Journal of Wetlands Research
Vol. 17, No. 4, November 2015, pp. 325-331

ISSN 1229-6031 (Print) / ISSN 2384-0056 (Online)
DOI http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2015.17.4.325

지붕 빗물이용을 위하여 개발된 침투화분의 환경·수문학적 평가

문소연·최지연·홍정선·전제찬·유기경·Precious Eureka D. Flores·김이형†

공주대학교 건설환경공학부

Hydrologic and Environmental Assessment of an Infiltration Planter for Roof Runoff Use

So-Yeon Moon·Ji-Yeon Choi·Jung-Sun Hong·Gi-Gyung Yu·Je-Chan Jeon·Precious Eureka D. Flores·Lee-Hyung Kim†

Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

(Received: 06 May 2015, Revised: 15 July 2015, Accepted: 15 July 2015)

요 약

불투수면의 증가와 도시화 현상은 지하수량의 감소, 지표수의 고갈, 홍수의 증가 등과 같은 자연적인 물순환 시스템에 변화를 가져왔다. 또한, 인간이 사용할 수 있는 수량의 감소 또한 초래하게 되었다. 이에 빗물의 적절한 처리와 재활용은 최근 발생되는 수문학적 문제의 해결에 도움이 될 수 있을 것으로 예상되어왔다. 따라서 본 연구는 지붕빗물유출수를 침투 및 저류 기작으로 처리하여 자연적인 물순환의 회복을 이루고자 침투화분 기술을 개발하였다. 연구결과, 침투화분 기술은 평균 79% 정도의 강우유출유량 저감효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 유출유량 지연효과 및 첨두유량 지연효과도 발생하였는데, 약 3시간의 유출지연효과와 38%의 유량 저감효과가 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 침투화분의 오염물질 처리효율은 TSS 97%, BOD 및 CODcr 94%, TN 86%, TP 96%, Total Cu, Total Zn, Total Pb의 중금속은 약 93% 처리되었으며, 처리수의 오염물질 농도는 TSS 13.3mg/L, BOD 3.6mg/L, TN 4.7mg/L 및 TP 0.1mg/L로 분석되어 도시재이용수, 조경용수, 공업용수로서 사용이 가능할 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 비점오염원, 빗물재이용, 옥상유출수, 침투화분

Abstract

Due to urbanization and increase in impervious area, changes in natural water circulation system have become a cause of groundwater recharge reduction, streamflow depletion and other hydrological problems. Therefore, this study developed the infiltration planter techniques applied in an LID facility treating roof stormwater runoff such as, performance of small decentralized retention and infiltration through the reproduction of natural water circulation system and use of landscape for cleaning water. Assessment of an infiltration planter was performed through rainfall monitoring to analyze the water balance and pollutant removal efficiency. Hydrologic assessment of an infiltration planter, showed a delay in time of effluent for roof runoff for about 3 hours and on average, 79% of facilities had a runoff reduction through retention and infiltration. Based on the analysis, pollutant removal efficiency generated in the catchment area showed an average of 97% for the particulate matter, 94% for the organic matter and 86-96% and 92-93% for the nutrients and heavy metals were treated, respectively. Comparative results with other LID facilities were made. For this study, facilities compared the SA/CA to high pollutant removal efficiency for the determination to of the effectiveness of the facility when applied in an urban area.

Key words : Infiltration planter, Non-point Source, Roof Runoff, Rainwater use

1. 서 론

경제 성장을 위한 개발사업과 도시화로 인하여 토지이용 특성은 급격히 변화되었으며, 이는 도심의 물순환 시스템 변화에 큰 영향을 미쳤다. 과거 녹지였던 지역이 건물, 도로 및 주차장 등 불투수지역으로 변화하면서 강우시 빗물의 지하 침투량 감소, 지표 유출량 증가 및 증발산량 감소 등 자연적인 물순환 시스템이 변화되었고, 이로 인하여 지하수위 감소, 하천의 건천화 및 강우시 첨두유량 증가 등의 수문학적 문제가 발생하고 있다(U.S.EPA, 1997; U.S.EPA, 1999; Kim, 2008; Park *et al.*, 2009; Kim and Sim, 2013). 또한, 물순환 시스템 변화로 인한 지하수위 감소와 비점오염물질 유입으로 인한 하천, 호수 및 저수지의 수질 악화는 인간 생활에 꼭 필요한 담수자원을 감소시켰으며,

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University
E-mail: leehyung@kongju.ac.kr

이는 전 세계적으로 매우 중요한 문제가 되었다. 빗물의 경우, 강우량은 풍부하나 중앙 집중형 상하수도 시설이 공급되지 않은 지역에서 사용하는 중요한 수자원이다. 건물의 지붕으로부터 유출된 빗물은 고농도의 오염물질을 포함한 초기강우를 배제할 경우, 세계보건기구(WHO)의 음용수 수질 가이드라인에 근접하는 수질을 나타내는 것으로 조사되었다. 그러나, 황사, 미세먼지 및 자동차 배기가스 등으로 인한 대기오염 증가로 인하여 적절한 수질 처리가 수행된 후에 담수자원으로 이용 가능할 것으로 판단된다(Han, 2003).

