

SWAT 모형의 유출해석모듈 개선이 수질모의에 미치는 영향

Effect of Improved Runoff Module in SWAT on Water Quality Simulation

김 남 원* / 신 아 현** / 이 정 우***

Kim, Nam Won / Shin, Ah Hyun / Lee, Jeongwoo

Abstract

For reliable water quality simulation by semi distributed model, accurate daily runoff simulation should have preceded. In this study, newly developed channel routing method which is nonlinear storage method is combination of Muskingum routing method and variable storage routing method and temporally weighted average curve number method were applied for effect analysis of water quality simulation. Developed modules, which are added in SWAT models and simulation, were conducted for the Chungju dam watershed. The simulation result by each module applied effect. As a result of analysis contribute water quality modeling, nonlinear storage method is more effective than temporally weighted average curve number method. Nutrient loading discharge was affected by development of runoff delaying from improvement of channel routing, because of characteristics of nonpoint source pollution.

keywords : nonlinear storage method, SWAT, temporally weighted average curve number, water quality simulation

요 지

신뢰도 높은 수질 모의를 위해서는 유역 내 정확한 유출 모의가 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서는 연속방정식과 운동과 근사에 의한 Manning의 식이 결합된 비선형 저류방정식에 근거한 하도추적법과 금일 강수량을 고려하여 시간적으로 가중 평균된 유출곡선지수를 산정하도록 개선된 지표유출계산 모듈이 수질 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 대표적 준분포형 모형인 SWAT에 탑재하여 충주댐 유역에 적용하여 각 개선모듈별 독립적인 분석과 전체 개선의 효과를 개선 전·후로 분석하였다. 각 개선 모듈별 수질 모의의 기여도를 분석한 결과 지표유출계산 모듈의 개선보다는 하도추적의 개선이 더 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 비점오염원의 특성 상 하도추적의 개선으로 인한 유출 지체 현상의 개선이 부하량의 배출에 가장 큰 요인으로 작용하였기 때문이라고 판단된다.

핵심용어 : 비선형 저류방정식, 수질 모의, 시간가중 유출곡선지수법, SWAT

* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 책임연구원
Research Fellow, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, KICT, Goyang-Si, Gyeonggy-Do, 411-712

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 연구원
Corresponding Author, Researcher, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, KICT, Goyang-Si, Gyeonggy-Do, 411-712
(e-mail: znsin48@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 선임연구원
Senior researcher, Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, KICT, Gyeonggy-Do, 411-712

1. 서 론

수질관리에 있어서 유역의 비점오염원 관리가 핵심적인 변수로 인식되고 있고 그 비중 역시 커지고 있다. 비점오염원 관리를 위해서는 장기간의 지속적인 모니터링 자료를 축적하여 비점오염원의 발생, 이동, 수질에 미치는 영향 등을 정량적으로 평가하여야 한다. 그러나, 축적된 자료가 충분하지 않은 점과 시간과 비용의 경제성을 고려해 볼 때 강우로 인한 비점오염물질의 유출과정을 하천내의 수리학적 특성과 결합시켜 모의할 수 있는 유역 모형을 이용하여 비점오염원을 추정, 해석하는 것이 효율적일 수 있다(윤춘경 등, 2007). 국내에서 대표적으로 사용되는 수질모형으로는 도시유역에 많이 적용되는 STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)과 SWMM(Storm Water Management Model), 농촌유역에 많이 적용되는 AGNPS(Agricultural Nonpoint Source Pollution Model), 대규모 유역을 대상으로 하는 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)와 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 등이 있다(신아현, 2008). 특히 SWAT은 다양한 토지 이용, 토양 특성 등을 반영하여 물순환은 물론 유사 및 영양물질의 이동과 저감을 모의할 수 있는 모형으로(Arnold *et al.*, 1993) 유출량 산정은 물론 수질 분석을 위한 도구로 비점오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석(금강유역환경청, 2005), 유역내 하천유지가능 유하량 해석(한강수계관리위원회, 2006), 금강수계 물수지 및 비점오염물질수지 해석(금강수계관리위원회, 2007), 고랭지 농업의 작물별 객토량 변화에 따른 토양 유실 저감분석(강원발전연구원, 2007), 지표수 수문성분 해석시스템 개발(과학기술부, 2007) 등에 다각도로 적용되고, 최근 국내 사용이 증가하고 있는 모형이다.

권명준(2000)은 SWAT과 WASP의 연계운동을 통한 농촌유역 하천 관리를 위하여 매개변수 검·보정 및 민감도 분석을 통한 SWAT으로부터 모의된 BOD, T-N, T-P, NO₃, PO₄ 값을 WASP의 입력자료로 이용하였다. 김종성(2006)은 AVSWAT을 이용하여 용담댐 유역의 BOD, T-N, T-P를 환경부 월 1회자료와 금강오염총량관리제에서 수집한 주 1회 실측 자료와의 비교를 통하여 모의하고, 오염물질 발생 원단위를 산정하였다. 유혜은(2007)은 대청호 유역에 SWAT을 적용하여 SS, BOD, T-N, T-P에 대한 매개변수 보정 및 검증 실시하고, 오염원의 유달율을 산정하였다. 김철검 등(2008)은 충주댐 유역을 대상으로 유사량, 총 질소와 총 인 부하량에 대한 시공간적 분석 및 부하량의 점·비점오염원의 기여도를 분석하였다. 박종윤 등(2008)은 미래 토지이용 변화가 수

