creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000264091

2013年 8月
석사학위논문

파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조를 이용한 살균

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

김 경 면

파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조를 이용한 살균

Disinfection by Pilot Scale Non-contact Type UV Photoreactor

2013년 8월 23일

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

김 경 면

파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조를 이용한 살균

지도교수 김 성 홍

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

김 경 면

김경면의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 길 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

2013년 5월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론 1

제 2 장 이론적 고찰 3

2.1 살균의 개념과 종류 3

2.1.1 염소에 의한 살균 9

2.1.2 오존에 의한 살균 11

2.1.3 자외선에 의한 살균 15

2.2 자외선의 특징과 살균 원리 16

2.2.1 영향인자 21

2.2.2 비접촉식 자외선 살균 모델 24

제 3 장 실험 재료 및 방법 25

3.1 상수의 살균 25

3.2 하수의 살균 29

제 4 장 결과 및 고찰 33

4.1 상수의 살균 33

4.2 하수의 살균 38

제 5 장 결 론 42

참 고 문 헌 43

감사의 글 47

표 목 차

표 2.1 여러 가지 처리공정에서 박테리아 제거 또는 사멸 ····· 5

표 2.2 일반적으로 사용되는 살균제의 이상적인 특성과
실제 특성 비교 ····· 7

표 2.3 염소, 오존, UV를 사용한 살균 메카니즘 ····· 8

표 2.4 오존의 성질 ····· 11

표 2.5 하수살균을 위한 오존사용에 미치는 하수 성분의 영향 ····· 12

표 2.6 국내 오존공정 운영 정수장 현황 ····· 14

표 3.1 상수의 살균 실험 조건[자외선 램프 (40W × 1,3EA)] ····· 26

표 3.2 상수의 살균 실험 재료 및 장치 ····· 28

표 3.3 방류수 수질 ····· 29

표 3.4 하수의 살균 실험 조건[자외선 램프 (40W × 1,3,5EA)] ····· 31

표 3.5 하수의 살균 실험 재료 및 장치 ····· 32

표 4.1 램프 1개를 이용한 상수에서의 대장균군 실험 결과(유입) ····· 34

표 4.2 램프 3개를 이용한 상수에서의 대장균군 실험 결과(유입) ····· 36

그 림 목 차

그림 2.1 빛의 스펙트럼 ····· 17

그림 3.1 파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조 입체도
(상수 살균실험) ····· 27

그림 3.2 파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조 입체도
(하수 살균실험) ····· 30

그림 4.1 램프 1개를 이용한 상수의 살균 (유입) ····· 35

그림 4.2 램프 3개를 이용한 상수의 살균 (유입) ····· 37

그림 4.3 램프 1개를 이용한 하수의 살균 ····· 38

그림 4.4 램프 3개를 이용한 하수의 살균 ····· 39

그림 4.5 램프 5개를 이용한 하수의 살균 ····· 40

그림 4.6 HRT와 UV의 강도의 변화에 따른 대장균의 감소 ····· 41

ABSTRACT

Disinfection by Pilot Scale Non-contact Type UV Photoreactor

Kim, Kyung Myun

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

In the field of water supply and wastewater treatment plant, disinfection of miciroorganisms using UV right is widely used. In spite of the high germicidal effect and relatively clean by-product, UV disinfection has fundamental defeat which is fouling at the interface of water and lamp sleeve. Non-contact type of UV disinfection system was developed in this study and the performance evaluation of the system was carried out by using a pilot-scale photoreactor. E-coli. removal rate was evaludted as a disinfection index. For the disinfection of water supply, synthetic source water containing 3×10^3 to 3×10^4 colony/mL was completely inactivated at the dosage of 1 lamp with 10 second of contact time. Secondary effluent of wastewater treatment plant was also treated by the non-contact type UV photoreactor. The removal rate of E-coli. were ranged 60 - 100% at the UV dosage of 10 - 100mJ/L.

제 1 장 서 론

과거에는 장티푸스, 콜레라, 세균성이질 등의 세균에 의한 대규모 전염성 질병이 주였고, 아직도 개발도상국에서는 이러한 질병이 대규모 전염성 질병의 주원인이 되고 있다. 그러나 하·폐수처리, 상수도 급수 등 위생기반시설이 발달한 선진국에서는 이러한 세균에 의한 발병건수는 크게 감소하고 있다. 그렇지만 바이러스나 원생동물과 같은 새로운 병원균에 의한 발병건수가 증가하고 있어 장 관계 질병의 전체 건수는 크게 감소하고 있지 못하다. 특히 1980년대 이후로 상수원수에 존재하는 미생물 중에서 원생동물인 지아디아와 크립토스포리디움에 의한 발병사고가 전 세계적으로 증가하고 있다(염철민 등, 2003). 이에 대한 대책으로 국내의 경우 환경부에서는 현재 국내 하수처리장의 방류수를 수질 기준에 따라 총대장균군을 3,000개/mL 이하로 처리하여 배출할 것을 의무화하고 병원성 미생물의 상수원 유입을 근원적으로 차단하고 있다. 따라서 대부분 하수처리장에서는 염소 혹은 자외선(UV)을 이용하여 살균한 후 배출한다. 병원성 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 살균법으로 가격이 저렴하고 잔류성이 높은 특징을 가지고 있어 가장 대표적인 살균제로 사용되어 왔다(김성홍, 2008). 하지만 수돗물의 바이러스 검출 사건 및 지아디아, 크립토스포리디움과 같은 병원성 원생동물들이 원수에서 검출됨에 따라 살균의 중요성은 날로 증가하고 있다(김두일 등, 2008). 특히 최근 발견되는 병원성 바이러스 및 원생동물은 기존의 염소 살균에 강한 내성을 가지고 있어 기존 공정에서 높은 살균 효율을 기대하기가 힘들었다. 염소 살균의 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 (박세준, 2005). 이후 염소를 주된 살균제로 사용해왔던 지역에서는 오존(O_3), 이산화염소(ClO_2), 클로라민(Chloramine), UV 등 다양한 대체 살균법에 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 적

었다. 이산화염소의 경우 THM을 생성하지는 않지만 이산화염소의 생산과정에서 발생하는 chlorate가 문제가 되었다. 이렇게 염소이외의 살균제를 선택할 경우에도 유해한 부산물로부터 자유로울 수 없음이 밝혀졌다(이석현, 2002).

최근 들어 UV는 수처리에서 부산물의 생성 없이 살균할 수 있는 효과로 인해 염소살균을 대체하는 공정으로 많이 사용되고 있다. UV 공정의 장점은 살균 후에도 THM, 응집, 슬러지 등의 부산물이 생성되지 않고, 수중의 기본성상을 바꾸지 않으며, 돌연변이가 없고 쉽게 운전할 수 있다는 것이다. 최근 2008년 말 가동되는 53%의 하수처리 시설이 자외선 살균을 채택하고 있다(환경부, 2008).

그렇지만 현재 가동되고 있는 하수처리시설에 설치되어 있는 자외선 살균장치를 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 살균장치는 램프의 표면이나 수정관 표면에 fouling이 발생하는 것은 피할 수가 없다(김맹선, 2011).

본 연구에서는 fouling발생을 피할 수 있는 비접촉식 자외선 살균 방법을 개발하였고, 파일롯 규모의 비접촉식 자외선 살균 장치를 제작하여 상수 및 하수에 대해 실증 살균 실험을 실시함으로써 설계 및 운전 인자로 활용할 수 있도록 하였다.

제 2 장 이론적 고찰

2.1 살균의 개념과 종류

살균이란 질병을 유발하는 미생물 (organisms)의 선택적 제거를 의미한다. 이 공정에서 모든 미생물이 다 죽는 것은 아니다. 이 점이 모든 미생물이 다 죽는 멸균(sterilization)과 다르다. 하수처리분야에서 질병을 유발시키는 중요한 인체의 장(enteric) 미생물은 박테리아, protozoan oocysts와 cysts, helminths, 바이러스 네가지로 분류된다. 1900년대 초기부터 1970년대까지 처리의 목적은 주로 콜로이드, 부유성, 부상성 물질의 제거, 생물학적 분해 가능한 유기물의 처리, 처리 목표가 일반적으로 명시되지는 않았으나 병원균 제거에 있었다. 1977년과 1978년에 각각 Clean Water Act, Public Laws 95-217, 97-117로 개정된 1972년의 Federal Water Pollution Control Act Amendments (Public Law 95-200)법령은 수질을 화학적, 물리적, 생물학적으로 보존하기 위한 하수처리방침을 목적으로 개정되었다. 사실상 Clean Water Act의 목적은 수질을 양식과 수영이 가능한 상태로 만드는 것이었다.

1973년 U.S.EPA의 Clean Water Act는 2차 처리에 관한 규정을 채택했다. 이 규정은 133part, 40title로, Code of Federal Regulation (40CFR133)이다. 2차처리는 생화학적 산소요구량 (BOD), 총부유고형물 (TSS), pH, 분변성 대장균(FC) 박테리아에 대해 정의하고 있다. 분변성 대장균 박테리아는 1976년에 삭제되고 주(states)별로 살균을 포함하여 하수처리장의 수질기준을 향상시킬 수 있는 조항으로 대체되었다. 결과적으로 오늘날 분변성 대장균에 관한 기준은 500 MPN/100mL, 총대장균에 대한 기준은 10,000MPN/100mL로 다양해졌으며, 또한 계절에 따른 기준을 가지고 있다. 처리수에 대한 가장 일반적인 기준은 200MPN FC/100mL이다.

살균방법의 선택시에는 다음과 같은 요건을 고려하여 적절한 방법을 택하여야 한다.

가. 살균제의 물에 대한 용해도가 높을 것
나. 살균력이 강할 것
다. 잔류독성이 거의 없을 것
라. 경제적일 것
마. 안정적인 공급이 가능할 것
바. 주입조작 및 취급이 쉬울 것

여섯 가지 요건 중 첫 번째에서 세 번째까지의 사항은 살균제로서의 당연한 조건이지만, 실무적인 관점에서는 마지막의 세 가지 요건이 중요하기 때문에 첫 번째에서 다섯 번째까지의 요건을 만족시킨다고 할지라도 조작 및 취급이 어려우면 적합한 방법으로 선택할 수 없게 된다. 이들 요구조건을 만족시킬 수 있다고 현재까지 알려져 있는 방법으로서는 염소, 오존 및 자외선조사법 등 이다(이병찬 등, 2012). 이상적인 살균제는 취급과 적용하기가 용이하여야 하며, 살균제가 처리수에서 측정될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 가장 많이 쓰는 방법은 화학적 살균제, 물리적 수단, 기계적 수단, 방사선을 사용하는 방법으로 각각의 방법은 다음과 같다.

