

식생유니트형 LID 시스템의 우수유출 지연효과에 대한 SWMM 전산모의와 인공강우 모니터링 간의 유의성 분석[†]

김태한* · 최부현**

*상명대학교 환경조경학과 부교수 · **상명대학교 대학원 환경자원학과 대학원생

Analysis of Significance between SWMM Computer Simulation and Artificial Rainfall on Rainfall Runoff Delay Effects of Vegetation Unit-type LID System

Kim, Tae-Han* · Choi, Boo-Hun**

*Associate Professor, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sangmyung University

**Graduate Student, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Graduate School, Sangmyung University

ABSTRACT

In order to suggest performance analysis directions of ecological components based on a vegetation-based LID system model, this study seeks to analyze the statistical significance between monitoring results by using SWMM computer simulation and rainfall and run-off simulation devices and provide basic data required for a preliminary system design. Also, the study aims to comprehensively review a vegetation-based LID system's soil, a vegetation model, and analysis plans, which were less addressed in previous studies, and suggest a performance quantification direction that could act as a substitute device-type LID system. After monitoring artificial rainfall for 40 minutes, the test group zone and the control group zone recorded maximum rainfall intensity of 142.91mm/hr. (n=3, sd=0.34) and 142.24mm/hr. (n=3, sd=0.90), respectively. Compared to a hyetograph, low rainfall intensity was re-produced in 10-minute and 50-minute sections, and high rainfall intensity was confirmed in 20-minute, 30-minute, and 40-minute sections. As for rainwater run-off delay effects, run-off intensity in the test group zone was reduced by 79.8% as it recorded 0.46mm/min at the 50-minute point when the run-off intensity was highest in the control group zone. In the case of computer simulation, run-off intensity in the test group zone was reduced by 99.1% as it recorded 0.05mm/min at the 50-minute point when the run-off intensity was highest. The maximum rainfall run-off intensity in the test group zone (Dv=30.35, NSE=0.36) recorded 0.77mm/min and 1.06mm/min in artificial rainfall monitoring and SWMM computer simulation, respectively, at the 70-minute point in both cases. Likewise, the control group zone (Dv=17.27, NSE=0.78) recorded 2.26mm/min and 2.38mm/min, respectively, at the 50-minute point. Through statistical assessing the significance between the rainfall & run-off simulating systems and the SWMM computer simulations, this study was able to suggest a preliminary design direction for the rainwater run-off reduction performance of the LID system applied with single vegetation. Also, by comprehensively examining the LID system's soil and vegetation models, and analysis methods, this study was able to compile parameter quantification plans for vegetation and soil sectors that can be aligned with a preliminary design. However, physical variables were caused by the use of a single vegetation-based

[†]: 본 연구는 2019학년도 상명대학교 교내연구과제지원에 의해 수행되었음.

Corresponding author: Tae-Han Kim, Associate Professor, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sangmyung University, Cheonan 31066, Korea, Tel.: +82-41-550-5303, E-mail: tachankim@smu.ac.kr

LID system, and follow-up studies are required on algorithms for calibrating the statistical significance between monitoring and computer simulation results.

Key Words: Vegetated LID System, Artificial Rainfall-runoff Simulations, Reliability Verification, Runoff Reduction Evaluation, Statistical Analysis

국문초록

본 연구는 식생기반 LID 시스템 모델을 기반으로 생태적 구성요소의 성능 분석 방향을 제시하기 위해, SWMM 전산모의와 강우·유출 모의장치를 이용하여 모니터링 결과 간의 통계적 유의성을 분석하고, 시스템 사전설계에 요구되는 기초자료를 제공하고자 한다. 또한, 선행연구에서 상대적으로 논의가 부족했던 식생기반 LID 시스템의 토양, 식생 모델 및 분석 방안을 종합하고, 장치형 LID 시스템을 대체할 수 있는 성능 정량화 방향을 제시하려 한다. 인공강우재현 모니터링 40분 경과 후 실험구와 대조구 모두 최대강우강도인 142.91mm/hr($n=3$, $sd=0.34$), 142.24mm/hr($n=3$, $sd=0.90$)로 집계되었다. 우량주상도 대비 10분, 50분 구간은 낮은 강우강도가 재현되었으며, 20분, 30분, 40분 구간은 높은 강우강도가 확인되었다. 우수유출 지연효과와 관련하여, 실험구의 유출강도 저감량은 대조구의 최대유출강도가 발생한 50분에 0.46mm/min을 기록하여, 79.8% 저감된 것으로 분석되었다. 전산모의의 경우, 실험구의 유출강도 저감량은 대조구의 최대유출강도가 발생한 50분에 0.05mm/min을 기록하여, 99.1% 저감된 것으로 모의되었다. 최대 강우유출강도의 경우, 실험구($Dv=30.35$, $NSE=0.36$)는 인공강우 모니터링과 SWMM 전산모의가 동일하게 70분에 각각 0.77mm/min, 1.06mm/min을 기록하였다. 대조구($Dv=17.27$, $NSE=0.78$)도 동일하게 50분에 각각 2.26mm/min, 2.38mm/min으로 집계되었다. 상기 연구결과를 통해 강우·유출 모의장치와 SWMM 전산모의 간의 통계적 유의성을 통해 단일 식생이 적용된 LID 시스템의 우수유출저감 성능의 사전설계 방향을 제시할 수 있었다. 또한, LID 시스템의 토양, 식생 모델 및 분석방법을 종합하여, 사전설계와 연계 가능한 식생 및 토양 부문의 매개변수 정량화 방안이 정리되었다. 다만, 단일 식생기반 LID 시스템으로 유형과 물리적 변수가 제한되었고, 모니터링, 전산모의 결과 간의 통계적 유의성 보정에 요구되는 알고리즘 연구가 후속되어야 할 것으로 판단된다.

주제어: 식생저영향개발시스템, 인공강우유출모의, 신뢰성 검증, 유출저감평가, 통계분석

1. 서론

수도권의 경우, 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x)의 2차적 화학반응을 통해 생성되는 초미세먼지($PM_{2.5}$) 발생 비중이 전체 발생량의 2/3 이상을 차지(Ministry of Environment, 2016)할 정도로 2차 미세먼지 발생 기작에 대한 중요성이 점차 부각되고 있다. NO_x 의 주요 발생원은 주로 도로상 이동오염원에 기인하며, 이는 추가적으로 기타 분진 및 누유 오염물질 등의 비점오염원을 유발하게 된다. 강우가 발생할 경우, 도로상 비점오염원의 확산은 촉진되는데, 이에 대한 저감방안으로 유지관리가 용이한 장치형 저영향개발(LID: Low Impact Development) 시스템이 주로 적용되고 있다. 일반적으로 장치형 LID 시스템은 비점오염원 저감 및 치수 측면에서 정량화된 성능을 확보할 수 있지만, 기후변화에 따른 비균질한 강우사상으로 건조한 우기가 형성될 경우, 사용이 제한되어 비효율적일 수 있다. 반면, 식생기반 LID 시스템은 식물에 의한 비메탄 휘발성

유기화합물(NMVOCs) 저감으로 2차 미세먼지 생성을 완화하고, 본연의 치수 목적 외에 도시 경관적 측면에서 다중적인 활용이 가능하다. 또한, 시스템의 생태환경 개선성능은 대기질, 수해 및 열해 등의 복합적인 기후재해의 대안으로 제시될 수 있지만, 정량화되지 않은 성능은 장치형 설비를 대체하는데 제한적인 원인이 되고 있다.

