

## 자연정화방법에 의한 오수처리와 농업적 재이용 타당성 검토

### Feasibility Study of Natural Systems for Sewage Treatment and Agricultural Reuse

윤 춘 경\* · 정 광 욱\*\* · 함 종 화\*\* · 진 지 홍\*\*

Chun G. Yoon · Kwang-Wook Jung · Jong-Hwa Ham · Ji-Hong Jeon

#### Abstract

A pilot study was performed to examine the feasibility of the pond system for further polishing of treatment wetland effluent to agricultural reuse of reclaimed water. The constructed wetland and pond system was installed in Konkuk University and the effluent from septic tank of school building was used as an influent to the wetland system. The effluent of the wetland was used as an influent to pond systems. The influent concentrations of total coliform (TC), fecal coliform (FC), and *E. coli* were about  $10^5$  MPN/100 mL, and they were reduced to less than 10,000 MPN/100 mL on average after wetland treatments, showing over 95 % removal. And they were further reduced to less than 1,000 MPN/100 mL in average, showing over 85~93 % removal after pond treatment. Turbidity and SS were improved effectively on average and their pond effluent concentration was about 4.5 NTU and 9.8 mg/L in average, respectively. Average BOD<sub>5</sub> concentrations were also reduced substantially to 9.3 mg/L with about 83 % removal rate after wetland and pond treatment systems. Nutrients removal was relatively low and removal rate for T-N and T-P was less than 43 and 44%, respectively after wetland and pond treatment.

Considering stable performance and effective removal of bacterial indicators as well as other water quality parameters, low maintenance, and cost-effectiveness, pond system was thought to be an effective and feasible alternative for agricultural reuse of reclaimed water. This paper describes a preliminary result from pilot study and further investigations are recommended on the optimum design parameters before full scale application.

*Keywords*: Constructed wetland, Pond system, Wastewater reclamation, Water reuse, Total coliform, Suspended solid, Turbidity, Organic matter, Nutrients, Natural treatment system

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

## I. 서 론

수자원 요구량의 증가는 인구의 증가, 지표수 및 지하수의 오염, 수자원의 불공정한 분배와 주기적이고 계절 편중적인 가뭄 등에 의해 지속적으로 증가하여 왔으며, 수환경의 오염 및 수자원 부족현상은 날로 심각해지고 있다 (Han, 2002; Lee and Kim, 2001). 수자원 사용량의 50% 이상이 관개용수로 이용되고 있는 우리 나라에서는 관개용수의 확보 및 효율적인 관리가 매우 중요하다. 과거 30년 동안 간척사업 및 다목적댐의 건설을 통하여 수자원 확보를 위해 노력해 왔으나, 아직도 우리 나라는 물 부족 국가로 분류되고 있으며, 댐 건설을 통한 수자원 확보는 여러 가지 환경·사회적으로 불리하므로 수자원의 양적 증가를 통한 수자원 확보는 한계에 도달한 상태이다.

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 이용, 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 우리 나라에서도 그 적용가능성이 크다고 할 수 있다 (U.S. EPA, 1992).

우리 나라의 경우 수자원 총량 중 24%만이 이용가능수량으로, 이 중 농업용수는 약 50%를 차지하는 수자원 이용에 매우 중요한 요소이며 (Jung *et al.*, 1998), 보통의 수질만으로도 사용할 수 있기 때문에 하수 처리수를 재이용 할 수 있는 가능

성이 매우 크다고 할 수 있다.

재이용을 목적으로 하수처리수를 이용할 경우, 적절한 재이용수 수질기준을 마련하여 그에 맞는 처리방법을 연구하여 적용하는 것이 무엇보다 중요하다. 우리 나라에서는 제한된 범위의 하수재이용 기술이 활용되고 있으며, 그 이용량이나 실적이 미비한 실정이다. 건교부에서는 중수도의 개념을 도입하여 수세식 변기 세척수, 살수용수, 조경용수 등의 수질기준을 마련하여 일정규모 이상의 건물과 공장등에 재이용시설 설치 및 운영을 법제화하였다 (M.O.C.T., 1992). 하수처리장 방류수를 처리하여 농업용수, 양어장 그리고 축산업 등에 대한 폭넓은 수질기준은 마련되어 있지 않은 상태로서, 하수처리수의 재이용을 위한 폭넓은 재이용수 수질기준 마련이 시급하다고 할 수 있다.

하수처리수를 재이용하기 위한 조건으로는 소비자가 사용할 때 무색·무취이어야 하며, 위생학적인 안정성 확보가 무엇보다 중요하기 때문에 미생물의 지표인 대장균군 (Total coliform, TC), 분원성 대장균군 (Fecal coliform, FC) 그리고 대장균 (*E. coli*) 등과 BOD<sub>5</sub>, 탁도, pH와 잔류염소 등을 수질기준 항목으로 정해 규제하고 있다 (Duncan and Sandy, 1989; U.S. EPA, 1992; Anderson *et al.*, 2001; Lee and Kim, 2001). 또한, 우리 나라에서는 수질환경 보전법 하수처리장 방류수 수질기준을 하수도법시행규칙 제 6 조의 별표 1의 규정으로 이관하였으며, 양질의 수자원 확보를 위해 대장균군 등의 항목이 추가되어, 일부 하수처리장에서는 고도처리를 통해서 수질기준에 부합하는 방류수를 생산하기 위한 노력과 소독시설의 적용성을 검토하고 있다 (M.O.E., 2002).

농업적 용수재이용을 위해 하수처리수를 처리해 사용할 경우 적절한 시기에 사용할 수 있도록 용수를 저류하는 것이 중요하다. 우리 나라는 주로 벼농사를 중심으로 한 농업이기 때문에 관개기간에 많은 양의 용수가 단기간 필요하여 용수의 저류는 반드시 필요하다. 또한, 산재되어 있는 관개지역에

적절하게 용수를 공급하기 위해서는 팜 폰드 (farm pond)를 이용하여 하수처리수를 저장하는 과정 필요하다. 우리 나라 전국에 걸쳐 17,900여 개소가 설치되어 있는 농업용 저수지 (M.O.A.F., 2001)는 우리 나라 호소의 거의 대부분을 차지하고 있으며 농업용수 이용량의 50% 이상을 공급하는 수자원으로서 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서, 농업용 저수지를 적절하게 이용하여 재이용수를 저류하는 방법이 하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 검토되어야 할 사항이라고 생각한다.

