

물수지와 에너지수지 해석에 따른 수문기상성분 평가 Evaluation of Hydrometeorological Components Simulated by Water and Energy Balance Analysis

지 희 숙* / 이 병 주** / 남 경 엽*** / 이 철 규**** / 정 현 숙*****

Ji, Hee Sook / Lee, Byong Ju / Nam, Kyung Yeub / Lee, Chul kyu / Jung, Hyun Sook

Abstract

The objective of this study is to evaluate TOPLATS land surface model performance through comparison of results of water and energy balance analysis. The study area is selected Nakdong river basin and high resolution hydrometeorological components of which spatio-temporal resolution is 1 hr and 1 km are simulated during 2003 to 2013. The simulated daily and monthly depth of flows are well fitted with the observed one on Andong and Hapcheon dam basin. In results of diurnally analysis of energy components, change pattern throughout the day of net radiation, latent heat, sensible heat, and ground heat under energy balance analysis have higher accuracy than ones under water balance analysis at C3 and C4 sites. Especially, root mean square errors of net radiation and latent heat at C4 site are shown very low as 22.18 W/m² and 7.27 W/m², respectively. Mean soil moisture and evapotranspiration in summer and winter are simulated as 36.80%, 33.08% and 222.40 mm, 59.95 mm, respectively. From this result, when we need high resolution hydrometeorological components, energy balance analysis is more reasonable than water balance analysis. And this results will be used for monitor and forecast of weather disaster like flood and draught using spatial hydrometeorological information.

Keywords : TOPLAST model, land surface model, energy balance, nakdong river basin

요 지

본 연구는 TOPLATS 지표해석모형의 물수지와 에너지수지 해석에 따른 수문기상성분 비교를 통해 그 적용성을 평가하는데 목적이 있다. 대상지역은 낙동강유역을 선정하였으며 2003~2012년에 대해 1시간, 1 km의 고해상도 수문기상성분을 산출하였다. 안동댐과 함천댐유역의 관측 일/월단위 댐유입량과 모의유량 비교하여 두 유역의 모의치가 관측값과 유사함을 보였다. 또한 C3와 C4지점의 에너지성분에 대한 Diurnally 분석을 수행한 결과 에너지수지 해석에 따른 순복사량, 현열, 잠열의 일중 변화패턴이 물수지 결과에 비해 정확도가 높은 것으로 나타났다. 특히 C4지점의 순복사량과 잠열의 평균계급근 오차는 각각 22.18 W/m²와 7.27 W/m²로 매우 낮게 나타났다. 여름철과 겨울철의 계절평균 토양수분과 증발산량은 각각

* 연구원, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (email: sookkool@korea.kr)
Researcher, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

** 교신저자, 책임연구원, 기상기술개발원 (email: bjlee0704@gmail.com, Tel: 02-7850-6830)
Corresponding Author, Senior Scientist, Center of Atmospheric science & Earthquake Research, Seoul 121-835, Korea

*** 기상연구사, 국립기상연구소 응용기상연구과 (email: kynam@korea.kr)
Researcher, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

**** 기상연구관, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (email: chulkyu.lee@korea.kr)
Researcher, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

***** 과장, 국립기상연구소 응용기상연구과 (email: hsjung@kma.go.kr)
Manager, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

36.80%, 33.08%와 222.40 mm, 59.95 mm로 산정되었다. 이상의 결과로부터 고해상도의 수문기상성분 모의 시 에너지수지 해석방법을 이용하는 것이 더 합리적인 것으로 판단되며 본 연구 결과는 공간수문기상정보를 활용한 홍수 및 가뭄 등의 재해기상 감시 및 예측에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : TOPLATS모형, 지표해석모형, 에너지수지, 낙동강유역

1. 서론

최근 기후변화의 영향으로 홍수와 가뭄을 유발시키는 위험기상이 빈번하게 발생하고 있으며 이러한 위험기상을 사전에 감지하기 위해서는 토양수분, 증발산량과 같은 수문기상성분을 파악하는 것이 중요하다. 광범위한 대상유역의 수문기상성분은 관측을 통해 파악하기에는 한계가 있기 때문에 그 대안으로 분포형 지표해석모형(land surface model)을 이용하는 방법이 있다(Lee and Choi, 2012). 또한 기상모델의 모의과정에서 지표해석에 대한 중요성이 높아지면서 지표해석모형에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다.

물 순환과정의 구성요소 중 하나인 증발 및 증산과정은 지표면과 대기 사이의 에너지평형으로부터 이루어지며 이러한 지표면과 대기 사이의 에너지교환 현상을 풀어내는 방법으로는 물수지 방법(Water budget method)과 에너지수지 방법(Energy budget method) 등이 있다(Yoon, 2007). 물수지 해석방법은 지표면을 기준으로 유입되는 강수량과 지표에서 빠져나가는 유출량을 고려하여 증발산 현상을 해석하는 방법이며, 에너지수지 해석방법은 지표면으로의 유입 및 지표면에서 유출되는 에너지를 고려한 에너지 보존원리를 적용하는 것으로 지표면에 존재하는 에너지 플럭스의 연속방정식을 풀어서 증발산량과 토양수분 등의 수문기상성분을 산정하게 된다.

한편, 지표해석모형의 수문기상성분 생산 및 평가에 대한 국외사례를 살펴보면, 미국 국립우주항공국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)에서 운영하는 Land Data Assimilation System (LDAS)에서는 MOSAIC (Koster and Suarez, 1994; Koster et al., 2000), Noah (Chen et al., 1997; Betts et al., 1997; Ek et al., 2003), VIC (Liang et al., 1994; Wood et al., 1997), SAC (Burnash et al., 1973)의 4개 지표해석모형을 이용하여 전지구와 북미 전역에 대해 모델기반의 토양수분, 지표유출량, 증발산량을 생산하고 그 결과를 가뭄감시 및 예측에 활용하고 있다. 또한 NWS의 RFC (River Forecast Center)에서는 돌발홍수 예측과정에서 토양수분모의를

위해 SAC 모형을 이용하고 있다. TOPLATS 모형 (Famiglietti and Wood, 1994)을 이용하여 관측 에너지성분과의 비교분석을 통해 모형의 적용성을 검토한 바 있으며(Pauwels and Wood, 1999; Crow et al., 2004), 토양수분과 에너지성분의 공간분포특성을 분석한 사례(Peters and Wood, 2001; Crow et al., 2005)가 있다. 또한 Sridhar et al. (2002)은 오클라호마 지역의 플릭스타워 관측자료를 이용하여 NOAA 지표해석모형 기반 에너지성분을 평가하였다. Pauwels et al. (2008)은 물수지와 에너지수지 분석을 통해 토양수분은 물수지 해석에 따른 결과 값이 더 합리적이며, 에너지성분은 에너지수지 해석에 따른 모의치가 더 합리적인 것으로 평가하였다.

