

SCE-UA법을 이용한 수문모형의 매개변수 추정

○강민구* · 박승우** · 임상준*

1. 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.

또한, 최근의 수문 및 수질 모형들은 단지 유역의 유출량만을 모의하는 것이 아니라, 하천수의 화학적 성분, 유사량, 열흐름 등과 같은 다양한 항목들을 모의할 수 있게 구성이 되고 있다. 이러한 모형을 보정할 때 단일 목적함수를 사용하면 최적의 매개변수를 탐색하는데 어려움이 있으므로 여러 개의 목적함수로 구성되는 다목적 최적화기법이 필요하다.

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

따라서, 본 연구에서는 전체탐색법인 SCE-UA법을 수정 Tank 모형의 자동보정에 적용하였으며, 합성자료(synthetic data)와 여러 가지 목적함수를 사용하여 전체 최적해 탐색 여부를 파악하는 최적화 모형의 검증을 실시하였으며, 실제 유역의 유출량 자료를 이용한 모형의 보정 및 검증을 통해서 수문모형의 매개변수 추정에 대한 SCE-UA법의 적용성을 평가하였다.

2. 최적화 모형

1. SCE-UA법

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 Duan 등(1992)에 의해 제안되었다.

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 농업생명과학대학 교수

SCE-UA법은 Simplex법, Controlled random search법, 경쟁적 진화 등과 같은 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 이들은 독립적으로 서로 다른 방향으로 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 부집합체의 진화에 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. 이러한 개념은 모집단에 저장된 정보량을 증가시키게 되며, 새로운 자손들은 부모세대가 바뀌거나 소멸되기 전에 재생산에 기여할 최소한의 기회를 주기 위해 부집합체에 존재하는 불량한 점들을 대체한다.

SCE-UA법의 경쟁적 진화와 집합체의 혼합은 모집단에 포함된 정보가 효과적이고 완벽하게 전달되도록 하고, 정보가 퇴보하는 것을 방지하게 되며, 따라서, 광범위한 범위에서 전체 최적해를 탐색할 수 있으며, 수렴조건이 주어지면 전체 최적해를 찾을 확률을 높이게 된다.

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 E 와 함수 f 는 여러 가지 방법으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 표 1과 같이 12개의 목적함수를 고려하였다.

3. 유출모형의 적용

1. 수정 Tank 모형

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

수정 Tank 모형은 그림 1과 같이 3단 tank와 4개의 유출공을 갖는 것으로 하며, 각 유출공의 유출량은 선형으로 가정하였으며, 이들 유출공의 유출량합이 유역의 유출량으로 계산한다.

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.

산정된 매개변수의 정확도를 측정하는 값으로 식(2)와 같은 BRM(Average Relative Bias)를 사용하여 나타내었다.

$$BRM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\theta_i - \theta_i^*|}{\theta_i^*} \quad (2)$$

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

표 2는 합성자료를 모의발생한 매개변수와 매개변수 최적화에 사용된 초기값, 목적함수에 따른 추정된 매개변수, BRM을 나타내고 있다. 표 2에서와 같이 목적함수로 ABSERR을 사용하였을 때 BRM이 0으로 합성유량을 생성했던 매개변수 참값을 탐색하였으며, HMLE, DRMS, NS의 경우에는 참값에 근사한 결과를 보였다. 이처럼 실제 매개변수와 추정된 매개변수가 차이를 보이는 것은 모형의 구조 때문에 각 매개변수의 민감도가 차이가 있기 때문으로 판단된다.

