J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 54, No. 10 (2021), pp. 819-833
doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.10.819
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Evaluation of applicability of linkage modeling using PHABSIM and SWAT

Kim, Yongwon[a] · Byeon, Sangdon[b] · Park, Jinseok[c] · Woo, Soyoung[d]* · Kim, Seongjoon[e]

[a]Integrated Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea
[b]Graduate Student, Interdisciplinary Graduate Program in Environmental and Biomedical Convergence, Kangwon National University, Chuncheon, Korea
[c]Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National 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: 21-061
Received: 20 July 2021; Revised: 24 August 2021; Accepted: 24 August 2021

Abstract

This study is to evaluate applicability of linkage modeling using PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) and SWAT (Soil and Water Assessment Tool) and to estimate ecological flow for target fishes of Andong downstream (4,565.7 km^2). The SWAT was established considering 2 multi purpose dam (ADD, IHD) and 1 streamflow gauging station (GD). The SWAT was calibrated and validated with 9 years (2012 ~ 2020) data of 1 stream (GD) and 2 multi-purpose dam (ADD, IHD). For streamflow and dam inflows (GD, ADD and IHD), R^2, NSE and RMSE were 0.52 ~ 0.74, 0.48 ~ 0.71, and 0.92 ~ 2.51 mm/day respectively. As a result of flow duration analysis for 9 years (2012 ~ 2020) using calibrated streamflow, the average Q185 and Q275 were 36.5 m^3/sec (-1.4%) and 23.8 m^3/sec (0%) respectively compared with the observed flow duration and were applied to flow boundary condition of PHABSIM. The target stream was selected as the 410 m section where GD is located, and stream cross-section and hydraulic factors were constructed based on Nakdong River Basic Plan Report and HEC-RAS. The dominant species of the target stream was *Zacco platypus* and the sub-dominant species was *Puntungia herzi Herzenstein*, and the HSI (Habitat Suitability Index) of target species was collected through references research. As the result of PHABSIM water level and velocity simulation, error of Q185 and Q275 were analyzed -0.12 m, +0.00 m and +0.06 m/s, +0.09 m/s respectively. The average WUA (Weighted Usable Area) and ecological flow of *Zacco platypus* and *Puntungia herzi Herzenstein* were evaluated 76,817.0 m^2/1000m, 20.0 m^3/sec and 46,628.6 m^2/1000m, 9.0 m^3/sec. This results indicated *Zacco platypus* is more adaptable to target stream than *Puntungia herzi Herzenstein.*

Keywords: SWAT, PHABSIM, HSI, WUA, ecological flow

PHABSIM과 SWAT을 이용한 연계모델링 적용성 평가

김용원[a] · 변상돈[b] · 박진석[c] · 우소영[d]* · 김성준[e]

[a]건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 석박사통합과정, [b]강원대학교 일반대학원 환경의생명융합학과 석사과정,
[c]서울대학교 일반대학원 생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공 박사과정, [d]건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료,
[e]건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

요 지

본 연구는 안동댐 하류(4,565.7 km^2)를 대상으로 준분포형 수문모델인 SWAT과 서식처모델인 PHABSIM을 연계하여 적용성을 평가하고, 대상어종에 대해 환경생태유량을 산정하였다. 대상유역 내 다목적 댐 2개(안동댐: ADD, 임하댐: IHD)의 실제운영자료를 구축하여 SWAT에 적용하였으며 추가로 1개의 수위관측소(구담: GD)을 선정하여 ADD, IHD, GD에 대해 유입·유출량 검보정을 수행하였다. 검보정 결과 R^2는 0.52 ~ 0.74, NSE는 0.48 ~ 0.71, RMSE는 0.92 ~ 2.51 mm/day로 분석되었다. 검보정된 GD의 유출량을 이용하여 2012년부터 2020년까지의 유황분석을 실시한 결과, 관측값의 유황분석 결과와 비교하여 평균 Q185는 36.5 m^3/sec (-1.4%), 평균 Q275는 23.8 m^3/sec (0%)로 분석되어 Q185와 Q275를 PHBASIM의 유량경계조건으로 적용하였다. PHABSIM의 대상하천은 GD가 위치한 410 m 구간으로 선정하였고 하천기본계획보고서 기반으로 하천단면 및 수리인자를 구축하였다. 대상하천의 우점종은 피라미, 아우점종은 돌고기로 분석되었으며 문헌조사를 통해 대상어종의 HSI를 수집하였다. PHABSIM 수위 모의 결과, Q185, Q275에서 각각 -0.12, +0.00 m의 오차가 발생하였고, 유속모의의 경우 Q185, Q275에서 각각 +0.06, +0.09 m/s의 오차가 발생하여 연계모의가 적절하게 된 것을 확인하였다. PHABSIM의 서식처 모의 결과, 피라미의 평균 가중가용면적 WUA와 환경생태유량은 76,817.0 m^2/1000m, 20.0 m^3/sec, 돌고기의 평균 WUA와 환경생태유량은 46,628.6 m^2/1000m, 9.0 m^3/sec로 분석되어 피라미가 돌고기보다 대상하천에 대해 적응성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: SWAT, PHABSIM, HSI, WUA, 환경생태유량

***Corresponding Author.** Tel: +82-2-444-0186
E-mail: wsy0209@konkuk.ac.kr (S. Woo)

© 2021 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

과거의 하천은 자정, 저류, 생태기능 등 환경적인 기능이 고려되지 않은 이수와 치수의 목적을 갖는 개발의 수단으로 사용되었으나, 국가가 발전하고 국민들의 생활수준이 향상되면서 이수·치수의 기능뿐만 아니라 친수공간, 경관 등 생활환경과 자연환경의 기능이 요구되었다. 이러한 이유로 우리나라는 1999년 하천법을 개정하고 이수와 치수, 그리고 환경기능을 모두 고려한 하천개발을 실시하였고 그 결과 하천은 현재 이수, 치수, 환경, 생태적으로 매우 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 개발을 통해 하천의 이용성은 증대되었으나, 댐, 저수지와 같은 수리시설물 건설에 따른 하천환경은 직접적으로 피해를 입었으며 이에 하천내 서식하는 수생생물의 서식환경에 큰 영향을 가져왔다. 또한, 최근 기후변화에 따른 강수패턴의 변화, 수자원의 변동성 증가와 더불어 하천 이용에 따른 지속적인 수리시설물의 설치로 인해 하천유량과 하천의 흐름에 변화가 불규칙적으로 나타나면서 수생태계의 변화가 발생하고 있다(Hur *et al*., 2014; Chung *et al*., 2019; Park *et al*., 2020; Kim and Choi, 2021).

자연환경은 다양한 기후조건, 인간활동과 더불어 물리·생물·화학적으로 다양한 시스템들이 복합적으로 연결되어 있다. 자연환경 중 특히 수환경은 유역의 단위에서 수문순환과 물질이동이 수체의 수질에 영향을 주고 나아가 수생태계에 영향을 주는 등 다양한 요소들의 복합적인 상호작용의 산물로써 수문·수질·수생태 각 요소들에 대해 체계적이고 유기적인 관리가 필요하다.

수환경을 관리하기 위해 우리나라는 주로 댐, 저수지와 같은 수리시설물을 통해 하천유지유량을 조절하여 하천의 수량을 관리하였고, 수질은 환경부에서 운영중인 수질측정망을 통해 지속적인 모니터링과 점원, 그리고 비점오염원 배출을 중점적으로 관리하였다. 하지만 수생태의 경우, 수질측정망과 같이 6일에서 8일 간격으로 측정하는 것이 아닌 생물측정망 조사 및 평가지침을 기반으로 1년에 두 차례(봄철, 가을철) 측정하여 부착돌말지수(Trophic Diatom Index, TDI), 저서동물지수(Benthic Macroinvertebrate Index, BMI), 어류생물지수(Fish Assessment Index, FAI), 수변식생지수(Riparian Vegetation Index, RVI), 서식수변환경지수(Haitat and Riparian Index, HRI)에 대해 총 5단계(A: 매우 좋음 ~ E: 매우 나쁨) 등급화 하여 평가한다. 이처럼 대부분의 수환경 관리는 하천의 수량확보 및 수질 개선을 목적으로 진행하였기 때문에 수생태계에 대한 관리는 상대적으로 부족하다.

