매개변수 보정 전문가시스템을 이용한 HSPF 모형의 수문 매개변수 보정 및 적용성 평가

Evaluation of Applicability and Hydrologic Parameter Calibration for HSPF Model using Expert System for HSPF

김성민* · 김상민**,[†]

Kim, Sung Min · Kim, Sang Min

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the applicability of the HSPEXP expert system for the calibration of the Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF) for the study watershed. HSPEXP offers advice to the modeler, suggesting parameter changes that might result in better representation of a river basin and provides explanations supporting the recommended parameter changes. The study watershed, Sancheong, is located within the Nakdong River Basin and having the size of 1,072.4 km². Input data for the HSPF model were obtained from the landuse map, digital elevation map, meteorological data and others. Water flow data from 2006 to 2008 were used for calibration and from 2009 to 2010 were for validation. Using the HSPEXP expert system, hydrological parameters were adjusted based on total volume, then low flows, storm flows, and finally seasonal flows. For the calibration and validation period, all the HSPEXP model performance criteria were satisfied.

Keywords: HSPF; Expert system; HSPEXP; Model calibration

1. 서 론

미국 환경청 (USEPA)에서 개발된 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형은 유역단위 오염총량관리 (Total Maximum Daily Loads, TMDLs)에 대한 모의 모형으로 미국에서 광범위하게 적용되고 있다. HSPF 모형은 보정을 필요로 하는 모형으로 효과적이고 정확한 보정기법을 개발하는 것은 모형에 대한 적용성을 증대시킨다 (Kim et al., 2009). 모형의 적용에 필수인 매개변수 보정 기법은 과거부터 이용되어온 수동보정기법과 최근 연구되고 있는 자동보정기법이 있다. 수동보정기법의 경우, 좋은 보정결과를 얻을 수 있으나 보정결과에 대한 고유성이 없고 보정에 대한 기간이 오래 소요된다 (Madsen, 2000). 반면 자동보정기법은 빠르고 고유성을 지니며 프로그램 사용이 쉽다는 장점을 가지나 수문모형이나 수질모형의 매개변

수 및 예측값에 대해 수문학적 범위를 초과하는 오류를 범해 광범위하게 이용되고 있지는 않다 (Boyle et al., 2000). 최근 국내에서도 수질오염총량관리제를 실시함에 따라 다양한 수문·수질모형을 이용한 연구들이 발표되고 있다. HSPF모형의 경우 HSPEXP (Expert System for the Calibration of HSPF) (Lumb et al., 1994)를 이용한 수동보정 기법이 주로 이용되고 있다. HSPEXP는 HSPF 모형의 수문매개변수 보정을 위한 전문가 시스템으로 모형의 보정을 위해 총유출량 (total runoff), 상위 10 % 유출량 합 (10 % highest flows), 하위 50 % 유출량 합 (50 % lowest flows), 침투유출량 (storm peaks), 여름 홍수유출량 (summer storm volume) 등의 지표를 이용하고 있다. HSPEXP는 HSPF 모형의 결과를 실측치와 비교하고, 각 지표별 오차를 계산하며, 이로부터 적절한 매개변수의 보정방법을 제시한다. 어떤 매개변수의 값을 어떻게 수정할 경우 각 지표별 오차가 어떻게 개선될 것인지에 대한 보정방법을 제시하여 비교적 HSPF 모형의 매개변수에 익숙하지 않은 사용자로 하여금 보다 쉽고 편리하게 수문 매개변수의 보정을 가능하도록 도와준다. 매개변수의 보정을 위한 전문가시스템은 35개의 규칙과 80개 이상의 보정방법에 대한 제안을 포함하고 있다. 매개변수의 보정은 크게 4 단계로 - 연간 유출량 (annual volumes), 저수량 (low flows),

