

용수재이용을 위한 하수처리 유출수의 UV 소독 후 광회복 조사

Photoreactivation Study of Wastewater Treatment Effluent Disinfected by UV-disinfection for Water Reuse

윤 춘 경** · 정 광 옥* · 함 종 화* · 전 지 홍*

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

Abstract

Photoreactivation of microorganism following UV-disinfection is one of the research topics of interest in assessing the UV-disinfection performance. Apparent photoreactivation was examined under fluorescent lamp and solar radiation as well as in darkness. Total coliform, fecal coliform, and *Escherichia coli* were used as indicator microorganisms, and their concentration was monitored with time after UV-disinfection. Under the darkness, their initial concentration of 10~30 MPN/100 mL increased to the level of 100 MPN/100 mL after 24 hours, which implied that part of damaged microorganisms by UV-disinfection might be repairable with time. Under the fluorescent lamp, photoreactivation was more apparent that their concentration increased up to 1,000 MPN/100 mL which might significantly impair the water uses specially in reuse of reclaimed wastewater. However, their concentration further decreased down to below 2 MPN/100 mL under the solar radiation primarily due to additional disinfection by solar radiation rather than photoreactivation. Samples not disinfected by UV-disinfection also demonstrated substantial decrease of their concentration under solar radiation from about 5,000 MPN/100 mL to less than 30 MPN/100 mL in 24 hours. But direct reuse of effluent without disinfection is not recommended because natural decay by solar radiation may take time and be affected by climatic conditions. The result suggests that photoreactivation of pathogenic microorganisms may not be concerned in agricultural reuse of reclaimed wastewater because solar radiation may provide further disinfection after UV-disinfection.

Keywords : Photoreactivation, Reactivation, UV-disinfection, Fluorescent lamp, Solar radiation, Wastewater, Water reuse

* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과

** 건국대학교 지역건설환경공학과

** Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747

fax: +82-2-446-2543

E-mail address: chunyoona@konkuk.ac.kr

I. 서 론

수자원 사용량의 50% 이상이 관개용수로 이용되고 있는 우리 나라에서는 관개용수의 확보 및 효율적인 관리가 매우 중요하다. 과거 30년 동안 간척사업 및 다목적 댐의 건설을 통하여 수자원 확보를 위해 노력해 왔으나, 아직도 우리 나라는 물 부족 국가로 분류되고 있으며 댐 건설을 통한 수자원 확보는 여러 가지 문제를 야기 시키고 환경적 측면에서 불리하므로 수자원의 양적 증가를 통한 수자원 확보는 한계에 도달한 상태이다.

용수재이용은 지구 전체에 걸쳐서 많은 지역들이 사용 가능한 수자원이 한계에 도달하면서, 수자원 보전 및 효율증대라는 측면에서 크게 관심을 끄는 대안이 되었다.

재이용수의 조건은 수요자가 사용할 때 무색·무취이어야하고 무엇보다도 보건상 안전해야 하므로, 병원성 미생물의 특징과 종류, 질병 전염 기작 등을 이해하고 그 처리수준을 결정한 후 적절한 소독방법을 선택하는 것이 무엇보다 중요하다(U.S. EPA, 1992). 염소소독은 20세기 이후 먹는물의 생산에 널리 이용되어 왔으나, 잔류염소가 생태계에 미치는 영향과 트리할로메탄(trihalornmethanes, THMs)의 생성으로 인하여 염소소독 이외의 오존(ozone), 이산화염소(ClO_2 , chlorine dioxide), 클로라민(chloramine), 자외선(UV, ultraviolet ray) 등 다양한 대체소독법의 적용성 검토가 진행되었다(Lee, 2002). 오존은 강력한 산화력을 가지고 있어 유럽에서는 오랫동안 이용되어왔으나, bromate라고 하는 독성부산물을 생성할 가능성이 있고, 다른 소독법에 비하여 고가이며, 유지관리 및 운영이 복잡하다는 단점을 갖고 있다. 클로라민은 염소에 비해 소독력이 매우 낮기 때문에 적용예가 적다.

UV는 소독제가 잔류하지 않고, 과잉주입의 우려가 없으며, 유지관리 및 운영이 단순하기 때문에 이미 미국과 일본의 경우 하수처리장에서 염소소독

의 대체기법으로 사용되기 시작하였다. 최근 들어 UV를 이용한 소독법이 수처리에 있어서 염소소독법을 대체하거나 보완할 수 있는 중요한 기술적인 대안으로 주목을 받고 있다(Lee, 2002; M.E.O., 2002; Lee *et al.*, 2002; George *et al.*, 1991). 우리 나라에서도 2003년부터 하수처리장의 방류수 수질 기준에 대장균 군수에 대한 기준이 제정·시행되어 소독시설 설치를 의무화하였으며 적절한 소독시설을 설치하기 위한 노력으로 UV 소독이 그 대안으로 검토되고 있다(M.E.O., 2002).

