

목적함수에 따른 매개변수 추정 및 수문모형 정확도 비교 · 분석

이기하¹ · 연민호² · 김영훈³ · 정성호^{4*}

¹경북대학교 미래과학기술융합학과 부교수, ²경북대학교 미래과학기술융합학과 박사과정, ³경북대학교 미래과학기술융합학과 석사과정, ⁴경북대학교 미래과학기술융합학과 박사수료

Analysis of the Effect of Objective Functions on Hydrologic Model Calibration and Simulation

Gi Ha Lee¹, Min Ho Yeon², Young Hun Kim³, and Sung Ho Jung^{4*}

¹Associate Professor, Dept. of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University

²Ph.D Student, Dept. of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University

³Master Student, Dept. of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University

⁴Ph.D Candidate, Dept. of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University

요약

수문모형의 최적 매개변수를 추정하기 위해서 자동최적화기법이 자주 이용되며, 이러한 최적화기법은 관측값과 모의값의 오차를 최소화하기 위해 목적함수를 필요로 한다. 다만, 다양한 목적함수 선택에 따라 각기 다른 수문응답 결과를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 국내·외에서 사용되는 다양한 목적함수를 활용하여 단기 강우-유출 수문모형의 매개변수를 추정하고, 목적함수에 따른 수문곡선의 재현성을 평가하고, 적정 목적함수를 제시하고자 하였다. 강우-유출 모형으로는 현행 홍수예보에서 유역 유출모의에 활용되고 있는 집중형 수문모형인 저류함수모형을 선택하였으며, 모형의 5개 매개변수에 대해서 전역최적화기법인 SCE-UA를 적용하여 모형의 최적매개변수를 추정하였다. 목적함수별 수문곡선의 재현성 평가를 위해 용담댐 상류유역인 천천유역을 대상으로 9개의 강우사상을 추출하였으며, 7개의 목적함수를 선택하여 개별 강우사상별로 저류함수모형의 매개변수를 추정하고, 이를 활용한 모의 수문곡선의 재현성을 비교·분석하였다. 분석결과, 목적함수에 오차제곱을 포함하고 있는 RMSE, NSE, RSR이 Event 7을 제외한 모든 강우사상에 대해 가장 높은 정확도를 나타냈으며, 관측유량과 모의유량의 오차만을 반영한 ABIAS의 경우, 정확도가 가장 낮은 것으로 분석되었다. 또한, 관측유량 대비 오차 항을 포함하고 있는 PBIAS 및 VE의 경우 역시, 상기 3개(RMSE, NSE, RSR)의 결과와 유사하게 비교적 안정적인 수문곡선 재현성을 보여주었다. 다만, 고유량과 저유량을 동시에 고려하여 이에 민감한 매개변수를 조정하도록 개발된 MIA의 경우, 수문곡선 재현성 성능이 매우 낮은 것으로 나타났다.

핵심용어: 강우-유출 모형, 저류함수모형, 최적화기법, 목적함수

ABSTRACT

An automatic optimization technique is used to estimate the optimal parameters of the hydrologic model, and different hydrologic response results can be provided depending on objective functions. In this study, the parameters of the event-based rainfall-runoff model were estimated using various objective functions, the reproducibility of the hydrograph according to the objective functions was evaluated, and appropriate objective functions were proposed. As the rainfall-runoff model, the storage function model(SFM), which is a lumped hydrologic model used for runoff simulation in the current Korean flood forecasting system, was selected. In order to evaluate the reproducibility of the hydrograph for each objective function, 9 rainfall events were selected for the Cheoncheon basin, which is the upstream basin of Yongdam Dam, and widely-used 7 objective functions were selected for parameter estimation of the SFM for each

*Corresponding author: Sung Ho Jung, sh1202@knu.ac.kr

Received: 14 March 2022, Revised: 21 March 2022, Accepted: 25 March 2022



rainfall event. Then, the reproducibility of the simulated hydrograph using the optimal parameter sets based on the different objective functions was analyzed. As a result, RMSE, NSE, and RSR, which include the error square term in the objective function, showed the highest accuracy for all rainfall events except for Event 7. In addition, in the case of PBIAS and VE, which include an error term compared to the observed flow, it also showed relatively stable reproducibility of the hydrograph. However, in the case of MIA, which adjusts parameters sensitive to high flow and low flow simultaneously, the hydrograph reproducibility performance was found to be very low.

Keywords: Rainfall-runoff modeling, Storage function model, Optimization, Objective functions

1. 서론

수자원 분야에서 수문모형은 홍수에·경보, 물수지 분석, 범람해석 등 목적에 따라 다양한 형태로 개발·발전되어 왔다. 모형의 개발자를 비롯하여 모의결과를 활용하여 수자원 설계 및 정책을 수립하는 정책결정권자 등은 그 목적달성을 위해 보다 정확한 모형이 필요하며, 이러한 모형의 재현성 또는 신뢰도 평가를 위해 수문 실측자료(수위, 유량 등)와의 정량적 비교·분석을 수행한다. 이러한 과정을 모형검증(model validation or verification)이라 하며, 모형검증의 객관적 정량화를 위해 평가지수(evaluation criteria)가 사용된다(Jain and Sudheer, 2008).

