

## 분포형 수문모형을 이용한 침식 및 퇴적의 시·공간 변동성 분석

### Analysis on Spatiotemporal Variability of Erosion and Deposition Using a Distributed Hydrologic Model

이 기 하\* / 유 완 식\*\* / 장 창 레\*\*\* / 정 관 수\*\*\*\*

Lee, Gi Ha / Yu, Wan Sik / Jang, Chang Lae / Jung, Kwan Sue

#### Abstract

Accelerated soil erosion due to extreme climate change, such as increased rainfall intensity, and human-induced environmental changes, is a widely recognized problem. Existing soil erosion models are generally based on the gross erosion concept to compute annual upland soil loss in tons per acre per year. However, such models are not suitable for event-based simulations of erosion and deposition in time and space. Recent advances in computer geographic information system (GIS) technologies have allowed hydrologists to develop physically based models, and the trend in erosion prediction is towards process-based models, instead of conceptually lumped models. This study aims to propose an effective and robust distributed rainfall-sediment yield-runoff model consisting of basic element modules: a rainfall-runoff module based on the kinematic wave method for subsurface and surface flow, and a runoff-sediment yield-runoff model based on the unit stream power method. The model was tested on the Cheoncheon catchment, upstream of the Yongdam dam using hydrological data for three extreme flood events due to typhoons. The model provided acceptable simulation results with respect to both discharge and sediment discharge even though the simulated sedigraphs were underestimated, compared to observations. The spatial distribution of erosion and deposition demonstrated that eroded sediment loads were deposited in the cells along the channel network, which have a short overland flow length and a gentle local slope while the erosion rate increased as rainfall became larger. Additionally, spatially heterogeneous rainfall intensity, dependant on Thiessen polygons, led to spatially-distinct erosion and deposition patterns.

**Keywords** : soil erosion, rainfall-sediment yield-runoff model, unit stream power, spatial distribution of erosion and deposition

#### 요 지

기후변화에 의해 집중호우의 빈도 및 강도가 증가하고 지속적인 유역개발에 따른 토지이용의 증가는 토양침식 및 토사유출로 인한 재해 및 환경문제를 야기한다. 현재 광범위하게 사용되고 있는 토양침식량 산정기법은 대부분 대상유역 내의 평균 토양침식량을 산출하는 총량적 개념의 경험식이므로 호우기간동안의 침식 및 퇴적의 시·공간적 변화양상을

\* 충남대학교 건설방재연구소 post-doc 연구원 (e-mail: leegiha@gmail.com)

Research Associate, Construction and Disaster Research Center, Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

\*\* 충남대학교 공과대학 토목공학과 석사

Graduated student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea (e-mail: yuwansik@gmail.com)

\*\*\* 교신저자, Chungju대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: cljang@cju.ac.kr)

Corresponding Author, Assistant Prof. Dept. of Civil Engrg., Chungju National Univ., Chungju 380-702, Korea

\*\*\*\* 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

모의할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 따라서 보다 합리적인 유역규모의 강우-유사-유출 메카니즘 해석을 위해서는 기존의 집중형 모의기법을 대체하고 다양한 기상학적/지형학적 정보를 활용할 수 있는 물리적 기반의 분포형 모형이 요구된다. 본 연구에서는 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈과 단위수류력 이론을 기반으로 하는 유사 유출 모의모듈을 결합한 분포형 강우-유사-유출 모형을 확장개발하고, 용담댐 상류부의 천천유역에 적용하여 모형의 재현성 평가를 수행하였다. 수문곡선의 모의 결과 모형의 재현성은 우수하였으며, 유사량곡선의 경우 침투부분에서 과소 선정되는 경향이 나타났다. 또한, 지표면 유동거리 및 국부경사에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포를 분석한 결과, 침식된 토사는 비교적 경사가 완만한 하천주변에 퇴적되었으며, 강우량과 침식 및 퇴적의 공간분포의 분석결과, 강우량의 증가에 따라 침식량이 증가하였으며, Thiessen망 유역별로 침식 및 퇴적 분포는 상이하게 나타났다.

**핵심용어** : 토양침식, 강우-유사-유출 모형, 단위수류력, 침식 및 퇴적의 공간분포

## 1. 서 론

지구온난화로 인한 급격한 기후변화에 의해 집중호우의 빈도 및 강도가 증가하고 지속적인 유역개발에 따른 토지이용의 증가는 토양침식을 가속화시키고 있으며, 토사유출로 인한 재해 및 환경문제를 유발한다. 특히, 산지 하천의 경우 분류와 합류하는 합류점 부근의 주거지와 농경지 등에서 토사의 퇴적에 따른 토사재해가 극심한 실정이다. 토양침식현상은 하천 상류부에 위치한 농경지의 황폐화를 초래할 수 있으며, 하천으로 გადა이송된 토사는 통수능을 감소시켜 홍수 위험성을 증대시키고 저수지의 퇴사량을 증가시킴으로서 댐의 수명을 단축시킬 수 있다.

따라서 토양침식 및 토사유출로 인한 피해를 예방하고 대응방안을 수립하기 위해서는 토양침식의 발생원인 및 규모에 대한 정확한 예측 및 정량적 평가가 필요하다. 이를 위해서는 지속적인 모니터링을 통한 실측에 의한 토양 침식량의 산정이 가장 바람직하지만 실질적으로 측정이 어렵고, 인력과 비용면에서 비효율적이므로 경험식이나 집중형 토양침식모형 (lumped erosion model)을 사용하여 토양침식량을 산정하는 것이 일반적이다. 하지만 토양 침식현상은 지형, 지질, 기상 등 복합적인 요인에 의하여 발생되기 때문에 토양침식량을 산정하기 위한 회귀식 모형이나 집중형 토양침식 모형을 완벽히 신뢰하는 것은 무리가 있다. 회귀식 모형의 경우 수집된 자료들이 제한된 공간 및 시간에 대한 자료이므로 장기간 또는 적용범위를 벗어난 회귀식의 응용 결과에 상당한 불확실성이 내포되어 있고 (행정자치부 국립방재연구소, 1998), 집중형 모형의 경우 공간적으로 유역의 수문학적, 지형학적 이질성 (heterogeneity)을 고려하지 못하므로 적용성에 한계가 있다. 따라서 강우-유사-유출의 연계모의 및 유역내 침식 및 퇴적에 관한 시-공간적 변동성을 분석하기 위해서는 분포형 수문모형이 필요하다.

국내의 경우 기존의 토양침식량 산정기법을 이용하여

연간 토양침식량을 산출하는 연구들 (김용태 등, 2001; 손광익, 2001a, 2001b)은 다수 수행된 바 있으며, 최근에는 지리정보시스템 (GIS)가 발달되면서 이러한 토양침식모형과 지형정보시스템을 연계하여 보다 정확한 토양침식량의 산정에 관한 연구가 진행되고 있다 (권혁현, 2002; 조영진, 2004). 또한, 준분포형 장기유출 모형인 SWAT을 이용하여 강우-유출 및 토양침식량 산정에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (갈병석, 2008; 예령 등, 2008; 이근상 등, 2009). 하지만 토양유실 및 유사발생의 경우 대부분 높은 강우강도의 집중호우로 의해 발생하므로 시시각각으로 변화하는 강우강도를 이용한 모의기법이 필요하다 (한국환경정책평가연구원, 2009). 그러나 전술한 모형들은 모형자체의 구조적 제한 때문에 시 또는 분단위의 강우강도를 이용한 유출, 토사발생 및 침식/퇴적의 시-공간적 분포를 모의하기에는 한계가 있다. 따라서 기존의 회귀식 또는 집중형 모형을 대체할 수 있고 유사 발생 시 토양침식의 발생 원인과 지역, 그리고 규모 및 기간에 대해 규명하고 GIS기반의 모의시간별 토사 침식/퇴적 정보를 제공하여 유역대응 토사유출 관리방안 수립 시 활용이 가능한 물리적 기반의 분포형 수문모형의 개발은 중요 연구과제라 할 수 있다.

국외의 경우 EUROSEM (Morgan et al., 1992, 1998), WEPP (Flanagan and Nearing, 1995), KINEROS (Woolhiser et al., 1990), LISEM (De Roo et al., 1996a, 1996b) 등과 같은 다양한 물리적 기반 (physically-based or process-oriented)의 분포형 토양유실 평가모형이 개발되어 수자원 및 환경분야를 포함한 다양한 분야에 활용되고 있는 반면, 국내의 경우 불충분한 유사측정 데이터 및 모의기법의 부재로 인해 강우-유사-유출 연계모의기법에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기계발전 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈 (Tachikawa et al., 2004)과 단위수류력 (unit stream power) (Yang, 1972) 이론을 기

반으로 한 유사유출모의 모듈 (Sayama, 2003)을 결합하여 raster기반의 분포형 강우-유사-유출 모형을 확장개발하고 비교적 유량과 유사량 실측자료가 풍부한 용담댐 상류 천천유역을 대상으로 모형의 재현성을 평가하고 유역내 침식 및 퇴적의 시·공간적 분포에 대하여 분석하고자 한다.

