

하수처리수 관개후 벼재배 시험구에서 지표미생물 거동 분석

정광욱 · 윤춘경* · 전지홍 · 함종화

(건국대학교 지역건설환경공학과)

Analysis of Indicator Microorganism Concentration in the Rice Cultural Plot after Reclaimed Water Irrigation. Jung, Kwang-Wook, Chun-Gyeong Yoon*, Ji-Hong Jeon and Jong-Hwa Ham (Department of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

A study was performed to examine the effects of UV-disinfected reclaimed water on microorganism concentration during rice culture. Four treatments were used and each one was triplicated to evaluate the changes of microorganism concentrations: stream water irrigation (STR), biofilter effluent irrigation (BE), UV-disinfected water irrigation with dose of $6 \text{ mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$ (UV-6), and UV-disinfected water irrigation with dose of $16 \text{ mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$ (UV-16). The indicator microorganisms of interest were total coliform (TC), fecal coliform (FC), and *E. coli*. The biofilter effluent from 16-unit apartment sewage treatment plant was used as reclaimed water and flow-through type UV-disinfection system was used. Concentrations of indicator microorganisms in the treatment plots ranged from 10^2 to 10^5 MPN/100 mL during 24 hours after irrigation in May and June, where initial irrigation water for transplanting preparation was biofilter-effluent without UV-disinfection. It implies that initial irrigation using only non-disinfected reclaimed water for puddling in paddy field can be health-concerned because of more chance of farmer's physical contact with elevated concentration of microorganisms. The concentrations of microorganisms varied widely with rainfall, and treatments using UV-disinfected water irrigation showed significantly lower concentrations than others and their levels were within the range of paddy rice field with normal surface water irrigation. The mean concentrations of STR and BE during growing season were in the range of 4×10^3 MPN/100 mL for TC, and 2×10^3 MPN/100 mL for FC and *E. Coli*. While mean concentrations of UV-6 and UV-16 were less than 1×10^3 MPN/100 mL for all the indicator microorganisms. Overall, UV-disinfection was thought to be feasible and practical alternative for agricultural reuse of secondary level effluent in Korea.

Key words : indicator microorganisms, paddy rice culture, reclaimed water, irrigation, UV-disinfection, water reuse

서 론

하수처리수의 농업적 재이용은 대체수자원 확보 및 효

율증대라는 양적인 측면 뿐만 아니라, 수계에 방류되었을 때 발생할 수 있는 수질문제를 경감시킬 수 있는 오염부하 저감측면에서도 큰 관심을 가지게 한다. 물의 재처리 및 비음용수로써의 재이용은 이미 적용 중인 상·하수처

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3747, Fax: 02) 446-2543, E-mail: chunyoonyoon@konkuk.ac.kr

리 기술만으로도 가능하기 때문에 대부분의 국가에서도 활용 가능한 방법으로써, 세계적으로 120여 개국에서 하수처리수를 농업적으로 이용하고 있으며 우리나라에서도 그 적용가능성이 크다(US EPA, 1992). 세계적으로 생활하수의 재이용에 대한 관심과 노력이 계속되고 있는데, 재이용수의 활용 분야는 그 목적에 따라 중수도, 공업용수, 농업용수, 그리고 하천유지용수 등으로 다양하다. 실제로 물 부족을 겪는 많은 국가에서는 하수 재이용을 주요한 대체수자원으로 다양하게 이용하고 있다. 하수재이용은 부족한 수자원의 보충, 하천의 건천화 방지, 용수이용효율 제고 등의 효과 이외에도 농경지에 비료성분 공급, 양어양식에 영양분 공급 등의 효과를 기대할 수 있다. 처리수의 이용이 활성화되기 위해서는 처리기술적인 문제외에도 비용문제, 보건위생상의 위험, 주민들의 정서적 저항과 반대 등 경제 사회, 문화적 측면도 고려되어야 할 것이다.

재이용을 목적으로 하수처리수를 이용할 경우, 적절한 재이용수 수질기준을 마련하여 그에 맞는 처리방법을 적용하는 것이 가장 중요하다. 우리나라에서는 중수도 개념의 제한된 범위에서 하수재이용 기술이 활용되고 있으며, 그 이용량이나 실적은 미비한 실정이다(M.O.C.T., 1992). 중수도에 관한 수질기준은 있으나, 하수처리장 방류수를 처리하여 농업용수, 양어장, 그리고 축산업 등에 적용할 수질기준은 마련되어 있지 않은 상태이다. 하수처리수나 생활하수를 농업용수로 재이용하는 일은 흔히 있는 일로써 우리나라에서는 농업발전과정에서 관행적으로 이루어져 왔으며, 아직도 미처리된 생활하수가 흘러 들어간 저수지나 보, 용수로 등에서 취수하여 벼농사에 사용하는 지역이 많은 것이 현실이다.

우리나라의 경우 농업용수 사용량이 전체용수량의 약 50%를 차지할 정도로 사용량이 많으며 하수처리수를 농업용수로 재이용할 수 있는 가능성이 매우 크다. 하수처리수를 재이용하기 위한 조건으로는 소비자가 사용할 때 무색·무취이어야 하며, 병원·위생학적인 안정성 확보가 무엇보다 중요하기 때문에 일반적으로 지표성 미생물인 대장균군(total coliform, TC), 분원성 대장균군(fecal coliform, FC) 그리고 대장균(*E. coli*) 등을 기준으로 규제하고 있다(Duncan and Sandy, 1989; US EPA, 1992; Anderson *et al.*, 2001; Lee and Kim, 2001). 국제적 농업용수 수질기준으로는 USEPA와 WHO의 수질기준이 사용되고 있는데, USEPA의 수질기준은 실제적으로 음용수 수준의 보건·위생학적으로 절대적 안전수준의 처리를 요구하고 있으며, 1920년대부터 세계 각국의 수질기준제정에 영향을 주었다. 수질항목으로는 대장균 이외에

pH, BOD, turbidity, SS, 잔류염소가 포함되어 있고, 처리방법과 수질모니터링 방법, 상수원과 용수로와의 거리 등 세부적인 항목까지 포함하고 있다. 심미적 부분인 SS, turbidity를 포함하였으며, 수처리에 관한 기준까지 제시함으로써 사용자에게 심미적 거부감, 공중보건의 안정성을 절대적으로 확보하기 위한 수질기준을 제시함과 동시에 적절한 처리방법에도 초점을 맞추고 있다. 그러나 이 기준은 먹는 물 수준의 처리를 요구하고 있으며, 재이용수가 공중보건·위생에 미치는 영향에 대한 실질적인 평가보다는 위험요소로 완전히 제거하는 목적을 달성하도록 제안된 기준이다.

