

SWAT 모델을 이용한 강우특성 변화에 의한 퇴적물-유출량 간의 관계 평가

김지수¹ · 김민석^{2*} · 조용찬²

¹전남대학교 일반대학원 사범대학 사회교육학과

²한국지질자원연구원 지질환경연구본부

Assessment of Relationship between Sediment-Discharge Based on Rainfall Characteristic using SWAT Model

Kim Jisu¹ · Kim Minseok^{2*} · Cho Youngchan²

Department of Social studies Education, Chonnam National University, Gwangju, Korea

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

The sediment transportation caused by soil erosion due to rainfall-discharge in the large watershed scale plays critical role in human society. The relationship between rainfall-discharge-sediment transportation is depending on the start time of rainfall and end of rainfall but, the studies related with rainfall characteristics are insufficient. In this study, The Soil and Water Assession Tool (SWAT) model was used to study the relationship between rainfall-discharge-sediment transportation at the Sook river watershed which is monitored by the Ministry of Environment. To do this, first of all, the sensitivity analysis about model attributes was performed using monitored data. The accuracy analysis of SWAT model was conducted using the model's efficiency index (Nash and Sutcliffe model efficiency; NSE) and the coefficient of determination (R^2). After that, it was studied what results could be obtained according to changes in rainfall timing and end points. In the result of discharge simulation, the modified rainfall values (sum of total rainfall starting time and end time) showed more high accuracy values (R^2 :0.90, NSE: 0.8) than original rainfall values (R^2 :0.76, NSE: 0.72). In the result of sediment transportation simulation, during calibration had more resonable results(R^2 :0.87, NSE: 0.86) than compared with original rainfall values (R^2 :0.44, NSE: 0.41). However, validation results of sediment transportation simulation showed low accuracy values compared with calibration results. This results maybe cause monitoring periods of sediment flow compared with discharge monitoring periods. Nevertheless, since rainfall characteristic plays critical rule in model results, continuous research on rainfall characteristic is needed.

Keywords : SWAT model, rainfall characteristic, discharge, sediment transport

1. 서 론

급격한 기후변화 및 도시화, 산업화 등에 따른 유역의 토지이용 변화는 물 순환체계 및 이용 형태의 변화뿐만 아니라 하천 생태계에 영향을 미치는 유사 및 비점오염 문제를 초래하고 있다. 이런 유사와 관련된 문제는 특정 지역에 국한되지 않고 광범위하게 발생되므로 효율적인

관리 및 평가가 필요하다. 유역 내에서 하천으로 이동하는 퇴적물은 강우량에 비례하여 이동하므로 강우량의 계절적변동이 큰 우리나라에서는 유역 내 퇴적물의 유출이 계절적으로 크게 변동할 수밖에 없다. 예를 들어, 대청호는 대전을 비롯한 충청 지역에 필요한 각종 용수를 공급하는 중부권 최대 식수원이지만, 매년 여름철에 부영양화 현상이 반복되고 있다(Cheon et al., 2006). 이런 부영양화의 원인인 대청호의 조류는 강우에 의해 토양에 흡착되어 이동되는 질소, 인 등의 영양물질의 영향을 많이 받는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2009). 최근 30년 동안 여름철에 극한 강우가 발생하는 횟수가 뚜렷하게 증가하고 있고(Bae et al., 2020), 농업이나 도시개발과 같은 인간의 경제활동이 더욱 확대됨에 따라 토양 유실의 위험성

주저자: 김지수, 박사과정생

공저자: 조용찬, 책임연구원

*교신저자: 김민석, 선임연구원

E-mail: minseok_kim@kigam.re.kr

Received : 2021.12.01 Reviewed : 2021.12.02

Accepted : 2021.12.14 Discussion until : 2022.02.28

이 커지고 있어(Ministry of Environment, 2020), 대청호로 유입되는 영양물질을 운반하는 유량과 퇴적물량을 평가하고 적절한 관리 방법을 개발할 수 있는 연구가 필요한 것으로 보고되고 있다.

미국에서 개발된 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)은 전 세계적으로 많이 사용되고 있는 수문 모형 중 하나로, 다양한 토양, 토지 이용, 관리 조건에서 유량, 퇴적물량, 영양염류량을 모의할 수 있다. 최근 수십 년부터 대청호 유역에서 모니터링 자료를 기반으로 유역 내 비점 오염원 간의 관계를 파악하기 위해 SWAT을 이용한 연구들이 진행되었다. 예를 들면, Jeon et al.(2010)은 대청호의 상류 유입하천인 안내천과 월외천 유역을 대상으로 2010년 동안 유량과 영양물질을 모의하였으며, Jeong et al.(2011)은 소옥천 유역을 대상으로 5년간의 유량을 모의하였다. 그러나 대청호로 유입되는 유역에서 SWAT을 적용한 기존 연구들은 주로 유량 모의에 초점을 맞추었고, 모형의 예측 성능이 비교적 낮게 나타나 모형의 적용성을 향상시킬 수 있는 추가적인 연구가 필요한 것으로 제안하고 있다.

특히, 기존 SWAT을 이용한 모델링 연구(Jeon et al. 2010)에서 지표 유출을 모의할 때 SCS Curve number 방법을 주되게 사용하고 있는데, King et al.(1999)은 SCS Curve number 방법을 사용할 때 강우사상의 강우강도와 지속시간이 반영되지 않음을 지적하였다. 이를 위해 최근 연구에서는 이러한 SCS Curve number 방법의 한계를 보완하고자 기존의 SWAT 모형을 개선하고 평가하였다. Jeong et al.(2010)은 Green-Ampt 방법으로 하루 미만의 시간 단위 강수량을 적용하여 지표 유출을 추정하였고, Shi et al.(2017)은 선행 함수 예측 모형을 통해 지표 유출을 추정하여 기존 SWAT 모형을 개선하였다. 하지만, 많은 연구에서 강우 특성 분포에 의해 발생할 수 있는 유역 침식에 의한 퇴적물의 이동에 대한 연구는 많이 미흡하다. 더욱이, SWAT의 일 단위로 계산되는 SCS Curve number 방법은 강우사상의 강도와 지속시간이 왜곡되어, 지표 유출량을 과소 모의(King et al., 1999; Jeong et al., 2010) 할 수 있으므로 이러한 한계를 개선할 필요성이 있다. 이를 위해 본 연구에서는 유역 내에서 강우에 의해 이동될 수 있는 유량과 퇴적물 간의 관계를 살펴보고 이의 정확성 향상을 위한 제언을 목적으로 하고 있다. 즉, 강우의 시간적 연속성에 대한 반영이 필요하므로, 본 연구에서는 SCS Curve number의 매개변수 중 하나인 일강우량(R_d)을 해당 일에 종료된 강우사상으로 나누어 이에 대한 강우량의 총합으로 정의하여 정확성을 판

별하였다. 여기서, 이용된 일 단위 강우자료(mm/day)는 시간단위 강우자료(mm/h)를 24시간 합산하여 이용하였는데, 이는 일반적으로 대유역에서의 물의 이동은 지체시간이 있으며, 이로 인해 유량자료를 비교 시 오류가 발생할 수 있기 때문이다.

