지형학적 인자 및 강우량에 따른 침식 및 퇴적의 영향 평가

Assessment of the Effect of Geographic Factors and Rainfall on Erosion and Deposition

유완식* · 이기하** · 정관수***

Yu, Wan Sik · Lee, Gi Ha · Jung, Kwan Sue

Abstract

This study aims to demonstrate the relationship between various factors and soil erosion or deposition, simulated from distributed rainfall-sediment-runoff model applications. We selected area, overland flow length, local slope as catchment representative characteristics among many important geographic factors and also used the grid-based accumulated rainfall as a representative hydro-climatic factor to assess the effect of these two different types of factors on erosion and deposition. The study catchment was divided based on the Strahler's stream order method for analysis of the relationship between area and erosion or deposition. Both erosion and deposition increased linearly as the catchment area became larger. Erosion occurred widely throughout the catchment, whereas deposition was observed at the grid-cells near the channel network with short overland flow lengths and mild slopes. In addition, the relationship results between grid-based accumulated rainfall and soil erosion or deposition showed that erosion increased gradually as rainfall amount increased, whereas deposition responded irregularly to variations in rainfall. Within the context of these results, it can be concluded that deposition is closely related with the geographic factors used in this study while erosion is significantly affected by rainfall.

Key words : Erosion and deposition, Distributed rainfall-sediment-runoff model, Geographic factors, hydro-climatic factor

요 지

본 연구에서는 분포형 강우-유사-유출 모형을 이용하여 격자기반의 유역침식 및 퇴적 공간분포 정보를 획득하고, 유역의 지형학적, 수문기상학적 특성인자가 유역의 침식 및 퇴적에 미치는 영향을 평가한다. 유역의 지형학적 특성을 대표하는 인자로는 유역면적, 지표흐름 이동거리, 국부경사를 선택하였으며, 격자기반의 누적강우량을 수문기상학적 인자로 활용하여 대상유역에서의 침식 및 퇴적의 변동성을 분석한다. 유역면적에 따른 침식 및 퇴적의 변화양상을 분석하기 위해 대상유역은 Strahler 하천 치수법칙에 의해 다수의 소유역으로 구분되었으며, 면적에 따른 변동성을 분석한 결과, 침식 및 퇴적 모두 면적이 커짐에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 지표흐름의 이동거리 및 국부경사에 따른 침식 및 퇴적양상의 분석 결과, 침식은 유역전반에 걸쳐 비교적 균등하게 발생하였으나 퇴적의 경우 짧은 지표흐름 이동거리 및 완만한 경사를 갖는 하천선 인접 격자에서 집중적으로 발생하였다. 또한 격자별 누적 강우량에 따른 침식 및 퇴적 변동성 분석결과, 강우량이 증가함에 따라 침식은 점진적으로 증가하는 반면 퇴적은 강우량 증감에 따라 불규칙적인 변동성을 나타내었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 선택된 지형학적 인자들은 퇴적과정에 밀접한 관련이 있으며, 강우량은 유역의 침식에 영향을 미치는 매우 중요한 인자임을 확인하였다.

핵심용어 : 침식 및 퇴적, 분포형 강우-유사-유출 모형, 지형학적 인자, 수문기상학적 인자

1. 서 론

자연계에 있어서 토양 침식 및 퇴적의 과정은 비선형(non-linear)의 형태로서 호우로 인해 발생하는 토사유출(water-induced sediment yield)은 유역의 지형학적, 수문기상학적 특성뿐만 아니라 다양한 인위적 요인 등에 의해 매우 복잡하게 나타난다(Morris and Fan, 1997). 즉, 토양 침식 및 퇴적은 유역의 형상, 토양종류, 토지이용 및 피복상태, 강우지

속기간 및 강우강도 등에 의해 시·공간적으로 변화하므로 이러한 다양한 요인들의 상호작용을 이해하고 분석하기 위해서는 물리적 기반(physics-based or process-based)의 분포형 침식·퇴적 해석모형이 필요하며, 모형의 구성요소에 전술한 정보들이 적절하게 포함되어야 한다(행정자치부 국립방재연구소, 1998; Toy et al., 2002; Merrit et al., 2003).

