

## 신양천 하천수정화 연못시스템의 처리수준 및 연못반응

양 홍 모<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 전남대학교 조경학과

### Treatment Level and Reactions of a Treatment Pond System Purifying Sinyang Stream Water

**Yang Hongmo<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup> Department of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University.

#### ABSTRACT

Treatment level and pond reactions of a pond system were examined from May to October 2002. The system was constructed in July 2000 for purifying water of Sinyang stream that flows into Koheung Estuarine Lake located in the southern part of the Korean Peninsula. The system was composed of a primary and a secondary pond in series and established on the rice field near the lake. Water pumped from the stream was funneled into the primary pond, whose effluent was discharged into the secondary pond by gravity flow. Effluent from the secondary pond was funneled into wetlands.

About 130 m<sup>3</sup>/day of water was pumped into the primary pond and detention time of the primary and secondary pond was about 2 days. DO from the surface to the 1.0 m depth of the primary and secondary pond was in the range of 5.2 to 11.0 mg/L and 4.3 to 0.7 mg/L, respectively. DO at the bottom layer of the primary pond was 0 mg/L and that of the secondary pond ranged 3.0~4.7 mg/L. The primary pond functioned as a facultative pond and the secondary as an aerobic one. The temperature difference between the surface and bottom layers of the ponds in August was about 2.5°C and that in May and October was about 1.0°C. Thermocline was observed in the primary pond during the high ambient temperature of August. The sludge depth of the primary pond in May, August, and October was 2.4, 1.9, and 2.2 cm, respectively. That of the secondary pond was 1.2, 1.0, and 1.1 cm, respectively.

SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, and T-P concentrations in influent averaged 16.64, 6.71, 6.21, and 0.23 mg/L and

---

**Corresponding author** : Yang, Hongmo, Department of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, Kwang-Ju, 500-757,  
Tel : +82-62-530-2101, E-mail : hmy@chonnam.ac.kr

those in effluent from the primary pond averaged 11.48, 4.97, 4.81, and 0.17 mg/L, respectively. The removal rates of the primary pond for SS, BOD<sub>5</sub>, T-N and T-P were 31%, 26%, 22%, and 24%, respectively. Average concentrations of SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, and T-P in effluent from the secondary pond were 9.81, 4.07, 4.03, and 0.14 mg/L, respectively and the abatement rates of the secondary pond for SS, BOD<sub>5</sub>, T-N and T-P were 20%, 12%, 13%, and 15%, respectively. SS, BOD<sub>5</sub>, T-N and T-P concentrations in effluent from the primary pond were significantly low( $p=0.001$ ) when compared with those from the secondary one.

**Key Words :** *Facultative pond, Aerobic pond, Sludge depth, Thermocline, Hydraulic loading rate.*

## I. 서 론

자연정화 기법인 수질정화 연못시스템(treatment pond system)은 자연상태에서 태양에너지와 생태계의 작용으로 수중의 오염물질을 정화하는 시스템으로, 생활하수, 산업폐수, 축산폐수를 정화하기 위해서 활용되어 왔으며(Green et al., 1996; Oswald et al., 1994; WHO, 1987) 오염정도가 상대적으로 낮은 강우유출수, 오염하천수를 정화하기 위해서도 활용하고 있다(Claytor, 1995; Kantrowitz, 1995; Lar, 2000; Lundberget et al., 1999).

연못시스템에서 수질정화는 다양한 생물화학적, 물리적 반응에 의해 이루어진다. 침전, 유기산생성, 메탄발효, 호기성산화, 광합성산소배출, 영양염류제거 등이 규명되어 왔으며, 이들 반응 중 연못시스템의 설계에서 중요하게 고려하는 반응은 부유물의 침전과 연못바닥의 혐기상태에서 일어나는 메탄발효, 연못상층에서 일어나는 호기성미생물에 의한 분해 및 조류(algae)에 의한 광합성산소배출이다(EPA, 1987; Oswald, 1988).

조건성연못은 햇빛이 비치면 태양열로 온난하고 밀도가 낮은 상층과, 차갑고 밀도가 높은 하층으로 구분된다. 상하층이 구분되면 수직으로 물의 이동이 없어 바닥에 고형물이 침전되고, 연못속의 오염물정화는 다양한 생물학적, 화학적, 물리적 반응에 의해서 이루어진다. 하층은 혐기성상태가 되어 박테리아 활동으로 침전된 유기물이

분해되어 유기산이 생성되며, 유기산을 메탄박테리아가 메탄과 이산화탄소로 분해시킨다. 상층에서는 호기성미생물에 의해 유기물이 이산화탄소, 물, 영양염류로 분해되며, 햇빛이 쬐이면 조류가 이산화탄소와 영양염류를 흡수하여 성장하면서 산소를 배출하여 연못상층의 용존산소가 증가한다(WHO, 1987). 따라서 연못의 수심별 온도, DO, pH를 조사하고, 슬러지층의 깊이를 측정하여 연못의 중요한 반응을 분석할 수 있다. 연못시스템의 마지막 부분에 위치하는 호기성연못은 마무리연못(maturation pond)이라고도 부르며, 조건성연못에서 성장한 조류가 침전되고, 처리가 덜된 유기물의 일부가 분해되어 정화된다.

연못시스템에서 활용하는 연못의 종류는 혐기상태를 유지하는 혐기성연못, 호기상태를 유지하는 호기성연못, 호기층과 혐기층이 공존하는 조건성연못(facultative pond), 수심을 0.3~0.4m로 유지시키고 유입수를 이동시키는 고속처리연못(high rate pond)으로 대별된다(Nurdogan and Oswald, 1995). 혐기성연못, 호기성연못, 조건성연못은 대부분 자연유하로 유입수가 이동하도록 설계하며, 수심을 약 2m 정도로 설계하고 있다(EPA, 1987; WHO, 1987). 연못시스템은 유입수의 양과 유입수에 함유되어 있는 오염물질의 양에 따라 이들 연못을 적절히 조합하여 구성한다. 호기성연못이 유입수의 유기물 부하량이 증가할 경우, 혹은 혐기성연못이 유기물의 부하량이 감소할 경우 조건성연못으로 변하기 때문에 일반적

으로 조건성연못을 가장 많이 활용하고 있으며, 온대권에서는 조건성연못을 2~4개 직렬로 연결한 연못시스템을 가장 많이 활용하고 있다. 동일 유량을 처리할 경우 1개의 연못보다는 2~4개 연못으로 구성하여 처리하는 것이 수질정화 효율이 높아지기 때문이다(Oswald, 1988). 처리유량이 많은 경우 연못시스템 몇 개를 병렬로 연결하여 활용한다.

