

용담댐유역의 다지점 유량관측 자료 이용에 따른 SWAT 모형의 정확도 향상성 평가*

신형진¹ · 박민지^{2*} · 이지완³ · 황의호⁴ · 강석만¹ · 채효석⁴

Evaluation of Accuracy Improvement of SWAT Model for the Yongdam-Dam Watershed based on Multi-Point Hydrological Observations*

Hyung-Jin SHIN¹ · Min-Ji PARK^{2*} · Ji-Won LEE³
Eui-Ho HWANG⁴ · Seok-Man KANG¹ · Hyo-Sok CHAE⁴

요 약

본 연구에서는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형과 다지점 수문관측 자료를 이용하여 모형의 정확도 향상성을 평가하고자 한다. 대상유역은 한국수자원공사 용담시험유역의 수위자료를 측정하고 있는 용담댐(930.4km²), 동향(165.5km²), 천천(290.9km²), 주천(57.8km²), 석정(80.5km²) 유역으로 70%이상이 산림유역이다. 모형의 정확도를 향상시키기 위해 강수량자료는 기상관측소 2개(장수, 금산) 관측소와 기상청, 국토부, 수자원공사에서 관리하는 AWS 16개의 2003~2011년 일 강수량 자료를 이용하였다. 2003~2011년의 용담시험유역의 신뢰할만한 실측자료를 바탕으로 5지점의 일 유출량을 이용하여 단일지점(용담댐)과 다지점(동향, 천천, 주천, 석정)의 유출량을 검·보정하여 비교하였다. 모의 결과 단일지점의 소유역(동향, 천천, 주천, 석정)의 R²는 0.84, 다지점은 0.88, 단일지점의 Nash-Sutcliffe의 모형효율계수 0.45, 다지점은 0.70으로 보다 향상된 모의 결과로 나타났다.

주요어 : SWAT, 다지점 수위 관측소, 유출량, 용담댐 유역

2018년 08월 31일 접수 Received on August 31, 2018 / 2018년 09월 20일 수정 Revised on September 20, 2018 / 2018년 09월 20일 심사완료 Accepted on September 20, 2018

* 본 연구는 환경부 물관리연구사업의 연구비지원(18AWMP-B079625-05)에 의해 수행되었으며 수문자료를 제공해주신 K-water 연구원에 감사드립니다.

1 한국농어촌공사 농어촌연구원 Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

2 국립환경과학원 한강물환경연구소 Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

3 건국대학교 사회환경플랜트공학과 Dept. of Civil and Environmental and Plant Engrg., Konkuk Univ

4 한국수자원공사 K-water 융합연구원 K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

※ Corresponding Author E-mail : iamg79@korea.kr

ABSTRACT

This study is to evaluate the accuracy improvement of the model using SWAT(Soil and Water Assessment Tool) model and multi - point hydrological observation data. The watershed is located in the Yongdam Dam(930.4km²), the Donghyang(165.5km²), the Chuncheon(290.9km²), the Juchun(57.8km²) and the Seokjeong(80.5km²). The watershed covers 70.0 % forest. In order to improve the accuracy of the model, precipitation data were used from two weather stations(Jangsu, Geumsan) and 16 AWS stations daily precipitation data(2003~2011) managed by KMA, MLIT, and K-water. Based on the reliable data of the Yongam test basin in 2003~2011, the runoff of single point (Yongdam dam) and multi-point (Donghyang, Chuncheon, Juchun, Seokjeong). Simulation results show that the R² of the single subwatershed (Donghyang, Chuncheon, Juchun, Seokjeong) is single point(0.84) and multipoint(0.88). For model efficiency coefficient of Nash-Sutcliffe at single point(0.45) and multipoint(0.70).

KEYWORDS : SWAT, Multi-Point gauge station, Streamflow, Yongdamdam watershed

서론

유역 모델은 수문학적, 생태학적, 생지화학적 과정을 이해하고, 인간 활동과 기후변화와 같은 자연적인 현상에 따른 수질과 수문의 변화를 예측하기 위해 광범위하게 사용되고 있다(Shin *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2013a; Park *et al.*, 2013b; Zhang *et al.*, 2013). 대부분 유역 모델은 많은 매개변수를 가지고 있으나 모든 변수에 대한 직접적인 측정은 현실적으로 불가능하며, 한정적인 관측값을 사용하여 많게는 수백 개의 매개변수를 보정해야 하는 어려움을 가지고 있다. 매개변수의 최적화는 하나나 그 이상의 관측 항목을 이용하여 모델의 예측값과 관측값의 불확실성을 줄이는 중요한 과정이며, 모든 모델링 연구의 기본으로 제시되어 왔다(Park *et al.*, 2013c; Park *et al.*, 2012; Ahn *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2009).

최근 유역 모델에 지리정보시스템과 고해상도 자료의 적용이 증가하고 있어 모델은 더욱 복잡해졌다(Gupta *et al.*, 1998). 특히 수동으로 하는 모델의 보정은 많은 노력과 시간을 필요로 하게 되었고, 자동 보정은 수동 보정의 단점을

극복하고자 보편적이고 다양한 방법으로 연구되고 있다(Gupta *et al.*, 1999; Van Liew *et al.*, 2005). 자동 보정 방법에는 Gauss-Levenberg-Marquardt 방법(Doherty and Johnston, 2003)과 같은 gradient-based 방법, Shuffled Complex Evolution(SCE; Duan *et al.*, 1992)과 같은 개체군 진화 알고리즘, 지역화 또는 공간 일반화(Lamb and Kay, 2004) 방법 등이 있다.

대부분 모델의 보정 연구에는 단일 관측 지점에 대한 관측값을 사용하고 있다. 하지만 매개변수의 추정이 아무리 잘 되어도 한 지점에 대해 예측된 매개변수를 유역의 특성이 동일하지 않은 모든 소유역에 적용하는 것은 문제가 될 수 있다(Beven, 2000). 따라서 여러 지점에 대한 보정 결과를 사용하면 단일 지점에 대한 관측값을 사용한 경우보다 매개변수에 대한 불확실성을 효과적인 줄일 수 있다(Vandewiele and Elias, 1995). Li *et al.*(2010)의 경우 GWLF 모델을 이용하여 미국 Rhode 강 유역의 최적화를 위해 유출량과 부하량의 다지점보정을 실시하였으며, Boscarello *et al.*(2013)은 FEST-WB 모델을 이용하여 이탈리아 Piemonte 지역 내 6지점의 유출량에 대한 보정을 실시하여 모델 효율이 향상됨을 확인하였다. 국내에서는

Choi *et al.*(2012)는 소유역의 신뢰성 있는 유출량을 얻기 위해 GRM 분포형 모형의 다지점 보정 모듈을 개발하였고, Park *et al.*(2013b)과, Kim *et al.*(2006)이 각각 충주댐과 갑천 유역을 대상으로 SWAT 모형의 다지점 보정을 실시하였다.

SWAT(Soil Water Assessment Tools) 모형은 분할된 소유역에 대한 동일한 토지이용과 토양도, 경사도가 같은 수문반응단위(Hydrologic Response Unit; HRU)를 가지며, 각 HRU에는 많은 매개변수가 필요하다. 앞서 언급한 바와 같이 SWAT 모델에 입력되는 모든 매개변수의 시·공간적인 추정 어렵기 때문에 보정을 통한 매개변수의 평가가 필수적이다.

