

소유역구분이 SWAT 예측치에 미치는 영향 평가

Effects of Subwatershed Delineation on SWAT Estimation

허 성 구* 김 기 성** 안 재 훈***
Heo, Sung-Gu · Kim, Ki-Sung · Ahn, Jae-Hun

임 경 재**** 최 중 대*****
Lim, Kyoung Jae · Choi, Joong Dae

Abstract

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model has been widely used in hydrology and sediment simulation worldwide. In most cases, the SWAT model is first calibrated with adjustments in model parameters, and then the validation is performed. However, very little study regarding the effects on SWAT estimation of subwatershed delineation was performed. Thus, the SWAT model was applied to the Doam-dam watershed with various threshold values in subwatershed delineation in this study to examine the effects of the number of subwatershed delineated on SWAT estimation. It was found the flow effect of subwatershed delineation is negligible. However there were huge variations in SWAT estimated sediment, T-N, and T-P values with the use of various threshold value in watershed delineation. Sometimes these variations due to watershed delineation are beyond the effects of parameter adjustment in model calibration and validation. The SWAT is a semi-distributed modeling system, thus, the subwatershed characteristics are assumed to be the same for all Hydrologic Response Unit (HRU) within that subwatershed. This assumption leads to variations in the SWAT estimated sediment and nutrient output values. Therefore, it is strongly recommended the SWAT users need to use the HRU specific slope length and slope value in model runs, instead of using the slope and the corresponding slope length of the subwatershed to exclude the effects of the number of subwatershed delineated on the SWAT estimation.

* 강원대학교 농업생명과학대학 (pure0016@nate.com)

** 강원대학교 농업생명과학대학 (kskim@kangwon.ac.kr)

*** 농촌진흥청 고령지 농업연구소 (jh6590@rda.go.kr)

**** 강원대학교 농업생명과학대학교수 (kjlim@kangwon.ac.kr)

***** 강원대학교 농업생명과학대학교수 (jdchoi@kangwon.ac.kr)

키워드 : SWAT, HRU, 수질, 유출량, 유사량

I. 서 론

강원도는 농경지의 48%가 400m 이상의 고랭지에서 밭농사가 이루어지고 있으며, 우리나라 고랭지 면적의 90% 이상이 강원도에 분포한 전형적인 산지 고랭지지역이다(조, 1999). 고랭지 농업은 특성상 지형적으로 높은 곳에 위치하고 있기 때문에 기상적인 영향을 많이 받는다. 그 중 고랭지 지역의 강수 특성상 여름작물 재배기간인 6~9월에 연 강수량의 60% 이상의 강우가 집중하고 있으며, 호우와 태풍의 영향이 크기 때문에 토양유실 발생 가능성과 비료성분의 유실로 지력이 감소되어 생산성이 감소한다. 또한 유실된 토양은 수로에 퇴적되어 수로의 통수능력이 감소되며 이를 준설하기 위하여 막대한 예산이 투입될 뿐만 아니라(최 등, 1999), 각종 비료와 농약 권장 시비량보다 더 많이 살포하기 때문에 강우 발생시 토양유실에 따른 수계 유입 시 하천과 호수의 부영양화를 초래하여 하천의 환경적 수(水) 환경의 피해를 야기 시킨다. 또한 유실 발생시 농경지의 황폐화에 의한 원 지반에서의 작물 생산성 저하 및 영농 작업 수행의 어려움이 발생한다. 이와 같이 우리나라에서는 현재 토양유실 발생시 여러 환경적인 문제에도 불구하고, 토양유실에 따른 환경 피해에 관한 정확성 평가 및 대책이 수립되어 있지 않는 실정에 놓여 있다. 그 중 현재 강원도 고랭지 지역에 환경 현안으로 대두되고 있는 도암댐 유역은 고랭지 부근에 위치하여 남한강 최상류인 송천에 댐을 막아 이루어진 도암댐이 건설됨으로써 강릉 남대천의 수계 및 서울의 상원인 한강 상류에 위치했다는 점에서 고랭지 지역에서의 토양유실에 따른 수(水) 환경에 미치는 심각성은 더욱 크다고 할 수 있다(허 등, 2005). 수 환경에 직접적인 영향을 미치는 오염원으로 고랭지 농경지에서의 소득 작물에 대한 연작피해 경감, 작물의 생산성 향상과

농민들의 소득 증대와 연관되어 무분별 하게 원 지반에 농약 및 비료를 살포하고 있어 토양유실 발생시 유사가 발생하여 이에 따라 하류지역 즉 도암댐 수계내 탁수 및 수질악화 문제가 심각하게 발생할 수 있다(허 등, 2006). 이러한 수(水) 환경 문제를 해결하고 방안을 제시하기 위하여 토양유실의 물리적 현상과 토양유실에 영향을 미치는 제반 인자의 특성을 구명하고자 하는 연구의 이론적 방법과 여러 가지 모델링 기법이 도입되었다. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) 모형은 많은 현장 실험 자료를 분석하여 USDA의 Wischmeier와 Smith가 개발한 USLE를 개정한 공식으로 유역의 토양 유실량을 추정하는데 널리 사용되고 있다(최 등, 1999). 농업 비점원 오염에 의한 수문 순환을 고려한 모델로 공간적인 변이에 따른 모의 방법 중 분포형 모델에는 ANSWERS, AGNPS, SWRRB, SWAT, HSPF 등이 있다. 이러한 비점오염원의 모델들은 지형, 지질, 기후 및 토양 특성, 수문학적 특성, 그리고 영농형태 및 토지 이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 수용하고 있어, 오염물질의 이동 기작 등을 예측을 할 수 있다(김 등, 2005). 그 중 대표적인 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형은 비점원 오염을 추정하기 위해 개발된 유역단위 모델로서(Arnold et al., 1993), 분포형 매개변수 모델이다. 이 모델은 일, 월, 년 단위의 모의가 가능하며, 유역내 유량, 유량, 유사농도, 영양물질의 발생과 이동 등을 모의 할 수 있다(허 등, 2005). 일반적으로 분포형 모델에서는 유역을 공간적으로 작은 계산 단위로 분할하고, 각 단위에 대해 모델의 이론식을 전개하여 수행하게 된다. 이 계산단위는 일반적으로 입력 자료의 공간적인 해상도 보다 크기 때문에 어느 정도 수준까지의 취합을 내포하게 된다. SWAT에서도 사용자가 실제 소유역을

