

비점오염원 저감을 위한 신평천 인공습지의 수생태학적 특성 평가

서동철[†] · 강세원[†] · 임병진¹ · 박종환¹ · 김갑순¹ · 이준배¹ · 김현욱² · 허종수³ · 장남익⁴ · 성환후⁵ · 조주식*

순천대학교 생물환경학과, ¹국립환경과학원 영산강 물환경연구소, ²서울시립대학교 환경공학부,
³경상대학교 응용생명과학부, ⁴국립환경과학원 기후대기연구부, ⁵농촌진흥청 국립축산과학원

Evaluation of Aquatic Ecological Characteristics in Sinpyongcheon Constructed Wetlands for Treating Non-point Source Pollution

Dong-Cheol Seo[†], Se-Won Kang[†], Byung-Jin Lim¹, Jong-Hwan Park¹, Kap-Soon Kim¹, Jun-Bae Lee¹, Hyunook Kim², Jong-Soo Heo³, Nam-Ik Chang⁴, Hwan-Hoo Seong⁵, and Ju-Sik Cho*

Department of Bio-Environmental Sciences, Sunchon National University, ¹Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, ²Division of Environmental Engineering, University of Seoul, ³Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, ⁴National Institute of Environmental Research, Climate & Air Quality Research Department, ⁵Rural Development Administration, National Institute of Animal Science

To evaluate the aquatic ecological characteristics in Sinpyongcheon constructed wetlands for treating non-point source pollution, the removal rates of nutrients in water, the total amounts of T-N and T-P uptakes by water plants, and chemical characteristics of T-N and T-P in sediment were investigated. The concentrations of BOD, COD, SS, T-N and T-P in inflow were 0.07~1.47, 0.60~2.65, 0.50~4.60, 1.38~6.26 and 0.08~0.32 mg L⁻¹, respectively. The removal rates of BOD, COD, SS, T-N, and T-P were 14%, 6%, 18%, 24%, and 10%, respectively. The maximum amount of T-N uptake by water plants in August was 813 mg plant⁻¹ for *Phragmites communis* TRIV in 2nd bed, 1,172 mg plant⁻¹ for *Typha orientalis* PRESL in 3rd bed, respectively. The maximum amount of T-P uptake by water plants in August was 247 mg plant⁻¹ for *Phragmites communis* TRIV in 2nd bed, 359 mg plant⁻¹ for *Typha orientalis* PRESL in 3rd bed, respectively. Organic matter, T-N, and T-P contents in sediments were high in the order of 1st bed > 2nd bed > 3rd bed. Microbial biomass C/N/P ratios in sediments in 1st, 2nd, and 3rd were 78~110/3~6/1, 73~204/1~6/1, and 106~169/1~6/1, respectively.

Key words: Sinpyongcheon constructed wetlands, Non-point source pollution, Aquatic ecology, Nutrients, Water plants, Sediment

서 언

최근 농촌지역의 도시화, 산업화 및 소비생활수준 향상 등의 사회·생활환경 변화 등으로 농어촌 지역의 소하천과 농어촌 저수지의 수질이 날로 오염되고 있다 (Choi et al., 2006). 특히 비점오염원은 농경지에 살포된 농약과 비료, 축사에서 유출물, 도로상 오염물질, 도시지역의 먼지와 쓰레기 및 지표상 퇴적 오염물질 등이 강우시 빗물과 함께 유출되면서 발생하며 (Seo et al., 2006b), 이러한 오염물질과 화학물질이 결합된 입자들이 빗물에 의해 운반되어 하천으로 유입되면 심각한 수질문제를 일으킬 수 있다. 비점오염원은 배출지점이 유역전체에 걸쳐있어 제어가 어렵

고, 제어를 한다고 해도 일정한 처리효과를 얻기 위해서는 장시간이 소요되며, 강우량에 따라 유입량이 크게 변동되어 일정한 처리효율을 얻기가 힘든 문제점이 있으며, 관리에 많은 어려움이 있다 (Kwun, 1998; Lee and Bae, 2002).

우리나라 4대강 유역의 비점오염원이 차지하는 오염부하하는 한강 30%, 낙동강 25%, 금강 21% 및 영산강·섬진강 37%로서 수질오염에 미치는 영향이 매우 큰 실정이다. 특히, 팔당 상수원의 비점오염원이 차지하는 오염부하는 44%에 달하여 비점오염원의 오염부하가 심각한 실정이다 (Choi et al., 2006).

다목적댐인 주암호는 1989년 완공되었고, 총 32 km의 유로 연장을 갖으며, 보성강을 비롯하여 동북천, 사평천 및 송광천 등 3개 지류가 합류되면서 이루어진다. 전라남도 순천시, 보성군 및 화순군 경계에 위치한 주암호는 그동안 주변에 특수한 공장지대와 인구가 밀집한 도시가 없어서

접수 : 2011. 5. 25 수리 : 2011. 6. 21

*연락처 : Phone: +82617503297

E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

[†]공동 제1저자

호수의 오염원으로서 농가에서 배출되는 생활하수와 인근 농경지에서 유입되는 배수에 의한 비점오염원이 주를 이루고 있었으나, 최근에 호수 주위에 레저시설과 위락시설이 형성되면서 발생하는 점오염원 및 비점오염원으로 수질오염이 가중되고 있는 실정이다 (Kang et al., 2011; Park et al., 2008).

