

## TOPLATS 지표해석모형 기반의 고해상도 수문성분 평가

이병주\* · 최영진

국립기상연구소 응용기상연구과

(접수: 2012년 6월 18일, 수정: 2012년 8월 30일, 게재확정일: 2012년 9월 2일)

### Evaluation of High-Resolution Hydrologic Components Based on TOPLATS Land Surface Model

Byong-Ju Lee\* and Young-Jean Choi

Applied Meteorological Research Lab., National Institute of Meteorological Research

(Received: 18 June 2012, Revised: 30 August 2012, Accepted: 2 September 2012)

**Abstract** High spatio-temporal resolution hydrologic components can give important information to monitor natural disaster. The objective of this study is to create high spatial-temporal resolution gridded hydrologic components using TOPLATS distributed land surface model and evaluate their accuracy. For this, Andong dam basin is selected as study area and TOPLATS model is constructed to create hourly simulated values in every  $1 \times 1 \text{ km}^2$  cell size. The observed inflow at Andong dam and soil moisture at Andong AWS site are collected to directly evaluate the simulated one. RMSEs of monthly simulated flow for calibration (2003~2006) and verification (2007~2009) periods show 36.87 mm and 32.41 mm, respectively. The hourly simulated soil moisture in the cell located Andong observation site for 2009 is well fitted with observed one at -50 cm. From this results, the cell based hydrologic components using TOPLATS distributed land surface model show to reasonably represent the real hydrologic condition in the field. Therefore the model driven hydrologic information can be used to analyze local water balance and monitor natural disaster caused by the severe weather.

**Keyword:** Hydrologic components, TOPLATS, Land surface model, Soil moisture

## 1. 서 론

위험기상으로 인한 홍수와 가뭄피해를 사전에 감지하기 위해서는 예측강우와 함께 토양수분 분포와 같은 지표에서의 수문현상을 잘 파악하는 것이 중요하다. 지표수문성분은 현장에서 관측을 통해 파악하는 것이 가장 좋겠으나 대상지역이 광범위할 경우 효율성, 경제성 측면에서 한계가 있다. 그 대안으로 분포형 지표해석모형 (distributed land surface model)을 이용하는 방법이 있다. 분포형 지표해석모형은 단위 격자별로 물수지와 에너지수지를 통해 기상조건에 따

른 실제증발산량, 유출량, 토양수분량 등의 수문성분을 모의하는 도구이다. 최근에는 전지구에 대한 지형 정보 구축 및 이용이 보편화되어 이를 통한 수문반응의 공간적 특성을 잘 고려할 수 있고 기상모델의 모의과정에서 지표해석에 대한 중요성이 높아지면서 분포형 지표해석모형에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

지표해석모형의 수문성분 생산에 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 토양

\*Corresponding Author: Byong-Ju Lee, Applied Meteorological Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea.

Phone : +82-70-7850-6830, Fax : +82-2-834-5922  
E-mail : bjlee0704@korea.kr

수분, 지표유출량, 증발산량을 생산하고 그 결과를 가  
 목감시 및 예측에 활용하고 있다. 또한 NWS의 RFC  
 (River Forecast Center)에서는 돌발홍수 예측과정  
 에서 토양수분모의를 위해 SAC 모형을 이용하고 있다.  
 이들 모형 이외에도 TOPLATS 모형 (Famiglietti and  
 Wood, 1994)을 이용하여 토양수분, 에너지성분 (순복  
 사량, 잠열, 현열, 지열)의 공간분포특성을 분석한 사  
 례 (Peters and Wood, 2001; Crow *et al.*, 2005)와 중  
 규모 기상모델인 Lokal Model (Doms and Schättler,  
 1999)과 쌍방향 접합을 통해 기상예측성능이 향상  
 (Seuffert *et al.*, 2002)됨을 보인바 있다.

국내에서는 지표해석모형과 관련하여 대기대순환모  
 형과 지표해석모형의 접합을 통한 민감도분석 (하경  
 자 등, 1998), 대기대순환모형과 지표해석모형 접합결  
 과의 분석을 통한 해석능력의 향상 (김형진 등, 2005),  
 UM의 지표경계조건 변화에 따른 단기예보결과 분석  
 (강전호와 서명석, 2011), Noah 지표해석모형 기반의  
 Korea LDAS 구축 및 수치모델과의 연계를 통한 정  
 확도 향상능력 평가 (Lim *et al.*, 2012)에 대한 연구  
 등이 있다. 다만, 이 과정에서 지표해석모형으로부터  
 모의되는 다양한 지표수문기상성분들의 타당성 평가  
 에 대한 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기상모델과 쌍방향 접합이  
 가능한 TOPLATS 지표해석모형을 국내 유역에 적용  
 하여 고해상도 수문기상정보를 생산하고 관측자료와  
 의 비교를 통해 모의결과에 대한 정확도를 평가해보  
 고자 한다.

