

## 강수패턴과 토지이용의 시공간적 분석을 위한 SWAT모형의 검보정 개선방안 연구

이지원 · 금동혁\* · 김범철\*\* · 김영석\*\*\* · 정교철\*\*\*\* · 김기성\* · 최종대\* · 임경재†

강원도 철원군청

\*강원대학교 지역건설공학과

\*\*강원대학교 환경과학과

\*\*\*한국건설기술연구원

\*\*\*\*안동대학교 지구환경과학과

### Study on Improvement of Calibration/Validation of SWAT for Spatio-Temporal Analysis of Land Uses and Rainfall Patterns

Ji-Won Lee · Donghyuk Kum\* · Bomchul Kim\*\* · Young Sug Kim\*\*\* · Gyo-Cheol Jeong\*\*\*\* ·  
Ki-sung Kim\* · Joong-dae Choi\* · Kyoung Jae Lim†

Cheorwon County office of Gangwon province

\*Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

\*\*Department of Environmental science, Kangwon National University

\*\*\*Korea Institute of Construction Technology

\*\*\*\*Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

(Received 8 January 2013, Revised 19 March 2013, Accepted 1 April 2013)

#### Abstract

The purpose of this study was to evaluate effects of spatio-temporal changes in land uses and rainfall magnitude using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Prior of application of the model to real-world problem, the model should be calibrated and validated properly. In most modeling approaches, the validation process is done assuming no significant changes occurring at the study watershed between calibration and validation periods, which is not proper assumption for agricultural watersheds. If simulated results obtained with calibrated parameters match observed data with higher accuracy for validation period, this does not always mean the simulated result represents rainfall-runoff, pollutant generation and transport mechanism for validation period because temporal and spatial variables and rainfall magnitude are often not the same. In this study SWAT was applied to Mandae study watershed in Korea to evaluate effects of spatio-temporal changes in landuses using 2009 and 2010 crop data for each field at the watershed. The Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) values for calibration and validation with either 2009 or 2010 was evaluated and the NSE value for calibration with 2009 and calibration with 2010 were compared. It was found that if there is substantial change in land use and rainfall, model calibration period should be determined to reflect those changes. Through these approaches, inherent limitation of the SWAT, which does not consider changes in land uses over the simulation period, was investigated. Also, Effects of changes in rainfall magnitude during calibration process were analyzed.

**Key words** : Calibration, Mandae, Sediment, Spatio-temporal, SWAT model, Validation

## 1. 서론

우리나라의 수자원 관리는 유역단위에서 점점 세분화 되어 지금은 필지단위까지 이르렀다. 수질관리의 주체는 점오염원에서 비점오염원 저감으로 관심이 집중되었으며, 사계절이 뚜렷하고 6월부터 9월에 연평균 강수의 70%가 집중되는 우리나라의 경우 급경사 지대의 집약적 토지이용과 주기적인 객토, 과도한 비료사용 등으로 인해 강우시 수질 오염 및 탁수문제가 심각하다. 특히 북한강의 최대수역인

소양댐 유역은 지난 몇 년간 계속되는 고탁수 문제로 인하여 환경적인 측면뿐만 아니라 경제적으로 많은 문제를 일으키고 있다(MOE, 2006a). 소양댐 유역 내에는 홍천군 자운리, 인제군 가아리 및 서화, 양구군 해안면 등의 고랭지 농업지구가 분포되어 있다. 이러한 고랭지 농업지구를 중심으로 발생한 토양 유실은 소양강댐 유역 탁수 문제의 가장 직접적인 원인으로 지적되고 있다(Jeon, 2007). 홍천군 자운리, 인제군 가아리 및 서화, 양구군 해안면은 심각한 토양 유실로 인한 탁수문제로 한강수계 탁수 우선관리지역으로 지정 되었으며 그 중 양구 해안면 만대천 유역은 급경사지대에서의 집약적 토지이용과 생산량 증대를 목적으로 한 과도한 비료사용이 이루어지고 있다(Han Basin Commis-

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

sion, 2008). 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, 고랭지 농업지대에서 비료가 과다하게 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(MOE, 2006a). 최적의 탁수 및 수질오염에 저감대책을 수립하기 위해서는 먼저 유역 내 토양유실 발생 현황을 파악하는 것이 필요하다. 유역 내 토양유실 발생 현황을 파악하기 위해서 유역 내 토지이용별, 지형별, 작물별, 시간별 장기 모니터링을 수행하는 것이 가장 정확한 방법이지만, 시간과 비용이라는 한계 때문에 모형을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지 토양유실 및 토사유출량 산정을 위하여 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE; Wischmeier and Smith, 1958), USLE 기반 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control(SATEEC; Lim et al., 2005), 그리고 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE; Renard et al., 1997)이 전 세계적으로 널리 이용되어 왔다. 또한 단일강우에 따른 유사량을 산정하기 위한 수정 범용토양손실 공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE; Williams, 1975)이 개발되어 널리 이용되고 있으나, 이러한 공식들은 미국의 중동부 지역 농지의 사용 용도에 따른 유사유출량의 변화 및 조절을 주목적으로 개발된 경험공식이므로, 공식의 각종 독립인자 및 계수가 미국의 일부지역에 적합하도록 개발되어 우리나라에 대하여는 적용 시 사용자의 주관적 판단이 요구되는 경우가 많다.

본 연구에서 사용된 MUSLE 기반의 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 모형이다. 지금까지 SWAT 모형을 이용한 연구에서 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위하여 매일 변화하는 기상자료와 하나의 Landuse, Soil, DEM 을 이용하였다. 하지만 변화하는 것은 기상자료만이 아니다. 우리나라의 경우 집약적 토지이용과 해마다 다른 농산물 가격 때문에 해마다 경작되는 작물이 다르고, 경작면적의 확대·축소·소멸 등이 매우 심하다. SWAT 모형에서 단순한 작물 변화는 모의가 가능하지만 경작 면적의 확대·축소·소멸은 모의가 불가능하다. 이러한 이유는 SWAT 모형이 소유역별 수문학적 반응단위인 Hydrologic Response Unit(HRU)을 이용하여 유역 내 수문 및 수질을 평가하기 때문이다. HRU는 Landuse, Soil의 중첩에 의하여 생성되며, 생성된 HRU와 기상자료를 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석한다. 즉 Landuse, Soil 중 하나만 변화더라도 완전히 다른 HRU가 생성되는 것이다. Soil의 경우 수 세기가 지나도 변화가 매우 적지만, Landuse의 경우 논을 제외

한 모든 농경지에서 단순한 작물 변화뿐만 아니라 경작 면적의 확대·축소·소멸 등의 시·공간적 변화가 매우 심하다. 하지만 SWAT 모형은 하나의 Landuse만을 이용하기 때문에 토지이용의 시·공간적 변화는 고려할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 고랭지 농업이 주를 이루고 있는 양구 해안면 만대천 유역의 2009년과 2010년 유량 및 수질 모니터링 자료와 2009년과 2010년의 각기 다른 토지이용도를 이용하여 1) 토지이용의 시·공간적 변화가 모형의 결과에 미치는 영향을 분석하여, 2) 단일 토지이용도를 다년간의 모의에 사용함에 따른 SWAT 모형의 태생적 한계점에 대하여 알아보고, 3) 기존의 보정·검정 기간에 동일한 변수를 사용하여 모형의 적용성을 평가하는 것에 대한 문제점을 통하여 SWAT 모형의 개선방안에 대하여 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상지역

본 연구에서는 강원도 인제군 가아리, 홍천군 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 km<sup>2</sup>로 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 분지지를 제외하고는 매우 급하며 전형적인 고랭지 농업이 주를 이룬다(Yoo et al., 2008).

