



## HSPF 모형을 이용한 합천댐 유입량 추정 Estimation of the Hapcheon Dam Inflow Using HSPF Model

조현경<sup>a</sup> · 김상민<sup>b, †</sup>

Hyun Kyung Cho · Sang Min Kim

### ABSTRACT

The objective of this study was to calibrate and validate the HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) model for estimating the runoff of the Hapcheon dam watershed. Spatial data, such as watershed, stream, land use, and a digital elevation map, were used as input data for the HSPF model. Observed runoff data from 2000 to 2016 in study watershed were used for calibration and validation. Hydrologic parameters for runoff calibration were selected based on the user's manual and references, and trial and error method was used for parameter calibration. The  $R^2$ , RMSE (root-mean-square error), RMAE (relative mean absolute error), and NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) were used to evaluate the model's performance. Calibration and validation results showed that annual mean runoff was within  $\pm 4\%$  error. The model performance criteria for calibration and validation showed that  $R^2$  was in the range of 0.78 to 0.83, RMSE was 2.55 to 2.76 mm/day, RMAE was 0.46 to 0.48 mm/day, and NSE was 0.81 to 0.82 for daily runoff. The amount of inflow to Hapcheon Dam was calculated from the calibrated HSPF model and the result was compared with observed inflow, which was  $-0.9\%$  error. As a result of analyzing the relation between inflow and storage capacity, it was found that as the inflow increases, the storage increases, and when the inflow decreases, the storage also decreases. As a result of correlation between inflow and storage,  $R^2$  of the measured inflow and storage was 0.67, and the simulated inflow and storage was 0.61.

**Keywords:** HSPF; calibration; validation; Hapcheon dam; dam inflow

### 1. Introduction

HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모형은 미국환경청 (U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 장기유출 모형으로 유역의 복잡한 수문 및 수질에 측에 효과적이며, 점 및 비점오염배출량 산정, 수질오염총량제 평가, 유역물수지 변화, 탁수발생, 유역관리를 통한 수질개선효과, 유역내 오염원변화에 따른 수질평가 등 다양한 분야에 적용이 가능하다. 오염총량관리의 선진국인 미국에서 수질오염총량제 (TMDL)를 위한 연구와 정책적용 등에 HSPF를 선정하여 이용하고 있으며 (USEPA, 1997), 국내에서도 수질오염총량제도의 확대적용으로 수계 수질관리에 있어 유역 및 수질모델링에 대한 중요성이 대두되어 HSPF모형의 사용빈도

가 증가하고 있는 추세이다 (Jung, 2012). 수문모델링은 물 순환과정을 하나의 폐합계로 보고 입력 및 출력자료를 정의하여 (Yoon, 1996) 유역특성자료 및 유출과정을 수식화하는 지배방정식과 이들의 초기 및 경계조건을 정의해 줌으로써 일련의 유출과정을 모의할 수 있게 한다. 특히 수문모의 결과는 대상유역의 수질 모델링의 기초자료로 활용되며, 수문모의값에 따라 수질농도와 오염부하량 모의 결과가 도출되므로 수질오염총량관리제 이행을 위해 정확한 수문모델링은 매우 중요하다 (Lee, 2012; Kim and Kim, 2017). HSPF 모형의 모의결과는 높은 신뢰도와 정확도를 요구하며, 실측값을 기준으로 모의값을 보정하고 검증하는 과정은 모형에 대한 적용성을 증대시킨다 (Kim and Kim, 2013).

본 연구의 대상인 합천댐 유역의 연평균 강수량은 1,468 mm (2000년~2017년)으로 전국의 연평균 강수량 1,277 mm 보다 높아 다우지역에 속하며 (기상청), 매년 여름철 태풍의 영향과 주변 농경지의 토사유출로 인해 탁수가 발생하고 있으며 탁수현상은 댐 하류 생태계의 변화, 하천이용도 저하, 하류지역 정수처리 비용 증가 등의 많은 문제점을 발생시킨다 (Hwang et al., 2005). 또한 유역의 하단에 연간 8,000만  $m^3$ 의 관개용수로 사용되는 합천댐이 위치하고 있어 수문 및 수질관리가 매우 중요하다 (Kim and Kang, 2013). 합천댐 유

<sup>a</sup> PhD Student, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University

<sup>b</sup> Professor, Department of Agricultural Engineering (Institute of Agriculture & Life Sciences), Gyeongsang National University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1931 Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: April 24, 2019

Revised: August 21, 2019

Accepted: August 22, 2019

역의 유출량 추정 및 수문특성에 대한 분석은 향후 수자원 관리 측면에서 중요할 것이며, 합천댐의 안정적인 운영을 위해 기후변화와 다양한 수문여건의 변화를 고려한 유출량과 유입량의 변화를 분석할 필요가 있다.

