

# 자외선을 이용한 수(水)처리 살균기술

장인성 · 김준영 (호서대학교 환경공학과)

## 1 수처리 공에서의 살균

최근 들어 병원성 미생물의 상수원 유입을 근원적으로 차단하기 위하여 하수처리 시설의 방류수 수질 기준에 대장균군수 항목이 신설되어 적용되고 있다. 수중의 미생물을 살균하는 방법에는 염소( $\text{Cl}_2$ ), 클로라민(Chloramine), 이산화염소( $\text{ClO}_2$ ), 오존( $\text{O}_3$ ) 등 화학약품을 이용한 처리 방법과 UV 조사 및 분리막 공정(membrane separation)을 이용한 물리적 방법이 있다.

살균 공정에 가장 광범위하게 사용되는 방법은 염소 살균이다. 염소는 저렴하고 잔류성이 높은 특징을 가지고 있어서 대표적인 살균제로 사용되어 왔다. 그러나 자연수 속에 존재하는 천연 유기물질(NOM, Natural Organic Matter) 또는 하수 방류수나 폐수 속에 존재하는 유기성 물질이 살균제로 사용되는 염소와 반응하여 살균 부산물(DBPs, Disinfection By-Products)을 발생한다. 대표적인 부산물로서 트리할로메탄(THM, Trihalomethane)을 들 수 있는데 이들 중 대부분은 발암성이 인정되었거나 의심되는 것들이다. 따라서 이러한 살균부산물의 발생이 염소살균의 대표적인 문제점으로 지목되어 왔다.

또한 염소는 취급 및 저장에 용이하지 않고 사용상의 안전 문제가 존재하여서 새로운 대체 살균 기술이 요구되어 왔다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 오존

이나 이산화염소 또는 자외선을 이용한 살균 공정이 시도되어 왔다. 이산화염소 사용에 의한 살균은 아직 많은 부분이 밝혀지지 않고 있어서 광범위한 적용이 되지 않고 있는 실정이다. 오존 또한 강력한 산화력 때문에 그 취급이 용이하지 않다. 이에 반해 UV는 비교적 간단한 설비로 살균 목적을 달성할 수 있어서 최근 들어 주목받기 시작하였다. 특히 하수처리 방류수의 UV에 의한 살균기술은 1980년 초 미국의 EPA가 중심이 되어 연구가 진행되어 1986년 UV에 의한 하수 방류수 살균 살균에 대한 설계 지침서가 완성되면서 본격적인 상업화가 진행되었다. UV 살균은 단독으로 사용되어 살균목적을 달성하기도 하지만 다른 공정과 Hybrid 공정을 이루어 복합적으로 사용되기도 한다. 일례로 광화학 촉매제로써 자외선을 이용하여 산화력이 강한 OH Radical에 의한 살균 처리 기술이 각광받고 있다[1~2].

## 2 자외선 살균 기술 개요

### 2.1 자외선 살균의 메커니즘

자외선은 세포의 유전정보를 갖는 유전자인 핵산의 DNA를 손상시키는 것에 의해 살균력을 발휘한다. DNA 대신에 RNA에서 생성된 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 복제능력을 잃게 하여 생물의 불활성화를 초래하게 되는 것이다[3].

자외선 살균의 특이한 점으로서 다른 살균제에서는 볼 수 없는 살균에 대한 영향인자로 자외선 살균 효과가 빛에 의해 감소하는 현상이 있다. 이른바 빛에 의한 재활화 또는 광회복(photoreactivation)이라는 현상이 있다. 이는 자외선에 의해 불활성화된 세균이 가시광선의 조사에 의해 손상이 회복되는 것이다. 이 현상은 1949년에 Kelner이 자외선을 조사한 후 *Streptomyces griseus*가 510[nm] 이하 파장의 가시광선에서 활성이 회복되는 것을 발견한 것이 최초였다. 그 이후 *E. coil*(대장균)를 시작으로 여러 가지 미생물에서 광 회복 현상이 인정되고 있다. 즉 광회복이란 근자외선 혹은 가시광선을 비추면 세포내에서 생산되는 광 회복효소에 의해 일단 형성된 이중체가 회복되면서 세포가 다시 활성을 되찾는 현상이다 [4].

