

## 토지피복도 정확도에 따른 SWAT 예측 오류 평가

허성구·김기성\*·김남원\*\*·안재훈\*\*\*·박상현·유동선\*·최중대\*·임경재\*†

강원발전연구원  
\*강원대학교 농업공학부  
\*\*한국건설기술연구원  
\*\*\*농촌진흥청 고령지농업연구소

## Evaluation of SWAT Prediction Error according to Accuracy of Land Cover Map

Sunggu Heo · Kisung Kim\* · Namwon Kim\*\* · Jaehun Ahn\*\*\* · Sanghun Park · Dongseon Yoo\* ·  
JoongDae Choi\* · Kyoungjae Lim\*†

National Kangwon Development Research Institute

\*Division of Agricultural Engineering, Kangwon University

\*\*Korea Institute of Construction Technology

\*\*\*National Institute of Highland Agriculture, Rural Development Administration

(Received 4 June 2008, Revised 22 September 2008, Accepted 14 October 2008)

### Abstract

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model users tend to use the readily available input dataset, such as the Ministry of Environment (MOE) land cover data ignoring temporal and spatial changes in land cover. The SWAT model was calibrated and validated with this land cover data. The EI values were 0.79 and 0.85 for streamflow calibration and validation, respectively. The EI were 0.79 and 0.86 for sediment calibration and validation, respectively. With newly prepared landcover dataset for the Doam-dam watershed, the SWAT model better predicts hydrologic and sediment behaviors. The number of HRUs with new land cover data increased by 70.2% compared with that with the MOE land cover, indicating better representation of small-sized agricultural field boundaries. The SWAT estimated annual average sediment yield with the MOE land cover data was 61.8 ton/ha/year for the Doam-dam watershed, while 36.2 ton/ha/year (70.7% difference) of annual sediment yield with new land cover data. Especially the most significant difference in estimated sediment yield was 548.0% for the subwatershed #2. Therefore it is recommended that one needs to carefully validate land cover for the study watershed for accurate hydrologic and sediment simulation with the SWAT model.

**keywords** : Hydrological response unit (HRU), Land registration map, Landuse (EGIS), Soil and water assessment tool (SWAT), Soil erosion, SWAT ArcView GIS Extension Patch

## 1. 서론

우리나라는 고도경제 성장기를 거치면서 급속한 도시화 및 토지이용 변화 과정을 겪고 있다. 특히 농촌지역의 경우 인구감소, 고령화, 경관 자원의 훼손 등의 원인으로 인해 농업전반이 침체되고 있다. 특히 농산물 시장의 해외 개방 이후 논농사와 가축 사육두수 등 전반적으로 농촌경제가 위축되는 양상을 띠고 있다. 심리적으로 위축된 농민들은 생산성 향상을 위하여 권장시비량 이상의 과도한 농약과 영양물을 살포하고 있다. 우리나라의 대표적인 고랭지 농업지대에 위치하고 있는 강원도 평창군 도담담 유역 부근의 농업구조는 채소류 등 작물 상품성 향상을 목적으로 1~3년마다 마사토로 20~50 cm 정도 객토를 실시하고 있어

(전만식과 김범철, 2005) 하천 또는 도로보다 발 높이가 높아져 토양유실을 가중시키며, 산지 및 하천과 접한 고랭지밭의 경사면이 연중 나지로 방치되어 있어 작물 재배기간 2~3개월을 제외하면 해빙기와 강우기에 토양이 유실되어 발 기반 훼손 및 하천 오염을 유발시키고 있다. 또한 농민들은 경작면적을 확장하기 위해 고랭지 밭과 접한 산지에서 객토용 흙을 채토한 후 이를 밭으로 전용하거나 하천부지를 고랭지 밭으로 전용하는 사례 등의 이유들로 토양유실 및 비점오염원이 심각할 수밖에 없는 구조적 문제를 가지고 있다(강원도, 2005). 따라서 위와 같은 문제점들을 해결하기 위해 고랭지 지역에서의 정확한 비점오염원 및 토양유실 발생량을 정확히 모니터링 분석해야 한다. 하지만 천문학적인 연구비 및 연구인력 부족과 시간 등이 소요되기에 현실적으로 많은 제약이 뒤따른다(신용철 등, 2007). 이러한 이유들로 인해 유역에서의 효과적인 농업비점오염원 관리를 위한 여러 가지 모델링 기법이 도입되어 적용되

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

고 있다. 그 예로, 김봉석 등(2006)은 도암댐 유역 상류부 비점오염원 물질을 예측하기 위해 Hydrological Simulation Program-Fortran(HSPF) 모형을 이용하여 최적영농관리방법에 의한 비점오염 부하량의 저감효과를 분석하였다. 김민경 등(2001)은 임고천 소규모 농업유역에 대해 Agricultural Nonpoint Source Pollution Model(AGNPS) 모형을 이용하여 농업지대 유역에서의 농업비점오염 부하량을 추정하는데 적용하였다. 박경철 등(2000)은 팔당호 유역에서의 영양염류 예측을 위해 Simulator for Water Resources in Rural Basins(SWRRB) 모형을 적용하였다. 위와 같은 여러 모델을 통한 적용방법이 있으나 그 중 현재 우리나라에서 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 유역 단위 모델인 Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 모형은 농업 비점오염원에 의한 수문 순환 및 시·공간적 변화를 모의할 수 있는 시스템이다. SWAT 모형은 입력 자료로 장기 일 기상자료를 이용하기에 고랭지 지역과 같은 기상변화가 심한 지역의 수문 및 수질 현상 모의도 가능하며, 토양과 토지이용 및 관리 상태에 따라 반응하는 대규모 유역의 물과 토사유출 및 농업 화학물질 거동에 대한 토지관리 방법의 영향도 예측 가능한 모형이라 전 세계적으로 많이 이용되고 있다(허성구 등, 2007). 그러나 대부분의 SWAT 모형을 통한 연구들에 있어 가장 기본적인 입력 자료 구축 시 연구지역 내 유출 및 비점오염 거동에 영향을 미치는 현황을 최대한 반영하여 SWAT 모형을 운영하는 연구사례가 극히 부족하다. 허성구 등(2007) 연구결과에 의하면 고랭지 농경지의 도암댐 유역 내 농경지에서 객토가 많이 성행하고 있다는 점을 착안하여 SWAT 운영 시 기존 농촌진흥청 농업과학기술원(NIAST, 2000)에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 사용하였을 경우와 객토된 토양속성을 고려하여 SWAT 예측치의 유사량을 비교 평가하였을 시 약 79%정도 오류가 발생함을 알 수 있었다. 모델의 정확성 평가 시 객토 속성을 고려하지 않고 수문 모의 시 모형효율지수(EI)가 0.66, 유사농도 모형효율지수(EI)가 0.41이었다. 그러나 객토 속성을 고려했을 경우 수문 모의 시 모형효율지수(EI) 0.86, 유사농도 모형효율지수(EI)가 0.51로 향상되었다. 이는 SWAT 모형을 이용하여 토양유실량 예측에 있어 유역 내 토양 특성을 정확히 반영하는 것이 유역 내 토양유실 및 유사거동에 얼마나 큰 영향을 미치는지 알 수 있는 중요한 결과라 할 수 있다. 그 다음으로 SWAT 운영에 있어 중요한 입력 자료로 토지피복도를 들 수 있다. 박정규(2007)는 대규모 복잡한 유역에서의 장기간에 걸친 유역내의 장기 강우유출 과정과 비점오염물질의 거동을 예측하기 위해 SWAT을 이용하여 금강유역에 적용하였으며, 한진연 등(2006)은 적절한 오염 총량규제를 위한 비점오염원 관리방안을 고찰하기 위해 SWAT 모형을 이용하여 낙동강 일부 유역을 대상으로 비점오염원 평가를 하였다. 또한 서동일 등(2006)은 SWAT 모형을 이용하여 우리나라의 유역에 대하여 비점오염원 부하의 정확한 예측을 평가하고자 하였다. 위와 같은 연구들은 SWAT 운영에 환경부에서 제공하는 토지피복도를 이용하여 SWAT 모의를 한 연구사례들이다. 그러나 환

