

## HSPEXP 모형평가지표를 이용한 HSPF 모형의 수문매개변수 보정 Calibration of HSPF Hydrology Parameters Using HSPEXP Model Performance Criteria

김상민\* · 성충현\*\*† · 박승우\*\*\*  
Kim, Sang Min\* · Seong, Chung Hyun\*\*† · Park, Seung Woo\*\*\*

### ABSTRACT

The purpose of this study was to test the applicability of the HSPEXP model performance criteria for calibrating hydrologic parameters of HSPF. Baran watershed, located at Whasung city, was selected as a study watershed in this study. Input data for the HSPF model were obtained from the digital elevation map, landuse map, soil map and others. Water flow data from 1996 to 2000 was used for calibration and from 2002 to 2007 was for validation. Using the HSPEXP decision-support software, hydrology parameters were adjusted based on total volume, then low flows, storm flows, and finally seasonal flows. Suggested criteria for each model performance variables were referenced from the previous research. For the calibration period, all the HSPEXP model performance criteria were satisfied while two criteria were slightly violated for the validation period.

**Keywords:** HSPEXP; HSPF; calibration; hydrology parameter; watershed model

### 1. 서 론

HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)(Bicknell et al., 2001) 모형은 현재 유역단위의 오염총량관리 (Total Maximum Daily Loads, TMDLs)의 적용을 위해 미국에서 가장 광범위하게 적용되고 있다. HSPF 모형은 보정을 필요로 하기 때문에 효과적이고 정확한 보정기법을 개발하는 것은 오염총량관리의 대상이 되는 유역에 대한 모델링을 통해 적합한 오염총량관리 프로그램을 개발하는 비용을 절감하고 모형의 적용성을 증대시킨다.

매개변수의 보정을 위한 기법에는 과거 주로 이용되던 수동 보정기법과 최근 컴퓨터의 발달과 함께 많이 응용되고 있는 자동보정 기법이 있다. 수동 보정기법의 경우 숙련된 수문학자의

경우 좋은 보정결과를 얻는 것이 가능한 반면, 사용자마다 모형의 보정결과가 달라질 수 있어 보정결과의 고유성이 없으며, 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다 (Madsen, 2000). 또한, 경험이 많은 전문가의 기술이나 노하우가 다른 사용자에게 쉽게 전달될 수 없다.

수동보정기법의 여러 단점을 극복하기 위해 보다 효과적이고 효율적인 자동보정기법에 대한 연구가 진행되고 있다 (Madsen et al., 2002). 자동보정기법에서는 목적함수를 최소화하기 위해 주어진 알고리즘에 따라 매개변수가 보정된다. 수동보정기법과 비교하면 자동보정기법은 빠르고 사용자에게 따른 결과의 차이가 없어 보정결과가 고유성을 지니며 자동보정기법을 위해 개발된 프로그램은 사용하기 쉽다는 장점이 있다. 그러나 많은 수문학자들은 자동보정기법으로 얻어진 결과가 수문학자들이 받아들이기 어려운 매개변수나 예측값을 제시할 때가 있어 자동보정기법은 수문모형이나 수질모형에 광범위하게 이용되고 있지는 않은 실정이다 (Boyle et al., 2000).

HSPF모형의 경우 HSPEXP (Expert System for the Calibration of HSPF) (Lumb et al., 1994)를 이용한 수동보정 기법이 주로 이용되고 있다. HSPEXP를 이용할 경우 사용자의 모형 이용 목적에 따라 매개변수 보정에 필요한 함수를 설정하고 이

\* 경상대학교 지역환경기반공학과 조교수 (농업생명과학연구원)

