

LID 시설로서 도로에 적용 가능한 수목여과시설 개발

최지연 · 손영규 · 이소영 · 이유화* · 김이형+

공주대학교 건설환경공학과

* 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 도로연구실

Development of tree box filter LID system for treating road runoff

Jiyeon Choi · Younggyu Son · Soyoung Lee · Yuhwa Lee · Lee Hyung Kim+

Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

* Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

요 약

본 연구는 Low Impact Development (LID) 시설로서 도로에 적용 가능한 수목여과시설을 개발 하고자 수행되었다. 수목여과시설의 적용가능성 및 효과 검증에 위해 Test-bed 규모의 시설을 조성하여 총 17개월(2011년 6월 ~ 2012년 11월)동안 모니터링을 수행하였다. 모니터링 결과, 누적강우량 2 mm 이하의 강우시 발생하는 강우유출량은 시설내 전량 저류되며 20 mm 이상일 경우 유입유량의 최소 20%가 시설내 저류 되는 것으로 분석되었다. 강우량에 따른 오염물질별 저감효과를 분석한 결과, Total Pb는 70% 이상의 저감효율을 보여 오염물질 중에서 저감효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났으며 중금속, 입자상 물질, 영양염류 및 유기물 순으로 저감효과가 높은 것으로 조사되었다. 오염물질별 평균 저감효율은 60~73%의 범위로 나타났으며 소규모 강우(10 mm 미만의 강우)시 10 mm 이상의 강우 일 때 보다 오염물질이 함유된 강우 유출수가 시설 내에서 충분히 저류되기에 오염물질 저감에 효과적인 것으로 분석되었다. 본 연구결과를 활용하여 강우량, 오염물질 저감효율과 같은 LID 시설의 설계인자를 도출할 수 있었으며 물순환 효과 및 오염물질의 효율평가를 통하여 향후 본 시설과 유사한 시설의 설계시 활용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우유출수, 도로, 비점오염, 수목여과시설, 저영향 개발

Abstract

The aim of this study was to develop a tree box filter system, an example of Low Impact Development technology, for treating stormwater runoff from road. Monitoring of storm events was performed between June 2011 and November 2012 to evaluate the system performance during wet day. Based on the results, all runoff volume generated by rainfall less than 2 mm was stored in the system. The minimum volume reduction of 20% was observed in the system for rainfall greater than 20 mm. The greatest removal efficiency was exhibited by the system for total heavy metals ranging from 70 to 73% while satisfactory removal efficiency was exhibited by the system for particulate matters, organic matters and nutrients ranging from 60 to 68%. The system showed greater pollutant removal efficiency of 67 to 83% for rainfall less than 10 mm compared to rainfall greater than 10 mm which has 39 to 75% pollutant removal efficiency. The system exhibited less pollutant reduction for rainfall greater than 10 mm due to the decreased retention capacity of the system for increased rainfall. Overall, the system has proved to be an option for stormwater management that can be recommended for on-site application. Similar system may be designed based on several factors such as rainfall depth, facility size and pollutant removal efficiency.

Keywords : LID, non-point source, road, stormwater, tree box filter system

1. 서론

도로는 포장지역으로 불투수율이 높고 차량의 운행으로 인한 비점오염물질의 축적량이 많은 토지이용이다. 대부분 수계와 연관되어있는 도로는 강우시 강우유출수와 함께 비점오염물질을 처리 없이 수계로 유입시

켜 수생태계에 악영향을 미친다(Boxall and Maltby, 1995; Maltby et al., 1995; Perdikaki and Mason, 1999; Kim et al., 2006; Son et al., 2008). 이러한 비점오염을 관리하기 위하여 2000년 이후 환경부에서는 수질 및 수생태계보전에 관한 법률 및 제도적(사업장 및 개발사업 비점오염저감시설 설치신고제도, 비점오염원관리지역지

+ leehyung@kongju.ac.kr

정제도, 수질오염총량관리제도 등) 장치를 수립하여 4대강의 수질개선을 꾀하고 있다. 또한 국토해양부는 도로 비점오염원 관리의 중요성을 인식하고, 도로 비점오염저감시설 설치 및 관리 지침 제정을 통하여 도로 비점오염원관리에 자연적 정화기능을 가진 시설의 설치를 의무화하고 있다.

