

# SCE-UA를 이용한 Tank 모형의 최적 매개변수 추정 방안

## Study on Estimation of Optimal Parameters for Tank Model by Using SCE-UA

신상훈\*, 정일원\*\*, 배덕효\*\*\*

Sang Hoon Shin, Il Won Jung, Deg Hyo Bae

---

### 요 지

본 연구에서는 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University Arizona) 매개변수 최적화 기법을 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 추정할 경우 SCE-UA 기법의 적용성을 검토하고 실제 관측유량에 대해 적용하고자 한다. 이를 위해 임의매개변수를 4단 TANK 모형의 유출결과를 관측치로 가정하고 역으로 SCE-UA 기법을 이용하여 전역 최적해 추정 능력을 검증하였다. 또한 실제 유역에 대한 적용성 평가를 위해 소양강 댐 상류 유역을 대상유역으로 선정하였으며 관측유량을 보정과 검증기간으로 나누어 추정된 매개변수의 정확도를 평가하였다. 향후 수문성분 분리 과정을 통해 각 유출 성분별 매개변수 최적화를 수행하고자 하며 이러한 결과는 유출 성분자료가 부족한 우리나라에서 보다 정확한 수자원 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : SCE-UA, Tank 모형, 매개변수 최적화, 목적함수, 유출성분분리

---

### 1. 서론

강우-유출과정을 자연현상에 가깝게 모의하기 위해 개발된 수문모형들은 모형 고유의 매개변수들을 포함하고 있는데 정확한 유출해석을 하기 위해서는 대상유역의 유출특성을 반영하는 유역 고유의 매개변수 추정이 선결되어야 한다. 그러나 대부분의 비선형 수문모형의 매개변수들은 이론적으로 계산해 낼 수 없는 미지의 값들이므로 기지의 강우와 유출 자료를 이용하여 가능한 한 정확하고 신뢰성 있게 추정하여야 한다.

모형의 매개변수를 추정하는 방법에는 시행착오에 의한 수동보정(manual calibration)과 최적화 기법을 사용하는 자동보정(automatic calibration)이 있다. 일반적으로 작은 수의 매개변수 보정은 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교하거나 오차를 최소화하는 시행착오법과 같은 수동보정이 가능하나, 다수의 매개변수의 보정은 매개변수 상호간섭을 고려하기가 매우 어렵기 때문에 신뢰성 있는 매개변수 추정을 위해서는 모형에 대한 지식과 경험이 요구된다. 한편 자동보정 방법은 최적화 기법을 적용하여 목적함수를 최대, 최소화하여 매개변수를 자동으로 추정함으로써 모형 사용자가 다르더라도 동일하고 객관적인 매개변수 추정이 가능하나 관측유량과 모의유량 간의 통계치만을 이용하고 있어 물리적 특성을 가지는 매개변수를 추정하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 전역최적화 기법인 SCE-UA 기법을 개념적 수문모형인 Tank 모형의 자동보정에 적용하였으며, 합성자료(synthetic data)를 이용하여 전역 최적해 탐색 여부를 파악하는 최적화 모형의 검증을 실시하고, 소양강 댐 상류유역의 관측 댐 유입량 자료를 이용하여 모형을

---

\* 정희원 · 세종대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 · E-mail : [hjssh@naver.com](mailto:hjssh@naver.com)

\*\* 정희원 · 포틀랜드 주립대학교 박사후연구원 공학박사 · E-mail : [bobilwon@paran.com](mailto:bobilwon@paran.com)

\*\*\* 정희원 · 세종대학교 물자원연구소 토목환경공학과 교수 · E-mail : [dhbae@sejong.ac.kr](mailto:dhbae@sejong.ac.kr)

보정 및 검정하였다.

## 2. Tank 모형의 개요

Tank 모형은 일본의 Sugawara가 1961년 처음 개발한 모형으로 유역을 여러 개의 저류형 탱크로 가정하여 강우-유출 과정을 모형화 한 것으로 하천유출과 관련된 일종의 개념적 수문모형이다. 일반적으로 장기 유출에 사용되는 4단 Tank 모형은 유역 대수층의 구조에 대응한다는 개념을 가지고 있으며 유출현상은 다음과 같다.

