

주암호 소유역의 영양물질 부하 추정을 위한 SWAT 모형의 적용성 평가

정재운 · 윤광식* · 한국현 · 최우영* · 이준배** · 최훈근**

한국농어촌공사 농어촌연구원, *전남대학교 생물산업공학과, **국립환경과학원 영산강물환경연구소
(2009년 7월 7일 접수; 2009년 8월 24일 수정; 2009년 9월 22일 채택)

Evaluation of SWAT Model for Nutrient Load from Small Watershed in Juam Lake

Jae-Woon Jung, Kwang-Sik Yoon*, Kuk-Heon Han, Woo-Young Choi*,
Jun-Bae Lee** and Hun-Geun Choi**

Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Ansan 426-908, Korea
*Department of Biosystems & Agricultural Engineering, Chonnam Natational University, Gwangju 500-757, Korea
**Yeongsan River Environment Research Laboratory, National Institute of
Environmental Research, Gwangju 500-480, Korea

(Manuscript received 7 July, 2009; revised 24 August, 2009; accepted 22 September, 2009)

Abstract

For the assesment of pollutant loads, a monitoring has been conducted to identify hydrologic conditions and water quality of the Oenam watershed in Juam Lake, and the SWAT model integrated with GIS was applied to the watershed and evaluated for its applicability through calibration and verification using observed data. For the model application, digital maps were constructed for watershed boundary, land-use, soil series, digital elevation, and topographic input data of the Oenam watershed using Arcview. The observed runoff was 832.8 mm while the simulated runoff was 842.8 mm in 2003. The model results showed that the simulated runoff was in a good agreement with the observed data and indicated reasonable applicability of the model. In terms of nutrient load, the simulation results of T-N, T-P showed a similar trend to observed values. The observed T-N load was 10.8 kg/ha and the simulated T-N load was 7.6 kg/ha while the observed T-P load was 0.21 kg/ha and the simulated T-P load was 0.18 kg/ha. In general, SWAT model predicted observed runoff and loads of T-N and T-P after calibration with observed data in acceptable range. Overall, SWAT model was satisfactory in estimation of nutrient pollutant loads of the rural watershed.

Key Words : Nonpoint source, Runoff, SWAT, T-N, T-P

1. 서 론

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 국

Corresponding Author : Kwang-Sik Yoon, Department of
Biosystems & Agricultural Engineering, Chonnam Natational
University, Gwangju 500-757, Korea
Phone: +82-82-62-530-2158
E-mail: ksyoon@jnu.ac.kr

내에서 다양하게 적용되었다. Kang¹⁾은 SWAT 모형을 발안유역에 적용하여 유량, 유사량, 영양물질을 추정하였다. Im 등²⁾은 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran) 와 SWAT 모형을 산림유역의 유출 및 유사량을 추정하였으며, Jang³⁾은 SWAT모형이 장기 일유출량 추정 및 유역 전반의 통합관리 측면

에서 그 적용성 및 활용성이 우수하다는 연구결과를 발표하였다. Heo 등⁴⁾은 고랭지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성을 평가하였다. Kim 등⁵⁾은 저해상도 DEM 사용으로 인한 SWAT 지형 인자 추출 오류 개선 모듈을 개발하여 평가하였다. Park⁶⁾은 VFSMOD-W(Vegetative Filter Strip Model-W)모형을 이용한 SWAT 모형의 초생대 유사저감 효율 모듈을 개선하였다. Yoo 등⁷⁾은 실측 경사장 및 경사도를 고려한 양구 해안면 지역의 유사량을 평가하였다.