* 경상대학교 대학원 농공학과 석사과정

** 경상대학교 지역환경기반공학과 (농업생명과학연구원) 부교수

[†] Corresponding author Tel.: +82-55-772-1931

Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

2013년 3월 18일 투고

2013년 4월 23일 심사완료

2013년 5월 28일 게재확정

홍수 유량 (storm flows), 계절유량 (seasonal flows) - 로 구분된다. HSPEXP를 이용할 경우 사용자의 모형 이용 목적에 따라 매개변수 보정에 필요한 함수를 설정하고 이에 대한 기준을 수립한 후 사용자가 원하는 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있어 오염총량관리와 같이 모형의 결과가 각 유역의 오염부하량의 삭감과 할당에 민감한 영향을 끼치는 경우 효과적으로 이용될 수 있다 (Kim et al., 2009). 그러나, 국내에서는 아직 HSPEXP를 이용한 HSPF 모형의 수문 매개변수 보정에 대한 적용결과는 많지 않다. 국내에서는 발안유역, 황강유역, 임하호 유역, 보청유역, 충주댐 유역, 새만금 유역 등에 HSPF 모형의 적용성을 분석한 사례가 있다 (Kim et al., 2009; Choi et al., 2011; Kim et al., 2009; Jeon et al., 2010; Jeon et al., 2010; Jeong et al., 2011;). HSPF 보정을 위해 자동보정기법 소프트웨어인 PEST (Parameter Estimation) (Kim et al., 2007; Jeon et al., 2010), HSPEXP를 이용한 사례가 있으며 (Kim et al., 2009), 전통적인 모형평가지표인 결정계수 (R^2), Nash와 Sutcliffe (1970)의 효율 지표와 평균제곱근오차 (RMSE)를 이용하여 보정한 사례가 있다. 본 연구에서는 중규모 산림유역인 낙동강 유역내 산청소유역을 대상으로 수자원공사의 WAMIS 유량자료를 기반으로 HSPEXP를 이용하여 HSPF 모형의 보정과 검정을 실시하고 적용결과에 대한 고찰을 통해 모형의 적용성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상유역

본 연구는 남강댐 유역 내에 위치한 낙동강유역 내 주요수관 측문지점인 산청을 대상으로 수행하였다. 산청은 동쪽으로 함천군·의령군, 북쪽으로 거창군, 남쪽으로 진주시·하동군, 서쪽으로 함양군에 접하고 있으며 황매산이 함천군과 분수령을 이루어 분지를 형성하고 있다. 유역면적은 약 1,072.4 km²이며 산지가 767.0 km² 정도로 전체면적의 71.5 %를 차지하고 있다. 농경지의 경우, 236.8 km²로 전체면적의 22.1 %를 차지하며 시가지가 2.9 %, 초지, 습지 등의 기타 지역이 3.5 %로 나타났다. Fig. 1의 (a)는 대상유역인 산청의 유역경계와 하천도, 기상관측소를 표시한 모식도이다. 모형의 입력자료는 수치고도모형 (DEM), 농업과학기술원의 정밀토양도, 환경부의 토지이용도 등의 GIS 자료를 이용하여 구축하였다.

2. 기상자료

기상자료는 Fig. 1의 유역도에 나타난 바와 같이 유역 내 상류부에 위치한 산청 기상관측소의 자료를 이용하였으며, 기상청 (<http://www.kma.go.kr/>)에서 제공하는 5년간 (2006~2010)의 자료를 사용하였다. 수집된 기상자료는 시간별 강우량, 이슬점

Fig. 1 Subwatershed (a), DEM (b), and Landuse Map (c) of the Sancheong Study Watershed

Table 1 Landuse Data for Sancheong Subwatershed (Unit : km²)

Classification	A	B	C	D	E	F	G	Total
Water	0.4	1.5	1.2	1.2	1.6	0.4	1.6	8.2
Barren Land	0.1	0.3	0.8	4.4	1.7	0.4	2.5	10.4
Wetlands	0.2	0.8	0.9	1.5	1.4	0.5	1.1	6.4
Grass Land	0.3	2.4	2.4	4.1	1.9	0.1	1.4	12.5
Urban or Built-up Land	0.6	4.9	6.0	7.1	3.5	1.3	7.9	31.2
Forest Land	85.5	63.4	122.0	201.1	181.2	22.9	90.7	767.0
Agricultural Land	2.6	48.7	42.4	62.0	37.6	9.5	33.9	236.8
Total	89.7	122.1	175.8	281.5	228.9	35.3	139.2	1072.4

온도, 일최고기온, 일최저기온, 평균풍속, 운량, 일사량 등이며 이로부터 일평균기온, 일 증발량 등의 자료를 산정하였다. Table 1은 최고기온 (Maximum Temperature), 최저기온 (Minimum Temperature), 풍속 (Wind Speed), 운량 (Cloud Cover), 증발량 (Evaporation)을 연 평균값으로 나타낸 것이다. 조사기간 동안의 산청유역의 연평균 최고기온은 19.0-19.9 °C의 범위를 가지며 연평균 최저기온은 7.9-8.9 °C, 연평균 평균풍속은 1.66-1.87 m/s, 연평균 운량은 4.69-4.93 tenths로 나타났다.

