



Application of land cover and soil information for improvement of HSPF modeling accuracy

Kang, Yooeun^a · Kim, Jaeyoung^b · Seo, Dongil^{c*}

^aMaster's Student, Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

^bPostdoc, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

^cProfessor, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

Paper number: 22-067

Received: 2 September 2022; Revised: 21 September 2022; Accepted: 2 October 2022

Abstract

This study aims to improve the runoff modeling accuracy of a basin using Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF) model by considering nonhomogeneous characteristics of a basin. By entering classified values according to the various types of land cover and soil to the parameters in HSPF-roughness coefficient (NSUR), infiltration (INFILT), and evapotranspiration (LZETP)- the heterogeneity of the Yongdam Dam basin was reflected in the model. The results were analyzed and compared with the one where the parameters were set as a single value throughout the basin. The flow rate and water quality simulation results showed improved results when classified parameters were used by land cover and soil type than when single values were used. The parameterization changed not only the flow rate, but also the composition ratio of each hydrologic components such as surface runoff, baseflow, and evapotranspiration, which shows the impact of the value set to a parameter on the entire hydrological process. This implies the importance of considering the heterogeneous characteristics of the land cover and soil of the basin when setting the parameters in a model.

Keywords: HSPF, Surface runoff, Infiltration, Land cover, Soil, Basin modeling

HSPF 예측 정확도 제고를 위한 토지피복 및 토양 특성 자료의 활용

강유은^a · 김재영^b · 서동일^{c*}

^a충남대학교 환경IT융합공학과 석사과정, ^b충남대학교 환경공학과 박사후연구원, ^c충남대학교 환경공학과 교수

요 지

HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)는 미국과 우리나라에서 특히 많이 사용하는 유역 수문 및 수질 모델이다. 이 모델은 분산형 모델로서 각 유역의 지형, 지질 및 오염부하특성을 정확하게 반영하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 HSPF의 매개변수 중 조도계수(NSUR), 침투(INFILT), 토양 하부의 증발산(LZETP)에 대하여 실제 용담댐 유역의 토지피복과 토양의 종류에 따라 값을 차등 입력함으로써 단일 값을 입력했을 때에 대비하여 유량, 수문 성분 및 수질의 정확도 향상 여부를 분석하였다. 조도계수와 식물의 밀도를 의미하는 토양 하부의 증발산은 토지피복의 종류에 따라 입력하였고, 침투는 유역의 수문학적 토양 그룹의 분포에 따라 입력하였다. 분석 결과 유량과 수질은 단일 값을 입력했을 때보다 각 매개변수를 토지피복과 토양의 종류별로 차등 설정하였을 때 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 또한, 조도계수(NSUR) 입력에 의해 지표유출과 침투유량이 증가하였고, 침투(INFILT) 입력에 의해 기저유출이 감소하고 지표유출이 증가하였으며, 증발산(LZETP) 차등 입력으로 중간유출과 지표유출이 증가하고 지하수유출이 감소하는 등 각 매개변수의 설정이 유역 말단의 유량뿐 아니라 모든 수문 성분의 구성 비율에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 유역의 토지피복 및 토양의 비균질한 특성을 정확하게 표현하는 것이 이 모델을 이용한 유량 및 수질 예측의 정확도 제고에 중요하다는 것을 시사한다.

핵심용어: HSPF, 표면유출, 침투유량, 토지피복, 토양, 유역모델

*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-6679

E-mail: seodi@cnu.ac.kr (Seo, Dongil)

1. 서론

인류의 지구 개발이 초래한 기후변화와 토지이용변화로 인해 전 세계적으로 물 순환 과정에 큰 변동이 일고 있으며, 홍수와 가뭄 등 극한 수문 현상의 빈도 또한 증가하는 경향을 보이고 있다(Kim et al., 2010a; Kim and Choi, 2013; Yang, 2007). 기후변화로 인한 기온 상승과 강우 형태의 변화는 토양의 수분 함량 변화를 유발하며, 도시화로 인한 불투수지역의 증가는 강우 시 지표유출을 증가시키고 침투와 증발은 감소시키는 영향을 나타낸다(Ahn et al., 2013; Park et al., 2005). 가뭄의 경우 안정적인 수자원 확보를 위해서는 기저유출 분석과 관리의 중요성도 대두되고 있는데, 강우 시 단시간에 하천으로 도달하는 지표유출과는 달리, 토양에 흡수되어 오랜 시간이 지난 후에 하천으로 유출되는 기저유출이 건기 시 하천 수량의 대부분을 차지하기 때문이다(Han et al., 2016). 이렇듯 물 순환 과정의 변화는 곧 강수량, 지표유출량, 기저유출량, 증발산량 등 수문 성분들의 변화를 의미하며, 근래에는 거시적인 물 수지뿐 아니라 각 수문 성분을 분석함으로써 물 순환을 더욱 면밀히 파악하고자 하는 연구가 이루어지고 있다(Kim et al., 2009).

각 수문 성분을 정밀하게 분석하기 위해서는 물이 이동하는 주요 매개체인 토지피복과 토양의 영향을 아는 것이 중요하다. 강우가 지표면에 닿으면 토양으로 침투되고, 침투되지 않은 물은 지표면을 따라 유출된다. 토양으로 침투되는 양이 증가할수록 지표유출은 감소하며, 침투가 발생하지 않는 불투수면에서는 지표유출이 물의 이동의 가장 중요한 부분을 차지하게 된다. 지표유출은 지표면에 축적된 오염물질을 동반하여 하천으로 흘러 들어가 마침내 해양으로 이동한다. 한편, 토양으로 침투된 수분은 토양에 저장되었다가 식물의 증발산에 의해 대기로 돌아가거나 중력으로 인해 더욱 깊은 곳으로 이동하여 지하수가 된다. 이 일련의 과정에서 모든 단계는 토지피복 혹은 토양의 영향을 받으며, 유역 모델에서 이들의 특성을 반영하는 것은 매우 중요한 일이다.

HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)는 대한민국 환경부와 미국 환경청(U.S. EPA)에서 수질오염총량제의 평가와 TMDL (Total Maximum Daily Loads) 정책 적용을 위해 사용되고 있는 모델이다(Park et al., 2020). HSPF의 토지피복과 토양과 관련된 연구는 다양하다. Park et al. (2005)은 경안수위관측소 상류유역의 1980, 1990, 2000년의 10년간격 토지피복도 3개를 HSPF에 입력자료로 사용하여 산림 감소와 도심지 증가에 의한 유출량과 침투유량의 증가를 연구하였다. Seo et al. (2007)은 용담댐 유역의 대분류와 중분류 토지피복도 적용 결과 분류 항목이 더 자세한 중분류 토지피복도의 모의 결과가 더 정확하다는 연구를 하였다. HSPF를

이용해 수문 성분을 분석한 연구로는 Kim et al. (2009)이 충주댐 유역의 수문 성분 모의에 HSPF와 SWAT-K를 각각 사용하여 모델 종류에 따른 수문 성분 모의 값의 차이와 그 원인에 대해 비교 분석한 것과 Kim et al. (2022)이 의암댐 유역에 실제 토양층의 깊이와 유효수분함량을 이용하여 토양 하층 저류량 매개변수(LZSN)를 산정 및 반영한 후 수문 성분을 분석한 연구가 있다. 그러나 아직 많은 연구에서 모델의 매개변수를 토지피복이나 토양에 따라 구분하지 않고 일괄적으로 적용하는 경향이 있는 것으로 보인다(Albek et al., 2004; Amirhossien et al., 2015; Engelmann et al., 2002; Jang et al., 2006; Kim and Park, 2004; Lee, 2012; Lee et al., 2018; Mishra et al., 2009; Singh et al., 2005). 모델의 수문 관련 매개변수들의 초깃값은 유역 내 토지피복과 토양의 비균질성과 상관없이 평균적인 단일 값이 유역 전체에 설정되어 있으며, 이것은 종종 실제 토지피복이나 토양을 더 정확히 반영하려는 목적이 아닌 유역 말단 유량을 실측에 맞춰 조절하기 위한 인자로만 여겨져 단 하나의 값으로 전 유역에 일률적으로 입력되거나 임의적 수치가 적용된 채 연구되는 것으로 추정된다. HSPF는 국내·외로 유역 계획과 평가에 널리 사용되는 모델로서, 이러한 점들을 보완할 시 물 순환 과정의 더욱 정확한 분석과 효율적인 계획 수립 및 관리에 도움이 될 것이라 판단하였다. 이에 본 연구는 지표수의 세 가지 이동 경로인 지표유출, 침투, 증발과 각각 관련이 있는 매개변수에 대하여 실제 용담댐 유역의 토지피복과 토양의 종류별 특성을 반영하여 설정함으로써 그에 따른 유량, 수문 성분 및 수질의 변화를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상지

연구대상지는 금강수계 최상류에 위치한 용담댐 유역으로 전라북도 진안군, 무주군, 장수군 등을 아우르고 있다(Fig. 1). 용담댐은 국내에서 다섯번째로 규모가 큰 댐으로 전라북도를 포함한 서해안 지역에 용수를 공급하고 침수에 취약한 금강 중·하류 지역의 홍수를 대비시키는 역할을 하여 지속적인 유량 및 수질 관리가 필요한 곳이다. 유역 면적 930.4 km²로 금강 유역의 약 9.45%를 차지하며, 유로연장은 62.58 km, 평균 표고는 510.29 m, 평균 경사는 43.43%이다. 용담댐 유역의 토지피복도에 의하면 산림지역이 67.46%로 가장 많고, 농업지역 11.90%와 초지 10.79%가 뒤따르고 있다. 연구에 사용된 보정지점은 용담댐 유역 내 환경부 유량측정망 4곳 - 운곡교(UG), 연화교(YH), 성산리(SS), 댐(DAM) - 과 수질측정망 2곳 - 가막(GM), 진안천(JA) - 이다(Fig. 1).

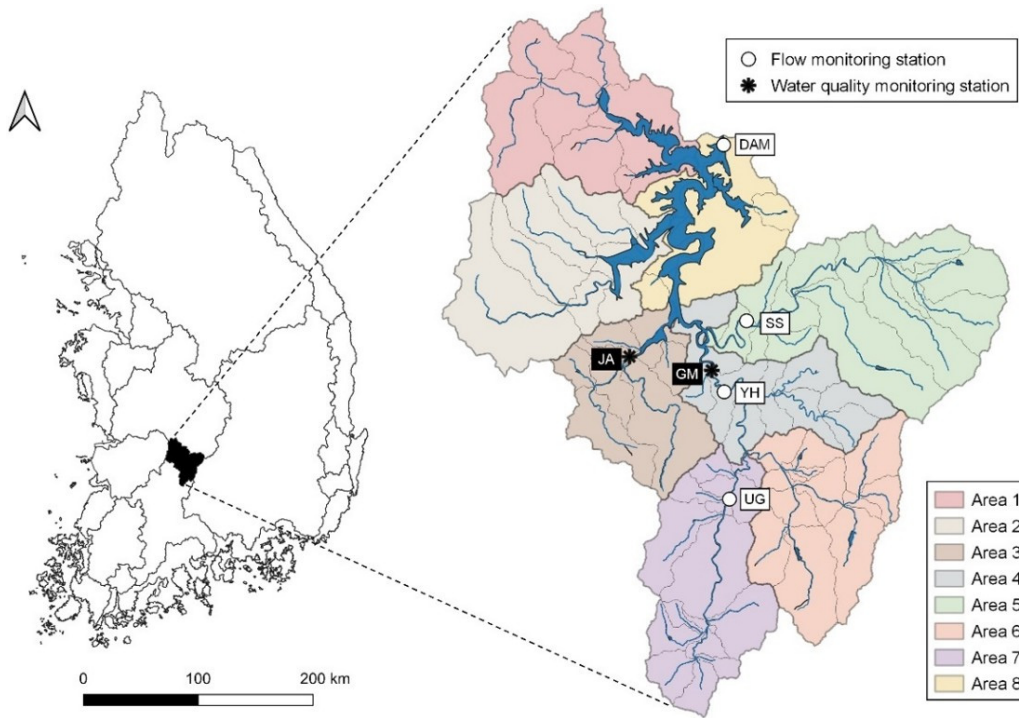


Fig. 1. Location, subbasins, and monitoring stations of Yongdam Dam basin

2.2 HSPF 모델

Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)은 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency)과 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)의 지원을 받는 유역 모델로 유역 내 유량과 오염물질의 이동을 모의해 환경 문제들을 결정하고 대비하는 데에 적용된다(Kim and Park, 2004). HSPF는 투수 지역(PERLND), 불투수 지역(IMPLND), 그리고 하천(RCHRES)을 구분하여 수량과 수질을 모의한다(Bicknell et al., 2001). 투수 지역에서의 수문학적 모의는 지표유출(surface runoff), 중간유출(interflow), 지하수유출(groundwater), 식물 등에 의한 차단(interception), 증발(evaporation), 증발산(evapotranspiration)으로 이루어진다. 불투수 지역에서는 지표저류, 지표유출, 증발이 모의된다.

