한국습지학회지 제13권 제2호, 2011년 8월 (199 - 208)

도시내 녹지공간 조성을 위한 소규모 HSSF 인공습지 개발

이 정 용* / 강 창 국** / Joan B. Gorme*** / 김 순 석**** / 김 이 형*****+

Development of Small HSSF Constructed Wetland for Urban Green space

Jeong Young Lee* / Chang Guk Kang** / Joan B. Gorme*** /
Soon Seok Kim**** / Lee Hyung Kim*****+

요약 : 세계적으로 물의 부족, 온실가스 배출증가, 에너지 소비 증가 등으로 인하여 지구가 위협받고 있다. 기존의 도시 계획 및 개발 과정에서 산림, 하천 등 자연 생태계가 파괴되어 왔으며 이는 불투수면의 증가를 초래하였다. 불투수면의 증가로 인하여 자연적인 물순환 체계가 파괴됨에 따라 도시내 물의 저류, 침투, 증발 등이 감소되고 있으며, 강우시 불투수면에서 발생하는 비점오염원이 하천 및 호소로 직접 유입되어 수계에 악영향을 끼치고 있는 실정이다. 본 연구에서는 강우시 불투수면에서 발생하는 비점오염물질을 저감하고 불투수면의 증가로 인한 도시지역의 온도증가, 열섬현상 등을 해결하는 소규모 HSSF 인공습지 기술을 개발하고자 한다. HSSF 인공습지는 표면에 물이 존재하지 않고 유체의 흐름이 표면 아래 수평으로 흐르는 습지이며 침전, 여과, 흡착, 식생에 의한 흡수 등의 기작을 포함한다. 이러한 HSSF 인공습지를 도시지역의 협소한 공간에도 적용이 가능한 소규모 형태로 개발하고자 pilot-scale test를 실시하였으며, 이러한 연구결과는 향후 국내 도시 열섬현상 저감 및 자연적 물순환 복원을 위한 시설 개발에 기초자료로 활용 될 것이다.

핵심용어 : 물순환 시스템, 비점오염원, 소규모 HSSF 인공습지, 저영향개발(LID)

Abstract : Scarcity of water worldwide, increasing greenhouse gas emissions, increased energy consumption due to the Earth is threatened. Existing in the process of urban planning and development of forests, rivers and other natural ecosystems have been destroyed and that there was increased impervious pavement. Impervious pavement increase water circulation system to destroy the natural and urban water retention, infiltration and decreased evaporation. Nonpoint source pollution(NPS) occurs when rainfall impervious pavement and appeal directly to the river water inflow is adversely impacts of the situation. In this study, rainfall occurs impervious pavement NPS pollution reduction and temperature increase due to the increase in urban areas, and to solve heat island phenomenon is to develop small HSSF constructed wetland technology. The small HSSF constructed wetland sedimentation, filtration, adsorption, absorption by vegetation, including such mechanisms. Techniques for verification of the pilot-scale test was conducted. In the future domestic urban heat island phenomenon and restore the natural water cycle for the facilities will be used as a basis to develop.

Keywords : *Impervious pavement, Water cycle system, Non point sources(NPS), Small HSSF constructed wetland*

+ Corresponding author : leehyung@kongju.ac.kr
* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 박사과정 · E-mail : jjangaw@kongju.ac.kr
** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 석사과정 · E-mail : kcg1792@kongju.ac.kr
*** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 석사과정 · E-mail : joangorme@kongju.ac.kr
**** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 석사과정 · E-mail : kss9321@kongju.ac.kr
***** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · E-mail : leehyung@kongju.ac.kr

1. 서 론

최근 세계적으로 자원의 고갈, 물부족의 심화, 온실가스 배출증가, 에너지 소비 증가 등의 문제가 발생하여 지구를 위협하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 국내에서는 인간과 생태계가 공존하자는 모토 아래 환경 (environment)과 개발 (economy) 등을 주요 가치로 삼고 있으며, 건설 분야의 경우 물에 대한 관리를 통하여 생태계와 개발의 공존, 환경과 개발의 공존을 추구하는 녹색성장을 추진하고 있다. 녹색성장은 에너지 및 자원 사용량 최소화, 온실가스 배출 및 환경오염부하 최소화, 녹색기술과 청정에너지를 신 성장 동력으로 개발한다는 3가지 요소로 구성되어 있다(국토해양부, 2009).

