



# 국내 하천 형상을 반영한 SWAT 모형 내 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식 도출

## Derivation of Channel and Floodplain Width Regression Reflecting Korean Channel Shapes in SWAT Model

이현구<sup>a</sup> · 한정호<sup>b</sup> · 이동준<sup>c</sup> · 임경재<sup>d</sup> · 김종건<sup>e, †</sup>

Lee Hyeon-Gu · Han Jeongho · Lee Dongjun · Lim Kyoung-Jae · Kim Jonggun

### ABSTRACT

In this study, the channel and floodplain widths are indirectly measured for three different watersheds using satellite images to reflect the shape of Korean channels in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. For measuring the channel and floodplain widths, multiple satellite images were referred to ensure the widest width of certain points. In the single channel, the widths at the multiple points were measured. Based on the measured data, the regression equations were derived to estimate the channel and floodplain widths according to watershed areas. Applying these developed equations, this study evaluated the effect of the change of channel and floodplain widths on the SWAT simulation by comparing to the measured streamflow data. The developed equations estimated larger channel width and smaller floodplain compared with those calculated in the current SWAT model. As shown in the results, there was no considerable changes in the predicted streamflow using the current and developed equations. However, the flow velocity and channel depth calculated from the developed equations were smaller than those of the current equations. The differences were caused by the effect of different channel geometries used for calculating the hydraulic characteristics. The channel geometries also affected the water quality simulation in channels because the hydraulic characteristics calculated by the channel geometries are directly related to the water quality simulation. Therefore, application of the river cross-sectional regression equation reflecting the domestic stream shape is necessary for accurate water quantity / quality and water ecosystem simulation using hydrological model.

**Keywords:** Regression equation; channel width; floodplain width; SWAT; channel geometry

### 1. 서 론

우리나라는 연 강수량의 60% 이상이 여름에 집중되어 여름철에는 홍수와 장마가 발생하며, 봄철에는 가뭄이 발생하는 기상학적 특징을 가지고 있다 (Ko et al., 2005). 특히, 최근에 가속화 되고 있는 기후변화로 연 강수량이 증가함에도 강수일수가 감소하여 집중호우, 국지성 폭우, 돌발홍수 및 대형홍수 발생 빈도가 증가하고 있다 (Kwon, 2005). 또한, 연 강수량의

대부분이 여름철에 집중되고 봄철과 겨울철 강수량이 감소하는 상황에 가뭄재해의 위험성이 기후변화와 더불어 증가하고 있다 (Hanson and Weltzin, 2000). 이렇듯 이상기후에 의한 자연재해 발생 빈도 및 재해강도가 증가하고 있다. 이상기후에 의한 자연재해는 인명피해나 재산피해 외에도 생태변화를 야기하며 수량, 수질, 그리고 수생태에 큰 영향을 미친다 (Jang and Ahn, 2012). 따라서 이러한 자연재해를 예측하고 예방하기 위해 다양한 대책마련이 필요하다. 이를 위해서는 우선 하천의 정확한 수량 및 수질 예측을 위한 연구가 선행되어야 한다. 과거부터 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 다양한 유역 특성을 고려하여 수문·수질 예측을 위해 SWAT (Soil and Water Assessment Tool), HSPF (Hydrological Simulation Program - FORTRAN), PRMS (Precipitation Runoff Modeling System) 등 여러 수문 모형이 개발되었다. 이러한 수문 모형은 기상 및 지형자료 등 다양한 사용자 입력자료 등을 필요로 하고, 사용자 입력자료를 바탕으로 모형 구동을 위한 변수들을 산정한다. 이렇듯 변수 산정에 중요한 입력자료의 불확실한 값의 입력은 모형의 수문 및 수질 모의 결과의 신뢰도에 영향을 미친다. 이에 정확한 수문 및 수질 모의를 하기 위해서는 신뢰도 높은 입력자료 및 변수들을 필요로 하며 하천단면 입력자료 중에서 하천 유속과 수심은 수문·수질 모의에서 큰 비중을

<sup>a</sup> Undergraduate Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>b</sup> PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>c</sup> PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>d</sup> Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>e</sup> Postdoctoral Research Fellow, Institute of Agricultural and Life Science, Kangwon National University

† **Corresponding author**

Tel.: +82-33-241-6468

E-mail: kimjg23@gmail.com

Received: December 14, 2018

Revised: June 7, 2019

Accepted: June 7, 2019

차지한다. 하천단면 자료들은 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 조화가 가능하지만 특정 구간에 대해서만 자료가 제시되어 있다. 하천단면 실측자료를 구축하는 것은 많은 인력, 시간, 장비 등이 필요하기에 현재 구축되어 있는 실측 하천단면 입력자료가 부족한 실정이다. 따라서 미계측 유역에 대한 모의를 위하여 유역 및 하천 특성자료들을 이용하여 하천단면 입력자료를 산정하기 위한 연구가 필요하다.

미계측 유역에 대한 하천단면을 산정하기 위하여 다양한 인자들이 반영될 수 있으나 추가적인 인자구축의 어려움과 복잡성 때문에 영향력이 큰 소수의 독립인자를 반영한 회귀식 도출이 필요하다. 여러 수리·수문 모형 중 현재 우리나라에서 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 유역 단위 모델인 SWAT 모형은 GIS와 연계하여 유역단위의 수문 및 수질을 시공간적으로 모의할수 있다. SWAT 모형은 Allen et al. (1994) 그리고 Leopold and Maddock (1953)의 연구를 토대로 평균 하천폭을 산정하며, SWAT 모형에서는 하천폭 산정시 유역 면적만이 독립인자로 반영된다. SWAT의 평균 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식은 미국 지형을 기준으로 도출된 식이므로 기존 SWAT의 하폭 산정 회귀식은 국내의 실정을 반영하지 못하고 있다 (Ames et al., 2009). 미국과 한국은 지리적 특성에 따라 하천 경사도, 유역 경사도, 유로연장, 유역면적 등을 비롯한 하천 및 유역의 특성이 다르다. 한국은 미국보다 경사가 급한 동고서저의 지형으로 국토 면적의 70% 이상이 산지이다.

