



## TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발 Regression Equations for Estimating the TANK Model Parameters

안지현\* · 송정현\*\* · 강문성\*\*\*,† · 송인홍\*\*\*\* · 전상민\*\* · 박지훈\*\*

An, Ji Hyun · Song, Jung Hun · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Jun, Sang Min · Park, Jihoon

### Abstract

The TANK model has been widely used in rainfall-runoff modeling due to its simplicity of concept and computation while achieving forecast accuracy. A major barrier to the model application is to determine parameter values for ungauged watersheds, leading to the need of a method for the parameter estimation. The objective of this study was to develop regression equations for estimating the 3th TANK model parameters considering their variations for the ungauged watersheds. Thirty watersheds of dam sites and stream stations were selected for this study. A genetic algorithm was used to optimize TANK model parameters. Watershed characteristics used in this study include land use percent, watershed area, watershed length, and watershed average slope. Generalized equations were derived by correlating to the optimized parameters and the watershed characteristics. The results showed that the TANK model, with the parameters determined by the developed regression equations, performed reasonably with 0.60 to 0.85 of Nash-Sutcliffe efficiency for daily runoff. The developed regression equations for the TANK model can be applied for the runoff simulation particularly for the ungauged watersheds, which is common for upstream of agricultural reservoirs in Korea.

**Keywords:** TANK model; runoff; watershed characteristics; regression equation

### 1. 서 론

국내에 산재한 저수지는 2010년을 기준으로 총 17,531개로 한국농어촌공사와 시군에서 관리하고 있다. 관리자들은 저수지 관리 시 시설물 안전에 우선순위를 뒀음에도 불구하고, 효율적인 물 관리를 위한 저수지 상하류의 수문 순환 성분에 대한 계측이 미흡하다. 특히 저수지 상류 유역은 대부분 미계측 유역으로 강우량, 유출량 등의 수문 기상자료와 관개용수 공급량, 관개지구 용수로의 수위변화 등에 대한 계측 자료가 부족하여 저수지 설계 및 운영을 위한 정확한 유입량 예측에 어려움이 많다 (Kang et al., 2013).

일반적으로 유출량 또는 저수지 및 댐 유입량을 모의하기 위해서 강우-유출모형을 이용하고 있으며, 이러한 모형들은 수문사상을 보다 사실에 가깝게 모의하기 위하여 많은 매개변수들을 가진다. 하지만, 이러한 매개변수는 유역의 지형적 특성, 수문학적 특성 등에 따라 결정되므로 미계측 유역에 매개변수가 많은 모형을 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 최근에는 매개변수 수가 적은 개념적 강우-유출 모형을 미계측 유역에 적용하여 유출량 또는 유입량을 예측하고 있으며, 그 중에서도 매개변수가 비교적 적고 단순한 구조를 가지면서도 비선형적인 수문현상을 효과적으로 반영하는 TANK 모형을 많이 이용하고 있다.

국내에서는 TANK 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 유역특성인자와 매개변수 간 회귀식에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. Kim and Park (1986)은 2.75~7,126 km<sup>2</sup>의 6개 유역에 대하여 4단 TANK의 매개변수를 일반화시키려고 시도하였으며, 또한 Kim and Park (1988)은 3단 TANK의 매개변수를 4가지 유역 인자에 의하여 일반화시켜 Daily Irrigation Reservoir Operation Model (DIROM)을 개발하였다. Heo (1992)은 6개의 유역 인자를 이용하여 3단 TANK의 매개변수를 일반화하였으며, 10개 유역에 대하여 그 적용성을 평가하였다. Kim et al. (2000)은 26개의 하천유역을 대상으로 3단 TANK의 매개변수를 7개의 유역 인자에 대하여 일반화한 바 있으며, 최근에는 Kang et al. (2013)이 Heo (1992)에 의해 개발되었던 수정 TANK 모형의 3단 지하배수과정을 생략하

\* Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries

\*\* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

\*\*\* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

\*\*\*\* Research Institute of Agricultural and Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: July 3, 2015

Revised: July 16, 2015

Accepted: July 17, 2015

여 유역인자 4개에 대하여 일반화하여 모형 성능을 검증하고 모형의 적용성을 평가하였다. 한편 국외에서는 Yokoo et al. (2001)이 12개 유역에 대해 4단 TANK 모형을 사용하여 매개변수를 일반화한 바 있다.

기존의 회귀식 중 Kim and Park (1988)의 회귀식은 미세측저수지 유역의 유입량을 산정하기 위해 최근까지도 많은 연구자들이 이용하고 있다(Yoo et al., 2013). 하지만 해당 회귀식은 개발에 이용된 유역 개수가 12개로 비교적 적으며, 매개변수 추정을 위한 유출량 실측 기간 또한 1~2년으로 짧은 한계가 있다. 최근에는 국토교통부 및 한국수자원공사에서 주요 유역에 대한 비교적 장기간의 유량 자료를 보유하고 있으며 이를 이용한 Tank 모형 매개변수 추정 회귀식이 개발될 필요가 있다. 또한, 해당 회귀식 개발에 이용된 보정 매개변수 중 일부 침투 계수, 유출공 계수, 유출공 높이 매개변수는 Sugawara (1972)가 제시한 범위에서 벗어나고 있다. 산정된 매개변수가 제시된 범위를 벗어날 경우, 이를 그대로 적용하면 유출량이 제대로 모의되지 않을 수 있으며 이에 대한 고려가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 개념적 강우-유출 모형인 TANK 모형으로 미세측 유역의 유출량을 추정하기 위하여, 실측 유출량 자료를 확보하고 있는 국내 다목적댐 상류유역 및 하천수위관측소유역을 30개를 대상으로, 모형의 매개변수 범위를 고려하는 TANK 모형의 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상유역

본 연구에서는 국내의 다목적댐 상류와 하천수위관측소를 대상으로 관측 자료의 신뢰성이 높은 유역을 대상유역으로 선정하였다. 대상유역으로 다목적댐 상류유역 15개 유역을 선정하였으며, 하천수위관측소 유역은 국토교통부 및 한국수자원공사에서 관리하고 있는 수위관측소 중에서 자료가 양호한 지점으로 15개 유역을 선정하였다.

Table 1은 대상유역의 면적, 수문자료의 가용기간, 그리고 기상관측소 등을 정리하여 나타낸 것이다. 유역의 크기는 최소 59.0 km<sup>2</sup> (부안댐)에서 최대 6,661.6 km<sup>2</sup> (충주댐)까지 다양하게 분포하고 있으며, 대상유역의 위치는 Fig. 1에 도시하였다.

