

## 용수재이용을 위한 하수처리 유출수의 UV 소독 효율 연구

### Feasibility Study of UV-Disinfection for Water Reuse of Effluent from Wastewater Treatment Plant

윤 춘 경 · 정 광 옥\* · 함 중 화\* · 전 지 홍\*

Chun G. Yoon · Kwang-Wook Jung · Jong-Hwa Ham · Ji-Hong Jeon

#### Abstract

The feasibility study of UV-disinfection system was performed for disinfection of effluent from wastewater treatment plant. Three low-pressure UV lamps of 17, 25, and 41 W were examined with various flow rates. Low-pressure UV lamps of 17W were examined with various turbidity, DOM (dissolved organic matter), and SS (suspended solid). The pilot plant was a flow-through type UV-disinfection system, and the range of exposure time varied from 5 to 40 seconds, turbidity from 0 to 40 NTU, DOM from 0 to 30 mg/L, and SS from 10 to 40 mg/L. The 41W lamp demonstrated complete disinfection showing no survival ratio in all the experimental conditions, and generally 17W and 25W lamps also showed high removal ratio over 97%. For the same UV dose (UV intensity times exposure time), high intensity-short exposure conditions showed better disinfection efficiency than low intensity-long exposure conditions. While the effects of turbidity and DOM were not apparent, the effects of SS was significant on the disinfection efficiency which indicates that SS control before UV-disinfection appears to be necessary to increase removal efficiency. Considering characteristics of effluent from existing wastewater treatment plants, cost-effectiveness, stable performance, and minimum maintenance, the flow-through type UV-disinfection system with high intensity and low-pressure lamps was thought to be a competitive disinfection system for wastewater reclamation.

*Keywords : Water reuse, UV-disinfection, Line-throw type, UV dose, Turbidity, Dissolved organic matter, Suspended solid, Treatment efficiency*

#### I. 서 론

물은 공기와 함께 모든 생명체의 생존에 없어서는 안되는 필수요소이며, 우리 인류에게는 필요한 만큼의 수자원을 확보하고 깨끗하게 보존해야 할 책임이 있는 귀중한 자원이다. 산업화와 도시화뿐

\* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과  
\* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747  
fax: +82-2-446-2543  
E-mail address: chunyoona@konkuk.ac.kr

만 아니라 인구증가나 국민들의 생활수준 향상은 물 소비를 증가시켰으며, 수질오염물질의 증가는 수자원 관리의 어려움을 더욱 가중시키고 있다. 현재 세계적으로 물 문제는 가장 중요한 과제로 부각되고 있으며, 우리 나라는 이미 물부족 국가군에 속하는 나라로 분류된 바 있다 (Kwun *et al.*, 1997).

이처럼 지구 전체에 걸쳐서 많은 지역들에서 사용 가능한 수자원이 한계에 도달하면서, 용수재이용이 수자원 보전 및 효율증대라는 측면에서 크게 관심을 끄는 대안이 되었다. 용수재이용은 수자원의 양적인 측면뿐만 아니라, 수계에 방류되었을 때 발생할 수 있는 수질문제를 경감시킬 수 있는 오염부하 저감측면에서도 관심을 가지게 한다. 재이용수의 조건은 수요자가 사용할 때 무색·무취이어야 하고 무엇보다도 보건상 위험성을 줄이는 것이 중요하다. 따라서, 병원성 미생물의 특징과 종류, 질병 전염 기작을 이해하고 그 처리수준을 결정한 후 적절한 소독방법을 선택하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다(U.S. EPA-manual, 1992). 대장균 군(total coliform, TC), 분원성대장균 군(fecal coliform, FC), 대장균(*Escherichia coli*, *E. coli*)는 미생물적 측면에서 수질오염의 평가기준이 되는 지표생물로서 미생물에 의한 오염으로부터 안정성의 평가 및 모니터링을 위해 일반적으로 사용되고 있다 (Weiner, 2000).

병원성 미생물 제거를 위한 소독방법에는 염소소독이 가장 널리 사용되고 있지만, 트리할로메탄(trihalornmethanes, THMs)과 같은 유해물질을 부산물로 발생시키고, 관리가 부족한 경우 수생 생물 및 수질 환경에 악영향을 미칠 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유에 따라 오존(Ozone), 이산화염소(ClO<sub>2</sub>, chlorine dioxide), 클로라민(chloramine), 자외선(ultraviolet ray, UV)등 다양한 대체소독법 적용성에 대한 검토가 진행되었다 (Yeom *et al.*, 2002). UV는 소독제가 잔류하지 않고, 과잉주입의 우려가 없고, 소독장치가 단순하다는 여러 가지 장점이 있는 대체법으로 각광을 받

고 있다. UV 개발 초기에는 장비의 가격이 고가였으나 지속적인 기술개발과 대량생산으로 인해 경제적인 측면에서도 좋은 대체소독법으로 평가받고 있다 (Mally *et al.*, 1996).

UV에 의한 소독은 일반적으로 살균선이라고 불리는 UV-C(253.7 nm)가 세포내에 존재하는 디옥시리보핵산(deoxyribonucleic acid, DNA)에 흡수되어 (1) 세포벽을 손상시키고, (2) 세포의 투수성에 변화를 주며, (3) 세포원형질의 콜로이드 특성에 변화를 주고, (4) 효소의 활성에 방해로 주며, 그리고 (5) 세포내의 유전정보 물질인 DNA나 리보핵산(ribonucleic acid, RNA)에 손상을 입히게 된다. 따라서, UV소독램프는 253.7 nm를 가장 효과적으로 방사할 수 있도록 설계되어 있다 (Linden *et al.*, 2001). 다시 말해, UV-C에 DNA가 노출되면 DNA가 구성하고 있는 유기물들의 결합을 끊어서 불활성화(inactivation) 된다 (Lee *et al.*, 2002).