경부 환경지리정보서비스(EGIS, 2007)제공 토지피복도 자료의 경우 토지피복 분류는 위성영상에서 나타나는 경계 설정을 기준으로 판독하는 것이고 토지의 소유관계에 따라 정확한 측량에 의해 설정되는 지목과 비교하였을 시 상당한 차이가 있을 것으로 판단된다. 환경부 토지피복도는 공간해상도 5 m인 IRS-1C 위성영상, 30 m인 Landsat TM 위성영상, 수치지형도(1:5,000)를 이용하고 참고자료로 임상도, 생태·자연도, 지형도(1:25,000)등을 이용하여 구축한다. 토지자원조사는 기본적으로 1975~2000년까지 약 5년 간격의 Landsat 위성자료를 이용하여 분석을 실시함을 목적으로 하였으나, Landsat 위성과 같이 분광센서의 경우 구름이 있는 경우와 광범위한 지역에 대해서는 지표면의 특성을 정확하게 파악하기 어려워 약 1~2년 정도의 시간적 차이를 허용하고 있다(환경부 환경지리정보서비스 EGIS, 2007). 즉 시·공간적 해상도가 낮아서 유역 내 토지이용현황을 정확히 구분하는데 있어 한계가 발생할 수 있다. 고랭지 지역과 같은 농업구조를 가지고 있는 지역은 탁수 발생의 경우 농경지에서의 발생량이 많이 발생하기에 시·공간 해상도가 낮은 환경부 토지피복도 자료를 사용하였을 경우 오류가 발생할 가능성이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 도암댐 유역에서의 지적도를 바탕으로 위성영상을 참고하여 구축한 토지피복도와 환경부 토지피복도를 이용하여 SWAT 모델의 입력 자료로 사용하였을 시 토지분류 정확성이 유사거동에 미치는 영향을 평가하였으며, 본 연구의 결과가 유역 내 정확한 토지이용 구축이 SWAT 모델의 정확성 평가에 얼마나 중요한지 제시해줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구지역 선정

연구 대상지역은 행정구역 상 강원도 평창군 대관령 면에 속하는 도암댐 유역으로 동경 128° 37'~28° 47', 북위 38° 35'~38° 47'에 위치해 있다. 대관령면 면적은 221.6 km<sup>2</sup>로서 평창군 전체면적 1463.7 km<sup>2</sup>의 15.2%에 해당되며, 송천 본류의 길이는 약 29.5 km이다. 도암댐 유역 면적은 144.6 km<sup>2</sup>로 대관령면 면적 221.6 km<sup>2</sup>의 65.3%를 차지한다. Fig. 1은 도암댐 유역의 소유역 경계를 나타내고 있다.

### 2.2. SWAT 모형 적용

#### 2.2.1. SWAT 모형 개요

SWAT 모델은 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 유역단위의 모델이다. 이 모델은 미국 농무성에서 개발하여 이용해 온 CREAMS 모델, GREAMS 모델 및 EPIC 모델과 같은 농업연구국 모델들을 결합하여 만들어졌다(Arnold and Srinivasan, 1994). 특히 SWAT은 강우-유출모델과 수질모델이 GIS와 연계된 호환모델로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미계측 지역에서도 모의가 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는

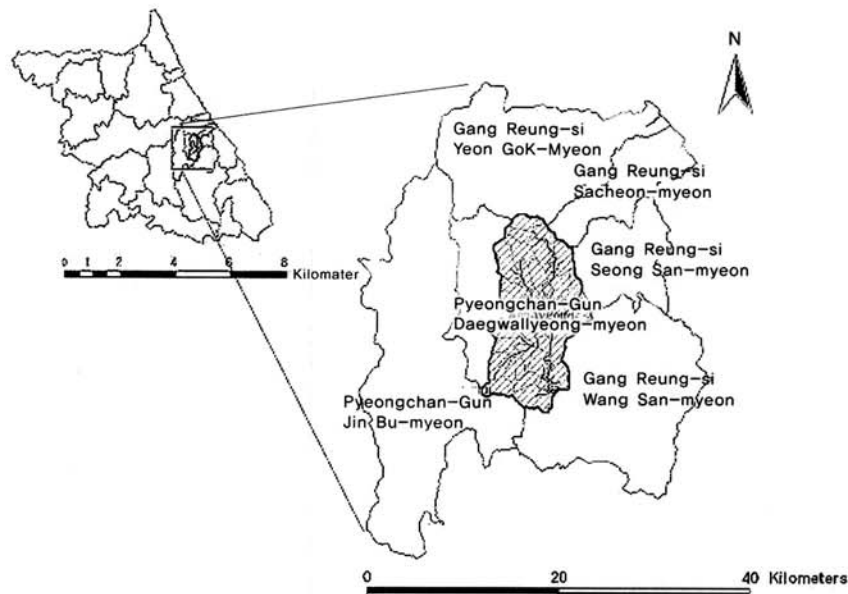


Fig. 1. Location of the doam-dam watershed at Pyeongchan-Gun, Gangwon-Do.

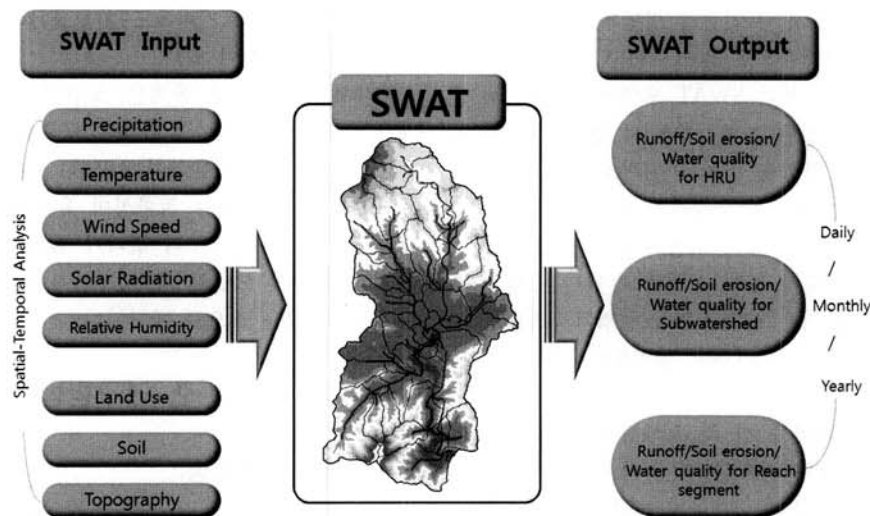


Fig. 2. Overview of the SWAT model - model input/output parameters (Park et al., 2008).

특징을 지니고 있다. Fig. 2는 SWAT 모델의 입력 자료와 출력자료를 보여준다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시·공간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 SWAT 모델은 유역 내 발생하는 비점오염원을 소하천별, 소유역 별, 그리고 소유역 내 수문학적 반응단위별로 모의한다(허성구 등, 2007).