합천댐 유역을 대상으로 수문 모델링을 적용하여 유출량 추정 및 수문 특성을 분석한 연구를 살펴보면 Shin et al. (2007)은 SWAT (Soil Water Assessment Tool) 을 이용하여 낙동강 유역을 대상으로 유역통합 (SWAT-Nakdong)을 구축하여 합천댐 유역의 유출특성을 분석하였으며, Jang et al. (2008)은 TANK 모형과 SWAT 모형을 각각 MODSIM (Generalized River Basin Decision Support System and Network Flow Model) 모형과 연계하여 유출량을 분석한 바 있으며, RMSE, NSE, R<sup>2</sup> 등 모형 평가지표를 이용하여 모형검증을 수행하였다. Lee et al. (2011)은 낙동강 유역에 격자형태의 수문기상정보를 생산하기 위해 분포형 수문모형인 TOPLATS 모형을 시험 적용하여 토양수분, 유출량, 실제 증발산량등의 수문성분을 생산하였으며, 최적 매개변수 추정과 모의결과에 대한 검증은 이루어지지 않았다. 대상유역인 합천댐 유역에서 HSPF 모형의 적용사례가 많지 않으며, 유역의 년도별 유출량 및 유출을 분석이 부족하고 대부분의 연구에서 대상유역을 낙동강유역으로 선정하여 합천댐의 유출량을 모의하는 경우가 많았다.

따라서 본 연구에서는 합천댐의 상류인 합천댐 유역에서 장기간의 실측자료를 수집하여 HSPF 모형의 적용성을 평가하고 연도별 유출량, 유출을 및 유출특성을 분석하고 다양한 평가지표를 이용하여 합천댐 유역에서 유출되는 유출량에 대해 비교, 분석하여 합천댐에서 유입량을 추정하고자 한다. 추정된 유입량을 이용하여 실측유입량과 비교하고 저수량과의 관계도 파악하고자 한다.

## II. Materials and Methods

### 1. HSPF 모형의 개요

HSPF (Hydrological Simulation Program -Fortran) 모형은 1960년대 초반 스탠포드 유역모형으로 처음 개발되어 수질기작이 추가되고 1970년대 후반 소프트웨어 공학 설계를 이용하여 몇 개의 모형을 연계하여 Fortran 프로그램으로 개발되었다. 그 후 USGS (U.S. Geological Survey)의 WDM (Watershed Data Management) 시스템이 USGS와 USEPA에 의해 공동으로 개발되었고 매개변수를 추정하는 전문가 프로그램인 HSPEXP, 입출력 관리 시스템인 WDMUtil, 사용자 편의 시스템을 이용하여 모형을 손쉽게 구동하도록 개발된 HSPF의 호환 모형인 WinHSPF와 HSPF 모형의 결과를 시각적으로 보여주기 위한 GenScn 모형 등이 개발되었다. HSPF는 장기간에 걸쳐 크고 작은 규모와 복잡한 유역의 수리, 수질에 관한 다양한 현상들을 모의하기 위해 개발되었고, 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 증발산, 지하수 충전, 용존산소, 생물학적 산소 요구량, 온도, 대장균, 플랑크톤 등을 모의할 수 있다 (Bicknell et al., 2001).

본 연구에서는 실측값과 수문모델링 결과를 비교하여 합천댐 유역의 모의 유출량을 산정하기 위하여 수문 매개변수를 보정하였으며, 선행연구를 참고하여 민감도가 높은 수문매개변수를 선정하였다. PERND 모듈에서 선정된 매개변수는 LZSN, INFILT, AGWRC, DEEPER, UZSN, NSUR, INTFW, IRC이며, Table 1은 BASINS Technical Note 6 (U. S. EPA, 2000)에서 제공하는 수문 매개변수의 적용범위이다.

### 2. 대상유역

연구 대상유역인 합천호는 경상남도 합천군 대병면에 위치하고 있으며, 낙동강 하류지역의 생활 및 공업용수, 농업용수

Table 1 HSPF hydrology parameters and value ranges

Parameter	Unit	Definition	Range of value	
			Typical	Possible
LZSN	inches	Lower zone nominal soil moisture storage	3.0-8.0	2.0-15.0
INFILT	in/hr	Index to infiltration capacity	0.01-0.25	0.001-0.5
KVARY	1/inches	Variable groundwater recession	0.0-3.0	0.0-5.0
AGWRC	none	Base groundwater recession	0.92-0.99	0.85-0.999
DEEPER	none	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	0.0-0.20	0.0-0.50
BASETP	none	Fraction of remaining ET from baseflow	0.0-0.05	0.0-0.20
UZSN	inches	Upper zone nominal soil moisture storage	0.1-1.0	0.05-2.0
NSUR	none	Manning's n (roughness) for overland flow	0.15-0.35	0.05-0.50
INTFW	none	Interflow inflow parameter	1.0-3.0	1.0-10.0
IRC	none	Interflow recession parameter	0.5-0.7	0.3-0.85

