

## 물리적 설계인자가 인공습지의 처리효율에 미치는 영향

### The Effect of Physical Design Parameters on the Constructed Wetland Performance

함 중 화\* · 윤 춘 경\*<sup>a</sup> · 구 원 석\*\* · 김 형 철\*\*\* · 신 현 범\*\*\*\*

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

#### Abstract

The field scale experiment was performed to examine the effect of physical design parameters on the constructed wetland performance and recommend the feasible design of constructed wetland in Korean polder areas. Four sets (each set of 0.88 ha) of wetland (0.8 ha) and pond (0.08 ha) systems were used. Two different wetland systems, a wetland-pond system and a pond-wetland system, were studied to examine the effect of wetland and pond configuration. And two different length-to-width ratios were used, 2:1 and 0.8:1, to examine the effect of aspect ratio.

A pond-wetland system was more preferable than a wetland-pond system, and also requires a smaller area than a wetland-pond system or a wetland system to reduce T-P. There was no difference in effluent concentration between the 2:1 system and the 0.8:1 system. Although the linear velocity of the 2:1 aspect was higher than the 0.8:1 aspect, resuspension was not a factor in this study due to a very low linear velocity. From this study and other literature review, it was found that design method of paddy rice field could be applied and expanded to the design of constructed wetland in Korea. Further investigation for the detailed design parameters of constructed wetland needs be continued for design method of paddy rice to be applied in full scale.

*Keywords : Constructed wetland, Nonpoint source pollution control, Wetland construction, Physical design parameters*

#### I. 서 론

인구 증가, 산업발달 및 도시화로 인해 다양한 오염물질이 발생되었고, 발생한 오염물질을 완전히 처리하지 못하고 방류함으로써 인근 지역의 하천과 호소의 오염이 가중되고 있다. 우리나라의 경우 생활하수, 축산폐수와 같은 점오염원(point source)의 처리에 주력하여 환경기초시설을 확충해가고 있

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

으나, 비점오염원(nonpoint source)의 수계유입에 대해서는 제대로 관리가 미흡한 상태이다. 그러므로 점원오염에 대한 처리시설이 점차 늘어나고 있음에도 불구하고 비점원오염의 관리부족으로 인하여 국내의 전반적인 하천과 호소의 수질에 가시적인 개선이 나타나지 못하고 있는 실정이다. 하천과 호소의 수질보전을 위해서는 외부오염부하량의 저감이 필수적인데, 전체 오염부하량의 상당부분을 차지하는 비점오염원과 같이 상대적으로 저농도 고유량인 상태에서 유입되는 오염부하량을 현실적으로 저감시킬 수 있는 방법은 제한적이다. 인공습지는 조성비용이 저렴하고 생태공학적인 복원능력을 활용하는 기법으로서 자연자원을 효율적으로 이용하는 친생태적 수질개선방안으로서, 유지관리가 거의 불필요하고, 안정적인 처리효율을 지속적으로 유지 가능하여 이 방법에 의한 수질개선기법의 적용에 국내·외적으로 관심이 높다.

외국에서는 이미 1980년대부터 수질개선용 인공습지 등에 대한 활발한 연구를 통하여 현장적용이 이루어지고 있으나, 국내에서는 적용된 곳이 매우 적다. 우리나라에서 인공습지를 적용하는데 가장 어려운 사항은 높은 부지비용으로 생각되는데, 부지비용이 비교적 저렴하고, 비점오염원이 전체 오염부하량의 상당한 부분을 차지하는 곳이 있다면 인공습지 조성이 가능할 것으로 판단된다. 국내에서는 상수원을 비롯한 하구담수호 등 국내 호소들의 수질문제가 국가적인 현안으로 대두되면서 인공습지를 이용한 수질개선기법을 적용하고자 하는 계획 중에 있다. 특히, 현재 시공 중에 있는 대규모 간척사업 지구에서 간척담수호로 유입되는 비점오염원을 제어하고자 인공습지의 조성을 추진 중에 있다. 갯벌을 매립하여 농경지와 담수호를 조성하는 간척지구에서 하천으로부터 유입되는 영양염을 저감시킬 목적으로 담수호의 유입구에 인공습지를 조성한다면, 비점오염원의 제어로 인해 담수호의 수질이 개선되어 호소의 부영양화를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 홍수범람의 조절과 철새를 비롯한

야생동물의 서식장소를 제공할 수 있다. 새만금호나 화옹호 등의 간척담수호에 수질개선용으로 인공습지의 조성을 고려중에 있으나(M.O.E., 1999; Huh, 2000), 국내에서 비점오염원 상태와 같은 저농도 고유량을 대상으로 연구한 신뢰할 만한 자료가 부족하여 설계 및 계획수립에 어려움을 겪고 있다. 이전의 연구(Ham et al., 2004; 2005)에서 간척담수호의 유입구에 비점오염원을 제어할 목적으로 인공습지를 조성하고 현장실험을 한 결과, 인공습지가 비점오염원을 처리하는데 효율적임을 규명할 바 있다.

