

# 대규모 육지수문모형에서 사용 가능한 지표면 및 지표하 연계 물흐름 모형의 개발: 1. 모형설명

## Development of a Conjunctive Surface-Subsurface Flow Model for Use in Land Surface Models at a Large Scale: Part I. Model Description

최현일\*

Choi, Hyun Il

### Abstract

The surface runoff is one of the important components for the surface water balance. However, most Land Surface Models(LSMs), coupled to climate models at a large scale for the prediction and prevention of disasters caused by climate changes, simplistically estimate surface runoff from the soil water budget. Ignoring the role of surface flow depth on the infiltration rate causes errors in both surface and subsurface flow calculations. Therefore, for the comprehensive terrestrial water and energy cycle predictions in LSMs, a conjunctive surface-subsurface flow model at a large scale is developed by coupling a 1-D diffusion wave model for surface flow with the 3-D Volume Averaged Soil-moisture Transport(VAST) model for subsurface flow. This paper describes the new conjunctive surface-subsurface flow formulation developed for improvement of the prediction of surface runoff and spatial distribution of soil water by topography, along with basic schemes related to the terrestrial hydrologic system in Common Land Model(CLM), one of the state-of-the-art LSMs.

**Key words:** Land surface model, Conjunctive flow model, Soil-moisture transport, Runoff, Flow routing

### 요 지

지표수 흐름은 육지 물수지 계산에 중요한 요소중에 하나이다. 그러나, 기상변화의 예측과 그로 인한 방재대책수립을 위한 대규모의 기상모형과 연계되는 육지수문모형(Land Surface Model, LSM)들은 지표수 흐름을 토양수분수지로부터 간단하게 산정하고 있다. 침투계산에서 지표수 흐름깊이를 무시하는 것은 지표면 및 지표하 물흐름 모두에 계산상 오류를 초래할 수 있다. 그러므로, 육지수문모형에서 종합적인 물과 에너지 순환 예측을 하기 위해, 지표수 흐름을 위한 1차원 확산모형과 지표하 물흐름을 위한 계산망 체적평균 토양수분이송(Volume Averaged Soil-moisture Transport Model, VAST)모형을 연계하는 대규모 지표면 및 지표하 연계 물흐름 모형이 개발되었다. 이 논문에서는, 최첨단 육지수문모형중 하나인 CLM(Common Land Model)내의 지표수리수문 모의를 위한 주요부분을 비롯하여, 지형특성에 따른 지표수 흐름과 공간적 토양수분 분포의 예측개선을 위한 새로운 지표면 및 지표하 연계 물흐름 모형에 대해 기술하였다.

**핵심용어:** 육지수문모형, 연계흐름모형, 토양수분이송, 유출, 흐름추적

### 1. 서 론

지역기상모형(Regional Climate Model, RCM)은 수백킬로미터의 계산망을 기본으로 하는 전체기상모형(Global Climate Model, GCM)의 결과들을 다운스케일링기법으로 횡방향 경계조건으로 사용하여 수십킬로미터의 계산망을 통한 지역적 모의가 가능하다. 상대적으로 고해상도인 지역기상모형은 수자원 관리와 영향평가, 즉 수자원, 생태, 이상기후, 태풍 등에 대한 기후변화의 영향을 고찰하고 방재대책을 수립하는데 필요하다. 위성자료 등 고해상도의 자료가 이용가능함에 따라,

지역기상모형의 한 부분인 육지수문모형도 고해상도에서의 여러 상호작용이 대축척의 계산망에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다. 이러한 노력은 수문기상모형의 전반에 걸쳐 이루어져 오고 있지만, 지표수리수문 모의부분에서는 고해상도(1 km미만)의 지형자료가 있음에도 불구하고, 대부분의 육지수문모형에서 지형특성에 의한 지표면 및 지표하 물흐름은 고려되지 않고 있다. 본 연구의 목적은 새로운 지표면-지표하 연계 물흐름 모형이 적용되어 개선된 육지수문모형이 모형의 예측능력을 개선시키고, 지형에 의한 토양수분의 공간적 분포 변화가 기후변화 연구에 필수적인 육지 물수지 및 에너지 수

\* 정희원 · 미국 일리노이주 수자원조사국 기상연구팀 연구원 (E-mail: hichoi@uiuc.edu)

지에 미치는 영향을 알기 위함이다.