최근 우리나라의 환경부에서도 기존의 한정된 수자원을 더욱 효율적으로 관리하고 이용하기 위하여 '물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률'을 제정하고 학교, 종합운동장, 공공청사 및 골프장 등을 지붕 빗물 처리 및 이용시설 설치 법적 의무대상으로 규정하였으며, 담수자원으로서의 지붕 빗물 이용 방법을 도입하였다(MOE, 2015). 또한, 지방자치단체에서도 조례와 지침을 제정하여 빗물이용시설의 설치를 추진하고 있으며, 서울시는 도시 안정성을 회복하고 자연적인 물순환 시스템의 회복을 위하여 2007년 '서울시 빗물관리 기본계획'을 수립하는 등 기성시가지 및 개발 사업에 대하여 빗물 관리를 추진하고 있다. 빗물 관리 방식에는 크게 중앙 집중형 방식과 소규모 분산형 방식이 있다. 소규모 분산식의 경우 강우유출수 발생원에서부터 빗물이용시설을 통하여 친환경적인 관리가 가능하며, 중앙 집중형 방식에 동반되던 환경적, 경제적 문제들을 방지할 수 있다(Han, 2003). 따라서, 미국과 유럽에서는 소규모 분산식의 빗물관리가 가능한 저영향개발(Low Impact Development, LID)이라는 새로운 도시개발방식을 제안하고 있으며(Kim, 2008), 우리나라의 환경부에서도 "제2차 비점오염원관리 종합대책"을 통해 비점오염원의 관리방법으로 LID 시설의 확대적용하는 것을 제시하고 있다(MOE, 2012).

LID 기법은 자연이 가지고 있는 침투, 여과, 저류 및 증발산과 같은 기본적인 수문학적 기능을 이용하여 강우유출수를 효과적으로 순환시키고 비점오염물질을 저감하는 처리기법으로 도시 계획단계에서부터 개발 후 발생되는 강우유출수와 비점오염물질을 저감하고 개발 이전의 자연적인 물순환 시스템을 회복시키는 친환경적인 기술이다(Kang *et al.*, 2011). 이러한 LID 기술에는 침투형 시설, 저류형 시설, 식생형 시설 및 인공습지 등이 있으며, 그 중 침투화분 시설은 상부 토양층에 식생이 식재되며 토양층 하부에 여재가 충진된 화분형태의 침투시설이다. 침투화분은 형태와 구성이 매우 다양하고 적용범위가 넓으며 좁은 공간에도 설치가 가능하며, 저류형 및 식생형 시설에 비하여 높은 오염물질 저감효율을 나타내는 것으로 조사된 바 있다(NIER, 2010). 이에 본 연구에서는 LID 기술요소 중 하나인 침투화분 기술을 대상으로 도시의 물순환 체계 회복과 빗물의 재이용 가능성을 평가하기 위해 모니터링을 실시하였고, 그 결과를 제시하였다. 이를 위해 강우시 발생하는 지붕유출수가 침투화분으로 유입되기 전·후의 수질 및 유량을 분석하였으며, 오염물질의 EMC 및 처리효율 또한 산정하여 중수도의 용도별 수질기준과 비교분석하였다.

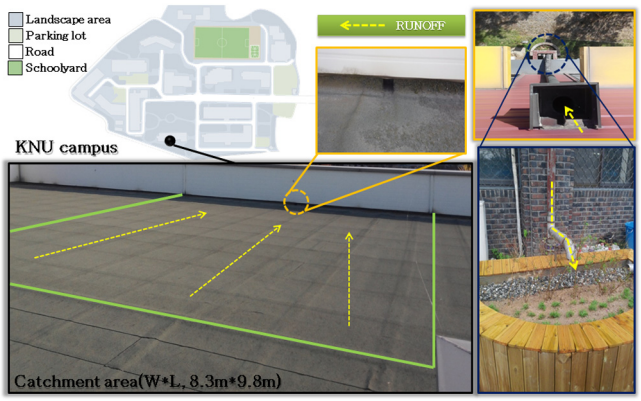
2. 연구방법

2.1 침투화분의 Test-bed

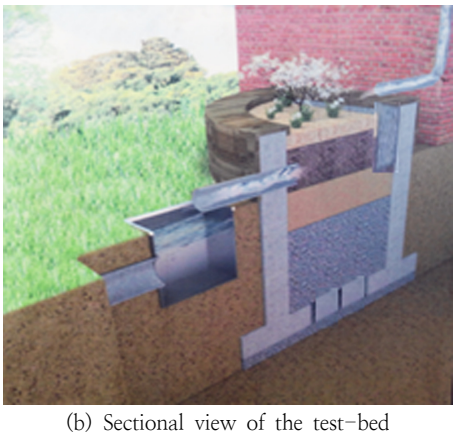
본 연구에서는 공주대학교 천안캠퍼스 내에 설치되어 있는 침투화분의 Test-bed를 대상으로 모니터링을 실시하였다. 강우유출수의 집수 면적과 Test-bed의 크기 및 제원은 Table 1에 제시되어 있다. 집수구역은 건물의 옥상으로 81.3m^{2}의 면적을 차지하고 있고, 침투화분 Test-bed의 표면적은 집수구역 면적의 약 2% 정도인 1.6m^{2}를 차지한다. 한편, 시설의 높이는 1.5m이다.

