



A correlation analysis between state variables of rainfall-runoff model and hydrometeorological variables

Shim, Eunjeung^a · Uranchimeg, Sumiya^b · Lee, Yearin^c · Moon, Young-Il^d · Lee, Joo-Heon^e · Kwon, Hyun-Han^{f*}

^aPh.D Candidate, Department of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, Korea

^bPh.D, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

^cMs. Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

^dProfessor, Department of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul, Korea

^eProfessor, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

^fProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Paper number: 21-098

Received: 18 October 2021; Revised: 22 November 2021; Accepted: 25 November 2021

Abstract

For the efficient use and management of water resources, a reliable rainfall-runoff analysis is necessary. Still, continuous hydrological data and rainfall-runoff data are insufficient to secure through measurements and models. In particular, as part of the reasonable improvement of a rainfall-runoff model in the case of an ungauged watershed, regionalization is being used to transfer the parameters necessary for the model application to the ungauged watershed. In this study, the GR4J model was selected, and the SCEM-UA method was used to optimize parameters. The rainfall-runoff model for the analysis of the correlation between watershed characteristics and parameters obtained through the model was regionalized by the Copula function, and rainfall-runoff analysis with the regionalized parameters was performed on the ungauged watershed. In the process, the intermediate state variables of the rainfall-runoff model were extracted, and the correlation analysis between water level and the ground water level was investigated. Furthermore, in the process of rainfall-runoff analysis, the Standardized State variable Drought Index (SSDI) was calculated by calculating and indexing the state variables of the GR4J model, and the calculated SSDI was compared with the standardized Precipitation index (SPI), and the hydrological suitability evaluation of the drought index was performed to confirm the possibility of drought monitoring and application in the ungauged watershed.

Keywords: Rainfall-runoff model, Parameter optimization, Regionalization, State variables, Drought index

강우-유출 모형의 상태변수와 수문기상변량과의 상관성 분석

심은증^a · 오랑치맥 솜야^b · 이예린^c · 문영일^d · 이주현^e · 권현한^{f*}

^a서울시립대학교 토목공학과 박사과정, ^b세종대학교 건설환경공학과 공학박사, ^c세종대학교 건설환경공학과 석사과정,

^d서울시립대학교 토목공학과 교수, ^e중부대학교 토목공학과 교수, ^f세종대학교 건설환경공학과 교수

요 지

수자원의 효율적인 이용과 관리를 위해서는 기본적으로 강우-유출에 대한 신뢰성 있는 해석이 필요하지만 이를 위한 연속적인 수문자료가 부족하고, 실측 및 모형 등을 통한 강우-유출자료의 확보는 여전히 요원한 실정이다. 특히 미계측 유역의 경우는 합리적인 강우-유출 모의 개선의 일환으로 모형 적용시 필요한 매개변수를 계측유역에서 미계측 유역으로 전이하는 지역화 방안이 활용되고 있다. 본 연구에서는 하천 내 미계측 유역 또는 가뭄모니터링이 필요한 지점에서 GR4J 모형을 선정하여 강우-유출과정의 상태변수를 추출하고 SCEM-UA 기법을 이용한 매개변수 최적화를 진행하였다. 모형을 통해 획득한 유역특성인자와 매개변수 상관성 분석을 위해 Copula 함수를 이용하여 지역화하였으며 미계측 유역에 대한 강우-유출 분석을 수행하였다. 분석과정에서 대상 유역의 중간상태변수를 추출하고 이를 수문변량 인자인 하천수위와 지하수위에 대해 각각의 상관성을 분석하였다. 나아가 강우-유출 모의 과정에서 GR4J 모형의 상태변수를 산출하고 지수화시켜 수문학적 가뭄지수(SSDI)를 산정하였으며 이를 대표 가뭄지수인 SPI와 비교분석하여 산정된 가뭄지수의 수문학적 적합성 평가를 수행하였으며 이를 토대로 미계측 유역에서의 가뭄 모니터링 및 가뭄정보제공 체계구축과 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 강우-유출 모형, 매개변수 최적화, 지역화, 상태변수, 가뭄지수

*Corresponding Author. Tel: +82-2-3408-3726

E-mail: hkwon@sejong.ac.kr (H.-H. Kwon)

1. 서론

국내외에서 수행되고 있는 가뭄 연구의 경우 주로 기상학적 가뭄을 대상으로 평가가 이루어지기 때문에 실제 국민들이 체감하는 가뭄과 밀접한 연관성을 가지는 수문학적 가뭄 정보를 제공하는 데 한계가 있다. 더욱이 우리나라와 같이 복잡한 지형을 가지고 있으며 대부분의 물공급이 댐 및 저수지, 광역상수도 등 수자원시스템 네트워크를 기반으로 물공급이 이루어지는 경우, 개별 요소만을 고려한 기존 가뭄 모니터링 및 전망은 현실적이지 못하며, 가뭄 위험도 관리 측면에서도 부족한 부분이 있다(Kwon and Kim, 2007). 즉, 이러한 수문학적 가뭄 분석체계가 구축된다면 수자원관리 시 다양한 목적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

가뭄 모니터링이 필요한 지점에서의 자연유출량 산정은 효율적인 하천관리 측면에서 기본적으로 중요한 요소이다. 유량 관측이 지속적으로 이루어지는 지점은 과거 관측 자료를 기반으로 검정(calibration) 및 검증(validation)을 진행하여 강우-유출모형의 매개변수 최적화 과정을 통해 신뢰성 있는 유출량 모의가 가능하다. 그러나 미계측유역의 경우, 관측자료의 부재로 인해 강우-유출모형의 매개변수 최적화 과정시 불확실성이 가중되며 복잡한 과정을 거치게 된다. 따라서 신뢰성 있는 지역화 모형을 구축하기 위해서는 무엇보다도 실제 미계측 유역에 적용시 나타날 수 있는 문제점을 최소화할 수 있는 방향으로 모형 개발이 이루어지는 것이 필요하다. 즉, 가급적 모형의 검정보다는 검증에 초점이 맞추어져 있어야 적합하며 사용되는 강우-유출모형의 매개변수가 적어야 한다. 강우-유출모형 매개변수가 증가하면 과적합(over-fitting)이 발생할 가능성이 높으며 지역화 모형 구축에도 불확실성을 가중시키게 된다(Lyne and Hollick, 1979; McIntyre *et al.*, 2005).