SWAT 모형을 활용한 기존의 연구들의 유량 및 수질 모의 값은 실제와 유사하지만, 국내 하천단면의 특성을 적절히 반영하지 않고 있다. 수문 모의결과 유량 예측 정확성이 높다하더라도 하천 형상을 제대로 반영하지 않았기 때문에 유속, 수심 등의 하천 수리 조건과 이를 반영한 수질 모의 결과를 참값이라고 하기에는 한계가 있다. 유속과 수심은 서식처 적합성 곡선에서 중요한 변수이므로 수생태 환경에도 중요한 영향을 미친다 (Choi et al., 2018). 이에 국내 하천폭과 홍수터폭에 대한 연구가 필요하며, 전 유황구간에서 물의 이·치수를 위해서 보다 실측 하천단면과 유사한 인자 구축이 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 국내 하천폭과 홍수터폭에 대한 실측자료를 수집하여 이를 바탕으로 새로운 회귀식을 도출하고, SWAT 모형의 모의 결과에 대한 하천폭과 홍수터폭의 변화에 의한 영향을 분석하여 국내 지형에 적합한 회귀식의 중요성을 제시하는 데 있다.

## II. 본 론

### 1. 연구대상지역

국내 하천은 상류로부터 하류로 내려갈수록 수리구조물 및 하천정비로 인해 자연 하천의 형상을 찾기 어렵고 하폭이 불규칙하여 하류에서의 하천 형상 자료 수집에 한계가 있다. 이

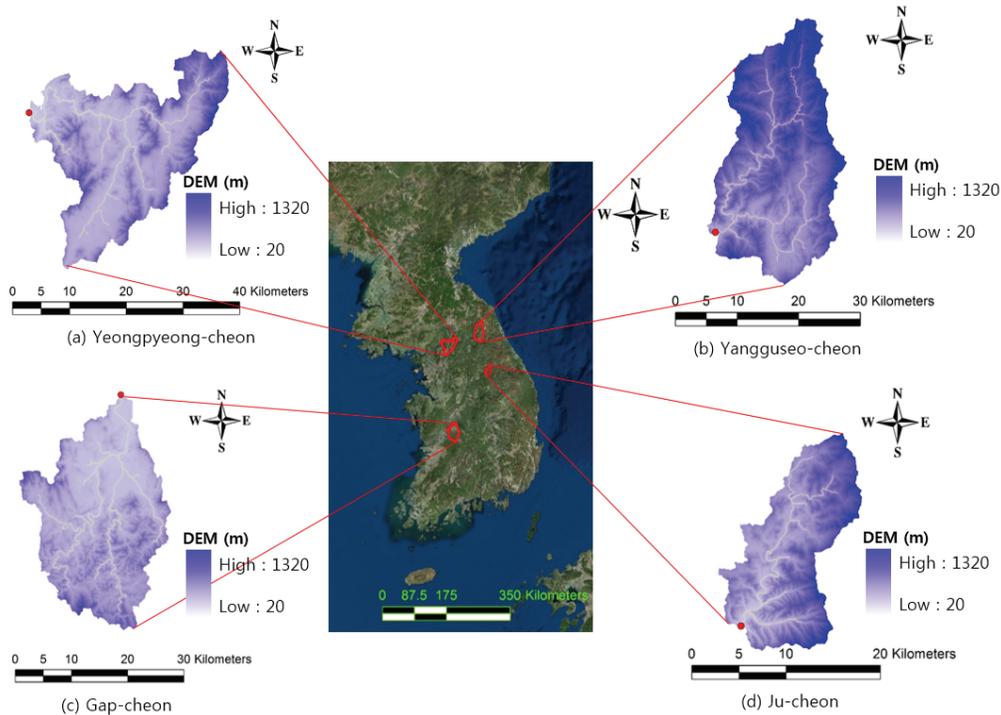


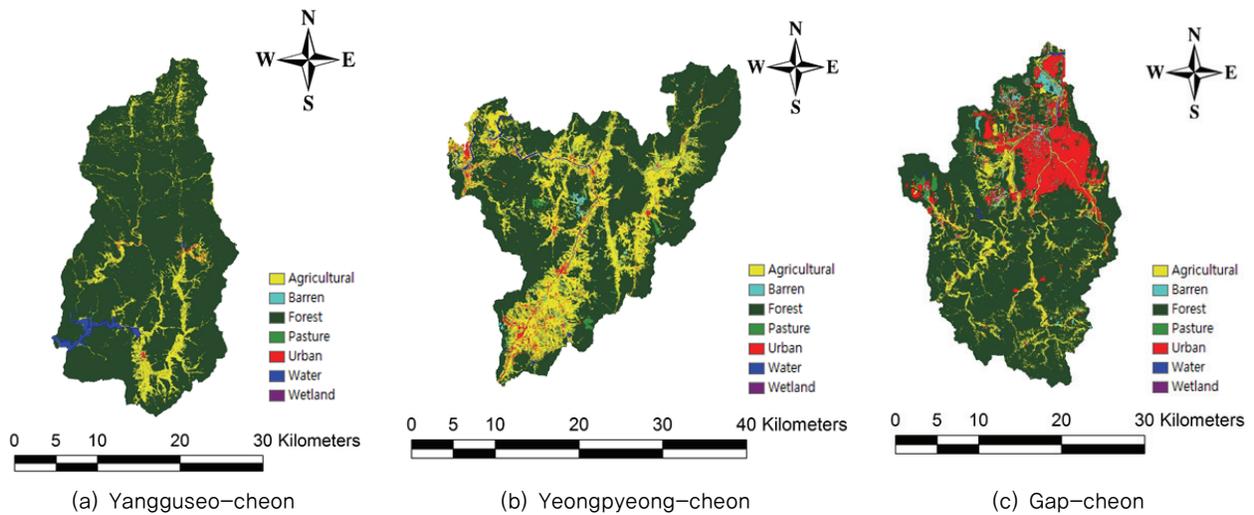
Fig. 1 Locations of study areas (three watersheds for channel width measurements (a)~(c) and one watershed for swat model application (d))

**Table 1** Analysis landuse at study areas

	Urban	Agricultural	Forest	Pasture	Wetland	Barren	Water
Yangguseo-cheon	0,3%	9,4%	88,8%	0,1%	0,0%	0,3%	1,1%
Yeongpyeong-cheon	3,0%	24,8%	67,5%	1,2%	0,1%	2,6%	0,8%
Gap-cheon	13,6%	8,5%	70,1%	4,0%	0,0%	3,2%	0,6%

