



Evaluation on applicability of on/off-line parameter calibration techniques in rainfall-runoff modeling

Lee, Dae Eop^a · Kim, Yeon Su^b · Yu, Wan Sik^c · Lee, Gi Ha^{a*}

^aDepartment of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

^bK-water Institute

^cInternational Water Resources Research Institute, Chungnam National University

Paper number: 17-009

Received: 16 January 2017; Revised: 23 February 2017 / 9 March 2017; Accepted: 9 March 2017

Abstract

This study aims to evaluate applicability of both online and offline parameter calibration techniques on rainfall-runoff modeling using a conceptual lumped hydrologic model. To achieve the goal, the storage function model was selected and then two different automatic calibration techniques: SCE-UA (offline method) and particle filter (online method) were applied to calibrate the optimal parameter sets for 9 rainfall events in the Cheoncheon catchment, upper area of the Yongdam multi-purpose dam. In order to assess reproducibility of hydrographs from the parameter sets of both techniques, the observed discharge of each event was divided into low flow (below average flow) and high flow (over average flow). The results show that the particle filter method, updating the parameters in real-time, provides more stable reproducibility than the SCE-UA method regardless of low and high flow. The optimal parameters estimated by SCE-UA are very sensitive to the selected objective functions used in this study: RMSE and HMLE. In particular, the parameter sets from RMSE and HMLE demonstrate superior goodness-of-fit values for high flow and low flow periods, respectively.

Keywords: Storage function model, Automatic parameter calibration, Particle filter, SCE-UA

온·오프라인 매개변수 보정기법에 따른 강우-유출해석 적용성 평가

이대엽^a · 김연수^b · 유완식^c · 이기하^{a*}

^a경북대학교 건설방재공학과, ^bKwater 융합연구원, ^c충남대학교 국제수자원연구소

요 지

본 연구에서는 오프라인 및 온라인 매개변수 자동보정기법을 이용하여 개념적 집중형 수문모형의 매개변수를 보정한 후, 각 보정기법에 따른 강우-유출 해석 결과를 비교·분석하여 기법별 적용성을 평가하였다. 이를 위해 용담댐 상류 천천 유역을 대상으로 9개의 단기 강우사상을 선정하고, 강우-유출 모의를 위한 수문모형으로 저류함수모형을 선택하였다. 또한 저류함수모형의 매개변수 보정을 위한 자동보정기법으로 오프라인 기법으로는 SCE-UA, 온라인 기법으로는 파티클 필터를 선정하여 해석을 수행하였다. 각 기법에 따른 유출 해석결과의 재현성 평가를 위해 관측수문곡선의 평균유량을 근거로 하여 저수부(평균유량 이하)와 고수부(평균유량 초과)로 구분하여 모의결과를 비교·검토하였다. 그 결과, 매 시간 입력자료를 이용하여 매개변수를 실시간으로 업데이트하는 파티클 필터의 경우, 저수부와 고수부에 구분없이 전반적으로 우수한 재현성을 보여주었다. 반면에 SCE-UA의 경우, 대상 사상에 대한 전체기간의 정보를 활용하여 선택된 목적함수 RMSE와 HMLE를 최소로 하는 최적 매개변수를 추정함에 따라 일정규모 이상의 홍수사상에서는 목적함수에 따라 매개변수의 변동성이 나타났으며, 고수부에서는 RMSE, 저수부에서는 HMLE가 비교적 우수한 유출모의 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.

핵심용어: 저류함수모형, 매개변수 자동보정기법, 파티클 필터, SCE-UA

*Corresponding Author. Tel: +82-54-530-1259
E-mail: leegiha@knu.ac.kr (G. H. Lee)

1. 서론

유역에 대한 유출해석은 지속가능한 수자원 관리 및 수재해 예방을 위한 가장 기본적인지만 중요한 과제이며, 특히 우리나라와 같이 재해의 빈도가 홍수와 가뭄과 같은 수재해가 대부분인 경우, 더욱 정밀하고 고도화된 유출해석이 요구된다. 일반적으로 유출해석은 강우-유출 과정(Rainfall-Runoff process)의 해석을 위한 접근방법에 따라 경험적(empirical), 개념적(conceptual), 물리적(physically-based) 해석기법으로 구분할 수 있다. 1990년 초부터 다양한 공간자료를 수집·가공할 수 있는 GIS 소프트웨어 및 고성능 컴퓨터 개발과 더불어 최근에는 물리적 강우-유출 모형이 활용되고 있는 추세이다. 그러나 물리적 모형의 매개변수의 경우, 현장에서 측정이 가능한 것으로 알려져 있으나 시·공간적으로 불규칙하게 변동하는 모든 물리적 매개변수를 현장 측정하여 수치화한다는 것은 무리가 있으며, 이러한 이유로 일정 중·소규모 유역에서의 강우-유출 해석의 경우 아직까지도 개념적 모형이 수문설계 분야 등에서 활용되고 있다(Lee et al., 2008).

저류함수모형(Storage Function Method or Model; Kimura, 1961)은 이러한 개념적 강우-유출 모형의 하나로써 하도추적 모형(Channel Routing Model)과 결합하여 국내 홍수에보 등 오랜 기간 실무에 이용되고 있다. 이 모형은 유출해석을 위한 모형의 구조가 비교적 간단하고 해석에 필요한 입력자료 및 매개변수의 수가 적어 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다(Song et al., 2006). 그러나 저류함수모형의 홍수유출 모의를 위해 추정된 매개변수들의 경우, 관측자료의 오차, 모형구조 자체의 오류 등의 불확실성 요인들로 인하여 유역을 대표하는 범용적인(universal) 매개변수를 추정하는 것은 쉽지 않다.

즉, 모든 강우-유출 모형과 마찬가지로 저류함수모형을 이용한 유출해석에 있어 매개변수 추정은 유출해석 결과에 지대

한 영향을 주며, 이에 모형의 최적 매개변수를 추정하는 것은 예측결과의 성능 향상에 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 이러한 개념적 집중형(lumped) 수문모형의 매개변수를 추정하는 방법에는 크게 시행착오에 의한 수동보정기법(Manual Calibration)과 최적화 알고리즘을 사용한 자동보정기법(Automatic Calibration)으로 구분할 수 있다.

자동보정기법은 매개변수의 추정에 있어 수동보정기법에 비해 사용자의 주관에 따른 불확실성의 영향이 비교적 적으며, 반복적인 시행착오 과정을 거치지 않아 보다 효율적이며 신속하다는 장점이 있다.

이러한 자동보정기법에 의한 매개변수의 추정은 Fig. 1과 같이 1) 모의기간 동안의 모든 관측정보를 사용하여 선택된 목적함수(Objective Functions)에 대한 전역최적해(Global Optimum)를 추정하는 오프라인(Off-line) 방법과 2) 모의기간 동안의 각 계산시간 단계별로 관측정보를 사용하여 동적 시스템의 상태를 순차적으로 업데이트하여 추정하는 온라인(On-line) 방법으로 구분할 수 있다(Noh, 2013).

