

하천수 정화를 위한 시화인공습지의 초기 수질 정화능

Early-Year Performance of the Sihwa Constructed Wetland for Stream Water Treatment

권순국* · 이경도** · 조영현** · 김성배* · 전기철**

Soon-Kuk Kwun · Kyung-Do Lee · Young-Hyun Cho · Song-Bae Kim · Gi-Seol Cheon

Abstract

A prototype surface flow constructed wetland was built in the upstream area of Sihwa reclaimed tidal lands to improve the water quality of Lake Sihwa by treating severely polluted stream water. In this study, we monitored hydrology, macrophyte (*Phragmites communis* Trin.) growth, and water quality in the Banwol and Donghwa wetlands to evaluate their performance during the initial period after the completion of wetland construction. The average removal efficiency(%) in each wetland was relatively low compared with the performance data from the North America Wetland Treatment System Database (NADB), which mainly includes urban sewage-treatment wetlands. However, the average removal rates per unit area ($g/m^2/day$) were 0.72, 0.72 and 0.51 (BOD), 2.04, 2.46 and 0.70 (SS), 0.89, 0.43 and 1.09 (TN) and 0.02, 0.02 and 0.02 (TP) in the Banwol and Donghwa wetlands and NADB, respectively. The overall performance of the Banwol and Donghwa wetlands was within the expected range of the wetland system processes contributing the reduction of the pollutant load to Lake Sihwa during the initial period of wetland operation. Considering the low influent concentration, high hydraulic loading rate, and insufficient macrophyte growth since the wetland was constructed, better performance is expected if an improved operational scheme is adopted.

Keywords : Constructed wetland, watershed management, stream water treatment, water quality monitoring

I. 서 론

시화 방조제 건설로 조성된 시화호는 유역 내 인구 및 축산 농가의 증가, 안산시 및 공단의 환경기초시설 미비, 입주공장의 불법폐수 방류 등으로 심각한 수질 오염 문제에 직면하게 되었다. 이에 정부는 1996년 환경기초시설 증설과 유입 오염원 차단 및 호소 내 수질개선을 주요 내용으로 하는 수

* 서울대학교 농업생명과학대학
** 서울대학교 대학원
* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4582
Fax: +82-2-873-2087
E-mail address: skkwun@snu.ac.kr

질개선 대책을 수립하여 시행하고 있다. 이러한 개선대책의 일환으로 시화호 상류 유입 지천인 반월천, 동화천, 삼화천의 합류부에 생활 오수, 농업 배수 및 축산 폐수를 처리하기 위하여 자연정화기법을 이용한 인공습지가 건설되어 운영되고 있다 (KOWACO, 2002).

인공습지는 수문학적 특성에 따라 수표면이 대기와 접촉해 있는 자유수면형 인공습지와 유입수가 땅 속의 여재를 통과하면서 이동하는 지하흐름형 인공습지로 분류할 수 있다 (USEPA, 1999). 시화인공습지는 자유수면형 인공습지로 분류되며 부유물질이 침전하는 물리적 과정, 토양 내에서 일어나는 흡착과 습지 내 휘발의 화학적 과정, 그리고 식생에 흡수되어 처리되는 생물학적 과정 등을 통하여 오염 물질을 제거한다 (William, 1999).

자유수면형 인공습지는 일반적으로 건설에 넓은 면적의 부지가 소요되고 처리효율도 비교적 낮은 단점이 있지만, 저농도 고용량의 특성을 지닌 비점원 오염 처리에 효과적이고 유지관리 비용이 저렴하며 생태계 복원기능과 생태 공원화 등을 통한 지역민의 휴식 공간을 마련해 줄 뿐만 아니라 야생동물의 서식처를 제공하는 등의 장점이 있다 (USEPA, 1999).

최근 들어, 국내에서도 인공습지에 대한 관심과 연구가 증가하고 있는데 (Yoon et al., 1997), 자유수면형 인공습지에 대한 연구로써 Hwang et al. (2000)은 농업활동 중단과 함께 식생이 발달하여 형성된 자연습지에서 수질개선 효과를 연구한 바 있으며, Yang (2001)은 하천으로 유입되는 하수처리장 방류수와 하수 월류수를 정화하기 위해 고수부지에 자유수면형 인공습지를 설치하여 초기 처리수준을 연구하였고, Park et al. (2001)은 저수지의 수질을 개선하기 위하여 설치한 자유수면형 인공습지에서 수리학적 고부하 조건에서 수처리 특성에 관하여 연구하였다. Ham et al. (2004)은 인공습지를 이용하여 하구 담수호로 유입하는 하천수의 수질 정화효과를 분석하였다.