본 연구에서는 현장실험을 통해 얻은 수질결과를 바탕으로 인공습지와 우수지의 배열순서 및 인공습지의 가로-세로비가 처리효율에 미치는 영향을 분석하여, 우리나라 실정에 적합한 인공습지의 구조적 형태를 제안하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험시설

인공습지를 이용한 비점오염원 제어효율을 검증하기 위해 2001년에 충남 당진군의 석문담수호 유입부에 인공습지와 우수지를 각각 4개씩 조성하였으며, 각각의 면적은 0.8 ha와 0.08 ha이고, 총 면적은 약 3.6 ha이다. 실험시설의 평면도는 Fig. 1과 같고, 각 인공습지의 자세한 제원은 Table 1과 같다. 습지와 우수지의 배치에 따른 처리효율을 비교하기 위해 습지가 우수지 앞에 놓인 습지-우수지 시스템(cell 2와 cell 4)과 습지가 우수지 뒤에 놓이는 우수지-습지 시스템(cell 1과 cell 3)으로 배치하였다. 또한 습지의 길이-폭비에 따른 처리효율의 변화를 조사하기 위해 길이-폭비가 0.8:1인 형태(cell 2와 cell 3)와 길이-폭비가 2:1인 형태(cell 1과 cell 4)로 조성하였다.

유입수는 석문담수호로 유입되는 당진천의 물을 펌핑하여 사용하였다. 습지의 수심은 웨어를 이용

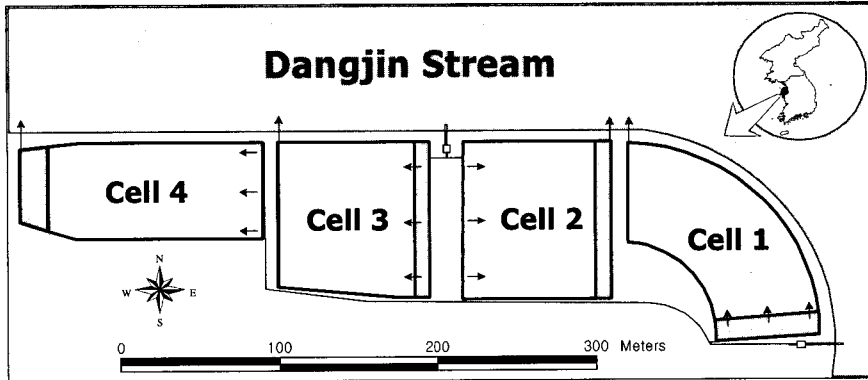


Fig. 1 Layout of study area

Table 1 Design parameters of constructed wetland systems

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	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.3~18.8
Cell 2 Wetland-Pond	101	79	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.3~18.8
Cell 3 Pond-Wetland	101	79	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.3~18.8
Cell 4 Wetland-Pond	61	131	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.3~18.8

하여 생장기(3월~11월)와 동절기(12월~2월)에 각각 0.3 m와 0.5 m를 유지하였으며, 체류시간은 2~5일을 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.

인공습지 조성 전 습지가 조성될 지역에 대해 식생조사를 실시한 결과 새섬매자기(*Scirpus planiculmis* Fr. Schm.), 갈대(*Phragmites australis*) 및 기타 육상 식물이 번성하였으며, 평균 피도는 약 20% 정도였다. 주변의 농지가 조성될 지역에 대해 식생조사 한 결과 갈대가 우점하였으며 평균 피도는 약 70%였다. 습지를 조성하는 과정에서 기존에 우점하고 있던 습지식물의 줄기, 뿌리 및 씨앗들이 습지 토양에 포함되어 유입되었고, 주변의 농지가 조성될 지역에 자생하는 대규모 갈대군락으로부터 씨

앗이 유입되어 좋은 식생원 역할을 할 수 있을 것으로 판단되어 습지에 인위적인 식재를 하지 않았다. 조성과정에서 유입된 습지식물의 줄기, 뿌리 및 씨앗으로부터 쉽게 발아 할 수 있도록 4월 동안 토양이 포화될 정도로 물 관리를 실시하였으며, 세 번의 생장기를 거친 2004년도 식생조사 결과 각 습지별로 평균 약 90% 정도의 식생피도를 나타내었다. 인공습지는 2002년부터 현재까지 운영하고 있으며, 본 논문에서는 2002년 6월부터 2004년 6월까지의 결과를 이용하여 분석을 하였다.

## 2. 측정 및 분석

실험기간동안 각 습지와 유수지별로 유입부, 중앙부, 유출부의 3개 지점에 대해서 월 평균 약 2회 정도로 시료를 채취하였으며, 모든 시료는 Standard Methods(APHA, 1998)에 따라 분석하였다.

길이-폭비가 습지의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 4개의 인공습지를 길이-폭비가 2:1 (cell 1, cell 4)인 것과 0.8:1 (cell 2, cell 3)인 것으로 나누어 각 그룹의 습지유입수 및 습지유출수의 농도에 대해 SPSS 10.0을 이용하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였으며, Duncan 방법으로 5%의 유의수준에서 사후분석을 하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 습지를 이용한 수처리 결과

2002년부터 6월부터 2004년 6월까지 4개의 인공습지에 대해 실측한 유입수 및 유출수 농도와 월 평균 유입수 및 유출수의 농도는 Fig. 2와 같으며,

동절기와 생장기 동안의 평균유입수, 유출수, 제거율 및 동절기와 생장기 사이의 평균비교를 위한 *p*-value는 Table 2와 같다.

