

도시 개발 전 · 후 LID 기법 적용에 따른 물수지 및 오염부하 변동 특성 Water Balance and Pollutant Load Analyses according to LID Techniques for a Town Development

박지영 · 임현만 · 이혜인 · 윤영한 · 오현재 · 김원재[†]

Ji-Young Park · Hyun-Man Lim · Hae-In Lee · Young-Han Yoon · Hyun-Je Oh · Weon-Jae Kim[†]

한국건설기술연구원 환경연구실

Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

(2013년 9월 27일 접수, 2013년 11월 6일 채택)

Abstract : According to the increase of impervious area due to the town development, the rate of infiltration generally lessens and that of runoff rises during wet weather events. And it is concerned that its impacts on water quality for the downstream water bodies due to the change of rainfall runoff patterns may also increase. To cope with these issues, LID (Low Impact Development) techniques which try to maintain the characteristics of rainfall runoff regardless of the town development have been introduced actively. However, the behaviors of each LID technique for rainfall runoff and pollutant loads is not understood sufficiently. In this study, considering the applications of some LID techniques, several sets of simulations using a distributed rainfall runoff model, SWMM-LID, have been conducted for D town whose development is progressing. As the results of the simulations, the rates of infiltration/storage have been decreased from 78% in the case before the town development to 15% after the development and increased again by 24% with LID techniques such as porous pavement, rain barrel and rain garden. The rates of runoff have been increased more than three times from 20% in the case before the development to 74% after the development, and they have also been decreased to 66% by the adoption of LID techniques. It has been simulated that porous pavement is more effective than others in the view point of the reduction of runoff and rain barrel is more attractive for the management of pollutant loads (TSS, BOD, COD, T-N and T-P). Therefore, if some LID techniques should be selected for the a new town, it could be concluded that some techniques with better infiltration functions are recommendable for the control of runoff, and ones with larger storage functions for the management of pollutant loads.

Key Words : Water Balance Analysis, Pollutant Load Analysis, Distributed Rainfall Runoff Model, SWMM, Low Impact Development, Town Development

요약 : 도시 개발 과정에서 토지이용 특성의 변화에 기인하는 불투수면적률의 증가에 따라 일반적으로 강우시 침투율은 감소하고, 유출률은 증가한다. 이에 따라 개발 이후 도시 내 하천 및 하류부 공공수역의 수질에 미치는 영향도 커질 것으로 우려되고 있다. 이러한 문제에 대응하기 위하여 도시 개발과정에서 가능한 개발 이전의 강우 유출특성을 유지하도록 하는 저영향개발(LID, Low Impact Development) 기법의 도입이 활발하게 검토되고 있다. 그러나 다양한 LID 기법이 검토되고 있음에도 불구하고, 각 기법별로 강우 및 오염부하 유출특성에 미치는 영향에 대한 이해는 충분치 못한 실정이다. 본 연구에서는 현재 개발이 진행되고 있는 도시 지역을 대상으로 분포형 강우유출모형을 구축하여 모의를 수행하였다. 범용성이 높은 SWMM 모형을 이용하여 LID 기법 적용에 따른 도시 개발 전 · 후의 유출 및 오염부하 저감효과를 분석하였다. 모의결과, 침투/저류율은 개발 전보다 개발 후 78%에서 15%로 감소하였고, LID 기법(투수성포장, 빗물저류조, 빗물정원)을 적용한 결과 24%까지 다시 증가하였다. 또한 유출률은 개발 전 20%에서 개발 후 74%로 3배 이상 증가하였고, LID 기법 적용시 66%까지 저감시킬 수 있는 것으로 나타나 그 효용성을 확인하였다. 본 모의에 적용한 LID 기법 중 강우유출 저감 측면에서는 투수성포장의 효율이 가장 높았고, 오염부하(TSS, BOD, COD, T-N, T-P) 저감 측면에서는 빗물저류조의 효율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 도시 개발에 따른 유출 및 오염부하 저감을 고려하여 LID 기법을 선정할 경우, 강우유출 저감의 측면을 고려한다면 침투의 기능이 주요한 기법을 선정하고, 오염부하 저감의 측면을 고려한다면 저류의 기능이 주요한 기법을 선정하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

주제어 : 물수지 분석, 오염부하 분석, 분포형 강우유출모형, SWMM, 저영향개발, 도시 개발

1. 서론

1970년대 이후 우리나라에서는 경제개발계획의 추진에 따른 인구의 도시집중 및 산업화의 영향으로 토지개발이 가속화되고, 토지이용 특성의 변화가 심화되었다. 이에 따라 도시유역에서는 대지, 도로, 주차장 등 불투수면적률이 증가하고, 이에 수반한 강우시 비점오염물질의 유출 증가로

인해 하천 및 호소에 대한 수질에 미치는 영향 또한 커지고 있다.¹⁾ 이와 같이 도시유역에서 불투수면적률의 증가는 강우시 토양으로 흡수되거나 증발되지 않고 하천으로 배출되는 빗물의 양을 증가시켜 홍수의 위험뿐만 아니라 비점오염물질의 유출률을 높이는 원인이 되고 있다.²⁻⁴⁾ 도시 개발과정에서 높아지는 유역의 불투수면적률은 강우 유출특성에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 동시에 도시유역의 수질

[†] Corresponding author E-mail: wjkim1@kict.re.kr Tel: 031-910-0303 Fax: 031-910-0291

악화와도 관련이 깊다.⁵⁾ 이처럼 도시화로 인한 수환경의 문제가 심각해짐에 따라 국가시책에서도 기존 도시의 재개발 및 신도시 계획을 수립할 때 위와 같은 문제점에 대한 해결 방안을 사전에 제시하도록 의무화하고 있다. 따라서 도시의 개발과정에서 유역의 불투수면적을 관리하는 것은 효과적인 수질관리 방법의 하나가 될 수 있을 것이다.²⁾