**Table 2** Analysis slope at study areas

	0~3°	3~7°	7~13°	13~20°	20~27°	27~34°	34~42°	42~68°
Yangguseo-cheon	9,2%	5,2%	11,0%	19,7%	22,5%	20,3%	10,7%	1,5%
Yeongpyeong-cheon	25,4%	11,0%	15,4%	20,0%	15,1%	9,1%	3,6%	0,5%
Gap-cheon	29,4%	9,8%	15,3%	18,5%	14,4%	9,0%	3,2%	0,3%



**Fig. 2** Landuse Maps for study areas

에 본 연구에서는 SWAT 모형 내에 적용되고 있는 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식에 대하여 국내의 수리적·지리적 특성을 반영한 회귀식 개선을 위해 한강수계와 금강수계의 상류에 위치한 양구서천, 영평천, 갑천유역을 연구 대상지역으로 선정하였다 (Fig. 1). 각 유역의 토지이용 및 경사도는 Table 1과 2, Fig. 2와 같다. 양구서천은 산림 (Forest)이 주를 이루고 있으며, 영평천 유역은 농업지역 (Agricultural)이 많은 편이고, 갑천 유역은 시가지지역 (Urban), 농업지역, 산림지역이 고르게 분포되어있다. 영평천, 양구서천, 갑천 유역은 다양한 토지이용 특성 및 경사도 분포를 가지고 있으며 면적은 각각 671.6km<sup>2</sup>, 609.9km<sup>2</sup>, 654.5km<sup>2</sup>이다. 본 연구에서는 양구서천, 영평천, 갑천유역에 대해 도출한 유역 면적 대비 평균 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식을 주천강 유역에 적용하여 SWAT 모형을 활용한 그 영향성 평가를 수행하였다.

## 2. SWAT 모형개요 및 입력자료 구축

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 유역단위 모형이다 (Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 GIS와 연계하여 유역단위의 수문 및 수질을 시공간적으로 모의할 수 있다. 특히, SWAT은 유역 내에서의 장기 강우-유출, 유사의 이동 및 과정을 예측하고 모의할 수 있으며, 미세측 지역에서의 수문 및 수질 모의가 가능하고, 경작형태 혹은 기후·식생 등의 변화를 고려하여 수질의 상대적 효과를 수치화 할 수 있는 특징을 지니고 있다. SWAT 모형은 입력 자료로 기상자료 (일강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도), 공간자료인 토지이용 현황, 토양속성, 그리고 수치표고모형 (Digital Elevation Model, DEM) 등을 이용하여 수문 및 수질을 모의할 수 있다.

SWAT 모형은 소유역 내 위치한 하천에 대해서 상류와 하류를 별도로 구분하지 않고, 하천단면과 관련한 매개변수 (하천폭, 홍수터폭 등)에 관하여 소유역 평균값을 산정하여 이를

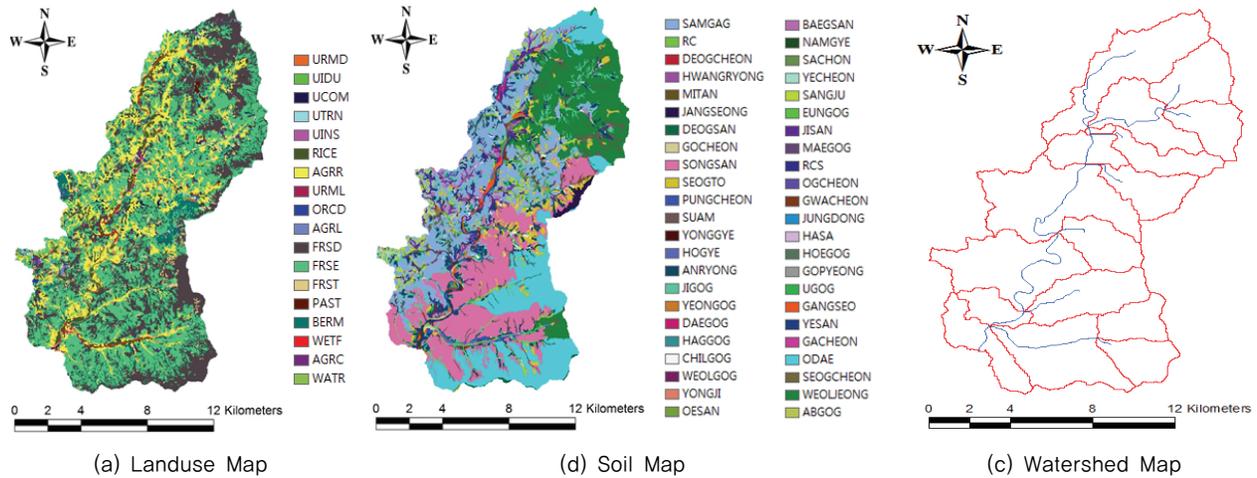


Fig. 3 Landuse, Soil and Watershed Maps for Ju-cheon watershed

해당 소유역에 적용하여 유량 및 수질을 모의하며, 소유역의 평균 하천폭 및 홍수터폭을 산정하기 위해 미국 지형에 대해 조사된 자료를 적용하여 도출한 회귀식을 적용하고 있다 (식 1, 2) (Ames et al., 2009). 하지만 SWAT 모형은 미국 유역을 대상으로 개발된 기존 식을 사용하여 하천폭과 홍수터폭을 산정하기 때문에 국내 유역을 대상으로 정확한 하천폭 및 홍수터폭 산정에는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 국내 지형 및 하천 형상을 반영할 수 있는 SWAT 모형 내 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식을 개선하고자 하였다.

$$W_b = 1.29A^{0.60} \quad (1)$$

$$W_f = 5W_b \quad (2)$$

여기서  $W_b$ 는 하천폭 (m)이며  $A$ 는 유역면적 ( $km^2$ ),  $W_f$ 는 홍수터폭 (m)을 의미한다.