신뢰도 높은 보정을 위해 다지점의 강우자료 및 유출량 자료가 필요하며 시험유역은 신뢰성과 정확성을 기본으로 장기간의 고품질 수문자료를 제공한다. K-water 연구원에서 운영하는 용담댐 시험유역은 수문변화를 장기간 지속적으로 조사하기 위해 4지점의 신뢰도 높은 수문자료를 구축 및 제공하고 있으며 8개의 우량관측소를 운영하고 있다. 또한 6지점의 토양수분과 1지점의 증발산량을 제공 및 용담시험유역 홈페이지(www.ydew.or.kr)를 통해 정보서비스를 하고 있다. 용담댐 시험유역을 대상으로 한 연구는 Kwon *et al.*(2008)은 수문학적 유역특성 자료 자동화 시스템을 이용하여 PRMS 모형의 매개변수를 추출하여 2지점을 검증하였으며 Lee *et al.*(2009)는 SWAT 모형을 이용한 용담댐 시험유역의 2지점 부유사량을 분석하였다. Park *et al.*(2014)는 용담댐 시험유역의 5개 지점 실측 토양수분자료와 3개 지점 실측 유출량 자료를 이용하여 SWAT 모형의 검증을 실시하였고 Lee *et al.*(2015)는 위성영상과 SEBAL 모형을 이용한 공간증발산량을 산정하여 용담댐 시험유역의 플러스 타워의 산림 증발산량으로 검증하였다.

본 연구에서는 모형의 정확성과 신뢰성을 위해 18개 강우관측소의 강우량 자료와 5지점의 소유역의 유출량 관측값이 존재하는 용담댐 유역을 대상으로 단일지점과 다지점의 보정을 통

한 준분포형 모형인 SWAT을 각각 구축하였다. 두 보정 방법의 결과 비교를 통해 준분포형 모형에서 다지점 보정 방법 적용 시 모형 효율을 정량적으로 제시하여 모형의 효과적인 매개변수 추정방법을 평가하고, 모형의 신뢰성을 높이고자 하였다.

재료 및 방법

1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 일 단위 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 모형이다(Arnold *et al.*, 1996). 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(HRU) 별로 계산 할 수 있다(Arnold *et al.*, 1998). SWAT 모형에서 일별 유출량은 SCS(Soil Conservation Service) CN(Curve Number) 방법을 통하여 산정하며, 잠재증발산량은 Penman-Monteith 방법을 이용한다. SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 다음과 같다(Neitsch *et al.*, 2001).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서 SW_t 는 최종 토양수분량(mm H₂O), SW_0 는 i일의 초기 토양수분량(mm H₂O), t는 시간(일), R_{day} 는 i일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i일의 지표유출량(mm), E_a 는 i일의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm H₂O), 마지막으로 Q_{gw} 는 i일의 회귀수량(mm H₂O)이다.

2. 용담댐 시험유역

본 연구의 대상유역인 용담댐 유역은 금강의 최상류에 위치하며, 전라도와 충청도의 중요 용수 공급원으로써 수량 및 수질 관리가 중요한 지역이다. K-water 연구원에서 1999년 시험유역으로 선정하여 다양한 수리·수문자료의 수집 및 검증에 위한 대표유역으로 활용되고 있다. 용담댐(Yongdam Dam; YDD) 유역은 북위 35° 35' ~36° 00', 동경 127° 20' ~127° 45'의 범위에 위치하고 있으며 면적은 930.4km², 유로연장은 62.6km, 연평균 기온은 11.6°C, 연평균 강수량은 1362.3mm이다. 유역은 임야 70%, 농경지 21% 등이 차지하고 있다(KIWE, 2013). 용담댐 유역의 4지점 유량관측소를 유역출구로 하는 소유역의 면적은 동향

(DongHyang; DH) 165.5km², 천천(CheonCheon; CC) 290.9km², 주천(JuCheon; JC) 57.8km², 석정(SeokJeong; SJ) 80.5km²이며 그림 1에는 용담댐 유역의 기상, 강우, 수문 관측소 및 4개의 소유역을 나타내었다.

3. 모형의 입력자료 구축

본 연구에서는 준분포 모형인 SWAT 모형을 적용하여 다지점 검보정 효과를 평가하기 위해서 검보정기간 2003년부터 2011년의 9개년에 대해 표 1과 같이 수치표고모형(Digital Elevation Model; DEM), 토양도, 토지이용도, 일 강수량(mm), 일사량(MJ/m²), 평균풍속(m/s), 평균상대습도(%) 등의 수문기상자료를 수집 및 구축하였다. 현재 K-water 연구원의 시험 유역으로