LID 시스템의 산업적 패러다임 변화를 견인할 수 있는 식생기반 LID 시스템의 성능 정량화는 공학적 설계가 선행되어야 하며, 우수유출 저감효과를 규명하는 수문학 모형들이 반영될 수 있다. 미국 환경성(EPA)에서 제공하고 있는 SWMM LID controls는 대표적인 수문학 모형으로 식생기반 LID 시스템 관련 연구에 폭넓게 사용되고 있다. 이와 관련하여, 식생기반 LID 시스템의 우수유출 전산모의를 통한 시스템 효율 및 경제성 규명(Shin *et al.*, 2013), RCP 8.5 기후변화 시나리오와 연계된 지붕녹화시스템의 성능예측(Kim *et al.*, 2014), 선릉·정릉 중심의 도심문화재를 위한 토심, 담심 변화에 따른 식생 LID 시

스택의 방재성능예측(Kim and Choi, 2017) 등이 보고되고 있다.

또한, SWMM LID controls 모형은 실험지의 실측 모니터링과 비교를 통한 시스템 신뢰성 제고에도 활용되는데, 식생기반 LID 시설을 포함한 7종의 시스템 모니터링(Kim and Joo, 2017), 옥상녹화 모니터링(Cipolla *et al.*, 2016) 등의 우수유출 저감성능 및 오차율 규명 연구와 통계학적 지표를 통한 보정 모형으로 LID 시스템의 설계방향을 제시한 연구(Jung *et al.*, 2018)도 진행된 바 있다. 관련 선행연구는 현장모니터링과 전산모의를 통해 수문학적 변수를 중심으로 표준설계모형을 제시하려 하였으나, 식생기반 LID 시스템 설계에 활용할 수 있는 식생, 토양 등의 생태적 구성요소에 대한 성능 관련 연구는 제한적인 상황이다. 지붕녹화형 LID 시스템의 우수유출 저감성능 모의에 미 농무부(USDA)의 토양모형(Saxton method)을 적용한 연구(Kim and Lee, 2016)가 보고되고 있지만, 식물생육이 고려된 복합적인 토양 매개변수 평가에 요구되는 통제된 강우사상 모니터링 간의 비교를 충족하지 못했다. 이는 기상환경 제어를 통해 실험환경을 제공하는 강우·유출 모의장치에 의한 모니터링 연구(Jang *et al.*, 2014; Erdal *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019)로 보완되고 있다.

본 연구는 식생기반 LID 시스템의 생태적 구성요소에 대한 수문학적 성능 분석 방향을 제시하기 위해 SWMM 전산모의와 강우·유출 모의장치의 모니터링 간에 통계적 유의성을 분석하고, LID 시스템의 사전설계에 요구되는 기초자료를 제공하고자 한다. 또한, 선행연구에서 상대적으로 논의가 부족했던 식생기반 LID 시스템의 토양, 식생 모델 및 분석 방안을 종합하고, 장치형 LID 시스템을 대체할 수 있는 식생기반 LID 시스템의 성능 정량화 방향을 제시하려 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 대상지 선정 및 실험방법

1) 대상지 선정

인공강우재현을 위한 확률강우 대상지는 선행연구(Kim *et al.*, 2019)에 준하여 충청남도 천안시로 선정하였다. 기상청 자료에 의하면 2017년 7월 16일은 일강수량 232.7mm, 시간당 강수량 69.3mm로 강수량 데이터 수집을 시작한 이후 천안시의 3번째 극값으로 기록하고 있다. 강우재현에 적용되는 확률강우량도는 국토교통부 확률강우량 정보시스템에서 제공하는 강우특성 분석 자료를 참조하였다.

2) 실험방법

본 연구는 식생유니트형 LID 시스템의 우수유출 지연효과를 규명하기 위해 실험실 단위의 강우·유출 모의장치를 통한 모

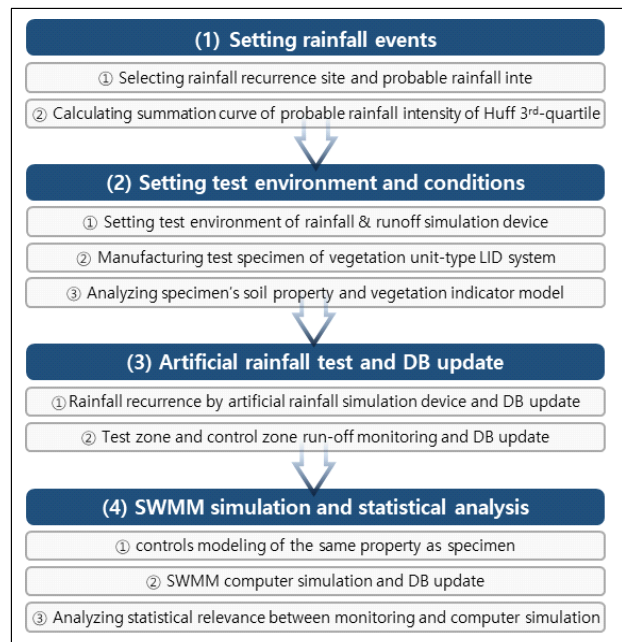


Figure 1. Research process

니터링 결과와 시험편과 동일한 시스템 물성이 반영된 SWMM 전산해석을 상호비교하고, 통계적 유의성 분석을 수행하였다. 이는 Figure 1과 같은 실험과정을 통해 진행되었다.

여기서, 3 반복된 인공강우 재현·유출모니터링과 시스템의 우수유출 지연효과에 대한 전산모의는 동일하게 10분 단위로 총 120분의 시간분포 누가곡선을 적용하였다. 전산모의 소유역은 실험구의 유출베드와 동일한 1m²로 설정하였으며, 모의시간도 강우재현·유출시간과 동일한 120분을 반영하였다.

2. 실험환경 설정

1) 강우·유출 모의장치의 환경설정

강우·유출 모의장치는 관련 선행연구를 통해 개방형 시스템(Jang *et al.*, 2014; Lora *et al.*, 2016)과 부분 폐쇄형 시스템(Erdal *et al.*, 2018)으로 구분할 수 있다. 본 연구는 선행연구(Kim *et al.*, 2019)에서 재현성능과 신뢰성이 확인된 강우·유출 모의장치를 통해 대상지의 확률강우강도 환경을 모사하였다.

