

농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용(Ⅱ)

- AGNPS모형의 수정 -

Development and Application of a GIS Interface for the Agricultural Nonpoint Source Pollution (AGNPS) Model(Ⅱ)

- Modification of AGNPS Model -

김 진 택* · 박 승 우**
Kim, Jin Taek · Park, Seung Woo

Summary

The interface system, GIS-AGNPS was to be validated with field data from six tested small watersheds ranging from 0.7 to 4.7km² in size which have steep topography and complex landuses. The model validation involved the calibration of input parameters and component modifications, in efforts to develop a model applicable to general uses for identifying and controlling nonpoint source pollution loads from agricultural watersheds.

The simulated direct runoff from AGNPS was in good agreement with the field data for the averaged antecedent moisture conditions or AMC-Ⅱ. The results differed, however, from the observed for AMC-Ⅰ or Ⅲ. A simple empirical relationship was proposed to estimate the curve number for AMC-Ⅰ or Ⅲ from AMC-Ⅱ, which was found to result in simulated runoff close to the observed. The peak runoff relationship at AGNPS was also modified to reflect the watershed conditions and tested satisfactorily with the field data. The simulated sediment yields from the watersheds were fair as compared to the observed. Nutrient loads simulated from the model were different from the observed data. It appeared that the model was incapable of adequate depicting nutrient transport processes at paddy field and other landuses of the tested watersheds. Some modifications may be needed for the accurate representing the processes at paddy field.

* 농지개량조합연합회 시험연구소
** 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 농업비점원오염, 유출, 토양유실, 영양
물질, 수질오염, 지리정보시스템

I. 서 론

농업 비점원 오염의 추정을 위하여 여러 수학적 모형이 응용되고 있는데 국내에서는 WQM-MRA(권, 1994)⁴⁾, 외국에서는 EPIC, SWR-RB, CREAMS, ANSWERS, AGNPS 등이 개발되어 이용되고 있다.^{1,6)}

AGNPS는 미국 농무성과 미네소타주에서 공동으로 농업유역으로부터의 강우사상에 의한 유출, 유사, 총인, 총질소 및 COD성분 등의 추정을 위해 개발된 분포형 매개변수모형으로서, 중·대 규모의 유역에 적용이 가능하다. 또한, 모형의 입력자료준비 및 모형구동이 타 모형에 비해 비교적 간단하고 유역내의 오염원의 위치와 기여정도를 추정할 수 있는 등의 특징으로 세계 여러 지역에서 비점원 오염의 추정과 그 억제 대책수립 및 분석에 이용되고 있는데, 국내의 경우는 김(1995)에 의해 국내유역에 적용된 바 있다.³⁾

본 연구의 목적은 농업유역에서의 비점원 오염을 효과적으로 해석하기 위하여 농업 비점원 오염모형 AGNPS의 모의발생 결과와 실제유역의 측정자료를 비교하고 모형의 보정 및 검증을 실시하여 국내유역의 적용성을 분석하는 데 있다.

II. 농업 비점원 오염모형(AGNPS)

AGNPS모형은 유역을 수문특성이 균일한 직각 격자로 구분하여 이들 격자에 대해 각각의 강우사상에 따른 수문인자, 토양유실 및 운송, N, P, COD 수질인자 등의 성분을 계산하고, 이를 유역의 출구까지 추적해 대상유역의 비점원 오염 부하량을 구하는 분포형 매개변수모형이다. 모형의 주요부분으로는 수문부분, 유사운송 및 수질부분이 있다.⁸⁾

1. 유출 모형

가. 총유출량

수문모형에서 유출량은 SCS유출수법에 의해 추정되는데 다음 식과 같다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, Q=직접유출량(mm),
P=강우량(mm),
S=최대잠재보유수량(mm)이다.

나. 침투유량

침투유량은 Smith와 Williams의 경험식을 사용하여 추정하며, 식 (2)와 같다.^{7,8)}

$$Q_p = 3.79A^{0.7}CS^{0.16}(RO/25.4)^{(0.903A^{0.07})}LW^{-0.19} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Q_p=침투유량(m³/s),
A=유역면적(km²),
CS=하천경사(m/km),
RO=유출량(mm),
LW=유역주장-면적비(L/A)이다.

