



SWAT모형을 이용한 유량 및 유사 예측 정확성 평가 및 최적관리 기법 효과 분석

Evaluation of SWAT Flow and Sediment Estimation and Effects of Soil Erosion Best Management Practices

이지민* · 류지철* · 강현우* · 강형식*** · 금동혁* · 장춘화* · 최중대** · 임경재**†

Lee, Ji Min · Ryu, Jichul · Kang, Hyunwoo · Kang, Hyeongsik ·

Kum, Donghyuk · Jang, Chun Hwa · Choi, Joong Dae · Lim, Kyoung Jae

ABSTRACT

Soil erosion and sediment from agricultural farmland has caused various negative impacts on environment in recent years. The effect of rice straw mat on soil erosion has been investigated by many researchers these days. In this study, the SWAT model was applied to Hongcheon watershed to evaluate SWAT flow and sediment, and the effect of rice straw mat on sediment yield at watershed outlet was evaluated. The Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) values for flow simulation (calibration period) were 0.66 and 0.67, and the NSE values for sediment was 0.90. The calibrated parameters were used to analyze the reduction of sediment yield in the farmland with rice straw mat. Average daily sediment yield without rice straw mat was 49.8 ton/day and sediment yield with rice straw mat was 25.5 ton/day, and the reduction rate was 38.7 %. Also, average daily sediment yield with/without rice straw mat were 97.5 ton/day and 190.7 ton/day during the rainy season (Jun. 2008 - Aug. 2009), with the reduction rate 46.3 %.

Keywords: SWAT; Sediment yield; Rice straw mat; BMP

1. 서 론

우리나라는 매년 유역으로부터 발생된 대규모의 토사가 하천이나 호수로 유입되면서 고탁수 등의 환경적 문제가 발생하고 있다. 특히 홍수조절이나 전력생산 또는 다목적용으로 많은 댐이 건설된 한강수계의 경우 여름철 상류지역으로 발생된 대량의 토사가 장기간 저류하면서 토사에 흡착되어 있던 오염물질들이 수질이나 수생태계에 악영향을 미치고 있다 (Han River Basin Environmental Office Republic office Republic of Korea, 2005). 이에 환경부에서는 강우 유출수에 의해 발생하는 토사를 비점오염원으로 고시하였고, 토양유실 발생량을 저감하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 2004년에는 비점오염관리 종합대책이 발표되어 4대강 비점오염원관리 종합대책, 고랭지 경작지 토사유출저감을 위해 농림부가 주관하는 고랭지 밭 시범사업추진,

환경부가 추진하는 고랭지밭 주변 흙탕물저감사업 등 여러 비점오염원 관련대책이 구체화되고 있다 (Gangwon Development Research Institute, 2007). 또한 환경부에서는 농업지대에서 발생하는 탁수문제 및 토양유실을 효과적으로 해결하기 위해서 저류지, 침사지, 사방댐 등과 같은 수리구조물을 이용하는 방법과 초생대, 벧짚매트 등과 같은 자연구조물을 이용하는 방법을 최적관리기법으로 제안하였다 (NRCS, 2011).

그 중 벧짚매트는 강우시 토양유실을 저감시키기 위해 주로 농경지 주변에 설치되는데, 농경지부근에서 발생하는 유출수의 유속을 감소시켜 유출수에 포함되어 있는 유사 및 다양한 비점오염물질을 침전시키거나 여과시켜 유출수의 수질을 개선하는 역할을 한다. 이미 Ruan et al. (2001)의 연구에 따르면 벧짚으로 지표층을 피복하였을 경우 토양표면의 표면 막힘 현상이 발생하지 않고 침투능이 증가하여 직접유출량이 감소하는 것으로 나타났으며, Shin et al. (2009)의 연구에서는 시험포 조성을 통해 나지상태일 경우와 벧짚매트를 이용하여 표토를 피복하였을 경우의 유사량을 비교한 결과 표토를 벧짚매트로 피복하였을 때 유사량이 64.9 %~74.1 % 정도 감소하는 것으로 나타났다.

하지만 기존의 선행연구는 주로 소규모의 시험포단위의 모니터링 결과를 이용한 것이기 때문에 보다 정확한 벧짚매트의 토양유실 저감효과를 분석하기 위해서는 유역단위나 소유역단위로

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과
 ** 강원대학교 지역건설공학과 교수
 *** 한국환경정책·평가연구원
 † Corresponding author Tel.: +82-33-250-6468
 Fax: +82-33-251-1518
 E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr

2011년 11월 28일 투고
 2012년 1월 4일 심사완료
 2012년 1월 17일 게재확정

적용해 볼 필요가 있다. 하지만 유역단위나 소유역 단위로 저감 효과를 모니터링하기 위해서는 인건비와 장비 등 많은 비용이 요구된다. 따라서 유역단위나 소유역 단위로 저감효과를 분석하기 위해서는 전 세계적으로 많이 활용되어지고 있는 모델링을 이용한 연구가 필요하다고 사료된다. 수문/비점 모형에는 USLE 기반 SATEEC (Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control, Lim et al., 2005), HSPF (Hydrological Simulation Program in Fortran; Bicknell et al., 2001), SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) 등 다양한 모형이 사용되어 왔으며, 그 중 SWAT모형은 미국 농무성의 농업연구소 (USDA/ARS) 에서 장기간에 걸친 다양한 토양특성과 토지이용을 고려할 수 있는 유역단위 모형으로 유역에서 강수에 따른 비점오염원의 발생 및 거동을 시·공간적으로 분석 할 수 있어, 국내·외에서 SWAT모형을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Park et al., 2007; Ruy et al., 2010; Jang et al., 2010; Jung et al., 2011). 또한 다양한 선행연구를 통해 SWAT 모형은 연구지역의 유출 및 비점오염 거동 특성을 잘 반영하는 것으로 나타나 모형의 적용성이 입증되었다.

