

**비점원오염모델을 이용한
오염총량모의시스템의 개발 및 적용**
**Development and Application of Total Maximum Daily Loads Simulation
System Using Nonpoint Source Pollution Model**

강 문 성* / 박 승 우**
Kang, Moon Seong / Park, Seung Woo

.....
Abstract

The objectives of this study are to develop the total maximum daily loads simulation system, TOLOS that is capable of estimating annual nonpoint source pollution from small watersheds, to monitor the hydrology and water quality of the Balhan HP#6 watershed, and to validate TOLOS with the field data. TOLOS consists of three subsystems: the input data processor based on a geographic information system, the models, and the post processor. Land use pattern at the tested watershed was classified from the Landsat TM data using the artificial neural network model that adopts an error back propagation algorithm. Paddy field components were added to SWAT model to simulate water balance at irrigated paddy blocks. SWAT model parameters were obtained from the GIS data base, and additional parameters calibrated with field data. TOLOS was then tested with ungauged conditions. The simulated runoff was reasonably good as compared with the observed data. And simulated water quality parameters appear to be reasonably comparable to the field data.

Keywords : TMDL, SWAT, Artificial neural networks, RS, GIS

.....

요 지

본 연구에서는 소유역에서의 오염총량을 추정하기 위하여 위성영상 카테고리분류 인공신경망 모형과 지리정보시스템 기반의 오염총량모의시스템 (TOtal maximum daily LOads simulation System, TOLOS)을 개발하였으며, 발안유역의 HP#6 소유역을 시험유역으로 선정하여 유역 수문·수질 모니터링을 수행하였고, 시험유역의 도형 자료를 구축하여 TOLOS의 적용성을 평가하였다. TOLOS의 오염총량추정 모듈인 SWAT 모형은 논에서의 지표배수량을 고려하여 구성하였다. TOLOS을 이용하여 일별 측정 자료인 유출량, 유사량, 그리고 영양물질에 대하여 SWAT 모형의 보정과 검정을 실시하였으며, 그 결과 적용 가능성이 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 오염총량, SWAT, 인공신경망, 위성영상, 지리정보시스템

.....
* 서울대학교 농업생명과학연구원 연구원

Research Associate, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon, Kyonggi 441-744, Korea Email: kms97@phoenix1.snu.ac.kr

** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 교수

Professor, Dept. of agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon, Kyonggi 441-744, Korea

1. 서론

유역의 수계로 유입되는 하·폐수를 배출허용 기준이나 방류수 수질기준에 따라 규제하는 농도규제 중심의 수질관리는 수질오염 물질 배출이 수환경 용량을 초과하는 경우에는 수질개선에 한계가 있다 (환경부, 2000). 특히, 오염자가 정해진 배출기준치를 준수하더라도 동일한 수역에 집중되어 자정능력을 초과하는 오염물을 배출하는 경우에는 공공수역에 설정된 수질기준치를 달성할 수가 없다. 따라서 개별오염원에 대한 규제방식에서 일정한 유역내의 모든 오염원을 관리할 수 있는 유역별 오염총량관리 (total maximum daily loads, TMDL)가 필요하다.

오염총량관리는 수질기준을 만족시키기 위해 수체에서 받아들일 수 있는 수질 항목별 오염부하량의 최대치를 계산하여 삭감량을 산정한 후 유역별로 할당하는 것이다 (Novotny & Olem, 1993; USEPA, 1999; NIER, 2001). 미국에서는 1972년 수질환경보전법 (Clean Water Act)의 303 (d)항에 의거하여 배출수 수질기준을 만족함에도 불구하고, 수질기준을 만족하지 못할 경우 TMDL을 각 주로 하여금 적용하도록 하였다 (USEPA, 1999; NIER, 2001). 미국의 TMDL 프로그램은 농도규제만으로는 수질기준을 달성할 수 없을 경우에 총량을 규제하는 것으로서, 점원오염원과 비점원오염원 그리고 불확실성에 대한 안전율을 고려하고 있다 (Novotny & Olem, 1993; USEPA, 1999)

우리 나라의 오염총량관리는 수질목표달성과 당해연도의 오염배출량의 총량관리를 모두 포함하고 있다 (환경부, 1999). 즉, 기준치 초과지역과 달성지역을 구분하여 기준치 초과지역은 삭감량을 할당하여 삭감가능량 및 삭감량을 고려하고, 기준치 달성지역에 대해서는 허용량을 할당하여 허용가능량 및 허용량을 고려하도록 오염총량관리 목표수질을 설정하고 있다. 우리나라에서의 오염총량관리제도는 상수원 수질 개선을 위하여 1998년 처음으로 도입되었으나, 아직 초기단계라 해도 과언이 아니다.

오염총량은 수질 예측 모델링 기법으로 산정하고 있다. 오염총량산정 모형에는 CREAMS (Knisel, 1980), ANSWERS (Beasley et al., 1980), EPIC (Williams et al., 1984), SWRRB (Williams et al., 1985), GLEAMS (Leonard et al., 1987), HSPF (Johanson et al., 1982; Barnwell & Kittle, 1984),

AGNPS (Young et al., 1987), SWAT (Arnold et al., 1993) 등이 있다. 이들 모형 중에서 농촌유역의 오염총량추정에 사용되는 대표적인 것이 SWAT (soil and water assesment tool) 모형이다. SWAT 모형은 미농무성에서 개발된 것으로서 복합 토지이용상태 및 토양 특성을 갖는 유역에서의 장기간에 걸친 오염총량을 추정하고, 최적관리기법에 따른 관리대안을 제시하는 연속적 모형이다 (Neitsch et al., 2001; Diluzio et al., 2001).

