



Simulation of dam inflow using a square grid and physically based distributed model

Choi, Yun Seok^a · Choi, Si Jung^{b*}

^aResearch Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^bSenior Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 24-019

Received: 27 March 2024; Revised: 12 April 2024; Accepted: 12 April 2024

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the applicability of the GRM (Grid based rainfall-Runoff Model) to the continuous simulation by simulating the dam inflow. The GRM was previously developed for the simulation of rainfall-runoff events but has recently been improved to enable continuous simulation. The target watersheds are Chungju dam, Andong dam, Yongdam dam, and Sumjingang dam basins, and runoff models were constructed with the spatial resolution of 500 m × 500 m. The simulation period is 21 years (2001 to 2021). The simulation results were evaluated over the 17 year period (2005 to 2021), and were divided into three data periods: total duration, wet season (June to September), and dry season (October to May), and compared with the observed daily inflow of each dam. Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), Kling-Gupta efficiency (KGE), correlation coefficient (CC), and total volume error (VE) were used to evaluate the fitness of the simulation results. As a result of evaluating the simulated dam inflow, the observed data could be well reproduced in the total duration and wet season, and the dry season also showed good simulation results considering the uncertainty of low-flow data. As a result of the study, it was found that the continuous simulation technique of the GRM model was properly implemented and the model was sufficiently applicable to the simulation of dam inflow in this study.

Keywords: Continuous simulation, Rainfall-runoff model, GRM, fitness assessment

격자 기반의 물리적 분포형 모형을 이용한 댐 유입량 모의

최윤석^a · 최시중^{b*}

^a한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원, ^b한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원

요 지

본 연구의 목적은 물리적 분포형 유출 모형인 GRM (Grid based rainfall-Runoff Model)을 이용하여 댐 유입량을 모의함으로써 연속형 모의에 대한 GRM 모형의 적용성을 평가하는 것이다. GRM 모형은 기존에 강우-유출 사상의 모의를 위해서 개발되었으나, 최근에 연속형 모의가 가능하도록 개선되었다. 대상 유역은 충주댐 유역, 안동댐 유역, 용담댐 유역, 섬진강댐 유역이며, 500 m × 500 m의 공간 해상도로 유출 모형을 구축하였다. 모의 기간은 21년(2001년~2021년)이다. 모의결과의 평가는 17년 기간(2005년~2021년)에 대해서 수행하였으며, 17년 전체 자료(total duration), 풍수기(6월~9월, wet season), 갈수기(10월~5월, dry season)의 3개 자료 기간으로 구분하고, 각 댐의 관측된 일유입량과 비교하였다. 모의결과의 적합도 평가는 Nash-Sutcliffe efficiency 계수(NSE), Kling-Gupta efficiency 계수(KGE), 상관계수(CC), 총용적 오차(VE)를 사용하였다. 모의된 댐 유입량의 평가결과 total duration과 wet season에서 관측자료를 잘 재현할 수 있었으며, dry season에서도 저유량 자료의 불확실성을 고려할 때 양호한 모의결과를 나타내었다. 연구결과 GRM 모형의 연속형 모의기법은 적절히 구현된 것으로 판단되었으며, 본 연구의 댐 유입량 모의에 충분히 적용성이 있는 것으로 나타났다.

핵심용어: 연속형 모의, 강우-유출 모형, GRM, 적합도 평가

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0664
E-mail: sjchoi@kict.re.kr (Choi, Si Jung)

1. 서론

최근 들어 광주광역시, 전라남도 및 경상남도 섬 지역에서는 가뭄으로 인해 안정적인 용수 공급의 어려움을 겪었다. 이런 가뭄피해로 인해 효율적인 수자원 관리의 필요성이 대두되고 있으며 지역별 중장기 가뭄대책 마련을 위해 노력하고 있다. 하천 관리 및 수자원 공급시설물의 효율적인 운영을 위해서는 가용수량을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 가용수량 중 하천 유출량 및 댐 유입량은 관측자료를 통해 산정할 수 있으나 하천에서의 관측유량은 하도구간에서의 취수, 회귀, 지하수로의 유출입 등이 포함되므로 유역에서의 자연유출량만을 평가하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 국내의 수자원 계획 및 평가에서 활용하고 있는 자연유출량은 주로 강우-유출 모형을 통해 산정한 값을 이용하고 있다. 강우-유출 모형을 적용함에 있어 강우-유출 모형의 매개변수에 대한 검·보정 과정을 거치게 되며, 인위적인 물순환 과정이 배제된 유역의 관측값을 활용하고 있다. 일반적으로 국내에서는 댐 유입량이 교란되지 않았다는 가정하에 이를 자연유출량 모의에 적용하고 있다.

연속형 유출모의를 위해 국내에서는 다양한 강우-유출 모형을 활용하고 있으며, 주로 국외에서 개발된 모형을 국내 댐 유역에 적용한 사례가 많다. 강우-유출 모형의 적용에 있어서는 관측치를 잘 모의하기 위해 매개변수의 추정 방법, 매개변수의 지역화 및 기후변화와 같은 다양한 시나리오에 따른 유출량의 변화분석 등이 많은 연구자에 의해 수행되었다. TANK 모형을 이용한 사례로는 댐 유역에 대해 모형의 매개변수를 최적화 기법을 사용하여 추정하였으며, 추정된 매개변수와 유역특성 인자들의 회귀식을 작성하였고, 용설의 고려 여부에 따른 유출량의 변화를 분석한 바 있다(Lee *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2004; Lee and Kang, 2007). Jung and Bae (2005)는 한강 유역의 4개 댐 유역과 낙동강 유역의 3개 댐 유역에 대해 PRMS 모형을 통해 유출을 모의하였으며, Lee *et al.* (2019)는 PRMS 모형과 기후변화 시나리오를 적용하여 댐 유입량을 산정하였다. Cho and Kim (2019)는 합천댐 유역, Kim and Kim (2018)은 남강댐 유역을 대상으로 HSPF 모형의 적용성을 평가하였다. 또한 기존의 연구에서는 SWAT 모형을 활용하여 댐 유역에 대한 유출을 모의하고, 매개변수를 최적화 기법을 이용하여 댐 유입량에 대한 모의결과를 향상시켰으며, 기후변화 시나리오와 유역 간 물이동 감소에 따른 수문 변화를 평가한 바 있다(Lee and Seo, 2011; Jung *et al.*, 2015; Kim and Kim, 2017; Woo *et al.*, 2020).

Shim *et al.* (2009)는 TANK 모형과 PRMS 모형의 결과를 혼합하는 방법을 제안하였으며 단일 모형으로 모의한 결과보

다 관측 유출량과의 오차를 작게 할 수 있다는 것을 보여주었다. 여러 강우-유출 모형 간의 결과를 비교한 연구도 활발히 진행되었다. Sung *et al.* (2004)는 SIMHYD와 TANK 모형을 소양강댐과 영천댐 유역에 적용하였으며, Jung *et al.* (2008)은 PRMS, SLURP, SWAT 모형을 이용하여 안동댐 유역에 대한 유출모의 능력을 비교하였고, Kim *et al.* (2009)는 충주댐 유역을 대상으로 SWAT-K와 HSPF 모형의 결과를 평가하였다. Kim and Kim (2012)는 한강 유역에 대한 TANK 모형 결과와 SWAT 모형 결과를 비교하였으며, Kim *et al.* (2014)는 4개의 댐 유역을 대상으로 TANK 모형과 SWAT 모형의 모의결과를 제시하였다. 이러한 연구에서 강우-유출 모의는 적용된 모형별로 상이한 결과를 나타내었으며, 국내에서는 각 모형에서 모의할 수 있는 수리, 수문 및 수질 성분의 범위와 사용자의 편의성에 따라 강우-유출 모형을 선택하여 활용하고 있다.

