



## 인공습지의 장기운영에 따른 수질정화효율 변동

### Variation of Water Treatment Efficiency during Long-term Operation of Constructed Wetland

손영권\* · 윤춘경\*\*† · 김형중\*\*\* · 함종화\*\*\*\*

Son, Yeong Kwon · Yoon, Chun Gyeong · Kim, Hyung Joong · Haam, Jong Hwa

#### ABSTRACT

Long-term water treatment performance analysis was conducted for the constructed wetland treating agricultural tailwater. Studied wetland was established in 2001 and operated from June, 2002 to November, 2010. Wetland vegetation cover was shown over 90 % coverage after 2005. According to vegetation development, accumulation of sediment nutrient was observed; Organic Carbon, T-P and T-N. In addition, DO concentration and temperature was decreased in the constructed wetland output. An infiltration rate also significantly decreased due to compaction of wetland soil. A runoff coefficient was increased due to the low infiltration rate after 2005. A T-N, TSS and Chl.a removal rate was maintained constantly. However, the T-P removal rate was slightly decreased along to wetland operation because low DO concentration could increase elution of phosphorus from sediment. After constructing open water, the T-P removal rate was increased. This is because open water could accelerate the reaeration process. Consequently, over three years of vegetation development could be helpful for wetland performance. In addition, DO concentration is important factor to maintain the T-P treatment.

**Keywords:** Constructed wetland; Long-term analysis; Vegetation; Removal rate; non-point source pollution

#### 1. 서 론

호소나 하천의 부영양화에 대한 비점오염원의 비율이 증가하면서 이를 저감하기 위한 대책의 하나로 인공습지의 사용 및 필요성이 증대되고 있다 (Yoon et al., 2008). 인공습지에서 영양물질의 처리는 물질의 침전 및 토양입자의 흡착, 식물조직의 동화작용, 그리고 미생물을 이용한 물질변환 등을 포함하는 이화학적 및 생물학적 작용을 통해 이루어진다 (Vymazal et al., 1998; Lund et al., 2000; Spieles and Mitsch, 2000).

습지 내 수생식물은 인공습지의 수질정화 기작에서 중요한 역할을 하는 미생물, 플랑크톤 그리고 수서곤충 뿐 아니라 다양한 야생동물들의 서식공간을 제공해 주며, 영양염류를 식물체내로 흡수하는 역할을 할 수 있다 (Ham et al., 2005). 또한 수체 내

에 존재하는 수생식물의 줄기와 잎은 유속을 감소시켜 침전을 도울 뿐 아니라, 미생물이 서식할 수 있는 공간을 제공하여 자연적인 생물막을 형성할 수 있다. 이 밖에도 대기중의 산소를 근권 주위의 토양에 전달하여 질산화와 탈질화를 촉진할 수 있다. 하지만 새롭게 조성된 인공습지에서는 식생이 천이를 거쳐 안정한 군집을 형성하기 위해서 적어도 5년 이상의 시간이 필요한 것으로 알려져 있다 (Kadlec and Wallace, 2008).

인공습지 조성 초기단계의 경우 식생의 밀도가 낮고 저질토의 성분이 일반적인 습지와 다른 상태이다. 인공습지를 조성할 경우 이탄층이 잘 형성되어 있는 자연습지 토양과 달리 깨끗한 토양을 사용하는 경우가 많다. 인공습지 토양의 낮은 유기물과 인의 함량은 유입수의 인과 유기물을 흡착 및 퇴적시키는 능력을 증가시킬 수 있다 (Kim et al., 2006a). 또한 식생 밀도가 낮을 경우 인공습지에서 식생에 의해 기대되는 다양한 효과들이 자연습지보다 낮게 나타날 수 있다.

반대로 장기간 운영된 인공습지의 경우 인공습지 내부에 많은 유기물 및 인이 축적되어 처리효율이 낮아질 수 있다. 인공습지에서 습지의 조류 및 식생은 높은 일차생산력을 가지며, 생산된 많은 양의 유기물이 습지로부터 유출되어 오염부하가 높아질 수 있다. 고사한 식물체는 탈질작용에서 주요 탄소원으로 작용하여 인공습지의 질소 처리에 필요한 요소이지만, 과다한 생물량은 인

\* 건국대학교 환경과학과

\*\* 건국대학교 환경과학과

\*\*\* 한국농어촌공사 농어촌연구원

\*\*\*\* 한국농어촌공사 농어촌연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3786

Fax: +82-2-452-3931

E-mail: chunyoong@konkuk.ac.kr

2011년 10월 5일 투고

2011년 11월 7일 심사완료

2011년 11월 7일 게재확정

공습지의 DO 농도를 감소시켜 질소 처리효율은 증가하는 반면 인의 처리효율은 감소시킬 수 있다 (Kim et al., 2008). 또한 습지 내 식물체를 제거하지 않을 경우 장기적으로 고사한 식물체에서 영양물질이 용출될 수 있다 (Reed et al., 1995).