UV가 흡수에 의하여 발생하는 광화학적인 변이 현상은 최근 UV를 이용한 소독기술이 수처리에 있어서 염소소독법을 대체하거나 보완할 수 있는 중요한 기술적 대안으로 주목을 받고 있으나, 실제 UV 특성의 이해 및 UV에 대한 인식이 부족하며 효율적 이용이 절실히 요구되고 있는 실정이다 (Lee *et al.*, 2002). UV는 미국과 일본의 경우 하수처리장에서 염소소독을 대체하기 시작하였으며 (George *et al.*, 1991; Lee, 2002; Ministry of Environment(M.O.E.), 2001), 우리 나라에서도 2003년부터 하수처리장의 방류수 수질 기준에 대장균 군수에 대한 기준이 제정·시행되어 소독시설 설치를 의무화하였으며 적절한 소독시설을 설치하기 위한 노력으로 UV소독이 검토되고 있다 (M.O.E., 2002).

본 연구에서는 UV의 소독능을 나타내는 자외선 조사량(UV dose)과 처리유량 변화에 따른 소독효율을 평가하고, 용존성 유기물질(DOM), 탁도(turbidity), SS(suspended solid)와 같은 물리적

인 인자가 UV소독에 미치는 영향을 평가하여 용수 재이용이나 하수처리장 등의 UV소독시설 설계에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. UV 소독시설

UV 소독시설은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 유수식(flow-through type)으로서 경기도 양평군 소재 연립주택의 생활하수를 처리하는 호기성 bio-filter의 처리수를 유입수로 활용하였으며, 호기성 biofilter의 처리용량은 8 m<sup>3</sup>/day이다. UV 소독시설의 외관은 부식 방지를 위해 스테인리스 스틸(stainless steel)로 만들어졌으며, 외관의 내경이 96 mm, 길이는 860 mm이고, 램프를 감싸고 있는 석영관은 외경 24.5 mm, 그리고 길이는 860 mm이다. 2개의 UV 램프를 직렬로 연결하는 구조이며, 실제 실험에서는 2개를 사용해 본 결과, 소독수에서 미생물이 검출되지 않았기 때문에 1개의 UV 램프만을 사용하여 처리효율을 실험하였다. 석영관 안에 UV 램프를 배치하는 형식으로 되어 있고, UV 소독량을 조절하기 위한 유입유량 조절밸브

Table 1 Characteristics of UV lamp used for experiment

Watts (W)	Lamp length (mm)	Lamp current (mA)	UV lamp intensity (mw/cm <sup>2</sup> )
17	357	425	0.90
25	436	425	0.75
41	842	425	0.99

를 설치하였다. 석영관에 파울링(fouling)이 발생하는 것을 방지하기 위하여 타이머를 설치하여 시간 간격에 의해 석영관의 자동 세척이 가능하도록 설계하였다.

본 실험에 사용된 UV 램프는 Philips 제품으로 저압형 램프(low-pressure lamp)이며 그 제원은 Table 1에 요약되어 있다.

UN 소독의 소독능을 표현하는 방식은 자외선 조사량(UV dose)을 사용하며 milliwatt-seconds/cm<sup>2</sup>(mw·s/cm<sup>2</sup>)로 나타내며, 자외선 강도에 노출 시간(second)을 곱하여 구한다. 자외선 강도(UV lamp intensity)는 램프자체에서 발생하는 소독할 수 있는 자외선의 양을 측정할 단위면적당 강도로 milliwatt/cm<sup>2</sup>(mw/cm<sup>2</sup>)로 표현된다. 자외선 강도를 계산하는 방법은 point source sumanation

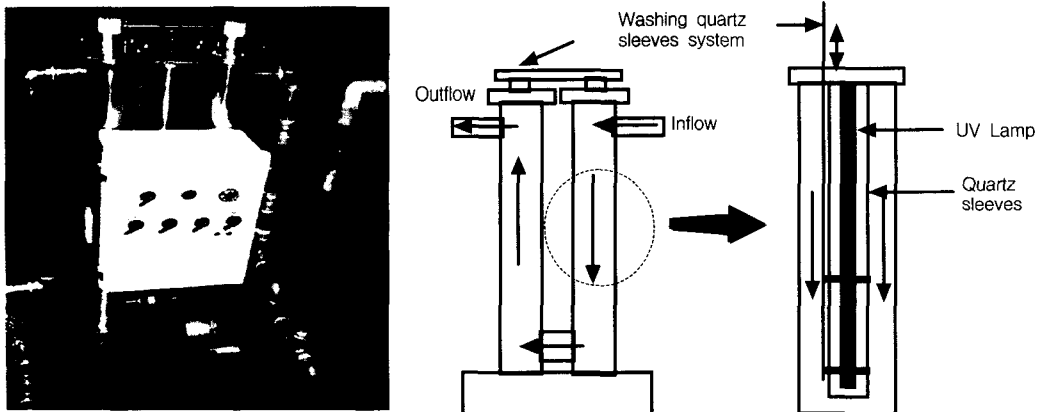


Fig. 1 UV disinfection system

(PSS)를 사용하였다(Tchobanoglous et al., 1996).

## 2. 실험방법

유량변화에 대한 UV 소독효율을 평가하기 위하여 Table 1에서 보는 것과 같이 각 UV 램프 (17W, 25W, 41W)에 대해 처리유량을 10, 20, 30, 40 m<sup>3</sup>/day로 변화시키면서 처리효율을 측정하였다. 탁도가 UV 소독에 미치는 영향을 조사하기 위해서는 표준탁도 유발물질인 카오린 분말을 biofilter 처리수에 혼합하여 일반적인 하수의 탁도 범위인 0~40 NTU로 조제하여 변화시키면서 UV 소독효율을 측정하였다. 용존성유기물질(DOM)의 영향을 알아보기 위해서는 biofilter 유입원수를 Whatman사의 GF/B(1.0µm)로 여과한 후 biofilter 처리수와 혼합하여 측정하였다. 일반적인 하수의 성상과 같은 종류의 DOM을 유발하기 위해서는 biofilter 유입원수를 여과하여 사용하였으며, DOM을 측정하기 위한 수질항목인 BOD<sub>5</sub> 범위를 0~32 mg/L로 변화시키면서 실험하였다. SS의 영향을 알아보기 위해서는 biofilter 처리수에 유입원수를 일정 배수로 혼합하여 변화시키면서 SS에 의한 영향을 평가하였고, 농도범위는 10~40 mg/L로 하였다.

