

연구논문

유역모형과 하천수질모형의 연계를 통한 비점오염원 영향분석

최현구* · 김동일* · 김지은** · 한건연***

경북대학교 건축·토목공학부 박사과정수료*, 인천국제공항공사**, 경북대학교 건축·토목공학부 교수***
(2010년 9월 2일 접수, 2010년 12월 29일 승인)

Non-point Source Impact Analysis through Linkage of Watershed Model and River Water Quality Model

Choi, Hyun Gu* · Kim, Dong Il* · Kim, Ji Eun** · Han, Kun Yeun***

Ph.D. Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea*
Incheon International Airport Corporation, Incheon, 400-700, Korea**
Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea***
(Manuscript received 2 September 2010; accepted 29 December 2010)

Abstract

In this study, the accurate water quality analysis in rivers, including the non-point source is performed. First of all, watershed model, SWAT(Soil and Water Assessment Tool) was applied to analyze the impact of the non-point source in study area. And then, water quality analysis integrating the point source and the non-point source is implemented using QUALKO model. For more exact simulation, it should be the calibration and verification of variables and parameters which are needed for simulation. In addition, the importance of considering the non-point source was confirmed in river water quality simulation. BOD, TN, TP were analysed, and the results shows that BOD, TN and TP concentration was increased to 16.8%, 8.2% and 25.8% respectively. The more accurate estimate will be carried if use of reliable measurements and watershed simulation be done in models linking process. The suggested technique will improve the accuracy of the water quality analysis. The methodologies presented in this study will contribute to basin-wide water quantity and quality management.

Keywords : SWAT, QUALKO, Non-Point Source, Water Quality Modeling

1. 서론

도시화, 산업화의 진전으로 토지개발이 가속화되고 대지, 도로, 주차장 등 불투수층 면적이 늘어남에 따라 비점오염원에 의한 하천, 호소의 수질악화가 가중되고 있다. 특히 낙동강유역에서의 오염원 관리, 특히 비점오염원의 정량화는 삭감시설의 삭감량 평가 및 배출오염원 평가에 더욱 절실한 문제로 부각되고 있다. 삭감시설의 삭감량 평가 시에는 실험실 규모로 이상적인 유량 상태를 가정하여 삭감효율을 산정하고 있으나, 자연강우에 의하여 나타나는 삭감효율 평가는 이상적인 유량평가 해석시와는 다른 경향을 나타낸다. 또한 유역 말단 지점에서의 3년 평균 수질이 목표수질을 상회하였을 경우 오염총량 기본계획 지역에서 오염총량 이행평가 지역으로 포함시켜 오염부하량 관리를 실시하고 있다. 그러나 배출부하량과 수질의 연계가 쉽지 않고, 그 원인이 되는 지역 및 시기를 찾아 특별 관리하는 것이 난해하여 하천 수질 관리가 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 낙동강 유역에서의 비점오염원과 점오염원을 동시에 고려하여 모델링하기 위한 방안 및 방법론을 제시하고자 한다.

본 연구의 목적은 유역 내에서의 수질 분석을 통한 점 및 비점오염원의 정량화를 수행하고, 유역 모델과 하천 수질모델의 연계방안을 구축하여 오염원 관리에 있어 비점오염원 관리 중요성을 고찰하는 것이다. 최근에 들어 도시화와 이상기후의 영향으로 유역에서의 유출특성과 오염물질 발생특성도 변화하고 있고 이에 따라 정교한 유역 수질분석이 요구되고 있다. 유역수질해석을 위한 Prototype을 개발하고 비점오염원의 유출경로를 파악함으로써, 발생부하-유출부하-유달부하의 상관관계 분석이 필요하고 이를 통해서 비점오염원의 적정관리기술이 제시되어야 할 것이다.

수질의 통합하천관리의 중요성을 인식하고 각각의 모형의 장단점을 고려하여 다양한 모형들을 연계하는 방안을 구축함으로써, 정량화된 비점오염원 산정을 통해 하천에서 무분별하게 들어오는 비점오염원 관리 방안을 구축할 수 있고 이를 오염총량제 및

하천 수질 모의에 활용하여 더욱 정확한 수질 모의가 가능할 것이라 판단된다. SWAT 모형과 HSPF 모형과 같은 유역모형의 경우 유역 말단 지점의 수질모델링만이 가능하고, 반면 QUALKO모형과 같은 하천모형은 비점오염원을 정량화된 오염원 값이 아닌 대략적인 비점오염원의 양을 입력하거나 또는 고려하지 않고 모델링하는 한계점을 가지고 있다. 이러한 한계점을 극복하고 수질해석에 있어서 오염원의 정확한 반영을 위해 비점오염원 모델링에 유리한 SWAT 모형과 점오염원의 영향을 가장 잘 반영하고 질소와, 인의 모의에 탁월한 QUALKO 모형을 연계하여 최적의 하천 유역 통합 모의가 가능할 것으로 보인다. 이로 인해 수질에 영향을 미치는 많은 수의 점오염원과 비점오염원을 동시에 고려함으로써, 수질 평가와 장래 수질 예측, 그리고 추후 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원 관리 기반을 구축하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

최근 수질관련 연구 동향으로는 유역모형에서는 박경옥(2007)이 유역내 비점오염원 정량화에 대한 연구를 하였으며, 김남원 등(2009)이 SWAT 모형을 개선시킨 SWAT-K 모형을 이용하여 BOD 모의를 실시하였다. 장재호 등(2010)은 점·비점오염원의 삭감시나리오에 따른 저감효과와 수질변화를 분석하였으며, 허성구 등(2008)은 고령지 지역에서 농업 비점오염원 발생량을 평가하고, 저감대책을 수립하는 연구를 실시하였다. Manoj *et al.* (2006)은 라쿤강 유역에서 토지이용과 관리대책에 따른 유량, 유사, 영양염류에 대한 분석을 실시하였으며, Debele *et al.* (2008)은 SWAT 모형과 CE-QUAL-W2 모형을 연계하여 수자원 관리를 위한 연구를 수행하였으며, Liu *et al.* (2007)은 수변녹지대를 구성하여 수질의 영향을 분석하였다. BASINS/HSPF를 이용한 연구는 정광욱 등(2007)이 화성유역의 오염부하량을 정량적으로 평가했으며, 김승필(2005)은 탄천유역의 수질 수문 모델링을 실시하였다. BASINS/WinHSPF 모형의 적용으로는 윤춘경 등(2007)은 소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 수행하였고, 한정운(2007)은 소양강댐 유역관리방안을 연구하였

