



Evaluation of stream flow and water quality behavior by weir operation in Nakdong river basin using SWAT

Lee, Ji Wan^a · Jung, Chung Gil^{b*} · Woo, So Young^c · Kim, Seong Joon^d

^aPh.D candidate, Graduate School of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

^bPostdoctoral Research Associate, Agricultural and Water Resources Engineering, Texas A&M AgriLife Research Center at El Paso, 1380 A&M Circle, El Paso, Texas, USA

^cPh.D student, Graduate School of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

^dProfessor, School of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 19-011

Received: 5 March 2019; Revised: 10 April 2019; Accepted: 10 April 2019

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the stream flow and water quality (SS, T-N, and T-P) behavior of Nakdong river basin (23,609.3 km²) by simulating the dam and weir operation scenarios using SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The operation scenarios are the simultaneous release for all dam and weirs (scenario 1), simultaneous release for all weirs (scenario 2), and sequential release for the weirs with one month interval from upstream weirs (scenario 3). Before evaluation, the SWAT was calibrated and validated using 11 years (2005-2015) daily multi-purpose dam inflow at 5 locations (ADD, IHD, HCD, MKD, and MYD), multi-function weir inflow at 7 locations (SHW, GMW, CGW, GJW, DSW, HCW, and HAW), and monthly water quality monitoring data at 6 locations (AD-4, SJ-2, EG, HC, MK-4, and MG). For the two dam inflow and dam storage, the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) was 0.56~0.79, and the coefficient of determination (R²) was 0.68~0.90. For water quality, the R² of SS, T-N, and T-P was 0.64~0.79, 0.51~0.74, and 0.53~0.72 respectively. For the three scenarios of dam and weir release combination suggested by the ministry of environment, the scenario 1 and 3 operations were improved the stream water quality (for T-N and T-P) within the 3 months since the time of release, but it showed the negative effect for 3 months after compared to scenario 2.

Keywords: SWAT, Dam and weir release, Release scenario, Stream water quality

SWAT을 이용한 낙동강유역의 보 개방에 따른 하천유량 및 수질 거동 분석

이지완^a · 정충길^{b*} · 우소영^c · 김성준^d

^a건국대학교 대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료, ^bTexas A&M 박사후과정,

^c건국대학교 대학원 사회환경플랜트공학과 박사과정, ^d건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

요 지

본 연구의 목적은 낙동강유역(23,609.3 km²) 내 댐-보 연계운영 평가를 위해 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 댐보 운영 시나리오에 따른 하천 유량·수질 거동을 평가하는 것이다. 댐-보 방류시나리오는 댐-보 동시방류(시나리오 1), 보 동시방류(시나리오 2), 상류 보에서부터 1개월 간격의 순차방류(시나리오 3)로 모의되었다. 평가에 앞서 SWAT은 11년(2005-2015) 동안 5개의 다목적댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 밀양댐)과 7개의 다기능보(상주보, 구미보, 칠곡보, 강정보, 달성보, 합천보, 함안보) 및 6개의 수질관측지점(안동4, 상주2, 왜관, 합천, 남강, 물금)에 대하여 검토되었다. 유입량 및 저수량 검토결과 R²는 0.68~0.90, NSE는 0.56~0.79, RMSE는 0.94~1.74 mm/day였으며, PBIAS는 -7.52~18.08%로 분석되었고, 수질 R²는 SS는 0.64~0.79, T-N는 0.51~0.74, T-P는 0.53~0.72의 상관성을 나타냈다. 댐-보 연계운영 평가를 위해 환경부에서 제시한 연계운영 시나리오 중 3개의 시나리오를 선택하여 모의하였으며, 시나리오에 따른 수문·수질 거동을 분석하였다. 분석결과 시나리오 2에 비해 시나리오 1과 3은 연계운영 종료 이후 3개월 이전에는 수질 (T-N, T-P)개선 효과가 나타났지만, 3개월 이후로는 시나리오 2에 비해 수질이 나빠진 것으로 나타났다.

핵심용어: SWAT, 댐보 방류, 방류 시나리오, 하천수질

*Corresponding Author. Tel: +1-915-79927-5020

E-mail: chunggil.jung@ag.tamu.edu (C. G. Jung)

1. 서론

국내에서는 기후변화 등으로 인한 가뭄 홍수 피해방지, 건강한 수생태계 조성, 다양한 친수공간 조성을 목적으로 2009년 말부터 4대강 사업이 추진되었으며, 이로 인해 하천환경이 크게 변화하였다(Na *et al.*, 2015). 조류(녹조)발생과 대응 연차보고서(Ministry of Environment, 2016)에 따르면 낙동강 유역의 녹조현상은 2013년부터 해마다 발생했으며 국가적으로 가장 극심한 가뭄을 겪은 2015년의 경우 최장 161일 동안 지속되었음을 보고하였다.

4대강 사업 조사평가위원회는 녹조 저감 및 수질 개선을 위해서는 댐-보-저수지 연계운영을 통한 하천유량 증가와 보수위하향운영을 동시 적용하는 방안이 필요하고 이수, 치수, 수질 개선 등을 감안한 보 운영 기준이 필요하다고 제안한 바 있다. 이러한 수질오염에 대한 대응을 위해 환경부 및 국토교통부 등 관계기관은 댐-보 연계운영협의회 등을 통해 댐-보-저수지 연계운영 방안을 검토하였으며, 2016년 8월부터 낙동강 일부 댐 및 보에 대해 부분 방류를 실시 해 왔다.

우리나라는 여름에 편중된 계절별 강우의 특성으로 인해 평상시에는 하천유지용수의 부족으로 수질관리의 어려움이 따르고 홍수기에는 집중호우로 인해 유역에서 유입되는 토사로 인해 수질이 악화되는 문제가 고질적으로 발생 되고 있다. 다기능보 건설에 따라 수량을 확보하여 이를 이용한 수질 관리를 하기 위한 수리-수문 연계모형 통합 운영기법이 요구되고 있으며, 댐-보 연계운영을 고려하여야 하며, 수량, 수질 및 유사이동과 같은 복합적인 요인 및 다양한 시나리오를 중심으로 종합적으로 검토할 수 있는 기법의 중요성이 대두되고 있다(Ministry of Environment, 2015)

이러한 국가적 이슈로 인해 댐-보 연계운영으로 인한 수량 확보 및 수질 개선효과에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 관련연구를 살펴보면, Ahn *et al.* (2011)은 우리나라의 16개의 다기능보의 연계운영에 관한 연구를 진행하였으며, Kim (2012)은 수량과 수질을 고려한 낙동강 수계 댐-보 연계운영을 위한 수질사고 시뮬레이션 모형(Water Pollution Accident Response Management System, WARMS)과 하천수질예측 시스템(Water Quality Forecasting System) 모형 등 수질을 고려한 3차원 모형과의 연동 및 연계를 통한 분석방법을 제안하였다. Ahn *et al.* (2014)은 HEC-Resim을 이용하여 낙동강 수계 댐과 다기능보의 연계운영을 통한 용수공급 효율화를 정량화하였고, Jang (2014)은 HEC-Resim과 PRMS를 이용하여 낙동강 유역 내 개별 공급능력을 개별적으로 평가한 후, 댐 간 연계 공급조건으로 모의 하여 수계단위 공급능력을 평가한 바

있다. Lee *et al.* (2014)은 CE-QUAL-W2 모형을 이용하여 낙동강 수계 내 보간 연계운영을 통한 낙동강 수질개선 효과 분석을 실시하여 보간 연계운영을 통한 수질 개선 효과를 정량적으로 도출한 바 있다. Ryu *et al.* (2015)은 수질측정자료를 통해 낙동강 보 건설로 인한 수질환경 변동특성 분석결과를 제시하였다.