국내에서는 지표해석모형과 관련하여 대기대순환모형과 지표해석모형 접합결과의 분석을 통한 해석능력의 향상(Kim et al., 2005), VIC모형의 국내 적용성 평가(Son et al., 2010), UM의 지표경계조건 변화에 따른 단기예보결과 분석(Gang and Seo, 2011), NOAA 지표해석모형 기반의 Korea LDAS 구축 및 수치모델과의 연계를 통한 정확도 향상능력 평가(Lim et al., 2012)에 대한 연구 등이 있다. Lee and Choi (2012)는 안동댐유역에 대해서 TOPLATS 모형 기반 수문기상정보를 산출하고 관측자료를 이용하여 평가를 수행하였으며 Kim et al. (2013)은 통합수문모형인 Common Land Model로부터 순복사량 등의 에너지성분을 산정하여 분석한 사례가 있다.

국내·외 대다수 연구에서는 물수지 해석을 통한 수문기상성분 산정에 관하여 다루고 있으며 에너지수지 해석을 적용한 수문기상성분의 평가 및 물·에너지수지 해석방법에 따른 수문기상성분의 비교분석에 관한 연구는 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 물수지와 에너지수지 해석이 모두 가능한 TOPLATS (TOPmodel-based Land Atmosphere Transfer Scheme) 지표해석모형을 이용하여 단위격자별 수문기상성분의 산정 및 관측 에너지플럭스 자료를 통해 모의결과를 평가하고 물수지와 에너지수지 해석에 따른 모의 수문기상성분을 비교·분석하고자 한다.

2. TOPLATS 모형 이론

TOPLATS (TOPographically-based Land Atmosphere Transfer Scheme)은 TOPMODEL 모형(Beven and Kirby, 1979)을 기반으로 한 분포형 지표해석모형으로 Famiglietti and Wood (1994)에 의해 개발되었다. 이 모형은 물수지와 에너지수지를 통해 단위격자에 대한 실제증발산량, 지표 유출량, 토양수분량, 지하수면깊이, 순복사량, 잠열, 현열, 지열을 모의한다. 토양층을 중심으로 물수지 성분의 거동은 Fig. 1과 같다.

TOPLATS 모형은 토양층을 근권역(root zone; RZ)과 투수권역(transmission zone; TZ)의 두 층으로 구분한다. 단위격자에 대해서 지표면에서 지하수면깊이(Z_{wtl})에 해당하는 비포화대(unsaturated zone)에서 시간에 따른 토양수분 변화량은 Eq. (1)과 같다. 식에서 θ 는 토양수분량(mm), I 는 침투량(m/s), Q_v 는 중력배수량(m/s), AET 는 실제증발산량(m/s), dt 는 모의시간간격을 의미한다.

$$\Delta\theta = (I - Q_v - AET) \cdot dt \quad (1)$$

침투량(I)은 Eq. (2)와 같이 단위시간동안 지표면에 떨어진 강우량이 토양 침투능(infiltration capacity)보다 적은 경우에는 강우량과 같고 초과하는 경우에는 침투능과 같으며 이때 침투능을 초과하는 강우량은 지표유출량으로 간주된다. 침투능은 Millly (1986)이 제안한 Eq. (3)으로부터 산정된다. 식에서 i_c 는 토양 침투능(m/s), c 는 무차원 상수, K_s 는 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity)(m/s), S 는 수축계수(sorptivity), I_c 는 누적침투량(m)이다.

$$I = \begin{cases} i_c & ; i_c \leq P \\ P & ; i_c > P \end{cases} \quad (2)$$

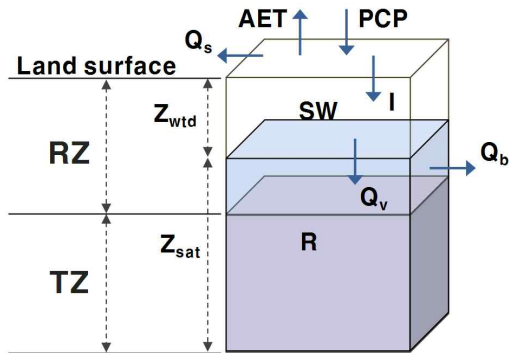


Fig. 1. Schematic Diagram of Water Movement (Lee and Choi, 2012)

$$i_c(I_c) = cK_s \left(1 + \left(\left(1 + \frac{4cK_s I_c}{S^2} \right)^{0.5} - 1 \right)^{-1} \right) \quad (3)$$

중력배수량은 근권역에서 투수층으로 배수되는 양이며 Eq. (4)로부터 산정할 수 있다. 식에서 Q_v 는 중력배수량(m/s), K_s 는 포화수리전도도(m/s), θ 는 현시점 토양수분비, θ_r 은 잔여토양수분량(residual soil moisture), θ_s 은 포화토양수분비, B 는 공극크기분포지수(Brooks-Corey pore size distribution index)이다.

$$Q_v = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{2+3B}{B}} \quad (4)$$

포화대(saturated zone)로의 지하수함양량(recharge)은 유역단위 물수지 방정식으로부터 산정되며 관계식은 Eq. (5)와 같다. 식에서 \bar{R} , \bar{Q}_v , \overline{AET}_{wt} 는 각각 유역평균 지하수함양량(m), 침투량(m/s), 포화대의 실제증발산량(m/s), \bar{Q}_b 는 유역의 기저유출량(m³/s), A 는 유역면적(m²)을 의미한다.

$$\Delta \bar{R} = (\bar{Q}_v - \overline{AET}_{wt} - \bar{Q}_b/A) \cdot dt \quad (5)$$

Q_b 는 포화대에서 빠져나가는 기저유출량(m/s)을 의미하며 Sivaplan et al. (1992)이 제안한 Eq. (6)으로부터 산정된다. 식에서 Q_0 는 해당유역의 최대기저유출량(m³/s)이다. 지하수함양량이 토양공극을 초과하는 경우 초과되는 양은 기저유출량으로 간주된다(Eq. (7)).

$$Q_b = \begin{cases} Q_0 e^{-fz} & (\Delta R \leq \theta_p) \\ Q_0 e^{-fz} + Q_z A & (\Delta R > \theta_p) \end{cases} \quad (6)$$

$$Q_z = (\Delta R \times dt - \theta_p) / dt \quad (7)$$

Eq. (5)로부터 유역평균 지하수함양에 대한 변화량이 결정되면 이로 인한 지하수면깊이는 Eq. (8)로부터 갱신된다.

