



Enhancing the simulation accuracy of long-term runoff models using digital filter methods

Lim, Ye-Jin^a · Bae, Deg-Hyo^{b*} · Kwon, Hyun-Han^c · Shin, Hong-Joon^d

^aM.S, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

^bProfessor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

^cProfessor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

^dSenior Researcher, Hydro Technology Department, Hydro Power Division, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd, Gyeongju, Korea

Paper number: 24-025

Received: 16 April 2024; Revised: 30 August 2024; Accepted: 9 September 2024

Abstract

The objectives of this study propose a parameter estimation method that can consider both the total runoff and the runoff component by integrating the digital filter method and the long-term runoff models (SWAT, TANK), and evaluate the appropriateness of the applied methods. The study area is the Soyang River Dam basin, and parameter calibration and validation are performed by dividing it into a parameter estimation method considering the total runoff and a parameter estimation method considering the runoff component. In both methods, the fit between the observation and simulation runoff was excellent, and the model performance was found to be good with a coefficient of determination (R^2) of 0.73~0.87, and NSE of 0.67~0.85. As a result of comparison with each method, it was confirmed that the simulation accuracy was improved when applying the method considering the runoff component in both the SWAT model and the TANK model. When comparing between the models, the SWAT model showed better statistics in both methods, but the effect of applying to the method was found to be insignificant. However, even though the TANK model did not specifically consider the physical characteristics of the methodology, the statistical value of NSE increased by 17% when integrating a method such as a digital filter. In other words, the applicability to the digital filter method was found to be better in the TANK model, and when a hydrograph separation method such as a digital filter is applied to a conceptual model such as this model, it is judged that more improved simulation results can be obtained than the physical model. Accordingly, it is judged that estimating the parameters by considering the runoff component will be more accurate than estimating the parameters by considering only the total runoff when simulating the hydrological model.

Keywords: SWAT, TANK, Digital filter method, Enhancement of simulation accuracy

디지털 필터 기법을 활용한 장기유출모형 모의 정확도 향상

임예진^a · 배덕효^{b*} · 권현한^c · 신흥준^d

^a세종대학교 건설환경공학과 석사, ^b세종대학교 건설환경공학과 교수, ^c세종대학교 건설환경공학과 교수,
^d한국수력원자력(주) 수력처 수력기술부 선임연구원

요지

본 연구에서는 디지털 필터 기법과 장기유출모형(SWAT, TANK)을 연계하여 총유출량 및 유출성분을 모두 고려할 수 있는 매개변수 추정 방안을 제시하고, 적용기법의 적절성을 평가하고자 한다. 적용 대상지역은 소양강댐 유역이며, 총유출량을 고려한 매개변수 추정 방안과 유출성분을 고려한 매개변수 추정 방안으로 구분하여 매개변수 검·보정을 수행하였다. 두 방안 모두 관측 및 모의유량 간의 적합도가 우수하게 나타났으며 결정계수(R^2) 0.73~0.87, NSE 0.67~0.85로 모형성능이 양호한 것으로 나타났다. 각 방안에 대한 비교 결과, SWAT 모형과 TANK 모형 모두 유출성분을 고려한 방안 적용 시 모의 정확도가 향상되는 것으로 확인되었다. 모형 간 비교 시, 두 방안 모두 SWAT 모형이 더 우수한 통계치를 보였으나 기법에 대한 적용 효과는 미미한 것으로 나타났다. 다만, TANK 모형은 방법론 상 물리적 특성을 구체적으로 고려하지 않고 있음에도 디지털 필터와 같은 방법 적용 시 NSE의 통계치가 17% 상승하는 결과를 보였다. 즉, 디지털 필터 기법에 대한 적용성은 TANK 모형이 더 우수한 것으로 나타났으며 본 모형과 같은 개념적 모형에 디지털 필터와 같은 수문곡선 분리 기법을 적용할 경우 물리적 모형보다 더 향상된 모의결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 수문모형 모의 시 총유출량만 고려하여 매개변수를 추정하는 것 보다 유출성분을 고려하여 매개변수를 추정하는 것이 정확도 높은 유출모의를 할 것으로 판단된다.

핵심용어: SWAT, TANK, 디지털 필터 기법, 모의 정확도 향상

*Corresponding Author. Tel: +82-2-3408-3337
E-mail: dhbae@sejong.ac.kr (Bae, Deg-Hyo)

1. 서론

최근 전지구적 기후위기로 인한 수자원의 시공간적 변동성이 증가하고 있다. 이에 국내에서도 태풍 및 집중호우로 홍수 피해가 증가하고 있다(Heo, 2021). 특히, 우리나라 하천과 같이 유황 변동성이 큰 경우 수문순환 변화에 민감하게 반응하므로 수자원의 효율적 이용을 위해서는 장기간의 정확도 높은 유출해석이 필요하다. 이를 위해 다양한 형태의 강우-유출모형이 개발 및 활용되고 있다.

강우-유출모형은 자연계의 강우 및 유출의 물리적 관계를 수학적으로 표현한 것으로 모형별로 고유의 매개변수를 포함하고 있다. 그러나 대부분의 비선형 강우-유출모형의 매개변수는 이론적 계산이 불가하여 관측 강우 및 유출 자료를 통해 적정 매개변수를 추정해야 한다. 또한, 통상의 수문모형의 경우 유역 및 하도유출을 통한 총유출량 관련 매개변수의 추정만 가능하여 모형 내에서 지표유출 및 기저유출 등 유출성분을 고려하고 있음에도 성분 간 비교가 어렵다. 특히, 기저유출은 지표유출과 달리 땅속으로 침투된 강수가 장기간에 걸쳐 하천으로 유출되는 형태이기에 직접적인 측정이 쉽지 않은 특성이 있다. 따라서 하천 유량으로부터 이를 분석하기 위한 다양한 기법들이 제시되고 있으며 대표적으로 화학적 추적 기법, 도식적 기법, 디지털 필터 기법 등이 있다(Liu *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2020).

화학적 추적 기법(Tracer-based method)은 하천 내 비반응 화학성분을 추적자로 이용하여 하천 유량을 분리하는 것으로, 장기간 현장측정을 통한 직접 측정이 가능하나 다수의 인력 및 비용이 소요되는 단점이 있다(Kang and Lee, 2022; Lott and Stewart, 2016). 이에 도식적 기법 및 디지털 필터 기법과 같은 현장측정 없이 기저유량을 추정하는 비추적 기반의 기법이 실무에서 주로 활용되고 있다. 도식적 기법(Graphical method)은 수문곡선에서 유량이 증가하기 시작하는 시점과 변곡점을 선으로 연결하여 수문곡선을 분리하는 것이다(Jung and Lee, 2020). 전통적인 수문곡선 분리 기법으로 높은 활용성을 보이지만, 사용자가 수작업으로 기저유량을 분리하기에 개인의 주관에 반영되는 단점이 있다. 디지털 필터 기법(Digital filter method)은 하천유량에 디지털 필터를 이용하여 직접유출은 고주파 신호(High-frequency signal), 기저유출은 저주파 신호(Low-frequency signal)로 구분하여 유량을 분리하는 기법이다(Lyne and Hollick, 1979). 다양한 디지털 필터 기법들에 대해 시스템과 프로그램이 개발되어 있어 접근성이 좋아 현재도 각종 디지털 필터 기법을 활용한 연구가 활발히 진행 중이다. Luo *et al.* (2012)은 유출특성이 다른

두 저수지에 SWAT 모형을 구축하고 BFLOW로 기저유출을 분리하여 유출특성에 따라 기저유출이 모의되는 정도를 분석한 바 있다. Lee *et al.* (2014)은 수문곡선의 감수특성을 고려한 SWAT BFLOW로 수문곡선을 분리하고 미래기후변화에 따른 지하수 함양과 기저유출 경향을 전망한 바 있다. Hong *et al.* (2015)은 효율적인 하천 관리를 위해 BFLOW와 WHAT (Web-GIS based Hydrograph Analysis Tool)을 이용하여 강수계의 하천에 대한 직접유출 및 기저유출을 산정하고 하천에 미치는 기저유출 기여도를 정량화하는 연구를 수행하였다.

이와 같이 수문모형의 총유출량과 관련된 매개변수 추정과 관련한 연구(Bae *et al.*, 2003; Jung, 2003; Kim *et al.*, 2014; Jeong, 2021) 및 디지털 필터 기법을 연계한 다양한 연구가 수행되고 있지만, 다양한 물리적 알고리즘을 갖는 다수의 장기유출모형에 대해 유출성분과 같은 유역의 유출특성을 고려한 매개변수 추정 방안과 관련한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 기존 연구의 경우 유출성분을 직접유출과 기저유출 2가지 형태로만 분리하거나, 기저유출에 주안점을 두어 하천에 미치는 기저유출 기여도를 분석하는 연구가 주를 이루고 있다. 더욱이, 하나의 수문모형에 대해 여러 기법을 연계하여 기법별 결과를 비교하는 연구가 주로 수행되었다. 따라서 수문모형의 모의 정확도 향상을 위해서는 적절한 장기유출모형을 활용하여 총유출량뿐만 아니라 지표유출, 기저유출 등 대상유역의 유출특성을 반영할 수 있는 유출성분별 매개변수를 추정하는 방법론의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 국내·외 여러 연구에서 활용되고 있는 장기유출모형과 대표적인 수문곡선 분리 기법인 디지털 필터 기법을 연계하여 유출성분별 적정 매개변수를 추정할 수 있는 방안을 제시하고, 제안된 방법의 특성을 기존 기법과 비교·분석하여 제시하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구의 수행절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 자료수집 및 구축에서는 대상유역에 대하여 유출모형의 입력자료로 활용되는 강우 및 기상자료, 유량자료, 지형자료를 수집 및 구축하였다. 장기유출모형 구축 및 적용에서는 장기유출 모의를 위해 SWAT 모형과 TANK 모형을 선정 및 구축하고 매개변수 동보정 방법을 이용하여 매개변수 검·보정을 수행하였다. 매개변수의 추정은 각 모형에 대한 모의 정확도 향상을 위해 2가지 방안(CASE 1, CASE 2)으로 구분하였다. CASE 1은 총유출량을 고려한 매개변수 추정 방안으로 관측유량의 수문곡선