3. 취약성 평가 지표의 계산

대상유역의 강우자료, 수위자료, 유량자료를 구축하기 위하여 국토해양부가 각 관할기관에서 조사된 자료를 수집하여 제공하는 수자원관리 종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr/>)의 산청 관측소 값을 이용하였다. 자료기간 동안의 연도별 수위자료와 수위-유량 관계식을 이용하여 연도별 유량을 산정하였으며, Table 2는 2006년부터 2010년까지 강우, 유량, 유출율을 보여주고 있다. 연 강우량의 경우 2010년이 2,189.5 mm로 가장 많은 비가 내려 연간 유출량 또한 1,183.9 mm로 크게 나타났다. 그러나 연간 유출률은 2007년이 54.8 %로 가장 높았으며 가장 낮은 유출률은 36.9 %인 2009년이였다. 5년간의 연평균 강우량은 1,520.5mm, 유출량은 748.2mm, 유출율은 47 %로 나타났다. HSPF를 이용한 모형의 보정을 위해 2006년부터 2010년까지

Table 2 Meteorological Data for Sancheong Station from 2006 to 2010

Year	TMAX (°C)	TMIN (°C)	WIND (m/s)	CLOU (tenths)	EVAP (mm)
2006	19.7	8.3	1.72	4.93	0.17
2007	19.9	8.9	1.87	4.88	0.18
2008	19.7	7.9	1.66	4.76	0.18
2009	19.8	8.0	1.74	4.69	0.19
2010	19.0	8.1	1.74	4.93	0.17
Mean	19.6	8.2	1.75	4.84	0.18

Table 3 Observed Rainfall, Runoff, and Runoff Ratio for Sancheong Station from 2006 to 2010

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio (%)
2006	1,684.0	848.9	50.4
2007	1,775.5	973.8	54.8
2008	784.9	303.8	38.7
2009	1,168.4	430.7	36.9
2010	2,189.5	1,183.9	54.1
Mean	1,520.5	748.2	47.0

자료 중 80 mm이상의 단일강우사상 23개를 선정하여 여름 폭우사상에 대한 매개변수 보정을 위해 이용하였다.

4. HSPF 모형

HSPF 모형은 준분포형 장기 유출모형으로 미국 환경청에서 1950년대 개발된 SWM (Stanford Watershed Model) 모형에 1970년대에 수질처리 모듈이 추가되고 1980년대에 전후처리 모듈, 알고리즘 강화, WDM (Watershed Data Management)의 기능이 미국 지질조사국 (U.S. Geological Survey, USGS)과 미국 환경청에 의해 추가됨으로써 개발된 모형이다 (최현구 등, 2011). HSPF 모형은 투수층 (PERLND)과 불투수층 (IMPLND)으로 구분하여 모의되며 모의한 결과인 유출량과 비점오염원이 하천모듈 (RCHRES)로 입력되어 유출량과 수질항목을 모의한다. HSPF 모형은 토지이용 변화, 저수지 운영, 점원·비점원 오염 처리 대안, 오염총량관리 등에 대한 평가를 위해 미국에서 가장 광범위하게 적용되고 있다. 또한 준분포형, 개념적 모형으로 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 적설심, 수분함량, 용설, 증발산, 용존산소, 질소, 인, 홍수추적, 저수지 홍수추적 등을 모의할 수 있다 (Bicknell et al., 2001). HSPF 모형은 보정을 필요로 하기 때문에 1990년대 이후 매개변수를 수정하는 전문 프로그램인 HSPEXP, 입출력 자료 관리 시스템 WDMUtil 등 사용자 편의 시스템을 이용하여 손쉽게 구동하도록 개발되어 HSPF 호환모형인 WinHSPF, HSPF 모형이 결과를 시각적으로 보여주기 위한 GenScn 모형 등이 있다 (김상민과 박승우, 2004). USGS (2000)에 따르면 HSPF 모형은 WDMUtil을 이용하여 입출력 자료의 통계분석, 전후처리 및 그래픽 등을 제공하며 수분에서 수백년까지 기간에 대한 모의가 가능하다. 또한 시험포장의 크기 또한 160,000 km²의 Chesapeake만에 이르기까지 다양한 유역에 적용되었다. 본 연구에서는 수문 매개변수의 보정을 위하여 BASINS Technial Note 6 (USEPA, 2000)을 참고하여 모형의 보정을 위한 수문 매개변수를 선정하였으며, 다음의 Table 4는 HSPF 모형의 유출량 보정을 위해 이용된 수문 매개변수와 각각의 정의를 보여주고 있다.

