

토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구

A Study on Calibration of Tank Model with Soil Moisture Structure

강 신 욱* / 이 동 루** / 이 상 호***

Kang, Shin Uk / Lee, Dong Ryul / Lee, Sang Ho

Abstract

A Tank Model composed of 4 tanks with soil moisture structure was applied to Daechong Dam and Soyonggang Dam watersheds. Calibration and verification were repeated 332 and 472 times for each watershed using SCE-UA global optimization method for different calibration periods and objective functions. Four different methods of evapotranspiration calculation were used and evaluated. They are pan evaporation, 1963 Penman, FAO-24 Penman-Monteith, and FAO-56 Penman-Monteith methods. Tank model with soil moisture structure showed better results than the standard tank model for daily rainfall-runoff simulation. Two types of objective function for model calibration were found. Proper calibration period are 3 years, in which dry year and flood year are included. If a calibration period has an inadequate runoff rate, the period should be more than 8 years. The four methods of evapotranspiration computation showed similar results, but 1963 Penman method was slightly inferior to the other methods.

Keywords : Tank model, soil moisture structure, objective function, calibration period, evapotranspiration

요 지

토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크모형에 SCE-UA 전역최적화 기법을 사용하여 목적함수에 따라 보정자료 기간을 달리하여 대청댐 유역에 332회, 소양강댐 유역에 대해 472회의 보정 및 검증 실험을 수행하였다. 그리고 증발산량 산정 방법에 따른 매개변수 추정 영향을 검토하기 위해 소형 증발계 증발량, 1963 Penman, FAO-24 Penman-Monteith, FAO-56 Penman-Monteith 방법을 사용하였다. 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형은 표준 4단 모형보다 우수한 결과를 나타내었다. 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형의 매개변수 추정에 적합한 목적함수 두 가지를 확인하였다. 매개변수 추정을 위해 적절한 자료기간은 3년 정도이었으며, 평균강수량 이상인 해와 가물었던 해를 포함하는 것이 좋은 결과를 보였다. 그리고 유출률이 적절하지 않은 해를 포함하는 경우에는 8년 이상으로 하는 것이 적절하다고 판단된다. 4가지 증발산량 산정 방법에 의해 추정된 증발산량을 입력으로 모형을 보정한 결과 유사한 매개변수를 나타내었으며, 1963 Penman 방법만이 근소하게 열등하였다.

핵심용어 : 탱크모형, 토양수분 저류구조, 목적함수, 보정기간, 증발산량

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원, 공학석사
Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea

(E-mail : sukang@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원, 공학박사
Research Fellow, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea

(E-mail : dryi@kict.re.kr)

*** 부경대학교 건설공학부 부교수, 공학박사
Associate Prof., Division of Construction Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea

(E-mail : peterlee@pknu.ac.kr)

1. 서론

강우를 상호 연결된 수학적 함수를 통해 유량으로 변환하는 주요 수단으로 개념적 강우-유출 모형 (conceptual rainfall-runoff model)이 개발되어 왔다. 우리나라에서는 NWSRFS-SMA(NWS River Forecasting System - Soil Moisture Account) 모형, SSARR 모형, TOPMODEL, 탱크모형 등을 사용해왔으며, 그 중 탱크모형을 가장 많이 사용하고 있다.

탱크의 구조는 최초 개발 이래로 여러 가지 형태로 변화되어 사용되어 왔으며, 표준 4단 탱크를 발전시켜 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형(Sugawara 등, 1984)에 이르렀다. 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크 모형은 17개의 매개변수와 5개의 초기상태변수를 가진다. 따라서 표준 4단 탱크보다 매개변수의 추정이 어렵고, 우리나라에서는 그 적용사례가 없다.

강우-유출 모형의 매개변수를 추정하는 방법에는 시행착오(trial and error)에 의한 수동보정법과 최적화방법을 사용한 자동보정법으로 구분할 수 있다. 자동보정법에 의한 매개변수 추정은 모형의 구조, 모형 보정에 사용되는 자료의 기간(period)과 질(quality), 사용된 목적함수의 형태, 최적화방법에 영향을 받는다(Gupta 등, 1999).

본 연구에서는 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크 모형을 SCE-UA 전역최적화 기법으로 보정하여 다음과 같은 사항들을 분석하였다.

- 1) 탱크모형을 장기유출모의 모형으로 사용함에 있어 일반적인 표준 4단 모형과 토양수분 저류구조를 갖는 모형 중 어떠한 것이 적절한가?
- 2) 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형의 매개변수 추정에 어떠한 목적함수가 적합한가?
- 3) 모형의 매개변수 추정을 위해 적절한 자료기간은 어느 정도이며, 어떠한 해를 포함하는 것이 좋은가?

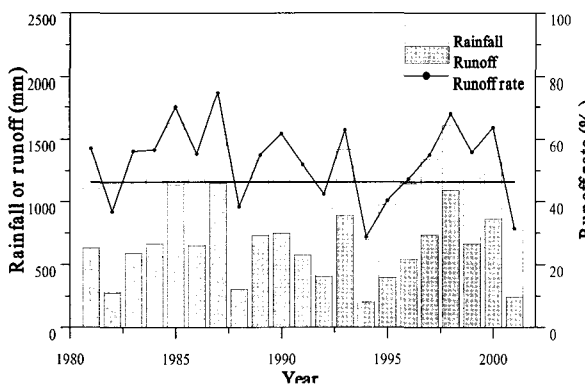


그림 1. 대청댐 지역의 강수량, 유출고, 유출률

4) 일 유출 모의의 주요한 입력인자인 증발산량의 산정방법에 따라 모형 보정에 어떠한 영향을 미치는가?

2. 대상지역 및 자료수집

토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형을 적용하기 위해 대상지역을 선정하였다. 자연하천 지점의 유출자료는 일반적으로 저수부에서 매년 수위-유량 관계식이 변화하여 일관성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 자료기간이 길고, 댐 유입량 자료가 양호한 금강유역의 대청댐과 한강유역의 소양강댐 유역을 대상으로 하였다.

