

담수호 수자원보전을 위한 수질정화 연못-습지 시스템의 초기처리수준

양 흥 모¹⁾

¹⁾ 전남대학교 조경학과

Treatment Efficiency of a Pond-Wetland System for the Water Quality Conservation of Estuarine Lake

Hongmo Yang¹⁾

¹⁾ Dept. of Landscape Architecture, College of Agriculture, Chonnam National University

ABSTRACT

Treatment efficiency was examined of a pond-wetland system constructed for water quality conservation of Koheung Estuarine Lake over one year after its establishment in July 2000. The system is composed of primary and secondary ponds in series and six wetland cells in parallel. Cattails (*Typha angustiflora*) were planted in three wetland cells and common reeds (*Phragmites australis*) in three other cells. Water pumped from Sinyang Stream flowing into the Lake was funneled into primary pond whose effluent was discharged into secondary pond by gravity flow. Effluent from secondary pond was distributed into each wetland cell.

SS, BOD₅, T-N, and T-P concentrations in influent to primary pond, and effluent from primary pond, secondary pond, and three wetland cells planted with cattails were analyzed for about one year from August 2000 to August 2001.

The removal rates at primary pond for SS, BOD₅, T-N and T-P were 29%, 30%, 15%, and 36%, respectively. The abatement rates at secondary pond for SS, BOD₅, T-N and T-P were 38%, 40%, 30%, and 47%, respectively. The reduction rates measured at three cattail-planted wetland cells for SS, BOD₅, T-N and T-P were 54%, 57%, 60%, and 68%, respectively. Considering early stage of the pond-wetland system and inclusion of winter during the research period, its treatment efficiency was rather good. Cattails had not yet grown to dense stands due to initial establishment period, which resulted in slightly lower treatment efficiencies of wetland cells for these pollutants, compared with those of ponds.

Key words : Pond-wetland system, Constructed wetlands, Surface flow wetlands, Nitrification, Denitrification,

I. 서론

시화호의 수질악화로 인한 담수화 증지는 막대한 경제적 환경적 손실을 가져와 하구지역에 조성된 담수호(estuarine lake)의 수질보전에 관심이 높아지고 있으며, 새만금 간척사업으로 조성된 만경호와 동진호의 수질에 대한 관심도 높아가고 있다. 간척지 담수호의 수자원 보전을 위해서는 상류유역 및 담수호 주변 개답지역에서 담수호로 흘러드는 유입수에 함유되어 있는 비점원 및 미처리 점원 오염물을 자연생태적으로 처리할 수 있는 유역처리시스템의 개발이 필요하다. 호수나 하천으로 유입되는 비점원 오염물과 미처리 점원 오염물을 정화하는 기법으로 연못-습지 시스템(pond-wetland system)과 인공습지 시스템(constructed wetland system)이 활용되고 있으나(Mitsch and Gosselink, 2000; Schueler, 1992; 河川環境管理財團, 2000), 국내에서는 활용이 되지 못하고 있다. 연못-습지 시스템은 연못시스템과 인공습지 시스템의 장점을 결합한 시스템이다.

연못시스템(pond system)은 자연상태에서 태양에너지와 생태계의 작용에 의해 각종 수질오염물질을 효율적이며 경제적으로 처리할 수 있는 기법으로 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 등 점원뿐 아니라 오염하천수, 강우유출수 등 비점원 오염을 처리하기 위해 열대에서 한대에 걸쳐 전 세계적으로 이용되고 있다(Yang, 1992; 양, 1999a). 인공습지도 점오염원(Reed, et al., 1988; Vrhovsek, et al., 1996)은 물론 비점오염원(Higgins, et al., 1993)을 정화하기 위해 사용하고 있다. 인공습지는 유입수의 T-N, T-P를 3차 처리수준 이상으로 정화하기 위해 활용하는 경우가 많다. 미국은 미시시피강 하구의 용존산소 결핍현상을 해소하기 위해 미시시피강 유역에서 발생하는 비점오염물 정화를 위해 방대한 유역면적의 3%를 습지로 조성하는 방안이 검토되고 있다. 연못과 습지는 수질정화 이외에 다양한 친환경적 기능을 제공한다. 연못은 새등 야생동물 서식처와 자연학습 및 시민휴식 공간을 제공할 수 있으며, 습지는 야생동물 서식처

제공, 비오톱 조성, 시민휴식 및 자연학습 공간 제공, 경관 개선 등의 기능을 가지고 있다(Kadlec and Knight, 1996; Mitch and Gosselink, 2000).