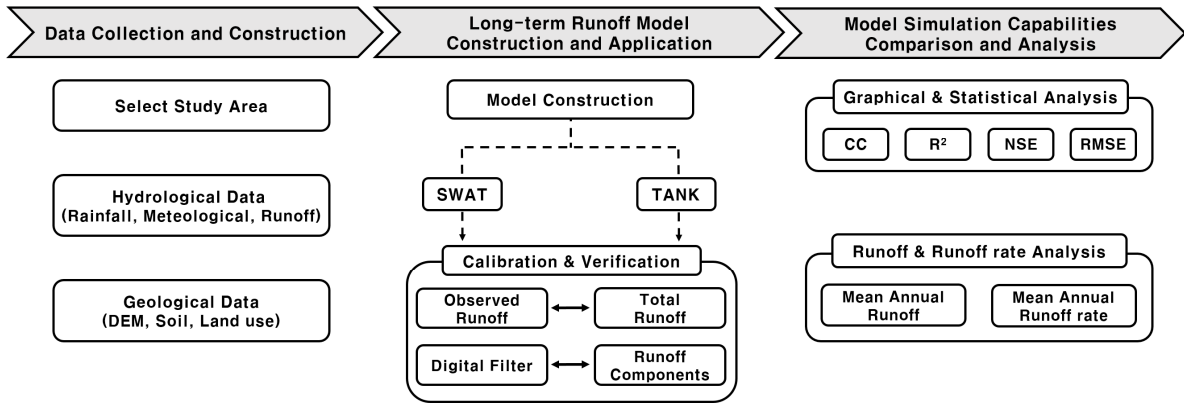


Fig. 1. Flowchart of study

을 기준으로 모의유량(총유출량)과 관측유량을 비교하며 우수한 모의성능을 갖도록 관련 매개변수를 조정하는 방법이다. CASE2는 유출성분을 고려한 매개변수 추정 방안으로 디지털 필터 기법을 활용하여 대상유역의 관측유량을 유출성분별로 분리한 후 이를 모형의 유출성분별 모의유량과 비교하여 각 성분과 관련된 매개변수를 조정하는 것이다. 추정된 매개변수의 적절성을 판단하기 위해 모형 검증을 실시하였으며, 검·보정 결과를 바탕으로 모형 모의능력에 대한 분석 및 평가를 수행하였다.

2.1 수문모형

본 연구에서는 장기유출 모의를 위해 SWAT 모형과 TANK 모형을 활용하였다. SWAT 모형은 Soil and Water Assessment Tool (Arnold *et al.*, 1998)의 약자로 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 준분포형 모형이다. 장기간에 걸친 기상, 토지이용, 토지피복, 지형자료 등에 대한 자료를 바탕으로 광범위한 지역에 대한 복합적인 수자원 변화를 모의하기 위해 개발되어, 국내뿐 아니라 전 세계적으로 많은 연구에 활용되고 있다.

SWAT 모형은 전체유역을 지형학적 특성에 따라 여러 개의 소유역으로 구분하여 동일한 토지피복 및 토양특성을 갖는 수문학적 반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 나눠 각 단위별로 모의를 수행한다. 물수지 방정식을 토대로 모든 수문성분(강수, 증발산, 지표유출, 기저유출 등)에 대한 모의를 HRU 별로 계산할 수 있으며, 성분별 유출량은 모두 합산하여 해당 소유역의 주하도로 유입된다. 이는 계산단위시간 (Δt) 동안 주하도에서 하도추적과정을 통해 해당 소유역 밖으로 유출된다. Fig. 2는 HRU 단위의 토양층에 대한 수문성분 거동을 나타낸 것으로 최대 10개의 토양층으로 구성할 수 있

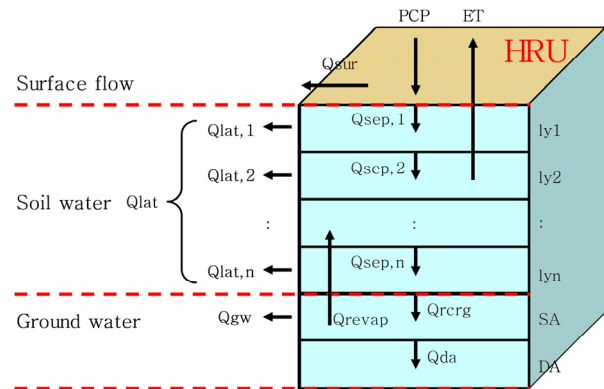


Fig. 2. Schematic representation of the soil layer structure of SWAT

다. 한 개의 HRU에서 강수(PCP)로 인해 발생하는 증발산량(ET), 지표유출량(Q_{sur}) 및 측방유출량(Q_{lat}), 침투량(Q_{sep}), 지하수 함양량 및 유출량(Q_{gw})은 다음과 같이 산정할 수 있다. Q_{sur} 은 SCS 유출곡선법 또는 Green & Ampt 침투법을 활용하여 산정할 수 있다. 이후 강수량에서 을 감한 나머지 양은 토양 표면 아래로 침투된다(Sloan and Moore, 1984). 침투된 양은 기존 토양수분량에 추가되어 포장용수량(Field Capacity, FC)을 초과하는 경우 Q_{lat} 과 Q_{sep} 로 이동하게 된다. 이때 측방 유출량은 Kinematic Storage Model에 의해 산정된다. 나머지 토양수분량은 식생과 기상조건에 따라 영구위조점(Wilting Point, WP)에 도달할 때까지 모관수로 정의되어 ET형태로 토양층 내에서 제거된다. 토양층의 침투량은 지하수함양량으로 얇은 대수층(Shallow Aquifer, SA)에 저장된 지하수에 추가되어 Q_{gw} 를 형성하게 된다. 일부는 하천으로 회귀하는 지하수 또는 깊은 대수층(Deep Aquifer, DA) 및 토양층으로 이동한다(Kim *et al.*, 2007).

SWAT과 같은 물리기반 모형의 매개변수는 주로 DEM, 토양도 및 토지피복도 등의 지형자료와 도심지 및 토양, 식생과

연계된 데이터베이스를 이용하여 산정한다. 이외 지형자료로부터 직접 산정이 불가능한 매개변수는 보정을 통해 값을 추정한다. 본 연구에서 추정하고자 하는 시범 유역에 대한 SWAT 모형 매개변수는 Table 1과 같다. 지표유출 관련 매개변수 4개, 하도추적과 증발산 각각 1개, 토양수분 2개, 중간유출 2개, 기저유출 5개로 총 15개의 매개변수로 구성되어 있다.

한편, TANK 모형은 1961년 일본의 Sugawara에 의해 처음 개발된 개념적 집중형 모형(Sugawara, 1972)으로 유역을 3~4단 탱크 구조로 가정하여 지표유출, 중간유출, 기저유출(비피압지하수유출, 피압지하수유출) 등의 강우-유출 과정을 모형화한 일체형 모형이다. 단순한 모형구조로 강우량과 증발산량을 입력자료로 하여 개념적으로 강우-유출 해석을 수행하며, 매개변수의 수가 상대적으로 적어 분포형 모형보다 간단하지만 정확한 유출모의가 가능하다. 이에 미세측유역과 같이 기상 및 토양, 토지이용 등 유역의 물리적 특성에 대한 자료수집이 곤란한 경우에도 실용적으로 적용할 수 있는 장점이 있다 (Neitsch *et al.*, 2001). 또한, 비선형 모형 구조를 갖추고 있어 대부분의 유출수문곡선과 갈수유출 및 홍수유출에 대한 동시

재현이 가능하다. 다만, 집중형 모형 특성상 토지이용 및 토양 특성의 변화, 기후변화 등과 같은 유역 내 수문환경 변화에 따른 유출특성변화를 해석하기 어려운 단점이 있다.

장기유출 모의 시 통상적으로 사용되는 4단 TANK 모형은 유역 대수층 구조에 대응한다는 개념을 가지고 있어 강우가 먼저 탱크모형 최상단(1단) 탱크에 주입되면 2, 3, 4단 탱크 순으로 일부는 각 단의 탱크 유출공을 통해 대수층에 대한 성분별 유출량이 산정되고, 나머지는 바닥면에 있는 침투공을 통해 지하로 침투하게 된다. Fig. 3은 장기유출 해석에 사용되는 4단 탱크모형에 대한 유출 구조를 나타낸 것이다. 먼저 유역에 강우가 내리면 증발산, 지표면 저류, 침투(B_1) 등으로 인해 초기손실이 발생하고 지표면으로부터 유출이 시작된다. 이때 강우가 지속되면 지표면에서의 유출이 점차 증가하여 1단 탱크 측면 유출공(A_{11}, A_{12})을 통하여 유출이 발생하게 되고 이를 지표면유출(Q_s)이라 한다. 2단 탱크에서는 1단 탱크에서 침투된 양을 입력값으로 하여 3단 탱크로의 침투량(B_2)을 계산하고 지표하로 침투한 강우의 일부가 지표하 불투수층에 도달할 경우, 다시 지표면으로 유출되어 중간유출(Q_i)을 산정한다. 3단 탱크와 4단 탱크는 2단 탱크와 동일한 과정으로 기저유출($Q_{ub}+Q_{cb}$)을 계산하나, 4단 탱크의 경우 침투공이 없어 더 이상 침투가 발생하지 않는다. 이러한 유출 과정에 따라 TANK 모형은 각 단의 탱크에서 유출고(mm/d) 형태로 계산된 유역유출량을 합산하여 최종 하천유출량(m^3/s)을 산정한다.

