

PEST를 이용한 임하호유역 HSPF 수문 보정

전지홍 · 김태일 · 최동혁 · 임경재* · 김태동†

안동대학교 환경공학과
*강원대학교 지역건설공학과

Hydrologic Calibration of HSPF Model using Parameter Estimation (PEST) Program at Imha Watershed

Ji-Hong Jeon · Tae-Il Kim · Donghyuk Choi · Kyung-Jae Lim* · Tae-Dong Kim†

Department of Environmental Engineering, Andong National University

*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(Received 25 May 2010, Revised 20 July 2010, Accepted 23 July 2010)

Abstract

An automatic calibration tool of Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), Parameter Estimation (PEST) program, was applied at the Imha lake watershed to get optimal hydrological parameters of HSPF. Calibration of HSPF parameters was performed during 2004 ~ 2008 by PEST and validation was carried out to examine the model's ability by using another data set of 1999 ~ 2003. The calibrated HSPF parameters had tendencies to minimize water loss to soil layer by infiltration and deep percolation and to atmosphere by evapotranspiration and maximize runoff rate. The results of calibration indicated that the PEST program could calibrate the hydrological parameters of HSPF with showing 0.83 and 0.97 Nash-Sutcliffe coefficient (NS) for daily and monthly stream flow and -3% of relative error for yearly stream flow. The validation results also represented high model efficiency with showing 0.88 and 0.95, -10% relative error for daily, monthly, and yearly stream flow. These statistical values of daily, monthly, and yearly stream flow for calibration and validation show a 'very good' agreement between observed and simulated values. Overall, the PEST program was useful for automatic calibration of HSPF, and reduced numerous time and effort for model calibration, and improved model setup.

keywords : Automatic calibration, Hydrological simulation, Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), Imha watershed, Optimization, Parameter Estimation (PEST)

1. 서론

경상북도 북부 지역에 위치한 임하호유역은 낙동강 상류 유역에 위치하고 있음에도 불구하고, 강우시 유역내 토사유출로 인하여 탁수문제가 빈번하게 발생하고 있으며, 2007년에는 우리나라에서 총 4개의 비점오염관리지역 중 하나로 지정되었다. 비점오염 측면에서 임하호 유역은 중요한 지역이기 때문에 몇몇 연구자들에 의해 수문 및 부유사 모델링에 대한 연구가 수행되었다. 김보경(2006)은 SWAT을 이용하여 2001~2005년간 월별 유출량 모의값과 실측값의 회귀분석결과를 이용하여 결정계수의 값으로 모델의 정확성을 평가하였다. 박윤식 등(2007)은 2002~2003년을 보정기간, 2004년을 검증기간으로 하여 월별 유출량 모의결과를 결정계수와 모델효율을 구하여 SWAT을 검·보정한 바 있다. 토양유실은 강우강도와 그에 따른 유출유량에 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 비점오염부하량이나 토양유실

모의를 위한 수문보정에서는 월별 모의보다는 일별모의결과를 이용한 모델의 검·보정 평가가 이루어져야 한다. 또한 다양한 강우의 특성을 모델이 잘 반영하기 위해서는 장기간을 대상으로하는 모델 검·보정과정도 필요하다. 일별모의결과에 의한 임하호 유역에 대한 유출량 보정은 김정근 등(2008)에 의해서 수행된바 있으나 여전히 보정기간(2년)과 검증기간(1년)이 짧다는 한계점을 가지고 있다. 전지홍 등(2009b)은 수질학적 관점에서의 수문모델 유출량 보정방법에 대한 평가를 실시함으로써, 결정계수나 모델효율을 이용한 유출량의 1:1 비교뿐만 아니라, 계절별 혹은 연별 총량에 대한 상대오차 계산과 유출량발생빈도에 대한 예측치와 실측치의 목적함수 계산 등과 같은 다양한 측면에서의 통계결과를 이용한 모델보정의 필요성을 제기한 바 있다.

모델의 보정과 검증은 모델의 모의결과에 대한 정확성을 높이기 위한 모델적용과정에 있어서 반드시 선행되어야 하는 과정이다. 그러나 최근들어 널리 사용되고 있는 SWAT이나 HSPF 유역모델은 고도의 전문성을 필요로 할 뿐만 아니라 모델 보정에 있어서 많은 시간과 노력을 필요로 하며 이러한 전문성과 보정과정에서의 어려움은 모델사용을

† To whom correspondence should be addressed.
tdkim@andong.ac.kr

제한하는 주요한 요인이었다. 이러한 한계점을 극복하기 위해서 모델의 보정인자를 자동적으로 보정해 줄 수 있는 최적화 알고리즘이 개발되었다. 우리나라에서도 최적화를 통한 모델 매개변수보정에 대한 연구가 수행되었는데, SCE-UA 최적화 알고리즘을 L-THIA모델에 연계하여 적용시켰으며(전지홍 등, 2009a), 낙동강 유역에 존재하는 총 8개의 유역을 대상으로 SCE-UA 알고리즘을 이용하여 낙동강 수계를 대표할 수 있는 CN값을 도출한 바 있다(전지홍 등, 2009c). 최근에는 SWAT이나 HSPF의 자동 검·보정을 위한 패키지 툴이 개발되어 사용되고 있다. 전지홍 등(2009b)은 HSPF의 매개변수보정을 위해 개발된 PEST을 이용하여 전주천 유역의 수문보정을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 임하호 유역을 연구대상지역으로 2004 ~ 2008년(5년)을 보정기간으로, 1999 ~ 2003년(5년)을 검증기간으로 하여 HSPF모델과 PEST 유출 매개변수 보정 프로그램을 연계적용하여 다양한 통계 기법들을 통하여 모델 검·보정을 평가함으로써 HSPF-PEST의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

