

소규모 농업유역에서 질소와 인의 하천 부하에 대한 AGNPS 모형의 적용

김민경^{1)*} · 최윤영²⁾ · 김복진³⁾ · 임준영³⁾ · 정종배

¹⁾농업과학기술원 환경생태과 · ²⁾경도대학 토목환경과 · ³⁾영남대학교 자연자원대학 생물자원학부
대구대학교 자연자원대학 생명환경학부

(2001년 7월 5일 접수, 2001년 9월 7일 수리)

Application of AGNPS Model for Nitrogen and Phosphorus Load in a Stream Draining Small Agricultural Watersheds

Min-Kyeong Kim^{1)*}, Yun-Yeong Choi²⁾, Bok-Jin Kim³⁾, Jun-Young Lim³⁾ and Jong-Bae Chung (¹⁾National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon 441-707, Korea, ²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kyongdo College, Yecheon 757-800, Korea, ³⁾Dept. of Agronomy, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea, Dept. of Agricultural Chemistry, Taegu University, Kyongsan 712-714, Korea)

Abstract : The event-based agricultural non-point source(AGNPS) pollution model was applied to estimate the loads of nitrogen and phosphorus in a stream draining small agricultural watersheds. Calibration and verification of the model were performed using observed data collected from rainfall events in the Imgo watersheds during 1997-1998. Parameter calibrations were made for the runoff curve number. The peak flow volumes in the watersheds were well reproduced by the modified model. Average deviation between observed and simulated values was 10%, and this match was confirmed by the coefficient of efficiency value of 0.97. The deviations tended to increase as the peak flows increased. The simulated total N concentrations in the stream water were fairly close to the measured values, and the coefficient of efficiency in the estimation was 0.93. However, there were relatively large variations between calculated and observed values of total P concentration, and the coefficient of efficiency in the estimation was 0.74. Any inaccuracies that arise in estimating runoff flow and nutrient loading can not be explained exactly and further adjustment and refinements may be needed for application of AGNPS in agricultural watersheds. With this restrictions in mind, it can be concluded that AGNPS can provide realistic estimates of nonpoint source nutrient yields.

Key words : agricultural non-point pollutant, AGNPS, curve number, peak flow, nitrogen, phosphorus

서 론

시설재배 등 여러 형태의 농업활동이 집단적이고 또한 집약적으로 이루어지고 있는 상황에서 비료의 과다 사용과 그에 따른 유실량의 증가와 적절한 폐수처리 시설의 확보가 미흡한 축산농가의 증가로 인해 생활하수나 공장폐수의 유입이 많지 않은 농업지대 소유역에서도 하천수의 오염이 심각해지고 있다^{1,2)}. 낙동강의 지천이면서 사과를 위주로 한 과수원이 집단적으로 형성되어 있는 경북 영천시 임고면의 임고천에서 시기별로 수질을 조사한 결과, 연중 무기태 질소는 0.47~19.94 mg/L, 총인은 0~0.21 mg/L이었는데³⁾, 이러한 오염 수준은 부영양화 유발 수준을 훨씬 상회하며 실제로 대부분의 농업지대 소하천들이 이미 상당한 부

영양화의 단계에 도달해 있는 것으로 조사되었다³⁾. 그리고 이러한 수준의 질소와 인의 하천 부하는 결국 농경지에 시용된 비료나 퇴비를 비롯한 농업 비점오염원에 기인하는 것으로 알려져 있다⁴⁾.

이러한 비점오염원은 점오염원과 달리 배출 부하의 원인과 결과가 모호하고 복잡하여 규명이 어렵고, 주위의 여건이나 환경에 의해 민감하게 영향을 받기 때문에 정확한 부하량이나 배출양상을 결정하기가 매우 어렵다⁵⁾. 특히 대규모 유역에서는 농업활동에 의한 오염부하량을 측정하기에 부적합하기 때문에 농업활동 이외에 다른 산업활동이 적은 지역을 통한 소유역에서의 토양과 영양원의 유실을 정량적으로 분석하여 잠재적인 오염문제를 감소시켜야 비점오염원으로부터 수질보호를 효율적으로 실시할 수 있기 때문에⁶⁾, 소규모 유역에 있어서 비점오염원의 부하 실태를 파악하고 이를 효율적으로 관리하고 억제할 수 있는 체계가 갖추어져야 할 것이다.

*연락처 :

Tel: +82-31-29-0206 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: mkkim@rda.go.kr

이미 외국에서는 폭우사상에 따른 농업지대 유역에서 비점오염 부하량을 추정하기 위해 AGNPS, CREAMS, ANSWERS 등과 같은 다양한 수질예측 모형이 개발되어 있으며 그 적용 범위와 기술을 다양하게 넓혀가고 있다^{7,9)}. 이들 모형 중에서 AGNPS 모형은 미국의 Agricultural Research Service와 Soil Conservation Service(SCS) 및 Minnesota Pollution Control Agency에서 농업유역의 비점오염을 추정하고 농업비점오염의 발생을 억제하기 위한 영농 최적관리체계를 구축하기 위한 목적으로 공동 개발한 분포형 매개변수 모형이다. AGNPS 모형은 포장규모 이상의 유역에 적용할 수 있으며 강우사상별로 시험유역에서 수집된 자료를 이용하여 쉽게 모형의 적용이 가능하므로 우리 나라의 농업 유역에서도 이 모형을 이용한 농업비점오염의 관리가 가능할 것이다. 물론 이러한 모형들은 우리 나라와는 다른 지리적 및 농업적 환경에서 개발되었으며, 국내에 적용할 때 먼저 그 가능성이 충분히 검토되어야 하며 필요에 따라서 우리 나라 실정에 맞게 변형된 모형의 개발이 이루어져야 할 것이다. 우리 나라에서도 반월 저수지 유역을 대상으로 AGNPS 모형의 적용 가능성이 검토되었으며¹⁰⁾, 독일에서는 하천 유출수량의 예측 부분을 일부 변형한 AGNPS 모형을 Geographical Information System(GIS)과 연계하여 농업 유역의 비점오염 부하량을 예측하는데 이용 가능한 것으로 나타났다¹¹⁾.

