

연구논문

침투 여과형 비점오염저감시설의 설계 및 평가

최지연* · 말리* · 이소영* · 강창국* · 이정용* · 강희만** · 김이형*

공주대학교 건설환경공학부*, 한국도로공사 도로교통연구원**

(2010년 1월 30일 접수, 2010년 8월 16일 승인)

Evaluation and Design of Infiltration and Filtration BMP Facility

Choi, Ji Yeon* · Lee So Young* · Maniquiz, Marla Chua* · Kang, Chang Guk* · Lee, Jung Yong* · Kang, Hee-Man** · Kim, Lee-Hyung*

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chunanamdo 331-717, Korea*
Expressway and Transportation Research Institute, Hwaseong, Gyeonggi-do, 445-812, Korea**

(Manuscript received 30 January 2010; accepted 16 August 2010)

Abstract

Lots of pollutants typically originating from urban transportation are accumulating on the paved surfaces during dry periods and are washed-off directly to the river during a storm. Also, paved surfaces are contributing to increase in peak flows and volume of stormwater flows. These are the main reasons why the water quality of rivers and lakes remain polluted and still below standards. Currently, several management practices are being applied in developed countries but the design standards are still lacking. This research was conducted to develop a treatment technology that can be useful to address the problems concerning runoff quality and quantity. A lab scale infiltration device consisting of a pretreatment tank and media zone was designed and tested for various flow regimes characterizing the low, average and high intensity rainfall. Based on the experiments, the high intensity flow resulted to increase in outflow event mean concentration (EMC) of pollutants, about twice as much as the average outflow EMC. However, 78 to 88% of the total suspended solids were captured and retained in the pretreatment tank because of sedimentation. The removal of heavy metals such as zinc and lead was greatly affected by the vertical placement of woodchip layer prior to the media zone. It was observed that the high carbon content (almost 50%) in the woodchip provided opportunity for enhancing its uptake of metal by adsorption. The findings implied that the reduction of pollutants can be greatly achieved by means of proper pretreatment to allow for settling of particles with a combination of using high carbon source media like woodchip and a geotextile

mat to reduce the flow before filtering into the media zone and finally discharging to the drainage system.

Keywords : NPS, BMP, Heavy metals, EMC, Sediment

1. 서론

지속적인 인간의 활동으로 인한 유역의 개발은 자연적 물순환 시스템의 왜곡과 함께 다량의 비점 오염물질을 하천으로 유출시키고 있다. 환경부에서는 하천과 호소의 수질개선을 위해 많은 노력을 기울이고 있으나, 하천과 호소의 수질은 ' 좋음 ' 수준에 미달하고 있는 곳이 2007년에 70% 이상으로 나타나고 있다(이규만, 2009). 몇 년 전까지만 하더라도 우리나라의 수질 규제는 주로 점오염원에 중점을 두어 시행되어왔다. 이러한 정부의 노력으로 하천과 호소에 있어서 수질 개선은 어느 정도 이루어졌으나 더 이상의 진전이 이루어지지 않은 시점에서 비점오염원의 관리의 중요성이 대두되었다. 실제로 환경부가 비점오염원에 의한 수계의 영향을 파악한 결과 4대강 수계의 비점오염원 기여율이 2006년 기준으로 22~40%를 차지하는 것으로 나타났으며, 향후 2020년에는 65%까지 높아질 것으로 예측하였다(환경부, 2006). 따라서 환경부는 점오염원과 더불어 비점오염원을 관리하기 위해 유역으로부터 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 오염총량관리제(Total Pollution Load Management System)를 도입하였고 '수질 및 수생태계 보전에 관한 법률' 등을 제정하였다. 이에 4대강수계 시범사업 및 비점오염원 설치신고제도와 관련하여 대상사업장에 146개소의 비점오염저감시설을 설치하였다(환경부, 2008). 그러나 기술개발에 앞선 제도의 도입으로 국내에 설치된 비점오염저감시설은 적용과정에서 다양한 문제점, 즉 한국의 강우사상 및 토양특성이 고려되지 않은 비점오염저감기술의 적용 등을 나타내었다(김이형, 2009). 따라서 본 연구에서는 아시아 몬순기후에서 발생하는 강우사상인 여름철 집중강우에 대응가능하고, 도시지역의 초기강우 현상에도 높은 적응력을 가지고 있으며, 노년기의 실트 및 점토성의 토양 특성을 극복하는 토양치

