

하수의 농업적 재이용에 따른 논 담수 내 미생물 위해성 평가

이한필 · 윤춘경[†] · 정광욱* · 손장원

건국대학교
*한국수계환경연구소

Microbial Risk Assessment in Reclaimed Wastewater Irrigation on a Paddy Field

Han-Pil Rhee · Chun-Gyeong Yoon[†] · Kwang-Wook Jung* · Jang-Won Son

Department of Environmental Science, Konkuk University

*Korea Water Environment Research Institute (KWERI)

(Received 6 July 2008, Revised 14 October 2008, Accepted 29 October 2008)

Abstract

Water stress has become a major concern in agriculture. Korea suffers from limited agricultural water supply, and wastewater reuse has been recommended as an alternative solution. A study was performed to examine the effects of microorganism concentration in the ponded-water of a paddy rice field with reclaimed-water irrigation for evaluating the microbial risk to farmers and neighborhood children. Most epidemiological studies were performed based on an upland field, and they may not directly applicable to paddy fields. Beta-Poisson model was used to estimate the microbial risk of pathogen ingestion. Their risk value increased significantly high level after irrigation and precipitation. It implies that agricultural activities such as plowing, and fertilizing, and precipitation need be practiced a few days after irrigation considering health risks. The results about field application of the microbial risk assessment using *E. coli* showed difference according to monitoring time and treatment plot. Result of the microbial risk assessment showed that risk values of ground-water and reclaimed secondary wastewater irrigation were lower than directly use of wastewater treatment plants' effluent. This paper should be viewed as a first step in the application of quantitative microbial risk assessment of *E. coli* to wastewater reuse in a paddy rice farming.

keywords : *E. coli*, Microbial risk, Paddy field, Wastewater reuse, Water quality

1. 서론

하수처리수의 재이용은 물 부족에 따른 대체수자원으로서 많은 나라에서 관심을 갖고 있으며, 특히 농업용수로서의 재이용은 이미 전 세계 120여 개국에서 이루어지고 있다(US EPA, 1992). 환경부(2000)에 따르면 정부는 2010년까지 하수처리장 2차 처리수의 재이용량을 10%를 상회하는 수준으로 확대하겠다는 방침을 발표하였으며, 우리나라의 경우 총 수자원 이용량의 48%를 차지하고 있는 농업용수를 하수 재이용수로 이용할 경우 활용가능성이 더욱 높을 것으로 판단된다(건설교통부, 2001).

하수처리수의 농업적 재이용은 대체수자원 확보 및 효율 증대라는 측면 뿐 아니라, 수계에 방류되었을 때 발생 가능한 수질문제를 경감시킬 수 있는 오염부하 저감측면에서도 큰 이점을 가지게 한다(Jung et al., 2005a, 2005b; Yoon et al., 2003a, 2003b). 그러나 하수처리수를 농업용수로 사용할 경우 그 수질은 사용자인 농민은 물론이고, 공공보건에 대한 위험으로부터 안전성이 보장되어야 할 것이다. 그

에 따라 US EPA(1992), WHO(2002)등은 하수의 재이용에 관한 수질기준을 권고하고 있고, 국제적으로도 하수재이용에 따른 병원성 미생물에 대한 역학조사와 위해성평가 사례가 보고되고 있다. Peasey 등(2000)은 스프링클러 관개 시, $10^3 \sim 10^4$ FC 100 mL⁻¹의 농도로 관개할 경우 질병감염의 가능성이 낮다고 보고하였으나, 멕시코에서는 103 ~ 104 FC 100 mL⁻¹의 농도로 관개할 경우 5 ~ 14세 어린이의 설사(Diarrhoea) 등 장내 질병(Enteric disease)의 발생 확률이 증가하였다고 보고하고 있으며, 관개방식, 섭취 방법, 그리고 노출대상 등에 대한 제한적인 연구결과가 보고되고 있다. 위생학적으로 스프링클러 관개가 미생물 감염을 유발시킬 가능성이 가장 높으며, 관개수의 기생충 알이 농산물에 부착되어 섭취되면 감염될 수 있다고 보고되었다(Ayres et al., 1992). 한편, Bastos and Mara(1995)에 의하면, 논외 관개방식과 가장 흡사한 Flood/Furrow 관개의 경우 어린이의 설사 발병률이 증가한다고 보고되고 있다.