## 2. 분포형 강우-유사-유출모형의 확장개발

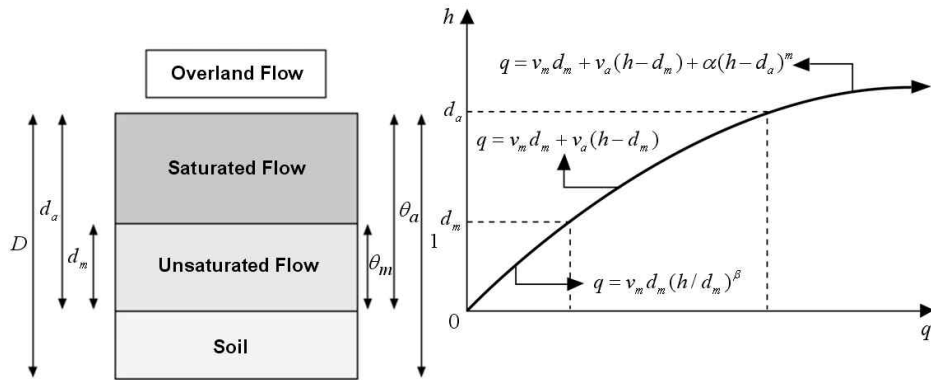
분포형 수문모형을 이용한 격자기반의 토양유실량 산정을 위해서는 토양침식의 주요 원인이 되는 강우와 지표류의 물리적 해석이 반영되어야 하며, 격자별 토양침식량의 이송과정을 수식화하여 모형에 포함하여야 한다 (Nearing et al., 1989). 따라서 본 연구에서는 토양의 포화 정도에 따른 포화초과지표류 (saturation excess overland flow)의 모의가 가능한 강우-유출 모듈을 선택하고, 강우 침식력 및 지표류침식력을 고려한 토사발생모의 모듈을 결합한 분포형 강우-유사-유출모형을 확장개발하였다.

### 2.1 강우-유출 모듈

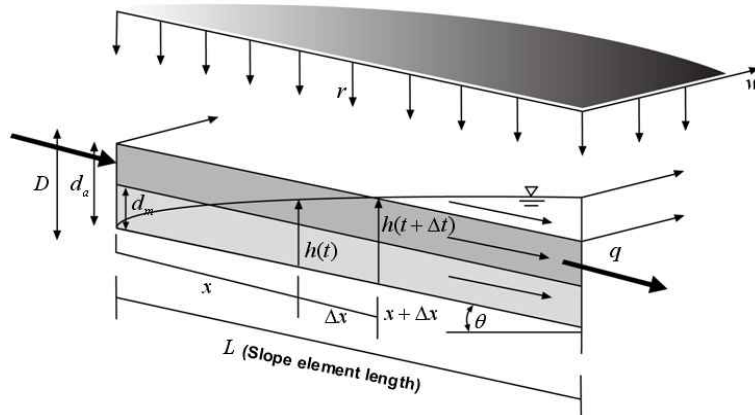
본 연구에서 사용된 강우-유출 모듈 (Tachikawa et al.,

2004)은 강우발생시 각 격자에서 강우는 지표하로 직접적으로 더해지고 격자의 토양층이 포화되면서 지표흐름이 생성되며, 지표하 흐름은 비포화 흐름과 포화흐름으로 구분되어 모의된다. 지표하 흐름의 수직적인 채움현상 때문에 초기 강우 손실을 고려하지 않고, 투수계수와 토양층 두께에 따른 지체된 지표하 흐름을 효과적으로 모의할 수 있으며, 개념적인 수위-유량 관계식을 이용하여 각 격자별 지표 및 지표하 흐름을 해석한다.

흐름해석을 위한 지배방정식은 운동과 (kinematic wave)방정식에 기반을 두고 있다. 운동량 방정식의 가속항과 압력항을 무시하는 운동과 근사해는 배수 영향을 고려하지 않으며, 파형은 연속방정식에 의해 기술되어진다. 운동과 모형은 분포형 모형에서 지표류와 하도추적뿐만 아니라 지표하 흐름을 적용하고 계산하는데 있어 간단하고 계산 효율성을 인정받고 있으며, 다양한 수문해석 목적으로 사용되고 있다 (Singh, 2001). 지표 흐름 및 지표하 흐름 (비포화 흐름과 포화 흐름)을 고려한 개념적인 수위-유량 관계식은 Fig. 1 (a)와 같고, 모형의 사면요소에서의 유입-유출 계산모식도는 Fig. 1 (b)와 같다. 강우초기 토양의 미소공극 (micropore,  $\theta_m$ )이 강우로 인하여 채워지



(a) Stage-Discharge Relationship (Tachikawa et al., 2004)



(b) Rainfall-Runoff Process at a Slope Element

Fig. 1. Schematic Structure of the Rainfall-Runoff Module

먼저 토양은 비포화 흐름이 되고, 지속된 강우에 의해 수위가 상승함에 따라 토양의 미소공극과 대공극 (macropore,  $\theta_a$ )이 채워지면서 토양은 포화흐름이 된다 (Miyazaki, 2006).

지표류는 수심  $h$ 가  $d_m$ 보다 높을 때 발생하며,  $d_m$ 보다 낮은 경우 포화도  $(h/d_m)^\beta$ 와 유속  $v_m$ 으로 표현되는 Darcy 법칙에 의한 단위폭당 유량  $q$ 를 계산할 수 있다. 비포화 흐름의 유속  $v_m$ 은 투수계수  $k_m$ 과 경사  $i$ 의 곱으로 계산되며, 수심  $h$ 가  $d_m$ 에 도달하고 지표류가 발생하기 전인 포화흐름의 단위폭당 유량  $q$ 는 투수계수  $k_a$ 와 경사  $i$ 의 곱으로 산정되는 유속  $v_a$ 를 이용하여 구할 수 있다. 이상의 메카니즘에 의해 강우시 각 격자에서 수심증가에 따른 단위폭당 유량  $q$ 는 구간별로 Eq. (1) (Tachikawa et al., 2004)과 같이 나타낼 수 있으며, 모의를 위한 연속방정식은 Eq. (2)와 같다.

$$q = \begin{cases} v_m d_m (h/d_m)^\beta & : 0 < h \leq d_m \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) & : d_m < h \leq d_a \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \alpha (h - d_a)^m & : d_a < h \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x,t) \quad (2)$$

여기서,  $v_m = k_m i$ ,  $v_a = k_a i$ ,  $k_m = k_a/\beta$ ,  $\alpha = \sqrt{i}/n$ ,  $q$ 는 단위 폭당 유량 ( $m^3/s$ ),  $h$ 는 수심 (m),  $i$ 는 경사,  $k_m$ 는 비포화대층의 투수계수 ( $m/s$ ),  $k_a$ 는 포화대층의 투수계수 ( $m/s$ ),  $d_m (= D\theta_m)$ 는 비포화대층의 두께 (m),  $d_a (= D\theta_a)$ 는 비포화대층과 포화대층의 두께 (m),  $n$ 은 조도계수 ( $m^{-1/3}$ ),  $\beta$ 는 투수율 ( $k_a/k_m$ ),  $m$ 은 5/3이다.

본 강우-유출 모듈에서 지표류는 운동과 근사해를 위하여 사각형 단면으로 가정하고 지표하 흐름과 지표흐름의 유선은 경사와 평행하고 동수경사 역시 경사와 평행하다고 가정한다. 강우 입력 자료  $r(x,t)$ 는 격자의 수심에 따라서 지표하 흐름과 지표 흐름에 직접적으로 더해지며, 유출 생성과 추적을 모의하기 위한 1차원 운동과 방정식의 수치해석 방법은 Lax-Wendroff 유한차분기법 (Lax and Wendroff, 1960)을 사용한다.

## 2.2 유사-유출 모듈

토양입자는 빗방울의 충격과 흐름의 침식력이 그 침식력에 저항하는 토양 능력을 초과할 때 분리되며, 그 후 토양입자는 지표류에 의해 이송된다 (Morris and Fan, 1997). 토양입자의 퇴적은 입자의 중량이 이송시키려는 힘을 초과할 때 발생하며, 이 조건은 유사 이송능력 (transport capacity)을 초과하는 유사량으로 표현된다. 유출의 생성, 토양 침식과 퇴적은 격자별로 계산되고 흐름방향을 따라

상류격자로부터 하류격자로 추적된다. 유사량은 빗방울에 의한 토양분리량 (soil detachment by raindrop)과 지표류에 의한 토양분리량 (soil detachment by overland flow)에 의해서 계산되며, 지표류가 발생할 때 유사는 지표류에 의해 사면으로부터 하도로 이송된다. Eq. (3)은 유사연속방정식을 나타내며, Eq. (4)은 순 침식 (net erosion)을 나타낸다.

$$\frac{\partial (h_s C)}{\partial t} + \frac{\partial (q_s C)}{\partial x} = e(x,t) \quad (3)$$

$$e(x,t) = DR + DF \quad (4)$$

여기서,  $C$ 는 지표류의 유사농도 ( $kg/m^3$ ),  $h_s$ 는 지표류의 수심 (m),  $q_s$ 는 지표류의 유량 ( $m^3/s$ ),  $e$ 는 순 침식 ( $kg/m^2/hr$ ),  $DR$ 은 빗방울에 의한 토양분리량,  $DF$ 는 지표류에 의한 토양분리량이다.

빗방울 충격은 토양입자 분리를 위한 운동에너지의 주요한 요소로 작용한다. 일반적으로 토양 분리는 강우, 토양입자의 침식성 (erodibility), 지표류에 의한 함수이며, 침식성은 빗방울 충격에 의해 생성되는 에너지와 직접적인 연관이 있고 강우강도, 강우기간, 계절, 빗방울 크기, 토지피복 조건 등의 멱함수로 표현된다.

