

저영향개발 시설의 요소기술별 연계 효과 분석

백종석^{1a} · 이상진^{1b} · 신현석^{2a} · 김재문^{2b} · 김형산^{1c,†}

¹K-water융합연구원 물순환연구소

²부산대학교 사회환경시스템공학과

Analysis of the Linkage Effect by Component Technology in Low Impact Development Facilities

Baek, Jongseok* · Lee, Sangjin* · Shin, Hyunsuk** · Kim, Jaemoon** · Kim, Hyungsan*[†]

¹Water Resource Research Center, K-water Convergence Institute

²Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(Received 6 September 2018, Revised 10 December 2018, Accepted 31 December 2018)

Abstract

Urbanization has led to extreme changes in land use on urban watersheds. Most cities are becoming residential, commercial and industrial areas, making infiltration and storage of rainfall less favorable. The demand for LID (Low Impact Development) technology is increasing in order to mitigate this water cycle distortion and return to existing hydrological conditions. The LID technique is effective in reducing runoff by permeating the urban impervious area. However, considering the limit of the installation area and the financial requirement of the installation, there is not much research on the linkage of each LID component technology for optimum efficiency according to the appropriate scale. In this study, the effects of the LID facilities applied to the target site were simulated using the SWMM model, suggesting the optimal linkage method considering interconnectivity, and applying the effects as an existing installation of individual facilities. The water balance at the time of application of the LID technology, short-term and long-term rainfall event were compared. Also, the individual application and the linkage application were compared with each other. If each component technology has sufficient processing size, then linkage application is more effective than individual application.

Key words : EPA SWMM, LID, Linkage, Runoff, Urbanization

^{1a} 위촉연구원(Researcher), baekdo@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0002-2345-0720

^{1b} 책임연구원(Principal Researcher), sjlee@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0002-8911-9627

^{2a} 교수(Professor), hsshin@pusan.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-7605-8378

^{2b} 박사과정(Ph.D. Student), ekzmans7@naver.com, https://orcid.org/0000-0002-7265-7912

^{1c,†} Corresponding author, 위촉선임연구원(Senior researcher), hskim@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0001-8537-3225

1. Introduction

도시화의 진행에 따라 기존의 투수면적들이 포장층으로 덮여 불투수화되고, 포장층에 내린 강우는 충분한 침투와 저류 없이 도시하천으로 방류되고 있다. 이로 인해 이전과 같은 강우량에도 도시 하천은 쉽게 범람하고, 상습 침수구역이 생기는 등 도시의 기존 물순환 체계가 변화되었다. 침투량 감소, 표면유출량 증가로 인한 도시하천의 범람, 상습 침수구역의 발생, 지하수 함량 및 유출량의 감소로 도시하천의 건천화 및 열섬현상의 심화 등이 진행되고 있다. 도시화에 따른 불투수면적의 확대에 의한 물순환 왜곡과 관련된 선행 연구를 살펴보면 Kim et al. (2006)은 대전 3대 하천 유역을 대상으로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 도시화율에 따른 물수지 분석을 수행하여 도시화가 많이 진행된 유역일수록 지표유출량의 증가 폭이 컸고 지하수유출량이 대폭 감소한 것을 확인하여 풍수기 동안의 홍수피해와 갈수기 동안의 하천 건천화가 도시화에 큰 영향을 받았다는 점을 분석하였다. Lee (2009)는 도시화로 인한 불투수면적의 증가를 38%, 50%, 100% 등 3개의 시나리오로 구성하여 SWMM (Storm Water Management Model)을 적용하여 유출모의를 수행한 결과 불투수면적이 증가할수록 유출량 증가 폭이 커진다는 점을 제시하였다. Jung et al. (2014)은 도시화로 인한 불투수면적의 증가가 지하수량의 감소와 지표유출의 증가를 발생시킨다는 점을 증명하기 위해 SWAT 모형을 이용하여 정량적이고 공간적인 토지이용 변화를 원인으로 연구하였고, 도시의 공간적 변화가 5% 유의수준 이상일 때 도시화로 인한 유출량의 변화가 있다는 점을 제시하였다. Fu et al., (2018)는 HEC-1과 SWMM을 이용하여 대만의 저수강 유역을 대상으로 2008년부터 2030년까지 도시화가 진행됨에 따라 유출량이 증가한다는 모의 결과를 제시하였다.

저영향개발 기술은 미국, 호주, 유럽 등의 국가에서 활용하는 도시 유출 저감 기술로서 국내에 소개된 이후 꾸준한 관심과 연구가 진행되고 있다. 저영향개발 기술의 적용이 유역의 유출에 어떤 영향을 미치는지에 관한 연구결과는 다음과 같다. Suh and Lee (2013)는 동탄, 신갈, 송도 등 3개 지역의 공동주택 단지내 침투형 저영향개발 요소기술을 설치하였을 때의 유출, 침투, 증발 등의 물수지 분석을 수행하여 도시 물순환 개선 효과를 확인하였다. 도시유역에 대한 저영향개발 기술의 물순환 개선 효과 검증에 대한 국외 모의 연구는 다음과 같다. Ahiablame et al. (2013)은 L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment)를 이용하여 미국 인디애나주 도시유역을 대상으로 빗물통과 저류조, 투수성포장의 조합을 6가지 시나리오로 분류하여 유역의 유출 저감 정도를 분석하였다. Ko et al. (2016)는 아산탕정 신도시 단지에 식생수로, 침투도랑, 인공습지, 축구형 침투시설 등 4개의 저영향개발 요소기술별 유출저감 효과와 수질개선 효과를 분석하기 위하여 실제 강우와 인공 강우에 대한 모니터링을 수행하였고, 유역 면적비에 따른 유출패턴을 분석하였다. Back et al. (2017)은 송산그린