## 2. TOPLATS 모형 이론

TOPLATS (TOPmodel-based Land Atmosphere Transfer  
 Scheme)은 Famiglietti and Wood (1994)에 의해 개발된  
 분포형 지표해석모형이다. 이 모형은 물수지와 에너

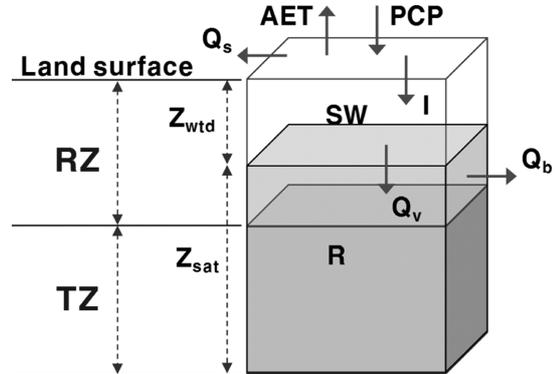


Fig. 1. Schematic diagram of water movement.

지수지를 통해 단위격자에 대한 실제증발산량, 토양  
 수분량, 지하수면깊이, 지표유출량, 잠열, 현열, 지열,  
 순복사량을 모의한다. 토양층을 중심으로 물수지 성  
 분의 거동은 Fig. 1과 같으며 물의 주요거동에 대한  
 산정방법은 Table 1과 같다.

TOPLATS 모형은 토양층을 근권역 (root zone; RZ)  
 과 투수권역 (transmission zone; TZ)의 두 층으로 구  
 분한다. 단위격자에 대해서 지표면에서 지하수면깊이  
 ( $Z_{wt}$ )에 해당하는 비포화대 (unsaturated zone)에서  
 시간에 따른 토양수분 변화량은 식 (1)과 같다. 식에  
 서  $SW$ 는 토양수분량 (mm),  $P$ 는 지표에 도달하는 강  
 수량 ( $ms^{-1}$ ),  $I$ 는 침투량 ( $ms^{-1}$ ),  $Q_v$ 는 침투량 ( $ms^{-1}$ ),  
 $AET$ 는 실제증발산량 ( $ms^{-1}$ ),  $dt$ 는 모의시간간격을 의  
 미한다. 토양이 포화상태 ( $Z_{wt}=0$ )에서는 토양수분의  
 변화는 0이다.

$$\Delta SW = (P - I - Q_v - AET) \cdot dt \tag{1}$$

침투량 ( $I$ )은 식 (2)와 같이 단위시간동안 지표면에

Table 1. Main process and approach of the TOPLATS model.

Process	Approach
Interception	Storage approach: Storage capacity is proportional to leaf area index
Potential evapotranspiration	Penman-Monteith equation (plant specific PET) (Monteith, 1965)
Actual evapotranspiration	Reduction of PET by actual soil moisture status (alternative: solving energy balance equation)
Infiltration	Infiltration capacity after Milly (1986) (depending on soil properties and soil water status)
Runoff	
Infiltration excess	Difference between rainfall rate and infiltration capacity
Saturation excess	Contributing areas derived from TOPMODEL; approach based on the soils topographic index
Percolation	Gravity driven drainage
Water table depth	Soils-topographic index (Sivapalan <i>et al.</i> , 1987) used in the TOPMODEL
Base flow	Exponential decay function used in the TOPMODEL; maximum base flow is base flow at basin saturation

떨어진 강우량이 토양 침투능 (infiltration capacity)보다 적은 경우에는 강우량과 같고 초과하는 경우에는 침투능과 같으며 이때 침투능을 초과하는 강우량은 지표유출량으로 간주된다. 침투능은 Milly (1986)이 제안한 식 (3)으로부터 산정된다. 식에서  $i_c$ 는 토양 침투능 ( $ms^{-1}$ ),  $c$ 는 무차원 상수,  $K_s$ 는 포화수리전도도 (saturated hydraulic conductivity) ( $ms^{-1}$ ),  $S$ 는 수착계수 (sorptivity),  $I_c$ 는 누적침투량 (m)이다.

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

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

침투량 (percolation)은 Beven (1986)이 Darcy 법칙을 이용하여 제안한 식 (4)로부터 산정할 수 있다. 식에서  $Q_v$ 는 침투량 ( $ms^{-1}$ ),  $\alpha$ 는 유효연직동수경사 (effective vertical hydraulic gradient),  $K_s$ 는 포화수리전도도 ( $ms^{-1}$ ),  $f$ 는 기저유출 감수상수 ( $m^{-1}$ ),  $z$ 는 지하수면 깊이 (m)를 의미한다.

$$Q_v = \alpha K_s e^{-fz} \quad (4)$$

TOPLATS 모형은 증발산량 모의과정에서 각 토지 피복형태를 식생유무에 따라 나지와 피복 (습한 피복과 건조한 피복)으로 구분하여 대기조건으로부터 잠재증발산량을 산정하고 그때의 토양수분량을 고려하여 실제증발산량을 산정한다.

포화대 (saturated zone)로의 지하수함양량 (recharge)은 유역단위 물수지 방정식으로부터 산정되며 관계식은 식 (5)와 같다. 식에서  $\bar{R}$ ,  $\bar{Q}_v$ ,  $\bar{AET}_{wr}$ 는 각각 유역평균 지하수함양량 (m), 침투량 ( $ms^{-1}$ ), 실제증발산량 ( $ms^{-1}$ ),  $\bar{Q}_b$ 는 유역의 기저유출량 ( $m^3s^{-1}$ ),  $A$ 는 유역면적 ( $m^2$ )을 의미한다.