Table 4 HSPF Model Parameters for Hydrologic Calibration

Parameter name	Parameter definition
LZSN	Lower zone nominal storage (mm)
UZSN	Upper zone nominal storage (mm)
INFILT	Index to infiltration capacity (mm/hr)
BASETP	The fraction of potential ET that can be sought from baseflow
AGWETP	Fraction of remaining potential ET that can be satisfied from active ground water storage
LZETP	Lower zone ET parameter - an index to the density of deep rooted vegetation
INTFW	Interflow inflow parameter
IRC	Interflow recession parameter (/day)
AGWRC	Ground water recession parameter (/day)
DEEPPFR	Fraction of ground water inflow that goes to inactive ground water
CEPSC	Interception storage capacity (mm)

5. HSPEXP 모형평가지표

HSPEXP는 유역 모델링 사용자에게 HSPF 모형의 매개변수 보정을 지원하기 위한 전문가 시스템으로 미국 지질조사국 (USGS)에서 개발되었다. 이 프로그램은 모형의 결과에 따라 매개변수를 어떻게 수정할 것인지를 사용자에게 제안하며, 결과가 어떻게 달라질 것인지를 설명한다. 비교적 모형에 익숙하지 않은 사용자에게는 HSPF 모형의 수문기작에 대한 이해를 높여주고 모형의 보정을 보다 편리하게 하는 장점이 있다. HSPEXP에 의한 매개변수의 보정은 크게 4단계로 - (1) 총유출량, (2) 저수량, (3) 홍수량, (4) 계절적 보정 - 구분되어 진행된다. HSPEXP는 HSPF 모형의 결과를 실측치와 비교하고, 각 지표별 오차를 계산하며, 이로부터 적절한 매개변수의 보정방법을 제시한다. 그러나 용설과 수질항목에 대한 보정은 지원하지 않고 있으며, 매개변수를 얼마나 변화시킬 지에 대한 정보는 제공하지 않는다. 또한 특정 토지이용에 따른 매개변수의 보정방법은 제시하지 않는 단점이 있다. 계절적 편차를 분석할 때 여름은 6월부터 8월, 겨울은 12

Table 5 HSPEXP Model Performance Variables and Criteria for Hydrologic Calibration of HSPF (Benham et al, 2005)

HSPEXP model performance variable	HSPEXP model performance criteria (% error)
Total volume	10
50 % lowest flows	10
10 % highest flows	15
Storm peaks	15
Seasonal volume error	10
Summer storm volume error	15

월부터 2월로 고정되어 있어, 계절이 이와 상이한 지역에서 적용할 때는 주의가 필요하다. 다음의 Table 5는 Benham et al. (2005)의 연구에서 미국 버지니아주에서 오염총량관리 (TMDL)을 적용하기 위해 주정부에서 제시하고 있는 수문 매개변수의 보정기준을 보여주고 있으며, 본 연구에서도 이 기준에 따라 모형의 보정을 실시하고 결과를 분석하였다.

6. 전통적인 모형평가지표

모형의 평가를 위하여 일반적으로 많이 이용되고 있는 지표로는 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE), 상대평균절대오차 (Relative mean absolute error, RMAE), 상대오차 (Relative bias, RB), 결정계수 (R^2), Nash-Sutcliffe 효율성 지수 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 등이 있다. 각각의 통계변량은 식 (1)~(4)과 같이 표현된다.