2. 토양유실 모형

단일 강우사상의 경사지 토양유실량 추정은 수정 USLE(Modified Universal Soil Loss Equation)으로 다음 식과 같다.

$$SL = (EI) K L S C P (SSF) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, SL=토양유실량(ton)
EI=강우에너지계수(m-Mg/ha-cm)
K=토양침식계수
LS=경사계수
C=작물피복계수
P=보전영농계수
SSF=경사보정계수이다.

토양유실량은 유역의 각 셀에 대해 계산되며 이렇게 계산된 유사량은 입자성분에 따라 분할되어 Foster 등(1980)⁵⁾이 제시한 유사운송 및 퇴적식에 의해 유역의 출구지점까지 추적된다.

3. 수질 모형

모형은 수질성분으로 유역에서 유거하는 질소, 인, COD에 대해 추정하고 있는데, 각각의 성분은 유출수 중의 용존상태와 유사에 부착된 상태로 나누어 계산된다.

모형의 총질소량 및 총인량 TN, TP는 유출수 중의 용존상태의 질소 및 인량 RON, ROP와 유사에 부착된 상태의 질소량 및 인량 SEDN, SEDP의 합으로 다음 식과 같다.

$$TN = RON + SEDN \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$TP = ROP + SEDP \quad \dots\dots\dots (5)$$

유출수내의 N 농도 추정식은 다음과 같으며 용존 P 산정식은 강우중 P량의 영향을 제외하고는 용존 N 추정식과 유사하다.

$$RON = 0.01 \cdot C \cdot EXKN2 \cdot RO \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서, RON = 유출수 내의 N 농도
 C = 유출중 표토의 용존 N 농도
 EXKN2 = 유출로의 용탈계수
 RO = 총유출량 (mm)이다.

한편, 유사에 포함된 수질량은 각 셀에서의 총유사량에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$SEDN, SEDP = SOIL \cdot SED \cdot ER \quad \dots (7)$$

여기서, SEDN = 유사운송 N량
 SEDP = 유사운송 P량

SED = 유사량(kg/ha)

ER = 고행계수

SOIL = 토양의 N, P 농도이다.

III. 모형의 적용

1. 시험유역

가. 시험유역의 개황

1) 위치 및 수문계측망

모형의 적용을 위한 시험유역은 경기도 화성군 반월면에 위치한 서울대학교 농공학과 반월시험유역으로 하였다.

시험유역은 Fig. 1과 같이 수계별로 몇 개의 소유역으로 구성되며 수문계측망으로는 하천관측소 5개소와 강우관측소 1개소가 설치되었다.

2) 지형 및 토지이용 특성

시험유역은 유역내의 5개 소유역으로 선정

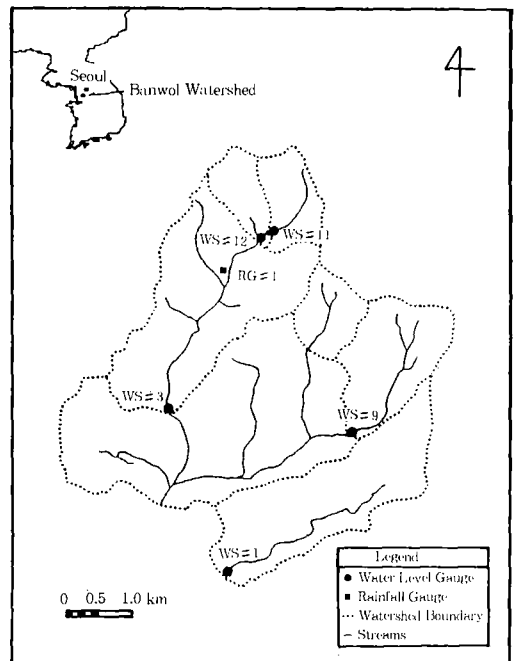


Fig. 1. Location of the banwol watershed and monitoring stations

하였으며, 각각의 소유역에 대해 1:25,000 지형도 및 정밀토양도와 현지 조사를 통해 유역 특성을 구하였는데 그 결과는 Table-1과 같다.

유역면적은 평균 217.7ha였으며 하천경사는 WS#11, 12유역이 급경사, WS#1유역은 완경사를 보였다.

유역의 토지이용상태는 WS#11, 12유역의 경우 95% 이상이 산지로 구성되어 있으며 시험유역의 평균 토지이용비는 산지가 71.5%, 논 16.5%, 밭 8%이었다.

