Korean J. Limnol. 36 (3) : 356~368 (2003)

농업적 용수재이용 수질기준을 고려한 적정 하수재처리에 관한 연구

윤춘경* · 정광욱 · 전지홍 · 함종화

(건국대학교 지역건설환경공학과)

Guidelines and Optimum Treatment for Agriculture Reuse of Reclaimed Water. ***Yoon, Chun-Gyeong*, Kwang-Wook Jung, Ji-Hong Jeon and Jong-Hwa Ham (Department of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea)***

Water quality of effluent from wastewater treatment plants (WWTPs) was reviewed to examine the feasibility of agricultural reuse using USEPA and WHO guidelines. It might meet the guidelines for BOD and SS, however, the most critical microbiological concentration was too high and further treatment is required. The pilot study of three treatments were performed to reduce microbiological concentrations. The UV irradiation was proved to be very effective in disinfection of secondary level effluent, and about 30 mW · s/cm^2 of dose was suggested to meet the even most stringent USEPA guidelines. Slow sand filter demonstrated effective removal of bacteria, and effluent concentration of total coliform (TC), fecal coliform (FC), and *E. coli*. dropped from about 10,000/100 mL to 300, 200, and 150 MPN/100 mL, respectively, showing over 95% removal. These level of bacterial concentration sufficiently meet the WHO guidelines ($10^3 \sim 10^5$ FC/100 mL), and could meet the more stringent USEPA guidelines (200 FC/100 mL) if properly applied. Slow sand filter also provided about 50% removal of SS, turbidity, and BOD in addition to bacterial removal. The removal efficiency of pond system was relatively poor, but still showed over 85% removal and effluent concentration of TC, FC, and *E. coli* was all below 1,000/100 mL. The pond system alone could meet the WHO guidelines, but hardly meet the USEPA guidelines and further treatment might be necessary. Overall, three methods evaluated in the study treat the effluent to meet the WHO microbiological guidelines for agricultural reuse. The UV disinfection and slow sand filter might also could the USEPA guidelines, while the pond system can hardly meet the USEPA guidelines if applied alone. The WHO and USEPA guidelines were made based on data from upland field agricultural system and may not be directly applicable to the paddy field agricultural system. Therefore, national standards for agricultural reuse of reclaimed water should be made considering domestic agricultural systems as well as international guidelines. Also, further investigation is recommended to develop optimum and feasible treatment measures for agricultural reuse of effluent from WWTPs.

Key words : UV-disinfection, intermittent slow sand filter, pond system, wastewater reclamation, water reuse, guidelines for water reuse, microorganism

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

서 론

물은 공기와 함께 모든 생명체의 생존에 꼭 필요한 요소이며, 우리 인류에게는 필요한 만큼의 수자원을 확보하고 깨끗하게 보존해야 할 책임이 있는 귀중한 자원이다. 산업화와 도시화 뿐만 아니라 인구증가나 국민들의 생활수준 향상은 물 소비를 증가시켰으며, 수질오염 물질의 증가는 수자원 관리의 어려움을 더욱 가중시키고 있다. 현재 세계적으로 물 문제는 가장 중요한 과제로 부각되고 있으며, 우리나라는 이미 물부족 국가군에 속하는 나라로 분류된 바 있다(Kwun *et al*., 1997). 우리나라의 경우 하천수는 강우의 계절적인 편중현상으로 갈수기인 10월부터 4월까지는 전 유역에서 물 부족현상이 일어나 하천유지수량이 부족하게 되고 많은 하·폐수의 유입으로 수질오염은 날로 심각해지고 있다.

이처럼 지구 전체에 걸쳐서 많은 지역들이 사용 가능한 수자원이 한계에 도달하면서, 용수부족문제에 대한 대책으로 댐 건설과 지표수의 효율적 이용, 새로운 지하수 개발 및 오염방지, 경제적인 해수담수화, 우수 재이용, 그리고 최근 들어 주목받고 있는 하수처리수의 재이용 등 수자원 확보를 위한 노력이 다각도로 검토되고 있다. 하수처리수의 재이용은 수자원 보전 및 효율증대라는 측면에서 크게 관심을 끄는 대안으로, 수자원의 양적인 측면과 수계에 방류되었을 때 발생할 수 있는 수질문제를 경감시킬 수 있는 오염부하 저감측면에서도 관심을 가지게 한다. 물의 재처리 및 비음용수로써의 재이용은 이미 적용 중인 상·하수처리 기술만으로도 가능하기 때문에, 대부분의 국가에서도 적용 가능한 방법으로 우리나라에서도 그 적용가능성이 크다고 할 수 있다(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 물부족을 겪는 많은 국가에서는 하수 재이용을 주요한 수자원으로 간주하고, 다양한 형태의 이용방법을 채택하고 있다.

재이용을 목적으로 하수처리수를 이용할 경우, 적절한 재이용수 수질기준을 마련하여 그에 맞는 처리방법을 연구하여 적용하는 것이 무엇보다 중요하다. 우리나라에서는 제한된 범위의 하수재이용 기술이 활용되고 있으며, 그 이용량이나 실적이 미비한 실정이며(M.O.C.T., 1992), 하수처리장 방류수를 처리하여 농업용수, 양어장, 그리고 축산업 등에 대한 수질기준은 마련되어 있지 않은 상태로서, 하수처리수의 재이용을 위한 재이용수 수질기준 마련이 시급하다고 할 수 있다. 특히, 농업용수는 우리나라 전체용수량의 약 50%를 차지할 정도로 사용량이 많기 때문에 하수 처리수는 재이용할 수 있는 가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 생활하수를 농업용수로 이용하는 일은 세계적으로도 흔히 있는 일로, 우리나라에서는 농업의 발전과정에서 관행적으로 이루어져 왔다. 최고의 논을 칭하는 문전옥답(門前沃畓)이란 생활하수 잡배수가 자연적으로 조성된 습지나 초지 등을 통과하여 일정부분 정화된 물을 사용하는 마을 앞 논을 의미하는데, 하수에 포함된 영양물질이 작물의 생육에 도움을 주어 수확량이 높아지는 양질의 논을 의미한다. 또한, 처리하지 않은 생활하수가 흘러 들어간 저수지나 보, 용수로 등에서 직접 취수하여 벼농사에 사용하는 지역이 많은 것이 현실이다.

재이용수의 조건은 수요자가 사용할 때 무색·무취·무해이어야하고 무엇보다도 공중보건·위생상의 위험성을 줄이는 것이 중요하다. 따라서, 하수처리수의 재이용에는 병원성 미생물의 특징과 종류, 질병 전염 기작을 이해하고 그 처리수준을 결정한 후 적절한 처리·소독 방법을 선택하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다(US EPA, 1992).

WHO와 세계은행 등은 1985년 스위스 엥겔버그(Engelberg)에서 농업용수 재이용수의 수질기준을 제시하였다. 그 결과는 엥겔버그 보고서라 부르며, 작물 유형별, 관개방식별 수질기준을 제시하고 있으며 1989년에 현재의 재이용수 수질기준을 발표하였으며(WHO, 1989), 지속적인 연구를 통하여 2000년도에 보다 보완되고 상세한 수질기준을 발표하였다(WHO, 2000). 또한, US EPA(1992)는 대장균 이외에 pH, BOD, turbidity, 잔류염소가 포함된 농업적 재이용수 수질기준을 제시하였다. 이 기준들은 농업적으로 하수처리수를 사용하는 개별국가에서 수질기준 제정시 기초로 할 수 있는 기준들이지만, 이러한 기준들은 밭농사를 목적으로 하는 관개가 주를 이루고 있기 때문에 농업용수의 대부분이 논의 관개용수로 사용되고 있는 우리나라에 직접 적용하기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 논농사를 주로 하는 우리나라에 하수처리수가 농업용수로 재이용될 경우 적용 가능한 수질기준을 고찰하고, 하수처리수의 모래여과, 저류지, 그리고 UV소독 등에 의한 처리효율을 검토함으로서, 하수처리수가 농업용수로 재이용될 경우에 필요한 수질기준 제정에 기초자료를 제공하여 도움을 주고자 한다.