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

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)|}{M_o} \quad (2)$$

$$RB = \frac{M_f - M_o}{M_o} \times 100 \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_f(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - M_o(i)]^2} \quad (4)$$

여기서, Q_o 는 실측치, Q_f 는 모의치, n 은 자료수, M_o 는 실측 유출량의 평균치, M_f 는 추정 유출량의 평균치이다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정

본 연구에서는 모형의 수문 매개변수 보정을 위해 2006년 1월부터 2008년 12월까지 3년간의 자료를 이용하였으며, 2006년부터 2008년까지 10개 강우사상을 선정하여 HSPEXP 모형평가 지표의 여름폭우사상에 대한 매개변수를 보정하였다 (Table 6). 모형의 보정은 Table 5에서 제시한 모형평가지표의 기준에 도달

Table 6 Selected storm events for calibration and validation periods

Period	Storm Starting Date	Storm Ending Date	Storm Duration (hr)	Storm Rainfall (mm)
Calibration	19 May 2006	19 May 2006	16	86.5
	14 Jun 2006	14 Jun 2006	11	93.5
	08 Jul 2006	09 Jul 2006	22	135.5
	10 Jul 2006	10 Jul 2006	16	229.5
	04 Mar 2007	04 Mar 2007	13	80.0
	30 Jun 2007	01 Jul 2007	19	95.0
	12 Aug 2007	14 Aug 2007	55	223.0
	05 Sep 2007	05 Sep 2007	24	100.0
	16 Sep 2007	16 Sep 2007	19	140.0
	17 Sep 2007	18 Sep 2007	10	86.0
Validation	07 Jul 2009	07 Jul 2009	17	93.5
	15 Jul 2009	16 Jul 2009	38	127.5
	19 Jul 2009	19 Jul 2009	12	33.0
	15 Jul 2010	16 Jul 2010	29	171.5
	28 Jul 2010	28 Jul 2010	14	82.5
	10 Aug 2010	11 Aug 2010	36	226.0
	06 Sep 2010	07 Sep 2010	35	168.0

Table 7 Initial value, Recommended Range, and Adjusted HSPF Parameter Values for the Calibration

Parameter name	Initial value	Recommended range	Adjusted value
LZSN	218.4	50.8 to 381	105.92
UZSN	17.53	0.25 to 50.8	0.05
INFILT	1.78 to 15.49	0.025 to 16	2.184
BASETP	0 to 0.1	0 to 0.2	0.01
AGWETP	0 to 0.001	0 to 0.2	0.0
LZETP	0.1 to 0.8	0.1 to 0.9	0.5
INTFW	1.0 to 2.0	1.0 to 10.0	4.79
IRC	0.6	0.001 to 0.999	0.7
AGWRC	0.99	0.001 to 0.999	0.977-0.987
DEEPFR	0.0	0 to 0.2	0.2
CEPSC	1.27-6.35	0.25 to 10.16	2.54

Table 8 HSPEXP Statistics for the Calibration and Validation Periods

Measures	Calibration			Validation			HSPEXP criterion (%)
	Observed	Simulated	Percent error	Observed	Simulated	Percent error	
Total runoff (mm)	2,329.5	2,326.1	- 0.1	1,769.1	1,873.3	5.9	10
Total of highest 10 % flows (mm)	1,638.6	1,513.3	- 7.6	1,144.9	1,177.5	2.9	15
Total of lowest 50 % flows (mm)	180.3	163.1	- 9.5	111.5	119.1	6.9	10
Average of storm peaks (m ³ /s)	533.5	489.3	- 8.3	318.1	297.4	- 6.5	15
Summer storm volume (mm)	293.2	283.0	1.1	226.5	193.8	- 6.3	15

할 수 있을 때까지 실시하였다. Table 7은 모형의 보정에 이용된 매개변수의 초기값, 추천된 허용범위, 보정 후 선정된 매개변수의 결과를 보여주고 있다. 보정된 매개변수는 추천된 매개변수의 허용범위에 있는 것으로 나타났다. Fig. 2는 일별유출량과 모의기간 동안의 누가유출량을 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 일별유출량의 비교에서 2006년의 가장 큰 폭우사상은 일부 차이를 보이고 있으나, 전체 모의기간에 대해 대체로 실측치와 모의치가 유사한 경향을 보이고 있다. 모형의 보정결과를 HSPEXP 모형평가지표와 전통적인 평가지표를 이용하여 평가한 결과는 Table 8과 Table 9에 정리하여 보여주고 있다. 모형의 보정기간에 대해 HSPEXP 모형평가지표의 모든 기준을 만족하

Fig. 2 Daily and Cumulative Flow Comparison Between the Simulated and Observed for the Calibration Period

Table 9 Conventional Statistics for the Calibrated and Validation Periods

Measures	Calibration	Validation
RMSE (mm/day)	2.44	1.36
RMAE (mm/day)	2.79	0.76
RB (%)	- 0.28	5.77
NSE	0.91	0.96
R ²	0.73	0.73

고 있으며, 총유출량은 -0.1% 의 오차를 보였으며, 그 외의 지표는 실측치에 비해 모의치가 다소 낮게 모의되었다. 전통적인 모형평가지표를 살펴보면, RMSE는 2.44 mm/day , RMAE는 2.79 mm/day , NSE는 0.91 , R^2 는 0.73 의 값을 보였다. NSE는 $-\infty$ 에서 1 까지의 범위를 가지고 1 에 가까울수록 실측치와 잘 일치한다는 것을 의미한다.

