

재처리수 관개후 지표미생물의 농도변화 조사

Investigation of Indicator Microorganism Concentrations after Reclaimed Water Irrigation in Paddy Rice Pots

정 광 욱* · 윤 춘 경** · 장 재 호* · 김 형 철* · 전 지 홍***

Jung, Kwang-Wook · Yoon, Chun-Gyeong · Jang, Jae-Ho · Kim, Hyung-Chul · Jeon, Ji-Hong

Abstract

A study was performed to examine the effects of reclaimed-water irrigation on microorganism concentration in ponded-water of paddy rice plots. Several treatments were used and each one was triplicated to evaluate the change of indicator microorganisms (total coliforms (TC), fecal coliforms FC), and *E. coli* concentrations in 2003 and 2004 growing seasons. Their concentrations increased significantly right after irrigation, but decreased about 45% in 24 hours. It implies that agricultural activities such as plowing and fertilizing should be practiced one or two days after irrigation considering health-risks. Treatments with UV-disinfected water irrigation demonstrated significantly lower concentrations than others including control plots where natural surface water was irrigated. The monitoring results from actual paddy rice fields and experimental paddy plots showed that concentrations of indicator microorganisms ranged from 10^2 to 10^5 MPN/100mL. A comprehensive assessment of existing agricultural practices and a thorough monitoring in the field as well as treatment-plots are recommended to make more realistic national guidelines more applicable. UV-disinfected water irrigation reduced microorganism concentrations in paddy fields down to below the concentration of conventional paddy rice culture, and is thought to be an effective and feasible measure for agricultural reuse of secondary effluent.

Keywords : Indicator microorganisms, Reclaimed-water irrigation, Paddy rice culture, Water quality guidelines.

I. 서 론

하수처리수는 유용한 자원이며, 역학조사와 미생물학적인 연구를 근거로 적절한 처리방법을 선택하여 재이용하는 것이 바람직하다 (Peasey et al, 2000). 세계적으로 생활하수의 재이용은 부족한 용수의 대체수자원이며 용수이용효율 증대라는 부가적인 효과를 얻을 수 있다. 하수처리수의 이용이

* 건국대학교 대학원

** 건국대학교 환경과학과

*** 한국환경정책·평가연구원 정책연구부

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

Fax: +82-446-2543

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

활성화되기 위해서는 처리기술적인 문제 외에도 비용문제, 위생상의 위험, 주민들의 정서적 저항과 반대 등 경제, 사회, 문화적 측면도 고려되어야 할 것이다.

위생학적인 안정성을 평가하기 위해 이용되고 있는 지표성 미생물에는 대장균군 (total coliform, TC), 분원성 대장균군 (fecal coliform, FC) 그리고, 대장균 (*E. coli*) 등이 세계적으로 널리 이용되고 있다 (USEPA, 1992). 국제적 농업용수 수질 기준으로는 USEPA와 WHO의 수질기준이 사용되고 있는데, USEPA의 수질기준은 실제적으로 음용수 수준의 위생학적으로 절대적 안전수준의 처리를 요구하고 있으며, 1920년대부터 세계 각국의 수질 기준제정에 영향을 주고 있다.

WHO는 캘리포니아 수질기준이 역학조사 (epidemiological basis) 없이 만들어진 지나치게 엄격하고 비합리한 수질기준이라 판단하고, 보다 현실적인 기준을 설정하기 위해 노력하였다. 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. USEPA와 WHO의 수질기준 모두 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 기준으로서, 경제, 사회, 환경, 그리고 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.

많은 나라에서 역학조사를 통해 하수처리수 관개시 발생할 수 있는 기생충 문제 (*ascaris infec-*

tion), 설사 (diarrhoeal disease) 등에 대해 조사하였으며, 이 결과들은 관개수의 처리수준설정 과정에 많은 영향을 주었다. Cifuentes (1998)에 의하면 하수처리수를 두개의 treatment pond에 일정기간 저류하여 처리한 후 (평균 4×10^3 FC/100mL, 최대 10^5 FC/100mL) 관개하였을 경우, 직접적인 접촉 후에도 작업자나 어린이를 제외한 주변주민의 위생문제에 큰 영향을 주지 않았으나, 5~14세의 어린이들에게는 놀이 등을 통한 접촉으로도 설사증상을 보였다고 보고하고 있으며, 하수처리수를 관개한 채소를 날로 먹었을 경우에 설사와 같은 장내 문제가 증가하였다고 보고하였다 (Blumenthal et al., 1996). 이와 같이 하수처리수를 관개용수로 사용하고 있는 국가의 연구 자료를 바탕으로 하수처리수가 우리나라 농업용수로 재이용되었을 경우 지표미생물의 농도를 이용하여 간접적으로 위험을 평가하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 하수처리수가 재이용수로 이용될 경우 작업자와 주변 주민에게 발생할 수 있는 위생적인 측면에 초점을 맞추고 2년간 (2003~2004년) 수행되었다. 논에 관개용수로 이용되고 있는 하천수와 호소수, biofilter 유출수, pond 처리수 그리고 UV소독수를 관개용수로 사용한 후 실험구내에서 지표미생물의 농도 변화를 분석하였고 앞으로 하수처리수가 농업용수로 재이용 될 경우 발생 가능한 위생문제에 대하여 연구하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 시설