### 2.3. SWAT 모형의 입력자료 구축

#### 2.3.1. 기상자료

SWAT 모형의 적용에 필요한 기상자료는 장기 일 강우(mm), 일 평균풍속(m/sec), 일 평균상대습도(%), 일 최고온도( $^{\circ}\text{C}$ )·일 최저온도( $^{\circ}\text{C}$ ), 일 수평면일사량( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )이다. 기상청에서는 일 수평면일사량( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) 자료를 제공하지 않기 때문에, 국가수자원관리종합정보(2007)를 이용하여 SWAT

에서 필요한 일 수평면일사량( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )을 구축하였고, 다른 기상자료는 1974년 1월 1일부터 2007년 6월 28일까지 측정된 대관령 지역의 기상자료를 이용하였다.

#### 2.3.2. 객토속성 고려한 토양 DB 이용

도암댐 수계 내 토양속성은 농촌진흥청 농업과학기술원(NIAST, 2000)에서 제공해 주는 정밀토양도(1:25,000)를 사용하였다. 하지만 도암댐 유역 내 고랭지 농경지에서는 매년 연작 피해, 병충해 예방, 작물 생산성 향상 등을 위해 지속적으로 많은 양의 객토가 성행하고 있어 토양유실 및 탁수발생을 가중시키고 있다. 따라서 본 연구에서는 허성구 등(2007)이 고랭지 농경지에서의 도암댐 유역 내 농경지에서 객토가 성행하고 있다는 점을 착안하여 객토 토양 시료를 채취하여 비중계 실험 및 체가름 분석을 통한 입도 분석을 수행하였다. 그 결과 자갈 함량 20%, 모래 함량 61%, 실트 함량 19%인 사양토(SL)로 분석되었다. 구축된 객토

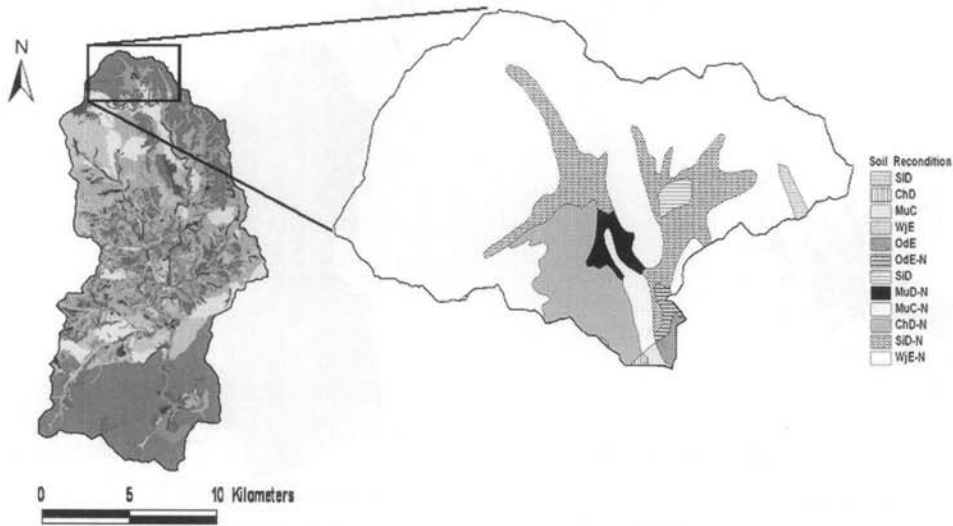


Fig. 3. Soil distribution map using soil properties of reconditioned soil at agricultural field.

토양도를 토지이용과 중첩하여 객토 속성을 고려한 토양 DB를 SWAT 모형 입력 자료에 이용하였다(Fig. 3).

2.3.3. 도암댐 유역 환경부 토지피복도 자료

앞에서 언급되었듯이 본 연구의 목적이 도암댐 유역의 환경부 토지피복도와 지적도를 바탕으로 위성영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 SWAT 모형의 입력 자료로 사용하였을 시 토지분류 정확성이 유사거동에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 환경부 토지피복도의 경우 Landsat TM 위성영상 기본자료, 참고자료로는 지형도(1/50,000), 전술기본도(1/50,000), 항공사진, 고해상도 영상, 다중시기 Landsat TM 영상을 이용하여 작성한 자료이다(EGIS: <http://egis.me.go.kr/egis>). 도암댐 유역 토지피복도의 경우 환경부 환경지리정보서비스에서 제공하는 1/25,000 대분류 수치 피복도 자료를 이용하였다. 토지피복 분류 결과 산림(FRST) 61.9%를 차지하며, 농업지역(AGRL) 31.7%, 초지(PAST) 2.3%, 시가화(URLD) 1.9%, 나지(CLVA) 1.0%, 수역(WATR) 1.2% 각각 차지하고 있다(Fig. 4).

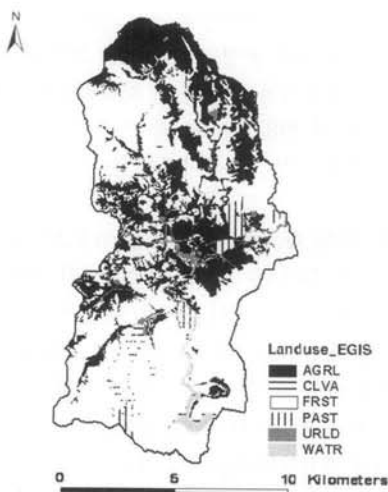


Fig. 4. Landuse at the doam watershed (EGIS).

2.3.4. 도암댐 유역 지적도기반 위성영상을 참고한 토지피복도 구축

본 연구에서는 도암댐 유역 내 현황을 최대한 고려하기 위해 지적도 기반 고해상도 인터넷제공 공간해상도 1 m급 위성영상 자료와 비교를 통하여 수작업을 통한 디지털화 기법을 이용하여 토지피복도를 구축하였다. 즉 Fig. 5(a)는 지적도 지목 상에 농경지(Land Registration Map(AGRL))로만 분류되어 있던 농경지 면적이 1,315 ha이다. 그러나 영상자료와 비교·검토하였을 시 지적도 지목 상에는 산림(FRST)으로 분류되어 있던 지역이 영상자료에는 산림(FRST)이 아닌 Fig. 5(b)의 농경지(High Resolution Satellite Map(AGRL))로 전용된 면적이 365 ha로 분류되었다. 따라서 도암댐 유역의 실 농경지 면적이 1,680 ha로 분석되었다. 이는 고랭지 농업 종사자들이 경작면적을 확장하기 위하여 고랭지 밭과 접한 산지에서 객토용 흙을 채토한 후 이를 밭으로 전용한 것으로 판단된다. Fig. 5(c)는 도암댐 유역의 지적도 지목 상 농경지 분류와 영상자료에서의 농경지 즉 지적도 지목 상 산림으로 분류되어 있으나 영상자료는 농경지로 분류되어 있는 것을 나타내고 있다.

이렇게 구축된 도암댐 유역의 토지이용 현황을 분류하여 보면 산림(FRST)이 72.0%를 차지하며, 농업지역(AGRL) 12.0%, 초지(PAST) 11.0%, 시가화(URLD) 3.0%, 수역(WATR) 2.0% 각각 차지하고 있다(Fig. 6).