1980년대 후반부터 컴퓨터와 지형정보처리 기술의 비약적인 발달에 의해 국외에서는 토양침식 및 토사이송 모의를 위한

*충남대학교 공과대학 토목공학과 석사 (E-mail : Yuwansik@gmail.com)

**충남대학교 건설방재연구소 post-doc 연구원 (교신저자)

***충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

다양한 물리적 기반의 모형이 개발되어왔으며, 대표적인 모형으로는 KINEROS(Woolhiser et al., 1990), WEPP(Flanagan and Nearing, 1995), LISEM(De Roo et al., 1996a, 1996b), EUROSEM(Morgan et al., 1998)등이 있다. 이외에도 토양 침식 모의를 위한 다양한 모형들이 존재하며, 모형의 기본이론 및 적용사례 등은 Schmidt(2000)에 자세히 소개되어 있다. 이상의 모형들은 수문학적 응답단위(hydrologic response unit)로서 소유역(sub-catchment) 또는 격자(cell)를 기반으로 구성되어 있으므로 유사 발생시 토양침식의 발생 원인과 지역, 그리고 규모 및 기간을 규명하고, GIS tool과의 연계구동을 통해 모의시간별 토사 침식 및 퇴적 정보의 제공이 가능하다(Renschler, 2003). 국내의 경우 갈병석(2008), 예령 등(2008), 이근상 등(2009)이 GIS기반의 준분포형 장기유출 모형인 SWAT을 이용하여 강우-유출 해석 및 토양유실량 산정에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 박상덕(2008)은 WEPP 모형의 산불지역 적용을 위한 매개변수 추정기법을 제시하였다. 그러나 국내의 대부분의 연구들은 기개발된 준분포형 또는 분포형 모형을 이용하여 유역에서 발생하는 토양침식량 산정 및 적용성 평가에 초점이 맞춰져 있으며 토양침식, 침식된 토사의 이송, 이송된 토사의 퇴적 과정에 영향을 미치는 주요 지배인자에 관한 연구 및 유역의 규모, 지형학적 위치에 따른 침식 및 퇴적 양상의 변화 등에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 시·공간적으로 변동하는 침식 및 퇴적 현상을 유역규모에 따라 해석하고, 그 특성을 분석하였다. 대상 유역을 Strahler(1952)의 하천차수법칙에 의해 하천차수별 소유역으로 구분하고, 분포형 강우-유사-유출 모형을 이용하여 각각의 소유역에 해당하는 격자기반의 유역침식 및 퇴적 공간분포 정보를 획득한 후 지형학적 인자(유역면적, 지표흐름 이동거리, 국부경사) 및 수문기상학적 특성인자(강우량)에 따른 침식 및 퇴적의 변동성을 유역규모별로 검토하고 그 특성을 분석한다.

2. 분포형 강우-유사-유출 모형

본 연구에서는 침식 및 퇴적의 공간분포에 대한 분석을 위해 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈과 단위수류력 이론을 기반으로 한 유사유출 모듈을 결합하여 확장개발된 분포형 강우-유사-유출 모형(유완식, 2010; 이기하

등, 2010)을 이용하였다. 본 모형은 임의지점에서의 유출량 및 유사유출량뿐만 아니라 강우기간동안의 유역내 침식 및 퇴적에 관한 계산결과를 격자기반의 matrix 형태로 제공하기 때문에 사용자에게 의해 분할된 임의유역에서의 정보획득이 매우 용이하다.

강우-유출 모의는 수치지도를 통해 생성된 DEM으로부터 계산된 흐름도(flow direction map), 흐름누적도(flow accumulation map) 등의 흐름계산을 위한 지형정보와 토지피복에 따른 조도계수 분포 및 격자기반의 공간분포형 강우 등을 고려하여 각 격자에서의 강우에 따른 유출을 계산하며, 사면의 흐름해석을 위한 지배방정식은 지표흐름과 지표하 흐름(비포화 흐름과 포화 흐름)을 고려한 kinematic wave 방정식을 기반으로 한다.

그림 1은 수문모의를 위해 대상유역을 격자기반으로 분할한 형태 및 각 격자에서의 지표흐름과 지표하 흐름 계산을 위한 개념적인 수위-유량 관계식을 나타내고 있으며, 강우지속기간동안 각 격자에서 수심증가에 따른 유량은 식(1)과 (2)로 계산된다.

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

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

여기서 $v_c = k_c i$, $v_a = k_a i$, $k_c = k_c / \beta$, $\alpha = \sqrt{i} / n$, q 는 단위 폭당 유량(m^2/s), h 는 수심(m), i 는 경사, k_c 는 비포화대층의 투수계수(m/s), k_a 는 포화대층의 투수계수(m/s), $d_c (=D\theta_c)$ 는 비포화대층의 두께(m), $d_s (=D\theta_s)$ 는 비포화대층과 포화대층의 두께(m), n 은 조도계수($m^{-1/3}s$), β 는 투수율 (k_a/k_c), m 은 5/3이다.

유사유출 모의의 경우 격자별 유사량은 빗방울 및 지표류 흐름에 의한 토양분리를 고려하여 계산되며, 각 격자별 이송 능력과 상류격자에서 유입되는 유사량과의 실시간 비교를 통해 침식과 퇴적을 계산하게 되며 이송능력은 Yang(1972)이 제안한 단위수류력 이론을 기반으로 결정된다. 유사유출을 위한 유사연속방정식과 순 침식(net erosion)의 계산식은 식(3), (4)와 같으며, 격자별 토양침식 및 퇴적과정의 모의를 위한 이송능력 (transport capacity, TC) 계산식은 식(5)와 같다.

