저영향개발 모델링 기법 비교연구: 사례중심으로

Low Impact Development Modeling: Literature Review and Suggestion for Future Work

백상수¹ · 최한나² · 박종관^{1,*}
Sangsoo Baek¹ · Hanna Choi² · Jongkwan Park^{1,*}

¹울산과학기술원 · ²태영건설
¹Ulsan National Institute of Science and Technology
²TAEYOUNG E&C.

(Received December 28, 2018; Revised April 4, 2019; Accepted April 10, 2019)

Abstract : Addressing water-associated challenges is critical for urban watershed management. Low Impact Development (LID) practices have been proposed as a promising urban management methodology based on water storage and infiltration. Previous studies considered LID practices as a promising strategy that can control urban stormwater runoff and pollution in the urban ecosystem. With limited stormwater management funding, mathematical models became vital tools to better understand and control hydrological processes in LID; thus, encouraging a wider application of LID practices. As well, they can be useful for implementation of LID in more efficient approaches. Several research groups have developed LID modeling tools such as Storm Water Management Model (SWMM), System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegrationN (SUSTAIN), and Western Washington Hydrologic Model (WWHM). EPA SWMM have used widely to simulate LID practices and SUSTAIN can analyze the cost-effectiveness regarding to LID. WWHM is developed for the long-term simulation of LID. These models can simulate the effect of LID applications on the hydrological cycle and water quality and have been widely used to evaluate the performance of LID in urban areas. In addition to analyzing the reduction effect by LID, these models can also generate optimal LID designs. However, these models still have limitation in terms of the soil water flow and water quality simulation by LID because they used simple equation for soil water flow and water quality simulation. Therefore, these model need to modify the model mechanism for enhancing the model.

Key Words : Low Impact Development, Urban, SWMM, SUSTAIN, WWHM.

요약 : 도시화가 진행됨에 따라, 도시 수문학적 변화가 대두되고 있다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 침투와 저류기 반을 바탕으로 한 저영향개발 기법이 하나의 해결책으로 나타나고 있다. 이러한 저영향개발 기법은 설치와 관리 비용이 상당히 높기 때문에 수치모델을 이용하여 저영향개발 기법의 효과 분석은 필수적이다. 이에, 많은 연구자들은 EPA Storm Water Management Model (SWMM), System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegrationN (SUSTAIN)와 Western Washington Hydrologic Model (WWHM) 모델을 이용하여 저영향개발 기법으로 인한 유출 및 오염물질 저감을 모의하고 있다. 이러한 모델은 단순히 저영향개발 기법으로 인한 유출 및 오염물질 저감 효과뿐만 아니라, 비용 및 저영향개발 기법의 특성을 고려한, 최적 설계도 또한 산출이 가능하다. EPA SWMM 모델은 가장 폭넓게 저영향개발 요소 모의 시 가장 널리 사용되고 있으며, SUSTAIN 모델은 비용-효율분석이 가능하다. WWHM 모델은 저영향개발 요소의 장기모의 분석을 위해 개발이 되었다. 이러한 수치 모델을 이용한 저영향개발 기법 모의는 이러한 효율적인 저영향개발 기법 설치 및 관리에 많은 정보를 제공이 가능하다. 각각의 모델의 장점을 이용하여, 저영향개발 요소를 모의하고 있지만, 여전히 수질 기작과 토양 내 물 흐름 모의 경우 한계점을 보여주고 있다. 향후, 모델의 정확도 향상을 위하여, 이러한 모델의 한계점의 개선이 필요하다.

주제어 : 저영향개발 기법, Urban, SWMM, SUSTAIN, WWHM.

1. 서론

우리나라는 급속한 산업화와 도시화로 인하여, 투수지역은 감소함으로 인한, 개발전과 다른 지표 · 지표하 유출이 나타난다. 이로 인해 잠재적으로 홍수와 가뭄의 유발이 일어나며, 이러한 변화는 결국 생태적, 수문학적으로 지역적, 대규모적인 변화가 나타난다.¹⁻⁴⁾ 이에 따라, 도시의 물 지속 가능성 및 계획은 대중의 관심을 끌고 있으며, 유역적 측면에서의 도시화에 대한 세심한 접근과 관리에 대한 계

획이 필요하다. 최근에 침투와 저류를 바탕으로 한 저영향개발(Low Impact Development)은 이러한 도시화로 인해 발생될 수 있는 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 제안되고 있다. 저영향개발 기법을 적용하면 침투 및 총 유출량을 완화하여 개발 전 상태의 수문학적 기능을 유지할 수 있게 해주며, 생물 다양성과 기후 복원력의 증가를 포함한 사회적 편익을 촉진한다. 또한 저영향개발 기법은 물리학적 및 생물학적 기작을 이용해 오염물질의 저감에도 효과를 보여줄 수 있다. 이러한 장점으로 인해 저영향개발 기법

* Corresponding author E-mail: jkpark@unist.ac.kr Tel: 052-217-2886 Fax: 052-217-2886

의 필요성에 대해 인식이 높아지고 있지만, 직접적으로 도시계획에 반영되는 사례는 많지 않은 상황이다.⁵⁾ 이는 저영향개발 기법을 적용할 때, 필요한 설치 및 유지관리 비용의 문제와 설치에 관한 구체적인 매뉴얼 또는 가이드라인이 부족하기 때문이다.⁶⁾ 최근 저영향개발 기법 모의가 탑재된 수치모델이 개발됨에 따라, 많은 연구자들이 이를 이용하여 저영향개발 기법모의를 진행하였다.⁶⁻⁸⁾ 수치모델링은 다양한 시나리오를 제시함으로써 저영향개발 기법 특성파악을 할 수 있는 강점으로 인해 저영향개발 기법 모델링 시 많이 사용되고 있다. 또한 수치모델링을 이용하여, 각각의 저영향개발 기법 별로 비용-효율 분석이 가능하며, 저영향개발 기법 최적 크기와 위치를 산정할 수도 있다. 이에 본 연구에서는 국내외 많이 사용되고 있는 저영향개발 기법 모델인 EPA Storm Water Management Model (SWMM)¹⁾, System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration (SUSTAIN)⁷⁻⁸⁾, Western Washington Hydrologic Model (WWHM)⁹⁾ 대하여 비교 및 분석을 실시하였고, 각각의 모델 별 저영향개발 기법 모델링 사례를 조사하였다.

