

SWAT 모델을 이용한 수변 완충지역에서 비점오염원 저감효율 평가

Evaluating the Trapping Efficiency of Vegetative Buffer Systems on Sediment Reduction Using SWAT model

김익재* , 손경호** , 김정곤***
Ikjae Kim, Kyongho Son, Jeongkon Kim,

요 지

유역에서 상류 유역 또는 수변을 따라 자연 자원을 이용하여 조성되어야 할 완충지대는 비점오염의 영향을 줄이기 위한 중요한 최적 관리공법이다. 교란된 토지 피복과 수변 완충지대를 관리 및 복원할 때 같은 지형조건이라도 식생 종류, 발달정도, 토양조건에 따라 오염물 제거효과가 다를 수 있으며, 최소 완충지대 길이도 제거 오염물질 대상별로 적합하게 설계되고 해석되어야 한다. 본 연구의 목적은 용담댐 유역에서 SWAT 모델을 이용하여 식생 완충지대의 비점오염원 저감 모의 재현성을 평가하는 것이었다. 소유역의 관측값과 모델 예측값에 대한 모델의 검·보정이 선행되었으며 그 중에서 가장 높은 모델 효율을 가지는 소유역에서 three zone concept의 90m 수변완충지대를 지방하천을 경계로 하여 토지 피복도를 변화시켜 SWAT 모델에 적용하였다. 이 때 교목으로는 포플러 (*Populus*, 30m)을 적용하였고, 포플러의 높이 및 Leaf area index를 조정하여 관목 지대(30m)에 입력하였다. 잔디 지대(30m)는 자연초지를 선택하였다. 또한 지형변수(average slope)와 Manning's coefficient을 수변완충지대의 조건에 고려하여 변화를 주었고 이에 따른 유출량 및 유사량, T-N, T-P의 변화율을 조사하였다. 또한 5, 10, 30m의 식생 여과대를 밭 지역에만 적용하여 오염물의 저감 효율을 평가하였다. SWAT 모델은 각 소유역에서 발생된 전반적인 유출량과 수질변수의 추세를 잘 예측하였으며 정자천 소유역이 선택되었다. 모의된 완충지대에서는 연평균 940 m³/ha의 유출량이 감소되는 것으로 유사농도는 28.7 %의 저감효과를 보였다. 그러나 T-N, T-P의 농도는 오히려 증가되었는데 본 연구에서 고려된 보다 수변완충지대를 조성할 때 지하수 수위, 식생 성장변화 등과 같은 보다 정확한 설계 인자 산출 및 모델 DB 개발이 유역모델에 포함되어야 할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 비점오염원, 수변완충지대, SWAT, 식생 및 토양 변수

* 비회원.한국수자원공사 수자원연구원 연구원 공학박사 E-mail : ikjae.kim@gmail.com
** 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 연구원 공학석사 E-mail : kkyong77@hotmail.com
*** 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 공학박사 E-mail : jkkim@kwater.or.kr

1. 서론

비점오염(nonpoint pollution) 관리는 하천 수질 저감대책의 차원에서뿐 아니라 유역의 생태계 보존에도 중요하며 분산오염이라는 특징으로 유사 및 영양염류 유입농도의 변동이 심하다. 또한 토지피복도에 따른 광대한 지역을 지속적인 관리를 해주어야 장기간 대책이 요구된다. 따라서 유역 통합관리 측면에서 기후적, 지형적, 토지형태 등의 유역 특성에 따라 비점오염원을 저감시키는 다양한 최적관리 기법들(best management practices, BMPs)이 개발되어 하천의 목표수질을 달성에 적용되고 있다.

BMPs는 재료의 종류에 따라 크게 구조물을 이용하는 장치형과 자연자원을 이용하는 자연형으로 구분할 수 있다. 자연형 BMPs 중에서도 수변 완충지대 (riparian buffer system, RBS)은 일정한 간격으로 하천을 따라 서식하는 다종의 식생 관리를 통하여 비점오염원을 저감시키는 방법이다. 수변 완충지대의 정의는 기능과 역할에 따라 다르나 three zone concept이 대표적인 예라고 할 수 있다(Welsch, 1991). 일반적으로 수변 완충지대의 구성요소는 크게 경계구역 (field edge)와 식생대 (vegetated zone)로 나눌 수 있으며, 기타 식생수로 (grass waterway)와 저류지(wetland)가 포함될 수 있다. 완충지대의 위쪽으로는 도로 또는 경작지 등이 인접하며 식생대에는 구성요소별로 임상형 수변완충대(forested riparian buffer)와 잔디형 식생여과대(vegetated filter strip)로 세분된다. 본 연구의 목적은 수변 완충지대와 식생여과대의 비점오염물의 제거 효율을 평가하는데 있어서 유역 모델인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모델(Arnold, xxxx)의 적용 가능성 및 개선점을 제시하는 것이다.