시티 산업단지를 대상으로 옥상녹화와 투수성포장 설치규모의 분석하여 저영향개발 기술의 적용이 우수관망 통수능을 개선할 수 있고, 돌발홍수 및 국지적 침수 등의 수재해를 예방할 수 있다고 제시하였다. Wu et al. (2017)은 SWMM과 IFMS (Integrated Urban Flood Modelling System)를 병용하여 중국 광둥성의 도시유역에 옥상정원과 투수성포장의 적용 비율에 따라 도시 침수 개선 효과를 분석하였고, LID 적용비율이 25%일 때 최적의 조합 효율이 나타난다고 제시하였다.

최근에는 이러한 연구 결과들을 바탕으로 각각의 저영향개발 요소기술들을 도시기본계획 및 개발 기준 범위내에서 최적으로 조합하는 연구가 진행되고 있다. Kang et al. (2014)은 국내의 저영향개발 기법 적용 수위에 비하여 도시계획과의 연계수준이 낮아 계획 원칙에 LID 기법의 적용지향에 대한 명시와 도시별 환경 및 특성을 고려한 제도적인 기반이 필요하다고 제시하였다. Hoghooghi et al. (2018)은 도시 수문 모형인 VELMA (Visualizing Ecosystems for Land Management Assessments)를 이용하여 미국 오하이오주의 단독주택단지에 빗물정원, 빗물통, 투수성포장을 비율별로 적용하였고, 세 개의 요소기술이 수문상태 건전화에 효과적이거나 빗물정원이 단위면적 당 최적의 효율인 것으로 분석하였다.

Kim et al. (2018)은 계획여건 및 계획수립자의 의견 등을 반영할 수 있는 토지이용별 LID 표준 조합 Set을 제시하고, 이중 학교를 대상으로 모의분석을 수행하여 저영향개발 요소기술 간의 연계가 유출량 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

이와 같이 저영향개발을 통한 도시지역의 유출량 저감에 관한 연구는 지속적으로 진행중에 있으나 각 요소기술 간의 상호 연계적인 부분을 고려한 최적 적용 계획에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 저영향개발 기술을 적용하여 불투수면적의 유출저감 분석 및 각 요소기술 간의 상호 연계를 통해 연계 효과를 분석하고자 하였다. 유출량의 증가는 적정 저영향개발 설계를 통해서도 해결할 수 있으나, 개별적 요소기술의 운용보다는 요소간의 상호 연계성 있는 효율적인 운용을 한다면 면적에 따른 설치량의 한계성을 극복하고 경제성있는 개발이 될 것이라 기대한다.

2. Materials and Methods

2.1 연구방법

본 연구의 연구 방법은 다음 순서에 따른다. 먼저, 실제 저영향개발 기술이 적용되는 대상지를 선정하고, 적용될 요소기술들의 종류와 용량을 소개한다. 저영향개발 기술의 개별적인 적용과 상호 연계를 통한 적용을 구분하여 모형을 구축하고, 대상지의 실제 강우자료를 적용하여 장단기 강우사상 모의를 수행한다. 결과 분석을 통해 저영향개발 기술의 개별적 적용과 연계시의 효과를 비교 정리하여, 해당 기술의 적용이 대상지역의 물순환 시스템에 미치는 수문학적 개선 효과를 제시하고자 한다.

2.2 모형 구축

2.2.1 대상지 선정

대상지는 경기도 화성시에 위치한 교육 및 연구센터로 계획중인 시범지구로써, 저영향개발 기술을 적용하여 실증적인 물순환 시스템을 구현하도록 다양한 요소기술들이 적용되어 상호 연계성 확인에 적합하여 대상지로 선정하였다. 대상지는 Fig. 1과 같이 기상청 강우 관측소 중 수원시와 인접하여 수원관측소를 대상관측소로 선정하였다. 2008년에서 2017년까지 10년간의 관측자료를 대상으로 연간 강수량 평균과 월간 증발산 및 기온은 Table 1 및 Table 2와 같다. 대상지역의 10년 평균 강수량은 1,345 mm로 분석되어, 국토교통부에서 발행한 수자원장기종합계획(MLIT, 2016)의 우리나라 연평균 강수량 1,300 mm 보다 다소 큰 강수량을 보이는 것으로 나타났다.

2.2.2 모형 선정 및 설정

저영향개발 효과 분석이 가능한 모형의 종류로는 단순 알고리즘을 Excel 시트 상에서 간략 계산할 수 있는 Spreadsheet 모형, 소규모 유역을 대상으로 설치 전후의 유출량 저감, 수질개선을 비교적 간단히 계산 가능한 Simple 모형, 요소기술 간의 수리·수문학적 해석을 통해 유역의 유출을 복합적으로 분석이 가능한 Complex 모형으로 구분할



Fig. 1. Location of study area.