하수를 농업용수로 재이용하기 위한 미생물 위해성 평가는 미국(Asano et al., 1992; Dowd et al., 2000; Tanaka et al., 1998), 이스라엘(Shuval et al., 1997) 그리고 호주(Gardner et al., 1998; Petterson et al., 2001a, 2001b; Storey and Ashbolt, 2002) 등에서 적용되고 있다. 그러나 대부분의

[†] To whom correspondence should be addressed.
chunyeon@konkuk.ac.kr

국제적인 역학조사는 발관개 위주로 수행되었으며, 농업용수의 이용에 있어서 논농사가 큰 비중을 차지하고 있는 국내에 직접 적용하기에는 한계를 갖고 있다. 국내의 경우 하수처리수 재이용수질 권고기준에 따르면, 하수처리수를 농업용수로 이용 시 총대장균군에 대하여 $200 \text{ TC } 100 \text{ mL}^{-1}$ 이하로 제시하고 있으나 총대장균군은 일반 자연계에서 쉽게 접할 수 있는 것으로서 병원성 미생물에 대한 지표로 이용하기에는 무리가 있다. 또한 하수처리수를 관개용수로서 재이용할 경우 발생할 수 있는 질병에 대한 위해성 평가 등을 통한 역학조사가 부족한 상황에서 제안한 상태이며, 지속적 연구를 통한 보완이 필요하다(Jung et al., 2005a).

일반적으로 짙은 정미와 같은 유통과정을 거치며, 대부분 끓는 물로 조리하여 섭취하므로 병원성 세균의 직접 섭취에 의한 감염 가능성은 낮으나, 재이용수가 논농사에 이용될 경우 일정기간 저류된 상태를 유지하기 때문에 하수처리수를 이용할 경우 그에 따른 주변 위생문제 및 작업자에 대한 안전성 문제가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 하수재이용 시범사업지구의 시험논에 지하수, 하수처리장 방류 하천수, 그리고 재처리수를 관개하고 *E. coli* 농도를 이용하여 장내 질병에 대한 미생물 위해성 평가를 실시함으로써 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 발생할 수 있는 보건·위생적인 측면에 대한 안전성을 검토하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상지역 및 실험방법

경기도 화성시 병점읍에 조성되어있는 하수재이용 시범사업지구의 시험 논을 대상지역으로 이용하였으며, 시험 논은 지하수(대조군), 하수처리장 방류 하천수, 재처리수의 관개수 종류에 따라 3×4 Randomized Block Design을 이용하여 배치되어 있다. 본 사업지구는 수원하수종말처리장의 방류수를 주요 수원공으로 하고 있는 한국농촌공사 경기도본부 수원지사 관할의 병점양수장의 공급시스템에 기 개발된 농촌용수 재이용 기술을 이용한 하수처리수 재이용 공급시설이 설치되어 있다. 일 처리유량 8,000 ton 규모로서 부유물질 제거 후 biofilter를 이용한 여과와 UV 소독을 거쳐 경작지로 공급되고, 소독설비의 자외선 조사량은 30 mJ/cm^2 로서 biosimetry 형태로 설치되어 있다. 본 사업지구 주변의 많은 농경지에서 수원하수종말처리장의 방류수가 유량의 큰 비중을 차지하는 하천수를 관개수원으로 이용되고 있다.

지표 대장균군의 농도 분석은 최적확수시험법(MPN)을 이용하였으며, 공정시험법에 따라 총대장균군(Total coliform), 분원성대장균군(Fecal coliform), *E. coli* 항목에 대하여 확정시험까지 실시하였다. 접종은 12개의 시험논에 대하여 각 시료당 3단계로 희석하고 5×5 개의 시험관에 10, 1, 0.1, 0.01, 0.001 mL로써 각 5개씩 5단계 접종한 후, 48 ± 3 시간 배양하여 인접한 3단계의 15개 시험관을 취해 양성과 음성을 판정하였다.

모니터링은 영농기간 동안 2007년 5월 17일로부터 9월 6일까지 1~2주 간격으로 총 13회 모니터링 하였다.

2.2. 미생물 위해성 평가

위해성 평가(Risk Assessment)는 개인이나 집단이 유해상황에 노출되었을 때 발생할 수 있는 영향의 양과 정도를 추정하는 것이다. 미생물 위해성평가(Quantitative Microbial Risk Assessment)는 음용수에 대한 수질기준제정에 필요한 과학적 기반 조성을 목적으로 US EPA가 주축이 되어 시작되었으며, 유해화학물질의 위해성 평가방법을 중심으로 발전되었다(Macler and Regil, 1993). 미생물 위해성 평가는 병역학(epidemiology)의 결과를 기초로 위험성 확인(Hazard Identification), 용량-반응 평가(Dose-response Assessment)와 노출평가(Exposure Assessment)를 거쳐 위해도 결정(Risk Characterization)의 과정을 통해 이루어진다(이건형, 2001; An et al., 2007; Fewtrell and Bartram, 2001; Jung et al., 2005a; Yoon et al., 2006). 또한, 기존의 방법을 수정한 미생물 위해성 평가의 구조가 소개되고 있으며, Rotavirus에 대한 연구사례로서 이용된 바 있다(Fewtrell and Bartram, 2001; Haas et al., 1999; ILSI, 2001).