컴퓨터와 GIS(geographic information system) 기술의 발달로 수문모형은 집중형 개념적 모형(lumped conceptual model)에서 시·공간적 수문 상태변화를 모의할 수 있는 분포형 물리적 모형(distributed physics-based model)으로 대체되고 있는 추세이나 후자의 경우, 매개변수의 수가 증가함에 따라 매개변수 보정 및 불확실성 문제가 대두되었다. 즉, 모형을 이용한 수문모의과정은 (1) 모형의 선택(model selection), (2) 매개변수의 보정(parameter calibration), (3) 모형의 검증(model validation), (4) 불확실성 평가(uncertainty assessment)를 포함하고 있으며, 특히 매개변수의 보정 및 모형검증 단계에서는 시각적 적합도(goodness of fit) 분석이외에도 목적함수(objective function)의 선택과 모형검증을 위한 통계기반의 정량적 평가지수가 요구된다.

이미 수많은 연구를 통해 수문모의 시계열 자료의 정량적 평가를 위한 다수의 평가지수가 제안되었고, 개별 평가지수의 장·단점에 대해 분석된 바 있다(Legates and McCabe, 1999; Krause et al., 2005; Hwang et al., 2012). ASCE(1993)에서는 모형 검증을 위해 특정 평가지수를 한 가지만 사용할 경우, 수문모의 분석결과에 대해 왜곡된 정보가 전달될 수 있으므로 모의결과에 대해 다양한 모형 평가지수를 제시하는 것을 권고하고 있으며, 장기유출과 단기유출을 구분하여 적합한 평가지수를 제안하였다. Schaeffli and Gupta(2007)는 수문모의 결과 정확도 검증 시 주로 활용되는 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency)의 한계에 대해 지적하였으며, McCuen et al.(2006)은 모형검증에 사용되는 데이터의 크기, 데이터의 편의(bias) 정도, 이상치(outlier)의 유무에 따라 NSE 값에 영향을 미칠 수 있음을 분석한 바 있다. 마찬가지로 Criss and Winston(2008)은 이러한 NSE의 문제점 등으로 인해 NSE를 대신하여 VE(Volumetric Efficiency)의 사용을 제안하였다.

평가지수를 이용한 수문모형의 매개변수 보정의 경우, GA(genetic algorithm; Wang, 1991)와 SCE(shuffled complex evolution; Duan et al., 1992) 등과 같은 전역최적화기법(global optimization method)을 이용하여 일반적으로 Eq. (1)과 같이 대상기간 동안의 시계열에 대하여 모의결과와 실측과의 오차제곱이 최소가 되도록 목적함수를 설정하고, 가능 매개변수 범위(feasible parameter range) 내에서 국부최적해로의 수렴을 방지하고 전역최적해(global optimal)를 산정하게 된다.

$$\min z = \min \sum_{t=1}^n [q_{t,obs} - q_{t,sim}(x_t : A)]^2 \quad (1)$$

여기서 $q_{t,obs}$, $q_{t,sim}$ ($x_t : A$)은 시간 t 에서의 실측 및 모의 수문량이며, x_t 는 시간 t 에서의 입력벡터(강우량, 증발산량, 강설량 등), A 는 적용된 수문모형의 매개변수를 나타낸다.

그러나 이러한 단일목적의 최적화기법(single-objective optimization method)은 사용자에게 의해 선택된 목적함수에 따라 각기 다른 수문응답(hydrologic response) 결과를 제공할 수 있으며, Beven and Binley(1992)와 Gupta et al.(1998, 2003)은 이러한 현상은 수문모의과정에 포함되어 있는 다양한 불확실성 인자들로부터 기인한 것이며, 근본적으로 한 개의 특정 목적함수를 이용하여 산정된 최적매개변수로 수문시스템의 응답을 완벽하게 재현하는 것은 불가능하다고 지적하였다. 이는 수문모형의 불확실성으로 인해 목적함수로 사용되는 다양한 모형 평가지수에 따라 최적 매개변수가 변동할 수 있으며, 모의결과 역시 변동할 수 있음을 의미한다. Yapo et al.(1998)은 목적함수에 따라 전역최적해가 변동하며, 특히 Eq. (1)과 같이 오차제곱항을 포함하고 있는 모형평가지수에 따른 모형 최적 매개변수의 경우, 저수량(low flow)에 비해 고수량(high flow)에 보다 정확한 모의결과를 제공함을 확인한 바 있다. 이에 Vrugt et al.(2003)은 단일 목적함수를 선택하는 대신에 다양한 목적함수 선택에 따른 최적 매개변수의 trade-off를 추정하고, 이를 수문모의결과에 반영할 수 있는 다중최적화기법(multi-objective optimization function)을 개발하여 매개변수 trade-off에 따른 수문모형의 불확실성을 분석하였다.

이에 본 연구에서는 국내외에서 사용되는 다양한 모형 평가지수를 목적함수로 하여 집중형 수문모형인 저류함수모형에 적용하고, 목적함수의 선택에 따른 수문곡선의 정확도(침투유량, 침투시간) 및 불확실성(수문곡선 재현성)을 분석하고, 단기 강우-유출 분석을 위한 적정 모형 평가지수를 제시한다.

