

# 개선된 여과형 시설의 비점오염물질 처리효율 평가

장 희 만\* / 최 지 연\*\* / 김 이 형\*\*\* / 배 우 근\*\*\*\*†

## Treatment Efficiency of Non-Point Source Pollutants Using Modified Filtration System

Hee man Kang\* / Jiyon Choi\*\* / Lee-Hyung Kim\*\*\* / Woo keun Bae\*\*\*\*†

**요약** : 본 연구는 여과와 침투기작을 이용한 개선된 여과형 시설의 비점오염물질 처리효율을 평가하고자 수행되었다. 저감시설은 지리학적 기후학적인 인자를 고려하여 기존의 저감시설의 단점을 보완하여 설계되었다. 저감시설의 처리효율 평가는 실험실 규모로 수행되었으며, 3가지 유형의 유속[초기강우(120 mL/min), 일반적인 강우(242 mL/min), 집중호우(500 mL/min)]을 적용하여 실험을 진행하였고, 이를 통하여 수질 분석 및 물수지를 산정하였다. 실험결과, 저감시설의 입자상 물질 제거 효율은 90%이상으로 높게 분석되었다. 3가지의 유속변화 실험 중, 집중호우의 경우에서 11~91% 범위로 낮은 제거효율을 보였는데, 이는 다른 유속에 비해 짧은 체류시간을 갖기 때문으로 판단된다. 또한 저감시설의 물수지 산정결과 침투량은 유출량의 약 1%에 불과하여 향후 저감시설 설계 시, 침투를 증가시키기 위해서 시설하부의 토양치환 등을 통한 침투량 및 저류량을 증가시킬 수 있는 기술적 접근이 필요하며, 이는 오염물질의 저감에 크게 기여할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 비점오염원, 침투, 여과, EMC, 물수지

**Abstract** : The objective of this study was to evaluate the efficiency of a modified filtration system treating non-point source (NPS) pollutants. The developed Best Management Practice (BMP) technology was designed based on the geographical and climatic characteristics of the site. A lab-scale test experiment was conducted using three different hydraulic loading rates representing the first flush flow, average flow and overflow conditions during a rainfall event. Water quality analysis was performed on the water samples taken at the inflow, outflow and infiltration during the test experiment of the lab-scale BMP. Also, the water and mass balance at different hydraulic loading rates was determined. Results from the lab-scale test experiment showed that the lab-scale BMP had a high removal efficiency of 80-90% for all NPS pollutants. The overflow test condition obtained the lowest removal efficiency among the hydraulic loading rates because it gave less opportunity for the pollutants to be filtered and retained inside system. The infiltration ratio was approximately 1 % of the inflow and outflow. Increasing the infiltration ratio requires technical approach of soil amendment where the BMP is installed.

**Keywords** : Non-point source, Infiltration, Filtration, EMC, Water balance

### 1. 서 론

환경부에서는 4대강 비점오염원 기여율이 1998년 기준으로 22~37% 정도였던 것이 향후

2015년에는 65~70%정도로 증가할 것으로 예측됨에 따라 비점오염원 관리에 대해 관심을 갖게 되었다(환경부, 2004). 그러나 토지이용 및 강우 특성에 따른 비점오염원의 유출 특성은 매우 다양

† Corresponding author : wkbae@hanyang.ac.kr  
\* 정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 · 책임연구원  
\*\* 정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 박사과정  
\*\*\* 정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 교수  
\*\*\*\* 정희원 · 한양대학교 건설환경공학과 · 교수

하며, 이를 처리하기 위한 비점오염저감시설에 대한 설계 기준 및 유지관리 방안 수립이 어려운 실정이다.