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 만대천 유역은 소양댐 유역의 일부로서 소양댐 유역면적 2,703 km<sup>2</sup>의 2.24% 밖에 되지 않지만 평균경사가 11° 이고 전형적인 고랭지 농업이 이루어지고 있으며, 과다한 비료 사용과 주기적으로 이루어지고 객토로 인하여 강우시 농경지에서 심각한 토양 유실과 함께 영양물질이 수체로 유입된다. 또한 양구 해안면의 경우 대암산(1,304 m), 가칠봉(1,242 m), 대우산(1,179 m) 등 1,000 m 이상의 고지로 둘러 싸여 있으며 이러한 지형적인 특성으로 인하여 양구군내 다른 지역과 격리되어 있다.

### 2.2. SWAT 모형개요

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

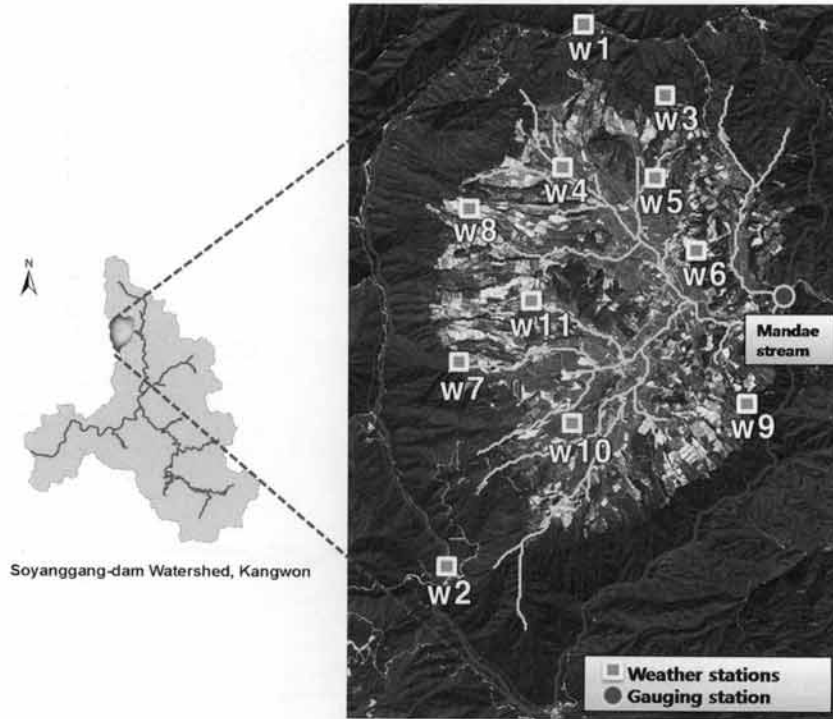


Fig. 1. Location of the Mandae watershed, Gangwon province.

(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 공간적으로 다르게 분포하는 토지이용현황, 토양속성, 지형자료, 그리고 영농자료 등이 필요하다(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(Choi et al., 2009; Kim et al., 2009a; Pisinaras et al., 2010; Ullrich and Volk, 2009).

### 2.3. SWAT 모형의 입력자료 구축

#### 2.3.1. 기상자료

SWAT 모형은 일 강수(mm), 일 평균풍속(m/sec), 일 평균 상대습도(%), 일 최고·최저기온(°C), 일 수평면 일사량(MJ/m<sup>2</sup>)과 같은 기상자료를 이용하여 유출량 및 수질을 평가한다. 본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 유역의 유출량 및 수질현황을 정확히 산정하기 위하여 TERRECO (2010)에서 조사한 양구 해안면 만대천 유역의 2009년 7월부터 2010년도 8월까지 11개의 관측소 기상 자료를 이용하였다. SWAT 모형의 입력자료 중 유출에 가장 많은 영향을 미치는 강수량 자료는 11개 관측소마다 많은 강수량의 차이를 보였다. 14개월 평균 2,010.45 mm로 최소 1,772.4 mm에서 최대 2,080.4 mm까지 다양하게 분포하는 것으로 나타났다.

#### 2.3.2. 토지이용도

Heo et al. (2008)의 연구에 따르면 연구지역내 토지이용/재배작물 특성을 정확히 반영하지 못하는 대분류/중분류

토지피복 자료를 이용하여 SWAT 모형 구동 시 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 유출량 및 수질현황을 정확하게 예측하기 위하여 TERRECO (2010)에서 2009, 2010년에 조사한 양구 해안면 만대천 유역의 실측 작물지도를 이용하여 2009년 토지이용도(Fig. 2)와 2010년 토지이용도(Fig. 3)를 구축하였다.

2009년, 2010년 실측 작물지도는 환경부 중분류 토지피복도에서 다양한 작물 재배 경작지를 단순히 논, 밭, 하우스재배지, 과수원, 기타재배 만으로 구분하는 것에 비해 Table 1과 같이 해안면 내에서 실제 경작이 이루어지고 있는 Pumpkin, Cabbage, Corn, Orchard, Pepper, Potato, Rice, Radish, Bean 9가지 작물로 구분한다. 이렇게 구축된 토지이용도를 SWAT 모형의 입력자료로 활용함으로써 실제 필지별 작물의 영농정보 입력(시비/경작방법 등)이 가능해졌다.

Table 1은 2009년, 2010년 토지이용 중 실제경작이 이루어지는 9가지 작물을 비교한 것으로 전체적인 경작면적은 2009년 18.45 km<sup>2</sup>, 2010년 17.15 km<sup>2</sup>로 2009년에 비하여 2010년에 1.3 km<sup>2</sup>의 농경지가 축소되었다.

#### 2.3.3. 영농 입력자료

2009년, 2010년 실측 작물지도를 이용하여 토지이용도를 구축함에 따라 해안면에서 경작되는 9가지 작물에 대한 영농정보(파종, 시비, 경작 방법 등) 입력이 가능해졌다. 따라서 농촌진흥청(RDA, 2010)에서 제공하는 작목별 관리 매뉴얼을 참고하여 해안면 내에서 경작되고 있는 Pumpkin,

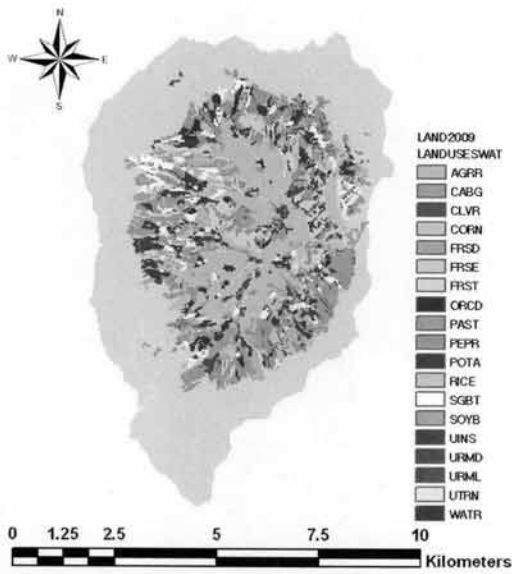


Fig. 2. Crop map in 2009 (TERRECO, 2010).