① 화학적 살균제

살균제로 사용되어온 화학적 살균제는 염소와 염소화합물, 브롬, 요오드, 오존, 페놀과 페놀 화합물, 알콜, 중금속과 관련 화합물, 염료, 비누와 합성세제, 4기 암모니아 화합물, 과산화수소, 과아세트산(peracetic acid), 여러 가지 알칼리, 여러 가지 산 등이 있다. 이중 가장 보편적인 살균제는 산화작용을 하는 화학약품이고 염소가 가장 많이 쓰이고 있다. 강산이나 강알칼리의 물은 병원성 박테리아를 없애는데 사용되어왔는데 그 이유는 pH가 11보다 높거나 3보다 낮은 물은 대부분의 박테리아에 독성을 나타내기 때문이다.

② 물리적 수단

물리적 살균제로는 열, 빛, 음파가 사용될 수 있다. 예를 들어, 끓는점까지 물을 끓이면 포자를 생성하지 않는 대부분의 질병유발 박테리아를 파괴시킬 수 있다. 가열은 보통 음료와 유가공 산업에서 사용되지만, 높은 비용 때문에 많은 양의 하수를 처리하는

데는 적절하지 못한 방법이다. 그러나, 슬러지의 저온 살균방법(pasteurization)은 유럽에서 많이 사용되고 있다.

태양광선도 좋은 살균제로서 살균은 주로 전자기 스펙트럼의 자외선에 의한 것이다. 산화지에서 관찰되는 미생물의 사멸은 태양광선의 자외선 성분의 노출에 기인한다. 자외선 광선을 방출하기 위해 개발되어진 특 별한 램프가 상수와 하수 살균에 성공적으로 사용되어져 왔다. 이 공정의 효율은 물속으로 침투되는 광선에 따라 좌우된다. 부유물질, 용존유기분자, 물 자체 그리고 미생물 또한 광선을 흡수하기 때문에 자외선 광원과 물이 접촉하는 기하학적 형상은 매우 중요하다.

③ 기계적 수단

하수처리에 있어 박테리아와 다른 미생물은 기계적인 수단에 의해서도 제거된다. 다양한 처리 공정과 조작에 대한 일반적인 제거 효율은 표 2.1과 같다. 처음의 4가지 운전조작은 물리적 방법으로 간주될 수 있다. 공정에 의해 수행된 제거율은 공정의 고유기능에 의한 부산물이다.

표 2.1 여러 가지 처리공정에서 박테리아 제거 또는 사멸

공 정	제거율(%)
조대스크린	0-5
미세스크린	10-20
침사지	10-25
보통침전	25-75
약품침전	40-80
살수여상	90-95
활성오니	90-95
처리된 하수의 염소살균	98-99.9

④ 방사선

방사선의 주요 형태는 전자기식, 음향식, 입자식이다. 감마선은 코발트 60과 같은 방사성 동위원소로부터 방출된다. 감마선의 투과력 때문에 상수와 하수를 살균하는데 사용되어져 왔다. 하수나 슬러지의 고에너지 전자 방출장치의 사용에 관하여 많은 부분 연구되고 있으나 조작에 있어 상용화된 장치나 실규모 설비는 없는 상태이다.

표 2.2 일반적으로 사용되는 살균제의 이상적인 특성과 실제 특성 비교

특성	염소	차아염소산 나트륨	차아염소산 칼륨	이산화염소	오존	자외선
유용성	낮은 비용	비교적 낮은 비용	비교적 낮은 비용	비교적 낮은 비용	비교적 높은 비용	적당히 높은 비용
무취성	높음	적절	적절	높음	높음	적용안됨
균질성	균질	균질	균질	균질	균질	적용안됨
외부물질과의 반응성	유기물산화	활성있는 산화제	활성있는 산화제	높음	유기물산화	자외선 흡수
비부식/비염색	높은 부식성	부식성	부식성	높은 부식성	높은 부식성	적용안됨
비독성	고등생물에 대한 독성이 큼	독성	독성	독성	독성	독성
침투성	높음	높음	높음	높음	높음	보통
안전성	높음	보통	보통	높음	보통	낮음
용해성	보통	높음	높음	높음	높음	적용안됨
안정도	안정	약간불안정	비교적 안정	불안정	불안정	적용안됨
미생물에 대한 독성	높음	높음	높음	높음	높음	높음
상온에서의 독성	높음	높음	높음	높음	높음	높음

살균제의 역할을 설명하기 위해 제안된 다섯가지 기본적인 메카니즘은 세포벽에 손상을 주고, 세포의 투과력을 바꾸고, 원형질의 콜로이드 성질을 바꾸며, 미생물의 DNA 및 RNA를 바꾸고, 효소활동의 방해이다. 세포벽이 손상되거나 파괴되면 세포가 용해되고 사멸하게 된다. 페니실린과 같은 어떤 물질은 박테리아 세포벽의 합성을 방해한

다. 페놀 화합물이나 세제는 세포질 막의 투과력을 변화시킨다. 이런 물질들은 막의 선택적 투과력을 파괴시키고 질소와 이과 같은 필수 영양분이 빠져나가도록 한다. 가열, 방사선, 그리고 강산과 강알칼리제는 원형질의 콜리이드 성질을 변화시킨다. 가열은 세포단백질을 응고시키고 산이나 염기는 단백질을 변성시켜 치명적인 영향을 나타낸다. 자외선은 DNA 가닥을 해체하고 미생물내 이중구조를 생성시킬 수 있다. UV광자(photon)가 DNA에 의해 박테리아와 원생동물로 흡수되고, DNA와 RNA에 의해 바이러스 안으로 흡수될 때, 인접한 DNA내의 티민이나 RNA내의 우라실로부터 공유원자의 2분자체가 생성될 수 있으며 이중구조의 생성은 미생물이 더 이상 번식하고 활동하지 못하도록 한다. 살균의 다른 유형은 효소의 활동 억제이다. 염소와 같은 산화제는 효소의 화학적 배열이나 활동력을 변환시킬 수 있다. 하수살균에 사용되는 일반적인 염소, 오존, UV의 살균메카니즘을 표 2.3에 비교하였다.

표 2.3 염소, 오존, UV를 사용한 살균 메카니즘

염소	오존	UV
1. 산화	1. 직접 산화/세포 외부의 누출로 인한 세포벽 파괴	1. 미생물의 세포벽 내의 RNA와 DNA의 광화학적 손상 (이중결합 생성)
2. 가용한 염소의 반응	2. 오존분해에 의한 래디칼 부산물의 반응	2. 미생물내 핵산은 240~280nm의 파장 범위에서 자외선 흡수가 가장 활발
3. 단백질 침전	3. 핵산 구성요소의 손상	3. RNA와 DNA는 생산을 위한 유전적 정보를 수행하기 때문에 이들의 손상은 세포 비활성에 효과적
4. 세포벽 투수성의 변형	4. 중합반응에 의한 탄소-질소 결합의 파괴	
5. 가수분해와 물리적인 해체		

살균제나 살균방법을 적용하는데 고려하여야 할 인자는 접촉시간, 살균제의 농도, 물리직 수단의 강도와 성질, 온도, 미생물의 종류, 부유액의 성질이다(Metcalf 등, 2004).

2.1.1 염소에 의한 살균

모든 화학 살균제 중에서 염소는 세계적으로 가장 보편적으로 사용되는 살균제 중의 하나이다. 그 이유는 염소가 이상적인 살균제의 요구사항을 대부분 만족하고 여러 가지의 소독제(예, chlorine, chloramines, ozone 및 chlorine dioxide) 중에서 chlorine(염소, Cl_2)은 소독력 및 잔류성이 좋은 편이기 때문에, 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로도 살균에 가장 널리 사용되고 있다(Singer, 1999). 하수의 살균을 위해 염소를 처음으로 사용한 것은 1914년 Altoona, PA와 Milwaukee, WI에서 였다(Enslow 1938).

하수처리장에서 이용되는 주된 염소화합물은 염소(Cl_2), 차아염소산 나트륨(NaOCl), 차아염소산 칼슘($Ca(OCl)_2$), 그리고 이산화 염소(ClO_2)이다. 많은 대도시에서는 액체염소의 저장과 운전과 관련된 안전성을 고려하여 염소가스를 차아염소산 나트륨으로 대체하고 있다.

염소는 이처럼 가장 널리 쓰이는 살균제이지만 1970년대초, 색도제거, 냄새, 맛, 살균을 위한 수처리시설에서 염소와 오존과 같은 산화제의 사용은 바람직하지 않은 살균부산물(DBPs)의 생산을 야기한다는 것을 알았다(U.S.EPA, 1999). 가장 높은 농도로 매우 흔하게 나타나는 DBPs는 트리할로메탄(THMs)과 할로아세틱산(HAAs)이다. 트리할로메탄과 할로아세틱산과 더불어 다양한 DBPs가 생산되어진다. DBPs의 생성은 이 화합물들이 공중보건과 환경에 미치는 잠재적인 영향 때문에 큰 관심의 대상이다. 예를들어, 클로로포름은 잘 알려진 동물 발암물질이고, 대부분의 haloforms 또한 동물 발암물질로 생각되고 있다. 또한, 이런 화합물들의 대부분은 인간에게 암을 유발시킬 가능성이 있는 물질로 인간 발암물질로 분류되어지고 있다. 이런 화합물질의 어떤 것들은 염색체 이상과 정자의 기형을 야기하는 것으로 알려져 있다(Metcalf 등, 2004). 이와 같은 두 종류의 DPBs와 일부 화합물들은 동물실험 및 역학 연구 결과 생식 및 발생 독성, 그리고 발암성을 나타낼 가능성이 있는 것으로 알려져 있어, 우리나라에서는 최대오염농도(Maximum Contaminant Level, MCL)를 둘 다 0.1 mg/L로 규제하고 있다(김희갑 등, 2008). 또한 방류되는 잔류염소는 낮은 농도에서도 접촉시간과 염소 형태에 따라 방류지에서 대부분의 어류와 수생동물에 독성을 갖는 문제점이 있다(백영석 등, 2005). 이러한 화합물들과 관련된 잘 알려지지 않고 잠재적인 공중보건 및 환경적 위험을 인식하여 미국 EPA에서는 먹는 물에서의 생성을 제어하기 위한 적극적인 태도를 취하고 있다.