대청댐과 소양강댐 유역의 강수량과 유입량 자료는 한국수자원공사에서 취득하였다. 그림 1과 같이 대청댐의 1981년부터 2001년 강수량과 유입량을 분석한 결과 21년간의 평균강수량은 1,159mm이고, 평균유입량은 643mm로 평균유출률은 약 56%이었으며, 평균강수량 이상인 해는 11개년, 최대강수량은 1985년에 1,627mm, 가장 가물었던 해는 1994년에 695mm이었다. 대청댐 유역의 유출률은 연강수량에 대체로 비례하였다. 그리고 소양강댐의 1974년부터 2001년 자료를 분석하였다(그림 2). 28년 동안의 평균강수량은 1,168mm이고, 평균유입량은 844mm로 평균유출률은 약 72%이었으며, 평균강수량 이상인 해는 13개년, 최대강수량은 1990년에 2,018mm, 가장 가물었던 해는 1988년에 775mm이었다. 소양강댐의 1990년 이전 평균유출률은 연강수량을 비교해 보았을 때 높았다.

유출모형의 장기적인 연속모의는 잠재증발산량 또는 실제 증발량이 주요 입력자료이다. 이를 위한 기상관측소로서 대청댐 유역의 기준 기상관측소는 유역에 인접한 대전, 소양강댐 유역은 유역 중심부에 위치한 인제 기상관측소로 하였다. 대전과 인제관측소의 소형증발계 증발량과 기상자료는 기상청에서 수집하였다.

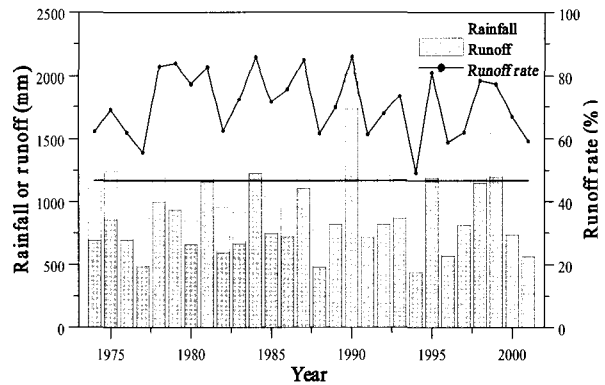


그림 2. 소양강댐 지역의 강수량, 유출고, 유출률

3. 증발산량 추정 및 적설-용설모의를 포함한 토양수분 저류구조의 탱크모형

3.1 증발산량 추정

탱크모형에서는 실제 증발산량을 입력하여 II 유출 모의를 수행하므로 실제 증발산량의 추정이 필요하다. 일반적으로 증발계 증발량은 잠재증발산량보다 크며, 실제 증발산량은 잠재증발산량보다 작다. 실제 증발산량은 잠재증발산량에 작물의 종류와 성장에 관계된 작물계수, 토양수분과 환경의 영향을 고려하는 계수를 곱하여 추정할 수 있다.

본 연구에서 잠재증발산량을 추정하기 위해 사용한 방법은 1963 Penman법(식 (1)), FAO-24 Penman-Monteith법(식 (2)), FAO-56 Penman-Monteith법(식 (3))이다. 각 방법의 관계식은 아래와 같다.

$$ET_0 = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (1.0 + 0.537u_2)(e_s - e_a) \right) / \lambda \quad (1)$$

$$ET_0 = c \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 0.27 \left(1 + \frac{U}{100} \right) (e_s - e_a) \right) \quad (2)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] \quad (4)$$

$$(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

여기서, Δ 는 포화증기압대 온도곡선의 변화율(kPa/°C), γ 는 건습구 상수(kPa/°C), R_n 은 순복사에너지(MJ/m²/day), u_2 는 지상 2m에서의 풍속(m/s), e_s 는 포화증기압(kPa), e_a 는 실제 증기압(kPa), λ 는 증발잠열(latent heat of vaporization)(MJ/kg), U 는 지상 2m에서의 풍속(km/day), T 는 절대온도(K), α 는 반사율(albedo)(초치 0.23), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수(4.903×10⁻⁹MJ/m²/day/K⁴), R_s 는 태양복사에너지(MJ/m²/day), R_{so} 는 청명일의 태양복사에너지(MJ/m²/day), c 는 낮과 밤의 기상조건을 고려해주는 계수이며, Kotsopoulos와 Babajimopoulos의 연구(1997)에서 사용한 식을 사용하였다. 각 식들에 대한 자세한 계산과정은 Allen 등의 연구(1998)와 잠재증발산량 표준화 작업 위원회(Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee)의 연구(2002)를 참고할 수 있다.

실제 증발산량의 추정은 아래 식과 같이 잠재증발산량을 구해 적절한 계수를 곱하여 실제 증발산량을 추정하였다.

$$ET_a = k \cdot ET_0 \quad (5)$$

여기서, ET_a 는 실제 증발산량, ET_0 는 잠재증발산량이다. k 는 유역 증발산량 보정계수로써 물수지법(water balance method)을 이용하여 대청댐과 소양강댐 유역에 대해 결정하였다. 물수지법에 의한 증발산량 추정은 유역단위의 넓은 면적에서 사용하며 장기간 동안의 강수량과 유출량의 차이로 추정한다(Ward와 Elliot, 1995).

3.2 적설-용설 모의

용설은 겨울동안 유역내의 적설이 봄철에 녹기 시작하여 유출로 나타나는 현상이므로 적설이 있는 어떤 지역에 대한 유출량을 계산할 경우에는 적설과 용설의 영향을 고려함이 바람직하다. 유역의 평균 적설, 용설량은 다음과 같이 유역내의 어떤 기상관측소에서의 일평균기온으로부터 추정한다. 우선, 유역내의 고도에 의한 온도 변화를 고려하기 위하여 유역을 고도에 따라 적당히 분할한 다음, 기상관측소 지점의 일평균기온으로부터 고도에 따른 기온저감율을 고려하여 각 분할 지대의 일평균기온을 계산, 추정한다. 기온저감률은 Sugawara 등(1984)과 이상호 등(2002)이 사용한 대로 0.6°C/100m를 사용하였다. 기온이 영하이면 강수는 적설이 되고, 용설 모의는 아래 식과 같이 계산한다.

$$SMELT \times t(i) + (1/80)p(i) \times t(i) \quad (6)$$

여기서, SMELT는 용설 매개변수(mm/day/°C), p 는 강수량(mm), t 는 일평균기온(°C), i 는 시간(day)이다.

