

## 자유수면형 인공습지에 의한 저농도 고유량의 하천수질개선 효과 분석

### Analysis of Stream Water Quality Improvement Using Surface-flow Wetland

함종화\* · 윤춘경\*\* · 구원석\* · 김형철\* · 신현범\*\*\*

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

#### Abstract

Wetland systems are widely accepted natural water purification systems around the world in nonpoint sources pollution control. Constructed wetlands have become a popular technology for treating contaminated surface and wastewater. 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, including winter performance using four newly constructed wetlands. The Dangjin stream water flowing into Seokmun estuarine lake was pumped into wetlands, and inflow and hydraulic residence time of the system was 500m<sup>3</sup> ~ 1500m<sup>3</sup>/day and 2~5 days respectively. After 3 years operation plant-coverage was about 80~90 % from zero at initial stage even with no plantation. Average water quality of the influent in growing season was BOD<sub>5</sub> 3.96mg/L, TSS 22.98 mg/L, T-N 3.29 mg/L, and T-P 0.30 mg/L. The average removal rate of four wetlands for BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N and T-P in growing season was 24%, 62%, 54%, and 51%, respectively. And average water quality of the influent in winter season was BOD<sub>5</sub> 4.92 mg/L, TSS 12.47 mg/L, T-N 5.54 mg/L, and T-P 0.32 mg/L, respectively. The average removal rate of four wetlands for them was -21%, 23%, 33%, and 53%, respectively. The reason of higher BOD<sub>5</sub> effluent concentration in winter season might be that low temperature restrained microorganism activity and a organic body from the withered plant and algae was flown out. Except the result of BOD<sub>5</sub>, the effectiveness of water quality improvement in winter season was satisfactory for treating polluted stream waters, and BOD<sub>5</sub> variation was within the range of background concentration. 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 satisfactory for NPS control such as improvement of polluted stream water.

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

\* 건국대학교 대학원  
\*\* 건국대학교 환경과학과  
\*\*\* 농업기반공사 농어촌연구원  
\* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747  
Fax: +82-2-446-2543  
E-mail address: churyoon@konkuk.ac.kr

## I. 서 론

호소의 수질은 유역에서 유입되는 외부 부하량과 저수지내 자체적으로 발생하는 내부 부하량으로 구분되는데, 저수지와 같이 흐르는 강을 막아서 인위적으로 조성한 경우에는 유역에서 유입되는 외부 부하량이 대부분을 차지하고 있으므로 외부 부하량을 저감시키는 것이 저수지 수질개선을 위해 필수적이다. 특히 하구에 위치한 호소는 유역으로부터 많은 오염물질이 유입되는데, 유역 및 공공수역으로 유입되어 수질을 악화시키는 오염물질은 크게 점오염원(point source pollutants)과 비점오염원(nonpoint source pollutants)으로 구분할 수 있다. 이는 정체수역의 수질환경에 가장 큰 영향을 끼치는 수질성분인 질소와 인과 같은 오염물질이 어떤 상태로 유출되느냐에 따라 분류한 것으로, 점오염원은 주로 도시의 생활하수나 공장폐수와 같이 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생하는 배출특성을 가지고 있는 것에 반해, 비점오염원은 넓은 면적에 분포하는 오염물질로서 산림, 초지, 도시용지, 농경지, 하상퇴적물 등의 부하를 포함하며, 이들 부하는 주로 강우시 유출되기 때문에 일간, 계절간 배출량 변화가 크다 (Kwun, 1998).

특히, 최근의 수질오염 특징은 과거의 점오염원에 의한 수질오염에서 도시 강우 유출수, 농지 등에 의한 다수의 저농도 발생원의 비점오염원에 의한 광역적 수질오염이 갈수록 문제가 되고 있다. 따라서 비점오염원은 점원오염이 연중 거의 일정하게 배출되는 특징과 비교할 때, 비록 그 농도에서는 점오염에 비하여 낮을지라도, 오염총량에 있어서는 무시할 수 없는 양이며, 전체 수체에 직접적인 영향을 미치게 된다 (Novotny and Olem, 1994). 우리나라 경우도 수질정책이 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 구체적인 실질적인 비점오염원 관리대책이 필요하다.

인공습지는 하수 및 오염된 지표수를 처리하는데 많이 사용되는 기법으로, 폭 넓은 범위의 수리부하에서도 운영이 가능하며, 자연생태계를 이용하므로 처리비용이 적게 든다는 경제적인 장점과, 유기물질, 고형물, 질소, 인과 같은 많은 오염물질을 제거할 수 있기 때문에, 도시와 농촌지역의 비점오염원을 처리하는데 효과적이며, 하천에서의 수질개선 및 경관개선에서도 큰 몫을 할 수 있다 (Yang and Jung, 2002). 특히, 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. 그러나 외국에 비해 우리나라의 경우 습지에 대한 연구는 대부분 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, 대부분의 인공습지 수처리 결과 자료는 비교적 작은 규모의 단기간 수처리 결과가 대부분이다.

근래에 이르러 새만금호를 비롯한 간척지 담수호의 수질오염이 환경단체를 통해 여론화 되면서 습지에 대한 관심이 고조되어 있는 가운데, 정부는 새만금호 수질보전대책으로 5개소 약 1,090 ha의 인공습지조성을 계획하고 있으며 (M.O.E., 1999), 화옹담수호 수질개선대책안으로 약 116 ha의 인공습지조성을 계획하고 있다 (Huh, 2000). 따라서, 우리나라에 큰 규모의 인공습지를 수질개선용으로 적용하였을 경우 처리가 어떻게 이루어지며, 겨울철을 포함한 처리효율이 어느 정도 유지가능한지에

대한 본격적인 연구가 필요하다.

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

## II. 재료 및 방법

### 1. 현장실험시설

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, 우수지 0.32 ha, 기타 부대시설 등 총 4 ha로 조성하였다 (Fig. 1). 습지 및 우수지는 Table 1과 같이 각각 4개로 구성되어 있다. 또한 습지의 유입수 특성을 달리 적용하기 위하여 Cell 1과 Cell 3는 하천수를 펌핑하여 우수지에 약 1.5일 체류시킨 후 습지에 유입하였고, Cell 2과 Cell 4는 하천수를 펌핑하여 바로 습지로 유입하였다.