자동보정기법에 의해 저류함수모형의 매개변수의 추정 및 유출해석과 관련된 연구들은 다음과 같다. 오프라인 기법의 사례로는 Park et al. (1997)은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 저류함수모형의 매개변수 추정에 적용하여 경험공식과 비교·검토하였고, Kim et al. (2006)은 최소자승법에 의한 준선형화, Runge Kutta 및 Patten Search 기법들을 적용하여 동적효과를 고려한 저류함수모형의 최적 매개변수를 제시하고자 하였다. Choi et al. (2009)은 다중회귀분석을 이용하여 한강유역의 저류함수모형 매개변수를 계산하기 위한 공식을 유도한 바 있다.

이후 Chung et al. (2012)은 다양한 수문모형의 전역 최적해를 찾기 위해 국내·외적으로 적용·검증된 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method-University of Arizona)방법을

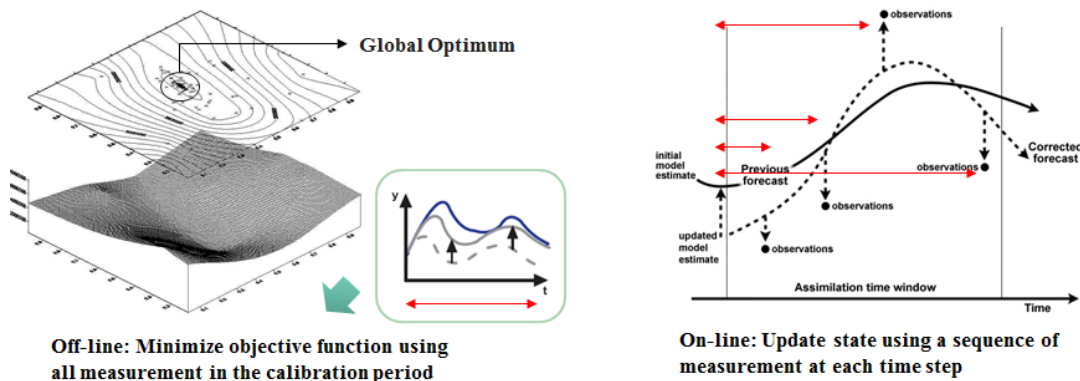


Fig. 1. Schematic diagram of hydrological model calibration methods categorized into (left) Off-line technique and (right) on-line technique

이용하여 저류함수모형의 매개변수를 최적화하고, 유출해석을 수행하였다. 저류함수모형과 관련된 온라인 기법의 적용사례의 경우는 오프라인 방법에 의한 사례보다는 많지 않으며, 대표적으로 Bae et al. (2009)는 실시간 관측유량자료 동화(Assimilation)를 위해 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter, EKF) 기법을 도입하여 확정론적 모형을 추계학적 모형으로 개선한 바 있다. 또한, Noh et al. (2011)는 저류함수모형에 파티클 필터(Particle Filter, 이하 PF)기법 및 DUS (Dual state-parameter updating scheme)를 적용하였으며, Noh (2013)는 파티클 필터 기법의 성능 평가를 위해 저류함수모형 뿐만 아니라 분포형 수문모형과 결합하여 매개변수를 추정하고, 그에 따른 수문학적 불확실성을 분석한 바 있다. 이외에도 Kim et al. (2012), Kim (2013) 및 Kim et al. (2015)은 각각 하천의 수위-유량관계곡선의 불확실성 추정 및 토양침식모형의 매개변수를 추정하기 위해 PF 기법을 적용하여 알고리즘의 실효성을 검증하였다.

이상과 같이 GA 또는 SCE-UA 등과 같은 오프라인 보정방법의 경우, 대상으로 하는 관측기간에 대해 선택된 목적함수에 따라 최적의 매개변수를 제공해주는 반면, 매개변수의 시간적 변동성 및 매개변수의 불확실성에 대한 정보를 제공할 수 없다. 반면에 EKF 및 PF 기법 등과 같은 온라인 자료동화기법의 경우, 각 시간간격별로 입수되는 관측정보를 기반으로 하기 때문에 시간간격별 최적 매개변수의 변동성에 대한 정보를 제공할 뿐 아니라 관측오차에 대한 정보를 사전 입력자료로 활용함으로써 이에 따른 매개변수 및 수문해석결과의 불확실성에 대한 정보도 함께 제공해줄 수 있는 장점이 있다. 기존의 연구를 살펴본 결과, 오프라인과 온라인의 대표적 기법들을 활용하여 매개변수 추정 및 유출해석을 수행한 연구는 다수 존재하나 두 가지 방법의 비교·검토를 통해 각 기법의 장·단점 및 강우-유출 등 수문해석에 있어서의 적용성 평가를 수행한 연구는 미흡한 것으로 조사되었다.

이에 본 연구에서는 용담댐 상류 천천 유역의 강우-유출 해석을 위한 모형으로 저류함수모형을 선정하고, 매개변수 보정을 위하여 SCE-UA (Off-line) 기법과 PF (On-line) 기법을 활용하였다. 매개변수 보정 및 유출해석에 대한 재현성 평가를 위해 모의된 유출해석 결과와 관측자료와의 비교·분석을 통해 기법별로 저류함수모형에 대한 적용성을 평가하였다. 특히, SCE-UA의 경우 목적함수 선택에 따라 저수부(Low flow) 또는 고수부(High flow)의 정확도가 변화할 수 있으므로 이를 고려하여 두 가지 목적함수에 대해 매개변수를 보정하고 유출모의 결과를 분석하였다. 본 연구는 2장에서 사용된 모형 및 매개변수 자동보정 알고리즘에 대한 배경이론에 대해

기술하였으며, 3장에서 대상유역, 입력자료 및 모형의 적용조건, 4장에서 매개변수 보정 및 유출해석 결과, 마지막으로 5장에서는 결론 순으로 구성되어 있다.

2. 이론적 배경

2.1 저류함수모형

저류함수모형은 Kimura (1961)에 의해 개발된 단기 강우사상에 대한 강우-유출 모형으로 강우와 유출의 차이를 저류량이라 정의하고, Eq. (1)과 같이 유출은 저류량에 비례하며, Eq. (2)의 연속방정식을 이용하여 유출량을 산정한다. 일본에서는 다양한 유역의 홍수해석을 위해 많이 활용되고 있으며, 우리나라에서도 단기 홍수유출해석 및 하도추적모형과 결합하여 국가하천 홍수예보 등에서 활용되고 있다.