Tank 모형에서 강우는 상부 첫 번째 탱크로 유입되며, 이때 탱크의 유출공의 높이에 따라 유출이 발생한다. 그 후 1단탱크에 남아있던 강우는 증발산이 발생하고 나머지는 2단탱크로 침투하며 이는 1단 탱크의 바닥면에 붙어있는 침투공에 대응한다. 이와 같은 메커니즘으로 4단탱크까지 강우가 전달되어 유출이 발생한다. 4단 Tank 모형의 매개변수는 표 1과 같이 총 16개이며 각 단의 초기 저류고 4개는 유량자료를 이용하여 산정할 수 있고, 수문자료로부터 산정할 수 없는 나머지 매개변수들은 각 변수들이 갖는 물리적 의미와 유역의 특성을 고려하여 산정할 수 있다(건설교통부, 1997).

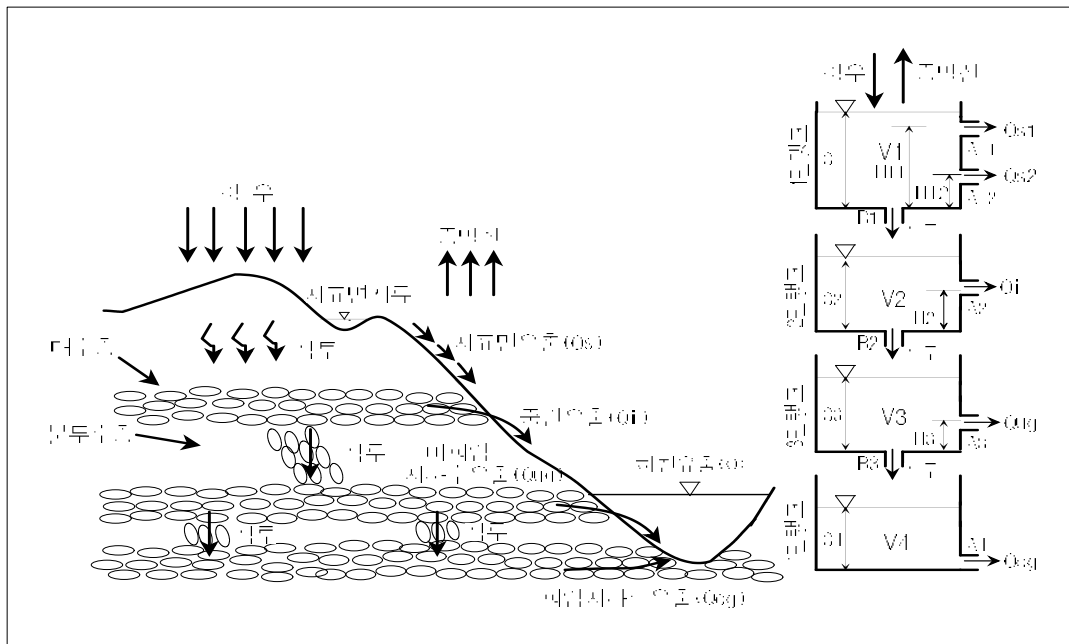


그림 1. Tank 모형의 유출 개념도 (배덕효 등, 2003)

표 1. Tank 모형의 매개변수

구분	1단탱크		2단탱크	3단탱크	4단탱크
유출공계수	상부	A11	A2	A3	A4
	하부	A12			
유출공높이	상부	H11	H2	H3	-
	하부	H12			
침투공계수	B1		B2	B3	-
탱크저류고	TANK1		TANK2	TANK3	TANK4

### 3. 최적화 기법

#### 3.1 SCE-UA법

SCE-UA(Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona) 기법은 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 전역최적화 기법이다. SCE-UA법은 가능해 공간에서 무작위 추출을 통해서 초기 모집단(population)을 형성한다. 적합매개변수 공간은 매개변수들의 최소값과 최대값의 범위를 정의하여 결정되며, 초기 집단의 무작위 추출 후에  $2n+1$ ( $n$ :최적화할 매개변수 개수)개의 점으로 구성된 집합체로 분할된다. 각각의 집합체는 Simplex 알고리즘을 이용하여 목적함수를 최소화하는 방향으로 독립적으로 진화하며, 진화과정 중 얻은 정보를 공유하기 위하여 주기적으로 혼합되어 새로운 집합체를 형성하고, 수렴조건이 만족될 때까지 반복적 모의를 수행하여 전체 매개변수 공간에 대한 최적 해를 찾게 된다.