수질악화로 인한 시화호의 담수화포기는 막대한 경제적 환경적 손실을 가져와 간척사업으로 조성된 담수호의 수질악화에 관심이 고조되면서 담수호 수질개선을 위한 다양한 방안이 제시되고 있다(농어촌연구원, 1999). 담수호의 수질보전은 상류지역의 점오염원 처리장의 증설만으로는 불가능하며, 담수호 유역과 주변 개답지역에서 담수호로 유입되는 비점원오염물질을 처리할 수 있는 방안이 필요하다. 새만금호의 경우 담수호 유입부에 침전조의 설치, 담수호 주변에 저류지 및 인공습지의 조성이 제시되고 있다(농어촌연구원, 1999). 도시 및 농경 유출수에 함유되어 하천으로 유입된 오염물질을 정화하는 방법으로 오염물의 침전이 주목적인 저류지와, 질소의 정화가 주목적인 인공습지가 제시되고 있다(양홍모, 1999). 저류지의 경우 일반적으로 1개의 저수지로 설계하는 경우가 많으나 연못시스템으로 설계하면 오염물의 침전과 정화를 동시에 수행할 수 있으며, SS, BOD는 물론 질소와 인도 제거할 수 있는 장점이 있다. 연못시스템을 담수호 유입부나 주변에 조성하여 담수호로 유입되는 하천수에 함유되어 있는 오염물질을 침전·정화시킨 후, 연못시스템의 처리수를 담수호에 유입시켜 담수호의 수질을 개선할 수 있다. 연못시스템은 수질을 정화하면서 저류지의 역할도 수행

할 수 있다.

본 연구는 간척개답지의 담수호로 유입되는 하천수를 정화할 수 있는 연못시스템 모델을 연구하기 위해 담수호 유입부에 조성한 연못시스템의 수질정화 수준과 연못시스템을 구성하고 있는 연못의 반응을 연구하는데 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험재료 및 장치

2000년 7월초에 전라남도 고흥군 고흥지구 담수호 유입부의 신양천변 개답지역에 연못시스템을 설치하였다. 연못시스템은 연못 2개를 직렬로 연결하여 구성하였으며(Figure 1), 1차연못은 조건성연못, 2차연못은 호기성연못의 기능을 하도록 설계하였다. 1차연못에서 2차연못으로 우회파이프를 연결하여 2차연못에 유입수가 유입될 수 있도록 설계하였으며, 폭우시 연못을 보호할 수 있도록 각 연못에는 월류파이프를 설치하였다. 신양천 하천수를 펌핑하여 1차연못에 유입시킨 후, 1차연못의 유출수가 자연유하로 2차연못으로 이동하며, 2차연못의 유출수는 습지로 유입된 후 방류된다.

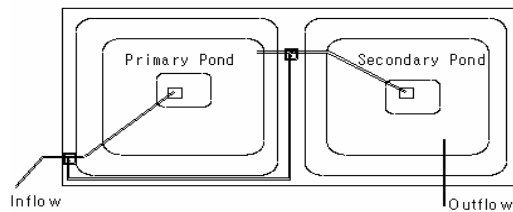


Figure 1. Schematic plane of the pond system and design parameters of the primary and secondary ponds.

Table 1. Design parameters of the primary and secondary ponds.

Water depth (m)	Free board (m)	Sludge depth (m)	Levee height (m)	Levee slope	Water surface (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Detention time (day)
2.0	0.3	0.4	2.7	1 : 3	18×17	264	1.5-2

연못의 수심은 약 2m이며, 부유물 침전을 고려하여 0.4m 여유깊이를 두었다. 유입수의 단기이동을 완화하기 위해 유입수는 수중으로 유입된 후 표면유출이 되도록 설계하였으며, 유입부와 유출부가 대각선상에 위치하도록 설계하였다(양홍모, 1998). 연못의 사면경사는 1 : 3으로 수심 약 2m일 때 수표면적이 약 306m<sup>2</sup>, 체적이 약 264m<sup>3</sup>가 된다(Table 1).

## 2. 실험방법

새로 조성한 연못시스템의 바닥에 슬러지층이 형성되어 수질정화에 중요한 기작인 메탄발효가 이루어지려면 약 1년 정도 기간이 필요하다(Parker, 1979). 실험 연못시스템을 조성한 후 약 22개월 후인 2002년 5월부터 10월까지 6개월 동안 연못시스템을 조사분석하였다. 따라서 연못시스템의 초기운영단계보다는 비교적 생태적으로 안정된 연못시스템의 처리수준을 조사분석할 수 있는 조건이었다. 1차연못과 2차연못의 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여, 샘플수는 각각 21개였다. 환경부 수질오염공정시험방법(환경부, 2000)을 기준으로 미국공중보건협회(APHA, 1998)의 수질분석방법을 참고하여 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 등을 분석하였으며, 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 2002년 5월, 8월, 10월에 1차연못과 2차

