

## 복합토지유역에서의 LID적용에 따른 유출량 저감효과 분석을 위한 SWAT-SWMM 연계모델 개발

우원희 · 류지철\* · 문종필\*\* · 장춘화 · 금동혁 · 강현우 · 김기성 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과  
\*국립환경과학원 수질총량연구과  
\*\*국립농업과학원

### Development of Coupled SWAT-SWMM to Evaluate Effects of LID on Flow Reduction in Complex Landuse

Won Hee Woo · Jichul Ryu\* · Jong Pill Moon\*\* · Chun Hwa Jang · Donghyuk Kum · Hyunwoo Kang · Ki-sung Kim · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

\*National Institute of Environmental Research Water Pollution Load Management Research Division

\*\*National Academy of Agricultural Science

(Received 15 December 2011, Revised 1 May 2012, Accepted 10 May 2012)

#### Abstract

In recent years, urbanization has been a hot issues in watershed management due to increased pollutant loads from impervious urban areas. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model has been widely used in hydrology and water quality studies at watershed scale. However, the SWAT has limitations in simulating water flows between HRUs and hydrological effects of LID practices. The Storm Water Management Model (SWMM) has LID capabilities, but it does not simulate non-urban areas, especially agricultural areas. In this study, a SWAT-SWMM coupled model was developed to evaluate effects of LID practices on hydrology and water quality at mixed-landuse watersheds. This coupled SWAT-SWMM was evaluated by comparing calibrated flow with and without coupled SWAT-SWMM. As a result of this study, the  $R^2$  and NSE values with SWAT are 0.951 and 0.937 for calibration period, and 0.882 and 0.875 for validation period, respectively. the  $R^2$  and NSE values with SWAT-SWMM are 0.877 and 0.880 for validation period. Out of four LID scenarios simulated by SWAT-SWMM model, the green roof scenario was found to be most effective which reduces about 25% of rainfall-runoff flows.

**keywords** : Low Impact Development (LID), SWAT, SWAT-SWMM, SWMM

## 1. 서론

수자원의 보존 및 효율적인 관리와 오염총량관리제의 목표수질 달성을 위해 유역의 장기적인 유출분석은 매우 중요하다(김남원 등, 2009). 우리나라의 대부분의 유역에서는 도시화와 산업화 등으로 인하여 도시로 인구가 집중되면서 토지개발이 급격히 이루어졌고(권준희 등, 2010), 이에 따라 농지와 임지 등의 투수면적은 감소하는 반면 주거지 및 상업지, 도로와 주차장 등 불투수면적은 지속적으로 증가하여 강우시 유출량 또한 증가하였다(오동근 등, 2010). 서울시의 불투수면적은 과거(1962년) 7.8%에서 2011년 47.2%로 증가하였고, 2011년 7월에 내린 폭우(강서·양천 지역은 시간당 최대 98.5 mm, 3시간 동안 최대 261 mm)로 인해 유출량 또한 2010년에 비해 10%에서 48%나 증가하였다.

이로 인한 피해를 예방하기 위해서 환경연합은 획일적으로 하수관거를 늘리는 공사보다는 홍수발생 저감대책을 세워야 한다고 주장하였으며, 도로 포장방법을 개선하고, 공원 및 운동장을 주변보다 낮춰 지하수 침투를 돕는 것이 우선시 되어야 한다고 주장한다(Mt뉴스, 2011). 이러한 방법들은 현재 미국 및 선진국에서 친환경적 도시개발 시 적용하고 있는 Low Impact Development (LID) (Prince George's County, 1999; US EPA, 2000; Pitt, R., 2004)와 매우 밀접한 연관을 갖는다. LID는 유출이나 유사 발생 전 처리 방식에 초점을 맞춘 기법으로 보다 더 자연 친화적인 도시 설계 디자인을 말한다(박준호 등, 2008). 지난 2010년 국내에서는 친수구역활용에 관한 특별법이 제정(2010년 12월)되어 새만금사업 및 4대강 사업과 관련하여 정부기관에서 하천정비사업을 시행할 때 LID기법을 보편적으로 적용해야 한다는 계획을 발표하였다(최희선, 2011). 이러한 계획을 수행하기 위해서는 먼저 유역의 유량 및 수질 현황을 파악하는 것이 중요하다. 우리나라의 경우 유역에서의 유량 및

† To whom correspondence should be addressed.  
kjlim@kangwon.ac.kr

수질을 평가하는 방법으로 모니터링과 모델링 기법이 널리 이용되고 있지만 이 중 모니터링은 시간, 인력, 장비 등을 많이 필요로 하는 제한점을 가지고 있어, 최근 많은 연구자들에 의해 모델링 기법이 보다 더 많이 사용되고 있다(최재완 등, 2011). 유역에서의 강우에 의한 수문 순환과, 하천수질을 모의할 수 있는 모형으로는 TANK, Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) (Leavesley et al., 1983), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold, 1992; Arnold et al., 1998), Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) (Bicknell et al., 2001) 등이 있으며, 이중 특히 SWAT과 HSPF는 준분포형 유역유출모형으로 널리 사용되고 있다(김남원 등, 2009; 박윤식 등, 2007; 류지철 등, 2010; 장재호 등, 2010; 정재운 등, 2011). 그러나 SWAT과 HSPF모형은 준분포형 모형으로서 도시지역의 LID를 평가하기에는 한계가 있으므로, 친환경 도시개발에 널리 사용되는 LID기법의 효과를 정확히 평가할 수 없다.

Storm Water Management Model (SWMM) (Metcalf & Eddy Inc., 1971)은 대표적인 도시유출 모형으로, 도시지역의 강우-유출 모의에 활발히 이용되고 있다(장주형 등, 2006; 이재용 등, 2008; 오동근 등, 2010). 최근 SWMM ver. 5.0이 개발되어, 도시 유역에 대한 LID 기법 평가가 가능해졌다(Lewis, 2010). 하지만 SWMM만으로는 도시 및 비도시지역이 혼재된 유역의 강우-유출 특성을 제대로 반영할 수 없기 때문에, 도시와 비도시지역 모두를 평가하기 위해서는 다른 모형과의 연계가 필요하다. 또한 최근 환경부에서 실시하는 수질오염총량관리제도의(환경부, 2004) 단위유역 목표수질(10년 평균 저수량)을 설정하기 위해서는 SWAT 등의 강우-유출 모형이 이용되고 있다(경기개발연구원, 2010; 국립환경과학원, 2010; 국립환경과학원, 2011). 하지만 단위유역 내 도시 및 비도시지역이 혼재되어 있을 경우, 도시 지역을 SWAT으로 정확하게 모의할 수 없고, LID기법 적용에 따른 도시지역 내 수질개선 효과를 모의할 수 없으므로 수질오염총량관리제도 평가 내 이러한 부분을 개선 및 보완할 수 있도록 하는 유역단위 수문모형과 도시유출해석 모형의 연계가 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 유역단위 준분포모형인 SWAT과 LID기법이 탑재된 SWMM ver. 5.0을 연계하여