Yoon *et al.* (1999, 2000)은 지하흐름형 인공습지를 이용하여 오수를 처리한 결과 생장기 및 동절기에 높은 제거율을 얻을 수 있다고 발표하였으며, 지하흐름형 인공습지에서 위생학적인 안정성의 지표인 분원성 대장균군이 평균 98% 이상 제거되었으며 SS와 BOD<sub>5</sub>도 높은 처리효율을 나타내었다고 보고하였다 (Thurston *et al.*, 2001; Hench *et al.*, 2003; Tanner *et al.*, 1995). Ham *et al.* (2002)은 지하흐름형 인공습지와 연못시스템을 연계적용시 동절기 고농도의 습지처리수를 추가 처리할 경우 연못시스템이 효과적이었다고 보고하였으며, 습지처리수가 연못시스템으로 계속유입 (plug-flow)될 경우의 수질변화에 대한 추가 연구가 필요하다고 하였다. 연못시스템은 자연상태에서 태양에너지와 생태계의 작용에 의해 각종 오·폐수를 처리하는 기법으로 생활하수, 공장폐수, 그리고 축산분뇨를 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 보고하였다.

본 연구에서는 지하흐름형 인공습지 유출수를 연못시스템에 계속유입 시키는 현장실험을 통하여 인공습지와 연못시스템의 연계적용 가능성과 미생물 및 수질인자의 처리효율을 검토하면서, 생활하수의

자연정화 처리에 의한 농업적 용수재이용에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

실험에 사용된 인공습지와 연못시스템은 건국대학교 내에 설치하였으며, 개요도는 Fig. 1과 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<sup>3</sup>/day이고, 그에 따른 처리조내 체류기간은 약 3.5일이었다. 습지에서 처리된 하수처리수를 저류탱크로 보낸 후 자연유하방식으로 두 개의 연못시스템에 0.5 m<sup>3</sup>/day씩 유입하도록 하였으며, 연못에서의 체류기간은 약 9일 이었으며 연못의 유출은 상층부에서 일어나도록 설계하였다 (Fig. 1).

연못 상층과 바닥이 각각 호기성과 혐기성 상태를 유지할 수 있는 조건성 연못 (facultative pond)이 되도록 깊이, 폭 및 길이가 모두 2 m인 콘크리트 box 두개를 설치한 후, 바닥에 모래를 0.4 m 채우고 6월 중순부터 습지처리수를 동시에 담기 시작하여 수심이 1.5 m 까지 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.

수질측정항목은 분석시간이 비교적 빠르고 용수재이용과 관련이 많은 미생물, 유기물 그리고 영양물질 위주로 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였다. 미생물 분석은 최적 확수 시험법 (multiple-tube fermentation method, MPN)을 사용하였으며, DIFCO 사의 시약을 이용하였다. Total coliform은 Lauryl trptose broth, fecal coliform은 EC broth 그리고 *E. coli*는

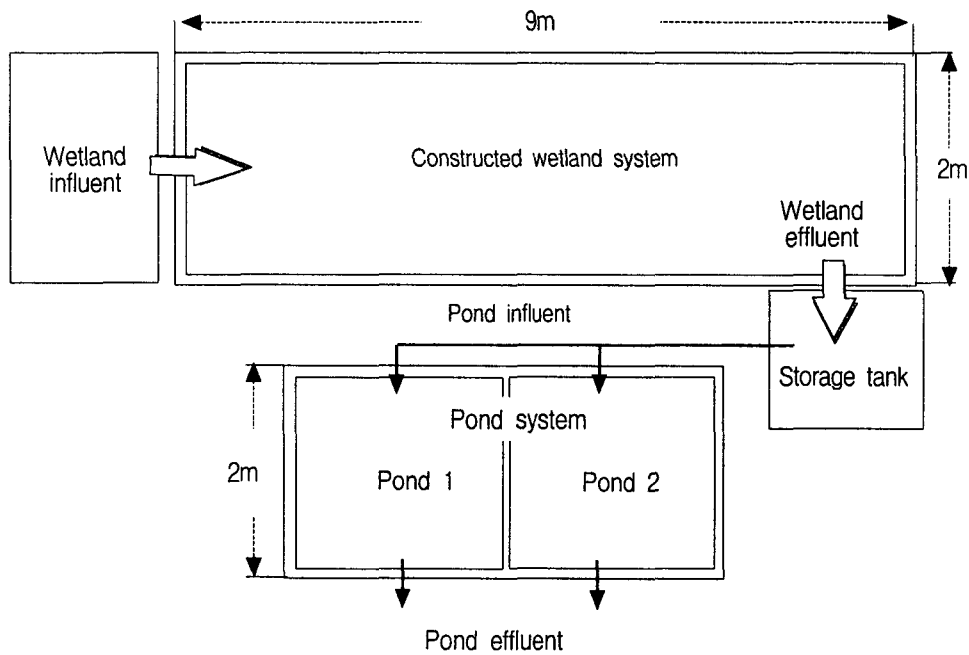


Fig. 1 Schematic diagram of the constructed wetland and pond system

EC-MUG broth 시약을 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 인공습지에 의한 오수처리

인공습지를 이용한 오수처리실험은 1997년부터 시작하여 2003년 현재까지 수행하고 있으며, 여기

에서는 실험조건이 동일한 1998년 7월 이후부터 2002년 12월까지 유입수와 유출수의 평균수질과 제거율을 나타내었다 (Table 1). 보다 자세한 실험시설 및 연간 항목별 수질변화는 Yoon *at al.* (1999; 2000)을 참고하기 바란다. BOD<sub>5</sub>와 SS의 제거율은 평균 78.1과 69.3%로 비교적 높은 처리효율을 보였으나, T-N과 T-P의 처리효율은 19.5와 39.9%로 비교적 낮은 처리효율을 나타내었다.

Table 1 Summary of the constructed wetland performances in the 1998~2002

Parameter	No. of Samples	Wetland (Mean ± Standard Error) <sup>a</sup>		
		Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Average removal(%)
DO	130	0.3±0.07	2.5±0.09	-
BOD <sub>5</sub>	130	118.2±5.68	27.1±2.70	77.1±1.33
SS	130	66.9±3.57	16.8±1.32	74.8±2.59
T-N	130	135.9±7.16	103.2±5.13	24.1±2.89
T-P	130	13.0±0.38	7.2±5.13	46.2±2.35

<sup>a</sup> : Mean concentration and standard error from October in 1998 to December in 2002.