2. 저영향개발(Low Impact Development)

저영향개발 기법에 대한 정의는 지역과 기관 따라 매우 다양하게 정의되고 있으나 개발로 인해 변화되는 수문특성을 개발 전과 최대한 유사하도록 하는 것을 공통된 목적으로 제시하고 있다.¹⁰⁾

국내 문헌에 따르면 국립환경과학원¹¹⁾은 저영향개발 기법을 자연에 미치는 영향을 최소화 하여 개발하는 것으로 정의하였으며, 국토교통부¹²⁾에서는 홍수 및 수질오염 저감을 위한 우수의 침투, 저류, 물순환 체계를 고려한 토지이용 계획기법으로 정의하였다. 토지주택연구원¹³⁾은 개발 이

전 수문학적 체계의 유지와 향상을 위한 광범위한 토지 계획 및 공학적 설계를 고려하는 방식이며, 발생원에서 가까운 곳에서 빗물을 관리함으로써 지표 유출과 오염부하를 줄이기 위해 설계된 일련의 시설들과 그 관리방법으로 저영향개발 기법을 정의하고 있다.

국외의 경우, 미국 환경 보호청¹⁴⁾은 저영향개발 기법을 도시화로 인해 변화되는 수문특성 때문에 발생하는 문제점들에 대해 지역 내의 수문학적 기능을 도시화 이전의 수문특성과 같게 보존하는 계획과 설계의 접근 방법으로 정의하고 있다. 이는 도시지역이 자연 상태와 유사한 물순환 체계를 갖출 수 있도록 하는 접근 방법으로, 기존의 최적관리 기법(Best Management Practices: BMPs) 적용뿐만 아니라 도시지역 토지이용계획 수립시 물순환을 고려한 강우유출수 관리체계로 정의하고 있다.¹⁰⁾

저영향개발 기법으로 많이 적용되는 기술요소는 식생체류지(Bio-retention), 빗물정원(Rain garden), 옥상녹화(Green roof), 침투 도랑(Infiltration trench), 침투포장(Permeable pavement), 식생수로(Vegetative swale) 등이 있다(Table 1). 식생체류지는 토양층과 자갈로 이루어진 층으로 이루어져 있으며, 빗물정원의 경우 토양층으로만 이루어져 있다. 옥상녹화는 토양층과 배수층을 이용하여 건물 옥상에 설치된다. 침투 도랑의 경우 자갈로만 이루어져 있어 빠른 침투가 가능하다. 침투포장의 경우 상단의 침투성 있는 도로포장을 사용하여, 도시 유출을 저감 할 수 있다. 식생수로는 식생이 덮인 개수로 이용하여, 강우유출수를 배출하는 시설이다.^{15,16)}

2.1. 저영향개발 기법 모델

2.1.1. EPA Storm Water Management Model (SWMM)⁶⁾

도시유역에서의 강우로 인한 홍수량을 산정하는 모형들 중 SWMM 모형은 1971년 미국 EPA의 지원 아래 Metcalf & Eddy사가 Florida 대학 및 W.R.E와의 공동 연구로 도시

Table 1. EPA SWMM LID module⁶⁾

Table 2. Summary of the numerical models

	Time domain	LID types	Time step	Surface runoff/ infiltration	Infiltration method in LID	Soil water flow method in LID	Water quality simulation method	Cost-effectiveness
SWMM	Single event, Continuous	7	Minimum 1min	Manning/Horton, Curve number, Green-Ampt	Green ampt equation	Modified Darcy's equation	Dilution effect by rainfall	X
SUSTAIN	Single event, Continuous	13	Minimum 1min	Manning/Green-Ampt, Hltan-Lopez	Green ampt equation	Modified Darcy's equation	Dilution effect by rainfall, first order decay	O
WWHM	Continuous	7	Minimum 1min	Manning/Philip's equation	Van genuchten equation /Darcy equation	Van genuchten equation /Darcy equation	Dilution effect by rainfall, first order decay	O

유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발되었다. 1981년에는 SWMM 모형 내의 Transport 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 Extran 블록이 SWMM 모형에 포함되었다(Table 2).

SWMM은 도심지역의 합류식 관거(combined sewer overflows, CSOs)에서 발생하는 다양한 수문현상을 해석하기 위한 모델로써 전원지역에서부터 도심지역에 이르는 다양한 유역특성을 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 연속적인 모델 시뮬레이션과 단일 사상에 대한 시뮬레이션이 가능하며 소배수 유역에서 대배수 유역까지 적용할 수 있다. 최대 3,000개의 소유역, 2,000개의 수로 또는 관거를 사용할 수 있는 장점도 있다.

유출은 강우와 용설로 인하여 발생하는 것으로 가정하고, 지표유출은 비선형 저류방정식(non-linear reservoir equation)을 사용하여 추적한다. 지표유출의 이동은 Kinematic wave equation으로 침투량은 Horton 혹은 Green-Ampt equation을 사용하여 계산한다.