특히 우리나라의 경우, 좁은 국토면적과 더불어 국토의 70%가 산지로 형성되어 있다. 대부분의 강우유출수는 이러한 지세를 따라 빠르게 이동되기 때문에 지표로 침투되기 어려우며, 급속한 도시화로 인한 불투수층의 증가는 물의 저류 및 침투를 더욱 힘들게 만들고 있는 실정이다. 또한 불투수층 증가는 침투 유량의 증가, 기저 유출 감소, 퇴적도 부하량 변화, 다양한 종류의 오염물질 유출 등을 야기하게 되며, 이러한 영향은 인근 수계의 자정작용을 악화시키면서 심각한 수생태계 파괴를 유발하게 된다(EPA, 1997). 따라서 도시 내부에 물의 저류량과 침투량을 확보하여 도시 열섬 효과를 감소시키고 도시 홍수를 저감시킴과 동시에 비점오염물질의 유출을 저감하여, 수생태계를 보전할 수 있는 LID(Low Impact Development) 기술의 적용이 필요하다(김이형, 2008).

여과형 비점오염저감시설의 설계요소는 최소 여과층의 두께 및 표면적, 공극율 및 투수계수 등이며, 각각의 기준은 처리 강우량이 결정되면 간단한 식을 이용하여 계산할 수 있다(EPA, 1999). 그러나 국내 비점오염처리를 위한 여과형 시설의

경우 비점저감시설의 설치 및 관리 운영 매뉴얼(환경부, 2008)을 참고하여 설계하고 있으나, 세부 설계기준이 명확하지 않아 현장에서 적용하기에 어려운 실정이다.

또한 국내에서 적용되는 침투형 시설의 설계기준 중 침투속도의 경우 13 mm/hr 이상이 되도록 권고하고 있으며, 미국의 설계기준과 동일하게 적용되고 있다(Caltrans 2009). 그러나 현실적으로 국내 토양의 경우 침투속도 13 mm/hr 이상을 만족하기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 여과형 시설이 단일여과로만 구성되어 설치되었다면 다양한 여재를 여러 층으로 혼합하여 구성한 경우에 대한 처리효율을 평가하고자 하였으며, 여과형 시설의 하부에 침투 특성을 갖도록 개량한 침투여과형 비점오염처리시설의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 여재 입도 및 투수계수 실험

여재의 입도분포와 크기는 여과효율에 큰 영향을 미치므로 본 실험에 사용될 5가지 여재[우드칩(Crushed wood chip, CWC), 중간모래(Medium

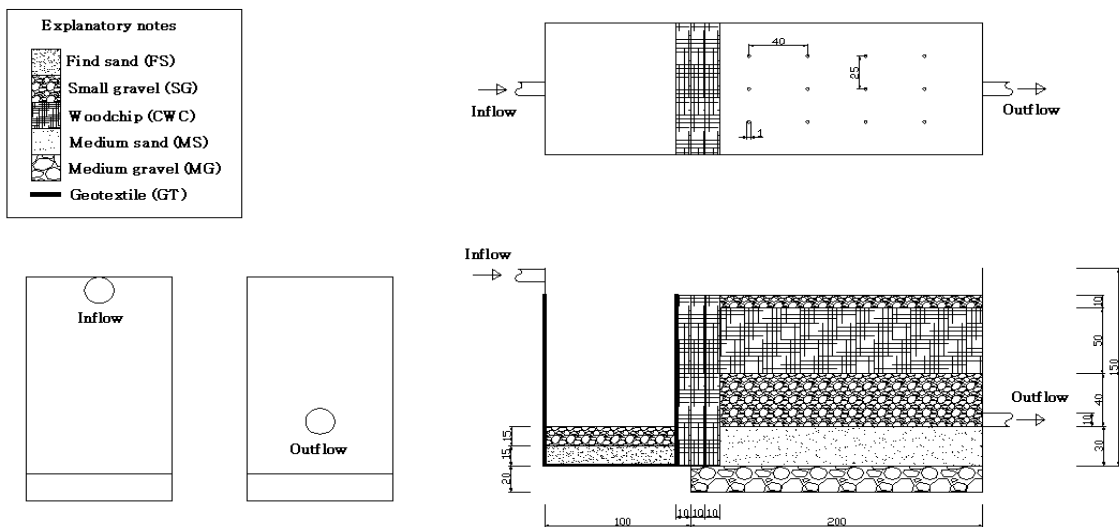


Fig. 1. Schematic of Modified Filtration System

Sand, MS), 가는 모래(Fine Sand, FS), 중간 자갈(Medium Gravel, MG), 가는 자갈(Small Gravel, SG)]에 대하여 한국산업규격인 KS F 2302에 근거하여 체 분석을 수행하였다. 투수계수는 침투시설의 중요한 기작으로, LID 기술 중 침투시설에서 중요하게 고려되는 설계인자이므로 적정 투수계수(k) 산정을 위하여 정수위 투수시험(한국산업규격 KS F 2322 근거)을 실시하였다.