또한 국내 주요댐에 적용한 사례를 살펴보면 Kang⁸⁾은 소양강댐 상류 내린천 유역에서 SWAT을 이용한 BMP의 유사발생 저감효과의 분석을 실시하였고, Heo 등⁹⁾은 GIS 기반의 모형을 이용하여 도암댐 유역의 산림 파편화에 따른 수(水)환경 영향을 평가하였다. Yu¹⁰⁾는 SWAT 모형을 이용한 대청호 유역의 오염물질 유달을 산정에 대하여 연구하였다. Jung과 Yang¹¹⁾은 제주도 하천에 대한 SWAT 모형을 적용하였고, Kim과 Kim¹²⁾은 충주댐 상류유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유역 내 점오염원 및 비점오염원에 따른 수질 영향을 평가하는 등 주요 댐유역에 대한 모형의 적용사례는 많이 있다. 하지만 현재까지 광주·전남 상수원인 주암호 유역의 오염부하 모니터링을 통한 실측자료를 이용하여

SWAT 모형의 오염부하 예측 능력을 살펴본 사례는 찾아보기 어렵다.

본 연구의 적용유역인 주암호 유역은 부영양화로 녹조현상이 나타나기 시작함에 따라 수질관리에 대한 문제점이 제기된 유역이다. 따라서, 본 연구에서는 주암호 유역내 소유역인 외남천 유역을 선정, 모니터링을 실시하여 수문 및 수질관련 인자를 조사·분석 하였다. 또한 모니터링을 통하여 얻어진 유량 및 수질관측치를 이용하여 상수원농촌유역에 대한 SWAT 모형의 적용성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상유역

SWAT 모형의 적용성을 검토하기 위한 적용유역은 주암호 유역의 소유역인 외남천 유역을 선정하였다. 외남천유역은 주암호 유입 소유역 중 접근성이 좋고 다른 소유역보다 농경지 비율이 높아 농촌유역의 특성을 잘 반영할 수 있어 농촌유역 모델인 SWAT 모형의 적용성을 검토하기에 적합한 유역이다(Fig. 1). Table 1은 대상유역의 토지이용현황을 나타내고 있다.

2.2. 수문 및 수질조사

외남천 유역에서의 강수량 자료는 유역 내에 위

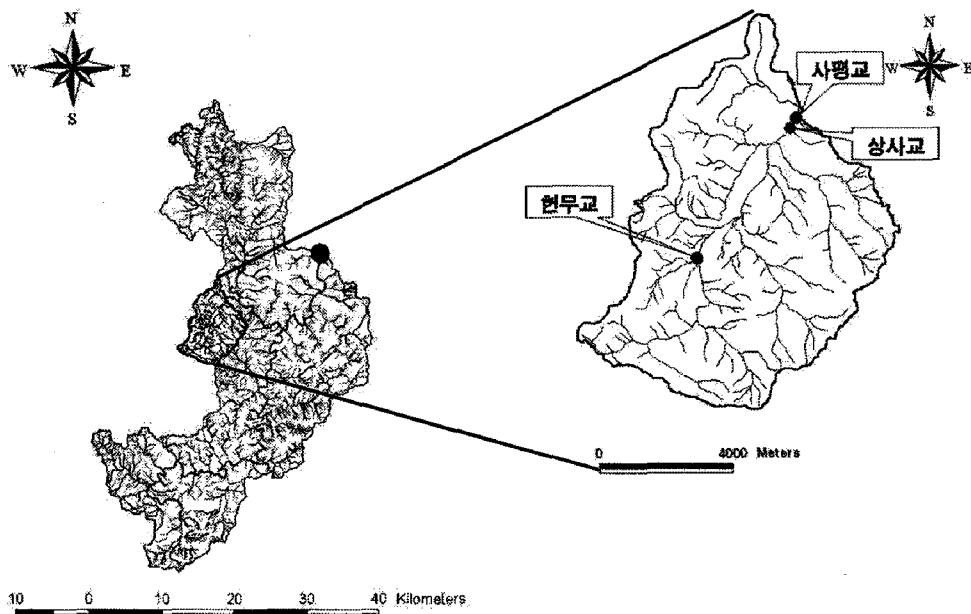


Fig. 1. Location map of study watershed.

Table 1. Status of landuse(2001)

Region	Landuse(ha)					
	Total	Paddy	Upland	Forest	Residential	etc
Nam meun	2,877	374	134	2,235	42	92
Han cheonmuyun	2,964	201	78	2,591	21	73
Total	5,841	575	212	4,826	63	165

치해 있는 남면 면사무소의 강우량자료(2001~2003년)를 이용하였으며, 일사량, 풍속, 기온, 상대습도 등의 기상자료는 광주 기상청 자료를 이용하였다.

