

도시 및 도로 조경공간을 활용한 소규모 인공습지 조성 기술

강 창 국* / Marla C. Maniquiz** / 손 영 규*** / 조 혜 진**** / 김 이 형*****

Development of small constructed wetland for urban and roadside areas

Kang, Changguk* / Marla C. Maniquiz** / Son, Younggyu*** /

Hye-Jin Cho**** / Kim, Leehyung*****

요약 : 도시화가 진행될수록 건물의 옥상 및 교통관련 시설물 또한 증가하여, 녹지공간은 감소하고 불투수면은 증가하게 된다. 불투수면이 증가함에 따라, 도시내 자연적 물순환 시스템 파괴, 비점오염물질 증가, 생태축 단절 등과 같은 다양한 환경수리학적 문제점이 발생되고 있다. 최근 들어 국민들의 생활 및 의식수준이 향상되면서, 도시의 경제적인 측면뿐만 아니라 심미적인 측면, 환경적인 측면을 동시에 고려한 지속가능한 도시 개발이 요구되고 있다. 또한 강우유출수 관리에 대한 관심과 인식이 높아지면서 Low Impact Development(LID) 관련 기술의 개발 및 적용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 국내 환경에 적합한 가이드라인, 설계기준 등은 매우 부족한 실정이다. 본 연구는 도시 및 도로가에 적용하기 위한 소규모 인공습지 기술을 개발하기 위하여, Pilot-scale 실험을 실시하였으며, 분석 결과, TSS, COD_{Cr}, TN, TP, Total Pb에 대한 평균저감효율이 각각 95%, 82%, 35%, 91%, 57%로 나타났다. 이러한 결과는 소규모 인공습지가 향후 도시 내 효율적인 물순환 시스템을 구축하고, 수생태계 보전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우유출수, LID, 소규모 인공습지, 저감효율

Abstract : Recently, the green spaces in the urban areas were greatly reduced due to urbanization and industrialization. As urban structures such as roads and buildings are built, the amount of impervious area within a watershed increases. High impervious surfaces are the common causes of high runoff volumes as the soil infiltration capacity decreases and the volume and rate of runoff increase thereby decreasing the groundwater recharge. These effects are causing many environmental problems, such as floods and droughts, climate change, heat island phenomenon, drying streams, etc. Most cities attempted to reduce sewer overflows by separating combined sewers, expanding treatment capacity or storage within the sewer system, or by replacing broken or decaying pipes. However, these practices can be enormously expensive than combined sewer overflows. Therefore, in order to improve these practices, alternative methods should be undertaken. A new approach termed as “Low Impact Development (LID)” technology is currently applied in developed countries around the world. The purpose of this study was to effectively manage runoff by adopting the LID techniques. Small Constructed Wetland(Horizontal Subsurface Flow, HSSF) Pilot-scale reactors were made in which monitoring and experiments were performed to investigate the efficiency of the system in removing pollutants from runoff. Based on the results of the Pilot-plant experiments, TSS, COD_{Cr}, TN, TP, Total Pb removal efficiency were 95, 82, 35, 91 and 57%, respectively. Most of the pollutants were reduced after passing the settling tank and the vertical filter media. The results of this study can contribute to the conservation of aquatic ecosystems and restoration of natural water cycle in the urban areas.

Keywords : *Runoff, LID, Small Constructed Wetland, Removal efficiency*

+ Corresponding author : leehyung@kongju.ac.kr
* 정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 석사
** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 박사과정
*** 정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 · BK21 계약교수
**** 연구위원 · 도로연구실 · 한국건설기술연구원
***** 정희원 · 교신저자 · 공주대학교 건설환경공학부 교수

1. 서 론

급격한 도시화와 고도의 산업화에 따른 인구과밀화, 에너지의 과사용, 환경을 고려치 않은 무분별한 개발은 도시내 녹지공간을 크게 감소시키고 있다(강현경과 이경재, 1996). 도로 및 도심지 대부분은 불투수층으로 존재하며, 이러한 불투수층은 도시내 자연적인 물순환 시스템을 파괴함과 동시에 생태축을 단절시켜 생물종다양성 저하, 기후변화, 도시 내 열섬현상, 하천의 건천화 등과 같은 다양한 환경수리학적 문제점을 야기한다. 특히 도로, 보도, 주차장 등과 같은 시설물은 배수시스템과 직접적으로 연결되어 있기 때문에 수문학적, 환경적으로 큰 영향을 끼치며, 전체 불투수면적의 60%~70%를 차지하는 것으로 조사되고 있다(강등, 2005). 교통관련 시설물은 인간의 활동과 밀접하게 연계되어 있으며, 대부분의 환경오염물질은 이러한 인간의 활동에 의해 발생되고 있으므로, 도로, 주차장, 건물 등은 도시내 주된 오염원이라 할 수 있다. 국내 도로 및 도시지역 대부분의 경우, 포장면으로부터 발생된 강우유출수가 우수관거로 직유입되도록 설계되어 있으며, 유출수내 오염물질은 저감되지 못한 상태로 수계로 유입된다. 이러한 배수시스템은 강우유출수의 수질이 나 지하수의 함량을 개선하기 위한 적절한 시스템이 될 수 없으며, 유지관리 비용도 높아 재정적인 부담 또한 가중시키는 것으로 나타나고 있다.

