

SWAT 모형의 수문·수질 모듈 개선에 의한 BOD 모의 A BOD Simulation by Improved Hydrology and Water Quality Module in SWAT

김남원* 신아현**

Nam Won Kim, Ah Hyun Shin

요 지

본 연구에서는 국내에서 널리 사용되는 대표적 유역모형인 SWAT 모형의 한계를 인식하고 유출해석모듈과 하도수질모듈을 개선한 SWAT-K(Korea) 모형이 현재 오염총량관리 대상물질로 지정되어 있는 BOD 모의에 미치는 영향을 분석하기 위하여 충주댐유역을 대상으로 각 개선모듈별 BOD 모의 결과를 분석하였다. 유출해석모듈의 개선결과 하도의 흐름을 따라 이동하는 BOD 항목의 모의 특성 상 유출 구조의 개선에 의하여 BOD 부하량의 지체가 감소되며 침투 부하량이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 하도수질모듈의 개선결과 저유량 시 매개변수 산정에도 불구하고 증가하지 않던 값들이 모형의 개선에 의하여 정상적인 범위로 상승한 것을 확인할 수 있었다. 전체적인 개선에 의하여 각 모듈별 개선효과와 함께 충주댐 지점의 개선 전·후 일대일 비교를 수행한 결과 결정 계수(R^2)가 0.54에서 0.88로 상승하며 개선 후 모의값이 실측값에 근사하게 모의되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 유출해석모듈, 하도수질모듈, Bottle BOD₅, SWAT-K

1. 서 론

4대강 물관리종합대책에 의하여 총량관리 단위유역의 배출부하량을 규제하는 오염총량관리제의 시행에 있어 목표 년도까지 목표 수질의 예측 및 달성을 위하여 다양한 노력이 이루어지고 있다. 이에 따라 유달을 및 부족한 실측자료를 보완하기 위한 연속오염부하곡선 산정 등의 시도에 있어 유역 모형이 사용되고 있다. 또한, 유역 내에서 발생하는 유출을 따라 이동하는 비점오염원의 배출 특징과 오염총량관리제의 농도 개념이 아닌 부하량 개념에 있어 유역의 정확한 유량과 수질은 모두 간과할 수 없는 요소이기 때문에 유역내의 수문·수질 순환 전체를 포괄하는 모형의 선정이 중요하며, 대표적인 유역모형으로 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형이 있다. 기존 SWAT 모형은 미국에서 개발된 모형이기 때문에 국내 적용의 한계를 인식하고 모형의 구조적인 개선을 통하여 SWAT-K(Korea) 모형을 개발하였다(과학기술부, 2007). 특히 유출 구조의 개선을 위하여 연속방정식과 Manning식을 하도추적의 기본 방정식으로 사용하는 비선형 저류방정식을 통한 하도추적의 개선과, 금일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있는 시간 가중 평균 유출곡선지수 산정법을 탑재하였다(김남원 등, 2007; Kim and Lee, 2008). 또한 하상 경사가 크고 댐 및 수중보 등의 저류시설이 많은 국내 하천의 특성을 고려하여 기개발된 모형의 DO 중심의 구조를 조류 및 유기물 중심의 구조로 전환하기 위하여 조류의 대사과정 세분화에 의한 내부 유

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 수자원연구실 책임연구원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 수자원연구실 연구원 · E-mail : znsin48@kict.re.kr

기물 증가 및 현재 총량관리대상물질인 BOD가 수질오염공정시험법에 의하여 Bottle BOD5 형태로 측정되는 것을 모형에 반영하기 위하여 QUAL2E를 기반으로 개발된 QUAL-NIER(박준대, 2008) 모형을 표본모델로 SWAT 모형의 수질 모듈을 개선하였다.

본 연구에서는 개선된 SWAT-K 모형을 충주댐 유역에 적용하여 유출 구조의 개선과 수질 구조의 개선이 BOD 모의 개선에 미치는 영향을 분석하고, 오염총량관리에 있어 본 모형의 적합성을 평가하고자 한다.

