

GIS 기반에서 토양침식의 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구

장영률* · 이근상** · 조기성***

The Determination of Resolution for Quantification of Soil Loss in GIS Environment

Young-Ryul Jang* · Geun-Sang Lee** · Gi-Sung Cho***

요 약

강우나 물의 유출에 의한 토양침식은 농업 생산성을 떨어뜨리고 목초지를 손상시키며, 물의 흐름을 방해하는 등의 각종 환경적인 문제를 야기시키고 있다. 또한 침식된 토사의 하천유입으로 저수지나 댐의 유효저수량이 감소되는 문제가 발생하고 있다. GIS를 연계하여 유역의 토양침식량을 추정하기 위해 수정범용토양손실공식(RUSLE)을 주로 활용하고 있으나, 실측자료와의 비교가 어려워 계산된 토양침식량을 정량적으로 평가하는 것은 큰 의미가 없다.

본 연구에서는 RUSLE 모형으로 계산한 토양침식량의 정량적인 추정을 위해 보성강 유역의 비퇴사량 실측자료를 이용하였다. RUSLE 모형으로 계산한 비유사량과 비퇴사량 실측자료로부터 계산한 비유사량과의 비교 검토를 통해 RUSLE 계산에 적합한 해상도를 결정한 결과, 150m의 셀크기가 가장 적절한 것으로 평가되었다.

주요어 : 수정범용토양손실공식, 토양침식, 비유사량, 비퇴사량, 해상도

ABSTRACT : Soil Loss by outflow of water or rainfall has caused many environmental problems as declining agricultural productivity, damaging pasture and preventing flow of water. Also, validity pondage of reservoir or dam is decreased by rivers inflow of eroded soil.

* 순천청암대학 GIS과 교수(Professor, Department of Geographic Information System, Suncheon Chongam College, Duckwol-Dong, Suncheon, Chonnam, Korea, 540-260)

** 전북대학교 토목공학과 박사수료, 순천청암대학 지리정보기술연구소 연구원(Researcher, Research Institute of Geographic Information Technology, Suncheon Chongam College, Duckwol-Dong, Suncheon, Chonnam, Korea, 540-260)

*** 전북대학교 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Duckjing-Dong, Chonju, Chonbuk, Korea, 561-756)

Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE) is mainly used to presume soil loss amount of basin using GIS. But, because comparison with survey data is difficult, it is no large meaning that estimate calculated soil loss amount as quantitative.

This research used unit sediment deposit survey data of Bo-seong basin for quantitative conclusion of soil loss amount that calculate on RUSLE. Through comparison examination with unit sediment yield that calculate on RUSLE and unit sediment deposit survey data, we can estimate resolution for RUSLE Model. As a result, cell size of 150m was estimated by thing which is most suitable.

Keywords : RUSLE, Soil Loss, Unit Sediment Yield, Unit Sediment Deposit, Resolution

1. 서론

급속한 산업화로 인한 환경오염이 증대되면서 세계적으로 이상기후가 발생하고 있으며 특히 사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 비정상적인 계절변화로 가뭄과 호우가 반복되는 기후 특성이 자주 발생하면서 지표층을 구성하는 토양이 많은 피해를 입고 있다.

가뭄으로 인해 피해를 입고 있는 주민들에게 적절한 상수원수를 공급해야 할 하천이나 저수지의 담수용량이 과거에 비해 크게 감소한 것으로 발표되고 있으며, 이와 같은 결과발생의 가장 큰 원인이 바로 유역의 토양침식으로 인한 저수지나 댐의 퇴사가 증가한 것으로 밝혀졌다. 따라서, 향후 댐 관리 운영측면에서 유역내의 토양침식의 정량적인 추정이 요구되나, 강우시 넓은 유역에 따른 토양침식량을 계측한다는 것은 현실적으로 비용과 시간 측면에서 어려운 실정에 있다(Durgin, 1985).

최근, 토양침식을 정확하고 효과적으로 분석하기 위해 기술정보의 한 분야로 등장

한 지형정보시스템(Geographic Information System; GIS)과 원격탐사(Remote Sensing; RS) 기술이 토양침식량 추정에 접목되어 활용되고 있으나, 실제 유역내의 실측자료가 없는 관계로 정량적인 추정은 그 객관성을 확보하기가 어렵다.