실험구, 대조구, 강우사상모의장치(rainfall simulator), 급수조로 구성된 강우·유출 모의장치는 유출베드(1m×1m)별 0~180mm/hr의 강우강도를 재현할 수 있도록 총 9개의 0.5mm 포그형 분사노즐이 시험편 상부에서 1.05m 이격된 위치에 구비되어 있다. 인공강우는 시험편을 통과하여 저면부 수평저류조의 측면에 구비된 유출구를 통해 유출되며, 인공강우량과 유출량은 전자식 유량센서(ifm electronic, SM6100)에 의해 집계된다. 해당 센서는 데이터수집(DAQ)시스템으로 구성된 강우사상모의장치와 연동되며, LabVIEW기반의 “강우재현프로그램

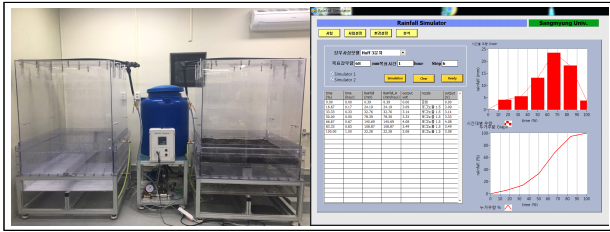


Figure 2. Rainfall simulator and LabView diagram panel of rainfall simulator program

램”에 천안시의 20년 빈도 60분 기준 확률강우강도에 Huff, 3분위를 적용한 우량주상도가 입력되어 인공강우가 재현된다 (Figure 2 참조).

2) 시험편 제작

LID 시스템의 유출지연효과 규명을 위한 선행연구의 시험편은 포장재 및 투수블록(Song and Im, 2007; Kim *et al.*, 2015), 스펀지(Jang *et al.*, 2014), 다층형 토양(Erdal *et al.*, 2018) 등이 사용되었다. 본 연구는 중소기업청 지원으로 개발된 500mm×500mm×200mm 규격의 식생유닛형 LID 시스템(Korea Institute of Green Infrastructure Co., Ltd., 2018)을 시험편으로 적용하였다. 해당 시스템은 500mm×500mm×3mm의 격막으로 토양부와 저류부를 구분하는 구조이다. 격막을 중심으로 상부는 토심(soil thickness) 90mm와 일시저류를 위한 담심(berm height) 10mm를 유지하고, 하부는 토양침투 후 우수 저류를 위한 배수판 깊이(drainage mat thickness) 100mm로 구축되었다. 토양층은 담압에도 일정한 투수율을 확보할 수 있는 LID 시스템 전용 토양이 적용되었으며, 식생모델은 저관리형 녹화시스템에 사용되는 세덤류가 식재되었다. 강우·유출 모의장치 실험구에는 다음 도면(Figure 3 참조)과 같이 총 4개의 시험편을 구비하였다.

3. 분석모형 및 해석방법

1) SWMM LID 시스템 모형

US EPA SWMM(Storm Water Management Model) 기반

의 LID 시스템 모델링은 다양한 선행연구(Shin *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014; Kim and Joo, 2017)에 활용되고 있으며, 유출모의 예측에 대한 적합성이 검증되고 있다. SWMM은 2014년 3월 5.1 개정 후 2018년 5월 build 5.1.013 업데이트를 통해 생태저류지(bio-retention cell), 우수정원(rain garden), 지붕녹화(green roof), 침투트렌치(infiltration trench), 투수포장(permeable pavement), 우수저류조(rain barrel), 식생수로(vegetative swale)에 옥상분기시설(rooftop disconnection)이 추가된 총 8가지 LID controls 모형을 제공하고 있다(EPA, 2015).

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (\text{식 1})$$

i : Rate of rainfall + snowmelt (m/s)

e : Surface evaporation rate (m/s)

f : Infiltration rate (m/s)

q : Runoff rate (m/s)

SWMM LID controls의 LID 모델은 표면(surface), 포장(pavement), 토양(soil), 저류(storage), 배수(drain)층의 조합을 통해 표면유출, 저류, 침투, 여과, 증발산에 의한 수순환 모의를 제공한다. 시스템의 유입조건은 강우와 강설이 고려되며, 손실조건은 유출, 증발, 침투가 적용된다. 여기서, 소유역의 유출 q 는 유입되는 강우와 강설에 의한 최대저류깊이 d 와 표면 유출량이 제외된 요지저류량 d_s 의 차로 표현할 수 있다(Figure 4 참조). 요지저류량은 표면저류와 평지붕, 식재 및 습윤한 표면에 집적되는 초기강수로 산정된다.

2) 토양 분석모형

식생유닛형 LID 시스템의 전용토양은 연속 강우사상에도 일정한 투수율을 유지할 수 있는 물리적 특성이 제공된다. 이에 대한 사전성능예측을 위해 물리적 모델링이 요구되는데, SWMM은 USDA Saxton method를 채택하고 있으며, 이는 지

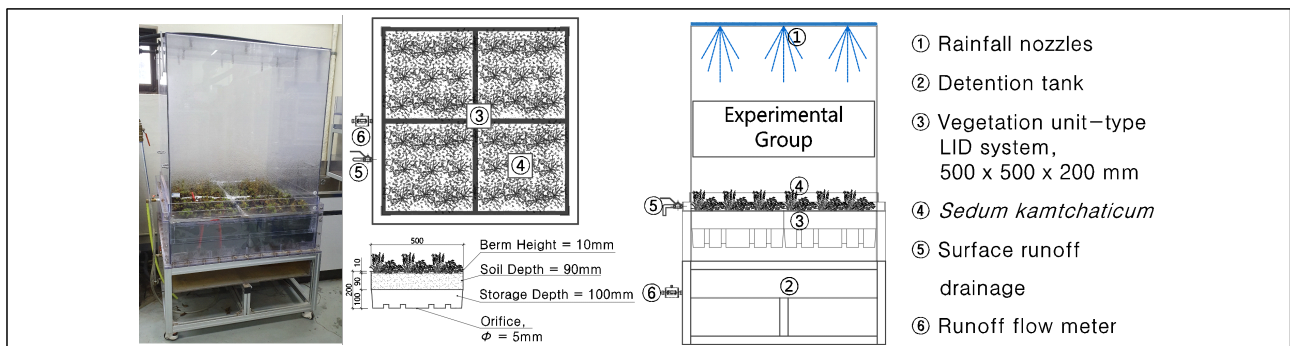


Figure 3. Test piece of vegetation unit - type LID system in experimental group

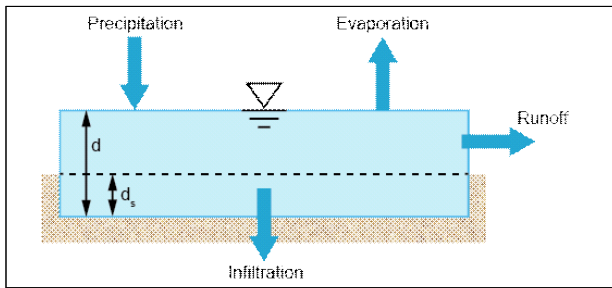


Figure 4. Nonlinear reservoir model of a subcatchment(EPA, 2015)

