HSPF-PEST를 이용한 불연속 실측치 자동보정

Automatic Calibration for Noncontinuous Observed Data using HSPF-PEST

전지홍^{*,†} · 이새봄^{**}

Jeon, Ji-Hong · Lee, Sae-Bom

ABSTRACT

Applicability of 8 day interval flow data for the calibration of hydrologic model was evaluated using Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) at Kyungan watershed. The 8 day interval flow monitored by Ministry of Environment located at upstream was calibrated and periodically validated during 2004-2008. And continuous daily flow monitored by Ministry of Construction & Transportation (MOCT) and located at the mouth was compared with daily simulated data during 2004-2007 as spatial validation. Automatic calibration tool which is Model-Independent Parameter Estimation & Uncertainty Analysis (PEST) was applied for HSPF calibration procedure. The model efficiencies for calibration and periodic validation were 0.63 and 0.88, and model performances were fair and very good, respectively, based on criteria of calibration tolerances. Continuous daily stream flow at the mouth of Kyungan watershed were good agreement with observed continuous daily stream flow with showing 0.63 NS value. The PEST program is very useful tool for HSPF hydrologic calibration using non-continuous daily stream flow as well as continuous daily stream flow. The 8 day interval flow data monitored by MOE could be used to calibrate hydrologic model if the continuous daily stream flow is unavailable.

Keywords: HSPF; PEST; 8 day interval flow; automatic calibration; Kyungan watershed; hydrologic calibration

1. 서 론

최근 유역관리에 있어서 유역모델은 유역에서의 수문 및 비점오염물질의 거동을 파악하거나 수리·수문현황, 강우사상, 토지 이용현황, 오염원 등을 고려한 유역 평가에 매우 유용한 수단으로 이용되고 있다 (Jang et al., 2009). 최근 들어 컴퓨터의 발달로 인하여 유역에서의 수문모의를 보다 상세히 할 수 있는 복잡한 모델들이 개발되고 적용되고 있다. 수문모델 중 대표적인 상세모델로는 논, 밭, 산림 등 투수지형이 많은 유역에 많이 적용되는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool), AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model) 등과 주거지와 공업단지 등 불투수지형이 많은 유역에 적용되는 SWMM (Storm Water Management Model), STORM (Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model) 등과 투수지형과 불투수지형이 혼재되

어 있는 유역에 적용할 수 있는 HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran) 모델 등이 있다 (Knisel et al., 1980; Beasley et al., 1981; USEPA, 2001).

모델 적용에 있어 보정은 모델입력인자를 조절하여 실측치와 예측치의 잔차를 최소화 하는 과정이며 검정은 보정에서 결정된 인자를 그대로 적용하여 또 다른 실측치에 대한 예측치의 적용성을 평가하는 과정이다. 모델적용에 있어 보정과 검정과정은 모델의 정확성을 확보하는데 있어 반드시 이루어져야할 과정이다. 그러나 상세모델은 보다 많은 보정인자를 필요로 하며, 시행착오법에 의한 보정과정은 많은 시간과 노력, 고도의 전문성을 요구하기 때문에 보정과정은 상세모델의 사용을 제한하는 중요한 요소이다. 뿐만 아니라, 시행착오법에 의한 모델 보정에는 모델 사용자의 주관성이 포함되어 있어 모델 사용자가 누구냐에 따라 모델 보정결과가 달라질 수 있으며 이는 장래예측을 포함한 시나리오예측결과에도 영향을 미치기 때문에 모델 보정에 있어서의 객관성 유지와 최적의 보정결과를 도출하는 과정은 모델 적용에 있어 여전히 풀어야할 숙제로 남아있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 상세 모델과 최적화 기법을 연계하여 모델을 적용하거나 자동보정모델이 개발되어 적용되고 있다. SWAT의 경우 SWAT2005부터 자동보정모델을 연계·적용할 수 있도록 자동보정모델을 자체 개발하여 보급하고 있다. HSPF모델의 경

* 안동대학교 환경공학과

** 안동대학교 비점오염원센터

† Corresponding author Tel.: +82-54-820-5093

Fax: +82-54-820-6187

E-mail: jhjeon@andong.ac.kr

2012년 6월 5일 투고

2012년 8월 22일 심사완료

2012년 11월 12일 게재확정

우 보정인자를 자동으로 보정해 주는 PEST (Model-Independent Parameter Optimizer)가 개발되었다 (Doherty, 2005).