2.2.1. 위험성 확인(Hazard Identification)

일반적으로 총대장균군은 동물의 장에 서식하는 것 외에 자연적으로 식물 및 토양에도 존재하는 것으로서 오락용수나 재이용수의 수질기준에는 적합하지 않은 항목이다. 그러나, 분원성대장균군(Fecal coliform; 분변성대장균군)은 분변에 의한 오염을 대표하는 항목으로 오락용수나 재이용수 등의 기준으로 널리 사용되고 있다. 또, *E. coli* (*Escherichia coli*)는 분원성대장균군의 한 종으로서 인간과 온혈동물의 분뇨에서만 나타나며, 수인성질병과 더 밀접한 관계가 있어 많은 연구에서 분원성대장균군을 대체할 수 있는 항목으로 적극 추천하고 있다(Jung et al., 2004; Yoon et al., 2003c). 또한 Hass 등(1999)은 *E. coli* 농도를 이용한 미생물 위해성 평가 방법을 소개하고 있다. 보다 정확한 미생물 위해성 평가를 위하여 대상지역에 존재하는 검출 가능한 위해 미생물을 모두 검출하여 적용하는 것이 적절하지만, 시간적·경제적 측면에서 불리하며 모든 위해미생물이 검출 가능한 것은 아니다. 그러므로 본 연구에서는 병원성 미생물에 대한 지표로서 논 담수 내 *E. coli* 농도를 이용하였으며, 영농작업의 특성 상 관개수보다는 관개 후 담수에서 노출 가능성이 더 높다고 판단되었기 때문이다.

2.2.2. 노출평가(Exposure Assessment)

노출평가는 인간이 환경물질에 노출되는 강도, 빈도, 기간 등을 측정하거나 평가하는 과정으로, 오염 물질에 대한 노출은 호흡이나 물, 음식물의 흡입, 또는 피부를 통하여 발생할 수 있다(이건형, 2001). 본 연구에서는 장내질병에 대하여 관개수의 차이에 따른 미생물 위해성의 비교평가를 목표로 하고 있기 때문에 노출경로는 경구 복용으로 한정하였다.

영농기간 동안 하수처리수를 관개하였을 경우, 작업자인 농민과 인근지역 어린이에 대하여 각 노출 시나리오를 설정하여 미생물 위해성 평가를 실시하였다. 정하우 등(1999)에 의하면 벼는 이앙 후 70~90일경에 출수하고 이앙으로부터 낙수까지의 기간이 약 100~110일에 달하는 것으로 소개하고 있으며, 영농 작업자가 담수상태에서 작업하는 기간은 이보다 짧다. 논은 담수기간으로부터 영농작업자가 작업에 임할 수 있는 기간은 약 100일로 산정하여 지속적으로 노출된다고 가정하였고, 인근지역에 거주하는 어린이의 경우 관개기간 동안 지속적으로 노출되지 않으며 직접 노출의 가능성이 영농작업자에 비하여 낮기 때문에 30일간 노출되는 것으로 가정하였다(An et al., 2007; Jung et al., 2005a; Yoon et al., 2006).

Asano 등(1992)은 하수를 재처리하여 골프장에 관개하였을 경우 골프채, 골프공, 그리고 의복 등을 통한 섭취 가능량을 1 mL day⁻¹로 가정하였다. 이를 참고할 때 논 관개용수 역시 직접 섭취하지 않으나, 농민과 인근지역 어린이는 골퍼에 비하여 영농활동 중이나 주변에서 담수된 관개수와 직접 접촉할 수 있으며, 위생적으로 열악한 것으로 판단하여 일 섭취량 2 mL day⁻¹로 가정하였다.

2.2.3. 용량-반응 평가(Dose-response Assessment)

평가모형(Quantitative Microbial Risk Assessment model)으로서 Beta-Poisson Dose-response 모형을 이용하여 감염가능성(Assessment of Infection Probability, P_I)을 적용하였다. 이 모형은 음용수의 세균성 미생물에 의한 감염을 평가하기 위하여 개발된 모형으로, 일정농도의 미생물을 섭취할 경우 발생할 수 있는 위험을 평가하는 경험 모형이며, 식 (1)과 같다.

$$P_I = 1 - [1 + \frac{d}{N_{50}}(2^{1/\alpha} - 1)]^{-\alpha} \tag{1}$$

여기서, P_I 는 음용수에서 병원성 미생물을 섭취하였을 경우 발생할 수 있는 위험도이고, d 는 미생물의 농도, N_{50} 는 50%가 감염 될 수 있는 농도이고, α 값은 N/N_{50} 와 P_I 의 비로서, 용량-반응 곡선의 기울기를 나타낸다. 본 연구에서는 *E. coli*에 대한 best-fit parameter로서 Haas 등(1999)이 제시한 $N_{50} = 8.6 \times 10^7$ 과 $\alpha = 0.1778$ 을 사용하였다.