토지이용과 토양의 상태에 따라 유출해석을 위한 기본 단위인 (Hydrological Response Unit: HRU)을 정하여 소유역의 복합적인 특성을 반영할 수 있는 구조를 가지고 있으며, HRU라는 계산 단위를 통하여 모형 입력 매개변수를 생성하고, 모의를 수행한다.

유역내 유출량, 유사량, 영양염류의 거동 등을 모의하기 위하여 SWAT 모형을 이용한 많은 연구자들은 모형의 정확성 평가를 하기 위하여 모델 변수를 변경하여 보정 및 검증작업을 수행한다. 그러나, 유역단위 모형인 SWAT 모형의 보정 및 검증작업 이전에 소유역구분에 대한 명확한 기준 없이 일반적으로 SWAT 모형에서 주어지는 임계값을 이용하여 소유역 구분을 수행한다. 그러나 준분포형 모형이 SWAT의 경우 수계 추출시 임계값에 따라 그모의 결과값이 상당히 많은 영향을 받는다.

따라서 본 연구에서는 SWAT 모형의 거동 특성과 SWAT 모형의 적용시 소유역 분할의 중요성을 제시할 목적으로, 도암댐 유역을 대상으로 SWAT 모형 적용시에 소유역 개수에 따른 연평균 유량, 유사량, T-N, T-P의 변화를 검토하였다.

II. 연구지역 선정 및 분석방법

1. 연구지역 선정

연구 대상지역은 강원도 평창군 도암면에 속하는 도암댐 유역으로 도암호의 집수구역이다. 위치는 동경 128° 37' ~ 128° 47', 북위 38° 35' ~ 38° 47'이다. 송촌 본류의 길이는 약 29.5Km이며 유역면적은 149.2Km²로 도암면 면적(221.6Km²)의 67.3%를 차지하며, 도암면 면적은 평창군 전체 면적 1463.7km²의 15.2%에 해당되며 이 중 농경지와 초지는 각각 8.1%와 4.4%를 차지한다. 반면, 산림이 82.6%를 차지하는 전형적인 산지 고원 지역이다(허, 2005).

Fig. 1은 평창군 도암면의 도암댐 수계를 나타내고 있다. 도암댐 수계는 상대적으로 해발고도가 높은 고산지대로서, 지세, 토질, 기후 등이 고랭지 농업에 적합한 지역에 속한다.

본 연구지역의 연평균 기온은 6.5℃이며, 여름철 월평균 기온이 20℃ 미만으로 매우 서늘하며 12월부터 3월까지 월평균 기온이 0℃ 이하로 낮게 유지되고 있다. 연평균 강수량 1797.95mm로 남한 다우지역 가운데 하나로 꼽히며, 고도가 높고 태백산맥의 분수계에 위치하여 지형성 강우가 많기 때문에 강수량이 많다(Fig. 2). 중부지방의 다른 지역과 마찬가지로 여름철에 많은 강수가 집중되지만 9월 강우량이 비교적 많고 겨울철에 눈이 많이 내린다는 점이 특징이다.

2. SWAT 모형의 적용

가. SWAT모형 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 만들었다(Arnold and

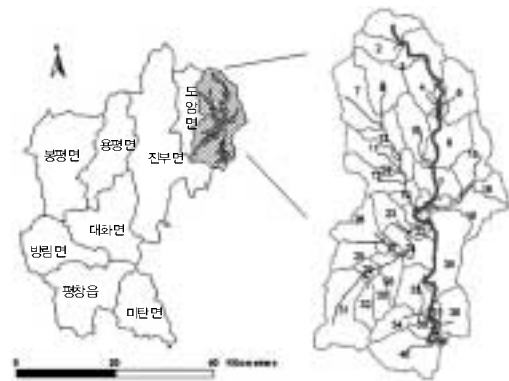


Fig. 1. Study watershed - Doam-dam watershed at Pyoeng-chang, kangwon

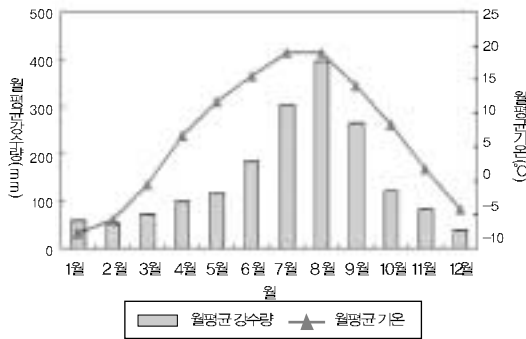


Fig. 2. Monthly precipitation and temperature at Doam-dam watershed

Srinivasan, 1994). 특히 SWAT은 강우-유출모델과 수질모델이 GIS와 연계된 호환모델로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미세측 지역에서는 모의도 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는 특징을 지니고 있다. Fig. 3은

SWAT 모델의 입력 자료와 출력자료를 보여준다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료 (일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와, 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 SWAT 모델은 유역에서의 토지이용에 따라 발생하는 비점오염원과, 유역내 소하천별, 소유역별, 그리고 소유역내 수문학적 반응단위별 유출량, 토양유실을 모의한다(허, 2006).

