

유효토심을 적용한 유출해석 결과의 왜곡 분석

송성욱·유철상[†]

고려대학교 건축사회환경공학부

Analysis of Bias in the Runoff Results Due to the Application of Effective Soil Depth

Sunguk Song·Chulsang Yoo[†]

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

(Received : 7 April 2023, Revised : 8 May 2023, Accepted : 18 May 2023)

요약

본 연구에서는 토심 대신 유효토심을 사용함에 따라 발생하는 강우-유출 해석과정의 문제를 VIC(Variable Infiltration Capacity) 모형을 가지고 살펴보았다. 이러한 연구목적을 달성하기 위해 모형의 매개변수를 다음과 같이 결정하였다. 먼저, 가용한 수치 정보를 이용하여 결정할 수 있는 매개변수는 고정하였다. 직접유출 및 기저유출 등에 관여하는 매개변수는 VIC 모형의 추천값을 적용하였다. 토심의 경우 (1) 유효토심을 적용하는 경우, (2) 토양층 연직 구조 특성을 반영하여 유효토심의 1.5배를 적용하는 경우 및 (3) 유효토심의 1.25배를 가정한 토심을 적용하는 경우, (4) 유효토심의 2.0배를 가정한 토심을 적용하는 경우 총 4가지를 고려하였다. 본 연구는 한강 유역의 충주댐 유역 및 소양강댐 유역을 대상으로 1983년에서 2020년까지의 기간에 대해 모의를 수행하였다. 연구 결과, 토심 대신 유효토심을 적용하는 경우 직접유출과 기저유출에는 정반대의 영향을 미치며, 직접유출에는 3% 이상의 증가, 기저유출에는 동일 규모의 감소가 발생하는 것을 확인하였다. 추가로 충주댐과 소양강댐 유역의 유효토심 추정에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것은 암석노출지의 비중으로 나타났으며, 그 영향으로 두 유역의 직접유출률과 기저유출률의 차이가 크게 다른 것으로 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 토심, 유효토심, 강우-유출, VIC 모형

Abstract

This study examines the possible problem in the rainfall-runoff analysis process using the VIC (Variable Infiltration Capacity) model caused by using the effective soil depth instead of the soil depth. The parameters of the model are determined as follows. First, parameters that can be determined using available numerical information are fixed. For parameters related to direct runoff and base runoff, the recommended values of the VIC model are applied. In the case of soil depth, four cases are considered: (1) the effective soil depth is applied as the soil depth, (2) 1.5 times of the effective soil depth is applied as the soil depth by reflecting the vertical structure of the soil layer, (3) 1.25 times of the effective soil depth, and (4) 2.0 times of the effective soil depth as alternative soil depths. This study simulates the rainfall-runoff for the period from 1983 to 2020 targeting the Chungju Dam and Soyang River Dam basins of the Han River system. As a result of the study, it is confirmed that when the effective soil depth is applied instead of the soil depth, direct runoff and baseflow have opposite effects, and direct runoff increases by more than 3% while base runoff decreases by the same scale. In addition, the most influential factor in the estimation of the effective soil depth in the Chungju Dam and Soyanggang Dam basins is found to be the proportion of rock outcrop area. The difference between the direct runoff ratio and the base runoff ratio in the two basins is conformed significantly different due to the influence of the rock outcrop area.

Key words : Soil depth, Effective soil depth, Rainfall-runoff, VIC model

[†]To whom correspondence should be addressed.

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea
E-mail : envchul@korea.ac.kr

• **Sunguk Song** School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea/Ph.D. candidate(ssu0103@korea.ac.kr)
• **Chulsang Yoo** School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea/Professor(envchul@korea.ac.kr)

1. 서 론

토심이란 토양의 수직적 깊이를 말한다. 이에 반해 유효토심은 식물이 자라는데 필요한 조건을 갖춘 토층의 깊이를 의미한다. 토양 단면에서 모래나 자갈층, 경반층, 지하수위, 특히 산성토층 등이 나오면 그 위층까지를 유효토심으로 본다(National Geographic Information Institute, 2016). 좀더 기술적인 판단은 토층을 지표면에서부터 O(유기물층), A(용탈층), B(집적층), C(모재층), R(모암층)로 구분했을 때 R(암반) 위까지의 깊이(즉, O+A+B+C 깊이)는 토심으로, O+A+B 깊이는 유효토심으로 간주한다(Hyun et al., 2008; Herren and Donahue, 1991). 토심은 수문학적으로 중요한 개념이며, 유효토심은 농업 분야에서 중요하게 사용하는 개념이다(Rural Development Administration, 1997).

다른 관점에서 보면, 토심은 수분을 함유할 수 있는 공간을 대표한다. 이에 반해 유효토심은 작물이 뿌리를 뻗어 땅속에서 호흡, 물과 양분 흡수 등을 할 수 있는 깊이이다. 유효토심이 얇으면 물과 영양분을 저장할 수 있는 토양 용적이 적어 뿌리의 성장이 나빠 생육이 불량하고 수확량이 줄어든다. 이런 이유로 농업 분야의 연구, 조사에서는 유효토심이 토심보다 의미가 있으며 이에 대한 정보도 많다. 국내에서 가용한 수치토양도는 농업분야에서 구축한 것이며(Korean Soil Information System, <https://soil.rda.go.kr/soil/>), 따라서 제공되는 정보도 유효토심이다. 유효토심의 구분은 매우 얇음, 얇음, 보통, 깊음 등 4단계로 구분한다. 우리나라의 유효토심은 보통(50 - 100cm)이 41.5%로 가장 넓은 면적을 차지한다. 다음은 얇음(20 - 50cm)이 21.5%, 매우 얇음(20cm 이하)이 19.0%이며, 깊음(100cm 초과)이 18%를 차지한다(National Geographic Information Institute, 2016).

우리나라의 대부분을 차지하는 산지의 경우는 유효토심이 더욱 얇다. 우리나라 대부분의 산림이 산지에 위치하고 있으므로 산림지역에서의 유효토심은 산지에서의 유효토심을 의미한다고 보아도 무방하다. 최근의 연구를 보면 우리나라 산림의 유효토심은 30 cm 이상 60 cm 미만의 경우가 49.2%로 가장 높게 나타나고 있으며, 30 cm 미만이 35.3%, 60 cm 이상이 12.2% 분포하고 있다. 또한 암석지와 석력지 등의 기타 토심이 3.3%를 차지하고 있다(Kwon et al., 2021). 대한민국국가지도집(2권 자연환경과 국토)을 보면 우리나라의 60cm 이상의 유효토심 분포 비율을 약 24%로 추정하였으나(평균은 51cm), 이 비율이 최근 조사에서는 12.2%로 줄어든 것이다. 산림지역 유효토심의 평균은 45 cm 수준일 것으로 추정한다.

