

## 건기 실측간격, 강우인자에 따른 탱크모형 매개변수 추정

박재일 · 백천우 · 전환돈 · 김종훈<sup>†</sup>

고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과

### Parameter Estimation of Tank Model by Data Interval and Rainfall Factors for Dry Season

Park, Chae Il · Baek, Chun Woo · Jun, Hwan Don · Kim, Joong Hoon<sup>†</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University

(Received 9 March 2006, Accepted 4 August 2006)

#### Abstract

For estimating the minimum discharge to maintain a river, low flow analysis is required and long term runoff records are needed for the analysis. However, runoff data should be estimated to run a hydrologic model for ungaged river basin. For the reason, parameter estimation is crucial to simulate rainfall-runoff events for those basins using Tank model. In this study, only runoff data recorded for dry season are used for parameter estimation, which is different to other methods based on runoff data recorded for wet and dry seasons. The Harmony Search algorithm is used to determine the optimum parameters for Tank model. The coefficient of determination ( $R^2$ ) is served as the objective function in the Harmony Search. In cases that recorded data are insufficient, the recording interval is changed and Empirical CDF is adopted to analyze the estimated parameters. The suggested method is applied to Yongdam dam, Soyanggang dam, Chungju dam and Seomjingang dam basins. As results, the higher  $R^2$ s are obtained when the shorter recording interval, the better recorded data quality, and the more rainfall events recorded along with certain rainfall amount is. Moreover, when the total rainfall is higher than the certain amount,  $R^2$  is high. Considering the facts found from this study for the low flow analysis, it is possible to estimate the parameters for Tank model properly with the desired confidence level.

**keywords** : Coefficient of determination, Harmony search, Parameter estimation, Tank model with soil moisture structure

## 1. 서론

하천유지유량을 산정하기 위해서는 하천의 갈수량 산정이 선행되어야 하고, 갈수량을 산정하기 위해서는 장기간의 유출량 자료가 필요하다. 장기간의 유출량 자료를 보유하고 있는 유역은 실측자료를 그대로 이용하면 되나, 미계측 유역의 경우 유출모형을 이용한 장기유출량 산정이 선행되어야 한다. 장기유출량 모형으로는 IHACRESS 모형, TOP 모형, TANK 모형, SSARR 모형, KRISH 모형, NWS-PC 모형 등이 있으며, 그 중 TANK 모형은 입력 자료가 적은 개념적 모형으로 쉽게 적용이 가능하다.

Sugawara 등(1956)이 최초 개발한 탱크모형은 보다 합리적인 모의를 위해 다양한 형태로 발전되었다. 이후 Sugawara 등(1986)은 표준 4단 탱크모형에 토양수분 저류구조를 추가한 모형으로 발전시켰으며, 국내에서는 박(1993)이 수정 탱크모형의 입력, 구동, 출력 및 매개변수의 보정을 실시할 수 있는 셀 프로그램 DSFS를 개발, 중소유역의 일 유출량의 추정에 적용하였고, 이 등(1995)은 탱

크모형의 매개변수를 시행착오법으로 산정하는 것을 보완하기 위해 Kalman filter를 이용 실시간으로 매개변수를 산정하여 저수유출의 예측에 활용하였으며, 신 등(2001)은 유전자알고리즘과 Powell 방법에 의해 금강 수계 대청댐 지점의 탱크모형 매개변수를 추정하였다. 또한, 강 등(2001)은 우리나라 4대 권역 93개 소유역의 32년간 일 강수량 및 일 유출량자료와 Powell 기법을 이용하여 탱크모형의 매개변수를 산정하였고, 최(2003)는 모형에서 목적함수가 미치는 영향을 고려하였으며, 이 등(2003)은 적설 및 용설 모의를 포함한 탱크모형을 소양강댐과 충주댐에 적용하였다. 강 등(2004)은 토양수분 저류구조 탱크모형을 대청댐과 소양강댐에 적용하여 표준 4단 탱크모형과 토양수분 저류구조 탱크모형을 비교하였고, 매개변수를 추정하기 위해 목적함수, 자료기간, 증발산량 산정방법에 따른 영향을 비교하였다. 백 등(2005)은 하천유지유량 산정을 위하여 건기만을 고려한 탱크모형의 매개변수를 추정하였고 우기와 건기의 결과를 비교하였다.

토양수분 저류구조 탱크모형은 16개의 매개변수와 5개의 초기상태변수를 가지며 이 매개변수를 추정하기 위해서는 장기간의 강우량, 증발산량, 유출량 등의 실측자료가 필요하다. 그러나 일반적으로 미계측 유역인 목표유역에서 강우

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jaykim@korea.ac.kr

량, 증발산량 자료획득은 용이하나, 유출량 자료는 거의 없는 실정이며 많은 인력, 시간, 자본과 같은 제약이 따르므로 측정하기도 어렵다. 따라서 유출량 측정에 제약이 따를 경우, 매개변수 추정을 위한 최소한의 자료획득 기준이 필요하다.

또한, 갈수량은 건기의 유출량만으로 산정이 가능하며, 건기에는 기저유출량이 지배적이므로 유출량 크기도 큰 변화가 없다. 즉, 강우도 거의 없고 강우가 있을 경우, 그 크기가 작아 유출량에 기여하는 정도가 작다고 할 수 있으며, 입력 자료가 연속적이지 않아도 탱크모형의 매개변수를 추정할 수 있다.

본 연구에서는 건기에 대한 구분 없이 매개변수를 추정하는 기존의 방법과는 달리, 건기(9월21일~이듬해 6월20일)의 자료만을 이용하여 토양수분 저류구조 탱크모형의 매개변수를 추정하였다. 또한 장기간 동안 주기적인 실측이 어려운 경우, 탱크모형의 매개변수 추정을 위하여 필요한 최소한의 실측을 위한 Guideline을 제안하기 위해 유출량 실측 간격에 따른 매개변수 추정결과를 Empirical CDF (Empirical Cumulative Density Function)와 강우인자를 이용하여 비교 분석하였다. 또한, 매개변수 추정을 위하여 HS(Harmony Search) 알고리즘과 결정계수를 최적화 기법으로 사용하였으며, 계측유역인 용담댐, 소양강댐, 충주댐, 섬진강댐 유역에 적용하여 미세측유역의 적용성을 검토하였다.

## 2. 토양수분 저류구조 탱크모형의 매개변수 추정기법

### 2.1. 토양수분 저류구조 탱크모형

탱크모형은 강우-유출 현상을 Fig. 1과 같이 오리피스 유출공을 가진 몇 개의 저류형 탱크의 조합으로 가정하여 강수량을 유량으로 환산하는 유출모형으로, Sugawara 등

(1986)은 보다 실제 현상에 유사한 모의를 위해 토양수분 저류탱크를 추가한 모형을 개발하였다.