연못의 수심별 DO, pH, 온도를 측정하고 슬러지의 깊이를 조사하여 연못의 반응을 분석하였다. 수심별 DO는 YSI 5905를 사용하여 측정하였고, pH와 온도는 HORIBA U-10을 활용하였으며, 각 연못의 3개 지점에서 2회 측정하여 평균값으로 나타냈다. 1차연못과 2차연못의 바닥에 형성된 슬러지의 깊이는 Coretaker(EW-05465, Cole-Parmer)를 이용하여 각 연못 3곳에서 2회 조사하여 평균값으로 나타냈다. 1차연못과 2차연못 유출수의 BOD<sub>5</sub>, SS, T-N, T-P 농도에 차이가 있는지를 검증하기 위해 t-검정을 수행하였으며, t-검정에는 PC용 SAS(ver. 8.1)을 활용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 연못의 반응

조사기간 연못시스템 유입수의 양을 약 130m<sup>2</sup>/day로 유지시켜, 1차연못과 2차연못의 체류시간은 약 2일이었다. 조사기간 유입수의 평균온도는 22.1℃였으며, 1차연못과 2차연못의 유출수의 평균온도는 각각 23.9와 23.8℃였다. 1차연못과 2차연못의 평균온도가 유입수보다 각각 0.8, 0.7℃ 높았다. 1차연못과 2차연못의 월평균 온도는 거의 같은 수준이었으며, 1차연못의 5월~8월까지 월평균 온도는 21.6, 24.0, 27.3, 28.5℃로 증가하다가, 9월~10월에는 24.6, 17.3℃로 감소하는 추

**Table 2.** Temperature, DO, and pH of the primary(PP) and secondary(SP) ponds at water depth(Dep) of 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m on May 17, August 16, and October 18, 2002.

Dep (m)	May 17, 2002						Aug 16, 2002						Oct 18, 2002					
	DO (mg/L)		Temp (°C)		pH		DO (mg/L)		Temp. (°C)		pH		DO (mg/L)		Temp. (°C)		pH	
	PP	SP	PP	SP	PP	SP	PP	SP	PP	SP	PP	SP	PP	SP	PP	SP	PP	SP
0.3	10.7	10.0	20.8	20.7	8.0	8.3	7.5	6.5	27.0	26.9	8.2	8.6	8.5	7.8	18.4	18.4	7.8	8.2
0.5	11.1	10.3	20.6	20.6	8.1	8.2	6.9	5.5	27.0	26.4	8.2	8.6	8.1	7.4	18.4	18.1	7.8	8.1
1.0	10.7	9.5	20.6	20.5	7.9	8.2	5.2	4.3	26.8	26.5	8.2	8.5	6.8	5.8	18.4	18.0	7.6	8.0
1.5	1.8	8.8	20.3	20.5	7.3	7.9	0.3	3.3	25.5	25.3	8.4	8.6	2.1	4.9	18.0	17.9	7.5	7.8
2.0	0.0	4.7	19.7	19.7	7.4	8.0	0.0	3.0	24.5	24.5	8.4	8.6	0.0	3.0	17.4	17.4	7.5	7.7

세를 보였다. 2차연못의 월평균 온도도 5월~8월까지는 증가하다가 9월~10월에는 감소하는 경향을 보였다.

조사기간 유입수, 1차연못 유출수, 2차연못 유출수의 평균 pH는 각각 7.6, 8.7, 8.5였으며, 1차연못과 2차연못의 평균 pH가 유입수보다 각각 1.1과 0.9 높게 나타났다. 1차연못의 월평균 pH가 2차연못보다 약간 높았으며, 6월~8월의 1차연못 월평균 pH는 2차연못보다 약 0.3 높았다. 수질정화 연못에서 조류가 성장하면 연못상층의 pH가 높아진다(Yang, 1992). 1차연못과 2차연못의 pH가 유입수보다 높은 이유는 유입수에 함유된 유기물이 분해되어 영양염류가 제공되면서 녹조가 성장한데 원인이 있으며, 1차연못의 pH가 2차연못보다 약간 높은 이유는 1차연못의 조류활동이 2차연못보다 활발한데 원인이 있는 것으로 판단된다.

Figure 2는 2002년 8월 16일에 조사한 1차연못과 2차연못의 수심별 DO, 온도, pH를 보여주며, 수심 2.0m는 연못바닥을 나타낸다. 8월 16일 조사에서 1차연못과 2차연못의 온도는 수심 0.3m에서 각각 27.0, 26.9°C였으며, 수심 1.0m에서 각각 26.8, 26.5°C였고, 수심 1.5m에서 각각 25.5, 25.3°C로 낮아졌다가 수심 2.0m에서는 24.5°C로 내려가 약한 약층(thermocline)이 발생하였다(Table 2). 5월 17일과 10월 18일 조사에서는 1차연못과 2차연못의 수심별 온도는 거의 같은 경향을 보였으며, 약층현상은 나타나지 않았다. 5월 17일 조사의 경우 1차연못과 2차연못 수심 0.3m의 온도는 약 20.7°C, 수심 2.0m의 온도는 약 19.7°C였다. 10월 조사에서는 1차연못과 2차연못 수심 0.3m의 온도가 약 18.4°C였으며, 수심 2.0m의 온도는 약 17.4°C였다. 기온이 높은 8월의 연못상층과 바닥의 온도차는 약 2.5°C였고, 5월과 10월의 상층과 바닥의 온도차는 약 1.0°C로 상대적으로 작았다. 8월 16일의 수심별 수온이 5월 17일과 10월 18일의 수심별 수온보다 높은 이유는 여름철 강한 햇빛이 연못수면에 쬐여 연못

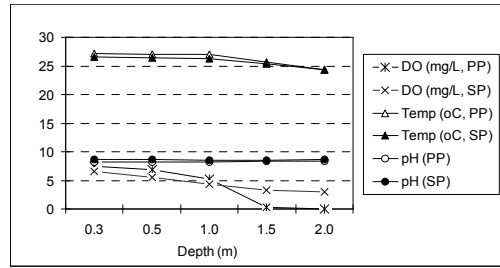


Figure 2. Temperature, DO and pH of the primary and secondary ponds at the depth of 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0m on August 16, 2002.

의 수온이 올라간데 원인이 있다.

