

## 하수처리수의 논 관개용수 재이용을 위한 미생물 위해성 평가

### Quantitative Microbial Risk Assessment of Wastewater Reuse for Irrigation in Paddy Field

윤 춘 경\* · 한 정 윤\*\* · 정 광 옥\*\* · 장 재 호\*\*

Chun-Gyeong Yoon · Jung-Yoon Han · Kwang-WookJung · Jae-Ho Jang

#### Abstract

The reuse of wastewater for agricultural irrigation may cause human health risk as a result of exposure to pathogens. This study conducted the quantitative microbial risk assessment in paddy field irrigated with treated wastewater. Six treatments were used to irrigate the paddy field from Year 2003 to Year 2005: biofilter-effluent, UV-disinfected water (6, 16, 40, 68  $\text{mW}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), pond-treated water, wetland-treated water, conventional irrigation water and tap water. Total coliforms, fecal coliforms and *E. coli* were monitored during rice growing period. Beta - Poisson model was employed to calculate the microbial risk of pathogens ingestion that may occur to farmers and neighbor children. Uncertainty of risk was estimated using Monte - Carlo simulation. In this study, the microbial risk was higher during initial cultivation (end of May~June), and it decreased with time. Biofilter effluent (secondary effluent) irrigation showed higher risk values than others ( $>10^{-4}$ ), and irrigation with UV-disinfected water has the lowest risk range ( $10^{-6}\sim 10^{-5}$ ). The risk value estimated in 2005 was lower than risk value in 2003 and 2004, it is likely due to clean tap water irrigation in initial transplanting stage. It is suggested that irrigation with UV-disinfected water and pond-treated water would reduce the microbial risk associated with wastewater irrigation in paddy field. In addition, the first irrigation water quality significantly affected the subsequent microbial risk.

*Keywords* : Quantitative microbial risk assessment, Paddy field, *E. coli*, Wastewater irrigation

#### I. 서 론

최근 물 부족 해결의 한 방안으로 제시되고 있는 하수처리수의 재이용은 전 세계적으로 많은 나라에서 이용되고 있으며, 재이용 적용성과 위해성에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 국내에서도 물 사용량 증가로 인한 물 부족이 예상되기 때문에 대체

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

수자원으로써 하수처리수의 재이용에 관한 관심이 증가하고 있으며, 정부에서는 2010년까지 하수처리장 2차 처리수를 10% 이상 재이용 하겠다는 방침을 발표하였다 (환경부, 2000). 특히 하수처리수의 농업적 재이용은 이미 전 세계 120여 개국에서 이용되어져 왔으며 (USEPA, 1992), 우리나라의 경우 수자원 총 이용량의 48%를 차지하고 있는 농업용수를 하수처리 재이용수로 대체할 경우 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다 (건설교통부, 2001).

그러나 하수처리수를 재이용하는 경우 병원성 미생물에 의한 질병이 발생할 우려가 있으므로 엄격한 수질기준을 적용하여 작업자, 소비자와 공공에 대한 보건, 위생학적 안전이 보장되어야 할 것이다. WHO (2002)와 USEPA (1992)에서는 하수 재이용을 위한 수질기준 권고안을 발표하였고, 많은 나라에서 이와 비슷한 수준의 재이용수 수질기준을 적용하여 하수재이용에 대한 보장을 추진 중에 있다. 하수처리수를 관개용수로 이용하였을 경우에 발생하는 질병 사례와 위해성 평가 결과가 보고되었다. Blumenthal et al. (1998)은  $10^3 \sim 10^4$  FC/100 mL농도의 하수처리수를 지표관개한 경우 작업자가 바이러스에 감염될 위험이 있다고 보고하였고, Peasey et al. (2000)은 처리하지 않은 하수를 관개할 경우 작업자와 아이들이 질병에 감염될 위험이 있으나, 처리된 하수로 관개할 경우에는 처리수준에 따라서 감염률이 감소한다고 보고하였다. 또한 적절하게 처리된 하수를 관개하여 재배한 당근, 상추, 오이 등의 작물을 먹은 소비자는 일반적인 사람들과 비교하였을 때 위험이 없다고 보고하였다. 하수를 농업용수로 재이용하기 위한 미생물 위해성 평가는 미국 (Asano et al., 1992; Tanaka et al., 1998; Dowd et al., 2000), 이스라엘 (Shuval et al., 1997) 그리고 호주 (Gardner et al., 1998; Petterson et al., 2001a, b; Storey and Ashbolt, 2002) 등에서 적용되고 있다. 그러나 국내의 경우 재이용수에 대한 수질기준이 아직 제정되지 않은 상태이고, 하수처리수를 관개용수로

재이용 할 경우 발생할 수 있는 질병에 대한 역학조사나 위해성 평가가 부족한 실정이다. 특히 대부분 국제적인 역학조사가 발관개 위주로 수행되었으므로 논의 많은 부분을 차지하고 있는 국내에 이를 직접 적용하기에는 한계성을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 2003년부터 2005년까지 3년 동안 벼 실험포트에서 분석한 *E. coli* 농도를 바탕으로 하수처리수를 논 관개용수로 재이용하였을 경우 발생할 수 있는 위해성을 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험시설 및 방법