국내의 기온 상승 변화는 지난 100년 간 1.5 ℃가 상승하였으며 이는 지구 온도증가보다 2배에 달하는 수치이며 제주도 인근 바다는 지난 38년 동안 22.8 cm의 해수면 상승을 보였다(한국정책평가원, 2008). 기상이변은 기존의 도시 계획 및 개발의 과정에서 산림 및 녹지공간의 훼손 및 파괴에 기인하며, 이러한 무분별한 개발로 인한 불투수층의 증가는 도시내 열섬현상, 물의 저류 및 침투량 감소 등과 같은 환경수리학적 문제점을 가중시키고 있다(김이형, 2008; 한영해 등, 2006). 국내 도시의 배수시스템은 강우 발생시 도로 및 주차장 등 포장면을 따라 곧 바로 배수구 및 우수 맨홀로 유출되는 시스템을 보이고 있다. 도시지역의 유출 특성상 강우유출수내에는 입자상 물질 및 중금속 등 각종 오염물질이 다량 포함되어 있으며, 비점오염물질을 포함한 강우유출수는 별도의 처리 없이 하천 및 호소로 유입되어, 인근 수생태계에 악영향을 끼치고 있는 실정이다 (Norman, 1991; Randall *et al.*, 1978; Yi *et al.*, 2005). 선진국의 경우 도로 및 주차장 등 포장지역에서 발생하는 강우유출수를 LID (Low Impact Development) 시설로 유입시켜, 시설내 저류 및 침투, 여과 등의 기작을 통하여 일정량의 오염물질을 저감한 이후, 배수되는 시스템을 보이고 있다. 최근 환경부에서도 하천 및 호소의 수질을 개선하기 위하여, 수처리 효율이 높고 대민 친화적 시설인 인공습지의 적용을 증가하고 있는 실정이다. 인공습지는 자연상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 오염물질을 저감하는 시설로서 도시의 비점오염물질 저감, 농업배수, 축산폐수 등 다양한 분야에 적용되고 있으며 흐름형태에 따라 FWS (Free water surface flow), HSSF (Horizontal subsurface flow), VF (Vertical subsurface flow)형 인공습지로 분류된다. FWS 형태의 인공습지는 수면이 대기 중에 노출되어 있는 형태로서 자연습지와 가장 유사하다. 그렇지만 대규모 부지를 필요로 하며 표면에 노출되어 있어 인체에 유해한 모기, 해충 등의 발생 가능성이 있다. VF 형태의 인공습지의 경우 표면에 물이 존재하지 않고 물의 흐름이 수직으로 흐르며 오염물질이 여과되는 형태를 가진다. 마지막으로 HSSF 형태의 인공습지는 VF 형대와 마찬가지로 표면에 물이 존재하지 않지만 물의 흐름이 수평방향으로 흐르는 형태로 여재에 따른 여과, 침전, 흡착 등의 물리적인 기작을 이용하여 오염물질의 저감효과가 우수하다. 그러나 인공습지를 적용함에 있어, 대규모의 부지가 요구되며 국내 강우특성을 고려하지 않은 설계 등 다양한 문제를 가지고 있어 국내 강우특성을 고려하며 도시지역과 같은 협소한 공간에도 적용 가능한 새로운 소규모 형태의 인공습지 기술이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 인공습지 적용 시, 발생할 수 있는 단점을 최소화하면서 도시지역과 같은 협소한 공간에서도 적용 가능한 소규모 HSSF 인공습지 기술을 개발하고자 Pilot-scale test를 수행하였으며, 연구결과를 토대로 기술의 적용성을 평가하였다. 소규모 HSSF 인공습지는 기존의 배수시스템과 비교하여 도시내 물의 저류 및 침투량의 향상을 기대할 수 있으며, 도시지역의 열섬현상 등 기상이변에 대하여 대응하는 기술이 될 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 여재 및 식생의 선정

인공습지에 사용되는 여재와 식생은 오염물질을 저감하는데 중요한 설계인자로 작용한다. 여재의 크기 및 입도분포등과 같은 물리적 특성은 여과효율 및 유지관리에 영향을 미치며, 사용되는 여재는 자연친화적이며 경제성을 갖추어야 한다. 이에 인공습지에 사용될 여재인 모래, 자갈 우드칩에 대하여 한국산업규격인 KS F 2302를 근거하여 체분석을 실시하였으며 한국산업규격 KS F 2322의 정수위 방법에 따라 투수계수 (k)를 산정하였다. 식생의 경우 유체 흐름의 굴절 및 수리전도도를 증가시켜 물리적인 침전, 흡수, 여과 등을 유도하여 수질정화 능력을 향상시켜 식생 선정시 수질정화능력이 탁월하고 구입 및 유지관리가 용이한 수종이어야 한다(김동섭 등, 2005; Yeh *et al.*, 2009). 또한 주변 환경조건에 잘 적응하며 생장력이 강한 수종이어야 한다. 따라서 소규모 HSSF 인공습지의 특성상 수면이 대기 중에 노출되지 않는 형태로서 국내 기후와 자생력, 오염물질 정화능력을 고려하여 정수식물의 식재가 적합하다. 농림부(2004)에 의하면 정수식물 중 갈대(*Phragmites australis*)와 애기부들(*Typha angustata*)의 경우 유기물 및 영양염류제거에 효과적인 수종으로 나타내었다. 이에 본 연구에서는 갈대와 애기부들로 선정하여 식재하였다.