낙동강 수계의 상류에 위치한 임하호 유역은 주요 하천으로는 반변천이 흐르고 있으며 유역면적이 1,361 km²이고 유로연장은 98.1 km로써 북쪽 태백산맥을 분수령으로 표고 1,219 m인 일원산을 수원으로 하고 있으며 행정구역상 경상북도 영양군(667.08 km²), 청송군(516.93 km²), 안동시(180.38 km²)의 3개 시군으로 구성되어 있다(김태동 등, 2009). 반변천 유역은 전반적으로 산악지대로 구성되었으며 낙동강 유역면적의 5.7%를 차지하고 있다. 유역 남측을 흐르는 용전천은 표고 807 m인 구암산과 무포산 및 주왕산을 수원으로 하며 청송읍을 지나 후평리 지점에서 반변천

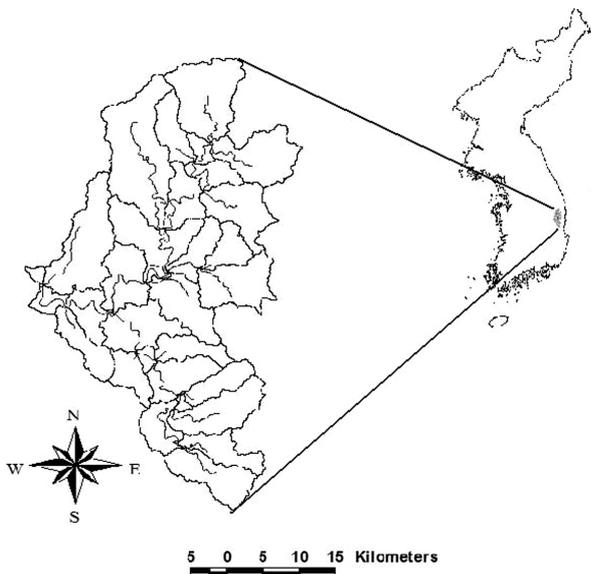


Fig. 1. Study area.

과 합류하는데 유역면적은 402.6 km²이고 유로연장은 54.3 km이다. 합류 후 반변천은 또 하나의 지류로서 표고 607 m인 장갈령을 수원으로 남류하는 유역면적 97.5 km², 유로연장 19.0 km인 대곡천과 망천리에서 합류하며 이곳 직하류에 임하다목적댐이 위치하고 있다(김태동 등, 2009).

2.2. PEST 개요

PEST 프로그램은 미국의 S.S. Papadopoulos & Associates, Inc.에서 개발되었으며 현재 PEST 프로그램과 PEST 적용을 위해 수정된 HSPF는 <http://www.pesthomepage.org/Home.php>에서 다운로드할 수 있다. PEST 프로그램은 기능적으로 크게 최적화될 인자의 종류와 HSPF 입력파일에서의 위치, 최적화될 인자의 범위를 읽어 들이는 ① Parameter definition and recognition과, 모델의 결과를 관측값의 단위와 일치시켜 목적함수를 계산할 수 있도록 해주는 ② Observation definition and recognition, 비선형 최적화 기술 중의 하나인 Gauss-Marquardt-Levenberg (GML)을 사용하는 ③ Nonlinear estimation and predictive analysis algorithm으로 구성되어 있다(전지홍 등, 2009b). PEST의 적용 흐름도는 Fig. 2와 같다. 매번 모델이 실행되기 전에 PEST는 GML에 의해 생성된 매개변수의 값을 모델의 입력파일에 입력하여 새로운 모델입력파일을 생성한 후 모델을 실행시키며, 모델에 의해 모의된 예측값을 읽어 들이고 실측값과 함께 목적함수를 계산한 후 매개변수별 난수를 발생시킨다. 이러한 일련의 과정은 특정한 조건을 만족 할 때까지 반복하게 된다.

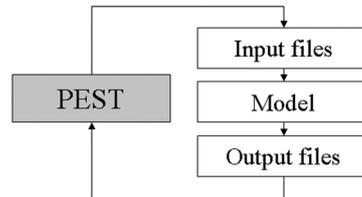


Fig. 2. PEST interact with a model (Watermark Numerical Computing, 2005).

2.3. HSPF 구축

HSPF의 구축은 Better Assessment Science Integrating Point Nonpoint Source(BASINS)3.0을 이용하였다. BASINS3.0을 적용하기 위해서는 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM)과 토지피복도, 기타 GIS 파일을 필요로 한다. 환경부의 지리정보서비스(<http://egis.me.go.kr/egis/>)에서 30 m 격자의 DEM과 2007년도에 작성된 중분류 토지피복도를 다운받았다. 환경부 토지피복도에 의한 임하호유역의 토지이용상태를 살펴보면 산림이 전체면적의 약 80%로 가장 많은 면적을 차지하고 있었으며, 농경지가 약 15%를 나타내었다. 도시지역과 나지가 각각 1.4%, 1.1%로 가장 낮은 면적비율을 나타내어 전형적인 산림지역인 것으로 나타났다 (Table 1).