환 기능을 겸비한 비점오염 저감 기술을 개발하고자 한다. 이러한 한국형 강우 및 토양특성에 적합한 저감기술은 여과 및 침투기능을 가진 기술이어야 하며, 비점오염저감 및 왜곡된 물순환시스템 회복에 기여할 것이다.

II. 연구방법

1. 여재의 입도 및 투수계수 선정

여재의 입도분포와 크기는 여과효율과 관계가 있으므로 중요한 설계인자이다. 본 연구에서는 총 7가지 여재에 대하여 한국산업규격인 KS F 2302를 근거하여 체 분석을 실시하였으며, 우드칩(Woodchip, WC), 모래(Sand, S1, S2, S3), 자갈(Gravel, G1, G2, G3)을 선정하여 시험을 수행되었다. 또한 투수계수(k)는 한국산업규격 KS F 2322의 정수위 방법을 참고하여 선정하였다.

2. 저감시설의 제작

실내모형실험을 위한 저감시설의 크기는 30cm×10cm×15cm (W×L×D)이며, 용량은 4,500cm³로 하였다. 본 저감시설의 오염물질 저감기작은 침전, 여과 및 침투이며, 이러한 저감기작을 가지게 하기 위하여 시설에는 초기침강지, 여과지, 침투지를 구성하였다(Figure 1). 초기침강지의 경우 전처리 시설이며 침전이외 추가적인 오염물질 제어를 위하여 하부에 여과층을 두었다. 이러한 여과층은 후속공정의 여재층의 과부하를 줄여 여과지와 침투지의 막힘현상(Clogging effect)을 늦출 수 있다. 여과지에서는 유지관리가 비교적 용이하며 초기강우현상을 제어할 수 있는 수직 여재와 초기강우 이후의 강우유출수를 처리하기 위한 수평여재를 배치하였다. 또한 침투를 통한 물순환시스템을 구축하기 위하여 초기침강지 및 여재부 하부에는 쇄석을 채운 침투

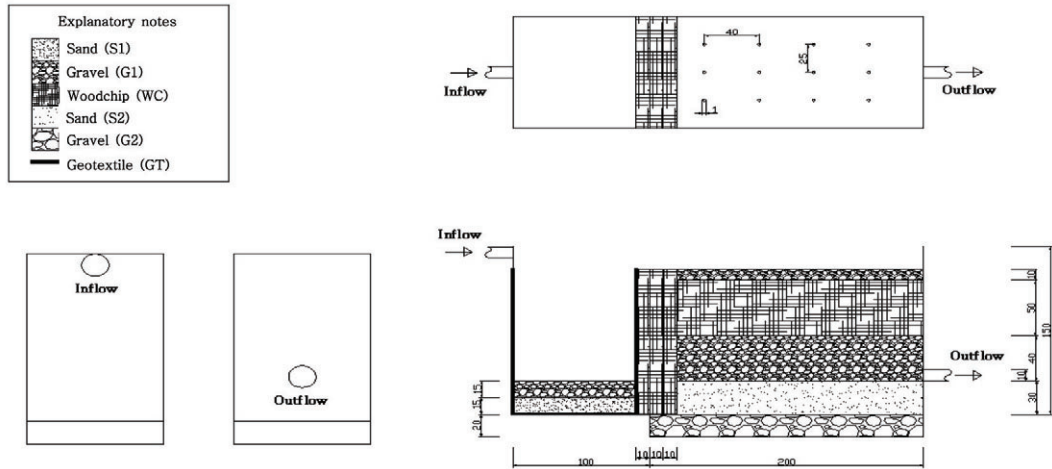


Figure 1. Trench design schematic

지를 설치하였다.

