SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 비점오염 모델링

Modeling of sediment and nutrients loadings
from the Soyang Dam upstream watershed with SWAT

김철겸*·김남원·이정은 (한국건설기술연구원)
Kim, Chul-gyum*·Kim, Nam-won·Lee, Jeong-eun

Abstract

In this study, SWAT model was applied to the Soyang Dam upstream watershed in order to evaluate the model applicability for estimating runoff, sediment, and nutrients loadings from the watershed. By trial and error method, the model parameters related with runoff, sediment, nitrogen and phosphorus were calibrated step by step. Then the simulated runoff, sediment, and nutrients loadings by the model were compared with the observed data measured at the Soyang Dam, the outlet of the watershed. And several statistical criteria were calculated to evaluate the model performance. From the comparison and statistical criteria, good agreement between simulated and observed stream flows was found. For sediment and nutrients, it was not reliable to quantitatively model the observed values, but the model could simulate the trend with reasonable accuracy. Hence, it was concluded that the model can be applied for the long-term non-point modeling in a large watershed.

Ⅰ. 서론

비점오염은 1980년 이후 지표수 수질문제의 중요한 요소로 인식되고 있다 (Novotny와 Oelm, 1994). 이 오염원들의 대부분은 자연적, 인위적 원인에 의해 침식되는 유사인데, 여러 토목공사, 농업, 광업, 벌목 등이 자연의 침식을 가속화하고 지표수로의 유사 공급을 증가시키고 있다.

이러한 유사 및 영양물질 등과 같은 비점오염원의 효율적인 관리를 위해서는 지형, 지질, 기후 및 토양특성, 수문학적 특성, 그리고 영농형태 및 토지이용방법 등과 같은 다양한 변화 요인들을 포괄적으로 수용하여 전반적인 관리대책을 세우는 것이 필요하며, 이러한 관리 및 오염물질의 이동 기작 등의 예측을 위한 모델링 기법이 개발되어 많이 활용되고 있다.

본 연구에서 활용하고자 하는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 1990년대 초 미국 농무성 농업연구소 (USDA Agricultural Research Service; ARS)에서 개발한 유역 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지 이용 및 토지관리상태에 따른 물과 유사 및 여러 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하고 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다 (Neitsch 등, 2001).

본 연구에서는 대규모 유역인 소양강댐 상류유역에 대하여 SWAT 모형을 적용하여 유사 및 비점오염 관련 매개변수의 보정을 수행하고, 대상유역에 대한 비점오염 모델링에 대한 적용성을 평가해 보고자 한다.

Ⅱ. SWAT 모형의 개요

2.1 모형의 개요

SWAT은 유역규모의 연속모의모형으로서, 일별 간격으로 물, 유사, 영양물질 부하량의 영향을 평가할 수 있도록 개발되었으며 (Arnold 등, 1998), 물리적 기반하에 기후, 수문, 토양온도, 식생성장, 영양물질, 농약성분, 토지관리 등에 대한 모의기법을 모두 포함하고 있다.

2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)

SWAT에서 유역은 다수의 소유역으로 구분되고 이는 다시 균질한 토지이용, 관리, 토양특성을 갖는 HRU (Hydrologic Response Unit)로 세분된다. 각 HRU에서의 물수지는 눈, 토양층, 얕은 대수층, 깊은 대수층의 4가지 형태로 표현되며, 각 HRU로부터의 유출, 유사, 영양물질, 농약성분에 대한 부하량은 소유역 단위로 합산되고, 이는 다시 하도, 저류지, 저수지 등을 통한 추적 과정을 거쳐 유역 출구까지 이르게 되어 유역 총량으로 계산된다 (Jha 등, 2004).

2.2 SWAT 모형에서의 유사량 산정 방법

SWAT에서는 유역으로부터의 유사량 추정을 위해, MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 식을 적용하여 각 HRU 및 소유역별 토양침식 발생량을 산정한 후, 눈 피복과 지표유출에서의 지체 효과, 측방 및 지하수 흐름에서의 유사 유입 등을 고려하여 하도 추적을 수행하고, 하도 바닥과 폭 확대 등의 모의를 통해 최종적으로 각 출구점에서의 유출 유사량을 산정한다.

SWAT에서 사용하고 있는 MUSLE 식은 다음과 같다 (Williams, 1995).