강우가 Tank1으로 유입하면 증발산량만큼 Tank1에서 감소하고 저류량이 증가한다. 저류량 중 일부는 측면 유출공으로 유출되며 일부는 저면 침투공으로 침투되어 Tank2로 유입된다. 이와 같은 과정이 Tank4까지 이루어지며, Tank1의 2개의 유출공은 지표면 유출, Tank2의 유출공은 중간유출, Tank3, Tank4의 유출공은 기저유출 등으로 구분되어 유출을 해석한다. 각 탱크의 유출공을 통해 유출된 물은 성분 별로 합하여 유량으로 계산된다.

특히, Tank1에서 토양에 저류되는 저류량은 1차 토양수분 저류량  $X_f$ 와 2차 토양수분 저류량  $X_s$ 로 구성되며, 각각 최대저류량은  $S_1$ 과  $S_2$ 이다. Tank1의 저류량  $X_A$ 는  $X_f$ 와 Tank1의 자유수  $X_f$ 로 이루어지며, 강우가 더해지고 증발량이 감해진다. 이 때  $X_A$ 가  $S_1$ 보다 작을 때는  $X_A$ 는  $X_f$ 가 되고 자유수는 0이 된다.  $X_A$ 가  $S_1$ 보다 클 때는  $X_f$ 가 포화되고 남은 양은 자유수가 된다.  $X_f$ 가 포화되지 않고 Tank2에 자유수가 존재한다면, Tank2에서 Tank1으로 식 (1)처럼  $T_1$ 만큼 공급된다.  $X_f$ 와  $X_s$ 에서도 수분교환이 존재하며 식 (2)와 같이  $T_2$ 로 나타낼 수 있다(강 등, 2004).

$$T_1 = K_1(1 - X_f/S_1) \tag{1}$$

$$T_2 = K_2(X_f/S_1 - X_s/S_2) \tag{2}$$

토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형은 유출해석을 위해 탱크 측면 유출공의 유출계수( $A_1, A_2, B_1, C_1, D_1$ ), 저면 침투공의 침투계수( $A_0, B_0, C_0$ ), 토양수분 교환계수( $K_1, K_2$ )와 탱크 유출공의 높이( $HA_1, HA_2, HB, HC$ ), 토양수분 최대 저류량( $S_1, S_2$ )과 같은 16개의 매개변수와 탱크의 초기상태 변수( $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$ )가 필요하다. 16개의 매

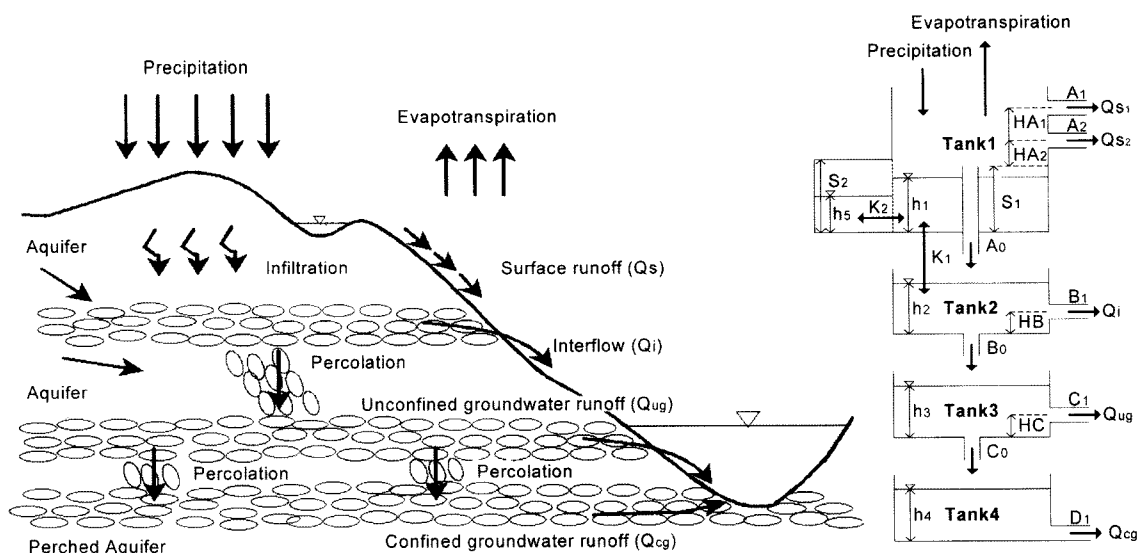


Fig. 1. Tank model with soil moisture structure.

개변수는 시행착오법 또는 최적화기법에 의해 결정되어야 하고, 5개 탱크의 초기 저류고는 실측과 적절한 가정을 하여 산정하여야 한다.

2.2. 최적 매개변수 산정기법 : 화음탐색법

화음탐색법(HS, Harmony Search)은 Geem 등(2001)에 의해 제안된 최적화 방법으로 대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 관찰을 통해 만들어진 것과 달리 화음(Harmony)이라는 인공적인 현상에서 착안되어 만들어진 알고리즘이다. HS에서도 다른 탐색기법과 같이 몇 가지 인자들을 사용한다. 인자로는 HM(Harmony Memory), HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjusting Rate) 등이 있다.

HM이란 연습과정을 통해 경험한 화음 중에서 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되며 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 되는 것이다. HM의 구조도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2와 같이 saxophone, fiddle, keyboard의 세 개 악기가 내는 소리로 만들 수 있는 화음은 여러 가지가 있다. 그러나 화성학적 입장에서 볼 때에는 그림의 세 화음 중에는 장 3도로 이루어진 (C, E, G)가 (C, F, A), (B, D, G), (D, A, C)보다 는 잘 어울리는 화음이다. 또한 (C, F, A)가 (B, D, G)보다 는 좋은 화음이 되며, HM안에서 순차적으로 배열된다. HS는 탐색하고자 하는 각 매개변수를 악기라 하고, 매개변수의 값을 악기의 음조라 하면, 가장 잘 어울리는 악기의 소리 조합을 탐색하는 것이다. 이때 화음의 어울림 정도는 GA(Genetic Algorithm)에서와 같이 적합도함수로 판단하게 된다.

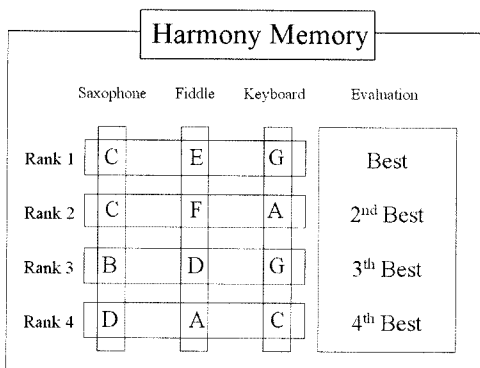


Fig. 2. Harmony memory.

