

SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 수질관리 영향 평가

장재호 · 윤춘경[†] · 정광욱* · 김형철

건국대학교 환경과학과

*한국수계환경연구소

Evaluation of the Impacts of Water Quality Management in Kyongan Stream Watershed using SWAT Model

Jae-Ho Jang · Chun-Gyeong Yoon[†] · Kwang-Wook Jung* · Hyung-Chul Kim

Department of Environmental Science, Konkuk University

*Korea Water Environment Research Institute (KWERI)

(Received 30 April 2009, Revised 12 March 2010, Accepted 14 March 2010)

Abstract

SWAT model would be applied to evaluate the pollutant removal capacity with various best management practices (BMPs) in Kyongan stream watershed which plays an important role in water quality conservation and improvement of Paldang reservoir. The methods for the representation of various BMPs scenarios with SWAT is developed and evaluated. Riparian buffer strip, agricultural conservation practices to reduce fertilizer, sediment, and nutrients occurring from farm field (Grassed swale, Contour farming/Parallel terrace, Field border, Farm retention pond, Grade stabilization structure), and washland such as wetland and pond to extend detention and improve water quality are represented in SWAT. And to represent the expansion of existing Waste Water Treatment Plants (WWTPs) in Soil and Water Assessment Tool (SWAT), reduction effect for point source pollutants was simulated. As the result of simulation, the removal rates of SS, TN, TP from scenarios of Kyongan stream watershed are the average annual SS yield by 5.2% to 69.2%, the average annual TN yield by 0.5% to 26.3%, and the average annual TP yield by 1.3% to 32.5%, respectively. This study has demonstrated that the SWAT is a very reliable and useful water quality and quantity assessment tool, and the BMPs representation in SWAT for watershed management is able to effectively simulate in Kyongan Stream watershed.

keywords : BMPs representation, Pollutant removal capacity, SWAT, Watershed management

1. 서론

팔당호의 수질관리를 위해서는 유역에서 발생하여 하천으로 유입되는 오염원을 기본적으로 파악하고 제어해야 한다. 경안천은 팔당호로 직접 유입되는 하천으로 팔당호 전체 유입량의 2.5%로 매우 적으나 팔당호 유입하천 중 오염도가 높아 상수원보호를 위해서 특별한 관리가 요구되고 있다(공동수 등, 2006). 경안천 유역은 수도권에 인접하고 있어 개발 요구에 따라 산림 및 농업지역의 감소와 시가지/건조지역의 증가(0.9% 1975년~7.0% 2000년) 등 토지이용이 지속적으로 변화하고 있으며, 개발에 따른 오염원 증가가 예상된다(한강유역환경청, 2007). 또한 경안천 유역의 농업지역의 대부분은 남·북한강의 고랭지 농업과는 달리 하천을 따라 좁은 충적평야로 이루어져 있어 강우초기 농경지 비점원 오염물질이 일부 지표층을 유하하거나 대부분이 농배수로를 통하여 아무런 처리 없이 하천으로 직접 유입

되기 때문에 이로 인한 팔당호 수질악화가 우려된다.

최근에 경안천 유역은 중권역 유역관리방안에 의해 팔당 상수원 수질보호, 유지용수 공급, 시민생활 환경 개선을 목적으로 2009년까지 하수처리장 3개소 신설 및 5개소 증설로 52,070 m³/일 규모의 처리장을 추가 가동토록 하고 있으며(한강유역환경청, 2007), 환경관리공단(2007)은 인공습지, 침투트렌치, 침투저류지, 식생여과대, 식생수로 등의 자연형 시설과 여과형, 와류형 등의 장치형 저감시설을 다양한 오염원에 적용하여 저감시설별 처리효율을 제시하고자 하였다. 현재 많은 학자들은 농업생태계의 지속성을 보전하기 위한 실천방안으로 최적영농관리방안을 제안하고 있다. 최적영농관리란 농업비점오염원에 의해 초래되는 오염량을 수질목표에 상응하는 수준으로 줄이거나 억제하는 권장된 수단으로서 기술적, 경제적, 행정적으로 볼 때 가장 효율적으로 실현 가능한 영농방법으로 정의된다. 국내에서도 전문가들에 의한 다양한 비점오염 및 유역관리 연구 등과 더불어 중앙정부, 지방자치단체 및 민간단체 등의 가이드라인 설정과 포럼개최 등이 꾸준히 이루어지고 있다(김민경, 2007; 김이형, 2009; 김진철 등, 2006; 농촌정책국, 2006; 박창진,

[†] To whom correspondence should be addressed.
chunyeon@konkuk.ac.kr

2002; 박철수 등, 2005; 정성민 등, 2009; 환경부, 2003).

이러한 최적영농관리 및 유역관리를 통한 수질개선 영향에 대한 분석은 장기간 모니터링을 통한 자료수집이 수반되어야 하며, 유역환경의 충분한 조사 및 분석과 점·비점 오염원의 평가 등이 이루어져야 한다. 그러나 축적되어 있는 자료가 부족하고 자료를 수집하기 위한 비용 및 시간을 고려했을 때 유역모델을 적용하면 장래 수질예측 등이 쉽게 이루어질 수 있다. 유역모델의 적용에 있어 유역에 대한 전반적인 특성 즉, 유역 내 수문기작, 오염원의 유출기작 등을 고려하는 과학적 근거 하에 장기적인 변화의 예측이 이루어져야 보다 구체적인 분석이 가능하며, 그에 따른 적절한 관리대책을 제시할 수 있다. 이를 위해 충분한 실측자료를 바탕으로 모델을 검·보정함으로써 모델결과의 신뢰성을 확보해야 하며, 검증된 모델로부터 도출된 결과를 통해 유역의 오염물질 거동특성 규명은 물론, 장래 수문·수질환경의 변화에 따른 영향을 평가할 수 있고, 비점오염 저감에 필요한 다양한 관리기법의 효과분석에 활용될 수 있다.

유역모델은 적용지역과 모델의 복잡성, 계산시간에 따라 다양하게 구분할 수 있는데, 준분포형의 장기 강우-유출모델로써 미농림부에서 개발된 SWAT(Neitsch et al., 2002)의 적용이 증가하고 있으며, 하천의 수리(Kangsheng and Carol, 2007) 및 수질모의(Bryan and Christine, 2007) 뿐만 아니라 유역 내 점·비점오염 산정(Migliaccio et al., 2007), BMPs를 이용한 오염물질 저감효과 모의(Arabi et al., 2007), 수변녹지대 모의(Zhongwei, 2006) 등을 포함하여 통합적으로 하천 수질관리 및 유역 최적관리(Kang et al., 2006; Ouyang et al., 2008)에 널리 적용되어 왔다. 최근에 국내에서도 그 적용이 증가하고 있는 추세이며(김철겸과 김남원, 2008; 박종윤 등, 2008; 장재호 등, 2009; 허성구 등, 2005), 특히 SWAT 모델은 농업지역 오염관리를 위한 BMPs 효과모의에 적용되어 왔다. Vache 등(2002)은 BMPs의 피복밀도와 유실저항 등을 모의하기 위해 SWAT에서 수로피복과 수로유실 인자를 수정하여 수변 완충지, 초생수로, 여과대 등을 모의하였다. Santhi 등(2003)은 경사와 토양유실 인자를 수정하여 사면유실 및 하안보호를 위한 수로안정구조물을 모의하였으며, Arabi 등(2007)과 Bracmort 등(2006)은 다양한 최적영농관리방안을 효과적으로 모의한 바 있다. 또한 국내에서는 강동균(2005)이 내린천 유역을 대상으로 초생대, 계단전, 등고선재배, 벚길부초설치재배, 하천정비 등의 최적영농관리 효과를 모의하였으며, 다수의 연구자들에 의해 수변구역 조성 및 농경지 유사저감 등의 유역관리영향에 대해 연구되어 왔다(김재희, 2007; 이은영, 2008; 허성구 등, 2005).