## 2.2 개선된 침투여과형 저감시설 설계 및 운전

실내모형실험을 수행하기 위한 저감시설은 10cm×30cm×15cm (W×L×D)의 크기이며, 용량은 4,500 cm<sup>3</sup>로 하였다. Fig. 1은 개선된 침투여과형 저감시설의 도면으로, 초기 침전지, 여과지, 침투지로 구성되어있다. 저감시설의 세부 구성별 특징을 살펴보면, 초기 침전지의 경우 기존의 초기 침전지와는 달리 여과 기작이 적용된 형태로 지오텍스타일(Geotextile, GT)을 하부에 배치하였고, 그 위로 FS와 SG를 배치하여 초기 침전지에 여과 성능을 추가하였다. 여과지에서는 유지관리가 비교적 용이한 수직형태로 CWC 여재를 3겹 배치하여 초기침전지에서 통과된 오염물질을 저감시킴으로써 후단의 수평여재의 교체기간을 증가시킬수 있도록 하였으며, 수평여재의 경우 CWC, SG, MS여재를 혼합하여 배치함으로써 여과효율을 높이고자 하였다. 하부의 침투지에는 MG를 이용하여 침투를 용이하게 하였다.

실내모형실험은 Siriwardene 등(2007)의 연구방법을 바탕으로 막힘 현상(Clogging effect)으로 인해 유출유속이 유입유속의 10%가 될 때까지 수행되었으며, 다양한 유입유속에 적용 가능한 정도를 분석하기 위하여 [120 mL/min (TEST-1), 242 mL/min (TEST-2), 500 mL/min (TEST-3)]로 나누어 진행하였다. 실험수행 중, 막힘 현상으로 인한 유속저하를 고려하고 초기 침강지에서의 일정한 수두 유지를 위해 TEST별 유입유속을 점차적으로 감소시키면서 실험을 수행하였다. 저감시설의 효율평가 및 물질수지 분석을 위하여 저감

시설 내 유출이 발생하는 시점을 시작으로 유입수, 유출수 및 침투수를 6시간 간격으로 채취하여 분석하였다. 또한 저감시설 실내모형 실험에 사용된 인공 강우유출수는 공주대학교 천안캠퍼스 교내에 차량운행이 빈번한 도로로부터 채취하여 사용하였다.

## 2.3 분석방법

모니터링을 통해 채취된 시료는 수질오염공정시험법에 준하여 수질분석이 이루어졌다. 분석항목은 입자상물질, 유기물질, 영양염류 및 중금속으로 수질시험공정시험법에 준하여 분석하였다. 분석된 수질데이터와 유량을 고려하여 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였다. 산정된 EMC를 이용하여 제거효율법(Efficiency Ratio, ER, 식1)으로 제거효율을 구하였으며, 저감시설로의 유입량과 유출량 및 침투량을 측정하여 물수지(Water balance, 식2)를 산정하였다.

$$ER (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N RE_i}{N} \quad (1)$$

$N = No. of events, i = Storm event, RE_i = Removal efficiency$

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{inf} \quad (2)$$

$Q_{in} = Inflow, Q_{out} = Outflow, Q_{inf} = Infiltration flow$

## 3. 연구결과

### 3.1 여재의 특성

여재별 입도범위를 살펴보면, 모래는 0.25~0.84 mm, 자갈은 0.84~9.51 mm 범위로 나타났으며, 이는 미국환경청(EPA)에서 제시한 여과재 기준입도 0.5~1.0 mm와 비교할 때 모래 및 자갈은 유사