물리적 기반의 공간분포형 입력자료 및 매개변수로 구성된 SWAT 모형에 비해 TANK 모형은 개념적 매개변수로 구성되어 있어 유출해석에 필요한 매개변수의 수가 작다. 일반적으로 장기유출분석에 적용되는 4단 직렬탱크는 16개의 매개변수로 5개의 유출공 계수, 4개의 유출공 높이, 3개의 침투공 계수, 4개의 초기저류고로 구성되어 있다. 본 연구에서 추정하고자 하는 TANK 모형의 매개변수는 Table 2와 같다. 각 단의 탱크별로 매개변수의 수가 상이하며 지표유출과 관련된

Table 1. Parameters of SWAT model

Parameter	Range	Definition
Surface Runoff		
CN2	35-98	SCS curve number for moisture condition
SURLAG	1-24	Surface runoff lag coefficient
OV_N	0.01-30	Manning's "n" value for overland flow
CH_N(1)	0.01-30	Manning's "n" value for tributary channel
Channel Routing		
CH_N(2)	0.01~30	Manning's "n" value for the main channel
Evapotranspiration		
ESCO	0-1	Soil evaporation compensation coefficient
Soil Water		
SOL_AWC	0-1	Available water capacity of the soil layer
SOL_K	0-2,000	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
Lateral Flow		
SLSOIL	0-150	Slope length for lateral subsurface flow (m)
LAT_TTIME	0-180	Lateral flow travel time (days)
Groundwater Runoff		
GW_DELAY	0-500	Delay time for aquifer recharge (days)
ALPHA_BF	0-1	Base flow recession constant
GW_REVAP	0.02-0.2	Groundwater 'revap' coefficient
GWQMN	0-5,000	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)
REVAPMN	0-1,000	Threshold water level in shallow aquifer for 'revap' flow (mm)

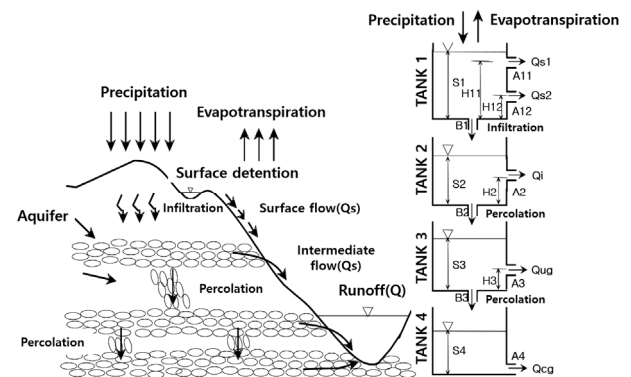


Fig. 3. Conceptual diagram of the runoff of the TANK model

Table 2. Parameters of TANK model

Parameter	1 st Tank		2 nd Tank	3 rd Tank	4 th Tank
Runoff coefficient	Upper	A_{11}	A_2	A_3	A_4
	Lower	A_{12}			
Water storage level	Upper	H_{11}	H_2	H_3	-
	Lower	H_{12}			
Infiltration coefficient	B_1		B_2	B_3	-

1단 탱크는 5개 매개변수로 구성되어 있다. 중간유출이 발생하는 2단 탱크는 3개의 매개변수, 기저유출이 발생하는 3단 및 4단 탱크는 4개의 매개변수로 구성되어 있다.

2.2 디지털 필터 기법

디지털 필터 기법은 신호 분석 원리를 수문곡선 분리에 적용한 것으로, 하천유량에 디지털 필터를 이용하여 직접유출은 고주파 신호(High-frequency signal), 기저유출은 저주파 신호(Low-frequency signal)로 구분하여 유량을 분리하는 기법이다. 이중 BFlow (Baseflow filter program)는 Arnold and Allen (1999)이 제시한 알고리즘을 적용한 것으로 하천 유량 중 기저유출의 비율을 결정하는 수문곡선 분리 프로그램이다. 본 프로그램은 기저유출 분리 결과에 영향을 미치는 필터 매개변수가 하나로만 구성되어 상대적으로 적용이 용이하며, 수문곡선 감수특성에 따라 유량을 분리하여 빠른 계산 및 일관성 있는 재현이 가능하다. 또한, 장기 유량자료를 토대로 유역을 대표할 수 있는 Alpha factor를 산정할 수 있어 계절별 및 월별로 변화하는 수문곡선 감수부 특성을 반영할 수 있는 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 디지털 필터 기법 중 국내·외적으로 활용성이 높은 BFlow 프로그램을 활용하여 수문곡선을 분리하고자 한다. Eq. (1)은 BFlow의 필터 방정식을 나타낸 것으로 총 3번의 패스(Forward, Backward, and Forward)를 통해 수문곡선으로부터 각 유출성분을 분리하는 과정을 의미한다.

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

여기서 q_t 는 시간(t)에 대한 직접유출량, Q_t 는 시간(t)에 대한 총유출량, Q_{t-1} 는 시간($t-1$)에 대한 총유출량, β 는 필터 매개변수를 의미하며 Nathan and McMahon (1990)이 제시한 0.925를 사용하였다. 기저유출 b_t 는 총유출량 Q_t 에서 직접유출량 q_t 를 감하여 산정하며 Eq. (2)와 같다.

Alpha factor (α)에 대한 산정식은 Eq. (3)과 같다.

$$Q_t = Q_0 K^t = Q_0^{-\alpha t} = Q_0^{ln K t} \quad (3)$$

여기서 Q_0 는 감수부 시작점에서의 유량, Q_t 는 시간(t)에 대한 총유출량, K 는 감수인자(Recession index)를 의미한다.

BFlow는 Pass 1, Pass 2, Pass 3 필터에 유량자료를 입력하고 Pass 1, 2, 3 순으로 기저유량이 작게 산정된다. 따라서 유역 특성에 적합한 값을 선택하여 사용할 수 있으며(Lyne and Hollick, 1979; Eckhardt, 2005), 분리된 성분들은 모형의 모의총유출량 및 성분별 유출량과 비교·검토할 수 있다. Arnold *et al.* (1995)은 Pass 3을 기저유출량으로 가정하여 SWAT 모형에 적용하였다. Abu El-Nasr *et al.* (2002)은 기저유출량은 Pass 3, 지표유출량은 총유출량에서 Pass 1을 감하여 산정하고, 중간유출량은 Pass 1에서 Pass 3을 감하여 산정하였다. Jung (2003)은 Abu El-Nasr *et al.* (2002)에서 제시한 방법을 활용하여 성분별 유출량을 산정하고 이를 국내유역에 적용한 바 있다. 본 연구에서는 Abu El-Nasr *et al.* (2002)의 방법을 활용하여 관측유량에 대한 유출성분별 유량을 산정하였다.

2.3 매개변수 추정 방안

수문모형의 매개변수 보정 및 검정 과정은 기존의 관측치와 모형으로부터 계산된 모의치가 가장 잘 일치하도록 초기조건 및 매개변수를 조정해 가는 것을 의미한다. 매개변수 추정 기법은 크게 최적화 기법을 이용한 자동보정기법과 시행착오법을 이용한 수동보정기법으로 구분된다. 매개변수 자동보정기법은 최적화 기법을 이용하여 목적함수를 최대 또는 최소화하도록 매개변수를 추정하는 방법이다. 이는 편리하고 신속한 보정이 가능하나, 매개변수의 물리적 의미를 유지한 상태에서 관측치와 모의치의 차이가 최소가 되는 매개변수를 추정하기보다는 수학적으로 최소값을 추정하는 한계가 있다. 수동보정기법은 모형의 매개변수를 변화시키면서 도식적 일치 및 통계적 허용오차를 만족할 수 있는 결과가 나올 때까지 모형을 반복 실행하는 것으로 유역 조건을 고려한 안정적인 해를 구할 수 있다. 그러나 전문가의 경험이나 판단에 의존하는 방법으로 연구자의 숙련도 및 주관이 개입될 수 있는 단점이 있다. 두 기법 모두 장단점이 다르기에 유역 및 수문모형의 특성을 고려할 수 있는 최적 기법을 선정하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 유출모형의 매개변수가 갖는 물리적 범위 및 유역 고유의 유출 특성, 유역 내 시설물을 고려하여 비현실적인 매개변수를 배제하고자 매개변수 수동보정을 수행하였다.

아울러, 수문모형에 대한 모의 정확도 향상을 위해 총유출

량과 유출성분으로 구분하여 적정 매개변수를 추정하였다. 총유출량을 고려한 매개변수 추정 방안(CASE 1)은 관측유량의 수문곡선을 기준으로 관측유량과 모형에 의해 모의된 유출 총량(하도유출 모의결과)을 비교하며 우수한 모의성능을 갖도록 매개변수를 조정하는 방법을 의미한다. 즉, CASE 1 방안은 유출성분에 상관없이 유출량에 민감하게 반응하는 매개변수를 모두 조정하는 것으로 이는 통상의 수문모형 매개변수 추정 방법과 동일하다.