수 있다. 본 연구에서는 Complex 모형 중유역의 관망 모의를 통해 수문학적 분석이 가능한 EPA-SWMM 모형에 LID Tool을 추가한 SWMM 5.1 모형을 선정하였다. SWMM 5.1 모형은 도시 유역의 장기 연속 강우 모의가 가능하고 강우, 유출, 침투, 저류, 증발산 등 수문학적 물수지 산정 및 저영향개발 기술의 적용 모의가 가능하여 Back et al. (2017), Back et al. (2018), Kang et al. (2014), Suh and Lee (2013)등 다수의 연구에서 적용되었으며, 본 연구의 대상지역에 설치되는 LID 시설물의 분석이 가능하여 대상모형으로 선정하였다.

대상지역의 실시계획과 수리계산서를 기반으로 Fig. 2와 같이 SWMM 모형을 구축하였다. 소유역의 저류깊이, 조도계수 등의 매개변수는 Koo and Seo (2017)의 실제 모니터링 및 검증 자료를 적용하여 Table 3과 같이 설정하였다. 대상지의 토양은 자갈 섞인 사질토로 비교적 투수성이 양호한 수문학적 토양그룹 Type-B에 해당하며, 관련 매개변수는 Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD, 2017)의 Horton's equation에서 제시한 값을 적용하였다.

2.3 저영향개발 기술 적용

2.3.1 대상지 적용 요소기술

대상지역은 향후 저영향개발 요소기술들의 실증적 효용 분석을 위해 다양한 기술들이 부지내에 계획되어있다. 공원·녹지에는 건식우물(Dry well), 연못(Pond), 식생여과대(Riparian buffer), 실개천(Swale), 나무여과상자(Tree box filter)를 적용하였으며, 건물에는 옥상녹화(Vegetated roof), 소규모 지하저류조(Wet vault), 대규모 지하저류조(Underground detention)를 계획하였다. 도로·교통 부지에는 침투집

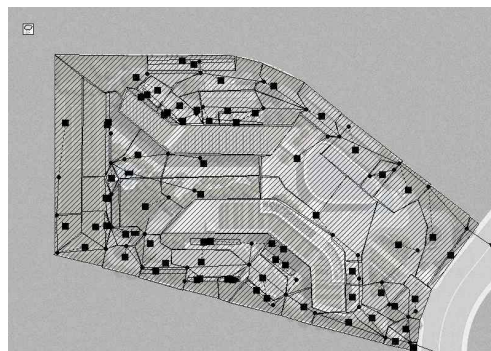


Fig. 2. Design for SWMM model.

Table 1. Annual average precipitation in Suwon meteorological station

Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Average
Precipitation (mm)	1,343	1,541	1,471	1,976	1,748	1,240	1,029	751	1,023	1,329	1,345

Table 2. Monthly average evaporation and temperature in Suwon meteorological station in 10 years

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Evaporation (mm/day)	1.25	1.72	2.63	3.68	4.81	5.20	3.78	4.14	3.76	2.84	1.69	1.28
Temperature (°C)	-2.67	0.42	5.72	12.04	17.99	22.66	25.58	26.30	21.82	15.22	7.46	-0.44

Table 3. Design for SWMM option

SWMM 5.1 options					
Routing model	Kinematic wave		Infiltration model	Horton	
Start-end date	2007-12-31 to 2018-01-01		Simulation interval (min)	15	
Subcatchment summary					
Subcatchments (EA)	70		Total area (m ²)	22,030	
Rate of average impervious area (%)	50		Average Slope (%)	1	
Manning's roughness coefficient	N-impervious	0.035	Depression storage (mm)	Impervious	2.54
	N-pervious	0.055		Pervious	8.89
Infiltration model : Horton					
Maximum infiltration rate of the Horton infiltration curve (mm/hr)	114.3		Minimum infiltration rate of the Horton infiltration curve (mm/hr)	15.24	
Decay constant of the Horton infiltration curve (1/hr)	6.48		Drying time a fully saturated soil (days)	7	

수정(Infiltration collect well), 침투트렌치(Infiltration trench), LID 원형교차로(LID roundabout), 투수성포장(Permeable pavement), 식생처리장치(Street planter)를 적용하였다. 각 요소기술들이 적용되는 위치는 Fig. 3과 같이 공원·녹지, 건물, 도로·교통에 따라 분류하였으며, 적용된 요소기술별 상세한 규모 및 규격은 Table 4와 같다.

2.3.2 요소기술간 연계 방안

저영향개발 요소기술간의 연계는 집중호우시 우수관망의 순간적인 집중부하를 저감시켜 통수능을 개선할 수 있고, 일반적인 강우사상에서는 최대한의 강우량을 저장 및 침투

시킬 수 있다. 강우가 직접적으로 접하는 면적에 따라 연계가 가능한 방안을 Fig. 4와 같이 계획하였다.

