



Development of Land Surface Model for Soyang river basin

Lee, Jaehyeon^a · Cho, Huidae^b · Choi, Minha^c · Kim, Dongkyun^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Hongik University

^bDepartment of Civil and Construction Engineering, Southern Polytechnic College of Engineering and Engineering Technology, Kennesaw State University

^cDepartment of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

Paper number: 17-032

Received: 22 March 2017; Revised: 17 October 2017 / 18 October 2017; Accepted: 18 October 2017

Abstract

Land Surface Model (LSM) was developed for the Soyang river basin located in Korean Peninsula to clarify the spatio-temporal variability of hydrological weather parameters. Variable Infiltration Capacity (VIC) model was used as a LSM. The spatial resolution of the model was 10 km and the time resolution was 1 day. Based on the daily flow data from 2007 to 2010, the 7 parameters of the model were calibrated using the Isolated Particle Swarm Optimization algorithm and the model was verified using the daily flow data from 2011 to 2014. The model showed a Nash-Sutcliffe Coefficient of 0.90 and a correlation coefficient of 0.95 for both calibration and validation periods. The hydrometeorological variables estimated for the Soyang river basin reflected well the seasonal characteristics of summer rainfall concentration, the change of short and shortwave radiation due to temperature change, the change of surface temperature, the evaporation and vegetation increase in the cover layer, and the corresponding change in total evapotranspiration. The model soil moisture data was compared with in-situ soil moisture data. The slope of the trend line relating the two data was 1.087 and correlation coefficient was 0.723 for the Spring, Summer and Fall season. The result of this study suggests that the LSM can be used as a powerful tool in developing precise and efficient water resources plans by providing accurate understanding on the spatio-temporal variation of hydrometeorological variables.

Keywords: Land Surface Model, VIC model, Soil moisture, Particle Swarm Optimization

소양강댐 유역에 대한 지표수문모형의 구축

이재현^a · 조희대^b · 최민하^c · 김동균^{a*}

^a홍익대학교 토목공학과, ^b미국 케네소주립대학교 서던폴리테크닉공과대학 토목건설공학과, ^c성균관대학교 수자원대학원 수자원학과

요 지

본 연구에서는 소양강댐 유역의 수문기상인자들의 시공간적 변동성을 명확히 파악하기 위하여 지표해석모형을 구축하였다. 지표해석 모형으로 Variable Infiltration Capacity (VIC) 모형을 사용하였으며, 모형의 공간 해상도는 10 km, 시간 해상도는 1일로 정하였다. 2007~2010년 기간의 일유량자료를 바탕으로 Isolated Particle Swarm Optimization 알고리즘을 사용하여 모형의 7개 매개변수를 보정하였고, 2011~2014년 기간의 일유량자료를 사용하여 모형을 검증하였다. 보정된 모형은 보정기간과 검증기간 모두에 대하여 0.90의 Nash-Sutcliffe Coefficient 값과 0.95의 상관계수를 보였다. 소양강댐유역에 대하여 산출된 인자들은 여름철에 강우가 집중되어있는 우리나라의 계절적인 특성과 기온변화로 인한 장·단파 복사량의 변화와, 지표면 온도의 변화, 이로 인해 피복층에서의 증발과 식생 증산의 변화가 고려되어 총 증발산이 변화하는 경향이 잘 반영된 것으로 나타났다. 산출된 수문인자를 검증하기 위하여 지상관측토양수분자료와 비교하였다. 겨울철을 제외한 4~11월의 비교결과 두 자료의 추세선의 기울기는 1.087로 나타났고, 상관계수는 0.723의 값을 나타냈다. 이러한 본 연구의 결과는 지표해석모형이 우리나라 주요 댐 유역의 수문기상인자의 시공간적인 변화를 정확히 파악하는데 활용될 수 있으며, 나아가서는 더욱 정밀하고 효율적인 수자원계획을 수립하는 데에도 활용될 수 있다는 점을 시사한다.

핵심용어: 지표해석모형, VIC model, 토양수분, 입자군집최적화

*Corresponding Author. Tel: +82-2-320-1613

E-mail: kim.dongkyun@hongik.ac.kr (D. Kim)

1. 서론

지구온난화는 점진적으로 증가하여 최근에는 해수면 상승, 가뭄, 홍수, 태풍, 폭염, 폭설 등의 재난을 통해 자연과 인류에게 직접적인 피해를 주기에까지 이르렀다. 지난 100년간 전 지구 평균기온은 0.8°C 상승하였으며, 향후 100년간 약 1.4~5.8°C의 온도 상승이 예측되고 있다(IPCC, 2013). 특히, 한반도가 위치한 중위도 지역에서는 지구 평균의 2배를 상회하는 기온의 상승이 발생하여 극한 강우의 발생빈도가 증가하고, 몬순기간에 대하여 태풍의 발생빈도와 강우의 지속시간이 증가할 것으로 예상된다(IPCC, 2013). 이렇듯 기후 변화는 유역의 강수 및 온도, 그리고 이에 따른 증발산의 시공간적인 변화를 초래하고, 유역의 물 순환 및 가용 수자원량에도 큰 영향을 미친다(Stocker and Raible, 2005).

따라서, 향후 수자원계획의 수립을 위해서는 기후변화의 영향이 고려된 수문기상인자의 파악이 필수적이다. 수문기상인자를 파악하는 가장 이상적인 방법은 현장에서 직접 관측하는 것이지만 현장 관측은 지점에서만 이루어지는 경우가 대부분으로 모든 지역과 모든 시간에 대하여 관측하는 것이 실질적으로 불가능하고 관측시스템의 유지·관리도 많은 노력과 비용이 요구된다. 또한, 과거 기간 동안의 관측자료에서 분석된 시간적인 추세가 미래기간에도 지속된다는 보장이 없으므로, 관측자료만으로는 기후변화의 영향을 고려할 수가 없다. 이러한 한계는 미래일기생성기(Future Weather Generator, Kim et al., 2017; Kim et al., 2016; Kilsby et al., 2007; Fatichi et al., 2011)를 사용하여 기후변화의 영향이 고려된 강우 및 온도 등의 수문기상자료를 미래기간에 대하여 생성하고, 이렇게 생성된 미래기간의 수문기상자료를 지표해석모형(Moran et al., 2004; Pauwels et al., 2001)의 입력자료로 사용하면 모형 내의 모든 지역 및 시간에 대하여 증발산, 토양수분, 지하수량, 하천 유량 등의 주요 수문인자들을 모형의 모의의 결과값으로 얻을 수 있게 되기 때문에 해결할 수 있다(Fowler et al., 2007).