본 연구는 시화인공습지에 대하여 건설 후 초기 습지 수문, 식생 변화 및 수질 처리능력을 조사하여 전반적인 수질 정화 능력을 파악함으로써 향후 이와 유사한 대규모 현장 인공습지의 설계 및 운영 관리 기초 자료를 제공하고자 수행되었다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상 지역

경기도 안산시 본오동과 경기도 화성군 비봉면 일원의 간석지에 조성 (2000년 5월)된 시화인공습지는, 시화호 상류부 유입하천인 반월천 (Banwol Stream), 동화천 (Donghwa Stream), 삼화천 (Samhwa Stream)의 합류 지점에 위치한다 (Fig. 1). 상류부 유입하천의 유역특성과 오염원은 하천별로 차이가 있는데, 반월천의 경우 유역에 도시와 농촌지역 및 공단이 분포하여 중·상류부의 도시와 농촌지역으로부터 유입되는 생활하수 및 축산폐수, 하류부의 공장에서 유입되는 공장폐수가 주요 오염원인 반면, 동화천과 삼화천의 유역은 대부분 농촌지역으로 주로 농경배수와 축산폐수 등이 주요 오염원이며, 유량이 집중되는 우기시 비점원오염 형태로 오염물질이 다량 유입된다.

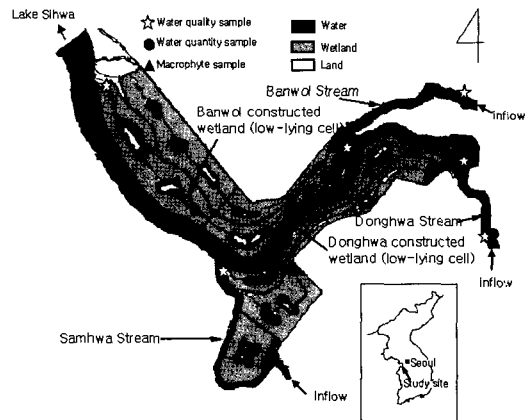


Fig. 1 Layout of the Sihwa constructed wetland and the locations of sampling sites

시화인공습지 상류부 유입하천의 유역면적 및 유출량은 Table 1에서와 같이 반월천의 유역면적은 40.9 km²로 동화천의 유역면적 43.0 km²와 비슷하나 유출백분율의 경우에는 반월천의 경우 52.7%로 동화천의 41.1%에 비해 높은 값을 보였다. 이는 동화천 유역에 농업용수를 취수하기 위한 보들이 다수 존재하여 강우시를 제외한 평상시에는 보문이 닫힌 상태로 유지되고 있어, 하천 하류로의 유출량이 적었기 때문이라 추정된다. 삼화천 유역의 경우 유역면적은 16.9 km²이고 유출백분율은 36.6%로 위의 두 지역보다 유역면적이 작고 유출백분율 또한 낮아 하천 유량의 부족으로 인하여 초기 인공습지 운영에 어려움을 겪었다.

시화인공습지의 총 조성 면적은 75 ha이며, 습지 조성지역의 지형 특성상 펌프로 유량을 공급하는 고습지와 자연 유하식 저습지로 구분된다. 이 중 본 연구에서는 자연유하식으로 건설되어 하천의 유량이 부족했던 시기에도 습지로 연속적인 유량이 공급될 수 있었던 반월저습지와 동화저습지를 연구 대상지역으로 선정하였다 (Fig 1). 인공습지의 면적은 자유수면지역 (open water area)과 식생지역 (vegetative water area)으로 나눌 수 있는데, 반월저습지의 경우 자유수면지역이 52,321 m²,

식생지역이 166,105 m² 이었고, 동화저습지의 경우 자유수면지역과 식생지역의 면적이 각각 25,395 m², 84,681 m² 이었다 (Table 2). 습지 내 수위는 갈대 발아기인 봄철 일부 기간 (20 cm, 2002년 3월~2002년 5월)을 제외한 모든 시기에 60 cm를 유지하였다.

2. 연구방법

가. 습지 수문 및 식생

습지로 유입하는 하천 유입량을 구하기 위하여 사각형 웨어로 만들어진 취수문의 수위를 압력식 수위계를 설치하여 측정된 후 수두-유량관계식 (Kwun et al., 1993)을 사용하여 계산하였다.

인공습지 내 강우로 인한 유량은 인공습지에서 가장 가까운 지역에 위치한 수원 기상대의 강우량 자료 (연간 1,220.7 mm)에 면적을 곱하여 산출하였다.

습지로부터의 유출량은 반월저습지의 경우 유출부 조절빈지 (stop-log weir)에서 실측하여 산출하였으며, 동화천의 경우는 직경 0.6 m의 관을 통해 유출되는 값을 측정하여 사용하였다. 증발산량은 수원 기상대의 증발계증발량을 기초로 자유수면지역의 경우에는 증발계증발량의 값을 취하고, 식생지역의 경우 식생지역의 면적에 갈대의 증발산비 (논벼의 생육시기별 증발산비 이용) (Kim et al., 1984)를 곱하여 계산하였다.