한편, 오염총량산정 모형은 방대한 입력자료를 필요로 하고, 결과를 분석하는데 있어서도 많은 노력이 따른다. 오염총량모형의 적용에 있어서는 자료를 효율적으로 관리할 수 있는 분석 도구로서 지리정보시스템 (geographic information system, GIS)이 이용되고 있다 (김지훈, 1998; 윤춘경, 2001). 또한, 토지피복분류는 유역의 수문·수질 해석 결과의 정도를 좌우하는 중요한 인자이다. 유역의 토지피복상태를 판단하는 방법으로 최근에 이용되고 있는 방법이 위성영상을 이용한 간접적인 방법이다. 위성영상의 이용은 정보의 최신성이나 분류의 자동화 및 결과의 수치화 등의 측면에서 장점을 가지고 있으며, 시간과 비용면에서도 효과적이다 (Jackson et al., 1977; Jensen, 1996).

따라서, 오염총량의 추정 및 평가는 국내의 토지이용 특성을 반영할 수 있는 오염총량예측 모형의 개발과 더불어 방대한 모니터링 자료와 모형의 입력 자료를 효율적으로 처리할 수 있는 GIS와 원격탐사기법의 활용이 요구된다.

본 연구에서는 소유역에서의 오염총량을 효과적으로 해석하기 위해서, 시험유역에 대하여 유역의 수문 및 수질관련 인자의 현장 모니터링을 실시하고, 시험유역의 위성영상 및 수치지형자료를 구축함으로써, 원격탐사기법 및 지리정보시스템과 비점원오염모형을 이용한 오염총량모의시스템을 개발하여 그 적용성을 평가하는데 목적이 있다.

2. 연구방법

2.1 토지피복분류

위성영상을 이용한 토지피복분류는 인공지능경망 이론을 이용한 방법과 최대우도법을 이용하였다. 최대우도법 (maximum likelihood classifier, MLC)은 트레이닝 데이터들의 평균값과 데이터들간의 분산, 공분산 값을 특징 값으로 이용하는 분류법으로 분류 정답율이

매우 높으며, 특히 데이터의 확률밀도 함수가 Gaussian 분포를 가질 경우 가장 우수한 분류방법이다. 그러나 일반적인 데이터들의 확률밀도 함수는 Gaussian 분포가 아닐 경우가 보통이며, 이러한 데이터 분포를 가질 때는 분류 정답율이 낮은 것으로 보고하고 있다 (Paola et al., 1995). 인공지능망을 이용한 위성 영상의 카테고리 분류방법은 1990년 초기에 시작되어 관심을 가지게 된 최근의 분류방법으로 데이터들의 확률밀도 함수를 가정하지 않는 것이 가장 큰 장점이다.

본 연구에서의 위성영상의 카테고리 분류를 위한 인공신경망 모형은 다층 신경망 구조로 구성하였고, 학습 방법은 오역전파 (error back propagation, EBP) 알고리즘을 사용하였다. 또한, 최적화 기법으로 적응형 학습률과 모멘텀을 고려하였다 (강문성 등, 2001). 입력층에서의 화소값을 고려하여 여러 형태의 신경망 모형으로 구성하였으며, 최적 모형으로 Model75모형을 선정하였다. Model75 모형은 입력층이 Landsat-TM 영상의 7개 밴드의 화소값이며, 출력층은 산림, 논, 밭, 주거지 및 물의 5개 카테고리로 구성되었다. 모형의 입출력 자료는 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$Model75; O(c1, c2, c3, c4, c5) = \text{function}(B(1), B(2), B(3), B(4), B(5), B(6), B(7)) \quad (1)$$

여기서, $O(c_i)$ 는 카테고리별 출력값, $B(i)$ 는 i 번째 밴드의 화소값이다.

2.2 오염총량 해석 입력자료 추출

오염총량 추정을 위한 입력자료인 도형자료는 ArcView와 위성영상자료에 의하여 추출된 결과를 바탕으로 오염총량모의시스템의 입력자료 형태로 변환하였다.

도형자료의 기본도는 토지피복도, 토양도, 그리고 수치표고도 (digital elevation model, DEM)로 구성하였다. 위성영상으로부터 인공신경망 모형을 이용하여 토지피복도를 생성하고, 국립지리원에서 구축한 국가지리정보시스템 (national geographic information system, NGIS)과 농업기반공사에서 구축한 농업지리정보시스템 (rural geographic information system, RGIS)으로부터 수치표고도와 토양도를 생성하였다.

기본도는 모의모형이 격자단위이므로 격자 (Grid)로 변환하여 비점오염추정모형의 입력자료로 이용되는 주제도를 추출하였다. 각각의 주제도의 추출은 ArcView

에서 제공하는 지도작성기 (Map composer)와 Avenue 언어로 추가되는 Extension을 이용하였다.

2.3 비점원오염 모형

오염총량추정모형은 SWAT모형을 사용하였다. SWAT 모형은 미농무성에서 개발된 것으로서 복합 토지이용상태 및 토양 특성을 갖는 미계측 유역에서의 장기간에 걸친 오염총량을 추정하고, 최적관리기법에 따른 관리대안을 제시하는 연속적 분포형 매개변수 모형이다. SWAT 모형은 일단위 모의가 가능하며, 유량, 유사량, 그리고 영양물질 등에 대하여 모의할 수 있다. SWAT 모형의 구성과 유출, 유사량, 영양물질 등의 산정 알고리즘은 Neitsch et al. (2001)에서와 같다.