2. SWAT 모델의 서술

SWAT은 다양한 토양, 토지 이용, 관리 조건에서 유량, 퇴적물량, 영양염류량을 모의하기 위해 개발되었다. 다양한 기후 시나리오에 따라 매년, 매월, 매일에 대한 정량적인 예측을 합리적인 비용으로 수행할 수 있기 때문에 세계적으로 많이 사용되고 있는 수문 모형 중 하나이다. SWAT에서 연구 지역은 유역으로 정의되며, 유역은 소유역으로, 소유역은 다시 하나의 지형, 토양, 토지이용 특성을 가지는 수문반응단위(HRU)로 분할된다(Neitsch et al., 2011). 기상 자료는 HRU에 입력되며 물수지를 기반으로 지표 및 토양에서 이동되는 물, 퇴적물, 영양염이 계산된다. 계산된 결과는 각 소유역에 해당하는 하계(Stream Network)에 누적되어 전체적으로 하천에서의 수문 과정을 포함한 모의 결과가 유역 출구점에서 최종적으로 산출된다. SWAT에서는 강우에 따른 지표 유출을 계산하기 위해 기본적으로 SCS Curve number 방법이 사용되며, 이 방법은 미국 내 소유역의 강우와 유출 간의 관계를 장기 간 관찰하여 만든 경험식으로 아래의 식과 같다.

$$Q_d = \frac{(R_d - 0.2S)^2}{(R_d + 0.85)} \quad (1)$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

여기서 Q_d 는 일일 지표 유출량(mm)이고, R_d 는 일일 강우량(mm), S 는 저류량(mm), CN 은 토양의 투수성, 토지이용, 선행 토양 수분 조건에 따른 Curve number이다.

이와 더불어, SWAT에서 지표가 침식되어 발생하는 퇴적물량은 USLE를 수정한 MUSLE를 사용하여 계산하며 다음과 같다.

$$Sed = 11.8(Q_d \cdot q_{peak} \cdot A_{hru})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot LS \cdot P \cdot CFRG \quad (3)$$

$$q_{peak} = \frac{c \cdot i \cdot A_{basin}}{3.6} \quad (4)$$

$$C = \frac{Q_d}{R_d} \quad (5)$$

여기서, Sed 는 일 퇴적물량(tons/day)이고, Q_d 는 일 지표 유출량(mm/day), q_{peak} 는 침투유출률(m^3/s), A_{hru} 는 HRU의 면적(ha), K, C, LS, P는 각각 USLE의 토양침식성($tons \cdot ha / MJ \cdot mm$), 식생피복, 경사인자, 보전관리인자이며, CFRG는 암석피복 인자, c는 유출계수, i는 강우강도(mm/h), A_{basin} 은 소유역의 면적(km^2)이다. 유출 관련 인자는 토양 침식과 퇴적물 운반에 사용되는 에너지에 해당하며, 기존 USLE에서 퇴적물량을 계산하는데 필요한 운송률을 고려할 필요가 없다(Williams, 1975). 본 연구에서는 해당식에 사용되는 일 강우량(R_d) 역시 새롭게 정의된 강우량으로 대체하여 계산하였다.

2.1. 매개변수 추정

매개변수 추정은 전체 유역을 설명하는데 필요한 모든 자료를 구하는 것이 거의 불가능하기 때문에 SWAT 모의에 추가적으로 필요하다. SWAT-CUP은 여러 매개변수를 정해진 범위 내에서 무작위 값으로 여러 번 반복할 수 있어 매개변수를 추정하는데 매우 효율적인 것으로 알려져 있다(Abbaspour, 2013), 따라서 본 연구에서는 기존 SWAT 모형과 수정된 SWAT 모형의 불확실한 매개변수를 추정하기 위해 SWAT-CUP 5.1.6.2의 SUFI-2 알고리즘을 사용하였다.

2.2. 모형 성능 평가

본 연구에서는 R^2 , NSE를 사용하여 모형의 성능을 평가하였다. R^2 은 모의 결과와 실측 결과의 상관관계가 높아질수록 1에 가까워지고, NSE는 모의 결과가 실측 결과가 일치할수록 1에 가까워진다. 각각의 값은 다음과 같이 계산된다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

여기서 O_i 는 개별 실측 값이고, \bar{O} 는 실측된 모든 값의 평균이다. P_i 는 개별 모의 값이고, \bar{P} 는 모의된 모든 값의 평균이다. Moriasi et al.(2015)와 Chen et al.(2017)에 의하면 모형이 유량과 퇴적물량을 모의할 때 각각 R^2 가 0.5, 0.4 보다 크고 NSE가 0.5, 0.45 이상이면 합리

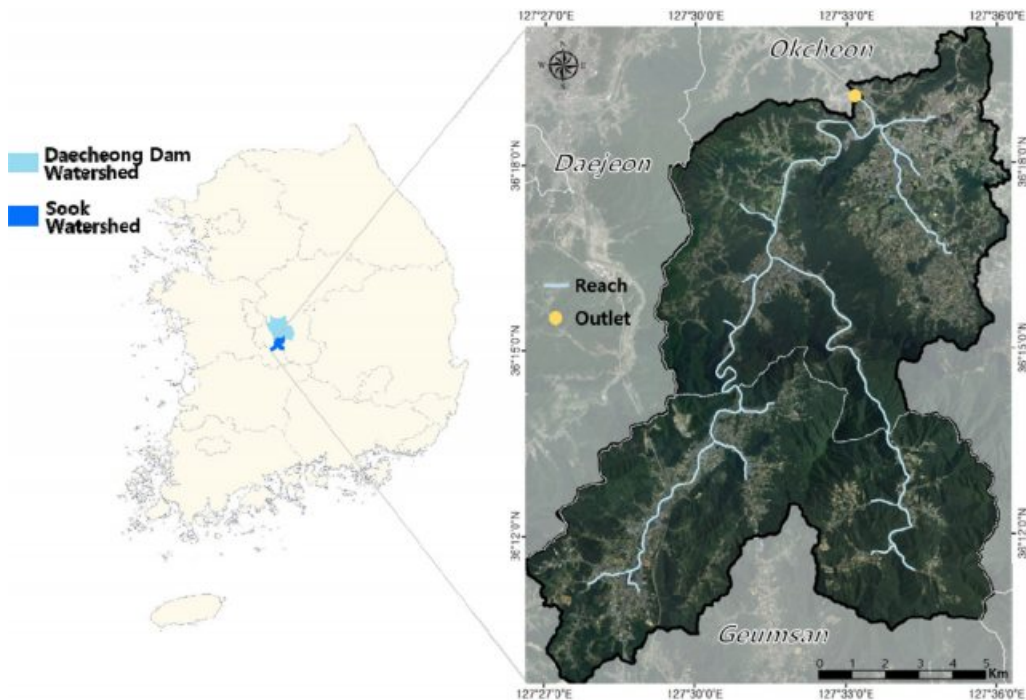


Fig. 1. Location of this study area.

적으로 모델링을 수행하였다고 제안하였다.