나. SWAT 모형의 입력자료

1) 기상자료

SWAT 모형의 운영에 필요한 기상자료는 일 강우(Precipitation), 일 풍속(Wind Speed), 일 일조량

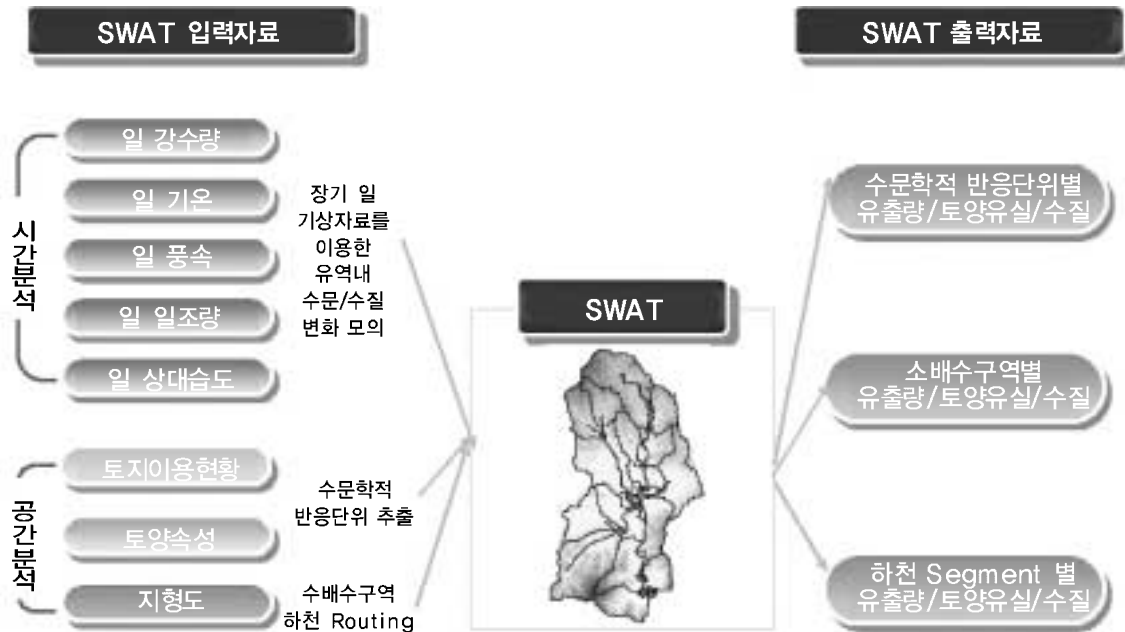


Fig. 3. Overview of the SWAT - Model input/output (허, 2006)

(Solar radiation), 일 최고온도(Max Temperature) · 일 최저온도(Min Temperature), 일 습도(Humidity) 이다. 1974~2005년까지 측정된 일누계강우와 풍속, 일조량, 온도, 습도는 대관령지역에서의 기상데이터를 사용하였다.

2) 토지이용도

도암댐 수계내 토지이용현황은 환경부에서 발행한 20005년의 자료로 1/25,000의 대분류 수치토지피복도 자료를 이용하였다. 도암댐 수계내에는 산림이 약 72.1%를 차지하며, 농업지역이 16.1%, 수역이 0.5%, 시가지화 0.2%, 휴경지 5.0%, 초지가 6.0% 각각 차지하고 있다(Fig 4).

3) 토양도

도암댐 수계내 토양속성은 농업과학기술원의 정밀토양도(1:25,000)를 사용하였으며, 대관령 지역은 주로 갈색산림토가 가장 많은 부분을 차지하며 비옥한 퇴적토는 적은 편이다.