2.3.5. 토지피복도 유형에 따른 소유역 별 HRU 생성

SWAT 모형은 실제 소유역의 토지이용과 토양의 상태에 따라 유출해석을 위한 기본 단위인 HRU(Hydrological Response Unit)를 정하여 소유역의 복합적인 특성을 반영할 수 있는 구조를 가지고 있다(Arnold et al., 1995). 이 HRU는 각 소유역내 동일한 토지이용과 토양특성의 조합으로 구성되며, SWAT 모형에서는 HRU 분포를 결정하는데 있어서 각 소유역 별 지배적인 토지이용과 토양특성에 의해 결정되는 하나의 대표 HRU를 설정할 수도 있고, 각 토지이용과 토양특성의 최소 점유 비율을 지정하여 각 소유역 별

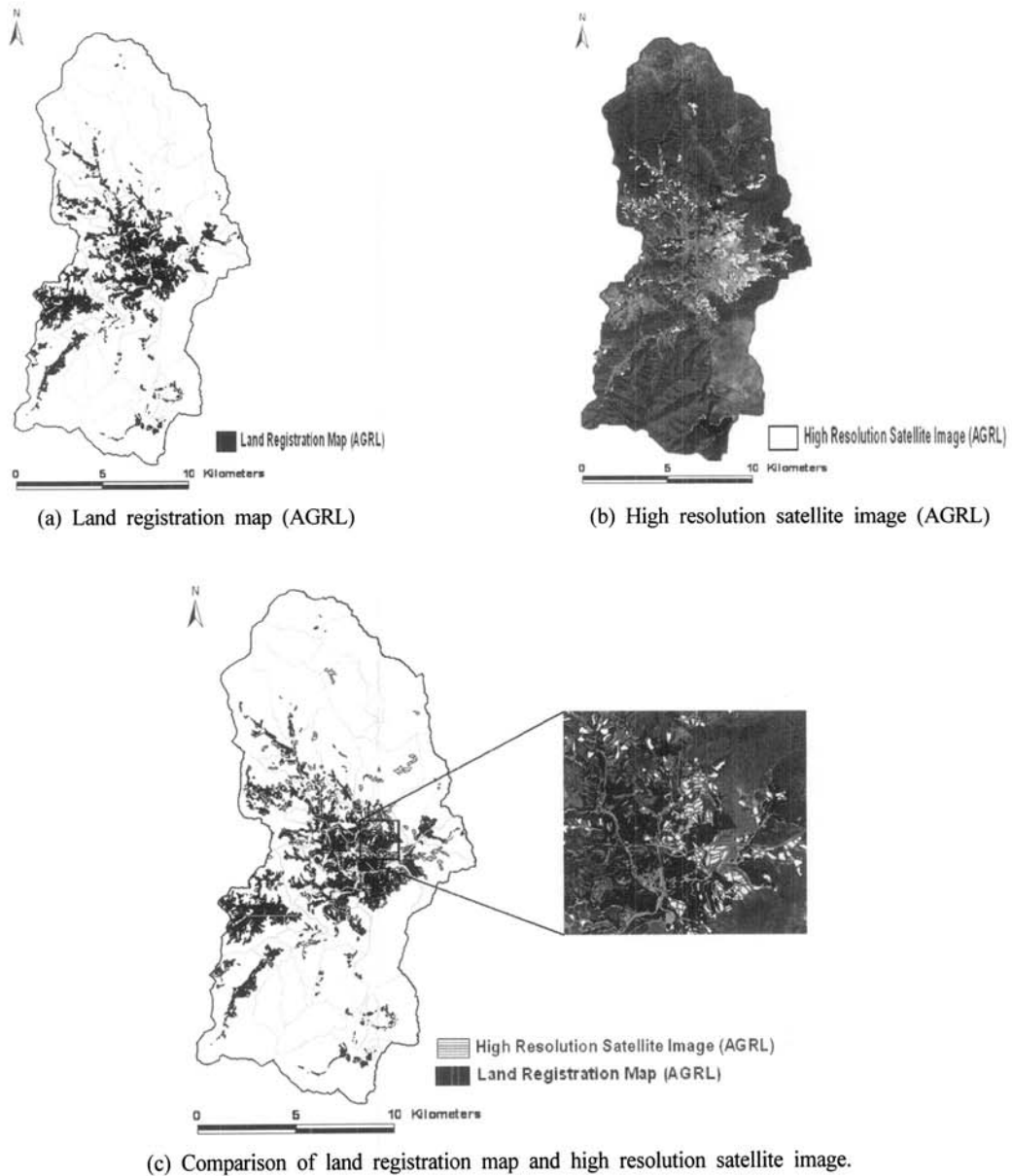


Fig. 5. Database development for land cover map with land registration map and high resolution satellite image at doam-dam watershed.

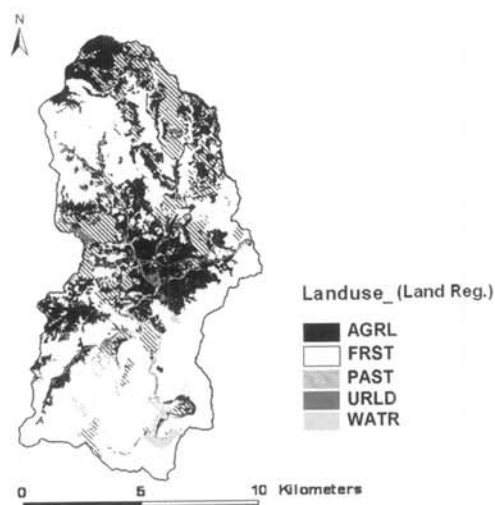


Fig. 6. Land registration map at the doam-dam watershed.

HRU를 조절할 수 있다(허성구 등, 2006). 본 연구에서는 각기 다른 토지피복도 유형 즉 환경부 토지피복도와 지적 도기반 영상을 참고하여 추구한 토지피복도와의 SWAT 모형의 각 소유역 별 HRU 개수 및 공간적 분포 차이를 통한 도암댐 유역의 수문 및 유사거동 분석을 수행하였다.

### 2.3.6. SWAT 모형 ArcView GIS Extension Patch 적용

SWAT 모형은 DEM을 이용하여 유역의 평균 경사도를 산정하고 평균경사도와 경사장과의 관계를 식을 이용하여 평균 경사장을 계산한다. 그러나 기존의 SWAT 모형은 전반적으로 미국 지형의 경사가 완만한 지역에 적합하게 개발되어 왔기 때문에 우리나라와 같이 산세가 험하고 경사가 급한 지역에 적용하기에는 부적절할 수 있다. 또한 SWAT 모형은 소유역의 평균경사를 통해 소수계의 각 HRU의 경사장을 산정한다. 기존 SWAT 모형은 분할된 소유역의 경



사장 산정 시 경사도가 25%이상의 급한 지형에서는 0.05 m로 일반적으로 사용하도록 되어 있다(Arnold and Srinivasan, 1994). 이러한 소유역마다 경사장 산정의 오류는 예측 유사량 모의 결과에 상당히 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 경사장과 경사도 관계를 이용하여 개발한 SWAT ArcView GIS Extension Patch(임경재 등, 2007) 기능을 적용하였다(허성구 등, 2008).

2.3.7. SWAT 모형 정확성 평가를 위한 보정 및 검증

SWAT 모형을 이용하여 환경부 토지피복도와 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도와 토지분류 정확성이 유사거동에 미치는 영향을 모의하기에 앞서, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 이용한 SWAT 모형의 수문 및 토양유실·유사 컴포넌트의 정확성을 평가해야 한다. 모형의 정확성 검증을 위해 도암댐 수계의 유량 데이터(한국수력원자력(주), 2006)와 송천 지점의 유사량 데이터(물환경정보시스템, 2006)를 실측자료로 이용하였다. 유사는 물의 이동에 의해 좌우되기 때문에 모형의 보정을 위해 먼저 유출과 관련된 매개변수를 보정하였고, 이후 유사 관련 매개변수를 보정 하였다. 수문 컴포넌트에 민감한 매개변수인 기저유출 관련 천층 대수층의 임계수분량(QWQMN), 기저유출감수상수(ALPHA\_BF), 천층대수층의 revap 계수(GW\_REVAP), 심층대수층으로의 침투에 대한 천층 대수층의 임계수분량(REVAPMN), 토양증발 보상계수(ESCO), AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수(CN2), 토양의 유효수분 함량(SOL\_AWC)과 유사에 영향을 미치는 매개변수 작물경작인자(USLE\_C), 침식조절인자(USLE\_P) 등을 변경시켜 모형의 보정을 실시하였다(Arnold and Allen, 1999; Santhi et al., 2001; Spruill et al., 2000). SWAT 모형의 정확성 평가 시 보정해야 할 매개변수가 많고 복잡한 모형이기 때문에 시행 착오법에 따라 각 매개변수의 민감도 분석 결과에 따라 단계별 매개변수를 변화시켜가며 보정을 수행하였으며, 보정 및 검증 결과에 대한 모형 적용성 평가를 위해 유량 및 유사에 대해 결정계수(Coefficient of Determination, R<sup>2</sup>), Nash and Sutcliffe(1970)에 의해 제안된 모형 효율(Model Efficiency, EI)을 산정하여 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토지피복도 유형에 따른 비교 및 분석

