

## 국내하수처리장 자외선소독조 운영실태 및 기술동향

이진영\* · 김영태\* · 이태제\*

### WTP UV Disinfection System

J. Y. Lee\*, Y. T. Kim\*, and T. J. Lee\*

Key Words : UltraViolet Sterilization, Contact and Non-Contact, Fluoropolymer

#### ABSTRACT

UV disinfection system allows the disinfection of municipal and industrial water and wastewater without the use of expensive chlorination and dechlorination techniques, labor intensive equipments. In traditional ultraviolet systems the UV lamps are separated from water by quartz sleeves. quartz is one of the few materials that is virtually transparent to UV light, the UV lamp is placed inside the quartz sleeve. UV light from the lamp is passed through the quartz and into the water, thereby providing disinfection.

In fluoropolymer tube-used non-contact UV systems, the water flows through fluoropolymer plastic tubes. banks of UV lamps surround these tubes such that each tube gets exposed to ultra violet light from all sides. in non-contact design the lamps operates at almost constant temperature. this design is extremely efficient in the utilization of UV energy and superior to conventional contact-systems

#### 1. 서론

최근 환경법의 개정으로 2003. 1.1.부터 하수처리장 방류수 수질기준에 대장균수가 신설됨에 따라 각 지자체가 운영중인 하수처리장에 대한 소독설비가 실제, 시운전 또는 운영 중에 있고 또 최근의 하수처리장 소독설비는 대부분 특별한 경우를 제외하고는 염소계의 환경영향을 고려하여 자외선 소독설비(UV Disinfection Systems)로 일원화 되는 추세이며 국내 하수처리장 소독설비에 대한 현황은 다음과 같다.

<방류수 수질기준 (하수도법 시행규칙 제6조제1항관련)>

구 분	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	대장균수 (개/ml)
특정지역 기준	10 이하	40 이하	10 이하	20 이하	2 이하	(2003.1.1부터) 전지역: 3,000이하
기타지역 기준	20 이하	40 이하	20 이하	60 이하	8 이하	특정지역: 1,000이하

<가동중인 하수처리장의 소독시설 현황>

(2004.12.말 기준)

(단위:개소)

구 분	계 (계획포함)	가동중	미 가동현황		
			소 계	가동중단	향후 계획
계	295	98			197
염소계		19			13
자외선		74			181
오존		4			
기타		1			3

그러나 현재 국내에 설계/시운전/시공/운전 중인 자외선소독설비는 대부분 외산기자재로 아직 국내에서는 자외선소독설비에 대한 설계 및 운영자료가 부족한 관계로 한국 실정에 맞는 하수성상에 따른 효율적인 자외선설비의 설계 등(자외선투과율 등)이 제대로 되지 못하고 있는 실정이다.

## 2. 자외선 소독기술

### 2.1 염소계소독 vs. 자외선소독비교

	염소 소독(가스상 & 차아염소산염)	자외선 소독
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 잘 알려진 기술임</li> <li>- 박테리아에 대해 효과적인 소독제임</li> <li>- 잔류효과로써 유지 및 모니터링이 가능함</li> <li>- 상대적으로 비싼 장비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 박테리아와 바이러스에 대해 효과적인 소독제임</li> <li>- 잔류효과가 없음, 잔류물질의 형성이 없음</li> <li>- 잔류효과가 없음</li> <li>- 염소/염소산염과 비교하면 경제적</li> <li>- 관리비용이 적음</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 염소소가 필요할 경우 안전수준이 증가</li> <li>- 처리된 물의 잔류염소는 환경수질오염</li> <li>- 트리할로메탄(THMs) 및 염소화 탄화수소의 형성</li> <li>- 휘발성유기물질(VOCs)을 방출시킴</li> <li>- 소독 물질수의 pH를 변화시킴</li> <li>- 물중소금비 환경영향평가필요/변비 고가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소독효율을 바로 측정할 수 없음</li> <li>- 잔류효과가 없음</li> <li>- 적정량의 UV를 위한 필터(필터 교체)</li> </ul>

### 2.2 자외선 소독기술

#### 2.2.1 정의

자외선은 100~400nm 파장범위에 있는 전자기스펙트럼으로 살균 파장영역은 200nm~300nm으로 가장 살균력이 강한 파장은 260nm부근에서 일어난다. 저압수은램프(Low Pressure Mercury Lamp)의 경우 파장영역 253.7nm에서 설계출력 85%의 자외선방사량을 가지고 있고 중압(Medium Pressure)인 경우 200nm에서 700nm의 다양한 파장영역을 가지고 있다.