WHO는 캘리포니아 수질기준이 역학조사(epidemiological basis)없이 만들어진 지나치게 엄격하고 비합리한 수질기준이라 판단하고, 보다 현실적인 기준을 설정하기 위해 노력하기 시작하였다. WHO에서는 기술적으로 대장균을 완전히 처리하는 것이 가능하지만, 경제적·실용적인 측면을 충족시킬 수 없다고 판단하여, 최신의 전염병학적인 증거를 통해 처리된 하수와 분뇨의 재이용에 대한 보다 현실적인 접근방법을 제안하였다(WHO, 2000). USEPA와 WHO의 수질기준 모두 보건·위생의 지표항목인 분변성대장균을 수질기준으로 채택하여 강력한 규제 항목으로 이용하고 있다. 이 기준들은 법률로서의 효력을 가지는 것은 아니며, 하수처리수를 농업용수로 재이용하는 국가에서 수질기준을 적용할 경우 참고하는 기준으로써, 경제, 사회, 환경, 관개·경작방법 등을 고려하여 각 국가에 적합한 수질기준을 적용하도록 권장하고 있다. 이 기준들은 발농사를 위주로 하는 외국의 수질기준이기 때문에 논농사가 대부분인 우리나라에 직접 적용하기에는 신중해야 하며, 일정기간 담수된 상태를 유지하는 논에 하수처리수를 재이용할 경우 각별한 주의가 필요하다.

일반적으로 호수나 저수지에서 지표성 미생물의 거동은 유입, 유출, 자연적인 소멸, 빛에 의한 소독 및 광회복, 침전, 저질(sediment)에서의 재부유 등 복잡한 관계를 나타낸다(Chapra, 1997). 논에서도 호수나 저수지와 유사한 거동이 일어날 것으로 생각되며, 낮은 수심으로 인해 빛과 sediment와의 관계가 보다 중요할 것으로 예상된다.

이 연구에서는 논에 관개용수로 이용되고 있는 하천수, biofilter 유출수(하수처리수), 그리고 UV소독수를 관개용수로 사용한 후 실험구내에서 지표미생물의 변화를 분석하였고 앞으로 하수처리수가 농업용수로 재이용 될 경우 발생 가능한 보건·위생문제에 대하여 연구하였다.

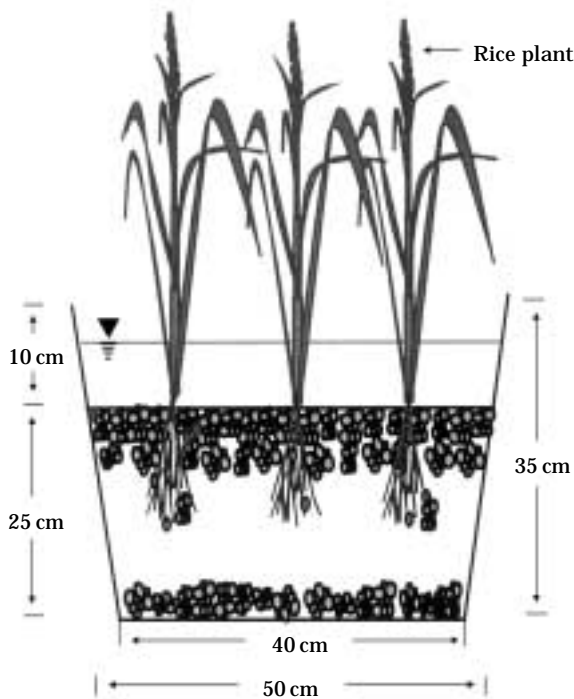


Fig. 1. Schematic and photo of experimental pot.

Table 1. Characteristics of UV lamp used for experiment.

Lamp/MAG	Watts (W)	UV output (watts)	Lamp arc length (mm)	Intensity ($\mu\text{W cm}^{-2}$)	Exposure time (sec)	Dose ($\text{mW} \cdot \text{sec cm}^{-2}$)
G10T5L/Lighttch	17	5.7	357	895.3	6.8	6.0
TUV36WT5/Philips	40	15	842	999.8	16.0	16.0

재료 및 방법

1. 실험 시설

1) 실험 포트

본 연구에 이용된 흡수성 biofilter는 경기도 양평군 소재 연립주택 16가구의 생활하수를 처리하기 위하여 정화조를 거친 오수를 간헐분사방식으로 충전된 흡수성 여재에 분사하여 자연적으로 생기는 생물막에 의해 산화·분해하는 방식의 처리시설로, 처리용량은 약 $8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이었다. 흡수성 biofilter는 슬러지 발생이 적어서 유지관리가 용이하고, BOD의 처리효율이 높은 소규모 오수처리 시설이다 (Yoon *et al.*, 2001).

흡수성 biofilter 유출수를 활용하기 위하여 그 옆에 벼재배 실험포트를 Fig. 1과 같이 총 12개 설치하였다. 작물재배 실험포트는 $40 \times 50 \times 35 \text{ cm}$ 규모로 표면적이 약

$2,000 \text{ cm}^2$ 인 합성수지용기이다. 실험포트는 논토양을 25 cm가량 채우고 상부 10 cm는 담수심을 위해 여유를 두었다. 본 실험포트는 태양에 노출되어 빛과 온도 등에 의한 영향을 줄이기 위해 부직포로 실험포트 옆면을 감쌌다.

