

## 인공습지를 이용한 하구담수호 유입하천수 수질개선 현장실험결과 분석

### Analysis of Field Experimental Data for Water Quality Improvement of Tributary Stream to Estuarine Reservoir Using Constructed Wetland System

함 중 화\* · 윤 춘 경\*\* · 구 원 석\* · 김 형 철\* · 신 현 범\*\*\*

Jong-Hwa Ham · Chun G. Yoon · Won-Seok Koo · Hyung-Chul Kim · Hyun-Bhum Shin

#### Abstract

Wetland system is widely accepted as one of natural water purification systems around the world for nonpoint sources pollution control. Constructed wetlands have become a popular technology for treating contaminated surface and waste water. In this study, the field experiment to reduce nonpoint source pollution loadings from polluted stream waters using wetland system was performed from June 2002 to March 2004. Four wetlands were used and the size of each one was 0.8ha. Water of Dangjin stream flowing into Seokmun estuarine reservoir was pumped into wetlands. Inflow and hydraulic residence time of the system was 500 m<sup>3</sup>/day~1,500 m<sup>3</sup>/day, 2~5 days, respectively.

After 2 year operation, plant-coverage of the wetlands was about 70% from bare soil surface at initial stage. Average water quality of the influent was BOD<sub>5</sub> 4.17 mg/L, TSS 18.45 mg/L, T-N 4.32 mg/L, and T-P 0.30 mg/L. The average removal rate of BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N and T-P during the study period was 5.6%, 46.6%, 45.7%, and 54.8%, respectively. Organic (BOD<sub>5</sub>) removal rate was low and the reason might be low influent concentration. Wetland removal rate of T-P was about 10% higher than T-N. Performance of the experimental system was compared with existing data base (NADB), and it was within the range of general system performance.

Overall, the wetland system was found to be adequate for treating polluted water stream with stable removal efficiency even during the winter period. Most of the nonpoint source pollutions from watershed are transported by streams or ditches, and they could be controlled by constructed wetland system before entering the lake or reservoir.

*Keywords : Nonpoint sources pollution, Newly constructed wetland, Field experiment study*

\* 건국대학교 대학원 환경과학과

\*\* 건국대학교 환경과학과

\*\*\* 농업기반공사 농어촌연구원

\*\* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747

Fax: +82-2-446-2543

E-mail address: chunyoona@konkuk.ac.kr

## I. 서 론

문명의 발달과 생활수준 향상으로 수량확보를 우선적으로 생각했던 시기가 지나 확보된 수자원의 수질문제에도 관심을 가지게 되면서 유역 및 저수지의 수질개선을 위해 여러가지 노력들이 이루어지고 있다. 우리나라의 경우도 과거의 물관리정책은 고도 경제성장과 생활수준의 향상, 인구증가 등으로 인한 물수요를 충족시키기 위해 수자원의 공급능력 확대에 주력해 왔으며, 수자원의 질적가치를 보전하기 위한 노력은 상대적으로 소홀하였다 (Yoon, 2001). 그러나 지금은 물부족 문제보다는 물의 질적가치 문제로 사회적인 갈등까지 발생하는 단계에 와있다. 그간의 수질정책은 행정구역 단위로 관리하여 점오염원으로 발생하는 오폐수의 처리에 집중되었으나, 4대강 특별법수질정책을 비롯 21세기를 향한 물관리정책방향은 유역단위로 배출되는 오염원의 40%이상률 차지하는 비점오염원도 관리를 철저히 하여 일정수준이상의 수질개선을 기대하고 있다. 따라서, 시가지, 농경지, 산림 등 넓은 지역에서 발생하는 오염부하인 비점오염물질을 하천유입전에 저류하여 침전, 처리하는 등 구체적이고 실질적인 비점오염원 관리대책이 필요하다 (Yoon, 2001). 4대강 특별법이 수립되면서 수변구역제도, 오염총량제, 물이용부담금, 수계관리위원회 등 유역관리체제가 법적으로 새로 구축되었다. 오염총량관리제도는 수계구간별 목표수질을 설정하고, 그 목표수질을 달성하고 유지하기 위한 허용부하량을 산정하여 총량관리단위유역에서 배출되는 오염물질의 양을 허용부하량 이내로 규제 또는 관리하는 제도이다. 오염총량관리제도는 환경과 개발을 함께 고려함으로써 지속가능성을 확보할 수 있는 핵심적 유역관리제도로서, 이를 위해서는 수문학적 경계로 둘러싸인 유역내에서의 비점오염원제어가 무엇보다 중요하다.

인공습지를 이용한 수질개선은 유지비용이 적게 들어 경제적이며 자연생태계를 이용한 오염물질처

리시스템으로 (Yang and Jung, 2002), 이 방법은 유역에서 담수호로 유입되는 비점오염원제어에 적용성이 높아 국내에서도 이러한 인공습지의 기능에 주목하여 Kim (1997), Yoon (1998, 1999, 2002) 과 Hwang (2000) 등은 습지가 지니고 있는 자정기능을 응용하여 인공습지의 수질정화기능에 관하여 연구한 바 있다. 습지에 유입된 오염성분 가운데 입자가 큰 부유물질은 여과되고, 용해상태의 성분은 토양입자나 식물의 뿌리에 흡착되며, 영양물질들은 식물에 의해 직접흡수된다. 여과되거나 흡착된 유기물은 토양이나 수중의 미생물 등에 의해 분해되어 식물섭취, 토양저류 혹은 고정화 과정을 거치면서 수중에서 제거되어 수질이 개선된다 (Tchobanoglous, 1987). 그러나 습지에 대한 대부분의 연구가 고농도의 오폐수를 처리하는 연구에 집중되어 있고, 오염된 하천이나 농지배수와 같은 저농도 고유량을 처리하는 연구나 사례는 많지 않은 실정이다. 또한 지금까지 우리나라에서는 습지를 이용한 수처리 연구는 도입단계로서, 현재 실험중인 대부분의 인공습지의 수처리 결과 자료는 비교적 작은 규모의 단기간에 걸친 수처리 결과가 대부분이다.

최근 새만금호를 비롯한 일부 간척지담수호의 수질오염이 환경단체 등을 통해 여론화되면서 수질오염에 대한 사회의 관심이 고조되고 있는 가운데, 정부에서는 현재 시공중에 있는 대규모 간척사업 지구부터 순차적으로 담수호 수질개선사업을 추진 중이다. 간척지담수호는 일반적으로 유역의 말단부에 위치하여 유역에서 발생하는 각종 오염물질이 최종 유입되고 있으며, 강우가 많은 하절기를 제외하고 호내에 장기간 체류, 누적되는 특성이 있다. 또한 유역 유입수는 대부분 저농도 고유량의 특성을 나타내고 있는데, 특히 초기 강우시는 노면에 집적된 비점오염물질이 분산상태로 유출되는 초기 세척수의 경우도 한곳에 모아 기계적인 수처리공법으로 처리하기는 현실적으로 불가능하다 (MOAF, 2003).