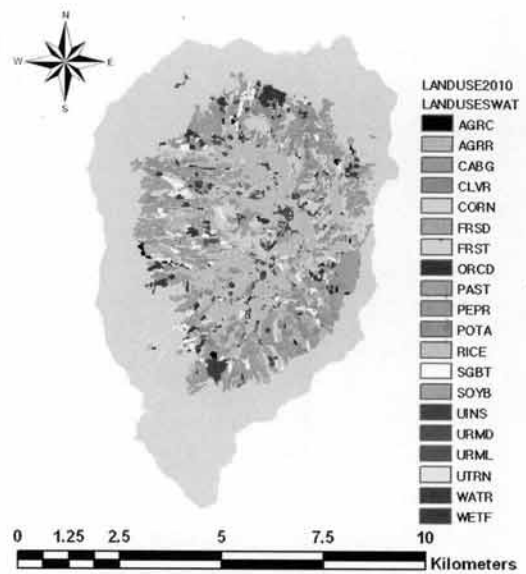


Fig. 3. Crop map in 2010 (TERRECO, 2010).

Table 1. Various cropping at Mandae watershed, 2009, 2010

Landuse	Pumpkin (AGRR)	Cabbage (CABG)	Corn (CORN)	Orchard (ORCD)	Pepper (PEPR)	Potato (POTA)	Rice (RICE)	Radish (SGBT)	Bean (SOYB)
2009 Area (%)	1.73	2.37	0.80	1.43	0.30	3.74	14.15	3.53	2.47
2010 Area (%)	2.80	1.48	0.28	2.44	0.01	3.33	13.17	2.10	2.77

Cabbage, Corn, Orchard, Pepper, Potato, Rice, Radish, Bean. 9가지 작물에 대하여 SWAT 모형의 영농자료를 구축하였다. 이러한 영농 자료는 각 필지별(HRU 별) 수문 해석 및 유사량 평가에 이용되기 때문에, 각 필지별 영농 자료를 모형의 입력자료로 구축하였다. 이를 통해 보다 신뢰성 높은 필지별 유출 및 유사량 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

2.3.4. 토양도, DEM, 오염원 현황

토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원(NIAST, 2000)에서 제공해 주는 개략토양도(1:50,000)를 사용하였다(Fig. 4). 또한 유역 구분 및 하천망 구축을 위해 국립지리원에서 제공해 주는 수치지도(1:5,000)를 이용하여 Digital Elevation Model (DEM)을 구축하였다(Fig. 5).

본 연구에서는 해안면내에서 발생하는 점오염원현황을

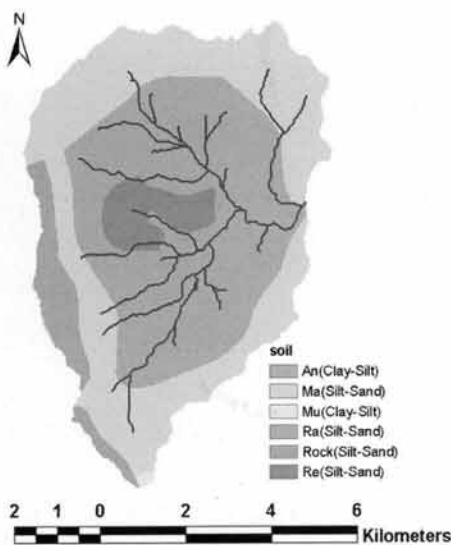


Fig. 4. Major soil types.

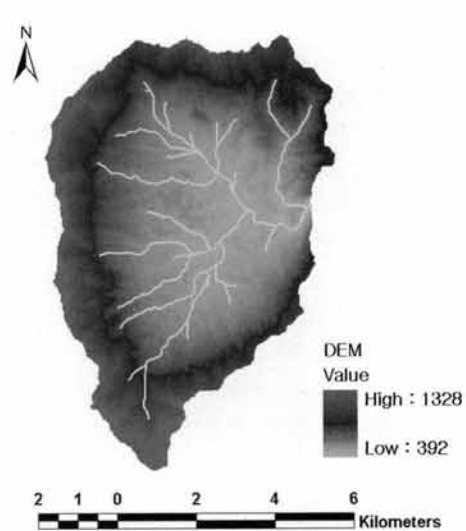


Fig. 5. DEM.

반영하여 유출 및 수질을 평가하기 위하여 양구군(Yanggu-gun, 2011)에서 제공하는 해안면 만대천 유역내 환경기초 시설인 마을하수처리장 5개소에서 배출되는 방류량(m<sup>3</sup>/day) 과 유사량(ton/day), Organic Nitrogen (kg/day), Organic Phosphorus (kg/day), Mineral (soluble) Phosphorus (kg/day) 자료를 이용하여 점오염원 입력자료로 사용하였다.

2.3.5. 실측 유량 및 수질 DB 구축

본 연구에 사용된 실측자료는 TERRECO (2010)에서 2009년 7월부터 2010년 8월까지 양구 해안면 물골교에서 Standard Methods (APHA, AWWA, 2005)와 수질오염공정시험법 (MOE, 2006b)으로 조사·측정된 유량 및 수질 자료를 사용하였다. SWAT 일 유량 및 수질 예측치를 실측치와 비교하기 위하여 적게는 하루에 한번 많게는 하루에 18번까지 실측된 유량 및 수질자료를 Numeric Integration (NI) 방법으로 일 부하량을 산정하였다. 일 부하량 산정을 위해 본 연구에서 사용된 NI 방법은 식 (1)과 같다.

$$Load = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \tag{1}$$

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 시간 구간이다.

2.4. SWAT 모형보정

2.4.1. 경사장 보정

Kim et al. (2009b)이 개발한 The SWAT ArcView GIS PatchII (Fig. 6)는 기존의 SWAT 모형이 DEM을 이용하여 유역의 평균 경사도와 평균 경사장을 계산하는 과정에서 경사도가 25% 이상인 급경사지역의 경사장을 0.05 m로 일

괄적으로 산정하는 오류를 개선한 것이다. SWAT 모형은 전반적으로 미국의 경사가 완만한 지역에 적합하게 개발되었기 때문에 우리나라와 같이 경사가 급한 지역에 적용하기에는 부적절 할 수 있다. 또한 SWAT 모형은 소유역의 평균경사를 통해 각 HRU의 경사장을 산정하는데, 이 과정에서 경사도 25% 이상인 지역의 경사장을 0.05 m로 일괄적으로 산정하도록 되어있어 급경사지대에서 정확한 유사 모의가 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 정확한 유출량 및 유사량 모의를 위해 The SWAT ArcView GIS PatchII를 적용하여, 전형적인 급경사 농업지대인 양구 해안면 만대천 유역의 유출량 및 유사량을 모의하였다.