본 연구에서 사용된 SWAT 모형의 입력 자료로 표고자료 (Fig. 1)는 국립지리원에서 제공해 주는 30m x 30m 해상도의 수치표고모형을 이용하여 구축하였다. 토지이용도는 환경공간정보서비스 (Environmental Geographic Information System; EGIS)에서 제공하는 중분류 토지이용자료를 이용하였으며, 토양도는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공해 주는 정밀 토양도를 사용하였다 (Fig. 3). 주천강 유역의 토지피복은 시가지지역 2.2%, 농업지역 19.3%, 산림지역 73.6%, 기타 4.9%이며 전체 면적은 189.3 $km^2$ 이다. 토양통은 SONGSAN (송산통)이 18.45%, SAMGAG (삼각통)이 18.162%, ODAE (오대통)이 15.801%로 유역 내 큰 비중을 차지하고 있다. 일 강수량 (mm), 일 평균풍속 (m/sec), 일 평균상대습도 (%), 일 최고기온·최저기온 ( $^{\circ}C$ ), 일 수평면 일사량 ( $MJ/m^2$ )과 같은 기상자료를 2011년 1월 1일~2014년 12월 31일까지 수집하여 SWAT 모형에 적

용하였다. 또한 물환경정보시스템에서 제공하고 있는 안흥 관측소의 실측 유량자료 (2014년 1월 1일~12월 31일)를 수집하여 SWAT 모형의 유량 보정에 활용하였다.

### 3. 회귀식 개발을 위한 하천단면 자료 구축

본 연구에서는 항공사진과 위성사진 자료를 활용하여 회귀식 개발을 위한 하천단면 자료를 구축하였다. Shin et al. (2016)은 영상자료를 이용하여 간접적으로 측정된 자료로 실제 측정값을 대체하여 하천단면을 추정하고 이를 Hec-Ras 모형에 적용하여 홍수위를 해석한 바 있다. 이러한 기존 연구는 영상자료의 활용 가능성을 입증한 것으로, 본 연구에서도 Shin et al. (2016)과 같이 항공 및 위성 영상자료를 이용하여 하천단면을 측정하였다. 또한 이를 위해 GIS의 유역 분할 기능을 활용하여 연구 대상 유역인 갑천, 영평천, 양구서천 유역을 여러개의 소유역으로 분할하고 각각의 소유역에 대한 면적을 산정하였다. 항공사진 및 위성사진 자료를 이용하여 소유역 면적에 따라 소유역별로 최소 10곳에서 최대 30곳까지 하천폭과 홍수터폭을 측정하였다. 갑천, 영평천, 양구서천 유역을 대상으로 각각 16개, 15개, 6개 소유역에 대하여 하천폭과 홍수터폭을 측정하였다. 동일한 소유역 내에서는 등간격으로 하천폭과 홍수터폭을 측정하고, 측정된 자료를 평균하여 해당 소유역의 평균 하천폭/홍수터폭을 산정하였다.

SWAT 모형에서의 하천폭 변수는 만수시의 폭을 의미하는데, 하천에서 만수시의 상태를 결정하는 요인들은 매우 다양하다. 하지만 모든 소유역에 대하여 현장 측정을 하거나 여러 요인들을 고려하여 만수시를 결정하는 것에는 자료의 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 다양한 시기에 촬영된 위성사진 및 항공사진을 비교하여 하천폭이 가장 넓은 시기를 만수기라고 가정하고, 이때의 하천폭을 만수시 하천폭이라고 가정하였다.

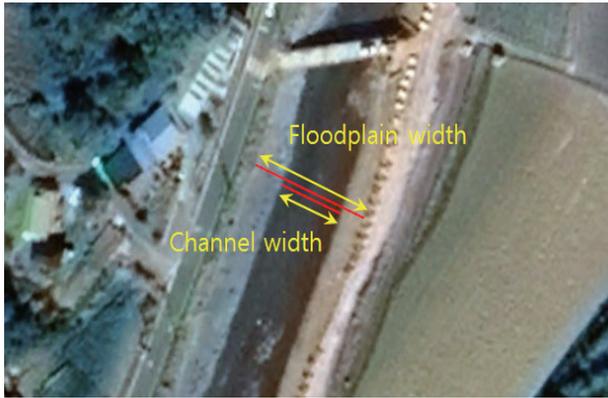


Fig. 4 Measurement method of channel and floodplain widths using satellite image

본 연구에서는 Google에서 제공하는 위성사진 서비스인 Google Earth (Airbus, DigitalGlobe)와 ArcGIS에서 국토지리정보원 항공사진을 이용하여 하천폭을 측정하였다. 하천폭 측정 시 댐이나 보, 저수지와 같은 수리구조물이 축조되어있는 지점 전후로는 물이 정체되어 있어 수리구조물 전후 하천폭에 큰 차이를 나타내기 때문에 이러한 수리구조물 인근의 하천폭은 측정에서 제외시켰다. 또한 소유역 내 대규모 수리구조물이 위치하여 전반적으로 수리구조물의 영향을 받는 소유역은 제외하였다. Cinotto (2003)에 따라 하천변의 퇴적물의 특징, 식생종류 등을 고려하여 하천폭과 홍수터폭을 측정한다. 기존 SWAT의 하천 산정 회귀식은 유역면적에 대한 하나의 독립변수로 적용하고 있으며, 본 연구에서 또한 유역면적을 고려하여 국내에 적용가능한 새로운 회귀식을 도출하였다. 위성 및 항공사진을 활용한 하천폭 측정 방법은 Fig. 4와 같다.

#### 4. 국내 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식 적용

회귀식 도출에 사용된 프로그램인 CurveExpert는 Windows용 곡선 맞춤 시스템이며 종속변수와 1개 이상의 독립변수를 입력하면 선형 모형과 비선형 모형의 여러 회귀식이 생성되며  $R^2$ 가 높은 순으로 나열할 수 있다. 사용자는 CurveExpert에 내장된 다수의 모형 외에도 직접 모형을 정의할 수 있으며, CurveExpert에 입력된 데이터로 여러 형태의 모형을 구축하여 최적의 곡선식을 도출하도록 최상의 적합성을 찾는 프로세스를 구동할 수 있다. 개선된 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식을 도출하기 위해 CurveExpert에 종속인자로 유역면적자료를 적용하였으며 독립인자로는 각 유역에 따른 평균 하천폭 및 홍수터폭을 적용하였다.