각 저영향개발 시설의 연계방안은 Fig. 3의 (a) 대상지역에 표시된 A, B, C, D로 구분하였으며, 요소기술별 연계 세부사항은 Table 5와 같다. 요소기술의 연계방안은 대상지의 고저차나 경사에 의해 자연적으로 처리될 수 있는 유출 흐름 방향에 따라 설정하였다. A지역으로 유출되는 강우는 옥상녹화를 통해 1차 처리되고, 처리용량을 초과하는 월류수는 건물 외벽에 설치된 식생처리장치를 통해 2차 처리되며, 식생처리장치 옆에 설치된 소규모 지하저류조를 거친 후 최종 유출되도록 하였다. B지역은 옥상녹화 처리용량을

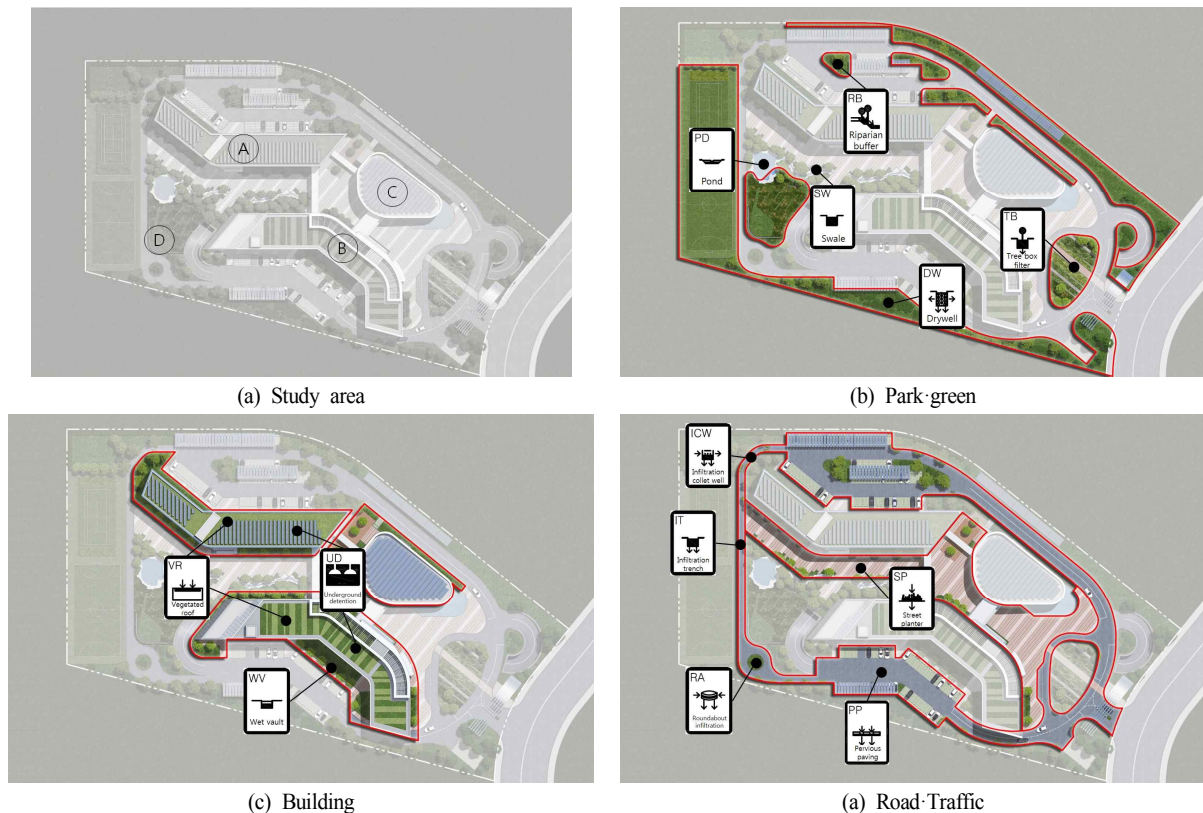


Fig. 3. Applied component technologies by type.

Table 4. Applied component technologies by type

Type	Applied component technologies	LID type in SWMM	Size of facilities	
			Size	EA
Park-green	Dry well (DW)	Infiltration trench	1 m ²	5
	Pond (PD)	Storage	390 m ³	1
	Riparian buffer (RB)	Rooftop disconnection	1.5 m × 3.0 m	2
	Swale (SW)	Vegetated swale	1.0 m × 0.5 m × 37 m	1
	Tree box filter (TB)	Bio-retention cell	1.5 m × 1.5 m × 1.3 m	3
Building	Vegetated roof (VR)	Green roof	A: 1,180 m ² , B: 1,730 m ²	1
	Wet vault (WV)	Rain barrel	0.5 m ³	7
	Underground detention (UD)	Rain barrel	A: 130m ³ , D: 250 m ³	1
Road-traffic	Infiltration collect well (ICW)	Infiltration trench	1.4 m × 2.2 m	8
	Infiltration trench (IT)	Infiltration trench	0.6 m × 0.6 m × 1.0 m	337
	LID roundabout (RA)	Infiltration trench	4 m ²	1
	Permeable pavement (PP)	Permeable pavement	1.0 m × 1.0 m	1,357
	Street planter (SP)	Bio-retention cell	5.6 m × 1.5 m × 1.7 m	7

초과하는 월류수가 지하저류조로 연계하도록 설정 하였으며, C지역은 저영향개발 시설이 적용되지 않았다. D지역은 실개천으로 유입된 유출수를 연못으로 차집하고, 연못이 일정 수위 이상에서 월류시에 지하저류조로 유출되도록 처리

과정을 설정하였다. 나머지 대지의 포장면적을 따라 유출되는 유출수는 침투트렌치와 침투집수정을 통해 최종 유출되도록 계획하였다.