2003년 벼 실험포트는 표면적이 약 2,000  $\text{cm}^2$ 로 경기도 양평군에 위치하고 있으며, 2004년과 2005년의 벼 실험포트는 표면적이 약 10,000  $\text{cm}^2$ 로 건국대학교 평생교육원에 위치하고 있다. 영농기간 동안 사용된 실험포트와 각 실험포트에 관개한 하수 처리수 및 대조구는 Fig. 1, Table 1과 같다. 실험포트의 초기 담수는 2003년과 2004년에는 각각 양평군 신애리의 생활하수와 건국대학교 일감호수물로 관개하였고, 2005년에는 수돗물로 관개하였다. 2003년 실험에서는 영농기간 동안 관개용수는 양평군 신애리의 생활하수를 각각 biofilter, UV (자외선조사량  $6 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $16 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ )로 처리하여 관개하였고, 대조구로는 양평군 신애리의 하천수를 관개하였다. 2004년에는 건국대학교 평생교육원의 생활하수를 biofilter, pond, UV (자외선조사량  $40 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $68 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ )로 처리하여 관개하였고, 대조구로는 건국대학교의 일감호수물을 사용하였다. 2005년에도 건국대학교 평생교육원 생활하수를 pond, 인공습지, UV (자외선조사량  $68 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ )로 처리하여 관개하고, 대조구로 일감호수물과 수돗물을 사용하였다. 실험에 사용된 UV처리수는 biofilter로 처리한 유출수를 유입수로 사용하여 UV소독을 하였다. 인공습지

는 오수 유입량이 1 m<sup>3</sup>/day, 체류기간은 약 8일인 지하흐름형으로, 이 인공습지를 통과하여 처리된 물이 저류탱크를 거쳐 자연유하방식으로 pond에 유입되어 처리되도록 설계되었다. Pond는 4개를 연속적으로 배치하였으며 총 체류시간은 약 20일이다.

Table 1 Description of wastewater treatment for irrigation in three years.

Year	First irrigation	Treatment	Control
2003	Wastewater	Biofilter	Stream
		UV (6.16 mW·s·cm <sup>-2</sup> )	
2004	Reservoir	Biofilter	Lake
		Pond	
		UV (40.68 mW·s·cm <sup>-2</sup> )	
2005	Tap water	Pond	Lake Tap water
		Wetland	
		UV (68 mW·s·cm <sup>-2</sup> )	

실험기간 동안 영농활동은 모두 동일한 방법으로 하였으며, 1회 관개 시 약 30L를 관개하여 수심이 5 cm 정도를 유지하도록 하였다. 실험포트는 각 처리구별 3반복을 실시하여 평균 2주일에 한번 씩 샘플링하였다. 수질분석은 Standard Method (APHA, 1998)에 의해 분석하였으며, total coliform, fecal coliform과 *E. coli*의 분석은 최적확수시험법 (MPN)을 통해 분석하였다.

2. 미생물 위해성 평가 모형 (QMRA model)

위해성 평가 (risk assessment)는 개인이나 집단이 위험에 노출되었을 경우 발생할 수 있는 영향을 추정하는 과정이다. 미생물 위해성 평가 (quantitative microbial risk assessment)는 음용수에 대한 수질기준제정에 필요한 과학적 기반 조성을 목적으로 USEPA가 주축이 되어 시작되었으며, 유해화학물질의 위해성 평가방법을 중심으로 발전되었다 (Marcler et al., 1993). 미생물 위해성 평가는 미생물관련 질병 파악 및 역학조사 등을 활용하는 위험성 확인 (hazard identification), 미생물에 대한 노출을 정량화하는 노출 평가 (exposure

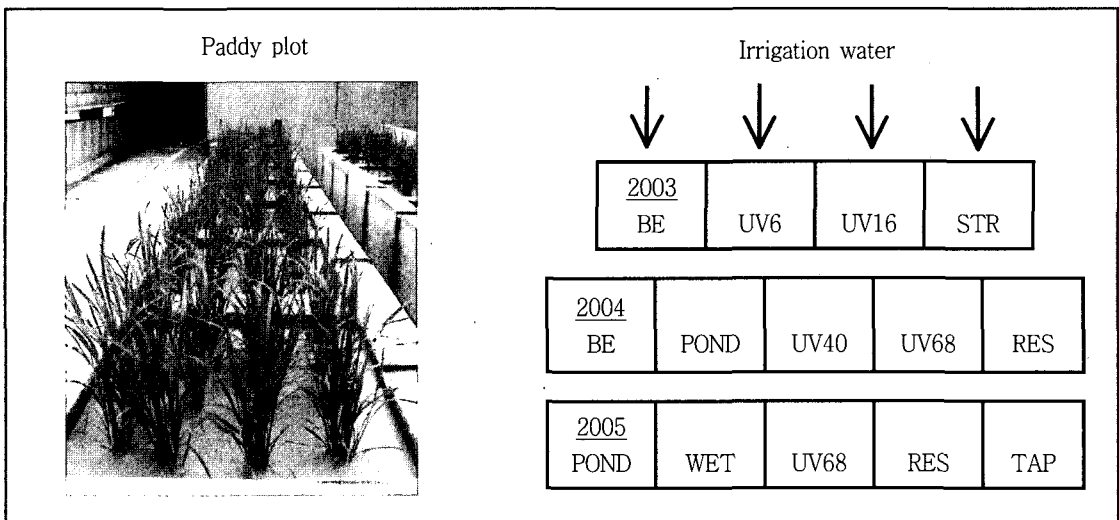


Fig. 1 Experimental paddy plot and treatment system from 2003 to 2005.

