

농촌소유역의 오염부하 추정을 위한 HSPF 모형의 보정과 검정

Calibration and Validation of HSPF Model to Estimate the Pollutant Loads from Rural Small Watershed

김 상 민* / 박 승 우**

Kim, Sang Min / Park, Seung Woo

Abstract

In this paper, the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) was validated to estimate the pollutant loads from rural small watershed. The study watershed was the HP#6 subwatershed in Balhan reservoir watershed, located southwest from Suwon. The drainage area of HP#6 study watershed was 3.85km². Parameters of the HSPF model related to hydrology and water quality were calibrated from 1996 to 1997, and validated from 1999 to 2000 using observed hydrologic and water quality data. The average simulated runoff ratio for the calibration period was 0.579 and the measured runoff ratio was 0.583. The root mean square error (RMSE) for runoff during the calibration period was 2.1mm and correlation coefficient (R²) was 0.92. Regarding the total nitrogen simulation, the RMSE was 0.086kg/ha/day and R² was 0.81 for the calibration period. In the case of total phosphorus, the RMSE was 0.012kg/ha/day and R² was 0.70 for the calibration period.

keywords : TMDL, HSPF, Water quality modeling, Runoff, Pollutant loads, Nutrients

요 지

본 연구에서는 미국 환경청에서 개발하여 유역 오염총량관리를 위한 수질모형으로 이용되고 있는 HSPF 모형을 선정하여 발안 HP#6 시험유역을 대상으로 모형의 적용성을 분석하였다. HSPF 모형을 이용하여 HP#6 시험유역에서 모형의 보정기간인 1996년부터 1997년까지 유출량을 모의한 결과, RMSE는 2.1mm, RMAE는 0.4mm, R²는 0.92로 모의되었으며, 모형의 검정기간인 1999년부터 2000년의 모의 결과 RMSE는 6.03mm, RMAE는 0.49mm, R²는 0.84로 모의되었다. 총질소에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 0.086kg/ha/day, RMAE는 0.534kg/ha/day, R²는 0.81로 나타났다. 모형의 검정결과 RMSE는 0.326kg/ha/day, RMAE는 0.708kg/ha/day, R²는 0.43으로 분석되었다. 총인에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 0.012 kg/ha/day, RMAE는 0.622kg/ha/day, R²는 0.70으로 모의되었으며, 모형의 검정 결과 RMSE는 0.063kg/ha/day, RMAE는 2.269kg/ha/day, R²는 0.76으로 분석되었다.

핵심용어 : 오염총량관리, HSPF, 수질모형, 유출, 오염부하, 영양물질

1. 서 론

수질모형(water quality model)은 오염물질이 물로 유입되어 하천, 호소, 또는 바다로 운송되는 중 생성,

소멸되는 물리적, 화학적, 생물학적 제반 과정과 상호 작용, 환경과의 관계 등을 수학적으로 추정하기 위한 도구이다. 유역단위 수질모형으로는 ANSWERS (Beasley et al., 1981), SWRRB(Williams et al., 1985),

* 서울대학교 농업생명과학연구원, 선임연구원

Researcher, Ph. D., Research Institute for Agricultural and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea (E-mail : smkim97@plaza1.snu.ac.kr)

** 서울대학교 농공학과 교수

Professor, Dept of Agricultural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

HSPF(Johanson et al., 1984), AGNPS(Young et al., 1986), SWAT(Arnold et al., 1998) 등이 있다.

유역의 오염총량관리를 위한 모형으로 미국 농무성(U.S. Department of Agriculture)에서 개발한 SWAT(Soil and Water Assessment Toll) 모형과 미국 환경청(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 HSPF 모형이 각각의 목적에 따라 이용되고 있다. SWAT 모형은 미계측 지역의 비점원오염을 추정하기 위해 개발된 모형으로 다양한 토양, 토지이용 및 관리조건에 따른 대유역 및 복합토지이용을 갖는 유역에서의 수문, 유사량 및 농업화학적 성분량 등을 장기간 모의할 수 있는 분포형 모형이며 일별로 모의가 가능하다(Arnold et al., 1998). HSPF 모형은 준분포형, 개념적 모형으로 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 적설심, 수분함량, 용설, 증발산, 지하수 충전, 용존산소, 생물학적 산소 요구량, 온도, 농약, 대장균, 유사운송, 토립자 크기, 하천 홍수추적, 저수지 홍수추적, pH, 질소, 인, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤 등을 모의한다(Bicknell et al., 2001).

