

농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영

Conjunctive Use of SWAT and WASP Models for the Water Quality Prediction in a Rural Watershed

권명준* · 권순국** · 홍성구***

Kwun, Myeong Jun · Kwun, Soon Kuk · Hong, Seong Gu

Abstract

Predictions of stream water quality require both estimation of pollutant loading from different sources and simulation of water quality processes in the stream. Nonpoint source pollution models are often employed for estimating pollutant loading in rural watersheds. In this study, a conjunctive application of SWAT model and WASP model was made and evaluated for its applicability based on the simulation results. Runoff and nutrient loading obtained from the SWAT model were used for generating input data for WASP model. The results showed that the simulated runoff was in good agreement with the observed data and indicated reasonable applicability. Loading for the water quality parameters predicted by WASP model also showed a reasonable agreement with the observed data. It is expected that stream water quality could be predicted by the coupled application of the two models, SWAT and WASP, in rural watersheds.

Keywords : Non-point source model, Stream water quality model, SWAT model, WASP model, Water quality prediction

I. 서론

농촌지역의 수질관리를 위한 수질예측기법으로서
는 일반적으로 모델링 기법이 널리 사용되고 있는

데, 크게 농업비점원모형과 하천수질예측모형으로
나눌 수 있다.

농업비점원모형 가운데 유역단위에 적용할 수 있
는 모형으로 ANSWERS, AGNPS, SWRRB 및
SWAT 등이 있다.⁷⁾ SWAT 모형은 장기간 동안의
오염물질에 대한 공간적인 농도변화를 예측하기 위
한 장기수질예측모형으로 소유역 수에 대한 제한이
없고, 영양물질에 대한 모의기능 및 하천에 대한
추적기능이 있다. 이러한 농업비점원모형은 농업지
역의 토지이용에 따른 영양염류 유출예측에 이용되

* 서울대학교 대학원
** 서울대학교 농업생명과학대학
*** 환경대학교
** Corresponding author. Tel.: +82-31-290-2362
fax: +82-31-294-1816
E-mail address: skkwun@snu.ac.kr

고 있으나 점오염원과 관련된 부분은 매우 약하다. 하천수질예측에는 WASP 모형을 비롯하여 WQRRS, AUTO-QUAL, STREAM, NSM, QUAL2E 등의 다양한 모형을 적용하고 있다. WASP 모형은 수체에 대한 동적 분할 모형으로서 시간에 따른 입력치의 변화를 고려할 수 있어 연중변화는 물론 짧은 시간 간격 사이의 수질성분 변화를 분석하는 데에도 대단히 유용하다. 그러나 하천수질예측모형은 주로 점오염원을 대상으로 하며 토지이용과 관련된 비점오염원에 의한 부하량은 입력자료로서 요구하고 있다. 따라서 농촌유역의 하천수질을 적정하게 예측하기 위해서는 비점원오염 모형과 연계하여 적용하는 것이 필요하다.

본 연구의 목적은 대상유역에 대하여 토지이용에 따른 영양염류 유출 모형인 SWAT 모형과 일반 하천수질예측모형인 WASP 모형을 연계운영하여 수질예측에 적용하고, 실측자료와의 비교를 통해 모형을 검증하여, 모형의 연계운영에 대한 적용성을 평가하는데 있다.

II. 모형의 구성과 연계

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 분포형 매개변수모형으로서 수문 부모형과 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형의 4가지로 구성되어있다. SWAT 모형은 GIS를 이용한 지형정보와 지형정보의 속성과 연결된 자료관리시스템(Related Data Base Management System, RDBMS)과 전처리 시스템을 구비하고 있어 모형의 입력자료가 대부분 구성되고, 기상자료 등의 기타자료는 사용자가 직접 입력하는 구조를 가지고 있다.⁷⁾

WASP 모형의 구성은 수리모형인 DYNHYD와 부영양화 모형인 EUTRO, 독성물질 모형인 TOXI로 구성되어 있으며, 국내에 알려진 WASP 모형은 대개 환경영향평가서 등에 사용된 EUTRO를 의미한다. EUTRO 모듈은 각 구획별로 거의 동일한 반

응계수를 입력하도록 되어있어 우리나라의 하천에 취수용 보(洑)가 다수 존재하는 곳에 적용시 무리가 있으며, 구획별로 각각의 반응계수를 갖도록 하는 것이 요구된다. Shin(1997)은 이러한 문제점을 개선하기 위하여 EUTRO 모듈을 부분적으로 수정한 바 있다. 수정된 EUTRO 모듈은 또한 입력자료의 형태 중 BOD₅를 입력하여 내부에서 초기 BOD를 계산하도록 수정하였다. 그 외에 점오염원에 의한 오염부하량은 발생부하량과 시기별 유달율로 입력할 수 있도록 하였다.