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

여기서, sed는 주어진 날의 유사량 (tons), Q_{surf}는 지표유출량 (mm/ha), q_{peak}는 첨두유출율 (m^3/sec), $area_{hru}$는 HRU 면적 (ha), K_{USLE}는 토양침식성인자, C_{USLE}는 피복 및 관리인자, P_{USLE}는 토양보전인자, LS_{USLE}는 지형인자, $CFRG$는 조립파편인자이다.

2.3 SWAT 모형에서의 영양물질 순환

HRU 내에서의 질소와 인의 변환 및 이동은 여러 개의 무기질과 유기질 형태로 구성되는 영양물질 순환의 함수로서 모의된다.

SWAT에서의 질소와 인은 식물에 의한 흡수 또는 용해 상태나 유사에 부착되어 지표유출에 의해 토양으로부터 제거될 수 있다. 토양에서 이탈된 질소는 근군역 아래로의 침루나 측방유출의 형태로 손실되기도 하고, 휘발에 의해 대기중으로 환원되기도 한다. 이 때 지표유출을 통해 손실되는 용해성 인의 양은 상부 10 mm 토층의 용해성 인의 농도, 지표유출량, 분배계수 등의 함수로서 결정된다.

또한 유사에 부착된 유기질 질소와 유기질 또는 무기질 인의 이동량은, McElroy 등 (1976)에 의해 처음 유도되어 Williams와 Hann (1978)에 의해 수정된 부하량 함수로부터 계산된다. 따라서, 일별 손실량은 표토층에서의 영양물질 농도, 유사량, 농축율 (enrichment ratio) 등으로 표현되는 부하량 함수로 계산된다.

하천에서의 영양물질의 변환은 모형의 하천내 수질성분에 의해 조절된다. SWAT에서는 QUAL2E (Brown과 Barnwell, 1987) 기법을 이용하여 하천내 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적한다. 유사에 부착된 영양물질이 유사와 함께 하천바닥에 퇴적되는 반면에 용해된 영양물질은 물과 함께 이동된다.

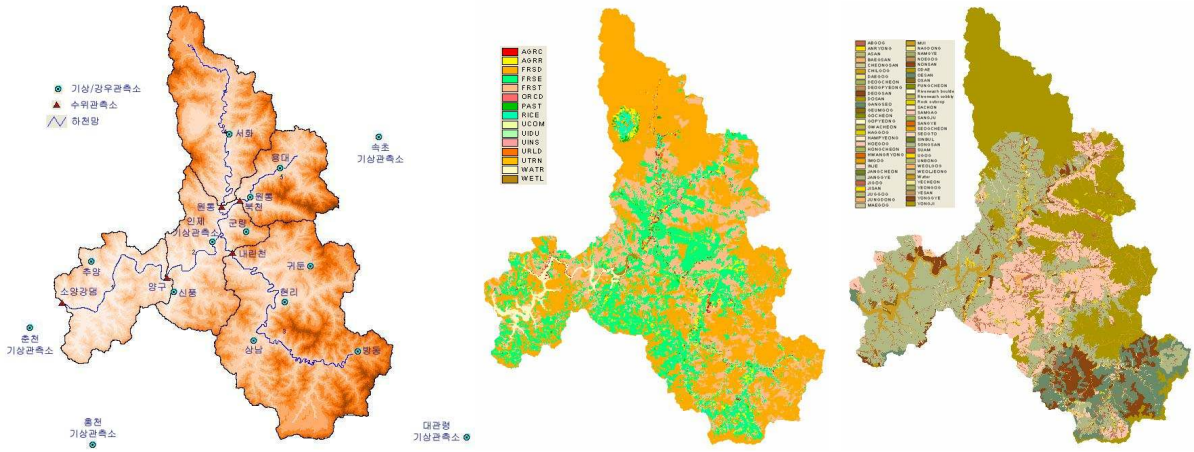
Ⅲ. SWAT 모형의 적용

3.1 대상유역

분석대상지역인 소양강댐 상류유역의 면적은 약 2,695 km^2이며, SWAT 모형 적용을 위해 25개의 소유역으로 구분하였다.

기상청 관할의 5개 관측소 (인제, 춘천, 홍천, 대관령, 속초)에 대한 일기상자료를 수집하고, 환경부의 DEM과 토지피복도, 농업과학기술원의 정밀토양도를 이용하여 모형내 GIS 입력자료를 구축하였다. 그림 1은 대상유역에 대한 유역현황 및 DEM, 토지이용 분류, 토양분포 특성을 나타낸

것이다.