담수호의 수질개선에 적용하고자 하는 수질개선

공법은 가급적 유지관리가 용이하고 환경친화적인 인공습지와 같은 자연정화공법 위주로 추진되고 있으며, 조성위치는 넓은 부지의 확보가 용이한 간척지를 대상으로하고 있다. 새만금호 수질보전대책으로 5개소 약 1,090 ha의 인공습지조성이 계획되었으며 (MOE, 1999), 화옹담수호 수질개선대책안으로 약 116 ha의 인공습지조성이 계획되어 있다 (KARICO, 2000). 따라서, 큰 규모의 인공습지를 수질개선용으로 적용하였을 경우 자연습지와 다른 인공습지에서 처리가 어떻게 이루어지며 처리효율은 어느정도 유지가능한지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 2001년 12월에 조성되어 2004년 현재까지 계속 운영되고있는 하구담수호로 유입되는 저농도 고유량 하천수의 인공습지에 의한 수질정화효과를 현장실험자료를 고찰하여 인공습지 설계 및 운영에 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

연구지역은 충남 당진군의 석문지구 담수호 유입부 좌안 퇴적구간 (고대면 슬항리)이며 전체 유역면적 22,672 ha 중 약 30 ha를 선정하여, 농지 22 ha, 습지 3.2 ha, 기타 부대시설 4 ha로 구성하였다 (Fig. 1). 습지는 Table 1과 같이 4개로 구성되어 있다. 또한 유입수 농도에 대한 습지의 수질개선효과의 차이를 확인하기 위해 Cell 1과 Cell 3은 하천수를 펌핑하여 저류지에 약 1.5일 체류시킨 후 습지에 유입하였고, Cell 2와 Cell 4는 하천수를 펌핑하여 바로 습지로 유입하고 저류지에

체류 후 방류하도록 설계하였다.

실험시설은 2001년 3월부터 2001년 12월까지 조성되었으며, 본격적인 시료채취는 2002년 6월부터 시작하였다. 주변에 대규모 갈대군락이 존재하고 공사과정 중 일부 갈대군락이 포함된 토양이 유입되었기 때문에, 자연적으로 습지식물이 도래할 수 있을 것으로 판단되어 인공적인 식재를 실시하지 않았다. 습지로 유입되는 유량을 제어하기 위해 밸브를 설치하였으며, 습지수위를 제어하기 위해 웨어를 설치하였다. 습지의 수심은 웨어를 이용하여 0.5 m까지 깊이로 변경이 가능하도록 설계하여, 생장기 (3월~11월)와 동절기 (12월~2월)에 각각 0.3 m와 0.5 m를 유지하였다. 습지조성지역의 토양이 실트질 토양으로 사면이 쉽게 손상될 수 있기 때문에 2002년 6월중순 모든 사면에 씨앗뿌리기를 실시하였으며, 식생이 완전히 정착한 9월 이후에는 사면 침식은 거의 일어나지 않았다. 각 습지 시험포에 약 500 m<sup>3</sup>/day~1,500 m<sup>3</sup>/day의 유량을 유입시켰으며, 그 결과 습지내 체류시간은 약 2~5일이었다. 수질측정 항목은 수온, pH, DO, BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N 및 T-P에 대해 평균 월 2회 측정하였으며, 모든 항목은 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

2002년 6월부터 2004년 4월까지 실험기간동안 인공습지처리 시설의 현장실험결과를 항목별로 고찰하였다.

Table 1 Design parameters of constructed wetland system

	System	Width (m)	Length (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Depth (m)	Detention time (days)	Flow (m <sup>3</sup> /day)	Hydraulic loading (cm/day)
Cell 1	Pond-Wetland	64	125.0	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75
Cell 2	Wetland-Pond	101	79.2	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75
Cell 3	Pond-Wetland	101	79.2	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75
Cell 4	Wetland-Pond	61	131.1	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75