SWAT 모형 적용 시 도암댐 유역의 입력 자료인 환경부 토지피복도와 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도와 비교 및 분석 결과 지적도기반 영상을 참고한 토지피복도가 환경부 토지피복도보다 산림(FRST) 10.1%, 초

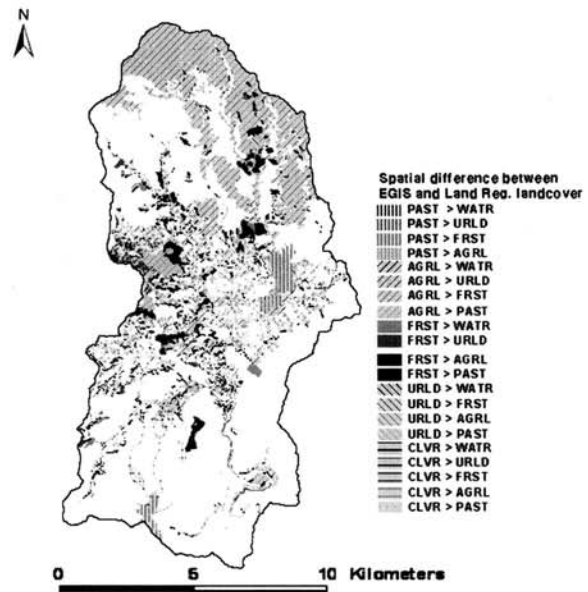


Fig. 7. Spatial changes of landuse with EGIS, land registration map with high resolution satellite image at doam-dam watershed.

지(PAST) 8.7%, 시가화(URLD) 1.1%, 수역(WATR) 0.8% 증가하였으며, 농업지역(AGRL) 19.7%, 나지(CLVA) 1.0% 감소하였다(Table 1).

또한 Fig. 7은 도암댐 유역의 환경부 토지피복도와 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도와 토지이용 변화에 따른 공간적 위치 변화를 나타내고 있다.

3.2. SWAT 모형의 보정(Model Calibration) 및 검증(Model Validation) 결과

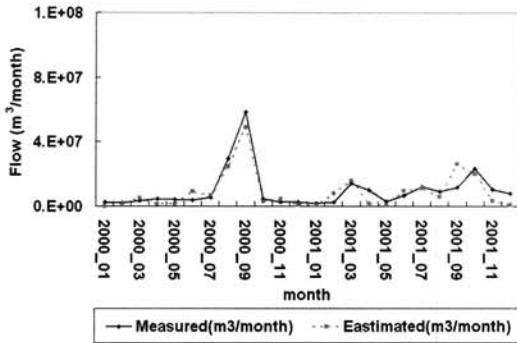
본 연구의 모의기간은 1985년부터 2007년으로 하였다. 또한 SWAT 모형의 수문 및 비점오염원 모의 시 모형의 안정화 및 신뢰성 있는 결과 도출을 위해 모형의 초기화 과정을 수행하였다. 본 연구에서는 초기화(Warming Up) 과정으로 1985년부터 수행하였다. 2000~2001년도의 실측값과 SWAT 모의 예측 값을 이용하여 월(Monthly) 단위별로 유량을 보정한 결과 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.83, 모형의 효율지수(EI)는 0.79로 분석되었다(Fig. 8(a), (b)).

보정된 매개변수를 적용하여 모형의 정확성을 검증하기 위한 기간으로 2002~2003년에 적용해 본 결과 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.86, 모형 효율지수(EI)는 0.85로 모의 예측치가 실측치의 경향을 잘 반영하였다(Fig. 9(a), (b)).

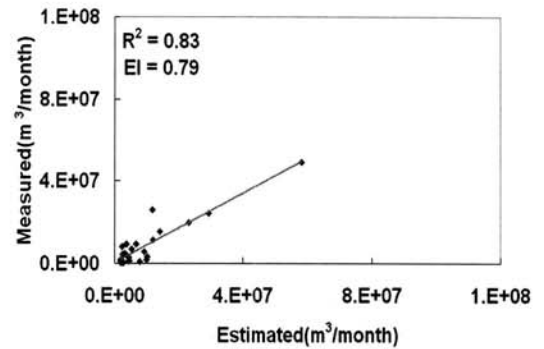
Fig. 10(a), (b)는 보정된 매개변수를 이용하여 모의 유사량과 2000~2001년까지 실측 유사량을 이용하여 월(Monthly) 단위별로 유사량을 보정한 결과 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.84,

Table 1. Comparison of landuse with land registration map and high resolution satellite image at doam-dam watershed

| Landuse (%) | Item | WATR   | URLD   | PAST   | FRST    | AGRL    | CLVA   |
|-------------|------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| EGIS        | A    | 1.2    | 1.9    | 2.3    | 61.9    | 31.7    | 1.0    |
| Land reg.   | B    | 2.0    | 3.0    | 11.0   | 72.0    | 12.0    | 0.0    |
| Difference  | B-A  | 0.8(↑) | 1.1(↑) | 8.7(↑) | 10.1(↑) | 19.7(↓) | 1.0(↓) |

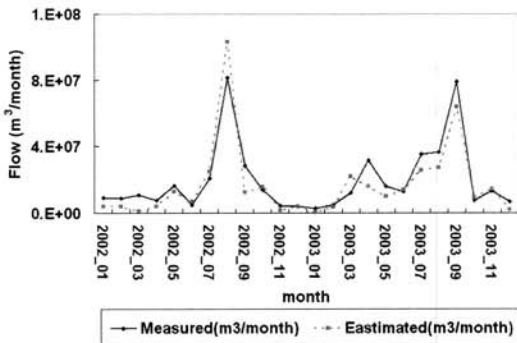


(a) Comparison of measured and estimated stream flow for calibration period

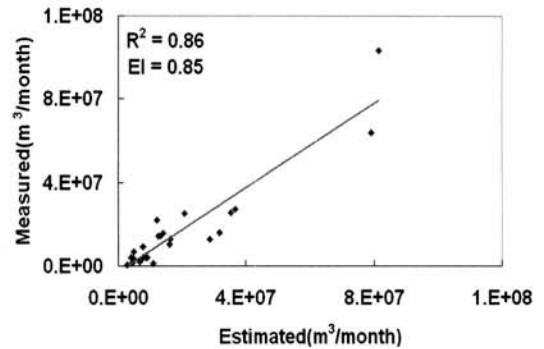


(b) Coefficient of determination ( $R^2$ ) model efficiency (EI) for calibration period

Fig. 8. Calibration of SWAT hydrologic component (2000~2001).

