J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 54, No. 9 (2021), pp. 719-730
doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.9.719
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Development of water quality and aquatic ecosystem model for Andong lake using SWAT-WET

Woo, Soyoung[a] · Kim, Yongwon[b]* · Kim, Wonjin[c] · Kim, Sehoon[d] · Kim, Seongjoon[e]

[a]Ph.D Candidate, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea
[b]Integrated Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea
[c]Ph.D Candidate, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea
[d]Ph.D Candidate, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea
[e]Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 21-045
Received: 7 June 2021; Revised: 19 July 2021; Accepted: 19 July 2021

Abstract

The objective of this study is to develop the water quality and aquatic ecosystem model for Andong lake using SWAT-WET (Soil and Water Assessment Tool-Water Ecosystem Tool) and to evaluate the applicability of WET. To quantify the pollutants load flowing into Andong lake, a watershed model of SWAT was constructed for Andong Dam basin (1,584 km^2). The calibration results for Dam inflow and water quality loads (SS, T-N, T-P) were analyzed that average R^2 was more than 0.76, 0.69, 0.84, and 0.60 respectively. The calibrated SWAT results of streamflow and nutrients concentration was used into WET input data. WET was calibrated and validated for water temperature, dissolved oxygen, and water quality concentration (T-N, T-P) of Andong lake. The WET calibrated results was analyzed that PBIAS was +19%, −13%, +4%, and +26.5% respectively and showed that it was simulated to a significant level compared with the observation data. The observed dry weight (gDW/m^2) of zoobenthos was less than 0.5, but the average value of simulation was analyzed to be 0.8, which is because the WET model considers zoobenthos with a broader concept. Although accurate calibration is difficult due to the lack of observed data, SWAT-WET can analyze the effects of environmental change in the upstream watershed on the lake based on long-term simulation based on watershed model. Therefore, the results of this study can be used as basic data for managing the aquatic environment of Andong lake.

Keywords: Aquatic ecosystem modeling, Andong lake, Water quality, Zoobenthos, SWAT-WET

SWAT-WET을 이용한 안동호의 수질 및 수생태계 모델 구축

우소영[a] · 김용원[b]* · 김원진[c] · 김세훈[d] · 김성준[e]

[a]건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료, [b]건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 석박사통합과정,
[c]건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료, [d]건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료,
[e]건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

요 지

본 연구에서는 상류의 휴·폐광산을 비롯한 다양한 점오염원과 비점오염원으로부터 유실되는 오염물질의 영향을 받는 안동호를 대상으로 수질 및 수생태 모델인 SWAT-WET을 구축하고, 적용성을 평가하고자 한다. 안동호르 유입되는 오염물질에 대한 정량적인 평가를 위해 유역모델인 SWAT을 안동댐 유역(1,584 km^2)을 대상으로 구축하여, 검보정을 수행하였다. 유출량과 수질 부하량(SS, T-N, T-P)에 대한 검보정 결과 R^2는 각각 0.76, 0.69, 0.84, 0.60 이상으로 분석되었다. 검보정된 SWAT의 유출량과 영양물질의 농도를 WET의 입력자료로 적용하여 안동호에 대한 수질, 수생태 모델 WET을 구축하였다. WET의 매개변수 민감도 분석 결과를 이용하여, 안동호의 수온, 용존산소, 수질농도(T-N, T-P)를 대한 검보정을 수행하였다. 검보정 결과 PBIAS는 각각 +19%, -13%, +4%, +26.5% 로 분석되었으며, 관측 자료를 유의한 수준으로 모의하는 것을 확인하였다. 저서동물의 관측 건중량(gDW/m^2)은 0.5 이하였으나 모의 건중량의 평균은 0.8로 분석되었으며, 이는 WET 모델이 더 넓은 개념의 저서동물을 고려하기 때문으로 나타났다. 관측자료 부족으로 정확한 검보정은 어렵지만, 유역모델과의 연계를 통한 장기간 모의와 상류 유역환경변화가 호소에 미치는 영향을 분석할 수 있으므로 안동호의 수환경 관리를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 수생태 모델링, 안동호, 수질, 저서동물, SWAT-WET

***Corresponding Author.** Tel: +82-2-444-0186
E-mail: longliveyw@konkuk.ac.kr (Y. Kim)

© 2021 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

우리나라는 여름에 강수가 집중되어 있어 계절에 따른 수자원 불균형이 심각하고 이는 홍수, 가뭄과 같은 재해로 이어지게 된다. 이를 대비하기 위해서 많은 다목적 댐이 하천에 건설되어 운영되고 있으며, 그로 인해 우리나라 유역 상류에 다양한 인공호가 생성되었다. 이러한 댐 구조물은 하천의 종적 연결성을 단절시키며, 자연적인 물 흐름 특성의 변화, 지형 및 생태계 변화, 부영양화로 인한 과잉 녹조현상, 탁수의 장기화 등 수체에 많은 영향을 미치고 있다(Chung *et al*., 2005; Tharme, 2003). 특히, 호소와 같은 폐쇄성, 정체성 수역은 상류에서 유입되는 오염원에 영향을 받을 뿐만 아니라, 퇴적되는 오염원의 양이 상대적으로 많아(Kim *et al*., 2019), 개방형 수역보다 외부 환경변화로 인한 자극에 취약하기 때문에 지속적인 모니터링과 더불어 수환경 보전 및 개선을 위한 관리대책이 필요하다.

호소의 수환경 문제의 원인을 분석하고 그에 따른 대책을 마련하기 위해 다양한 공간적 차원의 수질 및 수생태 모델이 개발되어 적용되고 있다. 국내외 많은 연구에서는 CE-QUAL-W2 (Cole and Wells, 2004), EFDC (Environmental Fluid Dynamics Computer Code) 모델을 이용하여 수온 성층 현상, 밀도류 이동 현상 모의(Kim *et al*., 2001; Kim *et al*., 2011; Saadatpour *et al*., 2017; Ziaie *et al*., 2019), 수질 변화 모의(Gong *et al*., 2016; Jeon *et al*, 2011; Kim *et al*., 2011; Noori *et al*., 2015; Tak *et al*., 2015), 탁수 영향 평가(Chung *et al*., 2005; Yi *et al*., 2005) 등의 연구가 수행되었다. 또한 AQUATOX를 이용하여 생태영향 평가(Rhee, 2012) 수생태 먹이망 변화 모의(Cho, 2016; Lombardo *et al*., 2015), 남조류 수화현상 모의(Chung and Lee, 2011)등의 연구가 수행되었다.

수생태계는 다양한 생물과 무생물이 상호작용하는 유기적인 시스템으로, 건강성 평가를 위해 어류, 저서동물(Zoobenthos), 부착돌말과 같은 생물학적 지표가 이용되고 있다. 그중 저서동물은 담수와 해수의 바닥층에 서식하는 동물로서, 종이 다양하고 풍부할 뿐만 아니라(Rosenberg and Resh, 1993), 영양단계의 1, 2차 소비자자 최상위 포식자인 어류의 먹이로 먹이사슬의 중요한 위치를 차지하고 있다. 또한, 낮은 이동성과 긴 생활사를 가지고 있어 만성적인 영향과 외부 자극에 의한 환경 교란 분석에 장점이 있으며(Reiss and Kröncke, 2005; Won *et al*., 2006), 퇴적물을 혼합하고 다양한 자원과 연계되어 있어(Covich *et al*., 1999) 퇴적물의 영향을 많이 받는 호소의 수생태계 건강성 평가의 중요한 지표로 활용될 수 있다. 이처럼 저서동물은 호소의 관리, 호소의 먹이사슬, 하상 서식지를 포함한 다양한 호소 생태와 관련된 많은 유형은 연구에서 중요하기 때문에(Håkanson and Boulion, 2003), PClake, LakeWeb, WET (Water Ecosystems Tool) 등의 모델이 개발되어 저서동물 생체량 예측에 적용되고 있다(Håkanson and Boulion, 2002; Janse and van Liere, 1995; Nielsen *et al*., 2017). 그러나 아직까지 호소에서 서식하는 저서동물, 어류와 같은 생물의 분포와 관련된 특성을 모의하는 연구는 많이 부족한 실정이다.