2. 방법론

2.1 저류함수모형

저류함수모형은 집중형(lumped) 강우-유출 모형으로 단기호우사상(short-term rainfall event) 시 강우와 유출의 차이를 저류량이라 정의하고, Eq. (2)와 같이 저류량은 유출량의 멱함수(power function) 형태로 가정하고, Eq. (3)의 연속방정식을 이용하여 유출량을 산정하게 된다. 일본에서는 다양한 유역의 홍수해석을 위해 많이 활용되고 있으며, 우리나라에서도 단기 홍수유출해석 및 하도추적모형과 결합 하여 국가하천 홍수예보 등에서 활용되고 있다(Chung and Park, 2013).

$$S(t) = Kq(t)^P \quad (2)$$

$$\frac{S(t)}{dt} = r_e(t - T_L) - q(t) \quad (3)$$

여기서 S 는 유역 내 저류량(m^3), t 는 시간(hr), T_L 은 지체시간(hr), q 는 직접유출량(m^3/hr), K 와 P 는 유역특성에 따른 상수, $r_e(t)$ 는 유효강우량으로 Eq. (4)에 의해 결정되며, $r_e(t - T_L)$ 은 유출물과 지체시간을 고려한 유역평균강우량(mm/hr)을 나타낸다.

$$r_e(t) = r(t) \times f^* \quad \text{with } f^* = \begin{cases} 1 & r_{accum}(t) \geq R_{sa} \\ f & r_{accum}(t) < R_{sa} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $r(t)$ 는 강우량, f 는 유출률, $r_{accum}(t)$ 는 t 시간까지의 누적강우량(mm), R_{sa} 는 포화우량(mm)이다.

2.2 자동최적화기법

수문모형의 매개변수 추정을 위해서는 민감도분석(sensitivity analysis)을 통해 주요 매개변수를 선정하고, 시행착오법과 같은 수동(manual)기법을 이용하거나 Fig. 1과 같이 Eq. (1)을 만족하는 매개변수의 전역최적해를 산정하기 위해 자동최적화기법을 사용하게 된다.

SCE-UA(Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) 기법은 Duan et al.(1992, 1993)에 의해 제안된 전역최적화 기법으로 다차원 매개변수 공간(multi-dimensional parameter space)을 탐색하여 최적해를 추적할 수 있다(Fig. 1 참조). SCE-UA 기법은 초기단계에서 해가 존재하는 다차원 매개변수 공간에서 표본을 생성하고 이를 Complex로 분할한다. 각 Complex는 Downhill Simplex 알고리즘을 사용하여 독립적으로 진화(evolutoin)되며, 진화를 거친 Complex들은 다시 혼합(shuffling)되고, 새로운 Complex가 생성된다. 이상의 진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다.

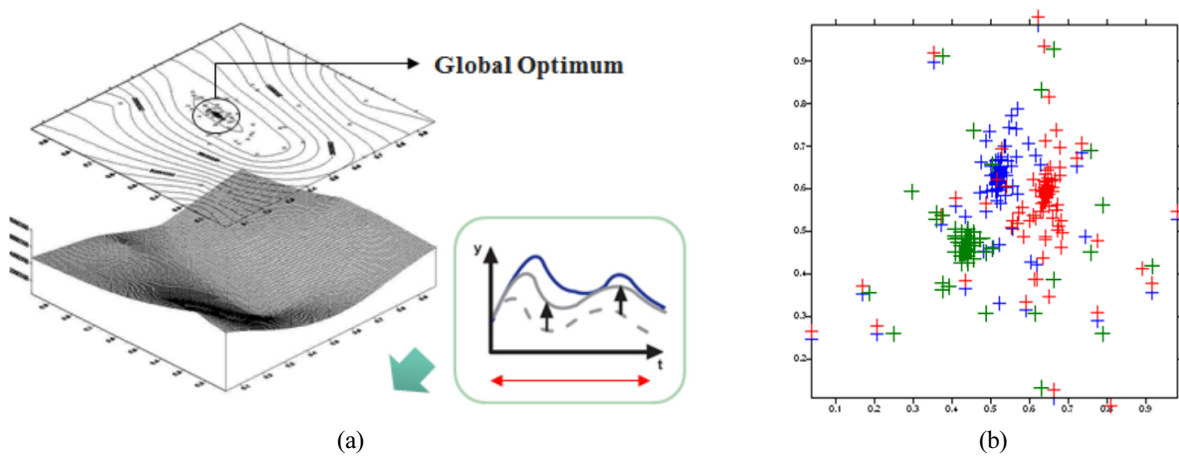


Fig. 1. SCE-UA algorithm process with hydrologic time-series data: (a) Tuning structure, (b) Positioning complexes

SCE-UA 기법은 집중형 수문모형 뿐만 아니라 분포형(distributed) 수문모형에도 적용되어 매개변수 추정에 매우 효과적이고 효율적인 것으로 검토된 바 있다(Lee et al., 2017). 본 연구에서는 SCE-UA를 이용하여 5,000번의 반복연산(iteration)을 통해 저류함수모형의 5개 매개변수(T_L , K , P , f , R_{sa})에 대해 최적 매개변수 값을 산정하였으며, 매개변수 보정시간을 단축하고 효율성을 높이기 위해 이전단계의 목적함수 대비 0.1%의 향상이 없을 경우, 반복연산을 정지하도록 하였다.