$$\bar{Z}_t = \bar{Z}_{t-1} - \Delta \bar{R} / (\theta_s - \theta) \quad (8)$$

일반적으로 지표면 에너지수지는 Eq. (9)와 같이 표현된다.

$$R_n = LE + H + G + \Delta \quad (9)$$

R_n 은 순복사량(Net Radiation), LE 는 잠열(Latent Heat), H 는 현열(Sensible Heat), G 는 지열(Ground Heat), Δ 는 에너지저장항을 의미한다. 순복사량은 지표면을 기준으로 하향과 상향의 전 복사량의 차, 즉 지표가 받게 되는

최종 복사에너지이며 현열은 상태변화 없이 온도를 변화 하는데 출입되는 열로 대기를 데우는데 필요한 에너지이다. 잠열은 증발이 일어날 때 필요한 에너지이며 지열은 흙, 바위 등과 같은 모체에 의한 전도과정에 의해서 땅속으로 전달되는 에너지이다. 에너지저장항은 지표면과 공기층의 공통경계면에 존재하며 경계면에서의 에너지 변화량을 의미한다(S. Pal Arya, 2001). 따라서 Eq. (9)는 지표면과 공기층 사이에 이루어지는 잠열 및 현열 플럭스의 조화와 지표면과 지중 사이에 이루어지는 지열 플럭스에 의해 지면에서 얼마나 순복사량 플럭스가 평형을 이루는지를 설명한다. 수평적으로 평면이며 복사에 대해 불투명한 이상적인 지표면 조건일 경우에는 에너지저장항을 고려하지 않고 순복사량은 잠열, 현열, 지열의 합으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 에너지수지 해석을 통한 모의치는 에너지저장항을 고려하여 산정한다.

한편 TOPLATS 모형은 수문기상성분 중에서도 에너지 성분 모의시 물수지 및 에너지수지 해석방법에 차이가 존재하며 두 방법의 차이는 Table 1과 같다.

순복사량은 물수지방법에서는 순 입사단파복사량과 순 복사장파복사량의 차이로부터 산정되고 에너지수지방법에서는 입사 장·단파복사량, 알베도, 방사율, 지표면온도를 이용하여 산정된다. 잠열의 경우 물수지방법은 잠열강도와 실제증발산량의 곱으로 산정되며 에너지수지방법에서는 Milly(1991)가 제안한 식으로부터 산출된다. 현열은 물수지방법의 경우 Eq. (9)로부터 구해지며 에너지수지방법에서는 지표면과 공기 중의 온도 차이로부터 산정된다.

지열은 해석방법에 따라서 순복사량의 양으로 결정되거나 Xu Liang et al. (1999)이 제안한 방법으로 산정된다.

에너지수지방법에서는 각 에너지성분을 산정하는 식에서 지표면온도(t_l)를 독립변수로 가지며 에너지수지 식에 대입하여 지표면온도에 대해 풀면 음해적인 형태를 가지므로 수치해석 방법을 통해 지표면온도와 이에 따른 에너지성분 값을 얻게 된다. 물수지방법에서는 순복사량과 지열은 FAO방법(Alleu et al., (1998))을 이용하여 산정한 후 모형의 입력자료로 이용하게 된다. 표에서 나타난 물수지 및 에너지수지 해석방법의 차이점으로부터 모의 에너지성분, 실제증발산량, 토양수분 등에 차이가 존재하게 된다.

3. 대상구역 선정 및 모형 입력자료 구축

국립기상연구소에서는 낙동강유역을 대상으로 수문기상 감시를 위하여 토양수분 관측을 포함한 AWS와 플렉스타워를 설치하여 수문기상 관측망을 구축, 시범운영에 있으며 관측자료의 활용을 위하여 본 연구에서는 대상유역을 낙동강유역으로 선정하였다. 낙동강유역은 유역면적은 23,817 km²이며 유로연장은 521.5 km이다. 유역 내에는 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐이 건설되어 운영되고 있으나 한강에 비해 저수용량이 적어 홍수와 가뭄에 취약한 지역이라 할 수 있다. TOPLATS 모형 구축 및 수문기상성분을 위해 낙동강 유역을 Fig. 2와 같이 43개 소유역으로 분할하였다.

Table 1. Equations of Energy Components on Water and Energy Balance Analysis

Energy Components	Water Balance	Energy Balance
Net Radiation	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$	$R_n = R_{sd}(1 - \alpha) + R_{ld} - \epsilon \sigma t_l^4$
Latent Heat	$LE = \rho_w L \times AET$	$LE = \frac{\rho_{air} c_p}{\gamma(r_{av} + r_s)} (vp_{sat} - vp_{za})$ (Milly (1991)) $vp_{sat} = 611 \times e^{\left(\frac{17.27 \times t_l}{273.3 + t_l}\right)}$ $vp_{za} = 611 \times e^{\left(\frac{17.27 \times t_{dw}}{273.3 + t_{dw}}\right)}$
Sensible Heat	$H = R_n - LE - G$	$H = \frac{\rho_{air} c_p}{r_{ah}} (t_l - t_{za})$
Ground Heat	$G = \begin{cases} 0.1 R_n & (\text{Daylight period}) \\ 0.5 R_n & (\text{Nighttime period}) \end{cases}$	<i>Xu Liang Fomular</i> (Xu Liang et al. (1999))

R_{ns} : Incoming net shortwave radiation (W/m²), R_{nl} : outgoing net longwave radiation (W/m²), α : Albedo, σ : Stefan-bolman constant
 R_{sd} : Incoming short wave radiation (W/m²), R_{ld} : Incoming long wave radiation (W/m²), ϵ : Emissivity t_l : Skin temperature (°C), ρ_w : Water density (kg/m³), L : Latent heat intensity (J/kg), AET : Actual evapotranspiration (m/s), ρ_{air} : Air density (kg/m³), c_p : Specific heat (J/kgK), γ : Humidity constant (Pa/K), r_{av} : Aerodynamic resistance to vapor flow (s/m), t_{dw} : Dew point temperature (°C), t_{za} : Air temperature (°C), r_{ah} : Aerodynamic resistance to heat flow (s/m), vp_{sat} : saturated vapor pressure (Pa), vp_{za} : vapor pressure of observation height (Pa)