한 입도인 것으로 나타났으나 우드칩은 입도가 매우 큰 것으로 평가된다. 저감시설의 운영시간과 효율에 밀접한 관계를 미치는 유효경(Effective size,  $D_{10}$ )을 살펴보면, 모래의 경우 0.45~0.71 mm, 자갈의 경우 1.90~4.80 mm를 보이고 있다. 또한 투수계수는 자갈의 경우 평균 0.940~1.292 cm/sec의 범위를 나타내었고, 모래의 경우 0.169~0.435 cm/sec의 범위로 분석되었다. 공극률의 경우 여과재로 사용된 모래와 자갈은 42.1~44.4%로 나타내 미국의 공극률 설계기준인 30%에 비하여 다소 높게 나타났으며, 수직여과재로 사용된 우드칩의 공극률은 75.2%로 매우 높은 것으로 분석되었다. 이는 우드칩의 경우 체가름을 통하여 얻어진 재료로서 입자의 크기가 모래와 자갈보다는 고르게 분포하기 때문인 것으로 사료된다. 실험 결과를 바탕으로 초기 침전지에는 FS와 SG, 여과지는 CWC, MS, SG를 선정하였으며, 침투지에는 비교적 높은 투수계수 값을 가진 MG로 설치하였다.

### 3.2 모니터링 결과

유입유속을 달리하여 저감시설을 운영한 결과 Table 2에 정리하여 나타내었다. TEST-1의 경우 초기 유입유속은 120 mL/min로 시작되었으며, 침강지에서의 수위가 4 cm로 일정하도록 유입유속을 감소시키면서 138시간 동안 수행되었다. TEST-2의 경우 242 mL/min의 초기 유입유속으로 실험이

수행되었으며, 침강지에서의 수위가 9 cm가 되도록 유입유속을 변동시키면서 총 180시간 동안 수행되었다. TEST-3의 경우 집중강우에 의한 현상을 분석하기 위한 실험이며, 시설내 모든 여과강우유출수에 잠길 정도의 수위 13 cm를 유지하였으며, 이때 초기 유입유속은 500 mL/min로 시작하여 다른 유입조건에 비해 짧은 시간 동안 수행되었다.

Fig. 2~4는 3가지 유입조건 별로 운전시간에 따른 오염물질 및 유량 변동 곡선을 나타낸 것이다. TEST-1과 TEST-2의 경우, 대부분의 오염물질에서 유입부하 변동에도 불구하고 처리수의 농도는 일정하게 유지되는 것으로 나타났으나 운전시간이 경과될수록 처리수의 오염물질 농도가 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다. 특히 유기물의 경우 초기 유출농도에 비해 3배 이상 높게 유출되었는데 이는 운전시간이 경과됨에 따라 여과 공극 속에 포집된 부유물질이 일부 돌파되었기 때문인 것으로 사료된다.

유입유속을 증가시킨 TEST-3의 경우, 오염물질 처리량이 비교적 낮게 나타났는데 이는 오염부하율이 증가할수록 제거효율이 감소한다고 보고된 자료와도 일치하는 것이다(방기웅 등, 2007). 또한 유량이 증가함에 따라 여과시설의 수리학적체류시간(HRT)이 짧아져 유입되는 오염물질의 침전 및 흡착 등의 기작이 잘 이루어지지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

Table 1. Media characteristics

Type of media		$D_{10}$ (mm)	Media range (mm)	Permeability (cm/sec)	Porosity (%)
FS	Fine Sand	0.45	0.25~0.84	0.169	44.3
MS	Medium Sand	0.71	0.42~0.84	0.435	44.4
SG	Small Gravel	1.90	0.25~4.76	0.940	42.1
MG	Medium Gravel	4.80	0.25~9.51	1.292	43.6
CWC	Wood chip	-	2.00~4.76	1.015	75.2

Table 2. Sampling conditions

TEST No.	Regime	Hydraulic loading (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

