

# 효율적 오염총량관리제 시행을 위한 SWAT-K의 적용

## Application of SWAT-K for the Effective Implementation of Total Maximum Daily Loads

김남원\* 신아현\*\*

Nam Won Kim, Ah Hyun Shin

### 요 지

본 연구에서는 장기유역모형인 SWAT 모형의 국내 적용의 한계를 인식하여 유출해석모듈과 하도수질모듈 등을 개선한 SWAT-K(Korea) 모형을 통해 수질 모형을 사용하는 의사 결정에 있어 하도추적법이 미치는 영향을 분석하고자 현재 우리나라에서 시행중인 오염총량관리제 개념에 적용하였다. 기준 유량 개념을 도입하여 모의된 수질항목을 평가하기 위하여 장기간의 유황곡선을 작성하고 유황곡선의 초과확률분포를 기준으로 오염부하곡선을 작성하여 하도추적법의 변화가 수질 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 이를 바탕으로 수질항목 초과확률분포에 따른 오염부하곡선을 작성하여 모형의 선택에 따라 동일 기준유량 시 모의되는 부하량 값의 변화를 분석하였다. 분석 결과 수질 항목은 유황의 변화를 매우 유사하게 재현하며, 수질 매개변수 보정에도 불구하고 하도추적법이 수질 항목의 모의에 있어 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 모형은 정교한 유출 모의와 더불어 오염물질의 신뢰도 높은 모의를 통해 향후 수질오염총량관리제 시행에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 기준유량, 오염부하곡선, 오염총량관리제, SWAT-K**

### 1. 서 론

유역의 효율적인 오염원 관리를 위하여 우리나라에서는 2004년부터 오염총량관리제도가 3대강을 중심으로 시행되고 있다. 오염총량관리제의 시행에 있어 유역에서 발생하는 총부하량을 예측하고 관리하기 위하여 적절한 모형의 선택이 의사결정이 큰 영향을 미치고 있다. SWAT 모형은 장기간의 정교한 모의가 가능한 대표적인 유역모형으로, 국내 적용에 있어 많은 한계를 드러내어 유출 구조 및 하도의 하도추적법을 개선하고 지하수 모의 및 수질 모의 모듈을 국내 유역특성에 적합하도록 개선하여 한국형 장기유출모형인 SWAT-K(Korea) 모형을 개발하였다(과학기술부, 2007). 오염총량관리제는 해당유역의 오염원을 농도 개념이 아닌 총량 개념으로 관리하는 제도로 해당유역의 목표 수질을 정하고, 배출 부하량이 목표수질환경기준 이하가 되도록 유역을 관리한다. 국내 규정에 의하여 오염부하량은 기준 유량을 설정하여 산정하고 있는데, 2010년까지 시행되는 1차 오염총량관리 대상 물질은 BOD<sub>5</sub>로 10년 평균 저수량을 기준유량으로 총량 관리가 이루어지고 있다. 그러나 내년부터 시행되는 2단계 오염총량관리제(2011~2015)는 대상 물질로 T-P가 추가될 예정이며 기준 유량 역시 10년 평균 평수량이 추가될 계획이다.

따라서 본 연구에서는 수질 모형을 사용하는 의사 결정에 있어 하도추적법이 미치는 영향을

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

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

분석하기 위하여 현재 우리나라에서 시행중인 오염총량관리제 개념에 적용해보고자 한다. 기준 유량 개념을 도입하여 모의된 수질항목을 평가하기 위하여 유황곡선을 작성하고 유황곡선의 초과확률분포를 기준으로 오염부하곡선을 작성하여 하도추적법의 변화가 수질 모의에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한 이를 바탕으로 수질항목 초과확률분포에 따른 오염부하곡선을 작성하여 모형의 선택에 따른 같은 기준유량 시 모의되는 부하량 값의 변화를 통해 수질 모의에 있어 선행 유출모의와 적절한 모형의 선택의 중요성에 대하여 확인하고, 오염총량관리에 있어 본 모형의 적합성을 평가하고자 한다.

## 2. SWAT 모형의 하도추적법의 개선

대표적 유역모형인 SWAT 모형은 수문성분의 물리적 거동을 표현함에 있어 수학적 오류가 발견되고, 이로 인해 국내적용에 있어 일단위 유출의 침투유출 및 유출감수부를 정확히 모사하지 못하는 문제가 발견되었다. 따라서 Kim and Lee(2010)는 연속방정식과 하도내 흐름을 운동과 근사로 표현하여 하도경사와 마찰경사가 같다는 가정을 기반으로 한 Manning 식을 하도추적의 기본방정식으로 사용하는 비선형 저류방정식에 입각한 하도추적방법(Nonlinear Storage Method, NSTR)을 모형에 탑재하여 개선효과를 입증하였다. 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 제안하여 지표유출의 개선효과를 확인한 바 있다.