국내에서 인공습지에 관해 연구된 많은 결과들은 인공습지 조성 후 5년 이내에 측정된 것이 대부분이다 (Yang, 2005; Yu et al., 2009; Kim et al., 2006b; Choi et al., 2007). 인공습지 조성 초기에는 식생피도가 낮고, 이탄층이 발달되어 있지 않으며, 인공습지 수질정화 기작의 중요한 부분을 차지하는 미생물의 활동이 원활하지 않을 수 있다. 따라서 인공습지 조성 초기에 측정된 결과들은 습지의 기능 보다는 단순침강 및 토양흡착의 효과에 의해 나타나는 결과일 가능성이 높다. 또한 낮은 식생밀도는 습지내부 생산량을 감소시켜 인공습지의 배경농도를 낮추는 영향을 할 수 있다. 이러한 단순침강 및 토양흡착, 그리고 낮은 배경농도는 자연습지와 차별되는 인공습지의 장점이 될 수 있으나, 이러한 처리 기작이 인공습지가 장기간 운영될 경우 지속적으로 유지되는지 조사되어야 한다.

본 연구에서는 장기간 운영된 인공습지에서 유입수와 유출수 농도 및 처리효율의 변동을 분석하였으며, 이를 통해 인공습지가 장기간 운영될 경우 발생할 수 있는 문제점 및 그에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지역

연구대상 지역은 충청남도 당진군 석문면에 위치한 자유수면형 인공습지이며, 인공습지를 이용한 비점오염원 제어효율을 검증하기 위해 2001년에 습지와 우수지를 각각 4개씩 조성하였다. Fig. 1과 같이 각각의 습지 면적은 8000 m<sup>2</sup>, 우수지 면적은 800 m<sup>2</sup>이며, 우수지의 경우 상층부는 산소가 충분한 호기성

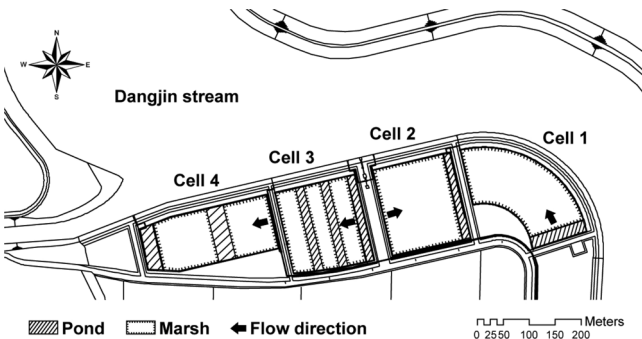


Fig. 1 Schematic of the studied wetland treating agricultural tailwater

상태를, 하층부는 산소가 부족한 혐기성 상태를 유지하는 임의성 상태를 유지하도록 수심을 2 m로 깊게 설계하였다.

습지를 지나면서 감소하였던 DO의 농도가 개방수역을 지나면서 상승하는 조사결과를 바탕으로 DO농도의 상승 및 수질개선 효과를 평가하기 위해 2007년에 Cell 3과 Cell 4의 일정부분에 임의로 개방수역 (Open water)을 조성하였으며, Cell 3에 폭 10 m, 수심 1.8 m의 개방수역 2개소와 Cell 4에 폭 20 m, 수심 1.8 m의 개방수역 1개소로 각각 이루어져 있다. 인공습지는 2002년부터 2010년 11월까지 운영되었으며, 본 논문에서는 2002년 6월부터 2010년 11월까지의 수질분석 결과를 이용하여 질소 처리효율을 분석하였다.

인공습지의 유입수는 간척농지 배수 및 석문담수호로 유입되는 하천수를 펌핑하여 사용하였으며, T-N과 T-P의 평균 유입수 농도는 각각 4.67 mg·L<sup>-1</sup>와 0.43 mg·L<sup>-1</sup>를 나타내었다. 습지의 수심은 웨어를 이용하여 생장기 (3~11월)와 동절기 (12~2월)에 각각 0.3 m와 0.5 m로 유지하였으며, 체류시간은 습지와 우수지에서 각각 2~10일과 1~5일을 유지하였다. 생장기보다 동절기에 높은 수심을 유지해준 이유는 동절기 낮은 온도로 부터 습지 식생의 번식기관인 뿌리를 보호하기 위해서이다.

### 2. 시료채취 및 분석방법

인공습지 유입수 및 유출수의 유량은 압력수위계를 이용하여 5분 간격으로 연속해서 측정되며, 수질시료는 습지의 유입부와 유출부에서 월 평균 2회 채취하여 수온, DO, TSS, Chl.a, T-N, T-P를 Standard Methods에 의해 분석하였다 (APHA, 2005). 토양시료는 1년에 2회 이상 Sediment Trap 및 지름이 10 cm 인 PVC파이프를 이용하여 채취한 뒤 유기탄소 및 T-N, T-P를 측정하였다 (Carter and Gregorich, 2007). 분석된 자료는 월 단위 시계열 자료로 정리하여 주었으며, 계절에 따른 주기성 및 시간의 흐름에 따른 추세를 가지는 시계열자료를 분석하기 위해 추세가중 지수평활법을 사용하여 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 식생발달 및 퇴적물

인공습지를 조성하기 전 (2001년)과 조성 후 (2002년 이후) 식생피도 변화 (Vegetation Cover) 및 퇴적물의 OC (Organic Carbon), T-N, T-P를 분석한 그래프 및 표는 Fig. 2와 Table 1과 같다. 조성초기 습지의 평균 피도는 약 5% 이하로, 대부분 육상식물이 우점을 하였으며 일부 갈대 (*Phragmites australis*) 군락이 관찰되기도 하였다.