재료 및 방법

1. UV 소독시설

UV 소독시설은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 유수식(flow-throught type)으로서 경기도 양평군 소재 연립주택의 생활하수를 처리하는 호기성 biofilter의 처리수를 유입수로 활용하였으며 호기성 biofilter의 처리용량은 약 8 m^3/day이다. UV 소독시설의 외관은 부식 방지를 위해 스테인리스 스틸(stainless steel)로 만들어졌으며, 외관의 내경이 96 mm, 길이는 860 mm이고, 램프를 감싸고 있는 석영관은 외경 24.5 mm, 그리고 길이는 860 mm이다. 2개의 UV 램프를 직렬로 연결하는 구조이며, 기초실험에서 2개를 사용해 본 결과, 소독수에서 미생물이 검출되지 않았기 때문에 1개의 UV 램프만을 사용하여 처리효율을 실험하였다. 석영관 안에 UV 램프를 배치하는 형식으로 되어 있고, UV 소독량을 조절하기 위한 유입유량 조절밸브를 설치하였다. 석영관에 파울링(fouling)이 발생하는 것을 방지하기 위하여 타이머를 설치하여 시간간격에 의해 석영관의 자동 세척이 가능하도록 설계하였다.

본 실험에 사용된 UV 램프는 저압형 램프(low-pressure lamp)이며, 그 제원은 Table 1에 요약되어 있다. UV 소독의 소독능을 표현하는 방식은 자외선조사량(UV dose)을 사용하는데 milliwatt-seconds/cm^2 (mW · s/cm^2)로 나타내며, 자외선 강도에 노출시간(second)을 곱하여 구한다. 자외선강도(UV lamp intensity)는 램프 자체에서 발생하는 소독할 수 있는 자외선의 양을 측정한 단위면적당 강도로 milliwatt/cm^2 (mW/cm^2)로 표현된다. 자외선강도를 계산하는 방법은 point source summation (PSS)을 사용하였다(Tchobanoglous *et al*., 1996).

Table 1. Characteristics of UV lamp used for experiment.

Watts (W)	Length (mm)	Current (mA)	Lamp intensity (mW/cm^2)	Mag/Model No.
17	357	425	0.90	Lighttech/G10T5L (Hungary)
25	436	425	0.75	Atlantic/G24T5L (USA)
40	842	425	0.99	Pillips/TUV36WT5 (Holland)

2. 간헐분사방식의 완속모래여과 시설

간헐분사방식의 완속모래여과 시설 직경(1.1 m), 높이(1.1 m)의 fiberglass reinforced plastics (FRP)통을 이용하여 설계하였으며, 총 3개의 층으로 구분하였다. 바닥으로부터 5 cm에는 자갈을 깔고, 그 위에 입경 1～2 mm의 굵은 모래를 10 cm를 채웠고, 그 위의 부분은 입경 0.1～0.3 mm의 잔모래를 45 cm 정도 채웠다. 경기도 양평군 소재 연립주택에 설치된 처리용량이 약 8 m^3/day 규모의 호기성 biofilter 처리수를 완속모래여과 유입수로 이용하였다(Fig. 2). 완속모래여과의 유입장치는 모래여재 전 표면에 균등한 유량이 공급될 수 있도록 분사식

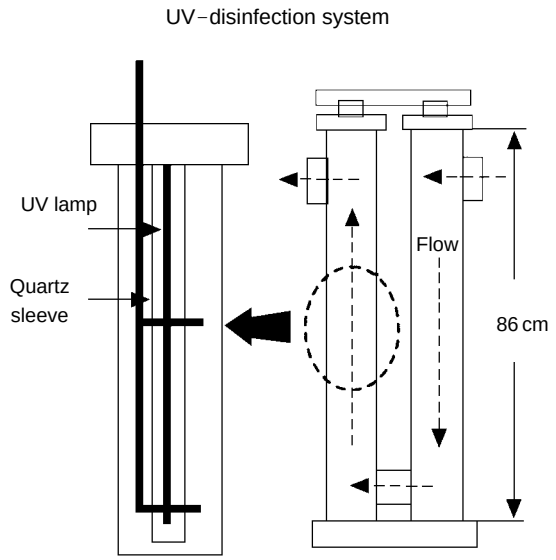

Fig. 1. Schematic of UV-disinfection system.

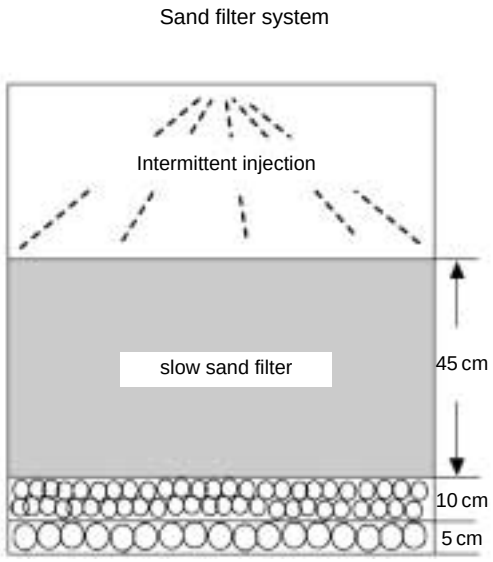

Fig. 2. Slow sand filter experimental system.

으로 설계하였으며, 먼저 유입된 유량을 처리하고 일정한 시간간격을 준 후에 다시 유입시키는 간헐분사방식을 선택하여 모래여재 전 부분을 호기성상태를 유지하게 하였다. 분사장치는 간헐적(intermittent) 분사를 위해서 biofiter 처리수를 저류한 후, 펌프(1/6HP)에 콘트롤 박스(control box)를 설치하여, 10분 간격으로 15초 동안 분사하였으며, 유입유량은 0.6 m^3/day였다. 본 실험은 2002년 3월부터 12월까지 이루어졌으며 완속모래여과장치는 실외에 설치하였고 강우의 영향을 받지 않도록 관리하였다.

3. 하수처리수의 연못시스템 적용

실험에 사용된 인공습지와 연못시스템은 건국대학교 내에 설치하였으며, 개요도는 Fig. 3과 같다. 인공습지는 폭 2 m×길이 9 m×높이 1 m의 콘크리트 박스에 모래를 0.6 m 채우고 갈대를 식재하였으며, 생명환경과학대학 별관에 설치된 정화조의 오수를 유입수로 사용하였다. 인공습지의 오수 유입량은 1 m^3/day이고, 그에 따른 처리조내 체류기간은 약 3.5일이었다. 습지에서 처리된 처리수를 저류탱크로 보낸 후 자연유하방식으로 두 개의 연못시스템에 0.5 m^3/day씩 유입시켜 추가 처리하였는데, 연못에서의 체류기간은 약 9일이었으며 연못의 유출은 상층부에서 일어나도록 설계하였다. 연못 상층과 바닥이 각각 호기성과 혐기성 상태를 유지할 수 있는 조건성 연못(facultative pond)이 되도록 깊이, 폭 및 길이가 모두 2 m인 콘크리트 box를 설치하였다. 바닥에 모래를 0.4 m 채우고 6월 중순부터 습지처리수를 두 개의 콘크리트 box에 동시에 담기 시작하여 수심이 1.5 m까지 채운 후 상층부의 물이 밖으로 흘러 유출되는 구조로 만들었다. 연못시스템은 구조적 안정성 및 외부 온도와의 영향을 줄이기 위해 지표면에서 약 1.3 m까지 땅을 파고 그 위에 콘크리트 박스를 만든 후 외벽을 흙으로 되메움하여 조성하였다.