본 연구에서는 CurveExpert를 활용하여 국내에 적용가능한 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식을 도출하였으며, 새롭게 도출된 회귀식의 적용성 평가를 위해 적용 대상지역인 주천강

유역에 대한 위성영상과 항공사진을 이용하여 4개의 대표 소유역의 평균 하천폭 및 홍수터폭을 측정하였다. 실제 영상자료를 활용한 측정자료와 각 소유역의 면적과 두 회귀식을 이용하여 산정한 하천폭 및 홍수터폭을 비교하였다. 또한 도출된 회귀식을 SWAT 모형에 적용 후 산정된 유량, 수심, 유속의 변화를 분석하여 하천단면의 하천폭과 홍수터폭이 SWAT 모형의 수문 및 수질 모의 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

### III. 결 과

#### 1. 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식 도출 및 비교

연구대상지역의 유역면적은 소유역 단위로 측정하였으며 위성 및 항공 영상자료를 이용하여 각 소유역의 하천폭과 홍수터폭을 측정하였다. 측정된 자료를 회귀곡선 산정 및 데이터 분석 프로그램인 CurveExpert에 적용하였고, 선형 회귀 모형, 비선형 회귀 모형 등 60개 이상의 모형 중에서  $R^2$ 와 NSE가 높은 축에 속하며 식이 간단하여 사용자가 적용하기 편한 Power 지수 회귀식 (식 3, 4) (Fig. 5)을 도출하였다. 식 (3, 4)의 형태는 기존 SWAT 회귀식과 동일하지만 적용된 계수 및 지수는 상이하게 산정되었다. 기존 회귀식 도출에 사용된 자료는 미국 하천자료를 바탕으로 도출된 것으로 국내 유역 형상 및 하천 수리 특성이 상이하여 나타난 것으로 판단된다. Fig. 5의 분석결과 회귀식 구축에 사용된 자료는 각 수계의 상류에 해당하는 부분으로 유역면적이  $252.3\text{km}^2$  이내이므로 이를 초과할 때 하천폭 및 홍수터폭 산정시 불확실성이 커질 수 있어  $252.3\text{km}^2$ 이내의 유역면적에 본 회귀식을 적용하는 것이 적합하다. Fig. 5의 갑천, 영평천, 양구서천 유역에 대하여 소유역 면적에 따른 소유역별 실측 평균 하천폭/홍수터폭을 의미한다. 하천폭과 홍수터폭 측정 결과와 기존 및 새롭게 도출된 회귀식 결과를 비교한 결과 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 하천폭의 경우 기존 SWAT 모형에서 산정된 결과는 과소하게 산정되는 경향을 보이고 있으며, 홍수터폭의 경우 과대하게 산정되는 경향이 나타났다. 따라서, 기존 SWAT 모형에 적용된 회귀식은 국내 하천폭 및 홍수터폭을 반영하기에는 한계가 있을 것을 판단된다.

$$W_b = 1.259A^{0.6857} \quad (3)$$

$$W_f = 5.183A^{0.5139} \quad (4)$$

또한, 본 연구에서는 양구서천, 영평천, 갑천 유역을 대상으로 측정된 하천폭 및 홍수터폭 자료를 활용한 회귀식의 국내 타 유역 적용성 평가를 위해 주천강 유역을 대상으로 영상자료 기반 측정된 결과와 본 회귀식 결과를 비교분석하였다.

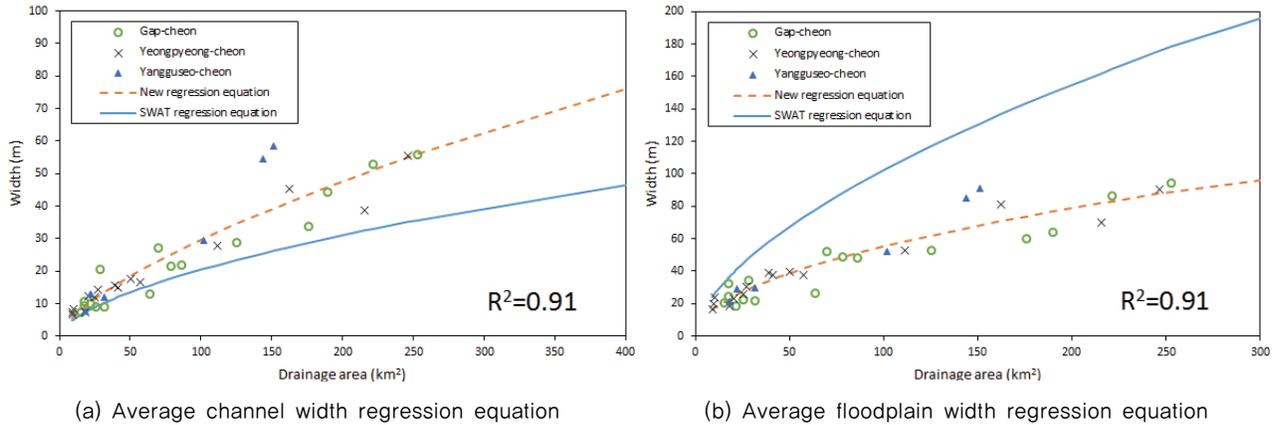


Fig. 5 Comparison of current and newly developed regression equations for estimating (a) channel and (b) floodplain widths