문 - 수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 미래 토지 이용 시나리오를 가정하고, 경안천 유역에 SWAT을 적용하여 유출량, Sediment, T-N, T-P항목을 모의하고, 매개변수에 대한 민감도 분석 및 모형 효율지수(ME)를 산정하였다. Gikas *et al.*(2006)은 그리스 지중해 유역의 SWAT에 대한 적용성을 검증하기 위하여 SWAT 2000 모형을 Northern Greece 농업 지역에 적용하여 유량 및 유사, 질소, 인 항목을 모의하고 RMSE를 산정하였다. Migliaccio and Chaubey(2008)는 유역의 공간적인 분할과 매개변수가 유출 및 유사 모의에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Northwest Arkansas 유역을 총 12개의 경우로 분할하고 매개변수의 민감도 분석을 실시하였다. Shen *et al.*(2008)은 저수지를 포함하는 유역에 SWAT을 적용하고 비점오염원 모의에 영향을 미치는 10개의 매개변수를 선택하여 민감도 분석결과를 바탕으로 일차오차분석, Monte Carlo법을 이용하여 불확실성을 분석하였다. 한편, Van Griensven *et al.*(2006)은 분포형 모형의 매개변수의 수가 과다하게 산정되는 문제를 지적하고 민감도 분석을 통해 매개변수의 수를 줄이기 위하여 새로운 민감도 분석법을 제안하였으며, 이를 SS, T-N, T-P, NO₃, NH₄ 등에 적용한 결과 수리 매개변수가 수질 예측에 매우 중요한 인자임을 밝혔다. 또한 김상단 등(2006)은 하천의 수질을 적절히 모의하기 위해서는 수질 관련 매개변수의 불확실성을 줄이는 것 이외에 수리학적 매개변수의 중요성을 언급하며 수리매개변수와 수질매개변수의 일차오차분석을 통하여 하천의 수리특성에 관련한 매개변수들이 DO, BOD, 유기질소, 유기인 등의 항목에 일정 정도의 기여도를 가지고 있다고 밝힌 바 있다.

위와 같이 수질을 평가, 예측하기 위해서 SWAT 모형을 적용하거나, 미국에서 개발된 SWAT의 국내 적용성을 높이고자 모형의 매개변수 검·보정 및 민감도 분석 그리고 수리·수질 매개변수의 상관성 분석 등의 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 그러나 이와 같은 SWAT의 활용 및 적용성 측면의 연구에 비해 모형의 정확도를 높이려는 노력과 유출이 수질 항목에 미치는 영향에 대한 검증은 상대적으로 미미한 실정이다. 특히 유출모형과 수질모형이 결합된 유역 모형을 적용함에 있어 하천의 수질변화는 유량 및 유속 분포, 유하하는 동안 다양한 수문인자의 변화, 유역 내 오염원의 분포상태 등에 영향을 받게 되므로 정확도 높은 수질 모의를 위해서는 기본적으로 정교한 유출 모의가 필수적이다. 한편, SWAT 수문성분의 물리적 거동을 표현함에 있어 수학적 오류가 발견되고, 이로 인해 국내적용에 있어 일 단위 유출의 침투유출 및 유출감수부를 정확히 모사하

지 못하는 문제가 발견되었다. 따라서 이를 만족하기 위한 새로운 기법이 도입되었다. 김남원 등(2007)은 SWAT모형의 대유역 적용의 근간이 되는 하도추적 모듈의 오류를 개선하여 제시하였으며, Kim and Lee (2008)는 시간적으로 가중 평균된 유출곡선지수에 따라 지표유출성분을 계산하는 모듈을 개발하여 SWAT에 새롭게 추가하였고 이를 실제 국내 유역에 적용하여 유출모의결과와 개선효과를 입증하였다. 아울러 유출모형 개선효과가 수질모의의 정확성 제고에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대하였으나 실제로 유출모형 개선으로 인한 수질모의 개선효과를 검증하는 연구는 아직까지 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 김남원 등(2007)과 Kim and Lee(2008)의 연구에 근거하여 SWAT 모형의 하도추적 및 지표유출해석 모듈의 개선으로 유출모의가 개선됨은 물론 유출모의 개선 효과가 실제로 유사 및 영양물질 모의에 미치는 영향을 분석, 평가하고자 하였다. 이를 위해서 충주댐유역에 대하여 SWAT과 개선된 SWAT을 각각 적용하여 장기유출분석을 수행하고, 유사량과 총인, 총질소의 모의 결과 비교를 통하여 수질모의에 있어 정교한 장기유출모델링의 중요성을 확인하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 유출해석모듈의 수정

유역내에서 발생하는 오염원은 강우나 유역내의 흐름에 의하여 하도로 유입되고, 하도의 흐름에 의하여 이동하는 특성을 지니고 있기 때문에 유역에서 배출되는 오염원은 유출 특성의 절대적인 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에 의하여 개선된 유출해석모듈의 이론적 고찰과 함께 오염원의 거동에 미치는 영향에 대해 검증하는 것에 주안점을 두고자 한다. 하도추적 모듈과 지표유출해석 모듈이 수질항목에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모듈의 개선사항을 충분히 반영할 수 있는 준분포형 장기유출모형인 SWAT을 대상모형으로 선정하였다. 개선 모듈을 모형 내에 탑재하고, 기존의 모형과의 총 유출량 비교와 선행된 유출 모의를 바탕으로 수질 항목에 대한 모의를 수행하였다. 수질 항목에 대한 비교는 유출해석모형 전체 개선에 의한 효과와, 하도추적 모듈, 지표유출해석 모듈이 전체 모의에 미치는 영향을 분석하고자 전체를 반영하는 모형과 각 모듈을 탑재한 독립적인 모형으로 세분하여 구동하였다. 수질 항목의 모의는 현재 축적된 관측값이 월단위 측정값으로 분석기간이 단기간인 경우, 신뢰성

있는 결과의 도출이 어려운 한계를 극복하기 위하여 장기간의 모의를 통하여 실측값과 모의값을 분석하고자 한다.

2.1.1 SWAT의 하도추적모듈

초창기 SWAT 모형의 하도추적 방법은 ROTO 모형이 결합되면서 변동저류추적법이 사용되었으나, AVSWAT2000 버전에서부터 새롭게 Muskingum 추적법이 추가되었고 이 방법이 SWAT 사용자들에게 주로 이용되고 있다. 이 추적방법을 이용할 때 유의점은 하도추적 후 유출량에 대한 수치적인 안정성이 확보되도록 추적매개변수인 저류상수(K), 가중치(X), 시간간격(Δt)의 관계를 나타낸 제약조건을 만족시키는 범위에서 변수값을 입력해야 한다. 그러나 SWAT 코드에는 Muskingum 방법의 제약조건을 강제로 만족하도록 하는 조건식이 포함되어 있지 않고, 또한 시간간격이 1일로 고정되었기 때문에 K 를 적절하게 설정하지 않으면 계산유출량 값이 수치적으로 불안정하게 산정될 수 있다. 설사 제약조건식을 항상 만족하도록 SWAT 모형의 코드를 수정하였다 하더라도 유하시간에 비해 저류상수가 매우 큰 경우에는 과도한 지체, 감쇠가 나타난다. 이러한 현상은 김남원 등(2007)의 논문에서 찾아볼 수 있다. 한편, SWAT에서는 부피 단위로 유출전이가 이루어지는데, 전날 남아있는 하도저류량에 금일 들어오는 유입량을 더하고 이를 하도의 길이로 나누어 유수단면적이 계산되며, 단면형상과 유수단면적 관계로부터 하도 수심을 결정하게 된다. 그러나 여기서의 문제점으로 지적될 수 있는 점은 SWAT이 물의 이동성, 즉 유하시간을 고려하지 않은 점이다. 이는 하도를 마치 저수지처럼 간주하여 하도내로 유입되는 수량을 하루 24시간 동안은 전량 체류시키고 있다. 따라서 하도 길이가 짧은데 상류 유역으로부터의 하도유입량이 큰 경우에는 수심이 과도하게 계산되는 문제가 발생한다. 하도내 인이나 질소 변화량은 수심, 유하시간 등의 함수이므로 SWAT의 하도추적상 문제점이 비점오염해석 결과에도 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