일반적으로 도로에 적용 가능한 비점오염저감시설은 주로 오염물질을 저감하는 최적관리기법(Best management practice, BMP)으로 장치 및 자연형 시설로 구분하여 적용을 하였으나, 개발이전의 자연적인 수문학적 체계를 재현할 수 없으며 낮은 오염물질 저감효율, 유지관리의 어려움 등의 여러 가지 문제점을 초래하였다. 이에 자연적 물순환을 도모하고 유지관리가 용이하며 오염물질의 저감이 가능한 새로운 비점오염관리기법이 요구되었다. 이에 선진국에서는 90년대 말 부터 2000년대 초반에 저영향 개발 기술(Low Impact Development, LID)을 비점오염관리기법으로 도입함으로써 침투, 여과, 저류 및 증발 등 자연이 가진 기작을 이용하여 혁신적으로 비점오염원 관리를 수행하고 있다(Department of Environmental Resources, 1999). 이와 유사하게 영국에서는 sustainable urban drainage systems (SUDS), 호주에서는 water sensitive urban design (WSUD) 기법으로 비점오염에 관한 관리가 이루어지고 있다(CIRIA, 2000).

LID 기술은 침투시설, 식생형시설, 생태저류시설, 저류시설 등으로 구성된다. 이중 생태저류시설은 토양과 식생을 이용하여 강우유출수 및 비점오염물질을 관리하는 시설로 친수성이 강한 초본 및 목본으로 조성되며 여과, 침전, 흡착, 휘발, 이온교환 등과 같은 물리·화학적 기작과 식생 및 미생물에 의한 생물학적 기작을 통하여 오염물질을 저감할 수 있다(Melbourne Water, 2005). 일반적으로 생태저류시설의 유역면적은 최대 0.8 ha 이며(Davis et al., 2009), 종류로는 침투화분, 빗물정원, 수목여과시설 등이 있다. 특히, 수목여과시설의 경우 설치

시 별도의 추가 공간이 필요하지 않고 기존 가로수 영역에 설치가 가능하여 공간 제약이 큰 도로에 가장 적합한 LID 시설로 알려져 있다.

국외 연구에 의하면 생태저류시설의 물순환 효과는 시설에 따라 20~99%의 범위로 조사되었으며(Toronto and Region and Credit Valley Conservation Authorities, TRCA and CVC, 2010) 특히 수목여과시설(1.8 m×1.8 m×1.0 m (W×L×H)규모의 유역면적 0.1 ha 미만)의 오염물질 저감효과는 TSS 85%, TP는 74%, TN은 68%, 중금속의 경우 82%로 조사되었다(Fairfax County Virginia, 2005). 한편 국내의 경우, 수목여과시설의 적용뿐만 아니라 시설의 물순환 및 오염물질 저감 효과에 관한 연구 결과가 미미한 실정으로 이에 본 연구에서는 국내에 적용 가능한 수목여과시설의 개발을 위하여 도로변에 수목여과시설 Test-bed를 설치, 운영하였으며 운영결과를 바탕으로 도로변 수목여과시설의 적용가능성과 시설의 효과를 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 모니터링 지점 현황 및 수목여과시설의 설계

수목여과시설은 모니터링의 용이성을 고려하여 충남 천안시 공주대학교 캠퍼스 내 조경공간에 Test-bed 규모로 설치되었으며(Fig. 1), 시설의 주 오염원은 캠퍼스에서 차량이 빈번히 운행되는 도로로 아스팔트(불투수율 100%)로 포장되어 있다. 본 시설의 주요 물순환 기작은 식생에 의한 증발산 및 저류이며, 시설의 유역면적은 48 m²이다. 자세한 시설의 제원은 Table 1에 정리하여 나타내었다. Fig. 2는 수목여과시설의 설계도를 나타낸 것으로 시설은 박스형태의 구조로 설치되었으며, 유입부, 여재 및 수목부, 유출부로 구성된다.