SWMM의 저영향개발 기법 모듈의 경우, SWMM모형에 저영향개발 기법 빗물관리시설의 수문영향분석이 가능하도록 추가하여 개발한 모형으로 같은 제원의 저영향개발 기법 시설을 다른 토지피복 특성을 가진 다른 소유역에 적용하는 것이 가능하며 SWMM 모의 동안에 물수지 균형을 유지하면서 각 layer 내에서 저류되고 순환되는 정도를 분석할 수 있다. 모의 가능한 저영향개발 기법 시설은 식생체류지(Bio-retention Cells), 빗물정원(Rain Garden), 침투트렌치(Infiltration Trenches), 투수포장(Porous Pavement), 빗물저장탱크(Rain Barrels), 식생수로(Vegetative Swales) 등이 있으며, 개별 시설들의 수리, 수문학적 특성을 결정하는 변수들에 변화를 주어 상기의 7가지 항목에 포함되지 않은 다양한 저영향개발 기법 기법들을 모의할 수 있는 장점이 있다(Table 1).

2.1.2. System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration (SUSTAIN)⁷⁻⁸⁾

SUSTAIN 모델은 미국환경청(U.S. EPA)과 Tetra tech로부터 개발되었으며, Total Maximum Daily Load (TMDL)에 달성하기 위한 저영향개발 기법과 Best Management Practices

(BMPs)의 선택 및 평가를 위해 개발되었다(Table 2). 또한 수자원 보호를 위한 오염물질의 효과적인 예측, Municipal Separate Storm Sewer System (MS4) 및 Combined Sewer Overflow (CSO)를 효율적으로 관리하기 위해 저영향개발 기법과 BMP를 이용하여 유량 및 오염물질 저감을 필요로 하는 곳에 사용이 가능하다. SUSTAIN은 Geographic Information System (GIS) 기반으로 제작되었으며, 도시유역에서 유량 및 수질관리뿐만 아니라 BMPs를 이용하여 효과적으로 오염물질의 저감 예측, BMP의 위치 및 규모 선정, 도시유역의 유량과 오염농도 예측을 할 수 있으며, 수질과 유량의 목적을 달성하기 위한 비용-효율분석이 가능하다. 모델은 유역에서의 수문과 수질기작은 SWMM5의 알고리즘을 이용하며, 토양유실 기작은 Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)의 알고리즘을 이용한다. 용설 모의는 Degree-day equation을 이용하며, 증발량은 일정한 값을 이용하거나, 월 평균값 혹은 사용자가 직접 증발량을 산정할 수 있다. 침투기작은 Green-Ampt공식을 이용하며, 지표유출은 비선형 저수지 공식을 사용한다. 오염물질의 축적과 유실은 SWMM5 모델과 같은 방법론을 사용하며, 도로청소에 의한 오염물질 제거를 고려할 수 있다. 저영향개발 기법에서의 하도추적은 웨어와 오리피스 방정식에 의해 계산된다. 침투방정식은 Green-Ampt 방정식을 기본으로 하고 있으며, 저영향개발 기법 내에서의 오염물질은 Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR)를 가정하여 1차 반응 공식에 의해 오염물질이 감소하는 것을 기본으로 하고 있다. 증발산량은 일정한 값 혹은 월별 값, 일별 값을 직접 입력하거나 Hamon 공식에 의해 계산할 수 있다. 오염물질 저감효과는 1차 반응 공식에 의해 계산된다. 적용 가능한 저영향개발 기법은 식생체류지, 빗물저장탱크, 건식 연못, 식생수로, 옥상녹화, 침투도랑, 침투포장, 모래여과기, 습식연못이 있다.

2.1.3. Western Washington Hydrologic Model (WWHM)⁹⁾

WWHM은 워싱턴주 저영향개발 기법시설(유출저감, 수질개선시설) 규모산정을 위해 개발된 모형으로 워싱턴주 생태국(부)의 "Stormwater Management Manual for Western Washington"의 근간이 되는 모형이다(Table 2). 유출빈도해석이 필요한 시설물 설계를 위해 워싱턴주 생태국은 AQUA

Table 3. WWHM model types

	Model	Area
Full Package	WWHM4	• Entire lower 48 states
	WWHM2012	• 19 counties of western Washington
	BAHM2013	• San Francisco Bay Area counties (Alameda, Santa Clara, San Mateo)
	SDHM2011	• San Diego County, California
	SAHM	• Sacramento County, California
Model for specific area	SOHM	• South Orange County, California
	SMRHM	• Santa Margarita Region, Riverside County, California
	SalinasHM	• City of Salinas, California
	TRUST	• Tualatin River Basin, Oregon

TERRA Consultants와 함께 개발 전, 개발 후의 유출, 수질 변화 및 빈도해석을 위한 컴퓨터 모형(WWHM, Western Washington Hydrology Model)을 최초로 개발하였다. 이후, AQUA TERRA Consultants의 WWHM 개발분야 전문가들이 회사로부터 독립하여 Clear Creek Solutions을 설립하고 WWHM 코드를 지속적으로 개선하고 있는 상황이다. Ver 2012에서는 Western Washington 주의 19개 카운티를 대상으로 개발하였으며 현재 미국 48개 주를 모델링 할 수 있는 Ver. 4 개발을 완료하였다.