그러나, 유역관리 측면에서 댐-보 연계운영에 따른 수문-수질 거동 분석은 우선적으로 대비해야 할 중요한 문제임에도 불구하고 2017년 국가 유관기관들이 발표한 댐-보 운영 시나리오를 수문-수질 모형에 적용하여 시나리오별 수문, 수질 개선효과를 분석한 연구사례는 전무하다.

따라서 본 연구의 목적은 댐-보 연계운영 평가를 위해 국토부, 환경부 및 농식품부에서 제시한 4개의 연계운영 시나리오 중 3개의 시나리오(① 댐+보 동시방류+제약수위 유지, ② 보 동시방류+제약수위 유지, ③ 보 순차방류+제약수위 유지)를 선택하여 시나리오에 따른 방류량 자료를 구축하여 모의하고 시나리오에 따른 하천 유량-수질 거동을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 낙동강유역으로 전 국토의 25%를 차지하며, 영양분의 증가, 보에 의한 유속 감소 및 체류시간 증가 등으로 상수원 및 보 구간의 녹조 현상 빈도가 증가하고 있다. 유역면적은 23,609.3 km², 유로연장은 510.36 km로 낙동강 유역 내에는 7개의 다목적 댐인 안동댐(ADD), 임하댐(IHD), 군위댐, 부항댐, 합천댐(HCD), 남강댐(NKD), 밀양댐(MYD)과 8개의 다기능보인 상주보(SJW), 낙단보, 구미보(GWM), 칠곡보(CGW), 강정고령보(GJW), 달성보(DSW), 합천창녕보

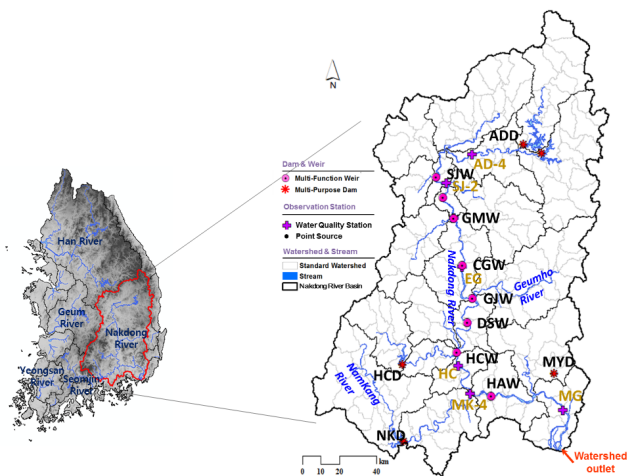


Fig. 1. Study watershed and monitoring stations

(HCW), 창녕함안보(HAW)가 설치되어 운영 중이다. 유역 전체 면적의 68.4%가 산림으로 이루어져 있으며, 논이 10.4% 밭은 7.2%를 차지하며 나머지 도시와 초지, 나지 등은 0.1%~6.9%를 차지한다. Fig. 1은 SWAT 모형에 적용하기 위해 분할된 195 개의 소유역과 댐, 보 및 수질 검·보정지점을 나타낸 것이다.

2.2 SWAT 모형의 개요

본 연구에서는 장기간에 걸친 유역의 일 유출을 모의하기 위하여 미농무성 농업연구소(USDA, Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT (Arnold *et al.*, 1996)을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준분포형 연속강우 유출모형으로서, 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출을 모의할 수 있다. 모형은 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산량, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrological Response Unit, HRU) 별로 계산할 수 있다(Neitsch *et al.*, 2001).

SWAT 모형에서 일별 유출량은 SCS (Soil Conservation Service) CN (Curve Number) 방법으로 산정하고 측방유입량은 Kinematic Storage Model을 이용하며, 침투는 토층을 최대 10개 까지 세분화 하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 토양침식은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)에 의하여 계산되며, 인, 질소와 같은 유기성 화학물질의 이동량을 모의할 수 있다. 수체는 하천과 저수지를 의미하며 유량, 퇴적물, 영양염류, 유기성 화학물질의 반응 등이 고려된다(Arnold *et al.*, 1996)

2.3 자료수집 및 분석 방법

2.3.1 GIS 및 기상, 수문입력자료

SWAT 모형의 GIS 공간자료로 DEM (Digital Elevation Model)과 토양도는 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 30 m×30 m DEM, 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다(Figs. 2(a) and (b)). 토지이용도는 환경부의 2008년 중분류 자료를 이용하였으며, 이를 9개 항목(활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 주거지, 논, 밭, 초지, 나지, 수역)으로 분류하여 모형에 입력하였다(Fig. 2(c)). 낙동강유역 내 토양종류에서 미사질양토(Silt loam)와 양토(Loam)가 각각 40%, 30%로 높은 비율을 차지하고 있으며, 토지이용은 산림이 68%, 농지는 18%로 이루어져 있다.

SWAT의 검보정을 위한 기상자료는 34개(충주, 울진, 추풍령, 안동, 상주, 포항, 대구, 울산, 창원, 부산, 통영, 진주, 태백, 보은, 남원, 장수, 김해시, 북창원, 양산시, 의령군, 함양군, 봉화, 영주, 문경, 청송군, 영덕, 의성, 구미, 영천, 경주시, 거창, 합천, 밀양, 산청) 강수량(mm), 최고 및 최저기온(°C), 풍속(m/sec), 상대습도(%), 일사량(MJ/m²) 기상관측소의 14년(2005~2017)동안의 일자료를 사용하였으며, 이 기간의 안동댐과 임하댐, 합천댐, 밀양댐 및 남강댐 일별 댐 유입량과 저수량 자료, 상주보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 합천창녕보, 창녕함안보는 5년 5개월(2012년 8월~2017년 12월) 동안의 일별 보유입량과 저수량 자료를 수집하여 사용하였다(K-water, 2016).

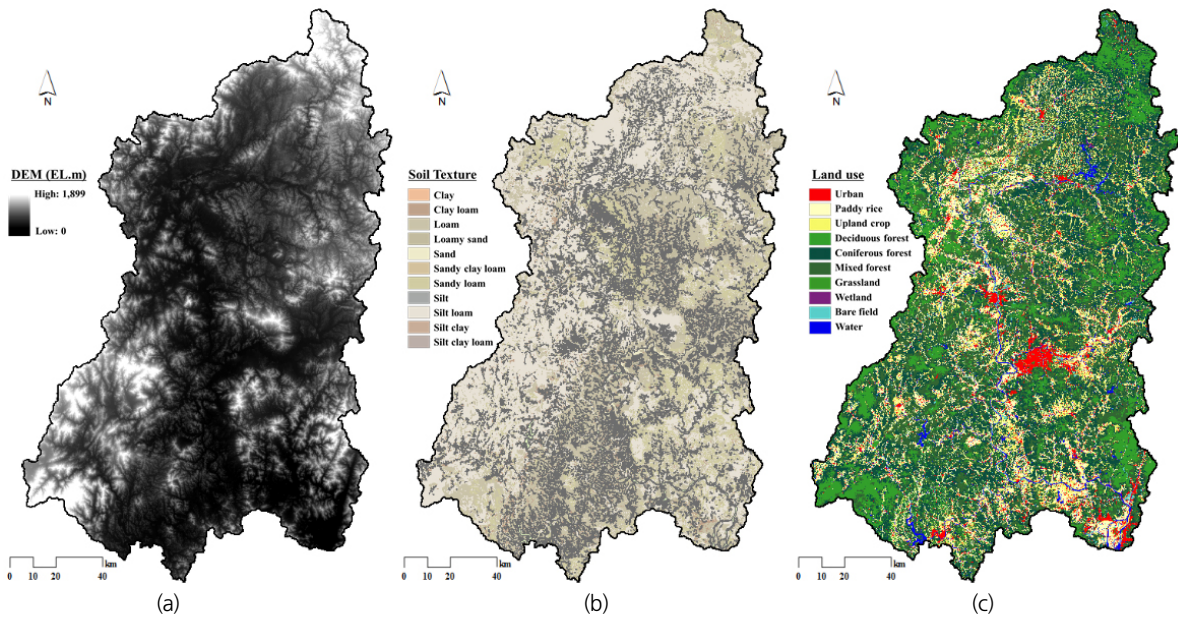


Fig. 2. GIS data of the Nakdong River Basins (a) DEM, (b) Soil properties, and (c) land cover