본 연구에서는 보성강 유역의 퇴사량 실측자료를 이용하여 정량적인 토양침식량을 추정하기 위해 GIS와의 접목이 용이하고 유역에 적합하게 설계된 수정범용토양손실 공식(Revised Universal Soil Loss Equation ; RUSLE)을 이용하고자 한다. 토양침식량의 정량적 추정을 위해 비유사량값을 활용하였다. 먼저, RUSLE 모형으로 계산한 토양침식량에 유사운송비를 고려한 비유사량과 실측한 비퇴사량으로부터 포착률과 단위중량을 고려하여 계산한 비유사량을 상호 비교하였다.

RUSLE로부터 계산한 비유사량을 실측한 비퇴사량에서 계산한 비유사량과 일치시키기 위해 토양침식계산에 활용된 DEM의 해상도를 이용하였다. 특히, DEM 해상도에 따라 값이 변화하는 지형인자 LS를 대상으로, 다양한 해상도에 따른 토양

침식량의 변화특성을 분석하여 적절한 셀 크기를 결정하고자 한다.

2. 기존연구 검토

농경지 및 유역의 토양침식량을 계산하기 위한 다양한 방법과 모형들이 개발되었으며, 본 논문에서는 RUSLE 모형 계산에 활용된 인자들에 관한 기존연구를 중심으로 정리하였다.

Wischmeier(1969) 등은 토양통별 토양특성과 토양침식과의 관계를 설명하였으며, Wischmeier(1971) 등은 토양침식성에 영향을 미치는 인자로부터 토양침식인자 K값을 산정할 수 있는 계산도표(Nomograph)를 제시하였다.

McCool(1989) 등은 USLE에서 침식사면의 길이인자 L을 유역에 맞게 수정하였으며, Liu(1994) 등은 침식사면의 경사인자 S가 토양침식에 미치는 영향을 평가하였다.

Dissmeyer(1981) 등은 여러 가지 조건을 가진 산림을 대상으로 식생피복인자 C를 추정하였으며, Gilley(1986) 등은 곡물상태가 토양침식에 미치는 영향을 평가하였다. 특히 Singh(1986)는 인공위성 영상인 LANDSAT TM 영상을 활용하여 최신의 토지피복상태를 평가하여 식생피복인자를 평가하였다.

사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 토양침식은 계절에 따라 다양하게 변화하는데, 이러한 토양의 시간적 계절적인 변화를 평가한 연구로는 Simanton(1994) 등과 Wall(1988) 등이 있으며, 이들은 시간이나 계절적인 토양침식변화를 월별 강우량 변

화에 따른 강우침식인자 R의 변화 및 식생피복변화에 따른 식생피복인자 C의 변화로서 설명하였다.

국내 연구로서, 정필균(1983)은 전국 강우관측소의 강우자료를 분석하여 토양침식량을 예측하기 위한 강우침식인자 R을 산정하였으며, 신계중(1999)은 USLE 모형에 GIS 기법을 적용하여 평창강유역의 토양유실량을 평가하였다.

이환주(2002)는 RUSLE 모형을 이용하여 토양침식량을 추정하였으며 특히, 각 인자들을 계산시 활용된 데이터의 지리경계를 보다 효과적으로 표현하였다. 또한 이근상(2001) 등은 토양침식량을 계산시 다양한 지형인자들의 영향을 평가하여 제시하였다.

GIS를 이용하여 토양침식량을 예측하기 위해 USLE 모형을 대부분 활용하고 있으나, 계산된 결과값이 연구자마다 많은 차이를 보이고 있었다.

토양침식량의 정량화가 어려운 이유는 강우로 인한 토양침식량을 유역공간 전체에 대해 실험하기에는 너무 많은 비용과 시간이 소요되기 때문이다. 본 논문에서는 토양침식의 정량화를 위한 하나의 방법으로 DEM 해상도에 따른 영향을 평가하여 제시하였다.

3. 토양침식과정과 모형의 선정

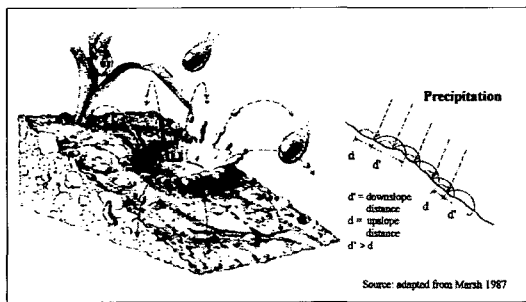
3.1 토양침식과정

토양침식이란 바람이나 유수에 의해 지각을 이루는 토양에서 토양이 지표면으로부터 이완, 분리 및 이송되는 일련의 자

연적인 과정이다.