최근 국내에서 간척지 담수호의 수질보전을 위해 수질정화 인공습지와 저류지(detention pond)를 담수호 유입부나 주변에 조성하는 방안이 검토되고 있다(농어촌연구원, 1999). 담수호 유입부나 개답지역에 몇 개의 대형 연못으로 구성된 연못시스템을 만들어 수질이 나쁜 하천 유입수나 강우시 초기 유출수를 유입시켜 자연생태적으로 정화 및 침전시키면 유기물 및 영양염류의 제거가 가능하다. 이는 담수호 바닥에 침전될 유기물의 상당량을 사전에 통제할 수 있는 좋은 방법이 된다. 강우 유출수를 정화하는 인공습지의 경우 습지만으로 조성하는 것보다 습지 앞에 연못을 조성하여 연못-습지 연결시스템으로 조성하는 것이 수질정화 효율이 높아지게 된다(Schueler, 1992). 동일 면적의 저류지와 인공습지를 연못-습지 시스템으로 조성하는 방안이 수질정화와 유량관리에 효율적이며 경제적인 방안이 될 수 있다. 온대권에서 월평균 기온이 0°C 이하인 겨울철에 인공습지의 수질정화효율이 다소 저하되어 최종처리수의 BOD와 T-N을 목표수질에 맞추기 어려운 경우, 연못시스템과 습지 시스템의 장점을 활용한 연못-습지 시스템이 응용되고 있다(Kadlec and Knight, 1996).

본 연구는 우리나라 기후 및 담수호 여건에 적합하고 담수호 유입수를 자연생태적으로 정화하여 담수호의 수질을 보전할 수 있는 유역처리 연못-습지 시스템 모델개발을 위해 조성한 연못-습지 시스템의 초기 처리수준을 연구하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1) 시스템 구조

연구대상 수질정화 연못-습지 시스템을 2000년 4월부터 7월초에 전라남도 고흥군 고흥지구 담수호 유입부의 신양천변 개답지역 상류부 포

략지 1.2ha에 조성하였다. 그림 1은 연못-습지 시스템의 개념도이며 표 1은 시스템의 주요 설계인자들이다. 연못-습지 시스템은 연못 2개와 습지셀 6개로 구성하였다. 그림 1에서 신양천 하천수를 펌핑으로 1차연못에 유입시킨후 1차연못의 처리수가 자연유하로 2차연못으로 유입되며 2차연못의 처리수가 각 습지 셀로 분산 유입된다.

1차연못은 조건성 연못, 2차연못은 호기성 연못의 기능을 하도록 설치하였다. 수질정화 연못의 종류는 유기물 부하가 과다하여 용존산소층이 없는 혐기성 연못, 유기물 부하가 적어 연못 전체에 용존산소가 존재하는 호기성 연못, 호기층과 혐기층이 공존하는 조건성 연못(facultative pond)이 있다(EPA, 1983; WHO, 1987). 혐기성 연못이 유기물 부하량이 적어지면 조건성 연못으로, 호기성 연못이 유기물 부하량이 증가하면 조건성 연못으로 변하기 때문에, 조건성 연못이 일반적으로 많이 이용되고 있다. 호기성 연못은 녹조(algae)침전을 유도하는 마무리 연못(maturation or polishing pond)으로 활용된다. 온대권에서는 혐기성, 조건성, 호기성 연못을 적절히 조합하여 연못시스템을 설계하고 있으며, 대부분 2~3개 셀(cell)의 연못을 직렬로 연결하여 구성한다. 동일 유량을 처리할 경우 1개의 셀보다 2~3개 셀의 연못시스템으로 구성하여 처리하는 것이 수질정화 효율이 높아지기 때문이다(Oswald, 1988; WHO, 1987).