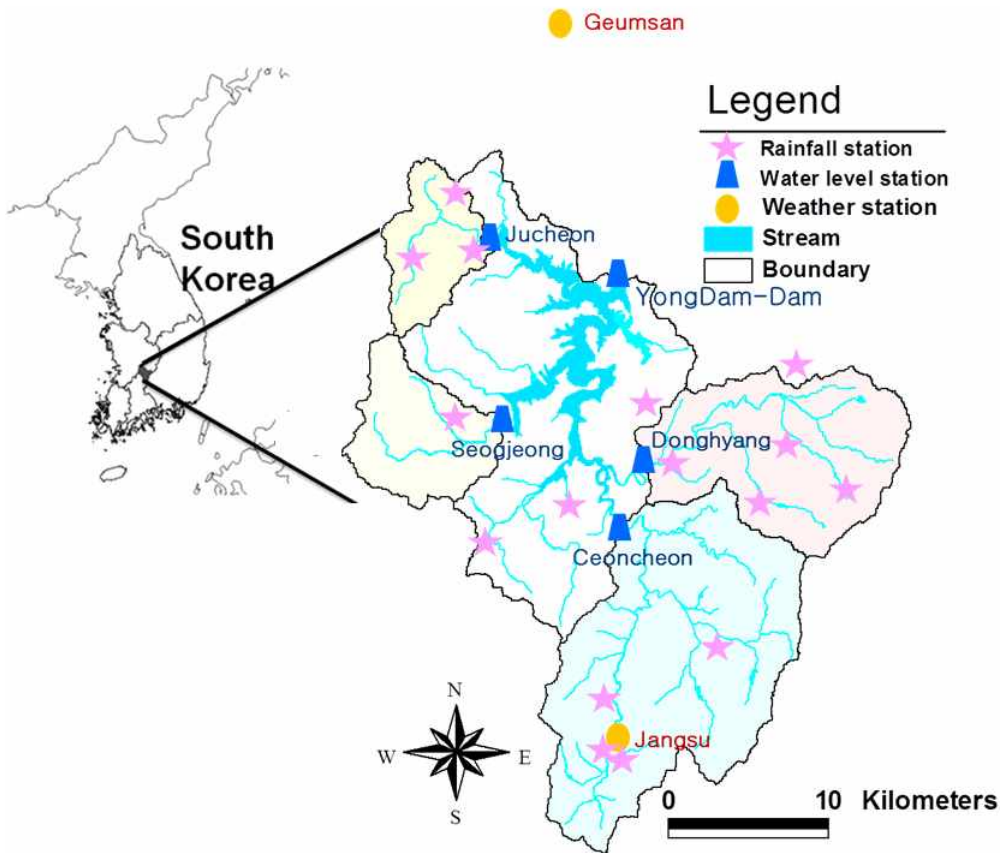


FIGURE 1. Yongdamdam Watershed and Observation Station

TABLE 1. Data Sets for SWAT model parameterization

Data type	Source	Scale / Period	Data Description / Properties
Topography	Korea National Geography Institute	30 m	DEM
Soil	Korea Rural Development Administration	1/25,000	Soil classifications and physical properties such as bulk density, texture, porosity, wilting point, field capacity and saturated hydraulic conductivity
Land cover	Korea Ministry of Environment	30 m	Land cover classifications such as water, deciduous forest, coniferous forest, mixed forest, urban, grassland, bare ground, paddy and upland crop
Weather	Korea Meteorological Administration	2003 ~ 2011	Daily precipitation, mean, max., min., temperature, wind speed, relative humidity and sunshine hour
Precipitation	KMA, K-water, MLIT	2003 ~ 2011	Daily precipitation
Streamflow	K-water, MLIT	2003 ~ 2011	Daily dam inflow, Daily observed streamflow

운영(1999~현재)되고 있는 용담댐 유역에는 우량관측소, 수위관측소, 플렉스타워, 토양수분 측정 및 기상관측소가 설치되어 양질의 수문자료를 얻고 있다. 본 연구에서는 K-water 연구원으로부터 용담댐유역의 우량 및 수문자료를 제공받아 모형의 입력자료 및 검·보정에 이용하였다. 2003년부터 2011년까지의 장수, 금상 관측소의 기상자료를 이용하여 입력 자료를 구축하였다. 강수량 자료는 기상청 기상관측소 장수, 금산, 기상청 AWS(Automatic Weather System)의 무주, 동향, 주천, 국토부 AWS의 대불, 진안, 안성장, 장수, 원통사, K-water 연구원에서 관리하고 있는 AWS 관측소인 안천, 주천, 부귀, 상전, 계북2, 장계, 천천2, 무주의 18개 강수량자료를 이용하였다(표 2). 18개 지점 강수량 관측

소의 고도는 약 170~800EL.m이며 그림 1과 같이 고르게 위치해 있으며 고도에 따른 보다 정확한 강수량 자료를 입력할 수 있었으며 연평균 강수량은 1219.7~1735.6mm로 고도에 따른 강수량은 약 500mm 차이로 고도에 따른 영향을 나타낸다. 유량자료는 K-water의 용담댐 댐유입량, K-water 연구원에서 시험유역으로 운영되고 있는 주천, 석정 수위관측소와 국토부에서 관리중인 동향, 천천 관측소에서 획득한 2003년부터 2011년까지의 관측자료를 사용하였다(표 3). 시험유역에서 운영되고 있는 주천, 석정 수위관측소는 평·갈수기 유량조사 및 홍수기 전·후 측정 지점의 단면측량과 홍수기 유량조사를 통한 관측데이터를 기반으로 수위-유량 관계곡선식을 산정하여 유량자료를 제공하고 있

TABLE 2. Precipitation stations and average annual precipitation

Operating agency	Station	Elevation (EL.m)	P (mm)	Operating agency	Station	Elevation (EL.m)	P (mm)	
KMA ASOS	jangsu	406.5	1573.9	K-water AWS	ancheon	313.0	1404.9	
	geumsan	170.4	1424.8		jucheon	303.3	1569.5	
KMA AWS	muju	205.8	1219.7		bugwi	396.0	1578.5	
	donghyang	320.2	1389.5		sangjeon	334.0	1381.9	
	jucheon	259.0	1561.1		gyebug2	453.0	1394.4	
	daebul	396.0	1676.9		jang-gye	422.0	1359.5	
MLIT AWS	jin-an	308.0	1523.0		cheoncheon2	409.0	1651.4	
	anseongjang	460.0	1362.9		muju	390.0	1327.5	
	jangsu	430.0	1541.5					
	wontongsa	800.0	1735.6					

TABLE 3. A water level observation station

Stage Station	River	Elevation of Datum (EL.m)	Drainage Area (km ²)	Instrument of Measurement	Type of Transmission
Yongdam Dam(YDD)	Geum River	268.5	930.0	Float level meter	VSAT
Dong Hyang(DH)	Gulyang-cheon	291.5	165.5	Float level meter	VSAT
Cheon Cheon(CC)	Geum River	273.5	290.9	Float level meter	VSAT
Ju Cheon(JC)	Juja-cheon	270.9	57.8	Air purge level gauge	CDMA
Seok Jeong(SJ)	Jeongja-cheon	266.5	80.5	Air purge level gauge	CDMA

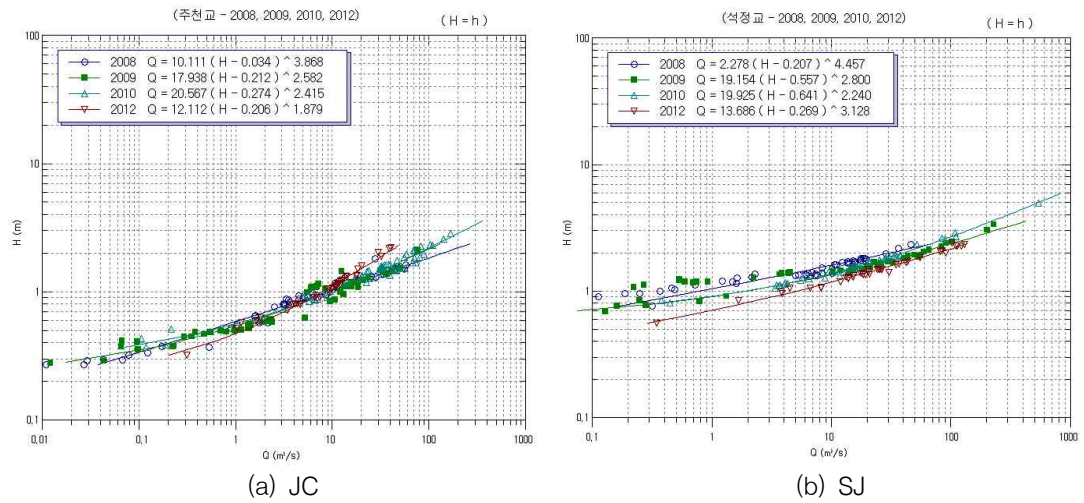


FIGURE 2. Rating curve (KIWE, 2013)

