

SWMM 모델을 이용한 지속 가능한 도시 소하천 관리를 위한 LID 기법의 적용 방안 연구

Application of LID Methods for Sustainable Management of Small Urban Stream Using SWMM

한양희 · 서동일*[†]
Yanghui Han · Dongil Seo*[†]

한국토지주택공사 토지주택연구원 · *충남대학교 환경공학과
Land & Housing Institute, Korea Land and Housing Corporation
*Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received October 14, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted October 30, 2014)

Abstract : Though the upper stream basin area of Gwanpyung-Cheon in Daejeon, Korea is protected as Green Belt Zone, the stream is under constant environmental pressure due to current agricultural practices and infrastructure development in its basin area. To develop appropriate integrated water resources management plan for the stream, it is necessary to consider not only water quality problems but also water quantity aspect. In this study, Storm Water Management Model (SWMM) was calibrated and validated with sets of field measurements to predict for future water flow and water quality conditions for any rainfall event. While flow modeling results showed good agreement by showing correlation coefficient is greater than 0.9, water quality modeling results showed relatively less accurate levels of agreements with correlation coefficient between 0.67 and 0.87. Hypothetical basin development scenarios were developed to compare effect on stream water quality and quantity when Low Impact Development (LID) technologies are applied in the basin. The results of this study can be used effectively in decision making processes of urban development Gwanpyung-Cheon area by comparing basin management alternatives such as LID methods.

Key Words : Storm Water Management Model (SWMM), Water Quality Modeling, Stormwater Management, Low Impact Development (LID), Urban Stream Management, Integrated Water Resources Management (IWRM)

요약 : 도시 하천의 지속가능한 관리를 위해서는 적절한 유역 관리가 필수적이다. 현재 대전 관평천의 상류 유역은 그린벨트 지역으로 보호되어 있으나 해당 유역의 농경활동이나 도로공사 등 인위적인 요인으로 인해 관평천은 지속적인 환경문제를 나타내고 있다. 관평천의 적절한 종합 수자원 관리 계획을 수립하기 위해서는 하천의 수질문제 뿐만 아니라 유량 문제도 의미있게 고려되는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 관평천 유역에 대해 대표적인 도시형 강우 유출 모형인 storm water management model (SWMM)을 구축하고 실측자료를 활용하여 보정 및 검증을 실시하고 향후 임의의 강우 조건에 대해 하천 주요지점의 유량 및 수질을 예측할 수 있도록 하였다. 유량 보정은 상관관계수(R^2)가 0.9 이상의 양호한 수준으로 수행되었으나 수질 보정은 상대적으로 오차가 큰($0.67 \leq R^2 \leq 0.87$) 것으로 나타났다. SWMM 모델을 이용하여 상류 유역이 개발되었을 경우 환경에 영향을 적게 미치는 LID (low impact development) 기법을 적용하는 가상의 시나리오를 구성하여 비교할 수 있는 방법을 구축하였다. 본 연구결과는 향후 관평천 상류지역을 개발하거나 환경관련 관리 계획을 수립할 경우, LID기법을 포함한 합리적인 수자원 기법 선택에 많은 도움을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : SWMM, 수질 모델링, 빗물관리, 저영향개발, 도시하천관리, 통합수자원관리

1. 서론

도시의 소하천은 해당 유역의 빗물이 이동하는 가장 중요한 통로이다. 유역의 빗물은 토양에 수분을 공급하면서 자연 및 농경지역의 식물 성장에 가장 중요한 요소를 형성하며 또한 토양으로 스며든 빗물은 지하수를 채워서 강우가 장기간 내리지 않은 경우에도 하천의 기본적인 유량을 유지해 주는 중요한 역할을 수행한다. 그러나 도시지역의 경우 지속적인 발전에 따라 도로나 건물에 의해 포장면적이 증가하고 우수관거가 발달됨에 따라 이러한 자연적인 빗물의 공급체계는 상당 부분 파괴될 수밖에 없다. 도시의 소하천은 강우시 유역에서 쏟아져 들어오는 비점오염물질로

인해 심각하게 오염되어 있으며, 줄어든 지하수로 인해 강우 후 급속하게 건천화 현상을 나타내는 경우가 대부분이다. 정부에서는 생태하천 사업이나 복원사업 등을 통해 하천의 여건을 개선하기 위해 지속적으로 노력을 하고 있지만 아직까지 도시 하천의 관리는 경관관리의 수준에 머무르고 있으며 하천의 유량이나 수질에 대해 원인을 제어하는 수준의 종합적인 관리는 본격적으로 이루어지지 못하고 있는 실정이다.¹⁻³⁾ 또한 도시의 소하천은 주민의 생활과 공간적으로 가장 가까운 뿐만 아니라 산책이나 운동 등 도시 생활의 활력을 회복하는 역할을 할 수 있는 장소로서 활용도가 증가하는 추세로 합리적인 관리가 시급한 실정이다.