HSPF은 투수지형과 불투수지형이 혼재되어 있는 복잡한 유역의 수리·수질에 관한 오염물질들의 현상들을 모의하기 위해 USEPA에 의해 개발되어 (Bicknell et al., 1996) 수문·수질학적으로 광범위하게 사용되어 왔다 (Albek et al., 2004; Fontaine and Jacomino, 1997). 국내에서는 소유역에서부터 대유역에 이르기까지 그 적용성이 평가되었으며 현재 환경부 수질통합관리센터에서 운영 중인 4대강수질예보시스템의 유역모델로 이용 중에 있다 (Jang et al., 2006; Yoon et al., 2007; Jeon et al., 2006; Chun et al., 2001). 국내 HSPF와 PEST의 연계적용사례를 보면 대부분의 경우 연속적인 일 유출량에 대하여 연구를 수행된바 있다 (Jeon et al., 2009; Jeon et al., 2010).

환경부에서는 수질오염총량제 운용을 위해 강우시와 비강우시를 포함하는 8일 간격의 수문 및 수질 모니터링을 수행하고 있다. 유역모델의 적용에 있어 환경부의 8일 간격 모니터링 자료는 유역모델의 검·보정에 있어 매우 유익하게 활용될 수 있는 자료이다. 그러나 8일 간격의 모니터링 자료를 이용한 모델 검·보정이 큰 강우시의 유출현상을 잘 반영할 수 있는지에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 한강수계내 경안천 유역을 대상으로 환경부 8일 간격의 유량 모니터링 자료와 PEST를 이용하여 HSPF를 검·보정한 후, 경안천 유역 말단의 건설교통부에서 제공하는 일별 유출량자료와 비교함으로써 8일 간격의 모니터링 자료를 유역모델 검·보정자료로 활용하기 위한 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역인 경안천 유역은 동경 127°, 북위 37°에 위치하고 있으며 용인시 호동 무명봉에서 발원하여 광주시 초월면 지월리에서 곤지암천과 합류된 후 팔당호로 유입된다 (Fig. 1). 경안천 유역의 면적은 561.13 km²에 달하고 이 중 임야가 차지하는 면적은 약 350.7 km²로 전체 면적의 약 63 %이다. 경안천 유역은 교통이 편리하고 수도권과의 인접성으로 급속한 도시화와 하·폐수배출시설, 축산시설 등 오염원이 증가하고 있으며 오염부하량이 유역면적에 비해 높은 편이다. 평균유량은 팔당호의 유입 유량의 2.5 %를 차지하는 약 5.4 m³/s이다 (Jang et al., 2009).

하천의 유하거리가 짧아서 팔당호 수질 오염에 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 팔당호 수질관리에 있어 중요한 유역이다. 경안유역의 모니터링은 환경부와 건설교통부에서 실시하고 있다.

Fig. 1 Study area

환경부에서는 경안A 지점에서 8일 간격으로 유출량 및 수질이 모니터링 되어 지고 있으며, 건설교통부에서는 경안에서 일별 유출량이 연속적으로 모니터링 되고 있다 (Fig. 1).