연못상층의 pH는 1차연못이 2차연못보다 약간 높았으며(Table 2), 이는 1차연못의 조류활동이 2차연못보다 높았던데 원인이 있는 것으로 판단된다. 5월 17일과 10월 18일 조사에서 수심별 pH는 1차연못과 2차연못 거의 비슷한 8.2였다. 8월 16일 조사에서 수심 1.0m까지 1차연못과 2차연못의 pH는 8.2~8.6이였으며, 수심 1.5~2.0m에서 1차연못의 pH가 2차연못보다 약간 낮았다.

5월 17일 조사에서 수심 1.0m까지 1차연못과 2차연못의 DO는 각각 11.1~10.7mg/L, 10.3~9.5mg/L 범위로 조류의 활동이 왕성하였으며, 1차연못의 DO가 2차연못보다 높아 1차연못의 조류활동이 2차연못보다 높았음을 알 수 있다. 수심 2.0m에서 1차연못은 DO가 0mg/L로 혐기상태였으며, 2차연못은 DO가 4.7mg/L로 호기상태였다. 8월 16일 조사의 경우 1차연못과 2차연못은 수심 1.0m까지 DO가 각각 7.5~5.2mg/L, 6.5~4.3mg/L범위였으며, 수심 2.0m에서 1차연못은 DO가 0mg/L로 혐기상태였고, 2차연못은 DO가 약 3.0mg/L로 호기상태였다. 10월 18일 조사에서는 1차연못과 2차연못은 수심 1.0m까지 DO가 각각 8.5~6.8mg/L, 7.8~5.8mg/L범위였으며, 수심 2.0m에서 1차연못은 DO가 0mg/L로 혐기상태였고, 2차연못은 DO가 3.0mg/L로 호기상태였다. 1차연못은 호기성 상층과 혐기성 바닥층이 공존하는 조건성연못의 기능을 하였으며, 2차연못은 전체가 호기상태인 호기성연못의 기능을 하였다.

2002년 5월 17일, 8월 16일, 10월 18일에 조사한 1차연못의 슬러지층의 평균깊이는 각각 2.4, 1.9, 2.2cm였으며, 2차연못은 각각 1.2, 1.0, 1.1cm였다(Table 3). 2002년 5월 17일의 슬러지 깊이는 연못시스템이 2000년 7월 조성된 후 약 22개월 후의 슬러지 깊이이다. 연못바닥의 슬러지 깊이는 침전작용과 메탄발효에 의해 결정된다. 메탄박테리아는 14°C에서 거의 활동을 멈추게 되어 침전된 유기물이 모두 쌓이기 시작하며, 19°C에서는 일일 슬러지 침전량과 분해량이 같아지고, 24°C에서 메탄박테리아의 왕성한 활동으로 분해량이 침전량보다 많아져 슬러지 깊이가 줄어든다(Oswald, 1988). 1차연못과 2차연못의 바닥온도는 5월 17일에 19.7°C, 8월 16일에 24.5°C, 10월 18일에 17.4°C였다(Table 2). 5월~10월의 1차연못 유출수의 월평균 온도는 각각 21.6, 24.0, 27.3, 28.5, 24.6, 17.3°C였다. 기온이 높은 8월 중순에 연못의 상층과 바닥의 온도차는 약 2.5°C였으며, 5월 중순과 10월 중순에는 연못의 상층과 바닥의 온도차는 약 1.0°C였다. 따라서 기온이 높은 7월에 상층과 바닥의 온도차를 2.5°C로 보고, 6월과 9월의 상층과 바닥의 온도차를 1.0°C로 보면, 6월, 7월, 9월의 연못바닥의 온도는 약 23.0, 24.8, 23.6°C로 예측된다. 따라서 6월~9월의 연못바닥의 온도는 23.0~24.3°C 범위로 일일 슬러지 침전량보다 분해량이 많아져 슬러지 깊이가 줄어드는 조건이었으며, 5월에는 슬러지 깊이에 변화가 없고, 10월에는 슬러지 깊이

**Table 3.** Sludge depth for the primary and secondary ponds on May 17, August 16, and October 18, 2002.

	May 17 (cm)	Aug 16 (cm)	Oct 18 (cm)
Primary pond	2.4	1.9	2.2
Secondary pond	1.2	1.0	1.1

가 약간 증가하는 조건이었다.

2차연못은 조사기간 호기상태를 유지하였으며, 8월 중순에 슬러지의 깊이가 줄어든 원인은 연못바닥의 온도가 호기성 박테리아의 활동에 적합하여 슬러지의 일부가 분해되어 슬러지 깊이가 줄어든 것으로 판단된다. 2차연못은 유입수의 유기물 농도가 낮고 슬러지층의 발달이 느려 호기상태를 유지하였다. 1차연못과 2차연못의 바닥에 슬러지퇴적 여유깊이를 40cm로 설계하였다. 1차연못의 바닥에는 1년에 슬러지가 약 1.2cm 쌓일 것으로 예측되며 2차연못은 1년에 약 0.5cm 정도 쌓일 것으로 예측되어, 약 30년에 한번 쌓인 슬러지층의 제거로 시스템의 운영이 가능할 것으로 예측된다.

## 2. 처리수준

조사기간 유입수의 평균 SS농도는 16.64mg/L였고, 1차연못 유출수의 평균 SS농도는 11.48mg/L로 처리율이 31%였으며, 2차연못 유출수의 평균 SS농도는 9.18mg/L로 2차연못의 SS 처리율은

**Table 4.** Treatment level of the primary and secondary ponds from May to October 2002 (Partial removal is the reduction in pollutant concentrations either in the primary or secondary pond. Total removal is the decrease in pollutant concentrations in the primary and secondary ponds).