본 연구에서 제시한 유출성분을 고려한 매개변수 추정 방안(CASE 2)은 디지털 필터 기법과 수문모형을 연계하여 유출성분에 대한 매개변수를 추정하는 방안으로 디지털 필터 기법을 활용하여 대상유역의 관측유량을 유출성분별로 분리한 후 이를 각 모형에 의해 모의된 유출성분별 모의유량(유역 유출 모의결과)과 비교하며 성분에 대응되는 매개변수를 각각 조정하는 방법을 의미한다. 즉, CASE 2 방안은 먼저 관측 지표유량 및 모의 지표유량과 관련된 매개변수를 통계치가 더 이상 유의미한 변화를 보이지 않을때까지 반복 조정한다. 이후 모의 지표유량에 관한 매개변수 값을 고정시킨 후 관측 및 모의 중간유량과 관련된 매개변수를 반복 조정한다. 마지막으로 지표유량과 동일하게 모의 중간유량에 관한 매개변수 값을 고정시킨 후 앞서 언급한 과정을 통해 기저유량과 관련된 매개변수를 추정한다. 해당 방안은 총유출량뿐 아니라 각 유출성분을 정확히 모의할 수 있도록 모형의 매개변수를 추정하는 것으로 디지털 필터 기법으로 분리된 관측유량이 참값이 아닐지라도, 실측이 불가능한 중간 및 기저유출에 대한 유출량 비교가 가능하다.

2.4 도식적 및 통계적 평가

유출결과에 대한 도식적 평가를 위해 검·보정기간에 대한 관측유량과 모의유량의 유출 수문곡선을 겹친 후 연속적 시계열로 도식화하였으며, 추가로 산포도를 도시하여 관측 및 모의유량 간의 관계를 비교하였다. 통계적 평가는 장기유출 모의 시 주로 활용되는 상관계수(Correlation Coefficient, CC), 결정계수(Coefficient of Determination, R^2), Nash and Sutcliffe 모형효율성계수(Model Efficiency, NSE), 평균제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 평가 기준으로 사용하였다(Eqs. (4)~(7)).

$$CC = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}) \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{N}} \quad (7)$$

여기서, Q_{obs} 및 Q_{sim} 는 관측 및 모의유량, $\overline{Q_{obs}}$ 및 $\overline{Q_{sim}}$ 는 평균 관측 및 모의유량, N 은 총자료 개수, i 는 자료의 순번을 의미한다.

3. 대상유역 및 자료수집

3.1 대상유역

본 연구에서는 장기유출모형의 모의 정확도 향상에 대한 분석 및 평가를 위해 한강유역 내 최상류 다목적댐 유역인 소양강댐 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 4). 소양강댐은 북한강 수계에 위치한 다목적댐으로 유역면적은 2,703 km², 고도는 194~1,694 m이다. 유역연평균유입량은 55.5 m³/s, 유효저수용량은 1,900백만 m³, 연간 용수공급계획량은 1,213백만 m³이다. 본 유역은 상류가 상수원보호구역으로 지정되어 있어 다른 하류 지역 댐 대비 인위적인 용수사용량이 적고 장기간의 관측자료를 보유하고 있다. 또한, 댐지점으로 회귀수량이 유입되어 이는 자연유출량에 가깝다고 볼 수 있다.

3.2 자료수집 및 구축

신뢰성 있는 강수량 자료는 유출 모의를 수행하는데 필수자료이며, 특히 장기유출해석에 사용되는 일단위 유역평균강수량의 정확한 산정은 가장 기본적이면서 중요한 요소이다. 본 연구에서는 각 유역에 대해 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 강우관측소 자료를 활용하였으며 총 17개 관측소가 위치하고 있다. 관측자료를 모두 도시한 후 역거리중첩으로 이상치를 보정하였으며, 티센계수법을 활용하여 소유역별 평균강수량을 산정하였다. SWAT 모형 모의를 위해서는 일단위 최고기온, 최저기온, 상대습도, 일조시간 및 평균

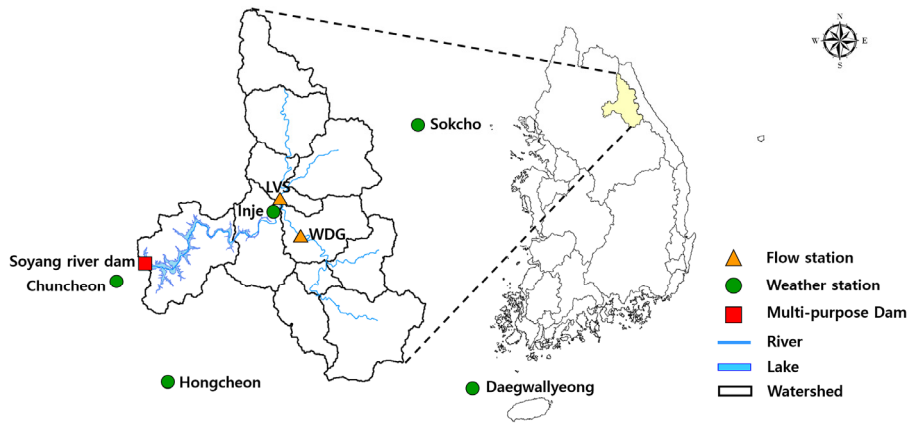


Fig. 4. Study area

풍속자료가 요구된다. 현재 우리나라에서는 기상청에서 일 기상자료를 제공하고 있으며 소양강댐 유역에 사용된 기상관측소는 ASOS 5개 지점으로 속초, 대관령, 춘천, 인제, 홍천이다. 댐 상류의 큰 인위적인 영향이 없는 경우 댐 지점의 유량 자료는 유역의 자연유출량을 파악할 수 있는 기초자료로 이용되며 유출해석 시 정확도 높은 유출모의가 가능한 것으로 알려져 있다 (Jung, 2003). 따라서 가용 가능한 모든 지점의 유량 시계열을 도시한 후 각 지점을 대표할 수 있고 자료 품질이 우수한 리빙스턴교(LVS) 지점과 원대교(WDG) 지점을 유량관측지점으로 선정하였다. 선정 지점에 대한 분포현황은 Fig. 4와 같다.

또한, SWAT 모형의 경우 구축 과정상 유역의 지형특성을 산정할 수 있는 지형자료의 수집 및 GIS 분석을 통한 입력자료 변환 과정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 환경부에서 제공하는 100m×100m 해상도의 DEM과 WAMIS에서 제공하는 토지피복도를 활용하였다. 토양도의 경우 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 활용하였다.

TANK 모형 모의를 위해서는 유역평균강수량, 증발산량, 초기 매개변수가 요구된다. 이에 SWAT 모형과 동일하게 유역평균강수량은 티센계수법, 증발산량은 Penman-Monteith 방법으로 값을 산정하였다. 초기 매개변수는 수자원 연구의 최적화 연구(III) 및 수자원관리기법개발 연구조사(건설교통부, 1997)에 제시된 값을 활용하였으며, 초기저류고는 관측 유량으로부터 산정하였다(Jung, 2003). 본 연구에서 활용한 TANK 모형의 초기 매개변수는 Table 3과 같다.

각 자료에 대한 수집기간은 1983년~2021년(39년)이며 동일 기간에 대해 모형 모의를 수행하였다. 각 모형에 대한 매개변수 보정기간은 2002년~2021년(20년), 검정기간은 1984년~2001년(18년)이다. 초기 1년(1983년)은 모형 안정화 기간(Warm-up)으로 설정하여 매개변수 검·보정기간에서 제외하였다.

Table 3. Initial parameter of TANK model

Parameter		1 st Tank	2 nd Tank	3 rd Tank	4 th Tank
Runoff coefficient	Upper	0.30	0.90	0.07	0.001
	Lower	0.50			
Water storage level	Upper	40.0	10.0	10.0	0.0
	Lower	20.0			
Infiltration coefficient		0.30	0.80	0.006	-

4. 적용 및 결과 분석

각 모형에 대해 구축된 지형변수와 관측 기상자료를 활용하여 모형 모의를 수행하였으며 모의기간은 1983년부터 2021년이다. 각 수문모형에 대한 모의 정확도 향상을 위해 총 유출량을 고려한 매개변수 추정 방안(CASE 1)과 유출성분을 고려한 매개변수 추정 방안(CASE 2)으로 구분하여 상류에서 하류 순으로 매개변수를 추정하였다. 매개변수 추정에 앞서 CASE 2의 경우 디지털 필터 기법을 활용하여 대상유역의 관측 수문곡선을 유출성분(지표, 중간, 기저유출)으로 분리한 후 성분별로 매개변수를 추정하였다. 매개변수 보정기간은 2002년~2021년(20년), 검정기간은 1984년~2001년(18년)이다.

4.1 관측유량의 성분 분리

Fig. 5(a)는 갈수해(2014년)의 성분 분리 결과를 사례로 나타낸 것으로 지표유출량 49.8%, 중간유출량 25.8%, 기저유출량 24.4%를 차지하였다. Fig. 5(b)는 홍수해(2020년)의 유출성분별 분리 결과로 전체유량 중 지표유출량이 차지하는 비율은 55%, 중간유출량은 24.3%, 기저유출량은 20.7%로 나타났다. 전체기간(1984년~2021년)에 대한 유출성분비율