따라서 본연구의 목적은 1) 홍천강 유역을 대상으로 SWAT 모형의 유량 및 유사 예측 정확성을 평가하고, 2) 벚짚매트를 경작지에 적용할 경우 유역 출구에서의 유수량 저감효과를 분석하는데 있다.

II. 연구방법

1. 연구지역

본 연구에서는 강원도 홍천군 홍천강 유역을 연구 대상지역으로 선정하였으며 (Fig. 1), 일 유량 관측지점(서면 관측소)과 홍천 A 지점의 위치는 Fig. 1, Table 1과 같다. 홍천강 유역은 면적은 1,566.1 km²이며, 유역평균경사 39.3 %, 연평균 강수량은

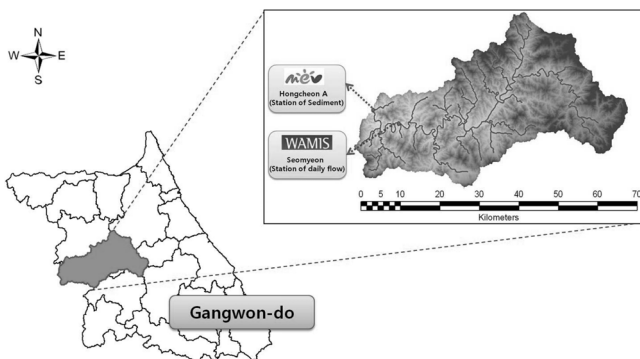


Fig. 1 Location of Hongcheon-gang watershed

Table 1 Location of monitoring station

Monitoring station	Latitude	Longitude
Seomyeon	37-41-37	127-40-15
Hongcheon A	37-43-22	127-35-27

1,387.1 mm이다 (Ministry of Environment, 2009). 지리적 위치는 북위 37° 32' ~ 37° 56', 동경 128° 51' ~ 127° 32'에 위치하며, 토지이용은 임야 82.5 %, 전 6.2 %, 답 4.3 %, 대지 2.2 %로 대부분 산림과 농업지역으로 분포되어있다 (Ministry of environment, 2009).

2. SWAT 모형 개요 및 입력자료

가. SWAT모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA/ARS)의 Dr. Jeff Arnold (Arnold 1992; Arnold et al., 1998)등의 의해 개발된 유역단위 모형이다. 특히 SWAT 모형은 유역내의 장기 강우-유출, 유사의 이동 및 과정을 예측 모의할 수 있으며, 미 계측 지역에서의 모의도 가능하며, 경작형태나 기후 · 식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 수치화 할 수 있는 특징을 지니고 있다. SWAT 모형을 이용하여 수문 및 수질을 시 · 공간적으로 분석하기 위해서는 시간적으로 변화하는 기상자료 (일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와, 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 수치표고모형 (Digital Elevation Model, DEM) 등이 필요하다 (Table 2) (Heo et al., 2008). SWAT 모형은 유역에서의 강수에 따른 유출 및 비점오염의 발생 및 거동의 시 · 공간적 변화를 분석할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있다. 하지만 최근 경작지에서의 유출 및 토양유실 특성을 충분히 반영하지 못하고 여러 가지 제한 및 모형의 구조적 한계점으로 인해 유사 발생이 빈번하게 일어나는 유역에서 정확한 토양유실 및 유사거동을 평가하는데 문제점이 지적되어 왔다 (Jha et al., 2002; Jang et al., 2009; Jang et al., 2010).

Table 2 Input and Output data of the SWAT model

SWAT Input		SWAT Output	
Temporal Analysis	Precipitation	Daily/ Monthly/ Yearly	Runoff / Soil erosion / Water quality for HRU
	Temperature		Runoff / Soil erosion / Water quality for Subwater shed
	Wind Speed		
	Solar Radiation		
	Relative Humidity		
Spatial Analysis	Land Use	Runoff / Soil erosion / Water quality for Reach segment	
	Soil		
	Topography		

나. SWAT모형의 USLE P 인자

토양 유실에 관련된 매개변수 중 하나인 작물경작인자(P)는 경운방법과 보전영농시설 등 토양침식에 영향을 미치는 값이다. 본 연구에서는 벧짚매트를 적용에 따른 유사량 저감효과를 평가하기 위하여 다음과 같은 방법을 활용하였다. 벧짚매트를 적용하지 않은 상태, 즉 보전 영농방법을 하지 않았을 경우 USLE P 인자는 실측 유출량과 유사량을 기준으로 보정하였으며, 벧짚매트를 적용할 경우 Jang et al. (2010) 연구의 따른 회귀식 (식1)을 이용하여 USLE P 인자 값을 보정하였다.

$$USLE P_{factor} = 0.0069 \times Slope (\%) + 0.28 \quad (1)$$

산정된 식(1)에 각각의 소유역 내 모든 HRU_Slope (%)의 경사도를 적용시켜 나온 USLE P 인자가 바로 벧짚매트를 적용하였을 경우이다. 본 연구에서는 벧짚매트를 경작지에 적용할 경우 유사량 저감 효과를 모의하였다. 또한 모의 기간 내 (2008년 1월 ~ 2009년 12월) 벧짚매트 적용 전/후의 유사량 총합과 일평균 유사량을 산정하였고, 강우가 집중되는 6 ~ 8월에 벧짚매트 적용 전/후의 유사량 총합과 일평균 유사량을 산정하여 벧짚매트의 적용 유무에 따른 유사량 저감 정도를 분석하였다.