본 연구에서 실시한 지하흐름형 인공습지 실험은 하수원수를 1 m<sup>3</sup>/day로 유입하여 처리하였으며, 2002년의 실험기간 동안 측정결과는 Fig. 2와 같다. 인공습지 평균유입수의 농도보다 본 실험기간의 평균농도가 낮은 경향을 나타내었는데, 이유는 실험에 이용된 건국대학교 생명환경과학대학 별관의 이용학생 증가로 인해 물 사용량이 증가하였으며, 농도가 비교적 높은 겨울철의 수질이 포함되지 않았기 때문으로 생각된다.

DO의 유입수의 평균농도는 0 mg/L이었는데, 처리조를 거친 유출수의 평균농도는 3.8 mg/L로 증가하였다. 일반적으로 정화조에서 처리된 유출수는

산소가 부족한 혐기성상태가 대부분이다. 따라서 정화조의 유출수를 처리하는 본 실험의 경우 유입수가 혐기성상태이었으나, 유입수가 인공습지를 통과하면서 식물체의 통기조직을 통해 산소가 뿌리로 전달되고 오수가 처리조를 통과하는 동안 대기로부터 재포기가 이루어졌기 때문에 수체(水體)에 산소가 공급되어 DO 농도가 증가하여 호기성 상태를 나타낸 것으로 생각된다.

BOD<sub>5</sub> 유입수의 평균농도는 53.5 mg/L이었고 유출수의 평균농도는 7.3 mg/L로서 평균 제거율은 86.4%를 나타냈다. 본 연구시기는 미생물과 식물이 성장하기에 적합한 온도였기 때문에 식물의 통

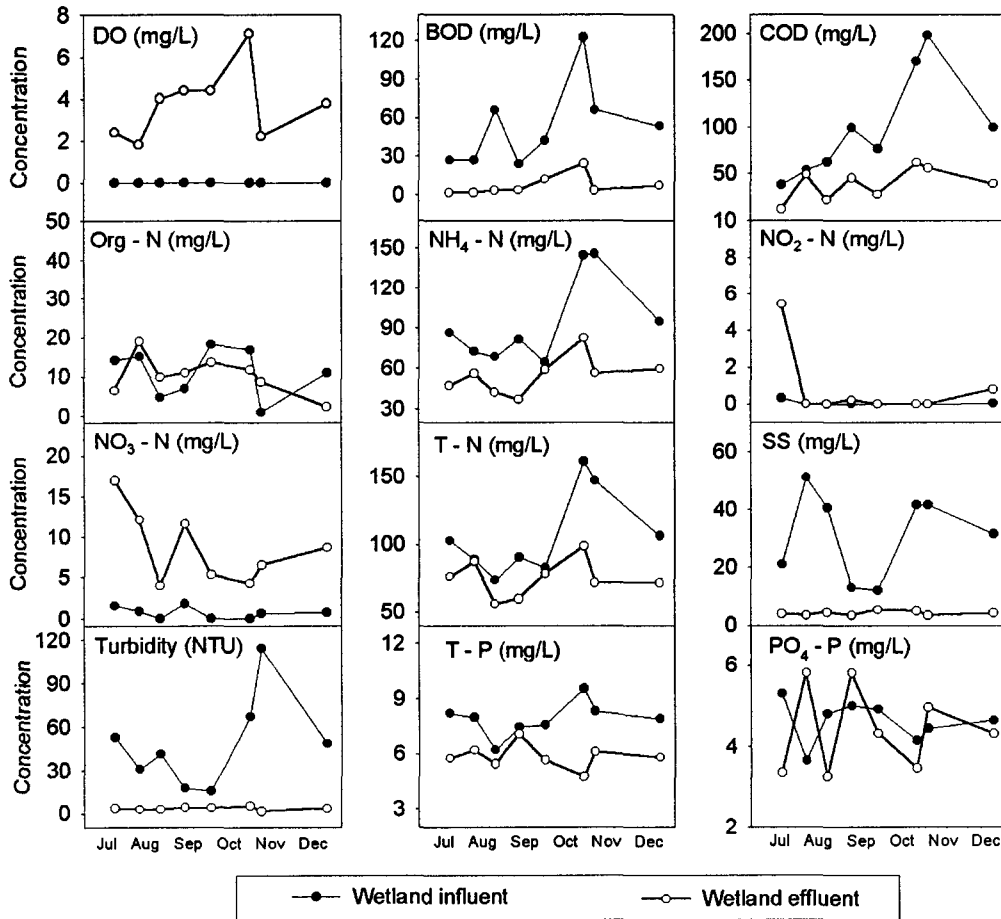


Fig. 2 Concentrations of water quality parameters in wetland system (2002)

기조직과 뿌리로부터 산소공급이 원활하고, 미생물에 의한 분해작용등이 활발하였기 때문으로 생각된다.

COD는 화학적 산소요구량으로서 미생물에 의해 분해 가능한 유기물을 분해하는데 필요한 산소요구량에 난분해성부분까지 포함한 산소요구량을 더한 값을 말한다. 유입수의 평균농도는 99.5 mg/L이었으며 유출수의 평균농도는 39.2 mg/L로서 처리효율이 약 61%로 비교적 BOD<sub>5</sub>보다는 낮았으나 높은 수준을 유지하였다. 유입수와 유출수의 COD/BOD 비율을 살펴보면 각각 1.86과 5.34으로서 유출수에서 높게 나타났는데, 습지내 COD의 제거는 미생물에 의해 분해가 가능한 BOD의 제거가 주로 이루어진 것으로 생각된다.

SS와 탁도의 평균 처리 효율은 유입수의 평균농도가 31.5 mg/L이었고 유출수의 평균농도가 4.2 mg/L였으며, 평균처리효율을 85%로 나타냈다. 인공습지에 의한 SS와 탁도의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 제거가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 부유물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응 등을 거치면서 궁극적으로 제거된다. 그런데, 유입되어 잔류하는 고형물질의 부하량이 처리조내의 제거율을 초과하게 되면 처리조에 고형오염물질이 누적되어 처리조의 전반적인 효율을 감소시킬 수 있다. 약 6년간의 현장실험 결과, 고형오염물질 누적으로 인한 처리조의 전반적인 효율저하는 아직 나타나지 않았다.