3.3 토양수분 저류구조 탱크모형

토양수분 저류구조를 가진 탱크모형은 표준 4단 탱크의 구조와 유사하다(그림 3). 강우 P가 1단 탱크에 유입되고, 증발산량 ET가 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) XP와 2차 토양수분 저

류량(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 포화되고, 포화되고 남은 양은 자유수가 된다.

$$X_A \leq S_1 \text{ 이면, } X_P = X_A, X_F = 0 \quad (7)$$

$$X_A > S_1 \text{ 이면, } X_P = S_1, X_F = X_A - S_1 \quad (8)$$

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.

$$T_1 = K_1(1 - X_P/S_1) \quad (9)$$

4) 1차 토양수분 저류량과 2차 토양수분 저류량 사이

에서도 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.

$$T_2 = K_2(X_P/S_1 - X_S/S_2) \quad (10)$$

각 탱크의 초기 저류고는 모형의 계산 개시일로서 1월 1일의 관측유량을 구하여 이 유량을 3, 4단에서 각각 40%, 60%가 유출된다고 가정하고, 3, 4단 유출공의 높이와 유출공 계수를 가정하였다(산업기지개발공사, 1985). 이와 같은 계산에 의해 구해진 초기저류고는 대청댐 유역에 대해 1, 2단 탱크는 0mm, 3단 탱크는 53mm, 4단 탱크는 453mm이고 소양강댐 유역은 1, 2단 탱크는 0mm, 3단 탱크는 50mm, 4단 탱크는 423mm이다. 그리고 다른 매개변수는 Sugawara 등의 문헌(1986)을 참고하였다. 토양수분 저류 탱크의 초기저류고는 240mm로 하였고, 최대저류량 S_1 과 S_2 는 각각 250mm, 40mm로 하였다.

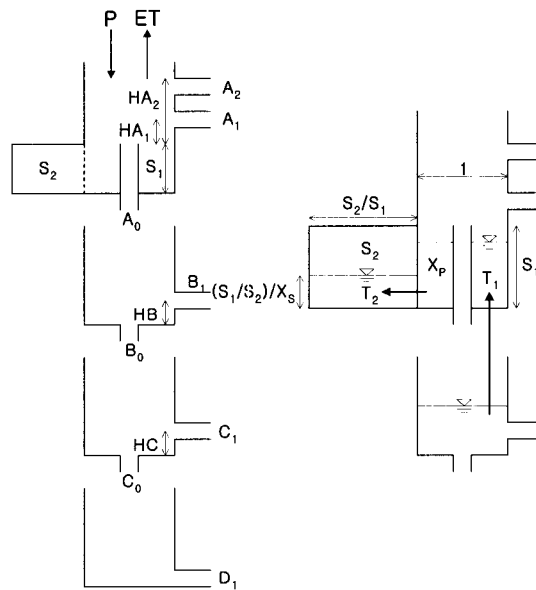


그림 3. 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 모식도

4. SCE-UA 최적화 방법 및 목적함수

SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University Arizona) 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 등, 1994): 1)확정론적 및 확률론적 접근의 결합, 2)컴플

렉스의 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.

연구에 사용한 목적함수는 식 (11)과 같이 Sugawara 등(1986)이 사용한 형태와 식 (12)~(14)와 같이 Sefe와 Boughton(1982)이 사용한 형태이다.

$$\text{Type-1 : } \text{Min.} \sum_{t=1}^N \frac{|q_t^{obs} - q_t^{sim}|}{q_t^{obs}} \quad (11)$$

$$\text{Type-2 : } \text{Min.} \sum_{t=1}^N |q_t^{obs} - q_t^{sim}| \quad (12)$$

$$\text{Type-3 : } \text{Min.} \sum_{t=1}^N \left(\frac{q_t^{obs} - q_t^{sim}}{q_t^{obs}} \right)^2 \quad (13)$$

$$\text{Type-4 : } \text{Min.} \sum_{t=1}^N \left(\sqrt{q_t^{obs}} - \sqrt{q_t^{sim}} \right)^2 \quad (14)$$

5. 표준 4단 탱크모형과 토양수분 저류구조 탱크모형의 비교

5.1 수행방법

탱크모형을 장기유출모의 모형으로 사용함에 있어 표준 4단 모형과 토양수분 저류구조 모형 중 어떠한 것이 적절한 지를 알아보기 위하여 모의를 수행하였다. 모의 대상유역은 대청댐으로 하였다. 매개변수를 추정하기 위한 자료기간은 Peck(1976)의 문헌에서 제시된 '8~10년'이라는 기준을 참고하여 8년으로 하였다. 실제 증발산량은 식 (5)와 같이 적절한 계수를 곱하여 추정하였고, 보정계수는 물수지법에 의해 0.476으로 결정되었다. 매개변수 추정을 위한 모의는 1991~1998년, 검증 모의는 1981~2001년 자료를 이용하였다.

모의 수행 결과를 평가하기 위해 4가지 지표와 모의 유량의 평균과 표준편차를 사용하였다. 사용한 평가지표는 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency), 평균편차의 비율(percent bias, PBIAS), 오차비율 추정량(proportional error of estimate, PEE), 체적비(ratio of volume, ROV)이다. NSE는 관측값의 표본분산에 대한 오차분산의 상

대적인 크기를 나타내며, 최적값은 '1'이다. PBIAS와 PEE의 최적값은 '0', ROV는 '1'이다. 각각의 관계식은 아래와 같다.

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_{mean}^{obs})^2} \quad (15)$$

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \times 100 \quad (16)$$

$$\text{PEE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N \left(\frac{q_t^{obs} - q_t^{sim}}{q_t^{obs}} \right)^2}{N}} \quad (17)$$

$$\text{ROV} = \frac{\sum_{t=1}^N q_t^{sim}}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \quad (18)$$

여기서, N은 자료의 수, t는 시간간격, q_t^{obs} 는 관측유량, q_t^{sim} 은 모의유량, q_{mean}^{obs} 은 관측유량의 평균값이다.