2.3 모형평가지수(목적함수)

본 연구에서는 Eq. (1)과 같이 관측값과 모의값 차이의 제곱 형태를 갖는 RMSE(root mean square error), NSE(Nash-Sutcliffe efficiency), RMSE를 관측값의 표준편차로 나눈 RSR과 관측값과 모의값 차이에 대한 함수로 표현되는 ABIAS(absolute bias), PBIAS, VE(volume error), 마지막으로 Legates et al.(1999)이 제안한 지수 MIA(modified index of agreement) 총 7개의 목적함수를 이용하여 매개변수를 보정하고, 수문곡선의 재현성을 분석하였다. 전술한 7개의 목적함수에 대한 식은 다음과 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (5)$$

여기서 n 는 모의시간에 대한 자료의 수, Y_i^{obs} 는 관측유량(m^3/s), Y_i^{sim} 는 모의유량(m^3/s), Y_i^{mean} 은 관측유량의 평균이다. 연구자들은 수문해석에 있어 관측값과 모의값에 대한 산포도(scatter plot)을 작성하고, 통계프로그램을 이용하여 최소제곱 직선(least square line) 및 결정계수(R^2 , determination coefficient)를 계산한다. 다만, 일반적으로 결정계수는 산포도가 최소제곱직선 주위에 얼마나 군집되어 있는지를 나타내는 적합도 통계량임에도 불구하고, 통계프로그램에서 도출되는 R^2 을 그대로 사용하는 오류를 범하게 된다. 실제로 NSE와 R^2 는 동일한 함수형태를 갖고 있으며 일부 논문에서는 NSE를 R^2 로 표현하기도 한다(ASCE, 1993). 따라서, 본 연구에서는 R^2 는 목적함수에서 제외하였다.

RMSE는 단일 강우사상에서의 강우-유출 모형의 정확도를 평가하기 위해 가장 많이 쓰이는 평가지수이며, 그 형태는 Eq.(6)과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \quad (6)$$

RSR은 Singh et al.(2004)이 제시하였으며, Eq. (7)과 같이 RMSE의 오차항을 관측유량의 표준편차로 나누어 스케일링 또는 정규화를 통해 무차원화하게 된다.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2}} \quad (7)$$

전술한 NSE, RMSE, RSR은 오차제곱을 함수에 포함하고 있어 첨두유량 등과 같이 그 오차가 매우 클 경우, 이를 강조하게 설계되었으며 수문모형의 매개변수도 이에 민감하게 반응하게 된다. 따라서 이를 방지하고자 관측유량과 모의유량의 차이를 그대로 평가지수로 활용할 수도 있으며, 그 대표적인 예가 Eq. (8)의 ABIAS와 Eq. (9)의 PBIAS이다.

$$ABIAS = \sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{sim}| \quad (8)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad (9)$$

Criss and Winston(2008)은 NSE의 경우, 모형 정확도가 가장 높을때 1의 값을 나타내고, 평가지수의 결과값이 무차원으로 활용도가 높지만, NSE의 높은 음수값은 모의유량이 관측유량의 평균값과 매우 유사할 경우에도 발생할 수 있다고 지적하였다. 따라서 NSE만으로 수문모형의 정확도를 평가하기에 적합하지 않다고 지적하고 Eq. (10)과 같은 평가지수를 제안하였다.

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{sim}|}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \tag{10}$$

마지막으로 Krause et al.(2005)는 전술한 평가지수들이 수문곡선의 고유량에서의 오차에 매우 민감하므로 고유량 뿐만 아니라 저유량에 대한 전반적인 결과가 모형평가에 반영될 수 있도록 Eq. (11)과 같은 MIA 평가지수를 제안하였다.

$$MIA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{Y_i^{mean}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y_i^{sim} - Y_i^{mean}| + |Y_i^{obs} - Y_i^{mean}|}{Y_i^{mean}} \right)^2} \tag{11}$$

3. 모형의 적용

3.1 대상유역 및 강우사상

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 용담댐 상류 천천유역을 대상으로 하였으며, 해당 유역은 천천 수위관측소를 유출구로 하며, 유역면적은 약 290 km², 하천길이는 25.5 km, 평균표고 555.2 m, 평균경사 17.6°이다. 용담댐 유역은 UNESCO-IHP 시험유역으로 K-Water에서 지속적으로 수리·수문자료의 수집 및 품질검증이 수행되고 있어 관측자료에 대한 신뢰도가 비교적 높다.