HMCR이란 새로운 화음을 만들 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 하는 확률이다. Fig. 2에서는 (D, A, C)가 가장 어울리지 않는 화음으로 최하위에 랭크되었으며 HMCR을 적용하여 새로운 화음 추가 시에 fiddle의 자리에 올 수 있는 소리는 다음과 같은 두 가지 경우에 따라 달라진다. 첫째, 전체 정의영역에서 새로운 화음을 구성할 때에는 가능한 모든 소리인 (A, B, C, D, E, F, G)안에서 새로운 화음의 fiddle음을 결정하게 된다. 둘째, 기존 HM안에서 새로운 화음을 구성할 때에는 HM안에서 fiddle의 음으로 존재하는 (E, F, D, A)안에서 새로운 화음의 fiddle음을 선택하게 된다. HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 더 나은 곳으로 찾아갈 수 있는 가능성을 부여하는 것으로 마치 GA의 돌연변이율과 유사한 기능이라고 할 수 있다.

PAR는 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조(Pitch)를 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자이다.

HS는 이들 인자를 기본으로 작동하며 기본 흐름은 Fig. 3과 같다. Fig. 3과 같이 HS에서는 가능해의 조합으로 HM를 구성하여, HM안에서 HMCR과 PAR를 적용하여 최적해에 접근해가는 과정을 통해 최적해를 탐색한다.

2.3. 목적함수 및 제약조건

본 연구에서 화음탐색법을 이용하여 탱크모형의 매개변수를 추정하기 위해 적용한 목적함수는 결정계수( $R^2 = \text{Coefficient of determination}$ )로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\text{Maximize } R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (QS_i - \overline{QO_i})^2}{\sum_{i=1}^N (QS_i - \overline{QO_i})^2 + \sum_{i=1}^N (QO_i - \overline{QO_i})^2} \quad (3)$$

제약조건 : 각 매개변수의 상 · 하한 값

여기서,  $QO_i$  : 관측유량,  $QS_i$  : 모의유량,  $N$  : 자료 수

본 연구에서 화음탐색법은 식 (3)과 같은 목적함수 값이 최대가 되도록 매개변수 값을 탐색한다. 이상영역으로의 최적해 탐색을 방지하기 위해 Table 1과 같이 각 매개변수의 상 · 하한 값을 제약조건으로 설정하였다(성 등, 2004). 또

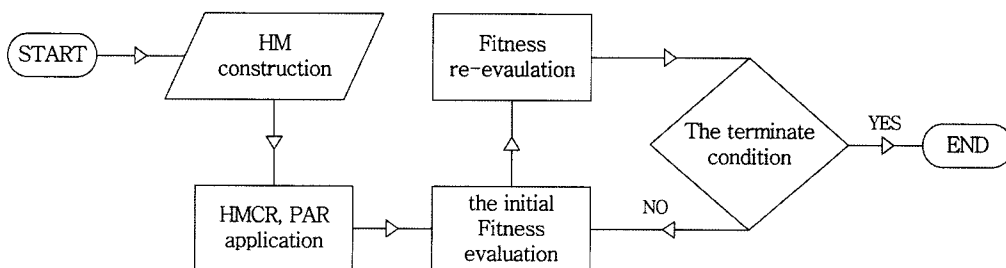


Fig. 3. Flow of harmony search.

**Table 1.** Tank model parameters' range

| Parameters  | $S_1$ | $S_2$ | $K_1$ | $K_2$ | $A_2$ | $A_1$ | $A_0$ | $B_1$ | $B_0$ | $C_1$ | $C_0$ | $D_1$ | $HA_2$ | $HA_1$ | $HB$ | $HC$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|------|
| Lower limit | 1     | 200   | 1     | 15    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 10     | 0      | 0    | 0    |
| Upper limit | 250   | 400   | 4     | 30    | 1     | 1     | 0.5   | 0.3   | 0.3   | 0.1   | 0.1   | 0.005 | 60     | 10     | 10   | 10   |

한, 각 탱크의 초기 저류고는 모형의 계산 개시일의 관측 유량을 이용하여 이 유량을 1단, 2단, 3단, 4단에서 각각 0%, 0%, 40%, 60%가 유출된다고 가정(산업기지개발공사, 1985)하여 산정하였다. 토양수분 저류탱크의 초기 저류고는 우기가 끝나는 시점이 모형의 계산개시 일이므로 어느 정도 토양수분이 존재함을 고려하고, 유역 별 몇 차례 보정을 통하여 200 mm로 가정하였다.

### 3. 매개변수 추정 및 유출량 실측간격에 따른 검증

#### 3.1. 대상유역의 선정

자연하천 유역의 경우 수위관측소는 홍수방재의 목적을 우선적으로 고려하여 설치되어 일정 수위 이하(저수부분)에서는 수위자료의 신뢰성이 떨어지며(노 등, 2004), 매년 수위-유량 관계식이 변화하여 유량자료의 일관성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 댐 유입량 자료가 양호하고 하천의 최상류 댐인 금강유역의 용담댐, 한강유역의 소양강댐과 충주댐, 섬진강 유역의 섬진강댐을 모형 적용 대상 유역으로 선정하였다.

#### 3.2. 대상 유역의 수문자료 수집

토양수분 저류구조 탱크모형의 주요 입력자료는 강우량, 유입량, 증발량으로 각각 댐 유역의 강우량과 유입량 자료는 건설교통부에 관리하는 국가 수자원관리 종합정보 홈페이지(<http://www.wamis.go.kr>)에서 수집하였고, 증발량 자료 수집을 위해 용담댐은 전주 기상대, 소양강댐은 춘천 기상대, 충주댐은 제천 기상대, 섬진강댐은 남원 기상대를 대표 지점으로 선정하여, 각 기상대의 소형 증발계 증발량 자료를 기상청으로부터 수집하였다. 용담댐을 제외하고 각 댐 유역 모두 강우량, 유입량의 자료기간은 길지만 증발량 관측의 자료가 부족하여 증발량 자료가 존재하는 기간만을 고려대상으로 하였다. 수집된 자료로 검증기간이 1/3을 넘지 않도록 매개변수 추정기간과 검증기간을 분리하였고, 유역 별 매개변수 추정 및 검증에 사용된 자료기간은 Table 2와 같다.