5.2 수행결과

각 모형의 보정결과와 검증결과를 표 1에 나타내었고, 검증시 유량수문곡선을 그림 4에 나타내었다. 모형 보정시의 결과를 보면 표준 4단 탱크모형은 PEE 평가 지표만 우위에 있었고, 토양수분 저류구조 탱크모형은 PBIAS, NSE, ROV 평가지표가 우위에 있었고, 또한 모의유량의 평균과 표준편차가 관측값(표 1의 소괄호 안의 값)에 더 근접하였다. 모형 검증시의 결과 또한 토양수분 저류 탱크모형이 우위에 있었다. 장기 유출모의에서 주요 결과인 유출체적을 살펴보면 토양수분 저류구조 모형이 관측값에 근사한 0.973이었다. 검증 수문곡선에서 살펴보면 표준 4단 탱크모형은 상승시에는 관측값과 유사하나 하강시에는 관측값에 비해 늦게 저감되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 토양수분 저류구조 탱크모형은 융설기를 제외하면 유출곡선의 상승과 하강부가 관측값과 유사한 것을 볼 수 있다. 이상과 같은 결과를 살펴보았을 때, 토양수분 저류구조 모형은 장기유출 모의시 표준 4단 모형보다 우수한 결과를 보임을 알 수 있다.

표 1. 표준 4단과 토양수분 저류구조 탱크 모형의 비교

평가 지표	보 정		검 증	
	표준 4단	토양 수분	표준 4단	토양 수분
PBIAS	10.66	5.747	9.286	2.701
PEE	0.745	1.222	1.585	2.380
NSE	0.790	0.812	0.753	0.770
ROV	0.893	0.943	0.907	0.973
모의평균 (관측평균)	70.84 (79.30)	74.74 (79.30)	76.46 (84.29)	82.01 (84.29)
모의표준편차 (관측표준편차)	198.3 (251.3)	201.4 (251.3)	191.9 (249.1)	194.8 (249.1)

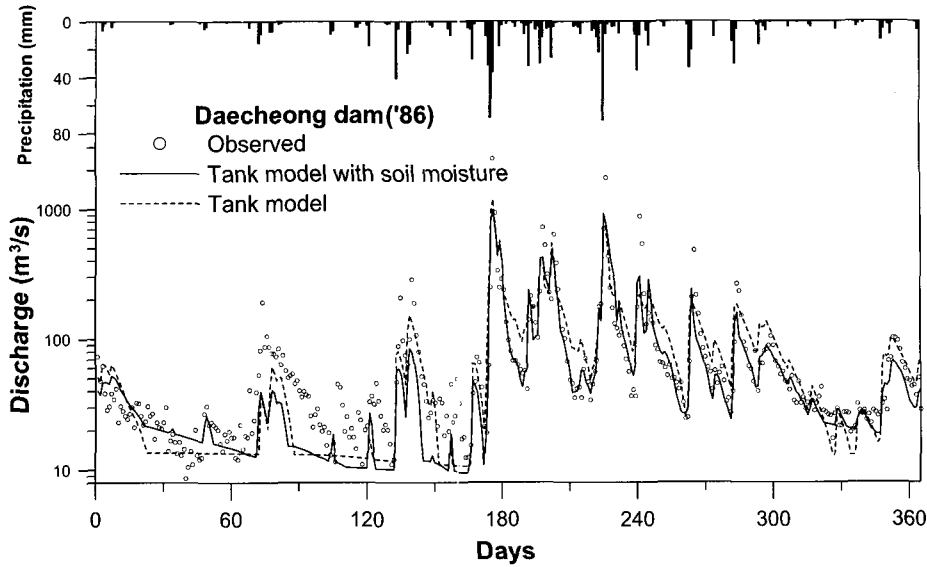


그림 4. 토양수분 저류구조 탱크모형과 표준4단 탱크모형의 비교(대청댐, '86)

6. 자료기간에 따른 매개변수 영향 검토

6.1 수행방법

보정 자료기간에 따른 영향을 검토하기 위해 대청댐 자료에 대해 1981~2001년 자료를 1, 3, 5, 8, 10년 연속 하계 자료쌍을 생성하였고, 소양강댐 자료에 대해 1974~2001년 자료를 같은 방법으로 생성하였다. 생성된 자료는 대청댐이 각각 21, 19, 17, 14, 12개이며, 앞서 제시한 4개의 목적함수를 사용하여 332회의 보정을 수행하였고, 소양강댐은 각각 28, 26, 24, 21, 19개이며, 472회의 보정을 수행하였다. 각 자료쌍으로 결정된 매개변수를 사용하여 대청댐은 21년, 소양강댐은 28년의 자료로 검증모의를 수행하였다.

6.2 수행결과

각 자료기간에 따른 목적함수별 수행결과를 California 도시 위치 공식(plotting formula)에 의해 경험적 확률분포함수(empirical cumulative distribution function) 형태로 나타내었다(그림 5). 각 CDF 곡선은 어떤 변량이 특정변수보다 크지 않을 확률을 의미한다. 그림 5에서 경사가 증가하는 것은 평가지표의 민감도(sensitivity)도 감소하는 것을 나타내며, CDF 분포가 오른쪽으로 이동되는 것은 모형의 평가지표가 향상되는 것을 의미한다.

대청댐 영역의 결과(그림 5)를 살펴보면 Type-3과 같은 목적함수 형태를 제외하고 자료기간이 길어질수록 평가지표의 민감도가 감소(경사가 증가)하고 평가지표

가 향상(오른쪽으로 이동)되었으나, 목적함수 Type-3은 오히려 1년 자료가 좋은 결과를 보였다(그림 5(c)). 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(그림 5(d)).