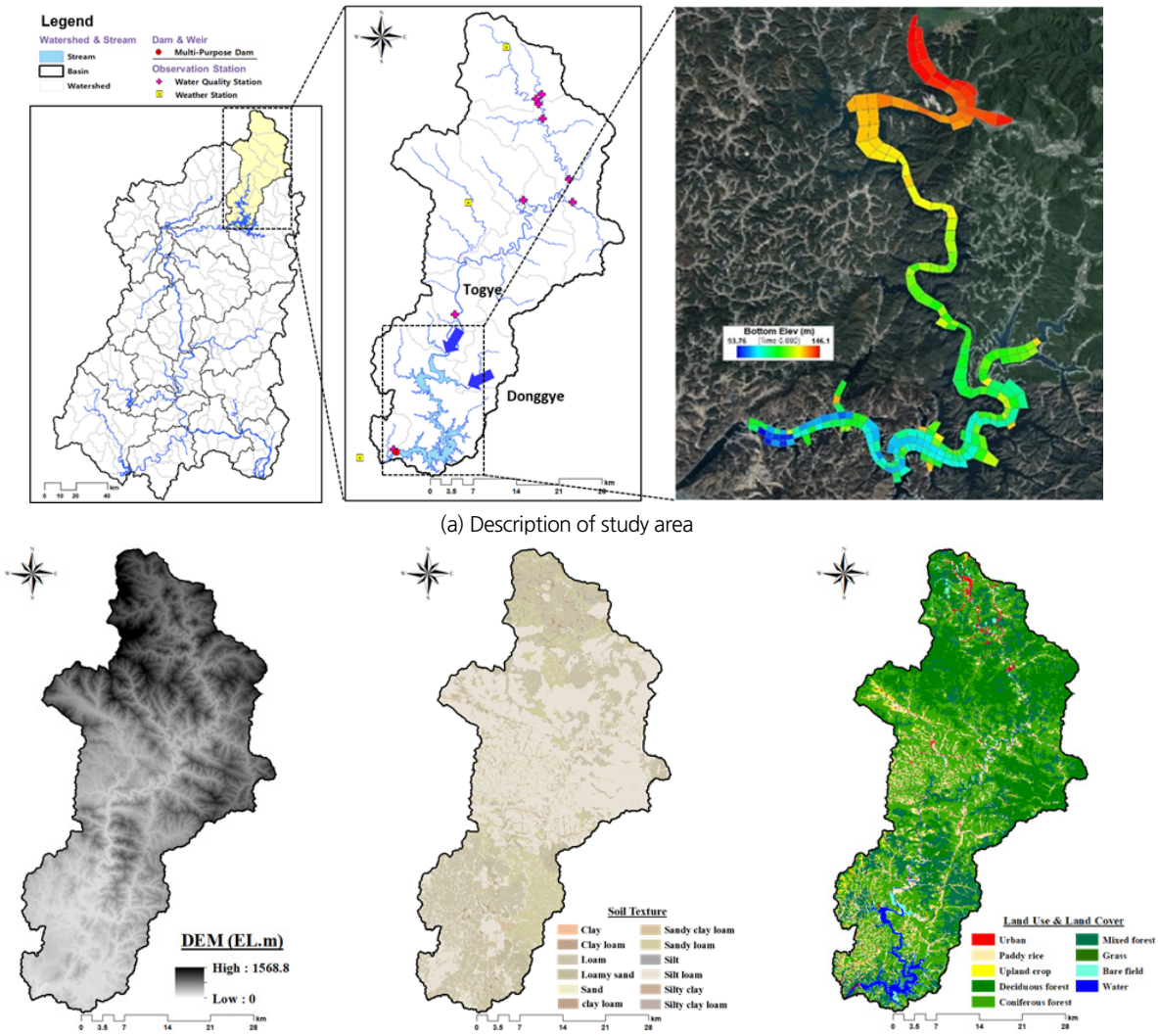
본 연구에서는 상류 휴, 폐광산을 비롯한 다양한 오염원으로부터 유입되는 퇴적물의 영향을 받는 안동호를 대상으로 유역모델 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)과 연계할 수 있는 호소 수질-수생태 모델인 WET을 구축하고, 수질 농도와 저서동물을 기준으로 모델의 적용성을 평가하고자 한다. 이를 위해 유역 상류의 특성을 고려하여 유역모델 SWAT을 먼저 구축하였으며, 안동호에 영향을 미치는 소유역의 유출량과 영양물질의 농도를 WET의 입력자료로 연계하였다. 그 후, WET의 매개변수 민감도 분석을 통해 영양물질과 저서동물에 가장 영향을 많이 미치는 매개변수를 선정하였다. 이를 기반으로 물환경정보시스템의 수질 자료와 기존 연구(Nakdong-river System Commission, 2010; 2013; 2016)에서 수행한 안동호의 저서동물 관측자료를 기반으로 모델의 검보정을 수행하여 적용성을 평가하였다

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역

본 연구의 대상지역인 안동호는 1976년 안동댐 건설로 생긴 인공 호수로서, 낙동강의 상류인 위도 36° 34′ 55″, 경도 128° 46′ 53″에 위치하고 있다. 안동호의 저수면적은 51.5 km^2이며, 상시만수위는 160 m, 저수위는 130 m이고, 총 저수량은 1,248 백만 m^3으로 그중 유효 저수량은 1,000 백만 m^3, 홍수조절량은 110 백만 m^3이다. 안동호의 주요 유입하천은 토계천, 동계천을 포함한 낙동강 본류이며, 유입되는 용수는 댐 운영을 통해 안동시를 포함한 구미, 대구, 마산, 창원, 울산, 부산 등의 경상도의 주요 산업도시에 생활 및 공업용수로 공급되고 있다. 이렇게 공급되는 공급량은 연간 926 백만 m^3에 달하며, 경상도의 주요 용수 공급원으로 주요한 역할을 하고 있다.

안동호가 위치한 안동댐 유역(1,584 km^2)은 총 12개의 표준유역단위로 이루어져 있으며, 유역 인근에 4개의 기상관측소(울진, 안동, 봉화, 태백)와 1개의 하수종말처리시설(태백)이 운영되고 있다(Fig. 1(a)). 유역의 과거 30년 평균 강우량은 1,192 mm, 평균 기온은 11.1℃이고, 태백 하수종말처리시설의 일 평균 처리용량은 약 29,000 m^3이다. Figs. 1(b) ~ 1(d)는 각각 SWAT의 GIS 공간 입력자료인 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM), 토양종류, 토지피복도를 나타낸 것



(a) Description of study area

(b) DEM (c) Soil type (d) Land use

Fig. 1. Description of study area and GIS data for SWAT

이다. 안동댐 유역의 고도는 0 ~ 1,568 m이며, 유역의 토양은 미사질 양토(Silt loam)가 52%로 가장 많았으며, 양토(Loam)가 27%를 차지하고 있다. 토지 피복 분류 결과 산림이 유역면적의 80% 이상을 차지하고 있으며, 안동호를 포함한 수역이 전체 유역의 약 3%를 차지하고 있다.