2. 입력자료 및 모델 구축

가. 입력자료 및 HSPF 구축

HSPF는 Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS)에 의해 구축되었다. BASINS에 의한 HSPF 구축을 위해서는 유역도, 하천도, 수치고도모델 (Digital Elevation Model; DEM), 토지피복도, 기상관측자료 등을 필요로 한다. 유역도와 하천도는 건설교통부에서 운영 중인 WASMIS의 GIS자료를 이용하였으며, DEM과 토지피복도는 환경부에서 운영 중인 공간정보서비스 (Environmental Geographic Information System; EGIS)에서 제공하는 30 m격자크기의 DEM과 2007년 기준 중분류토지피복도를 이용하였다 (Fig. 2). 기상관측자료는 이천, 수원, 양평 지점에 대하여 기상청에 요청하여 받은 시간별 대기온도, 이슬점온도, 풍속, 운량, 일사량, 강우량을 WDMUtil 프로그램에 저장하여 wdm파일을 생성하였다. WDMUtil 프로그램을 이용하여 일별 최고·최저온도, 일평균 이슬점온도, 일 풍속, 일 일사량을 생성한 후 WDMUtil 프로그램내 Jensen equation tool을 이용하여 일별 증발산량을 계산한 후 시별 증발산량을 산정하였으며, Penman Pan equation tool을 이용하여 같은 방법으로 시별 증발산량을 계산하여 wdm 파일에 저장하였다. 보정에 사용되는 유출량은 환경부에서 2004년 8월 13일에서 2008년 12월 18일 사이에 8일 간격으로 측정된 일별 유출량을 이용하였으며, 8일 간격의 유출량을 wdm파일에 저장하였다. 검정에 사용되는 유출량은 건설교통부에서 2004년 1월 1일에서 2007년 12월 30일의 일별 유출량을 이용하였으며, wdm파일에 저장하

Fig. 2 GIS data for BASINS application

였다.

HSPF 입력파일을 생성하기 위해서 BASINS를 이용하여 전처리 과정을 거쳤다. DEM자료를 BASINS의 Automatic Delineation Tool을 이용하여 16개의 소유역을 자동으로 분할하였다. BASINS의 Land Use and Soil Delineation Tool을 이용하여 토지이용도를 중첩시켜 소유역별 토지피복정보를 추출하였다. BASINS의 Model-HSPF tool을 이용하여 경안천 유역을 대상으로 한 HSPF의 입력파일을 생성하였다.

나. PEST/TSPROC 구축

HSPF의 최적화를 위해서 PEST 최적화프로그램과 함께 추가적으로 개발된 TSPROC프로그램은 HSPF의 예측치와 결과치를 저장하는 wdm 파일을 다루는 중요한 프로그램이다. Fig. 3은 HSPF와 wdm 파일, PEST, TSPROC와의 관계를 나타내고 있다. HSPF는 wdm파일에 있는 기상입력자료를 읽어 들여 모델을 실행하고 모의된 결과 값은 wdm파일에 저장된다. TSPROC에서는 wdm파일에 저장된 실측치와 예측치의 time series를 그대로 읽어 들여 pst파일로 출력한다. 또한 dates.dat 파일에서 지정한 시간간격에 따라 time series의 값을 더하여 실측치와 예측치의 값

Fig. 3 The relationship between PEST/TSPROC and HSPF

을 PEST의 입력파일인 pst파일에 출력한다. 따라서, wdm의 실측치와 예측치의 time series간격은 dates.dat에서 지정한 시간간격보다 항상 작거나 같아야 한다. TSPROC 입력파일 내에 사용자가 지정한 유출량(최대 30개 유량)에 따른 실측치와 예측치의 발생확률을 각각 계산하여 pst파일로 출력한다. TSPROC에서는 HSPF 보정인자 항목과 범위를 명시한 파일을 읽어 들여 pst파일에 출력한다. Fig. 4는 TSPROC에 의해 생성된 SEO파일 내의 wdm파일에서 읽어 들인 일별 유출량(mflow), dates.dat의 기간별 총 유출량(mvol), 사용자 지정 유출량에 따른 발생확률(mtime)에 대한 실측치와 예측치 작성 예를 보여주고 있다.