국내의 경우 유역단위의 수질예측을 위해 SWAT 모형을 적용한 사례가 많이 있으나, HSPF 모형의 경우 적용사례가 많지 않다. SWAT 모형의 국내 적용사례를 살펴보면 김지훈 등(1998)이 북한천 상류지역에 적용하여 그 적용가능성을 검토한 바 있으며, 권명준(2000)은 SWAT 모형과 WASP 모형을 연계 운영하여 일별 수질을 예측한 바 있다. HSPF 모형은 황룡강 유역의 장기유출해석(박남희 등, 2002)과 양평군 흑천 유역의 격자크기에 따른 유출량 분석(Jeon et al., 2002) 등 유출관련 해석에 적용된 바 있고, 낙동강 오염실태 조사 및 장단기 개발 기본 계획 수립(포항산업과학연구원, 1999)과 금강 갑천 유역의 비점오염부하량 추정(임상준, 2001) 등의 오염부하량 추정에 적용된 바 있다.

본 연구에서는 1996년부터 현재까지 수문·수질관측을 실시하고 있는 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역의 HP#6 시험유역을 대상으로 농촌유역의 오염총량 관리를 위해 이용되고 있는 HSPF 모형의 보정과 검정을 통해 모형의 적용성을 검토한다.

2. HSPF 모형의 개요

HSPF 모형은 1960년대 초반 스탠포드 유역 모형(Stanford Watershed Model)으로 처음 개발되었다. 1970년대에는 수질 기작이 추가되었으며, 1970년대 후

반에는 소프트웨어 공학 설계를 이용하여 몇 개의 모형을 연계하여 포트란(Fortran) 프로그램으로 개발하였다. 1980년대에는 전후처리 소프트웨어가 추가되었으며, USGS(U.S. Geological Survey)의 WDM(Watershed Data Management) 시스템이 USGS와 USEPA에 의해 공동으로 개발되었다. 1990년대에는 HSPF 모형의 매개변수를 추정하는 전문가 프로그램인 HSPEXP, 입출력 자료관리 시스템 WDMUtil, 사용자 편의 시스템을 이용하여 HSPF 모형을 손쉽게 구동하도록 개발된 HSPF 호환모형인 WinHSPF, HSPF 모형의 결과를 시각적으로 보여주기 위한 GenScn 모형 등이 개발되었다.

미국 환경청(USEPA)에서 개발된 HSPF 모형은 토지이용 변화, 저수지 운영, 점원 또는 비점원 오염 처리 대안 등에 대한 평가를 위해 이용되고 있다.

HSPF 모형은 WDM을 이용하여 입출력 자료의 전후처리 및 통계분석, 그래픽 지원 등을 제공하고 있다. 계산 시간 간격은 1분부터 1일까지 가능하며, 수분에서 수백년까지 기간에 대한 모의가 가능하며, 현재까지 수 ha 크기의 시험포장 단위에서 160,000km²의 Chesapeake만에 이르기까지 다양한 유역에 적용되었다(USGS, 2000).

HSPF 모형은 투수단위유역에 대한 PERLND 모듈, 불투수단위유역에 대한 IMPLND 모듈, 하천이나 호소 구간에 대한 RCHRES 모듈 등으로 구성되어 있으며 각각의 모듈은 다양한 수문, 수질 성분을 모의하기 위한 서브루틴으로 구성되어 있다.

3. 시험유역

3.1 시험유역의 개요

HSPF 모형의 적용성을 평가하기 위하여 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 시험유역으로 선정하였다. 유역면적 29.79km²의 발안저수지 유역은 농업용 저수지인 기천저수지와 발안저수지를 포함하고 있다. 발안저수지 유역은 토지이용과 저수지 위치를 고려하여 7개의 소유역으로 구분되며, 소유역 구분과 소유역별 수문관측지점의 위치는 그림 1에서 보는 바와 같다. 시험유역을 대상으로 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다. 본 연구에서는 모형의 적용성을 평가하기 위해 발안저수지 상단에 위치한 HP#6 소유역을 대상유역으로 하였으며, 유역 오염총량 수질모의를 위해 유역특성과 오염원을 조사하였다.