시스템의 각 연못은 수심이 평균 2m가 유지되며, 부유물 침전을 고려하여 0.4m 여유깊이를 두었다. 연못은 유입부와 유출부의 위치가 대각선에 위치하며, 각 연못은 수중유입과 표면유출 구조를 갖추고 있다(양, 1998). 연못은 오염물의 침전과 정화가 동시에 이루어지도록 연못시스템으로 조성하였으며 저류지의 기능도 수행한다. 각 연못은 사면 경사 1:3으로 수심 2m일 때 수표면적 306㎡, 체적 264㎡가 된다. 실험기간 연못 유입수의 양을 약 130㎡/day로 유지시켰다. 따라서 연못의 체류시간은 약 2일이 된다. 그림 1에서 습지 셀은 자유수면 습지로 설치하였으며 유입부는 확산유입이 되도록 유입관에

수개의 직경 2cm 구멍을 뚫었다. 유출부는 수문을 설치하여 수심 60cm까지 적정수심을 유지할 수 있다. 수질정화 인공습지를 수리적 특성(hydraulic characteristics)과 사용한 재질에 따라 자유수면습지(surface flow wetlands)와 여과습지(subsurface flow wetlands)로 대별한다(Corbitt and Bowen 1994; 양, 1999b, 양, 2000). 자유수면습지는 여과습지에 비해 공사비용이 저렴하고 수리조작이 용이한 장점이 있다. 자유수면 습지는 점오염원(생활하수, 산업폐수, 축산폐수)을 2차처리수준으로 처리하는 하수처리장이나 연못시스템의 방류수를 3차처리수준으로 정화하기 위해 활용하며, 오염된 하천수 및 호소수의 정화, 강우유출수의 정화에 활용되고 있다. 이 경우 질소와 인의 정화가 자유수면습지 조성의 일차적 목적이 되는 경우가 많다. 시스템의 습지 셀은 연못에서 처리되지 못한 질소와 인을 처리하고 연못에서 발생한 녹조를 제거하는 기능을 할 수 있도록 설치하였다. 각 습지 셀은 사면경사 1:2, 바닥면적 156㎡로 수심이 30cm일 때 체적이 52.6㎡가 된다. 실험기간 습지 셀의 유입유량은 약 20㎡/day로 습지 공극률(porosity)을 약 0.75로 보면(Reed et al., 1988) 체류시간이 약 2일이 된다.

2) 시스템 식재

자유수면 인공습지의 정수식물로 부들, 갈대, 고랭이 등을 주로 활용하고 있다(Reed et al., 1988). 고흥지구 간척지와 시스템 주변에 자생군락을 형성하고 있는 부들(*Typha angustifolia*)과 갈대(*Phragmites australis*)를 정수식물 수종으로 선정하였다. 2000년 6월초 시스템 주변에서 자생하는 부들과 갈대를 채취하여 뿌리에서 약 35cm 높이로 절단하여 약 30cm 간격으로 습지 셀1, 셀2, 셀3에는 부들을 식재하였으며, 셀4, 셀5, 셀6에는 갈대를 식재하였다. 부들은 1㎡당 평균 20주를 식재하여 1개 셀에는 약 3,120주의 부들을 식재하였다.