동절기 동안 유입수의 DO농도는 포화상태(약 15 mg/L, 120% O<sub>2</sub> saturation)을 나타낸 반면에, 유출수의 DO 농도는 과포화상태(>23 mg/L, 170% O<sub>2</sub> saturation)로 얼음층이 제거되는 2월 중순까지 지속되었다. 이는 낮은 수온으로 인한 산소의 용해도 증가 및 수중미생물의 산소 소모 감소, 얼음층으로 인한 압력의 증가로 인해 유출수의 DO 농도가 증가했을 것이라 생각된다. 생장기 동안 유출수의 DO 농도는 유입수(10.8 mg/L)보다는 약간 낮은 평균 9.8 mg/L를 나타내었고, 전반적으로 인공습지는 충분한 호기성상태를 유지하고 있었다. 생장기동안 유출수의 BOD<sub>5</sub> 농도(2.9 mg/L)는 유입

Table 2 Seasonal comparison of concentration of the wetlands

Constituents		Concentration (mean±S.D. <sup>a</sup> )		<i>p</i> -value	n
		Growing season	Winter season		
DO (mg/L)	Inf.	10.8±3.64	14.9±2.56	0.000 <sup>b</sup>	172
	Eff.	9.8±3.99	20.7±6.59	0.000 <sup>b</sup>	172
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	Inf.	4.0±2.66	4.4±3.28	0.460	172
	Eff.	2.9±2.63	5.4±3.77	0.000 <sup>b</sup>	172
	Removal (%)	22.0±53.55	-19.2±58.44	0.000 <sup>b</sup>	172
TSS (mg/L)	Inf.	23.1±35.81	13.2±7.72	0.005 <sup>b</sup>	172
	Eff.	8.0±9.06	11.7±8.78	0.015 <sup>b</sup>	172
	Removal (%)	49.6±51.90	10.3±57.01	0.000 <sup>b</sup>	172
Chl- <i>a</i> (µg/L)	Inf.	23.6±22.91	34.7±30.21	0.010 <sup>b</sup>	172
	Eff.	9.4±17.28	36.3±36.30	0.000 <sup>b</sup>	172
	Removal (%)	44.2±62.94	-6.5±66.87	0.000 <sup>b</sup>	172
T-N (mg/L)	Inf.	3.3±1.48	5.5±0.76	0.000 <sup>b</sup>	172
	Eff.	1.5±0.96	3.7±0.92	0.000 <sup>b</sup>	172
	Removal (%)	51.5±26.4	31.7±13.64	0.000 <sup>b</sup>	172
T-P (mg/L)	Inf.	0.30±0.149	0.31±0.089	0.595	172
	Eff.	0.14±0.092	0.14±0.080	0.998	172
	Removal (%)	50.6±29.58	53.0±29.26	0.628	172

<sup>a</sup> Standard deviation.

<sup>b</sup> Significantly different at *p*=0.05.