도시의 소하천을 합리적으로 관리하기 위해서는 빗물의

[†] Corresponding author E-mail: seodi@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6679 Fax: 042-822-5610

공급과 분포 그리고 오염특성들을 파악하고 이들을 효율적 또는 지속가능하게 활용할 수 있는 방법을 적용하는 것이 중요하다. Low impact development (LID) 개념은 도시의 소하천 관리에 있어 유역에서 영향을 될수록 최소화하는 방향으로 개발한다는데 초점이 맞추어져 있으며 자연적인 빗물의 이동을 복원하고 도시에 산재한 비점오염을 제어하는데 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다.⁴⁻¹³⁾

본 연구에서는 대전 관평천의 합리적 수질관리를 위해 아직 개발이 완성되지 않은 상류지역의 유역에 대하여 수량 및 수질 조건을 평가하고 관리대안을 평가할 수 있는 유역모델을 수립하였다. 또한 관평천의 상류지역을 개발할 경우를 가정하여 유역의 LID 기법이 관평천의 유량 및 수질에 미치는 영향을 예측하여 향후 개발계획에 기초자료로 활용하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상지역

본 연구의 대상지역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 금강 수계 제1지류인 갑천(국가하천)의 금강 합류점으로부터 3.2 km 상류에 위치한 금강 제2지류(지방2급 하천)인 관평천으로서 유역면적 10.85 km², 유로연장 5.45 km의 규모를 나타낸다.

관평천은 동화울교를 중심으로 상류는 자연적인 하천의 모습을 가지고 있는 비도시지역으로 대부분 논과 밭, 과수원, 산지 등으로 구성되어 있으나, 일부지역에는 주거 지역, 학교, 연구소 및 식당들도 존재하고 있다. 하류는 2000년 이후 계획적으로 개발된 주거지역, 상업지역, 산업지역이 대부분을 차지하며 분류식 하수관거가 설치되어 있어 강우시에는 우수관을 통해 빗물이 하천으로 빠르게 유출되는 전형적인 도시형 소하천의 모습을 가지고 있다.³⁾

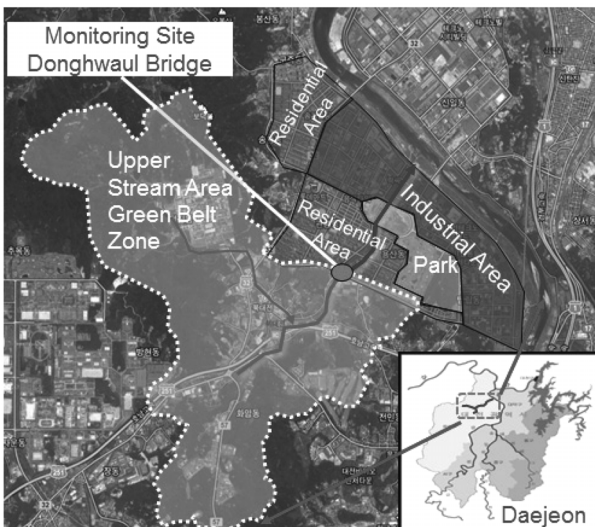


Fig. 1. Location of the study site and monitoring station for SWMM calibration.

2.2. SWMM 모델의 구축

2.2.1. SWMM의 특성

본 연구에서 사용한 Storm Water Management Model (SWMM)모형은 1971년 미국 환경국(United States Environmental Protection Agency, USEPA)의 지원 아래 Metcalf & Eddy 사가 도시유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발한 이래 LID 기술의 적용에 따른 영향을 고려할 수 있는 V5.0 까지 개발되어 있다.¹⁴⁾ SWMM 모델은 도시유역내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지하수 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형으로서 강우에 의한 도시 유출 유량과 수질예측에 널리 사용된 바 있다. 우리나라에서도 이 모델을 적용하여 오염부하량을 산정하려는 연구^{3,4,15-20)} 및 모델 예측의 정확도를 개선하고자 하는 연구^{6,21-22)} 등에 사용되는 등 유역의 강우에 따른 유량 및 오염부하 산정에 지속적으로 이용되고 있다.

SWMM은 도시유역 뿐만 아니라 비도시유역에 적용할 수 있으며, 단일 및 연속강우에 의한 모의가 가능하고 배수구역의 크기에 상관없이 적용이 가능하다는 특징이 있다. 본 연구진은 SWMM 모델을 관평천의 일부 시험 유역에 성공적으로 적용한 바 있으며³⁾ 본 연구에서는 관평천의 상류 포함 기존에 포함되어 있지 않은 유역에 대하여 SWMM 모델을 구축하고 보정 및 검증 작업을 실시한 결과를 보고하고자 한다.