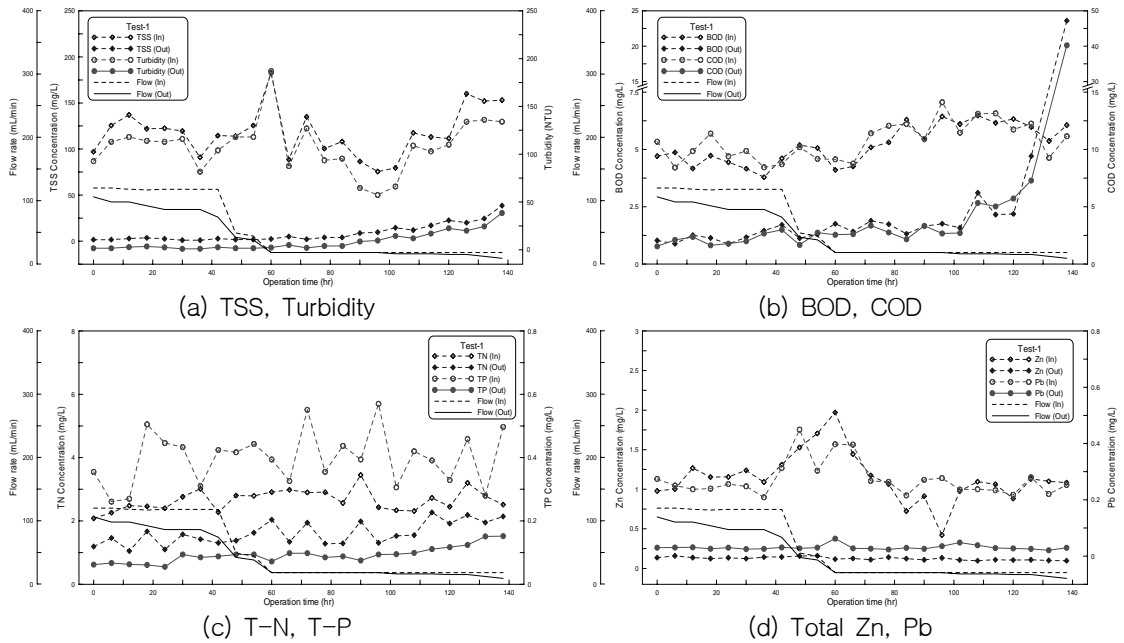


Fig. 2. Polluto and Hydro-graphs (TEST-1)

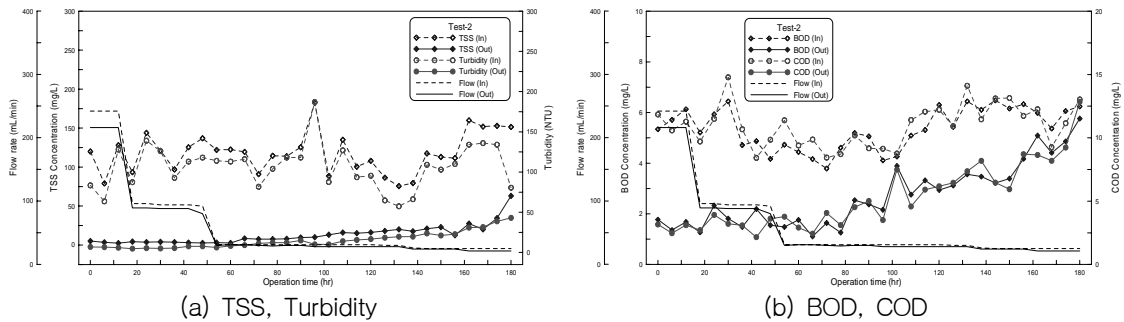


Fig. 3. Polluto and Hydro-graphs (TEST-2)

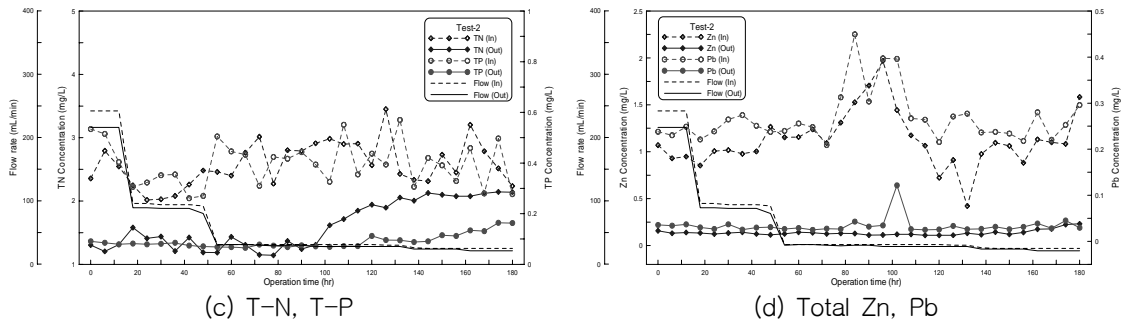


Fig. 3. Polluto and Hydro-graphs (TEST-2) (계속)