(a) 유역현황 및 DEM (b) 토지이용도 (c) 토양도

그림 1. 대상유역에 대한 SWAT 모형의 GIS 입력자료 구축

3.2 매개변수 보정

비점오염 영양물질인 질소와 인은 앞서 설명한 바와 같이 물 또는 유사와 함께 이동되고, 다시 유사는 물의 이동에 의해 좌우된다. 따라서 모형 보정을 위해 먼저 유출과 관련된 매개변수를 보정하고, 이후 유사 관련 매개변수, 영양물질 관련 매개변수의 순으로 보정하였다. 이때 영양물질에 관련된 매개변수는 유사 및 유출에도 영향을 미칠 수 있으므로, 유출 관련 매개변수의 보정 후, 유사 관련 매개변수를 보정할 때에는 앞선 유출 매개변수를 제외한 유사에 관련된 매개변수에 대해서만 보정을 수행하고, 마찬가지로 영양물질에만 관련된 매개변수만을 이용하여 모형을 보정함으로써 보정 결과가 유사 또는 유출 모의값에 영향을 주지 않도록 하였다.

각 보정단계별 보정 대상 매개변수는 표 1에 제시된 바와 같다.

표 1. 보정단계별 관련 매개변수

보정 항목	관련 매개변수
유출	CN2, ESCO, SLSUBBSN, ALPHA_BF REVAPMN
유사	USLE_C, USLE_P, BIOMIX, CH_COV, CH_EROD, SPCON, SPEXP
N, P	SOL_NO3, FRT_LY1, RSDCO, NPERCO, AI1, SOL_ORGN, SOL_MINP, PPERCO, PHOSKD, AI2, SOL_ORGP

매개변수 보정 방법에는 크게 시행착오법, 최적화기법에 의한 자동보정법, 그리고 이 두 가지를 병행한 방법이 있지만, SWAT과 같이 보정해야 할 매개변수가 많고 복잡한 모형에서는 여전히 시행착오법이 유용하게 적용되고 있다 (Feyen 등, 2000).

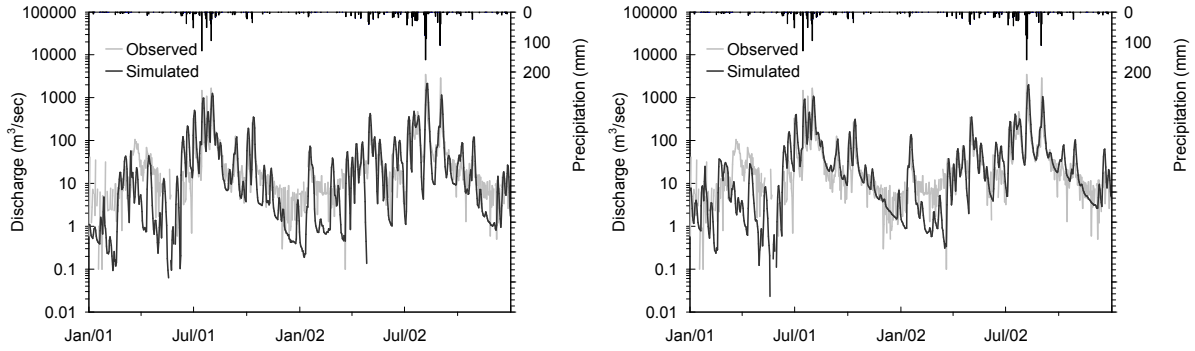
시행착오법에 따라 각 매개변수의 민감도 분석 결과에 의해 단계별 매개변수 값을 변화시켜가며 보정을 수행하였으며, 비교적 자료가 충분하고 양호한 유역 최종 출구점인 소양강댐 지점의 일유출자료 및 유사, 영양물질 부하량에 대해서 관측치와 모의치를 비교하여 보정하였다.

McCuen (2003)이 제시한 분할표본절차에 따라 2001~2004년의 4개년에 대한 유출 및 수질자료를 대상으로, 2001~2002년 자료는 보정에 적용하고, 이후 2003~2004년의 자료에 대해서는 모형 검증에 이용하였다. 또한 모형내 매개변수의 초기화를 위해 1998년부터 모형을 구동하였다.

보정 및 검증 결과에 대한 모형 적용성 평가를 위해 유출과 유사 및 영양물질 부하량에 대해 상대편향 (relative bias; RB), 제곱근평균제곱오차 (root mean square error; RMSE), 평균절대오차 (mean absolute error; MAE), Nash-Sutcliffe 모형 효율 (model efficiency; ME), 결정계수 (coefficient of determination; R^2) 등을 산정하여 검토하였다.