본 연구에서는 최근 팔당호 수질오염관리와 관련하여 관심이 모아지고 있는 경안천 유역의 수질관리 영향을 모의하기 위해 국내외에서 널리 검증된 SWAT 모델을 적용하였으며, SWAT 모델에서 적용 가능한 점원오염 및 비점원오염의 삭감 시나리오를 결정하여 시나리오별 저감효과 및 수질변화를 분석하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역

본 연구의 대상지역인 경안천 유역은 동경 127°8'6"~127°26'50", 북위 37°9'40"~37°29'27" 사이에 위치하고 있으며, 용인시 이동면과 원삼면의 경계인 문수봉 계곡에서 발원하여 광주시 초월면 지월리에서 곤지암천과 합류된 후 팔당호로 유입된다(Fig. 1). 경안천 유역은 49.5 km의 유로연장과 589.3 km²의 유역면적, 27.01%의 유역평균경사를 가지며, 경안천 하류에서의 유량은 약 5.4 m³/s로써 팔당호에 하루 약 47만 톤의 물이 공급되고 있다(이기영, 1998). 경안천 하류부의 연평균 체류시간은 약 20일로 하천흐름의 정체 발생하며, 비록 연평균 강우량이 약 1,300 mm이지만 상류에 대형 저수지가 없어 유역에 내린 강우가 지체 없이 하천수로 유입된다. 갈수기와 저수기에는 유량이 적고 수심이 얕으며 물의 정체가 심해 바닥에 퇴적물이 많이 쌓인다. 이렇게 쌓인 퇴적물은 강우시에 팔당호로 유입되어 수질을 더욱 악화시킨다. 연구지역은 도심지(11.2%)와 농경지(16.4%)가 북한강과 남한강 유역의 2배 이상 높고 인구밀도가 466.6 인/km² 수준이며 인구가 꾸준히 증가하고 있어 경안천 유역의 오염원 증가가 예상된다. 갈수기와 저수기에 흐르는 물은 대부분이 용인시와 광주시의 하수처리장에서 나오는 방류수이기 때문에 이 시기(10~11월, 3~5월)에 특히 수질관리가 요구된다. 현재 수질관리 목표는 I등급이나 수질상태는 III등급 수준으로 팔당호의 수질에 중요한 역할을 하고 있으며(김성수 등, 2002), 상수원 보호를 위한 규제가 유역 전역에 걸쳐 설정되어 있다.

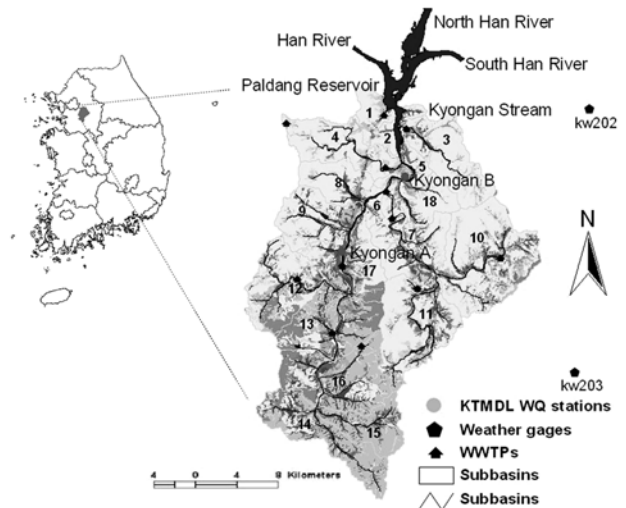


Fig. 1. Kyongan Stream watershed and the monitoring stations.

2.2. 모델 입력자료 구축

대상 유역의 기상자료, GIS 자료, 오염원자료 등을 수집하였고 BASINS tool을 이용하여 손쉽게 SWAT을 구축하였다(Fig. 2). GIS 기반의 공간입력자료로서, 환경부 DEM(30 m × 30 m)을 이용하여 하천도를 생성했으며, DEM과 하천도를 이용해서 대상유역 경계를 추출하였다. BASINS

Table 1. Land use characteristic in Kyongan Stream watershed

Land use	Forest	Paddy	Cropland	Pasture	Urban	Water	etc.
Area (km ²)	189.5	40.8	87.2	44.7	132.9	21.8	72.5
%area	65.0	8.0	8.4	3.1	11.2	2.2	2.2

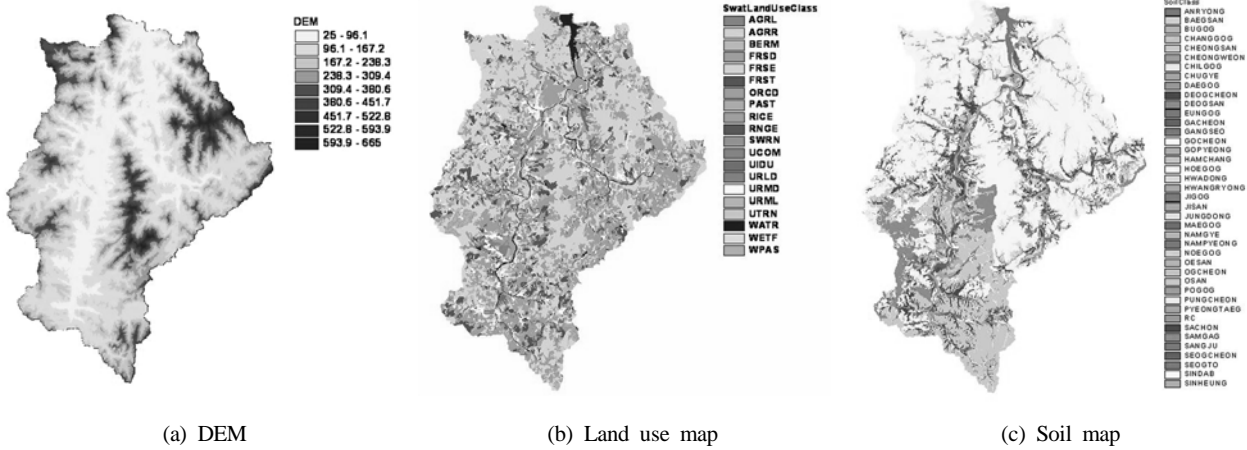


Fig. 2. Setup of DEM, land use and soil map by BASINS for study area.

의 소유역 자동분할 틀을 이용하여 18개의 소유역 경계를 추출하였으며, 토지이용도는 환경부 환경지리정보서비스 (<http://egis.me.go.kr/egis>)에서 제공하는 1:25,000 토지피복도를 참고하여 중분류 하였는데, 그 결과 산림이 65.0%, 농경지와 주거지역이 각각 16.4%, 11.2%로 나타났다(Table 1). 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도와 토양속성 DB를 이용하여 토양도를 구축하였으며, 소유역별 토양특성과 토지이용특성을 중첩하고 HRUs를 생성하였다.

모델 적용 기간은 2004~2008년으로 이 기간에 대한 일별 강우자료와 증발산량 산정을 위해 일별 기온(최대·최저 기온), 풍속, 태양복사량 및 상대습도 자료는 수원, 양평, 이천 등의 기상청 관측소(Fig. 1) 자료를 이용하였으며, 각각의 기상인자에 대한 일별 자료를 dbf파일 형태로 작성하여 모델에 입력하였다. 수질 모의를 위한 기초자료로서, 점오염원에 대한 고려를 위해 2003년 전국 오염원 기초자료(한강수계관리위원회, 2006)를 참고하여 경안천 유역의 모든 환경기초시설에 대한 방류량자료를 이용하였다. 유역 내 환경기초시설은 하수종말처리장 11개소, 마을하수처리장 4개소, 분뇨처리장 3개소, 축산폐수처리장 2개소로 총 20개소로 조사되었으며, 각 시설별 배출되는 방류량과 부유물질, 총질소 및 총인의 수질로부터 각각의 배출부하량을 산정하였다. 그리고 다시 하천 관측수질자료의 태별 질소 및 인의 비율을 고려하여 모델 입력에 필요한 유기질소, 질산염, 아질산염, 암모늄, 인산염, 유기인 등의 모든 항목별 일 단위 배출부하량을 소유역별로 각각 산정하였다.

2.3. 모델의 검·보정

모의 결과의 안정화를 위해 2001~2003년을 준비기간으로 추가 모의하였으며, 분석기간은 2004~2008년을 대상으로 하였다. 모델의 보정은 2004년 8월부터 2006년까지, 검정은 2007년부터 2008년까지 수행되었으며, 2004년 8월부터

2008년까지 8일 간격으로 측정된 경안A와 경안B지점의 실측자료(한강물환경연구소, 2008)를 이용하여 모의하였다. 모델 검·보정은 연중 일별자료를 중심으로 이루어졌으며, 매개변수 보정 방법에는 크게 시행착오법, 최적화기법에 의한 자동보정법 등이 있는데, 최근에는 다양한 최적화기법이 활용되고 있으며, SWAT의 경우 SCE-UA 최적화방법(이도훈, 2006)이 유용되고 있다. 본 연구에서는 국내의 연구자들이 보고한 매개변수를 참고하여 유량 및 수질에 적절한 매개변수를 선정하여 허용범위 내에서 변화시키면서 단순 시행착오법에 의해 검·보정을 수행하였다(Table 3). 또한 유사는 물의 이동에 영향을 많이 받으며, 영양물질의 경우 물의 이동 및 유사이동에 따라 변하기 때문에 모델의 보정은 유량, 유사, 영양물질 순서로 관련 매개변수를 수정하였다. 실측값에 대한 모델예측을 평가하기 위해 식 (1)과 (2) 처럼 NSE(Nash and Sutcliffe, 1970)와 % difference(ASCE, 1993) 및 실측값과의 단순한 비(O/S ratio)를 산정하여 검토하였다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \tag{1}$$

$$\% \text{ difference} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right| \times 100 \tag{2}$$

여기서, P_i 는 예측 값, O_i 는 실측값, n 은 데이터 수, 그리고 \bar{O}_i 는 실측 값의 평균이다.

