

분포형 수문모형을 이용한 강우-유사-유출량 산정에 관한 연구

A Study on Rainfall-Sediment-Runoff Estimation Using a Distributed Hydrologic Model

유완식*, 이기하**, 정관수***

Wan Sik Yu, Gi Ha Lee, Kwan Sue Jung

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 대상유역내의 평균 토양침식량을 산출하는 총량적 개념의 경험식이므로 호우기간동안의 유역 침식/퇴적의 시·공간적 변화양상을 모의할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 따라서 보다 합리적인 유역규모의 강우-유사-유출 메카니즘 해석을 위해서는 집중형(lumped) 모의기법을 대체하고 다양한 기상학적/지형학적 디지털 정보를 활용할 수 있는 물리적 기반의 분포형 모형이 요구된다. 본 연구에서는 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈과 단위수류력(Unit Stream Power)이론을 기반으로 유사유출 모의모듈을 결합한 분포형 강우-유사-유출 모형을 개발하고, 용담댐 상류부의 천천유역에 적용하여 개발된 모형의 재현성 평가를 수행하였다.

핵심용어 : 토양침식, 유사유출, 단위수류력, 분포형 강우-유사-유출 모의

1. 서 론

토양침식현상은 지형, 지질, 기상 등 복합적인 요인에 의하여 발생되기 때문에 토양침식량을 산정하기 위한 회귀식이나 집중형 토양침식 모형들을 완벽히 신뢰하는 것은 무리가 있다. 회귀식은 수집된 자료들이 제한된 시·공간에 대한 자료이므로 장기간 또는 적용범위를 벗어난 회귀식 응용 결과에 불확실성이 상당히 내포되어 있으며, 유역의 강우-유사-유출 과정이 몇 개의 경험적 매개변수에 의해서 모의되는 기존의 집중형 모형의 경우 유출 및 토사거동의 시·공간적 변화양상을 모의에 제약적일 수밖에 없다. 최근 개발된 수문모델링 시스템의 경우, 수질 및 유사유출 모듈을 탑재를 시도하고 있으나 몇몇 시스템을 제외하고는 아직까지 집중형 방식의 모듈을 채택하고 있으며, 분포형 모형을 이용한 토사유출 및 침식/퇴적의 시·공간적 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 기존의 집중형 모형에서 벗어나 유사 발생의 시·공간적 변화분석을 통해 유사의 발생 원인과 지역, 그리고 그 규모 및 기간에 대해 규명하고, 지형학적 인자들이나 강우특성을 고려할 수 있는 분포형 모형의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려

* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : babuwys@nate.com

** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 건설방재연구소 Post-doc 연구원 · E-mail : leegiha@gmail.com

*** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ksjung@cnu.ac.kr

한 유출모의 모듈과 단위수류력(Unit Stream Power; USP)이론을 기반으로 유사유출 모의모듈을 결합한 분포형 강우-유사-유출 모형을 개발하고, 용담댐 상류부의 천천유역에 적용하여 개발된 모형의 재현성 평가를 수행하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서 개발된 분포형 강우-유사-유출 모형은 강우에 따른 유출과 강우 및 유출에 의한 유사의 거동을 1차원적으로 모의한다. 강우-유출에 경우 호우시 각 격자에서 강우는 지표하로 직접적으로 더해지고 격자의 토양층이 포화되면 지표흐름이 생성되는데 지표하 흐름은 비포화 흐름과 포화흐름으로 구분된다. 지표하 흐름의 수직적인 채움현상 때문에 초기 강우 손실을 고려하지 않고 투수계수와 토양층 두께에 따른 지체된 지표하 흐름을 효과적으로 모의할 수 있으며, 개념적 수위-유량 관계식을 이용하여 그림 1과 같이 각 격자별 지표 및 지표하 흐름을 해석한다.

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

여기서 q 는 단위폭당 유량, h 는 수심, $v_m = k_m i$, $v_a = k_a i$, i 는 경사, k_m 와 k_a 는 각각 비포화대층과 포화대층의 투수계수, d_m 은 비포화대층의 두께, d_a 는 비포화대층과 포화대층의 두께이다.

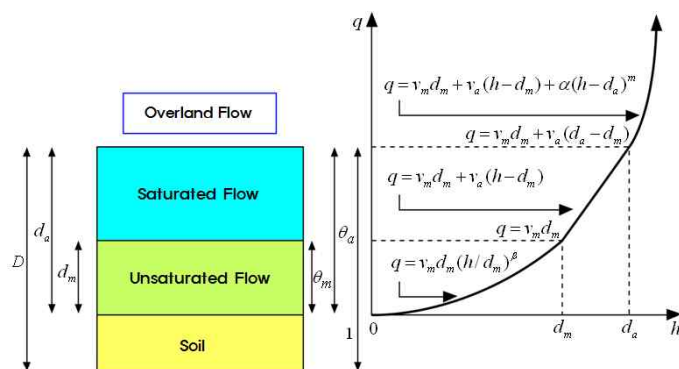


그림 1. 지표 형태에 따른 수위-유량 관계식 (Tachikawa 등, 2004)