가. 실험 포트

2003년도 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 처리

시설로, 처리용량은 약 $8 \text{ m}^3/\text{day}$ 이었다. 흡수성 biofilter는 슬러지 발생이 적어서 유지관리가 용이하고, BOD의 처리효율이 높은 소규모 오수처리시설이다 (Yoon et al., 2001). 작물재배 실험포트는 $40 \times 50 \times 35 \text{ cm}$ 규모로 표면적이 약 $2,000 \text{ cm}^2$ 인 합성수지용기이다. 실험포트는 논토양을 25 cm 가량 채우고 상부 10 cm는 담수심을 위해 여유를 두었다. 본 실험포트는 태양광선과 온도 등에 의한 영향을 줄이기 위해 부직포로 실험포트 옆면을 감쌌다 (Fig. 1).

나. UV 처리시설

UV 실험장치는 2003년과 2004년 실험 모두 같은 실험장치를 이용하여 실험하였으며, biofilter의 유출수를 유입수로 이용하였다. 반응조는 내경이 96 mm, 길이가 860 mm이고, 반응조 내부에는 석영관 ($\phi 24.5 \text{ mm} \times 860 \text{ mm}$)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 램프

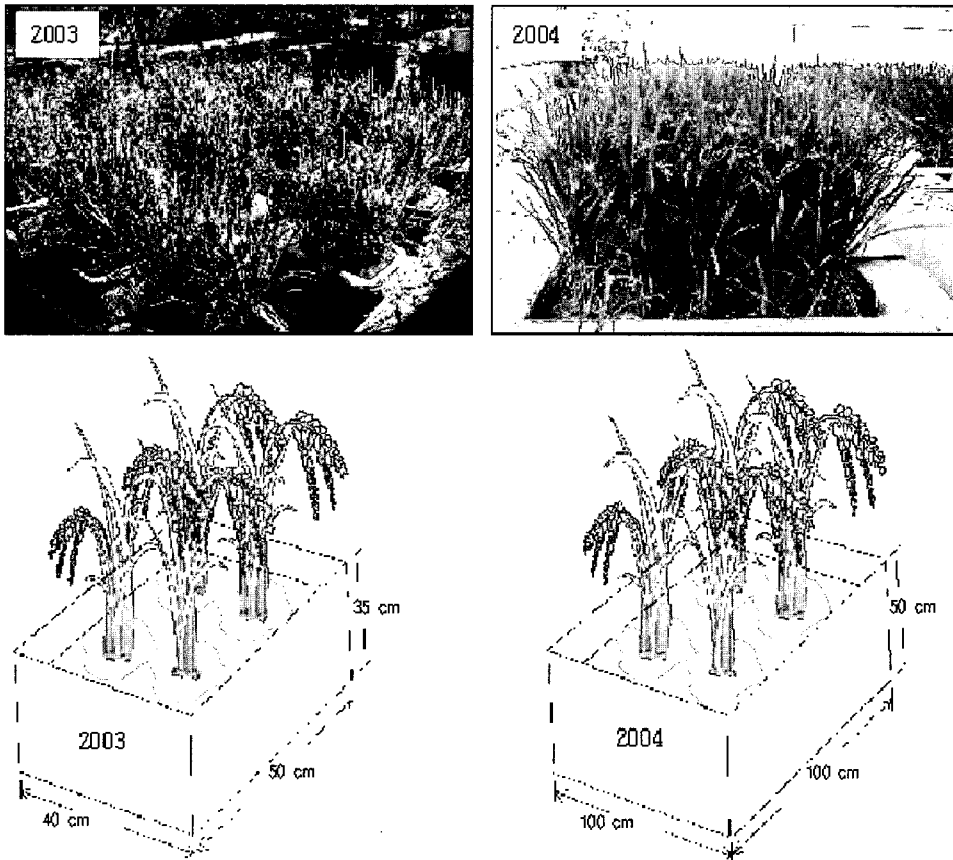


Fig. 1 Experimental pot during 2003~2004 (not to scale)