본 연구에서는 SWAT 모형에 대해 우리나라의 토지이용특성을 고려하여 논에서의 지표배수량산정 모듈을 추가하여 유출량을 산정하였고, 이를 토대로 오염총량을 추정하였다. 논에서의 물수지 식은 다음과 같다.

$$ST_t = ST_{t-1} + IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t \quad (2)$$

여기서, ST 는 담수심 (mm), IR 은 관개량 (mm), $RAIN$ 은 강우량 (mm), DR 은 유출량, INF 는 침투량 (mm), ET 는 증발산량 (mm), 그리고 t 는 날짜 (day)이다.

2.4 오염총량모의시스템

본 연구에서는 보다 효율적인 오염총량관리를 위하여 소유역별 오염총량을 추정하기 위해 SWAT 모형을 선정하고, 원격탐사기법과 지리정보시스템을 연계하여 오염총량모의시스템 (TOtal maximum daily LOading simulation System, TOLOS)을 개발하였다.

TOLOS의 전체적인 시스템의 구성도는 그림 1에서와 같다. TOLOS의 오염총량 추정을 위한 모형의 입력자료 구축은 GIS와 RS를 이용하였다. 오염총량 모형의 추정 정도를 좌우하는 중요한자인 토지피복 상태는 위성영상 자료를 이용한 인공신경망 모형 (artificial neural networks for remote sensing image analysis, RSANN)에 의해서 추출하였다. 일별 강우량에 대한 소유역별 오염부하량은 구축된 자료를 이용하여 SWAT 모형에 의해 추정하도록 구성하였다. TOLOS는 전처리시스템, 오염총량해석모듈, 그리고 후처리시스템으로 구성하였다.

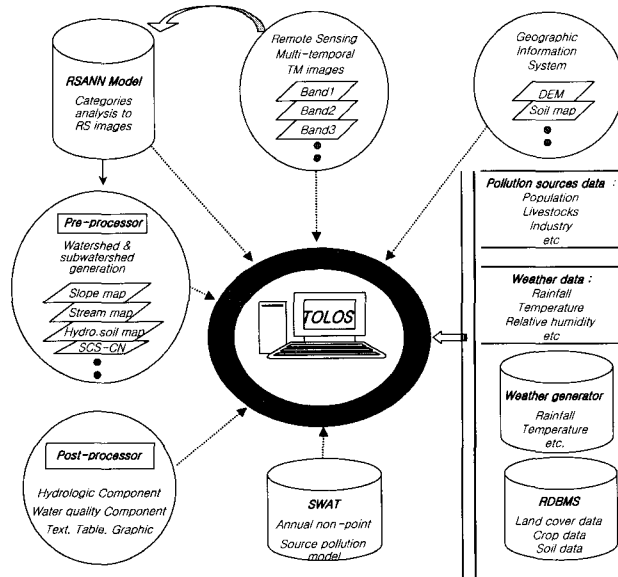


그림 1. TOLOS의 구성 개념도

2.5 모의결과 평가 통계변량

본 연구에서는 모형의 보정을 위한 최적화 기법으로 단순시행착오법을 사용하였고, 목적함수로서 RMSE와 RMAE (root mean absolute error), 그리고 모형의 효율지수를 이용하였다. 매개변수 보정을 위한 RMSE와 RMAE는 각각 다음 식 (3)과 식 (4)와 같이 계산한다.

$$\min RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2} \quad (3)$$

$$\min RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)|}{M_o} \quad (4)$$

여기서, Q_o 는 실측값, Q_f 는 모의값, n 은 자료수이다. 모형의 추정 오차를 평가하기 위한 상대오차 (Relative bias, RB)는 다음 식과 같이 계산한다.

$$RB = \frac{M_f - M_o}{M_o} \quad (5)$$

여기서, RB는 상대오차, M_f 는 추정 유출량의 평균치 (mm), M_o 는 실측 유출량의 평균치 (mm)이다. 모형의 추정 오차를 평가하기 위해서 사용되는 결정

계수 (R2)는 0.0~1.0 범위의 값을 가지며, 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한다. 그러나, 결정계수는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로서 오차의 정도를 나타내지는 못한다. 따라서, 오차의 정도를 나타내기 위해 RMSE와 RMAE 등을 사용하며, RMAE가 RMSE에 비하여 오차의 크기를 더 효율적으로 나타내는 전형적인 지표로 사용된다 (Maidment, 1993).

모형의 효율을 평가하기 위해서 사용한 효율지수는 Nash와 Sutcliffe (1970)에 의해 제안되었으며, 다음 식과 같이 계산한다.

$$EI = (ST - SE) / ST \quad (6)$$

$$ST = \sum_{i=1}^N (M_o - Q_o)^2 \quad (7)$$

$$SE = \sum_{i=1}^N (Q_o - Q_f)^2 \quad (8)$$

여기서, Q_o 는 실측치, M_o 는 실측치의 평균, Q_f 는 모의치이다. 식 (5-5)에서 ST는 실측치의 초기 분산 (initial variation)을 나타내며, SE는 실측치와 모의치의 불일치 (index of disagreement)를 나타낸다.

EI는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치

의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 계산된 EI가 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미한다 (Nash et al., 1970; Singh et al., 1995).

3. 시험유역 및 자료 구축

3.1 시험유역

모형의 적용성을 검토하기 위하여 발안저수지 유역의 HP#6 소유역을 시험유역으로 선정하였다. 발안저수지 유역은 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치하고 있으며, 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다.

시험유역의 유역특성인자는 유역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 하천평균경사, 하천빈도 등을 조사하였다. 발안유역의 HP#6 소유역은 면적이 385 ha, 유로장이 3.1 km, 유역경사가 1.5m/km였고, 형상계수가 1.56으로서 정방형의 소유역이다.