유출량의 경우 SWAT 모형에서 소유역 출구점에서의 일별 유출량을 계산하여 WASP 모형에서 하천 분류구간으로의 유입수로 입력받아 전체유역 출구에서의 유출량을 계산하도록 하였다. 유사량의 경우에는 비점원오염물질 중에서 유기물질인 Org-N과 Org-P의 보정을 위하여 SWAT 모형에서 모의하여 소유역 출구점으로 배출되는 유사부하량을 계산하였다. 오염부하량의 경우에는 SWAT 모형에서 비점오염원에 의한 영양염류 유출에 대한 예측을 실시하고, 이렇게 예측된 결과 함께 WASP 모형에서 점원오염원에 의한 배출부하량을 입력받아, WASP 모형에서 하천 분류구간에서의 수질변화를

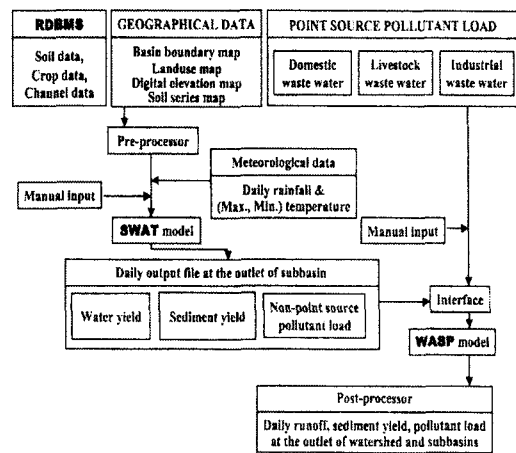


Fig. 1 Diagram of conjunctive operation scheme of SWAT and WASP models

고려하여 전체유역 출구점에서의 수질예측을 실시하였다. SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영에 대한 모식도는 Fig. 1과 같다.

III. 모형의 적용

1. 대표시험유역

모형의 적용을 위한 대상유역은 경기도 이천시에 위치한 북하천 상류지역으로 유역면적 78.5 km², 수로연장 18 km로서 지천을 중심으로 13개의 소유역으로 구분되어 있다. 대상유역의 토지이용은 임야가 71.5%, 논 18.5%, 밭 6.8%, 거주지역 3.0%, 기타지역이 0.2%로 구성되어 있다. 유역의 수문 및 수질 계측망과 유역현황은 Fig. 2와 같다.

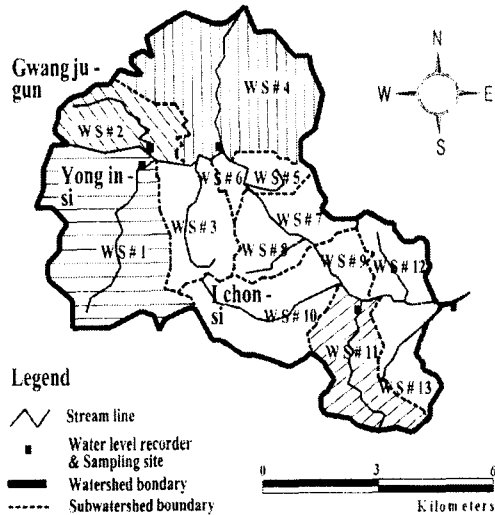


Fig. 2 Location map of experimental watersheds

2. 입력 자료의 구성

가. SWAT 모형의 입력자료

SWAT 모형의 입력자료의 구성을 위한 지형자료는 국립지리원의 수치지도 1:5,000도를 이용하

여 유역경계도와 토지이용도, 수치고도도를 구축하고, 농촌진흥청의 정밀토양도 1:25,000도를 이용하여 토양도를 구축하였다.

RDBMS는 구축된 도형자료의 속성값과 부합시켜 입력자료를 구성하게되며, 이 모듈에는 토양과 작물자료를 구성하는 두 가지가 있다.

나. WASP 모형의 입력자료

모형의 구성은 경기도의 북하천 하천정비 기본계획¹²⁾을 참고하여 Fig. 3과 같이 하폭, 바닥경사, 사행정도 등 수리적으로 비슷한 특성을 지닐 것으로 예상되는 분류 구간을 27개 구획으로 하고, 단면적, 특성길이, 부피 등을 도출하였고, 경계조건 구획의 하천제원들은 인접 분류구획의 값을 산술평균한 것으로 하였다. 또한, 13개 소유역을 기준으로 상류