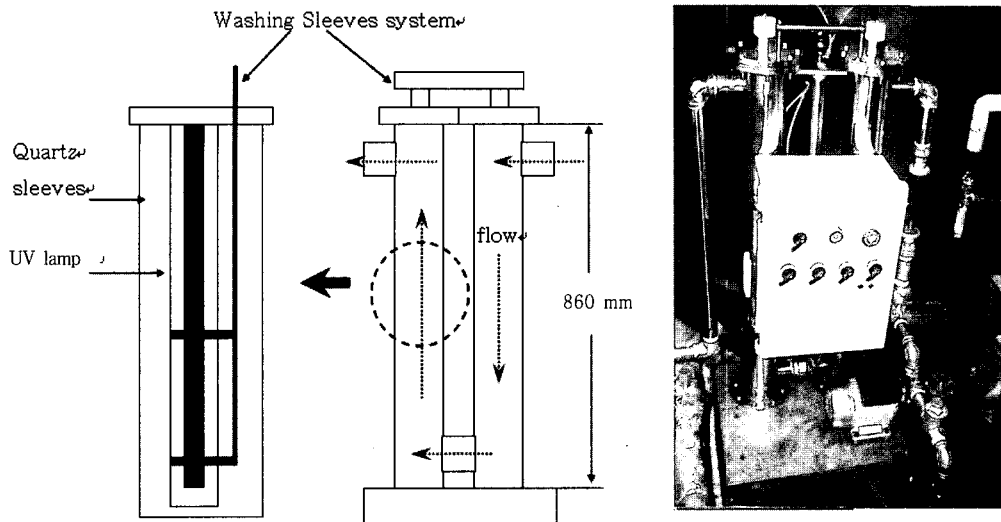


Fig. 2 Schematic and photo of experimental UV disinfection system

Table 1 Characteristics of UV lamp used for experiment

Lamp	Watts (W)	UV output (Watts)	Lamp arc length (mm)	Intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Manufacture
G10T5L	17	5.7	357	895.3	Lighttch (Hungary)
TUV36WT5	40	15	842	999.8	Philips (Hollands)

에서 발산하는 자외선 강도에 접촉시간을 곱하여 구한다. 자외선 소독 반응조에서의 평균 강도는 PSS (point source summation) method (Tcho-banoglous *et al*, 1996)를 적용하여 구하였다.

2. 실험방법

가. 벼재배 실험

2003년 실험은 하수처리수의 관개용수 재이용을 위해 처리구 (treatment)는 biofilter 처리수, 자외선 조사량 $6 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 와 $16 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 로 biofilter 유출수를 UV소독한 물을 각각 관개용수로 이용하였으며, 대조구 (control)는 양평군 신에서 관개용수로 사용하고 있는 하천수를 사용하였으며, 1회 관개시 총 5 L를 관개하여 수심을 약

3~5 cm정도로 유지하는 관행관개 방식을 사용하였다.

2004년 실험의 처리구 (treatment)는 biofilter 처리수, biofilter 처리수를 자외선 조사량 $40 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 과 $68 \text{ mW} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 로 UV소독한 물, 연못처리수, 건국대학교 교내의 일감호 호소수를 각각 관개용수로 이용하였으며, 1회 관개시 각각 30L를 관개하여 수심을 약 3~5 cm정도로 유지하였다. 실험에 사용된 연못유출수는 건국대학교 내에 설치한 인공습지와 연못시스템을 연계하여 가동 중인 시설로서, 인공습지는 폭 2 m × 길이 9 m × 높이 1 m의 콘크리트 박스에 모래를 0.6 m를 채우고, 습지식물인 노란 꽃창포를 식재하였으며, 평생교육원에 설치된 정화조의 오수를 유입수로 사용하였다. 인공습지의 오수 유입량은 $1 \text{ m}^3/\text{day}$ 이고,

그에 따른 처리조 내 체류기간은 약 8일이었다. 습지에서 처리된 하수처리수를 저류탱크로 보낸 후 자연유하방식으로 연못시스템에 0.1 m³/day씩 유입하도록 하였으며, 4개의 연못을 연속적으로 배치하여 한 개의 연못에서 혼합된 후 다음 연못으로 이동하게 설계하였으며 총 체류기간은 약 20일이었다.

2003년 실험보다 높은 자외선 조사량으로 소독한 이유는 2004년 biofilter 유출수의 수질 중 UV 소독에 큰 영향을 미치는 SS가 높아 2003년 실험의 자외선 조사량으로는 충분한 소독효과가 나타나지 않았기 때문이다. 2003년도 실험에서는 UV16으로 BE를 소독할 경우 지표미생물이 검출되지 않았으며, UV6으로 소독한 경우에는 100 MPN/100 mL 이하의 농도를 나타내었으며, 2003년도 실험과 유사한 유출수 농도를 얻기 위해 자외선 조사량을 증가시켰다 (Jung et al., 2003).

시비량은 농업과학기술원 고시 표준 권장시비량을 시비하였다. 질소는 기비, 이삭비, 분얼비를 각각 50, 30, 20%의 비율로 각각 시비하였고, 인은 전량을 기비로 시비하였으며, 실험에 적용된 영농활동은 Table 2에 요약되어 있다. 2003년과 2004년 실험은 년도 별로 약간의 시기의 차이는 있으나 같은 영농방식을 선택하였고 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 10 × 10 cm 간격으로 실험포트 당 공시품종 일품벼

를 1주 1본으로 6주씩 손으로 이앙하였다. 실험은 관개 후 24시간 동안 지표미생물의 변화를 알아보기 위해 주요 시점별로 1일 3~4회 샘플링 하였고, 또한 장기간 지표미생물 변화를 알아보기 위해서 평균 1주 간격으로 생육기간동안 (5월~9월) 모니터링 하였다. 주요한 경작활동인 관개와 비료 살포 시점을 중점적으로 샘플링 하였다. 샘플링 방법은 멸균된 피펫 (pipett)과 필러를 이용하여 실험포트 5군데의 지점을 선정하여, 논토양이 교란되지 않게 하여 채취하여 실험실로 운반 후 분석하였다.