1971년에 미국 환경보호국(EPA)이 중심이 되어 개발한 분포형 강우유출모형인 SWMM을 활용한 연구는 국내·외에 다수 보고된 바 있다. 한편 EPA에서는 최근 SWMM에 LID (low impact development) 모듈을 추가하여 다양한 LID 기법에 대하여 정량적인 유출 및 수질 변동을 모의할 수 있는 새로운 버전을 공개하였다(ver. 5.0.022). 국내에서도 SWMM-LID를 활용한 연구가 보고되고 있는데, 주택도시연구원(2012)은 LID 기법 중 침투트렌치, 침투통 및 빗물도랑을 활용하여 도시 수문순환과 인공순환 부문에 대해 미치는 영향을 모의하였고,⁶⁾ 장영선 등은 투수성포장을 활용하여 유출량 저감 및 유출시간 지연 등의 효과를 분석하였다.⁷⁾ 그러나 기존의 연구들은 도시화에 따른 유출 변동에 대한 연구가 주를 이루고 있고, LID 기법의 적용성을 모의하는 경우에도 일부 기법의 부분적 적용에 그치는 경우가 많으며, 각 기법별 설계 파라미터에 대한 구체적인 수치 제시 등에는 미치지 못하고 있어서 활용도가 높지 않은 실정이다. 특히, SWMM-LID의 적용을 통하여 우수유출 뿐만 아니라 오염부하 저감에 대한 모의 또한 가능함에도 불구하고,⁸⁾ 도시 개발사업에 있어 LID 기법 적용에 따른 오염부하 저감효과에 대한 연구는 여전히 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 현재 도시 개발이 진행되고 있는 유역을 대상으로 선정하고, 이 유역에서 도입이 검토되고 있는 LID 기법들에 대하여 국내 신도시의 특성을 반영한 설계인자를 활용하여 유출 및 오염부하 변동특성을 모의하고자 하였다. 이를 위하여 LID 기법의 적용 사례별로 시나리오를 작성하고, 유출 및 오염부하 저감효과를 모의·분석함으로써 도시 개발과정에서 LID 기법을 도입하고자 할 때 중요한 참고자료로 활용 가능하도록 하였다.

2. 연구방법

2.1. SWMM의 특성

본 연구에서 사용한 SWMM은 도시 우수유출과 합류식 관거의 범람을 재현하기 위하여 1971년 EPA의 지원으로 Metcalf & Eddy(社)가 도시유역 하수시스템 내에서의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발한 모형이다. 이는 강우사상

으로 인해 발생하는 유출과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

SWMM은 농촌유역과 도시유역에 적용할 수 있으며, 단일 및 연속 강우사상에 대한 모의가 가능하고, 배수구역의 결합과 분리가 가능하다는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 농지 및 임야로서의 토지이용 특성이 강한 도시 개발 이전 상황과 시가지로서의 특성이 강한 개발 이후의 상황에 대하여 동시에 적용할 수 있는 분포형 강우유출모형으로서 많은 선행 연구를 통하여 범용성이 확인된 SWMM을 채택하여 유역 모델링을 수행하였다.⁹⁾

2.2. 대상유역 및 토지이용 현황

본 연구의 대상유역으로는 현재 도시 개발이 활발하게 진행되고 있는 D 도시(전체 개발면적: 약 2,400 ha)의 일부 지역을 선정하였다. 선정된 대상유역의 면적은 총 123.6 ha로서 지세는 비교적 산세가 깊은 산지를 형성하고 있으며, 중앙은 저산성 구릉지대를, 서쪽으로는 평야지대를 이루고 있어 우리나라 도시 개발 전의 전형적인 토지이용 특성을 나타내고 있다.

도시 개발 이후의 토지이용 특성 및 기타 모형의 구축을 위해 필요한 기초자료는 관련기관의 도움을 받아 수집하였다. 개발 이후의 토지이용 현황은 면적의 약 50%가 주거지로 변경될 예정이고, 구체적인 토지이용 현황은 공사계획 평면도(CAD 파일)를 이용하여 주거지, 의료시설, 공원, 학교, 문화시설, 상업지, 공공청사, 근린생활 및 주차장 등으로 개발될 예정임을 확인하였다. 소유역별로 유역면적, 유역폭, 불투수계수, 불투수면적률, 평균경사, 평균고도, 조도계수 및 저류량 등의 입력자료를 구축하였다. 입력자료 중 유역별 면적은 위성사진 정보와 현장조사를 통하여 토지이용 현황을 확인하고, 지목별 면적을 산정하였다. Table 1과 Table 2에 D 도시의 개발 전·후 토지이용 특성을 정리하여 나타내었다(Fig. 1). 또한 관로와 관련된 입력자료로는 관 깊이, 관 길이 및 조도계수 등이 있는데, 개발 전에는 대상유역이 산과 농경지로 구성되어 있으므로 개수로로 설정하였고, 개발 후의 경우 우수계획도를 활용하여 구축하였다.

한편, 불투수면적률은 토지이용 특성에 따라 달라진다. 각 소유역별 토지이용 특성을 반영하여 재산정한 대상유역 전체의 불투수면적률은 개발 전 6.1%에서 개발 후 64.5%로 약 10배 이상 증가하는 것으로 나타나, 대부분의 유역이 도시 개발에 따라 불투수지역으로 변경될 예정임을 확인하였다.