다. 하천수질 모델링의 연구 동향으로는 고재홍 등 (2009)이 QUALKO 모형과 QUAL2E 모형을 영산 강수계에 적용하여 비교하였으며, 이재근(2008)은 QUALKO 모형을 이용하여 대전지역 하천의 오염원 삭감에 따른 수질변화를 예측하였다. 신창민 등 (2008)은 QUAL-NIER 모형의 수질모델 인자를 조사하여 4대강 수계에 적용하였다. Fang et al. (2008)은 엑셀 기반의 하천수질해석 모형인 QUAL2K를 이용하여 BOD 분석을 실시하였으며, Paliwal et al. (2007)은 BOD, DO 수질해석과 더불어 1차오차해석과 몬테카를로 분석을 통한 신뢰도 분석을 수행한 바 있다.

최근 연구 동향은 유역모형과 GIS 툴을 이용하는 모델링이 주를 이루며 유역모형과 수질모형의 연계를 통해 유역의 수질모델링을 실시한다. 유역모형은 유역의 비점오염원의 영향을 고려할 수 있으나 유역 발달의 수질만을 제시하여 하천 임의의 지점에서 비점오염원의 영향을 정량적으로 분석하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 이러한 통합적 수질관리의 필요성 증대에 따라, 유역 내 수문 순환 및 비점오염원의 발

생 거동을 정량적으로 분석할 수 있는 SWAT모형을 통해 비점오염원으로 인한 유역 내 수질 영향을 파악하고, 이를 바탕으로 QUALKO 모형과 연계하여 하천 수질 모델링을 수행하여 하천에서의 비점오염원의 영향을 평가하고자 한다(그림 1).

II. 모형의 특성 및 지배방정식

전형적인 유역모형은 수문에 초점을 두어 수질 및 비점오염원 모의 및 예측이 어려웠으나, 최근 들어 많은 모형은 수문·수질 모두에 대하여 모의할 수 있어 유역 관리 및 비점오염원 관리를 용이하게 하였다. 구체적으로 최근의 유역모형은 흐름뿐만 아니라, 오염물질 부하 및 농도, 토지이용과 관련된 부하 산정, 흐름 이송, 다양한 관리 대안을 평가하는 접근법 등을 제공하고 있는 실정이다.

유역모형의 수행은 자료의 유용성, 모형의 적합성 등에 의해 선정될 수 있고, 이 중에서 지하수 모의 수준, 비점오염원 관리에서 중요한 인자인 농작물 관리 및 성장 모의 여부, 그리고 인간의 인위적인 행위인 관개 등을 모의할 수 있다는 장점을 가지고 있는 SWAT 모형을 적용하여 비점오염원 모의를 수행하였다.

하천 모의는 낙동강의 경우 방대한 유역환경과 하천의 수리·수문학적 변동특성, 수질변동특성이 심하게 나타나므로 이들의 영향을 정확히 반영할 수 있는 수질모델이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 국내외에서 개발되어 널리 사용되고 있는 모형(QUAL2E, WASP5, CE-QUAL-RIV1, QUALKO, QUAL-NIER, QUAL2K) 중 하천의 질소와 인과 같은 영양염류의 관계를 세분화한 QUALKO 모델을 선정하였다.

1. SWAT 모형의 특성 및 지배 방정식

SWAT 모형은 큰 미계측 유역에서 물, 유사, 화학물질들의 관리 효과를 예측하기 개발된 모형이다. 하도와 저수지를 통과하는 유량 추적, 부가적인 유량의 추가, 관측자료의 입력 등에 대한 명령어가



그림 1. 연구 개요

존재하며 추적 명명어 언어를 이용하여 격자 및 소유역으로 나누어 유역을 모의하게 된다. 소유역 성분은 수문학, 기상, 유사, 토양 온도, 작물 성장, 영양물질, 농약, 농업 경영과 같이 여덟 개의 항목으로 구분될 수 있다.

수문 모형은 Eq. (1)과 같은 물수지 방정식에 기초한다.

$$SW_t = -SW + \sum_{i=1}^I (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

여기서 SW 는 토양 함수율에서 압력 15ba에서의 함수율을 뺀 값이고, R , Q , ET , P , QR 은 각각 일 강우량, 일 유출량, 일 증발산량, 일 침루량, 일 회귀수량을 나타낸다. 모든 단위는 mm로 나타낸다.

유출, 측방유량, 침루 내에 포함된 NO_3-N 의 양은 물의 체적과 평균 농도의 곱이다. 낮은 레이어에서의 침출과 측방 중간류는 지표유출이 고려되지 않는 것을 제외하고 위의 레이어와 동일하게 다루어진다. 토양 최상층에서의 유기성 질소 농도, 유사량, 농축비에 기반하여 부하함수에서 유기성 질소 유출 손실을 산정한다. 농작물의 질소 이용은 수요와 공급 접근을 이용하여 산정한다.

지표 유출에서 용해성 인 손실 산정에 대한 접근법은 Leonard *et al.* (1980)에 의해서 개발된 것처럼 농약을 용액상과 침전물상으로 분할하는 개념을 기반으로 한다. 인은 주로 침전물 상태와 관련이 있기 때문에 용해성 인의 유출은 토양 최상층에서의 불안정한 인 농도, 유출 체적, 분할 인자를 이용하여 예측한다. 인의 침전물 이송은 유기성 인 이송에서 언급된 것처럼 부하 함수로 모의된다. 농작물의 인의 사용은 또한 수요 공급 접근법으로 산정된다.