GRM 모형은 한국건설기술연구원에서 개발된 정형 사각격자 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형으로서 기존에는 홍수유출 사상의 모의를 위해 개발되었다(Choi *et al.*, 2008). 기존의 GRM 모형은 홍수유출 모의뿐만 아니라, 홍수예보시스템 구축, 홍수위험도 예측, 양상불 강수량 자료의 활용, 수위-유량 관계식 작성 등 홍수해석과 관련된 다양한 연구에 적용된 바 있다(Choi *et al.*, 2015; Kim and Yoon, 2019; Lee *et al.*, 2021; Choi *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2022). 최근 GRM 모형은 차단, 증발산, 용설을 모의하기 위한 기법이 추가되어 기존의 강우-유출 사상뿐만 아니라, 연속형 모의가 가능하도록 개선되었으며(Choi and Kim, 2024), 본 연구에서는 개선된 GRM 모형을 이용하여 댐 유입량을 모의하였다. 이를 통해 본 연구의 목적은 (1) GRM 모형의 연속형 모의기법의 타당성을 검토하고, (2) 댐유입량 모의를 통해 모형의 적용성을 total duration, wet season, dry season으로 구분하여 평가하는 것이다.

2. 모형 이론

GRM 모형은 정형 사각격자를 기본 모의 도메인으로 하는 격자 기반의 물리적 분포형 모형이다. GRM 모형은 차단, 증발산, 용설, 지표면 유출, 하천 유출, 침투, 지표하 유출, 기저유출을 모의할 수 있다. 지표면, 하천, 지표하 흐름은 운동파 모형을 이용하고, 침투는 Green-Ampt 모형을 이용하며, 기저유출은 Darcy의 법칙을 이용하여 계산한다. 모형의 구조와 지표 흐름, 침투, 토양층 흐름 계산에 대한 이론은 Choi and Kim (2024)를 참고할 수 있으며, 본 논문에서는 차단, 증발산, 용설

을 모의하기 위한 방정식을 기술하였다(Eqs. (1)~(12)).

2.1 차단

GRM 모형에서 차단은 LAI (Leaf Area Index)를 이용하여 Eqs. (1) and (2)로 계산한다(Neitsch *et al.*, 2005).

$$c_{mx_day} = c_{mx} \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (1)$$

$$p_g = p \times (1 - R_{cnpj}) + p_{cg} R_{cnpj} \quad (2)$$

여기서, c_{mx_day} 는 일최대 차단 가능량(mm/day), c_{mx} 는 식생 별 최대 차단 가능량(mm), p_g 는 지표면에 도달하는 강수량, p 는 차단을 고려하지 않은 강수량, p_{cg} 는 최대 차단 가능량을 초과하여 지표면에 도달하는 강수량, R_{cnpj} 는 하나의 검사체 적에서 식생피복 비율을 나타낸다.

2.2 증발산

GRM 모형에서는 잠재증발산의 계산을 위해서 Blaney-Criddle (Blaney and Criddle, 1950), Hamon (Hamon, 1961), Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Priestly-Taylor (Priestly and Taylor, 1972; Ponce, 1989) 방법을 이용할 수 있다. Eq. (3)은 Blaney-Criddle 방법을 이용한 잠재증발산 계산식을 나타낸 것이다.

$$e_{tp} = k R_{sr} (0.457 T_a + 8.128) \quad (3)$$

여기서, e_{tp} 는 잠재증발산량(mm/day), T_a 는 일평균기온($^{\circ}\text{C}$), R_{sr} 는 연간 총 일조시간에 대한 일 일조시간 비율(%), k 는 월 별 작물계수(0.45~1.2)로 생육기간(4월~9월)은 0.85, 비생육 기간은 0.45를 기본값으로 사용한다. Hamon 방법을 이용한 잠재증발산 계산식은 Eqs. (4)~(6)과 같다.

$$e_{tp} = 0.55 \times 25.4 \times \left(\frac{n}{12}\right)^2 \left(\frac{D_{sv}}{12}\right) \quad (4)$$

$$D_{sv} = \frac{216.7 \times e_s}{(T_a + 273.3)} \quad (5)$$

$$e_s = 6.108 e^{17.26939 T_a / (T_a + 273.3)} \quad (6)$$

여기서, n 은 일조시간(hours), D_{sv} 는 T_a 온도에서 포화수증기

밀도(g/m^3), e_s 는 T_a 온도에서 포화수증기압(mb)을 나타낸다. Hargreaves 방법을 이용한 잠재증발산의 계산은 Eq. (7)을 이 용한다.

$$e_{tp} = k_{RS} R_a (T_{\max} - T_{\min})^{e_h} \times \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + c_t \right) \quad (7)$$

여기서, R_a 는 일태양복사량(mm/day), T_{\max} 는 일최고 기온 ($^{\circ}\text{C}$), T_{\min} 은 일최저 기온($^{\circ}\text{C}$), k_{RS} 는 복사보정계수(0.0023), e_h 는 Hargreaves 지수(0.5), c_t 는 온도 계수(17.8)를 나타낸다. Eqs. (8) and (9)는 Priestly-Taylor 방법을 이용한 잠재증발산 계산식을 나타낸 것이다.

$$e_{tp} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r \quad (8)$$

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \rho_w} \quad (9)$$

여기서, e_{tp} 는 잠재증발산량(cm/day), γ 는 건습계 상수(kPa / $^{\circ}\text{C}$), α 는 계수(일반적으로 1.28), Δ 는 특정 기온에서의 포화 증기압 곡선의 기울기, E_r 은 증발률(cm/day), R_n 은 순방사량 (net radiation flux)(cal/cm²/day), l_v 는 증발잠열(cal/gr), ρ_w 는 물의 밀도(g/cm^3)를 나타낸다. 실제증발산은 잠재증발산 에 증발산 계수를 곱해서 Eq. (10)과 같이 계산한다.

$$e_{ta} = k_c e_{tp} \quad (10)$$

여기서, e_{ta} 는 실제 증발산량(mm/day), k_c 는 증발산 계수(혹 은 작물계수)를 나타낸다.

2.3 용설

용설은 Anderson (1976)과 Neitsch *et al.* (2005)의 연구를 기초로 해서 Eqs. (11) and (12)를 이용하여 모의한다.

$$S_p^{t+1} = S_p^t + p_{day} - S_{mt} \quad (11)$$

$$S_{mt} = b_{mt} \cdot S_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mt} \right] \quad (12)$$

여기서, S_p 는 snow pack의 수분함량(snow pack의 높이를 수 심으로 환산하였을 때의 높이)(mm), t 는 현재의 일, p_{day} 는 대

상 일에서의 강수량($T_{av} \leq T_{sr}$ 일 경우에 유효함)(mm), T_{av} 는 일 평균 기온($^{\circ}\text{C}$), T_{sr} 는 강수를 눈과 비로 구분하는 기준 온도($^{\circ}\text{C}$), S_{milt} 는 일별 용설량(mm), b_{milt} 는 용설계수(mm/ $^{\circ}\text{C}$), S_{cov} 는 눈으로 덮인 부분의 면적비, T_{snow} 는 대상 일(day)에서의 snow pack 온도($^{\circ}\text{C}$), T_{mx} 는 대상 일에서의 최고 기온($^{\circ}\text{C}$), T_{milt} 는 용설이 시작되는 온도($^{\circ}\text{C}$)를 나타낸다.