본 연구에서는 빗방울에 의한 토양 분리량 ( $DR$ )은 순 강우의 총 운동에너지에 비례하고, 지표류 수심이 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 경험 공식을 이용하여 산정하였다 (Morgan et al., 1998).

$$DR_i = k KE r_i e^{-bh_s} \quad (5)$$

여기서,  $k$ 는 토양 분리력 ( $kg/J$ ),  $KE$ 는 순 강우의 총 운동에너지 ( $J/m^2$ ),  $b$ 는 토성에 의해 결정되는 상수로서 0.9~3.1의 범위를 가지고 사용되나 보통 2의 값이 사용된다 (Torri et al., 1987).

지표류에 의한 토양 분리량 ( $DF$ )은 지표류에 의해 토양입자가 분리됨에 따라 계산되어지며, 지표류에 의한 유사 이송은 지표류의 이송능력이 입자를 이송시키기에 충분할 경우에 발생한다. 임의 격자  $i$ 에서 지표류에 의한 토양분리량은 다음과 같이 표현된다 (Morgan et al., 1998).

$$DF_i = \alpha \left( \frac{TC_i}{1000} - C_i \right) h_{s_i} \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 분리/퇴적 효율계수,  $TC$ 는 이송능력 (ppm)이다.

유사량을 산정하는데 있어 빗방울에 의한 토양분리량과 지표류에 의한 토양분리량을 이송하는 지표류의 이송능력 ( $TC$ )의 산정이 가장 중요하며, 지표류의 유사이송

능력의 개념은 다양한 침식모형에서 광범위하게 적용되고 있으며, 이러한 이송능력의 과정을 정의하는 식들은 실제적으로 물리적 기반의 토양침식모형들에 포함되어 있다 (Prosser and Rustonji, 2000).

본 연구에서는 격자별 토양 침식과 퇴적과정의 모의를 위한 이송능력을 산정하기 위해 개수로에서의 유사이송은 물론 유역내 지표면 침식까지 응용할 수 있다고 알려진 Yang (1972)의 단위수류력이론을 사용하였다 (행정자치부 국립방재연구소, 1998). 단위수류력이론은 토사이송에 사용된 에너지의 소산율이 토사운송량과 관계있다는 것에 기초를 두고 있으며, Yang (1972)에 의하여 하천형태학의 연구에서 처음으로 제안되었다. 이후 단위수류력 이론은 하천이나 개수로에서의 유사이송과 지표면 침식분야로부터 응용되고 발전되어왔다. 단위수류력은 유속과 경사의 곱 ( $VS$ )으로서 개수로에서 토사와 유수의 운송에 사용되는 단위중량당 유수의 에너지 ( $Y$ )의 변화로 나타낼 수 있으며 Eq. (7)과 같이 표현된다.

$$\frac{dY}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dY}{dx} = VS \quad (7)$$

수류력 (stream power) 개념을 처음 도입한 사람은 Bagnold (1960)이지만 Bagnold가 단위 면적의 하상에 작용하는 수류력을 강조한 반면, Yang (1972)은 유사를 이송하는 데 단위 무게와 유체당 일률을 강조하였다.

총 유사 농도를 결정하기 위해 Yang (1973)은 실험수로 자료의 분석을 통해 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + \left( 1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (8)$$

여기서,  $C_t$ 는 총 유사 농도 (ppm),  $VS$ 는 단위수류력 (unit stream power),  $V_{cr} S$ 는 한계단위수류력,  $\omega$ 는 침강속도 (m/s),  $U_*$ 는 마찰속도 ( $\sqrt{gih_s}$ , m/s),  $\nu$ 는 동점성계수 ( $m^2/s^2$ ),  $d_{50}$ 은 중앙입경 (mm)이다.

단위수류력 이론으로 산정된 유사량 즉, 이송능력과 그 격자에 유입되는 유사량을 비교하여 침식 또는 퇴적을 결정한다. 임의의 격자에서 흐름의 이송능력 ( $TC$ )이 상류 격자로부터 유입되는 유사량 ( $Q_{sed}$ )보다 클 경우  $TC - Q_{sed}$ 만큼의 유사가 침식되고 반면에 흐름의 이송능력 ( $TC$ )이 공급되는 유사량 ( $Q_{sed}$ )보다 작을 경우  $Q_{sed} - TC$ 만큼의 유사가 퇴적된다. Fig. 2는 단위수류력 이론에 의해 산정된 이송능력과 유입유사량과의 관계에 의한 침식과 퇴적

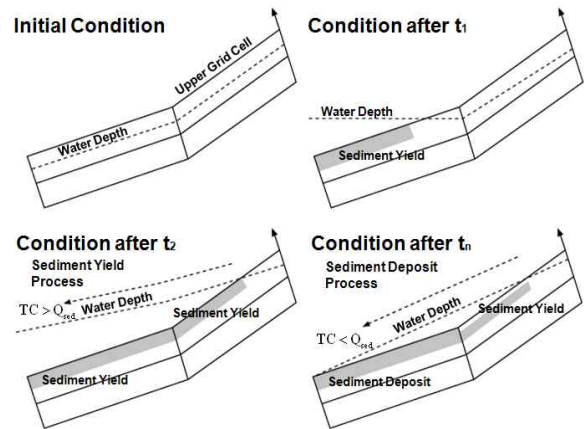


Fig. 2. Schematic Illustration of Sediment Transport Process by Flow on a Slope Element (Sayama, 2003)

의 개념도를 나타낸다. 유사유출은 연속방정식에 따라 격자별 흐름추적에 의해 상류격자에서 하류격자로 순차적으로 추적되며 유사유출 연속방정식의 수치해석 기법은 유한차분법인 MacCormack (MacCormack, 1969)기법을 사용하여 계산한다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 대상유역 현황

모형의 재현성 평가를 위한 대상유역은 용담댐 상류의 천천유역으로 장수군 천천면 연평리 연평교 하류 20m 지점의 좌안에 천천 수위관측소가 설치되어 있고, 유역면적은 289.8 km<sup>2</sup>, 유역평균고도는 EL. 549.13m이며 유로연장은 25.5km이다. Figs. 3 (a) and (b)는 대상유역 현황도와 모형에서 구성된 천천유역의 배수경로 (drainage network) 모식도이다.

#### 3.2 공간자료 및 수문자료 구축

본 모형은 DEM으로부터 생성된 지형정보를 모형의 입력자료로 사용하므로 1/25,000 수치지도의 지형정보속성을 추출한 후 상용 S/W인 ArcInfo와 ArcView를 이용하여 불규칙삼각망을 형성하고 250×250m 격자크기로 DEM을 구축하였다. 다양한 공간해상도의 DEM자료의 활용이 가능하지만 본 연구에서는 분포형 모형의 모의시간의 효율성을 고려하여 250m의 격자를 선택하였다 (Lee et al., 2009). 이상의 과정에 따라 생성된 DEM은 주위가 높은 표고값이나 낮은 표고값들로 둘러싸인 격자로 정의되는 sink나 peak와 같은 오차를 포함하게 되는데 이러한 오차들은 부정확한 수문지형정보를 제공하기 때문에 지형정보 추출 전 반드시 제거되어야 한다 (Tarboton et al.,

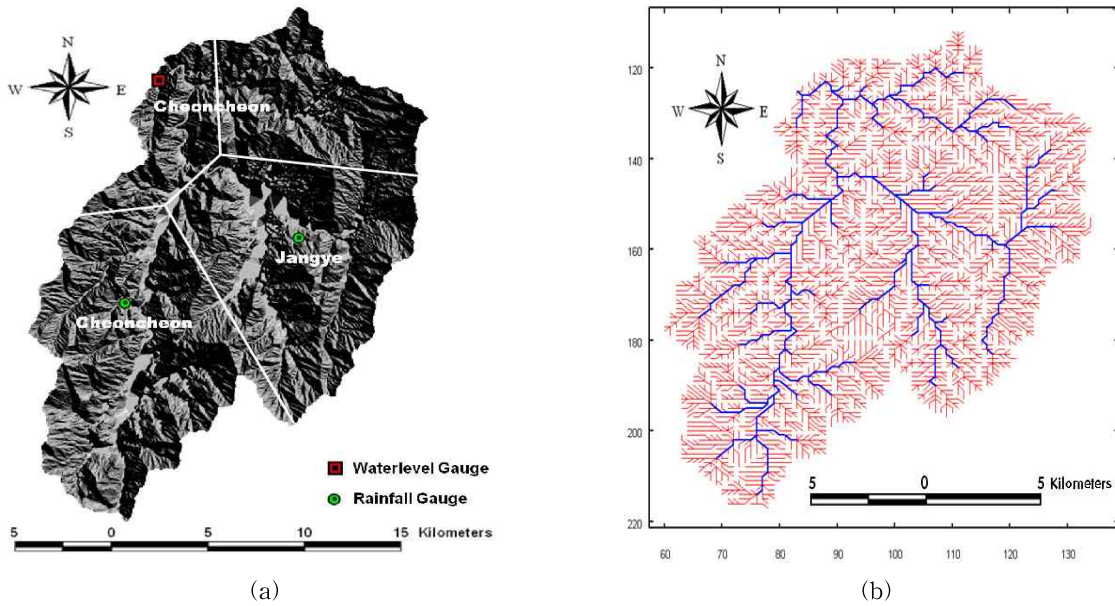


Fig. 3. (a) Study Site and (b) Topographic Representation of the Study Site in the Model

Table 1. Stage-Discharge Equations for the Three Specific Years

Gauge station	Year	The equation of stage (m)-discharge ( $m^3/s$ )
Cheoncheon	2002	$Q = 24.945 \times (H - 2.281)^{2.448}$
	2003	$Q = 53.522 \times (H - 2.346)^{2.219}$
	2007	$Q = 50.403 \times (H - 2.367)^{2.257}$

Table 2. Discharge-Sediment Load Equations for the Three Specific Years

Gauge station	Year	The equation of discharge ( $m^3/hr$ )-sediment loads (kg/hr)
Cheoncheon	2002	$SS = 0.9 \times 10^{-5} \times Q^{1.700}$
	2003	$SS = 0.5 \times 10^{-6} \times Q^{1.932}$
	2007	$SS = 0.28 \times 10^{-5} \times Q^{1.818}$

1989). 따라서 DEM의 함몰부와 평탄지 등을 전처리를 통해 오류를 수정하였으며, 흐름방향도, 흐름누적도, 유역속성 등을 그리드 형태로 구축하였다.