Table 1. A method of operation of dam-weir-reservoir system (Ministry of Environment, 2017)

Scenario	Dam/Reservoir release rule		Weir operation rule		
	Storage* (10 ⁶ ton)	Release period (days)	Drawdown	Maintenance period (days)	Drawdown/maintenance method
① Dam·reservoir release+ weir operation (at once)	81	5	M.L→ pumping/ groundwater C.L	74	• Weir level drawdown at once • Maintain after drawdown
② weir operation (at once)	-	-	M.L→ pumping/ groundwater C.L		• Weir level drawdown at once • Maintain after drawdown
③ weir operation (in order)	-	-	M.L→ pumping/ groundwater C.L		• Weir drawdown (in order by one month) • Maintain after drawdown
④ Iteration of ponding water in rainfall after weir operation (at once)	-	-	M.L→ pumping/ groundwater C.L (iteration)	0~30 (each)	• Weir level drawdown at once • ponding water in rainfall (2 to 3 iterations)

* (Release dam) Andong·Imha·Youngju

** M.L: Management Level

*** C.L: Constraint Level

2.3.2 댐·보 운영 시나리오 자료 구축

본 연구에서 활용한 댐·보 운영 시나리오는 2017년 3월 20일 환경부, 국토교통부, 농림축산식품부가 발표한 댐·보·저수지 연계운영 방안 연구용역 결과 발표 자료를 활용하였다. 관계부처에서 제시한 댐·보·저수지 연계운영 시나리오는 댐·저수지의 비축수량이 있는 경우와 비축수량이 없는 경우로 구분하여 설정하였다(Table 1).

시나리오 1의 경우 상류의 댐 및 저수지에 비축수량이 있을 경우 적용하는 시나리오로, 보 수위를 제약수위까지 낮춘 후 댐·저수지의 비축수량을 방류하도록 설정되어 있다. 시나리오 2~4는 상류 댐·저수지에 비축수량이 없을 경우 적용하는 것으로 시나리오 2의 경우 유역 내에 설치된 보의 수위를 제약수위까지 동시에 낮춘 후 모의 실험 기간 동안 유지하도록 하며, 시나리오 3의 경우에는 보 수위를 상류 보에서 하류 보로 순차적으로 제약수위까지 낮춘 후 모의실험 기간동안 유지하는 시나리오이다. 시나리오 4는 시나리오 2와 동일하나 강우 시에는 담수하고 이를 반복 시행하도록 설정되어 있다.

본 연구에서는 4개의 시나리오 중 1~3번 시나리오를 선택하여 보 방류를 시작한 2016~2017년에 대해 SWAT 모형 내 저수지 입력자료인 일별 방류량 자료를 시나리오별로 구축하여 모의하고 결과를 분석하였다. 댐 방류량 시나리오의 경우 댐·보·저수지 연계운영 방안 연구용역 결과에서 제시한 바와 같이 안동, 임하댐에 적용하였고, 보 방류량 시나리오는 2017년 관측자료를 기준으로 보 방류가 관측된 강정고령보, 합천창녕보, 창녕함안보에 대하여 적용했다. Table 1의 4개 시나리오 중 시나리오 1, 2, 3에 대한 저수지 및 보 방류량 자료를 구축하여 검·보정된 SWAT 모형에 적용하였다. 선정한 3개의 시나리오 중 2번 시나리오의 경우 2017년 6월 3일부터 낙

동강에 실제로 적용되어 운영됨에 따라 관측자료 그대로를 적용하여 분석하였고, 시나리오 1은 Table 1과 같이 2017년 6월 3일을 시작으로 5일 동안 안동댐, 임하댐과 강정고령보, 합천창녕보, 창녕함안보의 방류량을 조정했다. 시나리오 3은 상류에서부터 1개월(30일) 간격으로 보를 순차 방류하는 시나리오로 2017년 6월 3일 강정고령보 방류를 시작으로, 2017년 7월 3일에는 합천창녕보, 2017년 8월 3일에는 창녕함안보가 방류를 시작하여 8월 31일까지 유지하도록 방류량 자료를 구축했다.

2.3.3 연구 방법

본 연구의 방법은 Fig. 3과 같으며, SWAT모형의 입력자료 및 검·보정 지점에 대한 관측자료를 수집하였다. 댐 및 보에 대한 제원과 방류량자료를 구축하여 입력한 후 유역의 상류에서 하류로 순차적으로 댐 및 보의 유입량 및 저수량을 검·보정을 수행했다. SWAT 모형은 저수지 모듈에 댐의 제원과 방류량을 입력하여 운영자료 기반의 모의가 가능하나 보의 경우 댐과는 달리 자연월류가 가능해야 하는 구조물의 특성이 반영되어야 함에 따라 선행연구(Ahn *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2018)을 참고하여 SWAT 내부의 모듈을 개선하였다.

My water (K-water, 2016)를 통해 제공되고 있는 보의 방류량 관측자료는 소수력, 가동보, 배수문(고정보), 자연월류, 어도 등으로 방류되는 모든 유량을 합한 것으로, 총 방류량을 모델에 입력하게 될 경우, 하천의 유량이 과다하게 산정된다. 따라서 상류로부터 유입되는 총 유입량에서 총 방류량을 제외한 나머지를 실제 방류량으로 보고 이를 고려할 수 있도록 SWAT 내부의 모듈을 수정하였다.