Liltved *et al.*(2000)와 Kashimada *et al.*(1996)에 의하면 샘플을 암실에 두고 1~2시간동안 보관한 경우 샘플내의 미생물농도에 변화가 없거나 매우 적었으며, Standard Methods에도 미생물의 농도 변화를 방지하기 위해 즉시 실험을 못할 경우는 10℃의 냉암소에 보관하는 것을 권장하고 있다 (APHA, 1995). 따라서, 본 연구에서는 모든 시료를 10℃의 냉암소에 보관하여 운반 후, 2시간 이내에 실험실에서 분석하였다. 탁도, DOM, SS에 관한 실험에 사용된 UV 램프는 41W를 사용할 경우 모든 미생물이 살균되어서 소독효율분석이 어려웠기 때문에, 17W 램프를 사용하였으며 처리용량은 30 m<sup>3</sup>/day로 실험하였다.

수질측정항목은 분석시간이 비교적 빠르고 용수

Table 2 Analytical methods used for constituents

Constituents	Standard method	Remark
DO	SM 4500-O C	Azide modification method
BOD <sub>5</sub>	SM 5210-B	5-day BOD test
SS	SM 2540-D	-
Turbidity	SM 2130-B	Nephelometric method
T-N		
Organic nitrogen	SM 4500-N <sub>org</sub> -C	
NH <sub>3</sub> -N	SM 4500-NH <sub>3</sub> -D	BÜCHI 435 and B-316
NO <sub>2</sub> --N	SM 4110-B	Dionex DX-100
NO <sub>3</sub> --N	SM 4110-B	Dionex DX-100
T-P	SM 4500-P E	HP8452A spectrophotometer
Total coliform	SM 9221-B	
Fecal coliform	SM 9221-E	Multiple-tube fermentation Method
<i>Escherichia coli</i>	SM 9221-F	

재이용과 관련성이 높은 미생물과 유기물, 영양물질 위주로 분석하였으며 Table 2와 같은 Standard Methods(APHA, 1995)에 따라 분석하였다. 각 실험(탁도, DOM, SS)에 대한 분석항목(TC, FC, *E. coli*)별로 5회 이상 반복하여 구한 실험자료들은 통계프로그램(SPSS for windows, ver. 10.0)을 이용해 분산분석(analysis of variance)과 상관분석(correlation analysis)으로 통계분석 하였다. 분산분석(One-way ANOVA, Two-way ANOVA test)은 자외선 조사량에 대한 통계분석과 UV 소독에 대한 대장균 종류(TC, FC, *E. coli*)사이의 소독효율 차이를 평가하는데 이용하였다. 상관분석은 한 변수가 다른 변수에 어느 정도의 관련성이 있는지를 파악하고자 할 때 이용되는 분석기법이다 (Jung *et al.*, 1998). 각 실험 인자의 농도를 변화시키면서 UV 소독을 실시한 후 대장균 종류별 생존율을 이용하여 상관분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. Biofilter와 WWTP의 수질

본 연구에 이용된 biofilter 유입수와 처리수의 3

월에서 10월까지의 평균 수질과 2001년도 전국 하수종말 처리시설 WWTP 연 평균 수질은 Table 3에 비교되어 있다. 본 연구에서 UV 유입수로 사용된 biofilter 처리수와 향후 UV 소독시설 적용가능성이 있는 WWTP 유출수를 비교해 보면 biofilter 처리수가 TC의 경우 4.81배, T-P는

3.64배 정도 높은 상태이었고, SS, T-N 그리고, BOD<sub>5</sub>는 유사한 수질이였다. 이러한 차이는 유입수질의 차이는 있으나 biofilter 처리의 경우 정화조에서 고형물질이 침전된 후 다른 처리과정이 없이 biofilter 한가지의 처리공정만을 거치는데, 일반 하수종말처리장에는 1차처리, 2차처리 뿐만아니라 일부에서는 고도처리 및 소독처리까지 거친 후 방류하기 때문에 biofilter 처리수가 일반하수종말처리장보다 상대적으로 높은 수치를 나타낸 것으로 판단된다.

**Table 3 Comparison of water quality of biofilter and conventional waste water treatment systems**

Parameter	Biofilter <sup>a</sup>		WWTP <sup>b</sup>	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent
TC(MPN/100mL)	260,000	16,308	122,205	3,390
FC(MPN/100mL)	147,778	10,900	-	-
<i>E. coli</i> (MPN/100mL)	114,444	12,915	-	-
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	154.9	5.9	107.4	6.9
SS(mg/L)	54.4	3.4	111.7	5.9
Turbidity(NTU)	50.0	1.1	-	-
T-N(mg/L)	60.4	38.1	30.2	15.5
T-P(mg/L)	7.4	4.0	3.4	1.1

a : Mean concentration form March to October in 2002.  
 b : National mean concentration of WWTPs in 2001. (M.O.E., 2001).