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 합성할 수 없기 때문에 빛 회복 현상은 볼 수 없다. 다만 숙주세포가 광 회복을 하게 되면 바이러스가 그 세포내에서 증식하고, 바이러스가 외관상의 광 회복을 한다고 볼 수 있다. 광 회복이 일어나지 않게 하려면 충분한 자외선을 조사하여야 한다. 이것은 자외선 살균의 실무에서 반드시 고려하여야 하는 것이다. 그 만큼 초기투자와 유지관리비에 영향을 미치기 때문이다. 예를 들어 미국 캘리포니아주 정부에 제출된

National Water Research Institute의 자외선에 관한 가이드라인 가운데서는 광 회복이 향후 연구과제의 하나로 손꼽히고 있다. 자외선을 적절히 사용하면 다른 부산물질을 생성하지 않고도 박테리아나 바이러스를 죽이는 효과가 있다는 것이 알려졌다. 자외선은 미생물을 사멸시킬 수는 있지만 수중에 잔류되어 잔류 살균력은 전혀 없는 것으로 알려져 있어서 살균 후 공공수역의 급수에 사용되기에는 부적합한 것으로 알려져 있다. 자외선 살균은 지난 20년간 폐수처리 유출수에도 적용되어 왔다.

## 2.2 살균효과 자외선

자외선의 살균 효과는 자외선 파장 중에서도 주로 200[nm]에서 280[nm]사이의 UV-C영역에 의해 발생한다. UV-C는 살균(Germicidal)선이라고 하며 DNA와 단백질 그리고 오존이 잘 흡수하는 파장이다. 따라서 오존을 잘 분해하기 때문에 최근에는 UV/Ozone 고도처리 공정에 응용되거나 오존과 적용, 그리고 살균용으로 사용되고 있다.

전자기파 파장대별을 그림 1에 나타내었다. 여기에 사용되는 UV 램프는 방전(전극방식) 방법을 이용하고 있으나, UV 발생효율이 30[%]밖에 되지 않으며 UV의 출력이 50[W]에서 70[W] 정도로 낮다. 한편 고출력의 UV램프는 Arc 방전을 이용한 고압램프를 사용하고 있으나 에너지 효율이 발생열 때문에 5~7[%]정도이며, 램프의 수명도 7,000~10,000(hr)로 짧은 단점을 가지고 있다[5].

자외선 조사의 효과적인 광원 개발의 포인트 중 하나는 240~280[nm]의 파장의 빛을 효율적으로 발생시키는 것이다. 이 범위의 파장이 살균에 가장 적합한 영역이다. 이 파장은 저압 수은램프에서 얻을 수 있으며 그 개발은 1835년에 이루어졌다. 수은 램프는 전기에너지를 효율 좋게 253.7[nm]의 파장으로 전환할 수 있으며 현재 일반적으로 사용되어지는 자

특집 : 자외선 응용기술

외선 광원의 저압 수은 아크램프는 85(%)의 효율에서 253.7(nm)의 파장으로 변환할 수 있다. 최근에 중압 수은 자외선램프가 개발되어 살균력이 있는 광범위한 파장의 고밀도 광 에너지를 얻어낼 수 있어서 램프의 살균력이 강화되었다.