Table-1. Geomorphological and landuse characteristics of the test watersheds

Variables	Watersheds					
	WS#1	WS#3	WS#9	WS#11	WS#12	Mean
Geomorphological feature						
Areas(ha)	274.1	467.5	153.2	70.3	123.4	217.7
Stream length(km)	3.83	3.85	1.45	1.00	1.00	2.20
Shape factor	0.19	0.32	0.33	0.50	1.26	0.50
Relief(m/m)	0.021	0.113	0.130	0.360	0.380	0.201
Channel slope(m/km)	13.77	31.4	44.1	178.0	178.0	89.1
Channel frequency	0.36	1.45	12.86	2.00	3.17	3.97
Landuse						
Forest(%)	28.6	85.7	49.0	97.2	96.7	71.5
Upland(%)	21.6	2.3	12.4	1.4	2.3	8.0
Paddy(%)	41.0	10.0	29.4	1.4	0.8	16.5
Farmstead(%)	8.8	2.0	9.2	0.0	0.0	4.0

나. 강우자료

시험유역의 1993년 4~9월의 강우량 및 강우침식지수는 Table-2와 같다. 강우량은 6월 29일의 8.0mm에서 7월 29일의 117.5mm의 범위를 보였으며, 평균 40.1mm이었다.

다. 유출량 및 침투유량자료

강우사상에 의한 유역의 직접유출량은 감수곡선법으로 유역의 측정 유출량 중에서 기저 유출량을 분리하여 구하였다.

시험유역의 유출량자료는 유역별로 10~27개이며 최대유출량은 7월 13일의 97.5mm 강

Table-2. Rainfall data during the testing period

Storm event (mo/day/yr)	Rainfall (mm)	EI ₃₀	AP ₅ * (mm)	AMC
4/22/93	24.0	7.5	0.0	(I)
4/24/93	13.0	0.1	26.5	(I)
4/27/93	18.5	2.6	37.0	(II)
4/29/93	13.5	1.4	31.5	(I)
5/12/93	32.5	10.3	0.0	(I)
5/17/93	18.0	0.8	34.0	(I)
5/22/93	20.0	3.9	18.0	(I)
6/01/93	65.5	16.5	0.0	(I)
6/12/93	50.0	24.6	0.0	(I)
6/27/93	27.5	2.2	0.0	(I)
6/29/93	8.0	0.5	30.5	(I)
7/08/93	41.5	10.7	0.0	(I)
7/11/93	91.0	314.5	41.5	(II)
7/13/93	97.5	29.6	135.5	(III)
7/17/93	96.5	25.0	100.5	(III)
7/24/93	32.0	12.2	0.0	(I)
7/26/93	13.5	1.0	32.0	(I)
7/29/93	117.5	79.6	49.0	(II)
8/02/93	12.0	1.7	117.5	(III)
8/10/93	13.0	0.8	9.5	(I)
8/13/93	29.0	1.6	22.5	(I)
8/21/93	24.0	2.1	2.5	(I)
9/16/93	70.9	8.3	0.0	(I)
9/20/93	34.0	5.0	70.9	(III)
Mean	40.1	23.4	31.6	

*AP₅: 5day Antecedent Precipitation(mm)

우사상에서 발생하였으며, WS#12 유역과 WS#1 유역이 66.28와 65.10mm로서 WS#3, WS#9, WS#11 유역의 54.78, 55.04, 53.08mm 보다 큰 값을 보였다.

한편, 침투유량은 7월 13일에 WS#3 유역에서 24.74m³/s 이었고, WS#1이 11.82m³/s 이며 WS#9, WS#11, WS#12 유역은 5.92, 1.41, 2.63m³/s이었다.

라. 유사량자료

시험유역의 유사량은 수위관측지점에서 하천유출수를 1리터 정도 채취한 다음 실험실에

서 여과법으로 유사농도를 측정하여 유역유사량을 산정하였다.

유사농도의 자료가 없는 유량에 대한 보완을 위하여 각 유역별 유량-유사농도 관계식을 산정하여 유사량을 구하였다.

마. 수질자료

시험유역의 유출수의 수질측정은 수문계측지점에서 시료를 채취하여, 총질소(TN) 및 총인(TP)에 대해 농촌진흥청 농업기술연구소와 공동으로 비속계 및 흡광광도법을 이용하여 그 양을 분석하였다.