2.4.2. 유출량 및 유사량 보정

본 연구에서는 SWAT 모형 보정을 위하여 먼저 The SWAT ArcView GIS PatchII를 이용하여 만대천 유역내 49개 소유역의 경사장 산정 오류를 수정하였다. 그 후 유출량과 관련된 변수를 조정하였으며, 마지막으로 유사와 관련된 변수 순으로 보정하였다. 이 과정에서 유사에 관련된 변수 중 일부는 유출량에 영향을 미칠 수 있기 때문에 유출량 관련 변수 보정 후 유사관련 변수를 보정 하였다. Table 2는 본 연구에서 SWAT 모형 보정 시 사용된 변수를 나타낸다. 변수 중 LAT\_TTIME, SLSOIL, ALPHA\_BF, GWQMN는 유출량을 보정하는데 쓰였으며, SPCON, SPEXP은 유사를 보정하는데 쓰였다.

2.5. SWAT 모형의 적용성 평가

만대천 유역의 SWAT 모형 보정 시 SWAT 모형이 실제를 얼마나 잘 반영하는지를 평가하기 위하여 유출량 및 유사량은 결정계수( $R^2$ )와 유효 지수(NSE)를 이용하였으며, NSE 산정은 식 (2)에서 보이는 바와 같다(Nash and Sutcliffe, 1970).

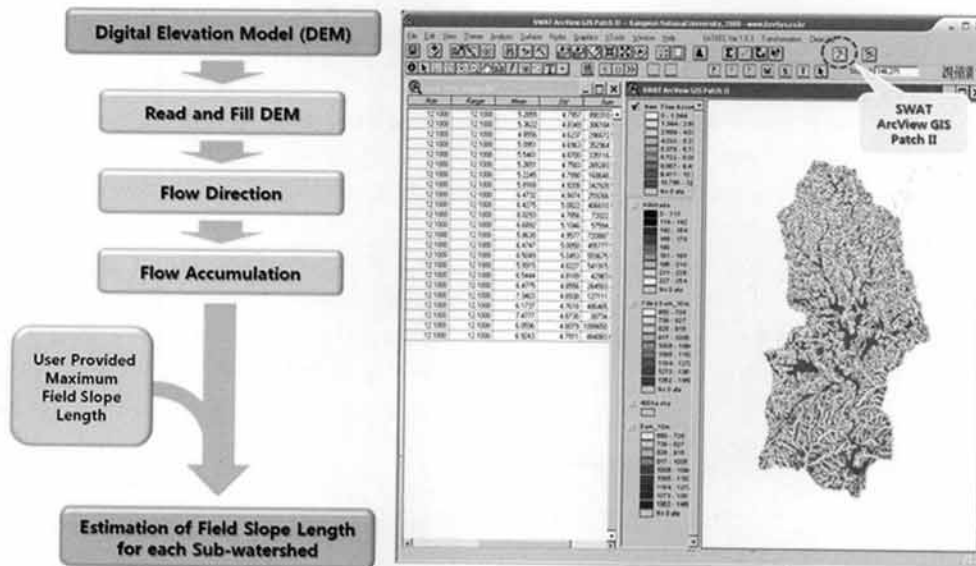


Fig. 6. Overview of the SWAT ArcView GIS PatchII (Kim et al., 2009b).

**Table 2.** The parameters used in calibration

File	Parameter	Description	Range	Default value
.HRU	LAT_TTIME	Lateral flow travel time.	0.0 ~ 180.0	0
	SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow.	0.0 ~ 0.6	0
.GW	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor.	0.0 ~ 1.0	0.048
	GWQMN	Threshold depth of water In the shallow aquifer required for return flow to occur.	0.0 ~ 5000.0	0
.BSN	SPCON	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing.	0.0001 ~ 0.01	0.0001
	SPEXP	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing.	1 ~ 2	1

**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
NSE for monthly simulation	<0.65	0.65 ~ 0.75	0.75 ~ 0.85	>0.85

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

여기서  $O_i$  는 각 강우시 실측된 값이고,  $P_i$  는 모델에서 예측된 각 강우별 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.

## 2.6. 연구 시나리오

토지이용도의 변화가 모형의 결과에 미치는 영향을 분석하고, SWAT 모형의 태생적 한계점과 기존의 보정·검정의 문제점을 지적하기 위하여 본 연구에서는 Table 4와 같이 4가지 시나리오를 사용하였다.

Scenario1은 2009년의 토지이용도와 2009년 기상자료를 이용한 2009년 예측 값으로 기존의 모형 보정기간이다. Scenario2는 Scenario1과 같은 보정 변수와 2009년 토지이용도, 2010년 기상자료를 이용한 기존의 검정기간에 해당한다. Scenario3은 2010년의 토지이용도와 2010년 기상자료를 이용한 2010년의 예측 값으로 기존의 보정에 해당된다. 또한 Scenario4는 Scenario3의 보정 변수와 2009년의 토지이용도와 2010년 기상자료를 이용한 2010년의 예측 값으로 토지이용도의 시·공간적 변화가 모형의 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 사용하였다.

**Table 4.** Scenarios simulated in this study

	Landuse 2009	Landuse 2010
Weather 2009	Scenario1	
Weather 2010	Scenario2 Scenario4	Scenario3

본 연구에서는 단일 토지이용도를 다년간의 연구에 사용하는 문제점을 제시하기 위해 Scenario2와 Scenario3의 유량 및 수질 모의결과를 비교 분석하였다. 또한 기존의 보정·검정이 옳은 것인가에 대하여 Scenario1, Scenario2, Scenario3의 유량 및 수질 모의 결과를 이용하였으며, Scenario3과 Scenario4의 결과를 이용하여 토지이용도의 시·공간적 변화가 모형의 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 유량 및 유사량 보정·검정 결과

#### 3.1.1. 2009년 유출량 유사량 보정(Scenario1)

NI 방법으로 산정된 실측 유출량 및 유사량 자료를 이용하여 SWAT 모형의 적용성을 평가하였다. 2009년 7월부터 10월까지 양구 해안면 물골교에서 조사된 실측 유출량 및 유사량에 대하여 보정하였다. 그 결과 유출량에 대하여  $NSE = 0.700$ ,  $R^2 = 0.768$  로 나타났다(Fig. 7). 유출량 보정 후 유사량에 영향을 주는 변수만을 이용하여 유사량 실측치와 예측치를 보정하였다. 그 결과  $NSE = 0.658$ ,  $R^2 = 0.669$  로 만족스러운 결과가 나왔다(Fig. 8).

Scenario1의 보정 결과 유출량 및 유사량 모두 어느정도 만족스러운 결과가 나와 보정기간 내 SWAT 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

#### 3.1.2. 2010년 유출량 및 유사량 검정(Scenario2)

2009년 유출량 및 유사량 보정에 사용된 변수를 이용하여 2010년 1월부터 8월까지 양구 해안면 물골교에서 조사된 실측 유출량 및 유사량에 대하여 검정하였다. 그 결과 유출량에 대하여  $NSE = 0.545$ ,  $R^2 = 0.884$ 로 나타났다(Fig. 9).

유출량 검정 후 보정기간에 사용된 유사량에 영향을 주는 변수만을 이용하여 유사량 실측치와 예측치를 검정하였다. 그 결과  $NSE = -7.621$ ,  $R^2 = 0.682$  로 매우 실망스런 결과가 나왔다(Fig. 10).