하천에 서식하고 있는 수생생물들이 이루는 수생태계는 수량과 수질에 대해 직접적으로 민감하게 반응한다. 하천 흐름의 변화 또는 수질의 변화와 같은 교란에 영향을 받은 수생생물의 반응은 수환경에 변화를 유추하는 데 좋은 자료로 사용될 수 있다(Jung *et al*., 2016). 예를 들어, 하천에 서식하는 수생태계의 1차생산자인 부착조류는 먹이망의 기본이 되며, 짧은 생활사와 생식주기가 특징이기 때문에 인위적인 요인에 따른 반응을 다른 생물에 비해 빠르게 확인할 수 있다(Hotzel and Croome, 1999; Domingues and Galvao, 2007; Cabecinha *et al*., 2009). 또한, 수생태는 자정작용을 통한 수질 정화, 담수, 홍수조절, 영양소 순환, 미적 가치 등 다양한 서비스를 제공하여 경제적, 생태적 가치가 높으며 직·간접적으로 육상생태계와 인간에게도 영향을 미치기 때문에 건강한 수생태계를 유지하는 것은 매우 중요하다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 환경부에서는 2018년 '수질 및 수생태계 보전에 관한 법률'을 '물환경보전법'으로 개정하여 물환경을 수질과 수생태를 총칭하는 개념으로, 환경생태유량을 수생태 건강성 유지를 위한 최소한의 유량으로 정의하였다(ME, 2018). K-water에서는 환경생태유량의 산정방안을 정립하고, 고시된 지점에서 물리적 서식처 모의를 통해 환경 생태유량을 산정하고 있다(K-water, 2018). 환경생태유량은 하천에서 서식하는 다양한 생물 중 하천 생태계에서 고등소비자이자 하천생태환경의 주요한 지표생물로 활용 가능성을 가진 어류를 대상으로(Tamai *et al*., 2000; Hur *et al*., 2014; Jang *et al*., 2018; Lee *et al*., 2021) 미국의 USGS (United States Geological Survey)에서 개발한 1차원 물리적 서식처 모형인 PHABSIM (Physical Habitat Simulation System)을 이용하여 어류의 물리적 서식조건인 수심(Depth), 유속(Velocity) 및 하상재료(Substrate)를 기준으로 서식처면적(가중가용면적)을 산정하고 가장 많은 면적이 확보되는 유량을 최적 환경 생태유량으로 산정하고 있다(Wu, 2001; Moir *et al*., 2005; Im *et al*., 2007; Hur and Kim, 2009; Kang and Hur, 2012; Hur *et al*., 2013; Jang *et al*., 2017; Wang *et al*., 2018; Park *et al*., 2020; Lee *et al*., 2021).

이처럼 국내외로 하천의 수생태계를 보전하기 위해 다양한 어종 및 수생생물을 대상으로 PHABSIM을 이용하여 환경생태유량을 산정하고 있으나, PHABSIM은 지형, 수문 및 어류조사와 같은 현장조사를 지속적으로 실시해야한다는 한계점이 존재한다. PHABSIM은 현재 자연 상태의 환경 생태유량을 산정하는 데에는 많이 사용되고 있지만 물리적 서식처 모의를 위해 기상자료, 토지이용도, 토양도와 같은 자료들을 입력자료로 사용하지 않기 때문에 미래 기후변화, 토지이용의 변화와 같은 자연적·인위적인 유역환경변화에 따른 환경생태유량의 변화를 예측하고 정량화할 수 없다는 한계점이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 보고서 및 문헌조사를 통해 현장조사를 최소화 한 PHABSIM을 구축하고, 미래 기후변화, 토지이용변화와 같은 다양한 유역환경변화에 따른 유역의 수문변화, 하천 유출량을 모의하고 분석할 수 있는 준분포형 수문모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)과 연계모델링을 실시하여 PHABSIM과 SWAT의 연계모델링 적용성을 평가하고 대상하천에 대해 환경생태유량을 산정하였다. Fig. 1은 본 연구의 연구흐름도를 나타낸 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상 유역 및 하천

본 연구에서는 낙동강 유역 중 수생태계 건강성이 취약한 지점과 다목적댐인 안동댐, 임하댐이 포함되어 있는 안동댐 하류를 대상유역으로 선정하였다(Fig. 2). 대상유역의 유역면적은 4,565.7 km^{2}이며 유역의 연평균 기온과 강수량은 각각 과거 40년(1981 ~ 2020)에 대해 11.8℃, 1,072.3 mm로 나타

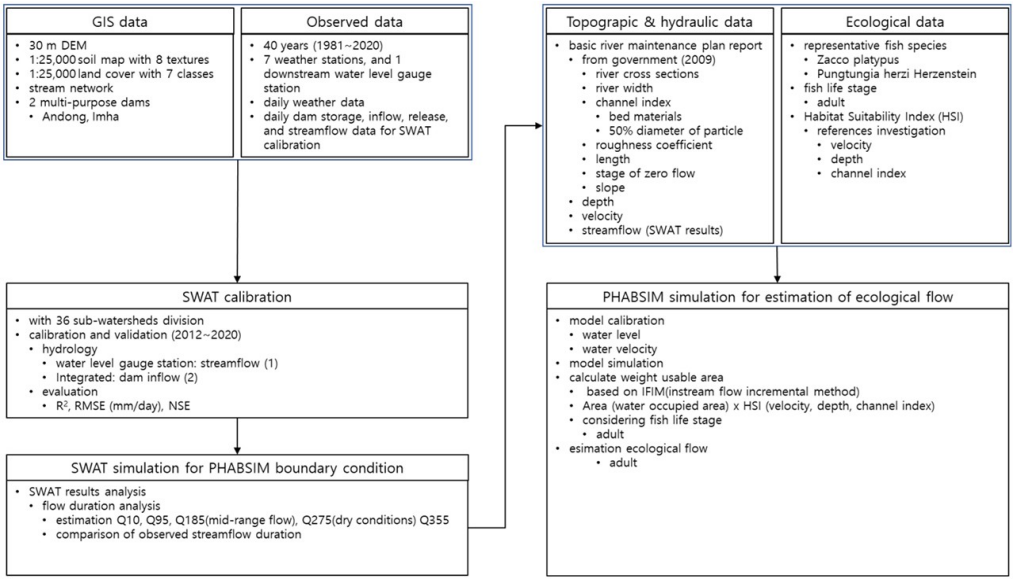


Fig. 1. Flowchart of this study

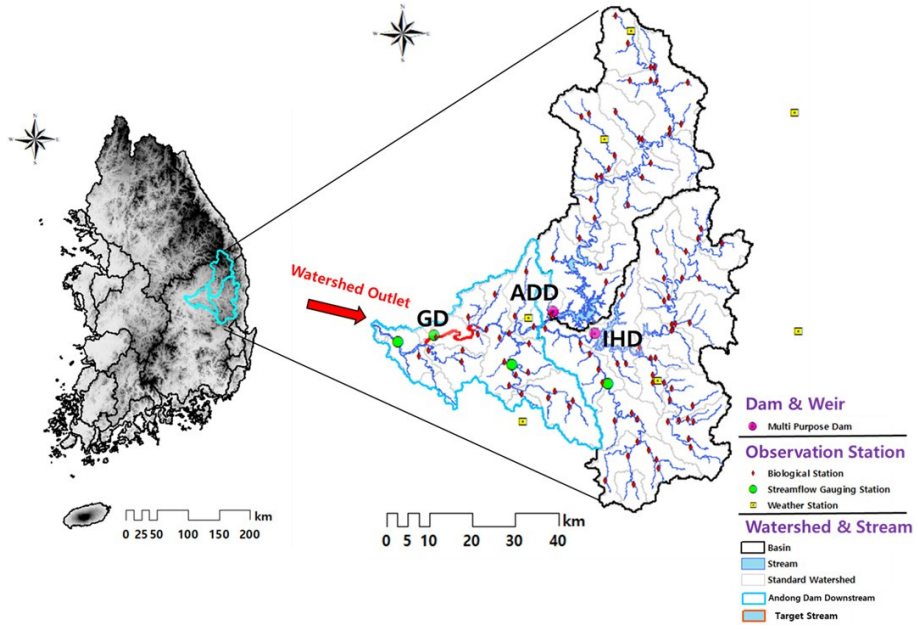


Fig. 2. Andong downstream

났다. 안동댐 하류의 경우 2020년에 FAI의 평균등급이 C등급으로 분석되어 상대적으로 수생태계 건강성이 좋지 않은 것으로 나타났다.

대상하천은 안동댐 하류에 위치한 구담수위관측소로부터 약 410 m구간을 대상하천구간으로 선정하였다. 대상하천에는 수위관측소, 수질 및 수질측정망이 모두 존재하고 하천의 상류에 다목적 댐 2개가 위치하기 때문에 추가적인 댐 방류 및 하천유지유량 방류를 통해 수생태계 건강성 개선을 도모할 수 있을 것으로 판단하여 안동댐 하류를 연구 대상유역 및 대상하천으로 선정하였다. Fig. 2는 안동댐 하류의 기상관측소, 수위관측소, 생물측정망, 다목적 댐 2개 안동댐(ADD), 임하댐(IHD) 및 검보정 지점인 구담수위관측소(GD)를 나타낸 것이고, Fig. 3은 대상하천을 나타낸 그림이다.

2.2 연구방법

본 연구에서는 안동댐 하류를 대상으로 두 개의 다목적 댐의 운영을 고려한 SWAT을 구축하고 PHABSIM의 유량경계조건(Boundary condition)을 생성하기 위해 대상하천에 대한 유출량을 이용하여 모의기간에 대해 유황분석을 실시하였다. 유황분석을 통해 대상하천의 평균적인 평수량(Q185, Mid-range flow)과 저수량(Q275, dry conditions)을 산정하여 PHABSIM에 적용하였다. PHABSIM 적용 후 관측 Q185와 Q275에 대한 유속과 수위를 이용하여 경계조건으로 적용한 SWAT의 Q185와 Q275에 대한 유속 및 수위를 모의하여 SWAT과 PHABSIM의 연계모의 적용성을 평가하고 대상어종에 대해 환경생태유량을 산정하였다.

SWAT 모형의 구축을 위해, 안동댐 하류의 DEM, 토양도 및 토지이용도와 같은 지형공간 입력자료와 검보정 지점에 대한 실제 유량 관측자료를 수집하였다. 또한, 대상유역의 상류에 위치한 두 개의 다목적 댐 안동댐과 임하댐의 방류량 및 유입량 자료를 구축하여 입력한 후 추가로 대상하천에 위치한 구담 수위관측소를 검보정 지점으로 선택하여 모형의 유입·유출량에 대해 다지점(Multi point) 검보정을 수행하였다.