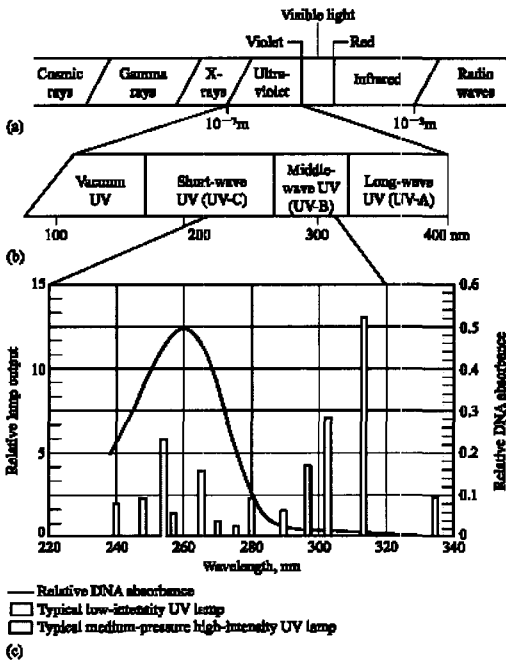


그림 1. UV 살균 스펙트럼

- (a) 전자기파 스펙트럼에서 UV선 부분
- (b) UV스펙트럼에서 살균 효율이 있는 부분[5]

자외선 살균은 전혀 화학물질 소비가 없고 해로운 부산물도 생성되지 않는다. 자외선을 조사한 수중에서 종속영양 박테리아의 성장이 억제되고 그 효과는 보통 1주일 이상 지속된다. 또한 휴믹 물질(humic substances)에 대한 자외선 조사시에 형성된 OH 라디칼이 생성되어 산화력을 가진다. 자외선 방사의 침투력은 이온화 방사보다 작다. 자외선은 핵산(nucleic acid)에 위해를 주지만 어떤 세포는 자외선 방사에 노출 후 회복될 수 있다. 물과 수중의 성분은 자외선의 전달 및 흡수에 영향을 주며 Beer-Lambert법칙이 여기

에 적용된다. Beer-Lambert 법칙은 투광현상을 지배하는 두 가지 기본법칙이다. 빛의 세기는 매질의 흡수에 의해 줄어든다. 각 매질층은 빛의 통과량을 비례적으로 감소시키는 바다음과 같은 1차식이 성립된다[6].

$$T = I/I_0 = 10^{-kl}$$

T : 투광도, I : 투과된 후의 빛의 세기,

I<sub>0</sub> : 조사된 빛의 세기,

k : 흡광율, l : 광흡수 매질의 길이

물 속의 부유물질은 자외선 방사량을 감소시킬 뿐만 아니라, 특히 부유입자 내부에 있는 박테리아를 자외선으로부터 보호해 준다. 어떤 박테리아는 자외선으로 인해 파괴된 DNA를 복구하는 능력이 있다. 즉 자외선 흡수는 광 생성물을 만들어 주는데, 그 중 가장 중요한 생성물은 DNA의 등일 가닥에서 이웃하여 존재하는 피리미딘 분자로부터 생성된 피리미딘 이합체이다. 광반응 활성화 효소는 빛과 함께 이합체를 쪼개어 DNA를 복구시킬 수 있다.

### 2.3 자외선 공정의 적용사례

- 음용수 살균 : 과거에는 생수 공장을 중심으로 자외선 살균기가 사용되어 왔으나, 최근 소비수준의 향상과 더불어 집단주거시설 및 집단급수시설(식당, 휴양시설, 교육시설 등)에도 설치되고 있으며 가정용 정수기의 증가와 함께 소형 자외선 살균기가 일반에도 널리 사용되고 있다.

- 공정수 : 배합수나 세척수가 이 범주에 들어가며 제품의 품질과 보존기간의 연장을 위해서 사용된다.