유역 내 도시지역과 비도시지역의 유출량 평가가 가능한 SWAT-SWMM 연계모형을 개발하는 것이며, 2) 개발된 SWAT-SWMM 연계모형을 이용하여 LID 적용 전, 후의 유출 특성을 분석하여 LID기법 적용성을 평가하는데 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1. SWAT의 개요

SWAT은 1990년대 초 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service: ARS)에서 개발한 유역규모의 연속모의 모형으로 일단위로 유출, 유사, 영양물질, 부하량의 영향을 평가할 수 있도록 개발되었다(Arnold et al., 1998). SWAT은 장기유량과 수질을 모의할 수 있으며 토지이용도의 형태나 기후 및 식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화 할 수 있는 특징을 지니고 있다(Arnold and Srinivasan, 1994). 또한 유역을 소유역으로 구분하고 이를 HRU (Hydrologic Response Unit)단위로 세분화 하여 유역에서 발생하는 유출 및 영양물질을 모의하고, 다시 소유역으로 합산한 후 하도로 유입되는 구조를 이루고 있다. 각 HRU에서의 물수지는 눈, 토양층, 얇은 대수층, 깊은 대수층의 4가지 형태로 표현되며, 각 HRU로부터의 유출, 유사, 영양물질, 영양성분에 대한 부하량은 소유역 단위로 합산되고 이는 하도, 저류지, 저수지 등을 통한 추적과정을 거쳐 유역출구까지 이르게 되어 유역 총량으로 계산된다(Jha et al., 2004).

### 2.2. SWMM의 개요

미환경부(Environmental Protection Agency, EPA)에 의해 개발된 SWMM은 도시 우수관거망 내의 도시유출을 모의할 수 있는 가장 종합적인 모형으로 도시 유역 내 강우에 따른 유출 및 수질을 평가하는데 널리 활용되고 있다.

본 연구에서는 미국 EPA에서 Graphical User Interface (GUI)를 추가시킨 SWMM ver. 5.0을 사용하였다. 또한 SWMM ver. 5.0에는 5가지 LID기법 모의모듈이 내장되어 있으며, 이 기법으로는 Bio-retention of Cells, Infiltration

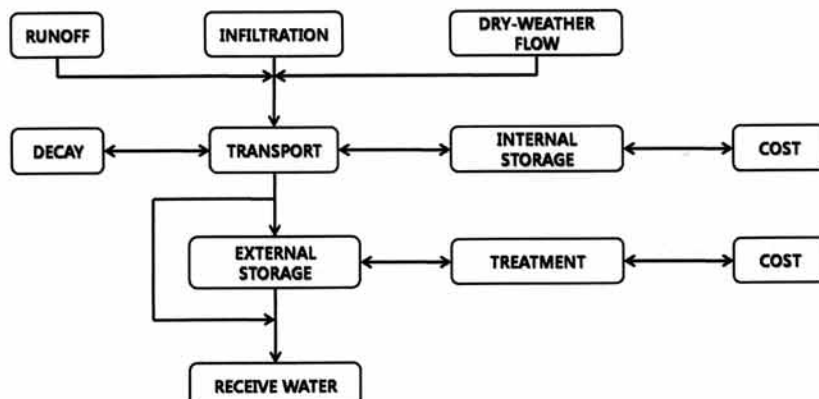


Fig. 1. Overview of SWMM ver. 5.0.

Trenches, Porous Pavement, Vegetative Swales, Rain Barrels 등이 있다(Lewis, 2010). SWMM ver. 5.0은 미국 EPA의 웹사이트에서 무료로 배포하고 있으며, 도시유역 내에서 우기 및 건기의 지표유출과 지하수 유출, 배수관망내의 유출량 추적, 수질모의, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있다(Fig. 1).

2.3. 연구 유역의 선정

본 연구의 대상지역은 강원도 홍천군에 위치한 홍천강 유역으로 유량 실측지점인 서면지점까지를 대상지역으로 하고 있다(한강 중권역유역). 홍천강 중권역은 동경 127°30'50" ~ 128°19'5", 북위 37°32'45" ~ 37°56'45" 사이에 위치하고, 유역면적은 1,566.1 km<sup>2</sup>, 유역평균폭 14.54 km, 유

역평균경사 39.3%, 유역 평균고도는 366.51 m이다(원주지방환경청, 2009). 유역 내에서 SWMM으로 모의한 도시지역의 면적은 총 유역면적의 약 3.74%를 차지한다(Fig. 2).

2.4. SWAT-SWMM 연계모델의 개발

본 연구에서는 도시지역과 비도시지역이 혼재되어있는 유역 내 LID기법 분석을 통하여 유량 저감효과 모의가 가능한 SWAT-SWMM 연계모델을 개발하였으며, 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 도시 지역의 배수체계를 고려하는 수계 분할모듈을 개발하였고, 둘째, 전처리 프로그램을 개발하여 SWAT의 소유역 속성 정보가 SWMM의 입력자료로 변환되도록 하였다. 셋째로 SWAT-SWMM 연계모델을 개발하여 SWMM의 결과 값을 SWAT의 하도추적 과정에 연결될 수 있도록 모델을 수정하였다(Fig. 3).

2.4.1. 도시의 배수체계가 포함된 수계 분할모듈 개발

SWAT과 SWMM의 지형정보인자를 연계하기 위해서는 SWAT과 SWMM의 도시지역 형상 및 면적을 최대한 동일하게 하여야 한다.

SWAT은 DEM과 임계값을 이용하여 소유역을 분할하는데, 임계값은 하천 시점을 형성하기 위한 최소한의 배수면적을 의미하며, 이 값에 따라 소유역의 형상 및 개수가 결정 된다(김철경과 김남원, 2005). 그러나 기존의 SWAT에서 수계 분할 시, 임계값의 최소치는 최대 flow accumulation값의 0.1%이므로, 정밀하게 소유역을 구분할 수 없고 이로 인하여 도시지역의 지형인자를 정확히 추출할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 사용자가 소유역의 경계를 보다 정밀하게 나눌 수 있도록 개발된 Dual Watershed Delineation Module (DWDM) (Jang et al.,

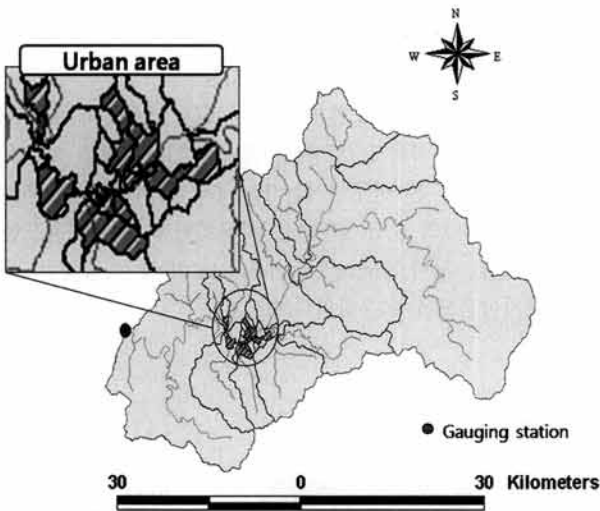


Fig. 2. Distribution of urban areas within the Hongcheon river watershed, Hongcheon-gun, Kangwon-do.