지표해석모형은 토양, 식생, 적설에 대한 지배방정식을 풀어 물, 에너지, 식생의 거동을 예측하는 모형으로 지난 20년 동안 약 30개 이상의 지표해석 모형이 개발되었으며(Dai et al., 2003), 이를 사용하여 유역내의 물과 에너지의 시공간적 분포를 모의하기 위한 연구 또한 다수 존재한다. 입력 자료로는 지표면의 초기 상태를 나타내는 초기조건, 강우 및 온도 등의 기상강제입력자료와 토양의 상태변수와 플럭스를 나타내는 경계조건, 그리고 토양, 식생, 지형 등을 나타내는 유역특성 변수를 필요로 하며 모의를 통해 상태변수(토양수분 및 증발

산), 플럭스(잠열, 현열, 지열), 유출량 등의 결과자료를 산출한다. 초기 지표해석모형은 식생이 물과 에너지의 순환에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 개발되었다. Dickinson et al. (1986, 1993)에 의해 개발된 BATS (Biosphere-Atmosphere-Transfer Scheme) 모형은 3개의 토양층과 1개의 식생층의 구조로 이뤄져 있고 모형의 토양수분 자료가 지표관측 자료와 유사하게 모의됨이 연구된 바 있다(Yang and Dickinson, 1996). SHEELS (Simulation for Hydrology and Energy Exchange at the Land Surface) 모형은 BATS에 기반을 둔 모형으로 토양수분 인자를 중점적으로 모의하기 위해 개발되었다(Crosson et al., 2002). SiB (Simple Biosphere Model)은 Sellers et al. (1986)에 의해 개발되었고 식생을 모의하기 위해 3개의 토양층과 2개의 식생층의 구조로 이뤄져 있다. 2개의 식생층은 나무와 관목으로 이뤄진 상부와 풀과 잔디 부분으로 이뤄진 하부로 구성된다. 이후 SiB모형을 더 간소화 한 SSiB (Simplified Simple Biosphere Model)이 개발되었고 이는 더 적은 변수로 높은 효율을 낼 수 있으며 SiB의 생물물리학적 기본 개념을 유지하되 계산을 간소화 하였다(Xue et al., 1991).

이후, 초기모형에 비해 토지이용, 입면적 지수, 토양 특성 등 다양한 변수가 추가된 모형이 개발되었다. SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU)은 저고도의 대기부터 지하수의 거동을 모의할 수 있는 모형으로 Rudiger et al. (2009)는 지상 관측 자료, AMSR-E와 ERS-Scat 위성 관측 자료, SIM 모형으로 모의된 토양수분 자료를 비교 검증한 바 있다. Famiglietti and Wood (1994)에 의해 개발된 TOPLATS (TOPMODEL based Land Atmosphere Transfer Scheme) 모형은 간단한 기상강제입력 자료를 통해 수직 토양수분 전달, 식물의 증산, 차단, 증발, 침투, 유출, 지표 열전달 등을 모의한다(Houser et al., 1998). CLM (Common Land Model)은 3개의 지표해석모형이 결합된 모형으로 다른 LSP (Land Surface Parameterization)의 모형 요소들이 쉽게 CLM에 입력될 수 있도록 설계되었다. Choi and Jacobs (2008)은 수문학적 관측 오차를 줄이기 위해 누적 분포함수 일치 방법(Cumulative Distribution Function Matching technique)과 지역적 통계학 방법(Regional Statistics Method)을 사용하였으며 미국 조지아 유역에 대해 구축한 CLM 모형과 통계학적 교정방법이 AMSR-E의 낮은 시간적 변동성을 향상시킨 바 있다. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 준 분포형 장기 유출 모형으로 Arnold et al. (1990)에 의해 개발되었다. 본 연구에서 사용한 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발되었다. VIC model은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용

등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지 플럭스(Water and Energy Flux)를 모의하는 분포형 모형이다(Liang et al, 1994). VIC 모형은 크게 물수지(Water Balance), 에너지수지(Energy Balance) 방법으로 구성되어 있다. VIC 모형은 다양한 공간 해상도로 모의가 가능하며, 대규모 유역 또는 전 지구적 스케일에 대한 수자원 분석 시 주로 사용되어 왔다. Liang et al. (1994)은 GCM에 VIC 모형을 연계하여 적용하였으며, Nijssen et al. (1997)은 대유역에 속하는 Colorado 강(650,000 km²) 및 Mekong 강(795,000 km²)에 대해 VIC 모형을 활용하여 유출거동을 모의하였다. 또한 Nijssen et al. (2001)은 기후 모델에 의해 생산되는 기후시나리오를 전지구적 스케일에서 VIC 모형에 적용하여 격자별 미래 토양수분의 거동을 모의하였으며, Andreadis et al. (2005)는 VIC 모형을 이용하여 미국 전역에 대한 가뭄영향평가를 수행하였다. 미국 국립우주항공국(NASA)에서는 위성 관측 자료를 기반으로 수문인자를 모의하기 위해 전지구 규모의 수문기상인자의 데이터베이스인 GLDAS (Rodell et al., 2004)와 북미를 대상으로 한 NLDAS (Cosgrove et al., 2003; Mitchell et al., 2004)를 운영하고 있으며 이때 네 개의 지표해석 모형(MOSAIC, Koster and Suarez, 1994; Noah, Chen et al., 1997; VIC, Liang et al., 1994; SAC, Burnash et al., 1973)을 사용하고 있다.

우리나라에서 VIC모형을 활용한 경우를 살펴보면 다음과 같다. Son et al. (2011)은 남한 전역에 대하여 VIC모형을 구축한 후 모의를 수행한 후, 모형의 격자별 유출 및 토양수분자료를 얻고, 다시 이를 3개월, 6개월, 12개월의 누가시계열로 전환한 후 각 기간에 대한 가뭄지수를 얻었으며, 그 결과가 관측 자료에 따른 가뭄 피해기간 및 지역상황을 잘 반영함을 보였다. Son et al. (2012)은 VIC모형의 활용을 동아시아 지역으로 확장하였는데, 코펜의 기후대 구분을 통한 매개변수 전이방법을 이용하여 미계측지역의 매개변수를 결정한 후, 17개 지점에 대하여 VIC모형의 모의 결과 중 하나인 유량과 관측된 유량이 유사하게 거동함을 보였다. Bae et al. (2012)은 영국기상청의 수치 예보 및 기후예측 모형인 UM (Unified Model)의 모의 결과값을 VIC모형의 입력자료로 사용하여 동아시아 전역에 대한 격자 별 유출 및 토양수분자료를 얻고, 이를 기반으로 준실시간으로 가뭄의 위험도를 산정하였다. Bae et al. (2013)은 Bae et al. (2012)의 방법론을 우리나라에 적용하여 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 우리나라의 수자원계획에서 가장 중요한 역할을 담당하는 지역 중의 하나인 소양강댐의 유역에 대하여 VIC 모형을 구축하여 그 적용성을 평가하였다. 본 연구가 우리나라에서 이미 수행되었던 연구들과 비교하였을 때 구분되