최근, 저탄소 녹색 성장과 같은 정부시책의 일환으로 도로 및 도시내 녹지 조성하고 생태축을 연결하여 자연적인 물순환을 도모하려는 노력이 활발하며, 이에 대한 사회적 관심 또한 높아지고 있다. 도로는 선형사업으로써 도로측면을 따라 연속적으로 녹지공간을 조성하고, 이러한 공간을 서로 연계시켜 녹지 생태축을 형성할 경우, 자연적인 물순환을 도모함과 동시에 비점오염원 저감 및 심미적인 기능까지 기대할 수 있다. 자연형 시설은 크게 저류시설, 인공습지, 침투시설, 식생형 시설 등이 있으며, 이 중, 인공습지에 의한 자연정화 방법은 하수 및 폐수, 강우유출수, 광산폐수,

매립지 침출수 등의 처리에 광범위하게 사용되고 있다(Rousseau et al., 2004). 특히, 인공습지 형태들 가운데 도시 조경공간과 도로가 등과 같은 좁은 공간에 적용이 용이하며, 모기와 같은 해충의 번식이 적게 발생하는 수평지하흐름형(Horizontal Subsurface Flow, HSSF) 인공습지가 소규모 형태로 도시 및 도로지역에 적용 가능하다. 또한 HSSF형 인공습지는 내부가 여재로 채워져 주된 처리 기작이 침전, 여과, 흡착 등과 같은 물리적인 처리로서, 도시 및 도로지역의 비점오염물질 중 큰 비중을 차지하는 입자성 물질과 중금속 등을 처리하기에 매우 적합한 습지 형태이다.

시민들의 의식 및 생활수준의 향상은 지구온난화, 황사 및 사막화, 기상이변 등과 같은 환경문제에 능동적으로 대처할 수 있는 기술을 요구하고 있다(김이형, 2008). 이러한 요구에 부합하여 불투수율이 높은 도시지역 및 도로에 대해 개발 전에 가지고 있던 수리학적 기능을 최대한 유지하면서 개발 후 발생하는 비점오염물질을 효율적으로 관리할 수 있는 LID(Low Impact Development) 기술이 국내외적으로 적용되고 있다. LID란 본래 자연이 가지고 있는 수리학적 기능(침투, 여과, 저류, 증발 등)을 최대한 유지하는 범위 내에서 개발을 허용함과 동시에 강우시 발생하는 강우유출수를 효율적으로 처리, 배제, 재이용 가능하도록 하는 개념이다. 이러한 기법은 개발 지역의 교란을 최소화하고, 그 지역의 자연적인 특징을 보존함과 동시에 기존의 강우유출수 처리시설에 비해 많은 양의 유지관리 비용을 절약할 수 있다(EPA, 2000). 따라서 미국, 유럽, 일본 등과 같은 선진국에선 불투수층 증가로 인한 다양한 문제를 해결하기 위한 방법으로, 건설 및 건축분야 기술에 LID 개념을 적용하여, 도시내 자연적인 물순환 시스템을 도모하고 있다.

본 연구의 목적은 도시 및 도로가 등의 조경공간에 소규모 인공습지를 적용시킴으로써 자연적인 물 순환 시스템을 구축하고, 강우시 발생하는 비점오염물질을 효과적으로 처리, 배제할 수 있는 LID 기술을 개발함에 있다. 또한 본 연구결과는

소규모 인공습지에 대한 적용가능성과 적정설계인자 도출에 필요한 자료구축에 기여할 수 있겠다.

2. 연구방법

도시 및 도로에 적용하기 위한 소규모 인공습지 기술을 개발하기 위한 Lab scale 시설의 형태,

여재 및 식생 등과 같은 구성 재료를 구축하기 위하여 국내의 문헌으로부터 기초자료조사를 체계적으로 실시하였다. Fig. 1은 소규모 인공습지를 적용하기 위한 기초자료조사부터 모니터링 및 수질 분석에 이르는 일련의 과정을 정리한 flow chart 로써 본 연구방법 수행과정을 순차적으로 보여주고 있다.



Fig. 1. Flow chart of the study method

2.1 여재 및 식생 선정 방법

2.1.1 여재

소규모 인공습지는 HSSF 인공습지로서, 습지 내부가 여재로 채워져 운영되는 시스템이다. 내부 충전 여재로는 침전부에 자갈(20~30mm), 습지부에 자갈(10~20mm), 모래(2~5mm)를 사용하여 선정하였으며, 입자성 물질 및 중금속의 흡착능 향상을 위하여 수직여재층에 Woodchip(10~20mm) 또는 Bottom ash(1~2mm)를 사용하였다. 공극률(KS F 2505), 비중(KS F 2504), 균등계수(KS F 2502), 투수계수(KS F 2322) 등과 같은 여재의 물성은 시설의 효율 및 운영에 영향을 미치는 인자로서 이에 대한 실험을 수행하였으며, 산업폐기물인 Bottom ash의 재이용 및 적용가능성을 판단하기 위하여 용출 및 흡착 능력에 대한 실험을 실시하였다.

2.1.2 식생 선정

습지내 식물은 미생물에게 필요한 서식환경을 제공하며, 수중의 줄기나 잎은 유속을 감소시켜 물리적, 화학적 반응시간을 증가시키고, 침전을 용이하게 한다. 본 소규모 인공습지는 습지내부가

여재로 충전된 HSSF형 인공습지로서, 오염물질 정화능력이 뛰어난 정수식물 중, 구입이 용이하며 내한성, 수집능력 등이 좋은 식물인 갈대와 애기부들을 선정하여 식재하였다. 특히 갈대는 각종 수질오염물질에 강한 내성을 가지고 있으며, 뿌리줄기(rhizome)의 발달로 근권에 산소를 원활히 공급함으로써, 호기성 미생물의 활성을 높이기 때문에 수처리에 널리 이용된다(Copper and Boon, 1987). 식생의 식재간격이 넓으면 높은 피도를 형성하는데 시간이 오래 걸리고, 원치 않은 주변 식물들이 침입할 가능성이 높아지며, 식재간격이 좁으면 짧은 시간 내에 높은 피도를 기대할 수 있으나 비용이 많이 든다. 환경연구정보시스템(2004)에 따르면 식물의 식재간격은 종에 따라 차이는 있지만 일반적으로 0.5~1.5m로 제시되어 있다. 본 소규모 인공습지의 경우, Pilot-plant 규모로서, 비교적 짧은 시간 내에 높은 피도를 요했기 때문에 0.25m의 간격으로 갈대와 애기부들을 식재하였다.