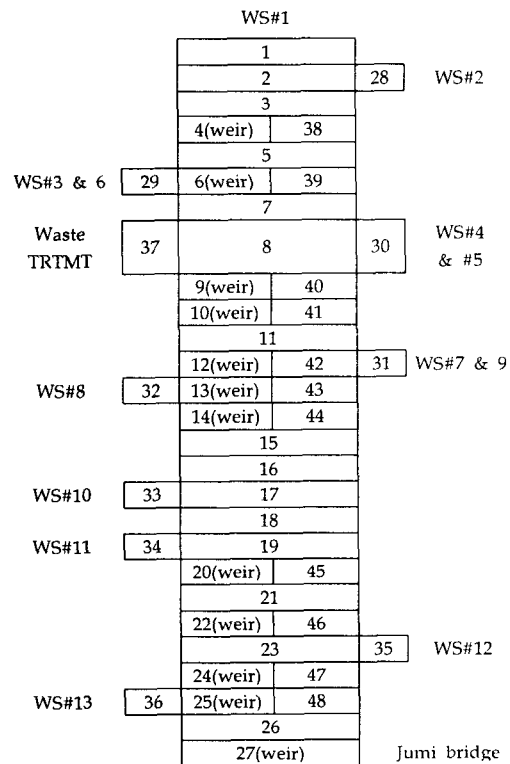


Fig. 3 Schematic diagram of Bok-ha stream

Table 1 Effluent loads of various point sources by subwatersheds
(Unit : kg/day)

	Domestic			Livestock			Industrial		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
WS#1	67.7	6.4	1.5	4.5	10.3	0.5	1.3	2.6	0.3
WS#2	10.1	1.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0
WS#3	8.4	1.0	0.2	9.9	8.9	0.6	0.0	0.0	0.0
WS#4	54.5	5.9	1.3	24.9	73.9	2.7	2.5	5.0	0.7
WS#5	17.0	1.8	0.4	6.0	12.9	0.7	0.0	0.0	0.0
WS#6	5.2	11.6	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
WS#7	4.0	0.5	0.1	2.3	10.3	0.2	0.0	0.0	0.0
WS#8	30.9	3.5	0.8	0.9	4.1	0.1	40.2	80.4	10.7
WS#9	6.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
WS#10	23.9	2.5	0.6	10.9	46.1	0.9	0.0	0.0	0.0
WS#11	26.9	2.5	0.6	8.1	37.3	0.7	15.0	30.0	4.0
WS#12	19.2	1.8	0.4	45.5	107.6	4.4	0.0	0.0	0.0
WS#13	13.6	1.3	0.3	17.3	92.2	1.7	0.0	0.0	0.0
Total	287.5	40.9	8.0	130.3	403.6	12.5	59.2	118.3	15.7

측 경계는 10개 주요 지류와 1개의 하수처리장이며, 하류측 경계는 복하천 중류부의 주미교이며, 분할구획의 구성은 평균 길이가 350 m인 37개 구획으로 하였고, 분류구간에서 보가 있는 지점을 보상류부와 하류부로 구분하여 총 48개로 하였다. WASP 모형의 입력자료 구축을 위한 분할모식도는 Fig. 3과 같다.

점오염원은 생활계, 축산계 및 산업계로 나누어 부하량을 산정하여 각 소유역별 점오염원 배출부하량을 Table 1과 같이 산정하였다.

3. 실측자료

모형의 보정 및 적용결과와의 비교를 위해서 4개 지점(WS#1, WS#2, WS#4, WS#11)의 유량을 이용하였다. 출구점에는 압력식 수위계를 설치하였다. 수위계 설치지점의 수위는 하류부에 위치한 보에 의해 영향을 받기 때문에 보의 표고를 고려하여 저수위와 고수위 구분하여 수위-유량관계식을 적

Table 2 Observed monthly sediment loads
(Unit : kg/ha · month)

	WS#1	WS#2	WS#4	WS#11
Apr.	4.0	3.4	-	2.9
May	4.1	1.8	0.3	4.6
June	5.6	4.6	21.0	11.5
July	21.5	34.9	27.3	94.7
Aug.	32.4	87.8	167.5	250.5
Sept.	3.9	4.1	8.3	8.5
Oct.	4.0	5.7	6.7	5.5
Nov.	1.9	0.3	1.4	1.3
Total	77.4	142.6	232.5	379.5

용하였다. 소유역의 경우에는 1998년 홍수로 인해 단면의 변화가 커서 수위-유량관계식(L-Q식)을 1998년의 홍수를 전·후하여 다르게 적용하였다.

유사량은 수위계 설치지점에서 하천 유출수를 1 L씩 채취하여 여과법을 이용하여 유사농도를 측정하여 유사량을 산정하였다. 시료의 채취는 직접채취법과 수면 유사채취법을 이용하였다. 각 소유역 출구점에서의 유사부하량은 Table 2와 같다.

본 연구에서 실측 오염부하량 산정을 위하여 유기물질(BOD)과 영양물질(N, P)에 대하여 소유역 WS#2와 WS#4 및 유역 출구점에서의 L-Q식을 도출하여 모형의 보정 및 적용결과와의 분석에 이용하였다. 소유역 WS#2는 점오염원이 거의 없는 유역으로 SWAT 모형에 의한 비점원오염의 모의결과와 비교하기 위하여 선정하였고, WS#4는 점오염원이 산재하여 있어 WASP 모형의 보정을 위하여 선정하였다.

수질자료는 1996년부터 1999년까지 4개년간 월 1회 및 강우시 24시간 측정치를 이용하였다. 채취된 시료는 수질공정시험법에 따라서 분석하였다. 각 지점의 항목별 유량-영양염류 부하량 관계곡선식과 각 회귀식의 결정계수(R^2)는 0.80에서 0.97로 매우 높게 나타났다.

