

지리정보시스템을 이용한 SWAT 모형의 적용

Application of the SWAT Model Using a GIS

김 지 훈* · 홍 성 구** · 권 순 국*
Kim, Ji Hun · Hong, Seong Gu · Kwun, Soon Kuk

Abstract

With the aid of SWAT/GRASS interface, SWAT model was applied to a representative rural watershed and evaluated for its applicability through calibration and verification using observed data. Results of the model application showed that the simulated runoff was in a good agreement with the observed data and indicated reasonable applicability of the model. In predicting sediment yield, however, there were differences between the simulated and the observed values. It seems due to the inaccurate determination of MUSLE factors, better prediction of sediment yield could be achieved by selecting more appropriate MUSLE factors for different land use types. In predicting nutrient loading, the simulation results showed a similar trend to observed data.

I. 서 론

비점원오염에 대한 수질 모의 방법으로는 단위 부하량을 이용하는 방법과 유출사상 평균농도에 관한 확률분포 개념에 근거한 통계적 방법, 실측 자료를 이용한 회귀분석에 의한 접근방법, 수문 순환을 고려한 모형에 의한 방법 등이 있다(전경수, 1997). 이 중 수문 순환을 고려한 모형은 대부분 확정론적 모형이다.

이러한 모형에는 주로 외국에서 개발된 CREAMS(Knisel, 1980), ANSWERS(Beasley 등, 1980), EPIC(Williams 등, 1985), SWRRB(Williams 등 1985), GLEAMS(Leonard 등, 1987), AGNPS(Young 등, 1987), SWAT

(Arnold 등, 1995) 등이 있다. 이 중 농촌유역에서 장기간 동안의 비점오염물질에 대한 공간적인 농도변화를 예측하기 위한 모형으로는 SWRRB, SWAT 모형이 있다.

SWRRB 모형은 미 농무성과 텍사스 대학에서 최적관리기법 평가도구로서 개발한 모형으로서 장기간에 걸쳐 유출, 유사에 대한 모의가 가능하다. 또한 분포형 모형으로서 결과치에 대한 공간적인 분석이 가능하다. 그러나 모의할 수 있는 소유역의 개수가 10개로 한정되어 있고 하천에서의 영양물질에 대한 모의발생 및 추적기능이 없다. 이러한 단점을 보완한 모형이 SWAT 모형이다. SWAT 모형을 적용하기 위해서는 국내 적용사례가 없기 때문에 모형에 대한 적절한 평

* 서울대학교 농업생명과학대학
** 안성산업대학교 농촌개발학과

키워드 : 비점원오염, SWAT 모형, 비점원오염 모형, 지리정보시스템(GIS)

가가 요구된다.

이러한 분포형 모형의 적용상 문제점의 하나는 입력자료가 방대하여 이를 구성하는데 많은 시간과 비용을 필요로 하다는 것이다. 이러한 단점을 해결하고 공간적 특성에 따른 자료의 효율적 수집, 관리, 분석 등을 뒷받침하기 위해 지리정보시스템(GIS)이 많이 사용되고 있다. GIS 소프트웨어 중 GRASS는 1980년대에 미 공병단에서 개발된 것으로서, 여러 종류의 수학적 모형들과 연계가 이루어져 있다. GRASS를 연계시켜 적용된 비점원오염 모형으로는 ANSWERS, AGNPS, SWRRB, SWAT 등이 있다.

본 연구의 목적은 GIS를 이용하여 시험유역에 대하여 도형자료를 구축, SWAT 모형을 적용하고, 적용결과와 실측자료를 통해 모형의 보정 및 검정을 실시하여 모형의 적용성을 평가하는데 있다.

II. SWAT 모형 및 SWAT/GRASS 인터페이스의 개요

1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 장기모형으로서 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도 추적 부모형의 4개의 부모형으로 구성된다.

수문 부모형에서는 소유역 내에서 토양과 토지 이용조건에 의해 결정되는 HRU(Hydrologic Response Unit)단위로 SCS의 CN법을 이용하여 지표 유출량이 계산되고, 중간유출과 지하수 흐름을 고려하여 하천 유출량이 계산된다. 증발산은 Penman-Monteith법(Monteith, 1977)을 이용하여 일단위로 산정된다. 토양유실 부모형에서는 MUSLE공식(Williams and Berndt, 1977)을 이용하여 유역내의 토양유실량이 추정된다. 영양물질 부모형은 질소와 인 두 가지 항목에 대해 용존상태와 유사에 흡착된 상태에서 손실되는 양을 추정한다. 하도 추적 부모형은 소유역간 하도 구간에서의 유출량과 유사량 그리고 영양물질을 모의발생한다.