붕복화형 LID 시스템에 적용한 연구(Kim and Lee, 2016)에서 보고되고 있다. Saxton method는 미국 농무성 자연자원 보호청(USDA-NRCS)의 토성 데이터를 기반으로 포장용수량, 생장위해위조점, 포화수리전도도 등의 데이터셋을 제공하는 토양 모형이다. 해당 모형은 삼상, 유기물(OM: organic matter)지수, 토성 등의 기초 토양물성을 반영하여, 토양의 수문학적 물성을 결정하는 모듈을 제공한다. 여기서, 생장위해 위조점(wilting point) 1,500kPa, 포장용수량(field capacity) 33kPa에 해당하는 장력조건을 설정하고, 초기위조점을 다음과 같이 sand, clay와 OM 지수비의 관계식으로 정리하고 있다(Saxton and Rawls, 2006).

$$WP = WP_t + 0.14 WP_t - 0.02$$

$$WP_t = -0.024S + 0.487C + 0.006OM \\ + 0.005(S \times OM) - 0.013(C \times OM) \\ + 0.068(S \times C) + 0.013$$

$$FC = FC_t + [1.283(FC_t)^2 - 0.374(FC_t) - 0.015] \quad (\text{식 } 2)$$

WP : Wilting point (1,500kPa), %v

WP_t : First wilting point, %v

FC : Field capacity moisture(33kPa), %v

FC_t : Field capacity moisture, %v

K_s : Conductivity, mm/h

$$FC_t = -0.251S + 0.195C + 0.011OM \\ + 0.006(S \times OM) - 0.027(C \times OM) \\ + 0.452(S \times C) + 0.299$$

$$K_s = 1930(S_0 - FC) \quad (\text{식 } 3)$$

S_0 : Saturation(0kPa), %v

S : Weight fraction of sand

C : Weight fraction of clay

OM : Percent organic matter.

본 연구에서는 식생유니트형 LID 시스템의 전용토양을 현장 채취하여 시편을 확보하고, 시편의 삼상은 실체적 분석기(Daiki, digital actual volumeter), OM 지수는 Walkley Black법,

토성은 pipet법으로 분석하여 모형에 적용하였다.

3) 식생 분석모형

식생유니트형 LID 시스템의 식생모형은 국내 기후환경에서 생육이 적합한 기린초(*Sedum kamtschaticum*)로 선정하였다. SWMM에는 물리적 식생지표로 식생체적분율(vegetation volume fraction), 표면조도(surface roughness)가 반영되는데, 이중 식생체적분율은 식생과 토양의 상대적 비율로 해석할 수 있다. 초광각 카메라 렌즈를 통한 디지털 전천사진(DHP: digital hemispherical photography)은 식생의 간극비를 측정에 활용하여, 다양한 식생지표 산정에 적용할 수 있다(Jonckheere *et al.*, 2004; Weiss *et al.*, 2004). 이미지 분류 프로세스를 일반 광학장비로 촬영한 DHP로 간소화하여, 보다 용이하게 해석결과를 제공하는 프로그램들이 소개되고 있다. CAN-EYE v. 6.1은 프랑스 국립 농업연구소(INRA) 산하 EMMAH(Mediterranean Environment and Agro Hydro System Modelisation)에서 개발된 교육용 소프트웨어이다. CAN-EYE는 식생캐노피를 대상으로 일반 또는 어안렌즈가 적용된 일반 광학장비에 의해 촬영된 트루컬러 이미지를 기반으로 식생지표 해석을 제공한다. 또한, 동시에 다중 이미지를 처리하여, 개별 RGB 이미지와 이진변환으로 표현한다. 제공되는 물리적 식생지표 중 FCOVER는 피복비율(cover fraction)로 천저향에서 식생으로 피복된 토양의 면적비율을 의미하며, 다음과 같이 식생피복비율(FVC: fractional vegetation cover)로 정리하고 있다(Park, 2019).

$$f \text{ Cover} = 1 - P_0(0)$$

$$FVC = 1 - f \text{ Cover} \quad (\text{식 } 4)$$

본 연구는 단위면적당 식생의 물리적 활착정도를 정량화하는 FVC를 적용하였으며, 기린초가 식재된 4개 유니트를 어안렌즈(Samyang Optics 1:3.5 8mm UMC FISHEYE CS II, F3.5~22, Ø81.6mm, 180°)로 DHP를 5회 반복 촬영하여 CANEYE v6.1의 이미지 분류 프로세스를 통해 해석하였다.

4) 통계적 유의성 분석

상기 SWMM LID controls 모델에 적용되는 토양 및 식생 분석모형과 동일한 물성을 반영한 시험편에 대한 강우·유출 모니터링 간의 통계적 유의성을 분석하였다. 통계학적 지표로는 선행연구(Hoghooghi N. *et al.*, 2018; Jung *et al.*, 2018)에서 모델 보정을 위해 주로 사용된 관측과 모의 간 비율(O/S, observed/simulated), 유출량의 편차(Dv, deviation of runoff volumes), Nash-Sutcliffe 효율계수(NSE, Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency), 평균오차의 제곱근(RMSE, root mean square error)을 적용하였다. 본 연구에서 O/S는 모니터링과 전산모의

평균값 간의 비율, D_v 는 모니터링과 전산모의 값 간의 상대적 편차, NSE 는 모니터링과 전산모의 값 간의 적합도를 나타내며, $RMSE$ 는 모델의 정밀도 지표로 모의결과의 평균오차를 의미한다.

$$O/S = \frac{\overline{O_i}}{\overline{S_i}} \quad NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \overline{O_i})^2}$$

$$D_v(\%) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i \right|}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (\text{식 5})$$

O_i : The i th measured variable

n : The total number of observations

S_i : The i th predicted variable

$\overline{O_i}$: The arithmetic average of the measured variable

$\overline{S_i}$: The arithmetic average of the predicted variable

III. 연구결과

1. 시험편 분석

1) 전용토양 분석

전용토양의 실제적 분석은 식생유니트형 LID 시스템의 4개 시험편에서 5회 반복 채취하여 진행되었으며, Figure 5와 같이 정리하였다. 토양삼상은 고상 $23.50 \pm 3.25\%$, 액상 $30.66 \pm 6.36\%$, 기상 $45.84 \pm 9.27\%$ 로 집계되었으며, 기타 토양물성은 입자밀도 $1.94 \pm 0.33 \text{g/cm}^3$, 용적밀도 $0.76 \pm 0.12 \text{g/cm}^3$, 공극률 $59.74 \pm 8.67\%$ 로 확인되었다.