시화인공습지에서는 수질정화를 위해 갈대 (*Phragmites communis* Trin.)를 주 식생으로 사용하였는데, 식생 조사를 위하여 조사지점 (Fig. 1)에서 30 cm × 30 cm 면적 안에 자라는 갈대의 수를 8회 측정하였다 (2000년 6월~2002년 5월). 이 중 3개의 갈대를 지상부 (shoot)만 채취하여 물로 씻어 건조시킨 후 건물중을 측정하고 이를 토대로 각 지역별 단위면적당 식물 건물중을 구하였다.

나. 습지 수질

수질분석을 위한 수질시료의 채취는 인공습지 유

Table 1 Drainage characteristics of the watershed

Stream	Banwol	Donghwa	Samhwa
Watershed area (km ²)	40.9	43.0	16.9
Runoff (×10 ⁶ m ³)	26.3	21.6	7.5
Percent runoff (%)	52.7	41.1	36.6

Table 2 Water area and water depth of the low-lying cells in the Banwol and Donghwa wetlands

Wetland	Banwol	Donghwa
Open water area (m ²)	52,321	25,395
Vegetative water area (m ²)	166,105	84,681
Water depth (cm)	60	60

입부 상류하천의 경우 각 하천별로 1개 지점 (Fig. 1)을 선정하여, 평상시 44회, 강우시 2회를 실시하였다 (2001년 8월~2002년 10월). 인공습지의 경우 반월저습지 54회, 동화저습지 39회의 시료를 유입부 및 유출부에서 채취하였다. 시료 분석은 BOD, SS, TP의 수질항목의 경우 수질오염 공정시험법 (Ministry of Environment, 2000)에 준해서 분석하였으며, TN의 경우 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Org.-N은 Semi-micro-Kjeldahl법으로 측정하고 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 MERCK 사의 시약을 이용하여 측정하고 합산하였으며, 온도, pH 및 EC는 현장에서 기기 (NeoMet model 815PDC)를 이용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 습지의 수문 및 식생

습지로의 총유입량 (total inflow)은 하천으로부터의 유입량과 습지 내에 내린 강우량이 있으며, 습지로부터의 총 유출량은 최종 방류구에서의 유출유량, 습지내의 증발산량, 침투 및 관리 손실이 있다. 반월저습지의 하천유입량과 강우량은 각각 $17,966 \times 10^3 \text{ m}^3$ 와 $267 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었으며, 동화저습지의 경우에는 각각 $7,703 \times 10^3 \text{ m}^3$ 와 $134 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었는데, 유입량 중 강우유량이 차지하는 비율은 1.5%와 1.7%로 매우 낮았다 (Table 3). 습지

Table 3 Hydrologic balance in the low-lying cells in the Banwol and Donghwa wetlands (unit : $\text{m}^3 \times 10^3$, (%))

Wetland		Banwol	Donghwa
Total inflow	Stream inflow	17,966 (98.5)	7,703 (98.3)
	Rainfall	267 (1.5)	134 (1.7)
Total outflow	Discharge	12,986 (71.2)	5,642 (72.0)
	Evapotranspiration	212 (1.2)	107 (1.4)
	Infiltration/Management loss	5,034 (27.6)	2,088 (26.6)

로부터의 유출유량은 $12,986 \times 10^3 \text{ m}^3$ (반월저습지)와 $5,642 \times 10^3 \text{ m}^3$ (동화저습지)로 총유입량의 71.2%와 72.0%를 나타내고 있는데, 이는 침투 및 측정되지 못한 습지 외부로의 유출이 상당한 비율 (각각 27.6%, 26.6%)을 차지하기 때문이다.

습지의 월별 하천 유입량을 바탕으로 계산된 수리학적 부하율 (hydraulic loading rate, HRL)을 살펴보면 (Fig. 2), 반월저습지의 경우 가물었던 시기 (2001년 가을과 겨울)에는 수리학적 부하율이 15 cm/day이하, 그 이후에는 월별로 16.8~41.7 cm/day의 범위를 나타내어 평균 20.8 cm/day의 수리부하를 보였다. 동화저습지의 경우 가물었던 시기에는 습지로의 유입량이 거의 없어서 수리학적 부하율을 산정할 수 없고, 상류 유입하천의 유량이 증가한 2002년 봄부터는 15.6~48.3 cm/day 범위에서 평균 17.6 cm/day의 값을 나타내었다. 오수처리를 위해 조성된 습지에서 수리학적 부하율은 0.7~50 cm/day의 다양한 값을 갖는데 (WRP, 1998), 적정 수리부하율은 2.5~5.0 cm/day로 알려져 있으며 (Knight, 1990), 5 cm/day 미만인 경우에 BOD 제거율이 높은 것으로 보고되었다 (USEPA, 1999). 따라서, 반월저습지와 동화저습지의 수리학적 부하율은 2002년의 경우 제시된 적정 수리학적 부하율을 초과하는 것으로 나타

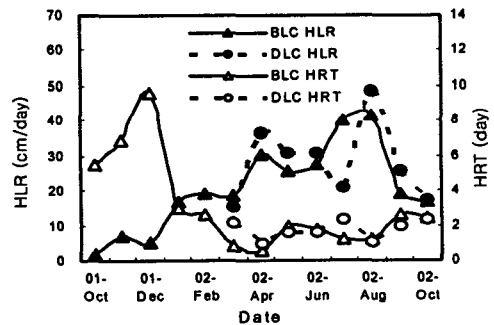


Fig. 2 Temporal variation in the hydraulic loading rate (HLR) and the hydraulic retention time (HRT) in the low-lying cells in Banwol (BLC) and Donghwa (DLC) wetlands

났다.