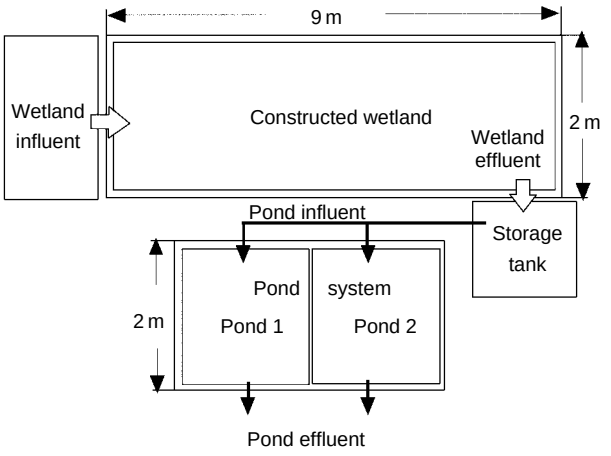

Fig. 3. Schematic diagram of the constructed wetland and pond systems.

Table 2. Analytical methods used for constituents.

Constituents	Standard methods	Remark
BOD_5	SM 5210-B	5-day BOD test
Turbidity	SM 2130-B	Nephelometric method
Total coliform	SM 9221-B	Multiple-tube fermentation method
Fecal coliform	SM 9221-E	
Escherichia coli	SM 9221-F	

4. 수질측정항목

수질측정항목은 현재 농업용 재이용수 수질기준으로 많이 사용되는 항목을 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였으며, 항목별 처리방법은 Table 2와 같다. 미생물 분석은 최적 확수 시험법(multiple-tube fermentation method, MPN)을 사용하였으며, DIFCO 사의 시약을 이용하였다. Total coliform은 Lauryl trptose broth, Fecal coliform는 EC broth 그리고 *E. coil*는 EC-MUG broth 시약을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 우리나라 하수종말처리장 유출수 수질

Table 3은 우리나라 하수종말처리시설의 평균 유입·유출수, 실험에 사용된 biofilter 평균 유입·유출수와 습지의 평균 유입·유출수의 수질자료가 요약되어 있다. 일반적인 하수처리수의 평균 BOD_5는 US EPA의 재이용수 수질을 모두 만족하며, 평균 SS의 농도의 경우 B, C 등급의 수질을 만족시킨다. 전국 200여 개의 하수처리장의 1,300여 개의 데이터 중 BOD_5와 SS는 약 85% 이상의 자료가 10 mg/L 이하의 농도를 나타내었으며, 30 mg/L를 초과하는 경우는 10개소 미만이었다. BOD_5와 SS의 경우 US EPA 수질기준을 충분히 만족시킬 수 있으므로 우리나라 하수처리수의 경우 재이용수로의 이용에 문제가 없을 것으로 판단된다. 우리나라 하수처리장 방류수의 TC의 시험방법은 수질환경보전법 제8조에 의해 평판집락시험법으로 정해져 있으며 개/mL의 단위를 사용한다. 하지만, 본 연구와 일반적인 수질기준에는 TC/

Table 3. Water quality characteristics of conventional waste water treatment systems.

Parameter	2001 WWTP[a]		2002 WWTP[b]		Biofilter[c]		Wetland[d]	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
TC (개/mL)	122,205	3,390	140,494	4,029	507,142	11,684	615,714	9,542
BOD_5 (mg/L)	107.4	6.9	111.9	6.5	74.4	5.7	118.2	27.1
SS (mg/L)	111.7	5.9	133.1	5.3	55.8	3.8	66.9	16.8

[a] : National mean concentration of WWTPs in 2001. (M.O.E., 2001).
[b] : National mean concentration of WWTPs from January to October in 2002. (M.O.E., 2002).
[c] : Mean concentration from March to December in 2002.
[d] : Mean concentration from October in 1998 to December in 2002 (TC mean concentration in 2002).

100 mL를 사용하기 때문에 우리나라 하수처리장 방류수의 농도와 구별하여 사용하여야 한다. 그러나, 보건위생과 직접적인 관계가 있는 대장균의 농도를 살펴보면 평균농도가 US EPA의 수질기준 뿐만 아니라 WHO의 기준인 1,000 FC/100 mL 수준도 만족시키지 못하기 때문에 하수종말처리장의 방류수를 농업용수로 재이용 하기위해서는 특별히 대장균 부분의 추가적인 처리가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 biofilter 처리수가 하수종말처리시설의 유출수를 비교해본 결과 TC의 경우 4.81배, T-P는 3.64배, 그리고 T-N의 경우 3.18배 정도 높은 상태이었고, SS와 BOD_5는 약간 낮은 상태이었다. 그러나, US EPA에서 정하고 있는 수질기준을 충분히 만족시키는 상태이고 하수처리장의 유출수와 마찬가지로 대장균에 대한 추가적인 처리가 요구되는 수준이었다. 습지 유출수의 경우에는 BOD_5와 SS의 경우 모두 하수처리장 방류수보다 월등히 높은 수준을 나타내었으나 US EPA의 B, C등급의 수질은 만족시킬 수 있었으며 대장균의 경우 추가처리가 필요한 수준이었다. 이러한 차이는 유입수질의 차이도 있으나 정화조에서 고형물질이 침전된 후 다른 처리과정이 없이 biofilter와 습지는 한가지의 처리공정만을 거치는데, 일반 하수종말처리장에는 1차처리, 2차처리 뿐만 아니라 일부에서는 고도처리 및 소독처리까지 거친 후 방류하기 때문에 biofilter와 습지처리수가 일반하수종말처리장보다 상대적으로 높은 수치를 나타낸 것으로 판단된다.

2. UV소독

UV흡수에 의하여 발생하는 세포내 광화학적인 변이현상은 최근 UV를 이용한 소독기술이 수처리에 있어서 염소소독법을 대체하거나 보완할 수 있는 중요한 기술적 대안으로 주목을 받고 있다(Lee *et al*., 2002). UV는 미국과 일본의 경우 하수처리장에서 염소소독을 대체하기 시작하였으며 (George *et al*., 1991; Lee, 2002). 우리나라에서도 2003년부터 하수처리장의 방류수 수질 기준에 대장균 군수에 대한 기준이 제정·시행되어 소독시설 설치를 의무화하였으며 적절한 소독시설을 설치하기 위한 노력으로 UV 소독이 검토되고 있다 (M.O.E., 2002).