본 연구에서는 소규모 농업 유역을 선정하여 분석유역의 수질 측정치와 일부 변형된 AGNPS 모형을 이용한 예측치를 비교하여 이러한 AGNPS 모형이 우리 나라 농업지대 유역에서 비점오염 부하량을 추정하는데 적용될 수 있는지를 검토하였다.

재료 및 방법

AGNPS 모형의 이론과 기본식

AGNPS 모형은 포장규모 이상의 유역을 대상으로 개발되었으며 유역을 cell이라고 부르는 정방형 격자로 구분하고, 각 격자에 대한 지형, 토양, 토지이용 및 식생, 테라스 등의 농지보전 형태, 비료 사용량, 토양중의 유효 양분함량, COD, 기타 침식량 또는 축산 등의 점오염량 등에 관한 매개변수를 입력하여 직접 유출량을 구하고 토양 유실량을 계산하며 하루 구간으로의 물질 이동량을 추정하여 유역의 출구에서 비점오염량을 결정하게 된다. 결국 AGNPS 모형은 유출량, 침두유량, 유사량, 그리고 총질소 및 총인의 부하량을 추정할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 이를 위해서는 조사 대상 유역에서 지속적으로 모형에 필요한 각 입력 변수에 대해 정확한 자료를 수집하고 정기적인 수질분석 자료들을 확보가 필요하며, 모형과 매개변수들을 수정, 보완해야 한다.

AGNPS 모형에서 하천의 직접유출량은 SCS의 방법에 의해 다음의 식 (1)과 같이 추정된다¹²⁾. 여기서 Q는 직접 유출량(mm), P는 강우량(mm)이고 S는 최대 잠재보유수량(mm)인데 식 (2)와 같이 계산된다. 한편, 유출곡선번호(Runoff Curve Number, CN)는

유역의 토지이용, 토양종류, 수문학적 토양조건 등의 영향을 받는 값으로 0~100의 범위 내에서 산정된다.

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

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{----- (2)}$$

강우사상에서의 침두유량(Peak flow)은 Smith와 Williams의 경험식을 사용하여 다음 식 (3)과 같이 추정하게 되는데^{7,8)}, 이때 Q_p는 침두유량(m³/sec), A는 유역면적(km²), CS는 하천경사(m/km), Q는 유출량(mm), LW는 유역 주연장에 대한 면적비(L²/A)이고 L의 단위는 km이다.

$$Q_p = 3.79 \cdot A^{0.7} \cdot CS^{0.159} \cdot \left(\frac{Q}{25.4}\right)^{0.903A^{0.0004}} \cdot LW^{0.187} \text{----- (3)}$$

강우사상에 대한 경사지의 토사량 추정은 수정된 Universal Soil Loss Equation (USLE)으로 구하며 다음 식 (4)와 같다¹³⁾. 여기서 SL은 토사량(ton), EI는 강우에너지계수(m-Mg/ha-cm), K는 토양침식계수, LS는 경사계수, C는 작물피복계수, P는 토양보전계수, F는 경사 보정인자이다. 이 때 토양침식계수 K는 아래의 식 (5)와 같이 계산된다.

$$SL = EI \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \cdot F \text{----- (4)}$$

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} \cdot (12 - OM) \cdot M^{1.14} + 3.25(S-2) + 2.5(P-3)}{100} \text{----- (5)}$$

여기서 OM은 유기물질함유백분율, P는 투수지수, S는 토양의 구조지수이고 M은 다음의 식 (6)에 의해 구해진다.

$$M = (\%MS + \%VFS)(100 - \%CL) \text{----- (6)}$$

이 때 %CL은 0.002 mm이하의 점토 백분율이며, %MS는 미사 백분율 및 %VFS는 극세사 백분율을 나타낸다. 그리고 토사량은

Table 1. Rainfall, API, and AMC for rainfall events in the Imgo stream watershed

Event No.	Event date	Rainfall mm	API ₅ ¹⁾ mm	AMC ²⁾
1	Jun. 26, 1997	75.0	45.0	II
2	Jul. 6, 1997	59.0	149.0	III
3	Aug. 4, 1997	83.0	9.0	I
4	Sept. 3, 1997	13.0	34.0	I
5	Jun. 15, 1998	15.0	17.5	I
6	Jul. 25, 1998	17.0	30.0	I
7	Aug. 3, 1998	29.5	66.5	III
8	Aug. 8, 1998	35.0	48.0	II

1) API₅ : 5-day Antecedent precipitation index.

2) AMC : Antecedent moisture condition.

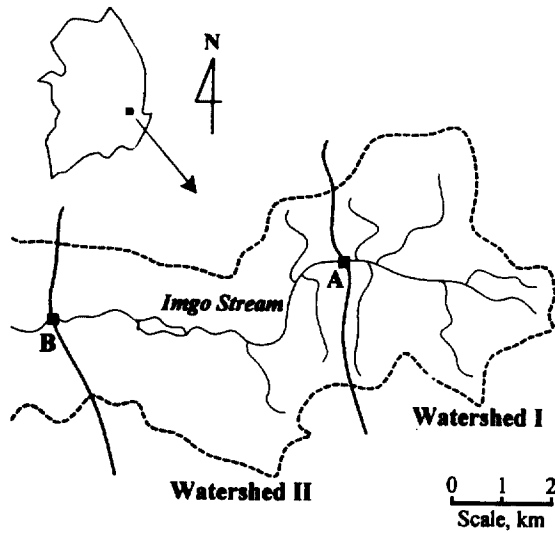


Fig. 1. Map showing monitoring sites of the Imgo stream watershed in Yongcheon, Kyongbuk.