3. Results and Discussion

3.1 물수지 분석

3.1.1 단기 강우사상 분석

2008년부터 2017년까지의 10년 강수량을 분석하여 Fig. 5와 같이 80, 90, 95, 98 percentile의 각 백분위수에 해당하

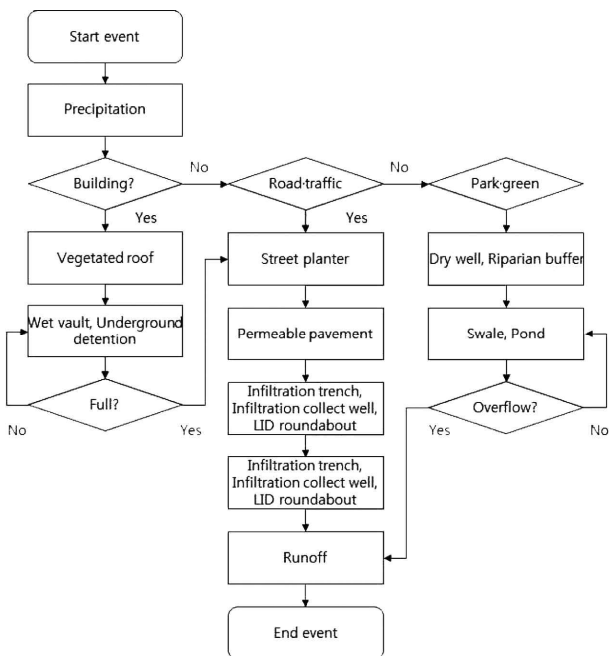


Fig. 4. Flowchart for LID linkage.

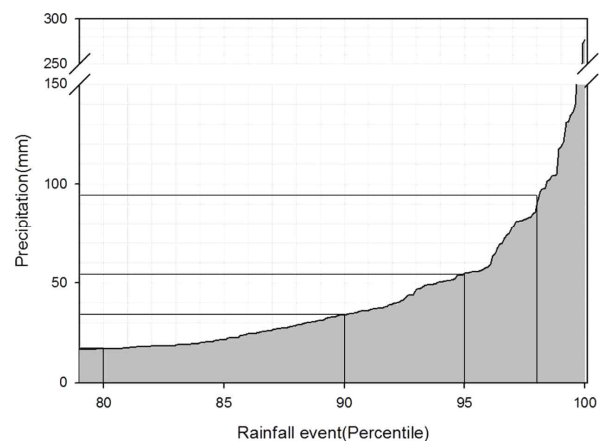


Fig. 5. Precipitation by each percentile.

Table 5. Linkage method of LID

Type	1 st phase	2 nd phase	3 rd phase	4
A	Vegetated roof (VR)	Street planter (SP)	Wet vault (WV)	Runoff
B	Vegetated roof (VR)	Underground detention (UD)	-	
C	-	-	-	
D	Swale (SW)	Pond (PD)	Underground detention (UD)	
All	Permeable pavement (PP)	Infiltration trench (IT)	Infiltration collect well (ICW)	

는 17, 34, 55, 95 mm/day의 일강우량을 선정하였으며, 확률강우량도 개선 및 보완연구(MLTMA, 2011)를 기반으로 Huff 3분위에 따라 10분 단위 강우자료를 구성하고 시나리오를 구축하였다. 구축된 시나리오를 바탕으로 저영향개발 기술의 적용 전, 적용 후 및 요소기술 간의 연계로 3가지 시나리오를 구성하였으며, 분석을 수행하였다.

물수지 분석 결과는 Table 6 및 Fig. 6과 같다. 일강수량

이 증가할수록 증발, 침투 및 저장은 감소하고 유출량은 증가하는 것으로 분석되었다. 대상지는 일반적인 평시 강우사상으로 고려할 수 있는 17.1 mm/day에서, 저영향개발 적용 이전에 66.1%의 유출이 발생하는 것으로 확인되었다. 같은 강우사상에서 저영향개발의 개별적인 적용시 유출이 28.6%로 분석되어 37.5%의 유출저감 효과가 발생하였고, 연계 적용시에는 22.0%의 유출로 44.1%의 유출저감 효과

Table 6. Water balance analysis by short-term rainfall events

Type	Precipitation		Evaporation		Infiltration		Storage		Runoff	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Original	17.1	100.0	1.0	6.0	4.8	27.9	-	-	11.3	66.1
	34.1	100.0	1.0	3.1	9.5	27.9	-	-	23.5	69.0
	55.2	100.0	1.1	1.9	15.4	27.8	-	-	38.7	70.2
	95.3	100.0	1.1	1.1	26.5	26.5	-	-	72.7	72.5
LID	17.1	100.0	1.6	9.4	8.1	47.6	2.4	14.2	4.9	28.6
	34.1	100.0	1.7	4.9	16.2	47.5	5.1	14.8	11.2	32.8
	55.2	100.0	1.7	3.1	25.7	46.7	8.5	15.4	19.2	34.9
	95.3	100.0	1.8	1.8	43.6	43.5	14.6	14.6	40.3	40.2
Linkage of LID	17.1	100.0	1.6	9.3	9.4	54.9	2.3	13.5	3.8	22.0
	34.1	100.0	1.7	4.9	19.3	56.5	4.7	13.8	8.4	24.7
	55.2	100.0	1.7	3.1	30.7	55.7	7.7	14.0	15.0	27.2
	95.3	100.0	1.8	1.8	34.6	34.5	12.8	12.7	34.6	34.5