## 2. 자외선 조사량에 따른 UV 소독 효율

Table 4 는 UV 램프 17W, 25W, 41W에 대해 각각 유량을 10, 20, 30, 40 m<sup>3</sup>/day로 변화시켰을 때 자외선조사량과 노출시간을 계산하여 정리한 표이며, 램프의 W가 적을수록 자외선 강도가 낮기 때문에 자외선 조사량이 감소하며, 또한 처리유량을 증가시키면 노출시간이 감소하기 때문에 자외선 조사량이 감소하게 된다. 각 UV 램프별 유량변화

**Table 4 Survival ratio for different lamp types (Watt) and flow rates (UV dose)**

Lamp	Flow rate (m <sup>3</sup> /day)	Exposure time (sec)	UV dose (mW · s/cm <sup>2</sup> )	Survival ratio (% mean ± S.E.*)		
				Total coliform	Fecal coliform	<i>E. coli</i>
17W	10	20.8	18.2	2.2±1.46	1.4±1.13	0.7±0.33
	20	10.4	9.1	0.4±0.21	0.3±0.13	0.2±0.08
	30	7.0	6.1	0.3±0.14	0.8±0.22	0.4±0.31
	40	5.0	4.6	0.6±0.26	0.7±0.41	0.6±0.26
25W	10	29.0	26.2	0.3±0.11	0.4±0.18	0.7±0.50
	20	14.5	13.1	0.7±0.19	0.9±0.16	0.3±0.16
	30	9.6	8.7	1.5±0.44	0.5±0.08	0.4±0.16
	40	7.3	6.6	2.0±1.35	0.5±0.13	0.4±0.16
41W	10	38	48.0	0.0±0.00	0.0±0.00	0.0±0.00
	20	19.0	24.0	0.0±0.00	0.0±0.00	0.0±0.00
	30	12.6	16.0	0.0±0.00	0.0±0.00	0.0±0.00
	40	9.6	12.0	0.0±0.00	0.0±0.00	0.0±0.00

\* : Standard error

에 대한 TC, FC, *E. coli*의 생존율 결과는 Table 4에 요약되어 있다. 41W 램프에서는 유량을 변화시켜도 실험범위에서는 모든 경우에서 100% 소독이 이루어졌으며, 25W와 17W 램프의 경우에도 유량변화에 따라 조금씩 차이는 있으나 모두 97% 이상의 매우 효과적인 소독이 이루어지는 것으로 나타났다. 각 항목(TC, FC, *E. coli*)에 대한 UV 소독효율을 파악하기 위하여 One-way ANOVA test를 실시한 결과 17W, 25W, 41W내에서 모두 유의수준 0.05 에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 UV소독이 TC, FC, *E. coli* 모두에게 통계학적으로 유사한 범위의 높은 처리효율을 나타낼 수 있음을 의미한다. Sinder *et al.* (1991)의 연구결과에서는 자외선조사량  $60 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  또는 그 이상인 경우에 하수처리수 소독에서 TC가 23 MPN/100mL 수준이었으며, 여과한 하수처리수 소독에서 자외선조사량이  $97 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 인 경우에 TC가 2.2 MPN/100mL 이하이었다. Loge *et al.*, (1997)은 SS의 농도가 10 mg/L인 하수처리수에서 자외선조사량  $100 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$  로 조사하였을 때  $4-\log$ 의 TC가 제거되었다고 보고하였는데, 이 연구 결과들은 모두 본 실험보다 많은 자외선 조사량으로 소독한 결과이다. Kashimada *et al.*(1996)은 FC가  $30\sim 35 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 에서  $3-\log$ 가 제거되었다고 보고하였는데 이 연구결과는 본 연구에서 사용된 41W의 램프에 유량을  $10 \text{ cm}^3/\text{day}$ 로 실험한 것과 비슷한 자외선 조사량이다. 본 실험에서는 대부분 다른 문헌상 연구결과보다 자외선 조사량이 적은 상태에서도 살균효과가 크게 나타났는데, 이유는 UV 소독장치가 유수식으로서 UV 램프와 시료 사이의 거리가 1~5 cm로 매우 작았으며, 자외선 소독에 영향을 미치는 SS 같은 인자들의 영향이 작았기 때문이라 판단된다. 일반적으로 광도나 광량은 거리제곱에 반비례하기 때문에 (Gregory *et al.*, 2000), 다른 실험에서 측정된 자외선조사량보다 적은 조사량으로서도 거리가 작아서 큰 처리효과를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다.

41W 램프에서 노출시간이 적은 경우(41W의  $40 \text{ m}^3/\text{day}$ )와 25W와 17W 램프의 노출시간 많은 경우(17W의  $10 \text{ m}^3/\text{day}$ , 25W의  $10 \text{ m}^3/\text{day}$ )에서 이론적인 자외선조사량이 적은 41W 램프에서 오히려 0%의 생존율을 나타내었으며 다른 조건들은 일정수치의 생존율을 나타내었다 (Table 4). 따라서, 이론적인 자외선조사량이 자외선소독능력을 간접적으로 평가할 수 있는 하나의 항목이나, 직접적인 소독능력과는 차이가 있을 수 있는 것으로 생각된다. 따라서, 자외선강도가 큰 램프를 사용하여, 체류시간을 짧게 하는 것이 자외선강도가 작은 램프에 노출시간을 길게 하여 이론적으로 자외선조사량을 비슷하게 한 경우보다 높은 소독효율을 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 본 실험에 사용된 biofilter 처리수는 41W의 램프로 소독 후 재이용할 경우 미생물이 검출되지 않는 것으로 나타나서 위생적인 문제가 없을 것으로 판단된다.

램프강도와 처리용량이 TC, FC, *E. coli*의 처리효율에 미치는 영향을 파악하기 위해서 Two-way ANOVA test를 실시한 결과, TC, FC, *E. coli* 모두 유의수준 0.05 에서 처리용량이 증가하여도 처리효율에 변화가 없는 것으로 나타났다. 이것은 처리용량  $10 \text{ m}^3/\text{day}\sim 40 \text{ m}^3/\text{day}$  범위내에서는 통계학적으로 변화가 없이 높은 처리효율을 유지하였다는 것을 의미한다. 또한 램프강도 17W~41W 사이에서는 TC, FC, *E. coli* 모두 유의수준 0.05 에서 처리효율에 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig. 3은 램프 W에 따른 LSD의 사후분석 결과인데, 사후분석은 모든 집단을 2개의 조합으로 만들어 이들 조합간의 차이를 비교하는 것으로, 그림에서 A와 B는 차이가 있고, AB와 B, AB와 A는 통계적으로 차이가 없음을 의미한다. 따라서, TC와 *E. coli*의 경우 41W 램프가 17W와 25W 램프 모두보다 처리효율이 높은 것으로 나타났으며, FC의 경우는 41W가 17W 램프보다 처리효율이 높은 것으로 나타났으나 25W 램프와는 처리 효율 차이가 없는 것으로 나타났다.

