

## GIS 기반에서 비퇴사량 실측자료를 활용한 토양침식의 정량화에 관한 연구

이근상\*장영률\*\*조기성\*\*\*

- \* 순천청암대학 지리정보기술연구소 연구원
- \*\* 순천청암대학 GIS과 교수
- \*\*\* 전북대학교 토목공학과 교수

### 1. 연구배경 및 목적

최근, 지구의 환경오염이 심각해지면서 이상기후로 인한 비정상적인 계절변화가 발생하고 있다. 특히, 올해와 같이 단기간의 폭우로 인해 많은 산림과 농지가 유실되고 하천이 범람하면서 미래 지구에 대한 불안감이 가중되고 있다. 강우로 인한 토양침식은 지구상에 존재하는 자원의 기반을 위협하는 중요한 환경문제이며 이로 인해 용수를 공급해야 할 하천이나 저수지의 담수용량이 과거에 비해 크게 감소한 것으로 발표되고 있다. 이러한 구역내의 광범위한 토양침식을 효과적으로 평가하기 위한 다각적인 연구가 진행되어 왔으며 최근 토양침식량을 객관적이고 효과적으로 분석하기 위해 GIS가 적극 도입되고 있다.

다양한 토양침식모형중 구역내의 토양침식을 GIS로 분석하기 위해 최근 RUSLE 모형이 이용되고 있으며, 국내외적으로 활발한 연구가 진행중에 있다. RUSLE 모형은 농경지의 토양침식을 계산하는 범용토양손실공식(USLE)으로부터 구역의 토양침식을 추정하기 위해 개선된 수정공식으로서, RUSLE 모형을 구성하는 각 인자들은 외국에서 개발된 식을 주로 활용하기 때문에 국내 현실과는 많은 차이를 나타내게 된다. 따라서, 국내 현실에 맞는 정량화된 토양침식량 계산이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 보성강 구역의 비퇴사량 실측자료를 이용하여 RUSLE 모형으로 계산한 토양침식의 정량적 계산에 적합한 해상도를 결정하고자 한다. 특히, 우리나라와 같이 지형이 복잡한 곳에서는 지형인자의 영향이 크므로 최근 발표된 다양한 지형인자 계산식별로 토양침식의 정량화에 적합한 해상도를 결정하는데 본 연구의 목적이 있다.

### 2. RUSLE 모형

RUSLE는 기존의 농업지역의 토양침식모형인 USLE의 개선된 경험식으로, 구역에 적용하기 위해 Renard(1991) 등에 의해 개발되었으며 경험적 자료를 기반으로 많은 연구가 진행중에 있다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

- A : 연평균 토양침식량(t/ha/yr)
- R : 강우침식인자(MJ/ha · mm/yr)
- K : 토양침식인자(t/ha/R)
- L : 침식사면의 길이인자
- S : 침식사면의 경사인자
- C : 식생피복인자
- P : 경작인자

### 2.1 강우침식인자(R)

강우침식인자는 연평균 강우의 침식능력으로서 강우의 시간적인 분포와 특성으로부터 얻어진다. 강우침식인자를 계산하는 식은 다양하나, 본 연구에서는 연평균 강우량 자료를 기반으로 강우침식인자를 계산할 수 있는 A. G. Toxopeus의 강우침식인자 계산식을 활용하였다.

$$R = 38.5 + 0.35 \times P$$

여기서 R은 강우침식인자(J/m<sup>2</sup>)이고, P는 연평균 강우량(mm/yr)이다.

### 2.2 토양침식인자(K)

토양침식인자와 토립자 입경분포와의 관계는 범용토양손실공식 연구의 선구자인 Wischmeier와 Smith에 의해 삼각형 도표가 제시되었다. 이를 Erickson이 보완하여 삼각형 도표를 완성하였으며 이로부터 구한 토양침식인자는 0.02 ~ 0.69 범위의 값을 갖는다. 본 연구에서는 1/25,000 정밀도양도의 토양통별 입경, 점토 및 이토함량, 배수상태 등을 분석하여 Erickson이 보완한 삼각형 도표에 적용하여 토양침식인자를 계산하였다.

### 2.3 침식사면의 길이인자(L)

침식사면의 길이인자(L)는 단위구획 경사길이인 22.13m에 대한 수평길이의 비를 나타낸다. 분포형모형에 활용가능한 L인자를 계산하기 위해 Renard와 Desmet & Govers는 다음 식을 제안하였다.