2) UV 처리시설

UV 실험장치는 biofilter의 유출수를 유입수로 이용하였으며, 반응조는 내경이 96 mm, 길이가 860 mm이고, 반응조 내부에는 석영관 ($\phi 24.5 \times 860 \text{ mm}$)이 자외선 램프를 감싸고 있다 (Fig. 2). 반응조 내부에 있는 석영관에 파울링 (fouling)이 발생하는 것을 방지하기 위한 석영관의 자동 세척장치가 있으며, 반응조와 석영관 사이에 유체가 흐를 수 있는 간격은 약 36 mm이다. 살균에 사용된 램프의 제원은 Table 1에 요약되어 있다. 살균을 위한 자외선 조사량은 식 (1)에 의하여 구하였으며, 자외선 소독 반응조에서의 평균 강도는 PSS (point source summation)

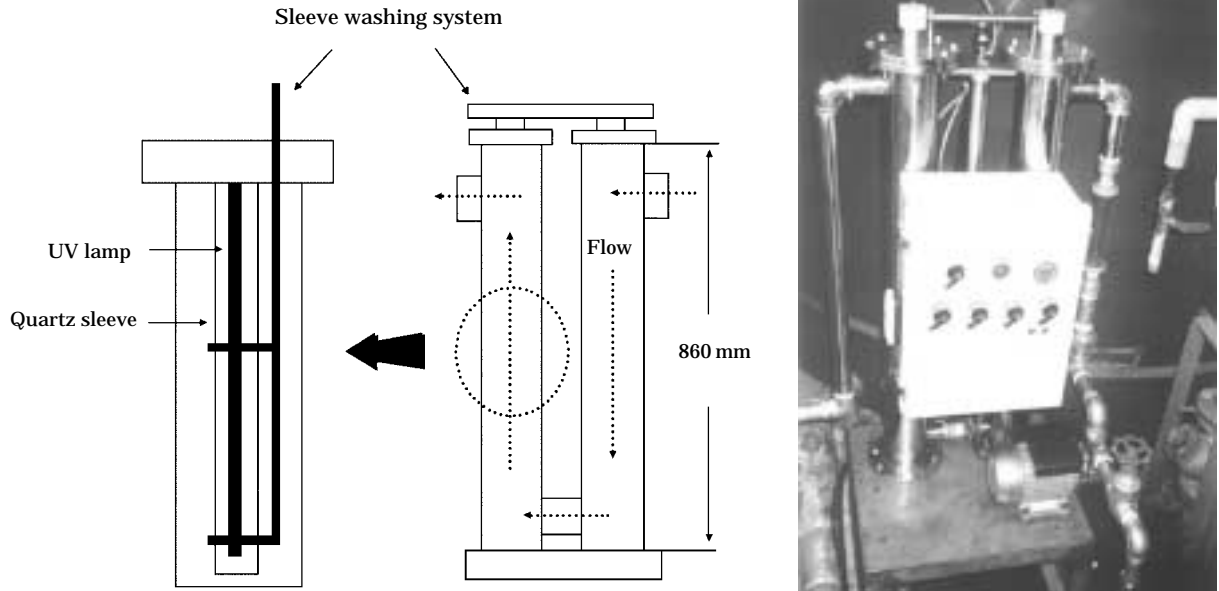


Fig. 2. Schematic and photo of experimental UV disinfection system.

method (Tchobanoglous *et al.*, 1996)를 적용하여 구하였다.

$$D = I \times t \quad (1)$$

Where : D = UV dose, $mW \cdot s \cdot cm^{-2}$
 I = Intensity, $mW \cdot cm^{-2}$
 t = Exposure time, sec

2. 실험방법

1) 벼재배 실험

하수처리수의 재이용을 위해 처리구(treatment)는 bio-filter 처리수, 자외선 조사량 $6 mW \cdot s \cdot cm^{-2}$ 와 $16 mW \cdot s \cdot cm^{-2}$ 의 소독수를 각각 관개용수로 이용하였고, 논에서의 지표미생물인 TC, FC, 그리고 *E. coli*의 밀도변화를 조사하였으며, 대조구(control)는 양평군 신애리에서 관개용수로 사용하고 있는 하천수를 사용하였다.

1회 관개시 총 5 L를 관개하여 수심을 약 3~5 cm 정도로 유지하는 관행관개 방식을 사용하였으며, 시비량은 모든 시험구에 농업과학기술원 고시 표준권장시비량을 시비하였다. 질소는 기비, 이삭비, 분얼비를 각각 50, 30, 20%의 비율로 각각 시비하였고, 인은 전량을 기비로 시비하였으며, 실험에 적용된 영농활동은 Table 2에 요약되어 있다.

5월 27일에 관개와 동시에 경운을 하였고 5월 27일에 기비, 6월 19일에 분얼비, 7월 31일에는 이삭비를 주었다.

Table 2. Agricultural activity during rice culture experiment.

Date	Activity	Remark
May 27, 2003	Plowing and basal fertilization	Nitrogen (50%), Phosphorus (100%)
May 29, 2003	Rice transplanting	10 × 10 cm, one plant/hill
June 19, 2003	Tillering fertilization	Nitrogen (30%)
July 31, 2003	Panicle fertilization	Nitrogen (20%)

기비는 경운과 동시에 질소질 비료와 인산질 비료를 동시에 주는 비료로서 벼의 생육에 기본이며, 분얼비는 벼가 성장하면서 새로운 잎이 나오는 시기에 주며, 이삭비는 벼가 열매를 맺는 시기에 주는 비료이다. 이앙은 5월 29일에 10 × 10 cm 간격으로 실험포트 당 공시품종 일품벼를 1주 1본으로 6주씩 손으로 이앙하였다. 실험은 관개 후 24시간 동안 지표미생물의 변화를 알아보기 위해 주요 시점별로 1일 3~4회 샘플링 하였고, 장기간 지표미생물 변화를 알아보기 위해서 평균 1주 간격으로 생육 기간동안(5~9월) 모니터링 하였다. 샘플링 방법은 멸균된 피펫(pipett)과 필터를 이용하여 실험포트 5군데의 지점을 선정하여, 논 토양이 교란되지 않게 하여 채취하여 실험실로 운반 후 분석하였다.