우리나라의 경우 대부분의 유역에서 댐과 같은 인공수리 구조물로 인해 자연 유량 취득이 어려우며 모형의 매개변수를 추정하기 위한 최소한의 수문자료를 확보하기도 어려운 실정 이므로(Kwon and Kim, 2007) 미계측 유역의 신뢰할 수 있는 수문현상 모의를 위하여 강우-유출 모형의 지역화 연구가 활발하게 진행중이다(Wagner *et al.*, 2004). 그 중 댐 상류를 자연유역으로 가정하여 얻은 수문모형을 지역화하는 방식을 취하여 연구들이 진행되고 있다. 이러한 방법들은 실제 유역의 고유한 특성들을 반영하여 강우-유출 관계를 유도하는 데 어려움이 있으며, 신뢰성 있는 유량을 추정할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 점에서 유역의 특성인자를 활용하여 모형의 매개변수를 산정할 수 있는 회귀식 등을 개발하는 다양한 연구들이 진행되어 왔다(Kang *et al.*, 2013).

수문학적 가뭄지수로는 유출량과 지하수위 등 수문학적 변수들이 사용된다. 유출량은 상대적 변동성이 커 정확한 가뭄 상태를 판단하기에 어려움을 가지고 있지만, 지하수는 수문기상 상황에 대한 반응이 느리며 가뭄을 완화시키는 효과 및 지하수 함양량이 용수의 공급에 영향을 준다는 점을 통해 지하수가 가뭄을 평가하는 지표로서 이용 가치가 있음을 알 수 있다(Kwon *et al.*, 2005). 하지만 지하수위 측정은 시공간적 어려움으로 인해 관측망이 부족한 실정이다. 이에 따라 수문학적 가뭄판단을 위하여 새로운 해결책이 요구된다.

이러한 점들을 고려하여, 본 연구에서는 수문학적 가뭄지수로 사용되는 수문자료와 강우-유출 모형의 상태변수의 상관성 분석을 수행하여 미계측 유역의 수문조건 검토를 위한 대리변수로써 적합성을 평가하고 활용방안을 제시하여 수자원 관리 시 다양한 목적으로 활용하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 전 세계적으로 활용되고 있는 일단위 개념적 강우-유출모형인 GR4J 모형을 활용하여 댐 상류를 자연유역으로 가정하여 수문모형 매개변수의 최적화를 통해 댐 유입량의 재현성을 평가하였다. 본 연구에서는 Kim *et al.* (2021)의 유출량과의 회귀분석을 통한 상관관계가 높은 6개의 유역특성인자 및 유역의 물리적 유출정도를 고려하기 위한 유출곡선지수(CN)를 선정하여 Copula 함수를 통해 지역화하여 표준 유역별로 산정한 매개변수를 이용하였다. 지역화 된 모형을 이용하여 미계측 유역에 대해서 강우-유출 분석을 수행하였으며 금강유역을 대상으로 GR4J 모형의 토양수분 및 기저유출에 해당하는 중간상태변수(intermediate state variables)를 추출하고 지하수위, 하천수위 각각의 관측자료와의 상관성을 분석하여 이를 대리변수로 이용하여 수문학적 가뭄지수를 개발하고자 한다.

2. 연구 방법 및 대상자료

2.1 강우-유출 모형 및 상태변수 추출 방법

본 연구에서는 강우-유출과정의 상태변수를 추출하기 위해 저류지 개념적(reservoir conceptual) 집중형 모형 GR4J 모형을 선정하여 분석을 진행하였다. GR4J 모형의 구조가 비교적 간단하고 매개변수 수가 적음에도 불구하고 해당 유역의 유출 현상을 우수하게 재현한다(Duan *et al.*, 2006). GR4J 모형은 미계측유역과 같이 수문기상 및 토양, 토지이용 등 유역의 물리적 특성에 대한 자료 수집이 어려운 경우에도 실용적으로 적용할 수 있는 장점이 있다. GR4J 모형은 4개(X_1, X_2, X_3, X_4)의 매개변수를 이용하여 차단(interception), 토양수분저류(pro-

duction store), 홍수추적(routing store) 등 3단계 과정을 거쳐 유출 현상을 모의한다(Im *et al.*, 2012). GR4J 모형에 의해 생성되는 유출량은 일 단위로 생성되며, 매개변수 추정지점에 대하여 관측개시일로부터 2020년까지 관측된 유입량 자료를 활용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 활용한 GR4J 모형의 개념적 모식도를 Fig. 1에 도시하였다.

Fig. 2에서는 GR4J 모형의 강우-유출 모의과정에 대한 물리적 순서 및 수식화를 나타냈으며 Table 1에 모형의 인자에 대해 간략히 정리하였다.

본 연구에서 강우-유출 모형의 상태변수는 유출 현상 재현 과정에서의 토양수분저류량(S)과 홍수추적량(R)을 의미하며, GR4J 모형 소스 코드와 최종유출량이 모형의 출력자료로 산출되도록 수정하였다. Fig. 2에서 홍수추적 단계에서 선형 홍수추적 과정에서 토양수분저류량, 비선형홍수추적 과정에서 홍수추적량을 각각 Eqs. (1) and (2)와 같이 산출하였다.