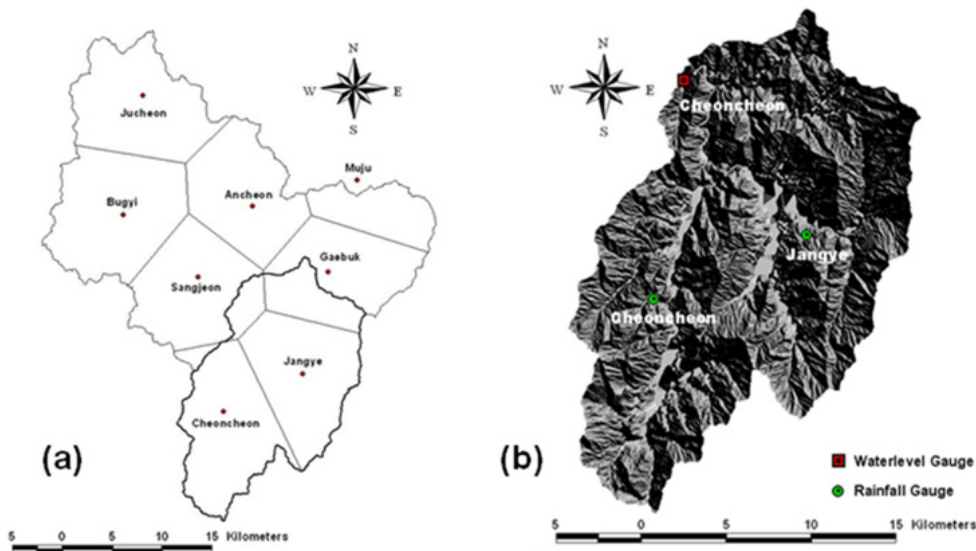


Fig. 2. Study catchment : (a) Yondam dam catchment, (b) Cheoncheon sub-catchment

본 연구에서는 저류함수모형의 매개변수 추정 및 강우-유출 해석을 위해 4개의 강우관측소(상전, 계북2, 장계, 천천)의 시 단위 자료를 획득하여 Fig. 2(a)와 같이 Thiessen 기법을 이용하여 해당유역에 대한 면적강우량 자료로 변환하였다. Table 1은 본 연구에서 선정한 9개의 사상을 나타내고 있으며, 관측유량의 경우, 천천 수위관측소의 시수위자료를 수위-유량관계식을 이용하여 변환하였다.

Table 1. Rainfall events used in this study

Event No.	Event Period	Total rainfall (mm)	Max. runoff (m ³ /s)
Event 1	30 Aug. - 2 Sep. 2002	177.97	1384.66
Event 2	17-19 July 2003	33.76	57.64
Event 3	11-15 Sep. 2003	133.34	931.90
Event 4	18-20 Aug. 2004	162.73	482.32
Event 5	20-22 Sep. 2004	44.17	114.58
Event 6	10-14 June 2005	42.86	28.92
Event 7	25-31 July 2006	103.74	269.70
Event 8	14-21 Sep. 2007	204.66	1134.14
Event 9	17-20 June 2008	68.93	52.01

3.2 초기 매개변수 및 매개변수 범위 설정

SCE-UA를 이용하여 Eqs. (2)~(4)의 저류함수모형 5개(T_L , K , P , f , R_{sa}) 최적 매개변수를 산정하기 위해서는 초기 매개변수와 범위를 설정해야 하며, 본 연구에서는 기존 연구에서 제시한 값을 초기 매개변수로 선정하였다. Shin et al.(2004)은 홍수예보 실무에서 사용하고 있는 저류함수모형의 매개변수로 유출률 $f=0.5$, $R_{sa}=20$ mm를 제시하였으며, T_L , K , P 의 경우 다음과 같은 식을 제시한 바 있다.

$$T_L = 0.0506 L - 0.31 \quad (12)$$

$$P = 0.175 (1/S_f)^{0.235} \quad (13)$$

여기서 L 은 주하천길이(km), S_f 은 주하천 평균경사이고, 해당 변수들은 GIS 도구를 이용하여 산정할 수 있다. 다만, Eqs. (12)~(13)의 초기값은 대상유역의 지형학적인자만을 고려하여 계산될 수 있으나 모든 강우사상에 적용될 수 있는 범용값은 아니므로 전역최적화기법을 이용한 최적해를 도출할 필요가 있다.

매개변수 범위는 Chung et al.(2012)이 제시한 매개변수별 최소, 최대 범위를 활용하였으며, 본 연구에서 사용된 모형 매개변수의 초기값 및 범위는 Table 2와 같다.

Table 2. Initial value and range of the Storage Function Model parameters

Parameter	T_L	K	P	f	R_{sa}
Initial Value	1	70	0.6	0.5	20
Range	0.0 ~ 1.0	0.0 ~ 80.0	0.0 ~ 1.0	0.0 ~ 1.0	0.0 ~ 300.0

SCE-UA를 이용한 최적 매개변수 산정의 경우, Table 1의 개별 강우사상 전기간에 대해서 Table 2의 매개변수의 범위 내에서 Eqs. (5)~(11)에 해당하는 7개 목적함수에 대한 오차를 최소로 하는 전역최적해를 추정하여 유출해석을 수행하게 되며 목적함수가 허용오차 범위를 만족할 경우, 최적 매개변수를 제시하게 된다. 다만, NSE, VE, MIA의 경우 최적값이 1에 해당하는 최대값에 만족하는 매개변수를 추정해야 하므로 식의 우측 2번째 항을 최소로 하도록 알고리즘을 구성하였다.

3.3 결과분석

Eqs. (5)~(11)을 목적함수로 하여 추정된 최적매개변수를 이용하여 도출된 수문곡선 결과는 Fig. (3)과 같다. 여기서 실선은 관측 수문곡선이며, 개별 도형은 목적함수에 따른 모의 수문곡선을 나타내고 있다. Fig. 3의 개별 강우사상에서 표기되지 않은 목적함수별 모의수문곡선의 경우, 모의결과가 과대산정되거나 과소산정되어 제외시켰다.