Table 1. Characteristics of the test-bed

Catchment area (m^2)	Land use type of catchment area	Surface area of test bed (m^2)	Dimentions of test bed (m^2×m)	Filter media
81.3	roof top of building	1.6	1.6×1.5	Gravel, Sand



(a) Sitemap and runoff flow path of the infiltration planter



(b) Sectional view of the test-bed

Fig. 1. Application of the Infiltration planter test-bed.

침투화분의 Test-bed 시설은 지붕에서 강우유출수가 시설로 유입될 시 소류력 감소, 토양층 침식 방지 및 초기강우가 빠르게 여재부로 침투할 수 있도록 $2\times0.2\times0.6(W\times L\times D,\ m)$의 규모로 자갈을 충진한 초기침강지와 패랭이 꽃과 조팝나무가 식재된 0.3m 깊이의 토양층(식생부)로 나뉘어진다. 초기침강지와 토양층의 하부에는 모래와 자갈이 충진된 여재부로 구성되어 있으며, 시설로 유입된 지붕유출수는 전처리부를 통과하여 여재부로 유입된다. 또한 Test-bed의 하단에는 내부로 유입된 강우유출수를 지하로 침투시키기 위한 지름 10cm의 침투구가 총 6개 존재하며, Test-bed 우측면에 지름 10cm의 파이프형 우회수로를 두어 집중강우시 발생할 수 있는 초과유입량을 신속하게 배제할 수 있도록 하였다. Fig 1의 (a)는 Test-bed가 적용된 지점과 집수면적 및 지붕유출수의 흐름도를 나타낸 것이며, (b)는 Test-bed의 단면조감도이다.

2.2 오염물질 분석 및 방법

적용된 침투화분 Test-bed의 수문학적·환경적 효율 검증을 위하여 강우시 모니터링이 수행되었다. 샘플링은 침투화분으로 유입되기 전의 강우유출수와 침투화분을 통과한 후의 유출수를 대상으로 실시하였으며, 지붕유출수가 불투수면인 점을 고려하여 강우유출수 발생 초기에는 5분, 10분, 15분, 30분의 짧은 간격으로 샘플링을 실시하였고, 그 이후로는 1시간 간격으로 수질 시료를 채취하였다. 또한, 유량의 측정은 모니터링 시작부터 끝날 때 까지 매 5분마다 시간-부피 법에 의해 측정하였다. 채취된 시료는 TSS(Total Suspended Solids), BOD(Biological Oxygen Demand), CODcr(Chemical Oxygen Demand), TN(Total Nitrogen), TP(Total Phosphorus) 및 중금속(Total Pb, Total Cu, Total Zn) 항목에 대하여 수질오염공정시험법(MOE, 1995)에 의해 분석을 실시하였다. 한편, 강우유출수 내 오염물질의 농도는 전체 강우 지속시간동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 유출량으로 나누어 계산한 유량가중평균농도(EMC, Event Mean Concentration)으로 평가하였다.