토지이용변화에 따른 유량제어시설의 규모를 최적화하고 시설물의 수질개선효과를 분석할 수 있는 객체지향 프로그램으로써, 단일호우사상에 유출해석에 한계가 있으며 연속유출모의해석을 중심으로 개발된 모형이라 할 수 있다. 유출모의는 HSPF를 기반으로 하며 장기간의 기상(강우, 증발)자료 및 지형특성 인자를 입력하여 하고, 개발 후(Post-development) 유출해석은 사용자가 구성한 저영향개발 기법 시설 입력에 자료를 넣어 할 수 있다. 적용 가능한 저영향개발 기법 시설은 지하 습지, 빗물통, 자갈 트렌치, 모래여과기, 식생저류지, 옥상녹화, 투수포장, 식생상자, 침투조, 침투 트렌치, 건식 연못 등이 있으며 개별 저영향개발 기법 시설의 유입-유출을 수리학적 이론을 기초로 상세하게 모의할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

소배수구역에 다양하게 설치된 저영향개발 기법 시설의 수리, 수문 기작을 상세하게 해석할 수 있으며 현재까지 개발된 국내외 개발 모형 중 가장 많은 저영향개발 기법 시설물 모듈을 탑재하고 있다. 기본적인 수문해석인 HSPF 유역유출 모의 모듈 이외에 투수 및 불투수 지류유역을 추가로 입력이 가능하고, 수리계산을 위하여 하천(수로), 저수지, 분기관, 암거 등을 각각 입력할 수 있다. 모형간 연계기능은 SWMM에 대하여 상세하게 개발되었으며 PCSWMM, XP-SWMM, SWMM4, SWMM5, SWMM5.1의 입출력자료와 연동하여 WWHM의 계산이 가능하다. 최근 버전에서는 Commercial Toolbox라는 메뉴를 새롭게 구성하였는데 이 기능은 상업적인 목적으로 개발된 개별 저영향개발 기법 시설(제품)의 효과를 계산하는 기능을 탑재한 것으로 현재 1개

의 모듈(Bio-Mod 모듈)을 개발하여 서비스를 제공 중이다.

분석결과를 지속기간별 유출량, 빈도, 수질, 수문곡선, 습지변화, 충전기간(개발 전, 개발 후) 등이 있으며 수문곡선은 연간, 월, 일, 시간자료를 최대치, 평균, 볼륨의 형태로 제공한다. 기타기능으로 GIS 데이터(Shp 파일)을 Import가 가능하며 HSPF의 PERLNDs, IMPLNDs의 매개변수를 수정할 수 있다. PERLNDs는 유역 내에 불투수지역의 유출, 침투, 증발을 모의하는 모듈이며, IMPLNDs는 유역 내에 불투수지역의 유출과 증발을 모의하는 모듈이다. WWHM 개발사인 Clear Creek Solutions, INC는 Full Package 모형을 지속적으로 개발함과 동시에 일부 기능을 제외하거나 추가한 모형을 개별 카운티에 적합하도록 사용자 편의환경, 모형수행 기능을 개선하여 솔루션 형태로 제품을 공급하고 있다(Table 3).

WWHM은 유출모의를 위한 기본 모형으로 HSPF를 사용하며 복잡한 수리현상을 모델링하기 위해서 SWMM과의 연계모의가 가능하다(Fig. 1). 유역유출 연속모의(장기유출모의)를 위해 HSPF모형이 포함되어 있고, U.S EPA와 USGS

Fig. 1. The overview of WWHM.

Table 4. Elements of WWHM Model

Basic Elements	Pro Elements
14 elements: land use drainage basin trapezoidal pond tank lateral pervious basin high groundwater/wetland vault open channel time series lateral impervious basin gravel trench bed sand filter flow splitter irregular-shaped pond stage-storage-discharge table	8 elements: culvert SWMM CAD bioretention green roof hydraulic porous pavement CAVFS (Compost Amended Vegetated Filter Strip)

에서 개발된 HSPF는 인터넷을 통해 무료로 다운로드 가능하다. 기상자료(강우, 증발) 및 모형보정매개변수를 기초자료로 모형 수행한다. 수리학적 계산을 위한 관로추적은 SWMM의 관로추적과 연동하여 계산이 가능하며 Channel Routing을 통해 계산한다. WWHM은 기본 구성요소 14개와 응용 구성요소 8개로 구성되어 있으며 응용 구성요소에는 식생체류지, 옥상녹화, 침투포장 등 저영향개발 기법 시설이 일부 포함되어 있다(Table 4).

3. 저영향개발(Low Impact Developement) 모의 사례

3.1. EPA SWMM

Qin 등¹⁷⁾은 EPA SWMM 모형을 이용하여, 저영향개발 기법의 홍수저감효과에 대하여 모의하였다. 적용된 저영향개발 기법 종류는 식생체류지, 투수성 포장, 옥상녹화였으며, 다양한 강우 시나리오에 따른 홍수저감효과에 대해 모의하였다. 강우 시나리오는 강우 강도, 강우 기간, 침투 강우 위치를 고려하였고, 이에 따른 저영향개발 기법의 효과를 분석하였다. 강우 초기에 침투 강우가 있는 경우, 식생체류지가 큰 저감효과를 보였고, 침투 강우가 중앙에 있을 경우는 투수성 포장, 침투 유량이 강우 말미에 있을 경우 옥상녹화가 높은 저감효과를 보여주었다. 이는 강우의 형태에 따라 저영향개발 기법의 효과 또한 다를 수 있었다.

Yeon 등¹⁸⁾은 도시구역에서의 저영향개발 기법의 적용성을 분석하기 위하여, EPA SWMM을 사용하여 저영향개발 기법 요소기술의 시공 및 유지관리에 따른 유출저감 효율 분석을 실시하였다. 분석결과, 총 유출량 저감효율이 높은 저영향개발 기법은 투수성포장, 시공 및 유지 관리비용에서 효율이 높은 저영향개발 기법은 식생수로, 시공 및 유지 관리 비용 대비 총 유출량 저감효율이 높은 저영향개발 기

법은 생태 저류 장치로 나타났다.