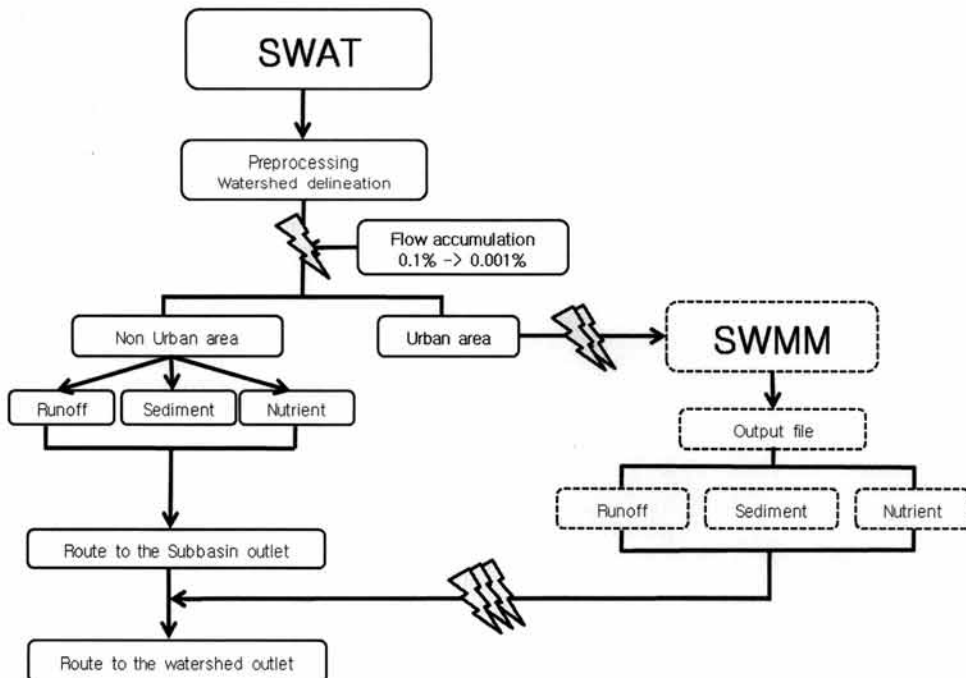


Fig. 3. Overview of SWAT-SWMM.

2009)을 수정한 수계분할 모듈을 개발하였다. 개발된 수계분할모듈은 임계값의 최소치를 최대 flow accumulation값의 0.001%까지 설정할 수 있도록 SWAT 코드를 수정하였다.

2.4.2. SWMM 입력자료 생성을 위한 전처리 프로그램 개발

SWMM은 모형의 특성상 입력자료 구축에 상당히 많은 시간을 요구하며, 입력자료 구축과정에서 많은 오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 수계분할모듈을 이용하여 구분된 도시지역의 소유역 지형인자 정보가 SWMM의 입력자료로 자동 변환되는 전처리 프로그램을 개발하였고, 이를 통해 SWMM의 입력자료 구축 시간을 단축시켰으며, 사용자가 입력자료를 구축할 때 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다. 본 연구에서 개발된 전처리 프로그램은 SWAT의 소유역을 SWMM의 소배수구역으로 변환하며, 이때 소배수구역의 속성 값은 소유역의 속성 값과 동일한 지형인자 정보를 갖는다. SWMM 소배수구역 정보 중 유량산출에 있어 중요한 부분을 차지하는 소배수구역 폭(m)은 SWAT의 소유역 면적과 유역의 길이를 통해 산정하며, 산정된 폭 정보는 전처리 프로그램을 이용하여 SWMM 소배수구역 정보로 자동 입력된다. 또한 SWAT의 수류와 유출구 GIS정보는 전처리 프로그램을 통하여 SWMM의 관거와 맨홀로 자동 변환된다(Fig. 4).

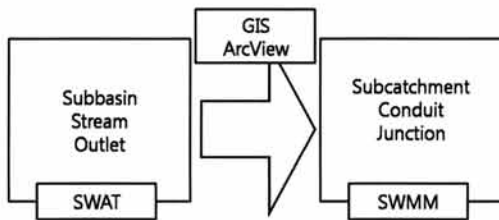


Fig. 4. Generation of SWMM input data using a preprocessing program.

2.4.3. SWAT-SWMM 연계모형 개발

본 연구에서 개발된 SWAT-SWMM 연계모형은 SWMM에서 모의된 도시지역의 유출량이 SWAT 내 적용될 수 있도록 개발되었다. 본 연구에서 사용된 SWAT ver. 2005는

최대 일단위로 유출량이 평가되지만 SWMM은 시간위로 유출량이 평가된다. 따라서 두 모형의 연계를 위해서는 SWMM으로 모의된 시간위 유출량을 일단위로 변환하여야 하며 이러한 과정은 SWAT-SWMM 연계모형에서 자동으로 수행된다. 또한 SWAT-SWMM 연계모형 모의 시, SWAT에서 모의된 도시지역의 유출량은 실제 하천 하도 추적과정에 적용되지 않고 SWMM 일단위 유출량으로 대체할 수 있도록 SWAT 내부 코드를 수정하였다. 그러므로 SWAT-SWMM 연계모형에서 도시지역의 유출량은 SWMM으로, 비도시 지역의 유출량은 SWAT으로 모의된다.

이렇게 개발된 SWAT-SWMM 연계모형은 SWMM의 유출량 결과가 그대로 SWAT의 하천 하도추적과정에 적용되므로 향후 SWMM 버전이 개선되어도 본 연구에서 개발된 연계모형은 그대로 사용이 가능하다.

2.5. SWAT-SWMM 연계모형 적용

2.5.1. SWAT-SWMM 연계모형 입력자료

SWAT-SWMM 연계모형의 입력자료는 SWAT의 입력자료인 DEM, 토지이용도, 토양도, 일단위 기상자료를 기본으로 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 강원도 홍천군 홍천강 유역의 5 m DEM을 사용하였고, 토지이용도는 환경지리정보 서비스(<http://egis.me.go.kr/>)에서 제공하는 중분류 토지이용도를 이용하였다(Fig. 6).

