



Parameter optimization of agricultural reservoir long-term runoff model based on historical data

Hong, Junhyuk^a · Choi, Youngje^b · Yi, Jaeung^{c*}

^aMaster course, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Sowon, Korea

^bPh.D Candidate, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Sowon, Korea

^cProfessor Department of Civil System Engineering, Ajou University, Sowon, Korea

Paper number: 20-113

Received: 14 December 2020; Revised: 12 January 2021; Accepted: 12 January 2021

Abstract

Due to climate change the sustainable water resources management of agricultural reservoirs, the largest number of reservoirs in Korea, has become important. However, the DIROM, rainfall-runoff model for calculating agricultural reservoir inflow, has used regression equation developed in the 1980s. This study has optimized the parameters of the DIROM using the genetic algorithm (GA) based on historical inflow data for some agricultural reservoirs that recently begun to observe inflow data. The result showed that the error between the historical inflow and simulated inflow using the optimal parameters was decreased by about 80% compared with the annual inflow with the existing parameters. The correlation coefficient and root mean square error with the historical inflow increased to 0.64 and decreased to $28.2 \times 10^3 \text{ m}^3$, respectively. As a result, if the DIROM uses the optimal parameters based on the historical inflow of agricultural reservoirs, it will be possible to calculate the long-term reservoir inflow with high accuracy. This study will contribute to future research using the historical inflow of agricultural reservoirs and improvement of the rainfall-runoff model parameters. Furthermore, the reliable long-term inflow data will support for sustainable reservoir management and agricultural water supply.

Keywords: Agricultural reservoir, DIROM, Historical data, Genetic algorithm, Parameter optimization

실측자료기반 농업용 저수지 장기유출모형 매개변수 최적화

홍준혁^a · 최영제^b · 이재응^{c*}

^a아주대학교 건설시스템공학과 석사과정, ^b아주대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^c아주대학교 건설시스템공학과 교수

요 지

최근 기후변화로 인해 국내 저수지 중 가장 큰 개소수를 차지하고 있는 농업용 저수지의 안정적인 용수공급이 중요해지고 있다. 그러나 현재 사용하고 있는 농업용 저수지의 유입량 산정모형인 DIROM 모형은 매개변수 산정을 위해 1980년대에 개발된 회귀식을 현재까지 사용하고 있다. 우리나라의 강우 및 유출 특성이 변화함에 따라 본 연구에서는 최근 수문자료 관측을 시작한 일부 농업용 저수지를 대상으로 실측 수문자료 및 유전자 알고리즘을 이용하여 DIROM 모형의 매개변수를 최적화하고, 그 결과를 평가하고자 하였다. 그 결과 기존의 매개변수를 적용한 결과에 비하여 최적 매개변수를 적용하였을 때 실측 유입량과의 차이가 약 80% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 평균적으로 상관계수는 0.64로 증가하였고, 평균제곱근오차는 $28.2 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 감소하였다. 최적 매개변수를 사용하여 장기유출모형을 하는 것이 실측 유입량에 좀 더 근접하게 모의할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과 장기적으로 관측된 실측 수문자료를 활용하게 된다면 좀 더 정확도 높은 유입량을 모의할 수 있으며, 미세측 농업용 저수지에서의 안정적인 용수공급 분석에 도움이 될 것이라 판단된다.

핵심용어: 농업용 저수지, DIROM 모형, 실측자료, 유전자 알고리즘, 매개변수 최적화

*Corresponding Author. Tel: +82-31-219-2507

E-mail: jeyi@ajou.ac.kr (J. Yi)

1. 서론

농업용수는 전체 수자원 이용량의 50% 이상을 차지하고 있으며 영농활동의 필수 자원으로 농업용 저수지의 용수공급에 크게 의존하고 있다(KRC, 2016). 농업용 저수지의 저수용량은 이수 측면의 농업용수를 포함하여 하류하천의 생태보전을 위한 환경용수용량과 재해방지를 위한 홍수조절용량이 포함된다(MAFRA, 2019). 최근 기후변화로 인한 강우의 변동성이 심해지고, 고온 일수가 증가하여 가뭄, 홍수 등 수자원관련 재해의 발생빈도가 증가함에 따라 저수지의 용수공급 안정성이 감소하고 있다(Choi, 2015; Kim *et al.*, 2012; KMA, 2020; MOLTMA, 2011). 현재 국내 저수지는 전국적으로 17,629개소가 있으며 이 중 농업용 저수지는 17,516개소로 가장 큰 개소수를 차지하고 있다(MOE, 2013). 하지만 농업용 저수지는 다목적댐과 비교하여 규모가 작아 가뭄이 발생하면 용수공급에 어려움을 겪을 가능성이 크다. 또한 대부분의 농업용 저수지가 노후화된 상태이며 수문 실측자료가 부족하여 이수 측면의 활용성과 관련된 연구가 부족한 실정이다. 농업용 저수지의 안정적인 용수공급 및 가뭄대응과 같은 이수 측면의 분석을 위해서는 저수지 상류의 정확도 높은 장기유출량 산정이 선행되어야 한다.

한국농어촌공사에서는 농업용 저수지의 유입량 추정을 위해 HOMWRS (Hydrological Operation Model for Water Resources System) 모형의 유입량 산정 모듈인 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model) 모형을 사용하고 있다(KRC, 2016; MAFRA, 2015). DIROM 모형은 Sugawara의 TANK 모형을 우리나라 농업용 저수지의 유역 특성에 맞게 수정한 일별 유입량 모의 발생 모형으로 현재 모형의 매개변수는 유역면적, 토지이용별 면적비율 등에 의한 회귀식으로 결정하여 사용되고 있다(Jang, 2003). 현재 적용되고 있는 매개변수 산정 회귀식은 Kim and Park (1988)에 의해 개발된 것으로 개발 이후 30년 이상 사용되어 특별한 개선 없이 사용되고 있다(MAFRA, 2015). 따라서 최근 우리나라의 강우 및 토지이용 특성이 변화함에 따라 유출특성 또한 변화하였기 때문에 장기유출량 산정을 위한 매개변수 개선이 필요하다.