그림 1. 본 모형에서의 격자별 강우-유출 계산 모식도

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

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

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

$$TC = 10^{\log C_t} = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + 1.799 - 0.409 \log \left(\frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (5)$$

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

최종적으로 이송능력 TC 와 그 격자에 유입되는 유사량 Q_{sed} 를 비교하여 침식 또는 퇴적을 결정한다. 임의의 격자에서 흐름의 이송능력이 상류 격자로부터 유입되는 유사량보다 클 경우 $TC - Q_{sed}$ 만큼의 유사가 침식되고 반면에 흐름의 이송능력이 공급되는 유사량보다 작을 경우 $Q_{sed} - TC$ 만큼의 유사 퇴적된다. 분포형 강우-유사-유출 모형에 대한 보다 상세한 내용은 유완식(2010) 및 이기하 등(2010)에 기술되어 있다.

3. 유역특성인자에 따른 침식 및 퇴적의 변동성 분석

Toy et al. (2002)에 의하면 침식을 유발하는 주요인자는 기후, 토양, 지형, 토지이용, 식생피복 등으로 요약할 수 있으며, 이는 일반적으로 실무에서 많이 사용되는 비교적 간단한 경험적 모형(empirical model)인 USLE(Wischmeier and Smith, 1978)과 RUSLE(Renard et al., 1997)의 계수에서도 그 중요성을 확인할 수 있다. 일반적으로 짧은 기간동안 높은 강도의 강우가 집중되는 호우의 경우 강우량 또는 강우강도는 토양침식의 주요원인이 되는 중요한 수문기상학적 인자(Kinnell, 2003)이며, 사면의 경사 및 길이는 지표흐름을 지배하는 인자로써 세류간 침식(inter-rill erosion) 또는 판상침식(sheet erosion)의 정도를 결정하는 주요원인이 된다. 본 연구에서는 유역의 침식 및 퇴적에 영향을 미치는 다양한 지형학적 인자중에서 유역의 면적, 지표흐름 이동거리, 국부경사를 선택하고, 분포형 모형에서 대상 강우사상동안의 격자별 침식 및 퇴적 정보를 획득하여 선택된 지형학적 특성인자에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포의 변동성을 분석하고, Thiessen망을 이용하여 산정된 공간분포형 강우장(rainfall field)으로부터 대상 강우사상동안의 격자별 누적강우량 정보를 획득하여 강우량 변화에 따른 침식 및 퇴적의 양상의 변화를 검토한다.

지형학적 인자 및 강우량에 따른 침식 및 퇴적의 영향 평가

유역규모별 침식 및 퇴적의 특성을 분석하기 위해 대상유역의 수계를 Strahler(1952)의 하천차수법칙으로 분류하여 각 차수에 해당하는 유역면적별로 총 침식량과 퇴적량을 계산하고, 유역면적 크기에 따른 침식 및 퇴적의 변동성을 분석한다. 다음으로 지형특성인자의 공간분포 형태를 시각화하고, 각 요소에 따른 침식 및 퇴적의 변동성을 분석한다. 마지막으로 강우사상동안의 격자별 누적강우량과 침식 및 퇴적의 상관성을 분석하여 수문기상학적 인자가 침식 및 퇴적에 미치는 영향을 평가한다.

4. 적용 및 결과분석

본 연구에서의 대상유역은 용담댐 상류유역 천천유역을 선정하고 1/25,000 수치지도의 지형정보속성을 추출한 후 250 m×250 m 격자크기로 DEM을 구축하였으며, 강우-유사-유출모의를 위해 4개의 강우관측소(천천, 장계, 상전, 계북2)로부터 시간별 점 강우량 자료를 Thiessen기법을 이용하여 공간분포형 강우량 자료로 변환하여 모형의 입력자료로 사용하고, 모형의 검보정을 위하여 천천수위관측소의 수위-유량 관계곡선식과 유량-유사량 관계곡선식을 이용하였다. 표 1은 모형의 적용에 이용된 강우사상, 표 2는 분포형 강우-유사-유출모형에 의한 모의결과 및 실측치와의 비교결과를 보여주고 있다. 여기서 RE (relative error)는 침투유량 및 유사량의 상대오차율(%)이고, EI (efficient index; Nash and Sutcliffe, 1970)는 모형의 효율성 지수로서 모의결과의 재현성을 평가하는데 사용되며 EI 가 0보다 작으면 모형의 추정결과가 나쁘거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미하고 1에 가까울수록 모형의 재현정도가 우수함을 의미한다. 상대오차율(RE), 효율성지수(EI)와 관한 식은 식 (6), (7)과 같다.