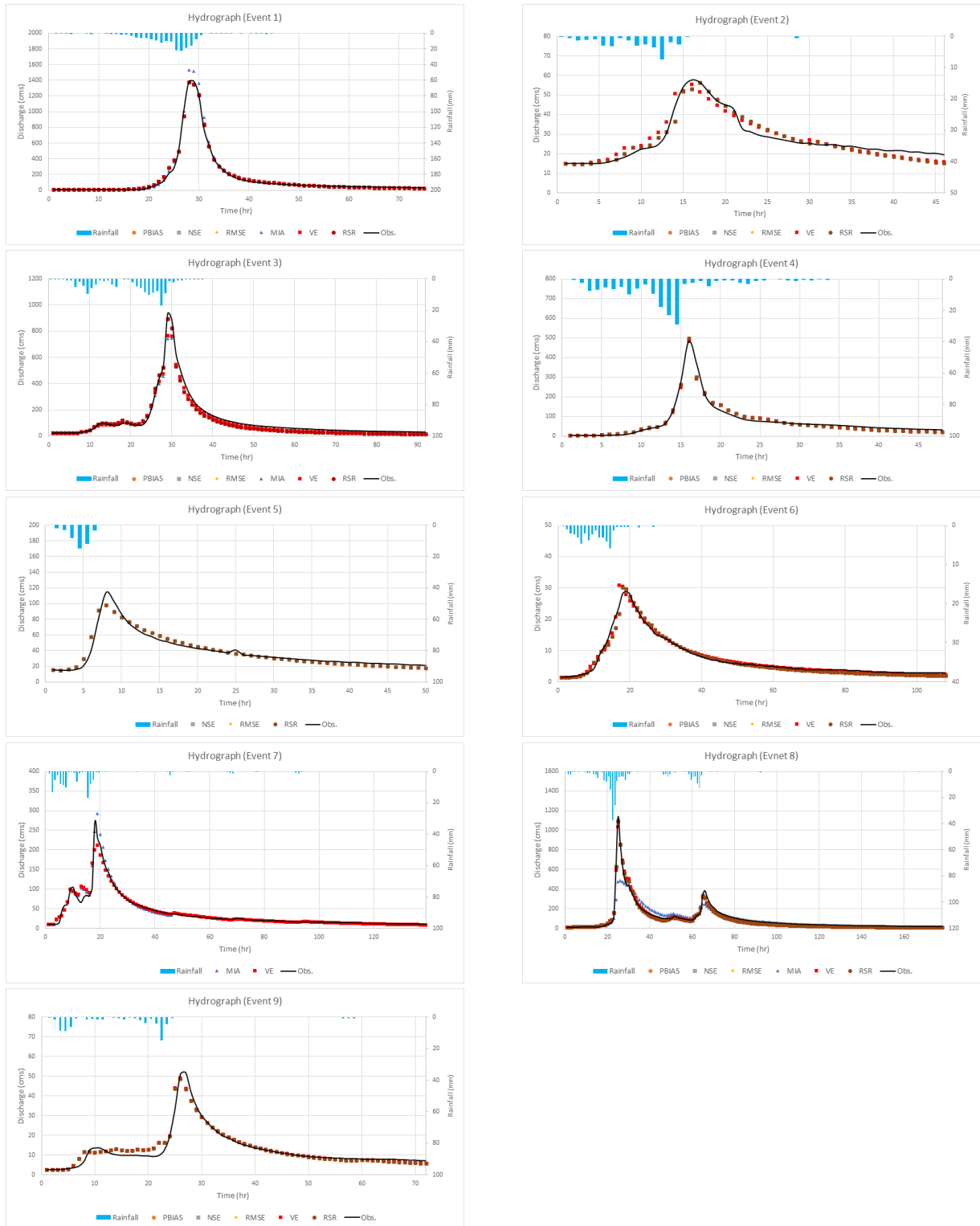


Fig. 3. Hydrograph comparison based on different objective functions

모의결과의 정확도 분석을 위해 9개의 강우사상에서의 첨두유량과 첨두시간의 오차결과를 분석하였으며, 그 결과는 Tables 3 ~ 4와 같으며, + 기호는 과대산정, - 기호는 과소산정을 나타낸다.

Table 3. Model performance comparison based on the objective functions (Peak flow rate)

Peak Flow (cms)	Event No.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Obs.	1384.66	57.64	931.90	482.32	114.58	28.92	269.70	1134.14	52.01
PBIAS	1373.40 (-0.80%)	56.22 (-2.46%)	894.18 (-4.05%)	497.08 (+3.06%)	97.72 (-14.71%)	30.23 (+4.53%)	173.92 (-35.51%)	1092.70 (-3.65%)	48.68 (-6.40%)
NSE	1373.65 (-0.80%)	56.22 (-2.46%)	894.18 (-4.05%)	497.96 (+3.06%)	97.72 (-14.71%)	30.23 (+4.53%)	173.92 (-35.51%)	1092.70 (-3.65%)	48.68 (-6.40%)
RMSE	1373.33 (-0.82%)	56.22 (-2.46%)	894.18 (-4.05%)	498.17 (+3.29%)	97.77 (-14.67%)	30.28 (+4.70%)	173.92 (-35.51%)	1093.43 (-3.59%)	48.68 (-6.40%)
MIA	1532.31 (+10.66%)	36.25 (-37.11%)	748.27 (-19.70%)	1119.50 (+132.11%)	1541.27 (+1245.15%)	616.34 (+2031.19%)	292.79 (+8.56%)	490.14 (-56.78%)	432.76 (+732.07%)
ABIAS	3475.62 (+151.01%)	328.33 (+469.62%)	879.42 (-5.63%)	2323.80 (+381.80%)	15.27 (-86.67%)	138.681 (+379.53%)	164.54 (-38.99%)	11.67 (-98.97%)	182.05 (+250.03%)
VE	1371.69 (-0.94%)	55.47 (-3.76%)	764.96 (-17.91%)	482.42 (+0.02%)	15.27 (-86.67%)	30.79 (+6.47%)	212.23 (-21.31%)	1034.62 (-8.77%)	49.10 (-5.60%)
RSR	1373.32 (-0.82%)	56.22 (-2.46%)	894.18 (-4.05%)	498.91 (+3.44%)	97.88 (-14.57%)	30.32 (+4.84%)	173.92 (-35.51%)	1093.43 (-3.59%)	48.68 (-6.40%)