TANK 모형을 이용한 유역의 정확한 유출 모의를 위해 모형의 매개변수를 개선하고자 하는 다양한 연구들이 진행되었다. Kim and Park (1988)은 실측자료를 보유하고 있는 12개 소유역을 대상으로 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생을 위해 TANK 모형을 적용하여 매개변수 회귀식을 개발 및 검증하였다. Yokoo *et al.* (2001)은 12개의 일본 댐 유역에 대해 4단 TANK 모형을 사용하여 회귀식을 작성하였고, 인접 유역의 매개변수를 초기값으로 사용하고 지역최적

화 방법인 Powell 방법을 사용하여 매개변수를 추정하였다. Kim and Kim (2004)은 6개의 소유역을 선정하고 선정된 유역에 대해 GIS를 이용하여 구축한 16개의 지형적 특성만을 고려하여 TANK 모형의 매개변수를 최적화하는 방법을 개발하였다. Kang *et al.* (2013)은 미세측 유역인 저수지 상류 유역의 유출을 모의하기 위하여 10개 소유역의 유역특성인자와 토지이용상태를 이용하여 TANK 모형의 구성성분을 개선하고 매개변수를 지역화하였으며, 모형의 적용성을 평가하였다. Kim *et al.* (2014)는 유출량 실측자료가 있는 4개의 댐 유역을 대상으로 최적화 기법을 이용하여 TANK 모형과 SWAT 모형의 매개변수를 최적화하고 유출량 모의 값을 비교하고 평가하였다. Ahn (2013)은 보다 정확한 TANK 모형의 매개변수 추정을 위해 실측 유출량 자료를 확보하고 있는 30개의 국내 다목적댐 상류유역 및 하천 수위관측소를 대상으로 유역특성인자 중 유역경사를 이용하여 세분화된 TANK 모형의 매개변수 회귀식을 개발하였다.

기존 DIROM 모형의 매개변수 추정 연구를 살펴보면 다목적댐 상류 유역 및 하천수위관측이 수행되고 있는 소유역 등 타 유역을 대상으로 매개변수를 산정하고, 이를 농업용 저수지에 적용하는 연구가 대부분이었다. 하지만 최근 315개소의 농업용 저수지에서 수문 실측자료 관측을 수행함에 따라 본 연구에서는 농업용 저수지의 실측 수문자료를 활용하여 DIROM 모형의 매개변수를 추정하고자 하였다. 이를 위해 수문관측을 수행하고 있는 농업용 저수지 중 25개 저수지를 선정하여 실측 수문자료 및 유전자 알고리즘을 활용하여 DIROM 모형의 매개변수를 최적화하였고, 이에 대한 평가를 진행하였다.

2. DIROM 모형 및 유전자 알고리즘

2.1 DIROM 모형

DIROM 모형은 농업용 저수지의 일별 유입량을 모의 발생하기 위하여 Sugawara (1961)의 TANK 모형을 우리나라 관개용 저수지의 유역 특성에 맞게 수정한 집중형 모형이다(Ahn, 2013; Kim and Kim, 2012; MAFRA, 2015). DIROM 모형은 기존의 4~5단 TANK 모형의 매개변수가 많아 보정의 어려운 점을 고려하여 3단 TANK를 직렬로 연결하여 유역의 지표유출, 중간유출, 기저유출을 성분별로 재현할 수 있도록 개념화한 모형이다(Kim and Park, 1988; Jang, 2003; Song, 2017).

Fig. 1은 DIROM 모형의 개념도를 나타낸 것이며 1단 TANK는 유출성분 중 지표유출을 나타내고, 2단 및 3단 TANK는 각각 중간유출 및 기저유출을 나타낸다(Ho *et al.*, 2018; Kim

and Park, 1988; Kim and Kim, 2012; Song, 2017; Yang, 2006). 1단 TANK의 유출공 수를 2개로 한 것은 홍수유출시 오차를 1개일 때보다 감소시키기 위한 것이다. 3단 TANK의 유출공의 높이(H_{31})를 0으로 한 것은 강우가 없을 경우의 초기 기저유출량을 표현하기 위한 것이며, 또한 저류수심은 유출공의 높이보다 커야만 유출공에서의 유출이 발생하게 된다 (Kim and Park, 1988; Yang, 2006).

DIROM 모형의 유역 유출량은 일별 강우량으로부터 Eq. (1)에 의하여 계산된다(Ahn *et al.*, 2015; Lee, 2012).

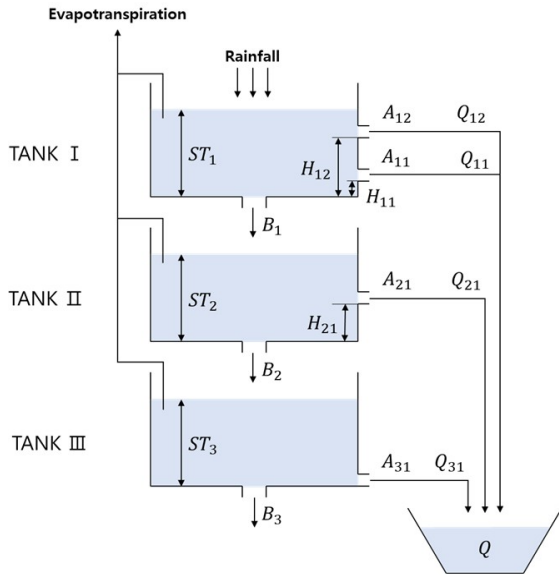


Fig. 1. Schematic diagram of DIROM

Table 1. Regressed equations of the DIROM parameter

TANK	Parameters	Description	Regression equation
TANK I	A ₁₁	Runoff coefficient	- 0.00414* <i>padd</i> + 0.169
	A ₁₂	Runoff coefficient	- 0.00175* <i>forst</i> + 0.333
	H ₁₁	Discharge outlet height	5.00
	H ₁₂	Discharge outlet height	16.68*ln (<i>area</i>) + 24.2
	B ₁	Infiltration coefficient	- 0.07*ln (<i>area</i>) + 0.47
	ST ₁	Storage depth	0.00
TANK II	A ₂₁	Runoff coefficient	- 0.00657* <i>uplan</i> + 0.163
	H ₂₁	Discharge outlet height	exp (- 0.0934* <i>uplan</i> + 2.0904)
	B ₂	Infiltration coefficient	0.00998* <i>padd</i> + 0.111
	ST ₂	Storage depth	0.00
TANK III	A ₃₁	Runoff coefficient	- 0.000267* <i>uplan</i> + 0.00912
	H ₃₁	Discharge outlet height	0.00
	B ₃	Infiltration coefficient	- 0.00618*ln (<i>area</i>) + 0.0351
	ST ₃	Storage depth	43.686*ln (<i>area</i>) + 37.159

**area* : Area, *uplan* : Upland area ratio, *padd* : Paddy area ratio, *forst* : Forest area ratio

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

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 유출공의 높이(mm), A_{ij} 는 i 번째 TANK의 유출공 계수(무차원)를 나타낸다. $ST_{i,t}$ 는 단위시간 t 에 따른 저류수심으로 Eq. (2)에 의하여 계산된다.

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

여기서, $ST_{i,t-1}$ 은 $t-1$ 일의 i 번째 TANK의 저류수심(mm), R_t 는 t 일의 강우량(mm), ET_t 는 t 일의 증발산량(mm), $Q_{i,t-1}$ 는 $t-1$ 일의 i 번째 TANK의 유출량(mm)을 나타낸다. $I_{i,t}$ 는 i 단 TANK의 침투량(mm)으로 Eq. (3)에 의하여 계산된다.