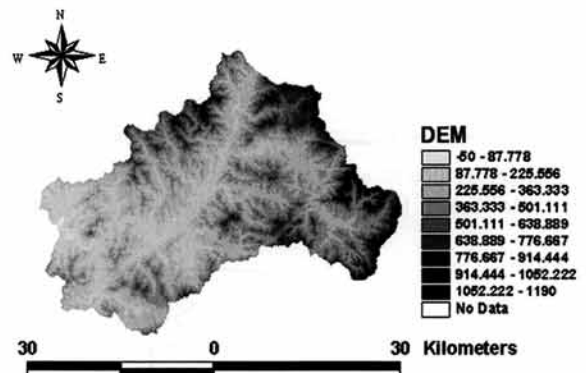


Fig. 5. DEM of Hongcheon river watershed.

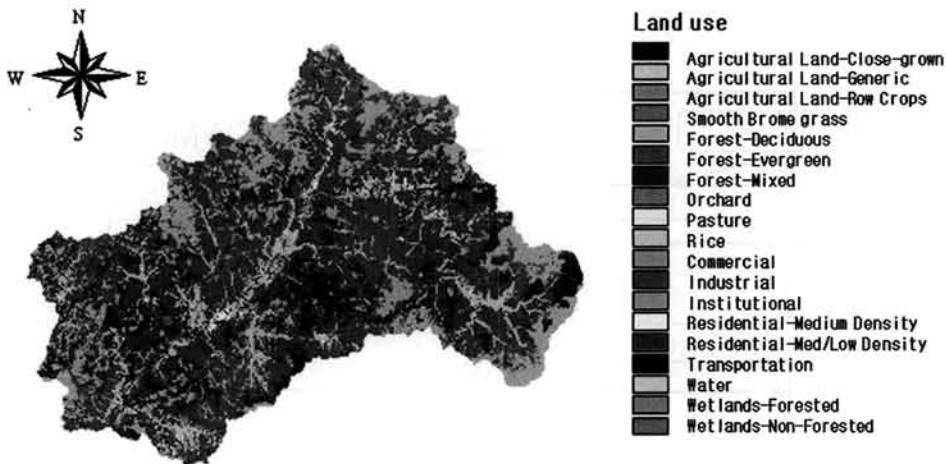


Fig. 6. Land use in Hongcheon river watershed.



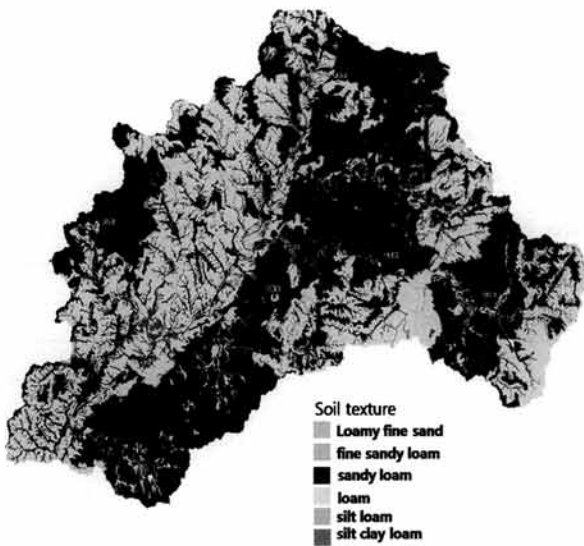


Fig. 7. Soil texture in the Hongcheon river watershed.

Fig. 7은 홍천강 유역의 토성도이다. 본 연구대상지역의 토성은 6개로 분류되며 양질세사토의 면적은 0.02 km<sup>2</sup>이며, 세사양토의 면적은 1.86 km<sup>2</sup>으로 연구지역의 약 1.8%를 차지하고 있다. 또한 사양토와 양토의 면적은 60.25 km<sup>2</sup>와 40.30 km<sup>2</sup>로 57.8%, 38.7%를 차지하고 있다. SWAT의 기상 자료는 기상청에서 제공하는 2009~2010년 일단위 강수량, 풍속, 일사량, 상대습도, 최고온도, 최저온도를 사용하였다.

SWMM의 입력자료로는 기상청에서 제공하는 시단위 강우자료와 홍천군에서 제공받은 우수관거 자료를 이용하였다. 시단위 강우자료의 경우 홍천지점 강우자료로, 2009년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지의 강우자료를 사용하였고, 관거자료는 홍천군에서 제공받은 우수관거의 간선과 지선을 추출하여 사용하였다. Fig. 8은 홍천군에서 제공받은 관거로 각각의 속성(관거의 길이(L), 구경(Φ), 재질, 깊이(D))값을 SWMM의 입력자료로 사용하였다.

2.5.2. SWAT-SWMM 연계모델의 보검정

본 연구에서는 여러 가지 LID기법을 적용한 유출 시나리오를 비교·분석하기 전에 SWAT의 유량관련 매개변수를 보정하였다. 실측 일 유량 자료는 국가 수자원관리종합정보시스템(2011)에서 제공하는 홍천군 서면 지점의 2009~2010년의 자료를 사용하였다. 2009년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지의 실측 일 유량 자료를 이용하여 모형을 보정한 후, 2010년 1월 1일부터 2010년 12월 31일을 모형의 검정기간으로 하였다. Table 1은 보정 시 사용되었던 매개변수들로, 유량과 관련된 27개의 매개변수 중 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)을 통해 추정된 상위 10개의 매개변수이다. SWAT 보정에서 매개변수를 변화하는 방법은 3가지로 첫 번째 방법은 ‘Replace by value’로 주어진 범위 안에서 직접 매개변수를 바꿔주는 방법이다. 두 번째 방법으로는 ‘Add to value’로 매개변수의 기본 값에 주어진 범위의 값을 가감하여 바꿔주는 방법이며, 세 번째 방법으로는 ‘Multiply by value’로 주어진 범위만큼의 비율을 곱한 뒤에 곱한 값을 기본 값에 가감하는 방법이다. 이러한 세 가지 방법을 통해 추정된 매개변수를 이용하여 SWAT- SWMM 연계모델에 적용하였고, 개발된 시스템의 결정계수 (R<sup>2</sup>)와 모형효율지수 (Nash and Sutcliffe efficiency; NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970)를 구하여 모형의 적용성을 평가하였다.