다. SWAT 입력자료

SWAT 모형의 수치표고모형 (Digital Elevation Model, DEM)을 구축하기 위해 1:5000 수치지도 DEM의 격자크기 결정에 있어서 모의 결과의 정확성을 높이기 위하여 격자크기는 5 m×5 m로 DEM을 구축하였다. 토지이용도는 환경지리정보서비스에서 (Environmental Geographic Information System: EGIS) 제공하는 1:25,000 중분류 토지이용자료를 이용하였으며 (Fig. 2), 토양도는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공해 주는 정밀토양도 (1:25000)를 사용하였다 (Table 3) (Fig. 3). 일 강수 (mm), 일 평균풍속 (m/sec), 일 평균상대습도 (%), 일 최고·최저기온 (°C), 일 수평면 일사량 (MJ/m²)과 같은 기상자료를 기상청에서 (2006년 1월1일 ~ 2009년 12월 31일) 제공받아 구축하였다.

3. SWAT 모형 보정

가. 유량 보정

본 연구에서는 SWAT 모형 보정을 위하여 먼저 유출량과 관련된 매개변수를 조정하였으며, 그 후 유사량과 관련된 매개변수 순으로 보정하였다. 이 과정에서 유사량과 관련된 매개변수는 유출량에 영향을 미칠 수 있기 때문에 유출량 관련 매개변수를 보정 후 유사량 관련 매개변수를 한다. 이때 앞서 조정한 유출량 관련 매개변수를 제외한 유사량에 관련된 매개변수에 대해

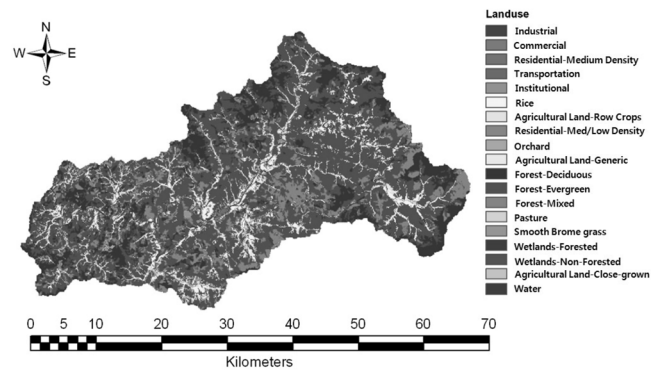


Fig. 2 Land uses of study watershed

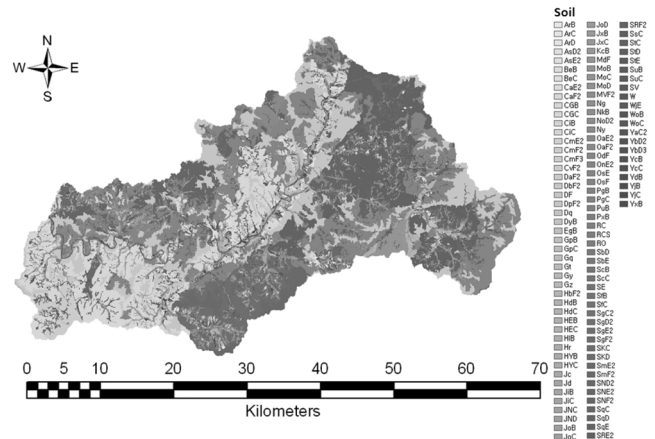


Fig. 3 Soil of study watershed

Table 3 Soil legend

silty clay loam	loam	silt loam	loamy coarse sand	sandy loam soil
ArB, ArC, ArD, HiB, KcB, SfC, SqC, SqD, SqE, YjB, YjC	AsD2, AsE2, DaF, GpB, GpC, Gq, Gt, Gy, HYB, Hyc, MdF, MoB, MoC, MoD, MVF2, NkB, NoD2, PgB, PgC, PxB, SgF2, SgF2, SbD, SbE, ScB, ScC, SNE2, SNF2, SRE2, SRF2, SsC, WjE, YcB, YcC, YdB, YxB	BeB, BeC, CaE2, CaF2, CGB, CGC, CiB, CiC, CmE2, CmF2, CmF3, CvF2, DbF2, DF, DpF2, Dq, DyB, GZ, HbF2, HdC, HEB, HEC, Hr, JiB, JiC, OnE2, OsE, Ng, PuB, RC, RCS, RO, SE, Sfb, SgD2, SmE2, SmF2, StC, StD, StE, SuB, SuC, SV, WoB, WoC, YaC2, YbD2, YbD3	EgB	Jc, Jd, JNC, JND, JoB, JoC, JoD, JxB, JxC, Ny, OaE2, OaF2, OdF, SgC2, SKC, SKD, SND2,

Table 4 Criteria for evaluating model performance (Donigian and Love, 2003)

	Poor	Fair	Good	Very Good
NSE for Daily simulation	< 0.60	0.60~0.70	0.70~0.80	> 0.80

서만 보정하여 결과에 서로 영향을 주지 않도록 하였다.

일 유량 자료는 WAMIS (WATER Management Information System) 에서 제공하고 국토해양부에서 관리하는 서면 관측소의 2008년의 자료를 사용하였고, 2009년 일 유량 자료를 사용하여 추정된 유량 매개변수를 검정 하였다.