Table 1. Landuse types before the town development

Total area (m ²)	Landuse characteristics					
	Residential	Forest	Paddy and dry field	Industrial	Inland wetlands	Etc.
1,236,000	201,490	633,650	352,260	25,460	11,190	11,950
100%	16.3%	51.3%	28.5%	2.1%	0.8%	1.0%

Table 2. Landuse types after the town development

Total area (m ²)	Landuse characteristics								
	Residential	Medical facilities	Park	School	Cultural facilities	Commercial	Government building	Neighborhood facilities	Parking lot
1,236,000	603,110	260,000	287,590	38,000	1,370	29,830	4,780	7,720	3,600
100%	48.8%	21.0%	23.3%	2.9%	0.1%	2.5%	0.5%	0.6%	0.3%

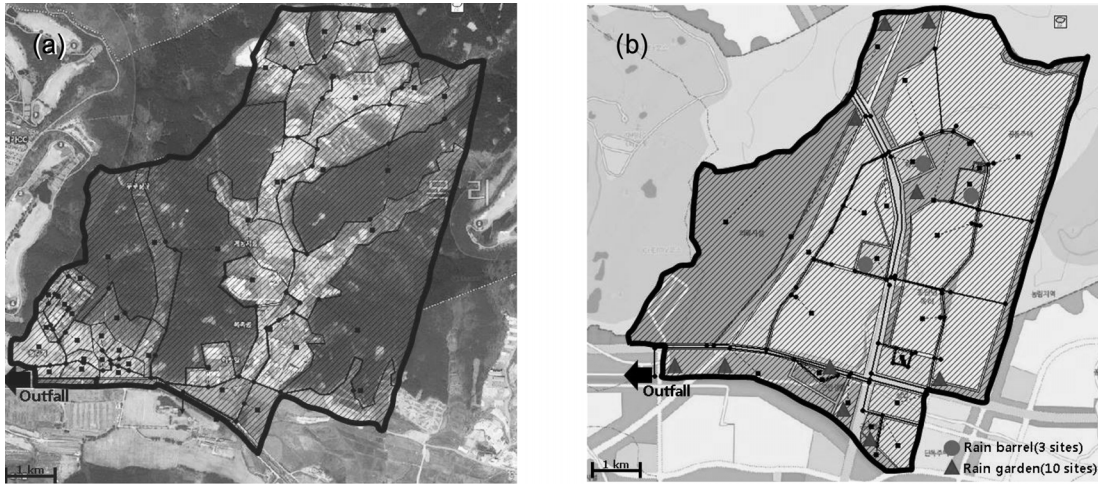


Fig. 1. Landuse characteristics of D town before (a) and after (b) development.

2.3. SWMM의 주요 입력변수 산정

2.3.1. Build-up 파라미터 산정

유역에서 발생하는 비점오염부하 중 도시지역 불투수면에서 발생하는 오염부하가 가장 큰 비중을 차지한다. 오염물질의 축적에 영향을 미치는 요소로는 선행무강우일수, 토지이용도, 도로청소율, 강우 및 바람 등이 있다. SWMM 모형에서 이를 반영할 수 있는 식으로는 Power식, Exponential식 및 Michaelis-Menten식이 있는데, 본 모의에서는 Exponential식을 활용하여 매개변수를 산정하였다. Build-up의 Exponential식은 다음과 같다.¹⁰⁾

$$Pshed = Qfact(1) \times (1 - e^{Qfact(2) \cdot t}) \quad (1)$$

여기서, $Pshed$: 오염물질의 축적량(kg)

$Qfact(1)$: 오염물질의 축적한계량(kg)

$Qfact(2)$: 지수

t : 선행무강우일수(days)를 나타낸다.

2.3.2. Wash-off 파라미터 산정

오염물질의 소류는 무강우시 유역에 축적된 오염물질이 강

우로 인한 유출에 의해 유역의 지표면으로부터 침식·용해되는 과정이다. SWMM 모형에서는 오염물질의 소류와 관련된 Linear-Exponential식 및 Rating curve식 중 하나를 선정하여 모의가능하다. 본 모의에서는 Linear-Exponential식을 활용하였다. Wash-off의 Linear-Exponential식은 다음과 같다.

$$Poff(t) = Pshed_0(1 - e^{-k \cdot t}) \quad (2)$$

여기서, $Poff(t)$: 시간 t 에 유실되는 누적 오염물질의 양(kg)

$Pshed_0$: 시간 $t=0$ 일 때, 축적된 오염물질의 양(kg)

k : 지수

를 나타낸다.

본 모의에서 활용한 Build-up 및 Wash-off의 입력변수를 Table 3에 정리하여 나타내었다. Build-up 파라미터는 실험을 통해 결정하였다. 대상유역이 위치하고 있는 D 도시와 유사한 조건을 갖춘 기 개발된 I 신도시의 이면도로를 선정하여 선행무강우일수에 따른 일별 축적량을 시계열별로 측정된 다음 최소제곱법을 적용하여 산정하였다. 한편, Wash-

Table 3. Build-up and wash-off parameters before and after the town development

Parameter		BOD		COD		TSS		T-N		T-P	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
Build-up	$Qfact(1)$	2.09	3.15	2.26	3.38	4.26	6.30	1.40	0.15	0.60	0.04
	$Qfact(2)$	1.40	1.45	1.47	1.50	1.58	0.40	1.40	1.30	1.00	0.30
Wash-off	$Poff(t)$	1.50	1.50	1.40	1.50	1.50	1.60	1.20	1.60	1.50	1.30
	k	0.20	0.15	0.15	0.10	0.20	0.20	0.20	0.23	0.08	0.10

Table 4. Parameters related with evaporation for S weather station (2008)

Parameter	Minimum	Maximum	Average
Monthly base (mm/month)	12.4	50.3	50.3
Daily base (mm/day)	0.4	1.7	1.7
Corrected evaporation co-efficient (mm/day)	0.3	1.2	1.2

off 파라미터는 기존 문헌자료에서 실험을 통하여 제시하고 있는 값을 활용하였다.¹¹⁾

2.3.3. 증발량 선정

SWMM 모형의 구축을 위해 필요한 인자 중 하나인 증발량은 다음과 같이 선정하였다. Table 4는 모의에서 활용한 2008년 월 평균 증발량 자료 및 증발접시 보정계수인 0.7을 곱한 보정증발량의 평균값을 나타낸 자료로서, 이 중 보정증발량 값을 적용하여 모의를 수행하였다.