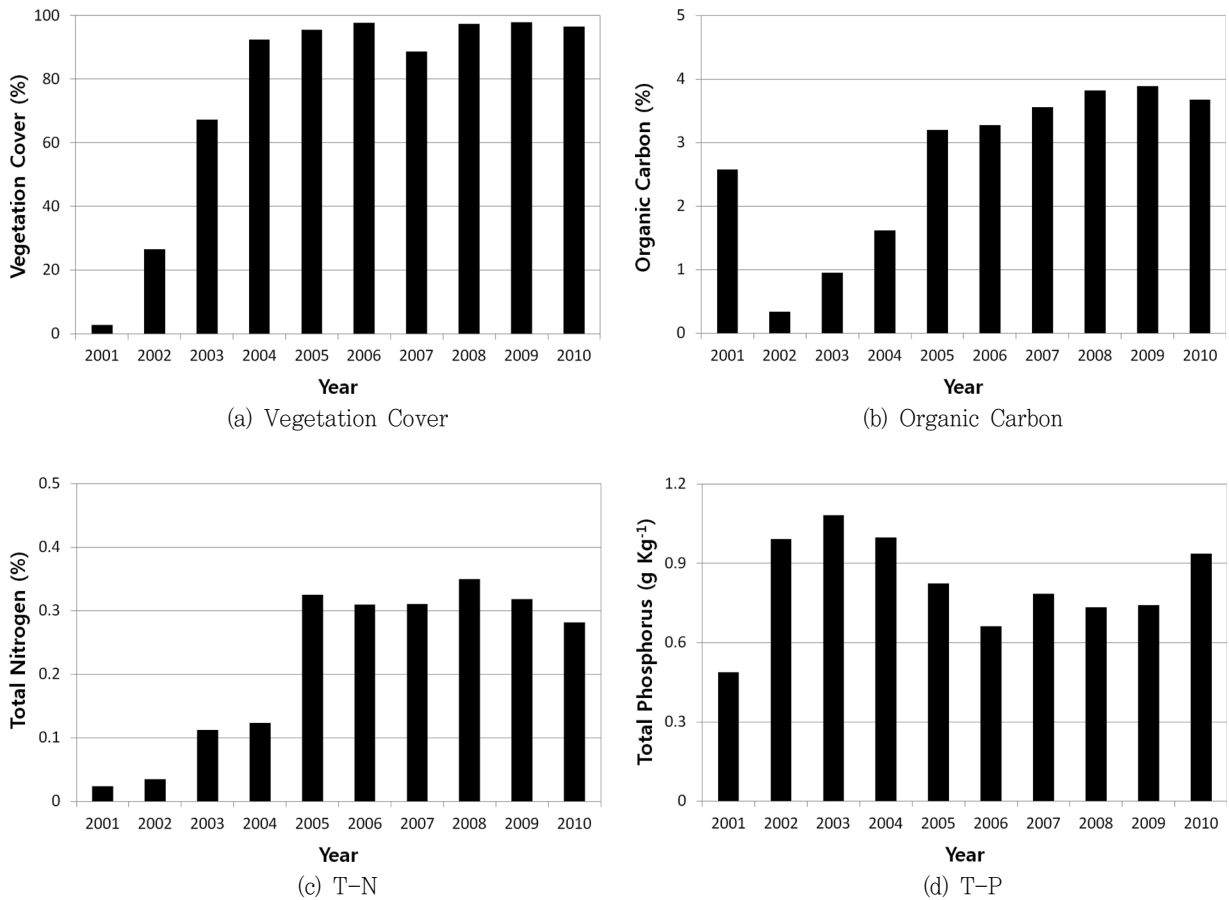


Fig. 2 Annual average of (a) Vegetation cover, (b) Organic Carbon, (c) Total Nitrogen and (d) Total Phosphorus in the bottom soil of constructed wetland

Table 1 Annual average for Vegetation Cover, Organic Carbon, T-N and T-P in the bottom soil of constructed wetland

Year	Vegetation Cover (%)	Organic Carbon (%)	T-N (%)	T-P (g · Kg <sup>-1</sup> )
2001	2.75	2.58	0.02	0.49
2002	26.5	0.33	0.03	0.99
2003	67.4	0.95	0.11	1.08
2004	92.5	1.62	0.12	1.00
2005	95.5	3.20	0.33	0.82
2006	97.8	3.27	0.31	0.66
2007	88.8	3.56	0.31	0.79
2008	97.5	3.82	0.35	0.73
2009	98.0	3.89	0.32	0.74
2010	96.5	3.68	0.28	0.94

