

# 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구

○강신욱<sup>1)</sup>, 이동률<sup>2)</sup>, 이상호<sup>3)</sup>

## 1. 서론

지난 수십년 동안 강우를 상호연결된 수학적 함수를 통해 유량으로 변환하는 주요 수단으로 개념적 강우-유출 모형(conceptual rainfall-runoff model)이 개발되어 왔다. 우리나라에서는 SAC-SMA 모형, SSARR 모형, Topmodel, 탱크모형 등을 사용해왔으며, 그 중 탱크모형을 가장 많이 사용하고 있다. 탱크의 구조는 Sugawara(1984)의 최초 개발 이래로 여러 가지 형태로 변화되어 사용되어 왔으며, 표준 4단 탱크를 발전시켜 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형을 개발하였다. 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크모형은 17개의 매개변수와 5개의 초기상태변수를 가진다. 따라서 표준 4단 탱크보다 매개변수의 추정이 어렵고, 우리나라에서는 그 적용사례가 없다.

본 연구에서는 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크모형에 SCE-UA 전역최적화 기법을 사용하여 다음과 같은 사항들을 분석하였다. 이때 사용한 자료는 대청댐 유역의 21년 자료와 대전기상청의 기상자료이다.

- 1) 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형의 매개변수 추정에 어떠한 목적함수가 적합한가?
- 2) 모형의 매개변수 추정을 위해 적절한 자료기간은 어느 정도이며, 어떠한 해를 포함하는 것이 좋은가?
- 3) 일유출 모의의 주요한 입력인자인 증발산량의 산정방법에 따라 모형 보정에 어떠한 영향을 미치는가?

## 2. 대상유역 및 자료수집

토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형을 적용하기 위해 대상유역을 선정하였다. 우선 자연하천 지점의 유출 자료는 일반적으로 저수부에서 매년 수위-유량 관계식이 변화하여 일관성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 댐지점의 유역을 선정하기로 하였다. 한강유역의 소양강댐, 화천댐은 용설의 영향으로 제외하였고, 낙동강 유역의 댐들은 자료기간이 짧거나 자료가 불량하다. 대청댐 유역은 1981년부터 자료가 존재하고 용설의 영향이 크지 않아 본 연구의 대상 유역으로 선정하였다. 대청댐 유역은 한국수자원공사에서 관리하고 있으며, 수위관측소 10개소, 유량관측소 24개소가 있다(그림 1).

대청댐 유역의 강우량과 유입량 자료는 한국수자원공사에서 취득하였다. 1981년부터 2001년의 강우량과 유입량을 분석하였다(그림 2). 21년 간의 평균강우량은 1159 mm이고, 평균유입량은 643 mm로 유출률은 약 56%이었다. 평균강우량 이상인 해는 11개년이며, 최대강우량은 1985년에 1627 mm, 가장 가물었던 해는 1994년에 695 mm이었다.

유출모형의 장기적인 연속모의는 잠재증발산량 또는 실제 증발량이 주요 입력자료이다. 연구에 필요한 증발계 증발량과 기상자료는 기상청으로부터 수집하였다.

## 3. 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형

토양수분 저류구조를 가진 탱크모형은 표준 4단 탱크의 구조와 유사하다. 강우  $P$ 가 1단 탱크에 유입되고, 증발량  $E$ 가 1단 탱크에서 감해진다. 그리고 각 탱크에 저류된 물은 측면의 유출공을 통해 유출되거나 하부탱크로 침투된다. 각 탱크의 유출공을 통해 유출된 물은 성분별로 합해져서 유량으로 환산된다. 1단 탱크의 토양수분 저류구조를 개략적으로 설명하면 다음과 같다.

1) 토양에 저류되는 저류량은 1차 토양수분 저류량(primary soil moisture storage)  $X_P$ 과 2차 토양수분 저류량(secondary soil moisture storage)  $X_S$ 로 구성되며, 각각의 최대저류량은  $S_1$ 과  $S_2$ 이다.

