

Research Paper

강우 유형에 따른 저영향개발 기법별 물수지 분석

유소현* · 이동근** · 김효민* · 조영철***

서울대학교 대학원*, 서울대학교 조경·지역시스템공학부**, GS건설***

An Analysis of the water balance of Low Impact Development Techniques According to the Rainfall Types

Sohyun Yoo* · Dongkun Lee** · Hyomin Kim* · Youngchul Cho***

Graduate School, Seoul National University*

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University**

GS Engineering and Construction Corporation***

요약 : 도시화로 인하여 자연적인 물순환이 파괴되었고 이는 도시 홍수 등의 문제를 야기하였다. 이를 해결하기 위해, 개발 이전의 상태로 물순환을 회복하는 것을 목표로 하는 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법이 대두되었다. 기존의 LID관련 연구는 주로 유출 저감 효과에 집중되어 있었으며 강우 유형에 따른 LID 기법별 효과에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 수문 모의를 통하여 LID의 물수지 개선 효과를 강우 및 공간 유형별로 정량적으로 평가하는 것을 목표로 하였다. 경기도 하남의 택지개발지구의 한 블록을 연구 대상으로 하여, 개별 LID시설의 모의가 가능한 STORM모형을 사용하였다. 강우 유형은 강우 강도에 따라서 두 가지로 구분하였으며 모의한 LID시설은 옥상녹화, 투수성 포장, 식생수로에 한하였다. 연구 결과 LID의 물수지 개선은 극한 강우 사상보다 낮은 강우강도의 강우에 더 효과적이며 기법별로는 낮은 강우강도일 때에는 투수포장, 높은 강우강도일 때에는 생태수로가 가장 낮은 유출률과 높은 침투율을 나타냈다. 본 연구 결과는 향후 물순환을 고려한 공간 계획 시 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 저영향개발, 물순환, 공간 계획, STORM 모형

Abstract : Urbanization caused various environmental problems like destruction of natural water cycle and increased urban flood. To solve these problems, LID(Low Impact Development) deserves attention. The main objective of LID is to restore the water circulation to the state before the development. In the previous studies about the LID, the runoff reduction effect is mainly discussed and the effects of each techniques of LID depending on rainfall types have not fully investigated. The objective of this research is to evaluate the effect of LID using the quantitative simulation of rainwater runoff as well as an amount of infiltration according to the rainfall and LID techniques.

To evaluate the water circulation of LID on the development area, new land development areas of Hanam in South Korea is decided as the study site. In this research, hydrological model named STORM is used for the simulation of water balance associated with LID. Rainfall types are separated into two categories based on the rainfall intensity. And simulated LID techniques are green roof, permeable pavement and swale. Results of this research indicate that LID is effective on improvement of water balance in case of the low intensity rainfall event rather than the extreme event. The most effective LID technique is permeable pavement in case of the low intensity rainfall event and swale is effective in case of the high intensity rainfall event. The results of this study could be used as a reference when the spatial plan is made considering the water circulation.

Keywords : LID, water circulation, spatial planning, STORM

I. 서론

우리나라는 1960년대 이후로 이루어진 급격한 도시화로 인한 불투수면의 증가로 강우유출량이 증가하는 등 물순환 구조가 바뀌게 되었다. 불투수면으로 인하여 침투량이 감소하여 지하수위 저하, 하천 건천화 등의 문제가 대두되었고, 유출량의 증가로 인해 도시 홍수의 빈도 및 강도도 증가하였다. 1990년대 초반 미국의 환경부에서는 개발 과정에서 손상된 도시 물순환으로 인해 야기되는 도시홍수 등의 문제를 해결하기 위하여 물순환을 개발 이전의 상태로 회복하는 것을 목표로 하는 저영향개발(Low Impact Development, LID)기법을 제안하였다. LID는 기존의 인프라 중심의 우수관리와는 달리 녹지의 확보 등을 통한 자연 상태의 수문순환 기능을 유지하기 위한 기법을 활용한 기술을 의미하는 것으로(Prince George's County, 1999) 대표적 기법으로 옥상 녹화, 투수성 포장, 생태연못, 빗물정원 등이 있다. LID기법이 국내에 소개됨에 따라서 아산탕정지구, 송도신도시 등이 물순환 신도시로 계획되는 등(서울특별시, 2014) 이를 적극적으로 도입하려는 노력이 이루어지고 있다.

기존의 관련 연구는 도시지역에 LID를 도입하였을 경우의 오염부하량 저감 효과 또는 침투량 증진을 통한 유출 저감 효과(Dietz, 2007)에 주로 초점이 맞추어져 있었다. 하지만 LID의 효과는 다양한 강우의 패턴 및 특성에 따라서 다르게 나타날 수 있으므로 이를 고려해야 하지만 강우 특성별 LID의 효과에 대한 연구는 부족한 실정이다(Qin *et al.*, 2013). 또한

도시지역의 물순환 회복을 위한 LID기법은 설치면적과 관리 비용 등에 한계를 가지기 때문에(신동수 등, 2013) 비용대비 효과를 늘릴 수 있도록 도시지역의 물수지 특성에 영향을 끼치는 주요한 변수인 토지이용 및 토지피복(USEPA, 1983; Ahiablame *et al.*, 2013)을 고려해야 한다.