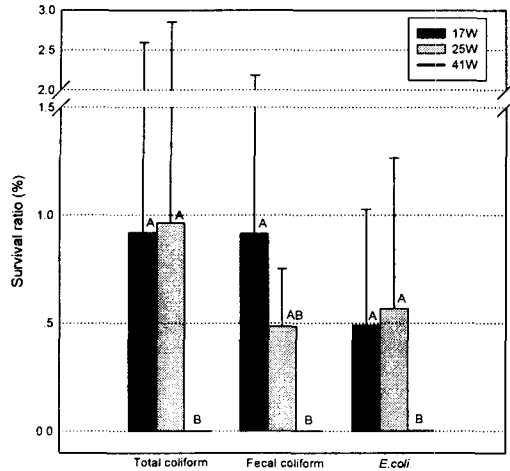


Fig. 3 Survival ratio of lamp type (Watt) on the UV disinfection (Mean±SD). Means with different letters are significantly different at P=0.05

각 항목(TC, FC, *E. coli*)에 대한 UV 소독효율을 파악하기 위하여 One-way ANOVA test를 실시한 결과 17W, 25W, 41W 내에서 모두 유의수준 0.05 에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 실험한 범위의 UV 램프 범위에서는 UV 소독이 TC, FC, *E. coli* 모두에게 통계학적으로 유사한 범위의 처리효율을 나타낼 수 있음을 의미한다.

### 3. 물리적인 인자에 따른 UV 소독 효율

#### 가. 탁도

본 연구에 사용된 탁도의 범위는 일반적인 하수처리장 방류수의 탁도범위인 0~40 NTU로 변화시켜서 17W의 30 m<sup>3</sup>/day에서 실험해본 결과 Fig. 4 과 같이 전반적으로 2% 이하의 생존율을 보였으며, 탁도 증가에 따른 TC, FC, *E. coli*의 상관관계를 분석해본 결과 상관계수가 각각 -0.54, -0.53, -0.41로 음의 상관관계를 나타내었으며, 이때의 유의확율은 각각 0.01, 0.01, 0.07 이었다. *E. coli*의 경우 유의수준 0.05를 기준으로 상관성이 없는 것으로 나타났으며, TC와 FC는 유의수준

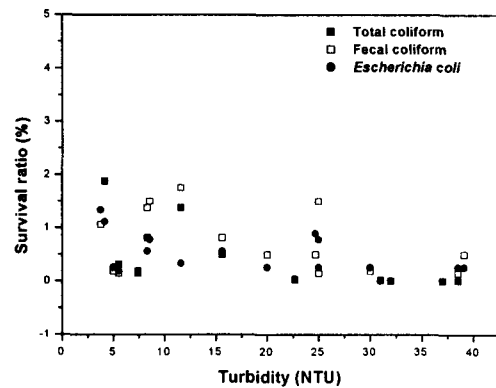


Fig. 4 The effect of turbidity on the UV disinfection

0.05를 기준으로 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. Lee *et al.*(2002)와 Ron *et al.*(1998)의 연구결과 탁도는 UV 효율을 감소시킨다는 연구결과와 본 연구에서의 생존율이 매우 낮은 것을 감안해 볼 때, 탁도와 UV에 의한 TC·FC 처리 효율이 음의 상관관계를 나타낸다는 결론보다는 0~40 NTU에서는 탁도가 UV 처리에 미치는 영향이 크지 않다는 해석이 합리적이라 판단된다.

본 연구에 사용했던 UV 소독시설은 탁도가 증가하여도 UV가 투과해 시료를 소독하는데 많은 간섭을 받지 않은 것으로 판단되며, 실제로 본 연구에 사용했던 형태의 유수식 UV 소독시설을 설치, 운영할 때 탁도의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 각 항목(TC, FC, *E. coli*)에 대한 UV 소독효율을 파악하기 위하여 One-way ANOVA test를 실시한 결과 농도범위 0~40 NTU 내에서 모두 유의수준 0.05 에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 실험한 정도의 탁도 범위에서는 UV 소독이 TC, FC, *E. coli* 모두에게 통계학적으로 유사한 범위의 높은 처리효율을 나타낼 수 있음을 의미한다.

