



보청A유역 유량 및 영양물질 자동보정을 위한 HSPF-PEST 연계적용

Automatic Calibration of Stream Flow and Nutrients Loads Using HSPF-PEST at the Bochung A Watershed

전지홍 · 최동혁 · 임경재* · 김태동†

Jeon, Ji-Hong · Choi, Donghyuk · Lim, Kyung Jae · Kim, Tae-Dong

ABSTRACT

Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) coupled with PEST which is optimization program was calibrated and validated at Bochung watershed by using monitoring data of water quantities and nutrient loading. Although the calibrated data were limited, model parameters of each land use type were optimized and coefficient of determinations were ranged from 0.94 to 0.99 for runoff, from 0.89 to 1.00 for TN loading, and from 0.92 to 1.00 for TP loading. The optimized hydrological parameters indicated that the forested land could retain rainfall within soil layer with high soil layer depth and infiltration rate compared with other land use type. Hydrological characteristics of paddy rice field are low infiltration rate and coefficient of roughness. The calibrated parameters related to nutrient loading indicated generation of nutrient pollution from agricultural area including upland and paddy rice field higher than other land use type resulting from fertilizer application. Overall PEST program is useful tool to calibrate HSPF automatically without consuming time and efforts.

Keywords: Automatic calibration; HSPF; PEST; pollutant loads; watershed model; optimization

1. 서 론

수질오염총량제도가 도입되고 비점오염원의 중요성이 강조된 이후 수계 수질관리에 있어서 유역 및 수질모델의 중요성이 대두되었다. 모델은 자연현상을 수식화함으로써 유량, 수질 혹은 오염부하량을 예측할 수 있기 때문에 유역의 유량 및 수질을 관리하는데 널리 이용되고 있다 (EPA, 1997). 유역모델은 모델의 모의정도를 기준으로하여 단순모델 (Simple models), 중간모델 (Mid-range models), 상세모델 (Detail models)로 구분할 수 있으며, 모델 입력자료의 가용성과 모델의 결과가 사용되는 정도를 고려해서 모델을 선택하여 적용해야 한다.

우리나라에서도 유역모델이 널리 이용되고 있으며, 상세모델로써는 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)과 Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF)가 많은 연

구자들에게 의해 적용되었다. Lee et al. (2009)는 미세측 유역의 유출곡선지수를 산정하는데 SWAT 모델 이용을 제안한 바 있으며, Jang et al. (2009)은 경안천 유역의 비점원 오염배출 중점관리 대상지역을 결정하는데 SWAT 모델을 이용한 바 있다. Park et al. (2009)은 기후와 식생활력도 변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하는데 SWAT 모델을 사용하였으며, Park et al. (2008)은 우리나라와 같이 경사가 급한 지역에 토양유실량을 보다 정확하게 모의할 수 있는 SWAT ArcView GIS Extension Patch를 적용하여 토양유실량을 산정한 바 있다. HSPF 모델의 적용사례를 살펴보면, Jeon et al. (2006)이 우리나라 유역에서의 유출량과 수질예측시 HSPF의 적용성을 평가한 바 있으며, Hwang (2007)과 Jung (2007)은 각각 낙동강 수계와 한강수계에 HSPF를 적용함으로써 대유역에 대한 HSPF의 적용성을 평가하였으며, 많은 연구자들에 의해 중소규모의 유역에 대한 HSPF 적용성을 입증한 바 있다 (Shin, 2008; Yoon et al., 2007a; 2007b; Jung et al., Jang et al, 2006). 한편, Jeon et al. (2007)은 HSPF를 논을 모의할 수 있도록 수정한 HSPF-Paddy를 개발하여 새만금 유역에 적용하였으며, HSPF-Paddy를 이용하여 토지이용별 물수지분석을 통한 논에서의 유출특성을 분석한 바 있다 (Jeon et al., 2010).

모델 매개변수를 변화시켜 실측치와 예측치의 차이를 최소화

* 안동대학교 환경공학과
 ** 강원대학교 지역건설공학과
 † Corresponding author Tel.: +82-54-820-5895
 Fax: +82-54-820-6187
 E-mail: tdkim@andong.ac.kr

2010년 7월 28일 투고
 2010년 9월 13일 심사완료
 2010년 9월 13일 게재확정

하는 과정을 보정이라고 하며 보정에 의해 결정된 매개변수를 그대로 사용하여 또 다른 실측치와 예측치를 비교하는 과정을 검증이라고 하는데 모델의 적용에 있어 보정과 검증과정은 반드시 선행되어야 하는 과정이다. 그러나 여전히 상세모델인 SWAT과 HSPF는 보정과정에 있어서 많은 시간과 노력을 필요로 할 뿐만 아니라 고도의 전문성을 필요로 하기 때문에 복잡한 유역 모델의 적용에 많은 제한을 주었다. 최근들어서는 모델의 보정 과정에 있어서 최소의 노력과 시간을 투자하여 보다 정확한 모델의 결과를 도출하기 위해 최적화 기법이 개발되었다. SWAT과 HSPF 모델 모두 매개변수 최적화를 위하여 자동보정 모듈 혹은 프로그램이 개발되어 배포되고 있다. 우리나라에서도 최적화에 대한 연구가 수행되었는데, Jeon et al. (2009a)은 SCE-UA 최적화 기법과 L-THIA 모델을 이용하여 낙동강 유역을 대표하는 CN값을 도출한 바 있으며, Kim et al. (2009)는 L-THIA 모델과 SCE-UA기법을 연계적용하여 금호강 유역의 비점오염분포를 공간적으로 파악한 바 있다. Jeon et al. (2009b)은 HSPF-PEST를 연계적용하여 수질학적 관점에서의 수문모델 유출량 보정 방법을 평가한 바 있다. 유역모델 최적화에는 대부분의 연구가 유출량 자동보정에 국한되어 있으며, 수질이나 오염물질 부하량에 있어서는 연구가 제한적이었다.