2) 수질분석 방법, 기상자료, 통계분석

수질분석항목은 분석시간이 비교적 빠르고 용수 재이

용과 관련성이 높은 미생물과 유기물, 영양물질 위주로 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였으며, 미생물 분석은 최적확수시험법 (MPN)을 사용하였는데 TC는 Lauryl triptose broth를 사용하였고, FC는 EC broth를 사용하였으며, *E. coli*는 EC-MUG broth를 사용하였는데 모두 DIFCO사의 시약을 사용하였다. 강우량과 일조시간은 양평 기상대 자료(KMA, 2003)를 이용하였다. 조도와 자외선량을 측정하였으며, 조도측정 장비는 LUX meter (LX-100, LUTRON, Taiwan), 자외선량 측정 장비는 Radiometer (VLX-3W, VILBER LOURMAT, France)를 이용하여 long wave UV (UV-A)의 범위인 365 nm (CX-365)와 short wave UV (UV-C)의 범위인 254 nm (CX-254) 프루브 (probe)를 이용하여 자외선강도 (mW cm^{-2}) 측정하였다.

실험기간 동안 수집된 자료는 통계용 전산 프로그램 (SPSS for windows, Ver. 10.0)을 이용하여 일원배치 분산분석 (one-way ANOVA)이 이루어졌다.

TC는 우리나라 하수처리장 방류수 수질기준의 항목으로 사용되고 있는 항목이며, FC는 인간이나 동물의 배설물에서 발견되며 현재 많은 국가의 수질기준으로 활용되고 있다. 대장균인 *E. coli*는 FC보다 전염병 등의 질병에 높은 상관관계를 갖고 있으며, 많은 학자들에 의해 재이용수 수질기준 항목이나 하천의 수영용수 기준등 보건·위생의 지표미생물로 강력하게 추천되고 있다 (Weiner, 2000). 본 연구에서는 하수처리수 관개 후 논에서의 지표 미생물 거동을 알아보기 위해 이상의 지표성 미생물 3가지를 중심으로 분석하였다.

본 연구에서는 실험기간 동안 관개용수의 종류와 지표 미생물 (TC, FC, *E. coli*)의 밀도변화의 관계를 평가하기 위해 유의수준 5%를 기준으로 일원배치 분산분석을 하였다.

결과 및 고찰

1. 관개용수의 수질

본 연구에 관개용수로 이용된 biofilter 유출수와 하천수 그리고 향후 농업적으로 재이용 가능성이 있는 하수종말처리장 (waste water treatment plant, WWTP)의 방류수 평균농도가 Table 3에 비교되어 있다. 관개용수로 이용된 UV 소독수에서 미생물외의 항목은 사전연구를 통해 UV 소독전의 biofilter 유출수와 유사한 수준이었기 때문에 분석하지 않았다. Biofilter 처리수와 향후 관개용수로 이용될 가능성이 있는 WWTP 유출수를 비교해 보

Table 3. Comparison of water quality of irrigation waters and used in the experiment and WWTPs (mean concentration)

Parameter	BE ^a	UV-6 ^b	UV-16 ^c	STR ^d	WWTPs ^e
TC (MPN/100 mL)	9,150	45	0.0	795	3,969
FC (MPN/100 mL)	6,500	50	0.0	587	—
<i>E. coli</i> (MPN/100 mL)	4,200	48	0.0	498	—
BOD ₅ (mg L ⁻¹)	5.9	—	—	1.8	6.33
SS (mg L ⁻¹)	3.4	—	—	0.8	5.2
Turbidity (NTU)	1.1	—	—	0.4	—
T-N (mg L ⁻¹)	38.1	—	—	5.0	15.6
T-P (mg L ⁻¹)	4.0	—	—	0.18	1.0

BE^a: biofilter effluent; UV-6^b: UV disinfected water with UV dose of 6 $\text{mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$; UV-16^c: UV disinfected water with UV dose of 16 $\text{mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$; STR^d: stream; WWTPs^e: National mean concentration of waste water treatment plants in 2003 (M.O.E., 2003).

Table 4. Recommended guidelines for water reuse in agriculture.

Parameter	WHO ^a	USEPA ^b	WWTPs ^c
Fecal coliform	10 ³ ~ 10 ⁵ /100 mL	ND ~ 200 /100 mL	3,969 TC/mL
BOD ₅ (mg L ⁻¹)	—	10 ~ 30	6.33
SS (mg L ⁻¹)	—	30	5.2
Intestinal nematodes	≤ 0.1 ~ ≤ 1/L	—	—

WHO^a: Recommended revised microbiological guidelines for treated wastewater use in agriculture (WHO, 2000).

USEPA^b: Suggested guidelines for water reuse in agriculture (USEPA, 1992).

WWTPs^c: National mean concentration of waste water treatment plants in 2003. (M.O.E., 2003).

면 biofilter 처리수가 TC의 경우 2.30배, T-N은 2.44배, 그리고 T-P는 4배 정도 높은 상태이었고, SS, BOD₅는 유사한 수질이었다. 유입수질에는 큰 차이는 없으나 biofilter 처리의 경우 정화조에서 고형물질이 침전된 후 다른 처리과정이 없이 biofilter 한가지의 처리공정만을 사용하였다. 그러나 일반 하수종말처리장에는 1차 처리, 2차 처리 뿐만 아니라 일부에서는 고도처리 및 소독처리까지 거친 후 방류하기 때문에 biofilter 처리수가 하수종말처리장 방류수보다 상대적으로 높은 농도를 나타낸 것으로 판단된다.

하천수의 수질은 하수처리장 방류수나 biofilter 유출수보다 좋은 수질을 나타내었는데, 이 연구에 사용된 하천수의 경우에는 유역상류에 위치하고 있어 오염이 적고 비교적 깨끗한 하천이었다.

