

SCE-UA법을 이용한 수문모형의 매개변수 추정

Calibrating a Rainfall-Runoff Model Using SCE-UA method

강민구*(서울대) · 박승우(서울대) · 박창언(신구대)
Kang, Min Goo · Park, Seung Woo · Park, Chang Eon

Abstract

A global optimization method known as the Shuffled Complex Evolution method from the University of Arizona(SCE-UA) was used for calibrating a Tank model. The model was calibrated with error-free synthetic data, and the SCE-UA method was found to effectively search optimal parameters. Historical data from an agricultural watershed was used to calibrate and validate the model parameters. The simulated results were in good agreement with the observed.

I. 서론

최근 많은 강우-유출모형의 개발로 유역의 수문학적 기작을 수식화함으로써 수문사상을 보다 사실에 가깝게 모의하여 하천유황을 신속하고 정확하게 예측할 수 있는 기능이 증대되고 있다. 이들 강우-유출 모형은 적용하는 목적이나, 모형의 정확도, 적용하고자 하는 유역 조건에 맞는 모형을 선택해야 하는 어려움이 있으며, 또한 선택된 모형은 수문, 기상 및 유역의 지형적 특성을 고려한 보정이 필요하다.

모형의 보정 방법에는 시행착오에 의한 수동보정(manual calibration)과 최적화 기법에 의한 자동보정(automatic calibration)이 있다. 수동보정 방법은 모형의 관측치와 모의치를 비교하면서 모형 및 유역의 특성을 완전히 이해하고 모형 보정에 숙련된 감각을 갖춘 수문기술자에 의해 매개변수를 조정하는 방법이며, 자동 보정 방법은 최적화 기법을 이용하여 특정한 목적함수를 최대, 최소화하여 모형의 매개변수를 결정하는 방법이다. 대부분의 수문모형의 보정에서는 이들 두 방법을 병용하여 실시하고 있다.

자동보정방법은 매개변수의 국부해(local optimum)을 찾는 국부 탐색법(local search method)과 여러 개의 국부해 중에서 한 개의 전체 최적해(global optimum)을 찾는 전체 탐색법(global search method)으로 구별할 수 있으며, 국부 탐색법은 비선형성을 포함하고 있는 강우-유출 모형에 적용할 경우에는 여러개의 국부해가 존재하므로 만족할 만한 결과를 얻지 못한다.

전체 탐색법 중 하나인 SCE-UA법은 개념적 수문모형의 매개변수 보정시 발생하는 문제인 ① 한 개의 수렴영역 보다 많은 유인 영역존재, ② 각각의 영역에 존재하는 다수의 국부 최적치의 존재, ③ 불연속적인 도함수를 갖는 거친 반응표면의 존재, ④ 목적함수에 대한 민감도가 낮은 매개변수의 존재, ⑤ Non-convex 표면의 존재 등의 문제를 해결하기 위해 제안되었다.

SCE-UA법은 Duan 등(1992)에 의해 SIXPAR 모형에 ARS법, multi-start Simplex법과 같이 적용하여 비교된 바 있으며, Sorooshian 등(1993)은 SAC-SMA모형의 매개변수 보정에 SCE-UA법과 multi-start Simplex법을 적용하여 SCE-UA법이 더 효율적으로 전체 최적해

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

(global optimum)을 탐색한다고 언급하였다. 또한, Thian 등(1996)은 SMA모형, NAM모형, Xinanjiang 모형, SMAR모형의 매개변수 보정시 SCE-UA법, multi-start Simplex법, local Simplex법을 적용하여 상호비교한 결과, SCE-UA법이 효율적이며, 다른 방법들 보다 적은 실행횟수로 매개변수의 최적값을 탐색하였다.

따라서, 본 연구에서는 전체탐색법인 SCE-UA법을 개념적 수문모형인 수정 Tank 모형의 자동보정에 적용하였으며, 합성자료(synthetic data)를 이용하여 전체 최적해 탐색 여부를 파악하는 최적화 모형의 검증에 실시하였으며, 실제 유출량 자료를 이용하여 모형을 보정 및 검증하였다.

II. 최적화 모형

1. SCE-UA법

SCE-UA법은 Duan 등(1992)에 의해 제안되었으며, Nelder와 Mead(1965)의 Simplex법, Controlled random search법(Price, 1987), 경쟁적 진화(Holland, 1975) 등의 기존 탐색기법의 장점에 집합체의 혼합(complex shuffling)이라는 새로운 개념을 도입한 혼합형의 전체 탐색법이다.

