

하수처리수를 관개한 후 벼재배 시험구에 대한 미생물 위해성 평가

정광욱 · 윤춘경* · 안윤주 · 장재호 · 전지홍¹

(건국대학교 환경과학과, ¹한국환경정책·평가연구원)

Microbial Risk Assessment in Treated Wastewater Irrigation on Paddy Rice Plot. Jung, Kwang-Wook, Chun-Gyeong Yoon*, Youn-Joo An, Jae-Ho Jang and Ji-Hong Jeon¹ (Department of Environmental science, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea; ¹Environmental Engineer Research Division, 613-2 Bulgwang-Dong, Wunpyeong-Gu, Seoul 122-706, Korea)

The protection of public health in wastewater reclamation and reuse is one of the most important issues. Monitoring data of *Escherichia coli* were collected from paddy rice plots in 2003 and 2004 experiments. Five treatments were used and each one was triplicated to evaluate the changes of *E. coli*: surface water, biofilter effluent (secondary level), UV-disinfected water and pond treatment. Microbial risk was quantified to assess human health risk by exposure to *E. coli* in paddy rice plots, which were irrigated with reclaimed wastewater. Beta-Poisson model was used to estimate the microbial risk of pathogen ingestion that may occur to farmer and neighbor children. Monte-Carlo analysis (10,000 trials) was used to estimate the risk characterization of uncertainty. In the following analysis, two scenarios were related to the reduction of risk against direct ingestion and exposure times. Scenarios A and B were assumed that the risk was 1,000 and 10,000 times lower than direct ingestion. Golfers were assumed to be 0.001 L of reclaimed water by contact with balls and their cloths. Opportunity of contact in paddy rice field with pathogens was more frequent than handing golf balls, because of agricultural activity was practiced in ponded water in paddy rice culture. As a result of microbial risk assessment using total data of experimental period, risk value of *E. coli* in 2003 and 2004 experiment ranged from 10^{-5} to 10^{-8} and 10^{-4} to 10^{-8} , respectively. The risk values in biofilter effluent irrigation was the highest, which is 10^{-4} in 2003 and 10^{-5} in 2004 experiments with scenario A. Ranges of 10^{-6} to 10^{-8} were considered at reasonable levels of risk for communicable disease transmission from environmental exposure and the risk value above 10^{-4} was considered to be attributable to the risk of infection. Irrigation with UV-disinfected water in the paddy field during the agricultural period showed significantly lower microbial risk than others, and their levels of risk value were within the range of actual paddy rice field with surface water.

Key words : microbial risk assessment, *E. coli*, paddy rice culture, reclaimed water, UV-disinfection, water reuse

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

서 론

수자원의 부족은 세계적으로 가장 심각한 문제 중의 하나로 인식되고 있으며, 수자원 문제를 해결하기 위한 노력으로 하수처리수를 재이용하려는 노력이 진행 중이다. 하수처리수의 농업적 재이용은 대체수자원 확보 및 효율 증대라는 양적인 측면뿐만 아니라, 수계에 방류되었을 때 발생할 수 있는 수질문제를 경감시킬 수 있는 오염부하 저감측면에서도 큰 관심을 가지게 한다. 하수처리수의 재이용이 적용되기 위해서는 처리기술적인 문제 외에도 비용문제, 보건위생상의 위험, 주민들의 정서적 저항과 반대 등 경제 사회, 문화적 측면도 고려되어야 할 것이다.

국제적 농업용수 재이용 수질기준은 유기물질이나 영양물질에 초점이 맞춰진 다른 수질기준과는 다르게, 발생할 수 있는 건강상의 위험을 줄이기 위해 지표미생물 항목을 제한하고 있다. 하수처리수를 재이용하기 위한 조건으로는 소비자가 사용할 때 무색·무취이어야 하며, 병원·위생학적인 안전성 확보가 무엇보다 중요하기 때문에 일반적으로 지표미생물로 사용하고 있는 대장균 군(total coliform, TC), 분원성 대장균 군(fecal coliform, FC) 그리고 대장균(*E. coli*) 등을 기준으로 규제하고 있다. 하지만, 이러한 기준은 발농사를 중심으로 하는 외국의 수질기준이기 때문에 직접적으로 우리나라에 적용하는데 한계점을 갖고 있다. 최근의 연구에서는 기생충 알에 대한 기준(nematode egg/litre)을 정하여 사용하고 있으며, 날로 먹는 채소와 같은 곳에 관개할 수 있는 무제한 관개(unrestricted irrigation)의 경우 대장균 기준을 10^3 FC 100 mL^{-1} 로 정하고 있다(WHO, 2000). 이 결과는 세계적인 역학조사 자료를 수집하여 분석한 결과로서 많은 나라에서 수질기준 제정에 이용되고 있다.

하수 처리수의 재이용으로 발생하는 질병에 관한 역학조사는 많은 연구자들에 의해 보고되었다. Peasey *et al.* (2000)은 스프링클러 관개시 $10^3 \sim 10^4$ FC 100 mL^{-1} 의 농도로 관개할 경우에는 질병감염의 가능성이 낮았다고 보고하였다. 멕시코에서는 $10^3 \sim 10^4$ FC 100 mL^{-1} 를 관개할 경우에 5~14세의 어린이들이 설사(diarrhoeal disease) 등의 장내질환의 발생 확률이 4~7배 높아졌다고 보고하고 있으며, 관개방식의 종류, 섭취하는 방법, 조사 대상 등에 대한 제한적인 연구결과가 보고되었다. 10^6 FC 100 mL^{-1} 로 관개할 경우에는 호흡기의 감염이 우려되거나 직접적인 질병 발생률은 낮으며, 하수처리장에서 종사하는 근로자의 경우 높은 미생물 농도에 의해 위장병에 노출될 가능성이 높다고 보고하였다. 위생학적으로 스프링

클러 관개가 미생물 감염을 유발시킬 가능성이 가장 높으며, 관개수의 기생충 알이 농산물의 섭취에 의해서 감염될 수 있다고 보고되었다(Ayres, 1992). 논에 관개방식은 외국의 플러드/퍼로우(flood/furrow) 관개방식과 유사한 특성을 갖고 있다. 퍼로우 관개방식의 경우 논과 같이 밭고랑에 관개를 한 후 시간이 지남에 따라 토양에 수분을 공급하는 방식으로 일정기간 담수상태를 유지하는 것이 논과 유사하며, 현재 우리나라에서 논에 적용하는 방법이 퍼로우 관개이다. Bastos and Mara (1995)에 의하면 플러드 관개를 할 경우에는 아이들이 설사 발병율이 4~5배 높아진다고 보고하였으며, 강우에 의하여 높은 농도의 *E. coli*가 유출되어 작물에 부착되어 이동하기 때문에 감염가능성이 높아진다고 보고하고 있다.

Camann and Moore (1988)은 농촌지역에서 부분적으로 처리된 하수처리수를 스프링클러 관개에 적용할 경우 도시지역보다 대기를 통해 바이러스의 감염 확률이 급격하게 높아졌으며 주요 관개기인 여름철에 집중되었다고 보고하였다.