- 하·폐수 : 최종 방류되는 하·폐수는 미생물 처리를 하여 방류 하도록 규정되어 있다. 과거에는 화학적인 방법(주로 염소처리)을 통해 하여 왔으나 여러 가지 문제점으로 인해 자외선이나 다른 방법에 의한 살균 공정이 증가추세에 있다. 하수살균에서 살균에

표 1. 하수살균에서 살균에 이용되는 염소, 오존, UV에 대한 장단점

	염 소	오 존	U V
장점	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 효과적인 살균제</li> <li>2. 상대적으로 저렴함</li> <li>3. 살균성 있는 염소 잔류물의 유지 가능</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 살균 능력의 우수</li> <li>2. 바이러스, 포자, 포낭의 비활성화에 대해 염소보다 효과적</li> <li>4. 염소보다 짧은 접촉시간</li> <li>5. 필요공간이 적음</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 잔류독성이 없음</li> <li>2. 살균을 위한 주입량에서 부산물이 생성되지 않음</li> <li>3. 화학적 처리보다 높은 안전성</li> <li>4. 유지관리 용이</li> <li>5. 단시간에 살균 가능</li> <li>6. 적용의 용이성</li> </ol>
단점	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 긴 접촉 시간 요구</li> <li>2. 트리할로메탄과 기타 부산물 생성</li> <li>3. 다양한 유기물질의 산화(살균제의 소비)</li> <li>4. 처리된 유출수의 잔류 독성은 탈염소화를 통해서 제거</li> <li>5. 휘발성 유기물질들의 방출</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 살균이 성공적인지 즉시 측정이 인됨</li> <li>2. 잔류효과가 없음</li> <li>3. Off-gas의 처리가 필요함</li> <li>4. 높은 부식성과 독성</li> <li>5. 운전과 유지에 신중을 요함</li> <li>6. 고순도 산소의 발생 설비가 있는 곳으로 제한</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 유기물 농도가 높은 곳에서는 부적합</li> <li>2. 필요한 자외선 조사량을 구하는 것이 어려움</li> <li>3. 잔류효과가 없음</li> <li>4. 에너지 소비량이 많음</li> <li>5. 빛에 의한 활성화 가능성 존재</li> </ol>

이용되는 염소, 오존, UV에 대한 장점과 단점을 다음 표 1에 나타내었다(7).

- 수영장 : 수영장은 폐쇄된 회로 안에서 한정된 물을 사용하기 때문에 사용되는 염소가 결합염소로서 수중에 누적되어 자유염소의 살균력을 떨어뜨리는 악순환이 되어 결국은 새로운 물로 바꾸어야 한다. 문제는 결합염소(chloramine)를 제거하는 방법인데 이때 자외선 살균기를 사용하면 결합염소가 제거되고 투입되는 염소의 절대량이 감소되어 최소한의 염소를 투입하고도 최상의 수질을 유지할 수 있게 해준다. 현재 유럽에서는 자외선과 염소를 이용한 수영장 시스템이 급속히 늘고 있다.

- 냉각수(Cooling Tower) : 건물이나 공장에서 사용되는 냉각수는 몇 가지 문제점을 갖고 있는데 첫째는 레지오넬라라는 미생물이고, 둘째는 배관부식이다. 레지오넬라가 인체에 치명적인 해를 주기 때문에 반드시 살균을 하여야 하고, 오래된 배관은 스케일을 형성하여 열전전도를 저하시키고 누수나 균열을 일으키기 때문에 반드시 처리되어야 한다. 스케일 형성은 미생물이 배관 내부에 부착되어 만드는 Biofilm 때문인데 이것은 스텐레스나 동배관 모드 공통된 현상이

다. 따라서 자외선과 염소를 사용하여 이들을 제거하면 효과적인 냉각수 운영이 가능하다.

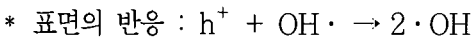
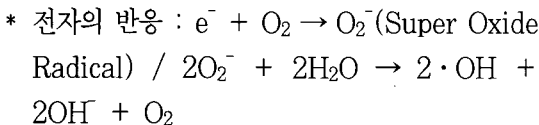
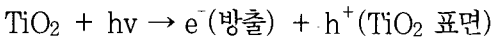
- 초순수 공정 : 자외선 중에서 단파장은 TOC(Total Organic Carbon, 총유기탄소)를 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있으며 현재 반도체 산업에서 주로 이용하고 있다. 이 때 사용되는 램프는 오존램프라고 부르며 185(nm)의 파장을 방출하는 램프이다.