표 1. SCR-UA법의 적용을 위한 목적함수

목적함수	식
DRMS(Daily Root Mean Squared Error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad DRMS(\theta) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i^{obs} - q_i^{sim}(\theta))^2}$
HMLE(Heteroscedastic Maximum Likelihood Error)	$\underset{\theta, \lambda}{\text{Minimize}} \quad HMLE(\theta, \lambda) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i(\lambda) (q_i^{sim}(\theta) - q_i^{obs})^2}{(\prod w_i(\lambda))^{1/n}}$
TMVOL(Total Mean Monthly Volume Squared Error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad TMVOL(\theta) = \sum_{i=1}^{nmonth} [\frac{1}{nday(i)} \sum_{j=1}^{nday(i)} (q_i^{sim}(\theta) - q_i^{obs})^2]$
ABSERR(Mean Absolute Error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad ABSERR(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i^{sim}(\theta) - q_i^{obs} $
ABSMAX(Maximum Absolute Error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad ABSMAX(\theta) = \underset{1 \leq t \leq n}{\text{Max}} q_t^{sim}(\theta) - q_t^{obs} $
NS(Nash-Sutcliffe Measure)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad NS(\theta) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_i^{sim}(\theta) - q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (q_i^{obs} - \bar{q}^{obs})^2}$
BIAS(mean daily error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad BLAS(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i^{obs} - q_i^{sim}(\theta))$
PDIFF(Peak Difference)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad PDIFF(\theta) = \underset{1 \leq t \leq n}{\text{Max}} q_t^{obs} - \underset{1 \leq t \leq n}{\text{Max}} q_t^{sim}(\theta)$
RCOEF(First Lag Autocorrelation)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad RCOEF(\theta) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i^{obs} - q_i^{sim}(\theta))(q_{i+1}^{obs} - q_{i+1}^{sim}(\theta))}{\sigma^{obs} \sigma^{sim}}$
NSC(Number of Sign Changes)	$\underset{\theta}{\text{Maximize}} \quad NSC(\theta) = \text{Number of times the sequence of residuals changes sign}$
VE(Volume Error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad VE(\theta) = \frac{(\sum_{i=1}^n q_i^{sim}(\theta) - \sum_{i=1}^n q_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n q_i^{obs}}$
RE(Relative Error)	$\underset{\theta}{\text{Minimize}} \quad RE(\theta) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i^{sim}(\theta) - q_i^{obs}}{q_i^{obs}} \right)^2$

표 2 합성 보정 결과

매개 변수	참값	초기값	목적함수												
			HMLE	DRMS	TMVOL	ABS ERR	ABS MAX	NS	BIAS	PDIFF	RCOEF	NSC	VE	RE	
a ₁₁	0.135	0.113	0.135	0.135	0.192	0.135	0.136	0.135	0.303	0.314	0.333	0.289	0.303	0.120	
a ₁₂	0.390	0.029	0.390	0.390	0.175	0.390	0.389	0.390	0.275	0.227	0.285	0.406	0.275	0.394	
a ₂	0.100	0.062	0.098	0.098	0.084	0.100	0.097	0.098	0.365	0.215	0.209	0.294	0.365	0.095	
a ₃	0.005	0.0001	0.005	0.005	0.009	0.005	0.010	0.005	0.006	0.005	0.005	0.004	0.006	0.005	
b ₁	0.143	0.427	0.142	0.142	0.107	0.143	0.139	0.142	0.213	0.252	0.240	0.428	0.213	0.150	
b ₂	0.032	0.067	0.030	0.030	0.037	0.032	0.025	0.030	0.026	0.040	0.048	0.057	0.026	0.035	
b ₃	0.0015	0.0001	0.0016	0.0016	0.0058	0.0015	0.0242	0.0016	0.0462	0.0456	0.0376	0.0015	0.0462	0.0034	
h ₁₁	10.803	0.5841	10.882	10.884	16.375	10.803	11.734	10.884	26.085	28.380	22.631	0.005	26.085	10.871	
h ₁₂	40.320	10.000	40.32	40.33	39.84	40.32	40.45	40.33	63.97	57.03	72.72	74.74	63.97	41.45	
h ₂	40.000	10.000	40.42	40.43	38.31	40.00	42.79	40.43	38.96	65.46	44.90	35.62	38.96	41.22	
BRM	0.000	0.890	0.023	0.024	0.572	0.000	1.655	0.024	3.685	3.600	3.012	0.800	3.685	0.171	

그림 2는 합성자료를 사용하여 매개변수를 탐색할 때, 다른 매개변수를 고정 시키고 a₁₁과 a₁₂만 탐색할 때 반응표면의 목적함수값을 나타낸 것이며, 최적해를 갖는 a₁₁과 a₁₂의 범위가 전체 최적해를 탐색하기 어려운 긴 계곡형태가 아닌 원형의 형태를 나타내고 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 일유출량 자료를 이용하여 수정 Tank 모형의 매개변수 최적화를 실시하였다.

