

## 비점오염원 저감을 위한 죽산천 인공습지의 오염물질 정화효율 평가

최익원<sup>†</sup> · 서동철<sup>†</sup> · 강세원 · 이상규 · 서영진 · 임병진<sup>1</sup> · 박종환<sup>1</sup> · 김갑순<sup>1</sup> · 허종수<sup>2</sup> · 조주식<sup>\*</sup>

순천대학교 생물환경학과, <sup>1</sup>국립환경과학원 영산강 물환경연구소, <sup>2</sup>경상대학교 응용생명과학부  
(BK21 농업생명산업 글로벌 인재 육성 사업단) & 농업생명과학원

### Evaluation of Treatment Efficiencies of Pollutants in Juksancheon Constructed Wetlands for Treating Non-point Source Pollution

Ik-Won Choi<sup>†</sup>, Dong-Cheol Seo<sup>†</sup>, Se-Won Kang, Sang-Gyu Lee, Young-Jin Seo, Byung-Jin Lim<sup>1</sup>,  
Jong-Hwan Park<sup>1</sup>, Kap-Soon Kim<sup>1</sup>, Jong-Soo Heo<sup>2</sup>, and Ju-Sik Cho<sup>\*</sup>

Department of Bio-Environmental Sciences, Sunchon National University,  
<sup>1</sup>Yeongsan River Environmental Research Center, <sup>2</sup>Division of Applied Life Science  
(BK21 program) & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University

To evaluate the water quality in Juksancheon constructed wetlands for treating non-point source pollution, the removal rates of nutrients in water and the total amounts of T-N and T-P uptakes by water plants were investigated. Chemical characteristics of T-N and T-P in sediment were investigated. The concentrations of BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), SS (Suspended Solids), 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<sup>-1</sup>, respectively. The removal rates of BOD, COD, SS, T-N, and T-P were -10, 51, 66, -3 and 5%, respectively. The maximum amount of T-N uptake by water plants in August was 368.7 mg plant<sup>-1</sup> in the 2<sup>nd</sup> treatment stage by *Nymphoides peltata*, 1314.6 mg plant<sup>-1</sup> in the 3<sup>rd</sup> treatment stage by *Iris pseudacorus*, 1160.4 mg plant<sup>-1</sup> in the 4<sup>th</sup> treatment stage by *Nymphaea tetragona* GEORGI, respectively. The maximum amount of T-P uptake by water plants in August was 121.7 mg plant<sup>-1</sup> by *Nymphoides peltata* in the 2<sup>nd</sup> treatment stage, 268.7 mg plant<sup>-1</sup> by *Iris pseudacorus* in the 3<sup>rd</sup> treatment stage and 212.0 mg plant<sup>-1</sup> by *Nymphaea tetragona* GEORGI in the 4<sup>th</sup> treatment stage, respectively. Organic matter contents in sediments were not different. Contents of T-N and T-P in sediments were higher in spring. Microbial biomass C:N:P ratios in sediments in spring, summer, autumn and winter were 117~140:1~4:1, 86~126:5~6:1, 68~101:2~6:1 and 47~138:2~4:1, respectively. We could conclude that Juksancheon constructed wetlands show high removal efficiencies of COD and SS. However, improvements of management in winter season should be considered to improve the removal efficiencies of pollutants.

**Key words:** Juksancheon, Pollutants, Wetlands, Removal efficiency

## 서 언

최근 농촌지역의 소하천이나 저수지의 저수구역으로 유입되는 점오염원과 비점오염원은 수온이 상승하는 여름에서 초가을까지 부영양화를 빈번하게 일으키는 것으로 알려져 있다 (Choi et al., 2011; Kang, 2012). 전라남도에 위치한 주암호의 오염원으로 농가에서 배출되는 생활하수와 인근 농경지에서 유입되는 배수에 의한 비점오염원이 주를 이루고 있었으나, 최근에 농촌지역의 소비생활의 변화에 따라

생활환경 등이 변화하여 호수 주위에 레저시설과 위락시설이 형성되면서 발생하는 점오염원 및 비점오염원으로 인한 수질악화가 문제시 되고 있다 (Kang, 2012; Kang et al., 2011; Park et al., 2008). 이에 주암호 등 섬진강 수계 물관리 종합대책을 수립하였으며 수질개선 방안으로 다양한 형태의 인공습지를 조성하였다. 조성된 인공습지는 질소와 인을 처리하는데 일차적 목적을 두고 있다. 인공습지에서 질소 제거의 주요기작은 유기질소의 침전과 암모니아성 질소의 분해를 통한 다른 질소 형태로의 변환, 암모니아의 휘발, 식물과 조류를 포함한 미생물에 의한 용존성 질소의 흡수, 질산화 및 탈질이다 (Kadlec and Wallace, 2008). 그 중 대부분은 생물학적 탈질작용에 의해서 제거되며, 일부분이