주암호 내 외남천을 대상으로 2001년부터 2003년 영농기간(5월~10월)동안 사평교에서 모니터링이 실시되었다. 조사지점의 수위-유량관계식을 개발하기 위해 독일 OTT사의 압력식 수위계인 Orphimedes를 설치하여 20분 간격으로 측정하였으며, 수위자료와 현장에서의 유속측정 결과로부터 얻어진 수위-유량 관계곡선을 이용하여 유량을 산정하였다.

수질조사(2001~2003년)는 유량측정 지점(사평교)에서 비강우시 2주 간격으로 강우시는 수위변화에 따라 수질샘플을 채취하여 4℃이하의 온도에서 보관하여 분석시료로 사용하였다. T-N은 수질시료 500 mL를 취하여 각각 환원중류-킬달법과 중화적정법으로 분석하였고, T-P는 수질시료 500 mL를 취하여 50 mL로 농축한 다음 ascorbic acid reduction법에 기준하여 분석하였으며, 실험방법은 수질오염공정시험방법에 준하여 실시하였다. 분석된 수질자료와 유량자료를 이용하여 유량-부하량 관계식을 도출하였으며 유량-부하량 관계식을 이용하여 일 부하량을 산정하였다.

2.3. GIS 자료 구축

적용유역의 기본도는 1:25,000 NGIS 수치지도와 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하였으며, 토지이용도는 국토지리정보원의 1:25,000 토지이용도를 이용하였다. 주제도는 기본도로부터 30 m by 30 m 해상도급 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)를 구축하였고, 토양도는 1:25,000 정밀토양도를 사용하였고 수문학적 토양군도, 토성, 토양침식성인자, 투수계수, 용적밀도 등의 토양의 물리적 특성치는 농촌진흥청의 농업토양정보시스

템의 자료를 이용하여 구축하였다. 또한 국토지리정보원에서 구매한 토지이용도를 이용하여 조사유역의 토지이용 피복도를 추출하였다(Fig. 2).

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출에 대한 모형의 보정

모형의 보정은 모형으로부터 계산된 값과 실측치가 가장 잘 일치하도록 모형의 초기조건 및 매개변수를 유역의 조건에 맞도록 일치시키는 과정이다¹³⁾.

수문모형의 보정에는 최적화 기법과 단순시행착오법이 있는데, 본 연구에서는 수문모형의 보정을 위해서 시간은 비록 많이 걸리지만, 간편하고 보편적으로 사용되고 있는 단순시행착오법을 이용하였다. 대부분 모형이 그러듯이, 보통 모형 구동시 처음 1~2년 정도는 모델 안정화 기간이기 때문에 결과만 얻어내고 결과 분석용으로 사용하지 않는다. 특히 SWAT같은 장기유출 모형일 경우 유출량의 모의는 토양수분변화에 따라 SCS의 CN값이 연속적으로 계산되므로 모형의 정확한 모의를 위해서 더욱더 안정화 기간이 필요하다. 본 연구에서는 2001년은 모델을 안정화 시키는 기간으로 선정하고, 모형의 보정은 2002년 5월부터 10월까지 외남천 유역의 유역출구점에서 측정된 유출량자료를 사용하여 보정하였다. 모형의 보정을 위한 기준으로는 실측치와 모의치의 회귀분석을 통해 결정되는 결정계수(R^2)와 절대적인 오차정도를 나타내는 RMSE(root mean square error)를 사용하였으며, 모형의 효율성을 나타내는 효율지수는(EI) Nash와 Sutcliffe¹⁴⁾가 제안한 식을 사용하여 계산하였다. 여기서, 결정계수는 0~1.0의 범위의 값을 가지면서 1에 가까울수록 실측치와 모의치가 상관성이 높다는 것을 의미한다. 하지만 결정계수는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로서 오차의 정도를 나타내지는 못한다. 따라서