2.2 SWAT 모델

SWAT은 미국 농무성 농업연구소(USDA-ARS)에서 개발한 유역모델로서, 기상조건, 토양 특성, 지형 및 토지 피복 그리고 토지관리 조건을 고려하여, 유역의 물순환, 유사 및 영양물질, 박테리아, 화학물질, 중금속의 이동 등을 모의할 수 있다. SWAT은 동일한 물리적 특성으로 구성된 수문반응단위(HRUs)를 사용하며, 물수지 방정식을 기반으로 각 HRUs에서 강우, 증발산, 차단, 침투, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 회귀 등의 수문순환을 모의한다. 그리고 각HRUs의 침식과 유사량은 수정범용토양침식공식(MUSLE)을 이용하여 계산되며, 영양물질은 식물의 성장에 필요한 수요, 공급량과 하천에 용해되거나 유사에 부착되는 등 다양한 형태의 전이와 이동을 추적하여 계산된다. 더 상세한 SWAT 모형의 이론은 Arnold *et al*. (1996)와 Neitsch *et al*. (2001)에 언급되어 있다.

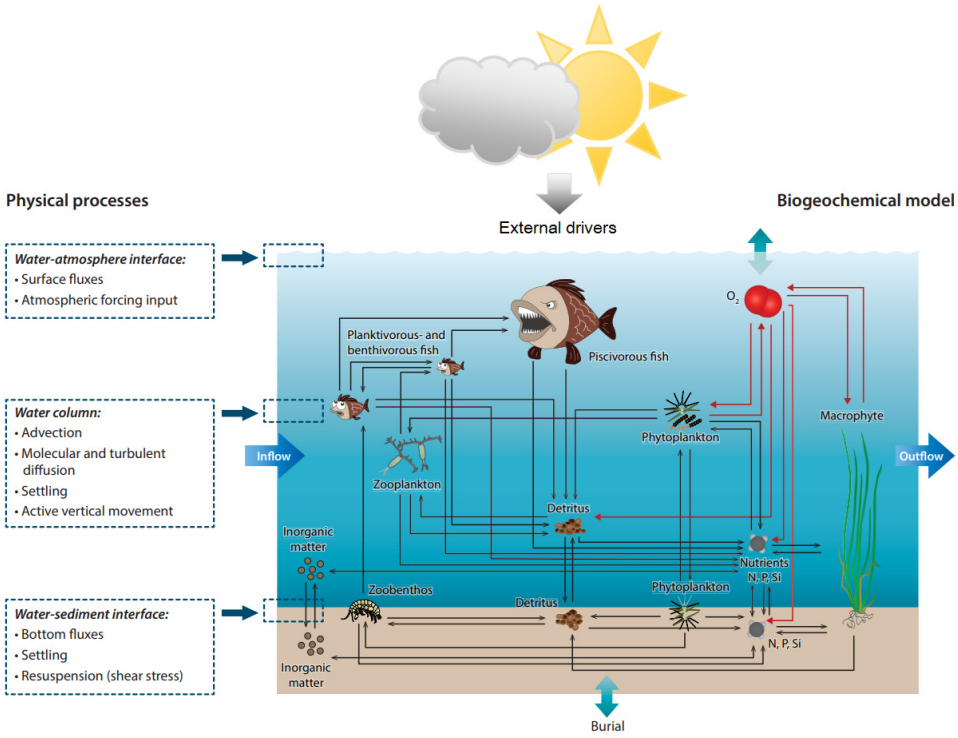
2.3 WET 모델

WET은 덴마크의 Aarhus University에서 개발한 오픈소스 수생태계 모델로서, FABM-PCLake (Hu *et al*., 2016)를 기반으로 하며, CAEDYM (Hamilton and Schladow, 1997)의 일부 모듈을 선택적으로 1차원에 맞게 수정하여 반영하고

있다. WET은 영양물질의 재부유(resuspended), 퇴적(burial), 수체와 하상 퇴적층에서의 비생물적 과정, 식물성 플랑크톤, 수생식물, 동물성 플랑크톤, 저서동물, 어류를 포함하여 총 12개의 모듈로 구성되어 있다.

Fig. 2(a)는 WET의 개념 모식도를 나타내며, 이 모델은 물리적 과정을 3가지 단계(수체-대기, 수체, 수체-하상)로 구분하여 모의한다. 그리고 이를 기반으로 생지화학적 과정에서는 여러 영양단계 생물, 무생물 간의 상호작용을 모의한다. 수체와 하상 퇴적층의 비생물적 과정에서는 광물화, 질산화, 탈질산화, 인의 흡수와 같은 영양물질의 순환을 고려하여 유기물, 무기물, 용존 산소 및 영양물질과 관련된 상태 변수들의 농도를 모의한다. 플랑크톤, 저서동물, 어류와 같은 생물들의 경우 각 모듈에서 동화(assimilation), 호흡, 배설, 사망, 이동을 고려하여 시스템에 분포하는 개체군의 밀도를 단위면적당 건중량(dry weight)으로 모의한다. Fig. 1에 제시된 바와 같이, WET의 각 모듈은 상호 연계되어 작용한다. 예를 들어, 저서동물의 성장은 DOM, POM, 그리고 영양물질(N, P, Si)의 농도에 영향을 받으며, 저서동물은 어류의 포식과 연결되어 있다. 또한, 저서동물과 어류의 호흡, 배설, 사망과 같은 활동은 다시 유기물과 무기물의 농도에 영향을 미치게 되어 각 모듈은 상호 연계되어 작용한다.

WET에서 고려하는 외부요소는 기상과 수체로 유입되는 하천의 유입량과 영양물질의 농도이다. 입력되는 기상자료는 10 m 높이 풍향에 따른 풍속(m/s), 표면 대기압(hPa), 기온(℃), 이슬점 온도(℃)이고, 각 자료는 시간 단위로 입력된다. 수체로 유입되는 유입량 및 영양물질의 농도는 유역모델인 SWAT과 연계되어 입력되며, Fig. 2(b)는 SWAT의 모의결과와 WET의 입력자료 간의 관계를 나타낸다.



*DOM : Dissolved organic matter, POM: Particulate organic matter

(a)

SWAT Output	Outflow	Organic P	PO_4	Organic N	NO_3	NH_4
WET Input	Inflow	Organic P (PPOM)	PO_4	Organic N (NPOM)	NO_3	NH_4

(b)

Fig. 2. (a) Schematic of aquatic ecosystem model WET concept (Hu *et al.*, 2016) and (b) relations between SWAT output and WET input

2.4 연구방법

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 SWAT과 WET 모델 구축을 위해 GIS 데이터, 수문, 수질, 수생태 관측 데이터를 활용하였다. 안동호 상류의 특성을 모의하기 위해 안동댐 유역(1,584 km^2)을 대상으로 SWAT을 구축하였으며, 수문과 수질 관측값을 이용하여 warm up 기간 5년을 제외하고 2010 ~ 2019년을 대상으로 모의하였다. 수문의 경우, 안동댐의 일 단위 유입량을 대상으로 검보정을 수행하였으며, 수질은 도산, 안동1 2개의 관측소의 8일 간격 부유사(SS), 총질소(T-N), 총인(T-P)을 대상으로 검보정을 수행하였다. WET은 안동호(51.5 km^2)를 대상으로 구축하였으며, 앞서 검보정한 SWAT의 결과는 안동호의 유입자료로 활용하였다. 그리고 동일한 기간에 대하여 호소의 물리적 특성, 수질 농도 그리고 저서동물의 건중량에 대한 결과를 분석하였다.