3) 처리수준 분석방법

2000년 7월초 시스템을 완공한 후 2000년 8

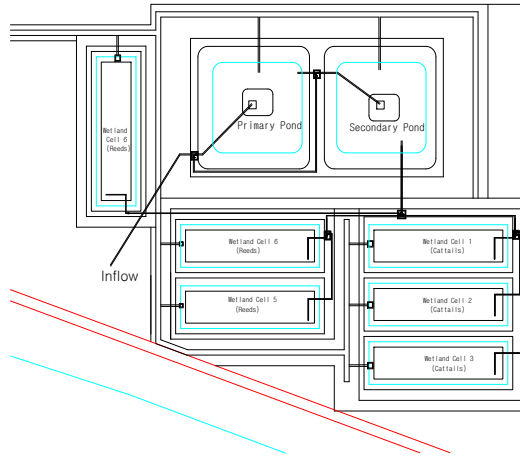


Fig. 1. Schematic plan of pond-wetland system

월부터 2001년 8월까지 약 1년 간 시스템 유입수와 1차연못 및 2차연못의 유출수, 부들이 식재된 습지 셀1, 셀2 셀3의 처리수를 1~2주에 한번씩 조사하였다. 수질 샘플은 1회용 무균 플라스틱 채수병에 넣은 후 아이스 박스에 저장하여 운반하였다. 수질조사 항목은 수온, BOD₅, SS, T-N, T-P 등을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였으며, 수질분석은 수질 오염공정시험방법(환경부, 2000)을 기준으로 SS는 유리섬유지법, BOD₅는 윙클러-아지드화나트륨법, T-N은 흡광광도법, T-P는 흡광광도법(아스코르빈산 환원법)을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 2~그림 5는 연못-습지 시스템의 유입수와 1차연못, 2차연못, 습지(셀1, 셀2, 셀3)에서 처리된 후 방류되는 유출수의 월별평균 SS, BOD₅, T-N, T-P 농도를 나타낸다. 습지의 월별평균 SS, BOD₅, T-N, T-P 농도는 습지 셀1, 셀2, 셀3 유출수의 농도를 평균한 값이다.

1) SS 및 BOD 제거

그림 2에서 유입수의 평균 SS는 19.0mg/l이며, 1차연못에서 평균 13.4mg/l로 처리되어 29%의 처리효율을 보며, 2차연못에서 평균 11.2mg/l로 낮아져 41%의 처리율을 보이고 있다. 습지 셀 처리수의 평균 SS는 8.5mg/l로 평균 55%의 처리효율을 보이고 있다. 습지의 SS 처리효율이 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 이는 강우시 습지 셀의 제방에서 빗물과 함께 진흙이 유입되는데 원인이 있는 것으로 사료된다.

그림 3에서 유입수의 평균 BOD₅는 5.8mg/l이며, 1차연못에서 평균 4.0mg/l로 처리되어 30%의 처리효율을 보며, 2차연못에서 평균 3.5mg/l로 낮아져 40%의 처리율을 보이고 있다. 습지 셀 처리수의 평균 BOD₅는 2.5mg/l로 평균 57%의 처리효율을 보이고 있다. 유입수의 BOD가 겨울철에 낮아지는 경향을 보이고 있다.

Table 1. Design Parameters of pond-wetland system

		Water depth (m)	Free Board (m)	Sludge Depth (m)	Levee Height (m)	Levee Slope (inside)	Levee Slope (outside)	Water Surface (m ²)	Volume (m ³)	Detention Time (day)
Pond-Wetland system	Primary Pond	2.0	0.5	0.4	3.0	1 : 3	1 : 3	18×17	264	1.5~2
	Secondary Pond	2.0	0.5	0.4	3.0	1 : 3	1 : 3	18×17	264	1.5~2
(Two Ponds and Six Wetland Cells)	Each Wetland Cell	0.6	0.3		0.9	1 : 2	1 : 2	8.6×26.6	52.6	2~2.7
	Total six Wetland Cells								315.6	2~2.7