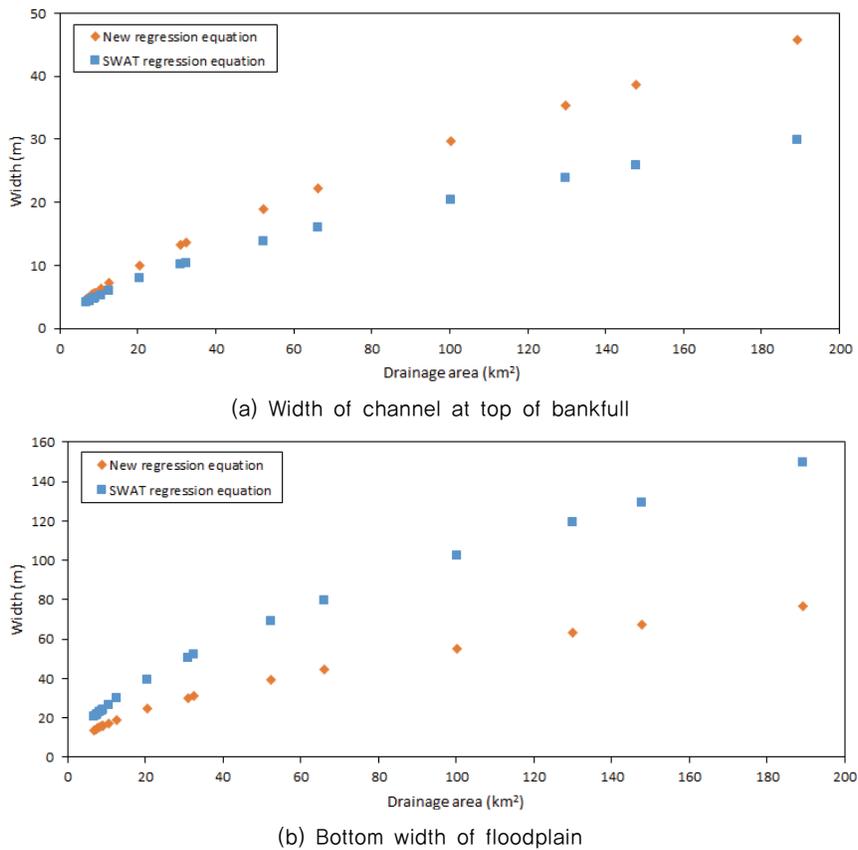


Fig. 6 Comparison of (a) bankfull width and (b) floodplain width estimated by the current and newly developed regression equations for Jucheon watershed

주천강 유역 내 상류에 위치한 4개의 소유역에서 하천폭과 홍수터폭을 측정하여 SWAT 회귀식과 개선된 회귀식을 적용한 결과를 비교하였을 때 기존 SWAT 회귀식의 하천폭 및 홍수터폭 평균오차율은 각각 19.5%, 38.4%로 분석되었으며, 본 연구에서 도출된 회귀식의 경우 각각 7.0%와 5.0%로 분석되어 실제 영상자료 기반 측정된 결과와 유사하게 나타났다.

또한 개선된 회귀식과 기존 SWAT의 회귀식을 주천강 유역에 적용하여 산정된 하천폭 및 홍수터폭을 비교한 결과 하천폭은 증가하였고 홍수터폭은 감소하였다 (Fig. 6). 하천단면의 변화는 유속, 수질, 수심 등에 영향을 미치고 이에 따른 수리·수문 및 수질 모델링 결과에 유효한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 2. 하천폭과 홍수터폭 재산정에 따른 하천 수리 특성 영향 및 모의결과 분석

본 연구에서는 새롭게 도출된 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식을 SWAT 모형 내 반영될 수 있도록 연산과정을 수정하였으며, 이를 통해 유량과 하천수심 및 유속 산정결과를 기존 SWAT 모형으로 산정된 결과와 비교분석하였다. 우선 수집된 실측 유량 자료를 바탕으로 SWAT 모형의 매개변수 조정을 통해 유량에 대한 보정을 수행하였으며, 2014년 일별 유량 보정 결과  $R^2$ 와 NSE는 각각 0.74과 0.73으로 실측 자료를 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. SWAT 모형을 활용한 유량 모의 결과 수정된 회귀식을 반영하여 하천폭이 감소하였음에도 불구하고 유량의 차이는 미미하게 나타났다. 이러한 결과는 SWAT 모형의 하천에서의 유출량 산정 방법에 의한 것으로 판단된다.

SWAT 모형은 기상자료/지형자료 및 사용자 입력 매개변수

값을 바탕으로 주어진 시간 단위에 대한 지표유출, 중간유출, 기저유출을 모의한다. 그리고 이렇게 모의된 각각의 유출량을 합하여 주어진 시간 단위에 대한 하천으로의 유입량을 산정한다. 따라서 하천단면과 관련한 정보만 수정한 경우에는 소유역내 하천으로 유입되는 유입량은 동일하다. 이에 따라 하천수심 및 유속에는 변동이 있으나 전체 유량에는 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 판단된다. Fig. 7에서 기존 회귀식을 적용한 SWAT 모형 모의 결과와 새롭게 도출된 회귀식을 적용한 결과를 비교하였을 때 연평균 수심과 유속은 각각 20.8%, 17.1% 감소하였으나, 이에 반해 연평균 유량은 0.02% 증가로 큰 차이가 나타나지 않았다. SWAT 모형은 지표유출, 중간유출, 기저유출의 형태로 하천으로 유입되는 유입량과 기존의 하천에 남아있는 물의 양을 고려하여 하천 내 저류량 ( $V_{ch}$ )을 산정하고, 하천연장 ( $L_{ch}$ )과의 관계식 (식 (5))을 통해 유수단면적 ( $A_{ch}$ )을 산정한다 (Neitsch et al., 2011). 식 (6)에서 만수위

