

## 수문학적 추적 기반의 GI 시설 평가 모델: 생태저류지, 침투도랑, 투수성포장, 식생수로를 대상으로

원정은·서지유·최정현·김상단\*\*

부경대학교 지구환경시스템과학부 (환경공학전공)

\*부경대학교 환경공학과

## Hydrologically Route-based Green Infra facilities assessment Model: Focus on Bio-retention cells, Infiltration trenches, Porous Pavement System, and Vegetative Swales

Jeongeun Won·Jiyu Seo·Jeonghyeon Choi·Sangdan Kim\*\*

*Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University*

*\*Department of Environmental Engineering, Pukyong National University*

(Received : 04 February 2021, Revised : 23 February 2021, Accepted : 23 February 2021)

### 요약

도시 개발로 인한 영향을 최소화하여 물 순환 체계를 개선하기 위해서는 적극적인 강우유출수 관리가 필수적이다. 최근에는 도시의 강우유출수 관리를 위한 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법이 합리적인 대안으로 주목받고 있다. Storm Water Management Model(SWMM)은 LID 모듈을 통해 다양한 GI(Green Infra) 시설에 대한 모의 기능을 제공하고 있어 도시 물순환 개선 사업에 적극 활용되고 있다. 그러나 SWMM을 이용하여 GI 시설을 모의하기 위해서는 복잡한 유역 설정과 GI 시설 배치에 많은 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 GI 시설의 핵심적인 수문 프로세스를 구현하면서도 상대적으로 간단하게 GI 시설의 성능을 평가할 수 있는 모형이 제안된다. 제안된 모형은 수문학적 추적을 기반으로 작동되므로 GI 시설의 침투, 저류, 증발산을 모두 반영할 수 있을 뿐만 아니라 GI 시설에 의한 도시 물순환 개선 효과를 정량적으로 평가할 수 있다. 제안된 모형의 결과와 SWMM의 결과를 비교함으로써 제안된 모형의 적용성을 검증하였다. 더불어서 SWMM의 투수성 포장 모의에서 발생하는 오류에 대한 논의가 포함된다.

핵심용어 : GI시설, 물순환, 강우유출수, SWMM

### Abstract

Active stormwater management is essential to minimize the impact of urban development and improve the hydrological cycle system. In recent years, the Low Impact Development (LID) technique for urban stormwater management is attracting attention as a reasonable alternative. The Storm Water Management Model (SWMM) is actively used in urban hydrological cycle improvement projects as it provides simulation functions for various GI (Green Infra) facilities through its LID module. However, in order to simulate GI facilities using SWMM, there are many difficulties in setting up complex watersheds and deploying GI facilities. In this study, a model that can evaluate the performance of GI facilities is proposed while implementing the core hydrological process of GI facilities. Since the proposed model operates based on hydrological routing, it can not only reflect the infiltration, storage, and evapotranspiration of GI facilities, but also quantitatively evaluate the effect of improving urban hydrological cycle by GI facilities. The applicability of the proposed model was verified by comparing the results of the proposed model with the results of SWMM. In addition, a discussion of errors occurring in the SWMM's permeable pavement system simulation is included.

Key words : Green infra facility, Hydrological cycle, Stormwater, SWMM

\*To whom correspondence should be addressed.

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail: skim@pknu.ac.kr

- **Jeongeun Won** Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University / Ph.D. Student (wjddms8960@naver.com)
- **Jiyu Seo** Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University / Master Course Student (gu426@naver.com)
- **Jeonghyeon Choi** Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University / Ph.D. Student (jeonghyeon202@naver.com)
- **Sangdan Kim** Department of Environmental Engineering, Pukyong National University / Professor (skim@pknu.ac.kr)

# 1. 서 론

도시화는 지형, 토양 유형 및 식생 피복에 변화를 일으켜 물순환 체계를 변화시킨다(Sarma et al., 2016). 특히 도시화로 인한 투수 면적의 손실은 강우의 토양으로의 침투를 어렵게 하며 표면 유출수를 증가시켜 홍수의 위험을 높이게 된다(Miller et al., 2014; Wałęga et al., 2019). 이에 더불어 기후변화로 인한 강우의 변화는 도시 지역에서의 잦은 침수를 초래하게 된다. 도시 침수를 효과적으로 제어하기 위해서는 적극적으로 도시의 강우유출수를 관리하는 것이 매우 중요하다(Luan et al., 2017). 전 세계적으로 강우유출수 관리를 위한 다양한 조치가 시행됐으며, 도시의 물순환 왜곡 문제를 해결하기 위한 합리적인 전략으로 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법이 주로 채택되고 있다(Jia et al., 2013; Sun et al., 2014; Xu and Zhao, 2016; Wang et al., 2020). GI(Green Infra) 시설은 불투수 지역의 강우유출수를 차집하기 위해 설계되는 지표면 관리 방법으로, 유역의 침투, 저류, 증발과 같은 자연적인 수문 기능을 모방함으로써 도시화에 따른 물순환 문제를 해결할 수 있다(Wang et al., 2017).

GI 시설의 효율적인 설치를 위해서는 각 시설의 성능을 올바르게 평가하는 것이 중요하다. 정확한 시설의 평가를 위해서는 실제 관측이 필요하나 현업에서는 어려움이 존재한다. 이에 따라 현재 우리나라에서는 수질오염총량관리기술지침(NIER, 2014)에서 제시하는 성능평가 공식을 이용하고 있다. 그러나 기술지침에서 제공하는 공식은 GI 시설의 강우유출수 차집 능력을 제대로 반영하지 못하기 때문에(Choi et al., 2014; Choe et al., 2016), GI 시설의 모델링을 통해 시설의 성능을 정확하게 평가하려는 연구들이 진행되어 왔다. Jeon et al. (2009)은 GI 시설의 성능 평가를 위해 시설 적용에 따른 유출량의 저감 효과와 그 적용성을 평가하는 모델인 LIDMOD를 개발하였으며, 이어진 연구에서는 GI 시설에 의한 비점오염 삭감량을 계산할 수 있는 엑셀프로그램 기반의 LID 평가 모델인 LIDMOD2이 개발되었다(Jeon et al., 2010). Shin et al. (2016)은 GI 및 LID 기술에 대한 물순환 효율성 측정을 위해 검증 및 인증 시스템을 개발하였으며, Baek et al. (2020)은 생태저류지를 모의하고 최적화하기 위한 모델링 소프트웨어를 개발한 바 있다.