를 공급하고 산업 시설과 농경지의 홍수피해를 조절하기 위하여 낙동강 지류인 황강에 건설된 다목적댐 저수지이다. 합천댐 유역의 면적은 929 km<sup>2</sup>, 총저수용량이 7억 9,000만 m<sup>3</sup>, 저수면적은 25 km<sup>2</sup>, 저수지 길이는 30 km, 최대 수심은 약 80 m이다. 용수공급능력은 연간 5억 9,900만 m<sup>3</sup>이며, 부산, 창원, 마산, 진해 등 낙동강 하류지역에 농업용수를 공급하고 있다. 합천댐 유역은 청정지역으로 알려져 있지만 매년 여름철 태풍의 영향과 주변 농경지의 토사 유출로 인해 장기간 이어지는 탁수현상이 보고되고 있다. 또한 유역 하단에 용량이 8,000만 m<sup>3</sup>인 합천댐이 위치하고 있어 수문 및 수질관리가 매우 중요하다. Fig. 1은 합천댐 유역의 현황을 나타내는 그림으로 소유역 및 하천, 기상, 수위 관측소의 위치를 보여주고 있다. 합천댐 유역의 기상관측소는 거창 기상관측소이며, 수위관측소는 3개 관측소 중 거창2 관측소를 선정하였다.

### 3. 모형입력자료

HSPF 모형의 지형관련 자료는 BASINS를 이용하여 유역도, 하천도, 수치표고지도 (DEM), 토지피복도 등을 구축하였으며, 기상자료, 수위, 유량자료 등의 시계열 자료는 WDMUtil을 이용하여 구축하였다. 기상자료는 거창기상관측소의 시간단위 강수량과 일단위 온도, 풍속, 일사량, 이슬점온도, 운량 자료를 이용하여 HSPF 모형에서 사용할 수 있는 입력형식인 WDM 파일로 구축하였다. 시험유역의 수위, 유량, 합천댐 유입량 자료는 국가수자원종합정보시스템 (www.wamis.go.kr)의 자료를 이용하여 구축하였다. 다음의 Fig. 2는 BASINS에 입력한 토지피복도와 수치표고자료 (DEM)을 보여주고 있다.

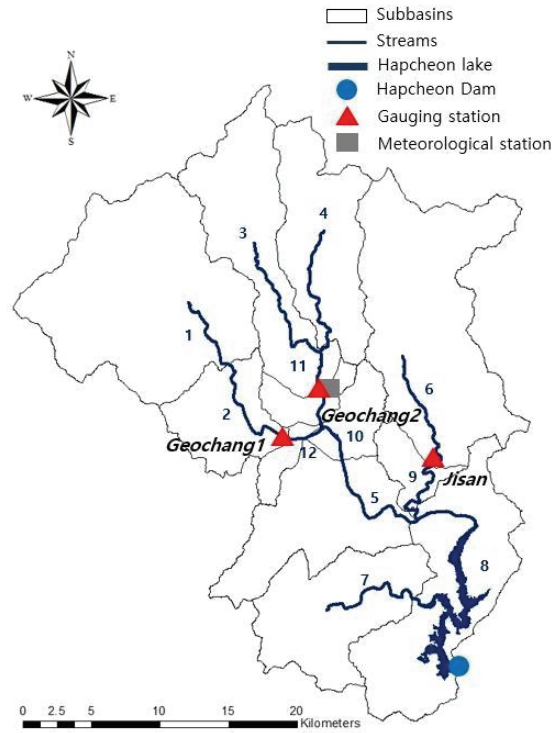


Fig. 1 Location of monitoring stations and delineated sub-watersheds of Hapcheon Dam

토지피복도는 지표면 상태를 시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역 7개로 나누어 22개로 중분류한 환경부의 토지피복도를 사용하였으며, 본 연구에서는 환경부 토지피복도를 HSPF모형에서 이용되는 Agricultural Land (농