1) Renard

$$L_i = \frac{x^m [i^{m+1} - (i-1)^{m+1}]}{22.13^m}$$

여기서,  $L_i$ 는 격자에 대한 침식사면의 길이인자이며  $x$ 는 격자크기이다.

2) Desmet & Govers

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-in} + D^2)^{m+1} - A_{ij-in}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{ij}^m \times 22.13^m}$$

$L_{ij}$ 는 격자에 대한 침식사면의 길이인자,  $A_{ij-in}$ 는 격자에 유입되는 상류 기여면적,  $D$ 는 격자크기,  $x_{ij}$ 는 흐름방향에 직교하는 등고선 길이로  $(|\sin \alpha_{ij}| + |\cos \alpha_{ij}|)$ ,  $\alpha_{ij}$ 는 격자의 방향이다.

#### 2.4 침식사면의 경사인자(S)

침식사면의 경사인자는 토양침식에 대한 사면경사의 영향을 나타내는 인자로서 길이인자인  $L$ 에 비해 더욱 민감한 특성을 갖는다. 유역에서 S인자를 산정하기 위해 McCool, Liu 그리고 Nearing은 다음 식을 제안하였다.

##### 1) McCool

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad (\text{경사} < 9\%), \quad S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad (\text{경사} > 9\%)$$

##### 2) Liu

$$S = 21.91 \sin \theta - 0.96$$

##### 3) Nearing

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin \theta)}$$

#### 2.5 식생피복인자(C)

특정지역내의 식생피복인자값은 식생의 종류, 식생이 성장하는 상태, 경작형태와 관리요소들에 의하여 좌우된다. 식생피복인자값의 비율은 식생이 성장하기 전의 맨 땅에서와 같은 지역에서는 약 1.0으로 높은 값을 가진다. 그리고 삼림이 밀집된 지역이나 곡물의 밀도가 높은 지역에서는 0.1이하로 낮은 값을 갖는다.

#### 2.6 경작인자(P)

경작인자는 지표면에서의 여러 가지 경작지에 따른 토양침식의 비를 나타낸다. 경작지 형태에는 등고선경작(Contour), 등고선대상경작(Cropping), 테라스경작(Terrace) 등이 있으며 침식을 통제할 수 있는 중요한 요소로 해석되고 있다. <표 1>은 신계종이 제시한 경작지 형태 및 경사에 따른 경작인자값을 나타낸 것이다.

표 1. 경작형태와 경사에 따른 경작인자

Slope(%)	Contour	Cropping	Terrace
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 -	1.00	0.50	0.20

### 3. 적용 및 분석결과

#### 3.1 대상지 선정 및 자료구축

지형인자에 따른 토양침식량의 정량화를 계산하기 위해 본 연구에서는 전남 보성군에 위치하고 있는 보성강댐 유역을 공간적 범위로 선정하였다. 보성강댐 유역은 전남 보성군 웅치면 봉산리의 표고 384m에서 발원하여 북동쪽으로 유하하며 보성강댐으로 유입된다. 보성강댐 유역의 면적은 274.046km<sup>2</sup>이고, 둘레는 97.614km이다. 본 연구에서 활용한 자료는 수치지형도(1/25,000), 토지피복도, 정밀토양도(1/25,000), 강우자료 등이다.

#### 3.2 RUSLE 인자 및 토양침식량 계산

먼저, 강우침식인자 R을 계산하기 위해 보성, 복내, 도암, 연산 강우관측소 자료를 이용하였다. 수자원공사에서 운영하고 있는 보성과 복내에는 최근의 자료까지 구축할 수 있었지만, 건설교통부에서 운영하고 있는 도암과 연산 관측소는 자료구축의 어려움으로, 1991년부터 1999년까지의 일우량 자료를 정리하여 연평균강우량을 계산하여 활용하였다. 강우관측소별 연평균강우량 자료를 이용하여 스플라인 보간으로 셀크기 22m의 강우분포도를 작성하였다. 스플라인 기법으로 구축한 강우분포자료로부터 강우침식인자를 추출하기 위해 A. G. Toxopeus가 제안한 식을 활용하였다.