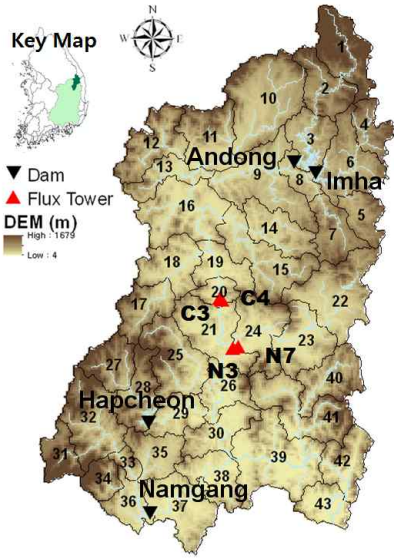


Fig. 2. Sub-basin Boundary and Flux Tower Site on Study Area

TOPLATS 모형은 분포형 모형이므로 격자단위의 입력자료를 요구하며 본 연구에서는 대상유역에 대하여 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 격자에 대한 시간위 수문정보를 생산하고자 한다. 이를 위해 모형에 필요한 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 대기압 등의 시간위 기상자료를 구축하였다. 강수량 자료는 기상청에서 운영하고 있는 AWS 관측소 중 낙동강 유역 내 2002~2012년에 대해 자료를 보유하고 있는 83개소에 대한 자료를 수집하였다. 강수량을 제외한 기상자료는 기상청에서 운영하는 ASOS 관측소 16개소로부터 구축하였으며 자료수집기간은 강수량자료와 동일하다. 관측소로부터 수집한 자료는 각 지점에 해당하는 자료이므로 공간내삽법을 적용하여 격자자료로 변환해야하며 본 연구

에서는 역거리가중법(inverse distance weight method)을 이용하여 지점자료를 격자자료로 변환하였다.

기상조건에 대한 지표에서의 정확한 모의를 위해서는 대상지역의 지형특성을 정확하게 반영하는 것이 필요하며 이를 위해 본 연구에서는 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 의 동일한 해상도로 지형자료를 구축하였다. 토지피복도는 환경부에서 구축한 중분류 토지피복도를 이용하였으며 토양도는 국립농업과학원에 제공하는 정밀토양도를 이용하여 토양통을 11개의 범용토성(universal soil texture)으로 재분류하였다. 대상지역에는 8개의 토성이 형성되어 있는 것으로 조사되었으며 사질양토(38.10%)와 양토(32.68%), 미사질양토(22.03%)가 90% 이상 분포되어 있는 것으로 나타났다. 낙동강 유역은 대부분의 토지피복형태가 산림 82%, 논 10%로 분포되어 있는 것으로 조사되었다. Fig. 3(a) and 3(b)는 본 연구에서 구축한 토지피복도와 토양도를 나타낸 것이다. 지형지수는 국토해양부에서 제공하는 수치표고도(digital elevation model)로부터 경사도, 흐름방향, 흐름누적에 대한 정보를 산출하여 산정하였다(Fig. 3(c)). 대상유역에서 지형지수는 10~22의 범위에서 분포하는 것으로 나타났다. 투수량계수는 포화대 내에서 단위폭 당 물의 투수능력을 의미하며 Fig. 3(d)는 투수량계수(m^2/h) 산정결과이다. 하천에서 토양의 포화수리전도도가 높기 때문에 투수량계수도 높은 것으로 나타났으며 투수량계수는 $0 \sim 0.78 \text{ m}^2/\text{h}$ 범위에서 분포하는 것으로 조사되었다.

앞서 언급된 4가지 주제도에 대한 격자단위의 값들이 모형에 입력되며 식생피복과 토양 관련 변수는 각 항목에 대한 look-up table 형태로 입력된다. 식생과 관련된 주요 변수는 엽면적지수(leaf area index), 조도길이(roughness length), 영면변위(zero plane displacement) 등이 있으며

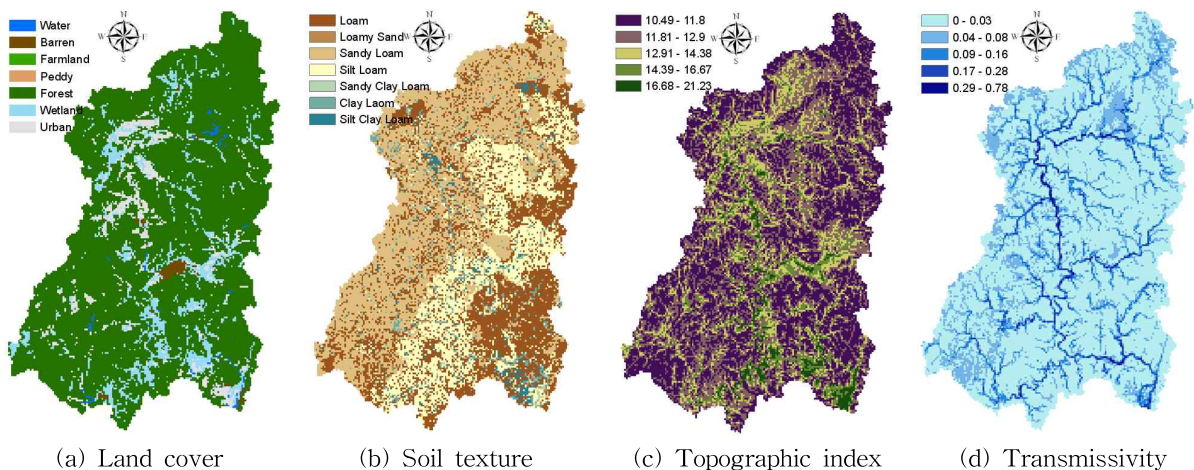


Fig. 3. Geomorphologic Data on Nakdong River Basin

각 토지피복에 따른 변수값은 NASA LDAS (<http://ldas.gsfc.nasa.gov/ldas>)에서 제공하는 값을 적용하였다. 토양과 관련된 변수는 기포압력수두, 공극분포지수, 포화수리전도도, 공극비 등이 있으며 이들 변수는 Rawls et al. (1982)과 Rawls et al. (1998)의 결과를 이용하였다.

4. 물수지와 에너지수지 방법별 결과 검증

4.1 유출량

TOPLATS 모형은 단위격자별 수문기상성분을 모의하는 모형이므로 모의값을 평가하기 위해서는 이와 동일한 물리적 의미를 갖는 관측값이 있어야 한다. 그러나 단위격자별 시단위 관측값은 존재하지 않으므로 격자단위에서 유역단위로 평가지역의 확장이 필요하다(Lee and Choi, 2012). 본 연구에서는 TOPLATS 모형의 검증에 위하여 2003~2012년 동안의 고해상도 수문기상성분을 산출하였으며 동일기간의 낙동강유역에 위치한 2개의 댐 관측 유입량을 이용하였다. TOPLATS 모형은 하도추적과정이 없기 때문에 유역 내 흐름에 대한 지체효과를 배제하기 위해 유역경계 내의 격자별 시단위 유출발생량을 일 및 월단위 유역평균 유출발생량으로 변환하여 평가를 수행하였다.