또한, 수집된 각 유역의 실측자료를 가지고 건기(9월21

일~이듬해 6월20일)와 우기(6월21일~9월20일)로 구분한 후, 각 유역에 대하여 보정기간의 자료 년에 따라 건기에 해당하는 연속된 자료를 추출하였다. 실측자료 간격에 따른 매개변수 추정을 하기 위해 보정기간에 해당하는 추출된 자료를 1일 간격 1개, 2일 간격 2개, 3일 간격 3개, 4일 간격 4개, 5일 간격 5개, 6일 간격 6개, 7일 간격 7개로 분리하여 각 1개 건기마다 28개씩의 자료쌍을 생성하였다. 그 결과 용담댐은 84개, 소양강댐은 280개, 충주댐은 84개, 섬진강댐은 420개의 자료쌍을 생성하였고, 유역별 생성된 자료쌍을 가지고 매개변수를 추정하였다.

#### 3.3. 탱크모형 매개변수 추정결과

유역 별, 자료간격 별 매개변수 추정결과를 경험적 누적확률밀도함수(Empirical CDF)의 형태로 표현하였다. Empirical CDF는 특정 이론적 확률밀도함수를 따르지 않거나 알 수 없을 때 사용하는 분포함수이며, CDF 값이 특정 변량보다 크지 않을 확률을 의미하므로, 매개변수 추정 결과를 제시할 때 PDF(Probability Density Function)보다 유용하다.

Empirical CDF는 표본으로 구성된 CDF이고 표본이 많을 수록 모집단의 CDF와 유사해진다. Empirical CDF에서 경사가 증가하면 변량 즉, 결정계수의 민감도가 감소하는 것을 의미하며, CDF가 오른쪽으로 이동하면 결정계수가 향상되는 것을 의미한다(강 등, 2004). Empirical CDF를 만들기 위하여 유역 별 자료간격 별 추정된  $R^2$ 을 크기순으로 정렬하였고 계급구간을 0.1로 하여 상대빈도를 산정하여 각 Empirical CDF를 구성하여 Fig. 4~Fig. 7에 나타내었다.

자료간격 별  $R^2$ 은 0.0~1.0 전 범위에서 분포되어 있다. 1일 간격의 그래프는 대상유역 전체가 오른쪽으로 치우쳐 있으며, 2일 간격의 그래프도 상대적으로 오른쪽에 치우쳐져 있지만 2일~7일 간격의 그래프가 근소한 차이만 있을 뿐 큰 차이가 없는 것처럼 보인다. Fig. 4~Fig. 7의 결과를 미루어볼 때, 건기 1일 간격으로 매개변수를 추정하면  $R^2$ 이 0.5이상 나올 확률이 용담댐은 100%, 소양강댐과 충주댐은 50%, 섬진강댐은 63%이고, 2일 간격으로 매개변수를 추정하면 결정계수 0.5이상 나올 확률이 용담댐은 88%, 소양강댐은 43%, 충주댐은 18%, 섬진강댐은 35%이다.

**Table 2.** The data period for calibration and verification of parameters for each basin

| Basin           | Data period |              | Remark                         |
|-----------------|-------------|--------------|--------------------------------|
|                 | Calibration | Verification |                                |
| Yongdam dam     | 2001~2004   | 2004~2005    | .                              |
| Soyanggang dam  | 1991~2001   | 2001~2005    | .                              |
| Chungju dam     | 1986~1989   | 1989~1990    | Deficiency of evaporation data |
| Seomjingang dam | 1975~1990   | 1998~2000    | Deficiency of evaporation data |

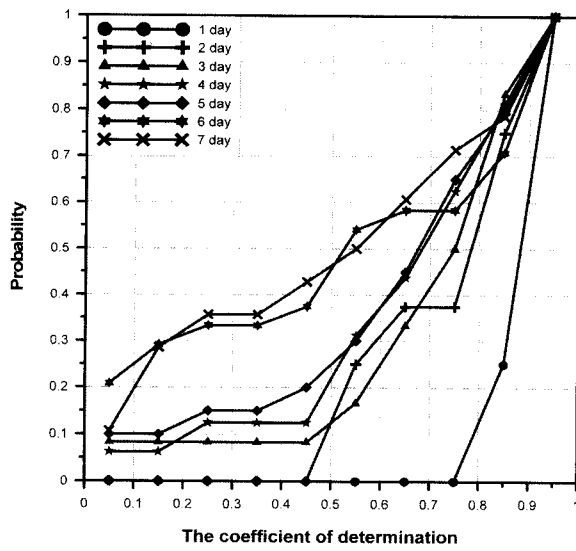


Fig. 4. Empirical CDF (Yongdam dam).

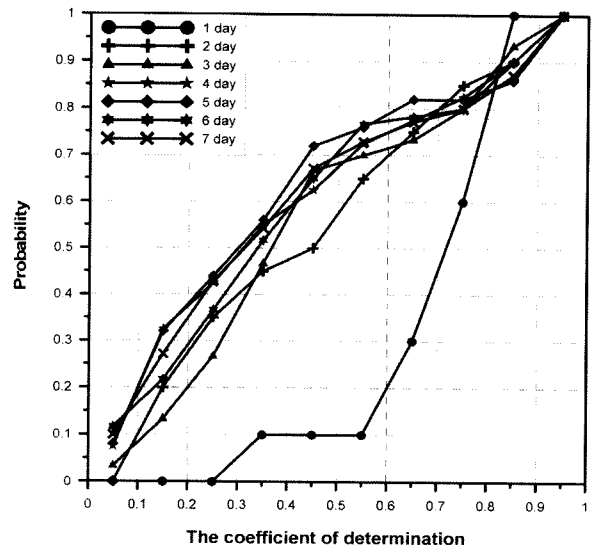


Fig. 5. Empirical CDF (Soyanggang dam).

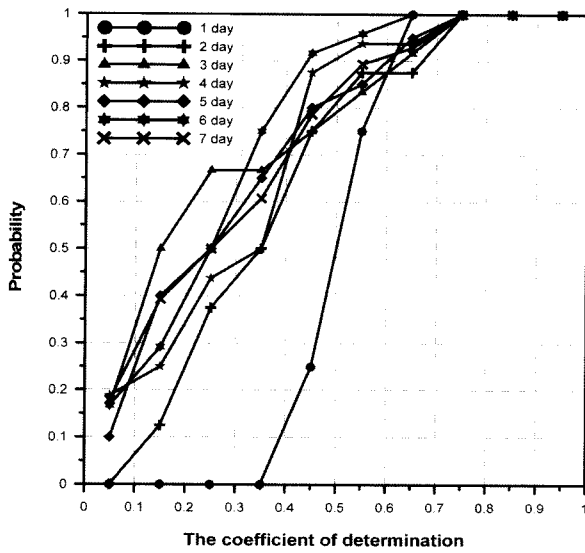


Fig. 6. Empirical CDF (Chungju dam).