assessment), 미생물의 용량에 따른 질병발생의 관계를 규명하는 용량-반응 평가 (dose-response assessment) 및 규명된 모델을 활용한 평가결과를 통합하여 위해도 (risk)의 예측과 불확실성 분석을 수행하는 위해도 결정 (risk characterization)의 네 단계를 통해 수행 되어진다.

본 연구에서는 Beta-Poisson 모델을 활용하여 미생물 위해성 평가를 실시하였고, 식 (1)과 같다 (Haas et al., 1993).

$$P_I = 1 - [1 + N / N_{50}(2^{1/\alpha} - 1)]^{-\alpha} \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $P_I$ 는 음용수에서 병원성 미생물을 섭취하였을 경우 발생할 수 있는 위해도이고,  $N$ 은 미생물의 농도,  $N_{50}$ 는 50%가 감염 될 수 있는 농도이고,  $\alpha$  값은  $N / N_{50}$ 와  $P_I$ 의 비로서, 용량-반응 곡선의 기울기를 나타낸다. 본 연구에서는 *E. coli*에 적합한 값인  $N_{50} = 8.6 \times 10^7$ 과  $\alpha = 0.1778$ 을 사용하였다 (Haas et al., 1999).

병원성 미생물에 감염되었을 경우 모든 사람이 질병으로 발전하는 것은 아니므로, 질병이 나타날 가능성은 식 (2)와 같이 계산한다.

$$P_D = P_{D,I} \times P_I \dots \dots \dots (2)$$

$P_D$ 는 감염된 사람이 질병으로 발전하는 위해도이고,  $P_{D,I}$ 는 질병이 발생할 가능성이다. 질병이 발생할 가능성은 미생물의 종류나 개인에 따라서 다르고, 환경적인 영향을 받으므로 많은 역학조사가 필요하다. 그러나 국내에서 하수처리수를 논에 관개하였을 경우 정확한 질병발생여부가 확인, 보고되지 않았으므로 중간 값인 50% ( $P_{D,I} = 0.5$ )를 사용하였다 (Haas et al., 1993).

### 3. 미생물 위해성 평가 방법

본 연구에서는 영농기간 동안 하수처리수를 관개하였을 경우 작업자인 농민과 주변 어린이에게 나

타나는 미생물 위해성을 평가하였다. 농민의 경우에는 영농기간인 100일 동안 관개용수에 직접 노출된다고 가정하였고, 농민의 연령이 고령화되었으므로 감염가능성을 일반인보다 2배 높여 평가하였다 (Jung et al., 2005). Nwachukul et al. (2004)은 어린이 (19세 미만)의 경우 미생물에 대한 위해성 평가결과 신경, 면역, 소화기계통이 발달하고 있는 단계로서, 감염 위험성이 어른에 비해 크다고 보고하였다. 이스라엘에서는 부분적으로 처리된 하수를 스프링클러 관개한 경우 0~4세 아이들의 장내 질병 발생률이 2배 높다고 보고하였고 (Fattal et al., 1986), 담수관개를 하였을 때 아이들의 설사 발생률이 4~5배 높다고 보고하였다 (Camann and Moore, 1988). 따라서 어린이의 경우 감염가능성을 어른에 비해 5배 높게 추정하였고, 노출기간은 논에서 직접 작업을 하는 농민에 비해서 상대적으로 낮은 30일로 가정하였다. USEPA에서는 음용수의 위해성 평가과정에서 한사람 당 2 L/day의 물을 섭취한다고 하였고, Asano et al. (1992)은 골프장에서 하수처리수를 이용하였을 경우 골프공이나 옷을 통해 섭취하는 양을 1 mL/day로 가정하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 하여, 관개용수는 음용수와 같이 직접 섭취하지 않으므로 위해도 값을 1/1,000로 낮추어 (2 mL/day 섭취) 평가하였다. 또한, 위해성 평가 과정에서 도출된 결과의 불확실성을 최소화하기 위해 Monte-Carlo simulation (n = 10,000) 기법을 활용하여 95% 신뢰구간의 위해도 값을 평가하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 하수처리수의 수질

2003년부터 2005년까지 관개용수로 사용된 하수처리수의 수질은 Table 2와 같다. UV처리를 위한 유입수로 biofilter처리수를 사용하였는데, 사전 연구에서 UV처리수 전, 후의 수질이 대장균을 제

Table 2 Water quality of treated wastewater from 2003 to 2005.

