

분포형 생태수문모형 개발 및 내성천 유역에의 적용

Development of Distributed Ecohydrologic Model and Its Application to the Naeseong Creek Basin

최 대 규* / 김 인 환** / 김 정 숙*** / 김 상 단****

Choi, Daegyoo / Kim, In-Hwan / Kim, Jeongsook / Kim, Sangdan

Abstract

Distributed ecohydrological model which can simulate hydrological components, vegetation and land surface temperature using practically available input and observed data with minimum parameters is introduced. This model is designed to properly simulate in area with lack of observed data. Parameter estimation and calibration of the model can be carried out with indirectly estimated data (monthly surface runoff by NRCS-CN method and annual actual vaporization by empirical equation) and remote sensing data (NDVI, LST) instead of observed data. We applied this model in the Naeseong creek basin to evaluate the model validity. Firstly, we found the sensitive parameters which largely influence the simulation results by sensitivity analysis, and then hydrological components, vegetation, land-surface temperature, routed streamflow and water temperature were simulated over 10 years (2001 to 2010) using calibrated parameters. Parameters are estimated by optimization method. It is shown that most of grids are well simulated. In the case of streamflow and water temperature, we checked two observed points in the outlet of watershed and it is shown that streamflow and water temperature are properly simulated as well. Hence, it can be shown that this model properly simulate the hydrological components, vegetation, land-surface temperature, routed streamflow and water temperature as well, even though in despite of using limited input data and minimum parameters.

Keywords: distributed model, ecohydrological model, hydrological components, landsurface temperature, vegetation

요 지

본 논문에서 소개되는 분포형 생태수문모형은 현실적으로 확보 가능한 입력자료와 최소한의 매개변수를 이용하여 유역의 수문, 식생, 지표온도를 모의하는 모형이다. 개발된 모형은 내성천 유역에 대해 적용하여 모형의 활용가능성을 살펴보았다. 우선적으로 매개변수에 대해 민감도 분석을 실시하여 모의결과에 많은 영향을 주는 매개변수를 선별해보았으며 이후 최적화 기법을 통해 모형의 매개변수를 추정하여 내성천 유역의 최근 10년간(2001~2010)의 수문, 식생, 지표온도 그리고

*부경대학교 환경연구소 선임연구원 (e-mail: dchoi@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6529)

Pukyong National University Institute of Environmental and Marine Science, Research Fellow, Chungmu Bldg., Daeyeon Campus, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea.

**부경대학교 공간정보시스템 공학과 박사과정 (e-mail: kim.inhwan82@gmail.com)

Pukyong National University, Department of Spatial Information Engineering, Candidate of Ph.D, Daeyeon Campus, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea.

***동서대학교 에너지생명공학부 교수 (e-mail: jkim28@gdsu.dongseo.ac.kr)

Dongseo University, Division of Energy and Bio-Engineering, Professor, Dongseo University, 47 Jurye-ro, Sasang-gu, Busan 617-716, Korea.

****교신저자, 부경대학교 환경공학과 부교수 (e-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Pukyong National University, Department of Environmental Engineering, Associate Professor, Daeyeon Campus, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea.

추적(routing)을 통한 하천유량 및 하천수온을 모의하였다. 최적화 기법을 통해 추정자료를 이용하여 매개변수를 추정하였으며 일부 격자를 제외한 대다수의 격자에서 적절히 모의된 것을 확인하였다. 하천유량 및 하천수온의 경우 단위 유역 발달 두 지점에 대해 검증을 실시하였으며 하천유량 및 하천수온 적절히 모의된 것을 확인할 수 있었다. 실제 유역인 내성천 유역을 대상으로 분포형 생태수문모형이 최소한(현실적으로 확보 가능한)의 입력자료와 매개변수를 이용함에도 불구하고 유역 수문순환 및 식생을 적절히 설명하고 있음을 살펴볼 수 있다.

핵심용어 : 분포형 모형, 생태수문 모형, 수문성분, 지표온도, 식생

1. 서론

지구에서 일어나는 물 순환에 대한 이해는 수문학의 근본적인 질문이 될 것이다. 구체적으로 1) 기후요소의 시공간적인 변동성과 토양, 토지이용, 식생으로 대표되는 유역 특성간의 상호작용, 2) 기후요소의 시공간적 변동성이 지표흐름, 토양수분, 증발산과 같은 수문성분들에 기여하는 영향력, 3) 장기간에 걸쳐 진행되는 기후변화 및 토지이용 변화로 인한 유역의 수문성분의 영향, 4) 유역에 존재하는 식생과 수문성분 간의 상호관계를 들 수 있다(Sivapalan et al., 2011). 최근 1~2세기 동안에 걸쳐 진행된 급격한 인구 증가 및 기후변화는 지구의 물 순환의 이해의 중요성을 더욱 더 부각시키고 있으며 수문순환의 평가 및 미래 기후변화에 따른 수자원의 영향을 예측하기 위한 노력들을 요구하고 있다(Overgaard et al., 2006).

물은 육상생태계를 조절하는 주된 요소이며(Huxman et al., 2004), 수문순환 요소 중 하나인 토양수분은 식생과 가장 밀접한 관계를 갖는 변수이다. 식생 또한 유역의 수문순환과 서로 밀접한 관계를 가지고 있다. 육상 생태계의 중요한 구성성분인 식생은 물, 온도, 토양 특성에 영향을 받음과 동시에 유역의 물수지에 기여하는 역할을 하고 있다(Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004). 지표온도는 토양수분의 기화와 지표에 존재하는 식생을 포함한 육상 생태계와 밀접한 관계를 가지며 나아가 하천수온 및 수생태계에도 영향을 주는 인자이며(Kozlowski and Pallardy, 1997; Zheng et al., 1993; Lei et al., 2011), 태양복사에너지, 기온과 같은 기상학적 특성, 알베도, 토양수분량, 토양 구성 물질과 같은 물리적 특성, 고도, 경사, 향과 같은 지형적 특성, 마지막으로 LAI와 같은 생태학적 특성에 매우 큰 영향을 받는 것으로 알려져 오고 있다(Kang et al., 2000). 따라서 이들 사이의 관계를 이해하고 예측하는 것은 매우 중요한 것으로 판단된다(Jackson et al., 2001).

수문요소, 식생, 지표온도는 기후변화에 의해 가장 많은 영향을 받는 변수들이며 이들 변수 사이에도 상호작용이

존재한다. 일찍이 기후-식생-지면간의 상호작용은 Land Surface Model (LSM)을 다루는 이들에게서 매우 중요한 요소로 자리 잡고 있으며 물수지 뿐만 아니라 에너지의 교환, 탄소 및 영양물질의 교환 등이 모형에 고려되고 있다. LSM은 지속적인 모듈개선을 통해 보다 현실적인 모사를 시도하고 있으나 근본적으로 이들 모형들은 엄청난 양의 입력자료와 매개변수들이 요구되고 있어 모형 적용에 있어 어느 정도 한계가 있는 것이 사실이다.

현실적으로 입력자료의 확보는 제한적일 수밖에 없으며, 많은 매개변수를 보유한 모형이 언제나 만족스러운 모의결과를 보장해주지는 못할 것이다. Overgaard et al. (2006)에서도 지적하였듯이, 수문학자들은 변수간의 상호작용이 충분히 반영되도록 모형을 설계하고 싶어 하지만 이는 어디까지나 추구하는 목적에 맞게 정확한 결과를 산출할 수 있을 때에 가능할 수 있을 것이다.

최근 들어 국내에서도 유역의 생태수문을 파악하려는 시도를 살펴볼 수 있다. Shin et al. (2012)에서는 설마천 유역을 대상으로 RHESys (Regional Hydro Ecological Simulation System) 모형을 이용하여 산림유역의 생태수문을 파악하였다. Lee et al. (2007)에서는 광릉시험림 유역과 강원도 인제군 강선리에 위치한 강선리 유역을 대상으로 동일한 모형을 적용하였으며 Kim et al. (2007)에서도 광릉 원두부 유역을 대상으로 모형을 적용하여 유역의 생태수문을 파악하였다. 위 선행연구에서 사용된 RHESys 모형은 유역의 수문과정 뿐만 아니라 순일차생산량(NPP, Net Primary Production), 엽면적 지수(LAI, Leaf Area Index)와 같은 생지화학적 과정을 동시에 고려하여 유역의 수문 및 생태학적 변화들을 모의 하는 모형이다(Lee et al., 2007).

하지만 이 모형은 유역의 생태수문학적 모의를 위해 많은 매개변수들이 요구되며 매개변수 추정에 활용되는 관측자료 또한 일별 증발산량, 토양수분량, 광합성량, 일차생산량과 같은 기존의 전통적인 수문모형에서는 사용되지 않은 다양한 자료들이 요구된다. 이러한 이유로 인해 선행연구에서는 소규모 유역에서만 적용된 것을 확인할

수 있다(설마천 유역: 8.5 km², 광릉시험림 유역: 2.2 km², 강선리 유역: 7.5 km², 광릉 원두부 유역: 0.22 km²).

본 논문에서 소개되는 분포형 생태수문모형은 최소한(현실적으로 확보 가능한)의 입력자료와 매개변수를 이용하지만 정확한 결과를 예측할 수 있는, 즉 Parsimonious 모형을 만들고자한다. 이는 국내에서 적용된 사례와는 달리 대규모 유역에서도 쉽게 적용할 수 있음을 의미한다. 또한 본 모형은 관측자료 대안으로 추정자료와 원격탐사 자료를 활용하여 관측자료가 없는 지역에서도 적절한 모의가 가능하도록 설계되었다.

