

시범 단지 운영을 통한 LID 기법별 물순환 및 수질개선 효과 분석

Analysis on the Water Circulation and Water Quality Improvement Effect of Low Impact Development Techniques by Test-Bed Monitoring

고 혁 배¹⁾ · 최 한 나²⁾ · 이 윤 규²⁾ · 이 채 영[†]

Hyugbae Ko · Hanna Choi · Yunkyu Lee · Chaeyoung Lee

Received: March 16th, 2016; Revised: March 23rd, 2016; Accepted: April 21st, 2016

ABSTRACT : Low Impact Development (LID) techniques are eco-friendly storm water management process for water circulation restoration and non-point pollutant reduction. In this study, four LID techniques (Small constructed wetland, Infiltration trench box, Infiltration trench, Vegetated swale) were selected and installed as a real size at the real site. All facilities were evaluated as monitoring under the real environmental climate situation and an artificial rain with exceeding design rainfall. In various rainfall, runoff reduction efficiency and non-point pollutant removal efficiency are increased to the bigger Surface Area of LID (SA)/Catchment Area (CA) ratio and the bigger Storage Volume of LID (SV)/Catchment Area (CA) ratio. Runoff did not occur at all rainfall event (max. 17.2 mm) in infiltration trench and vegetated swale. But Small constructed wetland was more efficient at less than 10 mm, a efficiency of infiltration trench box was similar at different rainfall. Although different conditions (such as structural material of LID, rainfall flow rate, antecedent dry periods), LID techniques are good effects not only water circulation improvement but also water quality improvement.

Keywords : LID, Water circulation, Non-point pollutant, Rainfall runoff, Storm water management

요 지 : 저영향개발(LID) 기법은 물순환을 고려한 친환경 도시계획기법으로 개발 이전의 물수지를 회복시키려는 빗물관리 방법이다. 본 연구에서는 도시지역에 적용 가능한 LID 기법 중 4개(침투도랑, 식생수로, 도심형 인공습지, 측구형 침투도랑)를 선정하여 실제 적용될 지역에 시범 단지를 조성하였으며, 실제 강우와 인공강우를 이용한 모니터링을 통해 각 시설의 물순환 및 수질개선 효과를 평가하였다. 다양한 강우사상에서 모니터링한 결과 LID 시설의 표면적과 유역면적비, 그리고 시설용량과 유역면적비가 클수록 모든 강우사상에서 유출이 발생하지 않았다. 또한, 식생수로와 침투도랑은 모든 강우(최대 17.2mm)에서 유출이 발생하지 않았으며, 도심형 인공습지와 측구형 침투도랑에서는 유출이 발생하였는데 도심형 인공습지는 10mm 이하의 강우에서 유출 저감율이 높았으며, 측구형 침투도랑은 10mm 이하 및 이상의 강우에서 유사하게 나타났다. LID 시설의 구조와 강우사상, 선행건기일수에 따라 차이가 있으나 LID의 적용으로 물수지 개선 및 비점오염원 물질의 저감이 가능하다.

주요어 : 저영향개발, 물순환, 비점오염원, 강우 유출, 빗물관리

1. 서 론

우리나라는 1970년 이후 가속화된 도시화는 자연상태의 토지가 주거, 상업, 도로 용지 등으로 변경되는 등 불투수면의 증가를 초래한 결과, 1970년 전국 평균 3%에 불과했던 불투수면적률은 2012년 7.9%(수계·임야 제외 시 22.4%)로 증가하였다. 특히 불투수면적률은 서울 54.39%, 부산 30.25%, 광주 27.03%, 대구 23.28%, 인천 22.3%, 대전 22.0% 등 울산을 제외한 모든 특·광역시 20%를 초과한 것으로 나타났다(환경부, 2013).

Lee(2009)는 기존 불투수면적이 38.4%인 도시지역에서

불투수면적을 12% 증가시켰을 때 유출량이 48.8% 증가하였고 특히 초기 강우 유출량의 증가율이 가장 높게 나타났다고 하였으며, Oh et al.(2010)은 갑천 유역의 각 소유역별 불투수면적을 10~50%까지 증가시켰을 때 유역의 침투 유출량은 불투수면적 증가율에 비례하여 증가하였고 하천에서의 침투 유량 도달시간도 빨라진다고 하였다. 또한, 도시 지역에서 발생된 강우 유출수는 불투수면의 초기세척현상으로 인해 다양한 오염물질이 고농도로 유출되는 것으로 나타나고 있다(Lee & Lee, 2009; Son et al., 2009; Park et al., 2014).

이와 같이 도시 내 불투수면의 증가는 강우 시 빗물의 토

1) Department of Civil Engineering, The University of Suwon

2) R&D Team, Taeyoung E&C CO., LTD

† Department of Civil Engineering, The University of Suwon·Institute of River Environmental Technology (Corresponding Author : chaeyoung@suwon.ac.kr)

양 침투를 차단하여 기저유출을 감소시켜 지하수 고갈과 하천의 건천화를 야기하고 지표유출을 증가시킬 뿐만 아니라 침투 및 총 유출량을 증가시키고 홍수지체시간을 감소시켜 최근 도시침수의 주요 원인이 되고 있다. 또한, 고농도의 비점오염원을 함유한 초기 강우를 단시간에 다량으로 수계로 유입시켜 공공 수역의 수질 악화를 초래하는 등 유역의 생태 건강성을 악화시키고 있다.

최근 국내에서 불투수면 증가로 야기되는 도시 환경 영향을 최소화하기 위하여 저영향개발기법(Low Impact Development, LID) 적용을 위한 연구가 광범위하게 수행되고 있다. LID는 물순환 기능을 고려한 친환경적인 도시계획기법으로 1990년대 미국의 프린스 조지 카운티(Prince georgy county)의 빗물관리계획으로부터 시작되어 bioretention cell(빗물 정원)이 빗물 저류는 물론 오염원의 정화에도 큰 효과가 있다는 사실을 발견하고 1998년 최초의 LID 매뉴얼을 작성하여 보급하면서 LID가 확대되는 계기가 되었다(Choi et al., 2010).

LID는 강우 시 개발 이후에도 개발 이전의 물순환 체계를 유지하고자 하며 비점오염원의 저감을 위한 최적관리기법(BMPs), 도시홍수예방을 위한 분산식 빗물관리 방법으로, 개발로 인한 영향을 피하거나(avoid impacts) 영향을 줄이거나(reduce impacts) 영향을 관리해서(manage impact) 개발 이전의 수문특성과 가장 유사하게 만드는 방법이다. LID는 침투, 저류, 여과 등 주요 기작에 따라 침투도랑, 식생수로, 빗물정원, 인공습지, 투수성 포장 등 다양한 기법이 있으며 최근 “개발사업 비점오염원 최적관리 지침(환경부와 국립환경과학원, 2010)”, “건강한 물순환 체계 구축을 위한 저영향개발(LID) 기술요소 가이드라인(환경부와 한국환경공단, 2013)” 등에서 LID 기법의 기술요소를 소개하고 있다.