2. 모형의 검증

모형의 보정에 이용되지 않은 2009년 1월부터 2010년 12월 까지 2년의 자료와 이 기간 중 선정된 7개의 강우사상에 대해 모형의 검정을 실시하였다 (Table 6). 검정기간에 대한 모의값과 실측값의 일별유출량, 누가유출량을 비교하여 그 결과를 도시하였다 (Fig. 3). 누가유출량은 2009년의 실측값이 모의값의 누가유출량보다 큰 값을 보였고 이 영향으로 인해 전체적인 누가유출량은 5.9% 의 차이가 있는 것으로 모의되었다. 모형의 검정결과를 HSPEXP 모형평가지표와 전통적인 평가지표를 이용하여 평

Fig. 3 Daily and Cumulative Flow Comparison Between the Simulated and Observed for the Validation Period

가한 결과는 Table 8과 Table 9에 정리하여 보여주고 있다. 모형의 검정기간에 대해 HSPEXP 모형평가지표의 모든 기준을 만족하고 있으며, 총유출량, 상위 10% 유출량, 하위 50% 유출량은 실측치에 비해 모의치가 다소 높게 모의되었으며, 여름 폭우사상과 홍수유출량은 모의치가 다소 낮게 모의되었다. 전통적인 모형평가지표를 살펴보면, RMSE는 1.36 mm/day , RMAE는 0.76 mm/day , NSE는 0.96 , R^2 는 0.73 의 값을 보였다.

3. 모형평가지표 기준 변경을 고려한 모의결과 비교

HSPF 모형의 적용목적에 따라 매개변수의 보정에 이용되는 지표를 달리 선택할 수 있으며, 본 연구에서 적용한 보정방법은 미국의 버지니아주에서 유역의 오염총량관리를 위해 적용되는 기준이다. 일반적인 장기유출모형의 적용에서는 총유출량의 오차를 최소화하는 방법으로 매개변수의 보정을 실시하게 된다. 이에 본 연구에서는 앞서 보정에 이용된 버지니아주의 HSPEXP 모형평가지표 적용 (시나리오 A)과 총유출량을 최소화하는 매개변수 보정결과 (시나리오 B)를 비교하였다. 다음의 Table 10은 두 개의 시나리오에 대한 HSPEXP 모형평가지표와 전통적인 모형평가지표를 비교하여 보여주고 있다. 시나리오 A의 경우 모형의 보정과 검정기간 전체의 오차의 합은 5.8% , 시나리오 B의 오차의 합은 -0.9% 로 모의되어 시나리오 B의 유출량 오차가 낮게 나타났다. 그러나, 시나리오 B에서는 보정과검정에서 고려하지 않았던 상위 10% 유출량, 홍수유출량 등에서는 오차가 다소 크게 나타났다.

IV. 결 론

HSPF 모형의 수문 매개변수 보정은 모형의 이용 목적에 따라 기준 범위에 벗어나지 않는 선에서 사용자가 매개변수 보정에 필요한 함수를 설정하여 결과를 얻을 수 있다. 국내에서도 하천

Table 10 Summary of HSPEXP Model Performance Variables and Conventional Statistics for Scenarios A and B