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

TOPLATS 모형은 대기조건으로부터 산정된 잠재증발산량 중 토양과 식생으로부터 빠져나간 실제증발산량을 제외한 나머지 양은 포화대에서 증발하는 것으로 간주하며  $\bar{AET}_{wr}$ 는 포화대에서의 증발량 ( $ms^{-1}$ )을 의미한다.  $\bar{Q}_b$ 는 포화대에서 중력배수로 인해 빠져나가는 기저유출량 ( $ms^{-1}$ )을 의미하며 Sivaplan *et al.* (1992)가 제안한 식 (6)으로부터 산정된다. 식에서  $Q_b$ 는 해당유역의 최대기저유출량 ( $m^3s^{-1}$ )이다.

$$Q_b = Q_0 e^{-fz} \quad (6)$$

식 (5)로부터 유역평균 지하수함양에 대한 변화량이 결정되면 이로 인한 지하수면깊이는 식 (7)로부터 산정된다. 식에서  $\theta_s$ 와  $\theta$ 는 각 격자에서의 포화토양 수분비와 현시점의 토양수분비를 의미한다.

$$\bar{Z}_t = \bar{Z}_{t-1} - \Delta \bar{R} / (\theta_s - \theta) \quad (7)$$

TOPLATS 모형에서 토양층 내 지하수면깊이에 대한 거동은 Benven and Kirby (1979)가 개발한 TOPMODEL 모형의 이론과 동일한 방법으로 모의되며 이에 대한 세 가지 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 포화대의 동역학적 거동은 연속적인 정상류 (steady flow) 상태
- 2) 토양층 깊이에 따른 투수량계수 (transmissivity)의 분포는 지수함수 형태
- 3) Darcy 법칙에 따라 포화대의 동수경사 (hydraulic gradient)는 지표면의 경사와 동일

첫 번째 가정에서 유역 내 지하수함양량이 공간적으로 균등하게 발생한다는 가정으로부터, 단위등고선 길이 (unit contour length) 당 지표하 흐름은 식 (8)로부터 산정된다. 식에서  $q$ 는 지표하 흐름 ( $m^2h^{-1}$ ),  $r$ 은 포화대로 유입되는 지하수함양량 ( $mh^{-1}$ ),  $a$ 는 단위등고선길이 당 상류경사면적 ( $m^2m^{-1}$ )을 의미한다. 두 번째 가정으로부터 지하수면깊이에 따른 투수량계수는 식 (9)와 같다. 식에서  $T_0$ 는 포화투수량계수 ( $m^2h^{-1}$ ),  $z$ 는 지표면에서 포화대까지의 지하수깊이 (m),  $f$ 는 지수감수계수 ( $m^{-1}$ )이다. 마지막으로, 세 번째 가정으로부터 경사면에서의 지표하 흐름은 식 (10)으로부터 산정된다. 식에서  $\beta$ 는 지표면경사이다.

$$q = ra \quad (8)$$

$$T = T_0 e^{-fz} \quad (9)$$

$$q = T_0 e^{-fz} \tan(\beta) \quad (10)$$

식 (8)과 식 (10)을 이용하여 해당격자의 지하수면 깊이와 지형지수 (topographic index  $\ln(a/(\tan(\beta)))$ )의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$z = \frac{1}{f} \ln \frac{ra}{T_0 \tan(\beta)} \quad (11)$$

평균지하수면깊이 ( $\bar{z}$ )는 식 (11)을 전체유역에 대해 평균하여 산정할 수 있으며 평균지하수면깊이와 식 (11)을 연계하면 식 (12)와 같이 표현할 수 있다. 따라서 유역 내 임의 지점의 지하수면깊이 ( $z_i$ )는 유

역평균 지하수면깊이 ( $\bar{z}$ )를 기준으로 임의지점의 지형지수와 투수량계수에 대한 각각의 격자와 유역평균값의 차이로부터 산정할 수 있다. 식에서  $\lambda$ 와  $\ln T_e$ 는 각각 유역평균 지형지수와 투수량계수를 의미한다.

$$z_i = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[ \left( \ln \frac{a_i}{\tan(\beta_i)} - \lambda \right) - (\ln T_0 - \ln T_e) \right] \quad (12)$$

### 3. 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 안동댐 상류유역과 그 주변지역을 대상유역으로 선정하였다. 안동댐은 낙동강 본류의 최상류에 위치한 댐으로 낙동강의 유량을 조절하는 역할을 하는 중요한 댐이다. 안동댐 상류유역면적은 1,584 km<sup>2</sup>이다.