유사유출의 경우 각 격자별 유사량은 빗방울에 의한 토양분리(Soil detachment by raindrop; DR; 식(2))와 지표흐름에 의한 토양분리(Soil detachment by overland flow; DF; 식(3))에 의해서 계산되며, 지표류가 발생할 때 유사가 지표류에 의해 사면으로부터 하도로 이송되어진다.

$$DR = k K E e^{-bh_s} \quad (2)$$

$$DF = \alpha \left(\frac{TC}{1000} - C \right) h_s \quad (3)$$

여기서 k 는 토양 분리력, KE : 순 강우의 총 운동에너지, b 는 토성에 의해 결정되는 지수, h_s 는 지표류 수심, α 는 분리/퇴적 효율계수, TC 는 이송능력, C 는 지표류의 유사량이다.

각 격자에서의 토양 침식과 퇴적과정의 모의를 위한 이송능력을 산정하기 위해 Yang(1971)이 제안한 단위수류력이론을 사용하였다. 단위수류력 이론은 토사이송에 사용된 에너지의 소산율이 운송토사량과 관계에 기초를 두고있으며, Yang(1972)에 의하여 하천형태학의 연구에서 처음으로 제안되었다.

$$\log C_t = I + J \log \left(\frac{VS - V_{cr}S}{\omega} \right) \quad (4)$$

여기서 C_t 는 총유사농도, VS 는 단위수류력, $V_{cr}S$ 는 한계단위수류력, ω 는 유사 침강속도, I 와 J 는 흐름과 유사의 특성을 나타내는 무차원 변수이다.

단위수류력이론으로 산정된 유사량 즉, 이송능력과 격자에 유입되는 유사량을 비교하여 단면의 침식 또는 퇴적을 결정한다. 한 격자에서 흐름의 이송능력(TC)이 상부 격자로부터 유입되는 유사량(Q_{sed})보다 클 경우 $TC - Q_{sed}$ 만큼의 유사 침식되고 반면에 흐름의 이송능력(TC)이 상부 격자로부터 공급되는 유사량(Q_{sed})보다 작을 경우 $Q_{sed} - TC$ 만큼의 유사 퇴적된다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역

천천유역은 용담댐 상류의 소유역으로 유역평균고도는 EL. 549.13m, 유역면적은 289.8km²이며, 유로연장은 25.5km이다. 토지피복현황을 살펴보면 전체적으로 산지가 대부분 차지하고 있으며 하천을 따라 농경지가 분포되어 있다.

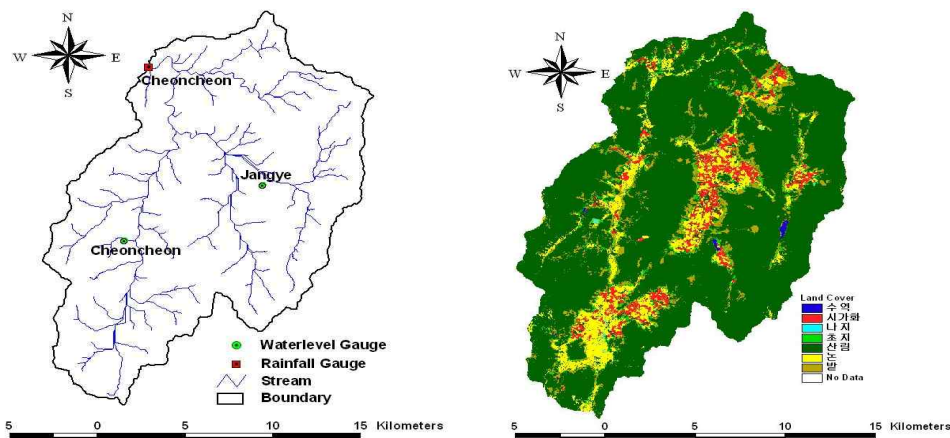


그림 2. 천천유역 현황

3.2 전역최적화 기법을 통한 매개변수 보정

개발된 모형에서 직접산출이 불가능한 과정매개변수(process parameter)와 지형학적 매개변수

(topographic parameter)들은 목적함수 RMSE (식(5))와 전역최적화 기법인 SCE-UA(Duan 등, 1992)를 이용하여 산정하였으며, 매개변수의 초기범위 및 최적값은 표 1과 같다.

$$RMSE(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i(\theta))^2} \quad (5)$$

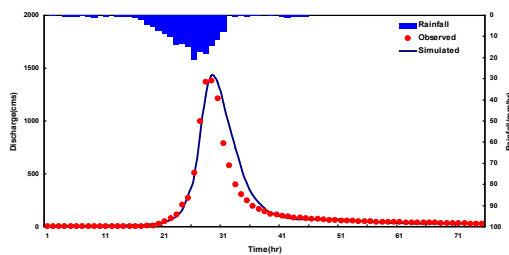
여기서 N은 자료의 개수, θ 는 매개변수, y_i 와 \hat{y}_i 는 각각 시간 t의 실측치와 모의치를 나타낸다.