Period	Measures	Observed	Simulated				HSPEXP criteria (%)
			Scenario A	Percent error	Scenario B	Percent error	
Calibration	Total runoff (mm)	2,329.5	2,326.1	-0.1	2,236.5	-4.0	10
	Total of highest 10 % flows (mm)	1,638.6	1,513.3	-7.6	1,384.0	-15.5	15
	Total of lowest 50 % flows (mm)	180.3	163.1	-9.5	142.5	-21.0	10
	Average of storm peaks (m^3/s)	533.5	489.3	-8.3	361.6	-32.2	15
	Summer storm volume (mm)	293.2	283.0	1.1	207.5	-2.3	15
Validation	Total runoff (mm)	1,769.1	1,873.3	5.9	1,824.0	3.1	10
	Total of highest 10 % flows (mm)	1,144.9	1,177.5	2.9	1,093.5	-4.5	15
	Total of lowest 50 % flows (mm)	111.5	119.1	6.9	114.8	3.0	10
	Average of storm peaks (m^3/s)	318.1	297.4	-6.5	290.0	-29.0	15
	Summer storm volume (mm)	226.5	193.8	-6.3	147.1	-7.3	15

의 정확한 수질해석, 유출량 예측, 수질개선 효과 등의 목적으로 일부 연구가 진행된 바 있으나 HSPF 모형의 적용은 대상 유역의 토지이용, 기상, 하천 현황 등의 자료를 반영하므로 최근 변화된 자료에 맞게 연구가 지속적으로 진행되어야 한다. 본 연구에서는 중규모 산림유역인 낙동강 유역내 산청소유역을 대상으로 HSPEXP를 이용하여 WAMIS 유량자료 (2006-2010)를 기반으로 HSPF 모형의 보정과 검정을 실시하고 적용결과에 대한 고찰을 통해 모형의 적용성을 평가하고자 하였다. 모형의 보정은 2006년부터 2008년까지 10개 강우사상에 대해 실시하였으며 제시한 모형평가지표의 기준에 도달할 수 있도록 보정을 실시하였다. 모의값과 실측값을 비교·분석하기 위해 월별유출량과 일별유출량을 비교한 결과, 강우가 많은 7월-9월에 실측치가 다소 높은 값을 나타내었으나 보정기간에 대한 모의값과 실측값의 총 유출량이 매우 유사하게 모의되었으며 특정일에 발생하는 모의값과 실측값의 차는 일강수량의 영향으로 판단된다. 선정된 강우사상 중 모형의 보정에 이용되지 않은 총 7개의 강우사상 (2009-2010)에 대해 모형의 검정을 실시하였다. 월별유출량의 경우, 7월의 모의값과 실측값 간의 차이가 다소 큰 것으로 나타났으며 누가유출량은 2009년의 실측값이 모의값의 누가유출량보다 큰 값을 보였고 2010년 초부터 모의값의 누가유출량이 실측값의 누가유출량보다 비교적 크게 나타나 총 유출량이 비교적 차이가 있음을 알 수 있다. 모형의 평가는 일반적으로 많이 이용되고 있는 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE), 상대평균절대오차 (Relative mean absolute error, RMAE), 상대오차 (Relative bias, RB), 결정계수 (R^2), Nash-Sutcliffe 계수 (Coefficient Of Efficiency, COE) 등을 적용하여 실시하였다. 보정과 검정기간에 대한 RMSE의 모의값과 실측값 차는 2.44, 1.36이고 RMAE는 2.79, 0.76을 나타냈다. RB는 보정의 경우 -0.28이고 검정은 5.77로 나타나 검정기간에 대한 모의값과 실측값이 다소 차이가 있었으며 COE의 경우 보정과 검정 모두 비교적 양호하게 판단되는 0.80이상인 0.91, 0.96으로 나타났다. 반면, 결정계수 R^2 는 두 기간에 모두 0.73로 모의값과 실측값이 다소 차이를 보이는 것으로 나타났는데 이는 국내에서 발생하는 장마철 폭우 및 집중호우 등으로 인한 대규모 강우사상에 의한 것으로 사료된다. 보정기간에 대한 총유출량은 모의값과 실측값의 차가 -0.1 %이고 첨두유출량은 -8.3 %로 나타났다. 여름 홍수유출량에 대한 모의값과 실측값의 유량은 각각 293.2 mm, 283.0 mm로 거의 일치하였으며 하위 50 % 유출량 합은 -9.5 %의 차이를 보였다. 검정기간도 모든 평가지표항목에 대해 HSPEXP 모형평가지표의 허용한계치를 만족하여 실측값의 경향을 잘 표현한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 모형평가지표의 기준을 고려하여 선정된 매개변수의 신뢰성을 분석하기 위해 선정된 매개변수를 (A), 보정과 검정의 총 유출량이 가장 근접하게 모의되는