LID관련 연구에서의 물순환 회복이란 개발 이전과 이후의 물수지 특성을 비교하여 LID적용 후의 물수지가 개발 전과 같은 양상을 보이는 것을 의미하는데(Lee *et al.*, 2012), 본 연구는 LID 기술의 도입이 개발지의 물수지 개선에 얼마나 도움이 되는지를 정량적으로 평가하는 것을 목표로, 강우 유형을 극한 강우사상과 일반적 강우사상 두 가지로 나누어 분석하였다. 또한 개발지의 LID 적용으로 인한 강우유형별 물수지 변동과 더불어 LID시설을 포함한 대상지의 물수지 특성을 분석하였고 이와 더불어 LID의 주요한 효과인 침투유출량 저감 효과 또한 제시하였다. 결과적으로 강우 유형 및 LID시설에 따른 시나리오별 물수지 변동을 정량화하여 연구 결과가 향후 대상지의 공간 계획 시 물순환을 고려한 LID도입 및 적용에 활용될 수 있도록 하고자 한다.

II. 연구 범위 및 방법

1. 연구 범위

경기도는 전국평균에 비해 도시화가 상당히 빠르게 진행된 곳으로 향후 빗물관리에 대한 중요도가 높게 인식되고 있다(경기개발연구원, 2012). 개발 전,

Table 1. Classification of rainfall types for the hydrological simulation

Rainfall type	Duration	Precipitation(mm)
small rainfall event	2011.5.6.~2011.5.11. (6days)	29
heavy rainfall event	2011.7.26.~2011.7.29. (4days)	506

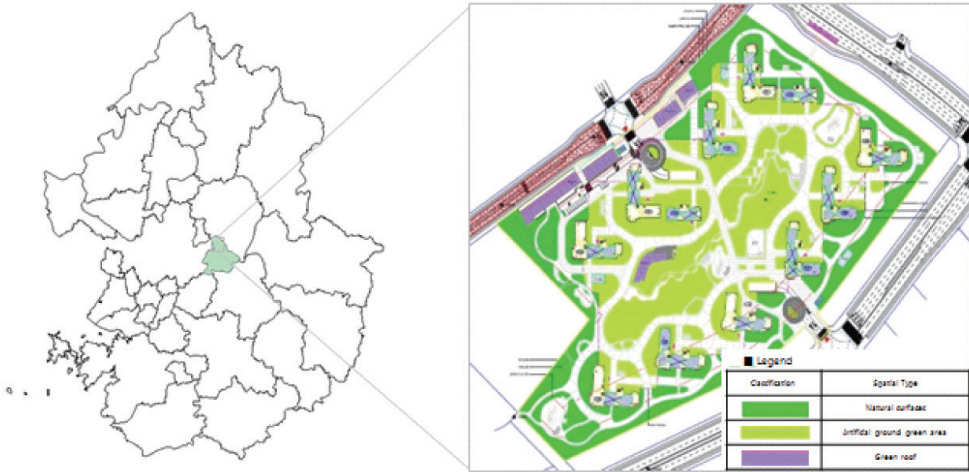


Figure 1. Location and design plan of the study area

후의 물수지 분석을 위해서 현재 신도시 개발이 계획되어 시공 중에 있는 경기도 하남시 하남미사지구의 아파트 단지를 연구 대상으로 선택하였다. 경기도 하남에 위치한 본 대상지는 빗물관리의 중요성이 대두되고 있는 맥락 하에서 LID기법을 적극 도입하기로 예정되어 있어 연구의 공간적 범위로 적절한 것으로 판단하였다(Figure 1). Figure 1에 나타나 있는 대상지의 생태면적구적도에는 자연지반, 인공지반, 옥상 녹화의 위치 및 면적이 표현되어 있으며 이 도면을 근거로 하여 대상지의 시나리오별로 공간 구성 및 LID 시설 면적을 도출하였다.

연구의 시간적 범위는 table 1에 나타난것과 같이 수문 모의의 대상 강우 기간으로 하였으며 서로 다른 강우 특성에 따른 물수지 변동을 확인하기 위하여 강우 유형 분류는 강우 강도를 기준으로 하였다. 2011년의 극한 강우 사상을 고강도의 강우사상으로 하여 같은 년도의 비슷한 지속기간 동안 있었던 5월의 강우 사상을 저강도의 강우사상으로 선정하였다. 7월 고강도 강우사상의 경우 4일 동안 506mm의 폭우가 내렸고 5월의 저강도의 강우사상의 경우 6일 동안 29mm의 강우량을 기록하였다. 강우량 자료는 1분 단위로

제공되는 기상청의 하남 관측소 AWS(Automatic weather station, 자동기상관측자료)를 활용하였다.

대상 지구에는 대규모 택지개발이 계획되어 있으며 대상지 블록은 현재 개발 전의 나지 상태이다. LID의 효과를 논하기 위해서는 대상지의 개발 정도에 따른 시나리오 구축이 필요하다. 본 연구에서는 물수지 모의를 위한 대상지의 상태를 세 가지로 가정하였다. 첫 번째는 대상지가 개발 이전의 자연지반으로 이루어진 상태이며, 두 번째는 택지 개발이 이루어진 상태, 세 번째는 개발이 이루어진 곳에 LID기법이 적용된 상태이다. 개발 전, 개발 후, LID적용 후로 표현되는 세 가지 시나리오별로 토지 피복이 각각 다르기 때문에 대상지의 상황에 따른 물수지 변동 및 LID의 물수지 개선 효과를 확인하기에 적절할 것이라 판단하였다.