수질분석항목은 분석시간이 비교적 빠르고 용수 재이용과 관련성이 높은 미생물과 유기물, 영양물질 위주로 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였으며 Table 3과 같다. 미생물 분석은 최적확수시험법 (MPN)을 사용하였는데 TC (SM 9221-B) 배양에는 Lauryl triptose broth를 사용하였으며, FC(SM 9221-E)는 EC broth를 사용하였으며, E. coil(SM 9221-F)는 EC-MUG broth를 사용하였는데 모두 DIFCO사의 시약을 사용하였다. BOD5는 SM 5120-B, SS는 SM 2540-D, Turbidity는 SM 2130-B, TN은 SM 4500-B, 그리고 TP는 SM 4500-P방법으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 관개용수의 수질

각 연도별로 관개용수로 이용된 용수의 평균농도가 Table 3에 비교되어 있다.

Table 2 Agricultural activity during rice culture experiment

Date		Activity	Remark
2003	2004		
May 27	May 25	Plowing and basal fertilization	Nitrogen (50%), Phosphorus (100%)
May 29	May 29	Rice transplanting	10×10 cm, one plant/hill
June 19	June 14	Tillering fertilization	Nitrogen (30%)
July 31	July 28	Panicle fertilization	Nitrogen (20%)

Table 3 Comparison of water qualities of irrigation waters in 2003 and 2004

Parameter	2003				2004				
	BE	UV6	UV16	STR	BE	Pond	UV40	UV68	LAKE
TC (MPN/100 mL)	9,150	45	0.0	795	33,288	1,374	625	7	600
FC (MPN/100 mL)	6,500	50	0.0	587	33,288	1,334	600	4	480
<i>E. coli</i> (MPN/100 mL)	4,200	48	0.0	498	717	868	44	0	260
BOD ₅ (mg/L)	5.9	-	-	1.8	19.2	18.0	-	-	5.8
SS (mg/L)	3.4	-	-	0.8	26.1	23.4	-	-	10.5
Turbidity (NTU)	1.1	-	-	0.4	16.7	9.2	-	-	7.2
T-N (mg/L)	38.1	-	-	5.0	85.7	27.2	-	-	3.4
T-P (mg/L)	4.0	-	-	0.18	8.8	5.5	-	-	0.01

BE - biofilter effluent; UV6 - UV disinfected water with UV dose of 6 mW · s/cm²; UV16 - UV disinfected water with UV dose of 16 mW · s/cm²; UV40 - UV disinfected water with UV dose of 40 mW · s/cm²; UV68 - UV disinfected water with UV dose of 68 mW · s/cm²; STR - stream; Pond : pond effluent; LAKE - li-Gam LAKE

관개용수로 이용된 UV 소독수에서 미생물의외의 항목은 사전연구를 통해 UV 소독전의 biofilter 유출수와 유사한 수준이었기 때문에 분석하지 않았다 (Park et al., 2004). 2003년도 실험에 사용된 관개용수의 TC의 농도는 일반적인 관개용수로 이용되고 있는 하천수인 STR의 농도가 약 10³ MPN/100 mL 이하였으며, UV소독으로 처리한 관개용수인 UV6와 UV16의 농도는 각각 45와 0 MPN/100 mL 이었다. 2004년의 관개용수 TC의 농도는 LAKE가 2003년도의 STR과 유사한 수준이었으며, UV소독수는 UV40과 UV68의 농도가 각각 625 와 7 MPN/100 mL 이었다. BE의 TC농도는 2004년도의 농도가 2003년 보다 월등히 높았으며, 2004연구에 사용된 biofilter는 2003년도 실험과 다른 실험시설로서 설치 후 운영초기 단계로서 미생물이 성장을 통해 처리가 이루어지는 초기단계였기 때문에 2003년 실험보다 높은 유출수의 농도를 나타내었다.

나. 관개 후 24시간 농도변화

2003년 실험에서는 BE, STR, UV6, 그리고 UV16을 관개수를 각각 3반복의 실험포트에 관개

한 후 24시간동안 지표미생물의 농도변화를 월별로 조사하였으며 관개용수의 농도와 함께 Fig. 3에 표기하였다.