수리학적 체류시간 (hydraulic retention time, HRT)은 인공습지에서 물이 머무는 평균적인 시간으로, 습지의 오염물질 처리능력과 밀접한 관련이 있는데 (Knight, R. L., 1990; Koskiaho et al., 2003), 반월저습지의 경우 가물었던 시기 (2001년 가을과 겨울)에는 수리학적 체류시간이 6~10 days이었고 그 이후에는 1~3 days이었으며, 동화저습지의 경우에는 1~2 days를 보였다. 도시하수 처리를 위한 습지의 최적체류시간은 5~14 days로 제시되었고, 강변습지의 경우에는 7 days (우기)/21 days (건기)로 제안되었다 (Brown, 1987). Ryu(2002)는 시화인공습지에서 초기 인이 50% 감소되는데 필요한 수리학적 체류시간이 3~9 days라 하였다. Crites and Tchobanoglous (1998)은 인공습지에서 10 mg/L 이상의 높은 질질소 제거를 위해서는 8에서 14일 정도 혹은 그 이상의 체류시간이 소요된다고 하였다. 따라서 반월저습지와 동화저습지의 체류시간은 습지 내 식생 및 기질이 충분한 정화능을 발휘하기에는 부족한 것으로 판단된다.

습지에서 수질정화와 관련하여 식생의 주요한 역할은 습지 내 유속을 감소시키며, 이동하는 오염물질을 여과하고, 동결기 수표면이 어는 것을 방지하며, 부착된 미생물이 성장할 수 있도록 넓은 표면적을 제공하는 것이다. 또한, 식생이 성장하면서 영양염류를 흡수하고, 뿌리를 통해 산소를 공급하여 유기물질의 분해 및 질산화 작용을 증진시키는 역할도 하고 있다 (Brix, 1994).

시화인공습지에서 갈대의 건물중 변화를 살펴보면 (Fig. 3), 반월저습지의 경우 1.2~4.4 kg/m² 동화저습지의 경우 0.9~3.1 kg/m²를 보였으며, 연구기간 동안 전반적으로 습지의 식생이 감소한 것으로 나타나 식생으로 인한 수질 정화능이 제대로 발휘되기 어려웠을 것으로 판단된다. Kang and Ju(1999)는 간척으로 조성된 지역의 자연습지에서 갈대의 적정 수심을 조사한 결과 0~30 cm 이내라

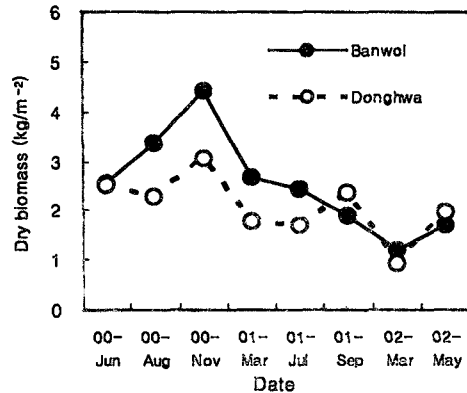


Fig. 3 Temporal variation in the dry weight of macrophytes in the low-lying cells in the Banwol and Donghwa wetlands

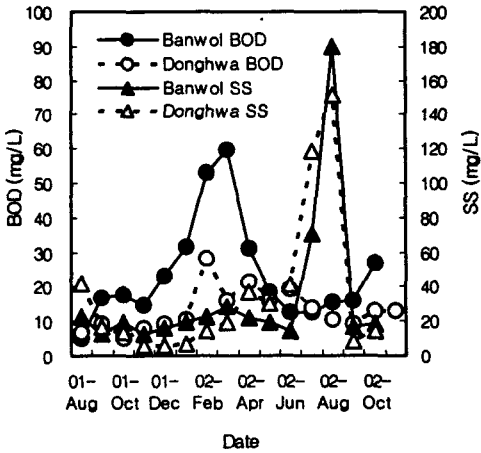
고 하였으며, 이보다 더 깊은 곳은 줄과 애기부들이 우점한다고 하였다. 이를 본 연구 결과에 적용해 보면 갈대 발아기를 제외하고 수심을 60 cm로 유지함으로써 갈대가 성장하기에는 부적절한 환경이었을 것이라 판단되며, 향후 수심을 갈대가 성장하기에 적합한 깊이 이상으로 계속해서 운영하게 된다면 자유수면구역이 확대되거나 줄과 애기부들의 다른 식생의 생육이 증가할 것으로 예상된다.