평가지점은 낙동강유역 상류와 중류에 위치한 안동댐(1,591 km²)과 합천댐(931 km²) 유역을 채택하였다. 평가방법은 보정기간(2003~2007년)에 대해 추정된 매개변수를

검정기간(2008~2012년)에 그대로 적용하여 평가하는 방법을 채택하였다. 매개변수 보정은 시단위로 수행되었으며 보정기간에 대해 시행착오법(trial and error method)를 이용하여 매개변수를 추정하였다.

Fig. 4는 TOPLATS 모형의 물수지 및 에너지수지 해석에 따른 월단위 모의유출고와 관측유출고를 도시한 것이다. 두 방법에 따른 유출고는 큰 차이를 보이지 않으며 관측치와 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 안동댐과 합천댐의 관측 연평균 유출고는 각각 678.04 mm, 1,068.59 mm이며 물수지와 에너지수지에 따른 모의유출고는 각각 670.70 mm, 648.28 mm와 841.14 mm, 863.39 mm로 산정되었다. 안동댐유역에 대한 모의값은 관측치와 유사하나 합천댐유역의 모의값은 관측치와 200 mm 이상의 큰 차이를 보였다. 합천댐의 관측 연평균 유출률은 연평균 강수량 1,498.02 mm를 기준으로 71.33%에 해당하며 이는 통상 50~60%의 연평균 유출률을 감안할 때 매우 높은 수치라 할 수 있다. 따라서 결과적으로는 모의유출고는 관측치에 비해 과소추정 되었다고 볼 수 있으나 모델입력자료로 이용된 강수량과 관측유입량에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

안동댐과 합천댐의 유역규모를 고려할 때 일단위 유출고에 대한 평가도 가능할 것으로 판단되어 Fig. 5와 같이 일단위 유출고에 대한 분석을 수행하였다. 관측치는 일유출량을 유출고로 환산한 값이므로 직접비교에는 한계가 있으나 일부 값을 제외하고 대체로 두 방법 모두 모의치가

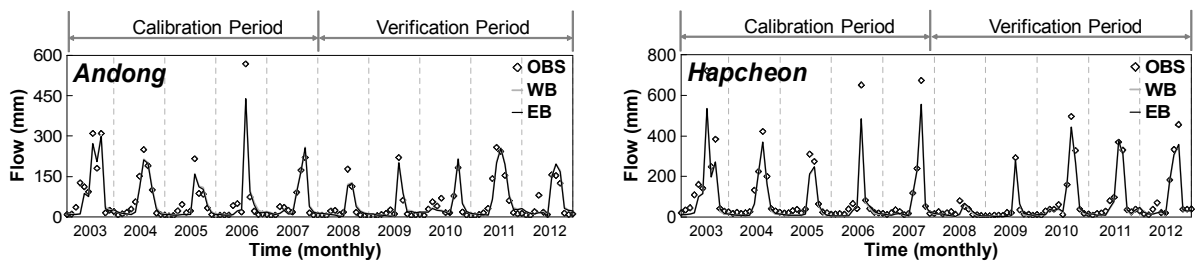


Fig. 4. The Monthly Observed and Simulated Flows (mm) of Water and Energy Balance Analysis

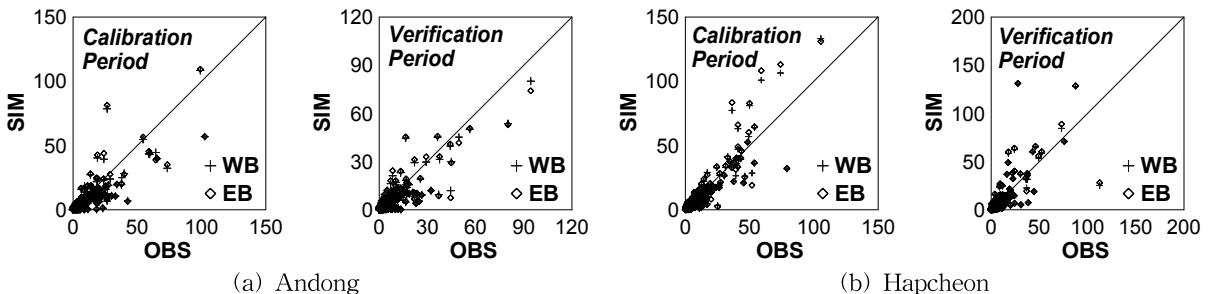


Fig. 5. Scatter Plot of Daily Observed and Simulated Flows (mm) of Water and Energy Balance Analysis

관측치와 잘 대응됨을 알 수 있다. 또한 산정방법에 따라 일유출고는 월 유출고와 달리 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이때 결정계수는 해석방법과 분석기간에 따라 안동댐과 합천댐은 각각 0.743~0.842와 0.635~0.781의 범위를 갖는 것으로 나타나 통계적 평가를 통해서도 적절히 모의됨을 확인하였다.

4.2 에너지플럭스

국립기상연구소에서는 낙동강 유역의 국지기상 관측을 위하여 2011년부터 7월부터 강정보지점(N3, N7)과 칠곡보지점(C3, C4)에 플렉스타워 각 2소를 설치하여 운영 중에 있으며 잠열, 현열, 지열, 이산화탄소, 수증기 플럭스, 3차원 풍향 풍속, 순복사량 등을 관측하고 있다(National Institute of Meteorological Research, 2011). 본 연구에서는 이러한 관측 자료를 이용하여 모의에너지 성분들에 대한 정확도 평가를 수행하였다.

관측 에너지플럭스는 에디공분산 방법을 통해 측정이 이루어지고 있다. 에디공분산 방법은 난류 플럭스를 직접 측정하는 방법으로 10 Hz 이상의 고 시간분해능의 시계열 자료와 Eq. (10)을 이용하여 산정할 수 있다. 식에서 w 는 연직속도성분, c 는 운동량이나 기온과 같은 변수를 의미한다. 이 식은 정상상태(stationary state) 하에서 적용 가능한 식이므로 가급적 풍속이 낮은 맑은 날에 적용하는 것이 바람직하다.

$$F_c = \overline{w'c'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \bar{w})(c_k - \bar{c})] \quad (10)$$

본 연구에서는 평가지점에서 가장 근접한 대기기상대의 일운량이 2 이하인 날을 맑은 날로 규정하여 분석을 수행하였다. N3과 N7 지점은 에너지수지에 대한 오차가 커 평가지점에서 제외하였다. 2011년 7월부터 2012년 3월까지의 분석기간 내 운량이 2 이하인 날은 54일(1,296시간)이었으며 C3지점은 2012년 1~2월동안 결측으로 조사되어 배제하였으며 분석기간은 27일(648시간)이다. 관측 에너지성분의 경우 결측 및 이상치에 대한 품질관리(Hong et al., 2009)와 에너지수지를 만족하도록 Bowen-ratio closure법(Twine et al., 2000)을 이용한 보정을 수행하였다.

