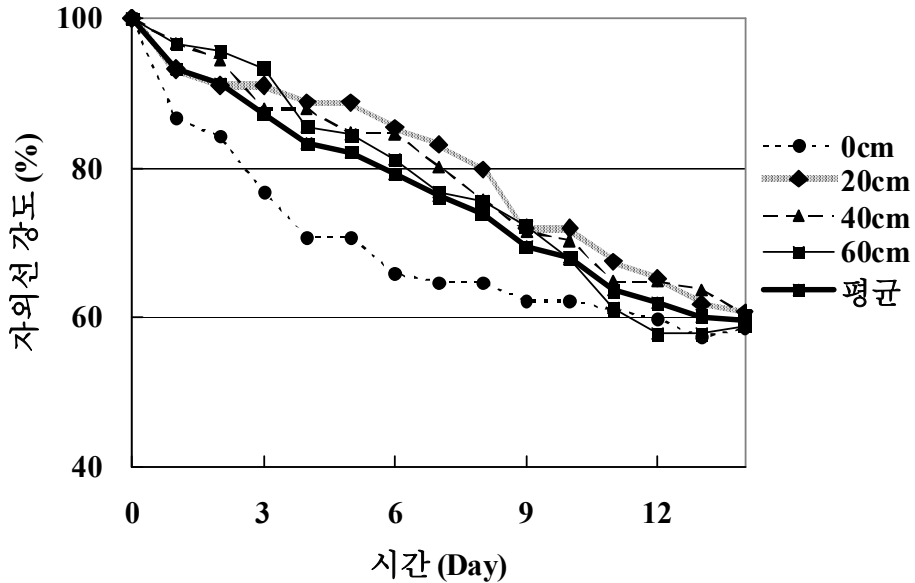


그림 4.2 방류수의 시간의 경과에 따른 자외선 강도 변화

램프 측정 높이 40 ~ 60cm 부분에서 자외선 강도 변화가 가장 크게 나타났던 수돗물의 실험과는 달리, 방류수의 경우에는 램프의 위치와 상관없이 일정한 자외선 강도 감소를 보였다. 방류수에서 평균 자외선 강도 감소 값은 15일간 100%에서 60%로 총 40%의 강도 감소를 나타냈다. 수돗물과 마찬가지로 7째 되는 날 평균 강도 감소를 비교해 보면 100%에서 79%로 총 21%의 강도 감소를 나타냈다. 이 경우 수돗물의 58% 감소와는 확연히 차이가 나는 결과였다.

수돗물과 방류수의 결과 값 차이는 다음과 같이 사료된다. 수돗물의 경우 유기물질 및 부유물질들이 포함되어 있지 않아 수중펌프를 설치하지 않았으며 강도 측정을 물의 정지 상태에서 측정하고 실험을 실시하였다. 하지만 방류수의 경우 유기물 및 무기물들이 많이 포함되어있고 조금이지만 부유물질들이 포함되어 있어서 수중펌프를 설치하여 14L/min의 유량으로 유수의 흐름을 주었다. 그러다 보니 펌프에 의해 물이 순환을 하며 물의 온도를 낮추어 수정관 표면의 fouling이 수돗물보다 방류수가 늦게 나타난 것으로 판단되었다. 그러므로 자외선 강도는 수돗물보다 방류수의 변화폭이 적었다.

온도에 의한 fouling의 영향은 다음과 같은 이유로 설명이 된다. 온도가 증가함에 따

라서 용해도가 감소하는 물질의 침전이 높은 온도에서 운전할 때, 보다 현저하게 영향을 미친다. 온도의 증가에 용해도가 감소하는 물질은 CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 , FePO_4 , $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ 등이 있다. 또한 온도의 증가는 조류의 성장에도 영향을 미치는데 이는 자외선램프에서 방출되는 가시광선에 의해서 조류의 성장을 촉진할 수 있다.

방류수 fouling 실험에서 시간의 경과에 따른 탁도의 변화를 그림 4.3에 표시하였다.

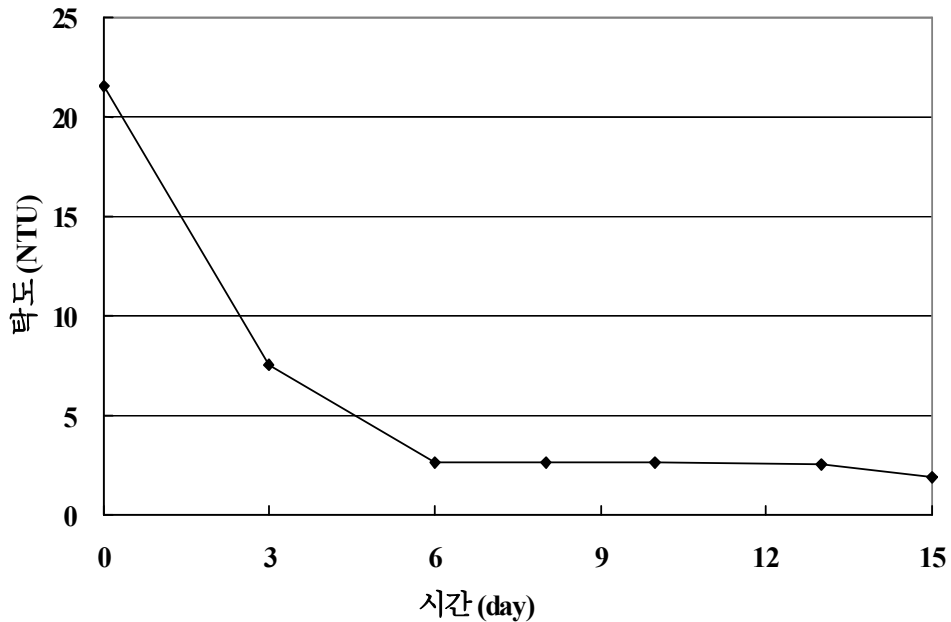


그림 4.3 방류수의 시간의 경과에 따른 탁도 변화

탁도는 시작시점에서 21.5NTU이었으나 이후 급속히 감소하여 약 7일 후에는 2.6NTU정도 측정되었다. 탁도는 부유물질의 농도와 관련이 높는데, 부유물질의 침전을 방지하기위해 수중펌프에 의한 강제 순환방식을 채택하여 침전에 의한 부유물질의 감소를 최소화하고자 하였다. 실험 기간 동안 실제로도 반응조 바닥에 침전하는 부유물질은 그리 많지 않았고, 오히려 반응조 벽면 및 순환호스 안에 부유물이 다량으로 부착되는 것이 관찰되었다. 따라서 탁도의 감소는 자외선에 의한 산화라기보다는 미생물 막의 형성 혹은 부유물질의 침적에 기인한 것이라 판단된다.

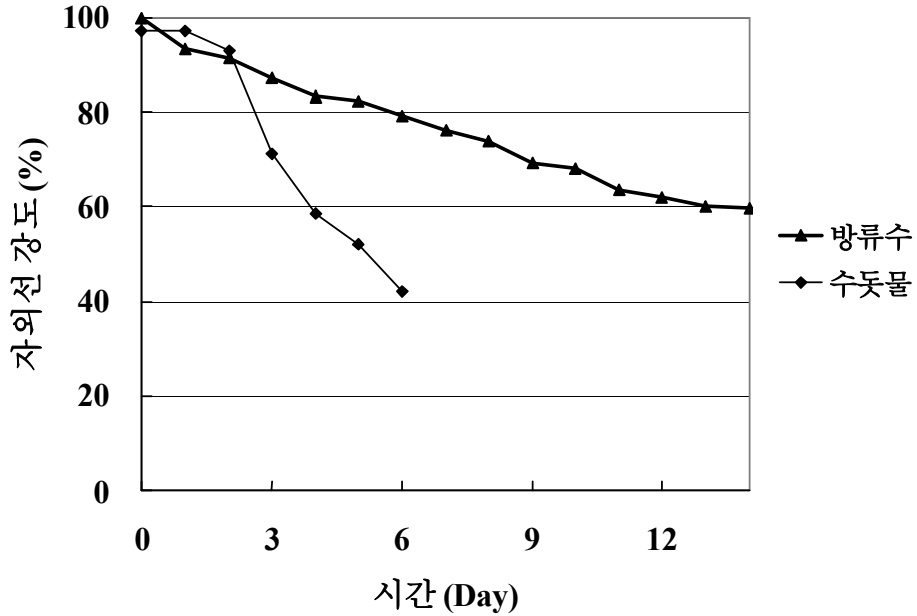


그림 4.4 시간의 경과에 따른 수돗물 및 방류수 평균 자외선 강도 변화

비 순환방식인 수돗물의 경우 실험 3일 쯤부터 급격한 자외선 강도 감소를 보였으며 실험 종료 시까지 자외선 강도의 감소폭은 97%에서 42%로 총 55%가 감소하였다. 강제 순환방식인 방류수의 경우 수돗물과 다르게 완만한 자외선 강도 감소를 보였으며 강도 감소 총 36%가 감소하였다. 수돗물에 비해 방류수의 경우 강도 감소폭이 더 적었는데, 이는 수중 모터로 인한 강제 순환으로 수정관 주변에 물의 흐름이 발생하고, 이로 인한 온도 저하로 인해 무기물질 침적이 저해 받았기 때문으로 판단된다.

4.2 모델의 보정

보정을 위해 실시한 실측 실험의 결과를 시뮬레이션 결과와 함께 그림 4.5에 표시하였다. 모델의 기본 모의 조건으로 자외선램프의 효율은 30% 및 물의 투과율은 85%를 각각 적용하였다.