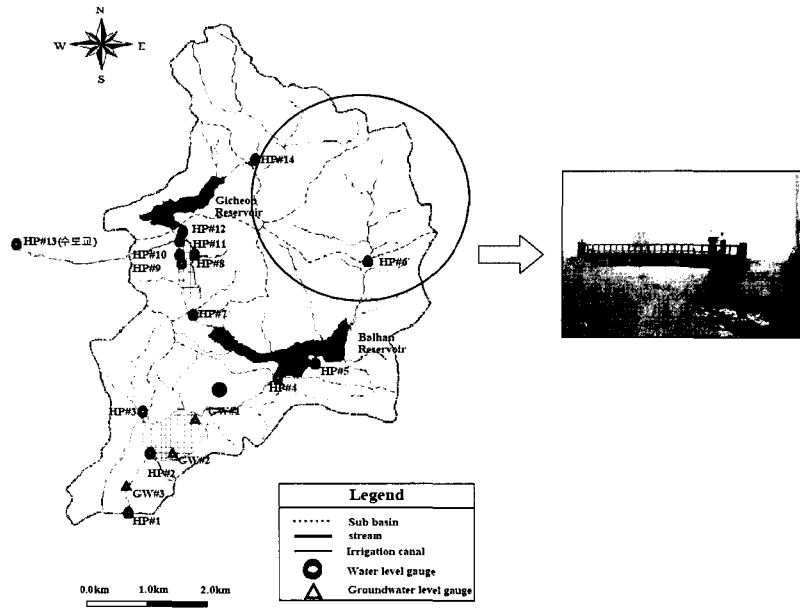


그림 1. 발안저수지 시험유역 개요도

3.2 유역특성, 오염원 조사

본 연구의 시험유역으로 선정된 발안저수지 유역의 HP#6 소유역의 유역면적은 385ha, 유로장은 3.088km, 유역면적을 본류의 유로장으로 나눈 형상계수는 1.562로써 다소 정방형이며, 최대기복량을 유로장으로 나눈 기복량비는 0.0895, 유역경사는 0.0149m/m으로 조사되었다.

오염원 자료는 시험유역의 오염부하량을 예측하기 위하여 시험유역 내의 생활계, 축산계, 산업계 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지답사를 통해서 기초 자료를 수집하여 정리하였다. 시험유역의 오염원은 2002년 봉담면 면사무소의 소장 자료와 현장 방문 조사를 이용하여 인구, 축산, 산업계를 조사한 결과, 유역에 거주하는 인구는 2,237명, 한우 45두, 육우 24두, 유우 615두, 공장 38개소로 조사되었다(김상민, 2004).

3.3 기상, 수문, 수질 조사

기상자료와 강우자료는 발안저수지 유역으로부터 약 10km 떨어진 수원기상대의 자료를 이용하였다. 1996년부터 2002년까지 수원기상대에서 관측한 시간별 강수량, 대형 증발량, 기온, 풍속, 일사량, 이슬점 온도, 운량 등을 구득하고, 이로부터 일최고기온, 일최저기온, 일평균 풍속, 일별 일사량, 일 증발량 등의 일별 자료를 산정하였다.

유역의 HP#6 지점에서의 하천 수위는 1996년부터 1998년 8월까지의 자기 수위계를, 1998년 8월부터는 압력식 수위계를 설치하여 관측하였다. 하천 수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하여 유출량을 산정하였다.

수질 시료의 채취는 월 1~2회 정기적으로 실시하였으며, 폭우시 수시로 수질 시료를 채취하였다. 수질 시료의 분석은 공정시험법에 따라 분석하였다. pH, DO, 수온 등은 현장에서 직접 측정하였으며, 부유물질, TN, TP 및 기타 수질 항목은 실내실험을 통해 분석하였다.

유역에서의 오염부하량을 추정하기 위해 실측자료에 대한 통계적 분석을 통해 부하량을 분석하는 유량-부하량 관계식을 이용하였다. 유량-부하량 관계식은 Gunnerson(1967)에 의해 제안된 방법으로 오염부하량과 유량을 지수함수식으로 나타낸 것으로 유량을 산정한 후 이로부터 유량-부하량 관계를 이용하여 오염부하량을 산정한다. 본 연구에서는 SS, TN, TP 항목에 대한 유량(Q)과 오염부하량(L)의 관계를 산정하였으며, 유량-부하량 관계식을 산정하기 위해 1996년부터 2002년까지 측정된 자료를 이용하였으며 특이치는 제외하였다.

다음의 표 1은 1996년부터 2002년까지 결측기간을 제외한 계측기간 동안의 수문, 수질 측정결과를 보여주고 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 HP#6 소유역의 유출률은 46.8~65.4%의 범위를 보였으며, 총질소(TN) 부하량은 15.83~31.36kg/ha의 범위를 보였다.