SCE-UA법은 자연진화의 과정을 최적해 탐색과정에 도입한 것으로, s 개의 선정된 점을 하나의 모집단으로(population)으로 구성하며, 이 모집단은 몇 개의 집합체로 나뉘어 지고 이들 각각은 독립적으로 각기 다른 방향으로 각각의 탐색공간을 찾아서 진화하게 된다. 진화를 한 몇 세대 후에는 이들 집합체들은 혼합되어 재분할과정을 거쳐 재형성된다. 이 과정을 통하여 각각의 집합체에서 독립적으로 얻은 탐색공간에 대한 정보를 공유함으로써 부모세대의 생존가능성을 높이게 된다.

진화과정의 경쟁성을 보장하기 위하여 양호한 부모세대가 불량한 부모세대 보다 자손세대의 생성에 기여할 확률을 높이기 위해서 삼각형 확률분포를 이용하며, Nelder와 Mead(1965)의 Simplex법을 부집합체에 적용하여 진화가 발전된 방향으로 진행되도록 하였으며, 가능해 공간의 탐색 중에 예상치 않은 영역에서 진화가 멈추지 않게 하기 위해서 자손의 개념이 도입되었다. 이것은 자연의 생물학적 진화에서 일어나는 스트레스에 대한 반응인 돌연변이와 유사하다. 각각의 돌연변이는 모집단에 저장된 정보량을 증가시키게 된다. 각각의 새로운 자손은 각각의 부모세대가 바뀌거나 소멸되기 전에 재생산에 기여할 최소한의 기회를 주기 위해 부집합체에 존재하는 불량한 점들을 바꾼다.

SCE-UA법의 경쟁적 진화와 집합체의 혼합은 모집단에 포함된 정보가 효과적이고 완벽하게 전달되도록 하며, 정보가 퇴보하는 것을 방지한다. 이러한 특징은 SCE-UA법이 광범위한 범위에서 전체 최적해를 탐색할 수 있게 하며, 수렴조건이 주어지면 전체 최적해를 찾을 확률을 높인다.

2. 목적함수

강우-유출모형의 매개변수 추정을 위한 일반적인 목적함수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(E) = f[Q^T - R(I, \theta)] \quad (1)$$

여기서, Q^T 는 실측치를 나타내는 벡터이며, R 은 모형에 의한 모의치를 나타내며, I 와 θ 는 모형의 입력변수와 매개변수를 나타낸다.

식 (1)에서 오차의 기준 E와 함수 f는 여러 가지 방법으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 SSR(Sum of Square of Residual)을 고려하였다.

SSR은 모형의 매개변수의 최적화를 위한 목적함수 중, 관측치와 모의치에 대한 편차의 제곱의 합을 최소화하는 목적함수이며 식 (2)와 같다.

$$\text{Min SSR} = \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2 \quad (2)$$

여기서, Q_{oi} 는 시간 i에서 실측 유량, Q_{si} 는 모의 유량을 나타내고, n은 자료수이다.

III. 유출모형의 적용

1. 수정 Tank 모형

수정 Tank 모형(박, 1993)은 Sugawara(1978)의 Tank 모형을 기초로하여 우리나라의 소유역 유출특성에 맞도록 매개변수를 보정하고, 모형의 증발산 성분유역증발산량 추정방법을 도입하여 장기유출해석의 정확도를 향상시키기 위한 모형이다.

수정 Tank 모형은 Fig. 1과 같이 3단 tank와 4개의 유출공을 갖는 것으로 하며, 각 tank의 저류량(S)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = S_{t-1} + U_t - q_t - E_t - D_t \quad (3)$$

여기서, S는 tank의 저류량, U는 강우량, q는 유출량, E는 증발산량, D는 배수량을 나타내며, 하첨자 t와 t-1은 계산일과 계산 전일을 나타낸다.

Fig. 1과 같이 유역의 유출량은 식 (4)와 같다.

$$Q_t = q_{11} + q_{12} + q_2 + q_3 \quad (4)$$

여기서, Q_t 는 t일의 일유출량, q_{11} 과 q_{12} 는 상단 tank의 상부, 하부 유출공으로 부터의 유출량 성분, q_2 는 중간 tank의 유출량 성분, q_3 는 하단 tank의 유출량 성분을 나타내며, 각 유출공의 유출량은 선형으로 가정한다.