2.2 소규모 HSSF 인공습지 설계

소규모 HSSF 인공습지의 Pilot-scale test를 위한 반응조는 환경부에서 제시하는 자연형 시설 설계기준에 준하여 제작하였다. 소규모 HSSF 인공습지는 길이 대 폭의 비율이 3 : 1로서 0.5 m×1.5 m×0.7 m (W×L×D)의 크기로 제작하였으며 총 0.525 m^3이다. Table 1은 환경부에서 제시하는 인공습지 설계인자와 소규모 HSSF 인공습지의 설계인자를 정리한 것이다.

소규모 HSSF 인공습지는 Fig. 1과 같이 침강지(sedimentation tank), 우드칩 수직카트리지(woodchip vertical cartridge), 습지부(wetland part), 자갈부(gravel part)로 구성되어 있으며 자갈, 모래, 우드칩, 식생 등을 적절히 배치하여 저감효율을 향상시켰다. 침강지는 자갈을 높이 20 cm로 충진하였으며 침전, 여과, 흡착 등의 기작으로 오염물질을 1차적으로 저감시킨 후 수직으로 설치된 우드칩 카트리지를 통과하면서 2차적으로 저감되는 형태이다. 습지부 여과층은 수평으로 중간 자갈과 굵은 모래를 2겹으로 배치하였으며, 바닥으로부터 높이 20 cm는 중간 자갈을 충진한 다음 높이 40 cm는 굵은 모래를 충진하였다. 습

Table 1 Summary of design factors

Design factor	Constructed wetland	Small HSSF constructed wetland
Design rainfall	More than 5 mm	7.4 mm
Formation	Shallow marsh, deep marsh, pond	Sedimentation tank, wetland part, gravel part
Sedimentation tank volume	should exceed at least 10% of total runoff volume	should be 20% of total runoff volume
Scale	More than 1.0% of catchment area	2.5% of catchment area
Size rate(L : W)	More than 2 : 1	3 : 1
Slope	0.5~1.0%	1.0%
Vegetation type	Emerged plant, submerged plant, floating leaved plant	Emerged plant (*Typha angustata, Phragmites australis*)

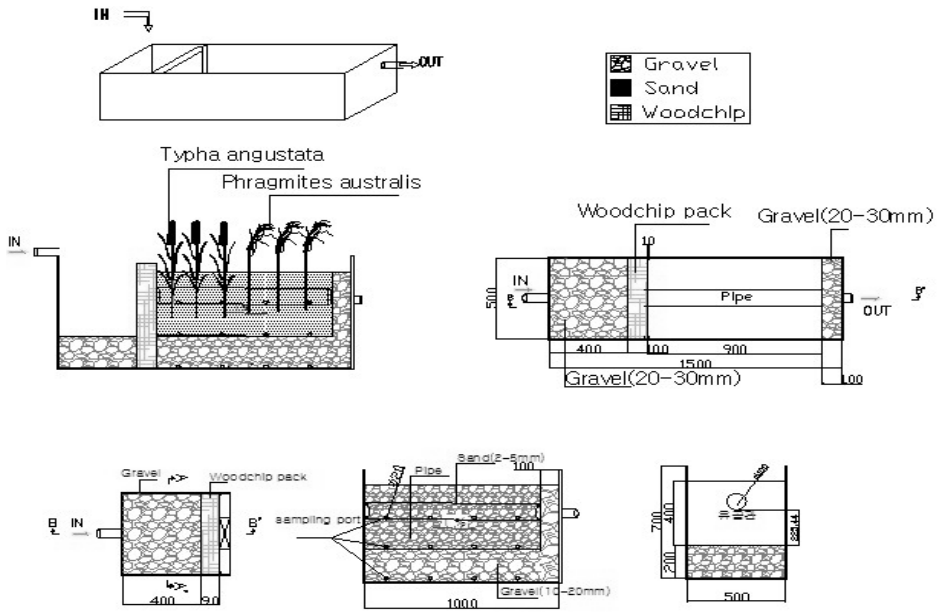
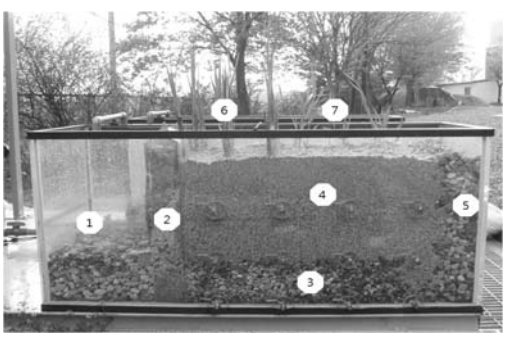