유역의 저류함수모형은 전술한 바와 같이 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$S(t) = K q(t)^P \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = r_e(t - T_L) - q(t) \quad (2)$$

여기서, S 는 유역 내 저류량(m^3), t 는 시간(hr), T_L 는 지체시간(hr), q 는 유역으로부터의 직접유출량(m^3/hr), K 와 P 는 모형 매개변수, $r_e(t - T_L)$ 는 유출률과 지체시간을 고려한 유역평균강우량(mm/h)을 나타내며, 유효강우 r_e 는 Eq. (3)과 같이 추정된다.

$$r_e = r \times f^* \text{ with } f^* = \begin{cases} 1 & r_{accum} \geq R_{sa} \\ f & r_{accum} < R_{sa} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, f 는 유출률, r_{accum} 은 누적강우량(mm), R_{sa} 는 포화우량(mm)이다.

2.2 파티클 필터(Particle Filter, PF)

PF는 Gordonel et al. (1993), Kitagawa (1996)이 각각 개별적으로 제안한 방법으로 Sequential Monte Carlo (SMC) 방법이라고도 불리며, 비선형 비가우시안 모형에 대한 최적 근사해 추정에 활용되는 방법으로 최근 금융 공학이나 화상 해석, 물체추적, 로봇공학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. PF는 몬테카를로법에 근거한 상태 수정법이며, 모형의 선형화

(Linearization) 등의 조작이 필요 없이 비선형(Non-linear)의 복잡한 구조 모형에도 쉽게 적용 가능하다는 장점이 있다. PF는 기본적으로 많은 수의 독립된 랜덤매개변수를 생성하여 이용하며, 이러한 독립랜덤변수들을 입자(Particle)라고 한다.

비선형식으로 구성된 수문모형 혹은 수리모형은 입력, 상태 및 출력을 갖는 상태공간식(State-space equations)으로 다음과 같이 일반화하여 표현할 수 있다.

$$x_t = f(x_{t-1}, v_t) \tag{4}$$

$$y_t = g(x_t, z_t) \tag{5}$$

여기서, f 와 g 는 각각 상태방정식과 관측방정식, x_t, v_t, y_t, z_t 는 각각 상태변수, 프로세스노이즈, 관측변수, 관측노이즈이다.

상태변수는 시간(t)에서 입자의 분포로 표현될 수 있으며, 각 입자는 변수의 기여도를 정의하는 변수와 가중치로 구성된다. 상기의 두 식에 확률적 개념을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x_t|x_{t-1}) \tag{6}$$

$$p(y_t|x_t) \tag{7}$$

베이즈 이론과 마르코프 특성을 활용하여 사후(Posterior) 확률 $p(x_t|Y_t)$ 를 우도(Likelihood) $p(y_t|x_t)$ 및 사전(Prior) 확률 $p(x_t|x_{t-1})$ 로부터 구하면 다음과 같다.

$$p(x_t|Y_t) = \frac{p(y_t|x_t)p(x_t|Y_{t-1})}{p(y_t|Y_{t-1})} \propto p(y_t|x_t)p(x_t|Y_{t-1}) \tag{8}$$

여기서, $p(y_t|Y_{t-1})$ 는 정규화 상수이다.

파티클 필터는 추정 값을 구하기 위해 파티클과 가중치를 이용하여 사후확률분포를 표현하는 것이 가장 중요하며, 이론적으로 최적 근사해를 제공할 수 있으나 이로부터 직접적으로 샘플링을 수행하는 것이 불가능함에 따라 Eq. (9)와 같이 근사화 될 수 있다(Doucet et al., 2000).

$$p(X_t|Y_t) = \sum_{i=1}^n w_i^t \delta(X_t - X_t^i) \tag{9}$$

여기서, $p(X_t|Y_t)$ 는 결합사후확률, w_i^t 는 가중치, δ 는 Dirac Delta 함수이다.

가중치는 중요 샘플링(Importance Sampling)의 원리를 이용하여 결정되며, Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다(Arulampalam et al., 2002).

$$w_t^i \propto \frac{p(x_t^i|y_t)}{q(x_t^i|y_t)} \tag{10}$$

여기서, $q(x_t^i|y_t)$ 는 주요확률밀도함수이다.

이후 순차적인 적용 및 주요확률밀도함수를 기반으로 하여 근사화하면 Eq. (11)과 같은 중요 가중치 w_t^i 의 갱신과 Eq. (12)과 같은 사후확률분포 $p(x_t|Y_t)$ 로 나타낼 수 있으며, 이는 순차적 중요샘플링 방법(SIS, Sequential Importance Sampling)이라 불린다.

$$w_t^i \propto w_{t-1}^i p(y_t|x_t^i) \tag{11}$$

$$p(x_t|Y_t) \approx \sum_{i=1}^n w_t^i \delta(x_t - x_t^i) \tag{12}$$

본 연구에서는 Eq. (13)과 같이 각각의 파티클의 우도 계산을 위해 실제유량과 수위-유량 관계곡선식의 오차를 고려하여 관측오차를 관측유량의 10%로 적용하였다.

$$w_t^i = p(y_t|x_t^i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_t^i - y_t)^2}{2\sigma^2}} \tag{13}$$

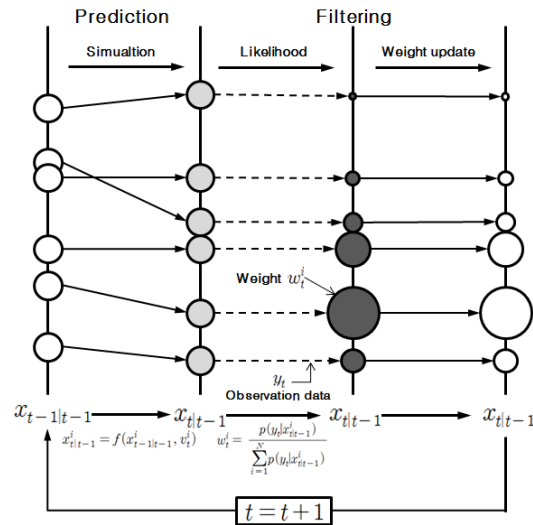


Fig. 2. Schematic diagram of particle filter (Murakami et al., 2013)

여기서, σ 는 관측오차, w_i 는 시간 t 에서 각 파티클 i 에 대한 우도이다.

이러한 SIS방법에 의한 PF 기법의 매개변수 추정과정은 다음과 같다. 우선 초기 매개변수에 대해 균일한 분포를 활용하여 파티클을 분포시키고, 시뮬레이션을 통해 파티클의 재배치를 거쳐 관측데이터와의 비교를 통해 파티클별 우도를 산정한다. 이후 산정된 우도를 정규화하여 파티클별 가중치를 산정하게 되며, 산정된 가중치에 의해 파티클이 업데이트 된다. 이후 시간단계의 진행에 따라 가중치에 의해 업데이트된 파티클들을 이용하여 시간단계별 최적 매개변수를 도출하는 과정을 반복하게 되며, 이러한 개념을 개략적으로 도시화하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

2.3 SCE-UA

SCE-UA 기법은 미국의 애리조나대학교의 Duan et al. (1992, 1993)에 의해 제안된 전역최적화 기법으로 Fig. 1의 좌측과 같이 전체 매개변수 공간(Parameter Space)을 탐색하여 해를 찾아가며, 최적해에 해의 모집단이 궁극적으로 모이도록 특정한 기법을 적용하여 해를 진화시킨다.