홍천강 유역의 SWAT 모형 적용성 평가시 유효지수 (Nash and Sutcliffe efficiency, NSE)를 이용하였으며, NSE 산정식은 (2)에서 보이는 바와 같다 (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (2)$$

여기서 O_i 는 각 강우시 실측된 값이고, P_i 는 모델에서 예측된 각 강우별 모의값이며, \bar{O}_i 는 모든 강우시 실측값의 평균이다. NSE 값이 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

Ramanarayanan et al. (1997)연구에 따르면 R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제안하였으며, Donigian and Love (2003)의 연구에 따르면, 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 일반적인 모델의 효율 범위와 신뢰구간을 Table 4와 같이 제시하였다.

나. 유사량 보정

SWAT모형 보정에 사용된 유사량 자료는 수질유량측정망시스템 (Water Information System)에서 제공하는 홍천A 지점의 2008년~2009년의 8일 간격 유사량 자료를 사용하였다. 연구 기간동안 홍천A 지점에서 유사량 자료는 87번 측정되었다.

현재 수질유량측정망시스템 (Water Information System)에서는 단위 유역의 8일 간격 유량 및 유사량 자료를 제공하고 있으나, 실제 측정 간격은 불규칙하여 1년에 평균 40회 정도의 자료가 수집되고 있다. 이는 유량 변동과 비점오염원 배출이 적은 갈수기와 저수기에는 부하량 산정에 적은 영향을 미치지만, 홍수기와 같이 일별 유량 변동이 심한 시기에는 부하량 산정에 큰 영향을 미칠 수 있다. 연구기간 동안 연구대상유역에 위치하는 홍천 A 지점과 서면 관측소의 유량을 비교한 결과, 서면 관측소의 일 유량은 2008년 7월 24일 (952.6 m³/s)과 7월 25일 (1567.0 m³/s)에 발생하였으나 홍천 A 지점에서는 같은 날짜에 유량을

Table 5 Comparison of daily and 8-day interval flow

DATE	8-day interval (Hongchoen A)	Daily Flow (Seomyeon)
2008-07-16	38.2	33.7
2008-07-17	-	28.9
2008-07-18	-	22.9
2008-07-19	-	55.0
2008-07-20	-	823.4
2008-07-21	-	643.5
2008-07-22	207.3	252.1
2008-07-23	-	135.7
2008-07-24	-	952.6
2008-07-25	-	1567.0

측정하지 않은 것으로 나타났다 (Table 5). 이는 8일 간격 유량 측정의 문제점을 나타냄과 동시에 일 부하량 산정에도 차이를 보일 수 있음을 의미한다. 이로 인해 본 연구에서는 유사량 측정에 있어 한계점이 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 유량 및 유사량 보정 결과

본 연구에서는 SWAT 보정을 이용하여 모형에서 모의된 유량을 검·보정 하였다. 서면 관측소의 2008년 1년 동안의 실측 일 유량을 자료를 사용하였고, 유량에 민감한 11개의 매개변수로 보정 하였다. 또한 2009년 일 유량 자료로 추정된 매개변수를 검정하였다. 보정결과 사용된 매개변수는 Table 6과 같으며, 매개변수로 보정된 일 유량은 보정기간에 NSE가 0.66, 검정기간에 0.81로 나타나 검·보정 기간 모두 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 유량 보정 후 보정된 매개변수를 이용하여 유사량 실측치와 예측치를 보정하여 비교하였다. 유사량 보정 매개변수는 Table 7과 같으며, 그 결과 NSE = 0.90로 매우 높은 결과가 나왔다 (Fig. 7). 유사량 자료는 수질 유량측정망시스템 (Water Information)에서 제공하는 홍천A 지점의 2008년~2009년의 8일 간격 유사량 자료와 같은 지점의 유량 자료로 계산된 일 부하량 자료이며, 일 부하량 계산식은 식(2) 과 같다.

$$\text{Load (kg/day)} = \text{WQD (mg/L)} \times \text{Flow (m}^3/\text{sec)} \times 86.4 \quad (2)$$

WQD: Water Quality data

Fig. 4과 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 유량 및 유사량 보정 결과 Ramanarayanan et al. (1997)과 Donigian and Love (2003)가 제시한 기준에 모두 만족할 만한 결과가 나왔으며, 이는 본 연구에서 홍천강 유역에 대해 구축한 SWAT모형이 자연