종방향 토양수분이송에 국한되어 있는 현재의 1차원 육지 수문모형들은 지형특성으로 인한 토양수분의 공간적 변화와 지표수 흐름을 고려할 수 없으므로, 지표 에너지흐름 예측에도 한계가 있다. Choi 등(2007)은 Richards 방정식(Richards, 1931)을 기본으로 지형적 특성으로 인한 지표하 토양수분의 횡방향 흐름과 계산망내 불균일성을 고려한 3차원 VAST 방정식을 개발하였다. 또한, 지표수 흐름이 육지 물수지에 중요한 요소중에 하나임에도 불구하고, 대부분의 육지수문모형들은 지표수 유출을 토양수분수지를 통하여 간략히 계산하고 있으며, 이렇게 구체적인 흐름추적 계산없이 개략적으로 산정된 지표수 유출은 지표하 물흐름의 경계조건으로 사용되지 않고 있어 육지 물수지 산정에 심각한 문제를 초래할 수 있다. 침투계산에서 지표수 흐름깊이를 고려하지 않는 것은 지표면 및 지표하 물흐름 모두에 계산상 오류를 초래할 수 있다 (Smith와 Woolhiser, 1971; Wallach 등, 1997; Corradini 등, 1998). 하도추적이나 유역의 유하시간을 고려하지 않는 모형은 실측치보다 큰 침투유량과 급격한 수문감수곡선을 모의하여, 일반적으로 감수곡선부의 형상으로 보정되는 토양수리전도도 및 관련매개변수 산정에도 오류를 초래할 수 있다. 그러므로, 지표면 및 지표하 연계 물흐름 모형은 육지수문모형에서 종합적인 수문모의를 위해 반드시 필요하다.

Saint-Venant식의 간략식중 하나는 하류부 배수위 효과를 모의할 수 있는 확산방정식으로, 정확성 및 계산시간상에 효율적인 것으로 알려져 있다(Ponce 등, 1978; Akan과 Yen, 1981; Hromadka II 등, 1987; Morita와 Yen, 2002; Kazezyilmaz-Alhan 등, 2005). 따라서, 본 연구에서는 지표수 흐름모의를 위한 1차원 확산방정식과 지표하 수분이송 모의를 위한 3차원 VAST 방정식을 연계하는 모형이 개발되었다. 초과강우와 지표포화로 인한 지표수 흐름을 모두 모의할 수 있는 이 연계 모형은 최근의 육지수문모형중에 하나인 CLM내의 기존 수리수문 모의부분을 대체하여, 모형의 예측도 향상과 육지 물수지 및 에너지수지에 미치는 지형의 영향을 이해하는데 도움을 줄 것으로 사료된다. 본 논문에서는 CLM내의 지표 수리수문 모의를 위한 주요부분을 비롯한 새로운 지표면 및 지표하 연계 물흐름 모형에 대하여 기술하였다.

## 2. 모형설명

CLM은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 Community Climate System Model (CCSM)의 지표모형 부분에서 시작되어, Bonan(1996)의 LSM, Dickinson 등(1993)의 Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS), 그리고 Dai와 Zeng(1997)에 의해 1994년에 보완된 Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics LSM (IAP94) 모형들의 장점들을 보강하여 1998년에 FORTRAN90으로 초기코드화 되었으며, 지금까지 개선과 검증이 계속되어 오고 있다. CLM모형은 최첨단의 토양-식생-대기순환(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer, SVAT) 모형중의 하나로, Zeng 등(2002)에 의해 미국 NCAR의 기상모형인 Community

Climate Model(CCM3)과 연계된 바 있으며, 최근 기상모형인 CWRP(Climat extension of the next-generation Weather Research and Forecasting)모형과 연계가 완성되었다(Liang 등, 2004).

최신 CLM모형의 주요특성으로는, 토양수분 및 온도예측을 위한 10개 토양층, 빙설 및 용설 예측을 위한 5개층, 토양수분의 결빙영향 고려, Topmodel(Beven과 Kirkby, 1979)에 기초한 지면포화도 계산, 식생과의 CO<sub>2</sub> 및 수증기 교환모의를 위한 광합성모의, 고해상도의 지표피복특성, 식생특성, 그리고 토양특성 자료의 구축(Liang 등, 2005) 등이다. CLM은 이미 실측자료를 사용하여 실유역을 대상으로 토양수분, 토양온도, 용설량(snowmelt), 순복사량(net radiation), 잠열 및 현열(latent and sensible heat fluxes), 그리고 유출 등의 모의가 수행되었다(Dai 등, 2003).