Table 4. Model performance comparison based on the objective functions (Peak time)

Peak Flow (cms)	Event No.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Obs.	29	16	29	16	8	19	18	25	27
PBIAS	28 (-1)	17 (+1)	29 (0)	16 (0)	8 (0)	18 (-1)	3 (-15)	25 (0)	26 (-1)
NSE	28 (-1)	17 (+1)	29 (0)	16 (0)	8 (0)	18 (-1)	3 (-15)	25 (0)	26 (-1)
RMSE	28 (-1)	17 (+1)	29 (0)	16 (0)	8 (0)	18 (-1)	3 (-15)	25 (0)	26 (-1)
MIA	28 (-1)	17 (+1)	30 (+1)	14 (-2)	3 (-5)	18 (-1)	19 (+1)	26 (+1)	31 (+4)
ABIAS	38 (+9)	7 (-9)	6 (-23)	25 (+9)	1 (-7)	5 (-14)	3 (-15)	1 (-24)	3 (-24)
VE	28 (-1)	16 (0)	29 (0)	16 (0)	3 (-5)	17 (-2)	19 (+1)	25 (0)	26 (-1)
RSR	28 (-1)	17 (+1)	29 (0)	16 (0)	8 (0)	18 (-1)	3 (-15)	25 (0)	26 (-1)

강우사상별 결과를 살펴보면, Event 1 및 2의 경우, ABIAS 및 MIA를 제외한 모든 목적함수에서 모의 수문곡선이 매우 안정적으로 도출되었으며, 특히, PBIAS, NSE, RMSE, VE, RSR의 경우, 첨두유량은 -1% 이내의 오차를 보였으나 모의 첨두시간은 1시간 오차가 발생한 것으로 나타났다. 다만, VE의 경우 Event 2에서 정확한 첨두시간 모의가 가능하였다. Event 3 및 4에서는 ABIAS, VE, MIA를 제외한 목적함수에서 첨두시간은 정확히 모의하고, 약 $\pm 4\%$ 의 동일한 첨두유량 오차가 발생하였다. Event 5의 경우, ABIAS, MIA, VE의 첨두유량 및 첨두시간 모의결과가 좋지 않은 것으로 나타났으며, PBIAS, NSE, RMSE, RSR는 첨두시간은 정확히 모의하였으나 첨두유량 오차가 약 -15%으로 분석되었다. Event 6의 경우, MIA의 결과에서 가장 큰 첨두유량 오차가 나타났으며, 대부분의 목적함수에서 모의 첨두시간이 빨리 발생하는 것으로 나타났다. Event 7의 경우, 대부분의 목적함수에서 첨두유량이 매우 과소산정(-39% ~ -21%)되었으나 MIA에서는 약 +9% 과대산정

된 것으로 나타났다. Event 8 및 9의 경우, PBIAS, NSE, RMSE, RSR은 비교적 우수한 모의성능을 보여주었으며, 다만, VE의 경우, Event 9의 침투유량 모의에서 가장 좋은 결과(-5.6%)를 나타냈다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 선택된 단기 강우사상의 경우, 오차제곱을 포함하는 목적함수 NSE, RMSE, RSR은 침투유량과 침투시간 오차에서 거의 유사하게 우수한 성능을 보여주었으며, 관측유량 대비 오차를 나타내는 PBIAS 역시 비교적 높은 정확도를 나타내는 것으로 분석되었다. 다만, PBIAS와 달리 오차만을 포함하는 ABIAS의 경우 경우, 저류함수모형의 매개변수를 추정하는데 용이하지 않은 것으로 분석되었으며, 분자가 ABIAS와 동일하지만, PBIAS와 마찬가지로 관측유량을 분모로 하는 VE의 경우는 Event 5를 제외하고 비교적 정확한 모의결과를 제공하였다. 그리고 고유량과 저유량의 민감도를 동시에 고려할 수 있게 구성한 MIA의 경우, Event 3과 Event 7에서의 결과를 제외하고는 수문곡선 재현성이 매우 낮게 나타난 것으로 분석되었다.

따라서 Moriasi et al.(2007)이 제시한 바와 같이 일유량 강우-유출 모의이외에도 시단위 자료를 활용한 수문곡선 재현성 평가 또는 수문모형 매개변수 추정에 있어 PBIAS, NSE, RSR은 적절한 것으로 판단되며, Criss and Winston(2008)가 제시한 VE 역시 활용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 목적함수를 활용하여 단기 강우-유출 수문모형의 매개변수를 추정하고, 목적함수에 따른 수문곡선의 재현성을 평가하고, 적정 목적함수를 제시하고자 하였다.

강우-유출 모형으로는 현행 홍수예보에서 유역유출모의에 활용되고 있는 집중형 수문모형인 저류함수모형을 선택하였으며, 모형의 5개 매개변수에 대해서 전역최적화기법인 SCE-UA를 적용하여 자동으로 모형의 매개변수를 추정하였다. 목적함수별 수문곡선의 재현성 평가를 위해 용담댐 상류유역인 천천유역을 대상으로 9개의 강우사상을 추출하였으며, 국내외 연구에서 활용되고 있는 7개의 목적함수를 선택하여 개별 강우사상별로 저류함수모형의 매개변수를 추정하고, 이를 활용한 모의 수문곡선의 재현성을 분석하였다.