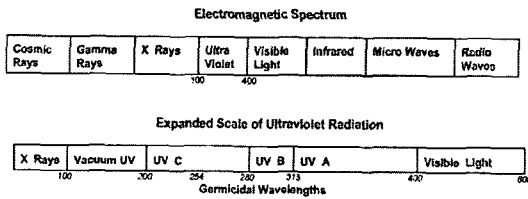


Figure 2.1: Electromagnetic Spectrum

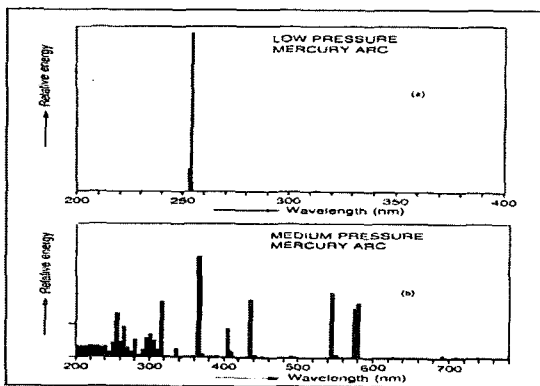
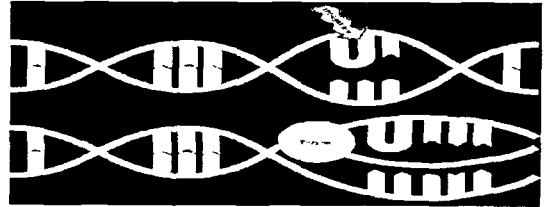


Figure 2.2: Spectral Output From:  
a) Low Pressure and  
b) Medium Pressure Lamp (Meulemans 1987)

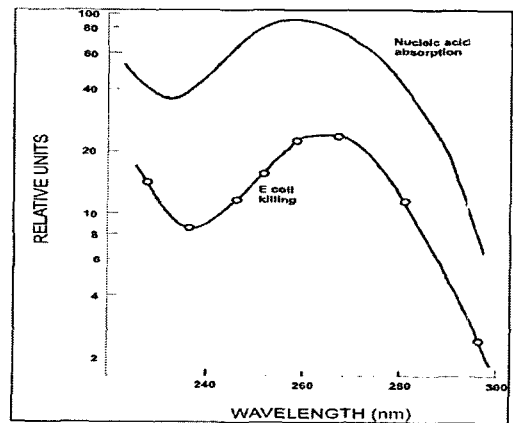
#### 2.2.2 물리적 기작

자외선 빛에 노출된 미생물은 핵산이 광화학작용

(Photochemical)에 의해 손상돼 생명력을 잃게 되는데 이는 세포질 내의 DNA 및 RNA가 자외선 빛을 흡수하게 되면 구조사슬이 이중구조로 되어 DNA 및 RNA의 생산/복제가 불가능하게 된다.



DNA 자외선흡수율은 자외선파장에 따른 함수로 표현되고 대장균 같은 경우 자외선파장이 220nm과 265nm부근에서 최고치를 나타내므로 저압램프 파장 특성인 253.7nm에 근접함을 알 수 있다.



세포의 손상정도는 미생물에 흡수되는 자외선 에너지의 양과 자외선에 대한 저항에 따라 달라지며, 대부분의 박테리아와 바이러스가 불활성화되기 위해선 상대적으로 소량의 자외선이 필요하고, 자외선 양은 자외선강도(UV intensity), 노출시간(exposure time),  $mW \cdot s/cm^2$ 로 표현된다.

