



SWAT 모형을 이용한 만대천 유역의 비점오염 예측과 초생대 수질 개선 효과 분석

Water Quality Prediction at Mandae Watershed using SWAT and Water Quality Improvement with Vegetated Filter Strip

이지원* · 엄재성** · 김범철** · 장원석* · 류지철* · 강현우* · 김기성* · 임경재*†

Lee, Jiwon · Eom, Jae Sung · Kim, Bomchul · Jang, Won Seok ·

Ryu, Ji Chul · Kang, Hyunwoo · Kim, Ki-Sung · Lim, Kyoung Jae

ABSTRACT

Mandae watershed in Gangwon province has been known as one of soil erosion hot spot watersheds within Hanggang basin. Thus numerous efforts have been made to reduce soil erosion and pollutant loads into receiving watershed. However, proper best management practices have not been suggested because no monitoring flow and water quality data were available. Thus, modeling technique could not be utilized to evaluate water quality issue properly at Mandae watershed to develop and implement the best management practices. In this study, the SWAT model was applied to the Mandae watershed, Gangwon province to evaluate the SWAT prediction ability and water quality improvement with vegetated filter strip (VFS) in this study. The Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) and Coefficient of determination (R^2) values for flow simulation were 0.715 and 0.802, respectively, and the NSE and R^2 values were 0.903 and 0.920 for T-P simulation indicating the SWAT can be used to simulate flow and T-P with acceptable accuracies. The SWAT model, calibrated for flow and T-P, was used to evaluate water quality improvement with the VFS in agricultural fields. It was found that approximately 56.19 % of T-P could be reduced with vegetated filter strip of 5 m at the edge of agricultural fields within the watershed (34.86 % reduction with VFS of 1m, 48.29 % with VFS of 3 m). As shown in this study, the T-P, which plays key roles in eutrophication in the waterbodies, can be reduced with proper installation of the VFS.

Keywords: SWAT; mandae; non-point pollution; T-P; total phosphorus; vegetated filter strip; VFS

1. 서 론

사계절이 뚜렷하고 6월부터 9월에 연평균 강수의 70 %가 집중되는 몬순기후에 속하는 우리나라에서는 급경사 지대의 집약적 토지이용과 과도한 비료사용으로 인하여 강우시 수질오염 및 탁수문제가 심각하다. 환경적인 측면뿐만 아니라 경제적으로도 많은 문제를 발생시키는 탁수 문제를 해결하기 위해서 정부는 7년 (2007~2013년)간 총 3,859억 원의 사업비를 투자하여 토사유출 방지에 대한 정부차원의 종합대책을 마련하였다. 그동안 고랭지 농업지대에서 발생하는 탁수 및 수질오염문제를 해결하기 위하여 여러 가지 최적관리기법 (Best Management

Practices, BMPs)들이 제시되어 왔으며, 침사지, 저류지, 사방댐 등과 같은 수리 구조물에 의한 대책과 더불어 초생대에 의한 대책이 대두되고 있다. 초생대는 강우시 토양 유실을 저감시키기 위해 설치되며, 유사저감효과 뿐만 아니라 세류 침식에 의한 토양유실, 강우시 유출수의 수질 개선 및 야생동물의 서식처 제공 등의 기능을 갖는다. 초생대는 주로 농경지 주변에 설치되며, 인접하고 있는 농경지로부터 발생하는 유출수의 유속을 감소시키고 유출수에 포함되어 있는 유사를 비롯한 다양한 비점오염물질을 침전시키거나 여과시켜 유출수의 수질을 개선하는 역할을 한다. 또한 수리 구조적 방법에 비하여 경제적·환경적 측면에서 효율적인 초생대의 수질개선 효과에 대한 많은 연구가 진행 되어 왔다. Jin et al. (2009)의 연구에 따르면 가로 2.5 m, 세로 20 m, 경사율 17 %의 배수가 재배되는 연구포장 말단에 폭 1, 2, 4 m 호밀 초생대를 적용하였을 때 각각 62, 60, 88 % 토양 유실 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. Park et al. (2008a)은 데스크탑 기반의 VFSSMOD-W 모형의 민감도 분석을 통하여 초생대 폭과 시험포로부터의 유

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

** 강원대학교 자연과학대학 환경과학과

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6468

Fax: +82-33-251-1518

E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr

2010년 11월 23일 투고

2011년 1월 5일 심사완료

2011년 1월 6일 게재확정

출량에 관한 유사저감 효율 관계식을 산정하여 폭 0.1~10 m의 초생대 적용 시 8~95.7%의 유사저감 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다. 또한 Gharabaghi et al. (2001)의 연구에 따르면 초생대의 유형에 따라 약 50~98% 유사저감 효과가 있는 것으로 보고되었다.

최적의 탁수 및 수질오염 저감대책을 수립하기 위해서는 장기적인 모니터링을 통한 연구가 진행되어야 하지만 시간과 비용이라는 한계 때문에 모형을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold, 1992; Arnold et al., 1998) 모형은 미국 농무성의 농업연구국 (United States Department of Agriculture/Agricultural Research Service, USDA/ARS)에서 개발된 유역 단위 모형으로써 유역에서 강수에 따른 비점오염의 발생 및 거동을 시간적·공간적으로 분석할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 전 세계적으로 널리 사용되고 있다 (Choi et al., 200; Kim et al., 2009; Pisinaras et al., 2010; Ullrich et al., 2009).