총인(T-P)의 유입수 총 평균농도는 7.9 mg/L이며 유출수의 평균농도는 5.9 mg/L로서 평균제거율은 약 25%로서 상대적으로 낮은 처리효율을 나타내었다. 본 연구에서는 총인과 함께 인산성 인(PO<sub>4</sub>-P)을 측정하였으며, 유입수의 인산성 인의 평균농도는 4.3 mg/L이며 유출수의 평균농도는 3.6 mg/L로서 16%의 처리효율을 나타내었다. 유입수와 유출수의 농도를 일원배치법의 분산분석

(One-way ANOVA test)를 실시한 결과, 유의수준 0.05에서 총인과 인산성 인의 유의확율이 각각 0.59와 0.12으로 처리효율이 없다는 결과를 나타내었는데, 이는 유입수의 농도가 유출수의 농도보다 낮은 경우도 발생하였기 때문에 평균 처리효율은 의미가 적은 것으로 나타났다.

총질소(T-N)의 유입수 평균농도는 106.4 mg/L이었으며 유출수의 총 평균농도는 74.8 mg/L로서 30%의 처리효율을 나타내었다. 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub>-N)의 경우 유입수의 평균농도가 94.8 mg/L이었고 유출수의 농도가 55.0 mg/L로서 42%의 높은 제거효율을 보였으나, 유기성 질소(Org-N)의 경우 유입수의 평균농도가 10.9 mg/L이었고 유출수의 평균농도가 10.26 mg/L로서 거의 변화가 없었다. 아질산성 질소의 경우를 보면 유입수의 평균농도가 0.05 mg/L에서 유출수의 평균농도가 0.8 mg/L로서 거의 변화가 없었으나, 질산성 질소의 경우에는 0.7 mg/L에서 8.7 mg/L로 오히려 증가하였다. 그 이유는 호기성을 유지하고 있는 처리조를 통과하면서 질산화작용(nitrification)이 일어나 유기성 질소와 암모니아성 질소, 그리고 아질산성 질소가 질산성 질소로 바뀌었기 때문으로 생각된다.

## 2. 인공습지유출수의 연못에서 수질변화

본 연구에서 실시한 연못시스템의 실험은 연속식 처리방법으로서 습지에서 유출되는 오수처리수 1 m<sup>3</sup>/day의 유량을 두 개의 연못에 각각 0.5 m<sup>3</sup>/day로 유입시켰으며, 그 실험결과는 Fig. 3과 같다.

Chl-*a*의 농도를 보면 두 연못에서 실험초기 높은 농도를 나타내었으나, 그 후로는 급격히 감소하는 결과를 보였다. 이유는 연못 1에서는 개구리밥(duckweed), 그리고 연못 2에서는 사상성 부착조류인 헛뿌리말(*R. riparium*)이 자연발생적으로 번성하여 경쟁관계인 조류의 성장을 억제하였기 때문으로 판단된다. 식물성 플랑크톤, 개구리밥, 그리고 헛뿌리말에 영향을 주는 요인들은 상당히 다양하고

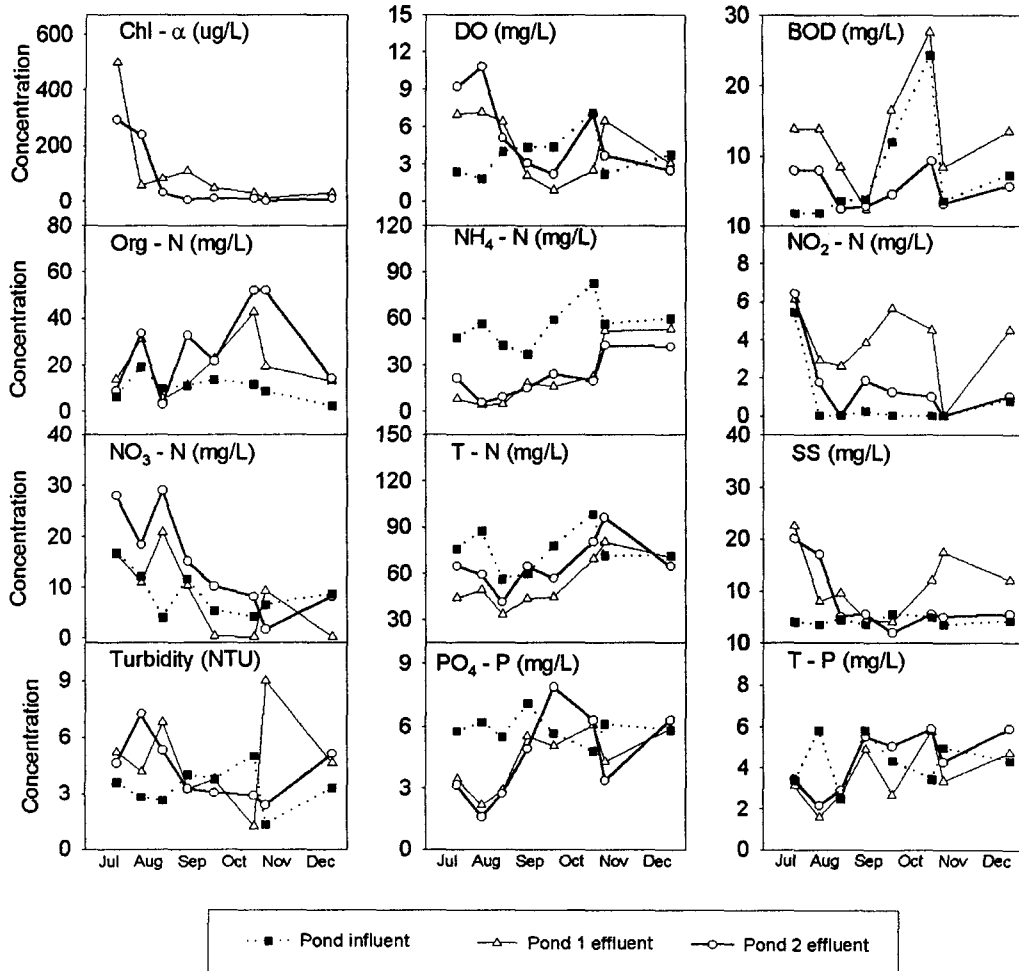


Fig. 3 Concentrations of water quality parameters in pond system

이런 요인들이 서로 복합적으로 작용하는 자연현상이다. 환경요인들 중 특히 영양염의 농도와 수온 그리고 광합성을 하는데 필요한 태양광 등 많은 요인들이 영향을 미치며, 본 연구에서와 같이 동일한 지역과 여건을 가지고 실험을 함에도 불구하고, 연못 1과 연못 2의 우점종이 다를 정도로 연못시스템에는 다양한 요인들이 작용한다. 또한 연못시스템에 조류, 개구리밥, 그리고 헛뿌리말과 같은 생물이 성장하는 것이 수체에 부정적인 측면을 가질 수도 있지만, 영양물질제거 등에 긍정적인 영향을 미칠수 있을 것으로 판단된다. Zimmo *et. al.* (2000)