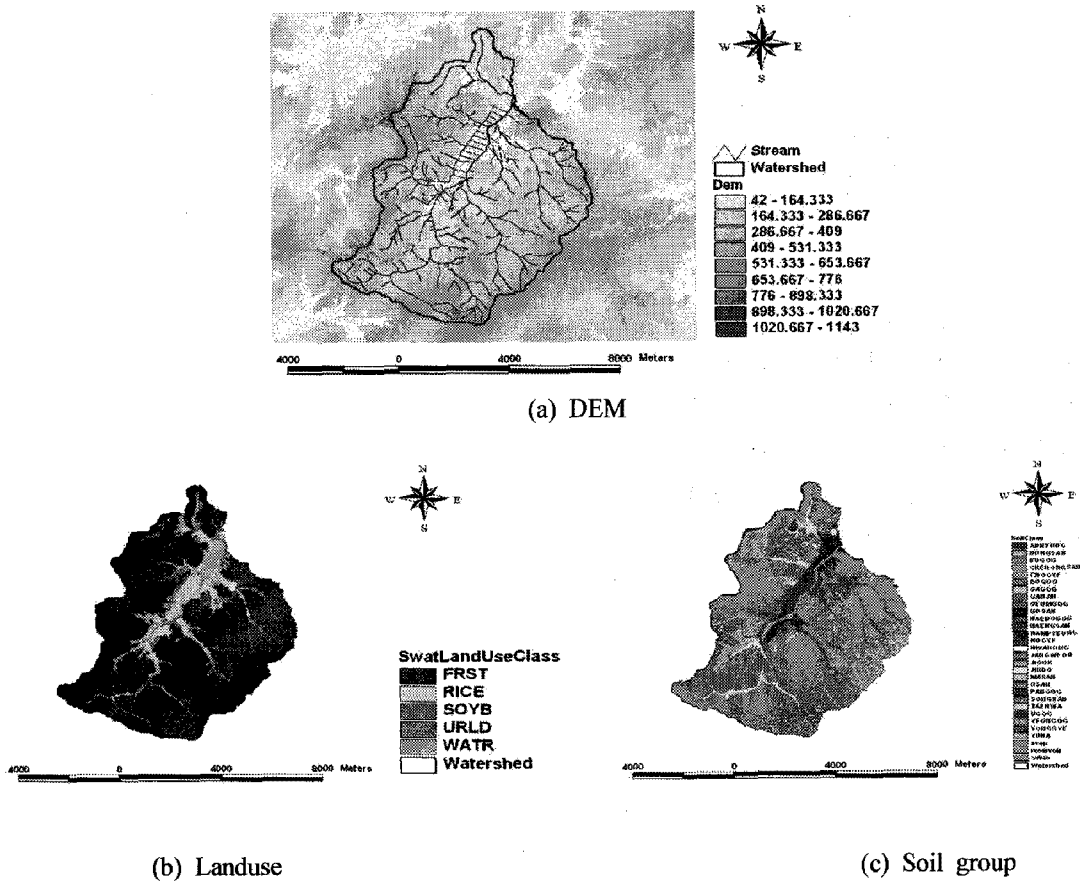


Fig. 2. DEM, landuse and soil group map of the Oenam watershed.

오차의 정도를 나타내기 위해 RMSE와 EI를 사용하였다. EI는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 계산된 EI가 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다¹⁴⁾.

본 연구에서는 유출보정을 위해서 SWAT 모형 자체에서 제공하는 Calibration tool을 이용하여 매개 변수를 선택하여 보정하였다. 그 결과 CN_2 는 모델 제시 기준치보다 4를 감소시켰고, 지하수 관련 매개 변수인 GWQMN은 100을 증가시켰다.

Fig. 3a는 보정기간인 2002년 강우량에 따른 유출량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있고, Fig. 3b는 유출량의 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 보정값은 실측값을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. Table 2는 통계적인

변량을 이용하여 실측치와 모의치를 비교하여 평가한 결과를 나타내고 있다. 2002년의 유출측정일에 해당되는 강우량이 1,331 mm였고, 자료기간에 대한 실측 유량은 1,061.8 mm였으며, 모의 유출량은 1,054.9 mm이었다. 모형의 보정에 사용된 전 자료기간에 대한 RMSE는 7.72 mm/day, EI는 0.97, 그리고 결정계수는 0.98의 값을 보였다. 따라서, 모의치는 실측치를 잘 반영함을 알 수 있었다.