분포형 생태수문모형은 기후변화에 민감한 요소인 수문 성분, 식생, 지표온도를 모의할 수 있다. 나아가 산출된 지표유출량과 기저유출량을 추적하여 하천유량을 모의할 수 있으며, 지표온도에서 수온으로의 간단한 변환과정을 통해 하천수온 또한 모의될 수 있도록 모형을 구성하였다. 본 논문에서는 분포형 생태수문모형의 소개와 매개변수 추정과정을 서술하고 이후 실제 낙동강 상류에 위치한 내성천 유역을 대상으로 모형을 적용하여 모형을 평가해보았다.

2. 모형의 구성

분포형 생태수문모형은 1) 수문성분 및 식생 모의 단계, 2) 지표온도 모의 단계, 3) 하천유량과 하천수온 모의 단계로써 크게 3단계로 구성되고 있다. 모형의 개괄적인 모의 과정은 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 수문성분 및 식생

수문성분 및 식생은 Choi et al. (2012b)에서 소개된 생태수문모형의 모의기작을 통해 이루어진다. 생태수문모형은 강수를 시작으로 수문요소들의 변화가 이루어지며 식생은 토양수분과 기화량의 함수로 모의된다. 전반적인

수문성분 및 식생 모의는 Fig. 2와 같다.

2.2 지표온도

토양온도 예측은 크게 두 가지의 방법으로 나누어 볼 수 있다. 이는 1) 토양의 Heat Flux와 에너지 수지에 기반한 모형(Rosenberg et al., 1983; Thunholm, 1990; Marshall et al., 1996; Elias et al., 2004; Mihalakakou, 2002; Mahrer and Katan 1981; Harris, 2007)과 2) 토양온도에 영향을 주는 주요인자와의 상관관계를 기반으로 하는 경험식을 통한 모의이다(Zheng et al., 1993; Kang et al., 2000; Lei et al., 2011).

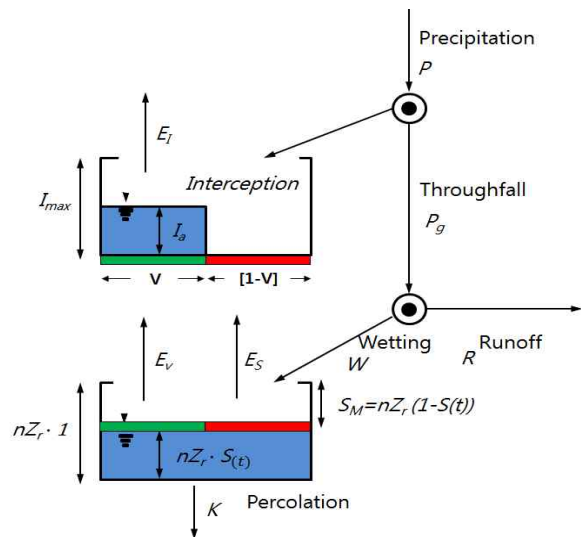


Fig. 2. The Scheme of the Ecohydrological Model (P: Precipitation, P_g: Throughfall, R: Surface Runoff, W: Wetting, K: Groundwater, E_v: Evaporation in vegetated area, E_s: Evaporation in nonvegetated area, E_i: Evaporation at vegetation canopy by intercepted water Q: Streamflow, V: Vegetation fraction) (Quevedo and Francés, 2008 and Choi et. al., 2012(b))

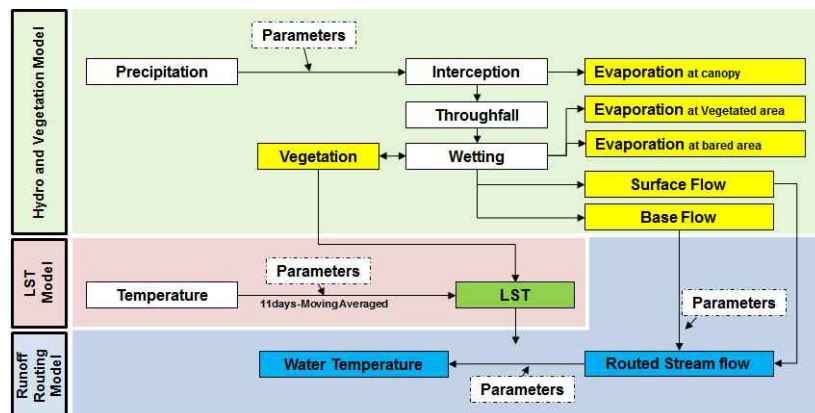


Fig. 1. The Flowchart of Distributed Ecohydrological Model

Heat Flux와 에너지 수지에 기반을 둔 모형들은 상대적으로 많은 매개변수들이 요구되며 국소적인 지역에서는 높은 정확성을 보이지만 대규모 지역에 대해서는 다소 부정확한 결과를 보이고 있다. 반면 경험식을 통한 예측은 비록 토양온도와 관계된 주요인자만을 고려하여 모의함에도 불구하고 상대적으로 정확한 결과를 보여주고 있다.

본 모형에서 지표온도의 모의는 Zheng et al. (1993)이 제안한 경험식을 기반으로 고안된 Choi et al. (2012a)에 서 적용된 경험식을 이용하였다(Eqs. (1) and (2)).

$$T_{soil}(t) = T_{soil}(t-1) + [T_{air,11}(t) - T_{air,11}(t-1)] \cdot M_1 \cdot \exp(-M_2 V(t)) \quad (1)$$

$$\text{at } T_{air,11}(t) > T_{air,11}(t-1)$$

$$T_{soil}(t) = T_{air,11}(t-1) + [T_{air,11}(t) - T_{air,11}(t-1)] \cdot M_3 \quad (2)$$

$$\text{at } T_{air,11}(t) \leq T_{air,11}(t-1)$$

여기서, $T_{air,11}$: 일별 기온의 11일 이동평균, T_{soil} : 모의된 지표면 토양온도, M_1 , M_2 , M_3 : 모형의 매개변수, V : 식생률.

2.3 하천유량 및 하천수온

본 모형은 격자 기반의 Cell to Cell 하천추적을 실시하고자 한다. Cell to Cell 하천추적 기법은 200~500 km의 전 지구 규모(Miller et al., 1994; Widén-Nilsson et al., 2007; Liston, 1994)에서부터 25 km 이하의 홍수예측, 수자원 관리 등과 같은 목적을 위한 지역적 규모(Ott et al., 1991; Nijssen et al., 1997; Kouwen et al., 1993)까지 모형의 적용목적에 따라 다양한 공간적 범위에서 사용되는 기법이다(Raina, 2004). Cell to Cell 기법은 고도에 따라 결정되는 물의 흐름 방향을 이용하여 하천추적을 실시하는 방법이다. 물의 흐름 방향은 과거 수작업을 통해 결정하였으나(Vörsösmarty et al., 1989; Miller et al., 1994), GIS의 도입이후에는 지형의 고도를 나타내는 DEM (Digital Elevation Model)을 이용하여 물의 흐름방향을 결정하고 있다(Raina, 2004; Fekete et al., 2001; Olivera et al., 2002).

본 모형에서는 지표유출량 추적을 위해 운동과 추적(Kinematic Wave Routing) 방법을 이용하였다. Chaudhry (1993)에서는 정방형 단면의 하천수로에서 공간적으로 변하는 1차원의 부정류의 연속방정식을 Eq. (3)과 같이 유도하였다.

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = i_r \quad (3)$$

여기서, h_r : 지표유출고(m), t : 시간(hr), x : 구간 거리(m), q_r : 단위 폭 당 지표유량($m^3/hr/m$) i_r : 해당 구간의 지표유출 유입량(m/hr).

단위 폭 당 유량은 Manning 공식을 이용하여 계산할 수 있으며 본 모형에서는 이를 수심의 함수로 변형하여 Eq. (4)와 같이 계산한다.

$$q_r = \alpha h_r^\beta \quad (4)$$

여기서 α , β : 단위 폭 당 지표유량 매개변수.

연속방정식에 변형 Manning 공식(Eq. (4))을 대입하면 운동과 추적방정식을 Eq. (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} + \alpha \beta h_r^{\beta-1} \frac{\partial h_r}{\partial x} = i_r \quad (5)$$

위의 식에 대한 수치해법은 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_{r,x_2}^n - h_{r,x_2}^o}{\Delta t} + \alpha \beta (h_{r,x_1}^o)^{\beta-1} \frac{h_{r,x_2}^o - h_{r,x_1}^o}{\Delta x} = i_r^n \quad (6)$$

여기서, h_{r,x_1}^o : 이전 격자에서 이전 시간의 지표유출고, h_{r,x_2}^o : 현재 격자에서 이전 시간의 지표유출고.

이 둘은 이미 알고 있는 값이기 때문에 h_{r,x_2}^n (현재 격자에서 현재 시간의 지표유출고)은 Eq. (6)을 정리하여 Eq. (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$h_{r,x_2}^n = h_{r,x_2}^o + i_r^n \Delta t + \frac{\Delta t}{\Delta x} \alpha \beta (h_{r,x_1}^o)^{\beta-1} (h_{r,x_1}^o - h_{r,x_2}^o) \quad (7)$$

기저유출량 추적 또한 지표유출량 추적과 동일한 형태로 연속방정식에 근거하여 작성하였으며, 다만 유속의 함수를 Eqs. (8) and (9)와 같이 정의하였다. 모형에서 기저유출량은 기본적으로 각각의 격자들을 통하여 개별적으로 모의되지만 하천형성이 된 이후에는 이들이 결합되어 모의되도록 설계하였다.

$$q_g = \gamma h_g \quad (8)$$

$$h_{g,x_2}^n = h_{g,x_2}^o + i_g^n \Delta t + \frac{\Delta t}{\Delta x} \gamma (h_{g,x_1}^o) (h_{g,x_1}^o - h_{g,x_2}^o) \quad (9)$$

여기서, q_g : 단위 폭 당 기저유량($m^3/hr/m$), γ : 단위 폭 당 기저유량 매개변수, h_g : 기저유출고(m), t : 시간(hr), x : 구간 거리(m), i_g : 해당 구간의 기저유출 유입량(m/hr).