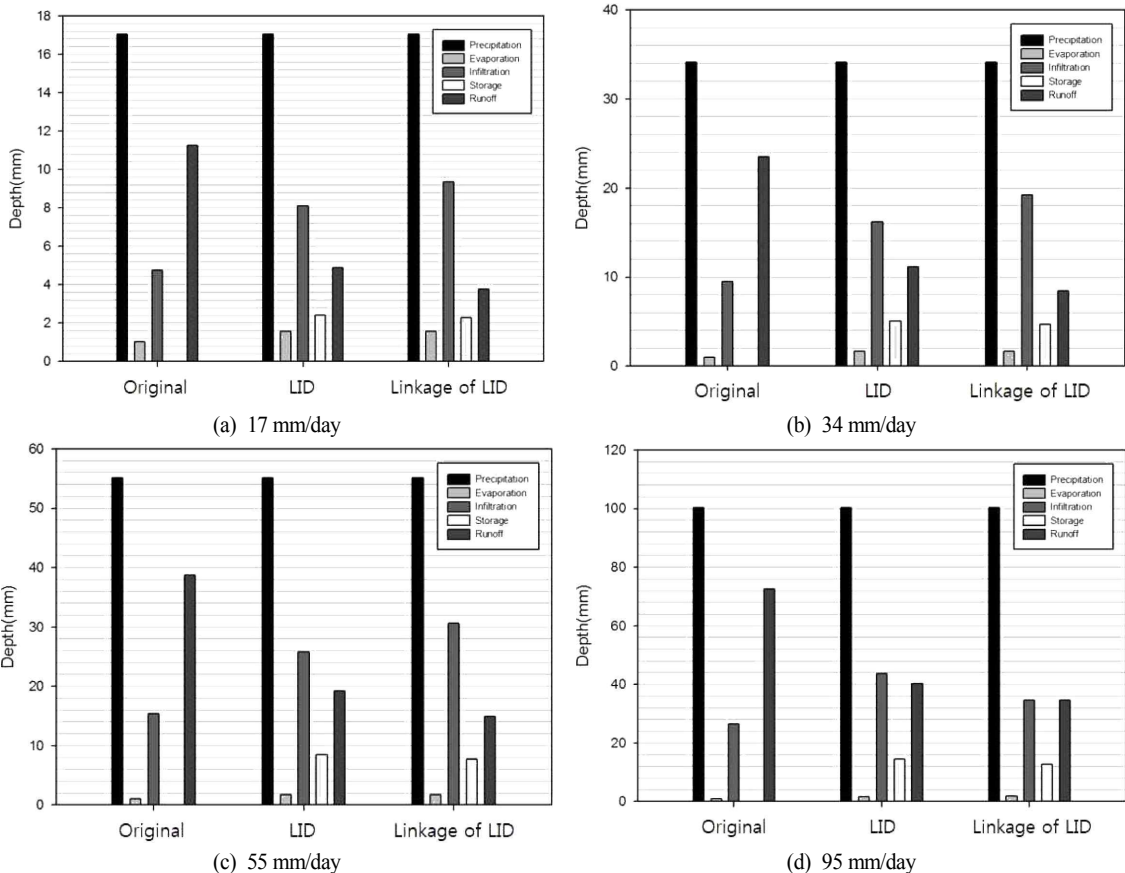


Fig. 6. Water balance analysis by each events.

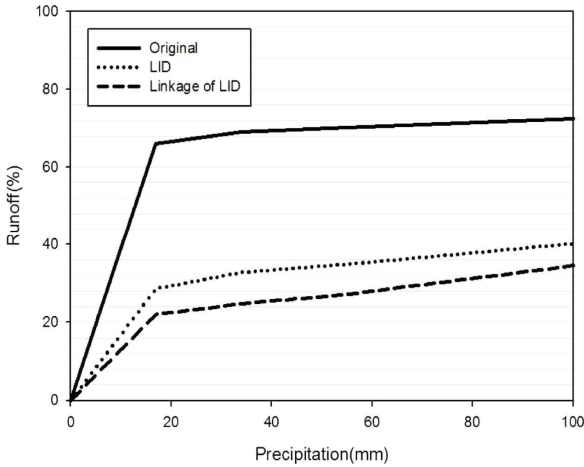


Fig. 7. Ratio of runoff by rainfall intensity.

가 있는 것으로 확인되었다. 단기 강우사상에서는 저영향개발 기술간의 연계시를 통해 유출을 저감할 수 있는 것으로 분석되었다. 95.3 mm/day의 극한 강우사상에서 저영향개발 적용시 40.2%, 연계시 34.5%의 유출이 발생하는 것으로 확인되었고, 이는 저영향개발 적용전보다 각각 32.3%, 38%의 유출저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 강우강도의 증가에 따른 유출률 변화는 Fig. 7과 같다.