UV에 의한 소독은 일반적으로 살균선이라고 불리는 UV-C (253.7 nm)가 세포내에 존재하는 디옥시리보핵산(deoxyribonucleic acid, DNA)에 가장 잘 흡수되어 (1) 세포벽을 손상시키고, (2) 세포의 투수성에 변화를 주며, (3) 세포원형질의 콜로이드 특성에 변화를 주고, (4) 효소의 활성화에 방해를 주며, (5) 세포내의 유전정보 물질인 DNA나 리보핵산(ribonucleic acid, RNA)에 손상을 입히기 때문에 UV 소독램프는 253.7 nm를 가장 효과적으로 방사할 수 있도록 설계되어 있다(Linden *et al.* 2001). UV-C에 DNA가 노출되면 DNA가 구성하고 있는 염기들을 하나로 묶어 염기이량체를 형성하여 불활성화(inactivation)되게 된다(Yeom *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2002; Snicer *et al.*, 2000; U.S. EPA, 1992).

그러나, UV 노출에 의해서 비활성화된 세균은 근적외선이나 가시광선을 조사하면 DNA 내부에 있는 효소가 빛을 받아 손상된 DNA를 복구함으로써 염기이량체가 다시 분리되어 미생물이 활성화되는데, 이러한 현상을 광회복(photoreactivation)이라고 부른다(Lee *et al.*, 2002; NWRI, 1993; Nelson *et al.*, 2000). 수환경중에서의 광회복에 대한 이해는 UV 소독을 적용하는데 있어서 중요한 과제 가운데 하나로서, 하수처리장의 방류수를 소독하거나 재이용을 위해 소독하는 경우, 처리수가 자연계로 유입된 후 태양광에 의해 발생할 수 있는 광회복에 대한 이해가 필수적이다.

본 연구에서는 하수처리수를 UV 소독한 후 여러 가지 종류의 빛에 노출되었을 때 지표 미생물로 사용되는 total coliform (TC), fecal coliform (FC), *Escherichia coli* (*E. coli*) 등이 어떻게 광회복 되는지를 비교 검토하여, 하수처리수의 재이용에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. UV 소독시설

UV 소독시설은 유수식(flow-through type)으로서 외관은 부식 방지를 위해 스테인레스 스틸(stainless steel)로 만들어졌으며, 외관의 내경이 96 mm, 길이 860 mm이고, 램프를 감싸고 있는 석영관은 외경 24.5 mm, 길이 860 mm이다. UV 소독시설은 2개의 UV 램프가 직렬로 연결하는 구조이다. 그러나, 실제 실험에서는 2개의 UV 램프를 사용해본 결과 미생물이 완전히 제거되어 소독수에서 검출되지 않았기 때문에 1개의 UV 램프만을 사용하여 실험하였다. 석영관 안에 UV 램프를

배치하는 형식으로 되어 있고, UV 소독량을 조절하기 위한 유입유량 조절밸브를 설치하였다. 석영관에 물 파울링(fouling)이 발생하는 것을 방지하기 위하여 타이머를 설치하여 시간 간격에 의해 석영관의 자동 세척이 가능하도록 설계하였으며 본 실험에서는 2시간 간격으로 세척하였다.

UV 소독시설은 경기도 양평군 소재 16가구 짜리 연립주택의 생활하수를 처리하는 호기성 bio-filter의 처리수를 유입수로 이용하였으며, 처리용량은 약 10 m³/day이다 (Fig. 1). 실험용 pilot UV 소독시설의 처리용량은 약 40 m³/day 이었다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 UV 램프 (low-pressure lamp, LIGHTTECH(USA), 17W-G10T5L)는 길이 357 mm, 자외선조사량(UV dose)은 PSS((point source summation) 방법을 사용하여 구하였으며, 30 m³/day의 유량으로 소독시 자외선조사량은 6.1 mW·s/cm² 이었다. 실험 후 시료는 10℃의 냉암소에 보관하여 2시간 이내에 양평군에서 건국대학교