2.2 Pilot-plant 시설의 규모 산정 및 설계

2.2.1 시설 규모 및 유입유량 산정

소규모 인공습지는 Pilot-plant 규모로 제작되

었으며, 시설규모는 1.5m×0.5m×0.7m (L×W×D)로써, 총용량이 0.53m³, 충전된 여재와 우회수로 등을 제외한 총 수처리 용량은 0.2m³로 산정되었다. 비점오염관리 업무편람(2006, 환경부)에 의하면 자연형 시설의 규모는 비점오염물질의 영향을 받는 하천의 수질 수량 보호를 위해 처리되어야 하는 강우유출수의 양(WQV : Water Quality Volume)을 기준으로 결정할 수 있으며, 계산식은 식(1)과 같다. 또한 별도의 설계기준이 없는 경우, 설계강우량은 해당지역의 강우량을 누적유출고로 환산하여 최소 5mm 이상을 처리할 수 있는 설계가 권장되고 있다. 소규모 인공습지 반응조의 WQV(수처리 용량)은 0.2m³이며, 설계강우량을 5mm로 할 경우, 반응조의 배수면적은 식(1)에 의해 40m²로 계산된다. 국내의 크고 작은 강우에 대한 적용 가능성을 평가하기 위하여 유입유량을 산정하였으며 Table 1은 유입유량 산정 결과를 나타낸다.

$$WQV = (P1) \times (A) \quad (1)$$

P1 : 누적유출고로 환산한 설계강우량 (mm)
A : 배수면적 (ha)

Table 1. Estimation of flow rate

	Q=(I/60)×A		
강우강도(I, mm/hr)	3	6	9
배수면적(A, m ²)	40	40	40
유입유량(Q, L/min)	2	4	8

2.2.2 Pilot-plant 시설의 설계

소규모 인공습지의 주된 처리작용은 침전, 여과, 흡착, 식물에 의한 흡수 등이며, 이러한 작용을 극대화시키기 위하여 시설내부를 크게 초기 침강지, 수직여재층, 습지부 순으로 구성하였다. Woodchip 및 Bottom ash를 충전한 수직카트리지는 침전부와 습지부의 경계부분과 습지부의 중간부분에 위치하였으며, Fig. 2는 시설에 대한 상세설계도면으로써 Woodchip이 충전된 경우이다. 집중강우 시 발생할 수 있는 초과유입량을 신속하

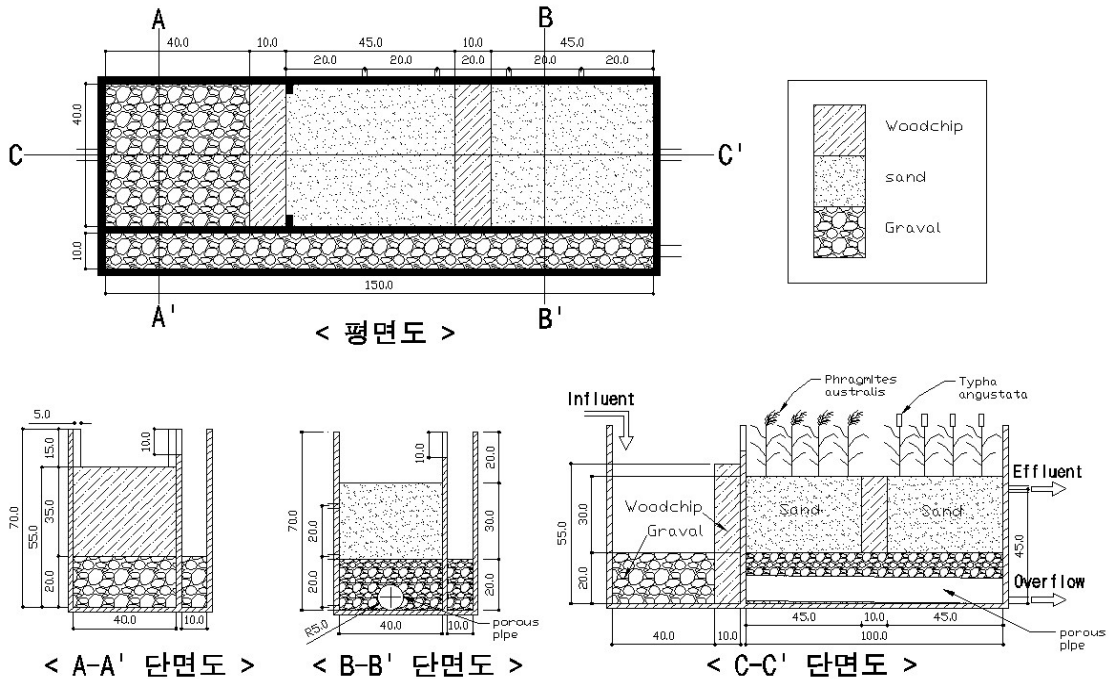


Fig. 2. Detailed design of the lab scale test bed

게 배제할 수 있도록 인공습지 진행방향의 우측면에 길이 방향으로 폭 10cm의 우회수로를 두었다. 유입수는 교반탱크로부터 연결된 PVC관을 통해 유입되며, 유출부는 습지부 말단 45cm 높이에 위치하였다. 습지부의 유하거리와 깊이에 따른 오염물질의 거동을 살펴보기 위하여 반응조의 측면에 12개의 포트를 설치하였으며, 유입된 원수가 습지부 하부로부터 습지부에 전체적으로 고루 퍼져나갈 수 있도록 습지부 바닥에 길이 방향으로 유공관을 적용하였다.