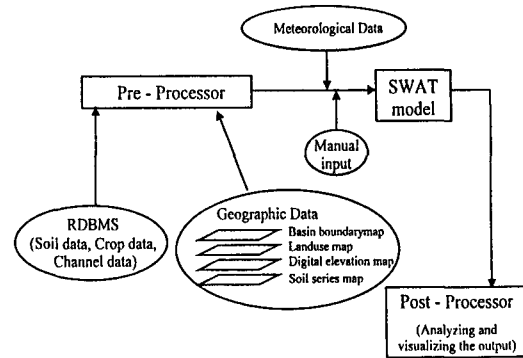


Fig. 1. Diagram of SWAT/GRASS interface

2. SWAT/GRASS 인터페이스의 개요

SWAT/GRASS 인터페이스는 SWAT 모형의 적용을 보다 용이하도록 GRASS의 자료와 여러 가지 기능을 이용할 수 있게 만든 것으로서, 모형의 입력자료구성을 위한 전처리 시스템, 출력 결과의 분석 및 시각적 표현을 위한 후처리 시스템으로 구성되어 있다 (Fig. 1).

SWAT/GRASS에서 요구되는 입력자료는 대부분 지형자료와 지형자료의 속성과 연결된 자료 관리시스템(Relational Data Base Management System, RDBMS)을 이용하여 전처리 시스템에 의해 자동으로 구성되며, 기상자료나 유역관리와 관련된 자료는 사용자에게 의해서 직접 입력되어 구축된다. 또한 모형의 구동결과를 후처리 시스템을 통해 그래픽 또는 공간적 분석을 할 수 있는 구조로 되어있다.

가. 전처리 시스템

SWAT/GRASS 인터페이스의 전처리 시스템은 모형의 입력자료를 용이하게 구축할 수 있도록 Fig. 2와 같이 GUI로 구성된 모듈이다. 전처리 시스템에 의해서 도형자료와 RDBMS를 이용하여 입력자료를 자동으로 구축할 수 있으며, 기상 및 유역관리와 관련된 자료는 사용자에게 의해서 직접 입력된다.

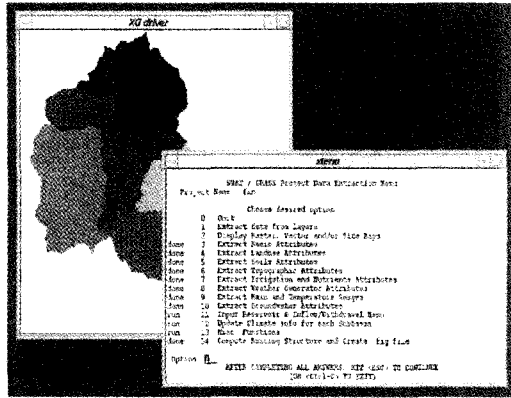


Fig. 2. Pre-processor of SWAT/GRASS

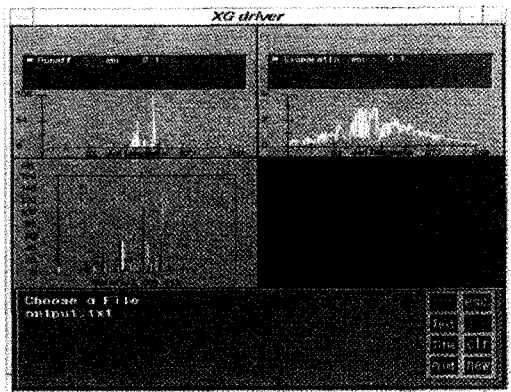


Fig. 3. Post-processor of SWAT/GRASS

나. 후처리 시스템

SWAT/GRASS 인터페이스의 후처리 시스템은 모형의 출력결과에 대한 그래프화, 통계적 분석 등의 기능을 제공한다. Fig. 3은 후처리 시스템에서 출력된 유출량과 증발산량 그래프를 보이고 있다. 이밖에 후처리 시스템을 이용하면 결과치에 대한 공간적 분포를 쉽게 파악하고 통계적 분석을 효과적으로 할 수 있다.

III. 모형의 적용

1. 대표시험유역

모형의 적용을 위한 시험유역은 경기도 이천시에 위치한 북하천 상류지역이며, 유역면적 78.52

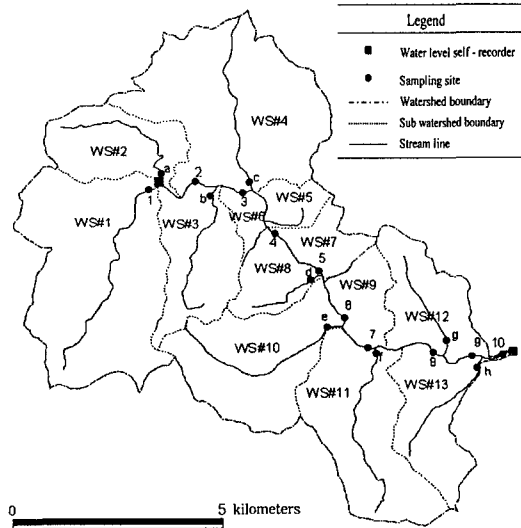


Fig. 4. Location map of Bok-ha Watershed

km², 수로연장 18km로서 지천을 중심으로 13개의 소유역으로 구분하였다. 시험유역은 임야가 71.5%, 논 18.5%, 밭 6.8%, 거주지역 3.0%, 기타지역이 0.2%로 구성되어 있다.