는 점은 (1) 유량뿐만이 아닌 토양수분의 관점에서도 모형의 정확성을 평가하였고; (2) Particle Swarm 기반의 최적화 알고리즘을 사용하여 모형의 매개변수를 교정하여, 모형이 높은 시간(1일) 해상도를 가졌음에도 불구하고 모형의 정확도가 매우 높게 산출되었다(유량에 대한 Nash-Sutcliffe Coefficient: 0.90, 상관계수: 0.95)는 점일 것이다.

2. 방법론

2.1 Vic model

VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington에서 개발된 수문 모형으로, 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지 플럭스(Water and Energy Flux)를 모의하는 모형이다(Liang et al, 1994). 모형은 크게 물수지(Water Balance), 하도추적(Channel routing), 에너지수지(Energy Balance) 등으로 구성되어 있다.

물수지 방법은 강우, 유입량 및 유출량, 저류량의 변화, 증발과 증산의 관계를 나타내는 것으로 다음의 연속 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - E - R \quad (1)$$

여기서, $\frac{\partial S}{\partial t}$ 는 저류량의 변화(mm), P 는 강수량(mm), E 는 증발산(mm), R 은 유출량(mm)을 나타낸다. VIC model은 토양이 허용할 수 있는 침투능을 산정하여 유입되는 강우로부터 지표유출과 침투량의 비율을 결정한다. 침투능의 산정 방법은 각 토양 종류에 따른 최대침투능과 현재의 토양수분량에 따른 포화면적비를 이용하여 산정이 가능하다.

$$I = I_{max} \left[1 - (1 - A_s)^{1/b_i} \right] \quad (2)$$

여기서, I 와 I_{max} 는 각각 현재 토양수분 함유량에 따른 침투능과 최대침투능을 나타내고, b_i 는 침투형상계수, A_s 는 포화면적비를 나타낸다.

2.1.1 증발산

VIC model은 피복층에서의 증발, 식생의 증산, 나대지에서의 증발을 모두 합하여 총 증발산을 산정한다(Liang et al., 1994). 총 증발산은 식생의 비율에 따라 증발과 증산에 가중치

를 고려하여 산정된다. 또한 VIC model은 Penman-Monteith 방정식을 사용하여 잠재증발산을 산정한다.

$$\lambda_p E_p = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

여기서, E_p 는 잠재증발산, λ_p 는 증발 잠열(J/kg), Δ 는 포화증기압-온도 곡선의 기울기(Pa/K), R_n 는 순 복사량(W/m²), G 는 지열 플럭스(W/m²), ρ_a 공기밀도(kg/m³), c_p 일정한압에서의 비열(J/kg·K), $e_s - e_a$ 포화수증기압과 수증기압의 차이(Pa), r_a 공기동역학적 저항(s/m), 그리고 γ 는 습도상수(66 Pa/K)를 나타낸다.

피복층에서의 증발은 피복층에서 강우의 차단에 의한 식생으로부터의 증발을 말하며 산정 공식은 다음과 같다.

$$E_c^* = \left(\frac{W_i}{W_{im}} \right)^{2/3} E_p \frac{r_w}{r_w + r_o} \quad (4)$$

여기서, E_c^* 는 최대 피복층 증발, W_i 는 피복층에서 차단된 총 수량(mm), W_{im} 은 피복층에서 보유할 수 있는 총 보유수량(mm), r_w 는 공기역학적 저항(s/m), r_o 는 architectural resistance (s/m)를 나타낸다. W_{im} 은 Dickinson (1984)에 의해 제시된 방법으로 산정된다.

$$W_{im} = K_L \times LAI \quad (5)$$

여기서, K_L 은 0.2 mm (Dickinson, 1984), 이며, LAI 는 월별 잎면적지수를 나타낸다. 공기역학적저항인 r_w 는 다음과 같이 산정된다(Monteith and Unsworth, 1990).

$$r_w = \frac{1}{C_w u_n(z_2)} \quad (6)$$

여기서, C_w 는 대기가 안정 상태일 때의 수분이동계수(Transfer coefficient for water) 이고, $u_n(z_2)$ 는 z_2 높이에서의 풍속(m/s)을 의미한다.

증산은 Blondin (1991)과 Ducoudre et al. (1993)이 제시한 공식을 이용하여 산정된다.

$$E_i = \left[1 - \left(\frac{W_i}{W_{im}} \right)^{2/3} \right] E_p \left(\frac{r_w}{r_w + r_o + r_c} \right) \quad (7)$$

여기서, E_i 는 증산이고, r_c 는 식생피복저항(s/m)으로 산정 방법은 다음과 같다.

$$r_c = \frac{r_o g_{sm}}{LAI} \quad (8)$$

여기서, g_{sm} 은 토양수분장력인자로 식생의 뿌리가 토양수분 흡수 가능여부를 결정하는 인자이다.

나대지에서의 증발은 최상부 토층에서 발생하는 증발을 나타내며, 산정방법은 다음과 같다(Francini and Pacciani, 1991).

$$E_1 = E_p \left\{ \int_0^{A_s} dA + \int_{A_s}^1 \frac{I}{I_{max} [1 - (1 - A)^{1/b_i}]} dA \right\} \quad (9)$$

여기서, E_1 는 나대지에서의 증발량, I 와 I_{max} 는 각각 현재 토양수분 함유량에 따른 침투능과 최대침투능을 나타내고, b_i 는 침투형상계수, A_s 는 포화면적비를 나타낸다.

2.1.2 토양수분

VIC model은 표층토양수분의 측면이동은 없는 것으로 가정한다. 따라서 VIC model의 표층토양수분의 거동은 1차원 Richard 방정식으로 모의된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (10)$$

여기서, θ 는 토양수분함량, $D(\theta)$ 는 토양수분확산성(mm²/d), $K(\theta)$ 는 수리전도도(mm/d), z 는 토양층의 깊이(m)를 나타낸다.