경험적 CDF 곡선과 더불어 모의 수행시 4단 탱크의 최종저류고(2001년 12월 31일의 저류고)를 표 2에 나타내었다. 표 2를 살펴보면 목적함수의 형태가 Type-3인 경우는 최종저류고는 초기저류고보다 아주 큰 값을 나타내었다. 목적함수가 Type-4의 경우는 매우 양호한 값을 보였다. 1981년의 강수량 1106mm와 2001년의 강수량 772mm를 참고하여 생각하면 4단 탱크의 초기저류고 423mm는 2001년에는 이보다 적어야 함을 알 수 있고, 강수량과 저류량이 비례한다고 가정하면 295mm 정도이다. 표 2에서 이와 유사한 저류고를 살펴보면 84~86, 90~92, 92~94, 93~95, 97~99, 98~00년의 자료로 보정된 결과가 가장 유사하였다. 이 기간동안의 강수량을 살펴보면 평균강수량 이상인 해와 가물었던 해를 포함하고 있다. 그 중 93~95년의 자료로 모형을 검증한 결과를 그림 6에 나타내었고 관측유량과 아주 근접하는 결과를 보였다.

NSE 평가지표와 4단 탱크의 최종저류고를 미루어 볼 때 대청댐 영역에 대해서는 평균강수량 이상인 해와 가물었던 해를 포함하는 3년 이상의 자료가 매개변수 추정에 적당한 것으로 판단된다.

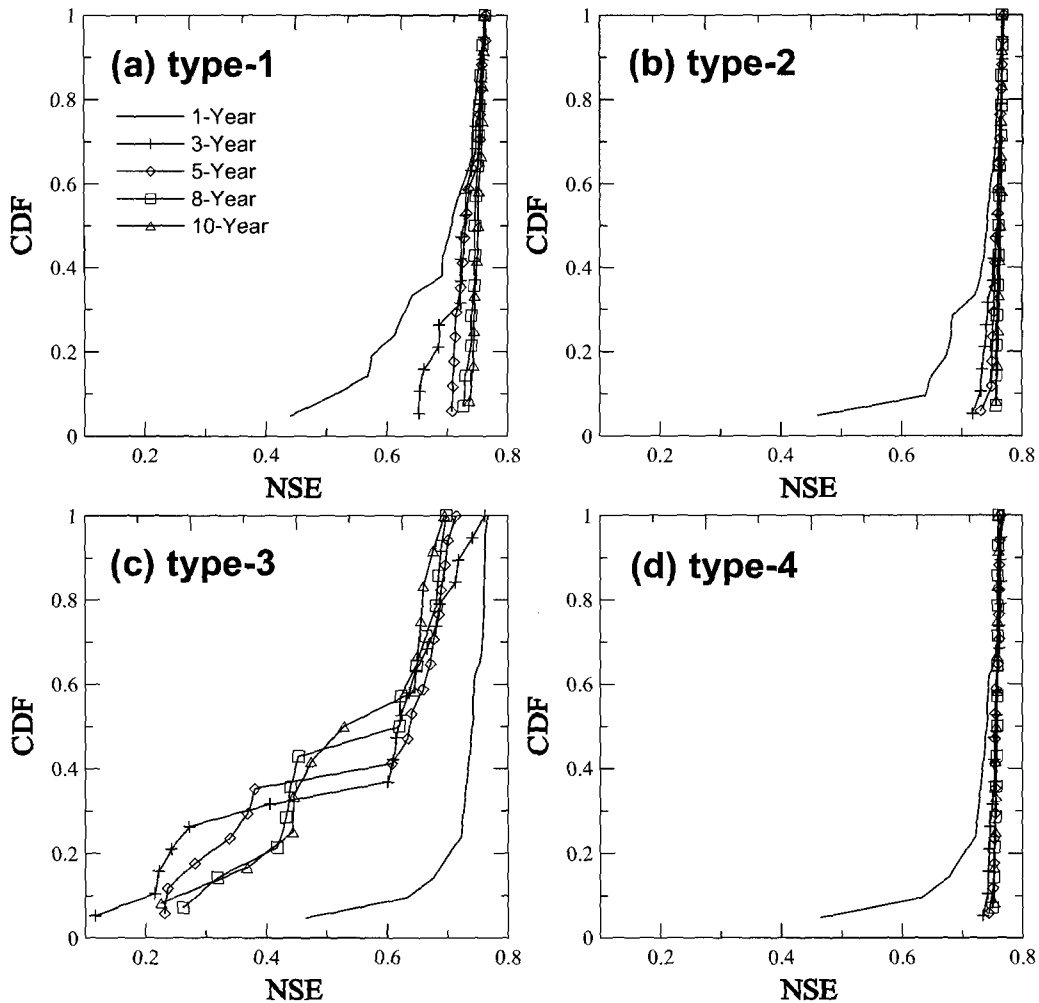


그림 5. NSE에 대한 경험적 cdf 곡선 (대청댐)

소양강댐 유역의 결과(그림 7)를 살펴보면 대청댐 유역의 결과와 유사하게 Type-3 목적함수 형태(그림 7(c))를 제외하고 자료기간이 길어질수록 평가지표의 민감도가 감소(경사가 증가)하고 평가지표가 항상(오른 쪽으로 이동)되었다. Type-1 목적함수는 보정자료의 기간이 길어짐에 따라 평가지표의 민감도가 감소하고 지표가 향상되기는 하나, NSE 지표가 0.75정도이며 Type-2나 Type-4와 비교해볼 때 0.4정도 작았다(그림 7(a)). Type-2 목적함수는 자료기간이 3년 이상일 때 보정결과가 유사한 형태를 보였고 양호한 보정결과를 나타내었다(그림 7(b)). Type-3 목적함수의 경우는 1년 자료기간에 의한 보정은 평가지표의 민감도가 0.22~0.77의 범위에 있었고, 8년과 10년 자료기간에 대해서는 0.62정도에서 직선형태를 보였다(그림 7(c)). 이에 대한 원인을 조사해본 결과 8년 자료쌍 21개중 18개, 10년 자료쌍 19개중 18개의 추정 매개변수가 각각 2종류의 매개변수 쌍으로 추정되었다. 이와 같은 상황을 미루어 볼 때 Type-3과 같은 목적함수의 형태는 토양수분 저

류구조 탱크모형의 매개변수 추정에 적합하지 않다고 판단된다. Type-4 목적함수에 대한 결과는 Type-2의 경우와 유사한 결과를 보였다(그림 7(d)).