유역의 수문 및 수질 계측망은 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

2. 입력자료의 구성

모형의 적용을 위한 입력자료는 3가지 요소에 의하여 구성된다. 3가지 구성요소는 지형자료, 지형자료의 속성과 연결된 데이터(RDBMS), 그리고 기상 및 유역관리에 관련된 자료이다. 지형자료는 1:25,000 축척의 유역경계도와 토지이용도, 수치고도도, 토양도 등이 이용되었다.

가. 유역도

본 연구에서는 현장조사와 지형도를 토대로 유역경계를 구분하였다. 소유역의 구분은 본류인 북하천의 각 지류를 토대로 하였다. Fig. 5는 이러한 방법으로 작성한 유역 경계도이다.

나. 토지이용도

토지이용도는 국립지리원의 지형도 및 현지조

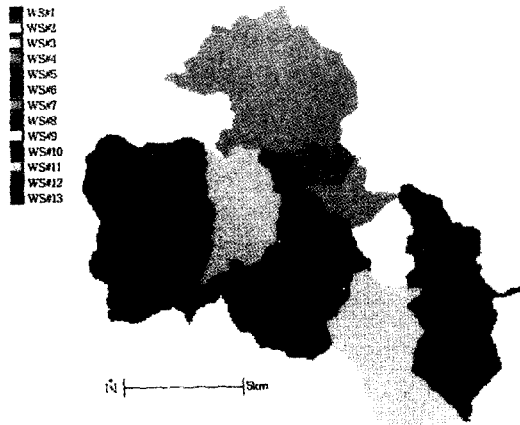


Fig. 5. Subwatershed boundary map of Bok-ha watershed

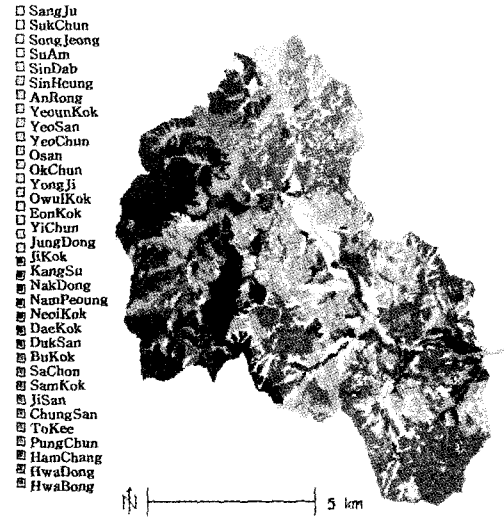


Fig. 7. Soil series map of Bok-ha watershed

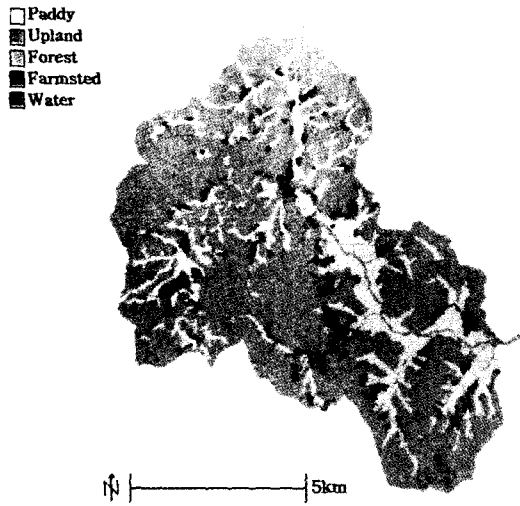


Fig. 6. Land use map of Bok-ha watershed

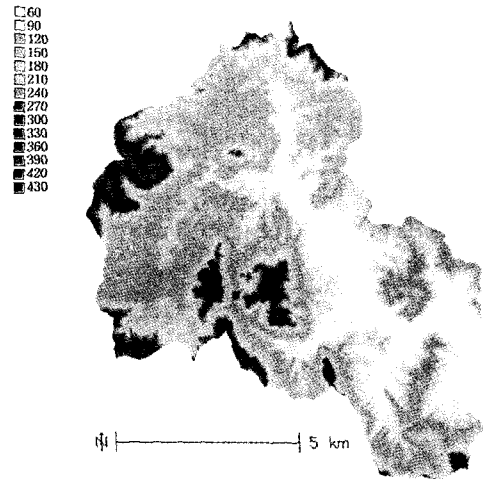


Fig. 8. Digital elevation map of Bok-ha watershed

사를 토대로 하여 작성하였으며, 속성으로는 논, 밭, 산림지, 거주지로 구분하여 입력하였다.