수질 검보정을 위한 관측자료는 환경부 물환경정보시스템에서 제공하고 있는 수질측정망 6개 지점의 자료를 수집하였

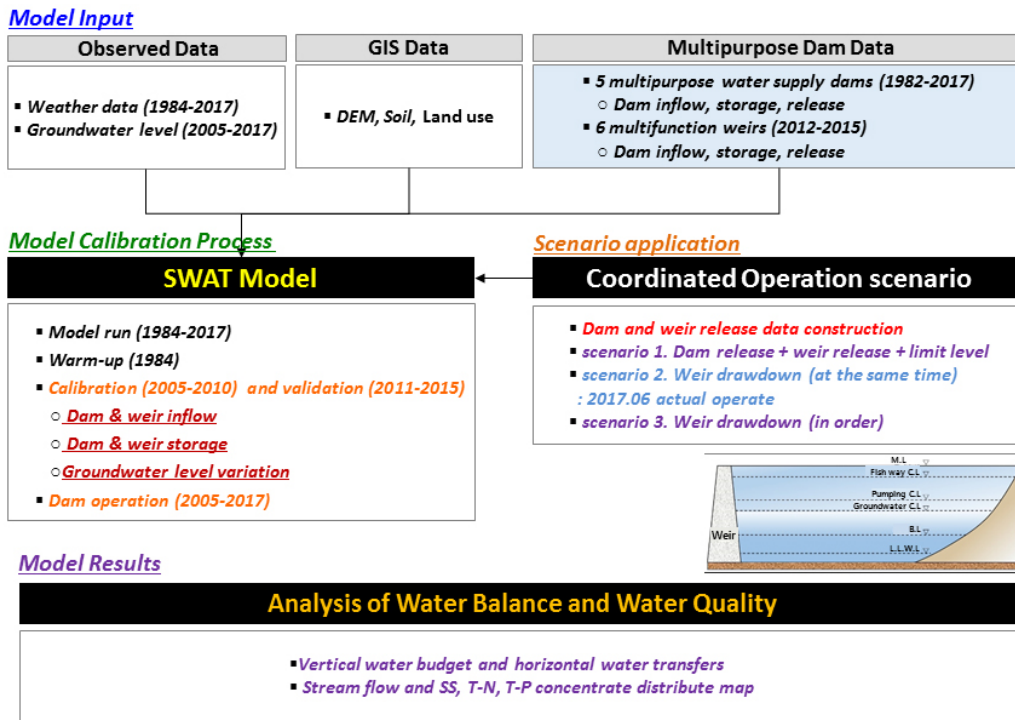


Fig. 3. Flowchart of this study

다. 매개변수 추정에는 수문·수질요소를 밸런스 있게 모의하기 위해 선행연구를 토대로 최적의 매개변수를 선정하여 시행오차방법(trial and error method)을 통해 모형에 적용했다. 댐·보 연계운영 시나리오에 따른 하천 유량 및 수질의 거동평가를 위해 실제 적용되어 운영되었던 시나리오 2를 기준으로, 시나리오 1과 3의 변화량을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT 모형의 검·보정

본 연구에서는 모형의 검·보정에 앞서 낙동강유역에 대한 매개변수 민감도를 수행하였으며, 이를 통해 최적의 매개변수를 선정하였다. Table 2는 모형의 보정 및 검증에 사용된 매개변수를 정리한 것으로 지표유출 관련 매개변수는 CH_N (2), 증발산량 관련 매개변수는 ESCO, 지하수 관련 매개변수는 GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF, REVAPMN, GW_REVAP이다. 저수지 운영매개변수는 7개(RES_ESA, RES_EVOL, RES_PSA, RES_PVOL, RES_VOL, RES_K, EVRSV)를 선정하고 매개변수의 추정과 검·보정 방법은 Ahn *et al.* (2016), Kim *et al.* (2018)과 Lee *et al.* (2018)이 제안한 방법을 적용하였다.

SWAT모형의 보정기간은 5년(2005~2009), 검증기간은

6년(2010~2015)으로 설정하였으나, 6개의 보(상주보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 합천창녕보, 창녕함안보)는 2012년 8월부터 운영됨에 따라 2013년을 보정, 2014~2015년을 검증기간으로 하여 분석을 수행하였다. 모형의 적용성 평가는 coefficient of determination (R^2), Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency (NSE), root-mean square error (RMSE), percent bias (PBIAS)를 사용했다. R^2 은 1에 가까울수록 관측값과 모의 값이 완벽하게 일치함을 나타내고, NSE는 $-\infty$ 에서 1까지의 범위를 통해 모형의 효율을 평가하는데 0보다 클수록 모형의 적용성이 높다고 설명할 수 있다(Mkhwanazi *et al.*, 2012). RMSE는 실측치와 모의치의 오차를 나타내는 것으로 0에 가까울수록 오차가 작음을 의미한다. PBIAS는 관측치와 모의치의 오차를 퍼센트로 나타낸 것으로 오차값이 작을수록 모형의 효율이 높음을 나타낸다(Lee *et al.*, 2018).

Fig. 4는 10개의 댐·보 지점에 대한 유입량 및 저수량 검·보정결과를 나타낸 것이며, Fig. 5는 6개의 하천수 수질관측망 지점에 대한 수질(SS, T-N, T-P) 검·보정 결과를 정리한 것이다. 검·보정 결과에 따른 통계분석 값은 Table 3에 정리하였다. 댐 유입량 통계분석 결과를 살펴보면, 전체기간에 대한 R^2 은 0.68~0.90, NSE는 0.56~0.79로 분석되었다. RMSE는 0.94~1.74 mm/day 였으며, PBIAS는 -7.52~18.08%의 통계치를 보였고 모든 검·보정 지점에 대해 통계분석 결과가 통계적으로

유의한 수준인 것으로 분석되었다. 전체기간에 대한 수질 R² 결과를 살펴보면, SS는 0.64~0.79, T-N는 0.51~0.74로 분석되었으며, T-P는 0.53~0.72의 상관성을 나타내었고 %Diff는

Donigian (2000)이 제시한 35% 이하 조건을 만족하는 수준으로 보정되었다. 본 연구에서 구축한 SWAT 모델은 QULE2E 모듈을 고려하지 않았다.

Table 2. The calibrated parameters for SWAT model

Parameter	Definition	Range	YDD	SJW	GMW	CGW	CJW	HCW	HCD	MYD	NKD	HAW
CN2	SCS curve number for moisture condition	35 to 98	+5	-	-	+5	+5	-	-	+10	+10	+5
CH_N (2)	Manning's "n" value for main channel	0.01 to 30	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.014	0.04	0.014	0.04
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0.95	0.75	0.75	0.75	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
CANMX	Maximum canopy storage	0 to 100	11	-	-	-	-	-	-	8	7	-
SLOIL	Slope length of lateral subsurface flow (m)	0 to 150	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0 to 180	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0 to 500	90	31	31	50	80	70	150	70	150	70
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0 to 5000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	500	1000	1000
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.024	0.048	0.048
RES_ESA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the emergency spillway (ha)	-	5,617	335	374	400	954	328	2,636	218	549	3,621
RES_EVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the emergency spillway (10 ⁴ m ³)	-	124,800	2,951	5,599	8,044	9,719	7,453	79,000	7,624	10,789	30,920
RES_PSA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the principal spillway (ha)	-	5,384	305	344	370	924	298	2,429	205	519	2,810
RES_PVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the principal spillway (10 ⁴ m ³)	-	121,642	2,751	5,273	7,532	9,234	6,996	72,407	6,990	10,093	18,237
RES_VOL	Initial reservoir volume (10 ⁴ m ³)	-	58,290	2,744	5,257	7,517	8,655	6,880	34,652	4,386	10,053	12,706
RES_K	Hydraulic conductivity of the reservoir bottom (mm/hr)	0 to 1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
EVRSV	Lake evaporation coefficient	0 to 1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Parameter	Definition	Range	AD-4	SJ-2	EG	HC	MK-4	MG				
USLE_P	USLE equation support practice factor	0 to 1	0.1	0.5	1	1	1	1				
SPCON	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	0.0001 to 0.01	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001				
SPEXP	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	1 to 1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5				
SHALLST	Initial depth of water in the shallow aquifer (mm)	0 to 5000	1000	2000	1000	1000	1000	1000				
LAT_ORGN	Organic N in the baseflow (mg/l)	0 to 200	0.17	20	20	80	10	20				
NPERCO	Nitrate percolation coefficient	0 to 1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25				
SDNCO	Threshold value of nutrient cycling water factor for denitrification to occur	0 to 1	1	1	1	1	1	1				
RAMMO_SUB	Atmospheric deposition of ammonium	0 to 1	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95				
RCN_SUB	Atmospheric deposition of nitrate	0 to 2	2	2	2	2	2	2				
GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin (mg P/L or ppm)	0 to 1000	0.018	0.1	0.1	0.4	0.1	0.4				
LAT_ORGP	Organic P in the base flow (mg/L)	0 to 200	-	-	-	4	-	-				