2.2.2. 모형구축 및 주요 입력변수 산정

SWMM 모델의 구축을 위한 지형 및 시설물 자료는 대전시에서 제공한 수치지도(1:5,000), 대덕테크노밸리 조성사업의 우수유역도, 우수계획평면도 등을 바탕으로 하였다. 각 배수관망의 분포와 주요 토구로 차집 되는 지역의 분석을 통하여 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 17개의

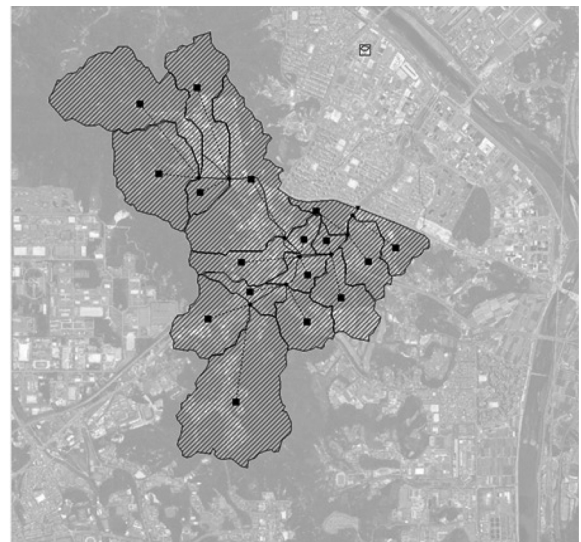


Fig. 2. Subcatchment division of the study site for SWMM modeling.

소유역(Subcatchment)으로 구분하여 구성하였다.

강우시 유역에서의 오염물 유출은 강우가 시작되기 이전 비강우시에 도시의 표면에 오염물이 축적되는 현상(Build-up)과 강우개시 이후 표면 유출의 에너지에 의한 씻김현상(Wash-off)의 두 가지 과정에 의해 표현이 가능하다. 유역에서 씻겨 내려온 오염물질은 도시지역의 경우 우수관거 또는 합류식 하수관거를 통해 하천으로 이송되며, 비도시지역의 경우는 지표면 위로 흐르는 우수에 포함되어 하천으로 유입이 되어 하천에서의 오염물질 부하를 증가시킨다.

SWMM에서는 오염물질의 축적은 유역면적이나 도로변의 길이에 비례하여 증가하며 선행 건기일수가 중요한 역할을 하며, 강우기간 동안 씻김 현상은 강우강도와 비례한다. 오염물질 축적량을 계산하기 위해 Power, Exponential, Saturation식 등이 사용 가능하며, 씻김량의 계산을 위해 Exponential, Rating Curve, Event Mean Concentration식 등이 또한 사용 가능하다.

본 연구에서는 서동일과 방철호의 연구에 사용된 방법³⁾과 마찬가지로 시행착오적인 방법을 통해 아래의 식 (1)과 (2)에 나타난 바와 같이 건기시 오염물질의 축적(Buildup)은 면적에 비례하여 Power Function에 의해 쌓인다고 가정하였고 씻김(Washoff)은 강우시 Exponential Function에 의해 유출되는 것이 가장 적절하다고 판단하였다.

Power Function:

$$B = M_m(C_1, C_2 t^{C_3}) \tag{1}$$

여기서,

- B = pollutant buildup (mass/unit of subcatchment area)
- C₁ = maximum buildup possible (mass per unit of area or curb length)
- C₂ = buildup rate constant
- C₃ = time exponent

Exponential Function:

$$W = C_1 q C_2 \cdot B \tag{2}$$

여기서,

- W = washoff load (mass/time)

C₁ = washoff coefficient

C₂ = washoff exponent

q = runoff rate per unit area (length/time)

B = pollutant buildup (total mass)

수질 항목으로 부유물질(SS), 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP) 등을 모의하였으며 침투량 산정은 Green-Ampt 식²³⁾을 이용하였다.

2.3. SWMM-LID 모형의 적용

SWMM 5.0 버전의 LID 모듈은 물수지의 균형을 유지하면서 표면 유출, 표면저류, 침투 그리고 증발산에 의한 유량변화를 제어할 수 있도록 고안되어 있으며 각 소유역의 특성으로 입력된다. SWMM 5.0 내에서 모의 가능한 기법은 식생저류장치(Bio-Retention Cell), 투수성 포장(Porous Pavement), 침투도랑(Infiltration Trench), 빗물통(Rain Barrel), 그리고 식생도랑(Vegetative Swale) 등 5가지 종류로 분류된다. 그러나 SWMM-LID 모형은 이 다섯 가지 분류 속에서 수문·수리학적 특성을 결정하는 다른 변수들을 변화시켜서 다양한 기법들을 모의할 수 있다.

소유역 내에서 LID 기법은 한가지의 방법만을 적용할 수도 있지만 유역 내에서 여러 가지 LID 기법을 함께 적용할 수도 있다. 이 방법에서 각 장치는 동시에 병렬적으로 처리된다고 보게 되며 특정 LID 장치로부터 나온 유출량이 다른 장치의 유입량으로 처리되는 것과 같은 직렬형태로 연결된 것으로는 보지 않는다. 장치가 설치된 후 LID 장치에 의해 대체된 원래 유역면적을 고려하여 유역의 불투수 면적비와 유역 폭에 대한 수정이 필요하다.