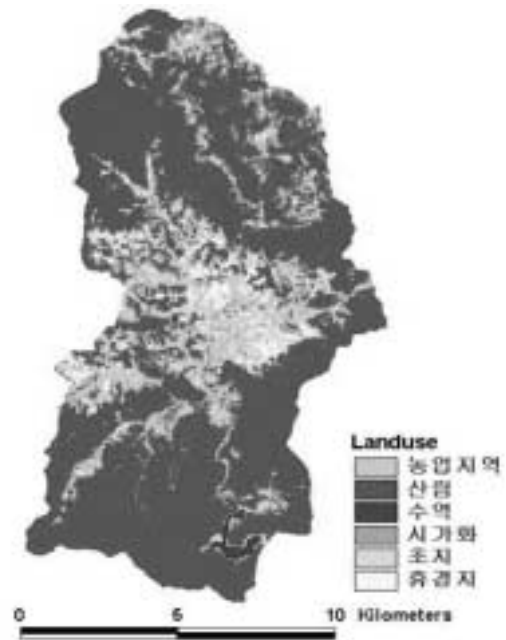


Fig. 4. Land use at Doam-dam watershed

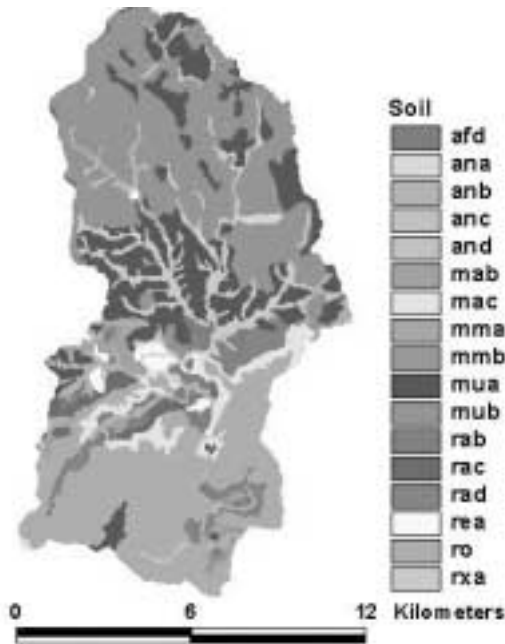


Fig. 5. Soil map at Doam-dam watershed

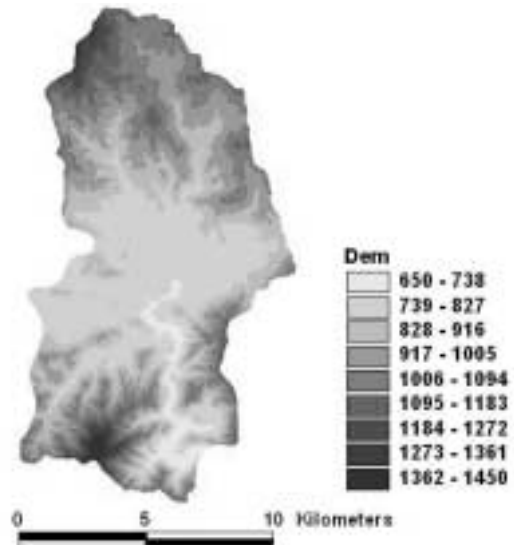


Fig. 6. Digital elevation model (DEM) at Doam-dam watershed

토성별로 보면 양토가 62%로 가장 많고 다음이 미사질양토로 17%를 차지한다(Fig. 5, 농촌진흥청, 2000).

4) DEM (Digital Elevation Model)

도암댐 수계내의 물의 흐름과 소유역을 구분하기 위하여 Arcview GIS 프로그램을 이용하여 1:5,000 수치지도내 고도값만을 분리한 후, Triangulated Irregular Network (TIN)을 형성하고, 격자(Cell)크기 결정에 있어 모의 시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 격자 크기는 5m × 5m로 하여 DEM을 구축하였다(Fig. 6).

3. SWAT 모형의 소유역 구분 및 HRU생성

SWAT 모형은 유역내 수문 및 유사, 그리고 영양물질의 거동을 모의하기 위하여 유역을 여러개의 소유역을 구분한다. SWAT 모형은 소유

역내 토지이용이나 토양의 상이성에 따른 수문 현상을 모의하기 위하여 수문학적 반응단위를 결정한다 (Neitsch 등, 2001). SWAT 모형에서는 이러한 소유역 구분을 위해 Neighborhood Technique(Srinivasan and Engel, 1991)을 이용하여 월류 경사를 추정하여 구분하고 있다. 즉 대상유역에 대한 소유역은 DEM 분석으로부터, 하천망 생성을 위한 임계값을 조정하여 자동 분할된다. 이 임계값은 하천 시점을 형성하기 위한 최소한의 배수면적을 의미하는 것으로서, 이 값에 따라 생성되는 하천망의 밀도가 좌우되며 이에 따라 Neighborhood Technique에 의해 소유역 분할 및 소유역 수가 결정된다(김 등, 2005). Fig. 7은 SWAT 모형은 사용자가 실제 소유역을 토지이용과 토양의 상태에 따라 유출 해석을 위한 기본 단위인 (Hydrological Response Unit: HRU)을 정하여 소유역의 복합적인 특성을 반영할 수 있는 구조를 가지고 있다

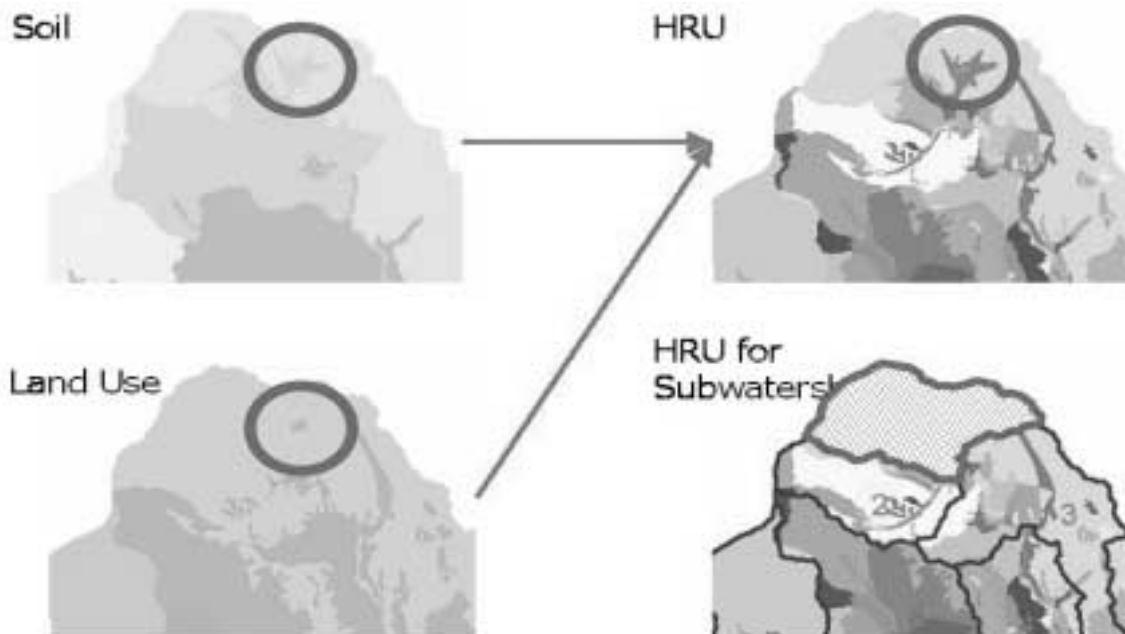


Fig. 7. Hydrological response Unit (HRU) in SWAT

Table 1. Details of SWAT simulation at the Doam-dam watershed to investigate the effects on SWAT estimation of subwatershed delineation