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

여기서, B_i 는 i 번째 TANK의 침투공 계수(무차원)를 나타낸다.

DIROM 모형의 주요 매개변수는 각 탱크의 저류수심, 유출공 계수, 유출공의 높이, 침투공 계수 등이 있으며, 각 매개변수는 유역면적, 토지이용상태(논, 밭, 산림 면적비율)에 대한 회귀식으로 정의된다. Table 1은 현재 사용중인 DIROM 모형의 매개변수 산정 회귀식이다(Kim and Park, 1988).

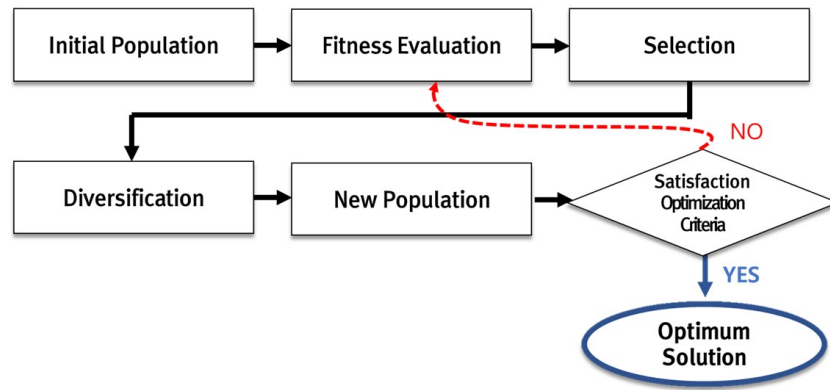


Fig. 2. Flow chart of the genetic algorithm

2.2 유전자 알고리즘

강우-유출 모형의 정확성 향상을 위해서는 모형 매개변수의 합리적 추정이 필요하다(Ahn *et al.*, 2015). 수문모형의 매개변수 추정을 위해 다양한 공식을 통해 이론적으로 계산할 수는 있으나 유출모의 결과의 정확성을 보장하기에는 어려움이 있다. 따라서 최근에는 실측자료를 활용하여 유출모형의 최적 매개변수를 추정하는 연구들이 수행되고 있다.

본 연구에서는 DIROM모형의 최적 매개변수 추정을 위해 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GA)을 활용하였다. 이 방법은 자연 선택의 과정을 모사하여 해를 찾아가는 알고리즘으로서 결과가 안 좋은 해는 진화 과정에서 도태되고, 더 나은 해를 나타내는 객체는 살아남는 유전학적 특성을 기반으로 하는 최적화 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 Holland (1975)에 의해 처음 소개되었고, DeJong (1975), Goldberg (1989) 등에 의해 발전되었다(Lee and Kim, 2001; Roh *et al.*, 2000). 일반적인 유전자 알고리즘의 진화 과정은 Fig. 2와 같이 초기화 단계로 주어진 탐색공간에서 초기집단을 무작위로 생성하며, 이를 각각의 객체에 대하여 적합성 평가를 수행한다(Jang, 2002; Kim *et al.*, 2014). 유전자 알고리즘은 최적해의 탐색에는 탁월한 성능을 발휘하지만 최적해 근처에 머물면서 최종 목표치로 수렴하는데 많은 시간이 소요되는 한계가 있다(Ahn, 2013).

3. 대상 저수지 및 입력자료 구축

3.1 대상 저수지 선정

본 연구에서는 수문자료 관측을 수행하고 있는 농업용 저수지를 대상으로 자료의 이상이 없고, 결측이 적은 25개 저수지를 선정하였다. Table 2는 지역별로 대상 저수지의 유역면

Table 2. Physical specification of the study reservoirs

Province	Reservoir	Area (ha)	Benefitted Area (ha)	Effective Storage Capacity (10 ³ m ³)
Gyeonggi-do	Gomo	396	131	1,250
	Mansu	378	140	614
	Deokwoo	2,270	573	3,547
	Giheung	5,297	1,226	11,630
Gangwon-do	Dowon	2,601	502	2,948
	Jamgok	1,970	825	4,279
Chungcheongbuk-do	Jungsan	784	215	2,270
	Daedeok	555	160	750
	Gung	1,244	392	8,223
Chungcheongnam-do	Jeongan	661	187	2,460
	Bangsan	689	266	2,054
	Gungpyeong	4,336	1,108	6,717
	Oksan	1,696	482	2,413
Jeollabuk-do	Daesan	455	132	1,241
	Mireuk	626	297	1,270
	Yongsan	921	390	2,439
	Daehwa	1,843	808	2,404
Jeollanam-do	Wolgok	540	378	2,238
	Baegyong	2,708	616	3,804
Gyeongsangbuk-do	Daebi	596	195	1,461
	Gyeongcheon	9,152	3,098	27,200
Gyeongsangnam-do	Jillye	474	242	2,095
	Deogam	471	150	1,130
	Daega	1,954	899	4,615
	Duryang	2,387	266	1,567

적 및 수혜면적, 유효저수용량을 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 3은 대상 저수지의 위치를 도시화한 것이다.



Fig. 3. Location map of the study reservoirs

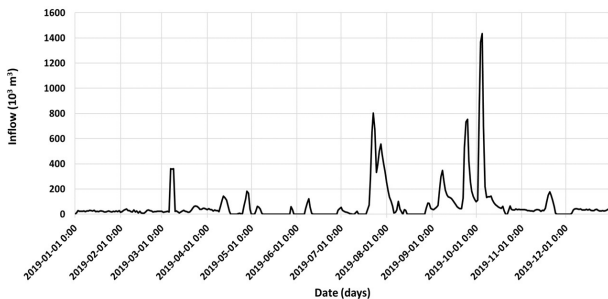


Fig. 4. Historical inflow of Gyeongcheon reservoir

3.2 입력자료 구축

3.2.1 농업용 저수지의 실측 유입량 산정

농업용 저수지에서 관측하고 있는 실측 수문자료는 저수지의 저수량, 저수위, 저수지 수로부의 수위 등을 관측하고 있으며 수로부의 수위로부터 저수지의 공급량 추정 가능하다. 각 저수지의 제원과 저수량, 공급량 데이터를 활용하여 물수지 관계 기반으로 Eq. (4)와 같이 실측 유입량 산정이 가능하다.

$$S_T = S_{T-1} + I_T - O_T \quad (4)$$

여기서, S_T 는 T 시간의 저수지 저수량, S_{T-1} 은 $T-1$ 시간의 저수지 저수량, I_T 는 T 시간의 저수지 유입량, O_T 는 T 시간의 저수지 방류량(공급량)을 나타낸다. Fig. 4는 경천 저수지(경

