

# Tank 모형의 4번째 저류탱크의 유출 불확실성 분석

## Runoff Uncertainty Analysis on the 4th Storage Tank of Tank Model

정 일 원\* / 구 보 영\*\* / 배 덕 효\*\*\*  
Jung, Il Won / Koo, Bo Young / Bae, Deg Hyo

### Abstract

Estimating a reliable and optimal parameters in applying a hydrologic model is still difficult in spite of their importance. Understanding hydrologic response of the model according to physical range of parameters will improve the possibility to estimate highly reliable parameters. The goal of this study is to explore the problems that may be caused in lowflow simulation according to variation of the parameter of Tank model that has been known to have excellent applicability in a long-term runoff analysis in various humid climate areas. This study analyzed the storage depth variation of the fourth storage tank, which simulate baseflow component, and investigated the change of the stability period according to each parameter. This study also evaluated the lowflow behavior according to the variation of the runoff hole coefficient of the fourth storage tank A4. The results show that the period required for stability of the fourth storage tank was 2~20 years depending on model parameters. The variation of A4 hardly influenced the statistical values of the simulated flow. It also reveal that the upper limits of A4 for simulating streamflow under arrange low discharge (Q275) is 0.001, when the optimal parameters obtained by Powell's method are used. It can be concluded that the analysis for obtaining stability periods of the fourth tank and the physical range of A4 parameter should be performed to estimate reliable lowflow analysis using a Tank model.

**keywords** : Tank model, Baseflow, Storage tank, Uncertainty, Lumped model

### 요 지

유출모형 적용시 신뢰성 있는 최적의 매개변수를 결정하는 것은 무엇보다 중요하나 여전히 어려운 문제로 남아있다. 모형의 매개변수가 가지는 물리적인 범위와 매개변수에 따른 모형의 유출응답을 이해하는 것은 신뢰성 높은 매개변수를 추정할 수 있는 가능성을 향상시킬 것이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 습윤기후지역에서 장기유출분석에 적용성이 우수하다고 알려져 있는 Tank 모형의 매개변수 값들에 따라 저수유출모의에서 발생할 수 있는 불확실성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 각 매개변수에 따라 기저유출성분을 모의하는 4번째 저류탱크의 저류고의 변동성과 안정화 기간의 변화를 분석하였다. 또한 4번째 탱크의 유출공계수인 A4의 변화가 통계치에 미치는 영향과 저수유출량 모의에 미치는 영향을 평가하였다. 분석결과 4번째 저류탱크의 안정화에 필요한 기간은 매개변수에 따라

\* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정  
Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: bobilwon@paran.com)  
\*\* 세종대학교 토목환경공학과 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: boyoungkoo@nate.com)  
\*\*\* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

2~20년 이상이 필요한 것으로 분석되었으며, A4의 변화가 모형의 모의 결과에 대한 통계치에는 거의 영향을 못 미치는 것으로 나타났다. 4개 유역에 대해 Powell 방법으로 최적화된 매개변수를 이용하여 관측 저수유출량에 대한 모의능력을 분석한 결과 A4가 0.001이하의 값을 가질 경우 유황성분 중에서 저수량(Q275) 이하의 유출량에 대해서는 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 결론적으로 Tank 모형을 이용하여 신뢰성 있는 저수유출분석을 수행하기 위해서는 매개변수에 따른 4번째 저류탱크의 안정화기간을 고려하는 것과 추정된 A4값이 관측 저수유출량의 변동성을 모의할 수 있는지를 평가하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : Tank 모형, 기저유출, 저류탱크, 불확실성, 집중형 모형

## 1. 서론

장기유출모형은 수자원의 안정적인 공급과 효율적인 관리에 관련된 다양한 수자원 문제를 해결하기 위해 개발되었다. 1966년 Crawford and Linsley가 SWM (Stanford Watershed Model)을 개발한 이래로 지금까지 세계적으로 많은 장기유출모형들이 개발되어 왔다 (Singh, 1995). 이러한 모형들은 수문순환과정의 공간적인 변화를 무시하느냐 혹은 고려하느냐에 따라 집중형 모형(lumped model)과 분포형 모형(distributed model)으로 구분할 수 있다. 이 중 집중형 모형은 분포형 모형에 비해 모형의 구조가 간단하고, 유출분석에 필요한 자료의 수도 적기 때문에 실용적인 측면에서 활용성이 높다. 대표적인 집중형 모형으로는 유역을 여러 개의 연속된 저류탱크로 가정하여 유출분석을 수행하는 Tank 모형(Sugawara and Funiyuki, 1956)이 있다. 이 모형은 간단한 유출계산 알고리즘과 구조에 비해, 다양한 습윤기후지역(humid climate regions)에서 다른 모형들에 비해 적용성이 우수하다고 알려져 있다(World Meteorological Organization, 1975; Franchini and Pacciani, 1991). 그러나 이러한 장점을 가진 Tank 모형도 유출분석을 위해서는 많은 매개변수를 보정해야 하는 어려움이 있다. 이로 인해 이 모형이 개발된 이래로 지금까지 매개변수를 보다 편리하고 정확하게 보정하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다.

Kadoya and Nagai(1980)는 수동보정방법으로 보정 하던 기존의 방법을 개선하기 위해 자동추적방법인 Powell 방법을 적용하여 매개변수를 추정하려고 시도하였다. Yokoo et al.(2001)도 유역의 지형인자와 Tank 모형 매개변수와의 관계를 분석할 목적으로 Powell 방법을 적용하였다. Lee and Singh(1999)은 Kalman filter 기법을 도입하여 실시간으로 매개변수를 보정하는 방법을 제시하기도 하였다. Paik et al.(2005)은 유출량이 계절별로 큰 차이를 보이는 유역에서 매개변수를 추정하기 위해 일년을 유출량 크기에 따라 3개의 기간으로 구

분하여 매개변수를 추정하였다. 또한 이 연구에서는 Powell 방법뿐 아니라 GA(Genetic Algorithm)와 조화 탐색법(harmony search)을 적용하여 최적화방법에 따른 영향도 분석하였다. Chen et al.(2005)도 Multistart Powell과 SCE(Stuffed Complex Evolution) 방법을 비교하여 SCE 방법이 Tank 모형의 매개변수 보정에서 더 나은 결과를 보인다고 제시하였다. 국내에서도 이관수 등(1995), 이상호(1998), 김현영과 박승우(1998), 이동률과 김형섭 (1999)이 Tank 모형의 매개변수를 보다 신뢰성 있게 추정하기 위한 연구들을 수행하였다.

지금까지의 연구들은 대부분 모의결과와 관측치의 오차를 목적함수로 결정하고 이 함수가 최소값을 갖는 최적의 매개변수를 추정할 수 있는 최적화 알고리즘을 개발하는 것에 초점이 맞춰져 있었다. 이러한 최적화방법들은 편리하고 빠르게 매개변수를 보정할 수 있는 장점이 있으나 물리적인 의미를 가진 매개변수를 추정하지 못하고 단순히 수학적으로 최소의 목적함수값을 갖는 매개변수들을 추정할 수 있는 단점도 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 모형이 가지는 매개변수의 물리적 범위와 매개변수에 따라 유출분석 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 인지하고 이러한 매개변수들이 추정되지 않도록 조정하는 것이 필요하다(배덕효 등, 2003). 유출모형의 매개변수에 따라 발생할 수 있는 불확실성을 평가하는 것은 유출분석결과와 신뢰성을 향상시키기 위해 중요한 일이다. 이를 통해 모형 실행자가 모형 매개변수에 따라 발생가능한 문제점을 인지하고 그것의 원인을 제거하거나 최소화한다면 Tank 모형의 적용시 유출분석결과와 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 Tank 모형 내에서 기저유출(baseflow)을 모의하는 4번째 저류탱크가 모형의 매개변수들에 따라 어떠한 반응을 하는지 그리고 어떠한 문제들이 발생하는지를 분석하고자 하였다. 이를 통해 Tank 모형이 현실적인 유출 반응을 모의하기 위해 요구되는 조건을 파악하고 해결책을 모색함으로써 보다 신뢰성 높은 저수유출 분석이 가능하도록 하고자 하였다.