접수 : 2012. 7. 19 수리 : 2012. 8. 17

<sup>†</sup>공동 제1저자

\*연락처 : Phone: +82617503297

E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

식물체의 흡수에 의해 제거된다. 탈질반응의 경우 온도에 영향을 많이 받으며 20~30°C 사이의 높은 온도를 유지할 경우 탈질반응이 활발한 것으로 알려져 있다 (Son et al., 2012). 인 제거 주요기작은 질소와 달리 대기 중으로 이동이 거의 일어나지 않고 수착 (sorption), 생체저장 (biomass storage), 잔여물 묻힘 (residual burial), 침전 (sedimentation), 변환 (transformation) 및 저장공간 이동 (movement)이 주요기작으로 질소에 비해서 상대적으로 낮은 경우가 대부분이다 (Yang, 2012).

인공습지는 자연생태계의 일부분을 그대로 이용하기 때문에 오염물질처리에 대한 비용이 적게 든다는 장점이 있으며, 오염물질의 제거에 효과적이기 때문에 하수처리장 방류수를 재처리하고 비점오염원을 처리하기 위한 방안으로 많이 이용되고 있다 (Choi et al., 2011; Kim, 2010). 하지만 현재까지 주암호의 비점오염원 유입을 저감하기 위해 조성된 인공습지들은 관리 소홀과 미숙한 운영 등으로 인해 습지로서 기능을 원활히 수행하지 못하고 있어 이에 대한 적절한 운영방안이 마련되어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 비점오염원 저감을 위한 죽산천 인공습지의 오염물질 정화효율을 평가하기 위해 죽산천 인공습지에서 시기별 정화효율, 수생식물의 생육특성 및 퇴적물의 화학적인 특성을 조사하였다.

### 재료 및 방법

**공시원수** 죽산천 인공습지에 유입된 원수의 수질 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 BOD는 평균 1.28 mg L<sup>-1</sup>,

COD는 평균 5.13 mg L<sup>-1</sup>, SS 함량은 평균 10.90 mg L<sup>-1</sup>, T-N 함량은 평균 1.87 mg L<sup>-1</sup> 및 T-P 함량은 평균 0.06 mg L<sup>-1</sup> 이었다.

**죽산천 인공습지 특성** 죽산천 인공습지의 위치와 구성도는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 죽산천 인공습지는 마을 하수 처리수와 인근지역 비점오염물질을 처리하기 위해 2005년 5월에 전남 보성군 문덕면 죽산리에 설치되었다. 죽산천 인공습지의 총 부지면적은 6,900 m<sup>2</sup> (습지 4,900 m<sup>2</sup>) 이었고, 자유수면형 (FWS, 수생식물정화) 인공습지를 적용하였다. 처리용량은 4,800 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup> (강우 시 기준)이었다. 본 인공습지는 침강저류지 (Fore bay), 하중도 (1<sup>st</sup>), 얇은습지 (2<sup>nd</sup>, 4<sup>th</sup>, 6<sup>th</sup>)와 깊은습지 (3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup>)의 다단계 식생습지 및 침전지 (Setting basin)로 구성되어 있다 (Cho et al., 2009). 각 단계별 주요 수생식물로 침강저류지는 마름 60%, 갈대 35%, 1<sup>st</sup> 처리조는 노랑어리연꽃 60%, 수련 35%, 갈대 5%, 2<sup>nd</sup> 처리조는 노랑어리연꽃 70%, 연 25%, 사마귀풀 5%, 3<sup>rd</sup> 처리조는 노랑어리연꽃 75%, 연 20%, 올방개 10%, 4<sup>th</sup> 처리조는 수련 90%, 부들 5%, 5<sup>th</sup> 처리조는 노랑꽃창포 30%, 6<sup>th</sup> 처리조는 갈대 60%, 노란꽃창포 15%, 부들 10%, 침전지는 갈대 70%, 노랑어리연꽃 10%, 부들 5%로 각각 우점하여 분포하였다 (Cho et al., 2009).

**실험방법 및 조사 시기** 죽산천 인공습지의 수질학적 특성을 평가하기 위해서 2008년 4월부터 2009년 3월까지 매월 1회 주기로 채취지점별로 영양염류의 수처리효율을 조사하였고, 수생식물의 수생태학적 특성을 평가하기 위해

Table 1. Chemical characteristics of raw water used (n=12).