실험시설은 2001년 3월부터 12월까지 조성되었다. 습지 식생은 인공습지 조성 전 주변 식생조사 결과 주변에 대규모 갈대군락이 존재하여 인공적인 식재를 실시하지 않고 자연도래를 유도하였다. 본격적인 수질개선실험은 2002년 6월부터 시작하였

으며, 2004년 6월까지 2년 동안의 실험결과를 생장기(3월~11월)와 동절기(12월~2월)로 나누어 유출수의 농도 및 처리효율에 대해 분석하였다.

### 2. 측정 및 분석

실험기간동안 각 습지별로 유입, 중앙, 유출 3개 지점에 대해서 월 평균 약 2회 정도로 시료를 채취하여 분석하였으며, 2002년 6월 중순~8월초 기간에는 20 mm 이상의 총 6회의 강우에 대해서 8시간 간격으로 평상시와 동일한 지점에 대해 각각 29회 시료를 채취하여 분석하였다. 또한 동절기 기간인 2002년 12월 중순~2003년 2월 중순, 2003년 12월 중순~2004년 2월 중순까지 습지는 약 5 cm 가량의 얼음층으로 덮여 있었으며, 이 기간동안에는 평상시와 동일한 지점에서 얼음층을 깨고 샘플링을 실시하였다.

강우기를 포함한 생장기 동안에는 총 4개의 습지에 동일하게 수심을 30 cm로 유지하였고, 동절기 동안에는 체류시간증가에 의한 습지의 효율을 알아보기 위해 습지별로 수심을 다르게 적용하는데, Cell-1 습지는 30 cm를 유지하였으며, Cell-2 습지는 50 cm, Cell-3 습지는 40 cm, Cell-4 습지는 45 cm를 유지하였다. 평균유입유량은 2002년 생장기와 동절기에는 각각 750, 755 m<sup>3</sup>/day를 적용하였고, 2003년 생장기와 동절기에는 이보다 적은 540, 700 m<sup>3</sup>/day를 적용하였으며, 2004년 생장기에는 675 m<sup>3</sup>/day를 적용하였다. 습지의 면적

Table 1 Design parameters of constructed wetland systems

|        | System       | Width (m) | Length (m) | Area (m <sup>2</sup> ) | Depth (m) | Hydraulic residence 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                 |

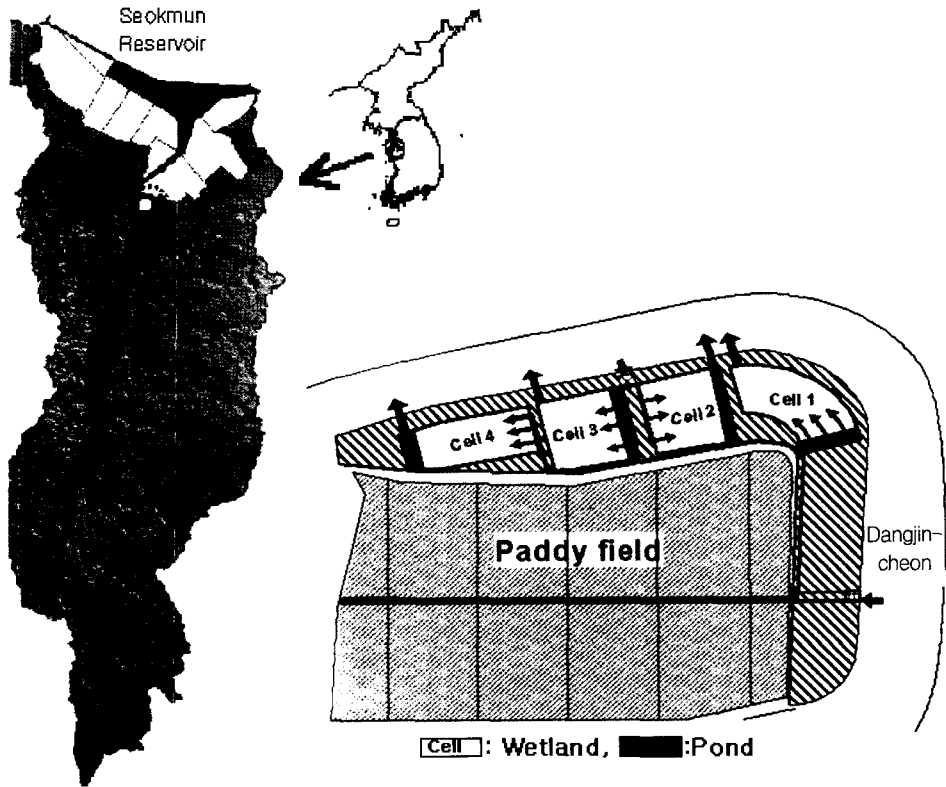


Fig. 1 Layout of study area

이 크기 때문에 각 지점에서 샘플링할 때, 한 지점에서만 샘플링을 할 경우 그 지점의 수질을 전부 반영하기 어렵다고 판단되어 시료채취 지점에 대해 3~4 개의 동일한 양을 샘플링하여 섞은 혼합시료를 사용하여 수질분석을 실시하였다. 조사기간동안 각 Cell당 약 150회 샘플링을 하였으며, 수질측정 항목은 수온, pH, DO, BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P 및 Chl-a이었고, 모든 항목은 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 습지식생

습지에 분배수로가 완성된 후 2002년 3월에 습

지식물이 쉽게 발아할 수 있는 수분이 충분한 습지 바닥을 만들기 위해 각 Cell마다 유입수를 유입시켜 수심 약 0.5 m까지 물을 채웠다. 한달 후 충분한 지하침투가 이루어져 습지바닥이 물로 포화되었다고 판단되어 토양에 통기성을 좋게 하여 식물뿌리에 산소를 공급하고 습지식생에 생육을 촉진하기 위해서 웨어와 수문을 이용하여 각 Cell 마다 물을 제거하였다. 그 후 습지식물의 성장에 따라 수위를 상승시켜주는 물관리를 실시해 주었다. 일반적으로 습지에서 토양수분이 부족할 경우 습지의 식물종이 육상(고지대)의 잡초와 같은 종으로 대체되며, 또한 수분이 너무 많을 경우에는 식물뿌리부분에 산소가 결핍되어 식생이 고사하거나 성장속도가 매우 느리게 된다. 따라서 인공습지에서 식재를 실시하지 않고 자연도래를 유도할 경우 습지조성 초기에

수위조절을 통한 물관리는 매우 중요하다고 할 수 있다.