표 1. 매개변수의 범위 및 매개변수 보정

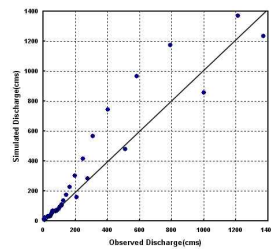
Parameter	Description	범위	최적값
d_m	비포화대층의 침도비	0.05 - 0.3	0.297
d_s	포화대층의 침도비	0.001 - 0.7	0.029
k_a	포화대층 투수계수 (m/s)	0.001 - 0.1	0.005
β	투수율(k_a/k_m)	2 - 20	14.787
D_{50}	중양입경 (mm)	1 - 10	9.999
k_s	토양분리력 (kg/J)	0.0008 - 0.006	0.001
α	분리/퇴적 효율계수	0.335 - 1.0	0.651
KE	강우의 총 운동에너지 (J/m ²)	10 - 30	10
$V_{cr}S$	한계단위수류력	0.002 - 0.100	0.100

3.3 모형의 적용

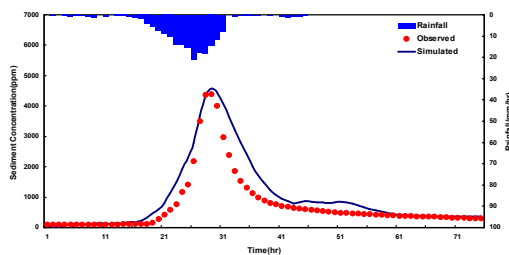
그림 3은 표1의 최적 매개변수를 이용하여 천천유역에 2002년 태풍 ‘루사’ 강우사상에 대하여 적용한 강우-유사-유출 모의결과이며, 그림 4는 모의시간동안 천천유역내 격자별 총 침식 및 퇴적(net erosion and deposition)의 3차원 분포도이다. 그림 4에서 (+)는 침식량을 (-)는 퇴적량을 나타내며 격자 최대침식량은 30.73cm, 최대퇴적량은 25.77cm로 나타났다.



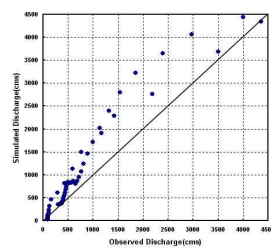
(a) 강우유출 모의



(b) 강우유출 모의치와 실측치의 비교



(c) 유사유출 모의



(d) 유사유출 모의치와 실측치의 비교

그림 3. ‘루사’ 강우사상을 이용한 천천유역 강우-유사-유출 모의결과

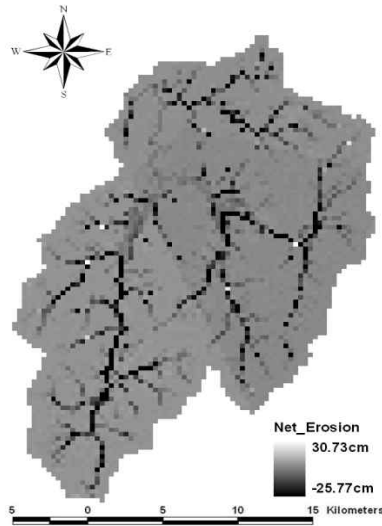


그림 4. 모의기간동안 천천유역의 총 침식 및 퇴적량 분포도

4. 결 론

본 연구에서는 분포형 강우-유사-유출 모형을 개발하여 천천유역의 태풍 ‘루사’ 강우사상에 대한 모의를 통해 개발된 모형의 적용성을 검토하였다. 모형의 매개변수는 전역최적화 기법인 SCE-UA를 이용하여 산정하였으며, 모의결과에서 유출량 및 유사유출량의 침투 및 침투시간은 적절히 모의되었으나 유사량 곡선의 상승부와 하강부에서 계산치가 관측치를 초과하는 결과가 발생하였다. 이는 제한된 시·공간에 대한 자료를 이용한 회귀식 응용결과에서 오는 불확실성에 의한 오차로 판단된다. 또한 본 모의를 통한 침식 및 퇴적분포 정보는 유역의 토양유실 취약지역을 판단 및 향후 유역대응 유사관리방안 수립 등을 위한 기초자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

감 사 의 글

본 연구의 일부는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Yang, C.T. (1972). "Unit Stream Power and sediment transport", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 98(HY10), pp.1805-1826
2. Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models." J. Hydrol., 158, pp.265-284.
3. 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 48, pp. 7-12 (in Japanese).
4. Apip, Sayama, T., Tachikawa, Y. and Takara, K. (2008). "Lumping of a physically-based distributed model for sediment runoff prediction in a catchment scale, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 52, pp. 43-48.