## 3. 모형의 구축 및 모의결과

### 3.1. 연구대상유역과 모형의 구축

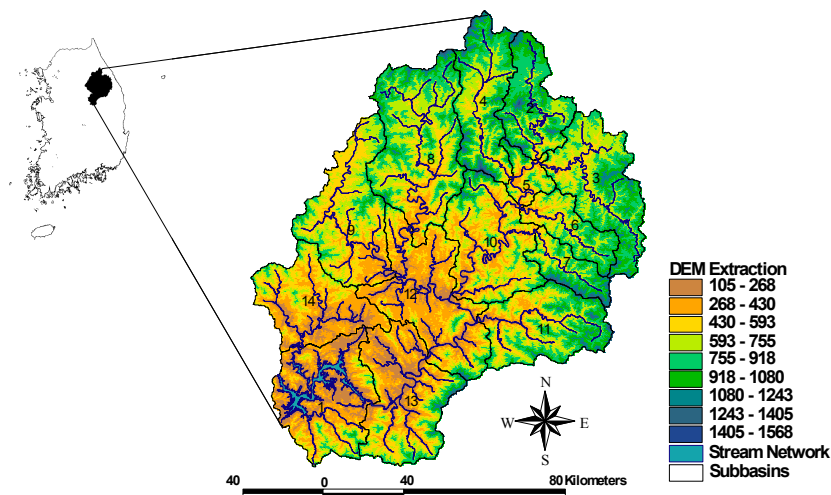


그림 1. 연구대상지역

연구대상지역은 남한강 유역 중 상류인 충주댐 유역으로 유역면적은 약 6,648 km<sup>2</sup>로 남한강 유역의 약 50%를 차지하고 있으며, 유로연장 375 km, 평균표고 EL.607 m로 전형적인 산림지역으로 분류된다. SWAT 2005 버전을 적용하기 위하여 하천도, 유역도, 환경부의 1/50,000 토지이용도, 환

정부의 100m×100m의 수치고도모형(DEM), 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도 등의 GIS자료를 구축하였다. 유역을 14개 소유역으로 분할하였고, HRU생성을 위한 토지이용과 토양특성 임계면적 비율은 3%로 설정하여 총 406개의 HRU를 생성하였다(그림 1). 수질 항목 모의를 위하여 요구되는 점오염원자료는 유역 내 환경기초시설자료를 충주댐 관리연보에서 제시하고 있는 환경기초시설이 모두 가동됨을 전제로 하고, 가동 효율은 70%로 가정하여 각 처리시설별 방류수 수질 기준과 관측 수질자료의 항목별 비율을 고려하여 소유역별 배출부하량을 산정하였다.

### 3.2. 오염부하곡선의 산정

유출 구조의 개선에 따른 수질 항목의 변화를 분석하기 위하여 1998~2003년 동안의 유황 곡선을 작성하고, 유황의 초과확률 분포를 각 수질 항목에 적용하였다(그림 2). 여기서 저수량( $Q^{275}$ )은 유황 곡선에서 365일을 통하여 275일 동안 이보다 낮아지지 않는 유량, 평수량( $Q^{185}$ )은 185일 동안 낮아지지 않는 유량을 의미한다.