4대강 중 비점오염원이 차지하는 오염부하의 비율은 영산강·섬진강이 37%로 가장 높은 비율을 보여 비점오염원의 효율적인 관리가 시급한 실정이며, 이에 주암호 등 영산강 수계 물관리 종합대책을 수립하여 하수처리장 방류수를 재처리하고 비점오염원을 처리하기 위한 인공습지를 조성하였으나, 그동안 이들 인공습지는 관리 소홀과 미숙한 운영 등으로 인해 효율적으로 운전이 되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 비점오염원 저감을 위한 신평천 인공습지의 수생태적 특성을 평가하기 위해 수질내 영양염류 처리효율, 수생식물의 무기성분 흡수량 그리고 퇴적물내 이화학적 특성을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

공시원수 신평천 인공습지에 유입되는 공시원수는 마을단위 하수처리장의 방류수와 신평천 하천수가 유입되고 있었으며, 공시원수의 주요 영양염류 평균함량은 Table 1에서 보는 바와 같이, BOD는 평균 0.91 mg L⁻¹, COD는 2.02 mg L⁻¹ 및 T-N 함량은 평균 2.77 mg L⁻¹으로 일반적인 농업 비점오염의 특성과 유사한 경향을 보였다 (Cho, 2009; Seo et al., 2008a).

신평천 인공습지의 특성 신평천 인공습지는 2004년

도에 주암호의 수질개선을 위해 조성한 자유수면형 인공습지 (FWS CWs)로 순천시 송광면 신평하수처리장 하단에 위치하여 있다 (Fig. 1). 습지의 구성은 침강지, 제 1습지 및 제 2습지로 구성되어 있었으며, 침강지에는 큰부들 및 애기부들이 우점 성장하고 있었고, 제 1습지 및 제 2습지에는 달뿌리풀, 갈대 및 갈풀이 성장하고 있었다. 신평천 인공습지의 전체 면적은 12,360 m²이고, 습지 면적은 3,605 m²이며, 처리 유량은 평균 800 m³ day⁻¹로 처리 유량에 따른 체류시간 (HRT)은 평상시의 경우 4.4 day 정도이며, 강우시의 경우 2.5 day 정도로 유지되도록 설계되었다 (Cho, 2008).

실험방법 및 조사시기 신평천 인공습지의 수질학적 특성을 평가하기 위하여 2008년 4월부터 10월까지 월 1회 주기로 채취지점별로 영양염류의 수처리효율을 조사하였고, 수생식물의 수생태학적 특성을 평가하기 위해 2008년 4월, 8월 및 10월에 우점종인 갈대 및 부들을 채취하여 건물중 등 생육상황과 식물체내 무기성분 함량을 조사하였다. 신평천 인공습지에서 퇴적물의 수생태학적 특성을 평가하기 위해 2008년 4월 (봄), 8월 (여름) 및 10월 (가을)로 구분하여 습지처리 단계별로 유입부 (1st 처리조), 중간부 (2nd 처리조) 및 유출부 (3rd 처리조)에서 퇴적물의 화학적 특성과 microbial biomass C, N 및 P 함량을 각각 조사하였다. 인공습지에 유입되는 비점오염원은 시기 및 계절에 따라 오염물질의 특성이 변하기 때문에 계절별 인공습지의 수생태적 특성을 평가하고자 시기별 수질, 식물체 및 퇴적물 시료를 3반복으로 채취한 후 분석하였다. 신평천 인공습지에서 겨울철인 12월부터 2월까지 유입수가 없어 운전이 정지되는 관계로 인해 수질, 식물체 및 토양의 시료채취가 불가능하였다.

Table 1. Chemical characteristics of raw water used.

Water	BOD	COD	SS	T-N	T-P
Average	0.91	2.02	1.75	2.77	0.19
SD	0.45	0.64	1.31	1.74	0.05

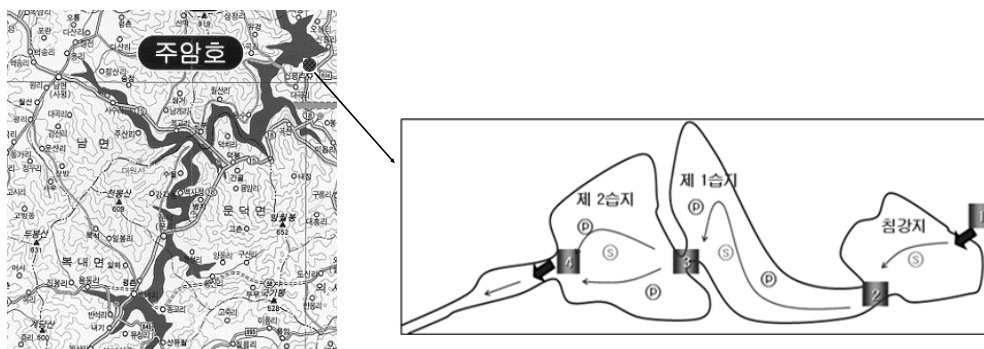


Fig. 1. Location and schematic of Sinpyongcheon constructed wetlands, and Sampling sites (■ : sampling sites for water).