SWAT의 검보정 및 모델의 효율성을 평가하기 위해 R^2 (coefficient of determination), NSE (Nash-Sutcliffe efficiency; Nash and Sutcliffe, 1970), RMSE (Root Mean Square Error) 통계 지표를 이용하였으며, 각 지표는 Eqs. (2) ~ (4)과 같이 계산된다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{1}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - \bar{y})^2} \tag{3}$$

여기서 y_i는 관측값, $\hat{y}_i$는 SWAT 모의값, 그리고 $\bar{y}$는 관측값의 평균값을 의미한다. WET의 매개변수 민감도 분석은 Eq. (4)을 이용하였으며, 각 매개변수에 대한 정규화된 민감도 (normalized sensitivity)를 계산하였다.

$$Sensitivity = \frac{Result_{par} - Result_{base}}{Result_{base}} \cdot \frac{100}{Par-changed} \tag{4}$$

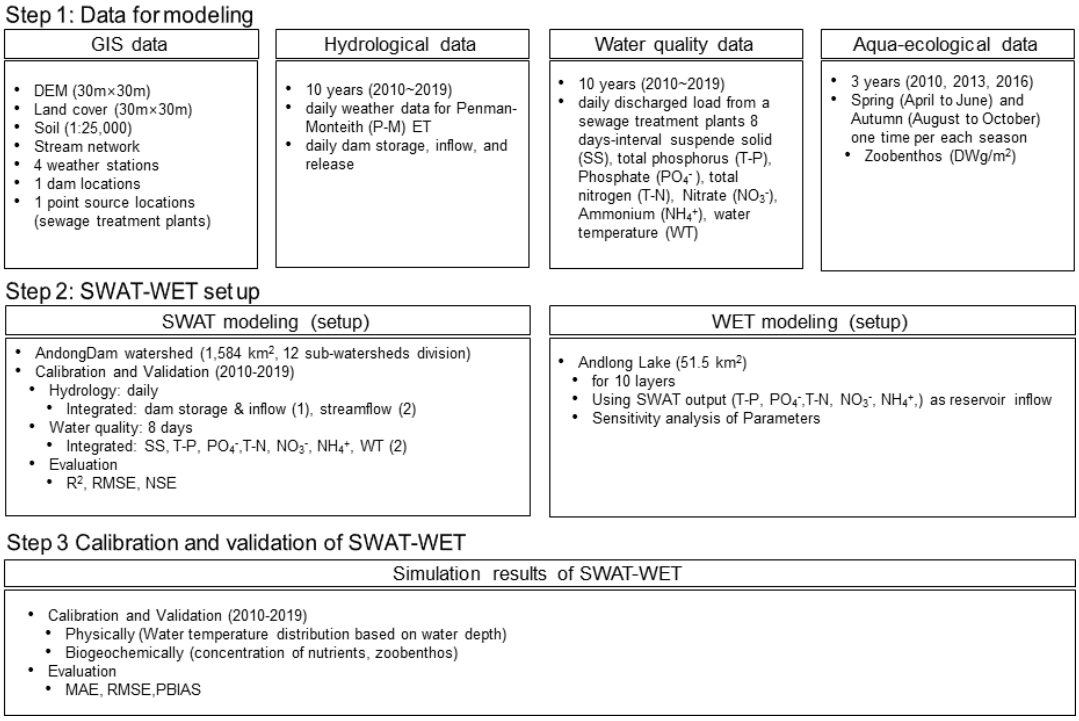


Fig. 3. Flowchart of this study

여기서 $Result_{par}$는 매개변수를 변화시켰을 때, WET 모의결과의 평균값, $Result_{base}$는 매개변수의 변동이 없는 초기 모의결과의 평균값, 그리고 $Par-changed$는 매개변수의 % 변화량을 의미한다. 민감도 분석결과를 이용하여, 안동호의 물리적, 생지화학적 특성에 관한 검보정을 수행하였으며 MAE (Mean Absolute Error), PBIAS (Percent Bias), RMSE를 이용하여 모델의 성능을 평가하였다. MAE, PBIAS는 계산식은 Eqs. (5) and (6)과 같다.

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|y_i - \hat{y}_i\right| \tag{5}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^{n}(y_i)} \tag{6}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT 모형의 검보정 결과

Fig. 4(a)는 안동댐 유입량에 대한 검보정 결과를 로그 스케일로 나타낸 그래프로, 안동댐 상류의 유출이 관측값을 유사하게 모의하는 것을 확인할 수 있다. 보정기간의 연평균 R^2, NSE는 0.82, 0.80이상 RMSE는 1.65 m^3/sec로, 검정기간의 연평균 R^2, NSE, RMSE는 각각 0.74, 0.72, 1.25 m^3/sec 분석되었다. 검정기간의 경우, 극심한 가뭄의 영향을 받았던 2015년이 포함되어 있어, RMSE는 보정기간 보다 낮게 계산되었으나, R^2, NSE 값도 함께 낮아지는 것으로 나타났다.

수질 검보정 결과, 도산 관측소 SS, T-N, T-P의 보정기간 평균 R^2는 각각 0.68, 0.87, 0.63 그리고 검정기간 평균 R^2는 각각 0.70, 0.83, 0.70으로 분석되었다. 안동1 관측소의 경우, SS, T-N, T-P의 보정기간 그리고 검정기간의 평균 R^2는 각각 0.78, 0.84, 0.73, 0.84, 0.84, 0.55로 분석되었다. Figs. 4(b) ~ 4(d)는 각각 안동호 상류에 위치한 도산 관측소의 SS, T-N,

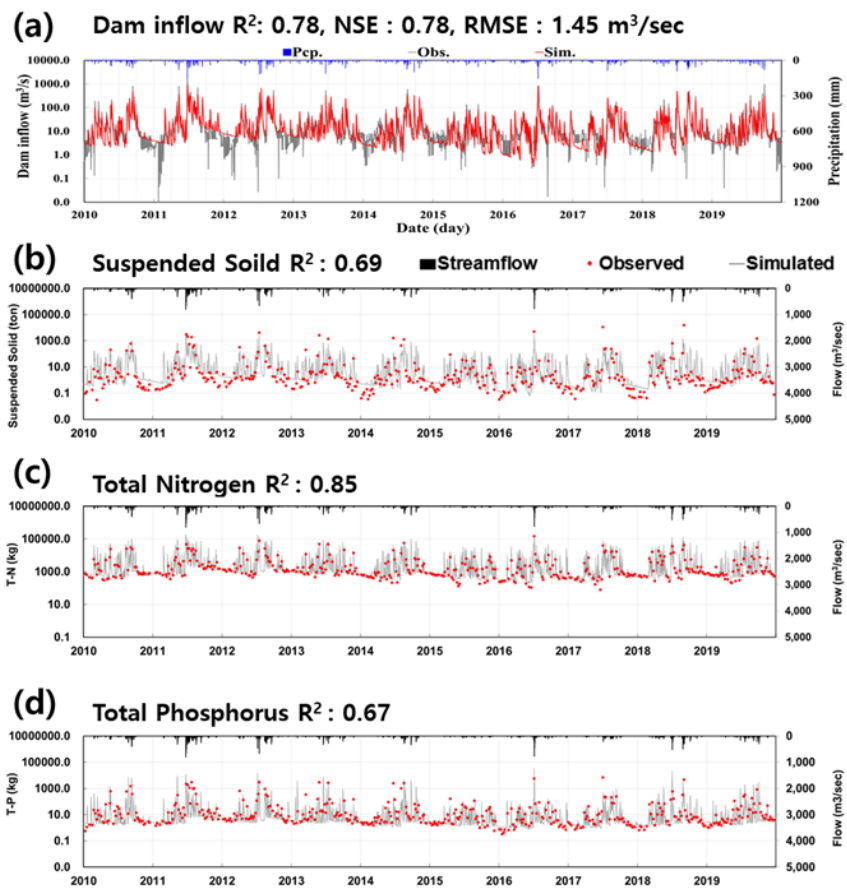


Fig. 4. Comparison of the observed and SWAT simulated results for (a) dam inflow, (b) suspended solids, (c) total nitrogen, and (d) total phosphorus during 2010 ~ 2019