3.3 모형의 보정 및 검증 결과

그림 2는 유출에 대한 모형 보정 전후의 결과를 나타낸 것으로, 홍수기보다는 갈수기에 초점을 맞추어 보정을 수행하였다. 그림에 나타난 바와 같이 일부 갈수 유량에서의 편차가 다소 크게 나타나고 있지만 비교적 그 경향을 따라가고 있으며, 홍수기에는 대체적으로 관측유량 수문곡선을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 보정 결과에 대한 모형효율과 결정계수는 각각 0.2, 0.3으로서 높지는 않았으나, 상대편향 13%, 평균절대오차 51 m^3/sec 정도로 양호하게 나타났다.



(a) 유출 보정 전의 수문곡선 비교 (b) 유출 보정 후의 수문곡선 비교

그림 2. 유출에 대한 모형 보정 전·후 결과 비교

그림 3은 보정된 매개변수를 적용하여 모형 검증기간인 2003~2004년에 대하여 적용한 결과이다. 보정 결과와 마찬가지로 10월에서 3월 사이의 기간을 제외하고는 대체적으로 모의치가 관측치의 경향을 잘 따르는 것으로 나타났으며, 모형효율과 결정계수는 각각 0.4, 0.5 정도이지만, 상대편향은 5% 정도로 보정 결과보다 양호하였다.

그림 4는 각 일별 유량에 대한 관측치와 모의치를 일대일로 비교한 것으로 보정, 검증에 대해서 모두 그 경향을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

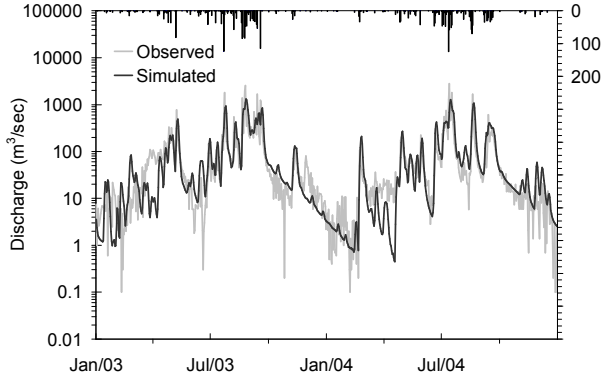


그림 3. 유출에 대한 모형 검증 결과

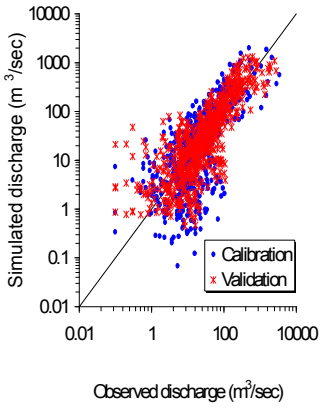


그림 4. 관측유량 및 모의유량 비교

그림 5~8은 유사 및 영양물질에 대한 비점오염 부하량을 보정과 검증기간에 대해서 일대일로 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 낮은 부하량, 즉 갈수기에 관측치와 모의치 사이의 편차가 다소 나타나지만, 비교적 그 경향을 잘 따르고 있고, 홍수기에는 모의 부하량과 관측 부하량이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

유출에서와 마찬가지로 보정보다 검증 결과가 좀더 양호하게 나타났으며, 정량적인 정확성은 떨어지지만 정성적인 경향은 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. 비점오염 부하량은 유출량에 의해 크게 좌우되는데, 분석대상 자료가 충분하지 못하고 또한 수질관측 오차가 매우 큰 것을 고려할 때 모형의 결과는 비교적 만족할 수준으로 판단된다.