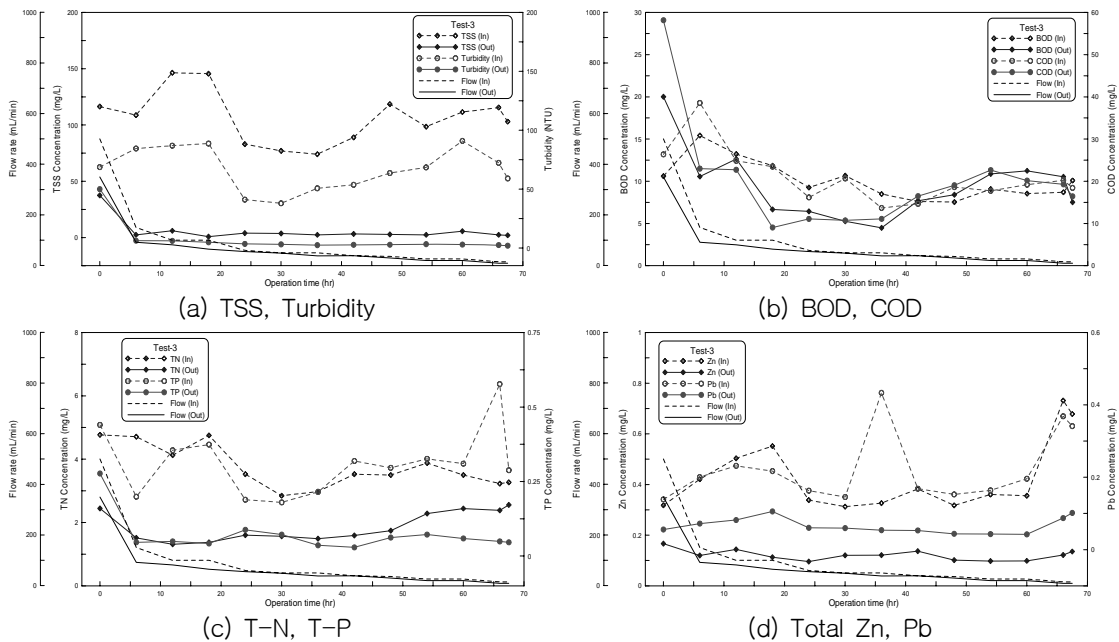


Fig. 4. Polluto and Hydro-graphs (TEST-3)

### 3.3 EMC 산정 및 처리효율 평가

개선된 여과시설에 대하여 3가지 유입조건 (TEST-1~3)에 따른 실험 결과, 평균 유입 EMC는 TSS가 115.1 mg/L, BOD는 7.1 mg/L, TN은 3.1 mg/L, TP는 0.4 mg/L, Total Zn는 0.9 mg/L, Total Pb는 0.2 mg/L로 나타났으며, 유출 EMC는 TSS는 8.6 mg/L, BOD는 5.3 mg/L, TN은 1.6 mg/L, TP는 0.1 mg/L, Total Zn는 0.1 mg/L, Total Pb는 0.04 mg/L로 나타나 입자상물질과 중금속류의 농도저감이 비교적 높은 것으로

나타났다.

Table 3은 각각의 유입조건에 따른 처리효율을 나타낸 것으로 유입유속이 적을수록 TN을 제외한 대부분의 오염물질에 있어서 처리효율이 높게 나타났다. 특히 중금속 물질의 경우 입자성 물질과의 결합정도가 처리효율에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나 TN의 경우 TEST-3에서 가장 높은 효율을 보이는데 이는 TEST-3의 경우 TN 유입농도가 TEST-1과 2보다 약 2 mg/L의 높은 농도로 유입되었기 때문으로 사료된다. 그렇지만 TEST-3의 경우 두 실험 결과에 비해 대체적으