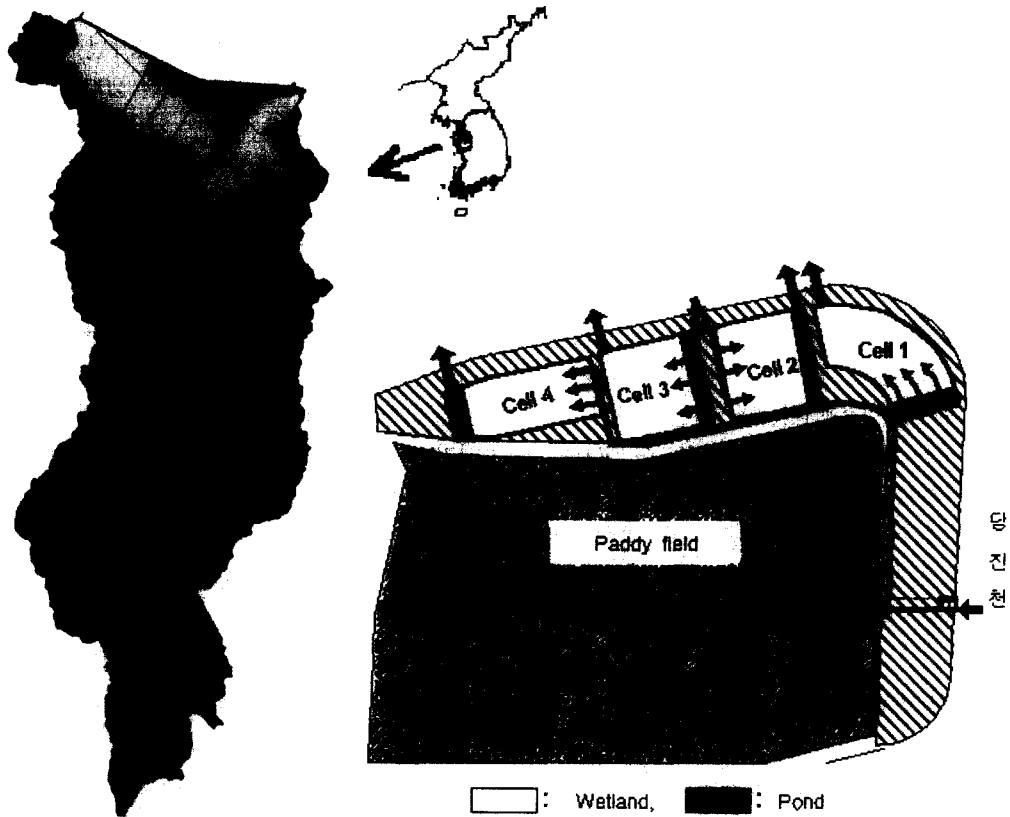


Fig. 1 Layout of study area

### 1. 습지식생

자연도래를 유도하여 두 번의 생장기를 거친 2003년도 식생조사 결과 각 습지별로 약 70% 정도의 식생피도를 나타내었고, 2002년도에 여러 종류의 수생식물이 성장하던 것이 2003년도가 되면서 갈대, 애기부들, 새섬매자기 등의 우점종들만 관측되었다. 식재를 실시하지 않았다는 사실을 감안할 때 조기에 식생이 자연도래 정착하였으며, 타 지역에서 인공습지를 조성할 경우에도 본 연구에서와 같이 습지조성전에 습지조성 예정지와 주변에 습지식물들이 자생하고 있다면, 식재를 실시하지 않아도 습지식물조성이 자연도래에 의해 가능할 것으로 판단된다.

### 2. 온도와 pH

수온의 경우는 Fig. 2에서 보듯이 각 습지별로 대기온도의 영향에 의해 계절별 수온의 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 습지 유입수와 유출수의 수온 차이는 거의 발생하지 않았다. 인공습지실험시설에서는 지속적인 유량유지를 위하여 겨울에 유입수가 동결되지 않도록 관리하는 것이 중요한데, 본 실험 시설에서는 별도의 인공적인 보온시설을 설치하지 않았음에도, 펌프나 유입관이 동결하는 일은 발생하지 않았다. 또한 각 습지별로 유입부에 유량조정조를 설치하여 균일하고 지속적으로 하천수유입이 가능하게 운영하였다. 대기온도가 영하인 경우에는 수표면 위로 약 5 cm 가량의 얼음층이 형성되었으

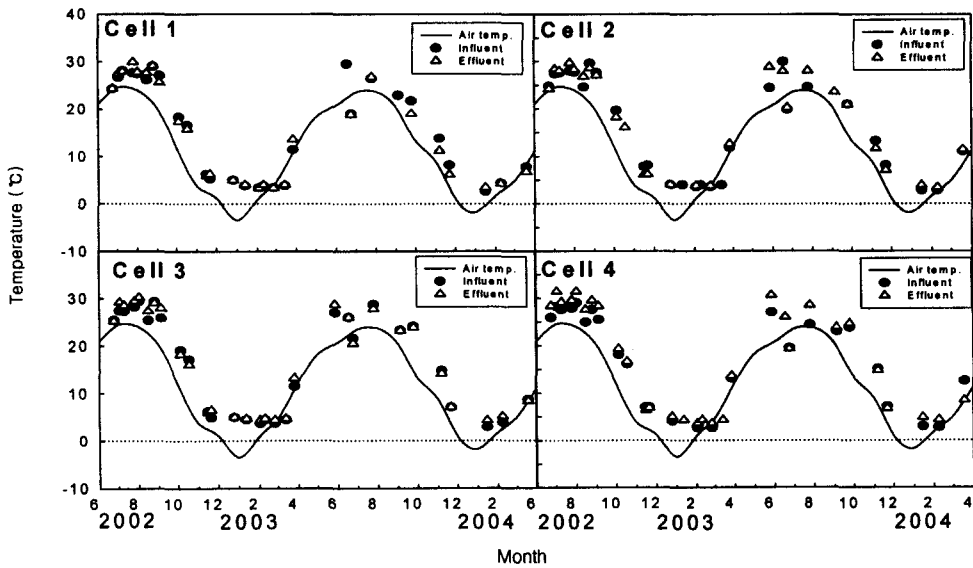


Fig. 2 Temperature in the constructed wetland system

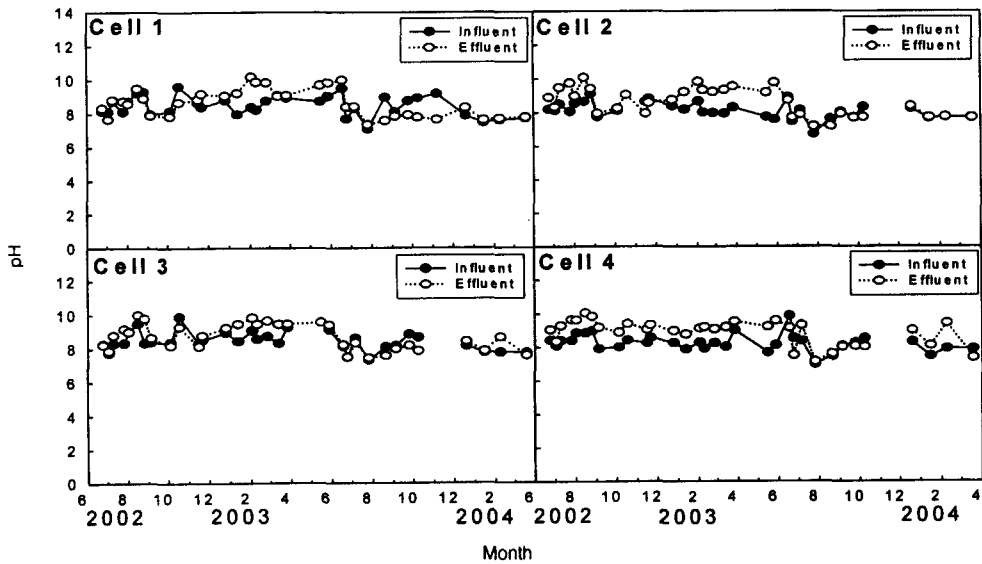


Fig. 3 pH of influent and effluent in the constructed wetland system

며, 얼음층 밑에는 최저 수온이 2.6°C를 나타내었다.

pH는 Fig. 3과 같이 시기에 따른 큰 변화는 나타나지 않았으며, 각 습지별로 평균 pH값은 유입수가 8.48, 8.11, 8.44, 8.25이고 유출수는 8.62,

8.62, 8.70, 8.87를 나타내었다. 전체적으로 중성보다 약간 높았으며, 유출수의 pH가 유입수보다 소폭 상승하는 경향을 나타내었는데 그 이유는 유입수가 습지를 통과하면서 식물성 플랑크톤의 광합

성 작용으로 인해 수중의  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{H}_2\text{CO}_3$  등이 소모되어 상대적으로 pH가 상승하게 되었다고 판단된다.