2. 습지의 수질

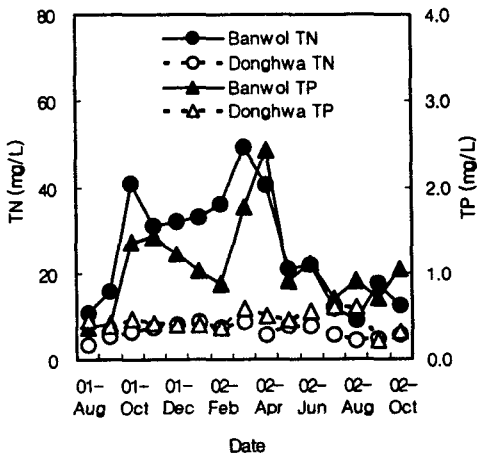
가. 유입하천의 수질

인공습지 상류 유입하천의 수질변화를 살펴보면 (Fig. 4). BOD의 농도는 반월천 4.9~60.0 mg/L 동화천 6.0~28.0 mg/L의 범위로 하천별로 평균 23.6, 13.7 mg/L의 값을 보였으며, SS 농도는 반월천 12.5~179.5 mg/L, 동화천 6.0~151.0 mg/L의 범위로 평균 33.0, 35.0 mg/L의 값을 나타냈다.

TN의 경우 반월천 9.2~49.4 mg/L, 동화천 3.5~8.92 mg/L의 범위에서 각각 평균 25.6, 6.5 mg/L의 농도를 나타냈다. TP의 농도는 반월천에서 0.4~1.8 mg/L의 범위에서 평균 1.1 mg/L의 값을, 동화천에서는 0.2~0.6 mg/L의 범위에서 평균 0.5 mg/L의 값을 보였다. 따라서, 반월천과 동



(a) BOD and SS



(b) TN and TP

Fig. 4 Temporal variation in water quality in the Banwol and Donghwa streams

화천의 수질은 BOD, TN, TP의 경우 (SS 제외) 환경정책기본법이 정한 하천, 호소수질기준 IV, V 등급을 크게 초과하여 오염된 것으로 조사되었다.

전반적으로 유입하천인 반월천과 동화천의 수질은 계절별로 큰 편차를 보였으며 강우기에 집중적으로 많은 양의 오염물질이 배출되는 것으로 나타났다. 한편, 반월천의 수질이 동화천에 비하여 나쁜 것으로 나타났는데, 이는 반월천 유역이 생활하수와 공장폐수 및 농업하수가 함께 유입되는 특성상

주로 농경배수 등이 유입되는 동화천에 비하여 고농도의 오염물질이 유입되기 때문으로 보인다. 특히, 2002년 봄철의 반월천 수질이 악화된 것으로 나타났는데 이는 가물었던 겨울 동안 유역에 쌓였던 오염물질들이 유량이 증가하는 봄에 하천으로 많이 유입되었기 때문으로 보인다.

나. 수질 처리 특성

반월저습지와 동화저습지의 수질항목별 유입수질 및 유출수질을 보면 (Table 4), BOD의 경우 반월, 동화저습지에서 각각 18.7, 12.9 mg/L의 평균농도로 유입되어 15.0, 8.1 mg/L의 농도로 유출되었고, SS의 경우 각각 14.4, 17.1 mg/L의 농도로 유입되어 5.3, 6.8 mg/L의 농도로 유출되었다. TN과 TP의 경우 반월저습지의 유입수 평균농도는 각각 19.3, 0.91 mg/L이었고, 유출수 농도는

Table 4 Water quality data for the low-lying cells in the Banwol and Donghwa wetlands (2001/October~2002/October)

Items	Banwol		Donghwa		
	range	ave.	range	ave.	
Temperature (°C)	In	3.5~28.8	14.9	2.1~29.0	16.0
	Out	0.6~29.0	14.1	3.5~28.9	15.4
pH	In	7.3~9.4	8.0	7.6~10.2	8.6
	Out	7.1~8.3	7.8	7.12~8.8	7.9
EC (dS/m)	In	0.3~3.4	1.5	0.4~1.3	0.6
	Out	0.4~3.7	1.5	0.3~1.1	0.6
DO (mg/L)	In	1.5~13.9	5.8	4.5~19.2	10.9
	Out	0.8~11.6	4.9	0.2~17.2	7.4
BOD (mg/L)	In	49~59.8	18.7	3.6~40.0	12.9
	Out	6.0~34.0	15.0	1.6~21.0	8.1
SS (mg/L)	In	5.0~31.5	14.4	5.5~49.5	17.1
	Out	0.5~18.5	5.3	1.0~43.0	6.8
TN (mg/L)	In	5.4~34.8	19.3	3.3~10.4	4.7
	Out	1.9~28.7	13.6	1.2~8.9	2.5
TP (mg/L)	In	0.19~2.55	0.91	0.12~0.55	0.20
	Out	0.17~2.03	0.69	0.03~0.25	0.10

13.6, 0.69 mg/L이었다. 동화저습지에서 TN과 TP의 유입수 평균농도는 각각 4.7, 0.20 mg/L이었으며, 유출수 농도는 2.47, 0.10 mg/L이었다.