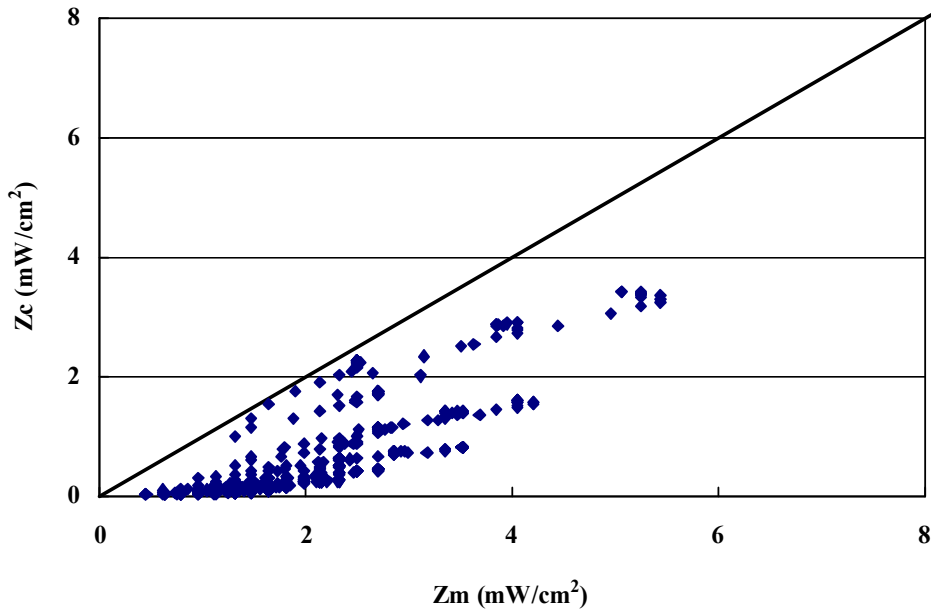


그림 4.4 비접촉식 모델 모의조건 효율 30%, 투과율 85%

Z_m : 실측한 자외선 강도 (mW/cm^2)

Z_c : 모의에서 얻어진 계산 자외선 강도 (mW/cm^2)

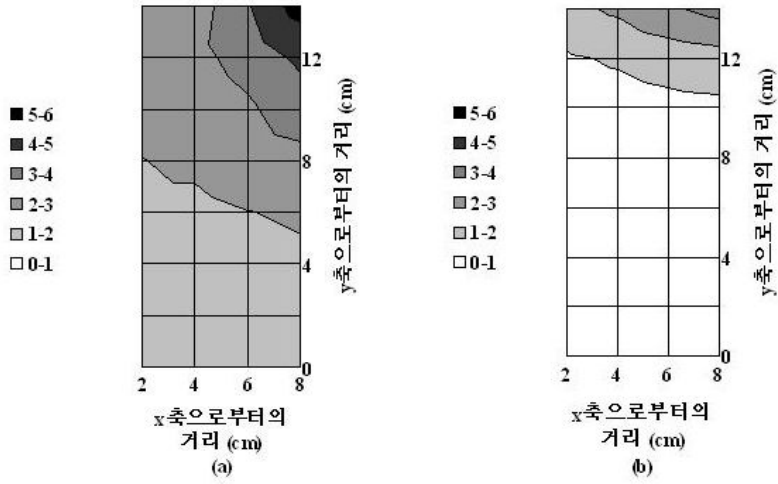


그림 4.6 보정실험에서 xy 평면의 자외선 강도 분포 (z = 36cm 지점) (a) 실측강도, (b) 계산강도

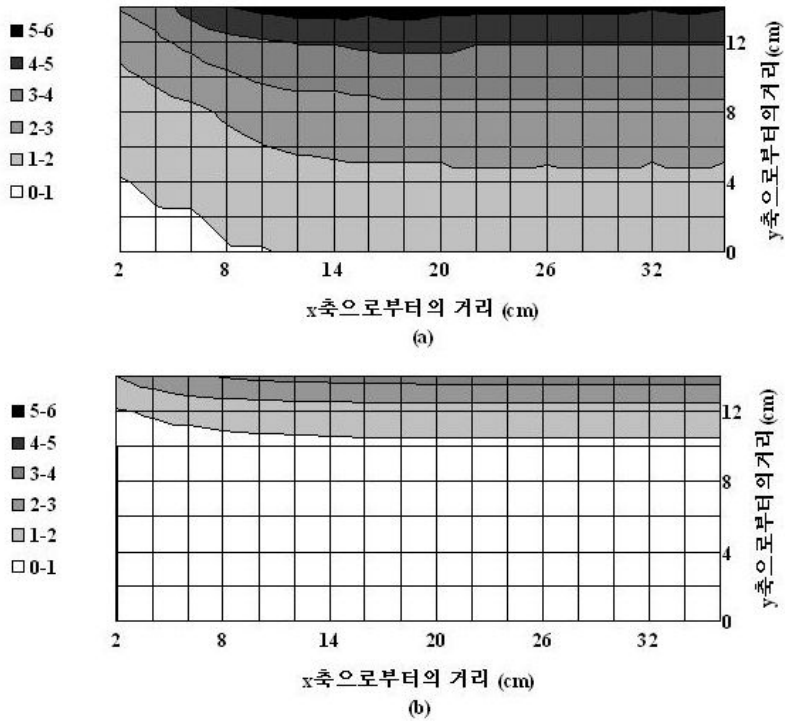


그림 4.7 보정실험에서 yz평면의 자외선 강도 분포 (x = 8cm 지점) (a) 실측강도, (b) 계산강도

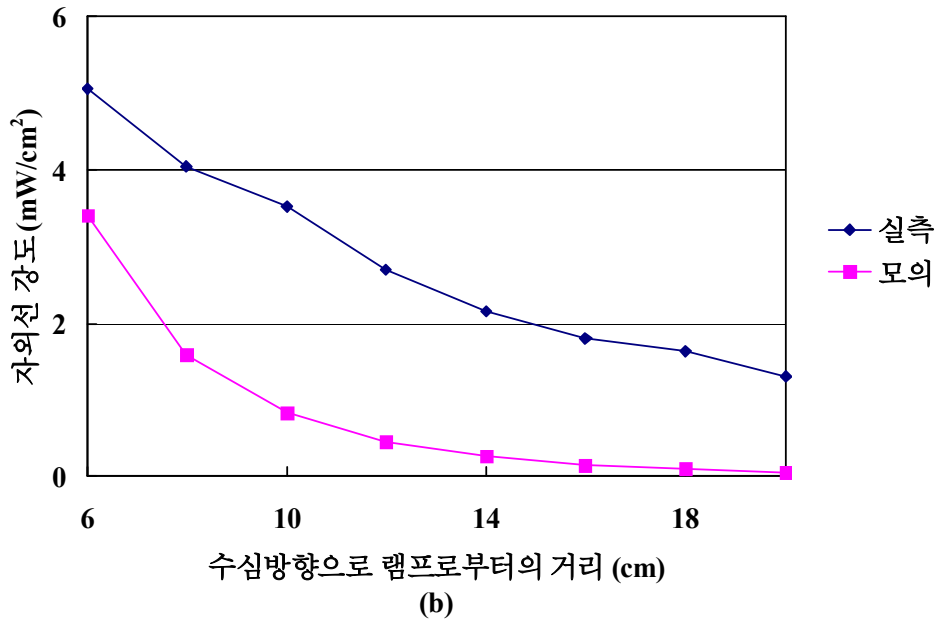
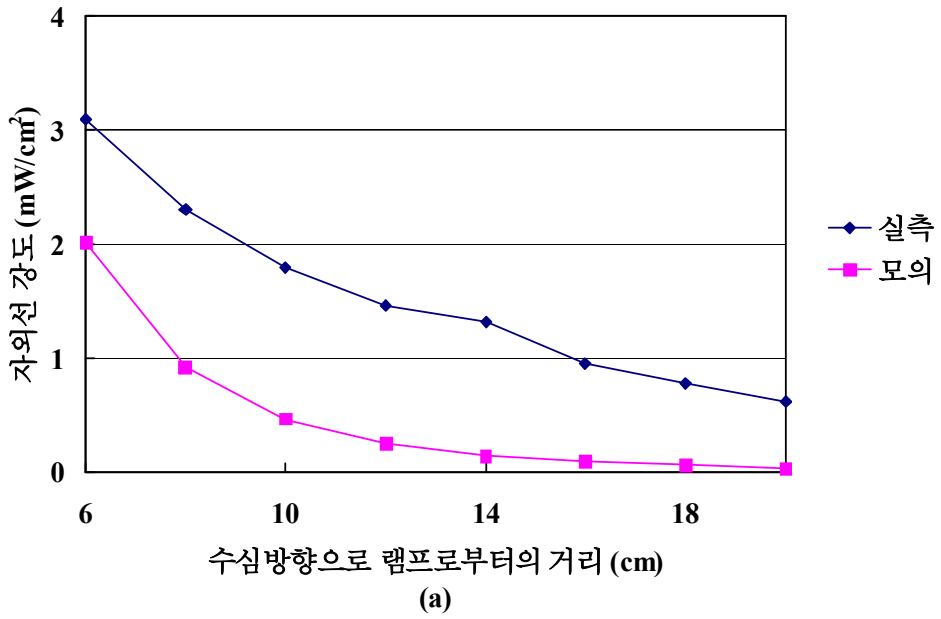