표 1. 시험구역의 수문, 수질 자료

연도	계측기간(일)	강수량(mm)	유출량(mm)	유출률(%)	유사량(kg/ha)	총질소(kg/ha)	총인(kg/ha)
1996	273	738	345	46.8	148.63	16.26	1.25
1997	348	1,204	788	65.4	511.52	31.36	2.66
1998	273	983	564	57.4	252.92	24.30	1.98
1999	299	1,238	719	58.0	609.88	26.14	2.33
2000	151	1,250	708	56.7	599.28	23.66	2.23
2001	160	864	475	54.9	349.37	15.83	1.50
2002	298	1,191	657	55.1	543.01	25.14	2.17

4. 모형의 보정과 검증

4.1 유출

모형의 보정은 단순시행착오법과 최적화 기법을 이용하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 모형의 매개변수 보정을 위해 단순시행착오법을 이용하였고, 목적함수로서 RMSE(root mean square error)와 RMAE(relative mean absolute error)를 사용하였다. HSPF 모형의 보정을 위해 HP#6 시험유역을 대상으로 1996년부터 1997년까지의 수문, 수질 자료를 이용하였다. HSPF 모형의 보정은 유출량, 유사량, 총질소, 총인의 순서로 진행하였다.

HSPF 모형의 유출량에 대한 보정은 총유출량과 첨두유출에 대하여 변위가 큰 변수부터 수정하였다. HSPF 모형의 유출에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 LZSN, INFILT, AGWRC, UZSN, DEEPFR, LZETP,

INTFW, IRC 등으로 분석되었으며, 다음의 표 2는 유출에 대한 매개변수의 보정결과를 보여주고 있으며, HSPF 모형에 대한 주요 연구결과에서 이용한 보정결과와 비교하였다.

다음의 그림 2와 그림 3은 자료의 보정기간과 검증기간에 대한 유출량의 모의결과를 실측치와 비교하여 보여주고 있다. 그림 4와 그림 5는 유출에 대한 모형의 보정과 검증 결과를 실측치와 일대일로 비교하여 보여주고 있다.

표 3은 통계적인 변량을 이용하여 유출에 대한 모형의 보정·검정 결과를 정리하여 나타내고 있다. 유출에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 2.1mm/day, RMAE는 0.40mm/day, R²는 0.92로 나타났으며, 모형의 검증결과 RMSE는 6.03mm/day, RMAE는 0.49mm/day, R²는 0.84로 나타났다.

표 2. HSPF 모형의 유출 매개변수 보정결과

매개변수	개요	초기치	보정 결과	Im 등 (2003)	Moore 등 (1988)	Chew 등 (1991)	Laroche 등 (1996)	Engelmann 등 (2002)
LZSN	Lower zone nominal storage (in)	6.0	4.0	4.3-5.8	4.9	5	14.2	5
INFILT	Soil infiltration capacity index (in/hr)	0.16	0.08	0.047-0.075	0.004-0.02	0.05-0.17	0.23	0.04
AGWRC	Groundwater recession coefficient (day ⁻¹)	0.98	0.98	0.88-0.91	0.98	0.98	0.99	0.99
UZSN	Upper zone nominal storage (in)	1.128	0.15	0.35-1.0	0.2	0.01-0.06	0.76	0.7
DEEPFR	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	0.1	0	0.05-0.45	-	-	-	0.18
LZETP	Lower zone ET parameter	0.1	0.2-0.4	0.2-0.7	0.3-0.55	0.2-0.6	0-0.8	0.42
INTFW	Interflow inflow parameter	0.75	1.28	1.0-1.7	1	0.75-1	9.83	0.5
IRC	Interflow recession parameter (day ⁻¹)	0.5	0.5	0.3-0.5	0.6	0.6-0.8	0	0.5