### 2. TANK 모형

수정 TANK 모형은 Sugawara의 TANK 모형을 우리나라 농업용 저수지의 상류 유역특성에 맞게 수정한 것으로서

(Kim and Park, 1988), 본 연구에서는 수정 3단 TANK 모형을 적용하였다.

TANK 모형에 의한 유역의 유출량은 일별 강우량으로부터 식 (1)에 의하여 계산된다.

$$Q_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (ST_{i,t} - H_{ij}) A_{ij} \quad (1)$$

여기서,  $Q_{ij}$ 는  $t$ 일의 총유출량 (mm),  $i$ 는 TANK의 수,  $j$ 는 TANK의 유출공 수,  $ST_i$ 는  $i$ 번째 TANK의 저류수심 (mm),  $H_{ij}$ 는  $i$ 번째 TANK의  $j$ 번째 유출공의 높이 (mm),  $A_{ij}$ 는 유출공의 계수 (무차원),  $ST$ 는 단위시간  $t$ 에 따른 저류수심으로 식 (2)와 같이 계산한다.

$$ST_{i,t} = ST_{i,t-1} + R_t - ET_t - I_{i,t} - Q_{i,t-1} \quad (2)$$

여기서,  $ST_{i,t-1}$ 은  $t-1$ 일의  $i$ 번째 TANK의 수심 (mm),  $R_t$ 는  $t$ 일의 강우량 (mm),  $ET_t$ 는 증발산량 (mm),  $Q_{i,t-1}$ 은  $i$ 번째 TANK의  $t-1$ 일의 유출량,  $I_{i,t}$ 는 침투량 (mm)으로 식 (3)과 같이 계산한다.

$$I_{i,t} = ST_{i,t} \times B_i \quad (3)$$

여기서,  $B_i$ 는  $i$ 번째 TANK의 침투계수 (무차원)이다.

### 3. 매개변수 최적화 및 매개변수 추정 회귀식 개발

본 연구에서는 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수를 최적화하고, 최적화된 매개변수와 유역특성인자 간의 상관분석과 다중회귀분석을 실시하였다. Fig. 2는 본 연구의 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발의 전체적인 연구 흐름도를 보여주고 있다.

본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 유전자 알고리즘은 자연적 유전형질의 원리에 기초한 적응적 탐색 (adaptive search) 기법이다 (Holland, 1975). 유전자 알고리즘은 자연선택의 과정을 모사하여 해를 찾아가는 알고리즘으로서 결과가 안 좋은 해는 진화 과정에서 도태되고, 더 나은 해를 나타내는 세트는 살아남는다. 진화를 거듭하면서 일부에서 돌연변이가 발생하여 해의 다양성을 유지함으로써 전역 최적해 (global optimum solution)를 구하도록 한다 (Lee et al., 2009).

TANK 모형의 매개변수 최적화에 있어 유전자 알고리즘

Table 1 Watershed characteristics and data period

Watershed	Area (km <sup>2</sup> )	Weather Station	Data Period		
			Meteorological (KMA <sup>1)</sup> )	Hydrological (MOLIT <sup>2)</sup> , WAMIS <sup>3)</sup> )	
Dam upstream	Soyangang	2694.36	Chuncheon	1975 – 2012	1977.01.01 – 2012.12.31
	Hoengseong	207.88	Hongcheon	1975 – 2012	2001.01.01 – 2012.12.31
	Chungju	6661.58	Chungju	1990 – 2012	1990.01.01 – 2012.12.31
	Andong	1590.72	Andong	1983 – 2012	1990.01.01 – 2012.12.31
	Imha	1367.74	Andong	1983 – 2012	1993.01.01 – 2012.12.31
	Hapcheon	928.94	Hapcheon	1975 – 2012	1990.01.01 – 2012.12.31
	Namgang	2293.42	Jinju	1975 – 2012	2000.01.01 – 2012.12.31
	Milyang	103.47	Milyang	2002 – 2012	2002.01.01 – 2012.12.31
	Daecheong	4134.00	Daejeon	1975 – 2012	2001.01.01 – 2011.12.31
	Yongdam	930.43	Geumsan	1975 – 2012	2001.01.01 – 2003.12.31 2008.01.01 – 2011.12.31
	Boryung	162.29	Boryung	1999 – 2012	1999.01.01 – 2012.12.31
	Buan	59.00	Buan	1998 – 2012	1998.01.01 – 2012.12.31
	Seomjingang	763.47	Imsil	1976 – 2012	1980.01.01 – 2002.12.31 2004.01.01 – 2012.12.31
	Juam	1010.00	Suncheon	2000 – 2012	2000.01.01 – 2012.12.31
	Tamjin	192.34	Jangheung	1975 – 2012	2005.01.01 – 2012.12.31
	River	Maeil	173.92	Wonju	1973 – 2012
Yeongweol		2281.32	Yeongweol	1995 – 2012	2006.01.01 – 2009.12.31
Socheon		660.94	Bongwaha	1988 – 2012	2006.01.01 – 2010.12.31
Shinan		234.74	Sancheong	1973 – 2012	2006.01.01 – 2009.12.31
Jisan		156.75	Geochang	1973 – 2012	2006.01.01 – 2010.12.31
Hyoryeong		150.43	Gumi	1973 – 2012	2007.01.01 – 2011.12.31
Gajang		153.18	Sangju	2002 – 2012	2006.01.01 – 2011.12.31
Okcheon		2942.88	Geumsan	1973 – 2012	2006.01.01 – 2010.12.31
Cheoncheon		290.60	Jangsu	1988 – 2012	2006.01.01 – 2010.12.31
Songcheon		349.70	Chupungryong	1960 – 2012	2006.01.01 – 2010.12.31
Gidaegyo		357.54	Boeun	1973 – 2012	2006.01.01 – 2011.12.31
Jangjeon		267.68	Suncheon	2000 – 2012	2006.01.01 – 2008.12.31
Neungju		404.01	Gwangju	1975 – 2012	2006.01.01 – 2011.12.31
Mareuk		689.84	Gwangju	1975 – 2012	2006.01.01 – 2008.12.31 2010.01.01 – 2010.12.31
Eodeung		513.16	Gwangju	1975 – 2012	2007.01.01 – 2012.12.31

<sup>1)</sup> KMA: Korea Meteorological Administration  
<sup>2)</sup> MOLIT: Ministry of Land, Infrastructure and Transport  
<sup>3)</sup> WAMIS: WAter Management Information System

의 이용은 Kim et al. (2004)과 Lee et al. (2009)이 우수한 통계적 변량을 도출하며 그 적용성을 검증한 바 있다. 유전자 알고리즘을 이용한 TANK 모형의 매개변수 최적화 방법은 Song et al. (2014)에 상세히 서술되어 있다. 또한, 최근에는

농업용수 공급량의 보정 및 검증에도 이용되는 등 농업수자원 분야에 있어서도 널리 이용되고 있으며, 이에 대한 자세한 설명은 Song et al. (2015)에 상세히 서술되어 있다.