표 1. 강우-유사-유출 모의를 위한 강우사상

Event	Rainfall Duration	Total Rainfall(mm)	Typhoon	Use for
1	2002.08.30.17:00 ~ 09.02.19:00	194.82	Rusa	Calibration
2	2003.09.11.21:00 ~ 09.15.16:00	133.89	Maemi	Validation
3	2007.09.14.06:00 ~ 09.21.15:00	205.46	Nari	Validation

표 2. 강우-유사-유출 모의결과 및 실측치와의 비교

Typhoon	Performance measure	Peak Discharge (m^3/s)	Peak Sediment Concentration (mg/l)
Rusa	RE	-1.2%	10.4%
	EI	0.98	0.86
Maemi	RE	-5.7%	43.4%
	EI	0.88	0.75
Nari	RE	30%	50.3%
	EI	0.72	0.70

그림 2. 강우사상에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포도

그림 3. 하천차수에 따른 유역구분 및 지형학적 인자

$$RE = \frac{(O_p - P_p)}{O_p} \times 100 \quad (6)$$

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

여기서 O_p 와 P_p 는 침투시간에서의 실측치와 모의치, N 은 자료의 개수, O_i 와 P_i 는 시간 i 에서의 실측치와 모의치, $\bar{O}$ 는 실측치의 평균값을 나타낸다.

모형의 매개변수 보정을 위해 사용된 루사 강우사상의 경우 매우 우수한 모의결과를 보여주었으며, 모형의 검증에 위해 사용된 매미, 나리 강우사상의 경우 수문곡선은 비교적 정확한 모의결과를 나타내었으나 유사량 곡선의 모의결과는 관측치에 비해 과소산정되었다. 그러나 Johnson et al. (2000)은 유사량 자료의 불확실성을 고려하였을 때 유사유출의 -50%~200% 범위의 오차는 인정할 수 있을 정도의 결과라고 제시하였으며, 본 연구에서의 모의결과는 이 범위안에 해당하기 때문에 타당한 것으로 판단된다.

그림 2는 각 강우사상동안 발생한 대상유역에서의 침식 및 퇴적의 공간분포를 나타내고 있으며, 루사의 경우 침식은 최

대 1.87 cm, 퇴적은 최대 1.66 cm, 매미의 경우 침식은 최대 0.46 cm, 퇴적은 최대 0.93 cm, 나리의 경우 침식은 최대 0.69 cm, 퇴적은 최대 1.19 cm으로 분석되었다.

대상유역의 지형학적 특성에 의한 침식 및 퇴적의 공간분포 변화를 분석하기 위해 3장에서 설명한 바와 같이 천천유역의 수계는 Strahler의 하천차수법칙에 의해 그림 3(a)와 같이 분류하였으며, 그림 3(b)는 1차 하천에 해당하는 유역을 나타낸다. 대상유역은 42개의 1차 하천유역, 9개의 2차 하천유역, 2개의 3차 하천유역으로 구분되며, 최종적으로 천천유역은 4차 하천유역이 된다. 또한 하천에 해당하는 격자를 기준으로 하는 지표흐름의 이동거리 산정결과는 그림 3(c)와 같으며 하천격자의 경우 지표흐름의 이동거리는 0의 값을 갖고 하천에서 멀어질수록 큰 양의 값을 갖게 된다. 마지막으로 국부경사는 흐름도를 이용하여 인접격자간 거리와 표고차에

표 3. 하천차수별 지형학적 특성

Stream order	1st	2nd	3rd	4th
Ave. Elevation(m)	600.96	591.87	569.54	555.47
Ave. Area (km ²)	4.52	22.67	117.03	294.44
Ave. Local Slope (m/m)	0.209	0.199	0.189	0.189
Ave. Flow Length (m)	825.80	794.94	806.82	780.70

의해 계산되며, 그 결과는 그림 3(d)와 같다. 이상의 지형학적 특성을 하천치수 유역별로 분류하여 분석된 결과는 표 3과 같다.

4.1 지형학적 특성인자에 따른 침식 및 퇴적의 변동성 분석

본 절에서는 대상유역의 지형학적 특성인자에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포의 변동성을 분석하였다. 우선 Strahler의 하천치수법칙에 분할된 모든 유역(총 54개)에서의 각 사상별 침식량 및 퇴적량을 그림 2와 3(a)로부터 획득한 후 유역면적 크기에 따른 변화를 분석하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 그 규모는 적용된 강우사상에 따라 다르지만 침식량 및 퇴적량 모두 유역면적이 커짐에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 여기서 각 격자에서 발생한 침식량 및 퇴적량은 깊이(cm)로 표현하였으며, 하천치수별 유역에서 발생한 총 침식량 및 퇴적량은 각 유역에 해당하는 격자의 수, 격자크기(250 m×250 m), 모의된 깊이의 곱으로 표시할 수 있다. 회귀분석 결과, 유역면적 크기에 따른 침식량 및

퇴적량의 결정계수는 평균적으로 약 0.97 및 0.95로써 높은 상관성을 나타내었으며, 이는 대상유역에서 다양한 강우사상에 따른 회귀식이 존재하고, 각 회귀식의 관계를 수치적으로 해석할 수 있을 경우 임의의 소유역(또는 미계측 유역)에서의 발생한 침식량 및 퇴적량을 유역면적만을 독립변수로 하여 예측이 가능함을 의미한다.