## 2. Tank 모형 및 적용 구역

### 2.1 모형의 개요 및 유출계산 알고리즘

Tank 모형은 강수량, 증발산량, 유출량 자료만으로 유출분석이 가능하며, 저류탱크의 수에 따라 단기유출 뿐 아니라 장기유출분석도 가능하다. 일반적으로 일단위 장기유출분석에는 직렬 4단 Tank 모형이 적용되는데, Sugawara(1972)는 많은 일본의 유역들에 적용하여 4단 Tank 모형이 일단위 유출분석에 적합하다고 제시하였다. 4단 Tank 모형에서 상단의 두 탱크는 빠른 강우-유출응답을 표현하며, 하단의 두 탱크는 느린 응답을 모의한다(Yokoo et al., 2001). Fig. 1은 본 연구에서 적용한 Tank 모형의 구조와 각 단의 저류탱크가 모의하는 유출성분을 나타낸 것이다. 각 단의 저류탱크들은 유출량의 조합을 통해 다양한 수문곡선을 모의할 수 있다.

Tank 모형에서 첫 번째 탱크는 강수에 의해 저류고가 증가하고, 측면 및 바다 유출공을 통해 유출과 침투를 모의한다. 하부의 저류탱크들은 상류단 탱크의 바다 유출공에서 유입되는 유입량에 지배를 받는다. 특히 본 연구에서 분석하려고 하는 4번째 탱크의 경우 세 번째 탱크로부터 유입량을 받으며, 매개변수가 단지 저류고와 유출공 계수 두개뿐이다. 이 탱크의 저류고는 세 번째 탱크의 침투량에 의해 증가되고 측면유

출공계수와 저류고의 곱으로 계산되는 유출량에 의해서만 감소된다.

유역에서의 일유출량은 아래의 Eq. (1)~ Eq. (4)에 의해 계산된다. 여기서  $R$ 은 각 탱크의 측면유출공으로부터의 유출고(mm/day)를 나타내며,  $I$ 는 하부단 탱크로의 침투고(mm/day),  $P$ 는 강수량(mm/day),  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $Q$ 는 하루 동안의 모의유량( $m^3/sec$ )을 뜻한다.  $n$ 은 상부로부터의 탱크 개수,  $t$ 는 유출계산 시작일로부터 현재까지의 계산 일수를 나타낸다.  $A(n,x)$ 와  $H(n,x)$ 는  $n$ 번째 탱크의  $x$  번째 측면유출공계수(1/day)와 유출공높이(mm)를 나타낸다. 첫 번째 탱크에서만  $x=1, 2$ 이고, 나머지 탱크에서는  $x=1$ 이다.  $B(n)$ 는 하단탱크로의 침투 및 침투공 계수(1/day),  $h(n,t)$ 는 각 단의 저류고(mm)를 의미하며,  $A$ 는 5개,  $B$  3개,  $H$  4개,  $h$  4개로 총 매개변수의 수는 16개이다. 각 단의  $A$ ,  $B$  및  $H$ 는 유출계산시 변화지 않는 고정매개변수이며,  $h$ 는 시간에 따른 저류량의 변화를 나타내는 변수로서 계산 시작시점에만 지정하도록 되어 있다.

$$R(n,t) = A(n,x)(h(n,t) - H(n,x)) \quad (1)$$

$$\text{for } h(n,t) > H(n)$$

$$= 0$$

$$\text{for } h(n,t) \leq H(n)$$

$$I(n,t) = B(n)h(n,t) \quad (2)$$

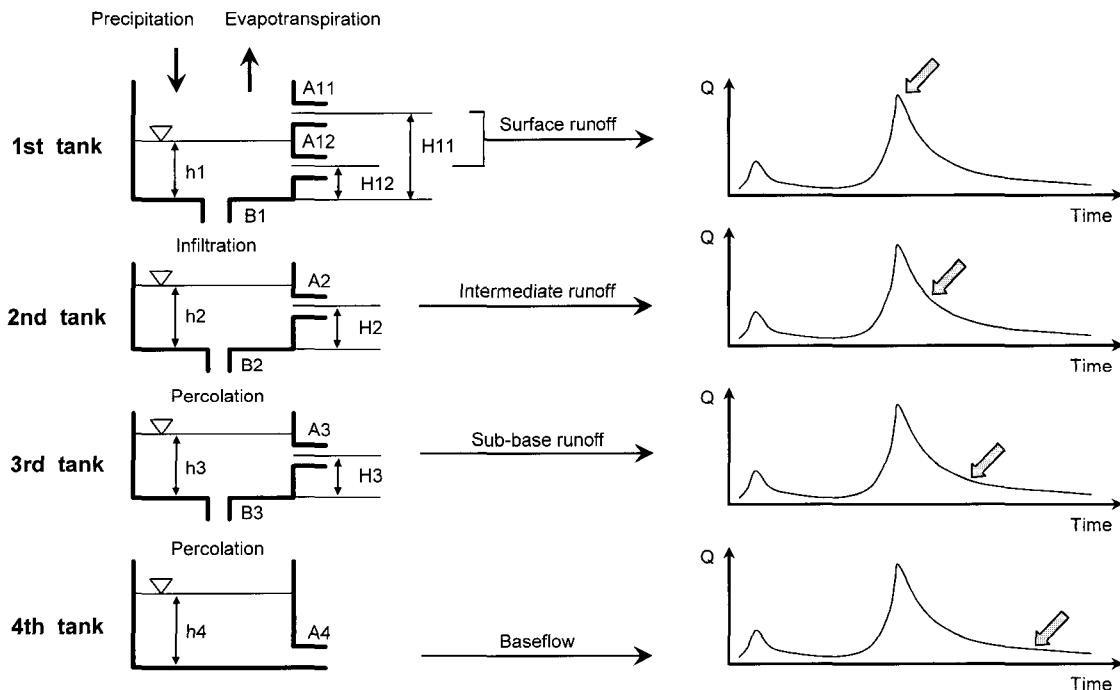


Fig. 1. Schematic of the Tank model used in this study

$$h(n,t+1) = h(n,t) - P(t+1) - E(t+1) - R(n,t) - I(t) \quad (3)$$

for  $n = 1$

$$= h(n,t) - R(n,t) - I(n,t) + I(n-1,t)$$

for  $n = 2, 3, \text{ and } 4$

$$Q(t) = \frac{A_w}{86.4} \sum_{n=1}^4 R(n,t) \quad (4)$$

## 2.2 대상유역 현황 및 자료

Tank 모형의 최하단 저류탱크 매개변수 값에 따라 발생할 수 있는 문제점이 유출분석에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 유역면적(676.73~6661.58km<sup>2</sup>) 이 상이한 4개의 댐유역을 선정하였다(Fig. 2). 이 유역들은 6월~8월에 연강수량의 54% 이상이 집중되는 강우특성으로 인해 시기별 유출량의 편차가 매우 큰 특징을 지니고 있으며, 강수량이 적은 11월~2월에는 유출량이 매우 작다. 이로 인해 Table 1에서와 같이 최대유

출량과 최소유출량의 편차가 큰 것을 볼 수 있다. 또한 평균유출량에 비해 중앙값이 1/3 이하인 것을 볼 수 있는데, 이것은 평균유출량보다 적은 유량의 발생빈도가 높다는 것을 보여준다. 이러한 유역의 유출분석에서는 홍수량의 모의뿐 아니라 저수량의 정확한 산정이 중요하다. 특히 갈수기의 하천유량에서 기저유출이 차지하는 비중이 크므로, Tank 모형의 적용시 기저유출에 관련된 매개변수를 정확하게 산정하는 것이 중요하다.

분석기간 동안의 강수량과 댐유입량 자료를 각 유역에 대해 수집하고, 강수와 유입량의 차이를 계산하여 실제증발산량으로 이용하였다. Ward and Elliot(1995)는 장기간의 강수량과 유출량의 차이는 유역의 실제증발산량에 근접하다고 제시하였다.