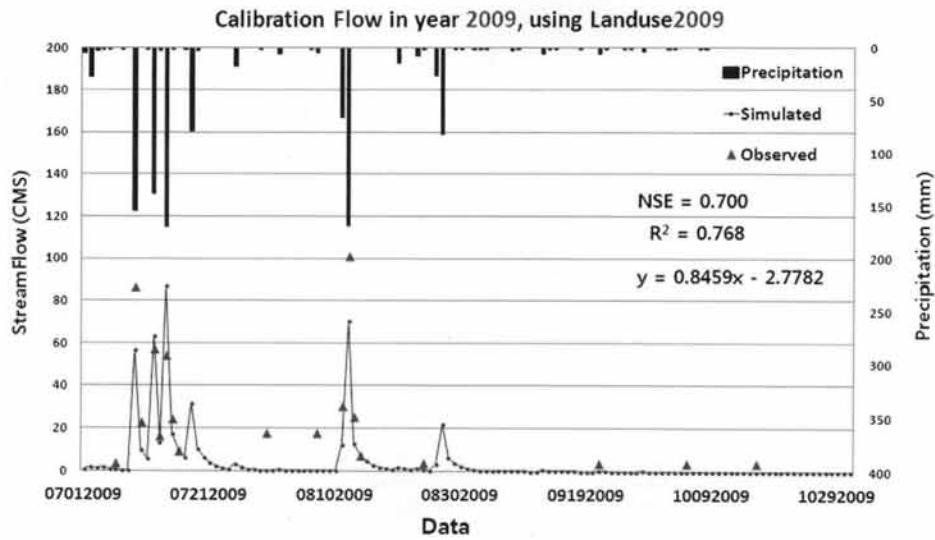


Fig. 7. Comparison of the estimated and the measured flow at the Madae watershed.

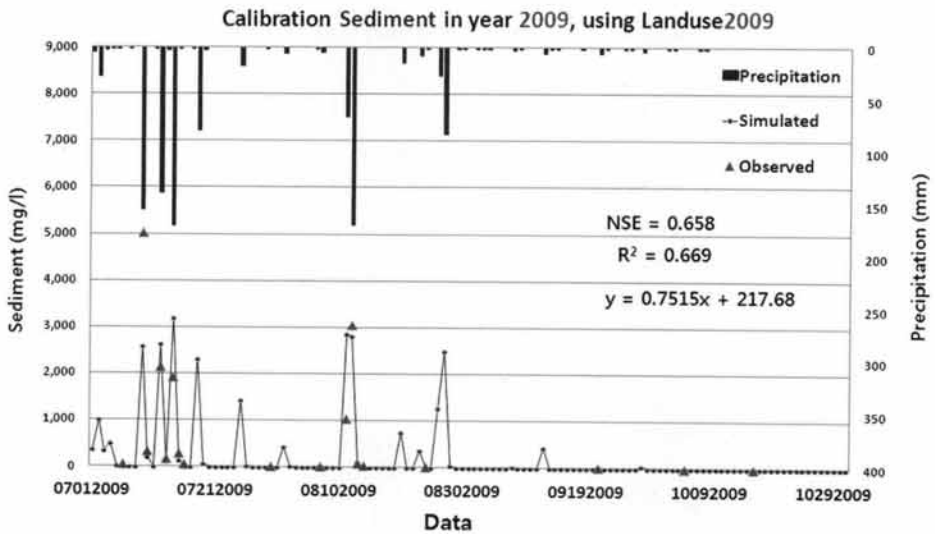


Fig. 8. Comparison of the estimated and the measured sediment at the Madae watershed.

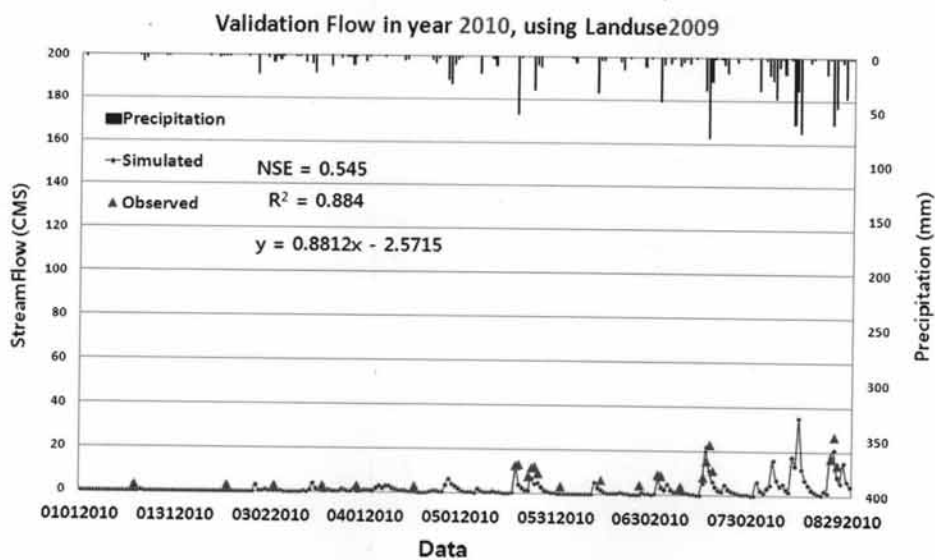


Fig. 9. Comparison of the estimated and the measured flow at the Madae watershed.

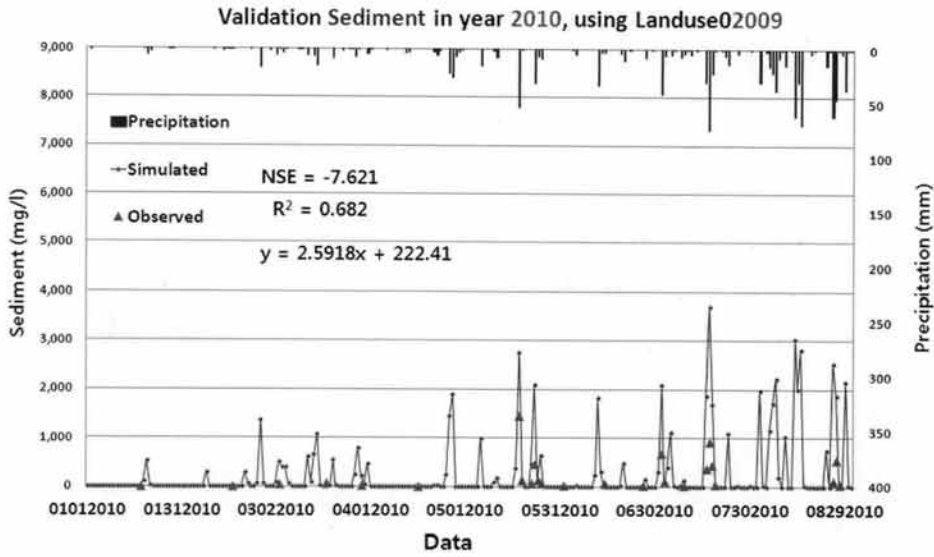


Fig. 10. Comparison of the estimated and the measured sediment at the Mandae watershed.

