

# SWAT-K 모형의 국내 토양특성 정보 구축

이정은\*<sup>ORCID</sup> · 김철겸\*\*<sup>ORCID</sup> · 이정우\*\*\*<sup>ORCID</sup> · 정일문\*\*\*\*<sup>ORCID</sup>

Lee, Jeong Eun\*<sup>ORCID</sup>, Kim, Chul-Gyum\*\*<sup>ORCID</sup>, Lee, Jeongwoo\*\*\*<sup>ORCID</sup>, Chung, Il-Moon\*\*\*\*<sup>ORCID</sup>

## Korean Soil Characteristics Database for SWAT-K Model

### ABSTRACT

SWAT-K (Soil and Water Assessment Tool-Korea) model is a long-term runoff model using a soil-centered water balance equation. Soil is crucial for simulating hydrological components, requiring a database (usersoil.dbf) with soil series attribute information. Since the soil property information estimated by soil transfer functions developed overseas does not reflect the characteristics of domestic soil, the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology has established the soil database, which incorporates the results of domestic soil surveys and research from the National Institute of Agricultural Sciences. This study provides a more detailed description of the hydrological component simulation process using soil property information and revises and supplements the previously established soil database to operate in the latest SWAT model. Additionally, by providing this database through the integrated water management platform, it is expected to be utilized not only in the SWAT-K model but also in various watershed hydrological models developed considering soil characteristics.

**Keywords** : SWAT-K, Hydrological analysis, Soil characteristics, Database

### 초록

SWAT-K(Soil and Water Assessment Tool-Korea) 모형은 토양 중심의 물수지 방정식을 기본으로 하는 장기유출모형이다. 모형의 필수 입력자료로 공간적인 정보를 나타내는 수치주제도인 토양도를 적용할 경우, 토양통(Soil series)으로 분류된 각 토양의 속성정보에 대한 데이터베이스(usersoil.dbf)의 구축을 필요로 한다. 국외에서 개발된 토양전이함수에 의해 추정된 토양 속성정보는 국내 토양특성을 반영하지 못하기 때문에 한국건설기술연구원에서는 국립농업과학원의 국내 토양 조사결과 및 연구결과를 반영한 토양DB를 구축한 바 있다. 본 연구에서는 토양 속성정보의 수문분류 모의과정을 보다 상세히 기술하고, 기구축된 토양DB를 최신 SWAT 모형에서 구동되도록 수정·보완하였다. 또한, 통합물관리 플랫폼을 통하여 구축된 토양DB를 제공함으로써, SWAT-K 모형 뿐만 아니라 토양을 고려하여 개발된 다양한 유역수문모형에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : SWAT-K, 수문해석, 토양특성, 데이터베이스

## 1. 서론

수문학적 유역모델링은 유역의 물순환 과정을 이해하고 관리하기 위한 필수 도구로, 수자원의 효율적인 계획, 이용 및 관리를 위해 매우 중요하다. 하지만 대부분의 수문모형이 해외에서 개발됨에 따라 국내 지표수 수문분류를 해석할 수 있는 모형을 구축하기 위해

\* 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원 (KICT · jeus22@kict.re.kr)

\*\* 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원 (KICT · cgkim@kict.re.kr)

\*\*\* 중신회원 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원 (KICT · ljw2961@kict.re.kr)

\*\*\*\* 중신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원 (Corresponding Author · KICT · imchung@kict.re.kr)

Received July 8, 2024/ revised July 11, 2024/ accepted July 19, 2024

미농무성에서 개발한 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 국내 토양 및 수문학적 특성을 고려하여 수정보완한 SWAT-K를 개발한 바 있다(Kim et al., 2009). SWAT-K의 국내 적용은 보다 정확한 유출 및 수문성분 모의를 가능하게 하며, 물관리에 중요한 역할을 하고 있다(Kim et al., 2023; Lee et al., 2023). 국내에서는 SWAT 모형의 구조적 개선, 기후변화 시나리오 분석, 유역간 물이동에 따른 수문 및 수질 평가, 위성영상 자료를 활용한 수문성분 모의능력 평가 등 다양한 연구가 지속적으로 수행되어 오고 있다(Jang et al., 2009; Woo et al., 2020; Han et al., 2021).