자연도래를 유도한 결과 인공습지조성초기인 2002년도에는 갈대 (*Phragmites communis*), 애기부들 (*Typha angustata*), 매자기 (*Scirpus fluviatilis*), 개기장 (*Panicum miliaceum*), 물피 (*Echinochloa crusgalli*), 개여뀌(*Persicaria blumei*) 등 여러 종의 식생들이 발견되었고, 각 습지별로 평균 40% 정도의 식생피도를 나타내었다. 2003년도가 지나면서 갈대, 애기부들, 새섬매자기 등의 우점종들만 관측되었으며 평균 60~70%의 식생피도를 나타내었고, 세 번의 성장기를 거친 2004년도 8월 식생조사 결과 각 습지별로 평균 80~90% 정도의 높은 식생피도가 나타났다. 습지조성 초기에 식재를 실시하지 않았다는 사실을 감안할 때, 현재는 식생이 습지에 완전히 정착되었다고 판단된다. 따라서 타 지역에서 인공습지를 조성할 경우에도 습지조성 전에

습지조성 예정지와 주변에 습지식물들이 자생하고 있다면, 적정 물관리를 통해 습지식물조성이 자연도래에 의해 가능할 것으로 판단된다.

## 2. 인공습지에서의 성장기와 동절기의 수질정화

2002년 6월부터 2004년 6월까지 2년 동안 실험결과를 가지고 성장기 (3월~11월)와 동절기 (12월~2월)로 나누어서 분석한 결과, 각 수질 항목별 유입 및 유출수의 평균농도와 처리효율은 Table 2와 같다. 각 수질 항목 중 BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P에 대해서 유입부하량, 부하량제거율, 단위 면적당 제거량을 각각 계산한 결과는 Table 3과 같다. Fig. 2는 각각의 습지에 대해서 BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P항목에 대해 시간에 따른 유입수와 유출수의 농도변화를 나타내었다.

Table 2 Seasonal comparison of concentration of the constructed wetlands

| Constituents            |             | No. of Samples | Concentration (mean ± S.D. <sup>a</sup> ) |                |
|-------------------------|-------------|----------------|---|----------------|
|                         |             |                | Growing season                            | Winter season  |
| Temp. (°C)              | Inf.        | 150            | 20.23 ± 8.29                              | 4.24 ± 1.90    |
|                         | Eff.        | 150            | 20.42 ± 8.82                              | 4.44 ± 1.78    |
| DO (mg/L)               | Inf.        | 150            | 10.68 ± 3.38                              | 15.17 ± 2.29   |
|                         | Eff.        | 150            | 9.64 ± 4.05                               | 21.77 ± 6.69   |
| BOD <sub>5</sub> (mg/L) | Inf.        | 150            | 3.96 ± 2.28                               | 4.92 ± 3.74    |
|                         | Eff.        | 150            | 2.87 ± 1.59                               | 5.96 ± 4.73    |
|                         | Removal (%) |                | 24.23 ± 18.64                             | -21.12 ± 10.77 |
| TSS (mg/L)              | Inf.        | 150            | 22.98 ± 27.69                             | 12.47 ± 7.41   |
|                         | Eff.        | 150            | 7.99 ± 7.67                               | 9.38 ± 5.74    |
|                         | Removal (%) |                | 62.66 ± 12.89                             | 22.72 ± 19.42  |
| T-N (mg/L)              | Inf.        | 150            | 3.29 ± 1.51                               | 5.54 ± 0.71    |
|                         | Eff.        | 150            | 1.51 ± 1.08                               | 3.74 ± 0.87    |
|                         | Removal (%) |                | 54.11 ± 4.42                              | 32.54 ± 4.44   |
| T-P (mg/L)              | Inf.        | 150            | 0.30 ± 0.14                               | 0.32 ± 0.09    |
|                         | Eff.        | 150            | 0.15 ± 0.13                               | 0.15 ± 0.08    |
|                         | Removal (%) |                | 50.55 ± 3.24                              | 53.74 ± 3.63   |
| Chl-a (ug/L)            | Inf.        | 150            | 24.8 ± 24.02                              | 36.3 ± 25.0    |
|                         | Eff.        | 150            | 9.8 ± 16.13                               | 38.8 ± 34.5    |

<sup>a</sup> : Standard deviation

Table 3 Comparison of performances in growing season and winter

| Components                      | Growing season             | Winter season | NADB <sup>b</sup> |
|---------------------------------|----------------------------|---------------|-------------------|
|                                 | Mean ± S.D. <sup>a</sup>   |               |                   |
| Hydraulic loading (cm/day)      | 7.83 ± 1.62                | 9.09 ± 1.88   | 10.90             |
| Hydraulic residence time (days) | 3.94 ± 0.68                | 5.67 ± 1.09   | 2.07              |
| BOD <sub>5</sub>                | Loading rate (kg/ha·day)   | 3.05 ± 1.00   | 4.49 ± 1.12       |
|                                 | Removal effic. (%)         | 24.36 ± 19.75 | -20.05 ± 7.83     |
|                                 | Amount removed (kg/ha·day) | 0.86 ± 0.81   | -0.90 ± 0.49      |
| TSS                             | Loading rate (kg/ha·day)   | 16.06 ± 6.75  | 10.64 ± 1.19      |
|                                 | Removal effic. (%)         | 62.79 ± 12.08 | 33.55 ± 17.88     |
|                                 | Amount removed (kg/ha·day) | 10.24 ± 4.88  | 3.53 ± 1.89       |
| T-N                             | Loading rate (kg/ha·day)   | 2.76 ± 0.56   | 5.02 ± 1.33       |
|                                 | Removal effic. (%)         | 52.71 ± 4.39  | 31.32 ± 4.63      |
|                                 | Amount removed (kg/ha·day) | 1.46 ± 0.36   | 1.57 ± 0.46       |
| T-P                             | Loading rate (kg/ha·day)   | 0.23 ± 0.04   | 0.29 ± 0.09       |
|                                 | Removal effic. (%)         | 47.78 ± 6.38  | 53.12 ± 4.79      |
|                                 | Amount removed (kg/ha·day) | 0.11 ± 0.01   | 0.16 ± 0.06       |

<sup>a</sup>: Standard deviation.