3.1.3. 2010년 유출량 및 유사량 보정(Scenario3)

Scenario3은 Scenario2와 마찬가지로 2010년의 모의치이지만, Scenario2가 Scenario1와 같은 토지이용도(2009)와 보정변수를 이용한 반면 Scenario3는 Fig. 11과 같이 2010년

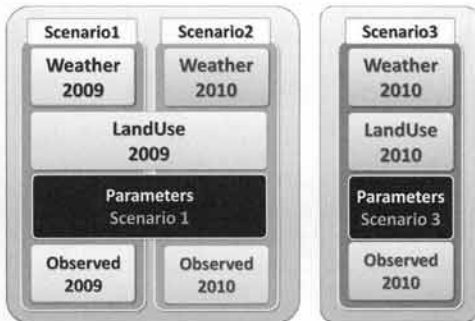


Fig. 11. Scenarios simulated in this study.

의 토지이용도와 다른 변수를 이용한 것을 알 수 있다.

Scenario3의 보정 결과 유출량에 대하여  $NSE = 0.531$ ,  $R^2 = 0.866$ , 유사량에 대하여  $NSE = 0.545$ ,  $R^2 = 0.884$ 로 나타났다(Fig. 12, Fig. 13). 유출량의 경우 Scenario2에서는 모의기간 평균  $2.00 \text{ m}^3/\text{sec}$  이고, Scenario3에서는 모의기간 평균  $2.01 \text{ m}^3/\text{sec}$  로 거의 같은 결과가 나왔다.

반면, 유사량의 경우 Scenario2에서는 모의기간 평균  $248.6 \text{ mg}/\ell$  이고, Scenario3에서는 모의기간 평균  $87.8 \text{ mg}/\ell$  로 Scenario2와 비교하여 유사량은 Scenario2가 Scenario3에 비하여 약 3배가량 많은 결과가 나왔다.

3.1.4. 보정변수

Table 5는 본 연구에서 사용된 보정 변수이며 SWAT 모형에서 유출량과 유사량에 민감한 변수 6개를 조정하였다.

유출량에 관여하는 변수인 LAT\_TTIME, SLSOIL, ALPHA\_

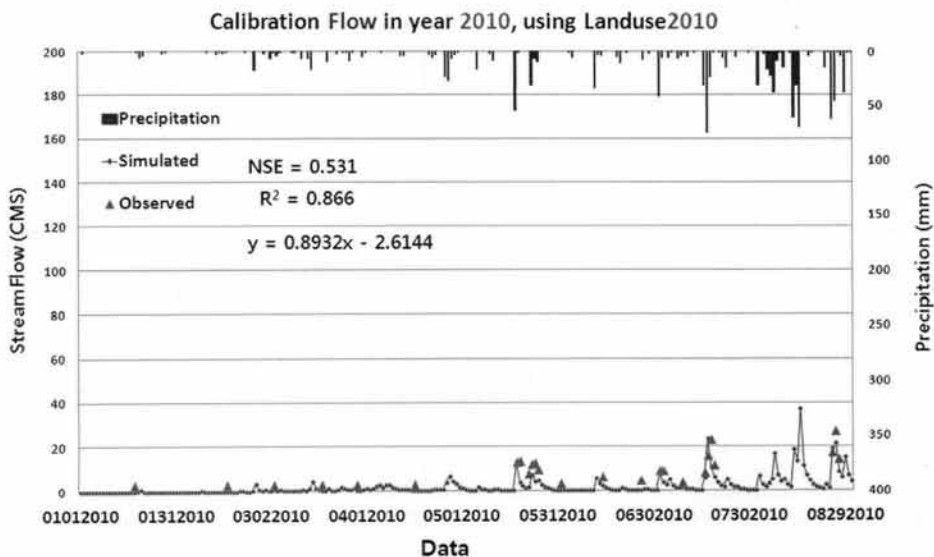


Fig. 12. Comparison of the estimated and the measured flow at the Mandae watershed.



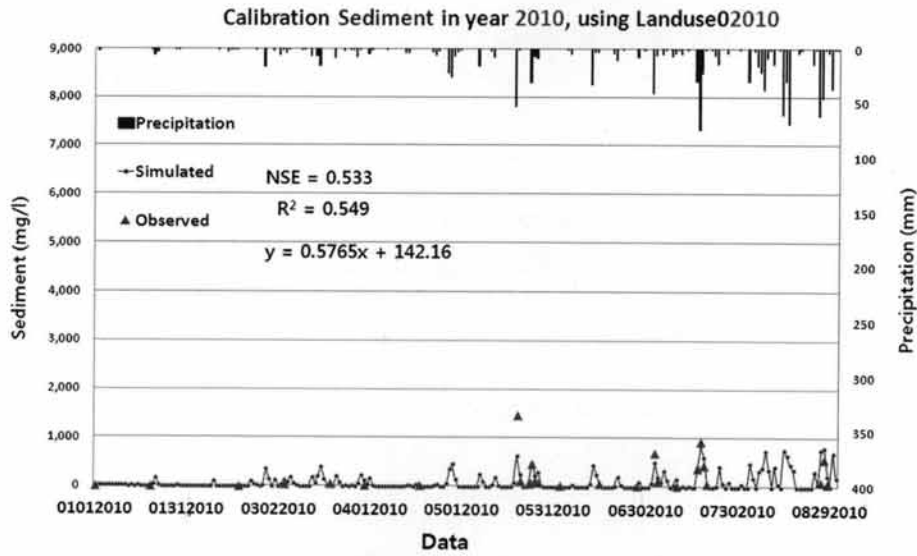


Fig. 13. Comparison of the estimated and the measured sediment at the Mandaе watershed.

Table 5. The parameters used in Scenario 1, 2, 3

File	Parameter	Scenario1,2	Scenario3
.HRU	LAT_TTIME	2	2
	SLSOIL	0.2	0.2
.GW	ALPHA_BF	0.5	0.5
	GWQMN	10	10
.BSN	SPCON	0.0008	0.0002
	SPEXP	1.3	1.2

BF, GWQMN는 Scenario2와 Scenario3에서 같은 값을 사용하였다. 그 이유는 Scenario1, 2에서 사용된 유량 변수가 보정·검정기간에 매우 높은 적용성을 나타내어, Scenario3 보정 시 동일 한 값을 사용하였을 때 가장 좋은 결과가 나왔다. 이는 유출량 보정·검정에 사용된 변수들이 만대천 유역의 강우·유출 메커니즘을 반영하는 가장 적합한 변수로 나타났기 때문이다.