2.6. SWAT-SWMM 연계모델의 LID 기법 적용

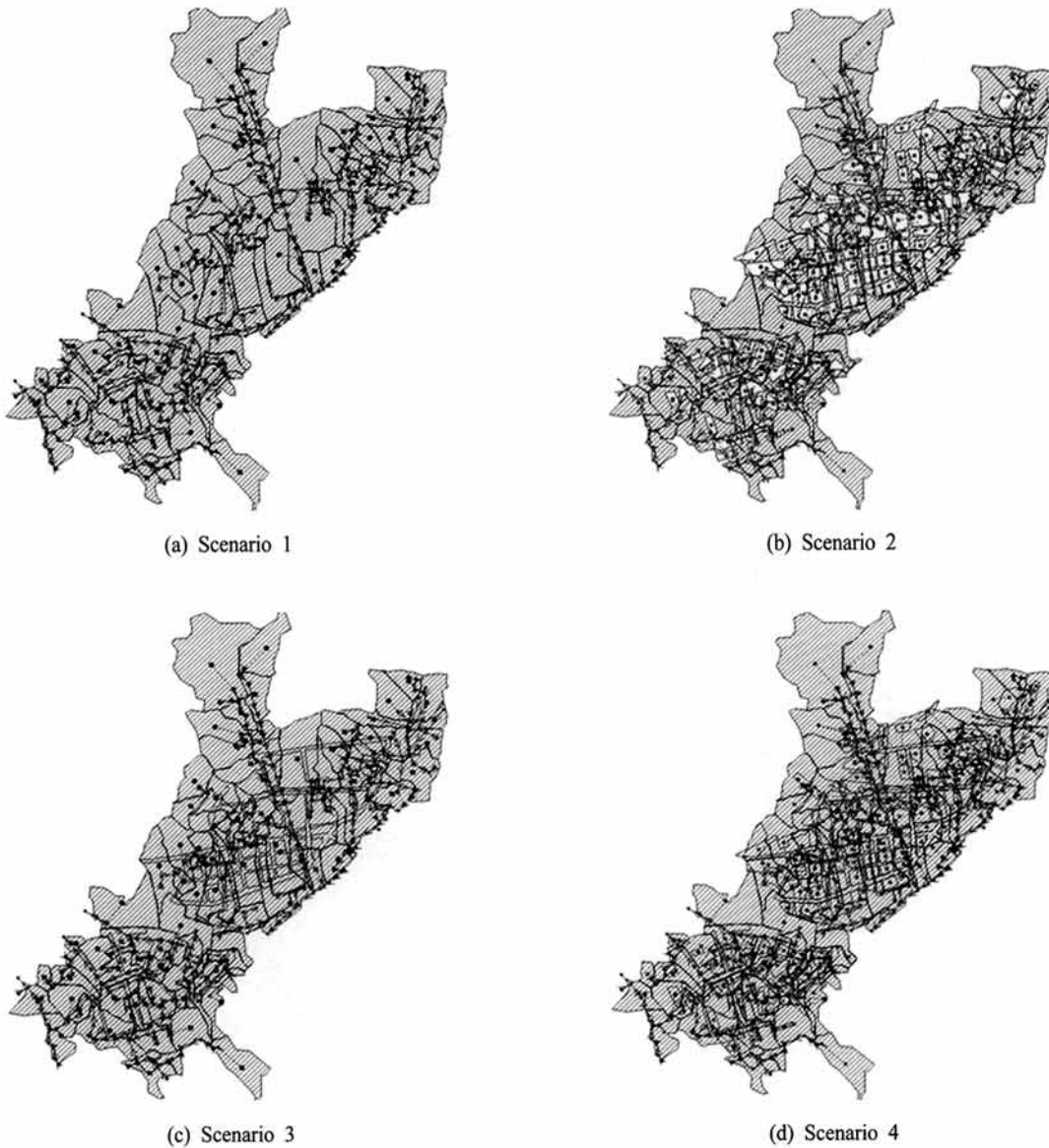
본 연구에서는 개발된 SWAT-SWMM 연계모델의 LID기법 적용에 따른 유출량 저감효과를 비교·분석하기 위하여 4개의 시나리오를 구축하였다. 시나리오 1은 개발된 SWAT-SWMM 연계모델에 LID기법을 적용하지 않은 것이고(Fig. 9(a)), 시나리오 2는 SWMM에 내장되어있는 LID기법 중 옥상녹화를 도시지역 주택 옥상면적의 50% 만큼 적용한 것이며(Fig. 9(b)), 시나리오 3은 투수성 포장을 홍천 도시지역의 주요 간선도로에 적용한 것이다(Fig. 9(c)). 또한 시나리오 4는 시나리오2와 3에서 사용한 옥상녹화 및 투수성 포장을 함께 적용한 것이다(Fig. 9(d)).



Fig. 8. SWMM storm sewer input data.

**Table 1.** Top 10 sensitive parameters manually calibrated for discharge

Parameter	Description	Variation method	Lower bound	Upper bound	Rank of sensitive analysis
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Replace by value	0	1	1
CANMX	Maximum canopy storage	Replace by value	0	10	7
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by value	0	150	3
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by value (%)	-25	25	2
SLOPE	Increase the lateral flow	Multiply by value (%)	-25	25	10
LAT_TIMES	Lateral flow travel time (days)	Replace by value	0	180	0
SURLAG	Surface runoff lag time	Replace by value	0	10	5
SOL_Z	Soil depth	Multiply by value (%)	0	3500	0
APM	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the subbasin	Replace by value	0.5	10	1
PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	Replace by value	0	2	2



**Fig. 9.** Four LID Scenarios used in this study.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. SWAT-SWMM 연계모델의 개발 결과

3.1.1. 도시의 배수체계를 고려한 수계 분할모듈 개발 결과  
 본 연구에서는 도시지역의 배수구역 세분화를 위하여 수계 분할모듈을 개발하였으며, 이를 홍천강 유역의 도시지역에 적용하여 배수구역을 구분하였다. 적용 결과 구분된 도시지역의 배수구역은 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)는 기존의 SWAT의 최소 임계값을 최대 flow accumulation값의 0.1%로 설정하여 수계를 구분한 것이며, Fig. 10(b)는 본 연구에서 개발된 수계 분할모듈을 이용하여 수계를 구분한 것으로, 도시지역의 관거 특성을 고려한 수계가 구분되었다.