토양침식과정은 3가지 큰 주제인 에너지, 저항 그리고 보호로서 요약할 수 있다. 에너지는 토양침식에 영향을 주는 강우유출의 잠재성을 의미한다. 또한 토양은 토양이 가지고 있는 물리 화학적 특성에 기초하여 다양한 형태로 침식에 저항하게 되며 토립자로부터의 분리 및 이송력에 대한 토양의 저항력을 침식으로 표현할 수 있다. 토양의 보호는 식생피복의 존재 여부에 따라 좌우된다. 식생은 강우를 직접적으로 차단하며 유출과 관련하여 유출속도를 감소시키는 역할을 한다. 추가로, 식생조직 형태에 따라 다양한 정도로 토양을 보호할 수 있게 된다(Hudson, 1997)

[Figure 1]은 강우 발생으로 인한 토양공극의 확장과 함께 빗물의 중력과 동역학 에너지의 결과로 토립자가 물과 함께 하류로 흘러가는 것을 보여주고 있다. 즉, 빗방울은 토양분리의 가장 중요한 토양분리 매개체가 된다(Morgan, 1981)



[Figure 1] Rain splash : Source of physical soil loss

3.2 침식모형의 선정

토양침식모형은 농경지의 토양침식을 계

산하는 범용토양손실공식(USLE)으로부터 유역의 토양침식을 추정하기 위해 개선된 수정범용토양손실공식(RUSLE)에 이르기까지 다양하게 발전되어 왔으며, 이 외에 ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulator), WEPP (Water Erosion Prediction Project), TBR(Transportation Research Board), AGNPS (AGricultural Non-Point Source)에 이르기까지 다양하다.

본 연구에서는 GIS 및 RS 자료의 이용이 가능하고 특히 중규모 유역에 활용 가능하도록 개발된 RUSLE 모형을 선정하였다.

4. 모형정립을 위한 인자의 검토

4.1 RUSLE 모형

1) 토양침식량(A)

RUSLE모형을 이용하여 토양침식량 A를 계산하는 식은 (1)과 같다. 식 (1)에서 토양침식량 A는 ton/ha/yr의 단위를 가지며, RUSLE의 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 침식사면의 길이인자(L), 침식사면의 경사인자(S), 식생피복인자(C), 경작인자(P)들의 곱으로 표현된다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

2) 강우침식인자(R)

강우침식인자 R은 강우량과 강우강도에 영향을 받는데, 강우량보다는 강우강도가 강우침식인자에 더 큰 영향을 미치며 일정

강우강도 이하에서는 상대적으로 비침식성 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 연구를 통해 제시된 결과를 보면, 침식이 기대되는 강우강도는 대략 25mm/hr라고 되어있다. 또한 온대기후에서는 대략 95%의 강우가 비침식성 강우강도를 갖는 반면, 열대지역에서는 대략 60%의 강우가 비침식성 강우강도를 갖는 것으로 알려져 있다(Hudson, 1977).

강우침식인자를 계산시 강우강도를 고려하는 식이 외국에서 개발되었으나, 우리나라의 경우 강우강도에 대한 자료가 미흡하여, 본 연구에서는 강우량을 기반으로 GIS 공간분석기법을 적용하기 위해 식 (2)와 같은 A. G. Toxopeus의 강우침식인자 계산식을 활용하였다.

$$R = 38.5 + 0.35 \times P \quad (2)$$

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

3) 토양침식인자(K)

토양침식인자와 토립자 입경분포와의 관계는 범용토양손실공식 연구의 선구자인 Wischmeier와 Smith(1965)에 의해 삼각형 도표가 제시되었다. 이를 Erickson(1977)이 보완하여 삼각형 도표를 완성하였으며 이로 부터 구한 토양침식인자는 0.02~0.69 범위의 값을 갖는다. 본 연구에서는 1/25,000 정밀도 토양도의 토양통별 입경, 점토 및 이토 함량, 배수상태 등을 분석하여 Erickson이 보완한 삼각형 도표에 적용하여 토양침식인자를 계산하였다.