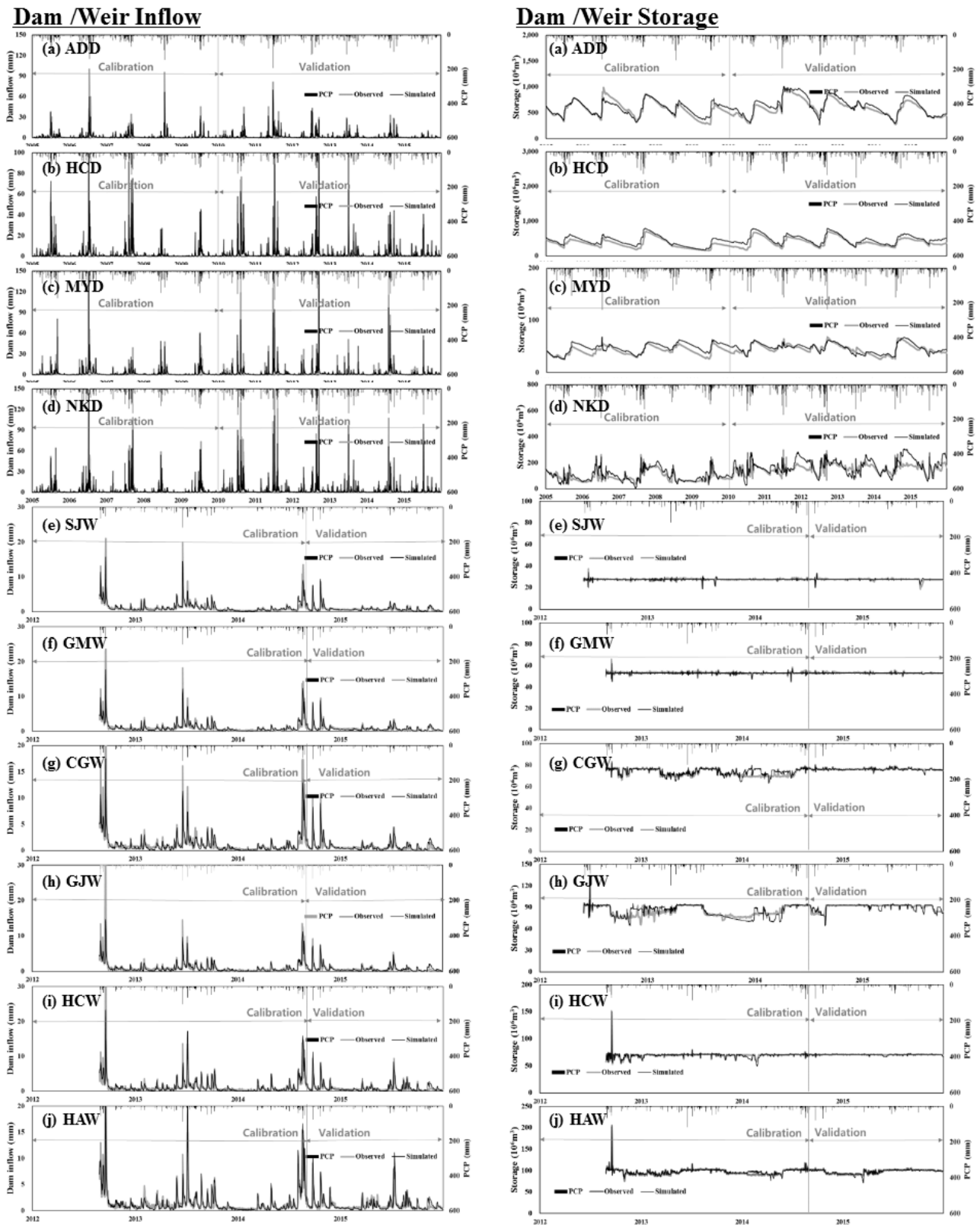


Fig. 4. The calibration and verification results for dam/weir inflow (mm) and storage (10^6m^3)

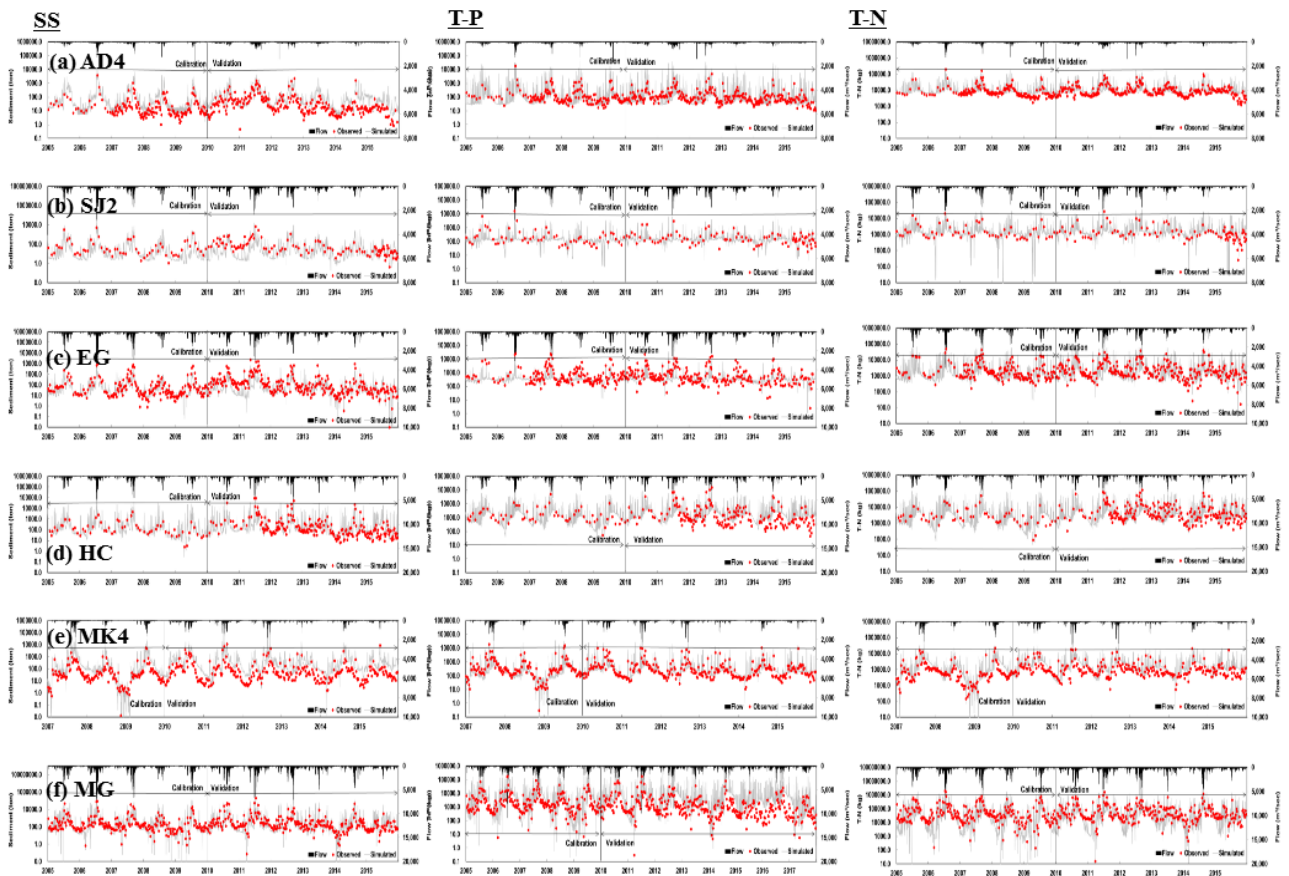


Fig. 5. The calibration and verification results for water quality (SS, T-N, T-P)

Table 3. Calibration and validation results for dam inflow at 10 and water quality at 6 calibration point