대부분의 영농활동은 관개 후 비료 살포나 제초제 살포 등이 진행됨으로 하수처리수를 관개한 후 1일 동안의 지표미생물 농도가 중요하여 그 위험정도를 예측하기 위함이다. 5월과 6월의 경우 관개 후 지표미생물의 평균농도가 10²~10⁴의 범위를 유지하였으나 24시간 후에는 관개 후 1~2시간 때의 농도보다는 낮은 상태였다. 모든 실험포트에서 이양 전 biofilter의 유출수를 이용하여 경운하였고, 토양내의 미생물 농도가 높았으며, 기비와 분얼비가 미생물에 충분한 영양물질을 공급하여 관개용수의 농도차이에도 불구하고 관개 직후 농도는 일정 범위의 농도를 나타낸 것으로 판단된다. UV 소독수의 경우 100 MPN/100 mL 이하를 관개할 경우에도 1,500~15,000 MPN/100 mL의 농도를 나타낸 것은 토양층의 미생물 농도가 높아서 혼합되었을 때 농도가 증가함을 알 수 있다. 일반적으로, 지표성 미생물의 농도는 저질의 농도가 수체의 농도보다 월등히 높고, 저질 상층부 5 mm에 높게 형성되며 (Chapra, 1997), 강우에 의해 상층부의 지

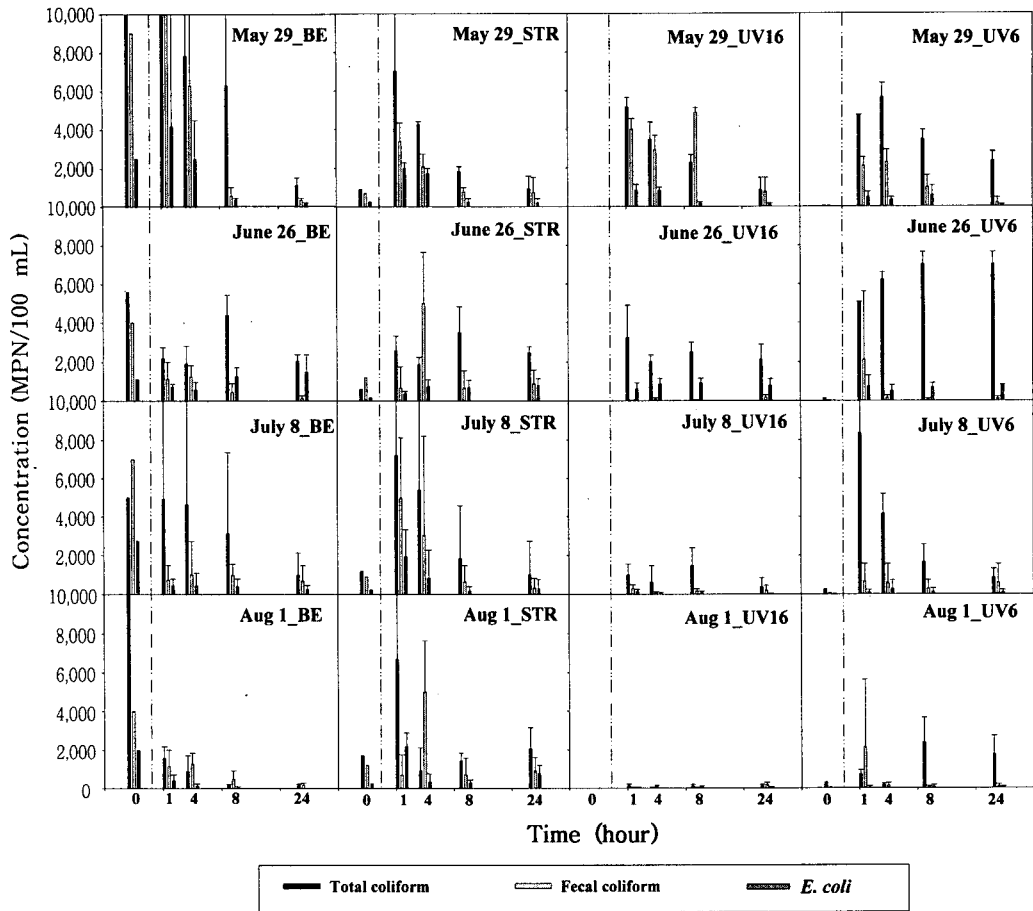


Fig. 3 Indicator microorganism concentrations of surface water sample in paddy field during first 24 hours after irrigation in 2003

표미생물이 즉각적으로 수체의 농도에 반영될 정도로 민감한 상태를 유지하고 있기 때문에, 관개시 저질 교란으로 수체의 농도에 반영되어 유입수 농도 차이에도 불구하고 유사한 농도를 유지하였을 것으로 판단된다 (Thomann and Mueller, 1987). 또한, 벼 식재 직후인 5월과 6월에는 실험포트가 벼의 성장으로 논 기능의 갖추기 시작하는 단계로서 완전한 벼생육 생태계가 갖춰지지 않았기 때문에, 논 생태계에 의한 영향이 제한적이었을 것으로 판단된다.