Statistic	BOD	COD	SS	T-N	T-P
	----- mg L <sup>-1</sup> -----				
Average	1.28	5.13	10.90	1.87	0.06
Standard deviation	0.39	2.95	9.58	0.64	0.04

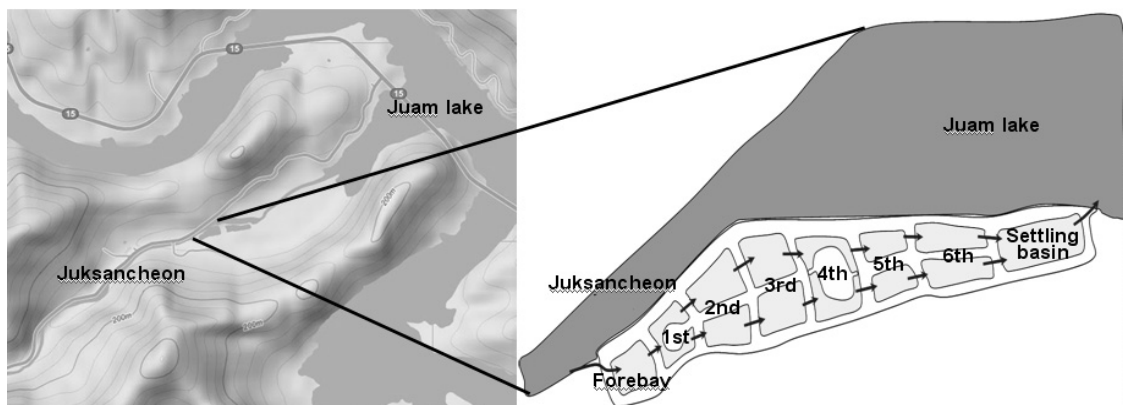


Fig. 1. Location and schematic of Juksancheon constructed wetlands.

2008년 4월, 6월, 8월 및 10월에 우점종인 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포 및 수련 등 3종을 채취하여 건물중 등 생육상황과 식물체내 무기성분 함량을 조사하였다. 죽산천 인공습지에서 퇴적물의 수생태학적 특성을 평가하기 위해 2008년 4월, 8월, 10월 및 12월로 구분하여 습지처리 단계별로 유입부, 중간부, 유출부에서 퇴적물의 화학적 특성과 microbial biomass C, N, 및 P 함량을 각각 조사하였다 (Brookes et al., 1985; Jenkinson, 1988; Vance et al., 1987).

**분석방법** 수질 분석은 수질오염공정시험법 (Choi et al., 2004) 및 APHA의 Standard method (APHA, 1995)에 준하여 BOD의 분석은 잉클리아자이드화나트륨변법을 사용하였고, COD는 중크롬산 칼륨법, SS의 분석은 유리섬유 여과법을 사용하였으며, T-N 및 T-P의 분석은 자외선 흡광광도법 (UV2550PC, Perkin-Elmer) 및 아스코르빈산 환원법 (UV2550PC, Perkin-Elmer)으로 분석하였다. 식물체 및 토양 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체분석법 (NIAST,

2000)에 준하여 유기물은 Tyurin법, T-N은 Kjeldahl중류법, T-P는 Vanadate법 (UV2550PC, Perkin-Elmer)을 각각 사용하였다.

### 결과 및 고찰

**오염물질 처리효율** 죽산천 인공습지의 수처리 효율을 평가하기 위하여 2008년 4월부터 2009년 3월까지 각 계절별 평균 수처리 효율을 비교하였다 (Fig. 2). 연평균 최종 방류수중 BOD 처리효율은 -10% 정도였고, 방류수중 계절별 BOD처리효율은 가을철이 약 44%, 여름철이 32%로 높았으며, 봄과 겨울철은 -77%와 -14%로 마이너스 효율을 보였다. 연평균 최종 방류수중 COD 처리효율은 51% 정도로 높게 나타났다. 방류수중 계절별 COD처리효율은 가을철이 약 72%, 여름철이 35%로 높았으며, 봄과 겨울철은 -37%와 -13%로 마이너스 효율을 보였다. 이와 같이 유기성 오염물질의 지표인 BOD와 COD의 처리효율은 전반적으로 기온이