토양침식인자 K를 추출을 위해 농촌진흥청에서 제작한 1/25,000 정밀토양도를 활용하였다. 먼저 정밀토양도의 영문으로 표기된 토양명을 농촌진흥청에서 작성한 한글식 토양통으로 통합한 후, 토양통에 해당하는 입경분포, 유기물함량, 골재함량을 '토양통 해설서'를 참조하여 결정된 후 Erickson의 삼각형 도표로부터 토양통별 토양침식인자 K값을 산정하였다.

지형인자 LS는 22m 해상도를 갖는 DEM 자료로부터 2.3과 2.4에서 제시한 L식과 S식의 곱으로 계산하였다.

식생피복인자 C를 추출하기 위해 환경부에서 구축한 토지피복도 자료를 활용하였으며, 신계종의 연구에서 제시한 각 토지항목별로 C값을 지정한 후 유역전체에 대한 통계분석을 수행하여 계산할 수 있었다.

경작형태에 따른 토양침식의 영향을 평가하는 경작인자 P를 추출하기 위해서는 논과 밭을 구분하여 분류한 토지피복도가 필요하다. 본 연구에서는 논과 밭의 구분없이 경작지 형태를 논으로 지정하였으며, 따라서 경작지 형태를 테라스방식으로 지정한 후 <표 1>에서 제시한 기준

에 의해 유역의 경작인자를 계산하였다. 토양침식량 A는 RUSLE 인자들의 곱으로 계산하였다. RUSLE 인자 및 토양침식량 분석결과는 <표 2>와 같다.

표 2. RUSLE 인자 및 토양침식량 분석결과

종 류		평 균 값	
RUSLE 인자	강우침식인자 (R)	436.912	
	토양침식인자 (K)	0.286	
	지형인자 (LS)	Desmet & Govers × Liu	10.549
		Desmet & Govers × McCool	8.782
		Desmet & Govers × Nearing	9.984
		Renard × Liu	12.298
		Renard × McCool	10.205
		Renard × Nearing	11.614
	식생피복인자 (C)	0.150	
경작인자 (P)	0.808		
토양침식량	Desmet & Govers × Liu	148.633	
	Desmet & Govers × McCool	121.84	
	Desmet & Govers × Nearing	139.664	
	Renard × Liu	173.254	
	Renard × McCool	141.774	
	Renard × Nearing	162.656	

### 3.3 비유사량 계산

RUSLE 모형을 이용하여 토양침식을 정량화하기 위해, 본 연구에서는 비유사량값을 이용하였다. 비유사량이란 단위기간(1년)에 단위면적(km<sup>2</sup>)당 상류유역에서 유출되어 유역출구의 한 하천지점을 통과하는 유사량을 말하며 단위는 보통 ton/km<sup>2</sup>/yr로 표시한다. 본 연구에서는 RUSLE로 계산한 토양침식량에 Boyce 공식인  $SDR = 0.41 \times A^{-0.3}$ 을 이용하여 계산한 유사운송비 0.0761을 곱하였으며, 비유사량 단위인 ton/km<sup>2</sup>/yr와의 일치를 위해 100을 곱해 최종적인 비유사량 값을 지형인자별로 <표 3>과 같이 계산하였다.

표 3. RUSLE 모형으로부터 계산한 지형인자별 비유사량 결과

비유사량	Desmet & Govers × Liu	1131.10
	Desmet & Govers × McCool	927.20
	Desmet & Govers × Nearing	1062.84
	Renard × Liu	1318.46
	Renard × McCool	1078.90
	Renard × Nearing	1237.81

보성강 유역에서는 댐 담수용량을 평가하기 위해 비퇴사량을 실측하여 200(m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yr)을 얻었

다. 실측한 비퇴사량으로부터 비유사량을 계산하기 위해  $V_s = E \frac{Y_r}{\gamma_m}$ 를 이용하여 314.28(ton/km<sup>2</sup>/yr)을 얻을 수 있었다. 이때 포착률(E)과 단위중량( $\gamma_m$ )은 우리나라 저수지에 일반적으로 활용되는 E=0.7과  $\gamma_m=1.1$ 을 적용하였다. 비퇴사량 실측치로부터 계산한 비유사량 값은 <표 3>의 RUSLE 모형으로부터 계산한 값과 많은 차이를 보임을 알 수 있다.

### 3.4 비유사량 정량화를 위한 지형인자별 해상도 결정

RUSLE 모형으로 계산한 비유사량과 비퇴사량 실측자료에서 얻은 비유사량과의 일치율을 위해 본 연구에서는 지형인자의 영향을 반영하였다.