그림 4.8 y축 방향의 자외선 강도
 (a) : x = 8cm, z = 2cm, (b) : x = 8cm, z = 36cm

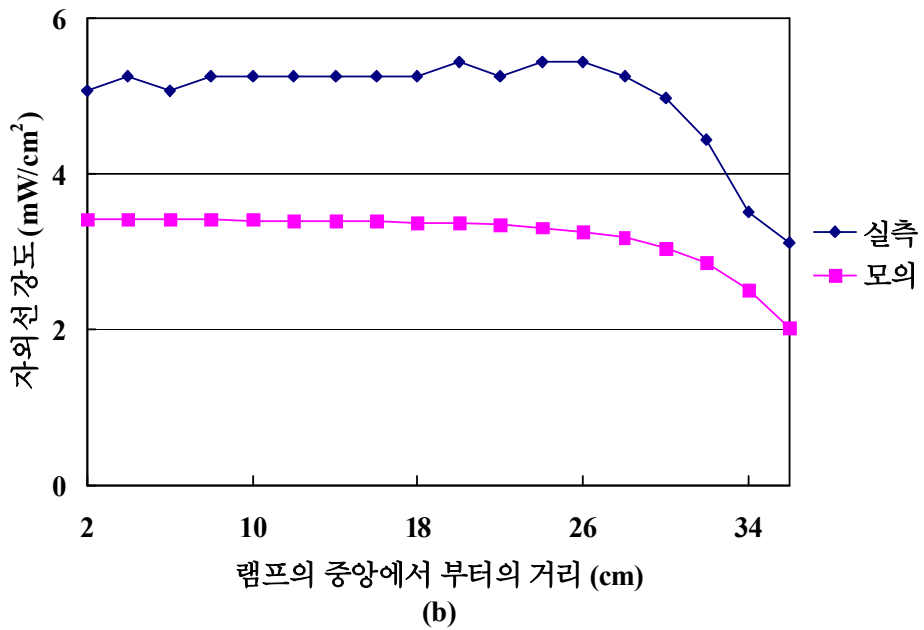
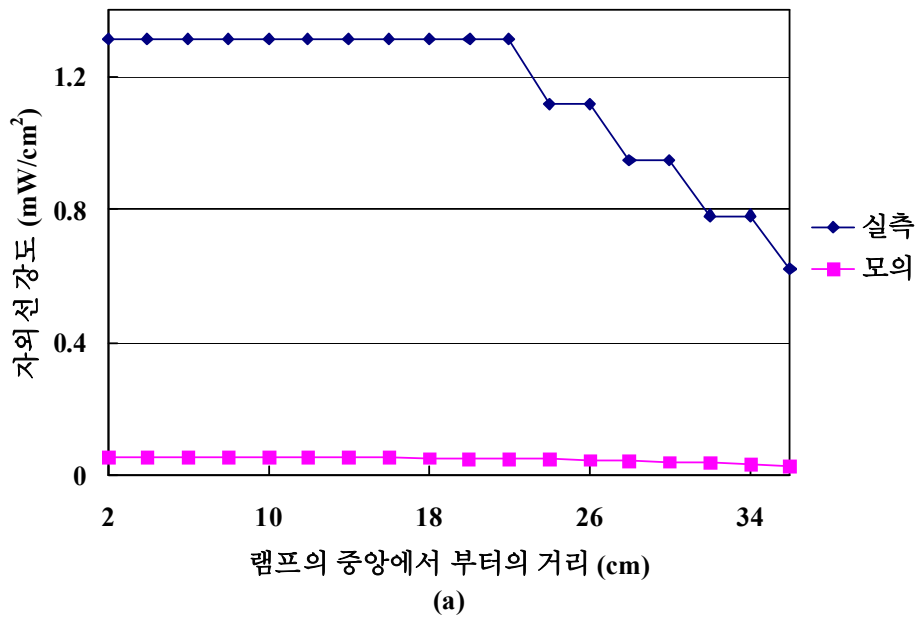


그림 4.9 z축 방향의 자외선 강도
 (a) : x = 8cm, y = 20cm, (b) : x = 8cm, y = 6cm

모의조건을 자외선 효율 30%, 투과율 85%의 조건으로 주고 평균 상대오차 값을 계산한 경우 77%가 나왔다. 그림 4.5에서 실측값과 모의 값의 분포가 직선상의 밑으로 분포하는 경향을 나타냈다. 이는 계산한 모의 값보다 실측값이 더 높았기 때문에 나타났으며, 그림 4.6 ~ 4.9에서 잘 나타났다. 실측조건과 가장 부합하는 모의조건을 찾기 위하여 우선 자외선램프 효율과 물의 투과율을 10% 씩 변화를 주어 시뮬레이션을 실시하였다.

표 4.1을 보면 실측값과 계산 값의 차이 즉, 평균 상대오차가 최소화되는 조건은 각각 램프 효율 40%, 투과율 100%일 때였으며, 이때의 평균 상대오차는 14.3%로 나타났다. 램프의 효율을 고정시킬 경우 투과율이 증가할수록 평균 상대오차 값은 줄어드는 경향을 보였으며, 투과율을 고정시키는 경우에도 똑같이 줄어드는 경향을 보였다.

표 4.1 램프의 효율 및 물의 투과율 변화에 따른 평균 상대오차(%)

투과율 효율	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	99.85	99.61	99.30	98.89	98.35	97.59	96.40	94.23	89.41	76.25
20	99.70	99.22	98.60	97.78	96.70	95.18	92.80	88.47	78.82	52.50
30	99.55	98.84	97.89	96.67	95.05	92.76	89.20	82.70	68.21	29.79
40	99.40	98.45	97.19	95.56	93.40	90.35	85.59	77.45	59.93	14.25
50	99.25	98.06	96.49	94.45	91.75	87.94	82.59	74.26	55.18	19.34
60	99.10	97.67	95.79	93.35	90.10	85.72	81.33	73.70	51.80	42.50
70	98.95	97.28	95.08	92.24	88.45	84.88	81.62	73.49	51.35	66.25
80	98.80	96.89	94.38	91.13	87.01	85.32	82.56	73.27	51.88	90.00
90	98.65	96.51	93.68	90.02	86.92	85.96	83.51	73.16	53.56	113.75
100	98.50	96.12	92.98	88.91	87.53	87.08	87.08	84.45	74.22	56.43

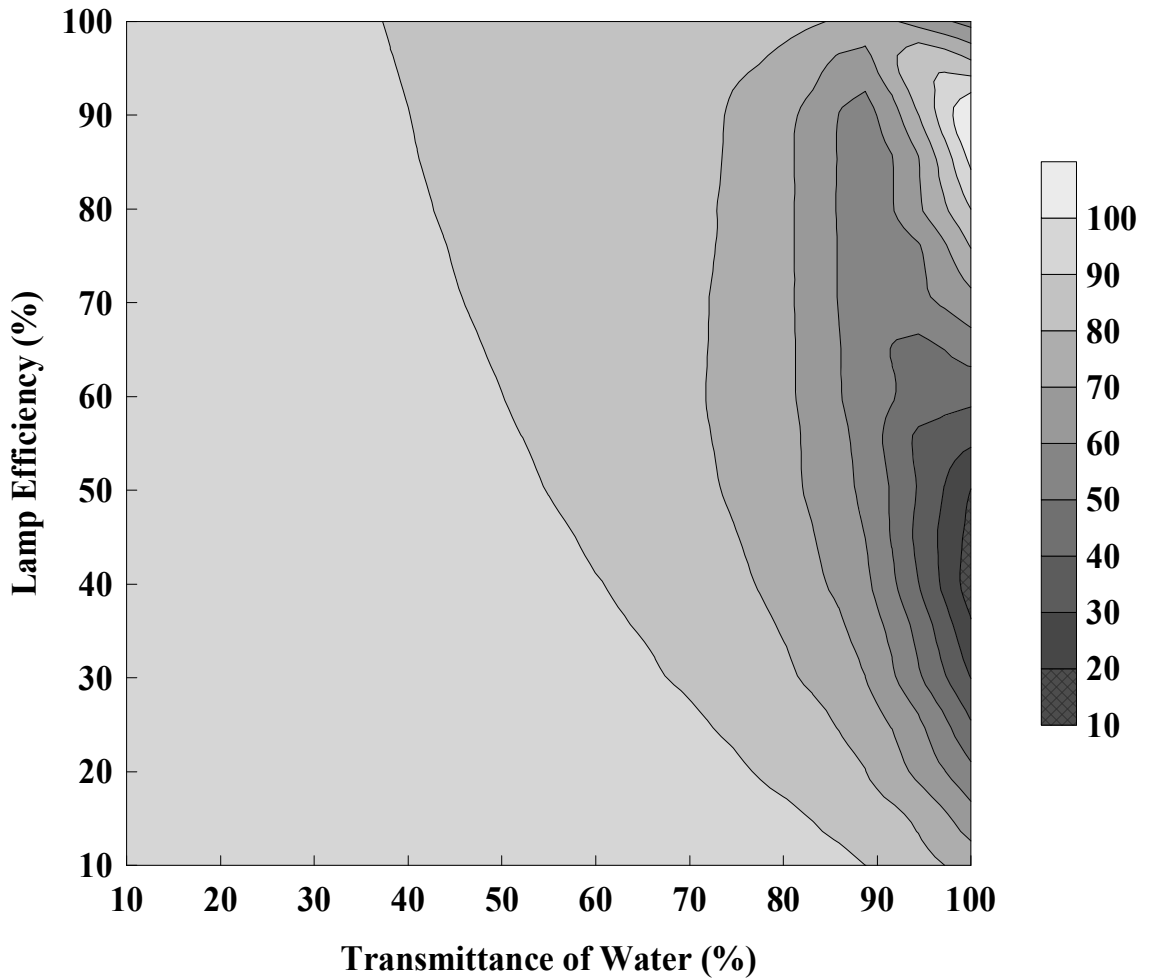


그림 4.10 램프의 효율 및 투과율 변화에 따른 평균 상대오차 변화

최적 값을 구하기 위하여 그래프 상에서 평균 상대오차 값이 가장 낮은 값인 0 ~ 20 % 범위에 있는 효율 35% ~ 50%, 투과율 95% ~ 100% 사이 값을 모델에 사용하여 시뮬레이션 하여 보았다. 효율을 30% 밑으로 낮추게 되거나 50% 이상 높게 되면 표 4.1에서 보이듯이 평균 상대 오차 값은 증가하게 된다. 마찬가지로 물의 투과율을 95% 이하로 낮추게 될 경우에도 평균 상대 오차 값은 증가하였다. 평균 상대 오차 값을 줄이기 위해서는 램프의 효율보다는 물의 투과율이 좀 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실측값과 계산 값의 오차를 최소화하는 램프 효율과 투과율을 더욱 정밀하게 찾기 위해 1% 간격으로 모의한 결과를 표 4.2에 표시하였다.