본 연구에서는 대상유역에 대해서 1 × 1 km<sup>2</sup> 격자에 대한 시단위 수문정보를 생산하고자 한다. 이를 위해 모형에 필요한 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 대기압의 시단위 자료를 구축하였다. 강수량은 기상청 AWS 관측소, 이외 기상인자는 ASOS 관측소로부터 구축하였다 (Fig. 2). 또한 TOPLATS 모형은 격자형태의 입력자료가 이용되므로 본 연구에서는 역거리가중법 (inverse distance weight method)을 이용하여 지점자료를 격자자료로 변환하였다. 역거리가중법은 거리변수만을 이용하여 내삽하는 방법이기 때문에 지형에 따른 영향을 고려하지 못하는 단점이 있으나 산정방법이 비교적 간단하고 관측소 밀도가 높은 지역

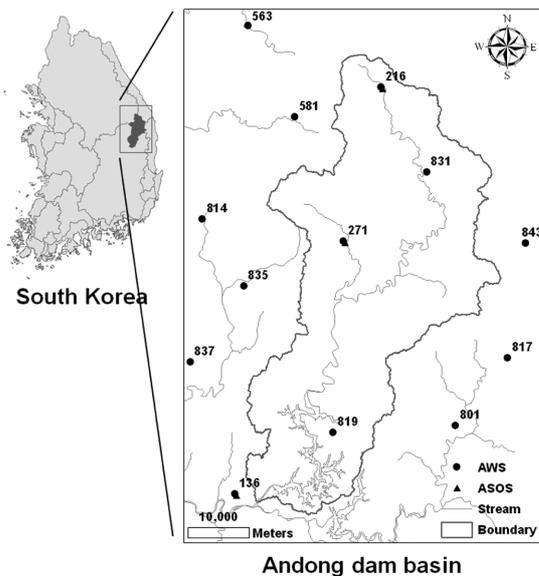


Fig. 2. The study area and the location of the weather stations.

에서는 적용이 가능하다고 판단하여 채택하였다. 산정방법은 식 (13)과 같다. 식에서  $P_k$ 는  $k$ 번째 격자의 강우량,  $k$ 는 격자번호,  $d_i$ 는  $i$ 번째 관측지점과  $k$ 번째 격자와의 거리,  $P_i$ 는  $i$ 번째 관측지점의 강우량,  $i$ 는 관측소 번호,  $m$ 은 거리가중지수이다.

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{1}{d_i} \right)^m \cdot P_i \right]}{\sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{1}{d_i} \right)^m \right]} \quad (13)$$

기상조건에 대한 지표에서의 수문반응을 잘 모의하기 위해서는 정확한 지형정보 구축이 중요하다. 모형을 1 × 1 km<sup>2</sup> 해상도로 구축하기 위해서는 동일한 해상도를 갖는 격자형태의 토지피복, 토양, 지형지수, 투수량계수 자료가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 국내에서 제작된 100 × 100 m<sup>2</sup> 해상도의 지형자료를 수집하여 1 × 1 km<sup>2</sup> 해상도로 재구축하였다. Fig. 3은 100 × 100 m<sup>2</sup> 해상도를 갖는 토지피복도 (a), 토양도 (b), 지형지수 분포도 (c), 투수량계수 분포도 (d)를 도시한 것이다. 토지피복도는 국토해양부에서 제공하는 자료로부터 구축하였으며 수역, 도심지, 나지, 습지, 초지, 산림, 논, 밭의 8개 항목으로 구성되어 있다. 안동댐 상류유역 내 산림 85.54%, 논 9.90%가 분포되어 있어 두 가지 토지피복형태가 95% 이상 차지하는 것으로 나타났다. 국립농업과학원은 남한 전역에 대해서 1300여개의 토양통 (soil series)으로 구성된 정밀토양도를 제공하고 있다. 본 연구에서는 토양관련 모형변수의 산정을 위해 토양통을 11개의 범용토성 (universal soil texture)으로 재분류하였다. 대상지역에는 7개의 토성이 형성되어 있는 것으로 조사되었으며 사질양토 (59.77%)와 양토 (26.56%)의 두 토성이 80% 이상 분포되어 있는 것으로 나타났다. 지형지수는 국토해양부에서 제공하는 수치표고도 (digital elevation model)로부터 경사도, 흐름방향, 흐름누적에 대한 정보를 산출하여 산정하였다. 상류지배면적이 클수록 지형지수는 큰 값을 가지므로 Fig. 3(c)와 같이 지형지수가 높은 지역은 하천망과 유사한 형태로 표현되는 것을 알 수 있다. 대상유역에서 지형지수는 4~27의 범위에서 분포하는 것으로 나타났다. 투수량계수는 포화대 내에서 단위폭 당 물의 통수능력을 의미하며 포화수리전도도 (mh<sup>-1</sup>)와 포화대 두께 (m)의 곱으로 산정할 수 있다. Fig. 3(d)는 투수량계수 (m<sup>2</sup>h<sup>-1</sup>) 산정결과이다. 하천에서 토양의 포화수리전도도가 높기 때문에 투수량계수도 높으며 유역의 하류지역이 상류지역보다 높은 것으로 나타났다. 투수량계수는 0~1.086 m<sup>2</sup>h<sup>-1</sup> 범위에서 분포하는 것으로 조사되었다.