일반적으로 에너지성분은 일중 변화가 일정한 패턴을 가지기 때문에 시계열 자료의 비교분석보다 일중 시간에 따른 변화를 볼 수 있는 Diurnally 분석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다.

C3지점의 경우 모의치가 전체적으로 관측치에 비해 과소추정 되었는데 이는 순복사량이 과소추정 되어 나머지

요소들도 에너지수지에 따라 과소추정 된 것으로 판단된다. 총 분석기간은 2011년 7월1일 여름철부터지만 맑은 날 선정과정에서 대부분의 분석날짜가 겨울에 해당되는 것으로 조사되었다. 따라서 잠열이 $-50 \sim 100 \text{ W/m}^2$ 범위 내에 분포하고 있으며 상대적으로 현열은 $-100 \sim 250 \text{ W/m}^2$ 의 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. C3지점의 관측 잠열은 일 중 변화가 일정하지 않는 것으로 나타나 관측값 품질에 대해서 재고할 필요가 있을 것으로 판단된다. C4지점은 C3지점에 비해 에너지수지 해석에 따른 모의결과가 관측치와 더 유사한 거동을 보였다. 에너지성분 모의값은 C3지점과 동일한 범위 내에 분포하였으며 일중 변화가 뚜렷하게 나타났다. 순복사량과 현열의 일중 변화가 관측치와 거의 동일하였으며 오차도 30 W/m^2 이내로 나타났다. 특히 잠열의 경우 물수지 해석을 통한 모의값은 관측치에 비해 과소추정 되었으나 에너지수지 해석을 통한 모의값은 관측값과 매우 유사한 거동을 보였다.

지열의 경우 두 지점 모두 방법별 모의결과가 관측치와 매우 상이하게 나타났다. C4 지점의 관측치는 일 중 변화가 나타나지 않았으며 0 이하의 값을 갖는 것으로 나타나 관측자료의 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 지열플럭스는 전도과정에 의해서 이동하는 에너지이므로 모형

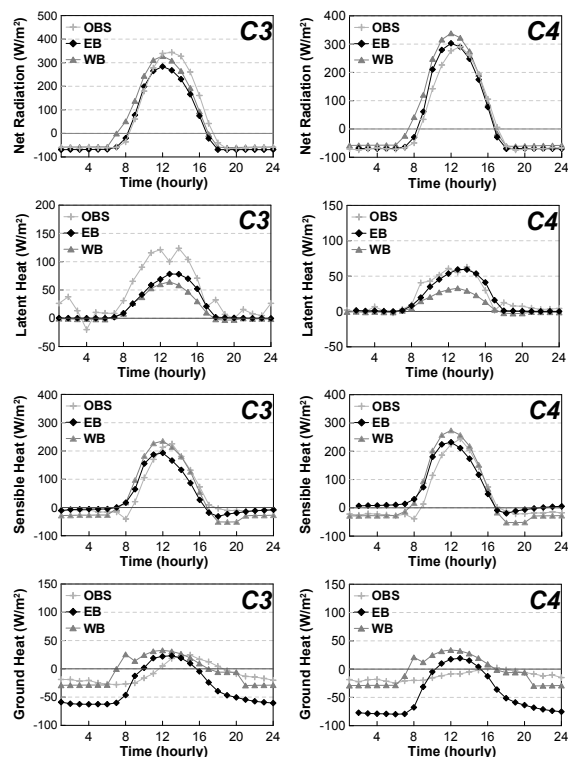


Fig. 6. Comparison of Diurnally Average Observed and Simulated Energy Flux at C3 and C4 Site

을 이용하여 지열 모의 시 실제 지표면 아래 흙, 바위 등의 모체를 구현하는데 한계가 있으므로 관측치와 모의값이 차이가 나는 것으로 사료된다.

유출량 평가와 동일하게 모의 에너지성분에 대한 통계 분석을 수행하였으며 결과는 Table 2와 같다. 평가지표로 평균값과 결정계수, 평균제곱근오차를 이용하였다. 순복사량의 결정계수는 C3지점의 경우 해석방법에 따라 0.94와 0.96로 나타났으며 C4지점은 두 방법 모두 0.98로 나타났다. 잠열의 결정계수는 C3지점이 0.85와 0.90이며 C4지점은 0.93과 0.92로 나타났다. 현열의 경우 C3지점은 해석방법에 따라 0.84와 0.79로 나타났으며 C4지점은 0.85와 0.77로 나타났다. 에너지수지 해석을 통한 모의성분 중 현열을 제외한 결정계수는 물수지 해석을 통한 모의치보다 더 나은 결과를 나타냈다. 현열 플럭스는 지표면 온도와 지표면 바로 위의 공기층의 기온 차이로 발생하는데 관측 및 물수지 해석을 통한 모의 현열플럭스는 공기 중 기온만을 고려하지만 에너지수지 해석을 통한 현열 모의시에는 모든 에너지성분이 평형을 이루는 지표면온도를 고려하기 때문에 상대적으로 결정계수가 낮은 것으로 판단된다. 평균제곱근오차는 C3지점은 에너지수지 해석방법을 통한 모의 순복사량과 현열이 물수지 해석방법을 통한 모의치보다 낮게 나타났다. C4지점은 에너지수지 해석방법에 따른 모의치의 평균제곱근오차가 물수지 해석방법을 통한 모의치보다 더 낮았으며 특히 순복사량의 평균제곱근오차는 22.18 W/m^2 , 잠열의 평균제곱근오차는 7.27 W/m^2 로 나타나 적절하게 모의된 것으로 판단된다. 지열의 경우 관측치와 비교하였을 때 낮은 상관성을 보였으나 에너지수지 해석을 통한 지열플럭스가 더 나은 통계치를 보였다.

유역평균 월 및 일단위 유출발생량에 대해서는 해석방법에 따른 차이가 크지 않으나 Diurnally 분석을 통해 일중 에너지플럭스의 변화를 살펴보면 상대적으로 큰 차이가 남을 확인할 수 있다. 따라서 유역단위 유출량을 모의할 경우는 물수지와 에너지수지 중 어느 방법을 적용하더라도 큰 문제가 없으나 지표면에서의 상세한 에너지플럭스자료가 필요할 경우에는 에너지수지 해석을 통해 획득하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 수문성분의 공간특성 분석

분포형 수문모형은 수문성분 발생량의 공간분포를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 과거 10년(2013~2012년)의 모의결과를 토대로 수문순환의 가장 중요한 요소에 해당하는 토양수분과 증발산량에 대한 발생량을 분석하였다.