Table 4에는 국제적인 농업용수 수질기준으로 이용되

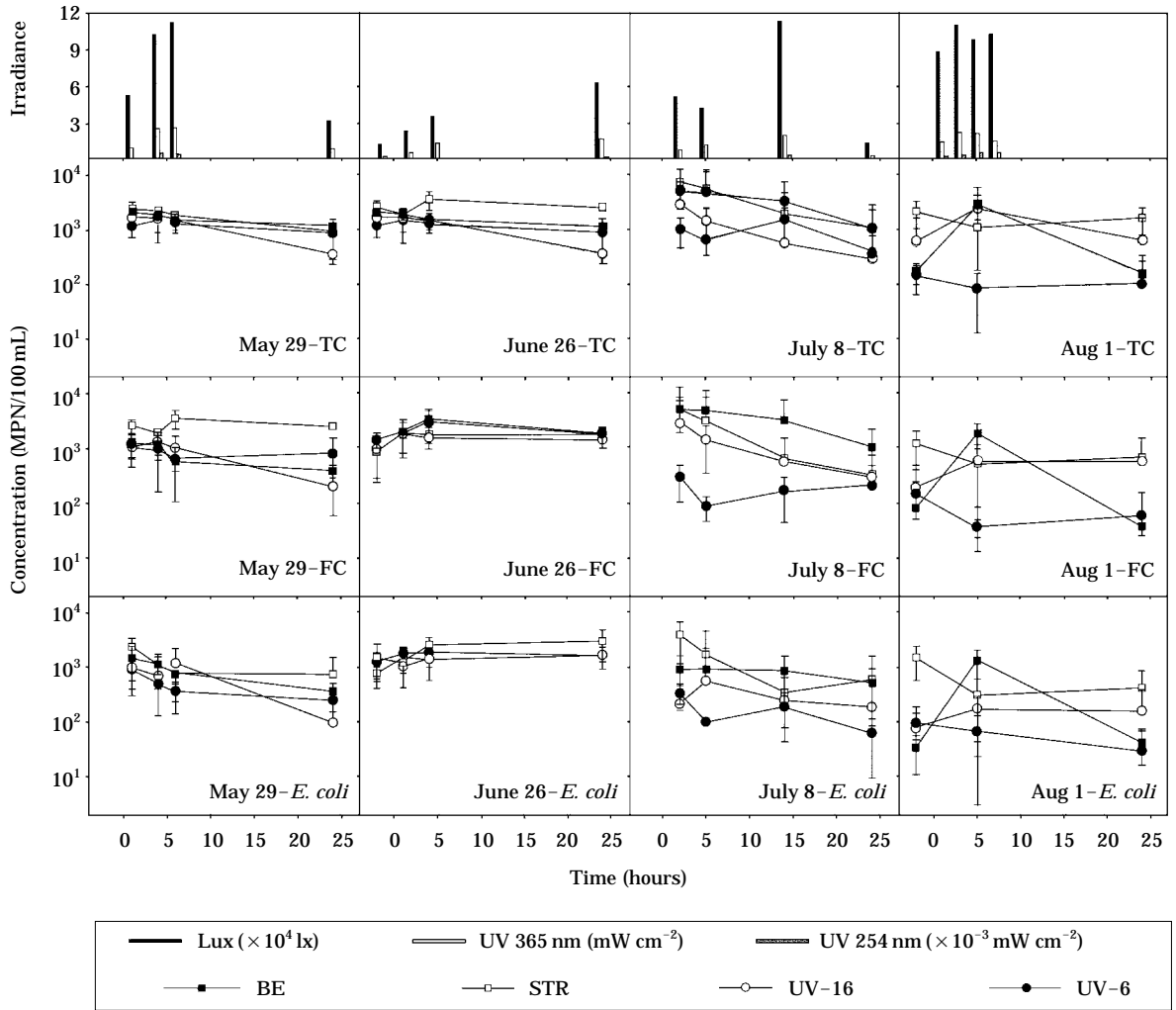


Fig. 3. Variation of indicator microorganisms concentration during first 24 hours after irrigation (Mean ± SD).

고 있는 USEPA와 WHO의 수질기준을 요약하였다. 우리나라 하수처리장 방류수의 평균 농도와 비교해 볼때, BOD와 SS 항목은 재이용수 수질기준을 충분히 만족시키지만 대장균 항목의 경우에는 보다 완화된 WHO 수질기준인 1,000/100 mL보다 높은 약 4,000개/mL 수준으로써 추가적인 처리가 요구된다.

2. 관개 후 24시간 밀도변화

본 실험에서는 biofilter effluent (BE), stream (STR), UV disinfection dose of 6 mW · s cm⁻² (UV-6), UV disinfection dose of 6 mW · s cm⁻² (UV-16), 그리고 STR의 관개수를 이용하여 각각 3반복의 실험포트에 관개한 후 24 시간동안 지표미생물의 밀도변화를 월별로 조사하였다 (Fig. 3).

5월과 6월의 경우 관개 후 24시간 동안의 평균밀도가 10²~10⁴의 범위를 유지하였으며, 시간이 경과하면서도 지표미생물의 밀도는 대체적으로 유사한 지표미생물 밀도를 유지하였다. 또한, 관개용수의 큰 차이에도 불구하고 24시간동안 급격한 밀도변화는 나타나지 않았다. 이유는 모든 실험포트에서 이양 전 biofilter의 유출수를 이용하여 경운하였기 때문에 초기에 높은 지표미생물, 유기·영양물질 농도를 유지하였으며, 기비와 분얼비가 미생물에 충분한 영양물질을 공급하여 관개용수의 밀도차이에도 불구하고 일정범위의 밀도를 나타낸 것으로 판단된다. 일반적으로, 지표성 미생물의 밀도는 저질에서 밀도가 수체의 밀도보다 월등히 높고, 특히 저질 상층부 5 mm에 높게 형성되며, 강우에 의해 상층부의 지표미생물이 즉각적으로 수체의 밀도에 반영될 정도로 민감한 상

태를 유지하고 있기 때문에, 관개시 저질 교란으로 수체의 밀도에 반영되어 유입수 밀도 차이에도 불구하고 유사한 밀도를 유지하였을 것으로 판단된다(Thomann and Mueller, 1987). 또한, 벼 식재 직후인 5월과 6월은 실험포트가 벼의 성장으로 논의 기능을 갖추기 시작하는 단계로서 완전한 벼생육 생태계가 갖춰지지 않았기 때문에, 벼에 의한 영향이 제한적이었을 것으로 판단된다.