### 2.4 자외선을 이용한 고도산화처리(AOP, Advanced Oxidation Processes)

AOP 기술이란 벤젠, 페놀 등과 같은 독성 및 난분해성 유기화합물을 산화 분해시키는 기술로써 강력한 산화력을 지닌 Hydroxyl Radical(OH Radical)을 중간물질로 수중에 생성시켜 수중에 오염되어 있는 각종 독성, 난분해성 유기물질을 최종적으로 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 산화, 분해시키는 수처리 기술이다(8). AOP 기술의 종류에는 오존, 펜톤, 광촉매(TiO<sub>2</sub>), 초임계 산화 등이 사용되고 있으며, 각각 단독으로 처리하는 것보다 자외선과 함께 사용하면 효율성이 증가하는 것이 입증된 바 있다(8~9).

### 2.4.1 UV/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

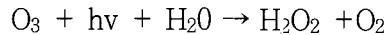
UV/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 처리공정은 비교적 긴 파장의 자외선인 400[nm] 이하의 광 에너지를 TiO<sub>2</sub> 촉매에 조사하게 되는데, 이 때 화학반응을 일으키는 양공(h<sup>+</sup>)의 반응에 의해 유기물질이 분해된다. 광촉매 산화반응에서는 유기물질들이 형태의 변화에 의하여 제거되는 것이 아니라 완전산화에 의하여 물과 이산화탄소 등의 무해한 물질로 전환하게 된다. 이 메커니즘은 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 광분해 반응을 통하여 OH Radical을 생성하며, 반도체 성질을 가지고 있는 촉매인 TiO<sub>2</sub> 입자에 일정 범위의 자외선이 조사되면 전자와 양전하의 정공이 생성된다. 정공은 TiO<sub>2</sub> 표면에서 강한 산화반응을 유발하는 반응 인자로 작용한다. 방출된 전자는 수중의 용존산소 혹은 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)와 반응하여 OH Radical을 형성시킨다. 또한 TiO<sub>2</sub> 광촉매 표면의 정공에 의해 OH Radical이 형성되며 유기물질 산화를 촉진한다.



### 2.4.2 UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

수용액 상태에서 오존의 유기물 제거 방법은 오존 분자의 직접적인 유기물 제거와 OH Radical의 생성으로 인한 2차적인 제거가 있다. 오존 분자의 직접적인 유기물 제거의 경우 유기물의 완전분해가 이루어지지만, 반응이 느리거나 혹은 어떤 유기물과는 전혀 반응을 하지 않는 경우가 흔히 있다. 반면 오존의 분해 부산물인 OH Radical은 오존 자체보다 높은 산화 전위(3.08[V])를 가지며, 거의 모든 유기물과 매

우 빠른 속도로 골고루 반응하는 특성이 있다. 따라서 수중에 있는 오존분자와 반응성이 강한 물질이 존재한다면 반응이 직접 경로에 의해 진행될 수 있도록 하고, 오염물질과 오존의 반응이 상대적으로 느린 경우 간접 경로인 OH Radical의 생성을 증가시킬 수 있도록 하는 것이 효율적이다. 이러한 목적으로 자외선을 조사하게 되는데 오존의 광분해 반응식은 다음과 같다.



오존은 자외선영역인 254[nm]에서 흡수성이 강하며 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 역시 OH Radical을 생성하게 되며 유기물질의 산화를 촉진시킨다.