<sup>b</sup>: North America Data Base

가. BOD<sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand)

BOD<sub>5</sub>의 경우를 살펴보면 성장기와 동절기의 유입수 평균농도는 3.96 mg/L와 4.92 mg/L, 그리고 유출수 농도는 2.87 mg/L와 5.96 mg/L를 나타내었다 (Table 2). 3회의 성장기와 2회의 동절기를 거친 조사기간 동안 유입수의 성장기와 동절기의 유입부하량은 3.05 kg/ha·day와 4.49 kg/ha·day로 동절기가 약 1.5배 정도 높았다. 부하량제거율은 성장기에는 24% 정도로 유기물제거효과가 나타났으나, 동절기에는 -20%로써 습지를 거치면서 BOD부하가 오히려 증가하였다 (Table 3). 습지에 의한 수질개선은 습지식물과 습지식물을 지지하고 미생물 부착의 매체인 자갈과 토양, 그리고 수질정화에 가장 중요한 기능을 수행하는 미생물로 구성되는데, 이중 미생물의 활동이 온도의 영향을 받는다. 즉, 동절기기간에는 평균 수온이 4.2~4.4 °C로써 성장기(20.2~20.4 °C)에 비해 낮은 수온으로 미생물에 의한 유기물분해가 저조하고, 2월경에 겨울철 고사한 습지 식물체가 분해되어 수체내에서 유기물이 용출되어 유입수에 비해 유출수의 BOD

부하가 더 증가하였다고 판단된다. Metcalf와 Eddy (1991)에서 BOD의 경우는 다른 생물학적 처리과정에 비해 온도에 민감한 영향을 받는다고 하였으며, 반면에 Kadlec과 Knight(1996)는 지하흐름형 습지(subsurface flow wetlands)인 경우는 BOD 제거에 있어서 자유수면형습지(surface flow wetlands)보다 온도의 영향은 적다고 하였다. Yoon과 Ham 등(1999)은 지하흐름형인공습지의 오수처리 성능을 약 3년간 실험한 결과 BOD의 경우 동절기기간에도 50% 이상의 부하량제거율이 나타났으며, 실제로 제거된 유기물의 양은 성장기(72.49 kg/ha·day)와 동절기(69.48 kg/ha·day)가 서로 큰 차이가 없다고 보고하였다. 자유수면형 습지(surface flow wetlands, SF)와 지하흐름형 습지(subsurface flow wetlands, SSF)에서 BOD부하량 제거율에 대한 온도가 미치는 영향이 서로 차이가 나는 이유는 SSF의 경우는 유입수가 습지 표층아래의 매질(자갈, 모래)사이를 흐르면서 매질과 식물뿌리의 생물, 화학, 물리적 작용으로 정화되는데 반해서, SF는 습지의 유입수가 대기와 접

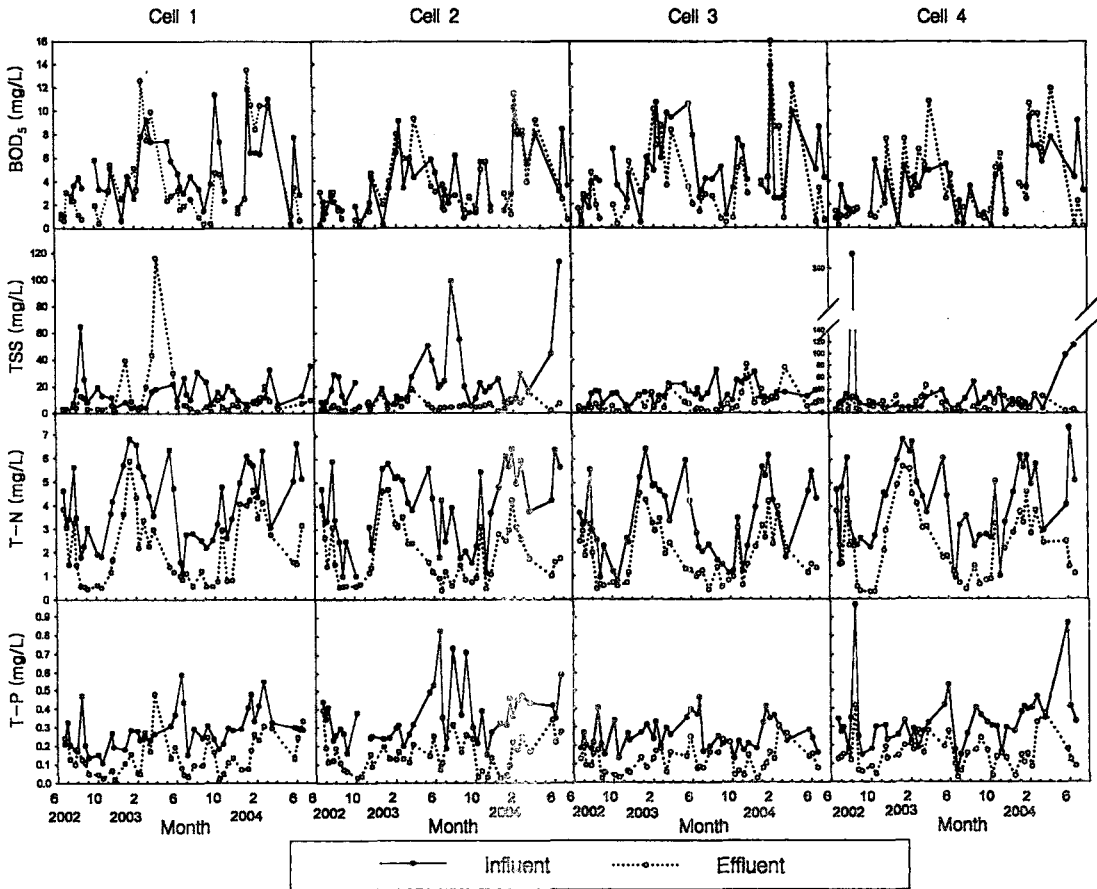


Fig. 2 Changes of the water quality in influent and effluent of wetland

측하며 직접 노출되어 있기 때문에 상대적으로 SF가 SSF보다 BOD제거 메카니즘에 있어서 대기온도에 의한 영향을 더 많이 받는다고 판단된다. 또한 일반적으로 SF는 유역에서 담수호로 유입되는 비점오염원 제어를 위한 저농도, 고유량의 오염하천수나 강우유출수를 주로 처리하는 반면에, SSF의 경우는 농촌생활오수와 같은 고농도 유입수를 주로 처리한다. Table 2에서 보듯이 본 실험에 적용한 인공습지의 경우도 BOD<sub>5</sub>의 유입수 평균농도는 생장기, 동절기 각각 3.96 mg/L와 4.92 mg/L로 배경농도 수준의 저농도를 나타내었다. 유입부하량으로 환산한 경우도 생장기, 동절기 각각 3.05 kg/ha · day 와 4.49 kg/ha · day로 고농도인 하수