#### 3.2 목적함수

수문모형거동의 측정치 역할을 하는 목적함수는 관측유출량과 모의유출량간의 근접정도를 나타낸다. 그러나, 특정한 목적함수가 다른 목적함수 보다 모형보정에 더 적절하다고 명확하게 주장할 수 없으며, 목적함수에 따라서는 대상유역의 최적의 매개변수를 찾을 수 없는 경우도 있다. 본 연구에서는 모의값과 관측값의 차의 제곱의 합과 Nash-Sutcliffe 계수를 목적함수로 사용하였다.

식 (1)은 관측치와 모의치의 편차의 제곱의 합을 최소화하는 목적함수를 나타내고 있으며 유량의 제곱의 차원을 가지므로 관측 및 모의된 유량의 첨두값(peak flow)에 중점을 두고 있다.

식 (2)는 Nash-Shutcliffe 계수를 나타내고 있으며 관측치와 모의치의 차이를 관측치의 분산정도에 대해 나타낸 값으로 관측치의 분산 정도가 커지면 상대적으로 관측치와 모의치의 차이가 적어진다. '1'에서 관측치의 분산정도에 대한 관측치와 모의치의 차를 뺀 값으로 '1'에 가까울수록 관측치와 모의치의 차이가 적음을 나타내는 무차원 수이다.

$$SLS = \sum_{i=1}^n (q_i - r_i)^2 \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - r_i)^2}{\sum_{i=1}^n (r_i - r^{\text{mean}})^2} \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 자료의 수,  $q_i$ 는 관측유량,  $r_i$ 는 모의유량,  $r_{\text{mean}}$ 은 관측유량의 평균값이다.

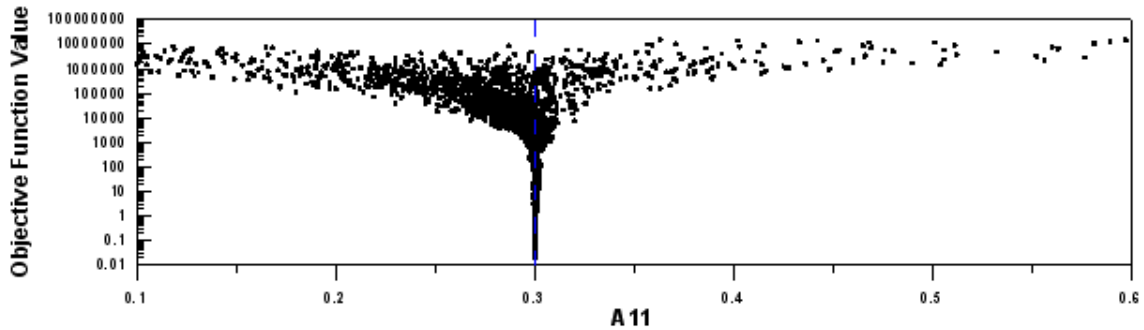
#### 3.3 매개변수 추정 능력 검증

SCE-UA법의 전역 최적해 탐색 유무를 확인하기 위해 자료에 오차가 없는 합성자료를 생성하여 사용하였다. 임의의 매개변수를 갖는 4단 Tank 모형의 유출결과를 관측치로 가정하고 역으로 SCE-UA 기법을 이용하여 전역 최적해 추정 능력을 검증하였다.