병원성 미생물에 감염되었을 경우 개인의 상태에 따라 질병으로 발전하지 않을 수도 있으며, 이는 개인적인 면역성, 건강상태 등의 특성에 따라 다르다. 따라서 발병가능성(Probability of Morbidity, $P_{D,I}$)을 고려하여 식 (2)와 같이 계산한다.

$$P_D = P_{D,I} \times P_I \tag{2}$$

P_D 는 감염된 사람이 질병으로 발전하는 위험도이고, $P_{D,I}$ 는 질병이 발생할 가능성이다. 질병이 발생할 가능성은 미생물의 종류나 개인에 따라서 다르고, 환경적인 영향을 받

으므로 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).

국내 농업 종사자 평균연령의 고령화에 따라 감염가능성을 일반인에 비하여 2배 높게 설정하여 평가하였다(Jung et al., 2005a). 한편, Nwachukul and Gerb(2004)에 의하면 19세 미만 청소년 및 어린이에 대한 미생물 위해성 평가 결과, 신경·면역·소화기 계통이 발달 중인 시기로서 감염위험성이 성인에 비하여 크다고 보고되고 있다. 또, 이스라엘에서는 부분적으로 처리된 하수를 스프링클러 관개한 경우 0~4세 아이들의 장내 질병 발생률이 성인에 비하여 2배 높다고 보고하였고(Fattal et al., 1986), 담수 관개 시 4~5 배 높다고 보고하였다(Camann and Moore, 1998). 따라서 인근지역에 거주하는 어린이의 경우 감염가능성이 일반인에 비하여 5배 높은 것으로 설정하여 평가하였다.

2.2.4. 위험도 결정(Risk Characterization)

위해성 평가과정의 마지막 단계는 위험을 정량화하는 것으로서, 특정 노출상태에서 인체 영향에 대한 확률을 산출하기 위해 노출평가와 용량-반응 평가를 통합하며, 양적인 위험은 적절한 매체와 경로로 계산된다(이건형, 2001).

Burmaster and Anderson(1994)과 Finkel(1990)에 따르면 위험도 결정의 과정은 용량-반응과 노출에 대한 정보의 결합을 통하여 이루어지며, Monte-Carlo Analysis의 적용이 위험도 산출의 부정확성(imprecision) 및 불확실성(Uncertainty)에 대하여 중요한 정보를 제공할 수 있다고 설명하고 있다. 본 연구에서는 Monte-Carlo analysis의 적용에 있어서 $n=10,000$ 으로 실시하였으며, 95% 신뢰구간에서 평가함으로써 불확실성 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. *E. coli* 농도 분석

병점 시험지구의 *E. coli* 농도는 2007년 5월 17일부터 9월 6일까지 모니터링 하였으며, 3 × 4 randomized block design으로 배치하여 지하수, 하수처리장 방류 하천수, 재처리수의 3개 관개구 각 4개 논으로부터 담수 시료를 취하여 분석하였다. Fig. 1은 시험 논으로부터의 *E. coli* 농도 분석결과를 나타낸 것이다.

대장균 농도는 같은 처리수를 관개한 4개의 같은 처리구 간에도 큰 차이를 보였는데, Jung 등(2005a)에 의하면 강우나 토양 퇴적층의 교란으로 인한 재 부유 정도 차이에 의하여 다른 배경농도를 가질 수 있다고 보고하고 있으며, 본 연구에서도 같은 관개용수를 이용하여 관개하여도 퇴적층의 교란정도, 배경농도 등에 따라 많은 차이를 나타내었다. 특히, 영농초기 실시된 모니터링에서 비교적 높은 결과를 보였으며, 이것은 시료채취 당시 관개 및 경운, 이앙, 시비 등의 작업에 의하여 토양 퇴적층의 교란이 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 같은 처리구에서 분석된 결과