수질 측정결과는 TN의 경우 평균농도는 WS#1과 WS#9유역에서 4.9와 13.0mg/ℓ로 WS#11, WS#12, WS#3유역의 2.3, 1.2, 1.8mg/ℓ보다 큰 값을 보였다. TP의 경우 WS#9에서 2.6mg/ℓ로 가장 큰 값을 보이고 그 이외의 유역에서 2.0mg/ℓ 이하의 값을 나타내었다.

2. 모형의 보정

모형의 보정은 대상기간의 강우사상에 대하여 예측된 5개 소유역중 유역특성이 상이한 3개 소유역(WS#1, 11, 12)에 대해 실시하였다.

가. 총유출량

본 연구에서 시험유역에 대한 모형의 적용을 위하여 측정유출량으로 부터 선행함수조건에 따른 측정 유출곡선지수를 산정하고 유역에서의 유출곡선지수와 비교분석 하였다.

측정 유출곡선지수를 구하기 위해서 식 (1)을 최대잠재보유수량 S에 대하여 정리하면 다음과식과 같다.²⁾

$$S=5P+10Q-10\sqrt{Q^2+1.25QP} \dots\dots (8)$$

식 (8)을 식 (1)에 대입하여 유출곡선지수 CN에 대하여 정리하면 식 (9)와 같은 측정 유출곡선지수(CN₀) 계산식을 얻을 수 있다.

$$CN_0 = \frac{25,400}{254 + 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1.25QP)^{1/2}} \dots\dots (9)$$

식 (9)에 의하여 각각의 강우사상에 대한 측정 유출곡선지수를 계산하여 이를 각 강우사상의 선행함수조건에 따라 나타내면 Table-3과 같다.

한편, 시험유역에 대한 SCS방법에 따른 추정 유출곡선지수 CN_{scs}는 AMCII 조건에서 측정 유출곡선지수 CN₀ 76.2에 근사한 76.9를 나타내었으나, AMC I 조건에서는 CN₀ 73.6에 비해 60.2로 상당히 작은 값을 보였으며, AMCIII 의 경우 CN₀ 85.6에 대해 88.2로 약간 큰 값을 보였다.

이는, SCS방법의 AMC I 과 AMCIII에서의 유출곡선지수 CN_{scs}I, CN_{scs}III 산정식이 시험유역의 측정 유출곡선지수 CN₀ 값과 차이를 나타내는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 수정 유출곡선지수 CN_mI 과 CN_mIII을 식 (10)과 식 (11)로 구성하였다.

$$CN_m I = a(CN_{scs} I) + (1-a)(CN_{scs} II) \dots\dots (10)$$

$$CN_m III = a(CN_{scs} III) + (1-a)(CN_{scs} II) \dots\dots (11)$$

식 (10)과 식 (11)의 수정 유출곡선지수식의 계수 a의 결정은 a를 0.1~0.9로 변화하여 구한 CN_m이 측정 유출곡선지수 CN₀에 가장 근사한 0.7을 사용하였다.

CN_m을 AGNPS모형에 적용하여 산정한 추정유출량과 측정유출량을 비교하면 Fig. 2와 같으며 추정치가 측정유출량에 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

Table-3. CN values from observed runoff

AMC	AP ₅ (mm)	Rainfall (mm)	Direct runoff (mm)	Curve Number	
				Observed (CN _o)	SCS (CN _{scs})
I	0.0	65.5	14.24	72	58
	0.0	50.0	6.41	71	58
	0.0	32.0	2.05	74	62
	22.5	29.0	0.81	72	65
	0.0	70.9	9.34	64	58
Mean	4.5	47.2	7.57	77	60
II	41.5	91.0	28.61	71	78
	49.0	117.5	46.08	71	78
	41.5	91.0	37.24	77	77
	49.0	117.5	61.84	78	76
	41.5	91.0	43.36	80	76
Mean	45.3	104.3	47.17	76	77
III	135.5	97.5	53.08	82	88
	100.5	96.5	45.55	79	88
	70.9	34.0	6.64	82	88
	135.5	97.5	66.28	88	88
	100.5	96.5	57.35	85	88
	135.5	97.5	71.43	91	89
	100.5	96.5	66.07	89	89
	70.9	34.0	13.75	90	89
Mean	106.2	81.3	47.52	86	88