2. QUALKO 모형의 특성 및 기본방정식

2001년 QUAL2E 모델에 조류생산 및 사멸에 의한 내부생산 유기물 증가를 고려하고 조류사멸/호흡에 따른 인과 질소 배출물의 존재형태를 세분화하고, Bottle BOD 개념을 도입하여 보다 정확한 수질예측을 하고자 했던 모델로 QUALKO는 전 대상 수역을 크게 n 개의 구간(reach)으로 나누고, 각 구

간 내부를 소구간 요소(element)로 다시 나누어 농도를 소 구간별로 계산하는 방법을 이용하고 있다.

전체 모형은 완전 혼합형 반응조가 계속적으로 이어져 있는 형태로 표현되고, 각 구간 내부에서는 구간의 수리학적 또는 지형학적 특성을 고려한 하상경사, 하천의 종단면적, 그리고 마찰계수 등과 각 구간의 매개변수인 BOD 분해율, 저층의 용출율, 그리고 조류의 침강속도 등을 포함한 화학적 분해속도 등이 일정하다고 가정한다.

모형 내에서 BOD를 계산하는 지배방정식은 다음과 같이 구성되었다.

$$\frac{dL}{dt} = -K_1L - K_3L + (1-\gamma)\alpha_4\rho A - \alpha_3\beta_5N_3 \quad (2)$$

여기서, K_1 은 CBOD의 탈산소계수이며, L 은 CBOD의 농도(mg/L)를 나타내며, K_3 는 C BOD의 침전계수이다. $(1-\gamma)$ 는 자생 BOD에 기여하는 부분이며, α_4 는 단위조류분해에 필요한 산소소비량을 나타낸다. ρ 는 조류의 호흡량이며, A 는 조류의 농도, α_3 는 조류성장시 산소발생량을 나타낸다. β_5 는 탈질화율(d^{-1})이며, N_3 는 질산성질소의 농도이다.

DO는 재포기와 광합성에 의해서 발생되며, CBOD의 산소소모, 질산화, 식물호흡과 광합성에 의해 소멸되며 기본방정식은 다음 Eq. (3)과 같이 구성되었다.

$$\frac{dO}{dt} = K_2(O_s - O) - K_1L - \frac{K_4}{H} + \alpha_3\mu A - \gamma\alpha_4\rho A - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \quad (3)$$

여기서, K_2 는 Ficks의 확산이론과 관련된 재포기 계수(d^{-1})이며, O 는 용존산소의 농도(mg/L), O_s 는 용존산소의 포화농도(mg/L)이다. K_4 는 하상산소요구량($g/m^2/d$)이며, H 는 평균수심(m)이다. μ 는 조류의 비성장율이며, γ 는 조류의 야간호흡에 기여하는 부분을 뜻한다. α_5 는 단위 암모니아성 질소산화에 필요한 산소소비량이며, β_1 는 암모니아성 질소의 산화율, N_1 은 암모니아성 질소의 농도를 나타낸다. α_6 는 단위 아질산성 질소산화에 필요한 산소소비량이며, β_2 는 아질산성질소의 산화율, N_2 는 아질산성질

소의 농도를 나타낸다.

유기질소는 조류의 사멸로부터 생성되고 무기화와 침전, 하상용출흡착에 의해 소멸되며 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\frac{dN_4}{dt} = \alpha_4 R_p A - \beta_3 N_4 - \sigma_4 N_4 \quad (4)$$

$$N_5 = N_4 + \alpha_1 A \quad (5)$$

여기서, α_1 은 조체중의 질소분율이며, β_3 는 암모니아성 질소의 수화에 의한 유기질소의 1차 감쇠율을 나타낸다. N_4 는 비생물성 유기질소 농도이며, σ_4 는 유기질소의 침강율을 나타낸다. α_1 은 조체중의 질소분율을 나타내며, N_5 는 유기질소 농도이다.

암모니아성 질소는 조류의 사멸에 따라 발생한 유기질소의 가수분해에 의해 증가하며 암모니아의 질산염으로의 변환, 조류의 섭취, 그리고 침전, 하상용출에 의해 감소하며 다음 Eq. (6)과 같이 구성된다.

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 + \frac{\sigma_3}{H} - F\alpha_1 \mu A - \alpha_1 (1-R)\rho A \quad (6)$$

여기서, σ_3 는 암모니아성 질소의 하상증가율이며, F_1 은 조류에 의한 질소의 섭취율을 나타낸다.

질산염은 질산화에 의해 생성되고 식물섭취와 탈질화에 의해 제거되며, 질산성 질소의 반응식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2 N_2 - (1-F)\alpha_1 \mu A - \beta_3 N_3 \quad (7)$$

여기서, $(1-F)$ 는 조류의 성장에 따른 질산성질소의 섭취분율을 나타낸다.

유기인은 조류사멸에 의해 생성되고 가수분해와 침전에 의해 소멸된다. 유기인의 가수분해는 용존인의 생성원이며 소멸원은 유사에 의한 흡착과 인의 식물섭취로 구성되며 다음과 같이 유기인과 용존인의 반응식을 구성할 수 있다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_2 R_p A - \beta_4 P_1 - \sigma_5 P_1 \quad (8)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4 P_1 - \alpha_2 (1-R)\mu \rho A + \frac{\sigma_2}{H} - \alpha_2 \mu A \quad (9)$$

여기서, α_2 는 조체중의 인 분율이며, β_4 는 유기인

의 감소계수를 나타내며, P_1 은 유기인의 농도이며, σ_5 는 유기인의 침강율(d^{-1})을 나타낸다.

III. 유역모형을 통한 비점오염원의 정량화

현재 비점오염원에 의한 유량 및 수질 관측은 각 기 지표수 유량 측정, 국부적인 유역의 수질 측정 등을 통하여 이루어지고 있다. 그러나 유역관리의 궁극적인 목적이 하천 수질의 개선에 있으므로 하천 수질에 영향을 주는 비점오염원 정량화에 목적을 두고 분석을 수행하였다.