연못에서 SS는 주로 침전에 의해 제거되며, BOD는 호기성산화와 혐기성발효에 의해 상당 부분 제거된다. 수심 2~2.4 m의 조건성 연못은 햇빛이 비치면 태양열로 온난하고 밀도가 낮은 상층과, 차갑고 밀도가 높은 하층으로 구분된다. 상하층이 구분되면 수직으로 물의 이동이 없어 바닥에 고형물이 침전되어 SS가 제거된다. 연못바닥에 유기물이 침전되면 얇은 슬러지층이 형성되며, 연못하층은 혐기성 상태가 되어 혐기성 박테리아 활동으로 침전된 유기물이 분해되어 유기산이 생성된다. 이 유기산은 메탄박테리아가 메탄과 이산화탄소로 분해시켜 유기물이 제거된다. 상층에서는 호기성 미생물에 의해 유기물이 이산화탄소, 물, 영양염류(N, P)로 분해되면서 제거된다(Oswald, et al., 1994; Green, et al., 1995). 연못바닥의 슬러지층 형성에는 1년 이상이 소요되며, 슬러지층이 형성된 연못이 슬러지층이 형성되지 못한 연못보다 BOD처리율이 높다(Parker, 1979). 2001년 8월 Coretaker로 1차연못과 2차연못의 바닥을 채취해본 결과 1차연못은 슬러지층이 아주 얇게 형성중이었으며 2차연못은 슬러지층이 거의 형성되지 않은 상태였다. 연못바닥의 슬러지층이 형성되면 BOD처리율이 다소 증가될 것으로 예측된다.

습지에서 SS는 주로 침전에 의해 제거된다. 습지에서 BOD는 유기물이 습지바닥으로 침전되어 제거되며, 침전된 유기물은 바닥층의 미생물에 의하여 분해되거나 토양에 흡수되어 제거된다. 수중의 습지식물 줄기나 잎, 잔재물에 호기성 미생물이 부착되어 형성된 얇은 미생물막과 유기물이 반응하여 BOD가 제거된다(Brix, 1993; Kadlec and Knight, 1996; Mitch and Gosselink, 2000). 근경을 이용하여 부들 등 정수식물을 인공습지에 식재할 경우 근경이 충분히 발달하는데 2~3년 정도 성장기가 필요하다(Corbitt and Bowen, 1994). 실험기간 중 습지 셀의 부들은 초기성장단계로 줄기와 잎, 잔재물의 표면적이 상대적으로 적은 상태였다. 부들이 2~3회 성장기를 거쳐 줄기와 잎, 잔재물이 증가하면 BOD제거율이 높아질 것으로 예측된

다.

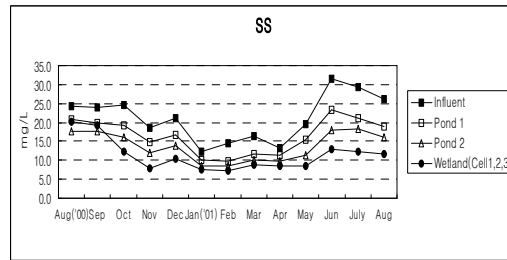


Fig. 2. Monthly average SS concentrations in influent and effluent of a pond-wetland system

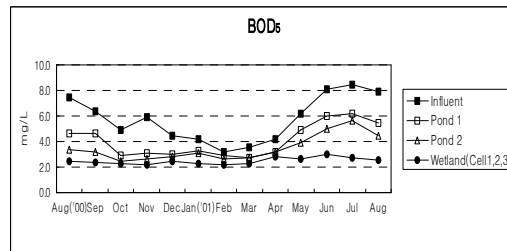


Fig. 3. Monthly average BOD₅ concentrations in influent and effluent of a pond-wetland system

2) T-N 및 T-P 제거

그림 4에서 유입수의 평균 T-N은 6.0mg/ℓ이며 1차연못에서 평균 5.0mg/ℓ로 처리되어 15%의 처리효율을 보이며, 2차연못에서 평균 4.2mg/ℓ로 낮아져 30%의 처리율을 보이고 있다. 습지셀 처리수의 평균 T-N은 2.4mg/ℓ로 평균 60%의 처리효율을 보이고 있다. 습지 셀의 겨울철 T-N 처리효율은 낮은 경향을 보이고 있다. 이는 수온의 저하로 습지내 미생물의 질산화와 탈질화 활동 저하(Kadlec and Knight, 1996)에 원인이 있는 것으로 사료된다.