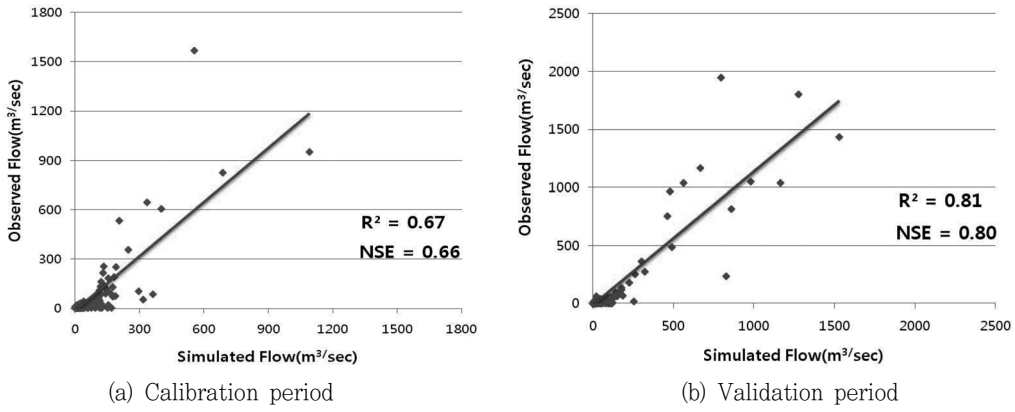


Fig. 4 NSE from SWAT calibration for flow estimation

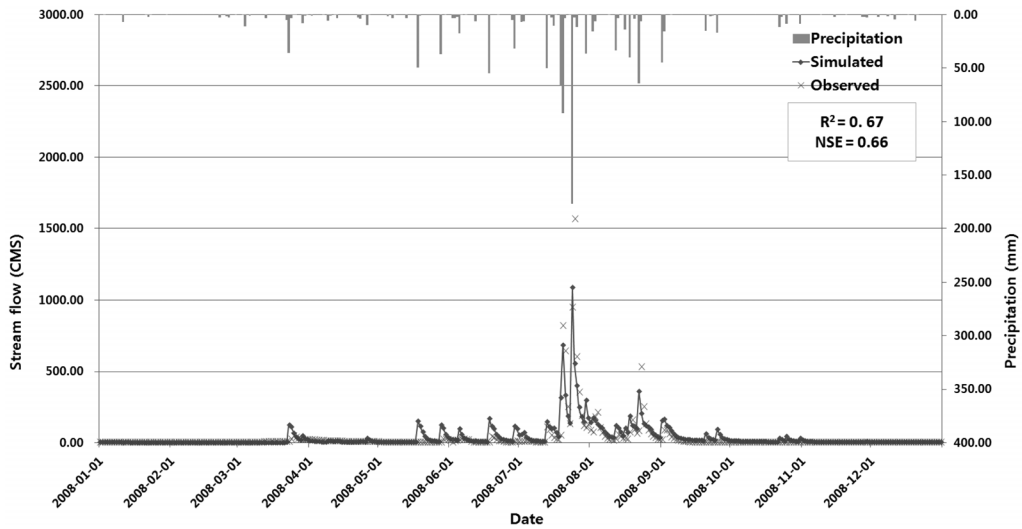


Fig. 5 NSE from SWAT calibration for flow estimation

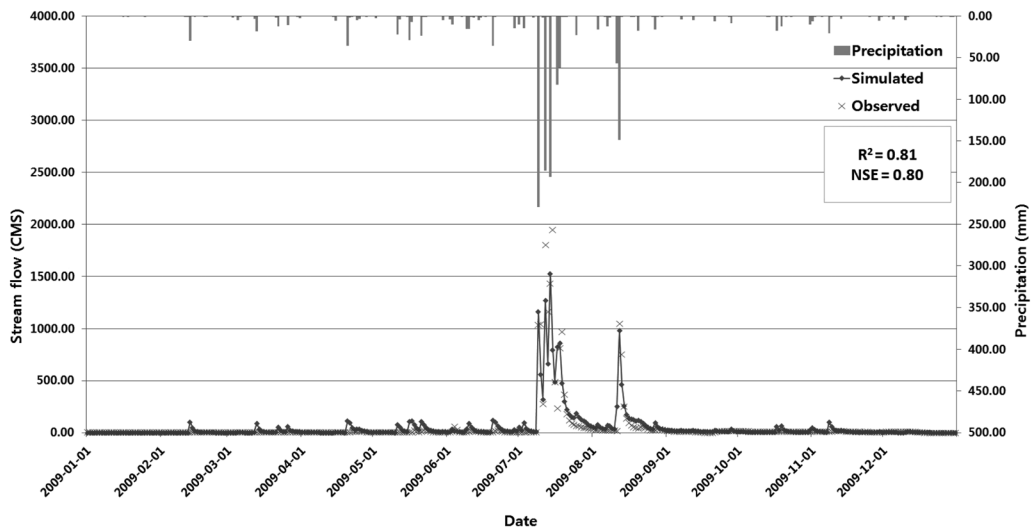


Fig. 6 NSE from SWAT validation for flow estimation

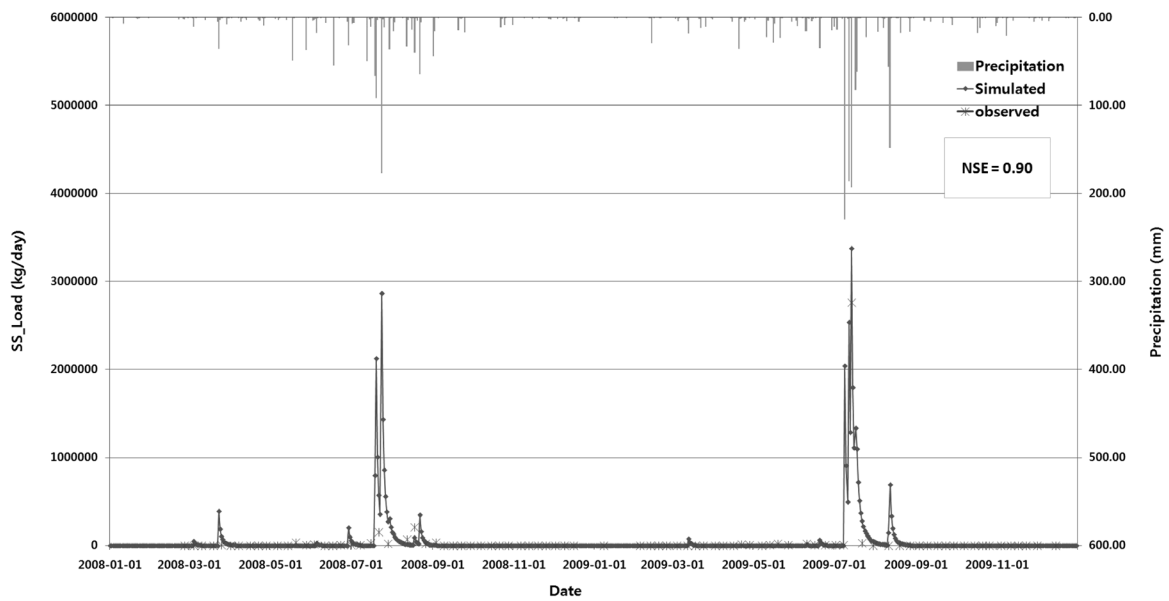


Fig. 7 Results of calibration using modified SWAT

Table 6 Eleven parameters used in calibration for flow estimation

Parameter	Description	Variation Method	Value
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	Replace by value	1Day
SURLAG	Surface runoff lag time	Replace by value	0.10
ADJ_PKR	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the subbasin	Replace by value	10.00
PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel.	Replace by value	2.00
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Replace by value	0.50
SOL_Z	Soil depth	Multiply by value (%)	23.66
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by value	149.63
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by value (%)	23.71
CANMX	Maximum canopy storage	Replace by value	9.84
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur(mm H2O)	Replace by value	- 492.94
SLOPE	Increase the lateral flow	Multiply by value (%)	- 6.32

Table 7 Nine parameters used in calibration for sediment estimation

Parameter	Description	Variation Method	Value
USLE_P	USLE support practice factor	Replace by value	0.32
USLE_K	USLE support practice factor	Replace by value	0.07
PHOSKD	Phosphorus soil partitioning coefficient	Replace by value	20
PPERCO	Phosphorus percolation coefficient	Replace by value	2
SPCON	Lin. re-entrainment parameter for channel sediment routing	Replace by value	0.0004