Back 등¹⁹⁾은 상업지구 지역에 대해 모니터링과 수치 모델링을 실시하여 도시구역의 초기세척 현상을 저감하기 위한 저영향개발 기법의 크기를 최적화방법론을 이용하여 제안하였다. 사용된 모델은 EPA SWMM 모델이며, 적용된 저영향개발 기법은 식생체류지, 옥상녹화, 침투도랑, 침투 포장, 빗물통, 식생수로이다. 저영향개발 기법 최적화시 초기세척현상을 정량화 하기 위하여 Mass First Flush (MFF)을 이용하였으며, MFF30을 초기세척현상의 기준으로 사용하였다. MFF란 초기세척현상을 정량화하는 방법으로 MFF30을 초기세척 현상 인덱스로 많이 사용되고 있다. 강우 시나리오를 산출하기 위해 Huff 곡선과 IETD (Inter-Event Time Definition)를 이용하였다. Huff 곡선을 이용하여 강우의 시간적분포를 계산하였으며, IETD를 이용하여 총 강우량과 강우기간을 산출하였다. 저영향개발 기법 최적화 결과 6개의 저영향개발 기법(식생체류지, 옥상녹화, 투수성포장, 식생수로, 빗물통, 빗물정원)의 최적 크기는 runoff depth에서 1.2 mm에서 3.0 mm 범위로 나타났으며, 그 중 식생체류지와 빗물통이 적용 면적대비 가장 높은 저감효율을 보여주었다.

Zhang 등²⁰⁾은 EPA SWMM 모델을 수정하여, 지하수를 고려한 저영향개발 기법을 모의하였다. 기존의 EPA SWMM 모델의 경우, 지하수위로 인한 저영향개발 기법의 영향을 고려하지 못하는 한계점이 있었다. 이러한 점을 수정하기 위하여 Zhang 등은 투과형 파이프를 통한 물흐름을 모의하는 underdrain 모듈과 저영향개발 요소의 지하부분의 물흐름을 모의하는 exfiltration 부분을 수정하여, 저영향개발 기법 밑의 지하수위를 고려하였다. 수정된 EPA SWMM의 모델결과는 기존보다 높은 정확도를 보여주었으며, 토양별로 다른 저영향개발 기법 저감 특성을 보여주었다.

Bhandari 등²¹⁾은 EPA SWMM 모델을 이용하여, 저영향개발 기법에 따른 홍수저감 대하여 분석을 실시하였다. 사용된 저영향개발 요소는 옥상녹화와 침투포장을 사용하였다. 분석결과로 침투유량은 감소하였으며, 침투유량의 시점도 또한 늦어짐을 보여주었다.

EPA SWMM 모델은 현재까지 저영향개발 기법을 모의하기 위해 가장 대중적으로 사용되고 있는 모델이다. 기본적으로 EPA SWMM모델의 경우 도시 유출 및 물순환 분석에 용이 하기 때문에, Qin 등¹⁷⁾과 Bhandari 등²¹⁾은 EPA SWMM을 이용하여 홍수분석을 하였다. 특히, EPA SWMM 모델은 모델 시뮬레이션 간격이 작기 때문에 Qin 등¹⁷⁾과 Bhandari 등²¹⁾과 같이 분 단위로 침투 강우의 위치에 따라, 자세한 침투 유출 특성 분석이 가능하다. 또한 저영향개발 기법을 이용하여 오염물질 저감모의가 가능하기 때문에 Back 등¹⁹⁾은 초기세척 현상의 저감모의를 위해 모델을 사용하였다.

하지만, 아직까지 대부분의 연구가 단순히 모델을 이용하여, 유량 저감 혹은 오염물질 저감에 대한 분석만을 하고 있으며, 최근에서야 Zhang 등²⁰⁾이 모델이 지하수의 영향을 고려한 저영향개발 기법 모의를 개발하였지만, 아직까지

저영향개발 기법의 모델 수정 또는 개발이 많이 이루어지지 않는 것이다.

3.2. SUSTAIN

Chen 등²²⁾은 SUSTAIN 모델을 대만 연산엔 유역에 적용하였다. 적용된 저영향개발 기법은 식생체류지, 식생수로, 투수성 포장이며, 모델 적용 시 연산엔 유역 내의 토지이용을 고려하였다. 그 결과, 저영향개발 기법의 큰 저감효과는 침투로 인해 나타났으며, 민감도 분석결과 토양침투율이 저영향개발 기법의 결과에 영향을 많이 주는 것을 확인하였다.

Gao 등²³⁾은 SUSTAIN 모델을 중국 마안산시의 공장지대에 적용하였다. 사용된 저영향개발 기법은 투수성 포장, 식생지류지, 습식 연못, 옥상녹화를 사용하였으며, 적용도시에 저영향개발 기법 구축 후 유량 및 오염물질의 저감을 분석하였다. 분석결과 저영향개발 기법에 의해서 TSS는 41%, 총질소 57%, 총 인 55%, COD 60%의 저감 효과가 나타났다.

Back 등²⁴⁾은 SUSTAIN 모델을 사용하여 광주광역시 상업지역과 도시공원의 모니터링 결과를 통해 저영향개발 기법의 최적 크기와 유형을 판단하였다. 상업지역과 도시공원에 대하여 유출량에 대하여 검토를 실시하였으며 검토된 모델을 이용하여 저영향개발 기법 적용성 평가를 하였다. 저영향개발 기법 크기를 유역 면적 대비 11 mm 및 3 mm 크기에 대하여, dry pond와 wet pond를 적용하였고, 각각 상업지구와 공공공원의 유출을 50% 정도 감소를 보여주었다.