앞서 언급된 4가지 주제도에 대한 격자단위의 값들

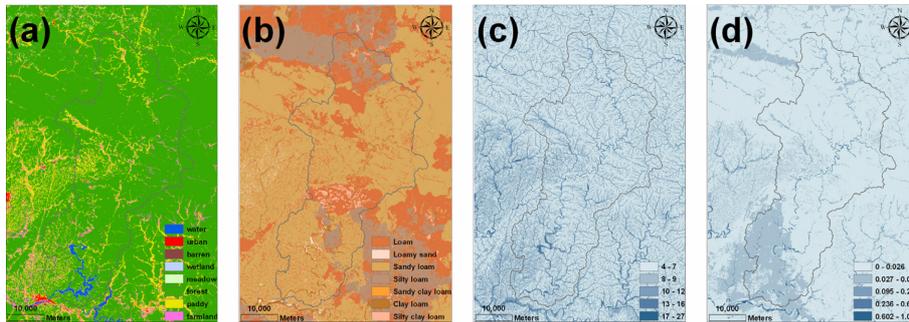


Fig. 3. Geomorphologic data; (a) land cover, (b) universal soil texture, (c) topographic index, (d) transmissivity ( $m^2h^{-1}$ ).

이 모형에 입력되며 식생피복과 토양 관련 변수는 각 항목에 대한 look-up table 형태로 입력된다. 식생과 관련된 주요변수는 엽면적지수 (leaf area index), 조도길이 (roughness length), 영면변위 (zero plane displacement) 등이 있으며 각 토지피복에 따른 변수 값은 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)와 Rawls *et al.* (1998)의 결과를 이용하였다.

#### 4. 매개변수 민감도 분석

TOPLATS 모형을 구동하기 위해서는 유역, 토양, 식생과 관련된 다양한 모형변수를 결정해야 한다. 모

형변수는 그 특성에 따라 직접 관측이나 매개변수 검보정과정을 통해 간접적으로 추정하게 된다. 모형변수간의 상대적 민감도를 파악하기 위해서는 각 변수에 대한 기준값을 선정하고 이를 기준으로 동일한 변화율을 적용하여 민감도분석을 수행하는 것이 일반적이다. 다만, 본 연구에서는 각 모형변수가 수문성분모의결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 각 변수를 물리적 범위 내에서 변화시켜 민감도 분석을 수행하였다. 분석기간은 유강수 조건에서 모형변수의 변화에 따른 물수지 성분의 변화를 분석하기 위해 강우가 많이 발생한 기간을 고려하여 2006. 7. 9~2006. 7.24 기간을 채택하였다. 이 기간 동안 발생한 유역평균강우량은 481.9 mm이다.

Fig. 4는 모형변수 중 포화수리전도도, 기포압력수두 (bubbling pressure head), 공극크기 분포지수 (pore

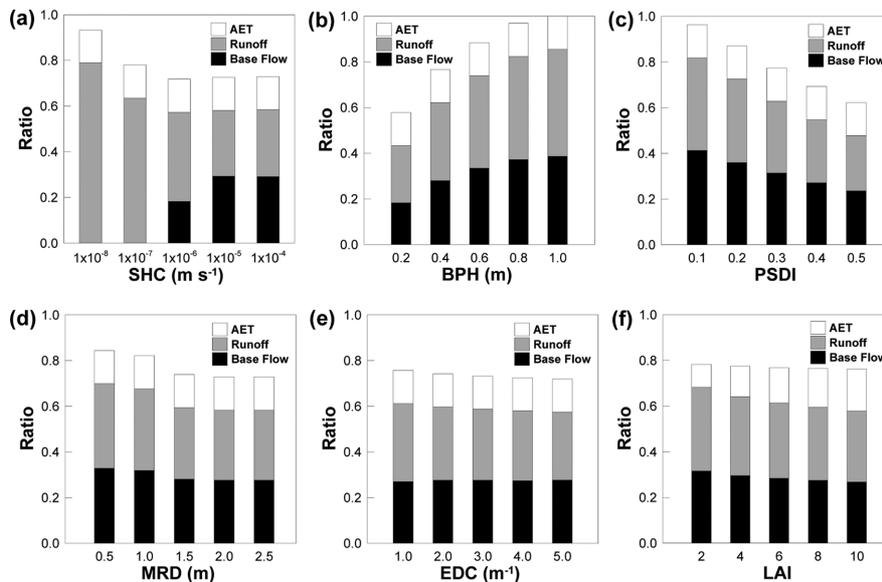


Fig. 4. The result of sensitivity analysis for saturated hydraulic conductivity (SHC), bubbling pressure head (BPH), pore size distribution index (PSDI), maximum root zone depth (MRD), exponential decay coefficient (EDC) and leaf area index (LAI).

size distribution index), 최대근권역깊이 (maximum root zone depth), 지수감수계수 (exponential decay coefficient), 엽면적지수에 대한 민감도분석을 수행한 결과로서 분석기간동안의 총강우량에 대한 실제증발산량, 지표유출량, 기저유출량의 변화를 도시한 것이다. 포화수리전도도는 토양 내 물의 투수능력을 의미하며 중력수의 이동을 결정하는 중요한 변수이다. 모형에서 포화수리전도도는 토양의 침투능과 토양 내 침투량을 결정하는데 직접적으로 이용된다. 모형에서 포화수리전도도는  $\text{ms}^{-1}$  단위로 입력되므로 유역전체의 토양에 대한 포화수리전도도를  $1 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-7}$ ,  $1 \times 10^{-6}$ ,  $1 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4} \text{ms}^{-1}$ 로 가정하여 민감도 분석을 수행하였다. 포화수리전도도가 감소함에 따라 침투능은 감소하고 이로 인해 지표유출량은 증가하고 기저유출량은 감소하게 된다. 민감도 분석 결과에서도 포화수리전도도가  $1 \times 10^{-7} \text{ms}^{-1}$  이하에서는 기저유출량이 0에 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