이와 같이 SWAT의 하도추적법을 사용할 경우 조건에 따라 수치적 불안정, 과도한 감쇠현상, 그리고 비현실적인 수심, 유속 등 수리적 물리량이 발생하게 될 수 있다. 이러한 모형의 단점을 극복하고 일 단위 하도추적을 보다 정교하게 해석하기 위해서 본 연구에서는 김남원 등(2007)이 제시한 비선형 저류방정식에 입각한 하도추적방법(Nonlinear Storage Method, NSTR)을 이용하였다. 이 방법은 Eq. (1), (2)와 같이 연속방정식과, 하도내 흐름을 운동과 근사로 표현하여 하도경사와 마

찰경사가 같다는 가정을 기반으로 한 Manning 식을 하도추적의 기본 방정식으로 사용하고 있다.

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (1)$$

$$O = \frac{1}{n} A_{ch} R^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} A_{ch}^{5/3} P^{-2/3} S_f^{1/2} \quad (2)$$

여기서, S 는 하도 저류량 (m^3), I 는 하도 유입량 (m^3/s), O 는 하도 유출량 (m^3/s), R 은 동수반경 (m), S_f 는 마찰경사 (m/m)로 운동과 근사에 의해 하도경사와 같고, A_{ch} 는 하도 단면적 (m^2)이며 P 는 윤변 (m)이다. 이 두 식을 결합하면 수심 d 에 관한 비선형 저류방정식을 구성할 수 있고, 이를 시간 차분화한 후 미지수인 종점시 수심과 유출량을 반복기법에 의해 계산할 수 있다. 비선형 저류방정식에 의한 하도추적법은 하도의 조도계수나 하도경사, 하도의 단면형 등 하도의 특성을 반영할 수 있으며, SWAT내 하도추적법인 Muskingum 방법이나 변동저류추적법에 비해 입력변수값 설정이 보다 유연한 장점이 있다(김남원 등, 2007). 따라서 유출수문곡선의 정확도를 높일 수 있도록 비선형 저류방정식을 이용한 하도추적법을 SWAT에 추가하였다.

2.1.2 SWAT의 지표유출해석모듈

SWAT 모형에서는 CN 값을 산정하기 위하여 시간적으로 변하는 토양수분량에 따라 CN 값을 결정할 수 있도록 개선된 형태의 유출곡선지수 산정법을 사용하고 있다. 이 방법은 토양의 물리적인 특성을 반영할 수 있고 CN 값의 시간에 따른 변화를 유연하게 표현할 수 있는 장점이 있으나 국내 적용에 있어서 모의된 일 단위 유출수문곡선에서 침투유출이 관측치에 비해 과소하게 산정되는 경향이 있다. 이는 원래 CN이 가지고 있는 급일 발생한 강수의 영향은 전혀 고려하지 않고 전 날 종점시 토양수분량에 따라 CN 값이 결정되는데서 기인한다. 따라서 Kim and Lee(2008)는 이러한 문제를 해결하기 위하여 급일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있도록 시간 가중평균 유출곡선지수 산정법(Temporally Weighted Average Curve Number Method, TWA-CN)을 제안하였다.

SWAT 모형에서 시간간격($t \sim t + \Delta t$) 동안 지표면 유출량($Q_{t,t+\Delta t}$) 및 침투량($F_{t,t+\Delta t}$)은 전 날 종점시 토양수분량에 따라 결정된 CN_t 의 함수이다. 그러나 전 날 종점시 CN_t 와 급일 종점시 $CN_{t+\Delta t}$ 의 가중합의 함수로 결정된다.

$$F_{t,t+\Delta t} = f(CN_w) \quad (3)$$

$$CN_w = \alpha CN_t + (1 - \alpha) CN_{t+\Delta t} \quad (4)$$

여기서, CN_w 은 시간가중평균 CN이고, α 는 0~1 사이의 값을 갖는 시간 가중치로서 관측치와 비교를 통해서 보정해야 할 매개변수이다. 본 연구에서는 Kim and Lee(2008)의 α 값에 따른 침투유출 산정 결과를 토대로 평균값인 0.5를 사용하였다. Eq. (4)에서 $CN_{t+\Delta t}$ 는 Eq. (5)와 같이 저류매개변수 $S_{t+\Delta t}$ 의 함수이고, $S_{t+\Delta t}$ 는 Eq. (6)과 같이 종점시 토양수분량 $SW_{t+\Delta t}$ 의 함수이다. Eq. (5)와 (6)으로부터 $CN_{t+\Delta t}$ 와 $F_{t,t+\Delta t}$ 는 음해적인 관계를 나타내고 있음을 알 수 있고, 따라서 반복 절차로 이들 값을 구하여야 한다. 본 연구에서는 침투유출량 모의의 정확도를 높일 수 있도록 시간 가중평균 유출곡선지수법을 이용하여 지표유출량을 산정하도록 SWAT을 수정하였다.

$$CN_{t+\Delta t} = f(S_{t+\Delta t}) \quad (5)$$

$$S_{t+\Delta t} = f(SW_{t+\Delta t}) = f(SW_t + F_{t,t+\Delta t}) \quad (6)$$

2.2 SWAT 모형의 수질 모의

SWAT모형에서 토양유실은 Eq. (7)과 같이 MUSLE 방법(Williams, 1995)에 의하여 산정되고 있다.