NSE는 실측값과 모의값이 1:1 라인을 얼마나 잘 묘사하는가를 나타내며, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 모의값을 사용하는 것이 실측값의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과

Table 2. General simulation targets or tolerances for SWAT application

	Very Good	Good	Fair	Poor
<i>% Difference</i>				
Water flow	< 10	10 ~ 15	15 ~ 25	-
Sediment	< 20	20 ~ 30	30 ~ 45	-
Nutrients	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35	-
<i>NSE</i>				
Daily water flow	0.90 ~ 0.80	0.80 ~ 0.70	0.70 ~ 0.60	0.60 ~ 0.50

를 얻을 수 있음을 의미한다(Nash and Sutcliffe, 1970). 또한 % difference는 실측값과 모의값을 수학적으로 비교하기 위한 통계 치로서 동일한 결과가 예상되는 반복되는 측정에 대한 신뢰성을 나타내는 양적 지표로 사용되어왔다. 모든 실측치와 모의치 자료가 일치한다면 “% difference = 0”을 나타낼 것이다(장재호 등, 2009). 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 Donigian(2000)이 제시한 일반적인 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 이용하였다(Table 2). 이 범위를 기초로 하여 유량의 경우 가능한 한 % difference ≤ 15%, NSE ≥ 0.5가 될 때까지 보정하였으며, 수질의 경우 sediment와 영양물질은 각각 % difference ≤ 30%이 될 때까지 보정하였다(장재호 등, 2009).

2.4. SWAT의 수질관리 영향 분석방법

본 연구에서는 경안천유역의 수질관리 영향을 모의하기 위하여 비점원오염의 경우 수변구역의 녹지대 조성(시나리오 1)과 시비저감 및 농경지에서의 유사발생 저감 등의 최적영농관리(시나리오 2), 그리고 생태습지 및 저류지 등의 친변저류지 조성(시나리오 3)을 SWAT에서 평가하고자 하였으며, 친수공간 조성 및 환경기초시설 확충이라는 2010년 정부계획(한강유역환경청, 2007)에 따라 점오염부하량 삭감(시나리오 4)을 적용하여 경안천유역의 수질관리 영향을 평가하고자 하였다. 또한 유역관리의 복합적인 평가를 위하여 위의 시나리오 1~4를 모두 적용하였을 경우(시나리오 5) 경안천 유역의 부하량 및 수질변화를 분석하였다.

2.4.1. 시나리오 1 - 수변구역 녹지대 조성

경안천 유역의 수변구역 지정범위는 팔당호를 중심으로 경안천 발원지까지를 대상으로 하며, 하천경계로부터 양쪽 1 km 이내 지역으로서 환경부가 관할·지정하고 있다. 그러나 수변구역 내에 거주 및 접근도 안 되는 외국과는 달리 경안천 유역은 수변 1 km 이내에 공장, 축사, 음식, 숙박시설 등이 밀집되어 있으며, 하천경사가 심해 발생한 오염원 부하가 1 km에서는 90% 이상이 유달된다(문정호, 1999). 토지피복의 증감추세를 살펴보면, 시가화/건조지역의 경우 1985년 이후부터 경안천수변을 중심으로 시가화/건조지역이 급속도로 생겨나고 있으며 반면에 산림 및 농업지역은 감소추세를 보이고 있다. 경안천 주변 산림 및 준농림지역 등이 개발될 경우 오염원이 급증할 것으로 예상된다. 따라서 물환경기본계획 및 4대강 살리기 사업에서는 수질오염 방지를 위해 하천수변을 포함한 생태하천 복원 및 상수원 수변을 생태벨트로 조성하는 계획을 추진 중이다. 본 연구

에서는 수변구역 내에 녹지대(초지 및 수림대)를 조성하였을 경우 수질개선 효과를 모의하고자 하였다. 경안천 유역의 현재 고지로 지정된 수변구역의 면적은 Table 3과 같이 약 35.8 km²이다. 이는 전체 유역면적 중 6.1%를 차지하며, 이 중 녹지대의 면적은 0.85 km²로 초지 및 습지로 구성되어있다. 변경 가능한 10.8 km²의 농경지와 나대지 면적 중 하천 양안 100 m을 고려하여 10% 정도를 변경할 수 있다고 가정하면 총 2 km²의 면적을 초지로 조성하였을 경우 수질개선 효과를 모의하였다(Fig. 3). 이를 위해서 ArcGIS 및 Arcview 등의 buffer기능을 이용하여 경안천 유역의 수변구역 내 하천변 토지이용도를 초지로 변경하였고, 이를 이용하여 모델을 구축하였다.

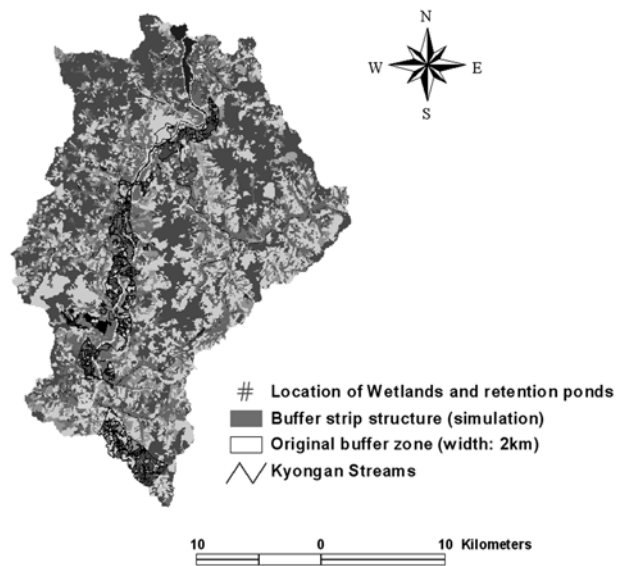


Fig. 3. Composition of buffer strip structure and location of wetlands and detention ponds.

Table 3. Land use distribution in buffer zone of Kyongan Stream watershed

Land use	Area (km ²)
Residue	2.80
Agriculture	9.75
Forest	21.04
Pasture	0.81
Barren	1.05
Wetland	0.04
Water	0.33
Total	35.82

2.4.2. 시나리오 2 - 최적영농관리

최적영농관리방안은 효율적인 시비 및 비료억제 등의 관리(Management)에 의한 오염원 발생 억제, 토양유실 방지, 유속감소, 토양 보비력 증가, 침투율 증가 등을 유도하기 위한 식물(Vegetative) 피복, 그리고 포장을 변경시켜 오염원의 발생을 억제하는 영구적인 시설물 등의 비교적 자본의 투자가 요구되는 구조적(Structural) 방법을 통한 오염원의 발생을 억제하는 수단이 있다. 본 연구에서는 이러한 관리효과를 모의하고자 하였다.

2.4.2.1. 관리방법(시비저감)

국내 농업은 녹색혁명(1981~1990년)을 시초로 경제적인 가치를 증대할 수 있었지만 농약과 비료의 다량사용 등으로 토양 및 수질오염, 생태계 파괴가 가속화되었다. 이에 비점오염원관리방안이 도입되면서 농업분야에서도 관행 농업의 문제점을 극복하기 위한 토양검정시비, 완효성비료, 질산화물 억제비료 등 농약과 비료사용을 적정사용하기 위한 종합관리기술(축산분뇨의 자원화)이 도입되는 등의 노력을 기울여 왔다.

최적영농관리방안 중 관리기법(시비저감)에 대한 효과를 모의하기 위해 SWAT 모델의 agricultural management operation 기능을 이용하였다. 논벼와 배추, 옥수수, 콩 등의 대표적인 발작물에 대한 영농시기, 경작, 식재, 시비, 관개, 수확 등의 일련의 영농자료를 입력하여 일반적인 농업활동을 묘사하였다. 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 일환으로 하수처리수의 농업용수 재이용 연구에 따르면 하수처리 방류수를 농업용수로 재이용할 경우 표준시비량의 40%와 동일한 수확량을 얻을 수 있음을 보고하였다(과학기술부, 2006). 현재 국내 농경지에서는 퇴비나 관행시비가 이루어지고 있으므로 시나리오 2의 시비저감 방안에서는 하

수처리수의 농업적 재이용을 통해 논벼와 발작물 표준시비량의 60%를 절감하는 것으로 가정하여 관리기법에 대한 효과를 모의하고자 하였다.