은 조류와 개구리밥으로 뒤덮인 연못에서 환경인자와 질소의 변화에 대해 비교한 연구에서 조류를 이용한 연못과 개구리밥을 이용한 연못에서 각각 45~48%와 42~62%의 총질소가 제거된다고 보고하였으며, 개구리밥을 이용한 연못에서는 빛의 차단으로 인해 조류가 발생하지 못했고, 개구리밥을 제거할 경우 추가적인 영양물질 제거효과가 있다고 하였다.

연못 유출수의 DO 농도를 살펴보면 연못 1의 경우 개구리밥이 생겨나기 시작하면서 DO 농도가 낮아지기 시작하였고, 전 수면을 덮고 있는 시기인

10월까지 매우 낮은 농도를 보이다가 온도가 감소하여 이들의 생장에 지장을 주기 시작하는 11월부터 서서히 증가하는 경향을 보였다. 개구리밥이 수면을 전체적으로 덮고 있는 시기에 DO 농도가 낮은 이유는 조류에 의한 광합성이 감소하여 산소가 공급되는 것이 줄어들기 시작하였으며, 대기와 접하는 수표면이 제한되어 산소공급이 제대로 이루어지지 않았기 때문이라 생각된다. 연못 2의 경우는 9월말까지는 연못 1과 비슷한 농도변화를 보였으나, 벽에 붙어 살아가는 헛뿌리말이 우점하였기 때문에 10월부터 연못 1보다 높은 농도를 나타낸 것으로 생각된다. 평균 유입수 DO 농도는 3.8 mg/L 이었고, 연못 1과 연못 2의 유출수가 각각 평균 4.5와 5.5로서 시기적인 차이는 보이나, 전체적으로는 적은 양이지만 산소가 수체로 공급되어 약간 증가하는 것으로 나타났다.

BOD<sub>5</sub>의 농도는 두 연못 모두 조류가 번성한 시기에는 유입수보다 유출수의 평균농도가 오히려 높았는데, 이유는 조류에 의해 1차 생산이 이루어졌기 때문이라 생각된다. 연못 1의 경우 유입수의 농도와 유사한 형태의 유출수 농도를 보였으며, 평균 유입수 농도가 7.3 mg/L에서 유출수의 농도가 13.1 mg/L로 약 44% 증가하였다. 연못 2의 경우에는 개구리밥이 우점한 연못 1의 경우보다는 유입수 농도 변화에 안정적인 유출수 농도를 보였으며, 평균농도가 5.5 mg/L로서 약 25% 저감되었다. 따라서 연못의 유기물 농도 억제에는 개구리밥보다 부착조류의 번식이 유리할 것으로 생각된다.

SS와 탁도는 오히려 전체적으로 농도가 증가하는 경향을 보였다. Yoon *et al.* (2002)은 연못에서 chl-*a*와 SS의 농도변화는 밀접한 상관관계가 있다고 보고하였으며, Kim *et al.* (2001)은 주암호에 있어서 chl-*a*와 SS에는 상관성을 보인다고 하였다 ( $r=0.75$ ). 본 연구에서도 chl-*a*가 높은 시기인 실험초기에 SS와 탁도의 농도가 높게 측정되었으며 개구리밥과 헛뿌리말이 우점한 시기에는 상대적으로 안정적인 농도를 나타내었다. 하지만 연못 1의

경우는 개구리밥이 계절적인 영향에 의해 소멸하여 분해되기 시작하면서 SS와 탁도가 증가에 영향을 준 것으로 나타났다.

질소의 경우 본 연구에서는 유기성 질소 (Org-N), 암모니아성 질소 (NH<sub>4</sub>-N), 아질산성 질소 (NO<sub>2</sub>-N), 질산성 질소 (NO<sub>3</sub>-N), 그리고 총질소 (T-N)를 측정하였다. 유기성질소의 경우 실험 초기에는 유입수와 유사한 농도경향을 보이다가 실험이 계속되면서부터 유입수의 농도보다 높은 농도를 지속적으로 나타내었다. 연못시스템내에서 조류, 개구리밥, 헛뿌리말, 그리고 각종 미생물들에 소멸함으로써 영양물질로 환원되었기 때문이라 생각된다. 암모니아성 질소의 경우는 유입수의 평균농도와 두 연못 유출수의 평균농도를 비교해본 결과 약 60%의 제거율을 보였다. 이는 DO 상승으로 인한 질산화, 조류·개구리밥·헛뿌리말에 의한 섭취, 그리고 대기로의 휘발 등에 의해 제거된 것으로 생각된다. 실험초기부터 높은 제거율을 보인 암모니아성 질소는 11월부터 그 농도가 상대적으로 높아지는 경향을 보이는데, 이유는 생물들이 소멸하면서 암모니아성 질소로 변한 것으로 생각된다. 연못 1과 연못 2의 아질산성 질소 농도는 각각 3.8, 1.7 mg/L, 질산성 질소의 농도는 각각 8.6, 14.8 mg/L를 나타내었다. 그 이유는 조류, 개구리밥, 그리고 헛뿌리말과 같은 호기성생물에 의한 질산화로 농도가 증가한 것으로 생각되며, 연못 1에서 연못 2보다 활발한 질산화가 이루어진 것으로 나타났다. 총질소(T-N)의 농도변화로서 질소를 평가하면, 연못시스템의 1차 생산에도 불구하고 유입수 평균 농도 74.8 mg/L에서 연못 1과 연못 2의 평균농도가 각각 54.5와 64.9 mg/L로 각각 27, 13%의 처리효율을 나타내었으며, 개구리밥과 헛뿌리말을 제거할 경우에는 더 높은 질소제거율을 기대할 수 있을 것이라 생각된다.