2002년에 식생조사를 실시한 결과 갈대 (*Phragmites australis*), 애기부들 (*Typha angustifolia Bory et Chaub*), 새섬매자기

(*Scirpus planiculmis Fr. Schm.*), 미국개기장 (*Panicum dichotomiflorum Michx.*), 물피 (*Echinochloa crus-galli var. oryzicola Ohwi*), 큰개여뀌 (*Persicaria nodosa Opiz*) 등 여러 종의 식생들이 발견되었고, 각 습지별 평균 식생피도는 약 26.5 %를 나타내었다. 2004년도 이후에 조사한 결과 평균 식생피도는 90 % 이상을 보였으며, 대부분의 지역에서 갈대 (*Phragmites australis*)가 우점하였고, 일부 수심이 깊은 웅덩이에 애기부들 (*Typha angustifolia Bory et Chaub*)이 존재하였다.

인공습지 퇴적물의 OC, T-P 그리고 T-N의 농도는 식생피도의 변화와 유사한 경향을 보였다. OC의 경우 인공습지 조성 전의 토양이 2.58 %로 측정되어, 조성 후인 2002년 0.33 %보다 높은 값을 보였다. 하지만 식생의 발달과 고사로 인해 지속적으로 퇴적물이 축적되어 2005년 3.20 %까지 증가하였다. T-P의 경우 조성 직후인 2002년에 0.99 g · Kg<sup>-1</sup>로 급격히 증가하여 습지가 운영됨에 따라 감소하는 경향을 보였다. 조성초기 높은 침전율로 인해 높은 농도를 보였을 것으로 판단되며, 인공습지 운영에 따라 식생에 의한 흡수 또는 용출에 의해 감소한 것으로

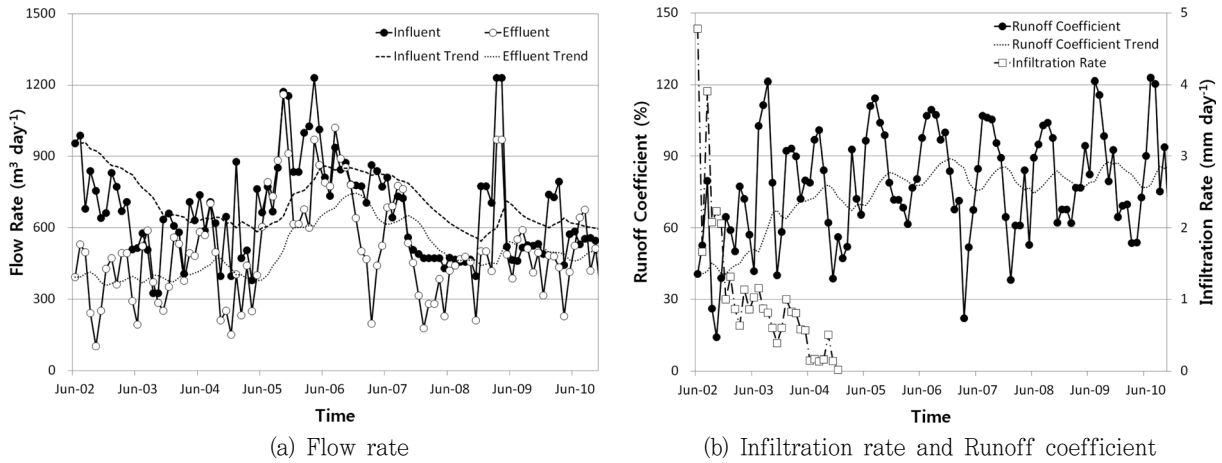


Fig. 3 Long term trend for (a) Flow rate and (b) Infiltration rate and Runoff coefficient in the constructed wetland

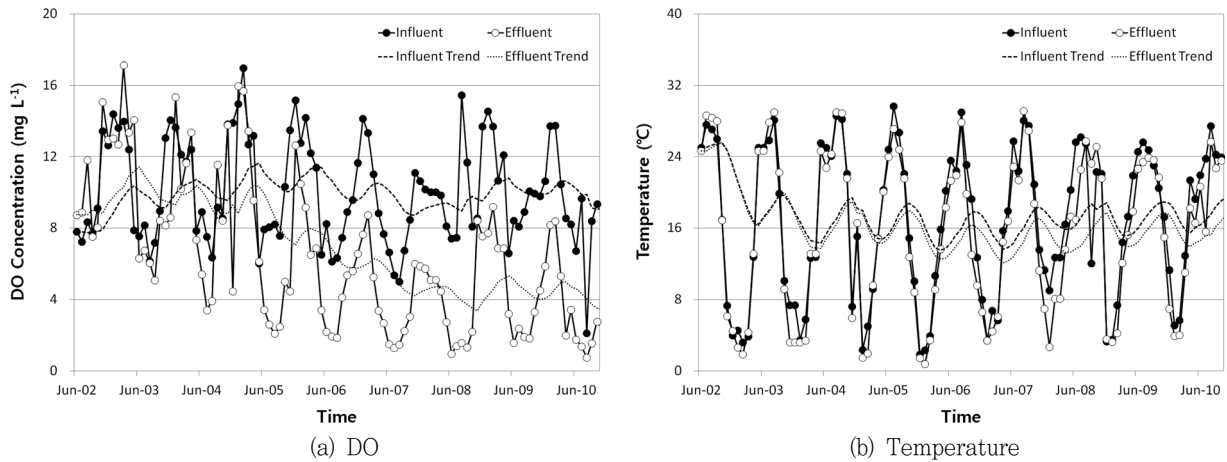


Fig. 4 Long term trend for (a) DO and (b) Temperature in the constructed wetland

생각된다. T-N의 경우에도 지속적으로 증가해 2005년 이후 약 0.31 %를 유지하는 것으로 측정되었다.