이러한 수문학적 장기유출모형은 대부분 토양을 중심으로 물순환 과정을 모의하는 메커니즘을 가지고 있으며, 중심이 되는 토양의 구분 및 특성은 수문성분(지표/중간/지하수 유출, 증발산, 함양 등)의 모의시 매우 중요한 인자로 활용된다. 그러나, 토양정보는 수많은 토양조사와 실험실 분석이 요구되어 시간적, 비용적 측면에서 구축하기에 어려움이 따른다(Ye et al., 2011; López-Ballesteros et al., 2023). 따라서, 국외에서는 SWAT 모의를 위해 글로벌 토양지도인 DSWM(Digital Soil World Map; FAO-UNESCO, 2003)과 HWSO(Harmonized World Soil Database; FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012)가 활용되고 있으나, 공간적인 해상도가 매우 낮으며, 토양층이 2개로 단순화되어 있어 모형의 수문성분 모의정확도를 향상시키기 위해 상세화된 토양 지도 및 정보가 요구된다(López-Ballesteros et al., 2023). 국내의 경우, 토양전문기관인 국립농업과학원에서 토양에 대한 조사와 연구가

지속적으로 수행되어 오고 있으나, 모형에서 필요한 모든 토양 특성정보를 제공하고 있지는 못하고 있는 실정이다. 또한, 국외의 Saxton et al.(1986)이 제안한 토양전이합수를 이용하여 추정된 토양 특성정보는 국내토양 특성을 반영하는데 한계가 있으며, 주요 토양 속성인자로 가용수분보유량, 용적밀도, 포화수리전도도 등에 대하여 민감도 분석을 수행한 결과, 전 수문성분 모의에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Kim et al., 2007). 따라서, 모형에서 활용되는 토양 속성정보의 데이터베이스 구축은 매우 중요한 사항이다.

본 연구에서는 SWAT-K의 토양수분 변화에 따른 모형의 기본 물수지 방정식과 유역 물순환 과정을 설명하고, 토양 속성정보에 따른 수문성분 모의이론을 상세히 기술하였다. 또한, 국내 토양에 대한 현황과 SWAT-K 모형의 토양 속성정보 구축과정에 대한 근거를 제시하였다. 마지막으로 국내 가용한 토양 조사 및 연구결과를 기반으로 토양 속성정보 데이터베이스(usersoil.dbf)를 구축하였으며, 한국건설기술연구원에서 개발중인 통합물관리 플랫폼(<http://iwrm.kr>)에서 제공하여, SWAT-K 모형 뿐만 아니라 다양한 유역수문모형의 사용자에게 유용한 자료로 활용되도록 하고자 한다.

## 2. SWAT-K 모형의 수문성분 모의

### 2.1 기본 물수지 방정식과 수문성분 모의과정

SWAT-K 모형(Kim et al., 2009)은 미농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역

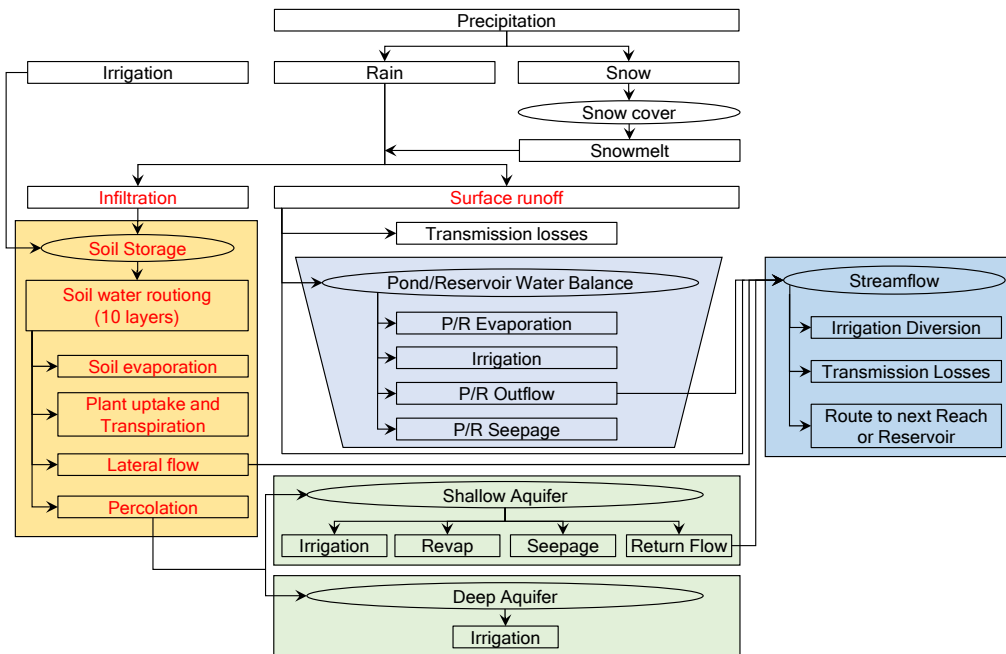


Fig. 1. Schematic of Pathways Available for Water Movement in SWAT (Neitsch et al., 2011)