우리나라에서는 2006년 12월 28일자로 수도꼭지의 먹는 물 잔류염소의 최소 농도기준을 유리잔류염소(F-Cl)에 대해서는 0.2 mg/L에서 0.1 mg/L로, 결합잔류염소(C-Cl)에 대해서는 1.5 mg/L에서 0.4 mg/L로 대폭 낮추는 개정령을 공포하였다. 반면에 병원성 미생물에 의해 오염되었거나 오염 우려가 있는 경우 F-Cl은 0.4 mg/L, C-Cl은 1.8 mg/L 이상이 되도록 규정하였다(환경부, 2006). 하수 살균제로써 염소의 사용과 관련되는 환경적 영향은 미생물의 재성장과 DBPs의 방류 등이 있다(Metcalf 등, 2004). 우리나라는 하수의 염소소독에 대한 운전 실적이 극히 적고 하수 특성에 따른 염소 소멸 특성에 대한 연구 자료는 매우 부족한 실정이다(백영석 등, 2005). 이와 같은 이유로 현재에는 대체 소독공정의 도입이 시급하다.

2.1.2 오존에 의한 살균

오존은 1900년대 초에 프랑스에서 용수 살균을 위해서 처음으로 사용되었다. 오존의 사용은 증가되었고 몇 나라의 서유럽 국가들과 북미까지 퍼졌다. 거의 전부가 용수 처리를 위한 것인데 세계적으로 1000개 이상의 오존 살균 설비가 있다. 대략 200군데의 설비는 북미에서 운전되고 있다. 이러한 설비에서 오존의 일반적인 사용은 맛, 냄새, 색도를 발생시키는 물질을 제어하기 위한 것이다. 비록 역사적으로 용수의 살균을 위해 주로 사용되었지만, 오존 발생과 용해 기술에서의 최근의 진보는 오존의 사용을 하수의 살균에 경제적으로 경쟁력 있는 공정으로 변화시켰다. 오존은 또한 냄새 제어와 탄소 흡착 대신에 용존성 난분해성 유기물의 제거를 위한 고도 하수처리에서 사용될 수 있다. 오존의 성질은 표 2.4와 같다.

표 2.4 오존의 성질

성 질	단 위	값
분자량	g	48.0
끓는점	°C	-119.9±0.3
녹는점	°C	-192.5±0.4
111.9°C에서 기화의 잠열	kJ/kg	14.90
-183°C에서 액체 밀도	kg/m^3	1574
0°C, 1atm에서 증기 밀도	g/mL	2.154
20°C에서 물의 용해도	mg/L	12.07
-183C°에서 증기압	kPa	11.0
0°C,1atm에서 건조공기에 비교되는 증기 밀도	-	1.666
0°C, 1atm에서 증기의 비부피	m3/kg	0.464
임계온도	°C	-12.1
임계압력	kPa	5532.3

Rice (1996); U.S.EPA (1986); White (1999).

오존은 대단히 반응성이 큰 산화제이고, 오존처리에 의한 박테리아의 사멸은 세포벽의 분해 (cell lysis)로 인하여 일어난다고 믿어지고 있다. 오존 살균에 미치는 하수 특성의 영향은 표 2.5에 나타내었다. 오존은 매우 효과적인 바이러스 사멸제이고 일반적으로 염소보다 더 효과적으로 믿어진다. 오존 처리는 용존 고형물을 생산하지 않고 공정에 들어오는 유입수의 암모늄이온이나 pH에 영향을 받지 않는다. 이러한 이유 때문에, 오존 처리는 특히 탈염소처리가 요구되고 처리시설에 순산소 장치가 있는 경우, 염소 처리나 차아염소산염 처리의 대안으로 고려되어진다(Metcalf 등, 2004).

표 2.5 하수살균을 위한 오존사용에 미치는 하수 성분의 영향

성 분	효 과
BOD, COD, TOC 등	BOD와 COD를 나타내는 유기성분들은 오존 요구량에 영향을 미칠 수 있다.
Humic material	오존 분해와 오존 요구량 정도에 영향을 미친다.
Oil and grease	오존 요구량에 영향을 미칠 수 있다.
TSS	오존 요구량은 증가시키고 둘러싸인 박테리아를 보호한다.
Alkalinity	없거나 적은 영향
Hardness	없거나 적은 영향
Ammonia	없거나 적은 영향, 높은 pH에서 반응 할 수 있다.
Nitrite(아질산)	오존에 의한 산화
Nitrate(질산)	오존의 효과를 감소시킬 수 있다.
Iron(철)	오존에 의한 산화
pH	오존 분해율에 영향을 미친다.
산업배출물	성분에 의존하고, 오존 요구량의 일별, 계절별 변동을 초래할 것이다.

이처럼 오존 소독의 경우, 유럽에서 정수분야에 가장 효율이 좋은 소독 공정으로 인정을 받았으나 1970년대 초반부터 시작된 미국 내에서의 하수 소독 효율평가연구에서 높은 초기투자비 및 유지관리의 문제로 인해 염소보다는 효율적이지만 UV 소독보다는 효과적이지 못한 것으로 이해되었다. 또한 많은 연구자들은 하수의 2차 처리수에 오존소독의 도입은 높은 오존 요구량(ozone demand)이 소요됨으로 경제적인 타당성이 없는 것을 지적하였다(Pei etal., 2002). 이와 같은 높은 오존 요구량의 발생은 처리수내에 존재하는 부유물이나 유기물에 기인하는 것으로 연구되었으며 이러한 물질들이 대장균 소독이전에 오존을 소모하거나 경쟁적인 반응으로 소독효율이 저하됨을 밝힌 연구가 있다(류승민 등, 2002). 또한 오존의 잔류가 종종 수중 생물에게 급성독성이 있다는 사례가 있었다(Ward etal., 1976). 그러나 오존은 빠르게 소멸하기 때문에 잔존 오존량은 유출수가 수계로 방류될 때면 일반적으로 검출되지 않는다. 오존처리시 약간의 독성 돌연변이와 발암성 물질을 생성할 수 있는 것이 여러 연구가들에 의해 보고되었다(Metcalf 등, 2004). 오존처리시 부산물질의 생성가능성은 여러 가지 수질특성에 따라 달라질 수 있으며, 유입원수에 포함된 TOC/DOC 와 UV_{254}흡수물질에 의해 부산물질의 종류와 양이 달라진다. 이에 따라 오존처리공정의 경우 시설의 도입단계부터 대상원수의 특성실험 및 분석에 의해 부산물질을 최소화할 수 있는 최적의 공정선정과 함께 운전조건 및 제어기법의 적용이 필요하다(오현제, 2002).

현재 국내에서는 정수처리 목적으로 전국 24개 정수장에서 오존 공정을 도입 계획중에 있으며, 그 중 16개 정수장에 오존설비가 설치, 가동중에 있다. 국내에 도입된 정수장 오존 공정은 대부분 미량 유해물질, 맛냄새 물질 등의 문제를 해결하기 위해 운영되고 있으며, 오존 공정의 특징 중 하나인 소독의 목적으로 운영하지 않고 있는 실정이다. 하지만 향후 염소 내성 원생동물등에 대한 미생물학적 안전성 확보 차원에서 오존의 소독능 제어는 중요한 문제이다. 표 2.6에 오존처리시설을 운영하고 있는 국내 16개 정수장이 위치한 지역 특성과 도입년도, 정수장 시설용량, 오존주입지점, 오존발생방식을 나타내었다(노희수 등, 2011).

표 2.6 국내 오존공정 운영 정수장 현황

정 수 장		운영도입 년도	시설용량 (m^3/day)	오존주입 지점	오존발생 방식
한강 수계(2)	AB	07	190,000	전오존	산소식
	GI	08	350,000	후오존	산소식
낙동강 수계 (14)	PH	89	600,000	전,후오존	공기식
	PD	02	1,555,000	전,후오존	공기식
	PM	98	277,000	전,후오존	공기식
	DS	09	200,000	후오존	공기식
	DG	98	800,000	후오존	공기식
	UH	99	270,000	후오존	공기식
	UC	02	60,000	후오존	산소식
	YU	01	55,000	후오존	공기식
	YB	98	37,500	후오존	공기식
	GS	01	165,000	전,후오존	공기식
	GM	03	105,000	전,후오존	산소식
	MC	98	400,000	전,후오존	공기식
	JS	99	70,000	전,후오존	공기식
	GG	08	36,000	후오존	산소식

2.1.3 자외선(UV)에 의한 살균

자외선 살균은 1900년대 초에 사용된 후 다양한 분야에서 이용되고 있다. 처음에는 양질의 급수에 사용되었으나 하수 살균제로서의 자외선은 새로운 자외선 램프, ballast, 보조장치의 발달과 함께 1990년대에 많이 진보하게 되었다. 적당한 자외선 조사는 하수내 박테리아나 바이러스의 제거에 효과적이고 독성 물질과 같은 부산물이 발생되지 않는다는 것이 입증되었다(Metcalf 등, 2004). 문헌에 의하면 크립토스포리디움이나 지아디아와 같은 원생동물은 오존이나 자외선 소독에 의해 효과적으로 사멸되어 염소소독에 비해 우수한 소독효율을 달성할 수 있는 것으로 알려져 있다(USEPA, 1996; USEPA, 1999).

그러나 오존소독의 경우 오존발생장치 및 배오존 파괴를 위한 장치 등 부속설비가 필요하고, 이들 장치의 가격이 높아 선진국에서는 병원성 원생동물의 제거를 목적으로 자외선 소독법이 적용되고 있다. 특히 1950년대 자외선 살균 메카니즘에 대한 연구(Dulbecco, 1950)가 이루어진 이래로 먹는 물 분야에 자외선 소독 기술 도입이 증가하여 1996년 유럽에서 자외선 소독기술을 적용하는 정수장은 2,000군데 이상으로 증가하였고, 핀란드의 헬싱키에서는 약 28만 톤/일 규모의 대용량 자외선 살균이 도입되었다. 미국의 경우도 크립토스포리디움 살균 목적으로 적용되어 왔으며, 대용량의 적용을 위한 설계가 여러 곳에서 진행 중이다(염철민 등, 2003).

자외선의 살균력은 자외선의 강도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 자외선 주입율(UV dose)에 비례하는데, 화학적 처리에서 농도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 주입율(dose)과 같은 의미로 사용된다. 자외선의 강도는 자외선 램프에서 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(김성홍, 2008).