2. 연구의 재료 및 방법

1) STORM모형

도시지역 수문 모의에 주로 사용되는 모형으로는 배수관망의 평가, 설계에 활용되며 관망의 특성을 모

의할 수 있는 SWMM, ILLUDAS 등이 있다. 본 연구에서 다루고자 하는 LID기법을 비롯하여 대상지의 전체적인 물수지 특성을 모의하기 위해서는 대상지를 구성하고 있는 개별 공간 요소에 대한 모의가 필요하다. 대표적으로 SWMM의 경우에도 소유역별로 LID기법 모의가 가능하지만 본 연구에서는 이를 비롯하여 대상지에 계획되어 있는 자연지역 및 인공지반의 특성 또한 모의에 반영되어야 하므로 다양한 유형의 공간 구성 요소에 대한 모의가 가능한 모형이 적합할 것으로 판단하였다. STORM모형은 독일의 IPS(Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH)에서 개발된 수문 모형으로 우수를 발생 지점에서 처리할 수 있는 투수 포장, 옥상 녹화, 저류 탱크, 침투 트렌치 등의 분산형 빗물관리 시설 모의가 가능하며 택지개발로 인한 물순환의 변동특성과 빗물관리시설의 적용 효과 모의에 적합(김영민 등, 2007)한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서의 물수지 모의를 위해 STORM 수문 모형을 선택하였다.

STORM모형은 기본적으로 5분 단위 강우자료를 반영하여 유효우량을 산정하고 이로부터 유출, 침투 및 증발 현상을 모의한다. 앞서 제시한 대상지 인근 기상청 관측소의 1분 단위 자동기상관측자료를 5분 단위로 수정하여 모형에 반영하였다.

증발량은 연간 총 증발량으로부터 일 증발량 그래프를 적용하여 다음 (식 1)을 통해서 산정된다(IPS, 2006). $\Delta h_v(i)$ 는 i 시간에서의 증발량(mm)이며 i 는 모의 시간, h_v 는 연간 평균 잠재 증발산량을 의미한다.

$$\Delta h_v(i) = \frac{7}{9} \sin \left[\frac{2\pi}{365} (i - 91) + 1 \right] \frac{h_v}{365} \quad (\text{식 1})$$

주로 불투수면으로 이루어져 있는 도시지역의 유출에서, 강우에 의해 유출이 일어나는 과정은 모델링 과정에서 가장 중요하다 할 수 있다. STORM모형의 유출 모의에는 한계치 방법(limit value method)을 적용하는데, 이는 강우의 초기 손실 및 영구적인 습윤 효과 등을 고려하며, 지면 저류는 별도의 손실로 포함시키는 방식이다. 이 과정에서 침투는 고려되지 않으며 따라서 이 방법은 도시 지역에 우선적으로 적

용될 수 있다(Achleitner, 2006). 총 강우량 h_N 에서 초기 손실량 h_i , 지면 저류량 h_D , 영구 손실량 h_P 를 제외하여 유출이 일어나는 유효 강우량 h_{N_e} 를 산정하며 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$h_{N_e} = h_N - (h_i + h_P + h_D) \quad (\text{식 2})$$

이 방법에 따라서 STORM모형에서는 다음 (식 3)에 의해 유출이 일어난다. 유출에 영향을 끼치는 주요 인자는 지표 손실계수와 유출계수이다. 유출계수는 유효 유출을 발생시키는 면적의 전체 면적 대비 비율을 의미한다. 불투수면의 유출 모의에는 유출계수가 가장 주요한 영향을 끼치는데 초기 유출 계수는 지면저류를 고려하지 않은 초기 손실 이후 일어나는 유출의 양을 결정하며 중기 유출계수는 초기 손실과 지면 저류 이후 일어나는 유출량을 결정한다(Schluter and Jefferies, 2002).

$$\Delta h_{N_e,i} = \psi_e [\Delta h_{N_e,i} - h_m (\epsilon_{m,i} - \epsilon_{m,i-1})] \quad (\text{식 3})$$

여기서 $\Delta h_{N_e,i}$ 는 유출에 직접적으로 연관되는 i 시간의 유효우량이며 ψ_e 는 중기 유출계수, $h_{N_e,i}$ 는 i 시간의 강우량이며 h_m 과 $\epsilon_{m,i}$ 는 각각 식생 차단과 지표 요철로 인한 손실량이다.

투수면에서 일어나는 침투는 Horton과 Paulsen 공식에 근거하여 이루어지는데, 강우강도가 침투능보다 클 경우는 (식 4)의 Horton방법, 강우강도가 침투능보다 작을 경우는 (식 5)의 Paulsen방법을 적용한다.

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) e^{-k \cdot \Delta t} \quad (\text{식 4})$$

$$f_i = f_0 + (f_0 - f_{i-1}) e^{-k_D \cdot c_m \cdot \Delta t} \quad (\text{식 5})$$

$f(t)$ 는 t 시간에서의 침투능을 의미하고 f_0 와 f_e 는 각각 초기, 중기 침투능이며 f_i 는 i 시간에서의 침투능을 의미한다. k 와 k_D 는 상수이며 각 변수들은 대상지의 공간 특성에 맞는 계수들을 입력할 수 있도록 되어 있다.

2) 시나리오에 따른 LID기법 및 입력 변수 설정

앞서 설정한 개발 전, 개발 후, LID도입 후의 시나리오에 해당하는 각 입력 변수는 대상지의 설계도면, 지반조사보고서와 환경영향평가서를 참고하였다. 개

Table 2. Ground soil characteristics of the site condition before the development

Depth	Soil characteristic	Conductivity (mm/s)
0~5m	Silty loam	0.0018
5~10m	Loamy clay	0.000028
10~22m	Silty sand	0.0083

Table 3. The proportions of spatial types according to the scenarios

Spatial type \ Scenario	Before the development (m ²)	After the development (m ²)	After the application of LID (m ²)
Total area	72,755(100%)	72,755(100%)	72,755(100%)
Impervious surfaces	0(0%)	50,420(69%)	43,671(60%)
Natural surfaces	72,755(100%)	8,902(12%)	8,902(12%)
Artificial ground green area	0(0%)	13,433(19%)	7,193(10%)
Green roofs	0(0%)	0(0%)	4,070(6%)
Permeable pavement	0(0%)	0(0%)	2,678(4%)
Swale	0(0%)	0(0%)	6,240(8%)

발 전의 경우 나지 상태의 자연지반으로 구성되어 있는 것으로 판단하였고 지반조사 결과를 참조하여 모형에 입력된 변수들은 다음 Table 2와 같다.