## 2.5 자외선 살균이 환경에 미치는 영향

현재까지의 자료에 의하면, 하수의 UV 살균(50~140[mJ/cm<sup>2</sup>])에 의해 생성된 화합물은 인체에 무해하거나 덜 유해한 형태로 전환된다는 것으로 보인다. 그러므로 UV에 의한 살균은 환경에 유해한 영향을 끼치지 않는다. 수중의 NDMA(N-nitrosodimethylamine)나 내분비계 교란 물질과 같은 미량 유기물을 파괴하기 위해 UV 조사량 400 [mJ/cm<sup>2</sup>] 이상의 조사량에서 살균을 실시할 때 환경에 미치는 영향과 화합물의 생성은 아직까지 알려지지 않고 있다.

## 3. UV 살균시설 및 설계

### 3.1 설계 기초

UV 살균시설을 설계하기 위해서는 1) 제거대상 미생물 제거에 필요한 UV 조사량, 2) UV 소독장치의 성능 확인, 3) UV 살균장치의 최적 구성 결정을 해야 한다. 이와 같은 내용은 NWRI(National

Water Research Institute)와 AWWARF (American Water Works Association Research Foundation)이 제공하는 “UV Disinfection guidelines for drinking water and wastewater reclamation”[10]에 수록되어 있다.

자외선 방사의 강도와 흐름의 분산도에 따라 다르긴 하나, 미생물의 비활성화에 필요한 접촉시간은 수초 내지 수분의 범위를 가지고 대개 장관형 램프가 사용된다. 물은 필요한 접촉시간을 만족시키며 램프 층을 통과하여 흐른다. UV 조사량의 경우 권고치는 입상여과 처리수의 경우  $100[mJ/cm^2]$ , 막여과 유출수는  $80[mJ/cm^2]$ , 역삼투 유출수는  $50[mJ/cm^2]$ 이다.

그림 2는 개수로용 UV 살균 장치의 주요 구성요소를 나타낸 그림이다. 램프는 물의 흐름과 평행으로(a) 또는 수직으로(b) 할 수 있다. 각 모듈은 석영관으로 쌓여있는 정해진 숫자의 램프로 구성되어 있으며 모듈당 램프수는 2, 4, 8, 12개가 사용된다. 수로 내 유량 깊이 조절을 위해 수위조절문, 장방형 위어(weir), 자동 수위계 등이 부착되어 있다. 오염물질의 부착에 의한 fouling의 방지를 위해 램프 및 수로를 정기적으로 청소해줘야 한다.

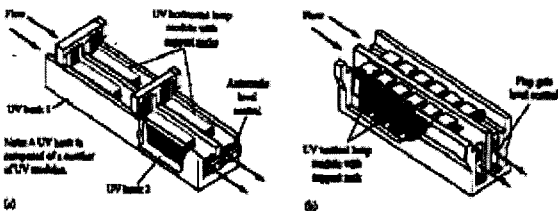


그림 2. Open-channel UV살균 시스템의 단면도(5)

UV 살균을 위해 필요한 최소한의 램프를 결정하는 인자는 1) 수리학적 부하율(Hydraulic loading rate), 2) UV 램프와 석영관 조립장치의 수명과 오염물 부착 특성, 3) 처리해야할 물의 수질 특성, 4)

방류수 기준 등이 있다. UV 살균시설의 설계에 앞서 위에서 열거한 사항을 면밀히 검토하여 장치 선택과 크기 등을 결정해야 한다.

### 3.2 살균에 사용되는 UV 램프

#### 3.2.1 저압-저강도 자외선 램프

(Low Pressure/Low Intensity)