지금까지 한강수계의 탁수저감을 위해 모형을 이용한 많은 연구가 진행되어 왔다 (Heo et al., 2008; Jang et al., 2009; Jang et al., 2010; Park et al., 2008b; Yoo et al., 2008). 특히 양구 해안면, 흥천 자운리, 인제 가아리는 심각한 토양 유실로 인한 탁수문제로 한강수계 탁수 우선관리지역으로 지정되었으며 그 중 양구 해안면 만대천 유역은 급경사지대에서의 집약적 토지이용과 생산량 증대를 목적으로 과도한 비료사용이 이루어지고 있다. 배추의 경우 관행 시비량이 토양검정 시비량에 비하여 질소의 경우 1.5배, 인산 7.9배, 칼리 4.0배이고, 무의 경우 관행 시비량이 토양검정 시비량에 비하여 질소 1.2배, 인산 6.8배, 칼리 3.0배로서, 고령지 농업지대에서 비료가 과도하게 사용되고 있으며, 그 중에서도 인산의 경우 질소나 칼리에 비하여 상대적으로 많은 시비가 이루어지고 있다. 또한 객토가 1.9년 주기로 이루어지고 있어 강우시 소양댐 유역의 탁수 및 수질오염의 주범으로 인식되고 있다.

지금까지 양구 해안면 유역의 SWAT 모형을 이용한 연구는 많았으나 대부분이 탁수 저감을 목적으로 한 연구였을 뿐, 실측 수질 자료를 활용한 수질 현황에 관한 연구는 매우 미비하였다. Kim et al. (2008)의 연구에 따르면 총질소 (Total nitrogen, T-N), 총인 (Total Phosphorus, T-P), 그리고 영양염류 등 여러 가지 수질오염의 원인 물질들 중 담수에서 수질오염에 가장 큰 영향을 주는 물질은 T-P로 밝혀졌으며, 수질오염과 관련하여 T-N에 비하여 두 배나 높은 상관관계를 보였다. 이러한 이유로 양구 해안면 만대천 유역에서의 유출 및 비점오염 발생 및 거동을 평가하고 효율적인 수질 개선 대책을 수립하기 위해서는 널리 이용되고 있는 SWAT 모형의 적용성 평

가 및 최적관리 효과 분석이 필요하리라 판단된다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 양구 해안면 만대천 유역을 대상으로 SWAT 모형의 적용성을 평가하고, 2) 초생대 적용에 따른 T-P에 대한 수질개선 효과를 분석하는 데 있다.

II. 연구방법

1. 연구지역

본 연구에서는 강원도 인제군 가아리, 흥천군 자운리와 함께 한강수계 탁수 우선관리지역 중 하나인 강원도 양구군 해안면에 위치한 만대천 유역 (Fig. 1)을 연구 대상지역으로 선정하였다. 양구 해안면 만대천 유역은 북위 38° 15'~38° 20', 동경 128° 15'~128° 10'에 위치하고 있다. 유역면적은 60.42 km²로 이 중 산림이 차지하는 비율은 54.70%, 농경지 30.52%, 초지 9.85%, 주거 및 상업지역은 4.88%이며 나머지 0.05%는 내륙수역이다. 주요 소하천으로는 내동천, 둔정골천, 큰골지천, 성황천, 천룡안천, 월산천, 만대천이 있으며 모두 만대천을 통하여 소양댐으로 유입된다. 평균경사가 11°이나 상부는 20° 하부는 5°로서 분지저를 제외하고는 매우 급하며 전형적인 고령지 농업이 주를 이룬다 (Yoo et al. 2008).

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 만대천 유역은 소양댐 유역의 일부분으로서 소양댐 유역면적 2,703 km²의 2.24% 밖에 되지 않지만 평균경사가 11°이고 전형적인 고령지 농업이 이루어지고 있으며, 과도한 비료 사용과 주기적으로 이루어지고 객토로 인하여 강우시 농경지에서 심각한 토양 유실과 함께 영양물질이 수체로 유입된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 다양한 최적관리 기법의 효과 분석을 통해 경작지에 적용함으로써 최소의 비용으로 최대의 효과를 기대할 수 있을 것이다.

2. SWAT 모델개요 및 입력자료

가. 모델 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA/ARS)의 Dr. Jeff Arnold (Arnold, 1992; Arnold et al., 1998) 등에 의해 개발된 유역단위 (Watershed Scale) 모형으로서 복잡한 대규모의 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토지이용과 토양 및 토지관리 상태에 따른 수질과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지 관리 방법 등을 비롯한 유역에서의 수문 거동을 모의하기 위하여 개발되었다 (Neitsch et al., 2005). SWAT 모형을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료 (일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 공간적으로 다르게 분포하는 토지이용현황,