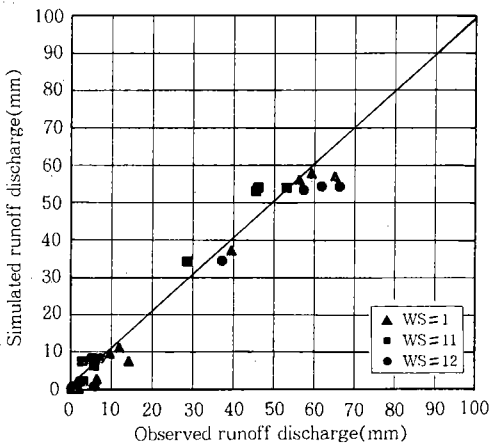


Fig. 2. Comparison of observed and simulated runoff of calibrated storms at WS #1, 11 and 12

나. 첨두유량

식 (3)에 의한 추정첨두유량과 측정첨두유량의 비교한 결과는 추정치가 측정치보다 2~11배 큰 값을 보이며, 유역면적이 증가함에 따라 첨두유량이 증가하였다.

한편, AGNPS의 첨두유량 산정식은 미국 14개주의 유역면적 0.7~62.2km²에 대해 개발된 식으로 유역면적이 작은 경우에 유역면적항의 지수의 조정이 요구되는 것으로 발표된 바 있다⁸⁾. 본 연구에서는 모형의 결과로부터 구해진 추정첨두유량과 측정첨두유량의 회귀식으로부터 구한 회귀계수 0.51을 곱한 식 (12)를 사용하였다. 식 (12)를 이용하여 구한 추정첨두유량과 측정첨두유량의 비교는 Fig. 3과 같이 측정치에 가까운 값을 나타내었다.

$$Q_p = 1.93A^{0.7}CS^{0.16}(RO/25.4)^{(0.903A^{0.91})}LW^{-0.19} \dots\dots\dots (12)$$

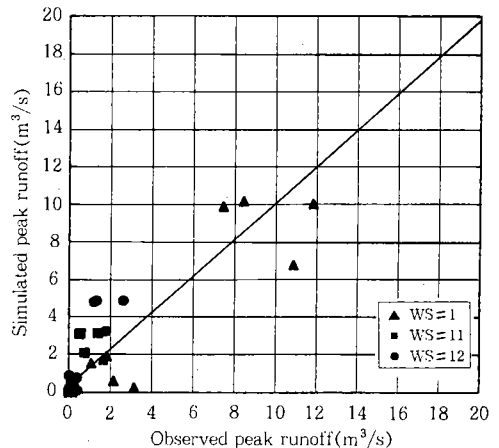


Fig. 3. Comparison of observed and simulated peak runoff from the modified relationship

3. 모형의 검증

가. 유출 모형

1) 유출량

모형의 검증은 보정에 사용되지 않은 2개

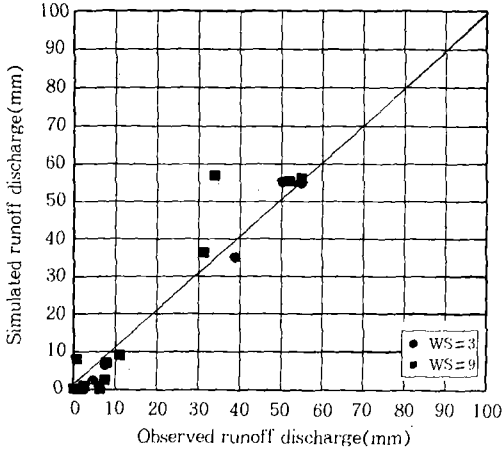


Fig. 4. Comparison of observed and simulated runoff for test watersheds

소유역(WS#3, WS#9)의 측정유출량 자료를 사용하였다. 유출량의 추정치와 측정치의 비교는 Fig. 4와 같으며 모의발생치는 측정치와 잘 일치하였다. 한편, 측정치에 대한 추정치의 결정계수 R^2 는 0.95이었으며, RMS오차는 WS#3 유역의 경우 3.14mm이며 WS#9 유역은 7.59mm이었다.