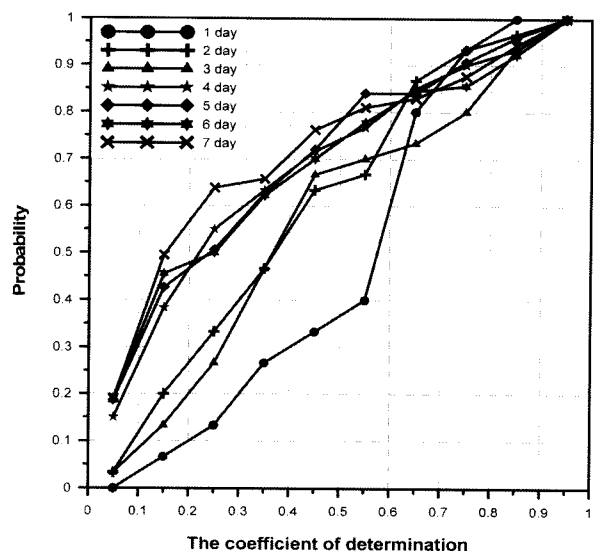


Fig. 7. Empirical CDF (Seomjingang dam).

Table 3에는 분산으로 표현된 자료간격 별  $R^2$ 의 평균과 분산을 나타내었다. Table 3은 소양강댐 유역을 제외한 4일 간격 이하에서 유역 별 자료간격이 늘어날수록 평균은 감소하고 분산은 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만 일부 유역의 비교적 자료간격이 큰 부분(이탈릭체)에서 평균이 증가하거나 분산이 감소할 때도 있었다. 이는 자료간격이 클수록 자료간격이 작을 때보다 더 많은 자료쌍이 생성되

고 그 자료쌍 중에는 적합한 매개변수를 추정할 수 있는 자료쌍이 생성될 수 있는 여지가 있기 때문이라고 판단된다.

또한, 모형의 구조는 토양수분 저류구조 탱크모형, 자료 기간은 건기, 사용된 목적함수는  $R^2$ , 최적화 방법은 화음 탐색법으로 동일하지만 자료의 질은 모두 다르다. 대상유역 자료의 질을 평가하는 지표는 없지만 용담댐 유역의 경우, 국가 시험유역으로 매개변수 추정에 사용된 자료가 비교적

Table 3. Averages and variances of  $R^2$  by the estimated parameters in each basin and data intervals

| Intervals       |          | 1 day  | 2 day  | 3 day         | 4 day  | 5 day         | 6 day         | 7 day         |
|-----------------|----------|--------|--------|---------------|--------|---------------|---------------|---------------|
| Basins          |          |        |        |               |        |               |               |               |
| Yongdam dam     | Average  | 0.9280 | 0.7776 | 0.7282        | 0.6793 | 0.6659        | 0.5464        | 0.5377        |
|                 | Variance | 0.0017 | 0.0303 | 0.0635        | 0.0691 | 0.0795        | 0.1376        | <b>0.1186</b> |
| Soyanggang dam  | Average  | 0.7397 | 0.4922 | 0.4682        | 0.4262 | 0.4171        | <b>0.4373</b> | <b>0.4319</b> |
|                 | Variance | 0.0265 | 0.0789 | <b>0.0713</b> | 0.0906 | <b>0.0841</b> | <b>0.0830</b> | 0.0896        |
| Chungju dam     | Average  | 0.5609 | 0.3953 | 0.3694        | 0.3352 | <b>0.3416</b> | 0.2779        | <b>0.3185</b> |
|                 | Variance | 0.0067 | 0.0242 | 0.0331        | 0.0360 | 0.0389        | 0.0501        | 0.0558        |
| Seomjingang dam | Average  | 0.5506 | 0.4392 | 0.3743        | 0.3614 | 0.3500        | <b>0.3663</b> | 0.3317        |
|                 | Variance | 0.0416 | 0.0537 | 0.0719        | 0.0756 | <b>0.0723</b> | 0.0857        | <b>0.0827</b> |

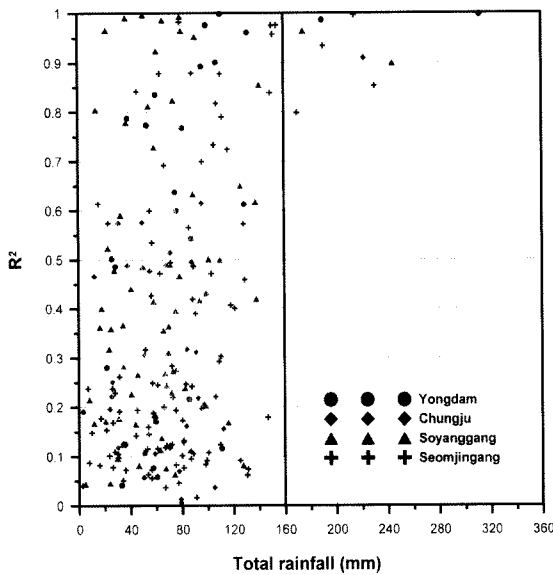


Fig. 8. Total rainfall and  $R^2$ .

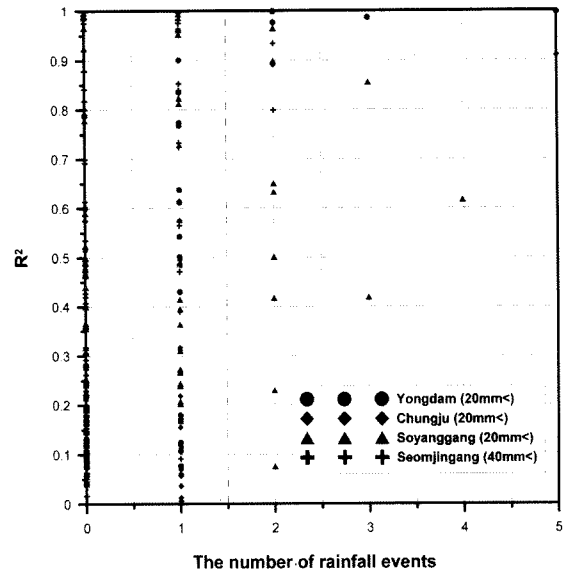


Fig. 9. The number of rainfall events and  $R^2$ .