연못에서 T-N은 조류성장에 의해 주로 제거되며, 일부는 미생물에 의한 질산화(nitrification)와 탈질화(denitrification) 과정에서 질소로 전환되어 대기중으로 이동하여 제거된다(EPA, 1983; Oswald, 1988). 습지에서 T-N제거는 식물에 의한 흡수보다 미생물에 의한 암모니아화, 질산화, 탈질화가 중요한 역할을 한다. 유입수의 유기태 질소(organic N)가 주로 호기성 미생물에 의한 암모니아화 과정을 통하여 암모니아로 전

환된다. 수온 25°C, pH 7 조건에서는 총 암모니아 중 암모니아태 질소(NH₃-N)로 0.6%, 암모니아이온태 질소(NH₄⁺-N)로 99.4%가 존재한다(Kadlac and Knight, 1996). 암모니아이온태 질소가 질산화를 통하여 아질산태 질소(NO₂⁻-N)로 전환된 후 질산태 질소(NO₃⁻-N)로 전환된다. 대부분의 습지에서 아질산태 질소는 화학적으로 불안정하여 낮은 농도로 존재한다. 질산태 질소는 혐기상태인 습지의 토양으로 확산되어 혐기성 미생물에 의하여 탈질화가 일어나면서 질소(N₂)와 아산화질소(N₂O)로 전환되어 이들이 대기중으로 이동하여 질소가 제거된다(Yang, et al., 2001). 습지식물의 근권도 질소제거에 상당한 역할을 한다. 정수식물은 대기중의 산소를 뿌리로 전달하고 토양에서 발생하는 질소와 아산화질소를 대기중으로 이동시키는 통기조직이 발달되어 있다. 산소가 뿌리로 전달되면 뿌리 주변에 옅은 호기상태의 근권이 형성되어 암모니아화와 질산화가 일어나며, 근권을 둘러싸고 있는 혐기상태의 심토층에서는 탈질화로 질소와 아산화질소가 발생하여, 습지식물의 통기조직을 통하여 대기중으로 이동한다(Faulker and Richardson, 1989). 실험기간 습지의 부들이 생태적 적응을 완전히 못한 초기상태에서 근권의 발달이 느려 질소의 제거효율이 낮은 것으로 사료된다. 부들이 2~3회 성장기를 거쳐 근권이 발달하면 T-N의 처리효율이 다소 높아질 것으로 예측된다.

그림 5에서 유입수의 평균 T-P는 0.16mg/ℓ이며 1차연못에서 평균 0.1mg/ℓ로 처리되어 36%의 처리효율을 보이며, 2차연못에서 평균 0.08mg/ℓ로 낮아져 47%의 처리율을 보이고 있다. 습지 셀 처리수의 평균 T-P는 0.05mg/ℓ로 평균 68%의 처리효율을 보이고 있다.

연못에서 인(P)은 조류성장으로 제거되거나 인산염(Ca-phosphate, Fe-phosphate, Al-phosphate)으로 전환되어 침강에 의해 제거된다. 수심 2~2.4m의 조건성 연못의 상층은 호기성 미생물에 의해 유기물이 이산화탄소, 물, 영양염류(N, P)로 분해되며, 햇빛이 쬐면 녹조(algae)가 이산화탄소와 영양염류를 흡수하여 성장하면서 질소

와 인이 제거된다(Oswald, et al., 1994; Green, et al., 1995). 조건성-호기성 연못으로 구성된 연못 시스템에서는 조건성 연못의 처리수에 함유되어 있는 녹조가 호기성 연못으로 유입되면 녹조의 상당부분이 죽어 연못바닥으로 침전되어 질소와 인이 제거된다.