2.4.2.2. 식물피복 및 구조적 방법

본 연구에서는 농촌유역에서 토양보전 및 유사저감을 위한 방안으로 1) 농경지 주변에 초생수로 및 초지 조성, 2) 등고선재배, 벧짚재배 및 계단경작, 3) 경작지의 쇄골, 전단, 세류 등에 의한 토사나 화학물질 등의 오염물질이 직접적으로 유실되는 것을 방지하기 위한 토사트랩(sediment trap) 및 침강지(retention pond) 조성, 4) 하천수로에서의 사면유실 및 하안보호를 위한 수로안구조물 조성 등의 최적영농관리방안을 SWAT 모델을 통해 모의하고자 하였다. 농업과학기술원(2005)에서 보고한 농경지 토양침식등급별 분포에 따르면 모의된 유역별 유사발생량은 “Lower”(6< ton/ha·year)에 해당되지만(Table 3), 토양보전 및 유사저감 효과를 분석하기 위하여 위에서 언급한 관리방법을 유역 내 비교적 발 경작지가 우점한 소유역에 각각 적용하였다.

Table 4와 같이 소유역별로 산출한 유사량을 참고로 경안천 유역 중 유사량이 연간 2 ton/ha 이하로 발생하는 유역의 경우 농경지 주변에 초생수로를 조성하고, 농경지 비율이 비교적 높고 연간 유사량이 2~4 ton/ha인 유역을 대상으로 초생수로, 등고선재배 및 계단전, 그리고 토사트랩 등 다양한 최적영농관리방안을 조성하고자 하였으며, Arabi 등(2007), Bracmort 등(2006), Santhi 등(2006)의 연구에서 제시한 값과 유역특성을 참고로 모델 내에서 입력변수들을 적절하게 수정하였다(Table 5). 18번 소유역의 경우 5년(2004~2008년)평균 강우량이 비교적 많았고, 이로 인한 연간 유사량이 4.61 ton/ha을 가장 크게 발생하였다. 따라서 Table 5에 제시된 초생수로, 등고선재배 및 계단전, 토사트

Table 4. Soil erosion yield in subbasins which contains the much number of upland

Sub-basin	2	4	5	7	8	12	13	16	17	18
% Upland	11.4	10.6	19.8	12.8	10.4	13.7	12.7	13.9	15.0	14.4
SYLD ^a	0.50	1.10	3.64	2.29	2.91	2.51	2.85	3.17	3.18	4.61

^a : SYLD(sediment yield, ton/ha·year)

Table 5. Representation of agricultural managements in SWAT

BMP	Function	Representative SWAT parameter		
		Variable (Input file)	Value with no BMP	Value with BMPs in good condition
Grassed swale	Increase channel cover	CH_COV	1.0	0.25
	Reduce channel erodibility	CH_EROD	0.6	0.15
	Increasing channel roughness	CH_N2	0.14~0.28	0.24
Contour farming/ Parallel terrace	Reduce overland flow	CN2	83	62
	Reduce sheet eroding	USLE_P	1.0	0.54
Field border	Increase sediment trapping	FILTERW	0	5
		POT_FR	0	0.3
Farm retention pond	Present pothole	POT_TILE	0	0.1
		POT_VOLX	0	0.05
Grade stabilization structure	Reduce gully erosion	CH_EROD	0.6	0.15
	Decrease cover factor	USLE_C	Assigned by SWAT	0.05

랩, 침강지, 그리고 수로안정구조물 등 토양보전 및 유사저감을 위한 관리를 모두 적용하는 것으로 가정하였다.

2.4.3. 시나리오 3 - 천변저류지 조성

경안천 수변구역 내 천변저류지 모의는 경안천 생태습지 조성계획에 따라 경안천으로 유입되는 지류 및 본류의 주요 지점(Fig. 3)에 수심이 0.3~0.5 m인 50 m×400 m(2 ha)의 습지와 수심이 1.5~2.0 m인 50 m×100 m(0.5 ha)의 저류지를 김형철 등(2008)과 함중화 등(2005)에 의한 연구를 참고하여 저류지-습지 시스템의 구조로 조성하여 저류지를 통한 전처리와 습지의 추가 처리효과를 유도하고자 하였다. 습지의 경우 평상시에는 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 강우시에는 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 이 저류할 수 있고 저류지의 경우 평상시에는 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^3$, 강우 시에는 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 이 저류할 수 있는 것으로 가정하였다. 습지 및 저류지 모의를 위한 수리학적 부하는 $1,000 \text{ m}^3/\text{ha}\cdot\text{day}$, 습지 내 침전은 연중 매월 발생하며, 습지와 저류지 내의 sediment 초기 농도는 경안A와 경안B지점의 SS 평균농도인 20 mg/L로 입력하였다. Mitsch and Gossolink(2000)에 의하면 습지의 sediment rate는 0.25~0.76 m/year이며, 본 연구의 습지와 저류지에 대한 인의 침전율은 0.7 m/year, 질소의 침전율은 인의 절반 수준인 0.3 m/year로 가정하여 입력하였다. 그 밖의 천변저류지 모의를 위한 입력인자들을 SWAT의 *.pnd를 이용하여 Table 6(a)와 6(b)와 같이 작성하였다.

2.4.4. 시나리오 4 - 점오염부하량 삭감

시나리오 4는 경안천중권역 물환경관리계획(한강유역환경청, 2007)에 따라 경안천 유역의 용인시와 광주시에 11개소의 환경기초시설 중 경안천에 오염기여도가 높은 환경기초시설을 확충할 경우 즉, 기존 시설의 증설 및 고도처리 시설의 추가설치를 통해 하수처리율을 향상시키고자 하였다. 전국 하수처리장 공정의 처리효율은 SS가 약 95%에 달하며, 영양물질은 약 60% 정도에 이른다(환경부, 2008). 본 연구에서의 SS와 영양물질 처리는 기존 하수처리효율의 50%를 추가 저감이 가능한 것으로 가정하였다. 현재 방류수질이 높은 용인, 오폭, 광주하수처리장의 수질이 SS가 50%, TN과 TP가 30%씩 감소하며, 시설용량이 20,000 m³/day 이상인 곤지암하수처리장과 경안하수처리장은 시설확충으로 SS가 50% 감소할 것으로 가정하였다(Table 7). 경안천중권역 물환경관리계획에 따른 하수도보급률 증가 및 환경기초시설의 신설계획은 상세한 자료의 부족으로 모의설계에 반영하지 않았다.

2.4.5. 시나리오 5

경안천 중권역 물환경관리계획의 수생태 건강성 복원, 비점오염원 관리비중 극대화, 환경기초시설 투자 합리화 및 효율증진 등 세부추진 대책에 따라 경안천 유역의 복합적 유역관리 평가를 위하여 수변녹지대조성(시나리오 1), 최적영농관리방안(시나리오 2), 천변저류지 조성(시나리오 3)의

Table 6 (a). Parameters for wetland simulation

Variable name	Definition	Values
IPND1	Beginning month of mid-year nutrient settling "season"	January
IPND2	Ending month of mid-year nutrient settling "season"	December
WET_FR	Fraction of subbasin area that drains into wetland	0.02
WET_SED	Initial sediment concentration in wetland water	20 mg/L
WET_NSED	Equilibrium sediment concentration in wetland water	5.00 mg/L
WET_K	Hydraulic conductivity of bottom of wetlands	0.03 mm/hr
PSETLW1	Phosphorus settling rate in wetlands for months IPND1 through IPND2	0.7 m/year
PSETLW2	Phosphorus settling rate in wetlands for months other than IPND1-IPND2	0.7 m/year
NSETLW1	Nitrogen settling rate in wetlands for months IPND1 through IPND2	0.3 m/year
NSETLW2	Nitrogen settling rate in wetlands for months other than IPND1-IPND2	0.3 m/year

Table 6 (b). Parameters for detention pond simulation

Variable name	Definition	Values
PND_FR	Fraction of subbasin area that drains into ponds	0.01
PND_SED	Initial sediment concentration in pond water	20 mg/L
PND_NSED	Equilibrium sediment concentration in pond water	5.00 mg/L
PND_K	Hydraulic conductivity of bottom of ponds	0.01 mm/hr
PSETL1	Phosphorus settling rate in pond for months IPND1 through IPND2	0.7 m/year
PSETL2	Phosphorus settling rate in pond for months other than IPND1-IPND2	0.7 m/year
NSETL1	Nitrogen settling rate in pond for months IPND1 through IPND2	0.3 m/year
NSETL2	Nitrogen settling rate in pond for months other than IPND1-IPND2	0.3 m/year
CHLA	Chlorophyll a production coefficient for ponds	1.00
SECCI	Water clarity coefficient for ponds	1.00
NDTARG	Number of days needed to reach target storage from current pond storage	6 days
WUPND	Average daily water removal from the pond for the month ($10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)	0.3