표층의 토양수분은 기상강제자료를 고려하여 다음과 같이 산정할 수 있다(Mahrt and Pan 1984).

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} z_i = I_r - E - K(\theta)|_{z_i} + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} |_{z_i} \quad (i = 0, 1, 2) \quad (11)$$

여기서, I_r 은 침투율(mm/d), z_i 는 토양층 i 의 깊이를 나타낸다. 침투율 I_r 은 강우와 지표 유출(Q_d)의 차이를 나타낸다.

하부토층의 토양수분은 토양층 사이의 확산을 고려한 물수지 방정식으로 나타낼 수 있다. 하부토층에서의 배수는 경험적 방법을 이용하여 기저유출(Q_b) 항으로 고려된다.

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial t} (z_3 - z_2) = K(\theta)|_{z_2} + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} |_{z_2} - E - Q_b \quad (12)$$

2.1.3 지표 유출

VIC model은 발생한 강우에 따른 침투능을 산정하여 포화면적별 지표유출을 산정한다. 강우에 따라 산정된 침투능을 최대침투능과 비교하여, 초과할 경우에는 격자전체에 대하여 유출이 발생하고, 작을 경우에는 포화면적비에 따라 유출이 발생한다.

$$Q_d = P - z_2(\theta_s - \theta_2) + z_2\left(1 - \frac{I+P}{I_{max}}\right)^{1+b_i}; I+P \leq I_{max} \quad (13a)$$

$$Q_d = P - z_2(\theta_s - \theta_2); I+P \geq I_{max} \quad (13b)$$

여기서, θ_s 는 공극율, b_i 는 침투형상계수, Q_d 는 지표유출량(mm), P 는 강우량(mm)을 나타낸다.

2.1.4 기저 유출

기저 유출의 산정 공식은 Arno model (Franchini and Pacciani, 1991)의 개념을 이용한다. Arno model의 기저 유출 산정 방식은 상부토층으로부터의 침투량과 하부토층의 토양수분량을 합한 값을 최대토양수분량과 비교하여 최대토양수분량 보다 적을 경우 선형 관계로 산정하고, 큰 경우 비선형 관계로 산정한다.

$$Q_b = \frac{D_s D_{smax}}{W_s \theta_s} \theta_3; 0 \leq \theta_3 \leq W_s \theta_s \quad (14a)$$

$$Q_b = \frac{D_s D_{smax}}{W_s \theta_s} \theta_3 + \left(D_{smax} - \frac{D_s D_{smax}}{W_s} \right) \left(\frac{\theta_3 - W_s \theta_s}{\theta_s - W_s \theta_s} \right)^2; W_s \theta_s \leq \theta_3 \quad (14b)$$

여기서, Q_b 는 기저유출(mm), W_s 는 비선형기저유량이 발생하는 지점에서의 최대토양수분비, D_s 는 비선형기저유량이 발생하는 최대유속의 비, D_{smax} 는 기저유량의 최대속도(mm/d)를 나타낸다.

2.2 대상유역 선정

본 연구에서는 지표해석모형을 구축하기 위하여 대상 유역을 선정하고, 선정된 대상유역에 대하여 모형의 입력 자료를 구축하였다. 대상유역은 비교적 정확한 유량 관측 자료를 얻을 수 있는 소양강댐 유역을 선정하였다(Fig. 1). 소양강댐

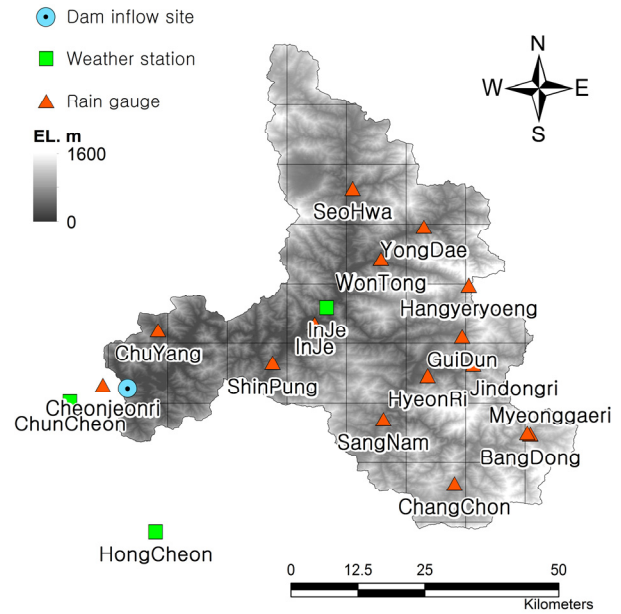


Fig. 1. Soyang river basin and location of dam inflow measurement site (blue circle), weather stations (green square), and rain gauges (red triangle)

은 2,703 km²의 총 유역 면적과 70 km²의 저수 면적을 가지는 다목적댐으로, 유역연평균 유입량은 55.5 m³/s, 유역 연평균 강우량은 1,100 mm 이다. 모형은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 10 km 해상도로 구축 하였다. 전체 분석기간은 2007~2014년이며, 일 단위의 시간해상도로 모의를 진행하였다.

2.3 지표해석모형 입력자료 구축

VIC model에는 강우, 최고 및 최저 기온, 풍속의 4가지 기상 자료가 요구된다. 최고 및 최저 기온을 이용하여 습도(Humidity)와 단파복사량(Incoming shortwave radiation)을 계산하고, 기온과 Tennessee Valley Authority algorithm (Bras, 1990)을 이용하여 계산한 습도로부터 장파복사량(Incoming longwave radiation)을 산정한다. 현재 우리나라에서는 국토교통부, 수자원공사, 기상청의 총 3개의 기관에서 강우를 관측하여 자료를 제공하고, 풍속과 기온 등의 기상인자들은 기상청의 기상관측소에서 자료를 제공하고 있다. Fig. 1에 대상유역인 소양강댐 유역 주변의 강우 및 기상관측소를 나타내었다. Fig. 1에서 붉은색 삼각형 표식은 강우관측소를 나타내고, 녹색 사각형 표식은 기상관측소를 나타낸다. 기상 입력 자료는 총 18개 관측소의 자료를 2007년부터 2014년 기간까지 수집하여 이용하였다. 기상자료를 VIC model의 공간 해상도인 10 km로 구축하기 위하여 Kriging 기법을 적용하여 공간분포 시켰다.