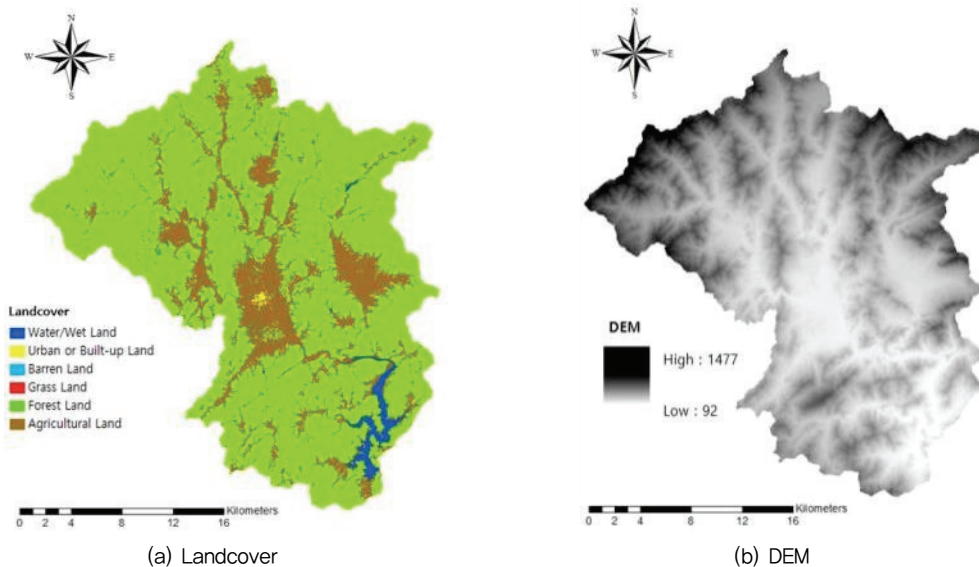


Fig. 2 Landcover and DEM in Hapcheon dam watershed

**Table 2** Landcover classification for Hapcheon dam watershed

Landcover	Area (km <sup>2</sup> )	Area ratio (%)
Urban or Built-up land	289.9	31.3
Agricultural land	98.2	10.6
Forest land	320.4	34.6
Marshy land	50.7	5.0
Barren land	37.4	4.0
Wetlands/water	82.1	8.8
Total	925	100

**Table 3** Range of R<sup>2</sup> for model performance evaluation (Donigan, 2000)

Item	Very good	Good	Fair	Poor
Flow	0.8 < R <sup>2</sup> ≤ 1.0	0.7 < R <sup>2</sup> ≤ 0.8	0.6 < R <sup>2</sup> ≤ 0.7	R <sup>2</sup> ≤ 0.6

경지), Barren Land (나지), Range Land (초지), Forest Land (산림), Wetlands/Water (습지/수역), Urban or Built-up Land (도시지) 6개 항목으로 재분류하였다. (b)는 합천댐 유역의 수치표고자료 (DEM) 자료이며, 환경부에서 제공하는 표고 속성을 사용하였다. 합천댐 유역의 표고는 92 m~1,477 m의 분포를 보이며, 평균표고는 512.71 m이다.

**4. 모형의 평가지표**

HSPF 모형을 적용하기 위해서 수문의 보정, 검정과정은 필수적인 과정이며, 매개변수의 보정을 위한 기법에는 시행착오법이라 불리는 수동보정기법과 HSPEXP (expert system for the calibration of HSPF), PEST (model-independent parameter optimizer)등의 자동보정기법이 있다. 본 연구에서는 수동보정기법인 시행착오방법을 이용하여 수문 모의결과를 보정 및 검정하였으며, 수문의 보정기간은 2011년~2014년, 검정기간은 2004년~2007년으로 설정하였다. 모형의 적합성과 상관성을 평가하기 위해 결정계수 (R<sup>2</sup>), 평균제곱근오차 (RMSE), Nash-Sutcliffe 효율성지수 (NSE), 상대평균절대오차 (RMAE)를 사용하였으며, 각각의 함수의 식은 다음과 같다. Q<sub>0</sub>은 실측치, Q<sub>s</sub>는 모의치, Q<sub>m</sub>은 실측치의 평균, Q<sub>ms</sub>는 모의치의 평균, n은 자료의 개수이며, 결정계수 R<sup>2</sup>는 1, RMSE는 0, RMAE는 0, NSE는 1에 가까울수록 오차가 없다는 것을 나타낸다.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n [Q_0(i) - Q_m][Q_s(i) - Q_{ms}]}{\left[ \sum_{i=1}^n [Q_0(i) - Q_m]^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n [Q_s(i) - Q_{ms}]^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_s(i) - Q_0(i)]^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_s(i) - Q_s(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_0(i) - Q_m(i)]^2} \quad (3)$$

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_s(i) - Q_0(i)|}{Q_m} \quad (4)$$

Donigan (2000)는 모형의 적합성을 평가하기 위해 결정계수 (R<sup>2</sup>) 범위를 매우좋음 (very good), 좋음 (good), 적절 (fair), 부적절 (poor) 총 4단계로 구분하였으며, 일단위 수문모의 자료에 대한 구간별 모형효율은 Table 3과 같다.

**III. Results and Discussion**

**1. 모형의 매개변수 보정**

HSPF 모형의 수문 유출량에 대한 보정은 총유출량과 첨두 유출량에 대하여 변위가 큰 변수부터 보정하였다. HSPF 모형의 유출에 비교적 크게 영향을 주는 인자는 LZSN, INFILT, AGWRC, UZSN, DEEPER, LZETP, INTFW, IRC 등으로 분석되었다. 합천댐 유역의 매개변수의 범위는 LZSN 2.0~5.0, INFILT 0.01~0.1, AGWRC 0.98~0.999, DEEPER 0.1~0.5, BASEIP 0.0~0.02, UZSN 0.05~0.5, NSUR 0.2, INTFW 0.01~0.5, IRC 0.5, KVARY 0.0~1.0를 나타내었다. Table 4는 합천댐 유역에서 가장 많은 넓이를 차지하는 Forest, Urban or