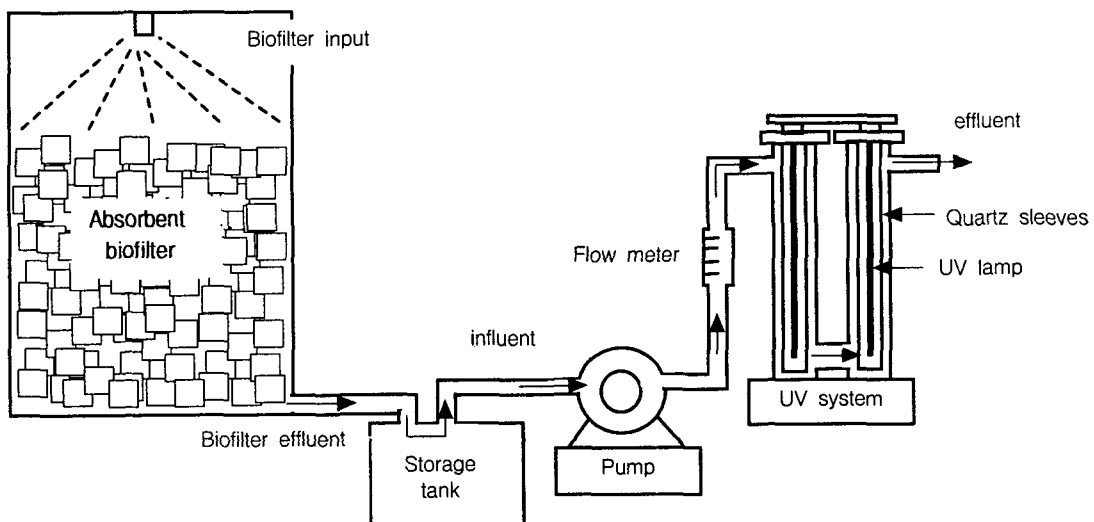


Fig. 1 Biofilter and experimental UV disinfection system

지역환경공학 연구실로 운반하여 실험하였다 (APHA, 1995). 광회복 실험조건은 1)태양광에 노출, 2)형광등 램프에 노출, 3)암실에 방치한 경우로 구분하였으며 0, 60, 120, 180, 240, 480, 720, 1440분에 시료를 채취하여 미생물 농도를 측정하였다. 태양광에 노출시킨 경우는 UV 소독 후 수계나 용수로 등에서 태양광에 의한 광회복자료를 얻고, 재이용수가 농업용수로 사용되어 논이나 밭으로 관개될 때 미생물의 농도변화를 평가하기 위해서이었고, 형광등에 UV 소독수를 노출시킨 경우는 광회복에 기여한다고 알려진 가시광선이나 근적외선에 대한 미생물의 농도변화를 알아보기 위해서이다. 암실에 보관한 경우는 UV 조사 후 시간에 따라 미생물의 농도변화에 대한 평가와 더불어 태양광과 형광등에 노출시킨 실험의 대조구로 사용하였다.

시료는 지름 90 mm 높이 15 mm의 petri dish에 14 mm 깊이로 채운 후 각 노출 실험에 사용하였으며, 실험처리시간별로 4개의 petri dish를 무작위로 선정해 200 mL 비이커에 혼합한 후 샘플하여 각 시간별 TC, FC, *E. coli* 농도를 측정했다. 모든 실험기구는 120°C의 autoclave에서 5분간 소독하여 다른 미생물에 의한 오염을 방지하였다.

태양광에 의한 노출실험은 건국대학교 생명환경과학대학 5층 옥상에서 실험하였으며 초기 실험 시작시간은 08:00~09:00시였고, 광량이 풍부한 맑은 날을 선택하여 실험하였다. 또한 각 측정시간별로 조도를 측정하였으며, 조도측정 장비로는 LUX meter (INS DX-100, Digital lux meter)를 사용하였다. 형광등에 의한 노출실험은 incubator안에 36W 형광등(OSRAM DULUX L) 램프를 설치하였으며, 램프와 시료와는 400 mm거리를 두었으며, 온도는 25~27°C이었다. 암실 조건은 빛이 들어가지 않는 incubator안에 petri dish 28개를 배치한 후 22~25°C 범위에서 실험하였다. 각 항목에 대한 UV 소독실험은 5 반복 이상 수행하여 평균값으로 사용하여 분석하였다.

Table 1 Analytical methods used for constituents

Constituents	Standard Methods	Remark
BOD ₅	SM 5210-B	5-day BOD test
SS	SM 2540-D	-
Turbidity	SM 2130-B	Nephelometric method
T-N		
Org.-N	SM 4500-N _{org} -C	
NH ₃ -N	SM 4500-NH ₃ -D	BÜCHI 435와 B-316
NO ₂ -N	SM 4110-B	Dionex DX-100
NO ₃ -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	

수질측정항목은 분석시간이 비교적 빠르고 용수 재이용과 관련성이 높은 미생물과 유기물, 영양물질 위주로 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였으며 항목별 실험방법은 Table 1에서와 같다.