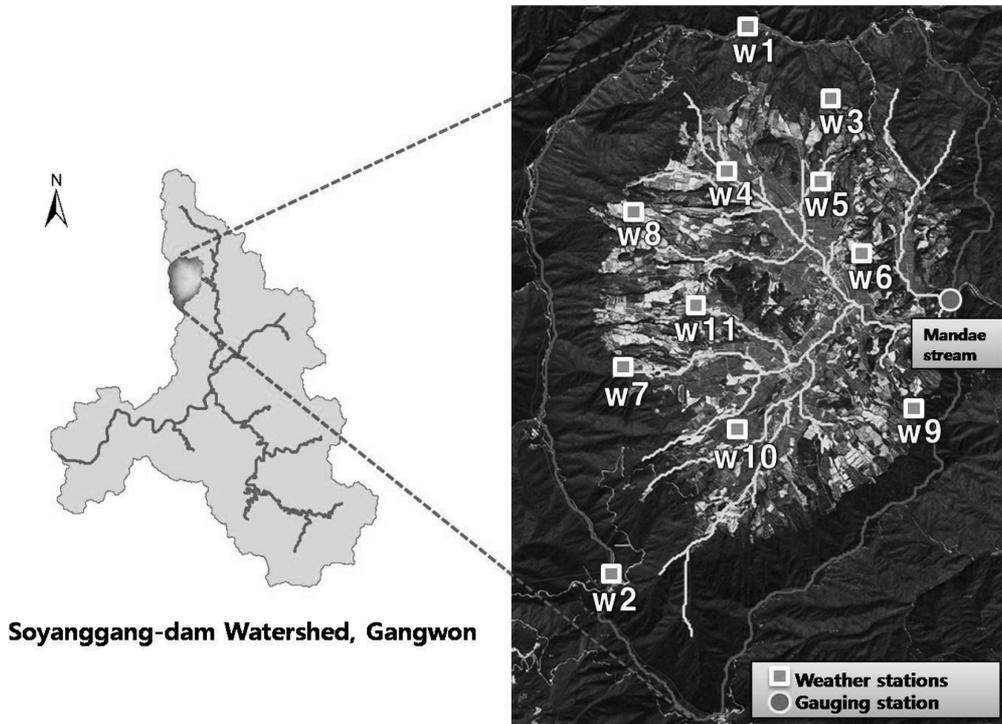


Fig. 1 Location of the Mandae watershed, Gangwon province

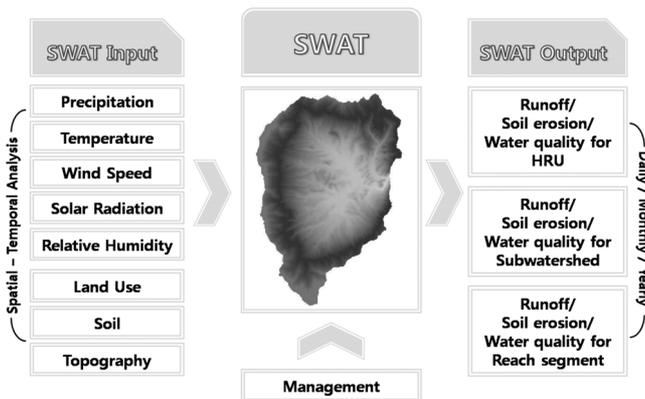


Fig. 2 Input and output data of SWAT model

토양속성, 지형자료, 그리고 영농자료 등이 필요하다 (Fig. 2) (Arnold, 1992; Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 유역에서의 강수에 따른 유출 및 비점오염의 발생 및 거동의 시·공간적 변화를 분석할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있다. 또한 미세측 지역에서도 모의가 가능하며, 경작 형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 변화 또한 정량화할 수 있는 특징을 가지고 있다.

나. 기상자료

SWAT 모형은 일 강수 (mm), 일 평균풍속 (m/sec), 일 평균

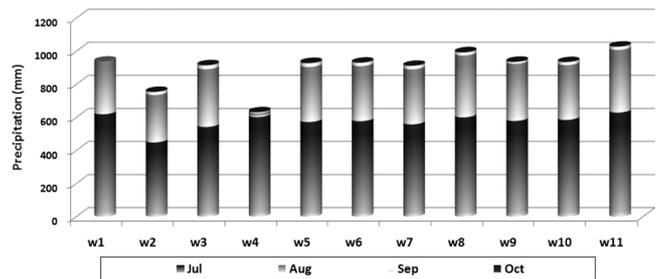


Fig. 3 Monthly precipitation at 11 weather stations

상대습도 (%), 일 최고·최저기온 (°C), 일 수평면 일사량 (MJ/m²) 과 같은 기상자료를 이용하여 유출 및 비점오염을 평가한다. 본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 유역의 유출 및 수질 현황을 정확히 산정하기 위하여 양구 해안면 만대천 유역에서 2009년 7월부터 10월까지 11개의 관측소에서 조사한 기상 자료를 이용하였다. SWAT 모형의 입력자료 중 유출에 가장 많은 영향을 미치는 강수량 자료는 Fig. 3에 보이는 바와 같이 11개 관측소마다 많은 강수량의 차이를 보였다. 4개월 평균 903.36 mm로 최소 634.20 mm에서 최대 1,031.20 mm까지 다양하게 분포하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 사용되는 SWAT 모형은 강수량의 시공간적 차이를 반영하기 때문에 보다 정확한 수문현상 및 비점오염 발생 및 거동 모의가 가능 할 것으로 판단된다.