표 4.2 최적지점 1%간격 평균 상대오차 값

효율 (%)	투과율 (%)	상대오차 (%)	효율 (%)	투과율 (%)	상대오차 (%)	효율 (%)	투과율 (%)	상대오차 (%)
35	95	47.58	41	95	41.31	47	95	36.67
	96	43.20		96	36.36		96	31.65
	97	38.26		97	30.89		97	26.27
	98	32.74		98	25.06		98	20.84
	99	26.68		99	19.08		99	15.85
	100	20.24		100	13.57		100	14.56
36	95	46.41	42	95	40.44	48	95	36.10
	96	41.89		96	35.39		96	31.08
	97	36.86		97	29.94		97	25.75
	98	31.26		98	24.13		98	20.43
	99	25.13		99	18.26		99	15.79
	100	18.75		100	13.09		100	15.86
37	95	45.25	43	95	39.58	49	95	35.56
	96	40.66		96	34.49		96	30.56
	97	35.56		97	29.06		97	25.30
	98	29.86		98	23.29		98	20.07
	99	23.68		99	17.57		99	15.93
	100	17.35		100	12.80		100	17.46
38	95	44.18	44	95	38.75	50	95	35.09
	96	39.53		96	34.49		96	30.08
	97	34.33		97	28.27		97	24.91
	98	28.52		98	22.55		98	19.82
	99	22.36		99	16.97		99	16.22
	100	16.08		100	12.84		100	19.34
39	95	43.20	45	95	38.00			
	96	38.45		96	32.96			
	97	33.11		97	27.53			
	98	27.23		98	21.91			
	99	21.12		99	16.46			
	100	15.07		100	13.13			
40	95	42.24	46	95	37.30			
	96	37.38		96	32.28			
	97	31.94		97	26.85			
	98	26.09		98	21.35			
	99	20.03		99	16.08			
	100	14.25		100	13.65			

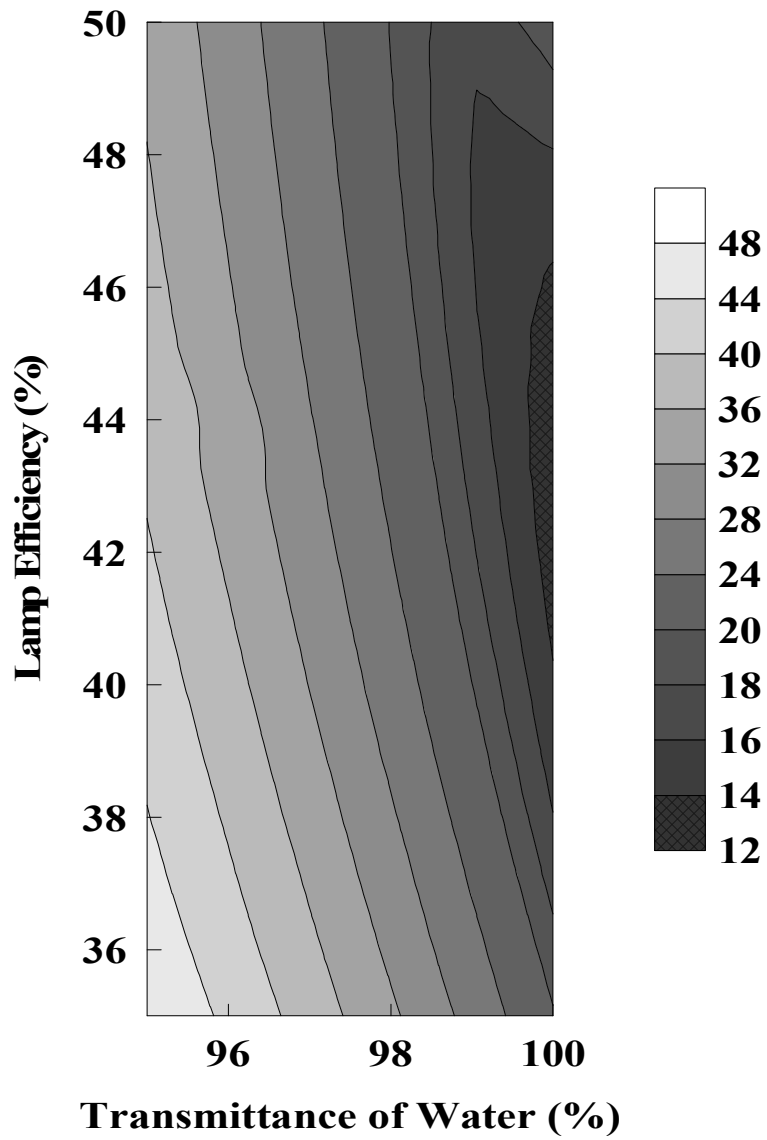


그림 4.11 최적지점 1% 간격 모의 결과

최적의 램프 효율과 물의 투과율은 효율이 43%, 투과율이 100%일 때로 나타났으며, 이때의 최소 평균 상대 오차 값은 12.8%로 나타났다. 실측값과 계산 값의 자외선 분포를 보기 위해 최적 모의조건인 램프의 효율 43%, 물의 투과율을 100%로 하고 모델링을 실시하였다. 모델링을 한 결과 모의조건의 기본 값인 램프의 효율 30%와 물의 투과율 85%일 때 보다 최적 값인 43%, 100%일 때 실측값과 모의 값의 분포가 직선상에 분포함을 알 수 있었다. 또한 xy, yz 평면에서도 실측값과 계산 값의 그래프는 유사하게 나왔으며 y 축에서의 자외선 강도 값 역시 유사하게 나왔다. 평균 상대오차 값 역시 77%에서 12.8%로 감소하였다. 그림 4.16에서 보면 램프에서 y축으로 먼 곳인 (a)의 경우 실측값이 계산 값보다 크게 나타났으며, (b)의 경우에는 실측값보다 계산 값이 더 크게 나왔다. (b)에서 계산 값이 더 크게 나온 것은 계산 값의 흡수율이 높아서 나타난 것으로 판단된다.