3. 연구결과 및 고찰

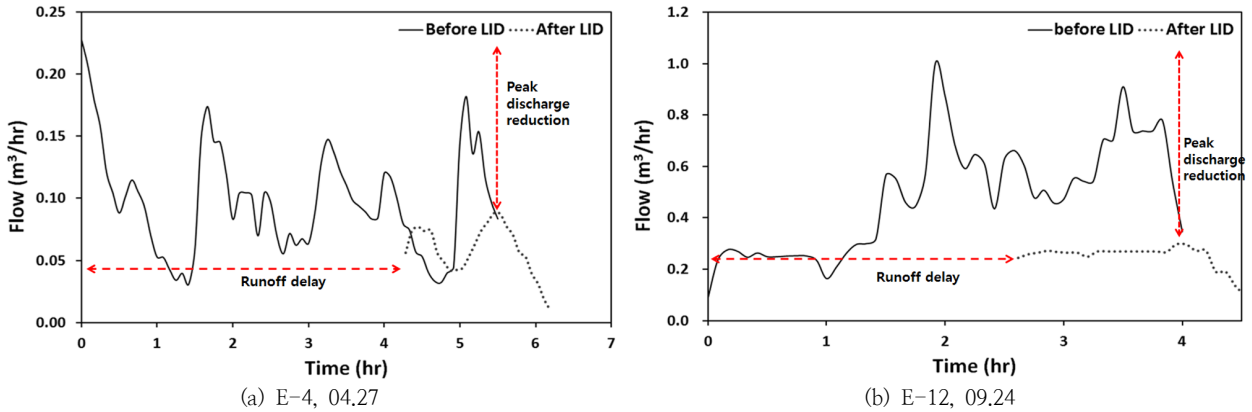
3.1 침투화분 Test-bed의 수문학적 능력 평가

적용된 침투화분 Test-bed의 환경적·수문학적 효율 검증을 위하여 2013년 11월부터 2014년 9월까지 총 12회의 강우사상에 대해 모니터링을 수행하였다. 모니터링이 수행된 강우사상의 Table 2에 정리하여 나타내었다. 모니터링이 실시된 강우량은 2~23mm의 범위에 있었으며, 평균 강우량은 8.8mm로 나타났다. 선행건기일수(ADD, Antesedent Dry Day)는 2.2~20.2day의 범위 평균 6.3day로 분석되었으며, 강우지속시간과 강우강도의 범위 및 평균은 1.4~11.6hr, 5.5hr 및 0.4~15.8mm/hr 및 2.8mm/hr로 분석되었다.

강우시 모니터링 결과를 토대로 침투화분 Test-bed 적용 후의 수문학적 변화를 분석한 결과를 Fig 2와 3에 나타내었다. Fig 2와 3을 살펴보면, 침투화분 시설이 설치된 후 시설에서 유출되는 유량은 침투화분이 설치되기 전 옥상으로부터 유출되는 강우유출량보다 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있었는데, 강우사상별로 최소 17%에서 최대 100%까지 유출유량을 저감시키는 것으로 분석되었다. 유출저감량 평균은 79%로 나타났는데, 강우량이 많을수록 시설의 유출저감유량이 낮아지는 것으로 분석되었다. 한편, 침투화분시설의 설치는 유출유량의 저감 외에도 첨두유출유량과 유출지연효과도 발생하는 것으로 분석되었는데 강우강도가

Table 2. Summary of the monitored storm events

Parameters	ADD (day)	Total Rainfall (mm)	Total Rainfall Duration (hr)	Aver age rainfall intensity (mm/hr)	Time before outflow starts (HRT) (hr)
Min.	2.2	2.0	1.4	0.4	0.8
Max.	20.2	23	11.6	15.8	4.2
mean±S.D	6.3±5.0	8.8±6.7	5.5±3.2	2.8±4.3	2.6±1.3



(a) E-4, 04.27 (b) E-12, 09.24

Fig. 2. Flow characteristics before and after applying LID.

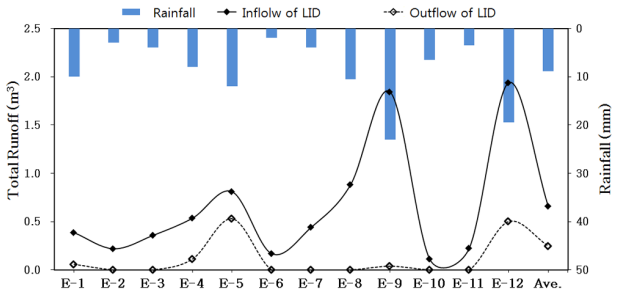


Fig. 3. Runoff volume reduction of each monitored storm events

가장 강한 시기에 발생하는 첨두유출 유량은 시설이 설치되기 전보다 모니터링 평균 약 32.8% 정도 저감시키는 것으로 분석되었으며, 약 3시간 정도의 유출 지연효과가 있는 것으로 조사되었다.

3.2 침투화분 Test-bed 환경적 능력 평가

3.2.1 EMC 분석 결과

본 연구에서 적용된 침투화분을 통하여 처리된 지붕유출수의 이용가능성을 평가하기 위하여 환경부(2015)에서 고시한 물 재이용시설 운영·관리 업무지침에 제시되어 있는 중수도의 용도별 수질기준과 본 연구에서 개발된 침투화분을 통하여 처리된 지붕유출수의 EMC를 비교하고, 이를 Table 3 및 Table 4에 정리하여 나타내었다. 먼저, 침투화분으로 유입되는 유입수와 유출수의 오염물질 EMC를 분석하였는데 유입되기 전의 유입수의 pH는 평균 6.1로 나타났으며, 유출수의 pH는 7.4로 분석되어 pH가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, TSS 및 BOD의 유입·유출 EMC는 22.7mg/L, 13.3mg/L 및 6.0mg/L, 3.6mg/L로 분석되었다. TN은 유입수와 유출수의 EMC가 5.3mg/L와 4.7mg/L로 분석되었으며, TP는 0.3mg/L와 0.1mg/L로 조사되었다.