Year	Treatment	TC	FC	<i>E. coli</i>	BOD <sub>5</sub>	SS	T-N	T-P
		(MPN/100 mL)			(mg/L)			
2003	BE	9,150	6,500	4,200	5.9	3.4	38.1	4.00
	UV6	45	50	48	-	-	-	-
	UV16	<2	<2	<2	-	-	-	-
	STR	795	587	498	1.8	0.8	5.0	0.18
2004	BE	33,288	33,288	717	19.2	26.1	85.7	8.80
	POND	1,374	1,334	868	18	23.4	27.2	5.50
	UV40	625	600	44	-	-	-	-
	UV68	7	4	<2	-	-	-	-
	RES	600	480	260	5.8	10.5	3.4	0.01
2005	POND	3,419	1,056	603	8.8	48.0	64.9	5.10
	WET	29,200	27,383	450	93.9	76.5	50.7	6.50
	UV68	4	4	<2	-	-	-	-
	RES	358	31	17	5.1	10.8	3.5	0.10
	TAP	ND	ND	ND	-	0	-	-

BE: biofilter effluent; UV6: UV disinfected water with 6 mW·s·cm<sup>-2</sup>; UV16: UV disinfected with 16 mW·s·cm<sup>-2</sup>; UV40: UV disinfected with 40 mW·s·cm<sup>-2</sup>; UV68: UV disinfected with 68 mW·s·cm<sup>-2</sup>; POND: pond treated effluent; WET: wetland treated effluent; STR: stream; RES: reservoir; TAP: tap water; ND: not detected.

외한 다른 수질항목이 유입수와 유사한 결과를 나타내어 분석에서 제외하였고 (Jung et al., 2003), 수돗물은 서울특별시 상수도 사업본부에서 제공한 정수장 수질검사결과 (광진구)를 이용하였다.

USEPA (1992)의 농업용수 재이용 수질권고치는 BOD<sub>5</sub>은 10~30 mg/L, SS은 30 mg/L이고, 대장균 200 FC/100 mL이하이다. 본 연구에 사용된 하수처리수는 습지와 pond처리수를 제외하고는 USEPA의 BOD<sub>5</sub>, SS의 수질권고치를 만족시켰다. 그러나 대장균의 경우 UV처리수를 제외한 다른 처리수는 모두 높은 값을 나타내었으므로 하수처리수의 재이용 시 UV처리와 같은 추가적인 처리가 필요한 것으로 나타났다. 일반적으로 관개용수로 사용되고 있는 하천수나 호수물의 대장균 농도 또한 재이용 수질권고치를 초과하는 경우가 있었다. UV 처리수는 조사량에 따라 대장균 농도의 차이가 크게 나타날 수 있으므로 하수의 수질에 따른 적절한

조사량에 대한 연구가 사전에 필요할 것으로 판단된다 (Yoon et al., 2004).

## 2. 대장균 농도 분석

대장균 농도는 2003년부터 2005년까지 영농기간 동안 (5월~8월) 각 처리구별로 3반복한 값을 분석하였으며, 처리구별 total coliform (TC), fecal coliform (FC)과 *E. coli*의 농도는 Fig. 2와 같다. 대장균 농도는 같은 처리수로 관개한 3개의 포트에서도 농도 차이가 크게 나타났는데, 이는 각 실험포트별로 강우나 토양 퇴적층의 교란으로 인한 재부유 정도 차이에 의해 다른 배경농도를 가질 수 있기 때문이다 (Jung et al., 2005). 2003년에는 UV처리수가 다른 처리수에 비해서 평균대장균 농도가 낮게 나타났으며, 2004년과 2005년에는 pond처리수의 대장균 농도가 낮게 나타났다. Yoon