7월과 8월의 경우에는 5월과 6월과 비교하면 24시간 동안에 농도변화가 상대적으로 크게 나타

났고, 관개 직후의 농도와 1일이 지난후의 농도가 상대적으로 낮게 측정되었으며, 실험포트별 농도차이가 크고 관개용수의 농도차이에 의한 영향도 관찰되었다. 이유는 많은 생물상이 공존하며, 토양층이 교란된 영농초기와는 달리 토양층이 안정된 상태였고, 한 종류의 처리구에서 나타나는 큰 농도차이는 실험포트마다 형성된 생태적 특성과 토양의 지표미생물의 농도 등이 복합적인 영향인 것으로 판단된다. 실제 논 기능의 경우에는 관개시 토양교란에 의한 영향이 소규모인 본 pilot 실험보다는 적을 것으로 판단된다.

Table 4는 2003년과 2004년에 실제로 벼농사

Table 4 Concentrations of indicator microorganisms in actual paddy field

Date	Location	n	TC (MPN/100 mL)	FC (MPN/100 mL)	<i>E. coli</i> (MPN/100 mL)
May 29, 2003	YP	2	10,900±14,284	400±141	205±106
	YJ	1	900	280	350
Jul. 30, 2003	YJ	1	900	20	2
Aug. 04, 2003	YP	2	1,850±354	275±35	475±177
Sep. 01, 2003	YJ	1	5,000	1,700	900
May 25, 2004	YJ	3	2,800±265	1,633±58	633±231
May 27, 2004	YJ	3	1,633±404	900±400	180±151
May 29, 2004	YP	2	11,000±7,071	2,900±2,970	335±92
Jun. 11, 2004	YJ	3	450±350	183±126	107±168
	YJ	3	447±739	157±127	200±173
Jun. 14, 2004	YP	2	750±71	300±141	155±120
	YJ	3	687±280	357±301	177±120
Jul. 20, 2004	YJ	3	753±175	343±140	510±285
Average		29	2,549±4,685	697±993	302±256

YP=Actual paddy field at Yangpyeong (stream irrigation). YJ=Actual paddy field at Yeosu (groundwater irrigation).

가 이루어지는 양평군의 하천수 관개논과 여주군의 지하수 관개논의 지표미생물 농도를 나타내고 있다. 양평군의 하천수를 관개한 논인 경우는 실험포트와 인접한 논으로 실험포트와 동일한 하천수를 관개용수로 사용하며, 여주군의 모니터링 자료는 지하수 관개지역의 논을 대상으로 하였다. 지표미생물의 농도는 TC의 경우가 FC, *E. coli*의 농도보다 월등히 높은 수준이었으며, 시기별로 농도의 차이는 있으나 TC, FC, 그리고 *E. coli*의 평균농도가 약 2,500, 700, 300 MPN/100 mL 수준을 나타내는 것으로 나타났다. 일반적인 논에서의 농도와 본 연구의 실험포트에서의 농도를 비교하면, TC의 경우는 유사한 수준이었으나, FC와 *E. coli*의 경우는 실험포트의 농도가 더 높은 수준이었다. 일반논의 지표미생물의 농도는 5월과 6월의 지표 미생물 농도가 7월의 농도보다 높은 경향을 나타내었으며, 포트실험과 유사한 결과였다. 2003년 실험포트는 초기 경운시 biofiter 유출수를 이용하여 높은 지표

미생물, 유기물질, 영양물질을 유지하였고, 토양층의 교란되어 높아진 수체의 농도의 정도가 큰 영향을 주었기 때문에 하천관개의 경우에도 높은 수준의 FC, *E. coli* 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 일반적으로 강우 초기에 유출이 일어나 높은 농도의 오염물질들을 이동시키기 때문에 많은 양의 지표미생물이 논으로 유입되어 농도가 높아질 수 있고, 지속적인 강우로 인해 직접유입이나 유입농도가 낮을 경우 희석되어 농도가 낮아질 것으로 판단된다. 양평과 여주논의 경우에도 지표미생물의 농도는 측정시기별로 많은 차이를 보이는데, 강우량에 의한 희석과 비점오염원의 유입 때문인 것으로 생각된다.

다. 영농기간동안 지표미생물 농도변화

2003년 실험은 영농기간동안 지표미생물의 연속적인 농도변화에 대해 알아보기 위하여 5월 31일~9월 1일까지 약 90일간, 2004년 실험은 5월 27일~7월 14일까지 약 50일간 지표미생물의 농도를