### 2.1 지표하 물흐름

기존 육지수문모형들에서 주로 사용되는 1차원 Richards 방정식(Richards, 1931)은 토양수분의 종방향 평균흐름만 모의하고 있어, Choi 등(2007)은 Richards 방정식을 기본으로 육지수문모형의 계산망에서 지형특성에 따른 지표하 수분의 횡방향 흐름과 모형계산망내 불균일성으로 인한 흐름성분을 추가한 3차원 VAST 모형을 식 (1)과 같이 개발하였다. VAST 모형을 구성하는 각 흐름성분들은 그림 1과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \underbrace{D_{\mu}}_{\text{mean}} \frac{\partial w}{\partial z} + \underbrace{\frac{\partial D_{\sigma}}{\partial z}}_{\text{variability}} \right] \quad \text{[Vertical Diffusion]}$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left[ \underbrace{K_{\mu}}_{\text{mean}} + \underbrace{K_{\sigma_1}}_{\text{variability}} \right] \quad \text{[Vertical Drainage]}$$

$$+ \zeta \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \underbrace{D_{\mu}}_{\text{mean}} \frac{\partial w}{\partial x_i} + \underbrace{\frac{\partial D_{\sigma}}{\partial x_i}}_{\text{variability}} \right] \quad \text{[Lateral Diffusion]}$$

$$+ \zeta \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \underbrace{K_{\mu}}_{\text{mean}} + \underbrace{K_{\sigma_1} + K_{\sigma_2}}_{\text{variability}} \right] \quad \text{[Lateral Diffusion]}$$