3. 소옥천 유역에의 적용성 평가

연구 지역인 소옥천 유역은 금강의 제1 지류로 대청호 상류에 위치하고 있다. 소옥천에서 유입되는 영양염류는 대청호의 조류발생에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2011). 유역의 최종 유출 지점은 옥각교(위도: 36°19'05", 경도: 127°33'20")로 설정하였고, 해당하는 총 유역 면적은 156 km²이다(Fig. 1).

소옥천 유역은 대청호로 직접 유입되는 유역 면적의 55%를 차지하고 있으며, 이 지역은 온난 습윤 기후로 여름은 덥고 습하며 겨울은 춥고 건조하다. 연평균 기온은 13.1°C이고, 연 강수량은 1,351 mm로 장마와 태풍의 영향을 받는 7월과 8월에 집중한다(연 강수량의 45%). 토양은 지속적으로 침식과 퇴적이 발생하는 환경에 노출되어 인셉티솔이 우세하게 나타나는 것으로 보고되고 있으며(Korean Soil Information System), 주로 나타나는 토지 이용 유형은 산림, 밭, 논이며, 산림이 차지하는 면적은 전체 유역 면적의 66%, 밭과 논이 차지하는 면적은 18%로 보고되고 있다(Environmental Geographic Information Service).

소옥천 유역의 정확한 유수량과 탁도와와의 관계를 파악하기 위하여 자동 Sampler(ISCO Sampler 6712)를 연구 지역 내 설치하여 Suspended Sediment(SS)를 채취 후 실험을 통하여 국립환경과학원 수질측정망에서 제공하는 탁도(NTU)를 SS(mg/L)의 단위로 환산하였다. 모형의 검

보정 계산을 위한 유량자료는 소옥천 하류지역 옥각교에 설치된 금강홍수통제소의 10분 단위의 T/M자료를 이용하여 일평균 유량을 재산정하였다.

3.1. 자료 구축과 매개변수 추정

SWAT 모의에 필요한 기상 자료는 2가지 형태로 구축하였다. 먼저, 기상청 및 공공기관에서 2006년부터 2017년까지 관측한 자료를 이용하였으며, SWAT의 입력자료 형태에 맞게 충청남도의 추부마전 관측소(위도: 36°11'40", 경도: 127°28'34"), 금산 관측소(위도: 36°06'17", 경도: 127°29'05"), 대전 관측소(위도: 36°22'20", 경도: 127°22'10")에서 강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속은 기상청의 일사량 자료를 이용하였다. 두 번째로, 일 단위로 계산되는 SCS Curve number 방법에서는 강우사상의 강도와 지속시간이 왜곡될 수 있으며, 지표 유출량을 과소 모의(King et al., 1999; Jeong et al., 2010) 할 수 있으므로 이러한 한계를 개선하고 강우의 시간적 연속성을 반영하기 위해 본 연구에서는 SCS Curve number의 매개변수 중 하나인 일강우량(R_d)을 해당 일에 종료된 강우사상 강우량의 총합으로 정의하였다. 이 때 강우량이 1 시간 동안 0.1 mm 이상 기록되지 않으면 새로운 강우사상으로 구분하였다(Fig. 2).

지형 자료는 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지형도의 등고선과 하천중심선을 이용하여 제작하였다. ArcGIS 10.4의 Topo to raster 도구를 사용하여 등고선에서 10 m 해상도를 가지는 DEM을 생성하였고, 생성된 DEM에 하천중심선을 ArcSWAT 2012로 Burn-in하여 연

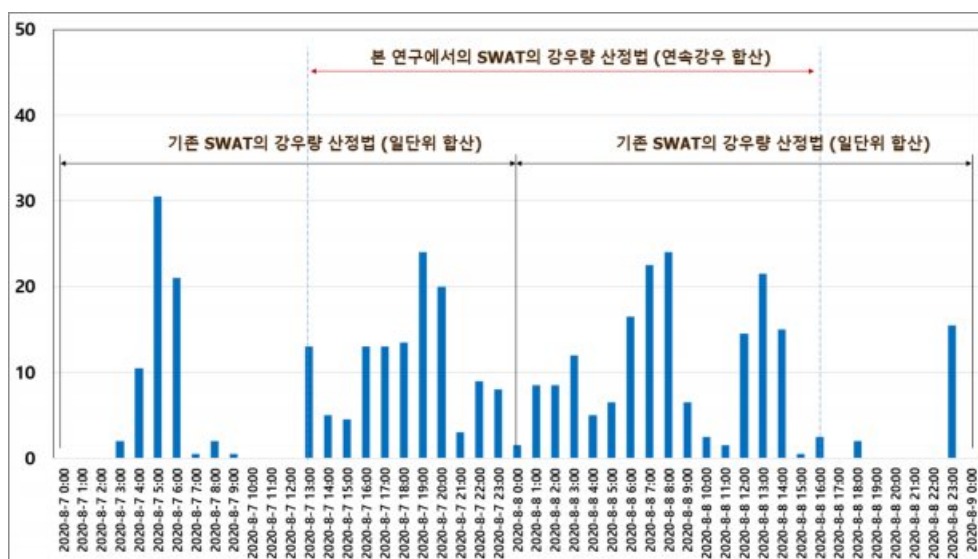


Fig. 2. Rainfall Characteristic distribution used in this study.

구 지역을 27개의 소유역으로 분할하였다. 그리고 국립농원과학원에서 제공하는 정밀토양도와 토양통 자료, 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복지도와 SWAT database 자료를 중첩하여 27개의 소유역을 다시 3,287개의 HRU로 분할하였다(Fig. 3).

유량 자료와 퇴적물량 자료는 2009년부터 2017년까지

구축되었으며, 퇴적물량 자료는 일부 기간(2011.01~2012.08, 2013.11~2013.02, 2015.06, 2016.01)이 누락되었다.

본 연구에서는 기존 SWAT 모형과 수정된 SWAT 모형의 불확실한 매개변수를 추정하기 위해 SWAT-CUP 5.1.6.2의 SUFI-2 알고리즘을 사용하였다. 매개변수 추정을 수행한 기간은 2009년부터 2011년까지, 이를 검증하기

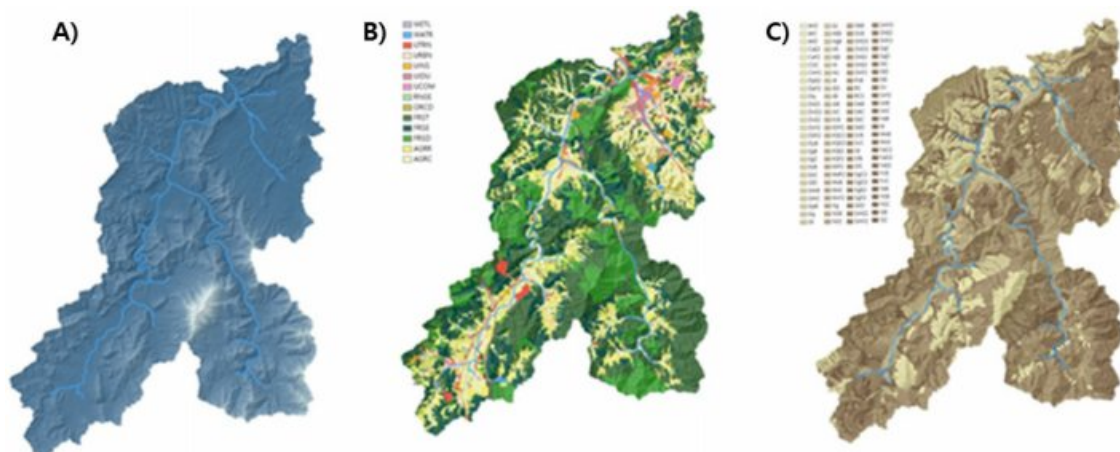


Fig. 3. SWAT input spatial data (A) Terrain, (B) Land-use (C) Soil data.