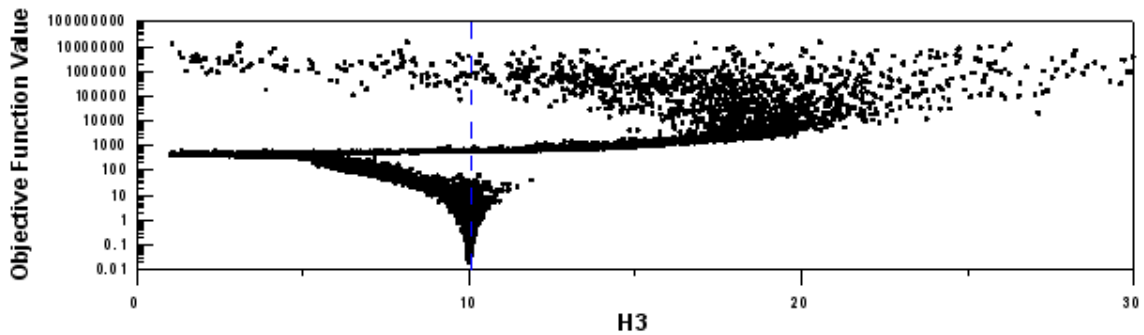
표 2는 SCE-UA법을 통해 추정된 Tank 모형의 매개변수 값을 초기값 및 참값과 비교하여 나타내고 있다. 그림 2는 매개변수 A11와 H3이 최소목적함수값을 가지는 최적매개변수로 수렴되는 과정을 나타내고 있다.

표 2. 매개변수 추정 능력 결과

매개변수	매개변수 초기값	최적화된 매개변수 값	매개변수 참값
X1 (A11)	0.3	0.3	0.3
X2 (A12)	0.5	0.2	0.2
X3 (B1)	0.3	0.2	0.2
X4 (A2)	0.05	0.05	0.05
X5 (B2)	0.05	0.05	0.05
X6 (A3)	0.01	0.01	0.01
X7 (B3)	0.006	0.0082	0.008
X8 (A4)	0.001	0.007	0.007
X9 (H11)	30	39.9992	40
X10 (H12)	15	19.9994	20
X11 (H2)	25	9.9593	10
X12 (H3)	25	9.7064	10



(a) 1단 탱크 상부유출공계수



(b) 3단 탱크 침루공높이

그림 2. 최적매개변수로 수렴되는 과정

#### 4. 모형의 보정 및 검정

실제 유역에 대한 적용성 평가를 위해 소양강 댐 상류 유역을 대상유역으로 선정하였으며 관측 유량을 보정과 검정기간으로 나누어 추정된 매개변수의 정확도를 평가하였다. Tank 모형의 초기 매개변수값은 건설교통부(1997)에서 제안한 방법으로 표 3과 같다.

그림 3과 그림 4는 보정시와 검정시의 실측치와 추정치를 도식적으로 나타낸 것이다.

표 4는 보정시와 검정시의 실측치와 추정치간의 통계적 결과를 나타낸 것이다. 보정기간에 비해 검정기간의 통계치가 낮게 나온 것을 알 수 있다. 검정기간의 소양강댐 유역의 강유량과 댐유입량을 그래프로 도시하여 검토한 결과 강유량과 실측치가 일치하지 않는 부분이 있는 것으로 나타나 관측자료의 신뢰성에 다소 문제가 있다고 판단된다.

표 3. Tank 모형의 초기 매개변수값

구분	1단탱크		2단탱크	3단탱크	4단탱크
	상부	하부			
유출공계수	상부	0.30	0.90	0.07	0.001
	하부	0.50			
유출공높이	상부	40.0	10.0	10.0	0.0
	하부	20.0			
침투공계수	0.30		0.80	0.006	-
탱크저류고	0.0		0.0	30.0	250.0