분석방법 수질 분석은 수질오염공정시험법 (Choi et al., 2004) 및 APHA의 standard method (APHA, 1995)에 준하여 다음과 같이 하였다. 채취된 수질의 BOD의 분석은 윙클러아자이드하나트륨변법을 사용하였고, COD는 중크롬산 칼륨법, SS의 분석은 유리섬유여과법을 사용하였다. T-N의 분석은 자외선 흡광광도법을 사용하였고, T-P의 분석은 아스코르빈산 환원법을 사용하였다. 식물체 및 토양 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 organic matter (O.M)은 Tyurin 법, T-N은 Kjeldahl 증류법, T-P는 Vanadate법 (UV2550PC, Perkinelmer)을 각각 사용하였다.

결과 및 고찰

수질중 영양염류 처리효율 신평천 인공습지의 시기별 및 습지 구성단계별 유입수 및 유출수의 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 함량변화를 조사하여 수처리 효율을 조사한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 유입원수의 BOD는 0.07~1.47 mg L⁻¹ 범위로 평균 0.91 mg L⁻¹으로 시기별 편차가 적은 편이었으며, 유출수 중의 평균 BOD는 0.78 mg L⁻¹으로 유입수의 평균 BOD와 큰 차이 없었다. 신평천 인공습지에서 평균 BOD 처리효율은 약 14%이었고, 4월부터 7월

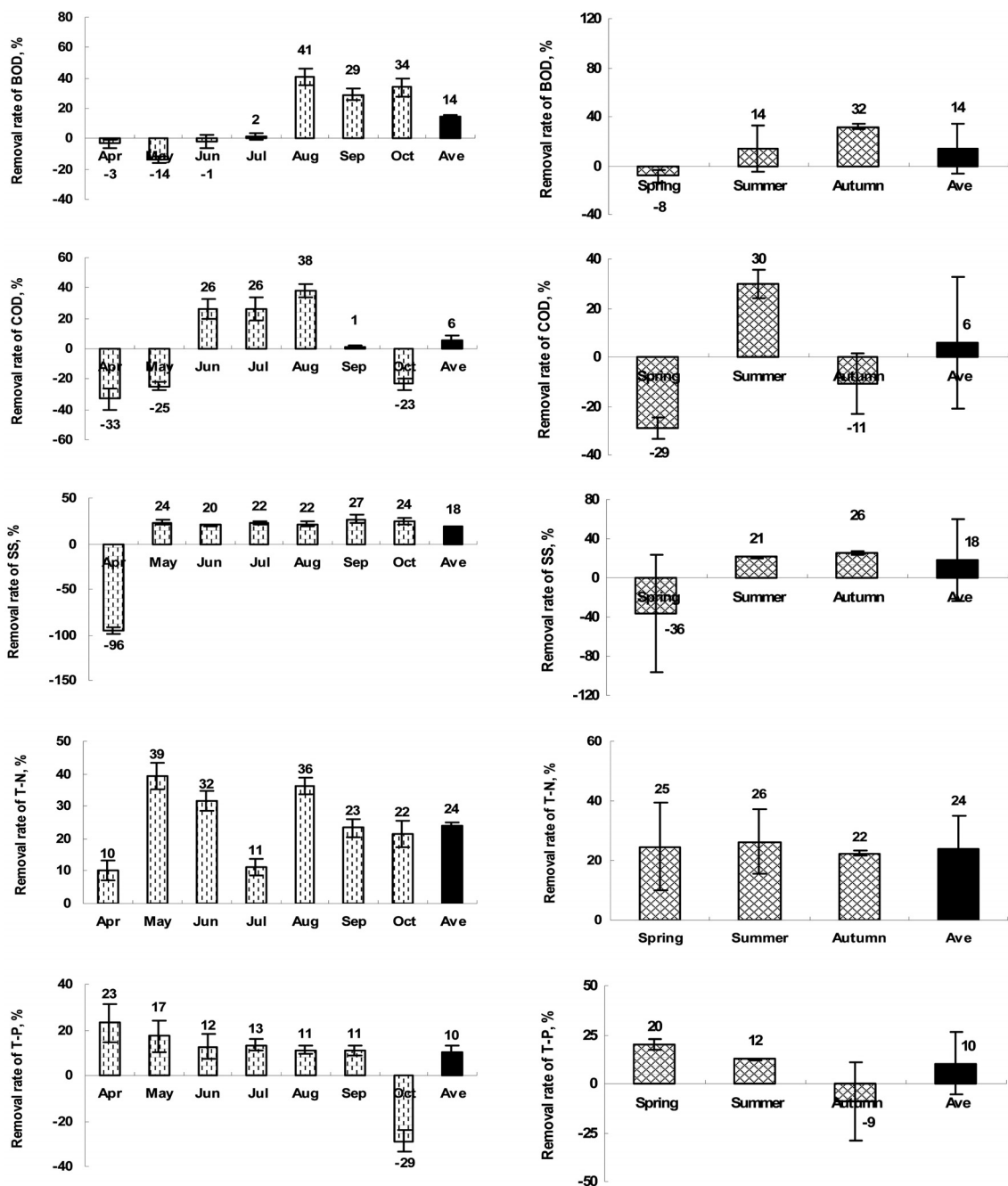


Fig. 2. Monthly and seasonal removal rates of BOD, COD, SS, T-N, and T-P in effluent in Sinpyongcheon constructed wetlands.