개발 후의 토지이용은 현재 설계도면 상에 계획된 대로 모형 입력을 위해 불투수면, 자연지반, 인공지반의 세 가지로 구분하였으며 이는 Fig.1의 도면에서 확인할 수 있다. Table 3에 대상지에 도입될 LID 시설은 현재 옥상녹화, 투수성 포장, 식생수로가 계획되어 있고 그 규모 또한 제시되어 있다. 개발 후와 LID적용 후 시나리오의 차이점은 LID시설이 도입되면서 불투수면과 인공지반의 모의 면적이 줄어든 것에 있다. 옥상녹화의 경우 기존의 불투수면인 옥상이 투수가 가능한 공간이 되었고, 투수성 포장 또한 불투수성 포장에서 바뀐 것으로 옥상녹화와 투수성 포장도 도입됨에 따라서 해당 면적만큼의 불투수면이 감소하였다. 식생수로의 경우 설계도면 상에서는 길 옆의 기존의 인공지반에 도입하는 것으로 계획되어 있으므로 LID도입 후 시나리오에서는 식생수로 면적만큼 인공지반의 면적이 감소하였다.

STORM모형에서 모의 가능한 시설은 포장면 및 자연지역을 비롯하여 분산형 빗물관리 시설인 물탱크, 투수포장, 생태연못, 트렌치, 옥상녹화, 저류조 등으로 다양한데, 대상지에 도입 가능한 LID 시설과 대응하는 STORM모형의 구성 요소는 자연지역, 옥

상녹화, 투수포장, 생태연못으로 선택하였다. LID 시설 외의 토지이용에 대한 입력 변수 또한 다양하나 European Commission(2012)와 Eckart(2012)의 연구에서 제시한 STORM모형의 주요 입력 변수를 참고하여 본 연구에서의 주요 입력 변수를 Table 4에 나타내었다.

STORM모형은 국내에서는 빗물관리시설의 설계를 목적으로 활용된 바 있으며 환경부의 빗물이용시설 설치 및 관리 가이드북(2010)에서 제시된 불투수면과 투수면의 손실계수와 유출계수를 참고하여 Table 4에 제시하였으며 이에 따라서 모형 매개변수를 적용하였다. 유출계수 인공지반의 토심과 투수계수는 개발 전의 토양의 최상층의 상태와 동일하게 적용하였으며, 옥상녹화의 경우 적용되는 토심, 포장용수량, 공극률, 투수계수와 배수층의 두께는 실제 옥상녹화 시공 업체의 계측 자료를 적용하였다. 투수성 포장 또한 실제 계측 자료를 활용하였는데, 적용한 투수블럭의 특성으로 포장층과 저류층의 두께 및 공극률과 투수계수를 Table 4와 같이 입력하였다. 생태수로의 경우 주요한 설계 매개변수는 저류 면적, 침투가 가능한 총 면적, 토양의 투수계수 등이며 실제 설계도면 상의 폭과 깊이를 반영하였고 토양 특성은 인공지반과 동일하게 입력하였다. 이외에 다른 입력 변수들은 IPS(2006)에서 제시한 설계값을 적용하였다.

Table 4. Parameters for the model simulations

Spatial type	Parameters	Values of guideline(2010)	Values	Unit
Impervious surfacesx	Wetting loss	0.5	0.5	mm
	Trough loss	1.8	1.8	mm
	Initial runoff parameter	0.25	0.3	-
	Final runoff parameter	1	1	-
Artificial ground green area	Wetting loss	2	2	mm
	Trough loss	3	3	mm
	Initial runoff parameter	0	0	-
	Final runoff parameter	0.3	0.3	-
	Soil depth	1.2		m
	Field capacity	20		%
	Conductivity	0.0018		mm/s
Green roofs	Soil depth	0.3		m
	Field capacity	61.6		%
	Conductivity	0.04		mm/s
	Overflow height	0.06		m
	Pore volume	60		%
Permeable pavement	Thickness	0.15		m
	Permeability	7.9		mm/s
	Void ratio	20		%
	Overflow height	0.005		m
Swale	Side slope	2.5		-
	Height	0.3		m
	Field capacity	20		%
	Conductivity	0.001		mm/s
	Overflow height	0.25		m

III. 결과 및 고찰

1. 강우 유형별 물수지 분석

분류된 두 가지 강우 유형은 6일간 29mm의 강우량을 기록한 강우 강도가 낮은 강우사상과, 4일간 506mm의 높은 강우강도를 나타낸 강우사상의 두 가지 종류이다. 두 가지 강우 유형에 대하여 물수지를 분석한 결과가 Table 5, 6과 Figure 2, 3에 정리되어 있다.

저강도의 강우 유형의 경우, 개발 전의 유출률은 5.3%이었으나 개발 이후는 49.3%로 급격하게 증가하였다. 침투 및 저류량의 경우, 개발 전의 49%에서 개발 후 19.4%까지 낮아진 것을 확인할 수 있다. 침투량의 감소와 더불어 증발량 또한 감소한 것으로 모

의되었다. 하지만 LID를 적용한 후 유출량은 개발 후 대비 14.1% 감소하였고, 침투 및 저류량은 33.7% 증가하였으며 증발량 또한 1.3% 증가한 것으로 모의되었다.