3. VIC model 적용성 평가

3.1 매개변수 추정

VIC model과 같은 물리기반의 모델에서는 많은 수의 매개변수가 사용된다. 대부분의 매개변수들은 지상관측소에서 측정된 값이나 인공위성을 이용한 원격탐사 자료를 이용하여 추정이 가능하다. 하지만 추정이 어렵거나 모형의 성능에 많은 영향을 미치는 매개변수들은 칼리브레이션을 통해 추정하게 된다. 본 연구에서는 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 7개의 매개변수를 선정하였고(Nijssen et al., 1997; Son et al., 2010), 각 매개변수값의 범위를 Table 1에 나타내었다. 이 매개변수들은 기저유출과 침투 및 토양수분에 관련된 모델 매개변수로 지표해석모형 모의에 많은 영향을 미친다.

7개의 최적 매개변수를 추정하기 위하여 2007~2010년의 기간 동안 모델을 보정하였고, 이를 검증하기 위하여 2011~2014년의 기간에 대한 결과를 비교하였다. 결과의 비교는 Fig. 1에 나타난 소양강댐 유역 출구에서의 2007년부터 2014년까지의 소양강댐 유입 유량 자료를 이용하였다. 관측 유량 자료를 VIC model 모의결과와 비교하기 위하여 VIC model의 각 격자별 유출량 모의 결과를 라우팅 모형(Lohmann et al., 1996, 1998)에 적용하여 유역 출구에서의 유량을 산정하였다. 모형의 보정은 Cho et al., (2011)이 제안한 isolated-speciation based particle swarm optimization algorithm (ISPSO)을 이용하였다. ISPSO는 기존의 particle swarm optimization 기법에서 다차원 공간의 해를 더욱 효율적으로 찾을 수 있도록 입자들의 거동이 향상된 알고리즘이다. 최적 매개변수를 산정하기 위한 ISPSO의 목적함수는 Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NS)를 사용하였다. NS 값은 1에 가까울수록 모의유량이 관측유량과 비슷하다는 것을 나타내며, 값이 음수

Table 1. VIC model calibration parameters

Variable name	Description	Range
b_infiltr	Variable infiltration curve parameter	0 ~ 0.4
Ds	Fraction of Ds_max where non-linear baseflow begins	0 ~ 1.0
Ds_max	Maximum velocity of baseflow	0 ~ 30
Ws	Fraction of maximum soil moisture where non-linear baseflow occurs	0 ~ 1.0
Wcr	Fractional soil moisture content at the critical point	Fraction
Wpwp	Fractional soil moisture content at the wilting point	Fraction
Residual M	Soil moisture layer residual moisture	Fraction

일 경우 모의 유량 결과보다는 관측유량의 평균값을 사용하는 것이 더 신뢰도가 높다는 것을 의미한다.

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}}]^2 - \sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}}]^2} \quad (15)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측유량, $\overline{Q_{obs}}$ 는 전체 기간 N 에 대한 관측유량의 평균, Q_{sim} 는 모의유량을 나타낸다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}})^2 \times \sum_{i=1}^N (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2}} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)]^2}{N}} \quad (17)$$

$$REV = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{sim}(i) - \sum_{i=1}^N Q_{obs}(i)}{\sum_{i=1}^N Q_{obs}(i)} \times 100 \quad (18)$$

보정 기간과 검증 기간에 대한 유출량 모의 및 비교 결과를 Table 2 및 Fig. 2에 나타냈다. 두 기간에 대한 모의유량과 관측유량을 비교 분석하기 위하여 NS, Correlation Coefficient (R), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Error in Volume (REV)의 4가지 지표를 이용하였다. 모의유량 자료와 관측유량 자료 사이의 상관성을 나타내는 지표인 Correlation Coefficient (Eq. (13))는 1에서 -1 사이의 값을 가진다. 1에 가까울수록 모의유량과 관측유량의 상관성이 높다는 것을 의미하고, 0일 경우 상관관계가 없으며, -1에 가까울수록 음의 상

Table 2. Comparison of statistical values for calibration period and validation period

Statistical value	Calibration period	Validation period
NS (-)	0.9031	0.8964
Correlation coefficient (-)	0.9525	0.9469
RMSE (m ³ /s)	69.9550	65.1917
REV (%)	-3.6028	-0.3363

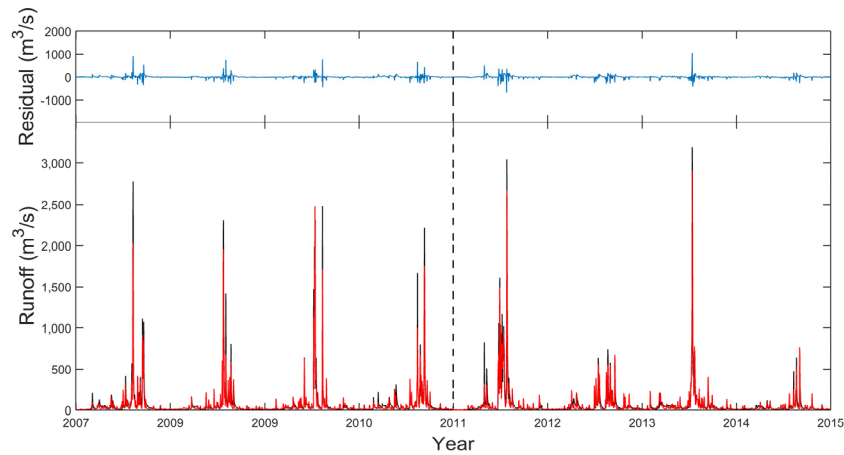


Fig. 2. Comparison of observed (black; 2007-2010) and simulated (red; 2011-2014) flows for calibration period and validation period

관관계를 나타낸다. Root Mean Square Error (Eq. (14))의 경우 분석기간에 대하여 관측유량에 대해 모의유량이 평균적으로 어느 정도의 오차를 가지는지를 나타낸 값으로 값이 클수록 오차가 큰 것을 의미한다. 단위는 해석하고자하는 단위와 동일하다. Relative Error in Volume (Eq. (15))은 총 관측유량에 대한 총 모의유량의 오차를 총 관측유량에 대한 백분율로 나타낸 값이다.