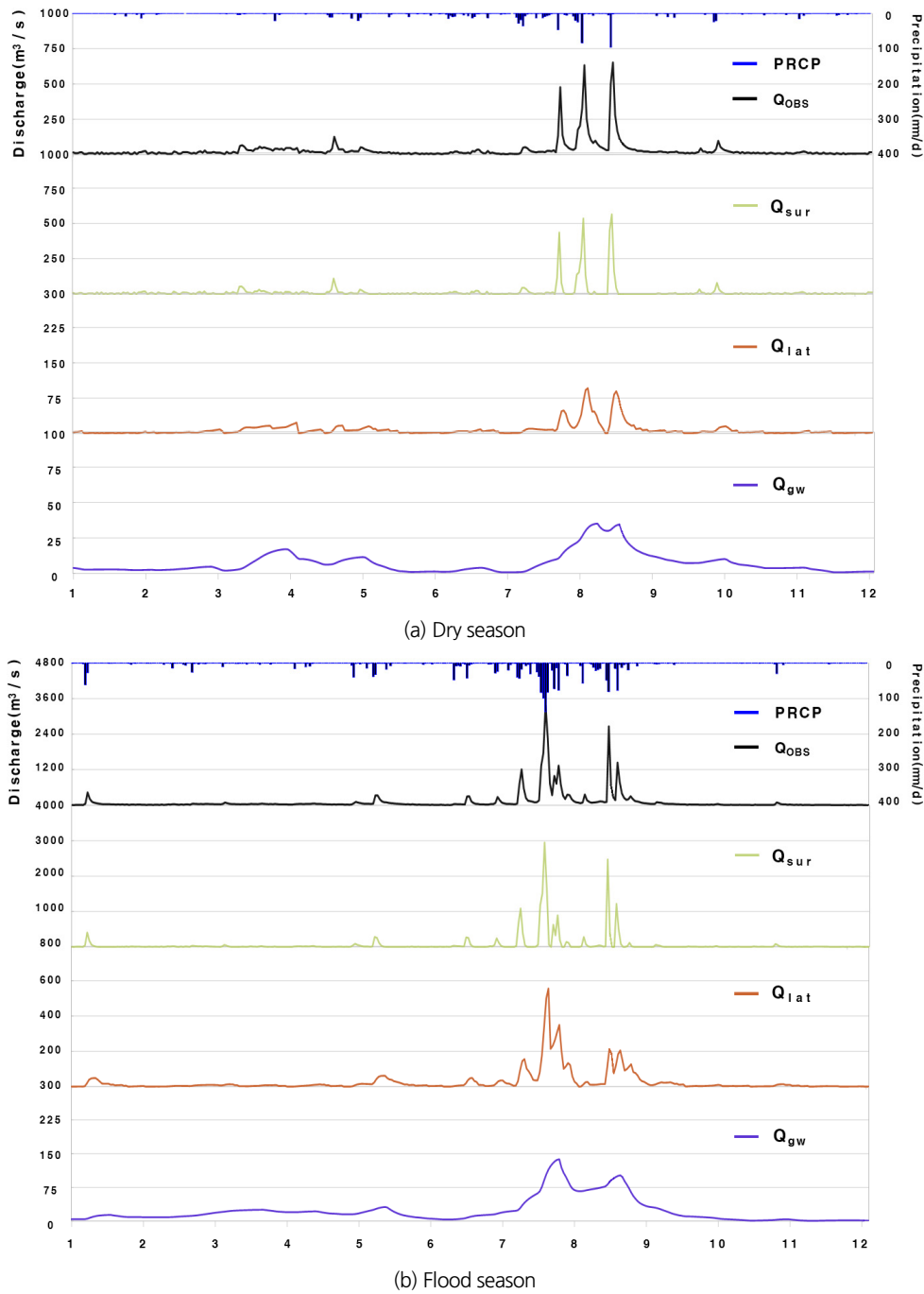


Fig. 5. Result of observation hydrograph separation

Table 4. Comparison of runoff components ratio (Unit : %)

Basin	Runoff	Period (1984-2021)	Dry Season (2014)	Flood Season (2020)
SYD	Surface Runoff	52.5	49.8	55.0
	Lateral flow	25.9	25.8	24.3
	Base flow	21.7	24.4	20.7

은 Table 4와 같으며 지표유출량이 가장 크고 기저유출량의 기여율이 가장 낮게 산정되었다. 이는 우리나라 강수량이 여름철 홍수기에 집중되어 있기 때문으로 판단된다.

4.2 매개변수 추정 방안별 결과

본 연구에서는 각 모형에 대해 방안별로 적정 매개변수를

추정하였다. SWAT 모형에 대한 매개변수 민감도 분석 결과, CASE 1 방안은 ESCO, CN2, SOL_AWC, CH_N(2)가 민감하게 반응하였으며 해당 매개변수를 중심으로 증발산, 지표유출, 토양수분, 기저유출, 하도추적 순으로 값을 보정하였다. CASE 2 방안의 경우 각 유출성분에 대하여 지표유출은 ESCO, CN2, SOL_AWC, 중간유출은 SOL_K, SLSOIL, 기저유출은 SOL_K, GWQMN, GWREVAP가 민감하게 반응하였다. 이에 토양수분, 기저유출, 중간유출, 증발산, 지표유출 순으로 반복하며 값을 추정하였다. 각 방안에 대한 SWAT 모형 매개변수 추정 결과는 Table 5와 같다. TANK 모형의 경우 상단 탱크 침투공에서 발생하는 유출량이 하단 탱크 유입량에 영향

을 미치는 형태이다. 따라서 CASE 1 방안은 지표유출, 중간유출, 기저유출 구분없이 전체 매개변수를 동시에 추정하였으며, CASE 2 방안은 지표유출(1단 탱크), 중간유출(2단 탱크), 기저유출(3단 및 4단 탱크) 순으로 반복하며 매개변수를 추정하였다. 각 방안에 대한 TANK 모형 매개변수 추정 결과는 Table 6과 같다.

Fig. 6은 CASE 1 방안의 모형별 유출량 모의결과를 도시한 것이다. Fig. 6(a)는 SWAT 모형, Fig. 6(b)는 TANK 모형을 나타낸 것이다. Figs. 6(c)~6(f)는 관측 및 모의유량의 산포도를 나타낸 것이다. 모의값과 관측값이 유사하게 거동하긴 하나, 홍수기 첨두유량의 경우 두 모형 모두 전반적으로 과대추정되는 경향이 나타났다. 이와 같은 결과는 산포도 상에서도 확인 가능하며 분석 결과, SWAT 모형은 저유량 부분에서는 비교적 잘 일치하지만 큰 홍수량에서는 편차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 매개변수의 물리적 특성상 고유량과 저유량이 동시에 증가하는 형태이기에 고유량에 대한 모의 적합도를 증가할 경우 저유량의 적합도는 낮아지는 것으로 확인되었다. 이에 관측유량의 수문곡선을 기준으로 매개변수를 조정하더라도 유출 거동을 정확하게 모의하기엔 한계가 있는 것으로 판단된다. TANK 모형은 홍수량에서는 높은 적합도를 보이지만 저유량은 분산이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 지표유출을 모의하는 상단탱크의 매개변수가 더 민감하게 반응한 결과로 판단된다. 그럼에도 CASE 1 방안의 추세선 기울기 평균이 0.89 이상으로 높게 나타나 관측값과 모의값 간의 적합도가 높은 것으로 판단된다.

Fig. 7은 CASE 2 방안의 모형별 유출량 모의결과를 도시한 것이다. Fig. 7(a)는 SWAT 모형, Fig. 7(b)는 TANK 모형을 나타낸 것이다. Figs. 7(c)~7(f)는 관측 및 모의유량의 산포도를 나타낸 것이다. 앞서 디지털 필터 기법으로 분리한 관측유량과 모형의 성분별 모의유량을 바탕으로 CASE 2 방안의 총 유출량을 비교·평가하였다. CASE 2 방안 역시 일부 홍수기 첨두유량이 비교적 작게 모의되는 특징이 있으나 관측유량에 대한 전반적인 유출패턴이 CASE 1 방안보다 유사한 형태로 거동하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 산포도 상에서도 확인 가능하며 산포도 분석 결과, CASE 2 방안의 추세선 기울기 평균이 0.92 이상으로 CASE 1 방안보다 높아 관측값과 모의값 간의 적합도가 더 우수한 결과를 보였다. 따라서 총

Table 5. Parameters of SWAT model

Parameter	Range	CASE 1	CASE 2
Surface Runoff			
CN2	35~98	+16	+30
SURLAG	1~24	1.30	1.0
OV_N	0.01~30	1.90	0.01
CH_N(1)	0.01~30	0.014	0.02
Channel Routing			
CH_N(2)	0.01~30	0.014	0.014
Evapotranspiration			
ESCO	0~1	0.95	0.95
Soil Water			
SOL_AWC**	0~1	0.10~0.12	0.10~0.15
SOL_K**	0~2,000	516	746
Lateral Flow			
SLSOIL	0~500	0	0
LAT_TTIME	0~1	0	0
Groundwater Runoff			
GW_DELAY	0~5,000	45	20
ALPHA_BF***	0~1	0.5	0.5~1.0
GWQMN	0~5,000	1,500	1,500
GW_REVAP	0.02~0.20	0.02	0.02
REVAPMN	0~1,000	750	750

** : The parameter related to soil moisture (Soil Water) is expressed as the average value across 10 soil layers.

*** : The parameter related to groundwater runoff is expressed by the parameter values for each sub-watershed.

Table 6. Parameters of TANK model

Method	Parameter											
	A ₁₁	A ₁₂	B ₁	A ₂	B ₂	A ₃	B ₃	A ₄	H ₁₁	H ₁₂	H ₂	H ₃
CASE 1	0.186	0.138	0.288	0.90	0.80	0.07	0.006	0.001	55.4	45.8	10.0	10.0
CASE 2	0.296	0.158	0.30	0.30	0.50	0.012	0.03	0.0001	59.4	45.8	26.0	25.0