2.4. LID 기법 선정

LID는 기술 특성에 따라 크게 식생기술, 침투기술, 저류기술, 융합/전략기술 등으로 분류할 수 있다. 최지용 등은²⁴⁾ LID기법을 활용한 자연형 비점오염원 관리방안으로서 토양개량, 생태저류셀, 건식우물, 식생여과대, 식생완충대, 식생수로, 침투도랑, 수리 동력학적 분리기, 빗물통, 나무화분상자 여과장치, 식생지붕, 투수성 포장 등 12가지로 분류하고 있으며, 임²⁵⁾은 친환경적 도시개발을 위한 LID 기술 적용에 대한 연구에서는 10가지, 환경부²⁶⁾에서는 11가지 로

Table 1. Summary of LID technologies applied in this study

LID Technology	SWMM-LID Module	Description	Note
Green Roof (GR)	Bio retention cell	Consist of grass and small plants. Intercepts runoff from roof of building and can treat pollutants.	- Can be applied to various types of building - Can reduce thermal island effect and provide rest area in urban area
Porous Pavement (PR)	Porous pavement	Use porous asphalt, concrete or block to enhance infiltration out of rainfall	Good for paved road, parking lot and blocks. Not recommended for gas stations and express ways.
Street Planter (SP)	Bio retention cell	Place filter material under street plant and treat pollutant in runoff	Treat polluted Ronoff from Impervious Area
Rain Barrel (RB)	Rain barrel	Storage that can use runoff water from roof top.	Can reduce surface runoff and can be used for backup water resources

분류한 바 있다. 본 연구에서는 국내에서 비교적 자주 적용되고 있는 LID 기법 중 옥상녹화, 투수성포장, 나무화분, 빗물통을 선정하여 시나리오를 구성하고 모의에 적용하였다. 각 LID 기법별 특징은 환경부²⁶⁾의 가이드라인에 자세하게 소개되어 있으며 그 대강의 특징을 정리하면 Table 1과 같다.

2.5. 시나리오 구축

LID 기법 적용에 관한 시나리오 산정시 연구대상지역인 관평천 상류지역을 대상으로 하였으며, 상류지역의 경우 농경지 등으로 현재 개발제한구역으로 지정되어 있어 개발 계획이 수립되어 있지 않은 상태이다. 본 연구에서는 도시 개발 전 상황으로서 현재의 상태를 기본적인 상태로 보고 시나리오 1로 명명하여 모델링 시스템을 구축하였다. 연구대상 지역의 경우 향후 개발이 예상되나 향후 설계에 불투수 지역이 어느 정도 분포할 지는 현재로서 알 수가 없다. 그러나 하류 지역과 같이 개발이 이루어지는 경우에는 도시개발 업무 지침에 따라 녹지면적은 최소 20% 이상, 도로나 학교 등 기반시설은 개발 면적의 최소 각각 10% 이상이 되는 기준을 맞추도록 설계될 가능성이 있다. 여타 지역은 주거지역, 산업지역 및 상업 지역으로 모두 개발된다고 볼 수 있다. 시나리오 2는 불투수 지역의 80%로 가정하여 구성하였다. Table 2는 환경부²⁷⁾가 조사한 우리나라 주요 도시의 평균 불투수 면적을 나타낸다. 이 표의 자료는 산림지역을 포함한 전체에 대한 산정 결과이며 집중적으로 개발이 이루어진 관평천 유역의 경우와는 다소 차이가 있을 수 있다. 또한 본 연구에서 비교된 시나리오는 가상의 시나리오에 불과하며 실제로 적용할 수 있기 위해서는 집중적인 현장 조사와 각종 기법에 대한 검증은 수행한 후 비교하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

시나리오 3, 4, 5 및 6의 경우 Table 3에 나타난 바와 같이 가상의 토지이용계획을 수립하여 나무화분(SP), 빗물통

Table 2. Average impervious area percentage in major cities in Korea

Division	Seoul	Busan	Gwangju	Daegu	Incheon	Daejeon	Ulsan
Impervious area (%)	57.22	25.68	24.53	19.54	19.06	18.97	11.56

Table 3. Scenario development for LID technology applications in the upper basin of Gwanpyung-Cheon

Condition	Scenario No.	Description	
Before development	1	As is now	
	w/o LID	2	After the development without LID Method (W/O LID)
After development	LID	3	Application of Street Planter (SP)
		4	Application of Rain Barrel (RB)
		5	Application of Green Roof (GR)
		6	Application of Porous Pavement (PP)
		7	Simultaneous Application of Scenario 3, 4, 5, and 6