2) 1단 탱크의 저류량  $X_A$ 는  $X_P$ 와 1단 탱크의 자유수  $X_F$ 로 이루어지며, 강우가 더해지고, 증발량이 감해진다. 이때  $X_A$ 가  $S_1$ 보다 작을 때는  $X_A$ 는  $X_P$ 가 되고 자유수는 '0'이 된다.  $X_A$ 가  $S_1$ 보다 클 때는  $X_P$ 가 포화되

1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원, 공학석사 (E-mail : sukang@kict.re.kr)

2) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원, 공학박사 (E-mail : dryi@kict.re.kr)

3) 부경대학교 건설공학부 부교수, 공학박사 (E-mail : peterlee@pknu.ac.kr)

고, 포화되고 남은 양은 자유수가 된다.

$$X_A \leq S_1 \text{ 이면, } X_P = X_A, X_F = 0 \quad (1)$$

$$X_A > S_1 \text{ 이면, } X_P = S_1, X_F = X_A - S_1 \quad (2)$$

3)  $X_P$ 가 포화되지 않았고 하단 탱크에 자유수가 존재한다면, 하단 탱크에서 상부탱크로  $T_1$ 의 양만큼 공급된다.  $T_1$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_1 = K_1(1 - X_P/S_1) \quad (3)$$

4) 1차 토양수분 저류량과 2차 토양수분 저류량 사이에서도 수분교환이 존재하며,  $T_2$ 로 나타낼 수 있다. 이때  $T_2$ 가 양수인 경우는 1차 토양수분 저류량에서 2차 토양수분 저류량으로 이동을 나타내며, 음수인 경우는 그 반대를 나타낸다.

$$T_2 = K_2(X_P/S_1 - X_S/S_2) \quad (4)$$

각 탱크의 초기 저류고는 모형의 계산 개시일을 1월 1일을 기준으로 계산 시작 전일(12월 31일)의 관측 유량을 구하여 이 유량을 3, 4단에서 각각 40%, 60%가 유출된다고 가정하고, 3, 4단 유출공의 높이와 유출공 계수를 가정하였다. 이와 같은 계산에 의해 구해진 초기저류고는 1, 2단 탱크는 0 mm, 3단 탱크는 50 mm, 4단 탱크는 423 mm이다. 그리고 다른 매개변수는 Sugawara(1986)의 문헌을 참고하였다. 토양수분 저류 탱크의 초기저류고는 240 mm로 하였고, 최대저류량  $S_1$ 과  $S_2$ 는 각각 250 mm, 40 mm로 하였다.

#### 4. SCE-UA 최적화 방법 및 목적함수

SCE 알고리즘(Duan, 1991)은 미국 국립 기상국의 NWSRFS(National Weather Service River Forecasting System)의 보정모형 중 하나이며, 최적해를 탐색하기 위해 4가지 중요한 개념을 포함하고 있다(Duan et al., 1994): 1)확정론적 및 확률론적 접근의 결합, 2)컴플렉스의 구조적 진화, 3)경쟁 진화(competitive evolution), 4)컴플렉스 혼합(complex shuffling). SCE 알고리즘은 초기에 해가 존재하는 전체 매개변수 공간에서 표본을 생성하고 컴플렉스들로 분할한다. 각 컴플렉스는 downhill simplex 알고리즘(Nelder와 Mead, 1965)을 사용하여 독립적으로 진화된다. 진화를 거친 컴플렉스들은 다시 혼합되고, 새로운 컴플렉스들이 생성된다. 진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다. 자세한 과정은 Duan(1991)의 연구를 참고할 수 있다.

본 연구에 사용한 목적함수는 식 (5)와 같이 Sugawara(1986)가 사용한 형태와 식 (6)~(8)과 같이 Sefe와 Boughton(1982)가 사용한 형태이다.

$$\text{Type 1 : } \text{Min. } \sum_{i=1}^N \frac{|q_i^{sim} - q_i^{obs}|}{q_i^{obs}} \quad (5), \quad \text{Type 2 : } \text{Min. } \sum_{i=1}^N |q_i^{obs} - q_i^{sim}| \quad (6)$$

$$\text{Type 3 : } \text{Min. } \sum_{i=1}^N \left( \frac{q_i^{obs} - q_i^{sim}}{q_i^{obs}} \right)^2 \quad (7), \quad \text{Type 4 : } \text{Min. } \sum_{i=1}^N (\sqrt{q_i^{obs}} - \sqrt{q_i^{sim}})^2 \quad (8)$$

#### 5. 자료기간에 따른 매개변수 영향 검토

보정 자료기간에 따른 영향을 검토하기 위해 1981~2001년의 자료를 1, 3, 5, 8, 10년 연속하게 자료쌍을 생성하였다. 생성된 자료는 각각 21, 19, 17, 14, 12개이며, 앞서 제시한 4개의 목적함수를 사용하여 332회의 보정을 수행하였다.