\*\* 서울대학교 농업생명과학연구원

\*\*\* 서울대학교 조정 · 지역시스템공학부

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4591

Fax: +82-2-873-8725

E-mail address: fpdlsao2@snu.ac.kr

2009년 5월 6일 투고

2009년 7월 22일 심사완료

2009년 7월 24일 게재확정

**Table 1 HSPF model parameters adjusted during hydrologic calibration and their initial values(USEPA, 2000)**

Parameter name	Parameter definition	Initial value	Recommended range
LZSN	Lower zone nominal storage(mm)	218.4	50.8 to 381
UZSN	Upper zone nominal storage(mm)	17.53	0.25 to 50.8
INFILT	Index to infiltration capacity(mm/hr)	1.78 to 15.49	0.025 to 16
BASETP	The fraction of potential ET that can be sought from baseflow	0 to 0.1	0 to 0.2
AGWETP	Fraction of remaining potential ET that can be satisfied from active ground water storage	0 to 0.001	0 to 0.2
LZETP	Lower zone ET parameter - an index to the density of deep rooted vegetation	0.1 to 0.8	0.1 to 0.9
INTFW	Interflow inflow parameter	1.0 to 2.0	1.0 to 10.0
IRC	Interflow recession parameter(/day)	0.6	0.001 to 0.999
AGWRC	Ground water recession parameter(/day)	0.99	0.001 to 0.999
DEEPPFR	Fraction of ground water inflow that goes to inactive ground water	0.0	0 to 0.2
CEPSC	Interception storage capacity(mm)	1.27 - 6.35	0.25 to 10.16

에 대한 기준을 수립한 후 사용자가 원하는 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있어 오염총량관리와 같이 모형의 결과가 각 유역의 오염부하량의 식감과 할당에 민감한 영향을 끼치는 경우 효과적으로 이용될 수 있다. 그러나 국내에서는 아직 HSPEXP를 이용한 HSPF 모형의 수문 매개변수 보정에 대한 결과가 소개되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 적용성을 평가하기 위해 시험유역을 대상으로 모형의 보정과 검정을 실시하고 그 결과를 고찰하도록 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. HSPF 모형의 개요

미국 환경청 (USEPA)에서 개발된 HSPF 모형은 준분포형, 개념적 모형으로 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 적설심, 수분함량, 융설, 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 모의할 수 있다 (Bicknell et al., 2001). HSPF 모형은 토지이용 변화, 저수지 운영, 점원 또는 비점원 오염 처리 대안 등에 대한 평가를 위해 이용되고 있다.

HSPF 모형은 WDM (Watershed Data Management)을 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 160,000 km<sup>2</sup>의 Chesapeake 만에 이르기까지 다양한 유역에 적용되었다 (USGS, 2000).

본 연구에서는 수문인자의 매개변수 보정만 고려하였으며, 유사와 수질인자는 고려하지 않았다. 수문 매개변수의 보정을 위하여 USEPA에서 작성한 BASINS Technical Note 6 (USEPA, 2000)을 참고하여 초기치와 매개변수의 범위를 선정하였다. 다

**Table 2 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

음의 Table 1은 본 연구에서 이용된 수문 매개변수의 초기치와 범위를 보여주고 있다.

### 2. HSPEXP 모형평가 지표

HSPF 모형은 모형의 적용을 위해 매개변수의 보정을 필요로 한다. 최근에는 매개변수의 보정을 위해 매개변수 자동보정 기법들이 많이 적용되고 있으나, 자동보정 기법은 사용자가 필요로 하는 다양한 목적함수에 대한 사용자가 설정한 기준을 충족하는 목적에는 미흡한 것이 사실이다 (Kim et al., 2007). 미국에서는 오염총량관리의 대상이 되는 유역의 수질관리를 위해 HSPF 모형의 적용시 매개변수의 보정을 위해 개발된 의사결정 소프트웨어인 HSPEXP를 이용해 수동적으로 HSPF 모형을 보정하고 있다 (Lumb et al., 1994). 다음의 Table 2는 HSPEXP의 모형평가지표와 각각의 지표에 대한 기준을 보여주고 있다 (Benham et al., 2005). HSPEXP의 모형평가지표에서 이용되고 있는 변수는 총유출량, 상위 10 % 유출량 합, 하위 50 % 유출량 합, 첨두유출량 평균치 등의 지표를 포함하고 있다. 모형평가지표의 선정과 기준의 설정은 사용자의 목적에 맞게 선정하여 이용할 수 있으며 Table 2의 기준은 미국의 버지니아

주에서 오염총량관리를 위해 적용되고 있는 사례를 보여주고 있다.