현재 GI 시설 모델링에 대표적으로 사용되고 있는 US EPA(United States Environmental Protection Agency)에서 제공하는 SWMM은 GI 시설을 모의할 수 있는 오픈 소스 소프트웨어로, LID에 관련된 많은 연구 성과들이 도출되고 있다(Elliott and Trowsdale, 2007; Park et al., 2008; Burszta-Adamiak and Mrowiec, 2013; Xie et al., 2017; Kim et al., 2019). 그러나 SWMM을 이용하여 GI 시설을 모의하고 평가하기 위해서는 사용자가 직접 유역을 설정하고 GI 시설을 배치하는 절차를 수행해야 한다. 또한 GI 시설의 모의를 위해서는 GI 시설을 설명하는 수많은 매개변수를 결정하고 입력해야 한다. 실제로 SWMM의 입력 매개변수는 GI 시설을 모의하는데 중요하게 작용되고 있기 때문에 중요한 매개변수들을 식별하고 보정하기 위한 수많은 연구들이 진행되고 있는 추세이다

(Krebs et al., 2013; Baek et al., 2015; Rosa et al., 2015; Choi et al., 2020; Panos et al., 2020). 이에 덧붙여서 GI 시설 모의와는 무관한 관망 자료를 입력하는 절차도 사용자가 SWMM을 이용한 GI 시설에 대한 평가를 어렵게 하는 원인으로 작용하고 있다. 따라서 GI 시설의 핵심적인 수문 프로세스를 구현하면서도 상대적으로 간단한 매개변수 입력을 통하여 GI 시설의 효과를 살펴볼 수 있는 간단한 모형의 개발이 실무적으로 필요하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 간단한 매개변수 입력만으로도 GI 시설을 모의할 수 있는 모형을 개발하고, Graphic User Interface(GUI) 구축을 통한 소프트웨어를 개발하여 활용성을 높이고자 하였다. 즉, 기존의 복잡한 GI 시설 모델링 과정을 대체할 수 있는 모형을 제안하여, 단순한 입력 및 구동만을 통해 간편하게 GI 시설을 평가하는 환경을 제공하고자 한다. 제안된 모형에 포함된 GI 시설은 생태저류지, 침투도랑, 투수성 포장, 식생수로 등 4개 종류의 시설이다.

# 2. 연구방법

## 2.1 연구절차

본 연구는 GI 시설 중에서 가장 일반적으로 사용되는 생태저류지(Bio-retention cell, BR), 침투도랑(Infiltration trench, IT), 투수성포장(Porous pavement system, PP), 식생수로(Vegetative swale, VS) 시설을 대상으로 하였다. GI 시설 평가모형을 개발하기 위해서는 각 시설마다 모의를 위한 매개변수가 필요하다. 매개변수를 이용하여 LID 평가모형이 개발되며, 다양한 검증 시나리오를 적용하여 검증된다. 개발된 모형은 GUI 구축을 통해 소프트웨어의 형태로 개발된다. 본 연구에서 수행된 절차를 요약하면 Fig. 1과 같다.

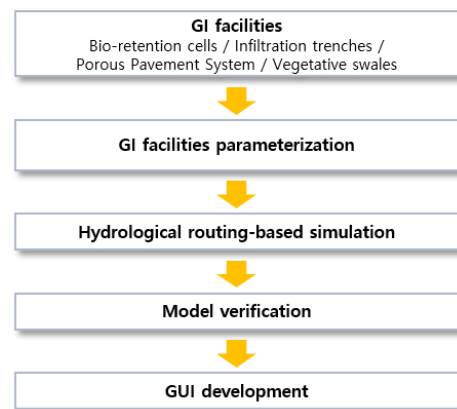


Fig. 1. Software development procedure.

## 2.2 GI 시설 평가모형 개발

강우 발생 시의 수문 프로세스는 불투수 지역과 투수 지역으로 구분되어 작동된다. 불투수 지역에 내린 강우는 불투수층의 지면저류고에 의해 저류된 후 나머지는 잠재증발산량을 고려

하여 가능한 만큼 증발하며, 지면저류고를 초과하는 양은 직접 유출된다. 투수 지역에서는 투수층의 지면저류고에 저류된 강우가 증발되거나 잉여 강우는 토양층으로 이동하게 된다. 토양층으로 이동한 물은 해당 시간에서의 토양수분을 고려하여 침투 또는 직접 유출된다. 토양층 내부로 침투된 물은 증발하거나 대수층으로 침투하게 된다.

불투수 지역에 설치되는 GI 시설을 모의하기 위해서는 시설의 유효높이를 정의하는 것이 핵심적인 사항이다. 불투수 지역에 내린 강우는 시설의 영향면적에 따라 GI 시설로 유입되는데, 이때 시설 TANK의 유효높이에 따라 차집되는 강우유출수의 양이 결정된다. 본 연구에서는 GI 시설 TANK의 유효높이를 산정하기 위해, 시설별 각 층의 유효높이를 이용하여 식을 구성하였다. 최종적으로 구성된 식은 여러 가지 식을 적용하는 시행착오를 거쳐 시설별 TANK 유효높이를 대표할 수 있는 최적의 식으로 결정하였다. 참고로 underdrain의 유무에 따라 TANK에 저장될 수 있는 물의 양이 달라지기 때문에 underdrain 설치 가능한 시설은 underdrain의 설치 유무를 고려해야 한다.

생태저류지는 표면층, 토양층, 저류층으로 구성되며, 생태저류지의 유효 TANK 높이  $nZ_r$  (mm)의 산정 공식은 아래와 같이 결정되었다.

Without underdrain:

$$nZ_r = \frac{D_{surface}}{5} + D_{soil} \times S_p + \frac{D_{storage} \times VR_{storage}}{1 + VR_{storage}} \quad (1)$$

With underdrain:

$$nZ_r = \frac{D_{soil} \times S_p}{2} + \frac{D_{storage} \times VR_{storage}}{1 + VR_{storage}} \quad (2)$$

여기서,  $D_{surface}$ 는 표면층의 높이(mm),  $D_{soil}$ 은 토양층의 높이(mm),  $D_{storage}$ 는 저류층의 높이(mm),  $S_p$ 는 토양층의 공극비(0.45)를 적용하였으며,  $VR_{storage}$ 은 저류층에서의 공극비(Void Ratio)로 0.625를 적용하였다.

침투도랑은 표면층, 저류층으로 구성되며, 유효 TANK 높이를 산정하기 위한 식은 다음과 같다.

Without underdrain:

$$nZ_r = \frac{D_{storage} \times VR_{storage}}{1 + VR_{storage}} \quad (3)$$

With underdrain:

$$nZ_r = \frac{\left( \frac{D_{storage} - D_{drain}}{4} + D_{drain} \right) \times VR_{storage}}{1 + VR_{storage}} \quad (4)$$

여기서,  $VR_{storage}$ 는 0.4이며,  $D_{drain}$ 은 underdrain offset 높이(mm)를 의미한다.

투수성 포장의 경우 표면층, 포장층, 토양층, 저류층으로 구성되며, 유효 TANK 높이( $nZ_r$ )는 다음 식과 같이 산정된다.

Without underdrain:

$$nZ_r = (D_{surface} - 1.5) + \frac{(D_{pavement} - 100) \times VR_{pavement} \times 1.5}{1 + VR_{pavement}} + (D_{soil} - 30) \times S_p \times 5 + \frac{300 \times VR_{storage} \times 0.25}{1 + VR_{storage}} \quad (5)$$

With underdrain:

$$nZ_r = (D_{surface} - 1.5) + \frac{(D_{pavement} - 100) \times VR_{pavement}}{1 + VR_{pavement}} + (D_{soil} - 30) \times S_p \times 5 + \frac{\left( 300 + \frac{D_{drain} - 300}{100} \right) \times VR \times 0.3}{1 + VR_{storage}} \quad (6)$$

여기서,  $D_{pavement}$ 는 포장층의 높이(mm),  $VR_{pavement}$ 는 포장층에서의 공극비로 0.16을 적용하였으며,  $VR_{storage}$ 는 0.63을 적용하였다.