그림 2와 같이 침식은 공간적으로 유역전반에 걸쳐 발생한 반면, 퇴적은 하천주변 격자에서 집중적으로 발생하였으며, 이는 본 연구에서 사용된 모형이 지표유출해석을 포화초과지표류 (saturation excess overland flow) 이론에 근거하여 해석하기 때문에 강우초기에는 하천주변에서 부분적으로 지표유출이 발생하여 토양침식이 발생하고, 강우지속기간동안 유출 기여면적이 유역전반으로 확대됨에 따라 전유역에 걸쳐 토양침식이 발생함을 의미한다. 이러한 침식과 퇴적 공간분포의 보다 정량적인 분석을 위해 하천을 기준으로 지표흐름 이동거리(그림 3(c)) 및 국부경사(그림 3(d))에 따른 하천치수별 유역에서의 평균 침식량 및 퇴적량을 분석하였다. 동일한 지

(a) 총 침식량

(b) 총 퇴적량

그림 4. 하천치수 유역면적에 따른 총 침식량 및 총 퇴적량

(a) 1차 하천유역

(b) 2차 하천유역

(c) 3차 하천유역

(d) 4차 하천유역

그림 5. 지표흐름 이동 거리에 따른 침식 및 퇴적의 변화

표호를 이동거리에 다양한 침식량 및 퇴적량이 발생할 수 있으며, 국부경사 또한 마찬가지로므로 황축은 각각의 지표호를 이동거리와 국부경사를 0.5 km, 0.05의 계급구간으로 구분하여 각 계급구간에서 발생하는 평균 침식량 및 퇴적량을 깊이로 표현하여 도시하였다.

그림 5 및 표 4와 같이 평균 침식량의 변화는 지표호를

이동거리의 증가에 따라 미소하게 감소하는 것으로 나타났으며, 하천치수별 유역에 상관없이 그 변화는 미비한 것으로 분석되었다. 퇴적의 경우 그림 5 및 표 5와 같이 지표호를 이동거리에 변화에 따라 그 값이 상이하게 나타났으나 2.0 km 이하의 격자(하천주변)에서는 퇴적이 집중적으로 발생하고 그 이상에서의 격자(유역 상류부)에서는 퇴적이 전혀 발

표 4. 지표호를 이동거리에 따른 하천치수 유역별 평균 침식량

Event Range(km)	Average Erosion (cm)											
	Rusa				Maemi				Nari			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
0.0 ~ 0.5	0.17	0.16	0.17	0.17	0.10	0.10	0.11	0.10	0.12	0.13	0.13	0.12
0.5 ~ 1.0	0.17	0.17	0.17	0.17	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.13	0.13	0.12
1.0 ~ 1.5	0.15	0.15	0.15	0.15	0.09	0.09	0.09	0.09	0.12	0.13	0.12	0.12
1.5 ~ 2.0	0.15	0.15	0.15	0.15	0.07	0.08	0.08	0.08	0.11	0.12	0.12	0.12
2.0 ~ 2.5	0.15	0.14	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.12	0.12	0.12
2.5 ~ 3.0	0.14	0.14	0.14	0.14	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.09

표 5. 지표호를 이동거리에 따른 하천치수 유역별 평균 퇴적량

Event Range(km)	Average Deposition (cm)											
	Rusa				Maemi				Nari			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
0.0 ~ 0.5	0.42	0.32	0.27	0.33	0.27	0.21	0.18	0.21	0.34	0.28	0.23	0.25
0.5 ~ 1.0	0.23	0.19	0.20	0.18	0.22	0.22	0.17	0.17	0.32	0.34	0.21	0.20
1.0 ~ 1.5	0.38	0.30	0.32	0.33	0.22	0.18	0.18	0.18	0.22	0.16	0.16	0.17
1.5 ~ 2.0	0.50	0.50	0.50	0.50	0.38	0.38	0.38	0.38	0.22	0.22	0.22	0.22
2.0 ~ 2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5 ~ 3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(a) 1차 하천유역