PHABSIM 구축의 경우, 대상하천에 대해 하천지리정보시스템(River Information Management GIS, RIMGIS)에서 제공하는 MOLIT (2009)를 수집하고, 보고서에서 제공하는 하천단면정보를 이용하여 하천의 하상정보와 수리학적 입력자료를 구축하여 PHABSIM에 적용하였다. 대상어종 선정의 경우, 물환경정보시스템(www.water.nier. or.kr)에서 제공하는 생물측정망의 출현생물종을 분석하고, 하천정비기본계획보고서에서 조사한 어류상 조사를 분석하여 선정하였다. 대상어종의 서식처적합도지수(Habitat Suitability Index, HSI)는 대상하천으로 선정한 하천의 인근에서 분석된 HSI를 적용하여 환경생태유량을 산정하였다.

2.3 SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 물리적 기반의 준분포형 연속강우유출모형으로써, 다양한 토양 특성과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 영향평가를 위해 개발된 모형이며 물수지 방정식을 기반으로 강수, 증발산량, 지표유출, 기저유출 및 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrologic Response Units, HRUs)별로 계산할 수 있으며, SWAT의 이론은 Arnold *et al*. (1996)와 Neitsch *et al*. (2001)에 자세히 언급되어 있다.

Fig. 3. Target stream of study area

2.3.1 SWAT 입력자료

SWAT의 GIS 입력자료는 DEM (Digital Elevation Map)과 토양도 그리고 토지이용도가 필요하다. 본 연구에서는 국토지리정보원(www.ngii.go.kr)에서 제공하는 30 *m* × 30 *m* 해상도의 DEM자료를 사용하였고(Fig. 4(a)), 토양도는 국가수자원종합정보시스템(Water Resources Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다(Fig. 4(b)). 토지이용도는 환경부에서 제공하는 2008년 중분류 토지이용도를 활용하여 SWAT구축에 사용하였다(Fig. 4(c)).

SWAT의 기상자료는 강수량(mm), 최고·최저기온(℃), 평균풍속(m/sec), 상대습도(%), 그리고 일사량(MJ/m^2)으로 구성되어 있다. 따라서 안동댐 하류에 위치한 기상관측소 7개소(울진, 안동, 태백, 봉화, 청송군, 영덕, 의성)에 대해 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 제공하는 자료들을 1975년부터 2020년까지 구축하여 SWAT의 기상자료로써 활용하였다. 또한, 낙동강 상류에 위치한 다목적댐인 안동댐과 임하댐의 일별 댐 유입량과 저수량자료를 기상자료 기간과 동일하게 수집하여 SWAT에 적용하였다.

2.4 물리서식처 모의시스템(PHABSIM)

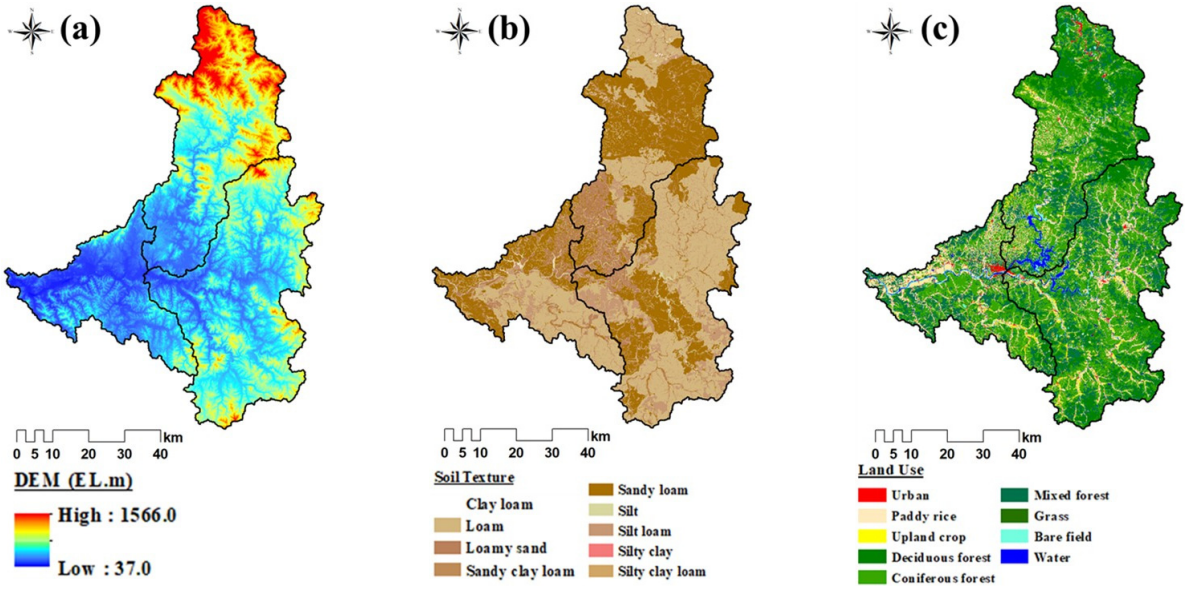
미국은 1960년대부터 연어과(Salmonidae) 개체수가 감소하면서 하천의 어류의 개체수와 서식처를 보전하기 위해 환경생태유량에 대한 연구가 처음 소개되었다. 이에 2001년에 물리적 서식처 모의시스템인 PHABSIM을 개발하여 유량과 가중가용면적인 WUA (Weighed Usable Area)의 관계를 제공하여 하천의 어류서식에 필요한 유량을 산정하였다(Stalnaker *et al.*, 1995; Hur and Kim, 2009).

PHABSIM은 하천의 유량, 수심 및 유속 등의 변화에 따른 하천 내 생물종별, 성장단계별 대상어종의 물리적 서식처 변화를 분석하여 유량증분방법론(Instream Flow Incremental Method, IFIM)에 기초하여 유량을 점차 증가시키면서 각 유량에서의 대상어종의 WUA를 산정하고 WUA가 최대일 때의 유량을 최적 환경생태유량으로 제시한다. PHABSIM에서의 WUA는 Eq. (1)과 같이 물의 점유면적과 분석하고자 하는 수생생물의 HSI의 곱으로 산정한다.

$$WUA = \sum_{i=1}^{n} A_i \times HSI \tag{1}$$

여기서, WUA는 가중가용면적, A_i는 i번째 하천단면에서 물의 점유면적, HSI는 대상어종의 각 물수심, 유속, 하상재료와 같은 물리적 서식처인자가 종합적으로 고려된 서식처적합도 지수이다.

PHABSIM은 크게 유량변화에 따른 수심, 유속 등의 물리적 서식처를 모의하는 수리해석 모형과 수생생물이 수리학적 변화에 적극적으로 반응함에 가정하여 각 물리적 서식환경에서 어류의 WUA를 산정하는 어류서식처모형으로 구성된다.



(a) DEM (b) Soil properties (c) Land use & cover

Fig. 4. GIS data of the Andong downstream

수리해석 모형은 하천단면별 수위와 유속 자료를 바탕으로 증분된 유량에서의 수위와 유속을 모의한다. 수의 모의방법은 수위-유량곡선을 이용하는 STGQ 모델링, Manning 방정식을 이용하여 모의하는 MANSQ 모델링, 표준축차법을 이용하여 수위를 모의하고 조도계수 N을 이용하여 보간하는 WSP 모델링이 존재한다. 본 연구에서는 Eq. (2)와 같이 STGQ 방법을 이용하여 수위를 모의하였다.

$$(WSL - SZF) = aQ^b \tag{2}$$

여기서, *WSL* (Water Surface Level)은 수위이고, *SZF* (Stage of Zero flow)는 흐름이 없을 때의 수위 Q는 유량 a와 b는 수위-유량 관계곡선의 상수이다.

유속의 경우, Manning 공식 기반의 VELSIM (VELocity SImulation Model)을 이용하여 모의된다(Waddle, 2001). VELSIM은 Eq. (3)과 같이 입력된 하상입력자료(경사, 수심, 유속 등)와 Manning 공식을 이용하여 각 하천단면별 조도계수를 역산한다. 증분된 유량에서의 유속은 각 방법으로 산정된 수위의 결과로 도출된 수심결과와 Eq. (3)에서 역산된 조도계수 값을 Manning 공식에 적용하여 계산된다(Eq. (4)).

$$n_i = \frac{1.486 \times S_e^{\frac{1}{2}} \times d_i^{\frac{2}{3}}}{v_i} \tag{3}$$

$$v_i = (\frac{1.486}{n_i}) \times d^{\frac{2}{3}} \times S_e^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

여기서, n_i는 단면 i에서의 Manning 계수이고, S_e는 경사, d_i는 단면 i에서의 수심, v_i는 단면 i에서의 유속이다.