목적함수로는 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error,

RMSE)을 선정하여 RMSE가 최소화되도록 매개변수 해가 진화되도록 구성하였다.



Fig. 1 Location map of the study watersheds

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 유전자 알고리즘에 의한 TANK 모형의 매개변수 최적화

TANK 모형의 매개변수를 결정하기 위해 가용 자료기간을 보정기간과 검증기간으로 구분하여 보정기간에 대해 매개변수를 결정하고, 검증기간에 대해 결정된 매개변수의 정확도를 평가하였다.

##### 가. 매개변수 초깃값 결정

최적화 방법에 의한 유출모형의 매개변수를 추정하기 위해서는 모형의 매개변수 초깃값이 필요하다. 모형의 매개변수 초깃값을 결정할 때는 모형의 매개변수가 가지는 물리적 의미를 이해하고 매개변수의 물리적 허용범위 내에서 적절하게 결정하여야 한다. TANK 모형의 매개변수는 유출공 계수 4개, 침투 계수 3개, 유출공 높이 3개, 최하단의 초기 저류고 등 총 11개이다. 수자원 연구의 최적화 연구 (III) (MCT, 1999)는 시산개시일이 1월 1일일 때, 전년도 12월 말에 큰 강우가 없을 경우, 1단 TANK와 2단 TANK는 0.0 mm, 3단 TANK는 30.0 mm을 각 TANK의 초기 저류고로 제안한 바 있으며, 기타 변수들의 초깃값은 Kim and Kim (2004)이 이용한 값을 사용하였다. TANK 모형의 유출량 모의 시 입력되는 자료 중 증발산량은 Penman-Monteith 법을 이용하여 산

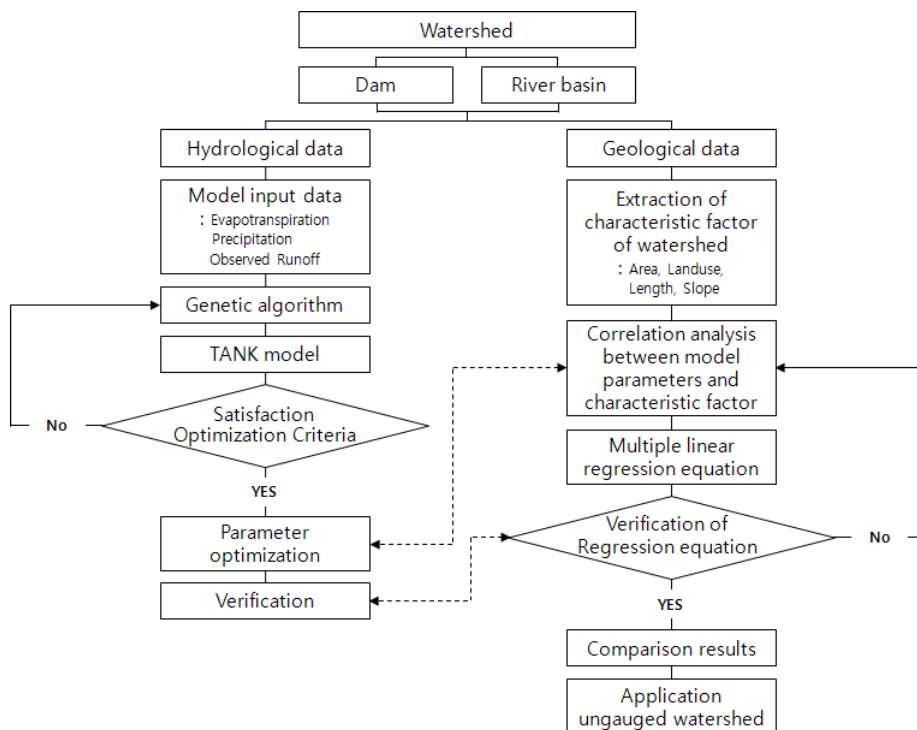


Fig. 2 Flowchart for the study procedure

Table 2 Initial values for the TANK model (Sugawara, 1972; Kim and Kim, 2004)

Parameters	Symbols	Range	Initial values
Storage of 1 <sup>st</sup> Tank	ST1	0,0	0,000
Storage of 2 <sup>nd</sup> Tank	ST2	0,0	0,000
Storage of 3 <sup>rd</sup> Tank	ST3	10~100	30,000
Area of upper side outlet in 1 <sup>st</sup> Tank	A11	0,1~0,5	0,260
Area of lower side outlet in 1 <sup>st</sup> Tank	A12		0,160
Area of bottom outlet in 1 <sup>st</sup> Tank	B1		0,330
Area of side outlet in 2 <sup>nd</sup> Tank	A2	0,03~0,1	0,090
Area of bottom outlet in 2 <sup>nd</sup> Tank	B2	0,01~0,1	0,080
Area of side outlet in 3 <sup>rd</sup> Tank	A3	0,005~0,1	0,007
Area of bottom outlet in 3 <sup>rd</sup> Tank	B3		0,006
Height of upper side outlet in 1 <sup>st</sup> Tank	H11	5~60	30,000
Height of lower side outlet in 1 <sup>st</sup> Tank	H12		15,000
Height of upper side outlet in 2 <sup>nd</sup> Tank	H2	0~50	10,000
Height of upper side outlet in 3 <sup>rd</sup> Tank	H3	0~30	10,000

정하였으며, 매개변수의 범위는 Sugawara (1972)가 제시한 매개변수 범위를 이용하였다. Table 2는 각 매개변수의 범위와 초깃값을 나타낸다.