## 3. 방법론

본 연구에서는 Tank 모형을 이용한 유출분석시 4번째 저류탱크에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하기 위해 크게 세 가지 분석을 수행하였다.

Table 1. Analysis period and hydrologic characteristics of the study areas

Watershed	Analysis period	Flow observation (m <sup>3</sup> /s)				Mean annual precipitation (mm)
		Mean	Median	Max.	Min.	
Guesan	19 years(1982-2000)	13.7	3.6	1292.4	0.0	1156.2
Andong	24 years(1977-2000)	31.1	10.8	2082.0	0.0	1081.4
Soyang	27 years(1974-2000)	68.8	21.0	7405.6	0.0	1155.7
Chungju	15 years(1986-2000)	164.9	53.9	13142.1	4.1	1266.3

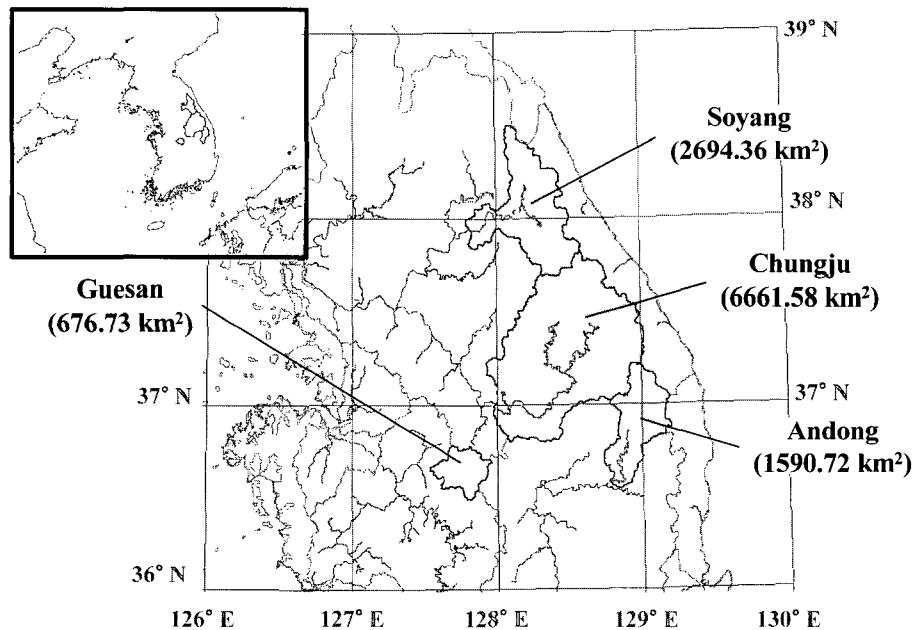


Fig. 2. Location of the study areas

첫째, 매개변수에 따라 4번째 저류탱크가 안정화되는 시기의 변화를 분석하였다. 비선형 유출모형의 경우 매개변수 초기치에 따라 상당 기간동안 유출결과에 영향을 받는다. 이러한 영향을 배제하기 위해 초기치를 추정하거나 모의시점부터 일정 기간을 유출분석에서 제외하고 있다. 그러나 초기치를 정확하게 추정하는 것은 매우 어려운 것으로, 보통 일정 기간을 제외하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 모의시점부터 초기치의 영향을 받지 않은 기간까지를 본 연구에서는 안정화기간(stability period)이라고 정의하였다. 안정화기간이 길어지면 유출분석결과에 불확실성을 증대시키며, 모형 매개변수의 안정적인 추정에도 문제가 발생할 수 있다. Tank 모형의 각 저류탱크의 안정화기간은 모의하는 유출성분의 유출응답 속도에 따라 다르다. 지표면유출성분을 모의하는 첫 번째 저류탱크가 가장 빠르고, 느린 기저유출 성분을 모의하는 네 번째 저류탱크가 가장 느리다. 본 연구에서는 네 번째 저류탱크가 안정화되는 기간이 매개변수에 따라 어떻게 변화되는지를 분석하였다. 저류탱크의 안정화시기를 결정하기 위해 간단한 방법을 제시하였는데, 이것은 각 유역의 강수와 증발산자료를 연속하여 연결하는 것이다. 예를 들어 소양강유역의 총 27년간의 자료를 세 번 연결하여 총 81년간의 자료를 만드는 것이다. 이 자료를 이용하여 연속적으로 모의를 수행한 다음 첫 번째 기간에서의 저류고 값이 두 번째와 세 번째 기간에서 동일한 결과를 보일 때까지 저류고가 안정화된 것으로 판단하였다.

둘째, 최적화 방법인 Powell 방법(Kuester and Mize, 1973)을 이용하여 유역별 매개변수를 추정하고 실제유역에서 A4의 변화에 따른 통계치의 변화를 분석하였다. 이것은 A4가 관측치와 계산치의 적합성을 정량적으로 나타내는 통계치에 얼마나 영향을 주는지를 평가하기 위한 것이다. Powell 방법을 통한 매개변수 보정 절차는 다음과 같다. 전체자료기간을 보정기간과 검정기간으로 구분하여, 보정기간에서 추정된 매개변수를 검정기간에 그대로 적용하여 추정된 매개변수의 적합성을 분석하였다. 보다 자세한 매개변수 보정방법은 이동률과 김형섭(1999), 배덕효 등(2003) 등을 참고하기 바란다.

셋째, 보정된 A4에 따른 최대·최소 저류고 및 유출고의 한계를 유역별로 분석하였다. 또한 이로 인해 유역의 저수유출량 모의에서 발생할 수 있는 문제를 제시하고자 하였다. 이 것은 최적화방법으로 추정된 Tank 모형의 매개변수들이 관측 저수유출량을 얼마나 적합하게 모의하는지를 평가하고, A4가 관측저수유량 모의에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다.

#### 4. 분석 결과

##### 4.1 초기저류고와 A4에 따른 안정화 기간의 변화

Table 2는 Powell 방법으로 보정된 유역별 매개변수를 제시한 것이며, Table 3은 보정기간과 검정기간에서의 통계치를 나타낸 것이다. 모든 유역에서 관측유량에

Table 2. Calibrated model parameters for study areas

Basin Name	Parameters											
	$A_{11}$ (1/day)	$A_{12}$ (1/day)	$B_1$ (1/day)	$A_2$ (1/day)	$B_2$ (1/day)	$A_3$ (1/day)	$B_3$ (1/day)	$A_4$ (1/day)	$H_{11}$ (mm)	$H_{12}$ (mm)	$H_2$ (mm)	$H_3$ (mm)
Guesan	0.572	0.127	0.115	0.058	0.101	0.012	0.046	0.0005	57.7	20.4	13.2	10.0
Andong	0.551	0.106	0.099	0.177	0.089	0.009	0.045	0.0003	50.7	20.4	10.2	10.0
Soyang	0.586	0.238	0.088	0.200	0.800	0.091	0.052	0.0008	55.4	25.8	10.9	10.9
Chungju	0.370	0.103	0.089	0.160	0.156	0.009	0.024	0.0006	56.8	33.8	5.6	10.0

Table 3. Statistical results of model calibration and verification periods for study areas

Basin Name	Calibration				Verification			
	Period	CORR	RMSE (mm/day)	ME	Period	CORR	RMSE (mm/day)	ME
Guesan	1991-2000	0.91	2.42	0.83	1982-1990	0.69	4.65	0.45
Andong	1991-2000	0.91	3.02	0.64	1977-1990	0.86	2.37	0.69
Soyang	1991-2000	0.87	4.80	0.63	1974-1990	0.83	3.83	0.66
Chungju	1994-2000	0.92	2.25	0.85	1986-1993	0.88	3.55	0.76

Correlation coefficient (CORR) =  $SS_o / \sqrt{SS_o \times SS_s}$ ,  $SS_o = \sum(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$ ,  $SS_o = \sum(O_i - \bar{O})^2$ ,  $SS_s = \sum(S_i - \bar{S})^2$ , where O is observed flow and S is simulated flow.