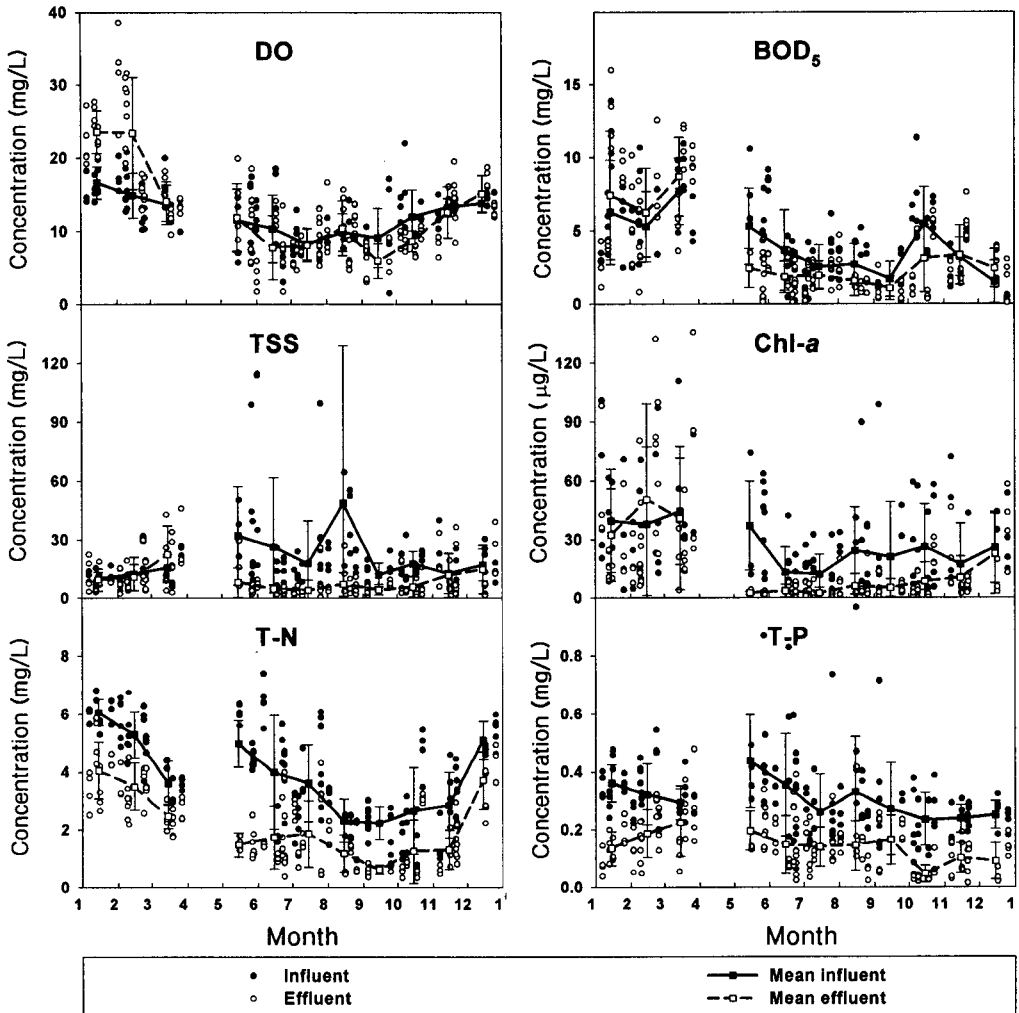


Fig. 2 Influent, effluent, and monthly mean concentration

수(4.0 mg/L)보다 약 20% 정도 낮게 나타낸 반면에, 동절기에는 유출수의 농도(5.4 mg/L)가 유입수(4.4 mg/L)보다 약 20% 정도 높은 농도를 나타내었다. 동절기 동안 유출수의 농도가 유입수보다 높게 나타난 이유는 낮은 온도로 인해 미생물의 유기물 분해가 감소하였고, 또한 고사하여 분해된 부착조류와 생장기보다 더 높은 농도의 조류(algae)가 유출수에 포함되었기 때문이라 생각된다. 본 연구결과에 의하면 인공습지의 유출수 농도를 2 mg/L 이하로 낮추는 것은 힘든 것으로 나타

났다. 이는 인공습지가 활발한 미생물활동과 수생 식물에 의해 유기물질 및 영양물질이 제거되는 자연정화시스템으로 미생물과 고사하여 분해된 식물이 유출수에 포함되기 때문으로 판단된다.

유입수의 TSS 농도는 5~8월 동안 높은 농도를 나타낸 반면에, 같은 기간 동안 유출수의 농도는 약 8.0 mg/L로 평균 60% 이상의 높은 제거율을 나타내었다. 특히 8월의 경우 유입수의 농도(>50 mg/L)가 강우로 인해 높았으나 유출수의 농도(약 10 mg/L)는 큰 변화 없이 다른 시기와 거의 비슷

한 값을 나타내어 강우기 동안 유역에서 발생하는 부유물질의 제거에 습지가 큰 효과가 있음을 알 수 있다. 유입수의 TSS 농도가 월별로 큰 차이를 나타낸 반면에, 유출수 농도는 안정적인 값을 나타내었다. 12월부터 이듬해 3월 동안 유입수보다 약 10% 정도 높은 유출수의 농도를 나타냈는데, 이는 고사하여 분해된 수생식물과 부착조류의 입자가 수체로 유입되었기 때문이라 생각된다. 월별 Chl-*a* 농도의 변화를 살펴보면, 유입수의 농도는 1~5월까지 높게 나타내었으며, 유출수의 농도는 12월부터 증가하여 이듬해 3월까지 유입수와 거의 비슷한 농도를 나타내었다. 이는 식물성 플랑크톤은 낮은 수온에 적합한 냉수성종이 계속 번식한 반면에, 식물성 플랑크톤을 섭식하는 동물성 플랑크톤은 낮은 수온으로 인해 거의 번식 못하였고, 식생피도 감소에 의한 광(light) 차단효과가 감소하였기 때문이라 생각된다.

유입수의 T-N 농도 변화는 1~2월에 높게 나타나고 8~9월에 낮게 나타났으며, 유출수의 농도 역시 5~6월을 제외하고는 유입수와 거의 유사한 변화 경향을 나타내었다. 이와 같은 변화는 수온의 변화와 유사한 경향을 나타내는데 이는 질소의 제거기작이 온도에 큰 영향을 받기 때문이라 생각된다. 또한, 5~6월에 유입수의 T-N 농도가 높게 나온 것은 벼농사를 위해 농지에 공급된 비료가 유출되어 습지로 유입된 하천수의 T-N 농도가 높게 나타난 것으로 생각된다. T-N의 유출수 농도는 생장기와 동절기에 각각 1.5 mg/L와 3.7 mg/L를 나타내었으며, 제거율은 생장기와 동절기에 각각 54%와 33%를 나타내었다(Table 2). T-P의 유입수 농도 역시 T-N과 같이 농지에 공급된 비료 성분으로 인해 높게 나타났으며, 이 시기를 제외하고는 연중 비슷한 범위를 나타내었다. 유출수의 농도는 T-N과 달리 10월을 제외하고는 연중 큰 변화 없이 비슷한 범위를 나타내어, T-P의 제거는 온도에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 유입수와 유출수의 T-P 농도는 연평균 0.31 mg/L와 0.15

mg/L이었고, 제거율은 약 53%를 나타내었다.

## 2. 습지와 우수지의 배치에 따른 영향

우수지-습지시스템은 고형물이 우수지에서 침전된 후 습지로 유입되면, 습지에서 용존성 영양물질이 처리되도록 하기 위해 적용하였다. 습지-우수지 시스템은 습지에서 고형물 및 영양물질이 제거되고, 시기에 따라 습지의 유출수가 높은 농도를 나타낼 경우 우수지에서 추가 처리 될 수 있도록 하기 위해 적용하였다.