BASINS의 Automatic Delineate Tool에서 DEM자료에 하

천도를 중첩시켜 소유역을 구분함으로써 소유역도와 하천도, 유역출구지점을 생성한 결과 총 47개의 소유역으로 구분되었다(Fig. 1). 소유역별 토지피복상태를 추출하기 위하여 BASINS의 Land use & soil definition tool을 이용하여 중분류 토지피복도를 중첩시켰다. 환경부 중분류 토지피복상태를 HSPF를 적용하기 위하여 도시, 농경지, 산림, 나지, 초지, 수체로 총 6가지로 재분류하였다(Fig. 3). HSPF 모의를 위해서는 총 6가지(강수량, 대기온도, 이슬점온도, 운량, 풍속, 일사량)의 시간별 기상자료를 필요로 한다. 강수량은 수자원공사에서 유역내에서 측정하고 있기 때문에 수자원공사의 자료를 활용하였으며, 강수량을 제외한 5가지의 기상자료는 입하호 유역에서 가장 가까운 안동기상대 자료를 활용하였다. 총 6개의 기상자료는 BASINS의 WDMUtil 프로그램에 의해 wdm 파일 형태로 구축하였으며, 증발량과 증발산량은 WDMUtil 프로그램에서 계산된 값을 사용하였다. HSPF의 입력파일(uci)은 BASINS의 model-HSPF tool에 의해 자동으로 생성하였다.

2.4. HSPF 보정 및 검증

PEST 프로그램에 의한 HSPF 매개변수보정은 wdm에서 생성되는 유출량과 일정한 간격의 총유출량과 유출량 발생일수를 기준으로 목적함수를 계산함으로써 이루어진다. 본 연구에서는 wdm의 일별유출량 자료와 월별 총량, 유출량 발생일수를 기준으로 매개변수 보정을 실시하였다. 보정기간은 2004~2008년으로 하였으며, 보정에서 결정된 매개별 수값을 그대로 사용하여 검증용 하였으며 검증기간은 1999~2003년으로 하였다. 검·보정의 정확도를 평가하기 위하여 통계기법과 그래프 기법을 활용하였다. 통계기법에 있어서는 일별유출량과 월별유출량은 상관계수(correlation coefficient;

R)와 결정계수(coefficient of determination; R^2), Nash-Sutcliffe coefficient (NS)를 계산하였으며 월별 유출량은 상대오차(relative error; RE)를 계산하였다. 상관계수와 결정계수, NS 값은 1에 가까울수록 상대오차는 0에 가까울수록 예측치와 실측치가 유사한 값을 나타내는 것을 의미한다. 각각의 계산은 식 (1)~(4)와 같다.

$$RE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \tag{1}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \tag{2}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \tag{3}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2} \tag{4}$$

여기서, P_i 와 O_i 는 각각 일별 유출량에 대한 예측치와 관측치이며, \bar{O} 는 실측치의 평균값이며, n 은 일 유출량에 대

Table 1. Land use classification for HSPF application

	Urban	Agricultural	Forest	Pasture	Barren	Water	Total
Area (km ²)	18.5	204.3	1085.4	5.4	14.3	32.9	1361
	1.4%	15.0%	79.75%	0.4%	1.1%	2.4%	100%

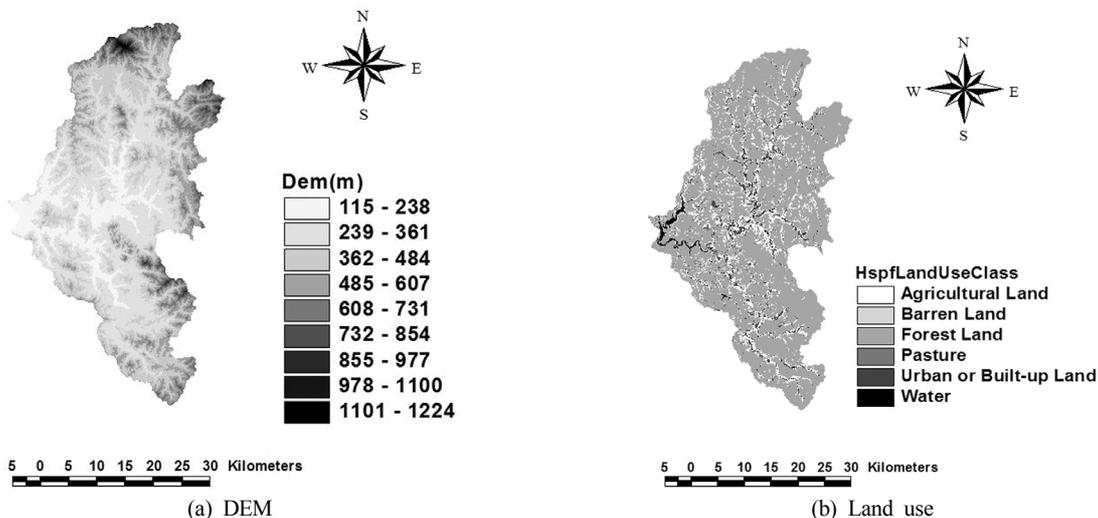


Fig. 3. GIS data for HSPF application.