Table 1. Statistics of SWAT results for WET input data (daily average inflow and nutrients concentration)

Input Data	Inflow (m^3/sec)	Organic P (mg/L)	PO_4 (mg/L)	Organic N (mg/L)	NO_3 (mg/L)	NH_4 (mg/L)
max	850.61	0.4631	0.1518	4.630	5.649	0.777
median	5.7	0.0041	0.0037	1.261	0.521	0.289
min	0.53	0.0005	0.0005	0.104	0.006	0.014
Average	22.63	0.0063	0.0048	1.340	0.646	0.277
Standard deviation	55.08	0.0187	0.0067	0.779	0.519	0.116

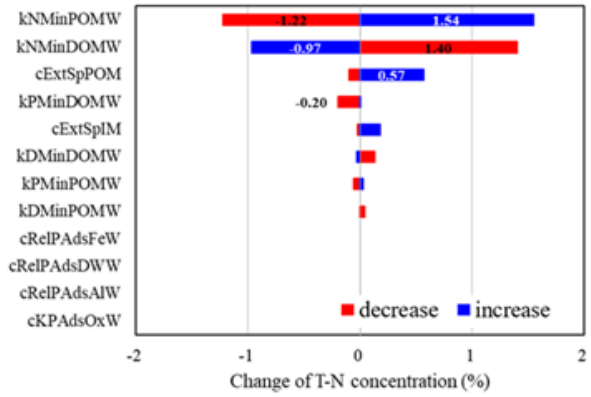
T-P 부하량에 대한 검보정 결과를 나타낸 그림이다.

SWAT 검보정 후, Fig. 1(b)에 제시된 출력-입력자료 관계를 기반으로 안동호로 유입되는 소유역 9, 10번의 결과가 WET의 입력자료로 사용되었다. Table 1은 안동호로 유입되는 일평균 유입량과 영양물질의 농도를 정리한 것이다. 모의기간의 평균 유입량은 22.6 m^3/sec이었으며, 유기인(organic P), 인산염(PO_4), 유기질소(Organic N), 질산염(NO_3), 그리고 암모니아(NH_4)의 농도는 각각 0.0063, 0.0048, 1.340, 0.646, 0.277 mg/L로 분석되었다.

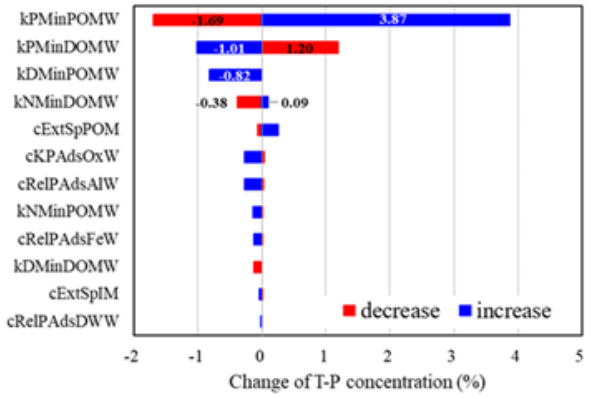
3.2 SWAT-WET 모형의 매개변수 민감도 분석

안동호를 대상으로 WET을 구축하였으며, SWAT과의 연계를 위해 warm up 기간은 5년으로 설정하였으며, 2010년부터 2019년까지의 결과를 분석하였다. 본 연구에서는 수체 내의 영양물질(총질소, 총인)의 농도와 최근 우리나라에서 생물학적 지표로 많이 사용되고 있는 저서동물을 대상으로 모델을 구축하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 수체의 영양물질 및 저서와 관련된 2가지 모듈(abiotic process in water, zoobenthos)의 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

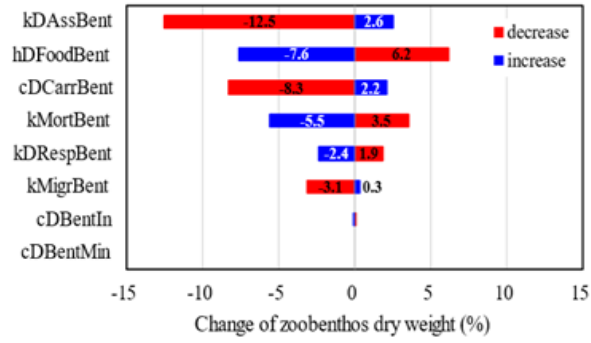
Figs. 5(a) and 5(b)는 각각 수체내 총질소와 총인 농도에 영향을 미치는 매개변수의 민감도 분석 결과이다. 총질소는 kNMinPOMW, kNMinDOMW가 민감했으며, 민감도 범위는 각각 -1.22 ~ 1.54, -0.97 ~ 1.40으로 분석되었다. 총인은 kPMinPOMW, kPMinDOMW가 가장 민감했으며, 민감도 범위는 각각 -1.69 ~ 3.87, -1.01 ~ 1.20으로 분석되었다. kNMinPOMW, kPMinPOMW는 각각 입자성 유기질소, 유기인의 분해(decomposition)와 관련된 매개변수로, 매개변수의 값을 줄이면 분해되는 유기물질이 감소하기 때문에 수체 내의 영양물질 또한 감소하게 된다. 반면 kNMinDOMW, kPMinDOMW는 각각 용존 유기질소, 용존 유기인의 광물화(mineralized)와 관련된 매개변수로, 매개변수의 값이 커질수록 수체내의 영양물질이 광물화되어 형태가 변하기 때문에 수체내 영양물질의 농도가 줄어들게 된다. 그 외의 매개변수들은 민감도가 1% 이하로 분석되었으며, 이는 WET의 각 모듈들이



(a) Total Nitrogen parameter analysis



(b) Total phosphorus parameter analysis



(c) Zoobenthos parameter analysis

Fig. 5. Parameter sensitivity results for (a) total phosphorus concentration, (b) total nitrogen concentration, and (c) zoobenthos dry weight

상호 연계되어있어, 단일 매개변수가 민감하게 작용하지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 5(c)는 저서동물의 건중량에 영향을 미치는 zoobenthos 모듈의 매개변수 민감도 분석결과이다. 저서동물의 건중량은 동화율(kDAssBent), 먹이농도(hDFoodBent), 수용능력(cDCarrBent), 사망률(kMortBent), 호흡량(kDRespBent), 이동(kMingrBent) 순으로 민감한 것으로 분석되었다. 가장 민감한 매개변수는 kDAssBent로 민감도 범위가 -12.5 ~ 2.6으로 분석되었으며, kDAssBent의 값이 감소하면, 동화작용이 감소하여 동물성 질소화합물의 농도가 감소하면 저서동물의 건중량도 감소하게 된다.