3. 대상 지역 및 적용자료

3.1 연구 대상 지역 및 지형자료

GRM 모형을 이용하여 댐의 일 유입량을 모의하기 위해서 4대 권역별 1개씩의 댐 유역을 선정하였다. 한강 권역은 충주 댐 유역, 낙동강 권역은 안동댐 유역, 금강 권역은 용담댐 유역, 영산강-섬진강 권역은 섬진강댐 유역을 대상으로 하였다. 각 유역의 모의 도메인 특성은 Table 1과 같고, 유역의 위치 및

수자원단위지도 표준유역으로 구분된 도메인은 Fig. 1과 같다. GRM 모형은 정형 사각격자를 최소 모의 단위로 하며, 본 연구에서는 500 m × 500 m 해상도로 모형을 구축하였다. 국토지리정보원의 30 m × 30 m 해상도의 원시 DEM (Digital Elevation Model)을 4개 댐 유역을 포함하도록 각 유역의 영역으로 clipping하고, 500 m × 500 m 해상도로 resampling한 후 수문지형학적 입력자료 래스터 파일을 구축하였다. GRM 모형에서 사용되는 수문지형학적 입력자료는 모의 도메인(유역), 흐름방향, 흐름누적수, 경사, 하천망 래스터 파일이다. 여기서 모의 도메인은 각 유역에 포함된 표준유역을 기준으로 소유역이 구분되도록 구축하였으며, GRM 모형은 이와 같이 구분된 하부 도메인(sub-domain)에 대해서 각각 다른 유역 평균 수문기상 자료와 유역 매개변수를 설정할 수 있다.

GRM 모형에 입력하기 위한 토지피복도, 토성도(soil texture map), 토양심도(soil depth map)를 각 유역의 DEM 영역에 맞게 500 m × 500 m 해상도로 구축하였다. 토지피복도는 환경부의 대분류 토지피복도를 이용하였으며, 토성도와 토양심

Table 1. The characteristics of study areas

Watershed	Simulated Area (km ²)	Num. of grids	Num. of standard watersheds	Grid resolution
Chungju Dam [Ⓐ]	6,667	26,669	49	500 m × 500 m
Andong Dam	1,591	6,362	11	
Yongdam Dam	932	3,728	8	
Sumjingang Dam	765	3,061	9	

Ⓐ Gwangdong Dam is included in the upper stream of Chungju Dam. Observed outflow from Gwangdong Dam is applied to the simulation of the Chungju Dam watershed.

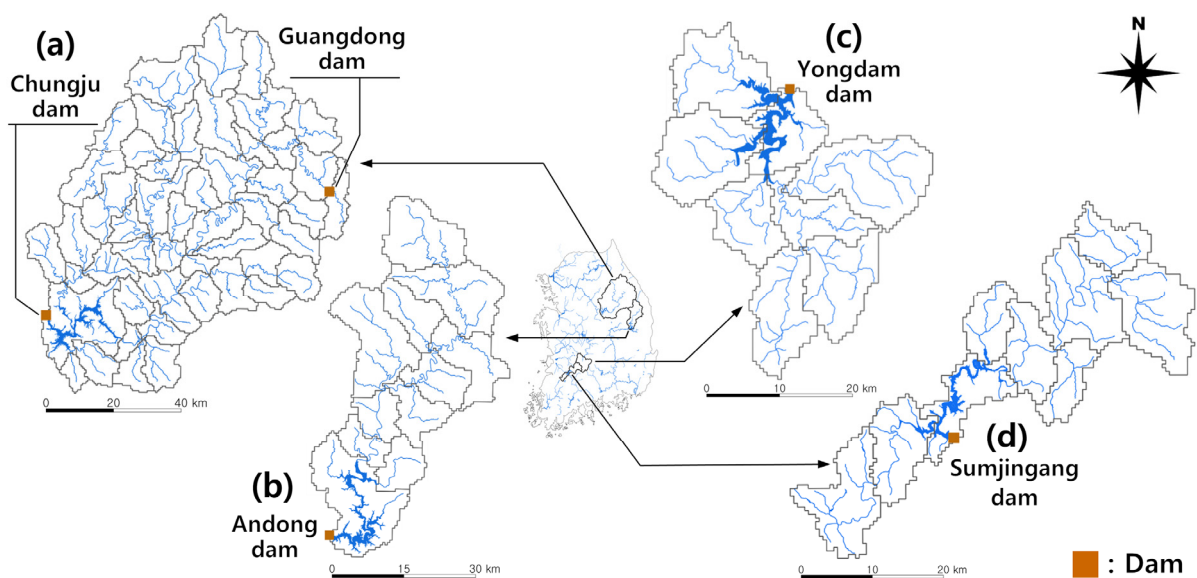


Fig. 1. Locations, streams, and sub-domains by standard watersheds of study areas

도는 국립농업과학원의 정밀토양도에서 ‘토성’과 ‘토양심도’ 속성(NAS, 1992)을 이용하여 구축하였다.

3.2 수문 및 기상 자료

본 연구에서 댐 유입량 모의 기간은 2001년~2021년의 21년을 대상으로 하였다. 모의결과의 평가 기간은 모의 초기 4년을 모형 안정화 기간으로 제외하고, 2005년~2021년의 17년에 대해서 관측된 댐 유입량과 비교하였다. GRM 모형은 사각격자 기반의 분포형 모형이므로, 격자형 수문기상자료를 이용할 경우에는 공간적으로 평균된 값을 적용하는 경우에 비해서 자료의 공간분포를 더 잘 고려할 수 있다. 그러나 현재 사용할 수 있는 격자형 수문기상 자료인 환경부 강우레이더, 기상레이더, 위성강수 자료 등은 자료의 기간과 품질 면에서 제한적이다. 그러므로 본 연구에서는 장기간에 대해 신뢰성 있는 자료를 제공하고 있는 환경부 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, <http://www.wamis.go.kr/>)과 기상청의 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)의 자료를 이용하여 유출을 모의하였다.

GRM 모형을 이용한 연속형 모의에서 필요한 수문기상 자료는 강수량, 일최고 기온, 일최저 기온, 일사량, 일조시간, snow pack 온도(T_{snow})이다. 이 중 강수량은 WAMIS에서 제공하는 표준유역별 평균 강수량을 적용하였으며, 일최고 기온, 일최저 기온, 일사량, 일조시간은 기상자료개방포털에서 제공되는 1일 간격의 종관기상관측소(Automated Surface Observing Systems, ASOS)의 기상자료를 티센 가중법을 이용하여 표준유역별 평균값으로 계산하여 적용하였다. 본 연구에서 사용된 ASOS 관측소는 충주댐 유역은 대관령, 영월, 제천, 안동댐 유역은 안동, 태백, 봉화, 용담댐 유역은 전주, 금산, 장수, 거창, 섬진강댐 유역은 전주, 임실, 정읍, 장수 지점이다. T_{snow} 는 기상청에서 제공되지 않는 자료로서, 본 연구에서는 모형 보정시 추정된 값을 이용하였다.