Doam-dam watershed		
Simulation period	1974~2004	
Simulated item	Yearly Flow (cms), Yearly Sediment (ton), T-N (mg/l), T-P (mg/l)	
Threshold Value (ha)	No. of Subwatershed Delineated	Stream Length (km)
700	13	42.59
500	19	48.63
300	31	61.41
200	41	78.58
100	77	111.33
75	101	127.11

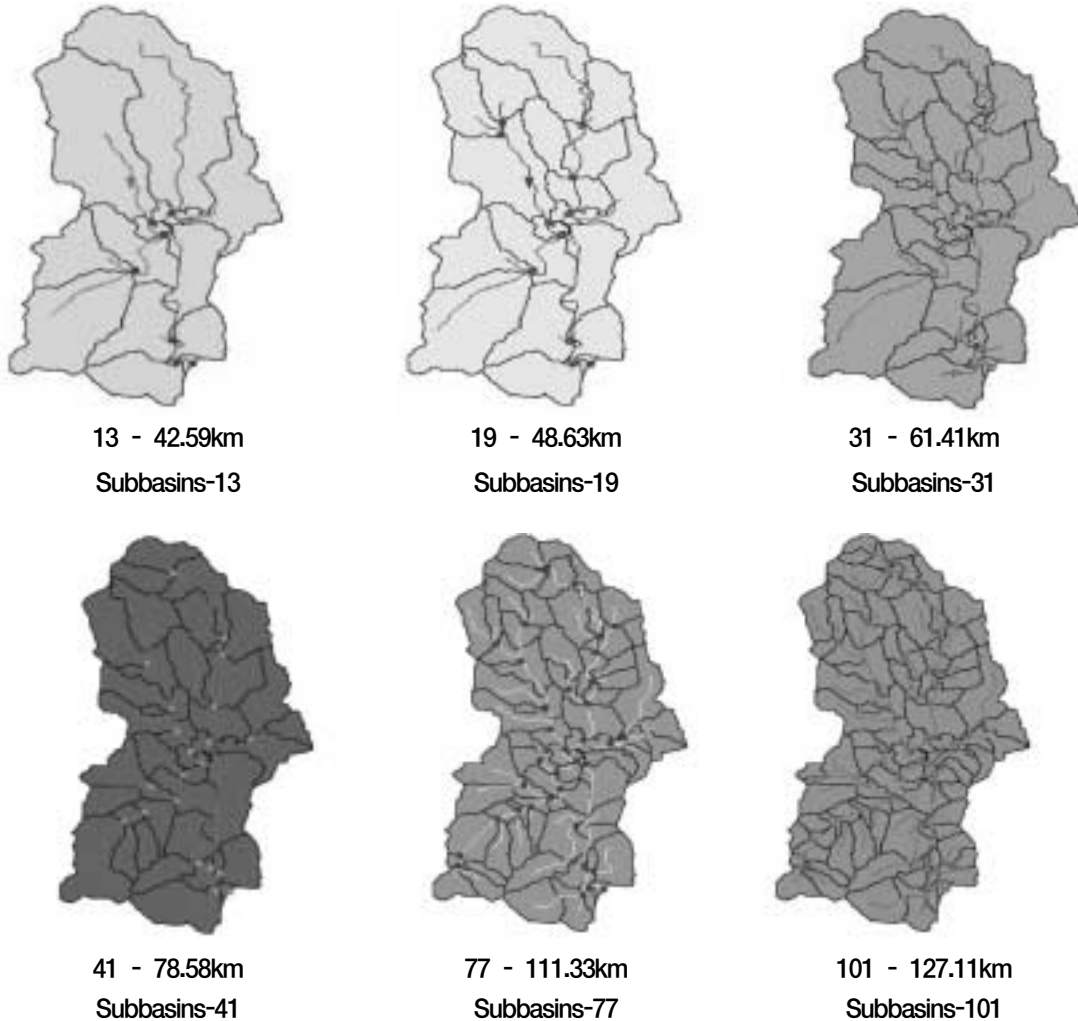


Fig. 8. Subwatershed delineation at the Doam-dam watershed with various threshold value

(권 등, 1998). 또한 각 소유역내 동일한 토지 이용과 토양특성의 조합으로 구성되며, SWAT 모형에서는 HRU 분포를 결정하는데 있어서 각 소유역별 지배적인 토지이용과 토양특성에 의해 결정되는 하나의 대표 HRU를 설정할 수도 있고, 각 토지이용과 토양특성의 비율을 지정하여 각 소유역별 HRU 수와 종류를 조절할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Watershed-Scale 모형인 SWAT 모형을 도암댐 유역의 소유역 분할 시 수자원 단위지도 상의 하천망을 표현할 수 있는 최적의 Threshold 값을 시행착오법을 적용하여 하천 생성을 위한 최소배수면적(임계면적)을 변화시켜가며 소유역 수에 따른 연 평균 유량 및 유사량, T-N, T-P의 변화를 검토하였고, 그림 8은 도암댐 유역의 소유역 수에 따른 소배수 구역 분할을 나타낸 것이다. 또한 과정 중 토지 이용과 토양특성 면적비율은 모두 0%로 설정하여 HRU 생성시 모든 공간적인 특성을 고려하였다. 위의 방법에 대해 적용된 도암댐 유역에 대한 모의기간 및 모의방법 설정에 대한 사항은 아래의 Table 1과 같다.