전용토양의 토성분석은 Pipet법에 의해 진행되었으며, 함량비는 sand 87.96%, clay 4.36%로 Loamy sand에 해당하였다. 유기물 함량분석은 Walkley Black법에 의해 진행되었으며, OM 23.59%로 집계되었다. 전용토양의 토성 및 OM 지수를

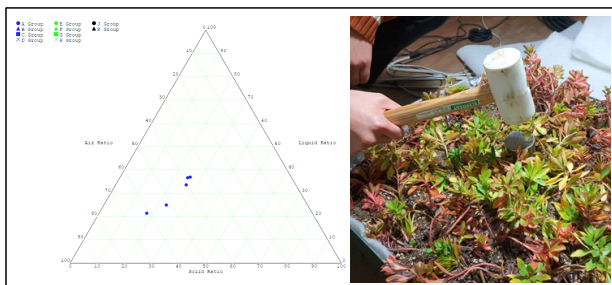


Figure 5. Degree of soil three phases and soil sampling

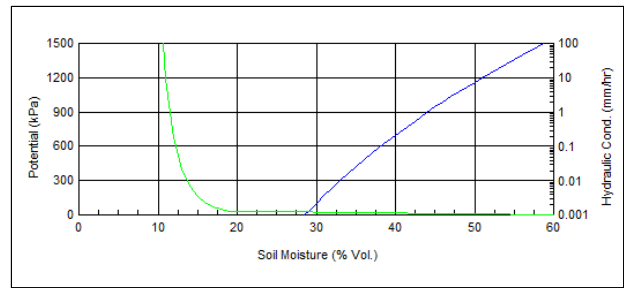


Figure 6. Relation properties between soil moisture and potential

Legend: — Matric potential — Matric+osmotic — Hydraulic cond

Table 1. Calculation soil characteristics through Saxton Method (Small and Medium Business Administration, 2018)

Properties	Result
Texture class	Loamy sand
Wilting point	10.5%
Field capacity	20.2%
Saturation	61.6%
Available water	0.10cm/cm
Sat. hydraulic conductivity	153.53mm/hr
Matric bulk density	1.03g/cm ³
Organic matter	21.59(8.0)%
Moisture calculator	10.5%
Matric potential	1,500kPa
Matric+osmotic	1,500kPa

Saxton method에 적용하고, 포장용수량, 생장위해위조점, 포화 수리전도도 등을 산출(Figure 6 참조)하여, Table 1과 같이 수문학적 물성으로 정리하였다.

2) 식생피복비율 분석

시험편의 식생피복비율은 기린초(*Sedum kamtschaticum*)가 식재된 유니트 4개를 상호체결한 후 5회 반복 촬영된 DHP를 기반으로 진행하였다. 천저향으로 촬영된 DHP를 CAN-EYE v.6.1의 이미지 분류프로세스에 의해 FVC를 분석하였다(Table 2 참조). 시험편의 FVC는 최대 36.21%, 최소 26.58%로 집계

Table 2. Fractional vegetation cover estimation of *sedum kamtschaticum*

<i>Sedum kamtschaticum</i> (%)	
Min	26.58
Max	36.21
Avg	31.55
sd	4.07

되었으며, 평균 31.55%($n=5$, $sd=4.07$)를 기록하였다.

2. 강우·유출 모니터링

1) 인공강우 재현 모니터링

인공강우 재현을 위한 우량주상도는 선행연구(Kim *et al.*, 2019)와 동일하게 충청남도 천안시의 60분 기준 20년 빈도 확률강우강도인 68mm/hr를 Huff 3분위에 적용하여, 10분 단위로 산출하였다. LID 시스템의 우수유출저감 효과를 분석하기 위해 시험편 적용 유·무에 따라 실험구와 대조구로 구분하여 인공강우 재현과 유출을 모니터링하였다. 실험구는 4개의 식생유니트형 LID 시스템 시험편을 인공강우기 내에 거치하여 구성하였으며, 대조구는 시험편을 배제하여 불투수층으로 모사하였다. 실험구와 대조구별로 3회 반복해 총 6회의 인공강우를 재현하였고, 우량주상도를 기준으로 Figure 7과 같이 통계적 유의성을 분석하였다.

인공강우재현 모니터링 40분 경과 후 실험구와 대조구 모두 최대강우강도인 142.91mm/hr($n=3$, $sd=0.34$), 142.24mm/hr($n=3$, $sd=0.90$)로 집계되었다. 10분, 50분 구간은 우량주상도

대비 낮은 강우강도가 재현되었으며, 20분, 30분, 40분 구간은 우량주상도 대비 높은 강우강도가 확인되었다. 강우강도의 편차가 가장 큰 구간은 실험구 20분($n=3$, $sd=4.77$)이었으며, 가장 적은 구간은 실험구 40분($n=3$, $sd=0.34$)으로 분석되었다. 반면, 우량주상도와 편차가 가장 큰 구간은 대조구 30분(5.01mm/hr)이었고, 가장 적은 구간은 실험구 60분(-0.18mm/hr)으로 집계되었다.

2) 우수유출 지연효과 모니터링

인공강우의 유출모니터링은 실험구와 대조구로 구분되어 진행하였으며, 선행연구(Kim *et al.*, 2019) 결과를 참조하여 Figure 8과 같이 정리하였다. 최대 인공강우 유출강도의 경우, 실험구는 70분 경과 후, 0.77mm/min($n=3$, $sd=0.12$)으로 기록되었으며, 대조구는 50분 경과 후, 2.26mm/min($n=3$, $sd=0.20$)으로 집계되었다. 여기서, 실험구는 대조구에 비해 최대 인공강우 유출강도 발생시점이 20분 지연된 것으로 확인되었다. 실험구의 유출강도 저감량은 대조구의 최대유출강도가 발생된 50분 경과시점에 0.46mm/min을 기록하여, 식생유니트형 LID 시스템 시험편의 적용에 따라 인공강우 유출강도가 79.8% 저감된 것

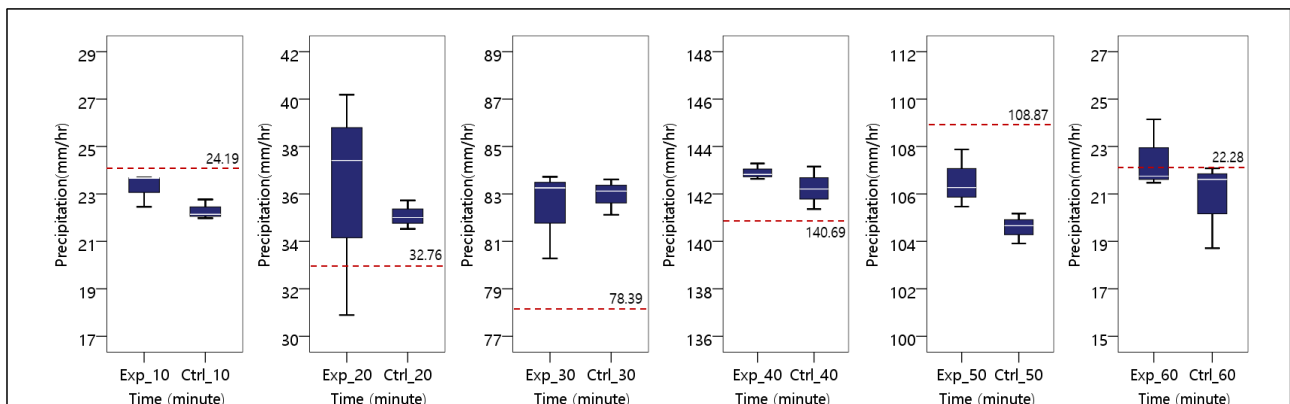


Figure 7. Comparison simulated rainfall between SWMM simulation and rainfall simulator