본 연구는 보청유역을 대상으로하여 HSPF-PEST를 연계 적용하여 유량 및 비점오염부하량을 자동보정함으로써 HSPF 보정에 있어서 PEST 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

연구대상지역은 금강수계의 상류에 위치한 보청A단위유역으로 보청A단위유역 내에 산림·밭·논·도시·우세혼합지역을 각각 선정하여 토지이용별 모델 매개변수를 최적화 하였다. 밭·우세지역은 충청북도 보은군 수한면 거현리(127° 41' 23" E, 36° 25' 25"N)에 위치하고 있으며, 유역내 하천은 덕대산에서 발원한 금강지류인 거현천으로 유역면적은 1.81 km²이고 하천장은 약 1.15 km이다. 산림·우세지역은 충청북도 보은군 삼승명송죽리와 선곡리의 경계(127° 43' 08" E, 36° 26' 07"N)에 위치하고 있으며, 유역내 하천은 금직산과 덕대산에서 발원한 금강지류이고 유역면적은 2.92km²이고 하천장은 약 3.74 km이다. 논·우세지역은 충청북도 보은군 외속리면 향곡리(127° 47' 41" E, 36° 26' 33"N)에 위치하고 있으며 유역내 하천은 삼가천이 있으며 유역면적은 0.73 km²으로 상류는 산림지역이나 산림보다는 논면적이 비교적 넓어 논에서 발생하는 오염물질 유출을 평가할 수 있는 유역특성을 가지고 있다. 도시·우세

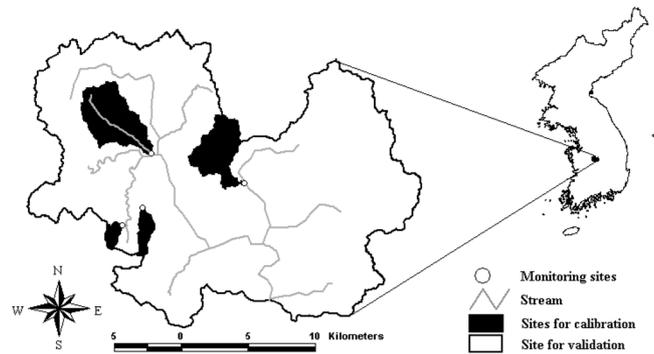


Fig. 1 Study area

지역은 충청북도 보은군 보은읍내 도시유출지점으로 127° 43' 07" E, 36° 28' 45"N에 위치하고 있으며 유역내 하천은 중초천으로 상류는 산림과 농업지역이고 하류는 보은읍이 자리잡고 있어 도심에서 발생하는 오염물질 유출을 평가할 수 있는 유역특성을 보이고 있다 (National Institute of Environmental Research, 2008).

2. PEST 개요

Model-Independent Parameter Optimizer (PEST)는 S.S. Papadopoulos & Associates, Inc.에서 개발된 최적화 패키지 프로그램으로 특정한 모델에 국한되어있지 않고 다양한 유역 및 수질 모델에 적용가능하며 현재 PEST 프로그램 홈페이지 (<http://www.pesthomepage.org/Home.php>)에서 무료로 다운로드 받아서 사용할 수 있다. PEST 프로그램은 기능적으로 크게 parameter definition and recognition, observation definition and recognition, nonlinear estimation and predictive analysis algorithm과 같이 3개의 요소로 구성되어 있다. Parameter definition and recognition은 모델의 입력파일에 최적화될 인자값의 이름을 문자로 표현된 확장자 tpl 파일에서 지정된 최적화될 인자값의 최소값과 최대값을 읽어 들여 최적화될 인자의 명칭과 모델입력파일에서의 위치 등을 인식한 후 최적화기법에 의해 새롭게 생성될 인자값으로 입력파일을 새롭게 생성하는 역할을 한다. Observation definition and recognition은 목적 함수를 계산하기 위하여 실측값을 추출하는 역할을 한다. 일별 실측값은 지정된 WDM 파일의 DNS 번호를 인식하여 WDM 파일에서 직접 추출할 수 있으며 일정한 기간 동안의 실측값은 dates.dat 파일에서 지정한 특정기간범위를 인식하여 계산한다. Nonlinear estimation and predictive analysis algorithm에서는 비선형 최적화 기술중의 하나인 Gauss-Marquardt-Levenberg (GML)기법에 의해 모델의 매개변수를 최적화하는 역할을 한다 (Jeon et al., 2009b).

3. HSPF 구축

Better Assessment Science Integrating Point Nonpoint Source (BASINS)3.0은 미환경부에서 개발된 GIS기반의 유역 통합관리 프로그램으로 SWAT과 HSPF을 지원하고 있다. 본 연구에서는 BASINS를 이용하여 HSPF를 구축하였으며 이를 위해서는 핵심 GIS data인 토지이용도와 수치고도모델 (Digital Elevation Model; DEM), 유역도, 하천도를 필요로 한다. DEM은 환경부에서 제공하는 30 m 간격의 DEM를 사용하였으며, 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 사용하였다. 유역도와 하천도는 건교부에서 제공하는 자료를 이용하였다. BASINS의 Automatic Delineation Tool에 DEM을 사용하여 새로운 소유역도와 하천도, 유역말단지점을 생성하였다. 건교부에서 제공받은 하천도는 Burning option에 의해 새로운 하천도와 소유역도를 생성하는데 사용된다. DEM을 이용하여 새로운 소유역도와 하천도, 하천출구지점이 생성되면 BASINS의 Land Use and Soil Definition Tool에 토지이용도를 사용

하여 소유역도에 토지이용도를 중첩시켜 소유역별 토지이용상태에 대한 정보를 추출한다. 토지이용도가 중첩되면 HSPF의 입력파일 중에 하나인 wdm파일 형태의 기상자료를 생성해야 한다. 기상자료의 경우 시별 강수량, 기온, 풍속, 운량, 이슬점 온도, 일사량 등은 기상청에서 제공받았으며, 증발량과 증발산량은 기상청에서 제공받은 기상자료를 WDMUtility 프로그램으로 계산하여 생성하였다. BASINS의 Model Tool을 이용하여 HSPF의 입력파일을 생성하였다. HSPF입력파일은 보청A단 위유역과 연구대상지역에서 언급한 임야, 논, 밭, 도시 우세지역에 대하여 생성함으로써 총 5개의 HSPF 입력파일을 생성하였다.

4. HSPF 보정 및 검증

각 토지이용별 시범유역에 대하여 강우시 모니터링 자료를 PEST프로그램으로 HSPF 보정이 수행되었다. 각 토지이용별 보정에서의 보정인자는 유역에서의 유출 혹은 오염부하와 관련된 인자만 보정인자로 사용하였다. 모형의 보정은 TP, TN 순으로 진행하였다. HSPF 검증은 보청A단위유역 말단에서 수질 오염총량제를 위하여 수행하고 있는 8일 간격의 모니터링 자료를 활용하였다.

모델 보정을 위한 강우시 모니터링 자료는 국립환경과학원 (National Institute of Environmental Research, 2008)에서 수행한 연구결과를 사용하였는데 논과 도시우세지역의 경우에는 2008년 6월 17일 5시부터 6월 19일 8시까지의 강우사상과 6월 28일 9시부터 6월 30일 6시 강우사상, 7월 19일 9시부터 7월 21일 6시 강우사상을 포함하여 밭과 임야우세지역의 경우에는 2008년 6월 17일 0시부터 6월 17일 20시까지의 강우사상과 8월 13일 14시부터 8월 14일 14시까지의 강우사상, 8월 22일 6시부터 8월 22일 18시까지의 강우사상을 포함한다. 검증에 사용된 모니터링 자료의 경우에는 유출량은 2004년 8월부터 2008년 8월까지 8일 간격으로 측정된 자료이며, TN과 TP 측정자료는 2006년부터 2008년까지의 측정자료를 포함한다.