SPEXP	Exp. re-entrainment parameter for channel sediment routing	Replace by value	0.0006
RCN	Concentration of nitrogen in rain (mg N/L)	Replace by value	0.2
N_UPDIS	Nitrogen uptake distribution parameter	Replace by value	2
P_UPDIS	Phosphorus uptake distribution parameter	Replace by value	2

현상을 잘 모의하는 것으로 사려 된다.

본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 SWAT 모형을 이용하

여 홍천강 유역에서 발생하는 유출량과 비점오염원을 정확히 평가 할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 벧짚매트 적용에 따른 유사저감효과

본 연구에서 연구 대상 지역 중 밭이 차지하는 면적은 5.82 %이며, Jang et al. (2010)의 연구를 따르면 Fig. 8에서 보이는 바와 같이, 경사도에 따라 벧짚매트에 의한 유사저감 효과를 고려하기 위한 USLE P 인자값은 선형적 관계를 보였으며, 이를 이용하여 회귀식 (식1)을 산정하였다. 산정된 회귀식에 USLE P 인자값을 Table 8과 같이 보정한 후, 유역에서의 벧짚매트에 의한 유사 저감 효과를 SWAT 모형을 이용하여 평가하였다.

$$USLE P_{factor} = 0.0069 \times Slope (\%) + 0.28 \quad (1)$$

Fig. 9에서 보는 바 같이 벧짚매트 적용 전/후의 모의 유사량 경향은 비슷하였으며, 최대값과 최소값 등에서 다소 차이가 나타났다. 벧짚매트 미적용시 모의 기간내 (2008년 1월~2009년 12월) 유사량 총합은 36,417.0 ton이고, 일평균 유사량은 49.8 ton/day로 산정되었고, 벧짚매트를 적용하였을 경우 모의 기간내 (2008년 1월~2009년 12월) 유사량 총합은 18,633.8 ton이고, 일평균 유사량은 25.5 ton/day로 벧짚매트를 적용하지 않았을 때보다 약 38.7 % 저감된 값을 보였다.

Table 9은 강우가 집중되는 모의 기간 내 6, 7, 8월의 벧짚매트 설치로 인해 저감된 유사량을 보여준다. 벧짚매트를 설치하지 않은 경우 모의 기간 내 6월부터 8월까지의 일평균 유사량은 약 190.7 ton/day, 벧짚매트를 설치하였을 경우 모의 기간 내 6월부터 8월까지의 일평균 유사량은 약 97.5 ton/day으로 산정되었다. 이결과 벧짚매트를 사용하지 않았을 경우에 비해서 사용했을 경우 유사량은 약 46.3% 저감된 것으로 분석되었다.

Shin et al. (2011) 연구를 따르면 경작지 규모의 시험포를 조성하고, 지표를 벧짚매트로 적용할 경우 유사량이 80.8 %로 저감 분석되었다. 또한 Jang et al. (2010) 연구를 따르면 강우가

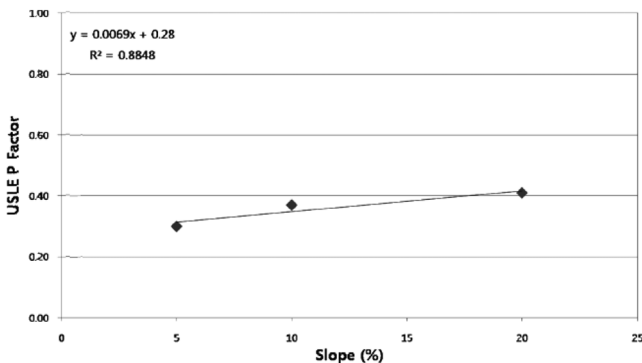


Fig. 8 Regression Equation of USLE P factor for different slope values

집중되는 모의 기간 내 6, 7, 8, 9월의 벧짚매트 설치로 인해 약 35.6 %로 저감 분석되었다.