비점오염원 정량화를 수행하기 위하여 블랙박스 모형을 도입하여 해석하였다. 유입 및 유출 조건을 모두 입력한 상황에서, 영향을 알아보고자 하는 조건을 제외한 다른 조건을 제거함으로써 계 내에서의 변동을 확인할 수 있다. 그 변동 양상을 통하여 비점오염원 정량화를 수행하였다. 즉, 모든 오염조건이 될 수 있는 유입 수문곡선, 환경기초시설 등에 의한 점오염원 자료를 입력함으로써 유입조건을 반영할 수 있고, 이에 따른 대상유역 말단지점의 유량 및 수질 자료를 유출조건으로 고려할 수 있다. 이러한 Black Box 모형을 학습을 통하여 최적으로 해석할 수 있도록 검·보정을 수행한다. 이런 조건 하에서 점오염원에 의한 유입조건을 제거함으로써 계 내에서의 비점오염원에 의한 부하량을 해석할 수 있다.

적용 대상유역은 밀양강 유역으로 형산강, 태화강, 양산천 및 낙동강 본류와 접하며 분수계를 형성하는 유역이다. 유역모형은 1997년에서 2004년까지 모형의 학습기간으로 설정하고 2005년부터 2008년까지 검보정을 실시하였다.

1. 유역모형의 입력자료 구축

유역의 유출특성을 규정할 수 있는 유역자료로 유역에 대한 표고자료, 토지피복도, 토양도, 하도망 자료로 정리할 수 있으며 사용한 자료를 그림 2에 나타내었다. 표고 및 토지피복도는 환경지리정보에서 취득한 자료를 이용하였고, 그 외에 필요한 자료

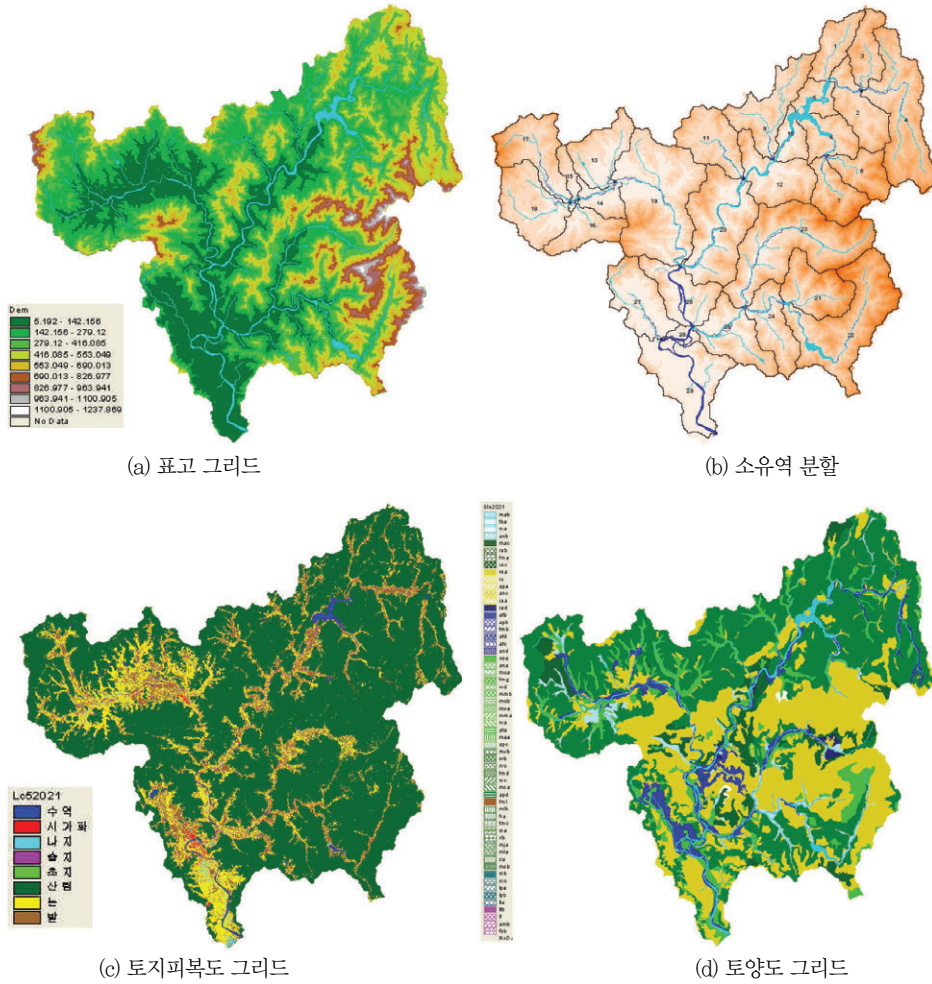


그림 2. 유역모형의 입력자료

에 대한 출처는 다음과 같다. 토양도의 경우 농업과 학기술원에서 발행하는 개략토양도를 이용하여 분석하였고, 하도망 자료는 국가수자원관리 종합정보 시스템 자료로 기존에 표고에 의해서 하천망을 취득하는 문제점을 극복하기 위해서 이용되었다.

유출 현상에 가장 영향을 미치는 변수는 강우 자료이다. 본 모의에서는 밀양강 유역의 총 5개의 강우 관측소를 이용하였고, 기간은 1997년 1월 1일부터 2008년 12월 31일 까지 총 11년으로 설정하여 모의를 수행하였다. 기상자료의 경우 낙동강유역의 기상관측소 중 밀양강 내에 위치하고 있는 밀양기상관측소와 대구, 영천, 합천 기상관측소 자료를 이