2.3 모니터링 및 분석 방법

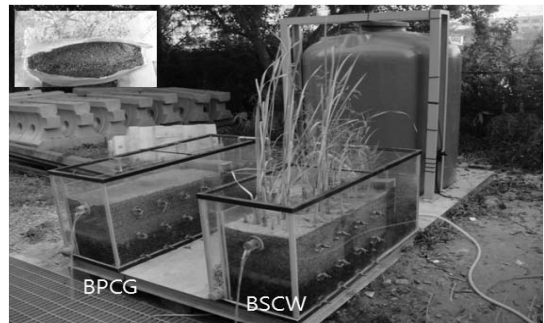
2.3.1 시설의 운영 및 모니터링 방법

Pilot-plant 시설의 유입수는 인공강우유출수로써, 150 μ m 이하의 도로퇴적물로 제조되었다. 유입수와 유출수는 포장지역의 강우유출수 유출특성

을 고려하여 0분, 30분, 1시간, 1시간 이후로는 1시간 간격으로 4시간 동안 각각 6개의 샘플을 채취하였다. 또한 습지부를 통과하는 오염물질의 거동을 살펴보기 위하여 시설 측면에 위치한 노즐을 통해 거리별, 높이별로 샘플을 채취하였다. 현장 측정 항목은 pH, DO, Conductivity이며, 채취된 시료는 실험실로 옮겨져 TSS, Turbidity, COD_{Cr}, BOD, TN, NH₄-N, TP, PO₄-P, Total Fe, Total Pb, Total Zn에 대하여 수질오염공정시험기준에 준하여 수질분석을 실시하였다. 식생유무, 수직여재의 종류에 따라 우드칩 소규모 인공습지(Woodchip Small Constructed Wetland, WSCW), 우드칩 식생대조군(Woodchip Plant Control Group, WPCG), Bottom ash 소규모 인공습지(Bottom ash Small Constructed Wetland, BSCW), Bottom ash 식생대조군(Bottom ash Plant Control Group, BPCG)로 나타내었다.



(a) Woodchip media of the vertical cartridge



(b) Bottom ash media of the vertical cartridge

Fig. 3. Panorama of the two lab scale systems (with and without vegetation)

2.3.2 EMC 및 저감효율 산정 방법

소규모 인공습지의 유입 · 유출수의 오염물질 부하량을 산정하기 위하여 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 식(2)에 의하여 산정하였다. 여기서 $C(t)$ 와 $Q_{TRu}(t)$ 는 강우

지속시간 t 에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다. 오염물질별 저감 효율은 식(3)을 적용하여 산정하였으며, M_{in} 은 유입부하량(kg), M_{out} 은 유출부하량(kg)이다.

$$EMC (mg/L) = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} = \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt} \quad (2)$$

$$RE(\%) = \frac{M_{in} - M_{out}}{M_{in}} \times 100 \quad (3)$$

3. 연구결과

3.1 모니터링 결과

Pilot-plant 실험은 2010년 6월부터 10월까지

진행되었으며 Table 2는 모니터링 결과를 정리한 것이다. 각각의 인공습지에 대하여 2 L/min, 4 L/min, 8 L/min의 유입유량이 적용되었으며, 유출유량은 유입유량과 동일하게 측정되었다. 인공 습지의 수위는 유입유량이 2 L/min일 때 43cm, 4 L/min일 때, 46cm, 8 L/min일 때 49cm로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

Table 2. Monitoring frequency of the lab scale test bed

Date	Flow	WSCW	WPCG	BSCW	BPCG	Middle Port
2010.06.17	4 L/min	1				
2010.06.21	2 L/min	1				
2010.06.24	8 L/min	1				1
2010.07.09	4 L/min	1				
2010.07.14	2 L/min	1				1
2010.07.27	8 L/min	1				
2010.08.03	4 L/min	1	1			1
2010.08.09	2 L/min	1	1			
2010.08.12	8 L/min	1				
2010.08.15	8 L/min		1			
2010.08.18	2 L/min			1	1	1
2010.09.04	4 L/min			1	1	1
2010.09.16	8 L/min				1	1
2010.10.13	8 L/min			1		
합계		9 회	3 회	3 회	3 회	6 회

3.2 여재의 물리적 특성

오염물질 저감 시설에 있어서, 시설 내부에 적용되는 여재의 종류 및 특성은 시설의 처리용량, 처리효율, 비용적인 측면에서 영향을 미친다. 따라서 적용 할 여재에 대하여 공극률, 비중, 균등계수, 투수계수에 대한 시험을 실시하였으며, Table 3에 시험 결과를 정리하였다. 시험 결과, 여재별 공극율은 0.37~0.46으로 분석되었으며,

입경이 커질수록 공극률 또한 커지는 경향을 보였다. 비중은 여재별로 1.08~2.64의 범위를 보였으며, 균등계수는 1.6~1.7의 범위를 보이며 일반적인 여과사의 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

Bottom ash의 인공습지 적용가능성을 평가하기 위하여 중금속에 대한 용출 및 흡착 실험을 수행하였다. 용출 및 흡착 실험은 1mm 이하, 1~2mm, 2~5mm의 입경 대하여 수행되었으며, Table 4와 Fig. 4는 실험결과를 보여준다. 용출

시험은 폐기물공정시험방법(환경부, 2007)에 준하여 Pb, Cu, As, Cr, Cd, 총 5항목에 대하여 수행되었다. 분석 결과, 모든 항목은 환경부의 폐기물관리법에서 지정한 허용치를 만족하였으며, 소규모 인공습지의 여재로 적용함에 있어 문제가 없는

것으로 나타났다. 흡착실험 결과, 입경이 작을수록 흡착능력이 뛰어난 것으로 나타났으며, 6시간 경과 후 62%, 24시간 경과 후 98%의 제거율을 보여, 중금속 흡착능력이 매우 뛰어난 것으로 나타났다.