유역의 각 격자마다 계산되며 유사이동 및 퇴적방정식으로는 Foster가 제안한 다음의 식 (7)이 적용된다⁶⁾.

$$Q_{so}(x) = Q_{si} + Q_{ls} \left(\frac{Ax}{L_r} \right) - \int D(x) B dx \dots \dots \dots (7)$$

여기서 $Q_{so}(x)$ 는 유출구 유사량(kg/sec), Q_{si} 는 유입구 유사량(kg/sec), Q_{ls} 는 측면유입 유사량(kg/sec), x 는 구간길이(m), L_r 는 하도길이(m), B 는 하천폭(m), $D(x)$ 는 x 지점의 유사 퇴적량(km/sec-m²)이다.

모형의 계산과정에서 영양원소로는 유역의 질소, 인 및 화학적 산소요구량(COD)을 추정할 수 있으며¹⁴⁾, 총질소(TN)와 총인(TP)의 양은 유출수내에 용존되어 있는 질소(DON)와 인(DOP)의 양과 유사에 부착된 질소(SON)와 인(SOP)의 양으로 다음의 식 (8)과 (9)로 나타낼 수 있다.

$$TN = DON + SON \dots \dots \dots (8)$$

$$TP = DOP + SOP \dots \dots \dots (9)$$

AGNPS 모형의 구동에 필요한 입력변수로는 유역 전체에 해당하는 유역 매개변수와 각 격자에 입력되는 격자 매개변수로 구분된다. 유역 매개변수로는 유역설명, 기본격자의 면적, 유역내의 격자 수, 강우량 및 강우 에너지 등이며 격자 매개변수로는 유출곡선지수, 평균경사, 경사형태, 경사장, 하천경사장, 토양침식, 작물경작, 침식조절, 경사방향 및 지표상태, 시비수준 및 유효성분 잔류량 등에 관한 것으로 총 22개의 입력변수들이 필요하다.

Table 2. Area, slope and land use characteristic of the cells

Cell No.	Area	Slope	Forest	Upland	Paddy	Others
	km ²	%	%	%	%	%
1	3.97	14.10	81	9	5	5
2	1.99	18.29	95	1	4	0
3	3.97	1.90	32	10	55	3
4	3.97	8.40	44	25	20	11
5	2.98	14.90	71	10	15	4
6	1.99	10.59	74	9	12	5
7	3.97	71.30	93	2	5	0
8	3.97	35.20	94	1	5	0
9	1.99	5.56	73	10	14	3
10	3.97	1.19	61	18	16	5
11	3.97	0.58	48	15	32	5
12	3.97	0.87	32	26	35	7
13	3.97	7.15	55	12	25	8
14	3.97	7.16	40	9	41	10
15	1.99	10.02	42	14	40	4
16	2.98	8.20	90	2	8	0
17	3.97	12.88	83	6	11	0
18	3.97	13.89	91	2	5	2
19	3.97	3.02	65	8	21	6
20	3.97	0.55	43	15	36	6
21	3.97	0.71	51	11	35	3
22	2.98	11.24	64	7	23	6

조사 유역 및 매개변수 결정

농업활동이 활발하고 이에 따른 오염 유발 가능성이 높은 경북 영천시 임고면에 위치한 임고천 유역(36° 01' ~36° 04' N, 129° 02' ~129° 09' E)을 조사유역으로 선정하였고 유역도는 그림 1에 나타내었다. 임고천은 낙동강 지천 중의 하나로 그 유역은 약 80%가 산림지대이며, 나머지 중 소규모 주거지를 제외하면 과수원을 포함한 밭이 62%, 논이 38%를 차지하는 전형적인 소규모 농업유역이다. 임고천은 수성동의 이리재(EL. 401.0 m)에서 발원하여 동쪽 방향으로 유하하고 있으며, 농업 외의 다른 산업활동은 전혀 없으며, 상·중류에는 하천변을 따라서 사과를 중심으로 한 과수재배가 집단적으로 이루어지고 있다. 조사 대상 유역의 총면적은 35.8 km²이었으며, 유역 I과 유역 II의 면적은 각각 14.2 및 21.6 km²이었다. 그리고 조사지점 A까지의 유로연장은 3.5 km, A 지점에서 B 지점까지의 유로연장은 7.5 km이었고, 유역 I과 II에서의 평균 하도경사는 각각 2%와 1%이었다.

AGNPS 모형의 모의발생을 위하여 조사유역을 격자망으로 구

Table 3. Data source, data collection, and applied methods for derivation of the input variables and parameters for AGNPS data sets

Input variable and parameter	Method of determination	Data source and collection
Fertilization level	-	Field survey in analysis watershed
Soil texture	Foster et al. ²⁰⁾	Particle range, Density, Full velocity, Equivalent sand diameters
Mannings n for concentrated flow	Young et al. ⁷⁾	Land use, Soil texture, Estimation based on literature
Soil erodibility factor	Schwertmann et al. ²¹⁾	Soil texture and Formation
Average slope length	Young et al. ⁷⁾	Land slope, Topographic map.
Cropping factor	McCool et al. ²²⁾	Storm event, Land use
SCS curve number	SCS ¹²⁾	Land cover, Treatment, Hydrologic condition, Topographic map
Surface condition constant	Young et al. ⁷⁾	Land use, Land map
Aspect	-	Digital elevation model
Maximum runoff coefficient	Young et al. ⁷⁾ Pamuska ²³⁾	Land use, Soil texture, field capacity
Average land slope	-	Digital elevation model
Channel indicator	-	Topographic maps
Field slope length	Young et al. ⁷⁾	Land use, Topographic maps

성하였는데, 동질성을 고려하여 분석유역을 평균 면적 2 km²의 22개 조격자로 구성하였으며, 하천의 수로방향 및 경사형태를 세분화하기 위하여 다시 88개의 세격자로 분할하였는데, 각 조격자의 면적, 경사 및 토지 이용현황은 표 2와 같다. 그리고 유역 형상의 불규칙성을 고려하여 유출 및 수질에 고려되지 않는 13개의 세격자를 반영하였다.