미생물 분석은 최적확수시험법(MPN)을 사용하였으며 total coliform은 Lauryl triptose broth를 사용하였고, fecal coliform은 EC broth를 사용하였으며, *E. coli*는 EC-MUG broth를 사용하였는데 이들 모두 DIFCO사의 시약을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. Biofilter와 WWTP의 수질

본 연구에 이용된 absorbent biofilter 하수처리 시설과 전국 하수종말처리시설의 유입수와 유출수의 비교는 Table 2와 같다. 본 연구에서 UV 유입수로 사용된 biofilter 처리수와 향후 UV 소독시설 적용가능성이 있는 WWT P유출수를 비교해 보면 biofilter 처리수가 TC의 경우 4.81배, T-P는 3.64배 정도 높은 상태이었고, SS, T-N 그리고, BOD₅는 유사한 수질이었다. 이러한 차이는 유입수

Table 2 Comparison of water quality from biofilter and conventional waste water treatment systems

Parameter	Biofilter ^a		WWTP ^b	
	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 ₅ (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 December in 2002.
 b : National mean concentration of WWTPs in 2001.(M.O.E., 2001).

질의 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 오염물 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용한 형태의 유수식 UV 소독시설은 처리시설 유출수 특성을 비교할 때 biofilter와 같은 처리수 농도 범위에서 처리효과가 검증된다면, 하수종말처리장과 같은 일정 규모이상 처리시설 유출수 소독에도 효과적인 것으로 예상된다. 일반적으로 SS가 소독효율에 영향을 미칠 수 있는 주요인자로 보고되고 있으나, 현재 운영중인 처리시설들의 일반적인 유출수의 SS 농도는 UV 소독에 영향을 미치지 않을 정도로 낮았다.

2. 암실에 의한 영향

암실에 방치하였을 때 경과시간에 따른 미생물의 농도 변화는 Fig. 2와 같다. UV 소독 후 초기 TC, FC, *E. coli* 농도에서 시간의 변화에 따라 종별로

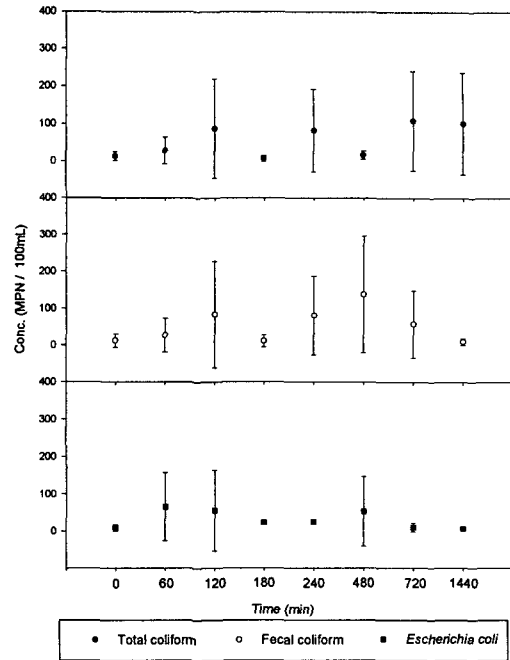


Fig. 2 Reactivation of microorganisms after UV disinfection in darkness (Mean±Standard deviation)

차이는 있으나, 빛이 배제된 상태인 암실에서 초기에는 10~20 MPN/100mL 정도로 매우 낮았던 미생물들의 농도가 약 100 MPN/100mL 정도 범위에서 증감을 나타낸 것은 미생물이 빛이 존재하지 않는 상태에서도 재활성할수 있다는 것을 의미한다.

Liltved *et al.*(2000)는 *A. salmonicida*와 *E. coli*의 농도가 UV 소독 후 3시간 동안 변화하지 않았다고 하였고, Koji *et al.*(1996)는 UV 소독 후 2시간 동안 냉암소에 보관할 경우 FC의 농도가 변하지 않거나 적었다고 보고하였다(Liltved *et al.*, 2000; Tosa *et al.*, 1999). 또한 Standard Methods에서도 샘플링 직후 실험이 불가능할 경우 10℃의 냉암소에 샘플을 보관하여 미생물 농도변화를 줄이는 것을 원칙으로 하고 있다.

하지만, 본 실험에서는 위의 실험과 같은 암실실험이었지만 상온(23~25 ℃)을 유지하였기 때문에

온도가 재활성에 영향을 주었을 것이라 판단된다. *E. coli*와 FC는 TC보다는 낮은 재활성(reactivation)을 보였으며, TC의 경우만이 1,440분이 지난 후 증가하는 형태를 보였다. 이러한 현상들은 UV가 잔류성이 없기 때문에 재오염이나 손상된 미생물이 재활성할 수 있다고 판단되며, 이러한 현상은 다른 소독법과 비교해 단점으로 지적되기도 한다 (Lee *et al.*, 2002; Ron and George, 1998; George *et al.*, 1991).