**Table 4** Calibrated result of HSPF hydrology parameters in Hapcheon dam watershed

Parameter	Unit	Initial value	Landcover	Calibration result
LZSN	inches	6.0	Forest	5.0
			Agriculture	2.0
			Etc.	2.0-5.0
UZSN	inches	1,128	Forest	0.5
			Agriculture	0.05
			Etc.	0.05-0.5
NSUR	none	0.2	Forest	0.2
			Agriculture	0.2
			Etc.	0.2
INTFW	none	0.75	Forest	0.5
			Agriculture	0.01
			Etc.	0.01-0.5
IRC	none	0.5	Forest	0.5
			Agriculture	0.5
			Etc.	0.5
INFILT	in/hr	0.16	Forest	0.01
			Agriculture	0.01
			Etc.	0.01-0.1
AGWRC	none	0.98	Forest	0.999
			Agriculture	0.999
			Etc.	0.98-0.999
DEEPEP	none	0.1	Forest	0.1
			Agriculture	0.45
			Etc.	0.1-0.5
BASETP	none	0.02	Forest	0.0
			Agriculture	0.02
			Etc.	0.0-0.02
KVARY	inches	0	Forest	0.1
			Agriculture	0.0
			Etc.	0.0-0.1

Built-up land, Agriculture와 나머지 토지이용의 매개변수 값과 범위를 보여준다.

보정기간 (2011년~2014년)에 대한 합천댐 유역의 강우량, 실측유출량, 및 모의유출량에 대한 유출율, 보정결과에 따른 적합성 평가 결과는 Table 5와 같다. 보정기간에 대한 실측 연평균 유출고는 744.6 mm이며, 모의 유출고는 712.3 mm로 -4.6%의 오차를 나타내었다. 모형 적합성 평가결과  $R^2$ 의 경우 0.83, RMSE는 2.55 mm/day, RMAE 0.46 mm/day, NSE 0.82로 나타났다. 보정기간에 대한 연평균 유출량은 실측값이 56.9%이고 모의 유출량이 55%로 매우 비슷한 결과를 나타내었다. Donigan (2000)의 결정계수 범위를 적용하여 모형 효율을 평가한 결과 0.83으로 매우 좋음수준을 보였다. 보정기간의 합천댐 연평균 유입량은 749.8 mm이며 연평균 유입률은 57.8%로 나타났다. Fig. 3은 실측유출량과 모의유출량의 일별그래프를 나타내고 있으며, 유출 보정결과를 나타내고 있다.

## 2. 모형의 검정

검정기간 (2004년~2007년)에 대한 합천댐 유역의 강우량, 실측유출량 및 모의유출량에 대한 유출율, 검정결과에 따른 모형의 적합성 평가 결과는 Table 6과 같다. 검정기간에 대한 합천댐 유역의 실측 연평균 유출고는 772.2 mm이며, 모의 유출고는 804.0 mm로 +3.9%의 오차를 나타내었다. 모형 적합성 평가 결과  $R^2$ 의 경우 0.78, RMSE 2.76 mm/day, RMAE 0.48 mm/day, NSE 0.81로 나타났다. 검정기간에 대한 연평균 유출량은 실측값이 51.7%이고 모의 유출량이 53.9%로 비슷한 결과를 나타내었다. Donigan (2000)의 결정계수 범위를 적용하여 모형 효율을 평가한 결과 0.78으로 좋음수준을 가졌다. 검정기간의 연평균 유입량은 787.7 mm이며 연평균 유입률은 53.2%로 나타났다. Fig. 4는 실측유출량과 모의유출량의 일별그래프를 나타내고 있으며, 유출 검정결과를 나타내고 있다.

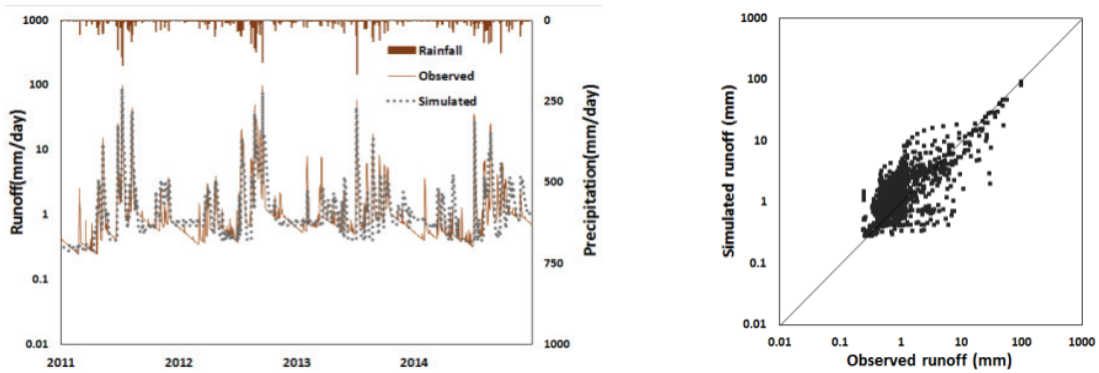


Fig. 3 Comparison between observed and simulated daily runoff for calibration period