인공습지에서 BOD의 제거는 미생물에 의한 분해, 습지바닥으로 침전, 토양에 의한 흡수에 의하여 이루어진다 (Kadlec and Knight, 1996). 반월저습지와 동화저습지에서 농도를 기준으로 한 BOD 처리효율은 각각 평균 19.7, 37.4%을 보였고, 부하량을 기준으로 단위면적당 제거량을 산정할 경우 두 습지 모두 0.72 g/m²/day로 나타났다 (Table 5, 6). 계절 변화에 따라 BOD 처리효율은 다양한 값을 보였는데 특히, 봄철의 경우 반월, 동화 저습지 모두 낮은 처리효율을 나타내었다. 이는 가을이던 겨울이 지나고 봄이 되면서 습지 내 유량이 점차 증가하기 시작하여 고사한 식물체의 분해로 유기물의 용출이 증가했기 때문이라 판단된다(Ham et al., 2004). 가을철의 경우 유출부의 자유수면 지역에 조류의 급격한 성장이 관찰되었는데, 이것이 처리효율의 저하에 영향을 주었으리라 추정된다(Herskowitz et al, 1987, Ham et al., 2004). 식생의 성장이 다른 계절에 비해서 왕성했던 여름

철에도 뚜렷한 처리효율의 증가를 볼 수 없었다. Yang(2001)의 연구에 의하면 여름철에는 강우 및 홍수로 인한 인공습지 내 급격한 수리학적 부하율의 변동으로 식생부착 미생물 막의 탈피, 습지바닥 표층의 교란 등이 발생하여 BOD의 처리효율이 다소 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 단위면적당 평균 제거량은 반월저습지와 동화저습지 모두 여름철에 높았는데, 이는 인공습지에서 단위면적당 공급되는 유량이 많아 체류시간이 짧을 경우 오염물질의 처리효율은 낮지만, 유입되는 오염부하의 증가로 인하여 단위면적당 오염물질 제거량이 증가한다는 Park et al.(2001)의 연구결과와 일치한다.

SS는 인공습지에서 효과적으로 제거되는 것으로 알려져 있는데 (Hammer, 1989; USEPA, 1999), 반월저습지와 동화저습지의 평균 처리효율은 63.1, 60.5% 이었고, 단위면적당 제거량은 각각 2.04, 2.46 g/m²/day이었다. SS의 경우도 강우로 인해 하천의 유입량이 많았던 봄과 여름철에 단위면적당 제거량이 높았다.

습지에서 질소의 제거는 대부분 질산화와 탈질화의 과정에서 일어나며, 온도, pH, 용존산소 및 생

Table 5 Summary of the removal efficiencies and unit removal loads for the low-lying cells in the Banwol and Donghwa wetlands

Items		2001 fall ¹		2001 winter ¹		2002 spring ¹		2002 summer ¹		2002 fall ¹	
		RE ²	RL ³	RE	RL	RE	RL	RE	RL	RE	RL
BOD	Banwol	38.0	0.21	40.6	1.25	-28.1	-1.66	41.5	3.00	22.0	0.58
	Donghwa	52.1	0.02	48.4	0.03	28.4	1.04	37.8	1.53	24.8	0.70
SS	Banwol	56.3	0.3	81.0	1.1	55.5	2.26	71.6	4.19	50.0	1.67
	Donghwa	69.5	0.06	52.5	0.04	67.2	4.49	42.5	3.98	84.6	3.13
TN	Banwol	51.1	0.55	17.8	0.41	19.4	1.19	34	1.39	51.8	0.76
	Donghwa	56.9	0.02	51.5	0.06	47.8	0.89	38.2	0.69	44.5	0.40
TP	Banwol	55.9	0.03	38.2	0.04	3.8	0.01	-9.3	-0.01	55.0	0.06
	Donghwa	61.5	0.001	63.9	0.001	59.1	0.04	24.2	0.02	58.7	0.03

¹ 2001 fall: October~November 2001; 2001 winter: December 01~February 2002;
² 2002 Spring: March~May 2002; 2002 summer: June~August; 2002 fall: September~October 2002
³ RE: Removal efficiencies (%)
 RL: Unit removal loads (g/m²/day)

물상 등의 인자에 영향을 받는다 (Kadlec and Knight, 1996). TN의 경우 반월저습지의 평균 처리효율은 29.7%, 동화저습지에서는 47.0%이었다. 계절별로는 반월저습지의 경우 겨울에 TN의 처리효율이 다른 계절에 비해 낮았으나, 동화저습지는 겨울에도 처리효율이 다른 계절과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 동화저습지의 경우 겨울철 동안 유량이 부족하여 긴 체류시간을 가질 수 있었기 때문이라 판단된다. 단위면적당 TN 제거량은 반월저습지와 동화저습지가 각각 0.89, 0.43 g/m²/day이었다. TN의 경우에도 유입부하가 높았던 봄, 여름철이 가을, 겨울에 비하여 단위면적당 제거량이 높았다.