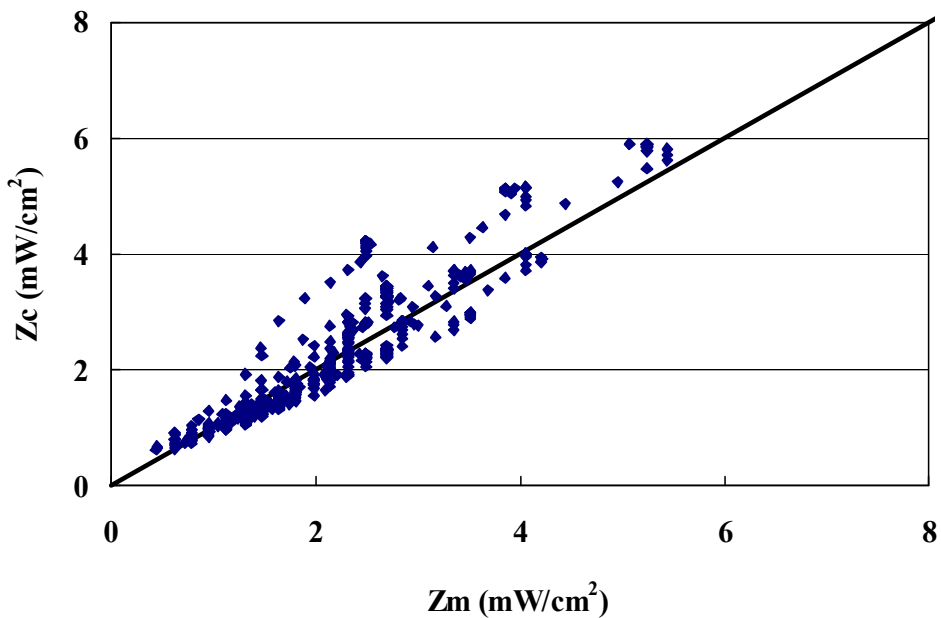


그림 4.12 최적 모의조건에서 실측값과 계산 값의 비교

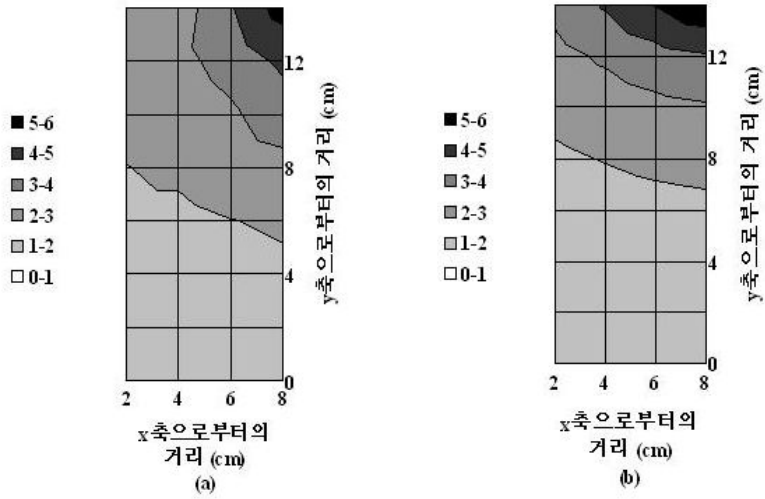


그림 4.13 최적 모의조건에서 xy 평면의 자외선 강도 ($z = 36\text{cm}$ 지점) (a) 실측강도, (b) 계산강도

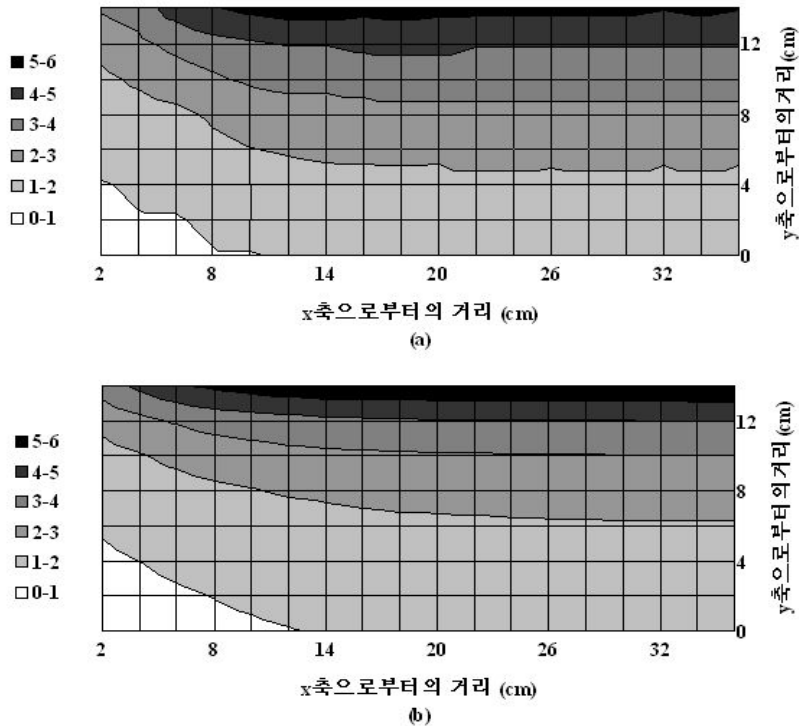


그림 4.14 최적 모의조건에서 yz 평면의 자외선 강도 분포 ($x = 8\text{cm}$ 지점) (a) 실측강도, (b) 계산강도

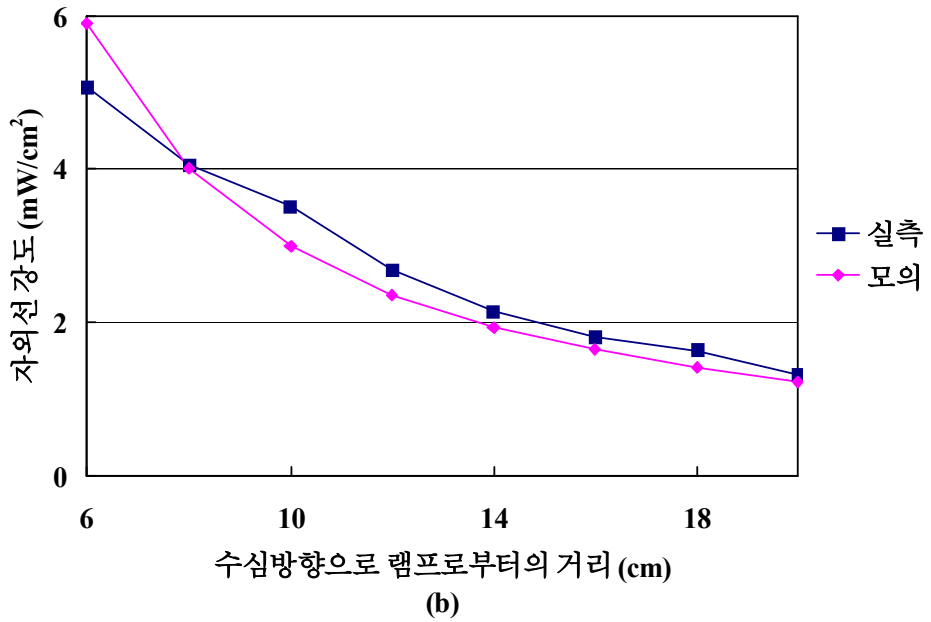
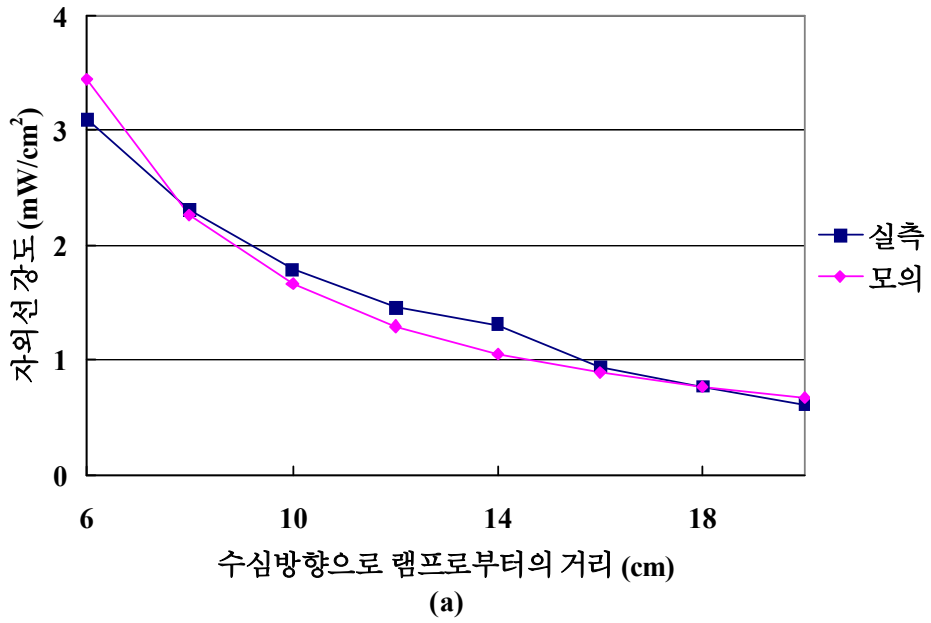


그림 4.15 최적 모의조건에서 y축 방향의 자외선 강도
 (a) : $x = 8\text{cm}$, $z = 2\text{cm}$, (b) : $x = 8\text{cm}$, $z = 36\text{cm}$

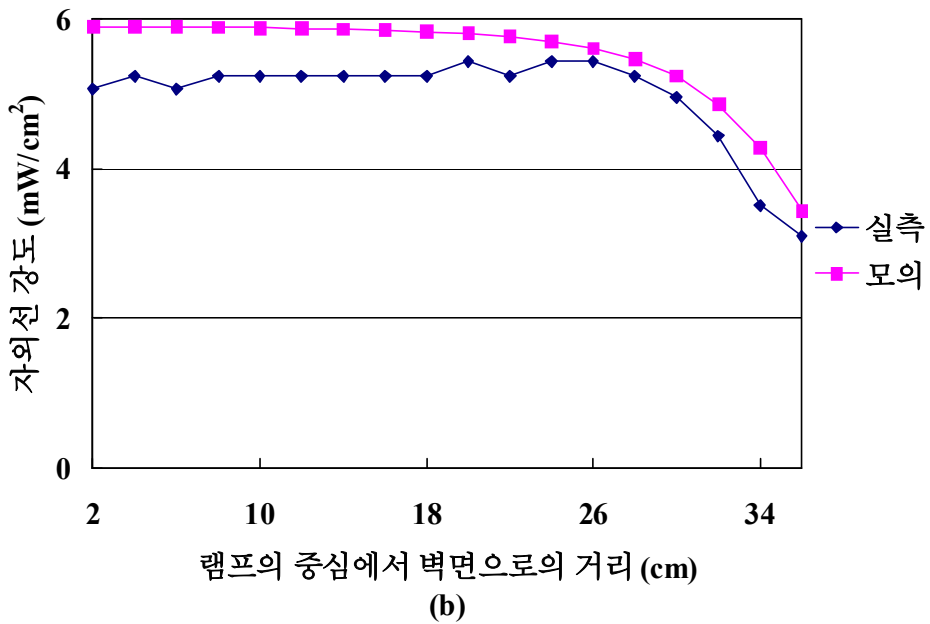
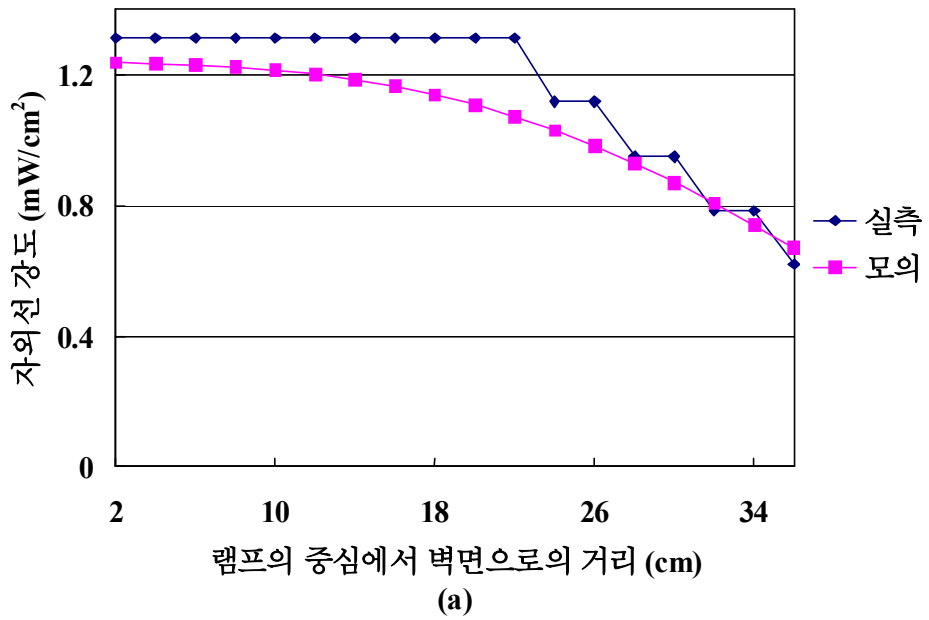