2. 모형의 개선

2.1 유출해석모듈

국내에서 널리 사용되는 SWAT 모형은 수문성분의 물리적 거동을 표현함에 있어 수학적인 오류가 발견되고, 이로 인해 국내적용에 있어 일단위 유출의 침투유출 및 유출감수부를 정확히 묘사하지 못하는 문제가 발견되었다. 따라서 김남원 등(2007)은 연속방정식과 하도내 흐름을 운동과 근사로 표현하여 하도경사와 마찰경사가 같다는 가정을 기반으로 한 Manning 식을 하도추적의 기본 방정식으로 사용하는 비선형 저류방정식에 입각한 하도추적방법(Nonlinear Storage Method, NSTR)을 제안하였다. 또한 Kim and Lee(2008)는 금일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있도록 시간 가중평균 유출곡선지수 산정법(Temporally Weighted Average Curve Number Method, TWA-CN)을 SWAT 모형에 탑재하여 지표유출의 개선효과를 확인한 바 있다.

2.2 하도수질모듈

SWAT 모형은 수질 모의 알고리즘으로 QUAL2E의 기본구조를 사용하고 있다. QUAL2E 모형은 1차원 정상 상태 하천 수질 모형으로 기준유량에 따른 하천의 수질은 적절하게 모의하지만 연속적인 일단위의 수질 모의에는 한계가 있다. 또한 국내 적용에 있어서 한계를 인식하고 QUAL2E와 WASP5의 특성을 결합하여 조류의 내부생산과 Bottle BOD₅ 모의가 가능한 QUALKO와 Bottle BOD₅와 TP의 정확한 모의 및 향후 오염총량관리 대상물질로 언급되고 있는 TOC의 모의가 가능한 QUAL-NIER가 개발되었다. 이와 같은 QUAL2E의 지속적인 개선에 비하여 QUAL2E의 기본 구조를 사용하고 있는 SWAT 모형의 수질 모의 구조에 대한 개선은 아직까지 이루어지지 않고 있다. 특히 현재 시행중인 오염총량관리체제 하에서 대상물질로 지정되어 있는 BOD는 우리나라의 경우 수질공정시험법에 의하여 5일단위의 Bottle BOD를 측정하고 있으나, SWAT에서는 Bottle BOD형태의 BOD를 모의할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 오염총량관리에 적절한 기준 모형으로 제시될 수 있는 유역모형인 SWAT-K 모형의 수질 구조를 개선하기 위하여 조류의 분비와 사멸에 따른 내부 생산과정과 질산화에 의한 산소소모량(NOD)과 조류 호흡에 의한 DO소모량(AOD)을 고려한 Bottle BOD의 모의가 가능한 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에서 개발한 QUAL-NIER을 표본 모델로 모형 내 BOD 모의 구조를 개선하였다.

3. 모형의 구축 및 모의결과

3.1. 연구대상유역과 모형의 구축

연구대상지역은 충주댐 상류유역으로 도암댐을 포함한 충주댐 상류까지의 구간이다. 유역면적은 약 6,648 km²로 남한강 유역의 약 50%를 차지하고 있으며, 유로연장 375 km, 평균표고 EL.607 m로 전형적인 산림지역으로 분류된다. SWAT모형을 적용하기 위하여 하천도, 유역도, 환경부의

1/50,000 토지이용도, 환경부의 100m×100m의 수치고도모형(DEM), 농업과학기술원의 1/25,000 정밀 토양도 등의 GIS자료를 구축하였다. 유역을 14개 소유역으로 분할하였고, HRU생성을 위한 토지이용과 토양특성 임계면적 비율은 3%로 설정하여 총 406개의 HRU를 생성하였다(그림 2). 점오염원 자료는 유역 내 환경기초시설자료를 충주댐 관리연보에서 제시하고 있는 환경기초시설이 모두 가동됨을 전제로 하고, 가동 효율은 70%로 가정하여 각 처리시설별 방류수 수질 기준과 관측 수질 자료의 항목별 비율을 고려하여 소유역별 배출부하량을 산정하였다.