식생수로의 유효 TANK 높이는 시설의 높이( $H_v$ ), 수평/수직비( $S_x$ ), 너비( $W_v$ ) 그리고 식생부피비( $veg_f$ )에 따라 산정되며, 다음과 같이 작성되었다.

$$nZ_r = 0.5 \times (W_v + (W_v - H_v \times S_x \times 2)) \times \frac{H_v}{W_v} \times (1 - veg_f) \times 100 \quad (7)$$

GI 시설 평가모형은 위와 같이 유도된 시설별 TANK 유효높이를 적용하여 처리대상구역 말단부에 단일한 TANK가 생성되는 것을 설정하여 수문학적으로 추적함으로써 작동된다. 따라서 제안된 모형을 이후 HRGIM(Hydrologically Routing-based GI facility assessment Model)이라 명명하였다. GI 시설 모의를 위해 필요한 시설 제원은 Choi et al. (2019)에서 제안한 GI 시설의 표준 제원으로 적용하였다.

### 2.3 HRGIM 검증 시나리오 구성

GI 시설 평가모형은 GUI 구축을 통해 소프트웨어 HRGIM으로 개발되었다. HRGIM은 다양한 시나리오를 통해 검증될 필요가 있다. 본 연구에서는 다양한 조건에서의 HRGIM의 GI 시설 모의 성능을 평가하기 위하여 지역별 강우특성, 처리대상 구역의 조건, GI 시설의 매개변수와 같은 세 가지 조건에 대해 검증 시나리오를 구성하였다. 지역별 강우특성은 우리나라 ASOS(Automated Synoptic Observing System) 주요 21개 기상관측소의 강우자료를 적용하여 다양한 강우 특성에서의 HRGIM의 GI 시설 모의 성능을 평가하고자 하였다. 또한 처리대상구역의 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 수문학적 토양그룹(A/B/C/D), 면적 및 불투수율에 대해 변화를 주었을 때의 결과를 확인하고자 하였다.

참고로 투수성 포장의 경우 NRCS 수문학적 토양그룹의 변화 없이 A 유형만을 적용하였다. 이는 SWMM에서 투수성 포장을 모의할 때 NRCS 토양그룹 중 B, C, D 유형에서의 오류 발생으로 인한 것이며, 이에 대한 내용은 3.4절에서 토의된다. 마지막으로 그린인프라 시설에 큰 영향을 주는 시설별 매개변

Table 1. Changes of LID facilities

		BR	IT	PP	VS	
Rainfall characteristic		ASOS 21 meteorological sites				
Soil type		NRCS Hydrological Soil Group A/B/C/D				
Subcatchment		Area, % of Impervious Area, Percent of Facility Area				
Para-meter	Surface	150, 300, 600	-	0.75, 1.5, 3	$H_v$	0.2, 0.4, 0.8
	Soil layer	300, 600, 800	-	15, 30, 45, 60	$S_x$	1.5, 3, 6
	Pavement	-	-	100, 200, 400	$W_v$	2.2, 4.4, 8.8
	Storage	300, 450, 600	750, 1500, 3000	300, 450, 600, 900	$veg_f$	0.04, 0.15
	Underdrain	Install status		Install status, Underdrain offset height		-

수들에 대해 변화를 주었다. 소프트웨어 검증을 위한 GI 시설별 자세한 변경 사항은 Table 1과 같다. 검증 시나리오에서 변경되는 사항 외의 시설제원은 시설별로 권장되는 표준제원으로 적용하였다(Choi et al., 2019).

### 3. 연구결과 및 토론

#### 3.1 HRGIM의 민감도 분석

HRGIM의 성능평가는 GI 시설의 제원이 변경될 경우를 고려하여야 한다. 이에 각 GI 시설 제원의 변경에 따른 민감도 분석을 수행하여 HRGIM과 SWMM의 모의 결과를 비교하였다. 결과 비교를 나타내기 위해 부산 지점을 대상으로 1981년부터 2018년까지의 장기간 유출 모의를 수행하였다.

생태저류지 검증은 시설면적과 영향면적의 비( $\phi$ ), 표면층,

토양층, 저류층 높이의 변경, 그리고 underdrain 유무에 따른 연평균 강우유출수를 비교하였다. 침투도랑의 경우 시설면적과 영향면적의 비, 저류층 높이 변경, underdrain 유무에 따른 강우유출수가 비교되었다. 투수성 포장에서는 시설면적과 영향면적의 비, 표면층, 포장층, 토양층, 저류층, underdrain offset 높이 변경, underdrain 유무에 따른 강우유출수가 비교되었다. 마지막으로 식생수로에서는 시설면적과 영향면적의 비, 시설의 높이, 수평/수직, 너비, 식생부피비 변경에 따른 강우유출수를 비교하였다. 시설 제원의 변경은 각 시설의 표준제원을 기준으로 일정 비율로 조정되었다. 변경되는 매개변수 외의 시설제원은 시설별로 권장되는 표준제원으로 고정하였다. 시설별 결과를 Table 2-5 및 Fig. 2-5에 나타내었다.

시설별 매개변수 변경에 따른 가장 큰 오차율은 생태저류지에서 4.68%, 침투도랑에서 3.51%, 투수성 포장에서 4.65%,

Table 2. Error rate of stormwater depth from BR simulated using HRGIM and SWMM

$\phi$	0.02	0.04(default)	0.06	0.08	0.10
Drain O	-2.00%	-1.69%	-2.15%	-3.03%	-3.93%
Drain X	-1.79%	-0.29%	1.19%	2.54%	4.21%
$D_{surface}$ (mm)	200	250	300(default)	350	400
Drain O	-3.79%	-2.69%	-1.69%	-0.77%	0.07%
Drain X	-4.63%	-2.05%	0.35%	2.57%	4.68%
$D_{soil}$ (mm)	500	550	600(default)	650	700
Drain O	0.01%	-0.85%	-1.69%	-2.50%	-3.28%
Drain X	2.01%	0.83%	-0.29%	-1.35%	-2.34%
$D_{storage}$ (mm)	200	250	300(default)	350	400
Drain O	-1.65%	-1.66%	-1.69%	-1.74%	-1.75%
Drain X	-0.07%	-0.17%	-0.29%	-0.39%	-0.48%

Table 3. Error rate of stormwater depth from IT simulated using HRGIM and SWMM

$\phi$	0.01	0.03(default)	0.05	0.07	0.09
Drain O	-2.13%	-0.52%	0.34%	0.39%	0.20%
Drain X	-3.34%	-3.46%	-3.34%	-3.18%	-3.10%
$D_{storage}$ (mm)	1300	1400	1500(default)	1600	1700
Drain O	-0.39%	-0.45%	-0.52%	-0.61%	-0.71%
Drain X	-3.39%	-3.43%	-3.46%	-3.49%	-3.51%

Table 4. Error rate of stormwater depth from PP simulated using the LID facility simulation model and SWMM