Model output	Evaluation criteria	ADD	HCD	MYD	NKD	SJW	GMW	CGW	GJW	HCW	HAW
Dam inflow (mm)	R ²	0.73	0.90	0.90	0.84	0.68	0.73	0.75	0.74	0.80	0.87
	NSE	0.60	0.65	0.79	0.64	0.56	0.63	0.64	0.65	0.61	0.76
	RMSE (mm/day)	1.72	1.61	1.40	1.74	1.30	1.39	0.98	0.94	1.45	1.24
	PBIAS (%)	18.08	11.40	7.43	-7.52	12.33	15.21	6.50	8.47	12.87	11.52
Dam storage (10 ⁶ m ³)	R ²	0.93	0.90	0.82	0.71	0.56	0.73	0.75	0.74	0.80	0.87
	NSE	0.99	0.65	0.98	0.93	1.00	0.63	0.64	0.65	0.61	0.76
	RMSE (mm/day)	1.38	1.61	0.48	0.89	0.15	1.39	0.98	0.94	1.45	1.24
	PBIAS (%)	6.05	20.95	8.08	-2.29	-0.63	15.21	6.50	8.47	12.87	11.52
Model output	Evaluation criteria	AD4	SJ2	EG	HC	MK2	MG				
SS (ton)	R ²	0.66	0.79	0.66	0.64	0.72	0.65				
	% Diff.	13.9	19.7	25.4	19.9	12.8	2.6				
T-N (kg)	R ²	0.62	0.51	0.52	0.74	0.63	0.58				
	% Diff.	2.50	23.8	2.4	16.9	29.8	13.4				
T-P (kg)	R ²	0.57	0.53	0.70	0.72	0.56	0.63				
	% Diff.	5.70	13.5	8.5	9.8	0.4	31.7				

3.2 댐-보 연계운영 시나리오에 따른 2017년 하천유량 및 수질 거동 분석

본 연구에서는 2017년에 대하여 댐-보 연계운영 시나리오 입력자료를 구축하여 하천유량 및 수질의 거동을 표준단위유역별로 검토하였다. 모의에 앞서 SWAT 모형의 안정화를 위해 2005년부터 2016년까지는 실제 관측자료를 그대로 적용하였다. Fig. 6은 2017년 연평균에 대한 시나리오별 하천유량 및 수질모의 결과를 정리한 것으로 각각의 모의 결과와 시나리오 2 대비 변화량을 공간분포하여 도시한 것이다. 변화량 분포도는 붉은색으로 갈수록 시나리오 2 대비 증가, 초록색으로 갈수록 감소함을 의미한다.

하천유량의 경우 시나리오 2의 경우 연평균 낙동강유역 전체의 유량은 25.9 m³/s로 분석되었으며, 시나리오 1은 댐, 보 동시 방류로 인해 하천 유량이 시나리오 2에 비해 연평균 0.1

m³/s 증가한 것으로 나타났다. 보 순차 방류를 모의하는 시나리오 3은 합천보부터 낙동강 하류까지의 연평균 하천 유량이 감소함에 따라 연평균 유량이 시나리오 2에 비해 0.1 m³/s 감소한 것으로 분석되었다 (Fig. 6(a)).

SS 시나리오별 모의 결과를 살펴보면 시나리오 2는 연평균 23.2 mg/L로 모의되었으며, 시나리오 1의 경우 연평균 SS는 23.0 mg/L로 시나리오 2에 비해 수질 농도가 감소한 것으로 나타되었으나, 구간별로 수질 개선 및 악화 현상이 상이하게 분석되었다. 안동, 임하댐 및 남강댐의 경우 댐 하류인 상주보~칠곡보, 남강댐 하류~함안보 구간의 SS 농도가 증가한 반면, 강정보~달성보 구간의 농도는 감소한 것으로 분석되었다. 시나리오 3의 경우 낙동강 유역에서부터 하류까지 보가 순차방류 됨에 따라 낙동강 하류인 합천보~낙동강하구언의 SS 농도가 감소하였고, 연평균 농도는 22.7 mg/L로 시나리오 2에 비

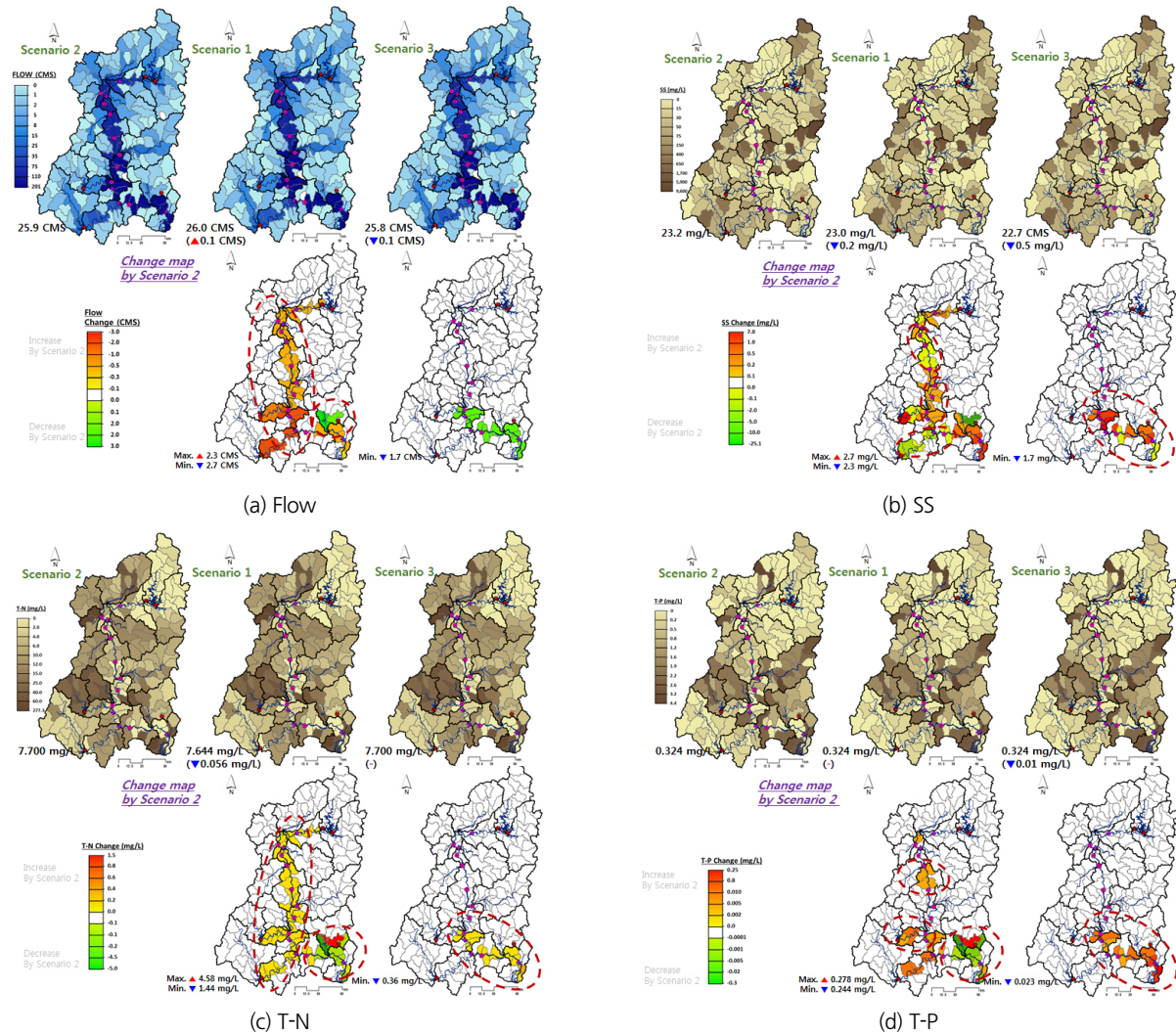


Fig. 6. The streamflow and water quality behavior in 2017

해 SS 수질 개선효과가 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 6(b)).