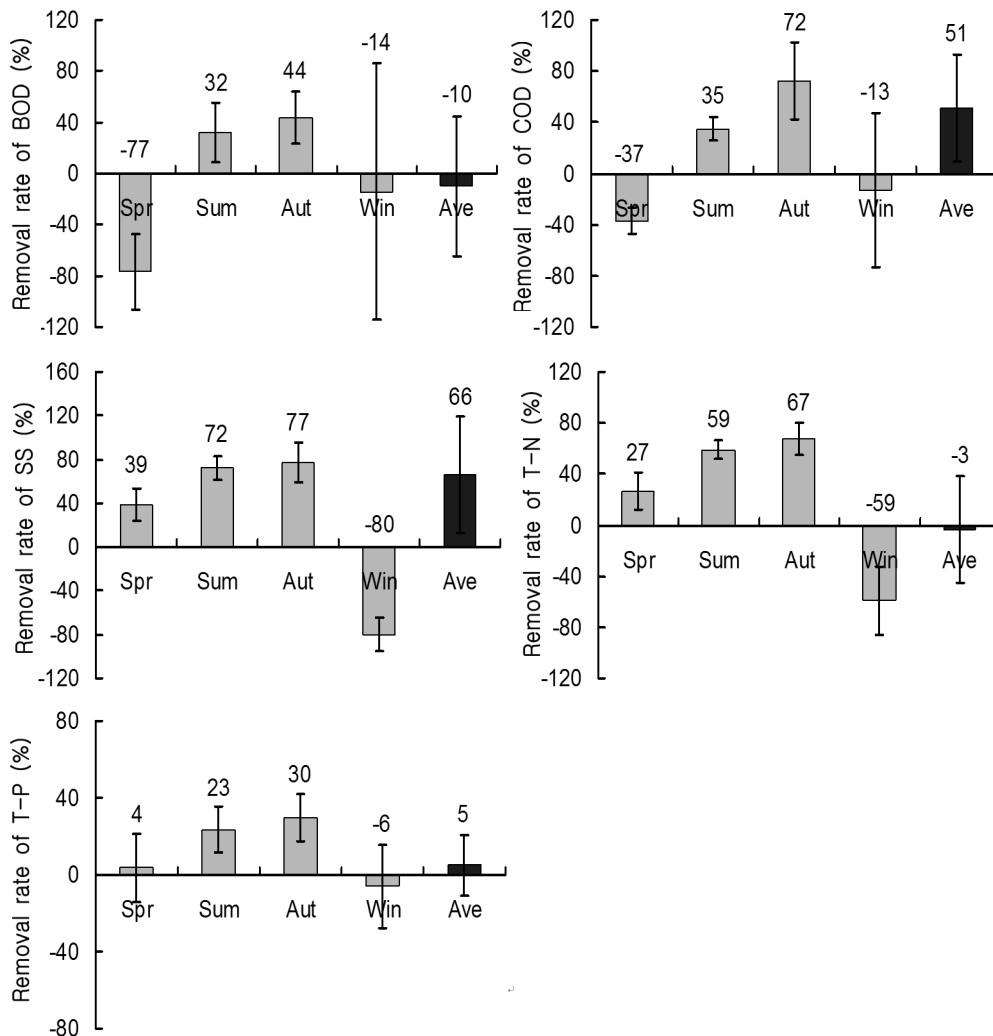
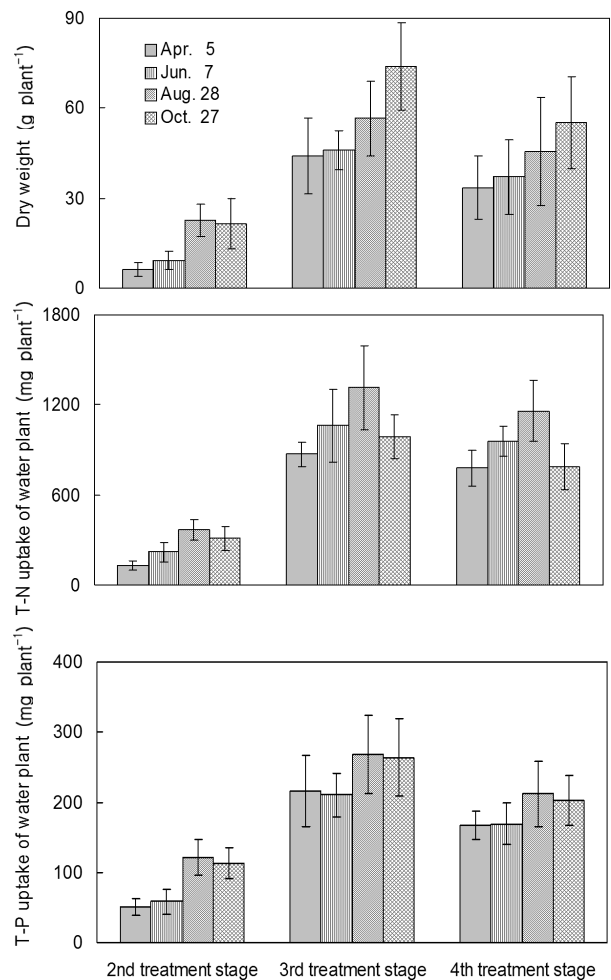


Fig. 2. Monthly and seasonal removal rates of BOD, COD, SS, T-N and T-P in effluent in Juksancheon constructed wetlands.