이 결과로 벧짚매트를 이용하여 지표를 피복할 경우 오염 부하량의 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 벧짚매트로 인해 강우가 피복재에 흡수되고, 표면으로 발생하는 유출수의 유속감소를 통해 토양에 저류되는 시간이 증가함으로 인해 토양으로 침투하는 강우량이 많아졌기 때문이라고 판단된다. 또한 강우시 피복재의 유실이나 이동이 없기 때문에 지속적으로 지표를 피복하여 강우에너지를 상쇄시켜 토양유실을 방지하고, 토양의 침투능을 높게 유지하여 밭에서 발생하는 비점오염원을 저감시키는 것으로 나타났다.

Table 8 USLE P values and straw mat with various slopes

W/O Rice straw mat		W/ Rice straw mat
HRU Slope (%)	USLE P Value	USLE P Value
0.409	0.320	0.283
0.409	0.320	0.283
0.409	0.320	0.283
0.409	0.320	0.283
0.349	0.320	0.282
0.349	0.320	0.282
0.349	0.320	0.282
0.732	0.320	0.285
0.732	0.320	0.285
0.732	0.320	0.285
1.535	0.320	0.291
1.535	0.320	0.291
0.756	0.320	0.285
0.756	0.320	0.285
3.541	0.320	0.304
0.429	0.320	0.283
0.429	0.320	0.283
1.284	0.320	0.289
1.284	0.320	0.289
1.617	0.320	0.291
0.095	0.320	0.281
0.095	0.320	0.281
0.095	0.320	0.281
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282
0.297	0.320	0.282

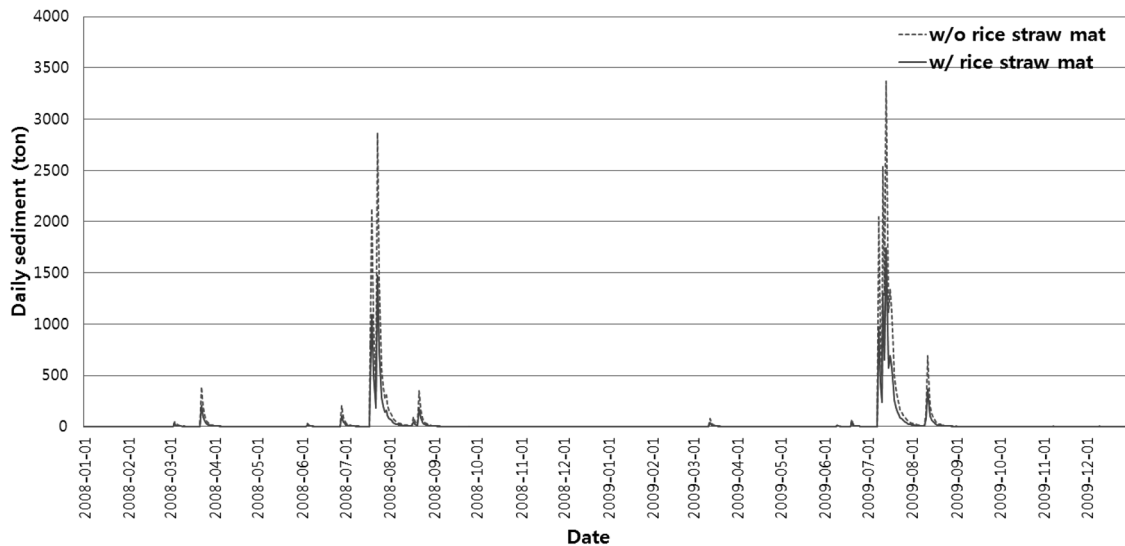


Fig. 9 Sediment yield calculated by the SWAT model w/o or w/ rice straw mat during 2008~2009

Table 9 Sediment yield simulated using the SWAT model W/O or W/ straw mat during the rainy season (2008~2009) (Unit: ton)

	w/o Rice straw mat	w/ Rice straw mat	Difference	Reduction (%)
2008-06	369.9	188.8	181.2	49.0
2008-07	11,961.4	6,150.8	5,810.7	48.6
2008-08	1,754.5	904.8	849.8	48.4
2009-06	172.5	87.8	84.7	49.1
2009-07	18,835.1	9,564.2	9,270.9	49.2
2009-08	2,003.1	1,048.2	954.9	47.7

IV. 결 론

본 연구에서는 집약적 토지이용과 많은 양의 비료사용으로 인하여 강우시 수질오염과 탁수문제가 일어난 홍천강 유역에 대하여 SWAT 모형 적용성 평가 및 벚짚매트 이용한 유사 저감효과를 모의하였다. 그 결과 실측유량에 대하여 SWAT 모형 보정결과 보정기간 (2008년) $NSE = 0.66$, $R^2 = 0.67$, 검정기간 (2009년)에 $NSE = 0.8$, $R^2 = 0.81$ 로 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났으며, 유사량 실측치와 예측치를 보정한 결과, 모의기간 (2008년~2009년)에 $NSE = 0.90$ 으로 유사량 보정도 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 벚짚매트 적용시 유사량 저감효과는 벚짚매트를 적용하지 않았을 때와 벚짚매트를 적용하였을 때 모의 기간 내 (2008년1월~2009년12월) 일평균 유사량은 각각 49.8 ton/day과 25.5 ton/day 으로 산정되었고, 벚짚매트 적용시 약 38.7 %가 유사량 저감 효과를 보였다. 강우가 집중되는 기간인 (6월, 7월, 8월(2008년~2009년))에 벚짚매트의 적용성 유무에 따른 분석 결과 190.7 ton/day 와 97.5 ton/day 로 분

석되었으며, 벚짚매트 적용시 약 46.3 % 저감효과를 보였다.