3. 저감시설의 실내모형실험 운영 및 모니터링 방법

저감시설의 실내모형실험은 유입유속을 달리하여 저감능력 실험을 수행하였으며, 막힘현상으로 인해 유출유속이 유입유속의 10%가 될 때까지 수행하였다. 다양한 유입유속 및 유량에의 대응가능 정도를 분석하기 위하여 case별 초기유입유속은 120mL/min (TEST-1), 242mL/min (TEST-2), 500mL/min (TEST-3)과 같이 실험을 시작하였다. 실험수행 중 막힘현상으로 인한 유속저하를 고려하고 초기침강지에서의 일정한 수두 유지를 위해 case별 유입속도를 점차적으로 감소시키면서 실험을 수행하였다. 저감시설의 실내모형 실험에 필요한 강우유출수는 차량운행이 빈번한 공주대학교 천안캠퍼스 교내 도로에서(25.4(W)×8.4(L)m²) 물을 뿌려 유출되는 유출수를 채취하여 실험에 이용하였다. 저감시설의 효율평가를 위하여 유입수, 유출수 및 침투수를 채취하였으며, 저감시설 내 유출이 발생되는 시점을 시작으로 시료채취는 6시간 간격으로 수행되었다.

4. 분석방법

모니터링을 통해 채취된 시료들은 수질오염공정시험법에 준하여 입자상물질로 TSS, Turbidity를

분석하였고, 중금속으로는 Total Pb, Total Cu, Total Zn, Total Fe, Total Ni, Total Cr, Total Cd 등의 수질분석이 이루어졌다. 본 논문에서는 TSS, Turbidity, Total Pb, Total Zn만 제시하고자 한다. 비점오염물질의 농도 산정에 있어서 단순히 산술평균농도로 계산하는 경우 실제 농도와 큰 농도 차이를 보일 수 있기에 정확한 부하량 산정을 위해서 유출유량을 고려한 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)로 산정하였다(Deletic and Mahsimovic, 1998; Ujevic *et al.*, 1998). EMC는 식 (1)과 같이 산정되며 식의 위 부분은 전체 오염물질 양을 나타내며 아래는 전체 유출유량을 나타내고 있다.

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

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

5. 저감시설 내 축적된 퇴적물 산정

저감시설 내 퇴적물의 축적은 수리학적 운영 및 저감시설의 기능을 저해하는 막힘현상, 과부하, overflow, 오염물질의 축적 및 낮은 저감효과 등의 문제를 야기시킨다(Ashley *et al.*, 1997). 따라서

본 논문에서는 오염물질의 축적현황을 파악하기 위하여 저감시설의 각 부분별 축적된 퇴적물의 양을 산정하여 퇴적물의 축적 분포를 분석하였다. 축적된 퇴적물은 식 (2)을 이용하여 산정하였으며, 퇴적물의 양은 건조 상태에서 측정되었다.

$$W_s = W_a + W_b \quad \text{식 (2)}$$

W_s = Weight of accumulated sediment in the media

W_a = Weight of media pack after experiment

W_b = Weight of media pack before experiment

모든 여재층은 Pack화 하였으며, 초기강우에 의한 오염물질을 제거하기위해 수직형태와 초기강우 이후 오염물질을 제거하기 위한 수평형태로 구성되었다. 수직여재 Pack의 경우 모양의 흐트러지지 않게 철제로 제작하였으며 수평여재 Pack의 경우 유연한 섬유상 소재를 사용하였다. 퇴적 및 여과된 오염물질의 흡착 및 여과형태와 퇴적물의 성분을 분석하기 위하여 SEM-EDX 실험을 수행하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 여재의 물리적 특성 및 반응조의 구조