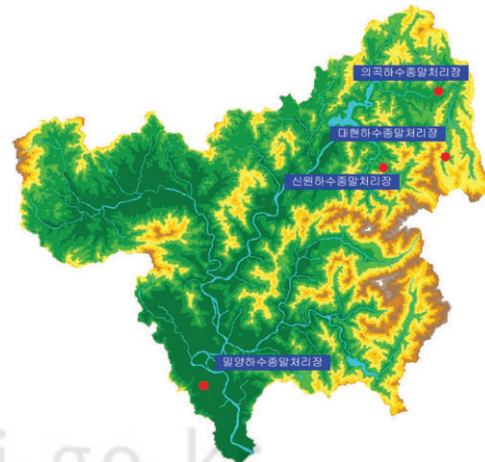


그림 3. 대상유역 내 환경기초시설

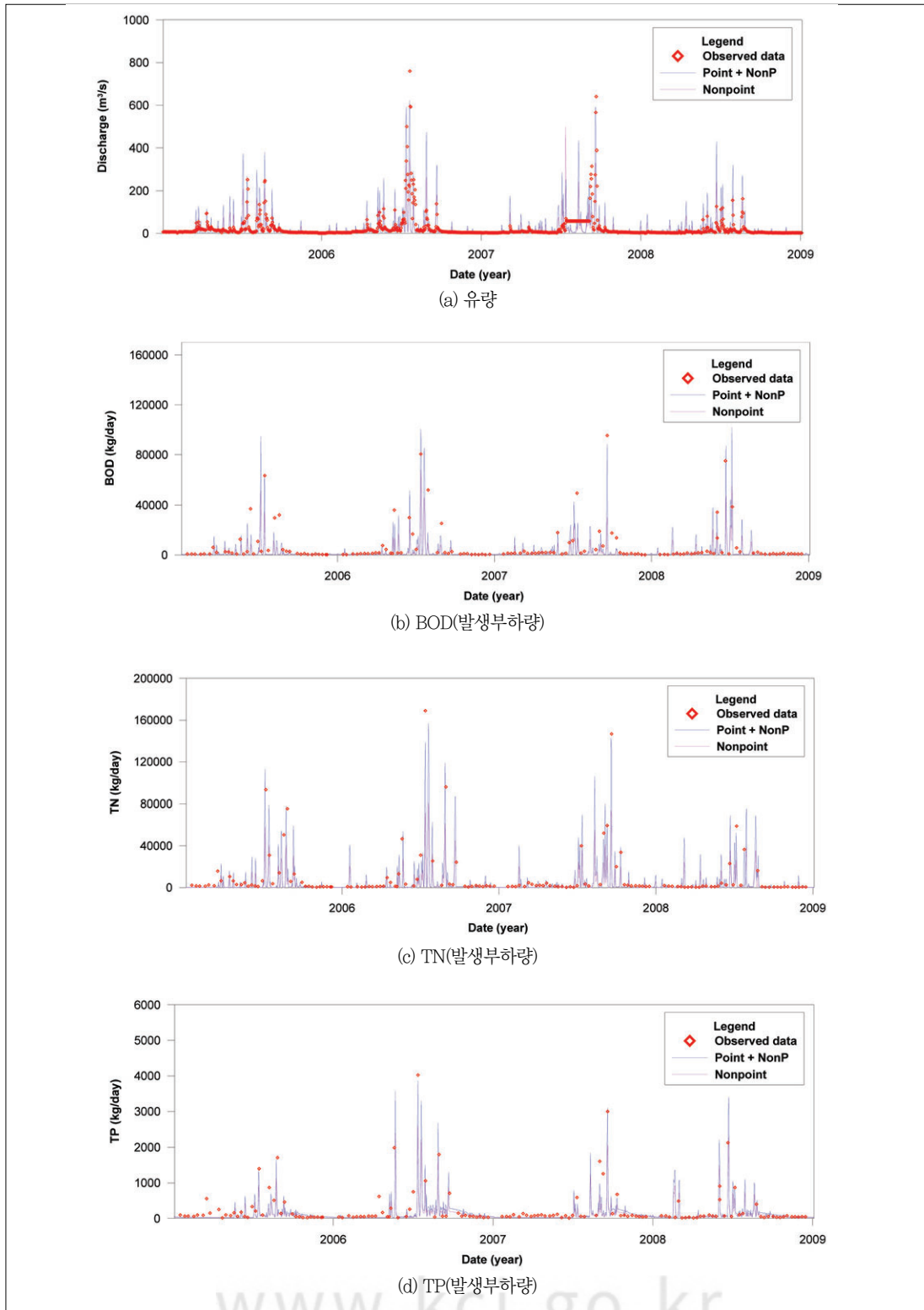


그림 4. 유역모형 모의 결과

용하였다.

하천 수질오염에 영향을 미치는 비점오염원 부하량을 정량적으로 산정하기 위해 우선적으로 점오염원 자료가 입력되어야 한다. 그리하여 비점오염원 산정을 위해 유량을 계산한 후 이를 바탕으로 점오염원을 제외하고 토양에서 나오는 비점오염원량을 산정하였다. 이를 위해 본 대상 유역 내에 존재하는 환경기초 시설을 오염원 입력 자료로써 구축하였으며 그림 3에 나타내었다.

2. 유역모형의 적용 결과

오염물질 검·보정은 밀양유역 말단지점 8일 실측치를 기반으로 모형내에 포함된 SCE-UA 기법을 이용하여 실시하였다. 초기에 총량 규제에 이용되는 물질은 5일 BOD를 기반으로 하므로 5일 BOD를 포함시켰고, 추가적으로 TN, TP를 포함하였다. TN의 경우 유기성 질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소로 나누어서 출력되는 것을 모두 합한

양으로 산정하였고, TP의 경우 무기성 질소와 유기성 질소의 합으로 표현하였다. 또한 오염물질 해석의 결과 검·보정에 이용되는 밀양유역 말단지점 8일 실측치 자료가 일농도 데이터로 나타나 있어 똑같은 유출 해석의 결과를 이용하기 위해 출력기간을 일별로 선택하여 값을 취하였고, 실측 농도값을 유량과 오염원 농도값을 이용하여 부하량으로 환산하여 비교하였다. 해석 결과는 그림 4와 같다.