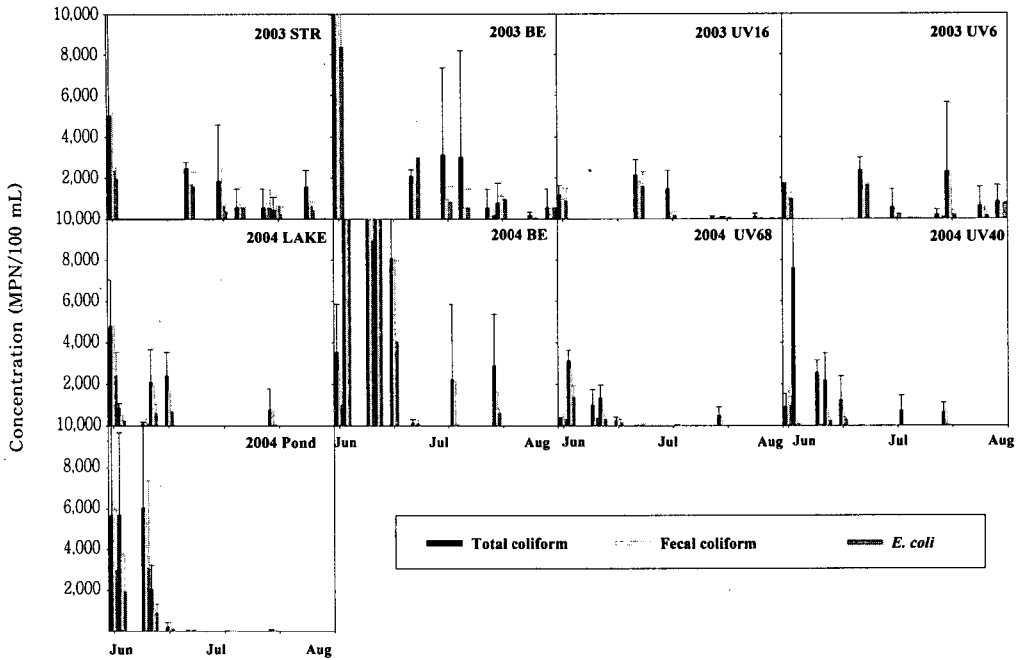


Fig. 4 Mean concentration and standard deviation during cultivation period in 2003 and 2004

조사하였으며 결과가 Fig. 4와 같다.

각 처리구별 지표미생물의 농도를 살펴보면 2003년 실험에서 하천수 관개인 STR과 BE의 처리구에서 UV6과 UV16의 처리구보다 상대적으로 높은 평균농도를 나타내었으며, 영농기간동안 이러한 상태를 지속적으로 유지하였다. 지표미생물의 농도가 낮은 하천수와 UV처리수를 관개용수로 사용하여도 하수처리수만으로 초기에 관개하여 이양 준비하고 벼재배를 시작하면 그 영향이 영농기간 동안 지속된 것으로 나타난다.

2004년 실험에서는 2003년의 하수처리수 보다 높은 농도의 미생물 농도를 보였으며, 이는 BE 유출수의 농도가 상대적으로 높은 수준이었으며, BE 유출수를 pond로 처리한 후 관개 한 경우 지표미생물의 농도를 비교적 낮게 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 자연정화 방법인 pond는 지표미생물 저감효과가 큰 것으로 알려져 있으며 잘 설계된 pond를 이용하여 하수처리에 이용하거나 기존 관개 시설인 농업용 저수지를 이용하여 관개할 경우

위생적인 위험을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다 (Yoon et al., 2003). UV소독수를 관개한 경우는 2003년과 유사한 결과를 얻었으며 UV68은 평균 1,000 MPN/100 mL의 낮은 농도였으며, 미생물의 농도가 높은 영농초기에도 낮은 농도를 나타내었다. 2년 동안의 실험결과 영농기간 동안의 농도는 하수처리수인 BE의 경우가 가장 높은 농도를 나타내었으며, 일반 관개수인 2003년의 STR은 UV소독 후 관개한 경우보다 높은 농도를 나타내었고, 2004년 LAKE의 경우 UV와 유사한 수준이었다. 또한, 평균과 표준편차를 살펴보면 같은 실험조건에서 같은 관개를 한 처리구의 표준편차가 상당히 큰 것으로 나타났는데, 이는 관개용수의 지표미생물 농도가 유사해도 는 생태계의 조건에 따라 영농기간 동안 지표미생물의 농도변화 폭이 클 수 있음을 의미한다. 또한, 완전하게 처리하여 하수처리수의 지표미생물 농도를 0 MPN/100 mL로 처리하여 관개하여도 일정수준 이상의 지표미생물 농도를 나타냄을 알 수 있다. 관개 후 저질이 교란되거

나, 강우에 의한 희석효과, 그리고 장기간 태양에 의한 소독, 실험포트의 생태변화 등 여러 조건에 따라 큰 농도변화가 나타난 것으로 판단된다.

Ⅲ. 요약 및 결론

본 연구에서는 하수처리수를 농업용수로 재이용 시 발생할 수 있는 위생문제를 검토하기 위해 2003년과 2004년에 하수처리수인 biofilter 유출수, UV소독수, pond처리수, 그리고 하천수와 호소수를 관개한 벼재배 실험포트에서 지표미생물의 농도변화를 조사하였다.