단위의 장기유출모형(Arnold et al., 1993; 1995)을 국내 유역상황에 적합하도록 필요한 모듈을 개선한 모형으로, 아래와 같은 토양수분 변화에 따른 물수지 방정식을 기본으로 한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{secp} - Q_{lat}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 는 시간  $t$  일의 토양수분량(mm),  $SW_0$ 는 초기 토양수분량(mm),  $R_{day}$ 는 일강수량(mm),  $Q_{surf}$ 는 지표유출량(mm),  $E_a$ 는 증발산량(mm),  $w_{secp}$ 는 침투량(mm),  $Q_{lat}$ 는 중간유출량(mm)이다. 기본 물수지 방정식인 Eq. (1)에서의 토양수분량 변화를 모의하기 위해서는 토양으로 유입 및 유출되는 각 수문성분이 계산되어야 하며, 이와 같은 일련의 계산과정(Fig. 1)에서 토양은 물의 이동 및 저장되는 매체로 중요한 의미를 가지고 있다.

토양에서의 수분변화량 모의는 대상 전체유역(최종출구점 위치)을 소유역으로 구분하고, 각 소유역 내 동일한 토지피복과 토양으로 정의된 수문응답단위인 HRU(Hydrological Response Unit)를 공간적인 기본단위로 강수량, 유출량, 증발산량, 함양량 등 각 수문성분 발생량을 계산하며 이루어진다. HRU별 수문성분은 연직 방향으로 물이 이동하면서, 강수 발생, 식생에 의한 차단, 지표유출 및 토양으로의 침투, 중간유출 및 대수층으로 침투, 토양 및 식생으로부터 증발산, 지하수 함양의 과정이 순차적으로 계산된다. 이후 소유역 내의 HRU별 수문성분은 합산되어 소유역별 발생량이 계산되며, 유역/하도 및 저수지 추적을 통하여 각 소유역 및 최종출구점에서의 하천유량이 결정된다.

## 2.2 토양 속성정보에 따른 수문성분 모의

모형에서 수문성분을 계산하는 기본 단위는 HRU이며, 강수발생 이후 토양 표면에 도달한 물이 연직방향으로 토양이라는 매체를 이동하며 계산된다. 이때 토양 속성정보는 각 수문성분량을 결정하는 주요 인자이며, 토양에서 이루어지는 기작인 지표유출, 중간유출, 침투, 증발산에 대한 모의 이론은 아래와 같다.

### (1) 지표유출

지표면 유출은 토양표면으로의 수분공급량이 침투율을 초과할 때 발생한다. 모형에서는 지표면 유출량을 모의하기 위해 NRCS-CN 방법을 근간으로 토양수분량의 변화에 따라 시간적으로 변화하는 CN 값을 이용하는 것이 특징이다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S_{day})^2}{(R_{day} + 0.8S_{day})} \quad (2)$$

$$S_{day} = 25.4 \left( \frac{1000}{CN_{day}} - 10 \right) \quad (3)$$

여기서,  $Q_{surf}$ 는 지표면 유출량(mm),  $R_{day}$ 는 강수량(mm),  $S_{day}$ 는 저류 매개변수,  $CN_{day}$ 는 유출곡선지수이다. 일별 CN 값을 산정하기 위해서 토양수분량과 저류 매개변수와의 관계곡선을 이용하며, 토양의 속성인자인 포장용수량, 위조점, 포화수분량 등이 필요하다.