Root mean square error (RMSE) =  $\sqrt{\sum(O_i - S_i)^2 / n}$ , where n is a number of data.

Nash-Sutcliffe efficiency (ME) =  $[\sum(O_i - \bar{O})^2 - \sum(O_i - S_i)^2] / \sum(O_i - \bar{O})^2$

매우 적합하게 매개변수가 보정된 것을 볼 수 있다. Powell 방법으로 최적화된 매개변수들 중에서 A4를 제외한 나머지 변수들은 고정시키고, A4를 0.0001~0.01까지 0.0001씩 변화시키기에 따른 4번째 저류탱크의 변화를 분석하였다. Tank 모형을 개발한 Sugawara는 일본유역에서 경험적으로 A4가 0.0005~0.01의 범위를 갖는다고 제시하였다. 그러나 실무에서 0.0005 이하의 값도 적용하고 있으므로 본 연구에서는 0.0001~0.01 범위에 대해 분석하였다. Fig. 3는 A4가 0.0001에서 0.005까지 변화됨에 따른 소양강댐 유역에서의 저류고의 변화를 나타낸 것이다. A4가 0.0001인 경우 저류고가 모의기간에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 그 이상의 값을 가질 경우에는 증가되는 기간이 점차 짧아지는 것으로 나타났다. Fig. 3을 살펴보면 A4가 0.0005 이상인 경우 두 번째와 세 번째 27년 동안의 저류고가 동일한 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 모형의 초기조건과 매개변수가 적용된 것으로 당연한 결과이다. 그러나 첫 번째 기간에서는 초기저류고의 영향으로 시작시점부터 굵은선(Fig. 3)으로 표시한 부분까지 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 이 기간은 초기저류고와 매개변수에 따라 저류고가 안정화되는데 필요한 기간으로 본 연구에서는 이것을 안정화기간이라 명하였다. 동일한 초기저류고에서도 매개변수에 따라 안정화되는 기간이 큰 차이를 보이는 것을 볼 수 있다.

각 유역별 초기저류고와 매개변수에 따른 안정화기간을 분석하였다. 초기저류고는 0~500.0mm까지 6개에 대해 분석하였다(Fig. 4). 유역별로 매개변수가 상이함에도 불구하고 매우 유사한 결과를 보였다. 모든 유역에서 초기저류고가 안정화기간에 미치는 영향은 적으며, A4가 안정화기간에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 괴산댐유역에서 A4가 0.004 이상의 값을 가질 경우 초기저류고에 따라 차이는 있으나 안정화기간이 매우 빨라지는 것을 볼 수 있다. 이것은 4번째 저류탱크의 저류고가 유출모의 중에 0이 됨으로 인해 나타나는 현상이다. 전체유역에서 A4가 0.003의 값을 가질 경우 평균적으로 약 6년(2190일)의 안정화기간이 필요하며, 2년 이내에 안정화되기 위해서는 0.009 이상의 값을 가져야 되는 것으로 나타났다.

Table 4에 제시된 매개변수들의 조합을 이용하여 Tank 모형의 매개변수들이 4번째 탱크의 안정화기간에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 유역은 안동댐유역으로 선정하였으며, 4단탱크의 초기저류고는 500 mm로 하여 분석을 수행하였다. Table 4에 제시된 매개변수의 상하한값은 Sugawara(1972)가 일본의 여러 유역에 적용하여 제시한 경험적인 범위이며, 일부 매개변수는 본 연구에서 추정된 매개변수 범위를 고려하여 조정하였다. A4는 5개 값(0.001, 0.003, 0.005, 0.007, 0.009)에 대해 분석하였으며, 나머지 변수는 최대·최소값만을 사

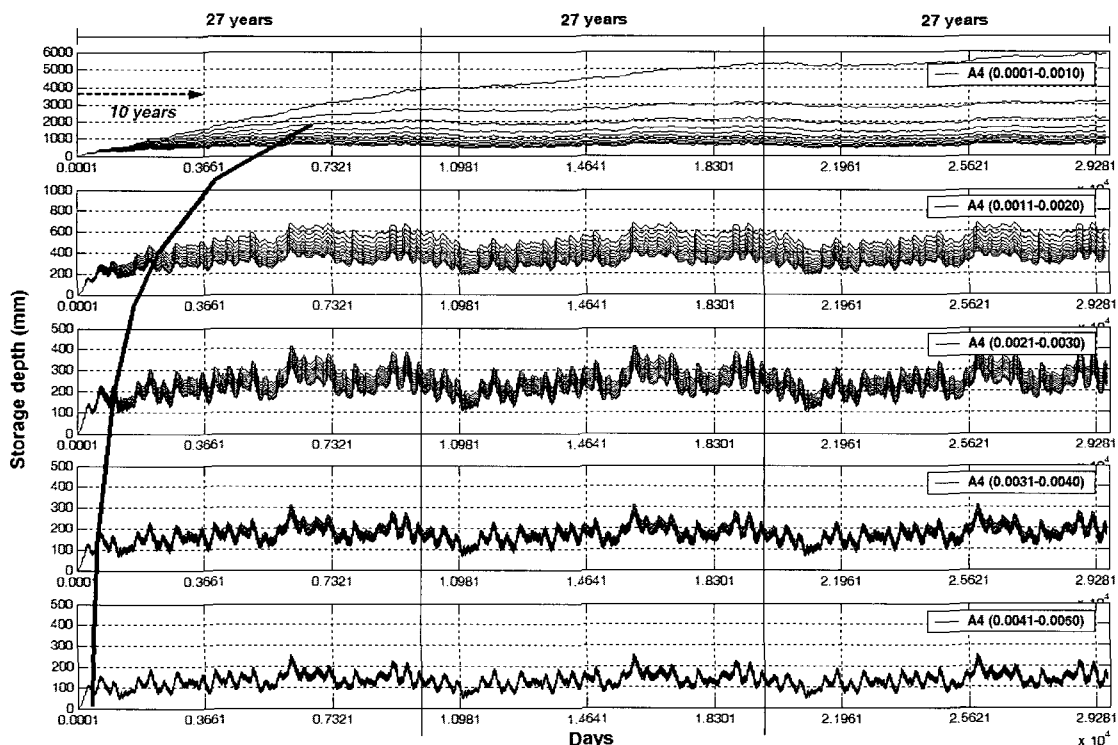


Fig. 3. Storage depth variations according to A4 parameter at Soyang; bold line shows stability periods

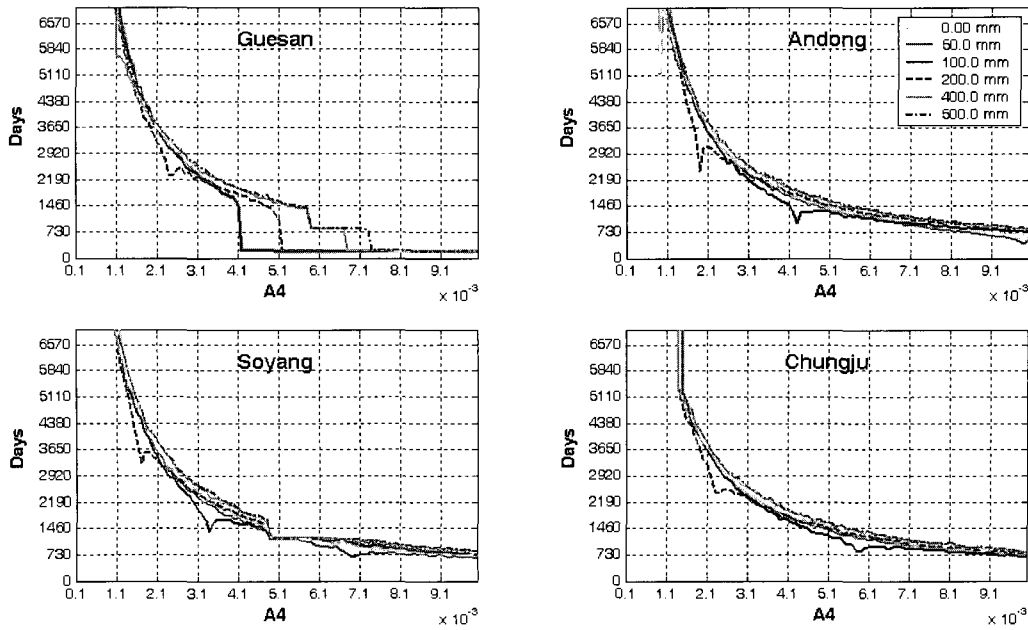


Fig. 4. Stability periods according to A4 parameter and initial storage depth of 4th storage tank