분석유역에서 AGNPS 모형을 구동할 때 적용된 매개변수들은 현장조사와 정밀토양도를 이용하여 표 3에 나타난 방법들에 의해 결정하였다. 유출곡선번호는 토지이용과 관리, 토양종류, 수문학적 토양 조건 등을 고려하여 1차적으로 AGNPS 지침서에 제시된 값을 이용하였으며, 토양의 함수 조건에 따라서 추후 보정하였다. 시비수준은 재배작물 등의 토지이용을 고려하여 무, 저, 중, 고의 수준으로 구분하여 작성한 시비수준도에 따라서 입력하였고, COD 인자는 토지이용을 고려하여 AGNPS 지침서에 제시된 값을 입력하였으며 작물경작 인자 값은 시기적인 변화를 고려해야 하나 본 연구에서는 Kim이 제시한 값을 사용하였다¹⁰⁾. 토성은 USDA 토양분류표에 따랐으며, 지표상태상수는 토지이용을 고려하여 AGNPS 지침서에 제시된 값을 입력하였으며 토양보전인자는 논의 경우는 0.2, 기타의 경우에는 1.0을 입력하였다. Manning

조도계수는 토지이용과 토성을 고려하여 AGNPS 지침서에 제시된 값을 입력하였다. 평균경사, 경사형태계수, 평균경사장, 평균하천경사 및 하천측면경사 등의 값은 수치표고도와 기타 유역의 지형자료 및 AGNPS 사용자지침서를 이용하여 구하였다.

수문 수질 조사

1997년 2월부터 12월까지 유역 I을 조사 대상 유역으로 하여, A 지점에서 하천 유량과 수질 조사를 실시하였고, 1998년 2월부터 10월까지 유역 I+II를 조사 대상 유역으로 하여 B 지점에서 수문 수질 자료를 조사하였다. 강우량은 조사 현지에 우량계를 설치하여 측정하였고, 유량은 유속단면을 3~5개의 소단면으로 구분한 후 유속계(Global Flow Probe, FP101)를 이용하여 유속을 측정하고 단면적을 곱하여 측정하였다. 수질분석용 시료의 채취, 운송 및 보관은 수질분석공정시험법에 따랐으며¹⁵⁾, 시료는 1 L plastic 용기에 채취한 후 실험실로 운반하여 즉시 분석하였고 필요에 따라 산을 첨가하여 pH 2 이하로 한 후 냉장 보관하였다.

총질소는 Kjeldahl법으로¹⁶⁾, 총인산은 질산으로 분해한 후 molybdate blue법으로 발색시켜 spectrophotometer(HP8452A, Hewlett Packard)로 정량 하였고¹⁷⁾, 이온형태의 질소와 인은 시료

Table 4. Statistical parameters of observed and simulated yields for peak flow rate, total N concentration, and total P concentration in rainfall events of the Imgo stream watershed

Watershed	Area	Type	No. of event	Peak flow rate		Total N			Total P		
				Mean	SD	Mean	SD	Sum	Mean	SD	Sum
	km ²			m ³ /sec		mg/L			mg/L		
I	14.22	Observed	4	12.55	8.87	4.03	1.14	16.10	0.09	0.09	0.36
		Simulated	4	13.86	9.86	3.97	1.15	15.89	0.13	0.11	0.54
I + II	35.77	Observed	4	12.33	13.60	19.90	2.61	79.61	0.17	0.25	0.70
		Simulated	4	13.76	15.22	19.52	2.83	78.08	0.14	0.18	0.56

* SD = standard deviation.

를 0.45- μ m nylon membrane filter로 여과한 후 Ion autoanalyzer (FIASStar 5000 system, Foss Tecator, Hoganas, Sweden)로 분석하였다.

모형 예측치의 평가

모형으로 예측된 값의 정확도를 평가하기 위해 Nash 등이 제시한 다음의 식 (10)을 이용하여 모형효율(Model efficiency)을 구하였다¹⁰⁾.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

여기서, x_i 는 모형 예측치, x'_i 는 실제 측정치, \bar{x} 는 모든 강우 사상에 대한 예측치의 평균값이다. $E = 1$ 이면 모형의 예측치와 실제 측정치가 완전히 일치하는 것이고, E 의 값이 1에 가까울수록 실제 측정치와 모형의 예측치가 잘 일치하는 것이다. 만약 $E < 0$ 라면 측정치의 평균치를 이용하는 것보다도 예측의 정밀도가 낮은 경우이다.

결과 및 고찰

모형의 보정

모형에 의한 예측치와 실측치가 가장 잘 일치하도록 모형의 초기 조건과 매개변수를 보정하였는데 본 연구에서는 모형의 유출 관련 매개변수와 영양원소 관련 매개변수 등을 변화시키면서 만족한 결과를 얻을 때까지 모형을 반복적으로 실행하여 최적의 매개변수를 결정하는 단순시행착오법을 이용하였다. 모형의 보정에는 1997년 2월부터 12월까지 유역 I에서 조사된 5개의 강우사상과 1998년 2월부터 10월까지 유역 I+II에서 조사된 3개의 강우

사상을 이용하였는데, 매개변수들 중에서 유출과 상관성이 높은 CN이 분석 결과에 가장 큰 영향을 주었으며, 시비수준, 토양침식인자, 지형경사 및 지형경사형상 등이 모형의 구동에 있어서 민감한 변수이었다.