Li 등²⁵⁾은 SUSTAIN 모델을 이용하여 도시 유역에 대하여, 저영향개발 요소의 시나리오 분석을 실시하였다. Li 등은 총 5가지의 시나리오를 적용하였으며, 첫 번째는 개발 전 상태, 두 번째는 도시 개발 후 상태, 세 번째는 실제 도시 지역에 저영향개발 요소 적용 상태, 네 번째는 비용-효율분석을 적용한 시나리오, 다섯 번째는 중국 스펜지 도시의 규정에 맞는 저영향개발 요소 시나리오를 적용하였다. 비록 5가지 시나리오의 적용된 저영향개발 요소의 면적이 다름에도 불구하고, 모델 결과 TN, TP, TSS, COD의 저감 효과가 비슷하게 나타났다. 또한 비용-효율분석을 적용한 시나리오는 적용 면적이 적으나, 높은 저감 효율을 보여주었다. 이는 비용-효율 분석을 이용 시, 저비용으로 좋은 저감효과를 얻을 수 있음을 보여주었다. SUSTAIN 모델은 도시 강우 유출 관리를 위한 의사결정을 목적으로 개발되었고, 저영향개발 기법의 비용-효율분석과 최적 위치산정 분석이 모델에 포함되어 있다. 이를 이용하여 Li 등²⁵⁾은 비용-효율분석을 실시하였다. 하지만, 아직까지도 많은 연구자²²⁻²⁴⁾들이 단순한 저영향개발 기법의 저감모의 기법에만 집중하여 연구를 진행하고 있는데, 이는 SUSTAIN 모델의 비용-효율분석 사용시, EXCEL 2003 버전과 visual basic이 설치 되어있어야만 비용-효율분석이 제대로 이루어지기 때문에 사용자가 비용-효율분석을 하기가 용이하지 않기 때

문이다. 그럼에도 불구하고, 비용-효율분석 기능을 제외하고 Dry pond와 Wet pond²³⁻²⁴⁾를 고려한 저영향개발과 BMP도 적용이 가능하기 때문에, 사용자 모델이 잘 구축된다면 다양한 저영향개발 기법과 BMP 적용, 비용-효율분석까지 가능하다.

3.3. WWHM

Beyerlein 등⁹⁾은 WWHM 모델을 이용하여 미국 필라델피아와 시애틀 지역의 장기적 저영향개발 기법 모의를 시행하였다. 사용된 저영향개발 기법은 옥상녹화, 식생체류지, 식생수로, 빗물정원, 투수성 포장이다. 모델을 이용하여, 저영향개발 기법 적용 전후의 계절적 강우 패턴과 증발량이 고려되었으며, 저영향개발 기법 설치 유무에 따라 변하는 표면유출, 증발산량, 침투량을 장기적으로 계산하였다. 장기 모의 결과 저영향개발 기법 설치 시 연구 지역 토양의 특성이 저영향개발 기법 저감효과에 크게 영향을 줄을 보여주었다. 이는 저영향개발 기법 설치 시 연구 지역 토양의 수문학적 특성이 불량일 경우, 토양 개량 또는 underdrain의 설치가 필요함을 보여준다.

Back 등²⁶⁾은 농촌, 산림, 도시유역이 섞여 있는 복합토지 이용 유역에 유역조건을 고려한 저영향개발 기법 최적화를 실시하였다. 저영향개발 기법 최적화 시 토양 종류에 따른 수문학적 특성과 수리 시설 특성을 고려하여 최적화를 진행하였는데, 분산형 저영향개발 기법과 집중형 저영향개발 기법 시설을 나누어 모의하였으며, WWHM 모델을 이용하여 유역 내의 저영향개발 기법의 최적 위치 및 크기를 산출하였다. 모델 최적화 결과에서 최적 토양은 Sandy loam로 분석되었으며, 집중형 저영향개발 기법의 경우 유역말단에 상대적으로 큰 크기의 식생체류지 면적을 요구하였다. 분산형 저영향개발 기법의 경우 도시지역에 대하여 높은 식생체류지 면적을 요구하였다. WWHM 모델은 EPA SWMM과 SUSTAIN 모델과 달리, 도시 지역뿐만 아니라, 농촌 산림지역까지 고려가 가능하다. 또한, 모델에 포함된 저영향개발 기법인 수직관과 오르피스 관을 이용하여 보다 상세하고 자세한 수리시설물에 대하여 모의가 가능하다. 하지만, 아직까지는 미국을 제외하고 WWHM 모델을 적용한 사례가 많지 않다. 우리나라에 적용된 사례로는 Back 등²⁶⁾ 뿐이며, 대부분 미국을 중심으로 모델이 적용되어 오고 있다. 그 이유로는 WWHM 모델이 미국을 중심으로 개발되어 국내의 유역현황, 기상자료가 입력되어 있지 않기 때문에, 국내에 적용을 하기에는 어려움이 많았다. 이에 최근 WWHM 모델을 우리나라 현황에 맞게 수정한 K-LIDM²⁷⁾ 모델이 개발되었다. 이 모델은 우리나라의 현황뿐만 아니라 기상, 기후정보가 들어가 있으며, 사용자가 쉽게 유역모델을 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 저영향개발 기법을 적용 또한 용이하다. 향후, 이를 이용하여 국내에 적용이 늘어날 것이라 기대하고 있다.