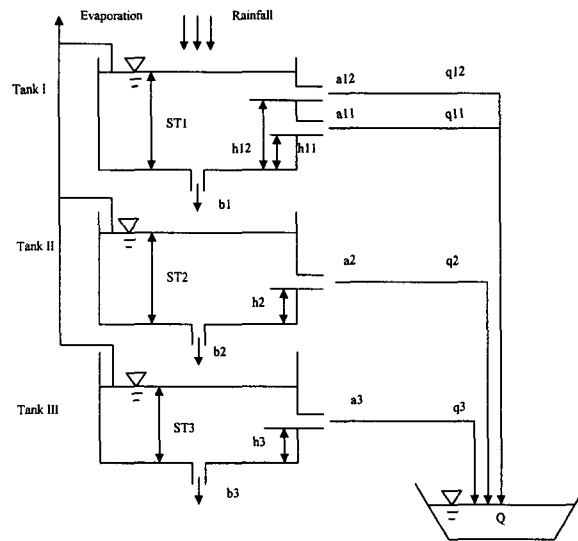


Fig. 1 Tank 모형 모식도

2. 합성보정(Synthetic Calibration)

SCE-UA법의 전체 최적해 탐색 유무를 확인하고, 최적해 탐색에 대한 효율을 평가하기 위하여 오차가 없는 합성자료(synthetic data)를 이용하여 모형을 보정하였다.

산정매개변수의 정확도를 측정하는 값으로 식(5)와 같은 BRM(Average Relative Bias)를 사용하여 나타내었다.

$$BRM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\theta_i - \theta_i^*|}{\theta_i^*} \quad (5)$$

여기서, n은 보정한 매개변수의 수, θ_i 는 매개변수의 추정치, θ_i^* 는 매개변수의 참값을 나타낸다.

Table-1은 합성자료를 모의발생한 매개변수와 매개변수 최적화에 사용된 초기값과 추정된 매개변수를 나타내고 있다. 매개변수 초기값의 BRM은 0.802이었으며, 이에 따른 RMSE는 3.313mm이었으며, SCE-UA법을 이용하여 추정된 매개변수의 BRM은 0.058이었으며, 추정된 매개변수에 의한 RMSE는 0.073mm이었다. 이처럼 실제 매개변수와 추정된 매개변수가 차이를 보이는 것은 모형의 구조 때문에 각 매개변수의 민감도가 차이가 있기 때문이다.

Fig. 2(a)는 합성자료에 대한 추정된 매개변수에 대한 탐색기간 동안 a_{11} 과 a_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 나타낸 것이며, Fig.2(b)는 h_{11} 과 h_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 도시한 것이다. Fig. 2(a), (b)와 같이 전체 최적해 이외에 많은 국부해가 존재하는 것을 알 수 있으며, 모형의 매개변수 중, a_{11} 과 a_{12} 이 민감한 매개변수 이므로, 전체 최적해의 범위가 h_{11} 과 h_{12} 의 것보다 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