(RB), 옥상녹화(GR), 그리고 투수성포장(PP) 등 LID 기법을 각각 적용한 예를 대상으로 시나리오를 수립하였다. 각 LID 기술의 적용 면적으로 유역의 각종 자료를 검토하고 연구자의 판단에 따라 다음과 같이 결정하였다. 나무 화분은 대전의 도로 밀도, 시설 개수 등을 고려하여 전체면적의 2%, 빗물 저류조는 공공시설의 20% 및 기타 5%로 가정하여 전체 면적의 4.8%, 옥상 녹화는 공공시설의 20% 및 기타 10%로 가정하여 전체 면적의 8% 그리고 투수성 포장도 도로 10%, 공공시설의 15% 및 기타 25%가 적용될 수 있는 것으로 분석하여 전체 면적의 18%가 적용 가능한 것으로 결정하였다. 시나리오 7은 위 방법들을 함께 종합적으로 적용할 경우에 대한 것으로 보고 시나리오를 구축하였다. LID 기법이 적용되는 경우는 상류의 불투수층의 면적 비율이 80% 정도에 이르는 것으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SWMM 모형의 보정

본 연구에서는 관평천을 대상으로 본 연구진이 수행한 기존의 연구 자료를³⁾ 참고하여 SWMM 모델의 입력 자료를 구축하고 2013년 8월, 9월 및 11월 강우시 각각 연속적으로 실측한 3회의 수질 및 유량 분석을 실시한 자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 9월의 자료를 이용한 모델의 보정 결과와 8월의 자료를 이용한 검증결과는 Fig. 3과 4에 각각

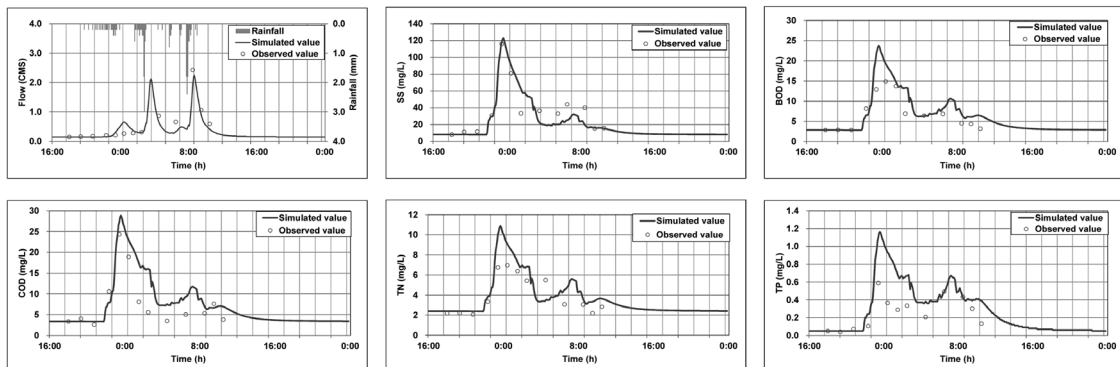


Fig. 3. Calibration of SWMM model for upper stream area (Sep. 10-11, 2013).

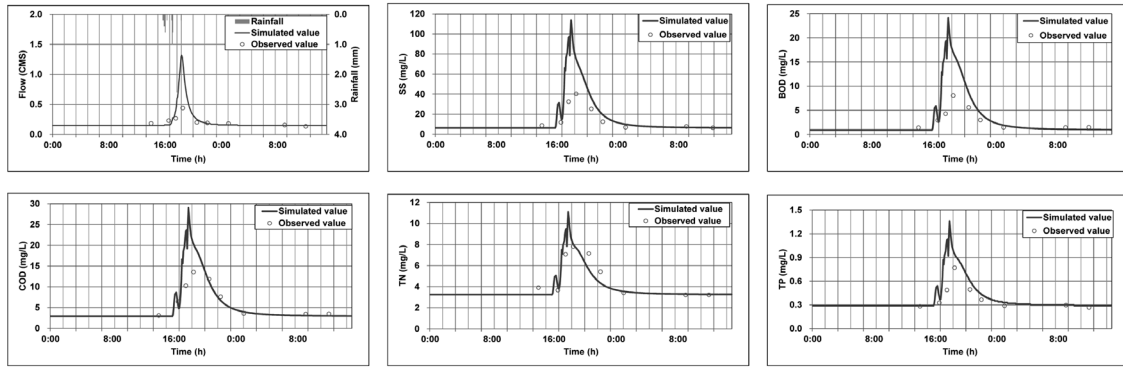


Fig. 4. Verification of SWMM model for upper stream area (Aug. 4~5, 2013).

Table 4. SWMM calibration and verification results (R^2)

		Flow	SS	BOD	COD	T-N	T-P
Calibration	Sept. 10-11	0.915	0.861	0.822	0.760	0.807	0.684
Verification	Aug. 04-05	0.916	0.865	0.679	0.729	0.769	0.669
	Nov. 23-24	-	0.854	0.816	0.797	0.795	0.825

Table 5. Calibrated coefficients of pollutant buildup and washoff

Pollutant	Buildup			Washoff	
	Func.	Rate constant	Power constant	Func.	Coefficient Exponent
SS		0.50	0.30	0.60	0.050
BOD		0.18	0.15	0.30	0.015
COD	Power	0.21	0.18	Exp.	0.30
TN		0.10	0.12	0.30	0.115
TP		0.01	0.08	0.30	0.015

나타낸 바와 같으며, Table 4는 11월의 검증결과를 포함한 각 모의 결과의 상관관계를 나타낸다.