#### 나. DOM에 의한 영향

Fig. 5는 DOM을 변화시키기 위해 원수를 여과

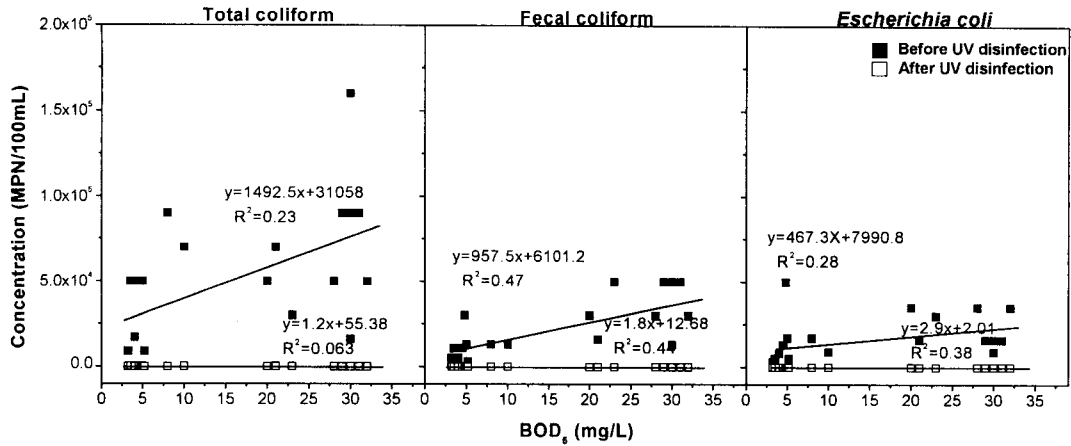


Fig. 5 The effect of dissolved organic matter on the UV disinfection

한 후 원하는 농도로 혼합하여 만든 시료의 UV 유입수와 UV 처리수의 농도를 나타낸 그래프이다 (17W 램프, 30m<sup>3</sup>/day). DOM을 평가하기 위한 수질항목은 BOD<sub>5</sub>를 0 mg/L에서 32 mg/L로 변화시켜 사용하였고, 일반적인 하수의 DOM을 표현하기 위하여 성상이 같은 하수원수를 여과하여 사용하였다. DOM을 높이기 위해 여과한 하수원수를 첨가함에 따라 TC, FC, *E. coli*의 농도가 일정비율 높아졌지만, UV 소독 후 생존율에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 6은 DOM의 변화에 따른 UV 소독 후 생존율 그래프이며, 생존율이 TC, FC, *E. coli* 모두 2% 이하로써 UV 소독에 대한 DOM에 의한 영향이 실험한 범위에서는 적은 것으로 나타났다. DOM 증가에 따른 TC, FC, *E. coli*의 상관관계를 분석해본 결과 상관계수가 각각 0.48, 0.38, 0.06으로 양의 상관관계를 나타내었으며, 이때의 유의확율은 각각 0.06, 0.11, 0.82로서 유의수준 0.05를 기준으로 유의성이 없는 것으로 나타났다. Morris *et al.*(1995)은 호소내에서 태양광을 이용하여 실험한 결과 DOC(dissolved organic carbon)의 농도가 증가함에 따라서 UV-B(280~320 nm)의 투과율이 감소한다고 하였다. Pages *et al.*(1997)은 DOC가 증가함에 따라 254 nm 파장

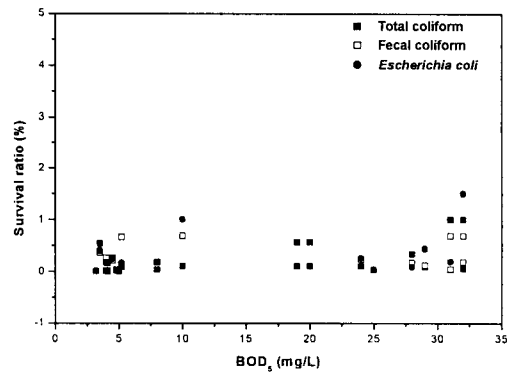


Fig. 6 The effect of dissolved organic matter on the UV disinfection

흡수율이 선형적( $R^2=0.76$ )으로 증가한다고 하였고, Dilling *et al.*(2002)는 친수성 DOM이 증가할수록 260 nm파장의 흡수율이 증가( $x=19.75y+0.53$ ,  $R^2=1.00$ )한다고 발표하였다. Laor *et al.*(2002)은 DOM의 양을 평가하는데 UV 흡수율로서 평가하여 10~15%의 DOM이 소모될 때, UV 흡수율은 35~65% 소모된다고 보고한 바 있다.

이러한 연구결과들과는 달리 본 실험에서는 사용된 UV 소독시설은 유수식으로써 램프와 시료와의 거리가 1~5 cm로서 매우 작았기 때문에 DOM에 의한 간섭이 적었다고 판단된다. Table 5는 UV 소독 전후의 TC, FC, *E. coli*의 농도로, BOD<sub>5</sub>가



Table 5 Average coliform concentration with dissolved organic matter

BOD <sub>5</sub> (mg/L)	Coliform groups (mean MPN/100mL)					
	TC		FC		<i>E. coli</i>	
	Before UV	After UV	Before UV	After UV	Before UV	After UV
3-10	50,200.0	62.4	10,640.0	24.2	13,500.0	21.4
11-20	80,000.0	114.3	32,000.0	49.3	26,400.0	44.3
21-33	76,000.0	108.3	31,000.0	63.8	20,000.0	66.7

증가함에 따라 UV 소독 후 TC, FC, *E. coli*의 농도는 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으나, DOM을 증가시키지 않은 biofilter 처리수를 소독한 것과 유사한 농도범위였다. 각 항목(TC, FC, *E. coli*)에 대한 UV 소독효율을 파악하기 위하여 One-way ANOVA test를 실시한 결과 농도범위 0~32 mg/L 내에서 모두 유의수준 0.05 에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 UV 소독이 TC, FC, *E. coli* 모두에게 실험한 범위의 DOM 농도에서는 유사한 범위의 높은 처리효율을 나타낼 수 있음을 의미한다.

다. SS에 의한 영향

SS의 영향을 조사하기 위해 하수원수를 혼합한 이유는 일반적인 하수에서 나타날 수 있는 SS를 재현하기 위해서 이었다. Fig. 7은 SS의 농도를 10~40 mg/L 범위로 변화시키면서 17W 램프에 처리용량 30 m<sup>3</sup>/day으로 UV 처리에 대한 결과로서, biofilter 처리수에 유입원수를 혼합하여 농도를 조정하여 실험하였는데 초기 대장균 농도가 그림과 같이 1×10<sup>4</sup>~3×10<sup>5</sup> MPN/100mL로 많이 증가함에도 불구하고 여전히 큰 소독 효율을 나타내었다. 그러나, UV 소독 후의 농도를 자세히 살펴보면 Fig. 8에서 보는 바와 같이 1×10<sup>3</sup>~8×10<sup>3</sup> MPN/