높고 유입수량이 풍부하고 식물생육이 왕성한 여름철과 가을철은 높고 봄철과 겨울철은 낮았다. 우리나라는 하절기에 강우가 집중되는 반면, 갈수기인 봄, 가을, 겨울철에는 비점 오염원 부하량이 급격히 감소하여 습지내 미생물이 생육할 수 있는 영양물질의 공급이 원활하지 않아 미생물상이 파괴되고 생육이 더욱 저해되는 경우가 있으며 (Seo et al., 2011a), 기온저하로 인한 미생물 활성저하 및 식물체 고사에 의해서 수처리효율이 감소되는 경우가 있다 (Seo et al., 2011b). 최종 방류수 중 연평균 SS에 대한 처리효율은 66% 정도였으나, SS의 계절별 처리효율은 식물체가 고사되고 제거된 시기인 겨울철은 -80%로 마이너스 처리효율은 나타났다. 수생식물의 생장하는 봄부터는 SS 처리효율이 증가하여 봄에는 39%였고, 여름에는 72%, 가을에는 77%로 상당히 높게 나타났다. 인공습지내 SS 처리효율은 수생식물의 생육과 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 수생식물은 습지에서 오염물질의 체류시간을 길게 하여 SS 처리효율을 높여 주고, 또한 미생물에 적합한 생물환경을 제공하여 오염물질의 처리효율을 향상시키는 역할을 한다 (Seo et al., 2011a). 죽산천 인공습지는 여름철에 수생식물의 생육이 왕성하여 주암호 주변 습지에 비해 SS처리효율이 77%로 높은 수준을 나타내었다 (Cho et al., 2009). 최종 방류수 중 연평균 T-N의 처리효율은 -3%정도였고, 계절별 방류수 중 T-N의 처리효율은 봄, 여름 및 가을에 각각 약 27%, 59% 및 67%로 비교적 안정한 처리효율을 보였으며 겨울철에는 -59%로 마이너스 효율을 나타내었다. 일반적으로 유입수 중의 질소 성분은 대부분 습지토양에 흡착되어 수생식물에 의해서 흡수되거나 미생물에 의해 분해 및 탈질 됨으로서 제거되는 것으로 알려져 있는데 (Seo et al., 2011a), 겨울에는 습지내 수생식물이 대부분 고사하거나 제거되었고 낮은 수온으로 인하여 미생물의 활성이 낮아져서 질소제거 기작이 제대로 이루어지지 못하여 효율이 낮아진 것으로 판단된다 (Seo et al., 2011b). 최종 방류수 중 연평균 T-P의 처리효율은 5%이었고, 계절별 방류수중 T-P의 처리효율은 봄, 여름 및 가을에는 각각 약 4%, 23% 및 30%로 안정적인 처리 효율을 보였으나 겨울에는 -3%로 마이너스 효율을 보였다. 일반적으로 수중의 인 성분은 토양입자나 기타 입자에의 흡착 (Kadlec, 1997; Tanner et al., 1998), 그리고 식물에 의한 흡수 (Greenway et al., 1999), 미생물에 의한 분해 (Newbold et al., 1983; Reddy et al., 1999) 등으로 생물학적으로 처리가 가능하다. 인공습지에서 인 처리의 주요기능은 미생물의 분해, 여과와 흡착인데 기온이 낮아지면서 미생물의 활성이 저하되어서 분해가 제대로 이루어 지지 못하여 효율이 낮아지고 (Seo et al., 2006; Vymazal, 2005), 부하량이 처리조의 용량을 초과할 경우에 누적되었던 인 성분이 세척에 의해서 용출되어 오히려 유출수의 농도가 높게 나타날 수 있다 (Gerrites, 1993).

**수생식물체내의 무기성분 흡수특성** 죽산천 인공습

지의 주요 수생식물종의 생육시기별 건물 생산량과 식물체내 T-N 및 T-P 함량을 이용하여 T-N 및 T-P 흡수량을 산출한 결과는 Fig. 3과 같다. 죽산천 인공습지에 생육하는 주요 우점 수생식물은 다년생 수초인 노랑어리연꽃, 노랑꽃창포 및 수련 등 3종이었으며, 이들 수생식물들의 생육시기에 따른 건물중과 무기성분 흡수량을 각각 조사하였다. 생육시기에 따른 건물중은 2<sup>nd</sup> 처리조의 노랑어리연꽃이 4월부터 8월까지 전체적으로 증가하였고 10월부터는 계절적인 영향으로 인해 감소하였다. 3<sup>rd</sup> 처리조의 노랑꽃창포와 4<sup>th</sup> 처리조의 수련은 4월부터 10월까지 전체적으로 증가하였으며 기온저하로 인한 감소는 없었다. 주요 우점 수생식물 중에서는 노랑꽃창포의 건물중이 가장 높았다. 주요 우점 수생식물의 질소 (N) 흡수량은 모든 처리조에서 8월까지 증가하여 2<sup>nd</sup> 처리조에서 노랑어리연꽃이 368.7 mg plant<sup>-1</sup>, 3<sup>rd</sup> 처리조에서 노랑꽃창포가 1314.6 mg plant<sup>-1</sup>, 4<sup>th</sup> 처리조에서 수련이 1160.4 mg plant<sup>-1</sup>로 최대 흡수량을 나타내었고 10월 이후에는 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 흡수량이 다시 감소하였다. 식물이 질소를 이용하기 위해서는 미생물이