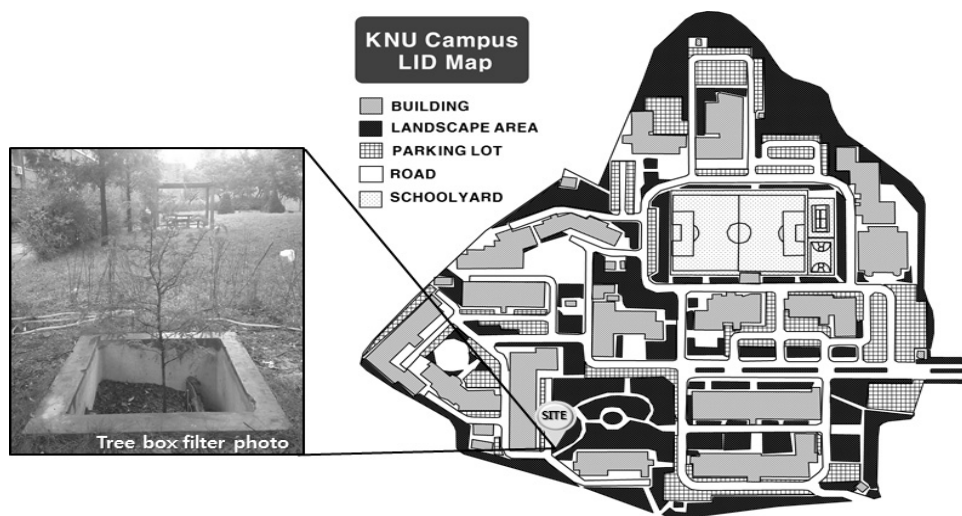


Fig. 1. Site location of tree box filter in Kongju National University Cheonan campus

Table 1. Physical design characteristics of tree box filter

Aspect ratio (L:W:H)	Catchment area (m ²)	Total volume (m ³)	Storage volume (m ³)	Surface area (m ²)
1:1:1.4	48	4.0	1.4	2.0

유입부는 도로로부터 강우유출수의 유입이 원활하도록 설치되었으며 여재 및 수목부의 경우 수목의 생존과 오염물질의 저감을 위하여 자갈, 모래 및 원토양을 혼합하여 충전 하였다. 또한 시설의 상부에는 우드칩(Woodchip)과 바크(Bark)를 배치하여 오염물질의 흡착능력과 경관성을 향상시켰다. Genc-Fuhrman *et al.*(2007)에 의하면 모래보다 바크가 오염물질 흡착능력이 더 높은 것으로 조사되었으며 Genc-Fuhrman *et al.*(2007)의 경우 우드칩을 이용한 흡착실험에서 부유물질의 85% 이상 저감되는 것으로 나타나 우드칩과 바크의 경우 모래나 자갈에 비해 오염물질 흡착능력이 높은 것으로 평가되어지고 있다. 각 여재층 사이에는 Geotextile을 배치하여 여재들 간에 섞임 및 공극의 막힘 현상을 방지 하였다. 시설에 식재된 수종은 추위에 강하고 관상용으로 좋으며 수분에 잘 견디는 특성을 가진 가로수종인 메타세콰이어(*Metasequoia glyptostroboides*)로 선정하였다. 유출부의 경우 시설 내부 토양의 유실을 최소화하기 위해 야자매트를 설치하여 여재 및 수목부와 유출부를 분리시켰으며 하부에 자갈을 배치하여 유출이 원활하도록 유도하였다.

2.2 모니터링 및 분석방법

모니터링은 강우유출수의 유출특성을 고려하여 포장 지역의 초기강우현상에 적합한 수질모니터링 방법으로 수행되었으며(Kim *et al.*, 2007) 이와 더불어 모니터링을 통해 획득한 자료를 활용하여 선행건기일수(Advanced dry days, ADD), 강우지속시간, 체류시간(Hydraulic retention time, HRT) 등을 산정하였다. 채취된 시료는 TSS, COD_{Cr}, DOC, TN, TP, Total Pb 및 Total Zn에 대하여 수질오염공정시험법에 의해 분석을 실시하였다. 시설 내 유입 및 유출수에 대한 오염물질의 부하량 및 효율을 산정하기 위하여 유량가중평균농도(Event mean concentration, EMC)를 산정하였으며(Kim *et al.*, 2004) 아래의 식(1)을 사용하여 물수지를 산정하였다. 본 식에서 유입량(Vol_{IN})과 유출량(Vol_{OUT})의 차는 저감량(Vol_{RED})으로 증발산량(Vol_{EVAP}), 저류량(Vol_{RET}) 및 손실량(Vol_{LOSS})을 포함한다.