댐 유역에 대해서는 물 사용을 유출모의에 반영할 경우 좀

더 정밀한 분석이 가능하다. 하지만 국내 댐 유역 물 사용의 대부분을 차지하는 농업용수의 경우 실사용량을 측정하지 못하며, 각 수요처에서의 회귀율, 회귀지점 등을 파악하기 어렵다. 또한 농업용수에 대한 수원이 농업용저수지, 하천, 관정, 보 등 다양하기 때문에 이를 반영하기에는 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 국내 연구 사례에서와 같이 댐 유입량이 댐 상류의 자연유출량이라는 가정하에 유출을 모의하였다. 충주댐 유역의 경우 상류에 광동댐을 포함하고 있다. 그러므로 충주댐의 댐 유입량 모의시에는 강우 및 기상자료와 함께 광동댐의 일 관측 방류량 자료를 적용하였다. 광동댐 일 방류량 자료와 각 유역의 모의결과 평가를 위한 충주댐, 안동댐, 용담댐, 섬진강댐의 일 유입량 자료는 한국수자원공사의 물정보개방포털(<https://www.water.or.kr/>)에서 제공되는 자료를 활용하였다. 여기서 댐의 관측 유입량 자료는 실측된 값이 아니며, 실측된 댐 수위와 댐 방류량 자료를 이용하여 추정된 값을 의미한다.

4. 댐 유입량 모의 및 평가

4.1 모형 보정

본 연구에서는 댐 유입량 모의를 위해 시행착오법으로 GRM 모형을 보정하였다. GRM 모형(GRM v.2024)에서는 총 20개의 유역 매개변수를 설정할 수 있으며, 본 연구에서 모형 보정을 위해 추정된 매개변수는 Table 2의 8개이다. Table 2에서 명시되지 않은 12개의 매개변수는 모두 모형에서 제시된 기본값을 이용하였다(Choi and Kim, 2024). Table 2에서 지표면 흐름 최소경사(MSOF)와 하천 흐름 최소 경사(MSCB)는 지표면 흐름과 하천 흐름 계산에 사용되는 경사의 최소 한계값을 나타낸 것이다. 이 매개변수는 DEM에서 두 격자 간의 고도차가 작거나 같은 경우에 산정되는 매우 작은 경사 값(Kim *et al.*, 2010)으로 인한 유출모의의 계산 오류를 방지하기 위해 사

Table 2. Calibrated model parameters

Watershed	MSOF	MSCB	CHK	CSD	PET	CET	TSMLT	SCOV
Chungju Dam	0.001	0.008	0.7	1.1	Blaney-Criddle	0.6	4	0.7
Andong Dam	0.002	0.010	0.8	0.5	Priestley-Taylor	0.7	4	0.7
Yongdam Dam	0.003	0.012	0.9	1.2	Blaney-Criddle	0.5	4	0.7
Sumjingang Dam	0.003	0.012	1.0	0.9	Blaney-Criddle	0.5	3	0.6

* Abbreviations of the model parameters

MSOF : Minimum slope limit of land surface
 MSCB : Minimum slope limit of stream bed
 CHK : Cal. coeff. of soil hydraulic conductivity
 CSD : Cal. coeff. of soil depth

PET : Potential evapotranspiration method
 CET : Coeff. for calculating actual evapotranspiration (k_c)
 TSMLT : Temperature above which snow melt begins ($^{\circ}\text{C}$)(T_{melt})
 SCOV : Snow pack coverage ratio by each cell

용되는 것으로서, 각 매개변수에 설정된 값보다 작은 경사를 가지는 격자에 대해서만 영향을 미친다. 모형 보정 결과 MSOF와 MSCB는 다른 유역에 비해서 시가지와 농경지를 다수 포함하고 있고, 유역이 가장 큰 충주댐 유역에서 가장 작은 값으로 추정되었다.

수리전도도 보정계수(CHK)와 토양심 보정계수(CSD)는 기존의 홍수유출 모의에 대한 GRM 모형의 매개변수 민감도 평가에 대한 연구(Shin and Choi, 2018)에서 비교적 민감도가 큰 것으로 제시된 것으로서, 본 연구에서도 매개변수 추정 대상으로 하였다. GRM 모형에서 제시하는 CHK와 CSD의 기본값은 1이며, 1이 적용될 경우에는 토성도와 토양심도에 의해서 설정되는 Green-Ampt 방정식의 매개변수와 지표하 유출 토양심이 그대로 유출모의에 적용된다. CHK와 CSD는 모형에서 제시하는 기본값인 1의 부근에서 추정되었으나, 안동댐 유역의 경우 CSD가 0.5를 나타내어 정밀토양도의 '토양심도' 속성으로부터 생성된 토양심 값의 1/2을 사용할 경우에 최적의 모의결과를 도출할 수 있었다.

잠재증발산량 산정 방법(PET)과 증발산 계수(CET)는 증발산 계산에 사용되는 매개변수이다. PET는 안동댐 유역은 Priestley-Taylor 방법, 충주댐, 용담댐, 섬진강댐 유역은 Blaney-Cridle 방법이 적절한 것으로 나타났다. 실제 증발산의 계산을 위한 계수인 CET는 0.5~0.7의 범위를 나타내어 적절히 추정된 것으로 판단된다(Yoon, 2007).

용설이 시작되는 온도(TSMLT)와 격자별 snow pack의 면적비(SCOV)는 용설을 모의할 때 사용되는 매개변수이다. 용설은 강우가 유출에 지배적이지 않은 기간에서 유출에 중요한 영향을 미치는 요소이다(Ellenburg *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2022). 본 연구에서는 TSMLT는 1°C~5°C의 범위에 대해서 검토하였고, 충주댐, 안동댐, 용담댐 유역에서 4°C, 섬진강댐 유역은 3°C로 추정되었다. SCOV는 0.5~1.0의 범위에서 검토하였으며, 충주댐, 안동댐, 용담댐 유역은 0.7, 섬진강댐 유역은 0.6으로 추정되었다. 기상청에서 제공되지 않는 시계열 자료인 T_{snow} 는 -2°C~-10°C의 범위에서 검토하였으며, 최적의 모의결과를 나타내는 값으로 충주댐, 안동댐, 용담댐 유역은 -6°C, 섬진강댐 유역은 -5°C를 일률적으로 적용하였다. 본 연구에서 검토된 TSMLT, SCOV, T_{snow} 값의 범위에 따른 모의결과와 변화에 대해서는 본 논문의 고찰 부분에서 기술하였다.

GRM 모형에서 차단의 모의를 위해서는 토지피복 속성별로 부여되는 월별 LAI 값, Canopy 면적비, 최대차단가능량이 필요하다. GRM에서는 국내의 지역을 대상으로 토지피복별 LAI를 평가한 기존의 연구(Kim, 2005; KICT, 2004, 2005)를 참고하여 월별 LAI 값을 제시하고 있으며, Canopy 면적비와

최대차단가능량은 모형 보정 과정에서 사용자 추정에 의해서 결정되는 매개변수이다. 본 연구에서는 이 3가지 인자 모두를 GRM에서 제시하는 기본값을 이용하였으며, 상세한 사항은 GRM 모형의 사용자설명서(Choi and Kim, 2024)를 참고할 수 있다.