보정 기간과 검증 기간에 대한 유출량 모의 및 비교 결과 MS 값은 보정 기간에 대하여 0.9031 로 나타났고, 검증 기간에 대하여 0.8964 로 다소 감소한 결과가 나타났다. Correlation Coefficient의 경우 역시 0.9525 에서 0.9469 로 감소하였다. 하지만 RMSE의 경우 검증 기간에서 오히려 감소하였고, REV 역시 검증 기간에서 0 에 더 가까운 값으로 나타났다. 이러한 결과는 보정 기간의 총 수량이 검증 기간의 수량보다 많기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다. 이상의 통계값들을 이용하여 비교 분석한 결과 보정 기간 뿐 만 아니라 검증 기간에 대해서도 관측유량과 높은 유사성을 보인 것으로 보아 추정된 매개변수를 이용한 VIC model의 유출량 모의 성능은 우수한 것으로 판단된다.

3.2 수문기상인자의 산정

본 연구에서는 지표해석 모형을 이용하여 각 격자에서의 수문기상 인자들을 산출해 내는데 목적이 있다. VIC model은 대기와 식생 및 토양의 상호작용을 이용하여 에너지 플럭스를 모의하여 여러 수문 기상인자들을 파악할 수 있다. 다음 Table 3은 VIC model에서 산출 가능한 수문기상인자 목록을 나타낸다. 하천의 흐름을 나타내는 기저 유출과 지표 유출을 산정할 수 있고, 증발 및 증산 등을 산정할 수 있다. 또한 토양수분 및 지표면 온도 등이 산출 가능하고, 순복사량 및 장·단파복사

량 산정이 가능하다.

VIC model은 격자기반의 모델로 각 격자에서의 수문기상 인자들을 파악할 수 있다. 다음 Fig. 3은 Fig. 1의 InJe 기상관측소가 위치한 격자에서의 수문기상인자의 거동을 보여준다. 각각의 x축은 daily time step을 나타내고, y축은 각 인자들이 가지는 값을 나타낸다. 2014년에 대한 결과를 나타내며, 각 인자들을 살펴보면 여름철에 강우가 집중되어있는 우리나라의 계절적인 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 또한 여름

Table 3. Hydrological weather parameters that can be estimated from the VIC Model

Variable name	Units	Description
EVAP	mm	Evaporation for current record
RUNOFF	mm	Runoff for current record
BASEFLOW	mm	Baseflow for current record
WDEW	mm	Canopy interception of liquid water
SOIL LIQ	mm	Moisture content of each soil layer
SW NET	W/m ²	Net shortwave radiation at the surface
R NET	W/m ²	Net radiation at the surface, includes long and shortwave radiation
EVAP CANOP	mm	Evaporation from canopy storage
TRANSP VEG	mm	Transpiration from the vegetation
EVAP BARE	mm	Evaporation from bare soil
SUB CANOP	mm	Sublimation from canopy interception
SUB SNOW	mm	Sublimation from ground snow pack
AERO RESIST	s/m	Aerodynamic resistance
SURF TEMP	C	Surface temperature
REL HUMID	fraction	Relative humidity
IN LONG	W/m ²	Incoming longwave at ground surface (under vegetation)

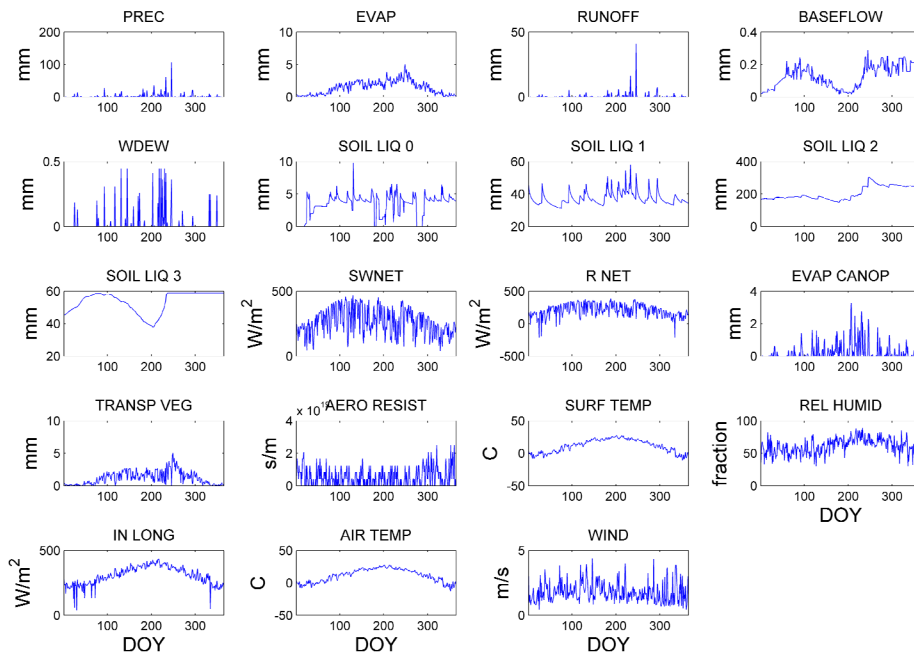


Fig. 3. Hydrological weather parameter estimation results using VIC model for 2014

철 기온상승으로 인해 장·단파 복사량이 증가하고, 지표면 온도가 상승한다. 이로 인해 피복층에서의 증발과 식생의 증산이 증가하여 총 증발산이 증가하는 경향이 잘 반영되어있다.

3.3 토양수분 자료의 검증

VIC model를 이용하여 산정된 수문기상인자를 검증하기 위하여 모의 토양수분자료와 관측 토양수분자료를 비교하였다. 국내의 경우 농촌진흥청 및 기상청에서 토양수분을 관측하고 있으며, 지표아래 10cm 깊이의 토양수분을 한 시간 단위로 관측하고 있다. 대상유역인 소양강댐 유역 내의 토양수분 관측지점은 Fig. 1의 InJe 관측소가 있으며, 이 InJe 관측소에서 관측한 10 cm 깊이의 토양수분자료와 VIC model을 이용하여 산정한 동일한 토양층 깊이의 토양수분 자료를 비교하였다(Fig. 3, SOIL LIQ 1).