Table 4. Range of Tank model's parameters for stability period analysis

Range	Parameters										
	$A_{11}$ (1/day)	$A_{12}$ (1/day)	$B_1$ (1/day)	$A_2$ (1/day)	$B_2$ (1/day)	$A_3$ (1/day)	$B_3$ (1/day)	$A_4$ (1/day)	$H_{11}$ (mm)	$H_{12}$ (mm)	$H_2$ (mm)
Maximum	0.600	0.500	0.500	0.100	0.100	0.100	0.100	60.0	30.0	50.0	50.0
Minimum	0.100	0.100	0.050	0.010	0.010	0.005	0.005	30.0	10.0	0.0	0.0

용하였다. 총 10240개(211×5)의 매개변수 셀 중에서 각 저류탱크의 유출공계수들의 합이 1을 초과하는 셀을 제외한 5120개에 대해 분석을 수행하였다. Fig.5는 매개변수셀에 따른 분석결과를 A4에 대해 나타낸 것이다. A4가 작을수록 다른 매개변수들에 따라 안정화기간의 변화가 큰 것으로 나타났으며, A4가 커짐에 따라 다른 매개변수들이 미치는 영향이 상대적으로 줄어들었다. 피산댐을 제외한 나머지 유역에서의 안정화기간이 평균에 대한 표준편차의 ±0.5 범위내에 있는 것으로 나타났다. 피산댐의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 저류고가 0이 됨으로 인해 빠르게 안정화되는 것으로, 안정화기간의 최소값은 이러한 경우에 결정되는 것으로 사료된다.

Fig. 6은 각 매개변수들이 4번째 탱크의 안정화기간에 미치는 영향을 분석하기 위해 매개변수의 변화에 따른 안정화기간의 변화를 등고선으로 도시한 것이다. A11은 안정화기간에 미치는 영향이 거의 없으나 A12는 값이 증가함에 따라 안정화기간이 짧아지는 것으로 나타났다. A2와 B2의 경우 A2가 작아지고 B2가 커질수록 안정화기간이 증가하였으며, B2가 0.08 이상의 값을 가질 경우에는 A2에 상관없이 안정화기간이 커지는 것으로 나타났다. A3와 B3도 동일한 결과를 나타내었다.

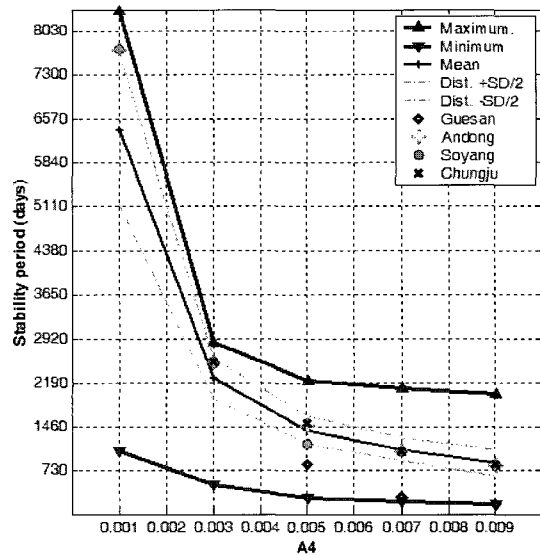


Fig. 5. Variation of stability period depending on model parameter set

A4의 경우 값이 커짐에 따라 전반적으로 안정화기간이 줄어들었으나 A3가 0.06 이상의 값을 가질 경우 안정화기간이 A4보다는 A3에 따라 지배되는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 저류탱크의 유출공높이인 H11과 H12는 큰

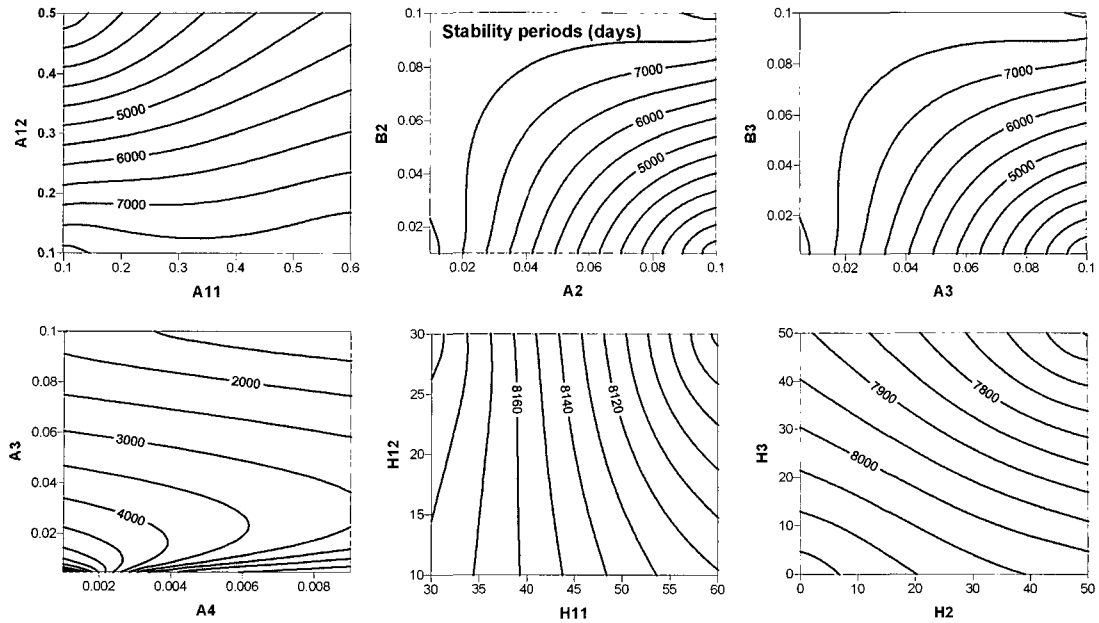


Fig. 6. Contour map of stability period (days) according to the variation of model parameters

영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. H11이 증가함에 따라 안정화기간이 아주 적게 감소하였다. H2와 H3의 경우에도 값이 증가함에 따라 안정화기간이 감소하는 것으로 나타났으나 그 변화폭은 매우 작았다.

#### 4.2 A4에 따른 통계치 변화

Table 2에 제시된 매개변수들 중에서 A4만을 0.0001~0.01까지 0.0001씩 증가시켜 상관계수, 평균제곱근오차, N-S의 모형효율성계수, 유출용적오차의 변화를 분석하였다. 분석기간은 각 유역에서의 전체자료기간을 이용하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 유출용적오차를 제외한 나머지 통계치에서는 거의 변화가 나타나지 않았다. 유출용적오차에서도 A4가 0.001 이상에서는 통계치의 변화가 미미하였다. A4가 0.0001에서 0.001 사이의 값에서는 유출용적오차가 최대 5% 정도 증가하였다. 이것은 이 범위의 A4값이 매우 작을 경우 4번째 탱크의 저류고가 상당 기간동안 계속 증가하여 최대 5%의 유량이 유출되지 않고 저류되기 때문이다. 이러한 상황을 제외하고는 A4가 통계치에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

#### 4.3 A4에 따른 저수유출량 모의 능력

저류고가 안정화된 상황에서 A4가 변화됨에 따른 최대·최소저류고와 유출고의 변화를 분석하였다. A4가 0.0005 이하의 경우 저류고가 지속적으로 증가함으로 인해 안정화기간이 나타나지 않아 분석에서 제외하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 A4가 증가함에 따라 4