### 3. 대상유역

유역단위 모형의 적용성을 평가하기 위해 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 시험유역으로 선정하였다. 유역면적 29.79 km<sup>2</sup>의 발안저수지 유역은 농업용 저수지인 기천저수지와 발안저수지를 포함하고 있으며, 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지이용 형태를 보이고 있다 (Fig. 1). 시험유역을 대상으로 1996년부터 서울대학교 지역시스템공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다 (Kim and Park, 2004). 본 연구에서는 발안 저수지 우측 상류에 위치한 HP#6 소유역을 대상으로 수문 매개변수의 보정을 실시하였다. HP#6 소유역의 유역면적은 385 ha, 유로장은 3.1 km이며, 유역면적을 본류의 유로장으로 나눈 형상계수는 1.562로써 다소 정방형이며, 최대기복량을 유로장으로 나눈 기복량비는 0.0895, 유역경사는 0.0149 m/m으로 조사되었다.

### 4. 기상자료와 수문자료

발안 시험유역의 기상자료 구축을 위해 시험유역 인근에 위치한 수원기상대의 자료를 이용하였다. 1996년부터 2007년까지의 자료기간동안 연간 강우량과 유출량은 다음의 Table 3에서 보는 바와 같이 나타났다. 1996년부터 2007년까지의 강우량은 859 mm에서 1,664 mm의 범위를 보였으며 1996년을 제외하고는 모두 1,000 mm 이상의 값을 보였다. 유출량의 경

**Table 3 Rainfall, runoff, and runoff ratio for the study watershed from 1996 to 2007**

Year	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Rainfall (mm)	859	1,360	1,664	1,556	1,329	1,067	1,104	1,208	1,003	1,104	1,070	1,115
Runoff (mm)	390	705	688	642	710	896	670	881	629	750	275	626
Runoff ratio(%)	45.4	51.8	41.3	41.3	53.4	84.0	60.7	72.9	62.8	67.9	25.7	56.1

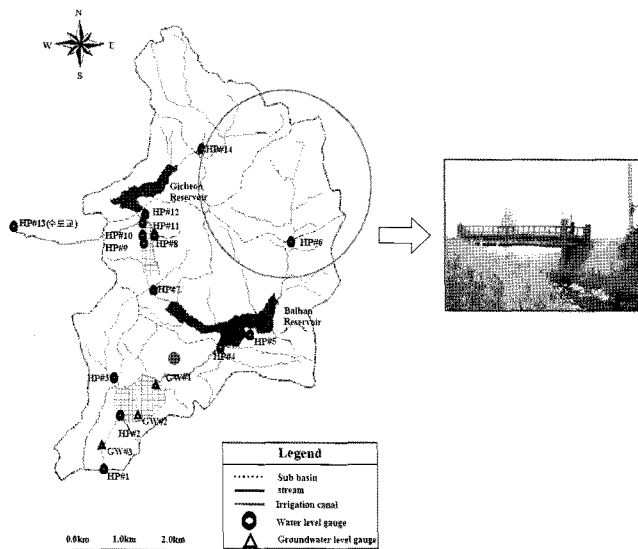
우 기기 오작동과 수위-유량관계식 오차 등으로 2001년의 경우 다소 높은 유출율을, 2006년의 경우 다소 낮은 유출율을 보였다. 나머지 자료기간에서는 41.3 %에서 72.9 %의 유출율을 보인 것으로 조사되었다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 수문매개변수의 보정