BOD 검·보정시 5일 BOD 값에 영향을 주는 매개변수는 탈산소계수 즉 RK1, 침전에 의한 생물학적 산소 요구량 손실 계수 RK3, 토양층에서의 침식에 영향을 미치는 매개변수 K에 영향을 받으므로 세 가지 변수를 중심으로 하여 하천 수질 검·보정을 실시하였다. TN의 경우 AI1, BC1, BC2, BC3, P_N, RS3, RS4 그리고 RHOQ 등의 매개변수들을 통해 하천 내에서의 N 계의 반응을 모의하는데 사용하였다. TN의 경우 강우에 따른 유출현상 때문에 매년 변동이 심한 것으로 확인되었다. TP의 경우

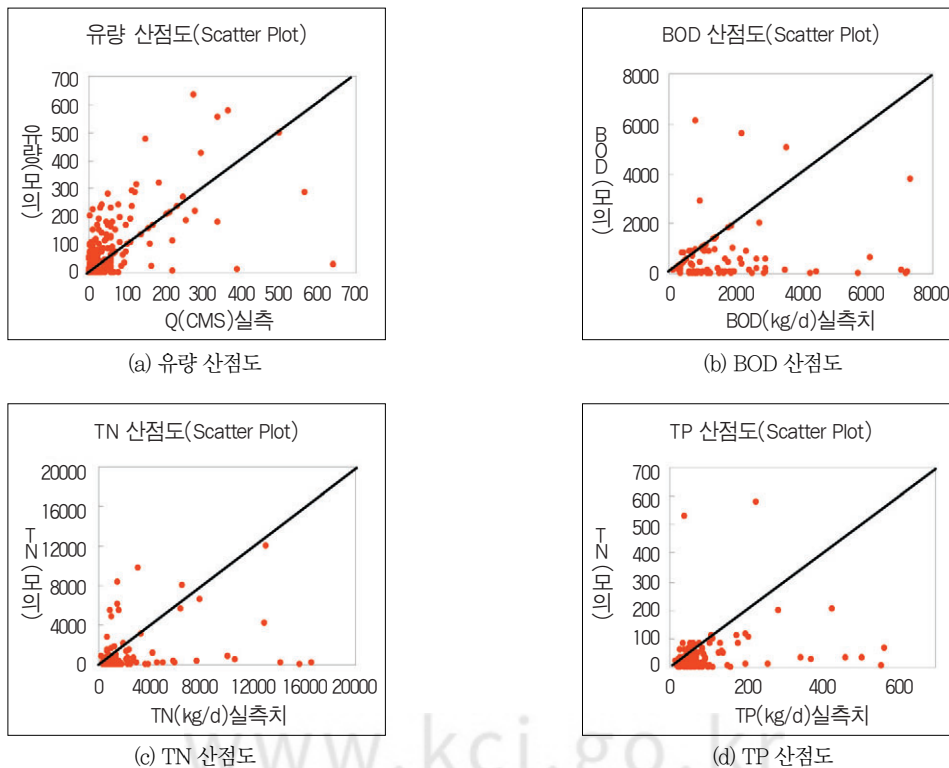


그림 5. 유역모형 모의 결과 산점도

표 1. Nash-Sutcliffe 계수 산정

	유량	BOD	TN	TP
Nash-Sutcliffe 계수	0.75	0.60	0.71	0.69

AI2, BC4, RS2, RS5 그리고 RHOQ 등의 매개변수들을 통해 하천 내에서의 P 계의 반응을 모의하는데 사용하였다.

유역모의 결과에서 실측치와 관측치의 상관관계는 그림 5와 같이 분석 되었으며, 유량의 경우 0.83, BOD, TN, TP의 경우 각각 0.63, 0.78, 0.73으로 분석되었다. Nash-Sutcliffe 계수를 적용하여 모형의 예측 정도를 파악하였으며 다음 표 1과 같다. 2005년에서 2008년 기간 동안의 해석 결과 유량의 경우 0.75, BOD의 경우 0.60, TN은 0.71 그리고 TP는 0.69로 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 부하해석 결과는 유량 및 수질의 불확실성을 모두 반영하여 나타나게 되므로, 유량에 비해 비교적 낮은 값으로 분석되었다.

산림 지역인 밀양강 유역을 바탕으로 유량을 계산한 후 이를 바탕으로 점오염원을 제외하고 토양에서 나오는 비점오염원량을 산정하였다. 하천에서의 점오염원 및 비점오염원의 영향에 따른 결과를 알기 위해 기 산정한 비점오염원 유량 및 오염원 부하량을 하천 모형에 등분포화하여 추가 적용하였다.

IV. 유역모형과 하천수질모형의 연계적용

1. QUALKO 모형의 적용

앞서 산정한 정량화된 비점오염원 부하량 및 배출 유량을 QUALKO 모형에 등분포화하여 추가 입력하였고, 이를 모델링하여 점오염원만 적용한 결과와의 차이를 도시하였다.

적용범위로는 밀양강 본류와 청도천과 단장천 등이 지천으로 본류로 합류하고 하수처리시설과 농업용수 및 취수시설을 포함한다. 그림 6은 모의 대상 유역인 밀양강 유역의 하천 유역도 및 하수종말처리장, 오염원, 취수, 농업용수, 지류, 댐 등의 요소

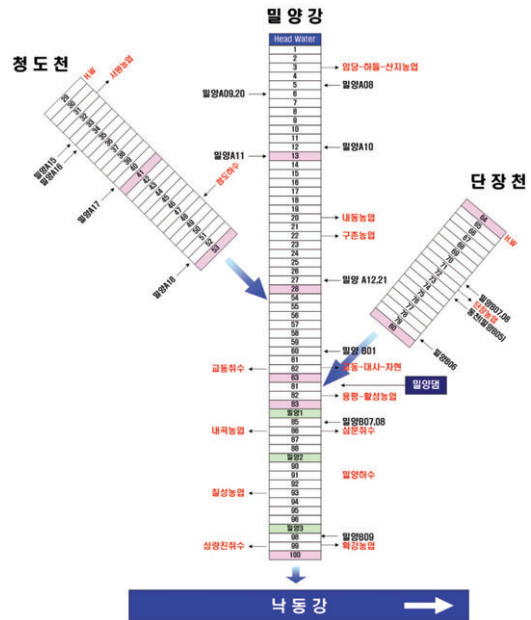


그림 6. 대상유역 모식도

표 2. 수질모델 적용 하천 및 구간 구분

하천 명	구간거리(km)	Reach 구분
밀양강	58	11
청도천(지류)	25	4
단장천(지류)	17	2

를 표시하여 나타낸 그림이다. 밀양강 상류 운문 댐으로부터 대상유역의 종점인 낙동강 합류점전까지의 전 구간 유로연장 약 100km에 대하여 모델을 구성하였다.