강도 높은 강우사상의 경우, 대상 강우가 2011년 7월의 폭우사상이었기 때문에 개발 전의 상태임에도 불구하고 80.4%의 높은 유출률을 나타냈으며 침투 및 저류량은 18%, 증발량은 1.6%로 상당히 적은 양으로 모의되었다. 개발 직후는 유출률이 95.5%까지 급격히 상승하였으나, LID 적용 후에는 3.2% 감소한 것을 확인할 수 있다.

Figure 2에서 확인할 수 있듯이 저강도 강우사상의 경우 LID적용에 따라 유출률이 감소하고 침투 및 저류량이 증가하고 있다. Figure 3는 고강도의 강우

Table 5. Water balance of the case of small rainfall event

Scenario	Areal rainfall (m^3)	Water balance		
		Runoff (m^3)	Infiltration & Storage (m^3)	Evaporation (m^3)
Before the development	2,109	112(5.3%)	1,033(49 %)	964(45.7%)
After the development		1,040(49.3%)	409(19.4%)	660(31.2%)
After the application of LID		893(42.3%)	547(25.9%)	669(31.8%)

Table 6. Water balance of the case of heavy rainfall event

Scenario	Areal rainfall (m^3)	Water balance		
		Runoff (m^3)	Infiltration & Storage (m^3)	Evaporation (m^3)
Before the development	36,814	29,561(80.4%)	6,640(18%)	613(1.6%)
After the development		35,175(95.5%)	1,083(3%)	556(1.5%)
After the application of LID		33,979(92.3%)	2,218(6%)	617(1.7%)

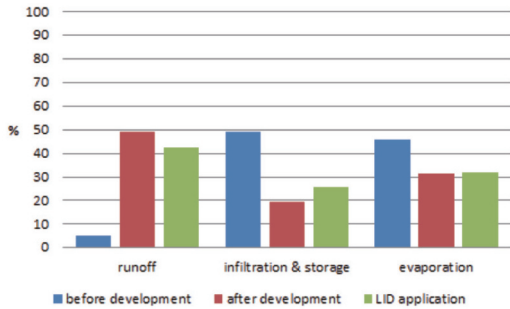


Figure 2. Water balance of the case of small rainfall event

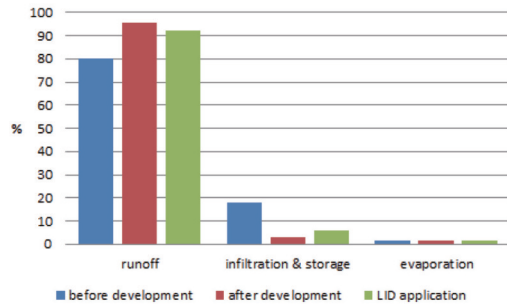


Figure 3. Water balance of the case of heavy rainfall event

사상의 모의 결과이다. 세 가지 시나리오에 대해서 대다수의 강우량이 유출되는 것을 확인할 수 있으며 증발 현상은 거의 일어나지 않고 있다. 이 경우에도 LID적용에 따라서 유출량이 감소하고 침투 및 저류량이 증가하였지만 유출량 감소폭이 Figure 2과 비교하여 다소 작게 나타난 것을 확인할 수 있다. 두 가지 강우 유형별로 LID의 효과를 분석한 결과 LID의 유출 저감으로 인한 물수지 개선 효과는 낮은 강우강도의 강우사상에서 더 큰 것으로 나타났다.

하지만 개발 직후와 비교하여 LID적용 후에도 증발량의 경우는 유출량이나 침투량의 경우처럼 눈에 띄는 차이점이 나타나지 않았다. STORM모형은 불투수면의 유출 과정에서 지면저류 등으로 초기의 강우 손실을 고려하는데, 물수지 모의 결과에서 표면손실량은 증발량으로 표현된다. 강우로부터의 초기 손실량은 지표면의 구조에 영향을 받는데, 이는 잠재적인 증발량 혹은 투수면의 경우 침투량으로 간주될 수

있다(Mansell *et al.*, 2008). 강우에 이어 일어나는 식생 차단, 증발, 침투 및 저류, 지면유출 등의 과정은 서로 상호 연관되어 복잡하게 일어나며, 본 연구에서 주된 변수로 설정한 투수계수, 토심 등의 토양 관련 변수 이외에도 특히 증발산의 경우는 수종이나 엽면적지수 등 식생 관련 변수에도 영향을 받으므로 (Keim *et al.*, 2006) 현재 본 연구에서의 총 증발량 산정 결과에는 불확실성이 존재한다.

3. 시나리오별 침투유출량 분석

LID기법의 핵심 중 하나는 도시지역의 불투수면으로 인해 증가한 침투유출량을 저감시키는 것에 있다. 본 연구 대상지에서의 개발 후, LID도입 후의 시나리오에 대해서 LID도입으로 인한 침투유출량 저감 효과를 분석하였으며 그 결과가 Table 7과 Figure 4, 5에 제시되어 있다.