여기서, sed 는 주어진 날의 유사량 (tons), Q_{surf} 는 지표유출량 (mm/ha), q_{peak} 는 침투유출율 (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.

유역에서 발생한 유사가 하도로 유입되면, 하도에서 유사 추적은 Williams (1972)가 제안한 방법에 의하여 침투유속의 함수인 하도 구간으로부터 운송될 수 있는 최대 유사량을 산정한다. 산정된 유사량을 기준으로 하도 내 퇴적되는 양과 침식되는 양이 계산되어 최종적으로 하도 밖으로 운송되는 유사량은 다음과 같이 계산된다.

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (7)$$

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (8)$$

여기서, sed_{out} 은 하도 밖으로 운송되는 유사량 (tons), sed_{ch} 는 하도에서의 부유사량 (tons), V_{out} 는 시간 간격 동안의 유출 체적 (m^3), V_{ch} 는 하도 구간에서의 수량 (m^3)이다.

SWAT에서 모의되는 질소와 인 계열의 NH_4 , NO_3 , NO_2 , $ORG-N$, PO_4 , $ORG-P$ 등의 항목은 모두 동일한 기작으로 모의되기 때문에 다음과 같이 NO_3 를 대표항목으로 기술하였다. 질산염인 NO_3 는 Eqs. (9)~(10)과 같은 과정에 의해 하도내에서 이동 및 배출되고 있다. 지표면으로부터 유출되는 질산염은 다음과 같이 계산된다.

$$NO_{3_{surf}} = \beta_{NO_3} \cdot conc_{NO_{3,mobile}} \cdot Q_{surf} \quad (9)$$

여기서, $NO_{3_{surf}}$ 는 표면유출로 이송되는 질산염 (kg N/ha), β_{NO_3} 는 질산 침투계수, $conc_{NO_{3,mobile}}$ 는 토양층의 상부 10 mm에서 이송되는 수분에 대한 질산염 농도 (kg N/mm H_2O), Q_{surf} 는 표면유출 (mm H_2O)이다.

하도로 유입된 질산염의 하천 내 추적과정은 다음과 같다.

$$\Delta NO_{3_{str}} = (\beta_{N,2} \cdot NO_{2_{str}} - (1 - fr_{NH_4}) \cdot \alpha_1 \cdot \mu_a \cdot algae) \cdot TT \quad (10)$$

여기서, $\Delta NO_{3_{str}}$ 은 질산염 농도의 변화 (mgN/L), $\beta_{N,2}$ 는 질산염의 생물학적 산화를 위한 비율상수 (day^{-1}), $NO_{2_{str}}$ 는 시점에서 아질산염의 농도 (mgN/L), fr_{NH_4} 는 조류에 의해 섭취되는 암모늄 비율, α_1 은 조류 생체량 중 질소 비율 (mgN/mgalg biomass), μ_a 는 조류성장률 (day^{-1}), $algae$ 는 시점에서 조류의 생체량 농도 (mg alg/L)이고, TT 는 하도에서의 유하시간 (day)이다.

2.3 모형의 구축

연구대상지역은 충주댐 상류유역으로 도암댐을 포함한 충주댐 상류까지의 구간이다. 유역면적은 약 6,648 km^2 로 남한강 유역의 약 50%를 차지하고 있으며, 유로 연장 375 km, 평균표고 EL.607 m로 전형적인 산림지역으로 분류된다. 행정구역상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도의 3개도 13개 시·군으로 구성되어 있으며, 동강, 평창강, 주천강, 서강과 골지천, 지장천, 옥동천 등을 포함하고 있다. 대상유역 중 남한강의 최상류 지점인 송천 유역은 고랭지 농업으로 인하여 유역면적 대비 오염

부하량 배출이 높은 지역으로 사회적인 관심을 받고 있는 지역이다. SWAT 모형을 적용하기 위하여 하천도, 유역도, 환경부의 1/50,000 토지이용도, 환경부의 100m×100m의 수치고도모형(DEM), 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도 등의 GIS자료를 구축하였다. 유역의 시·공간적인 수문·수질 분포 특성을 분석하기 위하여 사용되는 물리적 기반의 준분포형 모형에서 DEM은 중요한 요소이지만, 사용하는 유출해석모듈이 100m×100m를 기준으로 선행연구 되어 다른 해상도의 DEM을 사용하면 유출 개선의 효과가 모듈 개선에 의한 것인지 DEM의 해상도 변화에 의한 것인지 정확한 분석이 어렵다. 더욱이 모형의 특성상 소유역의 평균 경사장을 이용하여 유역 출구에서의 유출량을 분석하기 때문에 기존 연구(김남원 등, 2007; 김철겸과 김남원, 2008; Kim and Lee, 2008)와 동일한 해상도의 DEM을 사용하였다. SWAT 모형은 소유역 단위로 유역을 분할하고, 이를 다시 토양도와 토지이용도에 의하여 동일한 수문응답 특성을 가지는 HRU(Hydrologic Response Unit)단위로 세분하여 각 층별로 유역의 유출을 모의하고, 다시 하도로 유입되는 양을 모두 합산하여 소유역 단위로 모의하는 특성을 지니고 있다. 따라서 환경부 수질측정망 위치자료와 주 하천의 흐름을 고려하여 유역을 14개 소유역으로 분할하였고, HRU생성을 위한 토지이용과 토양특성 임계면적 비율은 3%로 설정하여 총 262개의 HRU를 생성하였다(Fig. 1). 그러나 수질관측 지점과 동일한 위치에 유량측정지점이 있다 하더라도 상류 다른 지점들에서의 유출은 결측 및 동절기 동일값이 상당기간 나타나는 등 관측자료가 불충분하여 정확한 비교가 어렵다. 따라서 대상유역의 특성을 나타내는 물리적 입력자료와 매개변수로부터 모형을 구축하여 유역 전체의 수문순환을 포괄하는 최하류 지점인 충주댐 지점에서의 보정을 통해 상류 여러 지점들에서의 수문순환 또한 충분히 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단하여 유역 출구에서의 유출 및 오염원에 대한 분석이 이루어졌다. 토지이용도는 환경부 토지피복분류의 대부분류를 이용하여 시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 나지, 습지, 수역으로 분류하였다. 기상자료는 대관령, 동해, 원주, 영월, 충주, 제천, 태백, 제천, 영주 등 9 지점의 기상관측소 자료를 1990~2006년까지 기상청으로부터 제공받아 Thiessen법에 의하여 분할하여 입력하였다. 점오염원자료는 유역 내 하수종말, 마을하수, 분뇨, 공단 및 축산폐수처리시설 등의 환경기초시설자료를 충주댐 관리연보(한국수자원공사, 2003)에서 제시하고 있는 환경기초시설이 모두 가동됨을 전제로 하고, 가동 효율은 70%로 가정하여 각 처리시설별 방류수 수

질 기준과 관측 수질자료의 항목별 비율을 고려하여 소
유역별 배출부하량을 산정하였다.