Fig. 4(a)에서 검은색 막대그래프는 인제관측소가 위치한 격자에서의 강수량을 나타내고, 붉은색 실선은 인제관측소에서 관측한 토양수분자료이고, 파란색 실선은 VIC model의 토양수분 결과 자료를 나타낸다. 표층에서의 토양수분은 발생한 강우에 의해 크게 영향을 받기 때문에 두 자료 모두 강우 발생 시 표층의 토양수분은 강우에 즉각 반응하여 순간 증가하고, 이후 침투작용에 의해 강우 종료 후 표층의 토양수분이 감소하는 경향성이 유사하게 나타났다. Fig. 4(b)는 지상관측자료와 모의자료의 관계를 나타낸다. x축은 모의자료이고 y축은 관측자료이며, 붉은색 선은 두 자료에 대한 추세선을 나타

낸다. 추세선 산정 결과 추세선의 기울기는 1.081로 나타났고, 상관계수는 0.499의 값을 나타냈다. 지상관측자료의 경우 겨울철 기온이 내려감에 따라 땅이 얼게 되어 토양수분 관측값의 정확도가 떨어지게 되고, 그림에서와 같이 강우 발생여부와 관계없이 토양수분값이 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 영향

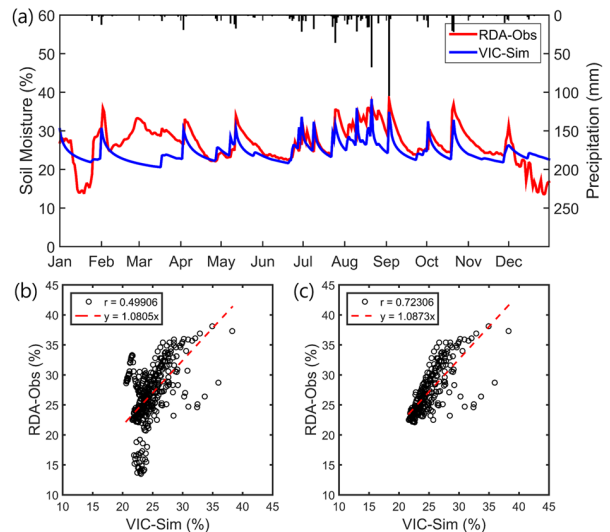


Fig. 4. Comparison of ground observed soil moisture and VIC model simulated soil moisture data. (A) Time series comparison of the observed soil moisture at the InJe station for 2014 and the VIC model simulated soil moisture in the corresponding grid; (B) Scatter plot and trend line for the 2014 period; (C) Soil moisture comparison from April to November 2014

을 제외한 4~11월의 결과를 사용하여 분석한 결과를 Fig. 4(c)에 나타내었다. 추세선 산정 결과 추세선의 기울기는 1.087로 나타났고, 상관계수는 0.723의 값을 나타냈다. 이상의 결과들을 종합하여볼 때, VIC model은 매우 정확도 높은 모의 성능을 보인 것으로 판단된다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 기후변화에 따라 변화하는 수문순환을 이해하고 대비하고자 지표해석모형으로 분포형 수문모형인 Variable Infiltration Capacity (VIC) model을 이용하여 격자 단위의 수문기상인자를 산출하였다. 모형의 구축을 위하여 소양강댐 유역을 대상지역으로 선정하여 2007년부터 2014년까지의 기간에 대하여 입력자료를 수집하여 모형을 구축하였고, 매개변수의 추정을 위하여 7개의 매개변수를 선정하여 최적 매개변수를 산정하였다. 이 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 최적 매개변수의 추정을 위하여 2007~2010년을 보정기간으로 하여 모형을 보정하였고 2011~2014년 기간을 검증기간으로 하여 모형을 검증하였다. 최적 매개변수 산정 결과 VIC model은 보정기간에 대하여 NS: 0.9031, R: 0.9525의 결과를 보였고, 검증 기간에 대하여 NS: 0.8964, R: 0.9469의 결과를 나타냈다. 통계값들을 이용하여 모형의 성능을 검증한 결과 보정 기간 뿐만 아니라 검증 기간에 대해서도 관측유량과 높은 유사성을 보인 것으로 보아 추정된 매개변수를 이용한 VIC model의 유출량 모의 성능은 매우 우수한 것으로 판단된다.
- 2) 소양강댐유역에 대하여 구축한 VIC model을 이용하여 수문기상인자를 산출하였다. 산출된 인자들은 여름철에 강우가 집중되어있는 우리나라의 계절적인 특성과 기온변화로 인한 장·단파 복사량의 변화와, 지표면 온도의 변화, 이로 인해 피복층에서의 증발과 식생 증산의 변화가 고려되어 총 증발산이 변화하는 경향이 잘 반영된 것으로 나타났다.
- 3) 산출된 수문인자를 검증하기 위하여 지상관측토양수분자료와 모의 토양수분자료를 비교하였다. 겨울철을 제외한 4~11월의 비교결과 두 자료의 추세선의 기울기는 1.087로 나타났고, 상관계수는 0.723의 값을 나타냈다. 이러한 결과는 VIC model의 토양수분 모의 성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Andreadis, K. M., Clark, E. A., Wood, A. W., Hamlet, A. F., and Lettenmaier, D. P. (2005). "Twentieth-century drought in the conterminous United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, No. 6, pp. 985-1001.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D., and Sammons, N. B. (1990). *SWRRB; a basin scale simulation model for soil and water resources management*.
- Bae, D. H., Son, K. H., and Kim, H. (2013). "Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 287-299.
- Bae, D. H., Son, K. H., Ahn, J. B., Hong, J. Y., Kim, G. S., Chung, J. S., Jung, U. S., and Kim, J. K. (2012). "Development of real-time drought monitoring and prediction system on Korea & East Asia region." *Atmosphere*, Vol. 22, No. 2, pp. 267-277.
- Blondin, C. (1991). "Parameterization of land-surface processes in numerical weather prediction." *In Land Surface Evaporation*, Springer New York, pp. 31-54.
- Bras, R. L. (1990). *Hydrology: an introduction to hydrologic science*. Addison Wesley Publishing Company.
- Burnash, R. J., Ferral, R. L., and McGuire, R. A. (1973). *A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers*.
- Chen, F., Crow, W. T., Starks, P. J., and Moriasi, D. N. (2011). "Improving hydrologic predictions of a catchment model via assimilation of surface soil moisture." *Advances in Water Resources*, Vol. 34, No. 4, pp. 526-536.
- Chen, F., Janjić, Z., and Mitchell, K. (1997). "Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model." *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 85, No. 3, pp. 391-421.
- Cho, H., Kim, D., Olivera, F., and Guikema, S. D. (2011). "Enhanced speciation in particle swarm optimization for multi-modal problems." *European Journal of Operational Research*, Vol. 213, No. 1, pp. 15-23.
- Choi, M., and Jacobs, J. M. (2008). "Temporal variability corrections for Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E) surface soil moisture: case study in Little River region, Georgia, US." *Sensors*, Vol. 8, No. 4, pp. 2617-2627.
- Cosgrove, B. A., Lohmann, D., Mitchell, K. E., Houser, P. R., Wood, E. F., Schaake, J. C., Robock, A., Sheffield, J., Duan, Q., Luo, L., Higgins, R. W., Pinker, R. T., Tarpley, J. D., and Meng, J. (2003). "Real-time and retrospective forcing in the