모형의 보정과 검정을 위해 시험유역의 자료 중 1996년부터 2000년까지의 자료를 모형의 보정을 위해 이용하였으며 2002년부터 2006년까지의 자료를 모형의 검정을 위해 이용하였다. 본 연구에서는 모형의 보정을 위해 HSPF 모형의 수문매개변수 보정을 위한 지원 프로그램인 HSPEXP를 이용하였으며 Table 2에서 제시한 모형평가지표의 기준에 도달할 수 있도록 반복하여 모형을 적용하였다. 다음의 Table 4는 보정된 매개변수의 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서는 모의치와 실측치의 시각적인 비교를 위하여 일별유출량, 월별유출량과 함께 일별유출량의 분포를 이용하였다. 다음의 Fig. 2는 모형의 보정기간에 대한 일별 유출량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 모의 초기 매개변



**Fig. 1 Schematic map of the Baran study watershed**

**Table 4 Estimated HSPF parameter values for study watershed**

Parameter name	Initial value	Recommended range	Adjusted value
LZSN	218.4	50.8 to 381	71.1
UZSN	17.53	0.25 to 50.8	28.7
INFILT	1.78 to 15.49	0.025 to 16	2.75
BASETP	0 to 0.1	0 to 0.2	0.1
AGWETP	0 to 0.001	0 to 0.2	0
LZETP	0.1 to 0.8	0.1 to 0.9	0.33 to 0.89
INTFW	1.0 to 2.0	1.0 to 10.0	0.75
IRC	0.6	0.001 to 0.999	0.5
AGWRC	0.99	0.001 to 0.999	0.9765
DEEPPFR	0.0	0 to 0.2	0.2
CEPSC	1.27 - 6.35	0.25 to 10.16	2.54

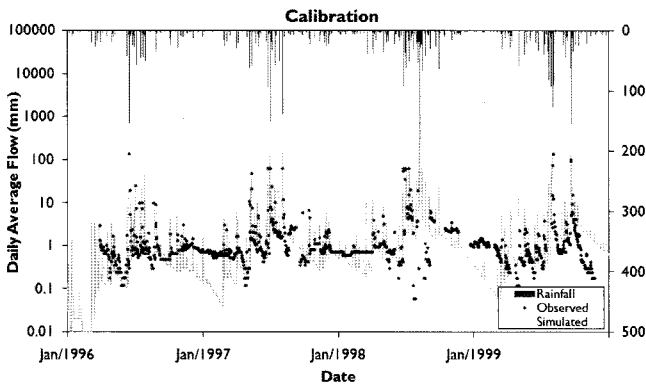


Fig. 2 Observed and simulated daily flows over the calibration period for study watershed

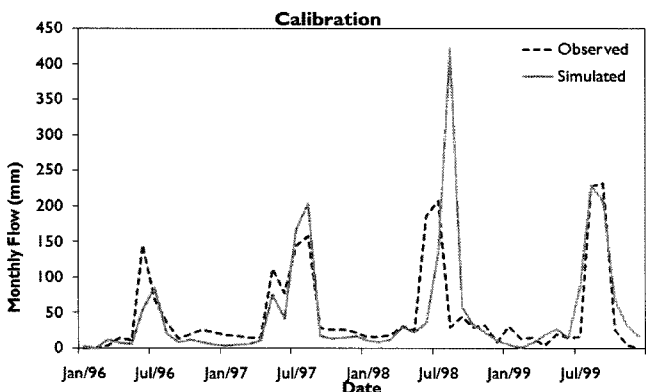


Fig. 3 Observed and simulated monthly flows over the calibration period for study watershed

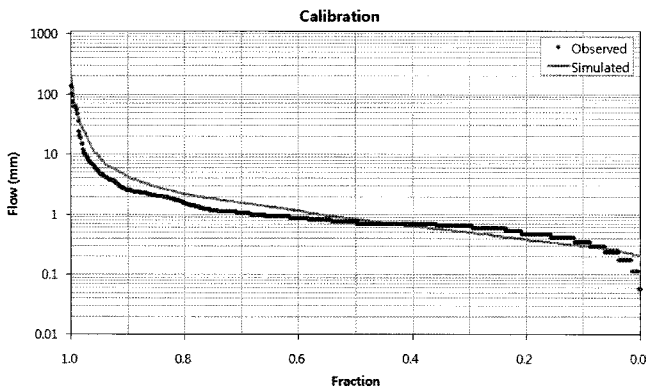


Fig. 4 Observed and simulated flow exceedance fraction over the calibration period for study watershed