PEST 프로그램은 TSPROC에서 출력한 보정인자 항목과 범위를 참조하여 보정인자에 대하여 난수를 발생시키고 HSPF입력 파일인 uci파일에 입력시킨 후 HSPF를 구동시킨다. 새롭게 모의된 예측치와 기존의 실측치를 참조하여 TSPROC에서 생성한 세 가지 종류의 실측치와 예측치의 값에 대하여 목적함수를 구

	0	10	20	30	40	50	60
728	mflow_727	mflow	186.0000	166.2733			
729	mflow_728	mflow	178.0000	163.6488			
730	mflow_729	mflow	178.0000	161.9742			
731	mflow_730	mflow	178.0000	161.0608			
732	mvol_1	mvol	2.7796291E+08	3.6047187E+08			
733	mvol_2	mvol	3.2749920E+08	3.5230771E+08			
734	mvol_3	mvol	3.8664000E+08	3.6243280E+08			
735	mvol_4	mvol	3.9860640E+08	3.3655773E+08			
736	mvol_5	mvol	4.1281920E+08	3.5985091E+08			
737	mvol_6	mvol	6.8364000E+08	6.5054643E+08			
738	mvol_7	mvol	1.0223280E+09	7.6314797E+08			
739	mvol_8	mvol	4.6366560E+08	5.6737146E+08			
740	mvol_9	mvol	4.3908480E+08	4.8360275E+08			
741	mvol_10	mvol	4.5316800E+08	5.1777818E+08			
742	mvol_11	mvol	3.7640160E+08	4.3323187E+08			
743	mvol_12	mvol	4.0305600E+08	4.6569181E+08			
744	mtime_1	mtime	0.9873469	0.9961531			
745	mtime_2	mtime	0.9277609	0.9950777			
746	mtime_3	mtime	0.8588468	0.8096622			

Fig. 4 SEO file generated by TSPROC

	0	10	20	30	40
1	01/01/2001	01:00:00	02/01/2001	00:00:00	
2	02/01/2001	00:00:00	03/01/2001	00:00:00	
3	03/01/2001	00:00:00	04/01/2001	00:00:00	
4	04/01/2001	00:00:00	05/01/2001	00:00:00	

(a)

	0	10	20	30	40
1	08/13/2004	00:00:00	08/13/2004	23:00:00	
2	08/30/2004	00:00:00	08/30/2004	23:00:00	
3	09/09/2004	00:00:00	09/09/2004	23:00:00	
4	09/18/2004	00:00:00	09/18/2004	23:00:00	

(b)

Fig. 5 Comparison of dates files preparations between continuous and noncontinuous stream flow: (a) is dates file for monthly flow calibration using continuous flow data and (b) is dates file for 8 day interval flow calibration

```

228 ### Information pertaining to flow time series is
229 OBSERVATION_SERIES_NAME oflow
230 MODEL_SERIES_NAME mflow
231 SERIES_WEIGHTS_EQUATION 1.0/(@_abs_value+0.001)
232 SERIES_WEIGHTS_MIN_MAX 1e-9 10000000
233
234 ### Information pertaining to flow volumes is supp
235 OBSERVATION_V_TABLE_NAME ovol
236 MODEL_V_TABLE_NAME mvol
237 V_TABLE_WEIGHTS_EQUATION 1.0e-2/sqrt(@_abs_value
238
239 ### Information pertaining to exceedence probablii
240 OBSERVATION_E_TABLE_NAME otime
241 MODEL_E_TABLE_NAME mtime
242 E_TABLE_WEIGHTS_EQUATION 300000.0
243
244 END WRITE_PEST_FILES[EOF]