하천수온은 서로 다른 온도(에너지)를 가진 물이 섞이거나 태양복사에너지와 같은 외부로부터의 에너지의 유

입 및 방출로 인해 변동될 수 있다. 본 모형은 실제 다양한 경로를 통해서 결정되는 하천수온을 간략하게 모의하고자 한다. 모형에서 하천수온은 지표 및 기저유출수를 통한 지표온도(에너지) 유입만을 고려하였으며 이후 하천수온은 서로 다른 격자에서 유입되는 유출수가 합쳐지는 과정을 통해 하천수온의 변화되도록 설계하였다.

격자에서 지표온도에서 하천수온으로 변환과정은 지표온도에 수온 보정계수의 곱하여 계산된다(Eqs. (10) and (11)).

$$T_R = R_{Ts} \cdot T_{soil} \quad (10)$$

$$T_G = G_{Ts} \cdot T_{soil} \quad (11)$$

여기서, T_R : 지표유출수의 수온, T_G : 기저유출수의 수온, R_{Ts} , G_{Ts} : 각각 지표 유출수 및 기저유출수의 수온 보정계수, T_{soil} : 일별 모의된 지표온도.

이후 격자의 유출수온은 유출량 추적을 통해 다른 격자로부터 유입되는 유출량과 수온을 고려하여 결정되도록 설계하였다(Eqs. (12) and (13)).

$$T_{R,x_2}^m = \frac{h_{r,x_2}^o T_{R,x_2}^o + \Delta h_r T_{R,x_1}^o + i_r^n T_{Rs}^m}{h_{r,x_2}^o + \Delta h_r + i_r^n} \quad (12)$$

$$T_{G,x_2}^m = \frac{h_{g,x_2}^o T_{G,x_2}^o + \Delta h_g T_{G,x_1}^o + i_g^n T_{Gs}^m}{h_{g,x_2}^o + \Delta h_g + i_g^n} \quad (13)$$

여기서, T_{R,x_2}^m : 현재 격자의 현재 지표유출수온, T_{G,x_2}^m : 현재 격자의 현재 기저유출수온, T_{R,x_2}^o : 현재 격자의 이전 날의 지표유출수온, T_{G,x_2}^o : 현재 격자의 이전 날의 기저유출수온, Δh_r , Δh_g : 이전 격자에서 유입되는 지표유출고 및 기저유출고.

2.4 모형 검증 및 매개변수 추정을 위한 추정자료 및 원격탐사자료의 활용

모형의 매개변수 추정을 위해서는 관측자료가 반드시 필요하지만 장기간의 관측자료를 보유하고 있는 유역은 매우 드물다. 따라서 대다수의 유역에서 모형의 검보정 및 매개변수 추정에 어려움을 가지고 있다. 본 모형은 이러한 미계측 유역에서도 모형의 검보정 및 매개변수를 추정할 수 있도록 대안적인 방법인 추정자료와 원격탐사자료를 활용하여 이를 극복하고자 한다. 사용된 추정자료는 경험식을 통해 산출된 유역의 연 실제기화량, NRCS 유출곡선법을 통해 산출된 월 지표유출량이며 원격탐사자료는 NDVI (정규화 식생지수, Normalized Difference Vegetation Index)와 LST (지표온도, Land Surface Temperature)

자료가 활용되었다.

추정자료와 원격탐사자료의 역할은 다음과 같다.

- 1) 연 실제기화량: 경험공식을 통해 개략적으로 강수량에서 연 기화량과 연 하천유량의 양을 분할한다.
- 2) NRCS 유출곡선법: 하천유량의 구성성분 중 하나인 지표유출량 추정에 활용한다.
- 3) NDVI 원격탐사자료: 직접적으로 유역의 식생의 변동의 검증에 활용한다.
- 4) LST 원격탐사자료: 지표온도의 모의결과 검증에 활용한다.

연 실제기화량을 추정하기 위하여 다양한 기후 및 토양 조건을 대상으로 수많은 경험공식들이 개발되었다(Pike, 1964; Budyko, 1974; Fu, 1981; Zhang et al., 2004). 이들 연구들을 살펴보면 대체로 모두 비슷한 형태의 식의 구조를 가지고 있으며, 주로 실제기화량과 강수량 사이의 비를 최대 기화량과 강수량 사이의 비의 함수로 표현하고 있다. 본 연구에서는 이들과 유사한 형태를 갖는 경험식을 제시하고 이를 활용하였다. 제시된 연 실제기화량 공식은 기존 경험식에서 나아가 식생지역과 비식생지역으로 구분하여 연 실제기화량을 추정할 수 있도록 작성되었다.

경험식의 매개변수 추정은 비교적 양질의 댐 유입량(하천유량)자료가 확보되어 있는 금강, 낙동강, 섬진강, 한강 유역의 주요 14개 댐(용담댐, 대청댐, 보령댐, 부안댐, 안동댐, 임하댐, 밀양댐, 남강댐, 합천댐, 섬진강댐, 주암본댐, 충주댐, 횡성댐, 소양강댐) 상류 유역을 대상으로 최적화 기법 중에 하나인 유전자알고리즘을 이용하여 추정하였다. 이때 연 실제기화량은 물수지법을 통해 산정되었으며 PET의 경우 Penman 방법(Penman, 1948)을 통해 산정되었다. 경험공식은 Eqs. (14) and (15)이며 매개변수 $w_1=1.7058$, $w_2=1.5362$ 이다.

$$\text{식생지역: } \frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left(1 + \left(\frac{PET}{P}\right)^{w_1}\right)^{1/w_1} \quad (14)$$

$$\text{비식생지역: } \frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left(1 + \left(\frac{PET}{P}\right)^{w_2}\right)^{1/w_2} \quad (15)$$

여기서, ET : 연 실제기화량, P : 연강수량, PET : 연 잠재증발산량(최대기화량).

지표유출량 산정방법에는 Green Ampt, Philip 등의 여러 수문학적 기법이 있으나, 우리나라에서 널리 사용되는 방법인 NRCS 유출곡선법을 이용하였다. 이 방법은 총 강우량에서 차단, 지면저류, 증발, 침투 등의 강우 손실을 빼줌으로써 직접유출에 기여하는 유효우량을 산정하는 방법이다. NRCS 유출곡선법 방법의 기본 식은 Eq. (16)과 같다.

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (16)$$

여기서, S : 유역의 최대잠재보유수량.

만약 단위를 mm로 사용할 경우에는 NRCS의 유출곡선번호(Runoff curve number, CN)와 Eq. (17)과 같은 관계가 있다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (17)$$

유출곡선번호는 유역의 토양도와 토지이용도를 중첩하여 구할 수 있으며, 시기별 5일 선형강수량에 따라서 유출곡선번호의 조정할 수 있다.

NDVI는 적외영역의 채널과 근적외영역 채널에서 발생하는 분광 차를 이용하여(Eq. (18)) 지면에 존재하고 있는 식생 특성을 파악하고자 개발된 지수이다. NDVI는 단위가 없는 값으로써 범위는 -1에서 1사이로 1에 가까울수록 식물의 활성도가 높음을 의미한다. 일반적으로 NDVI는 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 엽면적지수, 엽록소 함량, 엽량 및 광합성 흡수복사량 등과 관련된 지표로 사용된다(Jensen, 2000).

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (18)$$

여기서, NIR : 근적외선역의 반사값이며, red : 적색역의 반사값을 의미한다.

일반적으로 원격탐사자료는 촬영시점에서의 구름이나 기타 기상현상으로 인해 자료에 공백이 발생하거나 신뢰할 수 없는 값이 존재하기 때문에 이에 대한 자료의 이상치 제거 및 재처리과정이 필요하게 된다. 또한 본 연구에서는 NDVI 및 LST 자료를 월자료의 형태로 구성하려고 한다. 원격탐사 자료의 처리 및 월자료로의 변환은 다음과 같이 진행된다.

- 1) 이상치 제거 및 재처리 과정: 먼저 시계열의 이상치를 제거하기 위해 선행 2개 시계열과 후행 2개 시계열의 평균값과 비교하여 차이가 50% 미만, 200% 초과일 경우 해당 시계열 값을 제거하였다. 이후 자료의 노이즈를 줄이기 위한 목적으로 $2n+1$ 이동 평균을 실시하였다(하지만 만약 이동평균 계산중 시계열 값이 하나라도 존재하지 않으면 계산하지 않음).
- 2) 월 단위 자료로의 변환: 이상치 제거 및 재처리과정을 거쳐 생성된 원격탐사자료는 다음의 방법을 통해서 월자료로 변환하였다. NDVI는 같은 월에 해당하는 시계열 자료들 중에서 최고치를 그 월을 대표 값

으로 산정하였으며 LST는 같은 월에 해당하는 시계열 자료들을 평균하여 월 단위 자료로 변환하였다. 다만 그 월에 원격탐사자료의 시계열 값이 하나라도 존재하지 않는다면 그 월에는 공백으로 두었다.

- 3) 공백자료의 보완: 값이 공백으로 처리된 월 단위 원격탐사자료에 대해 Eq. (19)와 같은 cosine 함수를 적용하여 결측 자료를 보완하였다. LST 또한 동일한 방식으로 보완하였다.

$$RSData_{edited,m} = \overline{RSData} + A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t_m + B\right) \quad (19)$$

여기서, $RSData_{edited,m}$: 추정된 월 원격탐사자료의 값, \overline{RSData} : 원격탐사자료 시계열의 평균값, A : 원격탐사자료의 평균값으로부터 최대 및 최소 편차, B : 원격탐사자료가 최대가 되는 월, t_m : 해당기간의 월.