3.2. 유출에 대한 모형의 검증

SWAT모형의 검증을 위한 자료로는 2003년 5월부터 10월까지의 자료를 이용하였다. Fig. 4a는 2003년 강우량에 따른 모의 유출을 나타내고 있으며, 그 결과 실측 유량은 832.8 mm, 모의 유출은 842.8 mm로 모의치는 실측치의 경향을 잘 반영하고 있다. 유출량의 실측치와 모의치의 산포도는 Fig 4b와 같다.

Table 3은 2003년 검증기간동안의 모의 결과를

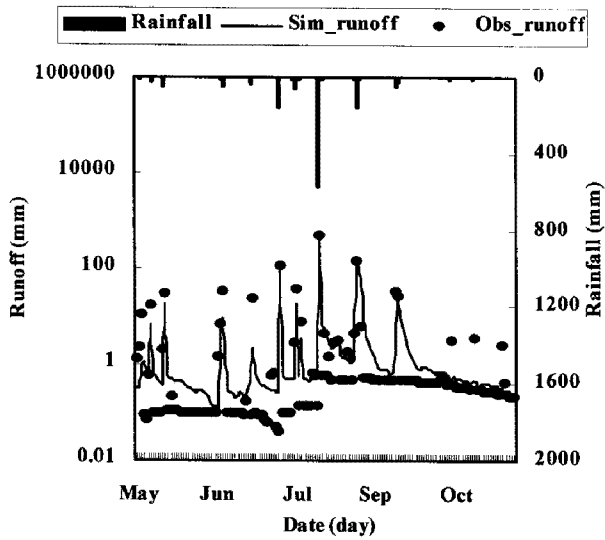


Fig. 3a. Observed and simulated discharge at the Oenam watershed for calibration period(2002).

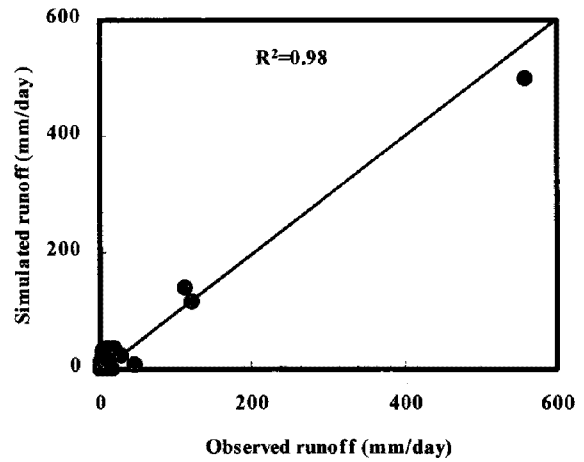


Fig. 3b. Scatter diagram of observed and simulated daily discharge at the Oenam watershed for calibration period.

Table 2. Observed and simulated discharge for calibration period

Year	Rainfall (mm)	Discharge (mm)		Sim/Obs (%)	RMSE (mm/day)	EI	R ²
		Obs.	Sim.				
2002	1,331	1061.8	1054.9	99.35	7.72	0.97	0.98

* Note) EI : Efficiency Index, Obs : Observed, Sim : Simulated

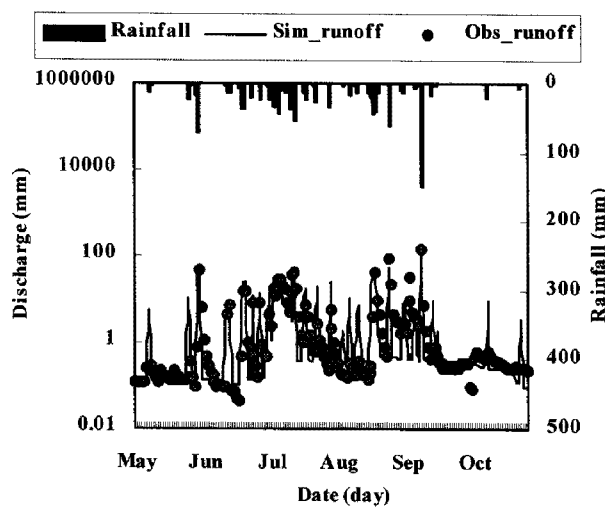


Fig. 4a. Observed and simulated discharge at the Oenam watershed (2003).