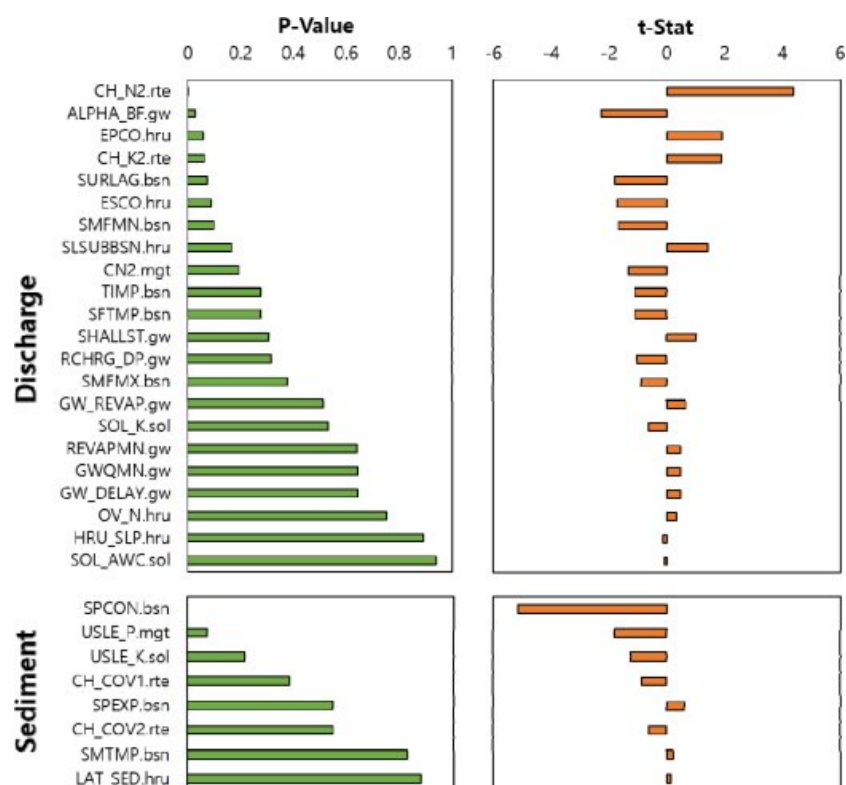


Fig. 4. Sensitivity of discharge and sediment parameters.

위한 기간은 2012년부터 2017년까지로 설정하였다. 모의된 기간 중 처음 3년 간(2006~2008)은 모형의 안정화를 위한 기간으로 사용되어 보정 및 검증에는 사용되지 않았다. 매개변수 값은 무작위로 1000번 입력되었고, R^2 와 NSE를 목적함수로 사용하여 최적의 값이 추정되었다.

4. 연구결과

4.1. 매개변수 민감도 분석

기존 SWAT 모형과 수정된 강우량을 반영한 SWAT 모형의 매개변수에 민감도 분석을 수행하였고, 모형 보정에

Table 1. Discharge and sediment parameters for sensitivity analysis

Parameter	Description	Range of Value	Final parameter value	
			SWAT based on original rainfall	SWAT based on modified rainfall
Discharge				
r_SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer	0 ~ 1	-0.30	0.29
r_SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity	0 ~ 2000	0.71	0.73
r_CN2.mgt	SCS runoff curve number	35 ~ 98	0.35	-0.02
r_HRU_SLP.hru	Average slope steepness	0 ~ 1	0.36	0.06
r_SLSUBBSN.hru	Average slope length	10 ~ 150	0.18	0.09
v_EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	0 ~ 1	0.40	0.60
v_ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	0 ~ 1	0.26	0.08
v_OV_N.hru	Manning's "n" value for overland flow	0.01 ~ 1	0.71	0.97
v_SFTMP.bsn	Snowfall temperature	-20 ~ 20	11.57	-0.44
v_SMTMP.bsn	Snow melt base temperature	-20 ~ 20	-0.04	0.51
v_SMFMX.bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice)	0 ~ 20	16.59	7.92
v_SMFMN.bsn	Minimum melt rate for snow during the year (occurs on winter solstice)	0 ~ 20	14.17	7.48
v_TIMP.bsn	Snow pack temperature lag factor	0 ~ 1	0.77	0.25
v_SURLAG.bsn	Surface runoff lag time	0.05 ~ 24	17.47	11.38
v_CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel	-0.01 ~ 0.3	0.23	0.21
v_CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01 ~ 500	263.81	94.48
v_GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02 ~ 0.2	0.02	0.20
v_GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0 ~ 5000	4171.60	725.00
v_SHALLST.gw	Initial depth of water in the shallow aquifer (mm)	0 ~ 50000	43235.29	611.93
v_GW_DELAY.gw	Groundwater delay (days)	0 ~ 500	283.82	175.28
v_ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor	0 ~ 1	0.86	1.00
v_RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction	0 ~ 1	0.78	0.37
v_REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	0 ~ 500	162.44	99.50
Sediment				
r_USLE_K.sol	USLE equation soil erodibility (K) factor	0 ~ 0.65	0.09	-0.13
v_USLE_P.mgt	USLE equation support practice (P) factor	0 ~ 1	0.17	0.25
v_LAT_SED.hru	Sediment concentration in lateral flow groundwater flow	0 ~ 5000	4583.49	36.98
v_SPCON.bsn	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing.	0.0001 ~ 0.01	0.001	0.002
v_SPEXP.bsn	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	1 ~ 1.5	1.45	1.28
v_CH_COV1.rte	Channel erodibility factor	-0.05 ~ 0.6	0.01	0.13
v_CH_COV2.rte	Channel cover factor	-0.001 ~ 1	0.38	0.52

사용한 매개변수와 그 값을 Table 1에 정리하였다. 사용한 매개변수는 총 30개이며, 이 중 23개의 매개변수가 유량을 보정하기 위해 사용되었고 7개의 매개변수가 퇴적물을 보정하기 위해 사용되었다.