4.2 모의결과 및 적합도 평가

GRM 모형을 이용해서 모의된 댐 유입량을 각 댐의 관측 일 유입량과 비교하여 평가하였다. 모의결과의 평가는 전체 기간의 자료(total duration), 각 년도의 풍수기에 해당하는 6월~9월 기간의 자료(wet season), 풍수기를 제외한 10월~5월 기간의 자료(dry season)로 구분하여 수행하였다. Figs. 2 and 3은 각각 2001년~2021년 기간에서 wet season과 dry season에 대한 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 2의 wet season에서는 충주댐을 제외한 3개의 댐에서 1 m³/s 미만의 관측 유입량이 다수 기록되었으나, 4개 유역 전체에서 1 m³/s 이상의 값에 대해서는 모의결과가 관측값을 양호하게 재현할 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 3의 dry season에 대한 그래프에서는 모든 유역의 댐에서 관측 유입량이 0 m³/s인 경우가 다수 기록되었지만, 전체적으로 계산된 값이 관측값을 적절히 재현하고 있는 것으로 나타났다.

2005년~2021년 기간에서의 적합도 평가지표에 의한 분석 결과는 Table 3과 같다. 적합도 평가지표는 Nash-Sutcliffe efficiency 계수(NSE), Kling-Gupta efficiency 계수(KGE), 상관계수(CC), 총용적 오차(VE)를 사용하였으며, 각 자료의 평균과 표준편차를 추가적으로 비교하였다. 적합도 평가지표의 계산 식은 Eqs. (13)~(16)과 같다. 여기서 NSE는 관측값의 평균을 기준으로 모형의 효율성을 평가하는 의미를 내포하고 있으며, 모의결과의 적합도 평가에 유용하게 사용되고 있다. 그러나 NSE는 전체 자료에서 작은 값의 영향을 상대적으로 작게 반영하고, 자료의 변동성을 과소평가하는 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 관측값과 계산값 사이의 상관계수, 표준편차의 비율, 평균의 비율을 함께 고려함으로써 NSE에 비해 자료의 변동성을 더 잘 반영할 수 있는 KGE (Gupta *et al.*, 2009)를 평가지표에 포함하였다.

$$NSE = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^N (X_{obs}^i - X_{sim}^i)^2 \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^N (X_{obs}^i - \overline{X_{obs}})^2 \right\} \quad (13)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (14)$$

$$CC = \left[\sum_{i=1}^N (X_{obs}^i - \overline{X_{sim}})(X_{sim}^i - \overline{X_{obs}}) / N \right] / (\sigma_{sim}\sigma_{obs}) \quad (15)$$

$$VE = |V_{obs} - V_{sim}| / V_{obs} \times 100 \quad (16)$$

여기서, N 은 전체 자료의 수, X_{obs}^i 와 X_{sim}^i 는 각각 관측값과 모의값, $\overline{X_{obs}}$ 와 $\overline{X_{sim}}$ 는 각각 관측값과 모의값의 평균, σ_{obs} 와 σ_{sim} 는 각각 관측값과 모의값의 표준편차, V_{obs} 와 V_{sim} 는 각각 관측된 총용적과 모의된 총용적, α 와 β 는 각각 모의값과 관측값 표준편차의 비($\sigma_{sim}/\sigma_{obs}$)와 평균의 비($\overline{X_{sim}}/\overline{X_{obs}}$)를

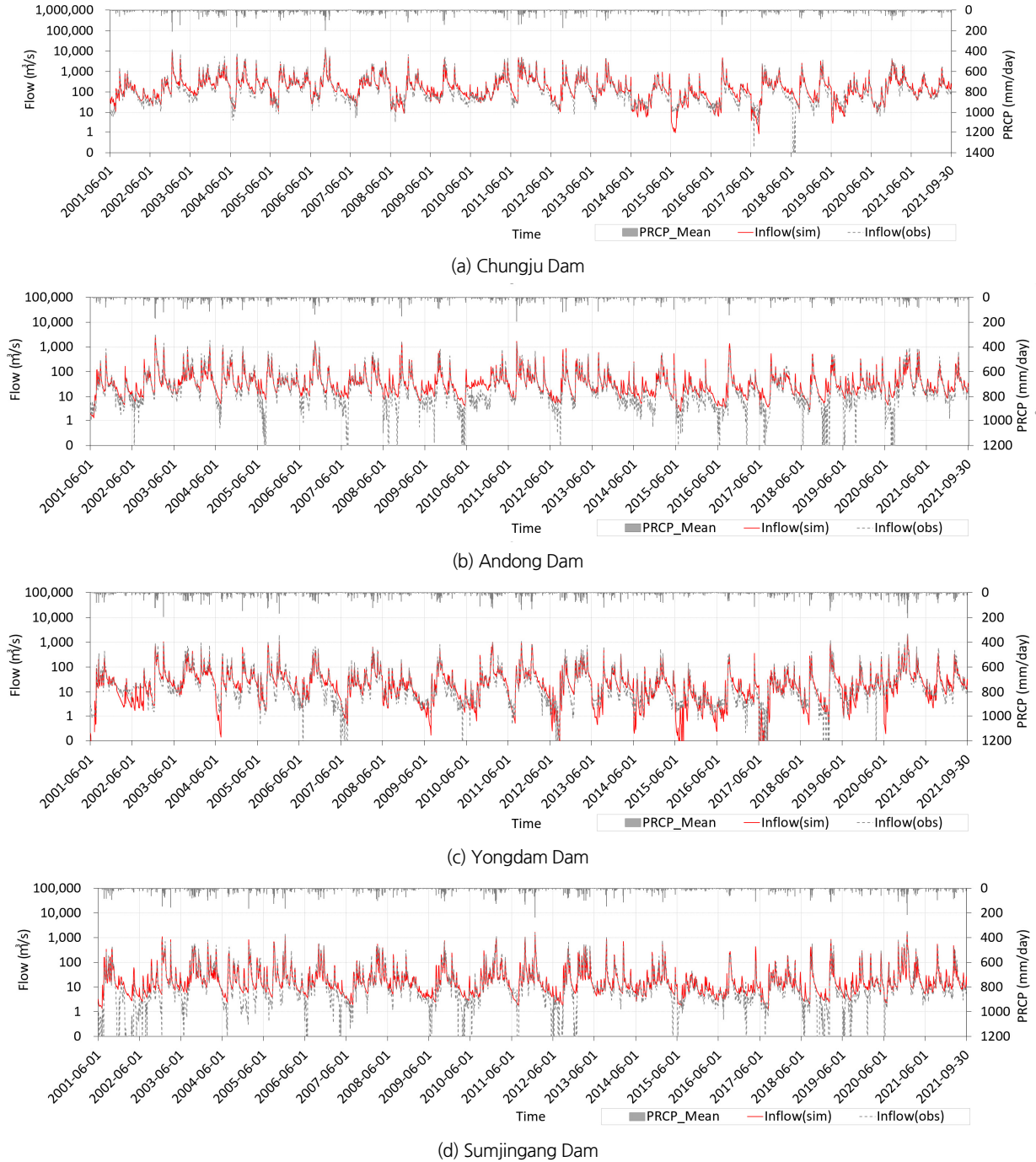


Fig. 2. Simulated and observed inflow of wet season (From Jun to September)