## 2. 수질정화효율

2002년부터 2010년까지 유량, 침투율, 수온 및 DO를 측정한 결과는 Fig. 3, 4 및 Table 2와 같다. 인공습지로 유입되는 유량은 하천수위 및 기상에 따라 변화를 보였으나, 인공습지의 침투율은 조성 초기  $4.77 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 에서 지속적으로 감소하여 2004년 말에는  $0.02 \sim 0.14 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 측정되었다. 침투율은 인공습지가 운영됨에 따라 토양의 압밀 및 식생에 의한 흡수가 원인일 것으로 판단된다. 유출율은 장기적으로 침투율이 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며, 연간 변화율은 강수량의 영향으로 계절적 변동을 보였다.

2002년 연평균 유입 및 유출량은 각각  $788.6 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $349.4$

Table 2 Annual average for flow rate, runoff coefficient, DO and temperature

Year	Flow rate ( $\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ )		RC (%) <sup>a</sup>	DO ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	Influent	Effluent		Influent	Effluent	Influent	Effluent
2002	788.6	349.4	45.2	9.47	9.84	19.2	19.6
2003	586.1	390.0	72.5	10.6	9.84	14.5	13.8
2004	585.7	450.9	78.8	10.5	9.03	17.6	17.2
2005	687.1	554.4	82.1	9.91	4.77	16.9	15.2
2006	905.4	790.4	88.4	9.62	5.84	15.9	13.8
2007	701.8	529.7	77.7	9.09	4.31	16.6	15.2
2008	484.6	360.9	76.3	10.0	3.24	17.4	15.7
2009	664.7	551.0	86.0	10.3	4.18	17.7	15.8
2010	599.0	468.4	80.2	9.13	2.72	19.0	16.9

<sup>a</sup>Runoff Coefficient

$\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ 로 유출율이 낮았으나 (45.2 %), 식생이 발달하고 습