수의 안정을 위해 모의치가 다소 낮게 나타나고 있으나 그 이후의 자료기간에서는 실측치와 모의치가 비교적 유사한 값의 변화를 보이고 있다. Fig. 3은 월별 유출량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있으며, 비교적 유출량이 작았던 1996년의 경우 실측치가 모의치에 비해 다소 낮게 모의되었으며,

Table 5 Summary of calibration statistics for study watershed

Measures	Observed	Simulated	Percent error	HSPEXP criteria (%)
Total runoff (mm)	2,932	2,931	0.0	10
Total of highest 10 % flows (mm)	2,149	2,159	-0.5	15
Total of lowest 50 % flows (mm)	134	146	-9.3	10
Summer flow volume (mm)	1,835	1,819	0.9	-
Winter flow volume (mm)	165	187	-13.3	-
Seasonal volume error (%)	-	-	3.5	10
Average of storm peaks (m <sup>3</sup> /s)	2.2	2.5	-13.6	15
Summer storm volume (mm)	805	920	-14.2	15

1998년의 경우 모의치가 실측치에 비해 다소 높게 모의된 결과를 보여주고 있다. Fig. 4는 일별유출량의 분포를 비교하여 보여주고 있으며 실측치와 모의치가 비교적 유사한 경향을 보이고 있다.

Table 5는 모형의 보정기간에 대한 HSPEXP 모형평가지표에 의한 실측치와 모의치의 비교결과를 정리하여 보여주고 있다. 실측치와 모의치에 대한 오차는 실측치에 대한 백분율을 구하여 산정하였다. 모형의 보정기간에 대해서는 총유출량, 상위 10 % 유출량, 하위 50 % 유출량, 첨두 유출량 평균치, 여름철 홍수유출량 등의 항목에 대하여 HSPEXP 모형평가지표의 기준을 각각 만족한 것으로 나타났다. Table 5에서 보여주듯이 총유출량은 실측치와 모의치가 거의 일치하는 것으로 모의되었으며, 여름철에 비해 겨울철의 유출량에서 다소간의 오차가 있는 것으로 나타났으며 폭우사상에 대한 결과는 평가지표의 허용한계치에 근접하는 오차범위를 보여주고 있다.

## 2. 모형의 검정

모형의 검정을 위해 시험유역의 자료중 2002년부터 2006년까지의 자료를 이용하였다. 모형의 보정에서와 마찬가지로 모의치와 실측치의 시간적인 비교를 위하여 일별유출량, 월별유출량, 일별유출량의 분포를 이용하였다. Fig. 5는 모형의 검정기간에 대한 일별 유출량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 2004년 말과 2005년 초의 갈수기에 실측치가 비교적 낮게 측정되어 실측치가 다른 갈수기에 비해 비교적 낮은 값을 보이고 있다. 나머지 자료기간에서는 실측치와 모의치가 비교적 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 6은 월별 유출량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있으며, 2003년의 경우 모의치가 실측치에 비해 다소 낮은 경향을, 2006년의 경우 모의치가 다소 높은 경향을 보여주고 있다. Fig. 7의 일별유출량 분포 비교에서는 앞서 설명한 2004년 말과 2005년 초의 갈수기 실측치가 낮게 측정되어 저유량에서 모의치와 실측치의