Type-4 목적함수에 대한 검증모의시 4단 탱크의 최종저류고를 보정기간별로 표 3에 나타내었다. 보정기간 3년과 5년의 최종저류고는 74~90년을 포함하는 모든 모의에서는 '0'이었고, 90년 이후의 모의에서는 최종저류고가 작은 값이었다. 보정기간 8년의 최종저류고는 83~90, 84~91, 86~93년 모의에서만 '0'이었고, 다른 모의에서는 양호한 결과를 나타내었다. 보정기간이 10년인 경우는 대부분의 양호한 값을 나타내었다. 이와 같이 최종저류고가 '0'이 되는 이유는 소양강댐 유역의 과도한 유출률에 의한 것으로 생각된다. 1990년 이전의 평균 유출률은 73.3%이었고, 이후에는 67.0%이었다. 한강유역의 평균유출률 57%에 비교해 보았을 때 큰 값을 나타내었고, 이것이 강수량 결측에 기인한 것인지 유입량 산정의 오류에서 기인한 것인지 는 확인할 수 없다.

표 2. 토양수분 저류구조 탱크의 최종 저류고

보정기간	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
81-83	441.6	215.5	1327	72.16
82-84	525.5	233.9	4736	62.94
83-85	519.9	134.3	4882	17.53
84-86	986.2	320.9	3281	263.2
85-87	485.9	141.3	1618	166.0
86-88	1.50	105.9	1825	53.61
87-89	0.00	121.5	1980	59.79
88-90	447.6	134.8	1277	182.5
89-91	734.0	406.9	2093	423.8
90-92	552.8	354.5	1307	239.7
91-93	939.8	468.0	2116	380.5
92-94	517.8	358.7	1318	347.7
93-95	281.5	372.6	257.7	248.4
94-96	1231	735.7	2778	452.5
95-97	1878	781.8	4090	578.0
96-98	1108	803.3	2360	405.8
97-99	813.9	337.9	2230	277.1
98-00	898.5	425.8	7692	349.2
99-01	2362	802.3	8722	571.2

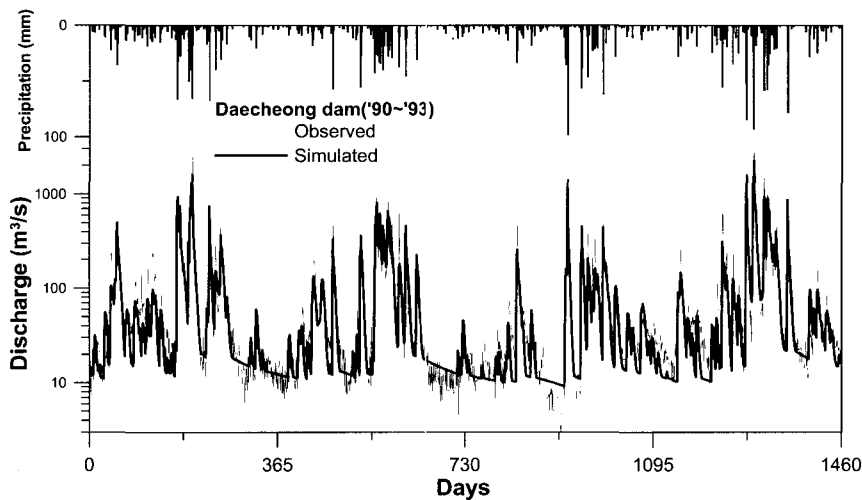


그림 6. 93~95년의 자료를 사용한 모형 검증시 유량수문곡선

보정기간이 3년인 모의중 94~96, 95~97년의 최종저류고는 계산시작년의 강수량과 초기저류고, 계산종료년의 강수량을 비교해 보았을 때 적절하였다. 이 기간들에는 강수량이 평균 이상인 해와 가물었던 해를 포함하고 있다. 그림 8에는 94~96년 자료로 매개변수를 추정하고 전 기간에 대해 검증한 결과의 일부를 나타내었으며, 관측유량과 모의유량이 아주 근접한 결과를 보였다.

소양강댐 유역의 경우 NSE 평가지표, 4단 탱크의 최

종저류고, 유출률을 고려하여 생각해 보면 매개변수 추정에 적당한 자료기간은 유출률이 적절하다고 판단되는 기간 중 평균강수량 이상인 해와 가물었던 해를 포함하는 3년 이상의 자료가 매개변수 추정에 적당한 것으로 판단된다. 그리고 유출률이 적절한 기간이 적다면 보정기간을 8년 이상으로 하고 평균강수량 이상인 해와 가물었던 해를 포함하는 것이 적절하다고 판단된다.