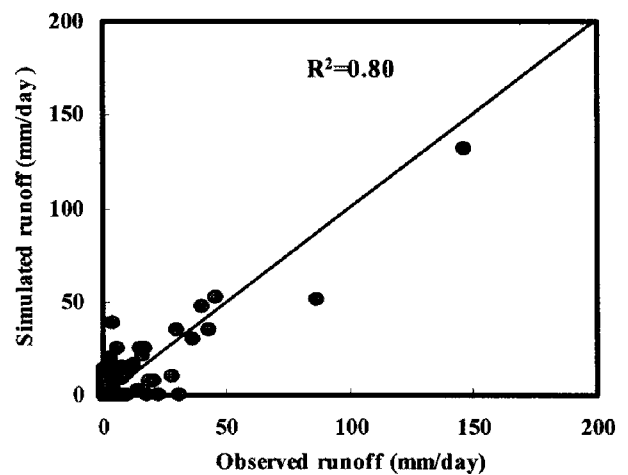


Fig. 4b. Scatter diagram of observed and simulated daily discharge at the Oenam watershed.

나타내고 있다. 모형 검증의 통계적 변량 RMSE는 6.47 mm/day, EI는 0.82, 그리고 결정계수는 0.80의 값을 보였다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 SWAT 모

형은 유역의 유출 반응에 비교적 적절한 결과를 나타냈음을 알 수 있었다.

Table 3. Observed and simulated discharge for validation period

Year	Rainfall (mm)	Discharge(mm)		Sim/Obs (%)	RMSE (mm/day)	EI	R ²
		Obs	Sim				
2003	1138	832.79	842.75	101.20	6.47	0.82	0.80

3.3. 영양물질 보정 및 검증

T-N과 T-P의 보정과 검증은 월별로 실시하였으며, 보정에 사용되는 주요 매개변수는 SOL_ORGN과 SOL_ORGP이다. SOL_ORGN의 보정 범위는 0부터 10000까지의 범위를 가지고 있는데 본 연구에서 기본값보다는 1,000을 증가시켰으며, SOL_ORGP의 보정 범위는 0부터 4000까지의 범위를 가지고 있는데 본 연구에서는 기본값보다 300을 증가시켜 모형을 보정하였다. 또한 토양의 질소와 인 농도의 변량인 SOL_N과 SOL_P는 농촌진흥청에서 조사한 1,300 mg/kg, 과 46 mg/kg의 값을 사용하였다.

Fig. 5a는 2002년 보정기간동안의 실측치와 모의

치의 T-N 총량분포를 나타내고 있다. 실측치 T-N 총량은 18.75 kg/ha, 모의치 T-N 총량은 14.26 kg/ha로 나타났으며 실측치가 모의치보다 더 크게 나왔으며 비교적 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 5b는 2003년 검증기간동안의 실측치와 모의치의 T-N 총량 분포를 나타낸 것으로 실측치 T-N 총량은 10.81 kg/ha, 모의치 T-N 총량은 7.59 kg/ha로 나타났다.