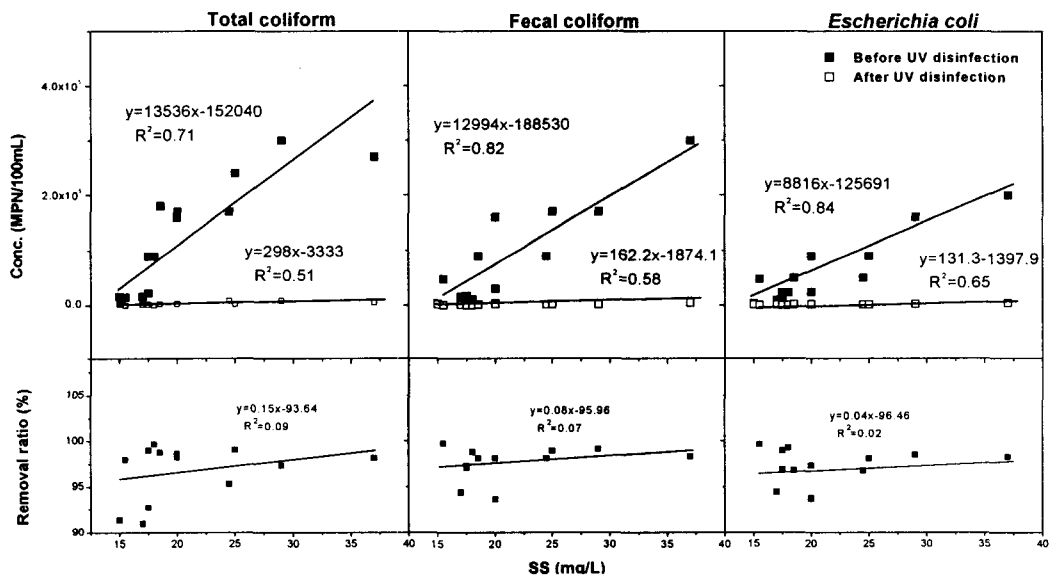


Fig. 7 The effect of SS on the UV disinfection

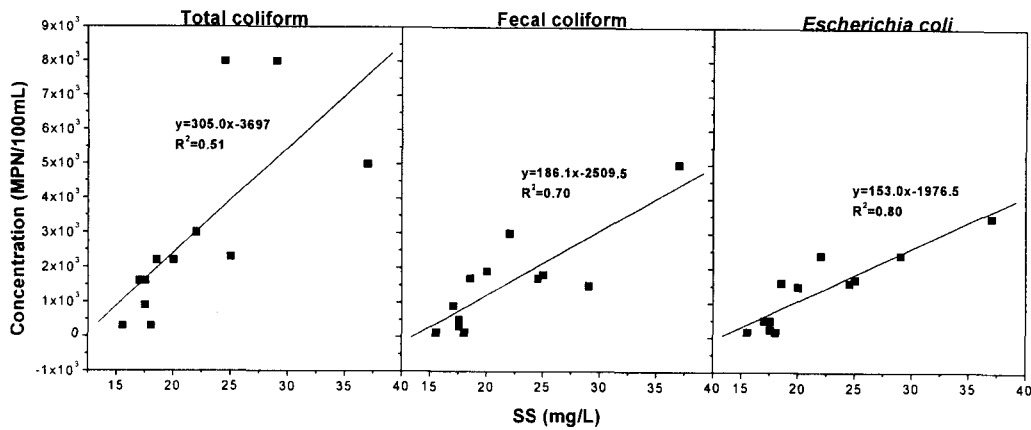


Fig. 8 Effect of SS conc. on TC, FC, and *E. coli* after UV treatment

100mL로서 biofilter 처리수를 UV 소독하지 않은 상태 정도의 높은 농도를 보였다. SS가 증가할수록 TC, FC, *E. coli*의 농도는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. *E. coli* 결정계수 0.80으로 비교적 뚜렷한 선형적 상관관계를 나타내었다.

Loge *et al.*(1997)은 자외선조사량을 변화시키면서 조사할 경우, SS의 농도가 증가함에 따라 UV 소독 효과가 감소하는 연구결과를 얻었다. 자외선 조사량에 차이가 커서 본 연구의 결과와 직접적인 비교는 어렵지만 감소 형태를 고려할 때 비슷한 연구결과라 판단된다. 수질이 탁한 경우 UV소독 효율이 감소하는 것은 많은 연구자들에 의해 보고되었고, UV의 단점으로도 소개되고 있는데(Lee *et al.*, 2002), 탁한 수질에 영향을 주는 항목중 탁도보다는 SS가 더 큰 영향을 미친다고 판단된다. 즉, UV소독효율이 감소할 때 탁도보다는 입자성 부유물질인 SS가 많은 경우 UV를 흡수·반사시켜 투과율을 저하시키기 때문에 소독효율이 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 보는 것과 같이 많은 미생물 저감효과를 보이거나 UV 소독후에도 Fig. 8 에서와 같이 UV 처리수의 농도는 아직도 상당히 높은 수준이었다. 하수처리장에서 방류하거나 또는 재이용할 경우 모든 경우에 위생 문제를 해결하기 위해 규정된

수질기준을 만족시키는 것이 중요하다. 단순한 처리효율이나 생존율을 가지고 소독효율을 판단하는 것은 부적합할 수 있으므로, UV 소독 후 수질기준에 만족여부를 평가해야만 하는데, 이때 UV 소독 과정에서 SS농도는 UV 소독효율에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자일 것으로 판단된다. 각 항목(TC, FC, *E. coli*)에 대한 UV 소독효율을 파악하기 위하여 One-way ANOVA test를 실시한 결과 농도범위 10~40 mg/L 내에서 모두 유의수준 0.05 에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 UV 소독이 실험한 정도의 SS 범위내에서는 TC, FC, *E. coli* 모두에게 통계학적으로 유사한 범위의 높은 처리효율을 나타낼 수 있음을 의미한다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 일반적으로 적용 가능한 저압형 UV 램프 3가지 강도에 유량을 변화시키면서 실험하였으며, 17W 저압형 UV 램프를 이용하여 30 m<sup>3</sup>/L의 유량으로 탁도, DOM, SS에 대한 UV소독 효율에 관하여 조사하였으며 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 램프를 17, 25, 41W로 세 가지 종류에, 유량을 10~40 m<sup>3</sup>/day로 변화시켜 노출시간이 5~40

s 범위에서 실험한 결과 41W 램프에서는 모든 경우에 100% 소독되었으며, 25W와 17W에서는 전반적으로 97% 이상 소독효율을 나타내었다. 자외선 강도가 큰 램프를 사용하여 짧은 노출시간을 통해 처리하는 것이 자외선 강도가 작은 램프를 이용해 긴 노출시간을 통해 비슷한 자외선 조사량으로 처리하는 것 보다 유리한 것으로 나타났다.