인의 경우 본 연구에서는 총인(T-P)과 인산성인(PO<sub>4</sub>-P)을 측정하였으며, 총인의 유입수 평균 농도는 5.9 mg/L이었으며 연못 1과 연못 2의 평



균농도가 각각 4.4와 4.5 mg/L를 나타내었고, 인산성인의 유입수 평균농도는 4.3 mg/L이었으며 연못 1과 연못 2의 평균농도가 각각 3.6과 4.3 mg/L를 나타내었다.

### 3. 자연정화에 의한 지표성미생물의 처리

본 연구에서 실시한 지하흐름형 인공습지와 연못 시스템에서 가장 관심을 가지고 조사한 부분은 농업적으로 용수를 재이용시 중요한 보건·위생학적인 인자인 미생물의 처리효율이었으며, 인공습지 유입수와 유출수 그리고 연못 1과 연못 2의 유출수의 미생물 농도는 Fig. 4와 같다.

인공습지 유입수의 평균 미생물 농도는  $10^5$  MPN/100mL 이상 수준으로 비교적 높은 수치를 나타내었지만 인공습지를 거치면서 평균 97% 이상 제거되어 TC, FC, *E. coli*의 평균 농도가 각각 9,542, 6,257, 4,762 MPN/100mL로 감소하였다. 하지만, 유출수의 농도범위가 300~16,000 MPN/100mL로서 샘플일자에 따라 큰 농도차이를 보였다. 습지시스템은 실험초기단계에서 유입수가 공급되기 시작하여 습지시스템이 안정화되어 가면서 점차적으로 낮은 미생물 농도를 보이다가, 11월에는 온도저하로 습지시스템의 처리효율이 감소하여 농도가 증가한 것으로 생각된다. 또한, 농도가 감소한 8월에서 10월까지의 지속적인 강우로 인해 유출수의 농도가 희석효과와 천적 미생물에 의해 감소한 것으로 생각된다. Thurston *et al.* (2001)에 의하면 습지 시스템에서 대장균군과 분원성 대장균군의 제거는 네마토데스 (nematodes)와 프로토조아 (protozoa) 같은 천적관계인 미생물에 잡아먹히거나 살균바이러스 (bacteriophage), 독소 (microbial toxins), 온도, 식물, 그리고 흡착 (adsorption)과 같은 작용에 의해 제거되며, 지하흐름형 인공습지에서 대장균군과 분원성 대장균을 모니터링한 결과 98%의 처리효율을 얻었다고 보고하였다. Tanner *et al.* (1995)은 13개월동안 분원성 대장

균군의 90~99% 처리효율을 얻었고, David *et al.* (2002)는 132개의 샘플에서 87%의 분원성 대장균군이 제거되었다고 보고하였다. 이 결과는 본 연구결과와 유사한 범위의 처리효율을 보이며 자연정화방법인 습지처리에서 높은 미생물제거효율을 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만, 습지처리시설을 하수처리시설로 사용할 경우 방류수 수질기준이나 재이용을 하기 위한 수질에는 아직 부족할 것으로 생각되며, 추가적인 처리가 필요할 것으로 판단된다.

연못에서는 대장균군, 분원성 대장균군, 대장균이 85~93%의 제거효율을 보였으나 샘플시기에 따라 20~3,000 MPN/100mL의 농도 변화를 보였다 (Fig. 4). 연못 1의 경우에 9월말에 미생물의 농도가 급증하는 경향을 보이는 이유는, 폭우의 영향에 의해 주변이 범람하여 연못으로 직접 유입됨으로써 영향을 주었기 때문이며, 연못 2의 경우에도 이런 경향이 일부 나타났다. 또한, 연못 2에서는 시기별 농도의 주기적인 변화가 연못 1에 비해 크게 나타난 이유는 연못에서 우점한 생물이나 동물성 플랑크톤과 같은 천적생물의 변화가 대장균의 농도변화에 영향을 준 것으로 생각된다. 연못시스템에서 미생물의 소독은 주로 태양광에 노출되어 이루어지며, 깊이에 따라 태양광 투과율이 감소로 소독효율이 저하된다고 보고되었다 (Ohgaki *et al.*, 1986; Sarikaya *et al.*, 1987). 태양에 의한 소독은 이미 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 보고되었는데, Downes *et al.* (1977)은 인도에서는 1세기 전부터 태양을 음용수 소독에 이용하였으며, 태양광이 미생물을 소독에 효과가 있다고 보고하였다. Ronan *et al.* (1996)은 태양광으로 소독한 물을 가지고 Massai족의 5~16세의 어린이들에게 음용수로 사용하게 하였으며, Peter *et al.* (2003)은 태양광에 의한 소독을 Haiti에 실제 적용하여 음용수로 사용하였다. 일반적으로, 태양광에 의한 소독은 자외선 파장대인 200~400 nm에서 이루어지며 UV-B (290~320 nm)가 미생물의 소독에 직