여기서,  $\theta$ 는 계산망 체적평균 토양수분함량,  $w = \frac{\theta}{\theta_s}$ 는 포

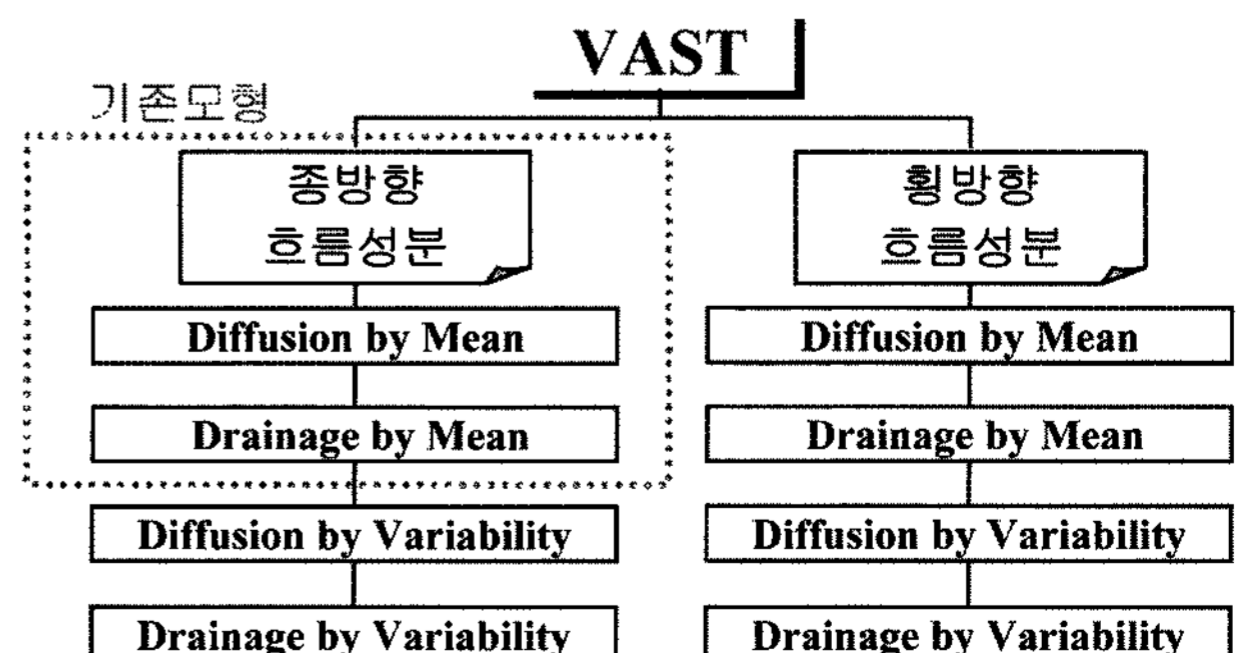


그림 1. VAST 모형 흐름성분 구조도

화토양수분량(공극)  $\theta_s$ 에 대한 상대토양수분도이다.  $t$ 는 시간,  $z$ 는 지형표고  $Z_G$ 를 기준으로 지구중심을 향하는 연직방향축, 그리고 좌표시스템  $x_i \in \{x, y\}$ 는 지표면과 평행한 평면좌표계를 나타낸다.  $\zeta$ 는 종방향에 대한 횡방향 수리전도도의 이방성을 나타내는 계수로서, 대규모 육지수문모형에서는 하천 수문곡선예측을 위하여 Chen과 Kumar(2001)에 의해 처음으로 고려되었다. 식 (1)에서 계산망내 흐름의 평균치( $\mu$ ) 및 변화 성분( $\varpi$ )을 나타내는 각 흐름성분의 확산도( $D$ ) 및 수리전도도( $K$ )는 상대토양수분도( $w$ )의 함수로서 아래와 같이 주어진다.

$$D_\mu = \frac{K_{s_z} \psi_s b}{\theta_s} w^{b+2} \quad (2a)$$

$$D_\varpi = -\frac{1}{2} K_{s_z} \psi_s b (b+2) \alpha^2 w^{b+3-2\beta} \quad (2b)$$

$$K_\mu = S_{x_i} K_{s_z} w^{2b+3} \quad (2c)$$

$$K_{\varpi_1} = S_{x_i} K_{s_z} (2b+3)(b+1) \alpha^2 w^{2b+3-2\beta} \quad (2d)$$

$$K_{\varpi_2} = \sigma_{s_{x_i}} K_{s_z} (2b+3) \alpha w^{2b+3-\beta} (\gamma_1 + \gamma_2 w + \gamma_3 w^2) \quad (2e)$$

여기서,  $K_{s_z}$ 와  $\psi_s$ 는 각각 포화상태에서의 수리전도도와 흡입수두이고, 지수  $b$ 는 입자크기에 따른 계수이다. Clapp과 Hornberger(1978)는 11개 토양종류에 따른 이들 토양특성인자들의 대표값을 제시하였으며, 이 값들은 또한 토양성분(sand와 clay)의 함수로 나타내어질 수 있다(Cosby 등, 1984; Bonan, 1996).  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 평균 토양수분값에 대한 변화 특성을 나타내는 계수로서,  $\sigma_\theta^2 = \alpha^2 \theta^2 w^{2(1-\beta)}$ 로 표현된다.  $x$ - 및  $y$ -방향에 대한 평균경사도는  $S_{x_i} = \partial z / \partial x_i$ 로 나타낸다. 여기서, 좌표시스템  $x_i$ 은  $x_i \in \{x, y, z\}$ 을 의미한다. 따라서, 각 축방향에 대한 평균지형경사는 각각  $(S_x, S_y, S_z) = (\partial z_G / \partial x, \partial z_G / \partial y, -1)$ 이다.  $\sigma_{s_{x_i}}$ 는  $x$ - 및  $y$ -방향에 대한 경사의 표준편차이고,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ , 및  $\gamma_3$ 는 지형경사에 대한 토양수분의 상관계수를 나타내는 매개변수들로  $\rho_{\theta, S_{x_i}} = \gamma_1 + \gamma_2 w + \gamma_3 w^2$ 로 표현된다. 자세한 내용은 Choi 등(2007)을 참조하기 바란다. 표기의 간략화를 위해, 논문 전체를 통하여 특별한 언급이 없는 한 모든 변수와 계수들은 각 계산망을 대표하는 계산망 체적평균값을 나타낸다.

## 2.2 지표수 흐름

지표수 흐름에 기여하는 지표면 및 지표하 유출의 각 성분들은 그림 2의 모식도와 같으며 다음에 각 성분별로 설명되어 있다.