이 토지이용도의 작물속성은 논은 벼, 밭은 지역의 대표 밭작물인 콩, 배추, 옥수수를 속성으로 입력하였다 (Fig. 6).

다. 토양도

토양도는 농촌진흥청의 정밀토양도를 기준으로 작성하였고, 각 토양통에 관련된 속성을 이용

하여 RDBMS를 구축하였다. 시험구역의 토양통은 35가지로 구분되었는데 덕산통, 삼각통, 예산통이 지역의 50% 이상을 차지하였다. GRASS를 이용하여 작성한 토양도는 Fig. 7과 같다.

라. 수치고도도

수치고도도는 10m 간격의 등고선을 읽어들이고 고도를 속성으로 입력하였다. Fig. 8은 수치고도도를 나타낸 그림이다.

Table 1. Input variables of management data
(unit : kg/ha)

Land use	Growth period	Amount of fertilizer	
		N	P
Paddy	4.25 ~ 9.10	290	80
Upland	5.10 ~ 10.10	30	25

마. 기타자료

1) 하천자료

각 소유역의 수로자료와 소유역의 출구점에서 유역의 출구점까지의 하도추적을 위한 자료는 현장조사와 복하천 하천정비기본계획(경기도, 1984) 등을 참조하여 작성하였다.

2) 농업 관리 자료

생육시기와 시비량, 작물잔류물 등의 농경지에 관련된 자료는 현지조사와 문헌조사(농림부, 1996) 등을 토대로 작성하였다 (Table 1).

3) 지하수흐름관련 자료

지하수흐름에 관련된 자료는 기저유출량을 추정하는데 매우 중요한 인자이다. 이들은 실험 등을 통하여 유역특성에 맞도록 정확하게 추정되어야 하나, 본 연구에서는 모형내 구축되어 있는 RDBMS의 자료를 이용하였다.

4) USLE 인자

유사량의 모의는 MUSLE공식을 사용하는데, 작물경작인자(C), 침식조절공인자(PE), 토양침식능인자(K)값 등을 제공하여야 한다. 침식조절공인자(PE)는 산림지와 밭은 보전농법이 실시되지 않은 것으로 간주하여 1.0을 사용하였고, 논은 0.2를 취했다. 작물경작인자(C)는 이전의 연구결과를 참조하여 입야 0.001, 밭 0.03, 거주지 0.01, 논은 0.0으로 각각 결정하였다 (정 등, 1985; Wischmeier 등, 1978; 김진택과 박승우, 1994). 유사량 추정에 관련된 입력자료는 Table 2에 주어진 바와 같다.

5) 점원오염자료

유역내에 존재하는 점오염원은 축산폐수와 생활하수, 산업폐수 세 가지로 나눌 수 있다. 각 오염원으로부터의 영양물질에 대한 유입 부하량

Table 2. USLE crop and management practice factors for different land uses

Land use	USLE C	USLE P
Forests	0.001	1.0
Paddy	0.00	0.2
Upland	0.03	1.0
Farmsteads	0.01	1.0

Table 3. Nutrient loading from point sources
(unit : kg/ha)

Watershed	T-N	T-P
WS #1	87.9	4.06
WS #2	25.6	0.78

자료는 시험유역의 96년도와 97년도의 실측자료(유출량 및 T-N, T-P농도)를 이용하여 소유역별 점오염원에 의한 배출부하량과 소유역 출구점에서의 실측 T-N, T-P(발생부하량)를 이용하여 산정하였다. 이와 같이 얻어진 소유역 WS#1과 WS#2에 대한 입력자료는 Table 3과 같다.

3. 시험유역의 실측자료

유역의 실측유출량은 유역출구점과 소유역 WS#2의 말단부에 자기 수위계를 설치하고, 수위-유량관계식을 정립하여 얻었다. 유사량은 유역출구점 한 곳에서 실측되었으며, 수질측정은 건기와 우기를 기준으로 하여 건기에는 월1회씩 우기에는 월2회씩 지천별로 이루어졌다. 모형의 적용에는 소유역 WS#1의 출구점과 WS#1과 WS#2의 합류점에서의 수질측정자료를 이용하였다.

IV. 모형의 보정 및 검증

1. 유출량

수문모형의 보정기법에는 최적화 기법과 단순 시행착오법이 있는데, 본 연구에서는 간편하고 많이 사용되고 있는 단순 시행착오법을 이용하였다.