4. 저영향개발 기법 모델의 한계

저영향개발 기법 설치하기 전, 수치 모델을 이용하여 저영향개발 기법 적용효과를 파악하는 것은 효과적인 저영향개발 기법 적용을 위해 필수적이다. 이에 따라 많은 저영향개발 기법 모델들이 개발되었으며, 그 중 EPA SWMM, SUSTIAN, WWHM 모델이 많이 사용되고 있다. 이러한 모델들은 다양한 저영향개발 기법 모의가 가능하며, 도시구역 관망과 연동하여 더욱 자세한 모델링이 가능하다. 하지만, EPA SWMM 모델의 경우, 저영향개발 기법으로 모의되는 침투 후 토양 내의 물 흐름의 경우 토양의 불포화, 포화 조건을 고려하지 않고 모의가 되고 있다. 아래의 식은 EPA SWMM에서 사용되는 저영향개발 기법 내의 토양 내 물 흐름을 모의하는 식이다.

$$f_2 = K_s \exp(-HCO(\phi - \theta_2)), \theta_2 > \theta_{FC} \quad (1)$$

$$f_2 = 0, \theta_2 \leq \theta_{FC} \quad (2)$$

여기서, f_2 는 토양 내 물 흐름 [cm/min], θ_2 토양층의 함수량, HCO는 decay constant θ_{FC} 는 포장용수량이다. 위의 식의 경우, 포장용수량 보다 적은 함수량일 때는 토양 내의 물 흐름이 멈추게 된다. 또한, 토양층이 포화된 후, 토양 층위에 수위가 생길 경우도 고려되지 않았다.²⁸⁾ 이는 옥상녹화나 식생체류지와 같이 underdrain을 사용하는 저영향개발 기법 경우, 단순한 변형된 Darcy equation으로만 토양 내 물 흐름을 계산하기 때문에, 토양에서 underdrain로 물 유입을 모의하는 경우 신뢰도가 떨어질 수 있다.²⁸⁾ 아래의 식은 EPA SWMM에서 사용되는 저영향개발 기법 내의 underdrain 모의식이다.

$$q = C(h)^\eta \quad (3)$$

여기서, h 는 underdrain 내의 hydraulic head이며, C 는 underdrain discharge coefficient (cm-($\eta-1$)/s), η 는 underdrain discharge exponent이다. EPA SWMM의 underdrain의 경우 파라메타 C 와 η 를 이용하여, underdrain pipe의 특성을 고려하며 모의하고 있다. 하지만, 간단한 지수식 (Eq. 3)을 이용하여, underdrain을 너무 단순화 시켜서 계산하고 있기 때문에 정확한 모의가 힘들다. 아래의 식은 EPA SWMM에서 사용되는 저영향개발 기법 내의 수질 저감 식이다.

$$C_{out} = \frac{[(C_{out}Q_{out})_{(non-LID)} + C_{rain}iA_{LID}]}{(Q_{out,non-LID} + iA_{LID})} \quad (4)$$

여기서, C_{out} 은 저영향개발 기법 처리 유출수 농도[mg/m³]이며, $C_{out,non-LID}$ 은 저영향개발 기법 처리 전 유출수 농도 [mg/L]이며, $C_{out,non-LID}$ 은 저영향개발 기법 처리 전 표면 유출량[m³/min]이며, C_{rain} 는 강우의 오염물질 농도[mg/L]이며, i 는 강우량(m/min)이며, and A_{LID} 저영향개발 기법

면적[m²]이다. 위의 식을 볼 때, 현재 EPA SWMM에서 사용되는 저영향개발 기법의 수질저감효과는 비로 인한 희석 효과 밖에 없다.²⁸⁾ 이는 토양이나, 식생들로부터의 수질 저감효과를 볼 수 없기 때문에, 저영향개발 기법 수질의 저감 효과의 예측에 대한 신뢰성을 약화 시킨다.

SUSTAIN 모델의 경우 또한 EPA SWMM과 비슷한 기작을 가지고 있기 때문에, EPA SWMM과 같이 저영향개발 기법 내의 토양 내 물흐름이 부정확하게 모의가 된다. 수질 기작의 경우, CSTR을 이용하여 모델을 수질 모의를 하고 있기 때문에, 오염물질의 decay를 고려할 수 있으나, 토양과 식생으로부터의 저감효과를 볼 수가 없다.

WWHM 모델의 경우 Darcy 식과 반고흐튼 식을 이용하여, 토양 내 물흐름을 모의하고 있다. 이 두 식은 토양 내 수문학적 특성을 고려하고 있기 때문에, 저영향개발 기법의 토양층 모의의 정확도가 향상되었다. 하지만, WWHM 모델 역시 오염물질의 decay외에 별다른 수질 기작을 고려하지 않기 때문에 상세한 수질모의가 쉽지 않다. 향후, 저영향개발 기법 모델 개발 시 좀 더 자세한 수질모의 기작의 추가가 필요하다.

5. 결론

최근 도시화로 인한, 수문학적 변화를 줄이기 위하여 많은 지자체 및 국가에서 저영향개발 기법을 적용을 권장 및 설치하고 있다. 하지만 저영향개발 기법을 적용시, 높은 설치 및 유지관리 비용이 들며, 현재 저영향개발 기법 설치에 관한 구체적인 매뉴얼 또는 가이드라인이 부족한 실정이다. 이에 많은 연구자들이 실제 도시구역에 저영향개발 기법 적용 모의 연구를 계속적으로 진행함으로써, 기존보다 구체적이고 실용적인 저영향개발 기법 설치 가이드라인이 나타나고 있다. 또한 현재까지 개발된 모델을 이용하면, 다양한 종류의 저영향개발 기법 시설들을 모의해 볼 수 있으며, 실제 도시구역 또는 복합 구역의 수리 수문, 수질모의가 가능하여 실제구역에서의 저영향개발 기법 적용효과를 볼 수 있다. 뿐만 아니라 저영향개발 기법 적용 전후로 홍수 저감 분석, 물순환 개선 분석, 수질저감 분석 등 다양하게 저영향개발 기법의 저감효과를 볼 수 있다. 하지만, 현재 우리나라에 연구된 저영향개발 기법 효과 분석 사례는 간단한 저영향개발 기법의 효과를 분석하는데 집중하고 있을 뿐만 아니라, 대부분 단기 강우 사상에 초점이 맞추어져 있어서 장기 저영향개발 기법 모의에 대한 연구 및 최적 저영향개발 기법 크기 및 최적 위치 등과 같이 최적화에 대한 연구가 미비한 실정이다. 향후, 우리나라의 구역 특성에 맞는 저영향개발 기법 설계 최적화의 연구 및 기존의 개발된 모델의 부정확한 토양 내 물 흐름, 구체적인 수질 기작을 포함하는 모듈 개발 등이 정확한 저영향개발 기법 모의를 위하여 필요하다.