IV. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정

유출량의 보정은 수위계 설치지점인 소유역(WS#1, WS#2, WS#4 및 WS#11)을 대상으로 1998년 실측자료를 이용하여 보정을 실시하였다.

소유역에서의 직접유출량에 대한 보정을 실시한 후 CN값을 고정시키고, 기저유출량에 대해 보정하였다. 전용적 밀도는 1.5~2.0 t/m³ 사이의 값에서 변화시키고, 토양수분함량은 정밀토양도에서 제시한 값에서 ±0.04 사이에서 변화시켰다. 기저유출량은 천층 대수층의 초기 값을 조정하여 보정하였다. 전체 유출량에 대한 보정 이후에 투수손실량, 하천 투수계수와 지하수 흐름이 하천에 회귀하는 비율을 나타내는 토양의 Alpha factor를 조정하여 침투유출량을 보정하였다.

SWAT 모형의 경우 비관개기인 모의발생 초기에 CN-II 값을 입력받아 강우조건에 따라 순차적으로 CN 값을 계산하므로 이 값을 적용하였을 경우 직접유출이 매우 높게 나타난다. 이 때문에 본 연구에서는 관개기에 적용되는 Im and Park(1997)이 제안한 논의 CN-II보다 적은 25로 하였다. Im and Park(1997)이 제시한 CN 값은 광역 논 지구에 적용하기에는 다소 높은 것으로 판단하였으며, 모형의 결과와 실측치와의 비교 및 보정을 통해서 비교적 낮은 값으로 지정하였다. SWAT 모형의 적용을 위해 논에 대한 CN 값은 앞으로 추가로 규명되어야 할 부분으로 판단된다. 지하수흐름에 대한 입력자료는 Table 3에 제시된 바와 같다.

Table 4에 나타난 바와 같이 SWAT 모형의 유출량에 대한 보정결과는 소유역(WS#1, WS#2, WS#4 및 WS#11) 출구점에서 1998년에 대한 실측자료와 비교한 결과, 일별 유출량에 대한 실측치와 모의치의 상관계수(R)는 0.70~0.82의 상관 정도를 나타내었다. 비교대상기간의 실측 유출량과 모의된 값을 비교하여 보면 1,636.1 mm의 경우에

Table 3 Values of groundwater related variables

Variable	Calibrated value	Range*
GWHT	2.5	0~25 (m)
GWQ	1.0	0~1000 (mm)
ABF	1.0	0.0~1.0
SYLD	0.4	0.0~0.4
DELAY	400	0~500 (days)
REVAPC	0.02	0.0~1.0
RCJRC	0.0	0.0~10
REVAPMN	100	0~500 (mm)

* Ranges suggested by SWAT Manual (Arnold et al., 1995)

Table 4 Comparison of observed and simulated water yield and runoff ratio

	Rainfall (mm)	Water yield (mm)		Runoff ratio (%)		R*
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
		Data	Data	Data	Data	
WS#1		1032.5	1082.4	63	66	0.70
Calibration (98. 4. 1 ~11. 30)	1636.1	1235.6	1205.8	76	74	0.72
WS#4		827.8	815.8	51	51	0.76
WS#11		949.0	936.1	58	57	0.82

* : Correlation coefficient between observed and simulated daily water yield

대해 실측 유출량 827.8~1,235.6 mm에 대하여 12.0~49.9 mm의 차이를 보였다.

유사량의 보정은 소유역(WS#1, WS#2, WS#4 및 WS#11)에서의 유사부하량을 SWAT 모형에서 모의하여 실측자료와 보정을 실시하였다. 유사량 보정에 고려된 매개변수는 작물관리인자(C), 침식 방지공인자(PE)를 이용하였다(Table 5~6).

소유역 출구점에서의 월별 유역 유사부하량과 모의치를 비교한 결과는 Table 7에 나타난 바와 같다. 비교기간동안 WS#1의 경우에는 모의결과와 실측치가 1.249 kg/ha의 차이가 났고, WS#2에서는 다른 소유역의 경우보다 모의 발생량이 많은데, 이는 WS#2가 대부분 산림지로 되어있어 경사가

Table 5 Crop factors for different landuse

Landuse	Before calibration	After calibration
Forests	0.001	0.001
Paddy	0.00	0.00
Upland	0.03	0.01
Farmsteads	0.01	0.00

Table 6 Erosion control practice factor for different landuse

Landuse	Before calibration	After calibration
Forests	1.0	0.7
Paddy	0.2	0.2
Upland	1.0	0.7
Farmsteads	1.0	1.0

Table 7 Calibration result of observed and simulated sediment loads (Unit : kg/ha · month)