Table 2. Organic matter (O.M), T-N, and T-P contents in sediment in Sinpyongchon constructed wetlands.

Date (Month/day)	Treatment stage	O.M		T-N	T-P
		----- % -----			mg kg ⁻¹
4/5 (April)	1 st	5.7 (± 2.31)		0.14 (± 0.08)	41.2 (± 5.80)
	2 nd	4.7 (± 1.62)		0.10 (± 0.05)	39.4 (± 10.0)
	3 rd	2.9 (± 0.97)		0.06 (± 0.02)	13.4 (± 8.21)
8/28 (August)	1 st	5.1 (± 1.84)		0.18 (± 0.03)	48.4 (± 5.69)
	2 nd	4.8 (± 0.95)		0.08 (± 0.01)	16.3 (± 5.62)
	3 rd	3.8 (± 1.45)		0.08 (± 0.01)	19.2 (± 1.46)
10/27 (October)	1 st	5.2 (± 0.64)		0.15 (± 0.10)	57.7 (± 9.46)
	2 nd	4.2 (± 0.92)		0.09 (± 0.02)	19.1 (± 5.11)
	3 rd	3.6 (± 1.10)		0.08 (± 0.03)	19.9 (± 4.77)

까지는 -14%~2%로 평균 BOD 처리효율보다 낮았다. 이와 같은 결과는 동절기인 12월부터 습지내 수생식물이 대부분 고사하고 수온이 낮아 미생물의 활성이 낮아 3~4월경의 BOD 처리효율이 낮은 것으로 생각된다. 또한, 6~7월의 경우에는 우리나라의 하계 집중적인 강우 특성 때문에 비점오염원의 유입이 증가하여 처리효율이 낮았지만 이후 8월부터 10월까지의 29~41%의 안정적인 처리효율을 보였다. 계절별 방류수 중 BOD 처리효율은 봄, 여름 및 가을에 각각 -8, 14 및 32%로 봄에 처리효율이 가장 낮았으며, 이와 같은 결과는 신평천 인공습지의 경우 10~11월에 수생식물을 제거하여 표면을 덮어 미생물활성을 위한 보온효과를 낼 수 있는 식물체가 없었기 때문으로 생각된다. Seo (2002)는 겨울철에 고사된 수생식물은 인공습지내 표면을 덮어서 미생물 활성이 저해되지 않게 보온효과를 낼 수 있어 이로 인해 겨울철 수처리 효율의 감소폭이 다른 인공습지에 비해 적은 것으로 보고하였다.

유입원수의 COD는 0.60~2.65 mg L⁻¹ 범위로 평균 2.02 mg L⁻¹에서 유출수 중의 평균 COD는 1.90 mg L⁻¹로 유입원수에 비해 약간 낮아졌으며 Choi et al. (2006) 및 Cho (2009)에서 보고한 다른 지역의 인공습지들과 비교하였을 때 상대적으로 약간 낮은 편으로 조사되었다. 이와 같이 유기물 (BOD 및 COD) 함량이 낮은 이유는 수질이 깨끗한 신평천 하천수가 유입되었기 때문으로 판단된다 (Cho, 2008).

월별 COD 처리효율은 -33~38%로 평균 6%의 낮은 처리효율을 보였다. BOD와 마찬가지로 4월 및 5월의 COD 처리효율은 -33 및 -25%로 낮았으며, 10월에는 갈수기로 인하여 비점오염원 유입이 급격히 감소하여 유량확보가 어려워 COD 처리효율이 감소된 것으로 판단된다. 또한, Seo et al. (2006a)의 연구에 의하면 습지내부에 미생물이 생육할 수 있는 영양물질의 공급이 원활하지 않으면 이로 인해 미생물상이 파괴되거나 생육이 급격히 저해되어 수처리 효율이 큰 폭으로 감소하기도 하는 것으로 알려져 있다.

계절별 COD 및 처리효율은 BOD 처리효율과 마찬가지로 봄에 -29%로 유출수의 COD가 유입수의 COD보다 높았으며, 유기물 처리를 위해서는 습지 생태계를 수생태학적인 면에서 유지할 수 있는 수생식물 제거 방안과 동절기 수생식물의 관리가 필요할 것으로 생각된다.