### 2.2.1 지표하 유출

최근의 CLM모형에서는 모형의 토양층 말단부 배수( $R_{sb,bot}$ )와 과포화로 인한 유출( $R_{sb,sat}$ )을 지표하 유출( $R_{sb}$ )로 고려한다. 말단부 배수는 모형의 최하부 토양층으로부터 배수되는 흐름이고, 토양의 공극보다 초과되는 수분은 토양내의 다른 불포화층으로 종방향으로 배분되며, 모든 토양층이 포화되었을 경우에는 과포화 부분이 지표하 유출로 고려된다. 지형특성으로

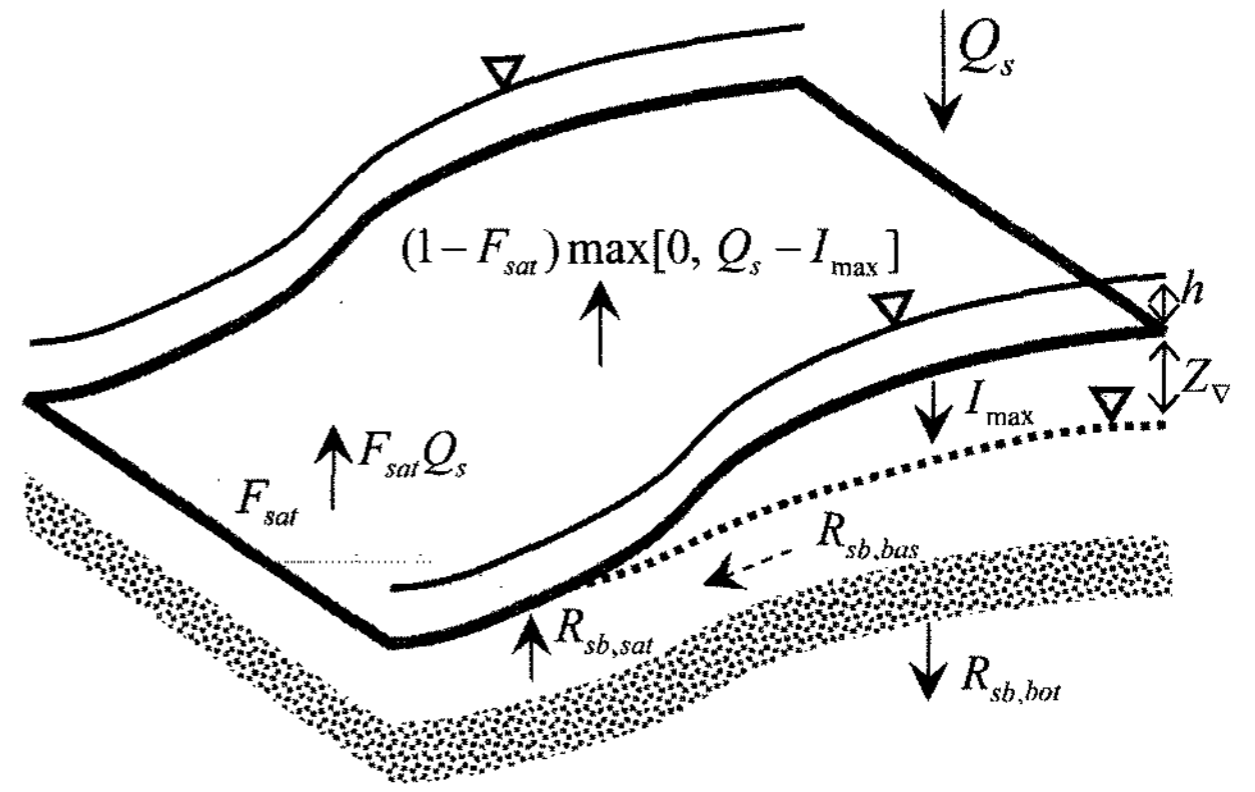


그림 2. 육지수문모형에서의 지표면 및 지표하 유출성분 모식도

인한 지표하 횡방향 유출 또는 기저유출( $R_{sb,bas}$ )은 기존의 CLM모형에서는 고려되지 않고 있다.