한편, 중수도 용도별 수질기준에는 본 연구에서 분석을 실시한 오염물질 항목 외 총대장균군수, 결합잔류염소 및 탁도 등 더 많은 항목이 있지만, 본 연구에서는 pH, TSS, BOD, TN 및 TP의 농도만을 대상으로 중수도의 용도별 수질기준과 비교하였다. 중수도의 용도별 수질기준에 제시되어 있는 친수용수, 하천유지용수, 습지용수의 pH, TN 및 TP의 기준은 pH 5.8~8.5, TN 10mg/L이하, TP 0.5mg/L 이하인데, 본 연구에서 도출된 결과는 세가지 항목 모두에서 적합한 것으로 분석되었다. 그러나 TSS의 경우 하천유지용수와 습지용수로 사용하기 위한 기준은 6mg/L 이하인데 반해 본 연구에서 도출된 결과는 평균 13.3mg/L를 나타내므로 부적합한 것으로 분석되었다. 또한, 중수도 용도별 수질기준에서 친수용수의 경우 3mg/L 이하로 제시되어 있으며, 나머지 용도의 경우 5~6mg/L이하로 제시되어 있는데, 침투화분 유출수의 경우 평균 3.6mg/L의 EMC를 나타내어 친수용수로서의 사용 기준에는 못 미치지만, 그 외 도시재이용수, 조경용수, 하천유지용수, 습지용수, 공업용수로의 사용은 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 중수도의 용도별 수질기준에 제시되어 있는 여러 항목들 중 pH, BOD, TN 및 TP만을 비교한 한계점이 가지고 있다. 따라서 추후에는 본 연구에서 분석한 오염물질 항목 외 다른 항목들에 대해서도 중수도의 용도별 수질기준과 비교하는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

3.2.2 오염물질 부하량 변화 및 저감효율 분석

비점오염원은 강우시 빗물과 함께 유출되기 때문에 강우특성으로 인한 불확실성이 매우 크다(Sansalone and Bushberger,

Table 3. Estimation of the average pollutants EMC after LID application

Parameters		pH	TSS	BOD	T-N	T-P
Inflow of LID	EMC(mg/L)	6.1±0.3	22.7±20.0	6.0±5.3	5.3±5.1	0.3±0.2
Outflow of LID	EMC(mg/L)	7.4±0.4	13.3±6.9	3.6±1.3	4.7±3.1	0.1±0.03
Stormwater use		○	-	-	-	-
Korea water quality standards-Treated water supply	Urban reclaimed water	○	-	○	-	-
	Landscape water	○	-	○	-	-
	Human-friendly water	○	-	×	○	○
	River maintenance	○	×	○	○	○
	Wetland water	○	×	○	○	○
	Industrial water	○	-	○	-	-

Table 4. Water quality standard by use of graywater (MOE, 2015)

Parameter	Urban reclaimed water	Landscape water	Human-friendly water	River maintenance	Wetland water	Industrial water
SS (mg/L)	-	-	-	under 6	under 6	-
BOD (mg/L)	under 5	under 5	under 3	under 5	under 5	under 6
T-N (mg/L)	-	-	under 10	under 10	under 10	-
T-P (mg/L)	-	-	under 0.5	under 0.5	under 0.5	-
pH	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5

Table 5. Pollutants load between before and after LID facility application and pollutants removal efficiency(mean±S.D)

Parameters		TSS	BOD	CODCr	T-N	T-P	Total Cu	Total Zn	Total Pb
Avr. Inflow of LID (g)		11.9±10.2	2.9±2.9	16.6±12.5	2.1±1.4	0.2±0.1	0.1±0.1	0.2±0.2	0.1±0.1
Avr. Outflow of LID (g)		1.3±2.1	0.7±0.4	3.9±2.4	0.7±0.6	0.02±0.02	0.03±0.04	0.06±0.06	0.02±0.04
RE (%)	Min.	83.1	67.9	77.5	18.3	84.2	58.3	45.6	72.6
	Max.	100	100	100	100	100	100	100	100
	mean±S.D	97.7±5.3	94.2±10.0	94.9±8.7	85.9±25.7	96.4±10.4	93.1±13.1	92.8±15.9	93.9±11.6

1997). 이러한 비점오염원을 보다 정확하게 분석하기 위해서는 장기간의 강우시 모니터링을 통한 오염물질의 부하량 산정이 필요하다(Kim *et al*, 2006). 따라서, 침투화분의 환경적 영향을 평가하기 위해 집수면적에서 유출되는 오염물질의 부하량을 분석하였다. Table 5의 Inflow of LID와 Outflow of LID는 침투화분으로 유입되기 전과 후의 지붕 유출수에 포함된 평균 오염물질 부하량을 나타낸 것이며, 침투화분의 오염물질 저감효율(Removal Efficiency, RE) 또한 산정하였다. 집수면적에서 발생하는 지붕유출수 내의 오염물질 부하량을 분석한 결과, 입자상 물질의 경우 평균적으로 11.9g정도 배출되었으며, BOD와 CODcr의 경우 평균 2.9g, 16.6g이 배출되는 것으로 분석되었다. 침투화분 적용 후에 TSS는 평균적으로 0.8g으로 분석되었으며, BOD와 CODcr의 경우 0.7g, 3.9g으로 침투화분 적용 전에 비하여 많은 오염물질 부하량이 감소한 것으로 나타났다. 또한, T-N, T-P의 경우 평균적으로 0.7g, 0.02g 부하량이 침투화분시설에서 배출되었으며, Total Pb, Total Cu 및 Total Zn의 경우 0.03g, 0.06g 및 0.02g의 부하량이 배출되는 것으로 조사되었다. 침투화분 적용 전과 후의 오염물질 부하량 분석 결과와 EMC 농도를 토대로 오염물질의 처리효율을 분석하였으며, 이를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 입자상 물질인 TSS의 경우 평균 저감효율은 97%, 유기물질인 BOD와 CODcr은 약 94% 처리되는 것으로 분석되었다. 또한, TN과 TP는 86%와 96%의 오염물질 저감효율을 나타내었으며, 중금속의 경우 약 92~93%의 처리효율을 나타내는 것으로 분석되어 본 연구를 통하여 개발된 침투화분은 오염물질 저감효율이 높은 것으로 나타났다.