Table 7. Reduction of point source pollutants in SWAT

Treatment plants	Capacity (m ³ /day)	Sub-basins	Extension capacity	Advanced treatment
Yongin	36,000	13	SS : 50%	TN : 30%, TP : 30%
Ohpho	7,000	12	SS : 50%	TN : 30%, TP : 30%
Maesan	500	17	-	-
Dochuk	2,000	11	-	-
Manseon	100	10	-	-
Konjjiam ^a	20,000	7	SS : 50%	-
Gwangju	5,000	18	SS : 50%	TN : 30%, TP : 30%
Namhansan seong	1,200	4	-	-
Kyongan ^a	25,000	4	SS : 50%	-
Gwangdong	300	3	-	-
Samsung	300	1	-	-

^a : WWTPs capacity above 20,000 m³/day

비점원오염 제어를 위한 시나리오와 점원오염 삭감을 위한 시나리오 4 등 위에서 언급한 모든 시나리오를 적용하였을 경우 경안천 유역의 오염물질 저감효과를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델의 검·보정

유출량의 경우 지표유출과 관련된 ESCO, CH_K2, CH_N2 및 SOL_AWC와 기저유출 및 지하수 관련인자 ALPHA_BF, REVAPMN, GWQMN, GW_REVAP 등을 이용하여 보정하였다(장재호 등, 2009). 모델 적용성을 평가하기 위해 경안 A, B지점의 일별 유출량에 대해 *NSE*와 % *difference* 및 *O/S ratio*를 산정하였다(Table 8). 보정기간에는 *NSE*의 경우 경안 A는 “Fair” (0.6~0.7), 경안 B는 “Good” (0.7~0.8)를 나타냈으며, % *difference*는 경안 A가 “Fair” (15~25%),

경안 B는 “Very good” (10% 이하)를 나타냈다. 검증기간에 대해서는 *NSE*의 경우 경안 A와 B 모두 “Very good” (0.92, 0.87), % *difference*는 경안 A는 “Fair” (15~25%), 경안 B는 “Very good” (10% 이하)를 나타냈다. *O/S ratio*의 경우도 0.83~0.96 범위에서 1.0값에 근사하게 나타났으며, 유출량의 경우 모델이 실측유량의 경향을 잘 반영함을 알 수 있었다. 전반적으로 경안천의 하류부인 경안 B지점에서 실측자료의 경향과 좀 더 유사하게 나타났는데, 모의에 이용된 관측자료는 평수기 및 갈수기의 관측자료가 대부분이기 때문에 평수량 이하의 유출량 모의가 잘 반영된 결과로 판단된다. 이는 경안천 하천 바닥면의 상승과 보 시설 등에 의해 평상시에도 풍부한 수량 확보가 가능해졌기 때문으로 사료된다.

고형물 표면에 흡착된 질소와 인성분은 강우시 유사이동에 큰 영향을 받는다. 따라서 수질의 검·보정은 SS, TN,

Table 8. Statistical comparison of observed and simulated daily streamflow, SS, TN, and TP during the calibration and validation periods

		Calibration				Validation			
		Kyongan A		Kyongan B		Kyongan A		Kyongan B	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
Stream-flow	<i>Mean</i>	6.07	7.30	13.86	14.42	6.34	7.92	13.71	14.65
	<i>SD</i>	10.22	9.11	23.46	23.15	13.41	13.73	27.89	26.84
	% <i>diff.</i>	-	20.3	-	9.0	-	25.0	-	6.8
	<i>O/S</i>	-	0.83	-	0.96	-	0.80	-	0.94
	<i>ENS</i>	-	0.71	-	0.77	-	0.92	-	0.87
SS	<i>Mean</i>	13.63	12.79	11.42	12.46	15.82	13.90	12.63	12.22
	<i>SD</i>	16.64	7.38	10.60	7.47	13.72	9.80	11.98	8.45
	% <i>diff.</i>	-	6.2	-	9.0	-	12.1	-	3.3
	<i>O/S</i>	-	1.07	-	0.92	-	1.14	-	1.03
TN	<i>Mean</i>	8.71	8.30	7.23	5.50	7.73	8.95	5.47	5.73
	<i>SD</i>	3.92	5.21	3.35	3.19	3.37	5.56	2.26	3.38
	% <i>diff.</i>	-	4.6	-	24.0	-	15.8	-	4.8
	<i>O/S</i>	-	1.05	-	1.32	-	0.86	-	0.95
TP	<i>Mean</i>	0.42	0.40	0.36	0.31	0.44	0.41	0.24	0.30
	<i>SD</i>	0.18	0.24	0.18	0.16	0.21	0.25	0.09	0.16
	% <i>diff.</i>	-	3.4	-	13.5	-	5.8	-	28.4
	<i>O/S</i>	-	1.04	-	1.16	-	1.06	-	0.78

TP 순서로 이루어졌다. SS의 경우에는 MUSLE와 관련된 경사(SLOPE) 및 경사장(SLSUBSN), 유사이동에 관계된 PRF, SPCON, SPEXP과 하천의 토양유실과 관련된 CH_EROD와 CH_COV가 주요 매개변수로 작용하였으며 이들 매개변수를 위주로 보정한 결과는 Table 8과 같다. 검·보정기간 동안 경안 A와 B지점의 % difference는 모두 “Very good” (20% 이하)로 평가되었으며, O/S ratio는 0.92~1.14 수준으로 모의값이 실측자료의 경향을 적절히 묘사하는 것으로 나타났다. 영양물질 검·보정은 GWNO3과 GWSOLP 등의 하천수질에 영향을 주는 매개변수와 지하수의 영양물질의 침전과 용출을 나타내는 RS1~RS5와 태별 질소와 인의 변화를 나타내는 BC1~BC4가 주요 매개변수로 작용하였다. 질소는 질산화, 탈질화, 질소고정 등 반응기작이 다양하며, 특히 농경지에서는 대부분 NO₃-N 형태로 존재한다. 인의 경우 질소와 달리 물에 쉽게 녹지 않고 주로 토양에 흡착되어 토양과 함께 유출되는 특성을 지니는 등 영역의 복잡한 반응기작을 감안할 필요가 있다(장재호 등, 2009). TN의 경우 두 지점 모두 검·보정 기간에 걸쳐 % difference가 “Good” (25% 이하) 이상을 나타냈으며, TP의 경우 보정기간 동안 경안 A와 B, 검정기간은 경안 A에서

“Very good” (15% 이하)을 나타냈지만, 경안 B는 검정기간 동안 “Fair” (25~35%)의 수준에 있었다. O/S ratio의 경우 0.78~1.32 범위에서 1.0과 다소 근사하게 변하는 것으로 나타났으며, 수질 매커니즘이 복잡·다양한 영역의 공간적 특성을 고려할 때 전반적으로 모의기간 동안 적절히 모의된 것으로 사료된다.

Fig. 4는 전체 검·보정지점의 실측값과 모의값의 산포도이다. 산포도는 분산도라고도 하며 변량 x 와 그 분포 $F(x)$ 가 주어졌을 때, 그 분포의 중심적 위치의 측도를 m 이라 할 때 $F(x)$ 의, m 주위에서 흩어져 있는 정도를 나타내는 기술적 지표이다. 본 연구에서는 실측값과 모의값의 관계를 분석하기 위해 두 변량간의 분포를 나타내었다(장재호 등, 2009). Flow, TN의 경우 실측값과 모의값이 1:1라인을 중심으로 집중되어 있는 반면에 SS와 TP의 경우 특정기간에 과대·과소평가 되는 등 outlier가 다소 있기는 하지만 대체적으로 분포의 흩어진 폭이 좁게 나타나 모의값이 실측값에 근접함을 확인할 수 있었다.