모델 보정을 위한 PEST 적용에서는 크게 세개의 데이터 형태에 대하여 목적함수를 계산하고 최적화를 수행하며 사용자의 지정에 따라 세개 모두 사용하거나 세개 중 두개 혹은 한개만 사용할 수 있다. 첫 번째 데이터 형태는 사용자가 WDM 파일에 입력한 실측치와 모델에 의해 WDM 파일에 입력되어지는 예측치를 비교하는 것으로 컨트롤파일에서 WDM 파일이름과 각각의 WDM DNS 번호를 지정하게 되면 PEST 프로그램은 지정된 WDM 파일이름과 각각의 WDM DNS번호에 해당되는 Time series를 읽어 비교한다. Fig. 3은 컨트롤파일에서의 실

Table 1 Land use classification for HSPF application (Unit: km²)

	Urban	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Barren	Water	Total	
Bochung watershed	12.7 (3%)	67.1 (17%)	46.3 (12%)	256.6 (64%)	4.9 (1%)	5.0 (1%)	7.9 (2%)	400.6	
Urbanized area	1.56 (11%)	0.03 (1%)	2.23 (16%)	9.78 (70%)	0.09 (1%)	0.00 (0%)	0.02 (1%)	13.92	
Cropped area	Paddy	0.44 (4%)	3.00 (25%)	0.77 (7%)	7.26 (61%)	0.08 (1%)	0.18 (2%)	0.09 (1%)	11.84
	Others	0.10 (3%)	0.34 (12%)	0.42 (15%)	2.06 (71%)	0.00 (0%)	0.00 (0%)	0.00 (0%)	2.92
Forested area	0.02 (2%)	0.26 (17%)	0.14 (9%)	1.10 (72%)	0.00 (0%)	0.00 (0%)	0.00 (0%)	1.52	

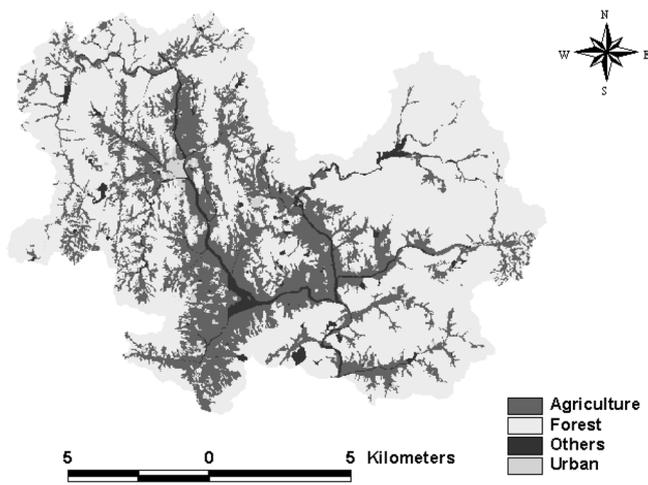


Fig. 2 Land use classification at study area

측치와 예측치 WDM 파일인 Bochung.wdm과 예측치 1001번과 실측치 2001번의 WDM DNS 번호 지정한 예를 나타내고 있다.

두 번째 데이터 형태는 사용자가 실측치와 예측치의 WDM DNS 번호를 지정하고 특정한 기간을 설정하면 그 설정기간 동안의 총량을 계산하여 목적함수를 계산하고 최적화를 수행한다.

```
#####
##### The use of TSPROC as a model post-processor is programmed. #####
#####

START GET_SERIES_WDM
  CONTEXT all
  FILE BOCHUNG.wdm
  DSN 1001
  NEW_SERIES_NAME nflow
END GET_SERIES_WDM

START GET_SERIES_WDM
  CONTEXT all
  FILE BOCHUNG.wdm
  DSN 2001
  NEW_SERIES_NAME oflow
END GET_SERIES_WDM
```

Fig. 3 Example of control file to designate observed and simulated time series

```
#####
##### Volumes are calculated from the modelled flows. #####
#####

START VOLUME_CALCULATION
  CONTEXT all
  SERIES_NAME mflow
  DATE_FILE dates.dat
  NEW_V_TABLE_NAME mv01
  FLOW_TIME_UNITS hours
END VOLUME_CALCULATION
```

(a) Control file

06/17/2008	15:00:00	06/18/2008	00:00:00
06/18/2008	00:00:00	06/19/2008	00:00:00
06/19/2008	00:00:00	06/19/2008	18:00:00
06/28/2008	07:00:00	06/29/2008	00:00:00
06/29/2008	00:00:00	06/30/2008	00:00:00
06/30/2008	00:00:00	06/30/2008	09:00:00
07/19/2008	09:00:00	07/20/2008	00:00:00
07/20/2008	00:00:00	07/21/2008	00:00:00
07/21/2008	00:00:00	07/21/2008	07:00:00

(b) Dates.dat file

Fig. 4 Example of control file to designate period of calculating volume

```
#####
##### Exceedence times for various flows of the modelled time series are
##### next calculated. #####
#####

START EXCEEDENCE_TIME
  CONTEXT all
  SERIES_NAME mflow
  EXCEEDENCE_TIME_UNITS days
  NEW_E_TABLE_NAME mtime
  FLOW 4.8
  FLOW 11.7
  FLOW 17.2
  FLOW 23.2
  FLOW 29.2
  FLOW 38.2
  FLOW 47.0
  FLOW 54.5
  FLOW 63.0
  FLOW 69.2
  FLOW 79.5
END EXCEEDENCE_TIME
```

Fig. 5 Example of control file to designate exceedence time

컨트롤파일에서 총량을 계산할 기간이 입력된 파일을 지정한 다. Fig. 4는 컨트롤파일에서 dates.dat를 지정하고, dates.dat에서 총량을 계산할 구간을 설정한 예를 보여주고 있다.

마지막 세 번째 데이터 형태는 사용자가 지정한 값에 대한 실측치와 예측치의 발생초과일수를 계산하여 이에 대하여 최적화를 수행한다. 총 입력할 수 있는 데이터의 개수는 30개이며 그 적용 예는 Fig. 5와 같다.