7월과 8월의 경우에는 5월과 6월과 비교하면 24시간 동안에 밀도변화가 상대적으로 컸으며, 실험포트별 밀도 차이가 크고 관개용수의 밀도차이에 의한 영향도 관찰되었다. 같은 종류의 처리구에서도 나타나는 큰 밀도차이는 실험포트마다 형성된 생태적 특성 등 복합적인 영향인 것으로 판단된다. Thurston *et al.* (2001)에 의하면 지표성 미생물의 제거는 태양광에 의한 소독 이외에 네마토데스(nematodes)와 프로토조아(protozoa) 같은 천적에게 잡아먹히거나 살균바이러스(bacteriophage), 독소(microbial toxins), 온도, 식물, 그리고 흡착(adsorption)과 같은 생태계의 작용에 의해서도 제거된다고 보고하였다. Yoon^a *et al.* (2003)에 의하면 petri-dish를 이용한 실험에서 biofilter 유출수와 UV 소독수가 태양에 노출될 경우 몇 시간내에 지표미생물의 밀도가 감소하여 24시간이 지난 후의 밀도가 2.0 MPN/100 mL 이하로 거의 검출되지 않을 정도로 낮아졌다. 지표미생물은 근자외선 또는 violet-blue spectral range에 노출되었을 때 자외선에 의한 손상을 회복시키기 때문에 광회복(photoreactivation) 기능이 나타난다. Yoon^b *et al.* (2003)에 의하면 UV-16과 UV-6을 이용하여 실험실에서의 광회복 실험결과 UV-6에서는 5% 정도의 광회복이 나타나나 UV-16에서는 광회복을 거의 일으키지 않는다고 보고하였다. 본 연구에서 UV소독 후 관개한 처리구에서 일부 발생한 지표미생물 밀도증가는 광회복에 의한 밀도증가 보다는, 논 생태계 내에 높은 지표미생물 밀도에 의한 영향일 것으로 추정된다.

Table 5는 실제로 논농사가 이루어지는 양평군의 하천수관개 논과 여주군의 지하수관개논의 지표미생물 밀도를 나타내고 있다.

양평군의 하천수를 관개한 논은의 경우는 실험포트와 인접한 논으로 실험포트와 동일한 하천수를 관개용수로 사용하며, 여주군의 지하수관개 지역에서 논의 지표미생물 밀도이다. 지표미생물의 밀도는 TC의 경우가 FC, *E. coli*의 밀도보다 월등히 높은 수준이었으며 시기별로 밀도의 차이는 있으나 TC, FC, 그리고 *E. coli*의 평균밀도가 약 4,000, 400, 300 MPN/100 mL 수준을 나타내는 것으로 나타났다. 일반적인 논에서의 밀도와 본 연구의 실험포트에

Table 5. Concentrations of indicator microorganisms in actual paddy field.

Date	Location ^a	TC (MPN/ 100 mL)	FC (MPN/ 100 mL)	<i>E. coli</i> (MPN/ 100 mL)
May 29, 2003	YP	800 21,000	300 500	130 280
	YJ	900	280	350
July 30, 2003	YJ	900	20	2
Aug. 04, 2003	YP	1,600 2,100	300 250	600 350
	YJ	5,000	1,700	900
Average		4,050 ± 7,373	431 ± 298	326 ± 556

^a : YP=Concentrations sampled in the paddy field at Yang-Pyeong (stream irrigation). YJ = Concentrations sampled in the paddy field at Yeo-Joo (underground water irrigation).

서의 밀도를 비교하면, TC의 경우는 유사한 수준이었으나, FC와 *E. coli*의 경우는 실험포트의 밀도가 더 높은 수준이었다. 실험포트는 초기 경우시 biofilter 유출수를 이용하여서 높은 지표미생물, 유기물질, 영양물질을 유지하고 있었기 때문에, 하천관개의 경우에도 높은 수준의 FC, *E. coli* 밀도를 나타낸 것으로 판단된다. 일반적으로 강우 초기에 유출이 일어나 높은 밀도의 오염물질들을 이동시키기 때문에 많은 양의 지표미생물이 논으로 유입되어 밀도가 높아질 수 있고, 지속적인 강우로 인해 직접유입이나 낮은 밀도로 유입되면 희석되어 밀도가 낮아질 것으로 판단된다. 양평과 여주논의 경우에도 지표미생물의 밀도는 측정시기별로 많은 차이를 보이는데, 이는 강우량에 의한 희석과 비점오염원의 유입 때문인 것으로 생각된다.

3. 영농기간동안 지표미생물 밀도변화

논에서 지표미생물의 지속적인 밀도변화에 대해 알아보기 위하여 5월 31일부터 9월 18일까지 약 70일 동안 지표미생물의 밀도를 강우량과 함께 조사하였다(Fig. 4).

각 처리구별 지표미생물의 밀도를 살펴보면 하천수 관개인 STR과 BE의 처리구에서 UV-6과 UV-16의 처리구보다 상대적으로 높은 평균밀도를 나타내었으며, 영농기간동안 이러한 상태를 지속적으로 유지하였다. 하수처리수보다 지표미생물의 밀도가 낮은 하천수와 UV처리수를 관개용수로 사용하여도 하수처리수만으로 초기에 관개하여 이양준비하고 벼재배를 시작하면 나중에 그 영향이 영농기간 동안 지속된 것으로 나타났다. 그러나 하수처리수를 UV소독한 후 관개하면 벼재배 논에서의 밀도