2. 연구 방법 및 데이터

대상 지역으로는 용담댐 유역을 유량 및 수질 변수 관측지점을 기준으로 하여 5개의 상류 소유역과 하나의 저수지 소유역으로 분할하였고, SWAT 모델 적용에 필요한 digital elevation models(DEM, 30m), 중분류 토지피복도, 그리고 개략도양도(1:50,000) 등의 지형정보 데이터는 국가 수자원관리 종합정보 시스템과 환경부 지리 정보시스템으로부터 활용하였다. 지형 좌표는 중부 원점을 기준으로 TM(Transverse Mercator)을 이용하였다. 강우 관측지점은 5개지점, 기상 관측값은 대전 기상대 자료를 입력하였다. 현장 측정값과 모델 예측값에 대하여 검보정을 실시하였는데 수질 변수는 비강우시는 spot sampling 및 분석 결과를 이용하였고 강우시 측정된 다수의 sampling은 유량가중치(flow-weighted) 농도로 환산하였다. 모의 총 기간은 2001~2006년까지였으며 첫째 2001년은 warming period으로, 그리고 보정기간은 현장 수질 측정이 실시된 2003~2006년 중에서 2003~2005년으로 계획하였으나 비교 가능한 측정값의 유효 기간에 따라 총 연도 수는 소유별 별로 각각 다르게 분석하였다. 현장 측정값에 대한 모델 검정기간은 2006년으로 통일하였다.

검보정 결과에서 가장 높은 모델 효율을 가지는 소유역을 선정하여 수변완충지대와 식생여과대의 유출량 및 수질저감효과를 분석하였다. 활용된 수변은 지방하천(polygon-shaped)을 기준하여 three zone concept에 가깝게 30, 60, 90m buffering을 ArcInfo (version 9.1)에서 실시하였고 각각 cell zone은 하천으로부터 교목대, 관목대, 그리고 잔디조성대로 선정하였다. 식생의 종류로는 오염 효과 뛰어난 포플러(*Populus*)(구본영, xxxx)를 교목대로 조성하였는데 이는 SWAT 모델에서 식생 모델입력변수를 제공하기에 용이하였다. 그리고 관목대에는 국내 수변환경에서 자라는 식물들(갯버들, 무궁화, 뽕나무 등)에 대한 적합한 모델변수 산정이 없으므로 포플러의 상세 입력 변수인 maximum canopy height, maximum root depth, biomass (BIO_E) 등을 변화시켜 사용하였다. 잔

다 식생대에는 자연초지(Range-Grass)를 적용하였는데 특히 수변완충지대에서 잔디대는 퇴적된 토사 제거 등의 관리대상 구역이므로 상세변수를 최대화하여 입력하였다. 또한 층흐름(sheet flow) 조건이 유지될 수 있도록 경사를 2%로 전환하고, 조밀한 식생성장을 모사할 수 있도록 Manning's coefficient를 교목/관목은 0.40, 잔디는 0.41으로 입력하였다.

SWAT 모델은 식생여과대의 오염물 제거효율을 다음의 식(1)과 같이 계산한다.

$$VFS_{eff} = 0.367(VFS_{width})^{0.2967} \quad (1)$$

여기서, VFS_{eff} 는 제거효율(-), VFS_{width} 는 여과대의 길이(m)이다. SWAT 모델은 대유역(basin)소유역(subbasin)으로 구획한 뒤에 다시 균질한(homogeneous) 최소 물질 이송 영역을 수문반응단위 구역(hydrologic response unit, HRU)으로 분할한다. 그러나 이 방법에는 식생 여과대 등과 같은 특정 관심 지역에 대한 위치, 면적 등으로 인한 영향을 반영하지 않는다. 그 예로 비록 다른 지형 경사를 가지는 식생여과대를 물리적 수문반응으로 프로세싱하지만, SWAT 모델(version 2005)은 동일한 소유역에서는 평균 경사도를 이용하여 오염물 이송을 모의한다는 단점을 가지고 있다. 또한 식(1)에서 알 수 있듯이 여과대의 길이가 29m이면 제거효율은 0.996이고 50m에서는 1.172이므로 현장설계에 적용하기에는 면밀한 평가가 필요할 것이다.