이에 반해 토심이 어느 정도인지를 명확히 제시한 정보는 찾기 어렵다. 토양학 교과서를 찾아보면 평균적으로 토양 C층의 두께는 전체 토심의 40% 정도를 차지하는 것으로 나온다(Brady and Weil, 2016). Kim et al. (2021)에 제시된 토양층도 유사한 구조를 가진다. 예를 들어 토심 150 cm인 경우 C층의 깊이는 55 cm 정도, 토심 60 cm 정도인 경우에는 C층의 깊이가 25 cm 정도로 조사한 바 있다. 토

심 50 cm인 경우 C층의 깊이가 10 cm 정도인 경우도 있고 25 cm 정도인 경우도 있다. 전체적으로 보면 C층의 깊이가 30 - 40% 수준임을 확인할 수 있다. 결국 유효토심에 대한 정보만 있다면 토심은 유효토심의 150% 정도로 가정할 수 있다는 의미이다.

가용한 토심 정보가 유효토심에 한정되는 이유로 토심 정보가 중요하게 사용되는 강우-유출 해석, 산사태 해석에서는 토심 대신 유효토심이 사용되는 경우가 많았다. 예를 들어, Choi et al. (2008), Ahn et al. (2013) 등의 강우-유출 해석에서 모두 유효토심을 토심으로 고려하였다. Kim and Shin (2016)의 경우에는 토심 정보가 없어 국외의 경험식을 가지고 토심을 추정하여 이용한 바 있으며, Kim et al. (2019) 등의 산사태 해석에서는 유효토심을 토심 정보로 이용하였다. 그러나 산사태 해석의 경우에는 뿌리의 응력이 산사태에 저항하는 힘으로 고려되므로 유효토심이 활동면의 판단에 의미가 있기도 하다. 활동면의 깊이가 유효토심 이하로 될 경우에도 유효토심에서 산사태가 모의된다는 문제가 있을 뿐이다. 즉, 토심 혹은 유효토심 사용 여부에 따라 모의되는 산사태 규모의 차이는 있지만, 산사태의 발생 여부 자체는 같다.

그러나 강우-유출 해석에서 유효토심을 토심으로 고려하게 되면, 특히 토양의 가능최대보유수분을 과소추정하게 되는 문제가 발생하게 된다. 이로 인해 직접유출의 규모가 과대 추정되고, 기저유출의 규모는 반대로 줄어든다. 직접유출의 발생시점이 빨라지고, 중간유출의 규모가 줄어 유출수문곡선 하강부의 경사가 급해져 기저시간(base time)이 줄어들 가능성이 크다. 토양 내 가용 수분량이 줄어들어 증발산의 규모도 줄어들게 된다. 강우-유출 모형의 적합(fitting) 과정에서 매개변수의 잘못된 추정을 유도할 수 있다는 문제도 있다. 관측 유출자료와의 비교를 통해 결정되는 매개변수는 특히 물리적으로 잘못된 값으로 결정될 가능성이 커진다. 이러한 문제들은 물론 유효토심과 토심 사이의 차이가 클수록 커진다.

본 연구에서는 토심 대신 유효토심을 사용함에 따라 발생하는 강우-유출 해석과정의 문제를 VIC(Variable Infiltration Capacity) 모형을 가지고 살펴보고자 한다. VIC 모형(Liang et al., 1994)은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발된 모형으로 중규모 이상의 유역에 대한 적용성이 검증된 지표수문해석 모형이다. VIC 모형은 대륙 또는 전지구 단위의 수문순환을 모의하는데 많이 활용되고 있다. 예를 들어, Xie et al. (2007)은 VIC 모형을 이용하여 중국 주요 하천에 대한 유량을 모의하고, 이를 실제 관측 자료와 비교하여 모형의 적용성을 검증한 바 있다. Shukla and Wood (2008)은 VIC 모형을 이용하여 미국 전역의 유출을 모의하고, 이를 바탕으로 표준유출지수(standardized runoff index)를 산정하여 과거 발생한 가뭄을 평가하였다. Sheffield and Wood (2008)은 VIC 모형을 이용하여 전지구 토양수분을 모의하고, 가뭄이 어떤 양상으로 진행되었는지 해석하였다. Wang

Table 1. Soil parameters of the VIC model

| Parameter | Description |
|-----------------|---|
| K_{sat} | Saturated hydraulic conductivity |
| exp | Exponent of Corey's equation |
| γ_{bulk} | Bulk density of soil |
| w_{cr} | Soil moisture at critical point |
| w_{pwp} | Soil moisture at wilting point |
| D_s | Fraction of $D_{s,max}$ at non-linear base flow |
| $D_{s,max}$ | Maximum velocity of base flow |
| b_i | Parameter for variable infiltration curve |
| z | Depth of soil layer |

려되는 값들은 식생의 구조저항(r_a), 식생의 기공저항(r_w), 엽면적지수 LAI , 알베도, RGL 등이 있다. 이들은 공통적으로 VIC 모형에서 고려된 식생들의 증발산에 관련된 정보들을 나타낸다.

Table 3은 VIC 모형의 식생 매개변수를 나타낸다. $Vegclass$ 는 모의 격자에서 고려되는 식생의 종류를 나타내는 값이다. Vegetation Library의 식생 ID와 같은 숫자로 나타낸다. $Nveg$ 는 어떤 모의 격자에서 고려되는 식생의 종류의 수, 즉 특정 모의 격자 내 식생 종류가 얼마나 다양한지를 나타내는 정수값이다. CV 는 모의 격자 내에서 각 $Vegclass$ 에 해당하는 식생이 차지하고 있는 면적비율을 나타내는 값이다. $root_depth$ 와 $root_fract$ 는 각각 식생의 뿌리에 대한 입력값으로, 본 연구에서는 식생 종류에 따라 부여된 기본값을 참고하여 입력하였다. $fetch$ 매개변수는 풍속에 관련된 매개변수로 $root_depth$ 와 $root_fract$ 의 경우와 마찬가지로 식생의 종류에 따라 부여된 기본값을 입력하였다.