유역의 토지피복은 지표면 흐름의 모의를 위한 조도계수에 많은 영향을 미치며, 강우에 의한 지표면 유출모의를 위한 토지피복에 따른 조도계수는 선행연구를 통해 많은 성과가 이루어져 있는 실정이다. 국내에서는 박상식과 이종태 (2008)가 Vieux (2004), Downer and Ogden (2006), Hjelmfelt (1986)이 제시한 조도계수의 기초자료와 이를 조합한 5개 유형의 조도계수를 사용하여 격자별 조도계수를 각각 선정하여 각 경우에서의 유출민감도를 검토한 바 있다. 본 연구에서는 Vieux (2004)가 제안한 지표면 조도계수를 바탕으로 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)

에서 제공하는 Landsat 위성영상을 통해 피복분류된 자료로부터 조도계수를 산정하였다. 이 밖의 강우-유사-유출 연계모의를 위해 상진, 계북2, 장계, 천천 우량관측소의 시간별 점 강우량 자료를 GIS상에서 Thiessen기법을 이용하여 공간분포형 강우량 자료로 변환하였다. 모형 매개변수 보정 및 검증을 위해 용담댐 일원 하천유량측정 등 수문조사보고서 (한국수자원공사, 2002, 2003, 2007)의 수위-유량 관계곡선식 (Table 1)을 이용하여 수위 H (m) 자료를 유량 Q ( $m^3/s$ )자료로 변환하여 유출구에서의 실측 유량 값을 산정하였으며, Table 1의 유량을  $m^3/hr$ 로 변환하여 유량-유사량 관계곡선식 (Table 2)으로부터 부유사량 SS (kg/hr)를 산정하였다. 본 연구에서는 부유사량의 단위를 mg/l로 환산하여 유사량 모의를 수행하였다.



### 3.3 매개변수 보정

수문모형의 매개변수는 일반적으로 물리적 매개변수 (physical parameter)와 과정 매개변수 (process parameter)로 구분된다 (Sorooshian and Gupta, 1995). 여기서 물리적 매개변수란 관측자료로부터 직접적으로 산정이 가능한 매개변수를 의미하며, DEM으로부터 자동추출이 가능한 지표면 유동경로 길이, 하천길이, 유역경사 및 수로경사 등 공간적으로 변화하는 지형학적 인자들을 포함하고 토지피복도, 토양도, 지질도 등에서 추출이 가능한 조도계수, 유효 토양심도, 투수계수 등과 같은 유출관련 수문인자들을 의미한다. 과정 매개변수는 수문모의를 위한 모형의 알고리즘 상에 포함되어 있는 수학적인 지수 또는 상수 등 양적으로 표시되는 값으로서 실측을 통해 획득하기가 어려우며, 대부분 보정을 통해 결정하게 되는 매개변수를 의미한다.

집중형 수문모형은 수문성분과정을 해석하기 위해 공간적으로 변화하지 않고 유역의 평균적인 상태를 나타내

는 물리 매개변수 및 개념적인 과정 매개변수를 사용함으로써 반드시 과거수문자료와의 비교·검토를 통하여 보정되어야 하는 반면, 완전 분포형 수문모형 (fully-distributed hydrologic model)은 다양한 디지털지형/수문자료를 활용함으로써 직접적으로 산정이 가능한 물리적 매개변수를 사용함으로써 매개변수의 보정은 과정 매개변수만을 고려하여 결정하게 된다.

그러나 현재의 수문관측기술 (hydrologic measurement technology)의 한계, 스케일 불확실성 등에 의해서 공간적 이질성을 완벽하게 고려할 수 있는 물리적 매개변수 산정은 불가능하며, 이러한 매개변수 역시 보정을 통해 산정해야한다. 따라서 현재 사용되고 있는 대부분의 분포형 수문모형의 경우는 완전 분포형이기 보다는 준분포형 수문모형 (quasi-distributed hydrologic model) 범주에 포함된다고 할 수 있다 (Fig. 4).

따라서 본 연구에서는 대상유역 내 총 토양두께  $D$ 는 격자별로 균등하게 1m로 고정하였으며, 물리적 매개변수

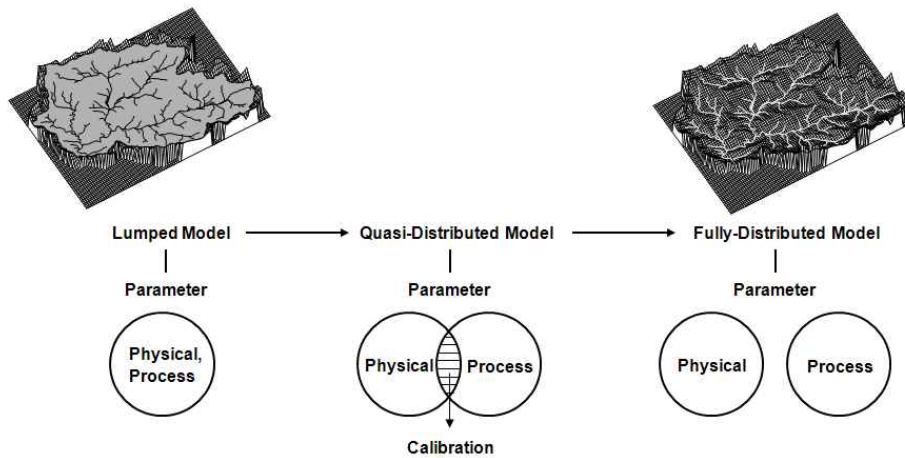


Fig. 4. Schematic Diagram for Model Calibration According to Model Structure (유완식, 2010)

Table 3. Feasible Parameter Ranges for Model Calibration and Optimal Parameter Values

Parameter	Description	Range of value	Optimal value
$d_m$	The depth of the unsaturated soil layer (mm)	50 ~ 300	54.00
$d_s$	The depth of the saturated soil layer (mm)	1 ~ 700	108.0
$k_a$	The hydraulic conductivity of the saturated soil layer (m/s)	0.001 ~ 0.1	0.006
$\beta$	The non-linear exponent constant for the unsaturated soil layer	2 ~ 10	2.01
$d_{50}$	The median grain size (mm)	1 ~ 10	9.50
$k_s$	The soil detachability (kg/J)	0.0008 ~ 0.006	0.002
$\alpha$	The detachment or deposition efficiency	0.335 ~ 1.0	0.375
KE	The total kinetic energy of the net rainfall ( $J/m^2$ )	1 ~ 30	1.182
$V_{cr}S$	The critical unit stream power (m/s)	0.002 ~ 0.100	0.098

와 과정 매개변수 중 실측을 통해 산정이 어려운 유출관련 매개변수 4개 ( $k_a$ ,  $d_s$ ,  $d_m$ ,  $\beta$ ), 유사유출관련 매개변수 5개 ( $d_{50}$ ,  $k_s$ ,  $\alpha$ ,  $KE$ ,  $V_{cr}S$ ) 총 9개의 매개변수를 Table 3과 같이 선정하였다. 모형의 재현성을 평가하고 유역 내 침식 및 퇴적의 시·공간적 분포에 대하여 분석하기 위해 2002년 태풍 ‘루사’ 강우사상에 대하여 전역최적화 기법인 SCE-UA (Duan et al., 1992, 1993, 1994)를 이용하여 목적함수 RMSE (root mean square error)를 최소로 하는 최적 매개변수를 산정하였으며, 이를 2003년 태풍 ‘매미’, 2007년 태풍 ‘나리’ 강우사상에 적용하여 모형을 검증하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2} \quad (9)$$

여기서,  $N$ 은 자료의 개수,  $O_t$ 와  $P_t$ 는 시간  $t$ 에서의 실측치와 모의치를 나타낸다.

SCE-UA 전역최적화기법을 통한 태풍 ‘루사’ 강우사상

에 대한 매개변수의 최적값은 Table 3의 4번째 열에 정리하였으며, 모형의 보정 및 검증을 위한 강우사상은 Table 4와 같다.