#### 나. 매개변수 최적화

매개변수 보정은 대상구역의 초깃값을 이용하여 유전자알고리즘으로 수행하였으며, 보정된 매개변수를 TANK 모형에 적용하여 유출을 모의하였다. 실측 유출량과 모의 유출량과의 일치 정도와 모형의 정확성을 판별하기 위하여 3가지의 통계적 변량을 이용하여 Table 3에 나타내었다. 모의 결과를 통계적으로 평가하기 위한 기준으로는 실측치와 모의치의 회귀분석에 의해 계산되는 결정계수 ( $R^2$ )를 사용하였고, 모형의 정확성을 파악하기 위한 기준으로는 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 Nash and Sutcliffe Efficiency (NSE)를 이용하였으며, 절대적인 오차 정도를 계산하기 위해서 RMSE를 이용하였다. NSE는  $-∞ \sim 1.0$ 의 범위로 나타나고 1.0의 값에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것을 의미하며, 만약 음수 값이 나타나면 모의 결과를 이용하는 것보다 실측치의 평균을 이용하는 것이 더 좋을 것을 의미한다 (Song et al., 2013; Song et al., 2015).

황성담, 합천담, 밀양담, 부안담, 탐진담 구역 및 매일, 지산, 천천 수위관측소 구역은  $R^2$ 와 NSE가 0.9 이상으로 나타나 높은 적합도를 보였으며, 다른 구역에서도 결정계수와 NSE가 0.8 이상으로 나타났다. RMSE는 모든 적용대상 구역에서 5 mm/day 이하로 나타났다. Moriasi et al. (2007)은 월단위 유출량 모의에 대해  $0.75 < NSE \leq 1.00$ 이면 “very good”

으로,  $0.65 < NSE \leq 0.75$ 이면 “good”으로,  $0.50 < NSE \leq 0.65$ 이면 “satisfactory”,  $NSE \leq 0.50$ 이면 “unsatisfactory”와 같은 기준을 제시하고 있다. 일반적으로 모의결과는 시간간격이 짧을수록 통계적 변량이 낮게 나타나기 때문에 (Engel et al., 2007), 본 연구에서의 모형의 보정기간의 결과는 모두 “very good”으로 평가할 수 있다.

Fig. 3은 보정기간 동안 대상 구역에서의 연평균 유출을 실측 연평균 유출량과 비교하여 보여주고 있다. 모의된 연평균 유출량이 실측 연평균 유출량에 비하여 다소 과소 추정되었으나 대부분 근접하게 모의되었으며, 수문곡선 또한 실측 데이터의 경향성을 잘 나타내었다.

#### 다. 매개변수 검정

각 대상구역에 대해 추정된 매개변수를 검정기간에 적용하여 그 통계적 결과를 Table 4에 제시하였으며, 검정기간에 대하여 적용구역에서 모의된 연평균 유출량을 실측 연평균 유출량과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 모의된 연평균 유출량이 실측 연평균 유출량에 비하여 과소 추정되는 경향을 보였다. 또한, 보정기간에 비하여 RMSE 값은 높게,  $R^2$ 와 NSE는 낮게 나타났으나, 전체적으로 NSE가 0.7 이상으로 나타나 Moriasi et al. (2007)의 기준에서 “very good” 또는 “good”으로 평가되었다.

## 2. 매개변수 추정 회귀식 개발

### 가. 구역특성인자와 모형 매개변수 간 상관분석

본 연구에서는 매개변수와 구역특성인자와의 상관성을

Table 3 Calibration statistics of the TANK model for daily runoff

Watershed Statistics	Soyangang	Hoengseong	Chungju	Andong	Imha
Ratio <sup>1)</sup>	0.68	0.99	0.66	0.69	0.79
RMSE (mm/day)	2.91	2.92	2.92	2.25	2.22
R <sup>2</sup>	0.85	0.92	0.83	0.86	0.86
NSE <sup>2)</sup>	0.84	0.92	0.81	0.85	0.85
Watershed Statistics	Hapcheon	Namgang	Milyang	Daecheong	Yongdam
Ratio	0.94	0.87	0.93	0.70	0.79
RMSE (mm/day)	1.94	4.23	3.87	2.83	2.42
R <sup>2</sup>	0.91	0.84	0.92	0.85	0.90
NSE	0.91	0.84	0.92	0.83	0.88
Watershed Statistics	Boryung	Buan	Seomjingang	Juam	Tamjin
Ratio	0.94	0.83	0.82	1.16	1.12
RMSE (mm/day)	3.81	3.34	2.92	2.45	2.35
R <sup>2</sup>	0.85	0.91	0.87	0.88	0.90
NSE	0.85	0.90	0.87	0.87	0.90
Watershed Statistics	Maeil	Yeongweol	Socheon	Shinan	Jisan
Ratio	0.95	0.90	0.83	1.06	1.10
RMSE (mm/day)	2.50	3.48	2.51	4.22	1.82
R <sup>2</sup>	0.92	0.85	0.84	0.85	0.91
NSE	0.92	0.85	0.84	0.85	0.91
Watershed Statistics	Hyoryeong	Gajang	Okcheon	Cheoncheon	Songcheon
Ratio	0.73	0.64	0.92	0.97	1.02
RMSE (mm/day)	3.54	3.26	1.09	1.07	1.63
R <sup>2</sup>	0.82	0.84	0.88	0.92	0.89
NSE	0.77	0.81	0.88	0.92	0.89
Watershed Statistics	Gidaegyo	Jangjeon	Neungju	Mareuk	Eudeong
Ratio	0.82	1.26	1.03	0.67	0.67
RMSE (mm/day)	2.13	2.13	3.56	2.11	3.27
R <sup>2</sup>	0.80	0.89	0.81	0.88	0.87
NSE	0.78	0.88	0.81	0.85	0.83

<sup>1)</sup> Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)

<sup>2)</sup> NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency

규명하기 위하여 대상유역별 유역특성인자와 최적매개변수와의 상관분석을 실시하였다. 회귀식 개발에 사용될 지형인자들을 우선적으로 선정하기 위하여 변수선택법 (variable selection method) 중 전진선택법, 후진제거법 및 단계별선택법을 모두 적용 후, R<sup>2</sup>가 가장 높게 나타난 방법을 이용하였다. 회귀식 산정에 적합한 유역특성인자는 유역면적 (Area,

km<sup>2</sup>), 논, 밭, 그리고 산림의 토지이용비율 (Paddy, %; Upland, %; Forest, %), 유로연장 (Length, km), 유역평균경사 (Slope, %) 등이다. Table 5는 유역특성인자와 최적매개변수 간 상관분석 결과를 나타내고 있다.