인의 경우 습지내의 식생 및 토양과의 접촉을 통한 침전 및 흡착과정에 의하여 제거되는 것으로 알려져 있다 (Kadlec and Knight, 1996). TP의 경우 반월저습지의 평균 처리효율이 23.8%, 동화저습지는 52.0%이었다. 반월저습지에서는 유입부하가 높고 유량 변동이 심했던 봄, 여름에 TP의 처리효율이 매우 낮았으며, 동화저습지도 여름에는 상대적으로 낮은 처리효율을 보였다. 단위면적당 TP 제거량은 반월저습지와 동화저습지가 모두 0.02 g/m²/day이었다.

본 연구와 복미 습지 데이터베이스의 자료를 비교해 보면 (Table 6), BOD, SS, TP의 수질 항목의 경우 주로 하수를 유입수로 사용하는 복미 습지에 비해 하천수를 유입수로 사용하는 본 연구 대상 습지가 유출수의 농도가 크게 차이나지 않음에도 불구하고 Table 4에서와 같이 유입수의 평균 농도가 낮아 처리효율이 낮게 나타났다. 특히, BOD의 경우 식물 고사체의 분해로 인한 유기물의 용출이 많았던 봄철과 습지 내 유량 변동이 심했던 여름철 강우기 일부 기간을 제외하고는 평균 6.7~11.6 mg/L의 일정한 값을 보였는데, 이는 자유수면형 인공습지의 배경농도가 10 mg/L임을 감안하면 (USEPA, 1999) BOD, SS, TP의 수질항목에서 본 연구의 결과가 다른 연구 결과들과 유사한 값을

보이고 있음을 알 수 있다.

TN의 경우 유량이 부족하여 2001년 겨울과 2002년 봄철 동안 수리부하가 작았던 동화 저습지와 복미 습지 (평균 수리부하 2.99 cm/day)에 비해 수리부하가 커서 질소 제거에 필요한 충분한 체류시간이 부족하고, 습지 운영 초기라서 습지 내 질소제거에 필요한 충분한 양의 유기물이 축적되지 않아 낮은 처리효율을 보인 것으로 판단된다 (Hwang, et al., 2000; Park et al., 2001; Yang, 2001)

본 연구대상 습지의 유입부하의 경우 년 중 하천에서 유입하는 수량이 많아 낮은 농도가 유입하여도 높은 값을 보였다. 단위면적당 평균 제거량의 경우 복미 습지 데이터베이스의 값들과 비교하여 볼 때 본 연구대상 습지가 좀더 높은 값을 보이거나 비슷한 값을 보여 저농도 고유량의 하천수를 유입수로 사용하고 건설 후 운영 초기라서 처리효율

Table 6 Operational performance of the constructed wetland treatment system

Items	Concentration (mg/L)			Mass (g/m ² /d)		
	In	Out	Eff (%)	Load	Rem ²	
Banwol	BOD	18.7	15.0	19.7	4.15	0.72
	SS	14.4	5.3	63.1	3.21	2.04
	TN	19.3	13.6	29.7	3.51	0.89
	TP	0.91	0.69	23.8	0.18	0.02
Dong-hwa	BOD	12.9	8.1	37.4	2.47	0.72
	SS	17.1	6.8	60.5	4.24	2.46
	TN	4.7	2.5	47.0	0.96	0.43
NADB ¹	TP	0.20	0.10	52.0	0.04	0.02
	BOD	30.3	8.0	73.6	0.72	0.51
	SS	45.6	13.5	70.4	1.04	0.7
	TN	9.0	4.3	52.2	1.94	1.06
	TP	3.78	1.62	57.1	0.05	0.02

¹NADB: North American Wetland Treatment System Database (Kadlec and Knight, 1996)

²Rem: Removal load

은 비교적 낮았지만, 오염물질에 대한 단위면적당 평균 제거량에 있어서는 다른 연구 결과들의 범주 안에 포함되고 있었다. 향후 습지 내 적절한 유량 관리와 오염물질의 처리기작이 안정화 된 후에는 보다 우수한 처리 성능을 보일 것으로 생각된다.

처리 성능을 보일 것으로 생각된다.

이 연구는 수자원공사의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

IV. 결론 및 요약

우리나라 최초로 유역 단위의 오염된 하천을 정화하기 위하여 대규모로 건설된 시화인공습지에 대하여, 건설 후 초기 습지의 수문과 식생변화 및 수질을 조사하였다.