Fig. 5는 SCE-UA기법을 통해 산정된 최적매개변수를 태풍 ‘루사’ 강우사상에 적용하여 유량과 유사농도를 분석한 결과로서, 유량에 대한 RMSE는  $38.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , 실측치와 관측치의 첨두유량차는  $13.61 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며, 유사량에 대한 RMSE는  $328 \text{ mg/l}$ , 실측치와 관측치의 첨두유사농도차는  $804.76 \text{ mg/l}$ 로 나타났다. 매개변수 보정을 통한 실측치와 모의치의 비교결과를 살펴보면 유출모의의 경우, 계산된 유출량은 실측치와 매우 유사하게 모의된 반면, 유사유출 모의의 경우, 강우의 시간적 변동에 따라 유사유출 변동 경향성 역시 비슷하게 모의되었으나 첨두부분에서 모의치가 실측치에 비해 과소산정되는 결과를 나타내었다. 이는 본 연구에서 사용된 유량-유사량곡선식은 고유량의 측정결과가 누락되어있는 상태에서 회귀분석을 통해 외삽

Table 4. Historical Flood Events for Rainfall-Sediment Yield-Runoff Simulation

Event No.	Rainfall Duration	Total Rainfall (mm)	Typhoon
1	2002.08.30.17:00 ~ 09.02.19:00	194.82	Rusa
2	2003.09.11.21:00 ~ 09.15.16:00	133.89	Maemi
3	2007.09.14.06:00 ~ 09.21.15:00	205.46	Nari

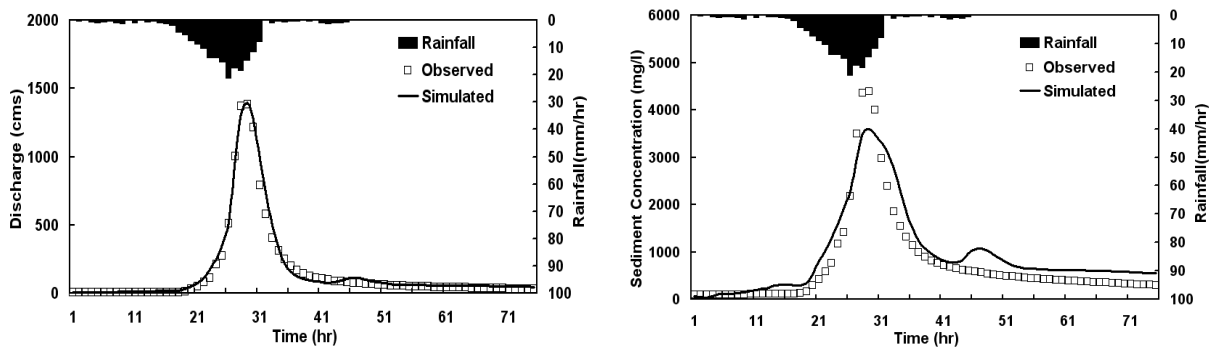


Fig. 5. Hydrograph and Sedigraph Based on the Optimal Parameter Set for the Rusa Event

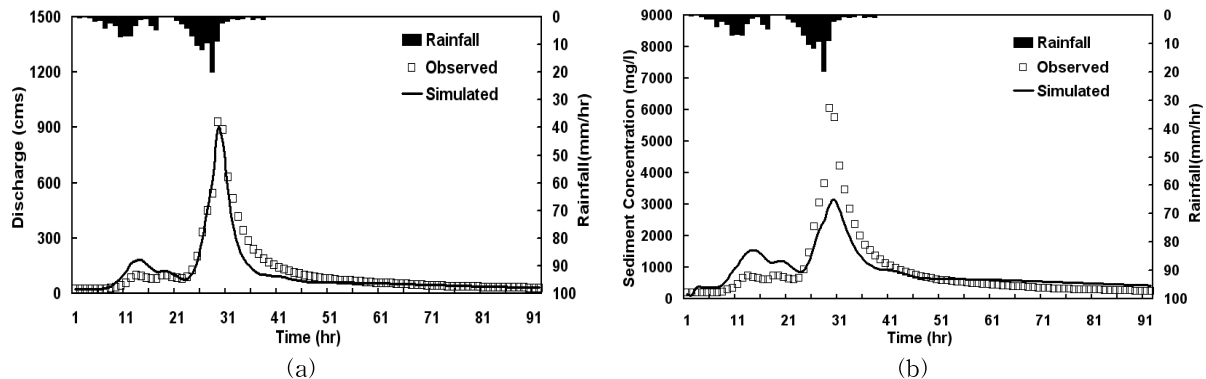


Fig. 6. Model Validation Results for the Maemi Event: (a) Hydrograph; (b) Sedigraph



된 결과를 사용하기 때문에 유량의 미세한 변화에도 고농도의 유사량을 제공할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.4 모형의 검증

개발된 모형의 재현성 평가를 위해 첨두상대오차 (relative error,  $RE$ ), 모형효율성지수 (efficient index,  $EI$ )를 이용하였으며, Eqs. (10) and (11)과 같이 정의된다.

$$RE = \frac{(Q_p - P_p)}{Q_p} \times 100 \quad (10)$$

$$EI = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O})^2} \quad (11)$$

여기서,  $N$ 은 자료의 개수,  $O_t$ 와  $P_t$ 는 시간  $t$ 에서의 실측치와 모의치,  $O_p$ 와  $P_p$ 는 첨두시간에서의 실측치와 모의치,  $\bar{O}$ 는 실측치의 평균값을 나타낸다.

Figs. 6 and 7은 2002년 태풍 ‘루사’에 대해 보정된 매개변수를 이용하여 2003년 태풍 ‘매미’와 2007년 태풍 ‘나리’에 적용한 모형의 검증결과이며, 실측치와 모의치의 비교 결과값은 Table 5와 같다. 2003년 태풍 ‘매미’ 강우사상에 대한 유출모의의 경우,  $RE$ 는 3.79%,  $EI$ 는 0.921로 우수한 재현성을 보였으며, 유사유출 모의의 경우,  $RE$ 는 47.91%,  $EI$ 는 0.712로 나타났다. 2007년 태풍 ‘나리’ 강우사상에 대해서는 유출모의의 경우,  $RE$ 는 31.49%,  $EI$ 는 0.774로 계산되었으며 유사유출 모의의 경우,  $RE$ 는 115.89%,  $EI$ 는 0.629로 분석되었다. 또한, 첨두시간의 분석 결과 2003년 태풍 ‘매미’ 강우사상에 대한 유사량의 모의 첨두시간이 관측치에 비해 1시간 늦게 발생한 것을 제외하고는 모든 유량 및 유사량 모의결과에서 모의 첨두시간과 관측 첨두시간은 동일하게 나타났다. 유출모의 결과에 비해 유사유출 모의결과는 실측치에 비해 과소산정되었는데, Johnson et al. (2000)은 일반적으로 유사유출의 경우 -50~200% 범위의 오차는 유사량 자료의 불확실성을 고려하였을 때

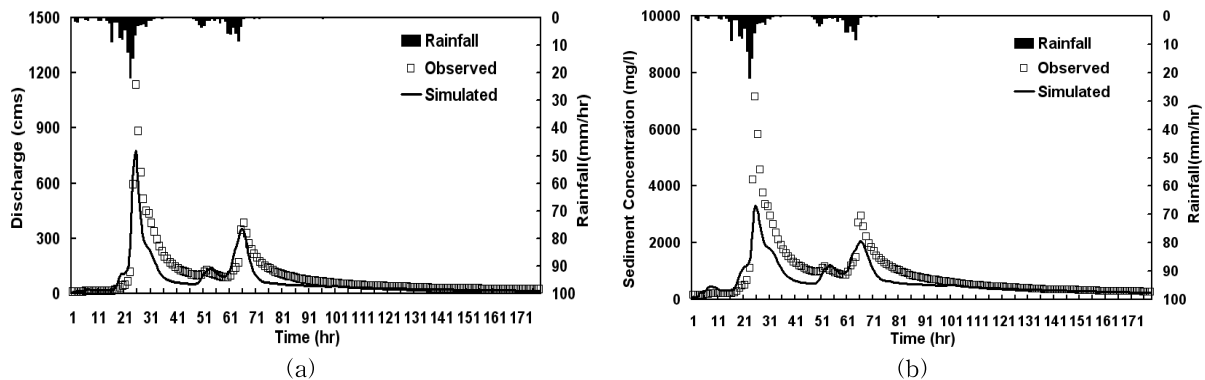


Fig. 7. Model Validation Results for the Nari Event: (a) Hydrograph; (b) Sedigraph

Table 5. Summary of Model Performances for the Three Historical Events

Typhoon	Item	Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Peak Sediment Concentration (mg/l)
RUSA	Observed	1384.66	4391.32
	Simulated	1398.27	3586.56
	$RE$	-0.98%	18.33%
	$EI$	0.983	0.878
MAEMI	Observed	931.90	6038.06
	Simulated	896.58	3145.13
	$RE$	3.79%	47.91%
	$EI$	0.921	0.712
NARI	Observed	1134.14	7160.30
	Simulated	777.04	3277.83
	$RE$	31.49%	115.89%
	$EI$	0.774	0.629

적합한 결과라고 언급하였다. 따라서 본 연구에서 확장해  
 발된 모형의 모의결과는 타당한 것으로 판단된다.