$$S = S - Prec \tag{1}$$

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \tag{2}$$

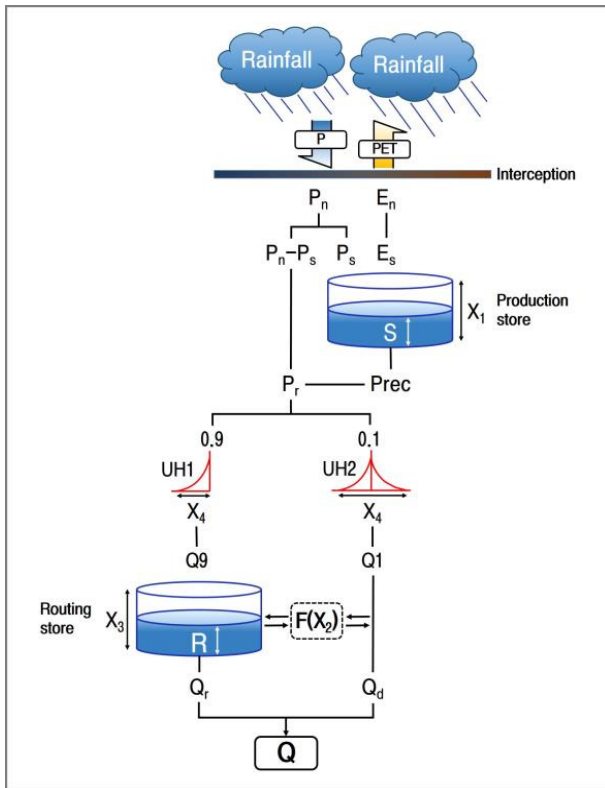


Fig. 1. Conceptual framework of the GR4J model

GR4J 모형의 보정과 검증을 위해서 최대한 자연유출과 유사한 현상의 관측자료가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서 현재 운영 중인 다목적댐과 그 상류에 위치하는 수위관측소 자료를 활용하여 SCEM-UA (Shuffled Complex Evolution Metropolis-University of Arizona) 기법을 통해 매개변수 최적화를 수행하였다. SCEM-UA 기법은 Duan *et al.* (1992)에 의해 개발된 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-Uncertainty Assessment method) 기법의 경쟁적 진화난수 발생, 결정 전량의 결함 무작위 탐색 제어 개념과 MCMC (Markov Chain Monte Carlo)

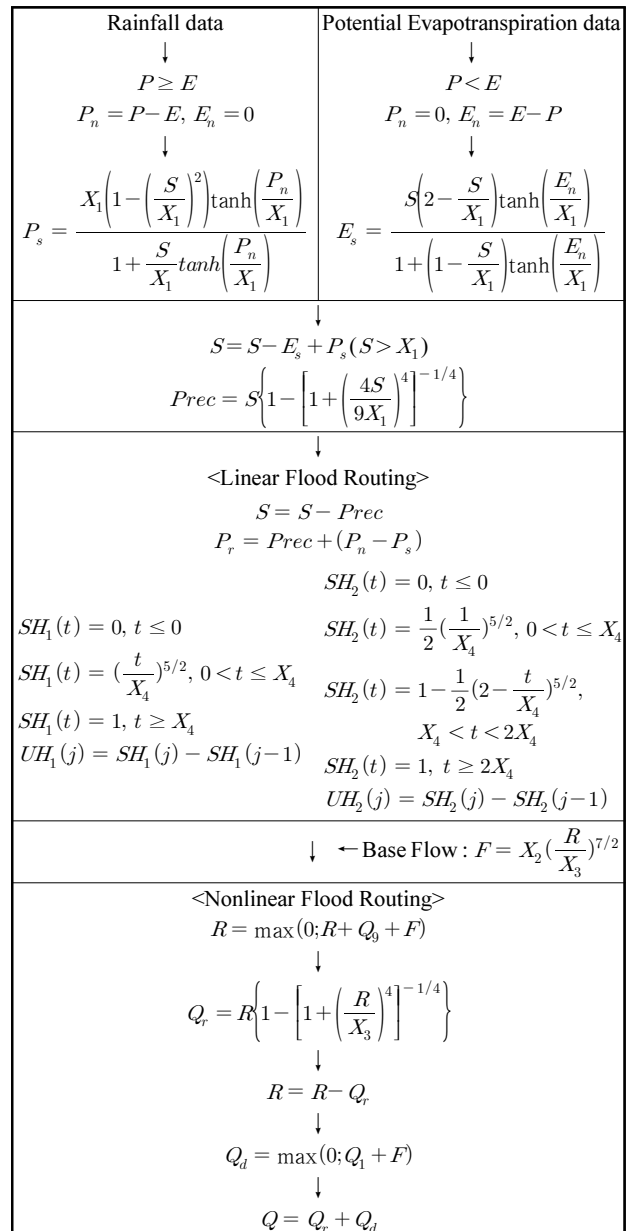


Fig. 2. Physical formular and flowchart of the GR4J model

Table 1. Input variables of the GR4J model

Variables	Description
PET	Potential areal evapotranspiration
E_n	Net evapotranspiration capacity
E_s	Actual evaporation rate
$F(X_2)$	Groundwater exchange term
P	Areal catchment rainfall
$Prec$	Percolation leakage
P_n	Net rainfall
P_r	Total quantity of water to reach routing functions
$P_n - P_s$	Amount of net rainfall that goes directly to the routing functions
P_s	Amount of net rainfall that goes directly to the production store
Q	Total stream flow
$Q1$	Output of UH2
$Q9$	Output of UH1
Q_d	Direct flow component
Q_r	Routed flow component
R	Water content in the routing store
S	Water content in the production store
$UH1$ $UH2$	Unit hydrographs
X_1	Capacity of the production soil (SMA) store (mm)
X_2	Water exchange coefficient (mm)
X_3	Capacity of the routing store (mm)
X_4	Time parameter (days) for unit hydrographs

방법을 조합하여 최적의 매개변수 집합을 추정하여 사후확률 분포를 활용한 신뢰구간을 제공한다(Vrugt *et al.*, 2003; Feyen *et al.*, 2007). Vrugt *et al.* (2003)이 제시한 SCEM-UA 기법의 매개변수 최적화 과정의 흐름도를 Fig. 3에 도시하였다.

본 연구에서는 다목적댐 및 댐 상류 수위관측소의 유입량에 대하여 매개변수 최적화 결과에 대한 통계적 평가를 위해 편의(Bias), Nash-Sutcliffe 계수(Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient, NSE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상관계수(Correlation Coefficient, CC), 일치 계수(Index of Agreement, IoA)를 활용하였다.