Fig. 1 Small HSSF constructed wetland design

Table 2 Physical description of the small HSSF constructed wetland

Treatment Region	No.	Layer Code*	Dimension** (w×l×h)	Trench Figure
Pretreatment Tank	1	CG (H)	0.5×0.4×0.2	
	2	WC (V)	0.5×0.1×0.6	
Wetland Media Layer	3	MG (H)	0.5×0.9×0.2	
	4	CS (H)	0.5×0.9×0.35	
	5	MG (V)	0.5×0.1×0.55	
Wetland Plant	6	*Typha angustata*	12 plants	
	7	*Pharagmites australis*	12 plants	

* H=horizontal; V=vertical;

** w=width, l=length, h=height expressed in m

지부 표면에는 애기부들과 갈대를 12본 식재하였고 자갈부는 원활한 배수를 위하여 굵은 자갈을 높이 60 cm로 충진하였다. Tabel 2는 침강지, 습지부, 자갈부, 식생의 배치 현황을 나타낸 것이다.

2.3 소규모 HSSF 인공습지 운영 및 모니터링 방법

Pilot-scale test의 유입수는 실제 강우유출수의 특성을 반영하기 위하여 인공강우유출수를 제조하여 사용하였다. 인공 강우유출수는 도로공사 천안 영업소의 고속도로 청소 후 수거된 도로퇴적물을 100℃에서 24시간 건조한 후 체거름을 실시하여 150 ㎛이하의 입자로부터 제조하였다(이준호 등, 2005). 포장지역의 비점오염물질의 경우,

짧게는 30분에서 길게는 4시간 안에 고농도의 오염물질을 포함한 강우유출수가 유출되며, 이러한 특성을 고려하여 TSS를 기준으로 일정한 농도를 가지는 유입원수를 4시간동안 유입시켰다(OMEE, 1994). 유입유속은 유역면적 30 m^2에 해당되는 강우강도(mm/hr)를 고려하여 산정하였다. Case별로 유입유속은 2.5 L/min(Q), 5.0 L/min(2Q), 7.5 L/min(3Q)로 유속을 변화시켜, 식생을 식재한 반응조와 식재하지 않은 반응조에 대하여 약 5개월 동안 주 1회씩 실험을 실시하였다. Table 3은 유입유속 산정 결과를 보여주며, 모니터링은 인공강우유출수 유입 직후 0분, 30분, 60분, 120분, 180분, 240분에 유입 및 유출수의 시료를 채취하였다. 인공 강우유출수 유입시 오염물질에 대한 높이별, 거리별 저감효율을 평가하기 위하여 습지부 중간에 설치된 12개의 샘플 포트에서 수질시료를 채취하였다.

Table 3 Calculation of Inflow rate

Rainfall intensity (mm/hr)	Catchment area (m^2)	Runoff volume (m^3)	Storage volume (m^3)	Inflow rate	
				m^3/min	L/min
5	30	0.15	0.210	0.0025	2.5
10		0.30		0.0050	5.0
15		0.45		0.0075	7.5

2.4 분석방법

유입 및 유출, 습지부내 수질시료를 채취한 직후, 실험실로 옮겨 수질오염공정시험법에 준하여 분석을 하였다. 유입 및 유출수의 분석항목으로는 Turbidity, TSS, BOD_5, COD_{Mn}, TN, TP, 중금속(Total Pb, Total Zn, Total Fe)을 분석하였으며 습지부에서는 중금속을 제외한 Turbidity, TSS, BOD_5, COD_{Mn}, TN, TP 항목에 대하여 분석하였다. 수질시료에 대하여 분석한 결과 값으로 식 (1)을 이용하여 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였다. 산정된 EMC의 결과를 식 (2)를 이용하여 오염물질에 대한 저감효율을 산정하였으며 여기에서 C(t)와 Q_{TRu}(t)는 강우 지속시간 t에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다.

$$EMC\ (mg/L) = \frac{\sum_{t=0}^{T} C(t) \cdot q_{run}(t)}{\sum_{t=0}^{T} q_{run}(t)} \quad (1)$$

$$Removal\ Efficiency\ (\%) = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} C_{in}(t) q_{in}(t) - \sum_{t=1}^{t=T} C_{out}(t) q_{out}(t)}{\sum_{t=1}^{t=T} C_{in}(t) q_{in}(t)} \quad (2)$$