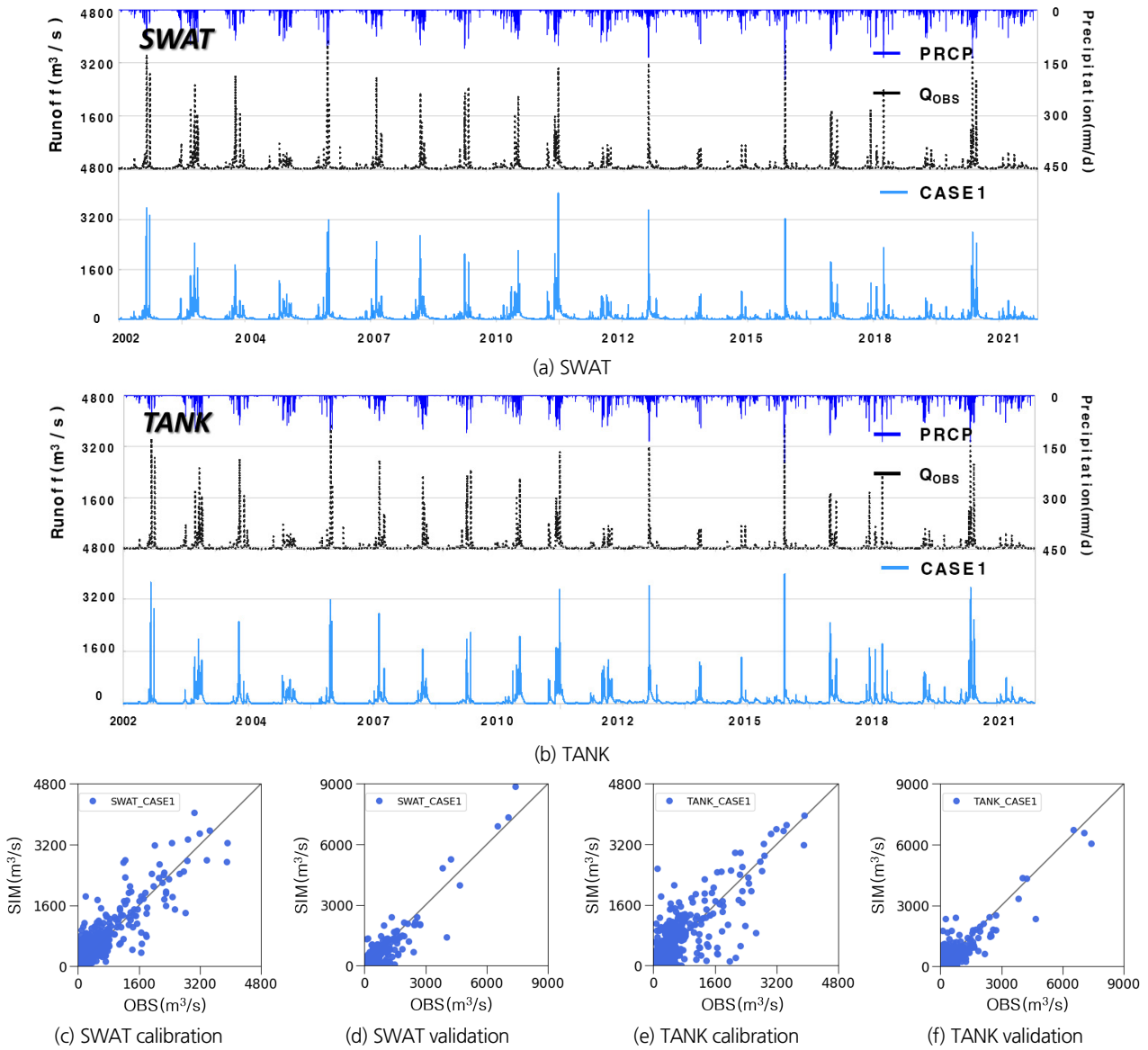


Fig. 6. Comparison of observed and simulated runoff for CASE 1

유출량만 고려한 경우보다 디지털 필터 기법을 함께 연계하여 유출성분까지 고려할 경우 수문모형의 모의 정확도가 향상되는 것으로 판단된다.

각 방안에 대한 통계적 평가결과는 Table 7과 같다. 보정기간에 대한 SWAT 모형의 CC는 0.90, 0.92, NSE는 0.78, 0.83, RMSE는 163.07 m³/s, 142.24 m³/s로 CASE 2 방안 적용 시 CASE 1 방안보다 더 우수한 통계치를 보였다. TANK 모형의 CC는 0.85, 0.90, NSE는 0.67, 0.79, RMSE는 201.13 m³/s, 158.44 m³/s로 CASE 2 방안 적용 시 결과가 더 우수한 것으로 확인되었다. 아울러, 검증기간의 경우 두 모형 모두 보정기간과 유사한 결과를 보이며 모형의 모의 정확도가 향상되는 것

Table 7. Statistical analysis of SWAT and TANK models

Mehod	Criteria	SWAT		TANK	
		CAL	VAL	CAL	VAL
CASE 1	CC	0.90	0.92	0.85	0.90
	R ²	0.83	0.85	0.73	0.81
	NSE	0.78	0.81	0.67	0.68
	RMSE	163.07	159.67	201.13	173.01
CASE 2	CC	0.92	0.93	0.90	0.91
	R ²	0.85	0.87	0.80	0.83
	NSE	0.83	0.85	0.79	0.80
	RMSE	142.24	150.41	158.44	173.29

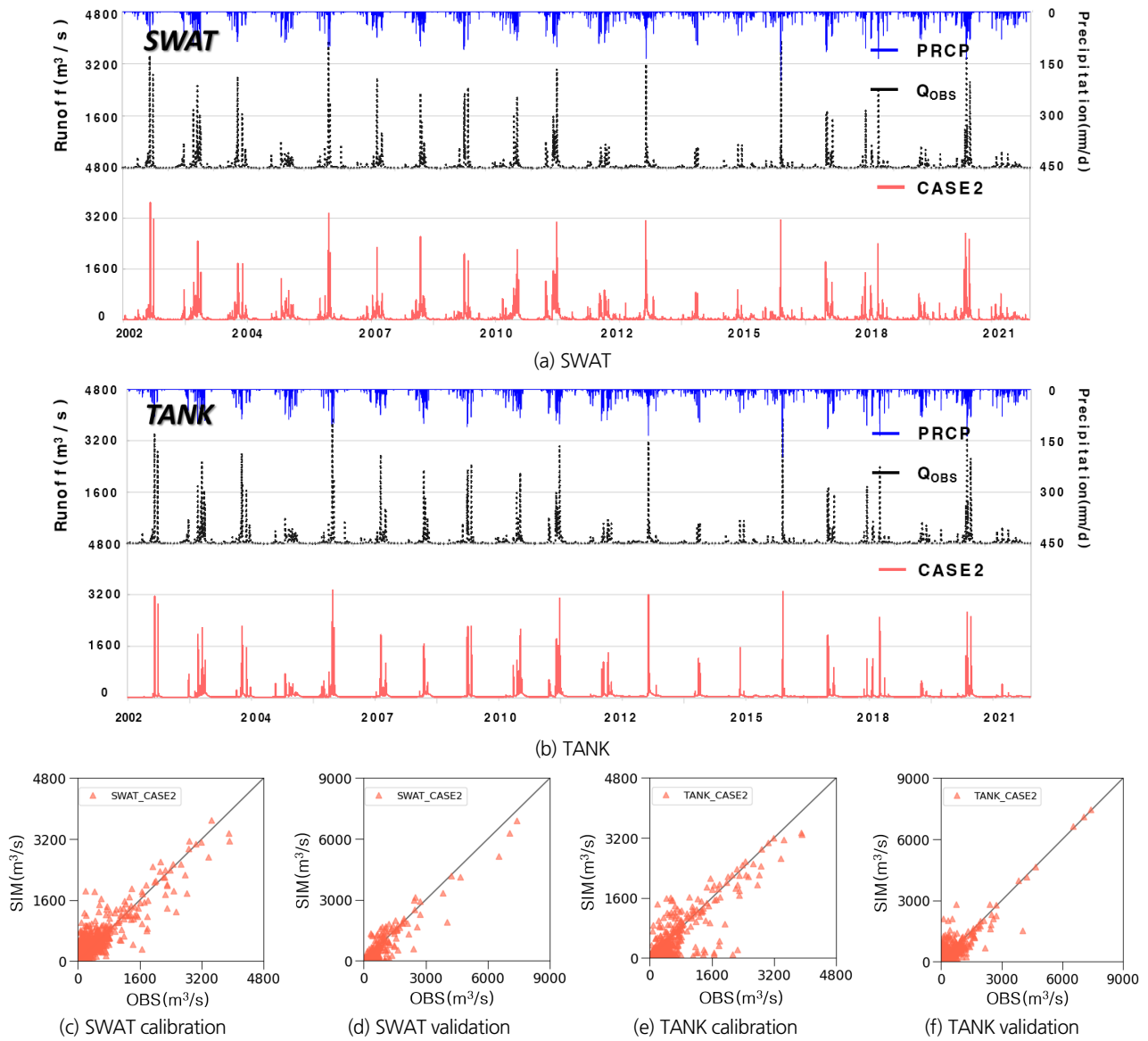


Fig. 7. Comparison of observed and simulated runoff for CASE 2

으로 나타났다. 모형 간 비교 시 CASE 1, 2 방안 모두 SWAT 모형이 TANK 모형보다 더 좋은 통계치를 보였다. 정량적 평가 기준(Donigian, 2000; Saleh *et al.*, 2000)을 활용하여 모형에 대한 검·보정 적절성 판단 결과, 두 모형 모두 R^2 은 적정구간($R^2 \geq 0.7$), NSE는 매우 우수 구간($NSE \geq 0.6$)으로 평가되었다. 따라서 통계적 분석 측면에서 신뢰성 및 정확도 높은 유출모의를 한 것으로 판단된다.