### 3. 용존산소량 (DO)

용존산소는 물속에 녹아있는 산소의 양으로, 수중생물 생육과 밀접한 관계가 있으며 하천 또는 호소의 자정능력을 판단하는 주요 인자이다. 일반 하천수나 호수수는 수온에 따라 일정량의 산소로 포화되어 있으나 분해성 유기물질의 함량이 높은 오수가 유입되면 수중의 DO는 급격히 저하된다. 시기에 따른 DO 농도 변화는 Fig. 4와 같다. 각 습지별로 평균 DO 농도값은 유입수는 13.38, 10.27, 13.16, 10.86 mg/L이고, 유출수는 12.99, 12.76, 13.24, 13.66 mg/L를 나타내어 전체적으로 충분한 호기성상태를 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 각 습지별로 유입수의 DO 농도가 동절기기간(12월~2월)에 높게 나타난 것은 기온의 저하로 인해 산소를 소모하는 미생물의 활동이 저조하고 온도가 낮음에 따라 용존포화농도가 높아졌기 때문

이라고 판단된다. 특히 이 기간에 습지 유입수에 비해 습지 유출수의 DO 농도가 월등히 높게 나타난 것은 습지내에서 식물성 플랑크톤, 부착조류 및 식물의 광합성에 의해서 수체에 공급된 산소가 습지 표면에 형성된 얼음층 때문에 대기중으로 이동하지 못하고 수체 내에서 잔류하여 나타난 현상이라고 판단된다. 또한 각 습지별로 2003년 8월 말경에 DO 유출수농도가 매우 낮게 나타난 이유는 지속되는 장마와 흐린 날씨로 인해 낮에도 일조량이 부족하여 습지내에 식물성 플랑크톤 및 부착조류 등의 광합성작용에 의한 산소공급이 미비한데 반해, 유기물분해를 위한 미생물의 산소소모는 계속되어서 결과적으로 습지유출수의 DO 농도가 5 mg/L 이하까지 낮아졌다고 추정된다.

### 4. 생물화학적 산소요구량 (BOD)

각 습지별로 평균  $\text{BOD}_5$ 는 유입수는 4.76, 3.68, 4.97, 3.25 mg/L이었으며 유출수는 3.90, 3.73, 4.06, 3.66 mg/L로 나타났다.  $\text{BOD}_5$ 는 각 습지별로 처리효율이 10% 미만의 매우 낮은 처리율을

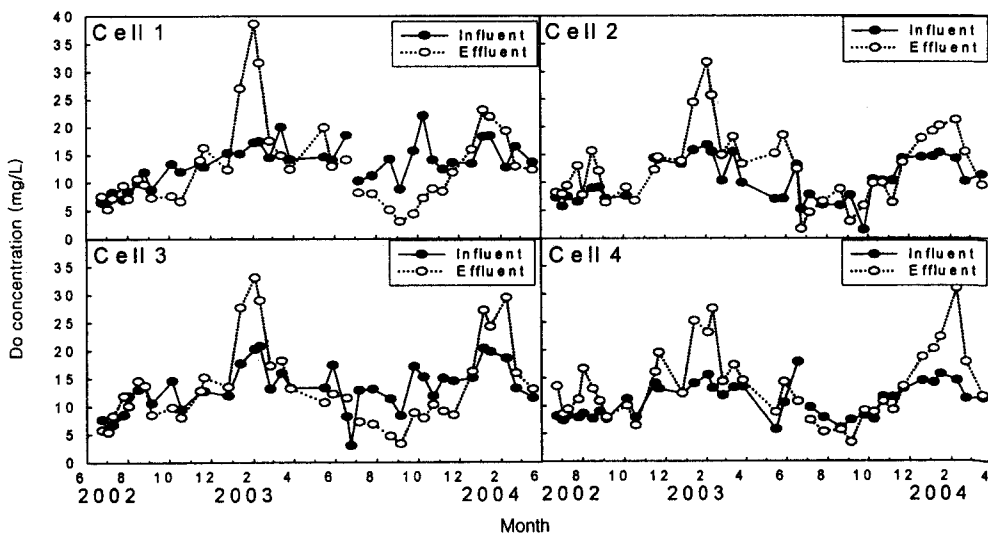


Fig. 4 DO concentration of influent and effluent in the constructed wetland system

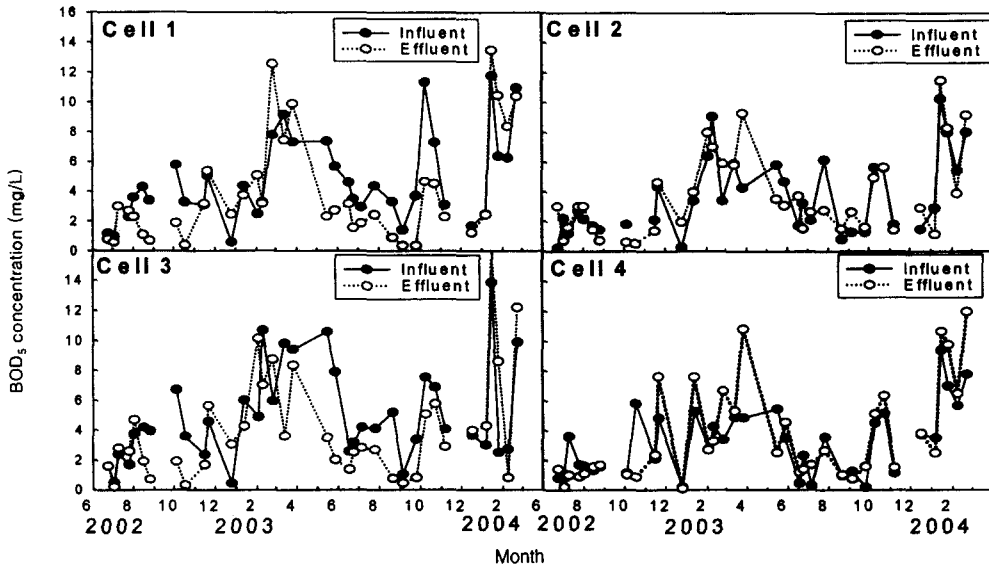


Fig. 5 BOD<sub>5</sub> concentration of influent and effluent in the constructed wetland systems