현장의 자료를 이용한 SWMM 모델의 보정은 식 (1)과 (2)에 나타낸 바와 같은 오염물질의 축적(buildup)과 씻김에 의한 유출(washoff) 현상에 관한 식에 대한 매개변수를 기존의 연구³⁾를 참조하여 시행착오적인 방법을 이용하여 실시하였으며, 보정된 매개변수는 Table 5에 나타낸 바와 같다.

3.2. 시나리오 모의 결과

3.2.1. 유출량 모의 결과

3.2.1.1. 시나리오 2: 불투수 면적의 증가

모델의 보정에 사용되었던 2013년 9월의 강우 및 매개변

Table 6. Hydrological distribution in the upper stream area of the Gwanpyung-Cheon for hypothetical impervious area percent changes

Imperviousness	Evaporation	Infiltration+Storage	Runoff
As Is	4.34	86.13	9.53
50%	5.60	49.00	45.40
60%	5.92	39.66	54.42
70%	6.26	30.25	63.49
80%	6.71	20.70	72.59
90%	7.05	11.28	81.67

수를 활용하여 상류 유역의 평균유량 및 총유출량은 Table 6에 나타난 바와 같이 불투수층이 증가할수록 증가하며 지하수로 이동하는 유량의 비율은 점차로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 향후 개발이 진행되었을 경우 평상시 하천 유지유량이 대폭 감소할 수 있다는 것을 의미하는 것으로서 관평천의 생태 및 하천 환경에 심각한 지장을 초래할 수 있는 것으로 판단된다.

3.2.1.2. 시나리오 3-7: LID 기법의 개별 적용에 따른 효과 분석

Table 7은 앞서 설명한 각종 LID 기법에 대한 Scenario를 적용할 경우, 유량 분포의 변화 특성을 나타내고 있다. 전반적으로 LID 기법을 적용하는 경우 평균 유량과 최대 유량이 감소하는 것으로 나타났으며 지하 침투 또는 표면 저류량은 증가하는 것으로 나타났다. LID 기법 적용에 따른 물수지 분석결과 본 연구의 시나리오 번호가 증가할수록 표면 유출량은 감소하는 반면 침투 또는 저수량이 증가하

Table 7. Rainwater water distributions in the upper stream basin area for different scenarios

Method	Scenario No.	Average. flow (m ³ /sec)	Max. flow (m ³ /sec)	Total volume (m ³)	Evaporation (%)	Infiltration+Storage (%)	Runoff (%)	
W/O LID	Before	1	0.285	2,247	49,228	4.34	86.13	9.53
	After	2	0.917	6,492	158,124	6.71	20.70	72.59
LID	SP	3	0.901	6,468	155,394	6.68	23.19	70.13
	RB	4	0.879	6,394	151,699	6.64	26.35	67.01
	GR	5	0.825	6,274	142,336	6.41	35.88	57.71
	PP	6	0.728	6,113	125,617	6.30	45.82	47.88
	Total	7	0.559	5,719	96,467	6.02	63.98	30.00

Table 8. Pollution load reduction percent in the upper stream basin area for different scenarios

Method	Scenario No.	TSS	BOD	COD	TN	TP
SP	3	1.65	1.90	1.86	1.63	21.62
RB	4	4.09	4.87	4.76	4.20	23.52
GR	5	6.58	7.64	7.47	6.46	24.91
PP	6	15.01	17.60	17.19	15.41	32.95
SP+PP	6-1	16.79	19.62	19.17	17.12	34.63
GR+PP	6-2	21.57	25.26	24.68	22.33	39.50
Total	7	27.64	32.73	31.98	29.09	45.30

는 것으로 나타났다. 이는 위의 시나리오 번호가 증가할수록 관평천 유역의 지하수 충진을 증가시킴으로써 비강우시에도 관평천의 기저유량의 유지가 상대적으로 유리하게 된다는 것을 의미한다.

그러나 어떠한 경우에도 개발 전의 상태와는 확연한 차이가 있으며 이는 관평천 상류의 개발이 실시될 경우 관평천의 자연환경을 최대한 보존하기 위해 본 연구에서 모의된 기법에 추가하여 적용할 수 있는 방법들을 검토해야 한다고 본다. 하천의 평균유량은 SP의 경우 1.7%, RB 4.1%, GR 10.0%, PP 20.6%가 각각 감소하는 것으로 나타났으며 모든 기법을 함께 적용하였을 경우 39.0%가 감소하는 것으로 나타났다. 최대유량의 경우 LID 기법에 따라 0.4%~11.9%까지 감소하는 것으로 나타났다.