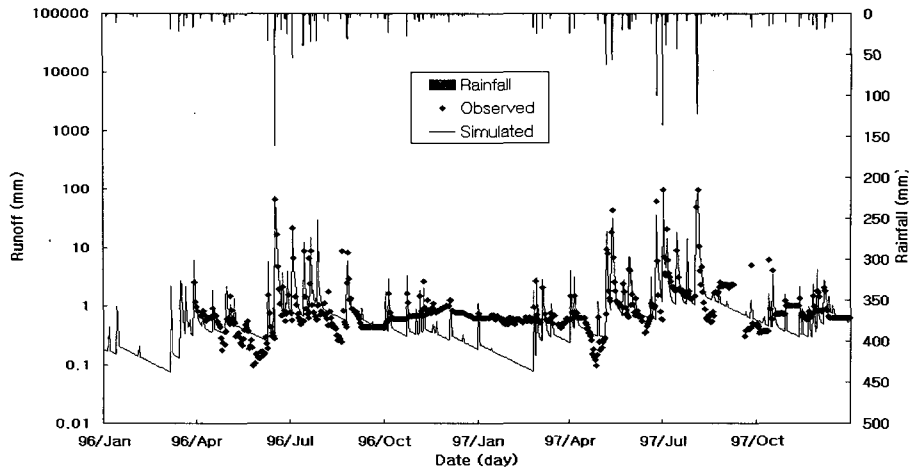


그림 2. 모형의 보정기간에 대한 유출량 비교

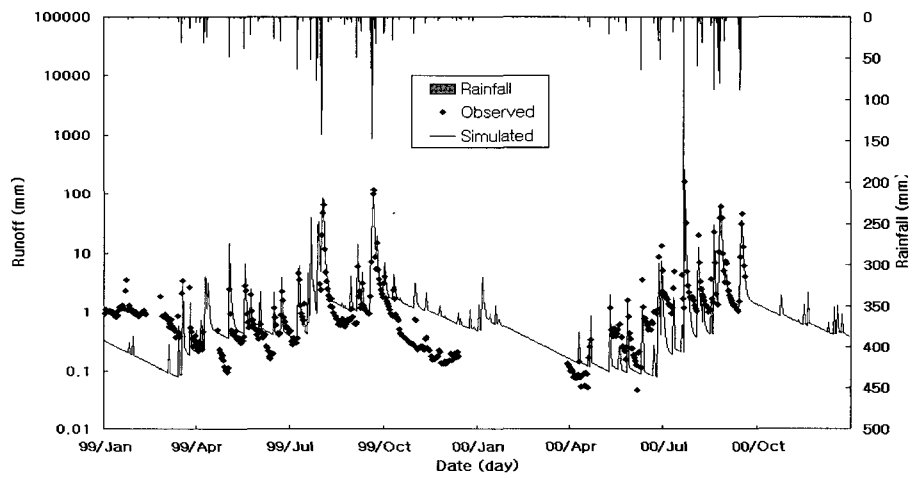


그림 3. 모형의 검정기간에 대한 유출량 비교

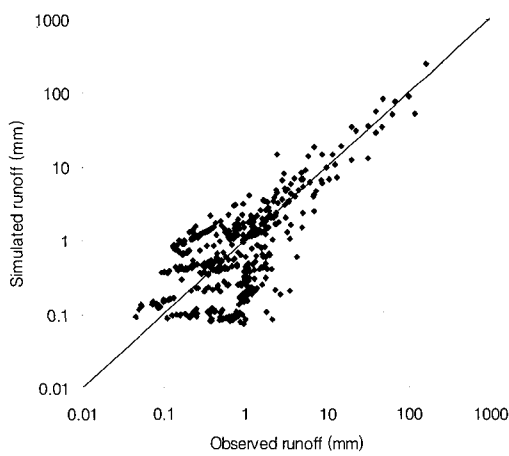


그림 4. 유출 보정결과

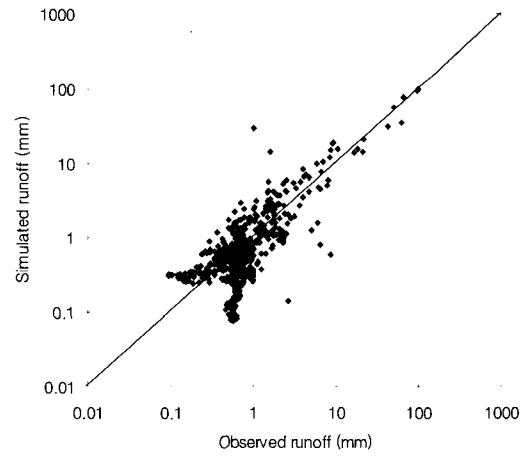


그림 5. 유출 검정결과

4.2 영양물질

영양물질에 대한 모형의 보정과 검정은 총질소와 총인에 대하여 유출과 동일한 자료기간에 대해 실시하였다.

4.2.1 총질소

HSPF 모형의 총질소에 대한 보정은 총질소 부하량에 대하여 변위가 큰 변수부터 수정하였다. HSPF 모형의 총질소 부하량에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 KDNI와 각 층별 KPLNM 등으로 분석되었으며, 다음의 표 4는 총질소에 대한 매개변수의 보정결과를 보여

주고 있으며, HSPF 모형에 대한 Moore 등(1988)의 연구결과에서 이용한 보정결과를 비교하였다.

다음의 그림 6과 그림 7은 총질소에 대한 모형의 보정과 검정 결과를 보여주고 있다. 표 5는 통계적인 변량을 이용하여 총질소에 대한 모형의 보정·검정 결과를 정리하여 나타내고 있다. 총질소에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 0.086kg/ha/day, RMAE는 0.534kg/ha/day, R^2 는 0.81로 나타났으며, 모형의 검정결과 RMSE는 0.326kg/ha/day, RMAE는 0.708kg/ha/day, R^2 는 0.43로 분석되었다.