기상자료와 강우자료는 발안지 유역으로부터 약 10km에 위치한 수원기상대의 자료를 이용하였다. 발안유역과 수원측후소 간의 공간적인 차이가 존재하므로 보다 정확한 강수량 자료를 얻기 위해 발안저수지 유역 내에 강수측점을 설치하였으며, 이를 수원측후소 강수량자료와 비교하였다. 이는 자료의 결측시 결측구간에 대한 자료의 보정에 이용하였다.

3.2 수문 자료

HP#6 측정의 하천수위자료는 자기 수위계와 압력식 수위계를 설치하여 수위를 관측하였다. 폭우시에 유속을 측정하여 수위-유량관계를 결정하고, 이로부터 유량 자료를 수집하였다. 압력식 수위계는 Global Water에서 만든 WL-14 Global Water Level Logger를 이용하였다. 하천 수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하기 위해, 수위별로 유량을 조사하였다. 현장 출장을 통해 폭우시 고수위 유량 측정과 평상시 저수위 유량 측정을 측정하여 수위-유량관계를 구하였다.

논의 관개량은 시험유역내의 발안저수지의 시기별 관개량을 조사하였고, 시험유역의 지하수위 변화를 고찰하기 위하여 발안유역에 GW#1, GW#2, GW#3 지점을 선정하여 지하수위를 관측하였다. 시험지구의 지하수위 측정은 G & C Tech.의 Water Level Indicator를 이용하여 주기적으로 수행하였다. 수문자료의 구체적인 값은 농림부 (2000)에서와 같다.

3.3 수질 자료

오염원 자료는 생활계, 축산계, 산업계 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지 답사를 통해서 기초자료를 수집하여 정리하였다. 시험유역의 오염원은 봉담면 면사무소의 자료를 이용하여 인구, 축산, 그리고 산업계를 조사하였다.

수질 표본의 채취는 월 2회를 기준으로 결빙기 후인 3월~11월 기간동안에 정기적으로 실시하였으며, 폭우 시에는 수시로 채수하였다. 수질 표본의 분석은 pH, DO, 수온 등은 현장에서 측정하였으며, 부유물질, TN, TP 등의 영양물질, 기타 수질 항목 등은 수질 표본으로부터 실험실에서 정량분석을 실시하였다.

시험유역에서의 오염부하량을 측정하기 위해 하천 측정에서 SS, TN, TP에 대한 오염부하량 (L)과 유량 (Q)의 회귀식인 L-Q식을 구하였다. 시험유역의 L-Q식은 1996년부터 2000년까지 측정된 자료를 이용하였으며, 특이치는 제외하였다.

지하수의 수질 변화는 GW#1, 2, 3 측정점을 대상으로 1999년부터 2000년까지 2개년간 총 15회에 걸쳐 수질 모니터링을 실시하였다.

강우 중에 함유된 질소와 인의 양은 해당지역의 대기 오염정도에 따라 상이하며 동일지역에서도 시기별 변화를 보이게 되므로 강수 수질 채취는 포장과 약 0.5 km 거리에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 옥상에서 실시하였다. 수질자료의 구체적인 값은 농림부 (2000)에서와 같다.

3.4 도형자료 구축

시험유역의 기본도는 1/5,000 NGIS 및 RGIS 수치지도와 농촌진흥청의 1/25,000 정밀도양도 (1973)를 이용하여 구축하였으며, 토지피복도는 Landsat-TM 영상 분석 결과로부터 추출하였다. 위성영상은 1996년 9월 1일 촬영된 Path 116/Row 34 영상을 사용하였다.

최대우도법과 인공신경망 모형에 의한 카테고리 분류 결과에 대하여 오차행렬에 의한 각각의 방법에 대한 분류성능을 평가한 결과, 카테고리별 최대우도법은 태만오차가 0.0~62.6%, 과실오차가 0.0~39.7%의 범위를 보였으며, 인공신경망 모형에 의한 분류 결과는 각각 0.0~21.7%, 3.4~28.6%의 범위를 보임으로서 인공신경망 모형의 분류 성능이 뛰어난 것으로 나타났다. 전체적인 분류 성능을 나타내는 전체의 분류 정확도 역

표 1. SWAT 모형의 입력변수 범위

Variable	Definition	Min.	Max.
SMFMC	Melt factor for snow on June 21 (mm H ₂ O/°C-day)	0	10
SMFMN	Melt factor for snow on Dec. 21 (mm H ₂ O/°C-day)	0	10
SPCON	Linear parameter for calculating sediment	0	0.01
SPEXP	Exponent parameter for calculating sediment	1	1.5
NPERCO	Nitrate percolation coefficient	0	1
PRERCO	Phosphorus percolation coefficient (m ₃ /Mg)	10	17.5
PHOSKD	Phosphorus soil partitioning coefficient (m ₃ /Mg)	100	200
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1
SLOPE	Average slope steepness (m/m)	0	0.6
SLSUBSN	Average slope length (m)	10	150
CH_COV	Channel cover factor	0	50
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0	1
GWQMN	Threshold depth for water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm H ₂ O)	0	5000
GWREVAP	Groundwater revap coefficient	0.02	0.2
REVAPMN	Threshold depth for water in the shallow aquifer for ravap to the deep aquifer to occur (mm H ₂ O)	0	500
USLE_P	USLE equation support practice factor	0.1	1
USLE_C	USLE C factor for land cover/plant	0.001	0.1
CN	Initial SCS runoff curve number for AMCII	30	100
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer (mm H ₂ O/mm soil)	0.02	0.2

시 인공신경망 모형에 의한 방법이 90%로서 최대우도 법의 82.7%보다 높게 나타났다.