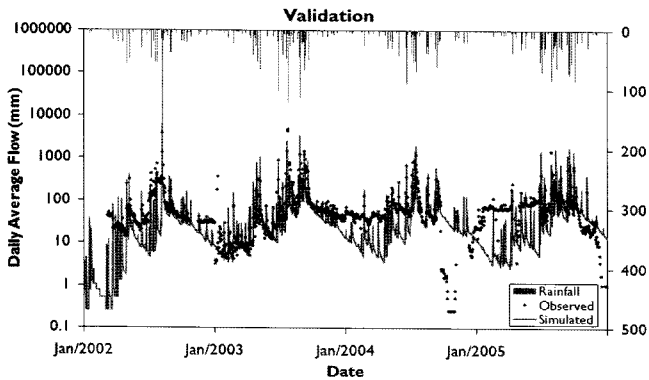


Fig. 5 Observed and simulated daily flows over the validation period for study watershed

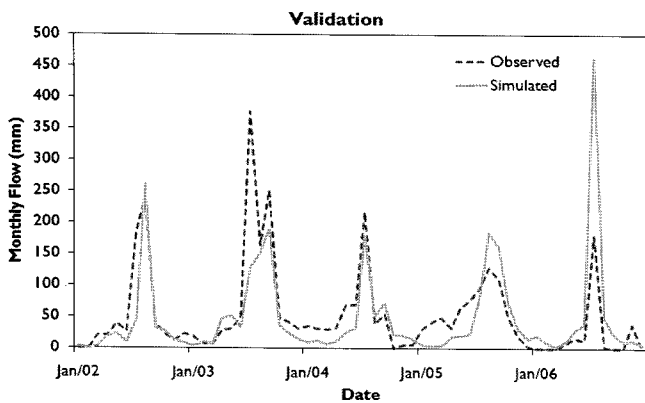


Fig. 6 Observed and simulated monthly flows over the validation period for study watershed

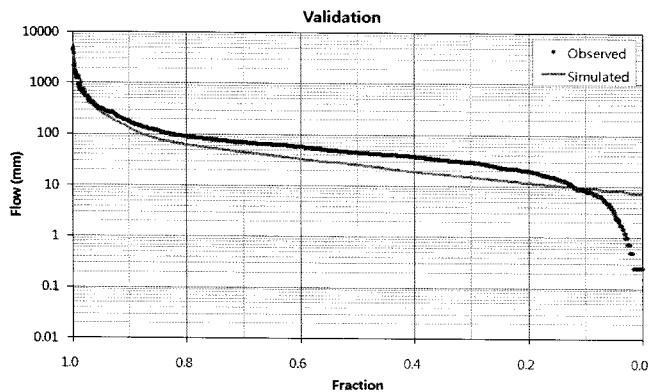


Fig. 7 Observed and simulated flow exceedance fraction over the validation period for study watershed

분포가 차이를 보이고 있으며 이러한 영향이 중간 유량 구간에 까지 영향을 미쳐 일별유출량의 분포에서 다소 차이를 보이고 있으나 고유량의 분포는 비교적 일치하는 경향을 보이고 있다.

다음의 Table 6은 모형의 검정기간에 대한 HSPEXP 모형평가 지표에 의한 실측치와 모의치의 비교결과를 정리하여 보여주

Table 6 Summary of validation statistics for study watershed

Measures	Observed	Simulated	Percent error	HSPEXP criteria (%)
Total runoff (mm)	3,231	2,911	9.9	10
Total of highest 10 % flows (mm)	1,915	2,035	-6.3	15
Total of lowest 50 % flows (mm)	210	182	13.5	10
Summer flow volume (mm)	1,866	1,683	9.8	-
Winter flow volume (mm)	228	187	18.0	-
Seasonal volume error (%)	-	-	3.5	10
Average of storm peaks (m <sup>3</sup> /s)	0.8	0.9	-12.5	15
Summer storm volume (mm)	188	157	16.3	15