각 자료쌍으로 결정된 매개변수를 사용하여 21년 간의 자료로 모의를 수행하였다. 모의 수행 결과를 평가하기 위해 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency) 지표를 사용하였다. NSE는 식 (9)와 같으며, 관측값의 표본분산에 대한 오차분산의 상대적인 크기를 나타낸다. NSE의 최적값은 '1'이다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_i^{sim} - q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (q_i^{obs} - q^{mean})^2} \quad (9)$$

여기서,  $N$ 은 자료의 수,  $q_i^{obs}$ 는 관측유량,  $q_i^{sim}$ 은 모의유량,  $q^{mean}$ 은 관측유량의 평균값이다.

각 자료기간에 따른 목적함수별 수행결과를 California 도시 공식(plotting formula)에 의해 경험적 확률분포함수(empirical cumulative distribution function) 형태로 나타내었다(그림 4). 그림에서 경사가 증가하는 것은 평가지표의 민감도(sensitivity)도 감소하는 것을 나타내며, cdf 분포가 오른쪽으로 이동되는 것은 모형의 평가지표가 향상되는 것을 의미한다. 그림 4에서 살펴보면 Type 3과 같은 목적함수 형태를 제외하고 자료기간이 증가할수록 좋은 결과를 보였으나, 목적함수 Type 3(그림 4.c)은 오히려 1년 자료가 좋은 결과를 보였다. 보정자료의 기간에 대해 살펴보면 Type 1 목적함수에 대해서는 5년 이상, Type 2에 대해서는 3년 이상, Type 4에 대해서는 3년 이상의 자료가 매개변수 추정에 적당한 것으로 나타났다. 그리고 Type 4 목적함수는

3, 5, 8, 10년 자료기간에 대한 보정결과가 매우 유사한 형태를 보였다. 이와 같은 경험적 CDF 곡선과 더불어 모의 수행시 4단 탱크의 최종저류고(2001년 12월 31일의 저류고)를 표 1에 나타내었다. 표에서 보면 목적함수의 형태가 Type 3인 경우는 마지막 저류고는 초기저류고보다 아주 큰 값을 나타내었다. 목적함수가 Type 4의 경우는 매우 양호한 값을 보였다. 1981년의 강우량 1106 mm와 2001년의 강우량 772 mm를 참고하여 생각하면 4단 탱크의 초기저류량 423 mm는 2001년에는 이보다 적어야 함을 알 수 있고, 강우량과 저류량이 비례한다고 가정하면 295 mm 정도이다. 표 1에서 이와 비슷한 저류량을 살펴보면 84-86, 90-92, 92-94, 93-95, 97-99, 98-00년의 자료로 보정된 결과가 가장 유사하였다. 이 기간동안의 강우량을 살펴보면 평균강우량 이상인 해와 가뭄이 있었던 해를 포함하고 있다. 그 중 93-95년의 자료로 모형을 검정한 결과를 그림 5에 나타내었고 관측유량과 아주 근접하는 결과를 보였다. NSE 평가지표와 4단 탱크의 최종저류고를 미루어 볼 때 대청댐 유역에 대해서는 평균강우량 이상인 해와 가뭄이 있었던 해를 포함하는 3년 이상의 자료가 매개변수 추정에 적당한 것으로 판단된다.

## 6. 증발산량 산정 방법에 따른 매개변수 영향 검토

증발산량 산정 방법에 따라 매개변수 추정에 어떤 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 흔히 사용하는 2가지 방법으로 증발산량을 산정하였다. 사용한 방법으로는 소형증발계 증발량에 계수를 곱하여 사용하는 방법과 Penman 방법에 의한 것이다. 각각의 증발산량을 산정하고 앞 절에서 결정된 기간 중 93-95년의 자료를 사용하여 매개변수 추정을 하고 검증하였다. 결과는 표 2와 같다. 표에서 보는 바와 같이 장기유출 모형의 증발산량 산정방법으로 두 방법 모두 유사한 결과를 보였으나, Penman 방법을 사용하는 것보다 소형증발계의 증발량을 사용하여 모의하는 것이 근소하게 나은 결과를 보였다.