2.2.1 모델 구축 자료

모델 구축을 위해 사용한 Geographic Information System (GIS) 입력자료로는 국토정보플랫폼(map.ngii.go.kr)의 수치표고모델(Digital elevation model), 환경공간정보서비스(egis.me.go.kr)의 토지피복도, 물환경정보시스템(water.nier.go.kr)의 KRF 3.0 유역도와 하천도가 있다. HSPF 모델의 구축작업을 도와주는 Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS)에서 유역을 생성할

시 KRF3.0 유역도를 전부 반영하되, 크기가 매우 작은 유역 2개는 각각의 하류 유역과 병합하여 대상 지역을 총 75개의 소유역으로 구분하였다(U.S. EPA, 2019). 토지피복도는 2020년 세분류 자료를 대분류 항목으로 전환하여 사용하였고, 대분류의 7가지 분류 항목은 시가지·건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역이다(Fig. 2(a)). 모델 구축에 하나의 토지피복도가 사용되므로 토지피복의 시간적 변화를 반영하는 데에는 한계가 있다. 따라서 2019년에 촬영된 2020년 세분류 자료가 결과 분석기간인 2017~2021년의 대표성을 띠다고 가정하였다.

모델 구축을 위해 사용한 기상 자료로는 기온, 이슬점온도, 풍속, 일사, 운량, 강수량, 잠재증발산량이 있다. 다섯 가지 기상 항목(기온, 이슬점온도, 풍속, 일사, 운량)은 기상청의 자료를 사용하였고, 강수량은 국가수자원관리종합정보시스템(wamis.go.kr)에서 제공하는 기상청, 환경부, 수자원공사의 관측 자료를 사용하였으며, 보다 정확한 모의를 위하여 티센망을 기반으로 각 소유역별 적합한 강우 관측소를 선정하여 개별 입력하였다(Fig. 2(b)). 잠재증발산량은 Penman-Monteith 식으로 계산되는 국제연합식량농업기구(Food and agriculture organization)의 ETo calculator 프로그램을 이용해 산출하였다(Raes, 2012). 모든 기상 자료는 2015년~2021년 7년간의 시 단위 자료를 입력하였다.

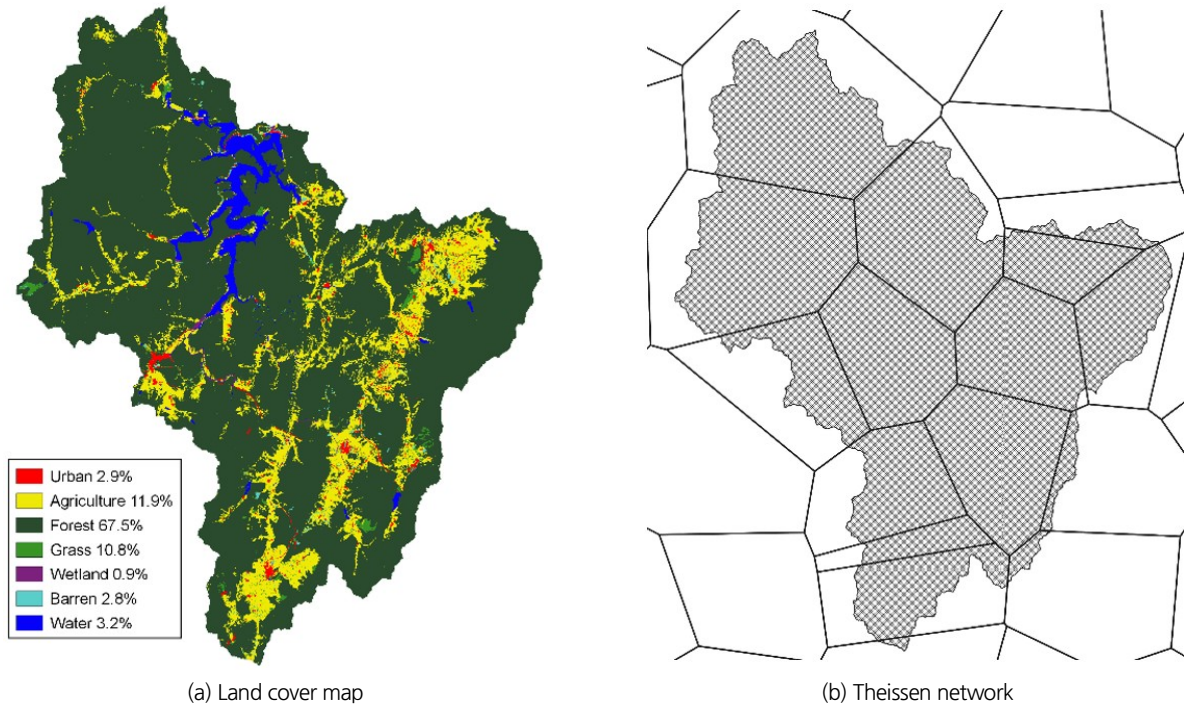


Fig. 2. Land cover map and Thiessen network of Yongdam Dam basin

2.2.2 모델 보정

보정이란 모델의 예측 불확실성을 줄이고자 모의 값이 실측 값에 근접하도록 모델을 조정하는 것이다(Arnold *et al.*, 2012). 본 연구에서는 2017~2019년을 보정기간으로, 2020~2021년을 검증기간으로 하였다. 보정 항목은 유량과 생화학적 산소요구량(BOD), 총질소(TN), 총인(TP)이다. 보정 결과를 평가하기 위한 지표로 유량은 결정계수(Coefficient of determination, R^2)와 평균 제곱근 오차(Root mean square error, RMSE)를, 수질은 % 차이와 RMSE를 사용하였다(Moriasi *et al.*, 2015). R^2 는 실측 값과 모의 값의 상관관계를 나타내며, 0~1 사이의 분포 중 1에 가까울수록 높은 상관관계를 의미한다(Eq. (1)). RMSE는 실측 값과 모의 값의 평균오차로, 값이 0에 가까울수록 정밀도가 높은 것을 의미한다(Eq. (2)). Eqs. (1)~(3)에서 n 은 데이터의 수, i 는 시간, O_i 는 i 에서의 실측 값, \bar{O} 는 실측 값의 평균, P_i 는 i 에서의 모의 값, \bar{P} 는 모의 값의 평균을 나타낸다.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (2)$$

$$\%Difference = \frac{\sum_{i=0}^n O_i - \sum_{i=0}^n P_i}{\sum_{i=0}^n O_i} \times 100 \quad (3)$$

매개변수를 토지피복이나 토양에 따라 구분하지 않고 단일 값으로 전 유역에 설정하여 보정한 결과 유량의 R^2 는 0.801~0.884, RMSE는 2.300~23.645 m^3/s 범위의 결과를 얻었으며, 수질은 RMSE 0.030~1.011 mg/L, % 차이 0.323~21.298% 범위의 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 3). 2020~2021년 검증 결과 유량의 R^2 는 0.756~0.959, RMSE는 3.692~30.443 m^3/s 범위의 결과를 얻었으며, 수질은 RMSE 0.036~1.497 mg/L, % 차이 4.598~22.451% 범위의 결과를 얻을 수 있었다.

2.3 매개변수

HSPF의 수문 관련 매개변수 중 지표의 조도(roughness), 증발산(evapotranspiration), 침투(infiltration)와 관련된 매개변수를 실제 토지피복과 토양의 특성을 반영하여 설정하였다.