Table 5 Observed and simulated annual mean runoff and model performance results for calibration period

Year	Precipitation (mm)	Observed		Simulated		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE (mm/day)	NSE
		Runoff (mm)	Runoff rate(%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)				
2011	1,321	817.4	61.9	807.5	61.1	0.91	1.76	0.31	0.94
2012	1,538	990.9	64.4	817.6	53.2	0.72	4.29	0.54	0.69
2013	1,085	622.4	57.4	604.8	55.7	0.85	1.32	0.35	0.90
2014	1,242	547.7	44.1	619.2	49.9	0.77	1.64	0.44	0.77
Mean	1,297	744.6	56.9	712.3	55.0	0.83	2.55	0.46	0.82

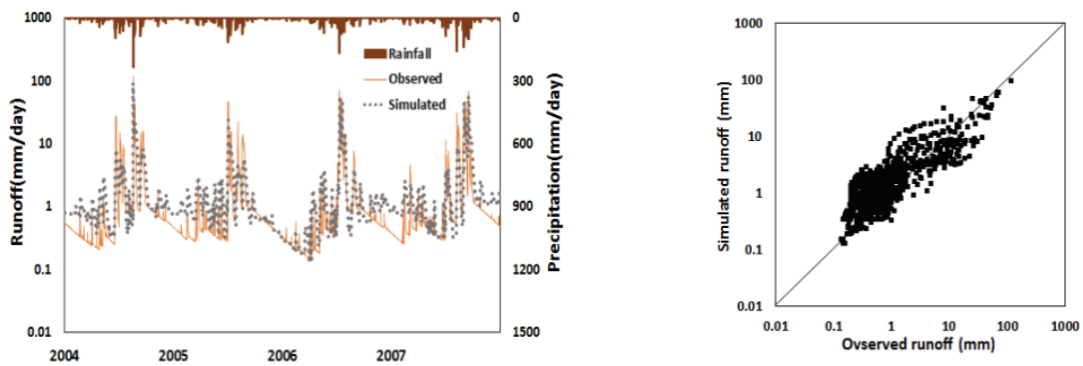


Fig. 4 Comparison between observed and simulated daily runoff for validation period

Table 6 Observed and simulated annual mean runoff and model performance results for validation period

Year	Precipitation (mm)	Observed		Simulated		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE (mm/day)	NSE
		Runoff (mm)	Runoff rate(%)	Runoff (mm)	Runoff rate(%)				
2004	1,547	868.7	56.2	871.0	56.3	0.84	2.66	0.13	0.89
2005	1,244	556.1	44.7	599.6	48.2	0.77	2.19	0.63	0.75
2006	1,411	747.4	53.0	770.5	54.6	0.67	3.27	0.65	0.78
2007	1,729	916.4	53.0	974.9	56.4	0.83	2.9	0.49	0.83
Mean	1,482	772.2	51.7	804.0	53.9	0.78	2.76	0.48	0.81

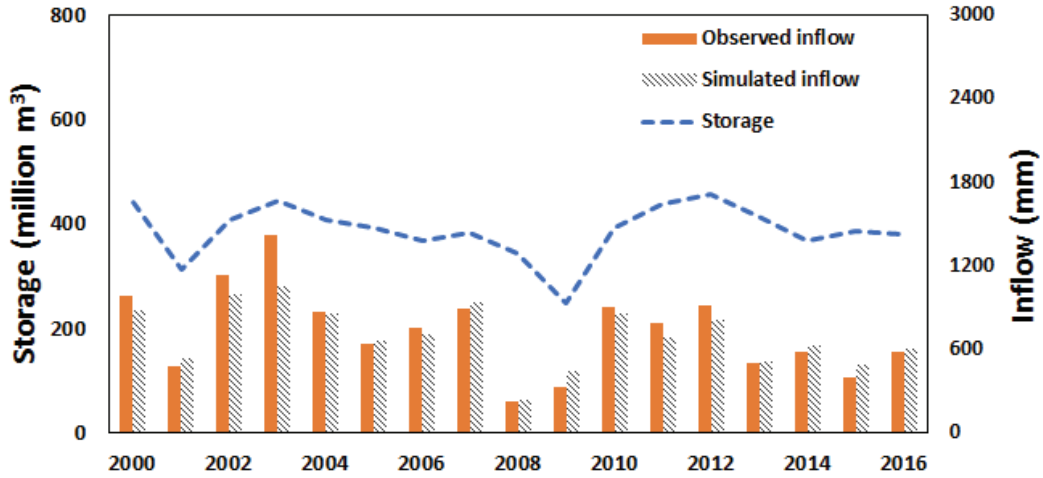


Fig. 5 Annual mean observed and simulated inflow and storage

### 3. 합천댐 유입량

합천댐 실측 유입량자료는 국가수자원종합시스템 (WAMIS)에서 수집하였으며, 합천댐 유입량 자료의 경우 댐저수량에서 전시간의 저수량차와 단위시간동안 방류량을 더한 양을 cms 단위로 환산하여 간접적으로 얻어진 값이다. 모의 유입량은