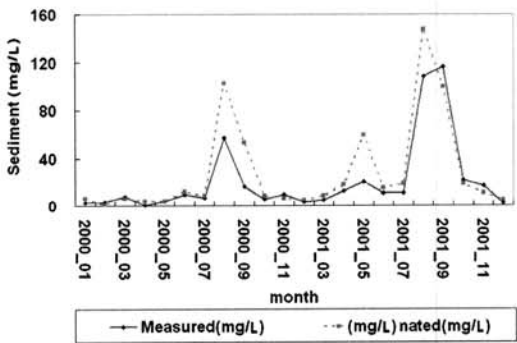


(a) Comparison of measured and estimated stream flow for validation period

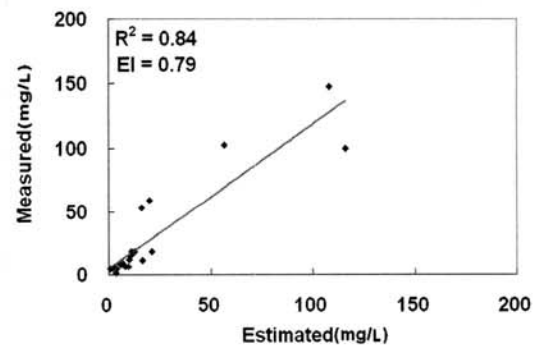


(b) Coefficient of determination ( $R^2$ ) model efficiency (EI) for validation period

Fig. 9. Validation of SWAT hydrologic component (2002~2003).



(a) Comparison of measured and estimated sediment for calibration period



(b) Coefficient of determination ( $R^2$ ) model efficiency (EI) for calibration period

Fig. 10. Calibration of SWAT sediment component (2000~2001).

모형 효율지수(EI)는 0.79로 분석되었다.

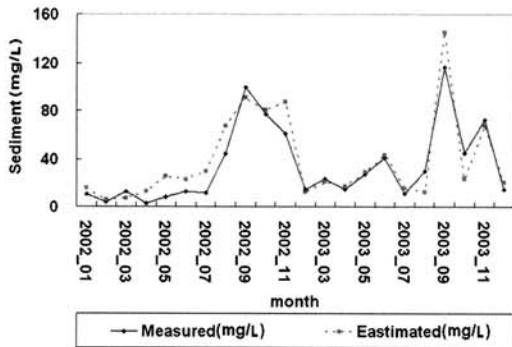
보정된 매개변수를 적용하여 모형의 정확성을 검증하기 위한 기간으로 2002~2003년까지 적용해 본 결과 결정계수 ( $R^2$ )는 0.87, 모형 효율지수(EI)는 0.86로 모의 예측치가 실측치의 경향을 잘 반영하였다(Fig. 11(a), (b)). 따라서 보정된 SWAT 모형은 도암댐 수계 내 유량·유사량 모의에 상당히 적합한 것으로 분석되었다.

이는 허성구 등(2007)의 고랭지 농경지의 객토 속성을 고려한 수문 및 토양유실·유사 컴포넌트의 정확성을 평가 시 SWAT 입력 자료인 환경부 토지피복도를 이용하여 수

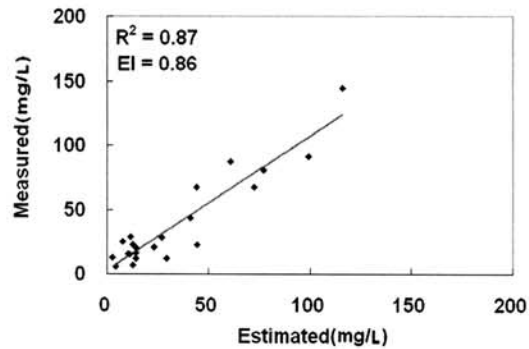
문 모의 시 모형 효율지수는 ( $EI = 0.53$  Calibration,  $EI = 0.74$  Validation) 및 유사( $R^2 = 0.54$ ,  $EI = 0.51$ ) 보다 도암댐 유역 내 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도 사용 시 수문 모형 효율지수는 ( $EI = 0.79$  Calibration,  $EI = 0.85$  Validation) 및 유사 ( $EI = 0.79$  Calibration,  $EI = 0.86$  Validation)로 SWAT 모형에 적용한 결과 도암댐 유역 내 자연 및 수문현상을 더욱 잘 반영하는 것으로 나타났다.

### 3.3. 토지피복도 유형에 따른 소유역 별 HRU 분석

도암댐 유역의 환경부 토지피복도와 지적도기반 영상을



(a) Comparison of measured and estimated sediment for validation period



(b) Coefficient of determination ( $R^2$ ) model efficiency (EI) for validation period

Fig. 11. Validation of SWAT sediment component (2002~2003).

참고하여 구축한 토지피복도와와 SWAT 모의 시 각 소유역 별 HRU 개수를 분석하였다. 그 결과 환경부 토지피복도를 이용하여 SWAT 모의 시 도암댐 유역의 HRU 생성 개수가 총 1,861개로 분석되었고, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도의 경우 SWAT 모의 시 도암댐 유역의 HRU 생성 개수가 총 3,167개로 약 70.2% 차이가 나는 것으로 분석되었다. 그중 소유역 13번 소유역의 경우 환경부 토지피복도 SWAT 모의 시 HRU 생성 개수는 총 61개로 분석되었다(Fig. 12). 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도 SWAT 모의 시 HRU 생성 개수는 총 1456개로 분석되어 약 139.3%로 가장 많이 차이가 나는 소유역 HRU 개수로 분석되었다(Fig. 13).

3.4. 토지피복도 유형에 따른 각 소유역 별 토양유실량

도암댐 유역을 41개 소유역으로 분할하여 각 소유역 별 유사발생량을 분석하였다. 그 결과 Fig. 14, 15와 Table 2에서 보이는 바와 같이 도암댐 유역의 41개 소유역 중 환경부 토지피복도를 이용한 SWAT 모의 시 연 평균 유사발생량이 약 61.8 ton/ha/year이며, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 이용한 SWAT 모의 시 연 평균 유사발생량이 약 36.2 ton/ha/year로 약 70.7% 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 환경부 토지피복도가 실제 도암댐 유역 내 토지이용 현황을 최대한 반영하지 못한 결

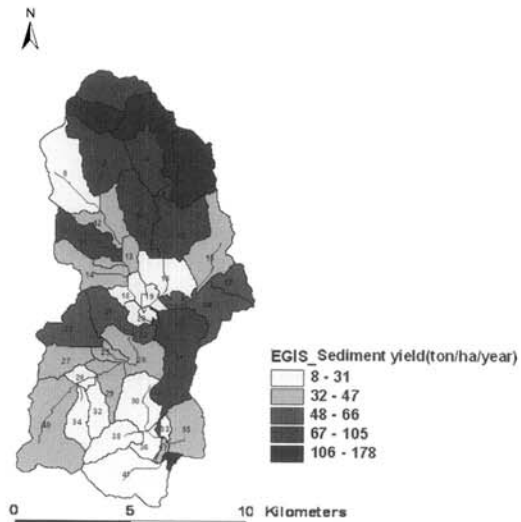


Fig. 14. Sediment yield yearly average with land cover of EGIS.

과라 할 수 있다. 모의 결과 값의 차이 발생으로 인해 기존의 환경부 토지피복도를 사용하여 토양유실량 평가 및 탁수 저감방안 대책 수립위해 SWAT 모델을 이용한 선행 연구들에 있어 모의 결과 값이 과대평가될 수 있는 결과라 할 수 있다.