#### 3.1.2. 전처리 프로그램 개발

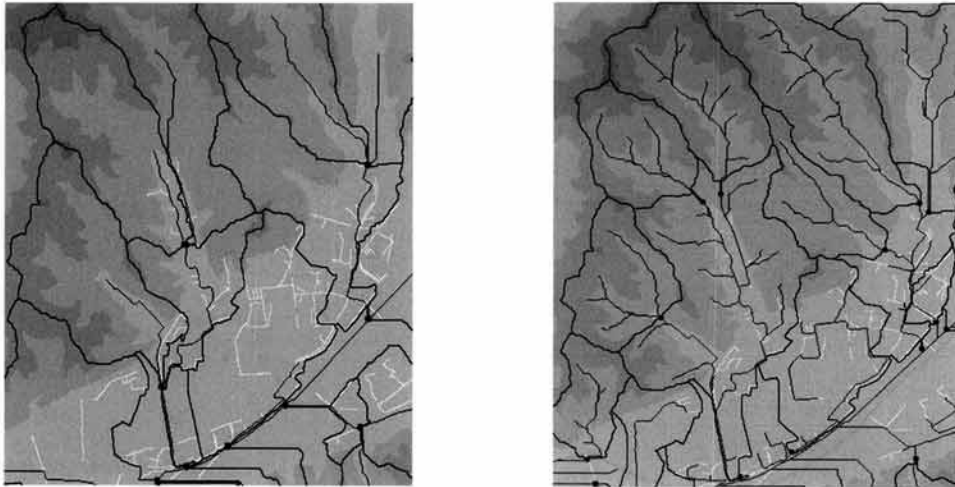
본 연구에서는 수계 분할모듈을 이용하여 구분된 도시지

역의 소매수구역이 SWMM의 입력자료로 사용될 수 있도록 전처리 프로그램을 개발하였다. 개발된 전처리 프로그램은 SWAT의 소유역, 수류, 유출구를 SWMM의 소매수구역, 관거, 맨홀로 변환하며, 유출구의 위치좌표를 자동으로 구축한다. 또한, 개발된 전처리 프로그램은 SWAT의 소유역의 속성 값을 SWMM의 소매수구역의 속성 값과 동일하게 적용하여야 한다.

본 연구에서 개발된 전처리 프로그램을 이용하면 입력자료 구축 시간을 단축시키고, 사용자가 입력자료 구축 시 발생할 수 있는 오차를 최소화하는데 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 3.1.3. SWAT-SWMM 연계모델 개발

본 연구에서 개발된 SWAT-SWMM 연계모델은 도시지역과 비도시지역이 혼재되어있는 유역에서 SWMM으로 산정



(a) Watershed delineation using current watershed delineation module in SWAT

(b) Watershed delineation using improved watershed delineation module in SWAT

Fig. 10. Comparison of current and improved watershed delineation modules.

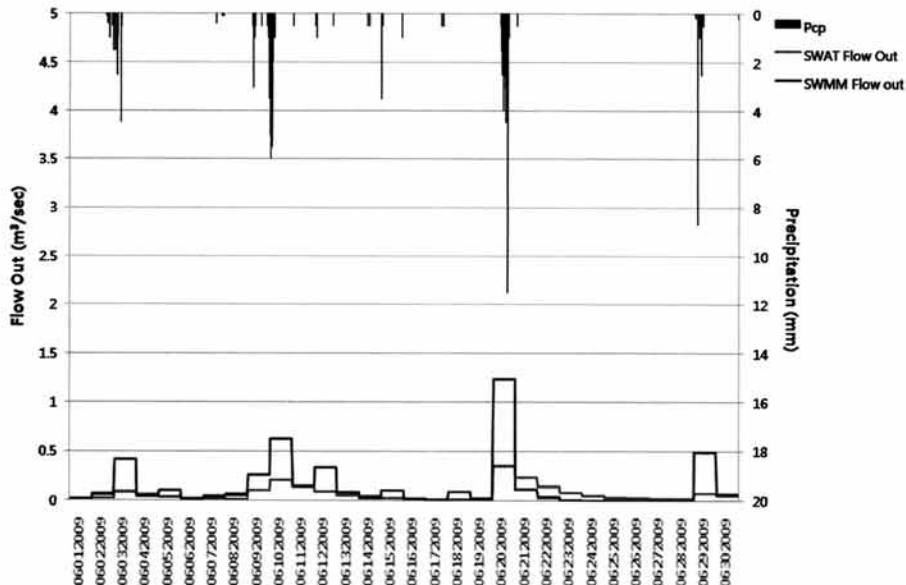


Fig. 11. Hourly precipitation and discharge.

된 도시지역의 유출량이 SWAT으로 연계되도록 모델을 개발하였다. 이때 SWMM의 유출량 결과 값은 SWAT의 결과 값과 연계 전 일단위로 자동 변환하여 적용된다. Fig. 11은 홍천강 유역 도시지역의 한 유출구에서 6월 한 달 동안 시단위 강우량과 SWAT/ SWMM 유출량을 비교한 그래프이다. Fig. 11과 같이 시 단위 강우량과 SWMM의 유출량 경향은 매우 비슷하게 나타났으며, 이는 여름철 집중강우를 잘 반영하는 것이라 판단된다. 또한, SWAT은 일단위 강우량을 사용하므로 강우지속시간에 따른 유출특성을 정확히 판단하기에는 많은 한계점을 가지므로, 정확한 유출특성을 파악하기 위해서는 시 단위 강우량을 이용한 SWAT-SWMM 연계모델을 이용하여 유출량을 모의해야 할 것이라 판단된다.

3.2. SWAT-SWMM 연계모델의 적용 결과

본 연구에서는 SWAT 유량 보정을 통해 10개의 매개변수를 추정하였다(Table 2). 추정된 매개변수를 이용하여 보정된 유량은 보정기간의 NSE가 0.937(Fig. 12), 검정기간 0.875로 나타나 보·검정기간 모두 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 13(a)). 또한 보정된 유량 매개변수를

Table 2. Final values of the parameters calibration for discharge

Parameter	Variation method	Value
ALPHA_BF	Replace by value	0.86
CANMX	Replace by value	9.84
CH_K2	Replace by value	149.63
CN2	Multiply by value (%)	23.71
SLOPE	Multiply by value (%)	-6.32
LAT_TIMES	Replace by value	0.8
SURLAG	Replace by value	0.16
SOL_Z	Multiply by value (%)	23.66
APM	Replace by value	10
PRF	Replace by value	2

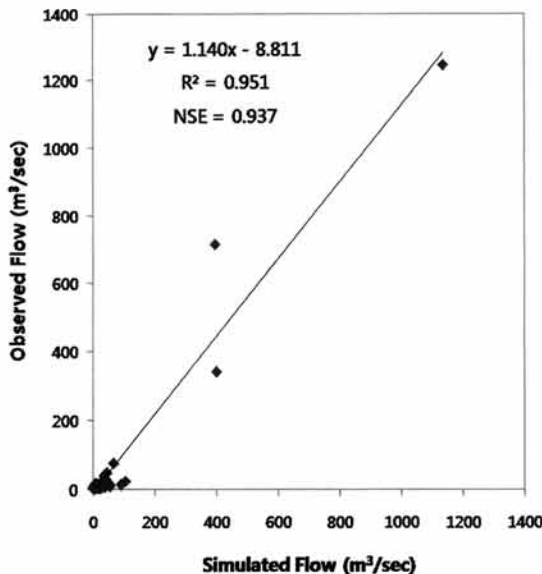
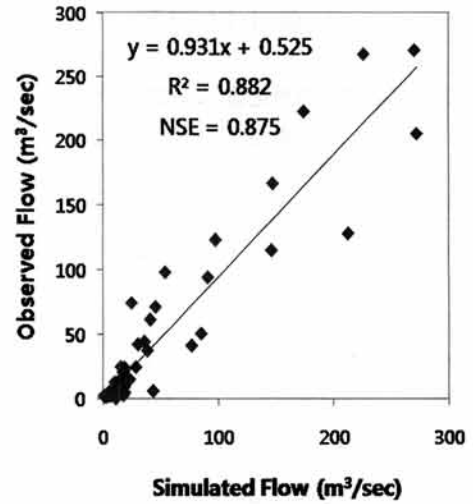
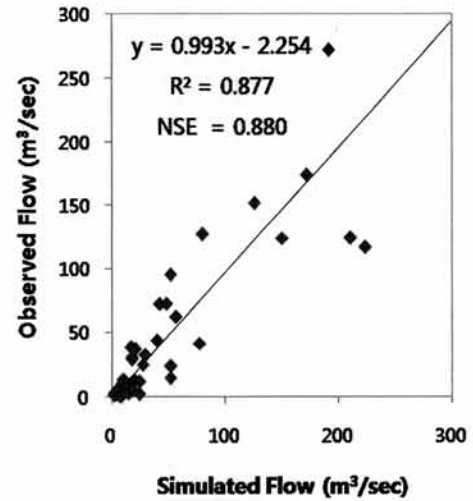