하천 모델 보정 및 검증은 밀양강1, 밀양강2, 밀양강3 측정지점의 2005년부터 2008년까지 저수기인 4, 5월의 평균 수질 자료를 이용하여 수행하였다. 보정을 행한 수질항목은 DO, BOD, TN, TP이다. 모델보정과정을 통하여 수질 반응계수를 산출하였으며, 보정결과 산출된 각 반응계수는 EPA가 제시하는 적용범위 안에서 적용하였다.

BOD의 경우 BOD 분해율 계수인 K1과 침전에 의한 BOD 제거율 계수인 K3값을 보정하였다. 그리고 TN은 유기질소의 가수분해율 계수 β_3 와 유기질소 침전을 계수 σ_4 , 암모니아 산화율 계수 β_1 , 암모니아 저질발생율 계수 σ_3 , 아질산 산화율 계수 β_2

를 조정하여 보정하였다. 마지막으로 TP는 유기인의 사멸률 계수 β_4 , 유기인의 침전을 계수 σ_5 , 용존인의 저질 용출률 계수 σ_2 ,를 이용하여 시행착오법으로 보정하였다.

2. 모형의 연계 적용

모델 연계를 위해서 유역 모델을 이용하여 모의한 각 소유역별 비점오염 부하량을 하천 수질 모형에 입력하였다. SWAT 모의는 하천을 따라 소유역을 나누어 수행하고, 각 소유역에 오염원은 하나씩만 할당된다. 밀양유역 말단지점이 해당되는 소유역을 유출구로 모의한 정량화된 비점오염원 부하량을 하천 모형의 각 구간별로 등분포하여 입력층을 구성하였다. 즉, 총 17개로 나누어진 대상하천 구간에 기 산정한 비점오염원 부하량을 총 구간 수로 나누어 등분포형태로 할당하였다. 그리고 이 등분포값을 증분유입량 자료에 해당되는 Data Type 8에 입력하였다. 따라서 기존의 점오염원을 고려한 하천 모델링 결과에 비점오염원을 포함한 모델링이 수행될 경우 결과를 알 수 있게 구성하였다.

하천 수질 모의는 2008년 4월과 5월의 실측자료를 평균하여 입력자료로 사용하였다. 기 산정된 비점오염원의 부하량을 유량으로 나누어 농도로 계산한 후 하천 수질 모의와 같은 기간에 대해 증분유입에 입력을 하였다. 유역모의 결과를 바탕으로 모의 기간동안 BOD와 TN, TP의 농도는 각각 0.0242, 0.8345, 0.5194mg/L의 값을 증분유입 구간에 입력하였다. 모형의 매개변수는 오염총량제에 사용되었던 밀양강 유역의 매개변수를 사용하였다.

그림 7은 유역모형과 연계한 하천 수질 모의 결과를 BOD, TN, TP 별로 그래프로 나타낸 것으로 Case 1은 점오염원만을 고려한 모의이고, Case 2는 점오염원과 비점오염원을 연계한 모의를 나타낸다. 비교대상으로 사용된 실측자료는 낙동강물환경연구소가 대상구간내에 있는 밀양A와 밀양 B지점에서 2008년 4월과 5월 기간동안 8일 간격으로 실측한 자료를 이용하였다.

모의 결과에서 점오염원만을 고려하였을 경우

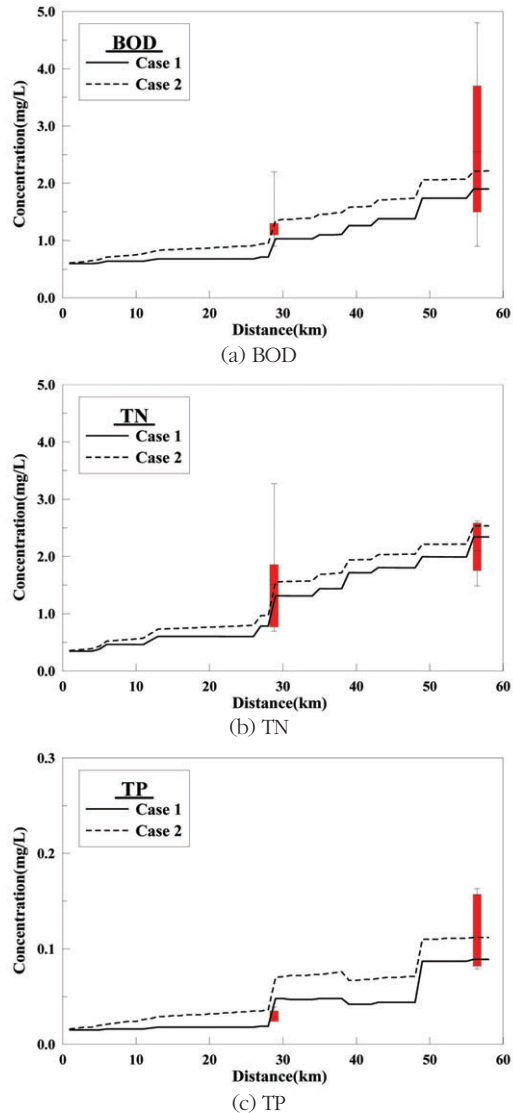


그림 7. 비점오염원과 연계한 하천수질해석 결과

TN의 밀양B 지점과 TP의 밀양A 지점을 제외하고는 실측값의 평균에 미치지 않는 것을 알 수 있으며, 비점오염원과 동시에 고려하여야 실측치의 범위에 들어감을 알 수 있다. BOD의 경우 최대값 1,900mg/L에서 2,220mg/L로 16.8% 증가하였으며, TN의 경우 최대값 2.343mg/L에서 2.536mg/L로 8.2% 증가하였다. 마찬가지로 TP의 경우도 최대값 0.089mg/L에서 0.112mg/L로 25.8% 증가하였다. 위의 결과를 바탕으로 정확한 점오염원 해석