매개변수를 (B)로 구분하여 실측치와 비교·분석한 결과, 보정기간에 대한 B의 총유출량은 실측값의 총유출량보다 -4.0 % 낮은 값으로 나타나 A의 총유출량보다 다소 큰 차이를 보였다. 반면 검정기간에 대한 실측값의 총유출량과 차는 A가 5.9 %이고 B가 3.1 %로 나타나 B의 총유출량이 실측값과 더 유사한 것으로 나타났으며 총유출량의 하위 50 % 유출량 합 또한 B가 3.0 %의 오차를 나타내어 A의 경우보다 실측값에 더 가까운 값을 나타냈다. 그러나 이를 제외한 총유출량의 상위 10 % 유출량 합, 첨두유출량, 여름 홍수유출량 등에서 B의 경우가 HSPEXP의 모형평가지표의 기준을 벗어나 실측값과 큰 차이를 보였다. 이는 HSPEXP의 모형평가지표의 기준을 고려하여 선정된 매개변수가 총 유출량만을 고려하여 선정된 매개변수보다 대상유역에서 발생할 수 있는 유출량의 경향을 잘 나타내는 것으로 판단된다. 이와 같이 유역관리의 효율을 증진시키기 위한 모형인 HSPF 모형의 적용 시 HSPEXP를 이용할 경우 사용자의 모형 이용 목적에 따라 매개변수 보정에 필요한 함수를 설정하고 이에 대한 기준을 수립한다면 국내의 각 유역에 대해 보다 정확한 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 국내 유역에 대해 HSPF 모형의 적용 시 더욱 신뢰도 높은 실측자료와 HSPEXP를 이용한다면 국내 수문모형적용에 대한 이해를 넓히고 보다 많은 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Kim, N. W., A. H. Shin, and C. G. Kim, 2009. Comparison of SWAT-K and HSPF for Hydrological Components Modeling in the Chungju Dam Watershed. *Journal of the Environmental Sciences* 18(6): 609-619 (in Korea).
2. Kim, S. M., and S. W. Park, 2004. Calibration and Validation of HSPF Model to Estimate the Pollutant Loads from Rural Small Watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(8): 643-651 (in Korea).
3. Kim, S. M., C. H. Seong, and S. W. Park, 2009. Calibration of Hydrologic Parameters of HSPF Using HSPEXP Model Performance Criteria. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4) 15-20 (in Korea).
4. Jeon, J. H., 2010. Simulation of Sediment Yield from Imha Watershed Using HSPF. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(6) 39-48 (in Korea).
5. Jeon, J. H., D. H. Choi, K. J. Lim, and T. D. Kim, 2010. Automatic Calibration of Stream Flow and

- Nutrients Loads Using HSPF-PEST at the Bochung A Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5) 77-86 (in Korea).
6. Jung, J. Y., Y. R. Shin, J. H. Choi, I. K. Choi, Y. C. Gyeong, and Y. K. Son, 2011. Characteristics of Pollutant Loads in Saemangeum Watershed Using HSPF. *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 18(2): 54-65 (in Korea).
7. Choi, H. G., K. Y. Han, B. H. Hwang, W. H. Cho, 2011. Application Analysis of HSPF Model Considering Watershed Scale in Hwang River Basin. *Journal of Environmental Impact Assessment* 20(4): 509-521 (in Korea).
8. Benham, B. L., K. M. Brannan, S. M. Morris, G. R. Yagow, and R. W. Zeckoski. (2005). Bacteria total maximum daily load development for North River. Richmond: Virginia Department of Environmental Quality. <http://www.deq.virginia.gov/>. Accessed 20 July 2012.
9. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr., T. H. Jobes, and A. S. Donigan, Jr. (2001). Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF): User's manual for release 12. *U.S. Environmental Protect Agency*, Athens, GA.
10. Boyle, D. P., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research* 36(12): 3663-3674.
11. Kim, S. M., B. L. Benham, K. M. Brannan, R. W. Zeckoski, and J. Doherty. (2007). "Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods." *Water Resources Research* 43.
12. Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235: 276-288.
13. Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River Fow Forecasting through Conceptual Models: Part I. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
14. USEPA, (2000). BASINS technical note 6: Estimating hydrology and hydraulic parameters for HSPF, EPA-823-R-00-012, *U.S. Environmental Protection Agency*, Office of Water, Washington, D.C.
15. USGS, (2000). Water Resources Applications Software: HSPF, <http://www.usgs.gov/>. Accessed 9 August 2012.