3.2. SWAT의 수질관리 영향 평가

수변완충지 및 최적영농관리, 친변저류지 조성 및 환경기

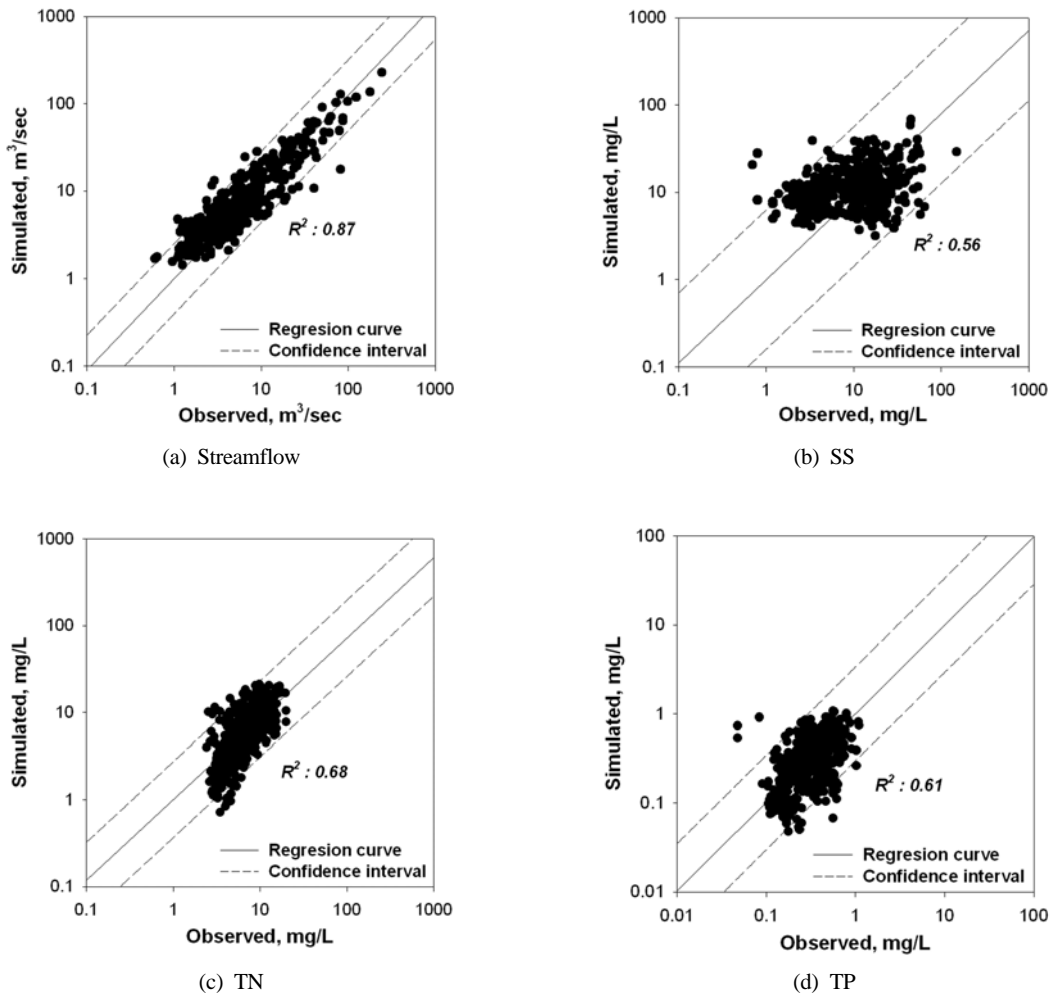


Fig. 4. Scatter plots of observed and SWAT-simulated daily stream-flow, SS, TN, and TP concentration during the simulation period.

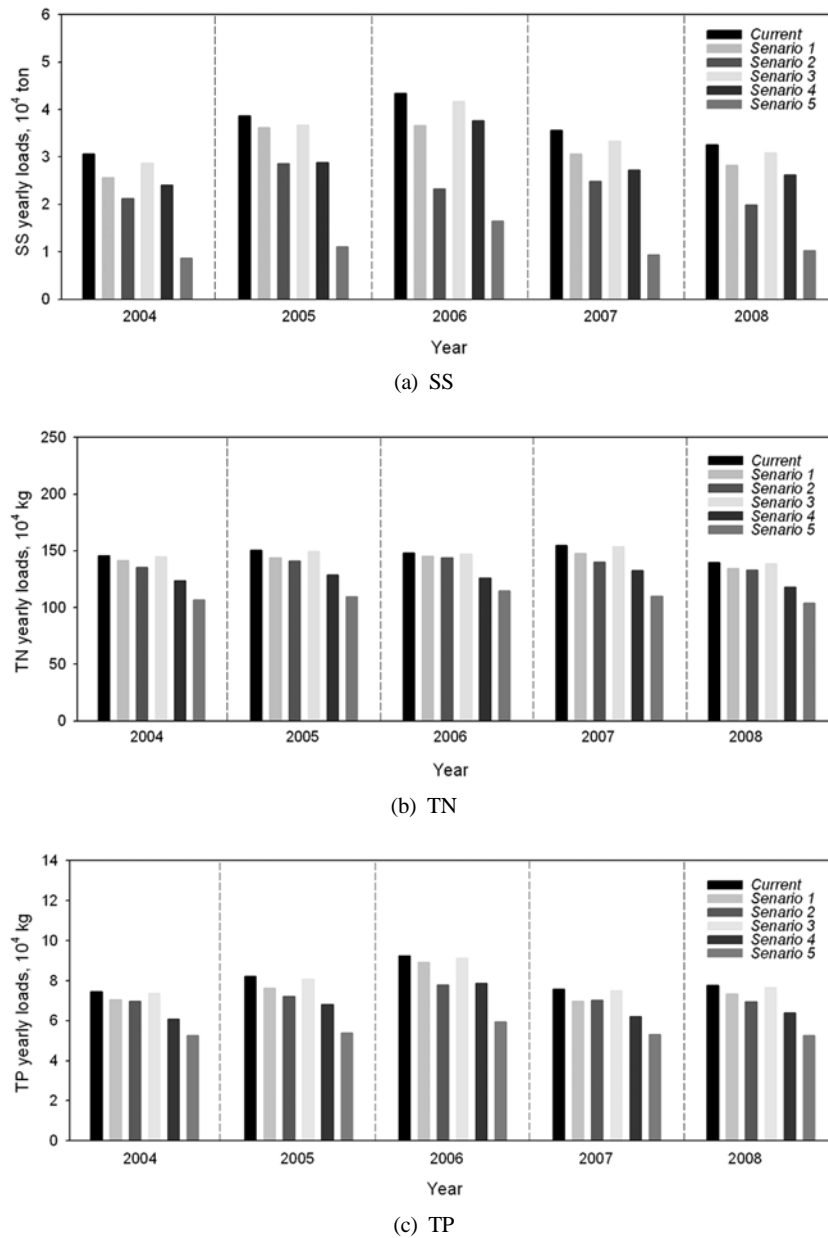


Fig. 5. Comparison between (a) SS, (b) TN and (c) TP yield after and before BMPs.

초시설 확충 등 SWAT에서 다양한 BMPs 모의효과를 분석한 결과, 현재 조건과 비교하여 수질개선 효과가 나타났다. 유역에서의 시나리오별 수질관리 효과분석은 2004년부터 2008년까지 유역의 최종 출구지점에 대한 연간 오염배출량을 분석하였으며, 각 시나리오별 저감효과를 비교하였다.

Fig. 5는 2004년부터 2008년까지 시나리오 적용 전·후에 대한 모의결과를 나타내고 있다. SS의 경우 시나리오별 저감효율은 적용 전의 연평균 유사발생량인 36,154 ton/year를 초과하는 년도가 한 번도 발생하지 않았으며, TN과 TP도 동일한 결과를 나타내었다. 또한 SS의 연도별 시나리오별 저감효과는 TN, TP와 비교하여 뚜렷한 차이를 나타내어 시나리오별 저감효과의 정량적 분석이 더 용이할 것으로 판단되었다. Table 9에 의하면 시나리오 1(수변구역 녹지대 조성)의 경우 시나리오 적용 전에는 SS가 36,154

ton/year, TN이 1,475,772 kg/year, TP가 80,501 kg/year이었는데, 시나리오 적용 후에는 SS가 31,440 ton/year로 평균 13.0%, TN이 1,424,456 kg/year로 평균 3.5%, TP는 75,816 kg/year로 평균 5.8%의 감소를 각각 나타내어 오염물질 저감효과를 볼 수 있었으나 이는 수변(초지)을 통과하여 오염물질이 저감되는 것이 아니라 단순히 유역 내 토지 이용변화(HRU 속성변화) 즉, 초지증가에 따른 영향이라 할 수 있다. 유역에서 발생한 오염이 수변을 통해서 얼마나 저감되는지 평가할 수 없는 준분포형 모델인 SWAT의 구조적인 한계점이 해결되지 않은 결과이다. SWAT-REMM Prototype 버전이 개발되어 소하천 일부구간에 대한 수변림 조성효과 분석(임경재 등, 2008) 등에 관한 연구들이 진행되고 있다.

시나리오 2(최적영농관리)의 경우 SS가 23,565 ton/year로

평균 34.4%, TN이 1,386,621 kg/year로 평균 6.0%, TP가 71,862 kg/year로 평균 10.7%가 각각 저감되어 비점오염 제어를 위한 단일 시나리오 중 가장 우수한 효율을 나타내었다. SWAT의 경우 HRU(Hydrological Response Unit)라는 계산단위를 통해 모델 입력 매개변수를 생성하고 유출 특성 및 오염물질 이동에 매우 중요한 역할을 한다. 시나리오 2에서 사용된 유사저감을 위한 모의방법 중 HRU의 FILTERW변수를 이용하여 초생대 효과를 평가하는 방법은 초생대를 공간적으로 분포시키지 않고 초생대 폭에 의한 유사 저감율만을 고려하기 때문에 초생대에 의한 농경지 면적 감소가 고려되지 않으며 이로 인해 유사저감 분석에 다소 제한이 따를 수 있다. 따라서 이 같은 단점을 보완하기 위해 박윤식 등(2008)은 VFSMOD-W 모델을 이용하여 여러 가지 인자(초생대 폭, 강우에 따른 유출, 식생에 관한 인자)가 초생대 설치에 따른 유사 저감 효과에 미치는 관계를 파악하여 SWAT 모델의 초생대 유사저감 모듈을 수정한 바 있으며, 허성구(2009)는 초생대를 공간적으로 분포하고 농경지 내에서의 발생 유사량을 저감하기 위해 모듈을 개발하여 적용성을 평가하는 등 많은 연구자들이 노력하고 있다.