다. 토지이용도, 영농자료, 토양도, DEM

Heo et al. (2008)의 연구에 따르면 연구지역내 토지이용/재배작물 특성을 정확히 반영하지 못하는 대분류/중분류 토지피복 자료를 이용하여 SWAT 모형 구동시 유역내에서 재배 되는 작물별 시비 및 경운 등의 정확한 영농 정보를 반영하지 못하기 때문에 모형의 보정 및 결과 해석에 많은 불확실성이 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해안면 만대천 유역내 유출 및 수질현황을 정확하게 예측하기 위하여 Bayreuth University (2009)에서 2009년에 조사한 양구 해안면 만대천 유역의 실측 작물지도를 이용하여 토지이용도를 구축하였다 (Fig. 4 (a)). 2009년 실측 작물지도는 환경부 중분류 토지피복도에서 다양한 작물 재배 경작지를 단순히 논, 밭, 하우스재배지, 과수원, 기타재배 만으로 구분하는 것에 비해 Table 1과 같이 Rice, Potato, Cabbage, Radish, Bean 등 해안면 내에서 실제 경작이 이루어지고 있는 9가지 작물로 구분한다. 이렇게 구축된 토지이용도를 SWAT 모형의 입력자료로 활용함으로써

실제 필지별 작물의 영농정보 입력 (시비/경작방법 등)이 가능해 졌으며, 이를 통해 작물에 따른 비점오염원의 거동을 보다 정확히 모의 할 수 있을 것으로 판단된다.

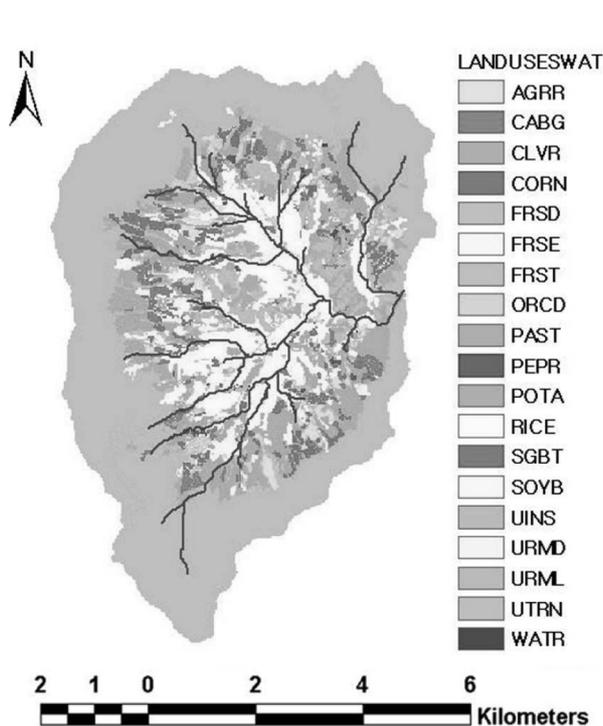
또한 정확한 비점오염원 거동을 모의하기 위하여 농촌진흥청 (RDA; Rural Development Administration)에서 제공하는 작목별 관리 매뉴얼을 참고하여 Fig. 4 (b)에서 보이는 바와 같이 Rice, Potato, Cabbage, Radish, Bean 등 해안면 내에서 경작되고 있는 9가지 작물에 대하여 SWAT 모형의 영농자료를 구축하였다. 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원 (NIAS, 2000)에서 제공해 주는 개략토양도 (1:50,000)를 사용하였다 (Fig. 5). 또한 유역 구분 및 하천망 구축을 위해 국립지리원에서 제공해 주는 수치지도 (1:5,000)를 이용하여 Digital Elevation Model (DEM)을 구축하였다 (Fig. 6).

라. 오염원 현황

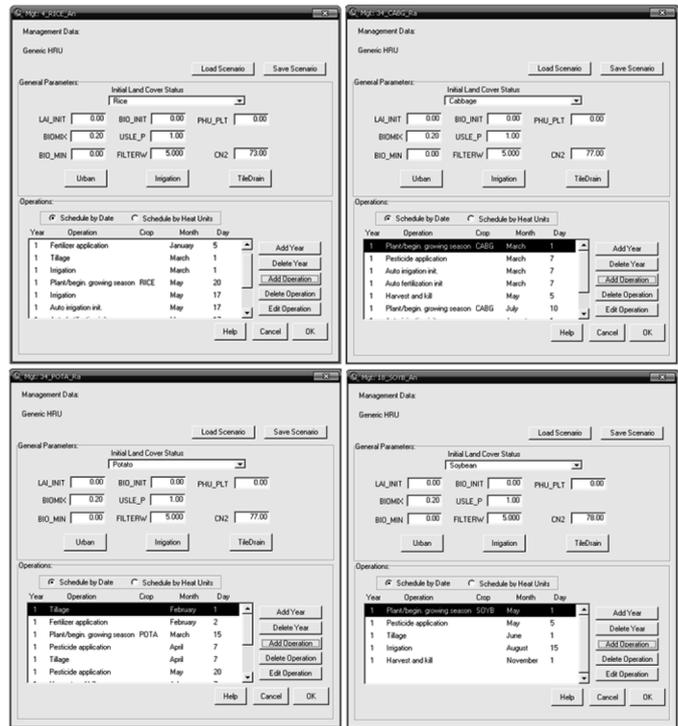
본 연구에서는 해안면내에서 발생하는 점오염원현황을 반영

Table 1 Various cropping at Mandaе watershed, 2009

Landuse 2009	Pumpkin (AGRR)	Cabbage (CABG)	Corn (CORN)	Orchard (ORCD)	Pepper (PEPR)	Potato (POTA)	Rice (RICE)	Radish (SGBT)	Bean (SOYB)
Area (%)	1.73	2.37	0.80	1.43	0.30	3.74	14.15	3.53	2.47