번째 저류탱크의 최대 및 최소 저류고는 감소하였다. 그러나 최대유출고는 A4가 증가함에 따라 증가하였다. 또한 최대유출고와 최소유출고의 차이도 증가하였다. 이것은 A4가 증가함에 따라 모의할 수 있는 기저유출의 범위가 증가한다는 것을 나타낸다. 유역별로 다소 차이를 보이고 있는데 이러한 범위도 다른 매개변수들에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

A4에 따른 유역별 관측 저수유량(1 mm/day 이하)의 변동성을 분석하였다(Fig. 9). 괴산댐은 8 m<sup>3</sup>/sec, 안동댐 20 m<sup>3</sup>/sec, 소양강댐 30 m<sup>3</sup>/sec, 충주댐 80 m<sup>3</sup>/sec 이하의 관측유량에 대한 Tank 모형의 모의 적합성을 분석하였다. 이 저수유량 이하의 값들은 유역별로 전체 자료기간의 75.2%(괴산), 69.8%(안동), 60.4%(소양), 64.1%(충주)를 차지하고 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 A4가 0.001 이하의 값을 가질 경우에는 유역별로 특정 유량값 이하에 대해서는 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 A4가 작을수록 모의할 수 있는 최소유량값에 한계가 있기 때문이다. Table 5는 각 유역의 유황을 나타낸 것으로 Fig. 9에서 보는 바와 같이 매개변수가 0.001 이하에서는 저수량(Q275) 이하의 유출량에 대해 모의하지 못하고 있다. 갈수량(Q355)은 수공구조물 설계시 하천유지유량 결정에 이용되는 값으로 이러한 매개변수를 적용할 경우 유출분석의 신뢰성에 문제가 발생할 수도 있을 것이다. A4가 0.005인 경우에는 관측 저수유량을 0.001이하의 값을 가지는 경우보다 잘 모의하는 것을 볼 수 있다. 그러나 A4가 0.010인 경우 개선된 결과를 보이지 않았



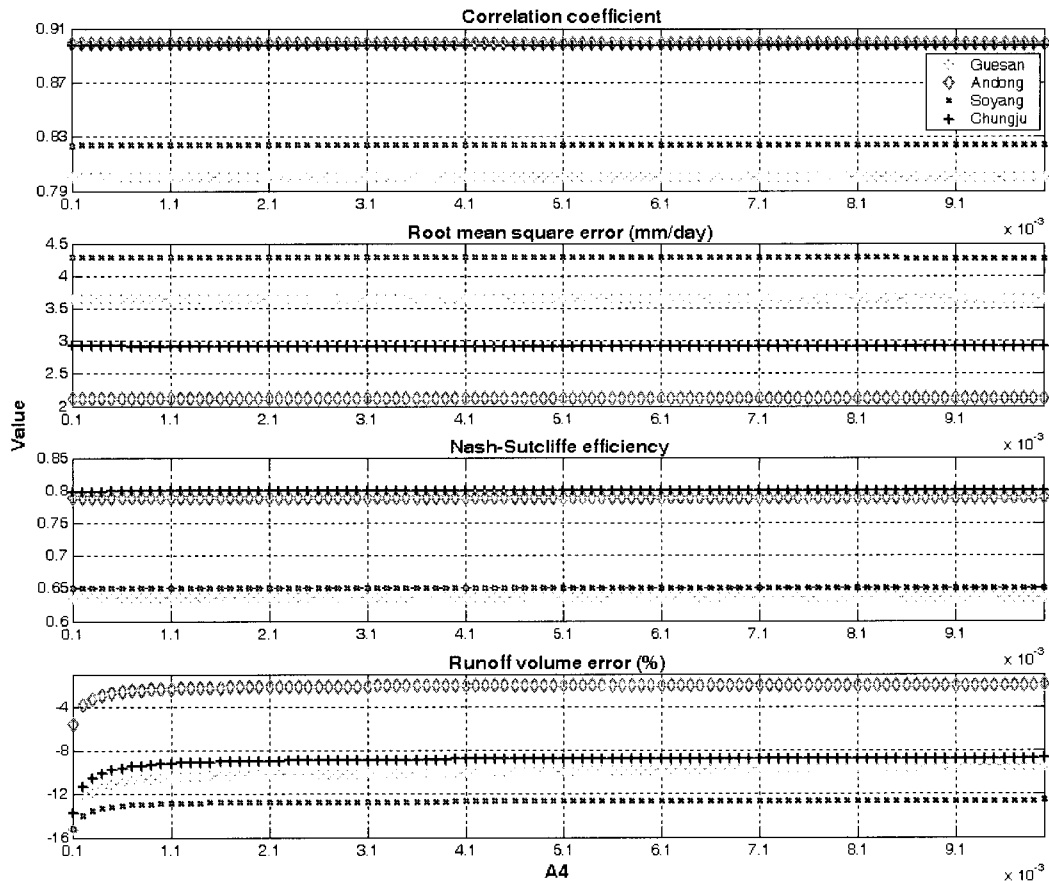


Fig. 7. Statistical values according to A4 parameters

으며, 0.005인 경우와 유사한 결과를 보였다. Fig. 10은 A4를 0.001~0.005 사이의 값 중에서 변화시켜가면서 저수유량에 대한 적합성이 높은 A4 값을 재추정한 것이다. A4만을 변화시킨 결과이지만 저수유출량에 대한 적합성이 조금씩 좋아진 것을 볼 수 있다.

### 5. 토 의

본 연구에서는 Tank 모형에서 느린 기저유출 성분을 모의하는 4번째 저류탱크의 거동을 분석함으로써 보다 정확한 저수유출을 모의할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 이를 위해 Tank 모형의 매개변수 값

에 따른 저류고와 유출고의 변화와 안정화기간의 변동성을 분석하였으며, 관측 저수유량에 대한 모의 적합성도 분석하였다.

일반적으로 많은 장기유출모형들은 유역을 가상의 저수지나 저류탱크로 표현하고 있다. 이러한 모형들을 적용할 경우 각 저수지나 저류탱크의 초기저류고 결정의 어려움으로 인해 저류고가 안정화될 때까지 유출결과에 불확실성을 증대시키게 된다. 따라서 이러한 불확실성을 최소화하기 위해 통상 유출계산 초기의 2~3년 정도의 기간을 유출분석에서 제외하고 있다. 그러나 본 연구에서 분석한 Tank 모형의 4번째 저류탱크의 안정