2.4.1 수리해석 입력자료

PHABSIM의 수리해석 모형을 모의하기 위해서는 모의하고자 하는 하천의 단면별 형상자료와 유량별 수위 및 유속 등의 수리환경 자료가 필요하다. 길이가 약 1 km이상인 하천을 대상으로 국내외로 연구가 많이 진행된 River2D 모형과는 다르게, PHABSIM은 약 500 m 내외로 구간을 작게 설정하여 수리해석 입력자료를 구축하여 연구를 진행하고 있다. 본 연구에서는 MOLIT (2009)의 실측자료를 이용하여 약 51.1 m의 간격으로 총 8개의 하천단면 형상자료를 입력하였다. 또한 PHABSIM은 검증할 수위와 유속자료를 단면별로 필요하기 때문에, PHABSIM에 입력한 단면을 HEC-RAS에 동일하게 적용하여 수위와 유속 등을 모의하고 PHABSIM의 입력자료로 이용하였다. HEC-RAS의 모의는 흐름특성의 변동성을 고려하기 위해 GD의 관측 2012 ~ 2020년의 평균 Q185와 Q275를 이용하였으며, GD의 관측 평균 Q185와 Q275는 각각 36.5 m^3/sec, 23.8 m^3/sec로 나타났다.

2.4.2 대상어종 선정

대상어종을 선정하기 위해, 대상하천내 위치한 생물측정망의 측정시기인 2011 ~ 2020년의 봄철과 가을철 출현생물종을 분석하였다. 분석한 결과, 피라미(*Zacco platypus*)가 가장 높은 개체밀도를 가지는 것으로 나타나 우점종(Dominant species)으로 선정하였다. 또한 MOLIT (2009)의 어류상 조사를 분석한 결과, 대상하천에 대해 돌고기(*Puntungia herzi Herzenstein*)를 아우점종(Subdominant species)으로 선정하여 과거와 현재의 우점종 및 아우점종을 모두 고려한 환경생태유량을 산정하였다. Table 1은 피라미(*Zacco platypus*)와 돌고기(*Puntungia herzi Herzenstein*)에 대한 기본 특성을 정리한 것이다.

Table 1. The characteristics and features of target fishes (www.nifs.go.kr, 2021.07.01. access)

Species	*Zacco platypus*	*Pungtungia herzi Herzenstein*
Features		
Average Length	12 ~ 17 cm	10 ~ 15 cm
Characteristics	- *Zacco platypus* lives the upstream and middle stream of all streams and reservoirs in the South Korea, China, Japan, and Taiwan - The breeding season is from May to July - *Zacco platypus* prefers clean water and fast ripple	- *Pungtungia herzi Herzenstein* lives in the whole rivers in the South Korea - The breeding season is from May to June - *Pungtungia herzi Herzenstein* prefers clean streams with a gravel zone and slow water velocity

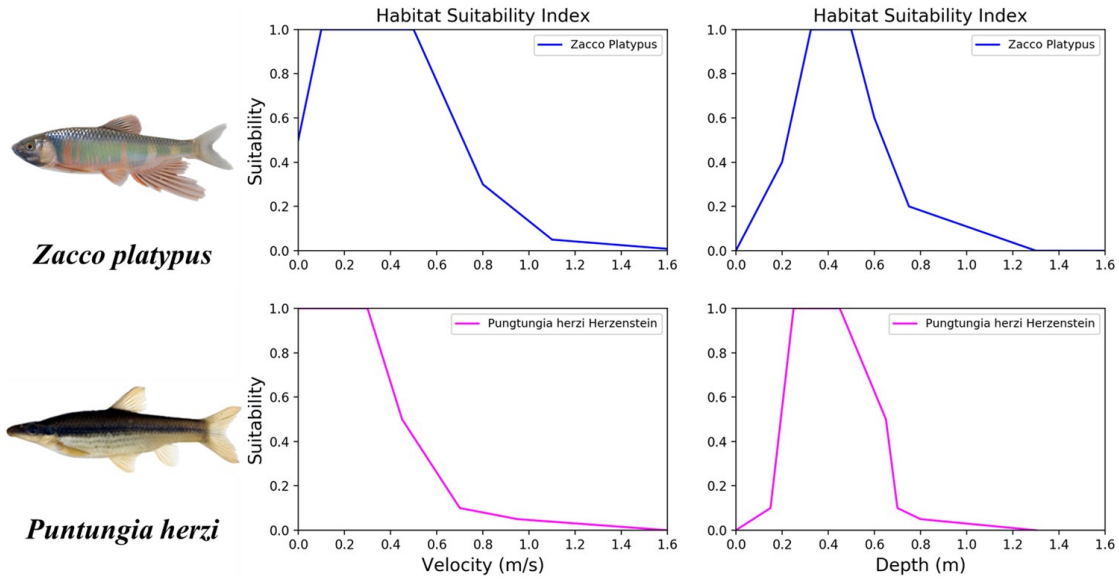


Fig. 5. HSI (Habitat Suitability Index) for target fishes

2.4.3 대상어종 HSI 산정

PHABSIM의 어류서식처 모형을 모의하기 위해서는 선정한 어종에 대해 HSI를 입력하여야 한다. HSI는 어종별, 어류의 생애주기별로 특정 서식처에서 서식의 가능 정도를 정량화하여 나타낸 것으로 서식조건이 가장 적합할 때 1.0의 값을 가지고, 가장 적합하지 않은 서식조건에서 0.0의 값을 갖는다. HSI 산정 방법으로는 각 유속과 수심, 하상재료 등의 서식처 환경에서 각각의 HSI를 산정하는 단변량법과 서식환경을 복합적으로 고려하는 다변량법 등이 있다(Waddle, 2001).

어류의 어종별, 생애주기별 HSI를 산정하기 위해서는 지속적인 현장조사와 어류와 서식처의 관계, 전문가의 자문 등 많은 노력이 필요하다. 또한, 같은 어종이라도 각각의 수계와 하천에서 다른 HSI를 가질 수 있기 때문에 대상하천과 인접한 수계 또는 하천에서 조사된 HSI를 고려하는 것이 바람직하다(Park *et al*., 2020).

본 연구에서 우점종으로 선정한 피라미의 HSI의 경우, 대상하천과 동일한 수계인 낙동강 내성천에 대해 적용된 연구사례를 인용하여 PHABSIM에 적용하였다(Kim and Choi, 2014). 우점종으로 선정한 피라미는 우리나라의 대부분의 하천에서 많이 발견되기 때문에 연구사례가 풍부하나, 아우점종으로 선정한 돌고기는 대상하천과 낙동강유역에 대해 산정한 HSI 및 연구사례가 부족하기 때문에, Kang (2010)이 현장모니터링을 통해 제시한 HSI를 적용하였다(Fig. 5). 적용한 HSI를 살펴보면, 피라미가 돌고기보다 더 빠른 유속을 선호하는 것으로 나타났으며, 수심은 피라미와 돌고기 모두 0.2 ~ 0.6 m에서 서식조건이 좋은 것으로 분석되었다.

하지만 본 연구에서 적용된 HSI는 모두 대상하천에서 직접 모니터링을 통해 산정된 HSI가 아니기 때문에, 추후에 대상하천에서의 조사를 통해 HSI를 산정하여 기입력한 HSI를 통해 산정한 환경생태유량의 비교·분석하여 발생한 차이를 반드시 고찰할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 모형의 최적의 매개변수를 찾기 위해 민감도 분석을 수행하였으며 각 수문요소들은 서로 영향을 주고받는 관계이므로 유기적이고 밸런스 있게 모의하기 위해 시행착오방법(Trial and error method)을 적용하여 유역내 위치한 ADD, IHD, GD에 대해 반복적으로 모형의 유입·유출량 검·보정을 시행하였다.

모형과 모형을 연계할 때 발생하는 불확실성을 줄이기 위해서는 모형을 보정하고 목적함수를 통해 검증하여 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다. SWAT의 유입·유출량 검보정에 따른 적용성 평가는 Determination of Coefficient (R^2), Nash Sutcliffe Model Efficiency (NSE), Root-Mean Square Error (RMSE), 그리고 Percent Bias (PBIAS)를 활용하였다. R^2는 관측값과 모의값이 완벽히 일치할 경우 1의 값을 나타내고, NSE는 -∞에서 1까지의 범위를 가지며 NSE의 값이 1일 때 관측값과 모의값이 완벽히 일치함을 의미한다. 또한, 0보다 큰 NSE 값은 모형으로부터 산정된 값이 용인되지만 0보다 작은 값은 용인될 수 없는 수준으로 판단된다. RMSE는 관측

값과 모의값의 오차를 판단하는 통계값으로 RMSE가 0에 가까울수록 오차가 적은 것으로 판단되며, PBIAS는 관측값과 모의값의 평균적인 경향을 판단하는 지표로써 양의 값(Positive values)는 과소평가(Underestimation)에 대한 모델의 편향(Bias)을 나타내고 음의 값(Negative values)은 과대평가(Overestimation)에 대한 편향을 나타낸다(Nash and Sutcliffe, 1970; Gupta *et al*., 1999; Santhi *et al*., 2001; Moriasi *et al*., 2007; Arnold *et al*., 2012; Moriasi *et al*., 2012; Mkhwanazi *et al*., 2012; Moriasi *et al*., 2015).

3.1 SWAT 수문 검보정

본 연구의 안동댐 하류에 대한 SWAT의 검보정에 사용된 매개변수는 Table 2와 같으며, 다목적 댐의 댐 운영을 고려한 모형의 수문 검보정을 실시하였다. 수문 관련 매개변수는 CN2, CH_N(2), CH_K(2), ESCO, CANMX, SOL_AWC, SOL_K, LAT_TIME, GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF로 총 10개의 매개변수를 사용하였으며 저수지 관련 매개변수로는 5개(RES_ESA, RES_EVOL, RES_PSA, RES_PVOL, RES_VOL)의 매개변수를 이용하였다.