일반적으로 미생물에 의해 오염된 용수는 태양에 노출될 경우 그 위험이 급격히 감소하지만, 논농사에 이용될 경우 일정기간 저류된 상태를 유지하기 때문에 그에 따른 주변 위생문제와 작업자의 위생에 주의가 필요할 것으로 판단된다. 미생물 위해성 평가를 위해서는 역학조사를 통한 체계적인 검토가 필요한 실정이나 논에 하수처리수를 관개한 후에 나타나는 위생 문제에 대한 검토는 세계적으로 전무한 실정이다. 쌀은 정미와 같은 유통과정을 거쳐 조리해서 먹기 때문에 섭취에 의한 감염위험은 매우 적을 것으로 판단되지만, 경작기간 중 대부분이 담수된 상태를 유지하기 때문에 작업자와 주변의 환경에 병원성 세균에 의한 위험이 클 것으로 판단된다. 따라서 논에 하수처리수를 관개할 경우 발생할 수 있는 위험에 대한 조사가 필요하며, 미생물 위해성 평가를 통해서 하수처리수의 처리수준을 결정하여 불필요한 처리로 인해 발생할 수 있는 경제적인 손실을 줄여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지표 관개수인 하천수와 호소수, biofilter 유출수, 그리고 UV소독수를 논 관개용수로 이용하여 실험구 내에서 *E. coli*의 농도변화를 2년간 모니터링 하였으며, 그 결과를 Beta-Poisson 모형을 이용하여 미생물 위해성 평가를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 실험시설

2003년 연구에 이용된 흡수성 biofilter는 처리용량이

약 $8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이고 경기도 양평군 소재 연립주택 16가구의 생활하수를 처리하는 소규모 오수처리시설이다. 작물재배 실험포트는 biofilter와 인접한 곳에 설치하였으며 $40 \times 50 \times 35 \text{ cm}$ 로 표면적이 약 $2,000 \text{ cm}^2$ 인 합성수지용기를 사용하였다. 논토양을 25 cm 가량 채우고 상부 10 cm는 담수심을 위해 여유를 두었다.

2004년에 사용된 흡수성 biofilter는 건국대학교 평생교육원의 생활하수 및 오폐수를 처리하는 시설로서 용량 $3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 를 처리하기 위한 시설이다. 작물재배 실험포트는 $100 \times 100 \times 50 \text{ cm}$ 규모로 표면적이 약 $10,000 \text{ cm}^2$ 인 콘크리트 구조물이며, 30 cm의 논토양을 채웠으며 담수심의 여유를 위해 상부 20 cm의 여유고를 두었다. UV 실험장치는 하나의 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. 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 램프는 40과 17 W 램프이다(Jung *et al.*, 2003). 살균을 위한 자외선 조사량은 평균 강도에 체류시간의 곱에 의하여 $\mu\text{W} \cdot \text{s cm}^{-2}$ 으로 표현되며, 자외선 소독 반응조에서의 평균 강도는 PSS(point source summation) method(Tchobanoglous *et al.*, 1996)를 적용하여 구하였다.

2. 실험방법

2003년 실험은 biofilter 처리수, 자외선 조사량 $6 \text{ mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$ 와 $16 \text{ mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$ 의 소독수를 각각 관개용수로 이용하였으며, 대조구(control)는 양평군 신에리에서 관개용수로 사용하고 있는 하천수를 사용하였으며, 1회 관개시 총 5 L를 관개하여 수심을 약 3~5 cm 정도로 유지하는 관행관개 방식을 사용하였다.

2004년 실험은 biofilter 처리수, 자외선 조사량 $68 \text{ mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$ 와 $40 \text{ mW} \cdot \text{s cm}^{-2}$ 의 소독수와 연못처리수를 각각 관개용수로 이용하였고, 대조구(control)는 건국대학교의 일감호수 물을 사용하였으며, 1회 관개시 각각 30 L를 관개하여 수심을 약 3~5 cm 정도로 유지하였다. 2003년 실험보다 높은 자외선 조사량으로 소독한 이유는 2004년 biofilter 처리수의 SS 등 수질인자가 높아 2003년 실험의 UV dose로는 충분한 소독효과가 나타나지 않았기 때문이다. 시비량은 농업과학기술원 고시 표준 권장시비량을 적용하였다. 질소는 기비, 이삭비, 분얼비를

각각 50, 30, 20%의 비율로 각각 시비하였고, 인은 전량을 기비로 시비하였다.

2003년과 2004년 실험은 동일한 영농방식을 취하였으며, 이앙은 $10 \times 10 \text{ cm}$ 간격으로 공시품종 일품벼를 1주 1본으로 손이앙 하였다. 실험은 관개 후 24시간 동안 *E. coli*의 변화를 알아보기 위해 1일 3~4회 샘플링하였고, 장기간 *E. coli* 농도를 알아보기 위해서 평균 1~2주 간격으로 영농기간 동안 모니터링하였다. 샘플링 방법은 멸균된 피펫(pipett)을 이용하여 실험포트 5군데의 지점을 선정하여, 논 토양이 교란되지 않게 채취하여 실험실로 운반 후 분석하였다. 수질분석은 Standard Methods(APHA, 1995)에 따라 분석하였으며, *E. coli*의 분석은 최적확수시험법(MPN)을 사용하였는데 EC-MUG broth를 사용하였으며 DIFCO사의 시약을 사용하였다.

3. 미생물 위해성 평가(Hass *et al.*, 1993)

위해성 평가는 위험에 노출된 개인이나 집단의 건강에 미치는 악영향의 양과 정도를 분석하는 것이다. 일반적으로 미생물 위해성 평가는 위험성 확인(Hazard identification), 용량-반응평가(Dose-response assessment), 노출평가(Exposure assessment), 그리고 위험도 결정(Risk characterization)의 네 가지 단계로 구성된 일반 화학물질의 위해성 평가방법과 유사한 과정을 거친다. 미생물 위해성 평가는 용량-반응에 의한 최대가능도(maximum-likelihood estimation of dose-response)와 가장 많이 노출된 개체(maximum exposed individual), 그리고 노출빈도함수(frequency distribution)를 통해서 이루어지며, 미생물 위해성 평가는 실험결과에 의해 얻어지는 point estimation methods를 통해서 행해진다.

1) 용량-반응 평가

수인성 질병에 노출될 경우 생명에 치명적인 위험을 줄 수 있다. 질병의 감염되기 위해서는 세 가지 과정을 거친다. 감염의 위험이 있는 미생물을 포함한 물을 섭취해야 하며 섭취한 양이 면역체계에서 살아남거나 증식할 수 있는 충분한 양이어야 한다. 일회 노출(P)시 발생할 수 있는 위험의 가능성을 기준으로 한다. 감염되었을 때 개인에 따라서 질병으로 발전할 수 있으며 그 가능성을 $P_{D: I}$ 로 표현한다. 감염되었을 경우 죽음에 이르는 가능성을 $P_{M: D}$ 로 표현한다. 미생물 위해성 평가의 과정은 위와 같은 세 가지 가능성과 노출 수준과의 상관관계를 정의하는 것이며, 노출의 수준은 물의 섭취량과 흡수된 물속의 병원성 미생물의 양으로 평가할 수 있다.