최근 자료이고 한국건설기술연구원에서 2차 확인과 재수정 과정을 거치도록 하고 있어 상대적으로 높다고 할 수 있다 (한 등, 2003). Fig. 4에서 용담댐 유역은 다른 유역과 달리 상대적으로 경사가 급하고 오른쪽으로 편향되어 있으며, Table 3에서 자료간격 별 추정된  $R^2$ 의 평균은 다른 유역에 비하여 크고 분산은 작으므로 매개변수 추정이 잘 되었다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 유역 별  $R^2$ 과 매개변수 추정에 사용된 자료의 총강우량과의 관계를 나타내며, 매개변수 추정이 불확실하고 확률적으로 자료쌍이 가장 많이 존재하는 7일간격의 자료만을 가지고 표현하였다. Fig. 8은 매개변수 추정에 사용된 총강우량이 작은 부분(160 mm이하)에서는 유역에 상관없이 큰 산포를 보이고 있다. 그 산포의 크기는 Table 3에서 분산으로 이미 표현한 바 있으나, 7일 간격의 자료에서는 의미를 가지지 못하였다. 하지만 총강우량이 큰 부분(160 mm이상)에서는 유역에 상관없이 작은 산포를 보이고 있으며,  $R^2$ 이 모두 0.8 이상이다. 이는 자료간격이 7일로 매개변수 추정에 있어 불확실성이 크다 할지라도 총강우량이 어느 정도 크다면, 적절한 매개변수를 추정할 수 있을을 반증한다.

Table 4는 매개변수 추정을 위한 7일 간격 자료쌍 중, 유역 별 강우크기에 따른 강우회수와  $R^2$ 과의 상관계수를 나타내고 있다. 용담댐의 경우, 보정기간 동안 생성되는 7일 간격 자료쌍에 대하여 각각 20 mm 이상의 강우회수를 산정하고, 매개변수 추정 후 산정한  $R^2$ 과의 상관관계가 다른

강우크기에 비하여 높다는 것을 의미한다. 유역 별, 7일 간격의 자료쌍으로 상관관계가 높게 추정된 강우크기에 따른 강우회수와  $R^2$ 의 관계는 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 특정 강우크기에 따른 강우회수가 증가할수록 근소하게  $R^2$ 의 변동폭은 줄어들고,  $R^2$ 은 향상되고 있음을 보여주고 있다. 또한, 섬진강댐의 경우, 1990/06/20에 111.0 mm를 기록하였고, 이 자료를 포함한 자료쌍은 모두  $R^2$ 이 크게 산정되었다고 하며, 건기라 하더라도 다른 유역과 달리 40 mm 이상의 강우를 많이 포함하고 있어 Table 4와 Fig. 9와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

### 3.4. 추정된 매개변수에 의한 검정결과

Table 2의 검정 자료기간에 대하여 추정된 매개변수로 검정하였다. 3.3절에 추정된 매개변수로 산정한 자료간격 별  $R^2$ 값을 크기순으로 나열하여  $R^2$ 값이 큰 상위 3개의 매개변수 별 평균으로 검정하였다.

자료간격 별, 유역 별로 검정을 하기위한 매개변수를 재 산정하였고, 재 산정된 매개변수 쌍은 유역 별 7쌍이다. 산정된 매개변수 쌍으로 유역 별 검정기간에 해당하는 1일 간격 자료쌍을 가지고 검정한 후 계산된  $R^2$ 값은 Table 6과 같고, 검정기간의 강우인자는 Table 5와 같다.

Table 6에서 소양강댐 유역의 2004-2005년의 결과를 제외하고, 자료간격 별 추정된 매개변수에 상관없이 모두  $R^2$  값이 0.5이상으로 고투 분포하고 있다. 자료간격이 크다 할

Table 4. The coefficient of correlation

| Basin           | The excessive rainfall (mm) |       |              |       |              |       |       |       |       |
|-----------------|-----------------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 0<                          | 10<   | 20<          | 30<   | 40<          | 50<   | 60<   | 70<   | 80<   |
| Yongdam dam     | -0.119                      | 0.382 | <b>0.542</b> | 0.537 | 0.508        | 0.522 | 0.438 | 0.349 | 0.252 |
| Soyanggang dam  | -0.026                      | 0.128 | <b>0.275</b> | 0.177 | 0.256        | 0.217 | 0.218 | 0.175 | 0.260 |
| Chungju dam     | 0.098                       | 0.077 | <b>0.377</b> | 0.318 | 0.349        | 0.174 | 0.334 | 0.229 | 0.000 |
| Seomjingang dam | 0.118                       | 0.376 | 0.439        | 0.393 | <b>0.475</b> | 0.430 | 0.356 | 0.288 | 0.204 |

**Table 5.** Rainfall factors during the verification period

| Rainfall's variables |           | Total rainfall<br>(mm) | The number of rainfall events |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|-----------|------------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Basin                |           |                        | 0<                            | 10< | 20< | 30< | 40< | 50< | 60< | 70< | 80< |
| Yongdam dam          | 2004-2005 | 438.7                  | 84                            | 16  | 7   | 2   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|                      | 2001-2002 | 473.7                  | 84                            | 17  | 9   | 3   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Soyanggang dam       | 2002-2003 | 487.8                  | 118                           | 13  | 5   | 3   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0   |
|                      | 2003-2004 | 494.7                  | 83                            | 16  | 8   | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|                      | 2004-2005 | 356.4                  | 76                            | 12  | 4   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Chungju dam          | 1989-1990 | 571.4                  | 66                            | 16  | 3   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Seomjingang dam      | 1998-1999 | 829.4                  | 73                            | 18  | 8   | 6   | 4   | 3   | 2   | 2   | 1   |
|                      | 1999-2000 | 560.4                  | 73                            | 11  | 6   | 3   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |

**Table 6.** Verified  $R^2$ 's based on the average of three estimated parameters having the highest  $R^2$

| Data interval   |           | 1day         | 2 day | 3 day | 4 day | 5 day | 6 day        | 7 day |
|-----------------|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|
| Basin           |           |              |       |       |       |       |              |       |
| Yongdam dam     | 2004-2005 | <b>0.822</b> | 0.707 | 0.748 | 0.727 | 0.679 | 0.663        | 0.665 |
|                 | 2001-2002 | 0.842        | 0.762 | 0.717 | 0.652 | 0.700 | 0.802        | 0.782 |
| Soyanggang dam  | 2002-2003 | 0.694        | 0.620 | 0.507 | 0.585 | 0.756 | 0.753        | 0.661 |
|                 | 2003-2004 | 0.664        | 0.596 | 0.558 | 0.585 | 0.650 | 0.663        | 0.611 |
|                 | 2004-2005 | 0.386        | 0.685 | 0.479 | 0.416 | 0.653 | 0.647        | 0.659 |
| Chungju dam     | 1989-1990 | 0.549        | 0.632 | 0.633 | 0.660 | 0.625 | 0.620        | 0.624 |
| Seomjingang dam | 1998-1999 | 0.926        | 0.912 | 0.736 | 0.801 | 0.814 | 0.818        | 0.737 |
|                 | 1999-2000 | 0.909        | 0.830 | 0.816 | 0.866 | 0.786 | <b>0.929</b> | 0.784 |

지라도  $R^2$  값이 오히려 큰 경우가 있는데, 이는 탱크모형의 매개변수를 추정할 때 자료간격이 크더라도 강우인자를 고려한다면, 적합한 매개변수를 추정할 수 있는 가능성을 나타낸다.