Fig. 3에서 각 시스템의 최종 유출수를 보면, DO와 T-P를 제외한 BOD<sub>5</sub>, TSS, Chl-*a*와 T-N의 농도가 거의 비슷한 농도를 나타내었다. TSS의 경우 비록 최종 유출수의 농도가 거의 비슷한 농도를 나타내었지만, 각 시스템별로 습지와 우수지가 TSS의 제거에 기여한 정도는 차이가 난다. 우수지-습지시스템에서는 대부분의 고형물질이 우수지에 침전되고 습지에서는 약간의 침전만 이루어진 반면에, 습지-우수지시스템에서는 대부분의 고형물이 습지에 침전되고 우수지에서는 거의 침전되지 않았다. 우수지-습지시스템에서 우수지의 면적은 습지면적의 10% 밖에 되지 않았지만 제거된 고형물의 약 60%가 우수지에서 제거되었다. Kadlec and Knight(1996)은 습지시스템에서 TSS 제거를 위해 우수지를 맨 마지막에 배치시키는 것은 바람직하지 못하다고 하였으며, Mitsch and Gosselink(2000)는 여러 개의 습지를 연결하여 적용한 결과 시스템으로 유입된 TSS는 첫 번째 습지 cell에서 크게 감소되었으나 마지막 cell에서는 플랑크톤의 영향으로 오히려 증가하였다고 발표하였다. 우수지-습지시스템에서 우수지는 침전지의 역할을 하기 때문에 상대적으로 습지에 쌓이는 고형물질의 양을 감소시켜 습지의 수명을 연장시키는 역할을 할 수 있으며, 상대적으로 면적이 적은 우수지에 침전된 고형물은 준설을 통해 쉽게 제거할 수 있다.

우수지-습지시스템의 Chl-*a* 농도는 우수지를

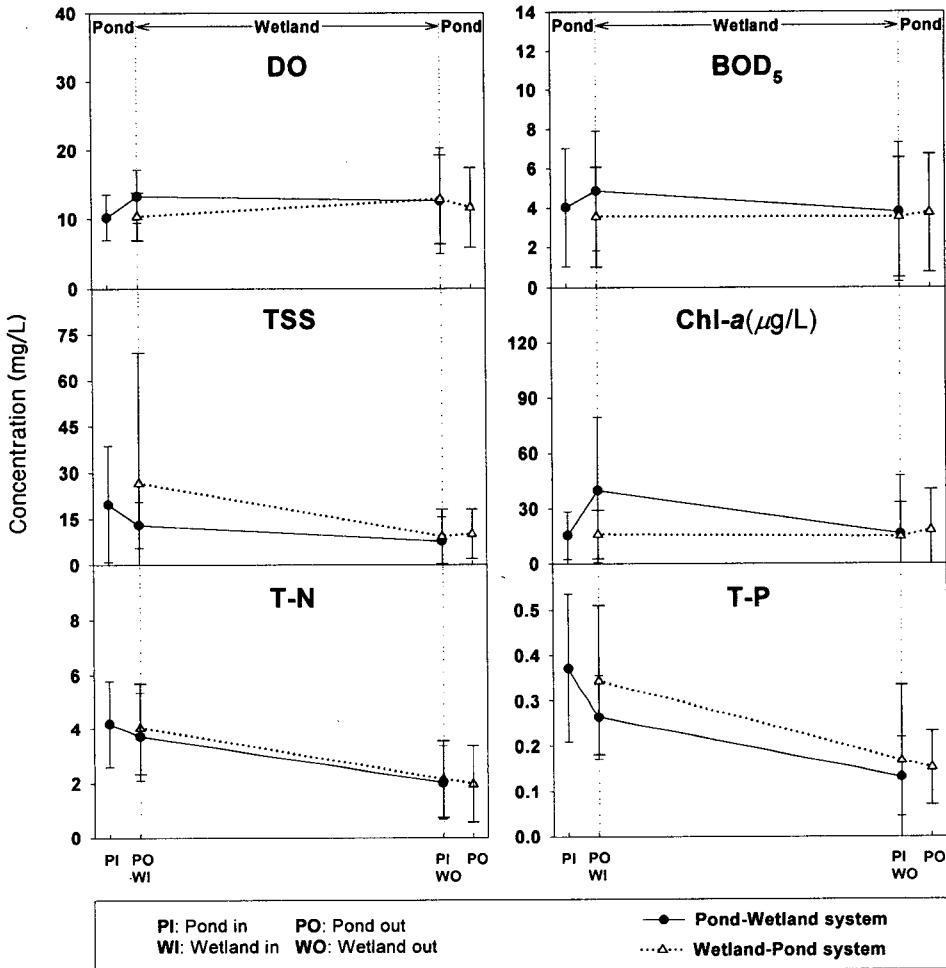


Fig. 3 Effluent water quality by wetland and pond

거치면서 농도가 2배 이상 증가 한 후 습지에서 감소하여 초기 유입수와 비슷한 농도로 유출된 반면에, 습지-유수지시스템에서는 습지와 유수지에서 큰 농도 변화 없이 비슷한 농도를 나타내었다. 유수지-습지시스템에서 조류(algae)는 유수지에서 풍부한 용존성 영양물질을 흡수하여 성장한 후 습지에서 동물성 플랑크톤에 의해 섭식되거나 습지식물에 의한 광(light) 차단으로 인해 사멸·침전되어 감소된 것으로 생각된다. 유수지-습지시스템에서 조류는 용존성 영양물질을 입자성 물질(조류의 세포)로 변환시켜 습지에서 쉽게 제거될 수

있도록 하는 역할을 한다. 이와 같은 조류의 작용은 하수처리시설(안정지 또는 라군)에서 영양물질 제거에 큰 역할을 하며, 고도처리에 이용하여 영양물질을 제거하는 연구도 많이 이루어지고 있다 (Vymazal, 1994).