Fig. 4는 각 매개변수가 모형에 미치는 영향 정도를 보여주고 있으며, P 값이 적을수록 매개변수가 모형에 미치는 영향이 크다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 하상의 거칠기를 나타내는 매닝의 조도계수(CH_N2.rte)가 유량을 모의할 때 가장 큰 영향을 주는 매개변수였다. 하천에서 이동하는 퇴적물의 최대 재부유량을 계산하는데 사용되는 선형 매개변수(SPCON.bsn)는 퇴적물을 모의할 때 가장 큰 영향을 주는 매개변수였다. 이외에도 하천과 관련된 다른 매개변수(CH_K2), 지하수의 흐름과 관련된 매개변수(ALPHA_BF.gw), 토양의 증발산과 관련된 매개변수(EPCO.hru, ESCO.hru), 지표 유출의 이동 시간과 관련된 매개변수(SURLAG.bsn)가 유량 모의에 주요한 영향(P-Value < 0.05)이 있었다. USLE의 보전관리 인자 P는 퇴적물 모의에 주요한 영향을 주는 또 다른 매개변수였다.

4.2. 모형의 예측력 평가

4.2.1. 유량

Table 2는 보정 및 검증 기간에 대해 기존 SWAT 모형에서 사용하는 일단위 강우자료(ODR)와 본 연구에서 제안한 기법을 이용한 강우 자료(MDR)를 이용하여 SWAT 모형이 모의한 유량의 정확도를 보여준다. MDR자료를 이용한 SWAT 모형의 결과는 보정 기간과 검증 기간 모두 기존 ODR 기반 SWAT 모형의 결과에 비하여 R^2 와 NSE 모두 높았다. 이는 Moriasi et al.(2015)의 기준에 따르면 기존 SWAT 모형은 유량 모의에 있어 보정 기간 동안은 좋은 예측력($0.75 < R^2 < 0.85$ and $0.70 < NSE < 0.80$), 검증 기간 동안에는 안정된 성능($0.60 < R^2 < 0.75$ and $0.50 < NSE < 0.70$)을 보였다. 수정된 SWAT

모형은 유량 모의에 있어 보정 기간 동안은 매우 좋은 성능($0.85 < R^2$ and $NSE < 0.80$), 검증 기간 동안에는 좋은 성능($0.75 < R^2 < 0.85$ and $0.70 < NSE < 0.80$)을 보였다.

Fig. 5는 모의 기간 동안 실제 관측된 일일 강우량과 일일 평균 유량을 시계열적으로 보여준다. 이 중 일일 평균 유량이 초당 200 m^3 가 넘는 사상은 2009년에 1번, 2011년에 1번, 2012년에 1번, 2016년에 1번, 총 4번 나타났다. 기존 SWAT 모형에서 모의한 침투유량 시간은 실제 침투유량이 나타나는 시간과 잘 일치하지 않는 경향이 나타났으며, 실제 침투유량이 나타나는 시간에는 유량을 과소 모의하였다. 수정된 SWAT 모형 역시 실제 침투유량이 나타나는 시간에는 유량을 과소 모의하였지만, 기존 SWAT 모형이 모의한 것 보다는 실제에 가깝게 모의하였다.

4.2.2. 퇴적물량

Table 3은 보정 및 검증 기간에 대해 기존 SWAT 모형과 수정된 SWAT 모형이 모의한 퇴적물량의 정확도를 보여준다. 수정된 SWAT 모형은 보정 기간 동안 기존 SWAT 모형에 비하여 R^2 와 NSE는 높았지만, 검증 기간에는 동일했다. Moriasi et al.(2015)의 기준에 따르면 기존 SWAT 모형은 퇴적물 모의에 있어 보정 기간 동안은 정확성이 떨어지고($NSE < 0.45$), 검증 기간 동안에는 안정된 성능($0.45 < R^2 < 0.65$ and $0.45 < NSE < 0.70$)을 보였다. 수정된 SWAT 모형은 퇴적물 모의에 있어 보정 기간 동안은 매우 좋은 성능($0.80 < R^2$ and $0.80 < NSE$), 검증 기간 동안에는 안정된 성능($0.40 < R^2 < 0.65$ and $0.45 < NSE < 0.70$)을 보였다.

Fig. 6은 모의 기간 동안 실제 관측된 일일 강우량과 일일 퇴적물량을 시계열적으로 보여준다. 이 중 자료가 누락된 기간을 제외하고 일일 퇴적물량이 2 tons이 넘는 사상은 2009년에 1번, 2016년에 1번, 총 2번 나타났다. 유량의 모의 결과와 유사하게 2009년의 사상에서 기존

Table 2. Discharge simulation performance of the original SWAT and modified SWAT

Discharge		SWAT results based on original daily rainfall		SWAT results based on modified daily rainfall	
		R^2	NSE	R^2	NSE
Calibration	2009-2011	0.76	0.72	0.90	0.80
Validation	2012-2017	0.69	0.67	0.81	0.75

Table 3. Sediment simulation results using the original rainfall and modified rainfall in SWAT model

Sediment		Original Rainfall		Modified Rainfall	
		R^2	NSE	R^2	NSE
Calibration	2009-2011	0.44	0.41	0.87	0.86
Validation	2012-2017	0.53	0.48	0.53	0.48

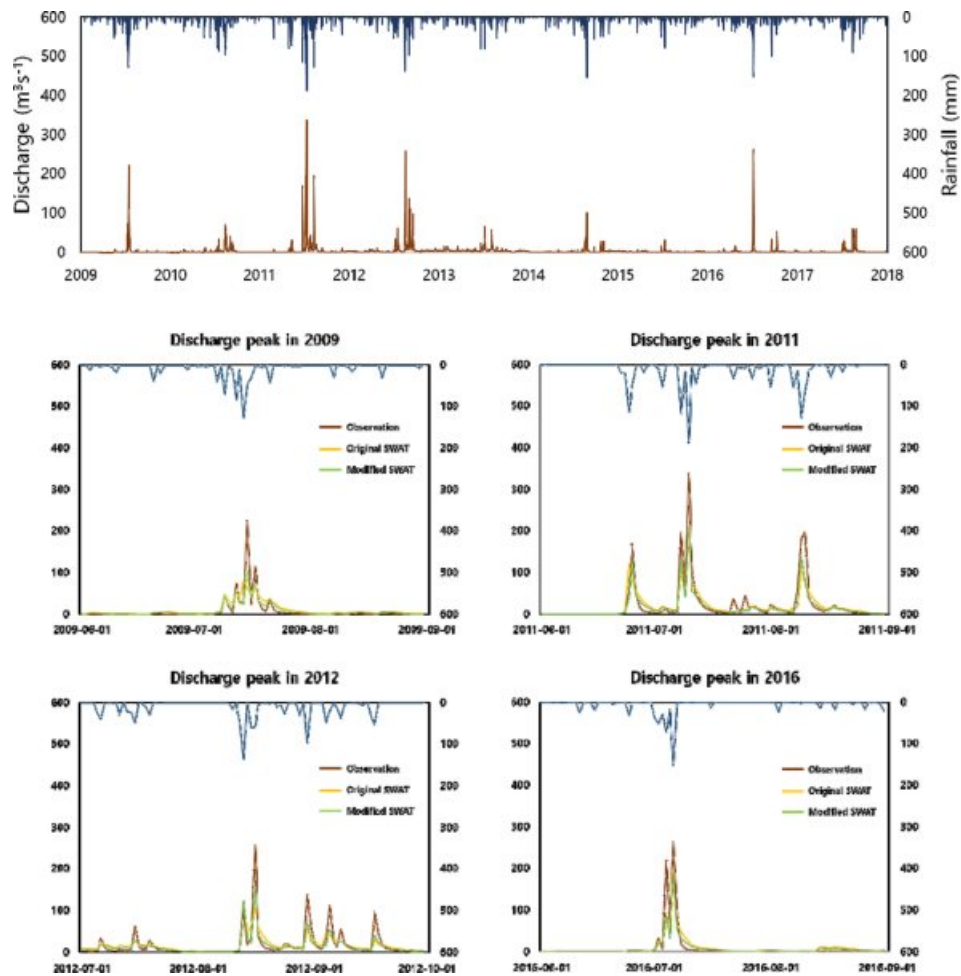


Fig. 5. Time series of observed versus simulated daily discharge using original SWAT and modified SWAT.