2.2 자외선의 특징과 살균 원리

자외선은 100-400nm의 파장대를 가진 모든 전자기적 방사에너지를 말하며, 주파수로는 7.5×10^{14}-3×10^{16}Hz에 해당한다(김성홍, 2008). 자외선은 태양으로부터 지구에 도달하는 빛의 일부분으로서 가시광선보다는 짧은 파장을 갖고 있으며 X-선보다는 긴 파장을 갖고 있다. 자외선의 종류는 근자외선으로 알려진 장파 (UV-A), 중파 (UV-B), 원자외선으로 알려진 단파 (UV-C)가 있다. UV-A선(315～400㎚)은 Black Light 라고도 하며, 오존층에 흡수되지 않는다. 파장영역이 0.32～0.40㎛에 해당하는 자외선 UV-A 는 UV-B에 비하여 에너지양이 적지만 피부를 그을릴 수 있다. 피부를 태우는 주역은 UV-B이지만 UV-A는 피부를 벌겋게 만들 뿐 아니라 피부 면역 체계에 작용하여 피부 노화에 따른 장기적 피부 손상을 일으킬 수 있다. UV-B선(280～315㎚)은 Dorno선이라고 부르며, 대부분은 오존층에 흡수되지만, 일부는 지표면에 도달한다. 지구에 극소량이 도달하는 UV-B는 파장영역이 0.28～0.32㎛에 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(200～280㎚)선은 오존층에 완전히 흡수되며, 파장영역이 0.20～0.29㎛인 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(김맹선, 2011).

살균에 관계된 파장은 220～320nm로 주로 단파범위에 있다. 자외선은 램프내 수은증기가 전기 불꽃에 의해 충전되고 이에 의해 여기된 수은 증기가 발생하는 에너지로 전환되면서 발생된다.

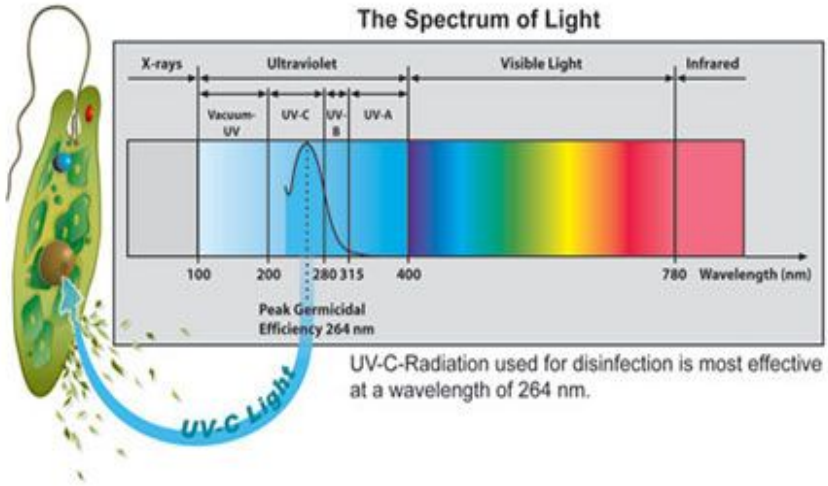

그림 2.1 빛의 스펙트럼 (Emperor Aquatics, 2012)

자외선 살균장치는 램프의 구성조건에 따라 크게 저압-저강도, 저압-고강도, 중압-고강도로 나뉘어진다. 저압-저강도 자외선 램프에서 살균효과가 가장 좋은 파장대는 260nm (255~265nm)부근으로 알려져 있으며 저압-고강도 자외선 램프는 기본적으로 254nm의 단일 파장을 방출한다. 모든 경우에 수은-아르곤 램프가 UV-C 방출에 이용된다. 저압-고강도 자외선 램프는 길이 0.75~1.5m, 지름 15~20mm의 선형으로 다양하게 제작된다. 이 램프들은 표면온도 40°C, 내부 압력 0.007mmHg (Note: 1mmHg=133.322N/m^2)에서 최적으로 작동 된다. 254nm파장에서 70~80W 전력에 대한 저압-저강도 램프의 출력은 약 25~27W이다. 약 85~88% 정도가 254nm의 단파장으로 방출되며 이는 살균에 있어 좋은 효과를 나타낸다. 저압-고강도 자외선 램프는 수은 대신 수은-인디윰 아말감을 사용한다는 것을 제외하고는 저압-저강도 자외선 램프와 유사하며 저압-저강도 자외선 램프에 비해 높은 전류와 0.001~0.01mmHg의 높은 압력이 필요하다. 일반적으로 수은 아말감은 UV-C의 출력을 저효율 램프의 2~4배 정도 크게 할 수 있다. 저압-고강도 자외선 램프의 아말감은 수은 원자의 수준을 일정하게 유지시켜줌으로서 넓은 범위의 온도 변화에 대해 안정하며 수명이 길다(다른 저압 램프보다 수명이 25% 증가). 중압-고강도 자외선 램프는 지난 10년간 발달해 왔으며 600~800°C의 온도와 10^2~10^4mmHg의 압력에서 운전되고 다양한 파장의 자외선을 방출한다. 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 사용은 적은 램프 숫자와 접촉시간의 감소로 다량의 하수나 우수, 공간이 협소한 현장에서 사용된다. 고강도 자외선 램프는 수은증기가 발생하는 온도에서 운전되기 때문에 자외선 출력은 램프의 스펙트럼의 큰 변화없이 여러 범위(일반적으로 60~100%)의 전력에서 조정될 수 있다. 전력 조정 능력은 전체 전력 사용량의 관점에서 중요하다. 게다가 높은 온도에서 운전되므로 석영관 표면에서의 비전도성 막의 생성을 방지하기 위하여 기계적으로 청소하는 것이 필수적이다.

석영관은 램프 표면을 물과의 직접적인 접촉으로부터 보호하고 자외선 램프가 노출되는 유출수의 온도를 완충시키고 램프 표면의 온도를 조절하기 위해 사용함으로서 UV 출력을 매우 일정하게 유지시켜준다. 저압-고효율 자외선 램프 내에는 과잉 액체 수은이 존재하기 때문에 수은 증기압은 램프 표면의 가장 차가운 부분에 의해 제어 받는다. 램프 표면이 최적 온도인 40°C를 유지하지 않으면 램프내의 수은 증기가 다시 액체 상태로 돌아가 자외선을 방출하는 수은 원가가 감소하게 되어 자외선 출력은 감소하게 된다. 또한 UV 램프내의 electron pool의 감소, 전극의 훼손, 석영관의 노후 때문에 시간이 지날수록 UV 살균장치의 효율도 감소하게 된다. 저압-고효율 램프의 수명은 하루의 램프 점등 횟수에 따라 9000~13000시간으로 다양하다. 석영관의 일반적인 수명은 4~8년이다(Metcalf 등, 2004).

자외선은 화학적이라기 보다는 물리적인 살균제이다. 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(김맹선, 2011).

과거, 크립토스포리디움에 대한 자외선에 의한 소독성능은 크게 평가받지 못하였는데, 그 이유는 상당량의 자외선을 조사하지 않을 경우 요구되는 수준까지 병원성 미생물을 사멸시킬 수 없어 경제성이 낮다는 기존의 실험결과 때문이었다. 한편, 이러한 실험결과는 자외선 조사 전후의 병원성 미생물에 대한 소독성능을 평가하는 방법에 크게 의존하게 되는데, 크립토스포리디움을 포함하는 수중의 병원성에 대해서는 미생물의 생존(viability) 여부 보다는 감염성(infectivity)의 보유여부가 중요한 지표가 되고, 자외선 조사 후에 사멸에 이르지는 않더라도 상당한 정도로 감염성을 상실하게 된다는 사실이 1996년 실험에 의해서 밝혀짐에 따라 자외선 소독 방법은 크게 주목을 끌게 되었다, 이러한 관심의 증가의 원인이 되는 것은 자외선 소독 방법이 충분히 효과적이라는 실험 결과 뿐만 아니라, 설치와 운전이 매우 단순한 공정이라는 장점을 동시에 가지기 때문이다(이석현, 2002).

자외선의 살균력은 자외선의 강도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 자외선 주입율(UV dose)로 표시하며, 화학적 처리에서 농도와 접촉시간의 곱으로 정의되는 주입율(dose)과 같은 의미로 사용된다. 자외선 반응조의 살균 효율을 측정하는 직접적인 방법으로는, 미국 환경청(USEPA)의 요구에 따라 Bacillus subtilis 포자나 MS2 coliphage 등과 같은 대표 미생물의 제거율을 측정하는 biodosimetry test가 사용되고 있다. 자외선의 강도는 자외선 램프에서 발생한 자외선이 반응도의 임의의 지점에 도달하여 직접적으로 살균에 작용하는 정도를 말하는 것으로, 램프의 동력과 자외선 발생 효율, 램프로부터의 거리, 굴절이나 반사, 흡수 등의 광학적 특성에 따라 달라지게 된다. 자외선의 강도는 실제로 자외선 램프를 설치하고 radiometer로 직접 측정하기도 하는데, 물리적 한계로 인해 접촉조 안의 임의의 점에서의 강도를 모두 측정하는 것은 불가능하다. 또한, 램프나 빛의 특성 등을 고려한 수학적 모델을 구성하고 이의 모사를 통해 예측하는 방법이 있다. 이러한 컴퓨터 모사의 장점은 각종 영향인자나 변수를 쉽게 바꾸어

가면서 모사하고 그 결과를 빠르게 예측하며, 또한, 그 결과를 이용해서 변수를 다시 수정할 수 있는 것이다. 반응조 전체의 자외선 강도 분포를 예측하는 것은 그 자체로도 중요하지만 살균의 효율을 예측하는데도 매우 중요한 부분이다(박광희, 2008).

정수처리를 위한 자외선 소독장치는 일반적으로 매우 짧은 접촉시간으로 소독효과를 발휘하기 때문에 처리대상수가 흐르는 관(pipe)내에 자외선 램프를 삽입한 형태로 구성하는 것이 전형적이다. 이러한 소독장치의 효율을 향상시키기 위해서는 반응기기의 수리학적인 최적화가 요구된다(이석현, 2002). 염소소독기술이 중심을 이루었던 국가아 지역을 중심으로 자외선 소독기술에 대한 관심과 수요는 최근 급속히 증가하고 있으며, 우리나라도 예외는 아니다, 즉, 과거 자외선 소독방법은 중소규모 이하의 정수시설에서 적절한 경제성이 확보된다는 것이 일반적인 인식이었으나, 대체소독기술에 대한 계속적인 요구와 자외선 소독의 효과에 대한 새로운 연구결과 그리고 더욱 관심이 증가하고 있는 운전관리상의 안전성 및 간편성 등의 이유로 기술 수요는 더욱 증가할 것으로 전망된다(박광희, 2008).