로 저감효율이 낮은 것으로 분석되었으며, 이는 짧은 체류시간으로 인해 입자상 물질의 침전 및 오염물질의 여재 흡착 등의 기작이 잘 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

전체 운전조건에서의 평균처리효율을 살펴보면, TSS 94%, BOD 52%, TN 57%, TP 79%, 중금속류 71~92%의 범위로 조사되었으며 해외 모래여과 시설의 전형적인 처리효율에 비하여 대부분 높은 것으로 평가된다(EPA 1999). 이는 일반적인 여과형 시설의 여과기능 이외에 침투기작에서 저감되는 침투기능, 시설 내 저류기능으로 인하여 오염물질

이 추가적으로 제거되었기 때문인 것으로 사료된다.

Table 4는 본 연구결과와 Hatt의 연구결과를 이용하여 유입유량 변화에 따른 오염물질 저감효율을 비교한 것으로 두 실험 모두 유입유량이 낮을수록 처리효율이 높은 것으로 조사되었으며, TN을 제외하고는 전반적인 효율은 여재를 혼합하여 배치한 본 실험의 효율이 더 높은 것으로 나타났다(Hatt et. al., 2007). 따라서 여과형 비점 저감시설의 경우 모래 이외에도 여과와 흡착 기능이 있는 우드칩, 제올라이트, 활성탄 등의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3. Removal efficiency (%)

Parameter	TSS	BOD	COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Cr</sub>	TN	TP	Total Cr	Total Fe	Total Ni	Total Cu	Total Zn	Total Cd	Total Pb
TEST-1	97	73	76	77	55	84	76	95	55	89	91	63	91
TEST-2	94	65	67	68	47	81	74	91	58	86	88	74	88
TEST-3	91	19	11	25	68	72	77	90	62	85	74	75	75
Average	94	52	51	57	57	79	76	92	58	87	84	71	85

Table 4. Comparison removal efficiency for this research and Hatt et al.

		Type of hydraulic loading	Water level (cm)	TSS	TP	TN	Total Cu	Total Pb
Hatt et al.	H-1	Constant	15	99	68	45	86	77
	H-2	Constant	45	92	83	40	68	74
	H-3	Constant	85	94	83	37	85	84
	H-4	Varied	15-85	92	53	44	62	80
This study	TEST-1	Constant	4	97	84	55	89	91
	TEST-2	Constant	9	94	81	47	86	88
	TEST-3	Overflow	13	91	72	68	85	75

Table 5. Comparison removal efficiency for other research

References	TSS (%)	TP (%)	TN (%)	Total Cu (%)	Total Pb (%)	Total Zn (%)
ERMD, 1999	87	58	44	57	82	74
Bell et al., 1995	79	63	47	25	-	91
Horner, 1995	83	41	-	31	-	69
COA, 1997	89	59	17	72	86	76
NRPD, 2000	95	70	51	-	-	99
Hatt et al., 2007	94	72	42	75	79	66

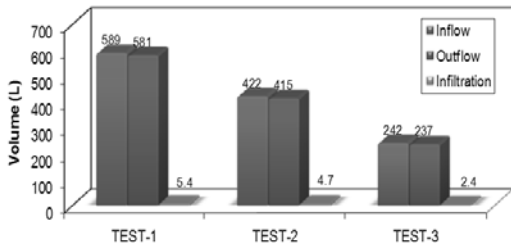


Fig. 6 Water Balance for each test

Table 5는 모래 및 자갈을 여재로 활용한 비점 저감시설의 처리효율을 정리한 것으로 대부분 입자상 물질의 효율은 높았으나 영양염류의 처리효율은 낮은 것으로 나타났다. 그러나 TP 및 중금속 물질의 경우 기존에 보고된 처리효율 보다 본 실험의 처리효율이 높은 것으로 나타났는데 이는 모래 및 자갈을 이용한 기존의 연구와는 달리 흡착에 효과적인 우드칩을 여재로 적용하였기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.4 물수지(Water Balance) 산정