Fig. 12. Scatter plot of observed and simulated discharge of SWAT for the calibration period.



(a) SWAT



(b) SWAT-SWMM

Fig. 13. Scatter plots of observed and simulated discharge for the validation period.

이용하여 SWAT-SWMM 연계모델에 적용한 결과 검정기간은 R²=0.877 NSE=0.880로 나타났다(Fig. 13(b)). Ramanarayanan et al.(1997)의 연구에 따르면, 결정계수(R²)가 0.5이상이고 모형효율지수(NSE)가 0.4이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것이라 제안하였으므로, 본 연구의 보정 및 검정 결과는 이를 만족시키는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 SWAT과 SWAT-SWMM 연계모델 그리고 실측유량을 비교한 것으로 SWAT 보다 SWAT-SWMM 연계모델의 유출량이 실측유량을 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 SWAT-SWMM 연계모델의 검정만 실시한 이유는 도시지역 말단부의 실측데이터가 부족하여, SWMM의 보정이 쉽지 않기 때문이다.

개발된 SWAT-SWMM 연계모델이 실제 유역에서 좀 더 정확하게 유량 및 수질을 모의하기 위해서는 향후 SWAT-SWMM Auto Calibration Module을 개발하여 유역 내 도시지역 말단부와 최종유출구의 유출량을 각각 만족시킬 수 있는 매개변수를 추정하여 모형의 적용성을 높여야 할 것이라 판단된다.



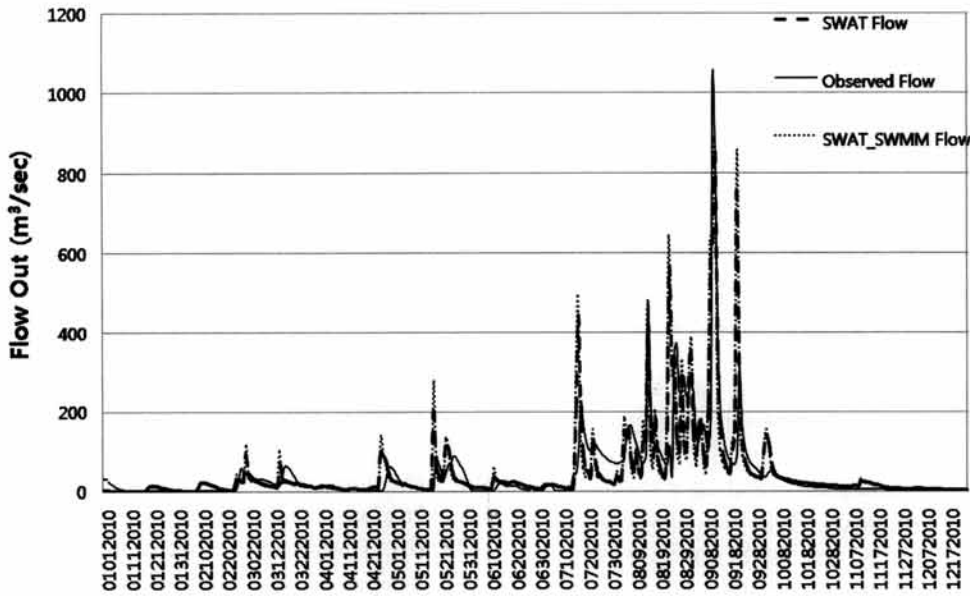


Fig. 14. Comparison of observed flow, simulated flows by SWAT and SWAT-SWMM.

3.3. SWAT-SWMM 연계모델을 이용한 시나리오 분석 결과

유역 내 최종 유출구에서 각 시나리오를 분석한 결과, 시나리오별 일 평균 유출량 및 유출 저감율은 Table 3과 같이 나타났다. 시나리오 1은 LID기법을 적용하지 않은 것으로, 일 평균 유출량은 72.46 m<sup>3</sup>/sec으로 모의되었으며, 옥상녹화를 적용한 시나리오 2에서는 일평균 유출량 54.40 m<sup>3</sup>/sec이 모의되어 총 24.92%의 저감율을 보였다. 시나리오 3은 LID기법 중 투수성 포장을 홍천군 주 간선도로 적용한 것으로, 적용 결과 5.98%의 유출량 저감을 보였다. 시나리오 4는 시나리오2와 시나리오3에서 적용한 옥상녹화와 투수성 포장을 함께 적용한 것으로 30.05%의 유출량 저감율을 보였다. LID기법을 적용한 3개의 시나리오를 분석한 결과 각각의 LID기법을 독립적으로 사용하는 것 보다는 함께 적용하는 것이 유출량 저감에 더 효율적인 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 도시지역과 비도시지역이 혼재되어있는 유역에서의 효과적인 LID적용을 위해 SWAT-SWMM 연계모델을 개발하였고, 이를 대상지역에 적용하여 LID 시나리오별 유출량 및 저감효과를 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 개발된 SWAT-SWMM 연계모델은 도시지역의 배수체계를 고려한 소유역 분할이 가능하며, 전처리 프로그램을 통해 분할된 소유역의 지형인자 정보는 SWMM 입력자료로 변환된다.