	SS			BOD <sub>5</sub>			T-N			T-P		
	mg/L	Removal (%)		mg/L	Removal (%)		mg/L	Removal (%)		mg/L	Removal (%)	
		Partial	Total		Partial	Total		Partial	Total		Partial	Total
Influent	16.64	-	-	6.71	-	-	6.21	-	-	0.23	-	-
Primary pond	11.48	31	-	4.97	26	-	4.81	22	-	0.17	24	-
Secondary pond	9.18	20	51	4.07	12	38	4.03	13	35	0.14	15	39

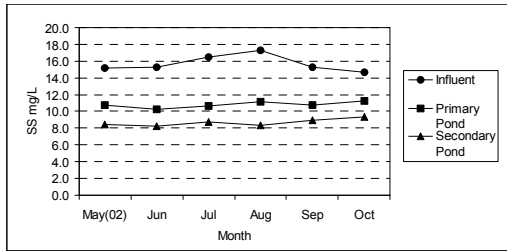


Figure 3. Monthly average SS concentrations of the pond system through May 2002 to October 2002.

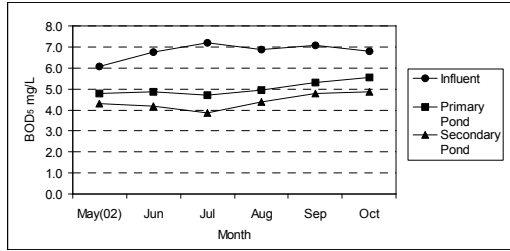


Figure 4. Monthly average BOD<sub>5</sub> concentrations of the pond system through May 2002 to October 2002.

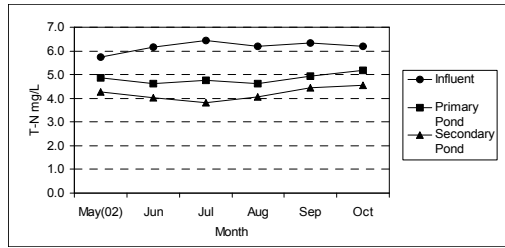
20%였다. 시스템 전체의 SS 처리율은 51%였다 (Table 4). 연못에서 SS는 주로 침전에 의해 제거된다. 1차연못의 SS 처리율이 2차연못보다 높게 나타나 유입수에 함유된 고형부유물의 상당부분이 1차연못에서 침전되어 제거되었음을 알 수 있다. 1차연못의 경우 유입수의 SS농도가 높을수록 처리율이 높아지는 경향을 보였다(Figure 3).

유입수, 1차연못 유출수, 2차연못 유출수의 평균 BOD<sub>5</sub>농도는 각각 6.71, 4.97, 4.07mg/L였으며, 1차연못과 2차연못의 BOD<sub>5</sub> 처리율은 각각 26%, 12%로 시스템의 BOD<sub>5</sub> 처리율은 38%였다 (Table 4). 1차연못의 BOD<sub>5</sub> 처리율이 2차연못보다 높게 나타나 유입수에 함유된 유기물의 상당부분이 1차연못에서 분해되어 제거되었음을 알 수 있다. 1차연못과 2차연못에서 온도가 높은 6월, 7월, 8월의 BOD<sub>5</sub> 처리율이 온도가 낮은 5월과 10월보다 다소 높게 나타났다(Figure 4). 연못의 온도가 높을수록 미생물의 활동이 높아진데 원인이 있다. 연못에서 BOD<sub>5</sub>는 호기성산화와 혐기성발효에 의해 제거된다. 연못바닥에 유기물이

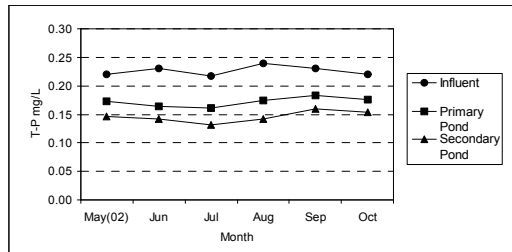
침전되면 슬러지층이 형성되고, 혐기성 상태가 되어 메탄박테리아가 유기물을 메탄과 이산화탄소로 분해시켜, 메탄가스가 대기 중으로 이동하여 유기물이 제거되면서 BOD<sub>5</sub>가 낮아진다. 슬러지층이 형성된 연못이 슬러지층이 형성되지 못한 연못보다 BOD<sub>5</sub> 처리율이 높다(Parker, 1979). 1차연못 바닥의 슬러지층이 발달하면 BOD<sub>5</sub> 처리율이 다소 증가될 것으로 예측된다. 연못상층에서는 호기성 미생물에 의해 유기물이 분해되면서 BOD<sub>5</sub>가 제거된다(Green et al., 1995; Oswald et al., 1994).

유입수의 평균 T-N농도는 6.21mg/L였으며, 1차연못 유출수의 평균 T-N농도는 4.81mg/L로 처리율이 22%였으며, 2차연못 유출수의 평균 T-N농도는 4.03mg/L로 13%의 처리율을 보였다. 시스템의 T-N 처리율은 35%였다(Table 4). 연못에서 질소는 주로 조류에 흡수되어 제거되며, 일부는 미생물에 의한 질산화와 탈질화 과정에서 질소가스로 전환되어 대기중으로 이동하여 제거되고, 성장한 조류의 일부는 죽어 바닥으로 침전되어 질소가 제거된다(EPA, 1987; Green et al., 1996; Oswald, 1988). 1차연못의 T-N 처리율이 2차연못보다 높게 나타났다(Figure 5). 유입수에 함유된 유기질소가 1차연못에서 분해되어 조류에 흡수되어 제거되는 양이 높는데 원인이 있다. 연못의 온도가 높은 6월, 7월, 8월의 T-N 처리율이 연못의 온도가 낮은 5월과 10월보다 높게 나타났다. 이는 연못의 온도가 높을수록 연못상층의 질산화 박테리아의 활동이 높아지고, 1차연못의 경우 혐기층의 탈질화 박테리아의 활동이 높아진데 원인이 있다.