Table 2. Vegetation library parameters of the VIC model

| Parameter | Description |
|-----------|--|
| r_a | Architectural resistance of vegetation type |
| r_w | Stomatal resistance of vegetation type |
| LAI | Leaf-area index |
| $Albedo$ | Shortwave albedo of vegetation type |
| RGL | Minimum incoming shortwave radiation for transpiration |

Table 3. Vegetation parameters of the VIC model

| Parameter | Description |
|---------------|--|
| $Nveg$ | Number of vegetation tiles in a grid cell |
| $Vegclass$ | Vegetation class identification number |
| CV | Fraction of grid cell covered by vegetation tile |
| $root_depth$ | Root zone thickness |
| $root_fract$ | Fraction of root in a root zone |
| $fetch$ | Average fetch distance |

3. 대상 유역 및 자료

3.1. 대상 유역

본 연구에서 VIC 모형에 대한 토양 및 식생 매개변수, 특히 토양 깊이의 영향을 평가하기 위한 대상 유역으로 소양강댐 유역과 충주댐 유역을 선정하였다. 소양강댐 유역은 유역면적이 2,703 km²이며 유역은 강원도 일부 지역을 포함한다. 소양강댐 유역의 연 평균 강수량은 1,100 mm 정도이며, 소양강댐의 총 저수용량은 2,900 백만 m³에 이른다. 충주댐 유역은 유역면적이 6,648 km²에 이르며 강원도, 충청북도, 경상북도 일부 지역을 포함한다. 충주댐 유역의 연 평균 강수량은 1,170 mm, 충주댐의 총 저수용량은 2,750 백만 m³에 이른다. 두 댐은 각각 한강의 북한강, 남한강 수계의 대표적인 댐이다. 두 유역은 댐 수문 자료가 1970년대부터 가용하여 관측자료를 장기간 수문순환 모의 결과와 비교하기 용이하다.

VIC 모형은 입력자료의 구성 및 모의 수행이 0.5°×0.5° 크기의 격자 단위로 이루어진다. 따라서 유역의 형태 또한 그대로 반영되는 것이 아니며, 유역이 속한 격자의 모의결과를 가지고 유역의 관측 수문자료와 비교하게 된다. 실제로는 충주댐 유역의 면적이 소양강댐 유역의 면적보다 2배 이상 넓지만 본 연구에서는 동일하게 2개의 격자로 두 유역의 수문순환 모의결과를 각각 표현하게 된다. Fig. 2는 본 연구의 대상 유역인 소양강댐 유역과 충주댐 유역의 위치를 나타낸 것이다.

3.2. 입력 자료

VIC 모형에서 유역의 특성은 토양 매개변수와 식생 매개변수로 표현된다. 모의에서 고려되는 매개변수의 종류와 역할 및 특성은 앞서 설명이 되었다. 본 절에서는 식생 매개변수와 토양 매개변수를 결정하기 위해 어떤 자료를 사용하였는지 구체적으로 설명하고자 한다. 먼저, 식생 매개변수는 원격탐사 자료를 사용하여 결정하였다. 먼저 시기별로 가용한 토지피복 자료를 수집하였다. 그러나 동일한 기관에서 장기간에 걸쳐 관측한 토지피복 자료는 가용하지 않아 수집된 자료들을 적절히 VIC 모형의 분류에 따라 재분류하였다. 식생 매개변수 산정을 위해 수집한 자료들, 그리고 각각의 자료들이 적용된 기간은 Table 4와 같이 나타난다.

토양 매개변수의 경우 토양도와 DEM으로부터 필요한 정보를 추출하여 결정하였다. 참고로 토양 매개변수의 경우, 식생 매개변수와는 달리 시기에 따라서 큰 변화가 없는 것으로 가정하였고, 전 기간 같은 자료를 적용하였다.

마지막으로, 토심은 농촌진흥청의 유효토심도로부터 추정하였다. 먼저, 대상 유역인 충주댐 유역과 소양강댐 유역의 유효토심은 다음 Table 5와 같이 결정하였다. 유효토심도에서 유효토심은 구간의 형태로 제시되므로 이를 수치로 확정하기 위해 각 구간의 평균값을 대푯값으로 사용하였다. 그러나 '깊음' 등급의 경우에는 '100 cm 이상'으로 정의되

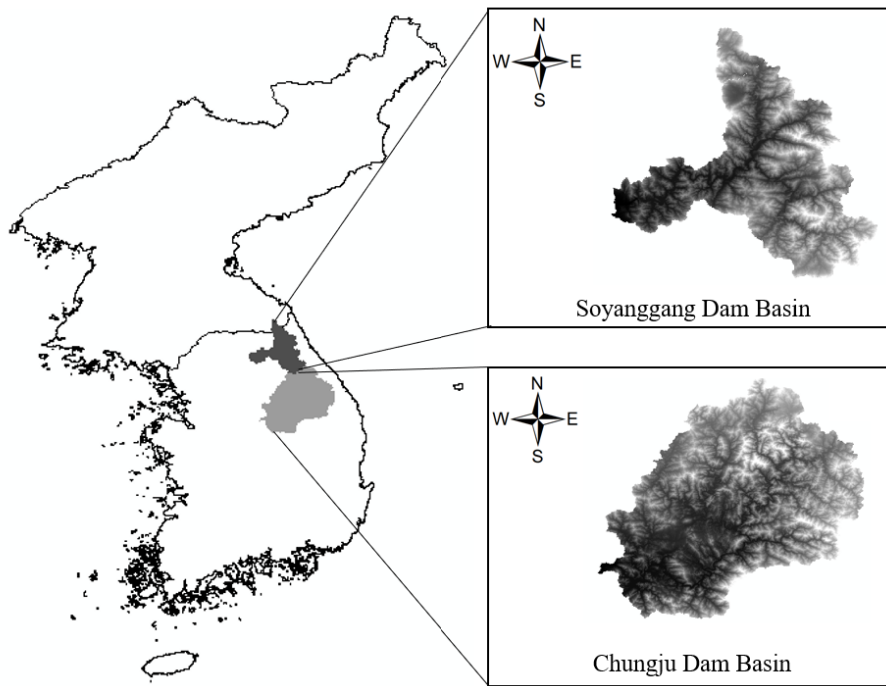


Fig. 2. Location of the two target basins in this study

Table 4. Land cover data collected for estimating the vegetation parameters

| Source | Resolution | Observation year | Data coverage |
|--------|---------------|------------------|---------------|
| NASA | 1°×1° | 1983 | 1981–1990 |
| UMD | 0.083°×0.083° | 1994 | 1991–2000 |
| NASA | 0.017°×0.017° | 2003 | 2001–2005 |
| GLCNMO | 0.083°×0.083° | 2008 | 2006–2010 |
| NASA | 0.017°×0.017° | 2013 | 2011–2015 |
| NASA | 0.017°×0.017° | 2018 | 2016–2020 |