T-N의 모의결과를 살펴보면 시나리오 1은 시나리오 2 대비 댐-보 방류구간에서 농도가 감소한 것으로 분석되었으나, 낙동강하류인 합천보~낙동강하구언의 농도는 증가한 것으로 모의되었다. 시나리오 3의 경우 SS 분석결과와 마찬가지로 낙동강 유역에서부터 하류까지 보가 순차방류 됨에 따라 낙동강 하류인 합천보~낙동강하구언의 T-N 농도가 감소하였고, 연평균 농도는 13.52 mg/L로 모의 되었다(Fig. 6(c)).

T-P의 모의결과를 살펴보면 시나리오 1은 시나리오 2 대비 구미보~칠곡보, 합천댐~합천보 구간에서 농도가 감소한 것으로 분석되었으나, 낙동강하류인 합천보~낙동강하구언의 농도는 T-N 모의 결과와 마찬가지로 증가한 것으로 모의되었다. 시나리오 3의 경우 낙동강 하류인 합천보~낙동강하구언의 T-P 농도가 감소하였고, 특히 농도의 변화가 가장 크게 나타난 낙동강하구언의 경우 시나리오 2 대비 0.023 mg/L 감소한 것으로 모의 되었다(Fig. 6(d)).

Fig. 7은 댐-보 연계 운영 시나리오가 적용되었던 2017년 6월부터 12월까지의 월별 하천유량 및 수질(SS, T-N, T-P)의 변화율을 도시한 것으로, 여기서 변화율은 2017년 실제 연계운영 실적인 시나리오 2 대비 시나리오 1과 3의 변화율을 의미한다.

시나리오 1의 경우 댐-보 동시방류가 시작된 6월의 하천유량과 SS가 시나리오 2에 비해 각각 18.93%, 7.64% 급증한 것

으로 분석되었으며, T-N과 T-P는 각각 0.4%, 1.01% 감소한 것으로 분석되었다. 이후 7~9월은 시나리오 2에 비해 SS, T-N, T-P의 개선효과가 더 큰 것으로 나타났으나, 10월 이후로는 시나리오 2에 비해 T-N, T-P의 농도가 각각 0.22%, 0.34% 상승하였다.

상류에서부터 보를 순차 방류하는 시나리오 3의 경우, 6월의 하천유량은 시나리오 2에 비해 6.43% 작게 모의 되었으나, 7월은 방류량이 증가하여 하천 유량이 0.97% 증가한 것으로 모의 되었다. 7월부터 9월까지 수질(SS, T-N, T-P)는 경우 시나리오 2에 비해 각각 -0.21%, -0.02%, -0.05% 변화하였다.

종합해 보면 시나리오 1은 시나리오 2에 비해 댐 방류 종료 및 보 동시 개방 이후 3개월까지 수질 개선 효과가 나타났다. 다만, 시나리오 운영 이후 시간이 지날수록 수질이 나빠지는 것을 확인할 수 있었다. 즉 시나리오 1은 댐 보를 동시에 방류하여 하천유량의 변화가 단기간에 가장 크게 나타나 낙동강 본류의 정체된 유속을 즉각적으로 증가시켜 다른 시나리오에 비해 가장 단기간에 수질 개선효과를 나타내는 시나리오로 판단된다. 시나리오 3의 경우 시나리오 2에 비해 순차방류 시점인 6월부터 8월까지의 수질개선 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 순차방류가 종료된 이후 10월~12월의 수질개선 효과는 시나리오 2에 비해 떨어짐을 확인할 수 있었다.