NSUR은 Manning의 조도계수로 흐름이 있는 경계면의 거친 정도, 즉 물의 흐름에 대한 표면의 저항을 나타낸다(Arcement and Schneider, 1989). 조도계수는 하천의 유량이나 수위를 결정하는 중요한 인자 중 하나로, 조도계수가 증가하면 유속이 감소하고 수위가 상승한다(Kim *et al.*, 2010b). HSPF에서는 지표유출을 계산할 시에 유역으로부터 제공되는 지표면의

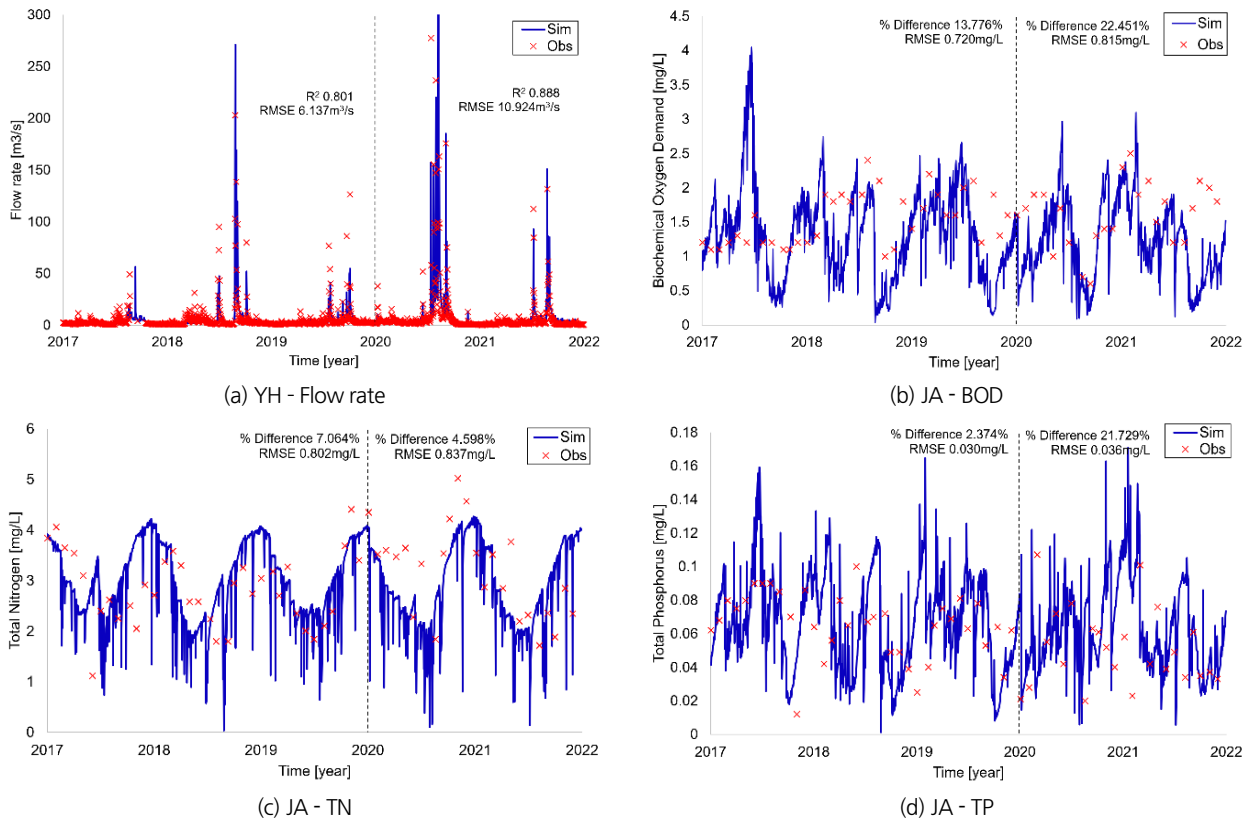


Fig. 3. Flow rate and water quality calibration results

길이, 경사, 강수량 등의 값 외에 조도계수를 지정하도록 되어 있다(Bicknell et al., 2001).

LZETP는 식물에 의한 토양 하부 영역의 증발산을 나타내는 매개변수로 식물의 밀도를 나타낸다. 증발(evaporation)과 증산(transpiration)을 합한 개념인 증발산(evapotranspiration)은 연평균 강수량의 약 70%를 대기로 되돌려 보낸다는 점에서 중요한 인자다(Kim et al., 2004). HSPF에서는 전체 증발산 중 토양 하층에서의 증발산이 다른 어떤 층에서보다 가장 큰 비중을 차지한다고 보고 있다(Bicknell et al., 2001). 토양 하층에서의 증발산은 식물의 종류, 뿌리의 깊이, 식물의 분포 밀도, 식물의 성장 단계 등에 영향을 받는데 이 모든 것을 내포하는 매개변수가 바로 LZETP다. LZPET은 최대 증발산 기회(maximum evapotranspiration opportunity)를 계산하는 데 사용되는데, Eq. (4)에서 RPARM은 최대 증발산 기회, LZS (Lower Zone Storage)는 하층 저류량, LZSN (Lower Zone Nominal Storage)은 하층공칭저류량, DELT60은 시간 간격을 의미한다.

$$RPARM = \left(\frac{0.25}{1.0 - LZETP} \right) * \left(\frac{LZS}{LZSN} \right) * \frac{DELT60}{24.0} \quad (4)$$

Table 1. INFILT estimate of each SCS hydrologic soil group (Donigian and Davis, 1978)

SCS Hydrologic Soil Group	INFILT Estimate		Runoff Potential
	(in/hr)	(mm/hr)	
A	0.4~1.0	10.0~25.0	Low
B	0.1~0.4	2.5~10.0	Moderate
C	0.05~0.1	1.25~2.5	Moderate to High
D	0.01~0.05	0.25~1.25	High

INFILT는 토양의 침투 능력에 대한 지표이고, 침투속도를 나타낸다. 토양은 종류에 따라 침투 능력이 다르므로 이를 구분하고자 미국 자연자원보전국(U.S. Natural Resource Conservation Service)이 토양을 침투 능력에 따라 네 가지 그룹으로 분류해 놓은 수문학적 토양 그룹(Hydrologic Soil Group)을 이용하였다. A는 침투율이 높고 유출량이 적으며, B는 침투율과 유출량이 보통이고, C는 침투율이 느리고 유출량이 보통 이상이며, D는 침투율이 매우 느리고 유출량이 많은 것을 나타낸다(Table 1). HSPF에서 INFILT는 Eq. (5)와 같이 평균 침투능(mean infiltration capacity)을 계산하는 데 사용된다(Bicknell et al., 2001). IBAR은 평균 침투능, INFEXP는 1보다 큰

지수, INFAC는 동토를 고려하는 인자를 의미한다.

$$IBAR = \left(\frac{INFILT}{(LZS/LZSN)^{INFEXP}} \right) * INFAC \quad (5)$$

본 연구에서는 세 매개변수를 전 유역에 단일 값으로 놓고 모의한 경우와 실제 유역의 토지피복과 토양 종류에 따라 개별 입력한 경우를 비교하였다. 사용한 단일 값은 NSUR 투수 지역 0.2, 불투수 지역 0.05; LZETP 0.4; INFILT 4.064이며, 토지피복과 토양에 따른 매개변수 설정 방법은 다음과 같다.