### 3.5 침식량의 모의시간별 공간분포 분석

태풍 '루사' 강우사상을 적용한 유사유출 모의결과를  
 이용하여 천천유역 내 임의의 모의시간별 침식량의 공간적

분포를 분석하였다. Fig. 8은 태풍 '루사'에 의한 천천유역  
 에서의 시간별 침식분포도를 나타낸다. 침식분포를 살펴  
 보면 강우초기 유역 내 일부격자에서 침식이 발생하고 강  
 우량이 증가함에 따라 토양이 포화되고, 지표류가 발생함  
 에 따라 넓은 유역에서 침식이 발생함을 확인할 수 있으  
 며, 강우가 종료됨에 따라 침식이 발생하는 격자의 수도

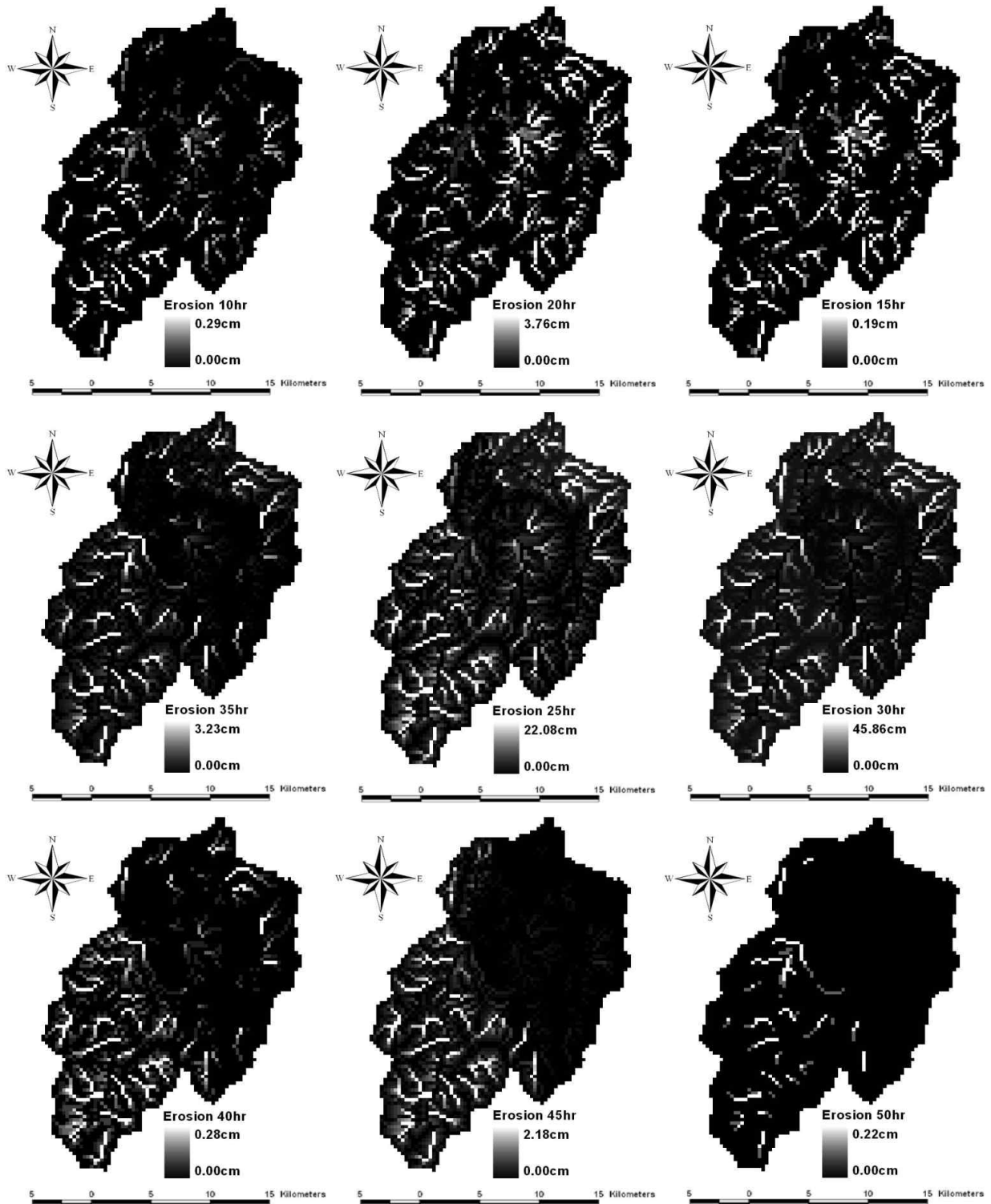


Fig. 8. Variation of Erosion in Time and Space During the Rusa Event

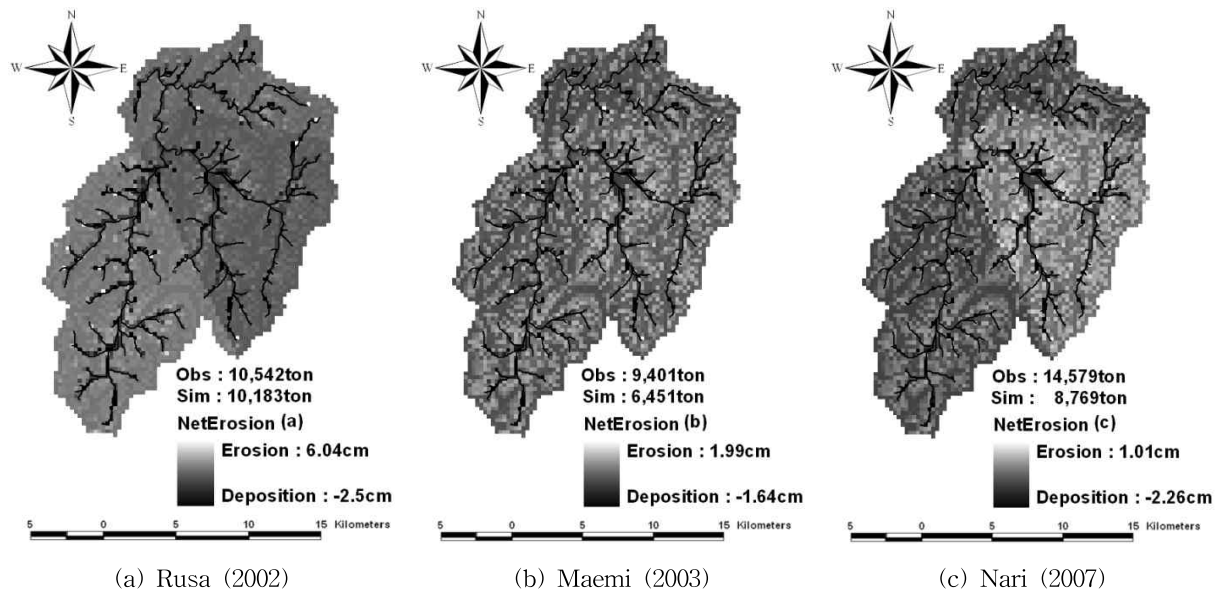


Fig. 9. Spatial Patterns of Erosion and Deposition within the Cheon Cheon Catchment

감소하게 된다. 또한 강우강도가 최대인 30시간에서 격자별 최대 침식량은 45.86 cm로 분석되었다. 이는 격자별 유사이송을 고려하지 않은 경우, 즉, 유사이송능력에 의한 침식과 퇴적에 의한 토양의 공간적 재분배 (soil spatial redistribution)를 고려하지 않은 경우를 도시한 것이며, 유사이송능력과의 비교를 통해 계산된 유역 내 침식 및 퇴적의 공간적 분포는 Fig. 9와 같다. 태풍 '루사' 강우사상의 경우 최대 6.04cm의 침식, 2.5cm의 퇴적이 발생하였으며, 강우기간 동안의 유사유출량은 10,183 ton으로 모의되었고 관측 유사유출량 10,542 ton과의 상대오차 분석결과 3.52%로 유사하게 모의되었다. 태풍 '매미' 강우사상의 경우 최대 1.99cm의 침식, 1.64cm의 퇴적이 발생하였고 모의 유사유출량은 6,451 ton, 관측 유사유출량은 9,401 ton으로 상대오차 45.72%를 보였으며, 태풍 '나리' 강우사상은 최대 1.01cm의 침식, 2.26cm의 퇴적이 발생하였고 모의 유사유출량은 8,769 ton, 관측 유사유출량은 14,579 ton으로 상대오차 66.26%로 분석되었다. 또한 격자별 총 침식 및 퇴적분포 분석결과 상류로부터 침식된 유사량은 하천주변에 퇴적됨을 알 수 있었으며, 강우강도의 차이에 의해 침식 및 퇴적 분포가 Thiessen망 유역별로 상이함을 확인할 수 있다.

이와 같은 격자별 침식과 퇴적분포 산정을 위한 공간분포 형태의 모의결과는 실측데이터의 부재로 인한 검증이 어렵고 불확실성이 내포되어 있지만, 격자별 침식 및 퇴적량 시각화를 통해 유역의 토양유실 취약지역을 선별 및 최우심지역을 결정할 수 있는 기초자료를 제공함으로써 향후 유역대응 유사관리방안 수립 등을 위한 중요한 자료로서 활용될 수 있으리라 판단된다.

## 4. 지형인자 및 강우량에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포 분석

### 4.1 지형인자와 침식 및 퇴적의 상관성 분석

Thiessen 망별로 총 강우량의 큰 차이가 없는 '매미'의 침식 및 퇴적의 공간분포 (Fig. 9(b))에서 볼 수 있듯이 침식은 유역의 상류 (산간지역)에서 대부분 발생한 반면, 퇴적의 경우 하류 (하천부근)에서 집중적으로 발생한 것을 확인할 수 있는데 보다 정확한 분석을 위하여 본 절에서는 두 가지 지형학적 인자 (국부경사, 지표면 유동거리)와 침식 및 퇴적의 공간분포의 상관성을 검토하였다. 여기서, 국부경사 (local slope)란 흐름도 (flow direction)에 따른 격자별 최급경사 (steepest slope) (김주철과 김재한, 2007)를 의미하며, 지표면 유동거리 (overland flow length)란 흐름도를 따라 하천선을 기준으로 각 격자가 떨어져 있는 거리 (Tucker et al., 2001)를 의미한다. Fig. 10(a)는 국부경사에 따른 침식량과 퇴적량의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 10(b)는 지표면 유동거리에 따른 침식량과 퇴적량의 변화를 보여주고 있다.