모형의 보정은 1997년도 WS#2와 유역출구점의 유출량 자료를 이용하였고 검증은 1994년

도의 자료를 이용하였다. WS#2의 경우 실측기간이 짧고 수위-유량 관계식에 있어서 고유량시의 자료가 없는 관계로, 강우가 발생하지 않은 저유량 시기의 자료만을 이용하였다. 이러한 자료를 효율적으로 사용하기 위해 WS#2의 자료를 토대로 강우가 없는 시기의 기저유출에 대한 보정을 실시하여 입력계수를 보정한 다음, 유역 출구점의 유출량 자료를 이용하여, 강우가 발생하지 않는 시기의 유출량을 보정하는 방법을 이용하였다.

보정에는 실측치와 계산치의 회귀분석을 통해 결정되는 결정계수(R²)와 절대적인 오차 정도를 나타내는 RMSE, 모형의 효율성을 나타내는 Nash-Schutcliffe의 모형(Nash and Schutcliffe, 1970)의 효율(E²)값을 이용하였다.

모형의 보정을 위해서는 입력계수의 적절한 선택이 필요한데, 본 연구에서는 예민도 분석을 통하여 입력계수를 결정하였다. 입력계수에 대한 예민도 분석에는 식(1)과 같은 상대 예민도(R_s)를 이용하였다.

$$R_s = \frac{\frac{\partial O}{\partial F}}{\frac{O}{F}} = \frac{\partial O}{\partial F} \frac{F}{O} \quad (1)$$

여기서, O는 일유출량이고, F는 입력계수이다.

예민도 분석은 먼저 입력계수들 중, 유역에 대해 정확한 값을 추정할 수 없는 항목을 선정하여 실시하였다. Table 4는 선정된 매개변수에 대한 예민도 분석 결과이고, 이 가운데 SCS CN값과 유효 토양수분함량, 토양의 전용적 밀도 등이 보정에 이용되었다. 토지이용형태별로 보정된 CN 값은 Table 5에 주어진 바와 같고, WS#2에 대한 보정결과는 Table 6과 Fig. 9에 제시되었다.

Fig. 9에서는 모의발생된 일 유출량이 부분적으로 실측치에 비해 다소 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우는 선행강우가 거의 없었던 시기의 강우유출로서, 유역내 토양에서의 저류효과를 적절히 나타내지 못하고 있음을 시사하고 있다. WS#2에 대한 보정결과 모형의 유량예측

Table 4. Results of sensitivity analysis for the selected input parameters

Item	Description	Relative sensitivity
CN _{II}	SCS Curve number	0.35
SC	Saturated hydraulic conductivity	0.003
POR	Bulk Density	0.05
AWC	Available water capacity	-0.23
CHNN	Manning's N for Channel	0.02
GWQ	Initial groundwater flow contribution to streamflow	0.09

Table 5. Calibrated CN-II values

Land use	Hydrologic soil group			
	A	B	C	D
Paddy	68	68	68	68
Upland	65(65)	76(76)	84(84)	
Forests	60(56)	77(75)		
Farmsteads	59(59)	74(74)	82(82)	86(86)

() indicate the values suggested by SCS.

*adopted from Kim Jin Taek (1995)³⁾.

Table 6. Calibration results for runoff during dry period at WS#2

Watershed	Runoff (mm)		R ²	RMSE
	Observed	Simulated		
WS#2	23.2	27.7	0.75	0.28

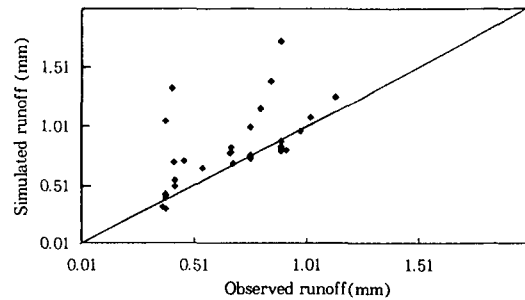


Fig. 9. Scattering diagram of observed and simulated runoff at WS#2

결과에 대하여 R²가 0.75로 나타났다.

유역 출구점에서의 보정 및 검정결과는 Table 7과 Fig. 10~11을 통해 제시하였다.

Table 7. Calibration and verification results at the outlet of watershed

Simulated duration	Rain-fall (mm)	Obs. runoff (mm)	Sim. runoff (mm)	R ²	RMSE (mm/day)	E ²	Evap. (mm)
Calibration (97.4.17~9.20)	804	510	489	0.8	5.1	0.76	200
Verification (94.4.11~9.17)	726.9	367	349	0.71	4.6	0.34	228