3.3 WET 모의 결과

안동호의 수질 및 수생태 분석을 위한 WET의 검보정은 민감도 분석결과를 기반으로 수행하였으며, 수체에 작용하는 물리적 특성과 수체내 산소역학을 고려하기 위해 수온과 용존산소에 대한 검보정도 함께 수행하였다. Table 2는 수체의 물리적특성과 수질 검보정에 사용된 매개변수의 값을 정리한 것으로, 물리적 특성은 light extinction 매개변수와 기상자료의 scale factor를 이용하여 검보정을 수행하였다.

Figs. 6(a) and 6(b)는 수온과 용존산소에 대한 검보정 결과를 나타낸 것이다. 수온의 검보정 통계량 MAE, RMSE, PBIAS는 각각 2.66℃, 3.22℃, +19%로 분석되었고, 용존산소의 MAE, RMSE, PBIAS는 각각 1.15 mg/L, 1.58 mg/L, -13%로 분석되었다. 수온의 경우, 검보정 통계량이 다소 크게 계산되었는데, 이는 겨울철 관측 수온은 4 ~ 5℃인 반면 모의되는 수온은 0℃로 다소 낮게 모의되었기 때문이다. 따라서, 겨울철 수온 보정을 위한 추가적인 매개변수 고려가 필요할 것으로 판단된다. 반면, 용존산소는 2015년 이전 관측자료의 계절별 경향성이 뚜렷하지 않고, 상대적으로 낮게 관측되어 오차가 많이 발생하였으나, 2015년 이후에는 오차가 감소하는 것으로 나타났다.

총질소의 경우, 관측 농도의 범위가 1 ~ 2 mg/L이었으며, 모의 값의 평균 농도는 1.5 mg/L로 분석되었다(Fig. 6(c)). 총질소는 관측값과 모의 값에서 모두 계절적인 특성이나 특정한 패턴이 없는 것으로 나타났으나, 모의 값의 15% 오차 범위(회색 영역) 내에 거의 모든 관측값이 존재하였다. 검보정 통계량 MAE, RMSE, PBIAS는 각각 0.15 mg/L, 0.1 mg/L, +4%로 분석되었다.

총인의 검보정 통계량 MAE, RMSE는 각각 0.005 mg/L, 0.007 mg/L이었고, PBIAS는 +26.5%로 분석되었다. 특히 PBIAS 값이 높게 분석되었는데, 그 이유는 2013년 ~ 2015년 높아진 총인의 농도를 모의하지 못했기 때문이다(Fig. 6(d)). 해당 기간에 총인이 관측값보다 과소 추정된 이유는, 심각한 가뭄으로 인해 안동호의 용수 공급량이 증가하여, 저수지의 수위가 낮아지고 용량이 감소하는 다양한 외부 영향을 고려하지 못했기 때문으로 사료된다. 그리고 모니터링 결과와 모의 결과에서 차이를 보이는데, 이는 모의 수온이 관측 수온보다 낮게 추정되었으며, SWAT에서 입력되는 결과의 오차가 누적되었기 때문으로 사료된다.

Table 3은 저서동물 검보정에 사용된 매개변수의 값을, Fig. 7은 저서동물 모의 결과를 정리한 것이다. 저서동물 관측은 2010년, 2013년, 2016년 매년 2회씩 저서성 대형무척추동물을 대상으로 조사되었다(Nakdong-river System Commission, 2010; 2013; 2016). 관측자료의 개수가 부족하여, WET 모의 결과를 상자도표(box plot)으로 도시하여 비교하였다. 2010년, 2013년, 2016년 저서동물 건중량 모의 값은 각각 0.61 ~ 1.31, 0.68 ~ 1.39, 0.62 ~ 1.13 gDW/m^2, 그리고 평균은 각각

Table 2. Calibrated parameters for physical process and the abiotic process in water module of WET

Process	Parameter	Description	Default	Calibrated Value
physical process	g1_light extinction	e-folding depth of non-visible shortwave radiation	0.4	4.0
	u10_meteo	wind speed in West-East direction @ 10 m	1.0	2.0
	v10_meteo	wind speed in South-North direction @ 10 m	1.0	2.0
abiotic process in water	cExtSpPOM	specific extinction factor for POM (m^2/gDW)	0.15	1.2
	cExtSpIM	specific extinction inorganic matter (m^2/gDW)	0.05	0.05
	kDMinPOMW	decomposition constant of POM-DW at 20*C (1/d)	0.001	0.008
	kNMinPOMW	decomposition constant of POM-N at 20*C (1/d)	0.01	0.08
	kPMinPOMW	decomposition constant of POM-P at 20*C (1/d)	0.01	0.003
	kDMinDOMW	mineralization constant of DOM-DW at 20*C (1/d)	0.03	0.03
	kNMinDOMW	mineralization constant of DOM-N at 20*C (1/d)	0.01	0.003
	kPMinDOMW	mineralization constant of DOM-P at 20*C (1/d)	0.01	0.08

0.90, 0.95, 0.84 gDW/m^{2}으로 분석되었다. 관측 저서동물 건중량 값은 2010년 0.003 ~ 0.402 gDW/m^2, 2013년 0.006 ~ 0.417 gDW/m^2, 2016년 0.004 ~ 0.101 gDW/m^{2}로 모의 값과 최소 0.208 gDW/m^2 이상 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 관측자료는 저서성 대형무척추동물만을 대상으로 계산한 건중량인 반면, WET 모의 결과는 저서성 대형무척추동물