$$Vol_{RED} = Vol_{IN} - Vol_{OUT} \tag{1}$$

$$= Vol_{EVAP} + Vol_{RET} + Vol_{LOSS}$$

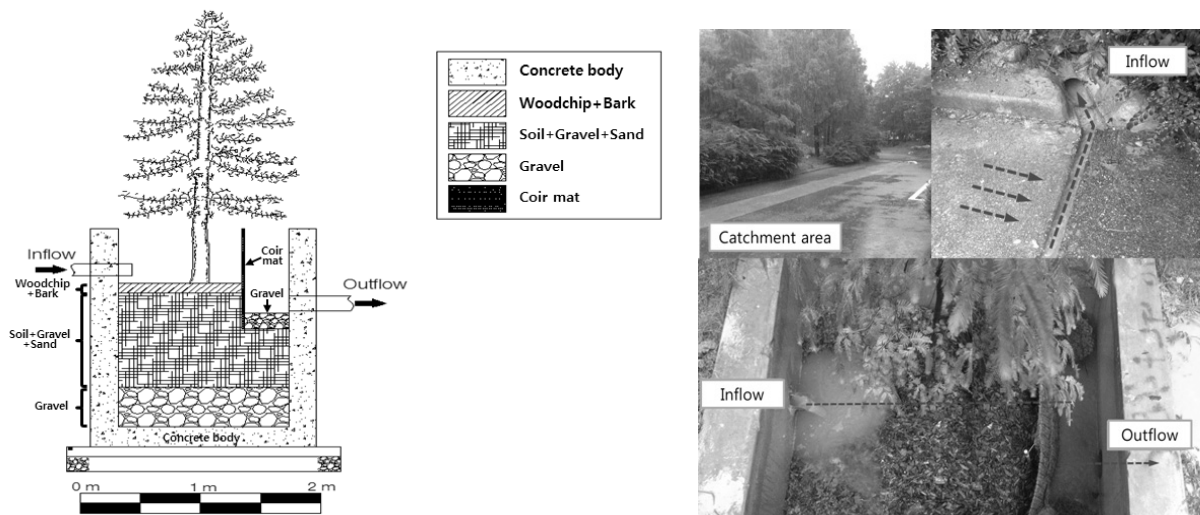


Fig. 2. Schematic and photo of the tree box filter

3. 연구결과

3.1 모니터링 결과

수목여과시설 Test-bed는 2011년 6월부터 2012년 11월 까지 총 12회의 모니터링이 수행되었으며 현재에도 진

행 중에 있다. Table 2는 모니터링 결과를 정리하여 나타낸 것으로 총 강우량은 2~23 mm의 범위로 대부분의 모니터링은 10 mm 이하의 강우에서 수행된 것으로 조사되었으며 평균 강우량은 10 mm로 분석되었다. 국내의 연간 강우사상 중 70~80% 이상이 10 mm이하의 강우가

발생되기에 (Maniquiz *et al.*, 2012) 모니터링 결과는 국내 기후 현황을 적절하게 반영한 것으로 판단된다. 강우 시작 후 시설내로 유입되는 평균시간은 0.41 hr로 나타났으며 강우유출수가 시설내로 유입된 후 평균 0.55 hr 이

후에 유출이 발생하는 것으로 조사되었다. 또한 유입유량은 0.06~4.02 m³/hr의 범위로 나타났으며, 유출유량은 0~1.86 m³/hr의 범위로 유출이 발생되지 않거나 최대 유입량의 46% 정도가 유출되는 것으로 분석되었다.

Table 2. Summary of monitored storm events (n=12)

Parameter	unit	Min	Max	Median	Mean	S.D. ^a
ADD	day	0.04	5.30	2.00	2.35	1.67
Total rainfall	mm	2.00	23.0	6.75	10.0	8.53
Total runoff	m ³	0.01	3.57	0.30	0.64	0.31
Total discharge	m ³	0	0.79	0.09	0.22	0.08
Total rainfall duration	hr	0.17	7.43	1.52	2.35	2.54
Total runoff duration	hr	0.17	6.50	1.00	1.82	2.27
Time before runoff starts	hr	0	1.27	0.28	0.41	0.40
Hydraulic retention time	hr	0	4.50	0.13	0.55	1.32
Average inflow	m ³ /hr	0.06	4.02	0.36	0.78	1.20
Average outflow	m ³ /hr	0	1.86	0.54	0.60	0.60