2.2 강우-유출 모형의 지역화 방법

특정 유역에서 장기간에 걸쳐 강우량, 증발산량, 유출량 등 수문기상 정보가 관측되어 있다고 하면 강우-유출 모형의 최적화를 통해 해당 유역의 유사한 유출 현상 재현이 가능하다. 그러나 미계측유역이나 관측자료가 충분하지 않은 유역의 유출량을 강우-유출 모형을 통해 재현하는 것은 현실적으로 신

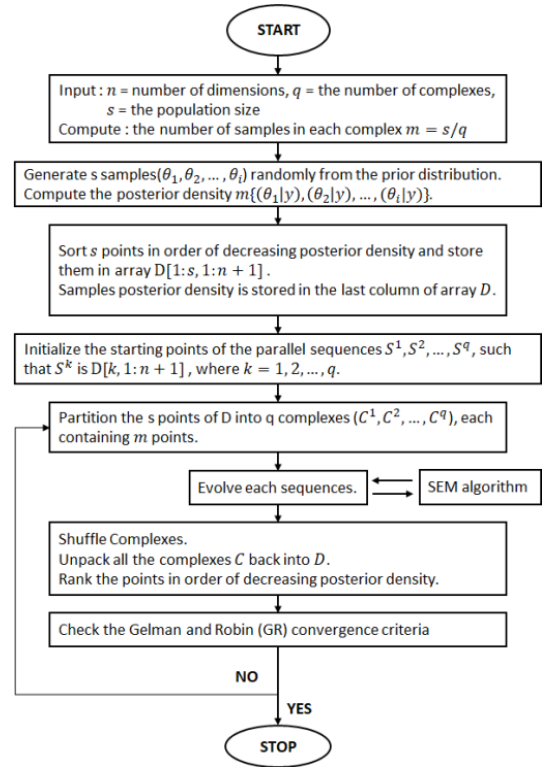


Fig. 3. Flowchart of the SCEM-UA algorithm

뢰성이 떨어지며 상당한 불확실성이 내포된다. 이러한 점에서 미계측유역의 자연유출량 추정 방법으로 해당 유역의 지형적 특성을 최대한 반영한 강우-유출 모형 지역화를 통한 방법이 많이 활용된다.

본 연구에서는 GR4J 모형의 지역화를 위해 환경부에서 운영 중인 국가수자원종합정보시스템(WAMIS)을 통해 표준 유역별 유출량과 상관성이 높다고 판단된 6개 유역특성인자(유역면적, 유역평균길이, 유역평균폭, 유역평균표고, 유역평균경사, 단일형상계수) 자료를 획득하였으며, 유역의 물리적 강우-유출 관계를 고려하기 위해 유출곡선지수(CN)를 포함하였다.

일반적으로 수문모형 매개변수 지역화 시 가장 많이 사용되는 방법은 지역회귀모형이다. 본 연구에서는 앞서 선정한 6개의 유역특성인자를 고려하여 다중회귀분석(multiple linear regression analysis, MLR)을 적용하였다. n 개의 독립변수로 구성된 다중회귀분석은 Eq. (3)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_n x_n \quad (3)$$

여기서, Y 는 종속변수, β_0 는 회귀식의 y 축의 절편(intercept), $\hat{\beta}$ 는 독립변수의 계수, x 는 유역특성인자를 의미한다. 이때, $\hat{\beta}$

의 추정자(hat)는 모형의 잔차(residual)를 의미한다. 잔차는 종속변수와 독립변수의 통계모형에 의하여 추정된 종속변수와 실제 종속변수 사이의 오차(error)를 의미한다.

본 연구에서는 유역특성인자와 GR4J 모형 매개변수와와의 상관성과 각각의 인자가 갖는 통계적 특성을 동시에 고려하기 위해 두 개 이상의 확률변수들 사이의 복합적인 의존성을 파악하여 Copula 함수를 적용하였다. Copula 함수는 2개 이상의 주변확률분포를 이용하여 결합확률분포를 구축하는 역할을 하며, 기본적으로 누가확률분포함수가 입력자료로 활용된다. 본 연구에서는 Copula 함수 중에서 다른 함수에 비해 적용성이 높으며, 다양한 확률분포형이 적용이 가능한 Gaussian Copula 함수를 활용하였다. Copula 함수를 활용하여 각각의 변량에 대한 주변확률분포를 선정하기 위해, 확률분포형의 유효성을 판단할 수 있는 Bayesian 정보 기준(Bayesian Information Criteria, BIC)에 따라 선별하였다. Findley (1991)에 따르면 BIC 통계량은 Bayesian 이론을 통해 추정된 우도(likelihood)와 매개변수의 개수를 고려하여 추정되며, Eq. (4)을 이용하여 계산된다.

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n) \quad (4)$$

여기서, k 는 매개변수의 개수, n 은 자료의 수 및 L 은 우도값을 의미한다. 우도가 크고 매개변수가 적을수록 BIC 통계량은 최적의 값을 가진다. 즉, BIC 통계량이 최소의 확률분포가 선정된다. 우도값은 Eq. (5)와 같이 계산된다.

$$L = \left(\prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \right) \quad (5)$$

여기서, f 과 θ 는 각각 확률밀도함수와 그의 매개변수를 의미한다. x 는 자료, n 은 자료의 수를 의미한다.

2.3 상태변수를 이용한 가뭄지수 개발

본 연구에서는 GR4J 모형의 상태변수를 이용한 가뭄지수(Standardized State variable Drought Index, SSDI)를 소개하고자 한다. SSDI는 Mckee (1995)이 제한한 SPI (Standardized Precipitation Index) 개념은 같으며, 상태변수의 확률분포함수를 추정하여 누가확률값에 해당하는 표준정규변수를 추정하면, 이는 일 단위 SSDI가 된다. 본 연구에서는 2가지 상태변수에 대한 확률분포를 Normal 분포와 Generalized Extreme Value (GEV) 분포로 각각 가정하였다.

3. 적용 및 결과

3.1 GR4J 모형 기반의 강우-유출 모의

본 연구에서는 GR4J 모형의 최적화 및 지역화를 위해 우리나라 다목적댐 상류 유출량을 자연유출량으로 가정하여, 14개소 다목적댐과 12개소의 다목적댐 상류의 수위관측소 관측자료를 이용하였다. 본 연구에서 활용된 다목적댐 및 수위관측소에 대한 기본정보는 Tables 2 and 3에 정리하였다.