3. 형광등에 노출시킨 처리구

형광등에 UV 소독수를 노출시킨 처리구의 시간에 따른 미생물의 농도변화는 Fig 3 과 같다. UV 소독 후 초기 TC, FC의 경우 초기 농도가 10~20 MPN/100mL으로 낮은 상태에서 형광등에 노출시킨 후 240분까지 500~700 MPN/100mL로 증가하였다가 480분 정도에서 감소한 후, 1,440분 경에는 다시 1,000 MPN/100mL 까지 증가하는 경향을 나타내었다. *E. coli*도 TC, FC의 경우와 비슷한 증감 형태를 보였으며 180분까지 증가한 후 480분까지 감소한 후 다시 1,440분에는 760 MPN/100mL까지 증가하였다. Tosa *et al.*(1999) 등은 9.9 mW·s/cm²의 UV dose로 소독 후 5시간 동안 형광등 아래에 두었을 때 *E. coli*가 log-3 광회복이 이루어진다고 보고하였으며, Liltved *et al.*(2000)는 2.3 mW·s/cm² UV dose로 소독 후 fish pathogenic bacteria가 2시간 동안 log-2 광회복 후 다시 소멸한다고 보고하였다. Log 제거율은 일반적으로 단위가 큰 미생물에 많이 사용되는 방법으로서 log-1이 제거되었다는 의미는 약 10,000개 정도의 미생물이 약 1,000개 정도로 한 단위 제거되었다는 의미이다. Isabelle *et al.*(2002)은 하수처리수를 20°C의 Incubator에서 24 시간 동안 fluctuation시키면서 7회 샘플하여 실험한 결과 FC의 농도가 12시간까지 농도가 높아지다가, 18시간에 농도가 감소하는 경향을 보이고, 24

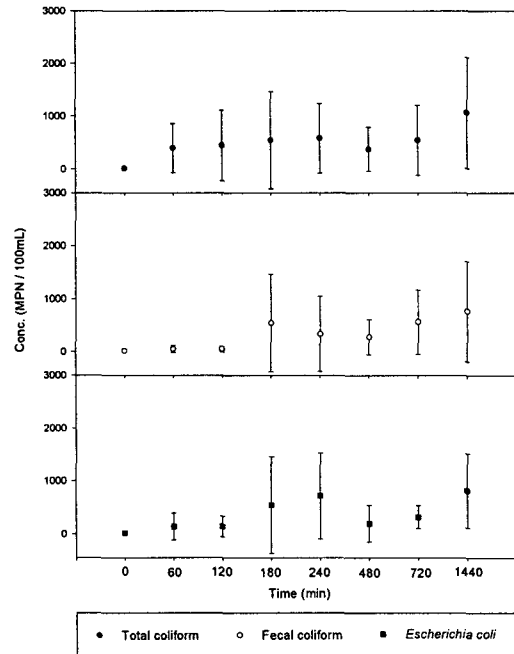


Fig. 3 Photoreactivation after UV disinfection under fluorescent lamp (Mean±Standard deviation)

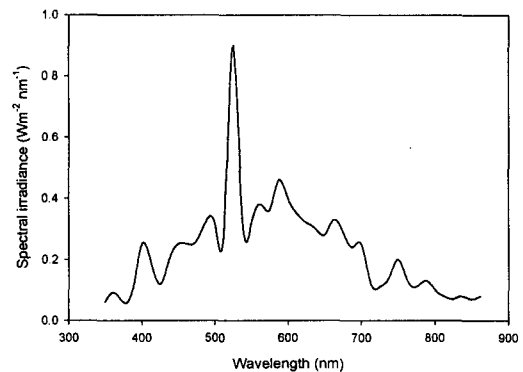


Fig. 4 Spectral irradiance of the fluorescent lamp used

시간이 지난 후 다시 농도가 증가하는 현상을 보였는데, 이러한 경향들은 본 연구와 유사한 증감 형태이다.

Fig. 4 는 실험에 사용된 형광등이 방출하는 빛의 파장대별 조사량으로서, 소독할 수 있는 파장대인 UV-B(280~320 nm)와 UV-C(200~280

nm)가 완전히 배제된 상태에서 가시광선이나 근적외선 파장대를 주로 발산하였다. 광회복 현상에 영향을 미치는 빛의 파장은 근자외선 파장영역에서 가시광선 파장영역까지 폭넓게 존재하며, 미생물의 종류에 의해 그 민감도도 달라진다(Koji *et al.*, 1996). 빛의 조도는 1,700 lx를 유지하였으며, 온도는 미생물의 생장에 유리한 25~27 °C를 유지하였기 때문에 광회복이 활발히 이루어졌다고 판단된다. 1,440 분 후의 광회복된 농도와 UV소독 후 농도를 비교하면 종류에 따라 40~90배정도 광회복된 것으로 나타났다. Takebe(1983)는 *E. coli* B가 340~420 nm 에서 광회복이 일어나며 380 nm파장이 광회복을 가장 많이 일으킨다 하였고,

Kashimada *et al.*(1996)은 *E. coli*가 360 nm파장에서 광회복이 가장 활발하다고 보고하였다. 가시광선이나 근적외선 파장대의 빛을 받게 되는 UV 처리수는 TC, FC, *E. coli*의 광회복을 고려해야 하지만, 광회복 되는 미생물의 양이 초기 UV 소독시설의 유입수와 비교하였을 때 10% 이하로 아직은 낮은 상태이었다.