본 연구에서 사용한 여재 및 재료는 모래, 자갈 및 우드칩으로 Table 1은 입도범위, 가격 및 물리적 특성 등을 나타내고 있다. 여재별 입도범위를 살펴보면 우드칩(WC)은 2.00~4.76mm, 모래의 경우 S1은 0.25~0.84mm, S2는 0.42~0.84mm이며, S3은 0.42~2.00로 나타났다. 자갈의 경우 G1은 0.25~4.76mm, G2는 0.25~9.51mm로 나타났고

G3의 경우 9.51~13.20mm의 범위를 보이고 있다. 유효경(Effective size, D_{10})은 반응조의 운영시간과 밀접한 관계를 가져 효율에도 관계가 깊다. 유효경을 살펴보면 S의 경우 0.45~0.92mm까지 나타났고 G의 경우 1.90~11.20mm로 여재의 종류별로 각각 다른 값을 보였다. 모래의 경우 입도범위와 중간값이 작을수록 가격이 낮은 반면 자갈의 경우 모래보다 가격이 높으며 가격은 크기에 비례하지 않게 나타났다. 투수계수를 살펴보면 모래의 경우 0.169~0.602cm/sec로 나타났으며 자갈의 경우 0.940~1.965cm/sec의 범위로 분석되었다. 모래와 자갈의 공극률은 36~54 %이며, 우드칩의 경우 75%를 나타냈다. 우드칩의 경우 작은 반응조 크기를 감안하여 잘게 부서 체를 통과하였기에 모래와 자갈보다는 입경이 고르게 분포 하므로 높은 공극률을 보인다. 또한 각 여재별로 다짐의 정도가 달라 다양한 공극률을 나타내고 있다.

Figure 2는 유입수의 흐름에 대한 모식도를 나타내고 있으며, Table 2는 유입유속을 달리하여 수행된 저감시설의 운영 및 시료채취 현황을 보이고 있다. TEST-1의 경우 초기 유입유량은 120 mL/min

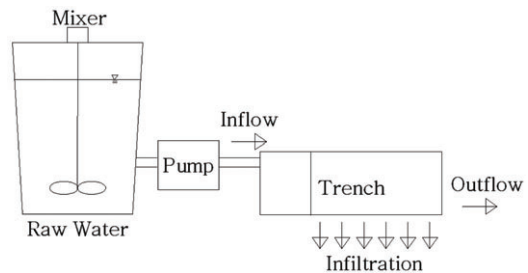


Figure 2. Test design schematic

Table 1. Media characteristics

Type of media	D_{10} (mm)	Media range(mm)	Price(W/ton)	Permeability(cm/sec)	Porosity	
Sand	S1	0.45	0.25~0.84	67,000	0.169	44.3
	S2	0.71	0.42~0.84	78,000	0.435	44.4
	S3	0.92	0.42~2.00	98,000	0.602	36.3
Gravel	G1	1.90	0.25~4.76	90,000	0.940	42.1
	G2	4.80	0.25~9.51	95,000	1.292	43.6
	G3	11.20	9.51~13.20	88,000	1.965	54.0
Woodchip (crushed)	WC	-	2.00~4.76	85,000	1.015	75.2

Table 2. Operating and sampling conditions

TEST No.	Regime	Average flow rate(mL/min)	Running time(hr)	Water Depth (cm)	HRT (min)	Number of collected samples		
						In	Out	Infiltration
TEST-1	Low Constant water level	120	138	4	15.7	24	24	4
TEST-2	Constant water level	242	180	9	3.2	33	33	5
TEST-3	Overflow	500	68	13	2.6	13	13	2