본 연구에서 사용된 UV유입수는 biofilter 유출수와 완속모래여과 유출수를 이용하여 17, 25, 40 W의 3가지 램프를 이용하여 4가지의 유량으로 UV dose를 변화시키면서 실험한 결과는 Table 4와 같다. 실험에 사용된 biofilter 유출수의 TC, FC, *E. coli*의 평균농도는 각각 17,800, 11,000, 10,200 MPN/100 mL이었으며, 모래여과 유출수의 TC, FC, *E. coli*의 평균농도는 175, 330, 208 MPN/100 mL이었다. 17과 25 W 램프로 유량을 10, 20, 30, 40 m^3/day 하수처리장 유출수 수준의 처리수를 UV 소독한 결과 98% 이상 소독되어 평균 농도가 100 MPN/100 mL 이하로 나타났다. 그러나, 40 W 램프로 소독했을 때는 모든 경우에 대장균의 농도가 모두 0 MPN/100 mL로 100% 소독되는 것으로 나타났다. 모래여과 유출수를 40 W의 램프로 UV소독한 결과 biofilter 유출수와 마찬가지로 100% 소독효율을 보였으며, 17과 25 W의 경우에는 유출수의 농도가 20 MPN/100 mL 이하였다. 따라서, US EPA 기준과 유사한 엄격한 수질기준이 적용될 경우에도 하수처리장의 유출수가 BOD_5와 SS의 농도 수질기준을 만족할 경우, 적절하게 설계된 UV소독을 적용하면 대장균군의 수질기준을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. UV소독방법의 사용은 US EPA의 수질기준에서 채택하고 있는 잔류염소 항목도 UV소독을 적용할 경우 문제가 되지 않는 장점을 가지고 있다.

Sinder *et al*. (1991)의 연구결과에서는 자외선조사량 60 mW · s/cm^2 또는 그 이상인 경우에 하수처리수 소독에서 TC가 23 MPN/100 mL 수준이었으며, 여과한 하수처리수 소독에서 자외선조사량이 97 mW · s/cm^2인 경우에 TC가 2.2 MPN/100 mL 이하이었다. Loge *et al*., (1997)은 SS의 농도가 10 mg/L인 하수처리수에서 자외선조사량 100 mW · s/cm^2로 조사하였을 때 4-log의 TC

Table 4. Concentrations for different lamp type (W) and flow rate in UV-disinfection system.

Lamp	Flow rate (m^3/day)	UV dose (mW · s/cm^2)	Concentration (mean±S.E.*)					
			Biofilter effluent			Sand filter effluent		
			TC	FC	*E. coli*	TC	FC	*E. coli*
17W	10	18.2	20±11.6	84±55.6	70±42.2	5±1.5	5±1.3	14±3.0
	20	9.1	68±38.2	20±8.2	20±0.0	18±2.1	6±5.4	12±4.2
	30	6.1	53±26.3	50±10.0	40±23.1	2±1.2	3±0.7	18±3.0
	40	4.6	106±42.6	42±22.4	58±43.6	17±7.5	12±3.2	14±3.1
25W	10	26.2	50±17.3	25±9.6	70±34.9	2±1.0	3±2.0	1±1.0
	20	13.1	80±20.0	57±8.8	30±5.8	0.7±0.7	1±0.7	2±1.2
	30	8.7	53.3±24.0	30±5.8	40±0.0	2±0.0	1±0.7	2±0.7
	40	6.6	38±11.8	32±12.4	36±16.9	6±3.0	5±1.8	6±2.1
40W	10	48.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0
	20	24.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0
	30	16.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0
	40	12.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0	0±0.0

* : Standard error

가 제거되었다고 보고하였으며, Kashimada *et al.* (1996)은 FC가 30～35 mW · s/cm^2에서 3-log가 제거되었다고 보고하였다. 본 실험에서는 약 30 mW · s/cm^2 정도로 UV 처리하면 하수처리수의 농업적 재이용에 무리가 없을 것으로 나타났다.

본 연구에서 적용한 형태의 유수식 UV 소독시설은 처리시설 일반적인 하수처리장의 유출수 특성과 비교해 보았을 경우 biofilter와 같은 소규모 처리시설 뿐만 아니라 하수종말처리장과 같은 일정 규모이상 처리시설 유출수 소독에도 효과적일 것으로 예상된다. 이 과정에서 SS가 소독효율에 영향을 미칠수 있는 주요인자로 나타났으나, 현재 운영중인 처리시설들의 일반적인 유출수 SS 농도가 UV 소독에 영향을 미치지 않을 정도로 낮아서, 기존 하수종말처리시설에도 본 연구에서 사용한 것과 유사한 형태의 유수식 UV 소독시설을 적용하면 효과적인 소독이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다 (Yoon *et al*., 2002).

3. 간헐분사방식 완속모래여과 처리

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 유입수의 평균 TC, FC, *E. coli* 농도는 약 10^4 MPN/100 mL로서 비교적 높은 수치를 나타내었으나, 완속모래여과 후에는 1,000 MPN/100 mL 이하로 낮아져서 평균 농도가 330, 207, 154 MPN/100 mL로 95% 이상의 높은 제거효율을 나타내었다. 우리 나라의 농업용수 재이용 수질기준이 US EPA의 수질기준이 아닌 WHO의 수질기준으로 정해질 경우에는 소독과정 없이도 사용이 가능할 것으로 판단되며, 적절한 관리를 통해 효율을 높인다면 US EPA의 B, C 등급의 기준도 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 여과과정을 거친 후 탁도의 유입수 평균수질이 1.6 NTU에서 약 50% 제거되어 유출수의 농도가 평균 0.8 NTU로 나타났으며, SS의 경우는 유입수의 평균농도가 3.4 mg/L에서 약 50% 제거되어 유출수의 SS 평균농도가 1.7 mg/L이었다. 탁도는 다른 수질 기준에는 사용되지 않지만, 먹는물 수질기준을 1 NTU로 제한하고 있는데, 완속모래여과 처리수의 경우 평균 0.8 NTU로 먹는물 수질기준에 부합하는 처리수준을 보였으며, 육안관찰시에도 탁도와 SS가 거의 완전히 제거되어 매우 깨끗한 수준이었다. BOD_5는 모래여과 유입수의 평균농도가 5.8 mg/L에서 유출수의 평균농도가 2.6 mg/L로 감소하였으며, 그 처리 효율이 약 50%이었다.

하수처리수의 재이용이나 방류수의 수질개선을 위해서 하수처리수를 여과, 질산 · 탈질화, 응집 · 침전 그리고, 활성탄흡착 등 많은 고도처리기술들이 활용되고 있다. US EPA의 농업용수 재이용 수질기준 A등급의 경우 2차 처리 후 여과과정과 소독과정 후 재이용하는 것을 권장하고 있는데, B, C등급에서 정하고 있는 SS항목을 제외하고 탁도 항목을 기준으로 정하고 있다. 또한, 모래 또는 혼합 여재를 통한 여과과정이 2차처리 후에 연결될 때 BOD_5, COD, 그리고 TOC의 45～85% 정도 제거할 수 있으며 상당량의 미생물을 제거하며, 하수의 탁도를 매우 낮게 하여 후속되는 살균효과를 증대시킨다고 보고하였다 (Sanitation District of Los Angeles, 1977). US EPA (1992)에 의하면 완속모래여과에서는 적절한