2) Assessment of Infection Probability (P_I)

이모형은 음용수의 세균성 미생물에 의한 감염을 평가하기 위해 개발된 Beta-poisson 모형으로 일정 농도의 미생물을 섭취할 경우 발생할 수 있는 위험을 평가하는 경험모형이며 식 1)과 같다.

$$P_I = 1 - \left[1 + \frac{N}{N_{50}} (2^{1/\alpha} - 1) \right]^{-a} \quad \text{식 1)}$$

P_I : The risk of infection by ingesting pathogens in drinking water

N : Number of pathogens ingested

N_{50} : Number of pathogens that will infect 50% of the exposed population

a : Slope parameter (the ratio N/N_{50} and P_I)

P_I 는 병원성 미생물을 섭취하였을 때 발생할 수 있는 위험도이며, N 은 섭취되는 미생물의 농도, N_{50} 는 섭취한 사람의 50%가 감염될 수 있는 농도, α 는 섭취와 발병과의 상관관계를 나타내는 계수이다.

3) Probability of Morbidity

발병가능성은 병원성 미생물에 감염될 경우 개인의 상태에 따라 질병으로 발전되지 않을 수도 있으며, 이는 개인적인 특성에 따라서 다르다. 따라서 충분한 데이터에 의한 분석이 필요하지만, 섭취와 질병과의 뚜렷한 상관성을 찾아내는 것은 매우 어렵다. 발병가능성은 P_D 로서 구할 수 있으며 노출된 농도와는 관계없는 값이다. 음용수로서 병원성 미생물을 섭취할 경우 보통 한 종류 이상이며 식 2)와 같다.

$$P_D = P_{D:1} \times P_I \quad \text{식 2)}$$

발병가능성은 장내바이러스의 경우 바이러스의 종류와 관찰대상에 따라 1~97%까지 다양하다. 많은 데이터에 의해 정확한 발병가능성이 확인되기 전까지는 중간값인 50%를 사용한다. 섭취량, 연령, 건강상태, 그리고 민감도 등 다양한 형태의 실험이 필요하며, 이와 같은 실험과정을 거쳐 정확한 발병가능성을 확인할 수 있고, 질병감염에 의해 사망할 확률은 매우 낮지만 무시할 수준은 아닌 것으로 보고되고 있다.

3. 미생물 위해성 평가의 적용

논의 경우에는 작업자가 담수된 관개수에 손과 발을 담그고 경운, 비료와 제초제 살포, 이앙 등의 영농활동이 행해지기 때문에 그 위험이 증가할 것으로 판단되며, 담수된 관개수의 세균성 미생물이 바람이나 공기에 의해

주변 환경에 영향을 줄 수 있기 때문에 각별한 관리가 필요할 것이다. 본 연구에서는 Beta-Poisson (Hass *et al.*, 1993) 모형을 사용하여 미생물 위해성 평가를 실시하였다. Asano *et al.* (1992)은 관개 후 곡물에 남아있는 하수처리수 10 mL를 지속적으로 섭취하며 마지막 관개와 곡물의 수확시기 사이에 바이러스의 99.99%가 제거된다고 가정하여 스프레이 관개시 발생하는 1년 동안 미생물 위해성을 Beta-Poisson 모형으로 평가한 결과, 최악의 경우에도 위해도 값이 10^{-4} 을 넘지 않았다고 보고하고 있으며, Tanaka *et al.* (1998)은 식용곡물에 소독하지 않은 2차 처리수를 관개시 발생할 수 있는 위해도를 Monte-Carlo analysis를 통해서 분석하였으며 소독을 하지 않은 경우에는 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 위해도를 나타내었으며, 염소 소독하여 관개한 경우에는 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 로 위해도를 줄일 수 있다고 보고하였다. Beta-Poisson 모형은 음용수를 섭취할 경우 발생하는 미생물 위해성 평가를 위해서 개발된 모형이지만 하수처리수의 재이용시 발생할 수 있는 문제에 대한 평가에 이용된 바 있다.

본 연구에서는 2년간의 실험포트에서 실측된 *E. coli*의 농도를 이용하여 위해성 평가를 실시하였으며, 문헌고찰을 통해 N_{50} 와 α 값을 선정하여 사용하였으며, Hass *et al.* (1999)에 의해 보고된 $N_{50} = 8.6 \times 10^{-7}$ 과 $\alpha = 0.1778$ 을 이용하였다. 논에 하수처리수를 관개할 경우 발생할 수 있는 위험에 대한 선행연구가 전무하기 때문에 문헌에서 제시된 상수를 이용하였으며 시나리오 A와 B로 나누어 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 시나리오 A는 최악의 경우를 나타내며 시나리오 B는 A보다 위험이 낮은 경우를 평가하였다.

1) 시나리오 A

(1) 관개 후 1시간과 24시간이 지난 후 1회 노출시 미생물 위해성 평가

관개 후 24시간이 지나면 지표미생물의 농도가 약 50% 감소하기 때문에 관개 후 1시간 후와 24시간 후의 *E. coli* 농도를 이용하여 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 관개수를 직접 섭취할 가능성이 낮기 때문에 위해도를 10^{-3} 배 낮추었으며 현재 우리나라 작업자의 평균 연령이 고령화되었기 때문에 감염가능성을 2배 높여 평가하였다. 어린이의 경우는 감염가능성이 높기 때문에 5배 높여 평가하였다.

(2) 영농기간 동안 미생물 위해성 평가

벼의 영농기간은 5월 중순에서 10월 초까지이나, 작업자가 영농기간 중 담수된 상태를 유지하는 100일 동안 지속적으로 관개수에 노출된다고 가정하였으며, 관개수

Table 1. Comparison of water qualities of irrigation waters in 2003 and 2004.

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

BE: biofilter effluent; Pond: pond effluent; UV6: UV disinfection by dose of 6 mW · s cm⁻²; UV16: UV dose of 16 mW · s cm⁻²; UV40: UV dose of 40 mW · s cm⁻²; UV68: UV dose of 68 mW · s cm⁻²; STR: stream; RES: li-Gam reservoir.

를 직접 섭취할 가능성이 낮기 때문에 10³배 낮추었고, 현재 우리나라 작업자의 평균 연령이 고령화되었기 때문에 감염가능성을 2배 높여 평가하였다. 관개지역 주변의 위해도의 평가는 어린이를 대상으로 하였으며 관개수에 노출되는 기간을 작업자보다 상대적으로 낮은 30일로 가정하였으며, 관개수를 섭취할 가능성을 10³배 낮추었으며 성인에 비해 아이들이 감염 가능성이 높기 때문에 위해도를 5배 높여 평가하였다. 섭취량, 연령, 건강상태, 그리고 민감도 등을 고려하여 일반적으로 50%를 감소시켜 평가하기 때문에 (Hass *et al.*, 1993) 본 연구에서도 50% 감소하여 평가하였다.

2) 시나리오 B

(1) 관개 후 1시간과 24시간이 지난 후 1회 노출시

미생물 위해성 평가

관개수를 직접 섭취할 가능성이 낮기 때문에 위해도를 10⁻⁴배 낮추었으며 현재 우리나라 작업자의 평균 연령이 고령화되었기 때문에 감염가능성을 2배 높여 평가하였다. 어린이의 경우는 감염가능성이 높기 때문에 5배 높여 평가하였다.