Table 2. Information of dams used in the study

Name	Watershed	Dam Code	Standard basin code	Operating agency
Andongdam	Nakdong River	2001110	200118	K-water
Boryeongdam	Geum River (West)	3203110	320308	K-water
Buandam	Mangyeong-Dongjin	3303110	530103	K-water
Chungjudam	Han River	1003110	100327	K-water
Daechongdam	Geum River	3008110	300809	K-water
Hapcheondam	Nakdong River	2015110	201810	K-water
Hoengseongdam	Han River	1006110	100603	K-water
Imhadam	Nakdong River	2002110	200212	K-water
Juandam	Seomjin River	4007110	400801	K-water
Milyangdam	Nakdong River	2021110	202315	K-water
Namgangdam	Nakdong River	2018110	202101	K-water
Seomjingangdam	Seomjin River	4001110	400301	K-water
Soyanggangdam	Han River	1012110	101107	K-water
Yongdamdam	Geum River	3001110	300108	K-water

Table 3. Information of water-level stations used in the study

Name	Watershed	Dam Code	Standard basin code	Operating agency
Najeongyo	Han River	1001630	100109	Ministry of Environment
Samokgyo	Han River	1001683	100117	K-water
Pyeongchanggyo	Han River	1002650	100206	Ministry of Environment
Jucheongyo	Han River	1002685	100210	Ministry of Environment
Sincheongyo	Han River	1002687	100210	Ministry of Environment
Palgoegyoo	Han River	1002698	100213	Ministry of Environment
Weondaegyoo	Han River	1012650	101205	K-water
Deokcheongyo	Nakdong River	2002655	200210	K-water
Mukgyegyoo	Nakdong River	2002685	200214	Ministry of Environment
Ungokgyoo	Geum River	3001605	300101	Ministry of Environment
Iwondaegyoo	Geum River	3006680	300601	K-water
Sangyeri	Geum River	3007670	300706	K-water

3.1.1 강우-유출 모형 최적화

본 연구에서는 GR4J 모형 매개변수 추정을 위해서 14개소 다목적댐 및 12개소 댐 상류 수위관측소의 관측자료 기반으로 SCEM-UA 기법을 이용한 GR4J 모형 매개변수 최적화를 수행하였다. 매개변수 최적화를 통한 매개변수를 이용한 GR4J 모형의 성능 평가를 위해 2.1 절에서 소개된 통계량을 활용하였다. Tables 4 and 5에 댐 및 수위관측소에서 관측된 유출량과 유역별 최적의 매개변수를 적용한 GR4J 모형 모의결과에 대한 통계량을 정리하였다.

Table 4에서는 다목적댐 유역 자료를 이용하여 추정된 GR4J 모형 매개변수를 통한 모의과 실측값에 대한 통계량을 나타냈으며, 최적화 과정에서 RMSE 최소화가 되게 목적함수를 설정했음에 불구하고 CC와 NSE 등 통계량들이 상대적 높은 결과를 보여주고 있다. Table 5에서 나타낸 바와 같이 댐 상류 수위관측자료 자료를 이용했을 때도 마찬가지로 우수한 결과를 나타낸 것을 확인하였다.

3.1.2 강우-유출 모형 지역화

본 연구에서 각각 14개소 다목적댐 유역과 12개소 댐 상류 수위관측소에 대해 최적화된 GR4J 모형 매개변수들과 유역 특성인자를 Copula 함수를 이용하여 지역화를 진행하였다. GR4J 모형 매개변수 지역화 방법은 다음과 같은 과정으로 구성된다.

첫째, 각 유역에서 관측된 강수량과 유출량을 이용해 GR4J 모형 매개변수 최적화를 수행한다.

둘째, 유역특성에 따라 GR4J 모형 매개변수 물리적 범위가 다를 수 있으므로 유역의 단일형상계수(unit shape factor) 크기에 따른 지역화 2가지 적용조건을 적용하였다. 단일형상계

수는 유역면적의 제곱근에 대한 최원유로연장의 비로 정의되며, Eq. (6)을 통해 산정할 수 있다. 이때 R_u 는 단일형상계수를 의미하며, A_w 는 유역면적, L_b 는 최원유로연장을 의미한다.

$$R_u = \frac{L_b}{\sqrt{A_w}} \quad (6)$$

셋째, 유역별 선정된 유역특성인자 및 최적의 매개변수들의 분포적 특성을 가장 잘 나타내는 주변확률분포를 선정하여 Copula 함수에 적용하여 인자 사이의 상관성이 유지되게 충분한 수의 모의를 수행한다. Copula 함수를 이용한 모의결과인 유역특성인자와 GR4J 모형 매개변수로 구성된 다차원 공간분포에서 미계측유역의 유역특성인자를 이용하여 해당 유역에 대한 GR4J 모형의 매개변수들을 산정한다.

최종적으로 지역화 방법에 적용성 평가를 위하여 앞 단계에서 Copula 함수를 통해 생성된 공간분포 기반으로 14개소 댐과 12개소 수위관측소 자료 대상으로 교차검증(cross-validation)을 수행한다. 다목적댐 및 수위관측소 자료를 구분하여 교차검증을 수행하였다. 개별 유역에 대한 GR4J 모형 매개변수를 Copula 함수를 통해 생성된 공간분포를 이용하여 재산정하고 GR4J 모형에 적용 및 유출량 모의를 하였다. Table 6에는 다목적댐 유역의 관측 유출량과 재산정된 매개변수를 이용한 GR4J 모형 모의 결과와 비교분석 결과를 나타냈다.