(a) Crop map in 2009



(b) Crop management information

Fig. 4 Crop map and management information used in SWAT runs

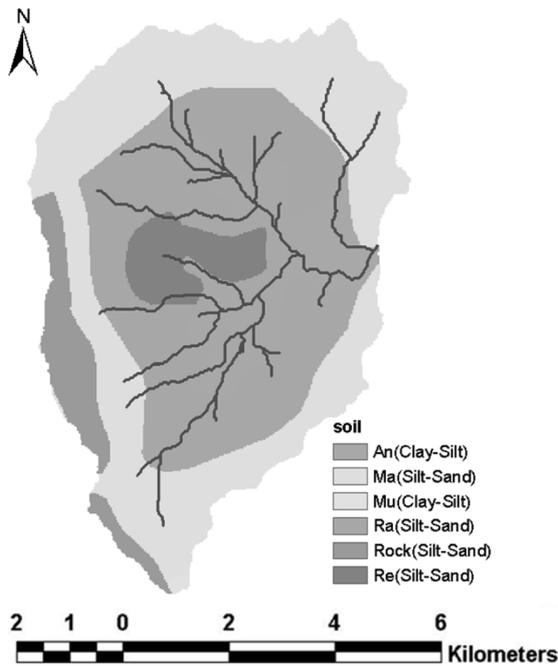


Fig. 5 Major soil types

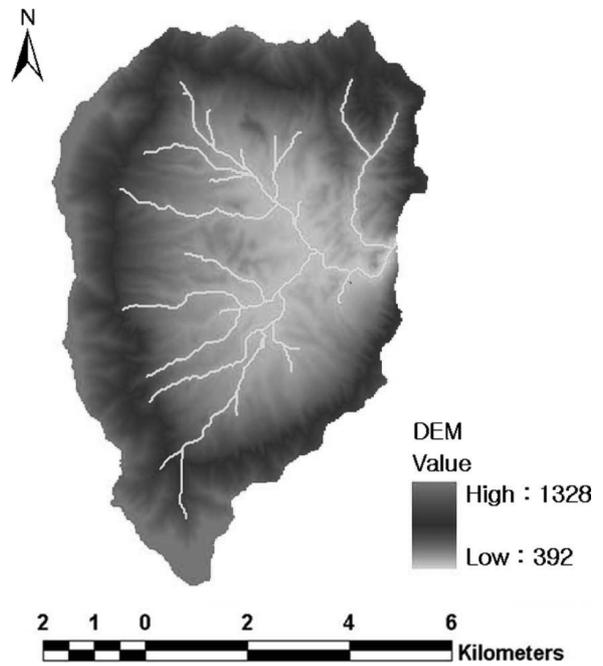


Fig. 6 DEM

Table 2 The parameters used in calibration

File	Parameter	Description	Range	Calibrated value
.HRU*	LAT_TTIME	Lateral flow travel time.	0.0 ~ 180.0	1
	SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow.	0.0 ~ 0.6	0.6
.GW	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor.	0.0 ~ 1.0	0.2
	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur.	0.0 ~ 5000.0	20
	GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin.	0.0 ~ 1000.0	0.1
.Chm	SOL_LABP	Initial labile (soluble) P concentration in surface soil layer.	0.0 ~ 100.0	50
	SOL_ORGP	Initial organic P concentration in surface soil layer.	0.0 ~ 4000.0	400

* HRU; Hydrologic Response Unit

하여 유출 및 수질을 평가하기 위하여 양구군 (Yanggu-gun)에서 제공하는 해안면 만대천 유역내 환경기초시설인 마을하수처리장 5개소에서 배출되는 방류량과 T-P의 자료를 이용하여 유역 유출 및 수질을 평가하였다.

3. 유량 및 수질 보정

가. SWAT 모형보정

SWAT 모형 보정에 사용된 실측자료는 2009년 (7월~10월) 양구 해안면 물골교에서 조사된 유량 및 수질 자료를 사용하였다. SWAT 일 유량 및 수질 예측치를 실측치와 비교하기 위하여 실측된 유량 및 수질자료를 Numeric Integration (NI) 방법으로 일 부하량을 산정하였다. 일 부하량 산정을 위해 본 연구에서 사용된 NI 방법은 식 (1)과 같다.

$$Load = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (1)$$

여기서, c_i 는 i 번째 농도이고, q_i 는 구간유량, t_i 는 $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는 i 번째 샘플로써 표현되는 시간구간이다.

본 연구에서는 SWAT 모형 보정을 위하여 먼저 유출량과 관련된 매개변수를 조정하였으며, 그 후 T-P와 관련된 매개변수 순으로 보정하였다. 이 과정에서 T-P에 관련된 매개변수는 유출량에 영향을 미칠 수 있기 때문에 유출량 관련 매개변수 보정 후 T-P관련 매개변수를 보정 할 때에는 앞서 조정한 유출량 관련 매개변수를 제외한 T-P에 관련된 매개변수에 대해서만 보정하여 보정 결과가 서로 영향을 주지 않도록 하였다. Table 2는 본 연구에서 SWAT 모형 보정 시 사용된 매개변수를 나

타난다.