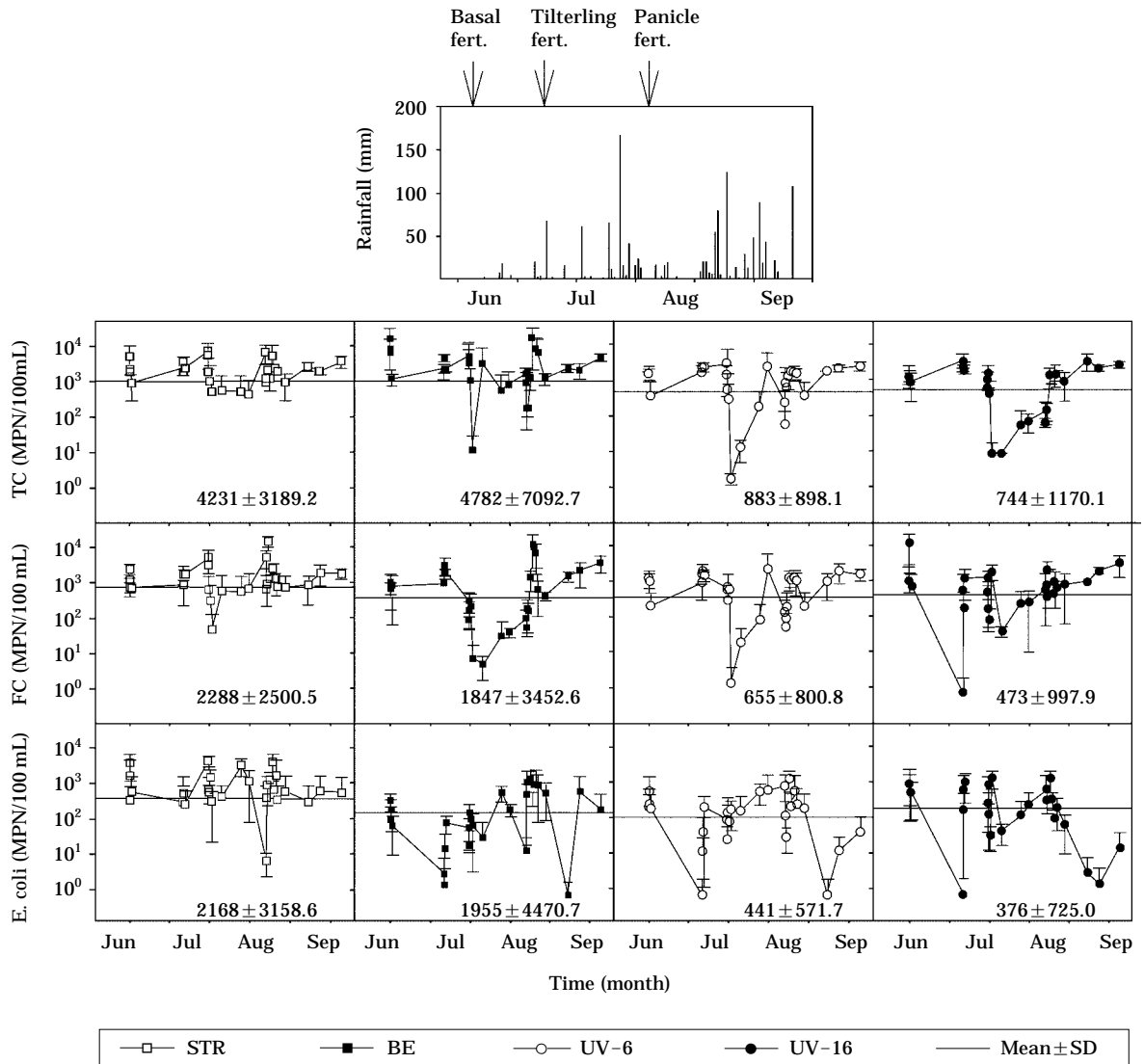


Fig. 4. Variation of microorganism concentrations during rice growing period.

수준 (Table 5)으로 낮은 미생물 밀도를 유지할 수 있기 때문에 보건·위생적인 위험을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 각 처리구 별로 일정시기에 낮은 미생물 밀도를 나타내는데 이유는 강우에 의한 희석효과가 큰 영향을 미친 것이라 판단된다. 2003년은 1971~2000년의 30년 평균 강우량과 비교하면 7월은 유사한 수준이었으나, 8월과 9월에 각각 100 mm 정도 많은 450, 400 mm의 강우량을 나타내었다 (KMA, 2003). Fig. 4에서 보는 평균과 표준편차의 경우를 살펴보면 같은 실험조건에서 같은 관개를 한 처리구의 표준편차가 상당히 큰 것으로 나타났는데, 이는 관개용수의 지표미생물 밀도가 유사해도 는 생태계의 조건에 따라 영농기간 동안 지표미생물의 밀도

변화 폭이 클 수 있음을 의미한다. 관개 후 저질이 교란되거나, 강우에 의한 희석효과, 그리고 장기간 태양에 의한 소독, 실험포트의 생태 등 여러 조건에 따라 큰 밀도 변화가 나타난 것으로 판단된다.

태양에 의한 소독은 이미 오래전부터 많은 연구자들에 의해 복되었는데, Ronan *et al.* (1996)과 Peter *et al.* (2003)은 태양광으로 소독한 물을 음용수로 사용하게 하였다. 태양광에 의한 소독은 자외선 파장대인 200~400 nm에서 이루어지며 UV-B (290~320 nm)가 미생물의 소독에 직접적인 영향을 미친다고 하였다 (Mayo, 1989).

관개용수에 따라 지표미생물의 밀도차이가 있는지를 알아보기 위해서 TC, FC, 그리고 *E. coli*에 대해 각각 일

원배치 분산분석 하였다. 일원배치 분산분석은 결과값에 영향을 미치는 인자가 하나일 경우 사용하는 분석으로 귀무가설은 유의확률이 5% 이하에 있을 경우 기각되어 평균이 같지 않다는 결론을 내리게 된다. 관개용수에 대한 TC, FC, 그리고 *E. coli*의 밀도차이는 유의확률이 5% 이하로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이는 관개용수의 종류에 따라 지표미생물의 밀도차이가 존재함을 의미한다.

일반적으로 관개용수로 사용되고 있는 하천수와 하수처리수인 biofilter 유출수를 관개한 경우에 유사한 지표미생물 밀도를 나타내었으며, 국제적 농업적 재이용수 수질기준이 보다 높은 수준이었다. UV소독수를 관개할 경우 평균 미생물 밀도는 Table 4의 WHO (2000)의 기준인 10^3 FC/100 mL보다 낮게 유지되었기 때문에, WHO의 수준으로 우리나라 재이용 수질 기준이 정해질 경우에는 UV소독을 이용할 경우 목표 수준의 처리뿐만 아니라 영농기간 동안 수질기준을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. UV소독은 지속적인 기술기발과 대량생산으로 다른 소독공정에 비해 설치비 및 유지비가 적으며, 처리 공정이 간단하여 적용성과 유지관리가 쉽고 소독부산물을 형성하지 않는 장점이 있기 때문에, 소독수 안정성이 확보된다면 하수처리수의 농업용 재이용에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

이 연구에서는 하수처리수를 농업용수로써 재이용시 발생할 수 있는 위생문제를 검토하기 위해 하천수, biofilter 유출수, 그리고 UV소독수를 관개한 벼재배 실험포트에서 지표미생물의 밀도변화를 조사하였다.