나타내었는데, Cell 2와 Cell 4의 경우에는 평균습지유출수의 농도가 유입수보다 오히려 소폭 상승하였다. 이유는 습지를 거친 유출수가 저류지에서 체류하면서 조류 등 내부일차생산에 의해 유기물 농도가 일부 증가한 것으로 생각된다. 또한 Fig. 5에서 보듯이 각 습지마다 시기에 따른 농도변화를 살펴보면, 동절기 및 얼음이 녹기 시작한 2~3월경에 높은 유출수농도를 나타내는 경향을 알 수 있다. 이는 동절기 동안 낮은 기온으로 인해 미생물에 의한 유기물 분해가 저조하고 얼음이 녹기 시작하면서 고사한 식물체가 분해되고 습지 수체내에서 유기물이 용출되어 이 시기에 유입수보다 유출수의 농도가 더 높게 나타났다고 판단되며, 그로 인해 전체적은 제거율이 낮게 나타났다. 그러나 전체적으로 각 습지의 평균 유출수 농도는 4 mg/L이하의 낮은 농도를 나타내고 있어 용존산소가 높은 상태의 하천수질에 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 처리용습지에서 배경농도가 약 5 mg/L인점과 비교하면 다른 연구결과들의 범위내에 있음을 알 수 있으며(Kadlec and Knight,

1994) 이 범위에서의 BOD 농도변화는 담수호 수질관리에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

### 5. 총부유 물질량 (TSS)

TSS는 각 습지별로 평균 유입수 농도는 13.71, 19.91, 13.75, 26.42 mg/L이고 평균 유출수 농도는 11.29, 5.56, 7.19, 13.47 mg/L로써, 평균 처리효율이 18, 72, 48, 49%로서 인공습지가 TSS 제거에 안정적인 효과가 있는 것으로 나타났다. 습지의 TSS 제거기작은 여과 및 침전과 미생물에 의한 분해가 있는데, 주로 습지식물에 의한 유속의 감소로 인해 입자성 물질이 침전되어 TSS가 제거되었다고 판단된다. Fig. 6에 나타난 각 습지별 시기에 따른 TSS의 농도 변화를 살펴보면, 얼음이 녹기 시작하면서 수층이 전체적으로 혼합되어 일시적으로 TSS가 높게 나타나는 경향이 있으나, 그 이외에는 각 습지별로 안정적으로 낮은 유출수의 농도를 나타내었다. 또한 Cell 1의 경우 2003년 3월경에는 먹이를 찾기위해 많은 새들이 날아들어 습지를 교란시켜 바닥에 침전되어있던 입자성물질

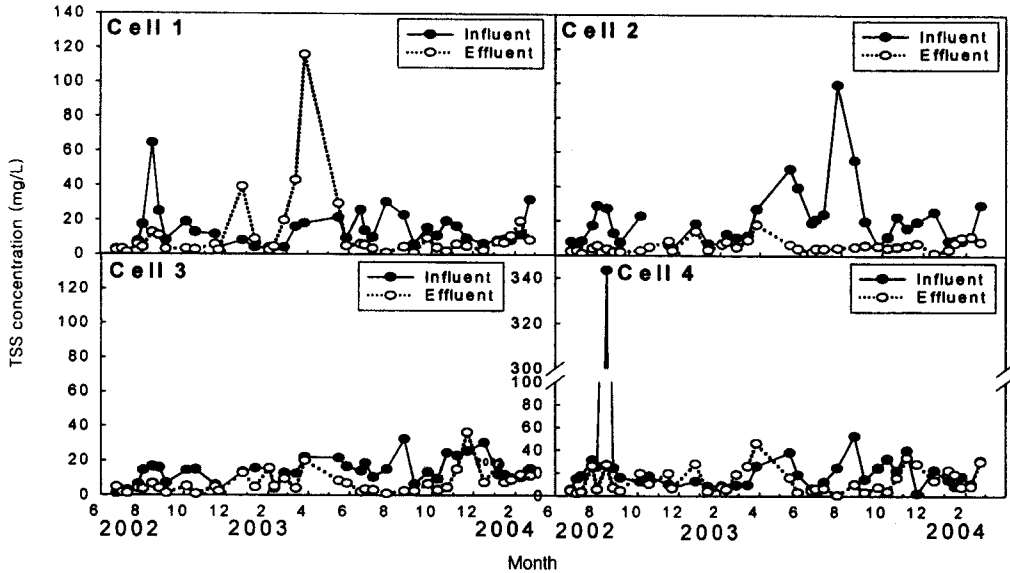


Fig. 6 TSS concentration of influent and effluent in the constructed wetland systems

이 교란되어 일시적으로 높은 TSS가 발생한 것을 제외하고는, 습지 유입수의 TSS가 높거나 시간에 따른 변화폭이 커도 습지 유출수의 TSS농도는 큰 변화 없이 낮은 농도를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 Cell 2와 Cell 4의 경우에는 2003년 8월경과 2002년 8월경에 집중강우로 인해 다량의 입자성 물질이 저류지를 거치지 않고 직접 습지에 유입되어도, 대부분이 제거되어 유출수의 TSS 농도는 다른시기와 비슷한 범위를 나타내어 습지의 완충능력을 확인할 수 있었다. 습지를 장기간 운영하는 측면에서 살펴보면, Cell 1과 Cell 3의 경우처럼 습지 이전에 유수지를 배치시켜 유수지에서 일단 많은 부유물질을 가라앉히고 습지에서 생물학적 처리가 이루어지도록 하는 것이 더 유리하다고 판단된다. 장기간 운영 후에 유수지에 유사가 많이 침전되어 수심이 낮아져도 유수지 바닥의 유사를 준설하면 쉽게 안정된 시스템으로 다시 이용할 수 있으며, 상대적으로 습지에서 침전되는 유사 및 오염부하를 감소시킬수 있기 때문에 습지의 수명을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 총 질소 (T-N)

질소는 인과 함께 부영양화 원인물질의 하나로 도시하수나 유기폐수, 축산폐수 중에 많이 함유되어 있으며, 유기질소 (Org.-N), 암모니아성 질소 (NH<sub>4</sub>-N), 아질산성 질소 (NO<sub>2</sub>-N), 그리고 질산성 질소 (NO<sub>3</sub>-N) 등의 형태로 자연계에 존재한다. T-N은 각 습지별로 평균 유입수 농도는 3.95, 3.84, 3.34, 4.05 mg/L를 나타내었고 평균 유출수 농도는 2.14, 1.95, 1.95, 2.48 mg/L로써, 각 습지별로 평균 처리효율이 각각 46, 49, 42, 39%로 비교적 높게 나타내었다. Fig. 7에서 나타난 시기에 따른 농도변화를 살펴보면, T-N 유입수 농도는 계절적인 변화가 뚜렷하였으며 그에 따라 유출수도 유사한 형태를 나타내었으나, 유출수가 유입수보다 안정적으로 낮은 농도를 나타내고 있다. T-N을 질소의 형태별로 구분한 질소항목별 구성비율 및 농도는 Table 2와 같다. 유입수의 질소항목별 평균구성비율은 유기질소 37%, 암모니아성 질소 10%, 아질산성 질소 3%, 질산성 질소 51%