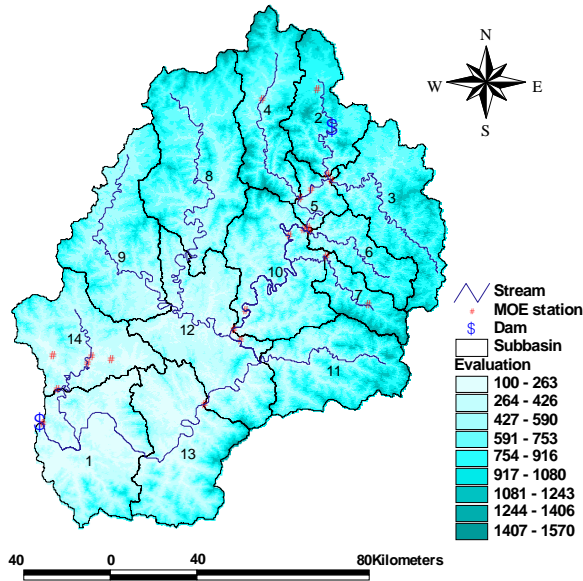


Fig. 1. Location of Study Area

3. 결과 및 고찰

3.1 유출량 분석

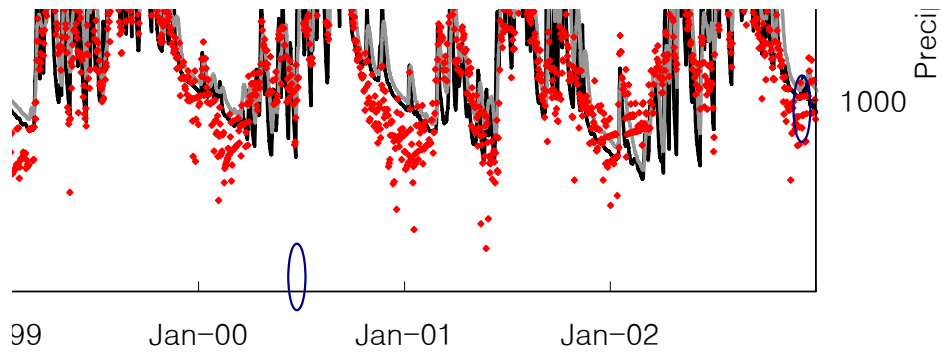
수질 모의에 앞서 유출구조 개선효과를 확인하기 위
하여 1998년에서 2002년까지 유출분석을 실시하였다
(Fig. 2(a)). Muskingum 방법과 기존의 CN 산정법을
사용한 AVSWAT2000 버전에 의한 모의값과 비선형
저류방정식과 TWA-CN이 탑재된 개선된 SWAT 모형
(SWAT-K)의 모의값을 유역의 최종 출구점인 충주댐
지점의 일단위 관측 댐유입량 자료와 비교하였다. 매개
변수의 보정은 총유출량과 침투유량에 변화가 큰 변수
를 중심으로 시행착오법에 의하여 수행하였으며, 개선
전·후의 두 모형 모두 같은 매개변수를 사용하여 보정
이 이루어졌다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 AVSWAT
2000의 모의값에 비하여 개선된 SWAT 모형의 모의값
이 과소 산정되던 침투유출을 실측치에 근사하게 모의
함으로써(Fig. 2(c)) 유출의 시간적 변화를 현실적으로
구현하고 있는 것으로 나타났다. 이는 Muskingum 방
법의 가중인자 계수값이 음의 값으로 산정되는 문제를
해결하기 위하여 인위적인 매개변수 보정을 수행하더라
도 과도한 지체현상이 나타나는 한계와 금일 발생한 강
수의 영향이 고려되지 않은 기존의 CN 산정법으로 인
하여 침투부가 과소하게 산정되는 문제점의 개선에 의
한 결과로 기존 연구(김남원 등, 2007)의 객관성이 입증
되었다.

3.2 수질 모의 분석

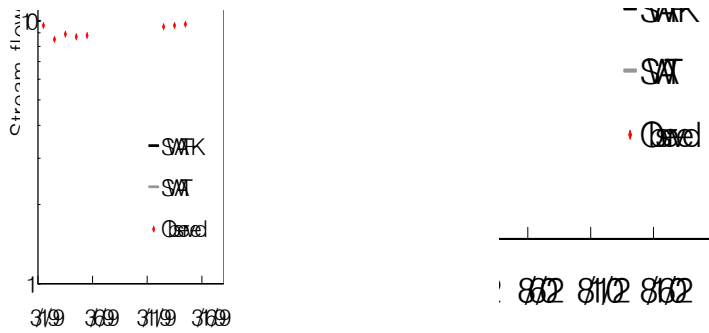
수질 분석을 위하여 1996~2006년까지의 수질 모의
결과와 충주댐 지점의 환경부 월 1회 수질관측망 자료
를 비교하였다. 영양물질 관련 매개변수는 유사 및 유
출에도 영향을 미치기 때문에(김철겸과 김남원, 2008)
모형 자체의 능력을 평가하기 위한 별도의 매개변수 보
정과정은 수행하지 않았고, 유출 구조 개선의 전체적인
효과(SWAT-K)와, 지표유출 개선(SWAT-TWACN)과
하도추적 개선(SWAT-NSTR)이 수질 모의에 미치는
독립적인 효과를 분석하기 위하여 지표유출 개선 전·
후, 하도 추적 개선 전·후, 지표유출과 하도추적 개선
전·후의 경우로 SS (ha/kg/day), T-N (ha/kg/day),
T-P (ha/kg/day) 항목에 대한 모의를 수행하였다.