Table 5. Effective soil depths determined for the Chungju Dam basin and Soyanggang Dam basin with and without considering the rock outcrop

| No | Description | Representative value (m) | Rock outcrop area considered | | Rock outcrop area neglected | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | | Chungju | Soyanggang | Chungju | Soyanggang |
| 1 | Very deep | 1.50 | 0.2% | 0.5% | 0.3% | 0.7% |
| 2 | Deep ~ Very deep | 1.25 | 0.9% | 0.6% | 1.0% | 0.8% |
| 3 | Deep | 1.00 | 6.2% | 3.2% | 6.8% | 4.2% |
| 4 | Moderately deep ~ Deep | 0.875 | 1.5% | 2.3% | 1.7% | 3.1% |
| 5 | Moderately deep | 0.75 | 17.5% | 10.3% | 19.1% | 13.7% |
| 6 | Shallow ~ Moderately deep | 0.55 | 0.9% | 10.1% | 1.0% | 13.4% |
| 7 | Shallow | 0.35 | 62.8% | 47.4% | 68.5% | 63.1% |
| 8 | Very shallow | 0.10 | 1.5% | 0.8% | 1.7% | 1.0% |
| 49 | Rock outcrop | 0.00 | 8.3% | 24.9% | – | – |
| Total | | | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Determined effective soil depth | | | 0.45 m | 0.37 m | 0.49 m | 0.49 m |

어 있어, 그 대푯값을 ‘보통’ 등급 대푯값의 두 배 정도인 150 cm로 가정하였다. 추가로 본 연구의 대상유역인 충주댐 유역에는 8.3%의 암석노출지가, 소양강댐 유역에는

24.9%의 암석노출지가 포함되어 있다. 이들 암석노출지의 토심은 0으로 반영되어 소양강댐 유역의 토심이 충주댐 유역의 토심에 비해 상당히 작게 추정되었다. 즉, 두 유역의

유효토심은 각각 0.37 m, 0.45 m로 결정되었다. 암석노출지를 제외하면 두 유역의 토심은 유사한 0.49 m 정도인 것으로 나타난다.

4. 결과 및 토론

4.1 VIC 모형의 매개변수 추정

먼저, 본 연구에서 사용한 식생 자료의 분류 방법은 VIC 모형의 식생 자료 분류 기준과 다르다. 이에 본 연구에서는 NASA의 The MODIS Terra+Aqua Combined Land Cover product 중 Land Cover Type Yearly L3 Global 500m (MCD12Q1) 자료의 식생 분류기준을 참고하여 이를 VIC 모형의 식생 분류기준과 일치시켰다. 이 과정에서 영구습지(permanent wetland)로 구분된 지역이 대부분 논(paddy)임을 반영하여 농경지(cropland)로 고려하였다. Table 6은 두 연구 유역을 대상으로 식생 매개변수를 산정한 결과이다.

Table 6에 나타난 결과는 충주댐과 소양강댐 유역 모두 산림(Vegclass: 1~6)의 면적이 지배적임을 나타낸다. 충주댐 유역은 전체 면적 중 78.9%가, 소양강댐 유역은 전체 면적 중 91.9%가 산림으로 분류된다. 관목과 초지에 해당하는 면적(Vegclass: 8~10)은 두 유역에서 각각 4.8%, 5.8%로 비슷한 수준으로 나타난다. 경작지 면적의 경우 충주댐 유역이 15.2%로 소양강댐 유역의 3.2%에 비해 5배 정도 큰 것으로 나타난다.

VIC 모형의 토양 매개변수는 토양도를 이용하여 Table 7과 같이 결정되었다. 참고로 토양 매개변수는 토양층별로

달리 입력하도록 설정되어 있다. 이 표의 결과를 보면 포화수리전도도(K_{sat})는 충주댐 유역에서 소양강댐 유역보다 작으며 exp 는 그 반대로 나타난다. 이는 토양층 내 수분의 이동이 소양강댐 유역에서 더 빠르게 진행됨을 의미한다. 또한 충주댐 유역의 γ_{bulk} 는 소양강댐 유역의 γ_{bulk} 보다 더 작고 w_{cr} 과 w_{pwp} 는 반대로 더 큰 것으로 나타난다. 이는 충주댐 유역의 토양 공극률이 소양강댐 유역보다 더 작다는 것을 의미한다. 결과적으로 두 유역의 토양 깊이가 비슷하다면 토양수분 및 증발산의 변동이 충주댐보다는 소양강댐 유역에서 더 민감하게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

마지막으로 본 연구에서는 다음과 같이 각 토양층의 깊이를 결정하였다. VIC 모형에서는 식생층(canopy layer)과 토양층 2개를 고려하기도 하지만 (Liang et al., 1994) 일반적으로 3개 토양층을 고려한다 (Markert, 2017). 본 연구에서도 3개의 토양층을 고려하였다. 먼저, 최상부토층은 0.1 m로 고정하였다. 다음으로 상부토층은 유효토심에서 0.1 m를 뺀 값으로 결정하였다. 즉, 최상부토층과 상부토층의 합을 유효토심으로 고정하였다. 마지막으로 하부토층은 다음과 같이 총 4개의 경우를 고려하였다. 먼저, Brady & Weil (2016)을 참고한 것으로 하부토층의 깊이를 유효토심의 50% 정도로 가정하는 방법이다(방법 (1)). 이렇게 하면 토심은 유효토심의 150% 정도가 된다. 기존의 문헌에서 제시한 토심과 유효토심의 관계를 그대로 인용한 수치이다. 또한 유효토심으로 토심을 대체하여 사용하는 경우를 만들기 위해 하부토층의 깊이를 0.01 m로 설정하였다(방법 (4)). 즉, 방법 (4)는 상부토층에서 유효토심을 고려하고, 하부토층에는 모의를 위해 최소한의 깊이를 할당하는 형태

Table 6. Relative portions of vegetation covers determined for the two target basins in this study

| Parameter | Chungju Dam basin | | Soyanggang Dam basin | |
|----------------------|-------------------------|-------|----------------------|-------|
| N_{veg} | 6 | | 6 | |
| $Vegclass \ \& \ CV$ | $Vegclass$ | CV | $Vegclass$ | CV |
| | 4 (Deciduous Broadleaf) | 38.4% | 4 | 62.4% |
| | 5 (Mixed Cover) | 12.0% | 5 | 13.0% |
| | 6 (Woodland) | 28.5% | 6 | 16.5% |
| | 8 (Closed Shrublands) | 3.8% | 8 | 1.1% |
| | 10 (Grasslands) | 2.0% | 10 | 3.7% |
| | 11 (Crop Land) | 15.2% | 11 | 3.2% |

Table 7. Soil parameters determined for the two target basins in this study

| Parameter | Chungju Dam basin | | Soyanggang Dam basin | |
|-----------------|-------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | Upper layer | Lower layer | Upper layer | Lower layer |
| K_{sat} | 507.8 | 253.3 | 601.2 | 291.2 |
| exp | 10.40 | 10.67 | 10.39 | 10.49 |
| γ_{bulk} | 1,254 | 1,386 | 1,285 | 1,433 |
| w_{cr} | 0.577 | 0.454 | 0.443 | 0.406 |
| w_{pwp} | 0.452 | 0.323 | 0.315 | 0.288 |