통상적으로 첫 번째 데이터 형태는 time series를 직접적으로 비교하는 것이기 때문에 실측치가 최소 일별로 연속성을 가진 수문 혹은 수질자료에 적합하며, 일별 유출량 실측자료가 존재하며 일별 유출량에 대한 보정이 필요할 경우 사용된다. 두 번째 데이터 형태는 특정구간에 대하여 총량을 계산하는 것이기 때문에 유출량 보정에는 월별로 구간을 지정함으로써 월별 유출량 보정에 사용할 수 있으며, 실측자료가 불연속성 자료일 때, 실측된 구간을 설정하여 적용할 수 있다. 세 번째 자료형태는 통상적으로 일별 유출량자료의 유황에 대한 보정을 수행할 때 사용된다. 따라서, 일반적으로 실측치가 일별 유출량 자료일때에는 세 개 데이터 모두 사용하여 유출량을 보정할 수 있으며, 일별 유출량 보다는 월별 혹은 계절별, 연별 물수지 분석이 주요한 목적이라면 두 번째 데이터 형태만을 이용하여 모델을 보정할 수 있다. 세개 데이터 형태 중 모델 사용자의 목

Table 2 Calibrated HSPF parameters and description

Parameter		Description
Water budget	LZSN (mm)	lower zone nominal storage
	INFILT (mm/hr)	index of the infiltration capacity of the soil
	AGWRC (1/day)	the basic groundwater recession rate
	UZSN (mm)	upper zone nominal storage
	NSUR	Manning's for the overland flow plane
	IRC (1/day)	the interflow recession parameter
TN/TP	ACCUM (g/ha/day)	the rate of accumulation of selected pollution
	SQOLIM (g/ha)	the maximum storage of selected pollution

```
FWAT-PARM2
*** < PLS> FOREST LZSN INFILT LRSUR SLSUR FVARY AGWRC
*** x - x (in) (in/hr) (ft) (1/in) (1/day)
11 17 .50000000 $ LZSN $ $ INFILT$ 150. 0.6509 0. $AGWRC$
21 27 .50000000 $ LZSN $ $ INFILT$ 150. 0.6727 0. $AGWRC$
31 33 .50000000 $ LZSN $ $ INFILT$ 150. 0.8636 0. $AGWRC$
37 37 .50000000 $ LZSN $ $ INFILT$ 150. 0.8636 0. $AGWRC$
41 43 .50000000 $ LZSN $ $ INFILT$ 150. 0.7391 0. $AGWRC$
47 47 .50000000 $ LZSN $ $ INFILT$ 150. 0.7391 0. $AGWRC$
```

Fig. 6 Example of tpl file

```
lzn log factor 7.0 2.0 15.0 lzn 1.0 0.0
infil none factor 0.2 0.001 0.5 infilt 1.0 0.0
agwrc log factor 0.9 0.85 0.99 agwrc 1.0 0.0
uzsn log factor 1.0 0.05 2.0 uzsn 1.0 0.0
intfw log factor 5.0 1.0 10.0 intfw 1.0 0.0
irc log factor 0.5 0.3 0.85 irc 1.0 0.0
```

Fig. 7 Example of initpar1.dat to designate minimum and maximum range of calibrated parameters