2.3.1 토지피복에 따른 NSUR과 LZETP 설정

NSUR과 LZETP는 각각 지표면의 거칠기와 식물의 밀도를 나타내는 매개변수로 토지피복과 관계가 있으니, 용담댐 유역의 토지피복별 적합한 수치를 차등 입력하였다. NSUR은 Vieux (2005)가 제시하고 Lee et al. (2016)가 적용한 바에 따라 Table 2에 나타난 것과 같이 토지피복별로 설정하였다. LZETP는 U.S. EPA (2000)가 제시한 것을 참고하여 Table 2와 같이 토지피복별로 설정하였다(U.S. EPA, 2000). 시가지·건조지역은 모델 구축 시 불투수로 설정하였기 때문에

Table 2. NSUR and LZETP estimation for each land cover type

Land cover	NSUR		LZETP	
	Single value	Classified value	Single value	Classified value
Agriculture	0.2	0.035	0.4	0.3
Forest		0.1		0.4
Grass		0.13		0.2
Barren		0.035		0.1
Water		0.03		0
Wetland		0.05		0.4
Urban	0.05	0.015	-	-

LZETP를 입력하지 않아도 된다.

2.3.2 토양에 따른 INFILT 설정

INFILT는 용담댐 유역의 토양 종류별 분포 면적을 분석하여 유역별로 고유한 침투속도를 산출 후 입력하였다. 국가수자원관리종합정보시스템(wamis.go.kr)에서 제공하는 유역 토양 분석에서 용담댐 유역에 존재하는 토양 기호를 확인한 뒤, 금강유역조사보고서(MOCT and KWRC, 2006)에서 각 토양 기호가 속한 수문학적 토양 그룹을 연결시켜 용담댐 유역의 표준유역별 수문학적 토양 그룹의 분포 비율을 분석하였다. 그 후 Donigian and Davis (1978)가 수문학적 토양 그룹에 따라 Table 1과 같이 제안한 범위를 참고하여 표준유역별 수문학적 토양 그룹의 분포 비율에 각각 곱한 후 모두 더하여 최종 INFILT 수치를 Table 3과 같이 산정하였다.

2.4 시나리오

실제 유역의 토지피복과 토양의 특성을 반영한 매개변수의 적용으로 인한 변화를 파악하기 위하여 5가지 시나리오를 구상하였다(Table 4). SINGLE 시나리오는 매개변수 NSUR, LZETP, INFILT를 토지피복이나 토양의 종류에 따라 구분하지 않고 전 유역에 단일 값으로 놓고 모의한 경우이다. NSUR 시나리오는 다른 매개변수는 조정하지 않고 NSUR만 토지피

Table 4. Parameter setup in each scenario

Scenario	Parameter setup		
	NSUR	LZETP	INFILT
SINGLE	Single	Single	Single
NSUR	Classified	Single	Single
LZETP	Single	Classified	Single
INFILT	Single	Single	Classified
ALL	Classified	Classified	Classified

Table 3. Hydrologic soil group distribution and INFILT estimation in each subbasin

Basin	Area (km ²)	Hydrologic Soil Group (%)				INFILT (mm/hr)	
		A	B	C	D	Single value	Classified value
Area 1	126.72	0.5	11.2	3.5	84.8	4.064	2.413
Area 2	143.54	0.2	11.9	7.9	79.9		2.489
Area 3	89.34	0	15.2	14.5	70.4		2.794
Area 4	82.61	0	15.9	13.9	70.2		2.870
Area 5	172.38	1.9	13.9	9.6	74.5		3.099
Area 6	114.33	1.0	23.1	7.7	68.0		3.658
Area 7	116.54	2.7	19.8	5.4	72.2		3.759
Area 8	84.88	10.8	8.3	10.0	70.9		4.724

복별로 0.015~0.13 범위의 값을, LZETP 시나리오는 LZETP 만 토지피복별로 0~0.4의 값을 차등 입력한 경우이다. INFILT 시나리오는 INFILT만 토양 분포에 따라 2.413~4.724의 값을 차등 입력하였고, NSUR과 LZETP는 단일 값으로 그대로 두었다. 마지막으로 ALL 시나리오는 NSUR, LZETP, INFILT 를 모두 토지피복과 토양별로 차등 입력한 경우를 의미한다. 이와 같이 각 시나리오별 매개변수 설정 후 2017~2021년의 결과를 추출하여 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유량 결과

시나리오별 각 매개변수의 적용 결과 유량의 결정계수와 RMSE는 Table 5와 같이 변화하였다. 대부분의 경우 매개변수 적용 후의 결과가 단일 값 적용 시보다 향상되었으며, 특히 UG와 DAM 지점은 세 매개변수를 동시 적용한 ALL 시나리오에서 가장 향상된 결과를 보여주었다.

Fig. 4는 단일 값 시나리오 대비 각 매개변수 적용에 의한 평균 유량과 첨두유량의 퍼센트 변화를 나타낸다. 평균 유량은

INFILT < SINGLE < ALL < LZETP < NSUR 순으로 증가하였다. INFILT 시나리오의 평균 유량은 모든 지점에서 SINGLE 시나리오에 비해 0.2~0.9% 감소하였고, NSUR 시나리오의 평균 유량은 SINGLE 시나리오에 비해 5.3~5.6% 증가하여 모든 시나리오 중 가장 높은 유량을 나타냈다(Fig. 4(a)). 첨두유량은 SINGLE < INFILT < LZETP < ALL < NSUR 시나리오 순으로 증가하여 NSUR 시나리오에서 가장 큰 첨두유량을 보여주었다(Fig. 4(b)).

시나리오별 유량의 변화 원인을 더욱 면밀히 분석하고자 HSPF에서 모의되는 수문 성분들인 SURO (지표유출), IFWO (중간유출), AGWO (지하수유출), IGWI (심층침투), TAET (총 증발산)의 비율 변화를 살펴보았다(Fig. 5). 매개변수를 단일 값으로 돌린 SINGLE 시나리오의 비율은 지표유출 24.7%, 중간유출 3.8%, 지하수유출 24.0%, 심층침투 2.8%, 총 증발산 44.8%였다.