Fig. 6a는 보정기간동안의 실측치와 모의치 T-P 총량을 나타내고 있다 실측치의 T-P 총량은 0.33 kg/ha, 모의치의 T-P 총량은 0.40 kg/ha로 모의치가 약간 과다하게 나타났으며, 모의치가 실측치 경향

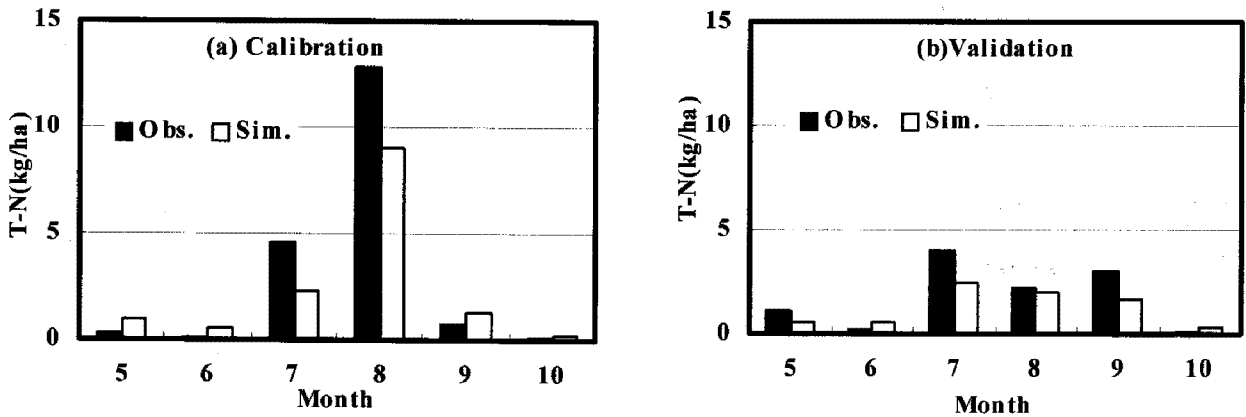


Fig. 5. The Observed and simulated T-N.

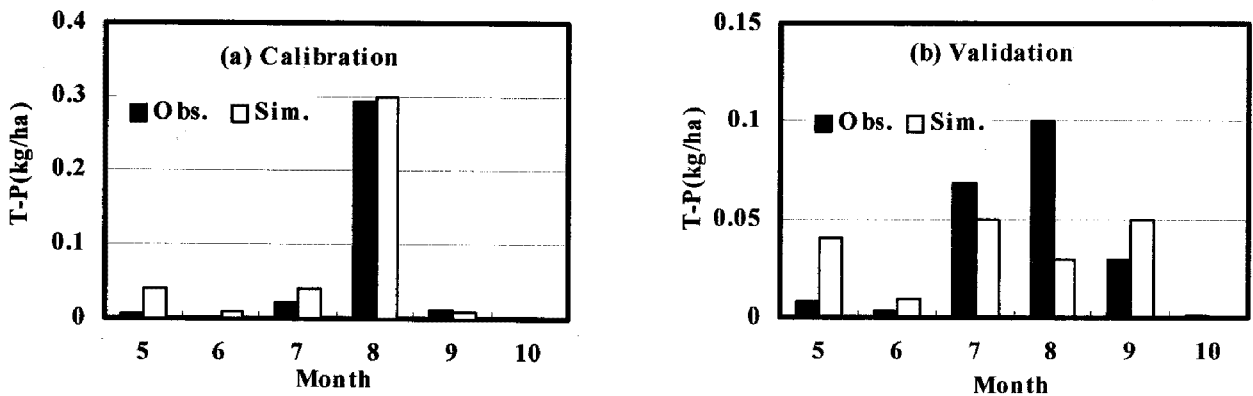


Fig. 6. The Observed and simulated T-P.