Table 2. General calibration/validation target or tolerances for HSPF application (Donigian, 2000, 2002)

		Very good	Good	Fair	Poor
Daily	R^2	>0.8	0.7~0.8	0.7~0.6	<0.6
Monthly	R^2	>0.85	0.75~0.85	0.65~0.75	<0.65
Yearly	RE	<10%	10~15%	15~25%	>25%

한 총 개수이다.

그래프 기법은 일별 유출량은 실측치와 예측치의 시간에 따른 유출량의 상대적인 비교그래프와 유황그래프, 1:1분산도를 이용하였으며, 월별 유출량은 실측치와 예측치의 시간에 따른 상대적인 비교 그래프와 1:1분산도를 이용하였다. 연간 유출량은 막대그래프를 활용하였다. 통계기법의 결과를 이용하여 모델 검·보정의 정도를 매우 좋음(very good), 좋음(good), 보통(fair), 나쁨(poor)으로 구분하였는데 그 기준은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 일별 유출량

일별 유출량 검·보정에 대한 통계분석결과와 시간에 따른 실측치와 예측치 비교 그래프는 각각 Table 3과 Fig. 4와 같다. PEST에 의한 매개변수 보정결과, 상관계수와 결정계수, 모델효율값은 각각 0.91, 0.84, 0.83으로 나타났으며, 검증결과는 각각 0.94, 0.88, 0.88로 검·보정 모두 매우 높은 모델효율 값을 나타내었다. Donigian(2002)은 다년간의 유역모델 보정경험을 토대로 일별, 월별 예측치와 실측

Table 3. Statistical analysis of calibration and validation for daily stream flow

	R	R^2	NS
Calibration	0.91	0.84	0.83
Validation	0.94	0.88	0.88

치에 대한 상관계수 및 결정계수를 통한 모델적용성을 평가하였으며, 이 기준으로 하였을 경우 일별 유출량 모의정도는 보정 및 검증 모두 ‘매우 좋음(very good)’으로 나타나 일별 모의결과에 대한 높은 적용성을 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 일별 유출량에 대한 실측치와 예측치의 1:1분산도와 유출량 발생빈도의 보정 및 검증결과를 나타내고 있다. 5년동안의 일별모의결과임을 감안해 볼 때, 1:1선에 대체적으로 밀집되어 있으며 유출량 발생빈도 곡선 또한 실측치와 예측치가 거의 유사한 것으로 나타났다.

3.2. 월별 유출량

월별 유출량의 검·보정에 대한 시간별 실측치 예측치 비교와 통계분석결과는 각각 Fig. 7과 Table 4와 같다. 보정시 상관계수, 결정계수, 모델효율은 각각 0.99, 0.97, 0.97로 나타났으며 검증시에는 각각 0.98, 0.97, 0.95의 매우 높은 값을 나타내었다. Donigian(2002)의 기준으로 하였을 경우에는 월별 유출량의 보정 및 검증 결과 역시 “매우 좋음(very good)”으로 나타나 월별 매개변수보정에 높은 적용성을 나타내었다. Fig. 8은 월별 유출량에 대한 실측치와 예측치의 1:1분산도를 나타내고 있으며, 보정과 검증 모두 1:1선에 밀집해 있는 것으로 나타났다.