4) 침식사면의 길이인자(L)

지형의 영향을 반영하는 지형인자에는 침식사면의 길이인자(L)와 침식사면의 경사인자(S)로 구성되어 있다. 먼저, 침식사면의 길이인자는 단위구획 경사길이인 22.13m에 대한 수평경사길이의 비를 나타낸다. L을 계산하기 위해 제시된 경험식은 많이 있으나, 본 연구에서는 다중흐름알고리즘을 이용한 Desmet & Govers식을 이용하였다.

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-m} + D^2)^{m+1} - A_{ij-m}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{ij}^m \times 22.13^m} \quad (3)$$

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

식 (3)은 경사 및 흐름방향 그리고 대상 격자로 유입되는 상부기여면적을 고려함으로써 실제 침식과정을 효과적으로 표현하게 된다. 즉, 침식된 토사는 물과 함께 하류로 이동한다는 점에 착안하여 상부기여면적을 산정하기 위해 유역추출알고리즘에서 활용되는 흐름누적격자 방식을 적용하였다.

5) 침식사면의 경사인자(S)

침식사면의 경사인자는 토양침식에 대한 사면경사의 영향을 나타내는 인자로서 침식사면의 길이인자에 비해 더욱 민감한

특성을 갖는다. 농경지에 적용했던 USLE를 유역에 적용하여 최근 개발한 침식사면의 경사인자식으로는 Nearing식이 있으며, 식 (4)와 같다.

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin \theta)} \quad (4)$$

θ 는 경사각이다.

6) 식생피복인자(C)

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

7) 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. <Table 1>

<Table 1> Support Practice Factor by support type and slope

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

은 신계종이 제시한 경작지 형태 및 경사에 따른 경작인자값을 나타낸 것이다.

4.2 유사운송비

RUSLE는 강우에 의한 토양의 침식을 추정하는 공식이며 토사의 퇴적이나 이송을 고려하지 않은 모형이다. 따라서 RUSLE에 의하여 산정된 토양침식량은 실제 유역 출구에서의 유사량과는 큰 차이를 보일 수 있다. 유출점에 도달하기 전에 발생하는 퇴적 및 기타 유사의 이송 특성을 고려하기 위해서는 유사 운송비의 개념이 요구되는데 추정된 총 침식량에 유사운송비를 곱하여 하류부에서의 유사량을 구할 수 있으나 유역에 따라 서로 다른 식들이 개발되어 사용되고 있다. 본 연구에서는 우리나라 주요하천에 적용하여 그 타당성이 검증된 Boyce가 제안한 식(5)를 활용하였다.

$$SDR = 0.41A^{-0.3} \quad (5)$$

SDR은 유사운송비이고 A는 유역면적 (km^2)이다(Da Ouyang, 2001).

4.3 비퇴사량

유사는 고지와 수로에서 생성되어 흐르는 물의 작용에 의하여 하류하천으로 이송되다가, 저수지나 댐의 입구와 같이 흐름 단면적의 확대에 의하여 유속이 감소하면 수송능력이 감소되어 퇴적이 발생한다. 저수지나 댐에 유입되는 유사중 큰 입자는 저수지입구 부근에 퇴적되어 삼각주를 형성하고, 부유상태의 미립유사는

댐 부근의 최심부에 퇴적되고 일부는 방류구를 통하여 하류하천으로 흘러간다.

비퇴사량이란 비유사량과 마찬가지로 단위기간(1년)에 단위면적(km^2)당 상류유역에서 유출되어 저수지 바닥에 퇴적되는 퇴사량을 말하며 보통 $m^3/km^2/yr$ 로 표시된다.

저수지나 댐에 유입되는 유사의 대부분은 저수지내에 퇴적되고 이는 저수지의 용량감소를 유발한다. 유사퇴적에 의한 저수지 용량감소는 유입유사량, 유입유사의 저수지내 포착률, 퇴적토사밀도의 영향을 받는다.

저수지나 댐계획에 관한 목적을 위해서는 저수지 수명동안 유사의 퇴적용량 산정이 필요하고 이는 유사의 포착률의 향으로 가능하다.

$$V_s = E Q_s \quad (6)$$

V_s 는 연평균 비퇴사량(m^3/yr), Q_s 는 저수지로 유입되는 유사유입량(m^3/yr)이고 그리고 E는 포착률이다.