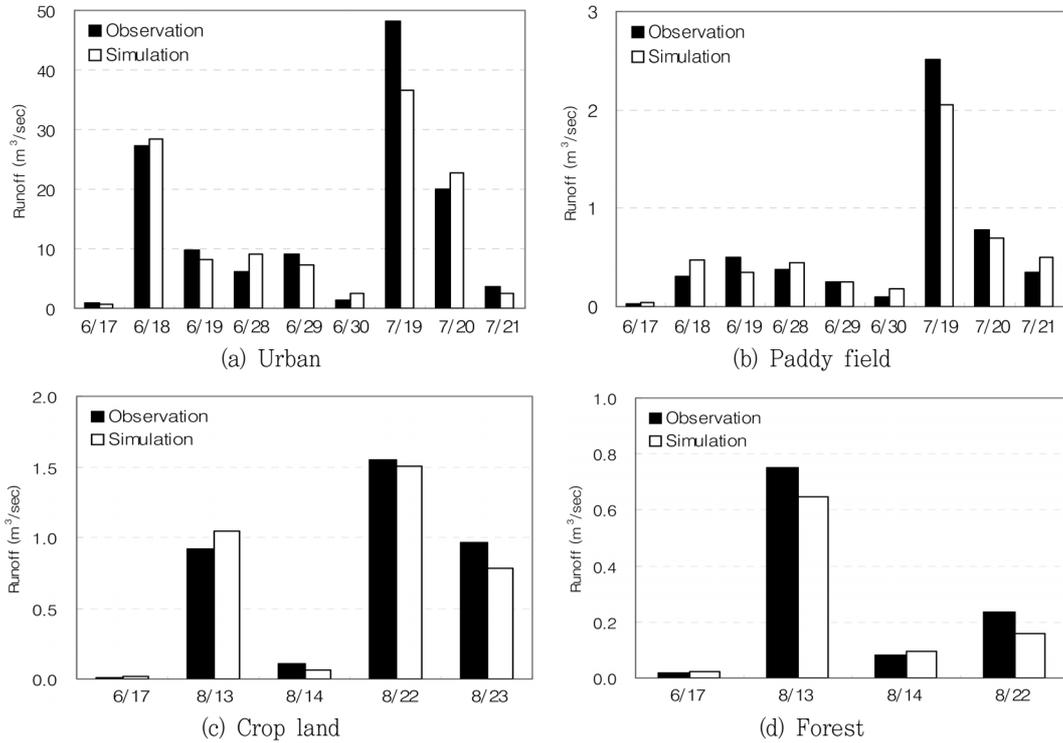


Fig. 8 Comparison of simulated and observed runoff from land use types

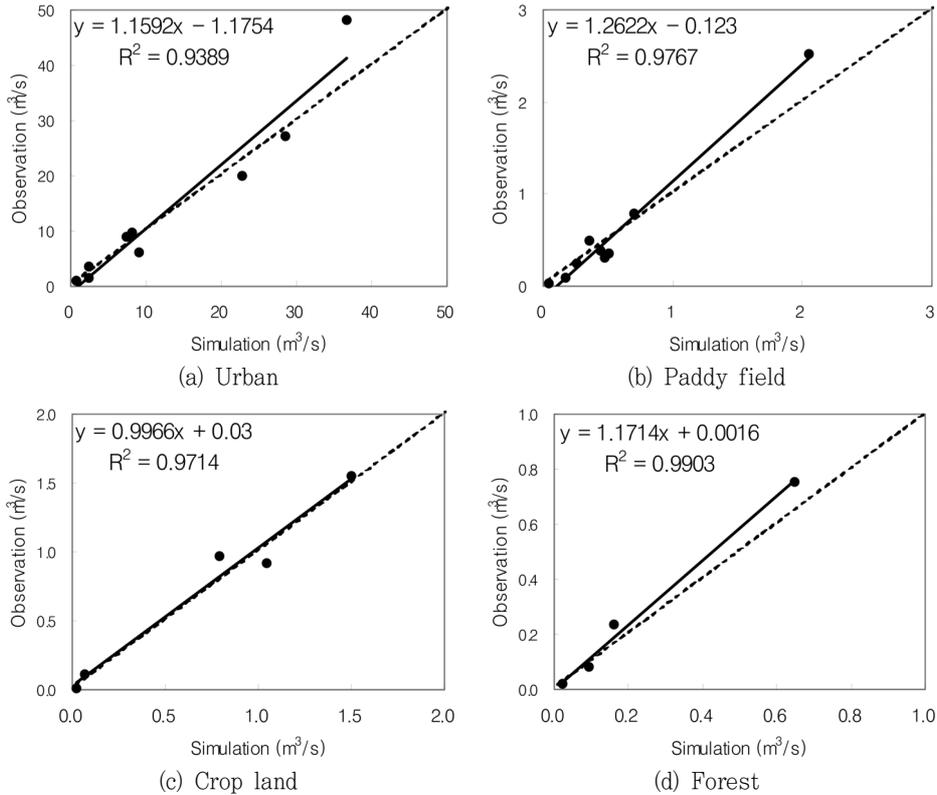


Fig. 9 1:1 Scatter plots between simulated and observed runoff for calibration

적에 따라 선택하여 적용할 수 있다는 HSPF-PEST 연계적용의 장점을 가지고 있다. 본 연구에서와 같이 강우시 특정한 기간에 대해서 실측이 이루어졌기 때문에 두 번째 데이터 형태인 실측이 이루어진 기간의 총량에 대한 보정방법 사용되었다.

본 연구에서 보정된 수문 및 영양물질 부하관련 보정인자는 Table 2와 같다. 보정인자가 결정되면, HSPF 컨트롤파일인 uci파일과 별도로 tpl 파일에서 보정인자의 명칭과 위치를 Fig. 6과 같이 지정해 준다. Initpar1.dat에서 Fig. 7과 같이 각 보정인자별 최소 최대 구간값을 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 검·보정결과

가. 일별 유출량

일별유출량에 대한 강우시 보정결과는 Fig. 8과 9와 같다. 비교적 모델의 예측치가 실측치를 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 분산도 (Fig. 9)에서는 1:1선에 밀집해 있는 것으로 나타났다. 논보다는 도시우세지역에서, 산림보다는 밭우세지역에서 유출율이 높은 것으로 나타났으며, 이는 도시지역의 불투수층 면적과 산림지역의 식생에 의한 차단과 식물에 의한 증발산량이 더 높기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 10은 보청A단위유역 말단에서 예측된 유출량과 8일 단위로 측정된 유출량을 검증의 단계에서 비교한 그래프이며, 예측치는 실측치의 유출경향을 잘 따르는 것으로 나타났다.

나. TN

일별 TN 부하량에 대한 강우시 보정결과는 Fig. 11과 12과 같다. 비교적 모델의 예측치가 실측치를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 논보다는 도시우세지역에서, 산림보다는 밭우세지역에서 질소 부하량이 높은 것으로 나타났다. Fig. 13은 TN 부하량에 대한 검증 결과를 나타내고 있는데, 실측치에 대한 몇몇

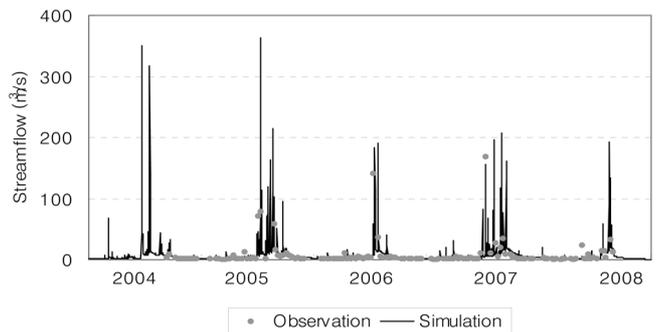


Fig. 10 Validation result of stream flow at Bochung watershed.