표 3. HSPF 모형의 유출 보정·검정 결과

구분	연도	강우 (mm)	유출 (mm)		유출률		RMSE (mm/day)	RMAE (mm/day)	R^2
			실측치	모의치	실측치	모의치			
보정	1996	737.5	345.0	370.5	0.468	0.502	2.10	0.40	0.92
	1997	1,204.0	787.8	753.0	0.654	0.625			
	합계	1,941.5	1,132.8	1,123.5	0.583	0.579			
검정	1999	1,238.4	719.0	768.3	0.581	0.620	6.03	0.49	0.84
	2000	1,249.8	708.3	679.4	0.567	0.544			
	합계	2,488.2	1,427.3	1,447.7	0.573	0.582			

표 4. HSPF 모형의 총질소 매개변수 보정결과

매개변수	개요	초기치	보정결과	Moore 등 (1988)
KDNI	Denitrification of NO ₃ (1/day)	0.0/0.0/0.0 ^a	10/5/3 ^a	0.0/0.05/0.002 ^a
KPLNM (지표면)	Plant uptake parameters for surface layer (/day)	0.3-0.5	0.35-0.55	0.0-0.46
KPLNM (상부층)	Plant uptake parameters for upper layer (/day)	0.3-0.5	0.35-0.60	0.0-0.46
KPLNM (하부층)	Plant uptake parameters for lower layer (/day)	0.0-0.2	0.10-0.20	0.0-0.20

a 각각 지표면, 상부층, 하부층

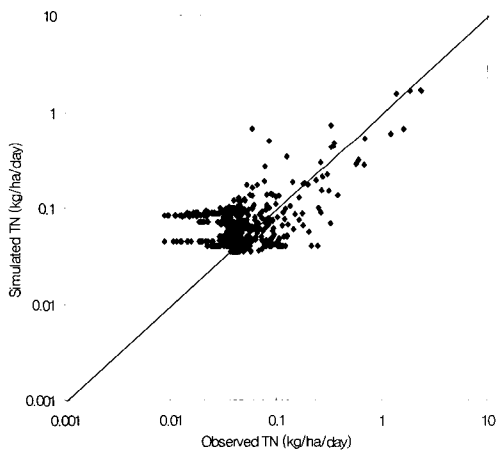


그림 6. 총질소 보정결과

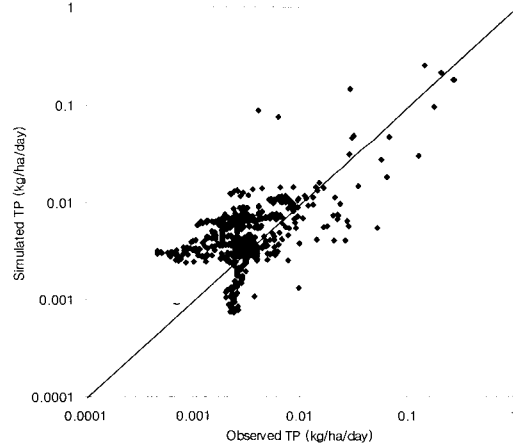


그림 7. 총질소 검정결과

4.2.2 총인

HSPF 모형의 총인에 대한 보정은 총인 부하량에 대하여 변위가 큰 변수부터 수정하였다. HSPF 모형의 총인 부하량에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 KIMP, KMP, XFIX, KI, PUPT 등으로 분석되었으며, 다음의 표 6은 총인에 대한 매개변수의 보정결과를 보여주고 있다.

다음의 그림 8과 그림 9는 총인에 대한 모형의 보정

과 검정 결과를 보여주고 있다. 표 7은 통계적인 변량을 이용하여 총인에 대한 모형의 보정·검정 결과를 정리하여 나타내고 있다. 총인에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 0.012 kg/ha/day, RMAE는 0.622kg/ha/day, R2는 0.70으로 모의되었으며, 모형의 검정결과 RMSE는 0.063kg/ha/day, RMAE는 2.269kg/ha/day, R2는 0.76으로 분석되었다.