저수지 포착률은 흐름에 의하여 수송되는 유사를 저수지가 포착하는 능력으로 유입유사에 대한 포착되는 유사의 백분율로 정의된다. 포착율은, 흐름의 저수지내 체류시간 또는 연평균 유출용적에 대한 저수지 체적의 비와 유사특성의 함수이며 보통 0.7의 값을 갖는다.

유입유사량 Q_s 는 유입되는 비유사량 Y_r 과 퇴사의 평균단위중량 γ_m 로서 계산된다.

$$Q_s = \frac{Y_r}{\gamma_m} \quad (7)$$

따라서, 비퇴사량은 식(8)과 같이 계산

된다(윤태훈, 1999).

$$V_s = E \frac{Y_r}{\gamma_m} \quad (8)$$

5. 적용 및 분석결과

5.1 대상지 선정 및 자료구축

본 연구는 전남 보성군에 위치하고 있는 보성강댐 유역을 공간적 범위로 선정하였다(한국건설기술연구원, 1992).

본 연구에서 구축한 자료는 수치지형도(1/25,000), LANDSAT TM 영상, 정밀토양도(1/25,000), 강우자료 등이다.

<Table 2> Database

Data	Detail Items
Digital Map	Scale (1/25,000)
Landcover Map	LANDSAT TM Imagery (30m×30m)
Soil Map	Scale (1/25,000)
Rainfall Data	Raingauge Name(Bosung, Boknae, Doam, Yeosan)

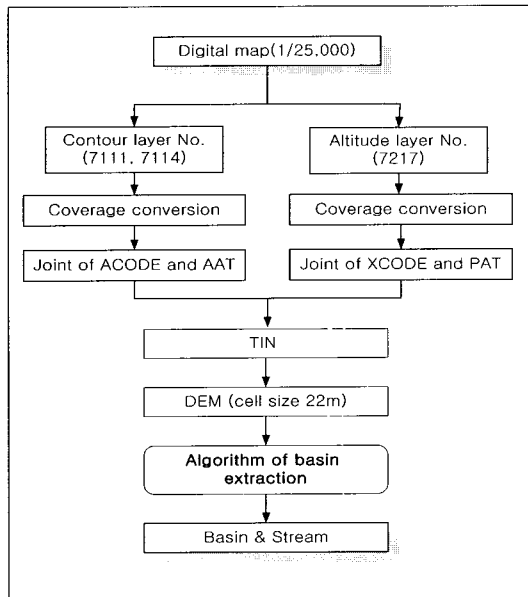
5.2 하천 및 유역 추출

보성강댐 유역경계 및 하천을 추출하기 위한 과정은 [Figure 2]와 같다.

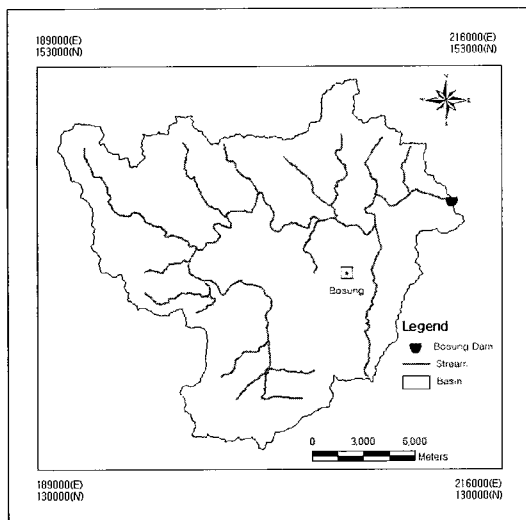
먼저 1/25,000 수치지형도상에서 등고선과 표고 레이어를 이용하여 TIN을 구축한 후, 셀크기 22m의 DEM으로 변환하였다.

DEM 자료로부터 유역추출 알고리즘을 활용하여 하천과 유역을 추출한 후, 보성강댐으로부터 하천을 역추적하여 [Figure 3]과

같은 하천과 유역을 추출할 수 있었다. 추출한 유역면적은 274.046 km^2 이고, 둘레는 97.614 km 였다.