지표면 유출을 모의하는 1단 TANK에서 지표면 유출량을 결정하는 유출공 계수인 A11은 밭비율 대수값 (ln\_Upland)

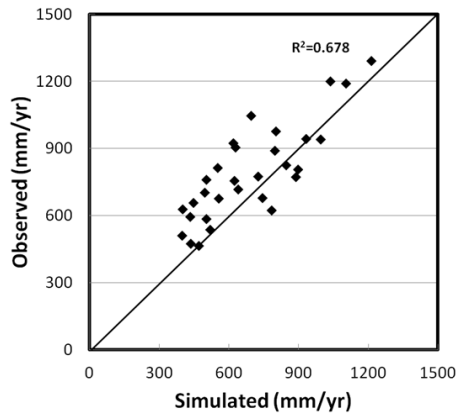


Fig. 3 Scatter plots comparing observed and simulated annual average runoff for the calibration period

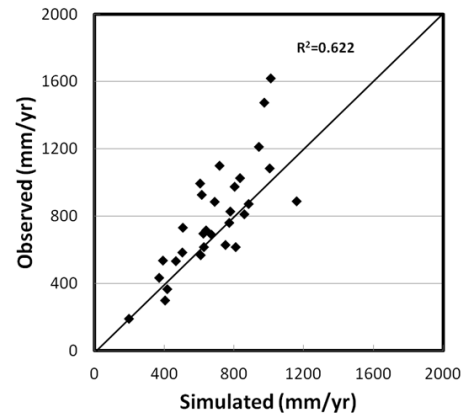


Fig. 4 Scatter plots comparing observed and simulated annual average runoff for the validation period

Table 4 Validation statistics of the TANK model for daily runoff

Watershed	Soyangang	Hoengseong	Chungju	Andong	Imha
Statistics					
Ratio <sup>1)</sup>	0,78	1,31	0,66	0,90	0,74
RMSE (mm/day)	3,57	3,10	3,54	3,08	2,53
R <sup>2</sup>	0,78	0,84	0,79	0,73	0,83
NSE <sup>2)</sup>	0,78	0,81	0,77	0,71	0,78
Watershed	Hapcheon	Namgang	Milyang	Daechyeong	Yongdam
Statistics					
Ratio	0,98	0,93	1,06	0,69	0,66
RMSE (mm/day)	2,22	4,21	2,80	2,48	3,88
R <sup>2</sup>	0,84	0,84	0,90	0,84	0,86
NSE	0,84	0,84	0,90	0,81	0,83
Watershed	Boryung	Buan	Seomjingang	Juam	Tamjin
Statistics					
Ratio	0,94	0,82	0,90	1,31	0,78
RMSE (mm/day)	3,26	4,60	3,42	2,74	2,84
R <sup>2</sup>	0,83	0,77	0,72	0,86	0,89
NSE	0,83	0,76	0,72	0,85	0,88
Watershed	Maeil	Yeongweol	Socheon	Shinan	Jisan
Statistics					
Ratio	0,63	1,02	1,08	1,15	1,20
RMSE (mm/day)	3,58	2,17	1,99	3,60	1,82
R <sup>2</sup>	0,84	0,84	0,78	0,83	0,90
NSE	0,84	0,84	0,77	0,82	0,90
Watershed	Hyoryeong	Gajang	Okcheon	Cheoncheon	Songcheon
Statistics					
Ratio	0,73	0,86	1,35	1,02	0,88
RMSE (mm/day)	3,54	2,14	1,19	2,16	1,86
R <sup>2</sup>	0,82	0,79	0,86	0,91	0,89
NSE	0,77	0,79	0,85	0,91	0,87

Table 4 Validation statistics of the TANK model for daily runoff

Watershed Statistics	Gidaegyo	Jangjeon	Neungju	Mareuk	Eudeong
Ratio	0.81	1.06	1.02	0.86	0.65
RMSE (mm/day)	3.33	0.49	3.17	2.28	3.85
R <sup>2</sup>	0.78	0.88	0.79	0.86	0.81
NSE	0.78	0.88	0.78	0.81	0.78

<sup>1)</sup> Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)

<sup>2)</sup> NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency

Table 5 Correlation between the watershed characteristics and model parameters

Watershed Characteristic	Parameters	A11	A12	A2	A3	B1	B2	B3	H11	H12	H2	ST3
Paddy (%)		0.03	0.40	0.52	0.07	0.03	0.01	0.33	0.20	0.12	0.05	0.11
Upland (%)		0.39	0.16	0.10	0.38	0.37	0.23	0.01	0.13	0.13	0.51	0.16
Forest (%)		0.18	0.42	0.55	0.07	0.27	0.08	0.41	0.32	0.21	0.37	0.31
Area (km <sup>2</sup> )		0.20	0.25	0.18	0.19	0.14	0.34	0.14	0.04	0.49	0.16	0.10
Length (km)		0.15	0.05	0.09	0.37	0.07	0.22	0.13	0.08	0.21	0.07	0.00
Slope (%)		0.16	0.43	0.39	0.14	0.32	0.01	0.08	0.78	0.35	0.23	0.23
In (Paddy)		0.04	0.32	0.45	0.16	0.08	0.18	0.20	0.26	0.20	0.12	0.02
In (Upland)		0.56	0.03	0.04	0.33	0.58	0.15	0.12	0.27	0.18	0.64	0.25
In (Forest)		0.15	0.41	0.58	0.11	0.25	0.11	0.41	0.31	0.19	0.36	0.30
In (Area)		0.35	0.19	0.18	0.32	0.15	0.45	0.23	0.04	0.32	0.10	0.12
In (Length)		0.12	0.06	0.06	0.39	0.04	0.26	0.01	0.07	0.04	0.04	0.00
In (Slope)		0.44	0.43	0.40	0.08	0.31	0.06	0.13	0.60	0.33	0.22	0.24

과 0.56로 가장 높은 상관관계를 보였고, A12는 유역경사 대수값 (In\_Slope)과 0.43로 상관관계가 가장 높았으며, 다른 인자로는 논비율(Paddy), 밭비율(Upland)의 영향을 받는 것으로 나타났다. 침투량을 조절하는 침투공 계수 B1은 밭비율 대수값 (In\_Upland)과 0.58로 상관관계가 가장 높았고, 다음으로 유역경사가 높은 상관성을 보였다. 중간유출을 나타내는 2단 TANK의 경우 유출량을 결정하는 유출공 계수인 A2는 논비율, 산림비율 대수값, 유역경사와 상관성이 높았으며, 침투공 계수 B2는 유역면적 대수값과 상관성이 높았다. 비피압 지하수유출을 모의하는 3단 TANK의 유출공 계수인 A3는 유로연장 대수값, 밭비율과 상관성을 보였으며, 침투공 계수인 B3는 논비율, 산림비율의 영향이 큰 것으로 나타났다.