(b) 2차 하천유역

(c) 3차 하천유역

(d) 4차 하천유역

그림 6. 국부경사에 따른 침식 및 퇴적의 변화

표 6. 국부경사에 따른 하천치수 유역별 평균 침식량

Event Range(m/m)	Average Erosion (cm)											
	Rusa				Maemi				Nari			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
0.00 ~ 0.05	0.18	0.18	0.18	0.18	0.13	0.14	0.14	0.13	0.15	0.17	0.16	0.16
0.05 ~ 0.10	0.18	0.18	0.18	0.18	0.13	0.13	0.14	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15
0.10 ~ 0.15	0.17	0.16	0.17	0.17	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.14
0.15 ~ 0.20	0.16	0.16	0.16	0.16	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.12	0.12
0.20 ~ 0.25	0.17	0.16	0.16	0.16	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.10
0.25 ~ 0.30	0.16	0.15	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07	0.07	0.10	0.10	0.10	0.10
0.30 ~ 0.35	0.15	0.15	0.15	0.15	0.05	0.06	0.06	0.05	0.09	0.09	0.09	0.09
0.35 ~ 0.40	0.14	0.13	0.14	0.14	0.04	0.05	0.05	0.04	0.10	0.10	0.10	0.10
0.40 ~ 0.45	0.16	0.15	0.15	0.15	0.04	0.04	0.04	0.04	0.09	0.09	0.09	0.09
0.45 ~ 0.50	0.14	0.14	0.14	0.14	0.02	0.03	0.03	0.02	0.07	0.07	0.08	0.07

표 7. 국부경사에 따른 하천치수 유역별 평균 퇴적량

Event Range(m/m)	Average Deposition (cm)											
	Rusa				Maemi				Nari			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
0.00 ~ 0.05	0.48	0.35	0.28	0.32	0.33	0.26	0.20	0.22	0.38	0.32	0.23	0.25
0.05 ~ 0.10	0.12	0.12	0.08	0.11	0.05	0.06	0.03	0.05	0.07	0.08	0.03	0.07
0.10 ~ 0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.15 ~ 0.20	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20 ~ 0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25 ~ 0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.30 ~ 0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
0.35 ~ 0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.40 ~ 0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.45 ~ 0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

생하지 않은 것으로 분석되었다. 또한 지표흐름 이동거리가 1.0 km 이하인 경우 1차 하천유역의 퇴적이 다른 하천치수 유역보다 크게 발생하였으며, 지표흐름 이동거리가 1.0 km 이상부터는 비슷한 퇴적양상을 나타내었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 지표흐름 이동거리가 짧은 지역, 즉 하천인접 격자에서 퇴적이 지배적이며, 1차 하천유역이 지표흐름 이동거리가 짧은 격자를 다른 하천치수의 유역보다 많이 포함하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

국부경사에 따른 하천치수별 유역에서의 평균 침식량 및 퇴적량의 분석 결과 경사가 급해짐에 따라 평균 침식은 그림 6 및 표 6과 같이 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었으나 하천치수에 따라서는 뚜렷한 변화를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 일반적으로 소규모 스케일의 침식의 경우 경사가 급해짐에 따라 침식발생 가능성은 높아지지만, 유역규모의 침식의 경우 동일한 크기의 유역일지라도 매우 다양한 경사가 존재하게 되며 (이기하 등, 2011), 본 연구의 대상유역의 경우, 급경사를 갖는 격자의 수가 완만한 경사를 갖는 격자의 수에 비해 그 수가 상대적으로 적고, 장우기간동안 식 (5)에 의해 침식 및 퇴적이 반복적으로 발생함에 따라 최종적으로는 평균 침식량의 크기가 감소하는 경향을 나타낼 수 있다.

퇴적의 경우 경사가 급해질수록 급속히 감소하고 경사가

0.1 이상인 격자에서는 퇴적은 거의 발생하지 않는 것으로 분석되었으며, 하천치수별 유역에서의 퇴적은 1차 하천유역에서 가장 크게 나타났으며 높은 차수의 유역일수록 감소하는 경향을 나타내었다(표 7). 이는 지표흐름 이동거리의 분석결과와 마찬가지로 완만한 경사를 갖는 격자를 1차 하천유역이 다른 하천치수의 유역보다 많이 포함하고 있기 때문이다.

그림 7은 침식보다 퇴적이 월등하게 지배적인 한계값

그림 7. 지표흐름 이동거리 2.0 km 이하, 국부경사 0.1 이하의 값을 갖는 격자의 공간분포

(2.0 km 이하의 지표흐름 이동거리 및 0.1 이하의 국부경사)을 동시에 만족하는 격자의 공간분포도를 나타낸 것으로써 대부분의 격자가 하천에 인접하여 발달하여 있으며, 이 격자에서는 지형적으로 침식보다는 퇴적현상이 우세함을 보여주고 있다. 지형학적 인자에 따른 퇴적의 변동성에 비해 침식의 경우 그 상관성이 명확하지 않은데 이는 지형학적 인자 이외에 강우량(식 (4))등과 같은 또 다른 지배인자들이 침식에 복합적으로 기여함으로써 단순히 지형학적 인자와 침식의 독립적인 분석으로는 그 상관성을 명확하게 설명할 수 없음을 의미한다. 따라서 다음 절에서는 침식현상을 발생시키는 주요 수문기상학적인 인자인 강우량과 침식 및 퇴적의 변동성 분석을 수행하였다.