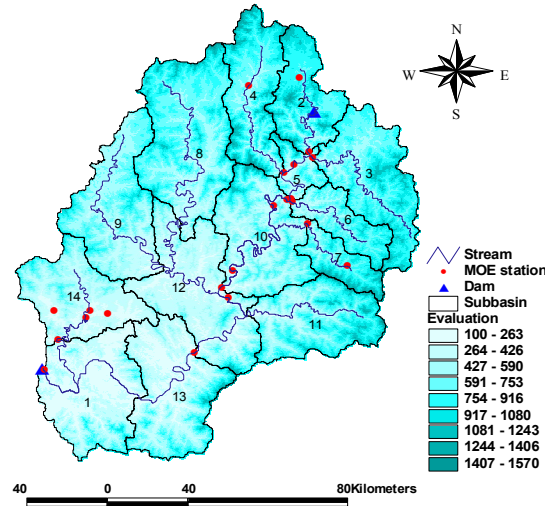
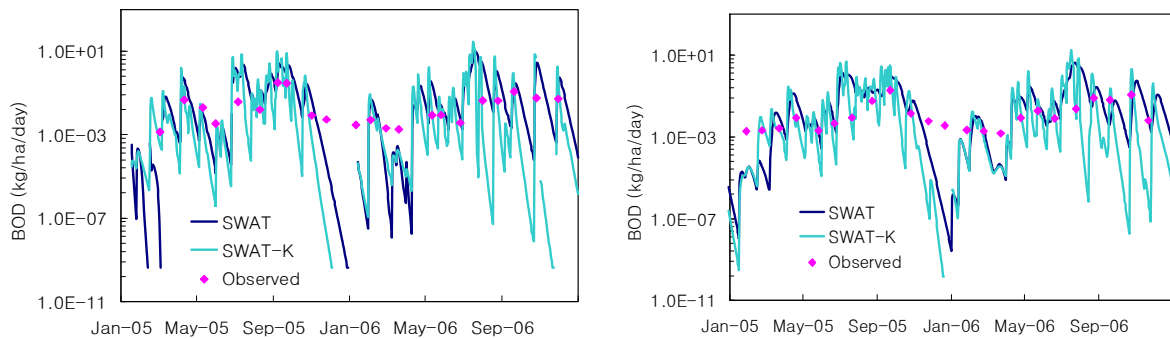


그림 1. 연구대상지역

3.2. 개선 전·후의 BOD 모의

각 개선효과별 모의결과를 비교하기 위하여 대상유역의 종류에 해당하는 영월1 지점과 출구점인 충주댐 지점에 대하여 개선전인 SWAT 2000상태와 유출구조의 개선, 하도수질의 개선, 유출구조와 하도수질 전체 개선의 경우로 세분하여 각 개선모델별 결과를 비교하였다. 정확한 부하량의 산정을 위하여 BOD의 모의에 앞서 유출 관련 매개변수의 보정이 이루어졌으며, BOD관련 매개변수는 개선 전·후 동일한 매개변수를 적용하였다. 유출구조 개선에 의한 결과는 그림 2와 같이 SWAT 2000의 과도한 지체현상과 과소하게 산정되던 침투유출 문제가 해결되어(김남원 등, 2009), 하도의 흐름을 따라 이동하는 BOD항목의 모의 특성 상 유출 구조의 개선에 의하여 지체가 감소



(a) 영월 1

(b) 충주댐

그림 2. 유출구조 개선 전·후의 BOD 모의

되며 침투 부하량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 하도 수질 개선에 의한 결과는 그림 3과 같이 저유량 시 RK1, RK3등의 매개변수 산정에도 불구하고 개선 전 증가하지 않던 값들이 모형의 개선에 의하여 정상적인 범위로 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 $CBOD_U$ 형태만 모의되는 SWAT에 Bottle BOD_5 계산 과정 추가에 있어서 고려된 질산화에 의한 산소소모량(NOD_5)과 조류 호흡에 의한 산소소모량(AOD_5) 중 질산화에 의한 산소소모량 추가가 전체 개선에 주요인으로 작용한 것으로 판단된다.