2.5 최적화 기법 통한 매개변수 추정

분포형 생태수문모형의 매개변수는 크게 식생의 성장과 관련된 매개변수(g, k, c, T_{max}), 차단과 관련된 매개변수(I_{max}), 토양수분과 관련된 매개변수($\overline{nZ}_r, A_z, \phi_z, S_w, \overline{s^*}, A_s, \phi_s$), 침투와 관련된 매개변수(K_s, β_s)로 구성되어 있으며, 이들 매개변수의 범위는 Choi et al. (2012b)에서 확인할 수 있다. 또한 지표온도 모의에 사용되는 매개변수(M_1, M_2, M_3), 마지막으로 하천유량 및 하천수온에서 사용되는 매개변수는 지표, 기저유출량에 사용되는 매개변수(α, β, γ)와 하천수온모의에 사용되는 매개변수(M_{T_r}, M_{Q_r})로 구성되어 있다. 각 매개변수들의 정의 및 값의 범위는 Table 1과 같다.

모형에서 하천유량과 하천수온 매개변수를 제외한 나머지 매개변수(수문성분, 식생, 지표온도)의 추정은 전적으로 비선형 프로그래밍(Nonlinear programming) 최적화 기법을 이용하였다. 이 기법은 실제값과 미지값 사이에 제약을 주고 목적함수를 최대화 하거나 최소화 해주는 해를 찾아내는 방법이다.

매개변수 추정을 위해 값의 추정범위, 제약조건, 목적함수를 설정하였다. 추정범위는 매개변수 값의 범위와 같으며 논리적인 추정을 위해 3가지 제약조건을 제시하였다.

연평균 유효토양깊이 \overline{nZ}_r 은 유효토양깊이의 최대 편차를 의미하는 A_z 보다 항상 커야하므로 Eq. (20)을 작성하였으며, 연평균 식생의 임계 토양수분 $\overline{s^*}$ 와 임계 토양수분의 최대편차, A_s 의 차이는 식생의 최저 임계 토양수분, S_w 보다 항상 높아야 하므로 Eq. (21)을 작성하였다. 마지막으로 토양수분은 최대 1을 초과하지 않도록 $\overline{s^*}$ 와 최대

Table 1. Parameters of Distributed Ecohydrological Model

Para.	Description	Range
M_1	LST Coefficient at $T_{air,11}(t) > T_{air,11}(t-1)$	1.0~3.0
M_2	LST Exponent at $T_{air,11}(t) > T_{air,11}(t-1)$	0.1~10.0
M_3	LST Coefficient at $T_{air,11}(t) < T_{air,11}(t-1)$	1.0~3.0
α	Coefficient of Surface Runoff Routing	0.0001~1
β	Exponent of Surface Runoff Routing	0.1~3
γ	Coefficient of Underground Runoff Routing	0.0001~1
M_{T_s}	Calibration Coefficient of Surface Runoff Temperature.	0.1~1.0
M_{G_s}	Calibration Coefficient of Surface Underground Runoff Temperature.	0.1~1.0

편차 A_s 의 합은 반드시 1보다 낮게 설정하였다(Eq. (22)).

$$\overline{nZ_r} \geq A_s \tag{20}$$

$$S_w \leq \overline{S^*} - A_s \tag{21}$$

$$S^* + A_s \leq 1 \tag{22}$$

목적함수는 추정자료 및 원격탐사자료 관측값과 모의값 간의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)가 최소가 되도록 Eq. (23)와 같이 구성하였다.

$$f = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} (S_i - O_i)^2} \tag{23}$$

지표온도의 경우 단일 항목만을 고려하기 때문에 Eq. (23)과 같이 구성하였지만 수문성분 및 식생에서는 3가지의 요소 연 실제증발량, 직접유출량, 식생이 동시에 만족하는 목적함수를 구성할 필요가 있다. 이를 위해 단일 요소의 목적함수에 각 요소의 평균을 나누어 RMSE값을 표준화시킨 다음, 이들의 합을 목적함수로 설정하였다(Eq. (24)).

$$f = \frac{N_i f_a}{\sum_{i=1}^{N_i} O_i} + \frac{N_j f_b}{\sum_{j=1}^{N_j} O_j} + \frac{N_k f_c}{\sum_{k=1}^{N_k} O_k} \tag{24}$$

여기서, N : 매개변수 추정에 적용된 관측 자료의 개수, S : 모의값, O : 간접추정자료, f_a, f_b, f_c : 각각 간접추정자료에 대한 목적함수 값.

3. 모형 적용

3.1 대상유역 및 자료 출처

낙동강의 지류하천인 내성천유역을 대상으로 분포형 생태수문모형 검증에 실시하였다. 내성천은 유역면적이 1,816 km², 유역의 평균표고는 318.7 m이다. 주 하천길이는

54.9 km이며 25개의 지류하천을 보유하고 있다. 유역내 토지이용은 70% 이상이 산림과 초지로 구성되어있으며 이외에도 농경지(논, 밭), 습지 등으로 구성되어 있다. 산림은 주로 침엽수인 소나무(28%)로 구성되어있으며 그 외에도 활엽수 혼효림(36.9%), 활엽수 혼효림(13.7%), 낙엽송림(17.6%)로 구성되어 있다. 토양의 대부분은 배수가 잘되는 사양질 내지 식양질로 이루어져 있다(www.wamis.go.kr). 내성천 유역은 최근 10년간(2001~2010) 연강수량이 대략 1,400 mm이며 연강수량의 60% 이상이 여름철에 집중되며 겨울철에는 30 mm 내외의 월강수량을 보이고 있다. 기온은 계절에 따라 뚜렷한 변화를 보이고 있으며 월 평균기온은 대략 -3에서 25°C 사이를 보이고 있다(Fig. 3).

Fig. 4는 내성천유역을 도시한 그림이다. 내성천 유역내 외에는 총 5곳의 기상관측지점이 존재하며 이들 지점에서는 강수, 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간 등을 제공한다. 이들 자료는 1979년 이후부터 현재까지 관측되고 있다. 또한 내성천 유역에는 환경부에서 수질오염총량관리를 위해 단위유역 말단부에 설치된 두 곳의 관측소가 존재한다. 이들 지점에서는 2004년 이후로 대략 8일 간격마다 하천유량, 수온, 수질이 측정되고 있다.

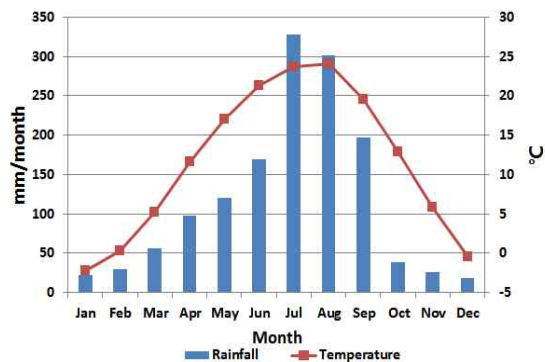


Fig. 3. Monthly Precipitation and Temperature in the Naeseong Basin for 10 Years (2001~2010)

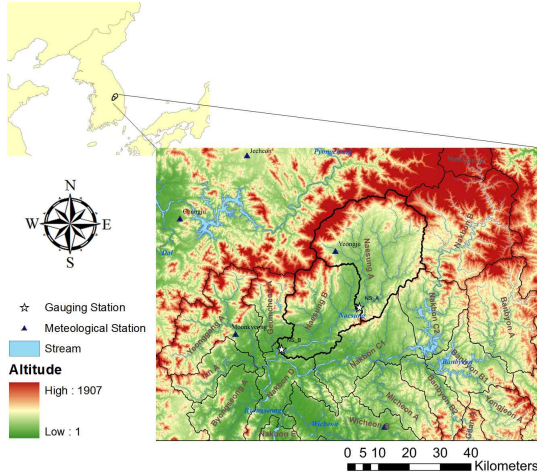


Fig. 4. Location of the Naeseong Basin

모형에서는 지형자료로써 DEM, 토지이용도, 토양도가 요구된다. DEM은 USGS에서 제공하는 공간해상도 1 km의 자료를 이용하였다. 토지이용도 및 토양도는 국가수자원종합정보관리센터(WAMIS)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 이들 자료는 공간해상도는 30m이다.

모형의 매개변수 추정에 사용되는 원격탐사자료는 NDVI, LST이다. NDVI자료는 SPOT/Vegetation으로 <http://www.vgt.vito.be/>에서 확보하였다. 자료는 1998년 이래로 현재까지 제공되고 있으며 공간해상도 1 km, 시간간격은 10 day이다. LST자료는 MODIS 자료를 이용하였다. 이 자료의 공식적인 명칭은 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8 Day L3 Global 1 km ISIN Grid이며 MOD11A2로 불린다. 이들 자료는 2001년부터 제공되고 있으며 자료의 공간해상도는 1 km이며 시간간격은 8 day이다.

3.2 모형 구축

본 모형은 분포형 모형으로써 1 km의 공간해상도에서 모의하고자한다. 입력자료인 기상자료의 경우 지점별로 존재하며 이를 분포형 모형에 적용하기 위해서는 공간적으로 보간을 할 필요가 있다. 내성천 유역 내외에는 총 5곳에서 기상관측소 존재하며 이를 간단한 내삽기법인 역거리 가중법을 통해 1 km 해상도의 공간자료로 변환하였다. 또한 지형자료인 DEM, 토지이용도, 토양도와 관측자료로 활용되는 NDVI, LST 원격탐사자료는 1 km 공간해상도에 맞게 자료를 재구성하였다. 모형의 시간간격은 기본적으로 일단위이며 모의기간은 2001년부터 2010년까지로 총 10년이다.