조사기간 유입수, 1차연못 유출수, 2차연못 유출수의 평균 T-P농도는 각각 0.23, 0.17, 0.14mg/L였으며, 1차연못과 2차연못의 T-P 처리율은 각각 24%, 15%였고, 시스템의 T-P 처리율은 39%였다 (Table 4). 연못에서 인은 조류에 흡수되어 주로 제거되며, 인산염으로 전환되어 침강에 의해서도 일부 제거되고, 조류가 죽어 바닥으로 침전하면



**Figure 5.** Monthly average T-N concentrations of the pond system through May 2002 to October 2002.



**Figure 6.** Monthly average T-P concentrations of the pond system from May to October 2002.

서 제거된다(Green et al., 1996; WHO, 1987). 1차연못의 T-P 처리율이 2차연못보다 다소 높게 나타났다(Figure 6). 유입수의 유기물에 함유된 인이 1차연못에서 분해되어 조류에 흡수되어 제거되는 양이 높은데 원인이 있다. 조건성-호기성 연못으로 구성된 연못시스템에서는 조건성연못의 유출수에 함유되어 있는 조류는 호기성연못의 바닥에 침전되어 질소와 인이 제거된다.

하천수를 정화하는 방법으로 인공습지가 활용되고 있다(Kadlec and Knight, 1996; 양홍모, 1999). 인공습지는 생활하수, 산업폐수 등 점오염원을 정화하기 위해 주로 활용되어 왔으며, 오염정도가 상대적으로 낮은 하천수 등 비점오염원을 정화하기 위해서도 활용되고 있다(Mitsch et al., 1998). 국내에서도 생활하수 및 농공단지폐수 처리를 위해 여재(자갈, 모래 등) 및 정수식물을 활용하는 여과습지(subsurface flow wetlands)

**Table 5.** Treatment level of surface-flow wetlands purifying stream water in USA, Japan, and Korea.

Wetlands	Area (m <sup>2</sup> )	Inflow (m <sup>3</sup> /d)	Detention time	SS			T-N		
				in (mg/ℓ)	out (mg/ℓ)	removal (%)	in (mg/ℓ)	out (mg/ℓ)	removal (%)
Olentangy <sup>1)</sup> / USA	10,000	1,000	2 days	-	-	-	4.6	2.5	46
Des Plaines <sup>2)</sup> / USA	101,300	4,635	1 - 3 weeks	-	-	-	2.73	1.34	51
Sangohgawa <sup>3)</sup> / Japan	38,000	18,240	5 hours	21.3	15.4 (24%)	24	2.82	2.35	17
Seimeigawa <sup>4)</sup> / Japan	19,000	777	10 hours	17.6	4.1 (78%)	78	3.0	2.1	30
Dangjin <sup>5)</sup> / Korea	32,000	684	2 - 5 days	-	-	-	4.4	2.6	41
Sinyang <sup>6)</sup> / Korea	1,900	120	3 days	-	-	-	5.77	3.26	47
Kwangju <sup>7)</sup> / Korea	370	40	1.5 days	-	-	-	10.24	6.32	39

Source : 1) Kadlec and Knight, 1996.

2) Mitsch et al, 1998.

3), 4) 河川環境管理財團, 2000.

5) 함중화 등, 2005.

6) 양홍모, 2002.

7) 양홍모, 2003.



에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있으며(박현건 등, 2004; 정동양, 1999; 김도선 등, 1997; 윤춘경 등, 1997), 최근 오염하천수를 정화하는 자유수면습지(surface-flow wetlands)에 관한 연구도 시도되고 있다(함종화 등, 2005; 양홍모, 2002; 2003). 점오염원을 정화하기 위해 북미에서는 상대적으로 자유수면습지를 많이 활용하고 있고, 유럽에서는 여과습지를 많이 활용하고 있는 추세이며, 하천수 정화에는 대부분 자유수면습지를 활용하고 있다. 북미에 조성된 여과습지의 T-N 평균처리율은 약 56%이며(Kadlec and Knight, 1999), 국내에서 연구가 수행된 여과습지의 T-N 평균처리율은 49%~73%(박현건 등, 2003), 40%(정동양, 1999), 41%(윤춘경 등, 1997), 38%(김도선 등, 1997)을 보이고 있다.

Table 5는 미국, 일본, 우리나라의 하천수정화 자유수면습지의 처리수준을 나타낸다. 이들 습지는 주로 SS와 T-N 정화를 목적으로 조성되었으며, 수심을 약 0.3m로 유지하여 습지면적이 연못시스템보다 넓다. 본 연구 1차연못과 2차연못의 면적은 각각 306m<sup>2</sup>였으며, 유입수량 130m<sup>3</sup>/day, 체류시간 2 days로, 수리학적부하율(hydraulic loading rate)이 약 0.42m/day였다. Olentangy 습지는 면적 10,000m<sup>2</sup>, 유입수량 1,000m<sup>3</sup>/day, 체류

시간이 2 days이며, 수리학적부하율이 약 0.10m/day이다. Des Plains 습지는 면적 101,300m<sup>2</sup>, 체류시간이 1~3 weeks로 매우 길며, 수리학적부하율이 약 0.05m/day이다. Seimeigawa 습지와 Sangohgawa 습지는 체류시간이 각각 5 hours, 10 hours로 상대적으로 짧으며, 수리학적 부하율은 각각 0.6m/day, 0.5m/day이다. 국내의 당진천 습지는 면적 32,000m<sup>2</sup>, 수리학적 부하율이 0.02m/day이며, 신양천 습지와 광주천 습지는 면적이 각각 1,900m<sup>2</sup>, 370m<sup>2</sup>이고, 수리학적 부하율이 각각 0.06m/day와 0.1m/day이다. 고지연 등(2003)의 연구에 의하면 호주의 Plumpton 습지와 Woodcorft 습지는 우기시 소하천을 흐르는 물을 정화하는 습지로 T-N 처리율이 각각 38%와 20%를 보이고 있으며, 단위시간당 유입유량이 제시되지 않아 수리학적부하율을 산출할 수 없다.