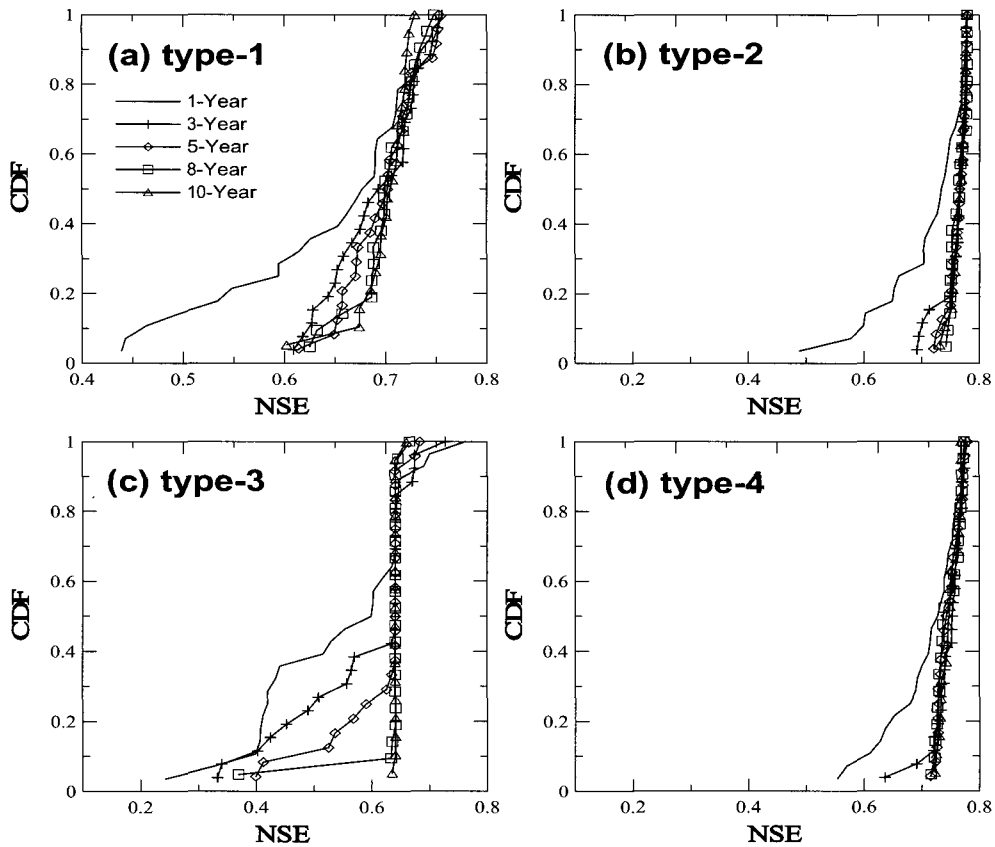


그림 7. NSE에 대한 경험적 cdf 곡선 (소양강댐)

표 3. 보정기간별 토양수분 저류구조 탱크의 최종 저류고

보정기간	3년	보정기간	5년	보정기간	8년	보정기간	10년
74-76	0.0	74-78	0.0	74-81	280.2	74-83	357.6
75-77	0.0	75-79	0.0	75-82	546.2	75-84	628.4
76-78	0.0	76-80	167.1	76-83	602.8	76-85	421.2
77-79	0.0	77-81	0.0	77-84	345.6	77-86	700.3
78-80	0.0	78-82	0.0	78-85	130.5	78-87	346.2
79-81	0.0	79-83	0.0	79-86	193.4	79-88	190.2
80-82	0.0	80-84	0.0	80-87	190.7	80-89	408.0
81-83	0.0	81-85	0.0	81-88	81.95	81-90	208.8
82-84	0.0	82-86	0.0	82-89	213.0	82-91	148.5
83-85	0.0	83-87	0.0	83-90	0.0	83-92	68.98
84-86	0.0	84-88	0.0	84-91	0.0	84-93	46.31
85-87	0.0	85-89	0.0	85-92	67.24	85-94	87.55
86-88	0.0	86-90	0.0	86-93	0.0	86-95	61.44
87-89	0.0	87-91	60.98	87-94	127.0	87-96	136.8
88-90	0.0	88-92	179.5	88-95	187.6	88-97	153.9
89-91	34.28	89-93	116.9	89-96	119.8	89-98	134.9
90-92	69.88	90-94	53.71	90-97	114.7	90-99	132.7
91-93	85.75	91-95	125.3	91-98	146.6	91-00	122.1
92-94	47.31	92-96	101.8	92-99	121.2	92-01	91.23
93-95	78.50	93-97	80.70	93-00	102.3		
94-96	252.3	94-98	258.1	94-01	188.1		
95-97	201.1	95-99	185.3				
96-98	10.49	96-00	171.9				
97-99	82.49	97-01	83.22				
98-00	0.0						
99-01	45.22						

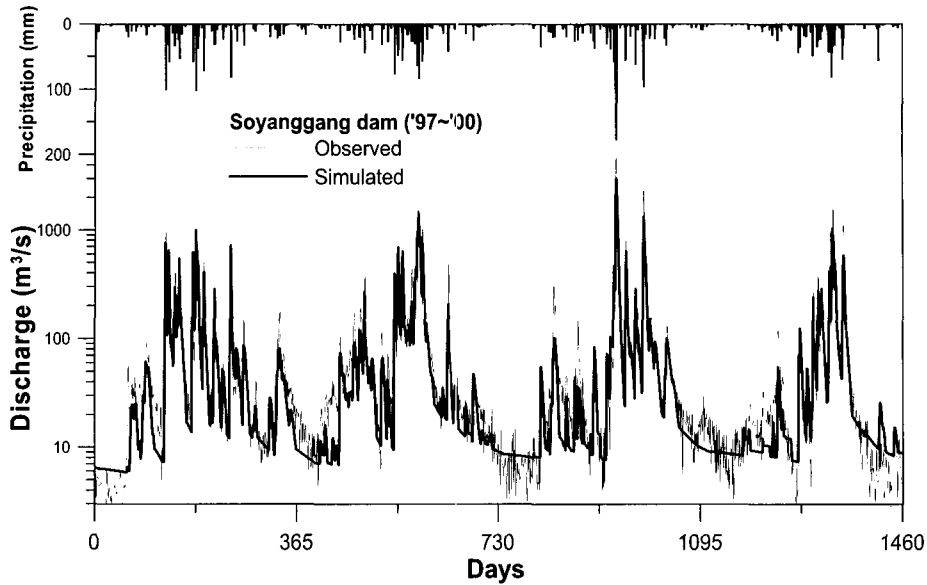


그림 8. 94~96년의 자료를 사용한 모형 검증시 유량수문곡선

표 4. 증발산량 추정방법에 대한 추정 매개변수

	FAO	Penman	FAO-24	FAO-56
K1	0.00296	0.00145	0.00172	0.00103
K2	6.24	6.46	7.75	6.45
A2	0.278	0.274	0.269	0.273
A1	0.0441	0.0420	0.0470	0.0430
A0	0.112	0.108	0.102	0.107
B1	0.252	0.249	0.245	0.248
B0	0.199	0.191	0.179	0.190
C1	0.00822	0.00875	0.00985	0.00874
C0	0.0272	0.0250	0.0222	0.0245
D1	0.00041	0.00039	0.00036	0.00039
HA2	50.8	48.4	47.8	48.4
HA1	19.9	19.3	19.2	19.4
HB	0.00	0.00	0.00	0.00
HC	0.0018	0.0003	0.0020	0.0050