LID가 본격적으로 국내에 적용되면서 LID의 우수유출 저감 및 수질개선 효과를 정량화하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. Sim et al.(2015)은 LID 요소 기술의 우수유출 저감 효율은 투수성 포장, 침투 트랜치, 생태 저류장치, 옥상녹화, 식생수로, 빗물정원, 빗물 통 순으로 높다고 하였으며 Park et al.(2013)은 불투수면적비 6.1%였던 도시지역을 재래식 개발방식으로 개발하였을 때 불투수면적은 64.5%로 증가되며 도시지역의 침투 및 저류율은 91.8%에서 33.8%로 감소하고 유출률은 5.2%에서 49.9%로 증가하였으나 투수성 포장을 적용할 경우 불투수율 52.3%, 침투 및 저류율 44.9%, 유출률 43.2%로 도시개발 전보다는 증가되지만 재래식 개발방식보다 개선되었다고 하였다. 또한, 투수 포장은 재현기간이 작은 강우사상에서 높은 유출량 저감 효과가 있으며(Lin et al., 2015), 투수성 포장을 적용하면 침투 유

량의 감소로 홍수예방뿐 만 아니라 도시 물순환 회복에 효과가 있다(Koo et al., 2013; Jung et al., 2013)고 하였다. 또한, Flores et al.(2015)은 배수면적의 약 1%에 해당하는 면적의 침투도랑과 나무여과상자를 적용한 이후 강우 시 침투 유량이 크게 감소하였으며 침투 유량 발생시간도 크게 지체되는 등 LID 시설의 침투와 저류기능은 강우유출수의 발생 빈도, 유출발생시간 및 유출량을 크게 낮추는 등 LID 적용이 수문기능 회복에 크게 기여한다고 하였다.

Kim & Sung(2012)은 강우 강도 2.5mm/hr와 5.0mm/hr에서 레인 가든을 이용한 오염물질 제거율을 평가한 결과 레인 가든이 저농도의 비점오염물질(N, P, 중금속)의 처리에 효과적이라고 하였다. 또한, Qin et al.(2013)은 도시지역에서 습지대, 투수성 포장, 지붕녹화 등 LID 기법을 평가한 결과 강우 강도, 지속시간 및 설치 위치에 따라 그 성능은 달라지나 단기간의 많은 강우에서 LID 적용지역이 기존 배수시스템의 적용지역보다 유출량 감소에 더 효과적이었으며 LID는 도시지역 빗물관리에 필수적이라고 하였다.

이와 같이 LID 기법의 성능 평가를 위한 연구는 대부분 실험실 규모의 장치와 인공강우를 이용하여 분석하거나 대상지역을 선정한 후 LID 기법이 적용되는 것을 가정하여 각종 지침에 제시된 효율을 적용하여 모델링을 통해 분석하고 있어 실제 지역에 적용할 경우 설치지역의 토양 및 강우 특성 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 LID 기법별 예측된 효과를 그대로 현장에 적용하기에는 한계가 있다.

그러므로 본 연구에서는 실제 신도시 조성지역에 적용될 LID 기법을 대상으로 실제 적용될 LID 기법에 대해 시범 단지를 설치한 후 인공강우 및 실제 자연강우 환경에서 모니터링을 통하여 각 기법의 실제 적용 지역에서의 지역 특성을 반영한 실질적인 물순환 효과를 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 시범 단지 조성 지역 현황

본 연구의 모니터링 대상인 LID 기법을 대상으로 테스트 베드를 설치한 지역은 천안시 서북구 불당동, 백석동 일대에 조성 중인 아산 탕정지구 분산형 빗물관리 시범 신도시 사업지구로 총 개발면적은 1,753,385m²이다. 대상지역은 서고동저형의 30~60m 내외의 낮은 고도와 저경사를 갖는 지형으로 주요 수계로는 동~서방향의 곡교천과 천안천을 경계로 북쪽은 산동천, 남쪽에는 회룡천 등이 분포하며 대상지역에는 소하천인 장재천이 남쪽으로 유하한다. 본 대상지 일원은 선캠브리아기의 편마암류와 이를 관입하는 중생대 화강

Table 1. Plan of LID installation in Tangjung new town

Item	Facility name	Size (m)	Quantity (ea)	Unit volume (m ³)	Total infiltration & Storage vol. (m ³)
Infiltration facility	Small constructed wetland	1.0×5.0	60	1.49	89.4
	Infiltration trench box	0.5×5.0	457	0.92	420.4
	Infiltration trench (Type-A)	1.2×5.0	41	2.03	83.2
	Infiltration trench (Type-B)	1.2×8.0	40	3.44	137.6
	Infiltration trench (Type-C)	1.0×4.0	767	2.37	1,817.8
	Vegetated swale (Type-A)	2.0×10.0	71	4.21	298.9
	Vegetated swale (Type-B)	2.0×5.0	19	1.99	37.8
Storage facility	Eco-pond & constructed wetlands	-	4	-	1,940.0
	Rain storage tank	-	5	-	4,200.0
Total sum		-	1,464	-	9,025.1

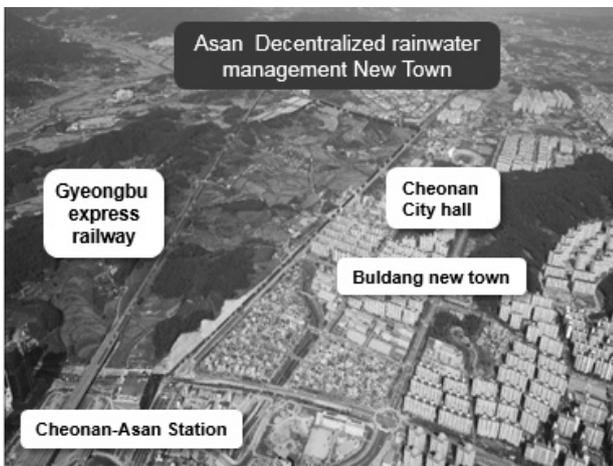


Fig. 1. Location of research site

암으로 구성되며, 하천 주변과 평탄지는 점성토 지층을 소량 포함하는 충적층이 분포하고 있다(한국토지주택공사, 2011).