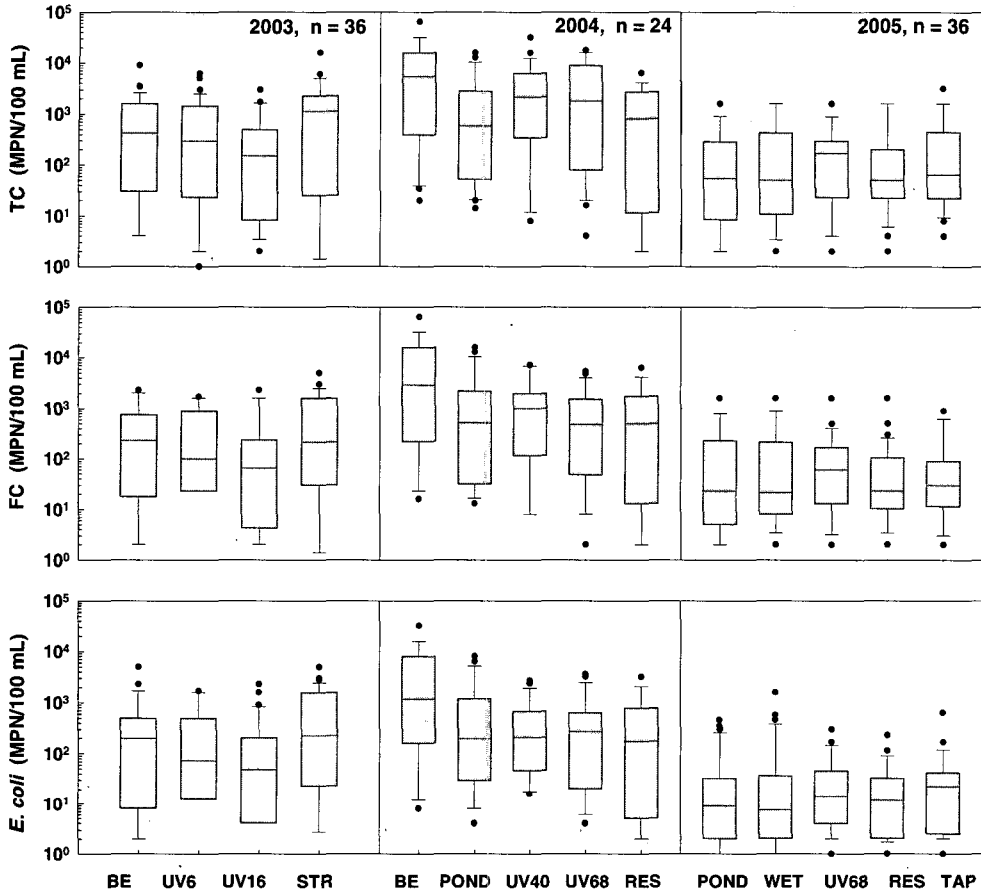


Fig. 2 Microorganisms concentration in paddy plot irrigated with treated wastewater from 2003 to 2005.

et al. (2003)은 pond는 자연정화 방법으로서 하수를 처리할 경우 일정수준의 처리효율을 얻을 수 있으며, 대장균의 농도가 평균 96% 제거되었다고 보고하였다. Biofilter처리수는 다른 처리수에 비해서 대장균의 농도가 높았으며, 특히 2004년에는 biofilter처리수의 농도가 현저히 높게 나타났다. 2004년 하수의 수질이 2003년에 비해서 좋지 않았기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 2005년은 2003년과 2004년에 비해 상대적으로 대장균의 농도가 낮게 측정되었는데 이러한 결과는 2005년에 초기 관개용수를 대장균 농도가 없는 수돗물로 관개하였기 때문에 전반적으로 농도가

낮게 나타난 것으로 생각된다.

### 3. *E. coli*의 위해성 평가

3년 동안 벼 실험포트에서 모니터링 한 처리구별 *E. coli*의 농도를 활용하여 위해성 평가를 실시한 결과는 Fig. 3과 같다. 농민과 어린이의 위해성 평가 결과 UV처리수의 위해도 값은  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 로 다른 처리구에 비해서 낮은 값을 나타내었다. Biofilter처리수는 위해도가 가장 높게 나타났는데, 특히 2004년에는 위해도 값이  $10^{-4}$ 보다 크게 나타났다. USEPA는 장내 질병에 관한 위해도 값이 1년 동

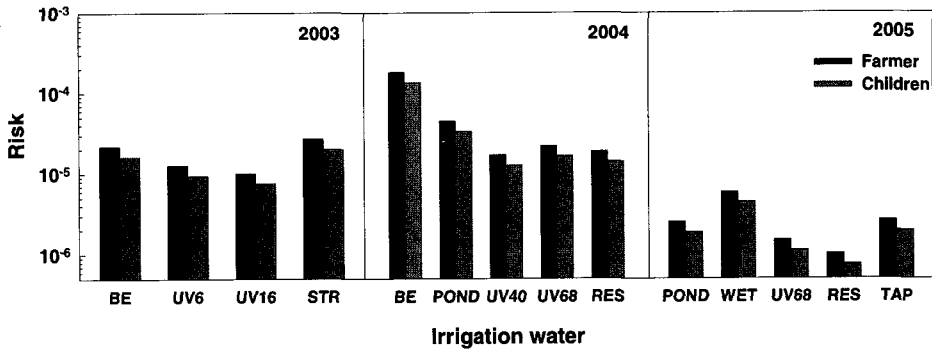


Fig. 3 Risk value associated with *E. coli* concentration in paddy plot.

안  $10^{-4}$ 이하인 경우 안전하다고 보고하였다 (Haas et al., 1993). Biofilter처리수를 제외한 나머지 처리수는 위해도 값이  $10^{-4}$ 이하로 나타났으며, 논에서 관행적으로 사용하고 있는 관개용수인 하천수나 호수물로 관개한 경우와 위해도 값이 비슷하거나 낮게 나타났다. 2005년 pond처리수의 위해도 값은  $10^{-6}$ 을 나타냈는데, 습지처리수를 바로 관개했을 경우보다 pond에 저류시킨 후 관개할 경우 위해도가 낮게 나타났다. 몇몇 연구자 (Blumenthal et al., 1996; Cifuentes, 1998)들은 하수를 사용하기 전에 2개의 pond에 저류시킨 후 사용한 결과 회충 (*A. lumbricoides*) 감염과 장내 질병발생의 위험이 감소되었다고 보고하였다. 3년 동안의 미생물 위해성 평가 결과 2005년의 위해도가 가장 낮은 값을 나타내었는데, 이러한 결과는 초기 관개를 대장균 농도가 낮은 수돗물로 관개하였기 때문이라 판단된다. 따라서 하수처리수를 관개용수로 재이용할 경우 초기 관개용수의 수질이 영농기간 동안 전체 위해성을 결정하는 중요한 요인으로 작용하므로 초기 담수를 비교적 수질이 깨끗한 물을 사용하여 관개한다면 미생물에 대한 위해도가 상당히 감소될 것으로 판단된다.