### 2.2.2 지표면 유출

지표면 유출은 지표 침투능을 초과하는 유효강우의 직접유출인 Hortonian 유출과 포화된 지면에 떨어진 강우에 의한 유출인 Dunnian 유출로 구분할 수 있다. 지면에서의 단위면적당 총유효 물공급량  $Q_s$ 는 시간간격  $\Delta t$ 에 대한 지표수 수심  $h$ 를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = Q_{rain} + Q_{dew} + Q_{melt} + h/\Delta t \quad (3)$$

여기서,  $Q_{rain}$ ,  $Q_{dew}$ , 그리고  $Q_{melt}$ 는 각각 지면에서의 강수량(rainfall), 결로량(dewfall), 융설량(snowmelt)을 나타낸다. 식 (3)은 지표수 수심이 지표수 흐름은 물론 침투량에 미치는 영향을 나타낸다. 따라서, 수심  $h$ 를 갖는 지표에서의 순유출량  $R_s$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$R_s = \underbrace{(1-F_{sat})\max[0, Q_s - I_{max}]}_{\text{Hortonian}} + \underbrace{F_{sat} Q_s}_{\text{Dunnian}} - h/\Delta t \quad (4)$$

여기서,  $F_{sat}$ 는 포화면적율로서 Niu과 Yang (2003; 2006), 그리고 Nui 등 (2005)에 의해서 다음 식 (5)와 같이 제안되었다.

$$F_{sat} = F_{max} e^{-0.5f Z_v} \quad (5)$$

여기서,  $F_{max}$ 는 최대포화율로, 평균지하수위  $Z_v$ 가 지표면과 같은 때의 지형지수(Topographic Index)의 누적분포곡선식으로 나타낼 수 있으며, 최근 CLM모형에서 최대포화율의 기본값은 0.3이다.  $f$ 는 토양수리전도도의 감소계수이다. 한편,  $I_{max}$ 는 최대잠재침투능으로 다음의 식으로 계산된다.

$$I_{max} = \underbrace{K_{s_z} \left[ 1 - \frac{\psi_s b}{d} (1-w) \right]}_{\text{mean flux}} + \underbrace{K_{s_z} \alpha^2 \left[ (2b+3)(b+1) - \frac{1}{2} b(b+2)(1-w^{b+3-2\beta}) \right]}_{\text{variability flux}} \quad (6)$$

여기서,  $d$ 는 지표면과 첫번째 토양층의 중심까지의 거리 (CLM에서는 0.875 cm)이고, 모든 변수와 계수들은 첫번째 토양층에서 정의되는 값들이다. 식 (6)은 Mahr과 Pan(1984), Abramopoulos 등(1988), 그리고 Boone과 Wetzel(1996) 등의 토양모형들에서 사용한, 강우시 지표면이 포화되는 조건하에서 유도된 것이다.

### 2.2.3 지표수 흐름추적

광폭직사각형 수로에서의 1차원 지표면 부정류 흐름해석을 위한 Saint-Venant방정식의 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음 식 (7-a) 및 식 (7-b)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x_c} = R_s \quad (7a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x_c} + g \frac{\partial h}{\partial x_c} = g(S_o - S_f) \quad (7b)$$

여기서,  $V$ 는 수심  $h$  전반에 걸친 평균유속,  $q = Vh$ 는 단위폭당 유량,  $S_o$ 와  $S_f$ 는 각각 하상의 바닥 및 마찰경사,  $x_c$ 는 하천의 종방향 좌표, 그리고  $g$ 는 중력가속도이다.

Saint-Venant방정식의 간략식들 중의 하나는 운동량 방정식에서 관성항들이 생략된 확산방정식이다(Tsai와 Yen, 2001; Morita와 Yen, 2002). 식 (7b)에서 관성항들을 생략하고, Manning의 식을 이용하면 단위폭당 유량을 나타내는 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$q = \frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{S_o - \frac{\partial h}{\partial x_c}} \quad (8)$$

여기서,  $n$ 은 Manning의 조도계수  $[T/L^{1/3}]$ 이다.