시나리오 3(천변저류지 조성)의 경우 SS가 34,267 ton/year로 평균 5.2%, TN이 1,467,873 kg/year로 평균 0.5%, TP가 79,489 kg/year로 평균 1.3%수준을 나타내어 시나리오 중 저감효과가 가장 작게 나타났다. 시나리오 3의 정확한 모의 및 효과분석을 위해서는 천변저류지의 정확한 위치, 특성, 용량 등에 대한 정보와 장기간의 식생 및 수질자료들이 충분히 뒷받침해주어야 한다. 또한 조성된 천변저류지의 습지로서의 지속 가능성을 평가하기 위해서는 천변저류지의 유황분석 및 수질저감효과 모의 등이 선행되어야 하며, SWAT 모델의 수리학적 모호성 및 수질 불확실성을 위해 수변관리 모델인 REMM 모델 등을 이용하여 연구결과와 비교할 필요가 있다(김재철 등, 2008).

시나리오 4(환경기초시설 확충)의 경우 SS가 28,760 ton/year로 평균 20.5%, TN이 1,257,004 kg/year로 평균 14.8%, TP가 66,686 kg/year로 평균 17.2%정도 삭감되어 가장 좋은 효율을 나타냈다. Jung 등(2008)은 HSPF를 이용한 경안천 유역의 모델링 연구결과에서 시나리오별 수질개선 효과를 분석하였는데, 하수처리장의 처리효율이 30% 개선시 BOD, TN, TP가 14~20% 범위로, 50% 개선시 19~31% 정

도가 저감될 수 있음을 보고하였다. 점오염원의 비중이 큰 경안천 유역의 경우 점오염원 관리에 따른 수질 및 부하량 저감이 효과적이며, 비점오염원 제어와 비교하여 모델 내에서 보다 쉽게 묘사하고 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

시나리오 5의 경우 SS가 11,155 ton/year로 평균 69.2%, TN이 1,087,913 kg/year로 평균 26.3%, TP가 54,309 kg/year로 평균 32.5%를 나타내어 효과적인 수질관리결과를 얻기 위해서는 점원오염 및 비점원오염에 대한 수질관리대책이 동시에 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

시나리오별 저감효율은 수질항목에 따라서 차이는 있으나 시나리오 5 > 시나리오 2, 4 > 시나리오 1 > 시나리오 3의 순서로 나타났다. 점오염 및 비점오염에 대한 복합적인 수질관리 대책인 시나리오 5를 제외하면 적절한 최적영농관리(시나리오 2)를 통해서 유사량을 효과적으로 저감할 수 있고 영양물질의 경우 다른 시나리오에 비해 최적영농관리(시나리오 2) 및 점오염 삭감 대책(시나리오 4) 등을 통해 적절한 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 농경지 유실 방지를 위한 식물피복 및 구조적 방안 등은 SS와 영양물질 저감에 효과적이며, 시비억제를 통한 영양물질 추가 저감 등의 최적영농관리방안은 농업생산성을 최대화하고 농업생태계의 지속성을 보전하며 농촌비점원오염의 제어를 위한 권장된 수단으로 자리잡아왔다(이승현과 최우정, 2002). 또한 경안천 유역의 지속적인 도시개발정책과 더불어 하수도 보급 및 환경기초시설 확충이 불가피할 것으로 판단되었다.

SWAT 모델의 모의결과에 의하면 SS의 BMPs 적용 전 수질은 5년(2004~2008년) 평균 49.21 mg/L이며 최적영농관리(시나리오 2)를 통해 평균 33.59 mg/L까지 개선할 수 있었고, 점오염 및 비점오염 삭감대책(시나리오 5)을 통해 시나리오 2보다 약 3배가량 더 낮은 평균 10.63 mg/L까지 개선할 수 있는 것으로 나타났다. TN은 BMPs 적용 전 4.90 mg/L에서 시나리오 2 적용 후 4.71 mg/L, 시나리오 5 적용 후 3.59 mg/L까지 개선되었으며 TP는 0.245 mg/L에서 각각 0.231 mg/L, 0.173 mg/L까지 수질이 개선됨을 알 수 있었다. SS의 경우 점오염 및 비점오염 삭감대책 적용 후에는 현행 호소수질환경기준인 III등급을 만족하나 TN, TP의 경우 V등급을 훨씬 초과하는 수준으로 팔당호 수질 개선을 위해서는 질소와 인 처리에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 9. The contribution of pollutant load and water qualities before and after BMPs

	SS			TN			TP		
	TPL ^a	R (%) ^b	mg/L	TPL ^a	R (%) ^b	mg/L	TPL ^a	R (%) ^b	mg/L
Current	3.62	-	49.21	147.58	-	4.90	8.05	-	0.245
Scenario 1	3.14	13.1	42.98	142.45	3.5	4.68	7.58	5.9	0.228
Scenario 2	2.36	34.4	33.59	138.66	6.0	4.71	7.19	10.5	0.231
Scenario 3	3.43	5.3	44.78	146.79	0.5	4.89	7.95	1.3	0.242
Scenario 4	2.88	20.7	42.34	125.70	14.8	3.97	6.67	17.3	0.193
Scenario 5	1.12	69.5	10.63	108.79	26.3	3.59	5.43	32.4	0.173

^a: Average total pollutant load (SS: 10⁴ ton/year, TN, TP: 10⁴ kg/year)

^b: Average reduction rate, %

4. 결론

최근 팔당호 수질오염관리에 있어서 경안천 유역의 수질 관리에 대한 관심이 증가하여 적절한 대책 마련이 시급해 지고 있는 가운데 점오염 및 비점오염에 대한 관리대책 등이 다양하게 연구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유역 수문수질 해석모델인 SWAT을 이용하여 경안천 유역을 대상으로 다양한 수질관리 시나리오에 따른 영향을 평가해보았다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

유출량 및 SS, TN, TP에 대한 보정 및 검증을 통해 모델 평가지수를 산정한 결과, 유출량은 실측값을 잘 반영하였고 SS, TN, TP의 경우도 모의 경향이 실측자료와 전반적으로 유사하게 나타나 경안천 유역 전반에 걸친 정성적, 정량적 평가가 충분히 가능할 것으로 판단되었다.

SWAT을 이용하여 묘사한 수질관리방안은 수변구역의 녹지대 조성(시나리오 1), 시비저감 및 농경지에서의 유사 발생 저감 등의 최적영농관리(시나리오 2), 생태습지 및 저류지 등의 천변저류지 조성(시나리오 3), 환경기초시설 확충에 의한 점오염 삭감(시나리오 4), 그리고 유역관리의 복합적인 평가를 위하여 점원오염과 비점원오염을 동시에 고려하였을 경우(시나리오 5)로 구분하였다. 연도(2004~2008년)별 시나리오에 대한 BMPs 저감효과에서 SS가 TN, TP와 비교하여 뚜렷한 차이를 나타냈고, 시나리오별 저감효과의 정량적 분석에 있어서 SS가 더 용이할 것으로 판단되었다. 경안천 유역 말단부에서 SS의 연평균 감소율 정도는 시나리오 2가 34.4%, 시나리오 4가 20.7%, 시나리오 1이 13.1%, 시나리오 3이 5.3%의 순서로 나타났다. TN의 연평균 감소율의 정도는 시나리오 4(14.8%), 시나리오 2(6.0%), 시나리오 1(3.5%), 시나리오 3(0.5%)의 순서를 보였고, TP의 경우 시나리오 4(17.3%), 시나리오 2(10.5%), 시나리오 1(5.9%), 시나리오 3(1.3%)로 TN과 유사한 범위를 나타내었다. 그리고 시나리오 5는 SS가 69.5%, TN이 26.3%, TP가 32.4%를 나타내어 점오염 및 비점오염을 동시에 관리할 경우 높은 수질개선효과를 얻을 수 있음을 시사하였다. BMPs 적용 전·후의 수질개선정도는 시나리오 5 적용 후 SS가 10.63 mg/L로 현행 호소수질환경 기준의 III등급 수준을 만족하나 TN과 TP의 경우 각각 3.59 mg/L, 0.173 mg/L로 V 등급을 초과하는 수준으로 영양물질에 대한 추가적인 관리방안이 필요할 것으로 판단되었다.