전체적인 개선에 의한 모의값과 실측값은 SS를 제외
하고 유사한 변화양상을 보이고 있다(Figs. 3~5 (a)).
다만 충주호는 유입량이 적으나 하도의 경사가 깊은 곳
에 형성된 호소형 댐 호로 모의 지점인 충주댐 지점은
이러한 댐 호의 특성을 갖고 있기 때문에 SS의 경우
관측치와 모의치의 상관성이 떨어지는 것으로 판단된
다. 유출량의 모의에서 나타났던 기존 SWAT 유출의
시간적 변화를 유연하게 모의하지 못하는 현상이 수질
모의 결과에 반영되는 것을 확인할 수 있다. SWAT 모
형의 하천의 영양물질을 계산하는 과정에서, 암모니아
(NH₄)농도의 변화, 수용성 무기인의 농도 변화 등은 모
두 수심과 하도 내 유하시간의 함수이기 때문에 비정상
적으로 과도하게 산정되는 수심 및 유하시간 계산의 개
선과, 시간 가중 유출곡선지수법에 의하여 침투유출이
개선되어 질소와 인 부하량이 현실적인 범위의 값으로
개선된 것을 확인할 수 있다. 그러나 영양물질의 모의
는 유입되는 오염물질이 유량 및 유속 분포에 따라 희
석, 환산, 분산 작용을 일으키며 유하하는 동안 수리·
수문학적 특성을 나타내는 각종 수문인자의 변화와 생
화학적 반응 및 오염원의 분포상태, 기후변화 등 복합
적인 요인에 의해 영향을 받기 때문에 어느 한 요인에
의하여 그 결과가 나타났다고 단정지를 수는 없다.

모형의 개선효과를 정량적으로 평가하기 위해 1996
년부터 2006년까지의 Mean Value(kg/ha/day), 결정계
수(coefficient of determination, R²), Nash and
Sutcliffe(1970) 모형효율(NSE)을 산정하였다(Table 1).
관측자료는 월 1회 비연속적으로 측정된 값으로 누락된
기간이 있는 등 단기간 분석을 하기에는 관측수의 부족
으로 신뢰성 있는 결과를 도출하기 어려워 SS와 T-N
130개, T-P 129개의 11년간의 관측치와 모의치와의 일
대일 비교를 통하여 통계치를 산정하였다.



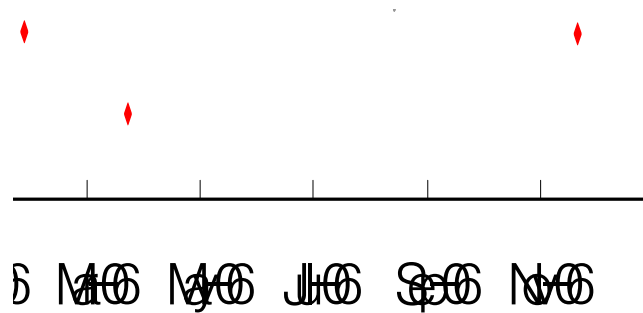
(a) Total runoff



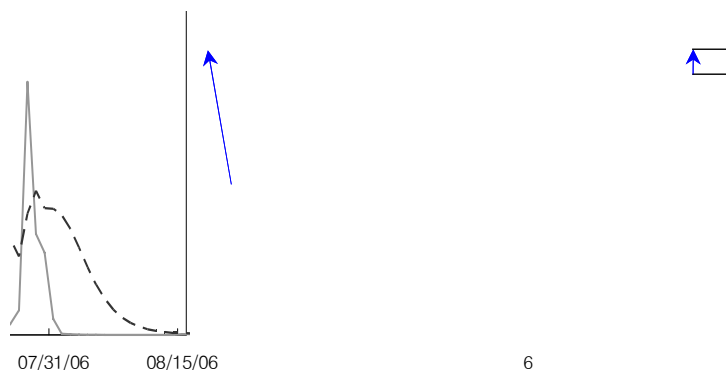
(b) Low flow

(c) Peak flow

Fig. 2. Comparison of Observed and Simulated Hydrograph for SWAT and SWAT-K Models



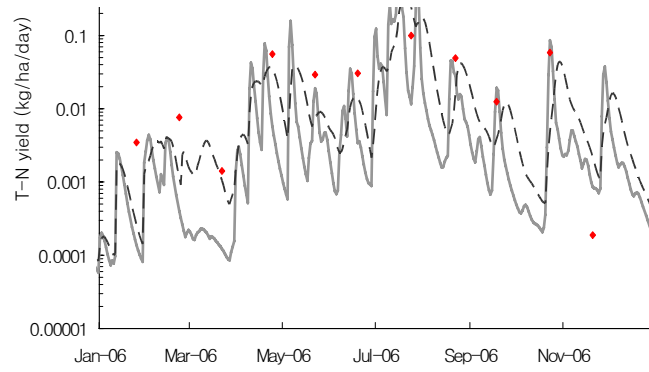
(a) SS (SWAT-NSTR and TWACN)



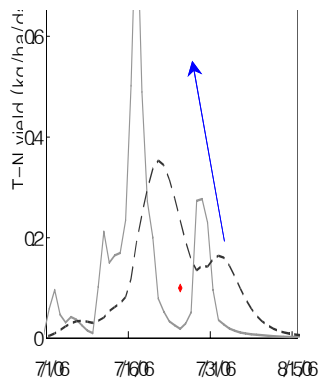
(b) SS (SWAT-NSTR)

(c) SS (SWAT-TWACN)

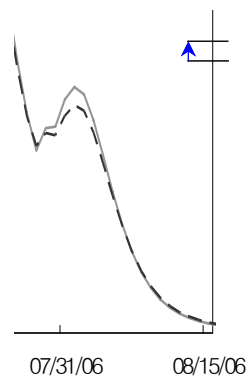
Fig. 3. Comparison of Observed and Simulated Sediment Yield for 2006



(a) T-N (SWAT-NSTR and TWACN)

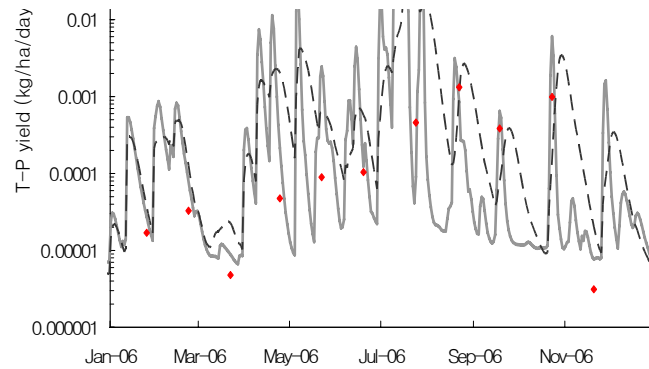


(b) T-N (SWAT-NSTR)