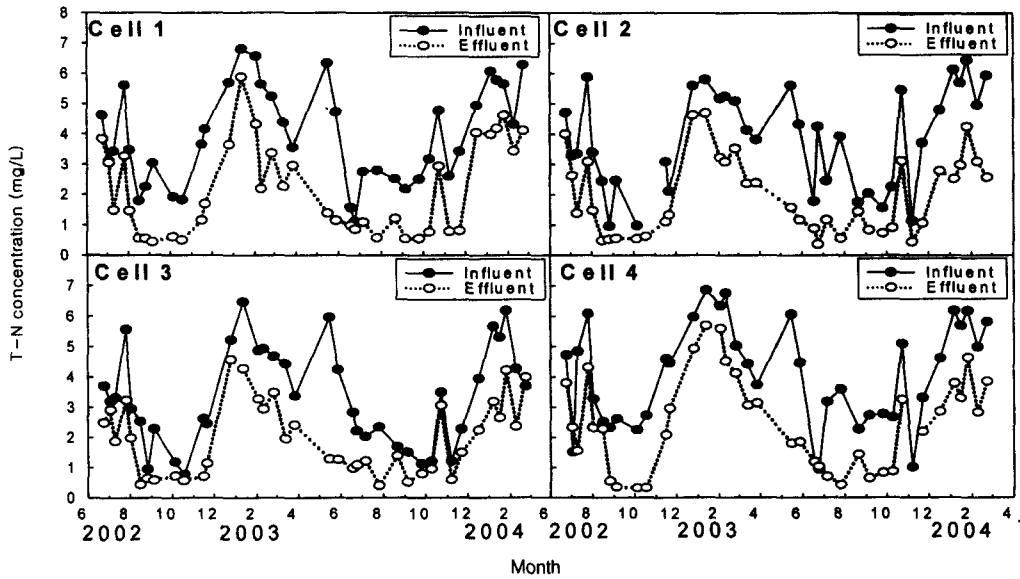


Fig. 7 T-N concentration of influent and effluent in the constructed wetland systems

Table 2 Nitrogen concentrations in types for wetland systems

Cell number	Sampling point	Nitrogen concentration (mg/L)			
		Org.-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N
1	Inlet	1.55 (39)	0.33 (8)	0.12 (3)	1.97 (50)
	Outlet	1.06 (50)	0.07 (3)	0.05 (2)	0.99 (46)
2	Inlet	1.33 (35)	0.48 (12)	0.13 (3)	1.91 (50)
	Outlet	1.08 (55)	0.10 (5)	0.04 (2)	0.76 (39)
3	Inlet	1.41 (42)	0.27 (8)	0.09 (3)	1.60 (48)
	Outlet	1.07 (55)	0.06 (3)	0.05 (3)	0.77 (40)
4	Inlet	1.28 (32)	0.44 (11)	0.12 (3)	2.23 (55)
	Outlet	1.14 (46)	0.13 (5)	0.06 (2)	1.08 (43)

\* Numbers in parenthesis are in percent

로 유기질소와 질산성 질소가 대부분을 차지하고 있다. 유출수의 평균구성비율은 유기질소 52%, 암모니아성 질소 4%, 아질산성 질소 2%, 질산성 질소 42%로써 유기질소의 구성비는 크게 증가한 반면, 질산성질소의 비는 감소하였다. 이는 질산성 질소만 감소하고 유기질소는 증가했다는 의미가 아니라, 질산성 질소는 크게 감소한 반면에 유기질소는

소폭 감소하여 전체적으로 유출수의 유기질소의 구성비가 높게 나타난 것이다. 따라서 현재의 습지 상황에서는 질산성 질소를 더 쉽게 제거 가능하며 유기질소의 제거에는 상대적으로 부족한 것으로 나타났다는데, 이유는 습지내에서 자가생산된 생물량이 일부 유출되어 유기질소의 구성비가 증가한 것으로 판단된다.

### 7. 총인 (T-P)

T-P는 조류의 증식에 필요한 영양분이 되어 수역의 부영양화를 지배하는 한계 인자이다. 각 습지별로 평균 유입수 농도는 0.28, 0.35, 0.26, 0.31 mg/L이고 평균 처리효율은 53, 60, 54, 52%로 상당히 높게 나타났다. T-N과 비교해보아도 약 10% 정도 더 높은 처리효율을 나타내고 있으며, 평균유출수 농도는 0.12~0.15 mg/L로 각 습지별로 비슷한 범위를 나타내고 있다. Fig. 8을 보면 시기에 따른 습지 유입수의 T-P 농도는 변화폭이 큰 것을 알 수 있다. 2002년 8월경과 2003년 6월경에 습지유입수의 T-P 농도가 높게 나타나는 경향을 보였으며, 집중호우가 내린 2003년 7월말경 T-P 농도가 감소 한 후 8월부터 다시 일정농도 이상으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 반면 각 습지별로 시기에 따른 T-P의 습지 유출수 농도를 살펴보면 시기에 따른 변화폭이 습지 유입수에 비해서 적은 것을 알 수 있다. 즉, T-P의 경우는 각 습지마다 T-P 유입수의 농도 및 시기의 변화와

큰 상관없이 상대적으로 안정된 유출수 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

### 8. 습지의 부하량 검토

본 처리시설에 적용된 부하량 및 유출수의 농도를, 다른 연구자들에 의해 얻어진 결과인 NADB (U.S. EPA, 1994)와 비교하여 Fig. 9와 Table 3에 정리하였다.

BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P 모두 동일 유입부하량에 대해 대부분 NADB 보다 비슷하거나 낮은 유출수의 농도를 나타내었다. NADB에 의하면 본 연구에서 적용한 BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P 유입부하량을 보다 낮게 유입시키더라도 유출수의 농도는 더 이상 큰 폭으로 감소하지 않을 것으로 판단된다. BOD<sub>5</sub>와 TSS의 경우 유입부하량을 감소시키더라도 1 mg/L 이하로 낮추기는 힘들다고 판단되며, T-N은 0.6 mg/L, T-P는 0.03 mg/L 이하로 낮추기는 힘들다고 판단된다. 따라서 습지 유출수의 목표 수질을 무리하게 낮게 잡아서 습지의 처리효