만대천 유역의 SWAT 모형 적용성 평가시 결정계수 (R^2)와 유효 지수 (NSE)를 이용하였으며, NSE 산정은 식 (2)에서 보이는 바와 같다 (Nash and Sutcliffe, 1970).

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

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

Ramanarayanan et al. (1997)은 R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의 하는 것으로 제안하였으며, Donigian and Love (2003)은 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 일반적인 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 Table 3과 같이 제시하였다.

Table 3 Criteria for evaluating model performance (Donigian and Love, 2003)

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE for Daily Simulation	< 0.6	0.60~0.70	0.70~0.80	> 0.80

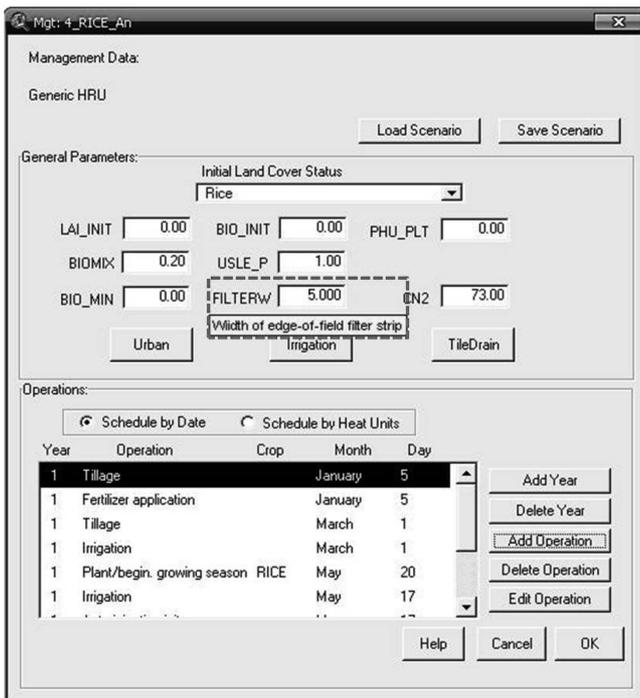


Fig. 7 Width of edge-of-field vegetated filter strip in SWAT

4. 초생대 적용에 따른 수질개선 효과 분석

본 연구에서는 여러 가지 토지이용 중 Rice, Potato, Cabbage, Radish, Bean 등 9가지 작물경작지에 해당하는 HRU에 대해서 다양한 폭의 초생대를 설치하였을 때의 수질개선효과를 분석하였다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 SWAT 모형의 .mgt 파일에 있는 초생대 관련 변수를 조정하여 농경지 주변에 설치되는 초생대 폭을 1, 3, 5 m로 하여 각각의 시나리오에 따른 T-P 저감 효율을 분석하였다.

III. 결 과

1. 유량 및 총인 보정결과

NI 방법으로 산정된 일 부하량을 이용하여 SWAT 모형의 적용성을 평가하였다. 2009년 7월부터 10월까지 양구 해안면 물골교에서 조사된 실측 유량에 대하여 SWAT 모형 보정결과 $NSE = 0.715$, $R^2 = 0.802$ 로 나타났다 (Fig. 8). 유량 보정 후 보정된 매개변수를 이용하여 T-P 실측치와 예측치를 보정하여 비교하였다. 그 결과 $NSE = 0.903$, $R^2 = 0.920$ 로 매우 높은 결과가 나왔다 (Fig. 9).

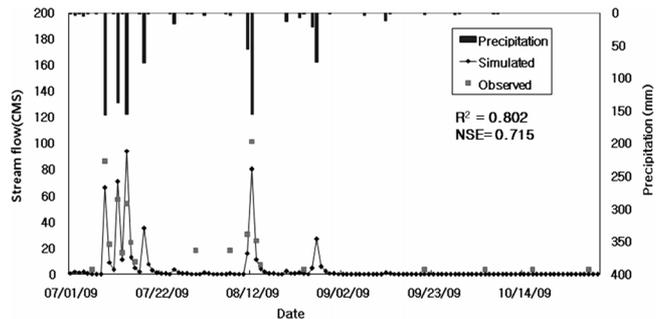


Fig. 8 Comparison of the estimated and the measured flow at the Mandae watershed

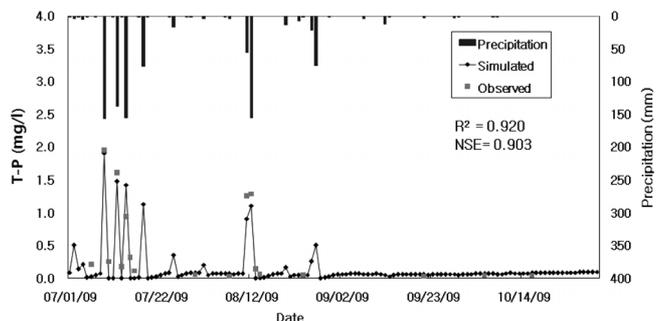


Fig. 9. Comparison of the estimated and the measured T-P at the Mandae watershed

Fig. 8과 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 유량 및 T-P 보정 결과 Ramanarayanan et al. (1997)과 Donigian and Love (2003)가 제시한 기준에 모두 만족할 만한 결과가 나왔으며, 이는 본 연구에서 해안면 유역에 대해 구축한 SWAT 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 사려된다.