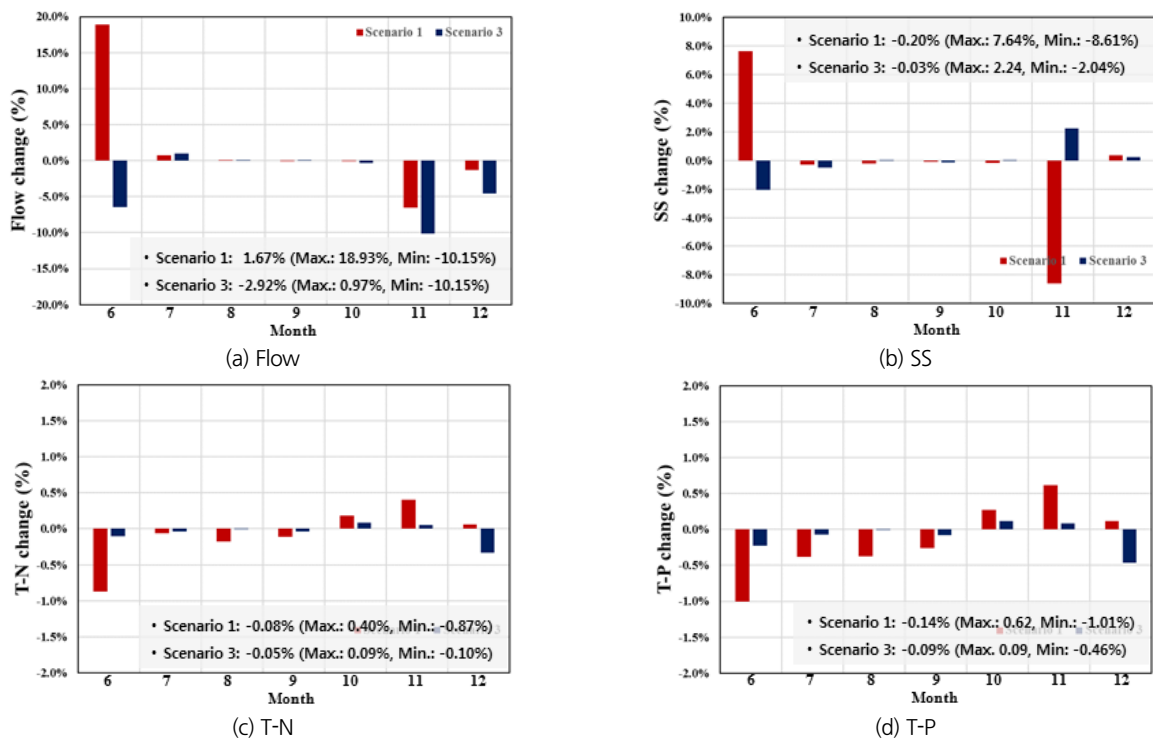


Fig. 7. Monthly change of streamflow and water quality

4. 요약 및 결론

본 연구는 물리적 기반의 준분포형 연속강우유출모형인 SWAT모형을 이용하여 낙동강 수계(23,690.3 km²) 내에 있는 다목적 댐 및 다기능 보의 운영자료를 이용한 검·보정을 시도하여 신뢰성 있는 수문순환을 재현하였고 댐-보 연계운영 시나리오 적용을 위해 시나리오별 방류량 자료를 구축하여 시나리오별 하천유량 및 수질 개선효과를 검토하였다. 본 연구에서 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 낙동강유역 내 10개의 댐, 보 지점에 대한 유입량 및 저수량 검·보정결과 R²는 0.68~0.90, NSE는 0.56~0.79로 분석되었다. RMSE는 0.94~1.74 mm/day 였으며, PBIAS는 -7.52~18.08%의 통계치를 보였고 수질 R² 결과를 살펴보면, SS는 0.64~0.79, T-N는 0.51~0.74로 분석되었으며, T-P는 0.53~0.72의 상관성을 나타내었다. 모든 검·보정 지점에 대해 통계분석 결과가 통계적으로 유의한 수준인 것으로 분석되었다.
- 2) 댐-보 운영 시나리오는 2017년 3월 20일 환경부, 국토교통부, 농림축산식품부가 발표한 댐-보-저수지 연계운영 방안 연구용역 결과 발표자료를 활용하여 4개의 시나리오 중 1~3번 시나리오를 선택하여 보 방류를 시작한 2016~2017년에 대해 SWAT 모형 내 저수지 입력자료인 일별 방류량 자료를 시나리오별로 구축하여 모의하고 결과를 분석하였다.
- 3) 2017년 연평균에 대한 시나리오별 하천유량 모의 결과, 시나리오 2의 경우 연평균 낙동강유역 전체의 유량은 25.9 m³/s로 분석되었으며, 시나리오 1은 시나리오 2에 비해 연평균 0.1 m³/s 증가한 것으로 나타났고 시나리오 3은 0.1 m³/s 감소한 것으로 모의되었다. 수질분석결과 SS, T-N, T-P 모의 결과 모두 시나리오 2에 비해 감소한 것으로 분석되었다.
- 4) 댐-보 연계 운영 시나리오가 적용되었던 2017년 6월부터 12월까지의 월별 하천유량 및 수질(SS, T-N, T-P)의 변화를 분석한 결과 시나리오 1은 시나리오 2에 비해 댐 방류 종료 및 보 동시 개방 이후 3개월까지 수질 개선 효과가 나타났다. 다만, 시나리오 1의 경우 댐-보 연계운영 직후 수질 개선효과가 즉각 나타났으나, 4개월 이상 경과 후 수질이 악화되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 2017년 다부처 공동연구를 통해 발표된 댐-보-저수지 연계운영 방식을 SWAT 모형에 적용하여 시나리오별 수질개선 효과를 분석하였다. 발표된 연구결과를 기반으로 다목적댐 2개(안동댐, 임하댐)와 2017년 실제로 보를 개방한 3개(강정고령보, 합천창녕보, 창녕함안보)의 시설물에 대

한 댐-보 연계운영 시나리오를 모의하여 수질개선 효과를 분석한 결과 수질이 악화된 지역은 낙동강 하류로 분석되었다. 낙동강 유역 내에는 안동댐, 임하댐 이외에도 합천댐, 밀양댐, 남강댐이 설치되어 운영중에 있다. 특히 낙동강 유역 내 다목적댐 중에서 유효저수용량이 두 번째로 큰 합천댐(790 10⁶m³)의 경우 낙동강 하류에 위치해 있어, 댐-보 연계 운영시 함께 고려되었다면 하류의 수질 개선에도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 또한 수질 개선효과는 방류 시나리오별로 수질 개선 효과 기간이 상당히 나타남에 따라, 기존에 수립되어 있는 방류 시나리오 이외에도 댐-보 연계운영 시에 방류일수와 댐의 방류량, 연계운영 대상 시설물에 대한 추가 고려를 통해 유역 내에서 가용한 수자원에 대한 연계운영 방안을 다양하게 수립하고 분석하여 최적의 댐-보연계운영 방안을 도출해야 할 것으로 판단된다.

수리·수문 연계모형을 통한 체계적인 하천 수질관리는 치수·이수·환경을 고려한 종합적인 하천관리의 기반이 되며, 이러한 학문적 연구결과 검증 및 현장에서의 적용을 위한 수질관리는 필수적이다(Ministry of Environment, 2015). 본 연구의 결과는 실제 적용한 연계운영 시나리오 대비 다른 시나리오를 비교 검토함으로써 댐-보 연계운영 전, 후에 따른 수질개선 효과를 분석하지 못한 한계가 있지만, 댐-보 연계운영 시나리오에 따른 표준단위유역별 하천유량 및 수질의 거동을 파악하고 예측하는 방법을 제시함으로써 댐-보 연계운영을 위한 의사결정 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 연구는 하천환경변화에 따른 댐 보 운영방안을 고려한 수문·수질 모형을 구축하고 이를 모델링함으로써 향후 실제 연계운영 시나리오에 따른 결과의 지속적인 보완과 질적 향상이 가능하며, 기 구축된 실시간 데이터 자료와의 연계를 통해 효율적인 하천환경변화를 고려한 댐보 연계운영에 따른 수문·수질 거동평가가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호RE201901080).

References

- Ahn, J. M., Cha, K. U., Ryou, K. S., and Lyu, S. (2011). "Study of the lower duration curve characteristic by reservoir and weir couple-operating system in geum river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 4, pp. 285-293.

- Ahn, J. M., Im, T. H., Lee, I. J., Lee, K. L., Jung, K. Y., Lee, J. W., Cheon, S. U., and Park, I. H. (2014). "A study on efficiency of water supply through conjunctive operation of reservoirs and multi-function weirs in the Nakdong river." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 30, No. 2, pp. 138-147.
- Ahn, S. R., Lee, J. W., Jang, S. S., and Kim, S. J. (2016). "Large scale SWAT watershed modeling considering multi-purpose dams and multi-function weirs operation -for Namhan river basin-." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 58, No. 4, pp. 21-35.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Srinivasan, R., and King, K. W. (1996). *SWAT manual*. USDA. Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas.
- 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.
- Jang, C. H. (2014). *A study on the reevaluation of dams and coordinated operation with weirs in the Nakdong river basin*. Masters dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Kim, S. K. (2012). "Coordinated operation of weirs and reservoirs of Nakdong River basin after the four river restoration project." *Water for future*, Vol. 45, No. 6, pp.11-17.
- Kim, D. R., Lee, J. W., Jung, C. G., and Kim, S. J. (2018). "Calibration of water quality parameters in SWAT considering continuous drought periods 2014~2015." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 60. No. 1, pp. 11-20.
- K-water (2016). South Korea, accessed 28 February 2019, <<http://www.water.or.kr>>.
- Lee, J. W., Jung, C. G., Kim, D. R., and Kim, S. J. (2018). "Assessment of future climate change impact on groundwater level behavior in Geum river basin using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 3, pp. 247-261.
- Lee, S. J., Kim, J. W., Lee, H. J., and Han, J. H. (2014). "Analysis of water quality improvement of conjunctive operation of weirs in the Nakdong river." *Korean Society of Civil Engineers 2014 Convention*, pp.195-196.
- Ministry of Environment (2015). *A Study on the Water Quality Management and Construction of Watergate Link Model Considering Beam and Repair Operation law preparation*. Research report.
- Ministry of Environment (2016). *Occurrence of algae (green algae) and corresponding annual report*.
- Ministry of Environment (2017). *Optimal Linkage Operation Plan of Dam-Weir-Reservoir*. Research report.
- Mkhwanazi, M., Chavez, J. L., and Rambikur, E. H. (2012). "Comparison of Large aperture scintillometer and satellitebased energy balance models in sensible heat flux and crop evapotranspiration determination." *International Journal of Remote Sensing Applications*, Vol. 12, pp. 24-30.
- Na, E. H., Park, S. Y., Kim, J. H., Im, S. S., and Kim, K. H. (2015). "A study on spatial and temporal patterns of water quality in the middle area of the Nakdong river, Korea." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 31, No. 6, pp. 723-731.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). *Soil and water assessment tool; the theoretical documentation*. U.S Agricultural Research Service, pp. 340-367, Temple, Texas.
- Ryu, S. H., Lee, I. C., Jang, T. Y., and Kim, K. H. (2015). "Analysis of water quality variation by weir construction in th Nakdong river basin." *Proceedings of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, pp. 16-20.