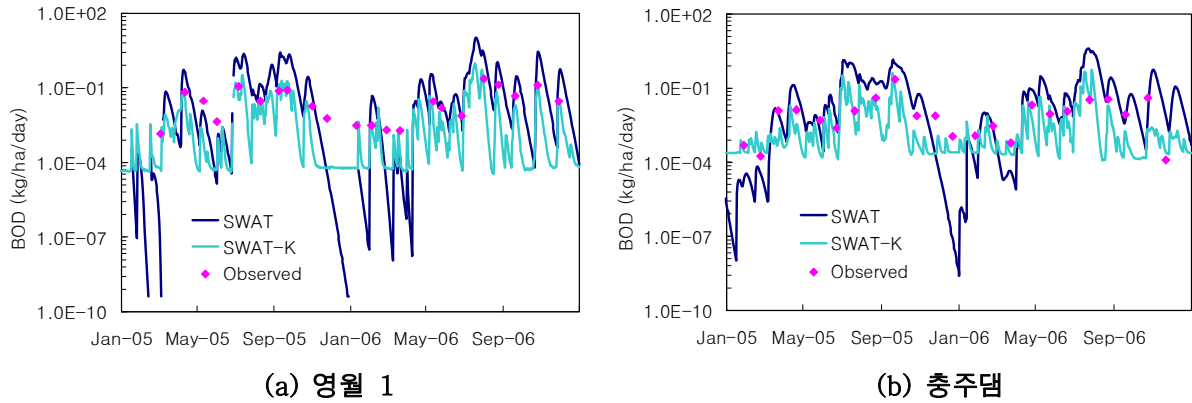


그림 3. 하도수질 개선 전·후의 BOD 모의

앞 서 고찰한 유출과 수질개선을 모두 적용한 결과 지체의 감소현상과 저유량 시 이상치의 개선을 확인할 수 있다(그림 4). 다만 그림 2의 유출구조 개선에 따른 침투 유출 증가 현상을 확인할 수 없는데, 이는 그림 3과 같이 하도 수질 개선에 의하여 과도하게 산정되던 BOD값이 감소하기 때문에 전체 효과를 고려하여 부하량을 산정한 결과 침투 유출의 증가와 침투 BOD값의 감소로 부하량의 계산 시 그 영향이 서로 상쇄하여 침투 부하량의 값에는 거의 변화가 없는 것으로 판단된다. 그림 5와 같이 충주댐 지점에 대하여 개선 전·후의 월 1회 관측값과 모의값의 일대일 비교를 수행한 결과 결정 계수(R^2)가 0.54에서 0.88로 상승하며 과도하게 산정되던 모의값이 실측값에 근사하게 모의되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 2-4에 걸쳐 일부 저유량 시 값이 0인 기간이 발생하는데, 이는 금일 발생한 BOD에서 RK1, RK3의 매개변수에 따른 BOD 손실량을 계산하는 과정에 의하여 일부 동절기시 발생량보다 손실량이 크기 때문에 0인 값이 발생하는 것으로 판단된다.