2.4. 모의강우 선정

SWMM 모의를 위한 강우 데이터로는 대상구역에서 가장 근접한 S 기상대의 자료를 활용하였다. 기상대의 최근 10년간(2003~2012)의 강우자료를 분석하여 당해연도 연평균 강우량이 10년 평균 강우량과 가장 근접한 강우년도의 자료를 대표 모의강우 자료로 선정하였다. 또, 강우규모에 따른 유출특성을 상세히 모의하기 위하여 소강우, 중강우 및 대강우를 각각 선정하였다. 일반적으로 초기강우 산정시 누적유출강우량으로 5 mm를 채택한다는 점을 고려하여 소강우의 기준은 10 mm로 결정하였고, 중강우 및 대강우는 연간 전체 강우사상을 대상으로 빈도분석을 실시하여 각각 30 mm 및 50 mm에 가장 근접한 총강우량을 갖는 강우사상을 선정하였다. 30 mm 및 50 mm의 총강우량은 연간 누적강우량 기준으로 각각 약 33% 및 67%에 해당하는 것으로 분석되어 통계적 측면에서도 중강우 및 대강우로서의 의미를 확인할 수 있었다(10 mm 이하 강우사상의 누적강우량은 약 10%). 국립환경과학원(2008)에서도 유사한 빈도분석을 실시하여 누적강우량 20 mm 단위로 강우 규모를 차등 분석한 사례가 있다.¹²⁾

위와 같은 절차에 따라 2008년의 전체 강우사상(연간 누적강우량: 1,342.9 mm)이 대상구역의 모의 강우자료로 선정되었으며, 소강우로는 2008년 3월 29일(강우량: 10.3 mm), 중강우로는 2008년 9월 20일(강우량: 30.5 mm), 대강우로는 2008년 6월 2일(강우량: 47.5 mm)의 강우사상이 각각 선정되었다.

2.5. LID 기법 선정 및 시나리오 구축

본 연구의 기본 시나리오인 시나리오 1은 도시 개발 전의 상황을 모의하기 위하여 구축하였다. 이 시나리오 1에 대해 모의한 결과를 대상구역의 상·중·하류에 걸친 4계절 수질 조사 결과와 비교함으로써 간접적으로 사전 검증하였다. 연 단위의 모의결과와 실측 결과를 직접 비교할 수 있는 객관

적인 방법이 없기 때문에, 본 연구에서는 모의결과를 바탕으로 연간 오염물질별 유출부하량(kg)에 대한 연간 유출유량(m³)의 비로 정의되는 연평균 유량가중평균농도(Y-EMC, Yearly based Event Mean Concentration)를 제안하고, 이 값과 실측값을 간접적으로 비교하는 방법을 적용하였다. 비교결과, Y-EMC 기준으로 BOD 7.6 mg/L, T-N 3.3 mg/L 및 T-P 0.33 mg/L로 모의되었으며, 실측 결과는 BOD 평균 3.9 mg/L (Min. 2.4~Max. 7.6 mg/L), T-N 4.8 mg/L (Min. 2.3~Max. 7.3 mg/L) 및 T-P 0.28 mg/L (Min. 0.04~Max. 0.64 mg/L)로 나타나 각 모의결과가 실측 결과의 범위에 포함됨을 확인하였다. 측정지점이 대상유역을 중심으로 흩어져 있고, 4계절에 걸쳐 측정이 이루어짐에 따라 데이터의 산포가 크다는 점을 감안할 때 양호한 모의결과로 판단하였다. 한편, 시나리오 2는 LID 기법을 적용하지 않는 기존의 일반적 도시 개발 사례에 대하여 모의하도록 구축하였다.

LID 기법은 기존의 강우 배제 기능 중심의 강우유출수 관리개념으로부터 개발 이전의 수문·순환구조를 유지할 수 있는 다양한 요소기술을 적용하는 강우유출수 관리체계로의 전환을 도모하는 기술이라 할 수 있다. LID 기법의 종류로는 식생체류지(Bio retention), 옥상녹화(Green roof), 나무여과상자(Tree box filter), 식물재배화분(Planter box), 식생수로(Bio slope), 침투도랑(Infiltration trench), 침투통(Dry wells), 투수성포장(Porous pavement), 모래여과장치(Sand filter), 빗물저류조(Rain barrel) 등이 있다.^{13,14)}

본 연구에서는 여러 가지 LID 기법 중 국내에서 많이 사용되고 있음과 동시에 D 도시의 토지이용 특성을 고려할 때 적용성이 큰 것으로 판단되는 투수성포장, 빗물저류조 및 빗물정원을 검토대상 LID 기법으로 선정하고, 투수성포장은 주거지에, 빗물저류조는 학교에, 빗물정원은 공원에 각각 또는 동시에 적용하도록 시나리오를 구축하였다(시나리오 3, 4, 5 및 6). 위 세 가지 LID 기법을 동시에 적용한 국내 사례는 확인하지 못하였으나 차을준과 장영선 등은 투수성포장을 주거지와 주차장 등에, 민혜영은 빗물저류조를 학교에, 주택도시연구원은 빗물정원을 공원에 적용한 사례 등이 보고된 바 있다.^{7,15-17)} LID 기법의 적용규모 산정시 투수성포장은 건설교통부의 조경기준을 참고하여 모든 주거지 면적의 25%를 적용하여 모의하였고,¹⁸⁾ 빗물저류조는 대상구역의 모든 학교(3개소)에 도입하는 것으로 가정하였으며, 그 규모는 우리나라에서 일반적으로 사용하고 있는 간편법을 활용하여 학교의 지붕면적에 누적유출고 0.05를 곱하여 산정하였다. 빗물정원은 대상구역의 모든 공원(10개소)에 도입하는 것으로 가정하였으며, 문헌고찰을 통하여 실질적으로 활용되고 있는 설계기준을 고려하여 반지름 10 m인 원형의 형태로 가정하고, 집수면적은 314 m², 처리용량은 47.1 m³(수심 0.15 m)의 설계인자를 채택하여 모의에 활용하였다. 빗물저류조(시나리오 4) 및 빗물정원(시나리오 5)이 적용된 소유역의 배치도는 Fig. 1(b)에 도시한 바와 같다. 본 연구의 목적에 따라 구축·활용한 시나리오는 Table 5와 같고, LID 기법 적용시의 구체적인 파라미터들은 Table 6에