3.2 상태변수와 수문기상 변량과의 상관성 분석

3.2.1 상태변수와 수문변량과의 상관성

본 절에서는 GR4J 모형 상태변수와 수문기상 변량들의 상관성 분석을 수행하였다. 먼저 금강 유역에서 운영 중인 지하수

Table 4. Statistics of GR4J model with optimized parameters (Dams)

Name	Bias	NSE	RMSE	CC	IoA
Andongdam	2.66	0.80	40.76	0.90	0.95
Boryeongdam	0.18	0.84	5.19	0.92	0.95
Buandam	-0.05	0.84	2.36	0.92	0.95
Chungjudam	8.82	0.83	203.48	0.91	0.95
Daecheongdam	-0.86	0.85	88.59	0.92	0.96
Hapcheondam	1.07	0.88	20.54	0.94	0.97
Hoengseongdam	0.46	0.90	6.36	0.95	0.97
Imhadam	2.97	0.85	30.88	0.92	0.96
Juandam	-0.35	0.85	27.82	0.92	0.96
Milyangdam	0.09	0.82	4.99	0.91	0.95
Namgangdam	-0.67	0.86	89.83	0.93	0.96
Seomjingangdam	0.07	0.75	28.96	0.87	0.93
Soyanggangdam	4.00	0.89	72.81	0.95	0.97
Yongdamdam	2.03	0.88	25.16	0.94	0.97

Table 5. Statistics of GR4J model with optimized parameters (Water-level stations)

Name	Bias	NSE	RMSE	CC	IoA
Najeongyo	-0.07	0.83	14.96	0.91	0.95
Samokgyo	15.03	0.78	44.00	0.91	0.95
Pyeongchanggyo	4.39	0.83	19.96	0.92	0.95
Jucheongyo	-6.20	0.31	69.23	0.59	0.73
Sincheongyo	-0.52	0.82	21.43	0.91	0.95
Palgoegyo	0.61	0.82	72.87	0.91	0.94
Weondaegyo	2.14	0.49	67.96	0.70	0.81
Deokcheongyo	0.95	0.69	7.13	0.85	0.92
Mukgyegyo	0.46	0.78	9.70	0.88	0.94
Ungokgyo	0.67	0.91	2.35	0.96	0.98
Iwondaegyo	1.12	0.57	102.19	0.75	0.85
Sangyeri	-0.02	0.61	18.99	0.78	0.87

Table 6. Statistics of GR4J model with parameter regionalization (Dams)

Name	Bias	NSE	RMSE	CC	IoA
Andongdam	4.315	0.601	58.043	0.826	0.902
Boryeongdam	-4.734	-0.284	14.607	0.905	0.842
Buandam	-1.077	0.295	4.926	0.832	0.871
Chungjudam	6.165	0.760	242.563	0.877	0.935
Daecheongdam	-9.135	0.616	142.687	0.812	0.896
Hapcheondam	-2.921	0.681	33.251	0.898	0.934
Hoengseongdam	-4.035	-0.254	22.098	0.905	0.847
Imhadam	-21.188	0.572	51.424	0.903	0.918
Juandam	-8.055	0.640	43.496	0.891	0.926
Milyangdam	-5.125	-0.961	16.571	0.728	0.737
Namgangdam	-2.512	0.853	91.917	0.924	0.959
Seomjingangdam	-3.723	0.739	29.640	0.865	0.926
Soyanggangdam	4.726	0.854	85.351	0.941	0.967
Yongdamdam	-3.736	0.751	35.925	0.886	0.938

위관측소와 하천수위관측소(Fig. 4) 자료를 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)을 이용하여 확보하여 2가지 상태

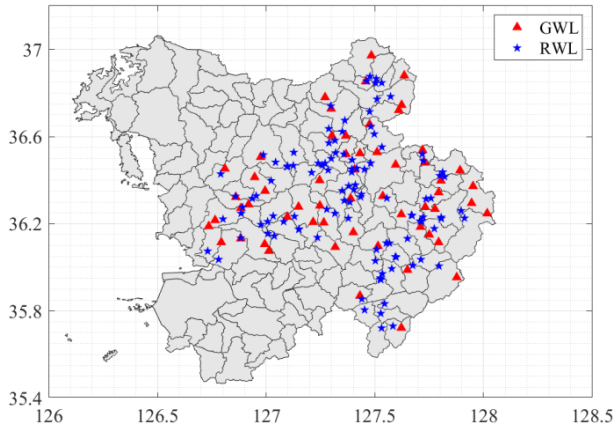
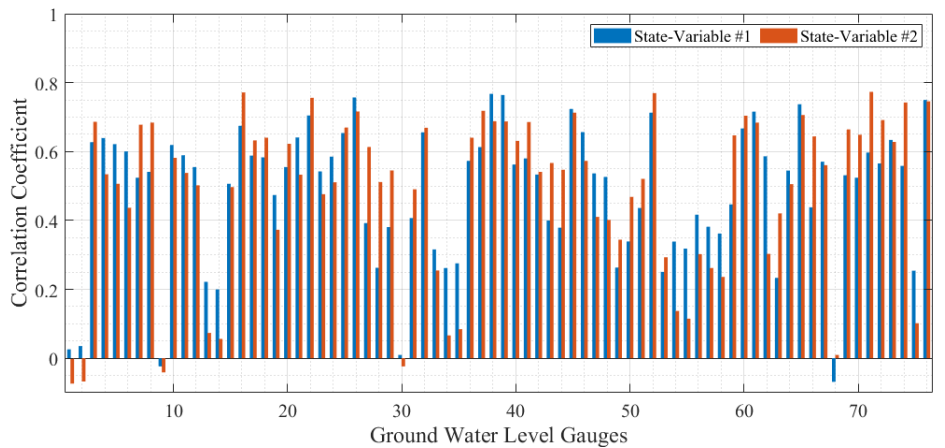


Fig. 4. Ground water level (GWL) and River water level (RWL) gauge station in Geum River basin