Fig. 1에서 합천댐을 출구로 하는 5, 7, 9 하천의 유출량을 HSPF 모형을 이용하여 모의한 값을 합산하여 얻은 값이며, cms단위의 모의 유출량을 합천댐이 위치한 합천호의 면적을 제외한 813.8 km<sup>2</sup>을 고려하여 mm단위로 산정하였다. Table 7은 합천댐 연평균 실측 유입량과 모의유입량을 비교하여 나타내고 있다. 합천댐의 연평균 실측 유입량은 729.7 mm이며, HSPF를

Table 7 Comparison between observed and simulated inflow to Hapcheon dam from 2000 to 2016

Year	Rainfall (mm)	Observed		Simulated	
		Inflow (mm)	Inflow rate (%)	Inflow (mm)	Inflow rate (%)
2000	1,595	982.2	61.6	885.1	55.5
2001	1,125	475.9	42.3	538.7	47.9
2002	1,769	1136.0	64.2	989.3	55.9
2003	1,951	1421.5	72.9	1055.3	54.1
2004	1,548	862.9	55.7	856.6	55.3
2005	1,245	639.5	51.4	659.4	53.0
2006	1,411	752.3	53.3	709.9	50.3
2007	1,729	896.0	51.8	942.7	54.5
2008	616	228.0	37.0	239.0	38.8
2009	975	332.6	34.1	438.7	45.0
2010	1,549	905.6	58.5	857.6	55.4
2011	1,321	790.6	59.8	683.5	51.7
2012	1,538	917.4	59.6	809.4	52.6
2013	1,086	499.0	46.0	517.1	47.6
2014	1,242	582.2	46.9	629.3	50.7
2015	1,031	398.9	38.7	484.2	47.0
2016	1,230	583.6	47.5	606.8	49.3
Mean	1,351	729.7	51.8	700.2	50.9

이용해 모의한 연평균 유입량은 700.2 mm으로 -0.9%의 오차를 보였다.

#### 4. 합천댐의 저수량과 유입량

합천댐 유입량 변화에 따른 저수량의 변화를 분석하기 위하여 2000~2016년의 저수량을 물환경정보시스템 (NIER)의 자료를 이용하여 구축하였다. 합천댐의 총저수용량은 790백만  $m^3$ 으로 합천댐의 일별 저수량을 평균하여 연평균 저수량을 산정하였으며 연평균 저수량은 387백만  $m^3$ 으로 나타났다. Fig. 5는 연평균 저수량을 유입량과 비교한 그래프이며 실측 유입량과 모의유입량 모두 유입량이 증가하면 저수량이 증가하고 유입량이 감소할 경우 저수량 또한 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 저수량과 유입량의 상관관계 분석 결과는 결정계수 R의 값이 측정된 유입량과 저수량은 0.67이었으며, 모의된 유입량과 저수량은 0.61로 상관관계를 보였다.

#### IV. Conclusion

본 연구에서는 합천댐 유역을 대상으로 HSPF 모형의 보정과 검정을 통해 모형의 적용성을 평가하고, 검증된 모형을 이용하여 합천댐 유입량을 모의하고 이를 합천댐의 저수량 자료와 비교하였다. HSPF 모형의 입력자료를 구축하기 위하여 하천도, 유역도, 토지피복도, 수치지표고지도를 이용하였고, 모형의 검정과 보정을 위해 모의기간을 2000년부터 2016년까지의 유출량 자료를 이용하였다. 모형의 적합성을 평가하기 위한 지표로  $R^2$ , RMSE, RMAE, NSE를 사용하였다. HSPF 모형의 수문 유출량에 대한 보정은 총유출량과 침투유출량에 대하여 변위가 큰 변수부터 보정하였으며, HSPF 모형의 유출에 비교적 크게 영향을 주는 인자는 LZSN, INFILT, AGWRC, UZSN, DEEPER, LZETP, INTFW, IRC 등으로 분석되었다. 합천댐 유역의 매개변수의 범위는 LZSN 2.0~5.0, INFILT 0.001~0.1, AGWRC 0.98~0.999, DEEPER 0.1~0.5, BASETP 0.0~0.02, UZSN 0.05~0.5, NSUR 0.2, INTFW 0.01~0.1, IRC 0.5, KVARY 0.0~0.1를 나타내었다.