Table 8. Soil depth of each soil layer assumed for the Chungju Dam basin and Soyanggang Dam basin

| Estimation method | Chungju Dam basin | | | | Soyanggang Dam basin | | | |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Top layer | Upper layer | Lower layer | Total depth | Top layer | Upper layer | Lower layer | Total depth |
| Method (1) | 0.10 m | 0.35 m | 0.22 m | 0.67 m | 0.10 m | 0.27 m | 0.18 m | 0.54 m |
| Method (2) | | | 0.11 m | 0.56 m | | | 0.09 m | 0.45 m |
| Method (3) | | | 0.45 m | 0.90 m | | | 0.36 m | 0.72 m |
| Method (4) | | | 0.01 m | 0.46 m | | | 0.01 m | 0.37 m |

Table 9. Soil Depth Estimated according to Previous Studies

| Estimation method | Equation | Soyanggang Dam basin | Chungju Dam basin |
|----------------------------|---|----------------------|-------------------|
| Mehnatkesh et al. (2013) | $Z(cm) = 122.13 - 0.11S + 0.012WT + 0.012CA - 0.23STI$ | 1.08 m | 0.94 m |
| Penizek and Boruvka (2006) | $Z(cm) = 88.8 + 1.020A + 0.0573H - 2.491S$ | 0.91 m | 0.83 m |
| USGS | $Z(m) = 2.5 - 1.5 \frac{\tan\theta}{\tan 60^\circ} (\theta < 70^\circ)$ | 2.43 m | 2.38 m |

이다. VIC 모형에서 하부토층의 깊이를 0으로 할 수 없어 가능한 최소값을 적용한 것이다. 마지막으로 이 두 경우의 중간적 경우로서 하부토층의 깊이를 유효토심의 25% 수준으로 결정한 경우(방법 (2))와 100%로 가정한 경우(방법 (3))를 추가하였다. 이 두 가지 경우는 각각 하부토층의 깊이가 상부토층의 깊이보다 작은 경우와 큰 경우를 가정한 것이며, 물리적 근거는 없으나, 유출 결과의 분석을 위해 추가한 방법이다.

참고로 위와 같이 가정한 토심을 경험식을 적용한 결과와 비교해 보았다. 먼저, Yoo et al. (2015)이 제안한 식을 적용해 볼 수 있다. 이 식은 식생 뿌리 깊이를 추정하는 식이지만 유효토심과 유사한 개념으로 볼 수도 있다. 적용 결과 유효토심은 충주댐 유역에서 0.46 m, 소양강댐 유역에서 0.56 m로 나타난다. 충주댐 유역에서는 상당히 유사하고, 반대로 소양강댐 유역에서는 차이가 큰데 암석노출지의 비중이 큰 탓으로 판단된다.

토심을 추정하는 경험식들도 있다. 이들 경험식은 대체로 사면의 경사와 같은 지형정보를 고려한다. 먼저, Mehnatkesh et al. (2013) 식은 사면경사와 방향, 유역의 면적 및 습윤지수를 고려한다. 토심을 추정해본 결과 충주댐 유역의 토심은 0.94 m로, 소양강댐 유역의 토심은 1.08 m로 나타났다. Penizek and Boruvka (2006)의 식에서는 유역면적과 유역의 평균 고도 및 사면경사를 고려하며, 그 결과로 충주댐 유역은 0.83 m로, 소양강댐 유역이 0.91 m로 토심이 추정되었다. 마지막으로 사면경사만 고려하는 USGS 방법을 적용한 결과 충주댐 유역의 경우 2.38 m, 소양강댐 유역은 2.43 m 매우 큰 토심이 추정되었다. 이들 결과를 종합해 보면, 먼저, 미국에서 만든 경험식을 우리나라에 적용하는 것은 무리이다. 이는 기본적으로 미국의 토심이 우리나라에 비해 토심이 월등히 깊기 때문이다. 다른 두 개의 경험식도 모두 본 연구에서 가정한 토심을 훨씬 상회하는 값을 제공하고 있다. 암석노출지의 영향을 고려하지 않아서 생기는

문제이기도 하지만, 반대로 우리나라의 토심이 이들 경험식이 만들어진 국가에 비해 얕다는 점을 나타내고 있는 것이기도 하다. 고려한 모든 경험식에서 소양강댐의 토심을 깊게 추정하고 있다는 점도 주목할 만하다. Table 9는 이들 경험식 및 결과를 정리한 결과이다.

4.2 강우-유출 해석 결과

4.2.1. 직접유출, 기저유출 및 유출률의 변화

본 연구에서는 VIC 모형을 이용하여 1983년에서 2020년까지의 일 단위 강우-유출 해석을 수행하였다. 그 결과를 정리하여 연 단위의 기저유출률, 직접유출률 및 총유출률을 나타낸 것이 Fig. 3이다.

Fig. 3은 먼저 두 유역에서의 강우-유출 모의결과가 충주댐 유역에서는 상당한 차이가 있음을, 반대로 소양강댐 유역에서는 상당히 유사하게 나타남을 보여주고 있다. 그러나 충주댐 유역에서의 큰 차이가 평균이 아닌 추세적 변화에서 나타나고 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 즉, 충주댐 유역의 경우에는 특히 관측된 기저유출률이 지속적으로 감소하고 있는 것으로 나타난다. 1980년대 나타난 큰 기저유출이 이후 점차 감소하는 뚜렷한 추세도 확인할 수 있다. 이런 이유로 1980, 1990년대 모의 기저유출률은 관측값에 비해 매우 작게 나타난다. 이와는 반대로 2000년대 이후 모의된 기저유출률의 규모는 관측치를 상회하는 것으로 나타난다.