2.2.1 영향인자

자외선 살균의 영향인자로서 가장 먼저 고려할 수 있는 것으로는 램프의 종류라고 할 수 있다. 수처리를 목적으로 하는 자외선 살균에 이용되는 광원은 크게 저압자외선램프(LP, low pressure UV lamp)와 중압자외선램프(MP, midium pressure UV lamp)로 분류된다. 저압자외선램프는 254nm의 소위 살균력을 특이적으로 방출하는 광원이며, 중압자외선램프는 자외부에서 가시부에 걸친 광범위한 방출 파장대를 가진다. 중압자외선램프는 저압에 비하여 고출력으로 자외선을 방출하게 되어 처리용량이 크다는 장점이 있으나 살균력이 없는 파장대에 에너지를 방출하게 되어 에너지소비에 비해 효율이 낮다는 것이 기존의 일반적인 인식이었다. 최근에는 저압램프의 254nm이외에도 미생물의 활성을 상실시키는데 효과가 있는 방출파장이 포함되기 때문에 소독에 더 효과적이라는 연구결과가 이른바 다파장 자외선(multi wave length ultraviolet)이라는 명칭으로 발표되고 있어 계속적인 연구와 현장검증이 요구되고 있다(박광희, 2008). 자외선 살균장치의 설계나 성능에 영향을 주는 인자로는 자외선 출력 및 밀도, 조사량 등의 기계적 특성과 탁도, SS, 자외선 흡광도와 같은 수질 특성이 있다. 특정 유·무기화합물은 254㎚의 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 자외선의 출력, 강도, 주입률, 투과율, fouling, 미생물의 종류와 농도, 조사량, 광회복 등이 있고(김맹선, 2011), 수온과 램프의 살균선출력의 열화가 있다. 각각의 영향인자에 관한 설명은 다음과 같다.

① 자외선 출력

자외선 출력(UV Output)은 램프에서 물로 전달되는 동력(파장 200～300㎚ 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.

② 자외선 강도

자외선 강도(UV Irradiance)는 자외선 에너지가 단위 면적당 입사하는 자외선 에너지를 말하며, 단위면적당 자외선 동력으로 표시한다.

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.

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

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(김맹선, 2011).

⑥ 수온

살균램프는 수온의 영향을 받아서 살균선(파장 253.7㎚)출력의 저하를 일으킨다. 이 관계는 살균램프 및 살균장치의 구조에 따라 꽤 다르다.

⑦ 램프의 살균선출력의 열화

살균램프의 살균출력은 점등시간에 따라 서서히 감소하며 살균효과도 낮아진다. 살균램프에는 수명이 표기되어 있다. 살균램프의 수명이란 점등 중에 살균출력의 감소를 고려한 값이다. 점등하지 않을 때까지의 시간은 이것보다도 훨씬 길지만, 출력이 크게 감소한 상태로 사용하면 소기의 살균효과를 얻을 수 없으므로 새 램프로 교환하는 것이 좋다(SNTC, 2007).

이 외에 광회복 현상 또한 자외선 살균의 영향인자라고 할 수 있다. UV소독법에 있어서는 미생물이 UV 소독 후 근자외성(near UV) 또는 가시광(visible) 영역의 빛에 노출되게 되면 UV에 의해 손상된 DNA가 회복되는 광회복(photoreactivation)을 일으킬 수 있다. 이러한 광회복 현상은 많은 연구자들에 의해 연구가 되었으며, 미생물의 광회복은 UV조사량, 광회복 빛에 대한 노출시간(photoreactivating light), 미생물의 종류 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. UV소독법이 널리 보급되면서 인체에 질병을 일으킬 수 있는 병원성 미생물을 광회복능에 대한 관심이 커지면서 E. coli 0157, 레지오넬라 뉴모필라 등 일부 병원성 미생물의 광회복능에 대해서 조사가 되었으며 질병과 관련이 많은 미생물 종에 대한 광회복능 조사가 중요함을 보고하였다(박광희, 2008).

2.2.2 비접촉식 자외선 살균 모델

비접촉식 자외선 살균 모델을 개발하여 반응조 전체의 자외선 강도분포와 살균의 효과를 예측하였다. 실험에 쓰인 모델의 영향인자로는 빛의 굴절과 반사, 흡수, 그림자 효과 등이 있다. 먼저 굴절에서 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 따른다. 그 이유는 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. 그리고 반사는 서로 다른 두 매질의 경계면에서 파동의 방향이 바뀌는 것을 말한다. 흡수는 빛이 매질을 통과할 때 그 매질이 흡수성이 있으면 빛의 세기는 줄어들게 되는 것을 말하고 투과율은 흡수율과 반대의 개념이다. 마지막으로 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.

제 3 장 실험 재료 및 방법

3.1 상수의 살균

파일롯 규모의 비접촉형 자외선 살균 살균장치를 실험실내에 설치한 뒤, $1m^3$의 물탱크에 상수를 채우고 $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$를 이용하여 잔류염소를 제거하였다. 상수의 잔류염소 제거는 다음 식으로 계산되어질 수 있다.

$$Cl_2 + 4Na_2S_2O_3 \rightarrow 2Cl^- + 2S_4O_6^- + 4Na^+ \tag{3.1}$$

① Cl_2 71g : $Na_2S_2O_3$ 632g 반응
② Cl_2 71g : $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 722g 반응

잔류염소 0.1mg/L × $1m^3$(1ton 규모)이므로

$$\begin{aligned} Cl_2 &= 0.1\frac{mg}{L} \times 1m^3 \times \frac{10^3 L}{m^3} \times \frac{g}{10^3 mg} \\ &= 0.1g \end{aligned} \tag{3.2}$$

필요한 $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$의 양은

$$\frac{722g}{71g} \times 0.1g = 1.017g \tag{3.3}$$

잔류염소가 제거된 상수에 액체배지로 배양한 E-coli. 100ml을 주입하고, 소형펌프(한일, PA-280)를 이용하여 물탱크 내에서 순환을 시켜 골고루 분산되게 하였다.

상수 살균 실험에서는 수돗물을 이용한 실험이기 때문에, 자체적으로 대장균 액체를 제조하고 그 대장균을 염소가 제거된 수돗물에 주입하여서 대장균군 실험을 실시하였다. 대장균은 종류와 범위가 매우 많기 때문에 미생물자원센터 KCTC(Korean Collection for Type Culture)에서 온라인(http://kctc.kribb.re.kr)을 통한 표준 E-coli.의 분양을 받

은 뒤(균주번호 : 2441, 균주명 : Escherichia coli) 제조된 액체 배지에 loop를 이용하여 한 차례 접종시키고 Auto Shaking Incubator에서 37℃로 24시간 배양한 후에 $1m^3$ 물탱크에 대장균 액체 100mL을 투여하였다. 파일롯 규모의 살균 장치의 펌프를 이용하여 물탱크의 상수를 반응조로 유입시키고, 반응조 내에서 살균된 상수는 유출구로 흘려보내면서 다양한 운전조건을 설정한 뒤 유입부에서 한 번, 유출부에서 한 번씩 각각 샘플을 채수하여 실험을 실시하였다. 실험에는 미생물의 지표로서 대장균군을 분석하였는데 대장균군은 수질오염공정시험법의 평판집락법으로 측정하였다. 실험 운전 조건은 표 3.1과 같다.

표 3.1 상수의 살균 실험 조건 [자외선 램프 (40W × 1,3EA)]

유량 (L/min)	웨어높이 (cm)	HRT (sec)
26	11	51.8
	9	43.2
	7	34.5
	5	25.9
74	11	19.4
	9	17.1
	7	14.4
	5	11.3
122	9	11.5
	7	9.6

$1m^3$의 물탱크를 사용하기 때문에 실험에 쓰이는 유량이 제한적이므로 26L/min, 74L/min, 113L/min의 세 가지 유량에 관해서 HRT(수리학적 체류시간)는 10.3~51.8sec 까지 실험을 실시하였다.

실험에 쓰인 비접촉형 자외선 살균 장치는 26cm(폭) × 24.7cm(높이) × 133cm(길이) 장방형이고, SUS제, 1조이다. 유입펌프(한일, PA-630)는 AC220V 단상 600W 출력, 1

조이며, 순환펌프(한일, PA-280)는 AC220V 단상 580W 출력, 1조이다. 자외선 램프(PHILIPS)는 저압 수은 램프로서 40W, 842mm 길이의 램프를 사용하였다. 수정관의 경우 지름 24.5mm에 두께 2.5mm, 길이 850mm이며, 형태는 튜브형이다. 상수의 살균 실험에 사용한 파일롯 규모의 비접촉형 자외선 살균장치의 입체도는 그림 3.1과 같다.

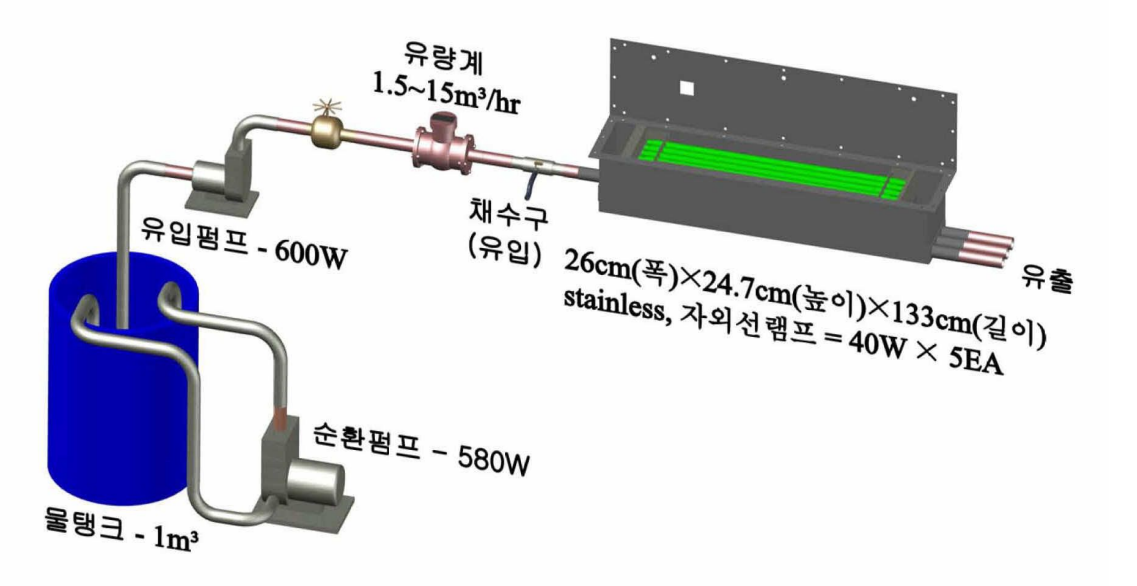

그림 3.1 파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조 입체도 (상수 살균 실험)

살균 장치의 살균 능력을 알아보기 위해 반응조 유입수와 반응조 유출수에 대한 각각의 대장균군 실험을 실시하여 제거율을 계산하였다. 유입 라인에 유량계(유유계기교역상사)를 설치하여 반응조 내에 유량을 조절하고, 반응조 내에 웨어 높이를 변경함으로써 반응조 내에 다양한 HRT(수리학적체류시간)를 설정하고 램프개수 1개와 3개에 대하여 실험하였다. 실험 운전 조건은 표 3.2와 같다.