아산 탕정 신도시 설계 시 빗물관리를 통해 유출량을 저감하고 개발 이전의 물순환 상태로 회복시키기 위하여 침투도랑, 인공습지, 식생수로, 빗물저류조 등 침투·저류 기능을 갖는 LID 기법이 적용되었으며, 설치 운영될 LID 시설은 Table 1과 같고 총 유효 침투·저류 용량은 9,025.1m³로 계획되었다(한국토지주택공사, 2011).

2.2 Test-bed 설치

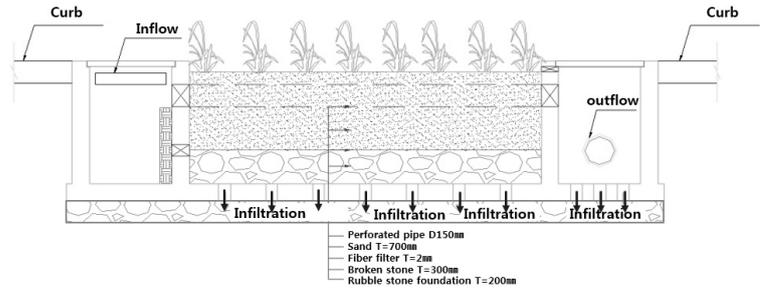
아산 탕정 신도시 개발지역의 물순환 회복을 위해 설계에 반영된 LID 시설의 효율을 평가하기 위한 시험 단지를 조성하였다. 시험 단지에 설치된 LID 시설은 도심형 인공습지(Small constructed wetland), 측구형 침투시설(Infiltration trench box), 침투도랑(Infiltration trench), 식생수로(Vegetated swale) 등 4개 시설이며 신도시에 반영된 실제 규모로 제작하여 설치하였다. 또한, 각 시설별 집수면적은 116m²로 동

일하게 하였으며, 개발 후 불투수면을 재현하기 위하여 집수면적 상부를 콘크리트로 포장하였다. 각 시설의 형태, 하부구조 등 모든 조건을 실제 설치될 시설과 동일하게 하였으며 기초 지반도 대상지 내 성토 조건과 동일하게 조성하였다.

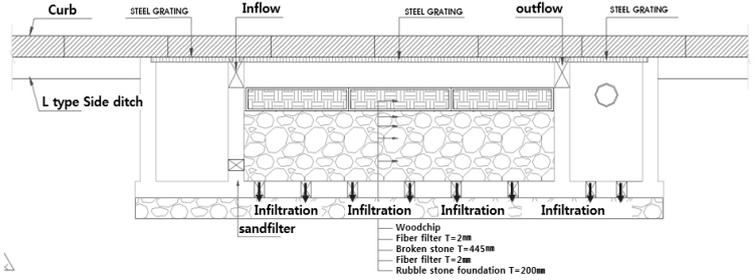
2.3 모니터링 방법

각 LID 시설의 효율을 평가하기 위하여 설계 강우 이내의 자연 강우와 설계 강우 이상 인공강우에서 유량과 수질 모니터링을 실시하였다. 유량은 강우 시 강우량과 LID 시설의 유입·유출 및 by-pass 지점 등 각 시설별 3개소에 대하여 모니터링을 실시하였다. 또한, 일반적으로 관련 문헌(환경부(2014))에서는 선행건기일수 3일을 권장하고 있으나 본 연구에서는 다양한 강우에서 유출특성을 살펴보기 위해 선행건기일수 2일 이상인 강우량을 대상으로 총 6번의 강우를 대상으로 실시하였다. 강우 시작부터 1시간까지 6회(유출 직전, 5분, 10분, 15분, 30분, 60분), 강우 중기부터 종료 시까지는 적정 시간 간격을 두어 6회 실시하였으며 강우량은 강우량계(Sigma rain logger)를 이용하였고, 각 시설의 유량은 유량계(Sigma 950)를 이용하였다. 또한, 각 시설의 침투량을 산정하기 위하여 도심형 인공습지와 측구형 침투 시설의 경우 각 시설의 전처리조와 후단 집수정의 수위를 측정하였고, 침투도랑과 식생수로의 경우 침투 저류연못에서의 수위를 측정하였다. 각 시설에서의 수위는 강우 시 유입과 동시에 차오르는 빗물의 수위를 1분 간격으로 10분 동안 측정(10회)하고 유입 10분 후부터 5분 단위로 1시간까지 측정(10회)하였으며, 이후 1시간부터 2시간까지 15분 단위로 측정(5회)하고 2시간 이후부터 48시간까지 적정시간 간격으로 5회 이상 측정하였다.

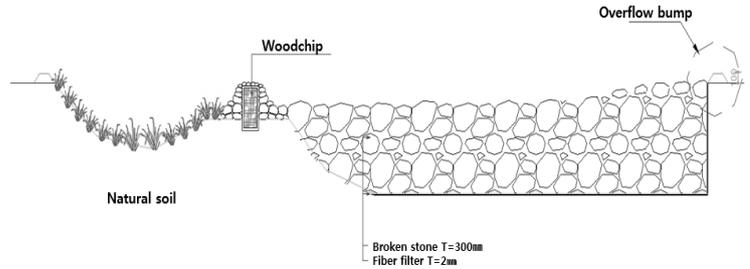
수질 모니터링은 각 시설의 유입수와 유출수에 대하여 선



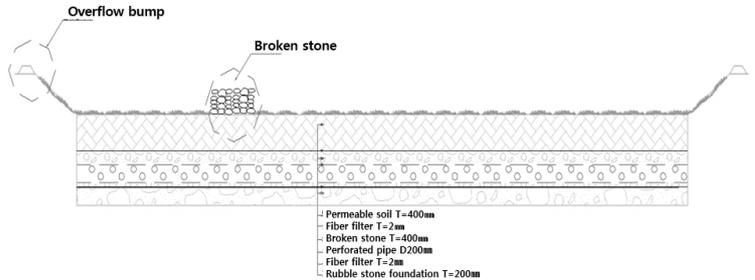
(a) Small constructed wetland



(b) Infiltration trench box



(c) Infiltration trench



(d) Vegetated swale

Fig. 2. Panorama view & cross-sectional diagram of LID facilities

행진기일수 3일인 강우에 대해 실시하였으며, 시료 채수 횟수는 유량 모니터링과 동일 간격을 두고 1회 강우 시 12회 채수하였고 시료의 탁도(Turbidity), 전기전도도(Conductivity), 총부유물질(TSS), 화학적 산소요구량(COD) 및 총질소(T-N), 총인(T-P)을 분석하였으며, 분석방법은 수질오염공정시험기준(환경부, 2016)에 준하여 측정하였다.