- 2) 또한 SWMM 시단위 결과 값은 일단위 결과 값으로 자동 변환되어 SWAT에 적용되며, 이때 SWAT의 도시지역 소유역의 결과 값은 SWAT코드 수정을 통하여 모형에 반영되지 않도록 하였다.
- 3) SWAT 유량 보정을 통해 유량에 민감한 매개변수를 추정하였으며, 추정된 매개변수를 SWAT-SWMM 연계모델에 적용한 결과 R<sup>2</sup>=0.875, NSE=0.880으로 높은 적용성을 보였다.
- 4) 개발된 SWAT-SWMM 연계모델은 복합토지유역에서 LID기법 적용을 통한 유출량 저감효과 모의가 가능하며, LID 기법별 시나리오 분석결과 옥상녹화와 투수성 포장을 함께 적용한 시나리오4가 가장 높은 유출량 저감율을 보였으며, 각 LID기법별로 5.98~30.05%의 저감율을 보였다.
- 5) 향후 연구에서는 유출뿐만 아니라 수질 평가가 가능하도록 SWAT-SWMM 연계모델을 개선할 것이며, 이는 수질오염총량제도 이행평가 모형으로 사용될 수 있을 것이라 판단된다. 또한, SWAT-SWMM Auto Calibration Module을 개발하여 유역 내 도시지역 말단부 최종유출구의 유출량을 각각 만족시킬 수 있는 매개 변수를 추정하여 모형의 적용성을 높여야 할 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 토양·지하수오염방지기술개발사업(과제번호: 12-292, 표토의 복합적 질 평가 및 최적 관리 시스템 구축)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

Table 3. Flow reduction by the 4 LID scenarios

	Scenario 1 (No LID)	Scenario 2 (Green roof)	Scenario 3 (Porous pavement)	Scenario 4 (GR+PP)
Flow (m <sup>3</sup> /sec)	72.46	54.40	68.12	50.68
Reduction ratio (%)	-	24.92	5.98	30.05

## 참고문헌

- 국립환경과학원(2010). 수질오염총량관리를 위한 유역관리 모델 적용방안 연구, pp. 5.
- 국립환경과학원(2011). 팔당 상수원 수질에 미치는 점오염원 및 비점오염원의 영향도 비교 평가(I), pp. 3.
- 권준희, 박인혁, 하성룡(2010). LID기법 적용에 의한 SCS-CN 값 변화가 강우유출 특성에 미치는 영향 분석, *환경영향평가*, 19(1), pp. 49-57.
- 경기개발연구원(2010). 수질오염총량관리계획 수립시 장기 유출 모형의 적용방안, pp. 15-17.
- 김남원, 신아현, 김철겸(2009). 충주댐 유역의 SWAT-K와 HSPF모형에 의한 수문성분 모의특성 비교 분석, *한국환경과학회지*, 18(6), pp. 609-619.
- 류지철, 강현우, 김남원, 장원석, 이지원, 문종필, 이규승, 임경재(2010). SWAT-REMM 모형을 이용한 봉곡천 유역의 수변립 조성에 따른 총 질소 저감 효율 분석, *수질보전 한국물환경학회지*, 26(6), pp. 910-918.
- 박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재(2007). 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가, *수질보전 한국물환경학회지*, 23(4), pp. 467-473.
- 박준호, 유용구, 박명근, 윤희택, 김종건, 박윤식, 전지홍, 임경재(2008). SWMM을 이용한 춘천 거두 1지구의 LID 개념 적용으로 인한 유출 감소 특성 분석, *수질보전 한국물환경학회지*, 24(6), pp. 806-816.
- MT뉴스(2011). <http://news.mt.co.kr/>.
- 오동근, 정세웅, 류인구, 강문성(2010). SWMM을 이용한 도시화 유역 불투수율 변화에 따른 강우유출특성 분석, *수질보전 한국물환경학회지*, 26(1), pp. 61-70.
- 이재용, 장성호, 박진식(2008). 도시지역 비점오염 관리를 위한 SWMM의 적용, *한국환경보전학회지*, 34(3), pp. 247-254.
- 원주지방환경청(2009). 증권역 물환경관리계획, pp. 11.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 김형철(2010). SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 수질관리 영향 평가, *수질보전 한국물환경학회지*, 26(3), pp. 387-398.
- 장주영, 박해식, 박청길(2006). GIS기반 SWMM모형을 이용한 하수도시스템 선정에 따른 도시하천 수질개선효과의 정량적 분석, *수질보전 한국물환경학회지*, 22(6), pp. 982-990.
- 정재운, 장정렬, 임병진, 이영재, 김갑순, 강재홍, 박해린, 조소현, 윤광식(2011). SWAT 자동보정기능을 이용한 새만금유역에서의 유출량 모의, *한국수처리학회지*, 19(1), pp. 11-17.
- 최재완, 신민환, 천세익, 신동석, 이성준, 문선경, 류지철, 임경재(2010). GeoWEPP을 이용한 침엽수림 지역 유출특성 예측 및 다양한 식생 피도에 따른 유출량 평가, *수질보전 한국물환경학회지*, 27(4), pp. 425-432.
- 최희선(2011). 종합적 토지이용 계획을 위한 저영향 개발 기법, *여름호, 물이 있는 세상*, pp. 32-42.
- 환경부(2004). 수질오염총량관리 업무편람, pp. 3.
- 환경지리정보 서비스(2011). <http://egis.me.go.kr/>.
- Arnold, J. G. (1992). Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN. pp. 1-186.
- Arnold, J. G. and Srinivasan, R. (1994). Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS, *Water Resources Bulletin, Journal of American Water Resources Association*, pp. 453-462.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., King, K. W., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, Jr., J. L., Jobs, T. H., and Donigan, Jr., A. S. (2001). Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12, U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, G.A. pp. 1-843.
- Jang, W. S. (2010). *Development of the SWAT DWDM for Accurate Estimation of Soil Erosion from Agricultural Dominant Watershed*, Master's Degree, Kangwon National University, pp. 48-50.
- Jha, M., Gassman, P. W., Secchi, S., Gu, R., and Arnold, J. G. (2004). Effect of Watershed Subdivision on SWAT flow, Sediment and Nutrient Predictions, *Journal of the American Water Resources Association*, 40(3), pp. 811-825.
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., and Saindon, L. G. (1983). Precipitation-runoff Modeling System-User's Manual, *U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report*, pp. 83-4238.
- Lewis A. R. (2010). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. EPA, pp. 1-285.
- Metcalf & Eddy Inc., University of Florida, Water Resource Engineers Inc. (1971). Storm Water Management Model, Volume 1-final Report, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 1-370.
- Pitt, R. (2004). WinSLAMM and Low Impact Development, Paper Presented at the Putting the LID on Stormwater Management, College Park, MD, pp. 13.
- Prince George's County. (1999). Low-impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach, Prince George's County, MD Department of Environmental Resources, pp. 1-150.
- Srinivasan, R. and Engel, B. A. (1991). Effect of Slope Prediction Methods on Slope and Erosion Estimates, *Applied Engineering in Agriculture*, 7(6), pp. 779-783.
- US EPA (2000). Low Impact Development (LID), a Literature Review, United States Environmental Protection Agency, EPA-841-B-00-005, pp. 1-33.