NSUR 시나리오에서는 지표유출의 비율이 SINGLE 시나리오에 비해 3.0% 상승하고 기저유출의 비율이 0.6%, 증발산의 비율이 2.3% 하락하였다. 이는 토지피복별 조도계수 입력에 의해 상대적으로 지표면이 덜 거칠어지면서 침투할 시간이 부족하여 지표유출이 상승하면서 기저유출과 증발산이 하락

Table 5. Flow rate results of each scenario

Index	Station	SIGLE	NSUR	LZETP	INFILT	ALL
R ²	UG	0.926	0.920	0.931	0.928	0.932
	YH	0.872	0.885	0.881	0.876	0.883
	SS	0.697	0.732	0.711	0.712	0.725
	DAM	0.934	0.940	0.942	0.944	0.948
RMSE (m ³ /s)	UG	2.993	2.935	2.843	2.910	2.775
	YH	8.263	8.562	8.162	8.398	8.389
	SS	7.959	7.623	7.776	7.893	7.745
	DAM	27.559	23.964	25.565	24.229	22.657

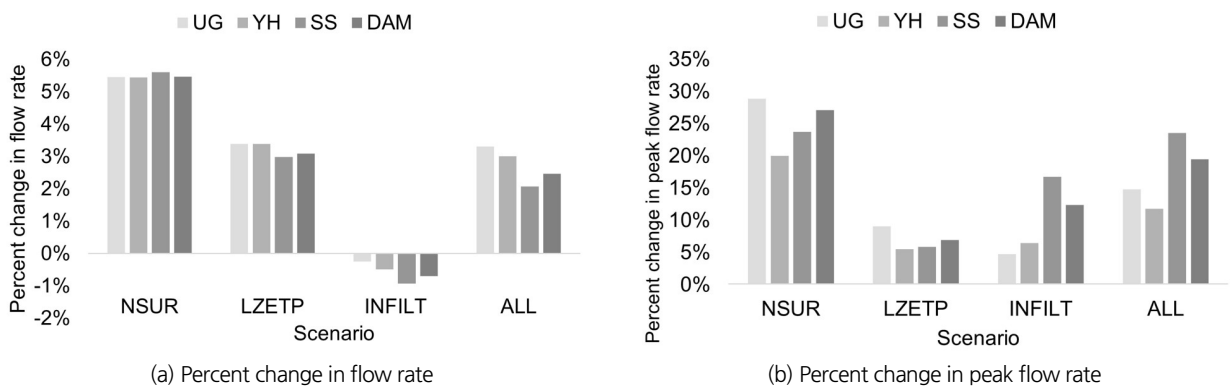


Fig. 4. Percent changes in flow rate and peak flow rate in each scenario

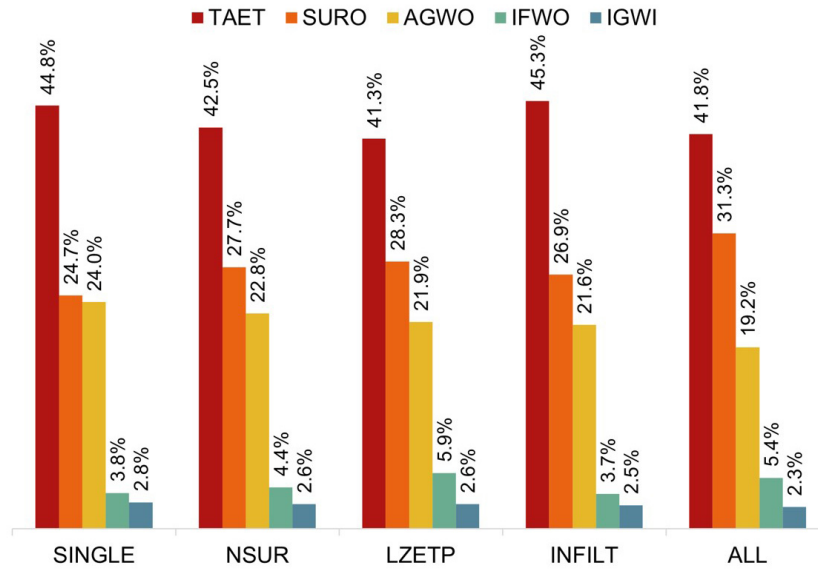


Fig. 5. Changes in hydrological components' ratio in each scenario

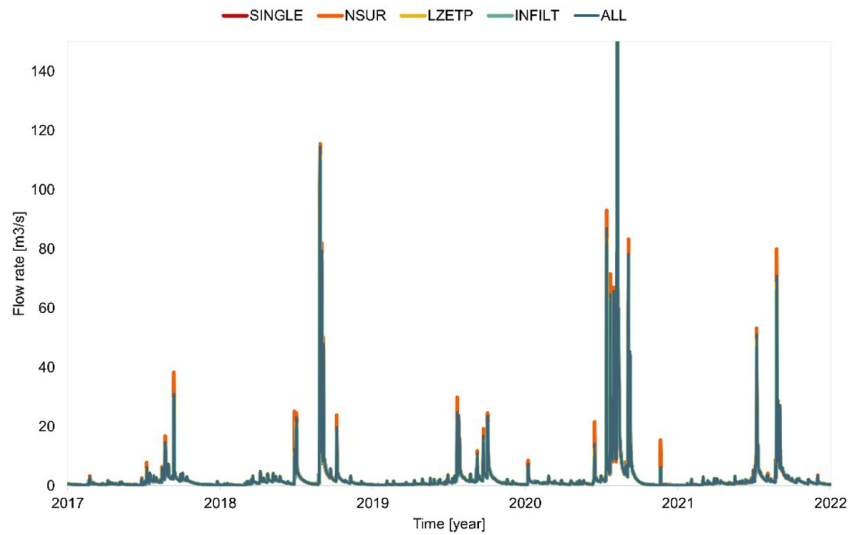


Fig. 6. Flow rate of UG in each scenario

한 것으로 보인다. 기저유출이 SINGLE 시나리오에 비해 소폭 하락(0.6%)한 것에 반해 유량이 증가(5.3~5.6%)한 것은 강우 시 매끄러운 토지피복 위를 빠르게 지나간 침투유량의 증가 때문으로 판단된다(Fig. 6).

LZETP 시나리오에서는 총 증발산의 비율이 41.3%로 SINGLE 시나리오나 NSUR 시나리오에 비해 증발산의 비중이 적어졌는데, 토지피복별 증발산 매개변수(LZETP)를 차등 입력함으로써 단일 값 입력 시보다 토양층 하부의 증발산이 감소하면서 나타난 것으로 생각된다. 중간유출과 지하수유출을 합한 기저유출의 총 비율은 27.8%로 SINGLE 시나리오와

동일했으나, 각각의 비율을 살펴보면 중간유출은 2.1% 상승, 지하수유출은 2.1% 감소하였다. 이는 토양 하층의 증발산량이 감소하여 수분량이 남아있기 때문에 상층의 수분이 횡방향으로 이동하여 중간유출이 증가하고 하층 아래의 지하수유출이 감소한 것이 원인임을 추측할 수 있다.