4. 태양광에 노출시킨 처리구

UV 소독수와 소독하지 않은 상태를 태양광에 노출시킨 후 TC, FC, *E. coli*의 시간별 농도변화는 Fig. 5~6과 같다. UV 소독을 하지 않은 경우는

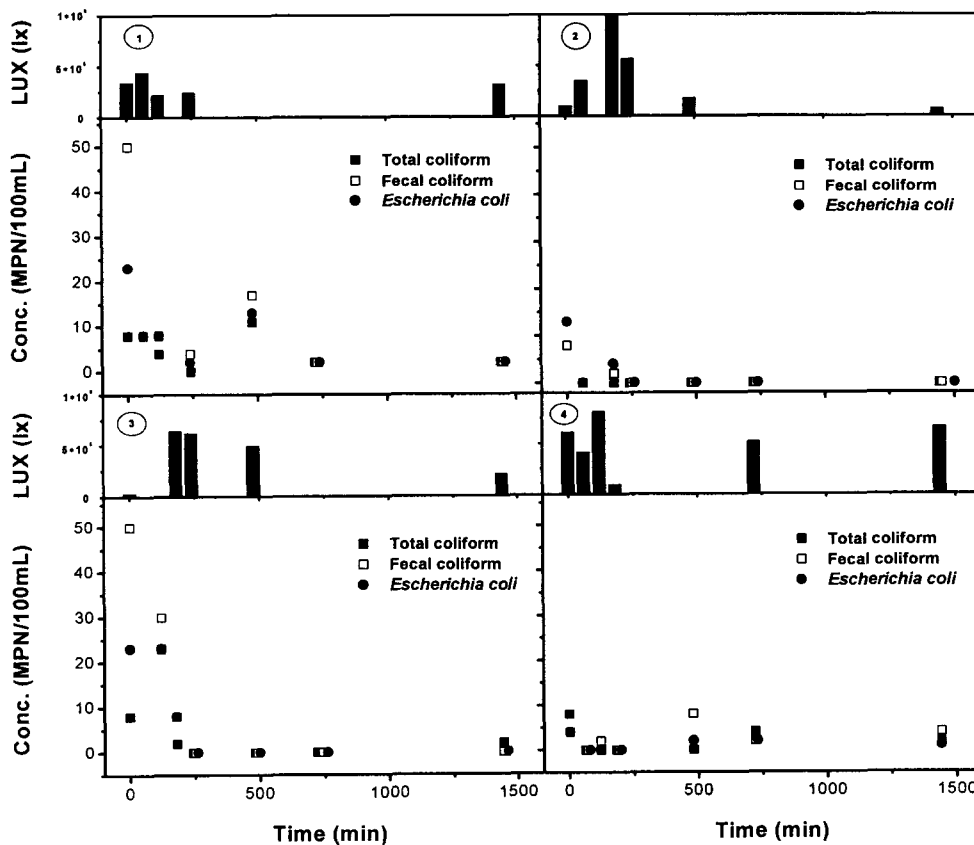


Fig. 5 Photoreactivation and solar disinfection after UV-disinfection under 4 different solar radiati

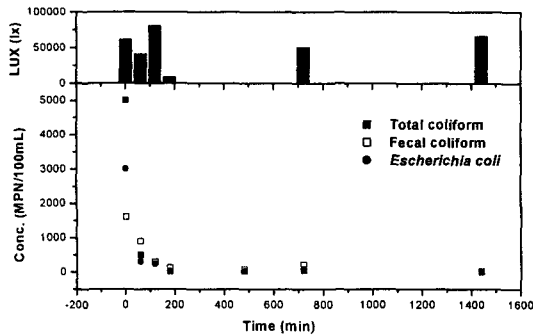


Fig. 6 Natural decay of microorganisms without UV-disinfection under solar radiation