**Fig. 3. Dry weight and amount of T-N and T-P uptakes by water plant in Juksancheon constructed wetlands.**

유기성 질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는  $\text{NH}_4\text{-N}$ 과  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 형태로 전환시켜 줌으로서 식물이 흡수하게 되는 것으로 알려져 있다 (Seo et al., 2011a). 주요 우점 수생식물의 인 (P) 흡수량도 질소와 유사한 경향으로 흡수량이 8월까지 증가하여 2<sup>nd</sup> 처리조에서 노랑어리연꽃이  $121.7 \text{ mg plant}^{-1}$ , 3<sup>rd</sup> 처리조에서 노랑꽃창포가  $268.7 \text{ mg plant}^{-1}$ , 4<sup>th</sup> 처리조에서 수련이  $212.0 \text{ mg plant}^{-1}$ 로 최대 흡수량을 나타내었고 10월 이후에는 수생식물의 잎과 줄기가 고사하여 흡수량이 감소하였다. 주요 수생식물의 인 (P) 함유량도 질소 (N) 함유량과 마찬가지로 노랑꽃창포와 수련이 높았는데 그 중에서 노랑꽃창포가 가장 높았고 노랑어리연꽃은 함유량이 상당히 낮았다. 인은  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  및  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 의 형태에서 식물이 흡수가 가능하며, 유기인을 미생물이 분해함으로써 식물이 쉽게 이용할 수 있다. 인은 식물 뿌리부의 산화층에서 식물에 의한 흡수가 활발한 반면 환원층에서는 인의 방출이 진행되고, 체류시간이 길수록 식물에 의한 인의 흡

수량이 많아져서 인의 처리효율이 향상된다 (Seo et al., 2011a).

**퇴적물의 화학적 특성 및 microbial biomass 함량** 죽산천 인공습지내 퇴적물의 시기에 따른 화학적 특성을 조사한 결과는 Table 2와 같다. 시기별 퇴적물내 유기물 (O.M) 함량은 3.1~4.7% 범위이었다. 유기물 함량은 4월, 6월, 8월, 10월 및 12월에 3.1~4.6, 2.8~4.3, 3.5~4.5, 3.8~4.7 및 3.6~4.5% 범위로 시기별로 차이가 거의 없었다. 시기별 퇴적물내 T-N 함량은 0.08~0.31% 범위이었다. 4월에는 T-N 함량이 0.08~0.31% 범위로 조금 높았고, 여름철인 6월에 0.11~0.17% 범위로 낮아져서 8월, 10월 및 12월의 T-N 함량이 0.08~0.14% 범위, 0.09~0.16% 범위 및 0.10~0.15%로 일정하게 유지되었다. 시기별 T-P 함량은 11.4~242.7  $\text{mg kg}^{-1}$  범위이었다. 4월에는 12.6~242.7  $\text{mg kg}^{-1}$  범위로 높았고 여름철인 6월에는 11.4~121.9  $\text{mg kg}^{-1}$  범위

**Table 2. Organic matter, T-N and T-P contents of sediment in Juksancheon constructed wetland.**

Date (Month/day)	Treatment stage	O.M		T-N	T-P		
		----- % -----			$\text{mg kg}^{-1}$		
Apr. 5	1 <sup>st</sup>	3.8	(±0.6)	0.28	(±0.04)	50.1	(±10.6)
	2 <sup>nd</sup>	3.6	(±0.8)	0.31	(±0.06)	143.2	(±25.1)
	3 <sup>rd</sup>	3.3	(±0.4)	0.26	(±0.04)	188.3	(±45.7)
	4 <sup>th</sup>	4.6	(±0.6)	0.28	(±0.08)	242.7	(±36.5)
	5 <sup>th</sup>	3.9	(±0.7)	0.08	(±0.02)	86.7	(±48.5)
	6 <sup>th</sup>	3.1	(±1.1)	0.11	(±0.03)	12.6	(±1.7)
Jun. 7	1 <sup>st</sup>	3.7	(±0.7)	0.12	(±0.02)	36.2	(±3.4)
	2 <sup>nd</sup>	4.3	(±1.0)	0.16	(±0.03)	74.3	(±21.9)
	3 <sup>rd</sup>	4.1	(±1.1)	0.15	(±0.02)	121.9	(±31.7)
	4 <sup>th</sup>	4.1	(±0.8)	0.17	(±0.04)	94.3	(±21.4)
	5 <sup>th</sup>	3.4	(±0.6)	0.12	(±0.04)	61.4	(±15.6)
	6 <sup>th</sup>	2.8	(±0.4)	0.11	(±0.03)	11.4	(±3.4)
Aug. 28	1 <sup>st</sup>	4.0	(±0.6)	0.08	(±0.02)	40.9	(±56.4)
	2 <sup>nd</sup>	4.4	(±0.7)	0.12	(±0.03)	69.6	(±21.1)
	3 <sup>rd</sup>	4.5	(±1.0)	0.13	(±0.02)	61.6	(±16.4)
	4 <sup>th</sup>	3.8	(±0.9)	0.14	(±0.03)	107.1	(±15.4)
	5 <sup>th</sup>	3.7	(±0.5)	0.11	(±0.04)	42.3	(±16.1)
	6 <sup>th</sup>	3.5	(±0.6)	0.12	(±0.03)	13.7	(±3.4)
Oct. 27	1 <sup>st</sup>	4.2	(±0.8)	0.09	(±0.02)	34.3	(±3.8)
	2 <sup>nd</sup>	4.7	(±1.0)	0.11	(±0.03)	49.5	(±5.4)
	3 <sup>rd</sup>	4.2	(±0.5)	0.14	(±0.02)	73.8	(±4.8)
	4 <sup>th</sup>	4.4	(±0.6)	0.16	(±0.04)	136.5	(±21.1)
	5 <sup>th</sup>	3.8	(±0.4)	0.10	(±0.03)	46.4	(±15.4)
	6 <sup>th</sup>	4.1	(±0.7)	0.14	(±0.04)	18.9	(±2.4)
Dec. 18	1 <sup>st</sup>	4.0	(±0.5)	0.10	(±0.02)	32.2	(±3.5)
	2 <sup>nd</sup>	4.5	(±0.6)	0.10	(±0.02)	47.3	(±2.9)
	3 <sup>rd</sup>	3.9	(±0.3)	0.13	(±0.04)	71.6	(±5.6)
	4 <sup>th</sup>	4.2	(±0.4)	0.15	(±0.03)	135.3	(±10.9)
	5 <sup>th</sup>	3.6	(±0.5)	0.11	(±0.03)	44.1	(±6.8)
	6 <sup>th</sup>	3.9	(±0.4)	0.13	(±0.04)	18.6	(±2.8)