Table 3. Landuse and characteristics of the study reservoirs

Reservoir	Area (ha)	Rate of paddy (%)	Rate of upland (%)	Rate of forest (%)
Gomo	396	0.50	11.10	80.46
Mansu	378	11.55	17.10	25.85
Deokwoo	2,270	17.12	5.94	59.59
Giheung	5,297	8.17	5.70	48.88
Dowon	2,601	0.00	0.20	76.77
Jangmok	1,970	2.62	2.10	93.30
Jungsan	784	0.87	15.51	80.00
Daedeok	555	6.74	9.81	75.92
Gung	1244	5.40	7.78	83.10
Jeongan	661	8.09	12.45	72.49
Bangsan	689	7.76	4.68	82.16
Gungpyeong	4336	11.19	8.00	65.99
Oksan	1696	20.75	8.96	60.77
Daesan	455	15.09	2.14	76.09
Mireuk	626	10.88	3.33	72.23
Yongsan	921	5.27	1.99	85.07
Daehwa	1,843	18.83	5.75	62.82
Wolgok	540	5.73	3.34	78.83
Baegyong	2,708	7.22	7.90	79.28
Daebi	596	0.01	0.03	94.55
Gyeongcheon	9,152	4.78	7.21	83.35
Jillye	474	5.01	0.18	90.10
Deogam	471	7.09	0.79	87.11
Daega	1,954	20.11	5.11	64.80
Duryang	2,387	13.24	12.32	60.70

북)의 실측 유입량 산정 결과이다.

3.2.2 저수지 유역 지형자료 구축

유전자 알고리즘을 활용하여 최적화된 매개변수를 추정하기 위해서는 각 매개변수의 범위와 초기치가 필요하다. 본 연구에서는 매개변수의 초기치를 Kim and Park (1988)이 개발한 매개변수 산정 회귀식(Table 1)을 이용하였으며 초기 매개변수 추정을 위하여 대상 저수지 유역의 유역면적, 토지이용 현황 등의 자료를 구축하였다. Table 3은 선정된 25개 대상 저수지의 유역특성인자 산정 결과이다.

3.2.3 강우량 자료 구축

정확도 높은 강우-유출 모의를 위해서는 정확도 높은 강우량 자료 구축이 선행되어야 한다. 하지만 농업용 저수지의 특성상 인근에 기상(강우)관측소가 존재하지 않는 경우가 대부분

이며 이러한 유역의 강우자료 구축을 위해서는 Thiessen 방법, 등우선법 등을 이용하여 주변 관측소 자료를 활용하여 유역의 면적평균강우량을 산정이 필요하다. 본 연구에서는 강우자료 구축을 위하여 기상청의 종관기상관측장비(Automated Surface Observing System, ASOS)와 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)에서 관측된 자료를 활용하였다. 이를 위해 전국의 ASOS, AWS를 대상으로 Thiessen 망을 구축하고, 농업용 저수지 유역의 면적평균강우량을 산정하였다. 본 연구에서는 농업용 저수지의 저수량 및 공급량 자료가 안정적으로 관측된 2019년 자료를 활용하기 위하여 2019년 1월 1일부터 12월 31일까지 총 1년의 강우량 자료를

일 단위로 구축하였다.

4. 최적 매개변수 추정

4.1 매개변수 범위 및 초기치 결정

유전자 알고리즘을 활용하여 최적화된 매개변수를 추정하기 위해서는 각 매개변수의 범위와 초기치가 필요하다(Ahn, 2013). 모형의 매개변수 초기치를 결정할 때는 모형의 매개변수가 가지는 물리적 의미를 이해하고 매개변수의 물리적 허용 범위 내에서 적절하게 결정하여야 한다. DIROM 모형의 매개

Table 4. Range of the DIROM parameters

Bound	A ₁₁	A ₁₂	A ₂₁	A ₃₁	H ₁₁	H ₁₂	H ₂₁	B ₁	B ₂	B ₃	ST ₃
Lower	0	0	0.03	0.005	5	5	0	0	0.01	0.005	10
Upper	0.5	0.5	0.1	0.1	60	60	50	0.5	0.1	0.1	400

Table 5. Initial values of the DIROM parameters

Reservoir	A ₁₁	A ₁₂	A ₂₁	A ₃₁	H ₁₁	H ₁₂	H ₂₁	B ₁	B ₂	B ₃	ST ₃
Gomo	0.167	0.192	0.236	0.006	5.000	47.166	2.869	0.374	0.116	0.027	97.308
Mansu	0.121	0.288	0.275	0.005	5.000	46.367	1.638	0.377	0.226	0.027	95.215
Deokwoo	0.098	0.229	0.202	0.008	5.000	76.282	4.642	0.251	0.282	0.016	173.566
Giheung	0.135	0.248	0.201	0.008	5.000	90.415	4.748	0.192	0.193	0.011	210.580
Dowon	0.169	0.199	0.164	0.009	5.000	78.553	7.938	0.242	0.111	0.015	179.514
Jamgok	0.158	0.170	0.177	0.009	5.000	73.913	6.647	0.261	0.137	0.017	167.360
Jungsan	0.165	0.193	0.265	0.005	5.000	58.541	1.900	0.326	0.120	0.022	127.101
Daedeok	0.141	0.200	0.228	0.007	5.000	52.788	3.235	0.350	0.178	0.025	112.033
Gung	0.147	0.188	0.214	0.007	5.000	66.244	3.912	0.294	0.165	0.020	147.274
Jeongan	0.136	0.206	0.245	0.006	5.000	55.704	2.529	0.338	0.192	0.023	119.671
Bangsang	0.137	0.189	0.194	0.008	5.000	56.394	5.223	0.335	0.189	0.023	121.477
Gung pyeong	0.123	0.218	0.216	0.007	5.000	87.077	3.833	0.206	0.223	0.012	201.837
Oksan	0.083	0.227	0.222	0.007	5.000	71.418	3.503	0.272	0.318	0.018	160.825
Daesan	0.107	0.200	0.177	0.009	5.000	49.455	6.623	0.364	0.262	0.026	103.302
Mireuk	0.124	0.207	0.185	0.008	5.000	54.795	5.928	0.342	0.220	0.024	117.289
Yongsan	0.147	0.184	0.176	0.009	5.000	61.235	6.716	0.315	0.164	0.021	134.155
Daehwa	0.091	0.223	0.201	0.008	5.000	72.802	4.727	0.266	0.299	0.017	164.450
Wolgok	0.145	0.195	0.185	0.008	5.000	52.328	5.920	0.352	0.168	0.025	110.827
Baeg yong	0.139	0.194	0.215	0.007	5.000	79.225	3.867	0.239	0.183	0.015	181.272
Daebi	0.169	0.168	0.163	0.009	5.000	53.982	8.063	0.345	0.111	0.024	115.160
Gyeong cheon	0.149	0.187	0.210	0.007	5.000	99.536	4.125	0.154	0.159	0.007	234.469
Jillye	0.148	0.175	0.164	0.009	5.000	50.137	7.953	0.361	0.161	0.026	105.091
Deogam	0.140	0.181	0.168	0.009	5.000	50.056	7.515	0.362	0.182	0.026	104.876
Daega	0.086	0.220	0.197	0.008	5.000	73.782	5.019	0.262	0.312	0.017	167.017
Duryang	0.114	0.227	0.244	0.006	5.000	77.117	2.560	0.248	0.243	0.016	175.753