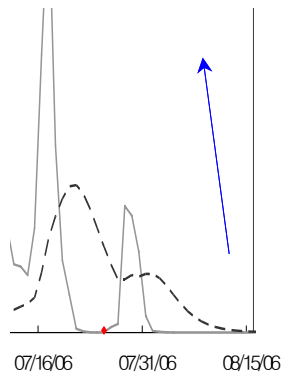


(c) T-N (SWAT-TWACN)

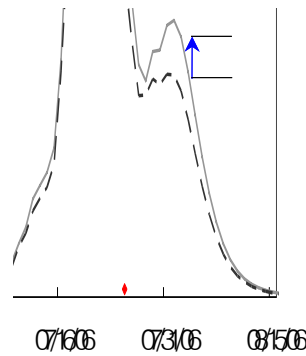
Fig. 4. Comparison of observed and simulated T-N yield for 2006



(a) T-P (SWAT-NSTR and TWACN)



(b) T-P (SWAT-NSTR)



(c) T-P (SWAT-TWACN)

Fig. 5. Comparison of observed and simulated T-P yield for 2006

Table 1. Statistical Analysis of T-N and T-P from 1996 to 2006

Pollutants	Models	No. of data	Mean Value (kg/ha/day)	R ²	NSE
SS	AVSWAT2000	130	3.94E+01	0.25	-
	SWAT-NSTR		2.99E+01	0.03	-
	SWAT-TWACN		3.91E+01	0.25	-
	SWAT-K		3.23E+01	0.04	-
T-N	AVSWAT2000	130	2.71E-02	0.11	0.07
	SWAT-NSTR		2.44E-02	0.84	0.63
	SWAT-TWACN		2.69E-02	0.12	0.08
	SWAT-K		2.39E-02	0.86	0.53
T-P	AVSWAT2000	129	2.55E-03	0.08	-
	SWAT-NSTR		2.05E-03	0.68	-
	SWAT-TWACN		2.53E-03	0.08	-
	SWAT-K		2.80E-03	0.77	-

개선 전·후와 개선 모듈에 따라 통계치를 산정한 결과, 각 방법 간 큰 차이를 보여주고 있다. 전체적으로 개선 전인 AVSWAT2000과 TWACN법이 유사한 값을 보이고, 개선 후인 SWAT-K와 NSTR법이 유사한 값을 보이고 있다. TWACN법은 침두시에만 유출이 개선되었기 때문에 일정하게 측정되지 않는 관측자료의 특성상, 침두시의 부하량이 아닌 값들은 AVSWAT2000과 거의 동일하게 산정되어 통계분석상 개선의 효과를 확인하기 어려운 것으로 판단된다. SS를 제외하고 R²의 값이 가장 뚜렷한 차이를 보이고 있는데, 이는 침두유출 증가로 인한 강우시의 부하량 증가로 비가 내린 날 측정된 관측값이 실측 부하량에 좀 더 근접한 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 모형효율(NSE)의 값이 이상치를 나타내는 것은 윤춘경 등(2007)에 의하면 인은 질소와 달리 물에 쉽게 녹

지 않고 토양에 입자에 흡착되어 토양과 함께 배출되는 특징을 지니고 있다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 SS와 T-P사이에 높은 상관성이 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 인의 모의에 앞서 정확한 유사량의 검·보정이 선행되어야 한다. 그러나 매개변수의 산정은 본 연구의 목적을 벗어나기 때문에 이와 관련된 자세한 설명은 생략한다.

모형의 구조적인 측면에서 접근하면 유사량의 산정은 앞서 언급한 2.2절 수질 항목 계산과정의 Eq. (7)과 같이 유량 이외에 토지이용의 형태 및 토양 특성의 함수임을 알 수 있다. 따라서 Table 1과 같이 SS의 R²가 개선 후 오히려 감소하며, 모형 효율 값이 일반적인 범위를 벗어나는 등 일관성 있는 자료의 경향을 분석하기 어렵다. 이는 본 연구에서 MUSLE식의 K_{USLE} , C_{USLE} , P_{USLE} , LS_{USLE} , $CFRG$ 등의 매개변수를 앞서 언급한



(a) Observed data (b) Simulated data
Fig. 6. Comparison of Observed and Simulated SS and T-P Data

바와 같이 초기값으로 고정하고 검 · 보정 과정을 수행하지 않았다. 모형의 매개변수가 초기값인 조건으로 우리나라에 적용함은 국내 지형 및 토지 이용 특성이 모형에 반영되지 않음을 의미한다. 따라서 유출모형을 개선한다 할지라도 지형 특성을 고려한 유사 매개변수의 산정이 필수적임을 알 수 있다.

질소와 인은 통계 분석 결과 명확한 개선효과를 확인할 수 있는데, 이는 유역내에서 발생한 영양물질은 Eq. (9)와 같이 유역 내 유출을 따라 이동하고, 하도로 유입된 후 Eq. (10)과 같이 유하시간에 의하여 배출이 이루어지는 유량의 함수이기 때문이다. 특히, 하도추적 개선에 의한 유하시간의 안정화로 인하여 SWAT-NSTR법에 의한 결과가 결과 개선에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 영양물질 모의에 있어서 매개변수의 산정에 앞서 정확한 유출 모의가 선행되면 안정된 결과값을 얻을 수 있다고 판단된다.