4.2 디지털 필터 적용 효과

매개변수 보정 방안에 대한 모의 정확도를 판단하고자 통계치를 활용하여 모형별 상대오차를 산정하였다(Fig. 8, Table

8). 산정결과 두 모형 모두 CC는 CASE 1 방안 대비 CASE 2 방안에서 미소한 증가율을 보였다. 반면 SWAT 모형의 보정기간 NSE는 6.41%, 검정기간은 4.94% 증가하였다. RMSE는 보정기간의 경우 12.77%, 검정기간은 5.80% 감소율을 보였다. TANK 모형의 보정기간 NSE 증가율은 17.91%로 큰 폭으로 증가하였으며 검정기간 역시 17.65% 증가하는 것으로 나타났다. RMSE는 보정기간의 경우 21.22% 감소하였으나 검정기간은 0.16% 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 모든 평가지표에서 CASE 1 방안보다 CASE 2 방안의 모의결과가 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 디지털 필터 기법을 활용하여 유출성분을 고려한 매개변수 추정 시 총유출량만

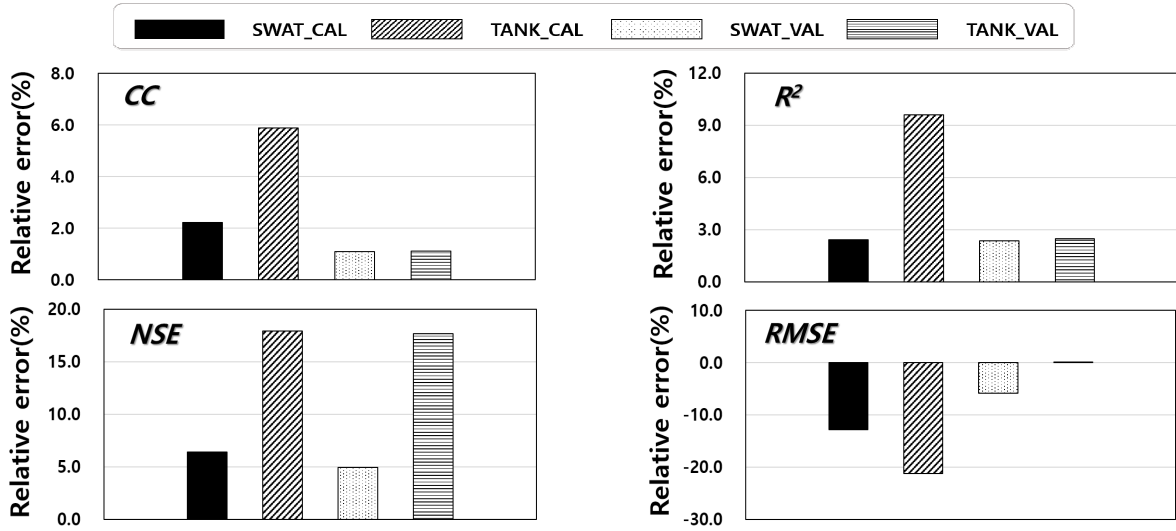


Fig. 8. Comparison of relative errors in models

Table 8. Relative errors between CASE 1 and CASE 2 (Unit : %)

Criteria	SWAT Relative errors		TANK Relative errors	
	CAL	VAL	CAL	VAL
CC	2.22	1.09	5.88	1.11
R ²	2.41	2.35	9.59	2.47
NSE	6.41	4.94	17.91	17.65
RMSE	-12.77	-5.8	-21.22	0.16

Table 9. Comparison of observation and simulation flows in dry and flood seasons

Period	Group	Runoff (m ³ /s)		Ratio	
		SWAT	TANK	SWAT	TANK
Dry Season	OBS	28.55	28.55	-	-
	CASE 1	20.64	18.04	0.72	0.63
	CASE 2	28.23	24.94	0.99	0.87
Flood Season	OBS	150.76	150.76	-	-
	CASE 1	178.13	175.10	1.18	1.16
	CASE 2	155.79	152.89	1.03	1.01

고려한 경우보다 모의 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 디지털 필터 기법 적용 시 TANK 모형의 NSE가 CASE 2 방안 적용시 약 18% 증가하는 것으로 나타나 본 기법에 대한 적용 효과는 TANK 모형이 SWAT 모형보다 우수한 것으로 판단된다. 이는 TANK 모형의 경우 전체유역에 대하여 각 단의 탱크로부터 성분별로 유출량이 산정되는 형태이지만, SWAT 모형은 여러 소유역을 토지이용 및 특성에 따라 HRU로 나누어 각 HRU별로 물리 기반 매개변수를 이용하여 모의하는 형태이기에 개념적 모형인 TANK 모형보다 개선

효과가 미비한 것으로 사료된다.

아울러, 전체 자료 기간(1984년~2021년)의 관측유량과 모의유량을 갈수기(1월~5월, 10월~12월)와 홍수기(6월~9월)로 구분하여 분석한 후 Table 9와 같이 정리하였다. Table 9에 제시된 바와 같이 갈수기와 홍수기 모두 디지털 필터 기법을 활용한 CASE 2 방안 적용 시 모의 정확도가 향상된 결과를 보였다. 특히, 갈수기에는 SWAT 모형의 모의유량이 28.23 m³/s로 관측유량(28.55 m³/s)에 더 근접하는 것으로 나타났다. 홍수기는 두 모형 모두 우수한 결과를 보이긴 하나 TANK 모형의 모의유량이 152.89 m³/s로 관측유량(150.76 m³/s)을 더 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 이는 기저유출을 모의하는 TANK 모형의 하단탱크의 저류고의 증가로 인해 기저유출이 주를 이루는 갈수기 때의 유출패턴을 민감하게 모의하지 못한 것으로 판단된다.

추가로, Fig. 9와 같이 전체 자료 기간에 대해서 관측유량과 모형별 모의유량의 연도별 유출량에 대한 평균치를 도시한 결과, 두 모형 모두 평균유출량의 변화를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 극심한 가뭄이 발생했던 1994년, 2014년, 2015년의 경우 SWAT 모형의 유출량이 관측치와 더 유사한 것을 확인할 수 있으며 1990년, 2011년 및 2020년과 같이 큰 홍수가 발생했던 홍수해의 경우 TANK 모형의 유출량이 관측치와 더 유사한 것으로 나타났다. 특히 1984년의 경우 TANK 모형보다 SWAT 모형의 모의유량과 관측유량 간의 차이가 크게 나타났으며 연평균유출물 환산 시 145%로 유입량 대비 100% 이상으로 나타났다. 이는 강우량 및 유량 관측 과정에서 발생한 오류 또는 홍수와 같은 대규모 수문현상의 변화로 인해 발생한 한계인 것으로 판단된다.

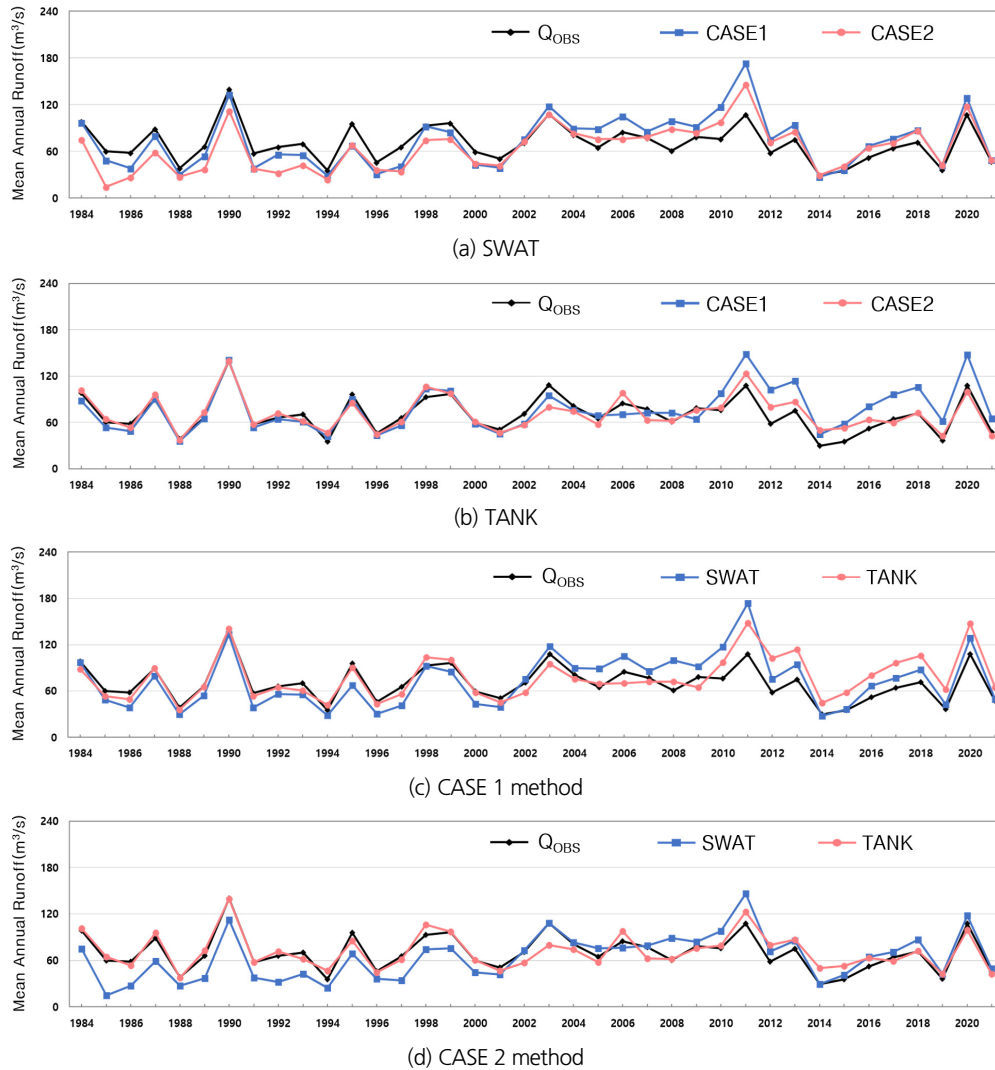


Fig. 9. Comparison of observed and simulated mean annual runoff

5. 결론

본 연구에서는 수문모형 모의 정확도 향상을 위해 디지털 필터 기법과 장기유출모형을 연계하여 유출성분별 적정 매개변수 추정 방안을 제시하고 기존 기법과 비교·분석하였다. 유역 내 인위적인 영향이 적고 장기간 수문자료를 보유하고 있는 소양강댐 유역을 대상으로 장기유출모형(SWAT, TANK)을 구축하였다. 각 모형에 대한 매개변수는 수동보정하였으며 모의 정확도 향상을 위해 총유출량을 고려한 매개변수 추정 방안(CASE 1)과 유출성분을 고려한 매개변수 추정 방안(CASE 2)으로 구분하여 적정 매개변수를 추정한 후 비교·평가하였다. CASE 1 방안은 총유출량을 고려한 매개변수 추정 방안으로 관측유량의 수문곡선을 기준으로 관측유량과 모형