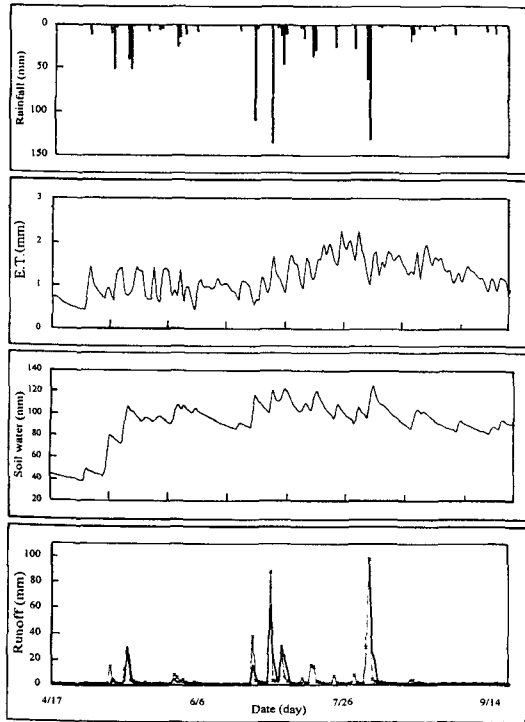


Fig. 10. Calibration results at the outlet of watershed ('97)

모의 발생 기간동안의 총유출량은 보정과 검정시 모두 실측치와 근사한 값을 나타내었다. 97년의 경우 804mm의 강우에 대해 실측 유출량은 510mm였고 모의 유출량은 489mm로써 21mm의 차이가 났고, 94년의 경우 726.9mm의 강우에 대해 실측 유출량은 367mm였고 모의 유출량은 349mm로서 18mm의 차이를 보였다. 모형의 효율성을 나타내는 E²값의 경우 모의한 2개년도

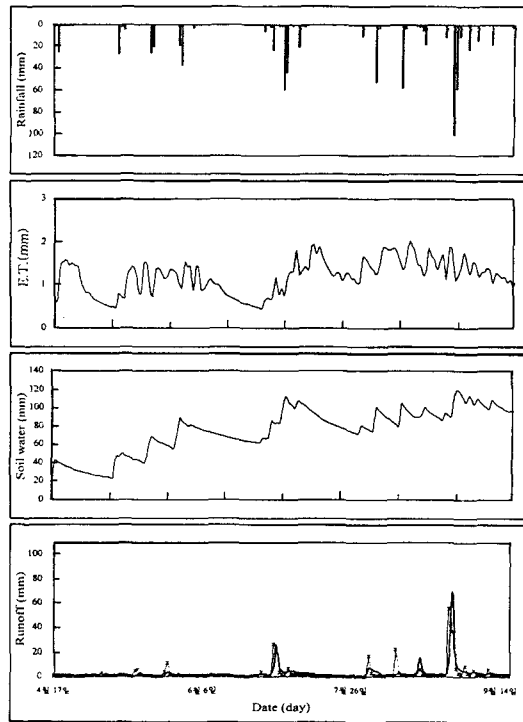


Fig. 11. Verification results at the outlet of watershed ('94)

모두 0.76('97)과 0.34('94)로 나타났다.

결정계수(R²)는 97년도에 0.8, 94년도에 0.71로서 모의치의 70%이상이 실측한 유출량과 유의성이 있는 것으로 나타났다. RMSE 값은 97년에는 5.1mm였고, 94년에는 4.6mm로서 94년도의 경우에 다소 작은 값을 나타내었다.

이상과 같은 결과를 토대로 모형이 유역의 유출현상을 비교적 적절히 모의발생함을 알 수 있었다.

2. 유사량

유역의 유사량은 97년도의 유량-유사량 농도 관계식을 통해 구한 유역 출구점에서의 일 유역 유사량과 모의치를 비교하였다. 유사량 추정 부 모형의 보정에는 MUSLE공식의 입력계수들 중 작물관리인자(C), 침식조절공인자(PE)와 하천의 조도계수를 이용하였다. 토양침식능인자(K)

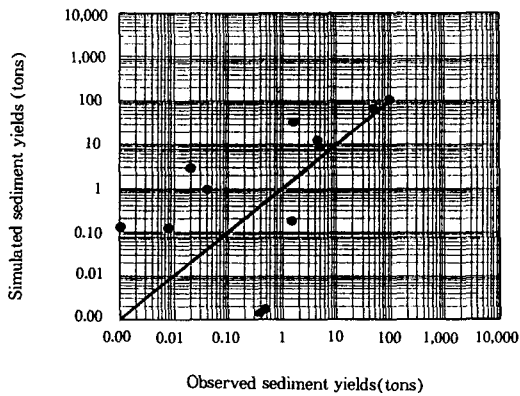


Fig. 12. Observed and simulated sediment yields

는 토양 입자구성비에 의해 계산되므로 보정에는 이용되지 않았다. 유사량에 대한 모의 발생치와 실측치의 비교결과는 Fig. 12와 같다.