SCE-UA 기법은 초기단계에서 해가 존재하는 전체 매개변수 공간에서 표본을 생성하고 Complex들로 분할한다. 각 Complex는 Downhill Simplex 알고리즘을 사용하여 독립적으로 진화되며, 진화를 거친 Complex들은 다시 혼합되고, 새로운 Complex들이 생성된다. 이상의 진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다.

SCE-UA 기법은 광범위한 문제에 대해서 효과적이고 효율적으로 해결할 수 있도록 디자인된 전역최적화 방법으로 본 연구에서는 저류함수모형의 목적함수에 따른 매개변수의 변동성 분석 및 유출모의 재현성 평가를 위해 다음과 같은 2개의 목적함수 RMSE (Root Mean Square Error)와 HMLE (Heteroscedastic Maximum Likelihood Estimator)를 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (14)$$

여기서, N 은 자료의 개수, y_t 와 \hat{y}_t 는 각각 시간 t 의 실측유량 및 계산유량을 나타낸다.

HMLE은 수치안정화를 위해 기존의 HMLE (Sorooshian and Gupta, 1980)에서 Eq. (15)와 같이 Duan (1991)에 의해 수정된 HMLE를 사용하였다.

$$HMLE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t (y_t - \hat{y}_t)^2}{\exp[2(\lambda - 1)a_d]} \quad (15)$$

여기서, $w_t = y_t^{2(\lambda-1)}$, $a_d = \frac{1}{N} \ln(y_t)$, $\lambda =$ 분산을 안정화시키는 자료변환매개변수이다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역 및 강우사상

본 연구의 대상지역인 천천 유역은 용담댐유역의 5개의 주요소유역 중 하나로 Fig. 3과 같이 천천 수위관측소를 유출구로 하며, 유역면적 290.89 km², 유로연장 25.5 km, 평균표고 555.2 m, 평균경사 17.6°이다. 용담댐 유역은 K-Water에서 시험유역으로 지정되어 수리·수문자료의 수집 및 품질검증이 수행되고 있어 관측 자료에 대한 신뢰도가 비교적 높다는 장점이 있다.

본 연구에서는 강우-유출해석을 위해 Table 1과 같이 4개의 강우관측소의 시 단위 자료를 획득하여 Table 2와 같이 9개의 사상을 선정하였다. 이후 모형에 적용될 천천유역 4개 우량 관측소의 시간별 점 강우량 자료를 Thiessen 기법을 이용하여 해당유역에 대한 면적강우량 자료로 변환하였다. 관측유량은 천천 수위관측소(Table 3)에서 측정된 수위자료와 K-Water에서 제시한 수위-유량관계식(Table 4)을 이용하여 사상별 유량자료를 생성하였다.

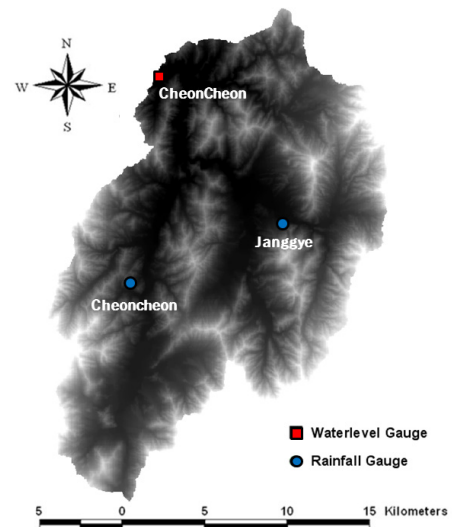


Fig. 3. Study site

Table 1. Information of rainfall stations

Rainfall station	Location		Elevation (EL.m)	Commencement date of observation
	Longitude	Latitude		
Sangjeon	127-29-10	35-48-11	334	99-06-15
Gyebuk2	127-37-46	35-48-27	453	99-06-15
Janggye	127-36-03	35-42-54	422	99-06-15
Cheoncheon	127-30-49	35-40-54	409	99-06-15

Table 2. Rainfall events for rainfall-runoff simulations

Event No.	Rainfall duration	Total rainfall	Note
1	2002.08.30.17:00 ~ 09.02.19:00	177.97	Typhoon 'Rusa'
2	2003.07.17.19:00 ~ 07.19.16:00	33.76	
3	2003.09.11.21:00 ~ 09.15.16:00	133.34	Typhoon 'Maemi'
4	2004.08.18.05:00 ~ 08.20.04:00	162.73	
5	2004.09.20.15:00 ~ 09.22.16:00	44.17	
6	2005.06.10.04:00 ~ 06.14.15:00	42.86	
7	2006.07.25.21:00 ~ 07.31.15:00	103.74	
8	2007.09.14.06:00 ~ 09.21.15:00	204.66	Typhoon 'Nari'
9	2008.06.17.21:00 ~ 06.20.20:00	68.93	

Table 3. Information of water level station

Water Level Station	Location		Commencement date of observation	Elevation (EL.m)	Basin area (km ²)
	Longitude	Latitude			
Cheoncheon	127-31-48	35-47-09	99-06-15	273.5	289.8

Table 4. Stage-discharge equations

Year	Stage-discharge equations	Coefficient of correlation
2002	$Q = 24.945 \times (H - 2.281)^{2.448}$	0.991
2003	$Q = 53.522 \times (H - 2.346)^{2.219}$	0.988
2004	$Q = 34.535 \times (H - 2.209)^{2.392}$	0.995
2005	$Q = 44.379 \times (H - 2.393)^{2.118}$	0.991
2006	$Q = 29.471 \times (H - 2.281)^{2.625}$	0.999
2007	$Q = 50.403 \times (H - 2.367)^{2.257}$	0.995

3.2 모형의 적용조건

저류함수모형을 이용하여 유출계산을 하기 위해서는 Eqs. (1)-(3)의 다음과 같은 매개변수를 결정해야 한다. 매개변수는 총 5개로 유역의 유출률(f), 포화우량(R_{sa}), 지체시간(T_L), 저류상수(K), 지수(P)이다. SCE-UA와 PF 기법을 통한 저류함수모형의 매개변수 추정을 위해서는 초기 매개변수 및 매개변수에 대한 범위를 설정해 주어야 하며, 본 연구에서는 다음과 같이 기존의 연구들에서 제시하고 있는 조건을 적용하였다.

Shin et al. (2004)은 우리나라 홍수분석 실무에서 적용하고 있는 저류함수모형의 설정 값으로, 유출률 0.5, 포화우량 20 mm를 제시하였으며, 유역에 대한 지체시간, 저류상수, 지수에 대한 추정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$T_L = 0.0506 \cdot L - 0.31 \quad (16)$$

$$K = 118.84 \cdot \left(\frac{1}{S_f}\right)^{-0.3} \quad (17)$$

$$P = 0.175 \cdot \left(\frac{1}{S_l}\right)^{0.235} \quad (18)$$

여기서, L 는 주하천장(km), S_l 는 주하천 평균경사이다.