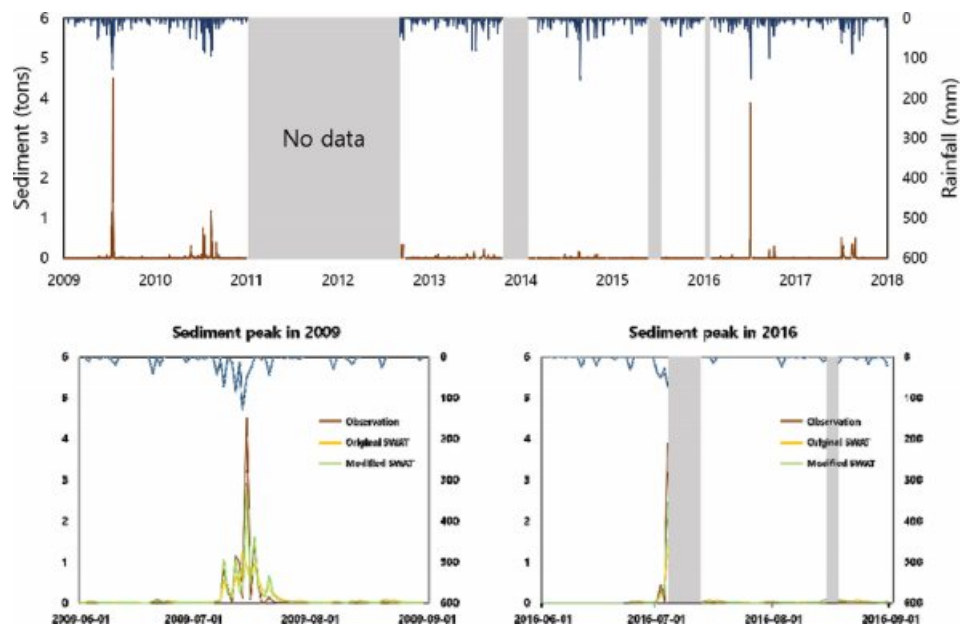


Fig. 6. Time series of observed versus simulated daily sediment using original- and modified-rainfall.

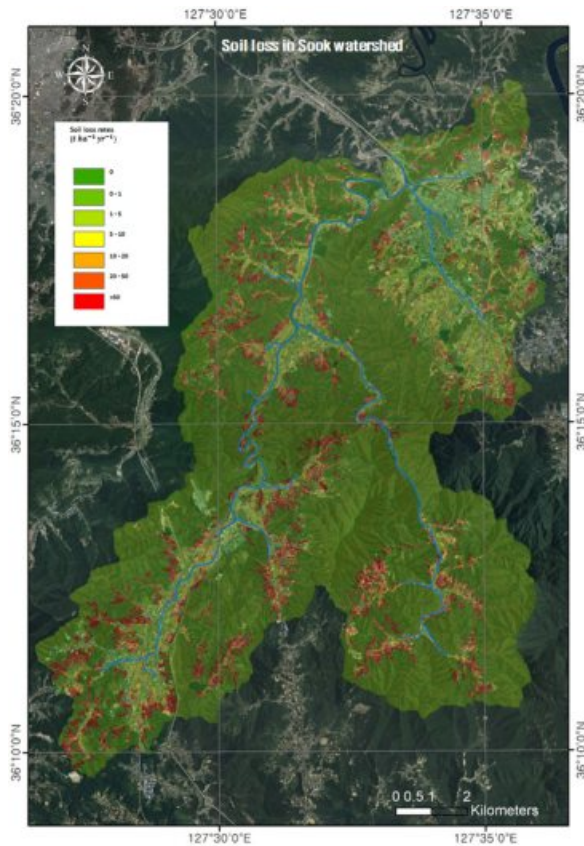


Fig. 7. Distribution map of soil erosion by rainfall.

SWAT 모형의 퇴적물량과 실제 퇴적물량의 침투 시간이 잘 일치하지 않는 경향이 나타났으며, 2009년과 2016년 사상 모두 실제 퇴적물량의 침투가 나타나는 시간에는 퇴적물량을 과소 모의하였다. 수정된 SWAT 모형 역시 실제 퇴적물량의 침투치가 나타나는 시간에는 퇴적물량을 과소 모의하였지만, 기존 SWAT 모형이 모의한 것 보다는 실제 모니터링 자료에 가깝게 모의하였다.

4.2.3. 퇴적물 발생지의 공간적 분포

수정된 강우가 반영된 SWAT을 이용하여 HRU에서 하천으로 유입되는 퇴적물량(output.hru; SYLD)을 통해 퇴적물 발생지의 공간적 분포를 확인할 수 있었다. Fig. 7은 소옥천 유역의 퇴적물 발생지와 발생하는 연간 퇴적물량의 공간적 분포를 보여준다. 퇴적물량의 발생이 가장 적은 곳은 0, 가장 많은 곳은 6.61로 다양하게 나타났다. 퇴적물량이 많이 발생하는 곳은 주로 하천이나 농업용 저수지 인근에 분포하였는데, 이는 소옥천 유역의 토지 이용과 밀접한 연관이 있었다. 연간 퇴적물량은 과수원(4.6 tons/ha), 밭(3.5 tons/ha), 침엽수림(2.3 tons/ha), 논(1.5 tons/

ha), 혼효림(0.3 tons/ha), 활엽수림(0.3 tons/ha) 순으로 발생 가능성이 높았다. 연간퇴적물량에 대한 각각 유역 내 특성에 대한 면적을 살펴보면 유역의 전체 퇴적물량 중 밭이 차지하는 비율(34.67%)이 가장 높았다. 그다음으로는 침엽수림(32.34%), 논(12.69%), 혼효림(8.04%), 과수원(7.99%), 활엽수림(4.28%) 순이었다.