미생물 위해성평가는 불확실성을 최소화 하기 위해 정규분포로 난수를 10,000번 발생시킨 후 이를 Monte-Carlo simulation을 적용하여 95% 신뢰도 값을 위해도 값으로 나타내었다. 2003년부터 2005

년까지 영농기간 동안 Monte-Carlo simulation 결과는 Fig. 4와 같고, 농민과 어린이의 연간 위해성 평가결과는 Table 3과 같다. 농민의 경우 어린이보다 노출시간이 길기 때문에 위해성 평가 결과 위해도 값이 높게 나타났다. UV처리수의 위해도 값은  $1.8 \times 10^{-6} \sim 2.1 \times 10^{-5}$  범위의 값을 나타내었고, 수돗물의 경우 다른 처리수에 비해서 상대적으로 위해도 값이 낮은  $2.6 \times 10^{-7} \sim 7.4 \times 10^{-7}$ 을 나타내었다. Biofilter처리수는 6월에 농민과 어린이의 위해도 값이  $10^{-4}$ 보다 크게 나왔는데, 이 값은 감염이 일어날 수 있는 위험한 수준이다 (Haas et al., 1993). 따라서 하수 재이용을 위해서는 UV소독과 같은 적절한 미생물농도 저감 대책이 필요하다고 판단된다.

각 처리구별로 위해도 값을 평가한 결과 영농기간 초기 (5월말~6월초)에는 위해성이 낮게 나타났으나, 시간이 지나면서 6월에는 위해성이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 7, 8월에 다시 위해도 값이 점차 감소하였다. 이러한 결과는 6월에 본격적인 영농활동이 시작되면서 관개용수를 많이 필요로 하여 영농 초기인 5월보다 관개를 많이 하기 때문에 대장균농도가 증가하였다고 판단된다. 7~8월에는 집중호우로 인해 강우량이 많은 시기로 관개를 상대적으로 적게 하며, 강우에 의한 희석효과가 나타났기 때문에 위해성이 감소한 것으로 판단된다. 선행연구에 의하면 하수처리수를 관개하였을