본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 SWAT 모형을 이용하여 양구 해안면 만대천 유역에서 발생하는 유출량과 비점오염원을 정확히 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 각 시나리오별 T-P 저감 효율

본 연구에서는 농경지에 다양한 초생대 시나리오를 적용하여 초생대에 의한 T-P 저감효율을 SWAT 모형을 이용하여 평가하였다. 모의기간인 2009년 7월부터 10월 중 강수가 내린 37 일에 대하여 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 초생대 적용 전과 각 시나리오별 초생대를 적용하였을 때 초생대 폭에 따라 많은 차이가 있는 것으로 분석되었다.

양구 해안면 만대천 유역내 30.52 %의 농경지에 초생대 적용전과 폭 1, 3, 5 m의 초생대 적용 후 T-P의 저감효율은 Table 4에서 보이는 바와 같이 폭 1 m 초생대 설치 시 초생대 설치 전에 비하여 T-P가 약 34.86 % 저감되었고 폭 3 m

Table 4 Effects of vegetative filter strip on T-P trapping efficiency

Scenarios	w/o VFS	w/ VFS 1 m	w/ VFS 3 m	w/ VFS 5 m
T-P (mg/l)	1.03	0.67	0.53	0.45
T-P (kg/day)	376.56	245.28	194.71	164.98
Reduction (%)		34.86	48.29	56.19

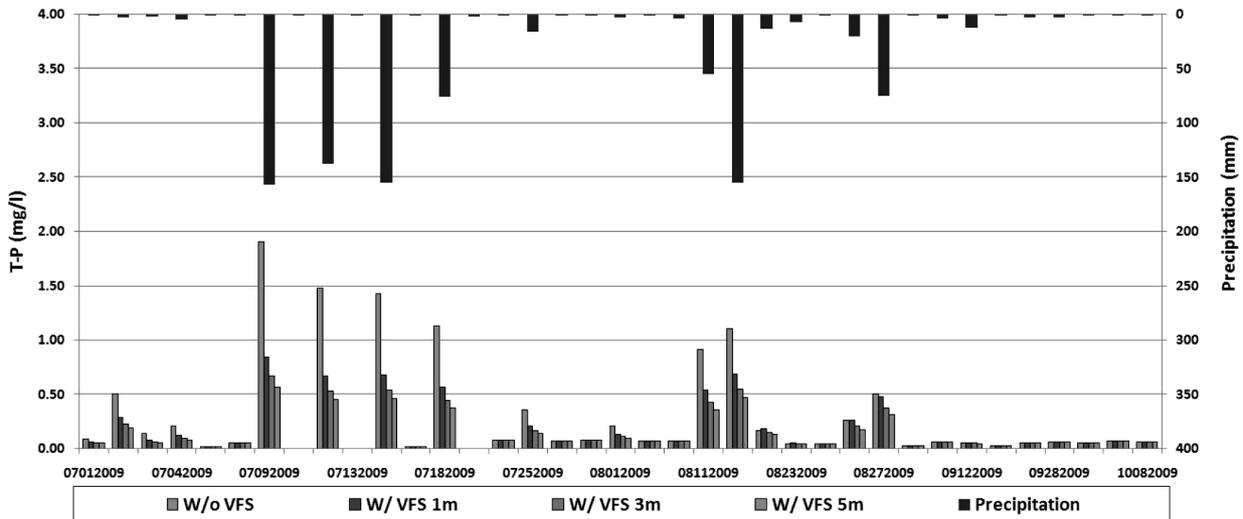


Fig. 10 Effects of vegetative filter strip on T-P trapping efficiency

초생대 설치 시 T-P가 약 48.29 % 저감되었으며 폭 5 m 초생대 설치 시 T-P가 약 56.19 % 저감되었다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구에서는 고랭지 농업지대에서 집약적 토지이용과 과도한 비료사용으로 인하여 강우시 수질 오염과 탁수 문제가 심각한 양구 해안면 만대천 유역에 대하여 SWAT 모형 적용성 평가 및 초생대를 이용한 비점오염 저감효과를 모의하였다. 그 결과 실측 유량에 대하여 SWAT 모형 보정결과 $NSE=0.715$, $R^2=0.802$ 로 나타났으며, T-P 실측치와 예측치를 보정하여 비교한 결과 $NSE=0.903$, $R^2=0.920$ 로 매우 높은 적용성을 보였다. 또한 각 초생대 시나리오별 비점오염 저감효과는 폭 1 m 초생대 설치 시 초생대 설치 전에 비하여 T-P가 34.86 %, 폭 3 m 초생대 설치 시 T-P가 48.29 %, 폭 5 m 초생대 설치 시 T-P가 56.19 % 감소하였다. 본 연구 결과를 통하여 양구 해안면 만대천 유역에 대한 SWAT 모형의 적용 가능성을 확인할 수 있으며, 또한 초생대를 이용하여 부영양화 원인 물질 중 가장 큰 영향을 미치는 T-P의 저감효과를 확인 할 수 있다. 본 연구의 결과는 해안면에서 발생하는 비점오염원 저감 대책을 수립하는데 필요한 기초자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

현재 유역에서의 비점오염원 저감을 위한 많은 연구가 진행되고 있으며 많은 대책들이 제시되고 있다. 이러한 대책 중 초생대는 농경지에서 발생하는 비점오염원을 저감시킬 수 있는 하나의 방법으로 비점오염원 저감에 큰 효과가 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 이러한 초생대 설치효과를 평가하기 위