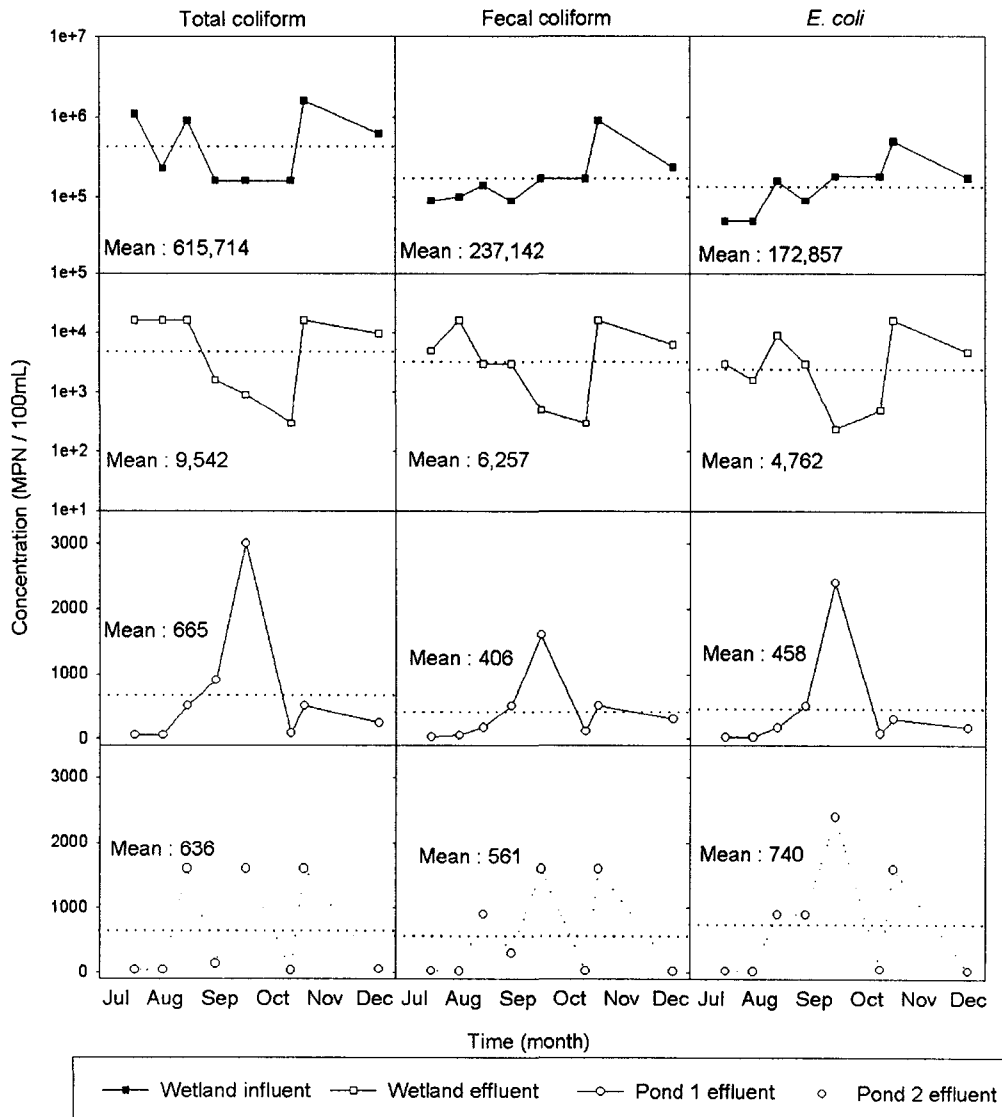


Fig. 4 Concentration of TC, FC, and *E. coli* in wetland and pond system

접적인 영향을 미친다고 하였다 (Mayo, 1989). Morris *et al.* (1995)은 호소내에서 태양광을 이용하여 실험한 결과 DOC (dissolved organic carbon)의 농도가 증가함에 따라서 UV-B (280~320 nm)의 투과율이 감소한다고 하였으며, Troussellier and Legendre (1989)은 태양광의 투과율이 계절변화에 따라 변하며 여름철에 더 깊

은 곳까지 투과한다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서는 연못시스템내에서 미생물 처리효율은 태양광의 소독효과 이외에도 조류, 개구리밥, 그리고 부착조류와 같은 생물의 영향, 계절적 영향, 강우, 그리고 용존성 유기물등에 영향을 받았을 것으로 생각된다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 미생물의 소독은 수체내의 물리·화학·생물학적인 영향과 계

절적인 변화에 의해 소독효율의 차이가 있을 수 있으나, 소독은 주로 태양광에 의해 이루어지기 때문에 용수재이용과 같이 소독을 주목적으로 연못시스템을 적용할 경우 큰 효과를 기대할 수 있으며, 본 연구와 같이 연못의 상층부를 방류하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

WHO (1989)에서는 재이용수 수질에 대한 권장 기준 중 조리하지 않고 날것으로 먹는 채소, 운동장, 공원 등의 FC 농도를 1,000/100 mL로 규정하고 있다. 우리 나라 하수처리장 방류수 수질기준은 TC를 3,000 개/mL로 규정하고 있으며, 하수도법 시행규칙을 2003년부터 강화하여 상수원보호구역 및 그 경계구역으로부터 상류로 유하거리 10 km 이내 지역과 취수시설로부터 상류로 유하거리 15 km 이내 지역은 방류수 수질기준을 1,000 개/mL로 강화하여 적용하고 있다. 연못시스템을 거친 후 TC의 방류수 평균수질이 1,000 MPN/100mL 이하로서 방류수 수질기준을 충분히 만족시키기 때문에 하수처리장에 적용가능성이 높으며, 재이용수로서 사용할 경우에도 보건·위생상의 문제를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 연못시스템을 일반적인 하수처리장 방류수의 조정지나 저류지의 개념으로 이용할 경우에도 높은 미생물 제거효율이 기대된다.

연못시스템에 관한 연구는 2002년의 6개월간의 연구결과로서 그 한계성을 갖고 있기 때문에 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 생각된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 용수재이용을 위해 생활하수를 지하흐름형 인공습지로 처리한 후 연못시스템에 연결시켜 각 시스템에서의 미생물과 각 수질인자들의 처리효과를 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 인공습지 처리 후 탁도와 SS는 85% 이상 제거되었는데, 연못시스템으로 유입되었을 경우 조류

와 생물들에 의한 1차 생산으로 인해 오히려 농도 증가 가능성을 나타냈으나, 우리 나라 방류수 수질 기준보다 낮은 농도를 유지할 수 있었다. 그러나, 용수재이용시 보건·위생적인 측면과 더불어 이용자가 사용하는데 심미적인 불편함이 없어야 하므로 유출부에 여과시설 등 이에 대한 추가처리나 관리 대책이 필요할 것으로 생각된다.

2. 인공습지를 통해서 산소를 공급하고 BOD<sub>5</sub>의 부하를 현저히 줄일 수 있었으며 연못시스템과 연계 적용한 경우에 DO와 BOD<sub>5</sub>의 농도에 연못내 1차 생산으로 인해 다소 변동이 있었으나, 전체적으로는 국제적인 농업적 재이용 수질기준보다 낮은 수준으로서 우려할 사항이 아닐 것으로 판단된다. 그리고, 영양물질인 인이나 질소의 인공습지를 통한 제거율은 상대적으로 낮았으나 연못시스템을 연계 적용한 경우 추가처리 효과를 기대할 수 있을 것으로 나타났다.