유입원수의 SS 함량은 0.50~4.60 mg L⁻¹ 범위로 다소 차이는 있었으나, 평균 1.75 mg L⁻¹로 약간 낮은 편이었으며, COD 함량과 마찬가지로 유출수 중의 평균 SS 함량이 약간 감소하는 경향이었으나, 특히 7월에는 강우의 영향으로 인해 인공습지 처리조 바닥에 침전된 오염물질이 부상하여 1st 처리조에서 SS 함량이 0.90 mg L⁻¹에서 4.80 mg L⁻¹로 약간 높아진 것으로 판단되어진다. 자유수면형 인공습지에서 SS의 처리는 물의 흐름과 수생식물의 밀도에 의존적이고, 습지내 수생식물의 개체밀도에 영향을 받는다고 Seo et al. (2008a, 2011)가 보고 한 바 있다. 본 실험 조사 대상 신평천 인공습지는 침강지에 수생식물의 개체가 밀집해 있었으며, 안정적인 물의 흐름을 보였다. 신평천 인공습지의 월별 SS 처리효율은 평균 18%로 조사되었으며, 4월에 -96%로 SS 처리효율이 가장 낮았으나, 5월부터 10월까지는 20%이상의 안정적인 처리효율을 보였다. SS 처리효율은 습지내 수생식물의 개체밀도에 밀접한 관련이 있다고 보고되었다 (Brix, 1993; Seo, 2002; Seo et al., 2008a). 신평천 인공습지의 4월에는 습지내에 식생이 자라고 있는 시기였기 때문에 SS의 처리효율이 비교적 낮았고, 5월 이후부터는 식물들의 왕성한 생육으로 인하여 처리효율이 상대적으로 안정적이었던 것으로 생각된다. Seo et al. (2006a)와 Vymazal (2005)의 보고에 의하면, 일반적으로 수생식물은 자유수면형 습지에서 수질의 흐름을 지체시켜 체류시간을 연장시키는 역할을 하여 SS의 침전율을 높여주고, 인공습지 내에서 성장하면서 영양물질을 흡수 이용하여 오염물질을 직접적으로 처리할 뿐만 아니라 미생물에 적합한 생육환경을 제공하여 오염물질의 처리효율을 향상시키는 것

로 알려져 있다. SS의 계절별 방류수 처리효율은 여름과 가을에 20% 이상의 처리효율을 보였으며, 수생식물이 자라고 있는 봄에는 여름과 가을에 비해 낮은 -36%의 효율을 보였다.

유입원수의 T-N 함량은 1.38~6.26 mg L⁻¹ 범위로 시기별로 편차가 큰 편이었으며, 조사기간 내 평균 유입농도는 약 2.77 mg L⁻¹이었다. 습지구성 단계별 T-N 함량 변화는 1st 처리조에서 시기별 평균 농도는 3.65 mg L⁻¹로 10월을 제외하고 모두 증가하였으나, 그 이후 T-N 농도는 꾸준히 감소하는 경향을 보였다.

T-N의 평균 처리효율은 약 24%로서 4월과 7월을 제외한 모든 달에서 20%이상의 안정적인 처리효율을 보였으나, 7월에는 장마철기간으로 강우에 의해 일시적인 비점오염원 부하량이 급격하게 증가하였기 때문에 처리효율이 다른 시기에 비해 낮았던 것으로 보인다. Seo et al. (2008b) 및 Vymazal (2007)에 의하면, 비점오염원의 발생특성은 강우시 일시적으로 부하량이 급격하게 증가하여 상대적으로 질소 농도는 감소되는 경향으로서 실제 오염물질의 처리효율은 감소되나, 처리량적인 측면으로 보면 T-N 처리량은 오히려 약간 증가하게 된다. 신평천 인공습지는 하수처리장

배출수 외에 깨끗한 신평천이 유입되기 때문에 생물학적인 탈질시 충분한 탄소원을 공급할 수 없었기 때문에 처리효율이 낮았던 것으로 생각된다. 계절별 방류수 중 T-N 처리효율은 봄, 여름 및 가을에 각각 25, 26 및 22%의 안정적인 처리효율을 보였지만, Cho (2008)가 보고한 다른 비점오염원 처리를 위한 인공습지에서의 질소 처리효율에 비해 비교적 낮은 처리효율을 보였다.

신평천 인공습지에서 유입원수의 T-P 함량은 0.08~0.32 mg L⁻¹ 범위이고, 평균 약 0.19 mg L⁻¹로서 시기별로 차이가 컸으며, 습지구성단계별 T-P 함량은 점점 감소하는 경향을 보였다. 최종방류수 중 T-P 처리효율은 평균 10%로서 T-N 처리효율과 마찬가지로 낮은 처리효율을 보였다. 특히 4월부터 9월까지의 10%이상의 안정적인 처리효율을 보였으나, 10월에 처리효율이 -29%로 급격히 줄어들었는데, 이러한 결과는 장마시기가 끝나고 비점오염원의 유입량이 줄어들었고, 퇴적물과 토양에 대부분의 인이 흡착하지 못하고 처리되었기 때문으로 생각된다. 계절별 방류수 중 T-P 처리효율도 T-N 처리효율과 비슷한 경향으로 가을에 -9%로 평균보다 낮은 처리효율을 보였다.