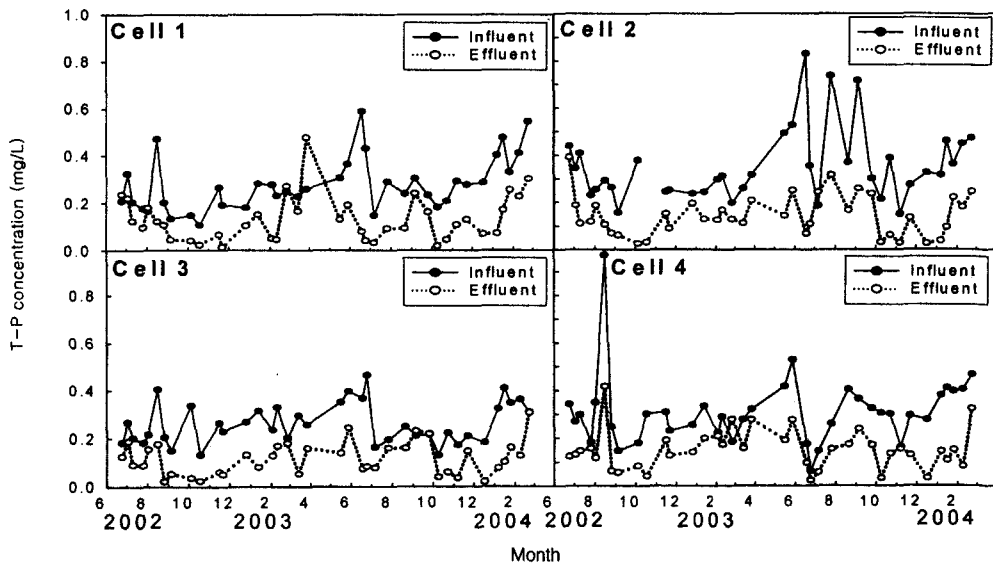


Fig. 8 T-P concentration of influent and effluent in the constructed wetland systems

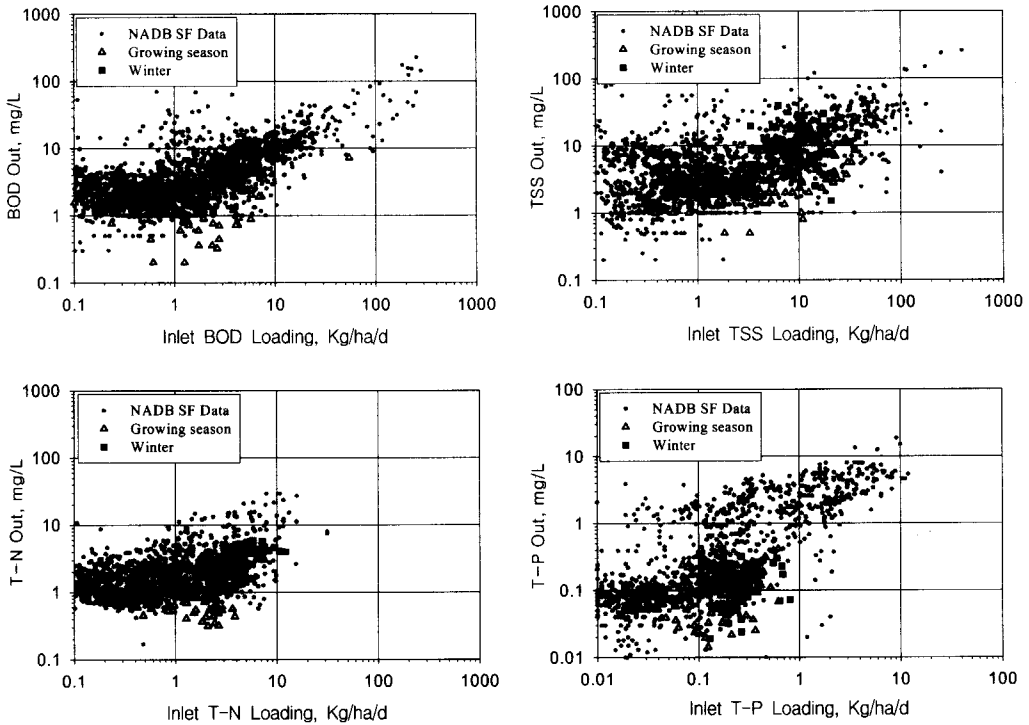


Fig. 9 Comparison of experimental data with NADB

율을 감소시키기보다는 기본적으로 습지가 가지고 있는 배경농도를 감안해, 이에 적합한 유량과 수질을 고려하여 부하량을 유입시키는 습지설계가 유리할 것으로 판단된다.

Table 3에는 BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P를 생장기와 동절기 기간으로 나누어서 유입부하량, 제거효율, 제거량을 비교하였다. 먼저 유입부하량을 살펴보면 BOD<sub>5</sub>와 TSS의 경우는 생장기와 동절기기간 모두 비슷한 범위에었는데, T-N과 T-P의 경우는 생장기에 비해서 동절기에 더 많은 부하량이 유입되는 것으로 나타났다. 제거효율 (removal efficiency)의 경우 각 항목별로 T-P를 제외하고는 동절기에 비해 생장기에 더 높게 나타난 것을 알 수 있다. T-P의 경우는 제거효율도 동절기 (49.2~57.9%)와 생장기 (52.0~60.1%)에 거의 유사한 범위를 나타내고 있다. 또한 T-N과 T-P의 경우 제거효율은 생장기가 동절기에 비해서 더

높거나 비슷한 경향을 나타내고 있지만, 제거량 (amount removed)은 오히려 동절기가 생장기에 비해 더 높게 나타났다. 이유는 동절기에 수위를 생장기 (0.3 m)보다 더 높게 (0.5 m) 유지시켜 습지의 체류시간을 늘려주었고, 유입부하량도 동절기가 생장기에 비해 더 높았기 때문에 제거량도 더 높게 나타났다고 판단된다. 이 같은 결과로 미루어 볼때 동절기기간에 기온의 저하로 인해 미생물의 활동이 저조하더라도 습지에서 체류시간을 조절해 주면 영양물질처리에는 동절기에도 상당한 처리효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 하구담수호로 유입되는 하천수와 같은 저농도 고유량에서 인공습지의 수질정화효과를 약 2년에 걸쳐 현장실험한 자료를 고찰하였으며