과 비점오염원 해석의 중요성을 인식할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 하천의 비점오염원을 포함한 정확한 수질해석을 위해 유역 수질 모형인 SWAT을 이용하여 낙동강 유역의 비점오염원의 영향을 분석한 후, 이를 오염총량 모형인 QUALKO 모형에 결합하여 점오염원과 비점오염원을 동시에 고려한 유역, 하천 통합 방안을 적용하였다. 그리고 매개변수의 검·보정을 통해 수질 모델링의 정확성 향상을 도모하였으며, 하천 모의에 있어 비점오염원 포함의 중요성을 확인해보았다. 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. SWAT 모형의 경우 많은 점오염원을 다 반영할 수 없고, QUALKO의 경우 비점오염원 영향의 고려에 있어서 정량화된 비점오염원 값을 입력하기 힘들다. 이러한 문제점을 두 가지 모형의 장점을 연계함으로써 하천에서의 비점오염원의 영향을 분석할 수 있었다.

2. 유역모의 결과에서 실측치와 관측치의 상관관계는 유량의 경우 0.83, BOD, TN, TP의 경우 각각 0.63, 0.78, 0.73으로 분석되었다. Nash-Sutcliffe 계수를 적용하여 모형의 예측 정도를 파악하였으며 유량의 경우 0.75, BOD의 경우 0.60, TN은 0.71 그리고 TP는 0.69로 우수한 것으로 나타났다.

3. 유역모형인 SWAT 모형과 하천수질모형인 QUALKO 모형을 연계하여 하천에서의 비점오염원의 영향을 평가할 수 있었으며, 모의 결과 비점오염원 농도를 점오염원과 함께 입력하였을 때, BOD의 경우 16.8%, TN의 경우 8.24%, TP의 경우 25.8%의 농도 증가를 나타냄으로써, 하천 모의에 있어서의 비점오염원 고려의 중요성을 확인할 수 있었다.

4. 유역 모델에서 예측한 소유역별 비점오염 부하량은 수질 모델에 입력하였고, 적용 결과 비점오염원에 의한 부하량이 강우에 따른 유출현상에 영

향을 많이 받는 것으로 확인되었다. 그리고 하천 모형에서 수질은 유역모델에서 수행한 비점오염원 부하량의 저수기 평균값을 사용하여 모의가 수행되었고, 농도에 있어서 대략 10~25% 정도의 변화를 보였다.

5. 하천 모형과 수질 모형의 연계 과정에서 좀 더 신뢰도 높은 측정 자료와 유역 모의 결과를 활용한다면 더욱 정확한 예측이 이루어질 수 있을 것이며, 본 연구에서 확인된 연계 적용성을 기반으로 여러 물 관리 방안들을 평가하고 도출하는 시스템에 효과적으로 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2010년 BK21 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고재홍, 박혜린, 이재춘, 이용운, 2009, QUALKO 및 QUAL2E를 이용한 영산강수계 수질모델리에 관한 연구, 한국도시환경학회지, 9(2), 75-80.
- 김남원, 신아현, 2009, SWAT 모형의 수문·수질 모듈 개선에 의한 BOD 모의, 한국수자원학회 학술발표회, 2068-2072
- 김승필, 2005, BASINS/HSPF를 이용한 탄천유역의 수질 수문 모델링, 석사학위 논문, 한양대학교
- 박경옥, 2007, GIS를 이용한 낙동강 유역에서의 비점오염원 정량화 체계구축, 박사학위논문, 경북대학교, 15-38.
- 신창민, 나은혜, 박준대, 박주현, 이수웅, 정제호, 류덕희, 정동일, 2008, 4대강수계 수질오염총량관리를 위한 수질예측모델인자 적용성 연구. 국립환경과학원, 16-18.
- 윤준경, 한정운, 정광욱, 장재호, 2007, 소양강댐 유역의 오염부하량 산정을 위한 BASINS/

- WinHSPE 적용, 한국육수학회지, 40(2), 201-213.
- 이재근, 2008, QUALKO 모델을 이용한 하천의 질소와 인 저감 기초연구. 대전발전연구원, 33-40.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 김형철, 2010, SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 수질관리 영향 평가, 한국물환경학회지, 26(3), 387-398.
- 정광욱, 윤춘경, 장재호, 김형철, 2007, BASINS/HSPF를 이용한 화성유역 오염부하량의 정량적 평가, 한국농공학회논문집, 49(2), 61-74
- 한정윤, 2007, BASINS/WinHSPF를 이용한 소양강댐 유역관리방안 연구, 석사학위 논문, 건국대학교
- 허성구, 유동선, 김기성, 안재훈, 박윤식, 김종건, 장원석, 임경재, 2008, SWAT 모형을 이용한 상류수계 비점오염 평가, 한국관개배수회지, 15(2), 36-49.
- Debele, B., Srinivasan, R. and Parlange, J.Y., 2008, Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models(SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins, Environmental Modeling & Assessment, 13(1), 135-153.
- Fang, X., Zhang, J., Chen, Y. and Xu, X., 2008, QUAL2K model used in the water quality assessment of Qiantang River, China, Water Environ Res, 80(11), 2125-2133.
- Leonard, R.A., and Wauchope, R.D., 1980, CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. The Pesticide Submodel, W.G. Knisel(ed). USDA Conserv Res. Report No. 2, chapter 5.
- Liu Y, Yang W, Wang X., 2007, GIS-based integration of SWAT and REMM for estimating water quality benefits of riparian buffers in agricultural watersheds, ASAE, 50(5), 1549-1563.
- Manoj, K.J., Jeffrey, G.A., nad Philip, W.G., 2006, Water Quality Modeling for the Raccoon River Watershed Using SWAT. Center for Agricultural and Rural Development, Paper 06-WP 428.
- Paliwal, R., Sharma, P. and Kansal, A., 2007, Water quality modelling of the river Yamuna(India) using QUAL2E-UNCAS, Journal of Environmental Management, 83(2), 131-144.