	WS#1		WS#2		WS#4		WS#11	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
Apr.	4.1	47.3	3.4	69.8	-	-	2.9	2.5
May	4.2	2.8	1.8	18.6	0.3	0.1	4.6	0.1
June	5.6	0.2	4.6	0.5	20.9	10.1	11.5	0.8
July	21.5	0.4	34.9	0.3	27.3	5.8	94.8	4.9
Aug.	32.4	2.8	87.8	1.8	167.5	14.9	250.5	14.9
Sept.	3.9	20.0	4.1	21.0	8.3	28.1	8.5	25.2
Oct.	4.0	0.7	5.7	1.8	6.7	0.0	5.5	0.0
Nov.	1.9	2.0	0.3	2.1	1.4	0.0	1.3	0.0
Total	77.6	76.2	144.6	115.9	232.4	59	379.6	48.4

급하기 때문에 직접유출의 비율이 높기 때문으로 사료된다. WS#4와 WS#11의 경우 모의 발생량이 실측치에 비해 적은 이유는 유출량의 보정을 위해 직접 유출을 낮추고, 기저유출부분을 높인 결과로 생각된다. 또한 7월과 8월의 시료채취가 강우시에 이루어진 것으로 실측치가 상대적으로 높게 계산되어 보정 후에도 차이가 많이 나타난 것으로 판단된다.

Table 8 Calibration result of observed and simulated pollutant loads at the outlet of WS#2

Type	NO ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P
R ²	0.62	0.70	0.89	0.55

비점원에 의한 오염물질 부하량 보정은 소유역 WS#2을 대상으로 SWAT 모형에 대하여 수행하였으며, WASP 모형에 대한 보정은 WS#4에 대하여 실시하였다.

Table 8에서 나타난 바와 같이 SWAT 모형의 보정결과, NO₃-N의 경우는 시기별 부하량의 변화가 컸으며 결정계수는 0.62로 비교적 신뢰할 만하였다. T-N은 모의치와 실측치간의 차이가 크지 않았고 결정계수가 0.70으로 용해성인 NO₃-N보다 신뢰도가 높았다. PO₄-P의 경우에는 시기별 변화량이 크게 나타났지만 발생량 자체가 매우 적으며 결정계수가 0.89로 나타났다. 마지막으로 T-P의 경우 결정계수는 0.55로 다른 오염물질보다는 신뢰도가 떨어지는 것으로 판단되었다. 자료의 분포와 범위를 고려할 때 결정계수를 이용하여도 실측치와 모의치의 비교·분석이 충분하다고 판단하여 상대평균오차, 상대절대오차, 또는 제곱평균제곱근오차(RMSE) 등은 이용하지 않았다.

SWAT 모형 보정결과와 점오염원에 의한 배출 부하량(Table 1)을 WASP 모형의 입력자료로 사용하여 보정을 실시하였다. WASP 모형에서의 주요 반응계수와 모형의 보정에서 결정된 각 반응계수의 적용값은 Table 9와 같다.

WASP 모형의 보정결과 BOD에 대한 실측치와 모의치의 일차 회귀식의 결정계수(R²)는 0.99로 매우 신뢰할 만한 수준인 것으로 나타났다. NO₃-N의 경우는 결정계수 0.73으로 다른 항목에 비해 다소 낮았다. T-N은 모의치와 실측치간의 차이가 크지 않았고 결정계수가 0.77로 용해성인 NO₃-N보다 신뢰도가 다소 높았다. PO₄-P와 T-P의 결정계수는 각각 0.94, 0.87로 나타났다. BOD의 경우 결정계수가 다른 항목에 비해 높게 나타난 것은

Table 9 Main reaction coefficients of WASP model

Const. code	Range* (Mean)	Calibrated value
Nitrification rate (11)	0.001~0.800 (0.387)	0.001
Denitrification rate (21)	0.001~0.151 (0.041)	0.001
Deoxygenation rate (71)	0.082~0.165 (0.124)	0.101
Reaeration rate (82)	0.101~1.500 (0.603)	0.251
Mineralization rate of dissolved organic nitrogen (91)	0.001~0.031 (0.017)	0.001
Mineralization rate of dissolved organic phosphorus (100)	0.001~0.021 (0.012)	0.001

* Ranges suggested by WASP5 Manual (1994)

WASP 모형이 소유역 WS#4에 대해서만 이루어진 반면, 다른 항목은 SWAT 모형과 WASP 모형 내에서 복합적으로 매개변수에 대한 보정이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

전체적으로 오염부하량에 대한 보정결과 WS#2보다 WS#4의 보정결과가 더 높은 신뢰도를 보이고 있다. 이는 SWAT 모형과 WASP 모형의 연계 운영을 통하여 WS#4에서 비점오염원과 점오염원을 함께 고려하였기 때문에 점오염원을 고려하지 않은 WS#2의 경우보다 높은 신뢰도를 보이는 것으로 사료된다.