### (2) 중간유출

지표하 흐름 모의를 위해 Sloan et al.(1983)에 의해 개발되고, Sloan and Moore(1984)에 의해 정리된 동역학적 저류모형(Kinematic storage model)을 채택하였다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\psi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (4)$$

여기서,  $Q_{lat}$ 는 중간유출량(mm),  $SW_{ly,excess}$ 는 단위면적당 경사면의 포화대에 저장된 배수가능한 수분량(mm),  $K_{sat}$ 는 포화수리전도도(mm/h),  $slp$ 는 경사(m/m),  $\psi_d$ 는 배수가능한 토양 공극율(mm/mm),  $L_{hill}$ 는 경사면 길이(m)를 나타낸다. 토양층은 토양수분량이 포장용수량을 초과할 경우, 포화된 것으로 간주하여 중간유출량이 발생하게 되며, 토양의 속성인자인 공극률, 포화수리전도도 등이 필요하다.

### (3) 침투량

모형에서 토양은 최대 10개의 토양층으로 구분할 수 있으며, 토양층의 토양수분량이 포장용수량을 초과하게 되면 발생하는 침투량은 하부 토양층으로 이동하게 된다. 침투량은 저류추적법을 이용하여 모의된다.

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left( 1 - \exp \left[ \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (5)$$

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (6)$$

여기서,  $W_{perc,ly}$ 는 하부 토양층으로 침투되는 수분량(mm),  $SW_{ly,excess}$ 는 해당 토양층에서 배수가능한 수분량(mm),  $\Delta t$ 는 시간 간격(hr),  $TT_{perc}$ 는 침투 유하시간(hr),  $SAT_{ly}$ 는 포화수분량(mm),  $FC_{ly}$ 는 포장용수량(mm),  $K_{sat}$ 는 포화수리전도도(mm/hr)이다. 침투량 계산을 위해서는 토양 특성인자인 포장용수량, 포화수리전도도 등이 필요하다. 최하부 토양층 아래로 침투되는 물은 토양 하부와 지하수 상부 사이의 불포화 지대인 vadose zone으로 유입된다.

(4) 증발산량

증발산량은 크게 식생에 의한 증산과 토양으로부터의 증발으로 구분할 수 있다. 잠재증발산량 산정방법으로는 Penman-Monteith 방법(Allen et al., 1989)을 주로 이용한다. 이후 식생증산량과 토양증발량은 식생의 뿌리깊이와 토양수분량 등을 고려하여 계산된다.

$$w_{up,z} = \frac{E_t}{[1 - \exp(-\beta_w)]} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\beta_w \cdot \frac{z}{z_{root}}\right) \right] \quad (7)$$

$$E_{soil,z} = E''_s \cdot \frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \cdot z)} \quad (8)$$

여기서,  $E_t$ 는 식생의 최대증산량(mm),  $\beta_w$ 는 수분이용 매개변수,  $z_{root}$ 는 뿌리의 성장깊이(mm),  $z$ 는 토양표면에서부터의 깊이(mm),  $E_{soil,z}$ 는 토양깊이  $z$ 에서의 증발요구량(mm),  $E''_s$ : 최대 토양수분증발량(mm)이다. 이러한 계산을 위해 토양 특성인자인 최대근권깊이, 토양최대깊이, 수분이용가능량 등이 필요하다.

3. SWAT-K 모형의 토양속성 정보 구축

전술한 바와 같이 SWAT-K 모형에서는 각 수문성분 모의를 위해 토양속성 인자들이 요구된다. 따라서, 모형 전처리 과정에서

토양과 관련된 공간적인 정보를 나타내는 수치주제도인 토양도와 토양속성 정보(usersoil.dbf)를 구축 및 입력하는 과정이 필요하다. 토양도의 경우에는 국립농업과학원에서 제공되고 있지만, 토양속성 정보의 경우에는 모형에서 요구하는 usersoil.dbf 형태로 제공되지 않을 뿐만 아니라, 일부 인자들에 대해서는 국내토양 조사결과가 이루어지지 않은 관계로 정보 구축에 어려움이 따르는 실정이다. 또한, 모형 사용자가 이러한 정보구축을 하는 것에는 한계가 따른다.

3.1 국내 토양정보

국내 토양에 대한 정보(토양도, 토양속성 인자)는 농업진흥청 국립농업과학원(National Institute of Agriculture Sciences, NAS)에서 운영하고 있는 토양환경정보시스템인 흙토람(<https://soil.rda.go.kr>)에서 제공받을 수 있다. 수치주제도인 1:25,000의 정밀토양도를 이용할 경우, 공간적인 분포는 토양통(soil series)으로 분류하는 것이 필요하다. 이는 모형에서 필요로 하는 토양속성 정보들이 토양통에 대해 제공되기 때문이다. 국내 토양은 현재 400여개의 토양통으로 분류되며, SWAT-K 모의에 필요한 토양속성정보와 국립농업과학원의 흙토람에서 제공하고 있는 상황은 Table 1과 같다.