습지에서 인은 인산염(Ca-phosphate, Fe-phosphate, Al-phosphate)의 상태로 침강(precipitation)하여 제거되며(Faulker and Richardson, 1989; Yang, 2001), 습지식물에 의해 일부는 흡수된다(Greenway and Woolley, 1999). 인은 유기물의 침전과 죽은 습지식물의 잔재물이 침전되어 형성된 습지바닥의 침전-잔재물 층(sediment-litter layer)에 흡착(adsorption)되어 95% 이상이 존재한다(Faulker and Richardson, 1989).

수질분석결과 T-P의 처리효율이 BOD, SS, T-N보다 다소 높다. 이는 T-P가 연못과 습지 셀의 바닥에 침전되어 저장되는데 원인이 있는 것으로 사료된다.

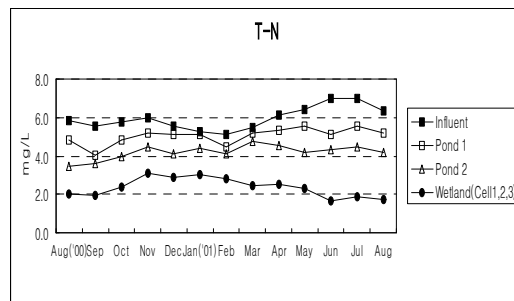


Fig. 4. Monthly average T-N concentrations in influent and effluent of a pond-wetland system

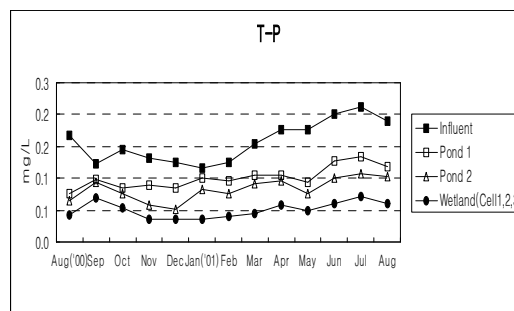


Fig. 5. Monthly average T-P concentrations in influent and effluent of a pond-wetland system

IV. 결 론

시스템 시공후 초기 약 1년간의 연못 및 습지(셀1, 셀2, 셀3)의 처리수준은 1차연못 과 2차연못에서 SS, BOD₅, T-N, T-P가 각각 38%, 40%, 30%, 47%가 처리되며, 습지 셀까지의 SS, BOD₅, T-N, T-P의 처리효율은 각각 54%, 57%, 60%, 68%이다. 1차연못 및 2차연못에서 BOD, T-N, T-P의 처리효율이 습지 셀의 처리효율보다 다소 높게 나타났다. T-P의 처리효율이 BOD₅, SS, T-N 처리효율보다 다소 높은 편이다. T-P가 연못과 습지 셀의 바닥에 침강되어 저장되는데 원인이 있는 것으로 사료된다. 습지 셀의 겨울철 T-N 처리효율이 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 겨울철 습지 수온이 낮아 미생물의 질산화와 탈질화 활동 저하에 원인이 있는 것으로 생각된다. 시스템이 운영 초기단계이고 겨울철에도 운영된 것을 고려하면 처리효율이 높은 편으로 나타났다. 습지의 부들이 생태적으로 적용하면 습지 셀의 처리효율이 향상될 것으로 예측된다.

연구결과 담수호 주변에 연못-습지 시스템을 조성하여 담수호로 유입되는 하천수에 함유되어 있는 오염물을 정화한 후 담수호로 유입시켜, 담수호 수질을 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 저류지와 인공습지를 분리하여 조성하는 방법보다, 저류지와 인공습지의 장점을 결합한 연못-습지 시스템으로 조성하면 수질정화 효율을 높일 수 있을 것으로 생각된다. 1차 및 2차연못에서 유입수의 BOD₅, SS, T-P, T-N이 상당부분 제거되고 있다. 담수호 유입부에 조성하는 저류지를 기존의 1개 셀 개념으로 설계하는 것보다 2~3개 셀로 구성된 연못시스템으로 설계하면 처리효율을 높일 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 생각된다. 선진국에서는 수질정화 연못과 습지를 조성할 경우 다양한 친환경적 기능을 고려하여 설계하고 있다. 담수호 주변의 연못-습지 시스템을 생태공원의 개념으로 설계하여 수질정화는 물론 야생동물 서식처 제공, 훼손된 습지 복원, 자연학습 및 시민휴식 공간을 제공할 수 있도록 조성이 가능하다.