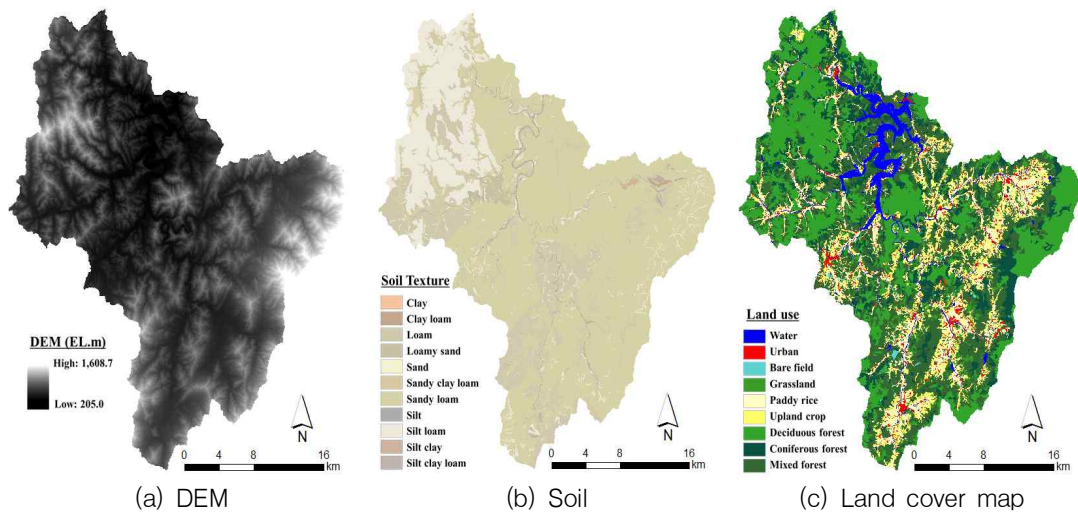


FIGURE 3. GIS Input Data

다(그림 2). 공간자료는 국토지리정보원에서 제공하는 격자크기 30m DEM을 이용하였으며, 토지이용 자료는 환경부 토지이용도의 수역, 주거지, 논, 밭, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 나지 및 기타 초지의 9개 항목으로 분류하였으며, 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여, 토양 종류에 따른 공극률, 포장용수량, 위조점, 토양 유효 깊이 속성을 모형의 입력 자료로 이용하였다(그림 3).

결과 및 고찰

1. 모형의 검·보정 매개변수

본 연구에서는 각 수문성분에 관련된 매개변

수를 이용하여 단일지점(용담댐)과 다지점(동향, 천천, 주천, 석정)의 관측 댐유입량 및 유출량 자료를 이용하여 검보정을 실시하였다. 검보정 방법은 시행오차법을 이용하였다. 모의 옵션으로 지표유출은 SCS 유출곡선법, 증발산량산정은 Penman-Monteith 방법, 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였다. 모형의 적용성 평가는 Nash-Sutcliffe(Nash *et al.*, 1970) model efficiency (E), coefficient of determination (R^2)를 이용하였다. E는 $-\infty$ 에서 1까지의 범위를 가지며 지수값 1은 관측값과 모형으로부터 산정된 값이 완전하게 일치함을 의미한다. 0보다 큰 E 지수는 모형으로부터 산정된 값이 용인되는 수준이며 0보다 작은 값은 용인될 수 없는 수준이며 모델링 결과 $E \geq 0.5$

TABLE 4. The calibrated parameters for the SWAT model

Parameters	Definition	Definition Range	Adjusted Value				
			Single point	Multipoint			
				YDD	DH	JC	SJ
Surface runoff							
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	1 to 24	2.56	7.15	0.19	0.19	7.15
SLSUBBSN	Average slope length (peak rate)	-50 to 50	2.11	6.72	39.14	39.14	6.72
Snow melt							
SMFMN	Melt factor on December 21	0 to 10	9.20	2.62	8.05	8.05	2.62
SFTMP	Mean air temperature at which precipitation is equally likely to be rain as snow/freezing rain	0 to 5	1.99	2.51	3.38	3.38	2.51
SMTMP	Threshold temperature for snowmelt	0 to 5	1.60	2.66	4.40	4.40	2.66
TIMP	Snow temperature lag factor	0.01 to 1	0.69	0.44	0.01	0.01	0.44
Evapotranspiration							
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0.31	0.38	0.64	0.64	0.38
CANMX	Maximum canopy storage	0 to 100	7.72	5.00	7.60	7.60	5.00
EPCO	Plant uptake compensation factor	-50 to 50	28.00	24.40	23.38	23.38	24.40
Soil water							
SOL_AWC	Available water capacity	0 to 1	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	0 to 2000	25.77	25.77	25.77	25.77	25.77
Groundwater							
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge	0 to 500	48.41	81.82	17.10	17.10	81.82
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	0 to 5000	321.43	32.16	245.72	245.72	32.16
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0.46	0.88	0.82	0.82	0.88
REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap	0 to 1000	43.16	55.75	245.56	245.56	55.75
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.02 to 0.2	0.02	0.04	0.20	0.20	0.04
RCHRG_DP	Aquifer percolation coefficient	0 to 1	0.60	0.69	0.02	0.02	0.69

은 적용성이 높은 수준으로 제시된다. R^2 는 관측값과 모의값이 완벽하게 일치할 경우 1의 값을 나타내며 모델 결과 $R^2 \geq 0.6$ 은 적용성이 높은 수준으로 제시된다(Ahn *et al.*, 2016; Mkhwanazi, 2012). 표 4는 모형의 검·보정에 이용한 수문요소별 매개변수를 정리하였다. 지표유출 매개변수는 SURLAG, SLSUBBSN, 융설 관련 매개변수는 SMFMN, SFTMP, SMTMP, TIMP, 증발산 관련 매개변수는 ESCO, CANMX, EPCO, 토양수분 관련 매개변수는 SOL_AWC, SOL_K, 지하수 관련 매개변수는 GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF, REVAPMN, GW_REVAP, RCHRG_DP를 조정하였다. 지표유출관련 SLSUBBSN 매개변수의 경우 주천과 석천 유역은 39.14의 값으로 경사가 심하고 유역전체는 2.11로 평균값을 가지는 것으로 조정하였다. ALPHA_BF 경우 지하수에 대한 반응이 빠른 유역은 값이 크고, 반응이 느린 유역은 값이 작아져 유역전체 0.46, 다지점 소유역은 0.82-0.88의 값으로 조정하여 지역특성을 반영하였다. 용담댐 유역은 무주 덕유산 지역을 포함하고 있다. 강설량이 많은 지역으로 봄철 융설이 유출량에 영향을 미친다. 융설 매개변수는 약 70% 이상이 산림인 주천, 석정유역과 약 60% 산림인 동향, 천천유역에 비교하여 SMFMN, SFTMP, SMTMP, TIMP의 값이 각 소유역의 특성에 맞게 조정하였다. ESCO는 총유출량과 증발산량에 영향을 주는 매개변수로 산림이 더 많은 주천, 석정유역이 동향과 천천유역보다 높게 조정되었다. 토양수분 매개변수인 SOL_AWC, SOL_K은 유효토양수분함량과 투수계수는 지하수 및 회귀유출에 영향을 미쳐 동일한 값으로 조정하였다. 단일지점으로 검·보정했을 때보다 다지점이 소유역의 특성을 반영한 매개변수를 적용하여 모형의 불확실성을 줄이고 신뢰성을 높일 수 있는 것으로 판단된다.