Table 5에서 SS, T-N의 처리수준은 각각 24%~78%, 17%~51% 범위를 보이고 있다. 하천수를 정화하는 본 연구 연못시스템의 SS, T-N 처리율은 각각 51%, 35%였다(Table 4). 면적과 유입유량을 고려한 수리학적부하율을 기준으로 비교하면, 본 연구 연못시스템의 SS, T-N 처리율이 Table 5에 제시된 습지보다 상대적으로 효율적임을 알 수 있다.

**Table 6.** Summary of *t*-test statistics of SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, and T-P concentrations in effluents from the primary and secondary ponds.

Pollutant species	Pond	N	Mean±S.E.	<i>t</i> Value	<i>p</i>
SS	Primary	21	11.482±0.1592	11.56	0.0001
	Secondary	21	9.181±0.1195		
BOD <sub>5</sub>	Primary	21	4.973±0.0889	7.84	0.0001
	Secondary	21	4.072±0.0729		
T-N	Primary	21	4.811±0.0679	8.30	0.0001
	Secondary	21	4.029±0.0654		
T-P	Primary	21	0.171±0.0032	6.73	0.0001
	Secondary	21	0.142±0.0030		

N : sample numbers

S.E. : standard error

*p* : *p*-values obtained by *t*-tests assuming equal variance.

$t$ -검정을 통하여 1차연못과 2차연못 유출수의 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 농도에 차이가 있는지를 분석하였다. Excel 프로그램(Excel 2003)의 정규확률그라프(normal probability plot)와 박스그라프(boxplot)을 활용하여 조사기간 1차연못과 2차연못의 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 농도분포가 정규분포 곡선과 유사함을 확인하였다.  $t$ -검정결과 ' $H_0$  : 조사기간 1차연못과 2차연못의 유출수 SS 농도의 평균이 같다.'라는 귀무가설이 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 기각되어( $p=0.001$ ,  $p<0.05$ ), 1차연못과 2차연못의 유출수 SS 농도는 다르다라고 말할 수 있다 (Table 6). 2차연못 유출수의 SS 평균농도( $9.181 \pm 0.1195$ )가 1차연못 유출수의 SS 평균농도( $11.482 \pm 0.1592$ ) 보다 낮게 나타났다. 1차연못과 2차연못의 유출수 BOD<sub>5</sub>, TN, TP 농도에 대한  $t$ -검정에서도 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 귀무가설이 기각되어 1차연못과 2차연못의 유출수 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 농도가 다를 수 있다. 2차연못 유출수의 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 평균농도가 1차연못 유출수의 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 평균보다 낮았다.

#### IV. 결 론

조사기간 1차연못은 호기성 상층과 혐기성 하층이 공존하는 조건성 상태를 유지하였으며, 2차연못은 호기성 상태를 유지하였다. 1차연못의 경우 5월 중순에 연못상층의 DO가 조류의 성장으로 약 10~11mg/L까지 증가하였다. 2002년 5월 17일, 8월 16일, 10월 18일에 조사한 1차연못의 슬러지층의 평균깊이는 각각 2.4, 1.9, 2.2cm였다. 연못바닥의 온도가 6월~9월에 약 23.0~24℃를 유지하여 슬러지 침전량보다 분해량이 많아 슬러지 깊이가 줄어드는 조건이었으며, 5월에는 연못바닥의 온도가 약 19℃로 슬러지 깊이에 변화가 없는 조건이었고, 10월은 연못바닥의 온도가 약 17℃로 슬러지 깊이가 약간 증가하는 조건이었다. 우리나라 남부지방에 연못시스템을 조성하였을 경우 1월~4월과 10월~12월의 7개월 동안은

연못바닥에 슬러지가 쌓이고, 5월에는 슬러지 깊이에 차이가 없으며, 6월~9월의 4개월은 슬러지 깊이가 줄어들 것으로 예측된다. 따라서 연못바닥의 슬러지 깊이가 매년 조금씩 증가할 것으로 예측된다. 일반적으로 온대권에서는 수질정화 연못의 바닥에 슬러지가 쌓이게 되어 약 20~30년에 한번 슬러지를 제거하도록 연못을 설계하고 있다(Yang, 1992).

유입수의 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 농도는 각각 16.64, 6.71, 6.21, 0.23mg/L였으며, 1차연못에서 각각 11.48, 4.97, 4.81, 0.17mg/L로 정화되어 1차연못의 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 처리율은 각각 31%, 26%, 22%, 24%였다. 2차연못 유출수의 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P농도는 각각 9.18, 4.07, 4.03, 0.14mg/L로 2차연못의 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 처리율이 각각 20%, 12%, 13%, 15%였다. 1차연못의 처리율이 2차연못보다 높았으며, SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 상당부분이 1차연못에서 제거되었다.  $t$ -검정 결과 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 1차연못과 2차연못의 유출수에 함유되어 있는 SS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 농도에 차이가 있음을 확인하였다. 연못시스템에서 1차연못은 조건성연못의 기능을 하면서 수질정화에 중요한 역할을 한다. 부유물과 유기물이 연못바닥에 침전되어 SS와 BOD<sub>5</sub>가 제거되고, 바닥에 쌓인 슬러지가 메탄발효에 의해 분해되면서 BOD<sub>5</sub>가 제거되며, 연못상층에서는 호기성 미생물이 유기물을 분해하고 조류가 성장하면서 영양염류를 흡수하여 T-N, T-P가 제거된다. 호기성연못은 조건성연못에서 성장한 조류를 침전시키고, 유기물의 일부를 정화는 역할을 한다.