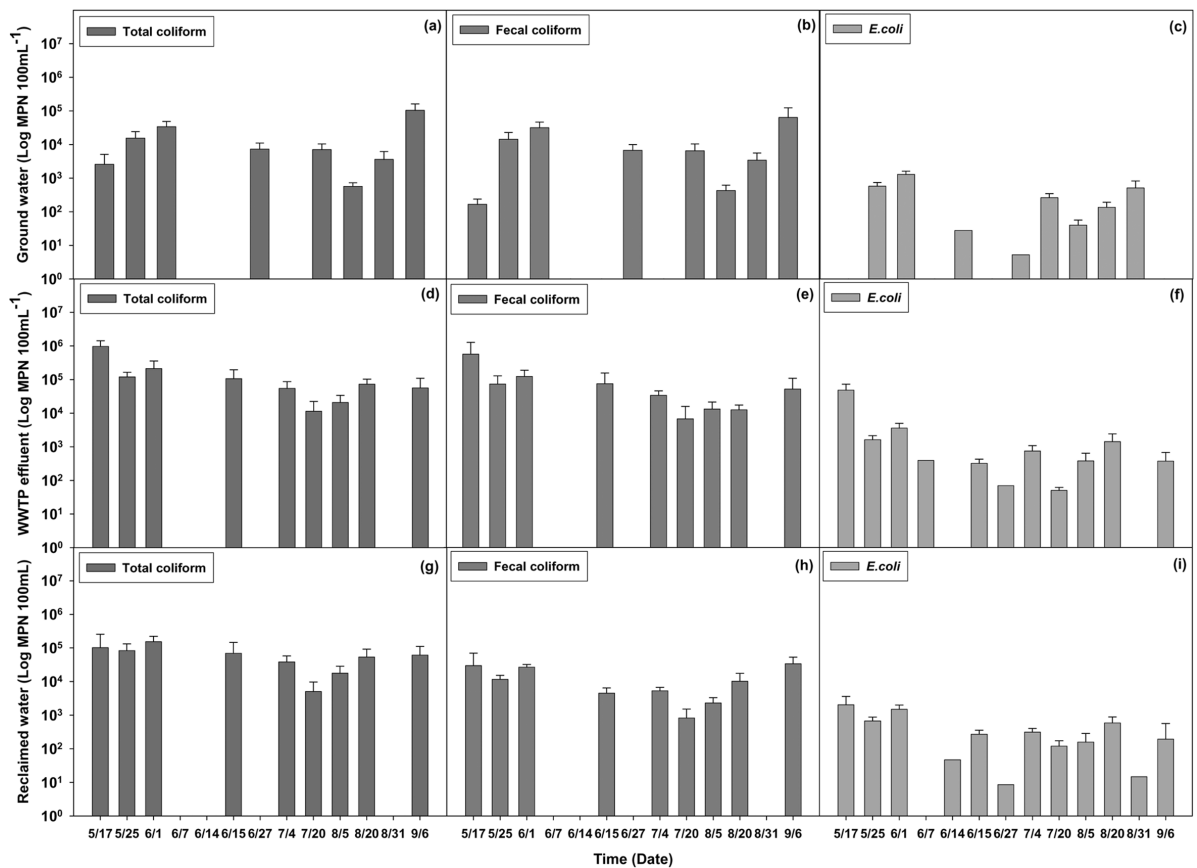


Fig. 1. Microorganism concentration in paddy field irrigated with each treated water. (a)~(c) groundwater irrigation, (d)~(f) WWTP effluent irrigation, (g)~(i) reclaimed water irrigation

역시 영농기간 동안 농도의 변화폭이 컸으며, 본 시험논은 오랜 기간 하수처리수의 관개 실험에 이용된 시험구로서 대장균 농도는 관개수의 수준뿐만 아니라 토양 내의 배경 농도에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 그러나 영농활동 시, 논 안에서의 작업은 반드시 토양 교란이 뒤따르기 때문에 위해성 분석에 있어서 다른 시기보다 높은 농도를 보인 영농초기와 강우 직후 모니터링 자료를 제외하지 않고 이용하였다. 영농기간 동안의 분석에 의하면 5월부터 6월 초에 가장 높은 결과를 보였으며, 이후 8월 중순에 이르기까지 비교적 낮은 농도로 나타났다. 이는 영농초기 영농작업 및 관개가 집중적으로 이루어지며, 이후에는 대부분의 용수를 강우에 의존하기 때문에 강우에 의한 희석효과 등에 의한 농도 감소로 판단된다.

3.2. 미생물 위해성 평가

관개수에 따른 각 처리구 별로 평균과 표준편차를 이용하여 Monte-Carlo analysis(정규분포, n=10,000)를 실시한 후 음의 값을 배제하여 유의수준 95%에서 위해도 값을 선정하였으며, Fig. 2는 영농기간 내 처리구별 평균 위해도 산출 과정에서 실시한 Monte-Carlo analysis 결과를 나타낸 것이다.

총 관개기간에 대한 위해성평가를 실시한 결과, 농민의 경우 하수처리장 방류 하천수를 관개수로 직접 이용한 논

담수에서의 위해도 값은 4.43×10^{-3} 으로서 지하수를 이용한 논(1.93×10^{-4})에 비하여 20배 이상 높은 수준의 위해도 값을 나타내었다. 반면, 재처리수를 이용한 논(2.91×10^{-4})은 지하수와 그 위해도 수준에 있어서 큰 차이를 보이지 않았다(Table 1). 주변지역 어린이에 대한 미생물 위해성평가 결과 역시 같은 경향을 보이고 있으나 농민에 비하여 노출기간이 짧기 때문에 위해도 값은 상대적으로 낮게 평가되었다.

USEPA는 장내 질병에 관한 위해도 값이 1년 동안 10^{-4} 이하인 경우 안전하다고 보고하였다(Haas et al., 1993). 한편, 하수처리장 방류 하천수를 관개하였을 때 농민과 어린이의 위해도 값은 10^{-4} 보다 크게 나타났는데, 이 값은 음용시 감염이 일어날 수 있는 수준(Haas et al., 1993)으로 하수처리장 방류수를 직접 재이용할 경우 작업자나 주변 주민에 대하여 감염의 원인이므로 작용할 가능성이 크다.