표 3.2 상수의 살균 실험 재료 및 장치

구 분	제 원
균 주	·Strain Name : Escherichia coli ·Author : (Migula 1895) Castellani and Chalmers ·History : <-HE Han <-Dept. Microbiol. Seoul National Univ. ·Aero Condition : Aerobic ·Temperature : 37 ·KCTC No. : 2441
액체배지	·Beef extract 3.0g ·Peptone 5.0g ·Distilled water 1.0L ·pH : 6.8
Incubator	·제품명 : Mini Shaking Incubator ·모델 : VS-101 SI ·전원 : 220V, 1.5A, 350W ·생산일 : 2012. 08. 10
순환 펌프	·형식 : PA-280 ·품명 : 유체펌프 ·정격전압 : 단상 220V, 60Hz ·양수량 : 100ℓ/min(4m시) ·정격전류 : 2.9A ·정격소비전력 : 580W
살균 방식	연속식

3.2 하수의 살균

G하수처리장 내에서 2차 처리수를 대상으로 한 비접촉형 자외선 살균조의 살균 검증 실험을 실시하였다. 2차 침전지에 비접촉식 자외선 살균 반응조를 설치한 후 펌프를 이용하여 2차 방류수를 반응조로 유입시키고 다시 처리장으로 유출시키는 연속식 실험을 실시하였다. 실험 시작과 실험 종료에 각각 방류수를 채수하여 실험하는 동안의 방류수의 수질을 분석했다. 방류수의 수질 분석 실험에서 pH, BOD, TSS, VSS등을 측정하였으며 실험 방법은 Standard Methods(2012)에 따랐다. 방류수 수질은 표 3.3과 같다.

표 3.3 방류수 수질

성 분		측 정 값
수온		26.4°C
탁도		1.6NTU
pH		6.8
BOD		3.25㎎/L
SS	TSS	1.5㎎/L
	FSS	0㎎/L
	VSS	2㎎/L

실험에 쓰인 비접촉형 자외선 살균 장치는 26cm(폭) × 24.7cm(높이) × 133cm(길이) 장방형이고, SUS제, 1조이다. 유입펌프(한일, PA-630)는 AC220V 단상 600W 출력, 1조이다. 자외선 램프(PHILIPS)는 저압 수은 램프로서 40W, 842mm 길이의 램프를 사용하였다. 수정관의 경우 지름 24.5mm에 두께 2.5mm, 길이 850mm이며, 형태는 튜브형이다. 하수의 살균 실험에 사용한 파일롯 규모의 비접촉형 자외선 살균장치의 입체도는 그림 3.2와 같다.

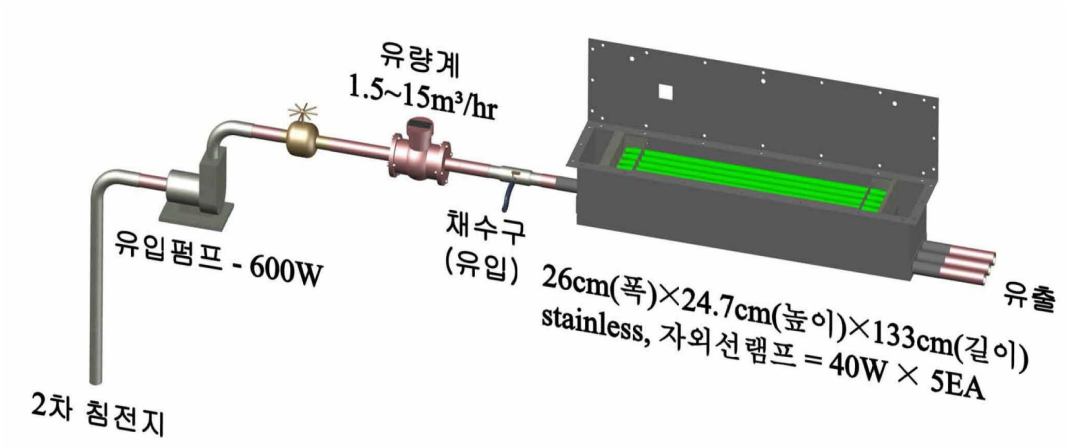

그림 3.2 파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조 입체도 (하수 살균 실험)

살균 장치의 살균 능력을 알아보기 위해 반응조 유입수와 반응조 유출수에 대한 각각의 대장균군 실험을 실시하여 제거율을 계산하였다. 유입 라인에 유량계(유유계기교역상사)를 설치하여 반응조 내에 유량을 조절하고, 반응조 내에 웨어 높이를 변경함으로써 반응조 내에 다양한 HRT(수리학적체류시간)를 설정하고 램프개수 1개와 3개, 5개에 대하여 실험하였다. 실험 운전 조건은 표 3.4와 같다.

표 3.4 하수의 살균 실험 조건 [자외선 램프 (40W × 1,3,5EA)]

유량(L/min)	웨어높이(cm)	HRT(sec)
52	11	26.5
	9	23.3
	7	19.4
	5	15.1
74	11	19.4
	9	17.1
	7	14.4
	5	11.4
91	11	16.0
	9	13.9
	7	11.7
113	11	13.7
	9	12.1
	7	10.3
122	9	11.5
	7	9.7
139	9	10.1

자외선 강도 측정의 경우 실험 시작 시 1회, 1곳의 강도를 측정하였는데 램프 중간의 바닥면과 5cm의 높이에서 강도를 측정하였다. 자외선 강도는 radiometer(Solar Light Company사, LM 100)를 사용하여 측정하였고, 실험의 정확성을 높이기 위해서 램프에 물이 닿지 않도록 유입 부분에 스커트를 설치하였다. 실험에 쓰인 실험 장치와 재료는 표 3.5와 같다.

표 3.5 하수의 살균 실험 재료 및 장치

구 분	제 원
반응조 크기	55㎝(W) × 45㎝(L) × 95㎝(H) 장방형
시료	2차 방류수
자외선램프	85㎝(L), 40W, PHILIPS
수정관	2.45㎝(OD) × 0.125㎝(T) × 85㎝, 튜브형,
유입 펌프	·형식 : PA-630 ·품명 : 유체펌프 ·정격전압 : 단상 220V, 60Hz ·양수량 : 180ℓ/min(4m시) ·정격전류 : 2.9A ·정격소비전력 : 600W
유량계	SSW-ER40B(유유계기교역상사), 구경:40mm, 유량범위:1.5~15(m^3/h)
살균 방식	연속식

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 상수의 살균

수돗물을 이용한 상수의 살균 실험에서 램프 1개와 3개를 이용하였을 때 자외선 강도는 램프 1개를 사용하였을 경우 자외선 강도는 정중앙에서 5cm떨어진 지점에서 3.8 mW/cm^2였고, 램프 3개를 사용하였을 경우에는 4.6 mW/cm^2로 증가하였다. 유출수에 대한 대장균군 실험 결과 대장균이 전부 사멸되어 하나도 검출이 되지 않음으로써 상수에 대한 살균 실험 결과, 자외선 램프의 완전 제거율을 나타냈기 때문에 추가적으로 램프 5개에 대한 실험은 실시하지 않았다. 자외선 램프를 이용한 유입수의 실험 결과를 표 4.1과 표 4.2에 표시하고, 분석결과를 그림 4.1과 그림 4.2에 표시하였다.

표 4.1 램프 1개를 이용한 상수에서의 대장균군 실험 결과 (유입)

웨어높이 (cm)	유량 (L/min)	HRT (sec)	1	0.1	0.01	0.001	시험성적 (개/mL)	평균
5	26	25.9	TNTC	TNTC	35	0	3.5×10^{3}	3.5×10^{3}
			TNTC	TNTC	29	3	TNTC	
	74	11.4	TNTC	TNTC	238	15	2.3×10^{4}	1.9×10^{4}
			TNTC	TNTC	240	14	1.4×10^{4}	
7	26	34.5	TNTC	TNTC	TNTC	19	TNTC	3×10^{4}
			TNTC	TNTC	TNTC	17	TNTC	
	74	14.4	TNTC	TNTC	TNTC	24	TNTC	2.7×10^{4}
			TNTC	TNTC	277	28	2.7×10^{4}	
	113	10.3	TNTC	TNTC	TNTC	28	TNTC	2.8×10^{4}
			TNTC	TNTC	283	5	2.8×10^{4}	
9	26	43.2	TNTC	TNTC	114	7	1.1×10^{4}	1.2×10^{4}
			TNTC	TNTC	129	6	1.3×10^{4}	
	74	17.1	TNTC	TNTC	204	27	2×10^{4}	2×10^{4}
			TNTC	TNTC	203	30	2×10^{4}	
11	26	51.8	TNTC	TNTC	104	8	1×10^{4}	1.3×10^{4}
			TNTC	TNTC	147	3	1.5×10^{4}	

<TNTC : Too Numerous To Count>

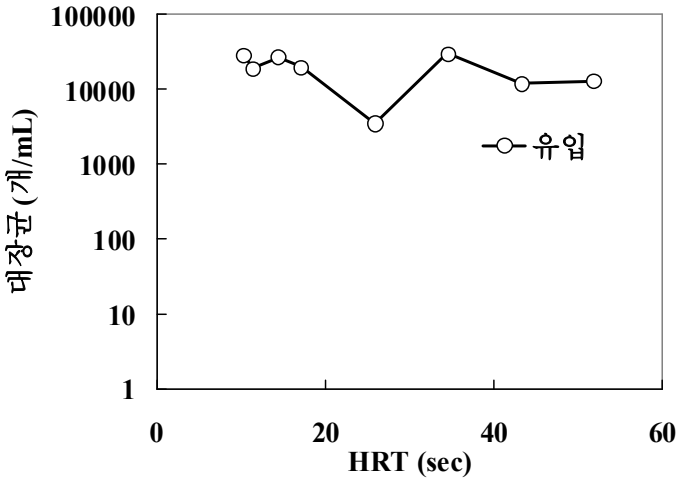

그림 4.1 램프 1개를 이용한 상수의 살균 (유입)

램프 1개를 사용했을 때 유입수의 대장균 분석결과를 그림4.1에 표시하였다. HRT의 변화와 무관하게 유입수의 대장균은 $3.5\times10^{3}\sim3\times10^{4}$ 정도로 분포하였다.