Table 3. Physical properties of filter media

	모래 (2~5mm)	자갈 (10~20mm)	자갈 (20~30mm)	Woodchip (10~20mm)	Bottom ash (1~2mm)
공극률 (%)	40	42	46	43	37
비중	2.53	2.64	2.62	1.08	2.43
균등계수	1.7	1.6	1.7	1.6	1.5
투수계수 (cm/sec)	1.32	1.52	2.16	1.86	1.03

Table 4. Leaching test results of bottom ash

(단위 : mg/L)

Heavy metal	< 1mm	1~2mm	2~5mm	Limit
Pb	0.113 ± 0.002	0.113 ± 0.002	0.111 ± 0.006	3.0
Cu	0.123 ± 0.000	0.124 ± 0.005	0.130 ± 0.008	1.0
As	0.295 ± 0.004	0.287 ± 0.008	0.283 ± 0.006	1.5
Cr	0.112 ± 0.002	0.111 ± 0.001	0.111 ± 0.002	1.5
Cd	0.109 ± 0.001	0.109 ± 0.001	0.109 ± 0.000	0.3

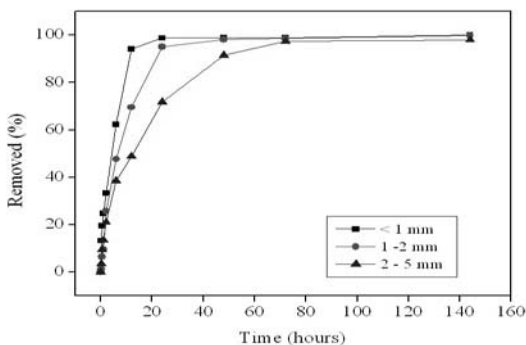


Fig. 4. Adsorption removal rate of Pb for various particle size range of bottom ash

3.3 유하거리에 따른 오염물질의 농도 변화

습지부를 통과하는 오염물질의 거동을 살펴보

기 위하여 반응조 측면에 위치한 12개의 포트로부터 샘플을 채취하였다. 샘플링은 각각의 유량조건에 대하여 2회씩 수행되었으며, Fig. 5는 유입 유량 2 L/min에 대한 분석결과를 보여주고 있다. 세로축은 오염물질의 농도를, 가로축은 흐름방향으로의 거리를 나타내며, 거리 20~80cm는 습지부 시작지점을 기준으로 나타낸 것이다. High 0, High 20, High 40은 시설바닥면을 기준으로 위쪽 방향으로 0cm, 20cm, 40cm 위치임을 의미한다.

DO는 침전부를 거쳐 습지부를 통과하면서 서서히 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 깊이별로 살펴보면, High 0과 High 40에 비해 High 20에서 비교적 높은 DO가 나타났으며, 이는 High 20 부근에 식생의 근권이 발달하여 산소가 계속적으로 공급된 결과로 보인다. pH의 경우,