#### 2.2.3 자외선조사량

자외선 빛에 노출된 미생물은 핵산이 광화학작용(Photochemical)에 의해 손상되어 자외선 요구량은 세포의 크기와 세포내 DNA와 RNA의 양에 따라 증가되는데 원생동물의 포낭(protozoa cysts)은 *E. coli*에 비해 10~15배로 많이 요구된다.

Gram negative bacilli는 gram positive cocci와 bacterial spores에 비해 더욱 민감함을 다음표에서 알 수 있다.

미국 EPA, Public Health Service등에서는 마실물을 자외선 소독하는 경우 최소  $16,000 \mu W \cdot s/cm^2$  을 권장하고 있으나 이는 소독대상이 되는 수원의 흐름형태, 색

도, 탁도, 램프의 노후화, 석영관의 수막현상(Fouling), 수온에 따라 그 이상의 조사량이 요구된다.

### 3. 자외선소독설비 설계지침

#### 3.1 자외선소독에 영향을 미치는 인자

- 자외선 살균능력은 미생물에 흡수되는 자외선 에너지의 양과 직접 관련이 있음
  - 자외선 소독은 온도나 pH에 영향을 받지 않음
  - 소독설비에 있어서 자외선의 양은 유량, 체류시간 및 자외선 강도와 연관 있음
- 자외선량(UV Dose) = 강도(Intensity) x 시간(Time)

강도(Intensity)	시간(Time)
<b>장치인자(Equipment Parameters)</b> • 램프공간 /평균강도 = 반응기 설계 • 램프 수명 • 슬리브 막힘(Sleeve fouling) (철, 칼슘, 마그네슘, 조류 및 생물막)	유량 반응조
<b>수질인자(Water Quality Parameters)</b> • 자외선 투과: 용존 유기물, 염색물, 철 • 현탁성 고형물(TSS) • 입도분포(PSD) • 총경도	

#### 3.2 자외선 장치의 설계인자

- 소독장치에 있어서 자외선의 강도는 램프 형태, 수 및 공간과 같은 설계인자들과 직접 연관이 있으며, 전형적인 자외선 장치는 낮은 강도의 수은 아크 램프로 설계되어 있고 253.7nm의 단파장에서 에너지의 85%를 발산함
- 중압램프는 폭넓은 살균 파장영역에서 에너지를 발산하여 UV효율이 적음
- 자외선 반응기는 자외선 램프수를 최적화하기 위해 설계되어야 하며, 수리학적 능력에 따라 자외선의 양이 제공되어야 하는데 수리학적인 특성에는 혼합되는 난류흐름을 최대화 하여 자외선조사가 균등하게 조사할 수 있는 수리학적 검토필요
- 자외선 강도에 영향을 미치는 인자들로는 램프의 수명과 슬리브의 막힘 현상이 있으며, 저압램프의 교환은 약 12,000시간이지만, 하수 특성 및 석영 유리관이 있는 접촉식 경우 슬리브 수막현상(Fouling) 및 수온에 따른 램프표면온도의 변동으로 약 8,000 시간정도 유지되고 중압인 경우 램프의 교환주기는 약 4,000시간 임
- 램프수명은 소독이 이루어지는 동안 ON, OFF 순환 횟수에 따라 달라지므로 설비장치에 있어서 일정한 강도는 램프 교환주기를 단계적으로 가능하게 함
  - 접촉식 경우 석영 슬리브위로 무기물 및 유기물 축적은 물로 투과되는 자외선의 강도를 감소시키며, 막힘율(fouling rate)은 공정 및 방류형태

에 따라 달라지며, 철, 칼슘 및 마그네슘 이온들이 고농도로 존재 할 경우에 더욱더 가속화됨

- 따라서, 접촉식의 경우 화학적 및 물리적인 방법으로 세척할 수 있는 세척설비가 필수적인 요건

#### 3.2.1 수질인자(Wastewater Quality Parameters)

자외선 소독설비의 효율은 폐수내 자외선 강도를 감소시키는 방류수질에 따라 영향을 크게 받으며, 자외선 강도에 영향을 미치는 방류수의 인자들로는 다음과 같다.