본 연구 연못시스템이 시공 후 약 2년이 경과한 시스템인 점을 고려하면, 시스템의 처리수준은 비교적 양호한 편이었다. 1차연못과 2차연못이 각각 조건성연못과 호기성연못의 역할을 하였고, 연못의 온도가 미생물의 활동에 비교적 적합한 조건이었으며, 1차연못의 바닥에 슬러지층이 어느 정도 형성되었고 연못바닥의 온도가 메탄박테리아의 활동에 비교적 적합한 조건이었던데 1

차적 원인이 있는 것으로 판단된다. 실험결과 연못시스템은 담수호로 유입되는 하천수에 함유되어 있는 오염물질을 정화할 수 있어 담수호의 수질개선에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 수질정화에 비교적 양호한 온도조건인 5월~10월의 연못시스템 반응과 처리수준을 분석하였다. 추후 1년 동안의 지속적인 연구는 겨울철의 처리수준과 반응을 분석할 수 있어 본 연구의 미비점을 보완할 수 있을 것으로 생각된다. 조사기간 연못의 상층과 하층이 섞이는 현상(turnover)은 발생하지 않았다. 유입수의 단기이동(short-circuiting)현상이 적어야 연못의 정화효율이 높아지게 된다(Oswald, 1988). 유입수의 흐름에 대한 추후 연구도 본 연구의 연못반응에 관한 미비점을 보완 할 수 있을 것으로 생각된다.

**인 용 문 헌**

김도선 · 이찬기 · 안태석 · 정의호 · 박상균 · 최지용 · 오근찬 · 신용건. 1997. 인공습지를 이용한 군부 대 오수 정화 처리에 관한 연구. 제2회 한 · 일 지방간 생태공학적 수질개선 공법에 관한 Symposium 논문집. pp. 58-69.

고지현 · 강항원 · 이재생 · 김춘송 · Sakadevan, K., & Bavor. H. J. 2003. 소수계 유역 인공습지에서 식생 밀도 차이에 따른 영양염류 제거효율. 한국환경농학회지 22(4) : 266-272.

농어촌연구원. 1999. 새만금지구 담수호 수질보전 대책 수립조사연구(II) pp. 225-252.

박현진 · 이춘식 · 이홍재 · 서동철 · 허중수. 2004. 모래와 굴패각을 이용한 인공습지 오수처리장치 개발. 한국물환경학회지 20(5) : 437-446.

정동양. 1999. 자연친화형 농어촌 하수처리장 모델 개발. 한국환경보존학회지 2(1) : 10-19.

양홍모. 1998. 생태적 축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템의 폐수처리기준. 한국환경농 학

회지 19(1) : 70-75.

양홍모. 1999. 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, 한국수자원학회지 32(5) : 111-123.

양홍모. 2002. 하천수정화 근자연형 인공습지의 초기 질소제거. 한국환경농학회지 21(4) : 269-273.

양홍모. 2003. 고수부지에 조성한 수질정화 자유수면습지의 초기운영단계 질소제거. 한국환경보존학회지 6(6) : 41-48.

윤춘경 · 임용호 · 김형중. 1997. 인공습지에 의한 농공단지 폐수처리. 한국환경농학회지 16(2) : 170-174.

환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.

함중화 · 윤춘경 · 김형철 · 구원석 · 신현범. 2005. 식생피도가 인공습지의 질소 및 인 처리효율에 미치는 영향과 습지식물의 조성 및 관리. 한국육수학회지 38(3) : 393-402.

河川環境管理財團. 2000. 植生淨化施設の現状と事例. Tokoy : 河川環境總合研究所. pp. 5-30.

APHA(American Public Health Association). 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C. : American Public Health Association.

Claytor, R. A. 1995. Stormwater management : pond design example for extended detention wet pond. Silver Spring, MD.

EPA(U.S. Environmental Protection Agency). 1987. Design manual : Municipal wastewater stabilization ponds. EPA-625/1-83-015, Washington, D.C. pp. 2-7.

Green, F. B., L. Bernstone., T. J. Lundquist., R. B. Tresan., & W. J. Oswald. 1995. Methane fermentation, submerged gas collection, and the fate of carbon in advanced integrated wastewater pond systems. Water Science Technology 31(12) : 55-65.

- Green, F. B., L. Bernstone., T. J. Lundquist., R. B., & W. J. Oswald. 1996. Advanced integrated wastewater pond systems for nitrogen removal. *Water Science Technology* 33(7) : 201-217.
- Kadlec, R. H., & R. L. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. CRC Press, Inc. Boca Raton. pp. 717-737.
- Kantrowitz, I. H. 1995. Efficiency of a stormwater detention pond in reducing loads of chemical and physical constituents in urban streamflow, Pinellas County, Florida Tallahassee, Fla. pp. 1-18.
- Lar, T. 2000. Stormwater quantity and quality in a multiple pond-wetland system : Flemingsbergsviken case study. *Ecological Engineering* 15(1-2) : 57-75.
- Lundberg, K., M. Carling., & P. Lindmark. 1999. Treatment of highway runoff : a study of three detention ponds. *The Science of The Total Environment* 235(1-3) : 363-365.
- Mitsch, W. J., Wu, X., Narin, R. W., Weihe, P. E., Wang, N., Deal, R., & Boucher, C. E. 1998. Creating and restoring wetlands; A whole-ecosystem experiment in self-design. *Bioscience* 48 : 1019-1030.
- Nurdogan, Y., & W. J. Oswald. 1995. Enhanced nutrient removal in high-rate ponds. *Wat. Sci. Tech.* 31(12) : 33-43.
- Oswald, W. J. 1988. A syllabus on waste pond fundamentals, University of California, Berkeley, Spring 1988, BEHS 259, pp. 66-68.
- Oswald, W. J., F. B. Green., & T. J. Lundquist. 1994. Performance of methane fermentation pits in advanced integrated wastewater pond systems 30(12) : 287-295.
- Parker, C. D. 1979. Biological mechanism in lagoon. *Process in water Technology* II(4/5) : 71-85.
- WHO. 1987. *Wastewater stabilization ponds : Principles of planning & practice*, Regional office for the Eastern Mediterranean Alexandria, WHO EMRO Technical Publication No. 10, World Health Organization.
- Yang, H. 1992. Ecological design of estuarine environment for a sustainable urban ecosystem, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley. pp. 103-167.

接受 2008年 8月 31日