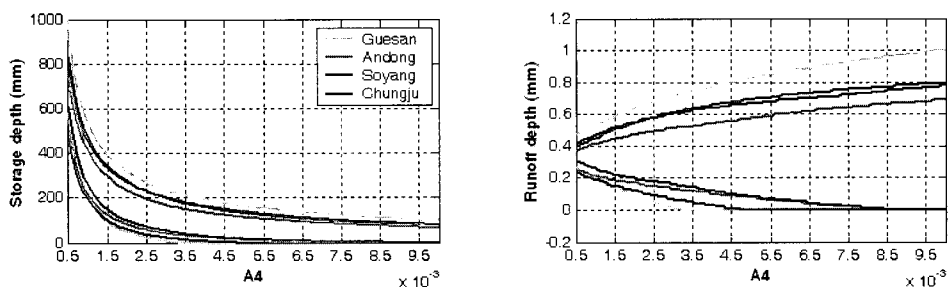


Fig. 8. Maximum and minimum storage depth and runoff depth according to A4

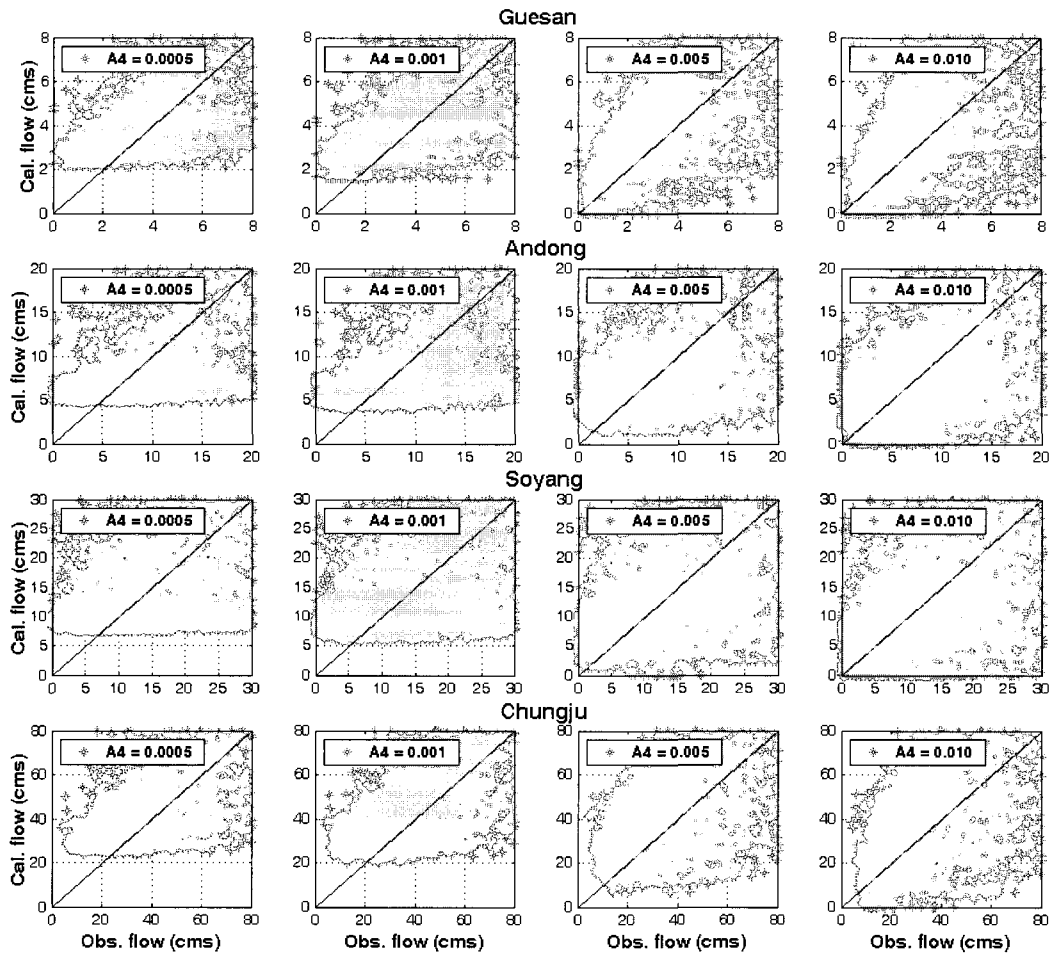


Fig. 9. Observed flows and simulated flow of low flow (below 1 mm/day)

Table 5. Streamflows in duration at each watersheds(m<sup>3</sup>/sec)

Duration value	Guesan	Andong	Soyang	Chungju
Ave. wet discharge(Q95)	7.8	23.9	51.1	113.4
Ave. normal discharge(Q185)	3.6	11.1	21.6	53.6
Ave. low discharge(Q275)	2.2	5.7	9.2	28.2
Ave. drought discharge(Q355)	1.1	1.9	2.2	14.3

Q95/Q185/Q275/Q355 : the average discharge amount which is retained in the river more than 95/185/275/355 days over a year

화에 필요한 기간은 매개변수에 따라 약 2~20년 이상이 필요한 것으로 분석되었다. 이것은 Tank 모형의 다른 저류탱크들에서 모의되는 양에 비해 4번째 저류탱크의 유출량의 비율이 상대적으로 매우 작아 지금까지 문제시 되지 않고 적용되어 왔다. 그러나 계절별 유출량의 변동성이 크고 저수유출분석이 중요한 유역에서는 이러한 영향이 유출결과에 불확실성으로 작용될 것이다. 4번째 저류탱크의 안정화 기간은 Tank 모형의 매개변수에 민감한 것으로 분석되었으나 4번째 저류탱크의 초기저류고가 안정화 기간에 미치는 영향은 거의 없는

것으로 나타났다. 유출공계수인 A12, A2 그리고 A3가 증가할수록 안정화기간이 짧아졌으며, B1, B2 그리고 B3가 증가할수록 길어지는 것으로 나타났다. 결과적으로 4번째 저류탱크로 유입되는 양이 증가될수록 기간이 길어졌으며, 유입량이 작거나 저류탱크에서 빠져나가는 양이 커질수록 감소하였다. 따라서 Tank 모형의 적용시 보정된 매개변수에 따른 안정화기간을 파악하여 충분한 예비모의시간(warmed up time)을 주거나 유출결과 분석시 이 기간을 분석에서 제외하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 또한 매개변수를 보정할 경우에도 이

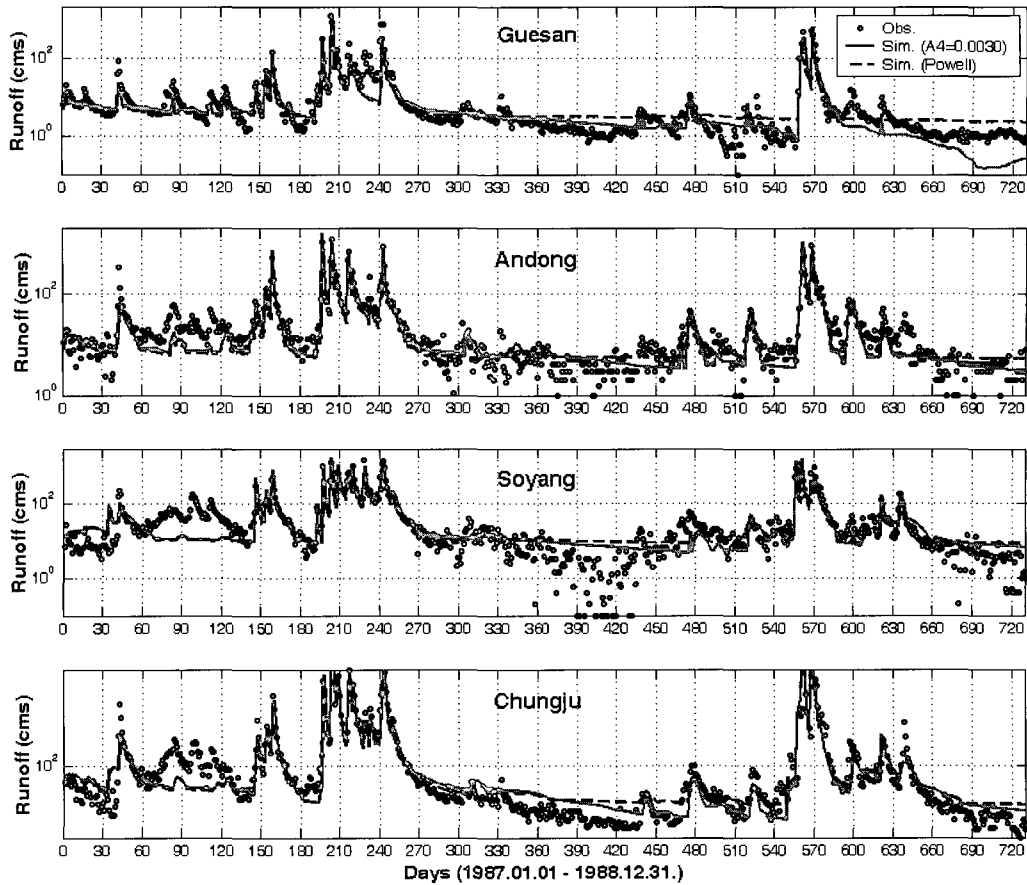


Fig. 10. Observed and simulated flows over each study area

러한 기간을 고려한다면 보다 신뢰성 높은 변수 추정 가능성이 있을 것으로 사료된다.