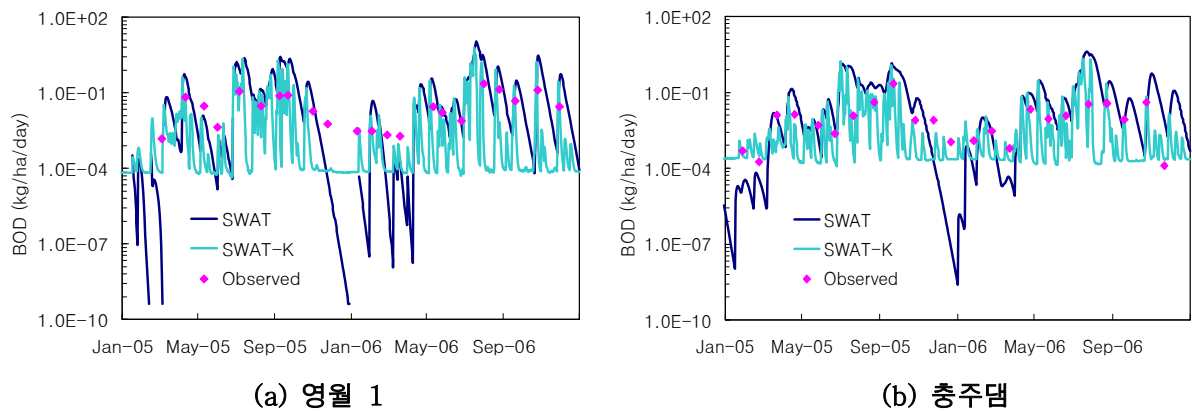


그림 4. 유출구조와 하도수질 개선 전·후의 BOD 모의

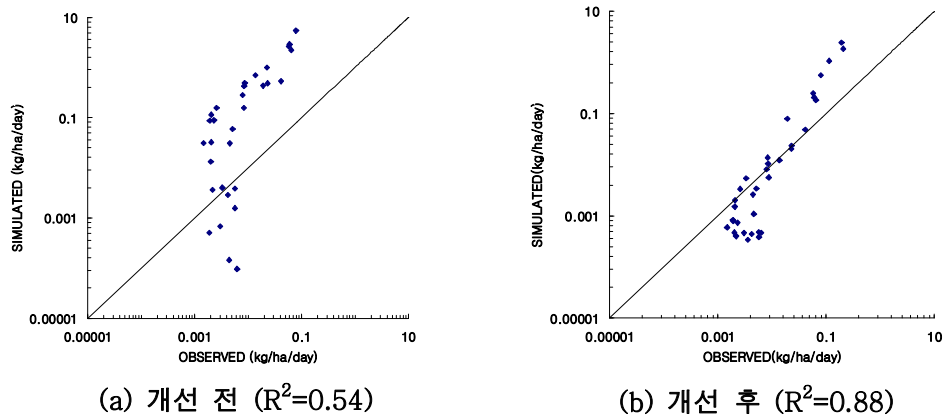


그림 5. 개선 전·후 충주댐 지점의 1:1 BOD 분석

4. 결론

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 국내에서 널리 사용되는 대표적인 유역모형인 SWAT 모형의 유출해석과 하도수질 모듈의 개선에 따른 각 모듈별 BOD 모의 결과를 비교·분석하였다. 유출해석모듈의 개선결과 하도의 흐름을 따라 이동하는 BOD항목의 모의 특성 상 유출 구조의 개선에 의하여 지체가 감소되며 침투 부하량이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 하도수질모듈의 개선결과 저유량 시 매개변수 산정에도 불구하고 증가하지 않던 값들이 모형의 개선에 의하여 정상적인 범위로 상승한 것을 확인할 수 있었다. 전체적인 개선에 의하여 각 모듈별 개선효과를 확인하였고, 충주댐 지점의 개선 전·후 일대일 비교를 수행한 결과 결정 계수(R^2)가 0.54에서 0.88로 상승하며 개선 후 모의값이 실측값에 근사하게 모의되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 개선된 SWAT-K 모형은 현재 오염총량관리 대상물질로 지정되어 있는 BOD모의에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 과학기술부 (2007). 지표수 수문성분 해석기술 개발
2. 김남원, 이정우, 이정은, 이병주 (2007). 비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법, 대한토목학회논문집, 제27권, 제5B호, pp. 533-542.
3. 김남원, 신아현, 이정우 (2009). SWAT 모형의 유출해석모듈 개선이 수질모의에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 제42권, 제4호, pp. 297-307.
4. 박준대, 신동석, 김문숙, 공동수, 류덕희, 정동일, 나은혜 (2008). 수질오염총량관리를 위한 하천수질모델(QUAL-NIER)의 개발, 한국물환경학회지, 제24권, 제6호, pp. 784-792.
5. Kim, N. W., and Lee, J. W. (2008). Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation. Hydrological Processes, Vol. 22, pp. 4936-4948.