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 5/1~10/31자료를 사용하였으며, 검정을 위한 일유출량 자료는 1997년 5/1~8/20 자료를 이용하였다.

표 3은 표 1의 목적함수에 대한 매개변수를 이용하여 모의한 보정기간과 검증기간의 추정치와 실측치간의 RMSE와 상관관계, 상대오차를 비교한 것이며, 그림 4와 그림 5는 ABSERR 목적함수를 사용하여 추정된 매개변수로 모의한 보정시와 검정시의 추정치와 실측치를 도식적으로 나타낸 것이다. 보정시와 검정시의 RMSE, 상관계수, 상대오차를 비교해보면, 목적함수에 따라 상이한 결과를 보이는데, HMLE, DRMS, ABSERR 목적함수를 사용하여 매개변수를 보정한 경우가 다른 목적함수

보다 다소 양호한 결과를 보였다.

사용된 목적함수 모두다 보정시 보다 검정시의 통계치가 큰 결과를 보이는데, 이는 검정시의 총강우량이 1021.2mm로 보정시의 총강우량인 555.0mm보다 2배 정도 커서 매개변수가 다소 저수시의 유출에 보정되었기 때문으로 판단된다

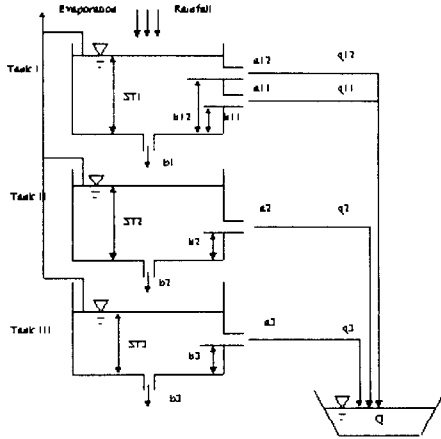


그림 1 수정 Tank 모형 모식도

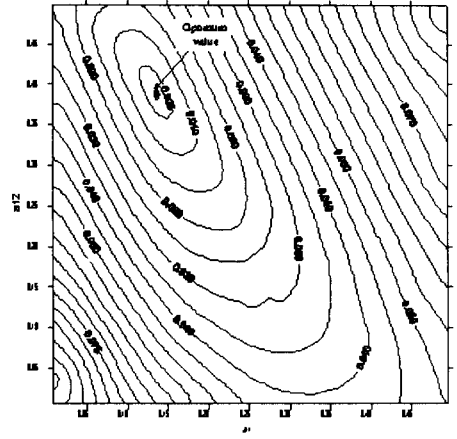


그림 2 매개변수 변화에 따른 등목적함수도

표 3 실측치와 모의치의 비교

목적함수	보정					검정				
	실측치 (mm)	모의치 (mm)	RMSE (mm)	R	상대오차 (%)	실측치 (mm)	모의치 (mm)	RMSE (mm)	R	상대오차 (%)
HMLE	294.2	273.4	1.0	0.98	-7.06	550.7	538.8	4.8	0.94	-2.17
DRMS	294.2	274.7	1.0	0.98	-6.62	550.7	540.4	4.8	0.94	-1.87
TMVOL	294.2	306.3	1.8	0.96	4.13	550.7	610.5	3.5	0.97	10.85
ABSERR	294.2	269.0	1.1	0.98	-8.56	550.7	538.9	4.8	0.94	-2.14
ABSMAX	294.2	398.9	1.6	0.96	35.57	550.7	540.5	4.8	0.94	-1.87
NS	294.2	274.7	1.0	0.98	-6.61	550.7	540.4	4.8	0.94	-1.87
BIAS	294.2	305.0	2.1	0.96	3.65	550.7	599.3	5.1	0.96	8.81