안동댐 하류에 대한 SWAT의 보정기간은 5년(2012 ~ 2016), 검정기간은 4년(2017 ~ 2020)으로 설정하였다. Fig. 6은 (a) ADD, (b) IHD 및 (c) GD의 유입·유출량 검보정을 나타낸 것이며, Table 3은 ADD, IHD의 댐유입량 및 GD의 유출량 검보정 결과 및 통계분석을 정리한 것이다.

SWAT의 유입·유출량 통계분석 결과, 전체 기간에 대해 R^2는 0.52 ~ 0.74, NSE는 0.48 ~ 0.71의 효율을 나타낸 것으로 분석되었다. RMSE는 0.92 ~ 2.51 mm/day의 오차를 나타내었고, PBIAS는 -14.9 ~ -2.7%의 경향성을 나타낸 것으로 분석되었다.

세 개의 검보정 지점에 대해 2015년의 통계분석 결과가 상대적으로 낮은 결과를 보여주었는데, 세 개 지점에 대해 2015년의 연평균 강수량이 각각 648.6, 606.8, 648.6 mm로 심각한 가뭄이 발생하여 모형이 관측값의 경향을 잘 따라가지 못하는 것으로 판단하였다. 또한, IHD는 2013 ~ 2015, 2017, 2019년의 통계분석 결과가 같은 다목적 댐인 ADD보다 낮은 결과를 보여주었다. 이는 IHD에 대해 2013 ~ , 2017, 2019의 평균 강수량이 824.7 mm로 다른 검보정 지점보다 가뭄이 많이 발생하여 전체적인 통계분석결과에 영향을 끼쳤을 것으로 판단

Table 2. The SWAT calibrated parameters for dam inflow and streamflow

Parameter	Definition	Range	Default	Adjusted Value		
				ADD	IHD	GD
Hydrology						
CN2	SCS curve number for moisture condition	35 to 98	Given by HRUs	-20	-10	-20
CH_N(2)	Manning's "n" value for main channel	0.01 to 30	0.04	0.05	0.05	0.05
CH_K(2)	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	-0.01 to 500	0	-	2	2
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0.95	0.3	0.3	0.2
CANMX	Maximum canopy storage	0 to 100	0	-	7	-
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer (mm H_2O/mm soil)	0 to 1	Given by HRUs	-	*1.4	*2
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	0 to 2000	Given by HRUs	-	-	10
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0 to 180	0	-	5	-
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0 to 500	31	200	200	200
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0 to 5000	1000	500	3000	500
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0.048	0.2	0.7	-
Reservoir						
RES_ESA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to emergency spillway (ha)	-	-	5,617	2,640	-
RES_EVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the emergency spillway (10^4 m^3)	-	-	124,800	595,000	-
RES_PSA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the principal spillway (ha)	-	-	5,384	2,771	-
RES_PVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the principal spillway (10^4 m^3)	-	-	121,642	56,558	-
RES_VOL	Initial reservoir volume (10^4 m^3)	-	-	58,289.7	23,612.1	-

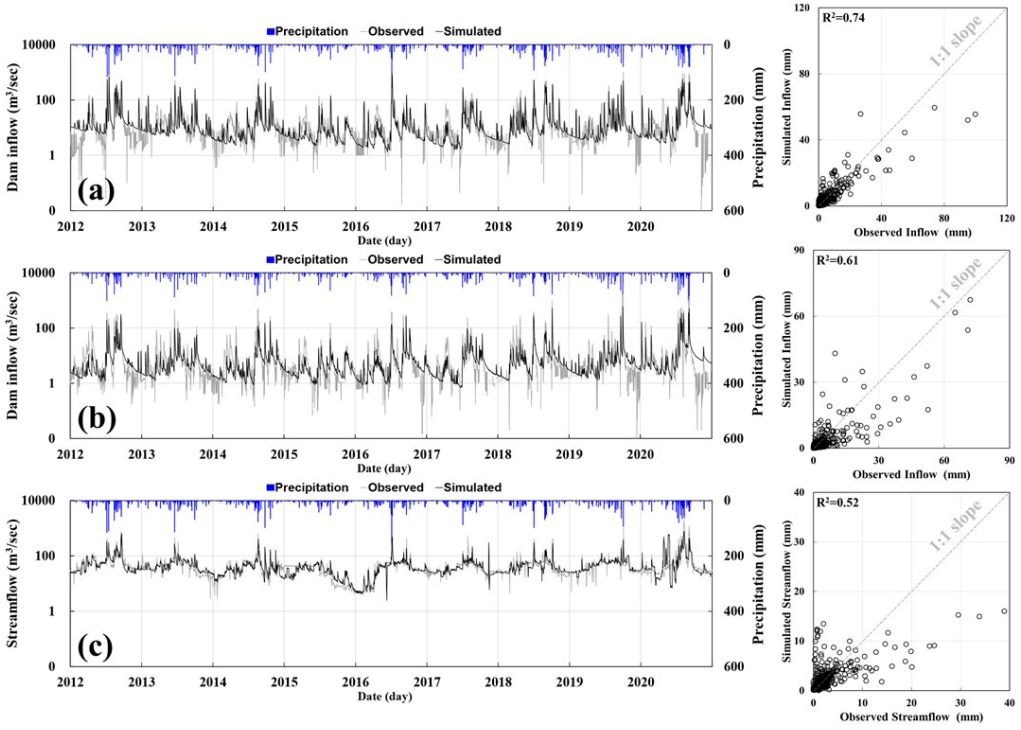


Fig. 6. The calibration and validation results for gauging station streamflow and weir inflow (a) ADD, (b), IHD, (c) GD

된다. GD의 경우 전체적인 R^2와 NSE가 다목적 댐과 비교하여 통계분석 결과가 낮게 산정되었는데, 이는 GD의 관측자료가 결측된 부분이 존재하여 통계분석 결과가 상대적으로 낮게 분석된 것으로 판단된다.

3.2 유황분석

본 연구에서는 PHABSIM의 유량 경계조건을 적용하기 위해 SWAT의 GD에 대해 2012년부터 2020년에 대한 유황분석을 실시하고, 대상하천의 평시유량과 저유량을 고려하기 위해 평균 평수량 Q185와 평균 저수량 Q275를 PHABSIM의 유량경계조건으로 적용하였다. Fig. 7은 GD의 2012년부터 2020년에 대한 관측값과 SWAT 모의결과의 연도별 유황곡선을 나타낸 것이며, Table 4는 2012년부터 2020년에 대한 평균 유황분석 결과를 나타낸 것이다. Q10의 경우 2020년 많은 비의 영향으로 모의결과가 관측값보다 작게 나온 것으로 분석되었다. 경계조건으로 설정한 Q185와 Q275는 각각 36.0 m^3/sec, 23.8 m^3/sec로 분석되었는데, 관측 Q185 36.5 m^3/sec, Q275 23.8 m^3/sec 과 비교하여 평균 -1.4%, 0.0%의 오차를 갖는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 SWAT이 GD의 유출흐름을 모의기간에 대해 1년 단위 유출경향을 잘 따라간다고 판단하여 관측 Q185, Q275를 PHABSIM의 보정할 유량, 모의 Q185와 Q275를 모의할 유량으로 적용하였다.

3.3 PHABSIM 유속 및 수심 보정

PHABSIM을 이용하여 환경생태유량을 산정하기 위해서는 먼저 입력한 단면의 유속과 수위에 대해 보정을 하여야 한다. 본 연구에서는 수심을 모의하기 위해 PHABSIM 내 존재하는 WSL (Water Surface Level) 모델 중 STGQ 모델을 이용하여 모의 및 검증하였다. 모의유량은 검증유량을 모두 포함한 1.0 m^3/sec부터 50.0 m^3/sec로 설정하였으며, 유속모의는 PHABSIM 내 VELSIM 모델을 이용하여 모의하였다. Fig. 8은 대상하천의 구담교가 위치한 하천단면과 단면에 대한 수위와 유속 모의결과를 나타낸 것이다.

수심모의 결과, 검증유량 Q185 36.5 m^3/sec, Q275 23.8 m^3/sec에서 각각 60.35, 60.11 m, 모의유량 Q185 36.0 m^3/sec, Q275 23.8 m^3/sec에서 각각 60.23, 60.11 m로 나타나 모의유량에서 각각 -0.12, 0.00 m의 오차가 발생하였는데, 이는 검증유량 Q185와 모의유량 Q185에서의 유량차이에서 발생한 오차로 판단된다.