AGNPS 기본 모형에 제시되어 있는 방법으로 구한 CN 값을 이용하여 하천 유출수량을 예측한 결과 실측치와 비교하여 11-42%(평균 29%)의 오차를 보였으며, 측정된 수문자료를 이용하여 식 (11)로 계산된 CN 값과 모형에 제시되어 있는 방법으로 구한 CN 값 사이에도 차이가 있었다. 결국 이러한 오차는 SCS가 제시한 AMC I 또는 AMC III 조건에서의 CN 값 추정식이 적절하지 못하기 때문인 것으로 판단되었으며, 따라서 AMC I과 AMC III 조건에서의 CN 값을 Kim이 제안한 식 (12)와 (13)을 이용하여 보정하였다¹⁰⁾. 계수 a는 0.1~0.9 사이에서 시행착오법을 거쳐 CN_m 값이 측정된 수문자료를 이용하여 계산한 유출곡선번호인 CN_o 값에 가장 근접하게 되는 0.65로 하였다.

$$CN_o = \frac{25400}{254 + 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1.25QP)^{0.5}} \quad (11)$$

$$CN_{mI} = a(CN_{scsI}) + (1 - a)(CN_{scsII}) \quad (12)$$

$$CN_{mIII} = a(CN_{scsIII}) + (1 - a)(CN_{scsII}) \quad (13)$$

위 식들에서 CN_o 는 AMC II 조건에서 측정된 유출곡선번호, CN_{scs} 는 SCS 방법에 따라 추정된 유출곡선번호, CN_{mI} 과 CN_{mIII} 는 각각 AMC I과 AMC III 조건에 대한 수정된 유출곡선번호이다.

Grunwald 등도 AGNPS 모형에서 유출량을 분석할 때 CN 식을 수정하는 것이 수질을 예측하는데 효과적이라고 하였다¹⁹⁾. 실제로 독일의 Bavaria 지방에 있는 소규모 유역에서 CN 식을 수정한 경우와 수정하지 않은 경우의 실측치와 예측치를 비교한 결과를 보면, 실측치에 대해 수정하지 않은 CN 식을 적용하여 구한 예측치를 비교할 때 모형의 효율은 0.25이었으며, 수정한 CN 식

을 적용하여 구한 예측치를 비교할 때의 모형효율은 0.96 이었다.

침투유량 및 영양원소 유출

1997년과 1998년에 조사된 강우사상 중에서 모형의 보정에 사용된 강우사상을 제외하고 6월에서 9월까지의 다우 기간 중에 발생한 각각 4개씩 총 8개의 강우사상을 선정하여 CN 식을 보정한 AGNPS 모형을 적용하여 실측치와 예측치를 비교하였다. 각 강우사상별로 조사된 강우량, 선행강우지수(API), 선행토양함수조건(AMC)은 표 1에 나타내었다. 강우사상별 강우량은 13~83 mm 범위이었고 선행강우지수 API₅은 9~149 mm이었으며, 선행토양함수조건도 I~III으로 다양하게 분포하였다. 이 때 관측된 침투유량은 0.28~35.42 m³/sec이었고, 총질소와 총인의 농도는 각각 2.49~22.10 mg/L와 0.02~0.56 mg/L이었다(그림 2, 3, 4).

CN 식을 보정한 AGNPS 모형을 이용하여 예측한 침투유량과 실측 침투유량을 그림 2에서 비교하였고 통계자료는 표 4에 나타내었다. 유역 I을 대상으로 한 결과를 보면 실측치는 0.38~20.90 m³/sec, 예측치는 0.36~23.22 m³/sec의 범위였고 평균 침투유량으로 비교하면 실측치에 비해 약 10% 정도 높게 예측되는 것으로 나타났다. 유역 I과 II에 대한 조사 결과에서는 실측치는 0.28~25.42 m³/sec, 예측치는 0.28~28.57 m³/sec의 범위였고 평균 침투유량으로 비교하면 실측치에 비해 약 12% 정도 높게 예측되었다. 그림 2에 나타난 것과 같이 유역의 규모에 상관없이 높게 예측되었으며 전체적으로 강우량이 많아 침투유량 값이 높을수록 예측치가 실측치보다 더욱 높게 나타났다. 예측의 정확도를 나타내는 모형효율은 0.97로 나타나 모형의 예측이 비교적 정확한 것으로 나타났는데(표 5), 이는 적절한 CN 식의 보정을 통하여 가능하였으며 유역의 동질성을 위해 격자망을 비교적 세분화하고 매개변수의 입력에 있어서 유역의 특성을 충분히 고려하였기 때

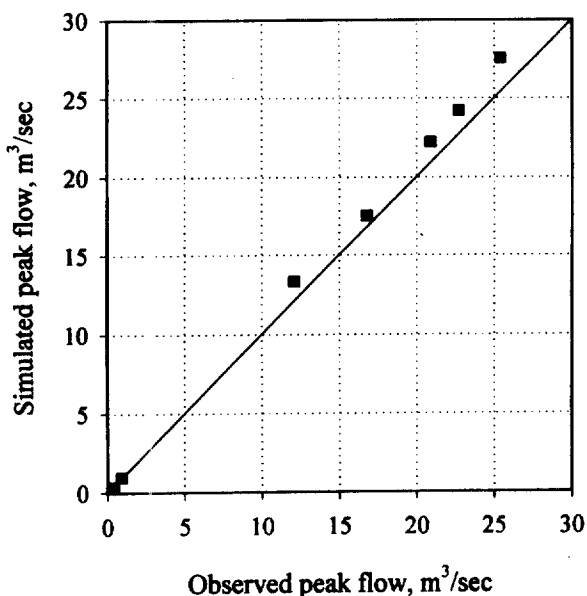


Fig. 2. Observed and simulated peak flow in the Imgo stream watershed.