$\phi$	0.2	0.5(default)	1.0	1.5	2.0
Drain O	0.20%	1.82%	1.89%	2.11%	0.75%
Drain X	-0.44%	0.63%	0.15%	-0.05%	-1.59%
$D_{surface}$ (mm)	0.5	1.0	1.5(default)	2.0	2.5
Drain O	1.19%	1.52%	1.82%	2.11%	2.39%
Drain X	0.01%	0.34%	0.63%	0.92%	1.20%
$D_{pavement}$ (mm)	100	150	200(default)	250	300
Drain O	-2.90%	-0.15%	1.82%	3.43%	4.48%
Drain X	4.65%	2.62%	0.63%	-1.26%	-3.45%
$D_{soil}$ (mm)	20	25	30(default)	35	40
Drain O	0.32%	0.88%	1.82%	2.59%	2.46%
Drain X	-1.15%	-0.42%	0.63%	1.59%	2.01%
$D_{storage}$ (mm)	350	400	450(default)	500	550
Drain O	1.82%	1.82%	1.82%	1.82%	1.82%
Drain X	0.63%	0.63%	0.63%	0.63%	0.63%
$D_{drain}$ (mm)	200	250	300(default)	350	400
Drain O	1.90%	1.87%	1.82%	1.76%	1.70%

Table 5. Error rate of stormwater depth from VS simulated using HRGIM and SWMM

$\phi$	0.05	0.075	0.1(default)	0.125	0.15
	2.74%	3.42%	3.98%	4.50%	4.99%
$H_v$ (mm)	300	350	400(default)	450	500
	5.36%	4.66%	3.98%	3.32%	2.67%
$S_x$	1.5	2	3(default)	4	5
	5.60%	5.60%	3.98%	2.60%	1.68%
$W_v$ (m)	3.6	4.0	4.4(default)	4.8	5.2
	2.95%	3.49%	3.98%	4.41%	4.79%
$veg_f$	0.01	0.025	0.04(default)	0.055	0.07
	3.94%	3.96%	3.98%	4.00%	4.02%

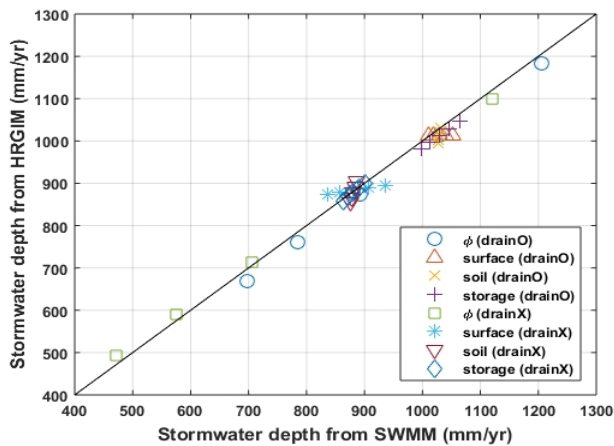


Fig. 2. Comparison of stormwater depth from BR simulated using HRGIM and SWMM.

식생수로에서 5.60%로 나타났다. 즉, HRGIM의 연평균 강우 유출수 모의 결과는 SWMM의 결과와 유사한 것으로 확인되었다.

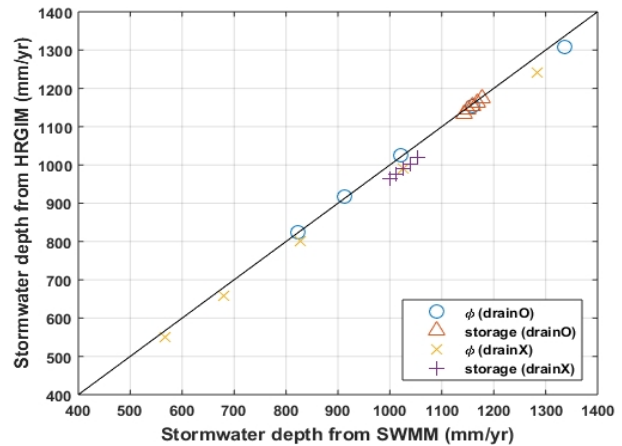


Fig. 3. Comparison of stormwater depth from IT simulated using HRGIM and SWMM.

참고로 동일한 조건의 유역에서 식생수로를 설치하지 않았을 때의 강우유출수는 약 1410 mm/yr로, Fig. 5의 강우유출수 결과와 비교하였을 때 식생수로는 큰 저감 효과가 나타나지

않는 것을 확인할 수 있다. 즉, 식생수로의 경우 시설 자체의 강우유출수 저감 효과가 미약하기 때문에 대개변수 변화에 따른 강우유출수의 변화도 작은 것으로 나타났다.

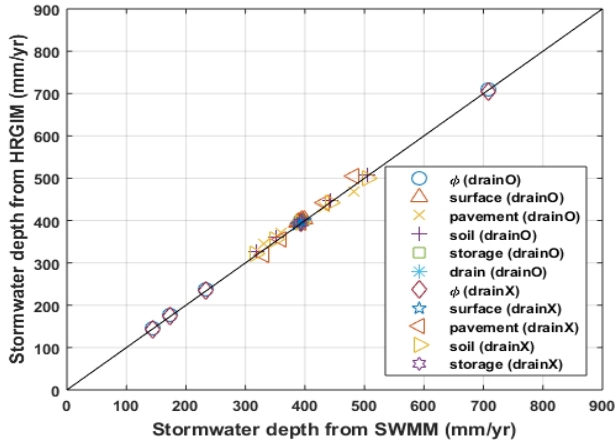


Fig. 4. Comparison of stormwater depth from PP simulated using HRGIM and SWMM.

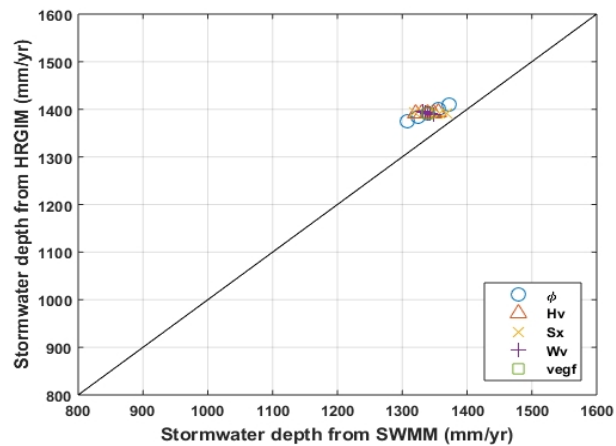
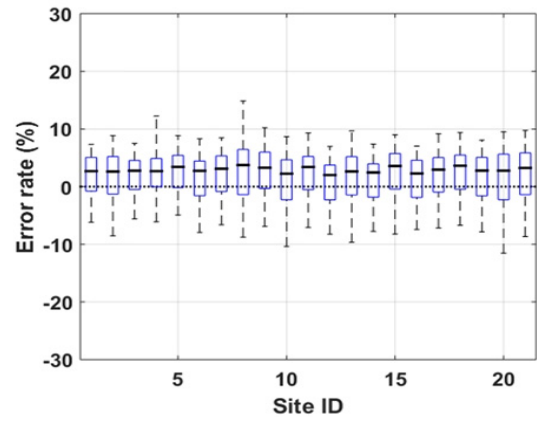


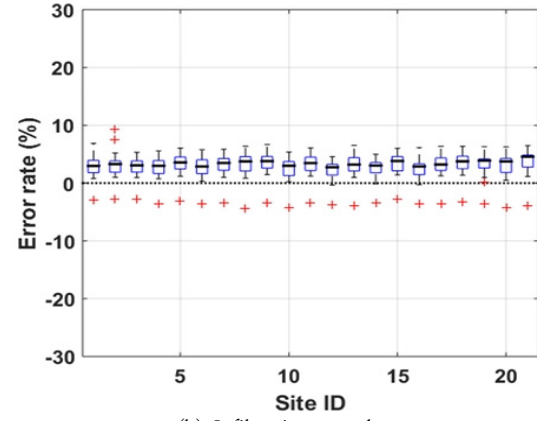
Fig. 5. Comparison of stormwater depth from VS simulated using HRGIM and SWMM.