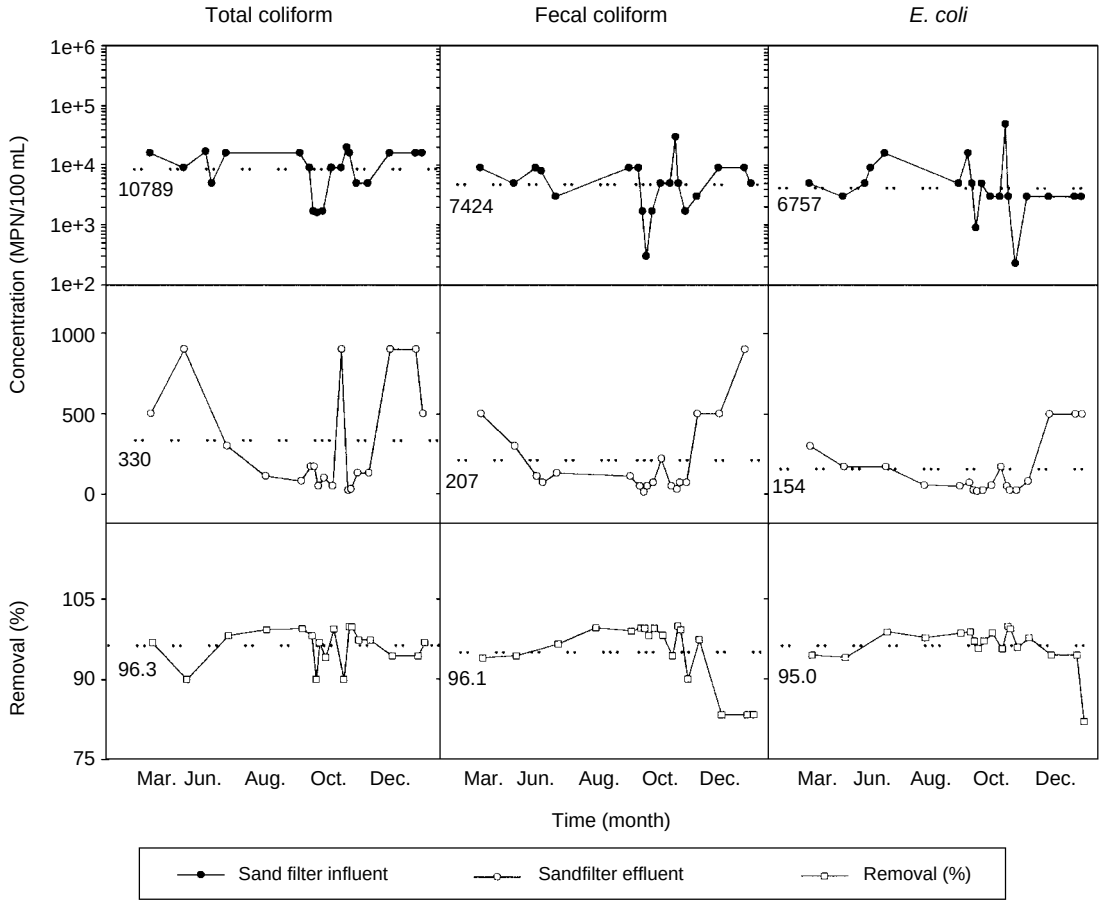

Fig. 4. Concentrations of TC, FC, and *E. coli* in intermittent slow sand filter system.

설계와 유지관리가 이루어지면 바이러스(Virus)의 90～99%의 제거가 이루어진다고 하였으며, 미생물의 제거는 급속여과와 비교했을 때 완속모래여과의 가장 큰 장점으로 소개하고 있다(Goldstein *et al*., 1972). 또한, 완속모래여과에서는 탁도 뿐만 아니라 색도와 맛과 냄새를 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다(US EPA, 1992). 이는 심미적인 거부감을 없애기 위해 무색·무취이어야 하는 재이용수의 조건을 만족시키는 방법이며, 수계로 방류되어 오염부하를 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 간헐분사방식의 완속모래여과 장치는 여과기능이외에도 생물학적인 처리를 기대할 수 있는 장점을 갖고 있는 방법으로서 미생물이나 유기물질 등의 제거 효율을 높일 수 있는 방법으로 사용되고 있으며, 최근에는 하수의 3차 고도처리과정으로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다(Nakhla and Farooq, 2003)

미생물 이외에 BOD_5, SS, 탁도 등의 수질이 문제가 될 경우 완속모래여과를 거치면, 그 문제를 충분히 해결할 수 있을 것이라 판단되며, 완속모래 여과 후에 UV소독과정이 이어질 경우 Table 4와 같이 소독효율을 높여서 보다 낮은 조사량으로도 높은 처리효율을 얻을 수 있기 때문에 유리할 것으로 판단된다. 또한, 간헐분사방식의 모래여과는 경제적이고 유지관리가 간편하기 때문에, 부지확보가 가능하고 농업용수로 재이용이 가능한 적정 규모까지의 하수처리시설에서는 고도처리 시설로 사용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

4. 하수처리수의 연못시스템 적용

연못 시스템의 유입수의 평균농도는 TC, FC, *E. coli*가 각각 9,542, 6,257, 4,762 MPN/100 mL이었으며, 유출수의 평균농도가 각각 연못 1에서는 665, 406, 458 MPN/100 mL, 연못 2에서는 각각 636, 561, 740 MPN/100 mL의 농도를 나타내어, 85～93%의 제거효율을 보였으나 샘플시기에 따라 20～3,000 MPN/100 mL로 농도 변화가 크게 나타났다(Fig. 5). 연못 1의 경우에 9월 말에 미

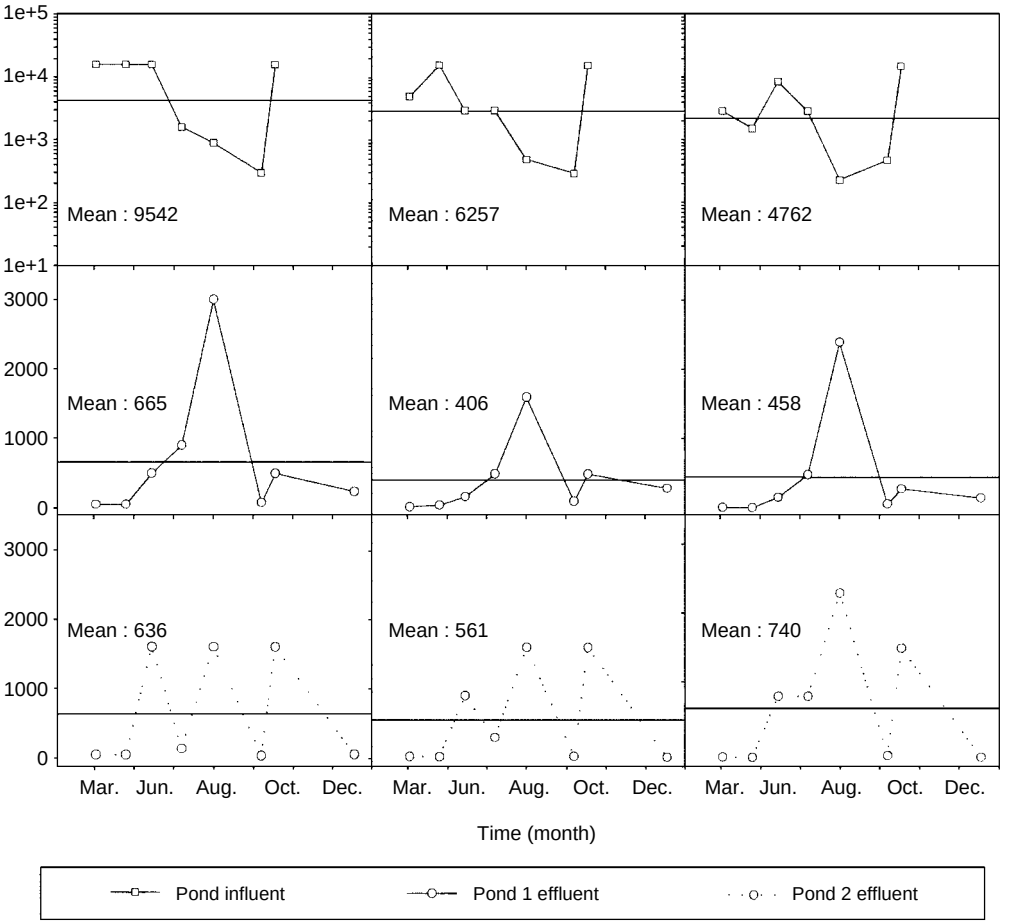

Fig. 5. Concentration of TC, FC, and *E. coli* in wetland and pond system.