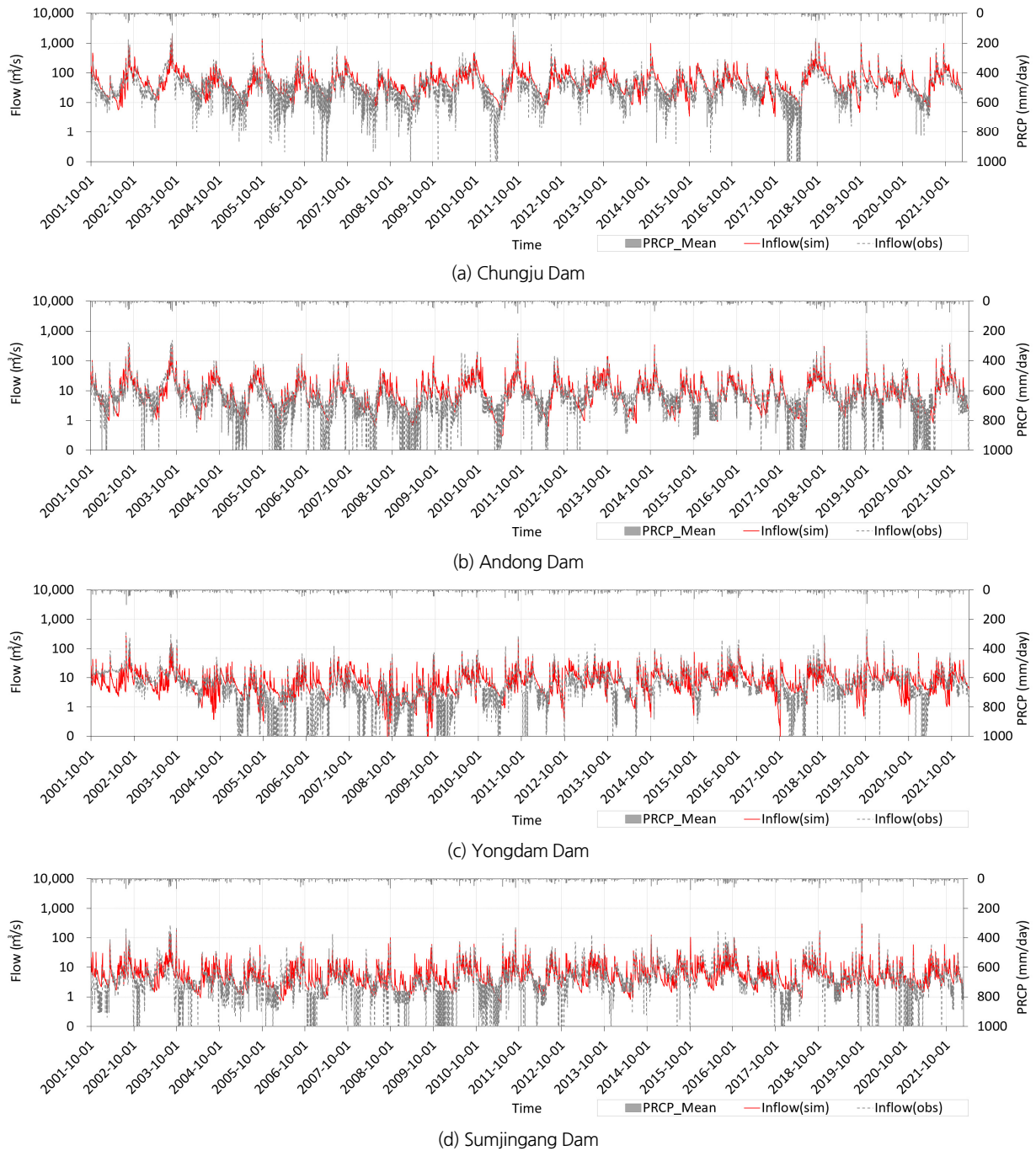


Fig. 3. Simulated and observed inflow of dry season (From October to May)

나타낸다.

Table 3에서 4개 댐 유역의 total duration에 대한 적합도 평가 결과는 NSE 0.84~0.89, KGE 0.82~0.92, CC 0.92~0.94, VE 0.38%~3.23%를 나타내었고, wet season에 대해서는 NSE 0.84~0.88, KGE 0.81~0.92, CC 0.92~0.94, VE 0.30%~6.07%, dry season에 대해서는 NSE 0.58~0.72, KGE 0.67~0.74, CC

0.76~0.86, VE 1.10%~3.98%를 나타내었다. 적합도 평가결과 4개 댐 유역에서 total duration, wet season, dry season 모두에서 관측자료를 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 섬진강 댐 유역의 dry season의 경우, NSE가 0.58로 가장 낮은 값을 가지나, NSE를 제외한 다른 적합도 평가지표에서는 양호한 결과를 보이고 있으며, Fig. 3(d)에서와 같이 관측 유입량이

Table 3. Evaluation of Simulation results compared with observed data

Watershed	Data period	NSE	KGE	CC	VE (%)	Average (m ³ /s)		Standard dev. (m ³ /s)	
						Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
Chungju Dam	Total duration [Ⓐ]	0.89	0.88	0.94	1.67	145.9	143.5	438.3	392.6
	Wet season [Ⓑ]	0.88	0.87	0.94	3.52	317.0	305.8	714.2	639.0
	Dry season [Ⓒ]	0.69	0.74	0.83	3.26	60.1	62.0	102.3	81.8
Andong Dam	Total duration	0.84	0.90	0.92	1.86	27.2	27.7	82.0	77.2
	Wet season	0.84	0.90	0.92	2.20	56.4	57.7	130.7	124.6
	Dry season	0.72	0.71	0.86	1.10	12.6	12.7	29.9	22.3
Yongdam Dam	Total duration	0.87	0.82	0.94	3.23	21.8	21.1	76.8	63.9
	Wet season	0.87	0.81	0.94	6.07	46.8	43.9	127.2	105.7
	Dry season	0.64	0.67	0.80	3.98	9.3	9.6	16.4	12.2
Sumjingang Dam	Total duration	0.87	0.92	0.93	0.38	18.1	18.1	67.4	64.2
	Wet season	0.87	0.92	0.93	0.30	39.5	39.6	112.1	106.7
	Dry season	0.58	0.73	0.77	2.16	7.4	7.3	13.1	11.4

Ⓐ Total duration : 2005~2021 years

Ⓑ Wet season: From Jun to September in 2005~2021 years

Ⓒ Dry season: From October to May in 2005~2021 years

0 m³/s인 경우가 다수 기록된 것을 고려하면 섬진강댐 유역의 dry season의 모의결과도 양호한 것으로 판단된다.

4.3 고찰

본 연구의 모의결과 및 평가에서는 몇 가지 고려해야 할 점이 있다. 우선 관측자료 부분에서 입력 기상자료로 사용되는 T_{snow} 와 적합도 평가의 기준이 되는 댐의 관측 유입량이다. T_{snow} 는 시계열 특성을 가지고 있으나, 현재 우리나라에서 제공되지 않기 때문에 본 연구에서는 -2°C~10°C의 범위에서 검토하여 유역별로 최적의 모의결과를 나타내는 온도를 일률적으로 적용하였다. T_{snow} 는 용설에 영향을 미치며, 용설은 연속형 모의에서 dry season에서와 같이 강우가 유출에 지배적이지 않은 기간에서 중요한 인자로 사용된다. 그러므로 연속형 모의결과와 불확실성을 감소시키기 위해서는 시계열 특성을 가지는 T_{snow} 의 불확실성을 줄일 필요가 있다. 또한 관측된 댐 유입량은 모의결과 적합도 평가의 기준이 되므로, 가장 중요한 자료라고 할 수 있다. 그러나 Figs. 2 and 3에서와 같이 dry season뿐만 아니라 wet season에서도 댐 유입량이 0 m³/s로 기록된 경우가 다수 있다. 그러므로 연속형 모의결과와 평가를 적절히 수행하기 위해서는 댐 유입량 관측자료의 불확실성을 줄일 필요가 있다.