3. 지하흐름형 인공습지에서의 미생물 처리효율은 TC, FC, *E. coli* 모두 평균 97% 이상 높은 처리 효율을 보였으며, 인공습지 유출수가 연못시스템을 거치면서 추가로 평균 85% 이상 제거되어 평균미생물농도가 1,000 MPN/100mL 이하이었다. 인공습지와 연못시스템을 연계·적용한 후 농업용수로 재이용하거나 수계로 방류할 경우 보건·위생상의 문제를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 미생물의 소독은 대부분 태양광에 의해서 이루어지기 때문에 본 연구와 같이 연못 상층부에서 유출시킬 경우 높은 처리효율을 기대할 수 있을 것으로 생각하며, 대장균과 연못내에 존재하는 생물들 사이의 상호작용을 정확히 이해하여 적절한 관리대책을 마련 할 경우 안정적인 방류수 농도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 인공습지와 연못시스템을 연계 적용한 방법은 일반적인 하수처리장과는 달리 토양, 식물과 미생물과 같은 자연요소들의 자정능력을 이용하는 자연정화방법으로서, 하수처리수를 재이용할 경우 처리와 저장을 동시에 할 수 있는 방법이다. 높은 미생

물 소독효율을 나타내어 보건·위생상의 문제를 크게 줄일 수 있었으며, 일반적인 하수처리장 방류수에 연못시스템을 적용할 경우에도 이러한 수준의 소독효율을 기대할 수 있을 것이라 판단된다. 인공 습지와 연못시스템을 이용한 하수처리방식은 간단한 구조, 큰 완충능력, 적은 슬러지 발생, 적은 관리요소와 저렴한 관리 유지비를 갖는 장점을 가지고 있으며, 농촌지역 하수처리와 농업용수 재이용 기술로서 적용가능성이 클 것으로 판단되어 적극적인 검토가 필요하다고 생각된다.

이 논문은 2003학년도 건국대학교 학술진흥 연구비 지원에 의한 논문임

### References

1. Anderson, J., A. Adin, J. Crook, C. Davis, R. Hultquist, B. Jimenez-Cisneros, W. Kennedy, B. Sheikh and B. van de Merwe. 2001. Climbing the ladder: a step by step approach to international guidelines for water recycling. *Water Science and Technology*. 43(1): 1-8.
2. APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 19th Ed
3. Dancan, M. and C. Sandy. 1989. *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture*. WHO. pp. 78-82.
4. 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.
5. David, S., L. Fraser, J. Boddy and B. Seibert. 2002. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. *Ecological Engineering* 18:429-440.
6. Downes, A. and T. P. Blunt. 1977. Resear-ches on the effect of light upon bacteria and other organisms. *Proc R Soc* 28(1): 488-500.
7. Hench, K. R., G. K. Bissonette, A. J. Sexstone, J. G. Coleman, K. Garbutt and J. G. Skousen. 2003. Fate of physical, che-mical, and microbial contaminants in dome-stic wastewater following treatment by small constructed wetlands. *Water Research*. 37: 921-927.
8. Mayo A. W. 1989. Effects of pond depth on bacterial kinetics in stabilization ponds. *Journal of Environmental Engineering*. 121: 964-977.
9. Morris, D. P., H. C. E. Zagarese, E. G. Williamson, B. R. Balseira, and B. Modunutti. 1995. The attenuation of solar UV radiation in lake and the role of dissolved organic carbon, *Limnology Oceanographic*. 40: 1381-1391.
10. NADB(North American Wetlands for Water Quality Treatment Database). 1994. Elect-ronic database created by R. Knight, R. Ruble, R. Kadlec, and S. Reed for the U. S. Environmental Protection Agency. Copies available from Don Brown. U. S. EPA. 569-7630
11. Ohgaki s., A. Ketratanakul and U. Pra-sertsom. 1986. Effect of sunlight on coliphages in an oxidation pond. *Water Science Technology*. 18: 37-46.
12. 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.
13. Peter, M. O., P. Shanahan and F. P. Martin. 2003. Solar disinfection(SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment

- in Haiti. *Water Research*, 37: 47-54.
14. 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.
  15. Sarikaya H. Z., A. M. Saatci and A. F. Abdulfattah. 1987. Effects of pond depth on bacterial dieoff. *Journal of Environment Engineering*, 113: 1350-1362.
  16. Tanner, C. C., J. S. Clayton and M. P. Upsdell. 1995. Effect of lading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands- I. Removal of oxygen demand, suspended solids and fecal coliform. *Water Research*, 29(1): 17-26.
  17. Thurston, J. A., C. P. Gerba. K. E. Forster and M. M. Karpiscak. 2001. Fate of indicator microorganism, *Giardia* and *Cryptosporidium* in subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, 35(6): 1547-1551.
  18. Troussellier M. and P. Legendre. 1989. Dynamics of fecal coliform and culturable heterotroph densities in an eutrophic ecosystem: stability of models and evolution of these bacterial groups. *Microbial Ecology*, 17: 227-235.
  19. US. EPA. 1992. Manual - Guidelines for water reuse. 1992. EPA/625/R-921004. *U.S. Agency international development*. <http://www.epa.gov>. Assessed 9 Aug. 2002.
  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.
  21. Zimmo, O. R., R. Alsa'ed. and H. Gijzen. 2000. Comparison between algae-based and duck-weed-based wastewater treatment: differences in environmental conditions and nitrogen transformations. In waste stabilization pond: Technology and the Environment. ed. Pearson. H. W., D. D. Mara. and Y. Azov. 215-222. IWA.
  22. Ham, J. H. C. G. Yoon. J. H. Jeon and M. H. Kim. 2002. Pond system for further polishing of constructed wetland effluent during winter season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(4): 139-148.
  23. Han, D. W. 2002. Treatment characteristics of rapid filtration process treating secondary clarifier effluent for wastewater reuse. (in Korean)
  24. Jung, H. W., S. J. Kim. J. S. An. B. K. Lee. G. H. Lee. and S. O. Jung. 1998. *Engineering of irrigation and drainage*. Seoul : Dongmyung sa. (in Korean)
  25. Lee, N. Y. and W. I. Kim. 2001. Water reuse using wastewater treatment plant effluent. *Journal of Environmental Hi-Technology*. pp. 100-109. (in Korean)
  26. Ministry of Construction and Transportation. 1992. A standard of equipment and guidelines for reclaimed water. (in Korean)
  27. Ministry of Agriculture and Forestry. 2001. An annual statistics report improvement of foundation facilities in agriculture (in Korean)
  28. Ministry of Environment. 2002. *Guidelines for Setting Disinfection System in Wastewater Treatment Plant*. (in Korean)
  29. Yoon, C. G., S. K. Kwun. J. H. Ham and J. K. Noh. 2000. Study on the performance of constructed wetland system for sewage treatment. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 42(4): 96-105 (in Korean)
  30. Yoon, C. G., S. K. Kwun and J. H. Ham. 1999. Wetland performance for wastewater treatment in growing and winter seasons. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 41(4):37-46. (in Korean)