유속 모의의 경우, 검증유량 Q185 36.5 m^3/sec, Q275 23.8 m^3/sec에서 각각 평균 0.53, 0.46 m/s, 모의유량 Q185 36.0 m^3/sec, Q275 23.8 m^3/sec에서 평균 0.62, 0.52 m/s로 나타나 각각 +0.06, +0.09 m/s의 오차가 발생하여 모의유량이 검증유량보다 더 빠른 유속을 갖는 것으로 모의되었다. 이는 PHABSIM에 입력한 유속과 조도계수 및 경사를 이용하여 모의할 때 발

Table 3. Summary of model calibration and validation for streamflow and dam inflows at 3 calibration points

Point	Year	PCP (mm)	Q				R^2	NSE	RMSE (mm/day)	PBIAS (%)
			Obs. (mm)	QR (%)	Sim. (mm)	QR (%)				
ADD	2012	1,181.0	615.0	0.52	698.2	0.59	0.88	0.82	1.62	+13.5
	2013	1,034.3	449.8	0.43	387.6	0.37	0.67	0.64	1.32	−13.8
	2014	993.5	456.3	0.46	389.6	0.39	0.70	0.68	1.60	−14.6
	2015	648.6	212.1	0.33	152.3	0.23	0.53	0.50	0.61	−28.2
	2016	1,110.7	465.2	0.42	362.9	0.33	0.88	0.87	1.63	−22.0
	2017	862.0	347.3	0.40	253.9	0.29	0.66	0.63	0.99	−26.9
	2018	1,293.0	625.1	0.48	538.4	0.42	0.82	0.82	1.56	−13.9
	2019	1,002.5	406.0	0.40	378.3	0.38	0.73	0.72	1.86	−6.8
	2020	1,374.4	877.7	0.64	687.3	0.50	0.77	0.72	3.38	−21.7
	Avg.	**1,055.6**	**494.9**	**0.45**	**496.7**	**0.43**	**0.74**	**0.71**	**1.62**	**−14.9**
IHD	2012	1,031.9	513.6	0.50	321.0	0.31	0.65	0.60	2.07	−37.5
	2013	839.0	288.7	0.34	197.3	0.24	0.46	0.38	1.66	−31.7
	2014	952.2	459.6	0.48	235.5	0.25	0.58	0.40	2.93	−48.8
	2015	606.8	149.0	0.25	108.6	0.18	0.45	0.35	0.61	−27.1
	2016	1,019.0	401.0	0.39	235.0	0.23	0.77	0.61	1.99	−41.4
	2017	732.2	228.5	0.31	176.2	0.24	0.51	0.47	1.01	−22.9
	2018	1,099.9	515.7	0.47	365.6	0.33	0.82	0.74	2.35	−29.1
	2019	993.1	415.9	0.42	307.9	0.31	0.54	0.49	4.66	−26.0
	2020	1,256.0	766.1	0.61	576.8	0.46	0.72	0.58	5.26	−24.7
	Avg.	**947.8**	**415.4**	**0.42**	**294.0**	**0.29**	**0.61**	**0.51**	**2.51**	**−32.1**
GD	2012	1,181.0	499.4	0.42	486.4	0.41	0.60	0.53	0.94	−2.6
	2013	1,034.5	350.2	0.34	352.8	0.34	0.56	0.56	0.49	+0.8
	2014	993.5	324.9	0.33	296.7	0.30	0.56	0.55	0.72	−8.7
	2015	648.6	212.6	0.33	205.8	0.32	0.43	0.39	0.28	−3.2
	2016	1,110.8	292.7	0.26	300.9	0.27	0.65	0.60	0.56	+2.8
	2017	862.0	290.1	0.34	286.1	0.33	0.16	0.06	0.68	−1.4
	2018	1,078.0	351.0	0.33	339.1	0.31	0.65	0.63	0.59	−3.4
	2019	867.8	361.7	0.42	376.8	0.43	0.59	0.56	0.77	+4.2
	2020	1,211.8	703.5	0.58	616.1	0.51	0.44	0.43	3.27	−12.4
	Avg.	**998.7**	**376.2**	**0.37**	**362.3**	**0.36**	**0.52**	**0.48**	**0.92**	**−2.7**

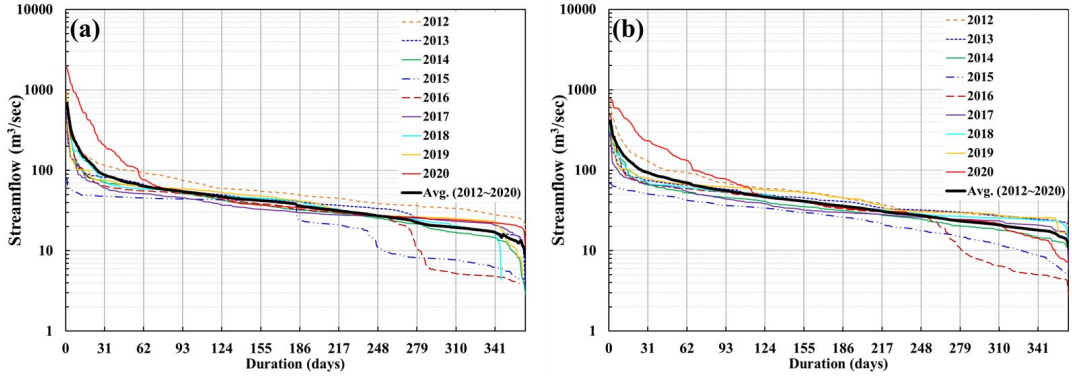


Fig. 7. The flow duration curves (2012 ~ 2020) (a) observed flow duration, (b) simulated flow duration

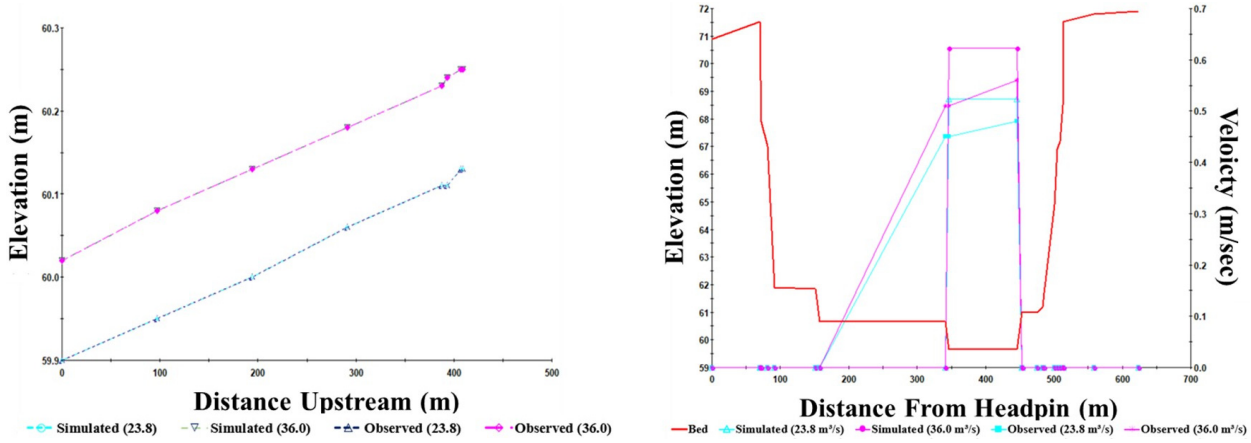
생한 오차로 판단되며 수위와 유속 모두 적절한 범위에서 모의된 것으로 판단되어 대상어종에 대해 환경생태유량을 산정하였다.

Table 4. The flow duration results for Andong downstream

Flow Duration	Observed (m^3/sec) 2012 ~ 2020 Avg.	Simulated (m^3/sec) 2012 ~ 2020 Avg.
Q10	195.2	168.0 (−14.0%)
Q95	54.2	55.0 (+1.5%)
Q185	36.5	36.0 (−1.4%)
Q275	23.8	23.8 (−)
Q355	13.8	15.3 (+10.8%)

3.4 환경생태유량 산정

본 연구에서는 환경생태유량을 산정하기 위해서 대상하천에 대해 우점종으로 피라미. 아우점종으로 돌고기를 선정하여 환경생태유량을 산정하였다(Fig. 9). 모의한 유량에 대해 피라미의 평균 WUA는 76,817.0 m^2/1000 m로 분석되었고 돌고기의 평균 WUA는 46,628.6 m^2/1000 m로 분석되었다. 피라미의 평균 WUA가 돌고기의 평균 WUA 보다 약 1.65배 정도 높게 산정되었는데, 이를 통해 피라미가 돌고기보다 대상하천에 대해 적응성이 높은 것을 확인할 수 있으며 피라미의 개체밀도 또한 높을 것으로 예상할 수 있다. 실제로 대상하천의 생물측정망의 관측시기인 2011년부터 2020년까지의 생물출현종을 분석하였을 때, 피라미의 개체밀도가 가장 높은



(a) (b)

Fig. 8. The calibration results of water surface level and velocity at GD cross-section (a) water surface level, (b) water velocity

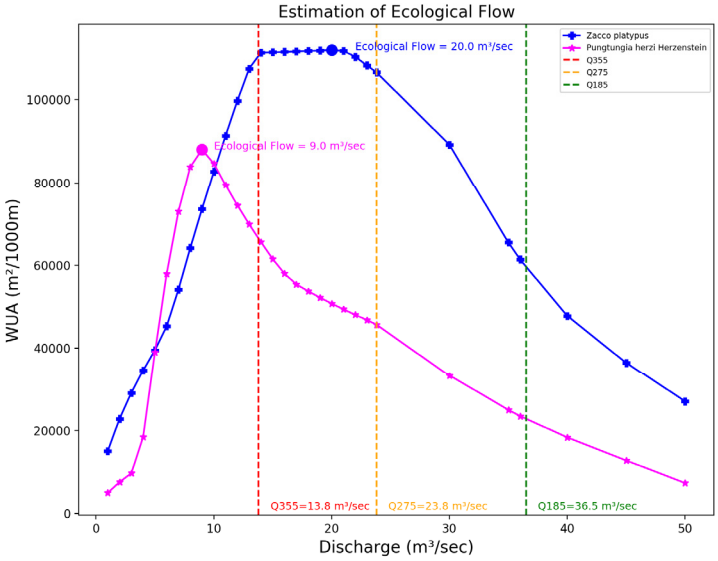


Fig. 9. Estimation of ecological flow for *Zacco platypus* and *Puntungia herzi Herzenstein*

것으로 나타나 PHABSIM의 서식처 모의가 적절하게 잘 모의된 것으로 판단된다.