Table 10 Calibration result of observed and simulated pollutant loads at the outlet of WS#4

Type	BOD	NO ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P
R ²	1.00	0.73	0.77	0.94	0.87

2. 모형의 적용

SWAT 모형과 WASP 모형에 대한 매개변수의 보정 후, 유역 전체에 대하여 적용하여 결과를 실측치와 비교하였다.

유역 출구점에 대한 유출량의 적용결과는 1998

Table 11 Application results of water yield and runoff ratio at the outlet of Bok-ha watershed

Rainfall (mm)	Water yield (mm)		Runoff ratio (%)		R*	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.		
96.31~ 9.30	973.6	557.9	568.0	57	58	0.77
97.41~ 9.30	1038.3	726.8	706.1	70	68	0.94
98.41~11.30	1636.1	1010.2	1028.1	57	58	0.84

* : Correlation coefficient between observed and simulated daily water yield.

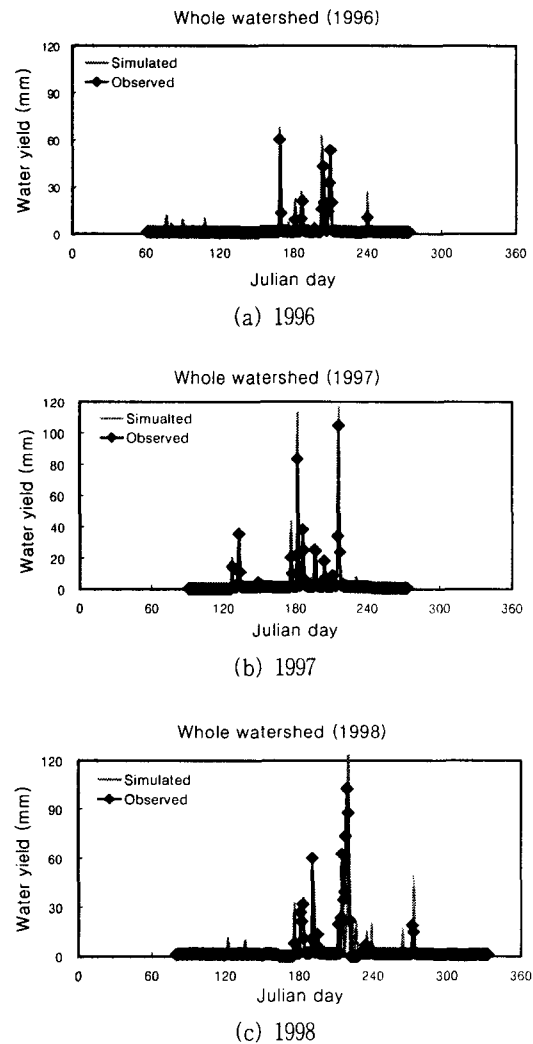


Fig. 4 Verification result of water yield at the outlet of whole watershed (1996~1998)

년의 실측자료와 비교하였고, 1996년과 1997년에 대해서도 적용결과를 비교하여 Table 11과 Fig. 4를 통해 제시하였다. 적용결과 1998년의 경우 1,631.6 mm의 강우에 대해 실측 유출량은 1,010.2 mm였고 모의 유출량은 1,028.1 mm로서 17.9 mm의 차이를 보였고, 일유출량에 대한 실측치와 모의치의 상관계수(R)는 0.84의 상관정도를 보였다. 1996년과 1997년의 경우 실측 유출량에 대하여 각각 10.1 mm와 20.7 mm의 차이를 보였고,

비교대상기간의 일유출량에 대한 상관계수는 0.77과 0.94로 나타났다. 연계운영을 통하여 전체유역에 대한 유출량 예측에 적용결과 수문현상에 있어서 모형이 유역의 유출반응에 대해 비교적 타당한 결과를 도출해내었다는 것을 알 수 있었다.

오염물질에 대한 모형의 적용은 유역 내 오염원에 대한 2차 조사가 1998년도에 이루어졌고 1999년도 수질측정 결과는 충분치 않아 1998년도에 대해서만 수행하였으며, 그 결과는 Table 12와 Fig. 5