(2) 영농기간 동안 미생물 위해성 평가

벼의 영농기간은 약 4개월이나 실질적으로 작업자가 담수된 처리수에 노출되는 기간을 30일로 가정하고, 관개수를 섭취할 가능성을 10⁴배 낮추었으며 작업자의 건강상태가 양호하다고 가정하였다. 어린이를 대상으로 한 관개주변의 평가는 10일 동안 관개수에 노출된다고 가정하였으며 관개수를 섭취할 가능성을 10⁴배 낮추었으며 성인에 비해 감염가능성이 높기 때문에 위해도를 5배 높여 평가하였다. 섭취량 등을 고려하여 50%를 감소시켜 평가하였다.

Asano *et al.* (1992)에 의하면 골프장에서 골퍼가 골프 공이나 의복을 통해 접촉하는 과정에서 섭취할 수 있는

Table 2. 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 ⁻¹
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 microbial guidelines for treated wastewater use in agriculture (WHO, 2000).

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

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

병원성 미생물의 양을 0.001 L라고 가정하였다. 본 연구에 사용된 N₅₀와 a값은 음용수로 2 L를 섭취하였을 때 발생할 수 있는 위해도를 나타내므로 섭취량은 5×10³배 차이가 난다. 논에서의 작업은 이 경우보다 많이 섭취할 수 있기 때문에 해도를 시나리오 A에서는 10³배 낮추어 계산하였으며, 시나리오 B의 경우는 10⁴배 낮추어 계산하였다. 하지만, 일반적으로 골퍼에 비해 작업자나 주위의 어린이가 위생적으로 열악하기 때문에 A의 경우가 보다 합리적이라 판단된다.

결과 및 고찰

1. 관개용수의 수질

각 년도별로 관개용수로 이용된 용수의 평균농도는 Table 1과 같고, Table 2에는 국제적인 농업적 재이용수 수질기준으로 이용되고 있는 USEPA와 WHO의 수질기

준과 WWTPs의 수질을 요약하였다. 관개용수로 이용된 UV 소독수에서 미생물 외의 항목은 사전 연구를 통해 UV 소독전의 biofilter 유출수와 유사한 수준이었기 때문에 분석하지 않았다. Biofilter 처리수와 향후 관개용수로 이용될 가능성이 있는 WWTPs 유출수를 비교해 보면 2003년의 biofilter 처리수가 TC의 경우 2.30배, T-N은 2.44배, 그리고 T-P는 4배 정도 높은 상태였었고, 2004년 실험에 사용된 Biofilter 처리수는 WWTPs 유출수를 비교해 보면 전 항목에서 높은 농도를 나타내었다.

우리나라 하수처리장 방류수의 평균 농도와 비교해 볼 때, BOD와 SS 항목은 재이용수 수질기준을 충분히 만족시키지만 대장균 항목의 경우에는 보다 완화된 WHO 수질기준인 1,000FC100 mL보다 높은 약 4,000개 mL⁻¹ 수준으로 추가적인 처리가 요구된다. 우리나라 하수처리장에서 이용되고 있는 TC의 측정방법은 평판집락법이며, 일반적으로 최적확수법에 의한 MPN 100 mL⁻¹ 단위와 평판집락법에 의한 개 mL⁻¹ 단위사이의 상관관계는 1 MPN 100 mL⁻¹ ≃ 5~10개 mL⁻¹의 범위로 나타낸다 (Chung *et al.*, 2003).

2. 논에서의 *E. coli*의 농도변화

2003년 실험에서는 biofilter 유출수 (BE), stream (STR), UV disinfection dose of 6 mW · s cm⁻² (UV6), UV disinfection dose of 16 mW · s cm⁻² (UV16), 그리고 STR의 관개수를 이용하여 3반복의 실험포트에 관개한 후 24 시간동안 *E. coli*의 농도변화를 월별로 조사하였으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. 대부분의 영농활동은 관개를 한 후 비료와 제초제 살포, 이앙 등이 진행됨으로 하수처리수를 관개한 후 1일 동안의 *E. coli*의 농도를 모니터링하여 위험정도를 예측하기 위함이다. 5월과 6월의 경우 관개 후 지표미생물의 평균농도가 10²~10⁴ MPN 100 mL⁻¹의 범위를 유지하였으나 24시간 후에는 관개 후 1~2시간 때의 농도보다는 낮은 상태를 나타내었으며, 이는 관개 후 1~2일이 지난 후에 영농활동을 하는 것이 관개 직후보다 병원성 미생물에 의한 감염위험을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로, 지표성 미생물의 농도는 저질의 농도가 수체의 농도보다 월등히 높고, 저질 상층부 5 mm에 높게 형성되며 (Chapra, 1997), 강우에 의해 상층부의 지표미생물이 즉각적으로 수체의 농도에 반영될 정

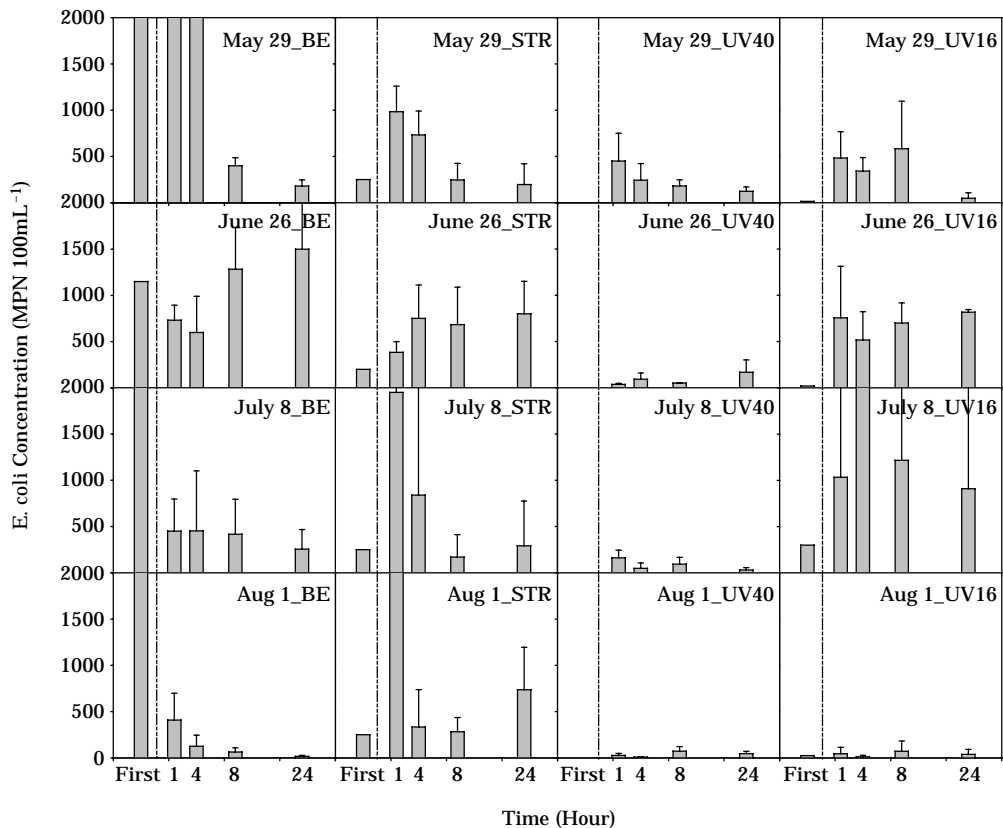


Fig. 1. Variation of *E. coli* concentrations during the first 24 hours after irrigation (Mean ± S.D.).