국부경사의 계급구간별 평균 침식량은 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나, 경사가 급해질수록 퇴적량은 급속히 감소하고 경사가 0.2이상인 격자에서는 침식이 발생할 뿐 퇴적은 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 지표면 유동거리별 평균 침식량 및 퇴적량의 관계를 살펴보면 경사와 마찬가지로 지표면 유동거리에 따른 침식량의 변화는 매우 미소한 반면, 퇴적량의 경우 3.5 km 이상에서는 대부분 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결

과는 지표면 유동거리가 짧고, 경사가 완만한 지역, 즉, 하천과 가까운 부근에서 퇴적이 침식보다 우세하기 때문으로 판단되며, 이 결과는 유역 내 침식과 퇴적의 공간분포를 시각화한 Fig. 9와 일치한다. 하지만 지형학적 인자와 침식량과의 상관관계는 명확히 규명되지 않았는데 이는 지형학적 인자뿐만 아니라 강우량과 같은 기상학적 인자 역시 침식의 주요 원인이며, 때로는 두 인자가 복합적으로 침식과정에 기여함으로써 지형학적 인자와 침식량과의 독립적 분석으로서는 유역의 침식과정을 명확하게 설

명할 수 없음을 의미한다 (Figs. 9 (a) and (c) 참조). 따라서 4.2절에서는 기상학적 인자인 강우량과 침식 및 퇴적의 상관성 분석을 수행하였다.

#### 4.2 강우량과 침식 및 퇴적의 상관성 분석

Fig. 11은 Thiessen망별 총 강우량과 침식·퇴적 분포와의 관계를 살펴보기 위해 유역 내 4개의 Thiessen망의 총 강우량과 각 Thiessen 면적 내의 평균 침식량 및 퇴적량과의 관계를 나타낸다. Figs. 11(a)~11(c)는 태풍 ‘루사’,

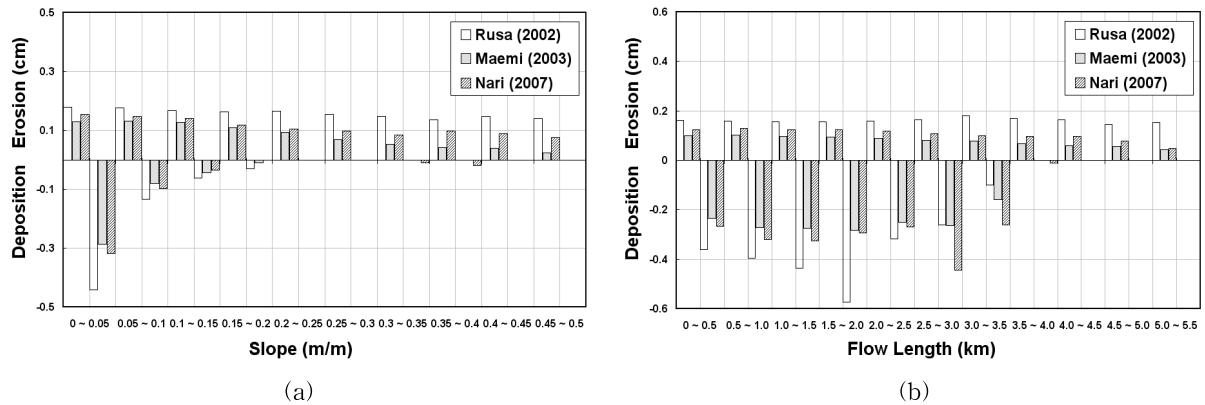


Fig. 10. Relationships (a) between Local Slope and Erosion/Deposition; (b) between Overland Flow Length and Erosion/Deposition

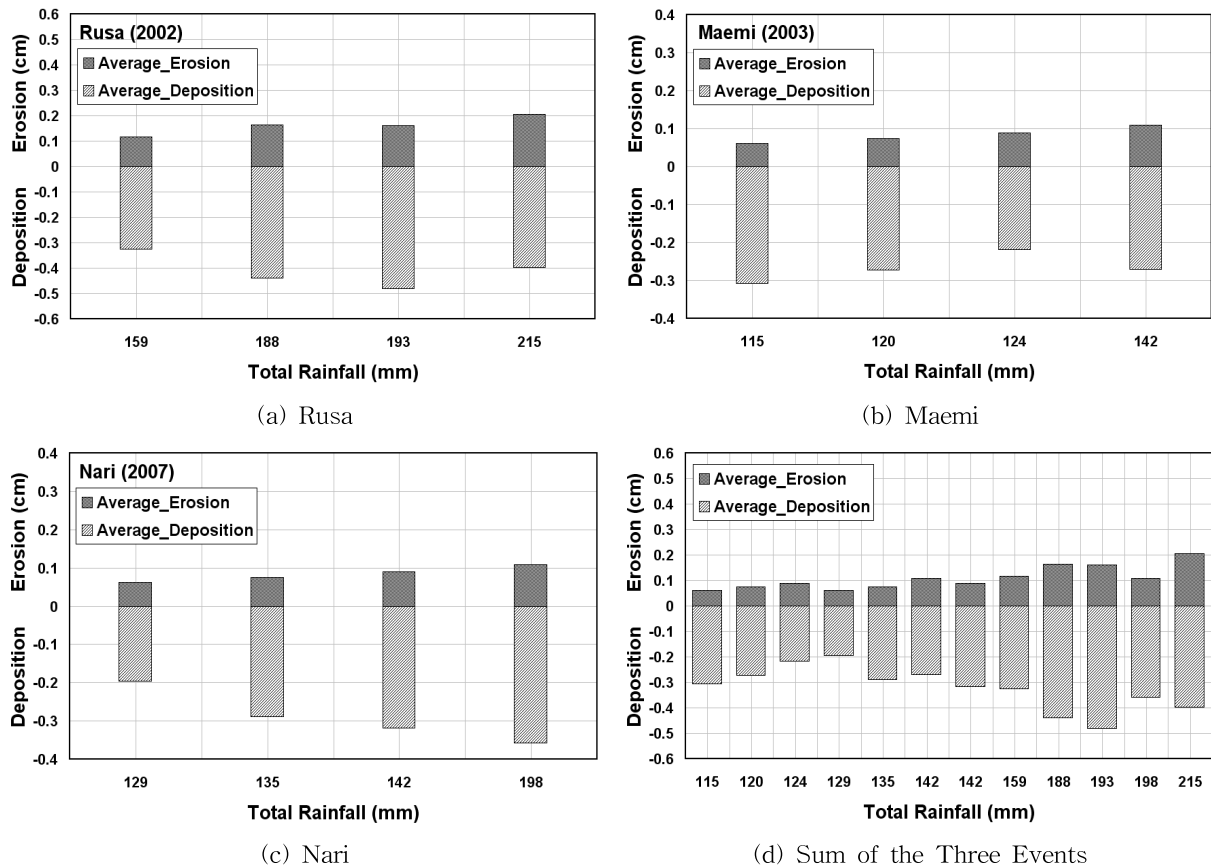


Fig. 11. Relationships between Total Rainfall and Erosion/Deposition

‘매미’, ‘나리’ 강우사상동안 천천유역의 Thiessen 면적에 기여하는 천천, 계북2, 장계, 상전 4개의 우량관측소의 총 강우량을 크기 별로 나열하여 평균 침식량 및 퇴적량과의 관계를 분석한 것이며, Fig. 11(d)의 경우는 태풍 ‘루사’, ‘매미’, ‘나리’의 총 강우량을 합산하여 평균 침식량 및 퇴적량과의 관계를 도시한 것이다. 분석 결과, 총 강우량이 증가함에 따라 침식량은 점진적으로 증가하는 추세를 보이는 반면, 퇴적량의 경우 강우량의 변화에 따른 특이한 경향성을 발견하지 못하였다. 본 연구에서 사용된 공간분포 강우장 (spatial rainfall field)의 경우 대상유역을 4개의 구역으로 분할하고 있어 유역 내 각 격자별 강우량과 침식량의 상관성을 규명하는데 제한사항이 있지만, Fig. 11로부터 토양침식은 기상학적 인자인 강우량과 밀접한 관계가 있으며, 토사퇴적의 경우는 Fig. 10과 같이 지형학적 인자에 지배적임을 확인할 수 있다. 본 연구에서 확장 개발된 모형은 다양한 공간분포를 갖는 강우자료의 처리가 가능하므로 향후 레이더 또는 내삽법 (Kriging, 역거리법 등)에 의한 강우자료를 생성하여 침식과 퇴적의 발생 원인의 규명을 위한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 raster기반의 분포형 강우-유사-유출 모형을 확장개발하여 2002년, 2003년과 2007년에 발생한 태풍 ‘루사’, ‘매미’, ‘나리’ 강우사상을 대상으로 모형의 재현성을 평가하고, 유역 내 침식 및 퇴적의 시·공간적 분포에 대하여 분석하였다. 그리고 분석결과를 바탕으로 유역의 지형인자 및 강우량에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포의 상관성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 확장개발된 모형의 유출모의 결과 계산된 유출량은 실측치와 매우 유사하게 모의된 반면, 유사유출 모의의 경우 계산치와 실측치와 경향성은 유사하게 모의되었으나 첨두부분에서 모의치가 실측치에 비해 과소산정되는 결과를 나타내었다.
- (2) 모형의 적합성 평가를 위한 검증 결과 태풍 ‘매미’ 강우사상에 대한 유출모의의 경우,  $RE$ 와  $EI$ 는 각각 3.79%와 0.921로 우수한 재현성을 보였으며, 유사유출 모의의 경우,  $RE$ 와  $EI$ 는 각각 47.91%와 0.712로 나타났다. 또한, 태풍 ‘나리’ 강우사상에 대해서는 유출모의의 경우,  $RE$ 와  $EI$ 는 각각 31.49%와 0.774로 분석되었으며, 유사유출 모의의 경우,  $RE$ 와  $EI$ 는 각각 115.89%와 0.629로 나타났다.
- (3) 유역 내 총 침식 및 퇴적의 공간분포 분석 결과 천천유역 내 태풍 ‘루사’ 강우사상의 경우 최대 6.04

cm의 침식, 2.5 cm의 퇴적이 발생하였으며, 태풍 ‘매미’ 강우사상의 경우 최대 1.99 cm의 침식, 1.64 cm의 퇴적이 발생하였고 태풍 ‘나리’ 강우사상은 최대 1.01 cm의 침식, 2.26 cm의 퇴적이 발생하였다.