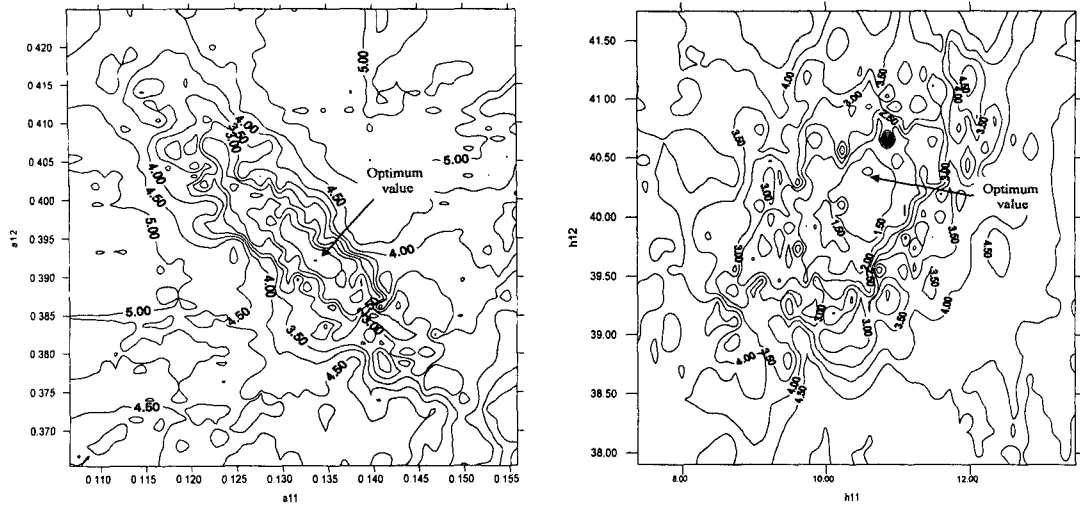
IV. 모형의 보정 및 검정

1. 대상유역 및 수문자료

모형의 적용을 위한 대상유역은 1996년 부터 서울대학교 농공학과에서 시험유역으로 선정하여 수문관측을 시행하고 있는 경기도 화성군 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안유역으로 하였다. 발안유역은 총 6개의 소유역과 2개의 저수지로 구성되어 있으며, 이 중, HS#3 유역의 일유출

Table-1 합성 보정 결과

매개변수	초기값	추정치	참값
a_{11}	0.113	0.134	0.135
a_{12}	0.029	0.392	0.390
a_2	0.062	0.094	0.100
a_3	0.002	0.005	0.005
b_1	0.427	0.139	0.143
b_2	0.067	0.024	0.032
b_3	0.015	0.250	0.210
h_{11}	5.841	10.639	10.803
h_{12}	10.000	40.160	40.320
h_2	10.000	41.398	40.000
RMSE(mm)	3.313	0.073	0.000
BRM	0.802	0.058	0.000



(a) $a_{11} : a_{12}$ (b) $h_{11} : h_{12}$
 Fig. 2 합성 보정시 매개변수 변화에 따른 SSR 등고선도

량 자료를 이용하여 수정 Tank 모형의 매개변수 최적화를 실시하였다.

해당유역의 기상자료는 약 14km 떨어진 수원 기상대의 일 강우자료, 일 증발량 자료를 이용하였다.

2. 모형의 보정 및 검정

수정 Tank 모형의 매개변수 최적화를 위한 초기값은 박(1993)에 의해 제안된 매개변수와 지상인자와의 관계를 이용하였으며, 매개변수의 보정을 위한 일유출량 자료는 1996년 자료를 이용하였다.

Fig. 3-(a)은 보정기간 동안의 일유출량 자료 대한 추정된 매개변수에 대한 탐색기간 동안 a_{11} 과 a_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 나타낸 것이며, Fig. 3-(b)는 h_{11} 과 h_{12} 의 변화에 따른 목적함수 값을 도시한 것이다. Fig. 3과 같이 전체 최적해 이외에 많은 국부해가 존재하는 것을 알 수 있으며, 이들 국부해 중 전체 최적해를 탐색해 내고 있음을 알 수 있다.

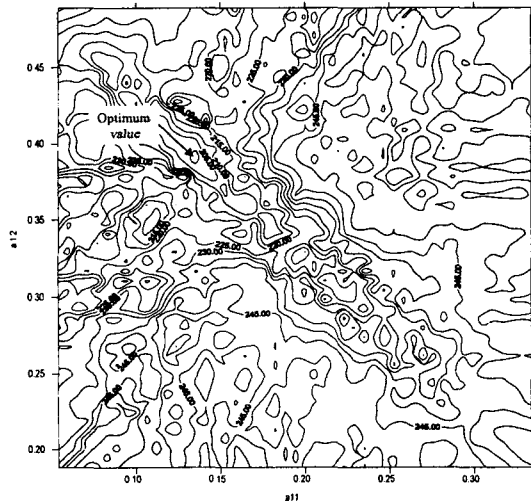
Table-2는 보정기간과 검증기간 동안 추정된 매개변수를 이용하여 모의한 추정치와 실측치간의 RMSE와 상관관계, 상대오차를 비교한 것이며, Fig. 4와 Fig. 5는 보정시와 검정시의 실측치와 추정치를 도식적으로 나타낸 것이다. 보정시와 검정시의 RMSE, 상관계수, 상대오차를 비교해보면, 보정시 보다 검정시의 통계치가 큰 결과를 보이는데, 이는 검정시의 총강우량이 1021.2mm로 보정시의 총강우량인 555.0mm보다 2배 정도 커서 매개변수가 다소 저수시의 유출에 보정되었기 때문이다.