Figs. 7 and 8은 에너지수지 해석에 따른 여름철(6, 7, 8월)과 겨울철(12, 1, 2월) 평균 토양수분과 증발산량의 공간분포를 도시한 것이다. 여름철 평균 토양수분비는 36.80%이며 18.2~50.1%의 범위를 갖고 겨울철은 평균 33.08%와 10.1~50.1%의 범위에서 분포하는 것으로 나타났다. 낙동강유역은 사질양토(38.10%)와 양토(32.62%)가 주로 분포하며 공간적으로는 유역 서쪽에 사질양토, 동쪽에 양토가 분포한다(Fig. 3(a)). 사질양토는 포화수리전도도가 매우 높아 빠른 배수로 인해 토양이 함양하는 수분이 작아지므로 유역 서쪽의 토양수분비는 낮게 나타나며 이에 비해 양토의 포화수리전도도는 상대적으로 낮고 기포압력수두가 크기 때문에 계절과 무관하게 동쪽지역은 높은 토양수분비를 나타냈다(Fig. 8).

Table 2. Statistics analysis of Hourly Averaged Energy Flux

Site	Variable	Mean Observations (W/m^2)	Mean Simulations (W/m^2)		R-Squared (-)		RMSE (W/m^2)		Hours
			WB	EB	WB	EB	WB	EB	
C3	Net Radiation	46.78	48.72	22.81	0.94	0.96	44.67	41.57	648
	Latent Heat	27.41	15.66	12.48	0.85	0.90	10.47	27.97	
	Sensible Heat	18.28	30.99	43.09	0.84	0.79	45.38	37.63	
	Ground Heat	-8.70	-3.93	-32.77	0.12	0.52	23.76	33.60	
C4	Net Radiation	21.52	24.80	32.87	0.98	0.98	22.24	22.18	1,296
	Latent Heat	15.29	7.02	12.44	0.93	0.92	11.66	7.27	
	Sensible Heat	25.72	63.01	55.70	0.85	0.77	53.56	48.14	
	Ground Heat	-11.99	-45.23	-35.27	0.25	0.27	48.10	47.19	

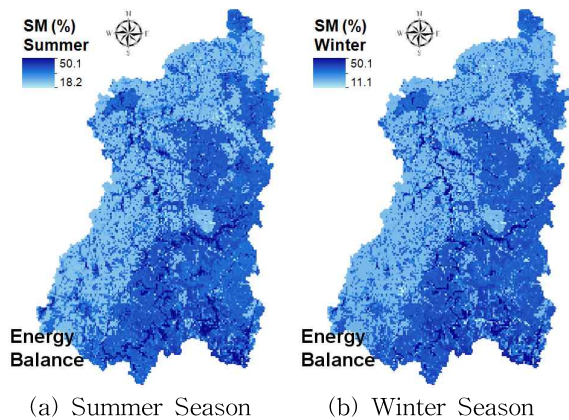


Fig. 7. Seasonal Soil Moisture (%) according to Water and Energy Balance Method during 2003~2012 Years

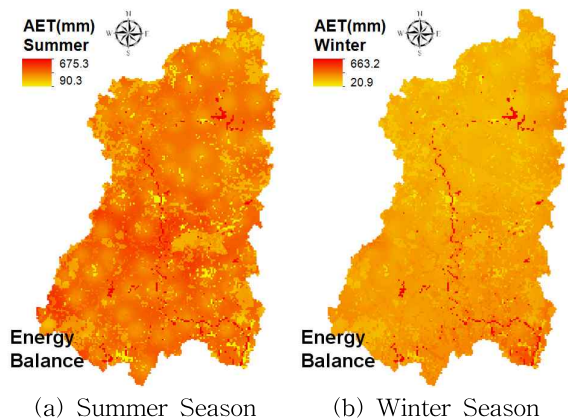


Fig. 8. Seasonal Actual Evapotranspiration (mm) according to Water and Energy Balance Method during 2003~2012 Years

여름철 증발산량은 90~680 mm 범위에서 분포하며 평균 222.40 mm로 나타났다. 잠재증발산량의 조건에 해당하는 수역에서 증발산량이 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 낙동강유역은 활엽수림, 혼효림, 침엽수림이 고르게 분포하며 삼림지역에서의 증발산량은 평균 221.33 mm로 나타났다. 증발산량은 토지피복특성의 영향을 많이 받기 때문에 공간분포도 이와 유사한 양상을 보임을 알 수 있다(Fig. 7). 겨울철 평균 증발산량은 59.95 mm로 여름철에 비해 약 1/4 정도 발생하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 TOPLATS 지표해석모형을 이용하여 물·에너지수지 해석방법을 통한 단위격자별 수문기상성

분을 산정하였으며 에너지플럭스 관측자료를 통해 모의 결과를 평가하고 물수지와 에너지수지 해석에 따른 모의 수문기상성분을 비교·분석하였다. 본 연구에서 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 2003~2012년 동안 낙동강유역에 대하여 1 km 격자의 시단위 수문기상성분을 산출하였으며 댐 관측유입량과 모의유출량 비교하였다. 안동댐과 합천댐 유역에 대하여 평가를 수행하였으며 일 단위 유출량을 비교한 결과 보정기간(2003~2007)과 검증기간(2008~2012)에 대해 해석방법에 따라 모의치의 결정계수는 안동댐유역이 0.743~0.842, 합천댐유역이 0.635~0.781의 범위를 갖는 것으로 나타나 유출모의에 대한 모형의 적용성이 높은 것으로 나타났다.
- 2) 칠곡보지점(C3, C4)의 플럭스타워 관측자료를 이용하여 에너지성분에 대한 Diurnally 분석을 수행하였으며 지열을 제외한 순복사량, 현열, 잠열의 일중 변화패턴이 관측치와 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 에너지수지 해석에 따른 결정계수는 순복사량 0.96~0.98, 잠열 0.90~0.93 범위이며 특히 C4지점의 순복사량의 평균제곱근오차는 22.18 W/m^2 , 잠열의 평균제곱근오차는 7.27 W/m^2 로 나타나 물수지 해석을 통한 방법보다 적절하게 모의된 것으로 판단된다.
- 3) 10년간의 에너지수지 해석결과를 토대로 격자단위 토양수분과 증발산량의 계절별 공간분포 특성을 분석하였다. 여름철과 겨울철에 대한 계절평균 토양수분은 각각 36.80%와 33.08%, 증발산량은 각각 222.40 mm, 59.95 mm로 산정되었다. 또한 장기간의 평균값을 고려할 때 토양수분과 증발산량의 공간분포특성은 기후특성보다 토성과 토지피복 분포특성에 영향을 더 받는 것으로 나타났다.