3.2.3 적정 유지관리 시점 산정

LID 시설의 경우 적정 규모 산정을 통한 경제적인 설계뿐만 아니라 시설 적용 후의 원활한 운영을 위한 유지관리 또한 매우 중요하다. LID 시설의 유지관리는 환경부(2014)의 비점오염저감시설의 관리·운영 매뉴얼에 따라 유입 및 유출수로 주변 협잡물 제거, 침강지 퇴적물 제거, 파손부위 수리 및 시설 안전 점검과 같은 정기적인 유지관리가 필요하다. 또한, 침투형 시설의 경우 설계처리성능을 지속적으로 유지하기 위하여 여재 공극이 막히지 않도록 침투 시설 표면에 부착되어 있는 오염물질 제거 및 필요시에는 상부의 자갈 및 여재교체 등 비정기적인 유지관리가 수행되어야한다. 비정기적인 유지관리가 자주 수행될 경우 높은 유지관리 비용이 발생할 수 있으며, 유지관리가 필요한 시기를

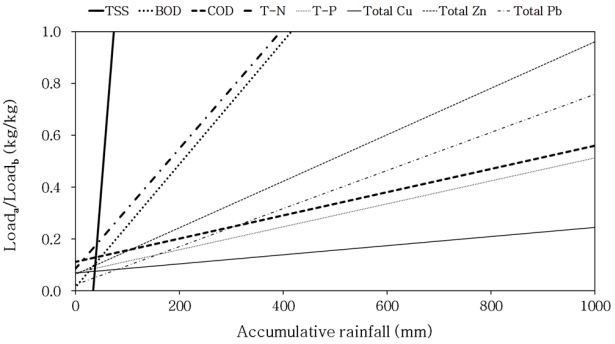


Fig. 4. Relationship of Loada/Loadb with respect to the accumulative rainfall.

놓치게 될 경우에는 강우유출수가 제대로 처리되지 못할 것이기 때문에 적정 유지관리 시점 산정이 필요하다. 이에 침투화분 시설의 적정 유지관리 시점을 분석하고 제시하였다. 비점오염원의 유출특성에 영향을 미치는 요인인 '강우량'과 '침투화분 유입 후의 오염물질 부하량(Loada, kg)/침투화분 유입 전의 오염물질 부하량(Loadb, kg)' 관계에 대한 회귀분석을 진행하였으며, Fig 4에 그 결과를 나타내었다. 침투화분을 통하여 처리된 누적강우량이 증가할수록 Loada/Loadb도 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. Loada/Loadb값이 1에 도달하면 침투화분 시설로 유입된 비점오염물질들이 시설 내부에서 저감되지 못하고 배출되는 것으로 시설의 설계처리성능 유지를 위한 유지관리가 필요한 시점으로 판단된다. Loada/Loadb값이 1에 도달하는 누적강우량은 오염물질 별로 다른 범위를 나타내었다. BOD, CODcr의 경우 처리 누적강우량이 약 411mm, 2,219mm에 근접할 때 유지관리가 필요할 것으로 분석되었으며, T-N의 경우 약 398mm, T-P의 경우 2,323mm로 나타났다. Total Cu의 경우 4,656mm로 오염물질 항목 중에서 제일 긴 주기로 유지관리가 수행될 것으로 분석되었으며, Total Pb와 Total Zn의 경우 처리 누적강우량이 1,097mm와 1,040mm에 근접할 때 유지관리가 필요한 것으로 산정되었다. 오염물질 항목 중에서도 TSS의 경우 침투화분을 통하여 처리된 누적강우량이 약 74mm에 도달할 때 유지관리가 필요한 것으로 산정되었으며, 다른 오염물질 항목에 비하여 짧은 주기를 나타내는 것으로 분석되었다. 환경부(2014)의 비점오염저감시설 관리·운영 매뉴얼에 의한 침투형 시설의 설계처리성능 유지를 위한 유지관리는 필요시 수행하도록 제시되어 있으며, OSU(2011)에 의하면 침투화분의 유지관리는 집중호우 직후에 수행하도록