- (4) 지형인자 및 강우량에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포 분석 결과 국부경사의 경우 경사가 급해질수록 퇴적이 감소하고 경사 0.2 이상인 격자에서는 퇴적이 발생하지 않는 것으로 분석되었으며, 지표면 이동거리의 경우 침식량의 변화는 미소한 반면, 퇴적량은 3.5 km 이상에서는 대부분 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 강우량 증가에 따라 침식량은 점진적으로 증가하는 추세를 보이는 반면, 퇴적량의 경우 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 지형인자 및 강우량에 따른 침식 및 퇴적에 관한 분석을 통해 토양침식은 기상학적 인자인 강우량과 밀접한 관계가 있으며, 토사퇴적의 경우 지형학적 인자에 지배적임을 확인할 수 있었다.
- (5) 격자별 총 침식 및 퇴적분포의 분석결과 하천 상류로부터 침식된 유사량은 하천주변을 따라 퇴적되었으며, 강우강도의 차이에 의해 침식 및 퇴적 분포가 티센망 유역별로 상이하게 나타났다. 이러한 격자별 침식 및 퇴적량 시각화를 통해 유역의 토양유실 취약지역을 선별 및 최우심지역을 결정할 수 있는 기초자료를 제공함으로써 향후 유역대응 유사관리 방안수립 등을 위한 기초자료로서 활용될 수 있리라 판단된다.

본 연구에서는 토양입경, 토양심도, 투수계수 등과 같은 일부 물리적인 매개변수의 경우, 최적화기법을 통해 보정하였지만, 모형의 적용성을 향상시키고 물리적으로 타당한 결과 값을 도출하기 위해서는 정밀도양도와 같은 공간분포형 자료를 직접 활용하여 격자별 매개변수의 적정값을 산정할 수 있는 방법론 등에 관한 후속 연구가 필요하다. 또한 보다 상세한 강우량에 따른 침식 및 퇴적의 변동성을 분석하기 위해서는 레이더 또는 인공위성 등과 같은 분포형 강우의 활용이 필요하다고 판단되며, 마지막으로 본 연구에서 모형 적용 및 평가의 효율성을 고려하여 적용된 250 × 250 m DEM이외의 다양한 격자 스케일에 따른 모형의 거동에 대한 후속 연구 역시 분포형 강우-유사-유출 모의기법의 적용성 및 제약성을 평가하기 위해 중요한 연구과제라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업 (08기술혁신F01)

에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 갈병석 (2008). SWAT모형을 이용한 낙동강 유량 및 부유사량 변동 분석 연구. 석사학위논문, 부산대학교, pp. 51-77.
- 권혁현 (2002). GIS를 이용한 토양손실량 산정기법에 관한 연구. 석사학위논문, 영남대학교, pp. 36-52.
- 김웅태, 윤용남, 박무중, 유철상 (2001). “분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제2호, pp. 131-140.
- 김주철, 김재한 (2007). “DEM을 이용한 수로망의 형태학적 표현.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제4호, pp. 287-297.
- 박상식, 이종태 (2008). “토지피복도와 분류체계를 이용한 적정 지표면 조도계수의 결정에 관한 연구.” **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 566-569.
- 손광익 (2001a). “해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토 (I) - RUSLE를 중심으로.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제3호, pp. 199-207.
- 손광익 (2001b). “해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토 (II)-MUSLE를 중심으로.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제3호, pp. 209-216.
- 예령, 윤성완, 정세웅 (2008). “대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 149-162.
- 유완식 (2010). 매개변수의 불확실성을 고려한 강우-유사-유출량 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 충남대학교, pp. 67-69.
- 이근상, 김유리, 예령, 이을래 (2009). “GIS 기반 SWAT 모델을 이용한 동향·천천유역의 부유사량 분석.” **한국지리정보학회지**, 제12권, 제2호, pp. 82-98.
- 조영진 (2004). 분포형 모형을 이용한 토사의 유출 및 퇴적분포 예측모형 개발. 공학석사 학위논문, 영남대학교, pp. 48-63.
- 한국수자원공사 (2002). **용담댐 일원 하천유량측정 등 수문조사 보고서**.
- 한국수자원공사 (2003). **용담댐 일원 하천유량측정 등 수문조사 보고서**.
- 한국수자원공사 (2007). **용담댐 일원 수자원·환경기초조사 보고서**.
- 한국환경정책평가연구원 (2009). **기후변화 대응을 위한 물환경 관리전략 및 정책방향 I**.
- 행정자치부 국립방재연구소 (1998). **개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구 (I)**.
- Bagnold, R.A. (1960). *Sediment discharge and stream power, a preliminary announcement*. USGS Circ. 421. Washington, DC.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., and Ritsems, C.J. (1996a). “LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output.” *Hydrological Processes*, Vol. 10, pp. 1107-1117.
- De Roo, A.P.J., Offermans, R.J.E., and Cremers, N.H.D.T. (1996b). “LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application.” *Hydrological Processes*, Vol. 10, pp. 1119-1126.
- Downer, C.W., and Ogden, F.L. (2006). *Gridded surface subsurface hydrologic analysis (GSSHA) user's manual*. Coastal and Hydraulic Laboratory (CHL), Engineering Research and Development Center (ERDC), US Army Corps of Engineers, pp. 1-13.
- Duan, Q., Gupta, V.K., and Sorooshian, S. (1993). “Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization.” *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 76, No. 3, pp. 501-521.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1992). “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.” *Water Resources Research*, Vol. 284, pp. 1015-1031.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1994). “Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284.
- Flanagan, D.C., and Nearing, M.A. (1995). *USDA-water erosion prediction project hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Hjelmfelt, Jr.A.T. (1986). “Estimating peak runoff from field-size watersheds.” *Water Resources bulletin*, Vol. 22, No. 2, pp. 267-274.
- Johnson, B.E., Julien, P.Y., Molnar, D.K., and Watson, C.C. (2000). “The two dimension-upland erosion



- model CASC2D-SED.” *Journal of the AWRA*, Vol. 36, No. 1, pp. 31-42.
- Lax, P.D., and Wendroff, B. (1960). “Systems of conservation laws.” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 13, pp. 217-237.
- Lee, G., Tachikawa, Y., and Takara, K. (2009). “Interaction between topographic and process parameters due to the spatial resolution of DEMs in distributed rainfall-runoff modeling.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 14, No. 10, pp. 1059-1069.
- MacCormack, R.W. (1969). *The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering*. AIAA Paper, pp. 69-354.
- Miyazaki, T. (2006). *Soil and water in water flow in soils* (Second Edition), Chapter 1: The Taylor and Francis Group.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., and Rickson, R.J. (1992). *EUROSEM documentation manual*, silsoe College, Silsoe, Bedford, UK.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Chisci, G., and Torri, D. (1998). “The european soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments.” *Earth Surface Processes and Landforms* Vol. 23, pp. 527-544.
- Morris, G.L., and Fan, J. (1997). *Reservoir sedimentation handbook*, McGraw-Hill, New York.
- Nearing, M.A., Page, D.I., Simanton, J.R., and Lane, L.J. (1989). “Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model.” *Transactions of the ASAE*, Vol. 32, No. 3, pp. 919-924.
- Prosser, L.R., and Rustonji, P. (2000). “Sediment transport capacity relations for overland flow.” *Progress in Physical Geography*, Vol. 24, No. 2, pp. 179-193.
- Sayama (2003). *Evaluation of reliability and complexity of rainfall-sediment-runoff models*. Master’s Thesis, Kyoto University, pp. 5-10.
- Singh, V.P. (2001). “Kinematic wave modeling in water resources: a historical perspective.” *Hydrological Process*, Vol. 15, pp. 671-706.
- Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1995). “Model calibration, in computer models of watershed hydrology.”, edited by Singh, V.P., pp. 23-68. *Water Resources Publications*, Highland Ranch.
- Tachikawa, Y., Nagatani, G., and Takara, K. (2004). “Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism.” *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 48, pp. 7-12. (Japanese with English abstract)
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1989). “Scaling and elevation in river networks.” *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 9, pp. 2037-2051.
- Torri, D., Sfalanga, M., and Del Sette, M. (1987). “Splash detachment: runoff depth and soil cohesion.” *Catena*, Vol. 14, pp. 149-155.
- Tucker G.E., Catani F., Rinaldo A., and Bras R.L. (2001). “Statistical analysis of drainage density from digital terrain data.” *Geomorphology*, Vol. 36, pp. 187-202.
- Vieux, B.E. (2004). *Distributed hydrologic modeling using GIS*, Kluwer Academic Publishers.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., and Goodrich, D.E. (1990). *KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*, USDA, ARS-77.
- Yang, C.T. (1972). “Unit stream power and sediment transport.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 98, No. 10, pp. 1805-1826.
- Yang, C.T. (1973). “Incipient motion and sediment transport.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 10, pp. 1679-1704.

논문번호: 10-080	접수: 2010.09.06
수정일자: 2010.10.26/11.04	심사완료: 2010.11.04