3.2 국내 토양속성 정보의 구축

국내 토양에 대한 조사가 이루어지지 못한 토양 특성인자들에 대한 DB의 구축에 대한 설명은 다음과 같다.

Table 1. Soil Characteristics

Variable name	Definition	Unit	NAS-provided
SNAM	Soil name	-	○
HYDGRP	Soil hydrologic group (A, B, C, D)	-	○
SOL_ZMX	Maximum rooting depth of soil profile	mm	X
ANION_EXCL	Fraction of porosity (void space) from which anions are excluded	-	X
SOL_CRK	Potential or maximum crack volume of the soil profile expressed as a fraction of the total soil volume	-	X
SOL_Z (layer #)	Depth from soil surface to bottom of layer	mm	○
SOL_BD (layer #)	Moist bulk density	Mg/m <sup>3</sup>	X
SOL_AWC (layer #)	Available water capacity of the soil layer	mm/mm	○
SOL_K (layer #)	Saturated hydraulic conductivity	mm/hr	X
SOL_CBN (layer #)	Organic carbon content	%	○
SOL_CLAY (layer #)	Sand content	%	○
SOL_SILT (layer #)	Silt content	%	○
SOL_SAND (layer #)	Sand content	%	○
SOL_ROCK (layer #)	Rock fragment content	%	○
SOL_ALB (top layer)	Moist soil albedo	-	X
USLE_K (top layer)	USLE equation soil erodibility (K) factor	0.013 (ton m <sup>2</sup> hr)/ (m <sup>3</sup> -ton cm)	X
SOL_EC (layer #)	Electrical conductivity	dS/m	X

(1) 토양의 수문학적 그룹(HYDGRP)

지표유출을 결정하는 NRCS-CN 방법에서 토양특성에 따라 유출률의 차이가 발생하므로, 토양을 4개의 그룹으로 구분하였다. 국내 토양에 대한 수문학적 토양군 분류는 NAS(2017)에서 제시한 결과로 정보를 구축하였다.

(2) 최대 근권깊이(SOL\_ZMX)

토양학적 관점에서 최대 근권깊이는 토양의 물리적, 화학적 특성에 따라 식물종류와 무관하게 뿌리의 신장이 어려운 깊이로 국내 토양조사에서의 유효토심과 유사한 개념이라 할 수 있으며, 여기에서는 토양의 깊이로 정의하였다.

(3) 용적밀도(SOL\_BD)

토양의 용적밀도는 유기물 함량과의 관계식으로 추정된 값을 이용하였다. 유기물 함량의 경우, 흙토람에서 제공되고 있다.

$$SOL_{BD} = 1.372 \times \exp(-0.039 \times OM) \quad (9)$$

여기서,  $SOL_{BD}$ 는 토양의 용적밀도( $Mg/m^3$ ),  $OM$ 은 유기물 함양(%)이다.

(4) 포화수리전도도(SOL\_K)

흙토람에서 제공하고 있는 각 토양층별 모래, 미사, 점토 및 유기물 함양의 비율(%)을 이용하여 추정된 값을 이용하였다. 이에 대한 자세한 사항은 지표수 수문성분 해석시스템 개발 보고서(MST, 2011)에 기술되어 있다.

(5) 토양침식인자(USLE\_K)

유사량 산정에 필요한 토양침식성인자  $USLE_K$ 는 입도분포함

량으로부터 Williams(1995)가 제안한 방법을 적용하여 다음 식과 같이 산정하였다.

$$USLE_K = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (10)$$

여기서,  $f_{csand}$ 는 모래 함량에 따른 인자,  $f_{cl-si}$ 는 점토-실트 함량에 따른 인자,  $f_{orgc}$ 는 유기탄소 함량에 따른 인자,  $f_{hisand}$ 는 모래 함량이 극도로 높은 토양에 대한 인자이다. 각 인자를 산정하기 위해 필요한 모래, 점토, 실트, 유기탄소 함량은 흙토람에서 제공하고 있다.