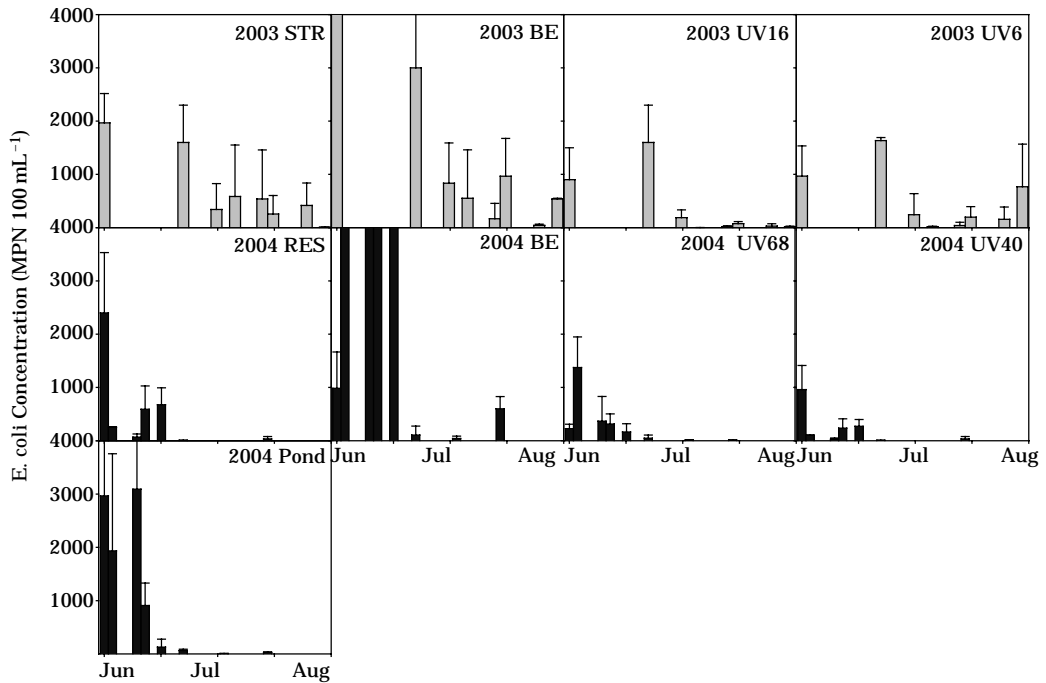


Fig. 2. Variation of *E. coli* concentrations during the rice growing period.

도로 민감한 상태를 유지하고 있기 때문에, 관개시 저질 교란으로 수체의 농도에 반영되어 초기 유입수 농도 차이에 관계없이 유사한 농도를 유지하였을 것으로 판단된다(Thomann and Mueller, 1987). 실제 논 의 경우에는 관개시 토양교란에 의한 영향은 작은 규모인 본 pilot 실험 보다는 적을 것으로 판단된다. 7월과 8월의 경우에는 5월과 6월을 비교하면 24시간 동안에 농도변화가 상대적으로 크게 나타났으며 관개 직후의 농도와 1일이 지난후의 농도가 상대적으로 낮게 측정되었으며, 실험포트별 농도차이가 크고 관개용수의 농도차이에 의한 영향도 관찰되었다.

2003년 실험은 영농기간동안 *E. coli*의 연속적인 농도 변화에 대해 알아보기 위하여 5월 31일~9월 18일까지 약 90일간, 2004년 실험은 5월 27일~7월 14일까지 약 70일간 *E. coli*의 농도를 조사하였으며 Fig. 2와 같다. 각 처리구별 지표미생물의 농도를 살펴보면 2003년 실험에서 하천수 관개인 STR과 BE의 처리구에서 UV6과 UV16의 처리구보다 상대적으로 높은 평균농도를 나타내었으며, 영농기간 동안 이러한 상태를 지속적으로 유지하였다. 2004년 실험에서는 2003년의 하수처리수보다 BE의 농도가 상대적으로 높았기 때문에 벼재배 시험구에서도 높은 농도의 *E. coli* 농도를 나타내었다. BE 유출수를 pond로 처리한 후 관개한 경우 벼재배 시험구의 *E.*

coli 농도가 낮은 수준이었다. 자연정화 방법인 pond는 *E. coli*의 저감효과가 큰 것으로 알려져 있으며 잘 설계된 pond를 이용하여 하수처리에 이용할 경우 미생물 위험을 크게 줄인다고 보고하였다(Yoon et al., 2003). UV 소독수를 관개한 경우는 2003년과 유사한 결과를 얻었으며 전체적으로 미생물의 농도가 높은 영농초기에도 낮은 농도를 나타내었다. 2년 동안의 실험 결과 영농기간 동안의 농도는 하수처리수인 BE의 경우가 가장 높은 농도를 나타내었으며, 일반 관개수인 2003년의 STR은 UV 소독 후 관개한 경우보다 높은 농도를 나타내었으며, 2004년 RES의 경우 UV 소독수와 유사한 수준이었다. 또한, 평균과 표준편차를 살펴보면 같은 실험조건에서 3반복의 처리구에서 표준편차가 평균보다 큰 것으로 나타났는데, 이는 관개용수의 지표미생물 농도가 유사해도 는 생태계의 조건에 따라 영농기간 동안 지표미생물의 농도변화 폭이 클 수 있음을 의미한다. 관개 후 저질이 교란되거나, 강우에 의한 희석효과, 그리고 장기간 태양에 의한 소독, 실험 포트의 생태변화 등 여러 조건에 따라 큰 농도변화가 나타난 것으로 판단된다.