변수 중 TANK의 저류수심은 시계열 변수로 초기저류수심만 필요하다. 1단 TANK와 2단 TANK의 초기저류수심(ST_1, ST_2)은 0으로 하였고, 강우가 없을 경우의 초기 기저유출량을 표현하기 위해서 3단 TANK의 유출공의 높이(H_{31})를 0으로 하였다. 따라서 최적화할 매개변수는 1단 TANK와 2단 TANK의 저류수심(ST_1, ST_2)과 3단 TANK의 유출공의 높이(H_{31})를 제외한 총 11개이다. 각 매개변수의 범위는 Sugawara (1972)가 제시한 매개변수 범위와 Kim and Park (1988)이 국내 유역 특성에 맞게 보정한 값들을 활용하여 모델에 적용하였다 (Table 4). 저수지별 매개변수 초기치는 기존 DIROM 모형에 적용되고 있는 매개변수 산정 회귀식을 이용하여 결정하였다 (Table 5).

4.2 매개변수 최적화

각 대상 저수지에 대하여 Table 5에서 제시된 초기값을 이용하여 유전자 알고리즘으로 매개변수 최적화를 수행하였

다. 매개변수 최적화를 위해 본 연구의 유전자 알고리즘 모형에서는 실측 유입량과 모의 유입량의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 최소화하는 목적함수를 이용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Opt\ Runoff_i - Obs\ Runoff_i)^2}{N}} \quad (5)$$

여기서, $RMSE$ 는 평균제곱근오차, $Opt\ Runoff_i$ 는 최적화된 유출량, $Obs\ Runoff_i$ 는 관측 유입량, N 은 전체 자료의 개수를 의미한다. 최적화를 위한 대상 기간은 저수량 및 공급량 자료의 안정성을 고려하여 2019년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지 총 1개년이며, 당시의 강우량 및 실측 유입량 자료를 활용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 총 25개 대상 저수지의 DIROM 모형 매개변수 최적화 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Optimal parameters of the DIROM

Reservoir	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{31}	H_{11}	H_{12}	H_{21}	B_1	B_2	B_3	ST_3
Gomo	0.035	0.050	0.096	0.014	9.630	14.051	41.244	0.192	0.100	0.051	38.527
Mansu	0.066	0.035	0.091	0.009	5.283	13.461	31.444	0.195	0.087	0.049	112.116
Deokwoo	0.042	0.036	0.043	0.012	5.167	8.893	36.788	0.203	0.092	0.062	38.964
Giheung	0.039	0.023	0.048	0.014	34.263	59.853	0.010	0.319	0.086	0.088	17.805
Dowon	0.004	0.011	0.043	0.006	33.948	59.970	49.847	0.491	0.097	0.098	105.342
Jamgok	0.030	0.078	0.096	0.011	48.250	54.937	43.642	0.090	0.081	0.052	21.252
Jungsan	0.025	0.014	0.033	0.010	5.250	59.579	49.899	0.184	0.100	0.058	45.940
Daedeok	0.347	0.043	0.047	0.034	52.138	58.294	48.227	0.241	0.046	0.062	18.855
Gung	0.013	0.011	0.091	0.034	59.691	59.961	0.129	0.416	0.086	0.011	22.264
Jeongan	0.005	0.057	0.031	0.034	7.877	16.244	0.075	0.151	0.016	0.006	23.835
Bangsan	0.003	0.004	0.040	0.007	5.043	18.001	48.082	0.429	0.088	0.062	20.040
Gung pyeong	0.007	0.007	0.088	0.041	53.775	59.964	44.528	0.403	0.093	0.089	10.103
Oksan	0.002	0.011	0.056	0.016	56.959	59.910	49.716	0.481	0.099	0.057	27.373
Daesan	0.024	0.036	0.098	0.019	5.047	5.243	48.094	0.243	0.096	0.098	10.022
Mireuk	0.003	0.025	0.088	0.014	59.507	59.794	29.900	0.332	0.099	0.037	27.441
Yongsan	0.027	0.036	0.062	0.006	5.032	8.504	45.515	0.266	0.096	0.056	107.643
Daehwa	0.016	0.110	0.099	0.011	10.768	60.000	40.751	0.074	0.100	0.019	32.472
Wolgok	0.005	0.019	0.031	0.010	17.185	20.338	5.942	0.218	0.100	0.053	71.793
Baeg yong	0.046	0.010	0.038	0.006	5.359	5.546	40.918	0.289	0.094	0.097	87.405
Daebi	0.038	0.261	0.095	0.010	21.495	36.500	0.026	0.002	0.027	0.006	399.988
Gyeong cheon	0.002	0.002	0.099	0.007	59.165	59.568	33.957	0.455	0.098	0.075	112.293
Jillye	0.059	0.064	0.037	0.006	35.930	51.990	12.933	0.129	0.097	0.056	28.047
Deogam	0.073	0.033	0.031	0.009	5.266	12.374	0.063	0.164	0.087	0.039	37.250
Daega	0.010	0.009	0.031	0.009	7.473	30.120	6.002	0.481	0.100	0.081	11.251
Duryang	0.036	0.019	0.040	0.007	5.045	14.403	49.993	0.217	0.086	0.075	33.568