처리용 인공습지의 유입부하량에 비하여 1/30~1/40로 매우 적어서, 습지에서 처리되는 유기물보다 고사한 식물이나 부착조류 등으로부터 분해되어 용출된 유기물이 더 많기 때문에 결과적으로 부하량제거율이 역으로 나왔다고 판단된다. 본 연구 인공습지실험시설의 경우 동절기를 포함하여 BOD의 경우는 3.0~6.0 mg/L의 농도를 나타내었다. 일반적으로 처리용습지에서 배경농도가 약 5 mg/L인 점과 비교하면 다른 연구결과들의 범위내에 있음을 알 수 있으며 (Kadlec and Knight, 1996), 이 범위에서의 BOD 농도의 증감변화는 담수호 수질관리에 큰 영향을 주지는 않을 것으로 판단된다. 동절기동안의 유출수 평균농도는 5.96 mg/L로 겨울동

안 하천이나 담수호에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

#### 나. TSS (Total Suspended Solid)

TSS의 경우를 살펴보면 성장기와 동절기의 유입수 평균농도는 22.98 mg/L와 12.47 mg/L를 나타내었고, 유출수 평균농도는 7.99 mg/L와 9.38 mg/L를 나타내었다(Table 2). 성장기 TSS의 유입부하량은 16.06 kg/ha · day로서 동절기인 10.64 kg/ha · day에 비해서 1.6배 높았으며, 부하량제거율 역시 성장기가 63%로서 동절기인 34%에 비해서 약 2배가량 높게 나타났다(Table 3). 습지의 TSS제거작용은 여과 및 침전과 미생물에 의한 분해가 있다. 본 습지와 같은 SF의 경우에는 습지식물에 의한 유속의 감소로 인해 입자성 물질이 침전되어 대부분의 TSS가 제거되었다고 판단된다. 다른 연구자들에 의하면 이런 물리적인 특성에 의한 TSS의 제거는 기온에 따른 계절적인 영향은 매우 적다고 보고하였다(Kadlec and Knight, 1996). 그러나, 본 연구에서 시기적으로 성장기가 동절기에 비해 유입수 평균농도, 유입부하량 및 부하량제거율이 더 높게 나타난 이유는 7~8월경에 집중호우로 인해 다량의 토사가 습지로 유입되어 TSS부하량이 급격히 증가해도 강우기에 약 90%까지의 매우 높은 제거율을 나타내어(Ham and Yoon, 2003), 성장기간에는 TSS의 유입수 평균농도 및 유입부하량이 높아도 안정적인 제거효율이 나타났다. 반면 동절기(12.47 mg/L)에는 성장기(22.98 mg/L)에 비해 유입수 평균농도가 낮고, 12월초에 습지식물과 부착조류가 고사하고 2월경에 얼음이 녹으면서 수체가 교란되어 습지바닥에 있는 sediment의 재부유가 일어나는 등 일시적으로 습지유출수부분의 TSS가 유입수보다 높아져서 전체적으로 동절기에는 TSS의 처리효율 및 단위면적당 제거량이 낮게 나타났다고 판단된다.

#### 다. T-N (Total nitrogen)

T-N의 경우 성장기와 동절기의 유입수 평균농도는 3.29 mg/L와 5.54 mg/L, 유출수 평균농도는 1.51 mg/L와 3.74 mg/L, 그리고 처리효율은 각각 54%와 33%를 나타내었다(Table 2). 유입부하량은 성장기 2.76 kg/ha · day에 비하여 동절기에는 5.02 kg/ha · day로 증가하였다. 부하량제거율을 살펴보면 성장기에는 평균 52%이상을 유지한 반면 동절기에는 31%로 약간 감소하였으나, 동절기에 습지로 유입된 부하량이 많아 습지에서 단위 면적당 부하량 제거량은 성장기와 동절기 각각 1.46 kg/ha · day와 1.57 kg/ha · day로 큰 차이가 나지 않았다 (Table 3). 습지식물은 미생물이 자랄수 있는 기질을 제공하며, 뿌리로 이동한 산소는 토양으로 확산되어 뿌리주변에 호기층을 형성한다. 유기질소의 무기질화로 생성된 암모니아는 호기층에서 질산화작용으로 질산성질소로 전화되며, 질산성질소는 다시 혐기층으로 확산되어 질소가스로 전환된 후 대기 중으로 이동하게 된다 (Seitzinger, 1988). 이런 질산화와 탈질화를 거쳐 습지에서 질소가 제거되는데, 질산화 및 탈질화 미생물은 온도의 영향을 받기 때문에 동절기 동안 제거율이 성장기에 비해서 낮게 나타났다고 판단된다. 질산화 과정은 수온이 10℃이하로 내려가면 억제되기 시작하여 6℃이하에서는 빠르게 감소되며, 탈질화 과정은 수온이 5℃까지 낮아져도 관측된다고 하였다 (Brodrick *et al.*, 1988). 또한 Yang(2002a)은 하천수정화를 위한 인공습지의 질소제거는 20~25℃에서 가장 효율적이고, 15℃ 이하에서는 질산화 및 탈질화 박테리아의 활동이 낮아져 질소 제거율이 떨어진다고 보고하였다. 본 습지의 경우도 성장기 기간에는 습지의 수온이 평균 20.2~20.4℃인 반면 동절기기간에는 4.2~4.4℃의 낮은 수온으로 인해 전체적인 제거율도 낮게 나타났다고 판단된다. 총질소제거에 영향을 주는 요인으로는 수온 이외에도 pH와 체류시간, 탈질화 박테리아에 에너지 공급원이 되는 유기탄소등이 있다. 본 습지의 경우