4. SWAT 모형의 정확성 평가

도암댐 유역에서의 소유역 수에 따른 유출과,

유사의 변화를 검토하기 위해 하천 생성을 위한 최소배수면적(임계면적)을 변화시켜가며, 그에 따른 변화량을 평가하기 위해서 SWAT 모형의 정확성이 먼저 평가되어야 한다. 허 등 (2005)은 SWAT 모형의 도암댐 유역 적용성을 평가하기 위하여 SWAT 모형을 도암댐 유역에 적용한 후 실측 유량 (한국수력원자력, <http://www.khnp.co.kr>)과 실측유사량 (물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr/weis>) 자료와 비교 분석하였다. 허 등 (2005)의 연구에 의하면 SWAT 모형은 도암댐 수계내 수문 (EI = 0.77 Calibration, EI = 0.66 Validation) 및 유사 (R2 = 0.60, EI = 0.41)를 잘 모의하는 것으로 분석되었다(Fig. 9). 따라서 본 연구에서는 허 등 (2005)에 의해 보정된 모델 변수를 이용하여 도암댐 수계내 유량 및 유사량 모의에 상당히 적합한 것으로 판단되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 소유역 수에 따른 유량 및 유사 비교

Fig. 10은 SWAT 모형 1974년부터 2004년까지의 하천망 생성을 통한 최소배수면적(임계면적)변화를 통해 소유역 수를 변화시켰으며,

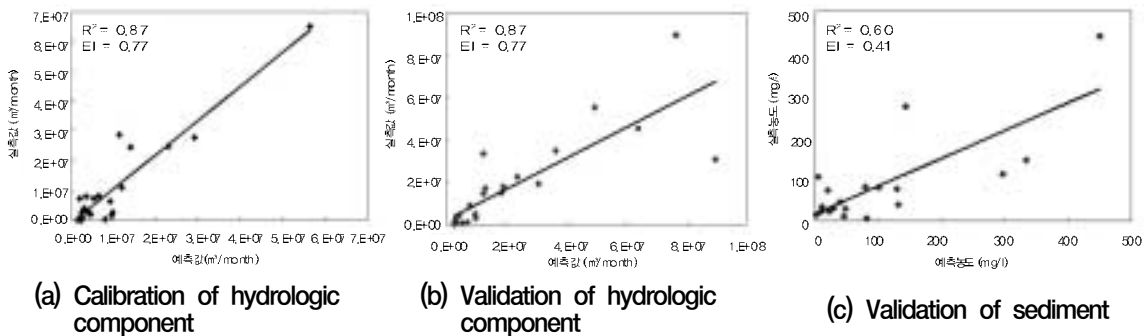


Fig. 9. Assesment of SWAT accuracy in predicting hydrologic and sediment component at the Doam-dam watershed (허 등, 2005)

이에 따른 연평균 유량을 나타낸 것이다. 임계면적의 변화에도 도암댐 유역의 소유역 수에 따른 약간의 유량 차이는 있지만, 연평균 6.5 m³/s 로 소유역 수 증가에 따라 유출모의가 안정적으로 나타나고 있다.

Fig 11은 임계면적 변화를 통해 소유역 수 변화를 통한 유사량 변화를 나타낸 것으로 Fig 10과 같이 소유역 수에 따른 유량이 비슷한 경향을 보이고 있는 반면에 유사량의 차이가 있다. 임계면적 700ha를 주었을 경우에 소유역 수 13개가 연평균 유사량 1,666,839 ton으로 가장 많이 분석 되었다. 임계면적 100ha를 주었을 경우 소유역 수 77개가 1,328,316 ton으로 가장 적게 분석 되었다. (허 등, 2006)은 임계면적을 200ha로 적용하였을 경우에 유역내의 하천을 최적으로 표현하였으며, 도암댐 유역 분류와 대표적인 큰 지류의 하천의 합류점을 출구지점으로 소유역 분할을 실시한 총 41개의 소유역으로 분할 산정한 값이 유사량 1,440,126 ton으로 나타났다.

2. 소유역 수에 따른 T-N 및 T-P 비교

Fig 12는 임계면적 변화를 통해 소유역 수 변화를 통한 T-N 변화를 나타낸 것으로, 본 도암댐 유역의 T-N 항목은 Organic Nitrogen(Org-N), NO₃, NH₄, NO₂,을 사용하였다. 임계면적 100ha를 주었을 경우에 소유역 수 77가 연 평균 농도 2,670,194 mg/l로 가장 많이 분석 되었다. 임계면적 75ha를 주었을 경우 소유역 수 101개가 916,584 mg/l로 가장 적게 분석 되었다. 최적 임계면적인 200ha인 소유역 수 41개는 1,546,813 mg/l로 분석 되었다.

Fig. 13은 임계면적 변화를 통해 소유역 수 변화를 통한 T-P 변화를 나타낸 것으로, 본 도암댐 유역의 T-P 항목은 Organic Phosphorus(Org-P), Mineral Phosphorus(MINP)를 사용하였다. 임계면적 100ha를 주었을 경우에 소유역 수 77가 연 평균 농도 1,588,397 mg/l로 가장 많이 분석 되었다. 임계면적 700ha를 주었을 경우 소유역 수 13개가 203,573 mg/l로 가