### 3.2 소프트웨어 개발 및 검증

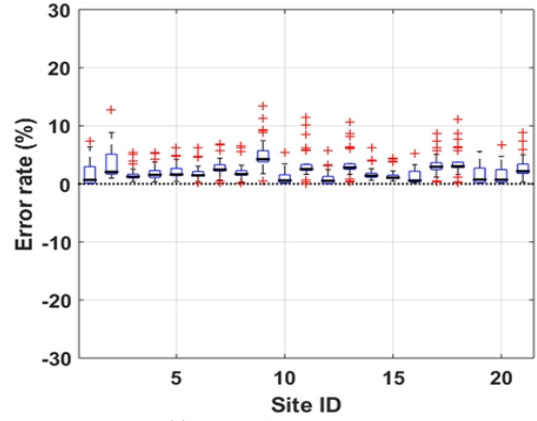
HRGIM은 최종적으로 MATLAB 기반의 GUI를 구축하여 소프트웨어 형태로 개발되었다. 개발된 소프트웨어는 사용자가 소프트웨어의 기반이 되는 MATLAB을 보유하고 있지 않아도 구동할 수 있도록 개발되었다. 이는 소프트웨어의 사용에 특별한 제약이 없도록 하기 위함이며, 따라서 관련 실무자들은 GI 시설의 모의에 있어 더 손쉽게 사용할 수 있을 것이다. 개발된 소프트웨어의 검증을 위해, 검증 시나리오(Table 1 참고)를 적용하여 SWMM과의 비교분석을 수행하였다. 다음 그림은 21개 지점에 대해 검증 시나리오에 따라 모의된 HRGIM과 SWMM의 연평균 강우유출수 오차율을 나타낸다. 이때 하나의 지점에서 모의되는 검증 시나리오는 시설별로 BR(24개), IT(16개), PP(34개), VS(13개)이다. 이는 21개 지점 모두 동일하게 적용되며, 따라서 각 시설은 최소 273개에서 최대 714개의 시나리오를 모의하여 검증되었다.



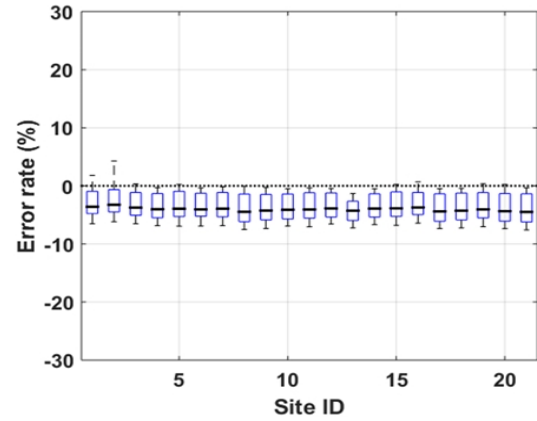
(a) Bio-Retention cell



(b) Infiltration trench



(c) Permeable Pavement



(d) Vegetative swale

Fig. 6. Error rate of stormwater depth from HRGIM and SWMM.



각 시설의 평균 오차율은 생태저류지는 약 3%, 침투도랑은 약 2.9%, 투수성 포장은 약 2.4%, 식생수로는 약 -3.7%인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 소프트웨어는 다양한 조건에서 SWMM과 비교하였을 때 강우유출수를 유사하게 모의하는 것으로 보이며, 따라서 GI 시설의 평가 성능에 대한 적용성은 확보된 것으로 판단된다.

### 3.3 소프트웨어 주요 기능

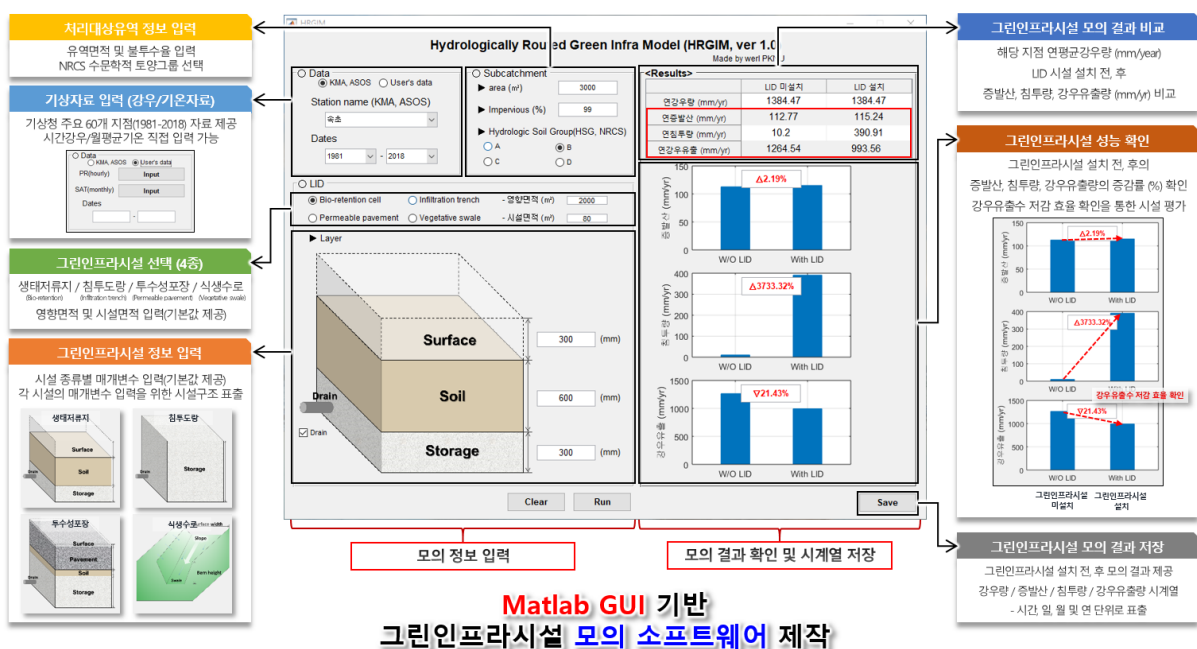
HRGIM은 모의 정보 입력 섹션과 GI 시설의 모의 결과 확인 및 시계열 저장이 가능한 섹션으로 구분된다. 첫 번째로 사용자는 처리대상구역의 GI 시설을 모의하기 위해 기상자료를 입력해야 한다. HRGIM에는 한국 기상청에서 운영 중인 ASOS 60개 기상관측소의 1981~2018년 기간의 기상자료가 기본적으로 탑재되어 있으므로 원하는 기상관측지점 및 기간을 선택하여 다양한 GI 시설의 모의가 가능하다. 또한 사용자가 원하는 자료를 직접 입력하여 GI 시설을 모의할 수 있다. 별도로 제공되는 자료 포맷을 참고하여, 시간 강우 자료 및 월 평균 기온자료 입력을 통해 GI 시설의 모의 및 평가가 가능하다. 두 번째로 GI 시설 모의를 위한 처리대상구역 정보 및 GI 시설 정보를 입력하여야 한다. 처리대상구역의 정보는 처리대상구역의 면적, 불투수율, Natural Resources Conservation Service (NRCS)의 수문학적 토양그룹의 입력이 필요하다. 모의하고자 하는 GI 시설을 선택하면 각 시설의 매개변수 입력을 위한 시설 구조가 함께 표출된다. 또한 시설별로 현업에서 권장되는 영향면적, 시설면적 및 매개변수의 표준 값이 함께 제공되며, 사용자가 이를 수정하여 직접 매개변수 값을 입력하는 것도 가능하다. 다만 HRGIM은 Table 1과 같이 구성된 모의 시나리오에 대해서 검증되었기 때문에, HRGIM을 이용한 GI 평가를 위해서는 Table 1의 매개변수 구간 내에서 시설 제