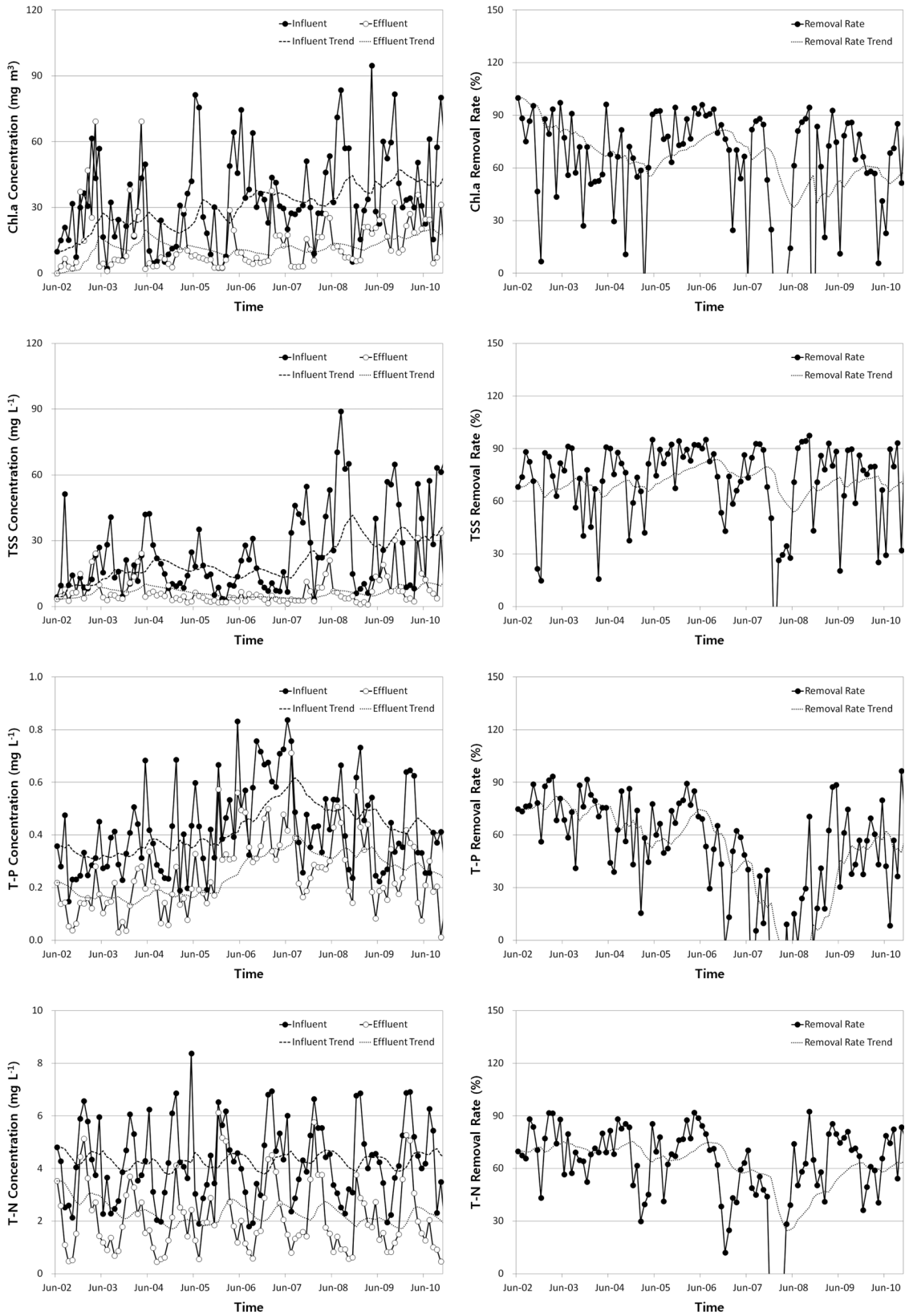


Fig. 5 Long term trend for Chl.a, TSS, T-P and T-N in the constructed wetland

지가 안정된 2005년에는 82.1 %의 유출율을 보였다. 향후 연도에 따라 약간의 차이는 보였지만 약 80 % 전후의 유출율을 보이고 있어 인공습지를 장기적으로 운영했을 경우 내부손실, 증발산 및 강우량을 고려한 유출율은 연평균 80 % 수준으로 판단된다.

유입수의 수온과 DO농도는 2002년부터 2010년 까지 큰 변화가 없었으나, 식생이 안정된 3년 후부터 유출수의 수온 및 DO 농도가 낮아지기 시작했다. 인공습지 유출수의 연평균 DO농도는 2004년까지  $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  이상의 높은 농도를 유지하고 있었지만, 식생이 발달하고 유기물이 충분히 퇴적되었다고 생각되는 2005년 이후  $4.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 감소하였다. 2007년과 2010년의 연평균 DO농도는 각각  $4.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $2.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 장기적인 관점에서 감소하는 추세를 보이고 있으나, 2010년의 경우 DO 농도가 높은 동절기 실측자료의 부족으로 상대적으로 연평균농도가 낮은 것으로 판단된다. 조성초기 수온은 유입수와 유출수에서 차이가 없었으나, 식생이 완전히 발달한 후 습지를 통과하면서 약  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 수온감소 효과가 있는 것으로 측정되었다.

장기운영에 따른 유입수와 유출수의 Chl.a, TSS, T-P 및 T-N 농도와 부하처리효율은 Fig. 5 및 Table 3과 같다. 대부분의 기간에서 인공습지의 처리효율은 크게 변화하지 않지만, 2007년 말에서 2008년 초 사이에 인공습지의 수질정화효율이 크게 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 2007년 개방수역 공사 당시 교란된 인공습지 토양이 유출되었기 때문으로 판단된다. 2008년 이후 다시 원래의 처리효율을 회복하였으므로, 일시적으로 낮아진 인공습지의 처리효율은 외부 교란에 의한 일시적인 현상으로 간주해도 무방할 것이다.

Chl.a와 TSS 처리효율은 인공습지를 장기간 운영하더라도 변화폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 습지 조성 초기의 경우 식생

이 발달하지 못해 유입수의 Chl.a 농도보다 유출수가 높게 측정되었다. 2005년 이후에는 유출수 농도가 비교적 안정이었는데, 이것은 식생피도가 높아져 태양광을 차단했기 때문으로 판단된다. TSS의 경우에도 유입농도는 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있지만 유출농도는 안정적으로 측정되었다. 따라서 인공습지가 장기간 운영되더라도 입자성 물질은 처리효율 변동이 작을 것으로 판단된다.

장기간 운영된 인공습지의 T-P 부하처리효율은 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 유입수의 연평균 T-P농도는 2002년  $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 에서 2006년  $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 유출수 농도는 유입수 농도와 유사한 경향을 보이고 있으나, 습지 처리효율은 2005년 이후 2.72 %에서 59.3 %까지 크게 변화하였다. 인의 처리효율이 지속적으로 감소하는 이유는 조성 초기 퇴적물에 급격히 축적된 인의 낮은 DO 농도로 인한 용출 및 내부에서 생산된 조류가 유출수로 혼입되어 T-P 농도를 상승시켰을 가능성이 있다 (Kim et al., 2008; Kadlec and Wallace, 2008). 2007년 개방수역을 설치한 뒤 낮았던 T-P 처리효율은 50 % 이상으로 측정되었으나 향후 변화를 지속적으로 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

T-N은 모든 수질항목 중 가장 안정적인 변화폭을 보였으며, 유량 온도 및 DO와 함께 계절적 주기성을 가장 잘 표현하고 있다. T-N의 연평균 유입수와 유출수 농도는 각각 약  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 와 약  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  수준으로 변화하고 있으며, 처리효율은 약 70 % 전후로 측정되었다. 개방수역 공사가 있었던 2007년과 2008년에 약간 낮은 처리효율을 보였으나, 유기물이 충분히 축적된 인공습지의 경우 장기간 운영되더라도 질소 처리효율에 문제가 일어나지 않았다.