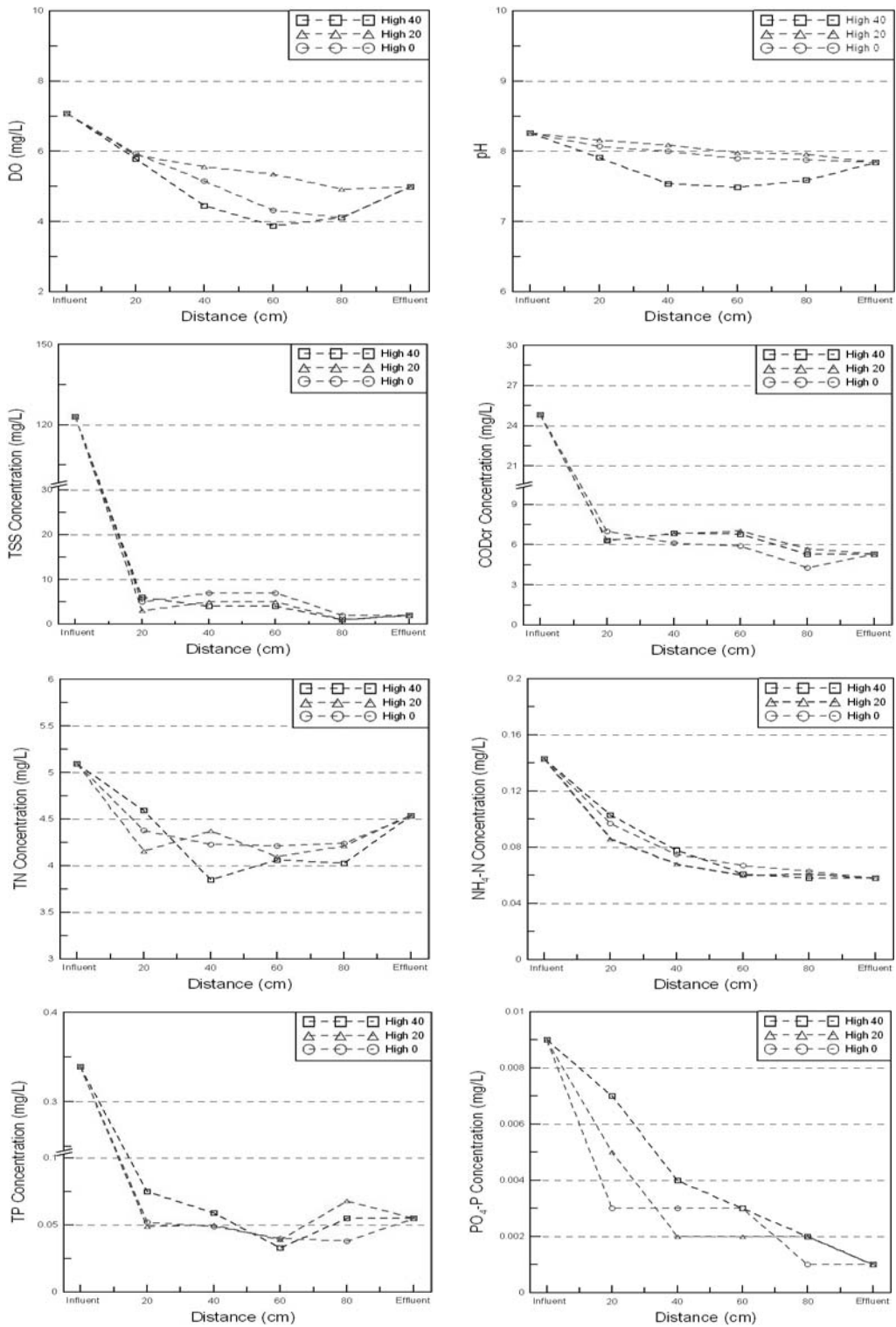


Fig. 5. Pollutant concentration plots with respect to distance

7.5~8.3의 범위를 보였으며, 침전부, 습지부를 거치면서 서서히 감소하는 경향을 보였으나 변화량은 매우 미비한 것으로 나타났다. 인공습지에서 유기물은 주로 물리적으로 제거되며, 유입수를 통하여 유입되는 입자형태의 유기물질이 저층으로 가라앉거나 식물체와 media에 부착하여 제거된다(허재규, 2007). 또한 TP의 제거는 주로 토양층에 의한 여과 및 흡착능에 의존하며, 습지에서 인은 이온과 결합한 인산염의 상태로 침전되며 습지 식물에 의해 일부는 흡수된다(Pant, H. K., 2001). 이렇듯 TSS를 비롯한 COD_{Cr}, TP의 주된 처리기작은 침전 및 여과, 흡착작용이며 Fig. 5에서 보여주듯이 TSS, COD_{Cr}, TP에 대한 오염물질 저감량중 대부분이 침전부와 수직여재를 거치면서 제거되는 것으로 나타났다. 또한 High 0의 농도가 High 20, High 40에 비해 높게 나타났으며, 이는 침전부와 습지부를 거치면서 침전, 여과, 흡착에 의해 저감된 입자성물질중 일부가 시설 바닥 부분에 축적된 결과로 보인다. TN은 침전부와 습지부를 거쳐 점차적으로 제거되는 경향을 보였으나, 그 양은 매우 미비한 것으로 나타났다. NH₄-N과 PO₄-P의 경우, 침전부와 수직여재를 거쳐 일부 제거된 이후, 대부분이 습지부를 거치면서 제거되는 것으로 나타났다. NH₄-N, PO₄-P와 같은 무기태 영양염류는 여재에 의한 흡착 작용에 의한 제거뿐만 아니라, 식물 및 미생물에 의해 쉽게 분해가능하기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 오염물질 저감효율 산정

소규모 인공습지의 적용 가능성 및 적정 설계 인자를 도출하기 위하여 EMC 산정 결과를 토대로 Pilot-plant 시설의 저감효율을 산정하였으며, Table 5는 시설별 저감효율을 정리한 것이다. 대부분의 오염물질은 유입유량이 증가할수록 저감효율이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 오염물질을 제거함에 있어서 시설 내 체류시간에 짧아질수록 오염물질과 여재, 식생, 습지 내 미생물과의 접촉 시간 역시 짧아졌기 때문인 것으로 보인다. 또한 WSCW와 BSCW 모두 각각의 식생 대조군에 비

해 높은 저감효율을 보여, 식생이 오염물질의 저감효율을 높이는데 기여를 하는 것으로 나타났다. WSCW에서 Turbidity와 TSS의 평균저감효율은 각각 91%, 95%로 입자성물질의 저감효율이 매우 우수한 것으로 나타났으며, BSCW 역시 92%, 95%로 입자성 물질에 대하여 높은 저감효율을 보였다. WSCW와 BSCW에서 COD_{Cr}의 평균저감효율이 각각 71%, 82%, TN의 평균저감효율이 각각 24%, 35%, TP가 각각 76%, 91%로 나타나, WSCW에 비해 BSCW의 저감효율이 전반적으로 우수한 것으로 분석되었다. 이는 Woodchip(10~20mm)보다 Bottom ash(1~2mm)의 입경이 비교적 작으며, 상대적으로 오염물질과 충돌할 기회가 많아져 침전, 여과, 흡착 등과 같은 물리적 반응이 보다 활발하게 일어난 결과로 보여진다. WSCW와 BSCW의 Total Zn의 평균저감효율이 각각 57%, 71%, Total Pb가 각각 22%, 57%로 수직여재 교체 후 중금속의 저감효율이 다른 오염물질에 비하여 크게 향상되었으며, 이는 Woodchip에 비해 Bottom ash의 중금속 흡착능이 우수하게 작용한 결과로 판단된다.