그림 4.16 최적 모의조건에서 z축 방향의 자외선 강도
 (a) : $x = 8\text{cm}$, $y = 20\text{cm}$, (b) : $x = 8\text{cm}$, $y = 6\text{cm}$

4.3 모델의 검증

비접촉식 자외선 모델의 검증은 수정관과 수면의 높이를 보정 실험과 다른 조건 즉, 램프와 수면의 간격을 5cm로 하여 실측한 결과와, 보정에서 얻어진 최적 인자 값 즉, 최적 램프 효율 및 최적 투과율을 입력 자료로 하여 시뮬레이션 한 결과를 비교하였다. 보정에서의 최적의 모의 조건은 램프 효율 43%, 투과율 100%일 때 이었다.

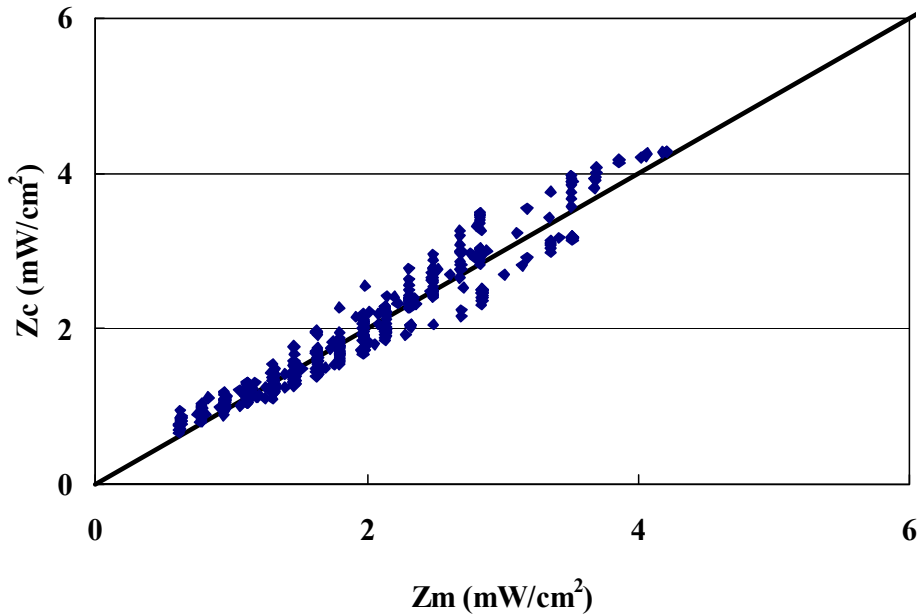


그림 4.17 검증 - 최적 모의조건에 실측값과 계산값의 비교

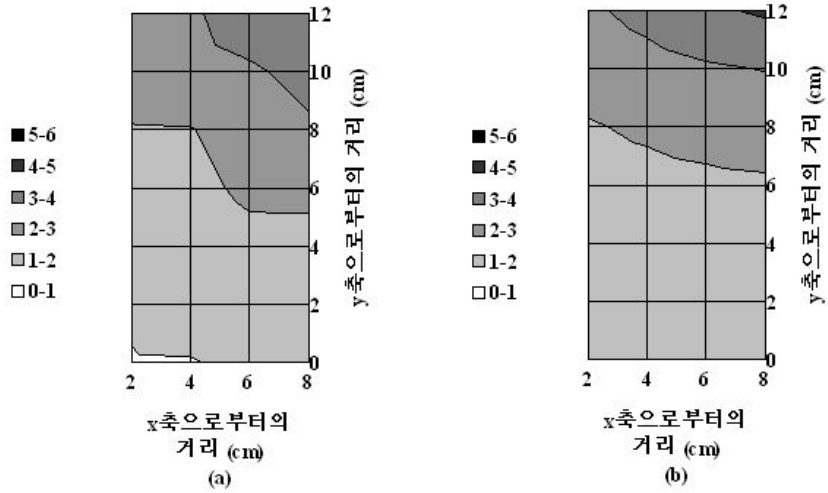


그림 4.18 검증 - xy 평면의 자외선 강도 ($z = 36\text{cm}$ 지점)
(a) 실측강도, (b) 계산강도

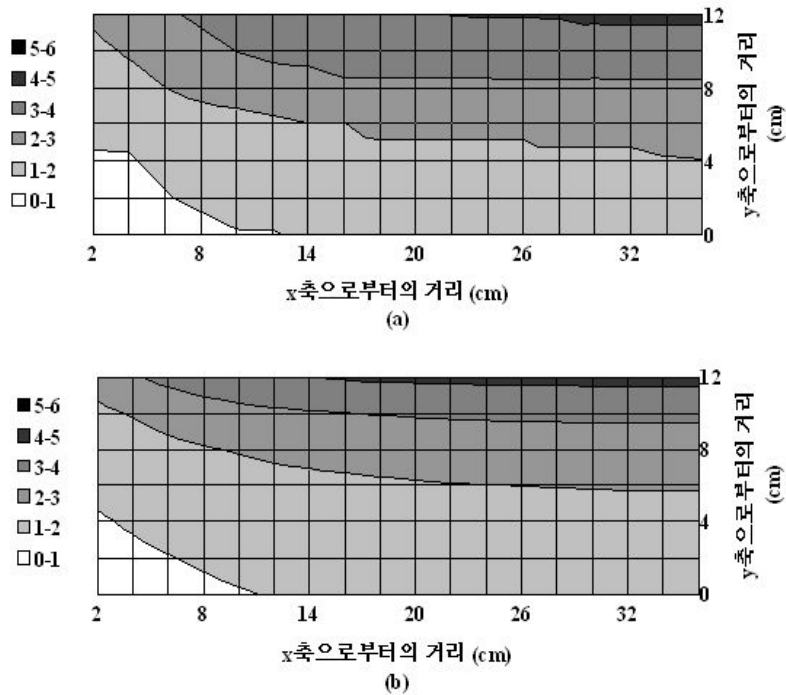


그림 4.19 검증 - yz 평면에서 자외선 강도 ($x = 8\text{cm}$ 지점)
(a) 실측강도, (b) 계산강도

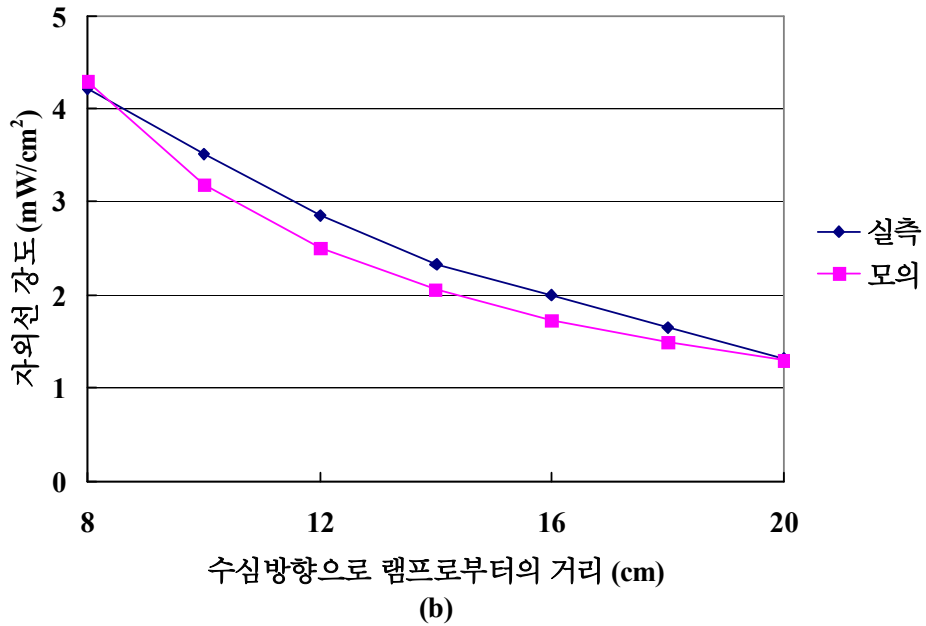
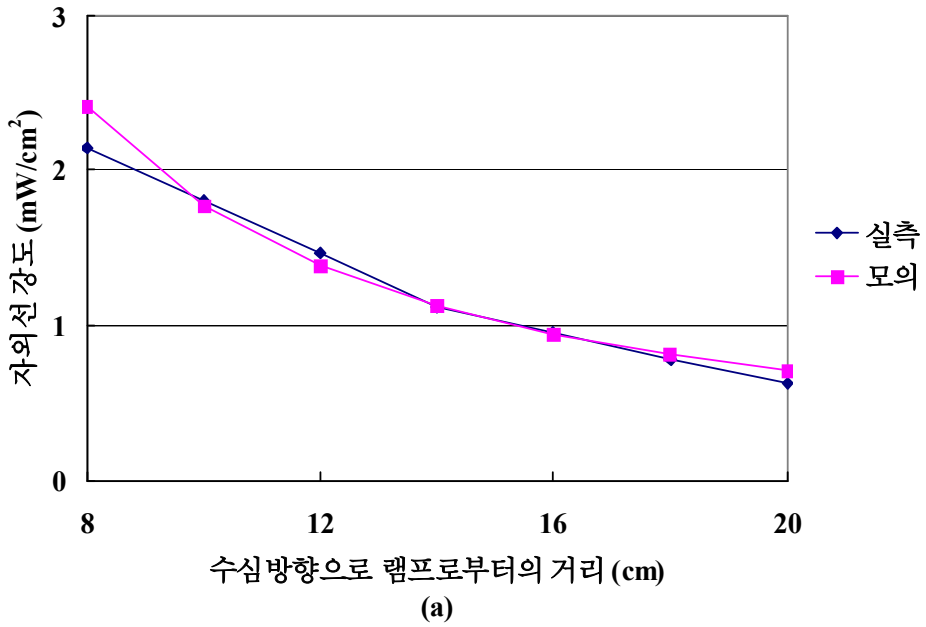