Table 6. Characteristics of the common roof runoff treatment facilities

Parameters		IP	RG-1	RG-2	This study
Referance		Hyun et al., 2008	Michael and John, 2005	Tobio, 2014	This study
Land use		Roof top			
Catchment area(m^2)		112.0	-	171.0	81.3
SV/CA(%)		1	-	0.3	2.9
SA/CA(%)		8	-	6	1.9
Dimensions (A×D, m^2×m)		9.0×0.1	9.2×0.6	10.8×1.5	1.6×1.5
Types of Filtrer media		Broken stone, Gravel	Round stone	Wood chip, Sand, Gravel	Sand, Gravel
Treatment mechanisms	Pre-settling	Yes	No	Yes	Yes
	Filtration	Yes	Yes	Yes	Yes
	Infiltration	Yes	No	Yes	Yes
Pollutant reduction(%)	TSS	100	-	29	97
	T-N	100	32	-	86
	T-P	100	100	-	96
Volume reduction(%)		100	0.4	42.9	79.6

권장되고 있어 객관적인 유지관리 시점이 제시되어 있지 않다. 따라서, 효율적인 유지관리가 어려울 것으로 판단되나, 본 연구결과는 오염물질 항목에 따라 처리 누적강우량을 기준으로 유지관리 주기를 산정하였기 때문에 환경부와 OSU보다 명확한 유지관리 시점을 제안함으로서 효율적인 유지관리가 가능할 것으로 판단된다.

3.3 유사 LID 시설과의 연구결과 비교

본 연구에서 도출된 시설의 수문학적·환경적인 결과를 지붕유출수를 처리한 다른 LID 시설들과 비교·분석하였다. Table 6에는 본 연구에서 모니터링 된 시설을 포함하여 총 4개의 지붕유출수를 처리한 LID 시설의 특징과 모니터링 결과를 정리하여 제시하였다. 시설들의 오염물질 저감효율을 비교해본 결과, 현경학 등(2008)이 연구한 Infilteration Pond(IP) 시설은 유입된 모든 유량이 시설 내에 저류 또는 지하로 침투되어 TSS, TN 및 TP의 처리효율이 100%로 나타났다. 한편, Rain Garden(RG-1) 시설의 영양염류 저감효과에 대해 연구한 Michael and John(2005)의 결과에서는 유입유량의 0.4%에 해당하는 유량만 시설 내 저류 및 지하로 침투되었으며, 32%의 TN 저감 효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 한편, Tobio(2014)가 모니터링한 Rain Garden(RG-2) 시설에서는 42.9%의 유량 저감 효과가 있었으며, 29%의 TSS 제거효율을 나타내었다. 한편, 본 연구에서 모니터링한 침투화분 Test-bed 시설은 TSS 97%, TN 86%, TP 96%의 저감 효율을 나타내었으며, 유량은 79.6%의 저감율을 나타내어 상당히 높은 효율의 오염물질 및 유량의 저감 효과를 나타내는 분석되었다. 오염물질 및 유량 저감 효과의 경우 강우 특성이나 여재종류 및 투수층의 깊이와 같은 설계 방법에 따라 그 결과가 달라지는 것이 일반적이지만, 본 연구의 결과에 따르면 침투화분 기술도 지붕유출수의 처리를 위한 LID 기술요소로서 하나의 대안이 될 수 있는 것으로 사료된다. 한편, 침투화분 Test-bed의 Storage Volume/Catchment Area(SV/CA) 및 Surface Area/Catchment Area(SA/CA)는 2.9% 및 1.9%로 집수면적대비 비교적 좁은 면적 및 부피를 차지하는 것으로 나타났다. 이에, 도심지역의 협소한 공간에 본 시설의 설치를 고려하는 것도 좋을 것으로 판단된다.

4. 결 론

경제성장을 위한 도시화 및 불투수면의 증가는 자연적인 물순환 체계를 변화시켰으며, 강우시 첨두유량 증가, 발생시간 단축, 지하 침투량 감소 및 지표수 유출량 증가 등의 수문학적 문제 발생의 원인이 되고 있다. 이에 환경부에서는 기존의 한정된 수자원을 더욱 효율적으로 관리하고 이용하고자 LID 기법을 통한 강우유출수 관리 방법을 도입하였다. 지붕유출수의 경우, 오염물질 농도가 도로 및 주차장에 비하여 낮게 나타나기 때문에 LID 시설을 이용하여 저류 및 지하 침투를 통한 자연적인 물순환 체계를 회복할 수 있으며, 더 나아가 조경, 청소 용수 등으로 이용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구는 지붕유출수 관리를 위한 침투화분 Test-bed의 모니터링 및 처리효율 평가를 통하여 물순환 체계의 회복과 빗물의 재이용 가능성을 평가하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1) 침투화분 Test-bed 적용 후 강우유출수의 수문학적 변화를 분석한 결과, 강우사상에 따라 유출유량의 최소 17% 에서 최대 100% 까지 저감시키는 것으로 분석되었으며, 평균 79% 정도 유량 저감 효과를 나타내었다. 또한, 강우시 유출유량의 지연효과 및 첨두유량 감소 효과도 나타나는 것으로 분석되었는데, 모니터링 평균 약 3시간 정도

유출 지연효과와 38%의 첨두유량 저감효과를 나타내는 것으로 파악되었다.