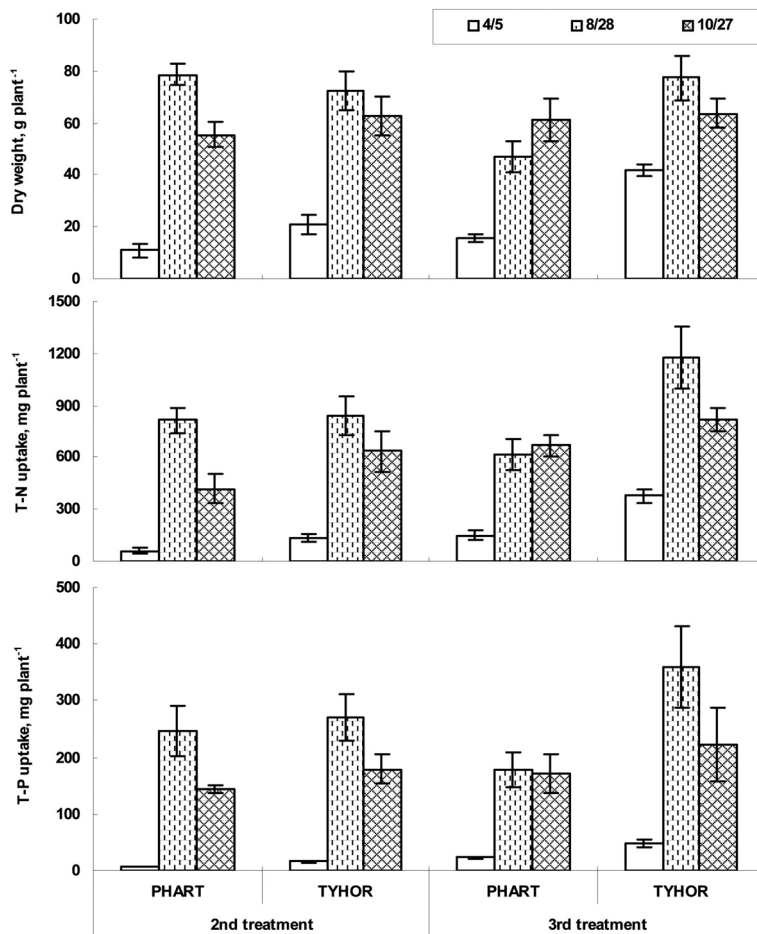


Fig. 3. Dry weights and amounts of T-N and T-P uptakes by water plants in Sinpyongcheon constructed wetlands. (PHART: *Phragmites communis* TRIV, TYHOR: *Typha orientalis* PRESL).

수생식물체내의 무기성분 흡수특성 신평천 인공습지의 주요 수생식물종의 생육시기별 건물생산량과 식물체내 T-N 및 T-P 함량을 이용하여 T-N 및 T-P 흡수량을 산출한 결과는 Fig. 3과 같다. 수생식물체내 T-N 흡수량은 8월에 갈대가 2nd 처리조에서 813 mg plant⁻¹, 부들이 3rd 처리조에서 1,172 mg plant⁻¹로 최대 흡수량을 보였고, T-P 흡수량도 8월에 갈대가 2nd 처리조에서 247 mg plant⁻¹, 부들이 3rd 처리조에서 359 mg plant⁻¹로 최대 흡수량을 보였으며, 전반적으로 부들이 갈대에 비해 T-N 및 T-P 흡수량이 약간 높게 나타났다.

주요 수생식물종의 질소 흡수량은 처리조 모두에서 8월 까지 점점 증가하는 경향이였으며 8월에 최대 질소 흡수량을 보였고, 10월 이후에는 수생식물의 고사로 인해 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 질소 흡수량이 점점 감소하였다. 수생식물 종류별 질소 흡수량은 전체적으로 부들이 갈대에 비하여 질소 흡수량이 높았으며, Seo et al. (2006a)의 인공습지 하수처리장에서 수생식물별 질소흡수량을 조사한 결과에 비해 약간 적은 T-N 및 T-P 흡수량을 보였으나 수생식물별 흡수량 경향은 유사하였다.

일반적으로 인공습지에 유입되는 유입수 중의 질소는 대부분 토양 및 퇴적물 입자 중의 점토 입자에 흡착되어 수생식물에 의해서 흡수되거나 혹은 미생물에 의해 분해 및 탈질 됴으로서 제거되는 것으로 알려져 있다. 또한 유기성 질소는 침전과 여과로 제거된 후 미생물에 의해 서서히 분해되어 암모니아 이온을 방출하는 용존성 아미노산으로 가수분해 되기도 한다. 암모니아는 식물과 미생물이 섭취하기 용이하고, 호기성 조건에서 생물학적 질산화에 의하여 NO₃-N로 전환되기도 한다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 NH₄-N과 NO₃-N로서 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기성 질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로서 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 되는 것으로 알려져 있다 (Seo et al., 2006b;

Cho, 2008). 자유수면형 습지내에서 수생식물은 성장하면서 영양물질을 흡수 이용하여 오염물질을 직접적으로 처리할 뿐만 아니라 미생물에 적합한 생육환경을 제공하여 오염물질의 처리효율을 향상시키는 것으로 알려져 있다 (Seo et al., 2006b; Vymazal, 2005).

주요 수생식물체내 인 흡수량도 질소 흡수량과 비슷한 경향으로 8월까지 인 흡수량이 점점 증가하여 8월에 최대 인 흡수량을 보였다. 주요 수생식물 종류별 인 흡수량도 질소와 마찬가지로 부들이 갈대에 비하여 약간 높았으며, 이 결과는 Seo et al. (2006a)의 결과와도 일치하였다. 일반적으로 식물이 흡수할 수 있는 인은 PO₄, HPO₄ 및 H₂PO₄의 형태이며, 질소의 경우와 마찬가지로 부착미생물이 유기인을 분해함으로써 식물이 흡수할 수 있도록 만들어 준다. 인은 식물 뿌리부의 산화층에서 식물에 의한 흡수가 활발한 반면 환원층에서는 인의 방출이 진행되고, 체류일수가 길어질수록 식물에 의한 인의 흡수량이 많아져 인의 처리효율이 향상되었다고 하였다 (Lee and Kim., 1999).