2) 침투유량

시험유역의 측정자료로부터 매개변수보정을 실시한 AGNPS모형에 의한 추정침투유량과 측정침투유량에 대한 모형의 검증은 2개 유역의 13개 강우사상으로 부터의 34개 측정침투유량 자료를 사용하였으며 모형에 의한 추정침투유량과 측정침투유량의 비교는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 모형에 의한 모의발생치는 일부 강우에 대해 차이를 보이고 있으나 측정치와 대체적으로 잘 일치하였다.

한편, 측정침투유량에 대한 모형에 의한 추정침투유량의 결정계수 R^2 는 0.71이었으며, RMS오차는 WS#3 유역의 경우 $3.91m^3/s$ 이고 WS#9 유역의 경우 $2.10m^3/s$ 이었다.

나. 토양유실 모형

시험유역의 AGNPS모형에 의한 유사량의

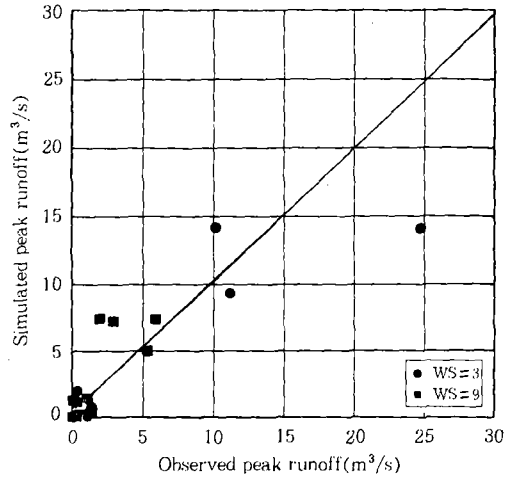


Fig. 5. Comparison of observed and simulated peak runoff for test watersheds

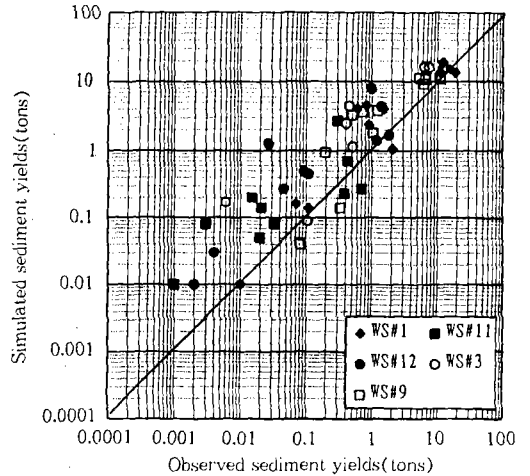


Fig. 6. Comparison of observed and simulated sediment yields

추정치와 측정치의 비교는 Fig. 6과 같으며 모형에 의한 모의발생치는 측정치와 대체적으로 잘 일치하였다.

유역별 추정유사량과 측정유사량의 평균상대 오차는 WS#1가 149%, WS#3이 219%, WS#9 294%, WS#11 315% 그리고, WS#12가 770%로 WS#1유역이 가장 작은 값을 보였으며 WS#12유역이 가장 큰 값을 보였다.

다. 수질 모형

1) 총질소

시험유역에서 모형에 의한 추정 TN농도와 측정 TN농도를 비교한 결과 WS#1, WS#3 유역의 경우는 모형에 의한 모의발생치가 측정치보다 큰 값을 나타내었고, WS#9, WS#11, WS#12유역의 경우는 모의발생 평균농도가 측정치보다 작은 값을 나타내었다. 이상의 결과에서와 같이 TN의 경우 모형의 모의발생치와 측정치가 유역에 따라 차이를 보였

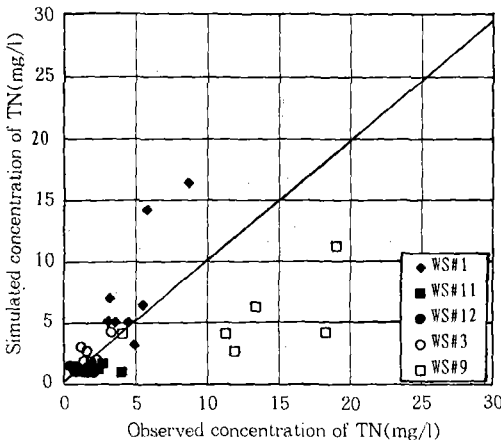


Fig. 7. Comparison of observed and simulated total nitrogen(TN)