지금까지 기술한 흙토람에서 직접적으로 제공하고 있는 인자와 이를 활용한 관계를 통하여 도출한 속성인자를 모형의 입력형태인 usersoil.dbf로 구축 및 모형 적용을 통하여 토양인자들을 토양도의 공간분포와 연결시켜 줄 수 있다. 구축된 토양 속성정보의 예시로 낙동강권역 감천중권역에 대한 공간적인 분포결과는 다음과 같다(Fig. 2).

4. 결론

SWAT 모형과 같은 토양수분을 중심으로 수문성분을 모의하는 구조를 가지고 있는 장기유출모형에서 토양은 물이 이동하고 저장되는 매체로서 물리적으로 중요한 의미를 가지며, 각 수문성분 모의를 위해서는 토양 속성정보는 반드시 필요하다. 모형의 국내 유역 적용시에는 이러한 토양 속성정보가 구축되어야 하며, 정보의 구축과정에 대한 기술이 필요하지만, 토양정보 구축의 어려움, 불확실성으로 대부분의 연구에서 이에 대한 자세한 사항은 언급되지 않고 있는 현실이다. 또한, 국내 토양정보에 대한 현황은 국립농업과학원에서 지속적인 토양조사를 통하여 모형에 필요한 토양 속성정보를 제공하고 있지만, 지속적인 조사 및 연구를 통하여

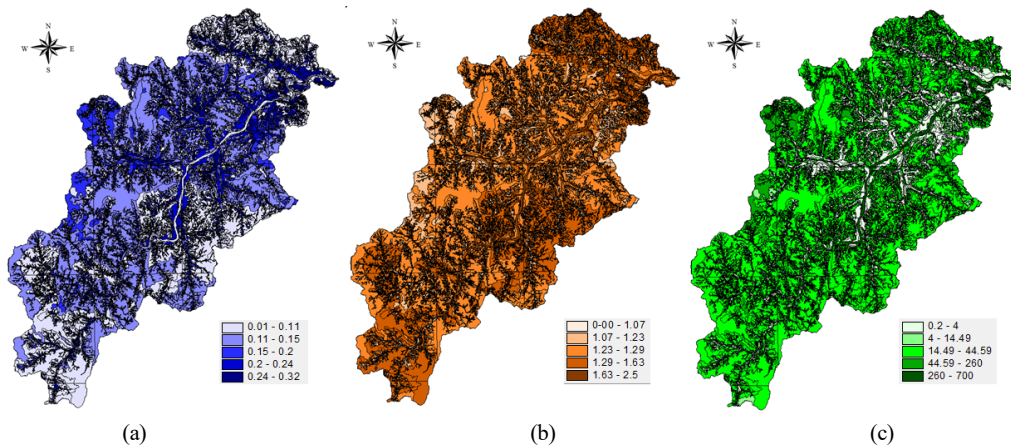


Fig. 2. Soil Characteristics Map of Gamcheon Watershed. (a) SOL\_AWC, (b) SOL\_BD, (c) SOL\_K


불확실성을 줄여나가는 것이 중요하다. 추가적으로 정밀토양도의 공간분류 상에서 토양이 아닌 수역, 하천범람지역, 암석지역 등으로 분류된 지역에 대하여 지표 아래의 수문학적 거동을 모의하기 위해 토양DB에서 요구하는 정보를 타당하게 설정하는 연구가 요구된다.


따라서, 현재 국내 가용한 토양정보 및 연구결과를 토대로 토양통(Soil series)으로 분류된 각 토양의 속성정보에 대한 데이터베이스(usersoil.dbf)를 구축하였으며, 구축된 토양 DB를 한국건설기술연구원에서 개발중인 통합물관리 플랫폼(<http://iwrn.kr>)에서 제공할 계획이다. 이와 같은 토양 속성정보 데이터베이스는 단지 SWAT 모형 뿐만 아니라 토양을 고려하여 개발된 다양한 유역수문 모형에 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.


## Acknowledgements


Research for this paper was carried out under the KICT Research Program (project no. 20240166-001, Development of IWRM-Korea Technical Convergence Platform Based on Digital New Deal) funded by the Ministry of Science and ICT.