V. 요약 및 결론

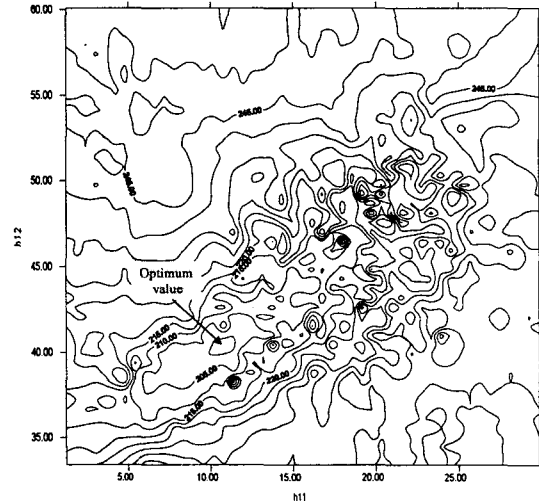
본 연구에서는 합성자료를 이용하여 전체 최적해 탐색 여부 및 효율성을 평가하기 위하여 전체 탐색법인 SCE-UA법의 합성보정을 실시하였으며, 개념적 수문모형인 수정 Tank 모형의 매개변수 자동보정에 적용하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

Table-2. 실측치와 모의치의 비교

구분	기간	총유출량				상대오차 (%)
		실측치 (mm)	모의치 (mm)	RMSE (mm)	R	
보정	1996/5/1 - 10/30	294.2	286.3	1.0	0.98	2.69
검정	1997/5/1 - 8/20	550.7	583.5	4.7	0.94	5.99



(a) $a_{11} : a_{12}$



(b) $h_{11} : h_{12}$

Fig. 3 모형의 보정시 매개변수 변화에 따른 SSR 등고선도

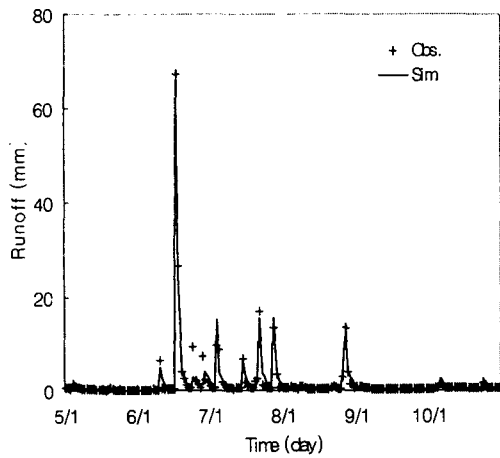


Fig.4 보정시 실측 수문곡선과 모의 수문곡선의 비교

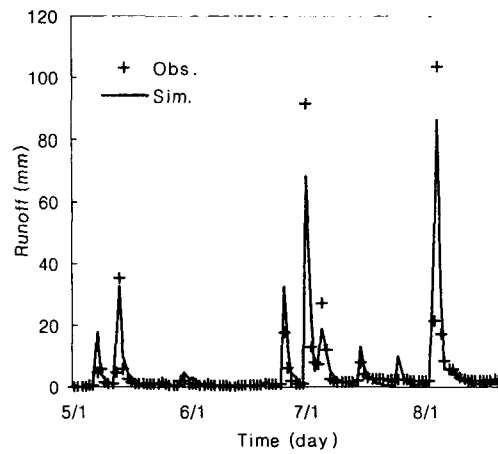


Fig.5 검정시 실측 수문곡선과 모의 수문곡선의 비교

① 합성자료를 이용하여 모형의 매개변수를 SCE-UA법을 이용하여 최적화 한 결과, 여러 개의 국부해 중 전체 최적해를 탐지했으며, 산정매개변수의 정확도를 나타내는 BRM은 0.058이었으며, RMSE는 0.073mm이었다.

② 대상유역의 1996년 일유출량 자료를 이용하여 모형의 매개변수를 보정하고, 1997년 기상자료를 이용하여 일 유출량을 모의하여 실측치와 비교한 결과, 실측치와 모의치가 비교적 일치하는 결과를 보였다.

참고문헌

1. 박봉진, 차형선, 김주환, 1997. 유전자 알고리즘을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구, 한국수자원학회지, 30(4), pp. 347-355.
2. 박승우, 1993. Tank 모형 셀프프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정, 한국수문학회지, 26(3), pp. 47-61.
3. 심순보, 김선구, 고석구, 1992. 최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정, 대한토목학회논문집, 12(3), pp. 127-137.
4. Duan Q., S. Sorooshian, V. K. Gupta, 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, 158, pp. 265-284.
5. Sorooshian, S., V. K. Gupta, 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models : The question of parameter observability and uniqueness, Water Resources Research, 19(1), pp. 260-268.