먼저, 22m에서 200m까지 10m 간격으로 DEM을 구축한 후 해상도별로 지형인자를 추출하였다. 분석한 해상도별 지형인자를 다른 인자와 일치시키기 위해 다시 22m로 재배열한 후 강우침식인자, 토양침식인자, 식생피복인자, 경작인자와 곱하여 다양한 해상도별 토양침식량을 계산할 수 있었다. 해상도별 평균토양침식량에 유사운송비 0.0761을 곱하여 비유사량을 계산하였다. <표 4>는 지형인자별 해상도에 따른 비유사량 분석결과이며, <그림 1>은 지형인자별 해상도에 따른 비유사량 분포도이다.

GIS 기반에서 비퇴사량 실측자료를 활용한 토양침식의 정량화에 관한 연구

표 4. 지형인자별 해상도에 따른 비유사량 분석결과

	Yr_DL	Yr_DM	Yr_DN	Yr_RL	Yr_RM	Yr_RN
22m	1131.1	927.20	1062.8	1318.4	1078.9	1237.8
	0		4	6	0	1
30m	975.98	788.17	905.29	1123.0	925.91	1071.7
				8		2
40m	840.57	698.48	777.71	977.57	810.62	903.35
50m	765.95	636.88	687.87	842.43	732.31	789.23
60m	678.71	571.75	620.69	789.07	663.04	720.47
70m	613.97	523.80	537.49	660.17	585.51	610.40
80m	555.53	475.84	504.89	555.53	475.84	504.89
90m	521.06	449.07	464.74	553.23	476.33	508.57
100m	474.68	412.84	431.17	549.85	476.50	498.10
110m	435.25	381.82	398.51	520.57	442.19	459.09
120m	410.35	363.14	374.02	473.95	417.67	430.56
130m	381.12	341.67	352.08	462.25	401.05	397.38
140m	357.08	322.00	327.95	412.49	370.08	377.20
150m	339.42	<b>314.21</b>	<b>306.50</b>	382.25	356.38	347.17
160m	<b>318.05</b>	291.88	294.55	367.17	335.02	338.29
170m	307.14	278.01	281.36	343.04	<b>321.04</b>	324.45
180m	285.22	267.10	267.48	328.26	305.40	<b>305.99</b>
190m	269.38	255.65	256.27	<b>305.73</b>	292.79	294.95
200m	255.60	244.09	243.28	294.19	278.87	278.06

Desmet & Govers×Liu(DL), Desmet & Govers×McCool(DM),  
Desmet & Govers×Nearing(DN), Renard×Liu(RL), Renard×McCool(RM),  
Renard×Nearing(RN)

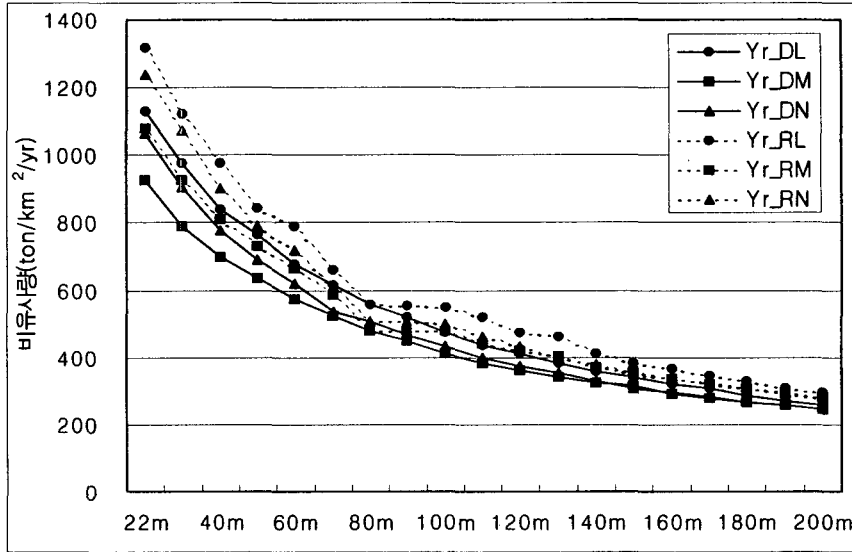


그림 1. 지형인자별 해상도에 따른 비유사량 분포도

실측한 비퇴사량 자료에서 계산한 비유사량 값인 314.28(ton/km<sup>2</sup>/yr)과 RUSLE 모형으로부터 계산한 비유사량 값을 분석함으로써, 각 지형인자별로 토양침식량 계산에 적합한 RUSLE 모형의 해상도를 <표 5>와 같이 결정할 수 있었다.