2.4 모니터링 결과 분석

강우 시 각 시설별 측정된 유량 및 수질 분석 결과를 이용하여 각 시설의 유출계수(Runoff coefficient), 물수지분석

을 실시하였다. 유출률은 강우 시 집수구역에서 유출되는 유출수량을 강우량으로 나눈 값으로 저감시설의 효율산정 및 물수지 분석에 중요하게 이용된다(Eq. (1)).

$$\text{Runoff coefficient(RC)} = \frac{\text{Event runoff volume}}{\text{Event rainfall volume}} = \frac{\int_0^T Q_{TR}(t)dt}{\int_0^T Q_{TR}(t)dt} \quad (1)$$

수질개선효과는 비점오염물질 저감효율을 산정하였으며, 저감효율 산정은 Summation Of Loads(SOL) 법을 적용하고

(Eq. (2)) 시간별 누적 침투량 산정은 각 시설의 전처리조와 유출 집수정의 빗물의 수위를 측정하여 수위, 체적, 용량을 고려해 누적 침투량을 산정하였다. 침투는 강우 시 시설 내 일시 저류용량을 제외한 값으로 산정하며 24시간을 기준으로 적용하려고 하였으나 강우지속시간에 따라 조절하여 적용하였다. 또한, 물순환 기여도는 물수지 산정방법을 통하여 평가될 수 있으며 물수지 균형식은 강우유출수가 시설 내로 유입 시 시설 내 여재 공극에 저류되는 양, 시설을 통하여 침투되는 양, 대기로 증발되는 양 및 손실되는 양 등을 합산하여 산정할 수 있다(Fig. 3).

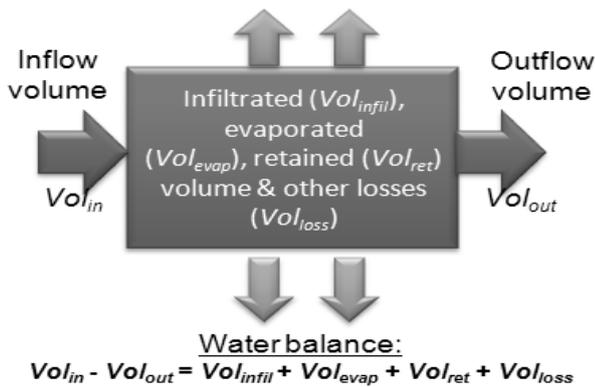


Fig. 3. Concept of water balance assesment

$$\text{Removal Efficiency}(\%) = \frac{\sum \text{Inlet loading} - \sum \text{Outlet loading}}{\sum \text{Inlet loading}} \times 100 \quad (2)$$

3. 연구결과

3.1 유출률 및 비점오염원 저감 효과

4개의 LID 시설별 모니터링 강우사상 결과를 나타낸 것으로 총강우량, 강우지속시간, 평균강우강도, 유출률 등은 Table 2와 같으며 모니터링은 20mm/event 이하의 강우사상을 대상으로 각 시설별 총 3~6회 수행되었다. 모니터링 결과 강우량은 2.6~19.1mm/event로 나타났으며 강우지속시간은 0.1~2.0시간, 평균 강우강도는 6.0~38.2mm/hr로 산정되었다. 유출률은 24~96%로 나타났으며 시설별 평균 유출률은 측구형 침투시설이 80%로 가장 높았고, 도심형 인공습지 70%, 식생수로 64%, 침투도랑 41%의 순으로 산정되었다.

각 시설에서 강우지속시간에 따른 유출률과 수질변화를 살펴보면 Fig. 4에서와같이 대부분의 강우사상에서 강우가 시작되고 유출이 시작된 이후 강우 초기에 오염물질의 농도가 높은 초기강우(first flush) 현상이 나타났다.

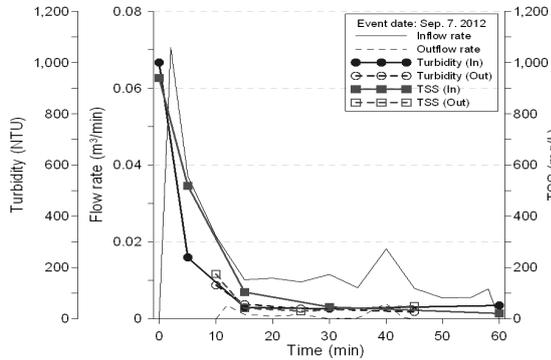
한편 초기강우 시 LID 시설로 유입된 비점오염물질은

Table 2. Status of rainfall monitoring

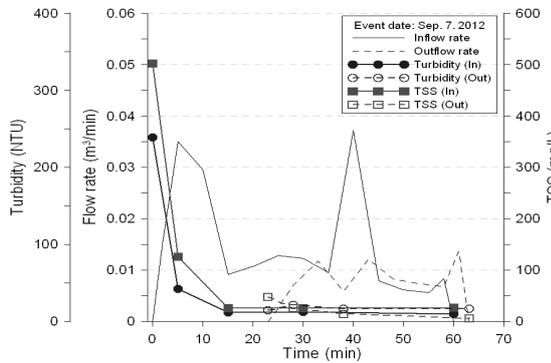
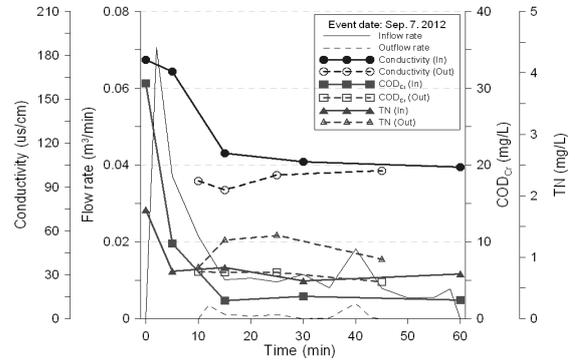
LID type	Event No.	Monitoring date	Total rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Avg. rainfall intensity (mm/hr)	Total rainfall vol. (m ³)	Total runoff vol. (m ³)	Runoff rate (%)	Note
Vegetated swale	1	2012-09-04	8.0	1.0	8.0	0.93	0.693	74.7	
	2	2012-09-07	10.0	1.0	10.0	1.16	0.810	69.8	
	3	2012-10-09	17.2	0.6	30.4	2.00	1.642	82.1	Artificial rainfall
	4	2012-11-08	19.1	0.6	31.9	2.22	1.524	68.6	Artificial rainfall
	5	2012-11-11	12.0	2.0	6.0	1.39	0.355	25.5	
Infiltration trench	1	2012-10-09	2.6	0.1	31.0	0.30	0.1464	48.8	Artificial rainfall
	2	2012-11-11	12.0	2.0	6.0	1.39	0.3348	24.1	
	3	2012-11-29	3.9	0.1	29.6	0.46	0.2347	51.3	
Small constructed wetland	1	2012-08-14	17.2	0.5	38.2	2.00	1.784	89.2	Artificial rainfall
	2	2012-09-04	8.0	1.0	8.0	0.93	0.694	74.7	
	3	2012-09-07	10.0	1.0	10.0	1.16	0.962	82.9	
	4	2012-10-09	17.2	0.6	29.6	2.00	1.225	61.2	Artificial rainfall
	5	2012-11-08	17.2	0.6	28.7	2.00	1.358	67.9	Artificial rainfall
	6	2012-11-11	12.0	2.0	6.0	1.39	0.577	41.4	
Infiltration trench box	1	2012-08-14	17.2	0.8	22.9	2.00	1.778	88.9	Artificial rainfall
	2	2012-09-04	8.0	1.0	8.0	0.93	0.707	76.2	
	3	2012-09-07	10.0	1.0	10.0	1.16	0.950	81.9	
	4	2012-10-09	17.2	0.6	29.6	2.00	1.921	96.1	Artificial rainfall
	5	2012-11-11	12.0	2.0	6.0	1.39	0.739	53.1	
	6	2012-11-29	17.2	1.3	12.9	2.00	1.669	83.4	Artificial rainfall