주계도는 기본도로부터 소유역 경계도, 수계망도, 경사방향도, 경사도 등을 구축하였고, 1/25,000 정밀도양 도로부터 수문학적도양군도, 토성, 토양침식성인자도, 작물인자도, 영농보전인자도 등을 구축하였다.

도형자료는 분포형 수질모형의 구동을 위해 벡터 맵 으로부터 격자형 자료인 그리드 (grid) 자료로 변환하였으며, 위성영상의 분해력인 30m×30m의 그리드 자료를 사용하였다.

3.5 SWAT 모형의 매개변수

연간 오염총량을 추정하기 위한 SWAT 모형의 입력자료는 방대하게 구성되어 있다. SWAT 모형의 입력자료는 유역 전반에 걸쳐 적용되는 유역매개변수와 각각의 소유역별로 입력되는 자료 및 각 소유역에 대하여 수문응답단위별로 입력되는 자료로 구성되며, 크게 유역자료, 기상자료, 소유역자료, 하천특성자료, 토양자료, 작물관리자료, 그리고 지하수자료 등으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 SWAT 모형의 입력자료를 기 구축된 기상, 작물, 토양 등의 RDBMS와 연계하여 GIS 도형자료에 의하여 작성하였다. SWAT 모형의 입력자료중에서 모의 결과에 영향을 미치는 수문·수질 매개변수와 그에 따른 최소값과 최대값은 표 1에서와 같다. 제시된 매개변수중 융해인자 (SMFMC, SM-FMN), 유사량 산정 매개변수 (SPCON, SPEXP), 영양물질 산정 계수 (NPERCO, PRERCO) 등은 유역 매개변수이고, 토양증발보상인자 (ESCO), 평균경사 (SLOPE), 평균 유로장 (SLLUBSN)은 수문응답단위인 HRU에 영향을 미치는 매개변수이다. 또한, 하천피복인자 (CH_COV)는 하천추적 매개변수이고, 기저유출인자 (ALPHA_BF)와 지하수 매개변수 (GWQMN, GWREVAP, REVAPMN)은 지하수 유출에 영향을 미치는 인자이며, 유출곡선번호 (CN), 작물경작인자 (USLE_C), 침식조절인자 (USLE_P) 등은 작물 및 영농관련 인자이고, 토층 유효수분량 (SOL_AWC)는 토양관련인자이다.

4. 시스템의 적용

4.1 모형의 보정

SWAT 모형의 보정은 시험유역인 HP#6 소유역에 대하여 1996년~1998년의 자료를 사용하였다. SWAT 모형의 보정을 위한 목적함수는 RMSE와 RMAE를 이용하여 최적 매개변수를 추출하였다. 모형의 보정 순서는 먼저 유출량에 대하여 보정하였고, 유사량, 그리고 영양물질인 총질소 및 총인의 순서로 수행하였다.

1) 유출량

그림 3은 보정기간인 1997년에 대하여 강우량에 따른 유출량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다. 실제 강우량에 대한 모의 유출량의 비로서 나타낸 유출율은 강우량이 880mm로서 적었던 해인 1996년에는 0.56이었고, 강우량이 1,204mm로서 많았던 해인 1997년에는 0.68로서 상대적으로 큰 값을 보였다.

표 2는 통계적인 변량을 이용하여 실측치와 모의치

를 비교하여 평가한 결과를 나타내고 있다. 모형의 보정 자료기간동안의 HP#6 소유역의 실측치는 결측치를 제외한 값으로서, 1996년의 유량 계측일에 해당되는 강우량이 738mm였고, 1997년은 1,204mm였다. 자료기간에 대한 실측 유출량은 강우량이 작은 1996년에 376mm 였으며, 1997년에는 863mm로서 유출율이 각각 0.51, 0.72로 나타났다. 전 자료기간에 대한 유출율은 0.64인 것으로 나타났다.

SWAT에 의한 모의 결과중 실측치의 결측일을 제외한 유출율은 1996년과 1997년에 각각 0.58과 0.68이었고, 전체 자료에 대해서는 0.64의 유출율을 보였다. 모형의 보정에 사용된 결측치를 제외한 전 자료기간에 대하여 상대오차인 RB는 0.18%, RMSE는 2.30mm/day, RMAE는 0.41mm/day, EI는 0.93, 그리고 결정계수는 0.93의 값을 보였다.

2) 유사량

SWAT 모형을 이용한 일별 유사량의 추정엔 RMSE와 RMAE를 목적함수로 하여 경사장, 유역평

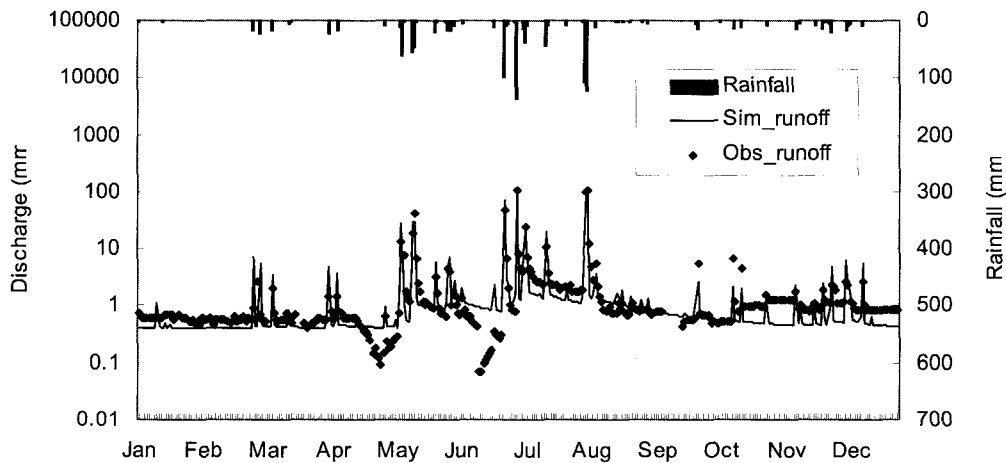


그림 3. 유출량에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과 (1997)