3. 미생물 위해성 평가

본 연구의 위험 평가 방법은 각 처리구 별로 3반복씩 실시한 결과의 평균과 표준편차를 이용하여 Monte-

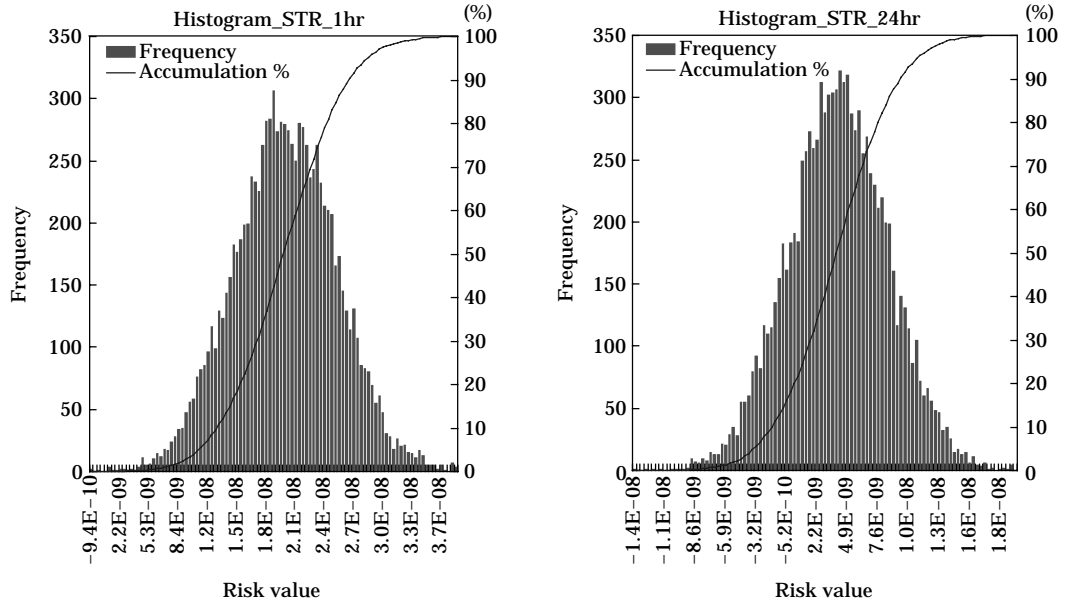


Fig. 3. Microbial risk assessment by Monte-Carlo analysis.

Table 3. Risk values of *E. coli* concentrations in 1 hr and 24 hr after irrigation ($\times 10^{-7}$).

Date	STR		UV40		UV16		BE	
	1 hr	24 hr	1 hr	24 hr	1 hr	24 hr	1 hr	24 hr
Scenario A (Farmer)								
May	2.86	1.11	1.88	0.40	1.90	0.29	29.08*	0.58
Jun.	1.14	2.75	2.27	2.22	3.31	1.73	2.00	5.88
Jul.	8.39	2.19	0.60	0.15	0.62	0.64	2.01	1.21
Aug.	6.69	2.99	0.12	0.17	0.31	0.25	1.77	0.07
Scenario A (Children)								
May	7.15	2.77	4.69	1.00	4.75	0.73	72.69*	1.45
Jun.	2.85	6.88	5.67	5.55	8.28	4.32	5.01	14.70*
Jul.	20.98*	5.47	1.50	0.36	1.56	1.60	5.04	3.02
Aug.	16.73*	7.46	0.31	0.43	0.78	0.63	4.42	0.17
Scenario B (Farmer)								
May	0.29	0.11	0.19	0.04	0.19	0.03	2.91	0.06
Jun.	0.11	0.28	0.23	0.22	0.33	0.17	0.20	0.59
Jul.	0.84	0.22	0.06	0.01	0.06	0.06	0.20	0.12
Aug.	0.67	0.30	0.01	0.02	0.03	0.03	0.18	0.01
Scenario B (Children)								
May	0.71	0.28	0.47	0.10	0.47	0.07	7.27	0.15
Jun.	0.28	0.69	0.57	0.56	0.83	0.43	0.50	1.47
Jul.	2.10	0.55	0.15	0.04	0.16	0.16	0.50	0.30
Aug.	1.67	0.75	0.03	0.04	0.08	0.06	0.44	0.02

*Risk value higher than 10^{-6}

Carlo Analysis (정규분포함수, n = 10,000)을 통해 유의수준 5%의 위험도 값을 선정하였으며 두개의 시나리오로

나누어 평가하였다. 관개 직후 높은 *E. coli* 농도를 나타내다가 24시간이 지난 후에 약 50% 미생물의 농도가 감

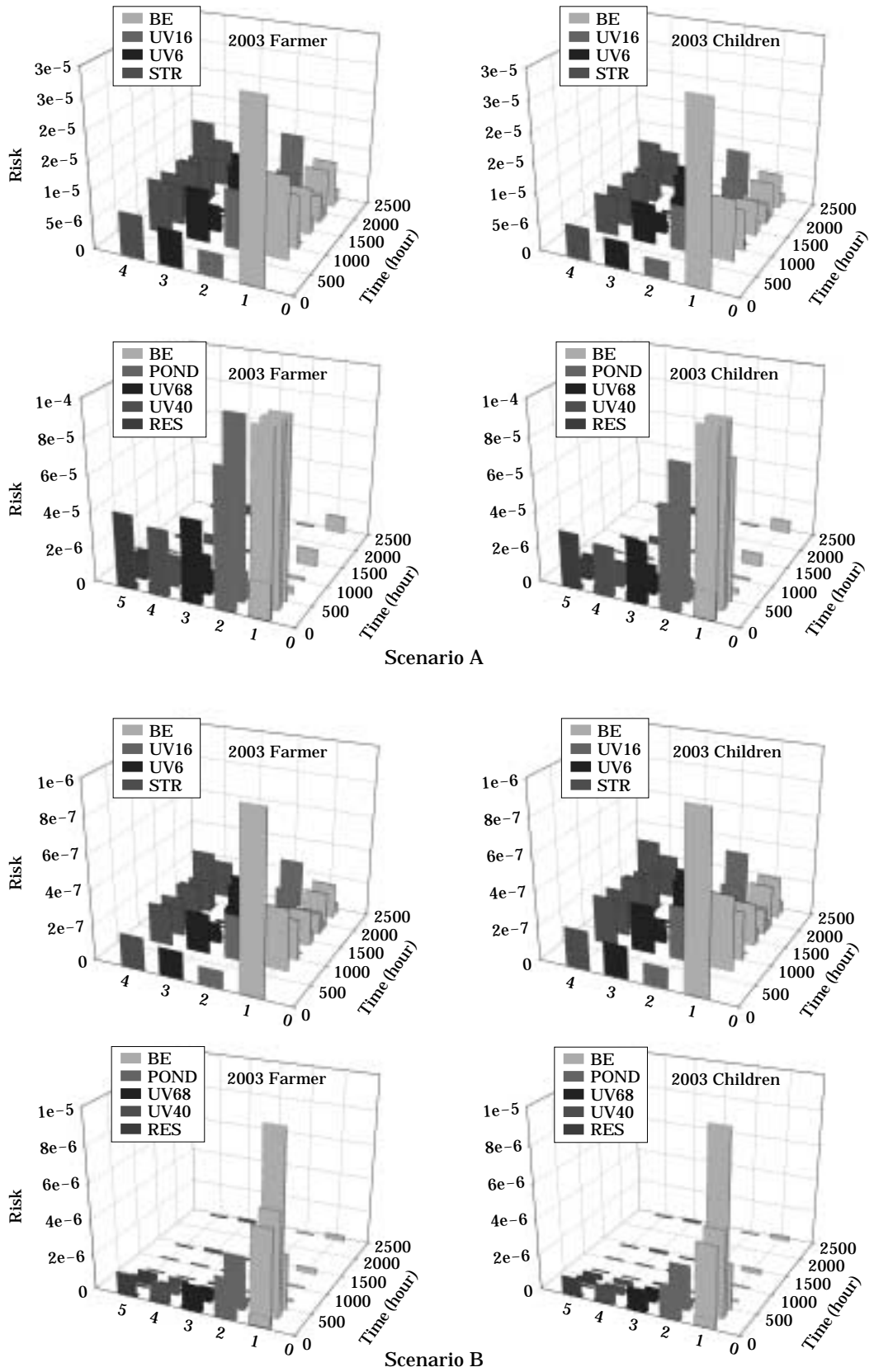


Fig. 4. Microbial risk value of wastewater reuse for paddy field irrigation.