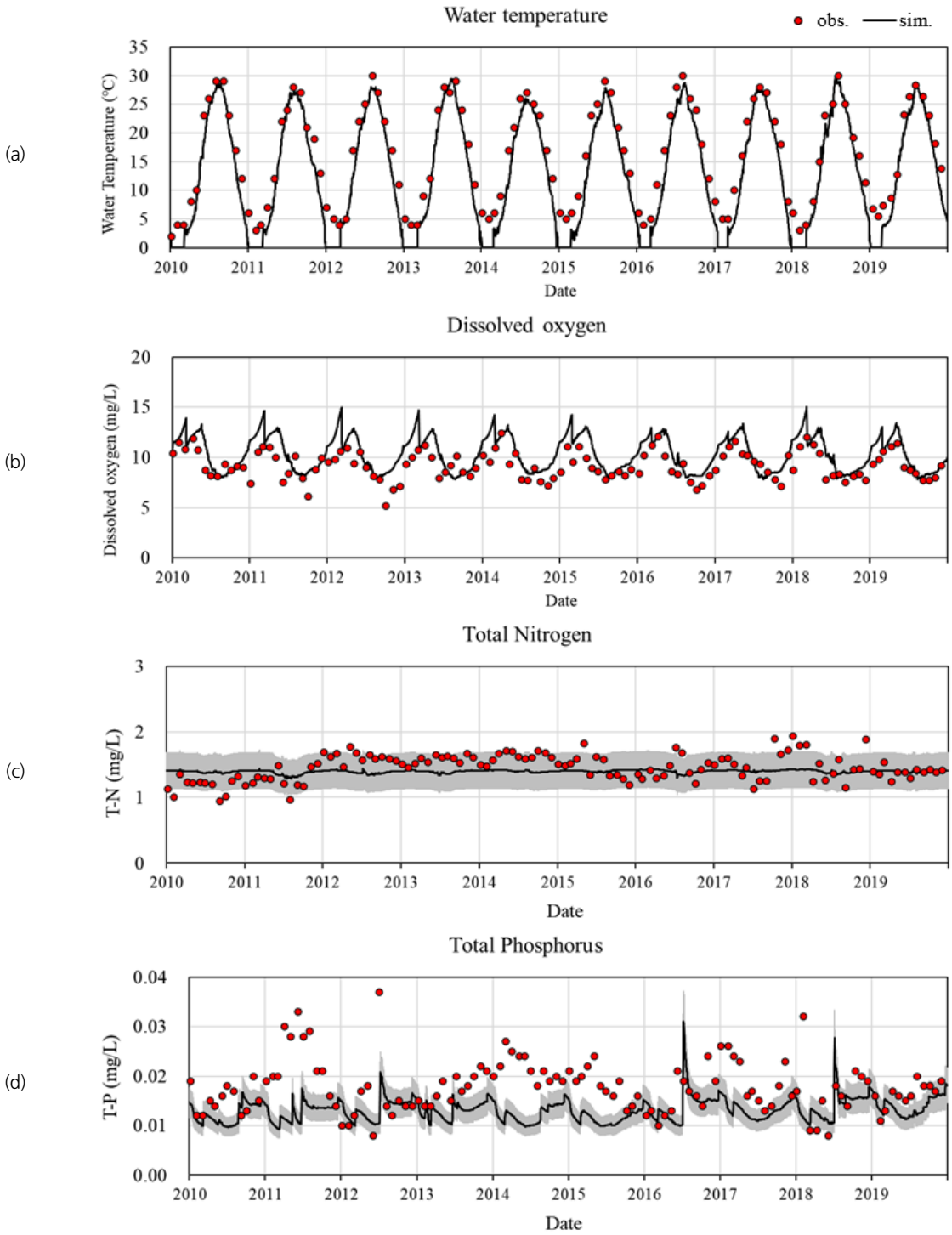
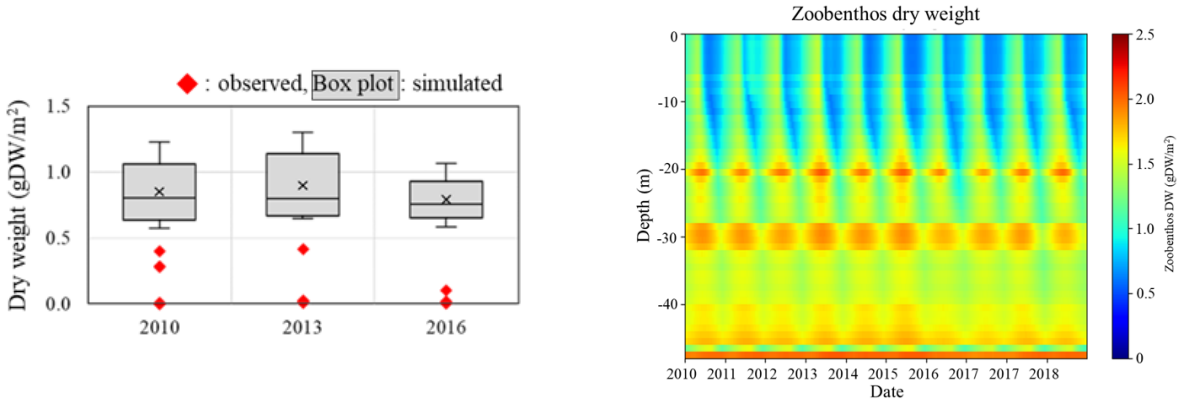


Fig. 6. Comparison of the observed and WET-simulated value for (a) water temperature, (b) dissolved oxygen, (c) total nitrogen concentration, and (d) total phosphorus concentration during 2010 ~ 2019

Table 3. Calibrated parameters for the zoobenthos module of WET

Parameter	Description	Default	Calibrated Value
cDCarrBent	carrying capacity (gDW/m^2)	10	10
cDBentMin	minimum DW density (gDW/m^2)	0.00001	1E-05
cDBentIn	external density (gDW/m^2)	0.01	0.01
kMigrBent	migration rate (1/d)	0.001	0.001
hDFoodBent	half-saturation food concentration (g/m^2)	200	100
kDAssBent	maximum assimilation rate at 20*C (1/d)	0.1	0.1
fDAssBent	C assimilation efficiency (-)	0.3	0.3
kDRespBent	respiration rate at 20*C (1/d)	0.005	0.003
kMortBent	mortality rate (1/d)	0.005	0.003



(a) (b)

Fig. 7. Comparison of the observed and WET-simulated value for (a) dry weight of zoobenthos at 2010, 2013, and 2016, (b) simulated results for total depth during 2010 ~ 2019

을 포함하여 대형조류(macroalgae), 조개(clam, mussel) 등의 동물군을 포함하여 계산하기 때문으로 사료된다. Fig. 7(b)는 안동호 전체 수심에 대한 저서동물 건중량 모의 결과를 나타낸 것으로, 수심이 얕을 곳보다 깊은 곳에서의 건중량이 더 큰 것으로 모의 되었으며, 이는 Pratt *et al*. (2016)이 Lake superior의 저서 생체량 관측 결과와 유사하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 유역모델과 연계되는 1차원 모델인 SWAT-WET을 이용하여 안동호에 대한 수질 및 수생태 모델을 구축하여 그 적용성을 평가하였으며, 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1) 안동댐 유역을 대상으로 SWAT을 구축하여 일 단위 유출량(댐 유입량), 8일 간격 수질(SS, T-N, T-P)에 대한 검보정을 수행하였다. SWAT 검보정 결과, 유출량의 NSE (Nash Sutcliffe efficiency), R^2는 0.78 이상 SS, T-N, T-P의 R^2는 각각 0.69, 0.84, 0.60 이상으로 분석되었다. SWAT 결과를 기반으로, 안동호로 유입되는 평균 일 단위 유입량은 22.6 m^3/sec, 영양물질(Organic P, PO_4, Organic N, NO_3, NH_4)의 농도는 각각 0.0068, 0.0048, 1.34, 0.646, 0.277 mg/L이다.
2) 안동호를 대상으로 WET을 구축하여, 호소의 수질과 저서동물에 대한 매개변수 민감도 분석을 수행하였으며, 영양물질의 분해(decomposition)와 광물화(mineralized)가 수체 내 영양물질 농도에 민감하게 작용하는 것으로 나타났다. 저서동물의 경우, 동화, 먹이의 농도, 호흡, 사망, 이동 등의 매개변수가 모두 민감하게 작용하는 것으로 나타났다.
3) 민감도 분석 결과를 기반으로 수온, 용존 산소, T-N, T-P, 그리고 저서동물에 대한 검보정을 수행하였다. 수온과 용존산소의 경우, 관측 값과 모의 값의 전체적인 패턴이 유사하였으며, PBAIS는 19% 이내로 분석되었다. T-P의 경우, RMSE는 0.007 mg/L, PBAIS가 +26.5%로 분석되었으며,

이는 2014-2015년 증가하는 농도를 잘 모의하지 못하였기 때문으로 사료된다.

4) 저서동물의 경우, 관측 건중량(gDW/m^2)은 0.5 이하였으나 모의 건중량은 평균 0.8로 Scale이 차이났으며, 이는 관측 건중량은 저서성 대형무척추동물(benthic macroinvertbrate)을 대상으로 계산되었으나, 모의 건중량은 대형조류, 저서성 대형무척추동물, 조개를 모두 고려하여 계산되기 때문으로 판단된다.

WET 모델을 이용하여 수생태계를 평가할 경우, 수생태 관측자료가 부족하여 모델 구축 및 검보정에 어려움이 있으며, 가뭄으로 인한 댐의 운영 변화와 같은 외부 환경변화에 대한 고려가 어려운 단점이 있다. 또한, WET은 1차원 모델로서, 기존에 개발되어 적용되었던 다차원 모델인 CE-QUAL-W2, ELCOM-CAEYM, AQUATOX와 같은 모델과 달리 공간적 패턴 분석이 어려우나, 입력자료가 간단하며, 모의 시간이 짧아 경제적이며 호소의 수생태 특성을 전반적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한, 유역모델과 연계하여 장기간 호소의 생태적 특성 변화를 모의할 수 있는 장점이 있으며, 이는 오염물질의 유입과 기후변화로 인한 수온 상승으로 인한 호소의 부영양화 등에 대응하기 위한 계획을 수립의 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003050001).