고 있다. 모형의 검정기간에서는 하위 50 % 유출량과 여름철 홍수유출량의 항목에서 HSPEXP 모형평가지표의 기준을 약간 초과하는 것으로 나타났으며 나머지 항목에서는 기준을 만족하는 것으로 모의되었다. 하위 50 % 유출량에서 기준치를 초과한 것은 2004년 말과 2005년 초의 낮은 실측치가 영향을 미친 것으로 보인다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 HSPEXP를 이용한 HSPF 모형의 수문 매개변수 보정에 대한 적용성을 분석하기 위해 경기도 화성시에 위치한 발안시험유역을 대상으로 HSPF 모형의 입력자료를 구축하고 1996년부터 2007년까지의 수문 모니터링 자료를 이용하여 HSPEXP의 모형평가 지표 (총유출량, 상위 10 % 유출량, 하위 50 % 유출량, 첨두유출량 평균치 등)를 이용하여 모형의 보정과 검정을 실시하고 그 결과를 고찰하였다. 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 있으나 국내에서는 적용사례가 없어 본 연구에서는 이에 대한 연구결과를 소개하고 분석한 결과를 제시하였다.

모형의 보정을 위해 1996년부터 2000년까지의 자료를 이용하였으며, 모의치와 실측치의 시각적인 비교를 위하여 일별유출량, 월별유출량과 함께 일별유출량의 분포를 이용하였다. 모형의 보정기간에 대한 HSPEXP 모형평가지표에 의한 실측치와 모의치의 비교결과, 총유출량, 상위 10 % 유출량, 하위 50 % 유출량, 첨두 유출량 평균치, 여름철 홍수유출량 등의 항목에 대하여 HSPEXP 모형평가지표의 기준을 각각 만족한 것으로 나타났으며, 총유출량은 실측치와 모의치가 거의 일치하는 것으로 모의되었고, 여름철에 비해 겨울철의 유출량에서 다소간

의 오차가 있는 것으로 나타났다. 2002년부터 2006년까지의 자료를 이용한 모형의 검증결과, 2004년 말과 2005년 초의 갈수기에 실측치가 비교적 낮게 측정되어 실측치가 다른 갈수기에 비해 비교적 낮은 값을 보이고 있으며, 하위 50 % 유출량과 여름철 홍수유출량의 항목에서 HSPEXP 모형평가지표의 기준을 약간 초과하는 것으로 나타났으며 나머지 항목에서는 기준을 만족하는 것으로 모의되었다. 하위 50 % 유출량에서 기준치를 초과한 것은 2004년 말과 2005년 초의 낮은 실측치가 영향을 미친 것으로 보인다.

이상에서와 같이 HSPEXP를 이용하여 HSPF 모형의 수문 매개변수를 보정 후 검증하였으며, 모형의 사용 목적에 맞게 평가지표를 선정하고 기준을 정립한 후 모형의 보정을 수행한다면 사용자의 목적에 맞는 보다 명확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 평가된다. 향후 HSPEXP 모형평가지표에 의한 매개변수의 보정결과를 기존에 이용되고 있던 RMSE, 결정계수등과 비교하여 각각의 장단점을 분석한다면 수문모형의 매개변수 보정에 대한 이해를 넓히고 보다 많은 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보 기술 사업단의 연구비지원 (과제번호 4-5-3)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. 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/tmdl/apptmdls/shenrvr/northbac.pdf>. Accessed 13 March 2008.
2. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, Jr., T. H. Jobs, and A. S. Donigan, Jr., 2001. Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF): User's manual for release 12, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
3. 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.
4. Kim, S. M., and S. W. Park, 2004. Calibration and validation of HSPF model to estimate the pollutants loads from rural small watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(8): 643-651 (in Korean).
5. 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: W01402.
6. Lumb, A. M., R. B. McCammon, and J. L. Kittle, 1994. Users manual for an EXPert System (HSPEXP) for calibration on the Hydrological Simulation Program-Fortran. Water-Resources Investigations Report 94-4168, U.S. Geological Survey, Reston, VA.
7. Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235: 276-288.
8. Madsen, H., G. Wilson, and H. C. Ammentorp, 2002. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* 261: 48-59.
9. 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.
10. USGS, 2000. Water Resources Applications Software: HSPF. <http://water.usgs.gov/software/hspf.html>. Accessed 7 Apr. 2009.