4개의 유역에 대해 Powell 방법으로 최적화한 매개변수를 이용하여 유역별 저수유출량(1 mm/day 이하)의 모의 정확성을 평가하였다. 그 결과 특정 값 이하의 유출값에 대해서는 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 A4만을 변화시켜가며 관측치와 모의치의 통계치를 분석한 결과 상관계수, 평균제곱근오차, N-S 모형효율성계수, 유출용적오차에서는 거의 변화가 없었다. 이것은 최적화방법을 이용하여 매개변수를 보정할 때 A4가 적절하게 추정되지 않을 수 있는 것을 보여준다. 일반적으로 최적화방법 적용시 목적함수는 관측치와 계산치의 오차로 계산되는 통계치를 이용하고 있다. 따라서 매개변수의 변화가 통계치에 영향을 못주게 되면 신뢰성 있게 추정되지 않을 것이다. 실제 4개 유역의 최적화된 매개변수들 중에서 A4만을 변화시킨 결과 저수유출량에서 관측치에 보다 적합한 결과를 보였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 최적화방법을 통해 보정된 매개변수에 대해 4번째 저류탱크가 모의할 수 있는 유출량의 범위를 파악하여 관측치와 비교하는 과정이 필요할 것으로 판단된다. 다른 대안으로 저수유출량을 고려한 목적함

수를 이용하는 방법도 있을 것이다. Madsen(2000)은 이러한 문제를 해결하기 위해 MIKE 11/NAM 모형을 대상으로 물수지, 수문곡선의 모양, 침투유량, 저수유량 등을 고려할 수 있는 다목적함수(multiple objective function)를 제안하기도 하였다. 본 연구에서는 이 부분에 대해서는 분석을 수행하지 않았다.

이미 많은 연구들에서 모형의 매개변수들을 효율적으로 추정하기 위한 다양한 최적화 알고리즘을 제시하고 있다(Nelder and Mead, 1965; Wang, 1991; Duan et al., 1992). 그러나 이러한 기법들은 관측치와 계산치의 오차인 목적함수를 최소화하는 매개변수를 추정하는 수치적인 알고리즘에 기반하고 있어, 모형의 매개변수가 가지는 물리적인 의미나 모형의 거동이 물리적인 현상을 반영하지 못할 수도 있다. 따라서 모형의 각 매개변수가 가지는 물리적인 의미와 범위에 대해 이해하고 최적화방법으로 추정된 매개변수가 적용유역에 적합한지를 판단한 다음 적용하는 과정이 필요할 것이다. 본 연구에서 Tank 모형의 4번째 저류탱크에 대해 분석한 결과 신뢰성 있는 유출분석을 위해서는 매개변수에 따른 안정화기간의 고려와 최적화방법에 의해 추정된 A4가 관측 저수유출량의 변동성을 모의할 수 있는지를 검토하

는 것이 필요한 것으로 나타났다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 Tank 모형을 이용한 유출분석시 보다 신뢰성 있는 저수유출 모의를 위해 기저유출을 모의하는 4번째 저류탱크에서 발생할 수 있는 문제점을 분석하고 이에 따른 유출분석의 불확실성을 최소화할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 초기저류고와 매개변수에 따른 4번째 저류탱크의 안정화기간의 변화를 분석하였다. 분석결과 Tank 모형의 매개변수에 따라 저류탱크의 안정화기간이 최소 2년에서 최대 20년 이상으로 나타나 보정된 매개변수에 따른 안정화기간을 고려하지 않을 경우 저수유출량은 계산의 신뢰성이 낮을 것으로 판단되었다. 또한 4번째 저류탱크의 유출공계수인 A4의 변화에 따른 통계치의 변화와 관측 저수유량에 대한 모의 적합성을 평가하였다. 결과적으로 A4의 변화가 통계치에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타나 본 연구에서 적용한 Powell 최적화방법에서 적절한 매개변수를 추정하지 못하는 것으로 분석되었다. 관측 저수량에 대한 모의 적합성을 분석한 결과 A4가 0.001 이하의 값을 가질 경우 저수량(Q275) 이하의 유출량에 대해서는 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 유출분석시 보다 현실적인 저수유출모의를 위해서는 최적화방법을 통해 추정된 A4값이 0.001 미만의 값을 가질 경우는 Tank 모형의 저류고가 지속적으로 증가하는지를 확인한 다음 유출분석을 적용하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 분석한 결과 Tank 모형을 이용하여 신뢰성 있는 저수유출분석을 수행하기 위해서는 매개변수에 따른 4번째 저류탱크의 안정화기간을 고려하는 것과 최적화된 매개변수에 의해 모의된 저수유량의 범위가 관측치에 적합한지를 평가하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

향후 저수유출을 신뢰성 높게 모의할 수 있는 매개변수를 추정할 수 있는 목적함수에 대한 연구와 계절별 유출량의 변동성이 큰 국내 유역에서의 적정 매개변수 범위에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(지자체별 실시간 내배수재해 예측기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김현영, 박승우 (1986). “유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화.” *한국농공학회지*, 제28권, 제2호, 한국농공학회, pp. 42-52.
- 배덕효, 정일원, 강태호, 노준우 (2003). “유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정”, *한국수자원학회논문집*, 제36권, 제3호, 한국수자원학회, pp. 423-436.
- 이동률, 김형섭 (1999). “낙동강 갈수관리를 위한 의사결정 지원시스템.” *대한토목학회논문집*, 제19권, 제II-4호, 대한토목학회, pp. 455-465.
- 이상호 (1998). “탱크모형의 유출공 승수 변화를 고려한 홍수모의.” *한국수자원학회논문집*, 제31권, 제1호, 한국수자원학회, pp. 3-12.
- 이관수, 이영석, 정일광 (1995). “탱크모형의 매개변수 추정을 위한 상태공간모형의 결정.” *한국수자원학회논문집*, 제28권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 125-135.
- Chen, R.S., Pi, L.C. and Hsieh C.C. (2005). “Application of parameter optimization method for calibrating Tank model”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 389-402.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, H.J. (1992). “Effective and efficient global optimisation for conceptual rainfall-runoff models”, *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 1015-1031.
- Franchini, M. and Pacciani, M. (1991). “Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models”, *Journal of Hydrology*, Vol. 122, pp. 161-219.
- Kadoya, M. and Nagai, A. (1980). “Method of runoff analysis (12th)”, *Japan Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, Vol. 48, No. 12, pp. 935-943.
- Kuester, J.L. and Mize, J.H. (1973). *Optimization Techniques with Fortran*. McGraw-Hill Company.
- Lee, Y.H. and Singh, V.P. (1999). “Tank model using Kalman filter”, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, Issue 4, pp. 344-349.
- Madsen, H. (2000). “Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives”, *Journal of Hydrology*, Vol. 235, pp. 276-288.

- Nelder, J.A. and Mead, R. (1965). "A simplex method for function minimization", *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313.
- Paik, K.R., Kim, J.H., Kim, H.S. and Lee, D.R. (2005). "A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation", *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 3837-3850.
- Singh, V.P. (Ed.) (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publication, USA, pp. 1-22.
- Sugawara, M. (1972). *Method of Runoff Analysis*, Kyouritsu Publication Co., Japan (in Japanese).
- Sugawara, M. and Funiyuki, M. (1956). *A method of revision of the river discharge by means of a rainfall model*. Collection of Research Papers about Forecasting Hydrologic Variables, pp. 14-18.
- Wang, Q.J. (1991). "The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models", *Water Resources Research*, Vol. 27, pp. 2467-2471.
- Ward, A.D. and Elliot, W.J. (1995). *Environmental Hydrology*, CRC Lewis Publishers, Washington D.C., USA.
- World Meteorological Organization (1975). *Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting*, Operational Hydrology Report No. 7. WMO, Geneva, Switzerland.
- Yokoo, Y., Kazama, S., Sawamoto, M., and Nishimura, H. (2001). "Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression", *Journal of Hydrology*, Vol. 246, Issues 1-4, pp. 209-222.

(논문번호:06-76/접수:2006.07.19/심사완료:2007.02.20)