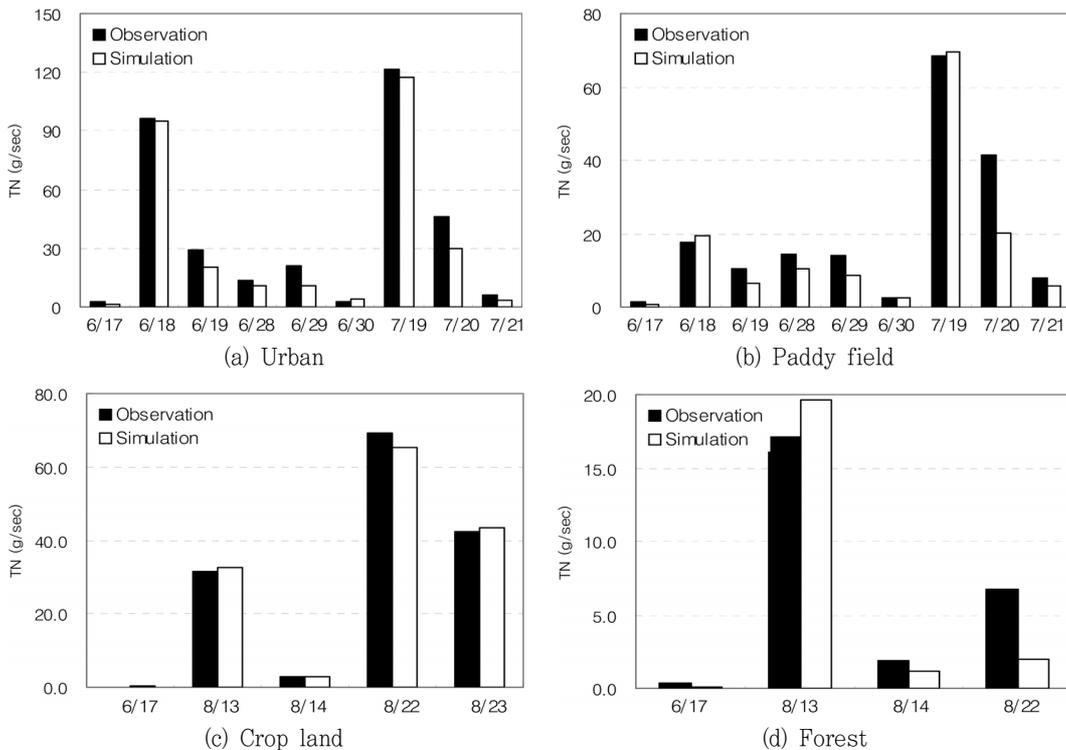


Fig. 11. Comparison of simulated and observed TN loading from land use types

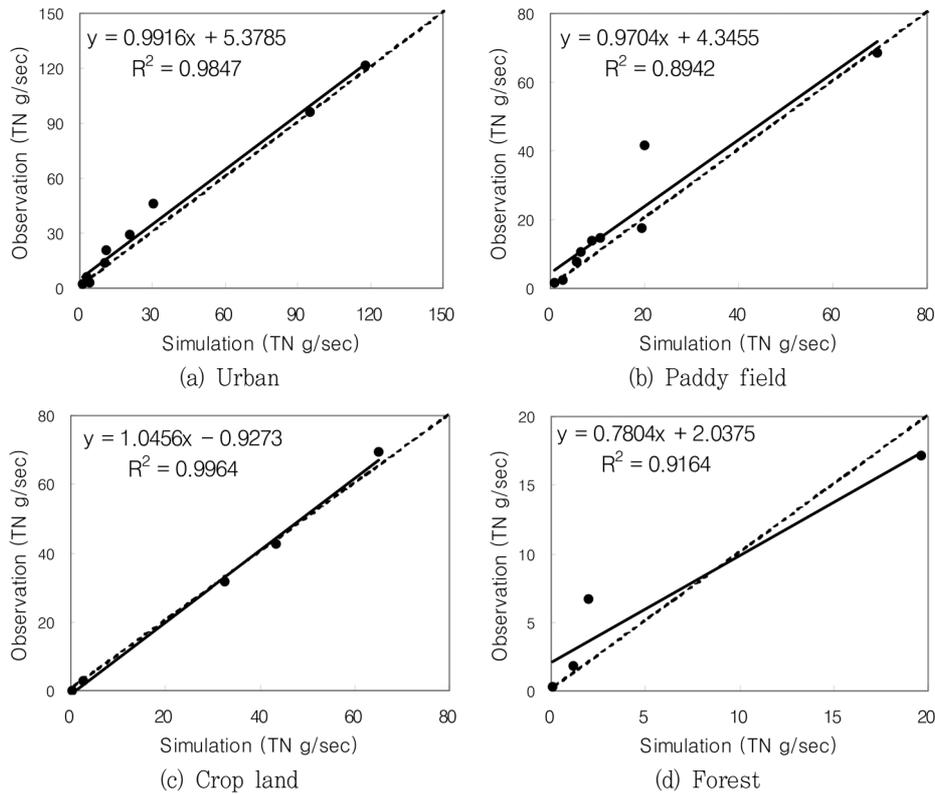


Fig. 12 1:1 Scatter plot between simulated and observed TN loading for calibration

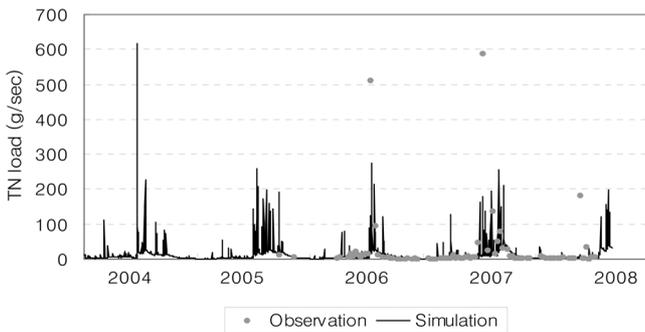


Fig. 13 Validation result of TN loading at Bochung watershed.

의 극값을 나타내는데 이는 수질오염총량제에서 측정하는 8일 간격의 모니터링 자료는 일평균이 아닌 특정한 시간의 1회 측정자료이기 때문인 것으로 판단된다. 3개 정도의 극값을 제외하고는 TN 부하의 유출경향을 잘 나타내는 것으로 나타났다.

다. TP

일별 TP 부하량에 대한 강우시 보정결과는 Fig. 14와 15와 같다. 비교적 모델의 예측치가 실측치를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 도시와 논우세지역에서의 인 부하는 질소 부하와는 다

른 양상을 나타내었는데, 도시보다는 논우세지역에서 인 부하가 오히려 높게 나타나는 것으로 나타났다. 이는 불투수층 비율이 상대적으로 높고 인유입이 제한되어 있는 도시우세지역의 경우 인 부하량이 낮게 나타났으며 반대로 일정량의 시비가 이루어지는 논인 경우에는 강우시 인부하량이 상대적으로 높게 나타난 결과로 판단된다. 밭우세지역은 산림우세지역보다 인 부하량이 높은 것으로 나타났다. Fig. 16은 TP 부하량에 대한 검증 결과를 나타내고 있는데, 실측치에 대한 몇몇의 극값을 제외하고는 TP 부하의 유출경향을 잘 나타내는 것으로 나타났다.

2. 보정 매개변수

본 연구에서 보정된 유량 및 부하량 관련 매개변수 결과는 Table 3과 같다. 불투수층인 도시지역을 제외하고는 상하 토양층에서의 저류깊이는 산림이 가장 높으며 다음이 밭, 논 순으로 나타났다. 토양으로의 침투율은 산림이 가장 크며, 그 다음이 밭이며 투수층에서는 논이 가장 낮은 값을 나타내었다. 따라서, 투수층에서는 강우가 시작되면 토양으로 침투되어 토양 내에서 저류되는 양은 산림이 가장 높으며, 다음이 밭이며 논이 적은 양이 토양으로 유입되는 것으로 나타났다. 논에서의 낮