기저유출률의 이러한 차이에도 불구하고, 충주댐 유역의 직접유출률 변동은 모의자료와 관측자료에서 모두 상당히 유사하게 나타난다. 2010년대의 상당히 적은 직접유출률도 관측자료와 모의자료 모두에서 유사하게 나타나고 있다. 이들은 함께 고려하는 총유출률의 경우는 전반적으로 유사한 수준을 나타내고 있으나, 관측 총유출률이 점차 감소하는 추세를 꾸준히 보여주고 있다는 차이가 있다. 모의 자료의 총유출률은 거의 그대로 유지되고 있다. 이러한 관측 유출

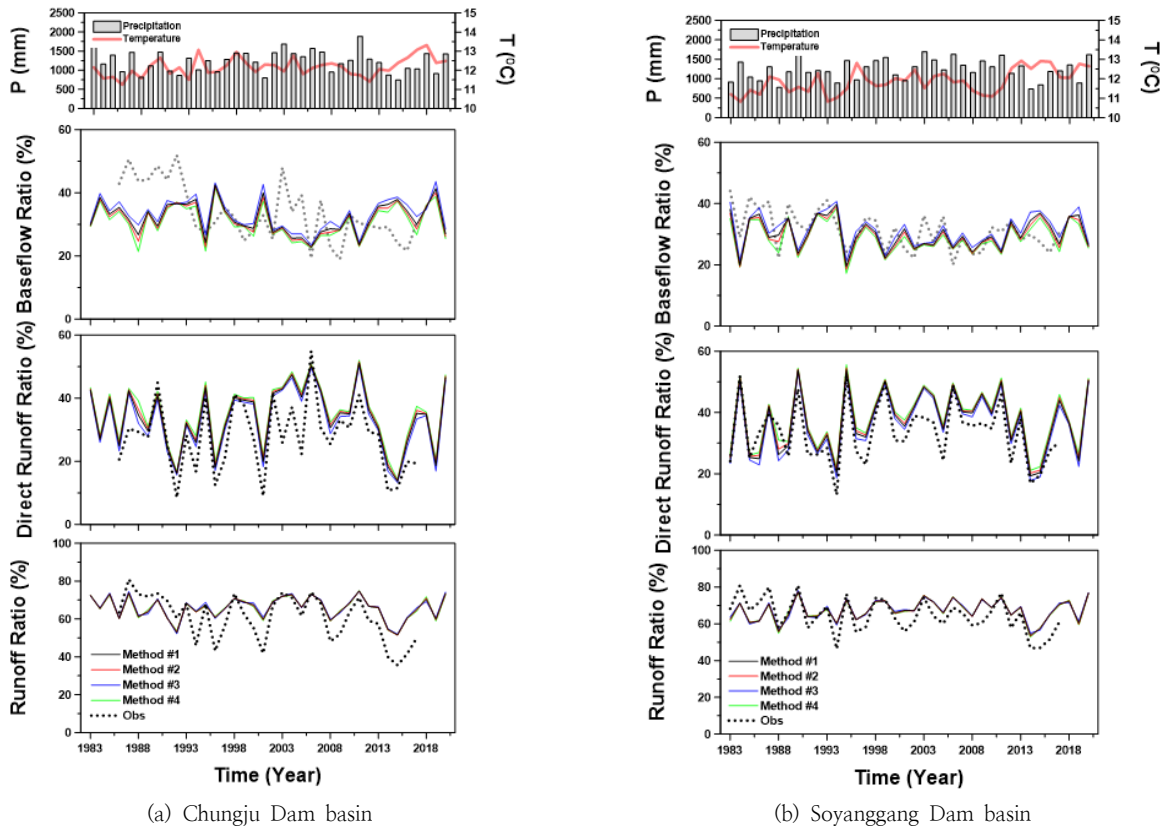


Fig. 3. Comparison of observed and simulated runoff ratios in the two target basins

률의 감소 경향은 소양강댐 유역에서도 동일하게 나타난다. 이 그림에서 총 4가지의 토심 자료를 적용하여 모의된 결과는 그 차이를 확인하기 어려울 정도로 상당히 유사하게 나타난다. 특히 유출률의 결과는 토심을 결정하는 4가지 방법 모두에 있어 거의 차이가 없어 보인다. 평균적으로 보면, 충주댐 유역의 관측 총유출률은 60.7%, 모의 총유출률의 경우에는 65.9%~66.1%로 나타난다. 소양강댐 유역의 경우 관측 총유출률은 64.6%, 모의 총유출률의 경우에는 66.7%~66.8% 정도로 나타난다. 토심 추정 방법에 따른 모의 유출률의 차이가 두 유역에서 모두 1%에도 미치지 못하는 것으로 나타난다. 총 토심이 알아질수록 총 유출률이 감소하는 경향이 있는 것은 사실이나 그 차이는 미미한 수준으로 나타난다. 토심의 차이가 가장 큰 방법 (3)과 방법 (4)의 유출률 차이는 0.2% 이내에 그치고 있다.

4.2.2. 토심에 따른 직접유출과 기저유출의 변화 경향

Table 10은 본 연구에서 고려한 4가지 토심에 대해 직접

유출율과 기저유출률을 정리한 것이다. 그림에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타나지만 이 표의 결과는 직접유출률과 기저유출률이 토심에 상당한 영향을 받고 있음을 보여준다. 먼저, 토심이 깊을수록 직접유출률의 크기가 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 토심에 따라 충주댐 유역에서의 직접유출률은 최대 2.3%의 차이가 나타나고, 소양강댐 유역에서는 최대 2.1%의 차이가 나타난다. 직접유출률의 평균이 35% 전후임을 고려하면 이러한 차이는 직접유출량의 10%에 달하는 큰 차이가 된다. 이에 반해, 기저유출률의 변화 경향은 직접유출률과는 정반대이다. 기저유출률은 기본적으로 토심에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 즉, 토심대신 유효토심을 사용하는 경우 직접유출률의 1% 이상 증가(직접유출량의 3% 이상 증가)와 동일한 수준의 기저유출률 감소가 나타나게 된다. 총 유출률은 유사한 수준으로 유지되는 것으로 나타난다. 이는 토심의 증가에 따라 토양의 보유수량이 증가함에 따른 당연한 결과이기도 하다, 또한 유출률의 변화가 미미하다는 점을 고려해도 쉽게 유출할 수

Table 10. Comparison of ratios of total runoff, direct runoff, and baseflow with respect to the assumed soil depth

| Estimation method | Chungju Dam basin | | | | Soyanggang Dam basin | | | |
|-------------------|-------------------|--------------|---------------|----------|----------------------|--------------|---------------|----------|
| | Total depth | Total runoff | Direct runoff | Baseflow | Total depth | Total runoff | Direct runoff | Baseflow |
| Method (1) | 0.67 m | 65.9% | 33.9% | 32.0% | 0.54 m | 66.8% | 38.3% | 28.4% |
| Method (2) | 0.56 m | 65.9% | 34.5% | 31.4% | 0.45 m | 66.7% | 38.9% | 27.8% |
| Method (3) | 0.90 m | 66.1% | 32.9% | 33.2% | 0.72 m | 66.9% | 37.4% | 29.5% |
| Method (4) | 0.46 m | 65.9% | 35.2% | 30.7% | 0.37 m | 66.7% | 39.5% | 27.2% |