본 연구에서는 DEM을 이용하여 입력자료를 생성할 경우에 발생할 수 있는 아주 작은 경사값을 수정하기 위한 매개변수

와 GRM 모형을 이용한 홍수 유출모의에서 민감성이 상대적으로 큰 것으로 알려진 매개변수, 증발산과 용설의 모의에 사용되는 매개변수를 포함하여 총 8개를 대상으로 시행착오법으로 모형을 보정하였다. 이 8개의 매개변수 중 용설의 모의에 영향을 미치는 매개변수인 TSMLT, SCOV와 시계열 자료인 T_{snow} 는 지역별로 관측된 자료가 없을 경우에는 모형의 보정 과정에서 추정되어야 하며, 지역별 특성치임을 고려할 때 비교적 불확실성이 큰 매개변수라고 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 T_{snow} , TSMLT, SCOV의 값의 변화가 모의결과에 미치는 영향을 평가하였으며, T_{snow} 는 -10°C~2°C, TSMLT는 1°C~5°C, SCOV는 0.5~1.0의 범위에서 검토하였다. T_{snow} , TSMLT, SCOV 값의 변화에 따른 적합도 평가지표의 변화는 Fig. 4와 같다. T_{snow} , TSMLT, SCOV의 변화는 total duration과 wet season보다는 겨울철이 포함된 dry season에서 모의결과에 미치는 영향이 컸으며, 평가지표 중에서는 VE가 가장 민감한 것으로 나타났다. 또한 보정된 모형에서 충주댐, 안동댐, 용담댐 유역은 T_{snow} , TSMLT, SCOV가 유사한 값으로 추정되었으며, 가장 남쪽에 위치한 섬진강댐 유역은 다른 유역에 비해서 T_{snow} 는 높게, TSMLT와 SCOV는 작게 추정되었다.

본 연구에서는 각 매개변수의 합리적인 범위를 검토하기 위해 우선적으로 시행착오법을 통하여 모형을 보정하였으며, GRM 모형의 매개변수 8개를 주요한 추정 대상으로 적용하였다. 그러나 연속형 모의에서는 지표면 흐름뿐만 아니라, 차단, 증발산, 용설, 토양층에서의 흐름 등과 같은 많은 수문성

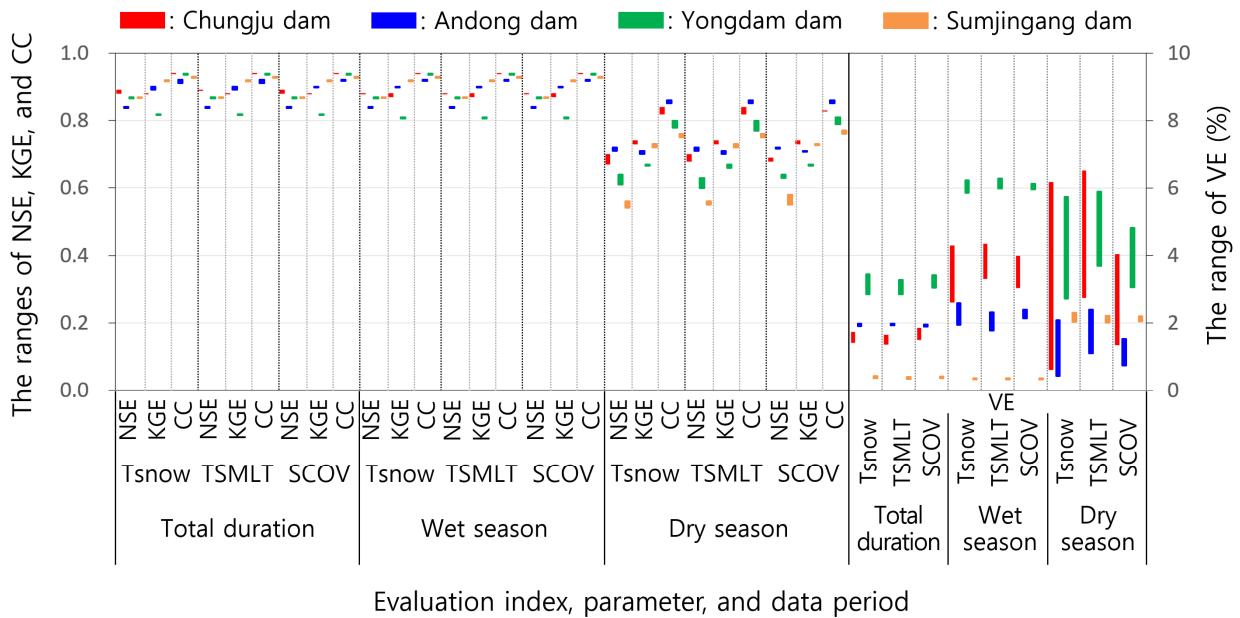


Fig. 4. The changes of evaluation indices by the variations of snow melt parameters

분이 풍수기와 갈수기 각각에서 중요한 영향을 미치기 때문에, 시행착오법을 이용한 모형의 보정은 최적화 기법에 비하여 국지적인 최적화에 도달할 가능성이 크다. 또한 모형에서 사용되는 매개변수 전체가 개별적으로 유출모의에 미치는 영향과 매개변수 상호간에 미치는 영향을 평가하기에도 한계가 있다. 그러므로 GRM 모형을 이용한 연속형 모의에서 좀 더 양호한 결과를 도출하기 위해서는 시행착오법을 통하여 얻어진 각 매개변수의 적절한 범위에 대한 경험을 토대로 최적화 기법을 이용하여 전체 매개변수를 고려한 모형의 거동을 평가할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 연속형 모의에 대한 격자 기반의 물리적 분포형 유출 모형인 GRM 모형의 적용성을 평가하고자 국내 4개의 다목적댐의 유입량을 모의하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 연속형 모의가 가능하도록 개선된 GRM 모형을 이용하여 4개 다목적댐 유역의 유출모의를 수행함으로써 GRM 모형의 적용성을 평가하였다. 연구결과 모의된 유량은 관측값을 잘 재현할 수 있었으며, 보정된 모형의 매개변수 또한 타당한 값을 나타내었다. 그러므로 하천의 자연유출량 산정을 위한 연속형 모의에서 GRM 모형은 충

분히 적용성이 있는 것으로 나타났다.

- 2) 관측된 댐 유입량과 모의결과의 비교평가는 total duration 뿐만 아니라, wet season과 dry season으로 구분하여 수행하였다. 모의결과의 적합도 평가결과 4개 유역에서 total duration의 경우 NSE 0.84, KGE 0.82, CC 0.92 이상, VE 3.23% 이하를 나타내었고, wet season은 NSE 0.84, KGE 0.81, CC 0.92 이상, VE 6.07% 이하, dry season은 NSE 0.58, KGE 0.67, CC 0.76 이상, VE 3.98% 이하를 나타내어 모의결과가 양호한 것으로 평가되었다. 특히 dry season의 경우 0 m³/s로 기록된 댐의 관측 유입량이 다수 있었으나, 수문곡선 그래프에서 관측값을 잘 재현하고 있으며, NSE를 제외한 다른 평가지표(KGE, CC, VE, 평균, 표준편차) 또한 양호한 값을 나타내어 dry season에서도 유출이 적절히 모의된 것으로 판단되었다.
- 3) 본 연구에서는 GRM 모형의 8개 매개변수의 합리적인 범위를 검토하기 위해 시행착오법을 이용하여 모형을 보정하였다. 그러므로 본 연구에서 제시된 모의결과를 향상시키기 위해서는 향후 다양한 유역에 모형을 적용하여 각 매개변수의 적절한 범위를 추가로 검토할 필요가 있으며, 이를 기반으로 최적화 기법을 이용한 전체 매개변수에 대한 평가와 모형의 보정이 유용할 것이다.
- 4) 본 연구에서는 우리나라에서 비교적 유량의 교란이 적은 4개의 댐 유역을 대상으로 연속형 유출모의를 수행하였다. 그러나 우리나라 대부분의 하천은 유량 교란으로 인하여 자연유출량에 기반한 모형의 보정이 어려운 실정이다.