```

(a)

```

218 ### General information is supplied.
219
220 CONTEXT pest_prep
221 NEW_PEST_CONTROL_FILE case1.pst
222 TEMPLATE_FILE example1.tpl
223 MODEL_INPUT_FILE example1.uci
224 NEW_INSTRUCTION_FILE model.ins
225 PARAMETER_DATA_FILE initpar1.dat
226 PARAMETER_GROUP_FILE groups1.dat
227 MODEL_COMMAND_LINE model1.bat
228
229 ### Information pertaining to flow time series is
230 OBSERVATION_V_TABLE_NAME ovol
231 MODEL_V_TABLE_NAME mvol
232 V_TABLE_WEIGHTS_EQUATION 1.0e-2/sqrt(@_abs_valu
233
234 END WRITE_PEST_FILES[EOF]

```

(b)

Fig. 6 Comparison of tsproc input files preparations between continuous and noncontinuous stream flow: (a) represented calculating function for calibration of daily stream flow, monthly volume, and exceedence probabilities (b) represented calculating function for calibration of 8 day interval stream flow

본 연구에서는 불연속적인 모니터링 자료에 대한 HSPF의 보정을 위해 dates.dat를 이용하였다. dates.dat에서의 시간간격 지정을 모니터링이 수행된 날의 0:00시와 24:00을 각각 지정된 시간의 시작시간과 끝시간으로 지정함으로써 불연속적인 모니터링 자료를 TSPROC-PEST에 의해 자동보정 하였다 (Fig. 5) ①의 time series를 직접 읽어 들이는 것과 ③의 유량별 발생확률 계산은 TSPROC에서 삭제함으로써, dates파일에서 지정된 8일 간격의 일별 유출량만 계산하여 비교하도록 하였다. Fig. 5는 연속유출량 자료의 월유출량 보정을 위한 dates파일 작성 예 Fig. 5(a)와 본 연구에서 8일 간격의 불연속 유출량 자료의 보정을 위한 dates 파일 작성 Fig. 5(b)결과를 나타내고 있다. 일별 불연속 자료 뿐만 아니라 시별 불연속자료도 Fig. 5(b)에서 측정시간에 맞추어 수정하여 적용할 수 있다.

Fig. 6은 TSPROC의 입력파일인 TSPROC1.DAT에 ① wdm에서 직접 읽어들이는 일별 유출량, ② dates.dat에 의한 월별 유출량, ③ 유량별 발생확률 계산을 모두 고려한 작성 예 Fig. 6(a)와 ② dates.dat에 의한 월별 유출량만 고려한 작성 예 Fig. 6(b)를 나타내고 있다.

3. 연구접근방법

HSPF-PEST를 환경부 측정망 중 경안A 지점에 연계·적용하여 자동 보정시키고, 그 인자값을 그대로 사용하여 경안천 유역 말단지점의 유출량 예측치와 건설교통부에서의 실측치와 비교함으로써 유역의 상류지점에서 검·보정한 인자값을 그대로 적용함으로써 유역 말단의 일별 유출량 모의 정확성을 검증하였다.

Table 1 Description and ranges of HSPF parameters

Parameter	Description	Ranges	
		Typical	Possible
LZSN	Lower zone nominal soil moisture storage	76.2–203.2	50.8–381.0
INFILT	Infiltration capacity of the soil	0.25–6.35	0.025–12.7
UZSN	Upper zone nominal soil moisture storage	2.54–25.40	1.27–50.80
NSUR	Manning's n coefficient	0.15–0.35	0.05–0.50
AGWRC	Groundwater recession rate	0.92–0.99	0.85–0.999
IRC	Interflow recession parameter	0.5–0.7	0.3–0.85
INTFW	Interflow inflow parameter	1.0–3.0	1.0–10.0
DEEPR	Fraction of GW inflow to deep recharge	0.0–2.0	0.0–0.5
BASETP	Fraction of ET from baseflow	0.0–0.05	0.0–0.20

Table 2 General calibration/validation target or tolerances for HSPF application (Donigian, 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

유출량 보정인자 결정은 USEPA (2001)에서 제시한 보정인자와 그 범위를 참조하였으며 Table 1과 같다. 유출량 관련하여 총 9가지가 보정인자였으며, 이 중 LZSN, INFILT, UZSN, NSUR은 토지이용별로 범위를 주어져있으며, AGWRC, IRC, INTFW, DEEPR, BASETP는 토지이용별로 범위가 주어지지 않았다. 본 연구에서도 Table 1과 같은 범위내에서 최적의 보정인자를 찾도록 하였다.