- 자외선 투과(UV transmittance : UVT)
- 총 현탁성 고형물(TSS)
- 입도분포(PSD)

#### 3.2.2 자외선 투과(UV Transmittance)

자외선 투과는 자외선 빛을 투과하는 폐수의 능력으로서 수질 측정 및 자외선의 조사량을 결정하는 것으로 살균장치의 설계기준으로 중요시됨

- 자외선 투과는 254nm에서 자외선 흡광도기기로 측정되며, 1cm의 석영 큐벳내에 들어 있는 시료의 투과도는 100%로 설정되어 있는 증류수를 대조구로 하여 측정됨
- 자외선을 흡수하는 물질 및 입자들이 존재할 경우 투과도는 저하되므로 소독시 이용가능한 자외선 에너지를 감소시키게 됨
- 일반적으로 현탁성 입자들이 있을 경우 투과도는 60~65% 범위이다

<다양한 처리공정에 따른 수질인자>

공정	투과율 (%)	TSS (ppm)	평균 입도분포(μm)
1차 침전	5~25	50~150	20~30
1차 처리			
알루미늄(Alum)	40~50	15~40	25~35
철염(Ferric)	25~45	15~40	20~30
라군(Lagoon)	30~50	15~50	20~30
여과지	20~35	15~40	20~30
고정막			
살수여상법	30~55	10~30	25~45
회전원판법	30~55	10~30	25~45
연속식회분반응조	45~60	10~30	25~40
부유성장 활성슬러지	45~65	10~30	25~45
3차 여과	50~85	<5	15~30

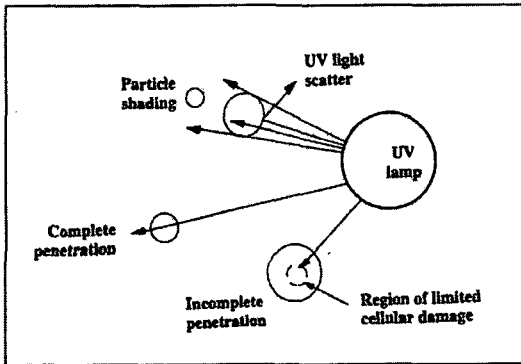
#### 3.2.3 무기화합물(Inorganic Compounds)

- 용존 알루미늄염은 자외선 투과에 영향을 주지 않지만, 물속에 존재하는 철은 자외선을 직접 흡수하여 슬리브를 막고 현탁성 고형물 및 박테리아 군집에 흡착되어서는 막을 보호하게 되므로 자외선 저항의 증가원인은 철이온 농도와 직접 관련이 있음

- 자외선의 양 = 강도 x 노출시간이므로 강도를 감소시키기 위해서는 체류시간과 램프의 수를 증가시킴으로써 보정이 가능함

### 3.2.4 총 현탁성 고형물(Total Suspended Solids)

TSS는 자외선 소독을 직접적으로 방해하며, 다음 그림에서 입자들이 자외선을 흡수 및 산란시켜서 자외선의 강도를 감소시키는 것을 나타냄



미생물은 입자들에 의해 둘러싸여 있으므로 자외선 및 다른 소독제(chemical disinfectants)로부터 보호되며, 입자들에 의한 보호는 입자수, 입도분포, 농도 및 화학물질의 소비와 관련이 있으므로 폐수내 자외선의 요구량을 증가시킴

### 3.2.5 입도분포(Particle Size Distribution : PSD)

방류수내 입도분포 측정은 여지(filter)와 침전지의 기능을 나타내는데 이용되며, 자크기는 폐수 공정의 형태와 관련이 있고, 다음표에 자외선 요구량에 대한 큰 입자크기의 영향에 대해서 설명함