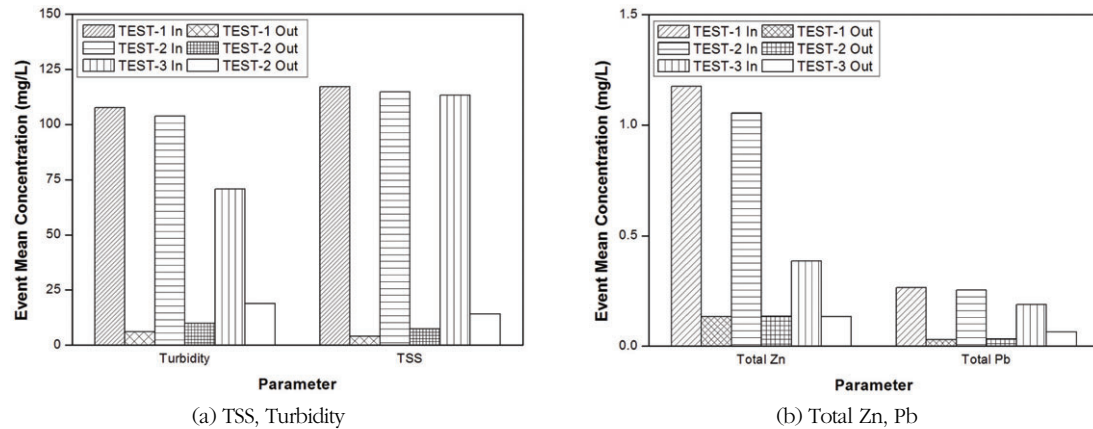


Figure 3. Inflow and Outflow EMC

로 시작되었으며, 침강지에서의 수위가 4cm로 일정하도록 유입유량을 감소시키면서 유출유량이 유입유량의 10%가 될 때 까지 138시간 동안 수행되었다. TEST-2의 경우 242mL/min의 초기 유입유량으로 실험이 수행되었으며, 침강지에서의 수위가 9cm가 되도록 유입유량을 변동시키면서 총 180시간 동안 수행되었다. TEST-3의 경우 집중강우에 의한 현상을 분석하기 위한 실험이며, 시설내 모든 여재가 강우유출수에 잠길 정도의 수위를 유지하였으며, 이때 초기 유입유량은 500mL/min로 시작하였다.

2. 저감능력 및 시설내 축적 퇴적물의 양

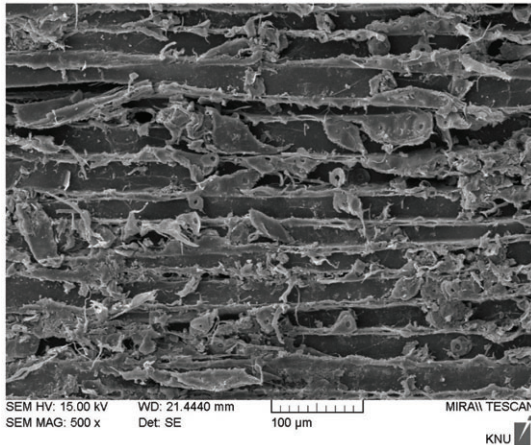
Figure 3은 유입 및 유출수의 EMC를 산정한 값이며 저감효율이 매우 높게 나타났다. 유입유량 대비 저감효율을 살펴보면 유입유량이 증가할수록 시설내 체류시간이 짧아져 TSS 및 Turbidity의 저감효율이 낮게 나타났으나, 중금속의 경우 유입유량의 증가에도 불구하고 거의 일정한 유출농도를 보이는 것으로 나타났다.

저감시설 내 퇴적물의 축적은 수리학적 운영 및 저감시설의 오염물질 저감능력을 저해하기에 이를 최소화하기 위한 전처리 시설이 필요하다(환경부, 2005; Galli, 1993; Maryland Department of the Environment, 2000). Table 3은 저감시설의 각 기작에서 제거되는 오염물질의 제거율을 기작(침전, 여과 및 침투)별로 나타낸 것이다. 퇴적물의 대부분은 저감시설의 전처리 시설에서 78~88%로 퇴적되는 것으로 나타나 전처리 시설의 개선효과가 크게 나타났다. 따라서 향후 전처리 시설로서 침강지를 설계할 시에는 여과기능을 덧붙임으로써 후속으로 연결되는 여재층의 교환주기를 상당기간 늘릴 수 있어 유지관리의 용이성을 가져올 것으로 판단된다.