하천유량 추적이 있어, 적절한 수치해석을 위해서는 공간해상도에 맞는 시간간격을 설정하는 것이 필요하다. Chaudhry (1993)에서는 모형의 안정성, 즉 모의결과의 수

치적 확산을 막기 위해 Courant Number가 1이거나 그 미만이어야 한다고 주장했다. 여기서 Courant Number Eq. (25)를 통해 계산할 수 있다.

$$C_n = \frac{|V| \pm c}{(\Delta t / \Delta x)} \quad (25)$$

여기서, C_n : Courant Number, $|V| \pm c$: 실제 유속, $\Delta t / \Delta x$ 는 모형에서 구현할 수 있는 최고 유속.

본 연구에서는 일반적으로 낙동강의 홍수 기 유속이 최대 약 3 m/s까지 도달하는 점과 공간해상도가 1 km임을 감안하여 시간간격을 5분으로 재설정하였다. 즉 모형에서 구현할 수 있는 최고 유속은 3.3 m/s이며 만약 모의 시 3.3 m/s를 초과할 경우 이를 넘지 못하도록 제약을 두었다.

일단위로 모의된 지표유출량, 기저유출량, 지표온도는 하천유량, 하천수온 추적을 위해 5분 단위간격으로 재설정하였다. 지표유출량 및 기저유출량의 경우 재설정된 시간간격 5분으로 일자료를 분할하였으며(예를 들어, 일 지표유출량이 30 mm이면, 이는 30/288로 설정됨), 하천수온은 일별 수온이 시간간격별로 동일하도록 구성하였다. 이후 모의된 결과 값은 하천유량의 경우 적분하여 일별 값으로, 하천수온의 경우 평균값으로 환산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

최적화기법을 통한 매개변수 추정에 앞서 수문성분 및 식생과 관련된 모형의 매개변수에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 매개변수의 변화에 따라 얼마나 모형의 결과값에 영향을 주는지를 알아보는데 사용되는 방법이며 이를 통해 모형의 정확성을 결정하는데 있어 가장 큰 영향력을 가지고 있는 매개변수를 파악할 수 있다 (Ji, 2008; Cuo et al., 2011).

민감도 분석이 실시된 결과 항목은 지표유출량, 기저유출량, 기화량, 토양수분과 식생이며 이들 모의결과 관련된 매개변수는 14개이다. 초기 모의결과 값은 매개변수의 범위의 중앙값을 사용하여 획득하였다. 이후 각 매개변수 값을 최저에서 최고범위까지 개별적으로 변동시켜서 모형의 결과값을 산정하였다. 이후 초기 모의결과 값과 이들 모의 값을 비교하여 매개변수의 민감도를 확인하였다.

Fig. 5는 각 매개변수의 변화에 따른 모의결과의 편차를 나타낸 그림이다. 지표유출량의 경우 3가지의 매개변수가 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이는 유효토양 깊이를 의미하는 \bar{nZ} (-30~85%), 기저유출과 관

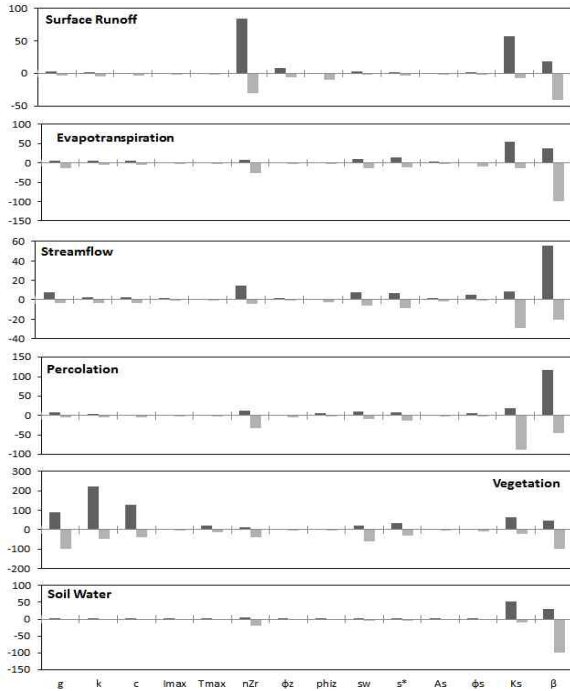


Fig. 5. Results of Sensitivity Analysis

런된 매개변수인 K_s (-7~58%), β_s (-41~18%)이다. 유효토양 깊이가 \bar{nZ}_r 은 토양의 수분보유능력을 의미하는 매개변수이며 이는 직접적으로 격자가 보유할 수 있는 물의 양을 조절하는 역할을 한다. K_s 와 β_s 는 유효토양깊이에 존재하는 토양수분에서 기저유출로 빠져나가는 물의 양을 조절에 관여하므로 이는 이전 날의 토양수분양에 직접적인 영향을 주기 때문에 지표유출량에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

지표유출량에 민감한 반응을 보인 이 3가지의 매개변수는 지표유출량 이외의 다른 수문성분에서도 민감하게 반응하고 있으며 특히 토양수분, 기저유출량에서 지표유출량과 유사한 매개변수 민감도를 보이고 있다. 반면 기화량의 경우 이들 3가지 변수 이외에도 토양수분과 관련된 변수인 S_w , \bar{s}^2 (-13~15%) 그리고 식생과 관련된 매개변수 g , k , c (-13~6%)에서도 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 이는 식생의 성장과 토양수분이 연동되도록 설계되어 있고 임계토양수분점에 따라서 토양수분에서 기화량으로 전환되는 양이 결정되는 식의 구조로 인한 것으로 판단된다.

식생의 경우 수문성분들과는 다른 민감도 분석결과를 보이고 있다. 식생과 관련된 3가지의 매개변수 g , k , c 가 가장 민감한 것으로 나타났으며 이외에도 K_s , β , S_w , \bar{s}^2 순으로 식생성분에 대한 민감도를 보이고 있다.

종합해보면 모형에서 가장 민감하게 반응하는 변수들이 기저유출과 관련된 매개변수 K_s , β 로 나타나고 있다. 이는 모형의 구조상 기저유출량으로 빠져나가는 토양수

분의 양이 어떻게 결정되느냐에 따라 모의결과에 가장 민감하게 영향을 주고 있음을 시사하고 있다. 민감도 분석결과를 통해 \bar{nZ}_r 역시 영향력이 큰 매개변수임을 알 수 있으며 이는 유역의 토양수분 보유능력이 어떻게 결정되어지느냐에 따라 모의결과에 큰 영향력을 주고 있음을 의미한다. 따라서 이들 세 가지 매개변수의 적절한 선택이 모형의 검보정에 있어 가장 중요한 것으로 판단된다.

4.2 통계 검증지표를 활용한 모형 평가

모형 평가를 위해 통계학적 검증지표를 이용하여 수문 성분, 식생, 지표온도 모의 시 목적함수로 활용된 연 실제 기화량, 월 지표유출량, 월 식생률, 월 지표온도와 또한 하천추적을 통해 모의된 하천유량과 하천수온에 대해 검증을 실시해 보았다.

사용된 검증지표는 결정계수(R^2)와 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율계수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE), 평균 제곱근 오차(RMSE), 상대오차(Relative Error, RE)이며 또한 주기성을 가진 시계열의 검증지표로 활용되는 상대 평균 제곱근 오차(Relative RMS Error, RRE)가 이용되었다. RMSE의 경우 계산식을 앞서 2.5절에서 소개하였으며(Eq. (23)) NSE, RE, RRE는 Eqs. (26)~(28)과 같다. 참고로 NSE는 1에 가까울수록 좋으며, RMSE, RE, RRE는 0에 가까울수록 좋음을 의미한다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (26)$$

$$RE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\bar{O}} \times 100 \quad (27)$$

$$RRE = \frac{SE}{O_{\max} - O_{\min}} \times 100 \quad (28)$$

여기서, \bar{O} 는 관측치의 평균값, O_{\max} 는 관측치의 최대값, O_{\min} 는 관측치의 최소값이다.

연 실제기화량의 경우에는 관측 자료가 10개(10년) 밖에 없기 때문에 R^2 와 NSE에 대한 검증지표의 결과가 무의미하다고 판단하여 제외하였으며 주기성을 가지고 있는 시계열인 식생률, 지표온도, 하천수온의 경우 RE 대신 RRE를 사용하였다.

연기화량, 월지표유출량, 월 식생률, 월 지표온도는 격자별로 관측값들이 존재하기 때문에 이에 대한 검증결과

는 지도형태로 나타내보았다.

Fig. 6은 연 기화량에 대한 검증결과를 나타낸 그림이다. 내성A, 내성B의 해당 격자 모두 RMSE가 20~40 mm이며 RE 또한 2~7% 정도로 추정자료와 비슷한 값이 모의되고 있음을 확인할 수 있다.

지표유출량은 R^2 가 0.3~0.9 사이, NSE는 -0.6~0.9 사이로 나타났으며 또한 RMSE는 20~90 mm 사이, RE는 30~250%로 나타났다. 내성 A의 경우 유역의 북쪽 일부지역 및 동남쪽의 경계 지역의 격자들이 검증지표가 다소 좋지 않으며, 내성 B의 경우에는 유역의 중심에서 동쪽과 서쪽 경계지역에 있는 격자들의 검증지표가 좋지 않았으나 이외에 대다수의 격자에서는 목적함수에 따라 관측값을 적절히 모사하고 있다. Fig. 7에는 내성 A의 지표유출량 검증 결과를 제시하였다.

식생의 경우, 내성 A, B 모두 몇몇 격자에서 R^2 와 NSE가 0.1 또는 그 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있으나 대부분의 격자에서 0.6 이상의 검증결과가 관찰되고 있으며 RMSE와 RRE는 0.06~0.18, 15~45%로써 지표유출량에 비해 더 적절히 모의되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 8에 내성 B의 검증결과를 제시하였다.