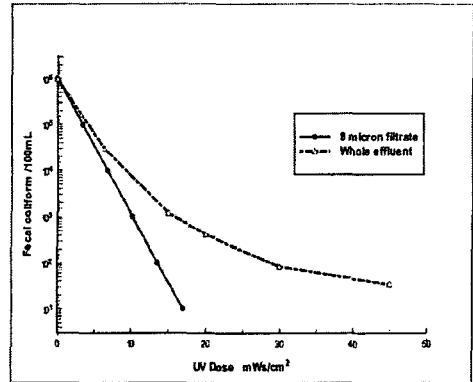
<자외선 요구량에 직접 영향을 주는 입자크기의 증가>

입자크기(μm)	자외선 요구량
<10	쉽게 투과되며 자외선 요구량이 적음
10~40	투과가 가능하며 자외선 요구량이 증가
>40	완전히 투과되지 않으며, 자외선 요구량은 높음

### 3.2.6 불활성 동력학 자외선의 양

- 전형적인 박테리아의 불활성 대 자외선 양에 대한 곡선은 저농도에서 1차 반응속도를 나타내며, 입자들이 존재할 경우 자외선의 농도는 높아지게 되므로 상향류 흐름 공정을 선택할 경우 자외선의 양을 감소시킬 뿐만 아니라 한계 소독효과도 볼 수 있음
- 다음 그림은 입자들에 의한 방해로 자외선 양이 고농도로 요구됨을 보여주며, 이런 TSS의 농도, 입자크기 및 수를 감소시키기 위해서는 여과를

하여야 함



(Kinetics UV Dose - Response Curve)

### 3.2.7 소독의 표준(Disinfection Standards)



- 북미/구라파에서는 폐수소독의 지표생물로 Total or faecal coliforms를 가장 일반적으로 사용하고 있으며, 그 외 *E. coli*와 *enterococci*가 일부 미국 지역에서 사용되고 있고, 100ml당 200마리 이하의 faecal coliform을 소독기준으로 보고 있음
- 일반적으로 투과율이 65%이고 TSS의 농도가 20ppm이하인 2차 처리수의 소독에 있어서 요구되는 자외선의 양은 20~30mW · s/cm<sup>2</sup>이지만, 자외선 양은 입자의 수, 크기, 구성성분에 따라 영향을 받게 되므로 자외선 요구량은 다양함
- 미국캘리포니아와 하와이에서 물을 재사용하기 위해서는 100ml당 total coliform이 2.2마리 이하로 나타나야 하는데 그러한 경우 TSS농도가 2ppm이하이거나 투과율이 65%인 여과된 방류수에 대해 소독기준을 만족시키기 위해서는 자외선의 양이 120mW · s/cm<sup>2</sup>로 높아야만 함

## 4. 자외선소독설비 현황

### 4.1 개요

미국 EPA등의 자외선 소독설비 설계자료에 보면 자외선소독설비는 접촉식(Contact)과 비접촉식(Non-Contact)식으로 나뉘어져 있으며, 구미/유럽에서 적용하고 있는 설계기준을 감안하여 금번 환경부에서 신설공표(환경부 하수67712-466, 2002.5.21)한 “하수처리장 소독시설 설치사업 업무처리 일반지침”에서도 보면 “UV소독(자외선소독)을 선정할 경우에는 처리장의 시설용량을 감안하여 접촉방식과 비접촉방식 중 시설비 및 유지관리비가 적게 소요되는 방식을 채택하여야한다”고 명시되어 있다.

TABLE 14-6 Comparison of Contact and Noncontact UV Reactors

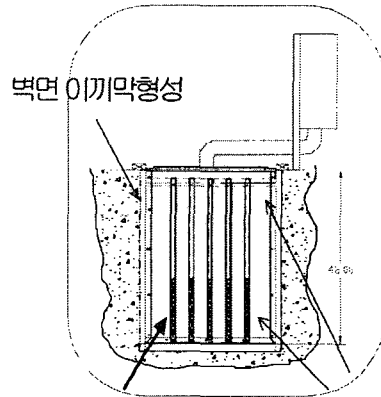
Reactor Type	Description	Flow Direction	Flow Type
<b>Contact</b>  <b>접촉식</b>	<p>The lamps are submerged at all times in wastewater. The lamps are encased in quartz sleeves that are slightly larger in diameter than the lamps. The lamp module or rack is encased in a sealed shell.</p>	<p>Parallel to lamps or perpendicular to lamps</p>	<p>Pressure or open channel flow</p>
<b>Noncontact</b>  <b>비접촉식</b>	<p>Lamps or quartz sleeves do not come in contact with the liquid. The lamps are suspended above the liquid or surround the Teflon® conduits that carry the liquid. These Teflon® conduits are transparent to UV light. The lamps are placed outside and parallel to the conduits or as an inserted removable rack (either vertically or horizontally) between the tubular rows.</p>	<p>Parallel to lamps or perpendicular to lamps</p>	<p>Pressure or gravity flow</p>