표 5. HSPF 모형의 총질소 보정·검정 결과

연도	연도	강우량 (mm)	총질소 부하량(kg/ha)		RMSE (kg/ha/day)	RMAE (kg/ha/day)	R ²
			실측치	모의치			
보정	1996	737.5	16.2	26.0	0.086	0.534	0.81
	1997	1,204.0	31.3	26.0			
	합계	1,941.5	47.5	52.0			
검정	1999	1,238.4	26.1	13.1	0.326	0.708	0.43
	2000	1,249.8	23.6	15.4			
	합계	2,488.2	49.7	28.5			

표 6. HSPF 모형의 총인 보정·검정 결과

매개변수	개요	초기치	보정결과
KIMP	Phosphate immobilization (/day)	8.0/1.5/0.1/0.0 ^a	10.0/2.0/0.1/0.0 ^a
KMP	Organic P mineralization (/day)	0.0009/0.00005/ 0.00006/0.0 ^a	0.0007/0.00003/ 0.00005/0.0 ^a
XFIX	Freundlich isotherm fixed phosphorus	20/12/8/9 ^a	25/15/10/12 ^a
KI	Freundlich isotherm coefficient	5/5/4/4 ^a	5/5/5/6 ^a
PUPT	Monthly plant uptake parameters for Phosphorus	0.01-0.15	0.01-0.15

a 각각 지표면, 상부층, 하부층

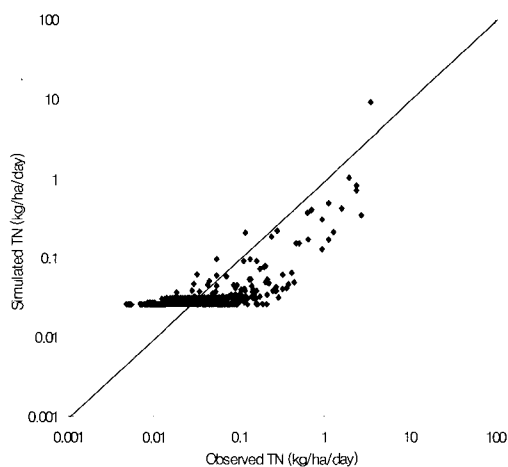


그림 8. 총인 보정결과

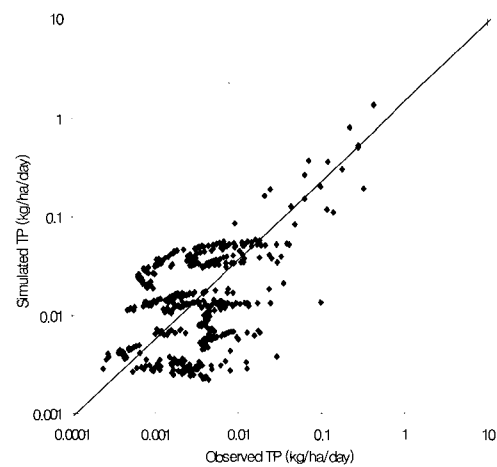


그림 9. 총인 검정결과

표 7. HSPF 모형의 총인 보정·검정 결과

구분	연도	강수량 (mm)	총인 부하량 (kg/ha)		RMSE (kg/ha/day)	RMAE (kg/ha/day)	R ²
			실측치	모의치			
보정	1996	737.5	1.252	1.701	0.0117	0.622	0.70
	1997	1,204.0	2.649	2.727			
	합계	1,941.5	3.901	4.428			
검정	1999	1,238.4	2.324	9.387	0.063	2.269	0.76
	2000	1,249.8	2.229	4.695			
	합계	2,488.2	4.553	14.082			

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 유역 오염총량관리를 위한 수질모형으로 이용되고 있는 HSPF 모형의 적용성을 평가하기 위하여 1996년부터 현재까지 수문·수질관측을 실시하고 있는 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 시험유역으로 선정하여 모형의 보정과 검정을 수행하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- ① 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 시험유역으로 선정하여 1996년부터 수문, 수질 자료를 구축하였다. 시험유역의 지형자료를 구축하기 위하여 1/5000 NGIS 자료, Landsat-5 TM 영상자료, 1/25,000 정밀토양도를 이용하였으며, 이로부터 유역특성인자를 추출하였다. 또한, 오염원 자료의 입력을 위해 시험유역의 오염원을 조사하였다.
- ② 시험유역에 인접한 수원기상대 자료를 이용하여 기상자료를 구축하였으며, 1996년부터 2002년까지 결측기간을 제외한 계측기간 동안의 수문, 수질 측정결과, HP#6 소유역의 유출률은 46.8~65.4%의 범위를 보였으며, 총질소(TN) 부하량은 15.83~31.36kg/ha, 총인(TP) 부하량은 1.25~2.66kg/ha의 범위를 보였다.
- ③ HSPF 모형의 유출에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 LZSN, INFILT, AGWRC, UZSN, DEEPFR, LZETP, INTFW, IRC 등이며, 총질소 부하량에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 KDNI와 각 층별 KPLNM 등으로 분석되었으며, 총인 부하량에 비교적 큰 영향을 주는 인자는 KIMP, KMP, XFIX, K1, PUPPT 등으로 분석되었다.
- ④ HSPF 모형을 이용하여 HP#6 시험유역에서 모형의 보정기간인 1996년부터 1997년까지 유출량을 모의한 결과, RMSE는 2.1mm, RMAE는 0.4mm, R²는 0.92로 모의되었으며, 모형의 검정기간인

1999년부터 2000년의 모의 결과 RMSE는 6.03mm, RMAE는 0.49mm, R²는 0.84로 모의되었다.