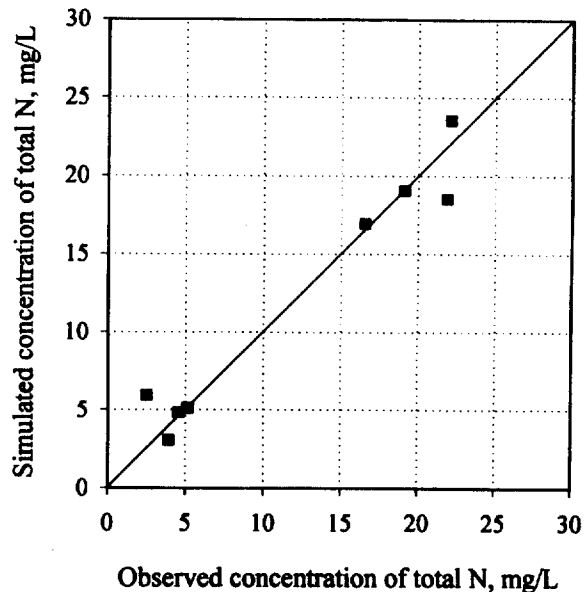


Fig. 3. Observed and simulated yield of total nitrogen concentration in the Imgo stream watershed.

문으로 판단된다. 하지만 하천 유량이 많을수록 높게 예측되는 경향에 대한 원인의 파악과 보정이 필요할 것으로 판단된다. Rode 등의 연구 결과를 보면 침투유량은 유역의 특성에 따라서 예측 결과가 다르다고 하였는데¹¹⁾, 130 km²의 유역에서는 실측치보다 낮게 예측되었고 82 km²의 유역에서는 높게 예측되어 특히 소규모 유역에서 실측치보다 높게 예측되는 것으로 나타났다. 또한 전체 유거수 발생량 중에서 복거수가 차지하는 비중에 따라 실측치에 비하여 침투유량의 예측치는 적어지게 된다. 유역의 지형적 특성에 따라서 지표유거수와 복거수의 발생정도에 차이가 생기게 되고 특히 산림지나 불투수 암반층이 있는 평탄지 등에서 복거수의 발생이 많으며 이들 복거수는 표면 유거수에 비하여 흐름이 느리며 따라서 이러한 요인들을 제대로 고려하지 못함으로써 정확한 예측이 이루어지지 못할 수 있는 것이다. Kim이 반월저수지 유역에서 AGNPS 모형을 적용한 결과를 보면¹⁰⁾, 규모가 다른 두 유역에서 침투유량의 예측치가 실측치에 비하여 19%와 55% 오차를 보인 것으로 나타났으며 CN값의 오차와 함께 강우강도의 변화를 충분히 고려하지 못한 것을 주요 원인으로 추정하였다. AGNPS 모형에서는 침투유량으로부터 유량 계산, 유수량이나 영양염류의 유실을 예측하게 되므로 정확한 침투유량의 예측은 모형의 성공적인 적용 여부를 결정하는 중요한 단계이다.

AGNPS 모형을 이용하여 예측한 총질소의 농도와 실측 농도를 그림 3에서 비교하였고 통계자료는 표 4에 나타내었다. 유역 I의 결과를 보면 실측치는 2.49~5.14 mg/L, 예측치는 2.92~5.11 mg/L의 범위였고, 평균값으로 비교하면 실측치에 비해 약 1.5% 정도 낮게 예측되는 것으로 나타났다. 유역 I+II에 대한 조사 결과에서는 실측치는 16.56~22.10 mg/L, 예측치는 16.95~23.55 mg/L의 범위였고, 평균 농도로 비교하면 실측치에 비해 약 1.9%

Table 5. Coefficient of efficiency for simulations of fourteen rainfall events in the Imgo stream watershed

Peak flow rate	Total N concentration	Total P concentration
0.97	0.93	0.74

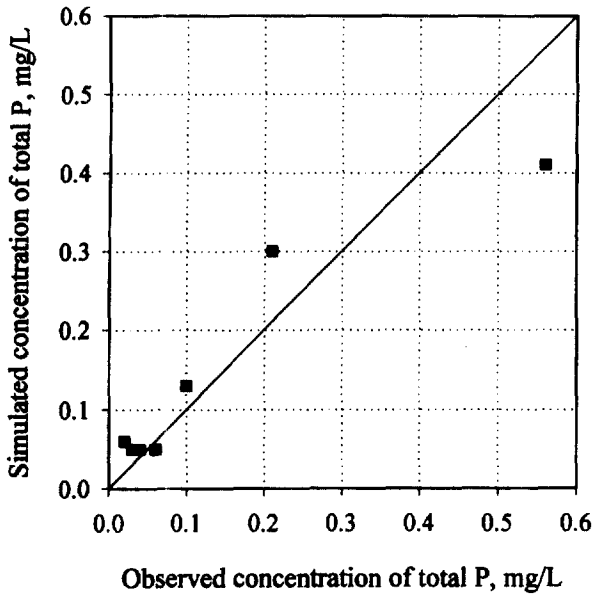


Fig. 4. Observed and simulated yield of total phosphorus concentration in the Imgo stream watershed.