보정기간에 대한 실측자료와 모의 자료를 비교한 결과 합천댐 유역의 실측 연평균 유출고는 744.6 mm, 모의 유출고는 712.3 mm로 나타나 -4.6%오차를 나타내었고  $R^2$ 는 0.83, RMSE는 2.565 mm/day, RMAE는 0.46 mm/day, NSE는 0.8로 나타났으며 매우 좋음 수준의 모형효율을 나타냈다. 검정기간에 대한 실측자료와 모의 자료를 비교한 결과 실측 연평균 유출고는 772.2 mm이며, 모의 유출고는 804.0 mm로 +3.9%의 오차를 나타내었다. 모형 적합성 평가 결과  $R^2$ 의 경우 0.78,

RMSE는 2.76 mm/day, RMAE는 0.48 mm/day, NSE는 0.81로 나타났으며 검정 또한 좋음 수준의 모형효율을 나타냈다. 산정된 유출량을 이용하여 합천댐 유입구를 출구로 하는 하천의 유출량을 합하여 모의한 유입량과 실측 유입량을 비교한 결과 모의된 연평균 유입량은 700.2 mm이며 유입률은 50.9%로 실측값에 비해 -0.9%의 오차를 가졌다. 유입량과 저수량의 관계를 파악한 결과 실측유입량과 모의유입량 모두 유입량이 증가하면 저수량이 증가하고 유입량이 감소할 경우 저수량 또한 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 저수량과 유입량의 상관관계 분석 결과는 결정계수 R의 값이 측정된 유입량과 저수량은 0.67이었으며, 모의된 유입량과 저수량은 0.61로 상관관계를 보였다. 이는 향후 수문모형을 이용하여 하천 유역 내에서의 수문특징을 파악하여 효과적인 수자원관리에 기여할 것으로 기대된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 이공학 개인기초연구지원사업 연구비지원 (과제번호 2018-0868)에 의해 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, T. H. Jobes, and A. S. Donigan, 2001. Hydrology simulation program-Fortran (HSPF) user's manual for version 12, U.S. Environmental Protection Agency. National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
2. Donigan, A. S., 2000. HSPF Training Workshop Handbook and CD, lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22, EPA Headquarters.
3. Hwang, D. J., C. K. Lee, J. K. Seo, T. H. Im, J. H. Jung, Y. S. Yoon, M. S. Kim, S. N. Huh, J. J. You, Y. H. Kwan, S. H. Park, and H. K. Kwan, 2005. Effect of turbid water on the water quality of Imha-Reservoir and Nakdong River, Nakdong River Environment Research Center. National Institute of Environmental Research.
4. Jang, K. S., H. K. Ji, and S. T. Lee, 2008. Developing a water budget model combined SWAT and TANK Mode with MODSIM. *Journal of the Korean Water Resource Association*, 1305-1309 (in Korean).
5. Jung, K. Y., 2012. Introduction of HSPF model for watershed hydrology and water quality analysis. *Journal of the Korean Water Resource Association* 45(12): 103-110



- (in Korean).
6. Kim, B. R., and B. S. Kang, 2013. Parameter sensitivity analysis for spatial and temporal temperature simulation in the Hapcheon dam Reservoir. *Journal of the Korean Water Resource Association* 46(12): 1181-1191 (in Korean). doi: 10.3741/jkwra.2013.46.12.1181.
  7. Kim, S. M., and S. M. Kim, 2013. Evaluation of applicability and hydrologic parameter calibration for HSPF model using expert system for HSPF. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 13-20 (in Korean). doi:10.5389/ksae.2013.55.4.013.
  8. Kim, D. H., and S. M. Kim, 2017. Estimation of inflow into Namgang Dam according to climate change using SWAT model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(6): 9-18 (in Korean).
  9. Lee, B. J., Y. M. Cha, J. W. Cha, J. C. Choi, and Y. J. Choi, 2011. Application of TOPLATS model on Nakdong River Basin. *Journal of the Korean Civil Engineering* 287-290 (in Korean).
  10. Lee, S. J., 2012. A study on improving simulation method in HSPF Model for TMDL application. Ph.D. diss., Seoul, Ind.: Konkuk University.
  11. Shin, H. S., D. K. Kang, and S. D. Kim, 2007. Analysis of the effect of water budget elements on flow duration characteristics using SWAT-Nakdong. *Journal of the Korean Water Resource Association* 40(3): 251-263 (in Korean). doi:10.3741/jkwra.2007.40.3.251.
  12. United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA), 1997. Compendium of Tools for Watershed Assessment and TMDL Development. EPA-841-B-97-006. United States Environmental Protection Agency.
  13. United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA), 2000. BASINS Technical Note 6: Estimating Hydrology and Hydraulic Parameters for HSPF. EPA-823-R00-012. United States Environmental Protection Agency.
  14. United States Geological Survey (USGS), 2000. Water Resources Applications Software: HSPF. [Http://water.usgs.gov/software/hspf.html](http://water.usgs.gov/software/hspf.html) (Accessed Feb. 2018).
  15. Water Information System, KRF (Korean Reach File). <http://water.nier.go.kr> (Accessed Feb. 2018).
  16. Water Resources Management Information System (WAMIS). <http://www.wamis.go.kr>. (Accessed Feb. 2018).
  17. Yoon, Y. N., 1996. Industrial Hydrology, Cheongmungag Publisher.