INFILT 시나리오에서는 앞선 세 시나리오에 비해 상대적으로 적은 비율의 기저유출을 보여주었다(25.3%). 토양별 침투속도의 차등 입력으로 인해 단일 값 입력 시보다 침투능이 줄어들었기 때문이며, 침투되지 못한 물은 지표유출(2.2% 증가)과 증발산(0.5% 증가)으로 분산되었다. INFILT 시나리오

Table 6. Water quality results in each scenario

Index	Station	Variable	SINGLE	NSUR	LZETP	INFILT	ALL
% Difference (%)	GM	BOD	19.733	18.915	20.709	19.364	19.845
		TN	2.340	1.201	1.417	3.382	4.369
		TP	4.533	2.826	3.822	1.988	3.009
	JA	BOD	17.341	14.875	18.033	12.658	13.693
		TN	2.081	2.926	1.796	2.583	2.461
		TP	9.013	11.746	7.881	14.579	13.705
RMSE (mg/L)	GM	BOD	0.840	0.823	0.841	0.827	0.830
		TN	0.950	0.958	0.945	0.940	0.937
		TP	0.062	0.063	0.062	0.062	0.062
	JA	BOD	0.760	0.758	0.743	0.750	0.738
		TN	0.816	0.815	0.811	0.817	0.808
		TP	0.032	0.032	0.032	0.033	0.033

의 평균 유량이 감소하였던 원인도 침투속도의 감소로 인해 지하수유출의 비율이 줄었기 때문으로 보인다.

NSUR, LZETP, INFILT 세 매개변수의 작용을 합한 ALL 시나리오에서의 비율은 지표유출 31.3%, 중간유출 5.4%, 지하수유출 19.2%, 침투침투 2.3%, 총 증발산 41.8%로 나와 단일 값이었을 때보다 지표유출과 중간유출이 증가하고 증발산과 지하수유출이 감소한 모습을 보였다.

NSUR이 지표유출량에, LZETP가 증발산량에, INFILT가 기저유출량에만 각각 독립적으로 영향을 미치는 것이 아니라 각 매개변수가 복합적으로 모든 수문 성분에 작용하는 것을 보며 각 매개변수가 수문 과정 전체에 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다. 특히 LZETP 시나리오에서와 같이 기저유출의 비율(27.8%)은 SINGLE 시나리오와 같았을지라도 중간유출과 지하수유출의 비율에는 차이가 있는 것을 보며 매개변수 설정의 효과를 볼 수 있었다. 이러한 수문 성분들의 파악은 하천에 도달하기까지의 각기 다른 경로별 유량의 비율을 가늠할 수 있게 한다는 면에서 단순히 유역 말단의 유량 결과만 비교했을 때에 비해 더 정밀한 분석을 가능하게 한다. 유역 말단의 유량 결과는 비슷할지라도 매개변수 설정에 의하여 지표유출, 기저유출, 증발산 등 수문 성분의 비율 차이가 극명히 있다는 것은 토지피복과 토양별 특성을 반영하는 것의 중요성을 시사하며, 유역 내 토지이용별 저감 대책 효과를 평가하거나 BMP (best management practices) 시나리오를 적용할 경우, 혹은 유역의 토지피복 변화에 따른 수문 분석 등에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 사료된다(Kim et al., 2022).

3.2. 수질 결과

시나리오별 각 매개변수의 적용 결과 수질의 % 차이와

RMSE는 Table 6과 같이 변화하였다. 큰 변화가 없었던 TP의 RMSE를 제외하고는 대체적으로 SINGLE 시나리오보다 매개변수 차등 적용 시나리오에서 정확도가 개선되었다. BOD의 RMSE는 LZETP 시나리오를 제외한 모든 지점에서 향상되었고, % 차이는 GM 지점은 NSUR, JA 지점은 ALL 시나리오에서 가장 크게 향상되었다. TN의 RMSE는 대부분 개선되었는데, 특히 세 매개변수를 동시 적용한 ALL 시나리오에서 두 지점 모두 가장 향상되었다. TP는 RMSE의 변화는 미미하였고, % 차이는 GM 지점에서는 매개변수를 차등 입력한 모든 시나리오에서 향상되었지만, JA 지점에서는 LZETP 시나리오에서만 향상되었다.

4. 결론

본 연구는 기후변화와 토지개발 등으로 변동하는 이 시대에 유량 및 수문 성분 모의에 대한 불확실성을 감소시키기 위해 실제 유역의 토지피복과 토양의 특성을 모델에 반영하여 모의하고자 하였다. HSPF 구축 시 토양자료가 사용되지 않는다는 점과, HSPF 모의 시 전 유역에 토지피복과 토양의 다양성을 고려하지 않은 일괄적인 매개변수가 흔히 선정된다는 점을 보완하고자 용담댐 유역을 대상으로 토지피복과 토양의 비균질한 특성을 매개변수를 통해 반영하였다. HSPF의 매개변수 중 NSUR, LZETP, INFILT의 값을 실제 용담댐 유역의 토지피복과 토양의 종류에 따라 차등 설정하였는데, NSUR은 조도계수, LZETP는 토양하층의 증발산, 즉 식물의 밀도를 나타내므로 토지피복의 종류에 따라 입력하였고, INFILT는 토양의 침투 능력으로 실제 유역의 수문학적 토양 그룹의 분

포에 따라 입력하였다. 각 매개변수의 설정으로 인한 변화를 파악하기 위해 시나리오는 매개변수를 토지피복과 토양에 따라 분류하지 않고 단일 값으로 모의한 SINGLE 시나리오, 각 매개변수를 토지피복 혹은 토양에 따라 분류하여 각각 적용한 NSUR, LZETP, INFILT 시나리오, 그리고 세 매개변수를 동시에 차등 적용한 ALL 시나리오로 구상하였다.

매개변수의 차등 입력 후 모의한 결과 유량은 매개변수를 단일 값으로 설정했을 때보다 결정계수 0.002~0.035, RMSE 0.058~4.902 m³/s의 범위에서 개선되었으며, UG과 DAM 지점은 세 매개변수를 동시에 적용했을 때 결과가 더 향상하는 경향을 보였다. NSUR 시나리오에서는 지표면 조도의 감소로 지표유출이 증가하고 기저유출이 감소하였으며, 침투유량이 모든 시나리오 중 가장 컸고 이로 인해 평균 유량도 가장 크게 나타났다. LZETP 시나리오에서는 토양 하층 증발산이 감소하여 중간유출과 지표유출이 증가하고 증발산과 지하수유출이 감소하였다. INFILT 시나리오에서는 침투능이 감소하여 기저유출이 감소하고 지표유출과 증발산이 증가하였다. 세 매개변수 동시 적용하여 각 매개변수의 영향이 종합된 ALL 시나리오에서는 SINGLE 시나리오에 비해 지표유출 6.6% 증가, 중간유출 1.6% 증가, 지하수유출 4.8% 감소, 총 증발산 3.0% 감소하였다. 수질의 경우 큰 변화가 없었던 TP의 RMSE를 제외하고는 대체적으로 SINGLE 시나리오보다 매개변수 차등 적용 시나리오에서 정확도가 개선되었지만 경향성을 찾기는 어려웠다.