[Figure 2] The process of Basin extraction



[Figure 3] Basin extracted by DEM

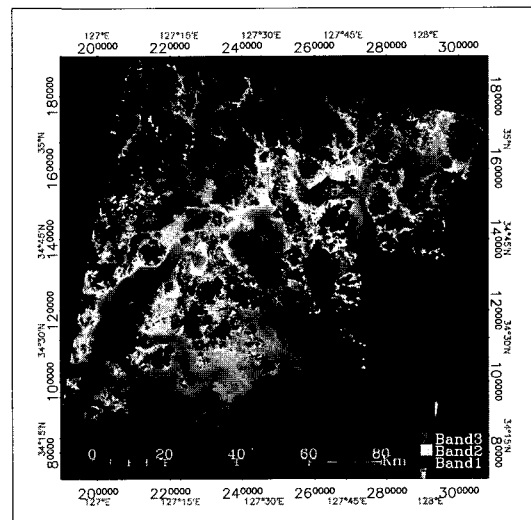
5.3 영상분류 결과

1) 영상의 제원

본 연구에서 활용한 영상은 LANDSAT-5 TM 센서에 의해 2000년 9월 16일에 취득된 영상이며, 일본의 RESTEC(Remote Sensing Technology Center of Japan)에서 구입하였다. [Figure 4]는 본 연구에서 활용한 LANDSAT TM 영상이다.

2) 기하보정

RESTEC에서 입수한 영상은 대상지역을 광범위하게 포함하여 처리시간과 용량이 많이 소요되므로 보성강댐 유역 주변으로 영상을 절취하였다. 연구에 사용된 영상은 방사보정 전처리가 완료되어 기하보정만을 실시하였다. 기하보정을 위한 지상 기준점(Ground Control Point)로는 일반적으로 도로의 교차점이나 주요 건물의 모서



[Figure 4] LANDSAT TM Imagery

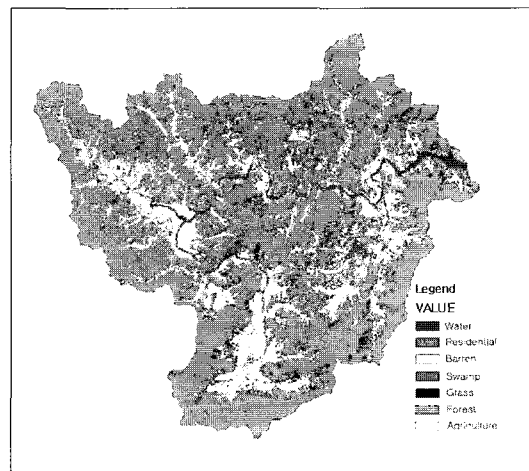
리 등이 주로 이용되지만, 연구대상지역의 경우 주로 산악지역으로 구성되어 있어, 영상에서 도로식별의 어려움이 있었다. 따라서, 식별이 용이한 하천의 분기점 등을 이용하여 Map To Image 방식으로 기하보정을 수행하였으며, GCP 선정을 위해 1/25,000 수치지형도를 활용하였다. 본 연구에서는 총 25점의 GCP를 선정하였으며, Map to Image 방식으로 계산한 RMSE는 0.4782 pixel로서 허용치인 0.5 pixel 이내로 확보할 수 있었다.

3) 토지피복분류

영상분류에 앞서 USGS에서 제시한 토지피복 분류체계를 분석한 후, 수역(Water), 주거지(Residential), 불모지(Barren), 습지(Swamp), 초지(Grass), 산림(Forest), 농경지(Agriculture)와 같은 분류항목을 선정하였다. 특히, 식생피복인자에서는 논과 밭에 대해 별도의 값을 규정하고 있지만, 영상에서 ROI (Region of Interest)를 선정시 논과 밭을 구분하기가 어려운 관계로 논과 밭을 농경지로 통합하여 분류항목을 선정하였다.

토지피복분류를 위해 영상분류기법 중 최대우도법을 이용하였다. 먼저, 수치지형도와 영상의 육안판독에 의해 ROI를 선정하여 최대우도분류의 훈련데이터로 활용하였다. 일반적으로 큰 수역은 양호한 분류 결과를 보여주지만, 세류가 많이 분포하는 지역의 히스토그램은 Bimodal 분포를 이루게 되어 분류에 부정적인 영향을 미치게 되어 다른 항목으로 오분류되는 결과를 가져온다. 따라서, 본 연구에서는 1/25,000 수치지형도에서 실폭하

천과 저수지를 추출하여 폴리곤 사상으로 편집하여 마스킹 레이어로 활용하였다. 마스킹 레이어를 이용하여 수역을 마스킹한 토지피복도는 [Figure 5]와 같고 분석결과는 <Table 3>과 같다.