^a standard deviation

3.2 물수지(Water balance) 산정

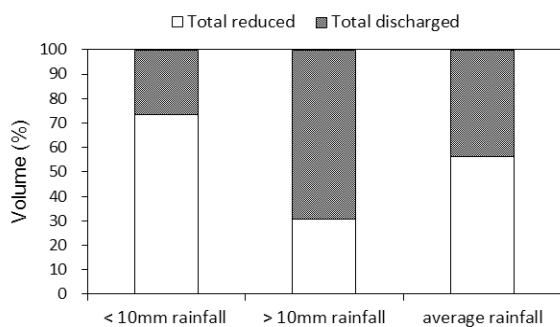


Fig. 3 Water balance for each rainfall range

강우량은 물수지 산정시 직접적으로 영향을 주는 인자로, 강우량에 의한 시설 내 저류 및 유출량의 변화를 알아보고자 식(1)을 활용하여 물수지를 산정하였다. 분석 결과, 시설 내 물의 저류량은 강우량에 따라 최소 2%에서 최대 100%의 다양한 범위로 조사되었으며 평균 저류량은 56%로 분석되었다. 시설의 평균 유출량은 44%로 나타났으며 최대 유출량은 98%로 조사되었다. Fig. 3은 강우계급별 물수지 산정 결과를 나타낸 것으로 모니터링 평균 강우량인 10 mm를 기준으로 하여 10 mm 이하, 10 mm 이상 및 전 강우사상으로 나누어 유출 및 저류량을 나타내었다. 분석결과, 10 mm 이하의 강우발생시 평균 저류량은 74%로 시설 유입량의 70%이상 시설 내 저류되는 것으로 나타났으며 10 mm 이상의 경우 유입량의 30%가 저류되는 것으로 조사되었다. 수목여과시설과 유사한 생물저류시설 중 침투기능이 없는 시설에 대하여 물순환 효과를 조사해본 결과, 유입량의 최소

20%에서 최대 60%까지 저류되며 평균 저류량은 45%로 나타났다(Hunt and Lord. 2006; Smith and Hunt. 2007; Li *et al.*, 2009). 본 시설의 경우 test-bed로써 48 m²의 적은 유역면적에서 발생하는 강우유출수를 처리하지만 기존 시설 대비 유입량의 최소 30%에서 최대 70%까지 저류가 가능한 것으로 나타나 10% 이상의 저류량을 더 확보할 수 있어 향후 본 시설의 적용시 물순환 효과에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 강우량에 따른 수목여과시설의 저류 및 유출량의 변화를 나타낸 것으로 누적강우량 2 mm 이하의 강우가 발생할 경우 시설의 유입량은 전량이 저류되며 2 mm 이상의 강우 발생 시 유출이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 누적강우량이 8 mm 이상 발생할 경우 시설 내 저류되는 양보다 유출되는 양이 증가하는 것으로 나타났다. 본 시설의 경우 20 mm 이상의 강우가 발생되더라도 유입량의 최소 20%의 강우유출수가 시설 내 저류 가능한 것으로 분석되었다.

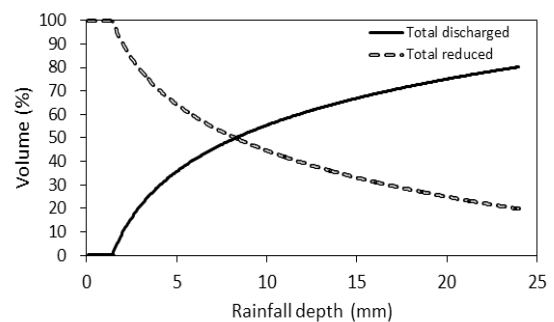


Fig. 4 Regression plot of discharge and reduced volume with respect to rainfall

3.3 저감효율 산정

수목여과시설의 비점오염물질 저감 능력을 평가하고자 Fig. 5와 같이 유입수의 EMC를 산정하였으며 위의 결과를 활용하여 Fig. 6와 같이 강우계급별로 나누어 오염물질별 저감효율을 알아보았다. 분석결과, 모든 오염물질 항목에 대해 평균 저감효율은 60~73%의 범위로 조사되었다. Fairfax County Virginia (2005)의 연구에서는 표면면적이 3.24 m²인 수목여과시설의 오염물질별 저감효율은 68~85%의 범위를 나타내는 것으로 보고되어 본 시설의 저감효율과 비교시 시설 규모대비 오염물질 저감효과는 만족스러운 수준인 것으로 판단된다. 강우계급별 오염물질 저감효율을 살펴보면 10 mm 이하의 소규모 강우발생 시 모든 오염물질 항목에서 60% 이상의 저감효율을 보인 반면, 10 mm 이상의 강우발생시 TSS와 Total Pb를 제외한 모든 오염물질 항목에서 10 mm 이하의 소규모 강우일 때 보다 낮은 30~50%범위를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 COD, DOC, TN, TP, Total Zn의 경우 보다 긴 저류시간이 필요하다는 것을 의미하는 것으로서, 체류시간을 보다 증가시킬 수 있는 시설물의 구조개선 혹은 해당 오염물질의 저감효율을 증진시킬 수 있는 여재의 개발 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