램프 석영관 조립하기 하수에 항상 잠김

램프 석영관 안쪽은 하수와 접촉하지 않고 하수가 흐르는 튜브의 외부에 배치되어 자외선 유효거리로 조사

- 석영관의 수막현상
- 램프교환시 고도의 숙련도 필요
- 석영관의 깨지기 쉬움(교체비용 고가)
- 유체의 단회로 현상으로 인한 조사량의 저하
- 동절기 수온저하에 따른 표면온도저하(자외선 강도저하)
- 램프 파손시 수온방출 (1개 파손시 약 20mg(지압), 300mg(중압) 수온 방출)

<접촉식 자외선소독설비 운영상의 문제점>

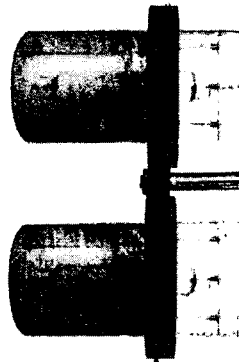
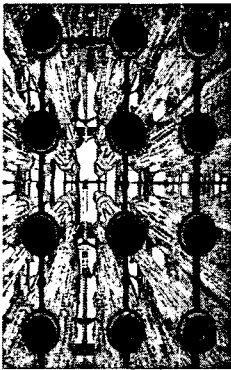


램프 벽 수막형성

상하유속 틀림

4.2 접촉식 자외선소독설비(Contact UV Disinfection)

접촉형 소독설비는 현재 미국/유럽등지에서 가장 설치실적이 많은 형식으로서 자외선램프(UV Lamp)가 깨끗한 석영관(Quartz Sleeve)으로 보호되어 석영관으로 이루어진 틀(Flame)을 형성하여 유체에 직각 또는 수평하게 하수속에 침수하여 석영관 주변으로 흐르는 하수를 살균하는 형식이다.

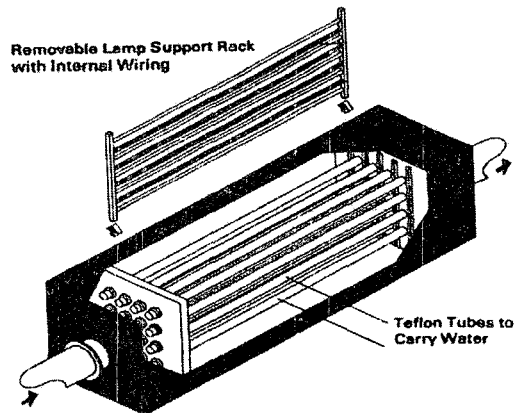


<석영관의 수막현상>

그러나 이러한 접촉식(Contact) 자외선소독설비의 단점은 구미등지에서의 운영자료를 살펴보면 시간이 경과함에 따른 석영관의 이물질 부착, 시설/운전이 복잡한 기계식/화학적 세척빈도증가로 말미암은 자외선투과율의 저하, 석영관의 깨지기 쉬운 특성, 잦은 교체로 인한 유지관리비 증가로 특히 운영인력이 부족한 중/소규모 하수처리장에서는 유지관리면에서 많은 문제점을 안고 있는 관계로 전 기술력을 석영관의 Fouling(흔탁현상)을 방지하는 세척장치 개발에 전 기술력을 집중하고 있는 실정이다. 즉, 하수와 석영관(자외선램프 포함)이 접촉하여 생기는 운영상 문제점으로는 다음과 같다.