2. 모형의 검·보정 결과

각각의 사상들에 대한 매개변수의 평균값들을 통해 2003년부터 2007년까지 5년 동안 보정하

고 2008년부터 2011년까지의 4년간의 일 유출량 자료를 이용하여 모형의 검정을 실시하였다. 그림 4는 단일지점 검·보정한 대유입량 및 유출량에 대하여 지점별로 실측치와 모의치를 비교하였으며, 그림 5는 다지점을 검·보정한 대유입량 및 유출량에 대하여 지점별로 실측치와 모의치를 비교하여 나타내었다. 표 5는 모형의 단일지점 및 다지점의 보정 및 검정결과의 통계값을 연별로 정리하고 전체기간의 평균값을 제시하였다. 단일지점 매개변수를 적용한 일 유출량의 관측치와 모의치의 상관성을 분석한 결과 Nash-Sutcliffe의 모형효율계수는 용담댐, 동향, 천천, 주천, 석정에서 보정기간 동안 각각 0.82, 0.49, 0.52, 0.58, 0.70, 검정기간 동안 0.84, 0.24, -0.02, 0.67, 0.25로 분석되었다. R^2 는 용담댐, 동향, 천천, 주천, 석정에서 보정기간 동안 각각 0.92, 0.86, 0.84, 0.81, 0.85, 검정기간 동안 0.92, 0.88, 0.87, 0.84, 0.76으로 분석되었다. 특히 2008년 극심한 가뭄이 발생한 해로 검증기간 통계치에 영향을 주었다. 다지점 매개변수를 적용한 일 유출량의 관측치와 모의치의 상관성을 분석한 결과 Nash-Sutcliffe의 모형효율계수는 용담댐, 동향, 천천, 주천, 석정에서 보정기간 동안 각각 0.82, 0.81, 0.78, 0.68, 0.71, 검정기간 동안 0.84, 0.67, 0.73, 0.70, 0.45로 분석되었다. R^2 는 용담댐, 동향, 천천, 주천, 석정에서 보정기간 동안 각각 0.92, 0.92, 0.87, 0.87, 검정기간 동안 0.93, 0.90, 0.93, 0.84, 0.85으로 분석되었다.

다지점 보정 적용결과 대상유역의 4개의 유역(동향, 천천, 주천, 석정)에서의 기저유출량 오차가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 이는 단일 유역 보정에 이용된 매개변수 군이 4개의 유역에서의 특성을 다양한 물리적, 수문학적 특성을 반영하지 못하기 때문이다. 모델의 신뢰성 향상을 위해 각 소유역에 맞는 매개변수 군을 각 소유역별로 모형에 적용한 결과 모형 효율 및 수문곡선이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 하천의 유량은 댐 저수량에 영향을 줄 수밖에 없으므로 신뢰성 있는 하천의 유량과 유역의 수문순환 패턴을 우선적으로 파악해야 한다. 다양

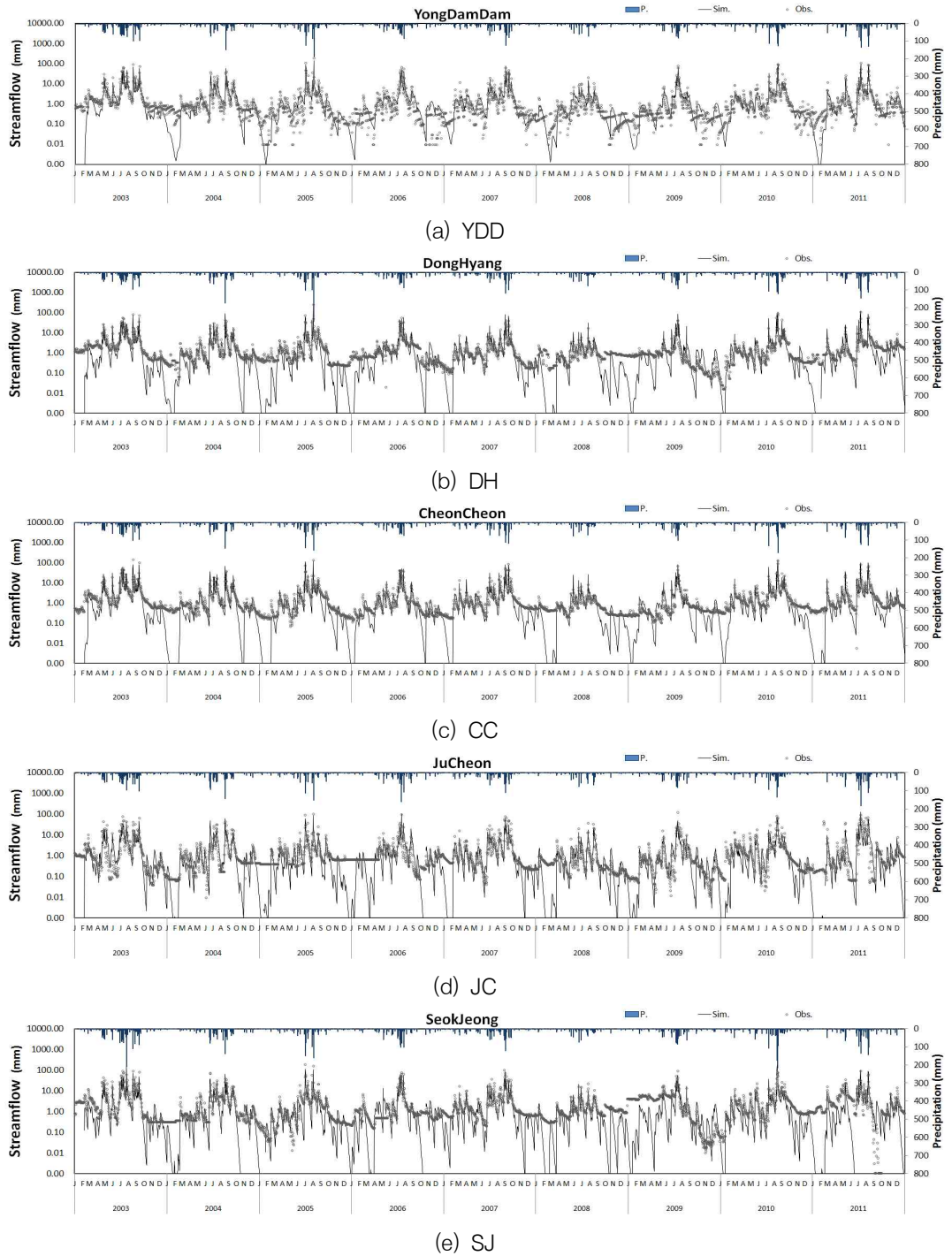


FIGURE 4. The single point calibration and verification results for dam inflow and streamflow