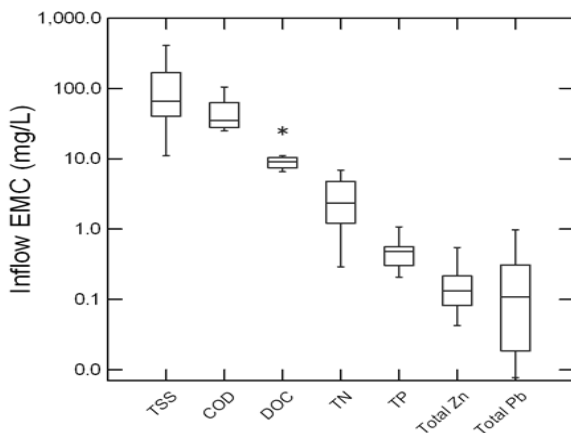


Fig. 5 Box plot of the inflow EMC of typical stormwater constituents

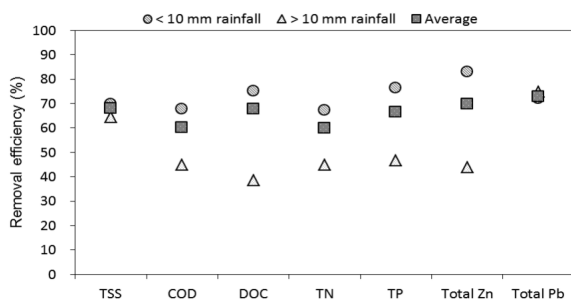


Fig. 6 Removal efficiency for each rainfall range

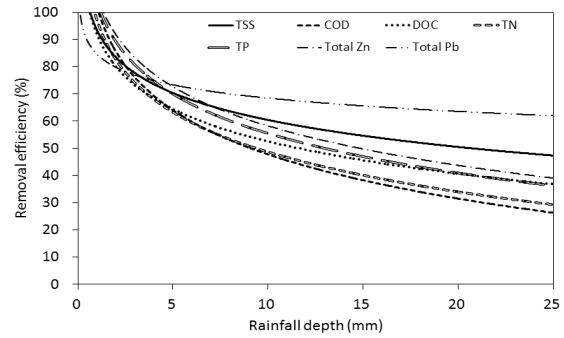


Fig. 7 Regression plot of removal efficiency with respect to rainfall

Fig. 7은 강우량에 따른 수목여과시설의 오염물질별 저감효율의 변화를 로그 회귀분석으로 나타낸 것으로, 5 mm 이하의 강우사상에서 모든 오염물질은 최소 60% 이상 저감되는 것으로 분석되었으며, 10 mm 이하는 최소 45%, 20 mm의 경우 최소 30% 이상 오염물질 저감이 가능한 것으로 나타났다. 특히 Total Pb의 경우 10 mm 이상의 강우에서도 60% 이상의 효율을 보여 저감효과가 가장 뛰어났으며 Total Pb를 제외한 오염물질별 저감 효과는 TSS > Total Zn > TP > DOC > TN > COD 순으로 분석되었다. 위의 그림을 통하여 설계강우량에 따른 적정 오염물질 저감효율을 산정할 수 있어 유사시설 설계시 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 도로변 수목여과시설의 적용가능성 및 시설의 효과를 평가하고자 모니터링이 수행되었으며 총 12회의 강우시 모니터링 결과를 통하여 수목여과시설의 물순환 효과와 오염물질 저감효율을 분석하였다. 연구결과, 평균적으로 유입유량의 50% 이상을 저류시킬 수 있어 유출량 저감에 큰 효과를 나타내는 것으로 분석되었으며, 이는 기존 생물저류시설보다 최대 10% 높은 저류 효과로 확인되었다. 오염물질별 평균 저감효율의 경우 60~73%의 범위로 나타나 기존 시설과 비교시 규모 대비 오염물질 저감효과는 만족스러운 수준인 것으로 판단되었다. 오염물질별 저감효과를 살펴본 결과, Total Pb의 경우 70% 이상의 효율을 보여 저감효과가 가장 뛰어났으며 중금속, 입자상 물질, 영양염류 및 유기물 순으로 오염물질별 저감효율이 높은 것으로 조사되었다. 본 연구결과를 활용하여 설계강우량 및 저감효율을 이용하여 수목여과시설의 설계인자를 도출할 수 있으며 향후 추가적인 연구를 통하여 수목여과시설의 적용 및 활용 가능성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대에코이노베이션사업(과제번호: 413-111-004)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Boxall, ABA, Maltby, L (1995). The characterization and toxicity of sediment contaminated with road runoff, *Water Research*, 29(9), pp. 2043-2050.
- CIRIA. (2000). *Sustainable Urban Drainage Systems - Design Manual for Scotland and Northern Ireland*, Report No. C521. CIRIA, Dundee, Scotland.
- Davis, A, Hunt W, Traver R, Clar M (2009). Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs, *J. of Environmental Engineering*, 135(3), pp. 109-117.
- Department of Environmental Resources (1999). *Low-impact Development: an Integrated Design Approach*, Department of Environmental Resources, Prince George's County, Maryland, USA.
- Fairfax County Virginia Stormwater Program (2005). *LID BMP Fact Sheet - Tree Box Filters*, Fairfax County, Virginia, USA.
- Genc-Fuhrman, H, Mikkelsen, PS, Ledin, A (2007). Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from stormwater: Experimental comparison of 11 different sorbents, *Water Research*, 41(3), pp. 591-602.