생물의 농도가 급증하는 경향을 보이는 이유는, 폭우의 영향에 의해 주변이 범람하여 연못으로 직접 유입됨으로써 영향을 주었기 때문이며, 연못 2의 경우에도 범람의 영향과 함께 기후나 생태계내의 포식자의 영향 등에 의해 일정한 처리효율 기대하기는 어려우나, 적절한 설계와 관리가 이어질 경우 일정수준의 처리효율은 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

WHO의 수질기준을 살펴보면, 연못시스템(stabilization pond)의 사용을 적극 권장하고 있으며, A와 B등급 처리과정으로서 소개를 하고 있다(Table 6). WHO의 수질기준에서 적절하게 설계된 연못시스템에서 A등급의 처리수 수질을 충분히 만족시킬 수 있다고 하였으며, 본 연구 결과에서도 농도의 변화폭은 크지만 평균농도는 1,000 FC/100 mL를 충분히 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한, B와 C등급의 경우에는 대장균 항목이 빠져 있기 때문에, WHO의 수질기준을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

SS, 탁도, 그리고 BOD_5는 오히려 전체적으로 농도가 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서는 조류의 성장과 개구리밥(dug-weed), 그리고 부착조류인 헛뿌리말(*R. riparium*)과 같은 생물 성장에 의한 1차 생산의 증가가 농도에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나, 그 농도증가율이 30% 내외로 크지 않았기 때문에 적절하게 처리된 하수처리장 방류수에 연못시스템과 같은 저류지 형태를 적용하여 농업용수로 재이용할 경우 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

우리나라는 주로 벼농사를 중심으로 한 농업이기 때문에 관개기간에 많은 양의 용수가 단기간 필요하여 용수의 저류가 필수적이다. 우리나라 전국에 걸쳐 17,900여 개소가 설치되어 있는 농업용 저수지(M.O.A.F., 2001)는 우리나라 호소의 거의 대부분을 차지하고 있으며 농업용수 이용량의 50% 이상을 공급하는 수자원으로서 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서, 농업용 저수지를 적절하게 활용하여 재이용수를 저류하는 방법

이 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 검토할 수 있는 대안중의 하나라고 생각한다.

연못시스템은 자연상태에서 태양에너지와 생태계의 작용에 의해 각종 오·폐수를 처리하는 기법으로 생활하수, 공장폐수, 그리고 축산폐수를 처리하기 위해 열대에서 한대지역에 걸쳐 전 세계적으로 광범위하게 이용되고 있다(Oswald, 1988; NADB, 1994). Davies-colley *et al*. (1998)은 안정지(stabilization pond)에서 분원성 미생물인 *E. coli*와 *Enterococci*가 90% 이상 제거된 것으로 보고하였으며, 연못에서의 소독효과는 주로 태양광에 의해 이루어지며 이미 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 보고되었다(Downes *et al*., 1977; Ronan *et al*., 1996)

하수처리장 방류수를 연못시스템에 연계 적용한 방법은 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 반드시 필요한 저장과 처리를 동시에 할 수 있는 방법으로써, 높은 미생물 제거효율을 나타내어 보건·위생상의 문제를 크게 줄일 수 있어 적용성이 클 것으로 판단된다. 연못시스템을 이용한 하수처리방식은 간단한 구조, 큰 완충능력, 적은 슬러지 발생, 적은 관리요소와 저렴한 관리유지비를 갖는 장점을 가지고 있으며, 농촌지역 하수처리와 농업용수 재이용기술로서 적용가능성이 높을 것으로 판단되어 적극적인 검토가 필요하다고 생각된다.

적 요

본 연구에서는 국제적으로 사용하고 있는 농업용수 재이용 수질기준을 검토하고 우리나라 하수처리 방류수의 재이용 가능성에 대하여 고찰하였으며, 재이용수로 이용하기 위해 필요한 처리대안에 실험·연구한 결과이다. Biofilter 유출수를 17, 25, 40 W의 3가지 램프로 UV 소독한 결과 40 W 램프에서는 모든 경우에 100% 소독되었으며, 25 W와 17 W에서는 전반적으로 97% 이상 소독효율을 나타내었으며, 적절하게 설계된 UV소독을 거친 하수처리장 유출수는 US EPA와 WHO의 가장 엄격한 수질기준을 충분히 만족시켜서 보건·위생적인 문제를 일으키지 않을 것으로 판단된다. 간헐 분사방식의 완속모래여과 처리후 미생물의 처리효율은 TC, FC, *E. coli* 모두 평균 95% 이상 높은 처리 효율을 나타내었으며, 완속모래여과 후의 평균 농도는 각각 330, 207, 154 MPN/100 mL이었고 탁도와 SS는 모두 약 50%의 처리효율을 나타내었는데, 이는 WHO의 수질기준을 충분히 만족시켰으며, US EPA의 수질기준인 200 FC/100 mL의 경우에도 적절한 관리가 이루어 질 경우 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 탁도는 평균 0.8 NTU로써 먹는물 수질기준인 1 NTU 수준이었고, SS의 경우에도 50% 이상의 처리효율을 나타내어 US EPA의 가장 엄격한 수질기준을 충분히 만족하였으며, 영양물질의 제거에도 기여를 하기 때문에 수계의 오염부하를 줄이는 측면에서도 유리할 것으로 생각된다. 연못시스템을 거치면서 TC, FC, *E. coli* 모두 85% 정도 제거되어 평균미생물농도가 1,000 MPN/100 mL 이하이었다. 우리나라의 수질기준으로 WHO 수질기준이 논농사에 적용될 경우 소독이나 여과처리 없이도 재이용할 수 있을 것이라 판단되나, US EPA의 수질기준이 적용될 경우에는 연못시스템만으로도 부족하여 추가적인 처리가 필요할 것으로 생각된다. 과거 US EPA의 위험을 완전히 배제한 수질기준을 여러 국가에서 받아들여 사용하고 있으나, WHO에서는 이 수질기준이 경제·사회적으로 불합리한 기준이라 판단하고 보다 완화된 수질기준을 제시하였다. 우리나라에서도 수질기준을 결정할 때 논농사라는 특수한 실정에 맞는 수질 기준을 정해 경제적이고 실용적인 처리방법을 선정하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 벼의 경우는 껍질과 추가적인 처리 후 섭취하는 작물이기 때문에 엄격한 수질기준이 필요하지 않을 수 있으나, 장기간 담수상태를 유지함으로써 농민을 포함한 공중보건에 위해성을 줄 가능성이 크므로 세균성미생물 등에 대한 신중한 결정이 필요하다.

Appendix : 농업적 재이용수 수질기준

재이용수 수질기준은 미국 캘리포니아(California)에서 1918년에 처음 제안되었으며, 총 대장균군(total coliform)의 농도가 7일 평균 2.2/100 mL로써 조리하지 않고 먹는 채소작물의 관개에 하수처리수를 사용하였다(State of California, 1968). 그러나, 2.2 TC/100 mL는 실제적으로 음용수 수질기준과 동일한 수준으로 보건·위생학적으로 절대적으로 안전한 “zero risk concept” 있었다. 가축이 먹는 초지와 공중의 접촉이 제한된 환경에 적용할 경우에는 23 TC/100 mL의 안전한 수질을 기준으로 선택하여 사용하기 시작하였다. 이 캘리포니아 수질기준은 같은 시기에 재이용수 수질기준을 정하는 많은 국가에 영향을 주었다.