SWAT 모델은 이미 TMDL 및 유역관리에 있어 그 적용성이 널리 입증되었으나 적용하고자 하는 대상지역의 충분한 입력자료를 기반으로 모델의 정확한 모의가 이루어져야 결과의 신뢰성을 뒷받침할 수 있으며, 저감 시나리오를 정확하게 묘사하기에는 분명한 한계점들이 따르기 때문에 본 연구 결과의 검증에 대해서 이를 극복할 수 있는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 오염이 심각한 유역을 대상으로 적합한 BMPs를 도입하기 위하여 각각의 시나리오에 대한 경제성 측면을 검토하는 연구도 반드시 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

강동균(2005). 소양강댐 상류 내린천 유역에서 SWAT을 이용한 BMP의 유사발생 저감 효과의 분석. 석사학위논문, 강원대학교.

공동수, 윤성규, 이형진, 김병익, 박지형(2006). 남한강수계 오염물질 유출 및 수질변동 특성에 관한 연구(III). 한강물환경연구소.

과학기술부(2006). 수자원의 지속적 확보기술개발 사업, 「하수처리수의 농업용수 재이용 시스템 적용」.

김민경(2007). 논에서 발생하는 비점원오염 저감을 위한 최적관리방안. 제 3차 비점오염포럼집.

김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정육진(2002). 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. 대한환경공학회지, 24(11), pp. 2019-2027.

김이형(2009). 침투여과·인공습지 이용한 비점오염원·유역관리방안·한국형 비점오염 저감기술 개발 시급. 워터저널, 63, pp. 52-55.

김재철, 김진관, 김상단(2008). 천변저류지 조성에 따른 습지 지속가능성 평가 및 우포늪에 미치는 수문학적 영향 평가. 한국방재학회지, 8(6), pp. 137-148.

김재희(2007). SWAT 모델을 이용한 수변구역 조성에 따른 오염물질 유출특성. 석사학위논문, 청주대학교.

김진철, 한국현, 이종식, 김원일, 정구복, 하성건, 정강호, 이경보, 이경도, 이정택, 권순국(2006). 농업환경분야 비점오염 연구방향. 2006년 비점오염포럼집.

김철겸, 김남원(2008). 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성. 수질보전 한국물환경학회지, 24(4), pp. 465-472.

김형철, 윤춘경, 엄한용, 김형중, 함중화(2008). 인공습지 내 개방구역 조성에 따른 처리효율분석. 수질보전 한국물환경학회지, 24(6), pp. 709-717.

농업과학기술원(2005). 비점오염원 관리와 국토 보전을 위한 전국 토양침식 위험성 평가.

농촌정책국 시설관리과(2006). 농업용수 수질개선대책 추진 방향안).

문정호(1999). 팔당상수원 수질오염예방을 위한 수변구역제도, 국토연구원, pp. 50-55.

박윤식, 김종진, 김남원, 박준호, 장원석, 최중대, 임경재(2008). VFSSMOD-W 모델을 이용한 SWAT 모델의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선. 수질보전 한국물환경학회지, 24(4), pp. 473-479.

박종윤, 이미선, 박근애, 김성준(2008). SWAT모델에서 공간 입력자료의 다양한 해상도에 따른 수문-수질 모의결과 비교분석. 한국수자원학회지, 41(11), pp. 1079-1094.

박창진(2002). 토양 및 수질의 환경친화적 보전을 위한 최적영농관리방안 모델 연구. 박사학위논문, 강원대학교.

박철수, 정영상, 주진호, 이정태(2005). 고령지 석비레 성토밭의 토양유실 저감을 위한 최적영농관리방안. 한국토양비료학회지, 38(3), pp. 119-126.

이기영(1998). 축산폐수가 하천에 미치는 영향분석 및 개선대책의 제시. 경기개발연구원 수질환경연구소.

이도훈(2006). LH-OAT 민감도 분석과 SCE-UA 최적화 방법을 이용한 SWAT 모델의 자동보정. 한국수자원학회지, 39(8), pp. 677-690.

이승현, 최우정(2002). 농업생태계의 특징과 지속가능 관리방안. 한국농촌공사 농어촌과 환경, 12(3), pp. 100-112.

- 이은영(2008). 수변구역 조성방법에 따른 비점오염물질 유출특성. 석사학위논문, 청주대학교.
- 임경재, 조재필, 김익재, 김남원, 최중대(2008). 하천 일부 구간에서의 수변립 조성에 따른 수질 개선 효과 모의를 위한 SWAT-REMM ArcView GIS 시스템의 개선 및 평가. *학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1290-1294.
- 장재호, 윤춘경, 정광욱, 김형철(2009). BASINS/SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 오염부하 배출 특성. *한국하천호수학회지*, **42**(2), pp. 200-211.
- 정성민, 장창원, 김재구, 김범철(2009). 한강상류 고령지 농업지역에서의 강우시 비점오염 유출특성. *한국농공학회지*, **25**(1), pp. 102-111.
- 한강물환경연구소(2008). 2004-2008년도 한강수계 오염총량 관리사업, 「수역별 수질/수량 관측망 운영 및 평가」.
- 한강수계관리위원회(2006). 4대강 대권역별 수질보전기본계획 수립을 위한 기초자료 조사.
- 한강유역환경청(2007). 경안천 중권역 물환경관리계획(2008-2012).
- 함종화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 신현범(2005). 물리적 설계 인자가 인공습지의 처리효율에 미치는 영향. *한국농공학회지*, **47**(5), pp. 87-97.
- 허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재(2005). 고령지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가. *한국농촌계획학회지*, **11**(4), pp. 67-74.
- 허성구(2009). 상류수계의 토양유실 모의를 위한 SWAT 모델링 기법 개발 및 적용성 평가. 박사학위논문, 강원대학교.
- 환경관리공단(2007). 한강수계 비점오염원관리시설 모니터링 및 유지관리.
- 환경부(2003). *유역관리기법(I, II)*.
- 환경부(2008). 2007년 하수도통계, 환경부 상하수도국 생활하수과.
- Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A., and Arnold, J. G. (2007). Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydro. Process*, Published online in Wiley InterScience DOI, 10.1002/hyp.6890.
- ASCE (1993). ASCE task committee on definition of criteria for evaluation of watershed models, Criteria for Evaluation of Watershed Models. *Irrigation Drainage Engineering*, **119**(3), pp. 429-442.
- Bracmort, K. S., Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A., and Arnold, J. G. (2006). Modelling long-term water quality impact of structural BMPs. *Transactions of the ASAE*, **49**(2), pp. 367-374.
- Bryan, A. T. and Christine, A. S. (2007). Cannonsville reservoir watershed SWAT2000 model development, calibration and validation. *Hydrology*, **337**, pp. 68-86.
- Donigan, Jr., A. S. (2000). *HSPF Training Workshop Handbook and CD*. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22, EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.
- Jung, K. W., Yoon, C. G., Jang, J. H., and Kong, D. S. (2008). Estimation of pollutant loads considering dam operation in Han River Basin by BASINS/Hydrological Simulation Program-FORTRAN. *Water Science and Technology*, **58**(12), pp. 2329-2338.
- Kang, M. S., Park, S. W., and Lee, J. J. (2006). Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 72-92.
- Kangsheng, W. and Carol, A. J. (2007). Hydrologic response to climatic variability in a great lakes watershed: A case study with the SWAT model. *Hydrology*, **337**, pp. 187-199.
- Migliaccio, K. W., Chaubey, I., and Haggard, B. E. (2007). Evaluation of landscape and instream modeling to predict watershed nutrient yields. *Environmental Modeling and Software*, **22**, pp. 987-999.
- Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands(Second edition)*. New York, NY 10003.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). Riverflow forecasting through conceptual model. *Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., and Williams, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual: Report 02-02*. Temple, Texas: USDA-ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory.
- Ouyang, W., Hao, F. H., and Wang, X. L. (2008). Regional Non point Source Organic Pollution Modeling and Critical Area Identification for Watershed Best Environmental Management. *Water Air Soil Pollutant*, **187**, pp. 251-261.
- Santhi, C., Srinivasan, R., Arnold, J. G., and Williams, J. R. (2003). A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in the Big Cypress creek watershed. *Second Conference on Watershed Management to Meet Emerging TMDL Environmental Regulation*, Albuquerque, New Mexico, november 2003, pp. 384-394.
- Vache, K., Eilers, J., and Santelmann, M. (2002). Water quality modeling of alternative agricultural scenarios in the U.S. Corn Belt. *American Water Resources Association*, **38**(3), pp. 773-787.
- Zhongwei, L. (2006). Water quality simulation and economic valuation of riparian land-use changes. Degree Ph.D, Arts and Sciences, Geography, University of Cincinnati.