#### IV. 결 론

장기간 운영에 따른 인공습지의 수질정화 효율 변화를 알아 보기 위해 2002년부터 2010년까지 약 9년간 운영된 인공습지에서 유량 및 수질항목을 분석하였다. 분석 결과 식생피도는 인공습지 조성 전인 2001년 2.75 %에서 2004년 92.5 %로 크게 증가하여, 식생의 안정을 위해서는 조성 후 약 3년간의 안정기가 필요한 것으로 분석되었다. 인공습지 조성 전인 2001년에 측정된 토양의 OC (Organic Carbon), T-N 및 T-P의 농도는 각각 2.58 %, 0.02 % 그리고  $0.49 \text{ g} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 이었다. 인공습지 토양의 영양물질 농도는 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 조성 후 5년이 지난 2005년에 OC, T-N, T-P 농도가 각각 3.20 %, 0.33 %,  $0.82 \text{ g} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 로 안정화 되었다. 인공습지의 침투율은 조성 초기  $4.77 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 에서 2004년 이후  $0.02 \sim 0.14 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ 로

Table 3 Annual average for Chl.a, TSS, T-P and T-N in the constructed wetland

Year	Chl.a			TSS			T-P			T-N		
	In <sup>a</sup>	Out <sup>b</sup>	RR <sup>c</sup>	In <sup>a</sup>	Out <sup>b</sup>	RR <sup>c</sup>	In <sup>a</sup>	Out <sup>b</sup>	RR <sup>c</sup>	In <sup>a</sup>	Out <sup>b</sup>	RR <sup>c</sup>
2002	18.7	8.23	71.3	15.6	6.60	60.1	0.28	0.11	75.1	3.75	2.03	69.9
2003	29.1	16.3	71.3	18.3	8.25	75.0	0.32	0.14	76.6	4.04	2.10	72.2
2004	20.7	15.6	58.7	21.0	9.62	66.6	0.38	0.19	66.8	4.15	1.77	74.9
2005	39.2	13.5	60.7	27.0	6.59	72.2	0.47	0.30	42.3	4.35	2.21	56.7
2006	40.1	9.15	86.3	14.9	3.95	80.7	0.56	0.38	59.3	3.96	2.22	70.1
2007	32.1	12.3	58.5	24.9	3.92	75.7	0.57	0.36	23.7	4.70	2.43	41.7
2008	41.8	12.7	28.4	39.7	7.38	53.7	0.45	0.33	2.72	4.26	2.14	33.9
2009	45.8	18.2	66.2	30.8	10.1	76.0	0.40	0.25	53.4	4.15	1.89	68.6
2010	43.2	20.3	55.4	37.6	11.1	68.0	0.42	0.22	56.2	4.65	2.11	66.1

<sup>a</sup>Influent concentration ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); <sup>b</sup>Effluent concentration ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); <sup>c</sup>Removal rate (%)

측정되었다. 유출율은 침투율이 높았던 2002년에 45.2 %로 측정되었고, 2004년 이후 약 80 % 이상의 안정적인 경향을 보였다. 분석 결과 인공습지가 조성되고 식생이 활착하기 까지는 약 3년의 기간이 필요할 것으로 보이며, 식생 고사체가 인공습지에 퇴적되어 이탄층이 형성되기 까지 약 5년의 기간이 소요될 것으로 판단된다. 따라서 인공습지 초기 기반재 및 식생의 종류에 따라 안정화 기간은 달라 질 수 있으나, 평균적으로 인공습지의 유출율, 식생피도 및 토양이 안정화되기 위해서는 3년 이상의 기간이 필요할 것으로 판단된다.