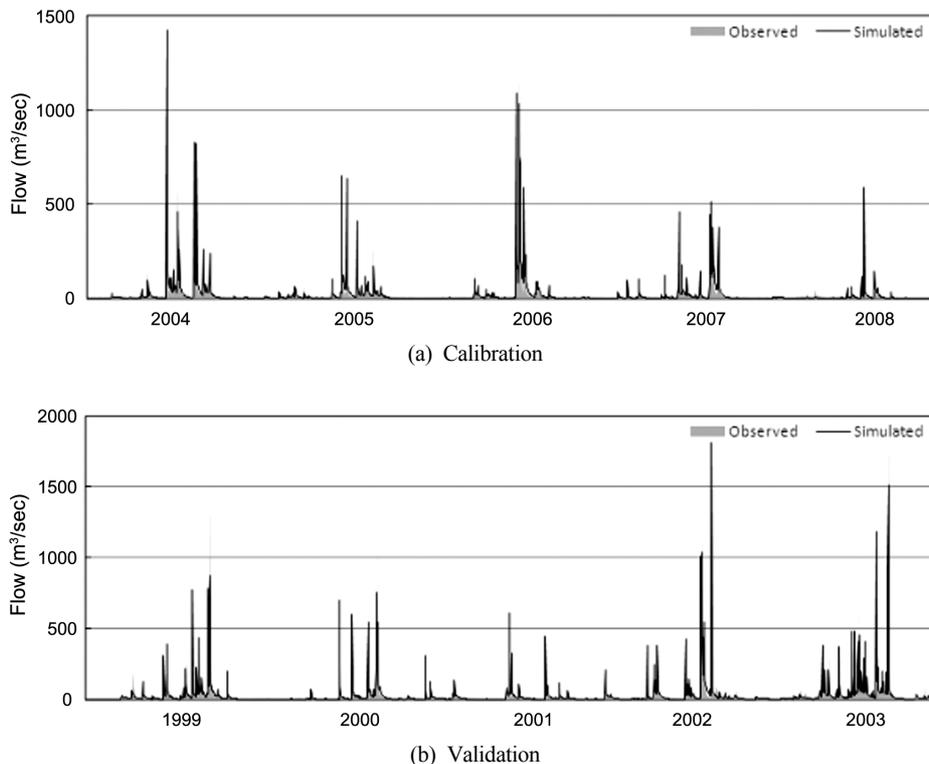


Fig. 4. Comparison of observed and simulated daily stream flow.

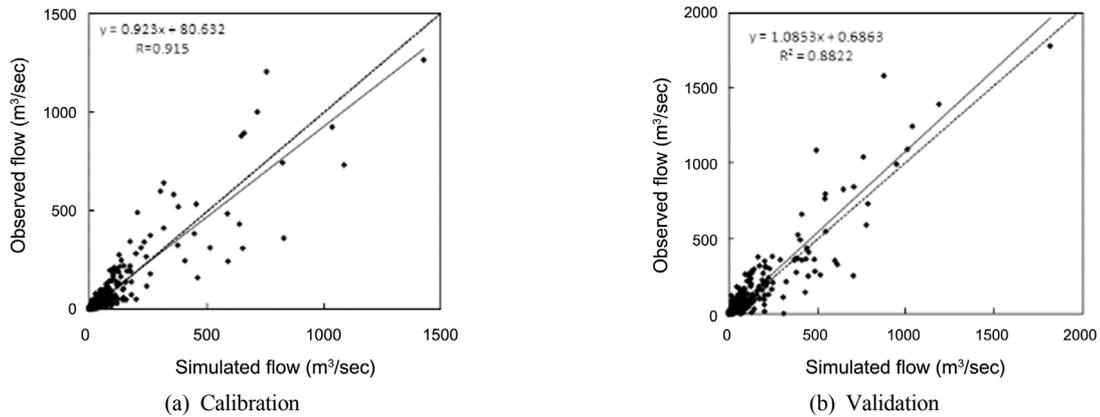


Fig. 5. The scatter plots of daily stream flow for calibration and validation.

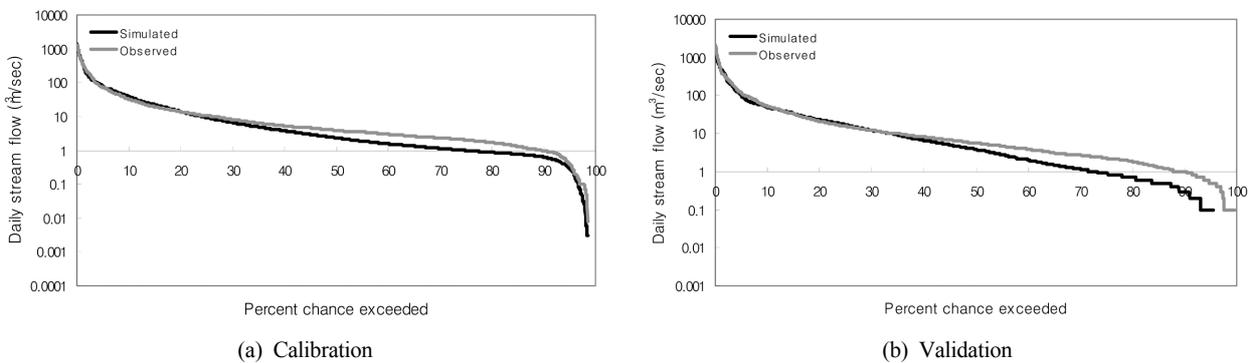


Fig. 6. Comparison of flow duration curves of simulated and observed daily stream flow.

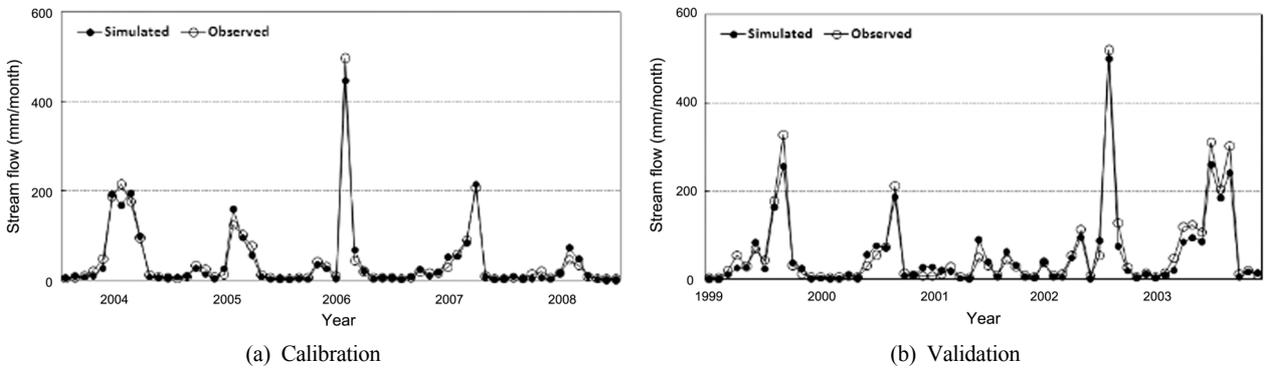


Fig. 7. Comparison of observed and simulated monthly streamflow.