기포압력수두는 토양 내 기포압력을 높이 단위로 표현한 변수이다. 기포압력수두가 클수록 토양 내 비포화대 영역은 감소하고 실질적인 지하수면깊이는 상승하여 지표유출량과 기저유출량이 모두 증가하게 된다. Fig. 4(b)에서 기포압력수두가 0.2에서 1.0으로 증가함에 따라 지표유출량과 기저유출량은 대략 두 배까지 증가하는 것을 알 수 있다. 실제증발산량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

공극크기 분포지수는 토양 내 공극의 크기를 결정하는 변수이다. 지수가 클수록 공극크기는 증가하고 반대로 토양수분비는 감소하게 된다. 이로 인해 지표유출량과 기저유출량이 모두 감소하게 된다. Fig. 4(c)에서 지수를 0.1에서 0.5로 증가시킴에 따라 지표유출량과 기저유출량은 각각 40%와 43% 감소하는 것으로 나타났다. 실제증발산량은 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

최대근권역깊이는 Fig. 4(d)에서와 같이 0.5 m에서 2.5 m로 증가시킨 결과 지표유출량과 기저유출량이 다소 감소하며 실제증발산량은 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 4(e)는 기저유출조정계수를 1.0에서 5.0으로 증가시킨 결과로서 기저유출량과 실제증발산량은 차이가 거의 없으며 침투량 증가로 인해 지표유출량이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 마지막으로 Fig. 4(f)는 식생의 엽면적지수를 2에서 10으로 증가시킨 결과이며 엽면적지수가 증가할수록 실제증발산량은 증가하고 지표유출량과 기저유출량은 모두 감소하는 경향을 보였다.

민감도 분석과정에서 모형변수별로 적용된 변화율이 상이하여 변수들간의 상대적인 민감도 순위를 알기는 어려우나 도출된 결과로부터 지표유출과 기저유출 발생량에 대해서는 포화수리전도도, 기포압력수두, 공

극크기분포지수가 상대적으로 큰 영향을 미치며 실제 증발산량에 대해서는 엽면적지수가 영향력이 크다고 할 수 있다.

## 5. 모델기반 수문정보 평가

### 5.1. 유출량

TOPLATS 모형은 단위격자에 대한 수문성분 발생량을 모의하는 모형이므로 단위격자별로 모의된 유출 발생량을 평가하기 위해서는 이와 동일한 물리적 의미를 갖는 관측값이 있어야 한다. 그러나 단위면적에 내린 강수량 중 유출에 기여하는 양을 시간위로 관측한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 평가지역을 격자단위에서 유역단위로 확장하여 안동댐 관측 유입량을 이용하여 유출모의결과를 평가하고자 한다. 다만, TOPLATS 모형은 하도추적과정이 없기 때문에 유역 출구점에서의 유량을 모의할 수 없다. 따라서 유역 내 흐름에 대한 지체효과를 배제하기 위해 안동댐 유역경계 내의 격자별 시간위 유출발생량을 월단위 유역평균 유출발생량으로 변환하여 월단위 유출고에 대한 평가를 수행하였다.

유역변수 추정치는 Table 2와 같다. 최대기저유출량 ( $q_0$ )는 유역단위 기저유출량 산정에 이용되는 변수이며 지수감수계수와 최대토양층깊이는 앞서 민감도 분석에서 설명한 바 있다. 이들 변수는 대상지역의 수문반응특성에 따라 결정되는 변수이므로 보정과정을 통해 간접적으로 추정하였다. 토양 및 토지피복 종류별로 입력되는 변수 중 엽면적지수를 제외한 변수는 3장에서 구축된 값을 그대로 적용하였으며 엽면적지수는 유출량이 과대모의되는 결과를 보정하기 위해 NLDAS에서 제공하는 엽면적지수값의 40%를 적용하여 최대 3.0 미만으로 조정하였다.

모형 매개변수는 보정기간 (2003~2006)에 대해 시행착오법 (trial and error method)을 이용하여 매개변수를 추정하고 검증기간 (2007~2009)에는 추정된 매개변수를 그대로 적용하여 평가를 수행하였다. 검·보정기간에 대한 월유출고 모의결과는 Fig. 5와 같다. 보정기간에는 월 유출고가 500 mm 이상 발생한 경우가 한차례 있으며 이를 제외한 경우는 두 기간 모두 월 유출고가 400 mm 이하로 발생하였다. 2003년과 2005년의 경우 관측치에 비해 모의치가 과소 또는 과대모

Table 2. Parameter estimates.