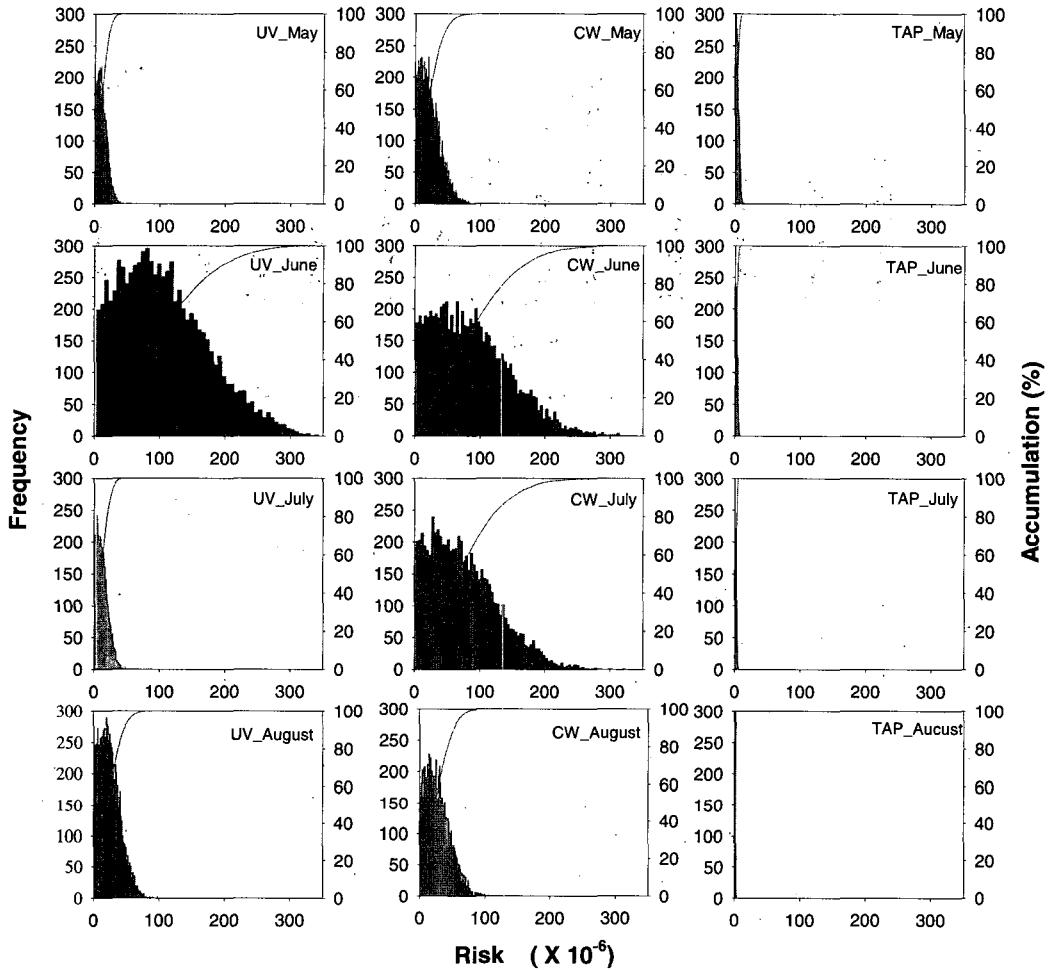


Fig. 4 Risk assessment by Monte-Carlo simulation. the risk value was estimated with 95% confidence interval (UV: UV disinfected water; CW: conventional irrigation water; TAP: tap water).

때 관개 후 24시간이 경과하면 미생물에 의한 위해성이 감소하므로 관개를 하고 1~2일이 지난 후 작업에 임하는 것이 위험을 줄일 수 있다고 보고하였다 (Jung et al., 2005). 그러므로 관개를 하는 시기에는 작업자나 주변의 주의가 필요할 것으로 생각된다.

Table 3에서는 벼 재배포트의 각 처리별 위해성 평가결과  $10^{-8} \sim 10^{-4}$  범위를 나타내었다. Tanaka et al. (1998)은 2차 처리수를 농업용수로 사용한 경우 Monte-Carlo simulation을 통해 위해성 평

가를 실시한 결과 연간 위해도 값이  $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 로 나타났다고 보고했으며, Shuval et al. (1997)은 하수처리수를 상추에 관개하였을 때 Beta-Poisson 모델로 위해성을 평가한 결과 간염 (hepatitis)과 rotavirus에 대한 위해성이  $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 과  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 이라고 보고하였다. 본 연구결과 하수처리수를 자연정화 방법인 습지나 pond에 의해 처리한 후 관개하였을 때 위해도 값이  $10^{-8} \sim 10^{-5}$ 로 낮게 나타났다. Yoon et al. (2004)은 하수를 습지-연못 시스템을 통해 처리하면 대장균의 농도가  $10^5$



Table 3 Risk values of *E. coli* exposure for farmer and children after irrigation (risk value  $\times 10^{-7}$ ).

	May		June		July		August	
	Farmer	Children	Farmer	Children	Farmer	Children	Farmer	Children
BE	58.4	43.8	1,936.6	1,452.5	100.4	75.3	44.8	33.6
NT	0.4	0.3	342.1	256.5	18.6	13.9	2.9	2.2
UV	23.3	17.5	211.8	158.9	27.4	20.5	50.9	38.2
CW	46.9	35.2	180.1	135.1	156.5	117.4	57.5	43.1
TAP	7.4	5.6	5.1	3.8	4.1	3.1	2.6	1.9

BE: biofilter effluent; NT: natural treatment (wetland and pond); UV: UV disinfected water; CW: conventional irrigation water (stream and reservoir); TAP: tap water.

MPN/100 mL 에서  $10^3$  MPN/100 mL으로 감소하므로 보건, 위생상의 문제를 줄일 수 있다고 하였다. 따라서 하수처리수를 pond 등에 의한 저류나 UV소독과 같은 적절한 처리 후 관개용수로 이용한다면, 미생물의 농도를 감소시켜 작업자와 주변의 위해성을 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 하수처리수를 관개용수로 재이용할 때 나타날 수 있는 위해성을 평가하였다. 3년 영농기간 동안 실험포트에서 채취한 수질자료를 활용하여 산정한 위해도 값은  $10^{-8} \sim 10^{-4}$ 범위를 나타내었다. UV처리수는 다른 처리구에 비해 위해성이 낮게 나타났으며, pond 처리수도 관행관개용수와 비슷하거나 약간 낮은 위해성을 나타내었다. 반면 biofilter처리수 (2차 처리수조 방류수)는 6월에  $10^{-4}$ 이상의 위해도 값을 나타내어 시기별로 감염 위험이 큰 경우가 나타났다. 따라서 하수를 관개용수로 재이용할 때 pond저류나 UV소독 등을 통해 대장균농도를 일정수준 이하로 낮춘다면 미생물 위해성이 크게 감소할 것으로 판단된다. 본격적인 영농활동이 시작되고 관개를 많이 하는 6월에 일시적으로 위해성이 높게 나타났으나, 시간이 지나면서 위해성이 감소하였다. 이는 영농기간 초기에 작업자와 주변의 각별한 주의가 필요하며, 관개

한 후 1~2일이 경과하고 영농활동을 하는 것이 위험을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 또한, 초기 관개용수로 미생물의 농도가 없는 수돗물을 사용한 2005년 실험은 2003년과 2004년에 비해 위해도 값이 매우 낮게 나타났다. 따라서 하수를 관개용수로 재이용 할 경우 UV처리와 같은 적절한 처리 후 이용하고, 초기 관개부터 하수처리수를 사용하는 것 보다는 초기관개는 관행관개용수로 사용하고, 하수처리수는 물이 부족한 시기에 보조 관개용수로 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