침투유출량 분석 결과 저강도의 강우사상에 대해

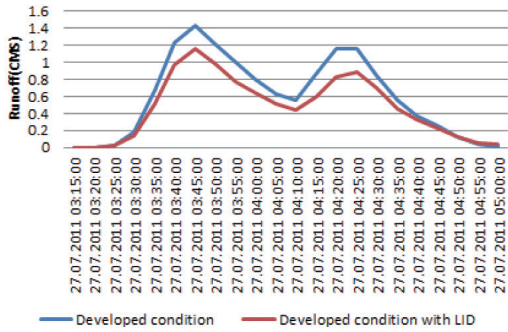


Figure 4. Runoff hydrograph in case of the heavy rainfall event

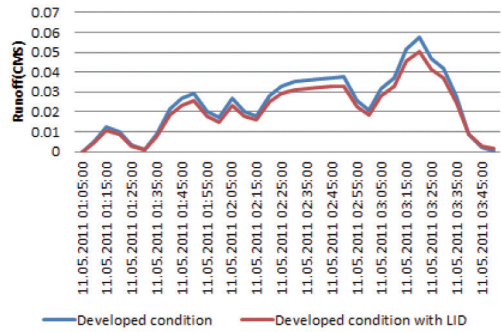


Figure 5. Runoff hydrograph in case of the small rainfall event

Table 7. The peak flow reduction effect of LID according to the rainfall types

	Peak discharge (m^3/s)	
	Small rainfall event	Heavy rainfall event
After the development	0.057	1.43
After the application of LID	0.049	1.15

Table 8. Results of water balance analysis according to the LID techniques and rainfall type

LID Techniques	Water balance according to the rainfall type		
	Rainfall type Water balance	Small rainfall event	Heavy rainfall event
Green roofs	Runoff	4.3%	87.5%
	Infiltration	70.4%	11.1%
	Evaporation	25.3%	1.4%
Permeable pavement	Runoff	0%	81.5%
	Infiltration	72%	17.6%
	Evaporation	28%	0.9%
Swale	Runoff	2%	72.7%
	Infiltration	63.7%	24.5%
	Evaporation	34.3%	2.8%

서 개발 직후에는 $0.057m^3/s$ 의 침투유출량이 기록되었으나 LID적용 후 $0.049m^3/s$ 로 감소하였다. 고강도의 강우사상에 대해서는 개발 후 $1.43m^3/s$ 의 침투유출량이 LID적용 후 $1.15m^3/s$ 로 24.3% 감소한 것으로 나타났다. Figure 4, 5에는 두 가지의 강우 사상에 대한 수문유출곡선이 제시되어 있는데, 투수포장, 옥상녹화와 생태수로의 도입에 따라서 유출량 그래프가 낮게 나타난 것을 확인할 수 있으며 따라서 세 가지 LID기법의 도입은 침투유출량 저감에 효과가 있는 것으로 볼 수 있다. 하지만 LID도입 이전에도 대상지인 아파트 단지에는 일정 면적의 자연지반과 투수면이 존재하고 있기 때문에 유출지연 효

과는 두드러지게 나타나지 않았다.

3. LID기법별 물수지 분석

대상지에 도입이 예정되어 있는 LID기법은 옥상녹화, 투수성 포장, 식생수로이며 이 세 종류의 LID기법에 대해서 어떤 시설이 어떤 효과를 나타내는지 알아보고자 수문 모의를 실시하였다. 앞서 강우유형에 따라서 시나리오별로 물수지를 평가했지만 각 LID시설별로 유출, 증발, 침투량이 각각 얼마인지에 대해서 전체 물수지 분석에서는 알 수 없다. 게다가 각 요소별로 그 적용 면적이 상이하기 때문에 모의 결과값을 단위 면적 당으로 나타내어야 각 시설

의 물수지를 파악하기 용이하다. Table 8은 앞서 설정한 LID기법인 옥상녹화, 투수포장, 식생수로에 대하여 두 가지 강우 사상에 따라서 물수지 분석 결과를 단위면적당으로 나타낸 것이다.

세 가지 LID기법 중 저강도의 강우사상에서 투수성 포장에서는 유출이 일어나지 않은 것으로 모의되었고 옥상녹화와 식생수로의 경우에도 각각 전체 물수지 대비 4.3%와 2%의 낮은 유출률을 보였다. 높은 강우강도일 경우 세 가지의 LID시설에서 모두 증발현상이 거의 일어나지 못하는 것으로 나타났고 옥상녹화의 유출률은 87.5%로 증가하였으며 투수포장 또한 81.5%의 유출률을 나타냈다. 생태수로는 72.7%로 가장 낮은 유출률을 보였다.

본 연구에서 적용한 투수포장은 저강도 강우사상 모의에서 거의 모든 강우를 침투시키고 유출 발생이 가장 적은 LID시설이므로 저강도에서는 물수지 개선 효과가 큰 것으로 볼 수 있다. 투수포장의 투수율을 결정하는 계수는 대상지를 구성하고 있는 토양의 투수계수와 비교했을 때 그 값이 큰 특성이 있으므로 즉각적인 침투가 이루어질 수 있도록 투수포장의 적지 배치가 중요한 것이다. 고강도 강우사상에서 물수지 개선에 효과가 있는 것으로 나타난 식생수로의 경우 강우 시 우수가 일정부분 저류되는 특성 상 낮은 유출률과 높은 증발량을 나타냈으며 빗물의 저류가 원활하게 이루어질 수 있도록 해야 한다. 하지만 생태수로는 적용면적 상의 한계를 가지는 단점이 있는 반면 투수포장과 옥상녹화는 저류용량은 적지만 현실제안 상의 적용면적보다 확대할 수 있는 가능성이 있으므로 물수지 개선 효과의 증진이 가능할 것이다. 본 연구의 물수지 모의 결과는 각 시설별로 서로 다른 구조로 인한 수문학적 반응의 차이(Grayson *et al.*, 2002)에 기인하는 것으로 판단되며 특히 투수포장의 유출률이 낮고 침투율이 크게 나타난 것은 다른 LID기법에 비해 우선적으로 침투, 저류가 일어나기 때문(박지영 등, 2013)인 것으로 볼 수 있다.