Table 5. Scenario composition for simulation

Condition	Scenario No.	Description	
Before the town development	1	Before development	
After the town development	w/o LID	2	General drainage system without LID technologies
	LID applications	3	Application of permeable pavement for residential area (Total 150,777 m ² , 25% of residential area)
		4	Application of rain barrels for 3 schools (Total 600 m ³ , each rain barrel volume of 200 m ³)
		5	Application of rain gardens for 10 parks (Total 471 m ³ , each rain garden area of 314 m ² and volume of 47.1 m ³)
		6	Simultaneous applications of scenario 3, 4 and 5

Table 6. Input parameters of LID techniques

Layer	Parameter	Porous pavement	Rain barrel	Rain garden
Surface	Storage depth (mm)	2	-	150
	Vegetation volume fraction	0	-	0.05
	Surface roughness (Manning's n)	0.013	-	0.15
	Surface slope (%)	1	-	2
Pave-ment	Thickness (mm)	125	-	-
	Void ratio (Voids/Solids)	0.2	-	-
	Impervious surface fraction	0	-	-
	Permeability (mm/hr)	360	-	-
	Clogging factor	0	-	-
Soil	Thickness (mm)	-	-	600
	Porosity (Volume fraction)	-	-	0.2
	Field capacity (Volume fraction)	-	-	0.19
	Wilting point (Volume fraction)	-	-	0.1
	Conductivity (mm/hr)	-	-	10
	Conductivity slope	-	-	5
Storage	Suction head (mm)	-	-	3.5
	Height (mm)	300	3,000	-
	Void ratio (Voids/Solids)	0.6	-	-
	Conductivity (mm/hr)	10	-	-
Under-drain	Clogging factor	0	-	-
	Drain coefficient (mm/hr)	0	0.72	-
	Drain exponent	0.5	0.5	-
	Drain offset height	0	300	-
	Drain delay (hours)	-	24	-

Table 7. Summary of simulation results for a weak rainfall

Constituent		Area (m ²)	Precipitation (mm)	Impervious area ratio (%)	Infiltration + storage (%)	Run off (%)	Evaporation (%)
Before the town development				6.1	91.8	5.2	3.0
After the town development (without LID)				64.5	33.8	49.9	16.3
LID	Porous pavement (A)	1,236,000	10.3	52.3	44.9	43.2	11.9
	Rain barrel (B)			62.1	35.3	49.3	15.4
	Rain garden (C)			51.9	38.7	45.3	16.0
	A + B + C			50.7	48.1	37.9	14.0

나타내었다. 각 파라미터들은 국내의 실제 적용사례를 참조하여 결정하였고, 적용 값의 확인이 곤란한 경우에 한하여 SWMM 매뉴얼의 default 값을 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우규모별 유출특성

도시 개발 전 · 후에 걸쳐 오염물질(BOD, COD, TSS, T-N 및 T-P)별 유출 오염부하와 LID 기법별 저감효율을 보다 상세하게 분석하기 위하여 강우규모별(소강우, 중강우 및 대강우)로 구분하여 사전에 선정된 각 강우사상을 대상으로 모의한 결과는 Table 7~9에 정리한 바와 같다.

소강우(2008. 03. 29, 10.3 mm)로 모의한 결과, 개발 후 불투수면적률의 증가에 따라 침투/저류율은 91.8%에서 33.8%로 약 1/3 감소하였고, 유출률은 5.2%에서 49.9%로 약 10배 증가하였다. 또한 3가지의 LID 기법을 동시에 적용한 경우 48.1%의 침투/저류율과 37.9%의 유출률을 나타내었다. LID 기법별로는 투수성포장, 빗물정원 및 빗물저류조의 순서로 침투/저류율이 낮아지는 반면 유출률은 그 역의 순서로 높아지는 것으로 나타났다.

중강우(2008. 9. 20, 30.5 mm)로 모의한 결과, 개발 전 90% 이상의 높은 침투/저류율을 보이다가, 개발 후 불투수면적률의 증가에 따라 7.8%로 확연하게 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 LID 기법의 적용 결과, 가장 높은 침투/저류율은 소강우의 모의결과와 동일하게 3가지 LID 기법을 동시에 적용한 경우의 23.9%로 나타났다. LID 기법별 침투/저류율 및 유출률의 순서 또한 소강우와 동일한 것으로 모의되었다.

대강우(2008. 06. 02, 47.5 mm)로 모의한 결과, 개발 전 49.0%의 침투/저류율을 보여 소강우 및 중강우에 비하여 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이는 대규모 강우의 경우, 투수가 지속적으로 이루어지는 산지와 재배지가 토지이용에서 많은 비율을 차지하더라도 높은 강우강도로 인하여 침투/저류율이 제한되기 때문인 것으로 판단된다. 모의한 세 가지의 LID 기법 중에서 투수성포장을 적용하였을 때 16.3%로 가장 높은 침투/저류율이 관찰되었으며, 빗물저류조와 빗물정원의 경우, 5% 미만에 그치는 것으로 모의되었다. 유출률은 LID를 적용한 모든 시나리오에서 80% 이상을 나타내어 대규모 강우에 대한 LID 기법의 유출저감 효과가 제한적임을 시사하였다.