유수지-습지시스템과 습지-유수지시스템의 최종 유출수의 T-N 농도는 동일한 범위를 나타내었다. 습지-유수지시스템의 유수지는 질소의 제거에 기여를 하지 못한 반면에, 유수지-습지시스템의 유수지는 단위면적당 제거율은 습지보다도 더 높게 나타났다. 이로서 유수지는 높은 농도의 질소를 제

거하는데 유리하고, 낮은 농도에서는 질소제거에 크게 기여하지 못하는 것을 알 수 있다. 또한 습지의 면적이 동일할 경우, 유수지-습지시스템, 습지-유수지시스템, 습지만 적용한 경우 모두 최종 유출수의 농도가 거의 비슷하여 유수지가 저농도(<5 mg/L)의 질소제거에는 효과적이지 못하다는 것을 알 수 있다.

최종 유출수의 T-P 농도를 보면 유수지-습지시스템이 습지-유수지시스템보다 더 낮게 나타났다. 유수지-습지시스템에서 전체 제거된 T-P 중 45%가 유수지에서 제거된 반면에, 습지-유수지시스템에서는 전체 제거된 T-P 중 10%만이 유수지에서 제거되었다. TSS와 마찬가지로 유수지-습지시스템의 유수지에서 많은 인이 침전되어 제거됨으로써 상대적으로 습지의 인부하를 감소시켜 습지의 수명을 증가시키는데 도움이 된다. 유수지에 침전된 인은 준설을 통해 고형물과 같이 제거될 수 있기 때문에 유수지와 습지의 관리상 유리하다. 동절기 동안 낮은 온도와 식생의 고사로 인해 일부 수질항목에 있어서 높은 유출수의 농도를 나타낼 수 있으며, 이 경우 습지의 유출수를 하류로 방류하기 전에 추가 처리가 필요할 수 있다. 습지-유수지시스템을 이런 문제를 해결하기 위해 설계·적용하였으며, 본 연구결과에 의하면 동절기 동안 습지-유수지시스템의 유수지에서 T-P만이 추가 처리되었다.

이상에서와 같이 습지-유수지시스템보다 유수지-습지시스템이 담수호로 유입되는 하천의 유기물 및 영양물질을 제거하는데 더 유리할 뿐만 아니라, 시스템의 관리에 있어서도 습지로 유입되는 고형물과 인의 부하를 감소시켜 습지의 수명을 연장시키는 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 길이-폭비에 따른 영향

습지의 길이-폭비(length-to-width ratio)는 습지내의 물의 흐름과 short circuiting 현상에 영향을 주기 때문에 습지의 설계에 있어서 중요한 인

자이다. 초기의 습지설계에 있어서는 높은 비율의 길이-폭비가 습지의 plug flow 상태를 유지하고 short circuiting 현상을 방지할 수 있다고 생각하여 최소 10:1 이상의 길이-폭비를 유지할 것을 추천하였다(Reed et al., 1995). 이러한 접근 방법의 가장 큰 문제점은 물의 흐름경로가 길어질수록 흐름에 대한 저항이 커지며(Reed et al., 1995), 높은 길이-폭비는 주어진 습지면적을 둘러싸기 위한 똑의 면적을 증가시킨다(Kadlec and Knight, 1996). 많은 연구자들은 인공습지 설계를 위한 최적의 길이-폭비를 추천하였다. Dinges(1978)는 3:1 이상의 길이-폭비를 추천한 반면에, Reed 등(1995)은 길이-폭비가 1:1~3:1 또는 4:1의 범위를 추천하였다. 또한 Knight(1987)는 지표흐름형 인공습지(surface flow wetland)의 가장 경제적인 길이-폭비는 2:1이하라고 하였다. 본 연구에서는 습지의 길이-폭비를 2:1과 0.8:1로 적용하여 실험을 수행하였으며, 그 결과에 대해 각 그룹별 유입수와 유출수의 농도를 비교하기 위해 분산분석을 실시하였다. 여러 수질항목에 대한 분산분석 결과는 Fig. 4와 같으며, 동일한 문자는 동일집단을 의미한다.