Table 4. Statistical analysis of calibration and validation for monthly stream flow

	<i>R</i>	<i>R</i> ²	<i>NS</i>
Calibration	0.99	0.98	0.97
Validation	0.98	0.97	0.95

3.3. 연유출량

연간 총유출량에 대한 모의 결과는 Fig. 9와 Table 5와 같다. 연간 유출량이 약 500 mm이하의 경우에는 모델이 과대평가하는 경향을 나타내었으며, 연유출량이 500 mm이상의 경우에는 모델이 실측치보다 과소평가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 가장 크게 과대평가한 경우는 유출량이 가장 낮은 2001년도이며 실측치와 예측치가 각각 221 mm,

295 mm를 나타내어 상대오차 33%를 나타내었다. 가장 크게 과소평가한 해는 유출량이 가장 높은 2003년으로 실측치와 예측치가 각각 1265 mm, 1008 mm로 상대오차 -20%를 나타내었다. Donigian(2000)은 연 유출량의 실측치와 예측치의 상대오차를 통하여 유출량 검·보정의 정도를 나타내었는데, 10년 동안의 연간유출량의 모의결과 중 총 7년치가 매우 좋음(very good)을 나타내었으며, 2년은 보통(fair), 1년은 나쁨(poor)을 나타내었다. 보정기간동안 예측치와 실측치의 연 평균 유출량은 각각 472 mm, 489 mm였으며, 검증기간 동안에는 각각 655 mm, 728 mm인 것으로 나타났다. 보정 및 검증에 대한 상대오차는 각각 -3%, -10%인 것으로 나타나 보정기간과 검증기간에 대한 연평균 유출량 모의 결과 모두 매우 좋음(very good)을 나타내

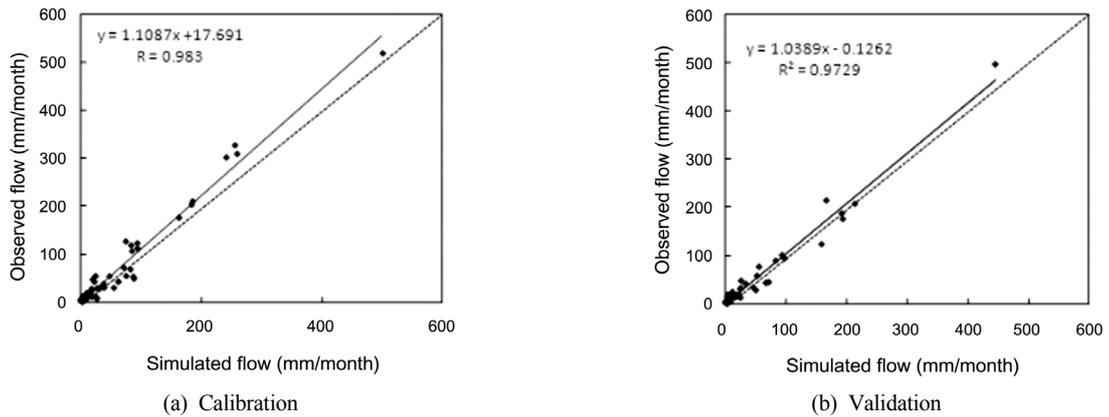


Fig. 8. The scatter plots of monthly stream flow for calibration and validation.

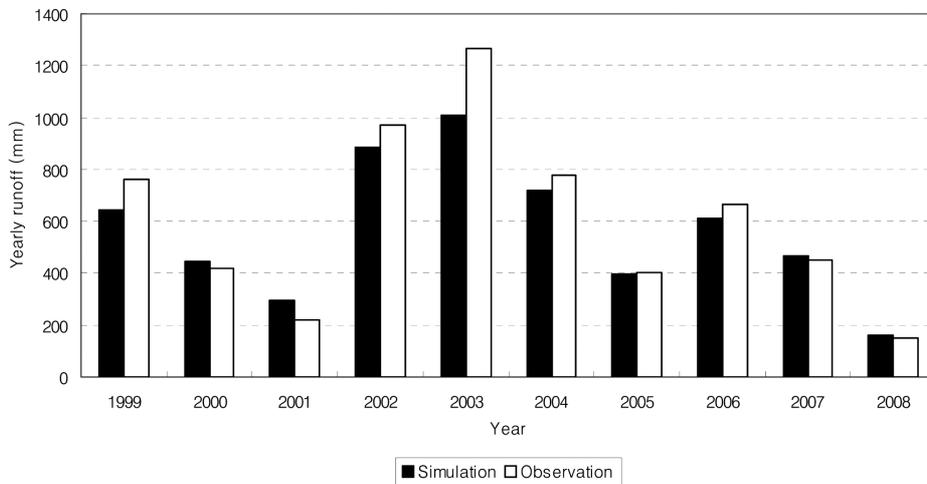


Fig. 9. Comparison of yearly runoff between simulated and observed values.