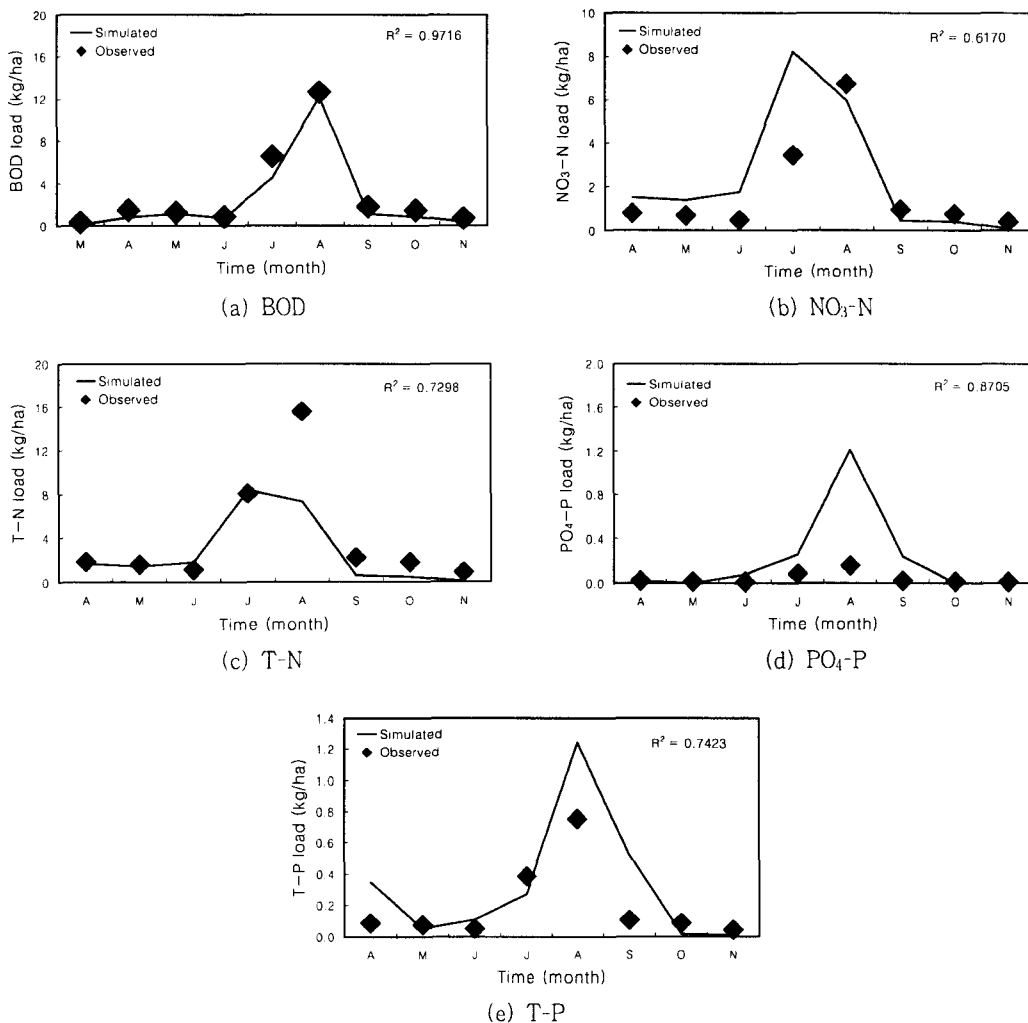


Fig. 5 Comparison of observed and simulated nutrient loads at the outlet of whole watershed (April 1998 ~ Nov. 1998)

Table 12 Application results of observed and simulated pollutant loads at the outlets of Bokha watershed

Type	BOD	NO ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P
R ²	0.97	0.62	0.73	0.87	0.74

와 같다. 오염부하량에 대한 모형의 적용결과 비교 대상기간에 BOD에 대한 모형의 모의 결과를 보면, 실측치와 모의치의 일차 회귀식의 결정계수(R²)는 0.97로 매우 신뢰할 만한 수준인 것으로 나타났다. NO₃-N의 경우는 결정계수는 0.62로 신뢰할 만하였다. T-N은 모의치와 실측치간의 차이가 크지 않았고, 결정계수가 0.73으로 용해성인 NO₃-N보다 신뢰도가 높았다. PO₄-P의 경우에는 발생량 자체가 매우 적었으나 시기별 변화가 뚜렷하여 결정계수가 0.87로 나타났다. 마지막으로 T-P의 경우는 결정계수가 0.74로 나타났다.

연계운영의 적용결과, 유기물질인 BOD에 대해서는 매우 높은 신뢰도를 보이지만, 영양물질인 질소에 있어서는 T-N이 NO₃-N보다 신뢰도가 높았으며, T-P에 비하여 무기성인 PO₄-P의 신뢰도가 더 높음을 알 수 있다. T-P의 대부분이 용존성인 PO₄-P가 차지하는 것은 앞에서 언급된 바와 같이 기저유출량의 비율이 높아 토사에 흡착된 양이 상대적으로 적게 모의발생된 것으로 판단된다. SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영을 실시하여 전체 유역에서의 오염부하량에 대한 적용결과 제한적으로 타당한 결과를 도출해 내어 그 적용성이 입증되었다고 사료된다.

V. 요약 및 결론

농촌유역 하천의 수질예측을 위해 농업비점원모형인 SWAT 모형과 하천수질예측모형인 WASP 모형의 연계운영을 실시하여 적용성을 검토하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영을 위

하여 SWAT 모형의 소유역 출구점에서의 유출량과 영양염류 유출에 관한 출력자료를 이용하여 WASP모형의 입력자료를 생성할 수 있도록 인터페이스를 구축하였다. 이렇게 구축된 인터페이스를 통하여 생성된 입력자료를 바탕으로 WASP 모형을 구동하여 대상유역에 대한 일별 수질예측을 실시하도록 하였다.