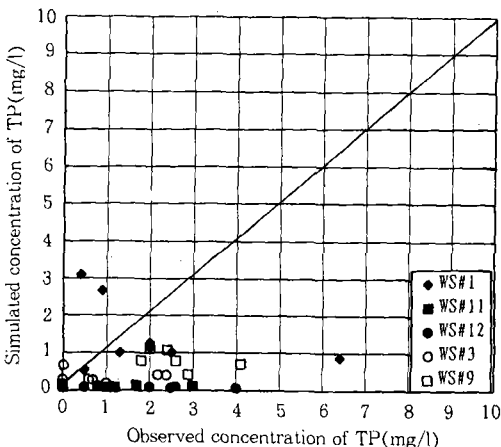


Fig. 8. Comparison of observed and simulated total phosphorus(TP)

는데, 이는 국내의 논, 밭의 토지이용에 따른 시비투여 상황 등의 차이에서 기인된 것으로 판단되었다.

2) 총인

시험유역의 모형에 의한 추정 TP농도와 측정 TP농도의 비교는 Fig. 8과 같다. TP의 경우도 모형의 모의발생치와 측정치가 유역에 따라 차이를 보였는데, 이는 TN에서와 같이 시비투여 및 오수 유입 등에 기인된 것으로 판단되었다.

이상의 결과에서 AGNPS모형에 의한 TN 및 TP추정은 측정치와 차이를 보이는 등 모형의 적용에 한계가 있음을 나타내었다.

II. 결 론

본 연구에서는 농업유역에서의 비점원오염을 효과적으로 해석하기 위하여 농업비점원오염모형 AGNPS를 이용하여 시험유역의 측정자료들에 대해 모형의 보정 및 검증을 실시하여 모형의 적용성을 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. SCS 유출곡선지수법에 의한 유출량산정에 있어서 AMC I, III조건인 경우 CN I, III 산정식을 수정한 다음식

$$CN_{m, I, III} = a(CN_{scs, I, III}) + (1-a)(CN_{scs, II})$$

을 구성하여 $a=0.7$ 로 모의발생한 유출량은 측정치와 잘 일치하였다.

2. 모형의 침투유량 산정식을 소유역인 시험유역에 대해 수정하고 침투유량을 추정한 결과, 측정치에 대해 결정계수 R^2 가 0.84로 개선된 결과를 보였다.

3. AGNPS모형을 검증한 결과, 유출량의 경우 모의발생 유출량의 측정유출량에 대한 결정계수 R^2 가 0.95이었고, 침투유량은 결정계수가 0.71로서 측정치에 근접한 결과를 보였다.

4. AGNPS모형의 유사량부분 검증 결과는 모의발생 유사량이 측정유사량에 비해 약간 큰 값을 보였으나 대체적으로 잘 일치하였다.

5. 모형의 모의발생 총질소 및 총인의 검증 결과는 전반적으로 측정치와 잘 일치하지 않았는데 이는 토지이용에 따른 시비투여 등의 차이도 판단되었다.

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 김병진, 박승우, 1988. 수문모형 ANSWERS의 반월유역에의 적용, 한국농공학회지, 30(1), pp. 81-90.
2. 김종덕, 1990. SCS법에 의한 소유역의 총수유출 추정, 서울대학교 석사학위논문.
3. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
4. 농림수산부, 농어촌진흥공사, 1992~1993. 농어촌 용수 환경관리에 관한 연구(I)~

- (II), 서울대학교 농과대학부속 농업개발연구소.
5. Foster, G. R., L. J. Lane, J. D. Nowlin, J. M. Laflen, and R. A. Young, 1980. CREAMS: A Field-scale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System, USDA, Cons. Res. Rep. No. 26.
6. Park, S. W., J. T. Kim, 1995. Validating AGNPS model with complex topography in central Korea, Presented at the 1995 ASAE Annual Meeting, Paper No. 952702, St. Joseph, MI.
7. Williams, J. R. and H. D. Berndt, 1972. Sediment yield computed with universal equation, J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol.98, No. HY12, pp. 2087-2098.
8. Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987. AGNPS, Agricultural Non-Point Source Polluton Model: A Watershed Analysis Tool, USDA Conservation Research Report 35.

(접수일자 : 1995년 3월 23일)