US EPA는 1992년에 미국 내 각주에서 시행하고 있는 재이용수에 관련된 법률과 권장기준을 기초로 하여 만들어진 수질기준을 발표하였다. 하지만, 캘리포니아 수질기준의 범위에서 크게 벗어나지 않았으며 대장균 이

Table 5. Suggested guidelines for water reuse (US EPA, 1992).

	Types of reuse	Treatment	Reclaimed water quality
A	Agricultural reuse (food crops) not commercially processed, surface or spray irrigation of any food crop, including crops eaten law	· Secondary · Filtration · Disinfection	· pH = 6～9 · ≤10 mg/L BOD · ≤2 NTU turbidity · ≤ No detectable fecal coliform/100 mL · 1 mg/L Cl_2 residual (min.)
B	Agricultural reuse (food crops) commercially processed, surface irrigation of Orchards and Vineyards	· Secondary · Disinfection	· pH = 6～9 · ≤30 mg/L BOD · ≤30 mg/L SS · ≤200 fecal coli/100 mL · 1 mg/L Cl_2 residual (min.)
C	Agricultural reuse (Non-food crops) Pasture; fodder, fiber and seed crops	· Secondary · Disinfection	· pH = 6～9 · ≤30 mg/L BOD · ≤30 mg/L SS · ≤200 fecal coli/100 mL · 1 mg/L Cl_2 residual (min.)

외에 pH, BOD, turbidity, SS, 잔류염소가 포함되어 있으며, 처리방법과 수질모니터링 방법, 상수원과 용수로와의 거리 등 세부적인 항목까지 포함하고 있는데 Table 5에는 농업용수 재이용 부분이 요약되어 있다. US EPA의 기준은 재이용수의 조건 중 심미적 부분인 SS, 탁도를 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 위험의 완전한 제거를 목표로 하여 제안된 기준이다.

WHO는 캘리포니아 수질기준이 역학조사(epidemiological basis)없이 만들어진 불합리한 수질기준이라 판단하고, 보다 현실적인 기준을 설정하기 위해 노력하기 시작하였다(WHO, 1973). WHO (1981)에서는 기술적으로 대장균을 완전히 처리하는 것이 가능하지만, 경제적·실용적인 측면을 충족시킬 수 없다고 판단하였다. WHO, 세계은행 및 국제폐기물조회센터(International reference centre for waste disposal)에 의해 소집된 위생·전염병전문가 및 사회과학자들은 논의를 거쳐 1985년 스위스 엥겔버그에서 최신의 전염병학적인 증거를 이용하여 처리된 하수와 분뇨의 재이용에 대한 보다 현실적인 접근방법을 제시하였다. 그 결과를 엥겔버그 보고서라 부르며, 작물 유형별, 관개방식별로 자세한 수질기준을 제시였다(WHO, 1989). 또한, 2000년도에 WHO에서는 기존의 수질기준에 관개방식에 대한 보완된 수질기준을 제시하였다(WHO, 2000).

WHO에서는 US EPA와 같은 음용수 수준의 처리는 경제적으로 부적합하며 역학조사를 통해 반드시 안전하다고 증명할 수 없으므로, 세계적으로 재이용수에 의한 수인성질병 자료를 모아 역학조사를 통해 대장균의 기준을 완화하였으며, 수인성 질병의 원인으로 밝혀진 장내기생충 항목을 추가하였다. 이 기준은 하수재이용시 발생할 수 있는 수인성질병에 관한 객관적인 기준을 기초로 하고 있으며 감염경로, 노출정도, 공공의 건강, 처리수준 등을 고려하여 만든 보다 합리적인 수질기준으로 인식하고 있다.

이 수질기준에서는 장내 기생충이 기준에 포함하였으나, 대장균에 대한 수질기준을 완화하였다. WHO기준은 US EPA에서 채택하고 있는 pH, BOD, 부유물질(SS), 탁도(turbidity), 잔류염소 등의 항목을 포함하지 않고 있으며, 보건·위생적인 측면인 대장균과 장내기생충의 보건·위생상의 항목을 기준으로 하고 있다.

이 기준들은 법률로서의 효력을 가지는 것은 아니며, 하수처리수를 농업용수로 재이용하는 국가에서 수질기준을 적용할 경우 참고할 수 있으며, 경제, 사회, 환경, 관개·경작방법 등을 고려하여 각 국가에 적합한 수질기준 적용을 권장하고 있다.

우리나라의 경우 농업적 용수재이용을 위한 수질기준 마련하기 위하여 US EPA의 기준을 기본으로 한 시안을 마련하여 적절한 처리기술을 개발하고, 하수처리수를 실제 규모의 벼농사의 적용하는 연구가 진행되고 있으며, 우리나라 관개용수의 대부분을 차지하는 논농사 관개의 경우는 US EPA의 B등급과 유사한 수준을 고려하고 있다(Seoul National Univ., 2002).

Oman에서는 제한관개시 US EPA의 기준, 무제한관개에는 재이용수를 사용하지 못하게 하는 US EPA의 기

Table 6. Recommended revised microbiological guidelines for treated wastewater use in agriculture[a] (WHO, 2000).

Category	Reuse conditions	Exposed group	Irrigation technique	Intenstinal nematodes[b] (/litre[c])	Fecal coliform (/100 mL[d])	Wastewater treatment expected to achieve required quality
A	Unrestricted irrigation A1 for vegetable and salad crops eaten uncooked, sports fields, public parks[e]	Workers, consumers, public	Any	≤ 0.1[f]	$\leq 10^3$	Ell-designed series of waste stabilization ponds (WSP), sequential batch-fed wastewater storage and treatment (e.g., conventional secondary treatment supplemented by either polishing ponds ir filtration and disinfection)
B	Restricted irrigation Cereal crops, industrial crops, fodder crops, pasture and trees[g]	B1 Workers (but no children $<$15 years), nearby communities	Spray or Sprinkler	≤ 1	$\leq 10^5$	Retention in WSP series including one maturation pond or in sequential WSTR or equivalent treatment (e.q., conventional secondary treatment supplemented by either polishing ponds or filtration)
		B2 as B1	Flood/ furrow	≤ 1	$\leq 10^3$	As for Category A
		B3 Workers (but no children $<$15 years), nearby communities	Any	≤ 0.1	$\leq 10^3$	As for Category A
C	Localized irrigation of crops if category B exposure of wakers and the public does not occur	None	Trickle, drip or bubbler	Not applicable	Not applicable	Pretreatment as required by the irrigation technology, but not less than primary sedimentation

[a] : In specific cases, local eqidemiological, sociocultural and environmental factors should be taken into account, and the guidelines modified accordingly.
[b] : *Ascaris* and *Trichuris* species and hookworms; the guideline limit is also intended to protect against risks from parasitic protozoa.
[c] : During the irrigation period (if the wastewater is treated in WAP or WSTR which have been designed to achieve these egg numbers, then routine effluent quality monitoring is not required).
[d] : During the irrigation season (fecal coliform counts should preferably be dine weekly, but at least monthly).
[e] : A more stringent guideline ($\leq$200 fecal coliforms/100 mL) is appropriate for public lawns with which the public may come into direct contact
[f] : This quideline limit can be increased to $\leq$1 egg/L if (i) conditions are hot and dry and surface irrigation is not ised or (ii) if wastewater treatment is supplemented with anthelmintic chemitherapy campaigns in areas of wastewater reuse
[g] : In the case of fruit trees, irrigation should cease two weeks before the fruit is picked and none should be picked off the ground. Spray/sprinkler irrigation should not be used.