4.2 수문기상학적 특성인자에 따른 침식 및 퇴적의 변동성 분석

본 연구에서 사용된 모형은 다양한 공간분포형태의 강우자료의 적용이 가능하므로 전술한 4개의 우량관측소를 기반으로 Thiessen망을 구축하고 시강우자료를 격자별로 입력하여 강우-유사-유출 모의를 수행하였다. 그림 8은 Thiessen 면적에 해당하는 강우사상별 총 강우량을 나타낸 것이며, 그림 9는 각 강우사상동안 우량관측소의 총 강우량을 오름차순으로 나열하여 그림 2와 3(a)의 정보를 활용하여 하천치수에 따른 유역별 평균 침식량 및 퇴적량과의 관계를 도식한 것이다. 분석 결과, 총 강우량이 증가함에 따라 모든 하천치수의 유역에서 침식은 점진적으로 증가하는 추세를 보이는 반면, 퇴적량의 경우 강우량의 증감에 따른 특이한 변동성(또는 규칙

그림 8. 강우사상에 따른 Thiessen 면적별 총 강우량

그림 9. 총 강우량에 따른 차수별 침식 및 퇴적의 변화

성)은 발견하지 못하였다. 실제적으로 2차 하천유역의 경우 Thiessen ①의 영역, 3차하천유역의 경우 Thiessen ①과 ② 영역에서는 침식만 발생할 뿐 퇴적은 발생하지 않았으며, 대상유역의 전체를 포함하는 4차 하천유역의 경우 가장 작은 강우량 (115 mm)에 의해 침식량은 가장 작게 나타났으나 퇴적량은 가장 큰 강우량 (215 mm)보다 오히려 크게 나타났다.

이상의 결과에서 지형인자 및 수문기상학적 인자 모두 침식 및 퇴적과정에 영향을 미치는 중요 요소임을 확인할 수 있으며, 지형학적 인자는 침식보다는 퇴적에 지배적이며, 반대로 수문기상학적 인자는 퇴적보다는 침식에 지배적임을 유추할 수 있다.

그러나 본 연구에서는 강우량과 침식 및 퇴적의 변동성 분석에 단지 12개의 지점 강우자료를 이용하였으므로 통계적으로 보다 유의한 결과를 도출하기 위해서는 지형공간 내삽법, 레이더, 인공위성 등과 같은 다양한 방법을 이용하여 공간 강우장(spatial rainfall field)을 생성하여 그에 따른 침식 및 퇴적의 변동성 분석에 대한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 분포형 강우-유사-유출 모형을 이용하여 격자기반의 유역침식 및 퇴적 공간분포 정보를 획득하고, 유역의 지형학적인 인자인 유역면적, 지표흐름 이동거리, 국부경사와 수문기상학적 인자인 강우량에 따른 유역내 침식 및 퇴적의 변동성에 대하여 분석하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) Strahler의 하천차수법칙에 의해 분할된 모든 유역에서의 침식량 및 퇴적량을 분석한 결과 그 규모는 강우사상에 따라 다르지만 유역면적이 커짐에 따라 선형적으로 증가하고 있으며 그에 대한 결정계수 역시 매우 높은 결과를 나타내었다.
- 2) 지표흐름 이동거리에 따른 평균 침식량 및 퇴적량의 분석 결과 평균 침식량의 변화는 지표흐름 이동거리의 증가에 따라 미소하게 감소하는 것으로 나타났으며, 하천차수의 변화에 따른 변화는 미비한 것으로 분석되었다. 퇴적의 경우 지표흐름 이동거리의 변화에 따라 그 값이 상이하게 나타났으나 지표흐름 이동거리가 2.0 km 이하에서 퇴적이 집중적으로 발생하고 그 이상에서는 퇴적이 발생하지 않은 것으로 분석되었다. 또한 지표흐름 이동거리가 1.0 km이하인 경우 1차 하천유역의 퇴적이 다른 하천차수 유역보다 크게 발생하였으며, 지표흐름 이동거리가 1.0 km이상부터는 비슷한 퇴적양상을 나타내었다.
- 3) 국부경사에 따른 평균 침식량 및 퇴적량의 분석 결과 경사가 급해짐에 따라 평균침식량은 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었으나 하천차수에 따라서는 계급구간별 국부경사의 증가에 따라 평균 침식량은 감소하는 경향을 나타내었으나 차수가 증가함에 따라서는 그 변화가 미비한 것으로 분석되었다. 경사가 급해질수록 퇴적이 급속히 감소하고 경사가 0.1이상인 격자에서는 퇴적이

거의 발생하지 않는 것으로 분석되었으며, 하천차수별 유역의 검토결과, 1차 하천유역에서 퇴적이 가장 크게 나타났으며 차수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