또한 도암댐 유역 각각의 41개 소유역 중 소유역 2번의

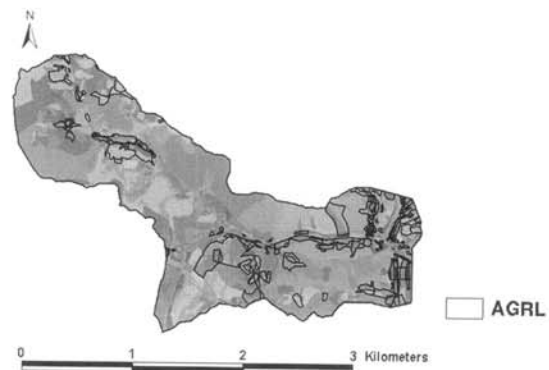
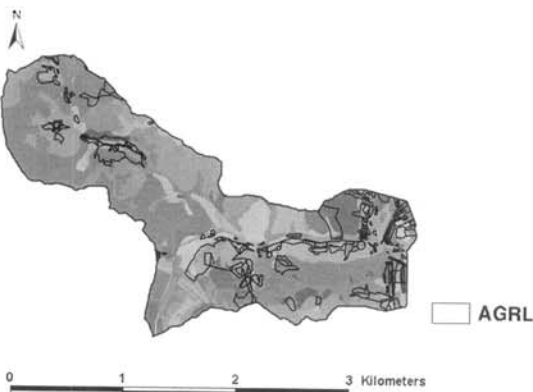
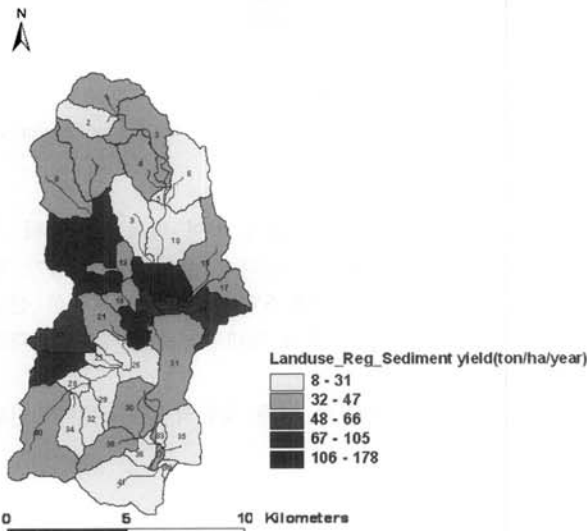


Fig. 12. Distribution HRU at the subbasin No. 13 (EGIS). Fig. 13. Distribution HRU at the subbasin No. 13 (landuse Reg.).



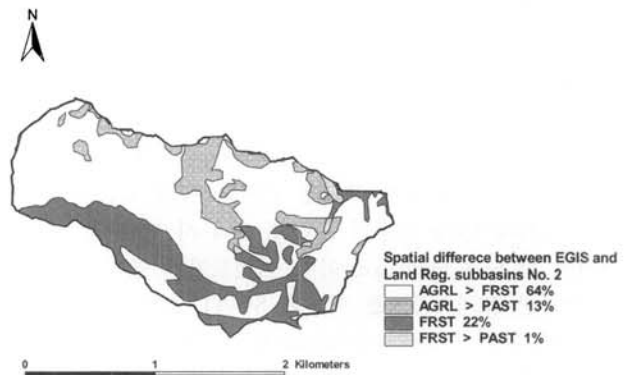
**Table 2.** Comparison of prediction sediment yield with EGIS, land registration map and high resolution satellite image using SWAT model

| No. of subbasins | Area (ha) | Sediment yield (ton/ha/year) |               |                  | No. of subbasins | Area (ha) | Sediment yield (ton/ha/year) |               |                  |
|------------------|-----------|------------------------------|---------------|------------------|------------------|-----------|------------------------------|---------------|------------------|
|                  |           | EGIS (A)                     | Land reg. (B) | Difference (B-A) |                  |           | EGIS (A)                     | Land reg. (B) | Difference (B-A) |
| 1                | 401       | 105.1                        | 36.4          | -68.7            | 22               | 87        | 51.9                         | 113.3         | 61.4             |
| 2                | 292       | 165.9                        | 25.6          | -140.3           | 23               | 315       | 64.7                         | 53.7          | -11.1            |
| 3                | 558       | 153.2                        | 41.2          | -112.1           | 24               | 402       | 48.7                         | 49.6          | 0.9              |
| 4                | 396       | 102.7                        | 37.5          | -65.2            | 25               | 299       | 35.4                         | 19.8          | -15.6            |
| 5                | 38        | 78.3                         | 23.8          | -54.4            | 26               | 439       | 37.5                         | 17.5          | -20.0            |
| 6                | 578       | 127.0                        | 27.6          | -99.3            | 27               | 103       | 35.3                         | 84.1          | 48.8             |
| 7                | 692       | 88.3                         | 39.1          | -49.2            | 28               | 275       | 31.2                         | 23.3          | -7.9             |
| 8                | 624       | 15.8                         | 35.3          | 19.4             | 29               | 108       | 41.7                         | 27.6          | -14.1            |
| 9                | 607       | 86.5                         | 25.5          | -61.1            | 30               | 213       | 24.8                         | 34.3          | 9.5              |
| 10               | 501       | 88.3                         | 25.6          | -62.7            | 31               | 973       | 86.4                         | 34.4          | -52.0            |
| 11               | 395       | 80.1                         | 68.6          | -11.5            | 32               | 238       | 23.1                         | 28.4          | 5.3              |
| 12               | 334       | 42.7                         | 71.3          | 28.7             | 33               | 437       | 25.1                         | 20.5          | -4.6             |
| 13               | 381       | 39.2                         | 46.1          | 6.9              | 34               | 313       | 15.9                         | 28.9          | 13.0             |
| 14               | 163       | 33.2                         | 68.4          | 35.2             | 35               | 868       | 46.6                         | 8.7           | -37.9            |
| 15               | 547       | 42.4                         | 33.1          | -9.3             | 36               | 139       | 25.9                         | 28.7          | 2.7              |
| 16               | 204       | 25.1                         | 74.4          | 49.2             | 37               | 47        | 37.5                         | 36.1          | -1.4             |
| 17               | 398       | 49.8                         | 32.2          | -17.6            | 38               | 415       | 19.2                         | 41.2          | 22.0             |
| 18               | 477       | 30.2                         | 46.7          | 16.5             | 39               | 42        | 126.4                        | 25.6          | -100.8           |
| 19               | 163       | 29.2                         | 47.7          | 18.5             | 40               | 741       | 41.7                         | 32.7          | -9.0             |
| 20               | 96        | 27.6                         | 96.9          | 69.3             | 41               | 44        | 24.4                         | 26.4          | 1.9              |
| 21               | 120       | 66.4                         | 35.3          | -31.2            | Total            | 14,463    | 61.8                         | 36.2          | -25.6            |



**Fig. 15.** Sediment yield yearly average with land cover using land registration map and high resolution satellite image.

경우 환경부 토지피복도를 이용한 SWAT 모의 시 연 평균 유사발생량이 약 165.9 ton/ha/year이며, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 이용한 SWAT 모의 시 연 평균 유사발생량이 약 25.6 ton/ha/year로 약 548%로 가장 차이가 많이 발생하는 소유역 지역으로 나타났다. 소유역 2번의 경우 차이가 발생한 원인으로 토지이용 현황을 분석한 결과 환경부 토지피복도의 분류상 농업지역(AGRL)이



**Fig. 16.** Spatial changes of landuse with EGIS, land registration map and high resolution satellite image at doamd-dam watershed.

77%를 차지하고 있었으나, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도 분류 상 기존 환경부 토지피복도의 농업 지역(AGRL)이 산림(FRST) 64%, 초지(PAST) 13%로 토지 이용 분류상 오류로 인해 환경부 토지피복도를 사용한 SWAT 모의 결과 값이 과대하게 평가된 결과이다(Fig. 16).