C(t) = Pollutant concentration, $q_{run}(t)$ = The runoff rate at time t, T = Time

3. 연구결과 및 고찰

3.1 선정된 여재의 특성 평가 및 운영결과

본 연구에서는 굵은 모래, 중간 자갈, 굵은 자갈, 우드칩에 대하여 투수계수 및 체분석 등의 기초실험을 실시하였다. 여재의 입도분포는 오염물질의 저감효율을 향상시키는 중요한 설계인자로 작용하며 입도분석 결과 굵은 모래는 2~4.76 mm의 범위를 나타내었으며 중간 자갈의 경우 4.76~25 mm로 분석되었다. 굵은 자갈은 10~

40 mm, 우드칩의 경우 10~20 mm로 나타났으며 모래와 자갈, 우드칩에 대하여 공극률을 실험한 결과 모래와 자갈의 경우 40~46%의 공극률을 나타냈다. 우드칩의 경우 76%로 다른 여재보다 공극이 큰 것으로 분석되었으며 Table 4는 선정된 여재에 대한 특성을 정리한 것이다. 2010년 5월부터 10월까지 제조된 인공강우유출수를 유속을 달리하여 식생을 식재한 반응조와 식재하지 않은 반응조를 운영하였다. Fig. 2에 pilot-scale test의 유입수 흐름을 나타내었으며 수질시료는 유입수와 유출수, 습지부의 중간 수질시료를 채취하였다. C1~12는 애기부들, R1~12는 갈대를 나타낸 것이다. 모니터링은 인공강우유출수를 4시간 동안 지속적으로 유입시켜 총 21회 실험을 실시하였다. 또한 오염물질 유입시 습지부에서 거리별, 높이별 오염물질 저감효율을 평가하기 위하여 습지부에 설치된 12개의 포트에서 Case별로 2회씩 총 6회 수질시료를 채취하여 분석하였다.

Table 4 Characterisitcs of media

Media	D_{10} (mm)	Particle Size Range (mm)	K (cm/sec)	Porosity (%)
Coarse Sand	2.4	2~4.76	3.22	40.39
Medium Gravel	12	4.76~25	4.52	43.35
Coarse Gravel	26	10~40	5.16	46.33
Woodchip	-	10~20	4.83	76.43

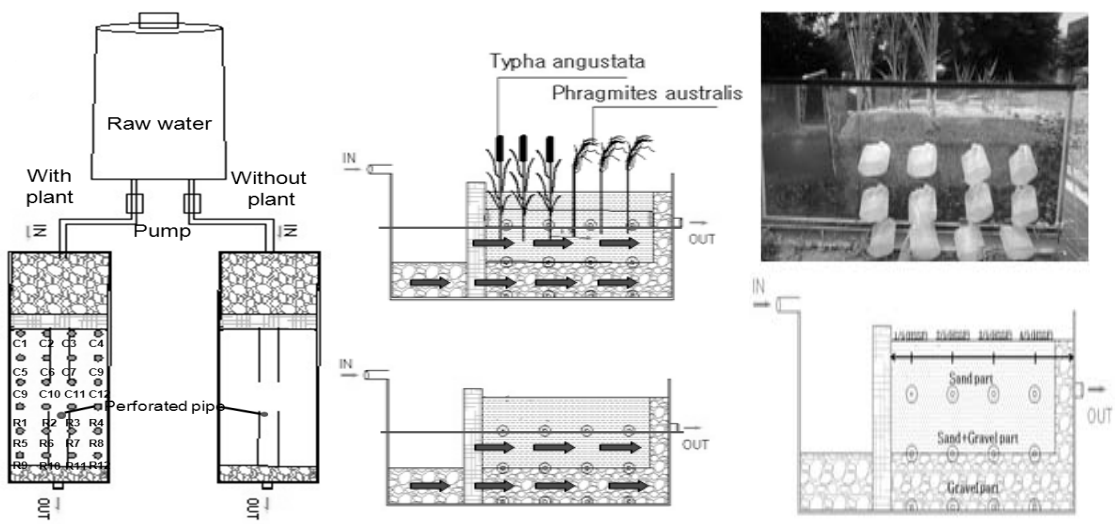


Fig. 2 Schematic diagram and water sampling in the small HSSF constructed wetlands

3.2 오염물질 EMC 및 저감효율 산정 결과

Table 5와 Table 6은 식생군과 무식생군에 대한 EMC 산정 결과를 통계분석하여 나타낸 것이다. 식생군의 평균 유입수 EMC의 범위는 TSS의 경우 164.2 mg/L, TN은 4.12 mg/L, TP는 0.35 mg/L, Total Fe는 5.123 mg/L, Total Zn은 0.404 mg/L로 분석되었다. 평균 유출수 EMC의 범위는 TSS는 6.1 mg/L, TN은 3.47 mg/L, TP는 0.05 mg/L, Total Fe는 0.584 mg/L, Total