Fig. 3은 영농기간 동안 시험논 담수 내 E. coli 농도의 월 평균 및 표준편차를 이용하여 위해도 값을 산출한 결과이다. 시기별로는 영농초기인 5월 중순으로부터 6월 초에 높은 위해도 값을 나타내었으며, 이 시기는 관개가 집중되고 대부분의 영농활동이 이루어지는 시기로서 영농작업 시 각별한 주의가 필요한 것으로 판단된다. 선행연구에 의하면, 태양빛이 강한 조건에 노출되었을 때 담수 내 대장균은 3시간 이내 급격히 감소하며, 우천으로 인하여 태양광

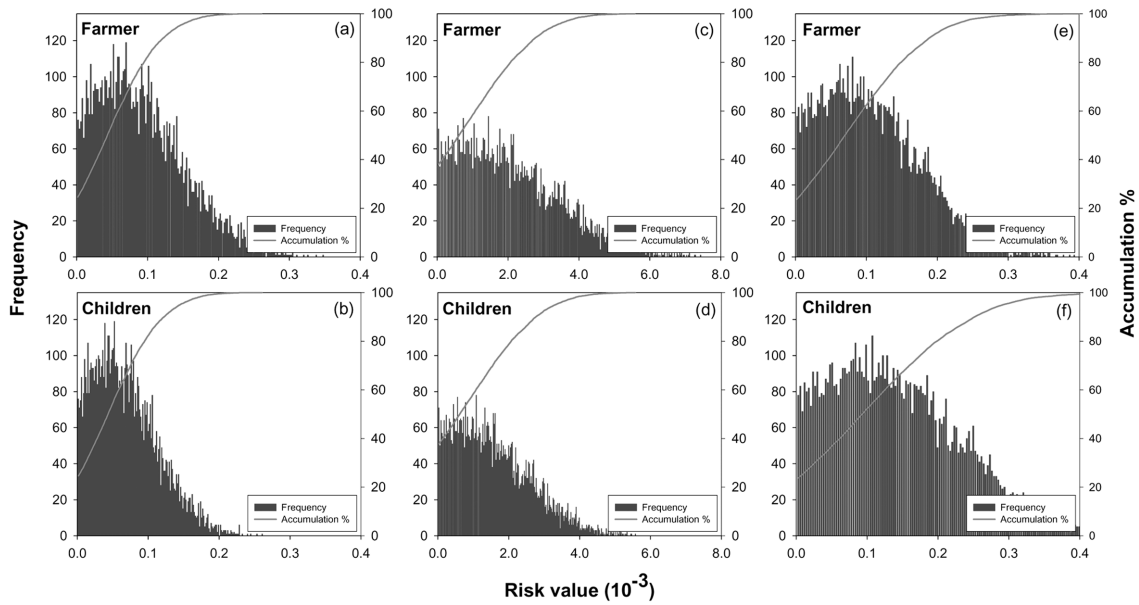


Fig. 2. Microbial risk assessment by Monte-Carlo analysis; (a)~(b) groundwater irrigation, (c)~(d) WWTP effluent irrigation, (e)~(f) reclaimed water irrigation.

Table 1. Monthly and annual risk values of cultivation period using *E. coli* concentration

	Farmer			Children			
	Ground water	WWTP effluent	Reclaimed water	Ground water	WWTP effluent	Reclaimed water	
Monthly risk	May.	3.43×10^{-5}	3.16×10^{-3}	1.71×10^{-4}	2.86×10^{-5}	2.64×10^{-3}	1.43×10^{-4}
	Jun.	8.32×10^{-5}	2.01×10^{-4}	8.43×10^{-5}	6.93×10^{-5}	1.67×10^{-4}	7.03×10^{-5}
	Jul.	2.84×10^{-5}	7.20×10^{-5}	2.62×10^{-5}	2.37×10^{-5}	6.00×10^{-5}	2.18×10^{-5}
	Aug.	3.88×10^{-5}	1.06×10^{-4}	4.47×10^{-5}	3.23×10^{-5}	8.81×10^{-5}	3.73×10^{-5}
	Sep.	N.D.	2.21×10^{-5}	1.16×10^{-5}	N.D.	1.84×10^{-5}	9.68×10^{-5}
Total risk	1.93×10^{-4}	4.43×10^{-3}	2.91×10^{-4}	1.44×10^{-4}	3.32×10^{-3}	2.18×10^{-4}	