3. 결과 및 결론

3.1 검토정 결과

SWAT 모델의 유출량에 대한 보정 효율(Nash and Sutcliffe, R_{NS})의 범위는 소유별, 연도별로 다르게 나타났고, 최저값 0.350(장계천 소유역, 2004년도)에서 최고값 0.822(정자천 소유역, 2004년도)의 범위였고 검증 기간에는 장계천(0.804), 정자천 소유역(0.768)에서 비슷한 값을 보였다. 따라서 정자천 소유역을 추가 수질 평가 대상 소유역으로 선정하였다. 각 30m로 구성된 완충지의 구성으로 HRU는 109 개에서 124 개로 증가되었는데 이는 소유역에서 수변완충대 조성을 다른 수문 특성단위구역으로 설정하는 것으로 판단된다.

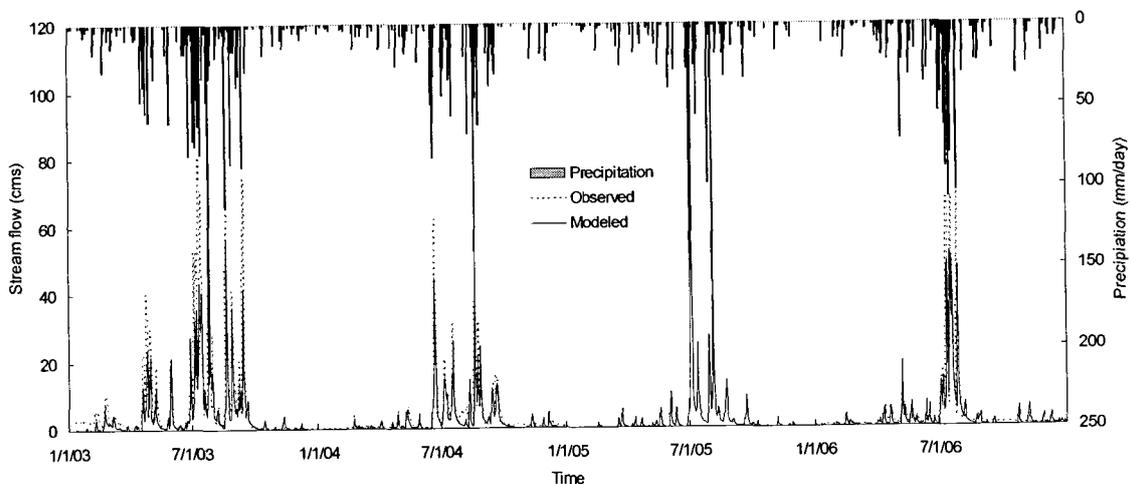


Figure 1 Comparison of observed and modeled stream flow in the calibration and validation period

3.2 수변 완충지대의 제거 효율 평가

유출량에 대한 모델 검·보정기간 동안(2003~2004년, 2006년) 수변 완충지대 조성 전후를 근거해서 연간 평균 유출량은 $940\text{m}^3/\text{ha}$ 의 감소가 있었고 평균 유사농도(suspended sediment)는 28.7%의 저감 효과가 산정되었다. 이 결과는 지형경사의 변화와 식생 성장 및 오염제거 변수를 변화시켜 얻어진 결과로 중요한 의미를 가진다고 사료된다. 반대로 영양염류(T-N, T-P)의 변화는 같은 기간 동안 범위는 큰 변동을 가지지만 모두 증가되는 결과가 도출되었다. 이 이유로는 첫째로 식생 성장에 따른 오염물 흡수에 대한 프로세스를 조사하고, 완충지대 내에서 지하공간에서 영양염류를 저장하고 탈질과 같은 다른 오염물 형태로의 반응에 대한 고려가 필요할 것으로 이해할 수 있다.

3.3 식생 여과대의 제거 효율 평가

식(1)을 이용한 식생 여과대의 전후 평가는 다음과 같다. 이전에 기술한 바, SWAT 모형은 식생 여과대에 대한 유출량 저감은 산출하지 않으므로 각 시나리오에 따른 유출량 변화는 발견되지 않았다. SS는 연 평균 33.2(5m), 40.8(10m), 56.1(30m)의 저감 효율을 보였고 5월에 가장 큰 저감 효율을 나타내었다. 그러나 영양염류의 제거 효율은 T-N은 0.26, 1.40, 6.07%, T-P는 3.21, 3.84, 4.94%로 T-P의 저장 또는 제거 효율은 상대적으로 컸지만 SS와 비교할 때 매우 낮게 예측되었다.

결론적으로 유역 모델인 SWAT 모형을 수변완충지나 식생 여과대와 같이 field-scale의 프로세스를 모사하는데 있어서 경험식을 이용한 예측은 식생여과대의 오염물 차단 능력을 제거 효율이 기존 문헌보고와 같이 높은 것으로 예측하지만, 토지피복도의 낮은 면적 변화로부터 영향을 평가하기에는 개선되어야 할 것으로 판단된다.