섬진강댐의 경우, Table 6에서 다른 유역에 비하여 상대적으로 높은  $R^2$  값을 나타내고 있다. 이는 Table 2에서 매개변수 추정을 위한 보정기간이 길어  $R^2$  값이 큰 상위 3개만을 고려할 때, 적절한 매개변수가 선택될 확률이 더 높고, 검증기간의 총강우량이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다.

소양강댐의 경우, Table 6의 건기 총강우량이 가장 작고 20 mm 이상의 강우회수가 가장 작은 2004-2005년의 4일 간격이하에서  $R^2$  값이 상대적으로 낮게 산정되었고, 20 mm 이상의 강우회수가 가장 많은 2001-2002년의 5일 간격을 제외한 모든 간격에서  $R^2$  값이 다른 검증기간에 비하여 높게 산정되었다. 자료간격, 총강우량, 강우크기, 강우회수 등이 매개변수 추정에 복합적으로 영향을 끼치므로 결과를 판단하기 위한 독립변수로 고정시킬 수 없지만, Table 5~6의 결과는 Table 3~4, Fig. 9~10의 결과를 대체적으로 따른다고 볼 수 있다. 용담댐과 충주댐은 검증기간 자료쌍이 1개 밖에 없어 그 경향을 알 수 없고, 섬진강댐은 2일 간격이하에서 소양강댐의 결과와 같다.

Table 6에서 유역 별 추정된 매개변수에 의한 검증결과, 매개변수 추정을 위한 자료쌍의 자료간격에 상관없이, 소양강댐의 2004-2005년을 제외하고 모두 0.5이상으로 고무 분포하고 있다. 또한, 일부 유역에서 자료간격이 큰데도 불구하고 오히려 좋은 결과를 나타내고 있는 것으로 보아 매개변수를 추정할 때, 건기에 자료간격이 크더라도 강우인자를

고려한다면 적합한 매개변수를 찾을 수 있다는 것을 반증하고 있다.

매개변수 추정 및 검증결과를 살펴보기 위하여 건기임에도 불구하고 강우가 고무 분포되고, 유출량의 크기가 상대적으로 작은 용담댐 유역의 2004/09/21~2005/06/20 자료기간과 자료간격이 6일임에도 불구하고  $R^2$  이 가장 크고 홍수량의 크기가 큰 섬진강댐 유역의 1999/09/21~2000/06/20 자료기간을 선정하였다(Table 6의 이텔릭체). 추정된 매개변수는 Table 7과 같으며, 그 매개변수로 모의한 결과는 Fig. 10~11과 같다.

Fig. 10~11의 결과를 살펴보면 유량이 작은 부분에서는 특정 값에 수렴하는데, 이는 저수위 수위-유량관계식의 불확실성과 강우가 없거나 강우가 있다하더라도 강우의 크기가 작을 때, 기저유출량의 변동이 작다는 것을 감안하면 적당한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

유역 별 건기(9월21일~이듬해 6월20일)의 자료만을 이용하여 토양수분 저류구조 탱크모형의 매개변수를 추정하였다. 유출량 측정에 있어 인력, 시간, 자본과 같은 제약이 따를 경우, 장기간 주기적 측정이 어려우며, 측정이 어렵다면 적절한 가정을 하여 최소한의 측정기준을 마련하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 인력, 시간, 자본과 같은 제약을 자료의 간격이 대변하는 것으로 가정하였고, 용담댐, 소양강댐, 충주댐, 섬진강댐 유역의 과거의 기록을 바탕으로 토양수분 저류구조 탱크모형의 매개변수를 추정하였다. 자료 간격에 따라 추정된 매개변수를 분석하기 위하여

Table 7. Parameters estimated by the suggested method

| Parameters | Yongdam dam | Seomjingang dam | Parameters | Yongdam dam | Seomjingang dam |
|------------|-------------|-----------------|------------|-------------|-----------------|
| $S_1$      | 39.86769    | 33.67556        | $B_0$      | 0.07473     | 0.14222         |
| $S_2$      | 202.38470   | 311.10180       | $C_1$      | 0.06577     | 0.00547         |
| $K_1$      | 3.43499     | 2.60059         | $C_0$      | 0.02416     | 0.07193         |
| $K_2$      | 29.20240    | 21.26737        | $D_1$      | 0.00046     | 0.00006         |
| $A_2$      | 0.67962     | 0.46042         | $HA_2$     | 33.29980    | 24.72364        |
| $A_1$      | 0.13328     | 0.81336         | $HA_1$     | 1.61616     | 6.90384         |
| $A_0$      | 0.39248     | 0.26457         | $HB$       | 0.23107     | 4.32219         |
| $B_1$      | 0.06211     | 0.24281         | $HC$       | 0.37300     | 6.84211         |

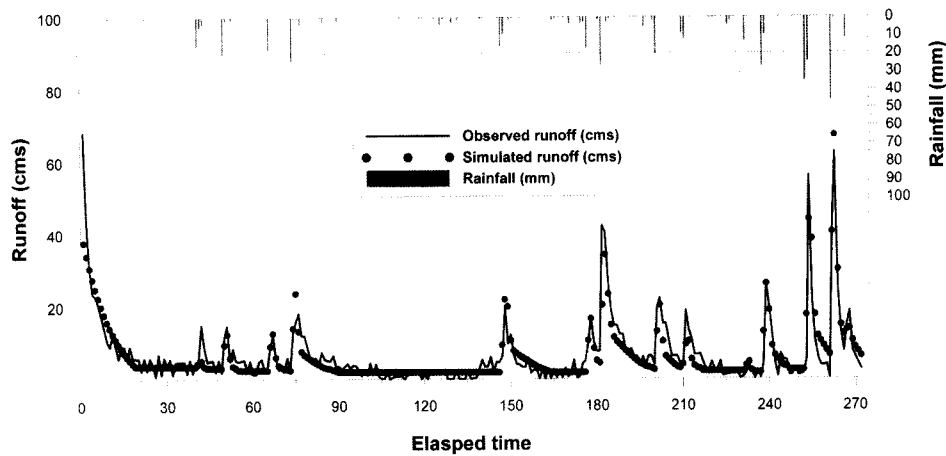


Fig. 10. Comparison between simulated and observed hydrographs by 1 day parameters of Yongdam dam basin in 2004~2005.