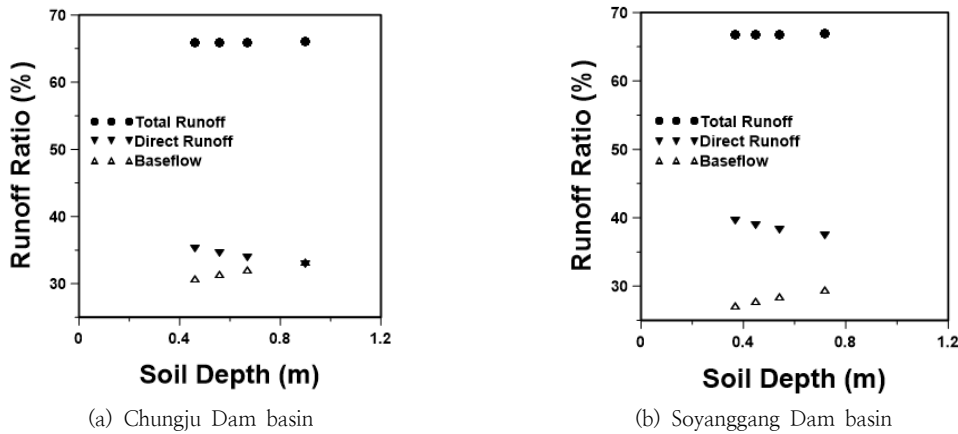


Fig. 4. Changes in the runoff ratios with respect to the assumed soil depth

있는 결과이다. 결국 토심의 증가에 따른 직접유출의 감소분은 기저유출의 증가분으로 나타난다고 판단할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 4를 통해서도 확인할 수 있다.

마지막으로, 충주댐 유역과 소양강댐 유역의 차이에 대해서도 언급할 필요가 있다. 충주댐 유역에서는 직접유출물이 기저유출물에 비해 약간 큰 수준(약 5% 전후)으로 나타난다. 이에 반해 소양강댐 유역에서는 직접유출물이 기저유출물에 비해 10% 이상 큰 것으로 나타난다. 총유출물 자체는 1% 정도의 차이로 두 유역 간에 유의한 차이가 있다고 판단하기는 어렵다. 토심의 영향도 어느 정도 작용할 것으로 판단되나 그렇지 않다. 유사한 토심(예를 들어, 충주댐 0.67 m, 소양강댐 0.72 m의 경우)에서도 충주댐에서는 직접유출물과 기저유출물의 차이가 1% 정도에 불과한 반면, 소양강댐 유역에서는 그 차이가 8% 정도에 이른다. 이러한 차이의 가장 큰 원인은 암석노출지의 영향으로 판단된다. 소양강댐 유역의 암석노출지 비중은 24.9%로 매우 크고, 충주댐 유역의 경우에는 8.3% 정도이다.

5. 결 론

본 연구에서는 토심 대신 유효토심을 사용함에 따라 발생하는 강우-유출 해석과정의 문제를 VIC(Variable Infiltration Capacity) 모형을 가지고 살펴보았다. 이러한 연구목적을 달성하기 위해 모형의 매개변수를 다음과 같이 결정하였다. 먼저, 주어진 수치 정보(지형, 토양, 토지이용, 식생 등)를 이용하여 결정할 수 있는 매개변수는 고정하였다. 나머지 다양한 흐름에 관여하는 매개변수는 토양특성을 고려하여 VIC 모형의 추천값을 적용하였다. 마지막으로 토심의 경우는 (1) 유효토심을 적용하는 경우, (2) 토양층 연직구조 특성을 반영하여 유효토심의 1.5배를 적용하는 경우 및 기타 유효토심의 1.25배 및 2배를 가정하는 경우를 추가하여 총 4가지를 고려하였다. 본 연구는 한강 유역의 충주댐 유역 및 소양강댐 유역을 대상으로 1983년에서 2020년까지의 기간에 대해 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

충주댐 유역과 소양강댐 유역의 유효토심 추정에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것은 암석노출지의 비중이다. 소양강댐 유역의 경우 그 비중이 24.9%이며 충주댐 유역의 경우는 8.3%이다. 이를 반영하여 추정된 충주댐 유역의 유효토심은 0.45 m, 소양강댐 유역의 유효토심은 0.37 m이다. 암석노출지를 제외하면 두 유역의 토심은 유사한 0.49 m 정도인 것으로 나타난다. 이러한 암석노출지의 영향은 두 유역에서 직접유출과 기저유출의 비율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 충주댐 유역에서는 직접유출물이 기저유출에 비해 약간 큰 수준(약 5% 전후)으로 나타난다. 이에 반해 소양강댐 유역에서는 직접유출물이 기저유출물에 비해 10% 이상 큰 것으로 나타난다. 두 유역의 총유출물 차이가 1% 정도인 점을 고려하면 두 유역의 직접유출물과 기저유출물의 차이는 상당히 큰 것이다.

VIC 모형을 이용한 두 유역에서의 강우-유출 모의결과는 충주댐 유역에서는 관측치와 상당한 차이를 보이고, 반대로 소양강댐 유역에서는 상당히 유사한 것으로 나타났다. 충주댐 유역에서의 이러한 차이는 기저유출물의 뚜렷한 감소 경향에 기인한다. 즉, 1980년대 나타난 큰 기저유출물이 이후 점차 감소하는 뚜렷한 추세가 관측자료에 나타나는데 반해 모의 자료에는 기저유출물이 유사하게 유지되는 것으로 나타났다. 토지피복 및 토지이용이 크게 변하지 않은 상황에서 발생한 기저유출의 변화는 임목축적의 차이에서 발생한 것으로 추측된다. 산림기본통계(Korea Forest Service, 1988; 2015)의 자료에 따르면 1980년부터 2015년까지 충주댐 유역이 위치한 충청북도의 임목축적은 약 4배 정도(17.2백만 m³에서 69.4백만 m³) 증가한 것으로 나타나나, 소양강댐이 위치한 강원도의 경우에는 임목축적의 변화가 거의 없다. 기저유출물의 이러한 차이에도 불구하고, 충주댐 유역의 직접유출 변동은 모의 자료와 관측자료에서 모두 상당히 유사하게 나타난다. 2010년대의 상당히 적은 직접유출물도 관측값과 모의값 모두에서 유사하게 나타나고 있다. 이 둘은 함께 고려하는 총유출물의 경우는 전반적으로 유사한 수준을 나타내고 있으나, 관측 총유출물은 점차 감소하는 추세를 꾸준히 보여주고 있다는 차이가 있었다.

이러한 관측 유출률의 감소 경향은 소양강댐 유역에서도 동일하게 나타났다.