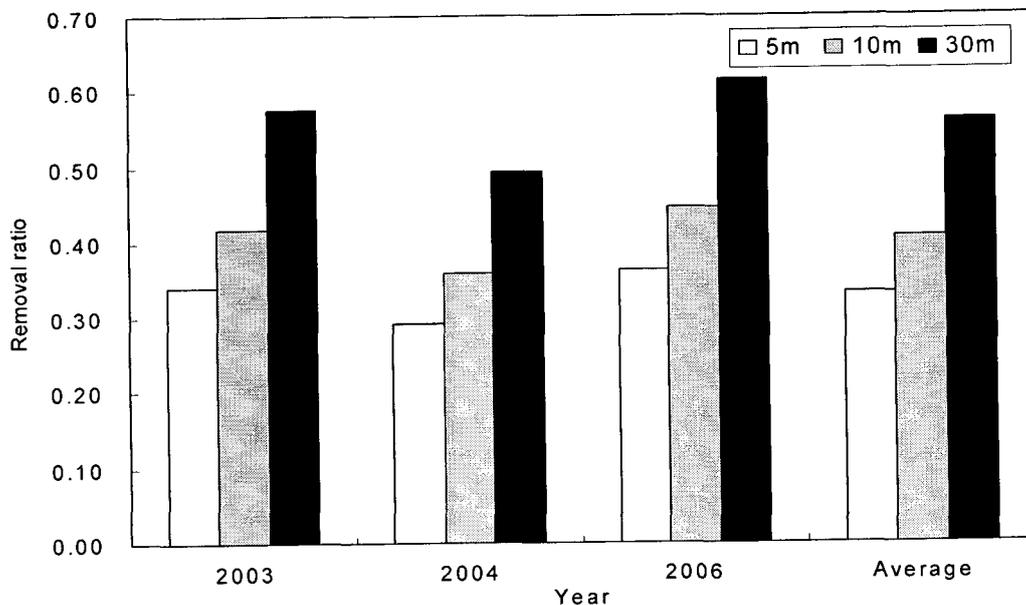


Figure 2 Annual Removal Ratio of Suspended Sediment in Jankye-chun Subwatershed

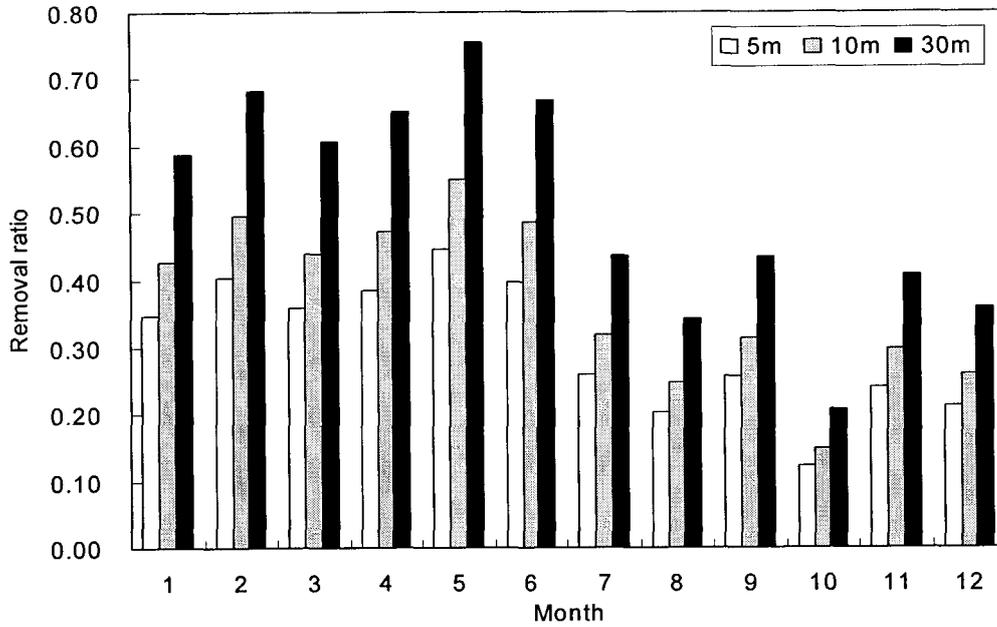


Figure 3 Mean Monthly Removal Ratio of Suspended Sediment in Jankye-chun Subwatershed

참 고 문 헌

1. Welsch, D. J., 1991. Riparian forest buffers, USDA-FS Publ. No. NA-PR-07-91. Randnor, PA.
2. 구영본, 포플러를 이용한 쓰레기 매립지 녹화 피복 및 오염물질 정화, 제1회 식물을 이용한 환경복원기술워크숍, 49-58pp, 1998.