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

2. 벼 식재 직후인 5월과 6월의 경우 관개 후 24시간 동안의 지표 미생물의 평균농도가 10²~10⁵의 범위로서 관개용수의 농도와 상관없이 지표 미생물의 농도변화는 크게 나타나지 않았으나 관개 후 24시간이 지나면 약 44%의 농도 감소를 보였다. 이 시기에는 기비와 추비로 인해 미생물의 성장에 필요한 영양물질, 교란된 저질의 높은 미생물 농도 등에 영향을 받고 논외의 벼 생육생태가 덜 성숙되었기 때문으로 판단된다. 7월과 8월은 처리구 별로 농도차이가 컸고 24시간 동안 변화폭도 컸으며, 관개용수 미생물농도가 실험포트의 미생물 농도에 직접적인 영향을 주기 시작하였다. 관개직후 영농활동을 시작하는 것 보다 관개 후 1~2일이 경과한 후 영농활동에 임하는 것이 위생학적인 안전성을 높일수 있을 것으로 판단된다.

3. Biofilter 유출수의 경우 관개한 후에도 높은 지표미생물농도를 나타내었기 때문에 추가처리 후 관개가 요구되며, 일반적인 관개용수와 유사한 농도를 보인 UV처리나 pond 등 추가처리가 필요할 것으로 판단된다.

4. 실제 논농사가 이루어지고 있던 양평군의 하천관개 논과 여주군의 지하수관개 논의 시료 분석 결과에서는 FC, *E. coli*농도가 TC농도보다 크게 낮았다. 시기별로 농도의 차이가 있으나, TC, FC, 그리고 *E. coli*의 평균농도가 약 2,500, 700, 300 MPN/100 mL 범위를 나타내었다.

5. 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 하수처리수를 관개용수로 직접 이용하기보다는 UV소독으로 위생학적으로 높은 안전성을 확보할 수 있으며, 하수처리수 재이용 수질기준에도 적합할 수 있을 것으로 나타났다. 하지만, UV로 지표미생물이 측정되지 않을 정도로 소독하여 논에 관개용수로 이용하여도 배경농도의 영향으로 TC의 경우 1,000 MPN/100 mL의 농도가 유지되었다. 우리나라의 농업적 재이용수 수질기준 제정시 논외의 특성을 고려하여 적용하는 것이 필요하며 현장 규모의 실험을 통한 검증과정이 필요할 것으로 생각된다. UV소독은 지속적인 기술기발과 대량생산으로 다른 소독공정에 비해 설치비 및 유지비가 적으며, 처리 공정이 간단하여 적용성과 유지관리가 쉽고 소독부산물을 형성하지 않는 장점이 있기 때문에 하수처리수의 농업용 재이용에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

References

1. APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Ed, APHA, Washington, DC.
2. Blumenthal, U.J., Mara, D.D., Ayres, R. M., Cifuentes, E., Peasey, A., Stott, R., Lee, D. L. and Ruiz-Palacios, G. 1996. Evaluation of

- the WHO nematode egg guidelines for restricted and unrestricted irrigation. *Water Science and Technology* 33 (10-11): 277-283.
3. Chapra, S. C., 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill.
 4. Cifuentes, E., 1998. The epidemiology of enteric infections in agricultural communities exposed to wastewater irrigation: perspectives for risk control. *International Journal of Environmental Health research* 8: 203-213.
 5. Jung, K. W., C. G. Yoon, H. S. Hwang, and J. H. Ham. 2003. Disinfection and reactivation of microorganisms after UV irradiation for agricultural water reuse of biofilter effluent. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 45(7): 94-106. (in Korean).
 6. Ministry of Environment (M.O.E.). 2003. *The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant*.
 7. Peasey, A., U. Blumenthal. D. Mara. D. and G. Ruiz-Palacios, 2000. A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: a Latin American perspective, Task No: 68 Part 2: 15-18.
 8. Park, S.W., M.B. Chun, and J.R. Park. 2002. Report of application for wastewater reclamation and reuse(SWRRC) : Technologies for the wastewater reuses for agriculture 4-5-1.
 9. Tchobanoglous, G., F. Loge, J. Darby, and M. Devries. 1996. UV design: Comparison of probabilistic and deterministic design approaches. *Water Science and Technology*. 33(10-11): 251-260.
 10. Thomann, R. V. and Muller, J. A. 1987. Principles of Surface water quality modeling and control. Harper & Row, New York.
 11. USEPA. 1992. Manual - Guidelines for water reuse. US EPA / 625 / R - 921004. *US Agency international development*. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2002.
 12. WHO. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme- Environment and Health.
 13. Yoon, C. G., K. W. Jung. J. H. Ham. and J. H. Jeon. 2003. Feasibility study of natural systems for sewage treatment and agricultural reuse. *Journal of the Korean Society of agricultural engineers*. 45(6): 194-206. (in Korean).
 14. Yoon, C. G, J. H. Ham. and J. H. Jeon. 2002. Reuse of reclaimed water for irrigation on paddy rice culture and its effect. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 44(7): 12-14. (in Korean).