지표온도의 경우, 내성 A, B 모두 모든 격자에서 R^2 와 NSE값이 0.8 이상으로 매우 만족할 만한 검증결과를 보이고 있다. RMSE와 RRE 또한 각각 2~3°C, 7~12%로 나타나 우수하게 모의되었음을 확인할 수 있었으며 Fig. 9에 내성 A의 검증결과를 제시하였다.

앞서 언급하였듯이 각 격자마다 산출된 지표유출량 기저유출량은 추적을 통해 하천유량을 모의하였으며 지표온도에서 격자의 수온으로 변환과 물의 이동과정을 반영

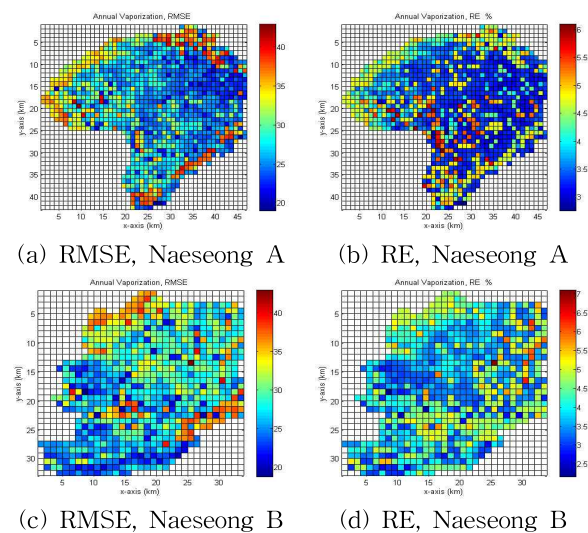


Fig. 6. Statistical Calibration Results of Annual Vaporization

하여 하천수온을 모의하였다. 이들 변수들의 평가는 각 단위유역의 말단 2곳 지점에 대해 이루어졌다. 내성 A 말단지점에는 2004년부터 2010년까지 하천유량 241회, 하천수온 258회 기록되고 있다. 내성 B 말단지점에는 하천유량이 262회, 하천수온은 285회 기록되고 있다.

Fig. 10은 내성천에 존재하는 두 곳의 관측지점의 일 하천유량, 일 하천수온에 대해 모의값과 비교한 그림이며 Table 2는 이에 대한 검증지표를 제시되고 있다. 하천유량의 경우, 내성 A에서 R^2 0.629, NSE 0.593, RMSE 40.68 m³/s RE 62.06%로 나타났으며 내성 B는 하천유량 R^2 0.749, NSE 0.675, RMSE 53.71, RE 61.24로 나타났다. 검

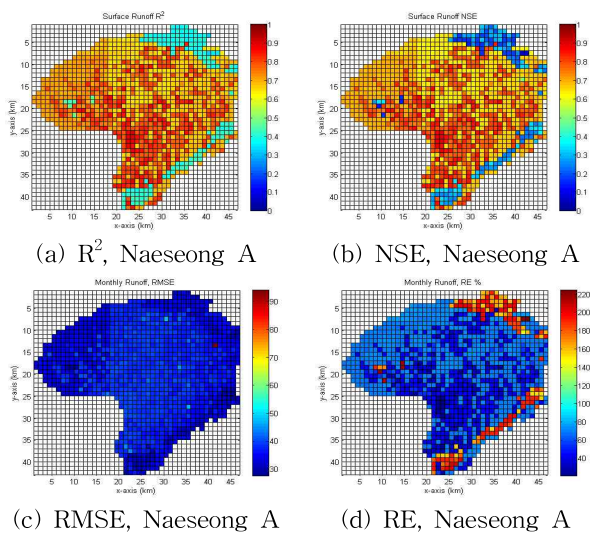


Fig. 7. Statistical Calibration Results of Monthly Surface Runoff

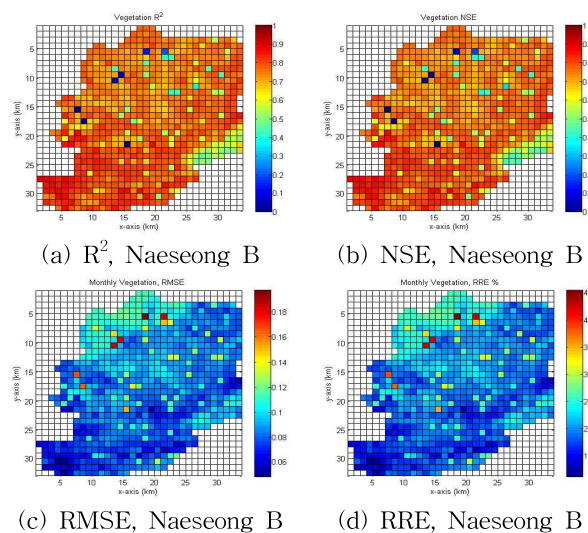


Fig. 8. Statistical Calibration Results of Monthly Vegetation

중에 있어서 7년간의(2004~2010년) 장기간 동안 8일 간격으로 관측된 유량자료를 이용하고 우리나라의 하천유량 특성상 계절에 따른 하천유량의 편차가 큰 것을 감안해 볼 때, 이 결과는 우수한 것으로 판단된다.

하천수온의 경우 내성 A, 내성 B 모두 여름철 고온으로 유지되는 기간의 경우 상대적으로 과소 모의되고 있음

을 확인할 수 있으나 이외의 기간에서는 비교적 적절히 모의하고 있다. 검증지표로 살펴보면, 내성 A에서는 R^2 0.832, NSE 0.787, RMSE 3.776°C, RRE 17.98%이며 내성 B에서는 R^2 0.886, NSE 0.879, RMSE 3.103°C, RRE 15.86%이다. 이들 검증 지표를 통해서도 하천수온 모의결과는 우수한 것으로 판단된다.

4.3 모의 결과

Figs. 11 and 12는 수문성분인 강수, 기화량, 지표유출량, 기저유출량, 식생, 지표온도를 10년 평균 하여 나타낸 그림이다. 강수는 역거리 가중법에 의해 공간적으로 분포된 그림이며 내성A의 경우 1,300~1,450 mm, 내성B의 경우 1,200~1,400 mm으로 나타났다. 기화량의 경우 내성A와 내성B 모두 500~600 mm 사이로 모의되었으며 지표유출량은 내성A 200~600 mm 내성B 200~800 mm로 나타났다. 기저유출량의 경우 내성A와 내성B 모두 200~800 mm 사이로 나타났다. 공간적으로 표현된 수문성분 모의 결과에서 한 가지 흥미로운 것은, 비록 서로 다른 수문성분들이지만 이들의 공간적인 분포는 유사하게 나타나는 점이다. 또한 식생의 공간적인 분포 또한 이들과 유사하게 나타나는 것을 살펴볼 수 있다. 지표유출량이 적은 지역

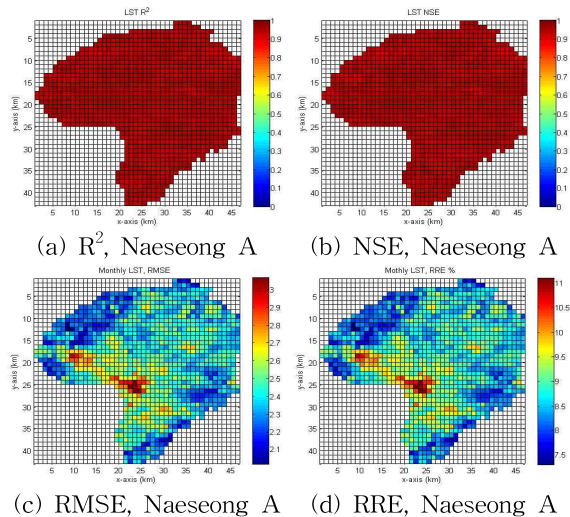


Fig. 9. Statistical Calibration Results of Monthly LST

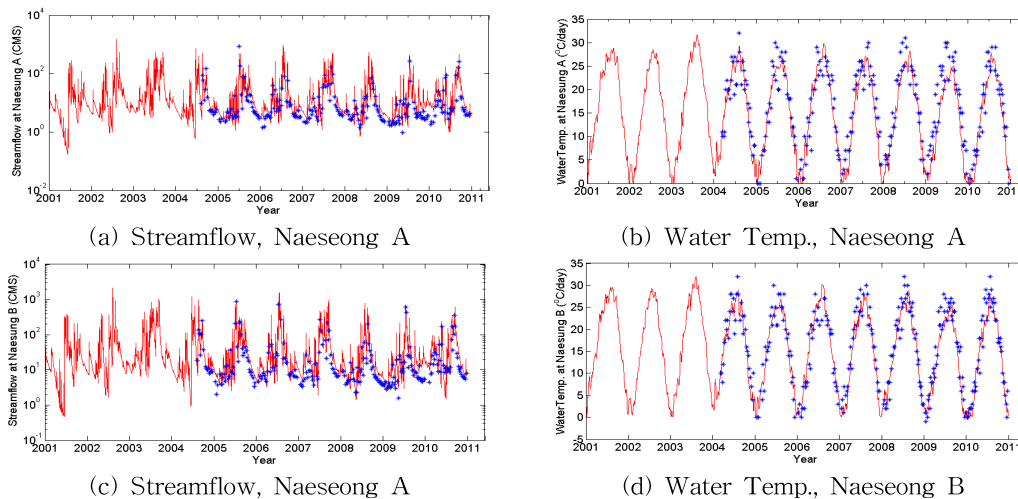


Fig. 10. Observed and Simulated Streamflow and Water Temperature at Outlet (blue asterisk: observed, redline: simulated)

Table 2. Calibration Results of Streamflow and Water Temperature

		Obs. Mean	Sim. Mean	R^2	NSE	RMSE	RE	RRE
Naeseong A	Streamflow (m^3/s)	19.618	26.767	0.629	0.593	40.68	62.06	-
	Water Temp. ($^{\circ}C$)	16.639	15.077	0.832	0.787	3.776	-	17.98
Naeseong B	Streamflow (m^3/s)	36.101	51.296	0.749	0.675	53.71	61.24	-
	Water Temp. ($^{\circ}C$)	15.789	15.083	0.886	0.879	3.103	-	15.86

(상대적으로 기화량 및 기저유출이 많은 지역)에서 식생의 활성도가 높은 것을 알 수 있으며 이는 토양수분의 함수로 설명되는 식생의 성장이 적절히 모의되고 있음을 반영하고 있다. 또한 지표온도는 식생과 반대되는 공간적인 경향을 살펴볼 수 있는데, 식생이 상대적으로 더디게 성장하는 (또는 덜 존재하는) 지역에서 지표온도가 높게 모의되고 있다. 이는 식생의 복사에너지 차단으로 인한 지표온도의 변동이 적절히 모의되고 있음을 보여주고 있다.