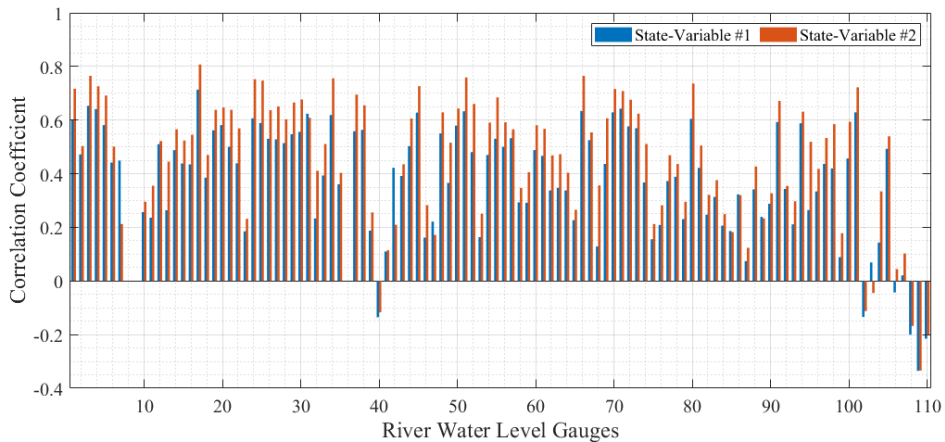
변수와 상관성 분석한 결과 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5(a)는 지하수위 관측자료와 GR4J 모형에서 산출된 2가지 상태변수와의 상관계수를 나타내고 있으며, 일부 몇 개 지점 제외 0.5 이상의 상관성을 보여주고 있다. 이 중에서 2번째 상태변수인 비선형홍수추적 과정에서 산출된 홍수추적량 상태변수가 더 높은 상관성을 보여주고 있는 것을 확인하였다. Fig. 5(b)는 하천수위와 상태변수에 대한 상관성 분석결과이며, Fig. 5(a)과 비슷하게 일부 지점 제외 상대적으로 높은 상관성을 보여주고 있다. Fig. 5를 살펴보면 일반적으로 수문변량과는 2번째 상태변수가 더 높은 상관성이 있고, 일 단위 자료를 봤을 때 하천수위가 지하수보다 상태변수와 더 높은 상관성을 보여주었다.

3.2.2 상태변수를 이용한 가뭄지수 산정

금강 유역은 3.2.1 절과 같이 수문변량 관측이 공간적으로 제한되어 있다. 이와 같은 미세측유역의 수문학적 가뭄을 판단하기 위해 강수량 기반의 SPI 또는 확보 가능한 관측자료기



(a) Ground water level and GR4J model state variables



(b) River water level and GR4J model state variables

Fig. 5. Relationship between GR4J model state variables and hydrological variables

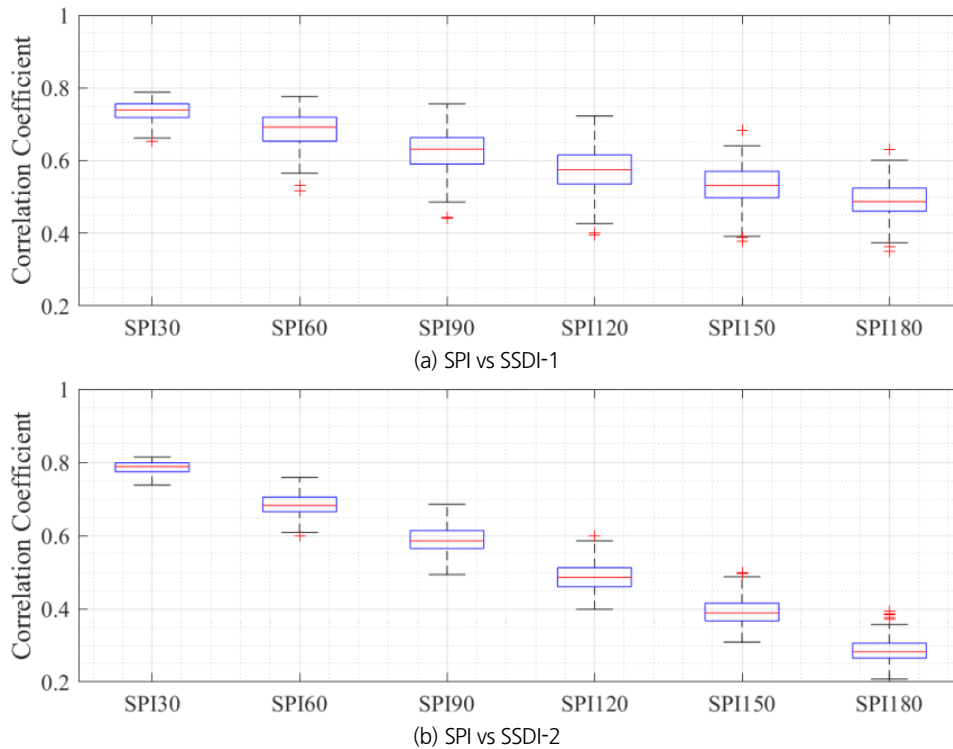


Fig. 6. SPI vs SSDI for 137 Standard Basin of Geum River Basin (Central mark indicates the median, bottom and top edges of the box indicate the 25th and 75th percentiles, "+" sign indicates outlier)

반의 가뭄지수를 간접적으로 사용해야 한다. 본 연구에서 소개하는 방법은 간단하면서도 신뢰성 높은 지역화를 통한 강우-유출 모형을 구축함으로써 미계측유역의 수문학적 가뭄 상황을 판단할 수 있게 된다. 그러나 수문학적 가뭄지수는 유출량보다 지하수위 같은 더 긴 메모리를 가진 자료를 활용하는 것이 일반적이다. 즉, 본 연구에서는 강우-유출 모형을 통한 유출량 자료보다 유출량 모의과정에서 상태변수를 산출 및 지수화시켜 해당 유역에 대한 수문학적 가뭄지수로서 적합성에 대한 평가를 대표적 가뭄지수인 SPI와 비교분석을 수행하였다.

본 절에서는 상태변수를 이용한 가뭄지수와 대표적 가뭄지수인 SPI와 비교를 하였다. Fig. 6에서 SPI는 일 단위(30일, 60일, 90일, 120일, 150일, 180일)로 금강 유역의 137개 표준 유역에 대해 1976년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 산정하였다. SSDI의 산정 절차는 SPI의 산정 절차와 동일하지만 다만 확률분포의 차이만이 있다. 또한 SSDI는 상태변수 기반의 가뭄지수로서 장기메모리(long memory)를 가지고 있었다고 판단하여 가뭄지수 산정 과정에서 누적하지 않았다.