Parameter	Value	Unit
Subsurface flow at complete saturation ( $q_0$ )	100.0	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$
Exponential decay coefficient ( $f$ )	3.6	$\text{m}^{-1}$
Maximum root zone depth (RZ)	1.5	m

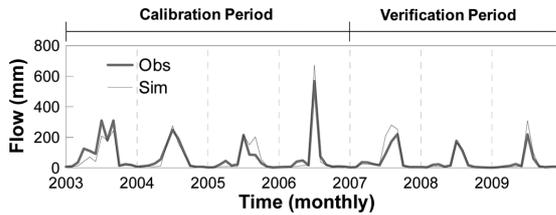


Fig. 5. The monthly observed and simulated flow (mm) during the calibration (2003~2006) and verification (2007~2009) periods.

의되는 것을 확인할 수 있으며 오차의 양상이 동일한 경향을 갖지 않음으로 인해 추가적인 매개변수 추정 과정을 통한 정확도 향상은 어려울 것으로 판단된다. 또한 통계지표를 이용하여 평가한 결과, 보정기간과 검증기간에 대한 평균제곱근오차 (root mean square error)는 36.87 mm와 32.41 mm, 결정계수 (coefficient of determination)는 0.90과 0.92로 산정되어 오차의 절대적 크기나 선형성에 기준해서 적절히 모의가 된 것으로 판단된다.

5.2. 토양수분

TOPLATS 모형으로부터 모의된 토양수분비에 대한 정확도를 평가하기 위해 안동기상대의 시간위 토양수분비 자료를 이용하였다. 안동기상대는 TDR (time domain reflectometer) 방식을 이용하여 토양수분비를 관측한다. 관측장비는 안동기상대 노장에 설치되어 있으며 피복형태는 초지이다.

Fig. 6은 관측자료의 상태가 양호한 2009년 동안 시간위 지중 30 cm와 50 cm에서의 토양수분비와 강수량, 안동 기상대 위치에 해당하는 단위격자의 근권역에 대한 모의 토양수분비를 도시한 결과이다. 관측 토양수분비는 연중 대략 30% 이내에서 분포하며 지중 30 cm에서의 토양수분비가 50 cm에서보다 대략 10% 정도 적게 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 6에서 강우가 많이 발생한 6~8월 (4344~5832 h) 기간의 토양수분비는 다른 기간에 비해 높으나 강우발생시점에서 급격한 상승은 발생하지 않았다. 반면에 여름철 이외의 기간에서는 강우에 대해 토양수분비는 급격한 상승을 보였다. 관측값은 지중 30 cm와 50 cm에서의 지점 (point)값이고 일반적으로 토양의 공극률이 40% 이상임을 감안할 때 여름철 많은 강우량에도 불구하고 토양수분비가 상승을 하지 않는 것은 관측자료의 품질에 대해서 재고할 필요가 있을 것으로 판단된다. 모의 토양수분비의 연중 분포는 지중 50 cm에서의 관측값과 유사하며 강우 발생시점에서는 관측값에 비해 상대적으로 더 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 두 자료간의 차이는 기본적으로 관측치와 모의치가 가

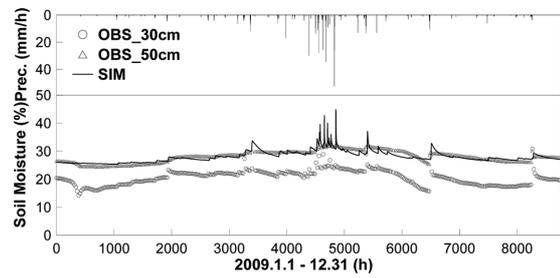


Fig. 6. Point based the hourly observed soil moisture at -30 cm and -50 cm and cell based the hourly simulated one in root zone during 2009.

지는 오차를 비롯하여 지점값과 단위격자평균값의 비교, 특정 지중깊이의 값과 근권역 평균값의 비교에서 오는 구조적 한계에서 기인한다고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 광범위한 지역에 대한 고해상도 수문정보의 생산에 활용가능한 TOPLATS 분포형 지표 해석모형을 안동댐 상류유역에 구축하고 민감도분석을 통해 모형변수가 모의결과에 미치는 영향을 분석하였으며 모의된 수문성분과 관측치의 비교를 통해 모의결과의 타당성을 평가하였다. 도출된 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

모형변수 중 포화수리전도도, 기포압력수두, 공극크기 분포지수, 최대근권역깊이, 지수감수계수, 엽면적지수에 대해 민감도분석을 수행하였다. 포화수리전도도가 클수록 지표유출량은 감소하고 기저유출량은 증가하였다. 기포압력수두는 증가할수록 지표유출량과 기저유출량이 모두 증가하며 공극크기 분포지수는 반대되는 결과를 보였다. 최대근권역깊이, 지수감수상수, 엽면적지수는 유출량에는 큰 영향이 없으며 엽면적지수는 증가할수록 실제증발산량이 증가하고 지표유출량과 기저유출량은 감소하는 것으로 나타났다.