표 5. 증발산량 추정방법에 따른 모형의 평가지표

	FAO	Penman (1963)	FAO-24 PM	FAO-56 PM	
보	PBIAS	4.202	4.010	3.931	4.082
	PEE	1.073	1.038	0.951	1.025
	NSE	0.783	0.780	0.781	0.780
	ROV	0.958	0.960	0.961	0.959
	평균 (64.96)	62.23	62.35	62.40	62.31
정	표준편차 (225.2)	183.6	183.2	183.5	183.1
	PBIAS	3.675	3.280	3.195	3.097
검	PEE	2.368	2.241	2.099	2.231
	NSE	0.769	0.768	0.769	0.768
	ROV	0.963	0.967	0.968	0.969
중	평균 (84.29)	81.20	81.52	81.59	81.68
	표준편차 (249.1)	192.7	192.6	193.4	192.5

7. 증발산량 산정 방법에 따른 매개변수 영향 검토

7.1 수행방법

증발산량 산정 방법에 따라 매개변수 추정에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해 소형 증발계 증발량, 1963 Penman, FAO-24 Penman-Monteith, FAO-56 Penman-Monteith 방법을 사용하였다. 대상유역은 대청댐 유역으로 하였다. 각 방법을 사용하여 실제 증발산량을 추정하기 위해 보정계수를 구하였다. 대청댐

의 21년 총강수량은 24,335mm, 총유출고는 13,509mm이며 총손실량은 10,825mm이다. 증발계 증발량의 총량은 22,723mm로 보정계수는 0.476, 1963 Penman 방법에 의한 잠재증발산량 총량은 19,802mm로 0.547, FAO-24 Penman-Monteith 방법에 의한 잠재증발산량 총량은 16,138mm로 0.671, FAO-56 Penman-Monteith 방법에 의한 잠재증발산량 총량은 17,949mm로 0.603이었다. 각각의 증발산량을 산정하고 앞 절에서 결정된 기간 중 93-95년의 자료, Type-4 목적함수를 사용하여 매개변수 추정을 하고 모형을 검증하였다. 검증모의에 사용한 자료는 21년 동안의 강수량, 유입량 자료이다.

7.2 수행결과

각 방법에 의한 매개변수 추정 결과는 표 4와 같으며, 보정과 검증모의 결과는 표 5와 같다. 각각의 증발산량 추정방법에 대한 추정 매개변수를 살펴보면 1963 Penman 방법에 의한 것과 FAO-56 Penman-Monteith 방법에 의한 것이 K1 값을 제외하고는 거의 유사하였다. 그리고 각 방법에 따른 모형 보정시 평가지표를 살펴보면 증발계 증발량을 사용하였을 때는 NSE 지표가 근소하게 나왔으며, FAO-24 방법을 사용하였을 때는 PBIAS, PEE, ROV 지표와 평균, 표준편차가 우위에 있었다. 모형 검증시 평가지표에서는 증발계 증발량을 사용하였을 때는 역시 NSE 지표, FAO-24 방법을 사용하였을 때는 PEE, NSE 지표와 표준편차, FAO-56 방법을 사용하였을 때는 PBIAS, ROV 지표와 평균이 우위에 있었다. 위와 같은 결과를 보았을 때 토양수분 저류구조 탱크모의에는 증발계 증발량, FAO-24, FAO-56 방법이 근소하게 나온 결과를 보였다.

8. 결 론

우리나라에서는 사용한 사례가 없는 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크모형에 SCE-UA 전역최적화 기법을 사용하여 목적함수에 따라 보정자료 기간을 달리 하여 대청댐 유역에 332회, 소양강댐 유역에 대해 472회의 보정 및 검증을 수행하였다. 그리고 증발산량 산정 방법에 따라 매개변수 추정에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해 소형 증발계 증발량, 1963 Penman, FAO-24 Penman-Monteith, FAO-56 Penman-Monteith 방법을 사용하였다. 이와 같은 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 장기유출모의 모형으로 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형은 표준 4단 모형보다 우수한 결과를 나타내었다.
- 2) 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형의 매개변수 추정에 적합한 목적함수는 관측값과 모의값 편차의 절대값을 최소로 하는 목적함수(Type-2)와 관측값과 모의값의 평방근 편차 제곱합을 최소로 하는 목적함수(Type-4)의 형태이었다.
- 3) 대청댐 유역과 소양강 댐 유역의 토양수분 저류구조 탱크모형의 매개변수 추정을 위해 적절한 자료기간은 3년 정도이었으며, 평균강수량 이상인 해와 가뭄이 있었던 해를 포함하는 것이 좋은 결과를 보였다. 그리고 유출률이 적절하지 않은 해를 포함하는 경우에는 8년 이상으로 하는 것이 적

절하다고 판단된다.

- 4) 장기 일유출 모의의 주요한 입력자료인 증발산량은 4 가지 방법 모두 유사한 매개변수를 나타내었으며, 증발계 증발량, FAO-24 Penman-Monteith, FAO-56 Penman-Monteith 방법에 의해 추정된 증발산량을 사용하였을 때 근소하게 나온 결과를 보였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-5-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 산업기지개발공사 (1985). **탱크 모형방법에 의한 유출 해석법**.
- 이상호, 박종표, 안태진, 심명필 (2002) “적설-용설모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐에 대한 적용.” **대한토목학회 학술발표회초록집**, p. 156.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). “Crop evapotranspiration (guidelines for computer crop water requirements).” *FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56*, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- 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.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1999). “Status of automatic calibration for hydrologic model : Comparison with multilevel expert calibration.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Kotsopoulos, S., and Babajimopoulos, C. (1997). “Analytical estimation of modified Penman equation parameters.” *Journal of irrig. and Drain. Eng.*, Vol. 123, No. 4, pp. 253-2256.
- Nelder, J.A. and Mead, R. (1965). “A simplex method for function minimization.” *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313.

- Peck E.L. (1976). *Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast System*. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-31, p. 12.
- 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.
- Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee (2002). *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*. ASCE.
- 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.
- Ward, A.D. and Elliot, W.J. (1995). *Environmental hydrology*. Lewis Pub., Boca Raton.
- (논문번호:03-73/접수:2003.09.08/심사완료:2004.01.29)