모델의 자동보정은 2004~2006년 사이의 실측유량을 사용하였으며, 검정은 2007~2008년 동안의 실측유량을 사용하였다. 모델의 검·보정의 정확도는 Donigian (2000)이 제안한 유출량 검·보정 평가 기준을 이용하여 판단하였으며 (Table 2), 결정계수 (R^2)와 모델효율 (Nash-Sutcliffe coefficient; NS)를 식 (1)과 식 (2)에 의해 계산하였다.

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

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

여기서, P_i 와 O_i 는 각각 일별 유출량에 대한 예측치와 실측치이며, $\bar{O}$ 는 실측치의 평균값이며, n 은 일 유출량에 대한 총 개수이다.

III. 결과 및 고찰

1. 유출량 검·보정

8일 간격의 불연속적인 유출량에 대한 모델 검·보정에 대한 실측치와 예측치사이의 결정계수와 모델효율은 Table 3과 같다. 보정결과의 결정계수, 모델효율은 각각 0.65와 0.63을 나타냈으며, 검정결과는 각각 0.89와 0.88을 나타내었다. Table 2의 기준에 따르면, 보정은 보통 (Fair), 검정은 매우 좋음 (Very good)인 것으로 나타나 전반적으로 검·보정은 양호한 모델효율을 나

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

	R^2	NS	Performance
Calibration	0.65	0.63	Fair
Validation	0.89	0.88	Very good

(a) Calibration

(b) Validation

Fig. 7 Comparison of observed and simulated stream flow at Kyungan A

Fig. 8 Scatter plot between simulated and observed daily and monthly stream flow at Kyungan A

타내었다. 시간에 따른 실측치와 예측치의 비교 그래프와 검·보정결과를 이용한 1:1 분산도는 각각 Fig. 7과 8과 같다. 특히 실측유량과 예측유량을 이용한 1:1 분산도를 살펴보면, 기울기는 1에 가까운 것으로 나타나 그래프를 이용한 검·보정 분석 결과 또한 양호한 것으로 나타났다.

2. 일유출량 연속 모니터링자료와의 비교

환경부 측정망 중 경안천의 상류인 경안A 지점에서 모델을 보정하고 그 인자값을 그대로 사용하여 경안천의 말단지점의 유출량 예측치와 건설교통부에서의 실측치와의 비교는 Fig. 9와 Table 4와 같다. 일별 유출량에 대한 예측치와 실측치의 결정계수와 모델효율은 모두 동일한 값인 0.63으로 나타내어 모델 검·보정 기준으로 보통 (Fair)로 나타났다.

Fig. 9 Comparison of observed and simulated stream flow at Kyungan

Fig. 10 Scatter plot between simulated and observed daily stream flow at Kyungan

Table 4 Statistical analysis compared with daily continuous stream flow at Kyungan

	R^2	NS	Performance
Daily stream flow	0.63	0.63	Fair

Table 5 Automatic calibrated HSPF parameters at Kyungan Watershed

Parameter	Optimized values					Possible range
	Urban	Upland	Forest	Pasture	Barren	
LZSN (mm)	—	202.18	66.04	55.63	187.45	50.8–381.0
INFILT (mm/hr)	—	2.48	1.26	0.80	12.70	0.025–12.7
UZSN (mm)	—	1.72	2.15	7.00	1.32	1.27–50.80
NSUR	0.05	0.27	0.46	0.15	0.27	0.05–0.50
AGWRC (1/day)	—	0.90				0.85–0.999
INTFW	—	5.26				1.0–10.0
IRC (1/day)	—	0.40				0.3–0.85
DEEPPFR	—	0.49				0.0–0.5
BASETP	—	0.97				0.0–0.20