[Figure 5] Landcover Map(After masking)

<Table 3> Analysis result of Landcover

Class	Cell Number	Percent(%)
Water	5514	1.81
Residential	3534	1.16
Barren	2080	0.68
Swamp	98	0.03
Grass	20997	6.90
Forest	205803	67.59
Agriculture	66469	21.83

5.4 RUSLE 인자 및 토양침식량 계산

1) 강우침식인자(R)

보성강 유역의 강우관측소로는 수자원

공사에서 운영하는 보성, 복내관측소와 건설교통부에서 운영하는 연산, 병영, 도암, 이양관측소가 있었다. 이 중 병영과 이양 관측소는 관측개시일이 1998년으로 관측기록이 매우 짧기 때문에 본 연구에서는 제외하였다. 따라서, 활용한 강우관측소는 보성, 복내, 도암, 연산 관측소이며, 수자원공사에서 운영하고 있는 보성과 복내는 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 식 (2)를 활용하였다. <Table 4>는 연평균강우량과 강우침식인자 분석결과이다.

<Table 4> Analysis result of Annual Average Rainfall and Rainfall Runoff Factor

Statistics	Annual Average Rainfall	Rainfall Runoff Factor
Min	1064.026	410.909
Max	1181.650	452.078
Mean	1138.319	436.912
Std.	24.278	8.497

2) 토양침식인자(K)

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 결정한 후 Erickson의 삼각형 도표로부터 토양통별 토양침식인자 K값을 산정하였다.

<Table 5> Analysis result of Soil Erodibility Factor

Statistics	Value
Min	0.100
Max	0.500
Mean	0.286
Std.	0.114

3) 침식사면의 길이인자(L)

22m 해상도를 DEM 자료로부터 Desmet과 Govers가 제안한 식 (3)을 활용하여 침식사면의 길이인자를 계산하였다.

특히 Desmet & Govers 식은 상류로부터 이송되어오는 토사의 영향까지도 고려하기 위해, 유역추출 알고리즘에서 이용되는 흐름누적 기법을 활용하였다. 이때 단위침식계산 단위 설정을 위한 상류기여의 셀수를 10으로 지정하여, 10개의 상류기

<Table 6> Analysis result of Slope Length Factor

Statistics	Value
Min	0.767
Max	9.769
Mean	2.448
Std.	1.751

여면적을 하나의 침식이 발생하는 단위구획으로 설정함으로써 단위 셀내에서 발생하는 매우 미세한 침식을 효과적으로 개선할 수 있었다.

4) 침식사면의 경사인자(S)

침식사면의 경사인자는 Nearing식을 활용하여 계산하였으며, 분석한 침식사면의 경사인자 분석결과는 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Analysis result of Slope Steepness Factor

Statistics	Value
Min	0.049
Max	14.948
Mean	3.593
Std.	3.108

5) 식생피복인자(C)

LANDSAT TM 영상에서 분류한 토지피복도를 이용하여 신계종이 제시한 논(Paddy)은 0.30, 밭(Dry field)은 0.40, 주거지(Residential)는 0.01, 초지(Grass)는 0.20, 산림(Forest)은 0.10, 불모지(Barren)는 0.50 그리고 수역(Water)은 0을 적용하였다. 다만, 본 연구에서 추출한 토지피복도는 논과 밭의 구분이 어려워 농경지로 통합하였으며, 수치지형도를 분석한 결과 이 지역의 농경지는 대부분 논이 차지하고 있으므로 농경지의 식생피복인자값은 0.3으로 계산하였다. <Table 8>은 식생피복인자의 분석결과를 보여주고 있다.