태양광 노출시간 60분에서 TC, FC, *E. coli* 모두 현저히 감소하는 경향을 나타내었으며, 180분이 지나서는 TC, FC, *E. coli*가 다소 증감이 있었으나 대체로 100 MPN/100mL 이하였다. UV 소독이 이루어진 처리수의 경우는 태양광 노출시간에 따라 미생물의 농도는 약간 증감하는 경향을 나타내었으나 그 농도가 거의 무시할 수 있을 정도로 낮았다. Table 5에서 120분 부근에서 미생물의 농도가 증가한 이유는 날씨가 급격히 변하여 비·바람이 불고 조도가 급격히 감소하였기 때문으로 판단된다. 그러나, UV 처리수의 미생물 농도가 낮았기 때문에 120분에서 미생물의 농도가 증가하여도 TC, FC, *E. coli* 농도는 모두 10 MPN/100mL 정도로 낮았으며, 720분 이후에는 모두 2.0 MPN/100mL 이하의 매우 낮은 값을 나타내었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 태양광에 의한 미생물 소독효과가 뚜렷한 것으로 나타났으며, 태양에 의한 소독은 이미 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 보고되었다. 인도에서 1세기 전부터 태양을 음용수 소독에 이용하였으며, Downes *et al.*(1977)은 태양광이 미생물을 소독에 효과가 있다고 보고하였다. Ronan *et al.*(1996)은 태양광으로 소독한 물을 가지고 Massai족의 5~16세의 어린이들에게 음용수로 사용하게 하였으며, Peter *et al.*(2003)은 태양광에 의한 소독을 Haiti에 실제 적용하여 음용수로 사용하였다. 그러나 안정된 값을 나타내

기까지는 상당한 시간이 필요하므로, 하수처리수가 소독처리 되지 않고 수계로 유입될 경우 일정한 유하거리나 유하시간까지는 상당한 미생물의 농도를 유지할 것으로 판단된다. 또한, 본 실험은 수심 14 mm의 낮은 petri dish에서 실험한 결과이기 때문에 이보다 깊은 수심을 가지는 수계에서는 태양광에 의한 소독효과는 본 실험결과보다 감소할 것으로 예상된다. 태양광 노출 실험에 의하면 UV 소독 전후의 시료에서 모두 광회복보다는 태양광 소독효과가 더 강하게 나타났으며, 이러한 결과는 하수처리수가 재이용을 위해 태양광에 노출되었을 때 미생물의 농도가 추가로 낮아져서 보건상 더욱 안전해지는 유리한 상황으로 진행될 것으로 판단된다. 따라서, 하수재처리수를 UV소독한 후 농업용수나 조경용수와 같이 태양광에 노출되는 환경에 적용될 경우 미생물에 의한 보건상 문제를 크게 우려하지 않고 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 태양광에 의한 소독효과는 확실하나 그 효과는 기상상태에 따라 좌우되며, 소독처리 없이 하수처리수를 방류하였을 때 높은 병원성 미생물이 자연계에 유출되었다는 그 자체만으로도 문제가 될 수 있다. 반면에 UV 소독수는 태양광에 의한 광회복이 나타났더라도 처리수의 미생물 농도수준이 매우 낮기 때문에 광회복 정도는 태양광 소독효과에 의하여 억제되어 보건위생문제를 야기하지 않을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 하수처리수의 재이용을 위한 UV 소독의 적용성을 평가하기 위하여, 일반적으로 사용하는 저압형 UV 램프에 의한 소독 후 태양광, 형광등, 암실에서 광회복(photoreactivation)과 재활성(reactivation)에 대해 실험하였으며, 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) UV 처리 후 암실에서 시료를 보관하는 경우에는 TC, FC, *E. coli* 농도 모두가 측정시간 마

다 약간의 증감변화를 보이면서 전체적으로 변화의 폭은 적었으나, UV 소독 후 빛이 차단된 상태에서도 미생물의 일부가 약 100 MPN/100mL 정도의 수준까지 회복할 수 있는 것으로 나타났다.

2) UV 소독 후 가시광선과 근적외 파장대만을 발산하는 형광등에 노출시켰을 경우 UV 소독 직후 농도보다 TC, FC, *E. coli*가 약 40~80 배 광회복되어 1,000 MPN/100mL 까지 증가하는 경향을 나타내었다. 이 농도는 UV 소독 전 농도의 약 10% 미만 수준의 농도로써 UV 소독에서 소독 후 재이용 사용처가 형광등 노출의 조건일 경우에 광회복에 의한 미생물 농도 상승이 고려해야할 중요한 인자일 것으로 판단된다.

3) UV 소독 후 태양광에 노출시킨 실험에서는 TC, FC, *E. coli* 의 초기 농도가 10~30 MPN/100mL 범위의 농도를 갖은 상태에서 노출 직후 급격하게 감소하기 시작하여, 1,440분(24시간)이 지난 후의 농도가 모두 2.0 MPN/100mL 이하로 감소하였다. 따라서, UV 소독수가 태양광에 노출될 경우 미생물의 농도는 더욱 낮아져서 광회복보다는 태양광 소독 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

4) UV 소독을 거치지 않은 상태의 biofilter 처리수를 태양광에 노출시킨 실험에서도 미생물의 농도가 UV소독 후 태양광 노출실험과 유사한 감소형태를 보였으며, TC, FC, *E. coli* 모두가 1,440분(24시간) 지난 후 99% 이상의 높은 소독효과를 나타내었으며, 그 농도는 10~30 MPN/100mL의 범위이었다. 이 결과는 태양광에 의한 소독효과가 상당히 높음을 의미하는데, 태양광에 의한 소독효과가 이와 같이 뚜렷하다고 하여도 고농도의 병원성미생물이 함유된 상태로 소독되지 않고 수계로 노출되면 소독이 충분히 이루어지기까지 기간에 환경위해성 문제가 우려된다.