또한 매개변수들에 대한 각각의 범위는 기존에 저류함수 모형에 SCE-UA 기법을 적용한 바 있는 Chung et al. (2012)이 적용한 매개변수별 가능최대 범위를 매개변수 범위로 사용하였다.

본 연구에서 적용한 매개변수의 초기조건 및 범위를 정리하면 Table 5와 같다.

이상과 같이 제시된 초기 매개변수 및 매개변수의 범위를 이용하여 Fig. 4와 같은 절차에 따라 저류함수모형의 매개변수를 추정하고 강우-유출해석을 수행하게 되며, 각 기법에 따른 매개변수 추정과정은 다음과 같은 차이를 보인다. 우선 SCE-UA를 이용한 오프라인 방법의 경우 모의사상 전체에 대해 설정된 매개변수의 범위 내에서 목적함수에 대한 오차를 최소화 하는 전역최적해를 추정하여 유출해석을 수행하게 되며 목적함수가 허용오차 범위를 만족할 경우, 이때의 매개변수를 최적 매개변수로 도출하게 된다. 반면 PF 기법을 이용한 온라인 방법의 경우, 각 시간단계별 관측정보 및 이전 단계에서의 매개변수별 가중치를 시간단계의 진행에 따라 지속적으로 업데이트를 수행하며, 이를 통해 시간단계별 최적 매개변수를 도출하게 된다. 이러한 자동보정기법의 적용에 있어 전

Table 5. Initialization of parameters for storage function model calibration

Parameter	Initial value	Value of range
f	0.5	0.0 ~ 1.0
R_{sa}	20	0.0 ~ 300
T_l	1	0.0 ~ 10
K	70	0.0 ~ 80
P	0.6	0.0 ~ 1.0

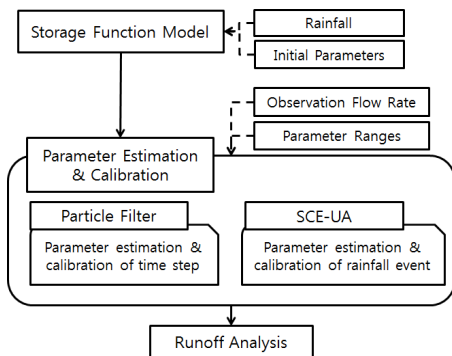


Fig. 4. Flowchart of rainfall-runoff analysis

술한 바와 같이 본 연구에서는 SCE-UA의 목적함수로 RMSE와 HLME를 적용하고, 전역 최적 해를 찾기 위해 최대 1,000번의 반복(Iteration)을 수행하도록 설정하였으며, PF 기법에서는 해석결과의 정확성을 위해 9,000개의 파티클과 관측자료에 대한 오차를 기존의 Noh et al. (2011)과 Noh (2013)에서 적용한 바와 같이 10% 범위로 적용하여 강우-유출 해석을 수행하였다.

4. 결과분석

본 연구에서는 9개의 강우사상에 대해 오프라인 방식의 SCE-UA와 온라인 방식의 자료동화기법인 PF 기법을 저류함수모형과 결합하여 유출해석을 수행하였으며, 그 중 주요 태풍사상인 3개의 사상에 대해 Figs. 5~7과 같이 수문곡선 비교 결과를 도시하였다. 각 기법에 따른 유출모의 결과의 재현성 평가를 위하여 각 사상별 평균유량을 이용하여 저수부(Low flow, 평균유량 이하)와 고수부(High flow, 평균유량 초과)으로 구분하였으며 전체 모의기간에 대한 재현성 및 저수부와 고수부와 같은 부분구간에 대한 재현성도 동시에 평가하였다.

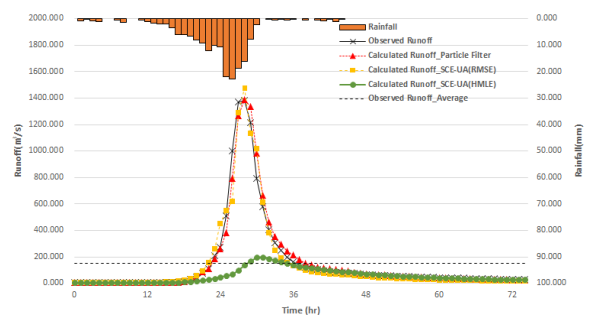


Fig. 5. Comparison of hydrographs between PF and SCE-UA (Event 1)

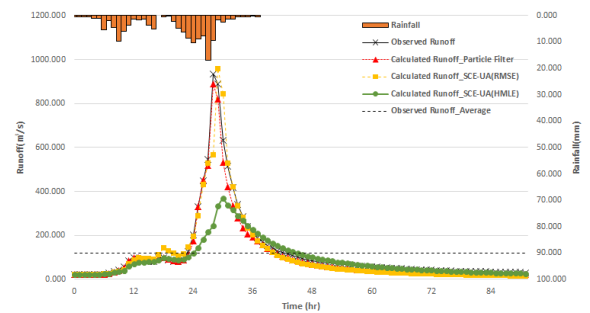


Fig. 6. Comparison of hydrographs between PF and SCE-UA (Event 3)

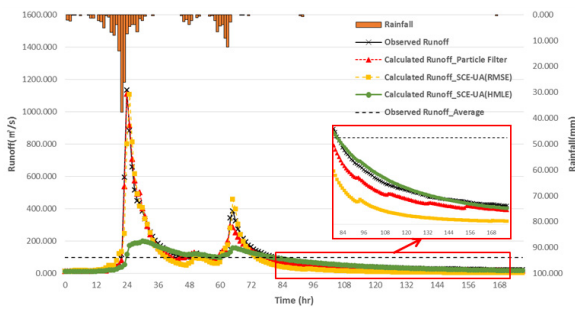


Fig. 7. Comparison of hydrographs between PF and SCE-UA (Event 8)

Table 6은 9개 강우사상별 전체 모의기간에 대한 PF 및 SCE-UA 기법에 의한 유출해석의 재현성 평가결과를 나타내고 있다. 여기서 재현성 평가지수인 NSE (Nash-sutcliffe model efficiency coefficient)는 Eq. (19)와 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y}_t)^2} \quad (19)$$

여기서, \bar{y}_t 는 관측유량의 평균값을 나타낸다.