대상어종들에 대해 WUA가 최대일 때 즉, 피라미의 최적 환경생태유량은 약 20.0 m^3/sec로 Q275 저수량보다 낮은 값을 갖는 것으로 분석되었고 돌고기의 최적 환경생태유량은 9.0 m^3/sec로 Q355 갈수량보다 작은 것으로 분석되었다. 피라미의 환경생태유량이 돌고기보다 2배 이상의 환경생태유량이 산정된 것은 피라미는 일반적으로 물이 맑고 유속이 빠른 여울이 형성된 하천을 선호하지만, 돌고기의 경우 완만한 유속을 갖는 하천을 더 선호하기 때문에 피라미의 환경생태유량이 돌고기보다 높게 산정된 것으로 판단된다. 특히 최적 환경생태유량이 포함된 모의유량 6.0 ~ 10.0 m^3/sec에서 돌고기의 WUA가 피라미의 WUA보다 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 수심이 얕고 유속이 완만한 환경을 선호하는 돌고기의 최적 서식환경이 조성된 것으로 판단된다. 또한 대상하천의 관측 평균 갈수량 Q355 13.8 m^3/sec 보다도 작은 유량에서 서식조건이 최적이기 때문에, 어도 또는 인공구조물을 설치하여 얕은 수심과 완만한 유속을 갖는 서식환경 조성이 필요할 것으로 판단된다.

3.5 환경생태유량 부족일수 분석

대상어종인 피라미와 돌고기의 환경생태유량이 각각 20.0 m^3/sec, 9.0 m^3/sec로 분석됨에 따라, GD의 2012년부터 2020년까지의 관측 유황분석결과를 이용하여 각 대상어종들의 환경생태유량 부족일수를 분석하였다.

Fig. 10은 Fig. 7(a)와 같이 GD의 관측 유황곡선에 피라미와 돌고기의 환경생태유량 20.0 m^3/sec, 9.0 m^3/sec를 표시한 것으로, 표시한 피라미와 돌고기의 환경생태유량 아래에 위치한 유황곡선들은 환경생태유량이 부족한 것을 의미한다. 피라미의 환경생태유량(20.0 m^3/sec) 부족일수를 분석한 결과, 2012년의 부족일수는 1일(9.42 m^3/sec)로 분석되어 2012년부터 2020년까지 중 가장 적은 일수로 분석되어 2012년에는 피라미의 환경생태유량 조건을 만족하는 것으로 분석되었다. 대상유역의 가뭄기간인 2013 ~ 2016년은 각각 66일, 79일, 143일, 90일로 분석되었다. 특히, 2015년의 경우 부족일수가 가장 크게 나타났는데, 이는 2015년의 강수량이 648.6 mm로 평가기간에 대해 가장 적은 강수가 내렸기 때문으로 판단되며 2013년, 2014년, 2016년은 2015년보다는 많은 강수가 내렸으나, 유역의 유출율이 각각 34.0%, 33.0%, 26.0%로 나타났기 때문에 부족일수가 크게 발생한 것으로 판단된다. 2017년부터 2020년은 각각 21일, 33일, 19일, 6일로 분석되어 대상유역의 가뭄기간보다 부족일수를 회복한 것으로 나타났고, 실제로 강수량과 유출율 또한 가뭄기간보다 높은 것으로 분석되었다.

돌고기의 환경생태유량(9.0 m^3/sec) 부족일수의 경우, 2012년에 0일로 분석되어 2012년은 부족하지 않은 것으로 나타났다. 가뭄기간인 2013 ~ 2016년은 각각 2일, 8일, 101일, 78일로 분석되어 피라미의 부족일수와 비교하여 조금 더 적은 부족일수를 나타내었다. 이는 돌고기의 환경생태유량은 피라미의 환경생태유량과 평균 Q355(13.8 m^3/sec)보다도 작은 9.0 m^3/sec로 분석되었기 때문에 피라미의 부족일수보다는 더 적은 부족일수를 갖는 것으로 판단된다. 2017 ~ 2020년의 경우 각각 0일, 1일, 5일, 0일로 분석되어 환경생태유량이 거의 부족하지 않은 것으로 분석되었다.

피라미와 돌고기에 대한 2012년 ~ 2020년의 평균 환경생

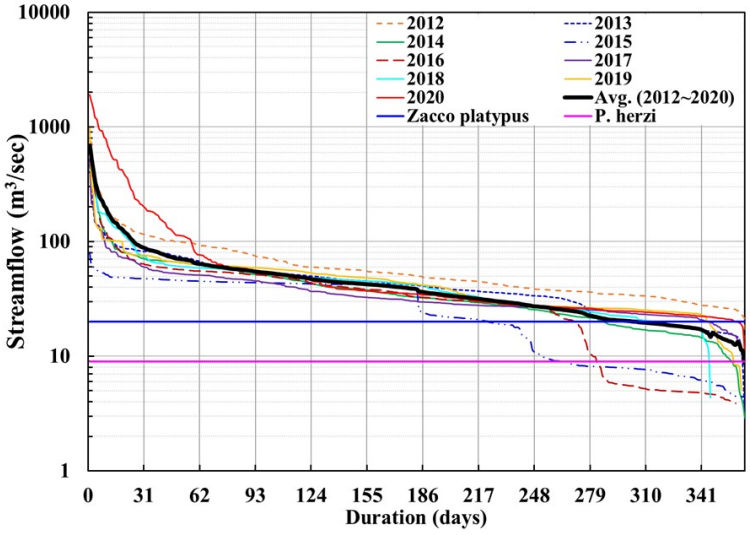


Fig. 10. Analysis of ecological flow insufficient days for target fishes

태유량 부족일수는 각각 50.9일, 21.7일로 피라미는 두 달보다 조금 적은 기간, 돌고기는 한 달보다 조금 적은 기간 정도가 환경생태유량이 부족한 것으로 분석되었는데, 이는 우리나라 4계절 중 평균적으로 강수가 적게 발생하는 봄철과 겨울철의 하천유량이 부족한 것으로 판단된다. 하천의 수생태계를 보존하기 위해서는 하천을 대표할 수 있는 어종을 파악하고 어종들의 환경생태유량 부족시기를 분석하여 댐과 같은 수리시설물의 방류시기를 조절하거나 하천유지유량과 같은 추가적인 유량방류를 고려해야할 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 수생태계 건강성이 취약한 안동댐 하류를 대상으로 SWAT을 구축하고 2012년부터 2020년까지의 유황분석을 실시하여 평가기간에 대한 평균 평수량 Q185와 저수량 Q275를 PHABSIM의 유량경계조건으로 적용하였다. 또한, 낙동강의 하천기본계획보고서를 활용하여 PHABSIM을 구축하고 우점종으로 선정한 피라미와 아우점종으로 선정한 돌고기를 대상으로 문헌조사를 실시하여 수집한 HSI를 바탕으로 대상어종들의 환경생태유량을 산정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) SWAT과 PHABSIM의 신뢰성 있는 모의를 위해, 안동댐 하류의 상류에 위치한 다목적 댐 2개(ADD, IHD)와 수위관측소 GD의 2012년부터 2020년에 대해 유입·유출량 검보정을 수행하였다. 유입·유출량 통계분석 결과 전체 기간에 대해 R^2는 0.52 ~ 0.74, NSE는 0.48 ~ 0.71의 효율을 나타내었고, RMSE와 PBIAS는 각각 0.92 ~ 2.51 mm/day의 오차와 -14.9 ~ -2.7%의 경향을 갖는 것으로 분석되었다.
2) PHABSIM의 유량 경계조건을 생성하기 위해, 보정된 SWAT의 대상하천의 유출량을 이용하여 유황분석을 실시하였다. 대상하천에 위치한 수위측정망 GD의 2012년부터 2020년까지의 평균 유황분석 결과, Q10, Q95, Q185, Q275, Q355는 각각 195.2, 54.2, 36.5, 23.8, 13.8 m^3/sec로 분석되었고, SWAT의 유황분석 결과 168.0(-14.0%), 55.0(+1.5%), 36.0(-1.4%), 15.3(+10.8%) m^3/sec로 분석되었다. 평시유량과 저유량시기를 모두 고려하기 위해, SWAT의 Q185와 Q275를 PHABSIM의 유량경계조건으로 적용하였다.
3) 대상어종을 선정하기 위해, 대상하천 내 위치한 생물측정망의 측정시기인 2011년부터 2020년까지의 봄철 및 가을철의 출현생물종을 분석하였다. 분석결과 대상하천에서 가장 높은 개체밀도를 나타내는 어종은 피라미로 분석되었으며, 대상하천의 하천기본계획보고서의 어류상조사 결과를 따르면 아우점종은 돌고기로 나타났기 때문에 우점종을 피라미, 아우점종을 돌고기로 선택하여 문헌조사를 통해 대상어종들의 HSI를 수집하였다.
4) PHABSIM을 구축하기 위해, 안동댐 하류에 대한 하천기본계획보고서를 수집하였다. 대상하천의 수리학적 자료 및 하천단면은 하천기본계획보고서에 기초하여 입력하여 평균 51.1 m 간격의 PHABSIM을 구축하였으며, HEC-RAS를 이용하여 PHABSIM의 검증유량으로 사용할 GD의 평균 Q185와 Q275 및 모의유량으로 사용할 SWAT의 평균 Q185와 Q275에 대한 수위와 유속자료를 생성하여 PHABSIM에 적용하였다.
5) PHABSIM의 수심모의결과, 검증유량 Q185, Q275에서 각각 60.35, 60.11 m, 모의유량 Q185, Q275에서 각각 60.23, 60.11 m로 나타나 모의유량에서 각각 -0.12, 0.00 m의 오차가 발생하였다. 유속모의의 경우, 검증유량 Q185, Q275에서 각각 평균 0.53, 0.46 m/s, 모의유량 Q185, Q275에서 각각 평균 0.62, 0.52 m/s로 나타나 각각 +0.06, +0.09 m/s의 오차가 발생하여 PHABSIM의 수리해석이 적절하게 모의되었다.
6) PHABSIM의 서식처모의결과, 피라미의 최적 환경생태유량은 20.0 m^3/sec로 분석되었고 돌고기의 최적 환경생태유량은 9.0 m^3/sec로 분석되었다. 또한 피라미의 평균 WUA가 76,817.0 m^2/1000 m로 돌고기의 평균 WUA 46,628.6 m^2/1000 m보다 크게 나타났다. 이 결과는 피라미가 돌고기보다 대상하천에 대해 적응성과 서식처 적합성이 높은 것으로 판단된다.