퇴적물의 화학적 특성 및 microbial biomass 함량 시기별 퇴적물내 유기물 (O.M)함량은 2.9~5.7%범위 (평균 4.4%)로 습지처리조별 유기물 함량은 1st > 2nd > 3rd 처리조 순으로 높았으며, 시기별로는 큰 차이 없이 유사한 경향이였다. T-N 함량은 0.06~0.18% 범위로 평균 약 0.11%로 시기별로 큰 차이 없었으며, 습지처리조별 T-N 함량은 유기물함량과 마찬가지로 각각 1st 처리조에서 높은 경향을 나타냈다. 퇴적물내 T-P의 함량은 13.4~57.7 mg kg⁻¹ 범위로 평균 약 30.5 mg kg⁻¹이었고, 시기별 T-P 평균 함량은 가을 (32.2 mg kg⁻¹)이 봄 (31.3 mg kg⁻¹) 및 여름 (28.0 mg kg⁻¹)에 비해 약간 높았으며, 처리단계별 퇴적물내 T-P 함량은 각 시기별 1st 처리조에서 가장 높았다. Cho (2009)와 Seo et al. (2011)이 보고한 복내 바이오파크 인공습지내 토양의 이화학적 특성과 비교해 보면, 신평천 인공

Table 3. Microbial biomass C, N, and P contents in sediment in Sinpyongcheon constructed wetlands.

Date (Month/day)	Treatment stage	Microbial biomass C, N, and P contents (mg kg ⁻¹)		
		Microbial biomass C	Microbial biomass N	Microbial biomass P
4/5 (April)	1 st	472 (±132)	20.4 (±5.3)	5.9 (±1.2)
	2 nd	421 (±264)	9.7 (±8.3)	3.4 (±1.1)
	3 rd	246 (±102)	2.1 (±2.1)	2.1 (±0.4)
8/28 (August)	1 st	675 (±288)	27.4 (±4.6)	8.7 (±0.5)
	2 nd	506 (±65.6)	6.8 (±4.2)	6.9 (±2.6)
	3 rd	159 (±13.1)	3.8 (±0.6)	1.5 (±0.3)
10/27 (October)	1 st	419 (±120)	22.6 (±10.4)	4.7 (±2.3)
	2 nd	449 (±120)	12.4 (±8.1)	2.2 (±1.5)
	3 rd	237 (±98.4)	8.3 (±2.1)	1.4 (±0.7)

습지내 퇴적물내 O.M, T-N 및 T-P의 시기별 함량은 큰 차이 없이 유사하였다.

신평천 인공습지에서 처리단계별 microbial biomass 함량은 Table 3에서 보는 바와 같이 microbial biomass C의 경우 1st, 2nd 및 3rd 처리조에서 각각 419~675, 421~506 및 159~246 mg kg⁻¹이었으며, microbial biomass N의 경우 1st, 2nd 및 3rd 처리조에서 각각 20~27, 7~12 및 2~8 mg kg⁻¹이었고, microbial biomass P의 경우 1st, 2nd 및 3rd 처리조에서 각각 5~9, 2~7 및 1~2 mg kg⁻¹이었다. 처리 단계별 microbial biomass C/N/P의 비율은 1st, 2nd 및 3rd 처리조에서 각각 78~110/3~6/1, 73~204/1~6/1 및 106~169/1~6/1로 biomass C의 비율이 습지내에서 처리단계가 증가됨에 따라 증가되는 경향이였다. 계절별 microbial biomass C/N/P의 비율은 4월, 8월 및 10월에 각각 80~124/1~3/1, 73~106/1~3/1 및 89~204/5~6/1로 biomass C의 비율이 다른 시기에 비해 10월에 높았다. Microbial biomass C/N/P의 비율은 시기별 및 처리단계별로 다소 차이가 있었으나 전반적으로 질소 및 유기물 함량이 낮아 인공습지에서 영양염류의 제한인자로 사용될 것으로 판단된다. Seo (2005)에 의하면, 인공습지에서 미생물에 의해 영양염류를 생물학적으로 처리할 경우 최적 BOD/T-N/T-P의 비율이 100/5/1정도라고 하였는데, 본 신평천 인공습지도 이들 기준과 비교해 볼 때 전반적으로 유기물과 질소의 함량이 약간 부족한 것으로 판단된다.

요 약

비점오염원 저감을 위한 신평천 인공습지의 수생태적 특성을 평가하기 위해 수질내 영양염류 처리효율, 수생식물의 무기성분 흡수량 그리고 퇴적물내 화학적 특성을 평가하였다. 유입원수의 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P의 함량은 각각 0.07~1.47, 0.60~2.65, 0.50~4.60, 1.38~6.26 및 0.08~0.32 mg L⁻¹범위이었으며, 평균 처리효율은 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P가 각각 14, 6, 18, 24 및 10%로서 전반적으로 영양염류의 처리효율이 낮았다. 수생식물내 T-N 흡수량은 8월에 갈대가 2nd 처리조에서 813 mg plant⁻¹, 부들이 3rd 처리조에서 1,172 mg plant⁻¹로 최대 흡수량을 보였고, T-P 흡수량도 8월에 갈대가 2nd 처리조에서 247 mg plant⁻¹, 부들이 3rd 처리조에서 359 mg plant⁻¹로 최대 흡수량을 보였다. 퇴적물내 O.M, T-N 및 T-P 함량은 1st > 2nd > 3rd 처리조 순으로 높았으며, 시기별로는 큰 차이 없이 유사한 경향이였다. 퇴적물내 처리단계별 microbial biomass C/N/P의 비율은 1st, 2nd 및 3rd 처리조에서 각각 78~110/3~6/1, 73~204/1~6/1 및 106~169/1~6/1이었다. 이상의 결과를 미루어볼 때 신평천 인공습지는 수생태적 측면에서 전