각 사상별 전체기간에 대한 유출해석결과를 비교한 결과, 총 9개의 강우사상 중 6개의 사상에서 PF 기법에 의한 유출해석결과가 SCE-UA에 의한 유출해석결과보다 오차가 작게 나타났다. 최소 NSE가 0.85 이상으로 유출모의 결과의 정확도가 비교적 높게 나타났다. SCE-UA에 의한 유출모의 결과에서 RMSE를 목적함수로 사용한 경우, 최소 NSE가 0.83 이상으로 PF 기법과 마찬가지로 비교적 유출결과에 대한 정확

도가 높게 나타났으며, 특히 Event 6, 7, 9의 경우는 PF 기법보다 우수한 재현성을 나타내는 것으로 분석되었다. 그러나 HMLE를 목적함수로 사용한 매개변수의 경우, 단지 NSE가 2개의 사상(Event 6, 9)에 대해서만 0.8 이상이었으며, 나머지 7개의 사상은 0.63 이하, 그 중 3개의 사상(Event 1, 4, 5)은 0.1 미만으로 나타났다. 이러한 결과에 대한 원인을 살펴보면, 모든 기법별로 비교적 NSE가 높게 산정된 2개의 사상(Event 6, 9)의 경우 첨두유량이 각각 29 m³/s와 52 m³/s로 매우 낮은 수문곡선인 반면, NSE가 0.1 미만인 사상들의 경우는 첨두유량이 최대 1400 m³/s까지 발생하는 고유량의 홍수수문곡선으로 분석되었다. Lee et al. (2007)은 모형의 구조가 단순한 개념적 수문모형의 경우, 강우사상의 규모에 따라 목적함수별로 상이한 최적 매개변수가 도출될 수 있다고 지적한 바 있다. 실제로 Event 6, 9의 경우, 사용된 목적함수에 관계없이 유출모의 결과가 우수한 반면, 이외의 사상의 경우는 HMLE를 목적함수로 사용한 모형의 결과가 RMSE를 목적함수로 사용한 유출모의 결과보다 현저하게 부정확한 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 이에 대한 추가적인 검토를 위해 Figs. 5~7의 검정 점선과 같이 사상별 관측유량의 평균값을 이용하여 유출곡선의 구간을 상부와 하부로 나누어 사상별 저수부와 고수부에 대한 RMSE를 계산하였으며, 이를 각각 Tables 7 and 8에 나타내었다.

SCE-UA 기법의 두 목적함수에 대한 사상별 수문곡선의 구간분할에 따른 오차를 비교하면 전체사상에 대한 오차와는 다르게 유출곡선의 저수부에서 Table 7 및 Fig. 7과 같이 HMLE 목적함수에 의한 유출해석결과가 RMSE 목적함수에 의한 결과보다 8개의 사상에서 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 특히, 4개의 사상(Event 2, 3, 7, 8)에서는 PF 기법에 의한 결과보다 정확도가 높게 나타났으며, Fig. 7의 붉은 선으로 확

Table 6. Comparison of model performance between PF and SCE-UA with RMSE and HMLE for the whole event period

Event	PF		SCE-UA (RMSE)		SCE-UA (HMLE)	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
1	0.97	44.07	0.95	60.95	0.07	282.75
2	0.95	2.48	0.93	2.89	0.62	7.00
3	0.98	23.64	0.91	48.21	0.55	110.60
4	0.88	30.33	0.83	37.37	0.05	88.00
5	0.97	3.35	0.92	12.82	0.07	21.13
6	0.97	0.98	0.98	0.85	0.97	0.89
7	0.85	16.50	0.94	10.43	0.43	32.32
8	0.98	19.34	0.87	52.02	0.31	119.19
9	0.88	3.40	0.94	2.35	0.83	4.04
Average	0.94	16.01	0.92	25.32	0.43	73.99

Table 7. Comparison of model performance for low flow period

Event	PF	SCE-UA (RMSE)	SCE-UA (HLME)
1	9.53	15.06	14.36
2	1.95	2.30	0.96
3	9.72	18.88	8.54
4	7.41	21.09	7.95
5	2.91	3.50	4.28
6	0.34	0.66	0.37
7	1.73	2.19	0.86
8	9.27	27.02	5.60
9	0.87	1.74	0.87
Average	4.86	10.27	4.87

Table 8. Comparison of model performance for high flow period

Event	PF	SCE-UA (RMSE)	SCE-UA (HLME)
1	100.05	137.54	653.75
2	3.41	3.93	12.61
3	47.25	97.00	236.66
4	59.30	65.22	175.47
5	4.03	8.75	34.76
6	1.75	1.21	1.57
7	31.44	19.63	61.80
8	31.93	84.43	214.27
9	6.310	3.49	7.55
Average	31.72	46.80	155.38

대된 저수부의 모의결과를 보면 이를 명확하게 확인할 수 있다. 반면 Table 8과 같이 수문곡선의 고수부에서는 사상전체에 대한 결과와 유사하게 RMSE 목적함수에 의한 결과가 오

차가 작은 것으로 분석되었다. 즉, 저류함수모형의 경우, 강우 사상의 규모에 따라 SCE-UA 기법의 목적함수별 최적 매개변수 민감도가 매우 높으며, 이에 따라 상이한 유출모의 결과가 발생할 수 있음을 나타낸다. 반면에 온라인 자료동화기법인 PF 기법의 경우, 수문곡선을 두 구간으로 구분한 결과에서도 유출곡선의 저수부 및 고수부 모두 전체기간에 대한 모의결과의 오차와 비슷한 정도의 정확도를 나타냈으며, 전체적으로 SCE-UA 기법의 RMSE(고수부) 및 HLME(저수부)의 결과보다 대체로 정확한 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

이는 PF 기법의 경우, 목적함수를 사용하여 전체기간에 대한 최적의 매개변수를 제공해주는 오프라인 기법과 달리 각 시간단계별로 생성된 파티클이 다음 시간단계에서의 관측유량 정보를 기반으로 지속적으로 업데이트됨에 따라 관측오차가 심각하지 않을 경우 안정적으로 계산시간별 최적 매개변수를 제공할 수 있음을 의미한다.

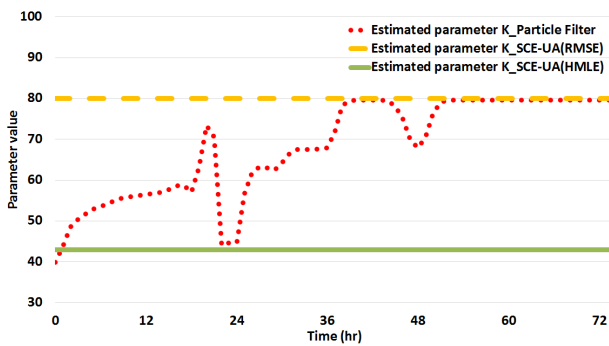
다만, 해당구역에서의 대표 매개변수를 선정하기 위해서는 시변성(time-variant) 매개변수를 제공하는 온라인 기법보다는 시불변성(time-invariant) 오프라인 기법이 활용성 측면에서 유리할 수 있다. Table 9는 PF로 추정된 사상별 매개변수를 나타낸 것으로 시간단계별 변화하는 매개변수의 범위를 보여주며, Table 10은 SCE-UA로 추정된 목적함수 및 사상별 최적 매개변수를 나타낸다. 이를 통해 PF의 경우 매개변수의 추정에 있어 유역에 대한 대표매개변수 뿐만 아니라 해당사상에 대한 대표적인 매개변수를 제시하기 어려움을 확인할 수 있으며, SCE-UA의 경우 사상별 대표 매개변수에 대한 도출은 가능하나 동일한 유역 내에서도 강우의 특성에 따라 도출되는 매개변수가 달라 나타나기에 유역에 대한 대표매개변수에 대한 도출은 어렵다. 이러한 기법별 도출되는 매개변수의 특징은 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 이는 비교적 유량 값이 큰