본 연구는 현장조사를 최소화한 SWAT-PHABSIM 연계모의를 통해 적용성을 평가하고, 적용성이 높은 것을 확인하였으며 이를 통해 대상어종의 환경생태유량을 산정 및 제시하였다. SWAT은 하천단면과 수위를 따로 결과파일에서 제공하지 않으며, 유속의 경우 결과파일에서 제공하나 단면별 및 층별로 제공하지 않기 때문에, PHABSIM과 연계를 위해서는 하천기본계획보고서 또는 HEC-RAS와 같은 프로그램과 같이 하천단면과 수리인자를 제공해주는 프로그램을 필요로 한다. 하지만, 본 연구에서 PHABSIM과 SWAT의 연계모델링 적용성이 높은 것을 확인할 수 있었으며 SWAT은 다양한 유역환경변화를 고려할 수 있기 때문에 추후 연구로 유역환경변화에 따른 환경생태유량을 제시할 수 있고 미래 기후변화 또는 미래 토지이용변화에 따른 환경생태유량을 예측 및 정량화 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 서식처 모델을 통해 산정

된 환경생태유량은 대상어종의 HSI에 가장 지배적인 영향을 받기 때문에, 분석하고자 하는 하천의 대상어종에 대한 정확한 현장조사 및 HSI 확립은 불가피할 것으로 판단되며, 이러한 부분을 보완한다면 대상하천과 어류들에 대한 더 정확한 환경생태유량을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., and Jha, M.K. (2012). "SWAT: model use, calibration, and validation." *Transactions of the ASABE*, ASABE, Vol. 55, No. 4, pp. 1491-1508.

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

Cabecinha, E., Cortes, R., Cabral, J.A., Ferreira, T., Lourenco, M., and Pardal, M.A. (2009). "Multi-scale approach using phytoplankton as a first step towards the definition of the ecological status of reservoirs." *Ecological Indicator*, Elsevier, Vol. 9, No. 2, pp. 240-255.

Chung, J.H., Lee, Y.G., and Kim, S.J. (2019). "Assessment of surface temperature mitigation effects of wetlands during heat and cold waves using daytime and nighttime MODIS land surface temperature." *Journal of Wetlands Research*, Kwetland, Vol. 21, No. s-1, pp. 123-133.

Domingues, R.B., and Galvao, H. (2007). "Phytoplankton and environmental variability in a dam regulated temperate estuary." *Hydrobiologia*, Springer, Vol. 586, No. 1, pp. 117-134.

Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.G., (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multi level expert calibration." *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.

Hotzel, G., and Croome. R. (1999). *A phytoplankton methods manual for australian freshwaters*. LWRRDC Occasional Paper, LWRRDC, pp. 1-58.

Hur, J.W., and Kim, J.K. (2009). "Assessment of riverin health condition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish habitat in downstream of Yongdam Dam." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 6, pp. 481-491.

Hur, J.W., Kang, H.S., Jang, M.H., and Lee, J.Y. (2013). "Fish community and estimation of optimal ecological flowrate in up and downstream of Hoengseong Dam." *Journal of Environmental Science International*, KENSS, Vol. 22, No. 8, pp. 925-935.

Hur, J.W., Kim, D.H., and Kang, H.S. (2014). "Estimation of optimal ecological flowrate of fish in Chogang Stream." *Journal of Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering*, KSEIE, Vol. 1, No. 1, pp. 39-48.

Im, D.K., Jung, S.H., Ahn, H.K., and Kim, K.H. (2007). "Application of Physical Habitat Simulation System (PHABSIM) in the reach of small dam removal for *Zacco platypus*." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 11, pp. 909-920.

Jang, K.H., Park, Y.K., Kangm J.I., and Kim, M.H. (2018). "Estimation of ecological flow rate for *Zacco platypus* based on habitat suitability index considering probability density function." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 3, pp. 207-219.

Jang, K.H., Park, Y.K., Kim, K.O., and Chung, M. (2017). "A comparative study on assessment model of ecological flow rate considering instream flow incremental methodology." *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, KSET, Vol. 18, No. 6, pp. 604-616.

Jung, C.G., Lee, J.W., Ahn, S.R., Hwang, S.J., and Kim, S.J. (2016). "Assessment of ecological streamflow for maintaining good ecological water environment." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 58, No. 3, pp. 1-12.

K-water (2018). *A research on estimation and securing of environmental flow*.

Kang, H.S. (2010). *Discussion for estimation of physical habitat suitability index for fish*. Working paper, Korea Environment Institute.

Kang, H.S., and Hur, J.W. (2012). "Aquatic ecosystem assessment and habitat improvement alternative in Hongcheon River using fish community." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 5B, pp. 331-343.

Kim, S.K., and Choi, S.U. (2014). "Change of fish habitat in a downstream reach of a stream due to dam construction." *Ecology and Resilient Infrastructure*, KSEIE, Vol. 1, No. 2, pp. 61-67.

Kim, S.M., and Choi, H.S. (2021). "Analysis and evaluation of physical habitat suitability for the stream fish." *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 63, No. 1, pp. 2-8.

Lee, J.J., Kim, S.Y., and Hur, J.W. (2021). "A study on the estimation of environmental ecological flow in the Gilan Stream of Nakdong River." *Crisisonomy*, KRCEM, Vol. 17, No. 3, pp. 99-111.

Ministry of Environment (ME) (2018). *Notification of instream flow status*. National Institute of Environmental Research.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2009). *Nakdong river basic plan report*.

Mkhwanazi, M., Chavez, J.L., and Rambikur, E.H. (2012). "Comparison of large aperture scintillometer and satellite based energy

balance models in sensible heat flux and crop evapotranspiration determination." *International Journal of Remote Sensing Applications*, IJRSA Vol. 2, No. 1, pp. 24-30.

Moir, H.J., Gibbins, C.N., Soulsby, C., and Youngson, A.F. (2005). "PHABSIM modelling of atlantic Salmon spawning habitat in an upland stream: Testing the influence of habitat suitability indices on model output." *River Research and Applications*, Wiley, Vol. 21, No. 9, pp.1021-1034.

Moriasi, D.H., Wilson, B.N., Douglas-Mankin, K.R., Arnold, J.G., and Gowda, P.H. (2012). "Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation." *Transactions of the ASABE*, ASABE, Vol. 55, No. 4, pp. 1241-1247.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *Transactions of the ASABE*, ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.

Moriasi, 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*, ASABE, Vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785.

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, pp. 340-367, Temple, Texas, U.S.

Park, J.S., Jang, S.J., and Song, I.H. (2020). "Estimation of optimum ecological stream flow in the Banbyeon Stream using PHABSIM -Focused on *Zacco platypus and Squalidus chankaensis tsuchigae*-." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 62, No. 6, pp. 51-62.

Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L.M. (2001). "Validation of the swat model on a large rwer basin with point and nonpoint sources 1." *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 37, No. 5, pp. 1169-1188.

Stalnaker, C.B., Lamb, B.L., Henriksen, J., Bovee, K., and Bartholow, J. (1995). *The instream flow incremental methodology a primer for IFIM*. Biological report 29. U.S. Department of the Interior, Fort Collins CO, pp. 45.

Tamai, N., Okuda, S., and Nakamura, S. (2000). *Assessingriverine environments for habitat suitability on the basis of natural potential*. University Tokyo Press, Japan, pp. 1-270.

Waddle, T. (2001). *PHABSIM for Windows user's manual and exercises*. No. 2001-340. USGS, U.S. Geological Survey, VA, U.S.

Wang, H., Wang, H., Hao, Z., Wang, X., Liu, M., and Wang, Y. (2018). "Multi-objective assessment of the ecological flow requirement in the upper Yangtze national nature reserve in China using PHABSIM." *Water*, MDPI, Vol. 10, No. 3, pp. 1-16.

Wu, F.C. (2001). "Ecohydraulic modeling of instream physical habitat by modified PHABSIM." *International Conference on Ecological Protection of the Planet Earth*, Xanthi, Greece, pp. 1-8.