실험기간동안 습지의 유입부 및 유출부의 pH 범위는 8.11~8.87로써 변화폭이 적어 pH에 의한 질소부하량 제거율의 변화는 매우 적다고 판단된다. 또한 질소 1 g을 미생물이 분해하기 위해서는 대략 2.5 g의 유기탄소가 필요하다는 연구가 있는데 (Kadlec and Knight, 1996), 성장기를 거치면서 습지에 높은 식생피복도(80~90%)를 형성한 식물들이 고사하면서 형성된 습지 바다의 유기물층은 탈질화박테리아의 충분한 유기탄소 공급원이 될 수 있다고 판단된다. 인공습지에서의 체류기간은 중요한 설계인자이자 운영인자로서 다른 연구자들에 의하면 인공습지의 적정 체류시간으로 5~14일을 제시하고 있다(Waston and Hobson, 1998) 본 습지에서도 동절기기간에는 습지의 수위를 높게 (0.5 m) 유지시켜 습지의 체류시간을 약 3.9일에서 5.7일까지 늘려 주었다. 2년동안의 실험결과를 가지고 총질소를 형태별로 살펴보았을 때, 습지유출부에서 전체질소중 유기질소와 질산성질소가 차지하는 비율이 각각 52%와 42%로 대부분을 차지하였다. 현재보다 습지의 수위 및 유입유량을 조절하여 체류시간을 동절기 기간에 더 늘려준다면 지금보다 침전에 의한 입자성 유기질소의 제거 및 탈질화 박테리아에 의한 질산성질소의 제거가 더 이루어 질수 있을 거라고 판단된다. 또한 지금까지의 결과를 살펴보면 T-N의 경우 질소유입부하량의 제거효율은 동절기기간에도 상당량의 제거효과가 유지되는 것을 알 수 있다.

#### 라. T-P (Total Phosphorus)

T-P의 경우 성장기와 동절기의 유입수 평균농도는 0.30 mg/L와 0.32 mg/L를 나타내었고, 유출수 평균농도는 성장기와 동절기 모두 0.15 mg/L로 50%이상의 처리효율이 나타났다(Table 2). 유입부하량은 성장기와 동절기 각각 0.23 kg/ha · day와 0.29 kg/ha · day를 나타내어 동절기에 더 많았으며, 부하량제거율 역시 성장기와 동절기 각각 48%와 53%를 나타내서 T-N과는 달리 통계학적

으로 유의한 차이 없이 성장기와 동절기 모두 유사한 범위를 나타내었다 (Table 3). 습지에서의 인의 제거기작은 흡착, 침강, 조류 및 습지식물의 흡수 등 여러 물리적, 화학적, 생물학적 과정에 의해 이루어진다. 본 습지의 경우 실험기간 동안 총인올 형태별로 분석해본 결과 입자성인 약 60%와 용존성인은 약 40%로 나타났으며, 입자성인은 주로 침전하고 용존성인은 식물 및 조류에 의해서 흡수되어 습지에서 총인이 제거되었다고 판단된다. Table 2을 보면 실험기간 동안 습지의 평균용존산소량은 성장기, 동절기 모두 10 mg/L이상의 충분한 호기성 상태를 유지하였는데, 호기성 상태에서 인 이온은 알루미늄 및 철 이온과 같은 금속이온과 결합하여 불용성화합물로 변하여 침전하게 된다. 상대적으로 입자성인의 비율이 높아 주로 침전 및 침강이 의해서 인이 제거 되었다고 판단되며, 수온 및 식생피복도에 따른 계절적 차이에 의한 영향은 상대적으로 적어서 동절기에도 성장기와 유사한 처리효과가 나타난 것으로 판단된다. 다른 연구자들에 의하면 Gumbricht(1992)은 스웨덴에 있는 SSF형 습지에서 140주 동안 연구한 결과 2~21°C의 온도변화에서 인의 처리효율에 미치는 영향 사이에서의 상관성이 거의 없다고 하였으며, Schierup (1990)은 덴마크에 있는 47개의 SSF형 습지를 연구한 결과 여름철과 겨울철 계절의 변화에 따른 인의 처리효율의 차이점은 발견할 수 없다고 보고하였다 (Kadlec and Knight, 1996). 우리나라의 경우 Yang(2002b)은 고흥 간척지구에 하천수정화를 위한 SF형 인공습지 조성 초기의 인 제거효과를 조사한 결과 조류성장기인 7~9월 평균 T-P 제거율이, 비성장기인 10~12월에 비해 약 1.4배 더 높게 나타났다고 하였다. 실제로 습지에서 수생식물 그 자체는 수처리에 있어서 큰 기여를 하지 않고 수처리 능력을 향상시키기 위한 환경을 제공하며(Tchobanoglous, 1987), 습지식물이 직접 흡수하는 인의 양은 매우 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 사상성 부착조류의 경우는 습지식물과는 달리

영양물질 제거능력이 우수하며, 동시에 박테리아와 같은 미생물의 부착매질을 제공하는 생물막(Bio-logical filter)의 기능을 하고, 빠른 성장속도로 인해 수중 영양염에 대한 이용효율이 높으며, 처리수의 영양물질 농도 고저에 관계없이 계절적인 영향이 적다는 장점이 있다. 특히 용존성 인은 습지에서 성장하는 녹조에 의해 상당부분 제거되는데 (Adey et al., 1993), 본 습지의 경우 시기에 따른 Chl-a의 평균농도를 살펴보면, 성장기에는 습지유입부와 유출수의 평균농도는 24.8 ug/L에서 9.8 ug/L로 크게 감소한 반면, 동절기에는 36.3 ug/L에서 38.8 ug/L로 성장기와 차이가 거의 없는 것으로 나타났다 (Table 2). 이처럼 동절기에 높은 Chl-a의 농도가 나타난 것은 습지식물의 고사로 인해 잎이 떨어져 햇빛을 가리지 않아 광량이 충분하고, 식물성플랑크톤을 포식하는 동물성플랑크톤의 활동이 저하되어 겨울철 높은 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 즉, 동절기에는 습지식물은 고사하여 성장기에 비해 습지식물에 의해 용존성 인과 같은 영양물질이 직접 흡수되는 부분은 적으나, 습지수체에 형성된 사상성 부착조류 및 녹조 등에 의해 용존성 인이 상당부분 제거되어 결과적으로 성장기와 비교하여, 총인의 처리효율면에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다고 판단된다. 인공습지에 의한 수질정화 능력은 기후, 습지의 형태 (Nichols, 1983), 습지에 발달된 식물 및 피복정도, 유입수의 수질(Knight et al., 1996), 습지의 수심 및 운영기간에 따라 매우 다양하게 나타날 수 있다. 습지를 장기간 운영하게 되면 퇴적물의 축적과 오염물질의 포화로 인해 습지의 효율성이 저하되며 인의 경우 습지가 가동된 3~4년후에는 제거율이 초기보다 낮아진다고 하였다 (Maehlum, 1998). 본 습지의 경우 2년동안 운영한 결과 운영기간에 따른 습지의 효율성이 아직은 저하되지 않았으며, 앞으로도 지속적으로 동절기와 성장기 모두 높은 처리율을 나타내는지에 대해서는 지속적인 관측이 필요할 것으로 생각된다.