그러므로 본 연구결과의 활용성을 높이기 위해서는 다양한 물수급을 반영할 수 있는 물수지 분석과 함께 연속형 유출모의를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원사업(주요사업)(과제번호 20240128-001, 기후위기 대응 물문제 해결형 이슈 발굴 및 미래선도 기술 개발)과 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 2022003610004).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anderson, E.A. (1976). *A point energy and mass balance model of snow cover*. NOAA Technical Report NWS 19, U.S. Dept. of Commerce, National Weather Service, MD, U.S., pp. 42-137.
- Blaney, H.F., and Criddle, W.D. (1950). "Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data." *US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Paper*, 96, p. 48.
- Cho, H.K., and Kim, S.M. (2019). "Estimation of the Hapcheon Dam inflow using HSPF model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 61, No. 5, pp. 69-77.
- Choi, C.K., Kim, T., and Choi, Y.S. (2022). "A study on prediction method for flood risk using LENS and flood risk matrix." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 9, pp. 657-668.
- Choi, Y.S., and Kim, K.T. (2024). *Grid based rainfall-runoff model User's manual*. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. pp. 1-42.
- Choi, Y.S., Choi, C.K., Kim, H.S., Kim, K.T., and Kim, S.J. (2015). "Multi-site calibration using a grid-based event rainfall-runoff model: a case study of the upstream areas of the Nakdong River basin in Korea." *Hydrological Processes*, Vol. 29, pp. 2089-2099.
- Choi, Y.S., Kim, K.T., and Lee, J.H. (2008). "Development of grid based distributed rainfall-runoff model with finite volume method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 895-905.
- Ellenburg, W.L., Cruise, J.F., and Singh, V.P. (2018). "The role of evapotranspiration in streamflow modeling - An analysis using entropy." *Journal of Hydrology*, Vol. 567, pp. 290-304.
- Feng, M., Zhang, W., Zhang, S., Sun, Z., Li, Y., Huang, Y., Wang, W., Qi, P., Zou, Y., and Jiang, M. (2022). "The role of snow-melt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes." *Journal of Hydrology*, Vol. 604, 127209.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling." *Journal of Hydrology*, Vol. 377, pp.80-91.
- Hamon, W.R. (1961). "Estimating potential evapotranspiration." *Journal of Hydraulics*, ASCE. Vol. 87, pp. 107-120.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 1, No. 2, pp. 96-99.
- Jung, C.M., Shin, M.J., and Kim, Y.O. (2015). "a comparison study of runoff projections for Yongdam Dam watershed using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 6, pp. 439-449.
- Jung, I.W., and Bae, D.H. (2005). "A study on PRMS applicability for Korean river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 9, pp. 713-725.
- Jung, I.W., Lee, B.J., Jun, T.H., and Bae, D.H. (2008). "Hydrological model response to climate change impact assessments on water resources." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 907-917.
- Kang, S.U., Lee, D.R., and Lee, S.H. (2004). "A study on calibration of tank model with soil moisture structure." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 133-144.
- Kim, B.S. (2005). *Impact assessment of climate change on hydrologic components and water resources in watershed*. Ph.D. Dissertation, Inha University, pp. 199-202.
- 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, D.H., and Kim, S.M. (2017). "Estimation of inflow into Namsang Dam according to climate change using SWAT model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 59, No. 6, pp. 9-18.
- Kim, K.T., Choi, Y.S., and Lee, H.J. (2010). "Comparison and examination of the calculating hydrological geographic parameters using GIS." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 1, pp. 25-39.
- 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, N.W., Shin, A.H., and Kim, C.G. (2009). "Comparison of SWAT-K and HSPF for hydrological components modeling in the Chungju Dam watershed." *Journal of the Environmental*

- Sciences*, Vol. 18, No. 6, pp. 609-619.
- Kim, S.R., and Kim, S.M. (2018). "Evaluation of HSPF model applicability for runoff estimation of 3 sub-watershed in Namgang Dam watershed." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 34, No. 3, pp. 328-338.
- Kim, S.Y., and Yoon, K.S. (2019). "A study on the determination of the optimal resolution for the application of the distributed rainfall-runoff model to the flood forecasting system - focused on Geumho river basin using GRM." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No.2, pp. 107-113.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2004). *Public applications research of satellite data: A study of river information production and application using satellite images*. pp. 69-75.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2005). *Public applications research of satellite data: A study of river information production and application using satellite images*. pp. 125-130.
- Lee, E.H., and Seo, D.I. (2011). "Flow calibration and validation of Daechung Lake watershed, Korea using SWAT-CUP." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 9, pp. 7111-720.
- Lee, M.H., Im, E.S., and Bae, D.H. (2019). "Future projection in inflow of major multi-purpose dams in South Korea." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 21, No. s-1, pp. 107-116.
- Lee, M.J., Yoo, Y.H., Joo, H.J., Kim, K.T., Kim, H.S., and Kim, S.J. (2021). "Construction of rating curve at high water level considering rainfall effect in a tidal river." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 37, 100907.
- Lee, S.H., Ahn, T.J., Yun, B.M., and Shim, M.P. (2003). "A tank model application to Soyanggang Dam and Chungju Dam with Snow accumulation and snow melt." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 851-861.
- Lee, S.H., and Kang, S.U. (2007). "A parameter regionalization study of a modified tank model using characteristic factors of watersheds." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 4B, pp. 379-385.
- Lee, S.H., Seong, Y.J., and Jung, Y.H. (2022). "LENS-GRM applicability analysis and evaluation." *Water*, Vol. 14, 3897.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NAS). (1992). *Supplement: An introduction to Korean soils*. Soil Survey Material 13, The Rural Development Administration, pp. 283-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Agricultural Research Service, TX, U.S., pp. 57-121.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, U.S., pp. 43-52.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Monthly Weather Review 100, Division of Atmospheric Physics, Victoria, Australia, pp. 81-92.
- Shim, S.K., Koo, B.Y., and Ahn, T.J. (2009). "Development of combination runoff model applied by genetic algorithm." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 3, pp. 201-212.
- Shin, M.J., and Choi, Y.S. (2018). "Sensitivity analysis to investigate the reliability of the grid-based rainfall-runoff model." *Water*, Vol. 10, 1839.
- Sung, Y.K., Kim, S.H., Kim, H.J., and Kim, N.W. (2004). "The applicability study of SIMHYD and TANK model using different type of objective functions and optimization methods." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 121-131.
- Woo, S.Y., Lee, J.W., Kim, Y.W., and Kim, S.J. (2020). "Assessment of future stream flow and water quality of Man-gyeong River watershed based on extreme climate change scenario and inter-basin water transfer change using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 8, pp. 605-616.
- Yoon, Y.N. (2007). *Hydrology*. Cheongmungak, pp. 164-174.