3.1.2 장기 강우사상 분석

2008년부터 2017년까지 총 10년간의 시강우 자료를 기반으로 저영향개발 적용 전과 후, 그리고 저영향개발 요소기술간 연계시에 대한 3가지 시나리오를 모의하였다. 장기 강우사상의 분석 결과를 연평균을 기준으로 Table 7과 같이 정리하였다. 저영향개발 적용시, 적용 전에 비해 증발산은 2.9%, 침투는 6.7%, 저장은 10.0%가 증가하였고, 유출은 19.8% 감소하였다. 요소기술간 연계시 저영향개발 적용전보다 증발산이 3.8%, 침투는 7.7%, 저장은 6.7% 증가

하고, 유출은 18.2% 감소하였다. 요소기술간 연계시 저영향개발 적용시에 비해 증발산이 0.9%, 침투가 1.0% 증가하였고, 저장은 3.3% 감소, 유출은 1.6% 증가하였다. 저영향개발 적용으로 인해 유출량은 약 20% 정도 저감되는 것으로 나타났으나, 개별적인 저영향개발 적용과 연계시의 적용에서는 물수지 증감차가 미미하게 나타났다. 이는 일반적인 강우량에는 유출저감에 효과적인 반면, 극한 강우사상에는 취약하기 때문인 것이라 판단하였다.

3.1.3 갈수기, 풍수기 비교

단기와 장기 강우사상에서의 결과를 재확인하기 위하여 10년 연평균 강우자료를 토대로 강우가 가장 적은 갈수해와 가장 많은 풍수해를 선별하여 연별 모의를 수행하였다. 갈수해는 강우량 751 mm의 2015년, 풍수해는 1,976 mm의 2011년으로 선정하였다. 갈수해와 풍수해 모두 저영향개발의 적용으로 증발, 침투, 저장이 증가하고 유출이 감소하는 것으로 Table 8과 같이 나타났다. 개별 적용과 연계 적용을 비교한 결과 갈수해에는 연계로 인해 유출량을 5.1% 추가 저감하였고, 풍수해에는 개별 적용시에 유출량이 1.4% 증가 하는 것으로 분석되었다. 이는 풍수기 시에는 개별 적용보다 연계 적용이 유출 저감에 효과적이거나, 극한 강우시에는 연계로 인한 유출 저감 효과가 미미한 것으로 확인되었다. 원인 분석 결과, 극한 강우시에 소유역별로 설치된 시설의 용량을 초과하는 월류량은 우수관망을 통해 배수되어야 하나, 연계된 요소기술로의 배수로 인해 각 시설의 처리 기능이 짧은 시간동안만 제 기능을 유지하고 이후의 강우는 모두 유출되기 때문이라고 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 공간 및 경제적 한계점을 해결할 수 있는 저영향개발 요소기술 간의 연계 운영 방안에 대해 분석하

Table 7. Water balance analysis for long-term rainfall events

Type	Precipitation		Evaporation		Infiltration		Storage		Runoff	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Original	1,345.1	100.0	68.9	5.1	275.0	20.5	-	-	1,001.2	74.4
LID	1,345.1	100.0	107.9	8.0	365.4	27.2	137.2	10.0	734.7	54.6
Linkage of LID	1,345.1	100.0	119.6	8.9	379.8	28.2	90.1	6.7	755.6	56.2

Table 8. Water balance analysis by drought and flooding year

Type		Precipitation		Evaporation		Infiltration		Storage		Runoff	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
2015 (drought year)	Original	751.1	100.0	54.4	7.2	192.0	25.6	-	-	504.7	67.2
	LID	751.1	100.0	76.1	10.1	334.0	44.5	75.4	10.0	265.2	35.3
	Linkage of LID	751.1	100.0	78.8	10.5	373.4	49.7	71.5	9.5	227.1	30.2
2011 (flooding year)	Original	1,975.9	100.0	90.3	4.6	374.2	18.9	-	-	1,511.4	76.5
	LID	1,975.9	100.0	118.4	6.0	545.4	27.6	187.6	9.5	1,124.4	56.9
	Linkage of LID	1,975.9	100.0	127.1	6.4	572.2	29.0	123.5	6.3	1,151.3	58.3

였다. 강우를 접하는 면적에 따라 연계 방안을 고려하여, 건물에서는 옥상녹화와 소규모 지하저류조, 식생여과대를 연계하였으며, 도로 및 포장 면적에서는 투수성 포장과 침투 트렌치를 연계하여 직접적인 우수관망으로의 유출이 아닌 요소기술간의 연계를 통한 유출량의 우회 및 유출시간을 지연시키도록 하였다.