TANK 모형의 유출은 유출공 계수뿐만 아니라 TANK의 저류고에 비례한다. 따라서 각 단별 유출공 높이와 유역특성 인자의 상관분석은 중요한 의미를 가진다. 지표면 유출을 발생시키는 H11은 유역경사와 산림비율의 영향이 크게 산정되었으며, H12는 유역면적, 유역경사 대수값의 상관도가 높게 나타났다. 3단 TANK의 저류고를 나타내는 ST3은 산림비율

외에 크게 영향을 미치는 인자는 나타나지 않았다.

TANK 모형의 매개변수를 살펴보면 1단 TANK 유출공의 유출계수 A11은 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 많아지고 총유출량 또한 증가하게 된다. A11과 마찬가지로 A12 또한 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 많아지고 총유출량 또한 증가하게 된다. 2단 TANK 유출공의 유출계수인 A2는 중간유출과 관련이 있는 부분으로서, A2의 값이 커짐에 따라 3단 TANK의 유입보다 측벽 유출공을 통한 유출이 많아지므로 중간유출량이 증가하게 된다. 3단 TANK 유출공의 유출계수 A3는 유출량에 가장 낮은 민감도를 나타낸다. 또한, 1단 TANK 침투공의 침투계수인 B1은 그 값이 커짐에 따라 2단 TANK로의 유입이 많아지고, 측유출공의 유출량이 적어지므로 총유출량은 감소하게 된다. 반면에, 침투계수가 작을수록 2단 TANK로의 유입이 적고 측유출공의 유출량이 많아져서 총유출량은 증가하게 된다. B2, B3는 유출량에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 1단 TANK 아래쪽 유출공의 높이를 나타내는 H11은 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 적어지므로 총유출량 또한



Table 6 Regression equations for estimating the TANK model parameters

Parameters	Regression equation	R	R <sup>2</sup>
A11	$-0.0003Slope - 0.017\ln(Area) - 0.067\ln(Upland) + 0.398$	0.60	0.36
A12	$-0.004Paddy + 0.001Forest + 0.163\ln(Slope) - 0.27$	0.56	0.31
A2	$9.897 \times 10^{-5}Paddy + 0.028\ln(Forest) + 0.0003\ln(Slope) - 0.03$	0.60	0.36
A3	$-0.0002Upland + 4.092 \times 10^{-5}\ln(Area) + 0.001\ln(Length) + 0.006$	0.58	0.34
B1	$0.003Slope - 0.101\ln(Upland) + 0.262$	0.59	0.35
B2	$-0.01\ln(Area) + 0.1$	0.64	0.41
B3	$7.086 \times 10^{-6}Paddy + 7.754 \times 10^{-5}Forest + 0.001$	0.55	0.31
H11	$0.318Forest - 0.543Slope + 22.018$	0.79	0.63
H12	$-0.004Area + 0.333Slope + 44.939$	0.69	0.48
H2	$0.421Forest + 15.412\ln(Upland) - 22.099$	0.65	0.42
ST3	$1.147Forest - 49.086$	0.40	0.16
	43.013	-	-

감소하게 된다. H12는 홍수 시 유출량에 영향을 많이 미치는 데, 이는 H12의 높이가 1단 TANK의 유출공 중에서 가장 높아 적은 양의 강우로는 H12의 높이를 채울 수 없기 때문에 사료된다.

TANK 모형의 매개변수 중 유출량에 민감한 매개변수를 분석한 연구는 Han (1994), Kim et al. (2001)에 의해 보고된 바 있다. 유출량 추정 시 민감한 변수들로 Han (1994)은 A11, B1, B2 및 H11 등을 제시하였으며, Kim et al. (2001)은 A11, A12, B1 및 H12 등으로 제시하였다.

나. 회귀식 개발

본 연구에서는 각 매개변수와 상관성이 높은 유역특성인자들을 대상으로 매개변수추정 회귀식을 개발하였다. TANK 모형의 매개변수를 종속변수로, 유역특성인자를 독립변수로 설정하여 다중회귀분석을 수행하였으며, R<sup>2</sup>와 자유도를 반영한 수정된 R<sup>2</sup>를 비교하며 매개변수를 진입 또는 제거하여 회귀식을 결정하였다. Table 6은 개발된 회귀식과 상관계수 및 결정계수를 보여주고 있다. 개발된 일반화식을 통해 산정된 매개변수는 Sugawara (1972)가 제시한 매개변수 범위에 포함되는 것으로 나타났다 (Fig. 5).

다. 회귀식 적용

개발된 회귀식에 따라 산정된 매개변수를 TANK 모형에 적용하여 각 대상유역의 검정기간 동안 유출량을 모의하였으며, 그 결과를 비교·분석하여 Table 7에 제시하였다. 검정기간 동안 모의된 연평균 유출량과 실측 연평균 유출량을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 유전자 알고리즘으로 최적화된 매개변수의 결과 (Table 4)와 비교하면 다소 통계적 결과가 안

좋게 나타나지만, 소천 유역을 제외하면 NSE가 0.75 이상으로 나타나 Moriai et al. (2007)의 기준의 가장 높은 등급인 “very good”으로 평가되어 회귀식의 적용성이 높은 것으로 사료된다. 소천 유역은 NSE가 0.6으로 다른 유역에 비해 비교적 낮게 되었으나 Moriasi et al. (2007)의 기준에서 “satisfactory”로 평가되기 때문에 적합한 것으로 나타났다. 그러나 일부 유역에서 모의된 연평균 유출량이 실측 연평균 유출량에 비해 과소 추정되는 경향을 보였는데, 이는 무강우 시 기저유출량이 실측값에 비하여 과소 모의되었기 때문에 기저유출량 모의에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 미계측 저수지 상류 유역의 유출량을 추정하기 위하여 실측 유출량 자료를 확보하고 있는 국내 다목적댐 상류유역 15개소, 하천 수위관측소유역 15개소 등 총 30개 유역을 대상으로 개념적 강우-유출 모형인 TANK 모형의 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하였다. 매개변수의 제한범위를 고려하고 기존에 비해 장기간의 실측 자료를 이용하여 회귀식을 개발하였으며 그 적용성을 평가하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유전자 알고리즘을 이용하여 TANK 모형 매개변수를 최적화하고 이를 대상유역의 보정기간에 대하여 적용하였다. 그 결과 모든 유역에서 R<sup>2</sup> 및 NSE가 0.8 이상으로 나타났다. RMSE는 5 mm/day 이하로 높은 적합도를 보였다.