- 4) 총 강우량과 침식 및 퇴적의 변동성 분석결과 총 강우량이 증가함에 따라 모든 하천차수의 유역에서 침식량은 점진적으로 증가하는 추세를 보이는 반면, 퇴적량의 경우 강우량의 증감에 따라 특이한 변동성은 나타나지 않았다. 또한 차수가 증가함에 따라 침식량은 차수변화에 뚜렷한 변화를 보이지 않았으나 퇴적량의 경우 그 변화가 상이하였다.
- 5) 지형학적, 수문기상학적 인자에 따른 침식 및 퇴적의 분석결과 지형인자 및 수문기상학적 인자 모두 침식 및 퇴적과정에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었으며, 퇴적은 지형학적 인자와 밀접한 관계가 있으며 침식은 수문기상학적 인자에 지배적임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 유역특성인자와 유역내 침식 및 퇴적의 공간분포를 분석하기 위하여 지형학적 특성인자인 유역면적, 지표흐름 이동거리, 국부경사를 사용하였으며 수문기상학적 인자로 총 강우량을 사용하였지만 자연계에 있어서 유역내 토양 침식 및 퇴적의 과정은 비선형으로서 유역내 침식 및 퇴적현상은 지형학적 특성과 수문기상학적 특성 등에 의해 매우 복잡하게 나타난다. 따라서 보다 정확한 상관성 분석을 위해서는 유역형상, 토양종류, 토지이용 및 피복상태, 강우지속시간 등 상세한 인자들과의 분석 또한 필요하다고 판단되며, 강우량의 경우 보다 통계적으로 유의한 결과를 도출하기 위해서는 다양한 공간 강우장을 생성하여 그에 따른 침식 및 퇴적의 변동성 분석에 대한 후속연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 갈병석 (2008) SWAT모형을 이용한 낙동강 유량 및 부유사량 변동 분석 연구, 석사학위논문, 부산대학교.
- 국립방재연구소 (1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구 (I), 행정자치부.
- 박상덕 (2008) 산불지역의 WEPP 매개변수 추정, 한국수자원학회 논문집, 제41권, 제6호, pp. 565-574.
- 예령, 윤성완, 정세웅 (2008) 대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용, 한국수자원학회 논문집, 제41권, 제2호, pp. 149-162.
- 유완식 (2010) 매개변수의 불확실성을 고려한 강우-유사-유출량 산정에 관한 연구, 석사학위논문, 충남대학교.
- 이근상, 김유리, 예령, 이을래 (2009) GIS 기반 SWAT모델을 이용한 동향·천천유역의 부유사량 분석, 한국지리정보학회 논문집, 제12권, 제2호, pp. 82-98.

- 이기하, 유완식, 장창래, 정관수 (2010) 분포형 수문모형을 이용한 침식 및 퇴적의 시공간 변동성 분석, **한국수자원학회논문집**, 제43권, 제11호, pp. 995-1009.
- 이기하, 윤의혁, 김주철, 정관수 (2011) DEM을 이용한 수로망 산정기법에 따른 유역배수구조 평가, **대한토목학회논문집**, 제31권, 제1B호 pp. 1-11.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G. and Ritsems, C.J. (1996) 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. (1996) 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.
- 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.
- 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 ASCE*, Vol. 36, No. 1, pp. 31-42.
- Kinnell, P.I.A. (2003) Event erosivity factor and errors in erosion prediction by some empirical models. *Australian Journal of Soil Research*. Vol. 41, pp. 991-1003.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A. and Jakeman, A.J. (2003) A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 18, pp. 761-799.
- 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 Process and Landforms*, Vol. 23, pp. 527-544
- Morris, G.L. and Fan, J. (1997) *Reservoir sedimentation handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual model; Part1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. Vol 10, No. 3, pp. 398-409.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA Handbook NO. 537. *U.S. Department of Agriculture*, Washington.
- Renschler, C.S. (2003) Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach. *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 1005-1007.
- Schmidt, S. (2000) *Soil erosion: application of physically-based models*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany.
- Strahler, A.N. (1952) Hypsometreic(area-altitude) analysis of erosional topography, *Bulletin of Geological Society of America*, Vol. 63, No. 11, pp. 1117-1142.
- Toy, T.J., Foster, G.R. and Renard, K.G. (2002) *Soil Erosion: processes, prediction, measurement and control*. John Wiley and Sons, New York.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA Handbook NO. 537. *U.S. Department of Agriculture*, Washington.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E. and Goodrich, DC. (1990) KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. *Agricultural Research Service, ARS 77, United States Department of Agriculture*.
- Yang, C.T. (1972) Unit stream power and sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. 10, pp. 1805-1826.

◎ 논문접수일 : 11년 01월 28일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 02월 16일
 ◎ 심사완료일 : 11년 03월 22일