보다 구체적으로 확인하기 위해 산림과 논으로 판단되는 격자를 선택하여 각 성분(연 기화량, 월 지표유출량, 월 식생율, 세부적인 월 기화량, 지표온도)에 대한 시계열변화를 Fig. 13에 제시하였다. 그림을 살펴보면 연 기화량, 월 지표유출량, 월식생율, 지표온도는 관측자료를 대신하여 이용된 추

정자료 및 원격탐사자료를 적절히 재현해주는 것을 살펴볼 수 있으며, 특히 세부 기화량 요소들은 식생의 계절적 변화에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 산림의 경우 논, 밭으로 구성된 지역에 비해 식생율이 전반적으로 높으며 그에 따라 상대적으로 식생에 의한 기화량과 식생의 차단으로 발생하는 기화량이 더 많이 모의되고 있다. 반면 나지에서 발생하는 기화량의 경우 적게 모의되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 식생과 수문성분들이 연동되는 모형의 구조가 실제 모의결과에서도 적절히 반영하고 있음을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서 소개하는 분포형 생태수문모형은 3가지의

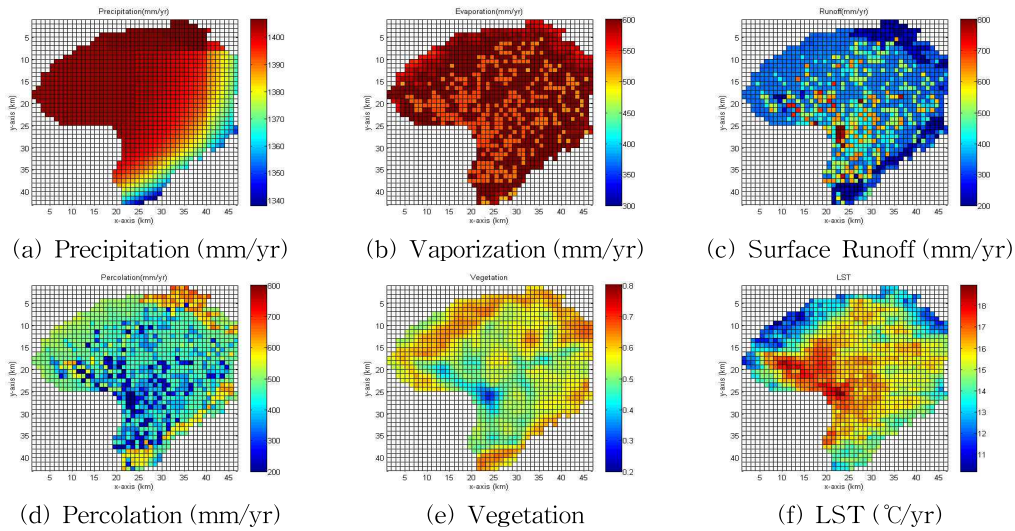


Fig. 11. The Map of Simulation Results in the Naeseong A (Annual Mean)

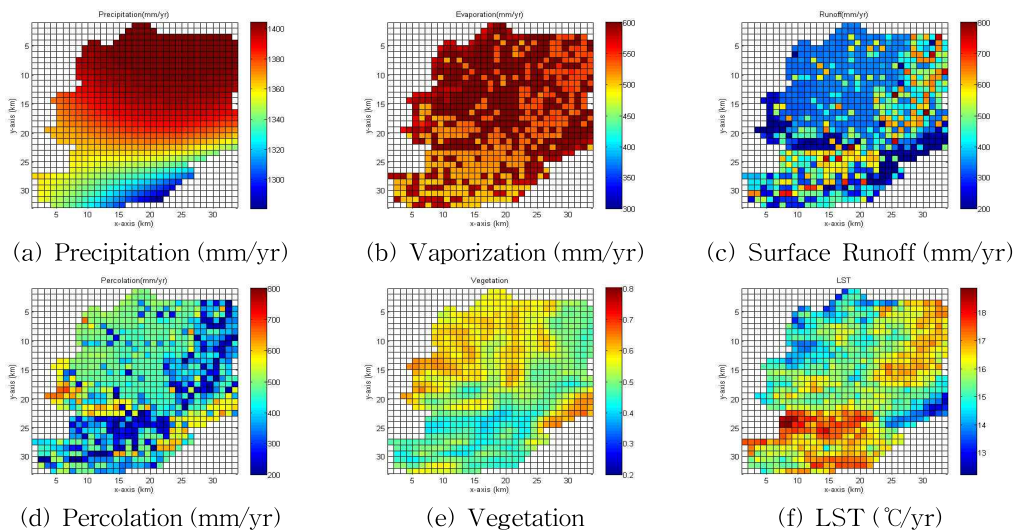


Fig. 12. The Map of Simulation Results in the Naeseong B (Annual Mean)

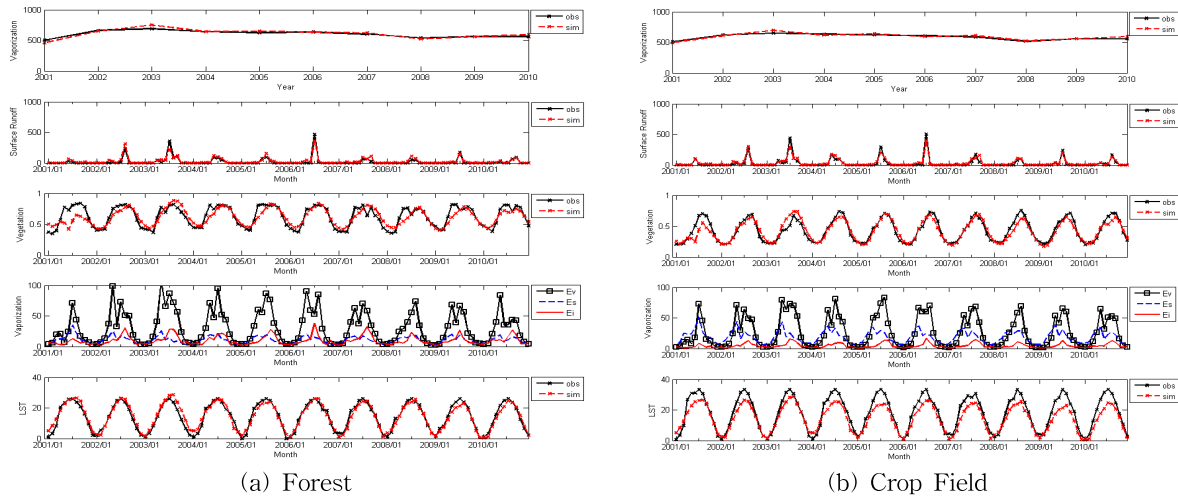


Fig. 13. The Simulation Results of Hydrological Components, vegetation and LST at Specific Landuse Grid

세부 모형을 보유한 모형이다. 각 세부모형은 1) 수문성분 및 식생 모의 모형, 2) 지표온도 모의 모형, 3) 하천유량 및 하천수온 추적 모의 모형이다. 토양수분 지배방정식 (Rodriguez-Iturbe, 2000)을 이용하여 설계된 수문 및 식생과 Zheng et al. (1993)을 참고하여 설계된 지표온도의 모의는 최소한의 매개변수와 입력자료를 이용하여 진행되도록 설계하였다. 또한 각 모듈에서 모의된 지표유출량, 기저유출량, 지표온도는 운동과 추적방법을 통해 하천유량과 하천수온까지 모의를 할 수 있다.

본 모형은 미계측 유역에서도 충분히 적용 가능한 모형이다. 관측자료의 부재를 극복하기위해 이를 대신할 수 있는 추정자료 및 원격탐사자료를 활용하였다. 추정자료는 연 실제 기화량(잠재증발산, 강수량 그리고 실제증발산의 관계를 경험적으로 나타낸 식을 이용), 지표유출량(NRCS-유출곡선법)이며 원격탐사자료인 SPOT/Vegetation NDVI와 MODIS LST가 사용되었다. 매개변수의 추정은 이들 대안 자료와의 비교를 통해 진행 될 수 있으며 각 격자마다 최적화 기법을 적용하여 매개변수를 자동적으로 산정하도록 구성하였다.

분포형 생태수문모형의 적용 가능성을 살펴보기에 앞서 수문성분 및 식생에 대한 매개변수들의 민감도 분석을 실시하였다. 14개의 관련 매개변수 중 K_s , β_s , $\overline{nZ_r}$ 이 가장 민감한 영향을 주는 매개변수인 것으로 확인되었으며 매개변수 추정에 있어서 이들 매개변수 값에 적절한 선택이 필요한 것으로 판단된다.