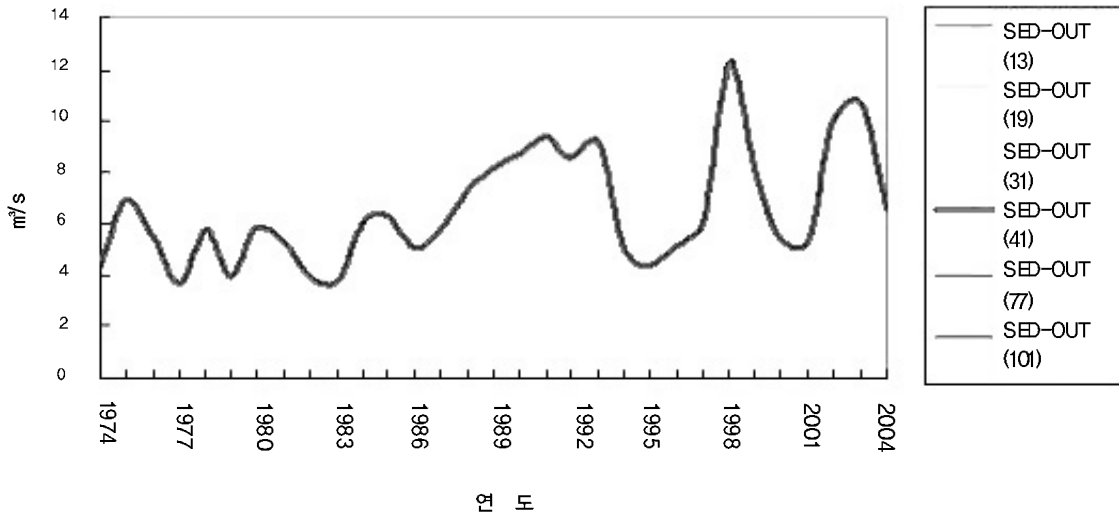


Fig. 10. Annual average flow with various threshold value for subwatershed delineation at the Doam-dam watershed

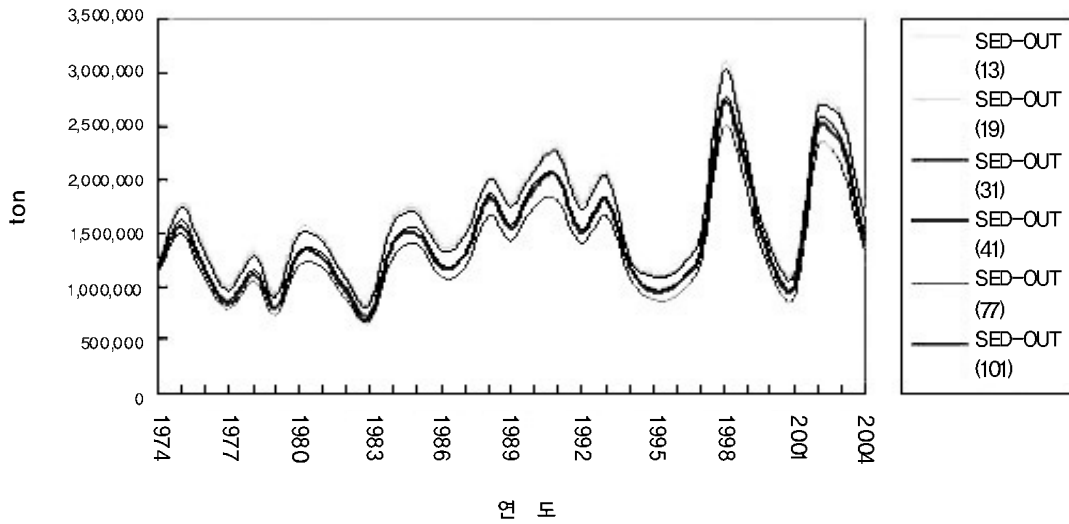


Fig. 11. Annual average sediment with various threshold value for subwatershed delineation at the Doam-dam watershed

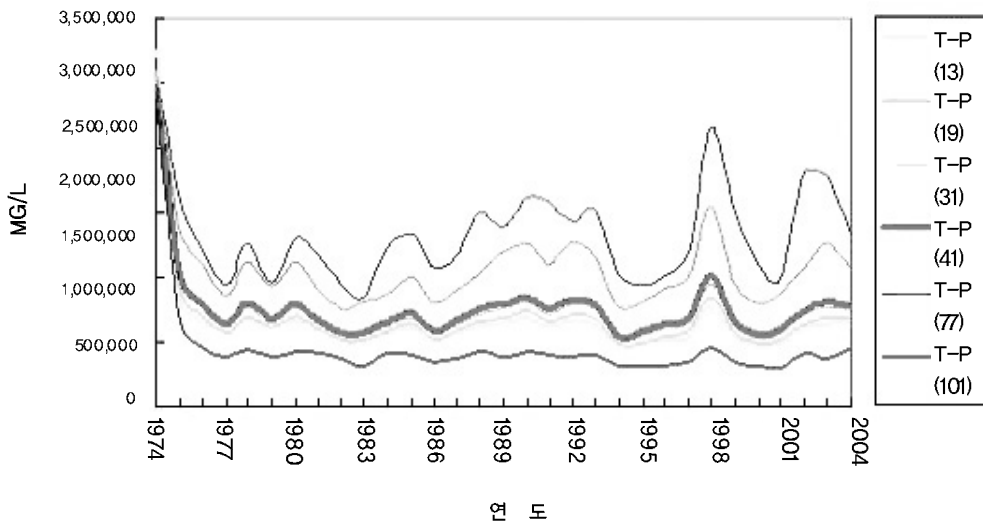


Fig. 12. Annual average T-N loads with various threshold value for subwatershed delineation at the Doam-dam watershed