우리나라 하수처리장 유출수 수질기준을 살펴보면, US EPA에서 정하고 있는 농업용수 재이용 수질기준 항목인 BOD₅와 SS의 수질기준은 만족시키지만, 대장균의 경우 추가적인 처리가 필요한 것으로 나타났다.

벼 식재 직후인 5월과 6월의 경우 관개 후 24시간 동안의 평균밀도가 $10^2 \sim 10^4$ 의 범위에서 관개용수의 밀도와 상관없이 지표미생물의 밀도변화는 크게 나타나지 않았다. 이 시기에는 기비와 추비로 인해 미생물의 성장에 필요한 영양물질, 교란된 저질의 높은 미생물 밀도 등에 영향을 받고 논의 벼 생육생태가 덜 성숙되었기 때문으로 판단된다. 그러나 7월과 8월은 처리구별로 밀도차이가 컸고 24시간 동안 변화폭도 컸으며, 관개용수 미생물 밀도에 영향도 일부 나타났다. 실험기간동안 지표미생물

의 밀도를 관개용수별로 분산분석한 결과, UV소독 후 관개한 경우가 하천수와 biofilter 유출수를 사용한 경우보다 낮은 밀도를 나타내었다. 실제 논농사가 이루어지고 있던 양평군의 하천관개 논과 여주군의 지하수관개 논의 시료분석에서 지표미생물 밀도는 FC, *E. coli* 밀도가 TC 밀도보다 크게 낮았으며, 시기별로 밀도의 차이가 있으나, TC, FC, 그리고 *E. coli*의 평균밀도가 약 4,000, 400, 300 MPN/100 mL 범위를 나타내었다. TC의 밀도는 본 실험포트 실험과 유사한 범위이었으며, FC와 *E. coli*는 실험포트에서 초기 경운시 사용된 biofilter 유출수의 영향으로 실제 논보다 높은 값이었다. 이앙기 때에는 특별히 논 표면수와 신체접촉이 많은 점을 고려할 때 하수처리수만을 관개하여 이앙준비를 하는 것보다 하수처리수를 보조관개용수로 사용하는 것이 보다 안전할 것으로 판단된다.

하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 하수처리수를 관개용수로 직접 이용하기보다는 UV소독으로 보건·위생학적으로 높은 안정성을 확보할 수 있으며, 하수처리수 재이용 수질기준에도 적합할 수 있을 것이다. 그러나 벼의 생육에 영향을 줄 수 있는 영양물질과다로 인한 도복문제, 하수처리수에 존재할 수 있는 독성물질에 의한 영향 등 하수처리수를 관개용수로 이용하는 때에는 종합적이고 과학적인 고찰이 필요하며, 본연구의 결과는 하수처리수를 농업적으로 이용할 경우 공공의 보건·위생적인 안전을 확보하기 위한 기초연구로서의 성격을 갖는다고 할 수 있다.

사 사

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

인 용 문 헌

- Anderson, J., A. Adin, J. Crook, C. Davis, R. Hultquist, B. Jimenez-Cisneros, W. Kennedy, B. Sheikh and B. van de Merwe. 2001. Climbing the ladder: a step by step approach to international guidelines for water recycling. *Water Science and Technology* 43(1): 1-8.
- APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Ed, APHA, Washington, DC.

- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill.
- Dancan, M. and C. Sandy. 1989. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. WHO. p. 78-82.
- Jung, C.Y. and L.G. Choi. 1998. Using SPSSWIN Statistics Analysis, p. 198-210.
- KMA. Climate data. <http://www.kma.go.kr>. Accessed 16 Dec. 2003.
- Lee, N.Y. and W.I. Kim. 2001. Water reuse using wastewater treatment plant effluent. *Journal of Environmental Hi-Technology* p. 100-109.
- Mayo, A.W. 1989. Effects of pond depth on bacterial kinetics in stabilization ponds. *Journal of Environmental Engineering* **121**: 964-977.
- Ministry of construction and transportation (M.O.C.T.). 1992. A standard equipment and guidelines for reclaimed water.
- Ministry of Environment (M.O.E.). 2003. The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant.
- 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.
- 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.
- Tchobanoglous, G., F. Loge, J. Darby and M. Devries. 1996. UV design : Comparison of probabilistic and deterministic design approaches. *Water Science and Technology*.
- Thomann, R.V. and J.A. Muller. 1987. Principles of Surface water quality modeling and control. Harper & Row, New York.
- Thurstun, J.A., C.P. Gerba. K.E. Forster and M.M. Karpisak. 2001. Fate of indicator microorganism, *Giardia* and *Cryptosporidium* in subsurface flow constructed wetlands. *Water Research* **35**(6): 1547-1551
- US. EPA. 1992. Manual-Guidelines for water reuse. US EPA/625/R-921004. US Agency international development. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2002.
- WHO. 1973. Water quality criteria. Ecological research series. US EPA R-3-73-033. US Environmental Protection agency, Washington, DC.
- WHO. 1989. Health Guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Report of a WHO Scientific Group. *Technical Report Series*. 778. WHO. Geneva.
- WHO. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme-Environment and Health.
- Weiner, R.W. 2000. Applications of Environmental chemistry. Lewis Publishers. Washington, D.C.
- Yoon^a, C.G., K.W. Jung, J.H. Ham and J.H. Jeon. 2003. Photoreactivation study of wastewater treatment effluent disinfection by UV-disinfection for water reuse. *Journal of the Korean Society of agricultural engineers* **45**(3): 84-93.
- Yoon^b, C.G., H.S. Hwang, K.W. Jung and J.H. Ham. 2003. Investigation on the repair of indicator microorganisms after UV irradiation for agricultural reuse of secondary effluent. *Journal of Korean Society on Water Quality* **19**(5): 533-542.
- Yoon, C.G., S.K. Kwun and J.H. Ham. 2001. Effects of treated sewage irrigation on paddy rice culture and its soil. *Irrigation and Drainage* **50**(3): 227-236.

(Manuscript received 28 January 2004,
Revision accepted 28 February 2004)