강우사상을 단기, 장기, 갈수기 및 풍수기로 구분하고, 저영향개발 시설의 적용 전후와 연계 운영에 대하여 분석을 수행하였다. 단기 강우사상의 경우, 저영향개발 기술의 개별적인 적용보다 연계시에 유출이 5.7~8.1% 추가적으로 저감되었다. 장기 강우사상의 경우, 요소기술 간의 연계로 인해 유출이 1.6% 증가하는 것으로 분석되었다. 저영향개발 기술의 연계가 단기사상에서는 효과적이나 장기사상에서는 효율이 낮은 점을 확인하기 위해, 장기 분석기간 중 최대 강우량을 기록한 2011년과 최소 강우량을 기록한 2015년을 비교 분석하였다. 갈수기인 2015년에는 기본 저영향개발 적용보다 연계시에 5.1% 추가 유출 저감 효과가 나타났지만, 풍수기인 2011년에는 1.4% 유출이 증가된 것으로 확인되었다. 이는 저영향개발 요소기술간의 연계가 일반적인 강우사상이나 갈수기에는 유출저감의 효과로 나타나지만, 극한강우사상이나 풍수기에는 유출량이 연계전보다 증가할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 논문에서 수행한 연구는 기 설치할 요소기술간의 추가적인 연계이다. 대상지의 강우 처리 목표에 맞는 기술에 대한 충분한 처리용량의 설계가 우선된다면, 기술간의 연계로 인한 추가적인 유출 저감이 가능할 것으로 판단된다. 기술간의 적정 처리용량 설계를 위해 빗물통과 저류지와 같이 크기에 비례하여 계산할 수 있는 시설 이외에 식생을 통해 강우를 저장하고 침투시킬 수 있는 요소기술들의 처리용량 및 수질개선에 대한 검증에 관한 연구가 향후 필요할 것으로 생각한다. 추후 수문학적인 관점에서 도시화를 분산시키고 완화할 수 있는 물순환 설계를 수행할 때, 요소기술간의 처리 용량을 고려하여 순차적인 유출 연계를 유도한다면 공간적, 경제적인 한계성을 극복하는 방안으로 사용될 것으로 기대한다.

References

- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., and 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(4), 151-161.
- Baek, J. S., Kim, B. J., Lee, S. J., and Kim, H. S. (2017). A study on application of LID technology for improvement of drainage capacity of sewer network in urban watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(6), 617-625. [Korean Literature]
- Baek, J. S., Lee, S. J., Shin, H. S., and Kim, H. S. (2018). Analysis of effectiveness for water cycle and cost-benefit according to LID application method in environmentally-friendly village, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(1), 57-66. [Korean Literature]
- Fu, J. C., Jang, J. H., Huang, C. M., Lin, W. Y., and Yeh, C. C. (2018). Cross-analysis of land and runoff variations in response to urbanization on basin, watershed, and city scales with/without green infrastructures, *Water*, 10(2), 106-123.
- Hoghooghi, N., Golden, H. E., Bledsoe, B. L., Barnhart, B. L., Brookes, A. F., Djang, K. S., Halama, J. J., McKane, R. B., Nietch, C. T., and Pettus, P. P. (2018). Cumulative effects of low impact development on watershed hydrology in a mixed land-cover system, *Water*, 10(8), 991-1010.
- Jung, Y. H., Moon, J. P., Lee, S. O., and Park, Y. S. (2014). Assessment of the effects of urbanization on the watershed streamflow, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(1), 51-59. [Korean Literature]
- Kang, J. E., Hyun, K. H., and Park, J. B. (2014). Assessment of low impact development (LID) integrated in local comprehensive plans for improving urban water cycle, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(5), 1624-1638. [Korean Literature]
- Kim, H. S., Lee, S. J., Baek, J. S., Park, S. K., and Shin, H. S. (2018). Development of LID standard combination set and planning model, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(3), 321-329. [Korean Literature]
- Kim, J. K., Son, K. H., Noh, J. W., Jang, C. L., and Ko, I. H. (2006). Evaluation of urbanization effect and analysis of hydrological characteristics in the Gap river catchment using SWAT, *Journal of Korea Water Resources Association*, 39(10), 881-890. [Korean Literature]
- Ko, H. B., Choi, H. N., Lee, Y. K., and Lee, C. Y. (2016). Analysis on the water circulation and water quality improvement effect of low impact development techniques by test-bed monitoring, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 17(5), 27-36. [Korean Literature]
- Koo, Y. M. and Seo, D. I. (2017). Parameter estimations to improve urban planning area runoff prediction accuracy using stormwater management model (SWM), *Journal of Korea Water Resources Association*, 50(5), 303-313. [Korean Literature]
- Lee, H. W. (2009). A study on watershed model for predicting the runoff characteristics of urban area, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(12), 1089-1094. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MLIT). (2016). *Water vision 2020*, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- Ministry of Land, Transportation Maritime Affairs (MLTMA). (2011). *A study on the improvement and complementary of precipitation frequency*, Ministry of Land, Transportation Maritime Affairs.
- Suh, J. H. and Lee, I. K. (2013). The water circulation improvement of apartment complex by applying LID technologies - Focused on the application of infiltration facilities -, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 41(5), 68-77. [Korean Literature]
- Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD). (2017). *Urban storm drainage criteria manual Volume 1, Chapter 6, runoff*, Urban Drainage and Flood Control District.
- Wu, J., Yang, R., and Song, J. (2017). Effectiveness of low impact development for urban inundation risk mitigation under different scenarios: a case study in Shenzhen, China, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(9), 2525-2536.