표 2. 증발산량 산정방법에 따른 비교

방 법	NSE	유출비	결정계수	평균유량 (관측:84.3) m <sup>3</sup> /s	표본분산 (관측:249) m <sup>3</sup> /s	최종저류량 mm
관측증발량	0.765	0.894	0.790	75.4	197	238
Penman	0.759	0.856	0.786	72.1	189	37.1

## 7. 결론

우리나라에서는 사용한 사례가 없는 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크모형에 SCE-UA 전역최적화 기법을 사용하여 목적함수에 따라 보정자료 기간을 달리하여 332회의 보정을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형의 매개변수 추정에 적합한 목적함수는 Type 4의 형태이었다.
- 2) 대청댐 유역의 탱크모형의 매개변수 추정을 위해 적절한 자료기간은 3년 정도이었으며, 평균강우량 이상인 해와 가뭄이 있었던 해를 포함하는 것이 좋은 결과를 보였다.
- 3) 장기 일유출 모의의 주요한 입력자료인 증발산량은 두 방법 모두 유사하였으나, 소형증발계 증발량을 사용하는 방법이 근소하게 나은 결과를 보였다.

## 8. 참고문헌

- Duan, Q. (1991). *A Global Optimization Strategy for Efficient and Effective Calibration of Hydrologic Models*, Ph.D. dissertation, Dept. of Hydrol. and Water Resour., Univ. of Arizona, Tucson.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed model." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284.
- Nelder, J.A. and Mead, R. (1965). "A simplex method for function minimization." *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313.
- Sefe, F.T. and W.C. Boughton (1982). "Variation of model parameter values and sensitivity with type of objective function." *Journal of Hydrology (NZ)*, Vol 21(1), pp. 117-132.
- Sugawara M., Watanabe, I., Ozaki, E., and Katsuyama Y. (1984). *Tank Model with Snow Component*. National Research Center for Disaster Prevention, No. 65, Japan.
- Sugawara M., Watanabe, I., Ozaki, E., and Katsuyama Y. (1986). *Tank Model Program for Personal Computer and the way to Use*. National Research Center for Disaster Prevention, Japan.