## ORCID

Jeong Eun Lee  <https://orcid.org/0000-0002-4035-8571>

Chul-Gyum Kim  <https://orcid.org/0000-0001-8135-7527>

Jeongwoo Lee  <https://orcid.org/0000-0002-3458-5014>

Il-Moon Chung  <https://orcid.org/0000-0003-0163-7305>

## References

- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L. and Burman, R. D. (1989). "Operational estimates of reference evapotranspiration." *Agronomy Journal*, Vol. 81, No. 4, pp. 650-662, <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040019x>.
- Arnold, J. G., Allen, P. M. and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90004-S).
- Arnold, J. G., Williams, J. R. and Maidment, D. R. (1995). "Continuous-time water and sediment-routing model for large basin." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 2, pp. 171-183, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:2\(171\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(171)).
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC (2012). Harmonized world soil database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- FAO-UNESCO (2003). The Digital Soil Map of the World, Version 3.6, Land and Water Development Division, Rome, Italy.
- Han, D. Y., Lee, J. W., Kim, W. J., Bae, S. C. and Kim, S. J. (2021). "Hydrologic evaluation of SWAT considered forest type using MODIS LAI data: a case of Yongdam Dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 11, pp. 875-889, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2021.54.11.875>.
- Korean Soil Information System (2024). Soil Series, Available at: <https://soil.rda.go.kr> (Accessed: July 7, 2024).
- Jang, W. S., Yoo, D. S., Chung, I. M., Kim, N. W., Jun, M. S., Park, Y. S., Kim, J. G. and Lim, K. J. (2009). "Development of SWAT SD-HRU pre-processor module for accurate estimation of slope and slope length of each HRU considering spatial topographic characteristics in SWAT." *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 25, No. 3, pp. 351-362.
- Kim, C. G., Cho, J. P., Lee, J. E. and Chang, S. W. (2023). "Future hydrological changes in Jeju Island based on CMIP6 climate change scenarios." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, No. 11, pp. 737-749, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2023.56.11.737>.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C. G., Lee, J. and Lee, J. E. (2009). Development and applications of SWAT-K (Korea), In: Arnold, J. et al. (Eds.), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications, Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand, 397 p.
- Kim, N. W., Lee, B. J., Lee, J. E., Chung, I. M., Kim, C. G., Lee, J. and Ha, S. K. (2007). "Relationship between surface water hydrological analysis and soil characteristics." In: National Institute of Agricultural Science and Technology (Eds.), Utilization of soil hydraulic characteristics and soil digital maps for hydrological analysis, 143 p.
- Lee, J. E., Lee, J. W., Kim, C. G. and Chung, I. M. (2023). "Effect of dam operation on the spatial variability of downstream flow." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 33, No. 4, pp. 627-638, <https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.627>.
- López-Ballesteros, A., Nielsen, A., Castellanos-Osorio, G., Trolle, D. and Senent-Aparicio, J. (2023). "DSOLMap, a novel high-resolution global digital soil property map for the SWAT+ model: Development and hydrological evaluation." *Catena*, Vol. 231, 107339, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107339>.
- Ministry of Science and Technology (MST) (2011). Development of analysing system for surface water hydrological components.
- National Institute of Agriculture Sciences (NAS) (2017). Classification of hydrological soil group of Korean soils.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009, Technical Report No. 406, Texas Water Resources Institute, 618 p.
- Saxton, K. E., Rawls, W., Romberger, J. S. and Papendick, R. I. (1986). "Estimating generalized soil-water characteristics from texture." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036, <https://doi.org/10.2136/sssaj1986>.

03615995005000040039x.

- Sloan, P. G. and Moore, I. D. (1984). "Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 1815-1822, <https://doi.org/10.1029/WR020i012p01815>.
- Sloan, P. G., Morre, I. D., Coltharp, G. B. and Eigel, J. D. (1983). "Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds." Water Resources Inst. Report 142, Univ. Kentucky, Lexington, <https://doi.org/10.13023/kwrri.rr.142>.
- Williams, J. R. (1995). Chapter 25: The EPIC model, pp. 909-1000. In: Singh, V. P. (ed.). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Woo, S. Y., Lee, J. W., Kim, Y. W. and Kim, S. J. (2020) "Assessment of future stream flow and water quality of Man-yeong river watershed based on extreme climate change scenarios and inter-basin water transfer change using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 8, pp. 605-616, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.8.605>.
- Ye, X., Zhang, Q. and Viney, N. R. (2011). "The effect of soil data resolution on hydrological processes modelling in a large humid watershed." *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 1, pp. 130-140, <https://doi.org/10.1002/hyp.7823>.