‡ mean ± standard deviation

**Table 3. Microbial biomass C, N, and P contents of sediment in Juksancheon constructed wetland.**

Date	Treatment stage	Microbial biomass		
		C	N	P
----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Apr. 5	Inflow	630.2 (±237.3)	23.5 (±6.8)	5.4 (±1.4)
	Effluent	671.2 (±302.7)	4.8 (±2.5)	4.8 (±1.3)
Aug. 28	Inflow	678.0 (±200.5)	38.0 (±12.4)	6.6 (±0.6)
	Effluent	387.3 (±73.4)	20.8 (±7.6)	4.5 (±1.2)
Oct. 27	Inflow	517.2 (±177.2)	32.4 (±13.6)	5.1 (±2.1)
	Effluent	322.5 (±170.1)	12.7 (±5.5)	3.3 (±0.4)
Dec. 18	Inflow	442.4 (±121.1)	28.4 (±10.1)	7.8 (±0.9)
	Effluent	289.6 (±100.5)	9.1 (±7.2)	2.1 (±0.2)

† mean ± standard deviation

로 T-P 함량이 낮아졌고, 8월, 10월 및 12월은 13.7~107.1 mg kg<sup>-1</sup>, 18.9~136.5 mg kg<sup>-1</sup> 및 18.6~135.3 mg kg<sup>-1</sup>로 큰 차이를 보이지 않았다. Cho et al. (2009)이 보고한 복내 바이오파크 인공습지내 토양의 화학적 특성과 비교해 보면, 죽산천 인공습지 퇴적물내 O.M, T-N 및 T-P의 시기별 함량은 큰 차이가 없었다.

죽산천 인공습지내 퇴적물의 시기에 따른 microbial biomass 함량을 조사한 결과는 Table 3과 같다. 유입부와 유출부의 microbial biomass 함량은 biomass C의 경우 각각 442~678와 290~671 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, biomass N의 경우 유입부와 유출부가 각각 24~38와 5~21 mg kg<sup>-1</sup>이었고, biomass P의 경우 유입부와 유출부가 각각 5~8와 2~5 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 처리단계별 microbial biomass C:N:P의 비율은 유입부와 유출부가 각각 57~117:4~6:1와 86~140:1~5:1로 biomass C의 비율이 유입부에 비해서 유출부에서 증가되는 경향이였다. 계절별 microbial biomass C:N:P의 비율은 봄, 여름, 가을 및 겨울이 각각 117~140:1~4:1, 86~126:5~6:1, 68~101:2~6:1 및 47~138:2~4:1로 나타났으며 biomass N의 비율은 다른 계절에 비하여 여름이 약간 높았다. Microbial biomass C:N:P의 비율은 시기별로 다소 차이가 있었으나 유기물 함량이 봄, 여름, 가을 및 겨울로 시기가 변함에 따라서 낮아지는 경향을 나타내었고, 질소 함량이 여름에 비해 봄, 가을 및 겨울에 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 100:5:1 정도로 알려져 있는데, 본 죽산천 인공습지는 이들 기준과 비교해 볼 때 전반적으로 최적비율에 해당하였다.