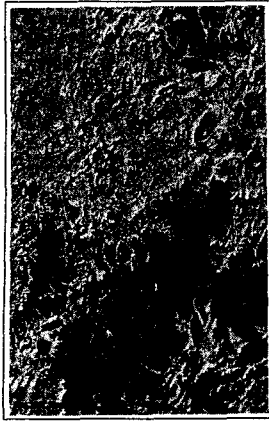


그림 1. 대청댐 지역의 위성사진

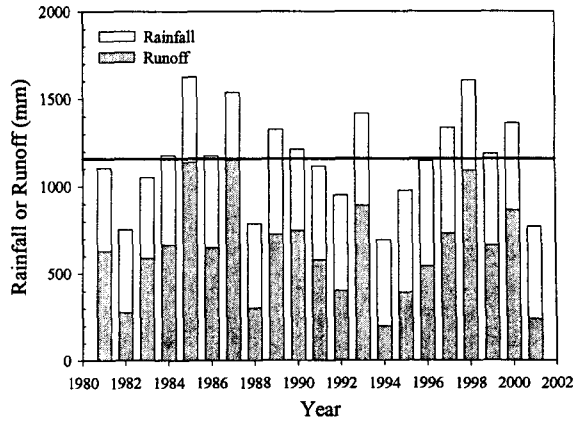


그림 2. 대청댐 지역의 강우량과 유출량

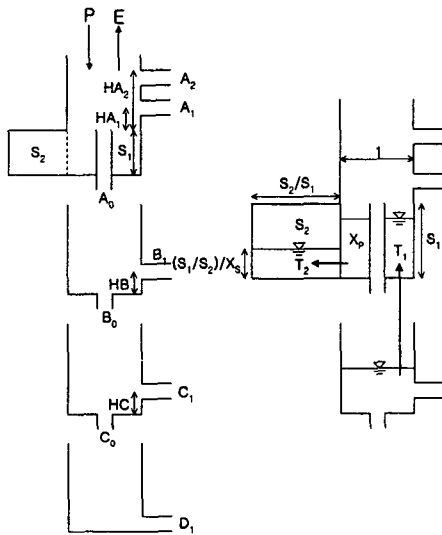


그림 3. 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 모식도

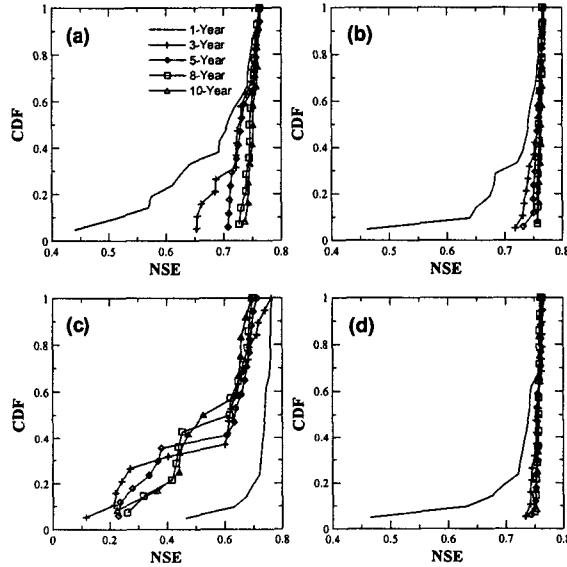


그림 4. NSE에 대한 경험적 CDF 곡선 (a) 목적함수 1, (b) 목적함수 2, (c) 목적함수 3, (d) 목적함수 4

표 1. 4단 탱크의 최종 저류량

보정 기간	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
81-83	441.61	215.52	1327.11	72.16
82-84	525.47	233.86	4736.73	62.94
83-85	519.87	134.32	4882.21	17.53
84-86	986.19	320.86	3281.55	263.22
85-87	485.90	141.34	1618.24	165.98
86-88	1.50	105.89	1825.20	53.61
87-89	0.00	121.55	1979.80	59.79
88-90	447.62	134.84	1277.33	182.51
89-91	734.01	406.90	2092.61	423.78
90-92	552.85	354.48	1306.71	239.72
91-93	939.83	468.00	2116.27	380.53
92-94	517.78	358.74	1317.72	347.67
93-95	281.50	372.60	257.70	248.37
94-96	1230.71	735.73	2778.30	452.47
95-97	1878.42	781.81	4089.96	578.03
96-98	1108.45	803.31	2359.66	405.77
97-99	813.94	337.89	2229.60	277.15
98-00	898.47	425.78	7691.89	349.18
99-01	2362.01	802.32	8721.86	571.23

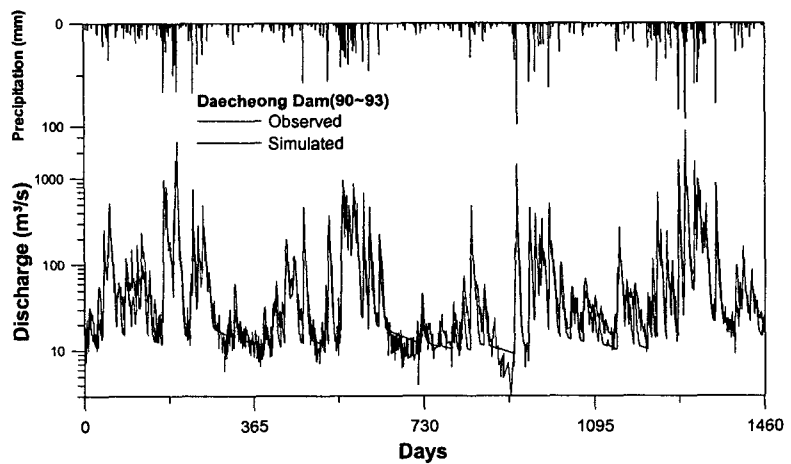


그림 5. 93-95년의 자료를 사용한 모형 검증시 유량수문곡선