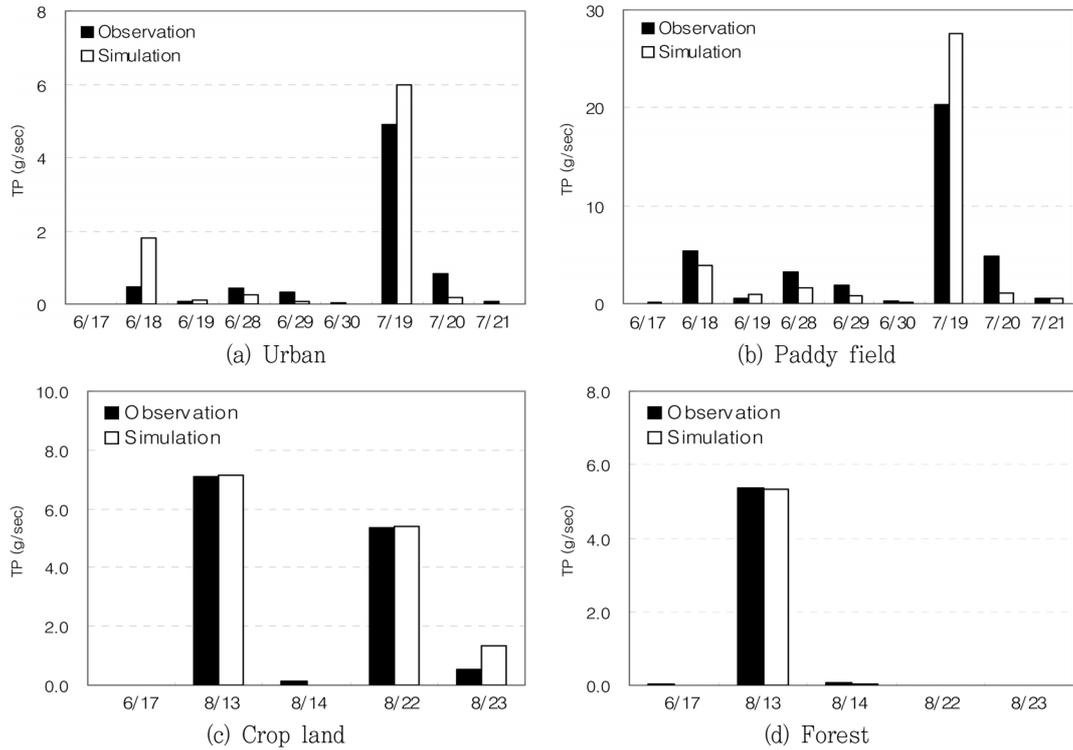


Fig. 14 Comparison between simulated and observed TN loading from land use types

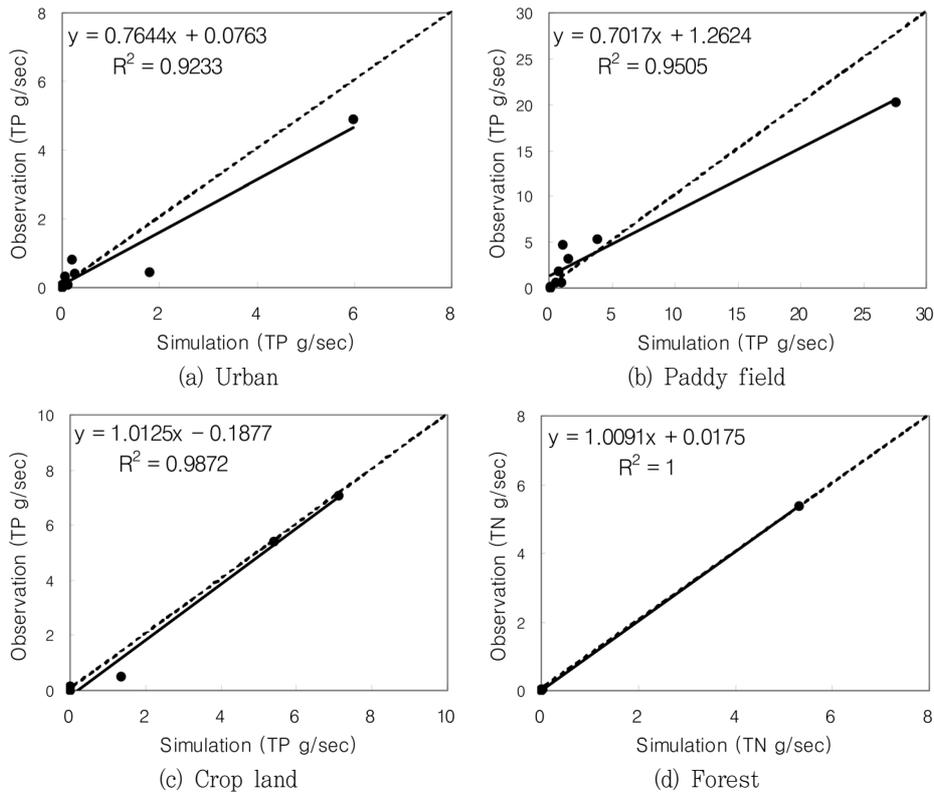


Fig. 15 1:1 Scatter plot between simulated and observed TP loading for calibration

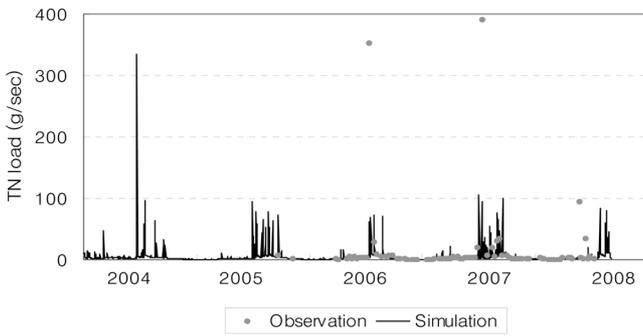


Fig. 16 Validation result of TN loading at Bochung watershed.

Table 3 Possible ranges and optimized values of calibrated HSPF parameters.

Parameter		Urban	Paddy	Upland	Forest
Water budget	LZSN (mm)		25.4	25.4	429.26
	INFILT (mm/hr)		0.76	1.52	2.79
	AGWRC (1/day)		0.99	0.58	0.99
	UZSN (mm)		45.0	73.41	5.59
	NSUR	0.05	0.43	0.78	0.54
	IRC (1/day)		0.97	0.05	0.83
TN	ACCUM (g/ha/day)	8.32	2.53	122.00	4.52
	SQOLIM (g/ha)	62.60	571.82	368.15	23.65
TP	ACCUM (g/ha/day)	0.62	1.52	4.05	0.40
	SQOLIM (g/ha)	2.99	19.27	184.30	17.91

은 투수율은 논에 생성된 경반층에 기인하는 것으로 추정되는데, 경반층이란 경우로 쟁기바닥에 의해 딱딱해진 층으로 수 mm 깊이로 철이 많이 집적되어 있으며 물과 양분의 이동이 불량한 층을 말하는데, 논토양의 경반층은 벼짚이나 보릿짚 등 유기물을 사용하지 않은 경우와 과습조건에서 중농기계로 로타리와 경운작업을 하는 경우 바퀴의 압축 등의 원인에 의하여 경반층이 형성된다 (Honam Agricultural Research Institute, 2005). 조도계수에서도 토지이용별 뚜렷한 차이를 나타내는데, 불투수층의 도시지역에서 가장 낮은 값을 나타내었으며, 투수층에서는 논에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

영양물질 부하관련 매개변수에서도 토지이용별 차이를 나타내었는데, 질소의 경우에는 밭에서 일별 축적량과 최대축적량이 비교적 높은 값을 나타내었으며, 논에서는 일별 축적량은 낮은 값을 나타내었으나 최대축적량은 가장 높은 값을 나타내었다. 산림에서 비교적 낮은 일별 축적량과 최대축적량을 나타내었다. 인의 경우도 유사한 경향을 나타내었으나 논외의 경우 질소에 비해 최대축적량의 정도가 밭과 큰 차이를 나타내는 것으로 나타났다. 전반적으로 시비가 이루어지는 논과 밭에서 영양