PDIFF	294.2	506.0	2.6	0.92	72.00	550.7	828.1	5.4	0.94	50.37
RCOEFF	294.2	324.2	1.6	0.96	10.20	550.7	609.1	4.5	0.94	10.59
NSC	294.2	656.5	8.9	0.87	123.1	550.7	1047.4	15.5	0.82	90.19
VE	294.2	305.0	2.1	0.96	3.65	550.7	599.3	5.1	0.96	8.81
RE	294.2	171.9	3.2	0.97	-41.55	550.7	327.4	8.6	0.91	-40.55

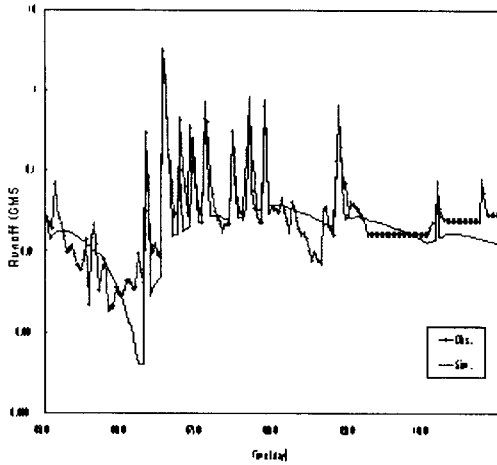


그림 4 보정시 실측 수문곡선과 모의 수문곡선의 비교

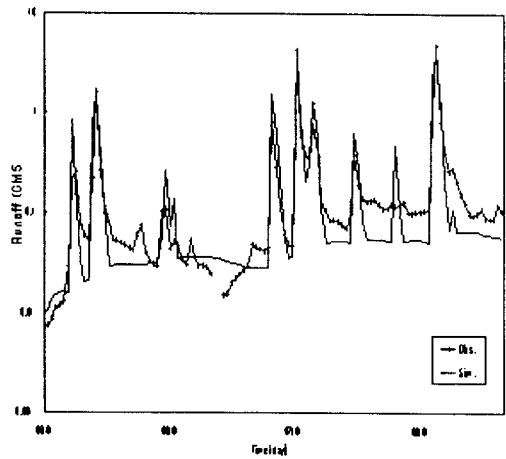


그림 5 검정시 실측 수문곡선과 모의 수문곡선의 비교

V. 요약 및 결론

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

① 합성자료를 이용하여 모형의 매개변수를 SCE-UA법을 이용하여 최적화 한 결과, 목적함수에 따라 서로 다른 결과를 나타냈으며, ABSERR를 목적함수로 사용했을 때, 합성 유량 생성시 사용했던 매개변수 참값을 탐색하였다.

② 선정된 목적함수를 이용하여 대상유역의 1996년 일유출량 자료를 이용하여 모형의 매개변수를 보정하고, 1997년 기상자료를 이용하여 일 유출량을 모의하여 실측치와 비교한 결과, 목적함수에 따라 상이한 결과를 나타냈으며, HMLE, DRMS, ABSERR 목적함수를 사용하여 모형의 매개변수를 보정했을 때 다른 목적함수 보다 양호한 결과를 나타냈다.

참고문헌

1. 박승우, 1993. Tank 모형 셀프프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정, 한국수문학회지, 26(3), pp. 47-61.
2. 심순보, 김선구, 고석구, 1992. 최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정, 대한토목학회 논문집, 12(3), pp. 127-137.
3. Yapo P. O., Gupta H. V, and Sorooshian, S., 1998, Multiple-objective global optimization for hydrologic models, Journal of Hydrology, 204, pp. 83-97.