원을 입력하는 것이 권장된다.

GI 시설 모의 결과는 첫 번째로 시설을 평가할 수 있는 수문성분의 모의 결과를 비교하는 표로 제공된다. 해당 표에서는 시설 설치 전·후의 연강수량, 연증발산량, 연침투량, 연강우유출수량을 비교하여 나타낸다. 두 번째로 제공되는 결과는 GI 시설 설치 후의 증발산, 침투량 및 강우유출수량의 증감률을 나타내며, 직관적인 그래프와 값을 통해 GI 시설의 강우유출수 저감 성능의 평가가 가능하다. 마지막으로 소프트웨어의 하단 우측의 [Save] 버튼을 클릭하여 모의 결과를 저장할 수 있다. 모의 결과는 GI 시설 설치 전·후의 강우량, 증발산량, 침투량 그리고 강우유출수 시계열로, 엑셀 파일의 형식으로 제공된다. 저장된 엑셀 파일은 시간, 일, 월 및 연 단위의 시계열로 구성된 총 4개의 시트가 존재한다.

### 3.4 토론

NRCS에서 제시하는 수문학적 토양그룹은 침투율이 가장 크고 배수능력이 뛰어난 A부터 배수능력이 대체로 양호한 B, 배수상태가 불량한 C, 그리고 침투율이 가장 낮고 배수 능력이 매우 불량한 D 유형으로 분류된다. 일반적으로 GI 시설의 경우 시설 아래의 원 토양의 배수능력이 시설의 성능에 매우 중요한 역할을 한다(Choi et al., 2018). 즉 강우유출수 저감 효과는 시설이 설치되는 토양형의 배수능력에 비례한다. 그러나 SWMM에서 4개의 토양형에 대해 투수성포장을 모의한 결과 A 유형에서 가장 높은 강우유출수 결과와 D 유형에서 가장 낮은 강우유출수 결과가 나타났다(Table 6). 이는 SWMM에서 투수성포장을 모의할 때 오류가 발생하기 때문인 것으로 확인하였다. 해당 오류는 투수성포장 시설로 다량의 강우가 유입되어 포장층, 토양층, 저장층이 포화된 상태에서 주로 발생하였다. 투수성 포장의 각 층이 포화된 상태에서 강우가 지속적으로 유입되면 Fig. 8과 같은 물의



Matlab GUI 기반  
그린인프라시설 모의 소프트웨어 제작

Fig. 7. Main features of HRGIM.

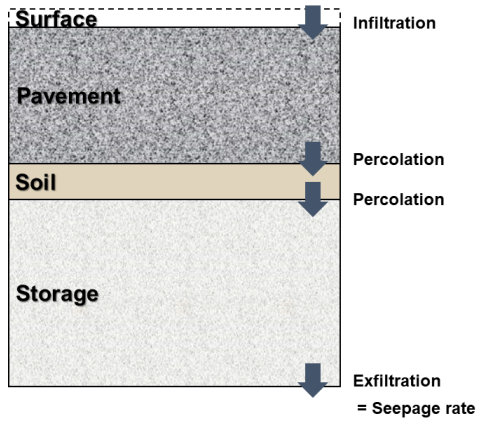


Fig. 8. Hydrological process in the PP.

Table 6. Stormwater depth from SWMM

NRCS Soil Type	A	B	C	D
Seepage rate(mm/hr)	7.62	3.81	1.27	0
Stormwater depth(mm/yr)	520.64	519.55	518.02	346.89

침투 및 침루는 토양형에 따른 침투율과 동일한 속도로 이동되어야 할 것이다. 하지만 SWMM의 경우 토양형 A를 제외한 나머지 유형의 토양에서 투수성 포장을 모의하면 합리적이지 못한 모의 결과가 제시되었다.

이러한 문제점을 살펴보기 위해 B 유형의 토양에 설치된 투수성 포장의 1985년 6월 23일부터 25일까지의 모의 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 시설로 유입되는 강우의 양을 나타내며, Fig. 9(b)는 침루 및 침투되는 물의 양을 나타낸다.