길이-폭비가 2:1인 것과 0.8:1인 시스템의 유출수 농도 사이에는 유의한 차이가 발생하지 않았다( $p < 0.05$ ,  $n = 172$ ). 길이-폭비가 증가함에 따라 습지내의 유속은 증가하게 된다. 대규모 습지를 조성할 경우 습지의 유속 또한 중요한 설계인자이다. 과도한 유속은 침전한 고형물에 대해 큰 전단력을 가하여 잠재적으로 이들 입자의 재부유 원인이 될 수 있다. 안전한 설계를 위하여 습지 내 유속을 1,000 m/day 이하로 유지할 것을 추천하고 있으며(Kadlec and Knight, 1996), 대부분의 자유수면형 인공습지(surface flow constructed wetland)는 이보다 더 작은 유속을 유지하고 있다. 본 연구에 이용된 인공습지의 습지 내 유속은 Fig. 5와 같다. 길이-폭비가 2:1인 습지(34 m/day)가 0.8:1인 습지(18 m/day)보다 습지 내 유속이 크게 나타났다. 문헌에서 제시한 한계치인 1,000 m/day



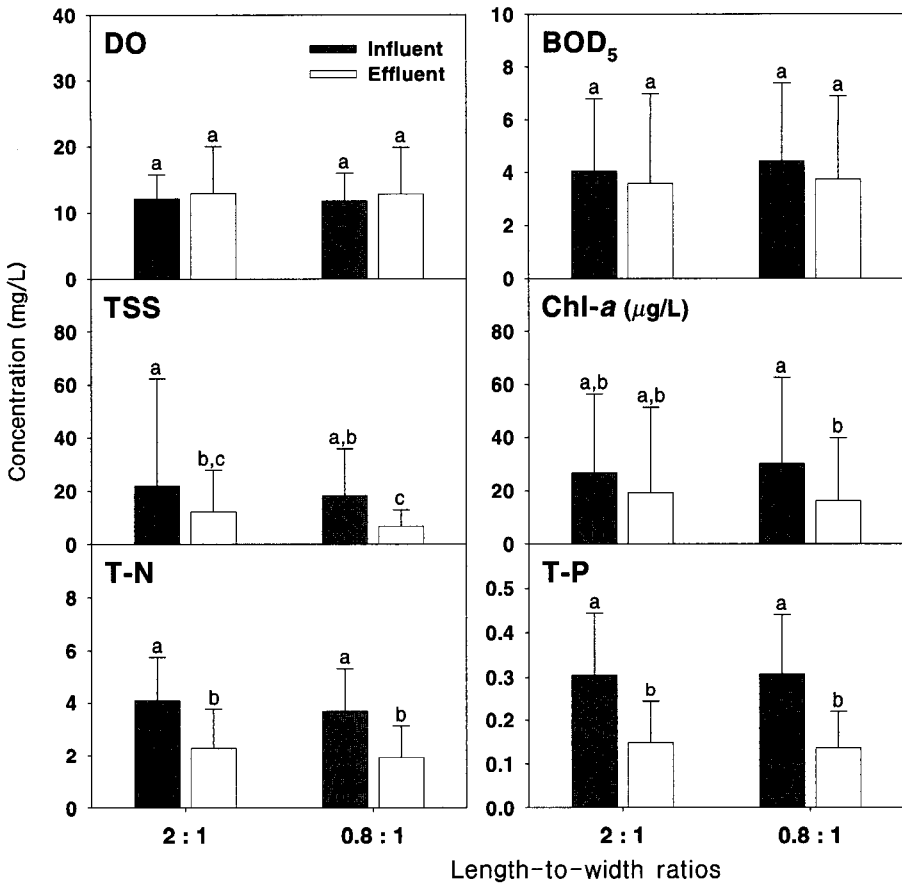


Fig. 4 Comparison of two different aspect ratios in water quality

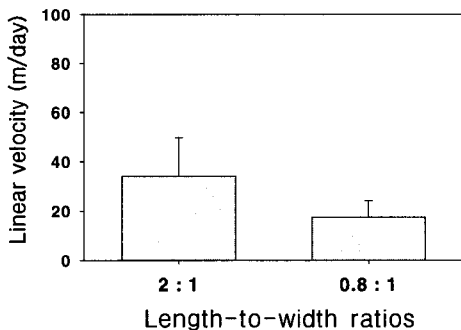


Fig. 5 Linear velocities in constructed wetland

보다는 훨씬 적은 유속을 나타내었다. 그러므로 본 연구에서 이용된 두 가지 형태의 인공습지 모두 습지 내 유속이 느리기 때문에 재부유가 수질변화에

영향을 미칠 정도로 크지 않아 길이-폭비의 차이에 의한 수질차이가 나타나지 않았을 것으로 생각된다.

#### 4. 인공습지의 구조적 형태 제안

이상의 결과를 바탕으로 하구담수호 간척지에 인공습지를 조성할 경우 다음과 같은 인공습지의 구조적 형태를 제안하고자 한다. 인공습지의 길이-폭비가 2:1의 범위 내에서 유출수의 농도에 영향을 미치지 않기 때문에 기존의 논과 유사한 형태를 유지하면 될 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 운영하였던 약 1 ha 규모의 인공습지는 물의 흐름

및 기타 시설관리에 용이하였기 때문에 습지 cell의 면적이 1 ha 정도로 조성하여도 무리가 없을 것으로 생각된다. 그러므로 간척지 담수호에 인공습지를 조성할 경우 논과 비슷한 디자인으로 인공습지를 설치하는 것에 대해 적극적으로 검토할 필요가 있다고 생각된다. 논은 세계적으로 가장 일반적인 습지의 형태이며(Mitsch and Gosselink, 2000), 또한 추수식물(emergent plant)의 하나인 벼를 포함하고 있다. 벼농사는 우리나라 농사중 제일 중요하며, 전체 경작지의 약 61%로 높은 비중을 차지하고 있다.