따라서, 광폭직사각형 수로에서의 확산방정식은 식 (7a)와 식 (8)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c_d \frac{\partial h}{\partial x_c} = D_h \frac{\partial^2 h}{\partial x_c^2} + R_s \quad (9)$$

여기서,  $c_d$ 는 확산과 속도, 그리고  $D_h$ 는 수리확산능으로 각각 다음의 식들로 표현된다.

$$c_d = \frac{5}{3} V = \frac{5}{3} h^{2/3} \sqrt{S_o - \frac{\partial h}{\partial x_c}} \quad (10a)$$

$$D_h = \frac{c_d h}{3 \left( S_o - \frac{\partial h}{\partial x_c} \right)} = \frac{Vh}{2 \left( S_o - \frac{\partial h}{\partial x_c} \right)} \quad (10b)$$

수치고도자료(DEM)으로부터 얻어진 하천망은 많은 합류점들을 가지고 있으므로, 이러한 하천망 모의를 위해서는 각 합류점에서 질량 및 에너지 보존을 위한 경계조건들이 필요하다 (Sevuk와 Yen, 1973; Akan과 Yen, 1981; Choi와 Molinas, 1993; Jha 등, 2000). 합류점에서 저류체적의 변화를 무시한 연속방정식은 식 (11a)에 나타내었고, 마찰 등 에너지손실을

무시한 에너지보존 방정식은 식 (11b)와 같다.

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \quad (11a)$$

$$h_{in} = h_{out} \quad (11b)$$

여기서,  $Q$ 는 전체 하천단면을 통한 유량이며, 첨자  $in$ 과  $out$ 은 각각 합류점에서의 유입과 유출을 의미한다.

## 3. 정리 및 결론

대규모 육지수문모형에서 모의되는 지표하 물흐름에서, 각 계산망의 지형적인 불균질로 인한 부흐름과 횡방향흐름은 공간적 토양수분 변화에 큰 영향을 미치고 있으며, 또한 지표수 유출은 육지의 물수지에 중요한 요소중에 하나이지만, 기상예측 및 방재대책수립을 위한 기상모형에 연계되는 대부분의 육지수문모형들은 이들을 간략히 산정하거나 고려하지 않고 있다. 대부분의 현존하는 모형들은 토양수분이동을 연직방향에 대해서만 모의하며, 지표수 유출은 지면에 도달한 강수량에서 증발량과 지하저류량을 제외하는 간단한 물수지로부터 계산하고 있다. 그러므로, 복합적인 지표 물순환과 에너지순환을 예측하기 위하여 현재의 육지수문모형에 사용될 수 있는 지표면-지표하 연계 물흐름 모형이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 지표면 물흐름을 위한 1차원 확산모형과 지표하 물흐름을 위한 3차원 VAST 모형으로 구성된 새로운 지표면-지표하 연계 물흐름 모형을 개발하여, 기존 모형에서 고려되지 않는 계산망내 부흐름, 횡방향 토양수분 이송 및 지표수 흐름추적 등의 모의가 가능하도록 하였다. 개발된 새로운 지표 수문모형은 각 흐름 특성에 적합한 수치해석방법으로 해를 구하게 되며, 한 시험유역에 대해 적용될 것이다. 자세한 수치해석 방법 및 시험구역 적용결과는 다음 논문을 참조하기 바란다. 대규모 육지수문모형에 적용될 새로운 지표면-지표하 연계 물흐름 모형은 수문기상모형의 예측도를 향상시킬 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Abramopoulos, F., Rosenzweig, C., and Choudhury, B. (1988) Improved ground hydrology calculations for Global Climate Models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration. *J. Climate*, Vol. 1, pp. 921-941.
- Akan, A.O., and Yen, B.C. (1981) Diffusion-wave flood routing in channel networks. *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 107, No. 6, pp. 719-732.
- Beven, K. J., and Kirkby, M. J. (1979) A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Bonan, G.B. (1996) A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies. *Technical description and User's guide*, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-417+STR, Boulder, CO.,
- Boone, A., and Wetzel, P.J. (1996) Issues related to low resolution modeling of soil moisture: Experience with the PLACE model.