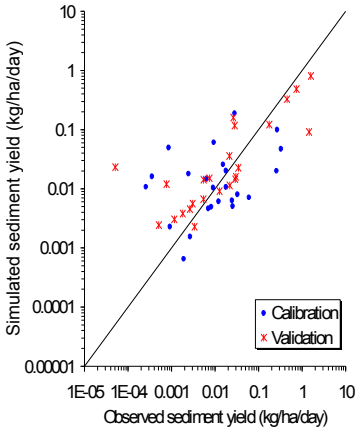


그림 5. 유사량 보정 및 검증 결과

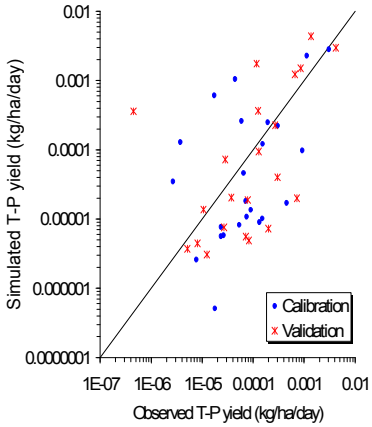


그림 6. 총인 부하량 보정 및 검증 결과

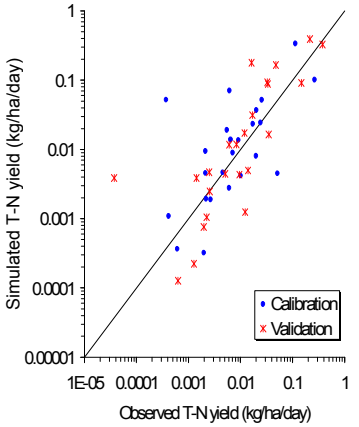


그림 7. 총질소 부하량 보정 및 검증 결과

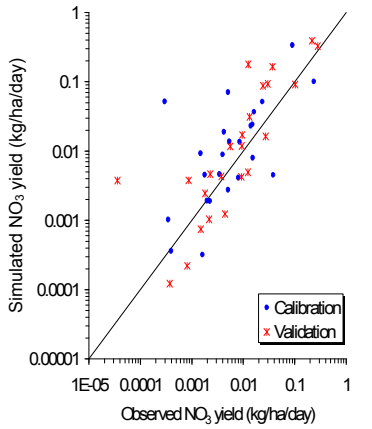


그림 8. 질산염 부하량 보정 및 검증 결과

Ⅳ. 요약 및 결론

SWAT 모형을 소양강댐 상류 유역에 적용하여 대유역에서의 유출, 유사 및 비점오염 관련 매개변수를 보정하고, 대상유역에 대한 비점오염 모델링에 대한 적용성을 평가해 보았다.

시행착오법에 따라 유출, 유사, 비점오염 영양물질 관련 매개변수들을 순차적으로 보정하였으며, 유역 최종 출구점인 소양강댐 지점의 관측 유출 및 수질자료와 비교함으로써 보정 및 검증 결과에 대한 통계치를 산정하여 모형 적용성을 평가하였다.

유출의 경우 갈수기에는 편차가 다소 나타났으나 전체적으로 양호한 모의 결과를 보였으며, 유사 및 수질의 경우 정량적 모의 신뢰성은 떨어지지만 관측치의 정성적인 경향은 잘 모의하고 있

어, 장기적인 측면에서의 활용성은 충분하다고 판단된다. 향후 유출 및 유사, 비점오염 관련 매개변수에 대한 보완과 분석자료를 충분히 확보하여 모의 신뢰성을 높여나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-2-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Arnold, J.G., R. Sirinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams, 1998, Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: Model development, Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 34(1): 73-89.
2. Brown, L.C. and T.O. Barnwell, Jr., 1987, The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual, EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, GA.
3. Feyen, L., R. Vázquez, K. Christiaens, O. Sels, and J. Feyen, 2000, Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment, Hydrology and Earth System Sciences, 4(1): 47-63.
4. Jha, Manoj, P.W. Gassman, S. Secchi, R. Gu, and J. Arnold, 2004, Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions, Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 40(3): 811-825.
5. McCuen, R.H., 2003, Modeling hydrologic change: Statistical methods, Boca Raton, Fla., Lewis Publishers.
6. McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, A. Aleti, and F.W. Bennett, 1976, Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources, Environ. Prot. Tech. Serv., EPA 600/2-76-151, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
7. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams, 2001, Soil and Water Assessment Tool: The theoretical documentation, U.S. Agricultural Research Service.
8. Novotny, V. and H. Olem, 1994, Water quality: Prediction, identification, and management of diffuse pollution, Van. Nostrand Reinhold, New York.
9. Williams, J.R. and R.W. Hann, 1978, Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints, Texas Water Resources Institute, Technical Report No. 96, Texas A&M University, College Station, Texas.
10. Williams, J.R., 1995, Chapter 25: The EPIC model, pp. 909-1000 in V.P. Singh (ed.), "Computer models of watershed hydrology", Water Resources Publications.