일반적으로 UV 소독 후 처리수가 태양광에 노출되면, 가시광선이나 근적외 파장대로 인한 광회복과, 태양광내의 UV-B와 UV-C에 의한 소독과 같은 상반된 효과가 동시에 발생할 수 있을 것으로

생각된다. 그러나, 태양광의 광회복 효과는 소독효과에 비하여 작아서 전체적으로는 소독효과에 의한 미생물 농도의 추가감소가 이루어지는 것으로 나타났다. 태양광에 노출되는 농업용수나 조경 용수와 같은 용도로의 용수재이용은 본 실험에서 TC, FC, *E. coli* 모두에게 공통적으로 나타난 현상들을 고려할 때 태양광에 의한 추가 미생물 농도 저감 효과를 기대할 수 있으며, 광회복에 의한 보건위생상의 문제를 우려하지 않아도 될 것으로 생각된다. 실험에 사용한 biofilter 유출수는 일반하수종말 처리장의 유출수보다 상대적으로 미생물 농도가 높았으며, 따라서 본 실험의 결과를 일반하수종말 처리장 유출수에 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

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

References

1. Alexander, J. Horne, Charles R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGRAW-HILL
2. APHA, 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Ed.*, APHA.
3. Downes, A. and T. P. Blunt. 1977. Resear-ches on the effect of light upon bacteria and other organisms. *Proc R Soc* 28(1): 488-500.
4. George, T. and F. L. Burton. 1991. *Waste-water Engineering(Treatment, Disposal, and Reuse)*. McGRAW-HILL.
5. Isabelle, G., P. Crop and P. Servais. 2002. Fecal coliform removal in wastewater treat-ment plants studied by plant counts and enzymatic methods. *Water Research* 36: pp. 2607-2617.
6. Kashimada, K., N. Kamikp, K. Yamamoto and S. Ohggaki. 1996. Assessment of Photo-

- reactivation follow UV Light Disinfection. *Water Science and Technology*. 33(1): 261-269.
7. Koji, K., N. kamico, K. Yamamoto and S. Ohgaki. 1996. Assessment of photoreactivation following ultraviolet light disinfection. *Water Science and Technology* 33(10-11): 261-269.
 8. 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.
 9. 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.
 10. National Water Research Institute(USA). 1993. UV Disinfection Guidelines for Wastewater Reclamation and Disinfection Research Needs Identification.
 11. Nelson, D. L., M. C. Michael. 2000. *Lehninger Principle of Biochemistry* Worth Publishers.
 12. Peter, M. O., P. Shanahan and F. P. Martin. 2003. Solar disinfection(SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti. *Water Research*. 37: 47-54.
 13. Ron, C. and G. Tchobanoglous. 1998. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. McGRAW-HILL.
 14. Ronan, M. C., E. M. Michael, J. Tina, G. G. Kevin and B. Joseph. 1996. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Massai children: a controlled field trial. *Early Reports*. 348: 1695-1697.
 15. Snicer G. A., J. P. Mally, Jr., A. B. Margolin, P. H. Shannon. 2000. *UV inactivation of Viruses in Natural Water*. AWWA Research Foundation.
 16. Tokebe, K.. 1983. DNA Repair. *Tokyo Univ. Press*. (in Japanese)
 17. Tosa, K. T. and T. hirata. 1999. Photoreactivation of *enterohemorrhagic escherichia coli* following UV disinfection. *Water Research*.. 33(2): 361-366.
 18. US. EPA,. 1992. Manual - Guidelines for water reuse. EPA/625/R-921004. *U.S Agency international development*. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2002.
 19. Lee, K. H. and S. C. Lee. 2002. UV Disinfection. *Journal of Environmental Hi-Technology*. pp. 1-13. (in Korean)
 20. Lee S. H.. 2002. UV Disinfection for Drinking Water Treatment. *KSWQ · KWWA Processing of 2002 fall conference*. (in Korean)
 21. Ministry of Environment(M.O.E.). 2001. *The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant in 3-Quarter*. 2001. (in Korean)
 22. Ministry of Environment. 2002. *Guidelines for Setting Disinfection System in Wastewater Treatment Plant*. (in Korean)
 23. 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)