시설에 따라 상당히 저감되는 것으로 나타났는데 식생수로와 침투도랑의 경우에는 모든 강우사상에서(20mm/event 이하) 유출이 발생되지 않아 시설로 유입된 강우의 전량이 시

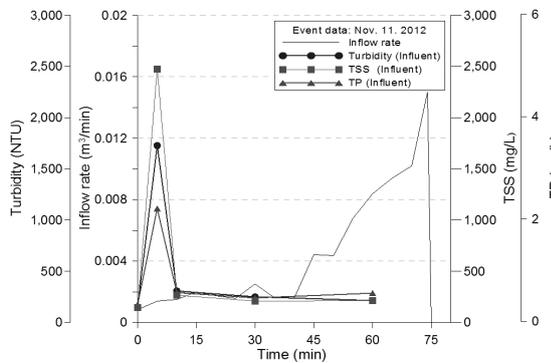
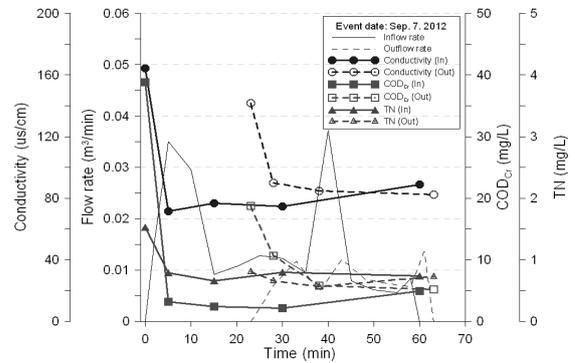
설 내에 침투 및 저류되는 것으로 나타났다. 도심형 인공습지와 측구형 침투시설의 경우에는 일정 시간 이후에 유출이 나타나기 시작했는데, 자연 강우에서는 유출이 없었으며 설



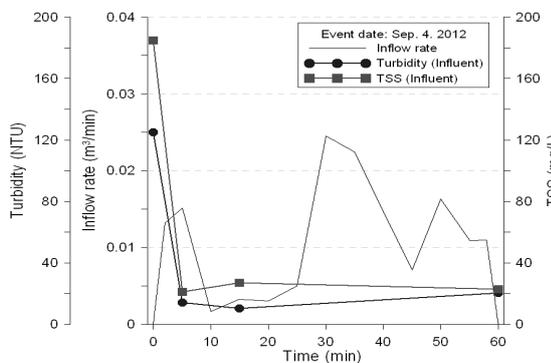
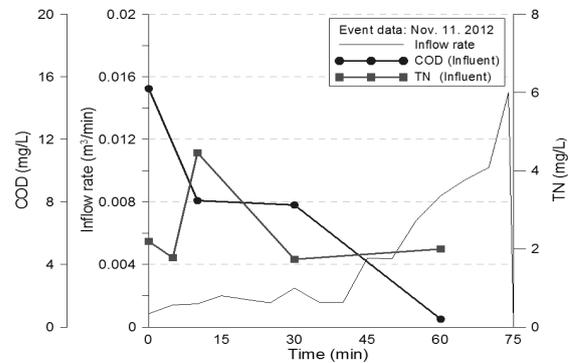
(a) Small constructed wetland



(b) Infiltration trench box



(c) Infiltration trench



(d) Vegetated swale

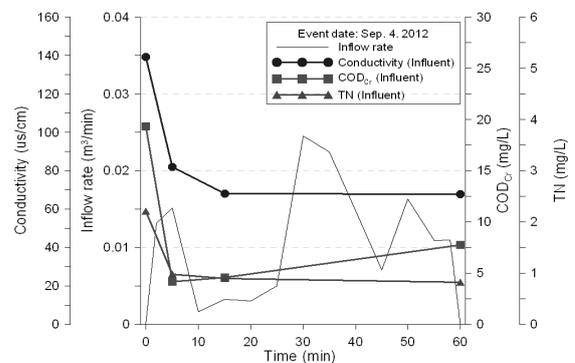


Fig. 4. Inflow rate and water quality characteristics for rainfall duration time

계 강우량 이상인 인공강우(17.2mm/event)에서는 Fig. 5와 같이 침투·저류량 및 유출량의 변화가 나타났다. 한편 지체 시간은 각 강우 발생일에 따라 다르게 나타났는데 이는 선행건기일수의 차이에 의한 것으로 판단되며, 비록 일정 시간 이후 유출이 발생되었으나 초기 강우는 유출되지 않아 초기 강우 시 유입된 고농도 비점오염물질은 유출되지 않은 것으로 나타났다. 유출이 발생한 강우에서 도심형 인공습지와 측구형 침투시설의 비점오염물질 저감효율은 Fig. 6과 같다. 비점오염물질의 평균 제거효율은 도심형 인공습지의

경우 TSS 83.8%, COD 82.1%, T-N 95.8%, T-P 68.9%로 나타났으며, 측구형 침투시설은 TSS 91.7%, COD 55.1%, T-N 62.5%, T-P 83.0%로 나타났다. 이와 같이 강우량에 따라 LID 시설별로 차이는 있으나 유출량 저감 및 비점오염물질저감 효과를 확인할 수 있었다.