Table 9. Result of parameter estimation using PF

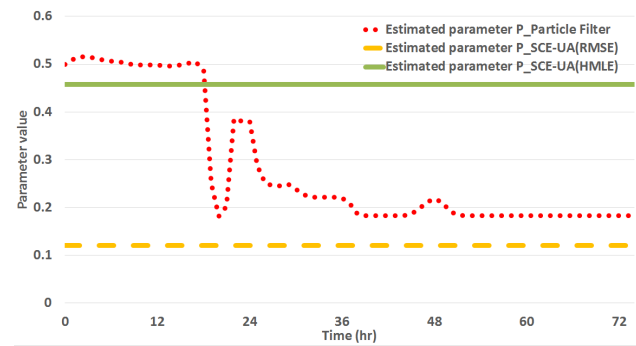
Event	K			P			f			R_{sa}			T_L		
	min	max	average	min	max	average	min	max	average	min	max	average	min	max	average
1	39.89	79.59	68.15	0.18	0.52	0.28	0.22	1.00	0.84	21.55	157.54	59.29	0.00	1.68	0.39
2	36.11	73.55	50.49	0.16	0.61	0.35	0.40	0.90	0.54	50.85	261.81	174.77	0.25	1.80	1.06
3	33.32	78.21	58.52	0.19	0.60	0.33	0.50	1.00	0.90	34.28	188.84	78.66	0.00	1.65	0.25
4	39.89	78.11	58.63	0.10	0.93	0.30	0.24	1.00	0.53	22.39	291.50	162.94	0.00	1.62	0.93
5	15.15	71.55	39.50	0.23	0.62	0.43	0.33	0.89	0.58	59.11	231.26	132.46	0.22	1.51	0.78
6	14.98	66.78	39.35	0.07	0.85	0.26	0.20	1.00	0.34	19.69	162.77	99.77	0.00	3.00	1.85
7	6.51	75.55	61.89	0.17	0.98	0.29	0.22	1.00	0.58	41.33	253.97	151.62	0.12	2.00	1.10
8	31.34	78.09	68.83	0.20	0.72	0.35	0.19	1.00	0.94	11.02	166.73	81.77	0.00	2.87	0.30
9	13.87	69.16	34.10	0.15	0.85	0.39	0.10	1.00	0.30	44.99	257.98	179.03	1.51	3.00	2.17

Table 10. Result of parameter estimation using SCE-UA

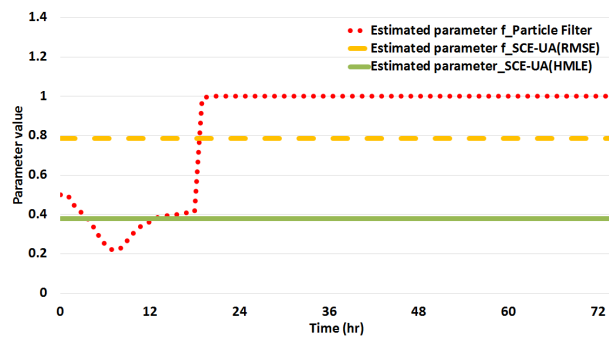
Event	RMSE					HLME				
	K	P	f	R_{sa}	T_L	K	P	f	R_{sa}	T_L
1	80.00	0.12	0.79	286.73	0.26	42.94	0.46	0.38	265.26	0.72
2	79.79	0.11	0.46	248.58	0.54	47.29	0.59	0.48	146.40	0.01
3	79.95	0.17	0.65	43.56	0.44	80.00	0.29	0.80	170.24	0.61
4	13.83	0.34	0.25	230.94	0.84	19.36	0.80	0.22	240.30	2.52
5	79.04	0.15	0.52	196.96	0.99	50.27	0.53	0.30	221.66	5.54
6	18.50	0.23	0.23	82.22	1.75	79.31	0.04	0.26	229.59	0.11
7	80.00	0.16	0.60	297.84	0.96	79.98	0.26	0.44	206.82	0.64
8	24.29	0.41	0.72	145.01	0.64	80.00	0.48	0.79	283.46	0.92
9	67.42	0.05	0.19	104.48	1.01	47.03	0.10	0.20	72.18	1.07



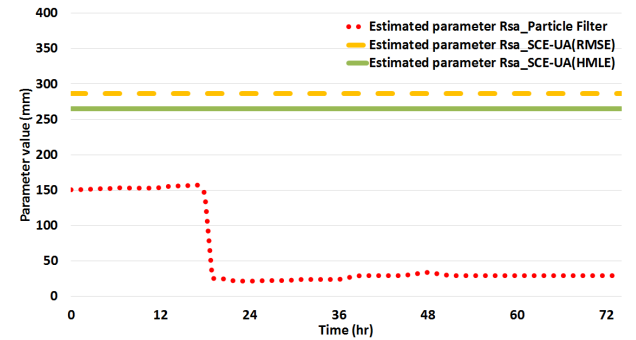
(a) K



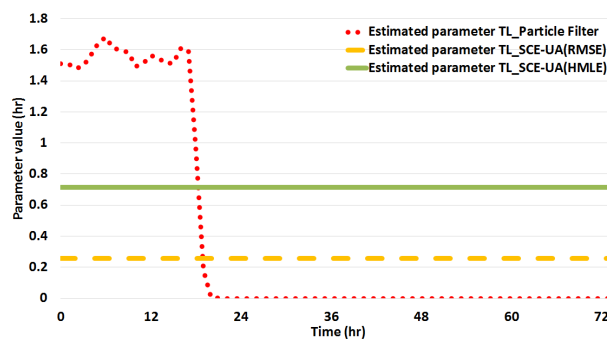
(b) P



(c) f



(d) R_{sa}



(e) T_L

Fig. 8. Comparison of optimal parameters between PF and SCE-UA for Event 1

Event 1에서의 PF 및 SCE-UA으로 추정된 저류함수모형의 최적 매개변수를 나타내고 있으며, SCE-UA는 적용된 사상의 전 기간에 대해 목적함수의 오차를 최소화 하는 최적 매개변수를 제공해주기 때문에 모든 시간에 대해 매개변수가 일정한 반면, PF는 매시간 입력되는 정보에 따라 최적 매개변수가 변동되는 시스템의 동적 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 개념적 집중형 수문모형의 매개변수 보정을 위해 오프라인과 온라인의 매개변수 자동보정기법을 이용하여 매개변수를 추정하고 기법별로 추정된 매개변수를 이용한 수문해석 결과의 비교·검토를 통해 각 기법의 장·단점 분석 및 적용성 평가를 수행하였다.