강수량과 상태변수 자료 기반의 가뭄지수들의 상관성 분석 결과 SSDI는 일 단위임에도 불구하고 SPI-30과 제일 높은 상관성을 보여주는 것이 확인되었다. 이 관계는 상태변수는 기본적으로 장기메모리를 가지고 있다는 판단을 확인시켜주었다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 신뢰성 있는 강우-유출모의와 산정된 가뭄지수의 적합성 검토를 목적으로 하천 내 미계측 유역 또는 가뭄모니터링이 필요한 지점에서 GR4J 모형을 선정하여 강우-유출과정의 상태변수를 추출하고 SCEM-UA 기법을 이용한 매개변수 최적화를 진행하였다. 모형을 통해 획득한 유역특성 인자와 매개변수 상관성 분석을 위해 Copula 함수를 이용하여 지역화하였으며 미계측 유역에 대한 강우-유출 분석을 수행하였다. 분석과정에서 대상유역의 중간상태변수를 추출하고 이를 수문변량 인자인 하천수위와 지하수위에 대해 각각의 상관성을 분석하였다. 나아가 강우-유출모의과정에서 GR4J 모형의 상태변수를 산출하고 지수화시켜 수문학적 가뭄지수(SSDI)를 산정하였으며 이를 대표가뭄지수(SPI)와 비교 분석하여 산정된 가뭄지수의 수문학적 적합성 평가를 수행하였다.

본 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 강우-유출과정의 상태변수 추출은 비교적 최소한의 매개변수를 가지고 모의가 가능한 개념적 집중형 일단위 강우-유출 모형의 하나인 GR4J 모형을 선정하였다. 14개의 다목적댐과 댐 상류에 위치한 수위관측소의 관측자료를 기

반으로 SCEM-UA 기법을 이용한 매개변수 최적화를 수행하였으며, 통계적으로 상당히 유의한 결과가 도출되었다.

- 2) 수문기상 정보가 충분하지 않은 미계측 유역의 자연유출량 추정을 위해 최적화된 GR4J 모형의 매개변수들과 유역 특성인자를 Copula 함수를 이용하여 지역화하였으며, 지역화 방법에 대한 적용성 평가를 위해 댐과 관측소 자료에 대한 교차검증을 수행하여 지역화에 대한 적합성을 확인하였다.
- 3) 금강 유역을 대상으로 GR4J 모형의 토양수분 및 기저유출에 해당하는 중간상태변수(intermediate state variables)를 추출하고 이를 지하수위, 하천수위 각각에 대한 상관성 분석을 수행한 결과 일부 몇 개 지점을 제외하고 0.5 이상의 상관성을 보여주었으며 특히 지하수보다는 하천수위와 상태변수에 대한 상관성이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 금강 유역의 137개 표준유역에 대해 강우-유출 모의 과정에서 산출한 상태변수를 지수화하여 가뭄지수(SSDI)를 개발하고 이를 대표 가뭄지수(SPI)와 비교 분석한 결과 SSDI가 SPI-30과 제일 높은 상관성을 보였으며 SPI의 누적강수 기간에 따라 상관성이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 장기 수문자료가 부족하거나 존재하지 않는 미계측 유역에서 좀 더 신뢰성 있는 강우-유출해석을 시행하고 그 과정에서 산정된 가뭄지수를 대표 가뭄지수에 적용하여 수문학적 적합성을 검토하였으며 이를 토대로 향후 미계측 유역에서의 가뭄 모니터링과 정보제공에서의 활용이 가능할 것으로 판단하였다.

감사의 글

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2019R1A2C2087944) 및 2021년 K-water 재원으로 수행된 “미계측 하천 취수지점의 가뭄판단 및 예측을 위한 분석체계 구축과제”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Duan, Q., Schaake, J., Andreassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H.V., and Hay, L. (2006). “Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops.” *Journal of Hydrology*, Vol. 320, No. 1-2, pp. 3-17.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.” *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.
- Feyen, L., Vrugt, J.A., Nualláin, B.Ó., van der Knijff, J., and De Roo, A. (2007). “Parameter optimisation and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation with the LISFLOOD model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 332, No. 3-4, pp. 276-289.
- Findley, D.F. (1991). “Counterexamples to parsimony and BIC.” *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Vol. 43, No. 3, pp. 505-514.
- Im, S.S., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2012). “Improvement of GR4J model applying soil moisture accounting process and its application in Korea Basin.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 3, pp. 255-262.
- Kang, M.G., Lee, J.H., and Park, K.W. (2013). “Parameter regionalization of a tank model for simulating runoffs from ungauged watersheds.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 519-530.
- Kim, J.-G. (2021). *Development of climate-informed framework for evaluation of water supply capability via water circulation model*. Ph. D. dissertation, University of Sejong, pp. 32-50.
- Kwon, H.-J., and Kim, S.-J. (2007). “Methodology of drought assessment using national groundwater monitoring network data.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineering B*, Vol. 27, No. 2B, pp.193-199.
- Kwon, H.-J., Lim, H.-J., Park, N.-S., and Kim, S.-J. (2005). “Assessment of available ground water resources based on topography and soil characteristics in a watershed.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineering B*, Vol. 25, No. 1B, pp. 19-25.
- Lyne, V., and Hollick, M. (1979). “Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling.” *Institute of Engineers Australia National Conference*, IEAust, Barton, Australia, Vol. 79, No. 10, pp. 89-93.
- McIntyre, N., Lee, H.S.H., Wheather, A.Y., and Wagener, T. (2005). “Ensemble Predictions of runoff in ungauged catchments.” *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 12, W12434.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). “Drought monitoring with multiple time scales preprints.” *9th Conference on Applied Climatology*, 15-20 January, Dallas, TX, U.S., pp. 223-236.
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W., and Sorooshian, S. (2003). “A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters.” *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 8, pp. 1-16.
- Wagner, T., Wheater, H., and Gupta, H. (2004). *Rainfall-runoff modeling in gaged and ungauged catchments*. Imperial College Press. London, UK.