Table 3 Comparison of the wetland performance with NADB

Components		Growing season	Winter season	NADB
Hydraulic loading (cm/day)		7.70 (6.87 ~ 9.31)	9.44 (8.30 ~ 11.38)	10.90
Hydraulic residence time (days)		3.95 (3.22 ~ 4.37)	5.37 (4.40 ~ 6.02)	2.07
BOD <sub>5</sub>	Loading rate (kg/ha·day)	3.01 (2.02 ~ 4.50)	4.66 (3.93 ~ 5.77)	19.46
	Removal effic. (%)	16.91 (-8.8 ~ 37.8)	-21.12 (-7.9 ~ -33.6)	62.38
	Amount removed (kg/ha·day)	0.69 (-0.18 ~ 1.68)	-0.93 (-0.46 ~ -1.32)	12.14
TSS	Loading rate (kg/ha·day)	15.91 (9.44 ~ 23.19)	11.89 (7.55 ~ 15.23)	38.06
	Removal effic. (%)	55.94 (29.2 ~ 78.3)	7.79 (-30.6 ~ 46.7)	76.00
	Amount removed (kg/ha·day)	9.07 (4.24 ~ 13.77)	1.66 (-2.31 ~ 7.21)	28.93
T-N	Loading rate (kg/ha·day)	2.38 (1.82 ~ 3.01)	5.23 (4.49 ~ 6.31)	8.16
	Removal effic. (%)	52.26 (47.0 ~ 57.1)	32.54 (28.4 ~ 38.7)	48.41
	Amount removed (kg/ha·day)	1.25 (0.89 ~ 1.72)	1.72 (1.45 ~ 2.44)	3.95
T-P	Loading rate (kg/ha·day)	0.22 (0.17 ~ 0.26)	0.31 (0.27 ~ 0.38)	3.99
	Removal effic. (%)	55.13 (52.0 ~ 60.1)	53.75 (49.2 ~ 57.9)	20.80
	Amount removed (kg/ha·day)	0.12 (0.09 ~ 0.16)	0.17 (0.15 ~ 0.22)	0.83

\* Numbers in parenthesis are range from minimum to maximum

결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유입수와 유출수의 수온은 대기온도의 영향을 받았으나, 대기온도가 영하인 경우에도 유출수 최저수온이 2.6℃를 나타냈으며, pH는 각 습지별로 8.11~8.87로 중성보다 약간 높았다. 유입수 유기물 농도가 낮아서 DO는 각 습지별로 평균 10 mg/L이상의 대체적으로 충분한 호기성 상태를 나타내었으며, 시기별로는 동절기기간에 성장기간에 비해 높은 값을 나타내었다.

2. BOD<sub>5</sub>는 각 습지별로 10% 미만의 저조한 처리율을 나타내었으며, 유출수의 농도가 유입수보다 오히려 소폭상승하는 경우도 있었는데, 각 습지의 평균 유출수 농도는 3.84 mg/L로써 다른연구결과와 유사한 배경농도 수준이며 이 정도 유기물농도 유입은 하구담수호 수질에 나쁜 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

3. TSS는 각 습지별로 평균 18, 72, 48, 49%의 처리율을 나타내었고, 새의 영향을 받은 특정한 상황을 제외하고 유출수의 TSS 농도는 유입수에

비해 강우시를 포함하여 시기에 관계없이 큰 변화 없이 낮은 농도를 안정적으로 유지하였다.

4. 영양물질 T-N은 각 습지별로 평균 46, 57, 42, 39%의 처리율을 나타내었으며, 질소의 형태별로 살펴보면 유기질소와 질산성 질소가 전체 구성비율의 약 90%를 차지하였다. T-P는 T-N보다 약 10% 정도 높은 처리효율을 나타냈으며, 평균 유출수 농도는 0.12~0.15 mg/L로써 T-P 유입수의 농도 및 시기의 변화와 큰 상관없이 일정한 범위의 안정적인 유출수 농도를 유지하였다. 이러한 영양물질의 제거기능은 성장기뿐만 아니라 동절기에도 지속적으로 이루어졌다.

5. 동절기를 포함하여 습지에 의한 영양물질 제거율이 2~3일 정도의 체류기간만으로도 40~50% 정도로 나타내었으며, 향후 하구담수호 수질개선을 위하여 호유입부에 인공습지에 의한 오염된 유입하천수 수질정화에 대한 장기적인 처리효율 검토를 위하여 지속적인 관심과 연구가 필요하다고 생각된다.

6. 본 연구에 적용한 습지를 NADB와 비교한 결

과 BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P 모두 동일 유입부하량에 대해 대부분 비슷하거나 낮은 유출수 농도를 나타내었으며, 습지 유출수의 목표 수질을 무리하게 낮게 잡아서 습지의 처리효율을 감소시키기보다는 기본적으로 습지가 가지고 있는 배경농도를 감안해, 이에 적합한 유량과 수질을 고려하여 부하량을 유입시키는 습지설계가 유리할 것으로 판단된다.

본 연구는 농어촌연구원 과제 수질개선용 자연정화시설현장시험연구의 지원에 의하여 수행되었음.

## References

1. APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 19th Ed.
2. 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. (in Korean)
3. Hwang, G. S., B. C. Kim, H. S. Kim, and M. S. Jun, 2000. Water Quality Improvement by Natural Wetland. *Korea J. Limnol.* 33(3): 295-303. (in Korean)
4. Huh, Y. M., 2000, Hwaong watershed reclaimed land Development work-water quality improvement of A freshwater reservoir. 385-398, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation.
5. Kim, H. J. 1997. Small Scale Wastewater Treatment in Rural Areas Using Natural Systems. Ph. D. Konkuk University.
6. Ministry of Environment, 1999, Basic report for integrated counterplan of the water quality conservation at Seamangeum polder(1), 7-9.
7. Ministry of Agriculture and Forestry, 2003, The field experimental study report of Natural purification for Water quality improvement. 3-15, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation.
8. 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 U. S. EPA. 569-7630.
9. Robert H. Kadlee, Robert L. Knight, 1996, Treatment wetlands. Lewis Publishers.
10. Tchobanoglous, G. 1987. Aquatic plant system for waste-water treatment engineering considerations, 27-48. In: *Aquatic plants for water treatment and resource recovery* (Reddy, K.R. and W.H. Smith, eds). Magonlia Publishing Inc. Orlando, Florida.
11. Yang, J. S., J. Y. Jung 2002 New alternative of water purification, constructed wetland. the press sowha: 239-245. (in Korean)
12. Yoon, C. G., S. K. Kwun, and T. Y. Kwun, 1998. Feasibility Study of Constructed Wetland for the Wastewater Treatment in Rural Area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 40(3): 83-93. (in Korean)
13. Yoon, C. G., S. K. Kwun, S. H. Woo, and T. Y. Kwon, 1999. Review of 3-year Experimental Data from Treatment Wetland for Water Quality Improvement in Rural Area. *Journal of Korean Society on Water Quality* 15(4): 581-589. (in Korean)
14. Yoon, S. K. 2001 Water management policy direction of korea toward 21<sup>st</sup> Century. In *Proceedings of International Seminar on Integrated Watershed Management toward 21st Century*. ed. Rhee, D. G., D. I. Jung. 1-14. National Institute of Environmental Research. (in Korean)