정도 낮게 예측되었다. 8개의 전체 강우사상에 대하여 분석하였을 때 실측치에 대한 예측치의 모형효율은 0.93이었다(표 5). 그림 3에 나타난 것과 같이 유역 규모나 강우량에 상관없이 전체적으로 총질소의 농도는 실측치에 비교적 근접하게 AGNPS 모형에 의해 예측될 수 있는 것으로 나타났다. Kim이 반월 저수지 인근 5개 소규모 유역에서 AGNPS 모형을 적용한 결과를 보면 총질소의 농도 예측에서 8~59%의 오차가 발생하는 것으로 나타났으며¹⁰⁾, 이러한 오차는 점오염원의 영향과 논에서의 질소 순환 기작을 고려하지 않은 것에 기인할 수 있다고 하였다. Rode 등의 적용 결과를 보면 두 개의 유역에서 가용성 질소의 부하량을 예측하였는데¹¹⁾, 각각 17% 및 53%의 오차 범위에서 실측치에 비하여 낮게 예측되었다. AGNPS 모형에서 총질소는 유출수내에 용존되어 있는 질소와 유사에 부착된 질소량의 합으로 구해지는데, 이 중에서 가용성 질소의 이동은 많은 부분이 복거수의 형태로 발생하기 때문에 이를 제대로 고려할 수 없는 AGNPS 모형에서는 가용성 질소를 낮게 예측할 수밖에 없는 것으로 보인다. 본 연구에서의 AGNPS를 이용한 질소부하 예측 결과는 위에서 언급한 다른 유역에서의 연구 결과와 비교해 볼 때 보다 정확하였는데 이는 본 연구의 대상 유역 규모가 작고 또한 점오염원이 거의 없었으며 적절한 모형의 보정을 실시하였기 때문인 것으로 보인다.

AGNPS 모형을 이용하여 예측한 총인의 농도와 실측 농도를

그림 4에서 비교하였고 통계자료는 표 4에 나타내었다. 유역 I의 결과를 보면 실측치는 0.02~0.21 mg/L, 예측치는 0.05~0.30 mg/L의 범위였고, 평균값으로 비교하면 실측치에 비해 약 44% 정도 높게 예측되는 것으로 나타났다. 유역 I+II에 대한 조사 결과에서는 실측치는 0.04~0.56 mg/L, 예측치는 0.05~0.41 mg/L의 범위였고, 평균 농도로 비교하면 실측치에 비해 약 17.6% 정도 낮게 예측되었다. 예측치의 모형효율은 0.74로 침투유량이나 총질소 농도 경우에 비하여 예측의 정확도는 낮았다(표 5). 유역 규모나 강우량의 차이가 예측의 정확도에 미치는 영향에서는 일정한 경향을 나타내지 않았으며 그림 4에 나타난 것과 같이 전체적으로 총인의 농도는 실측치에 근접하게 AGNPS 모형에 의해 예측될 수 있는 것으로 나타났다. Kim이 반월 저수지 인근 5개 소규모 유역에서 AGNPS 모형을 적용한 결과를 보면¹⁰⁾, 총인의 농도 예측에서 30~94%의 오차가 발생하는 것으로 나타났으며 질소의 예측에 비하여 오차가 더욱 크게 나타난 것은 본 연구의 결과와 마찬가지로였다. 이러한 오차는 점오염원의 영향, 시비투여, 그리고 생활 및 축산오수 유입 등의 차이에 의해서 총인이 총질소에 비해 더욱 민감하게 영향을 받기 때문으로 판단되며, 또한 총인의 농도가 총질소 농도에 비하여 매우 낮은 값이므로 질소에 비해 인의 농도를 예측하는 경우에 상대적으로 산술적인 오차가 더욱 크게 나타날 수 있는 것이다. Kim의 결과에 비하여 본 연구에 실측치에 보다 근접한 예측이 가능했는데¹⁰⁾, 이는 주거 인구가 매우 적고 축산활동이 극히 제한적으로 이루어지고 있는 대상유역의 특성 때문으로 판단된다. Rode 등의 결과에서도 두 개의 유역에 적용된 AGNPS 모형의 예측 결과 실측치에 비교하여 5.6%와 97% 정도 인의 농도가 높게 예측되는 것으로 나타났다¹¹⁾. AGNPS 모형에서 총인의 양은 유출수 내에 용존되어 있는 인의 양과 유사에 부착된 인의 양의 합으로 구해지는데, Rode 등은 총인의 부하는 대부분 토사의 유실에 따르며 따라서 토사량의 유실을 정확히 예측할 수 있으면 총인의 부하량 또한 비교적 정확히 예측할 수 있다고 하였으며¹¹⁾, 토사량의 예측에서 특히 강우량이 적은 경우 유거수의 발생이 적을 때 channel flow 때문에 토사 유실량의 예측이 과도하게 이루어지면서 전체 유실량의 예측에 큰 오차가 발생하는 것으로 해석하였다. 따라서 적은 양의 강우사상이 빈번히 발생하는 기후 조건에서 총인의 예측에 큰 오차가 발생할 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 강우량이 적은 강우사상에서 총인의 농도가 실측치에 비하여 높게 예측되었다. 또한 가용성 인의 유실은 결국 표층 토양 중의 가용성 인 함량, 시비 수준, 토양 종류, 토양 광물, pH, 경운, 토성, 토양 비중 등의 조건에 의해 결정된다. 따라서 모형을 이용하여 영양염류의 유실을 보다 정확히 예측하기 위해서는 유역에서 이들 변수들에 대한 정확한 자료의 수집이 관건이 될 것이다.