3. 보정된 매개변수

본 연구에 의해 도출된 경안천의 수문관련 HSPF 보정인자 값은 Table 5와 같다. 대부분의 인자들은 미환경부에서 제시한 일반범위 (Typical range) 내에 있는 것으로 나타났으며, 가능범위 (Possible range)내에서 최적화를 시행할 경우 본 연구에서는 높은 모델효율을 나타내었다. 따라서, 우리나라에 있어 HSPF에 의해 유출량을 모의할 경우, 미환경부에서 제시한 가능범위 내에서 보정인자 값을 결정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

4. 고찰

환경부에서 측정하고 있는 유량은 저유량의 정확한 산정을 위해 8일 간격으로 측정되고 있기 때문에 큰 강우시의 유출을 선택적으로 측정하고 있지 않다. Fig. 7의 환경부 측정망 실측치와 모델에 의한 예측치의 비교 그래프에서 보는 바와 같이, 대부분의 측정유량이 저유량이며 강우시 유량을 측정하였다 할지라도 침투유량 보다 낮은 유량의 측정값이 대부분이다. 또한 환경부에서 수행하는 8일 간격의 측정자료는 일평균이 아닌 특정 시점에서의 유량임을 고려해야 한다. 경안A지점의 보정결과보다 검정결과가 더 좋은 것은 보정시 사용되었던 환경부 8일 간격의 모니터링 자료 중 특정 몇몇 유출량의 경우 일평균 유량을 반영하지 못한 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 HSPF-PEST를 경안천 상류유역에 연계·적용하여 자동 보정시키고, 그 값을 그대로 적용하여 건설교통부에서 모니터링 하고 있는 경안천 말단지점의 일별 연속 측정자료와 비교하여도 비교적 높은 모델 효율

을 나타내었다. 하천 수질관리를 위한 유역에서의 다양한 대안 평가 및 분석 등에 HSPF나 SWAT과 같은 수문모델의 사용빈도가 높을 것으로 예상된다. 이러한 경우 환경부 측정망이 저유량을 초점으로 하여 모니터링이 실시됨에도 불구하고, 평상기와 강우시를 포함하여 유량과 함께 다양한 수질항목이 모니터링되는 국가차원에서 공식적으로 제공되는 유일한 자료이기 때문에 수문모델 검·보정에 매우 유용하게 사용할 수 있다. 본 연구결과 HSPF-PEST를 연계·적용함으로써 불연속 모니터링 자료를 이용하여 모델을 자동적으로 보정할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 환경부에서 측정하고 있는 8일 간격의 불연속적인 모니터링 자료를 이용하여 모델을 보정하여도 경안천 유역에 있어서 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타나 연속적인 유출량 모니터링 자료가 가용할 수 없을 경우 환경부에서 측정한 8일 간격의 모니터링 자료를 수문모델의 검·보정 자료로 활용 가능한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 경안천유역을 대상으로 하여 환경부에서 측정한 8일 간격의 불연속적인 유출량 모니터링 중 경안천의 상류인 경안A 지점에서 모델을 2004~2008년 검·보정하였다. 그 인자값을 그대로 사용하여 2004~2007년의 경안천 말단지점의 유출량 예측치와 건설교통부에서의 측정치와 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 8일 간격의 불연속적인 유출량에 대한 보정결과와 결정계수, NS값은 각각 0.65, 0.63을 나타냈으며, 검정결과는 각각 0.89, 0.88을 나타냈다. 보정은 보통 (Fair), 검정은 매우 좋음 (Very good)인 것으로 나타나 HSPF의 자동보정을 위해 개발된 TSPROC-PEST 프로그램 패키지는 연속적인 모니터링 자료뿐만 아니라 불연속적인 모니터링 자료를 이용한 HSPF 보정에 적용성이 높은 것으로 나타났다.