본 연구 결과를 통해서 홍천강 유역에 대한 SWAT 모형의 적용성을 볼 수 있었으며, 벚짚매트 적용하였을 때 유사량 저감효과도 확인 할 수 있었다. 본 연구 결과는 홍천강 유역에서 발생하는 유사량 저감 대책을 수립하는데 필요한 기초 자료로 이용될 수 있다고 판단된다.

REFERENCES

1. Arnold, J. G., 1992. Spatial scale variability in model development and parameterization. Ph.D. diss., West Lafayette, Ind.: Purdue University.
2. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
3. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, Jr. J. L. Kittle, T. H. Jobs, and Jr., A. S. Donigan, 2001. Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, G.A.
4. Donigan, A. S. and J. T. Love, 2003. Sediment calibration procedures and guidelines for watershed modeling. WEFTMDL, November 16-19, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Illinois, Chicago.
5. Gangwon Development Research Institute, 2007. 2007 annual report (in Korean).

6. Han River Basin Environmental Office Republic office Republic of Korea, 2005. Effects of Turbid Water on aquatic Ecosystem and Control Measure (in Korean).
7. Heo, S. G., N. W. Kim, Y. S. P, J. G. Kim, S. J. Kim, J. H. Ahn, K. S. Kim, and K. J. Lim, 2008. Evaluation of Effects on SWAT Simulated Hydrology and Sediment Behaviors of SWAT Watershed Delineation using SWAT ArcView GIS Extension Patch. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(2): 147-155 (in Korean).
8. Jang, J. H., K. W. Jung, H. C. Kim, and C. G. Yoon, 2010. Evaluation of the Impacts of Water Quality Management in Kyongan stream Watershed using SWAT Model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(3): 387-398 (in Korean).
9. Jang, W. S., D. S. Yoo, I. M. Chung, N. W. Kim, M. S. Jun, Y. S. Park, J. G. Kim, and K. J. Lim, 2009. Development of SWAT SD-HRU pre-processor module for accurate estimation of slope length of each HRU considering spatial topographic characteristics in SWAT. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 351-362 (in Korean).
10. Jang, W. S., Y. Park, J. Kim, N. Kim, J. Choi, Y. S. Ok, J. E. Yang, and K. J. Lim, 2010. Development of the SWAT DWDM for Accurate Estimation of Soil Erosion from an Agricultural Field, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 79-88.
11. Jang, W. S., Y. S. Park, J. D. Choi, J. G. Jong, M. H. Shin, J. C. Ryu, H. W. Kang, and K. J. Lim, 2010. Analysis of Soil Erosion Reduction Effect of Rice Straw Mat by the SWAT Model. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 52(3): 97-104 (in Korea).
12. Jha, M., P. W. Gassmann S. Secchi, G. Roy, and J. G. Arnold, 2002. Impact of watershed subdivision level on flows, sediment loads, and nutrient lossless predicted by SWAT, *Working Paper 02-WP*, 315: 22-23.
13. Jung, J. W., J. R. Jang, B. J. Lim, Y. J. Lee, K. S. Kim, J. H. Kang, H. L. Park, S. H. Cho, and K. S. Yoon, 2011. Simulation of Stream flow using SWAT Auto Calibration Tool over the Saemangeum Watershed. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology* 19(1): 11-17 (in Korea).
14. Lim, K. J., M. Sagong, B. A. Engel, T. Zhenxu, J. D. Choi, and K. S. Kim, 2005. GIS-based sediment assessment tool. *Catena*. 64:61-80.
15. Ministry of environment, 2009. The planning of water quality for Mid-watersheds (Hongcheon-gang watershed) (in Korean).
16. Nash, J. E., and J. E. Sutcliffe, 1970. River Flow Forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290
17. National Resources Conservation Service (NRCS), <http://www.nrcs.usda.gov/>, Accessed 2011.
18. Park, Y. S., J. G. Kim, J. H. Park, J. H. Jeon, D. H. Choi, T. D. Kim, J. D. Choi, J. H. Ahn, K. S. Kim, and K. J. Lim . Evaluation of SWAT Applicability to Simulation of Sediment Behaviors at the Imha-Dam Watershed 2007. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(4): 467-473 (in Korea).
19. Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W. A. Dugas, L. M. Hauck, and A. M. S. McFarland, 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. ASAE International Meeting, Minneapolis, MN.97-2209.
20. Ruan, H., L. R. Ahuja, T. R. Green, and J. G. Benjamin, 2001. Residue Cover and Surface-Sealing Effects on Infiltration. *Soil Science of America Journal* 65: 853-861.
21. Ruy, J. C., H. W. Kang, N. W. Kim, W. S. Jang, J. W. Lee, J. P. Moon, K. S. Lee, and K. J. Lim, 2010. Analysis of Total Nitrogen Reduction Efficiency with Established Riparian Buffer System using SWAT-REMM Model in Bonggok Watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(6): 910-918 (in Korea).
22. Shin, M. H., C. H. Won, Y. H. Choi, J. Y. Seo, J. W. Lee, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Simulation of Field Soil Loss by Artificial Rainfall Simulator - By Varing Rainfall Intensity, Surface Condition and Slope -. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(5): 785-791 (in Korea).
23. Shin, M. H., C. H. Won, W. J. Park., Y. H. Choi., J. R. Jang., K. J. Lim and J. D. Choi, 2011. Analysis of the Reduction Effect on NPS Pollution Loads by Surface Cover Application, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 29-37.

24. Water Information System, <http://water.nier.go.kr/>, Accessed 2011.

25. Water Management Information System (WAMIS), <http://www.wamis.go.kr/>, Accessed 2011.