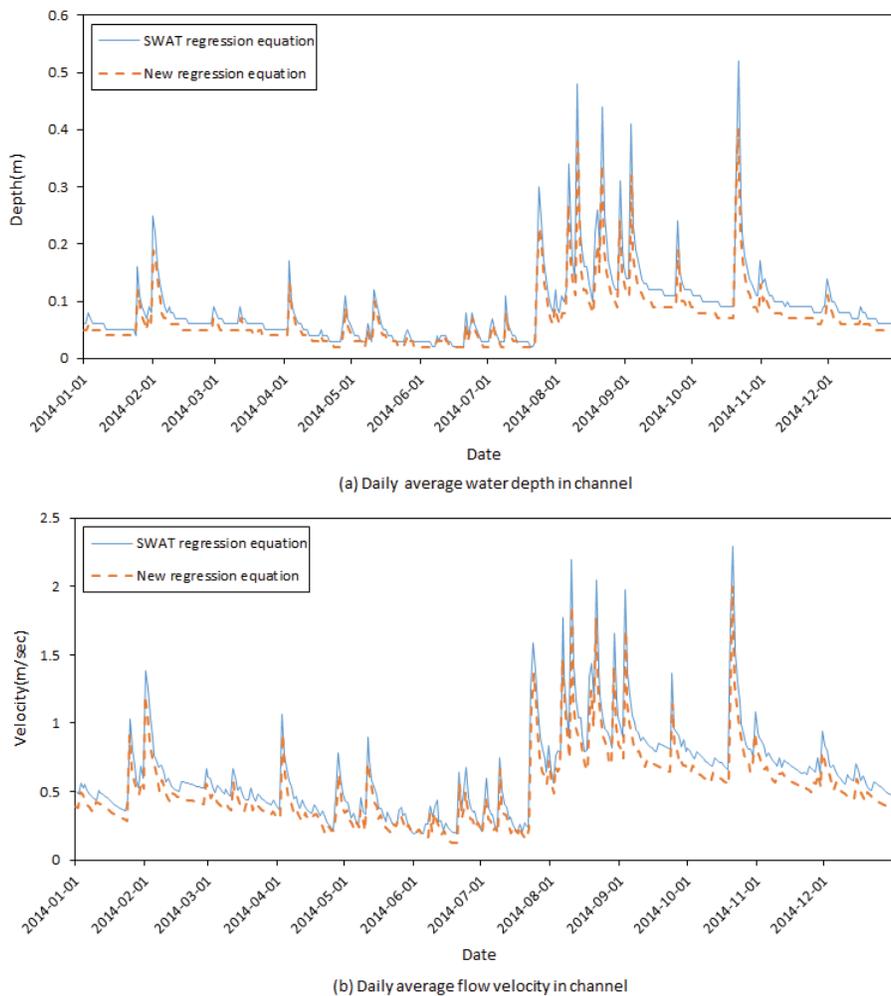


Fig. 7 Comparison of (a) water depth and (b) flow velocity estimated by current and newly developed regression equations for Ju-cheon watershed

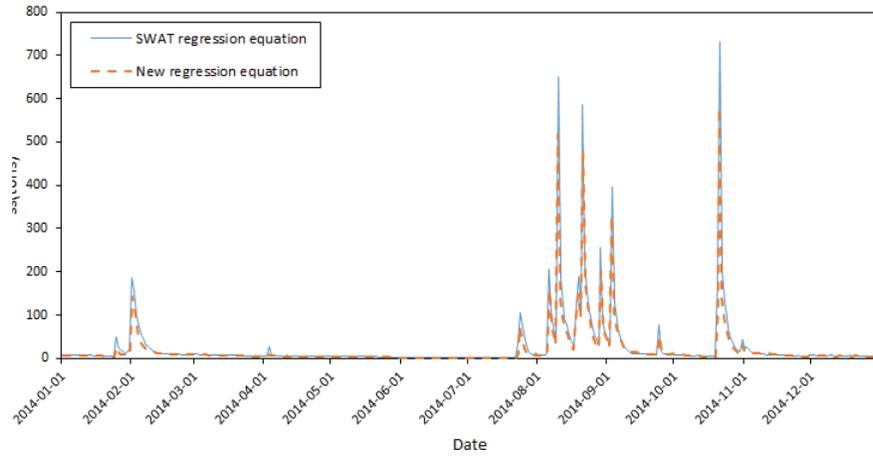


Fig. 8 Comparison of suspended solid estimated by current and newly developed regression equations for Ju-cheon watershed

수심 ( $depth_{bnkfull}$ )이 동일한 경우 하천폭 ( $W$ )에 의해서 하천바닥폭 ( $W_{btm}$ )이 영향을 받기 때문에 저류된 물에 대한 수심 ( $depth$ ) 또한 하천바닥폭에 의해 영향을 받는다 (식 (7)). 수심은 유변과 경심을 산정하는 과정에 영향을 주며 (식 (8), 식 (9)), 최종적으로는 유속을 산정하는 과정에도 영향을 미친다 (식 (10)). Fig. 7과 같이 수심과 유속의 감소에도 유량에 큰 차이가 없는 것은 하천폭이 증가하여 유수단면적의 증가에 큰 영향을 주었기 때문이다. 수심과 유속의 차이는 이러한 SWAT 모형의 산정 방법에 따른 것이며, 이는 하천폭에 의한 영향으로 판단된다. 그러나 모의기간동안 만수위를 초과하는 유량이 발생하지 않았기 때문에 이와 같은 결과가 나타났으며 만수위 초과시에는 개선된 회귀식 적용시에 수심이 급격히 증가하여 기존 SWAT 회귀식 적용시보다 수심이 높게 나타날 것으로 판단된다.

$$A_{ch} = \frac{V_{ch}}{1000 \cdot L_{ch}} \quad (5)$$

$$W_{btm} = W - 2 \cdot z_{ch} \cdot depth_{bnkfull} \quad (6)$$

$$depth = \sqrt{\frac{A_{ch}}{z_{ch}} + \left(\frac{W_{btm}}{2 \cdot z_{ch}}\right)^2} - \frac{W_{btm}}{2 \cdot z_{ch}} \quad (7)$$

$$P_{ch} = W_{btm} + 2 \cdot depth \cdot \sqrt{1 + z_{ch}^2} \quad (8)$$

$$R_{ch} = \frac{A_{ch}}{P_{ch}} \quad (9)$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (10)$$

여기서  $A_{ch}$ 는 하천의 유수단면적 ( $m^2$ ),  $V_{ch}$ 는 하천에 저류된 물의 양 ( $m^3$ ),  $L_{ch}$ 은 유로연장 ( $km$ ),  $W_{btm}$ 는 하천의 바닥폭 ( $m$ ),  $W$ 는 만수위의 하천폭 ( $m$ ),  $z_{ch}$ 는 하천 측 경사의 역수,  $depth_{bnkfull}$ 는 만수위 수심 ( $m$ ),  $depth$ 는 저류된 물의 깊이 ( $m$ ),  $R_{ch}$ 은 경심 ( $m$ ),  $P_{ch}$ 는 유변 ( $m$ ),  $v_c$ 는 유속,  $slp_{ch}$ 는 하천 길이에 따른 기울기,  $n$ 은 Manning 공식의 조도계수를 의미한다.