을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 6b는 2003년 검증기간동안의 T-P 총량 분포를 나타낸 것으로 2003년 실측치의 T-P총량은 0.21 kg/ha, 모의치의 T-P 총량은 0.18 kg/ha로 나타났다. 5월과 6월달은 모의치가 실측치보다 많게 나왔으며, 7월과 8월은 반대의 경향을 보였다. 하지만 전체기간 부하량은 모의치가 실측치와 유사하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 상수원유역에 SWAT 모형을 적용 오염총량을 효과적으로 예측하기 위해, 먼저 주암호 외남천유역에 대하여 수문 및 수질 모니터링을 실시하여 실측자료를 확보하였다. GIS와 연계된 SWAT 모형을 외남천 유역에 적용하여 모형의 보정을 실시한 후 유출량 및 영양물질에 대한 모의발생을 실시하였다. 그 결과 SWAT 모형을 통해 유출량을 보정 및 검증한 결과 R^2 은 0.80~0.98, EI는 0.82~0.97의 값을 나타내 SWAT모형은 농촌유역의 유출량에 적용성이 큰 것으로 나타났다. 또한, SWAT 모형을 이용하여 T-N, T-P 부하량의 월별 모의치와 실측치를 비교한 결과 실측치와 모의치 오차 변이 폭이 작아 상수원유역에 적용성이 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 영산강물환경연구소·전남대농업과 학기기술연구소 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Kang M. S., 2002, Development of total maximum daily loads simulation system using artificial neural networks for satellite data analysis and nonpoint source pollution models, Ph. D. Dissertation, Dept. of Agricultural Engineering, Seoul University, Suwon.
- 2) Im S. J., K. M. Brannan, S. Mostaghimi and J. P. Cho, 2003, Predicting runoff and sediment yield on a forest dominated watershed using HSPF and SWAT models, Korean Society of Rural Planning, 9(4), 59-64.
- 3) Jang D. W., 2004, Simulation of Daily Streamflows by SWAT Based on GIS, Master's degree, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon.
- 4) Heo S. G., K. S. Kim, M. Sagong, J. H. Ahn and K. J. Lim, 2005, Evaluation of SWAT Applicability to Simulate Soil Erosion at Highland Agricultural Lands, Korean Society of Rural Planning, 11(4), 67-74.
- 5) Kim J. G., Y. S. Park, N. W. Kim, I. M. Chung, W. S. Jang, J. H. Park, J. P. Moon and K. J. Lim, 2008, Development and Evaluation of SWAT Topographic Feature Extraction Error(STOPFEE) Fix Module from Low Resolution DEM, Journal of Korean Society on Water Quality, 24(4), 488-498.
- 6) Park Y. S., J. G. Kim, K. J. Lim, Y. C. Shin, J. H. Ahn, K. S. Kim and S. G. Heo, 2007, Development of Web GIS VFSMOD System to Simulate Sediment Reduction Efficiency with Vegetative Filter Strip, Korean Society of Water and Wastewater.
- 7) Yoo D. S., K. S. Kim, W. S. Jang, M. S. Jun, J. E. Yang, S. C. Kim, J. H. Ahn and K. J. Lim, 2008, Evaluation of Sediment Yield using Area-weighted Measured Slope and Slope Length at HeaAn Myeon Watershed, Journal of Korean Society on Water Quality, 24(5), 569-580.
- 8) Kang D. G., 2005, Analysis of the reduction of sediment yield by selected BMP in the Naerincheon Watershed of Soyanggang-dam using SWAT, Master's degree, Dept. of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon University, Chuncheon.
- 9) Heo S. G., K. S. Kim, J. H. Ahn, J. S. Yoon, K. J. Lim, J. D. Choi, Y. C. Shin and C. W. Lyou, 2006, Evaluation of Water Quality Impacts of Forest Fragmentation at Doam-Dam Watershed using GIS-based Modeling System, The Korean Association of Geographic Information Studies, 9(4), 81-94.
- 10) Yu H. E., 2007, Estimation of the pollutants delivery ratio on Daecheong Reservoir by SWAT Model, Master's degree, Dept. of Environmental Engineering, Chongju University, Chongju.
- 11) Jung W. Y and S. K. Yang, 2008, Application of SWAT Model on Rivers in Jeju Island, Journal of the Environmental Sciences, 17(9), 1039-1052.
- 12) Kim C. G and N. W. Kim, 2008, Characteristics of Pollutant Loads according to Types of Sources for the Chungju Dam Watershed, Journal of Korean Society on Water Quality, 24(4), 465-472.
- 13) Cho J. P., 1998, Applications of AGNPS model with rural watersheds having complex land use characteristics, Master's degree, Dept. of Agricultural Engineering, Seoul University, Suwon.
- 14) Nash J. E. and J. V. Sutcliffe, 1970, River flow forecasting through conceptual models, Part I - a discussion of principles, J. Hydrol, 10, 282-290.