표 2. 유출량의 보정기간에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과

Year	No. of measurements (day)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Ratio of runoff		RB (%)	a	b	EI	R ²
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.					
1996	274	738	376	425	0.510	0.575	0.01	2.29	0.40	0.93	0.93
1997	350	1,204	863	815	0.717	0.677					
Total	624	1,942	1,239	1,239	0.638	0.638					

a-RMSE (mm/day), b-RMAE (mm/day)

표 3. 유사량의 보정 기간에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과

Year	No. of measurements (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
			Obs.	Sim.					
1996	274	362.12	217.93	330.70	36.09	6.37	0.74	0.70	0.77
1997	350	753.67	578.56	753.24					
Total	624	1,115.79	796.49	1,083.94					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

표 4. 영양물질의 보정기간에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과

Item	Year	No. of measurements (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
				Obs.	Sim.					
TN	1996	274	12.76	19.99	11.13	41.45	0.15	0.69	0.73	0.84
	1997	350	24.23	40.32	24.19					
	Total	624	36.99	60.31	35.32					
TP	1996	274	1.61	1.22	1.38	5.69	0.02	0.62	0.42	0.81
	1997	350	2.77	2.62	2.74					
	Total	624	4.38	3.84	4.12					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

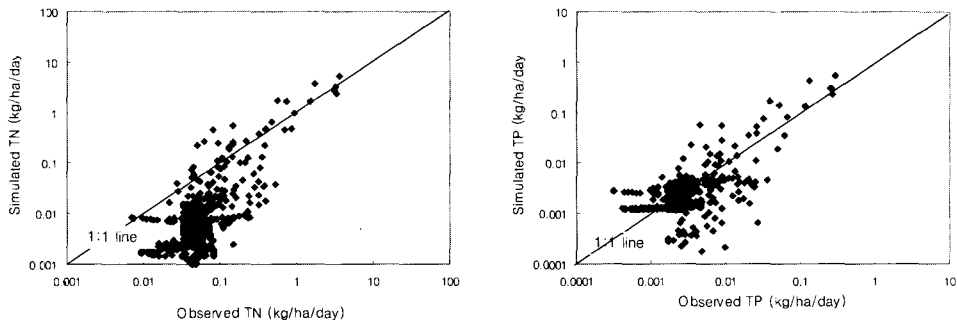


그림 4. 영양물질의 산포도

균경사, Manning의 조도계수, USLE C인자, 그리고 USLE P인자 등으로 보정하였다.

표 3은 최적 매개변수로부터 결측치를 제외한 일별 유사량의 추정 결과를 실측치와 비교하여 나타내고 있다. 표 3에서와 같이, 모형에 의한 연간 총 유사량은 강우량이 작은 해인 1996년에 362 kg/ha/yr, 그리고 강우량이 비교적 많이 내린 1997년에는 754 kg/ha/yr로서 큰 값을 나타냈다. 유량관측 기간에 대한 실측 유사

량은 1996년에 218 kg/ha, 1997년에 579 kg/ha로서 총 자료기간동안 796 kg/ha였으며, 모의 유사량은 1996년에 331 ka/ha, 1997년에 753 kg/ha로서 총 1,084 kg/ha였다. 실측치와 모의치의 통계적 변량은 상대오차가 36%, RMSE가 6.37 kg/ha/day, RMAE가 0.74 kg/ha/day, EI가 0.70, 그리고 결정계수가 0.77으로 나타났다. 모의 유사량은 실측 유사량의 경향을 비교적 잘 나타내고 있으나, 전체적으로 실측 유사

량보다 다소 큰 값을 보였다.

3) 영양물질

영양물질인 총질소와 총인의 실측치와 모의치를 비교하여 평가한 결과를 통계적인 변량을 이용하여 나타내면 표 4에서와 같다. 총질소와 총인은 전체적으로 실측치가 모의치에 비해 큰 값을 보였다. 총질소는 자료기간에 대하여 실측치가 60 kg/ha, 모의치가 35.32 kg/ha로서 상대오차가 41.45%, RMSE가 0.15 kg/ha/day, RMAE가 0.69 kg/ha/day, EI가 0.73, 그리고 결정계수가 0.84로서 비교적 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보였다. 그리고, 총인의 경우에는 실측치와 모의치가 각각 3.84 kg/ha와 4.12 kg/ha로서 유사한 총량을 보였고, RB가 5.69%, EI가 0.42, 그리고 결정계수가 0.81로서 실측치를 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 그림 4는 영양물질인 총질소와 총인의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다.

4.2 모형의 검증

SWAT 모형의 검증은 발안유역의 HP#6 소유역의 1999년과 2000년 자료에 대하여 수행하였다.

1) 유출량

그림 5는 1999년에 대하여 강우량에 따른 유출량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있으며, 유출량의 모의치는 실측치의 경향을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 1999년과 2000년에 대한 유출율은 각각 0.73과 0.76으로서 비슷한 값을 보였다.