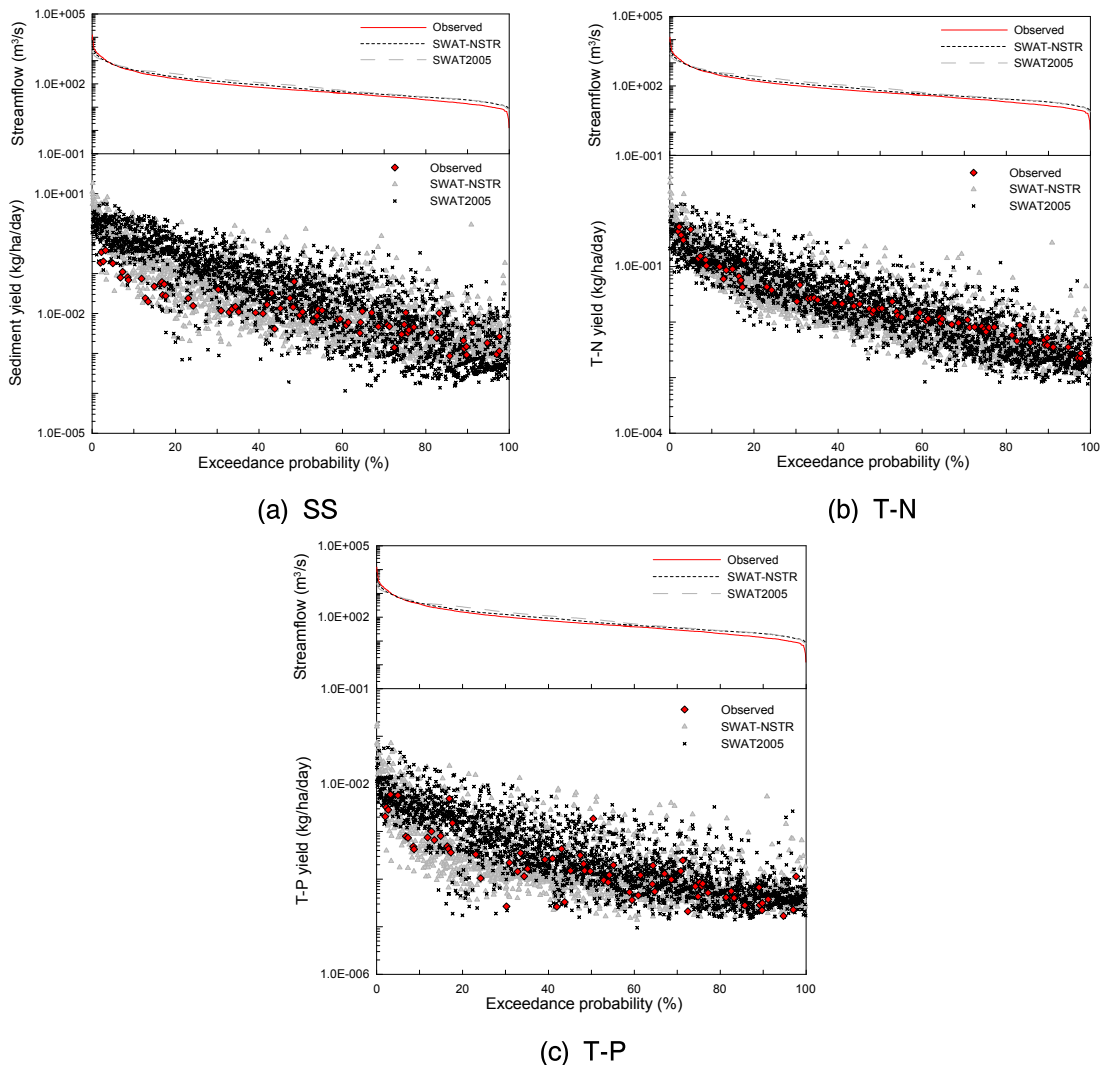


그림 2. 유황초과확률분포에 의한 오염부하곡선의 비교

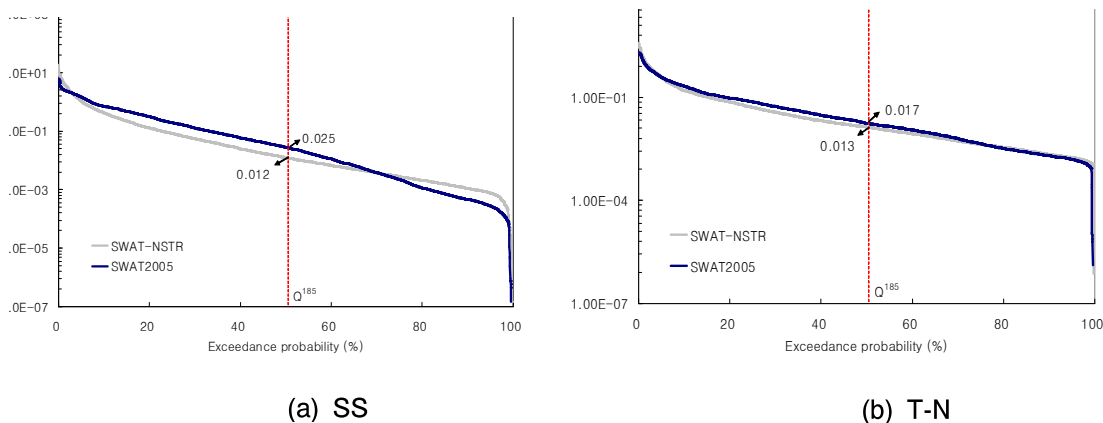
전체적으로 모든 항목이 유황의 변화 양상과 유사한 경향을 보이며 특히 SWAT 2005의 경우