반월, 동화저습지 유입량 중 하천으로부터 유입된 양이 98% 이상으로 강우에 의한 영향이 작았으며, 유출량의 경우 71~72%가 습지 유출수이었고, 침투 및 관리 손실에 의한 유출이 26~27%이었다. 반월, 동화저습지의 수리학적 부하율은 각각 20.8 cm/day, 17.6 cm/day로 계절별로 변동이 심했으며, 수리학적 체류시간은 일부기간을 제외하고는 1~3 days로서 문헌상의 제안된 최적 체류시간 보다 짧았다.

평균적인 수질 처리효율은 하수에 비해 저농도 고유량의 하천수를 유입하여 처리하는 본 연구 습지의 특성상 반월 저습지와 동화 저습지에서 각각 BOD 19.7%와 37.4%, SS 63.1% 와 60.5%, TN 29.7%와 47.0%, 그리고 TP 23.8%와 52.0%의 처리효율을 나타내어 SS를 제외하고는 낮은 처리효율을 보였다. 그러나 단위면적당 평균 제거량에 있어서는 복미의 자유수면형 인공습지와 유사한 값을 보여 초기 인공습지의 수질 정화능이 일반적인 수질 정화 습지의 범주 안에서 하천의 오염부하를 줄이고 있는 것으로 판단되며 특히, 많은 유량이 유입되는 강우기에는 단위면적당 오염물질 제거량이 높아 시화호로 유입되는 오염물질의 경감에 큰 기여를 한 것으로 판단된다.

그러므로 향후 습지 내 적절한 유량 관리와 오염물질의 처리기작이 안정화 된 후에는 보다 우수한

References

1. APHA. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 19th ed., Washington D. C., USA.
2. Brix, H. 1994. Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands. *Water Science and Technology* 29(4) : 71-78
3. Brown, M. T. 1987. Conceptual design for a constructed wetlands system for the renovation of treated effluent. Report from the center for wetlands. University of Florida. 1-18.
4. Crites, R. and G. Tchobanoglous. 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. WCB/McGraw-Hill.
5. 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)
6. Hammer, D. A. 1989. *Constructed wetlands for wastewater treatment*. Lewis Publishers, INC. 265-447.
7. Herskowitz, J., S. Black and W. Lewandowski. 1987. Listowel artificial marsh treatment project. *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. Magnolia Publishing Inc, Orland, FL. 247-254.
8. Hwang, G. S., B. C. Kim, H. S. Kim and M. S. Jun. 2000. Water quality improvement by natural wetland, *Korean J. Limnology* 33(3) :

- 295-303. (in Korean)
9. Kadlec, R. H. and R. L. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, pp. 893.
 10. Kang, H. C. and Y. G. Ju. 1999. The structural characteristics in natural wetlands and fitted depth zones of *Phragmites Japonica*. *Journal of the Korean Institute of Traditional Landscape Architecture* 17(4) : 191-200. (in Korean)
 11. Kim, S. W., C. K. Kim and K. C. Lee, 1984. *Agricultural hydraulics*. Hyangmun publishers, Seoul. 75-86. (in Korean)
 12. Koskiaho, J., P. Ekholm, M. Raty, J. Riihimaki and M. Puustinen. 2003. Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands - experiences under boreal conditions. *Ecological Engineering* 20 : 89-103.
 13. Knight, R. L. 1990. Wetlands systems in natural system for wastewater treatment, Manual of Practice FD-16. Water Pollution Control Federation. Alexandria. VA., 211-260.
 14. KOWACO. 2002. Study on operation and management of Sihwa constructed wetland. Korea Water Resources Corporation, Daejeon. (in Korean)
 15. Kwun, S. K., J. U. Gu, T. C. Kim, H. Namkung, B. H. Eum, S. Y. Ryu, H. Y. Lee and S. O. Chung. 1993. *Hydraulics*. Hyangmun publishers, Seoul. 302-312. (in Korean)
 16. Ministry of Environment. 2000. Official test methods for water pollution, Seoul. (in Korean)
 17. Park, B. H., G. S. Nam and K. S. Lee. 2001. Characteristics of water quality improvement in constructed wetlands under high hydraulic loadings. *Journal of Korean Society on Water Quality* 17(4) : 477-484 (in Korean)
 18. Ryu, J. H. 2002. Characteristics of adsorption and removal of phosphorus in soils of constructed wetland. MS thesis, Seoul National University. 20-22.
 19. USEPA. 1999. Constructed wetlands treatment of municipal waste waters, Manual, EPA/625/R-99/010, 1-165.
 20. William, F. D. 1999. Wastewater treatment wetlands : contaminant removal processes. University of Florida Cooperative Extension Service
 21. WRP. 1998. Methods to determine the hydrology of potential wetlands, WRP Technical Note HY-DE-4.1
 22. Yang, H. M. 2001. Treatment efficiency of a surface-flow wetland system constructed on flood plain. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 20(4) : 227-283. (in Korean)
 23. Yoon, C. G., K. S. Kwun and H. J. Kim. 1997. Study on natural wastewater treatment systems by constructed wetland for rural area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 29(4) : 55-63. (in Korean)