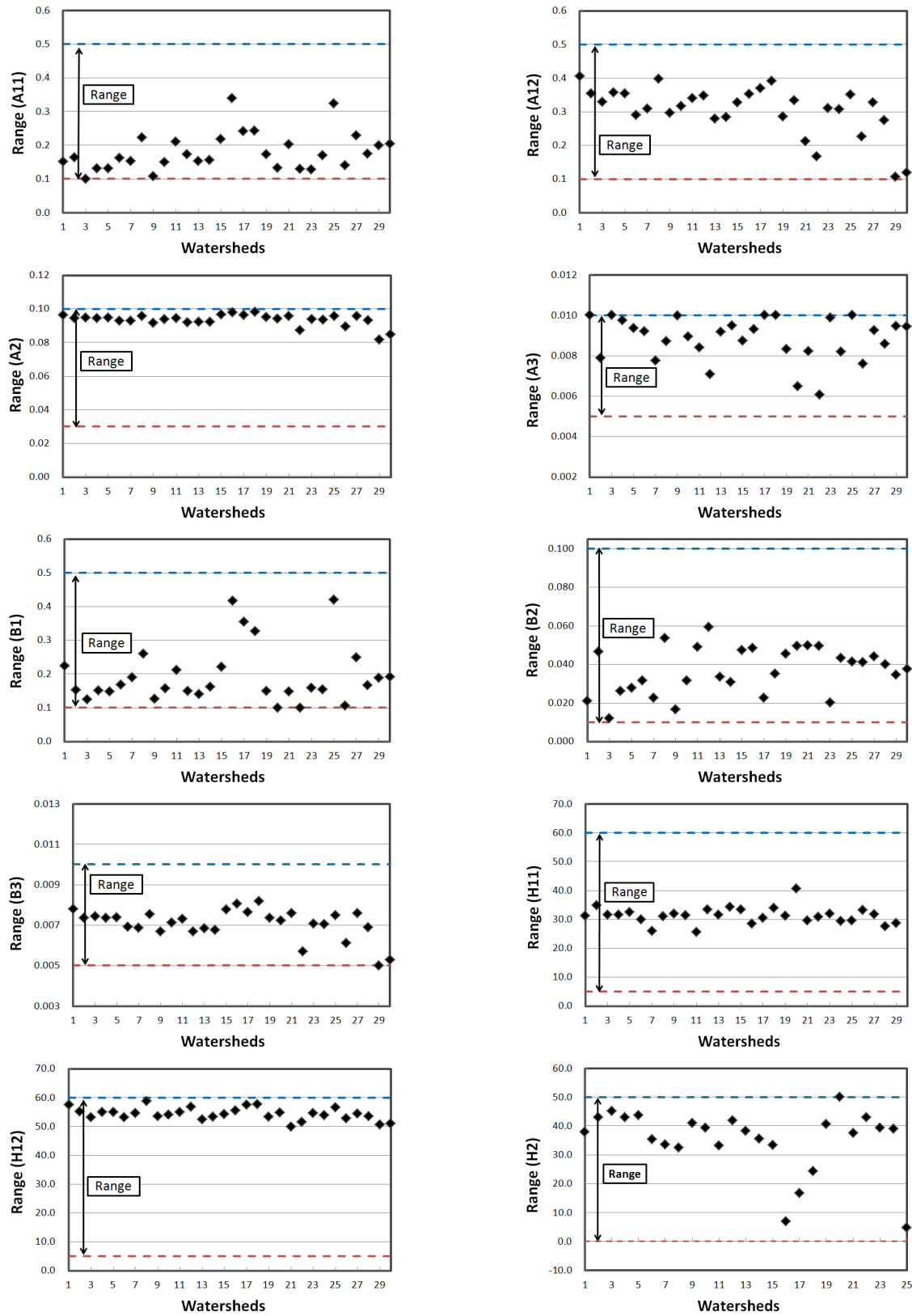


Fig. 5 Calculated parameter values by the regression equations (Each range is suggested by Sugawara, 1972)

**Table 7** Performance statistics of the TANK model with parameters calculated from the developed regression equations

Watershed Statistics	Soyangang	Hoengseong	Chungju	Andong	Imha
Ratio <sup>1)</sup>	0.77	1.12	0.77	0.97	0.72
RMSE (mm/day)	3.95	3.10	3.78	3.57	2.63
R <sup>2</sup>	0.73	0.82	0.74	0.75	0.81
NSE <sup>2)</sup>	0.73	0.81	0.74	0.71	0.76
Watershed Statistics	Hapcheon	Namgang	Milyang	Daechyeong	Yongdam
Ratio	0.81	0.85	0.72	0.71	0.77
RMSE (mm/day)	2.45	4.86	3.95	2.58	2.62
R <sup>2</sup>	0.87	0.83	0.85	0.82	0.86
NSE	0.85	0.78	0.80	0.79	0.84
Watershed Statistics	Boryung	Buan	Seomjingang	Juam	Tamjin
Ratio	0.79	0.73	0.79	1.22	0.90
RMSE (mm/day)	3.85	4.95	3.74	3.08	3.94
R <sup>2</sup>	0.78	0.83	0.86	0.82	0.78
NSE	0.77	0.77	0.78	0.81	0.78
Watershed Statistics	Maeil	Yeongweol	Socheon	Shinan	Jisan
Ratio	0.48	0.71	0.96	1.24	1.26
RMSE (mm/day)	4.09	2.19	2.69	3.65	2.32
R <sup>2</sup>	0.79	0.85	0.62	0.85	0.84
NSE	0.79	0.84	0.60	0.80	0.83
Watershed Statistics	Hyoryeong	Gajang	Okcheon	Cheoncheon	Songcheon
Ratio	0.62	0.96	1.25	1.02	1.14
RMSE (mm/day)	4.50	2.21	1.55	2.68	2.57
R <sup>2</sup>	0.75	0.78	0.74	0.86	0.75
NSE	0.72	0.77	0.74	0.84	0.75
Watershed Statistics	Gidaegyo	Jangjeon	Neungju	Mareuk	Eudeong
Ratio	0.75	1.35	0.79	0.72	0.71
RMSE (mm/day)	3.20	0.70	3.39	2.22	3.71
R <sup>2</sup>	0.80	0.77	0.78	0.75	0.83
NSE	0.79	0.74	0.75	0.70	0.78

<sup>1)</sup> Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)

<sup>2)</sup> NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency

2. 최적화된 매개변수는 Sugawara (1972)가 제시한 매개변수 범위를 만족하고 있으며, 이를 TANK 모형에 적용하여 검증기간에 대한 유출량을 모의하였다. 보정기간에 비하여 RMSE 값은 높게, R<sup>2</sup>와 NSE는 낮게 나타났으나, 전체적으로 R<sup>2</sup>와 NSE가 0.7 이상, RMSE는 5 mm/day 이하로 적합도가 높게 나타났다.