#### 4. 결론

고랭지 지역인 강원도 평창군 도암댐 유역은 지형 및 강수 특수성으로 인해 강수 발생 시 타 지역보다 토양유실 및 수질오염이 심각하여 생태계에 악영향을 미치고 있으며

기타 많은 문제점들을 야기시키고 있다. 이를 위해 많은 모델링 기법이 적용되어 탁수현황 파악과 저감대책에 대한 연구 및 사업이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 농업 비점오염원에 의한 수문 순환 및 시·공간적 변화를 모의할 수 있는 SWAT 모형을 이용하였다. 그러나 대부분 SWAT 연구들에 있어 가장 기본적인 입력 자료 구축 시 연구지역 내 유출 및 비점오염 거동에 영향을 미치는 현황을 최대한 반영하여 SWAT 모형을 운영하는 연구사례가 많이 부족하다. 그 중 유역 내 비점오염원 거동 모의에 있어 SWAT 입력자료 중 토지피복도의 정확성이 상당히 중요하며 정확한 현황 파악이 요구된다. 따라서 SWAT 모의 시 환경부 토지피복도와 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 이용하여 SWAT 모델의 입력 자료로 사용하였을 시 토지분류 정확성이 유사거동에 미치는 영향을 평가하였으며, 유역 내 정확한 토지이용 구축이 SWAT 모델의 정확성 평가에 얼마나 중요한지 평가하였다. 그 결과 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도의 SWAT 모의 시 수문 및 유사 컴포넌트 정확성 평가 시 유량을 보정한 결과, 결정계수( $R^2$ )는 0.83, 모형의 효율지수(EI)는 0.79, 보정된 매개변수를 적용하여 검증한 결과 결정계수( $R^2$ )는 0.86, 모형의 효율지수(EI)는 0.85로 나타났다. 유사의 경우 결정계수( $R^2$ )는 0.84, 모형의 효율지수(EI)는 0.79, 보정된 매개변수를 적용하여 검증한 결과 결정계수( $R^2$ )는 0.87, 모형의 효율지수(EI)는 0.86로 나타났다. 이는 환경부 토지피복도를 사용하여 허성구 등(2007)의 도암댐 유역의 객토 속성을 고려한 수문 및 토양유실·유사 컴포넌트 정확성보다 모델의 정확성이 향상한 결과이다. 또한 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도 SWAT 소유역 별 HRU 생성 개수는 환경부 토지피복도를 이용한 SWAT 소유역 HRU 생성 개수보다 약 70.2% 증가하였다. 그 중 소유역 13번의 경우 약 139.3%로 가장 많이 차이가 나는 소유역으로 나타났다. 즉 환경부 토지피복도를 사용하였을 경우에 비해 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 사용하였을 경우 HRU가 보다 자세히 분석되어 실제 소유역의 토지이용과 토양의 상태에 따른 유출해석을 최대한 반영하였다. 이를 바탕으로 환경부 토지피복도를 사용하였을 경우 SWAT 모의 연 평균 토양유실량이 약 61.8 ton/ha/year이며, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 사용한 SWAT 모의 연 평균 토양유실량이 약 36.2 ton/ha/year로 약 70.7% 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 소유역 2번의 경우 환경부 토지피복도를 사용한 SWAT 연 평균 토양유실량이 약 165.9 ton/ha/year이며, 지적도기반 영상을 참고하여 구축한 토지피복도를 사용한 SWAT 연 평균 토양유실량이 약 25.6 ton/ha/year로 약 548.0% 차이가 발생하는 소유역으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 결과는 환경부 토지피복도가 실제 도암댐 유역 내 토지이용 현황을 최대한 반영하지 못한 결과할 수 있다. 탁수저감 방안 및 대책 수립 시 유사발생 지역에 대한 최적 관리 방안 수립 시 현 유역 내 정확한 토지이용 현황 파악 및 구축을 하지 않고 기존 환경부 토지피복도를 이용

하여 SWAT 모델 적용 시 모의 결과 값이 과대평가될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-2-D01022).

## 참고문헌

- 강원도(2005). *고령지 발 흙탕물저감 중장기 프로젝트 보고서*. 국가수자원관리종합정보시스템(2007). <http://www.wamis.go.kr>.
- 김민경, 최윤경, 김복진, 임준명, 정종배(2001). 소규모 농업 유역에서의 질소와 인의 하천 부하에 대한 AGNPS 모형의 적용. *한국환경농학회지*, 20(3), pp. 192-200.
- 김봉석, 전지홍, 이병국(2006). HSPF 모델을 이용한 도암댐 상류부 비점오염물질 예측. *공동춘계 학술발표회논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 367-372.
- 농촌진흥청 농업과학기술원(2000). <http://www.niast.go.kr>.
- 물환경정보시스템(2006). <http://water.nier.go.kr/weis>.
- 박경철, 안규홍, 염익태, 강선홍(2000). 팔당호의 영양염류 예측을 위한 수질관리모형의 비교. *학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp. 174-180.
- 박윤식, 김종건, 김남원, 박준호, 장원석, 최중대, 임경재(2008). VFSMOD-W 모형을 이용한 SWAT 모형의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(4), pp. 473-479.
- 박정규(2007). 금강유역의 장기유출해석을 위한 SWAT 모형 적용. *환경관리학회지*, 13(1), pp. 41-48.
- 서동일, 김종성, 유경미(2006). 토지피복지도를 이용한 비점 오염물질 부하량 산정을 위한 SWAT 모형의 적용. *춘계 학술연구발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 423-428.
- 신용철, 임경재, 김기성, 최중대(2007). SWAT 모형을 이용한 시·공간적 토지이용변화에 따른 유량 및 유사량 특성분석. *한국관개배수학회지*, 14(1), pp. 66-73.
- 임경재, 허성구, 박윤식, 김종건, 박준호, 최대현, 강현우(2007). SWAT ArcView GIS Extension Patch개발, 강원대학교 농업공학부 GIS 환경 시스템 연구실, No.0708, <http://www.EnvSys.co.kr/~swat>.
- 전만식, 김법철(2005). 고령지 농경지로부터의 비점오염물질 유출특성 및 저감방안. 강원대농업과학연구소 발표자료.
- 한건연, 박경옥, 정제호, 김동일(2006). SWAT를 이용한 댐 유역의 비점오염 분석. *공동춘계 학술발표회논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 656-663.
- 한국수력원자력(주) (2006). <http://www.khnp.co.kr>.
- 허성구, 김기성, 안재훈, 임경재, 최중대(2006). 소유역 구분이 SWAT 예측치에 미치는 영향 평가. *한국관개배수학회지*, 13(2), pp. 55-62.
- 허성구, 김남원, 박윤식, 김종건, 김성준, 안재훈, 김기성, 임경재(2008). SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(2), pp. 147-155.
- 허성구, 김재영, 유동선, 김기성, 안재훈, 윤정숙, 임경재(2007). 객토 농경지의 토양특성을 고려한 도암댐 유역에서의 수문 및 유사 거동 모의. *한국농공학회지*, 49(2),

- pp. 49-60.
- 환경부(2007). 환경지리정보서비스. <http://egis.me.go.kr/egis>.
- Arnold, J. G. and Allen, P. M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water Recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, **35**(2), pp. 411-424.
- Arnold, J. G. and Srinivasan, R. (1994). Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS. *Water Resources Bulletin. American Water Resources Association*, **30**(3), pp. 453-462.
- Arnold, J., Williams, A., Srinivasan, R., King, B., and Griggs, A. (1995). SWAT, Soil and water assessment tool. Temple, TX76502. ARS, USDA.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models Part I -Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290.
- Santhi, C. J., Arnold, J. G., Williams, W. A., Srinivisan, R., and Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, **37**(5), pp. 1169-1188.
- Spruill, C. A., Workman, S. R., and Taraba, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from a small watershed using the SWAT model. *Transactions of the ASAE*, **43**(6), pp. 1431-1439.