4.3 비접촉식 자외선소독설비(Non-Contact UV Disinfection)

접촉식 자외선소독설비의 운영상 단점을 보완하기 위하여 이미 80년도에 구미에서는 하수이끼가 잘 달라붙지 않는 TEFLON(불소수지계 튜브)을 이용하여 유체는 튜브 내부로만 흐르게 하고 자외선램프는 별도의 보호석영관이 없는 자외선램프(UV Lamp)만의 틀을 형성하여 튜브주변에 배치하는 새로운 형태의 비접촉식 자외선소독방식을 개발하였다.

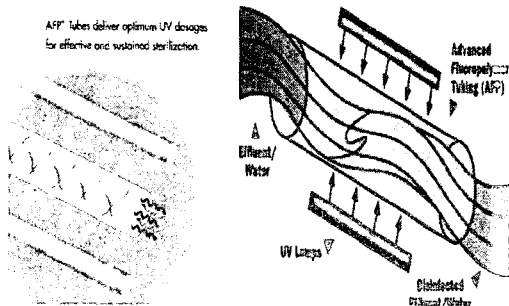


Removable Lamp Support Rack with Internal Wiring

Teflon Tubes to Carry Water

그러나 80년도 초기의 TEFLON관은 시간이 경과함에 따른 튜브내 이끼형성과 석영관이 지닌 자외선투과율보다 낮아 일부 정수처리/폐수처리공정에서만 부분적으로 사용되어 오다 초기 TEFLON의 단점을 완벽히 보완한 수처리 자외선 살균기 전용인 AFP™ 튜브를 이용한 비접촉 자외선소독설비(Advanced Fluoropolymer Non-Contact UV Systems)가 미국 IWT사에 의해 개발되어 구미지역 하수처리장에 85년도 이후로 널리 사용되어지고 있다. 이러한 AFP™ 비접촉식 자외선소독설비는 복잡한 기계/화학적 세척장치, 고가이며 깨지기 쉬운 석영관이 불필요하고 하수의 자외선조사율을 향상시켜 기존 접촉식 자외선 소독시설의 단점을 보완하여 유지관리의 편의성을 도모 하였다.

- 이끼형성이 없으므로 세척장치 불필요
- 석영관(Quartz Sleeve) 불필요
- 램프교환이 용이하고 AFP 튜브 반영구적
- AFP 자외선투과율 우수(96% 이상)
- 수은방출 없음

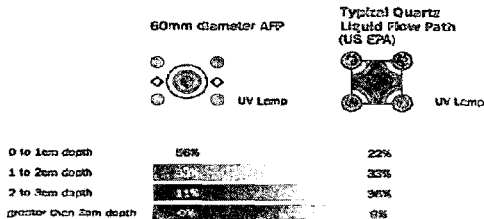


## 5. AFP™ 비접촉식 소독기술특징

### 5.1 자외선조사율(UV Dosing)

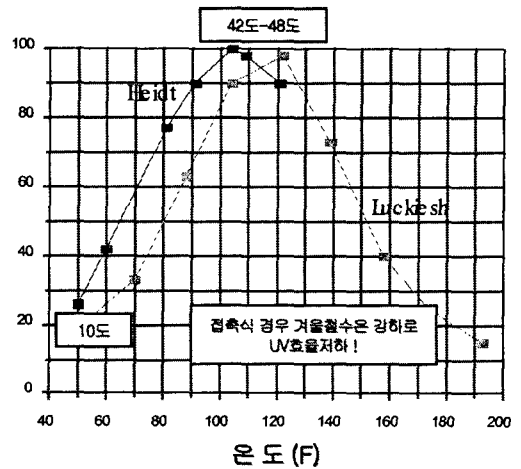
호주수질학회에서의 실험결과에 따르면 AFP™ 튜브내의 하수는 자외선조사의 사각영역(Dead Space)없이 자외선이 조사되는 반면 접촉식은 하수흐름에 따라 자외선이 미치지 못하는 영역(Dead Space)이 존재하는 것으로 확인 되었다.