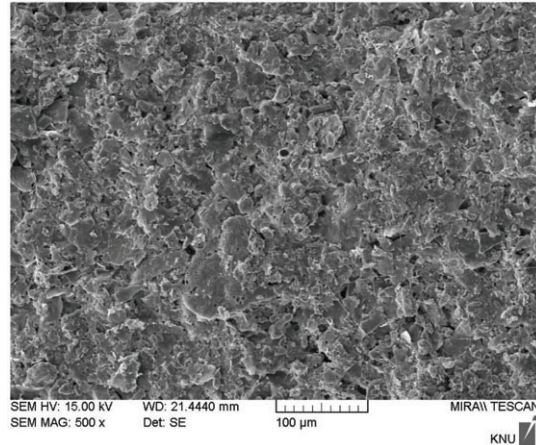
Figure 4는 TEST-2의 첫 번째 수직여재에서 사용된 우드칩의 실험 전과 후의 고 분해능 주사현미경(SEM) 분석결과를 나타내고 있다. 실험에 사용된 우드칩은 넓은 표면적을 가지고 있어 많은 양의 퇴적물이 흡착되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 Figure 5는 Energy Dispersive X-ray Analysis

Table 3. Accumulated sediment for each test

Treatment Region	Layer Code	TEST-1		TEST-2		TEST-3	
		Sediment accumulation rate (mg/d-cm ³)	Sediment removal by layer (%)	Sediment accumulation rate (mg/d-cm ³)	Sediment removal by layer (%)	Sediment accumulation rate (mg/d-cm ³)	Sediment removal by layer (%)
Pretreatment Tank	H*-SG	29.82	63.3	39.25	58.7	4.76	7.7
	H-FS	8.61	18.3	7.64	11.4	42.76	69.5
	GT*	3.12	6.6	5.57	8.3	2.32	3.8
Trench Media Layer	V*-WC 1	0.47	1.0	2.96	4.4	0.44	0.7
	V-WC 2	2.81	6.0	3.72	5.6	1.42	2.3
	V-WC 3	0.13	0.3	3.02	4.5	1.45	2.4
	H-SG	0.15	0.3	0.71	1.1	0.33	0.5
	H-WC	0.18	0.4	0.89	1.3	0.15	0.2
	H-SG	0.82	1.7	0.36	0.5	3.52	5.7
	H-MS	0.87	1.8	2.65	4.0	4.18	6.8
Infiltration Layer	H-MG	0.13	0.3	0.11	0.2	0.23	0.4



(a) Before Experiment (500×)



(b) After Experiment (500×)