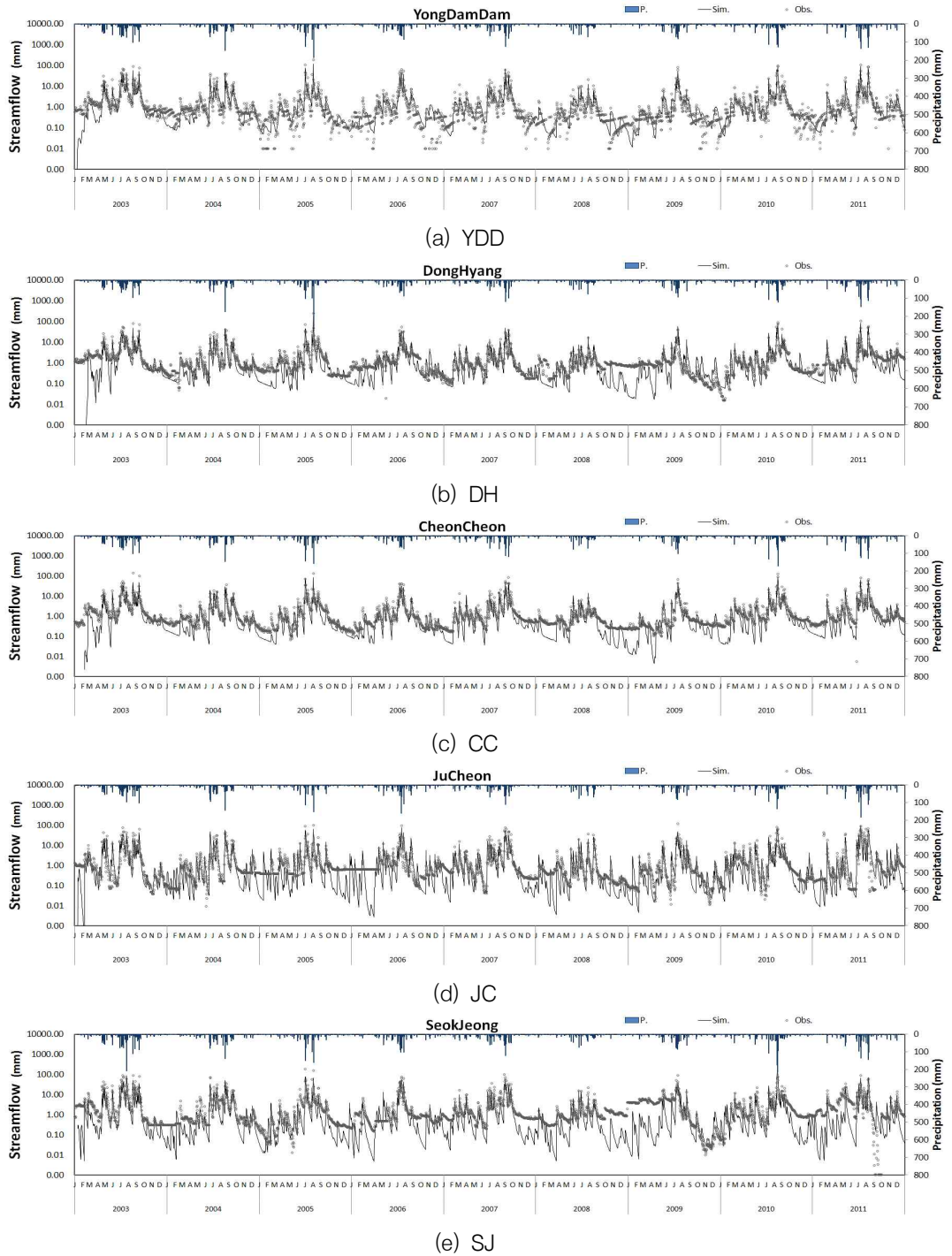


FIGURE 5. The multipoint calibration and verification results for dam inflow and streamflow

TABLE 5. Information on calibration and verification periods for streamflow

Station	Year	P (mm)	Observation		Simulation				Statistical summary				Note
					single point		multipoint		single point		multipoint		
			Q(mm)	QR(%)	Q(mm)	QR(%)	Q(mm)	QR(%)	E	R ²	E	R ²	
YDD	2003	2073.0	1728.6	0.83	1266.4	0.61	1170.9	0.56	0.78	0.90	0.74	0.90	C
	2004	1387.7	806.7	0.58	740.9	0.53	685.5	0.49	0.79	0.89	0.80	0.91	C
	2005	1458.7	896.3	0.61	769.2	0.53	826.4	0.57	0.85	0.96	0.90	0.96	C
	2006	1370.3	763.1	0.56	735.2	0.54	683.8	0.50	0.85	0.93	0.84	0.94	C
	2007	1535.2	849.8	0.55	858.3	0.56	797.6	0.52	0.81	0.90	0.83	0.91	C
	2008	840.8	287.0	0.34	341.5	0.41	309.5	0.37	0.72	0.86	0.72	0.86	V
	2009	1189.2	523.2	0.44	607.0	0.51	555.5	0.47	0.91	0.96	0.87	0.95	V
	2010	1711.2	991.4	0.58	903.0	0.53	964.1	0.56	0.86	0.93	0.89	0.94	V
	2011	1647.2	1078.0	0.65	990.6	0.60	937.0	0.57	0.86	0.93	0.87	0.95	V
	Avg.	1468.2	880.5	0.57	801.4	0.54	770.0	0.51	0.83	0.92	0.83	0.92	-
	DH	2003	1938.4	1595.2	0.82	1235.6	0.64	1085.9	0.56	0.75	0.88	0.72	0.89
2004		1365.3	815.5	0.60	753.1	0.55	691.1	0.51	0.05	0.69	0.74	0.87	C
2005		1432.3	1106.1	0.77	893.0	0.62	825.7	0.58	0.92	0.96	0.91	0.98	C
2006		1392.6	742.6	0.53	762.7	0.55	694.8	0.50	0.72	0.91	0.86	0.93	C
2007		1402.0	627.1	0.45	789.7	0.56	723.4	0.52	0.02	0.85	0.80	0.93	C
2008		814.1	355.1	0.44	332.9	0.41	308.5	0.38	-0.20	0.89	0.44	0.88	V
2009		1175.5	424.4	0.36	624.7	0.53	565.0	0.48	0.00	0.93	0.59	0.90	V
2010		1708.1	884.9	0.52	1015.0	0.59	931.4	0.55	0.58	0.83	0.80	0.90	V
2011		1638.1	1085.1	0.66	1006.0	0.61	930.5	0.57	0.59	0.85	0.85	0.92	V
Avg.		1429.6	848.4	0.57	823.6	0.56	750.7	0.52	0.38	0.87	0.75	0.91	-
CC		2003	2027.5	1637.4	0.81	1314.1	0.65	1083.0	0.53	0.60	0.79	0.61	0.83
	2004	1333.8	682.4	0.51	741.9	0.56	616.9	0.46	-0.24	0.75	0.78	0.90	C
	2005	1503.0	966.8	0.64	901.8	0.60	767.5	0.51	0.73	0.91	0.86	0.94	C
	2006	1290.1	752.9	0.58	702.1	0.54	579.3	0.45	0.79	0.90	0.85	0.96	C
	2007	1563.8	1127.0	0.72	905.9	0.58	755.6	0.48	0.73	0.86	0.79	0.95	C
	2008	801.0	292.2	0.36	332.7	0.42	273.7	0.34	-2.27	0.77	0.30	0.89	V
	2009	1131.2	518.4	0.46	595.4	0.53	485.5	0.43	0.85	0.95	0.91	0.96	V
	2010	1694.0	1128.9	0.67	999.0	0.59	846.9	0.50	0.74	0.90	0.86	0.94	V
	2011	1609.4	1160.0	0.72	999.6	0.62	852.0	0.53	0.60	0.85	0.86	0.94	V
	Avg.	1439.3	918.4	0.61	832.5	0.57	695.6	0.47	0.28	0.85	0.76	0.92	-
	JC	2003	2101.2	1404.3	0.67	1126.5	0.54	1235.4	0.59	0.59	0.78	0.65	0.81
2004		1516.6	755.3	0.50	755.4	0.50	805.1	0.53	0.33	0.69	0.28	0.72	C
2005		1392.4	849.1	0.61	744.4	0.53	651.0	0.47	0.76	0.88	0.87	0.95	C
2006		1554.7	716.8	0.46	786.1	0.51	881.4	0.57	0.55	0.82	0.82	0.92	C
2007		1571.9	1251.5	0.80	818.6	0.52	912.5	0.58	0.67	0.90	0.76	0.93	C
2008		960.3	413.2	0.43	386.4	0.40	413.9	0.43	0.70	0.85	0.71	0.85	V
2009		1205.1	704.0	0.58	549.9	0.46	591.0	0.49	0.63	0.85	0.61	0.80	V
2010		1598.5	1098.2	0.69	813.8	0.51	940.6	0.59	0.86	0.94	0.87	0.94	V
2011		1803.9	1616.2	0.90	1035.7	0.57	1187.1	0.66	0.50	0.72	0.59	0.77	V
Avg.		1522.7	978.7	0.63	779.6	0.50	846.4	0.55	0.62	0.83	0.68	0.85	-
SJ		2004	1478.1	1084.2	0.73	815.1	0.55	747.8	0.51	0.57	0.76	0.67	0.83
	2005	1493.1	1225.3	0.82	824.7	0.55	783.3	0.52	0.79	0.92	0.65	0.85	C
	2006	1514.8	951.6	0.63	860.8	0.57	799.1	0.53	0.76	0.87	0.82	0.91	C
	2007	1652.8	1441.9	0.87	929.0	0.56	877.9	0.53	0.66	0.84	0.71	0.89	C
	2008	869.8	527.1	0.61	350.3	0.40	246.6	0.28	0.22	0.60	0.30	0.68	V
	2010	1916.7	1314.9	0.69	1137.7	0.59	1123.6	0.59	-0.10	0.82	0.39	0.91	V
	2011	1709.7	1591.8	0.93	1020.3	0.60	1007.4	0.59	0.63	0.86	0.66	0.85	V
	Avg.	1519.3	1162.4	0.75	848.3	0.55	797.9	0.51	0.50	0.81	0.60	0.85	-