- Global and Plan. Change*, Vol. 13, pp. 161-181.
- Chen, J., and Kumar, P. (2001) Topographic influence on the seasonal and interannual variation of water and energy balance of basin in North America. *J. Climate*, Vol. 14, pp. 1989-2014.
- Choi, G.W., and Molinas, A. (1993) Simultaneous solution algorithm for channel network modeling. *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 2, pp. 321-328.
- Choi, H.I., Kumar, P., and Liang, X.-Z. (2007) Three-dimensional volume-averaged soil moisture transport model with a scalable parameterization of subgrid topographic variability. *Water Resour. Res.*, Vol. 43, W04414, doi:10.1029/2006WR005134.
- Clapp, R.B., and Hornberger, G.M. (1978) Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, Vol. 14, pp. 601-604.
- Corradini, C., Morbidelli, R., and Melone, F. (1998) On the interaction between infiltration and hortonian runoff. *J. Hydrol.*, Vol. 204, pp. 52-67.
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., and Ginn, T.R. (1984) A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.*, 20, 682-690.
- Dai, Y., and Zeng, Q.-C. (1997) A land surface model (IAP94) for climate studies, Part I: Formulation and validation in off-line experiments. *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 14, 433-460.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G., Denning, A.S., Dirmeyer, P.A., Houser, P.R., Niu, G., Oleson, K.W., Schlosser, C.A., and Yang Z.-L. (2003) The Common Land Model. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 84, pp. 1013-1023.
- Dickinson, R.E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P.J., and Wilson, M.F. (1993) *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to Community Climate Model*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR, pp. 72
- Hromadka II, T.V., McCuen, R. H., and Yen, B.C. (1987) A comparison of overland flow hydrograph models. *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 113, No. 11, pp. 1422-1440.
- Jha, R., Herath, S., and Musiak, K. (2000) River network solution for a distributed hydrological model and applications. *J. Hydrol. Process.*, Vol. 14, No. 3, pp. 575-592.
- Kazezyilmaz-Alhan, C.M., Medina Jr., C.C., and Rao, P. (2005) On numerical modeling of overland flow. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 166, No. 3, pp. 724-740.
- Liang, X.-Z., Choi, H. I., Kunkel, K. E., Dai, Y., Joseph, E., Wang, J. X. L., and Kumar, P. (2005) Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models. *Earth Interactions*, Vol. 9, No. 18, pp. 1-28.
- Mahrt, L., and Pan, H. (1984) A two-layer model of soil hydrology. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 29, pp. 1-20.
- Morita, M., and Yen, B.C. (2002) Modeling of conjunctive two-dimensional surface-three-dimensional subsurface flows. *J. Hyd. Eng.*, Vol. 128, No.2, pp. 184-200.
- Niu, G.-Y., and Yang, Z.-L. (2003) The Versatile Integrator of Surface and Atmosphere processes (VISA) Part II: Evaluation of three topographybased runoff schemes. *Global Planet. Change*, Vol. 38, pp. 191-208.
- Niu, G.-Y., and Yang, Z.-L. (2006) Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale. *J. Hydrometeorol.*, Vol. 7, No. 5, pp. 937- 952.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R.E., and Gulden, L.E. (2005). A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in GCMs. *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, D21106, doi:10.1029/2005JD006111.
- Ponce, V.M., Li R.-M., Simons D.B. (1978) Applicability of kinematic and diffusion models, *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol. 104, No. 3, pp. 353-360.
- Richards, L. (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, Vol. 1, pp. 318-333.
- Sevuk, A.S., and Yen, B.C. (1973) Comparison of four approaches in routing flood wave through junctions. *Proc., 15th Int. Assoc. of Hydraulic Engineering and Research Congress*, Vol. 5, pp. 169-172.
- Smith, R.E., and Woolhiser, D.A. (1971) Overland flow on an infiltrating surface. *Water Resour. Res.*, Vol. 7, pp. 899-913.
- Tsai, C.W.-S., and Yen, B.C. (2001) On noninertia wave versus diffusion wave in flood routing." *J. Hydrology*, Vol. 244, No. 1-2, pp. 97-104.
- Wallach, R., Grigorin, G., and Rivlin J. (1997) The errors in surface runoff prediction by neglecting the relationship between infiltration rate and overland flow depth. *J. Hydrol.*, Vol. 200, No. 1-4, pp. 243-259.
- Zeng, X., Shaikh, M., Dai, Y., Dickinson, R.E., and Myneni, R. (2002) Coupling of the Common Land Model to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate*, Vol. 14, pp. 1832-1854.

© 논문접수일 : 2008년 01월 30일  
 © 심사의뢰일 : 2008년 01월 31일  
 © 심사완료일 : 2008년 03월 09일