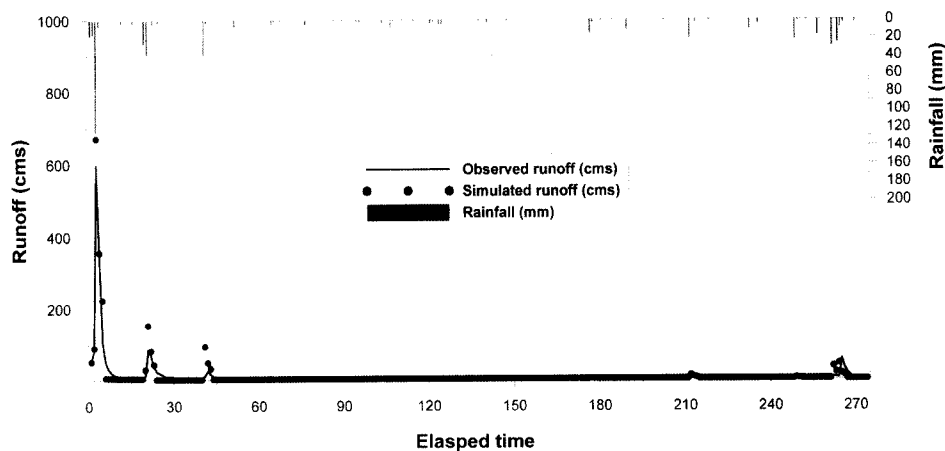


Fig. 11. Comparison between simulated and observed hydrographs by 6 day parameters of Seomjingang dam basin in 1999~2000.

Empirical CDF, 평균, 분산을 이용하여 확률적 접근을 시도하였고, 추정된 매개변수와 강우인자와의 상관관계를 분석하여 유량추정 방향을 분석하였다. 이와 같은 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Table 3에서 소양강댐을 제외하고, 4일 간격이하에서 평균은 감소하고 분산은 증가하며, Fig. 4~7에서 자료간격이 크더라도  $R^2$ 값이 큰 것이 존재함을 고려하면 자료간격이 클수록 적합한 매개변수를 추정할 확률이 줄어들지만 적합한 매개변수를 추정할 가능성이 있다.
- 2) Table 3에서 자료질이 좋은 용담댐의 경우, 다른 유역에 비하여 상대적으로 자료간격 별 평균이 크고, 충주댐을

제외한 4일 간격이하에서 분산이 작음을 볼 때, 자료질이 좋다면 상대적으로 적합한 매개변수를 추정할 확률이 크다(충주댐 유역은 분산은 평균이 작은 범위에서 작은 경우임).

- 3) Fig. 8에서 특정 총강우량 이상에서  $R^2$ 값이 크게 산정되는 것으로 보아 건기라 하더라도 강우량은 최대한 반영한다면 적합한 매개변수를 추정할 확률이 크다.
- 4) Table 4, Fig. 9에서 특정 강우크기에 따른 강우회수가 증가할수록 근소하게  $R^2$ 값의 변동폭은 감소하고  $R^2$ 값 자체가 향상되고 있으므로 상대적으로 적합한 매개변수를 추정할 확률이 크다.



결론은 종합하면 실측간격(자료간격)이 증가함에 따라 적합한 매개변수를 추정할 확률이 감소하게 되나, 강우를 최대한 반영하고 유량을 최대한 정확하게 측정한다면 실측간격이 증가하더라도 적합한 매개변수를 추정할 수 있다. 유량측정을 하는 현장에서는 항상 인력, 시간, 자본 등과 같은 제약이 따르게 되므로 희망 정확도에 따라 1)~4)에서 내린 결론을 반영하다면 현장상황에 따른 적합한 매개변수를 추정할 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

## 참고문헌

- 강경석, 이동률, 김명립, 차형선, 탱크모형을 이용한 장기 일 유출량 자료 구축, *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, pp. 245-250 (2001).
- 강신욱, 이동률, 이상호, 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구, *한국수자원학회 논문집*, 37(2), pp. 133-144 (2004).
- 건설교통부, 국가 수자원 관리 종합정보 홈페이지, <http://www.wamis.go.kr> (accessed Jun 2006).
- 노성진, 김현준, 장철희, 김동필, 홍일표, 청계천 유역의 갈수량 측정 및 분석, *한국수자원학회 학술발표회 특별세션/국제세션/발표논문 초록집*, pp. 153-153 (2004).
- 박승우, 탱크모형 셀프프로그램을 이용한 중하천의 일 유출량 추정, *한국수자원학회 논문집*, 26(3), pp. 47-61 (1993).
- 백천우, 김상단, 조덕준, 김중훈, HS를 이용한 Tank Model 최적 매개변수 추정 및 건기 하천유지유량 산정에 관한 연구, *한국방재학회 학술발표회 논문집*, pp. 189-194 (2005).
- 산업기지기개발공사, 탱크모형 방법에 의한 유출 해석법, 연구보고서 (1985).
- 성윤경, 김상현, 김현준, 김남원, 다양한 목적함수와 최적화 방법을 달리한 SIMHYD와 TANK 모형의 적용성 연구, *한국수자원학회 논문집*, 37(2), pp. 121-131 (2004).
- 신성철, 강경석, 서병하, Tank Model의 매개변수 최적화에 관한 연구, *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, pp. 158-163 (2001).
- 이관수, 이영석, 정일광, 탱크모형의 매개변수 추정을 위한 상태공간모형의 결정, *한국수자원학회 논문집*, 28(2), pp. 125-135 (1995).
- 이상호, 안태진, 윤병만, 심명필, 적설 및 용설 모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐 및 충주댐에 대한 적용, *한국수자원학회 논문집*, 36(5), pp. 851-861 (2003).
- 최경숙, 모형의 복잡성, 구조 및 목적함수가 모형 검정에 미치는 영향, *한국농공학회 논문집*, 45(4), pp. 89-97 (2003).
- 한명선, 정성원, 문장원, 김동필, *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, pp. 575-578 (2003).
- Geem, Z. W., Kim, J. H. and Loganathan, G. V., A New Heuristic Optimization Technique : Harmony Search, *Simulation*, 14(1), pp. 34-39 (2001).
- Sugawara, M. and Funiyuki, M., A method of Revision of the River Discharge by Means of a Rainfall Model, *Collection of research papers about forecasting hydrologic variables* (1956).
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyama, Y., Tank Model program for personal computer and the way to use, *National Research Center for Disaster Prevention* (1986).