용담댐 상류 천천 유역을 연구대상지역으로 선정하고, 강우-유출 모의를 위해 저류함수모형을 선정하였다. 또한 매개변수 보정을 위한 자동보정기법으로 오프라인 방법으로는 SCE-UA, 온라인 방법으로는 PF 기법을 선정하여 적용하였으며, 총 9개의 강우사상에 대해 강우-유출 모의를 수행하고, 관측 수문곡선과의 비교·분석을 통해 재현성 평가를 수행하였다.

유출모의 결과를 바탕으로 매개변수 보정기법별 유출해석에 대한 정확도를 비교한 결과, PF 기법에 의한 해석결과가 태풍사상을 포함하는 총 6개의 사상에서 높은 정확도를 나타내는 것으로 분석되었으며, 특히 수문곡선을 저수부와 고수부로 구간분할 하였을 경우와 하지 않았을 경우 모두 안정적으로 유출모의가 가능하였다. 반면에 SCE-UA 기법의 경우, 목적함수의 선택에 따라 최적 매개변수가 변화하여 RMSE를 목적함수로 했을 경우는 고수부, HMLE를 목적함수로 했을 경우 저수부에서 비교적 우수한 재현성을 나타내는 것으로 분석되었다.

PF 기법은 강우 및 관측유량 정보를 이용하여 지속적인 업데이트를 통해 실시간 유출해석 및 예측을 할 수 있다는 확장성을 갖고 있으며, 이용되는 파티클의 숫자의 증가에 따라 더 합리적인 결과를 도출할 수 있다는 추가적인 장점이 존재한다. 다만, Ristic et al. (2004)이 제시한 바와 같이 하나의 파티클을 제외한 다른 파티클들이 아주 작은 가중치 값을 가지게 되는 파티클의 퇴화현상이 발생할 수 있으며, 계산시간의 효율성과 정확도를 고려하여 적정숫자의 파티클을 사용자가 판단해야 한다는 점, 매개변수의 불확실성이 큰 집중형 모형을 적용하는 경우 매개변수의 추정에 있어 사상 또는 유역에 대한

대표적인 매개변수를 제시하기 어렵다는 단점 또한 존재한다.

이러한 대표 매개변수 추정에 있어서는 SCE-UA 기법의 경우도 마찬가지로 사상별 대표 매개변수를 도출할 수 있지만 동일한 유역내에서도 강우의 특성에 따라 도출되는 매개변수가 달리 나타나므로 이를 유역에 대한 최적 매개변수라고 할 수 없다는 제약이 있다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 시간 단계 또는 사상별 최적화된 매개변수를 유역에 대한 최적 매개변수로 변환 또는 전이하기 위한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 토양·지하수 오염방지 기술개발사업(과제번호: GAIA-2014000540005)에서 지원받았습니다.

References

- Arulampalam, M., Maskell, S., Gordon, N., and Clapp, T. (2002). "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking." *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 50, No. 2, pp. 174-188.
- Bae, D. H., Lee, B. J., and Georgakakos, K. P. (2009). "Stochastic continuous storage function model with ensemble kalman filtering (I) : Model development." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 11, pp. 953-961.
- Choi, J. N., Ahn, W. S., Kim, T. G., and Chung, G. H. (2009). "Development of empirical formulas for storage function method." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 9, No. 5, pp. 125-130.
- 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*, KWRA, Vol. 45, No. 11, pp. 1169-1186.
- Doucet, A., Godsill, S., and Andrieu, C. (2000). "On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering." *Statistics and Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 197-208.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. Ph. D. thesis, University of Arizona, Tucson, United States of America.
- 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*, Vol. 76, No. 3, pp. 501-521.
- Duan, Q. Y., Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp.

- 1015-1031.
- Gordon, N. J., Salmond, D. J., and Smith, A. F. M. (1993). "Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation." *IEE Proceedings-F*, Vol. 140, No. 2, pp. 107-113.
- Kim, Y. S. (2013). *Probabilistic Estimation of River Discharge Considering Channel Characteristics Uncertainty with Particle Filters*. Ph. D. thesis, University of Kyoto, Kyoto, Japan.
- Kim, J. R., Kim, J. C., Jeong, D. K., and Kim, J. H. (2006). "The optimal parameter estimation of storage function model based on the dynamic effect ournal title." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 7, pp. 593-603.
- Kim, Y. S., Lee, G. H., An, H. U., and Yang, J. E. (2015). "Uncertainty assessment of soil erosion model using particle filtering." *Journal of Mountain Science*, Vol. 12, No. 4, pp. 828-840.
- Kim, Y. S., Tachikawa, Y., and Shiiba, M. (2012). "Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2d hydraulic model and particle filters." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 6, No. 2, pp. 112-123.
- Kimura, T. (1961). *The flood runoff analysis method by the storage function model*. The Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan.
- Kitagawa, G. (1996), "Monte carlo filter and smoother for nonlinear nongaussian state-space models." *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-25.
- Lee, G. H. (2008). *Assessment of prediction uncertainty due to various sources involved in rainfall-runoff modeling*. Ph. D. thesis, University of Kyoto, Kyoto, Japan.
- Lee, G. H., Tachikawa, Y., and Takara, K. (2007). "Identification of model structural stability through comparison of hydrologic models." *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, No. 51, pp. 49-54.
- Murakami, A., Shuku, T., Nishimura, S., Fujisawa, K., and Nakamura, K. (2013). "Data assimilation using the particle filter for identifying the elasto-plastic material properties of geomaterials." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 37, No. 11, pp. 1642-1669.
- Noh, S. J. (2013). *Sequential monte carlo methods for probabilistic forecasts and uncertainty assessment in hydrologic modeling*. Ph. D. thesis, University of Kyoto, Kyoto, Japan.
- Noh, S. J., Tachikawa, Y., Shiiba, M., and Kim, S. (2011). "Dual state-parameter updating scheme on a conceptual hydrologic model using sequential Monte Carlo filters." *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 67, No. 4, pp. I_1-I_6.
- Park, B. J., Cha, H. S., and Kim, J. H. (1997). "A study on parameters estimation of storage function model using the genetic algorithms." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 4, pp. 347-355.
- Ristic, B., Arulampalam, B., and Gordon, N. J. (2004). "Beyond the kalman filter; Particle filters for tracking applications." *Artech House Pub*, Boston, United States of America., pp. 35-62.
- 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*, KWRA, Vol. 37, No. 11, pp. 969-978.
- Song, J. H., Kim, H. S., Hong I. P., and Kim S. U. (2006). "Parameter calibration of storage function model and flood forecasting (1) Calibration methods and evaluation of simulated flood hydrograph." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 1B, pp. 27-38.
- Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1995). "Model calibration." *Computer models of watershed hydrology*, Edited by Singh, V. P., Water Resources Publications, Highland Ranch, pp. 23-68.