반적으로 유입수의 오염부하량이 낮아 습지생태계 유지를 위한 영양염분이 부족하여 향후 수생태계의 미생물과 수생 식물 안정화를 위한 운영방안이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 영산강·섬진강 수계관리기금의 지원을 받아 수행한 연구결과의 일부임. 또한 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 [NRF-2010-0025548, NRF-2010-359-F00003]과 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업 [10037331, 지능형 BT-NT-IT 융합 플랫폼 기반 수처리 핵심기술 개발]의 일환으로 수행하였음.

인 용 문 헌

- APHA, AWWA, WCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC, pp. 4-112.
- Brix., H. 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands, system design, removal processes, and treatment performance, 9~22. In, Moshiri. G. A. (ed.), Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, Lewis publishers, Boca Raton, FL.
- Cho, J.S. 2008. Alternative of Optimum Management and Analysis of Removal Efficiency for Treating the Wastewater in Constructed Wetland to Upper Region of Juam Lake. Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, Gwangju, Korea.
- Cho, J.S. 2009. Selection of standard model for installing constructed wetlands suitable for watershed characteristics. Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, Gwangju, Korea.
- Choi, K.C., O.U. Kwun, Y.D. Kim, Y.H. Kim, W.S. Lee, J.Y. Lee, S.J. Jun, and S.K. Jung. 2004. Annotation for standard methods of water quality. printed in Dong Hwa Technology Publishing Co.
- Choi, S.H., Y. An, and H.I. Kim. 2006. Evaluation of water purification in the constructed wetland. Korean Society on Water Quality and Korean Society of Water Wastewater Meeting Conference Proceedings, Korea National Open University, Incheon, Korea p. 349-356.
- Kang, S.W., D.C. Seo, M.J. Han, J.H. Han, B.J. Lim, J.H. Park, K.P. Kim, Y.J. Lee, I.K. Choi., Y.H. Lee, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2011. Characteristics of nutrients release by submerged plants in flood control reservoirs within Juam lake. Korean J. Soil Sci. Fert. 44:271-277.

- Kwun, S.K. 1998. Management improvement and perspective on nonpoint sources of water pollution in Korea. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* 20:1497-1510.
- Lee, H.D. and C.H. Bae. 2002. Runoff characteristics and strategies for non-point source reduction. *Korean Soc. Water Quality* 18:569-576.
- Lee, Y.D., and H.H. Kim. 1999. A study on the advanced treatment of wastewater by plants. *J. Environ. Sci.* 8:75-81.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Park, W.Y., D.C. Seo, J.S. Im, J.K. Park, J.S. Cho, J.S. Heo, and H.S. Yoon. 2008. Optimum configuration filter media depth and wastewater load of small-scale constructed wetlands for treating the hydroponic waste solution in greenhouse. *Korean J. Environ. Agric.* 27:217-224.
- Seo, D.C. 2002. Development of sewage treatment apparatus by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
- Seo, D.C. 2005. Development of treatment process of biological nitrogen and phosphorus in sewage treatment plant by natural purification system. Doctor Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
- Seo, D.C., B.I. Jang, I.S. Jo, S.C. Lim, H.J. Lee, J.S. Cho, H.C. Kim, and J.S. Cho. 2006a. Selection of optimum water plant in constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment. *Korean J. Environ. Agric.* 25:25-33.
- Seo, D.C., M.R. Park, H.J. Kim, I.J. Cho, H.J. Lee, S.J. Sung, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2006b. Development of sewage treatment apparatus for detached house in agricultural village by natural purification method. *Korean J. Environ. Agric.* 25:202-210.
- Seo, D.C., H.J. Kim, W.Y. Park, J.S. Im, S.H. Hwang, C.H. Park, J.H. Choi, H.J. Lee, D.J. Lee, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2008a. Behavior and decomposition velocity of pollutants on various forms from domestic sewage in small-scale sewage treatment plant by natural purification method. *Korean J. Environ. Agric.* 27:18-26.
- Seo, D.C., W.Y. Park, J.S. Im, C.H. Park, H.J. Lee, H.C. Kim, S.W. Lee, D.J. Lee, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2008b. A study on the improvement of treatment efficiency for nitrogen phosphorus by improved sewage treatment process in constructed wetland by natural purification method. *Korean J. Environ. Agric.* 27:27-34.
- Seo, D.C., S.W. Kang, H. Kim, M.J. Han, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, Y.J. Lee, I.W. Choi, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2011. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Boknae bio-park constructed wetlands. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:263-270.
- Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecol. Eng.* 25:478-490.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrient in various types of constructed wetland. *Sci. Total Environ.* 380:48-65.