References

Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan, R., and King, K.W. (1996). *SWAT manual*. USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, TX, U.S.

Cho, M.S. (2016). *Prediction of foodweb dynamics in reservoir aquatic ecosystem using AQUATOX*. Ph. D. dissertation, Konkuk University.

Chung, S.W., and Lee, H.S. (2011). "Analysis of microcystis bloom in Daecheong reservoir using ELCOM-CAEDYM." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 27, No. 1, pp. 73-87.

Chung, S.W., Oh, J.K., and Ko, I.H. (2005). "Simulations of temporal and spatial distributions of rainfall-induced turbidity flow in a reservoir using CE-QUAL-W2." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 8, pp. 655-664.

Cole, T.M., and Wells, S.A. (2004). *CE-QUAL-W2: A two dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model*. Version 3.2 User Manual, Instruction Report EL-03-1, U.S. Army Corps of Engineers. U.S.

Covich, A.P., Palmer, M.A., and Crowl, T.A. (1999). "The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling." *BioScience*, Oxford University Press, Vol. 49, No. 2, pp. 119-127.

Gong, R., Xu, L., Wang, D., Li, H., and Xu, J. (2016). "Water quality modeling for a typical urban lake based on the EFDC model." *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 21, No. 5, pp. 643-655.

Håkanson, L., and Boulion, V.V. (2002). "Empirical and dynamical models to predict the cover, biomass and production of macrophytes in lakes." *Ecological Modelling*, Vol. 151, No. 2, pp. 213-243.

Håkanson, L., and Boulion, V.V. (2003). "Modelling production and biomasses of zoobenthos in lakes." *Aquatic Ecology*, Vol. 37, No. 3, pp. 277-306.

Hamilton, D.P., and Schladow, S.G. (1997). "Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part I - Model description." *Ecological Modelling*, Elsevier, Vol. 96, No. 1-3, pp. 91-110.

Hu, F., Bolding, K., Bruggeman, J., Jeppesen, E., Flindt, M.R., Gerven, L.V., Janse, J.H., Janssen, A.B.G., Kuiper, J.J., Mooij, W.M., and Trolle, D. (2016). "FABM-PCLake - linking aquatic ecology with hydrodynamics." *Geoscientific Model Development*, Copernicus, Vol. 9, No. 6, pp. 2271-2278.

Janse, J.H., and van Liere, L. (1995). "PCLake: A modelling tool for the evaluation of lake restoration scenarios." *Water Science and Technology*, Vol. 31, No. 8, pp. 371-374.

Jeon, J.H., Chung, S.W., Park, H.S., and Jang, J.R. (2011). "Evaluation of EFDC for the simulations of water quality in Saemangeum reservoir." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 27, No. 4, pp. 445-460.

Kim, S., Jeong, H.G., Kim, H.G., Kim, J.E., Park, S.J., Kim, Y.S., and Yang, D.S. (2019). "Spatial and temporal variation of characteristics and pollution assessment of sediment in the watersheds of Andong-Dam and Imha-Dam, Korea." *Journal of Environmental Science International*, KESS, Vol. 28, No. 12, pp. 1085-1099.

Kim, S.J., Seo, D.I., and Ahn, K.H. (2011). "Estimation of proper EFDC parameters to improve the reproductability of thermal stratification in Korea reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 9, pp. 741-751.

Kim, Y.-H., Kim, B.-C., Choi, K.-S., and Seo, D.-I. (2001). "Modelling of thermal stratification and transport of density flow in Soyang reservoir using the 2-D hydrodynamic water quality model, CE-QUAL-W2." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 15, No. 1, pp. 40-49.

Kim, Y.S., Kim, S.J., and Kim, H.S. (2011). "Analysis of water quality characteristics using simulated long-term runoff by

HEC-HMS model and EFDC model." *Journal of Wetlands Research*, KWS, Vol. 13, No. 3, pp. 707-720.

Lombardo, A., Franco, A., Pivato, A., and Barausse, A. (2015). "Food web modeling of a river ecosystem for risk assessment of down-the-drain chemicals: A case study with AQUATOX." *Science of the Total Environment*, Vol. 508, pp. 214-227.

Nakdong-river System Commission (2010). *Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system*.

Nakdong-river System Commission (2013). *Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system*.

Nakdong-river System Commission (2016). *Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system*.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Elsevier BV, 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, Temple, TX, U.S., pp. 340-367.

Nielsen, A., Bolding, K., Hu, F., and Trolle, D. (2017). "An open source QGIS-based workflow for model application and experimentation with aquatic ecosystems." *Environmental Modelling and Software*, Vol. 95, pp. 358-364.

Noori, R., Yeh, H.D., Ashrafi, K., Rezazadeh, N., Bateni, S.M., Karbassi, A., Kachoosangi, F.T., and Moazami, S. (2015). "A reduced-order based CE-QUAL-W2 model for simulation of nitrate concentration in dam reservoirs." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 530, pp. 645-656.

Pratt, T.C., Gorman, O.T., Mattes, W.P., Myers, J.T., Quinlan, H.R., Schreiner, D.R., Sitar, S.P., and Yurista, P.M. (2016). "The state of Lake Superior in 2011." *Great Lakes Fishery Commission*, Vol. 16, No. 1.

Reiss, H., and Kröncke, I. (2005). "Seasonal variability of benthic indices: an approach to test the applicability of different indices for ecosystem quality assessment." *Marine Pollution Bulletin*, Elsevier, Vol. 50, No. 12, pp. 1490-1499.

Rhee, H.-P. (2012). *Ecological impact assessment using AQUATOX model in Paldang reservoir*. Ph. D. dissertation, Konkuk University.

Rosenberg, D.M., and Resh, V.H. (1993). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Springer US, Chapman & Hall, New York-London.

Saadatpour, M., Afshar, A., and Edinger, J.E. (2017). "Meta-model assisted 2D hydrodynamic and thermal simulation model (CE-QUAL-W2) in deriving optimal reservoir operational strategy in selective withdrawal scheme." *Water Resources Management*, Springer, Vol. 31, No. 9, pp. 2729-2744.

Tak, Y.H., Kim, Y.D., Chong, S., and Chung, S.W. (2015). "Analysis of water quality impact for water intake in Jinyang reservoir using CE-QUAL-W2." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 48, No. 10, pp. 857-868.

Tharme, R.E. (2003). "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers." *River Research and Applications*, Wiley, Vol. 19, No. 5-6, pp. 397-441.

Won, D.H., Jun, Y.C., Kwon, S.J., Hwang, S.J., Ahn, K.G., and Lee, J.K. (2006). "Development of Konan Saprobic Index using benthic macroinvertebrates and its application to biological stream environment assessment." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 22, No. 5, pp. 768-783.

Yi, Y.K., Kim, Y.D., Park, K.Y., and Kim, W.G. (2005). "Two dimensional numerical modeling of turbidity variation in Imha reservoir." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 25, No. 4B, pp. 257-266.

Ziaie, R., Mohammadnezhad, B., Taheriyoun, M., Karimi, A., and Amiri, S. (2019). "Evaluation of thermal stratification and eutrophication in Zayandeh Roud Dam Reservoir using two-dimensional CE-QUAL-W2 Model." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 145, No. 6, 05019001.