소되는 것으로 조사되었기 때문에, 관개 후 1시간과 24시간 후의 *E. coli* 농도를 이용하여 작업자와 주변의 아이들에게 미치는 영향을 평가하였으며 그 결과는 Fig. 3 및 Table 3과 같다. Fig. 3은 Monte-Carlo Analysis의 결과이며, 하천수를 관개한 후 1시간과 24시간 후의 *E. coli* 농도를 이용한 결과로 유의수준 5%의 값을 이용하였다. 시나리오 A와 B 모두 BE의 경우에 가장 높은 위해도 값을 나타내었으며, 많은 용수가 필요한 5월의 경우에 위해도가 큰 것으로 나타났다. 시나리오 A는 관개 직후 10^{-6} 이상을 나타내었으나 어린이의 경우 BE의 6월을 제외하고는 10^{-6} 이하를 나타내었다. 시나리오 B의 경우에는 모든 위해도 값이 10^{-6} 이하를 나타내었다. STR의 경우 7월과 8월에 24시간 경과후 보다 1시간 후에 더 높은 위해도를 나타내었고, BE의 6월 결과는 24시간이 지난 후 더 높은 위해도를 나타내었다. USEPA (1992)에서는 1년 동안 노출되었을 경우 장내 질병에 관한 위해도 값이 10^{-4} 보다 작을 경우 안전한 것으로 판단하여 음용수로의 사용 적합 여부를 판정한다. 위해도 값이 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 은 자연계에 노출될 경우 질병의 이동이 가능한 수준으로 질병을 일으킬 가능성이 있는 수준으로 평가하고 있다. 모든 처리구에서 측정시기별로 차이는 있으나, 위해도 값이 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 으로 질병의 이동이 가능한 수준이었으며, 관개 직후보다는 24시간 경과 후에 위해도 값이 낮은 수준이었다.

Fig. 4는 영농기간 동안 측정된 농도를 이용하여 위해성 평가를 실시한 결과이다. 시기별로 위해성 평가 결과 영농초기인 5월 말부터 6월초에 높은 위해도 값을 나타내었으며, 이 시기는 많은 관개용수가 필요하고 대부분의 영농활동이 이루어지는 시기로 특별한 주의가 필요한 것으로 나타났다. 시나리오 A의 경우 영농기간 동안 위해도 값이 2003년은 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 범위이고 2004년 실험에서는 BE의 경우 위해도 값이 10^{-4} 이상을 나타내어 위험한 수준이었으며 나머지 실험구에서 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 의 범위를 나타내었고 시기별로 차이는 있으나 관개 초기에 높은 위해도 값을 나타내었다. 시나리오 B의 경우는 2003년 실험의 경우 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 범위이고 2004년 실험은 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ 의 값을 나타내었으며 시나리오 A와 같은 위험한 수준으로 평가되지는 않았다. 시기별로 차이는 보이지만 2003년 실험의 경우 BE의 경우 이양초기의 위해도가 높은 것으로 나타났으나 나머지 시기에는 낮은 위해도 값을 나타내었다. STR의 경우 영농기 중반부에 높은 값을 나타내기도 하였으나, *E. coli*의 농도 측정시 나타날 수 있는 오차범위 내에 있었다.

Table 4는 2003년과 2004년의 영농기간 동안 측정된

모든 *E. coli* 데이터를 이용하여 미생물 위해성 평가를 실시한 결과를 보여준다. 2003년도 모니터링 결과를 이용하여 위해성 평가를 실시한 결과 위해도 값이 $BE > STR > UV16 > UV6$ 의 순으로, 2004년도의 위해도 값은 $BE > POND > UV68 > RES > UV40$ 의 순이었다. 시나리오 A에서 2004년 biofilter 유출수를 관개한 BE의 경우 USEPA의 음용수 수질에 적합도를 평가하기 위한 위해도 값인 10^{-4} 보다 높게 나타나 위험한 수준으로 평가되었으며, 2003년의 BE의 경우는 10^{-5} 수준이었다. 다른 처리구에서는 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 작업자의 경우 영농기간 중 오랜기간 노출되기 때문에 주변의 어린이보다 높은 위해도 값을 나타내었다. Biofilter 유출수와 유사한 수질농도를 보이는 하수처리수를 직접 관개할 경우 위생문제의 개연성이 큰 것으로 나타났으며, UV나 Pond와 같은 추가 처리를 통해 관개할 경우 위생적인 안전성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

다른 미생물 위해성 평가 연구 결과를 살펴보면, Asano and Sakaji (1990)는 하수처리수를 관개한 채소를 섭취하였을 경우 장내바이러스에 감염될 확률이 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 범위였으며, Asano *et al.* (1992)에 의하면 세 가지 장내 바이러스(enteric virus)에 의한 위해성 평가 결과 장내 바이러스가 1개 $100 L^{-1}$ 인 재이용수를 관개한 채소를 섭취한 경우 위해도 값이 $10^{-6} \sim 10^{-11}$ 이고, 111개 $100 L^{-1}$ 를 관개한 채소의 섭취시 위해도 값이 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 이었다. Tanaka *et al.* (1993)에 의하면 2차 처리수를 추가처리 없이 관개할 경우 10^{-4} 이상의 위해도 값을 가지며, 골프 코스에 염소로 소독한 2차 처리수 관개시 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 의 위해도 값을 나타내고, 소독하지 않을 경우 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 로 높다고 보고하였다.

본 연구의 결과와 유사한 수준을 나타낸 결과도 있으

Table 4. Risks for the risk values whole data of *E. coli* during the study periods in 2003 and 2004 ($\times 10^{-5}$).

2003	Scenario A		Scenario B	
	Farmer	Children	Farmer	Children
BE	5.67	4.25	0.17	0.14
STR	6.85	5.14	0.21	0.17
UV16	2.38	1.79	0.07	0.06
UV6	1.66	1.25	0.05	0.04
2004				
BE	18.01	13.51	0.54	0.45
RES	3.12	2.34	0.09	0.08
UV68	1.27	0.95	0.04	0.03
UV40	1.07	0.80	0.03	0.03
POND	0.91	0.68	0.03	0.02

며 보다 위험한 수준을 나타낸 결과도 찾아 볼 수 있다. 위해성 평가는 문제형성화(Problem formation) 단계에서 가정(assumption)이 연구자 별로 달라 위해도 값에 차이가 있으며, 많은 실측 데이터를 통해 충분한 증거가 확보되면 좀더 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있다.