토심의 영향은 직접유출과 기저유출에 정반대의 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 토심이 깊을수록 직접유출률의 크기가 줄어드는 경향을 보였고, 반대로 기저유출률은 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 만일, 토심 대신 유효토심을 사용한다면 직접유출률의 1% 이상 증가(직접유출량의 3% 이상 증가)와 동일한 수준의 기저유출률 감소가 나타나는 것으로 확인되었다. 총 유출률은 유사한 수준으로 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 토심의 증가에 따라 토양의 보유수량이 증가함에 따른 당연한 결과이기도 하다, 또한 유출률의 변화가 미미하다는 점을 고려해도 쉽게 유출할 수 있는 결과이다. 결국 토심의 증가에 따른 직접유출의 감소분은 기저유출의 증가분으로 나타난다고 판단할 수 있다.

이상의 결과는 유역의 수문순환을 모의하는데 있어 토심과 유효토심을 구분하여 적용할 필요가 있음을 보여준다. 충주댐과 소양강댐으로 한정된 연구이고, 또한 본 연구에서는 토심은 유효토심을 기반으로 추정된 것이므로 불확실성이 여전히 클 수 있다고 생각할 수 있다. 또한 토양층의 구분 및 그 깊이에 따라라도 모의결과가 달라질 여지가 있다. 이러한 한계는 토심 자료의 광범위한 구축을 통해 해소될 것이지만, 그러한 작업은 단순하지 않아 상당 기간 달성되기 어려울 것이라는 것도 사실이다. 추가로 다양한 유역에 대한 연구 성과들이 축적된다면 이러한 문제를 해결하는데 도움이 될 것이다.

최종 결론에서는 제시하지 않았지만 외국에서 개발된 토심 추정모형(경험식)이 우리나라에 적합하지 않다는 점도 강조하고 싶다. 토심은 지형 자체 및 기후특성에 근거한 침식, 퇴적에 영향을 받는다. 따라서 동일한 지형특성을 가지고 있더라도 기후특성에 따라 토심의 차이는 매우 큰 것으로 나타난다. 특히 미국에서 개발된 경험식은 너무나 큰 토심 추정치를 제시하는 것으로 확인되었다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2022003640001)

References

- Ahn, SR, Jang, CH, Kim, SH, Han, MS, Kim, JH and Kim, SJ (2013). Discussion for the effectiveness of radar data through distributed storm runoff modeling, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(6), pp. 19–30. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2013.55.6.019>]
- Brady, NC, and Weil, RR (2016). *The nature and properties of soils*, Pearson Prentice Hall, Hoboken, New Jersey.
- Choi, YS, Kim, KT and Lee, JH (2008). Development of Grid Based Distributed Rainfall–Runoff Model with Finite Volume Method, *J. of Korea Water Resources Association*, 41(9), pp. 895–905. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2008.41.9.895>]
- Herren, RV and Donahue, RL (1991). *The Agriculture Dictionary*, Delmar Cengage Learning, Albany, New York.
- Hyun, BK, Rim, SK, Jung, SJ, Sonn, YK, Song, KC, Noh, DC, Lee, HS, Hyun, GS, Zhang, YS, Hong, SY, Park, CW, Kim, LH, Choi, EY, and Jang, BC (2008). The study on the limiting factor to determine available soil depth in Korea, *Korean J. of Soil Science and Fertilizer*, 41(5), 293–302. [Korean Literature]
- Kim, JW and Shin, HS (2016). Slope stability assessment on a landslide risk area in Ulsan during rainfall, *J. of the Korean Geotechnical Society*, 32(6), pp. 27–40. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2016.32.6.27>]
- Kim, KH, Park, KH, Sa, DM, Choi, EY, and Hyun, HN (2021). *Soil Science*, Korea National Open University Publication Center, Seoul.
- Kim, MI, Kwak, JH, Jun, BH and Kim, NG (2019). Analysis of landslide risk distribution pattern under extreme precipitation, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(3), pp. 105–112. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.3.105>]
- Korea Forest Service (1988). *Forest Basic Statistics*. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Korea Forest Service (2015). *Forest Basic Statistics*. Korea Forest Service, Daejeon, South Korea.
- Korean Soil Information System (KSIS) (2010). <https://soil.rda.go.kr/soil/>.
- Kwon, MY, Kim, GE, Jeong, JH, Choi, CE, Park, GS, Kim, CS and Son, YH (2021). The 1:5,000 Forest Soil Map: Current Status and Future Directions, *J. of the Korean Society of Forest Science*, 110(4), pp. 479–495.
- Lee, JH, Cho, HD, Choi, MH and Kim, DK (2017). Development of land surface model for Soyang River basin, *J. of the Korea Water Resources Association*, 50(12), pp. 837–847. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2017.50.12.837>]
- Liang, X, Lettenmaier, DP, Wood, EF and Burges, SJ (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), pp. 14415–14428. [DOI: <https://doi.org/10.1029/94JD00483>]
- Markert, K. (2017). *VIC Model Overview*, NASA–SERVIR Mekong Regional Associate, University of Alabama in Huntsville, Earth System Science Center, Huntsville, Alabama.
- Mehnatkesh, A, Ayoubi, S, Jalalian, A and Sahrawat, KL (2013).

- Relationships between soil depth and terrain attributes in a semi arid hilly region in western Iran, *J. of Mountain Science*, 10, pp. 163–172.
- National Aeronautics and Space Administration (2020). *The Terra and Aqua combined Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Land Cover Type (MCD12Q1) Version 6*, Land Processes Distributed Active Archive Center, USGS, Sioux Falls, South Dakota.
- National Geographic Information Institute (2016). *The National Atlas of Korea II: Lithosphere*. National Geographic Information Institute, Suwon.
- Penížek, V and Borůvka, L (2006). Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: a comparison of methods, *Plant, Soil and Environment*, 52(9), pp. 424–430.
- Rural Development Administration (1997). *Agricultural Dictionary*. Jeonju, South Korea.
- Sheffield, J and Wood, EF (2008). Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle, *J. of Climate*, 21(3), pp. 432–458. [DOI: <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1822.1>]
- Shukla, S and Wood, AW (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought, *Geophysical Research Letters*, 35(2). [DOI: <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>]
- Son, KH, Lee, MH and Bae, DH (2012). Runoff Analysis and Assessment Using Land Surface Model on East Asia, *J. of Korea Water Resources Association*, 45(2), pp. 165–178. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.2.165>]
- Wang, GQ, Zhang, JY, Jin, JL, Pagano, TC, Calow, R, Bao, ZX, Liu, CS, Liu, YL and Yan, XL (2012). Assessing water resources in China using PRECIS projections and a VIC model, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), pp. 231–240. [DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-231-2012>]
- Xie, Z, Yuan, F, Duan, Q, Zheng, J, Liang, M and Chen, F (2007). Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China, *J. of Hydrometeorology*, 8(3), pp. 447–468. [DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM576.1>]
- Yoo, CS, Kim, KW, Park, CY and Bae, DH (2015). Quantification of Tree Root Depth for Basin-Scale Sediment Yield Simulation, *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(2), pp. 301–311. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.2.301>]