표 4.2 램프 3개를 이용한 상수에서의 대장균군 실험 결과 (유입)

웨어높이 (cm)	유량 (L/min)	HRT (sec)	1	0.1	0.01	0.001	시험성적 (개/mL)	평균
5	26	25.9	TNTC	108	16	0	1×10^{3}	970
			TNTC	86	22	1	860	
	74	11.4	TNTC	TNTC	212	19	2.1×10^{4}	1.8×10^{4}
			TNTC	TNTC	166	13	1.6×10^{4}	
7	26	34.5	TNTC	TNTC	94	5	9.4×10^{3}	8×10^{3}
			TNTC	TNTC	66	8	6.6×10^{3}	
	74	14.4	TNTC	TNTC	154	16	1.5×10^{4}	1.6×10^{4}
			TNTC	TNTC	165	21	1.6×10^{4}	
	113	10.3	TNTC	TNTC	80	6	8×10^{3}	8×10^{3}
			TNTC	TNTC	80	5	8×10^{3}	
9	26	43.2	TNTC	TNTC	9	-	1.2×10^{3}	1.3×10^{3}
			TNTC	TNTC	6	1	1.3×10^{3}	
	74	17.1	TNTC	TNTC	9	-	1.2×10^{3}	1.3×10^{3}
			TNTC	TNTC	13	2	1.4×10^{3}	
11	26	51.8	TNTC	TNTC	5	-	519	320
			TNTC	TNTC	10	1	120	

<TNTC : Too Numerous To Count>

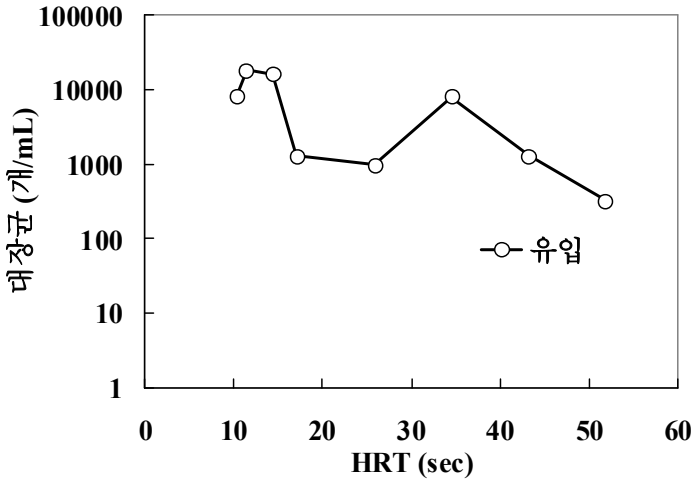

그림 4.2 램프 3개를 이용한 상수의 살균 (유입)

램프 3개를 사용했을 때 유입수의 대장균 분석결과를 그림4.2에 표시하였다. HRT의 변화와 무관하게 유입수의 대장균은 $3.2\times10^{2}\sim1.8\times10^{4}$ 정도로 분포하였고, 변화폭이 더 컸다.

4.2 하수의 살균

G하수 처리장 2차 방류수를 이용한 대장균 살균 실험에서 자외선 램프는 1개, 3개, 5개를 사용하고 각각 다른 운전조건의 유입수와 반응조의 유출수에 대한 대장균군 실험 및 탁도와 pH, DO측정을 하였다. 유입수와 유출수의 탁도는 평균 1.6NTU로 변화가 없었다. pH도 유입원수가 평균6.7 유출수가 평균6.9로써 큰 변화가 없었다. DO도 유입원수에서 평균1.8mg/L, 유출수에서 평균1.9mg/L로 큰 변화가 없었다. 대장균군 실험에서는 수면과 램프와의 거리가 살균조 내의 웨어 높이에 따라 달라지는데, 웨어 높이가 높아질수록 수면과 램프와의 거리는 줄어들었다. 최소 유량부터 최대 유량까지 공통적으로 9cm의 웨어가 들어가고, 램프 1개, 3개, 5개를 이용한 9cm 웨어에서 각각의 유량과 HRT(수리학적 체류시간)에 따른 유입수와 유출수의 변화 및 대장균 제거율 변화를 그림4.3~그림4.5에 나타내었다.

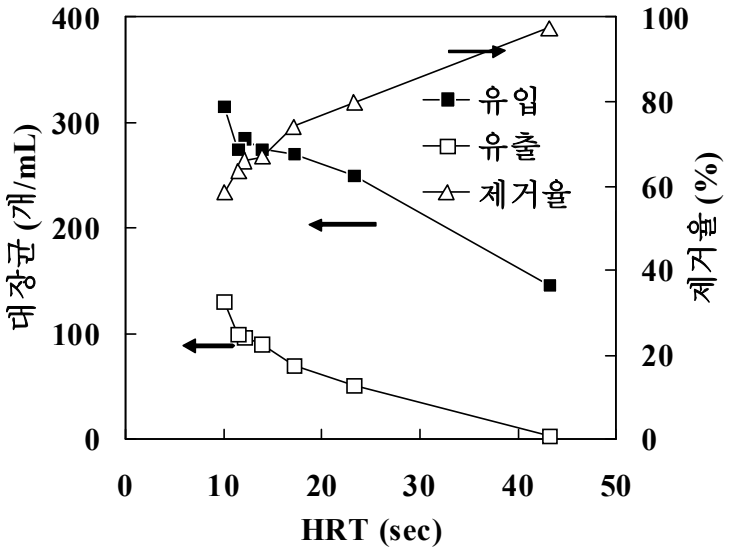

그림 4.3 램프 1개를 이용한 하수의 살균

그림 4.3은 램프 1개를 사용했을 때 HRT에 따른 유입 및 유출수의 대장균 변화를 표시한 것이다. 유입수의 대장균수는 0.8×10^2~3.3×10^2정도 이었으며, 유출수의 대장균수는 0~1.3×10^2의 범위로 HRT가 증가할수록 낮게 나타났다. 대장균 제거율은 HRT가 가장 작은 10sec에서 약 60%를 보이고, HRT가 증가함에 따라 제거율도 증가하며 HRT가 가장 높은 43sec에서 97% 정도로 측정되었다.

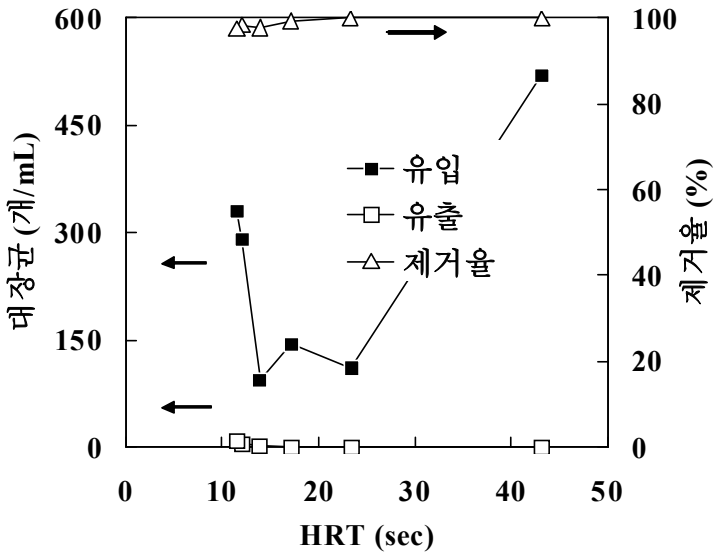

그림 4.4 램프 3개를 이용한 하수의 살균

그림 4.4는 램프 3개를 사용했을 때 HRT에 따른 유입 및 유출수의 대장균 변화를 표시한 것이다. 유입수의 대장균수는 0.9×10^2~8.2×10^2정도 이었으며, 유출수의 대장균수는 0~1.1×10^2의 범위로 HRT가 증가할수록 낮게 나타났다. 대장균 제거율은 HRT가 가장 작은 11sec에서 약 97%를 보이고, HRT가 증가함에 따라 제거율도 증가하며 HRT가 가장 높은 43sec에서 100%로 측정되었다.

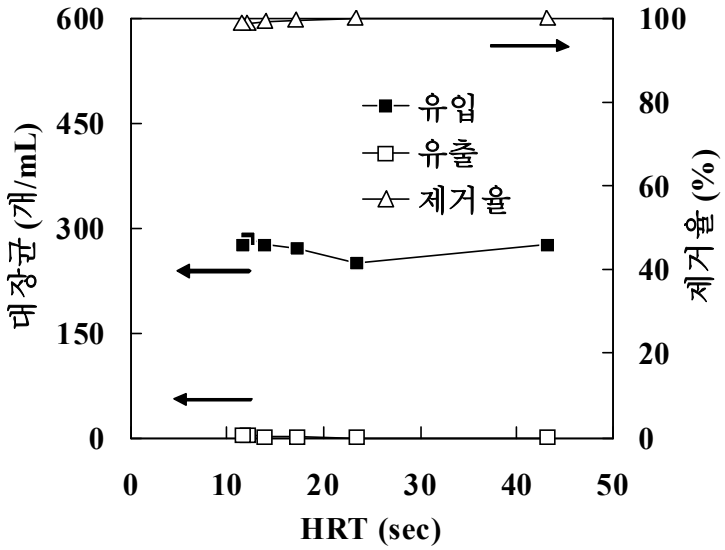

그림 4.5 램프 5개를 이용한 하수의 살균

그림 4.5는 램프 5개를 사용했을 때 HRT에 따른 유입 및 유출수의 대장균 변화를 표시한 것이다. 유입수의 대장균수는 2.3×10^2~3.3×10^2정도 이었으며, 유출수의 대장균수는 0~0.05×10^2의 범위로 대장균이 0에 가깝게 줄어들었다. 대장균 제거율은 HRT가 가장 작은 11sec에서 약 99%를 보이고, HRT가 증가함에 따라 제거율도 증가하며 HRT가 가장 높은 43sec에서 100%로 측정되었다.

그림 4.3~4.5에서와 같이 대장균 제거율은 HRT에 비례하여 증가하는 경향을 보이고, 램프 개수의 증가에 따라 제거율도 비례하여 증가하였다. 이 실험에서 알 수 있듯이 대장균 제거는 수리학적 체류시간 및 자외선 램프의 개수에 영향을 받는다. 여기에서 자외선 램프의 증가는 곧, 자외선 강도의 증가라고 할 수 있으며 자외선 강도는 램프 1개를 사용하였을 경우 자외선 강도는 정중앙에서 5cm떨어진 지점에서 3.4 mW/cm^2였고, 램프 3개를 사용하였을 경우에는 4.2 mW/cm^2로 증가하였으며 램프 5개를 사용하였을 경우에는 7.4 mW/cm^2로 증가하였다.

여러 조건에서 실험한 결과, 체류시간과 자외선 강도가 각각 증가할수록 대장균 수도 감소하는 것으로 나타났다.