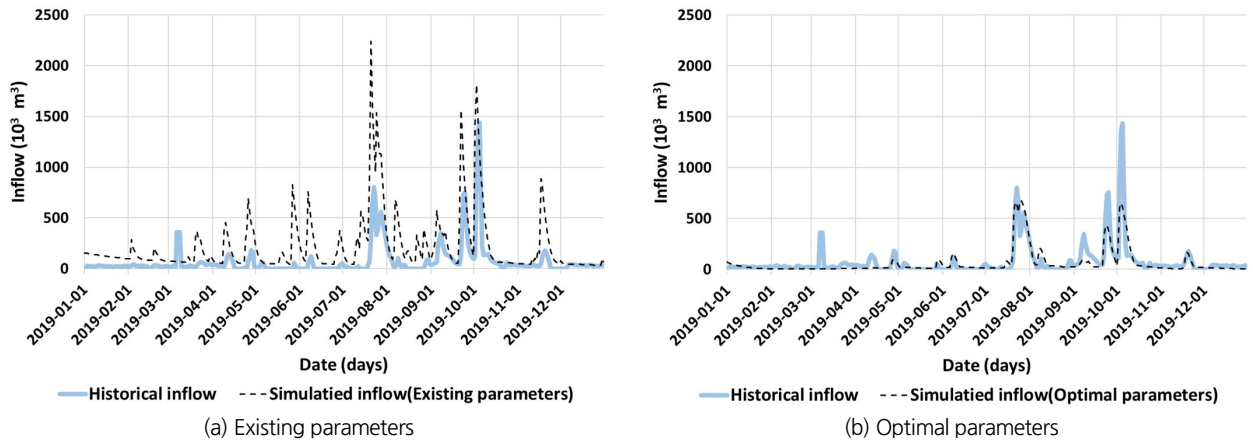


Fig. 5. Simulated inflow of Gyeongcheon reservoir

4.3 실측 유입량과 최적 매개변수 적용 모의 유입량 비교

추정된 매개변수의 적합성을 판단하기 위해 실측자료와 최적 매개변수가 적용된 DIROM 모형의 유출결과를 비교하였다. 또한 기존 매개변수가 반영된 DIROM 모형의 결과를 추가적으로 비교하여 DIROM 모형의 정확성 개선 정도를 판단하고자 하였다. Fig. 5는 경천저수지의 2019년 실측 유입량과 기존 매개변수를 적용하였을 때의 모의 유입량 및 2019년 실측 유입량과 최적화된 매개변수를 적용하였을 때의 모의 유입량을 나타낸다. 경천저수지에서 기존 매개변수를 적용하여 모의한 결과 연 총 유입량이 실측 유입량과 약 $55,452 \times 10^3 \text{ m}^3$ 차이가 발생하였고, 최적 매개변수를 적용한 결과에서는 실측 유입량과 약 $3,945 \times 10^3 \text{ m}^3$ 차이가 발생하였다. Fig. 5에서 기존 매개변수를 적용하였을 때 유입량이 과다하게 산정되는 것을 확인하였다. 최적 매개변수를 적용하였을 때는 연 총 유입량 변화에서 일부 첨두유입량을 근사하게 모의하고 있으나 모든 첨두유입량을 정확하게 모의하지는 못하였다. 이는 DIROM 모형의 매개변수는 유역면적과 토지이용에 따른 연중 고정된 값이기 때문에 선행강우 발생과 수문환경의 변화에 따른 유역의 유출특성 변화를 반영할 수 없기 때문이라 판단된다.

Table 7은 실측 유입량과 저수지별 기존 매개변수 및 최적화된 매개변수를 적용한 모의 유입량의 연 총 유입량과 오차율을 비교하였으며, Fig. 6은 실측 유입량과의 오차율 비교를 나타내었다. 25개 저수지에서 기존 매개변수를 적용하여 모의한 결과 연 총 유입량은 $2,116 \times 10^3 \sim 82,211 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 범위이며 평균은 $14,372 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 나타났고, 최적 매개변수를 적용한 결과에서는 $939 \times 10^3 \sim 22,814 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 범위이며 평균은 $6,560 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 나타났으며 실측 연 총 유입량 평균인 $6,798 \times 10^3 \text{ m}^3$ 에 비슷하게 모의되었다. 25개 저수지에

Table 7. Comparison of total annual historical inflow and simulated inflow

Reservoir	Historical inflow	simulated inflow (Existing parameters)		simulated inflow (Optimal parameters)	
	Total inflow (10^3 m^3)	Total inflow (10^3 m^3)	Error rate (%)	Total inflow (10^3 m^3)	Error rate (%)
Gomo	1,244.8	2,394.0	92.3	1,302.8	4.7
Mansu	939.9	2,116.1	125.1	1,332.4	41.8
Deokwoo	4,091.9	10,377.6	153.6	5,494.3	34.3
Giheung	35,023.2	39,105.9	11.7	22,176.1	36.7
Dowon	6,920.6	39,047.2	464.2	9,473.4	36.9
Jamgok	7,708.2	12,675.2	64.4	7,048.7	8.6
Jungsan	2,216.0	4,830.0	118.0	1,449.3	34.6
Daedeok	1,947.7	2,320.7	19.2	1,424.1	26.9
Gung	6,654.8	8,454.2	27.0	9,922.5	49.1
Jeongan	7,029.4	4,546.9	35.3	5,715.2	18.7
Bangsang	1,543.2	3,828.5	148.1	938.8	39.2
Gungpyeong	15,039.0	27,988.7	86.1	14,248.9	5.3
Oksan	5,046.3	8,530.5	69.0	3,520.0	30.2
Daesan	1,889.8	3,006.6	59.1	1,855.4	1.8
Mireuk	1,553.7	3,000.4	93.1	1,855.8	19.4
Yongsan	5,123.2	7,470.6	45.8	3,215.2	37.2
Daehwa	5,923.4	10,486.5	77.0	8,210.9	38.6
Wolgok	2,441.7	5,938.0	143.2	3,073.5	25.9
Baegyong	5,482.7	23,925.9	336.4	7,181.8	31.0
Daebi	3,723.5	4,585.8	23.2	7,283.6	95.6
Gyeongcheon	26,759.2	82,210.7	207.2	22,814.2	14.7
Jillye	3,054.0	5,105.8	67.2	3,055.3	0.0
Deogam	1,420.7	3,724.2	162.1	3,300.3	132.3
Daega	8,264.4	18,251.9	120.8	8,019.3	3.0
Duryang	8,905.4	25,386.4	185.1	10,094.2	13.3