이상의 수질, 식생 및 퇴적물의 결과를 미루어 볼 때, 죽산천 인공습지는 COD와 SS 제거효율이 양호하고 식생과 토양이 안정화 되어 있으나, BOD, 질소 및 인 등의 오염물질 정화효율이 낮아 습지의 정화효율 향상을 위한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

## 요 약

주암호 상수원 상류지역인 죽산천에 위치한 죽산천 인공 습지의 수생태학적 특성을 평가하기 위해 수질에서의 영양염류 처리효율, 수생식물의 무기성분 흡수량 및 퇴적물내 화학적 특성을 평가하였다. 수질에서의 영양염류 처리효율은 COD와 SS를 제외하고 전반적으로 낮았다. 죽산천 인공 습지의 주요 우점종의 영양염류 흡수량을 조사한 결과, T-N 및 T-P 흡수량은 8월에 노랑꽃창포 > 수련 > 노랑어리 연꽃 순으로 최대흡수량을 나타내었다. 퇴적물내 O.M 함량은 시기별로 큰 차이가 없었고, T-N 및 T-P의 함량은 봄에서 여름으로 시기가 변함에 따라 낮아져서 겨울까지 낮은 함량을 유지하였다. 퇴적물내 microbial biomass C:N:P의 비율은 봄, 여름, 가을 및 겨울이 각각 117~140:1~4:1, 86~126:5~6:1, 68~101:2~6:1 및 47~138:2~4:1로 나타났다. 죽산천 인공습지는 질소와 인의 처리효율이 낮고, 겨울철 수질 정화효율이 낮아 습지의 정화효율 향상을 위한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

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]의 지원으로 수행하였음.

## 인 용 문 헌

- APHA, AWWA, WCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater (19th ed.). p. 4-112. American Public Health Association, Washington DC, USA.
- Brookes, P.C., A. Landman, G. Pruden, and D.S. Jenkinson.

1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* 17:837-842.
- Cho, J.S., J.S. Heo, Y.M. Chun, D.C. Seo, H.S. Bae, Y.C. Kim, M.J. Han, W.Y. Park, J.S. Yim, Y.S. Chun, S.K. Park, Y.J. Park, and S.E. Kim, 2009. 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.
- Choi, I.W., S.D. Moon, D.C. Seo, S.W. Kang, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, J.B. Lee, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2011. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Bongsan constructed wetlands for treatment non-point source pollution. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1089-1094.
- 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. Korea.
- Gerrites, R.G. 1993. Prediction of travel times of phosphate on soils at a disposal site for wastewater. *Water Res.* 27:263-267.
- Greenway, M. and A. Woolley. 1999. Constructed wetlands in Queensland: performance efficiency and nutrient bioaccumulation. *Ecol. Eng.* 12:39-55.
- Jenkinson, D.S. 1988. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. p. 368-385. In Wilson, J.R. (ed.) *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*, CAB International, Wallingford.
- Kadlec, R.H. 1997. An autotrophic wetland phosphorus model. *Ecol. Eng.* 8:145-172.
- Kadlec, R.H. and S.D. Wallace. 2008. *Treatment wetlands* (2nd ed). p. 267-348. CRC Press, Boca Ration, FL, USA.
- Kang, S.W. 2012. Characteristics of nutrients uptake and release of submerged plants in Boknae reservoir around Juam Lake. Master Science Thesis, Sunchon National University, Korea.
- 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.
- Kim, H.C. 2010. Assessment of non-point source pollution reduction using constructed wetland. Ph.D. Thesis, Konkuk University, Seoul, Korea.
- Newbold, D.J., J.W. Elwood, R.V. O'Neil, and A.L. Sheldon. 1983. Phosphorus dynamics in a woodland stream ecosystem: a study of nutrient spiraling. *Ecology.* 64:1249-1263.
- 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.
- Reddy, K.R., R.H. Kadlec, E. Flaig, P.M. Gale. 1999. Phosphorus retention in streams and wetlands: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 29:83-146.
- 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, Jinju, 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. 2006. 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., S.W. Kang, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, J.B. Lee, H. Kim, J.S. Heo, N.I. Chang, H.H. Seong, and J.S. Cho. 2011a. Evaluation of Aquatic Ecological Characteristics in sinpyongcheon constructed wetlands for treating non-point source pollution. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:400-407.
- 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. 2011b. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Boknae bio-park constructed wetlands. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:263-270.
- Son, Y.K., C.G. Yoon, J.S. Kim, and H.J. Kim. 2012. A study on seasonal nitrogen treatment characteristics according to design of constructed wetland. *J. Korean Soc. Wat. Environ.* 28:94-101.
- Tanner, C.C., J.P.S. Sukias, and M.P. Upsdell. 1998. Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands. *J. Environ. Qual.* 27:448-458.
- Vance, E.D., P.C. Brookes, and D.S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19:703-707.
- Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecol. Eng.* 25:478-490.
- Yang, H.M. 2012. Phosphorous removal in a free water surface wetland constructed on the Gwangju stream floodplain. *J. Korean Ins. Land. Arch.* 40:100-109.