또한, Hur and Kim (2009)에 의한 연구에 따르면 유속, 수심 및 하상재료는 어종, 어류의 크기, 개체수 및 하천 특성과 단면 정보를 입력 자료로 활용하고 있는 서식처적합도 지수 등에 변동을 주어 수생태 분석에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 하천에서의 수심과 유속의 변화는 하천 수질과 수생태 예측에 영향을 미칠 수 있다. 수질 모의에 대한 수심과 유속의 영향을 확인하기 위하여 주천강 유역을 대상으로 도출된 회귀식 적용 전후의 부유물질 (Suspended Solid, SS) 발생량을 그래프로 비교하였다 (Fig. 8). 개선된 회귀식으로 모의했을 때 전체적으로 SS가 감소하였으며, 첨두유량이 발생시 큰 폭으로 감소하는 경향이 나타났다. 홍수기 (7월~9월)의 일평균 부유물질은 SWAT 회귀식 사용시 약 58.3 ton, 개선된 회귀식 사용시 약 46.0 ton으로 산정되었다. 이는 모형 내에서 하천의 유속 및 수심이 SS 모의결과에 유효한 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 수문 모형을 활용하여 정확한 하천의 흐름 및 수질/수생태계를 모의하기 위해서 국내 하천 형상을 반영한 하천단면 관련 회귀식의 적용이 필요할 것이라 판단된다. 또한, 이러한 국내 하천 형상의 적절한 고려없이 SWAT 모형의 수질모의에 대한 보정을 수행한다면 본 연구 결과에서 나타난 SS 모의 값의 차이는 매개변수의 불확실성을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구의 목적은 기존의 SWAT 모형에서 적용되고 있는 하천폭과 홍수터폭 산정 회귀식을 국내에서 적용하기 적합하도록 개선하는 데 있다. 개선된 하천단면 형상과 관련한 변수들이 실제 모의결과에 미치는 영향을 분석하였다. 신뢰도 높은 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식 개선을 위하여 하천폭 및 홍수터폭에 대한 기초자료 구축이 필요하다. 하천단면 실측자료를 현장에서 구축하는 것은 많은 인력, 시간, 장비 등이 필요하기 때문에 본 연구에서는 실제 하천단면 자료를 위성 및 항공영상 자료를 기반으로 구축하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 위성사진으로 측정한 하천폭 및 홍수터폭 자료를 토대로 회귀식을 도출한 후 회귀식 수정 전후의 하천폭 및 홍수터폭을 비교한 결과, 개선된 회귀식을 적용했을 때 하천폭은 증가하고 홍수터폭은 감소하는 것으로 나타났다.
2. SWAT 모형에서 평균 하천폭 및 홍수터폭 값을 개선된 회귀식으로 도출한 값으로 수정하고 SWAT 모형의 연산 과정을 수정하여 평균 하천폭 및 홍수터폭 회귀식을 수정하였다. 본 연구에서 주천강 유역을 대상으로 SWAT 모형을 활용한 유역 말단에서의 유량을 분석한 결과 그 변화는 미미하게 나타났다. 반면, 하천단면적은 증가하였고 하천의 수심과 유속은 감소한 것으로 나타났다. 이러한 하천단면 변화로 인한 수심과 유속의 변화는 하천에서의 수질 모의에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 SWAT 모형을 활용한 하천 수질 모의에 있어 국내 하천 형상을 반영할 수 있는 하천폭 및 홍수터폭 산정 회귀식 적용 후 관련 매개변수의 보정이 이루어져야 그 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실측 수질 자료의 부족으로 이에 대한 보정은 이루어지지 않았으나 상대적인 평가로 그 영향력을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 매개변수 보정 전 본 연구에서 개발한 회귀식의 적용이 필요할 것으로 판단된다.
3. 다만 본 연구에서 회귀식을 개발하기 위해 사용된 영상 자료를 이용하여 측정한 하천폭/홍수터폭 측정값에 대하여 실제 현장 측정값과의 비교를 통한 정확도 평가를 수행하지 못했다는 한계점이 있다. 따라서 향후 실제 하천폭 측정 자료와 비교하여 영상자료를 이용하여 측정된 하천폭 자료의 정확도를 검증할 필요가 있다.

본 연구의 결과로 보아 SWAT 모형과 같은 수리·수문 모형에서 하천폭과 홍수터폭 산정식의 신뢰도가 향상된다면, 유량 및 수질 모의 정확성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 유역단위 수자원 관리를 위한 사업 계획 수립을 위

해서는 대상 유역에 대한 신뢰도 높은 수문 및 수질 자료 구축이 필요하기 때문에 하천폭과 홍수터폭뿐만 아니라 다양한 입력자료의 신뢰도를 높이기 위한 연구가 지속적으로 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 83085).

#### REFERENCES

1. Allen, P. M., J. G. Arnold, and B. W. Byars, 1994. Downstream channel geometry for use in planning-level models. *Journal of the American Water Resources Association* 30(4): 663-671. doi:10.1111/j.1752-1688.1994.tb03321.x.
2. Ames, D. P., E. B. Rafn, R. Van Kirk, and B. Crosby, 2009. Estimation of stream channel geometry in Idaho using GIS-derived watershed characteristics. *Environmental Modelling & Software* 24(3): 444-448. doi:10.1016/j.envsoft.2008.08.008.
3. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
4. Choi, B. W., H. S. Kang, and W. H. Lee, 2018. Baseflow contribution to streamflow and aquatic habitats using physical habitat simulations. *Water* 10(10): 1304. doi:10.3390/w10101304.
5. Cinotto, P. J., 2003. Development of regional curves of bankfull-channel geometry and discharge for streams in the non-urban piedmont physiographic province, Pennsylvania and Maryland. *Water Resources Investigations Report* 3: 4014. doi:10.3133/wri034014.
6. Hanson, P. J., and J. F. Weltzin, 2000. Drought disturbance from climate change: response of United States forests. *Science of the total environment* 262(3): 205-220. doi:10.1016/S0048-9697(00)00523-4.
7. Hur, J. W., and J. K. Kim, 2009. Assessment of riverine health condition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish Habitat in downstream of Yongdam Dam. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(6):

- 481-491 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2009.42.6.481.
8. Jang, J. H., and J. H. Ahn, 2012. Hydrologic and water quality responses to precipitation extremes in Nakdong River Basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 45: 1081-1091 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2012.45.11.1081.
  9. Ko, J. W., H. J. Baek, and W. T. Kwon, 2005. The characteristics of precipitation and regionalization during rainy season in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 41(1): 101-114 (in Korean).
  10. Kwon, W. T., 2005. Current status and perspectives of climate change sciences. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 41(2-1): 325-336 (in Korean).
  11. Leopold, L. B., and T. Maddock, 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S. Geological Survey Professional Paper 252.
  12. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. *Texas Water Resources Institute*.
  13. Shin, S. B., S. M. Jun, J. H. Song, K. Kim, J. H. Ryu, J. Park, D. G. Lee, K. D. Lee, and M. S. Kang, 2016. Estimating Ungauged River section for flood stage analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(5): 11-18 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.5.011.