실제 내성천유역을 대상으로 2001~2010년간 총 10년간의 수문성분, 식생, 지표온도 그리고 추적(routing)을 통한 하천유량 및 하천수온 모의를 실시하였다. 최적화 기법을 통해 추정자료와 원격탐사 자료를 이용하여 매개변수를 추정하였으며, 검증결과, 격자 모의된 수문성분, 식생, 지표온

도의 경우 일부 격자를 제외한 대다수의 격자에서 적절히 모의된 것을 확인하였다(R^2 , NSE 0.6 이상). 하천유량 및 하천수온의 경우 단위 유역 말단 두 지점에 대해 검증을 실시하였으며 하천유량의 경우 내성A: R^2 0.629, NSE 0.593, 내성B: R^2 0.749, NSE 0.675로 7년(2004~2010년) 동안 8일간격의 관측자료를 통해 비교한 것을 감안할 때 적절히 모의된 것을 살펴볼 수 있었다. 하천수온의 경우 내성A, 내성B 두 지점 모두 R^2 , NSE가 0.8 이상 나타나고 RRE 역시 18% 이하로써 우수하게 모의된 것을 확인할 수 있었다.

내성천 유역을 대상으로 분포형 생태수문모형을 적용한 결과, 최소한(현실적으로 확보 가능한)의 입력자료와 매개변수를 이용함에도 불구하고 유역 수문순환 및 식생을 적절히 설명하고 있음을 살펴볼 수 있으며 앞으로 추후 제안된 모형을 통해 우리나라 전역을 대상으로 수문순환 특성 및 식생 등 다양한 생태수문학적 분석을 실시할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2012년 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2012R1A1A4A01011920).

References

Budyko, M.I. (1974). *Climate and Life*. Academic: San diego, CA: 508.
 Chaudhry, M.H. (1993). *Open Channel Flow*. Prentice Hall, p. 483.
 Choi, C.H., Choi, D.G., Choi, H.I., Kim, K.H., and Kim,

- S.D. (2012a). "Development of a Grid-Based Daily Land Surface Temperature Prediction Model considering the Effect of Mean Air Temperature and Vegetation." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 28, No. 1, pp. 137-147.
- Choi, D.G., Choi, H.I., Kim, K.H., and Kim, S.D. (2012b). "Development of Ecohydrologic Model for Simulating Water Balance and Vegetation Dynamics." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 28, No. 4, pp. 582-594.
- Cuo, L., Giambelluca, T.W., and Ziegler, A.D. (2011). "Lumped parameter sensitivity analysis of a distributed hydrological model within tropical and temperate catchments." *Hydrological Processes*, Vol. 25, pp. 2405-2421. doi: 10.1002/hyp.8017
- Elias, E.A., Cichota, R., Torriani, H.H., Lier, Q., and van de J. (2004). "Analytical soil-temperature model correction for temporal variation of daily amplitude." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 68, No. 3, pp. 784-788.
- Fekete, B.M., Vörösmarty, C.J., and Lammers, R.B. (2001). "Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: Development, analysis, and control of error." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 7, pp. 1955-1967.
- Fu, B.P. (1981). "On the calculation of the evaporation from land surface." *Scientia Atmospherica Sinica*, Vol. 5, pp. 23-31.
- Harris, R.N. (2007). "Variations in air and ground temperature and the POM-SAT model: results from the Northern Hemisphere" *Climate of the Past*, Vol. 3, pp. 611-621.
- Huxman, T.E., Smith, M.D., Fay, P.A., Knapp, A.K., Shaw, M.R., Loik, M.E., Smith, S.D., Tissue, D.T., Zak, J.C., and Weltzin, J.F. (2004). "Convergence across biomes to a common rain-use efficiency." *Nature*, Vol. 429, No. 6992, pp. 651-654.
- Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N., McKnight, D.M., Naiman, R.J., Postel, S.L., and Running, S.W. (2001). "Water in a changing world." *Ecological Applications*, Vol. 11, pp. 1027-1045.
- Jensen, J.R. (2000). Remote sensing of the environment: An earth resource perspective, Prentice Hall.
- Ji, Z.G. (2008). *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lake, and estuaries*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, U.S. pp. 471-472.
- Kang, S., Kim, S., Oh, S., and Lee, D. (2000). "Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature." *Forest Ecology and Management*, Vol. 136, pp. 173-184.
- Kim, E.H., Kang, S.K., Lee, B.R., Kim, K.H., and Kim, J. (2007). "Parameterization and Application of Regional Hydro-Ecologic Simulation System (RHESys) for Integrating the Eco-hydrological Processes in the Gwangneung Headwater Catchment" *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology*, Vol. 9, No. 2, pp. 121-131
- Kouwen, N., Soulis, E., Pietroniro, A., Donald, J., and Harrington, R. (1993). "Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling." *Journal of Water Resource Planning Management*, Vol. 119, No. 3, pp. 289-305. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:3(289)
- Kozłowski, T.T., and Pallardy, S.G. (1997). *Physiology of Woody Plants*, Academic Press, San Diego.
- Lee, B.R., Kang, S.K., Kim, E.S., Hwang, T.H., Lim, J. H., and Kim, J. (2007). "Evaluation of a Hydro-ecologic Model, RHESys (Regional Hydro Ecologic Simulation System): Parameterization and Application at two Complex Terrain Watersheds." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 9, No. 4, pp. 247-259
- Lei, S., Daniels, J.L., Bian, Z., and Wainaina, N. (2011). "Improved soil temperature modeling." *Environmental Earth Science*, Vol. 62, No. 6, pp. 1123-1130.
- Liston, G.E., Sud, Y.C., and Wood, E.F. (1994). "Evaluating GCM land surface hydrology parameterization by computing river discharges using a runoff routing model." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, pp. 394-405.
- Mahrer, Y., and Katan, J. (1981). "Spatial soil temperature regime under transparent polyethylene mulch: numerical and experimental studies." *Soil Science*, Vol. 131, pp. 83-87.
- Marshall, T.J., Holmes, J.W., and Rose, C.W. (1996). *Soil physics*, 3rd edition, Cambridge University Press, New York, NY.
- Mihalakakou, G. (2002). "On estimating soil surface temperature profiles." *Energy Build*, Vol. 34, pp. 251-259.
- Miller, J., Russel, G., and Caliri, G. (1994). "Continental

- scale river flow in climate models." *Journal of Climate*, Vol. 7, pp. 914-928.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- 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.
- Olivera, F., Lear, M.S., Famiglietti, J.S., and Asante, K. (2002). "Extracting Low Resolution River Networks from High-Resolution Digital Elevation Models." *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 11, pp. 131-138, doi: 10.1029/2001WR000726.
- Ott, M., Su, Z., Schumann, A.H., and Schultz, G.A. (1991). "Development of a distributed hydrological model for flood forecasting and impact assessment of land-use change in the International Mosel river basin." *In Proc. of the Vienna Symposium IAHS Pub* (No. 201).
- Overgaard, J., Rosbjerg, D., and Butts, M.B. (2006). "Land-surface modelling in hydrological perspective—a review." *Biogeosciences*, Vol. 3, pp. 229-241.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145.
- Pike, J.G. (1964). "The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate." *Journal of Hydrology*, Vol. 2, pp. 116-123.
- Quevedo, D.I., and Francés, F. (2008). "A conceptual dynamic vegetation-soil model for arid and semiarid zones." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 12, pp. 1175-1187.
- Raina, R. (2004). *Development of a cell-based stream-flow routing model*. Dissertation, Texas A&M University, Texas, U.S.
- Rodriguez-Iturbe, I. (2000). "Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics." *Water Resource Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 3-9, doi: 10.1029/1999WR900210.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Porporato, A. (2004). *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems*. Cambridge University Press, New York.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L., and Verma, S.B. (1983). *Microclimate: The Biological Environment*, 2nd ed., Wiley, New York, NY.
- Shin, H.J., Park, M.J., and Kim, S.J. (2012). "Evaluation of Forest Watershed Hydro-Ecology using Measured Data and RHESSys Model-For the Seolmacheon Catchment-." *Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 1293-1307
- Sivapalan, M., Yaeger, M.A., Harman, C.J., Xu, X., and Troch, P.A. (2011). "Functional model of water balance variability at the catchment scale. 1: Evidence of hydrologic similarity and space-time symmetry." *Water Resources Research*, Vol. 47, W02522, doi:10.1029/2010WR009568.
- Thunholm, B. (1990). "A comparison of measured and simulated soil temperature using air temperature and soil surface energy balance as boundary condition." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 53, pp. 59-72.
- Vörösmarty, C.J., Moore III, B., Grace, A., Gildea, M., Melillo, J., Peterson, B., Rasteller, E., and Steudler, P. (1989). "Continental-scale model of water balance and fluvial transport: An application to South America." *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 3 pp. 241-265.
- Wagner, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., and Woods, R.A. (2007). "Catchment classification and hydrologic similarity." *Geography Compass*, Vol. 1, No. 4, pp. 901-931, doi:10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x.
- Widén-Nilsson, E., Halldin, S. and Xu, C. (2007). "Global water-balance modelling with WASMOD-M: Parameter estimation and regionalisation." *Journal of Hydrology*, Vol. 340, pp. 105-118.
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H.S., Western, A.W., and Briggs, P.R. (2004). "A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 40, W02502, doi:10.1029/2003WR002710.
- Zheng, D., Hunt, Jr., R., and Running, S.W. (1993). "A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications." *Climate Research*, Vol. 2, pp. 183-191.

논문번호: 13-053	접수: 2013.06.25
수정일자: 2013.09.03/09.22	심사완료: 2013.09.22