Table 5. Relative errors between simulated and observed values

Year	Simulated yearly runoff (mm/yr)	Observed yearly runoff (mm/yr)	Relative error	Model performance
2004	717	777	-8%	Very Good
2005	399	401	0%	Very Good
2006	613	667	-8%	Very Good
2007	467	449	4%	Very Good
2008	163	151	8%	Very Good
Calibration	472	489	-3%	Very Good
1999	645	765	-16%	Fair
2000	444	417	6%	Very Good
2001	295	221	33%	Poor
2002	883	971	-9%	Very Good
2003	1008	1265	-20%	Fair
Validation	655	728	-10%	Very Good

어 연간유출량에 대한 PEST-HSPF의 연계적용 또한 매우 적용성이 높은 것으로 나타났다.

3.4. 매개변수 고찰

HSPF의 수문보정에 사용된 보정인자와 현실적으로 적용

가능한 범위와 본 연구에서의 최적화된 값은 Table 6과 같다. 토양상층부저류량(UZSN)과 토양하층부저류량(NZSN), 식생에 의한 차단(CEPSC)는 적용가능한 범위내에서 비교적 낮은 값을 나타내어 토양이나 식생에 의해 저류되는 강수의 양은 적은 것으로 나타났다. 또한 지하수에서의 증발

Table 6. Possible ranges and optimized values of calibrated HSPF parameters

Parameter	Description	Possible range	Optimized values
LZSN	Lower zone nominal soil moisture storage (mm)	50 ~ 380	50.8
INFILT	Related to infiltration capacity of the soil (mm/hr)	0.25 ~ 25	0.25
KVARY	Groundwater recession flow parameter (cm ⁻¹)	0 ~ 7.62	0
AGWRC	Groundwater recession rate (day ⁻¹)	0.83 ~ 0.99	0.99
DEEPPFR	Fraction of groundwater inflow to inactive groundwater recharge	0.0 ~ 0.5	0.0
BASETP	Fraction of remaining ET from baseflow	0.0 ~ 0.05	0.02
CEPSC	Interception storage capacity (mm)	0.25 ~ 10.1	2.54
UZSN	Upper zone nominal soil moisture storage (mm)	1 ~ 50	14.6
NSUR	Manning's n for overland flow	0.01 ~ 0.5	0.01
INTFW	Interflow inflow parameter	1.0 ~ 10.0	4.55
IRC	Interflow recession parameter	0.3 ~ 0.85	0.85
LZETP	Lower zone ET parameter	0.1 ~ 0.9	0.1

Source: U.S. EPA (2000)

산계수(BASETP)와 토양하층부에서의 증발산계수(LZETP)는 적용가능한 범위내에서 낮은 값을 나타내어 증발산에 의한 손실은 낮은 것으로 나타났다. 또한 불활성 지하수층으로의 유입비율(DEEPPFR)은 가장 낮은 범위의 값으로 나타내어 불활성 지하수로의 유입에 의한 손실량은 없는 것으로 나타났다. 낮은 침투율과 낮은 조도계수 또한 지표에서의 유출이 매우 높을 것으로 예상된다.

최적화된 모델보정값을 고찰한 결과, 침투에 의한 토양으로의 유입과 대기로의 증발에 의한 손실이 최소화 되도록 보정이 되어 있는 것으로 나타났으며, 지표하유출보다는 지표유출이 상대적으로 높을 것으로 예상된다. 이는 Fig. 9와 Table 5의 연간 유출량모의 결과를 살펴보면 보정된 결과를 알 수 있는데, HSPF의 모의값이 전반적으로 실측값보다 작게 모의되기 때문에 PEST프로그램은 실측값과 예측값의 오차를 줄이기 위해서 유역에서의 손실량을 최소화 하도록 보정값을 최적화한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 최적화된 결과는 보정인자의 허용범위내에서 검·보정의 허용오차내에서 최적화된 것을 알 수 있다.

많은 국내 연구자들은 유역모형을 이용한 유출량 검·보정시 월별 모의결과를 이용하거나, 단기간의 모의결과를 이용하여 모형의 검·보정에 대하여 평가를 수행하였다. 전지홍 등(2009b)는 유역모형의 유출량 보정시 다양한 평가기법을 제시하였으며, 수질학적 측면에서의 유출량 보정 접근방법을 제시한 바 있다. 특히, 수질오염총량제에 있어 기준유량 산정시의 유역모형 사용에 대한 필요성이 높아지고 있으며, 나아가 유역에서의 오염부하량 산정시 유역모형의 적용성을 검토하고 있다. 수질오염총량제에 있어 기준유량 산정시 10년 평균 갈수량을 산정하여 적용하기 때문에 미측정 지점의 기준유량 산정을 위한 유역모형 적용에 있어서는 월별 모의결과보다는 일별 모의결과를 이용하기 때문에 일별 유출량에 대한 모델 검·보정의 수행이 필수적이라고 할 수 있다. 또한 모델 보정의 목적함수 계산에 있어 시간에 따른 유출량의 1:1 비교시 침투유량이 얼마나 잘 맞느냐에 따라 모델효율이나 결정계수가 결정되기 때문에 유출량 발생빈도를 대상으로한 목적함수 계산에 따른 모델 검·보정 평가가 추가되어야 할 것이다. 본 연구에서는 장기