3.2 물수지 분석

물순환 기여도 평가 방법을 이용하여 각 LID 시설별 물

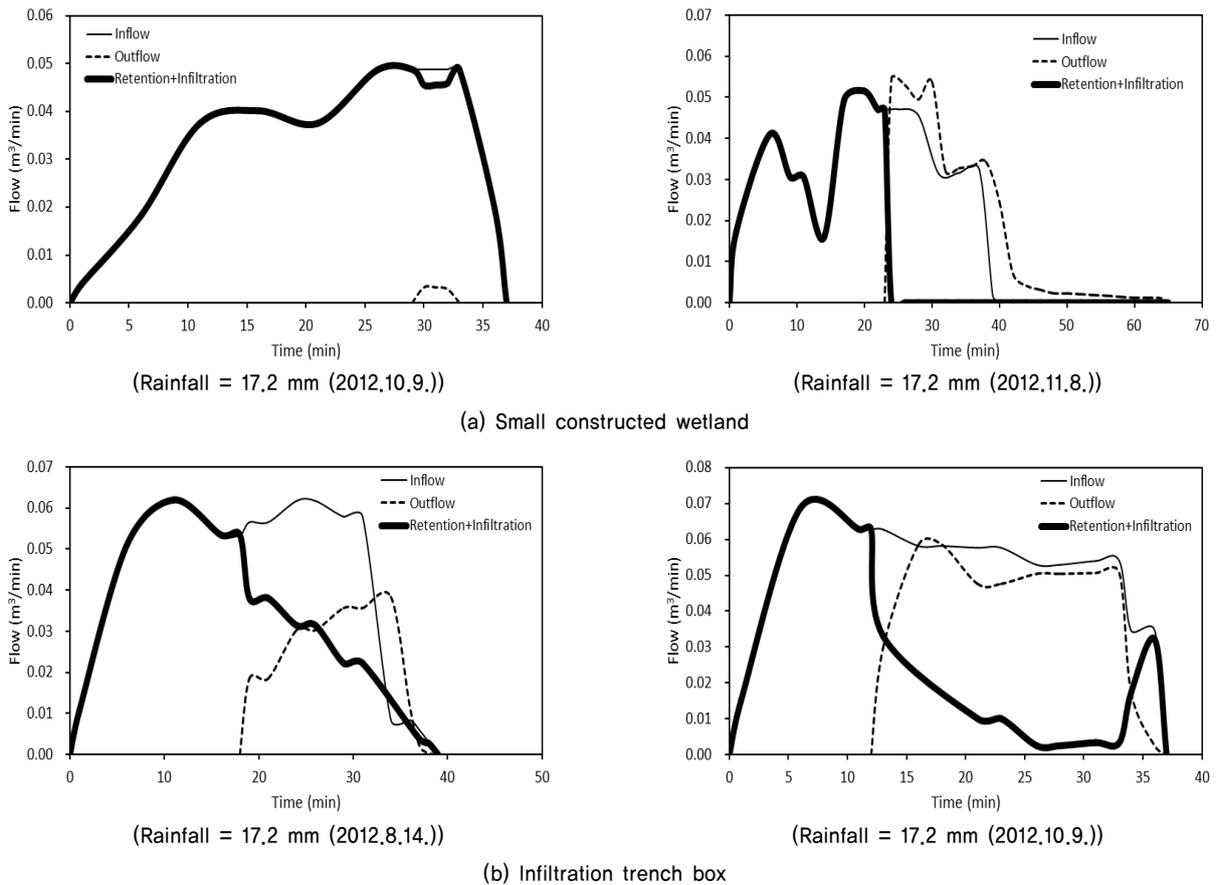


Fig. 5. Retention & Infiltration flow rate of LID facilities

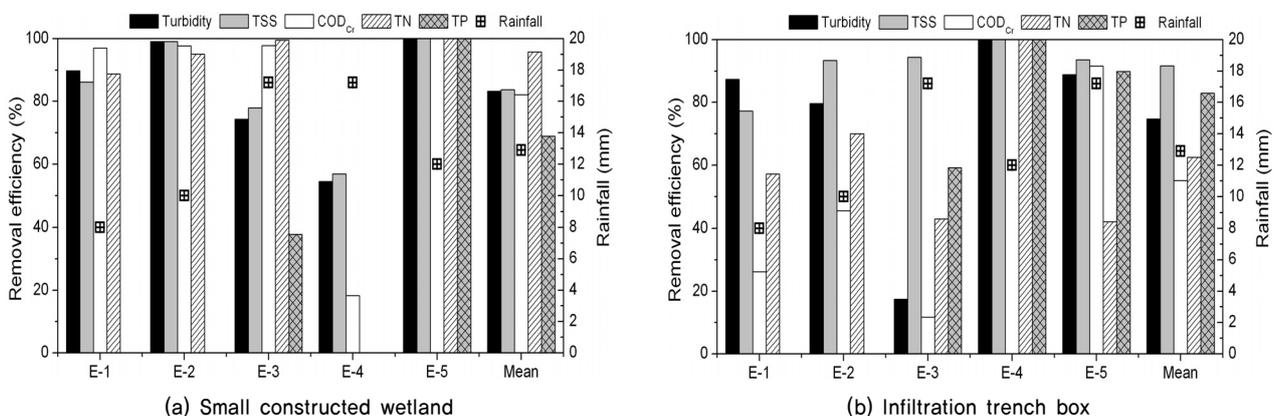


Fig. 6. Non point pollutant removal efficiency of LID facilities

수지를 산정한 결과 Table 3과 같이 각 시설에서 저감된 양, 즉 강우유출수가 시설 내로 유입하여 여재 공극에 저류된 양, 시설을 통하여 침투된 양, 대기로 증발된 양과 손실된 양 등을 합산한 양과 시설에서 유출된 양을 나타내었다. 식생수로와 침투도랑은 20mm/event 이하의 강우에서 시설로 유입된 강우유출수 전량이 시설 내 침투 및 저류되어 시설에서 유출이 발생하지 않았다. 또한, 도심형 인공습지의 경우 시설 내 저류 및 침투되는 양이 평균 77.5%로 22.5%가 유출되었으며, 측구형 침투시설은 평균 61.4%가 시설 내 저류 및 침투되고 38.4%가 유출되었다.