3.3.2. 수질 모의 결과

Table 8은 시나리오별 LID기법 적용에 따른 오염물질 부하량의 변화를 나타내고 있다. 대부분의 항목에서 투수성포장 기법이 가장 저감 효율이 높은 것으로 나타났으며 모든 기법을 종합적으로 적용할 경우 SS 27.6%, BOD 32.7%, COD 32.0%, TN 29.1%, TP 45.3% 정도 각각 저감되는 것으로 나타났다. 그러나 유량의 경우에서와 마찬가지로 본 시나리오에서 적용된 방법을 모두 적용하여도 개발 전의 상태에 비하여 상당한 오염의 발생이 예상되며 개발 시에는 이에 대한 면밀한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

장²⁸⁾은 옥상녹화 및 나무화분 기법을 동래천 유역에 적용한 결과 BOD 29.37%, SS 25.94%, 온천천 유역에 옥상녹화, 나무화분, 투수성포장 기법을 적용하여 BOD 29.94%, SS 30.68%의 저감 효율을 보고한 바 있으며, 박²⁹⁾은 신도시를 대상으로 투수성포장, 빗물통, 빗물정원 기법을 적용한 결과 TN 10~23%, TP 28~55%의 범위에서 저감되는 것으로 보고하였다. 본 연구의 결과는 오염부하의 저감효율의 범위는 기존 연구와 유사하게 산정되었으나 이는 강우 조건 및 유역 특성에 따라 서로 달라지기 때문에 직접적인 비교는 어려울 것으로 생각된다.

4. 결론

대전 관평천의 미개발 상류 유역을 대상으로 지형, 토지 이

용 및 토양분포 자료 등을 이용하여 강우유출모형인 SWMM을 구축하였으며, 3회에 걸쳐 강우시 현장 연속 측정자료를 이용하여 보정 및 검증을 수행하였다.

SWMM 모형의 보정 및 검증을 실시한 결과 유량의 경우 상관계수가 0.9 이상으로서 비교적 양호한 수준을 보여 주었으나 수질 항목들은 전체적으로 0.7의 수준으로서 유량의 경우에 비하여 상대적으로 낮은 상관성을 나타내었다. 그러나 전체적으로 시나리오를 비교하는 데에는 무리가 없는 보정 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

연구 대상 지역 상류의 개발을 가정한 경우, 불투수층의 면적을 50-90% 범위에서 변화시켜서 모의를 실시한 결과 불투수 면적이 증가할수록 강우시 하천의 평균 유량 및 최대 유량이 증가하나 지하수 충전률이 감소하여 강우 후 건천화에 의해 하천 유지용수 부족 등의 상황이 우려될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 향후 개발이 이루어지는 경우 적절한 유역관리 계획의 수립이 바람직할 것으로 판단된다.

대전 관평천 상류의 개발면적이 일반적인 도시계획의 예에 따라 80% 수준으로 보고 LID 기법 중 나무화분(SP), 빗물통(RB), 옥상녹화(GR), 그리고 투수성포장(PP) 등 및 동시에 여러 방법을 적용하는 경우도 검토하였다. LID 기법의 적용면적이 증가함에 따라 하천의 평균 유량 및 최대유량이 감소하는 것으로 나타났으며 오염물질 부하량도 상당 부분 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 적용한 어떠한 방법도 자연적인 상태의 유량 및 수질 조건에 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 실제의 설계에서는 관평천 및 유역의 건강성을 보전하기 위해 면밀한 분석 및 방법론에 대한 연구가 진행되는 것이 바람직하다고 판단된다.

본 연구결과는 향후 관평천 상류지역 개발을 가정한 가상적 상황에 대해 전·후 물수지 변화의 오염부하량의 정량적 비교·분석을 할 수 있는 방법을 제시하여 추후 유역과 연계한 관평천의 관리방법의 수립에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 유사한 사례의 소하천 관리에 있어서도 유역과 연계한 종합적 수질관리(integrated water resources management, IWRM) 방안으로서 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 2012년도 충남대학교 학술연구비 및 대전녹색환경지원센터의 2013년도 연구개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