5. 토 의

기존의 일 단위 강우사상을 이용한 SWAT 모형의 결과는 유량과 퇴적물량을 모의하는데 있어 대부분의 기간에서 안정적이었지만, 일부 기간(2009~2011년)의 퇴적물량을 모의하는데 있어서 정확성이 떨어졌다. 특히, 극한 강우사상에 따른 침투 유량과 퇴적물의 관계가 실제 관측치보다 훨씬 적게 추정되었다. 하지만, 수정된 강우사상을 반영한 SWAT 모형의 결과는 모든 기간에서 안정적인 결과를 보였고, 일 단위 강우사상에서 잘 모의하지 못했던 2009년에서 2011년의 유량과 퇴적물과의 관계를 합리적으로 모의하였다. 이렇게 모형 간에 결과에 있어 차이가 나는 이유를 3가지 부분으로 나누어 검토하였다.

5.1. SCS Curve number 방법

SCS Curve number 방법은 SWAT 모형을 이용한 지표 유출량 산정 연구 등 거의 대부분의 모델링 연구에서 사용하고 있으며, 국내에서도 소옥천과 마찬가지로 유량 및 퇴적물량을 모의한 대부분의 연구에서 이 방법이 사용된다. 그러나 SCS Curve number 방법은 강우와 지표 유출량 간의 경험적인 관계를 이용하기 때문에 최대 일일 단위로 지표 유출량이 계산되는 한계가 있다. 따라서 모의를 수행함에 있어 강우사상의 시간적 불연속성이 발생하며, 실제 강우에 대한 지표 유출량의 수문 곡선을 제대로 반영할 수 없는 가능성이 크다.

Fig. 8은 기존 SWAT 모형으로 유량을 모의했을 때, 실제 관측 값과 가장 큰 차이가 발생했던 사상의 시간당 강우와 일일 평균 유량을 보여준다. 첫 번째 사례(Fig. 8 (a))의 강우사상은 2009년 7월 14일 18시에 시작하여 당일 24시, 두 번째 사례(Fig. 8 (b))는 2012년 9월 4일 20시에 시작하여 당일 22시에 강우사상의 침투가 기록되었다. 일일 평균 유량은 강우사상의 침투가 기록된 날의 다음 날에 증가하였다. 이러한 결과는 지표 유출량과 하천 유량이 최종 유출구 지점까지 지체되고 도달되는 시간의 차이에서 발생한다. SWAT 모형에서 지표유출량의 지체 시간과 밀접한 연관이 있는 매개변수는 Table 1의

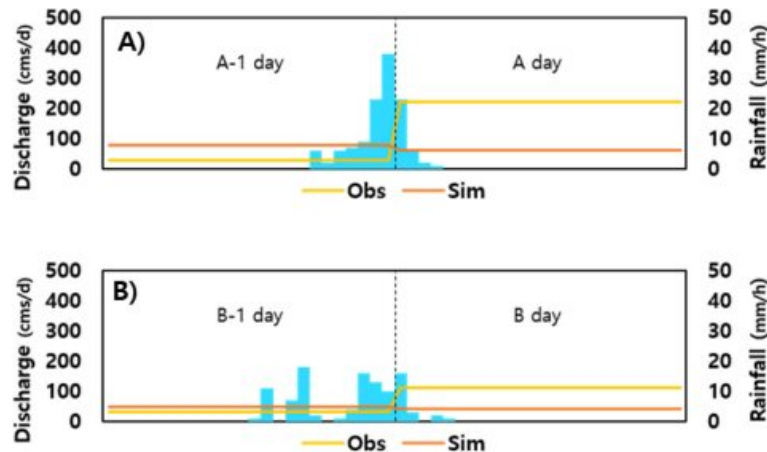


Fig. 8. Time series of observed hourly rainfall and observed versus simulated daily discharge (A) 2009.07.15., (B) 2012.09.05.

SURLAG.bsn이며, 본 연구에서도 유량의 모의 결과에 주요하게 영향을 주는 매개변수 중 하나였다. 그러나 SCS Curve number 방법을 사용할 때는 SURLAG.bsn의 매개변수를 조정하더라도, 일괄적으로 일일 강수량의 일정 비율을 다음 날로 넘겨주기 때문에 실제 유량을 추정하는데 불확실성이 존재하는 것으로 나타났다.

5.2. Green-Ampt 방법

Green-Ampt 방법은 SWAT 모형에서 SCS Curve number 방법에 비해 자주 사용되지 않지만, 일일 미만의 시간 단위로 유량과 퇴적물량을 모의할 수 있다. SWAT 모형에 Green-Ampt 방법을 추가한 Jeong et al.(2010)의 연구에 따르면 Green-Ampt 방법을 사용하고 일일 미만의 시간 단위를 가지는 강수량 자료를 입력할 경우, 기존 SWAT 모형의 SCS Curve number 방법에 비해 더 좋은 모의 결과를 도출할 수 있다. 특히 높은 유량이 관측되는 시기에 모의 성능이 상당히 향상된다. 이러한 결과는 본 연구의 수정된 SWAT 모형이 개선한 성능과 상통한다. 많은 지표 유출량과 유량이 발생할 때는 비점 오염원의 영양염류가 이동할 가능성이 커지기 때문에 이 시기의 모의 성능을 향상시키는 것은 중요하다. 다만, 아직까지는 일일 미만의 시간 단위로 계산한 모의 결과를 기존의 SWAT-CUP과 같은 프로그램을 통해 매개변수를 추정할 수 없다. 일일 단위 모의 결과로 추정된 매개변수를 그대로 적용할 수도 없어, 모형을 최적화하는데 시행착오법을 사용해야 하는 어려움이 있다(Jang and Kim, 2016).

5.3. MUSLE의 식생피복 인자

소옥천 유역에서 모의된 HRU별 퇴적물량은 식생피복

인자와 보전관리 인자 매개변수의 조정을 통해 보정되었다. 식생피복 인자와 보전관리 인자 매개변수는 SWAT database 자료에 기반 하여 동일한 비율로 조정되었기 때문에 모형 보정을 수행하더라도 모의 결과의 공간적 변동성이 달라지지 않는다. 가장 많은 퇴적물량이 발생하는 것으로 확인된 밭의 경우 SWAT database 자료에서 가장 높은 식생피복 인자 값(0.03)을 가진다. 이는 본 연구에서 제안한 퇴적물 발생지의 공간적 분포가 실제 공간적 분포를 반영하지 못하는 한계를 보여준다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 연구 지역이나 연구 지역과 동일한 환경에서 실험을 통해 얻어진 식생피복 인자와 보전관리 인자 자료가 필요하다. 그러나 실제 식생피복 인자와 보전관리 인자 값을 얻기 위해서는 비용이 많이 발생하기 때문에 기존에 구축된 자료를 찾기가 어렵다. 특히, 산림의 경우 국외 연구 사례를 보더라도 Kitahara et al.(2010)이 정리한 자료 외엔 극히 드물다. 이를 위해 최근 국내에서는 방사성동위원소를 이용한 핑거프린팅으로 퇴적물 발생지를 확인하는 연구가 수행되었다(Kim et al., 2013; Lim et al., 2014). 이러한 연구 결과들은 SWAT의 HRU 모의 결과의 보정 과정에 반영하면 보다 정확한 퇴적물 발생지의 공간적 분포를 확인할 수 있을 것으로 판단이 들며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 강우 입력 매개변수에 대해 기존의 일 단위 강우산정법을 이용한 SWAT 결과와 강우의 시점과 종점을 고려하여 일 단위 강우자료를 재생산한 모델링 기법을 이용하여 소옥천 유역을 대상으로 유량과 퇴적물량간의

결과를 평가하였으며 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 수정된 강우가 반영된 SWAT 모형은 유량을 모의할 때 보정 및 검증 기간 모두 기존 일단위 강우를 이용한 SWAT 모형과 비교하여 더 좋은 성능을 보였다. 퇴적물량을 모의할 때는 보정 기간에 더 좋은 성능을 보이고, 검증기간에는 같은 성능을 보였다. 특히 높은 유량과 퇴적물량이 관측된 기간에 기존 SWAT 모형보다 유량과 퇴적물량을 실제에 가깝게 예측하였다.