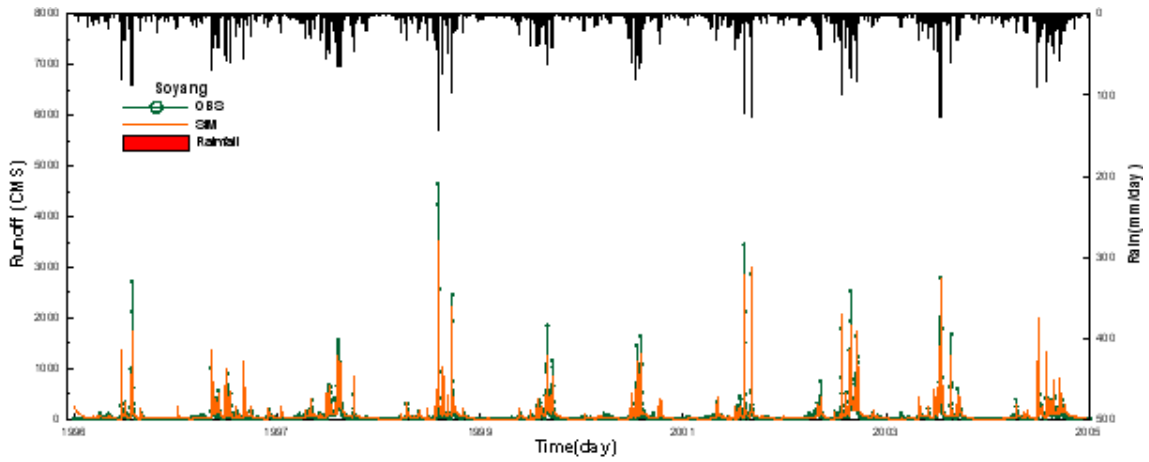


그림 3. 관측수문곡선과 모의수문곡선의 비교(보정기간)

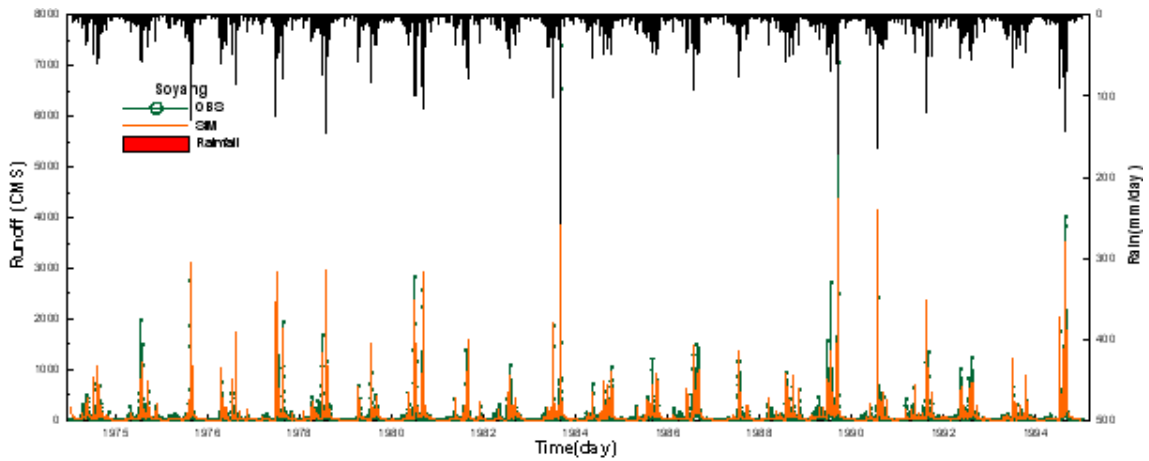


그림 4. 관측수문곡선과 모의수문곡선의 비교(검정기간)

표 4. 관측-모의 일유량 통계분석

구분	기간	VE(%)	ME	CORR-C	R <sup>2</sup>
보정	1974년-1995년	6.59	0.80	0.89	0.80
검정	1996년-2005년	0.91	0.73	0.85	0.73

## 5. 결과

본 연구에서는 SCE-UA 매개변수 최적화 기법을 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 추정할 경우 SCE-UA 기법의 적용성을 검토하고 실제 관측유량에 대해 적용하였다. 결과적으로 SCE-UA 기법은 전역 최적해를 찾지만 물리적 의미를 가지는 매개변수를 추정하기 보다는 관측유량과 모의유량의 통계적 근사치를 추정하는 한계를 가지고 있었다. 향후 수문성분 분리 과정을 통해 각 유출 성분별 매개변수 최적화를 수행하고자 하며 이러한 결과는 유출 성분자료가 부족한 우리나라에서 보다 정확한 수자원 관리를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부(1997), 수자원관리기법개발 연구조사.
2. 배덕효, 정일원, 강태호, 노준우(2003). "유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정.", 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 36(3), pp. 423-436.
3. Duan Q., Sorooshin, S. and Gupta, V.K. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." Water Resources Research, Vol. 28(4), pp. 1015-1031.
4. Nelder J. A and Mead R. (1965). "A simplex method for function minimization." Computer Journal, 7(4), 308-313.