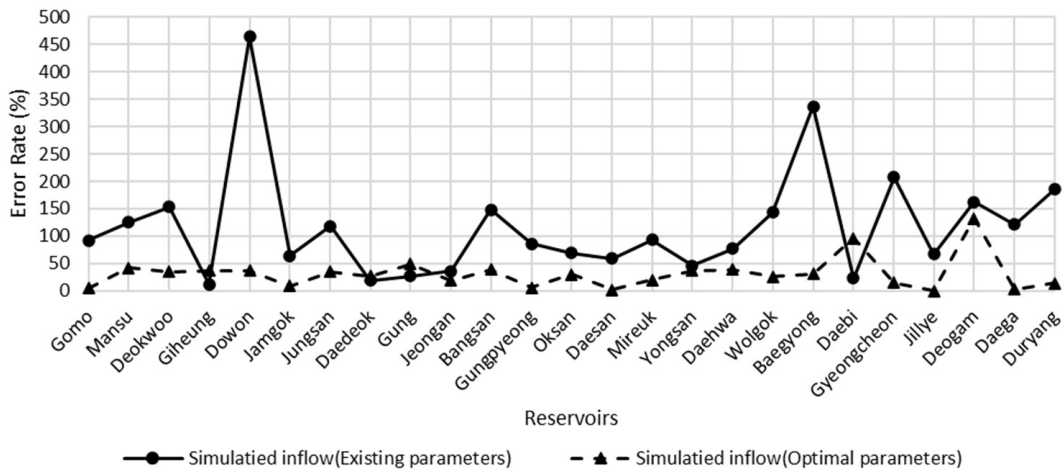


Fig. 6. Comparison of error rate

서 기존 매개변수를 적용하여 모의한 연 총 유입량과 실측 연 총 유입량과의 오차율은 11.7 ~ 464.2%의 범위이며 평균은 117.4%로 나타났고, 최적 매개변수를 적용한 연 총 유입량과 실측 연 총 유입량과의 오차율은 0.0 ~ 132.3%의 범위이며 평균은 31.2%로 나타났다. 대부분의 저수지에서 최적화된 매개변수를 적용한 모의 유입량이 실측 유입량에 근접하게 모의 되었으나 과소 추정되는 경향을 보였다. Table 8은 저수지별 2019년 실측 유입량과 기존 매개변수를 활용하였을 때의 모의 유입량의 상관계수(Correlation Coefficient, CC)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 최적화된 매개변수를 적용하였을 때 모의 유입량의 상관계수(CC)와 평균제곱근오차(RMSE)를 비교하였으며, Fig. 7은 상관계수(CC) 비교를 나타내었고, Fig. 8은 평균제곱근오차(RMSE) 비교를 함께 그래프로 나타내었다. 25개 저수지에서 기존 매개변수를 적용한 모의 유입량과 실측 유입량과의 상관계수(CC)는 0.31 ~ 0.80의 범위이며 평균은 0.53으로 나타났으며, 최적 매개변수를 적용한 모의 유입량과 실측 유입량과의 상관계수(CC)는 0.38 ~ 0.90의 범위이며 평균은 0.64로 기존 매개변수를 적용한 결과에 비하여 높게 나타났다. 25개 저수지에서 기존 매개변수를 적용한 모의 유입량과 실측 유입량과의 평균제곱근오차(RMSE)는 $10.1 \times 10^3 \sim 273.1 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 범위이며 평균은 $63.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 나타났으며, 최적 매개변수를 적용한 모의 유입량과 실측 유입량과의 평균제곱근오차(RMSE)는 $3.3 \times 10^3 \sim 153.4 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 범위이며 평균은 $28.2 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 대비 저수지를 제외하고 전체적으로 낮게 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 추정된 최적 매개변수를 적용한 DIROM 모형의 결과가 기존 매개변수를 적용한 모형에 비하여 높은 적합도를 갖는다는 것을 확인하였다.

Table 8. Comparison of correlation coefficient and root mean square error

Reservoir	Existing parameters		Optimal parameters	
	CC	RMSE	CC	RMSE
Gomo	0.71	12.69	0.85	4.39
Mansu	0.63	10.08	0.70	4.64
Deokwoo	0.80	39.51	0.81	15.91
Giheung	0.33	203.50	0.43	153.38
Dowon	0.48	189.42	0.42	55.33
Jamgok	0.78	52.28	0.90	25.82
Jungsan	0.41	26.68	0.50	9.50
Daedeok	0.31	11.08	0.61	5.24
Gung	0.54	31.88	0.73	19.24
Jeongan	0.56	19.17	0.74	10.39
Bangsan	0.46	21.73	0.59	5.44
Gungpyeong	0.64	110.55	0.88	28.24
Oksan	0.35	37.61	0.44	18.64
Daesan	0.42	15.99	0.53	11.31
Mireuk	0.55	12.69	0.88	3.28
Yongsan	0.57	33.42	0.61	22.18
Daehwa	0.63	35.39	0.69	22.32
Wolgok	0.34	32.15	0.47	10.24
Baegyong	0.60	101.31	0.57	34.29
Daebi	0.51	28.91	0.57	33.49
Gyeongcheon	0.68	273.13	0.82	92.80
Jillye	0.59	28.02	0.69	18.05
Deogam	0.32	26.19	0.38	15.44
Daega	0.36	113.17	0.42	51.43
Duryang	0.68	121.85	0.72	34.79

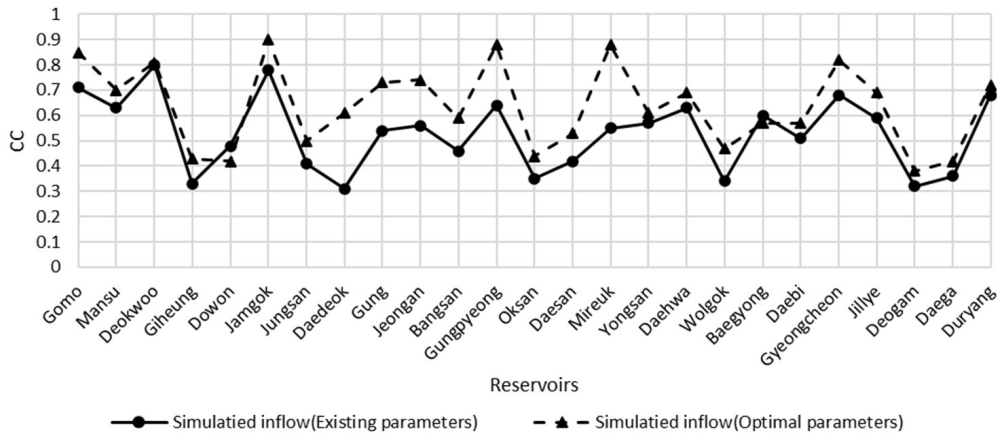


Fig. 7. Comparison of correlation coefficient (CC)

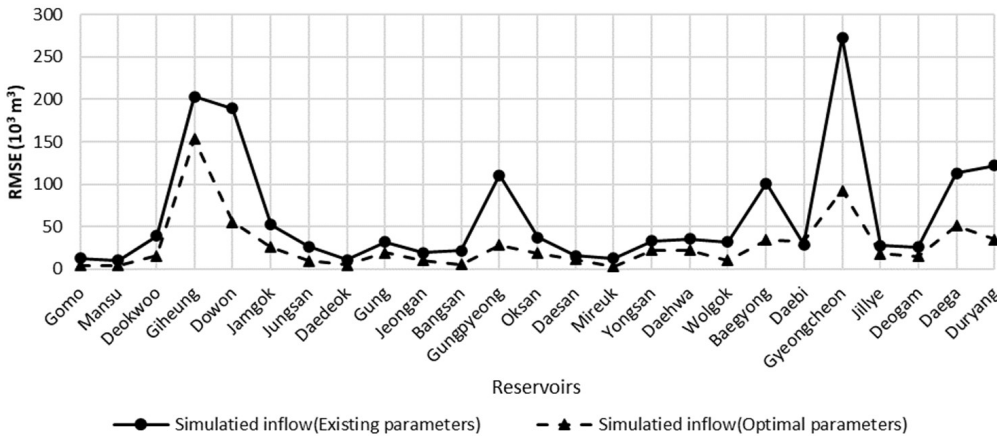


Fig. 8. Comparison of root mean square error (RMSE)