Zn 0.184 mg/L로 분석되었다. 무식생군의 평균 유입수 EMC의 범위는 TSS의 경우 156.4 mg/L, TN은 3.23 mg/L, TP는 0.48 mg/L, Total Fe는 7.020 mg/L, Total Zn은 0.518 mg/L로 분석되었다. 평균 유출수 EMC의 범위는 TSS는 5.6 mg/L, TN은 3.34 mg/L, TP는 0.05 mg/L, Total Fe는 0.783 mg/L, Total Zn 0.170 mg/L로 분석되었다. 무식생군의 TN을 제외한 대부분의 항목에서 유입수 EMC의 값보다 유출수 EMC의 값이 낮게 유출되었다. 식생군의 TN의 경우 실험종료후 습지내 물이 정체되어 있더라도 식생에 의한 영향으로 영양염류가 제거되는 반면, 무식생군 TN의 경우 실험 주기가 실험 종료 후 정체되어 있던 물이 호기성 조건에서 혐기성 조건으로 변화하여 습지내 TN의 농도가 증가한 것으로 판단된다.

Table 5 Statistics of EMCs of the small HSSF constructed wetland with plants

Parameters (mg/L)	Inflow				Outflow			
	Mean	95% Cl Upper	95% Cl Lower	SD	Mean	95% Cl Upper	95% Cl Lower	SD
Turbidity	26.8	39.5	14.1	5.10	3.2	5.8	0.7	1.02
TSS	164.2	200.2	128.2	14.49	6.1	8.9	3.4	1.10
COD_{Mn}	9.1	13.4	4.8	1.74	3.5	4.1	2.9	0.25
BOD	1.5	1.8	1.2	0.13	0.8	1.2	0.5	0.14
TN	4.12	5.61	2.62	0.60	3.47	5.32	1.62	0.75
TP	0.35	0.47	0.23	0.05	0.05	0.05	0.04	0.00
Total Cr	0.190	0.310	0.070	0.048	0.177	0.309	0.046	0.053
Total Fe	5.123	8.088	2.157	1.194	0.584	0.791	0.377	0.083
Total Zn	0.404	0.454	0.353	0.020	0.184	0.212	0.156	0.011
Total Pb	0.178	0.284	0.073	0.042	0.145	0.189	0.102	0.017

Table 6 Statistics of EMCs of the small HSSF constructed wetland without plants

Parameters (mg/L)	Inflow				Outflow			
	Mean	95% Cl Upper	95% Cl Lower	SD	Mean	95% Cl Upper	95% Cl Lower	SD
Turbidity	26.2	37.8	14.6	4.7	3.3	4.2	2.3	0.34
TSS	156.4	341.6	-28.8	74.6	5.6	13.1	-1.8	3.0
COD_{Mn}	9.9	12.8	7.1	1.2	6.3	11.3	1.2	2.0
BOD	1.3	1.9	0.8	0.2	1.0	1.7	0.3	0.3
TN	3.23	4.85	1.61	0.65	3.34	5.6	1.11	0.89
TP	0.48	0.56	0.41	0.03	0.05	0.07	0.04	0.01
Total Cr	0.267	0.641	-0.108	0.151	0.232	0.575	-0.110	0.138
Total Fe	7.020	16.862	-2.822	3.962	0.783	2.013	-0.447	0.495
Total Zn	0.518	0.760	0.277	0.097	0.170	0.351	-0.012	0.073
Total Pb	0.178	0.378	-0.021	0.080	0.137	0.326	-0.051	0.076

Fig. 3은 오염물질에 대한 저감효율을 산정 결과를 보여준다. TSS의 경우 식생군과 무식생군에서 88%이상의 높은 저감효율을 보였으며 식생군에서 유기물질의 경우 무식생군보다 17~21%의 높은 저감효율을 보였다. TN의 경우에서도 무식생군보다 식생군에서 16%가 높은 저감효율을 나타냈으며 인과 중금속에서는 유사한 저감효율을 보였다. 유입수가 소규모 HSSF 인공습지의 침강지와 수직카트리지, 충진된 여재를 통과하면서 침전, 여과, 흡착 등으로 인하여 대부분의 오염물질이 저감되는 것으로 판단된다. 또한 식생군에 식재되어 있는 애기부들과 갈대로 인하여 영양염류와 유기물질의 경우 무식생군보다 높은 저감효율을 보이는 것으로 판단된다.