불투수면의 증가는 자연적인 수리학적흐름에 변화를 가져오므로 이에 물의 자연적인 순환을 도모하기 위해서 저류 및 침투의 기작을 갖춘 저감기술 및 시설의 적용이 필요하다. Fig. 6은 TEST-1~TEST-3에 대한 물 수지를 나타낸 것으로 침투량이 유출량의 0.92~1.10%의 범위로 조사되어 개선된 여과형 저감시설의 경우 대부분의 유입수를 유출수로 내보내는 것으로 조사되었다. 따라서 향후 침투형 비점저감시설의 설계 시 침투량을 증가시킬 수 있도록 시설 하부의 토양을 개량하거나 치환하는 방법 등을 강구해야 될 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 강우유출수를 제어하기 위한 기존의 여과형 시설의 단점을 보완하기 위하여 침투 여과형 시설을 설계하였으며, 국내 현장에 적합한 비점오염저감기술을 개발하고자 다양한 유량조건

에 대하여 실내실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실내실험 결과, 유입부하가 증가할수록 유출 농도 또한 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이는 유입부하량이 증가함에 따라 시설 내에 체류시간이 감소하였으며, 오염물질과 여재가 충돌할 기회 또한 감소하여 시설의 주된 제거기작인 침전, 여과, 흡착작용이 저해된 결과로 판단된다.
2. 저감시설에 대한 효율은 입자상물질에서 91~97%로 매우 높게 나타났으며, 영양염류 및 중금속물질 또한 비교적 높은 저감효율을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 여재 사용 시 모래 및 자갈만을 이용하지 않고 높은 흡착성을 가진 우드칩을 적용한 결과로 판단된다.
3. 침투시설의 설계시 중요한 인자인 침투량은 유출량의 0.92~1.10%의 범위로 발생하였다. 향후 침투시설의 설계시 침투를 증가시키기 위해 시설 하부의 토양치환을 이용한 침투율 및 물의 저류량을 증가시키는 기술적 접근이 필요한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년 ‘건설기술혁신사업’의 일반 과제(과제번호 10 기술혁신 E08) 과제지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김이형, 21세기 친환경 건설을 위한 Low Impact Development(LID) 기술, 물과 미래, 41(6), 47-57, 2008.
- 방기웅, 이준호, 최창수, 이상일, 필터 분리기를 이용한 여재별 도로퇴적물의 오염물질 제거효율 비교, 대한환경공학회지, 29(3), 332-340, 2007.



환경부, 관계부처합동 [물관리 종합대책]의 추진 강화를 위한 4대강 비점오염원관리 대책, 2004.

환경부, 비점오염저감시설의 설치 및 관리 운영 매뉴얼, 2008.

Bell, W., L. Stokes, L. J. Gavan., T. N. Nguyen, Assessment of the Pollutant Removal Efficiencies of Delaware Sand Filter BMPs, Department of Transportation and Environmental Services. Alexandria, VA., 140, 1995.

California Department of Transportation (Caltrans), Infiltration Trenches Design Guidance, CTSW-TM-07-172-05, 2009.

City of Austin, Evaluation of nonpoint source controls an EPA/TNRCC section 319 grant report, Water Quality Report COA-ERM-97-04, 1997.

Environmental Resource Management Division, Removal Efficiencies of stormwater control structures, Final Report, Austin, TX, 36, 1999.

Hatt B.E., Fletcher T.D., Deletic A., Treatment performance of gravel filter media: Implications for design and application of stormwater infiltration systems, Water

research, 41, 2513-2524, 2007.

Horner R.R., and Horner C.R., Design, Construction, and Evaluation of a Sand Filter Stormwater Treatment System. Part II. Performance monitoring, Report to Alaska Marine Lines, Seattle WA, 1995.

Siriwardene N.R., Deletic A., Fletcher T.D., Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study, Water research, 41, 1433-1440, 2007.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), Urbanization of Streams: Studies of Hydrologic Impacts, EPA 841-R-97-009, 1997.

U.S. EPA, Storm Water Technology Fact Sheet, Sand Filters, EPA 832-F-99-007, 1999.

U.S. EPA, National Pollutant Removal Performance Database for Stormwater Treatment Practices 2nd Edition, 2000.

- 논문접수일 : 2011년 04월 17일
- 심사의뢰일 : 2011년 04월 20일
- 심사완료일 : 2011년 07월 04일