또한, 본 연구에서 적용된 LID 시설의 표면적(Surface Area, SA) 대비 유역면적(Catchment Area, CA)의 비(SA/CA)와 시설용량(Storage Volume, SV) 대비 유역면적의 비(SV/CA)와의 상관관계를 도출하였다. SA/CA 비는 식생수로, 침투도랑, 도심형 인공습지, 측구형 침투시설이 각각 0.21, 0.08, 0.04, 0.03이었으며 SV/CA 비는 각각 0.04, 0.03, 0.01, 0.01로 나타나 SA/CA비는 0.08 이상, SV/CA 비는 0.03 이상으로 설계할 경우 10mm 이상의 강우사상에서도 100%의 유출 저감 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되나 이는 경제성을 고려한 평가가 이루어져야 한다.

또한, 강우량별 물수지 산정 결과 Fig. 7과 같이 도심형 인공습지의 경우 시설에서 유출되는 양은 강우량 10mm 이하일 때 평균 9.6%, 10mm 이상일 때 28.9%로 나타나 10mm 이하의 소규모 강우 발생 시 시설 내 저류 및 침투되는 양이 많은 것으로 나타났다. 측구형 침투시설은 10mm 이하의 소규모 강우 발생 시 55.7%가 침투 및 저류되고, 10mm 이상의 강우 발생 시 64.6%가 침투 및 저류되어 강우량과 침투 및 저류량의 상관관계가 도심형 인공습지보다 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 LID가 적용된 지역의 경우 6.35mm 이하의 소강우일 때의 유출량 저감률이 그 이상의 강우 시

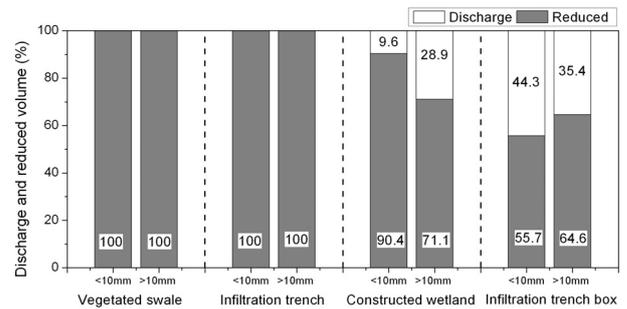


Fig. 7. Water balance of LID facilities according to the rainfall (maximum rainfall < 19.1 mm)

Table 3. Water balance of LID facilities

LID type	Event No.	Event date	Rainfall (mm)	Reduced volume (%)	Discharge volume (%)
Small constructed wetland	1	2012-08-14	17.2	43.6	56.4
	2	2012-09-04	8.0	85.4	14.6
	3	2012-09-07	10.0	95.4	4.6
	4	2012-10-09	17.2	99.2	0.8
	5	2012-11-08	17.2	41.6	58.4
	6	2012-11-11	12.0	100.0	0
	Mean		13.6	77.5	22.5
Infiltration trench box	1	2012-08-14	17.2	68.9	31.1
	2	2012-09-04	8.0	47.6	52.4
	3	2012-09-07	10.0	63.7	36.3
	4	2012-10-09	17.2	44.8	55.2
	5	2012-11-11	12.0	100.0	0
	6	2012-11-29	17.2	44.8	55.2
	Mean		13.6	61.6	38.4
Infiltration trench	1	2012-10-09	2.6	100	0
	2	2012-11-11	12.0	100	0
	3	2012-11-29	3.9	100	0
	Mean		6.2	100	0
Vegetated swale	1	2012-09-04	8.0	100	0
	2	2012-09-07	10.0	100	0
	3	2012-10-09	17.2	100	0
	4	2012-11-08	19.1	100	0
	5	2012-11-11	12.0	100	0
	Mean		13.3	100	0

보다 크게 나타났다(Zimmerman et al., 2010)는 결과와 유사하나 본 연구에서는 두 시설의 구조적인 차이가 더 큰 원인으로 판단된다. 특히 도심형 인공습지는 시설 내 하부 유공층의 상부가 토양 및 식생으로 구성되어 토양함수량 및 식생 발육에 따라 침투 및 저류량에 영향을 미치나 측구형 침투시설은 내부가 전부 유공층으로 구성되어 있어 비교적 일정한 효율을 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 식생수로와 침투도랑의 경우 강우사상에 관계없이 전체 유입수가 저류 및 침투되는 것으로 나타나 물순환 기여도가 가장 높은 시설로 평가되었다.

모니터링을 통해 평가된 LID 시설이 탕정 신도시에 Table 1과 같이 계획대로 설치된다는 것을 가정하여 LID 시설에 의한 빗물 유출 저감량을 산출하였다. 탕정 신도시가 위치한 천안지역의 2015년 연 강수량은 728mm로 전국 연평균 강수량 948.2mm 보다 적은 강수량(기상청, 2016)을 나타내어 물순환의 필요성이 더욱 대두되고 있는 지역이다. 2015년 천안지역 강우를 분석하면 10mm/event(선행건기일수 2일 이상의 독립강수 또는 연속강수이나 지속기간 총 강수량 10mm 이내) 이하의 강우사상을 나타낸 횟수는 연간 65회로 이는 전체 강우횟수 113회의 57.5%였다. 그러므로 탕정 신도시 지역에 LID 시설을 설치하여 운영할 경우 10mm/event 이하의 강우사상에서 지표 유출이 전혀 없기 때문에 연간 총 강수량 728mm 중 150.5mm의 빗물이 침투·저류될 수 있으며 LID 기법을 통해 20.7%의 물순환 효과를 기대할 수 있을 것이다.

4. 결 론

도시지역의 빗물관리를 위해 적용 가능한 4가지(식생수로, 침투도랑, 도심형 인공습지, 측구형 침투시설) LID 시설을 실제 적용될 지역에 시범시설을 설치하여 강우 시 유출량 및 수질을 모니터링 한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

또한, 강우량별 물수지 산정 결과 Fig. 7과 같이 도심형 인공습지의 경우 시설에서 유출되는 양은 강우량 10mm 이하일 때 평균 9.6%, 10mm 이상일 때 28.9%로 나타나 10mm 이하의 소규모 강우 발생 시 시설 내 저류 및 침투되는 양이 큰 것으로 나타났다. 측구형 침투시설은 10mm 이하의 소규모 강우 발생 시 55.7%가 침투 및 저류되고, 10mm 이상의 강우 발생 시 64.6%가 침투 및 저류되어 35.4%만 유출되는 것으로 나타나 강우량과 침투 및 저류량의 상관도가 도심형 인공습지보다 낮은 것으로 나타났다.