인 용 문 헌

- 농어촌연구원. 1999. 새만금지구 담수호 수질보전 대책 수립조사연구(Ⅱ) pp. 225-252.
- 양홍모. 1998. 생태적 축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템의 폐수처리기준, 한국환경농학회지, 19(1) : 70-75.
- 양홍모. 1999a. 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템, 한국수자원학회지, 32(5) : 111-123.
- 양홍모. 1999b. 농촌지역 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 및 재활용 연못시스템과 인공습지, 21세기 친환경지역농업 개발시스템에 관한 심포지엄, 한국농업시스템학회.
- 양홍모. 2000. 수질정화 인공습지 사례 설계고려사항, 농촌과 환경, 농업기반공사, 67 : 83-96.
- 河川環境管理財團. 2000. 植生淨化施設の現狀と事例, 河川環境總合研究所, Tokoy, Japan.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.
- Brix, H. 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands : system design, removal processes, and treatment performance. In : Moshiri, G.A. (Ed.), Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers, Boca Ra-ton, FL, pp. 9-22.
- Corbitt, R. A. and P. T. Bowen. 1994. Constructed wetlands for wastewater treatment, in Applied Wetlands science and technology, Kent, D.M. (ed.), Publishers Lewis, pp. 221-241.
- EPA. 1983. Design Manual : Municipal Wastewater Stabilization Ponds, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-625/1-83-015, Washington, D.C. pp. 2-7.
- EPA. 1988. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. EPA/625/1-88/022, Cincinnati Ohio.
- Parker, C. D. 1979. Biological mechanism in lagoon, Process in water Technology, Ⅱ(4/5) : 71-

- 85.
- Faulker, S. P. and C. J. Richardson. 1989. Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland Soils in Hammer, D.A. (ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : Municipal, Industrial and Agricultural*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan. pp. 41-72.
- Green F. B., L. Bernstone, T. J. Lundquist, R. B. Tresan, and W. J. Oswald. 1995. Methane Fermentation, Submerged Gas Collection, and The Fate of Carbon in Advanced Integrated Wastewater Pond Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 31(12) : 55-65.
- Higgins, M. J., C. A. Rock, R. Bouchard, B. Wengrezynek. 1993. Controlling agricultural runoff by use of constructed wetlands. In : Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 359-367.
- Kadlec, R. H. and R. L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton. Kern, J., Idler, C., 1999, Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems, *Ecological Engineering* 12 : 13-25.
- Luederitz, V., E. Eckert, L. W. Martina, A. Lange and R. M. Gersberg. 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands *Ecological Engineering*, 18 : 157-171.
- Mitsch W. J. and J. G. Gosselink. 2000. *Wetlands* (3rd ed.), John Wiley & Sons, New York.
- 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, *Wat. Sci. Tech.*, 30(12) : 287-295.
- Reed, S. C., E. J. Middlebrooks and R. W. Crites. 1988. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. McGraw-Hill, New York.
- Schueler, T. R. 1992. Design of stormwater wetland system : guidelines for creating diverse and effective stormwater wetlands in mid-Atlantic Region, Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC.
- Vrhovsek, D., V. Kukanja and T. Bulc. 1996. Constructed wet-land (CW) for industrial waste water treatment. *Wat. Res.* 30 : 2287-2292.
- 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, L., H. T. Chang and M. L. Huang. 2001. Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation, *Ecological Engineering*, 18 : 91-105.
- 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 2001年 11月 8日