### 3. Scatterplot을 이용한 유입부하량에 대한 유출수 농도

본 연구 결과를 이용하여 인공습지로 유입되는 유입부하량에 대한 유출수의 평균농도를 북미대륙에 조성된 인공습지 운영자료모음인 NADB (North America Data Base, 1994)의 결과와 비교 검토하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. BOD<sub>5</sub>의 경우 성장기에 동일 유입부하량에 대해 일부 NADB보다도 낮은 유출수 평균농도를 나타내기는 했지만, 대부분 NADB와 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

TSS의 경우 동일 유입부하량에 대해 강우기 기간을 포함한 성장기의 유출수 평균농도가 동절기의 유출수 평균농도와 비슷하거나 약간 낮은 농도를 나타내었고, NADB와는 거의 동일한 범위를 나타내었다. T-N의 경우, 동일 유입부하량에 대해 동절기의 유출수 평균농도는 성장기의 유출수 평균농도에 비하여 높게 나타났으며, 성장기 유출수 평균농도는 동일 유입부하량의 NADB의 결과보다도 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. NADB의 경우 유입부하량을 아무리 낮게 유지하더라도 습지 유출수 농도가 일정수준이하로 내려가지는 않을 것으로 나타났는데, 유출수의 T-N의 농도를 0.6 mg/L보다 더 낮은 농도를 유지하기 위해 유입유량 등을 조절하여 유입부하량을 낮추는 것은 큰 의미가 없을 것으로 생각된다. T-P의 경우 성장기와 동절기 모두 동일 유입부하량에 대해 비슷한 유출수의 평균농도를 나타내었으며, NADB의 결과와 비교해 볼 때 비슷한 범위의 유입부하량에 대해 본 실험의 유출수 평균농도값이 대부분 낮게 나타난 것을 알 수 있다.

본 연구결과를 NADB와 비교하면, 일부 성장기의 결과가 NADB보다 더 낮은 유출수의 평균농도를 나타내거나, 대부분의 항목에서 동일 유입부하량에 대해 NADB와 비슷한 범위의 유출수 평균농도를 나타내었다.

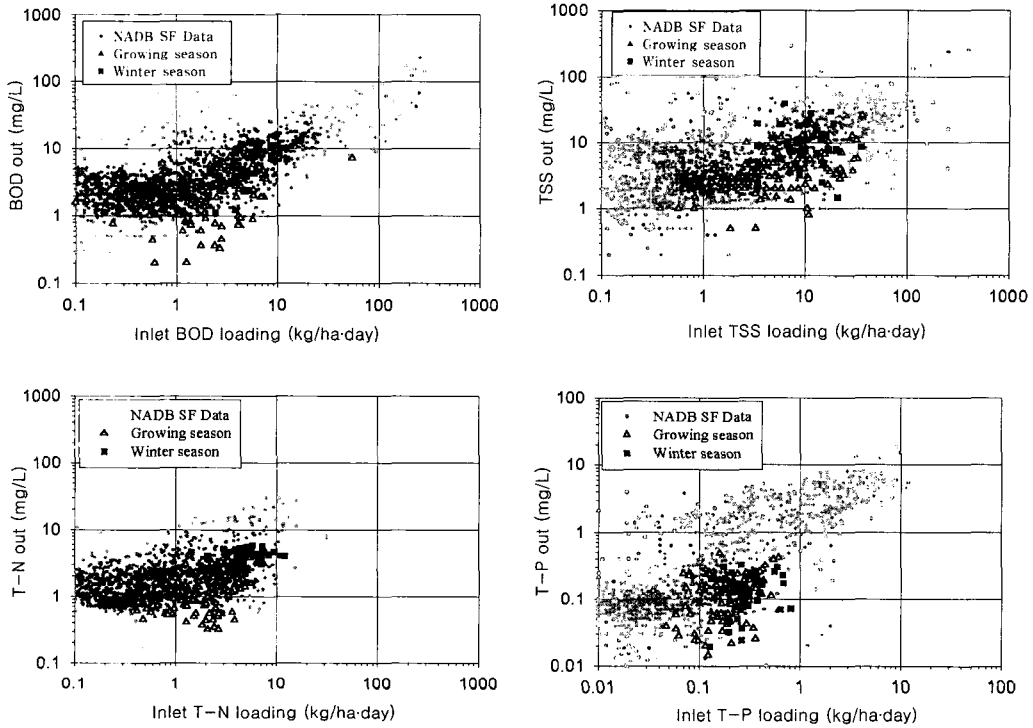


Fig. 3 Comparison of experimental data with NADB

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 저농도 고유량에서 인공습지 수질 정화효과를 약 2년에 걸쳐 연속실험한 현장자료를 고찰하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. BOD<sub>5</sub>는 생장기와 동절기의 처리율이 각각 24%와 -20%를 나타내어 생장기에는 습지에서 유기물 제거효과가 나타났으나, 동절기에는 낮은 수온(4.2℃~4.4℃)으로 인해 미생물에 의한 유기물 분해가 저조하고, 고사한 식물체나 부착조류 등에 의해 내부생산된 유기물이 많아 습지에서의 처리효과가 저조하였다. 그러나 동절기를 포함한 습지의 유출수 평균농도는 3.0~6.0 mg/L로 처리용습지의 배경농도 범위에 있었으며, 이 정도 농도는 하천이나 담수호 수질관리에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

2. TSS의 경우 장마철 집중호우기간을 포함한

생장기동안의 처리율은 63%로써 동절기인 34%에 비해서 약 2배 가량 높게 나타났다. 동절기동안의 낮은 처리효율은 기온에 따른 영향보다는, 생장기(22.98 mg/L)에 비해 낮은 유입수 평균농도(12.47 mg/L)와, 2월경 습지의 얼음이 녹으면서 일시적으로 수체가 교란되어 나타난 현상이라고 판단된다.