물질의 축적이 많이 이루어지는 것으로 나타났으며, 논과 밭을 비교했을 경우 강우시 직접적으로 토양유실이 이루어지는 밭에서 일별 축적량이 높게 나오는 것으로 나타났다. 기비때 인 전량이 시비되고 대부분의 인이 토양에 흡착되어 저류되기 때문에 논에서는 인과 관련된 축적량이 밭에 비해 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 단기간에 걸쳐 수행된 모니터링 자료를 바탕으로 하고 있기 때문에 보다 신뢰성 있는 결론 도출을 위해서는 장기간에 걸친 모니터링 자료를 바탕으로 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

IV. 결 론

금강수계에 위치한 보청유역을 대상으로하여, 산림-논밭-도시-우세기역에 대하여 2008년 강우시의 유량 및 수질모니터링 자료를 이용하여 HSPF의 유출량 및 영양물질 부하량 관련매개변수를 보정한 후 2006년~2008년 동안 8일 간격으로 보청유역단에서 측정된 모니터링 자료를 이용하여 모델을 검증하였다. HSPF의 보정은 자동보정 프로그램인 PEST를 사용하였다. 강우시의 유량 및 영양물질 부하량 보정결과 제한된 모니터링 자료를 활용하였다는 한계점은 있으나 높은 결정계수를 나타내었으며, 검정과정을 통한 장기간의 모의결과 실측한 결과와 유사한 유출경향을 나타내어 HSPF-PEST의 유량 및 부하량 보정시 높은 적용성을 나타내었다. PEST에 의해 보정된 유출관련 HSPF 매개변수를 고찰한 결과, 산림에서 높은 투수율과 토양저류량을 나타내어 강우시 상대적으로 많은 양의 강수가 토양으로 유입되는 것으로 나타났다. 논외의 경우에는 투수층 중에서 가장 낮은 투수율을 나타내었는데 이는 논외의 경반층에 기인하는 것으로 판단되며 낮은 조도계수는 논외의 수문학적인 또 다른 특성 중에 하나인 것으로 나타났다. 불투수층의 도시는 매우 낮은 조도계수를 나타내었다. 영양물질관련 매개변수를 고찰한 결과, 시비가 이루어지는 논과 밭에서의 축적량관련 값이 상대적으로 높은 것으로 나타났으나 논에서의 인 관련 매개변수값은 밭에 비해서 현저히 낮은 값을 나타내었다. 이는 논에서 인의 전량이 영농초기 기비시 시비되고 토양내에서 대부분의 양이 흡착되어 강우시 토양유실이 이루어지지 않기 때문에 밭에 비해 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구는 토지이용별 강우시 보정기간이 단기간으로 수행되어 모델이 보정되어졌다는 한계점을 여전히 가지고 있다. 보다 신뢰성있는 모델 보정과 토지이용별 보정인자 고찰을 위해서는 장기간으로 수행되어진 모니터링 자료를 바탕으로 모델 보정이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 2008년 국립환경과학원의 지원(금강수계 수질 오염총량관리 유허별 유달을 산정방법 연구)을 받아 수행된 연구임

REFERENCES

- Honam Agricultural Research Institute, 2005. Guideline of Soil Management of Paddy Rice Fields in Honam Plain Area. GOVP1200603450, Honam Agricultural Research Institute, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration (in Korean).
- Hwang, H. S., 2007. Applicability study of BASINS/WinHSPF on TMDL in Korea - Nakdong River Basin case study. Ph. D. Dissertation, Konkuk University, Seoul, Korea (in Korean).
- Jang, J. H., C. G. Yoon, K. W. Jung, and S. Y. Kwon, 2009. Decision of critical area due to NPS pollutant loadings from Kyongan stream watershed using BASINS-SWAT. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(5): 69-78 (in Korean).
- Jang, J. H., C. G. Yoon, K. W. Jung, J.-H. Jeon, 2006. Pollutant loading estimate from Youngdam watershed using BASINS/HSPF. *Korean Journal of Limnology* 39(2): 187-197 (in Korean).
- Jeon, J.-H., C. G. Yoon, J. H. Ham, and K. W. Jung, 2006. Evaluation of BASINS/WinHSPF applicability for pollutant loading estimation for Korean watershed. *Water Science & Technology* 53(1): 25-32.
- Jeon, J.-H., C. G. Yoon, A. S. Donigian, K. W. Jung, 2007. Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions. *Agricultural Water Management* 90: 75-86.
- Jeon, J.-H., Y.-J. Kim, K. J. Lim, D. Choi, and T.-D. Kim, 2010. Analysis of water budget components by simulation of HSPF-Paddy model at the Bochung watershed, Korea. *Paddy and Water Environment* (submitted).
- Jeon, J.-H. D. Choi, J. J. Kim, and T. D. Kim, 2009a. Regionalization of CN parameters for Nakdong Basin using SCE-UA algorithm. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(2): 245-255 (in Korean).
- Jeon, J.-H., D. Choi, J. J. Kim, and T. D. Kim, 2009b. Evaluating calibration methods of stream flow for water quality management. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 432-440 (in Korean).
- Jung, K. W., C. G. Yoon, J. H. Jang, and J. C. Kim, 2007. Quantitative estimation of pollution loading from Hwaseong watershed using BASINS/HSPF. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 49(2): 61-74 (in Korean).
- Kim, J.-J., T. D. Kim, D. Choi, K. J. Lim, B. A. Engel, and J.-H. Jeon, 2009. L-THIA modification and SCE-UA application for spatial analysis of nonpoint source pollution at Gumho River basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(2): 311-321 (in Korean).
- Lee, J., N. Kim, J. Lee, and B. Seo, 2009. Estimation of runoff curve number for ungaged watershed using SWAT model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 11-16 (in Korean).
- National Institute of Environmental Research, 2008. A research on calculation of dilivery rate for TMDL on the Geum River. National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment, Republic of Korea (in Korean).
- Park, Y., J. Kim, S. Heo, N. Kim, J. Ahn, J. Park, K.-S. Kim, and K. J. Lim, 2008. Comparison of soil loss estimation using SWAT and SATEEC. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 3-12 (in Korean).
- Shin, A. H., 2008. A study on BASINS/WinHSPF for dam simulation and non-point source pollution management in Chungju Dam watershed. Master thesis, Konkuk University, Seoul, Korea (in Korea).
- Yoon, C. G., J. Y. Han, K. W. Jung, and J. H. Jang, 2007. Application of BASINS/WinHSPF for pollutant loading estimation in Soyang Dam Watershed. *Korean Journal of Limnology* 42(2): 201-213 (in Korean).
- Yoon, C. G., A. H. Shin, K. W. Jung, and J. H. Jang, 2007. A study on BASINS/WinHSPF for evaluation on non-point source reduction efficiency in the upstream of Nam-Han River watershed. *Korean Journal of Limnology* 23(6): 951-960 (in Korean).
- USEPA, 1997. Compendium of tools for watershed assessment and TMDL development. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D. C.