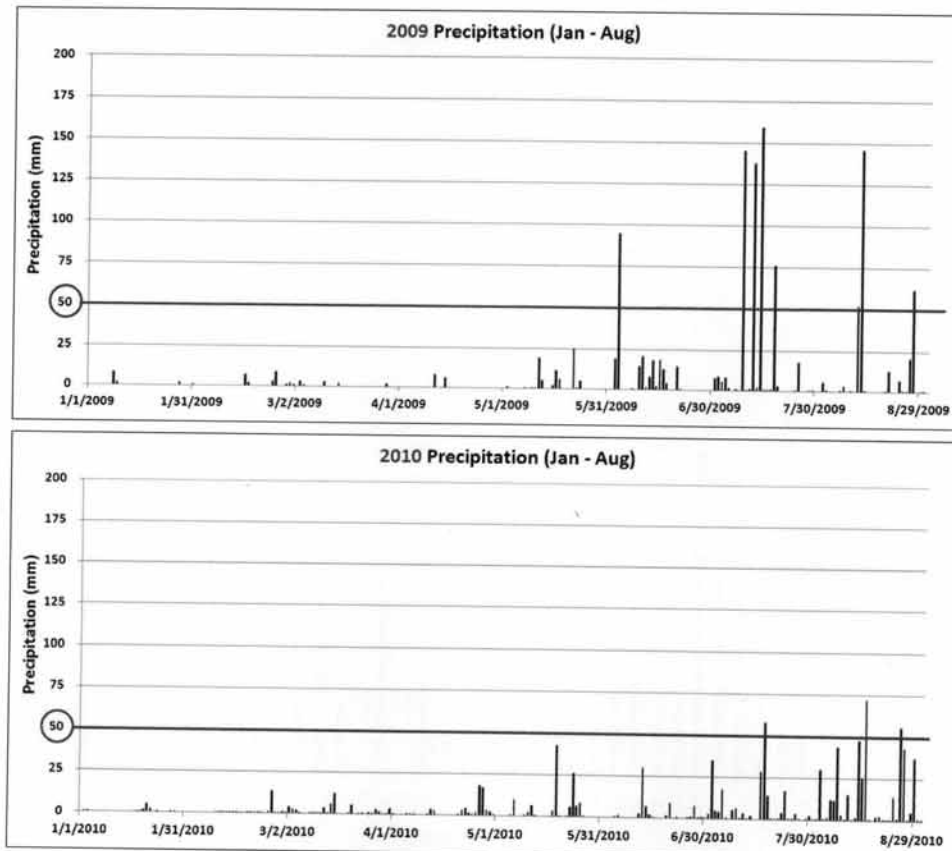


Fig. 14. Comparison of the measured precipitation in 2009 and 2010.

3.1.5. 2009년, 2010년 강수량 분석

Fig. 14는 2009년과 2010년의 1월부터 8월까지의 강수량을 나타낸다. 2009년과 2010년 1월부터 8월까지 50 mm 이상의 일 강수량을 살펴보면 2009년에는 8회, 2010년에는 3회이며, 총 강수량은 2009년 1,252 mm, 2010년 961 mm로 2009년에 더욱더 많은 비가 내린 것을 알 수 있다. 또한 50 mm 이상 강수량에서도 2009년에 50 mm 이상 강수량의 총합은 821 mm이고, 2010년에는 185 mm로 엄청난 차이를 보인다.

3.2. 기존 보정·검정의 문제점

기존의 검정 기간인 Scenario2에서 유사량이 과다하게 발생하여, 실측 유사량과 비교 자체가 불가능하였다. 이는 Scenario1에서 사용된 2009년의 보정 변수가 검정기간인 2010년(Scenario2)에 사용됨에 따른 오류이다.

Fig. 14에서도 알 수 있듯이 2009년과 2010년의 강수 패턴은 큰 차이를 보였다. 절대적인 양 뿐만 아니라 짧은 지속시간 내 엄청난 양의 강수가 발생하였다. 반면 2010년의 강수 패턴은 적은 양의 강수가 긴 지속시간을 두고 발생하였다. 이러한 강수 패턴의 차이는 침투유량 및 최대유속 그리고 강우에 의한 우적침식(Rain Erosion) 등에 영향을 주어 유역내 유출량 및 유사량 발생에 지대한 영향을 미치게 된다. 하지만 지금까지 SWAT 모형을 이용한 연구에서 적용성 평가시 이러한 강수패턴의 차이는 무시한 채 보정·검정기간 동안 동일한 변수를 사용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 본 연구에서도 알 수 있듯이 강수패턴은 유출량뿐만 아니라 강수·유출·수질이라는 메커니즘 모두에 영향을 주는 가장 중요한 요소이기 때문에 강수패턴에 따라 꼭 변해야만 하는 변수들이 있다. 유출량의 경우 많은 비가 내리면 당연히 많은 유출이 발생하게 되고, 적은 비가 내리면 적은양의 유출이 발생한다. 유출의 경우 대부분 강수와 지형적 특성에 따라 결정되기 때문에 유출량 보정에 사용된 변수들이 대상유역의 지형적 특성을 잘 반영한다면

보정·검정에 같은 변수를 사용하여도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 Scenario2의 유사량의 경우 2009년과 2010년의 강수패턴 차이로 인하여 실측과의 비교자체가 불가능하였다. 따라서 보정·검정 기간의 강수패턴 차이가 클 경우 보정변수를 검정기간에 적용하는 것에는 큰 문제가 있다고 판단된다.

3.3. 토지이용의 시·공간적인 변화가 모형의 결과에 미치는 영향

토지이용도의 시·공간적인 변화에 따른 영향을 평가하기 위하여 Fig. 15와 같이 Scenario4를 추가하였다.

Scenario4는 Fig. 15와 같이 Scenario3와 동일한 기상자료와 보정변수를 사용하지만 토지이용도의 시·공간적인 변화가 SWAT 모형의 결과에 미치는 영향과, 단일토지이용도를 다년간에 모의에 사용함에 따른 SWAT 모형의 태생적 한계점에 대하여 파악하기 위하여, Scenario4는 2009년의 토지이용도를 이용하였다.

그 결과 Scenario3과 Scenario4의 토지이용도 차이로 인하여 1번부터 49번까지 소유역에서 발생된 유사량이 큰 차이를 보였다(Fig. 16).

2010년 1월부터 8월까지 8개월간 발생한 총 유사량은

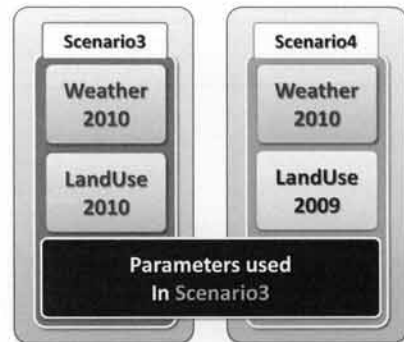


Fig. 15. Scenario3,4 simulated in this study.

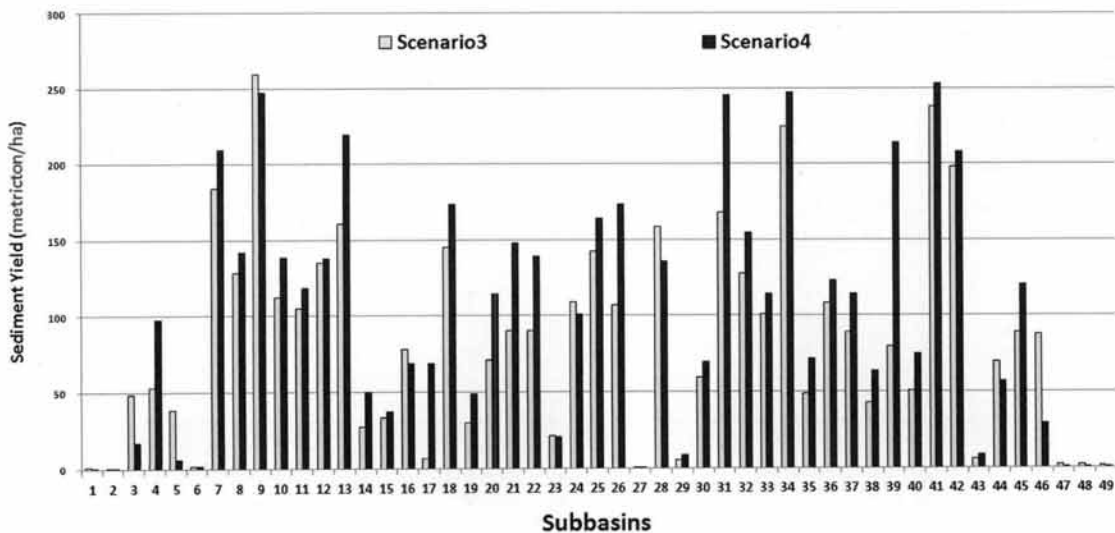


Fig. 16. Comparison of the sediment from each subbasins with Scenarios 3 and 4 (Metricton/ha).