Table 8. Summary of simulation results for a medium rainfall

Constituent		Area (m ²)	Precipitation (mm)	Impervious area ratio (%)	Infiltration + storage (%)	Run off (%)	Evaporation (%)
Before the town development		1,236,000	30,5	6,1	92,8	5,6	1,6
After the town development (without LID)				64,5	7,8	78,5	13,7
LID	Porous pavement (A)			52,3	22,8	65,4	11,8
	Rain barrel (B)			62,1	12,4	73,0	14,6
	Rain garden (C)			51,9	13,1	72,1	14,8
	A + B + C			50,7	23,9	62,1	14,0

Table 9. Summary of simulation results for a heavy rainfall

Constituent		Area (m ²)	Precipitation (mm)	Impervious area ratio (%)	Infiltration + storage (%)	Run off (%)	Evaporation (%)
Before the town development		1,236,000	47,5	6,1	49,0	47,6	3,4
After the town development (without LID)				64,5	3,0	93,4	3,6
LID	Porous pavement (A)			52,3	16,3	80,9	2,8
	Rain barrel (B)			62,1	4,7	91,3	4,0
	Rain garden (C)			51,9	5,0	91,1	3,9
	A + B + C			50,7	16,7	79,3	4,0

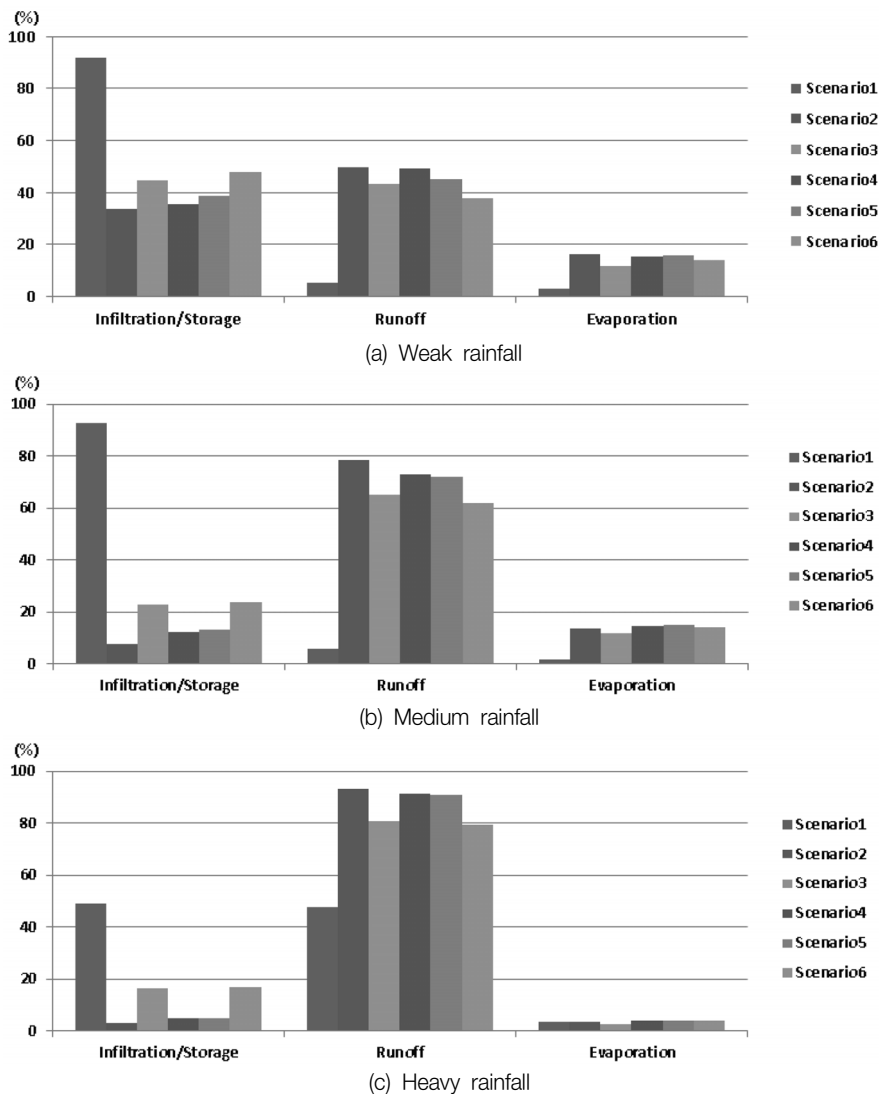


Fig. 2. Infiltration/storage, runoff and evaporation rates according to rainfall scale.

Fig. 2에 시나리오별로 강우규모에 따른 침투/저류율, 유출률 및 증발률을 비교하여 도시하였다. 모의결과, 개발 전에 비해 개발 후 불투수면적률의 증가에 따라 침투/저류율은 낮아지고 유출률은 증가하며, LID 기법 적용시 침투/저류율이 회복되고 유출률 또한 저하되는 경향성이 재확인된 점은 기존의 연구와 동일하다.^{11,13)} LID 기법의 적용(시나리오 3, 4, 5 및 6)에 따른 침투/저류율은 소강우에서는 35~48%, 중강우에서는 12~24%, 대강우에서는 4~17%의 범위로 나타나 강우규모에 따라 큰 폭으로 저하되었으며, 상대적으로 유출률은 소강우에서 37~50%, 중강우에서 62~73%, 대강우에서 79~92%의 범위로서 강우규모에 따라 큰 폭으로 증가하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 동일한 유역이라도 침투/저류율과 유출률은 강우규모에 따라 큰 편차를 나타내기 때문에 LID 기법을 적용할 경우 유출저감을 위한 적절한 강우규모의 산정에 충분한 주의를 기울일 필요가 있는 것으로 분석되었다. LID 기법의 유출저감 효과는 특히 소강우 및 중강우에 대하여 높은 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