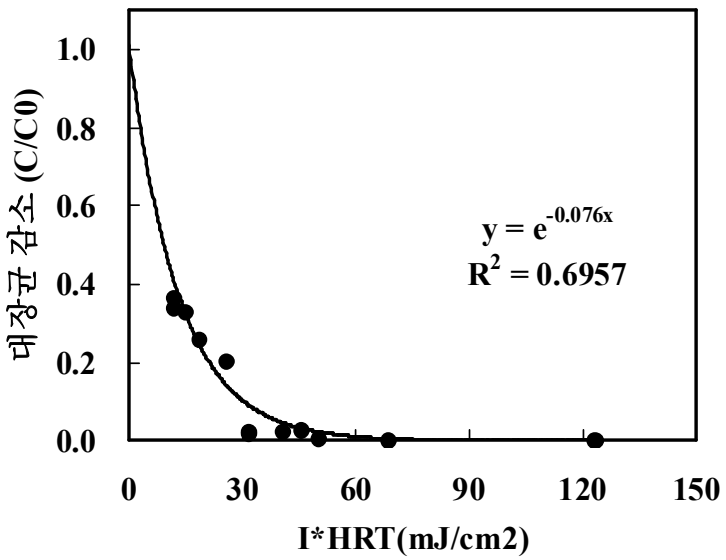

그림 4.6 HRT와 UV의 강도의 변화에 따른 대장균의 감소

체류시간과 자외선 강도의 곱을 하나의 변수로 보고 이 값에 대한 대장균군의 변화를 표시하면 그림 4.6과 같다. 대장균군의 감소를 지수함수(1차 반응)로 간주하면 분해상수는 0.076cm^2/mJ이고 이 때 결정계수; R^2는 0.6957로 계산되었다. 이 값을 근거로 계산하면 다음과 같다.

1개의 램프를 사용했을 때 90% 이상의 제거율을 얻기 위해서는 약 30sec 이상의 HRT가 필요하고, 95% 이상의 제거율을 얻기 위해서는 38sec 이상의 HRT가 필요하다.

3개의 램프를 사용했을 때 90% 이상의 제거율을 얻기 위해서는 약 10sec이상의 HRT가 필요하고, 95% 이상의 제거율을 얻기 위해서는 약 13sec 이상의 HRT가 필요하다.

5개의 램프를 사용했을 때 90% 이상의 제거율을 얻기 위해서는 약 6sec 이상의 HRT가 필요하고, 95% 이상의 제거율을 얻기 위해서는 약 7sec 이상의 HRT가 필요하다.

제 5 장 결 론

파일롯 규모의 비접촉식 자외선 광반응조를 제작하여 상수와 하수에 대하여 살균 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자외선의 강도가 증가할수록, 자외선 조사시간이 증가할수록 대장균의 제거율도 함께 증가하였다.

2. 비접촉식 자외선 살균 반응에서 자외선 강도와 체류시간은 가장 중요한 영향 인자이며, 대장균의 제거율은 자외선 강도와 체류시간의 곱에 1차 반응으로 비례한다.
   이 경우 비례상수는 $0.076cm^2/mJ$이다.

3. 단일 램프를 사용했을 때 90% 이상의 대장균 제거율을 얻기 위해서는 30sec 이상, 95% 이상을 얻기 위해서는 38sec 이상의 HRT가 필요하고, 3개의 램프를 사용했을 때 90% 이상의 대장균 제거율을 얻기 위해서는 10sec 이상, 95% 이상을 얻기 위해서는 13sec 이상의 HRT가 필요하며 5개의 램프를 사용했을 때 90% 이상의 대장균 제거율을 얻기 위해서는 6sec 이상, 95% 이상을 얻기 위해서는 7sec 이상의 HRT가 필요하다.

참 고 문 헌

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

2. 김맹선(2011) 강도측정에 의한 비접촉식 자외선 살균 모델의 보정, 석사학위논문, 조선대학교.

3. 김성홍(2008) 빛의 특성과 자외선 살균에 관한 연구, 대한상하수도학회·한국물환경학회 2008공동 추계학술발표회 논문요약집, P-184.

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

5. 김희갑, 문희란(2008) 염소소독 수돗물 중 잔류염소 저감 방안 연구, 기초과학 연구, 19, pp.101 - 112.

6. 노희수, 이경혁, 왕창근, 손대익, 강준원(2011) 국내 정수장의 오존 소독능 평가사례를 통한 정수처리기준 개선방안 연구, 상하수도학회지, 25(2), pp.153 - 160.

7. 류승민, 안제영, 박노석, 박희경(2002) 오존에 의한 하수소독시 알카리도의 영향 연구, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계 학술발표논문집 2002권 0호, C-20.

8. 박광희(2008) 자외선 강도분포에 관한 수학적 연구, 석사학위논문, 조선대학교

9. 박세준(2005) 하수 처리장 방류수 재이용을 위한 오존,UV,오존/UV 공정 평가 및 현장 적용에 관한 연구, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집 C-8.

10. 백영석, 손진석(2005) 하수의 염소 소독시 총잔류염소 감소 특성에 관한 연구, Journal of Korean Society on Water Quallity, 21(2), pp.176 - 183.

11. 염철민, 김도겸, 정광열, 유양수, 조창현(2003) 국외 먹는 물 자외선 소독 법규, 상하수도 학회지 기술정보, 17(6), pp.741 - 747.

12. 오현제(2002) 한강수계 상수원수에 대한 오존처리시 생성부산물질의 특성 및 제어방안 연구, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계 학술발표논문집 2002권 0호, A-2.

13. 윤정원(2011) 비접촉식 자외선 살균모델의 개발과 설계인자에 관한 연구, 석사학위논문, 조선대학교.

14. 이병찬, 정남선, 고광용, 김영균, 최선호, 조용현(2012) 최신 상하수도공학, pp.329 - 330

15. 이석현(2002) 수처리를 위한 자외선 살균기술의 현황과 전망, 대한상하수도학회, 공동춘계학술발표회논문집, pp.33 - 35.

16. 환경부 (2006) 환경부령 223호 수도시설의 청소 및 위생관리 등에 관한 규칙 일부개정령 제2조 3호.

17. 환경부 (2008) 2008 하수도통계, 서울, pp.670-920.

18. Dulbecco, R.(1950) Experiments on photoreactivation of bacteriophages inactivated with ultraviolet radiation.f.of Bacteriol, 59, pp.329 - 347.

19. Enslow, L.H.(1983) "Chapter Ⅶ Chlorine in Sewage Treatment," in L. Pearse, ed., Modern Sewage Disposal, Federation of Sewage Works Associations, New York.

20. Emperor Aquatics Inc.(2012) What is UV Sterilization, The Emperor Aquatics, Inc. Approach to Successful UV Sterilization.

21. Metcalf and Eddy.(2004) 폐수처리공학 Ⅰ, pp.784 - 901

22. Pei Xu, Marie-Laure Janex, Philippe Savoye and A Cockx(2002) Wastewater disinfection by ozone:main parameters for process design, Water research 36, pp.1043 - 1055.

23. Rice, R. G.(1996) Ozone Reference Guide, Prepared for the Electric Power Research Institue, Community Environment Center, St. Louis, MO.

24. Singer P.C.(1999) Humic Substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products, Water Science Technology, 40(9), pp.25 - 30.

25. SNTC(2007) SNTC Company Technique data, 자외선살균

26. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater by American Public Health Association, AWWA (American Water Works Association), Water Environment Federation and E.W. Rice (Jan 5, 2012).

27. U.S.EPA(1986) Design Manual, Municipal Wastewater Disinfection, U.S,Environmental Protection Agency, EPA/625/1-86/021, Cincinnati, OH.

28. U.S.EPA(1996) Ultraviolet Light Disinfection Technology in Drinking Water Application-An Overview, EPA/811/R-96/002.

29. U.S.EPA(1999) Alternative Disinfection and Oxidants Guidance Manual, EPA/815/R-99/014.

30. Ward, R. W, et al.(1976) Disinfection Efficiency and Residual Toxicity of Several Wastewater Disinfectants, EPA-600/2-76-156, U.S.Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

31. White, G. C.(1999) Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants, 4th ed.,A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York

감사의 글

먼저 오늘의 저를 있을 수 있도록 낳아주고 길러주신 부모님께 무한한 감사와 사랑의 말씀을 전합니다. 못나고 부족한 아들에게 배움의 기회를 주시고자 비가 오나 눈이 오나 뒷바라지 해주신 은혜는 평생을 다해도 부족하겠지만, 앞으로 효도하면서 보답해 나가도록 하겠습니다. 또한, 언제나 저를 믿어주고 응원을 아끼지 않은 누님 내외분과 조카들, 친인척 가족 분들에게도 감사의 말씀을 전합니다.

다음으로 부모님의 은혜 못지않게 학부 과정부터 석사 과정까지 학문적으로나 도덕적으로 제게 많은 가르침을 주신 김성홍 지도 교수님께 고개 숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 석사 과정에 진학하게 된 계기가 수(水)공학 공부를 심도 있게 해보고 싶은 것 외에도, 교수님의 강의를 들으면서 느꼈던 교수님의 인품을 본받고 싶었기 때문입니다. 석사 과정을 모두 마치고 졸업을 앞둔 지금 제 선택은 훌륭한 결정이었다고 자부할 수 있게 되었습니다. 다시 한 번 감사드립니다. 그리고 논문 심사 위원장을 맡아주신 김운중 교수님과 심사위원이라기 보다는 아버님처럼 따뜻한 가르침을 주신 박길현 교수님께도 고개 숙여 감사를 표합니다. 교수님들의 가르침은 앞으로도 제 인생의 등대와 같이 올바른 방향으로 나아갈 수 있게 해 줄 것입니다. 앞으로도 많은 가르침 부탁드립니다.

그리고 대학교 입학부터 대학원 진학 까지 항상 옆에서 같이 공부하고 이끌고 이끌어주며 많은 추억을 나눈 友 이인호, 조병철에게도 감사의 말을 전합니다. 다신 되돌아갈 수 없고, 어떤 돈으로도 살 수 없을 행복한 추억을 함께 해줘서 정말 고맙습니다.
앞으로도 우정 변치 않고 서로 돕고 도우며 각자의 위치에서 승승장구하는 토목인이 되길 진심으로 바랍니다. 더불어 대학 4년, 대학원 2년간 많은 도움을 주신 선·후배, 동기 여러분과 항상 저를 자랑스럽게 생각하며 응원해주는 친구들에게도 진심어린 감사의 뜻을 전합니다.

“끝은 또 다른 시작이다.” 라는 말이 있습니다. 여기에서 만족하고 그치지 않고, 항상 겸손한 자세로 배우고 공부하며 나날이 발전하는 사람이 되겠습니다.

감사합니다.

2013년 6월