표 5는 유출량에 대한 모형의 검증 결과를 나타내고 있다. 1999년의 유량 계측일에 해당되는 강우량은 1,235mm 였고, 2000년은 1,249mm 였다. 자료기간에 대한 실측 유출량은 1999년에 846mm로서 유출율이 0.69였고, 2000년은 784mm로서 유출율이 각각 0.63으로 나타났다. 모형의 모의 결과는 유출율이 1999년과

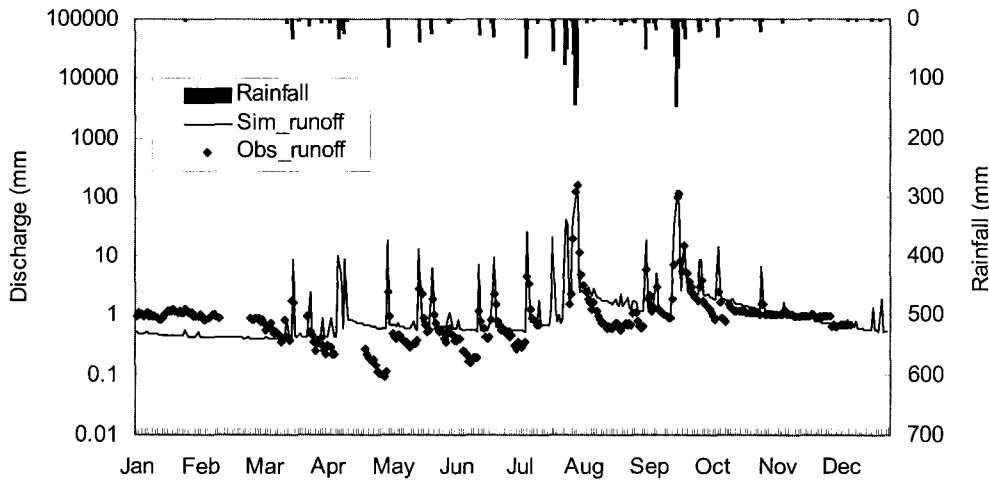


그림 5. 유출량에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과 (1999)

표 5. 유출량의 검증기간에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과

Year	No. of measurements (day)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Ratio of runoff		RB (%)	a	b	EI	R ²
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.					
1999	299	1,235	846	943	0.685	0.764	8.68	6.21	0.51	0.87	0.87
2000	150	1,249	784	828	0.628	0.663					
Total	449	2,484	1,630	1,771	0.656	0.713					

a- RMSE (mm/day), b-RMAE (mm/day)

2000년에 각각 0.76과 0.66으로서 실측치와 유사한 값을 보였다. 전체 자료에 대한 유출율은 실측치가 0.66, 모의치가 0.71이었다. 모형의 검정의 통계적인 변량은 RB가 8.68%, RMSE는 6.21mm/day, RMAE는 0.51mm/day, EI는 0.87, 그리고 결정계수가 0.87의 값을 보임으로서, SWAT 모형에 의해 모의된 유출량은 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

2) 유사량

일별 유사량의 실측치와 모의치에 대한 통계적 변량은 표 6에서와 같다. 모형에 의한 연간 총 유사량은

1999년에 1,025 kg/ha/yr, 그리고 2000년에는 1,099 kg/ha/yr였다. 모형의 검정이 보정에 비하여 유사량이 많은 이유는 모형의 검정에 사용된 1999년과 2000년에 300 mm/day 이상의 폭우가 내리는 등 다른 해에 비하여 비교적 많은 양의 비가 내렸기 때문인 것으로 보인다. 유량관측 기간에 대한 실측 유사량은 1999년에 802 kg/ha, 2000년에 830 kg/ha로서 총 자료기간동안 1,632 kg/ha였으며, 모의 유사량은 1999년에 875 ka/ha, 2000년에 1,020 kg/ha로서 총 1,895 kg/ha였다. 실측치와 모의치의 통계적 변량은 RB가 16.13%,

표 6. 유사량의 검정기간에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과

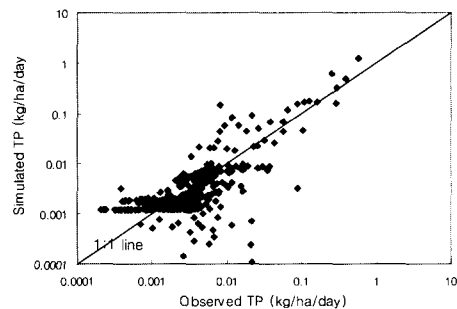
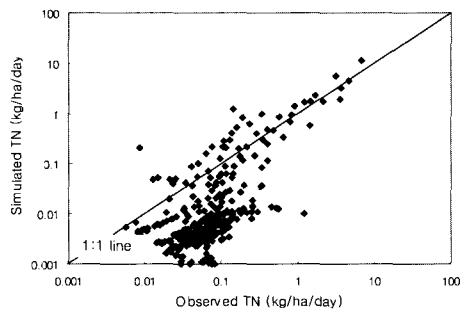
Year	No. of measurements (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
			Sim.	Obs.					
1999	299	1,024.84	802.39	875.18	16.13	10.08	0.59	0.89	0.89
2000	150	1,099.09	829.78	1,020.19					
Total	449	2,122.93	1,632.17	1,895.37					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

표 7. 영양물질의 검정기간에 대한 실측치와 모의치의 비교 결과

Item	Year	No. of measurements (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
				Sim.	Obs.					
TN	1999	299	29.62	36.39	24.38	23.54	0.30	0.66	0.65	0.85
	2000	150	30.34	30.95	27.11					
	Total	449	59.97	67.34	51.49					
TP	1999	299	3.49	2.45	3.00	25.30	0.04	0.67	0.19	0.85
	2000	150	3.58	2.19	2.84					
	Total	449	7.07	4.64	5.84					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)



RMSE가 10.08 kg/ha/day, RMAE가 0.59 kg/ha/day, EI가 0.89, 그리고 결정계수가 0.89로 나타났다. 모형의 검정 결과, 모형의 보정에서와 같이 SWAT 모형에 의한 모의 결과가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