P: Precipitation, Q: Streamflow, QR: Runoff Ratio, E: Nash-Sutcliffe Model Efficiency, R²: Coefficient of Determination, C: Calibration, and V: Verification

한 특성을 가지는 소유역을 포괄하고 있는 유역에 대해서 다지점 보정은 유역 내 계측지점의 모델링 결과를 향상시킬 뿐만 아니라 유역내 임의의 미계측 지점에 대한 유출량 추정에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

요약 및 결론

본 연구에서는 신뢰성 있는 다지점 유출량 자료를 통한 SWAT 모형의 불확실성 감소 및 예측 능력을 향상시켜 모형의 정확도 향상성을 평가하고자 하였다. 용담댐 유역을 대상으로 수문, 강수량자료를 이용하여 수문모형의 검보정시 불확실성 및 결과의 오차를 줄이고자 단일지점 및 다지점 보정에 따른 유출특성 분석 및 모형의 적용성 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 신뢰성 있는 수문순환 및 유출특성을 모의하기 위해 K-water 연구원에서 운영 중인 용담댐 시험유역을 대상으로 수위관측소 및 유량관측소가 설치되어 양질의 수문자료를 구축하였다. 용담댐 유역과 유역내 소유역인 동향, 천천, 주천, 석정 관측소를 유역 출구로 하는 소유역으로 모형을 구성하였으며, 보다 정확한 강수량자료를 구축하기위해 기상청, 국토부, K-water 연구원에서 운영 중인 AWS의 18지점의 강수량자료를 SWAT 모형에 적용하였다.

둘째, 각 수문성분에 관련된 매개변수를 이용하여 단일지점(용담댐)과 다지점(동향, 천천, 주천, 석정)의 관측 댐유입량 및 유출량 자료를 이용하여 검보정을 실시하였다. 이용한 수문요소별 지표유출 매개변수는 SURLAG, SLSUBBSN, 융설 관련 매개변수는 SMFMN, SFTMP, SMTMP, TIMP, 증발산 관련 매개변수는ESCO, CANMX, EPCO, 토양수분 관련 매개변수는 SOL_AWC, SOL_K, 지하수 관련 매개변수는GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF, REVAPMN, GW_REVAP, RCHRG_DP를 조정하였다. 유역 물수지 순환의 중요한 요소인 다지점 유출량을 이용하여 모형을 보정하는 과정에서 매개변수들의 물리적 범위를 파악하였다.

셋째, 2003년에서 2011년까지의 9년간의 유출량 자료를 이용하여 모형의 검보정을 실시하였다. 단일지점 일 유출량의 관측치와 모의치의 상관성을 분석한 결과 Nash-Sutcliffe의 모형 효율계수는 용담댐, 동향, 천천, 주천, 석정 각각 0.83, 0.38, 0.28, 0.62, 0.50, 다지점의 경우 0.84, 0.75, 0.76, 0.68, 0.60으로 보다 향상된 모의 결과를 나타내었다.

아울러, 유역의 실제적인 상황을 근접하게 모의하기 위해서는 다른 수문성분의 정확하고 신뢰성 있는 자료의 구축과 적용이 매우 중요하다고 판단된다. 신뢰성 있는 관측 자료가 많아질수록 수문모형의 예측 불확실성 감소 및 예측결과와의 신뢰도 향상에 크게 기여할 것으로 기대되며 이와 같은 모형의 결과로 도출되는 하천 유출량 등은 유역의 수자원 확보 및 관리에 있어 중요한 기초정보로 수 있을 것으로 기대된다.

KAGIS

REFERENCES

- Ahn, S.R., J.W. Lee, S.S. Jang and S.J. Kim. 2016. Large Scale SWAT Watershed Modeling Considering Multi-purpose Dams and Multi-function Weirs Operation -For Namhan River Basin-. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 58(4):21-35 (안소라, 이지완, 장선숙, 김성준. 2016. 다목적 댐 및 다기능 보 운영을 고려한 대유역 SWAT 모형 구축기법 연구 - 남한강 유역을 대상으로-. 한국농공학회논문집 58(4):21-35).
- Ahn, S.R., G.A. Park, I.K. Jung, K.J. Lim and S.J. Kim. 2011. Assessing Hydrologic Response to Climate Change of a Stream Watershed Using SLURP Hydrological Model. KSCE Journal of Civil Engineering 15(1):43-55.
- Arnold, J.G. and P.M. Allen. 1996. Estimating hydrologic budgets for three