살균용 자외선 에너지 발생 장치로 주로 사용되는 것은 저압수는 램프이다. 수은 램프는 살균효과가 가장 높은 적정한 범위(250~270(nm))내의 파장인 253.7(nm)에서 85[%] 정도의 광선출력을 내기 때문에 주로 사용되고 있다. 자외선 에너지를 생산하기 위하여 수은증기가 들어 있는 램프들은 전기 아크를 일으키면서 방전한다. 램프 안에 있는 수은증기의 여기(excitation)로부터 발생된 에너지에 의하여 자외선광이 방출된다. 살균 효과가 가장 좋은 파장대는 260(nm) 부근으로 알려져 있으며 저압-저강도 자외선 램프는 기본적으로 254(nm)의 단일 파장을 방출한다. 모든 경우에 수은-아르곤 램프가 UV-C 방출에 이용된다. 이 램프는 표면 온도 40(°C), 내부 압력 0.007(mmHg)에서 최적으로 작동된다. 약 85~88[%] 정도가 254(nm)의 단파장으로 방출되며 이는 살균에 있어 좋은 효과를 나타낸다. 또한 이 램프는 산업에 가장 보편적으로 쓰였던 램프로서(흔히 표준램프라고도 부른다) 형광등보다 지름이 적고 효율은 높으며 연결선도 양쪽에 1선씩 있는 램프이다.

#### 3.2.2 저압-고강도 자외선 램프

(Low Pressure/High Intensity)

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

특집 : 자외선 응용기술

이러한 요구에 부응하여 개발된 램프가 저압-고강도 램프이다. 저압-고강도 자외선 램프는 수은 대신 수은-인듐 아말감을 사용한다는 것을 제외하고는 저압-저강도 자외선 램프와 유사하며 저압-저강도 램프에 비해 높은 전류와 0.001~0.01(mmHg)의 압력이 필요하다. 일반적으로 수은 아말감은 UV-C의 출력을 저효율 램프의 2~4배 정도 크게 할 수 있다.

3.2.3 중압-고강도 자외선 램프  
(Medium Pressure/High Intensity)

중압-고강도 자외선 램프는 지난 10년간 발달해 왔으며 다파장(185~600(nm))이라는 특수성이 있으며, 600~800(°C)의 온도와 10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup>(mmHg)의 압력에서 운전된다. 전체 에너지의 약 27~44[%]정도가 살균력이 있는 UV-C 범위이며 출력의 7~15[%]만이 254(nm)의 파장을 방출한다. 그러나 전체 UV-C 출력은 저압-저강도 램프에 비해 약 50~100배 크다. 이 램프의 작용은 적은 램프숫자와 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 기대된다.

3.3 UV 살균 공정의 모델링

일반적으로 수중에 존재하는 부유불질은 UV 살균에 부정적인 영향을 끼친다고 알려져 있다. 입자들끼리 결합되어 있는 균들은 UV로부터 어느 정도 보호받을 수 있기 때문이다. UV 노출에 따른 미생물의 비활성화율은 다음의 1차 반응(1st order reaction)에 따르는 것으로 간주한다. 단일종 미생물의 자외선에 대한 초기저항을 설명하기 위해 연속적 혹은 다중 동력학의 사용이 제안되고 있다. 다음 식은

10(mJ/cm<sup>2</sup>) 이상의 조사량에서 분산되어 존재하는 대장균 박테리아의 비활성화를 모델링할 때 사용될 수 있는 공식이다.

$$N_D(t) = N_D(0)e^{-kt}$$

$N_D(t)$  = 시간 t에서의 분산되어 존재하는 총 대장균 생존수

$N_D(0)$  = UV 조사전 분산되어 존재하는 총 대장균수(time=0)

k = 비활성화율 계수((cm<sup>2</sup>/mW · s))

I = 용액에서의 평균 UV조사 강도((mW/cm<sup>2</sup>))

t = 노출시간((s))

분산 상태에서 입자와 결합되어 존재하는 대장균 박테리아 사이의 근본적인 차이는 미생물에 도달되는 UV의 양이다. 위의 반응식은 완전 혼합 반응조에서 같은 강도의 UV가 동일균의 미생물에게 전달된다고 가정하기 때문에 분산되어 존재하는 미생물에만 적용된다. 입자내 미생물은 용액에서보다 더 작은 UV 강도에 노출될 것이다. UV 강도가 어떻게 분포되는지에 대한 자료가 있다면 분산 상태에서 입자와 결합되어 있는 상태의 대장균 박테리아의 비활성화를 모델링할 수 있다. 이와 같은 두 가지 상태의 대장균의 비활성화에 대하여 다음 식을 이용하여 수용액에서의 UV 강도를 적용할 수 있다.