따라서 외국에서 개발 이용되고 있는 농업비점오염 부하를 예측하는 모형에 대하여 유역의 특성을 고려하여 매개변수들을 적절히 보정하고 취약지나 축산단지 등으로부터의 오염부하량을 정량화 하면 우리 나라의 소규모 농업 유역에서 비점오염부하량의

추정과 관리에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 모형의 구동에는 지리, 지형, 식생, 토지 이용 등과 관련된 많은 입력 변수들이 필요하며 조사 유역에서 이들 변수에 대한 정확한 자료의 구축이 모형의 적용성을 결정하는데 필수적이다. 따라서 이들 자료의 효율적인 수집을 위해 GIS와 연계된 모형을 구축할 필요가 있을 것이다. 현재 농촌진흥청에서는 정밀토양도를 기반으로 하여 우리 나라 전역에 대한 GIS system을 구축하고 있는데, 앞으로 이 자료를 이용하게 되면 보다 정확한 입력변수의 이용이 가능해질 것이며 또한 AGNPS 모형의 적용 범위와 정확도를 더욱 넓혀 갈 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

우리 나라의 농업지대 소유역에서 질소와 인의 부하에 대한 농업비점오염 모형 AGNPS의 적용 가능성을 검토하고자 경북 영천군 임고천 유역에서 조사된 실제 강우사상에 대하여 강우사상별로 실측치와 모형의 예측치를 비교하였다. CN 식에 대한 보정을 거친 모형을 적용한 결과, 침투유량은 강우에 따라 다소 차이는 있었으나 예측치는 모형효율 0.97로 실측치와 거의 일치하였다. 이는 유역의 특성을 고려하여 CN 식을 수정하였고 유역의 동질성을 위해 격자망을 비교적 세분화하였기 때문으로 판단된다. 총질소와 총인 농도의 경우의 실측치와 예측치를 비교하면 모형효율은 각각 0.93과 0.74였으며, 총인의 경우 총질소에 비해 결정계수가 비교적 낮은 것은 토지 이용에 따른 시비 및 생활 및 축산오수 유입 등의 차이에 상대적으로 민감하게 영향을 받았기 때문으로 판단된다.

농업비점오염 부하를 예측하는 모형인 AGNPS는 적용 대상 유역의 특성을 잘 고려하여 매개변수들을 적절히 보정하고 정확한 입력자료를 확보하면 우리 나라 소규모 농업 유역에서도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Chung, J. B., Kim, B. J. and Kim, J. K. (1997) Water pollution in some agricultural areas along Nakdong river, *Kor. J. Environ. Agri.* 16, 187-192.
2. Chung, J. B., Kim, J. K., Kim, B. J. and Kim, M. K. (1998) Water quality of streams in some agricultural areas of different agricultural practices along Nakdong river basin, *Kor. J. Environ. Agri.* 17, 140-144.
3. Chung, J. B., Kim, M. K., Kim, B. K. and Park, W. C. (1999) Nitrogen, phosphorus and organic carbon discharges in the Imgo small agricultural watershed catchment, *Kor. J. Environ. Agri.* 18, 70-76.
4. Chung, J. B., Kim, M. K. and Kim, B. J. (2000) Surface

- runoff loss of nitrogen and phosphorus from peach orchard, *J. Kor. Soc. Agric. Chem. Biotechnol.* 43, 124-129.
5. Tubbs, L. J. and Haith, D. A. (1981) Simulation model for agricultural non-point source pollution, *J. WPCF.* 53, 1425-1433.
6. Foster, G. R., Lane, L. T. and Nowlin, J. D. (1980) A model to estimate sediment yield from field-sized areas : Selection of parameter values, In Knisel, W., ed., *CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*, U.S. Dept. of Agric. Conser. Res. Rep. 26, 2, 193-281.
7. Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D. and Anderson, W. P. (1987) *AGNPS, Agricultural non-point-source pollution model : a watershed analysis tool*, U. S. Dept. of Agric. Res. Serv., Conserv. Res. Report 35, Washington D. C.
8. Knisel, W. G. (1980) *CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*, Conservation Report No. 26, USDA-SEA, Washington, D.C.
9. Bolton, S. M. and Ward, T. J. (1993) Scale effects of sediment-related transport of phosphorus, *Water Sci. Technol.* 28, 473-481.
10. Kim, J. T. (1995) Development and application of a GRASS interface for the agricultural nonpoint source pollution (AGNPS) model, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Suwon, Korea.
11. Rode, M. and Frede, H. G. (1997) Modification of AGNPS for agricultural land and climate conditions in central Germany, *J. Environ. Qual.* 26, 165-172.
12. Soil Conservation Service. (1985) *National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology*, USDA, Washington, D.C.
13. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning, *Agric. Handbook 537*, USDA, SEA.
14. Frere, M. H., Ross, J. D. and Lane, L. J. (1980) The nutrient submodel, In *CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*, USDA Cons. Res. Report 26, 65-85.
15. Dong-Hwa Technology Pub. Co. (1995) Standard test methods for water pollution, Dong-Hwa Technology Pub. Co., Seoul, Korea.
16. Bremner, J. M. and Mulvaney, C. S. (1982) Nitrogen-total, In Page A. L. et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 2.*

- 2nd ed. p. 595-624, Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI. USA.
17. Olsen, S. R. and Sommers, L. E. (1982) Phosphorus, In Page A.L. et al., (ed.) Methods of Soil Analysis, Part 2. 2nd. ed. p. 403-430, Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI. USA.
 18. Nash, J. E. and Sutcliffe, V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles, *J. Hydrol.* 10, 282-290.
 19. Grunwald, S. and Norton, L. D. (1999) An AGNPS-based runoff and sediment yield model for two small watersheds in Germany, *Trans. ASAE.* 42, 1723-1731.
 20. Foster, G. R., Lane, L. J., Nowlin, J. D., Laflen, J. M. and Young, R. A. (1981) Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas, *Trans. ASAE.* 24, 1253-1262.
 21. Schwertmann, U., Vogl, W. and Kainz, M. (1987) Bodenerosion durch Wasser- Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen, Ulmer Verlag, Stuttgart, Germany.
 22. McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. and Meyer, L. D. (1987) Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation, *Trans. ASAE.* 30, 1387-1396.
 23. Panuska, J. C., Moore, I. D. and Kramer, L. A. (1991) Terrain analysis : Integration into the agricultural nonpoint source (AGNPS) pollution model, *J. Soil Water Conserv.* 46, 59-64.