2. 모형의 보정을 통하여 유출량은 일별 유출량에 대한 상관계수 0.70~0.82 수준이었으며, SWAT 모형에 대한 보정 결과 영양염류의 결정계수는 0.55~0.89 수준이었다. WASP 모형의 보정에서는 결정계수가 BOD 0.99, 영양염류 0.73~0.94 수준이었다.

3. 보정과정을 통해서 확립된 자료를 이용하여 유역 전체에 대하여 SWAT 모형과 WASP 모형을 연계 운영하여 적용한 결과 비교적 타당한 결과를 도출해내었다는 것을 알 수 있었다. 오염부하량의 경우 연계운영의 적용결과 비교대상기간에 BOD의 경우 결정계수(R²)는 0.97로 실측치에 매우 근접하게 나타났다. NO₃-N의 경우는 0.62로 어느 정도 일치하고 있었고, T-N은 모의치와 실측치간의 차이가 크지 않았으며 결정계수가 0.73으로 NO₃-N보다 실측치에 더 근접하게 나타났다. PO₄-P의 경우에는 시기별 변화폭이 크게 나타났지만 발생량 자체가 매우 적으며 결정계수가 0.87로 실측치와 매우 근접하여 나타났다. 마지막으로 T-P의 경우는 결정계수 0.74로 나타나 실측치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

4. SWAT 모형을 통하여 기상과 작물생장, 토양 및 토지이용 등과 관련을 맺고 있는 비점원 오염부하량을 적정하게 추정하고, WASP 모형을 통하여 점오염원에 의한 오염과 하천 분류에서의 오염물질의 거동을 예측할 수 있었던 바, 강우유출 및 유사 유출과 관련된 변수에 대하여 추가적인 보정연구가 뒷받침된다면 두 모형의 연계운영을 통해서 농촌지역에서 적정한 수준으로 하천수질예측이 가능하다고 판단된다.

References

1. Arnold, J. G., 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.
2. Choi, Jin Yong and Ha Woo Chung. 1997. Development of a cell-based long-term hydrologic model using geographic information system(I). *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 39(1): 64-74. (in Korean)
3. Chun, Kyoung Soo. 1997. Modeling of nonpoint source water quality. *Magazine of Korea Water Resources Association* 30(4): 46-53. (in Korean)
4. Im, Sang Jun and Seung Woo Park. 1997. Estimating runoff curve numbers for paddy fields. *Journal of Korea Water Resources Association* 30(4): 379-387. (in Korean)
5. Jung, Pil Kyun, Mun Hwan Ko, Jeong Nam Im, Ki Tae Um, and Dae Ung Choi. 1985. Rainfall Erosion Factor for Estimation Soil Loss. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 18(1): 7-13. (in Korean)
6. Jung, Yeong Sang, Jae Sung Shin, and Yong Hwa Shin. 1976. Erodibility of the soils of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 9(2): 107-113. (in Korean)
7. Kim, Ji Hun, Seong Gu Hong, and Soon Kuk Kwun. 1998. Application of the SWAT model using a GIS. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 40(4): 67-76. (in Korean)
8. Kim, Jin Taek and Seung Woo Park. 1994. Runoff and soil losses from sloping lands with different cropping practices. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineeris* 36(1): 73-82. (in Korean)
9. Kim, Jin Taek and Seung Woo Park. 1997. Development and application of a GRASS interface for the agricultural nonpoint source pollution (AGNPS) model. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineeris* 39(1): 41-47. (in Korean)
10. Kim, Kyung Tak, Myung Pil Shim, and Jung Ho Sonu. 1999. Application of GIS for runoff simulation in ungaged basin(I). *Journal of Korea Water Resources Association* 32(2): 163-176. (in Korean)
11. Kwun, Soon Kuk and Myoung Jin Yu. 1993. Study on the management of water quality for rural water(II), Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Rural Development Corporation, Gyeonggi, Korea. (in Korean)
12. Office of Gyeonggi Province, 1984. Basic plan for the improvement of Bok-ha River, pp.23-133. (in Korean)
13. Rosenthal, W. D., R. Srinivasan, J. Arnold, 1993. A GIS-Watershed Hydrology Model Link to Evaluate Water Resources of the Lower Colorado River in Texas, Effective Management of Natural Resources, ASAE Proceedings of the 18-19 June 1993 Conference pp.260-266
14. Ramanarayanan, T. S. , R. Srinivasan, and J. G. Arnold, 1998. Modeling Wister Lake Watershed Using a GIS-Linked Basin-Scale Hydrologic/Water Quality Model.
15. Song, Dong Ha. 1999. Development of a distributed watershed model to predict daily pollutant loads. Ph.D. Diss. Seoul, Korea: Seoul National University. (in Korean)
16. Shin, Dong Seok and Soon Kuk Kwun. 1997. Water quality modeling for bokha stream by WASP5 model. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 16(3): 233-238. (in Korean)
17. USEPA. 1994. WASP5 User's Manual, and Programmer's Guide