2. UV 소독시설을 사용할 때, 본 연구에서 사용했던 형태의 유수식 시설을 사용하면 램프와 시료와의 거리를 줄일 수 있어 UV 소독효율의 저해인자로 알려진 물리적 인자인 탁도, DOM 등에 의한 영향을 줄일 수 있어서 유리할 것으로 판단된다.

3. SS의 농도가 증가할수록 UV 소독 후 TC, FC, *E. coli*의 농도는 선형적으로 증가하였으며, UV 소독시설을 설계하는데 가장 중요한 물리적인 인자로서 UV 소독과정 이전에 적절한 SS 저감 방안이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 형태의 유수식 UV 소독시설은 처리시설 유출수 특성을 비교할 때 biofilter와 같은 소규모 처리시설 뿐만 아니라 하수종말처리장과 같은 일정 규모이상 처리시설 유출수 소독에도 효과적일 것으로 예상된다. 이 과정에서 SS가 소독 효율에 영향을 미칠 수 있는 주요인자로 나타났으나, 현재 운영중인 처리시설들의 일반적인 유출수 SS 농도가 UV 소독에 영향을 미치지 않을 정도로 낮아서, 기존 시설에 본 연구에서 사용한 것과 유사한 형태의 유수식 UV 소독시설을 적용하면 효과적으로 소독이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 4-5-1)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 19th Ed
2. Dilling, J. and K. Kaiser. 2002. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry. *Water Research* 36: 5037-5044
3. George, T., and F. L. Burton. 1991. *Wastewater Engineering(Treatment, Disposal, and Reuse)*. American Public Health Association. Washington D.C.
4. Gregory, A. S., J. P. Mally, A. B. Margolin, and A. P. Hogan. 2000. *UV inactivation of Viruses in Natural Water*. Denver. AWWA.
5. Kashimada, K., N. Kamico, K. Yamamoto, and S. Ohgaki. 1996. Assessment of photo-reactivation following ultraviolet light disinfection. *Water Science Technology*. 33(10-11): 261-269.
6. Laor, Y., and Y. Avnimelech. 2002. Fractionation of compost-derived dissolved organic matter by flocculation process. *Organic Geochemistry*. 33: 257-263.
7. Liltved, H., and B. landfald. 2000. Effects of high intensity light on Ultraviolet-Irradiated and Non-Irradiated Fish Pathogenic Bacteria. *Water Research*. 34(2): 481-486.
8. Linden, K. G., G. Shin, and M. D. Sobsey. 2001. Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water. *Water Science, and Technology*. 43(12): 171-174.
9. Loge, F., W. Emerick, C. R. Williams, W. Kodo, G. Tchobanoglous, and J. Darby. 1997. Impact of Particle Associated Coliform on UV disinfection. *Proceedings of the Water Environment Federation 70th Annual Conference and Exposition*(Chicago)
10. Malley, J. P., J. Shaw, and J. D. Ropp. 1996. Evaluation of the By-Products produced By

- The Treatment of Ground-waters with Ultraviolet Radiation(UV) and Post Disinfection Following Irradiation. Denver. CO: *AWWA and AWWARF*.
11. Morris, D. P., H. Zagarese, C. E. Williamson, E.G. Balseira, B. R. Hargargreaves, and B. Modunutti. 1995. The attenuation of solar UV radiation in lake and the role of dissolved organix carbon. *Limnology Ocean*, 40: 1381-1391.
  12. Pages, J., J. P. Torretton, and R. Sempere. 1997. Dissolved organic carbon in coral-reef lagoons, by high temperature catalytic oxidation and UV spectrometry. *C. R. Acad. Sci. Paris* 324. Series II a: 915-922.
  13. Crites, R., C., and T. George, 1998, Small and Decentralized Wastewater Management Systems, WCB McGraw-Hill, pp. 853-857.
  14. Sinder, D. E., J. L. Darby, and G. Tchobanoglous. 1991. Evaluation of Ultraviolet Disinfection for Wastewater Reuse Applications in California. Department of Civil Engineering. *University of California at Davis*, California.
  15. Tchobanoglous, G., F. Loge, J. Darby, and M. Devries. 1996. UV disign : Comparison of probabilistic and deterministic design approaches. *Water Science and Technology*, 33( 10-11): 251-260.
  16. US EPA. 1992. *Manual - Guidelines for water reuse*. EPA/625/R-921004. U. S. Agency international development. 11-20.
  17. Weiner, R. W. 2000. *Applications of Environmental chemistry*. Lewis.
  18. Kwun, S. K., 1997. Issues and Perspectives on the Demand and Supply of Agricultural Water, *Report of 47th Regular Monthly Seminar of the Forum for Agricultural and Rural Policy* : 50. (in Korean)
  19. Lee S. H., 2002. UV Disinfection for Drinking Water Treatment. *KSWQ · KWWA Processing of 2002 fall conference*. (in Korean)
  20. Lee K. H., and Lee S. C., 2002. *UV Disinfection. Journal of Environmental Hi-Technology*, 1-13. (in Korean)
  21. Yeom, C. M., S. H. Cho, , H. W. Jung, and J. Y. Yoon. 2002. UV Disinfection and its Facility. *Journal of the KSWW*, 16(2): 99-108. (in Korean)
  22. Ministry of Environment(M.O.E.). 2001. *The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant*. 2001. (in Korean)
  23. Jung, C. Y., and L. G. Choi. 1998. *Using SPSSWIN Statistics Analysis*, 198-210. (in Korean)
  24. Ministry of Environment. 2002. *Guidelines for Setting Disinfection System in Wastewater Treatment Plant*, 1-5. (in Korean)