모의결과, LID 기법 비교시 투수성포장만을 적용한 시나리오 3과 3가지의 LID 기법을 모두 적용한 시나리오 6을 비교하였을 때, 침투/저류율 및 유출률의 차가 상대적으로 크지 않은 점은 복수의 LID 기법을 단일한 소유역에 동시에 적용하고자 하는 경우에 대한 몇 가지 시사점을 던져준다. 여기에서는 크게 두 가지 점이 기여하고 있는 것으로 판단된다. 첫째, 강우유출수의 침투, 저류 및 유출이 발생하는 과정에서 LID 기법별로 우선순위가 발생한다는 점이다. 투수성포장의 경우 표면에서 직접적인 침투가 발생하기 때문에 다른 기법에 비해 우선적으로 침투/저류율에 기여하게 되고, 여분의 유출수가 발생할 경우에 한해 타 LID 기법의 침투/저류율이 추가적으로 증가하게 된다. 따라서 투수율이 충분히 확보된 투수성포장의 LID기법이 적용된 경우에는 동일한 소유역에 다른 LID 기법을 적용한다고 하더라도 추가적인 침투/저류율의 상승 및 유출률의 저감을 기대하는 데 한계가 있게 된다. 또한, 이 결과는 각 LID 기법의 주요 기능과도 관련이 깊은 것으로 판단된다. 투수성포장은 침투기능, 빗물저류조는 저류기능만을 가지고 있으며, 빗물정원은 두 기능을 모두 갖고 있다. Table 10에서 볼 수 있듯이 투수성포장의 경우 모의한 모든 강우규모에서 100%에 가까운 침투율을 보인 반면, 빗물저류조 및 빗물정원의 침투/저류율은 강우규모의 증가에 따라 낮아지는 특징을 갖고 있어서 강우규모가 커질수록 3가지의 LID 기법을 모두 적용한 시나리오 6의 모의결과와 투수성포장만을 적용한 시나리오 3의 모의결과와의 격차가 줄어드는 현상이 관찰되는 것이다. 이상의 결과는 복수의 LID 기법을 적용하고자 할 때에는 각 LID 기법의 적용에 따른 침투/저류율의 증가 및 유출률 저감의 우선순위에 대한 고려뿐만 아니라 각 기법별로 고유한 침투능 및 저류능에 대한 검토가 뒤따라야 함을 시사한다. Table 10에서 침투율 또는 저류율은 단위 소유역에서 발생한 강우유출수 중에서 LID 기법에 의해 침투 또는 저류된 양의 비율로 정의하였다.

Table 10. Comparison of runoff characteristics according to LID techniques

Division	Porous pavement	Rain barrel	Rain garden	
	Infiltration rate (%)	Storage rate (%)	Infiltration rate (%)	Storage rate (%)
Weak rainfall	100.0	98.7	62.9	36.5
Medium rainfall	99.9	85.2	28.1	19.4
Heavy rainfall	100.0	82.3	28.0	7.8

Table 11. Reduction of runoff pollutant load according to LID techniques (unit : kg/m²/yr)

Description	TSS	BOD	COD	T-N	T-P
Porous pavement	0.32	0.28	0.32	0.07	0.04
Rain barrel	147.3	104.6	117.6	49.8	30.3
Rain garden	49.6	33.9	38.8	4.9	2.4

3.2. LID 기법별 유출 오염부하 저감효과 비교

LID 기법별로 적용면적이 상이할 경우 이에 대한 객관적인 비교가 곤란하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 단위면적당 LID 기법별 오염부하 저감효과를 산정하여 비교하였다. 2008년도 전체 강우사상을 대상으로 LID 기법을 적용하지 않은 개발 이후의 상태(시나리오 2)에서 대상유역으로부터 유출되는 연간 유출 오염부하량과 LID 기법을 적용했을 때(시나리오 3, 4, 5 및 6)의 연간 유출 오염부하량을 산출한 후, 두 연간 유출 오염부하량의 차를 LID 기법별 적용면적(투수성포장 : 150,777 m², 빗물저류조 : 200 m², 빗물정원 : 3,140 m²)으로 나누어 단위면적당 저감효과를 분석하였다. 그 결과는 Table 11과 같다.

단위면적당 유출 오염부하 저감량은 빗물저류조, 빗물정원 및 투수성포장 순으로 효율이 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 위에서 고찰한 강우유출수 발생과정에서의 LID 기법별 우선순위 및 기법별로 상이한 주요 기능의 측면과 더불어, 각 기법별 처리용량에 대한 검토를 필요로 한다. 즉, 빗물저류조와 빗물정원의 경우, LID 기법이 적용된 현장에서 유리되어 있는 지표면으로부터의 유출수에 대해서도 침투/저류 효과를 갖고 있어서 추가적인 오염부하 삭감이 가능한 데 비하여, 투수성포장의 경우에는 해당 기법이 적용된 지표면 위로 내리는 강우를 우선 침투시키기 때문에 타 소유역에서 발생하는 오염부하에 대한 추가적인 제거기능이 취약하다는 점에서 단위면적당 오염물질 저감효율이 낮게 모의된 것으로 판단된다. 한편, 기법별 처리용량의 측면을 고려하면, 빗물저류조와 빗물정원의 경우 높은 저류효과(저류고 각각 3,000 및 150 mm)가 단위면적당 효율을 제고하는 데 크게 기여하고 있는 반면, 투수성포장의 경우에는 본 연구에서 모의한 규모의 강우(최대 47.5 mm)에 대해서는 아직 투수능에 여유가 남아 있어 단위면적당 효율의 측면에서 저평가되는 것으로 판단된다.