영농전체기간동안 *E. coli*의 평균과 표준편차를 이용하여 미생물 위해성을 평가한 결과, 시나리오 A에서는 biofilter 유출수를 처리하지 않고 관개할 경우 10^{-4} 의 높은 위해도 값을 나타내어 감염의 위험이 큰 것으로 나타났다. 나머지 처리구에서도 질병의 감염이나 이동이 가능한 수준으로 평가되었다. 하지만 biofilter 유출수를 UV 소독을 통해서 추가 처리하여 관개한 처리구의 미생물 위해성 평가 결과 일반적인 지표수 관개와 유사하거나 그 이하의 위해도 값을 나타내었다. 따라서 하수처리수를 직접 사용하기보다는 UV와 같은 추가 처리를 통해서 미생물 안정성을 확보한 후 관개하는 것이 보다 유리할 것으로 판단되며, 하수처리수 내에 존재할 수 있는 병원성 미생물에 의한 주변 환경의 오염도 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

하수처리수는 이용할 수 있는 소중한 수자원이지만, 적절한 정책과 안전하고 효율적인 관리 없이는 이용할 수 없다. 본 연구에서는 국제적인 농업적 재이용수 수질기준을 고찰하고 하수처리수를 논에 관개한 후 *E. coli*의 농도를 모니터링 하였으며, Beta-Poisson 모형을 이용하여 두개의 시나리오를 바탕으로 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 본 연구의 모니터링 결과 biofilter 유출수를 추가 처리 없이 관개한 처리구에서 높은 *E. coli* 농도를 나타내었으며, 처리구와 모니터링 시기별로 큰 차이를 보였는데 이는 관개나 기타 영농작업시 저질이 교란되어 수체의 농도에 반영되고 처리구별 논생태 차이가 영향을 미친 것으로 판단된다. 하수처리수를 관개할 경우 Beta-Poisson 모형을 이용하여 직접 영농활동에 참여하는 농부와 주변의 아이들에 미치는 위해성에 대해 평가하였다. 미생물 위해성 평가 결과 관개 직후보다 관개 후 24시간이 경과되면 위해도 값이 감소하는 것으로 나타났으며, 관개 후 1~2일이 경과한 후에 작업에 임하는 것이 미생물 위험이 적은 것으로 나타났다. 2003년과 2004년 모두 관개 초기인 5월말과 6월초에 높은 위해도 값을 나타내었다. 본 연구에서 실시한 위해성 평가는 논에 관한 역학자료가 충분하지 않았으며, *E. coli*를 음용수로 섭취

할 경우 발생할 수 있는 질병에 대한 평가 모형을 이용하였기 때문에 하수처리수의 논 관개시 위험을 평가하는데 한계를 갖고 있다. 하지만, 하수처리수를 관개용수로 사용할 경우 병원성 세균에 의한 감염의 개연성을 보여 주었으며 하수처리수를 재이용하고자 할 때 추가적인 처리 등의 적절한 관리가 필요함을 시사한다.

사 사

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

인 용 문 헌

- APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Ed. APHA, Washington, DC.
- Asano, T., L.Y.C. Leong, M.G. Rigby and R.H. Sakaji. 1992. Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data. *Water Sci. Technol.* **26**: 1513-1524.
- Asano, T. and R.H. Sakaji. 1990. Virus risk analysis in wastewater reclamation and reuse. In: Chemical water and wastewater treatment. Hahn, H.H. and Klute, R. (Eds) Spinger-Verlag, Berlin Heidelberg, pp 483-496.
- Ayres, R.M., R. Stott, D.L. Lee, D.D. Mara and S.A. Silva. 1992. Contamination of lettuces with nematode eggs by spray irrigation with treated and untreated wastewater. *Water Sci. Technol.* **26**: 1615-1623.
- Hass, C.N., J.B. Rose, C. Gerba and S. Regli. 1993. Risk assessment of virus in drinking water. *Risk Analysis* **13**: 545-552.
- Hass, C.N., J.B. Rose and C. Gerba. 1999. Quantitative microbial risk assessment. Wiley, New York.
- Bastos, R.K.X. and D.D. Mara. 1995. The bacteriological quality of salad crops drip and furrow irrigated with waste stabilization pond effluent: an evaluation of the WHO guidelines. *Water Sci. Technol.* **31**: 425-430.
- Blumenthal, U.J., D.D. Mara, R.M. Ayres, E. Cifuentes, A. Peasey, R. Stott, D.L. Lee and Ruiz-Palacios, G. 1996. Evaluation of the WHO nematode egg guidelines for restricted and unrestricted irrigation. *Water Sci. Technol.* **33**: 277-283.
- Camann, D.E. and B.E. Moore. 1988. Viral infections based on clinical sampling at a spray irrigation site. In:

- Implementing water reuse. AWWA Research Foundation 847.
- Camann, D.E., M.N. Graham, H.J. Guentzel, H.J. Harding, T.L. Kimball, B.E. Moore, R.L. Northrop, N.L. Altman, O.R.B. Harrist, A.H. Holguin, R.L. Mason, P.C. Becker and C.A. Sorber. 1986. Project Summary. The Lubbock land treatment system research and demonstration project: Volume IV. Lubbock Infection Surveillance Study (LISS) USEPA/600/S2-86/027d. United States Environmental Protection Agency, North Carolina.
- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill. New-York.
- Chung, Q.Y. 2003. A study on the coliforms removal methods at wastewater treatment plants. Master's Program in Department of Agricultural resources and Environmental Engineering Graduate School of Agriculture & Animal Science Konkuk University.
- Cifuentes, E. 1998. The epidemiology of enteric infections in agricultural communities exposed to wastewater irrigation: perspectives for risk control. *International J. Environ. Sci. Health Res.* **8**: 203-213.
- Kwun, S.K., C.G. Yoon and I.M. Chung. 2001. Feasibility study of treated sewage irrigation on paddy rice culture. *J. Envir. Sci. Health A* **36**: 807-818.
- 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. *J. of KSWQ*. **45**: 94-106.
- Ministry of Environment (M.O.E.). 2003. The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant.
- Marples, R.R. and A.G. Towers. 1979. A laboratory model for the investigation of contact transfer of microorganisms. *J. Hygiene* **82**:237-248.
- 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.
- Shuval, H., Y. Lampert and B. Fattal. 1997. Development of a risk assessment approach for evaluation wastewater reuse standards for agriculture. *Water Sci. Technol.* **35**: 15-20.
- Tanaka, H., T. Asano and G. Tchobanoglous. 1993. Estimating the reliability of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. Water Environment Federation 66th Annual Conference and Exposition, Anaheim, California, USA. October 3-7, 1993.
- Tanaka, H., T. Asano, E.D. Schroeder and G. Tchobanoglous. 1998. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. *Water Envir. Res.* **70**: 39-51.
- Tchobanoglous, G., F. Loge, J. Darby and M. Devries. 1996. UV disin: Comparison of probabilistic and deterministic design approaches. *Water Sci. Technol.* **33**: 251-260.
- Thomann, R.V. and J.A. Mueller. 1987. Principles of Surface water quality modeling and control. Harper & Row, New York.
- USEPA. 1992. Manual, Guidelines for water reuse. USEPA/625/R-92/004. US Agency international development. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2004.
- WHO. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme-Environment and Health.
- 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. *J. of KSAE*. **45**: 194-206.

(Manuscript received 24 March 2005,
Revision accepted 6 May 2005)