전체적인 분석 결과, 수질 모의에 있어서 지표유출계산의 개선보다는 하도추적의 개선이 더 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 강우시 강우를 따라 배출되며 유출의 침투보다 부하량의 침투가 먼저 발생하는 유사 및 영양물질 등의 비점오염원의 특성 상 하도추적의 개선으로 인한 유출 지체 현상의 개선이 부하량의 배출에 가장 큰 요인으로 작용하였기 때문이라고 판단된다. 또한, 각 영양물질의 계산과정을 통하여 유량의 독립적인 함수가 아닌 SS의 경우 유출구조의 개선보다는 유역 특성을 반영한 매개변수의 산정이 필수적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

점오염원과 달리 널리 산재되어 있어 강우 시 강우와 함께 배출되는 특성을 지닌 비점오염원의 모의에 있어서 정확한 수문유출모의는 반드시 선행되어야 하는 필수요소이다. 장기유출모의는 유역의 지표유출계산과 하도 내 추적에 의해서 결정되기 때문에 정교한 유출모의를 위해서 각 추적방법의 선택 및 방법의 정확성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 유역모형의 지표유출계산과 하도추적의 개선이 수질 모의에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대표적 유역모형인 SWAT 모형과 개선된 SWAT-K 모형을 충주댐 상류 유역에 적용하여 유출모의를 통한 유출구조 개선효과를 확인하고, 이에 따른 수질 모의 결과를 분석하였다.

비선형 저류방정식법과 시간 가중평균 유출곡선지수 산정법을 모형 내 탑재하여 유출모의를 수행한 결과 개선 전의 모의값에 비하여 개선된 SWAT-K 모형의 모

의값이 감수부의 수치적 불안정함을 개선하고 과소 산정되던 침투유출을 실측치에 근사하게 모의함으로써 유출의 시간적 변화를 현실적으로 구현하고 있는 것을 확인하였다.

유출 구조의 개선이 수질 모의에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모형 개선 전 · 후 및 각 개선방법에 의한 결과를 분석하였다. 전체적인 개선에 의한 모의값과 실측값은 유사한 변화양상을 보이고 SS, T-N, T-P 모두 기존의 SWAT 결과에서 나타나는 약 1-4일 정도의 지체가 개선되어 실측치를 모사하는 능력이 높아지고, 유출수문곡선의 침투부 개선에 의하여 수질 항목별 침투부 부하량 역시 증가한 것을 확인할 수 있었다. 각 개선방법별 통계분석을 실시한 결과, 전체적으로 개선 전인 AVSWAT2000과 지표유출계산의 개선이 유사한 값을 보이고, 개선 후인 SWAT-K와 하도추적을 개선한 방법이 유사한 값을 보이고 있었다. 따라서 수질 모의에 있어서 지표유출계산의 개선보다는 하도추적의 개선이 더 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한, 각 영양물질 계산과정의 고찰을 통하여 SS의 경우 유출구조의 개선보다는 국내 특성을 반영한 매개변수의 산정이 필수적임을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시된 유출구조의 개선은 유출의 지체와 감쇠를 개선하고 침투유출의 증가를 통하여 유출모의의 신뢰도를 증가시키며 이는 유량을 따라 이동하는 영양물질의 모의에 절대적인 영향을 미친다. 따라서 개선된 SWAT-K 모형이 국내 유역에 높은 적용성을 갖는 모형임이 입증되었다. 다만 유역 내의 토지 이용 및 토양 특성 또한 오염원의 거동에 중요한 요소이므로 일부 항목의 적절한 매개변수의 산정이 필요함을 확인하였다. 결론적으로 오염총량관리 및 비점오염원 관리에 있어서 유출구조의 개선에 의한 정교한 수문모델링은 수질 모의의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

강원발전연구원 (2007). **고랭지 농업의 작물별 객토량 변화에 따른 토양유실 저감분석.**
과학기술부 (2007). **지표수 수문성분 해석기술 개발.**
권명준 (2000). **농촌유역 하천의 수질예측을 위한**

- SWAT모형과 WASP모형의 연계운영. 석사학위논문, 서울대학교, pp. 40-58.
- 금강유역환경청 (2005). **비점오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석.**
- 금강수계관리위원회 (2007). **금강수계 물수지 및 비점 오염물수지 해석.**
- 김남원, 이정우, 이병주, 이정은 (2007). “비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제5B호, pp. 533-542.
- 김상단, 강두기, 신현석 (2006). “수리매개변수가 수질에 미치는 영향분석.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1641-1645.
- 김종성 (2006). AVSWAT을 이용한 비점오염물질 원단위 및 유달을 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 충남대학교, pp. 44-53.
- 김철겸, 김남원 (2008). “충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제4호, pp. 465-472.
- 박종윤, 이미선, 이용준, 김성준 (2008). “SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문 - 수질에 미치는 영향 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 187-197.
- 신아현 (2008). BASINS/WinHSPF를 이용한 충주댐 유역의 댐 모의 및 비점오염 저감방안 연구. 석사학위논문, 건국대학교, pp. 9-15.
- 유혜은 (2007). SWAT모형을 이용한 대청호 유역의 오염물질 유달을 산정. 석사학위논문, 청주대학교, pp. 70-79.
- 윤춘경, 신아현, 정광욱, 장재호 (2007). “BASINS/WinHSPF를 이용한 남한강 상류유역의 비점오염원 저감효율평가.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제6호, pp. 951-960.
- 한강수계관리위원회 (2007). **유역내 하천 유지 가능 유하량 해석.**
- 한국수자원공사 (2003). **충주댐 관리연보.**
- Arnold, J. G., Allen, P. M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface-groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Chaplot, V. (2005). “Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions.” *Journal of Hydrology*, Vol. 312, pp. 207-222.
- Cunge, J. A. (1969). “On the subject of a flood propagation method(Muskingum method).” *Journal of Hydraulics Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 205-230.
- Gikas, G. D., Yiannakopoulou, T., Tsihrintzis, V. A. (2006). “Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin.” *Environmental modeling & assessment*, Vol. 11, No. 3, pp. 219-233.
- 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.
- Migliaccio, K.W., and Chaubey, I. (2008). “Spatial Distributions and Stochastic Parameter Influences on SWAT Flow and Sediment Predictions.” *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 258-269.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). Soil and Water Assessment Tool; the theoretical documentation (version 2000). U. S. Agricultural Research Service.
- Shen, Z., Hong, Q., Yu, H. (2008). “Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China.” *The Science of the total environment*, Vol. 405, No. 1/3, pp. 195-205.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., Srinivasan, R. (2006). “A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 324, pp. 10-23.
- Williams, J. R., and Berndt, H. D. (1972). “Sediment yield computed with universal equation.” *Journal of the Hydraulics Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 98, pp. 2087-2098.
- Williams, J. R. (1995). *Chapter 25: The EPIC model*, in V. P. Singh(ed.) Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications. pp. 909-1000.

(논문번호:08-119/접수:2008.12.16/심사완료:2009.03.12)