5. 결론

최근 활용도가 증가하고 있는 농업용 저수지는 실측 수문자료의 부족 등의 문제로 이수 측면에서의 체계적인 저수지 관리가 수행되지 못하였다. 이수 측면의 저수지 관리를 위해서는 정확도 높은 저수지의 장기 유입량 산정이 중요하다. 농업용 저수지의 장기 유입량 산정을 위한 DIROM 모형은 실측자료가 부재하다는 이유로 개발 당시의 매개변수 산정 회귀식을 현재까지 활용하고 있었다. 또한 기존 DIROM 모형의 매개변수 추정 선행 연구를 살펴보면 다목적댐 상류 유역 및 하천수위관측이 수행되고 있는 소유역 등 타 유역을 대상으로 매개변수를 산정하고, 이를 농업용 저수지에 적용하는 연구가 대부분이었다. 하지만 최근 일부 농업용 저수지에서 수문관측이 수행됨에 따라 본 연구에서 실측 수문자료 및 유전자 알고리즘을 활용하여 DIROM 모형의 매개변수를 최적화하고자 하였다.

이를 위해 총 25개 농업용 저수지를 대상 저수지로 선정하

였고, 저수지별 지형자료, 토지이용자료, 기상·수문자료를 수집하였다. 2019년의 실측자료를 기반으로 유전자 알고리즘을 적용한 매개변수 최적화를 수행하였고, 최적화한 매개변수를 적용하여 적용성을 평가하였다. 그 결과 25개 저수지에 대해서 기존 매개변수를 적용하여 모의한 연 총 유입량이 실측 연 총 유입량과 평균적으로 약 117.4%의 오차가 발생하였고, 최적 매개변수를 적용한 모의 연 총 유입량이 실측 연 총 유입량과 평균적으로 약 31.2%의 오차가 발생하여 감소하는 것을 확인하였다. 또한 기존 매개변수 산정 회귀식에 비하여 평균적으로 상관계수(CC)는 0.53에서 0.64로 증가하였고, 평균제곱근오차(RMSE)는 $63.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ 에서 $28.2 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 감소하였으며 대체적으로 정확도가 증가하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 추정된 최적 매개변수는 기존에 제시된 매개변수보다 통계적으로 높은 정확도를 보였으며 실측 유입량과 유사하게 모의되었다. 그러나, 일부 저수지에서 실측 유입량에 비해 과소 추정되는 경향이 나타났다. 아직 농업용 저수지

에서의 수문관측 기간이 길지 않으므로 충분한 실측 수문자료를 활용하고, 전국에 있는 농업용 저수지에 적용시키기 위해서는 DIROM 모형의 매개변수 추정에 있어 추가적인 보완이 필요하다고 판단된다.

향후, 더 많은 농업용 저수지를 대상으로 장기간의 실측 수문자료를 활용하여 매개변수를 최적화한다면 좀 더 정확도 높은 일반화된 매개변수 추정이 가능할 것으로 판단되며, 실측자료 획득에 어려움이 있는 미계측 농업용 저수지에 대해서도 안정적인 이수측면의 저수지 관리를 통한 농업생산력 확대에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(320004-01).

References

- Ahn, J.H. (2013). *Development of regression equations for the parameter estimation of TANK model based on basin slope*, Master thesis, Seoul National University.
- Ahn, J.H., Song, J.H., Kang, M.S., Song, I.H., Jun, S.M., and Park, J.H. (2015). "Regression equations for estimating the TANK model parameters." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 4, pp. 121-133.
- Choi, H.J. (2015). *A study on changes in the design flood of irrigation reservoir*, Master thesis, Ajou University.
- DeJong, K. (1975). *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ph. D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, U.S.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Co., MA, U.S.
- Ho, T.P., Nguyen., X.T., Hidetaka, C., and Kenji, O. (2018). "A hydrological Tank model assessing historical runoff variation in the Hieu River basin." *Asian Journal of water, Environment and Pollution*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-86.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Chambrige, MA, U.S.
- Jang, J.H. (2002). *A study on the estimation of streamflows using a distributed Rainfall-Runoff model*, Master thesis, Inha University.
- Jang, J.S. (2003). "Introduction of hydrologic models and parameters." *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, Vol. 10, No. 1, pp. 95-102.
- Kang, M.G., Lee, J.H., and Park, K.W. (2013). "Parameter regionalization of a Tank model for simulating runoffs from ungauged watersheds." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 519-530.
- Kim, C., and Kim, S.G. (2004). "Parameter optimization of TANK model using geographic data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 24, No. 6B, pp. 553-560.
- Kim, C.G., and Kim, N.W. (2012). "Comparison of natural flow estimates for the Han River basin using TANK and SWAT models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 3, pp. 301-316.
- Kim, H.Y., and Park, S.W. (1988). "Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs (1)-modeling inflow rates by a linear reservoir model-." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 30, No. 1, pp. 50-62.
- Kim, K.U., Song, J.H., Ahn, J.H., Park, J.H., Jun, S.M., Song, I.H., and Kang, M.S. (2014). "Evaluation of the Tank model optimized parameter for watershed modeling." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 4, pp. 9-19.
- Kim, Y.K., Yoo, J.A., and Chung, E.S. (2012). "Water management vulnerability assessment considering climate change in Korea." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-12.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2020). *Korea climate change Assessment Report 2020*.
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (2016). *Development of a integrated assessment of system for impact of climate change on agricultural water*.
- Lee, K.S., and Kim, S.U. (2001). "Automatic calibration of SSARR model with genetic algorithm." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 21, No. 3B, pp. 171-183.
- Lee, T.H. (2012). *The study of water supply reliability considering the management for restricted water level of agricultural reservoirs during flood period*, Master thesis, Kookmin University.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2015). *Development of a rural water resources assessment tool*.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2019). *Standard for Agricultural fill dam design*.
- Ministry of Environment (MOE) (2013). *A study on the improvement measures for survey on lake environmental*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTA) (2011). *A long-term comprehensive plan of water resources (2011-2020)*.
- Roh, K.B., Lee, H.M., Park, S.C., and Lee, K.S. (2000). "The river flows forecasting using genetic algorithm." *Proceeding of 2000 Korean Society of Civil Engineers Convention*, Vol. 2000, No. 3, pp. 533-536.
- Song, J.H. (2017). *Hydrologic analysis system with multi-objective optimization for agricultural watersheds*, PhD dissertation, Seoul National University.
- Sugawara, M. (1961). "On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers." *Japanese Journal of Geophysics*, Vol. 2, No. 4, pp. 1-76.

Sugawara, M. (1972). *A method for runoff analysis*. Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., Tokyo, Japan (in Japanese).

Yang, S.C. (2006). *Analysis and prediction of inflow for long-term water management of agricultural dams*, Master thesis, Hanbat University.

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, pp. 209-222.