2. 경안천의 상류인 경안A 지점에서 수문관련 HSPF 대부분의 보정인자들은 미환경부에서 제시한 일반범위 (Typical range) 내에 있는 것으로 나타났으며, 가능범위 (Possible range) 내에서 최적화를 시행할 경우 본 연구에서는 높은 모델효율을 나타내었다.

3. 경안A 지점에서 보정한 인자값을 그대로 사용하여 경안천의 말단지점의 건설교통부에서의 일별 연속적으로 측정한 유출량 실측치와 비교 분석한 결과 일별 모의치와 실측치의 결정계수와 모델효율은 각각 0.65, 0.63을 나타나 환경부에서 측정한 8일 간격의 유출량 모니터링 자료를 이용하여 수문모델의 검·보정이 가능한 것으로 나타났다.

유역모형의 유출량 검·보정에 있어서 건설교통부 측정자료와 같은 일 연속 모니터링 자료를 우선적으로 사용하기를 추천하며, 일 연속 유출량 자료의 획득이 불가능할 경우 차선택으로 환경부에서 측정하고 있는 8일 간격의 불연속 모니터링 자료로도 적용 가능한 것으로 나타났다. 그러나 환경부의 8일 간격 모니터링 자료는 일평균 자료가 아닌 특정 시점에서의 측정치임을 사용에 주의를 요하며 이와 관련된 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

REFERENCES

1. Albek, M., U. B. Ogutveren and E. Albek, 2004. Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *Journal of Hydrology* 285: 260-271.
2. Beasley, D. B. and L. F. Huggins, 1981. ANSWERS Users Manual. EPA 905/9-82-001. USEPA, Chicago, IL.
3. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, A. S. Donigan and R. C. Johanson, 1996. Hydrologic simulation program-FORTRAN user's manual, v.12, Athens, GA., USEPA.
4. Choi, J. H., J. H. Ha and S. S. Park, 2008. Estimation of the effect of water quality management policy in Paldang lake. *Korean Society of Environmental Engineers* 30(12): 1225-1230 (in Korean)
5. Chun, K. C., R. W. Chang, G. P., Williams, Y. S. Chang, D. Tomasko, K. LaGory, J. Ditmars, H. D. Chun and B. K. Lee, 2001. Water quality issues in the Nokdong river basin in the Republic of Korea. *Environmental Engineering and Policy* 2:131-143.
6. Doherty, J., 2006. Model independent parameter estimation. fifth edition of user manual. Watermark Numerical Computing, Brisbane Australia.
7. Donigan, A. S., 2000. HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture #19, Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22, EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., USA.
8. Fontaine, T. A. and V. M. F. Jacomino, 1997. Sensitivity analysis of simulated contaminated sediment transport. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 33: 313-326.

9. Jang, J. H., C. G. Yoon, K. W. Jung, and J. H. Jeon, 2006. Pollutant loading estimate from Yongdam watershed using BASINS/HSPF. *Korean Society of Limnology* 39(2): 187-197 (in Korean).
10. Jang, J. H., C. G. Yoon, K. W. Jung, and S. B. Lee, 2009. Characteristics of pollution loading from Kyongan stream watershed by BASINS/SWAT. *Korean Society of Limnology* 42(2): 200-211 (in Korean).
11. 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.
12. Jeon, J. H., D. Choi, J. J. Kim and T. D. Kim, 2009. Evaluation calibration methods of stream flow for water quality management. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 432-440 (in Korean).
13. Jeon, J. H., T. I. Kim, D. H. Choi, K. J. Lim, T. D. Kim, 2010. Hydrologic calibration of HSPF model using parameter estimation (PEST) program at Imha watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(5): 802-809 (in Korean).
14. Knisel, W. G., 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, conservation research report, No. 26. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
15. USEPA, 2001. WinHSPF Version 2.0 User's Manual. EPA 68-C-98-010. Washington, D.C.
16. 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 Society of Limnology* 40(2): 201-213 (in Korean).