분석결과, 목적함수에 오차제곱항을 포함하고 있는 RMSE, NSE, RSR이 Event 7을 제외한 모든 강우사상에 대해 가장 높은 정확도를 나타냈으며, 관측유량과 모의유량의 오차만을 반영한 ABIAS의 경우, 정확도가 가장 낮은 것으로 분석되었다. 또한, 관측유량 대비 오차 항을 포함하고 있는 PBIAS 및 VE의 경우 역시, 상기 3개의 우수한 성능을 보이는 목적함수보다는 낮지만 비교적 안정적인 수문곡선 재현성을 보여주었다. 다만, 고유량과 저유량을 동시에 고려하여 이에 민감한 매개변수를 조정하는 MIA의 경우, 수문곡선 재현성 성능이 매우 낮은 것으로 나타났다.

이미 전술한 바와 같이 단일 모형평가지수 또는 목적함수만을 이용하여 수문모형의 성능을 비교분석하는 것은 한계가 있으므로 본 연구에서 제시한 RMSE 또는 NSE, RSR 및 PBIAS를 활용하여 강우-유출 분석 및 평가를 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No. 2020R1A2C1102758).

References

ASCE. (1993). Criteria for Evaluation of Watershed Models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3):

429-442.

- Beven, K. and Binley, A. (1992). The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*. 6(3): 279-298.
- Chung, G. H., Park, H. S., Sung, J. Y., and Kim, H. J. (2012). Determination and Evaluation of Optimal Parameters in Storage Function Method using SCE-UA. *Journal of Korea Water Resources Association*. 45(11): 1169-1186.
- Chung, G. H. and Park, H. S. (2013). Modification of the Fixed Coefficient Method for the Parameter Estimation of Storage Function Method. *Journal of Korea Water Resources Association*. 46(1): 73-85.
- Criss, R. E. and Winston, W. E. (2008). Do Nash Values Have Value? Discussion and Alternate Proposals. *Hydrological Processes: An International Journal*. 22(14): 2723-2725.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-runoff Models. *Water Resources Research*. 28(4): 1015-1031.
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K., and Sorooshian, S. (1993). Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 76(3): 501-521.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., and Yapo, P. O. (1998). Toward Improved Calibration of Hydrologic Models: Multiple and Noncommensurable Measures of Information. *Water Resources Research*. 34(4): 751-763.
- Gupta, H., Thieman, M., Trosset, M., and Sorooshian, S. (2003). Reply to Comment by K. Beven and P. Young on 'Bayesian Recursive Parameter Estimation for Hydrologic Models'. *Water Resources Research*. 39(5): 1117.
- Hwang, S. H., Ham, D. H., and Kim, J. H. (2012). A New Measure for Assessing the Efficiency of Hydrological Data-driven Forecasting Models. *Hydrological Sciences Journal*. 57(7): 1257-1274.
- Jain, S. K. and Sudheer, K. P. (2008). Fitting of Hydrologic Models: A Close Look at the Nash – Sutcliffe index. *Journal of Hydrologic Engineering*. 13(10): 981-986.
- Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. (2005). Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment. *Advances in Geosciences*. 5: 89-97.
- Lee, D. E., Kim, Y. S., Yu, W. S., and Lee, G. H. (2017). Evaluation on Applicability of On/Off-line Parameter Calibration Techniques in Rainfall-runoff Modeling. *Journal of Korea Water Resources Association*. 50(4): 241-252.
- Legates, D. R. and McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the Use of "Goodness-of-fit" Measures in Hydrologic and Hydro-climatic Model Validation. *Water resources research*. 35(1): 233-241.
- McCuen, R. H., Knight, Z., and Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash – Sutcliffe efficiency index. *Journal of hydrologic engineering*. 11(6): 597-602.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
- Schaepli, B. and Gupta, H. V. (2007). Do Nash Values Have Value?. *Hydrological Processes*. 21: 2075-2080.
- Shin, C. K., Cho, H. S., Jung, K. S., and Kim, J. H. (2004). Grid based Rainfall-runoff Modelling using Storage Function Method. *Journal of Korea Water Resources Association*. 37(11): 969-978.
- Singh, J., Knapp, H. V., and Demissie, M. (2004). Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
- Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Bouten, W., and Sorooshian, S. (2003). Effective and Efficient Algorithm for Multiobjective Optimization of Hydrologic Models. *Water Resources Research*. 39(8): 1214.
- Wang, Q. J. (1991). The Genetic Algorithm and Its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-runoff Models. *Water Resources Research*. 27(9): 2467-2471.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., and Sorooshian, S. (1998). Multi-objective Global Optimization for Hydrologic Models. *Journal of hydrology*. 204(1-4): 83-97.

Korean References Translated from the English

신철균, 조효섭, 정관수, 김재한 (2004). 저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출모형 개발. 한국수자원학회논문집.

37(11): 969-978.

이대엽, 김연수, 유완식, 이기하 (2017). 온·오프라인 매개변수 보정기법에 따른 강우-유출해석 적용성 평가. 한국수자원학회 논문집. 50(4): 241-252.

정건희, 박희성 (2013). 저류함수법의 매개변수 추정을 위한 상수고정법의 개선. 한국수자원학회논문집. 46(1): 73-85.

정건희, 박희성, 성지연, 김현준 (2012). SCE-UA를 이용한 저류함수모형 최적 매개변수 선정 및 평가. 한국수자원학회논문집. 45(11): 1169-1186.