Legend: ■ Simulated precipitation

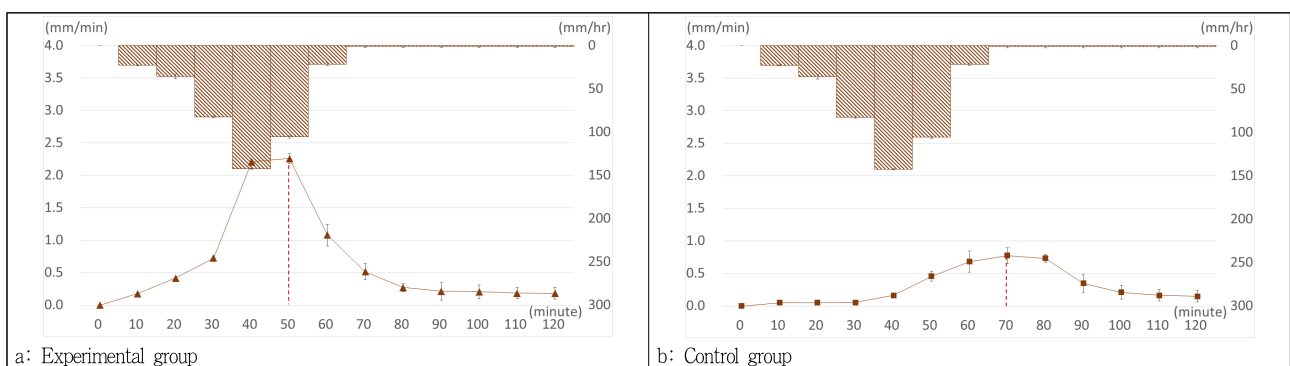


Figure 8. Reduction effect analysis of peak runoff between experimental and control group in artificial stormwater simulator

Legend: ▨ Precipitation ■ Experimental ▲ Control

으로 분석되었다.

3. 강우 · 유출 전산모의

1) SWMM LID Controls 모델링

식생유니트형 LID 시스템의 SWMM LID controls 모델링은 시험편을 기반으로 전용도양 및 식생피복비를 분석을 통해 도출된 정량지표가 반영되었다. 해당 정량지표는 LID controls 모듈 중 지붕녹화(green roof)모형의 시스템 요소인 표면(surface), 토양(soil), 배수판(drainage mat)으로 구분되어, Table 3과 같이 적용되었다.

2) 우수유출 지연효과 전산모의

식생유니트형 LID 시스템의 SWMM LID controls 모형에 대한 전산 모의결과는 Figure 9와 같이 정리하였다. 최대 강우

Table 3. Process layer of SWMM LID controls model

Process layer	Properties	Value
Surface	Berm height(mm)	10
	Vegetation volume fraction	0.316
	Surface roughness	0.2
	Surface slope(percent)	0
Soil	Thickness(mm)	90
	Porosity(volume fraction)	0.5974
	Field capacity(volume fraction)	0.202
	Wilting point(volume fraction)	0.105
	Conductivity(mm/hr)	153.53
	Conductivity slope(%)	10
	Suction head(mm)	61.3
Drainage mat	Thickness(mm)	100
	Void fraction	0.5
	Roughness	0.2

유출강도의 경우, 실험구는 70분 경과 후, 1.06mm/min으로 산출되었으며, 대조구는 50분 경과 후, 2.38mm/min으로 모의되었다. 여기서, 실험구는 모니터링 결과와 동일하게 대조구에 비해 최대 강우유출강도 발생시점이 20분 지연된 것으로 확인되었다. 실험구의 유출강도 저감량은 대조구의 최대유출강도가 발생된 50분 경과시점에 0.05mm/min을 기록하여, 식생유니트형 LID 시스템 모형의 적용에 따라 강우유출강도가 99.1% 저감된 것으로 모의되었다.

4. 통계적 유의성 분석

식생유니트형 LID 시스템의 우수유출 지연효과에 대한 인공강우 모니터링과 SWMM 전산모의 결과를 실험구와 대조구로 구분하여 Figure 10과 같이 정리하였다. 모니터링과 전산모의 간의 유의한 유출경향이 확인되었으며, 통계적 유의성 분석을 Table 4와 같이 도출하였다. 최대 강우유출강도의 경우, 실험구($D_v=30.35$, $NSE=0.36$)는 인공강우 모니터링과 SWMM 전산모의가 동일하게 실험 70분 경과시점에 각각 0.77mm/min, 1.06mm/min을 기록하였다. 대조구($D_v=17.27$, $NSE=0.78$)도 인공강우 모니터링과 SWMM 전산모의가 동일하게 실험 50분 경과시점에 각각 2.26mm/min, 2.38mm/min의 최대 강우유출강도가 집계되었다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구는 식생기반 LID 시스템의 생태적 구성요소 설계에 요구되는 모형 및 분석방법을 도출하고, 강우 · 유출 모의장치를 연계한 전산모의로 사전설계 방안을 제시하고자 하였다. 도심 내수피해는 주로 집중호우로 인한 침투유출량 증가를 원인으로 제한된 배수관망부하가 초과되어 발생된다. 따라서, 최대 우수유출강도를 저감하고, 발생시점을 지연하는 것은 수해방재

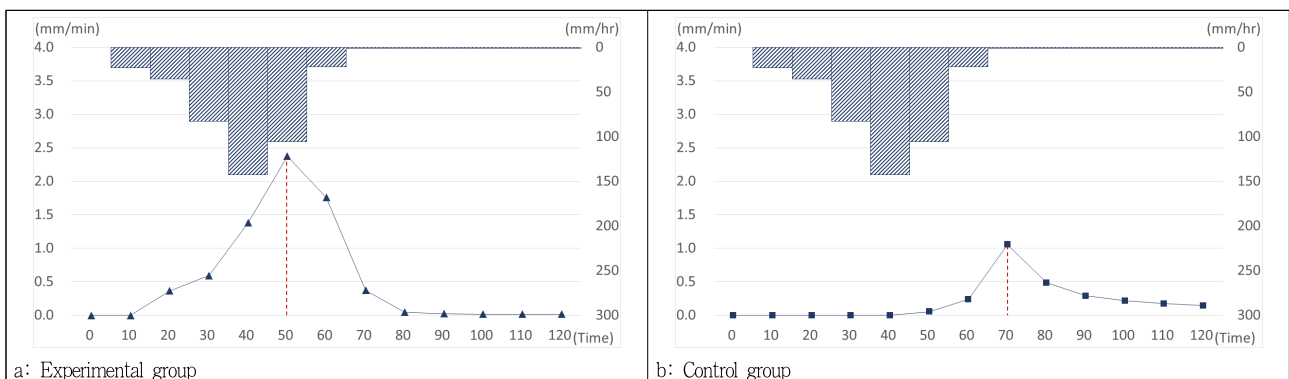


Figure 9. Reduction effect analysis of peak runoff between experimental and control group in SWMM simulation