그림 4.20 y축 방향의 자외선 강도
 (a) : $x = 8\text{cm}$, $z = 2\text{cm}$, (b) : $x = 8\text{cm}$, $z = 36\text{cm}$

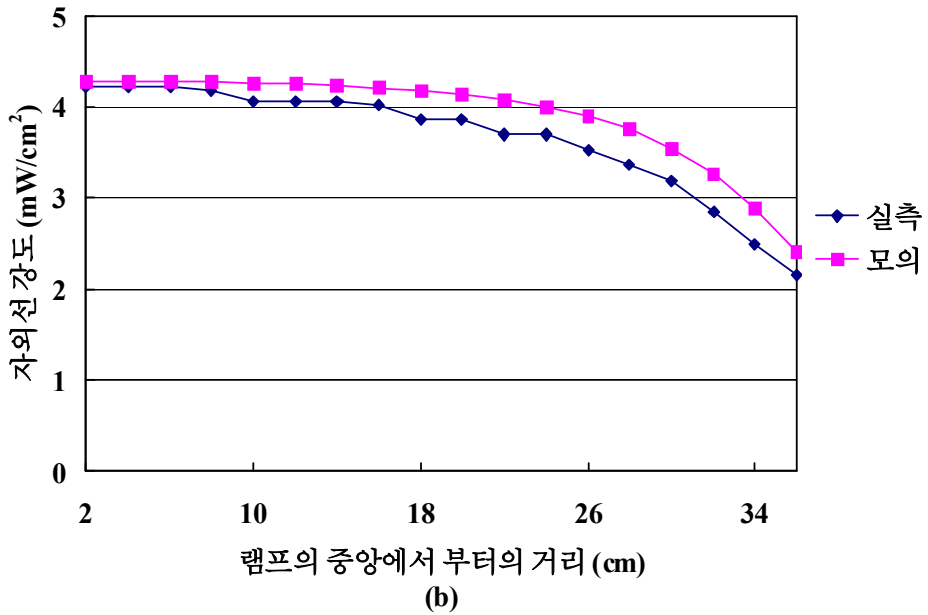
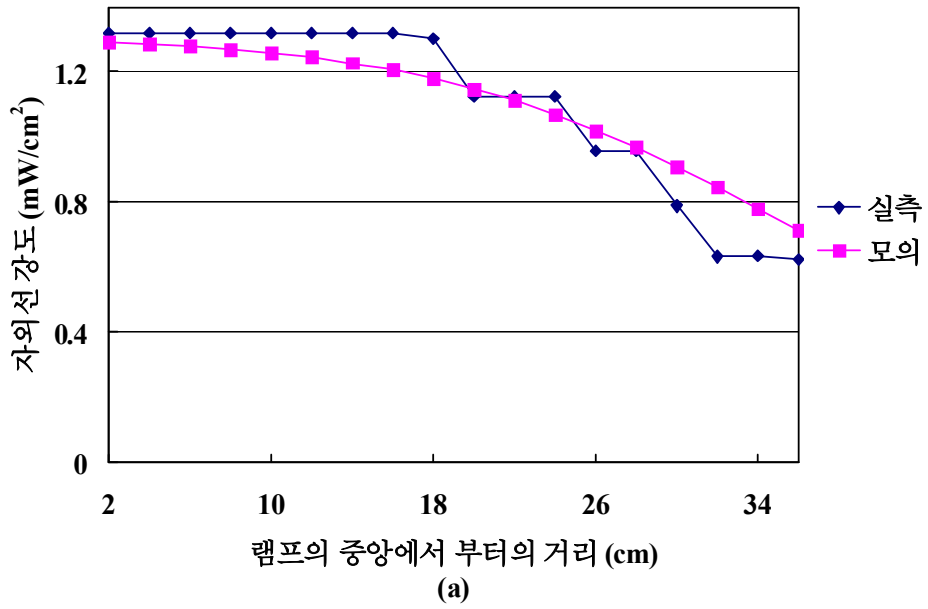


그림 4.21 z축 방향의 자외선 강도
 (a) : x = 8cm, y = 20cm, (b) : x = 8cm, y = 8cm

모델의 검증 결과를 그림 4.17에 표시하였는데, 실측값과 계산 값이 서로 유사하게 나타났으며, 평균 상대오차는 8.5%로 비교적 양호하였다. xy 평면과 yz 평면에서의 실측값과 계산 값을 비교한 그림 4.18 ~ 4.19 역시 유사한 형태를 보였고, y 축 방향의 자외선 강도와 z 축 방향의 자외선 강도를 나타낸 그림 4.20 ~ 4.21 또한 실측값과 계산 값 역시 유사한 형태를 보였다. 위 자외선 강도 및 분포를 나타내는 그림에서 보는 바와 같이 모델이 실제 반응조 내부의 자외선 분포를 비교적 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

제 5 장 결 론

접촉식 자외선 살균 반응조에서 수정관에 fouling이 발생하는 실험을 실시하고, 또한 비접촉식 자외선 살균 시스템의 활용을 위한 보정 실험 및 모델의 검증은 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수돗물을 대상으로 하여 비 순환방식으로 자외선 조사 실험을 실시한 결과 자외선 강도는 4일 만에 27% 정도, 7일 만에 56%정도 감소하였다. 하수처리장 방류수를 대상으로 순환방식으로 자외선 조사실험을 실시한 결과 부유물질과 탁도가 수돗물보다 높은데도 불구하고 자외선 강도의 감소폭은 오히려 더 적었다. 이는 강제순환방식으로 인해 수정관 주변에 물의 흐름이 발생하고, 이로 인해 온도가 저하하고 무기물질 침적이 저해 받았기 때문으로 판단된다.
2. 비접촉식 자외선 살균 모델의 보정을 위해 실험실 규모의 반응조를 운전하고 자외선을 실측한 결과 최적의 모의 조건은 램프의 자외선 효율 43% 및 물의 자외선 투과율 100%일 때였다. 그리고 이 조건에서의 실측값과 계산 값의 평균 상대오차는 12.8% 정도이었다.
3. 보정 실험에서 얻어진 최적 모의 조건을 사용하여 모델의 검증을 실시한 결과 실측값과 계산 값이 평균 상대오차 8.5%로서 매우 양호한 결과를 보였다. 이 외의 다른 인자들도 포함하여 보정을 실시하면 오차는 이보다 더 낮아질 것으로 예상된다.
4. 실측강도와 비접촉식 모델에서 계산된 강도가 유사한 분포를 그리는 것으로 보아 모델이 실제 반응조 내부의 자외선 분포를 비교적 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

부 록

Advantech사의 ADAM Viewer의 경우 BS Script의 창이 총 3개로 구성이 된다. 선행 작업을 하는 Pre-task창, 주 작업을 실행하는 BS Script창, 마무리 작업을 하는 Post task창이 있다. 본 논문에서 사용한 Script창은 Pre-task창과 주 작업을 실행하는 BS Script 창을 사용하였다. 부록에는 논문에서 사용한 Pre-task창과 BS Script창을 수록하였다.

Pre - task BS Script 창

```
public filename as string
public icount as integer
public tg7 as tag
Sub pre_task1()
set tg7 = gettag("virtask", "VT5")
icount = 0
tg7 = -1
End Sub
```

BS Script 창

```
public filename as string
public icount as integer
public tg7 as tag
Sub SCR1()
dim bt_on as tag
dim tg_on as tag
dim bt_data as tag
dim tg_data as tag
dim ai1 as tag
dim tg3 as tag
dim tg4 as tag
```



```

dim tg5 as tag
dim num as single
dim num1 as single
dim num2 as single
dim tg_mo as tag
dim bt_mo as tag
dim bt_mo1 as tag
dim bt_mo2 as tag
dim tg6 as tag
dim tg8 as tag

open "uv.txt" for append as #2

set tg_on = gettag("virtask", "VT_ON")
set bt_on = gettag("disp1", "BBTN1")
set ail = gettag("task1", "AII")
set bt_data = gettag("disp1", "bbtn2")
set tg_data = gettag("virtask", "VT_DATA")
set tg3 = gettag("virtask", "VT1")
set tg4 = gettag("virtask", "VT2")
set tg5 = gettag("virtask", "VT3")
set tg6 = gettag("virtask", "VT4")
set tg8 = gettag("virtask", "VT6")
set tg_mo = gettag("virtask", "VT_MO")
set bt_mo = gettag("disp1", "BBTN3")
set bt_mo1 = gettag("disp1", "BBTN4")
set bt_mo2 = gettag("disp1", "BBTN5")

'자외선 강도 측정기 % → mW/cm2 계산식
num = ail.array(2)
num1 = 100/(2.41-0.48)*(num-0.48)