IV. 결론

도시지역에서 자연적 물순환의 훼손을 최소화하기

위한 공간 계획 시 LID도입을 고려할 경우, 다양한 강우 특성 및 LID기법 유형에 따라서 대상지의 물수지 변동은 다르게 나타날 수 있으므로 이 두 가지를 고려한 물수지 분석이 선행되어야 효과적인 LID계획이 가능하다. 본 연구는 LID의 효과적인 적용을 위하여 대상지의 현황 시나리오별로 STORM모형을 활용한 수문 모의를 통하여 강우 유형에 따른 물수지를 분석하였고 옥상녹화, 투수포장, 생태수로의 LID 시설을 비롯하여 대상지의 토지이용을 반영하여 물수지를 분석하였다. 이를 통하여 개발로 인한 자연적 물순환의 훼손을 완화하고 개발 이전의 상태로의 회복을 돕기 위한 LID의 효과적인 적용 방안을 고찰하였다.

강우 유형에 따른 물수지 분석 결과 LID는 높은 강우강도를 지닌 극한 강우 사상보다는 비교적 낮은 강우강도를 나타내는 평상시 강우 사상에 물수지 개선 효과가 있는 것으로 모의되었으나 침투유출량 저감 정도는 고강도의 강우사상에서 더 큰 것으로 나타났다. LID도입 전의 상황에도 대상지에는 일정 면적의 자연지반 및 투수면의 도입이 예정되어 있으므로 LID도입으로 인한 유출지연 효과는 두드러지게 나타나지 않았다. 본 연구에 적용된 LID기법은 대상지의 상황을 고려하여 옥상녹화, 투수성 포장, 식생수로의 3가지로 한하였으며 기법별 분석 결과 유출 저감 및 침투 증진 물수지 개선에 가장 효과가 있는 것은 저강도 강우사상에서는 투수포장, 고강도 강우사상에서는 생태수로로 나타났다. 본 연구에서 적용한 투수포장의 경우 다른 두 가지 LID기법에 비하여 투수율이 큰 것이 낮은 유출량의 주요한 원인으로 나타났으며 따라서 즉각적인 침투 및 배수가 이루어질 수 있는 적지에 배치되어야 한다. 식생수로의 경우 다른 두 가지 LID기법과 비교하여 저류 용량이 크기 때문에 우수 저류 기능이 잘 이루어질 수 있는 곳에 계획하는 것이 개발지의 물수지 개선에 도움을 줄 것으로 판단된다.

본 연구는 수문 모형을 사용하여 강우 유형을 고려하여 옥상녹화, 투수성 포장, 식생수로의 세 가지 LID기법별로 물수지를 분석한 결과로부터 그 적용 방안을 고찰하였다. 본 연구의 모의 결과는 대상지의

실제적인 계획 도면을 근거자료로 하고 있으므로 향후 대상지의 공간 계획에서 LID도입을 통한 물순환 개선을 고려할 때에 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 하지만 본 연구는 수문 모의를 하는 데에 있어 관측값을 토대로 한 모의 결과의 검증이 부족한 한계점을 가지고 있다. 특히 증발량 모의의 경우 식생 관련 변수가 중요하게 다뤄질 수 있다. 본 연구의 수문 시뮬레이션 상에서는 많은 가정이 존재하는데 이는 향후 후속 연구에서 대상지에서의 관측값을 근거로 하여 매개변수의 보정 및 모의 결과의 검증을 통해 연구 결과의 불확실성을 줄일 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 “불확실성을 고려한 기후변화 영향 및 적응 경제성 평가 기술개발 (과제번호: 2014001310010)”과 “기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모델 (과제번호: 2014001310007)”과 “2014년도 BK 21 플러스 사업(서울대학교 협동과정조경학 그린인프라 창조 인재 양성팀)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

인용문헌

- 경기개발연구원. 2012. 경기도 빗물이용활성화 제도 보완 방안 - 빗물관리 기본계획 구상.
- 김영민, 김이호. 2007. 공동주택 빗물관리시설 적용방안 및 효과분석, 한국수자원학회 추계 학술발표회 논문집, pp.2003-2007.
- 박지영, 임현만, 이혜인, 운영한, 오현제, 김원재. 2013. 도시 개발 전·후 LID 기법 적용에 따른 물수지 및 오염부하 변동 특성, 대한환경 공학회지, 35(11), 795-802.
- 서울특별시. 2013. 서울특별시 빗물관리 기본계획 (보완) 가이드라인.
- 서울특별시. 2014. 저영향개발 사전협의제도 안내.
- 신동수, 박재범, 강두기, 조덕준. 2013. SWMM-LID를 이용한 상습침수유역 내 유출저감효과 분석, 한국방재학회 논문집, 13(4), 303-309.
- 유신코퍼레이션. 2009. 하남미사 보급자리주택지구 개발사업 환경영향평가서.
- 윤용남. 2008. 청문각, 수문학.
- 환경부. 2010. 빗물이용시설 설치·관리 가이드북.
- Achleitner S. 2006. Modular conceptual modelling in urban drainage development and application of city drain, Doctoral Dissertation, University of Innsbruck.
- Ahiablame LM, Engel BA, Chaubey I. 2013. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement, Journal of Environmental Management, 119, 151-161.
- Bowyer-Bower TAS. 1993. Effects of rainfall intensity and antecedent moisture on the steady-state infiltration rate in a semi-arid region, Soil Use and Management, 9(2), 69-75.
- Dietz ME. 2007. Low Impact Development Practices: A review of current research and recommendations for future directions, Water, Air, and Soil Pollution, 186, 351-363.
- Eckart Jochen. 2012. Flexible urban drainage systems in new land-use areas, Doctoral Dissertation, University of South Florida.
- European Commission. 2012. Recommendations on the management of increased urban runoff.
- Grayson RB, Blöschl G, Western AW, McMahon TA. 2002. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response, Advances in Water Resources, 25, 1313-1334.
- IPS. 2006. STORM.XXL Manual.
- Keim RF, Skaugset AE, Weiler M. 2006. Storage of water on vegetation under simulated