- Hunt, WF, Lord, WG (2006). *Bioretention Performance, Design, Construction, and Maintenance*, North Carolina Cooperative Extension Service.
- Kim, LH, Ko, SO, Jeong, SM, Yoon, JY (2007). Characteristics of washedoff pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm, *The Science of the Total Environment*, 376(1-3), pp. 178-184.
- Kim, LH, Lee, EJ, Ko, SO, Kim, SG, Lee, BS, Lee, JK, Kang, HM (2006). Determination of First Flush Criteria in Highway Stormwater Runoff using Dynamic EMCs, *J. of Korean Society on Water Quality*, 22(2), pp. 294-299. [Korean Literature]
- Kim, LH, Masoud, K, Stenstrom, MK (2004). Event mean concentration and loading of litter from highways during storms, *Science of The Total Environment*, 330(1-3), pp. 101-113.
- Li, H, Sharkey, LJ, Hunt, WF, Davis, AP (2009). Mitigation of Impervious Surface Hydrology Using Bioretention in North Carolina and Maryland, *J. of Hydrologic Engineering*, 14(4), pp. 407-415.
- Maltby, L, Forrow, DM, Boxall, ABA, Calow, P, Betton, CI (1995). The effects of mororway runoff on freshwater ecosystems: 1. Field Study, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(6), pp. 1079-1092.
- Maniquiz, MC, Lee, SY, Min, KS, Kim, JH, Kim, LH (2012). Diffuse pollutant unit loads of various transportation landuses, *Desalination and Water Treatment*, 38, pp. 308-315.
- Melbourne Water (2005). *WSUD Engineering Procedures: Stormwater*, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- Perdikaki, K, Mason, CF (1999). Impact of road run-off on receiving streams in eastern England, *Water Research*, 33(7), pp. 1627-1633.
- Smith, R, Hunt, W (2007). Pollutant removals in bioretention cells with grass cover, *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007*, United States, May 15-19, pp. 1-11.
- Son HG, Lee EJ, Lee SY, Kim LH (2008). Determination of nonpoint pollutant unit loads in toll-gate of highway, *J. of Wetlands Research*, 10(1), pp. 69-75. [Korean Literature]
- Syring, S, Krishnamurthy, R, MacKay, A (2009). Attenuation of roadway-derived heavy Metals by wood chips, *J. of Environmental Engineering*, 135(9), pp. 747 - 757.
- Toronto and Region and Credit Valley Conservation Authorities (TRCA and CVC) (2010). *Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide Version 1.0, Ontario, Canada.*
- 논문접수일 : 2013년 06월 17일
○ 심사의뢰일 : 2013년 06월 17일
○ 심사완료일 : 2013년 07월 02일