만약 인공습지를 논과 유사한 형태로 조성할 경우, 미래에 벼 수확량을 증가시키기 위한 논이 부족할 경우 논으로 변환이 가능하다는 장점이 있다. 또한 이미 우리나라에는 대규모 논 조성에 관한 기술(유입수로, 유출수로, 분배수로, 배수로, 펌프장 등)이 축적되어 있다. 논 조성 기법을 인공습지의 조성에 적용하기 위해서는 몇 가지 수정사항이 필요한데, 일반적인 논의 독 높이는 약 0.3 m 정도이나, 습지 내 수심을 0.3~0.5 m를 유지하기 위해 인공습지의 독의 높이는 약 0.6 m 정도로 설계하여야 한다. 앞에서 유수지-습지시스템이 습지-유수지시스템보다 유출수의 농도가 낮았고 또한 관리가 용이하기 때문에, 우리나라의 간척지에 인공습지를 설계할 때 논과 같은 형태로 만들되, 유입구의 수심을 최소 약 1 m를 유지하여 유수지-습지 효과를 얻을 수 있도록 하는 것이 유리할 것이다. 이때 앞의 깊은 구간은 유입된 물이 고르게 습지 전체로 유입되도록 하는 분배수로의 역할과, 고형물의 침전지, 침전물의 제거를 위한 공간, 습지의 조류와 어류의 안정적인 서식처를 제공할 수 있을 것이다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 비점오염원 제어를 목적으로 조성한 인공습지의 현장실험 결과를 바탕으로 인공습지와 유수지의 구조적 배치와 습지의 길이-폭비가

습지의 처리효율에 미치는 영향과 우리나라 실정에 적합한 인공습지의 구조적 형태에 대해 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. TSS, T-N, T-P의 제거율은 연 평균 약 45~55% 정도로 높게 나타났으며, TSS와 T-P는 성장기와 동절기 모두 비슷한 제거율을 나타낸 반면에, T-N의 제거율은 수온의 영향으로 동절기 동안 성장기보다 낮은 약 33%를 나타내었다.

2. 습지-유수지시스템보다 유수지-습지시스템이 담수호로 유입되는 하천의 유기물 및 영양물질을 제거하는데 더 유리할 뿐만 아니라, 시스템의 관리에 있어서도 습지로 유입되는 고형물과 인의 부하를 감소시켜 습지의 수명을 연장시키는 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 습지의 길이와 폭의 비를 2:1과 0.8:1로 실험한 결과 유출수의 농도 및 제거율에는 통계상의 유의한 차이가 나타나지 않아서, 습지의 길이-폭비가 0.8:1~2:1의 범위 내에서는 길이-폭비의 제약 없이 설계를 하여도 될 것으로 생각된다.

4. 간척담수호의 수질을 개선시킬 목적으로 담수호 유입구의 간척지에 인공습지를 조성할 경우, 논과 유사한 형식으로 인공습지를 조성하는 방안을 적극적으로 검토할 필요가 있다고 판단된다. 즉, 하나의 cell이 1 ha 정도의 정사각형 형태를 유지하고, 유수지-습지시스템과 유사한 배치를 만들기 위해 유입구부터 약 10 m 지점까지 수심이 약 1 m 정도 되도록 깊게 만들며, 독의 높이는 수심을 0.3~0.5 m로 조정할 수 있도록 약 0.6 m로 설계하며, 용·배수로를 포함한 기타 시설은 논과 동일하게 설계하는 방안이 실용적일 것으로 생각된다. 논과 유사한 형태로 인공습지를 조성할 경우 미래에 벼 수확량을 증가시키기 위한 논이 부족할 경우 쉽게 논으로 변환시킬 수 있는 장점과 우리나라에는 이미 논 조성에 관한 많은 기술을 축적하고 있다는 유리한 조건이 있어서 이에 대한 적극적인 검토가 필요하다고 생각된다.

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

## References

1. APHA. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
2. Dinges, R. 1978. Upgrading stabilization pond effluent by water hyacinth culture. *J. Water Pollut. Control Fed.* 50: 833-845.
3. Ham, J. H., C. G. Yoon, W. S. Koo, H. C. Kim, and H. B. Shin. 2004. Analysis of field experimental data for water quality improvement of tributary stream to estuarine reservoir using constructed wetland system. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers.* 46(5): 141-153. (in Korean)
4. Ham, J. H., C. G. Yoon, W. S. Koo, H. C. Kim, and H. B. Shin. 2005. Analysis of stream water quality improvement using surface-flow wetland. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers.* 47(1): 79-91. (in Korean)
5. Huh, Y. M. 2000. Hwaong watershed reclaimed land Development work-water quality improvement of a freshwater reservoir. Gyeonggi, Korea: Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation. (in Korean)
6. Kadlec, R. H., and R. L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. FL: CRC press.
7. Knight, R. L. 1987. Effluent distribution and basin design for enhanced pollutant assimilation by freshwater wetlands. In *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*, eds. K. R. Reddy, and W. H. Smith. 913-921. Orlando, FL: Magnolia Publishing.
8. M.O.E. 1999. Basic report for integrated counterplan of the water quality conservation at Seamangeum polder. Gyeonggi, Korea: Ministry of Environment. (in Korean)
9. Reed, S. C., R. W. Crites, and E. J. Middlebrooks. 1995. *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
10. Mitsch, W. J., and J. G. Gosselink. 2000. *Wetlands*. New York, NY: John Wiley & Sons.
11. Vymazal, J. 1994. *Algae and element cycling in wetlands*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.