정확한 에너지성분의 모의는 기상모델과의 접합시 보다 타당한 정보 교환이 가능하므로 수문기상성분 모의시 에너지수지 해석을 통한 방법을 이용하는 것이 더 합리적인 것으로 판단된다. 본 연구는 에너지수지 해석을 통한 지표해석모형 기반의 수문기상성분에 대한 객관성을 확보했다는 점에서 의미가 있으며 추가적으로 평가지점을 확대하여 에너지플럭스 및 토양수분에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “응

용기상 기술개발 연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Allen, R.G., PEREIRA, L.S., Dirk, R., and Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)
- Betts, A., Chen, F., Mitchell, K., and Janjic, Z. (1997). “Assessment of the land surface and boundary layer models in two operational versions of the NCEP Eta model using FIFE data.” *Mon. Weather Rev.*, Vol. 125, pp. 2896–2916.
- Beven, K. (1986). “Runoff production and flood frequency in catchments of order n: an alternative approach. In V.K. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E.F. Wood (Eds.)” *Scale Problems in Hydrology*, Reidel, Dordrecht, pp. 107–131.
- Beven, K., and Kirby, M.J. (1979). “A physically based, variable contributing area model of basin hydrology.” *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43–69.
- Burnash, R.J.C., Ferral, R.L., and McGuire, R.A. (1973). “A generalized streamflow simulation system: Conceptual models for digital computers.” *Technical Report*, Joint Fed.-State River Forecast Cent., U.S. NWS and Calif. Dep. of Water Resour., Sacramento, Calif.
- Chen, F., Janjic, 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, pp. 391–421.
- Crow, W.T., Fuquin, L., and Willian, P.K. (2004). “Inter-comparison of spatially distributed models for predicting surface energy flux patterns during SMACEX.” *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, pp. 941–953.
- Crow, W.T., Ryu, D., and Famiglietti, J.S. (2005). “Upscaling of field-scale soil moisture measurements using distributed land surface modeling.” *Advances in Water Resour.*, Vol. 28, pp. 1–14.
- Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., and Tarpley, J.D. (2003). “Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model.” *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. D22, pp. 8851.
- Famiglietti, J.S., and Wood, E.F. (1994). “Application of multiscale water and energy balance models on a tallgrass prairie.” *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 11, pp. 3061–3078.
- Gang, J.H., and Seo, M.S. (2011). “Impacts of land surface boundary conditions on the short-range weather forecast of UM during summer season over East-Asia.” *Atmospheric, Korea Meteorological Society*, Vol. 21, No. 4, pp. 415–427.
- Hong, J., Kwon, J.H., Lim, J.H., Byun, Y.H., Lee, J., and Kim, J. (2009). “Standardization of Koflux eddy-covariance data processing.” *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, Vol. 11, No. 1, pp. 19–26.
- Kim, D.E., Baek, J.J., Jung, S.W., and Choi, M.H. (2013). “Net radiation estimations using flux tower data and integrated hydrological model: For the Seolmacheon and Chungmichen Watersheds.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 301–314.
- Kim, H.J., Jeong I.W., and Jo, M.S. (2005). “On the coupling of a land surface model to an atmospheric general circulation model.” *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 41, No. 6, pp. 1137–1149.
- Koster, R., and Suarez, M. (1994). “The components of a SVAT scheme and their effects on a GCM’s hydrological cycle.” *Advances in Water Resour.*, Vol. 17, pp. 61–78.
- Koster, R., Suarez, M., and Heiser, M. (2000). “Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales.” *J. Hydrometeorology*, Vol. 1, pp. 26–46.
- Lee, B.J., and Choi, Y.J. (2012). “Evaluation of high-resolution hydrologic components based on TOPLATS land surface model.” *Atmospheric, Korea Meteorological Society*, Vol. 22, No. 3, pp. 357–365.
- 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 GCMs.” *J. Geophys Res.*, Vol. 99, pp. 415–428.

- Liang, X., Wood, E.F., and Lettenmaier, D.P. (1999). "Modeling ground heat flux in land surface parameterization schemes." *J. Geophys Res.*, Vol. 106, pp. 17,893-17,896.
- Lim, Y.J., Byun, K.Y., Lee, T.Y., Kwon, H., Hong, J., and Kim, J. (2012). "A land data assimilation system using the MODIS-driven land data and its application to numerical weather prediction in East Asia, Asia-Pacific." *J. Atmos. Sci.*, Vol. 48, No. 1, pp. 83-95.
- Milly, P.C.D. (1986). "An event based simulation model of moisture and energy fluxes at a bare soil surface." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, pp. 1680-1692.
- National Institute of Meteorological Research. (2011). *Hydrometeorology Research for the Test-bed Resion (I)*.
- Pal, A.S. (2001). *Micrometeorology*, Academic Press.
- Pauwels, V.R.N., and Wood, E.F. (1999). "A soil-vegetations-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes 2. Application and validation." *J. Geophys Res.*, Vol. 104, pp. 27,823-27,839.
- Pauwels, V.R.N., Wim, T., and Alexander, L. (2008). "Comparison of the estimated water and energy budgets of a large winter wheat field during AgriSAR 2006 by multiple sensors and models." *Journal of Hydrology*, Vol. 349, pp. 425-440.
- Peters-Lidard, C.D., Pan, F., and Wood, E.F. (2001). "A re-examination of modeled and measured soil moisture spatial variability and its implications for land surface modeling." *Advances in Water Resour.*, Vol. 24, pp. 1069-1083.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. (1982). "Estimation of soil water properties." *Trans. ASAE*, Vol. 25, No. 5, pp. 1316-1320.
- Rawls, W.J., Giménez, D., and Grossman, R. (1998). "Use of soil texture, bulk density, and the slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity." *Trans. ASAE*, Vol. 41, No. 4, pp. 983-988.
- Sivapalan, M., Beven, K., and Wood, E.F. (1987). "On hydrologic similarity. 2. A scaled model of storm runoff production." *Water Resour. Res.*, Vol. 23, pp. 2266-2278.
- 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.
- Sridhar, V., Elliott, R.L., Chen, F., and Jerald, A.B. (2002). "Validation of the NOAA-OSH Inad surface model usgin surface flux measurements in Oklahoma." *J. Geophys Res.*, Vol. 107, No. D20, pp. 4418.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Noman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P. J., and Wesely, M.L. (2000). "Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 103, No. 2000 pp. 279-300.
- Wood, E.F., Lettenmaier, D.P., Liang, X., Nijssen, B., and Wetzel, S.W. (1997). "Hydrological modeling of continental-scale basins." *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 25, pp. 279-300.
- Yoon, Y.N. (2007). *Hydrology*, CheongmunGak.

논문번호: 13-063	접수: 2013.08.07
수정일자: 2013.10.08/11.11	심사완료: 2013.11.11