표 5. 지형인자별 RUSLE 모형의 해상도 결정

RUSLE 해상도	Desmet & Govers × Liu	160m
	Desmet & Govers × McCool	150m
	Desmet & Govers × Nearing	150m
	Renard × Liu	190m
	Renard × McCool	170m
	Renard × Nearing	180m

#### 4. 결론

본 연구에서는 비퇴사량 실측치를 이용하여 보성강유역의 토양침식 정량화에 적합한 해상도를 지형인자별로 결정함으로써 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

먼저, 다양한 공간분석 기법에 의해 RUSLE 입력인자인 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 지형인자(LS), 식생피복인자(C), 경작인자(P)를 추출하는 방법을 제시하였다. 특히, 토양침식인자(K)는 1/25,000 정밀도토양도를 활용함으로써 기존의 1/250,000 개략도양도에 의존했던 연구



에 비해 침식에 대한 토양의 영향을 보다 정밀하게 고려할 수 있었다. 또한, 지형인자(LS) 계산에서는 사면의 경사 및 방향 그리고 관측셀로 유입되는 상부기여면적까지도 고려할 수 있도록 유역추출 알고리즘 기법을 함께 연계하여 적용함으로써 보다 현실적인 토양침식과정을 반영할 수 있었다.

유역의 토양침식량을 계산하기는 현실적으로 어렵기 때문에 기존의 연구들은 토양침식의 잠재성만을 GIS 기법을 이용하여 평가하였으나, 본 연구에서는 보성강 유역의 비퇴사량 실측치로부터 포착률과 단위중량을 이용하여 계산한 비유사량 값과 RUSLE 모형을 활용한 토양침식량으로부터 유사운송비를 고려하여 계산한 비유사량을 상호 비교하고, 지형인자의 해상도에 따른 영향을 평가함으로써 토양침식의 정량화에 적합한 해상도를 결정할 수 있게 되었다. 특히, 지형인자별로 토양침식의 정량화에 적합한 해상도를 평가함으로써 다양한 환경에서 토양침식량을 정량적으로 평가할 수 있게 되었으며, 향후 다른 유역에 적용하여 그 타당성을 검증할 경우 우리나라 유역에 전반적으로 적용할 수 있으리라 생각된다.

## 참고문헌

- Desmet, P.J., Govers, G., 1996, A GIS-procedure for the automated calculation of the USLE LS-factor on topographically complex landscape units, *Journal of Soil and Water Conservation* 51(5), pp. 427-433
- Dissmeyer, G.E. and G.R. Foster, 1981, Estimating the cover management factor in the USLE for forest conditions, *Journal of Soil and Water Conservation* 36(4), pp. 235-240.
- Durgin, P.B., 1985, Burning changes the erodibility of forest soils, *Journal of Soil and Water Conservation* 40(3), pp. 299-301.
- Gilley, J.E., S.C Finkner, R.G. Spomer and L.N. Mielke., 1986, Runoff and erosion as affected by crop residue, *Transactions of the American Association of Agricultural Engineers* 29(1), pp.157-160.
- Liu, B.Y., M.A. Nearing and L.M. Risse, 1994, Slope gradient effects on soil loss for steep slopes, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 37(6), pp. 1835-1840.
- McCool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K., and Meyer, L.D., 1989, Revised Slope Length Factor the Universal Soil Loss Equation, *Trans. American Society of Agricultural Engineers* 32(5), pp. 1571-1576.
- Wischmeier, W.H., 1971, A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction sites, *Journal of Soil and Water Conservation* 26, pp. 189-193.
- 신계중, 1999, 지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실분석, 강원대학교 토목공학과 박사 논문.
- 이근상, 이환주, 임승현, 조기성, 2001, GIS를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의 영향분석,

*GIS 기반에서 비퇴사량 실측자료를 활용한 토양침식의 정량화에 관한 연구*

대한토목학회 제 21권 4-D호, pp. 545-554.

이환주, 2002, “GSIS 공간분석 기법을 활용한 토양침식 잠재성 평가에 관한 연구”, 전북대학교 토목공학과 박사논문.

한국건설기술연구원, 1992, 하천유사량 산정방법의 선정기준 개발, 건기연 89-WR-113 연구보고서.