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

#### References

1. Ministry of Construction and Transportation. 2001. Water vision 2020.
2. Ministry of Environment. 2000. A comprehensive plan for water saving
3. APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed.), American Public Health Association, Washington.
4. Asano, T., Leong, L. Y. C., Rigby, M. G. and

- Sakaji, R. H. 1992. Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data. *Water Science and Technology*. 26(7-8). pp. 1513-1524.
5. Asano, T. and Sakaji, R. H. 1990. Virus risk analysis in wastewater reclamation and reuse. In: Chemical water and wastewater treatment. Hahn, H. H. and Klute, R. (Eds) Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp. 483-496.
  6. Blumenthal, U. J., Mara, D. D., Peasey, A., Ruiz-Palacios, G. and Stott, R. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines, Bulletin of the World Health Organization. 78(9). pp. 1104-1116.
  7. Blumenthal, U. J., Peasey, A., Quigley, M., Cifuentes, E. and Ruiz-Palacios, C. 1998. Consumer risk from enteric infections and heavy metals through agricultural reuse of wastewater, Mexco. Final report of project no. R5468 to Department of international development, UK.
  8. 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). pp. 277-283.
  9. Camann, D. E. and Moore, B. E. Viral infection based on clinical sampling at a spray irrigation site. In: Implementing water reuse. AWWA Research Foundation 847.
  10. 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. pp. 203-213.
  11. Dowd, S. E., Gerbaud, L., Planchon, C., Pepper, I. L. and Pillai, S. D. 2000. Bio-aerosol transport modeling and risk assessment in relation to biosolid placement. *Journal of Environmental Quality*. 26. pp. 194-199.
  12. Fattal, B., Wax, Y., Davies, M. and Shuval, H. I. 1986. Health risk associated with wastewater irrigation: an epidemiological study. *American Journal of Public Health*. 76. pp. 977-980.
  13. Gardner, T., Chinivasagam, N., Rao, A., Vieritz, A., Balckall, P., Rynne, F., Tomas, R., Klieve, A., Blaney, B., Green, P. and Barry, G. 1998. Quantifying the health risk of spray irrigation treated sewage effluent. *Water Technology '98*, Australian Water and Wastewater Association, Brisbane.
  14. Haas, C. N., Rose, J. B., Gerba, C. and Regli, S. 1993. Risk assessment of virus in drinking water. *Risk Analysis*. 13. pp. 545-552.
  15. Jung, K. W., Yoon, C. G., An, Y.-J., Jang, J. H. and Jeon, J. H. 2005. Microbial risk assessment in treated wastewater irrigation on paddy rice plot. *Korean Journal of Limnology*. 38(2). pp. 225-236.
  16. Jung, K. W., Yoon, C. G., Hwang, H. S. and Ham, J. H. 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). pp. 94-106.
  17. Macler, B. A. and Regil, S. 1993. Use of microbial risk assessment in setting US drinking water standards, *Int. J. Food Microbiol.* 18. pp. 245-256.
  18. Nwachukul, N. and Gerb, C. P. 2004. Microbial risk assessment: don't forget the children. *Curr. Opin Microb.* 7. pp. 206-209.
  19. Peasey, A., Blumenthal, U. J., Mara, D., and

- Ruiz-Palacios, G. 2000. WELL study: A review of policy and standards for waste-water reuse in agriculture: *a Latin American perspective*. 68(2). pp. 15-18.
20. Petterson, S. R., Teunis P. F. M. and Ashbolt, N. J. 2001(a). Modeling virus inactivation on salad crops using microbial count data, *Risk Analysis*. 21. pp. 1097-1107.
21. Petterson, S. R. Ashbolt, N. J and Sharma, A. 2001(a). Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: A screening-level risk assessment. *Water Environment Research*. 73(6). pp. 667-672.
22. Storey, M. V. and Ashbolt, N. J. 2002. A risk model for enteric virus accumulation and release from reuse water biofilms. Presented at the IWA 3rd World Water congress, Melbourne, 7-12, April, IWA Publishing.
23. Tanaka, H., Asano, T., Schroeder, E. D. and Tchobanoglous, G. 1998. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. *Water Environment Research*. 70(1). pp. 39-51.
24. USEPA. 1992. Guidelines for water reuse, Washington, DC, EPA 625/R-92/004.
25. WHO. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme-Environment and Health.
26. Yoon, C. G., Jang, J. H., Jung, K. W. and Ham, J. H. 2004. Feasibility study of wetland-pond system for water quality improvement and agricultural reuse. *Korean Journal of Limnology*. 37(3). pp. 344-354.
27. Yoon, C. G., Jung, K. W., Jeon, J. H. and Ham, J. H. 2003. Guidelines and Optimum Treatment for Agriculture Reuse of Reclaimed Water. *Korean Journal of Limnology*. 36(3). pp. 356-368.
28. Yoon, C. G., Jung, K. W., Ham, J. H. and Jeon, J. H. 2003. Feasibility Study of Natural Systems for Sewage Treatment and Agricultural Reuse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 45(6). pp. 194-206.