준보다 강화된 기준을 사용하고 있으며, Mexico의 경우는 제한관개에 10,000 TC/100 mL 그리고 무제한관개에 1,000 TC/100 mL의 WHO기준과 유사한 정도였다. 하지만, 대부분의 국가에서 아직까지도 날로 먹는 작물에는 관개를 하지 못하게 하거나 US EPA의 수질기준을 적용하고 있는 상황이다(Strauss, 1987). 이처럼, 각 국가에서는 위의 수질기준을 참고로 특성에 맞는 수질기준을 만들어 사용하고 있으며, 우리나라에서도 재이용수를 농업용수로 이용하기 위해서는 경제적 · 사회적 · 환경적 · 보건위생 등의 문제를 연구한 후 우리 실정에 적합한 수질기준을 마련하는 것이 중요하다고 생각한다.

우리나라의 경우 관개용수의 대부분이 논농사에 이루어지고 있기 때문에 밭농사를 주로 하는 외국의 수질기준을 그대로 받아들이기 어렵다. 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. 또한, 하수처리수에 포함된 영양물질의 유입은 작물의 생산성을 높일 수 있는 장점을 갖고 있지만, 질소 과잉의 경우 벼의 도복과 같은 문제를 일으킬 수 있기 때문에 여기에 대한 충분한 연구가 필요할 것으로 판단된다(M.O.A.F., 1997). Yoon *et al.* (2000, 2001)은 하수처리수를 관개용수로 이용하여 벼농사에 이용하였을 경우 도복의 문제는 일어나지 않았으며, 관행시비구보다 오히려 높은 생산량을 나타내는 경향이 있다고 보고하였다.

사 사

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

인 용 문 헌

Kwun, S.K. 1997. Issues and Perspectives on the Demand and Supply of Agricultural Water, Report of 47th Regular Monthly Seminar of the Forum for Agricultural and Rural Policy : 50. (in Korean).

Lee K.H. and S.C. Lee. 2002. UV Disinfection. *Journal of Environmental Hi-Technology*, 1-13. (in Korean).

Lee S.H. 2002. UV Disinfection for Drinking Water Treatment. KSWQ · KWWA Processing of 2002 fall conference. (in Korean).

Ministry of Agriculture and Forestry (M.O.A.F.). 1997. Study of agricultural water quality guidelines establishment and improvement systems. 204. (in Korean).

Ministry of Agriculture and Forestry (M.O.A.F.). 2001. An annual statistics report improvement of foundation facilities in agriculture (in Korean).

Ministry of construction and transportation (M.O.C.T.). 1992. A standard of equipment and guidelines for reclaimed water (in Korean).

Ministry of Environment (M.O.E.). 2001. The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant. 2001. (in Korean).

Ministry of Environment (M.O.E.). 2002. The Water Quality Reports of Wastewater Treatment Plant. 2002. (in Korean).

Ministry of Environment (M.O.E.). 2002. Guidelines for Setting Disinfection System in Wastewater Treatment Plant, 1-5. (in Korean).

Seoul Univ. 2002. Application for wastewater reclamation and reuse. Sustainable water resources research center (in Korean).

Yoon, C.G., H.S. Hwang and S.H. Woo. 2001. Rice growth and nutrient change in paddy soil with reclaimed sewage-irrigation. *Journal of the Korean society of agricultural engineers* **43**(6): 154-162. (in Korean).

Yoon, C.G., S.K. Kwun and S.H. Woo. 2000. Effect of reclaimed sewage irrigation on paddy rice culture and soil characteristics. *Journal of the Korean society of agricultural engineers* **42**(3): 66-75. (in Korean).

Yoon, C.G., K.W. Jung, J.H. Ham and J.H. Jeon. 2003. Feasibility Study of UV-Disinfection for Water Reuse of Effluent from Wastewater Treatment Plant. *Journal of the Korean Society of agricultural engineers.* **45**(2): 126-137 (in Korean).

APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Ed, APHA, Washington, DC.

California state department of public health. 1978. Statewide standards for the safe directuse of reclaimed wastewater for irrigation and recreational impoundments. Berkeley. California state department of public health. (California administrative code, Title 17-Public health).

Davies-colley, R.J., A.M. Donnison, D.J. Speed, C.M. Ross and J.W. Nagels. 1998. Inactivation of faecal indicator microorganism in waste stabilization ponds: Interactions of environmental factors with sunlight. *Water Research*. **33**(5): 1220-1230.

Downes, A. and T.P. Blunt. 1977. Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. *Proc R Soc* **28**(1): 488-500.

Goldstein, S., V. Weak. M. Flowler and S. Poh. 1972. A study of selected economic and environmental aspects of individual home wastewater treatment systems. National Technical information Service. US Department of Commerce. Springfield. VA. pp. 10-29.

Gregory, A.S., J.P. Mally, A.B. Margolin and A.P. Hogan. 2000. UV inactivation of Viruses in Natural Water. Denver. AWWA.

Kashimada, K., N. Kamico, K. Yamamoto and S. Ohgaki. 1996. Assessment of photoreactivation following ultraviolet light disinfection. *Water Science Technology*. **33**(10-11): 261-269.

Loge, F., W. Emerick, C.R. Williams, W. Kodo, G. Tchobanoglous and J. Darby. 1997. Impact of Particle Associated Coliform on UV disinfection. *Proceedings of the Water Environment Federation 70th Annual Conference and Exposition* (Chicago).

NADB (North American Wetlands for Water Quality Treatment Database). 1994. Electronic database created by R. Knight, R. Ruble, R. Kadlec, and S. Reed for the U.S. Environmental Protection Agency. Copies available from Don Brown. US EPA. 569-7630.

Nakhla, G. and S. Farooq. 2003. Simultaneous nitrification-denitrification in slow sand filters. *Journal of Hazardous Materials.* **B96**: 291-303.

Oswald, W.J. 1988. Advances in Anaerobic pond system designs. In Advances in Water Quality Improvement.

ed. E.F. Gloyna and W.W. Eckenfelder. University of Texas Press. Austin. 186–194.

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.

Sanitation Districts of Los Angeles County. 1989. 1988～89 Annual ground water Recharge monitoring report. Sanitation Districts of Los Angeles County. Whittier. California.

Sinder, D.E., J.L. Darby and G. Tchobanoglous. 1991. Evaluation of Ultraviolet Disinfection for Wastewater Reuse Applications in California. Department of Civil Engineering. University of California at Davis. California.

Strauss, M. Notes on the reuse practice in selected countries of the Gulf region, northern Africa and Latin America. Unpublished paper presented at the Seminar on Effluent Reuse, Ministry of Health, Oman, April 1987.

Tchobanoglous, G., F. Loge, J. Darby and M. Devries. 1996. UV disign : Comparison of probabilistic and deterministic design approaches. *Water Science and Technology*. **33**(10–11): 251–260.

US EPA. 1992. Manual–Guidelines for water reuse. US EPA/625/R–921004. U.S. Agency international development. 11–20.

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. 1973. Water quality criteria. Ecological research series. EPA R–3–73–033. US Environmental Protection agency Washington, DC.

WHO. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme–Environment and Health.

(Manuscript received 10 June 2003,
Revision accepted 6 August 2003)