저감효율 산정결과, 이전의 연구(Table 6)에 비해 대체적으로 비슷하거나 우수한 것으로 나타났으며, 이는 초기 침강지에 의한 침전작용과 수직여재층에 사용된 Bottom ash에 의한 여과 및 흡착작용이 복합적으로 작용한 결과로 보여진다. 또한 Yeh et al.(2009)은 갈대와 부들을 식재한 인공습지를 통한 Total Cu와 Total Pb의 저감능력에 대한 연구를 실시하였으며, 연구 결과 Total Cu와 Total Pb의 저감효율이 각각 83%, 92%로 나타났다. 본 연구의 Total Pb 저감효율은 57%로 Yeh et al.(2009)의 연구 결과에 비해 낮은 저감효율을 보였으나, 여재 사이즈, 짧은 체류시간 등을 고려해 보면 양호한 결과라고 판단된다. 따라서 도시 및 도로지역 강우유출수에 다량 포함되어 있는 입자성물질 및 중금속을 처리함에 있어 HSSF형 인공습지의 적용이 적합할 것으로 보여진다.

Table 5. Pollutant removal efficiency with respect to flow rates

Parameter	Removal Efficiency (%)															
	WSCW				WPCG				BSCW				BPCG			
	2 L/min	4 L/min	8 L/min	Avg±SD	2 L/min	4 L/min	8 L/min	Avg±SD	2 L/min	4 L/min	8 L/min	Avg±SD	2 L/min	4 L/min	8 L/min	Avg±SD
Turbidity	93	89	91	91±2	88	84	89	87±3	96	91	89	92±3	95	90	87	91±4
TSS	94	93	97	95±2	94	87	93	92±4	94	95	96	95±1	96	95	93	95±1
COD _{Cr}	68	67	78	71±8	51	40	39	43±7	89	78	77	82±6	75	70	77	74±3
BOD	44	53	55	51±12	23	22	24	23±1	64	58	57	60±4	55	44	49	49±5
TN	27	22	21	24±5	24	21	19	21±2	46	33	26	35±10	30	25	14	23±8
NH ₄ -N	53	38	48	46±15	53	33	36	41±11	74	49	48	57±15	36	24	28	29±6
TP	80	70	79	76±7	73	56	38	56±18	92	93	87	91±3	89	90	86	88±2
PO ₄ -P	73	61	58	64±10	53	60	48	54±6	78	71	59	69±9	65	61	37	54±15
Total Fe	86	88	88	87±4	76	84	81	80±4	90	81	81	84±5	89	79	81	83±5
Total Zn	50	57	64	57±9	53	53	61	56±5	72	70	69	71±2	73	68	54	65±10
Total Pb	14	20	31	22±11	21	18	17	19±2	41	64	67	57±14	52	64	47	54±9

Table 6. Comparison of the removal efficiency with other studies

References	Zurita <i>et al.</i> , 2009	Yoon <i>et al.</i> , 1999	Akratos and Tsihrintzis, 2007	Herrera Melian <i>et al.</i> , 2010	Fountoulakis <i>et al.</i> , 2009	This Study, BSCW
Parameter	Characteristics					
Influent	Domestic Wastewater	Domestic Wastewater	Domestic Wastewater	Urban Wastewater	Domestic Wastewater	Road Sediment
L × W × H, m ³	3.6 × 0.9 × 0.3	9.0 × 2.0 × 1.0	3.0 × 0.75 × 1.0	1.2 × 0.55 × 0.5	3 m ³	1.5 × 0.5 × 0.7
Media (mm)	Gravel (12)	Sand	Gravel (0.25-16.0)	Gravel (6.5)	Gravel (10-100)	Bottom ash(1-2), Sand(2-5), Gravel(10-30)
Plant	Calla	Reed	Reed	Reed	Reed	Reed, Cattail
Parameter	Removal Efficiency (%)					
TSS	79	70	-	75	78	95
COD	76	-	90	40	70	82
TN	58	30	-	-	21	35
NH ₄ -N	47	-	79	25	-	57
TP	45	57	82	-	40	91
PO ₄ -P	-	-	89	24	-	69

3.5 식생 성장 추이

Fig. 6은 식생성장에 따른 오염물질의 저감효

율을 보여준다. 애기부들은 5월~7월 사이에 급격히 성장하다가 9월 이후 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 갈대의 경우 5월~10월까지 꾸준한 성

장하는 것으로 나타났다. 대부분의 오염물질은 식생이 성장할수록 저감효율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 특히 PO₄-P와 NH₄-N과 같은 무기태 영양염류의 경우, 이러한 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 수중에 이온 상태로 존재하면서 식생의 뿌리 및 줄기가 발달할수록 습지내 침전 및 여재에 의한 흡착제거 외에 식생에 의한 흡수, 식생근권에 존재하는 미생물에 의한 분해 작용 등이 활발히 작용한 결과로 보여진다. 그러나 단순히 식생의 평균 신장과 저감효율을 연계시키기에는 한계가 있기 때문에, Bio-mass 측정, 식물체의 TN, TP 측정 등과 같은 추가 실험이 보완되어야 할 것으로 보여진다.