WWTP : Waste Water Treatment Plant
 N.D. : Non Detected

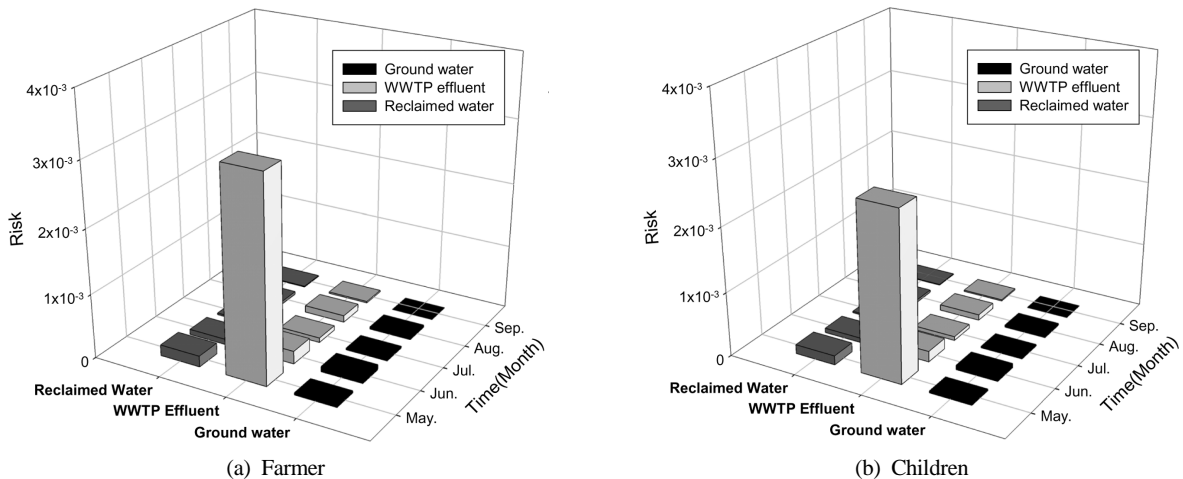


Fig. 3. Variation of risk values by monthly average *E. coli* concentration.

에 의한 소독효과를 배제한 경우에도 24시간 이내 대장균 농도의 확인한 감소가 확인되었다고 보고하였다(Jung et al., 2005b). 하수처리수를 논에 관개하였을 때 관개 후 24시간 경과 시 미생물에 의한 위해성이 감소하므로 관개를 하고 1~2일이 지난 후 작업에 임하는 것이 위험을 줄일

수 있다고 보고하였다(Jung et al., 2005a). 따라서 관개가 집중되는 경우, 최소 24시간 경과 후 작업에 임하는 것이 미생물로 인한 질병의 피해를 줄이는데 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 하수처리수를 논 관개용수로 재이용할 때 나타날 수 있는 위해성에 대하여 지하수 관개 논과 하수처리장 방류 하천수 관개 논, 재처리수를 관개한 논의 3개 처리구를 비교· 분석 평가하였다. 관개 기간 동안의 총 위해도 분석 결과는 재처리수와 지하수 관개를 한 시험구의 위해도 값이 유사한 수준이었으나, 하수처리장 방류 하천수를 추가적인 처리 없이 관개한 경우 20배 이상 높은 위해도를 보였다. 또, 월별 위해도 분석 결과에 따르면 기간에 따라 영농초기인 5월 중으로부터 6월 초까지 높은 위해도 값을 보였으며, 시간이 지남에 따라 위해성이 점차 감소하였다. 따라서 하수처리장 방류 하천수를 직접적으로 관개하기보다 여과 및 소독 등의 2차적 재처리를 가한 후 관개수로 이용하는 것이 위험성을 확연히 감소시킬 수 있으며, 영농 초기 관개 이후 최소 24시간이 경과하고 작업에 임하는 것이 위험성을 낮출 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 미생물 위해성 평가에 있어서 *E. coli*를 병원성 미생물에 대한 간접적 지표로 이용하여 관개수 간 위해도 차이에 대하여 비교 분석함으로써 하수처리수의 농업적 재이용에 대하여 현장 적용 시 추가적인 처리의 필요성을 시사하는데 목적이 있으나, 현장 적용에 있어서 아직 1년간의 자료만이 반영되었기 때문에 지속적 모니터링을 통한 자료 확보가 중요한 것으로 판단된다. 또한 향후 *Salmonella*, *Shigella* 및 Human Enteric viruses 등 감염력을 가진 병원성 미생물에 대하여 직접 검출을 통하여 위해성 평가를 실시함으로써 더욱 상세하고 신뢰성 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 하수처리수의 농업적 재이용에 있어서 위해미생물을 통한 장내질병 뿐만 아니라 잔류화학물질 및 독성물질에 대한 검토가 필요하며, 차후 작물 농축과 영농 작업을 통한 노출, 작물 섭취에 대한 위해성 평가를 병행함으로써 발생할 수 있는 보건· 위생적인 안전성 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호 4-5-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부(2001). 수자원장기종합계획.
 이건형(2001). 미생물학적 위해성 평가. *한국미생물학회지*, **37**(2), pp. 101-108.
 정하우, 김선주, 김진수, 안병기, 이근후, 이남호, 정상욱 (1999). *관개배수공학*, 동명사.
 환경부(2000). *물질약종합대책*.
 An, Y. J., Yoon, C. G., Jung, K. W., and Ham, J. H. (2007). Estimating the microbial risk of *E. coli* in reclaimed wastewater irrigation on paddy field. *Environmental monitoring*