GRASS내 함수를 이용하여 USLE공식의 LS 값을 계산하면 유역내의 경사장이 너무 크게 추정될 수 있다. 원래 USLE공식의 S는 경사가 20% 미만의 조건에서 개발되었기 때문에 20% 이상의 경사조건에서는 유사량이 과다하게 추정된다. 따라서 본 연구에서는 유역의 산림지에 대한 적절한 LS 값을 결정하기 위하여 추가의 보정을 수행하였다. 또한 C, PE인자들도 기존의 연구(김진택과 박승우, 1994)에 비해 다소 적은 값을 사용하였는데 앞으로 유사량에 대한 추정을 개선하기 위해서는 유역내의 토지이용형태와 관련된 실험적 계수들에 대하여 보완되어야 할 것으로 판단된다.

3. 영양물질

영양물질에 대해서는 1996년부터 1997년도에 실측한 T-N, T-P자료를 이용하여 WS#1의 출구점과 WS#1과 WS#2의 합류점에 대해 모의치와 비교하였다. 각 항목별 비교결과는 Fig. 4.13~4.16에 제시되어있다.

WS#1 출구점(Station #1)의 경우 유역에서 발생한 T-N이 평균 65.9mg/l 였고, 모의치는

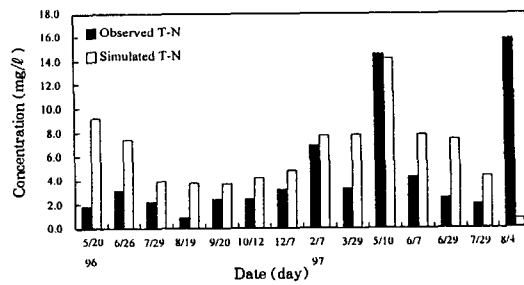


Fig. 13. Comparison between observed and simulated T-N (Station #1)

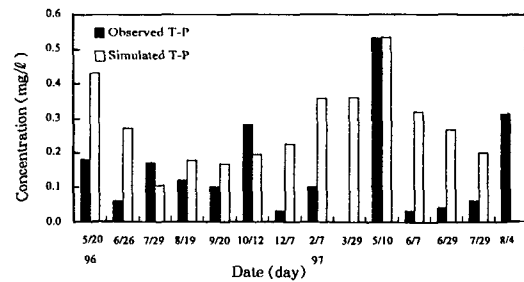


Fig. 14. Comparison between observed and simulated T-P (Station #1)

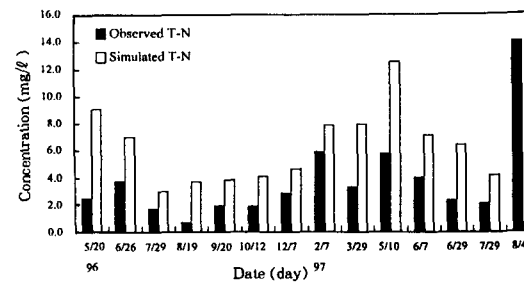


Fig. 15. Comparison between observed and simulated T-N (Station #2)

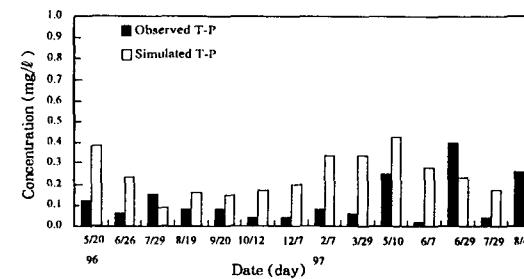


Fig. 16. Comparison between observed and simulated T-P (Station #2)

Table 8. Comparison of daily mean pollutant mass by land use

Land use	(units : kg/ha/year)			
	This study		Other study ⁵⁾	
	T-N	T-P	T-N	T-P
Forests	15.30	NA	16.9	0.077
Crop lands	52.65	0.19	31.3	3.27

87.3mg/l 였으며, T-P의 경우는 실측치가 0.12 mg/l, 모의치는 0.22mg/l 로써 T-N과 T-P의 경우 모두 모의치가 높게 나타났다. 상대오차는 T-N의 경우 32.5%, T-P의 경우 83.3%였다.

WS #1과 WS #2의 합류점(Station #2)에서는 T-N과 T-P의 실측치가 각각 52.31mg/l, 1.68mg/l 였고, 모의치의 경우는 각각 81.91mg/l, 3.18mg/l 로써, 모의치가 실측치보다 높게 나타났다. 상대오차는 T-N의 경우 56.6%였고, T-P의 경우 89.3%였다. 두 개의 비교지점에서 모두 T-P에 대한 상대오차가 다소 컸다.

비점오염원이 영양물질 부하에 미치는 영향을 분석하기 위해 T-N과 T-P의 일 평균 부하량을 산림지와 농경지로 구분하여 기존의 연구결과와 비교해 보았다 (Table 8).

기존의 연구결과와 비교해 볼 때 산림지 T-N의 경우 비교적 유사함을 알 수 있다. 그러나 농경지 T-N의 경우 기존의 연구결과에 비해 다소 크게 나타났고, T-P의 경우 비교적 작게 나타났는데, 이는 작부체계나 농업환경이 다른 지역에서 개발된 모형을 국내에 적용하는데 있어서의 한계라고 판단되며, 특히 논에서의 배출기작을 모형이 적절히 설명하지 못했기 때문으로 판단된다.