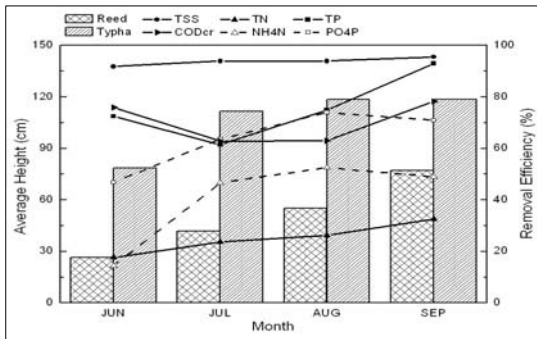


Fig. 6. Average monthly pollutant removal efficiencies and changes in plant height

5. 결론

최근 국내 강우유출수 관리에 대한 관심 및 인식이 높아지면서 LID 관련 기술의 개발 및 적용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 국내 환경에 적합한 가이드라인, 설계기준 등은 매우 부족한 실정이다. 본 연구는 도시 및 도로가의 조경 시설 공간을 활용하여, 자연적인 물순환을 구축하고, 강우시 발생하는 비점오염물질을 효율적으로 처리·배제할 수 있는 HSSF형 소규모 인공습지를 개발하고자 Pilot-plant 실험을 실시하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. Pilot-plant 실험 결과, 대부분의 오염물질은 침전부 및 수직여재를 통과하면서 저감되는

양이 상당한 것으로 나타났다. 도시지역 비점오염물질 중 큰 비중을 차지하는 입자성 물질, 중금속 등은 침전, 흡착, 여과와 같은 물리적 처리가 주된 처리기작인 만큼 소규모 인공습지에 침전부와 수직여재층의 접목은 성능 및 유지관리 측면을 고려했을 때 적절하다고 판단된다.

2. 대부분의 오염물질은 유입유량이 커질수록 저감효율 역시 감소하는 것으로 나타났으며, WSCW와 BSCW 모두 식생 대조군에 비해 높은 저감효율을 보이며, 식생에 의한 심미적 효과뿐만 아니라 수처리 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 수직여재의 경우, Bottom ash를 적용한 BSCW가 우수한 저감효율을 보였으며, 특히 중금속 항목에 있어 다른 시설에 비해 높은 저감효율을 보이는 것으로 나타났다. BSCW에서 TSS, COD_{Cr}, TN, TP, Total Zn, Total Pb의 평균저감효율은 각각 95%, 82%, 35%, 91%, 71%, 57%로 나타났으며, 도시 및 도로지역 강우유출수에 다량 포함되어 있는 입자성물질 및 중금속을 처리함에 있어 매우 효과적인 시설이 될 것으로 판단된다.
3. 식생의 성장과정이 오염물질의 저감 및 제거에 미치는 영향을 살펴보기 위한 Pilot-plant 실험 결과, 대부분의 오염물질은 식생이 성장할수록 저감효율이 증가하는 것으로 나타났으며, 영양염류의 경우 이러한 경향이 크게 나타났다. 하지만 보다 명확한 결과를 얻어내기 위하여 Bio-mass 측정, 식물체의 TN, TP 측정 등과 같은 추가 실험결과가 보완되어야 할 것으로 보여진다.

참고 문헌

강현경, 이정재, 녹지축 연결을 통한 생태공간 조성계획, 환경생태학회지, 10(1), pp. 24-38, 1996.
 강성원, 김석구, 김영임, 윤상란, 김소정, 도시지역

- 불투수면의 오염물질 유출특성 평가, 대한환경 공학회 2005 추계학술연구발표회 논문집, pp. 813-818, 2005.
- 김이형, 21세기 친환경 건설을 위한 Low Impact Development(LID) 기술, 물과 미래, 41(6), pp. 47-57, 2008.
- 윤춘경, 권순국, 우선호, 권태영, 농촌지역 수질개선을 위한 인공습지실험시설의 3년간 실험결과 검토, 한국물환경학회지, 15(4), pp. 518-589, 1999.
- 허재규, 남종현, 김용진, 김인선, 최경숙, 최승익, 안태석, 6년 동안 운영한 인공습지의 처리효율 분석, 한국환경물환경학회, 10(3), pp. 1-7, 2007.
- 환경부, 비점오염원관리 업무편람, 2006.
- 환경부, 폐기물공정시험방법, 2007.
- 환경연구정보시스템, 인공습지를 이용한 자연형 하천정화 기술(2), DICER TechInfo Part II, 3(12), pp. 589~597, 2004.
- Chrisotos S. Akrotas, Vassilios A. Tsihrintzis, Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands, Ecological Engineering, 29, pp. 173-191, 2007.
- Copper, P. F. and A. G. Boon, The use of phragmites for wastewater treatment by the root zone method: The UK approach. In K. R. Reddy and W. H. Smith (eds.), Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery, Magnolia Pub. Inc., Orlando, Florida. pp. 153-174, 1987.
- F. Zurita, J. De Anda, M.A. Belmont, Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands, Ecological Engineering, 35, pp. 816-869, 2009.
- J.A. Herrera Melian, A.J. Matrin Rodriguez, J. Arana, O. Gonzalez Diaz, J.J. Gonzalez Henriquez, Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands, Ecological Engineering, 36, pp. 891-899, 2010.
- M.S. Fountoulakis, S. Terzakis, N. Kalogerakis, T. Manios, Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and linear alkylbenzene sulfonates from domestic wastewater in pilot constructed wetlands and a gravel filter, Ecological Engineering, 35, pp. 1702-1709, 2009.
- Pant, H. K., Reddy, K. R. and Lemon. E., Phosphorous retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands, Ecological Engineering, 17, pp. 345-355, 2001.
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P., and Pauw, N., Model-based Design of Horizontal Subsurface Flow Constructed Treatment Wetlands : A Review, Water Res., 38(6), pp. 1484-1493, 2004.
- T.Y. Yeh, C.C. Chou, C.T. Pan, Heavy metal removal within pilot-scale constructed wetlands receiving river water contaminated by confined swine operations, Desalination, 249, pp. 368-373, 2009.
- U.S. EPA, Low Impact Development (LID); *A Literature Review*. EPA-841-B-00-005, 2000.
- 논문접수일 : 2011년 05월 16일
○ 심사의뢰일 : 2011년 05월 18일
○ 심사완료일 : 2011년 08월 08일