인공습지가 장기간 운영되더라도 TSS와 같은 입자성 물질에 대해서는 지속적으로 높은 처리효율을 보였다. TSS 처리효율은 조성 초기인 2002년에 60 %로 측정되었으며, 지속적으로 상승하는 경향을 보였다. 인공습지의 식생이 발달할수록 끌림효과(drag effect)에 의해 유속을 낮추기 때문에 입자성 물질의 침강이 잘 일어날 수 있으며 (Kadlec and Wallace, 2008), 식생의 줄기 부분과 수체와의 접촉면적이 넓어져 흡착이 잘 일어날 수 있는 환경이 조성되었기 때문으로 판단된다. 질소의 처리효율은 조성 초기 69.9 %로 측정되었으며 장기간 운영에도 60 % 이상의 처리효율을 유지하였다. 이는 높은 유기성 퇴적물로 인해 대부분의 습지가 혐기성 상태로 유지되어 탈질반응이 활발하게 일어나기 때문으로 판단된다. 하지만 개방수역이 없는 습지의 경우 혐기성 상태에서 인의 용출이 일어날 수 있으며, 일부 구간에서는 악취 및 모기가 발생하였다. 인 처리효율은 2002년 75.1 %의 매우 높은 처리효율을 보였으나 지속적으로 감소하여 2007년에는 23.7 %까지 낮아지는 경향을 보였다. 개방수역을 조성한 2007년 이후에는 약 50 % 수준의 처리효율을 보이고 있으므로, 장기간 운영할 경우 개방수역 등과 같이 습지 내부 구간의 DO 농도를 상승시켜 부분적인 호기성 조건을 유지시켜 줄 필요가 있다. 또한 중금속 등의 물질이 축적될 가능성이 있는 지역의 경우 정기적으로 내부 토양을 제거해 줄 필요가 있다.

인공습지를 장기간 운영할 경우 식생의 발달이 가장 큰 영향을 줄 수 있으며, 적절한 식생관리를 통해 수질개선효과를 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 측정된 안정화되는데 필요한 3년의 시간은 식생피도가 90 %에 도달하는 시점과 유사하며, 이는 인공습지의 수질정화기작이 식생과 밀접한 관련이 있다는 것을 의미한다. 선행 연구결과에서 제시한 5년 이상의 기간보다 (Kadlec and Wallace, 2008), 본 연구에서 조성된 습지의 식생발달이 빠른 이유는 기존에 존재하였던 습지식물들이 인공습지의 기반재에 포함되었기 때문으로 판단된다. 따라서 조성 초기 식생을 식재하지 않더라도 넓은 범위에 습지식물의 영양기관을 포함하는 기반재를 이용하는 것이 빠른 식생정착에 유리할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

1. APHA, 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21st edition*. Washington: American Public Health Association.
2. Batzer, D. P. and R. R. Sharitz, 2006. *Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands*. Berkeley and Los Angeles, CA.: University of California Press.
3. Carter, M. R. and E. G. Gregorich, 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis, 2nd eds*. Boca Raton, FL: .CRC Press.
4. Choi, D. H., K. S. Choi, S. W. Kim, Y. T. Oh, D. S. Kim, S. J. Joh and J. C. Park, 2007. Water Flow Distribution and Sedimentation Characteristics of Particle Materials in the Sihwa Constructed Wetland. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 29(4): 425-437.
5. Ham, J. H., C. G. Yoon, H. C. Kim, W. S. Koo and H. B. Shin, 2005. The Effect of Plant Coverage on the Constructed Wetlands Performance and Development and Management of Macrophyte Communities. *Korean J. Limnol.* 38(3): 393-402.
6. Kadlec, R. H. and S. D. Wallace, 2008. *Treatment Wetlands, 2nd edn*. Boca Raton, FL: .CRC Press.
7. Kim, H. C., C. G. Yoon, J. H. Ham, J. Y. Han, 2006a. Early Stage Performance of Constructed Wetland System for Nonpoint Source Pollution Control. *Korean J. Limnol.* 39(4): 481-488.
8. Kim, H. C., C. G. Yoon, H. Y. Um, H. J. Kim, J. H. Haam, 2008. Analysis of Treatment Efficiency according to Open-water in Constructed Wetland. *Journal of Korean Society on Water Quality.* 24(6): 709-717.
9. Kim, S. J., Y. S. Choi, W. K. Bae, 2006b. Performance Study on Pilot-scale Constructed Wetlands in order to Restore Contaminated Stream. *Journal of Korean Society on Water Quality* 22(3): 546-556.
10. Lund L. J., A. J. Horne and A. E. Williams, 2000. Estimating denitrification in a large constructed wetland using stable nitrogen isotope ratios. *Ecol. Eng.* 14: 67-76.
11. Reed, S. C., R. W. Crites and E. J. Middlebrooks, 1995. *Natural Systems for Waste Management and*

- Treatment, 2nd edn.* New York: McGraw-Hill.
12. Spieles, D. J. and W. J. Mitsch, 2000. the effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: a comparison of low and high nutrient riverine systems. *Ecol. Eng.* 14: 77-92.
  13. Vymazal, J., H. Brix, P. F. Cooper, M. B. Green and R. Haberl, 1998. *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe.* Leiden, The Netherlands: Backhuys.
  14. Yang, H. M., 2005. Comparison of Nitrogen Removal in Reed Wetlands with and Without Open Water Purifying Effluent from a Treatment Pond. *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.* 8(1): 37-44.
  15. Yoon, C. G, S. B. Kim, T. Y. Kwun and K. W. Jung, 2008. Development of natural and ecological wastewater treatment system for decentralized community in Korea. *Paddy Water Environ.* 6: 221-227.
  16. Yu, H. S., D. H. Kang, B. H. Kwon, 2009. Removal Efficiency of Pollutants in Agricultural Wastewater by Constructed Wetlands on Reclaimed Land in the Goheung Bay. *J. of Korean Wetlands Society* 11(3): 37-47.