Legend: ▨ Precipitation ■ Experimental group ▲ Control group

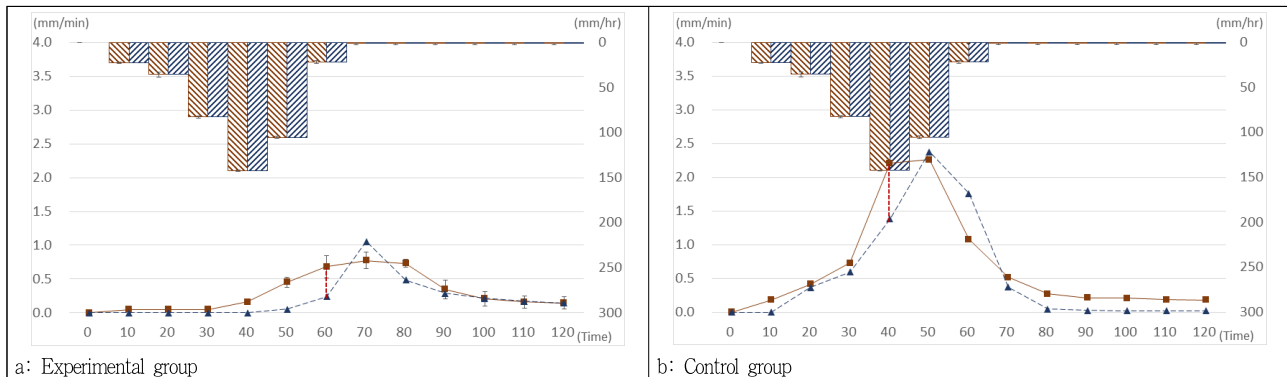


Figure 10. Comparison between observed and simulated runoff results

Legend: ■ Precipitation of rainfall simulator ■ Precipitation of SWMM ■ Runoff of rainfall simulator ▲ Runoff of SWMM

Table 4. Comparison between observed and simulated runoff results

	Runoff in vegetation unit-type LID system	
	Experimental group	Control group
Observed avg. (ℓ/hr)	0.32	0.70
Simulated avg. (ℓ/hr)	0.22	0.58
O/S	1.44	1.21
Dv	30.35	17.27
NSE	0.36	0.78
RMSE	0.21	0.34

전략의 중요 요소로 해석할 수 있다. 체계적인 수해방재에 식생기반 LID 시스템을 활용하려면 성능 정량화가 요구되는데, 식물, 토양 등의 생태적 구성요소는 장치형에 비해 성능 표준화를 제한하는 요인으로 작용된다.

이러한 식생기반 LID 시스템의 성능 정량화에 대한 선행연구는 주로 현장 모니터링과 SWMM 전산모의를 연동한 일반화 모형을 제시하고 있다. 현장에 시공된 7개 유형의 LID 설비를 기준으로 모니터링과 장기 전산모의와 연계한 연구(Kim and Joo, 2017)는 식물재배화분을 최고 우수유출저감 기술로 선정하였다. 기술별 평가를 위해 SWMM LID controls 모듈의 구성요소 중 수문학적 지표에 집중한 반면, 식생 및 토성에 따른 생태적 매개변수 제시는 제한적이었다. 식생기반 LID 시스템은 식물의 생육조건 확보가 중요한 지표이며, 이를 위해 실시설계에 반영할 수 있는 식생, 토양에 대한 객관적 준거가 요구된다. 이와 관련하여 지붕녹화 LID 설비의 우수유출 저감성능 모의에 미 농무부(USDA)의 토양모형을 적용한 연구(Kim and Lee, 2016)는 토양물성에 대한 분석 방안을 구체적으로 제시한 바 있다. 본 연구는 기존 선행연구에서 논의된 식생기반 LID 시스템의 토양, 식생 모델과 분석 방안을 종합하여, SWMM 모델링에 반영하는 프로세스를 제시할 수 있었다.

선행연구에서 주로 모니터링이 진행되었던 현장에 시공된 식생기반 LID 시스템의 경우, 대상지의 강우사상, 환경조건 등

이 상이하여, 분석결과를 표준설계에 반영하는 데에 제한적인 경향이 확인되었다. 이를 보완하기 위해 강우사상을 통제하여 균질한 LID 시스템 성능 평가환경을 조성할 수 있는 강우·유출 모의장치를 활용한 연구가 진행되고 있다. LID 시스템의 내수 피해 저감성능을 정량화하는 연구(Jang *et al.*, 2014)는 개발된 모의장치에 LID 시스템을 스펀지로 단순화하여, 수문학적 성능을 중심으로 평가하였다. 강우량 회귀곡선을 기반으로 강우량 보정을 통해 인공강우기 성능평가 환경을 조성한 연구(Erdal *et al.*, 2018)는 다층 토양의 배수과정을 규명한 바 있다. 해당 연구는 강우량과 유출량의 유의성을 분석하여, 인공강우기 개발을 중점적으로 논의하면서, 토양기반제에 따른 유출거동을 제한적으로 분석하고 있다. 반면, 본 연구는 개방형 시스템(Jang *et al.*, 2014; Lora *et al.*, 2016)과 부분 폐쇄형 시스템(Erdal *et al.*, 2018)의 강우재현환경을 검토하여, 재현성능과 신뢰성이 확인된 강우·유출 모의장치(Kim *et al.*, 2019)를 사용함으로써 보다 객관적인 강우사상 환경을 조성할 수 있었다. 여기에 Huff 3분위가 적용된 우량주상도를 모의장치에 입력하여, 식생유니트형 LID 시스템 모니터링에 표준화된 확률강우강도의 재현이 가능하였다.