간의 유출량에 대하여 PEST 프로그램을 이용하여 HSPF 모델의 다양한 측면에서의 검·보정 평가에 대하여 소개하였다. PEST는 일별, 월별 유출량 및 유출량 발생빈도를 기준으로 HSPF를 보정하였으며, HSPF 보정인자의 최적화 값을 고찰한 결과, 토양속으로의 침투와 대기로의 증발산에 의한 손실을 최소화함으로써 유출율이 비교적 높게 모의 되도록 최적화되었다. 본 연구에서는 일별, 월별, 년별 유출량에 대하여 모델 모의 능력에 평가하기 위하여 검·보정에 대한 다양한 통계값을 계산한 결과 검보정 모두 가장 높은 단계인 '매우 좋음(Very good)'으로 나타나 PEST의 매우 높은 적용성을 나타내었다. HSPF를 이용한 유역에서의 유출량 해석시 모델 사용의 목적에 맞도록 PEST 프로그램을 적용함으로써 보다 합리적인 결론 도출이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 임하호 유역의 유출량 보정을 위하여, 수문 모델인 HSPF와 최적화 프로그램인 PEST를 이용하여 2004 ~ 2008년(5년)을 보정기간으로 하고 1999 ~ 2003년(5년)을 검증기간으로하여 모델을 자동보정시켜 HSPF 유출량 보정에 있어 PEST의 적용성을 평가하였다. PEST 프로그램 적용에 있어서는 일별유출량과 월별유출량, 유출량 발생빈도를 포함한 3가지 항목을 기준으로 HSPF를 보정하였다. 그 결과, 일별 유출량에 대한 모델효율은 보정시 0.83, 검증시 0.88을 나타내어 매우 높은 보정 결과를 나타내었으며, 선행 연구 결과를 바탕으로 검·보정의 정도는 매우 좋음을 나타내었다. 월별 유출량에 대한 모델효율은 보정시 0.97, 검증시 0.95로 검증의 정도는 모두 매우 좋음을 나타내었다. 보정과 검증기간의 연평균 유출량에 대한 상대오차는 각각 -3%, -10%를 나타내어 물수지에 필요한 연간유출량 보정의 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 유출량 발생빈도에 대한 결과 또한 저유량일때에는 다소 차이가 났었지만 전반적으로 검·보정 모두 예측치가 실측치를 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 유출량 발생빈도에 대한 보다 정확한 모의를 위해서는 일별·월별 유출량에 대한 목적함수 계산을

삭제하고 유출량 발생빈도만 고려하여 PEST프로그램을 실행시키면 가능할 것으로 판단된다.

HSPF의 유출량 보정에 있어서 PEST 프로그램의 적용성이 높은 것으로 나타났다. HSPF는 고도의 전문성과 보정시 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 HSPF 적용에 많은 제약이 있었기 때문에 PEST 프로그램의 연계적용을 통하여 HSPF를 보다 손쉽게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 임하호유역 탁수저감사업 효과분석 및 관리방안 용역(2차) 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

김보경(2006). SWAT 모형 매개변수의 불확실성을 고려한 임하호의 부유사량 추정. 석사학위논문, 인하대학교

김정곤, 손경호, 노준우, 이상욱(2008). SWAT 모형을 이용한 임하·안동 유역의 부유사량 발생량 추정. *대한환경공학회지*, **30**(12), pp. 1209-1217.

김태동, 최동혁, 전지홍, 서태원, 배수호, 임길재(2009). 임하호유역 탁수저감사업 효과분석 및 관리방안. 중간보고서. 국립안동대학교.

박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재(2007). 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위

한 SWAT 모델의 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 467-473.

전지홍, 김태동, 최동혁, 임경재, 버나드엔젤, 전지홍(2009a). 환경부 토지피복 중분류 적용을 위한 L-THIA 모델 수정과 SCE-UA연계적용에 의한 금호강유역 비점오염 분포 파악. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(2), pp. 311-321.

전지홍, 최동혁, 김정진, 김태동(2009b). 수질학적 관점에서 수문모델 유출량 보정 방법 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(3), pp. 432-440.

전지홍, 최동혁, 김정진, 김태동(2009c). SCE-UA 최적화기법에 의한 낙동강 유역의 CN값 도출. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(2), pp. 245-255.

Donigian, Jr., A. S. (2000). HSPF Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issue, Slide #L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000. Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C. USA.

Donigian, Jr., A. S. (2002). Watershed Model Calibration and Validation: The HSPF Experience, National TMDL Science and Policy Specialty Conference 2002. Water Environment Federation, Phoenix, Arizona.

U.S. EPA. (2000). BASINS Technical Note 6: Estimating Hydrology and Hydraulic Parameters for HSPF. EPA-823-R00-012. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, USA.

Watermark Numerical Computing (2005). PEST Model-Independent Parameter Estimation User manual: 5th Edition. Watermark Numerical Computing. USA.