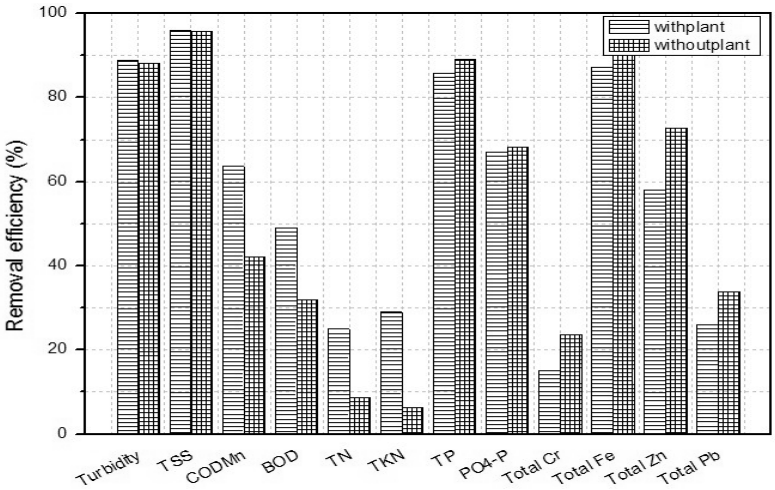


Fig. 3 Average removal efficiency of the small HSSF constructed wetland with and without plant