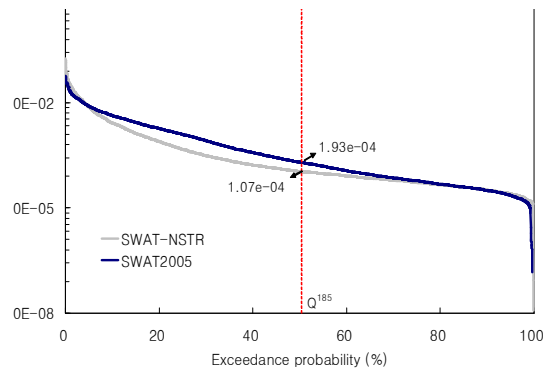
침투부하량은 낮게 모의되며, 고수위에서 평수위 구간은 과대 모의하나 저수기는 낮게 모의하는 경향을 나타냈다. 표 1과 같이 평수량과 저수량을 기준으로 모의값을 비교하면 동일 유황일 때 두 모형의 수질 모의 차이와 함께 유황에 따라서도 다른 변화 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. SWAT-NSTR을 기준으로 SWAT 2005의 유량이 평수기의 경우 1.29배 크게 산정되었고, 수질 항목은 유량의 증가보다 큰 1.75에서 2.57배 까지 증가하였다. 저수기는 유량의 변화가 1.05배로 변화의 폭이 크지 않아 수질의 변화 역시 0.29에서 1.31배 이상 증가하지 않았다. 특히 SS와 T-P는 저수량 일 때 유량이 증가함에도 불구하고 모의값이 0.29배까지 감소하였는데, 이는 T-P는 유사에 흡착하여 배출되며 특히, 저수기시 유량이 증가함에도 SS의 모의값이 감소하는 것은 유량 변화에 의한 결과라고 판단하기 어렵다(김남원 등, 2009). 전체적인 통계 분석 결과 수질 항목은 유량의 변화폭에 매우 민감하게 반응하는 결과를 나타내었다.

표 1. SWAT-NSTR과 SWAT2005의 유황지속기간에 따른 통계 분석 비교

		Flow (m <sup>3</sup> /sec)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
SWAT-NSTR	Q <sup>185</sup>	62.02	2.45e-01	1.43e-01	1.02e-03
	Q <sup>275</sup>	30.54	3.79e-02	1.21e-01	9.82e-04
SWAT2005	Q <sup>185</sup>	80.04(1.29)	6.19e-01(2.53)	2.50e-01(1.75)	2.62e-03(2.57)
	Q <sup>275</sup>	32.11(1.05)	1.10e-02(0.29)	1.58e-01(1.31)	6.67e-04(0.68)

유황에 의한 결과와 더불어 그림 3은 각 수질 항목 자체의 초과확률 분포를 통한 부하량 지속 곡선을 나타낸 것이다. 평수량을 기준으로 SS는 SWAT 2005의 값이 0.025(kg/ha/day)로 SWAT-NSTR보다 약 2.2배 높게 모의됐으며, T-N은 0.013(kg/ha/day)에서 0.017(kg/ha/day)로 약 1.3배, T-P는 1.07e-01(kg/ha/day)에서 1.93e-01(kg/ha/day)로 1.8배 높은 결과를 나타내었고, 전반적으로 평수량 구간에서 SWAT 2005가 높게 모의된 결과를 보이고 있는데, 이는 유황의 초과확률 분포에 의한 수질 분석 결과와 매우 유사한 경향을 보이고 있다.





(c) T-P

그림 3. 수질항목 초과확률분포에 의한 부하지속곡선의 비교

#### 4. 결론

전체적인 분석 결과 수질 항목은 유황의 변화를 매우 유사하게 재현하며, 수질 매개변수 보정에도 불구하고 하도추적법이 수질 항목의 모의에 있어 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있었다. 이는 유사 및 영양물질 등의 비점오염원이 강우 시 흐름을 따라 배출되며 유출의 침투보다 부하량의 침투가 먼저 발생하는 특성 때문에 하도추적 개선에 의한 유출의 지체 현상 개선에 의한 결과로 판단된다. 따라서 SWAT-K 모형은 정교한 유출 모의를 바탕으로 유량의 흐름을 따라 이동하는 오염물질의 신뢰도 높은 모의를 통해 향후 수질오염총량관리제 시행에 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, 신아현, 이정우 (2009). SWAT 모형의 유출해석모듈 개선이 수질모의에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 제42권, 제4호, pp. 297-307.
3. Kim, N. W., and Lee, J. (2008). Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation. Hydrological Processes, Vol. 22, pp. 4936-4948.
4. Kim, N. W., and Lee, J. (2010). Enhancement of the channel routing module in SWAT. Hydrological Processes, Vol. 24, pp. 96-107.