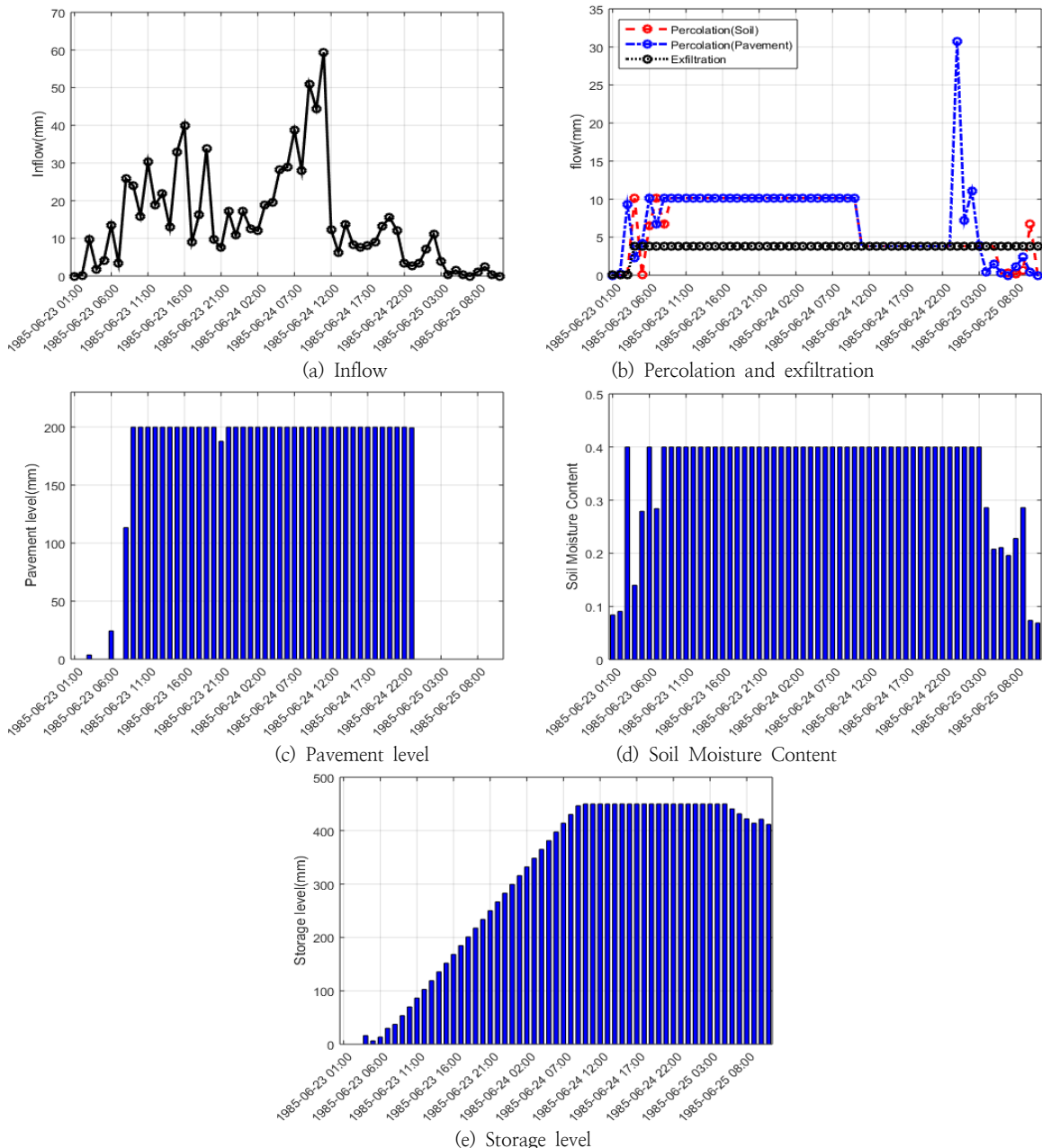


Fig. 9. Results from SWMM in soil type B.



Table 7. Stormwater depth from HRGIM

NRCS Soil Type	A	B	C	D
Seepage rate(mm/hr)	7.62	3.81	1.27	0
Stormwater depth(mm/yr)	517.61	649.58	823.94	1259.82

Fig. 9(c), (e)는 해당시간에서의 투수층 및 저장층의 물의 높이를 의미하며, Fig. 9(d)는 토양층에서의 수분 함량을 의미한다. 이때 투수성포장은 표준제원에 따라 투수층 높이 200 mm, 저장층 높이 450 mm, 그리고 토양층 공극 0.4로 설정하여 모의되었다. 저장층에 물이 가득 차게 된 시점인 6월 24일 10시에는 투수층 및 토양층도 이미 포화된 상태이며 따라서 투수층 및 토양층에서의 침투는 저장층에서의 침투율인 3.81 mm/hr과 동일하게 작용된다. 이는 6월 24일 23시까지 이어지다가 6월 25일 00시에 투수층에서 약 30 mm의 갑작스러운 침투가 발생한다. 이때의 저장층 및 토양층은 포화된 상태이기 때문에 투수층에서의 침투는 침투율을 초과할 수 없다. 그러나 SWMM의 모의 결과에서는 이러한 오류가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 투수층에서의 비정상적인 침투는 해당 시간에서의 투수층 내의 물의 양만큼 침투되었으며, 이후 투수층의 물의 높이는 0 mm로 나타났다. 즉 비정상적인 침투로 물이 사라졌기 때문에 토양형 B는 토양형 A 보다 적은 유출이 발생하였다. 토양형 A의 경우 침투율이 매우 높기 때문에 포장층, 토양층, 그리고 저장층이 포화되는 경우가 없어 비정상적인 현상이 발생하지 않았다. 그러나 토양형 C, D의 경우 B보다 침투율이 낮기 때문에 이와 같은 현상이 더욱 빈번하게 발생하였다. 따라서 배수상태가 가장 불량한 토양형 D에서 가장 낮은 강우유출수 모의 결과가 나타난 것으로 판단된다.

동일한 조건을 적용하여 HRGIM을 모의한 결과를 Table 7에 나타내었다. HRGIM에서의 투수성 포장은 토양형의 배수 능력에 따라 합리적으로 강우유출수를 저감한 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안한 HRGIM은 편리한 활용성뿐만 아니라 SWMM보다 합리적인 투수성포장 모의가 가능한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 간단하고 합리적인 GI 시설 모의 소프트웨어인 HRGIM의 개발을 통해 사용자가 GI 시설의 수문 프로세스를 손쉽게 모의할 수 있는 환경을 제공하고자 하였다. 현재 GI 시설 설치를 통한 강우유출수 모의에는 SWMM이 주로 활용되고 있으나 SWMM을 통해 GI 시설을 모의하기 위해서는 사용자가 직접 유역 설정과 수많은 매개변수를 결정하고 입력해야 하는 불편함이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 SWMM과 유사하게 강우유출수를 모의할 수 있지만, 상대적으로 간단한 매개변수 입력만으로도 GI 시설을 모의할 수 있는 모형을 개발하였다.

개발된 GI 시설 모의 소프트웨어 HRGIM은 4개의 시설 모의를 지원하며, 기본적으로 기상청 주요 60개 지점의 기상자료를 제공하고 있다. 또한 비교적 간단한 매개변수 입력만을

필요로 하므로 사용자는 HRGIM을 통하여 더 뛰어난 편의성으로 GI 시설을 간단하게 모의할 수 있다.

HRGIM은 다양한 검증 시나리오를 통해 검증되었다. 검증 시나리오는 지역별 강우특성, 토양형, 시설 매개변수 변경에 따른 모의 시나리오 등 GI 시설에 따라 최대 30개 이상으로 구성되었으며 이는 21개 기상관측지점을 대상으로 수행되었다. 모의 결과는 SWMM과 비교되었으며, 평균 5% 이하의 오차를 나타내는 것으로 확인하였다. 이는 본 연구에서 HRGIM이 간단한 매개변수 입력만으로도 SWMM과 강우유출수를 유사하게 모의하고 있음을 나타낸다. 또한 SWMM에서는 투수성포장 시설을 모의할 때 일종의 오류가 발생한 반면에, HRGIM은 합리적으로 투수성 포장을 모의할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 HRGIM은 단순한 매개변수 입력만으로도 SWMM과 유사한 GI 시설의 수문 프로세스를 구현할 수 있으며, GUI를 구축함으로써 간편하게 GI 시설을 평가할 수 있는 환경을 제공할 수 있다. 이를 통해 사용자는 GI 시설에 의한 도시 물순환 개선 효과를 보다 편리하게 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 본 모델의 GI 시설 모의 성능은 SWMM과의 비교를 통해 검증되었기 때문에, 추후 실제 관측된 GI 시설의 모니터링 결과를 이용하여 더욱 구체적인 GI 시설 재현 성능 검증이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시 수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2019002950004).