3. TANK 모형 매개변수 추정을 위한 일반화된 회귀식을 개발하기 위하여 유역면적, 논, 밭, 산림의 토지이용비율, 유로연장, 유역평균경사 등과 같은 유역 특성인자와 유전자 알고리즘에 의해 최적화된 매개변수 간 상관분석을 실시하였으며, 상관성이 높게 나타난 유역 인자를 이용하여 회귀식을 개발하였다.

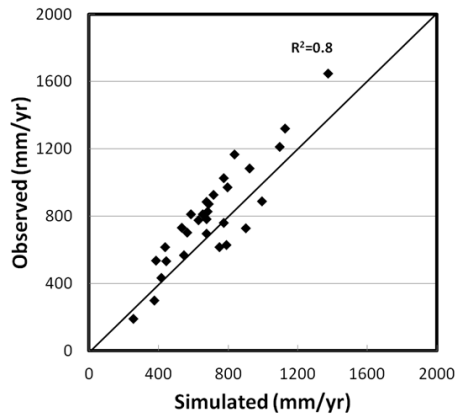


Fig. 6 Scatter plots comparing annual average runoff from observed values and simulated values by the regression equations

4. 개발된 회귀식을 이용하여 모형의 매개변수를 추정하였으며, 이를 TANK 모형에 적용하여 30개 대상구역의 유출량을 모의하고 그 결과를 실측 유출량과 비교함으로써 그 적용성을 평가하였다. 통계적 변량 평가 결과, 최적 매개변수에 의한 모의 결과에 비해 다소 모의 능력이 낮았으나, 30개 구역 중 29개에서 NSE가 0.75 이상으로 나타나 Moriasi et al. (2007)의 기준 상 “very good”으로 나타나, 그 적합성이 높은 것으로 평가되었다.

본 연구에서 개발된 일반화된 회귀식은 기존에 제시된 회귀식보다 통계적으로 높은 정확도를 보였으며, 향후 임의의 유역에 대한 장기유출량 모의 시 보다 신뢰성 높은 결과를 나타낼 것으로 기대된다. 하지만 본 연구에서 개발된 회귀식은 무강우 시 기저유출량이 실측값에 비하여 과소 모의되는 한계가 있어 모형의 보정 시 기저유출량 모의에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

향후, 더 많은 유역을 대상으로 유역경사 구간을 고려하고 기저유출모의 특성에 대한 분석을 추가적으로 고려한 뒤 회귀식을 개발하여 장기유출량을 모의한다면, 용수공급량, 무효방류량 등의 자료 획득에 어려움이 있는 미세측 저수지 유역의 유역관리, 설계 및 운영 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원(첨단생산기술개발사업)의 지원을 받아 연구되었음 (No. 112041-3).

## REFERENCES

- Engel B., D. Storm, M. White, and J. G. Arnold. 2007. A hydrologic/water quality model application protocol. *Journal of the American Water Resources Association* 43(5): 1223-1236.
- Han, S. H., 1994. Application of rainfall-runoff model for the runoff analysis. Master Dissertation, Kangwon National University (in Korean).
- Heo, Y. M., 1992. A streamflow network model for daily water supply and demands on small watershed. Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Holland, J. H., 1975. Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press.
- Kang, M. G., J. H. Lee, and K. W. Park, 2013. Parameter regionalization of a Tank model for simulating runoffs from ungauged watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association* 46 (5): 519-530 (in Korean).
- Kim, C., and S. K. Kim, 2004. Parameter optimization of Tank model using geographic data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 24 (6): 553-560 (in Korean).
- Kim, H. Y., and S. W. Park, 1986. An evaluation of parameter variations for a linear reservoir (Tank) model with watershed characteristics. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 28 (2): 42-52 (in Korean).
- Kim, H. Y., and S. W. Park, 1988. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs (1). *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 30 (1): 50-62 (in Korean).
- Kim, J. Y., and S. O. Jung, 2001. Sensitivity analysis for Tank model's parameters. *Journal of KCID* 8 (2): 55-63 (in Korean).
- Kim, S. J., P. S. Kim, and C. Y. Yoon, 2000. A regression equation of Tank model parameters for daily runoff estimation in a region with insufficient hydrological data. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers Symposium* 412-418 (in Korean).
- Kim, S. J., Y. G. Jee, and P. S. Kim, Parameter optimization of long and short term runoff models using genetic algorithm. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 46 (5): 41-52 (in Korean).
- Lee, S. Y., T. G. Kim, J. M. Lee, E. J. Lee, M. S. Kang, S. W. Park, and J. J. Lee, 2009. Comparison of estimating parameters by univariate search and genetic algorithm using Tank Model. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 51 (3): 1-8 (in Korean).
- Ministry of Construction Transportation (MCT), 1999. A study of optimization for water resources planning (III): The assessment of water supply reliability and development of water supply planning system. Korea Institute of Civil Engineering

- and Building Technology.
14. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transaction of the ASABE*, 50(3): 885-990.
  15. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
  16. Song, J. H., G. Chung, and M. S. Kang, 2014. An introduction of a parameter optimization method for watershed models using MATLAB. *Rural Resources* 56(2): 16-25 (In Korean).
  17. Song, J. H., I. Song, J. T. Kim, and M. S. Kang, 2015. Simulation of Agricultural Water Supply Considering Yearly Variation of Irrigation Efficiency. *Journal of Korea Water Resources Association* 48 (6): 425-438 (in Korean).
  18. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, J. H. Park, and J. H. Ahn, 2013. Surface drainage simulation model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 63-73 (in Korean).
  19. Sugawara, M., 1972. A method for runoff analysis. Kyoritsu Shuppan Press, Tokyo (in Japanese).
  20. Yokoo, Y., Kazamaa, S., Sawamotoa, M., and Nishimurab, H., 2001. Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression. *Journal of Hydrology* 246: 209-222.
  21. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, and D. K. Yun, 2013. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management* 117: 43-54.