한편, 시료채취가 대부분 비강우기나 강우유출이 없는 시기에 이루어졌기 때문에 시료 중의 영양물질의 농도는 대부분 점원오염에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 오염원으로부터 영양물질의 유입 부하량 산정이 현실적으로 매우 어렵고, 하천 내에서의 오염물질의 거동에 대한 설명이 부족하기 때문에 하천수질모형과의 연계를 고려할 필요가 있다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 농촌유역의 하천 오염정도를 예측할 수 있는 SWAT 모형을 시험유역에 대해 적용하고 제한된 양의 실측자료를 이용하여 모형의 보정 및 검정과정을 통해서 모형의 적용성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. GIS를 이용하여 SWAT 모형의 입력자료를 구성하기 위한 도형자료를 구축하였다.
2. 구축된 도형자료 및 도형자료의 속성과 연결된 RDBMS를 이용하여 SWAT 모형을 시험유역에 적용하였고, 94년도와 97년도의 실측 유출량자료를 이용하여 모형에 대한 보정 및 검정을 실시하였다.
3. 모형에 의한 모의 발생된 유사량이 실측 유사량에 비해 다소 큰 값을 보였으며, 영양물질의 경우에는 T-N, T-P 모두 상대오차가 100% 범위 이내에 있었다.
4. 영양물질의 토지이용별 단위면적당 발생량을 살펴보면 산림지의 경우 기존의 연구결과와 유사한 결과를 나타내었으나, 농경지에서의 T-N은 다소 높았고, T-P는 비교적 낮게 나타났다.
5. SWAT 모형의 적용결과를 종합적으로 고찰해보면 유출량과 영양물질에 대해서는 실측치와 유사한 경향을 보여 국내 농촌하천 유역에서의 적용가능성을 보여주고 있으나, 유사량과 농경지에서의 영양물질 부하량의 경우 예측결과를 개선하기 위해서 모형의 부분적인 수정 및 보완이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 경기도, 1984, 복하천 하천정비기본계획, pp. 23-133.
2. 김진택, 박승우, 1994, 경사지의 경종에 따른 유출 및 토양 유실에 관한 연구, 한국농공학회지, 36(1), pp. 73-82.
3. 김진택, 1995, 농업비점원오염모형을 위한

- 지리정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위 논문.
4. 농림수산부, 농어촌진흥공사, 1993, 농어촌 용수 환경관리에 관한 연구 (II), pp. 94.
 5. 농림수산부, 1996, 농림수산 통계연보, pp. 56-58.
 6. 전경수, 1997, 비점 오염원 수질 모델링. 한국수자원학회지, 30(4), pp. 46-53.
 7. 정영상, 신재성, 신화영, 1976, 경사지 토양의 침식성 인자에 관하여, 한국토양학회지 9(2), pp. 107-113.
 8. 정필균, 고문환, 엄기태, 1985, 토양유실량 예측을 위한 경작인자 검토, 한국토양학회지 18(1), pp. 7-13.
 9. Arnold, J. G., and J. R. Williams, R. Srinivasan, K. W. King, and R. H. Griggs, 1995, SWAT : Soil and Water Assessment Tool, Draft Users Manual, USDA-ARS, Temple, TX.
 10. Beasley, D. B., L. F. Huggins, and E. J. Monke, 1980, ANSWERS-A Model for Watershed Planning, Transactions of the ASAE, 23(4), pp. 938-944.
 11. U. S. CERL, 1988, GRASS Reference Manual, ver. 4.0, U. S. Army Corps of Engineers, Champaign, IL.
 12. Knisel, W. G., 1980, CREAMS : A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA-ARS Report 26, pp. 643.
 13. Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still, 1987, GLEAMS : Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. Transactions of the ASAE, 30(5), pp. 1403-1418.
 14. Monteith, J. L., 1977, Climate and the efficiency of crop production in Britain. Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B. 281, pp. 277-329.
 15. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe, 1970, River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles, Journal of Hydrology, Vol. 10, pp. 282-290.
 16. Ritchie J. T., 1972, Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover, Water Resource Res., 8(5), pp. 1204-1213.
 17. Williams, J. R. and H. D. Berndt, 1977, Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of ASAE 20(6), pp. 1100-1104.
 18. Williams, J. R., A. D. Nicks, and J. G. Arnold, 1985, Simulator for Water Resources in Rural Basins, J. of Hydraulics Eng., 111(6), pp. 970-986.
 19. Wischmeier, W. H., and C. B. Smith, 1978, Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning, Agric. Handbook 537, USDA. SEA.
 20. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987, AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model : A Watershed Analysis Tool, USDA Conservation Research Report 35.