$$N_D(t) = N_D(0)e^{-kd} + N_p(0)/kd(1-e^{-kd})$$

$N_D(t)$  = 시간 t에서의 분산되어 존재하는 총 대장균 생존수

$N_D(0)$  = UV 조사전 분산되어 존재하는 총 대장균수(time = 0)

$N_p(0)$  = 시간 t에서 최소한 한 개 이상의 대장균을 포함하는 총 입자의 수

k = 비활성화율 계수((cm<sup>2</sup>/mW · s))

d = UV조사량((mJ/cm<sup>2</sup>))

#### 4. 맺음말

용수처리나 폐수처리의 살균을 위해서 제3의 물질을 첨가해야 하는 화학약품에 의한 살균에 비하면 자외선 살균은 분명한 차별성이 있다. 또한 그 적용과 유지관리가 용이하며 염소 소독에서 발생하는 소독 부산물 문제에서도 자유롭다. 따라서 자외선 살균 시설은 비교적 자외선 소비도가 낮으면서도 원충의 유충이 포함되지 않는 지하수, 소규모에서 유지관리가 필요한 시설, 음용수 목적으로 하지 않는 재이용수 생산시설 등에 대한 적합한 공정이다. 자외선 살균시설의 효율적 운영을 위해서는 자외선 공법에 대한 충분한 이해가 요구된다. 또한 자외선을 이용한 살균기술은 염소살균 대체기술의 기능과 함께 복합 AOP 기술로 이용이 가능하기 때문에 자외선을 이용한 고도처리기술에 대한 수요가 늘어갈 것으로 예상된다.

#### ◇ 저자 소개 ◇



**장인성(張仁星)**

1964년생. 1996년 서울대학교 공과대학 공업화학과(박사). 현재 호서대학교 환경공학과 부교수.



**김준영(金遵英)**

1978년생. 2004년 호서대학교 환경공학과 졸업. 현재 호서대학교 환경공학과 대학원 석사과정.

#### 참 고 문 헌

- [1] 신동호, 이용택 “하수 방류수 살균을 위한 무전극 UV램프의 제조 및 특성”, J. Korean Ind. Eng. Chem, Vol. 16, No. 4, August, 570-575, 2005.
- [2] Water Recycling and Resource Recovery in industry, Edited by Piet Lens, Hulshoff Pol, Peter Wilderer and Takashi Asano, pp661, 2002.
- [3] 첨단 환경기술, “자외선을 이용한 수처리 기술” 1권 pp1-17, 2002.
- [4] 이용두 외 역, “물의 소독”, 제주대학교 출판부. pp182-210, 2004.
- [5] Metcalf & Eddy Inc. “Wastewater Engineering Treatment and Reuse”, 4th Edition, McGraw Hill, 2004.
- [6] Ronald L. Droste, Theory and practice of water and wastewater treatment, Wiley, pp530, 1997.
- [7] F.W. Pontius, Water quality handbook, AWWA(American Water Works Association), p877, 4th Edition, McGraw Hill, 1990.
- [8] 김종규, 정호진 “TiO<sub>2</sub>/UV 산화기술을 이용한 염색폐수처리에 관한 연구”, 상하수도 학회지 18권 3호, pp. 392-400, 2004.
- [9] 박주석, 박태진, 권봉기, “오존 및 오존/UV 산화법을 이용한 휴믹산의 분해와 THM 발생능의 비교”, 상하수도 학회 10권 4호, pp. 55-63, 1996.
- [10] NWER & AWWA, “UV Disinfection guidelines for drinking water and wastewater reclamation”, National Water Research Institute and American Water Works Association Research Foundation, 2000.