- ⑤ 총질소에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 0.086kg/ha/day, RMAE는 0.534kg/ha/day, R²는 0.81로 나타났다. 모형의 검정결과 RMSE는 0.326kg/ha/day, RMAE는 0.708kg/ha/day, R²는 0.43으로 분석되었다.
- ⑥ 총인에 대한 모형의 보정결과 RMSE는 0.012kg/ha/day, RMAE는 0.622kg/ha/day, R²는 0.70으로 모의되었으며, 모형의 검정결과 RMSE는 0.063kg/ha/day, RMAE는 2.269kg/ha/day, R²는 0.76으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호 4-5-1)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

권명준 (2000). 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영, 석사학위논문, 서울대학교.

김상민 (2004). 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 분석. 박사학위논문, 서울대학교.

김지훈, 홍성구, 권순국 (1998). “지리정보시스템을 이용한 SWAT모형의 적용.” 한국농공학회지, 40(4), pp. 67-76.

박남희, 김철 (2002). “황룡강 유역의 장기유출분석을 위한 HSPF 모형 연구.” 2002 한국수자원학회 학술발표회 논문집(1), pp. 170-175.

임상준 (2001). HSPF 모형을 이용한 비점오염부하량

- 산정에 관한 연구 (금강의 갑천을 중심으로), 석사학위 논문, 충남대학교.
- 포항산업과학연구원 (1999). 낙동강 오염실태 조사 및 장단기 개발 기본 계획 수립.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams (1998). "Large Area Hydrologic Modeling and Assessment. Part I: Model Development." *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Beasley, D. B., and L. F. Huggins (1981). ANSWERS Users Manual, EPA 905/9-82-001, U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, IL.
- Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr., T. H. Jobs, and A. S. Donigan, Jr. (2001). Hyrdologic Simulation Program - Fotran (HSPF) User's Manual for Version 12, U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA
- Chew, C. Y., L. W. Moore, and R. H. Smith (1991). "Hydrological Simulation of Tennessee's North Reelfoot Creek Watershed", *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol. 63, No. 10, pp. 10-16.
- Engelmann, C. J. K., A. D. Ward, A. D. Christy, and E. S. Bair (2002). "Application of the BASINS Database and NPSM Model on a Small Ohio Watershed", *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No. 1, pp. 289-300.
- Gunnerson, C. G. (1967). "Stream Flow and Quality in the Columbia River Basin." *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Proceedings of the ASCE, Vol. 93 (SA6).
- Im, S. J., K. M. Brannan, and S. Mostaghimi (2003). Calibration and Validation of the HSPF Model on an Urbanizing Watershed in Virginia, USA, *Water Engineering Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 141-154.
- Jeon, J. H., J. H. Ham, C. G. Yoon, and S. J. Kim (2002). "Effects of DEM Resolution on Hydrological Simulation in BASINS-HSPF Modeling", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(7), pp. 25-35.
- Johanson, R. C., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, and A. S. Donigan (1984). *Hydrologic Simulation Program -Fotran (HSPF): User's Manual*, Release 8, EPA 600/3-84-006, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Laroche, A. M., J. Gallichand, R. Lagace, and A. Pesant (1996). "Simulation Atrazine Transport with HSPF in an Agricultural Watershed", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 622-630.
- Moore, L. W., H. Matheny, T. Tyree, D. Sabatini, and S. J. Klaine (1988). "Agricultural Runoff Modeling in a Small West Tennessee Watershed, *Journal of Water Control Federation*, Vol. 60, No. 2, pp. 242-249.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2000). Water Resources Applications Software: HSPF, <<http://water.usgs.gov/software/hspf.html>>
- Williams, J. R., A. D. Nicks, and J. G. Arnold (1985). "Simulator for Water Resources in Rural Basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 970-986.
- Young, R. A., et al. (1986). Agricultural Nonpoint Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Morris, MN.

(논문번호:04-53/접수:2004.05.20/심사완료:2004.07.14)