2) 침투화분을 통하여 처리된 지붕유출수의 오염물질 평균 EMC는 TSS 13.3mg/L, BOD 3.6mg/L, TN 4.7mg/L 및 TP 0.1mg/L로 분석되었다. 이 결과를 토대로 수자원으로서 재이용 가능성을 판단하기 위해 중수도의 용도별 수질기준과 비교한 결과, 도시재이용수, 조경용수 및 공업용수로 사용이 가능할 것으로 분석되었고, 친수용수, 하천 유지용수 및 습지용수의 경우에는 추가적인 수질처리가 이루어진 후 사용 가능할 것으로 조사되었다.

3) 수질시료 분석결과를 토대로 모니터링 기간 동안 집수구역에서 발생된 오염물질의 처리효율을 분석한 결과, TSS는 평균적으로 97%, BOD 및 CODcr은 약 94%, TN은 86%, TP 96% 및 Total Cu, Total Zn, Total Pb의 중금속은 약 93% 처리되는 것으로 나타나 옥상 유출수를 처리한 다른 LID 시설보다 높은 저감효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한, 집수면적 대비 시설의 면적 또한 좁게 차지하는 것으로 조사되어 도심지역의 협소한 공간에 설치가 가능할 것으로 분석되었다.

4) 침투화분의 설계처리능력 유지를 위한 적정 유지관리 시점 산정을 위하여 오염물질 부하량과 처리 누적강우량의 관계에 대한 선형회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 유지관리가 필요한 누적강우량의 경우 TSS가 74mm, BOD 411mm, CODcr 2,219mm, TN 398mm, TP 2,323mm, Cu 4,656mm, Pb 1,097mm, 그리고 Zn은 1,040mm로 나타나 전체적으로 누적강우량 74 ~ 4,656mm의 범위에서 유지관리가 필요한 것으로 도출되었다.

사 사

본 연구는 비점오염원 관리기술 연구단의 “차세대 에코이노베이션 사업(과제번호: 413-111-002)”과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Han, MY (2003). Rainwater harvesting, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 51(2), pp. 62-77. [Korea Literature]

Hyun, KH, Oh, JI, Park, JB, Kim, JN, Jung, KY, Lee, KM, Kim, YH, Choi JJ, Jin, SW (2008). Effect on the removal efficiency of stormwater runoff and pollutant load in LID facilities, *housing & urban research institute huri focus*, 32, pp. 1-24. [Korea Literature]

Kang, CG, Maniquiz, MC, Son, YG, Cho, HJ, Kim, LH (2011). Development of small constructed wetland for urban and roadside areas, *J. of Wetlands Research*, 13(2), pp. 231-242. [Korea Literature]

Kim, LH, Ko, SO, Lee, BS, and Kim, SG (2006). Estimation of pollutant EMCs and loadings in highway runoff, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 26(2B), pp. 225-231. [Korea Literature]

Kim, LH (2008). Low impact development (LID) technology for the 21st centey eco-friendly construction, *Magazine of Korea Water Resources Association*, 41(6), pp. 47-57. [Korea Literature]

Kim, YR, Sim, JY (2013). A feasibility analysis of stormwater management for the housing redevelopment and reconstruction, *J. of Seoul Studies*, 14(2), pp. 145-159. [Korea Literature]

Michael, ED, John, CC (2005). A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment. *Water, Air and Soil pollution,* 167, pp. 123-138.

Ministry of Environment (MOE) (1995). *Standard Method of Korean.*

Ministry of Environment (MOE) (2012). *The 2nd phase NPS management measures.*

Ministry of Environment (MOE) (2014). *Manual for the BMPs installation management and maintenance.*

Ministry of Environment (MOE) (2015). *Promotion of and support for water reuse act.*

National Institute of Environmental Research (NIER) (2010). *Guidelines of Nonpoint Source Pollutant Best Management for Management of Total Maximum Daily Load,* 11-1480523-000643-01, Korea.

Oregon State University (OSU) (2011). *Stormwater Planter, Low Impact Development Fact Sheet, Oregon Sea Grant Corvallis,* ORESU-G-11-005, Oregon, USA.

Park, KS, Chung, ES, Kim, SU, and Lee, KS (2009). Effect of climate change and urbanization on flow and BOD concentration duration curves, *J. of The Korean Water Resources Association*, 42(12), pp. 1091-1102. [Korea Literature]

Sansalone, JJ, and Bushberger, SG (1997). Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater, *Water Science and Technology*, 36, pp. 155-160.

Tobio, JAS (2014). *Application of stormwater management model for optimization of low impact development techniques in urban areas*, Master`s thesis, Kongju National University, Cheonan, Korea.

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

U.S. Environmental Protection Agency (1999). *Preliminary Data summary of Urban Stormwater Best Management Practices.* EPA 821-R-99-012, USA.