격자단위 모의결과를 평가하기 위해 안동댐의 관측 유입량과 안동기상대의 관측 토양수분비를 구축하여 모의결과와 비교하였다. 월 유출량을 비교한 결과 보정기간 (2003~2006)과 검증기간 (2007~2009)에 대해 평균제곱근오차는 36.87 mm와 32.41 mm, 결정계수는 0.90, 0.92의 정확도를 보였다. 또한 2009년에서의 시간위 모의 토양수분비는 지중 50 cm에서의 관측치와 유사한 값을 가지고 강우발생시점에서의 상승거동은 유사하나 모의치가 강우에 대해 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 다만, 관측치와 모의치를 비교하는데 있어서 평면적으로는 지점-격자면적평균값, 연직으로는 특정깊이-깊이평균값에서 오는 한계는 여전히

존재한다고 할 수 있다.

분포형 지표해석모형으로부터 모의된 격자단위 수문성분모의는 관측-모의자료의 시공간 해상도 차이, 관측자료의 오차, 모형에 입력되는 토지피복 및 토양 특성치의 오차 등으로 인해 그 정확도를 정확히 평가하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서 분석된 유출고와 토양수분비 결과만으로 TOPLATS 지표해석모형의 적용성이 있음을 단정하기는 어렵다. 다만, 분포형 지표해석모형은 광범위한 지역에 대해 물수지와 에너지수지를 만족하는 수문기상정보를 산출할 수 있다는 장점을 고려할 때 지속적으로 연구할 필요가 있다. 모의결과의 정확한 평가를 위해서는 추가적으로 에너지 플럭스 타워의 관측 순복사량, 잠열, 현열, 지열 자료와 모의치의 비교를 통해 에너지성분에 대한 평가와 평가지점을 확대하여 평가결과에 대한 객관성을 확보할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “시범지역 수문기상기술개발 연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 강전호, 서명석, 2011: 지면경계조건이 UM을 이용한 동아시아 여름철 단기에보에 미치는 영향, *대기*, **21(4)**, 415-427.
- 김형진, 정일웅, 조민수, 2005: 대기 대순환 모형과 지면 모형의 접합에 관하여, *한국기상학회지*, **41(6)**, 1137-1149.
- 하경자, 김정우, 김기영, 문자연, 1998: 다층 지면과정 모형 접합에 대한 AGCM의 민감도 실험, *한국기상학회지*, **34(4)**, 630-642.
- Betts, A., F. Chen, K. Mitchell, and Z. Janjic, 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.*, **125**, 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, 107-131.
- Beven, K., and M. J. Kirby, 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, **24(1)**, 43-69.
- Burnash, R. J. C., R. L. Ferral, R. A. McGuire, 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., Z. Janjic, and K. Mitchell, 1997: Impact of atmospheric surface layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model, *Boundary Layer Meteorology*, **85**, 391-421.
- Crow, W. T., D. Ryu, and J. S. Famiglietti, 2005: Upscaling of field-scale soil moisture measurements using distributed land surface modeling, *Advances in Water Resour.*, **28**, 1-14.
- Doms, G., and U. Schättler, 1999: The non-hydrostatic limited-area model LM(Lokal-Modell) of the DWD. Deutscher Wetterdienst, *Technical Report*, 180.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model, *J. Geophys. Res.*, **108(D22)**, 8851.
- Famiglietti, J. S., and E. F. Wood, 1994: Application of multiscale water and energy balance models on a tallgrass prairie. *Water Resour. Res.*, **30(11)**, 3061-3078.
- Koster, R., and M. Suarez, 1994: The components of a SVAT scheme and their effects on a GCM's hydrological cycle, *Advances in Water Resour.*, **17**, 61-78.
- Koster, R., M., Suarez, and M. Heiser, 2000: Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales, *J. Hydrometeorology*, **1**, 26-46.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges, 1994: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GCMs, *J. Geophys. Res.*, **99**, 415-428.
- Lim, Y. -J., K. -Y., Byun, T. -Y., Lee, H. Kwon, J. Hong, and J. Kim, 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.*, **48(1)**, 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.*, **22**, 1680-1692.
- Monteith, J. L., 1965: Evaporation and environment, in: *Sympos. The state and movement of water in living organism*, edited by: Fogy, G. T., Cambridge (Univ Press), 205-234.

- Peters-Lidard, C. D., F. Pan, and E. F. Wood, 2001: A re-examination of modeled and measured soil moisture spatial variability and its implications for land surface modeling, *Advances in Water Resour.*, **24**, 1069-1083.
- Rawls, W. J. D. Gimenez, and R. Grossman, 1998: Use of soil texture, bulk density, and the slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. *Trans. ASAE*, **41(4)**, 983-988.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton, 1982: Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, **25(5)**, 1316-1320.
- Seuffert, G, P. Gross, and C. Simmer, 2002: The influence of hydrologic modeling on the predicted local weather: two-way coupling of a mesoscale weather prediction model and a land surface hydrologic model, *J. Hydrometeorology*, **3**, 505-523.
- Sivapalan, M., Beven, K., and Wood, E. F., 1987: On hydrologic similarity. 2. A scaled model of storm runoff production, *Water Resour. Res.*, **23**, 2266-2278.
- Wood, E. F., D. P. lettenmaier, X. Liang, B. Nijssen, and S. W. Wetzel, 1997: Hydrological modeling of continental-scale basins, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **25**, 279-300.