References

- Al-Kharabsheh, A. and Ta'any, R., "Influence of urbanization on water quality deterioration during drought periods at South Jordan," *J. Arid Environ.*, **53**(4), 619~630(2003).
- Goonetilleke, A., Thomas, E., Ginn, S. and Gilbert, D., "Understanding the role of land use in urban stormwater quality management," *J. Environ. Manage.*, **74**(1), 31~42(2005).
- Davis, A. P. and McCuen, R. H., *Stormwater Management for Smart Growth*, 1st ed., Springer Science & Business Media, New York (2005).
- Barbosa, A. E., Fernandes, J. N. and David, L. M., "Key issues for sustainable urban stormwater management," *Water Res.*, **46**(20), 6787~6798(2012).
- Elliott, A. and Trowsdale, S. A., "A review of models for low impact urban stormwater drainage," *Environ. Model. Softw.*, **22**(3), 394~405(2007).
- Gironás, J., Roesner, L. A., Rossman, L. A. and Davis, J., "A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM)," *Environ. Model. Softw.*, **25**(6), 813~814(2010).
- Jeon, J. H., Park, S. S., Park, C. K. and Kim, T. D., "Evaluating implementation of EPA SUSTAIN model for cost-effective LID design," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **14**(2), 135-143 (2014).
- Shoemaker, L., Riverson, J., Alvi, K., Zhen, J. X., Paul, S. and Rafi, T., "SUSTAIN-A framework for placement of best management practices in urban watersheds to protect water quality," U. S. EPA (2009).
- Beyerlein, D., "Low impact development computations—WWHM," in *proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2011*, American Society of Civil Engineers, California (2011).
- Choi, H. S., "Application and Effects of Low Impact Development in Urban Regeneration of Waterfront Area," Korea Environment Institute (2010).
- National Institute of Environmental Research (NIER), *Optimal Management of non-point surge for total pollution load mangement sysmtem* (2012).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Guideline for Waterfront development* (2012).
- Land & Housing Institute, *Development Plan for Water-cycle city in Asan New Twon* (2010).
- U. S. EPA, *Reducing stormwater costs through low impact development (LID) strategies and practices*, Nonpoint Source Control Branch Washington, D. C. (2007).
- Rossman, L. A., *Storm water management model user's manual*, version 5.0 (2010).
- Nonpoint Source Research Group, *The technical report for reducing facility of non-point source* (2015).
- Qin, H. P., Li, Z. X. and Fu, G., "The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics," *J. Environ. Manage.*, **129**, 577~585(2013).
- Yeon, J. S., Kim, S. D., Choi, H. I., Shin, H. S. and Kim, E. S., "Rainfall runoff reduction analysis for the construction and maintenacne costs of LID facilities," *J. Korean Soc. Hazzard Mitig.*, **15**(4), 281~287(2015).
- Baek, S. S., Choi, D. H., Jung, J. W., Lee, H. J., Lee, H., Yoon, K. S. and Cho, K. H., "Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach," *Water Res.*, **86**, 122~131(2015).
- Zhang, K., Chui, T. F. M. and Yang, Y., "Simulating the hydrological performance of low impact development in shallow groundwater via a modified SWMM," *J. Hydrol.*, **566**, 313~331(2018).
- Bhandari, S., Jobe, A., Thakur, B., Kalra, A. and Ahmad, S., "Flood damage reduction in urban areas with use of low impact development designs," in *proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2018*, Minnesota, 52~61(2018).
- Chen, C. F., Sheng, M. Y., Chang, C. L., Kang, S. F. and Lin, J. Y., "Application of the SUSTAIN model to a watershed-scale case for water quality management," *Water*, **6**(12), 3575-3589(2014).
- Gao, J., Wang, R., Huang, J. and Liu, M., "Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area," *Ecol. Modell.*, **318**, 177~183(2015).
- Baek, S. S., Choi, D. H., Jung, J. W., Yoon, K. S. and Cho, K. H., "Evaluation of a hydrology and run-off BMP model in SUSTAIN on a commercial area and a public park in South Korea," *Desalin. Water Treat.*, **55**(2), 347~359(2015).
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Han, R., Shi, T., Qu, X. and Wu, Y., "Evaluating the Hydrologic Performance of Low Impact Development Scenarios in a Micro Urban Catchment," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **15**(2), 273(2018).
- Baek, S. S., Ligaray, M., Park, J. P., Shin, H. S., Kwon, Y., Brascher, J. T. and Cho, K. H., "Developing a hydrological simulation tool to design bioretention in a watershed," *Environ. Model. Softw.*, (2017).
- Korea integrated urban & LID design model system, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, (2018).
- United States Environmental Protection Agency, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume 3-Water quality*, (2016).