Figure 4. SEM analysis of woodchip

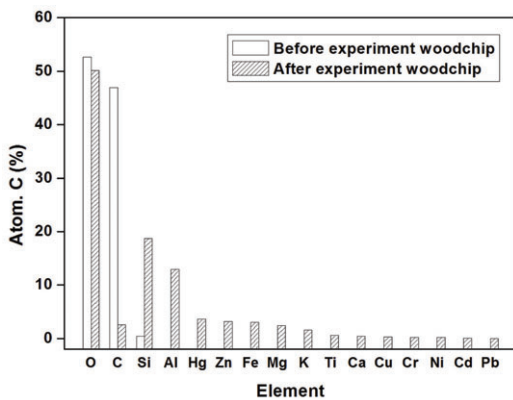


Figure 5. Elements of woodchip

(EDX)를 이용하여 퇴적물이 흡착되기 전과 후의 우드칩 원소 성분비를 정성 분석한 결과를 보이고 있다. 오염물질이 흡착되기 전의 우드칩은 O, C, Si가 주요 원소성분으로 구성되어 있었으나 흡착이 진행된 이후에는 C는 47%에서 3%로 감소하였고 Si, Al, Hg, Zn, Fe 등의 중금속의 함량이 매우 높게 나타나 있다. 이러한 현상은 우드칩의 높은 구성원소인 C가 우드칩의 중금속 흡착 능력을 높인 결과로 판단된다. C의 경우 중금속을 흡착할 수 있는 기회를 제공하고 C의 성분이 높을수록 중금속의 제거효율이 높은 것으로 알려져 있다(Yin *et. al.*, 2009).

IV. 결론

환경부는 그동안 기존 비점오염저감시설의 분류를 장치형 및 자연형과 같이 이분법적 분류를 함으로써 저감효율을 높이는 기술개발에 제약을 가져왔다. 또한 기존의 장치형은 침강지의 정체수 문제 및 여름철 집중강우시 낮은 저감효율 문제 등을 내포하였으며, 자연형의 경우 실트와 점토로 구성되어 있는 노년기 한국 토양특성에 적응도가 낮은 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서는 장치형의 특성인 여과능력과 자연형의 특징인 침투기작을 응용한 기술을 개발함으로써 국내 강우 및 토양특성에 적합한 기술을 개발하고자 한다. 실험실 분석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실험결과 입자상 및 중금속에서 80%이상의 높은 저감효율을 나타내었는데, 이러한 능력은 여재에 의한 흡착능과 침투에 의한 유출유량 저감에 의한 영향으로 분석되었다.

2. 전처리 시설인 침강지에서의 여재사용은 침전 이외 추가적인 오염물질을 제거함으로써 전처리 시설에서의 제거효율을 증가시켰으며, 후속공정의 여재 교환주기를 연장시키는 결과를 도출하였다.

3. 여재부의 수직여재는 오염물질의 농도가 높은 초기강우에 높은 대응정도를 보였으며, 후속공정인 수평여재의 막힘현상을 줄여 유지관리 용이성이 높은 것으로 나타났다.

4. 우드칩에서 탄소 함량의 변화(47%→3%)로부터 우드칩은 탄소를 이용하여 중금속의 흡착기회를 증대시켜 오염물질의 제거능을 높이는데 기여하였다. 향후 우드칩을 이용한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- 김이형, 2009, 침투여과 및 인공습지를 이용한 비점오염원 및 유역관리방안, 워터저널, 63, 52-55.
- 이규만, 2009, 4대강 건강성 회복 추진 방향, 2009 4대강살리기 수생태복원국제심포지엄, 3-19.

환경부, 2005, 비점오염원관리업무편람.

환경부, 2006, 물환경관리 기본계획.

환경부, 2008, 비점오염저감시설 설치, 운영 실태 조사 결과보고서.

Ashley, R. M., C. Jefferies, and R.A. Fleming, 1997, The use of models for the design and performance testing of source control systems, Proceedings in CIWEM Conference and on Integrated Modeling.

Deletic, A. B. and Mahsimovic, C. T., 1998, Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas, J. of water Environmental Engineering, 124(9), 869-879.

Galli, J., 1993, Analysis of Urban BMP Performance and Longevity in Prince Georges County, Maryland. Metropolitan Washington Council of Governments, 202.

Maryland Department of the Environment (MDE), 2000, Maryland Stormwater Design Manual.

Ujevic, I., Odzak, N., and Baric, A, 2000, Trace metal accumulation in different grain size fraction of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastwaters, Water Res, 34, 3055-3061.

Yin, Y., Impellitteri, C. A., You, S.-J., Allen, H. E., 2002, The importance of soil organic matter distribution and extract soil: solution ratio on the desorption of heavy metals from soils. Sci. Total Environ., 287, 107-119.