각 매개변수의 설정으로 인해 유역 말단의 유량뿐 아니라 모든 수문 성분의 구성 비율은 변화했으며, 한 매개변수가 한 수문 성분에만 독립적으로 영향을 미치는 것이 아니라 복합적으로 모든 수문 성분에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 이는 각 매개변수에 어떤 값을 입력하는지에 따라 수문 과정 전체에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미하므로 실제 유역의 토지피복과 토양의 비균질한 특성을 고려한 매개변수 선정이 중요하다고 판단된다. 토지피복과 토양 등 유역의 공간적인 특성이 모델에 잘 반영될수록 더욱 정확한 분석과 유역 계획 수립 및 관리를 할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 본 연구에서 적용했던 매개변수인 NSUR, LZETP, INFILT뿐 아니라 여타 수문 관련 매개변수들에 대해서도 실제 유역의 반응을 위한 범위 제안 및 적용에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원

“신기후체제 대응 환경기술개발산업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RE202201636).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahn, S.R., Park, G.A., Jang, C.H., and Kim, S.J. (2013). “Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 16, No. 6, pp. 569-583.
- Albek, M., Ögütveren, Ü.B., and Albek, E. (2004). “Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF.” *Journal of Hydrology*, Vol. 285, No. 1-4, pp. 260-271.
- Amirhossien, F., Alireza, F., Kazem, J., and Mohammadbagher, S. (2015). “A comparison of ANN and HSPF models for runoff simulation in Balkhichai River Watershed, Iran.” *American Journal of Climate Change*, Vol. 4, pp. 203-216.
- Arcement, G.J., and Schneider, V.R. (1989). *Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. United States Geological Survey, Denver, CO, U.S.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., and Van Liew, M.W. (2012). “SWAT: Model use, calibration, and validation.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 55, No. 4, pp. 1491-1508.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobs, T.H., and Donigian, A.S. (2001). *Hydrological simulation program-fortran User's manual version 12*. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. EPA, Athens, GA, U.S.
- Donigian, A.S., and Davis, H.H. (1978). *User's manual for agricultural runoff management (ARM) model*. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Athens, GA, U.S.
- Engelmann, C.J., Ward, A.D., Christy, A.D., and Bair, E.S. (2002). “Application of the BASINS database and NPSM model on a small Ohio watershed.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No. 1, pp. 289-300.
- Han, J.H., Ryu, T.S., Lim, K.J., and Jung, Y.H. (2016). “A review of baseflow analysis techniques of watershed-scale runoff models.” *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 58, No. 4, pp. 75-83.
- Jang, J., Yoon, C., Jung, K., and Jeon, J. (2006). “Pollutant loading

- estimate from Yongdam watershed using BASINS/HSPF.” *Korean Journal of Limnology*, Vol. 39, No. 2, pp. 187-197.
- Kim, B., Kim, H., and Seoh, B. (2004). “Evaluation of the evapotranspiration models in the SLURP hydrological model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 9, pp. 745-758.
- Kim, B., Kim, S., Kim, H., and Jun, H. (2010a). “An impact assessment of climate and land use change on water resources in the Han River.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-323.
- Kim, J., and Choi, C. (2013). “Impact of changes in climate and land use/land cover change under climate change scenario on streamflow in the basin.” *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 21, No. 2, pp. 107-116.
- Kim, J., Lee, J., and Ahn, J. (2010b). “Optimization for roughness coefficient of river in Korea-review of application and han river project water elevation.” *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 30, No. 6B, pp. 571-578.
- Kim, N., Shin, A., and Kim, C. (2009). “Comparison of SWAT-K and HSPF for hydrological components Modeling in the Chungju dam watershed.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 18, No. 6, pp. 609-619.
- Kim, S., Kim, J., Kang, H., Jang, W.S., and Lim, K.J. (2022). “Analysis of water balance changes and parameterization reflecting soil characteristics in a hydrological simulation program - FORTRAN model.” *Water*, Vol. 14, No. 6, 990.
- Kim, S., and Park, S. (2004). “Calibration and validation of HSPF model to estimate the pollutant loads from rural small watershed.” *Journal of Korean Water Resource Association*, Vol. 37, No. 8, pp. 643-651.
- Lee, H.A. (2012). *Catchment-scale hydrological response to land use change-a case study for the Wangsuk river basin*. Master Thesis, Seoul National University.
- Lee, J., Lee, S., and Kwak, C. (2016). “A study on the runoff parameter estimation in the distributed model.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 3, pp. 55-66.
- Lee, Y.G., Hwang, S.C., Hwang, H.D., Na, J.Y., Yu, N.Y., and Lee, H.J. (2018). “Water quality Modelling of flood control dam by HSPF and EFDC.” *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 27, No. 3, pp. 251-266.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) and Korea Water Resources Corporation (KWRC) (2006). *Geum River basin investigation report*.
- Mishra, A., Kar, S., and Raghuwanshi, N. (2009). “Modeling non-point source pollutant losses from a small watershed using HSPF model.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 135, No. 2, pp. 92-100.
- Moriassi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). “Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785.
- Park, M.J., Kwon, H.J., and Kim, S.J. (2005). “Analysis of impacts of land cover change on runoff using HSPF model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 6, pp. 495-504.
- Park, Y.S., Ryu, J., Kim, J., Kum, D., and Lim, K.J. (2020). “Review of features and applications of watershed-scale modeling, and improvement strategies of it in South-Korea.” *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36, No. 6, pp. 592-610.
- Raes, D. (2012). *The ETo calculator reference manual version 3.2*. Food and Agriculture Organization of the United States, Rome, Italy.
- Seo, D., Kim, J., and Chang, E. (2007). “Application of medium class land cover maps to AVSWAT2000 for the prediction of inflow, CBOD, TN and TP for Yongdam Lake, Korea.” *Water Science and Technology*, Vol. 55, No. 1-2, pp. 513-518.
- Singh, J., Knapp, H.V., Arnold, J., and Demissie, M. (2005). “Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 343-360.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2000). *BASINS technical note 6*. Washington, D.C., U.S.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2019). *Better assessment science integrating point and nonpoint sources (BASINS) version 4.5*. National Exposure Research Laboratory, Research Triangle Park, NC, U.S.
- Vieux, B.E. (2005). *Vflo TM 3.0 desktop user manual*. Vieux & Associates, Inc., OK, U.S.
- Yang, H. (2007). “Water balance change of watershed by climate change.” *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 42, No. 3, pp. 405-420.