해서 초생대에 의한 수질 저감효과를 평가해야 한다. 그러나 본 연구에서는 초생대 설치에 따른 장기적인 모니터링 자료의 부재로 인해 SWAT 모형 자체 초생대 모듈을 이용하여 수질 개선 효과를 평가하였다. SWAT 모형 자체에 내재된 초생대 모듈은 초생대 폭에 대한 수질 개선효과만을 평가하기 때문에 초생대 설치효과 평가 시 한계가 있다. 따라서 VFSMOD 모형과 연계된 SWAT-VFSMOD 시스템 모듈 개발이 필요할 것이라 판단된다. 이를 통해 더욱더 정확한 초생대 비점오염 저감 효과 분석이 가능해지며, 하천이나 호소로 유입되는 비점오염원의 거동을 정확히 파악하여 수질오염저감대책 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한 2009년 자료로 보정된 SWAT 모형을 이용하여 2010년 작물지도와 기상자료를 이용하여 모형을 검증하고, 초생대 모니터링 자료를 이용한 검증이 필요하리라 판단되며, 점오염원에 대한 입력자료 구축·적용과 함께 작물에 따른 비점오염원의 거동 특성을 정확히 파악하고 환경에 미치는 영향을 평가·분석하여 작물에 따른 최적관리기법 개발이 필요하리라 판단된다.

본 연구는 한강물환경연구소의 “비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가사업”의 연구비지원과 강원대학교 환경연구소의 지원으로 수행되었습니다. 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

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. Choi, D., H. S. Shin, Y. S. Yoon, and S. Kim, 2009. The Simulation of Nutrients using SWAT Model and its Application to Estimate Delivery Ratio. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 375-385 (in Korean).
4. Department of plant ecology, Bayreuth University, 2009. Department Report. Land Use Data at HaeAn, Mandae Watershed in Korea.
5. Dong, S. Y., K. S. Kim, W. S. Jang, M. S. Jun, J. E. Yang, S. C. Kim, J. H. Ahn, and K. J. Lim, 2008. Evaluation of Sediment Yield using Area-weighted Measured Slope and Slope Length at HeaAn Myeon Watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(5): 569-580 (in Korean).
6. Donigian, 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.
7. Gharabaghi, B., R. P. Rudra, H. R. Whiteley, and W. T. Dickinson, 2001. Sediment removal efficiency of vegetative filter strips. *ASAE Paper No.* 012071
8. Heo, S. G., K. S. Kim, N. W. Kim, J. H. Ahn, S. H. Park, D. S. Yoo, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2008. Evaluation of SWAT Prediction Error according to Accuracy of Land Cover Map. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(6): 690-700 (in Korean).
9. Jang, W. S., D. S. Yoo, L. 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 and 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. 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 using Rice Straw Mat with SWAT. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 52(3): 97-104 (in Korean).
11. Jin, Y. I., J. T. Lee, G. J. Lee, S. W. Hwang, Y. S. Zhang, C. Y. Park, M. C. Seo, J. S. Ryu, and J. C. Jeong, 2009. Effects of Vegetative Buffers on Reducing Soil Erosion and Nutrient Loss of Highland Field in Korea. *Journal of Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 42(4): 231-238 (in Korean).
12. Kim, B. C., S. H. Sa, M. S. Kim, Y. K. Lee, and J. K. Kim, 2007. The Limiting Nutrient of Eutrophication in Reservoirs of Korea and the Suggestion of a Reinforced Phosphorus Standard for Sewage Treatment Effluent. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(4): 512-517 (in Korean).
13. Kim, N. W., I. M. Chung, S. Yoo, J. Lee, and S. K. Yang, 2009. Integrated Surface-groundwater Analysis

- in Jeju Island. *Journal of the Environmental Sciences* 18(9): 1017-1026 (in Korean).
14. 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.
 15. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*. USDA, ARS, Temple, Texas.
 16. Park, Y. S., J. G. Kim, N. W. Kim, J. H. Park, W. S. Jang, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2008a. Improvement of Sediment Trapping Efficiency Module in SWAT using VFSSMOD-W Model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(4): 473-479 (in Korean).
 17. Park, Y. S., J. G. Kim, S. G. Heo, N. W. Kim, J. H. Ahn, J. H. Park, K. S. Kim, and K. J. Lim, 2008b. Comparison of Soil Loss Estimation using SWAT and SATEEC. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 3-12 (in Korean)
 18. Pisinaras, V., C. Petalas, G. D. Gikas, A. Gemitzi, and V. A. Tsihrintzis, 2010. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* 250(1): 274-286.
 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. Rural Development Administration. Home page. [Http://www.rda.go.kr/](http://www.rda.go.kr/) Accessed 7 Sep. 2010.
 21. Shin, M. W., J. Y. Seo, Y. H. Choi, J. G. Kim, D. S. Shin, Y. J. Lee, M. S. Jung, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Evaluation of LOADEST Model Applicability for NPS Pollutant Loads Estimation from Agricultural Watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(2): 212-220 (in Korean).
 22. Ullrich, A., and M. Volk, 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agricultural Water Management* 96(8): 1207-1217.
 23. Yanggu-gun Gangwon-do Korea. Home page. [Http://www.yanggu.go.kr/](http://www.yanggu.go.kr/) Accessed 6 Dec. 2010.