3. T-N은 생장기와 동절기의 처리율이 각각 53%와 31%를 나타내었는데 동절기의 경우 질산화 및 탈질화 미생물이 온도의 영향을 크게 받기 때문에 생장기에 비해 낮은 처리율이 나타났다고 판단된다. 그러나 동절기에 습지로 유입된 부하량이 많아 습지에서 단위 면적당 제거 부하량은 생장기(1.46 kg/ha·day)와 동절기(1.57 kg/ha·day)가 유사하게 나타났으며, 동절기기간에도 양호한 인공습지의 질소유입부하량 제거효과가 나타났음을 알 수 있다.

4. T-P의 경우 T-N과는 달리 시기에 상관없이 생장기와 동절기 각각 48%, 53%의 높은 처리율을 나타내었으며, 습지의 평균 유출수농도는 0.15 mg/L를 나타내었다. 이는 동절기기간에도 습지수체에 형성된 사상성 부착조류 및 녹조에 의해 인의 상당부분이 제거되어 총인의 처리효율면에서 생장기와 큰 차이가 없었던 것으로 판단된다. 습지운영기간이 길어져서 습지내 고사한 식물들이 누적되어 가면서 인 처리효율이 초기보다 저조한 것으로 예상되는데, 이 부분은 지속적인 관측과 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 본 연구결과를 NADB와 비교한 결과 BOD<sub>5</sub>, TSS, T-N, T-P 모두 동일 유입부하량에 대해 대부분 비슷하거나 낮은 유출수 농도를 나타내었으며, 습지 유출수의 목표 수질을 지나치게 낮게 잡아서 처리효율을 감소시키기보다는 기본적으로 습지가 가지고 있는 배경농도를 고려하여, 이에 적합한 유량과 수질에 의한 부하량을 유입시키는 습지 설계가 유리할 것으로 판단된다. BOD<sub>5</sub>와 TSS의 경우 유입부하량을 감소시켜도 1 mg/L 이하로 낮추기는 힘들다고 판단되며, T-N은 0.6 mg/L, T-P는 0.03 mg/L이하로 낮추기 어려울 것으로 판단된다.

6. 본 연구에서는 동절기를 포함하여 인공습지 조성 초기의 영양물질 제거율이 외국에 비해 짧은 2~5일 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.

## 사 사

본 연구는 농어촌연구원 과제 '수질개선을 위한 자연정화 시설 현장시험연구'의 지원에 의하여 수행되었음.

## References

1. Adey, W. H., C. Luckett, and K. Jensen. 1993. Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. *Rest. Ecol.* 1: 29-39.
2. APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19th ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
3. Brodick, S. J., P. Cullen, and W. Maher. 1988. Denitrification in a natural wetland receiving secondary treated effluent. *Water Res.* 22(4): 431-439.
4. Gumbricht, T. 1992. Tertiary wastewater treatment using the root zone method in temperate climates. *Ecol. Eng.* 1:199-212.
5. 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)
6. Ham, J. H., C. G. Yoon, and W. S. Koo. 2003. Stormwater treatment using Wetland and Pond. In *Proceedings of the 2003 Annual Conference the Korean Society of Agriculture Engineers*, 575-578. Jaeju, Korea: KSAE.
7. 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)
8. 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.
9. Kim, H. J. 1997. Small Scale Wastewater Treatment in Rural Areas Using Natural Systems. Ph. D. Ind.: Konkuk University.
10. Metcalf & Eddy, Inc. 1991. *Wastewater*

- Engineering Treatment, Disposal, and Reuse* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
11. Ministry of Environment, 1999, Basic report for integrated counterplan of the water quality conservation at Seamangeum polder (1), 7-9.
  12. Mitsch, W. J., A. J. Home, and R. W. Nairn, 2000. Nitrogen and phosphorus retention in wetlands ecological approaches to solving excess nutrient problems, *Ecol. Eng.* 14: 1-7.
  13. Nichols, D. S., 1983. Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater. *J. Water Poll. Control Fed.* 55: 495-504.
  14. 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.
  15. Kadlec, R. H. and R. L. Knight, 1996, Treatment wetlands. Lewis Publishers.
  16. Schierup, H. H., H. Brix, and B. Lorenzen. 1990. Wastewater Treatment in Constructed reed beds in Denmark-state of the art. In *Proceedings of the International Conference on the Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control.* 495-504. Oxford, U.K.: Pergamon Press.
  17. Seitzinger, S. P. 1988, Denitrification in freshwater and coastal marine systems: ecological and geochemical significance, *Limnol. Oceanogr.* 33, 702-704.
  18. 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.
  19. Watson, J. T., J. A. Hobson. 1988. Hydraulic design considerations and control structures for constructed wetlands for wastewater treatment. In: Hammer, D.A. Editor, 1988. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial, and Agricultural*, Lewis, Chelsea, 379-392.
  20. Yang, J. S., J. Y. Jung 2002 *New alternative of water purification\_ constructed wetland.* Sowha press: 239-245. (in Korean)
  21. Yang, H. M. 2002a Preliminary Nitrogen Removal Rates in Close to Nature Constructed Stream Water Treatment Wetland. *Korean Journal of Environmental Agriculture.* 21(4): 269-273. (in Korean)
  22. Yang, H. M. 2002b Preliminary Phosphorous Removal Rates in a Natural type Constructed Wetland for Stream Water Treatment. *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.* 5(6): 30-36. (in Korean)
  23. 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)
  24. Yoon, C. G., S. K. Kwun, S. H. Woo, and T. Y. Kwun, 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)