- rainfall of varying intensity, *Advances in Water Resources*, 29, 974-986.
- Lee J, Hyun K, Choi J, Yoon Y, Geronimo FKF. 2012. Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM5, *Desalination and Water Treatment*, 38, 326-332.
- Mansell M, Rollet F. 2008. The effect of surface texture on evaporation, infiltration and storage properties of paved surfaces, 11th International Conference on Urban Drainage.
- Prince George's County, Maryland Department of Environmental Resources Programs and Planning Division. 1999. *Low-Impact Development Design Strategies - An Integrated Design Approach*.
- Qin H, Li Z, Fu G. 2013. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics, *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585.
- Ramamurthy P, Bou-Zeid E. 2010. Contribution of impervious surfaces to urban evaporation, *Water Resources Research*, 50, 2889-2902.
- Schluter W, Chris J. 2002. Modelling the outflow from a porous pavement, *Urban Water*, 4, 245-253
- Stone JJ, Paige GB, Hawkins RH. 2008. Rainfall intensity-dependent infiltration rates on rangeland rainfall simulator plots, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(1), 45-53.
- Taylor CM, Lebel T. 1998. Observational Evidence of Persistent Convective-Scale Rainfall Patterns, *Monthly Weather Review*, 126, 1597-1607.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1983. Results of the Nationwide Urban Runoff Program, In: Final Report, vol. 1, Water Planning Division, Washington, DC.

References

- Achleitner S. 2006. Modular conceptual modelling in urban drainage development and application of city drain, *Doctoral Dissertation*. University of Innsbruck.
- Ahiablame LM, Engel BA, Chaubey I. 2013. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement, *Journal of Environmental Management*, 119, 151-161.
- Bowyer-Bower TAS. 1993. Effects of rainfall intensity and antecedent moisture on the steady-state infiltration rate in a semi-arid region, *Soil Use and Management*, 9(2), 69-75.
- Dietz ME. 2007. *Low Impact Development Practices: A review of current research and recommendations for future directions*, *Water, Air, and Soil Pollution*, 186, 351-363.
- Eckart Jochen. 2012. Flexible urban drainage systems in new land-use areas. *Doctoral Dissertation*, University of South Florida.
- European Commission. 2012. *Recommendations on the management of increased urban runoff*.
- Grayson RB, Bloschl G, Western AW, McMahon TA. 2002. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response, *Advances in Water Resources*, 25, 1313-1334.
- Gyeonggi Research Institute. 2012. *Supplementary Proposal to Promote Rainwater Utilization*

- in Gyeonggi Province.
- IPS. 2006. STORM.XXL Manual.
- Keim RF, Skaugset AE, Weiler M. 2006. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity, *Advances in Water Resources*, 29, 974-986.
- Kim Y, Kim RH. 2007. Application of rainwater utilization facilities in building complexes, *Journal of Korea Water Resources Association*, pp.2003-2007.
- Lee J, Hyun K, Choi J, Yoon Y, Geronimo FKF. 2012. Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM5, *Desalination and Water Treatment*, 38, 326-332.
- Mansell M, Rollet F. 2008. The effect of surface texture on evaporation, infiltration and storage properties of paved surfaces, 11th International Conference on Urban Drainage.
- Ministry of Environment. 2010. Guidebook of the installation and management of stormwater management facility.
- Park JY, Lim HM, Lee HI, Yoon YH, Oh HJ, Kim WJ. 2013. Water balance and pollutant load analyses according to LID techniques for a town development, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(11), 795-802.
- Prince George's County, Maryland Department of Environmental Resources Programs and Planning Division. 1999. *Low-Impact Development Design Strategies - An Integrated Design Approach*.
- Qin H, Li Z, Fu G. 2013. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics, *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585.
- Ramamurthy P, Bou-Zeid E. 2010. Contribution of impervious surfaces to urban evaporation, *Water Resources Research*, 50, 2889-2902.
- Schluter W, Chris J. 2002. Modelling the outflow from a porous pavement, *Urban Water*, 4, 245-253
- Seoul Metropolitan City. 2013. *The Guidelines for Rainwater Management Planning*.
- Seoul Metropolitan City. 2014. *The Guidelines for Prior Consultation System of Low Impact Development*.
- Shin DS, Park JB, Kang DK, Jo DJ. 2013. An analysis of runoff mitigation effect using SWMM-LID model for frequently inundated basin, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4), 303-309.
- Stone JJ, Paige GB, Hawkins RH. 2008. Rainfall intensity-dependent infiltration rates on rangeland rainfall simulator plots, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(1), 45-53.
- Taylor CM, Lebel T. 1998. Observational Evidence of Persistent Convective-Scale Rainfall Patterns, *Monthly Weather Review*, 126, 1597-1607.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1983. *Results of the Nationwide Urban Runoff Program*, In: Final Report, vol. 1, Water Planning Division, Washington, DC.
- Yoon YN. 2008. *Hydrology*, Cheongmungak, p.98.
- Yooshin Engineering Corporation. 2009. *Environmental Impact Assessment Report of Housing Development Project in Hanam Misa*.