3) 영양물질

SWAT 모형에 의한 총질소와 총인의 검정 결과는 표 7에서와 같다. 총질소는 자료기간에 대하여 실측치가 67 kg/ha, 모의치가 51 kg/ha로서 상대오차가 23.54%, RMSE가 0.30 kg/ha/day, RMAE가 0.66 kg/ha/day, EI가 0.65, 그리고 결정계수가 0.85로서 비교적 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보였다. 또한, 총인의 실측치와 모의치의 총량은 각각 4.64 kg/ha와 5.84 kg/ha로서 유사한 값을 보였고, EI가 0.19, 그리고 결정계수가 0.85인 것으로 나타났다. 그림 6은 영양물질인 총질소와 총인의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 소유역에서의 오염총량을 효과적으로 해석하기 위하여 원격탐사기법 및 지리정보시스템과 오염총량모형을 결합하여, 시험유역인 발안유역의 HP#6 소유역에 대하여 유역의 수문 및 수질관련 인자의 현장 모니터링을 수행하였으며, 시험유역의 위성영상 및 수치지형자료를 구축하여 오염총량모의모형의 보정 및 검정을 실시하여 모형의 적용성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. NGIS 및 RGIS 수치지도와 정밀도양도 등을 이용하여 소유역 수치표고모델, 수계망도, 경사방향도, 토양도 등을 구축하였고, Landsat TM 영상을 대상으로 토지이용도를 작성하였다. 이로부터 유출곡선번호도, 토양유실관련 인자도 등을 추출하였다.
2. 논에서의 지표배수량을 고려하여 SWAT 모형을 1996년과 1997년 자료에 대하여 보정한 결과, RB는 0.01%, RMSE는 2.29mm, RMAE는 0.40mm, EI는 0.93, 그리고 결정계수는 0.93의 값을 보였다. 유사량의 RB는 36%, RMSE는 6.37 kg/ha, RMAE는 0.74 kg/ha, EI가 0.70, 그리고 결정계수는 0.77로 나타났다. 총질소의 RB는 42%, RMSE는 0.15 kg/ha, RMAE는 0.69 kg/ha, EI는 0.73, 그리고 결정계수는 0.84였으며,

총인의 경우에도 EI가 양의 값을 보였으며, 결정계수도 0.81로서 비교적 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보였다.

3. 1999년과 2000년 자료에 대하여 SWAT 모형을 검정한 결과, 유출량의 RB가 8.7%, RMSE는 6.21mm, RMAE는 0.51mm, EI는 0.87, 그리고 결정계수가 0.87의 값을 보였다. 유사량의 RB는 16.1%, RMSE가 10.08 kg/ha, RMAE가 0.59 kg/ha, EI가 0.89, 그리고 결정계수가 0.89로 나타났다. 총질소는 RB가 23.53%, RMSE가 0.30 kg/ha, RMAE가 0.66 kg/ha, EI가 0.65, 그리고 결정계수가 0.85로서 비교적 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보였으며, 총인의 경우에도 EI가 양의 값을 보였고, 결정계수가 0.85로서 모형의 적용성이 있는 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

- 강문성, 박승우 (2001). "인공신경망 이론을 이용한 소유역에서의 장기유출해석" 한국농공학회지, 제43권, 제2호, pp. 69-77.
- 권순국 (1998). "우리 나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안" 대한환경농학회지, 제20권, 제1호, pp. 1497-1510.
- 김지훈, 홍성구, 권순국 (1998). "지리정보시스템을 이용한 SWAT모형의 적용" 한국농공학회지, 제40권, 제4호, pp. 67-76.
- 농림부 (2000). "농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업".
- 윤춘경, 전지홍 (2001). "오염총량제와 BASINS에 의한 유역오염부하 산정 검토" 한국농촌환경연구회·서울대 농업개발연구소, 비점원오염에 관한 한·일 국제SYMPOSIUM, pp. 28-36.
- 환경부 (1999a). "오염총량관리계획수립지침" 환경부고시, 제1999-143호.
- 환경부 (2000). "비점오염원 관리 요령".
- 환경부 (2000). "팔당상수원 비점오염원 최적관리사업".
- Diluzio, M., Srinivasan, R., and Arnold, J. (2001). "ArcView Interface for SWAT2000" Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Jackson, T. J., Ragan, R. M., and Fitch, W. N. (1977). "Test of Landsat-Based Urban Hydrologic Modeling" J. Water Resour. Plann.

- Manage. Div., ASCE 103 (WR1), pp. 141-158.
- Jensen, J. (1996). "Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective" Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.
- Maidment, David R., et al. (1992). "Handbook of Hydrology: Chap. 24 Remote Sensing" McGraw-Hill.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. G., and Williams, J. R. (2001). "Soil and Water Assesment tool, Theoretical Documentation", Version 2000, USDA ARS, Temple, Texax.
- Novotny, V., and Olem, H. (1993). "Water Quality, Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution", Van Nostrand Reinhold, New York.
- Paola, J. D., and Schowengerdt, R. A. (1995). "A Detailed Comparison of Backpropagation Neural Network and Maximum-Likelihood Classifiers for Urban Land Use Classification" IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 33, No. 4, pp: 981-996.
- USEPA (1992). "Compendium of Watershed Models for TMDL Development", EPA 841-R-94-002.
- USEPA (1998). "Report of the Federal Advisory Committee on the Total Maximum Daily Load (TMDL) Program".
- USEPA (1999). "Protocol for Developing Nutrient TMDLs" EPA 841-B-99-007.
- USEPA (2001). "Better Assessment Science Interating Point and Nonpoint Source User's Mannual".
- (논문번호:02-80/접수:2002.09.24/심사완료:2003.01.30)