에 의해 모의된 유출총량(하도유출 모의결과)을 비교하며 우수한 모의성능을 갖도록 매개변수를 조정하는 방법을 의미한다. 반면, 본 연구에서 제시한 CASE 2(유출성분별 적정 매개변수 추정) 방안은 디지털 필터 기법과 수문모형을 연계하여 유출성분에 대한 매개변수를 추정하는 방안으로 먼저 디지털 필터 기법을 활용하여 대상유역의 관측유량을 유출성분별로 분리한 후 이를 각 모형에 의해 모의된 유출성분별 모의유량(유역유출 모의결과)과 비교하며 성분에 대응되는 매개변수를 각각 조정하는 방법을 의미한다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 각 방안에 대한 모형별 적용 결과, 두 모형 모두 모의값과 관측값이 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 특히, CASE

1, 2 방안 모두 홍수기 첨두유량이 일부 과소산정되었음에도 관측유량에 대한 모의유량의 적합도는 CASE 2 방안이 더 우수한 것으로 확인되었다. SWAT 모형의 CC는 0.90(CASE 1), 0.92(CASE 2), NSE는 0.78, 0.83, RMSE는 163.07 m³/s, 142.24 m³/s로 CASE 2 방안 적용 시 CASE 1 방안보다 더 우수한 결과를 보였다. TANK 모형의 CC는 0.85, 0.90, NSE는 0.67, 0.79, RMSE는 201.13 m³/s, 158.44 m³/s로 CASE 2 방안의 결과가 더 우수한 것으로 확인되었다. 이는 CASE 2 방안이 지표, 중간, 기저유출로 분류하여 각 유출성분을 정확히 모의하도록 매개변수를 추정했기에 총유출량만 고려하는 것보다 모형의 모의 정확도가 향상된 것으로 판단된다.

- CASE 1 방안에 대해 SWAT 모형 통계치는 각각 0.90, 0.83, 0.78, 163.07 m³/s, TANK 모형은 0.85, 0.73, 0.67, 201.13 m³/s로 SWAT 모형이 더 좋은 통계치를 보였다. CASE 2 방안의 경우 SWAT 모형은 0.92, 0.85, 0.83, 142.24 m³/s, TANK 모형은 0.90, 0.80, 0.79, 158.44 m³/s로 CASE 2 방안 역시 SWAT 모형이 더 나은 결과를 보였다. 이는 SWAT 모형 자체가 물리적 특성을 잘 반영하고 있기에 기법을 적용하지 않아도 TANK 모형보다 물리적으로 안정적인 결과를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다. 다만, TANK 모형은 방법론 상 물리적 특성을 구체적으로 고려하지 않고 있음에도 디지털 필터와 같은 방법 적용 시 NSE의 통계치가 18% 상승하는 결과를 보였다. 따라서 TANK 모형과 같은 개념적 모형에 디지털 필터와 같은 수문곡선 분리 기법을 적용하는 것이 더 나은 모의결과를 얻을 수 있다고 판단된다.
- 갈수기 및 홍수기에 대한 유출량을 비교하면 SWAT 모형은 TANK 모형보다 다양한 범위로 저유량 모의가 가능한 것으로 나타났다. 이에 장기유출해석 시 중요한 갈수유량 모의 및 기저유출의 영향을 직접적으로 받는 수질 분석 시에는 SWAT 모형을 활용하는 것이 보다 더 정확한 모의를 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 장기유출모형과 디지털 필터 기법을 연계하여 총유출량 및 유출성분을 모두 고려할 수 있는 매개변수 추정 방안을 제시하였다. 제시한 기법을 토대로 기존 기법과의 비교·분석 및 수문모형에 대한 모의능력을 평가하였다. 본 연구결과는 유출특성이 서로 다른 수문모형을 활용했음에도 유출성분을 고려하여 매개변수를 추정할 경우 총유출량만 고려했을 때보다 모의 정확도가 향상되었다는 측면에서 연구의 가치가 있다고 판단된다. 또한, 유출성분과 관련된 매개변수

를 각각 조정했기에 총유출량뿐 아니라 성분별 모의 정확도 역시 향상되었을 것으로 판단된다. 따라서 특히나 기저유출의 영향을 직접적으로 받는 수질 모의 시 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후, 다양한 물리적 알고리즘을 갖는 다수의 수문모형 및 지형학적 특성이 다른 유역 적용을 통해 수문 및 수질 모의 정확도 향상에 관한 검증이 요구되며, 매개변수 자동추정에 따른 모의 정확도 평가 등의 후속 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주)에서 재원을 부담하여 수행한 연구결과입니다(No. H22S058000).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abu El-Nasr, A., Willems, P., Arnold, J., Feyen, J. (2002). "Comparison of two methods to split the total discharge in its components." *In Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK.
- Arnold, J.G., and Allen, P.M. (1999). "Automated methods for estimation baseflow and ground water recharge from streamflow records." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 411-424.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R.S., and Bernhardt, G. (1995). "Automated base flow separation and recession analysis techniques." *Groundwater*, Vol. 33, No. 6, pp. 1010-1018.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development." *Journal of The American Water Resources Association*, Vol. 31, No. 1 pp. 73-89.
- Bae, D.H., Jung, I.W., Kang, T.H., and Noh, J.W. (2003). "Automatic parameter estimation considering runoff components on Tank model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 3, pp. 423-436.
- Donigian, Jr., A.S. (2000). *HSPF Training workshop handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22*, EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington,

- DC., U.S.
- Eckhardt, K. (2005). "How to construct recursive digital filters for baseflow separation." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 2, pp. 507-515.
- Heo, J.Y. (2021). "Assessment of artificial neural network model for real-time dam inflow prediction." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 12, pp. 1131-1141.
- Hong, J.Y., Lim, K.J., Shin, Y.C., and Jung, Y.H. (2015). "Quantifying contribution of direct runoff and baseflow to rivers in Han River system, South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 4, pp. 3019-319.
- Jeong, T.M. (2021). *Parameter estimation of the SWAT model by the SWAT-CUP and monthly inflow prediction of Andong reservoir using the ensemble streamflow prediction*. Master Thesis, Pukyong University.
- Jung, H.J., and Lee, J.H. (2020). "A review on quantitative estimation of baseflow and hydrograph separation using isotopes as a tracer." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 56, No. 4, pp. 501-514.
- Jung, I.W. (2003). *A study on the applicability of long-term runoff models for Korean river basin*, Master Thesis, Sejong University.
- Kang, T.U., and Lee, N.J. (2022). "Review on characteristics and applicability of digital filter baseflow separation methods." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 22, No. 3, pp. 195-206.
- Kim, K.U., Song, J.H., Ahn, J.H., Park, J.H., Jun, S.M., Song, I.H., 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, N.Y., Lee, B.J., and Lee, J.E. (2007). "Sensitivity analysis of hydrologic components according to change characteristic soil." *In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1548-1552.
- Lee, J.M., Park, Y.S., Jung, Y.H., Cho, J.P., Yang, J.E., Lee, G.J., Kim, K.S., and Lim, K.J. (2014). "Analysis of spatiotemporal changes in groundwater recharge and baseflow using SWAT and BFlow models." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 30, No. 5, pp. 549-558.
- Liu, Z., Kiu, S., Ye, J., Sheng, F., You, K., Xiong, X., and Lai, G. (2019). "Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China." *Forests*, Vol. 10, No. 12, 1065.
- Lott, D.A., and Stewart, M.T. (2016). "Base flow separation: A comparison of analytical and mass balance methods." *Journal of Hydrology*, Vol. 535, p. 525-533.
- Luo, Y., Arnold, J., J, Allen, P., and Chen, X. (2012). "Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China." *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, pp. 1259-1267.
- Lyne, V., and Hollick, M. (1979). "Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling." *Institute Engineers Australia National Conference*, Perth, Australia, Vol. 79, No. 10, pp. 89-92.
- Nathan, R.J., and McMahon, T.A. (1990). "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses." *Water Resources Research*, Vol 26, No. 7, pp. 1465-1473.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R. (2001). *Soil and water assessment tool: Theoretical documentation (version 2000)*. USDA ARS, Temple, TX, U.S.
- Saleh, A., Arnold, J. Gassman, P.W.A., Hauck, L., Rosenthal, W., Williams, J., and McFarland, A. (2000). Application of SWAT for the upper north Bosque River watershed, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 43, pp. 1077-1087.
- Sloan, P.G., and Moore, I.D. (1984). "Modeling surface and sub-surface stormflow on steeply-sloping forested watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 1815-1822.
- Sugawara, M. (1972). "A method for runoff analysis." Kyoritsu Shuppan Press, Tokyo, Japan (in Japanese).
- Xie, J., Liu, X., Wang, K., Yang T., Liang, K., and Liu, C. (2020). "Evaluation of typical methods for baseflow separation in the continuous United States." *Journal of Hydrology*, Vol. 583, 124628.