2. 모의 결과에 따르면 하천이나 농업용 저수지 인근의 밭에서 가장 많은 퇴적물량이 유출되었다. 따라서 해당 토지 이용에서 발생하는 퇴적물량을 줄이기 위한 저감 기술의 개발이 필요하다.

3. 본 연구는 기존 모형의 수정을 통해 소옥천 유역에서 유량 및 퇴적물량 모의의 정확성을 개선하였고, 이는 연구 지역의 비점오염 유출을 줄이기 위한 의사 결정에 도움을 줄 수 있다. 또한 보다 정확한 유량 및 퇴적물량 모의를 위해서 하루 미만의 강우 자료를 반영할 수 있는 SWAT 모형을 사용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 환경산업기술원의 표토보전관리기술 개발사업(과제번호: 2019220830003)과 산림청 한국임업진흥원 산림과학기술 연구개발사업(과제번호: 2021342B10-2123-CD01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Abbaspour, K.C., 2013, Swat-cup 2012, SWAT calibration and uncertainty program-A user manual, Zurich, 1-106.
- Bae, Y.J., Lee, H.J., Jung, B.W., and Jung, H., 2020, Korean Climate Change Assessment Report 2020, Korea Meteorological Administration, Seoul, 4-7.
- Chen, H., Luo, Y., Potter, C., Moran, P.J., Grieneisen, M.L., and Zhang, M., 2017, Modeling pesticide diuron loading from the San Joaquin watershed into the Sacramento-San Joaquin Delta using SWAT, *Water Res.*, **121**, 374-385, doi: 10.1016/j.watres.2017.05.032
- Cheon, S.U., Lee, J.A., Lee, J.J., Yoo, Y.B., Bang, K.C., and Lee, Y.J., 2006, Relationship among inflow volume, water quality and algal growth in the Daecheong lake, *J. Korean Soc. Water Environ.*, **22**(2), 342-348.
- Jang, S.S. and Kim, S.J., 2016, Comparison of Hourly and Daily SWAT Results for the Evaluation of Runoff Simulation Performance, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **58**(5), 59-69, doi: 10.5389/KSAE.2016.58.5.059.
- Jeon, T.W., Kim, T.S., Lee, J.J., Lee, J.W., Hwang, S.H., Shim, I.K., Shin, K.S., Choen, S.U., Shin, D.S., Lee, Y.J., Kim, M.S., Youn, J.Y., Khan, J.B., Kim, K.Y., Choi, J.W., Tae, E.A., Lee, T.H., Kim, S.W., Choi, J.Y., Ji, J.Y., and Youk, J.S., 2010, Effect Analysis of Rainfall Runoff on Embayment Water Quality in the Daecheong Lake(II), National Institute of Environmental, Sejong, 1-30.
- Jeong, D.H., Hong, S.H., Youn, J.H., Hong, S.Y., You, J.J., Hwang, S.H., Park, S.Y., Kim, T.S., Lee, Y.J., Khan, J.B., Youn, J.Y., Kim, K.Y., Kim, S.W., Tae, E.A., Ji, J.Y., Youk, J.S., Lee, D.H., Choi, J.Y., Maeng, J.Y., Park, Y.M., Han, A.W., Kim, H.N., Kim, M.S., Choi, J.W., Lee, T.H., and Kim, C.H., 2011, A Study on the Impact of Non-Point Source Pollution upon Algal Blooming Area in the Daecheong Reservoir. National Institute of Environmental, Sejong, 1-63.
- Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L., and Srinivasan, R., 2010, Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model, *Water Resour. Manag.*, **24**(15), 4505-4527, doi: 10.1007/s11269-010-9670-4.
- Kim, J.K., Onda, Y., Yang, D.Y., and Kim, M.S., 2013, Temporal variations of reservoir sediment sources in a small mountainous catchment in Korea. *Earth Surf. Process. Landf.*, **38**(12), 1380-1392, doi: 10.1002/esp.3379.
- Kim, Y., 2018, Watershed Sediment Estimation Using Distributed Hydrological Model, Master dissertation, Chungnam National University, Daejeon.
- King, K.W., Arnold, J.G., and Bingner, R.L., 1999, Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT, *Transactions of the ASAE*, **42**(4), 919-926, doi: 10.13031/2013.13272.
- Kitahara, H., Okura, Y., Sammori, T., and Kawanami, A., 2000, Application of universal soil loss equation (USLE) to mountainous forests in Japan, *J. For. Res.*, **5**(4), 231-236, doi: 10.1007/BF02767115.
- Lee, J.A., Cheon, S.U., Lee, J.W., Lee, J.J., Shim, I.K., Hwang, S.H., Shin, K.S., Shin, D.S., Lee, H., Shin, M.H., Choi, J.W., Lee, Y.J., Choi, J.W., Lee, T.H., Youn, J.Y., Kim, K.Y., Kim, S.W., Khan, J. B., Tae, Y.B., Park, S.H., Park, N. W., and Kim, C.W., 2009, Effect Analysis of Rainfall Runoff on Embayment Water Quality in the Daecheong Lake(I), National Institute of Environmental, Sejong, 1-151.
- Lim, Y.S., Kim, J.K., Kim, J.W., and Hong, S.S., 2014, Evaluation of suspended-sediment sources in the Yeongsan River using Cs-137 after major human impacts, *Quat. Int.*, **344**, 64-74, doi: 10.1016/j.quaint.2014.05.033.

- Ministry of Environment, 2020, The second basic plan on soil conservation. Ministry of Environment, Sejong, 2-12.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P., 2015, Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria, *Transactions of the ASABE*, **58**(6), 1763-1785, doi: 10.13031/trans.58.10715.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R., 2011, Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009, Texas Water Resources Institute, Texas, 1-647.
- Shi, W., Huang, M., Gongadze, K., and Wu, L., 2017, A modified SCS-CN method incorporating storm duration and antecedent soil moisture estimation for runoff prediction, *Water Resour. Manag.*, **31**, 1713-1727, doi: 10.1007/s11269-017-1610-0
- Williams, J.R., 1975, Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, U.S. Department of Agriculture, Mississippi, 244-252.
- Environmental Geographic Information (<https://egis.me.go.kr>) [accessed 21.11.30]
- Korean Soil Information System (<https://soil.rda.go.kr>) [accessed 21.11.30]