또한, 현장시공사례를 중심으로 LID 시스템에 대한 통계적 유의성 분석연구가 보고되고 있다. 대규모 지붕녹화설비를 대상으로 12개월 장기 모니터링과 SWMM 전산모의 간의 유의성 연구(Cipolla *et al.*, 2016)는 불투수면(NSE=0.41~0.87)과 지붕녹화(NSE=0.44~0.93)가 모두 유의한 NSE 분석결과를 제시하였다. 반면, LID 시설물의 시공 전·후 유출 모니터링과 기상자료가 반영된 장기 유출 전산모의 간의 유의성 연구(Jung *et al.*, 2018)는 옥상녹화(Dv=6.15, NSE=0.75)가 투수성 블록(Dv=39.06, NSE=0.15)에 비해 상대적으로 높은 모형 신뢰도를 확보한 것으로 보고하고 있다. 다만, 이와 같은 선행연구는 광역단위의 현장모니터링을 기반으로 수문학적 매개변수 또는 경험적 물성 위주로 LID 시스템을 모델링하고 있어, 표준화된 시스템설계 반영은 제한적인 것으로 판단된다. 반면, 본 연구는

기존연구와 유의한 수준으로 분석결과가 도출되었으나, LID 시스템이 적용된 실험구($D_v=30.35$, $NSE=0.36$)가 대조구($D_v=17.27$, $NSE=0.78$)에 비해 낮은 모형 신뢰도로 집계되었다. 실험구와 대조구의 최대유출강도 경향에서 유의미한 특이점이 확인되는데, 최대유출강도 발생 직전시점에서 전산모의 결과에 비해 인공강우 모니터링이 높은 유출강도를 기록하였다. 이 시점의 전산모의 실험구는 인공강우 모니터링 대비 65% 부족한 0.44mm/min을 기록하였는데, 실제 유출가동이 10분 단위의 우량주상도와 연계된 전산모의 모형에 제한적으로 반영된 것으로 해석되었다. 대조구도 27% 부족한 1.38mm/min의 상대적으로 낮은 오차율을 기록하여, 실험구에 적용된 LID controls 모듈의 신뢰도가 제고되어야 할 것으로 판단된다.

이상의 논의를 통해 현장모니터링 중심의 LID 사전설계에 관한 선행연구를 보완하는 측면에서 강우·유출 모니터링과 SWMM 전산모의 간의 통계적 유의성을 분석하고, 식생기반 LID 시스템의 성능평가를 위한 기초 연구수행이 가능하였다. 선행연구에서 주로 진행된 광역단위의 LID 설비 분석은 치수 안정성을 위한 방제계획에는 유효하나, 사전설계를 위한 세부 물성은 제한적으로 제공되고 있었다. 특히, 식생기반 LID 시스템의 경우, 생태적 요소가 중요하지만, 기존 수문학 중심의 연구는 이에 대한 구체적인 해석방안 제시가 부족한 것으로 판단되었다.

본 연구는 실험실 단위의 강우·유출 모의장치를 이용하여 식생 유닛전형 LID 시험편의 우수유출 저감효과를 모니터링하고, 해당 시험편의 단위면적당 유출량을 SWMM 전산모의 결과와 통계적 유의성을 분석하였다. 여기서, 시험편 제작에 적용된 생태적 구성요소의 물성 해석에 요구되는 모형 및 분석방법을 정리하고, 사전설계에 반영할 수 있는 수치화된 지표를 제공할 수 있었다. 이를 통해 식생유닛전형 LID 시스템의 생태적 물성을 강우·유출 모의장치와 SWMM 전산모의에 반영하여, 통계적으로 상호 유의한 우수유출지연효과를 확인할 수 있었다.

다만, 단일 식생기반 LID 시스템으로 진행된 연구로 시험편의 유형과 물리적 변수가 제한되었고, 모니터링, 전산모의 결과 간의 유의성 보정이 반영되지 않은 점은 최대 유출량 발생시점이 반영된 유출 알고리즘 보정 연구 등으로 보완되어야 할 것이다. 마지막으로 해당 연구결과가 기후변화로 인한 수해피해에 지속적으로 노출되는 현대도시에 보다 정량화된 방제기능을 제공할 수 있는 그린인프라 기술 정립에 활용되기를 기대한다.

References

- Cipolla, S. S., M. Maglionico and I. Stojkov(2016) A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering* 95: 876-887.
- EPA(2015) Storm Water Management Model Reference Manual, Volume I - Hydrology.
- Erdal, K., D. Ahmet and A. Hayrullah(2018) Rainfall simulator for investigating sports field drainage processes. *Measurement* 125: 360-370.
- Hoghooghi, N., H. Golden, B. Bledsoe, B. Barnhart, A. Brookes, K. Djang, J. Halama, B. Mckane, C. Nietch, and P. Pettus(2018) Cumulative effects of low impact development on watershed hydrology in a mixed land-cover system, *Water* 10(8): 991.
- Jang, Y. S., M. E. Kim, J. S. Beak and H. S. Shin(2014) The study on development and verification of rainfall-runoff simulator for LID technology verification. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(6): 513-522.
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muysa, P. Coppin, M. Weiss and F. Baret(2004) Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
- Jung, J. S., K. W. Jung, S. M. Kang and K.H. Hyun(2018) Evaluation of water cycle improvement in LH institute using SWMM-LID model. *Journal of Korean Society on Water Environment* 34(3): 308-315.
- Kim, J. H. and J. G. Joo(2017) A study on the performance comparison of the low impact development facilities for long-term stormwater reduction. *The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 7(5): 337-344.
- Kim, M. E., Y. S. Jang, C. H. Nam and H. S. Shin(2015) A study on the effectiveness verification of hydrological cycle of pervious pavement using LID simulator. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(5): 321-330.
- Kim, T. H. and J. W. Lee(2016) Computer simulation study to generate an optimal hydrologic model based on the soil properties of the large area plate roof greenery system. *KIEAE Journal*, 16(1): 73-79.
- Kim, T. H., and J. H. Choi(2017) A study on the peak runoff reduction effect of Seolleung·Jeongneung zone by applying LID(Low Impact Development) system based on the landscape architectural technology. *Journal of the Korean Institute of Traditional Landscape Architecture* 35(4): 126-133.
- Kim, T. H., J. H. Park, and B. H. Choi(2019) Analysis of rainfall runoff delay effect of vegetation unit-type LID system through rainfall simulator-based probable rainfall recreation. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 22(6): 115-124.
- Kim, T. H., S. Y. Park, E. H. Park, and S. W. Jang(2014) A study for the computer simulation on the flood prevention function of the extensive green roof in connection with RCP 8.5 scenarios. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology* 17(3): 1-11.
- Lora, M., M. Camporese, P. Salandin(2016) Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. *CATENA*, 140: 77-89.
- Ministry of Environment(2016) You can see right away. Fine dust, what is it?
- Park, J. H. (2019) An analysis on Peak Runoff Rate of LID System through Artificial Rainfall Monitoring. Sangmyung University Master's Degree Thesis.
- Saxton, K. E. and W. J. Rawls(2006) Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70(5): 1569-1578.
- Shin, D. S., J. B. Park, D. K. Kang, and D. J. Jo(2013) An analysis of runoff mitigation effect using SWMM-LID model for frequently inundated basin. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(4): 303-309.

19. Small and Medium Business Administration(2018) Development of Rainwater Runoff and Delay Technology for Restoration of Urban Ecosystem.
20. Song, J. W. and J. H. Im(2007) An experimental study on runoff reducing effect of infiltration-storage system due to rainfall intensity. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 7(4): 85-95(in Korean with English summary).
21. Weiss, M., F. Baret, G. J. Smith and I. Jonckheere(2004) Methods for in situ leaf area index measurement, part II: from gap fraction to leaf area index: retrieval methods and sampling strategies. Agric. For. Meteorol 121: 17-53.

Received : 06 May, 2020

Revised : 24 June, 2020 (1st)

Accepted : 24 June, 2020

4인익명 심사필