- (1) 침투와 저류 기능이 있는 LID 기법 중 침투도랑과 식생수로는 20mm 이하의 강우에서는 유출이 발생하지 않았으나 도심형 인공습지와 측구형 침투시설에서는 강우량 및 선행건기일수에 따라 유출이 발생하였다. 유출이 발생된 두 시설의 평균 유출률은 강우사상이 적은 (10mm/event 이하) 소강우에서 27.0%, 10mm/event 이상의 대강우(최대 17.2mm)에서 32.2%로 도출되었다. 연구결과 도시지역에 LID 기법의 적용으로 강우 시 유출량 저감 뿐만 아니라, 유출시간을 지체시킬 수 있어 20mm/event 이하의 강우사상에서 LID 기법이 빗물관리에 효과적이다.
- (2) LID 시설의 표면적(SA) 및 시설용량(SV)과 유역면적(CA)의 비(SA/CA 또는 SV/CA)가 클수록 유출량 저감 효율이 증가되었다. 이와 같이, SA/CA비 또는 SV/CA비를 증가시킬수록 물수지 개선율이 증가되어 해당 유역의 물수지 개선에 상당히 기여할 것으로 판단되므로 최적의 SA/CA비 또는 SV/CA 비를 산정하기 위해서는 경제성과 연계한 후속 연구가 필요하다.
- (3) 20mm/event 이하의 강우사상에서 강우가 시작되고 유출이 시작된 이후 강우 초기에 오염물질의 농도가 급격히 증가되는 초기강우 현상이 나타났으나, 침투도랑과 식생수로에서는 유출이 발생되지 않았으며 유출이 발생한 도심형 인공습지와 측구형 침투시설의 경우에도 오염물질 농도는 평균 TSS 87.8%, COD 68.6%, T-N 79.2%, T-P 76.0% 저감된 것으로 나타나 LID의 적용으로 비점오염물질을 저감을 통한 수질개선에 기여할 수 있다.
- (4) 탕정 신도시 지역에 LID 시설을 적용할 경우 강우사상 10mm/event 이하에서는 유출이 없을 것으로 예측되어 20.7%의 물순환 개선효과를 기대할 수 있다.

References

1. 기상청 (2016), 국내기후 게시 자료, http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_table.jsp?stn=232&yy=2015&obs=21&x=23&y=12.
2. 한국토지주택공사 (2011), 아산탕정지구 분산형 빗물관리 도시 조성공사 종합보고서, pp. 425~490.
3. 환경부, 국립환경과학원 (2010), 수질오염총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침, pp. 35~106.
4. 환경부, 한국환경공단 (2013), 건강한 물순환 체계 구축을 위한 저영향개발(LID) 기술요소 가이드라인, pp. 65~100.
5. 환경부 (2013), 전국 불투수 면적율 조사 결과 보도자료, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EB%B6%88%ED%88%AC%EC%88%98&menuId=286&orgCd=&boardId=185571&boardMasterId=1&boardCategoryId=>

39&decorator=.

6. 환경부 (2014), 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼, pp. 183~189.
7. 환경부 (2016), 수질오염공정시험기준, pp. 106~458.
8. Choi, H. S., Kim, D. H. and Cho, S. Y. (2010), Application and effects of low impact development in urban regeneration of waterfront areas, KEI, p. 6 (in Korean).
9. Flores, P. E. D., Maniquiz-Redillas, M. C., Tobio, J. A. S. and Kim, L. H. (2015), Evaluation on the hydrologic effect after applying an infiltration trench and a tree box filter as Low Impact Development(LID) techniques, Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 31, No. 1, pp. 12~18 (in Korean).
10. Jung, J. Y., Lee, G. Y., Ryu, J. N. and Ohe, J. I. (2013), Effects of porous pavement on runoff reduction in Boguang subcatchment, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol. 27, No. 2, pp. 251~259 (in Korean).
11. Kim, C. S. and Sung, K. J. (2012), Effect of rain gardens on removal of urban non-point source pollutants under experimental conditions, Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 28, No. 5, pp. 676~685 (in Korean).
12. Koo, Y. M., Jo, J. A., Kim, Y. D. and Park, J. H. (2013), A study on runoff analysis of urban watershed by hydrologic infiltration experiment of permeable pavement, Journal of Korean Society of civil engineers, Vol. 33, No. 2, pp. 559~571 (in Korean).
13. Lee, H. S. and Lee, S. H. (2009), Runoff characteristics of stormwater in small city urban area, Journal of Kor. Soc. Environ. Eng., Vol.31, No.3, pp. 193~202 (in Korean).
14. Lee, H. W. (2009), A study on watershed model for predicting the runoff characteristics of urban area, Journal of Kor. Soc. Environ. Eng., Vol. 31, No. 12, pp. 1089~1094 (in Korean).
15. Lin, W. G., Ryu, S. W., Park, D. G., Lee, J. H. and Cho, Y. H. (2015), Performance evaluation of the runoff reduction with permeable pavements using the SWMM model, Journal of the Korean Society of Road Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 11~18 (in Korean).
16. Oh, D. G., Chung, S. W., Ryu, I. G. and Kang, M. S. (2010), Analysis of rainfall-runoff characteristics on impervious cover changes using SWMM in an urbanized watershed, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 26, No. 1, pp. 61~70 (in Korean).
17. Park, J. Y., Lim, H. M., Lee, H. I., Yoon, Y. H., Oh, H. J. and Kim, W. J. (2013), Water balance and pollutant load analyses according to LID techniques for a town development, Journal of Kor. Soc. Environ. Eng., Vol. 35, No. 11, pp. 795~802 (in Korean).
18. Park, J. Y., Lim, H. M., Yoon, Y. H., Jung, J. H. and Kim, W. J. (2014), Estimation of stream water quality changes brought by a new town development, Journal of Kor. Soc. Environ. Eng., Vol. 36, No. 1, pp. 58~66 (in Korean).
19. Qin, H. P., Li, Z. X. and Fu, G. (2013), The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics, Journal of Environmental Management, Vol. 129, pp. 577~585.
20. Sim, K. B., Yeon, J. S. and Kim, E. S. (2015), Analysis of low impact development element techniques runoff reduction efficiency, 2015 Korean Society of civil engineers Conference, pp. 199~200 (in Korean).
21. Son, H. G., Lee S. Y., Marla C. M. and Kim, L. H. (2009), Characteristics of NPS pollutants and treatment of stormwater runoff in paved area during a storm, Journal of Korean Wetlands Society, Vol. 11 No. 2, pp. 55~66 (in Korean).
22. Zimmerman, M. J., Waldron, M. C., Barbaro, J. R. and Sorenson, J. R. (2010), Effects of Low-Impact-Development (LID) practices on streamflow, runoff quantity, and runoff quality in the ipswich river basin, massachusetts: a summary of field and modeling studies, U.S. Geological Survey, pp. 16~18.