KSEE

Reference

1. Seo, D., "Necessity of Small Stream Management for River Management of Korea," *Magazine Kor. Water Resour. Assoc.*,

- 42(5), 18~22(2009).
2. Seo, D., "Necessity of Basin Management for the 4 Major River Restoration Project," *J. Kor. Soc. Civil Eng.*, **57**(4), 26~28(2009).
 3. Seo, D. and Fang, T., "Application of Automatic Stormwater Monitoring System and SWMM Model for Estimation of Urban Pollutant Loading During Storm Events," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **34**(6), 373~381(2012)
 4. Jang, Y. S., Kim, M. E., Baek, J. S. and Shin, H. S., "The Study on Development and Verification of Raonfall-Runoff Simulator for LID Technology Verification," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **47**(6), 513~522(2014)
 5. Jeon, J. H., Lim, K. J., Choi, D. and Kim, T. D., "Modeling the Effects of Low Impact Development on Runoff and Pollutant Loads from an Apartment Complex," *Environ. Eng. Res.*, **15**(3), 167~172(2010).
 6. Jeon, J. H., Choi, D. H. and Kim, T. D., "LIDMOD Development for Evaluating Low Impact Development and Its Applicability to Total Maximum Daily Loads," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **25**(1), 58~68(2009).
 7. Jeon, J. H., Kim, J. J., Choi, D. H., Han, J. W. and Kim, T. D., "Guideline of LID-IMPs Selection and the Strategy of LID Design in Apartment Complex," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **25**(6), 886~895(2009).
 8. Clary, J., Leisenring, M., Poresky, A., Earles, A. and Jones, J., "BMP Performance Analysis Results for the International Stormwater BMP Database," World Environmental and Water Resources Congress. pp. 441~449(2011).
 9. Clary, J., Quigley, M., Earles, A., Jones, J., Strecker, E. and Poresky, A., "Expanding the International Stormwater BMP Database Reporting, Monitoring, and Performance Analysis Protocols to Include Low Impact Development (Part 1)," Low Impact Development. pp. 1299~1308(2010).
 10. Poresky, A., Quigley, M., Leisenring, M., Strecker, E. and Clary, J., "Site-Level LID Monitoring and Data Interpretation: New Guidance for International BMP Database Studies (Part 2)," Low Impact Development, pp. 1387~1396(2010).
 11. Clary, J., Quigley, M., Earles, A., Leisenring, M., Strecker, E. and Jones, J., "Integration of Low Impact Development Studies into the International Stormwater BMP Database," World Environmental and Water Resources Congress. pp. 1~10(2009).
 12. Ellebracht, B. and Clark, S., "Relating Stormwater Treatment Device Design Criteria to Effluent Quality: An In-Depth Statistical Analysis of the BMP Database," World Environmental and Water Resources Congress, pp. 325~329(2013).
 13. Montalto, F., Behr, C., Alfredo, K., Wolf, M., Arye, M., Walsh, M., "Rapid assessment of the cost-effectiveness of low impact development for CSO control," *Landscape Urban Plann.*, **82**, 117~131(2007)
 14. Rossman, L. A., "Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0," EPA/600/R-05/040(2010).
 15. Park, J. H., Yoo, Y. G., Park, Y. K., Yoon, H. T., Kim, J. G., Park, Y. S., Jeon, J. H. and Lim, K. J., "Analysis of Runoff Reduction with LID Adoption using the SWMM," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **24**(6), 806~816(2008).
 16. Yoon, C. K. and Ham, J. H., "Prediction of water quality in estuarine reservoir using SWMM and WASP5," *Kor. Soc. Environ. Agric.*, **19**(3), 252~258(2000).
 17. Yoon, C. K., Jeon, J. H. and Ham, J. H., "Comparison of SWMM and rating curve methods for pollutant loading estimates from watershed," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **17**(2), 157~168(2001).
 18. Lee, J. Y., Jang, S. H. and Park, J. S., "Application of SWMM for Management of the Non-point Source in Urban Area -Case Study on the Pohang City-," *J. Environ. Health Sci.*, **34**(3), 247~254(2008).
 19. Lee, Y. C., Yoon, Y. S. and Lee, N. J., "Establishment of Rainfall and Contaminants Runoff Modeling System for the Joman River Watershed Using SWMM," *J. Environ. Sci. Int.*, **18**(9), 983~992(2009).
 20. Lee, S. H., Jung, T. H., Lee, J. M. and Lee, K. S., "Lecture Note for The 3rd SWMM-GE Workshop," pp. 3~7(2010).
 21. Kim, H. J., Jang, C. H. and Noh, S. J., "Development and Application of the Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool Considering Urbanization (I) - Model Development," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **45**(2), 203~215(2012).
 22. Kang, T. and Lee, S., "Development on an Automatic Calibration Module of the SWMM for Watershed Runoff Simulation and Water Quality Simulation," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **47**(4), 343~356(2014).
 23. Akan, A. S. and Houghtalen, R. J., "Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality," Wiley, pp. 37~44(2003).
 24. Choi, J. Y., Lee, B. K., Shin, H. S., Kim, S. D. and Kang, D. K., "Development of Natural Nonpoint Source Load Management Methods using LID Technologies," Korea Environmental Institute, Prepared for Ministry of Environment of Korea(2009).
 25. Lim, Y. K., "A study of LID technologies for friendly environmental urban development," Dissertation, Pusan National University(2011).
 26. Korea Environment Corporation, "Guidelines for LID Technology Applications," Prepared for Ministry of Environment of Korea(2013).
 27. Ministry of Environment of Korea Press Release "Green Area Percent of Korea... City of Ulsan was ranked as No. 1," 09. 23(2014).
 28. Jang, J. K., "The Study on Evaluation of Water Cycle Improvement and NPS Reduction in Watershed with LID-based SWMM," Ph. D., Dissertation, Pusan National University (2013).
 29. Park, J. Y., "Analysis of rainfall runoff reduction for LID applied new town development using SWMM," Master Thesis, University of Science and Technology(2013).