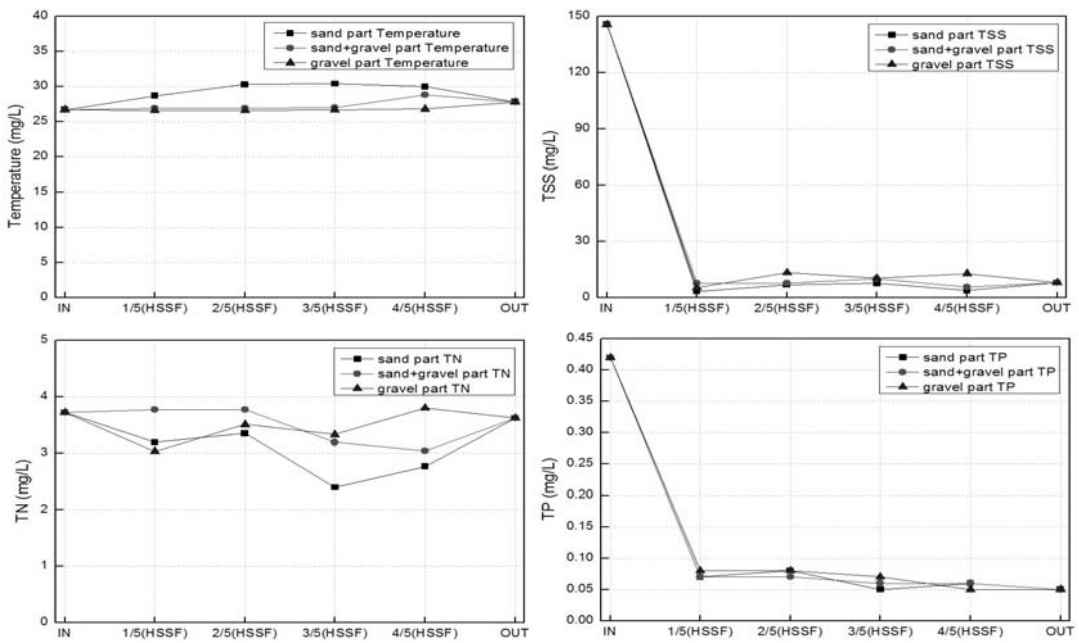


Fig. 4 Average pollutant concentration in the wetland part of the reactor

3.3 습지부내 오염물질 농도 변화

소규모 HSSF 인공습지내로 오염물질 유입시, 거리와 높이에 따른 오염물질 농도변화를 분석하였다. 습지부내 모래층, 모래+자갈층, 자갈층에 위치한 12개의 샘플 포트에서 유입수 유입 30분 후, 동시에 채취하였다. Fig. 4는 인공 강우유출수 유입시 거리 및 높이에 따른 오염물질의 농도를 나타낸 것으로 채취된 수질시료를 분석한 결과 1/5 지점에서 자갈층과 모래+자갈층보다 습지부 표면에 위치한 모래층에서 수온이 높게 나타났다. 오후에 실험이 진행되어 모래층이 태양열로 인하여 수온이 상승하는 것으로 나타났으며 입자상물질과 영양염류 중 인의 경우 침강지와 수직카트리지를 통과하면서 모든 여재층에서 80%이상 저감되어 유출되었다. 그 중 다른 여재층보다 모래층에서 채취된 수질시료가 낮은 농도로 유출되는 경향을 나타내었다. 모래층이 다른 여재층보다 공극률이 낮으며 표면에 식재되어 있는 식생의 줄기와 뿌리에 의해 여과, 침전, 흡수 등의 기작으로 인하여 낮은 농도로 유출되는 것으로 판단된다. 습지부에서 자갈층은 하단에 위치하여 수질시료 채취시 부유물질이 함께 채취되었으며 이러한 부유물질은 인공 강우유출수 유입시 여과 및 침전으로 인하여 형성된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 불투수면의 증가에 따른 단절된 녹지생태축을 연결하고, 강우시 발생되는 비점오염물질을 처리하기 위한 소규모 HSSF 인공습지 기술을 개발하였으며, Pilot-scale test를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 소규모 HSSF 인공습지 기술에 대한 검증을 위하여 pilot-scale test를 실시한 결과 입자상 물질의 경우 식생군 88.8%, 무식생군 88.1%로 가장 높은 저감효율을 보였다. BOD의 경우 식생군 49.0%, 무식생군 32.0%로 나타났으며, TP의 경우 식생군과 무식생군 모두 85%이상의 비교적 높은 저감효율을 보이는 것으로 나타났다. 대부분의 오염물질은 무식생군에 비해 식생군에서의 저감효율이 높게 나타났으며, 이는 여재에 의한 침전, 여과, 식생에 의한 흡수 및 차단 등의 기작이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

2. 오염물질에 대한 거리 및 높이에 따른 농도 분석 결과, 입자상 물질 및 인의 경우 침강지와 우드칩 카트리지를 통과하면서 약 80% 저감된 후 습지부와 자갈부로 유입되었다. 다른 여재층에 비해 모래층에서 높은 저감효율을 보이는 것으로 나타났으며, 모래층의 경우 다른 여재층보다 공극률이 낮아 유입수의 유속을 감소시킴으로써 오염물질에 대한 침전, 여과, 흡착 등의 기작이 활발히 발생한 결과로 판단된다.

3. 본 연구에서 개발된 소규모 HSSF 인공습지는 물이 표면에 노출되어 있지 않으며, 소규모 부지에 적용 가능한 기술로서 입자상 물질 및 중금속에 대한 높은 저감효율을 보이는 것으로 나타났다. 본 기술은 기존에 설치되어 있는 인공습지와 비교하였을 때 소규모로 적용이 가능하며 여재의 배열 및 종류에 따라 습지의 효율을 증가 시킬 수 있다. 또한 도시지역에 적용될 경우 도시지역에서 발생하는 비점오염원을 관리하는데 효과적이며 도시내 온도저감 및 열섬현상 등을 해결하는데 영향을 줄 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년 '건설기술혁신사업'의 일반과제(과제번호 10 기술혁신 E08) 과제지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김동섭, 김호준, 김세원, 계수현, 박언상, 류지훈, 이남재, 황길순, 박제철. 2005. 수질 생태보전을 위한 습지 설계지침 2차년도 개발 보고서. 한국수자원공사.

김이형. 2008. 21세기 친환경 건설을 위한 Low Impact Development(LID) 기술. 물과 미래. 41(6). pp. 47-57.

이준호, 조용진, 방기웅. 2005. 강우시 도로유출수 수질특성 및 입경분포. 대한환경공학회지. 27(6). pp. 777-784.

한영해, 이태구, 최영국. 2006. 도시개발에서 자연적 물순환체계 확보를 위한 제도적 접근방안. 2006춘계 한국조경학술발표회 논문집. pp. 64-69.

국토해양부. 2009. 저탄소 녹색도시 조성을 위한 도시계획수립 지침.

농림부. 2004 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계 · 관리 요령.

한국정책평가연구원. 2008. 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III.

Ontario Ministry of Environment and Energy (OMEE). 1994. Protocol for Conducting A Storm Water Control Study.

Norman, C.G.. 1991. Urban runoff effects on Ohio river water quality. Water Environmental Technology. 3. pp. 44-46.

Randall, C.W., Helsel, D.R., Grizzard, T.J., and Hoen, R.C.. 1978. The impact of atmospheric contaminants on storm water qulity in an urban area. Progress in Water Technology. 10(5). pp. 417-431.

Yeh T.Y., Chou C.C., Pan C.T.. 2009. Heavy metal removal within pilot-scale constructed wetlands receiving river water contaminated by confined swine operations, Desalination. 249. pp. 368-373.

Yi Y., Ken H., Carolyn O.. 2005. A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment. The Science of the Total Environment. 266. pp. 299-307.

○ 논문접수일 : 2011년 05월 17일
○ 심사의뢰일 : 2011년 05월 20일
○ 심사완료일 : 2011년 07월 22일