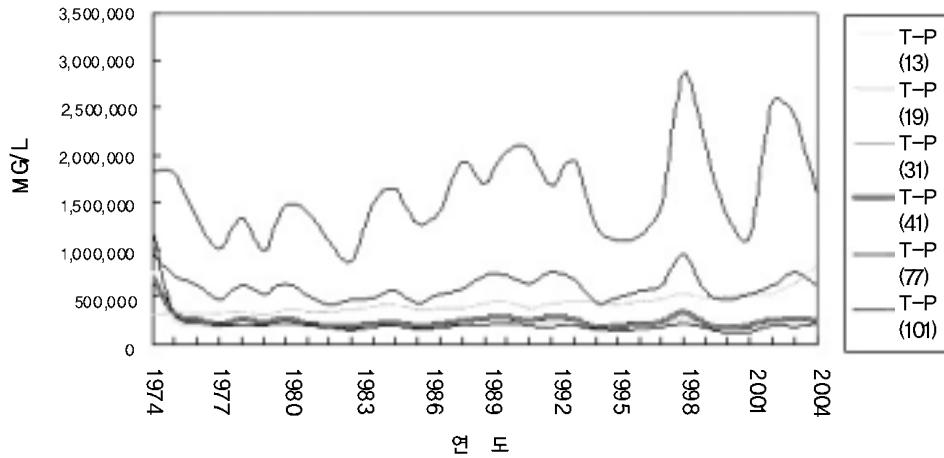


Fig. 13. Annual average T-P loads with various threshold value for subwatershed delineation at the Doam-dam watershed

장 적게 분석 되었다. 최적 임계면적인 200ha인 소유역 수 41개는 253,318 mg/l로 분석 되었다.

IV. 요약 및 결론

분포형 모델인 SWAT을 이용하여 유역내 유출 및 유사, T-N, T-P를 모의하는데 있어서 소유역 분할에 따른 소유역의 크기나 수는 유역 모형화 과정과 그 결과 값에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 SWAT 모형의 거동 특성과 유역별 적정한 수준의 소유역 분할에 대한 기준을 제시 할 목적으로 도암댐 유역을 대상으로, 각 유역별 소유역 수에 따른 연평균 유량, 유사량, T-N, T-P를 검토 하였다. 임계면적의 변화와 소유역 수의 변화에 따른 연평균 유량은 $6.5 \text{ m}^3/\text{S}$ 로 소유역 수 증가에 따라 유출모의가 안정적으로 나타나고 있다. 연 평균 유사량은 임계면적 700 ha를 주었을 경우 소유역 수 13개가 연평균 유사량이 1,666,839 ton으로 가장 많이 분석 되었고, 임계면적 100 ha를 주었을

경우 소유역 수 77개가 1,328,316 ton으로 가장 적게 분석 되었다. T-N의 변화는 임계면적 100 ha를 주었을 경우 소유역 수 77개가 연 평균 농도 2,670,184 mg/l로 가장 많이 분석 되었고, 임계면적 75 ha를 주었을 경우 소유역 수 101개가 916,584 mg/l로 가장 적게 분석 되었다. T-P의 변화는 임계면적 100 ha를 주었을 경우에 소유역 수 77가 연 평균 농도 1,588,397 mg/l로 가장 많이 분석 되었다. 임계면적 700 ha를 주었을 경우 소유역 수 13개가 203,573 mg/l로 가장 적게 분석 되었다.

본 연구의 결과를 종합적으로 정리해보면, SWAT 모의시 소유역분할이 SWAT 모의 유량에는 큰 영향을 주지 않지만, 유사 및 영양물질에 많은 영향을 주는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과를 분석해 본 결과, 준분포형 모형의 단점인 소유역 특성의 HRU 특성으로의 이용 문제를 해결하지 않으면 도암댐 유역에 적합한 적정 소유역 개수를 정의하기에는 상당한 무리가 있을 것으로 판단된다. 이는 SWAT 모형이 준분포형 모형으로서 SWAT 분할 소유역의 경사장 및 경사도

와 같은 유역특성이 HRU의 특성으로 이용되기 때문이다. 따라서 SWAT 모델 사용자가 각 소유역별 HRU의 적정 인자를 직접 입력해야 소유역분할에 따른 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 권명준, 권순국, 1998, SWAT 모형에서의 유출량에 대한 HRU의 영향, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
2. 김철겸, 김남원, 2005, SWAT 모형에서의 소유역 및 HRU 수에 따른 유사량 변화, 한국수자원학회 학술발표회 포스터발표 논문.
3. 김철겸, 김남원, 이정은, 2005, SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 비점오염 모델링, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
4. 농촌진흥청 고령지농업시험장, 2000, 고령지 채소재배기술.
5. 물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr/weis>, Last accessed Nov. 5, 2006.
6. 조병옥, 1999, 고령지 채소재배지의 토양환경 특성과 비육도 관리방안, 강원대학교 박사학위논문, p81.
7. 최종대, 양재의, 박지성, 최병용, 김도환, 최경진, 1999, 농업 소유역의 토양유실량 예측을 위한 RUSLE의 적용, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
8. 허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재, 2005, 고령지 농경지의 토양유실 모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가, 한국농촌계획학회, 11(4): pp.67-75.

9. 한국수력원자력(주), <http://www.khnp.co.kr>, Last accessed Nov. 5, 2006.
10. 허성구, 2006, 도암댐 유역의 산림파편화에 따른 수(水) 환경영향 평가, 강원대학교 석사학위논문.
11. 허성구, 김기성, 김재영, 유동선, 임경재, 윤정숙, 안재훈, 2006, 객토를 고려한 도암댐 유역에서의 수문 및 유사 거동 모의, In Review, 한국농공학회지.
12. Arnold, J. G, P.M. Allen, and G. Bernhardt, 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model J Hydrol, pp.43-69.
13. Arnold, J. G., Srinivasan, R. 1994, "Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS," Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, pp.453-462.
14. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams 2001, Soil and Water Assessment Tool: theoretical documentation, U.S Agricultural Research Service.
15. Srinivasan, R., and B.A. Engel. 1991, A Knowledge based approach to extract input data from Gis, ASAE Paper No. 91-7045, American Society of Agricultural Engineers, Summer Meeting Albuquerque, NW.

본 연구는 농촌진흥청 고령지 농업연구소와 강원대학교 농업과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.