4. 결론

현재 개발이 추진 중인 D 도시를 대상유역으로 선정하여

도시 개발 전·후의 토지이용 특성 변화에 따른 강우규모별 유출특성 및 유출 오염부하 저감효과를 LID 기법별 모의기능이 포함되어 있는 분포형 강우유출모형인 SWMM을 활용하여 모의하였다. 본 연구에서는 침투형, 저류형 및 침투/저류형에 대하여 각각 대표적인 LID 기법이라고 할 수 있는 투수성포장, 빗물저류조 및 빗물정원 등 3가지 기법을 선정하여 비교·검토하였으며, 주요한 연구결과는 다음과 같다.

1) 도시 개발에 따른 불투수면적률의 증가로 인하여 평균 침투/저류율은 개발 전에 비해 개발 후 78%에서 15%로 감소하였고, LID 기법을 적용한 결과 24%로 다시 증가하였다. 또한 유출률은 개발 전 20%에서 개발 후 74%로 증가하였고, LID 기법 적용시 66%로 저감됨으로써 LID 기법 적용에 따른 유출저감 효과를 확인할 수 있었다.

2) D 도시의 경우, 적용된 LID 기법 중에서 가장 높은 강우유출 저감효과를 갖는 기법은 투수성포장으로 나타났다. 침투/저류율은 3가지의 LID 기법을 동시에 적용한 경우에 가장 높은 값을 보였고, 투수성포장, 빗물정원, 빗물저류조의 순으로 나타났다. LID 기법 선정시 유출저감의 측면을 고려한다면 침투기능이 주요한 기법을 선정하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

3) D 도시의 경우, 적용된 LID 기법 중에서 유출 오염부하 저감효과가 가장 높은 기법은 빗물정원으로 나타났다. 또한 기법별 저감효과를 비교하기 위하여 단위면적당 오염물질별 유출 오염부하 저감량을 비교한 결과, 빗물저류조, 빗물정원 및 투수성포장의 순으로 나타났다. 이상의 결과로부터 LID 기법 선정시 오염부하 저감 측면을 고려한다면 저류기능이 주요한 기법을 선정하는 것이 효율적이라고 판단된다. 특히, 본 연구에서 제시한 단위면적당 오염부하 저감량의 개념 및 산출 결과 등은 LID 기법별 저감량을 예측하거나 유역별 오염원 총량관리 목표를 수립하는 데 유용할 것으로 판단된다.

4) 도시 개발시 유출 및 오염부하 저감효과를 도모하기 위하여 LID 기법을 도입할 때, 각 효과를 정량적으로 파악하기 위해서는 강우유출수 발생과정에서의 기법별 우선순위 및 기법별로 상이한 주요 기능의 측면과 더불어, 각 기법별 처리용량에 대한 검토가 동시에 이루어져야 하는 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 ‘마이크로그리드 스마트 용수관리 기술 개발’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

참고문헌

1. Ju, M. H., “Application of SWMM and establishment of auto-monitoring system to evaluate small urban nonpoint source pollutant,” Master’s degree thesis of Chung-nam National Uni-

versity(2010).

2. Jang, S. H., Choi, J. Y. and Lee, J. H., “A case study on correlation of water quality and impervious cover rates in watersheds; focused on An-yang cheon, Kyung-an cheon, Bokha cheon watersheds,” *Seoul City Res.*, **6**(3), 15~27(2005).

3. Park, J. Y., Bae, S. H., Yoon, Y. H., Lim, H. M., Park, J. R., Oh, H. J. and Kim, W. J., “Correlation of nonpoint pollutant and particulate matters at a small suburban area,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **34**(11), 720~728(2012).

4. Bae, S. H., Kim, W. J., Yoon, Y. H., Lim, H. M., Kim, E. J. and Park, J. R., “Characterization of runoff properties of non-point pollutant at a small rural area considering landuse types,” *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **26**(4), 654~663(2010).

5. Lee, H. W., “A study on watershed model for predicting the runoff characteristics of urban area,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**(12), 1089~1094(2009).

6. Land and Housing Institute, “The urban water cycle planning elements and hydrologic cycle simulation for green city,” (2012).

7. Jang, Y. S., Mun, S. H. and Yang, S. L., “An analysis of flood mitigation effect applying to LID in Mokgam cheon watershed using SWMM Model,” *J. Kor. Soc. Road Eng.*, **15**(3), 75~83(2013).

8. Choi, J. S., Hyun, G. H., Lee, J. M., Kang M. S. and Jung S. K., “Issues and improvements in extended application of LID technologies,” *Proc. Kor. Water Res. Assoc. KINTEX*, pp. 242~246(2012).

9. EPA, “Storm water management model user’s manual version 5.0,” (2005).

10. Kim, M. K., “Study on pollutant discharge characterization of non-point sources distributed around commercial and recreational sites in urban area using SWMM,” master’s degree thesis of Dongsin University(2009).

11. Ministry of Environment, “Research report for management of Nonpoint pollutants in Nakdong watershed,” (2003).

12. Han River Environment Research Center of National Institute of Environments Research, “Research on Long-term monitoring and BMPs for the Non-point source discharge,” (2008).

13. Lim, Y. K., “A study of LID technologies for friendly environmental urban development,” doctoral degree thesis of Busan National University(2011).

14. Bang, C. H., “Research for calibration and verification of SWMM model during rainfall in urban basin using automatic flow-quality monitoring system,” master’s degree thesis of Chung-nam National University(2011).

15. Cha, E. J., “An analysis on the effects for urban runoff reduction using cycle lane,” master’s degree thesis of Yonsei University(2009).

16. Min, H. Y., “The scheme for practical application of the rainwater utilization system introduced in education facilities,” master’s degree thesis of Sungkyunkwan University(2009).

17. Land and Housing Institute, “Application of the rainwater management and constructed wetland system for implementation of water-cycle in Asan New town,” (2008).

18. Kwon, J. D., “A study on environment-friendly pavement of Seoul: focused on urbanized area in seoul,” master’s degree thesis of the university of Seoul(2008).