#### References

- Baek, S. S., Choi, D. H., Jung, J. W., Lee, H. J., Lee, H., Yoon, K. S., and Cho, K. H. (2015). Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach. *Water Research*, 86, 122–131. [DOI : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>]
- Baek, S. S., Ligaray, M., Park, J. P., Shin, H. S., Kwon, Y., Brascher, J. T., & Cho, K. H. (2019). Developing a hydrological simulation tool to design bioretention in a watershed. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104074. [DOI : <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.006>]
- Burszta-Adamiak, E., and Mrowiec, M. (2013). Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science and Technology*, 68(1), 36–42. [DOI : <https://doi.org/10.2166/wst.2013.219>]
- Choe, B., Lee, O., Park, Y., Im, T., and Kim, S. (2016). Quantifying uncertainty in Korean non-point sources pollution control facilities design practice. *Journal of the*

- Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(5), 359–367. [Korean Literature] [DOI : <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.5.359>]
- Choi, D., Park, M. J., Park, B. K., and Kim, S. (2014). The improvement on the empirical formula of stormwater captured ratio for water quality volume based non-point pollutants water quality control basins. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(1), 87–94. [Korean Literature] [DOI : <https://doi.org/10.15681/KSWE.2014.30.1.087>]
- Choi, J., and Kim, S. (2020). Estimation of load capture ratio for evaluating LID facilities performance in Korea. *Water Supply*, 20(8), 3464–3477. [DOI : <https://doi.org/10.2166/ws.2020.243>]
- Choi, J., Lee, O., and Kim, S. (2017). Estimation of stormwater interception rate for bio-retention LID facility. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(5), 563–571. [Korean Literature] [DOI : <https://doi.org/10.15681/KSWE.2017.33.5.563>]
- Choi, J., Lee, O., Kim, Y., and Kim, S. (2018). Improvement of Estimation Method of Load Capture Ratio for Design and Evaluation of Bio-retention LID Facility. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(6), 569–578. [Korean Literature] [DOI : <https://doi.org/10.15681/KSWE.2018.34.6.569>]
- Choi, J., Lee, O., Lee, J., and Kim, S. (2019). Estimation of stormwater interception ratio for evaluating LID facilities performance in Korea. *Membrane Water Treatment*, 10(1), 19–28. [DOI : <https://doi.org/10.12989/mwt.2019.10.1.019>]
- Jeon, J. H., Choi, D. H., and Kim, T. D. (2009). LIDMOD development for evaluating low impact development and its applicability to total maximum daily loads. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(1), 58–68. [Korean Literature]
- Jeon, J. H., Choi, D., Na, E. H., Park, C. G., & Kim, T. D. (2010). LIDMOD2 Development for Evaluation of LID/BMPs. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(3), 432–438. [Korean Literature]
- Jia, H., Yao, H., and Shaw, L. Y. (2013). Advances in LID BMPs research and practice for urban runoff control in China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7(5), 709–720. [DOI : <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0557-5>]
- Kim, K., Choi, J., Kim, S., Kang, L. S., Shin, H., and Kim, S. (2019). Analysis of the Effect of Bio-Retention Cells to Improve Water Cycle and Water Quality in Urban Streams. *Journal of Wetlands Research*, 21(3), 224–235. [Korean Literature] [DOI : <https://doi.org/10.17663/JWR.2019.21.3.224>]
- Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Koivusalo, H., and Setälä, H. (2013). A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization. *Urban Water Journal*, 10(6), 394–410. [DOI : <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.739631>]
- Luan, Q., Fu, X., Song, C., Wang, H., Liu, J., and Wang, Y. (2017). Runoff effect evaluation of LID through SWMM in typical mountainous, low-lying urban areas: A case study in China. *Water*, 9(6), 439. [DOI : <https://doi.org/10.3390/w9060439>]
- Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., and Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70. [DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.011>]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2014). The Total Amount of Water Pollution Management Technical Guidance, *National Institute of Environmental Research*, pp. 67–68.
- Panos, C. L., Wolfand, J. M., and Hogue, T. S. (2020). SWMM Sensitivity to LID Siting and Routing Parameters: Implications for Stormwater Regulatory Compliance. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(5), 790–809. [DOI : <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12867>]
- Park, J., Yoo, Y., Park, Y., Yoon, H., Kim, J., Park, Y., Jeon, J., and Lim, K. J. (2008). Analysis of Runoff Reduction with LID Adoption using the SWMM. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(6), 806–816. [Korean Literature]
- Rosa, D. J., Clausen, J. C., and Dietz, M. E. (2015). Calibration and verification of SWMM for low impact development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 746–757. [DOI : <https://doi.org/10.1111/jawr.12272>]
- Sarma, A. K., Singh, V. P., Kartha, S. A., and Bhattacharjya, R. K. (Eds.). (2016). Urban hydrology, watershed management and socio-economic aspects. *Springer International Publishing*.
- Shin, H. S., Park, J. B., & Lee, J. H. (2016). Development of a Verification and Certification Method of Green Infrastructure and Low Impact Development Technologies. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 3(2), 92–99. [Korean Literature] [DOI : <https://doi.org/10.17820/eri.2016.3.2.092>]
- Sun, Y. W., Li, Q. Y., Liu, L., Xu, C. D., and Liu, Z. P. (2014). Hydrological simulation approaches for BMPs and LID practices in highly urbanized area and development of hydrological performance indicator system. *Water Science and Engineering*, 7(2), 143–154. [DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wse.2014.02.001>]

- [doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.003](https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.003)
- Wałęga, A., Radecki-Pawlik, A., Cupak, A., Hathaway, J., and Pukowicz, M. (2019). Influence of changes of catchment permeability and frequency of rainfall on critical storm duration in an urbanized catchment—A case study, Cracow, Poland. *Water*, 11(12), 2557. [DOI : <https://doi.org/10.3390/w11122557>]
- Wang, J., Zhou, L., Han, P., and Li, G. (2020). The Impact of Urbanization and LID Technology on Hydrological Effect. *Journal of Coastal Research*, 104(SI), 14-22. [DOI : <https://doi.org/10.2112/JCR-SI104-004.1>]
- Wang, M., Zhang, D. Q., Su, J., Trzcinski, A. P., Dong, J. W., and Tan, S. K. (2017). Future scenarios modeling of urban stormwater management response to impacts of climate change and urbanization. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 45(10), 1700111. [DOI : <https://doi.org/10.1002/clean.201700111>]
- Xie, J., Wu, C., Li, H., and Chen, G. (2017). Study on storm-water management of grassed swales and permeable pavement based on SWMM. *Water*, 9(11), 840. [DOI : <https://doi.org/10.3390/w9110840>]
- Xu, Z., and Zhao, G. (2016). Impact of urbanization on rainfall-runoff processes: case study in the Liangshui River Basin in Beijing, China. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 7-12. [DOI : <https://doi.org/10.5194/piahs-373-7-2016>]