Percentage of UV Light @ 254 nm wavelength which passes across a Typical Liquid Flow Path



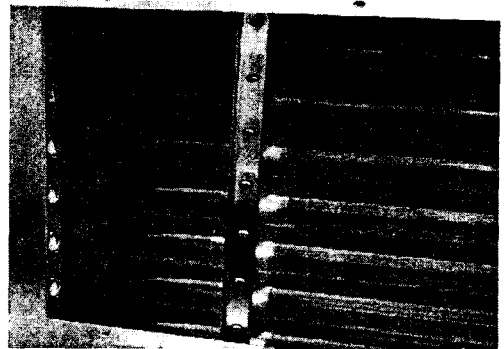
### 5.2 램프표면온도(Effect of Temperature on UV Output)

국제전기학회 실험결과에 따르면 겨울철 램프표면온도가 수온영향으로 급격히 저하되면 자외선 출력강도는 그에 비례해서 저하되므로 자외선램프의 설계강도를 일년 내내 유지하기 위해 일정한 램프표면온도를 유지하여야 하는바 램프표면온도는 약 42℃~45℃정도 유지할 때 설계강도의 95% 이상의 효율을 나타내는 반면 램프표면온도가 10℃로 하강할 때 설계강도의 20% 정도의 효율정도 밖에 나올수 없는 것으로 나타났다. 이는 기존 접촉식의 경우 겨울철 수온강하에 따른 램프표면온도의 강하로 자외선 효율이 동시에 저하됨을 뜻한다.



### 5.3 AFP™(AFP Tubing)

기존의 TEFLON 튜브의 자외선투과율 및 이끼형성 등의 단점을 보완하여 반영구적으로 한번설치로 교체가 필요 없는 튜브로 비접촉식 자외선 소독설비의 핵심



#### 5.4 경제성 분석

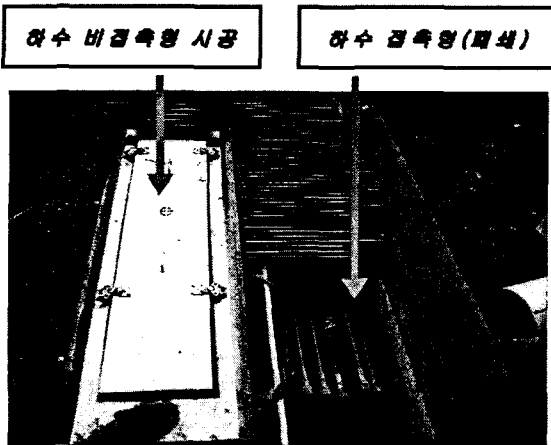
기존의 접촉식 자외선소독설비에 비해 시설비 및 유지관리비가 저렴

구 분	시설비	유지관리비		소 계 (시설비+1년 유지관리비)
		램프교체 (50개 기준)	전력비 (60원/ KW 기준)	
접촉식	200	20	8	28 (100%)
비접촉식	150	8	5	13 (47%)

- ※ 1.단위: 백만원, 처리용량:15,000m<sup>3</sup>/일, 저압고출력램프  
2.접촉식 : 램프 300W, 비접촉식 : 램프 175W 기준

#### 5.5 해외실적

미국/호주 등 전세계 폐수처리장 3,000여개, 하수처리장 600여개의 적용실적이 있고 기존 접촉식을 비접촉식으로 개조한 예는 아래 그림과 같다.



장소 : 미국 웨스트 버지니아(West Virginia)  
용량 : St.Pleasant(9,000m<sup>3</sup>/일), Kingwood WV(5,000m<sup>3</sup>/일)

#### 6. 종합 및 평가

AFP™ 튜브를 이용한 비접촉식 자외선소독설비 (AFP™ Non-Contact UVSystem)는 특히 인력투입이 어려운 중/소규모 하수처리장에서 시설비 및 유지관리 측면에서 그 우수성이 입증되었다.

#### 7. 참고자료

1. 미국 EPA 832-F-99-064(1999. 9)  
Wastewater Technology Fact Sheet, Ultraviolet Disinfection
2. Australian Water Quality Centre(1997. 12.)  
The Disinfection Capabilities of the Terminator Unit Using A Wastewater of poor physical

quality and high Microbial load

3. Wastewater Treatment Plants (1999, 저자: Syed R. Qasim)