- and assessment*, **129**(1/3), pp. 53-60.
 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.
 Ayres, R. M., Stott, R., Lee, D. L., Mara, D. D., and Silva, S. A. (1992). Contamination of lettuces with nematode eggs by spray irrigation with treated and untreated wastewater. *Water Science and Technology*, **26**, pp. 1615-1623.
 Bastos, R. K. X. and Mara, D. D. (1995). The bacteriological quality of salad crops drip and furrow irrigated with waste stabilization pond effluent: an evaluation of the WHO guidelines. *Water Science and Technology*, **31**, pp. 425-430.
 Burmaster, D. E. and Anderson, P. D. (1994). Principles of good practice for use of Monte Carlo techniques in human health and ecological risk assessment. *Risk Analysis*, **14**(4), 477-481.
 Camann, D. E. and Moore, B. E. (1998). Viral infection based on clinical sampling at a spray irrigation site. In: Implementing water reuse. *AWWA Research Foundation 847*.
 Dowd, S. E., Gerbaud, L., Planchon, C., Pepper, I. L., and Pillai, S. D. (2000). Bioaerosol transport modeling and risk assessment in relation to biosolid placement. *Journal of Environmental Quality*, **26**, pp. 194-199.
 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.
 Fewtrell, L. and Bartram, J. (2001). *Water quality. Guidelines, Standards and Health : Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease*, IWA Publishing, World Health Organization(WHO).
 Finkel, A. M. (1990). *Confronting uncertainty in risk management. Resources for the Future*, Centre for Risk Management, Washington, DC.
 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.
 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.
 Haas, C. N., Rose, J. B., and Gerba, C. (1999). *Quantitative microbial risk assessment*. Wiley, New York.
 ILSI (2001). *Revised Framework for Microbial Risk Assessment*, Workshop report, ILSI Risk Science Institute, 1126 Sixteenth Street, NW Washington, DC 20036-4810.
 Jung, K. W., Yoon, C. G., Jeon, J. H., and Ham, J. H. (2004). Analysis of Indicator Microorganism Concentration in the Rice Cultural Plot after Reclaimed Water Irrigation. *Korean J. Limnol.*, **37**(1), pp. 112-121.
 Jung, K. W., Yoon, C. G., An, Y. J., Jang, J. H., and Jeon, J. H. (2005a). Microbial risk assessment in treated wastewater irrigation on paddy rice plot. *Korea J. Limnol.*, **38**(2), pp. 225-236.
 Jung, K. W., Yoon, C. G., Jang, J. H., Kim, H. C., and Jeon, J. H. (2005b). Investigation of indicator microorganism con-

- centrations after reclaimed water irrigation in paddy rice plots. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **47**(4), pp. 75-85.
- 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.
- Nwachukul, N. and Gerb, C. P. (2004). Microbial risk assessment: don't forget the children. *Curr. Opin Microb.*, **7**, pp. 206-209.
- Peasey, A., Blumenthal, U. J., Mara, D., and Ruiz-Palacios, G. (2000). A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: a Latin American perspective. WELL study, London school of hygiene & Tropical Medicine, WEDC Loughborough University, UK., **68**(2), pp. 15-18.
- Petterson, S. R., Ashbolt, N. J., and Sharma, A. (2001a). Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: A screening-level risk assessment. *Water Environment Research*, **73**(6), pp. 667-672.
- Petterson, S. R., Teunis, P. F. M., and Ashbolt, N. J. (2001b). Modeling virus inactivation on salad crops using microbial count data. *Risk Analysis*, **21**, pp. 1097-1107.
- Shuval, H., Lampert, Y., and Fattal, B. (1997). Development of a risk assessment approach for evaluation wastewater reuse standards for agriculture. *Water Science and Technology*, **35**, pp. 15-20.
- 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.
- 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.
- US EPA (1992). Guidelines for water reuse, EPA No. 625/R-92/004. US Agency international development.
- WHO (2002). Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme-Environment and Health.
- Yoon, C. G., Han, J. Y., Jung, K. W., and Jang, J. H. (2006). Quantitative Microbial Risk Assessment of Wastewater Reuse for Irrigation in Paddy Field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **28**(2), pp. 77-87.
- Yoon, C. G., Hwang, H. S., Jung, K. W., and Ham, J. H. (2003a). 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), pp. 553-542.
- Yoon, C. G., Jung, K. W., Ham, J. H., and Jeon, J. H. (2003b). Photoreactivation Study of Wastewater Treatment Effluent Disinfected by UV-disinfection for Water Reuse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **45**(3), pp. 84-93.
- Yoon, C. G., Jung, K. W., Ham, J. H., and Jeon, J. H. (2003c). Feasibility Study of UV-Disinfection for Water Reuse of Effluent from Wastewater Treatment Plant. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **45**(2), pp. 126-137.