Scenario3에서 566,397 ton 이고, Scenario4는 680,096 ton으로 2009년 토지이용도를 이용한 Scenario4에서 113,698 ton의 유사량이 더 발생한 것을 알 수 있다. 또한 토지이용도의 시·공간적인 변화가 Scenario3과 Scenario4에서 소유역별 단위 면적당 발생한 유사량(Metricton/ha)이 적게는 1.5%부터 크게는 983%까지 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고랭지 농업이 주를 이루고 있는 양구 해안면 만대천 유역의 2009년과 2010년 유량 및 수질 모니터링 자료와 2009년과 2010년의 각기 다른 토지이용도를 이용하여 토지이용의 시·공간적 변화가 SWAT 모형의 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 단일 토지이용도를 다년간의 모의에 사용함에 따른 SWAT 모형의 태생적 한계점에 대하여 알아보았다. 그 결과 토지이용도의 변화에 따라 전체 유사발생량은 16.72% 차이를 보였으며, 소유역 별로는 1.5%에서 983%까지 엄청나게 큰 차이를 보였다. 비점오염원 관리과 유역단위에서 필지단위까지 세분화된 상황에서 우리나라와 같이 해마다 경작되는 작물이 다르고, 경작 면적의 확대·축소·소멸 등의 시·공간적 변화가 심한 지역에서는 반드시 토지이용의 시·공간적인 변화를 고려하여야 한다. 하지만 현재 SWAT모형은 하나의 토지이용도만을 사용하도록 설계되어 있기 때문에 복수의 토지이용도 사용은 불가능하다. 따라서 향후 복수의 토지이용도 사용이 가능하도록 개선되어야 정확한 모의가 가능 할 것으로 사료된다.

또한 보정·검정을 통한 적용성 평가는 모형의 정확성·적합성 등을 판단하여 모형을 사용한 연구의 타당성을 증명하는 중요한 도구이다. 하지만 본 연구에서도 알 수 있듯이 보정·검정기간의 토지이용과 강수패턴이 큰 차이를 보인다면 모형의 적용성 평가 자체가 불가능한 경우도 있다. 강수패턴은 유출량뿐만 아니라 강수·유출·수질이라는 메커니즘 모두에 영향을 주는 가장 중요한 요소이기 때문에 단지 실측치 기간의 전반부를 모형의 보정, 그리고 후반부를 모형의 검정 기간으로 선택하기 보다는 강수패턴의 변화가 충분히 반영될 수 있는 기간을 고려하여 모형의 적용성을 평가하여야 할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 Eco-Star Project(과제번호: EW32-07-10), 부담(생태호 조성 기술 및 생태 복원 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

#### References

American Public Health Association, American Water Works Association (APHA, AWWA). (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st Edition, pp.

- 2-55-56.
- Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, Ph.D. diss., West Lafayette, Ind.: Purdue University.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., 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.
- Choi, J. D., Shin, H. S., Yoon, Y. S., and Kim, S. (2009). The Simulation of Nutrients using SWAT Model and its Application to Estimate Delivery Ratio, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(3), 375-385. [Korean Literature]
- Donigian, A. S. and Love, J. T. (2003). *Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling*, WEF-TMDL, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Chicago, Illinois, USA. pp. 1-20.
- Han Basin Commission. (2008). Han-kang-soo-gye-tak-soo-ju-kam-da-chaek-ma-ryeon-eul-wi-han-yeon-gu, Han Basin Commission, pp. 152-153. [Korean Literature]
- Heo, S., Kim, N. W., Park, Y., Kim, J., Kim, S. J., Ahn, J. H., Kim, K., and Lim, K. J. (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 Environment*, 24(2), pp. 147-155. [Korean Literature]
- Jeon, M. (2007). Sediment Reduction Plans at Soyangdam Watershed, Research Institute for Gangwon. [Korean Literature]
- Kim, J. G., Park, Y. S., Yoo, D. S., Kim, N. W., Engel, B. A., Kim, S. J., Kim, K. S., and Lim K. J. (2009b). Development of a SWAT Patch for Better Estimation of Sediment Yield in Steep Sloping Watersheds, *Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), pp.963-972.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S., Lee, J., and Yang, S. K. (2009a). Integrated Surface-groundwater Analysis in Jeju Island, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(9), pp. 1017-1026. [Korean Literature]
- Lee, J. W., Eom, J. S., Kim, B. C., Jang, W. S., Ryu, J. C., Kang, H. W., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2011). Water Quality Prediction at Mandae Watershed using SWAT and Water Quality Improvement with Vegetated Filter Strip, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(1), pp.37-45. [Korean Literature]
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J. D., and Kim, K. S. (2005). GIS-based Sediment Assessment Tool, *CATENA*, 64(1), pp. 61-80.
- Ministry of Environment (MOE). (2006a). *The Base of the Water Environment Management Plan*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2006b). *Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAS). (2000). Home page, <http://www.naas.go.kr/> Accessed 6 Dec. 2000.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. E. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models. Part I-A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.

- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas.
- Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G. D., Gemitzi, A., and Tsihrintzis, V. A. (2010). Hydrological and Water Quality Modeling in a Medium-sized Basin Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), *Desalination*, 250(1), pp. 274-286.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management, *ASAE International Meeting*, Paper 97-2209, pp. 1-7.
- Renard, R. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., and Yoder, D. C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water, a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agric. Handbook no. 703* USDA-ARS, Washington, D.C.
- Rural Development Administration (RDA). (2010). Home page. [http:// www.rda.go.kr/](http://www.rda.go.kr/) Accessed 7 Sep. 2010.
- TERRECO, Department of Plant Ecology, Bayreuth University (2010). Department Report, Land Use Data at Haeon, Madae Watershed in Korea.
- Ullrich, A. and Volk, M. (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), pp. 1207-1217.
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield Prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor, *Proceeding of the Sediment yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory*, Oxford, Mississippi.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1958). Rainfall Energy and its Relationship to Soil Loss, *Trans. Am. Geophys. Un.*, 39, pp. 131-137.
- Yanggu-gun Gangwon-do Korea. Home page. <http://www.yanggu.go.kr/> Accessed 6 Dec. 2010.
- Yoo, D. S., Kim, K. S., Jang, W. S., Jun, M. S., Yang, J. E., Kim, S. C., Ahn, J. H., and Lim, K. J. (2008). Evaluation of Sediment Yield using Area-weighted Measured Slope and Slope Length at HeaAn Myeon Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(5), pp. 569-580. [Korean Literature]