- North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 108, 8842, doi: 10.1029/2002JD003118.
- Crosson, W. L., Laymon, C. A., Inguva, R., and Schamschula, M. P. (2002). "Assimilating remote sensing data in a surface flux-soil moisture model." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 8, pp. 1645-1662.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R. E., and Baker, I. (2003). "The common land model." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 84, No. 8, pp. 1013.
- Dickinson, R. E. (1984). "Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models." *Climate processes and Climate Sensitivity*, pp. 58-72.
- Dickinson, R. E. (1986). *Biosphere/atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model*. Technical report.
- Dickinson, R. E., Kennedy, P. J., and Henderson-Sellers, A. (1993). "Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model." *National Center for Atmospheric Research, Climate and Global Dynamics Division*.
- Ducroudé, N., Laval, K., and Perrier, A. (1993). "A new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model." *Journal of Climate*, Vol. 6, No. 2, pp. 248-273.
- Famiglietti, J. S., and Wood, E. F. (1994). "Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 3061-3078.
- Faticchi, S., Ivanov, V. Y., and Caporali, E. (2011). "Simulation of future climate scenarios with a weather generator." *Advances in Water Resources*, Vol. 34, No. 4, pp. 448-467.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., and Tebaldi, C. (2007). "Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling." *International Journal of Climatology*, Vol. 27, No. 12, pp. 1547-1578.
- Franchini, M., and Pacciani, M. (1991). "Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models." *Journal of Hydrology*, Vol. 122, No. 1-4, pp. 161-219.
- Houser, P. R., Shuttleworth, W. J., Famiglietti, J. S., Gupta, H. V., Syed, K. H., and Goodrich, D. C. (1998). "Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 12, pp. 3405-3420.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). *Climate change 2013: the physical science basis*.
- Kilsby, C. G., Jones, P. D., Burton, A., Ford, A. C., Fowler, H. J., Harpham, C., James, P., Smith, A., and Wilby, R. L. (2007). "A daily weather generator for use in climate change studies." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22, No. 12, pp. 1705-1719.
- Kim, D., Cho, H., Onof, C., and Choi, M. (2016). "Let-It-Rain: a web application for stochastic point rainfall generation at ungauged basins and its applicability in runoff and flood modeling." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, pp. 1-21.
- Kim, J. G., Kwon, H. H., and Kim, D. (2017). "A hierarchical Bayesian approach to the modified Bartlett-Lewis rectangular pulse model for a joint estimation of model parameters across stations." *Journal of Hydrology*, Vol. 544, pp. 210-223.
- Koster, R. D., and Suarez, M. J. (1994). "The components of a 'SVAT' scheme and their effects on a GCM's hydrological cycle." *Advances in Water Resources*, Vol. 17, No. 1-2, pp. 61-78.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J. (1994). "A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 99, No. D7, pp. 14415-14428.
- Lohmann, D., Nolte-Holube, R., and Raschke, E. (1996). "A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes." *Tellus A*, Vol. 48, No. 5, pp. 708-721.
- Lohmann, D., Raschke, E., Nijssen, B., and Lettenmaier, D. P. (1998). "Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 43, No. 1, pp. 131-141.
- Mahrt, L., and Pan, H. (1984). "A two-layer model of soil hydrology." *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-20.
- Mitchell, K. E., Lohmann, D., Houser, P. R., Wood, E. F., Schaake, J. C., Robock, A., Cosgrove, B. A., Sheffield, J., Duan, Q., Luo, L., Higgins, R. W., Pinker, R. T., Tarpley, J. D., Lettenmaier, D. P., Marshall, C. H., Entin, J. K., Pan, M., Shi, W., Koren, V., Meng, J., Ramsay, B. H., and Bailey, A. A. (2004). "The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 109, D07S90, doi: 10.1029/2003JD003823.
- Monteith, J. L., and Unsworth, M. H. (1990). *Principles of environmental physics*, Edited by Arnold, S.E., London, UK.
- Moran, M. S., Peters-Lidard, C. D., Watts, J. M., and McElroy, S. (2004). "Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models." *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 5, pp. 805-826.
- Nijssen, B., Lettenmaier, D. P., Liang, X., Wetzel, S. W., and Wood, E. F. (1997). "Streamflow simulation for continental-scale river basins." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 711-724.
- Nijssen, B., Schnur, R., and Lettenmaier, D. P. (2001). "Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model, 1980-93." *Journal of Climate*, Vol. 14, No. 8, pp. 1790-1808.
- Pauwels, V., Hoeben, R., Verhoest, N. E., and De Troch, F. P. (2001). "The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small-scale basins through data assimilation." *Journal of Hydrology*, Vol. 251, No. 1, pp. 88-102.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J.,

- Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., and Toll, D. (2004). "The global land data assimilation system." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 85, No. 3, pp. 381-394.
- Rüdiger, C., Calvet, J. C., Gruhier, C., Holmes, T. R., De Jeu, R. A., and Wagner, W. (2009). "An intercomparison of ERS-Scat and AMSR-E soil moisture observations with model simulations over France." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 2, pp. 431-447.
- Sellers, P. J., Mintz, Y. C. S. Y., Sud, Y. E. A., and Dalcher, A. (1986). "A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models." *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 43, No. 6, pp. 505-531.
- Son, K. H., Bae, D. H., and Chung, J. S. (2011). "Drought analysis and assessment by using land surface model on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 667-681.
- Son, K. H., Lee, J. D., and Bae, D. H. (2010). "The application assessment of global hydrologic analysis models on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 12, pp. 1063-1074.
- Son, K. H., Lee, M. H., and Bae, D. H. (2012). "Runoff analysis and assessment using land surface model on East Asia." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 165-178.
- Stocker, T. F., and Raible, C. C. (2005). "Climate change: water cycle shifts gear." *Nature*, Vol. 434, No. 7035, pp. 830-833.
- Xue, Y., Sellers, P. J., Kinter, J. L., and Shukla, J. (1991). "A simplified biosphere model for global climate studies." *Journal of Climate*, Vol. 4, No. 3, pp. 345-364.
- Yang, Z. L., and Dickinson, R. E. (1996). "Description of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the Soil Moisture Workshop and evaluation of its performance." *Global and Planetary Change*, Vol. 13, No. 1, pp. 117-134.