```

```
num2 = 17/(2.41-0.48)*(num-0.48)
```

```
tg_on = bt_on
```

```
bt_mo = bt_data
```

```
outputf 1, num1
```

```
outputf 2, num2
```

```
'25초 cycle data 입력 및 모터 구동
```

```
if bt_data = 1 then
```

```
////////////////////////////////////
```

```
    tg7 = tg7 + 1
```

```
        if abs(int(tg7/25) * 25 - tg7) < 0.01 and tg7 < 440 then
```

```
            tg3 = 25
```

```
            tg4 = 0
```

```
            tg5 = 0
```

```
        end if
```

```
    tg3 = tg3 - 1
```

```
select case tg3
```

```
    case 20 to 24
```

```
        tg_mo = 0
```

```
        tg6 = 0
```

```
    case 10 to 19
```

```
        tg6 = 1
```

```
        tg4 = tg4 + num1
```

```
        tg5 = tg5 + num2
```

```
        outputf 4, tg4/(20-tg3)
```

```
        outputf 5, tg5/(20-tg3)
```

```
        if tg3 = 10 then
```

```
            icount = icount + 1
```

```

                print #2, icount, tg4/10, tg5/10, time
                outputf 3, icount
            end if
        case 0 to 9
            tg_mo = 1
            tg6 = 0

end select

if abs(int(tg7/25) * 25 - tg7) < 0.01 and tg7 > 440 then tg_mo = 0
'////////////////////////////////////
end if

'모터 타이머에 의한 역구동 버튼
if bt_data = 0 and bt_mo2 = 1 then
    tg8 = 170
    bt_mo2 = 0
end if

if tg8 > 0 then
    tg_mo = 1
    tg8 = tg8 - 1
        if tg8 = 0 then tg_mo = 0
end if

'모터 강제 구동 버튼
if bt_data = 0 and bt_mol = 1 then tg_mo = 1
if bt_data = 0 and bt_mol = 0 then tg_mo = 0

close #2
End Sub

```

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. 박재형(1997) 자외선을 이용한 하수처리수의 소독효율에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교
4. 염철민, 김도겸, 정광열, 유양수, 조창현(2003) 국외 먹는물 자외선 소독 법규, 상하수도학회지, 17(6), pp.741 - 747.
5. 윤정원(2011) 비접촉식 자외선 살균모델의 개발과 설계인자에 관한 연구, 석사학위논문, 조선대학교
6. 이경혁, 안효원(2004) 정수처리를 위한 자외선(UV) 소독 기술 동향, 한국상하수도학회지, 가을호, pp.70 - 77.
7. 이석현(2002) 수처리를 위한 자외선 소독기술의 현황과 전망, 대한상하수도학회, 공동춘계학술발표회논문집, pp.33 - 35.
8. 장인성, 김준영(2005) 자외선을 이용한 수처리 살균기술, 조명·전기설비학회지, 19(5), pp14 - 21.
9. 환경부 상하수도종합정보시스템(푸르누리) 하수도 통계 과거자료(2004~2008)
www.info.waternow.go.kr
10. 환경부 보고서(2004) 정수처리기준의 보완 및 정수장 관리제도 개선방안 마련을 위

한 연구, 환경부 보고서, pp.1 - 281.

11. Battigelli. D. A, Sobsey. M. D, Lobe. D. C(1993) The Inactivation of Hepatitis A Virus and Other Model Viruses by UV Irradiation, *Water Science Technology*, 27(3-4), pp.339 - 342.
12. Blatchley III E.R, William L. Wood, Peter Schuerch(1995) UV Pilot Testing -Intensity distributions and hydrodynamics, *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, pp.258 - 262.
13. 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.
14. Bohrerova. Z, Bohrer. G, Mohan Mohanraj. S, Ducoste. J, Linden. K. G(2005) Experimental Measurements of Fluence Distribution in a UV Reactor Using Fluorescent Microspheres, *Environmental Science & Technology*, 39(22), pp.8925 - 8930.
15. 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.
16. 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 Predominantly by Aged People in the Republic of Korea, *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 65(5), pp.518 - 522.
17. Chiu. K. P, Lyn. D. A, Philippe Savoye, Blatchley E. R(1999), Effect of UV System Modifications on Disinfection Performance, *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, May, pp.459 - 469.

18. EPA (2006), Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced, EPA, pp.39 - 76.
19. Haris. G. D, Adams. V. D, Sorensen. D. L, Curtis. M. S(1987) Ultraviolet Inactivation of Selected Bacteria and Viruses with Photoreactivation of the Bacteria, *Water Research*, 21(6), pp.687 - 692.
20. Lin. L. S, Johnston. C. T, Blatchley III. E. R(1999), Inorganic fouling at quartz - water Interfaces in Ultraviolet Photoreactors - II. Temporal and Spatial Distributions, *inorganic fouling - II*, pp.3330 - 3338.
21. 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.
22. 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 Research*, 68(5) pp.900 - 916.
23. 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.
24. 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.
25. Sobsey. M. D(1989) Inactivation of health-related microorganisms in water by disinfection process, *Water Science Technology*, 21(3), pp.227 - 231.

26. Tchobanoglous. G, Darby. J. L, Snider. K. E(1991) Evaluation of Ultraviolet Disinfection for Wastewater Reuse Application in California, Department of Civil Engineering, University of California, Davis, CA
27. 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.
28. U.S.EPA(2003) Equipment verification testing plan for ultraviolet radiation technologies for inactivation of microbiological contaminants, Washington DC, USEPA
29. U.S.EPA(2003) Ultraviolet Disinfection Guidance Manual, EPA 815-D-03-007, pp.335 - 340.

감사의 글

학·석사 연계과정을 포함하여 2년여 동안 많은 가르침과 인생의 진로를 알려주신 김성홍 교수님께 감사를 드립니다. 김성홍 교수님은 제가 3학년 상하수도 수업을 들으면서부터 알게 되었습니다. 교수님께서 공부할 생각이 있는 학생은 교수님께 오면 방을 내주신다고 하셨고, 이곳 위생실험실을 받았습시다. 방학 때면 교수님 일을 도와드리며 같이 식사를 할 때마다 교수님께서서는 제게 인생에 필요한 좋은 말씀들을 해주셨습니다. 그중 하나가 석사에 관한 것입니다. 그때부터 석사에 대한 생각이 머릿속에 맴돌았고 가게 되면 꼭 김성홍 교수님 밑으로 가야겠다! 생각했습니다. 4학년 때 학·석사 연계과정을 거쳐 석사 1년 반을 했고, 어느덧 졸업논문을 쓰는 이 시점까지 오게 되었습니다. 그동안 많은 가르침 주셔서 감사드립니다. 교수님께서서는 앞으로도 제 인생에 영원한 스승님이자 멘토이십니다.

그리고 토목공학과 교수님들께도 감사드립니다. 이 토목공학과에 만형님이시자 기둥이시며 학생들에게 조금이라도 더 많은걸 알려주려 하신 박길현 교수님. 시설관리 처장님을 하시느라 고생하셨고, 항상 웃으시며 좀 더 쉽게 수리학이라는 학문을 학생들에게 알려주신 김운중 교수님. 저녁 늦게까지 연구실에서 연구하시며 고생하시는 박정웅 교수님. 토목공학과 학과장님을 하시며 학생들이 글로벌한 교육을 배울수 있게 노력하시는 김대현 교수님. 항상 웃으시며 친구처럼 다가와 주시는 이원희 교수님. 석사하는 동안 좀더 저에게 많은걸 가르쳐 주셔서 감사드립니다.

저와 같이 대학원 생활을 같이 했던 우리 대학원생들. 먼저 직속 선배이자 나에 모든 짜증과 힘든 소리를 모두 받아준 정원이형. 형이 있어서 석사생활 편히 했어요. 박사 가셨는데 형이 원하시는 것, 꿈꾸시는 것 꼭 이루셨으면 해요. 성공하면 저 잊지 마시구요. 그리고 12층에 있는 토질 형님들. 내 한마디 한마디에 뽕뽕 터지시는 성우형. 형이랑은 반년 더 있었으면 좀 더 재미있었을 텐데 좀 아쉽네요. 그리고 나이는 형이지만 그런 거 생각안하는 동기인 경호형, 광기형. 둘 다 수고했어요. 경호형은 박사가는데 형이 원하는바 꼭 이루시고, 광기형은 꼭 좋은데 취직하세요. 그리고 우리 대학원 막내 정환이. 네가 제일 고생이 많았다. 앞으로 1년 남았는데 좀만 더 고생해라. 그리고 우리 친구들. 군대 전역하고 친구 없이 학교 다닐 생각에 암울했던 첫날 혜성처럼 나타나 같이 다녀 지금은 친형 같은 도형이형, 상현이형, 고향 친구이자 취직으로 고생하는 익제, 공무원 준비하며 면접 보느라, 시험 보느라 고생하는 진항이, 광환이, 취직

해서 이곳저곳 현장으로 일하러 다니는 종민이, 석사를 갈려고 학·석사 연계를 준비 중인 태훈이, 우리 모임에서 막내이며 항상 형들한테 구박받는 용호. 모두들 감사합니다. 너네들이 내 옆에

마지막으로 우리 부모님. 지금은 허리가 아프셔서 고생 중이신 어머니. 저를 낳으시고 산후 조리도 못하시고 고생하셔서 힘드신 모습을 보면 항상 마음이 아픕니다. 그리고 아버지. 못난 저 가르치시겠다고 고생하시는데 죄송합니다. 부모님 고생하신 만큼 앞으로 열심히 하겠습니다. 이 논문을 마치기까지 옆에서 많은 도움을 주셨던 모든 분들께 깊은 감사를 드립니다. 앞으로 세상에 불필요한 사람이 되지 않도록 노력하겠습니다. 감사합니다.