- Illinois watersheds. *Journal of Hydrology* 176(1):57-77.
- Arnold, J.G., R Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I : model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1):73-89.
- Beven, K.J. 2000. *Rainfall-Runoff Modeling : the Primer*. John Wiley & Sons Press, New York.
- Boscarello, Laura, Giovanni Ravazzani, Marco Mancini. 2013. Catchment Multisite Discharge Measurements for Hydrological Model Calibration. *Procedia Environmental Sciences* 19:158-167.
- Choi, Y.S., C.K. Choi and K.T. Kim. 2012. Development of a Multi-Site Calibration Module of Distributed Model-The Case of GRM-. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(3): 103-118 (최윤석, 최천규, 김경탁. 2012. 분포형 모형의 다지점 보정 모듈 개발 -GRM 모형을 중심으로-. *한국지리정보학회지* 15 (3):103-118).
- Doherty, J. and J.M. Johnston. 2003. Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 39(2):251-265.
- Duan, Q., S. Sorooshian and V.K. Gupta. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28:1015-1031.
- Gupta, H.V., S. Sorooshian and P.O. Yapo. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research* 34:751-763.
- Gupta, H.V., S. Sorooshian and P.O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal Hydrologic Engineering* 4:135-143.
- Hong, W.Y., M. Park, J.Y. Park, G.A. Park and S.J. Kim. 2010. The Spatial and Temporal Correlation Analysis between MODIS NDVI and SWAT Predicted Soil Moisture during Forest NDVI Increasing and Decreasing Periods. *KSCE Journal of Civil Engineering* 14(6):931-939.
- Kim, J., K. Son, J. Noh, C.L. Jang and I.H. Ko. 2006. Multi-variable and Multi-site Calibration and Validation of SWAT for the Gap River Catchment. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(10):867-880. (김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환. 2006. 갑천유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 및 다 지점 검·보정. *한국수자원학회논문집*. 39(10):867-880.)
- KIWE, 2013. 2013 year YongDam test basin Operation White Paper. Daejeon South KOREA. (K-water 연구원. 2013. 2013년 용담시험유역 운영백서. 대전, 대한민국)
- Kwon, H.J., E.H. Hwang, G.S. Lee, B.H. Yu and D.K. Koh. 2008. Application of the Developed Pre-and Post-Processing System to Yongdamdam Watershed using PRMS Hydrological Model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(3):13-22. (권형중, 황의호, 이근상, 유병혁, 고덕구. 2008. 수문학적 유역특성자료 자동화 추출 및 분석 시스템 적용(II) - PRMS 모형을 이용한 용담댐 유역을 대상으로 -. *한국지리정보학회지* 11(3):13-22).
- Lamb, R. and A.L. Kay. 2004. Confidence intervals for a spatially generalized,

- continuous simulation flood frequency model for Great Britain. *Water Resour. Res.* 40:W07501. doi:10.1029/2003WR002428.
- Lee, G.S., Y.R. Kim, L. Ye and E.R. Lee. 2009. The Analysis of Suspended Sediment Load of Donghyang and Cheoncheon Basin using GIS-based SWAT Model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 12(2):82-98 (이근상, 김유리, 예령, 이을래. 2009. GIS 기반 SWAT 모델을 이용한 동향, 천천유역의 부유사량 분석. *한국지리정보학회지* 12(2):82-98)
- Lee, Y.G., S.H. Lee, S.R. Ahn, M.H. Choi, K.S. Lim and S.J. Kim. 2015. Estimation of Spatial Evapotranspiration Using Terra MODIS Satellite Image and SEBAL Model -A Case of Yongdam Dam Watershed-. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(1):90-104 (이용관, 김상호, 안소라, 최민하, 임광섭, 김성준. 2015. Terra MODIS 위성영상과 SEBAL 모형을 이용한 공간증발산량 산정 연구 : 용담댐 유역을 대상으로. *한국지리정보학회지* 18(1):90-104)
- Li, X., E.W. Donald and E.J. Thomas. 2010. Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging. *Journal of Hydrology* 380:277-288.
- Mkhwanazi, M., J.L. Chavez and E.H. Rambikur. 2012. Comparison of Large aperture scintillometer and satellitebased energy balance models in sensible heat flux and crop evapotranspiration determination. *International Journal of Remote Sensing Applications* 12:21-30.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:283-290.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, and K.W. King. 2001. *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation, Version 2000*. TWRI Report TR-191 College Station, TX: Texas Water Resources Institute.
- Park, G.A., S.R. Ahn, Y.J. Lee, H.J. Shin, M.J. Park and S.J. Kim. 2009. Assessment of climate change impact on the inflow and outflow of two agricultural reservoirs in Korea. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 52(5):1869-1883.
- Park, G.A., J.Y. Park, H.K. Joh, J.W. Lee, S.R. Ahn and S.J. Kim. Evaluation of Mixed Forest Evapotranspiration and Soil Moisture using Measured and SWAT Simulated Results in a Hillslope Watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering* DOI 10.1007/s12205-014-0193-z (Published online: 30 November 2013a)
- Park, M., J.Y. Park, H.J. Shin, M.S. Lee, G.A. Park, I.K. Jung and S.J. Kim. 2010. Projection of future climate change impacts on nonpoint source pollution loads for a forest dominant dam watershed by reflecting future vegetation canopy in a Soil and Water Assessment Tool model. *Water Science & Technology -WST* 61(8).
- Park, M., H.J. Shin, J.Y. Park, G.A. Park and S.J. Kim. 2012. Comparison of Watershed Streamflow Using Projected MIROC3.2 HiRes GCM Data and Observed Weather Data for 2000-2009 under SWAT Simulation. *Transactions of the ASABE* 55(3):1003-1010.

- Park, M., R.H., N.W. Kim, K.J. Lim and S.J. Kim. Assessment of Future Climate and Vegetation Canopy Change Impacts on Hydrological Behavior of Chungju Dam Watershed using SWAT Model. *KSCE Journal of Civil Engineering* DOI 10.1007/s12205-013-0176-5 (Published online: 30 November 2013b).
- Park, J.Y., G.A. Park and S.J. Kim. 2013c. Assessment of Future Climate Change Impact on Water Quality of Chungju Lake, South Korea, Using WASP Coupled with SWAT. *Journal of the American Water Resources Association* 49(6):1225-1238.
- Park, J.Y., H. Jung, C.H. Jang and S.J. Kim. 2014. Assessing Climate Change Impact on Hydrological Components of Yongdam Dam Watershed Using RCP Emission Scenarios and SWAT model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3):19-29 (박종윤, 정혁, 장철희, 김성준. 2014. RCP 배출 시나리오와 SWAT 모형을 이용한 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가. *한국농공학회논문집* 56(3):19-29).
- Shin, H.J., M.J. Park and S.J. Kim. 2012. Evaluation of Forest Watershed Hydro-Ecology using Measured Data and RHESSys Model-For the Seolmacheon Catchment-. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(12):1293-1307 (신형진, 박민지, 김성준. 2012. 관측 자료와 RHESSys 모형을 이용한 산림유역의 생태수문 적용성 평가-설마천유역을 대상으로-. *한국수자원학회논문집* 45(12):1293-1307)
- Van Liew, M.W., J.G. Arnold, and D.D. Bosch. 2005. Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Transactions of ASAE* 48:1025-1040.
- Vandewiele, G.L. and A. Elias. 1995. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *J. Hydrol.* 170:277-291.
- Zhang, X., P. Beeson, R. Link, D. Manowitz, R.C. Izaurralde, A. Sadeghi, A.M. Thomson, R. Sahajpal, R. Srinivasan and J.G. Arnold, 2013. Efficient multi-objective calibration of a computationally intensive hydrologic model with parallel computing software in Python. *Environmental Modelling & Software* 46:208-218 **KAGIS**