<Table 8> Analysis result of Cover Management Factor

Statistics	Value
Min	0.000
Max	0.500
Mean	0.150
Std.	0.091

6) 경작인자(P)

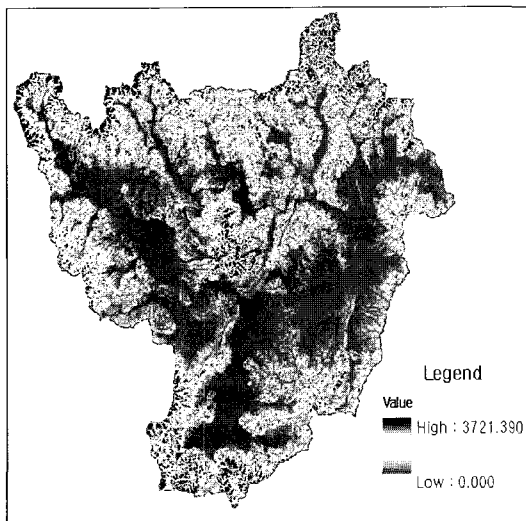
경작형태에 따른 토양침식의 영향을 평가하는 경작인자를 추출하기 위해서는 논과 밭을 구분하여 분류한 토지피복도가 필요하다. 그러나, 본 연구에서는 논과 밭의 구분없이 경작지 형태를 논으로 지정하였다. 논인 경우는 테라스방식을 밭의 경우는 등고선대상방식을 적용하므로, 본 연구에서는 테라스방식만을 적용하였다. 경작인자를 추출하기 위해 DEM으로부터 경사를 추출한 후 토지피복도와 중첩하여 <Table 1>에서 제시한 경작지형태 및 경사에 따른 경작인자를 적용하였다. <Table 9>는 경작인자에 대한 분석결과이다.

<Table 9> Analysis result of Support Practice Factor

Statistics	Value
Min	0.100
Max	1.000
Mean	0.808
Std.	0.363

7) 토양침식량(A)

유역별 평균 토양침식량 분석을 위해 RUSLE 각 인자인 R, K, L, S, C, P를 곱하였다. 특히 각 인자중 강우침식인자가 토양침식량 계산에서 가장 큰 값을 갖지만, 보성강댐 유역내 강우분포가 비교적 균일하므로 상대적으로 강우침식인자의 영향은 낮은 것으로 평가되었다. [Figure 6]은 RUSLE 각 인자를 이용하여 계산한 토양침식량 분포도이며, <Table 10>은 분석결과이다.



[Figure 6] Soil Loss Map

<Table 10> Analysis result of Soil Loss

Statistics	Value
MIN	0.000
MAX	3721.390
MEAN	139.664
STD	208.972

5.5 RUSLE 적용을 위한 해상도 분석

1) 비유사량 계산

RUSLE 모형을 적용하여 토양침식량을 정량화 하기 위해 본 연구에서는 비유사량을 이용하였다. 비유사량이란 단위기간(1년)에 단위면적(km^2)당 상류유역에서 유출되어 유역출구의 한 하천지점을 통과하는 유사량을 말하며 단위는 보통 $ton/km^2/yr$ 로 표시한다.

비유사량 계산은 토양침식량에 유사운송비를 곱하거나, 비퇴사량식으로부터 포착률과 단위중량을 이용하여 역으로 계산할 수 있다.

먼저, RUSLE로 계산한 토양침식량 139.664($ton/ha/yr$)에 Boyce 공식인 $SDR = 0.41 \times A^{-0.3}$ 을 이용하여 계산한 유사운송비 0.0761을 곱하여 비유사량을 계산하였다. 계산된 비유사량은 10.62843($ton/ha/yr$)으로 나타났으며, 비유사량의 단위인 $ton/km^2/yr$ 과 일치시키기 위해 100을 곱해 최종적으로 1062.843($ton/km^2/yr$)을 얻을 수 있었다.

두 번째로, 보성강 유역에서는 댐 담수용량을 평가하기 위해 비퇴사량을 실측하여 200($m^3/km^2/yr$)을 얻었다. 비퇴사량으로부터 비유사량을 역계산하기 위해 식(8)을 활용한 결과 314.285($ton/km^2/yr$)을 얻을 수 있었다. 이때 포착률(E)과 단위중량(γ_m)은 우리나라 저수지에 일반적으로 활용되는 $E=0.7$ 과 $\gamma_m=1.1$ 을 적용하였다.

RUSLE 모형에서 계산한 비유사량과 비퇴사량 실측자료에서 얻은 비유사량과는 차이가 있음을 알 수 있었다.

2) RUSLE 적용을 위한 해상도 분석

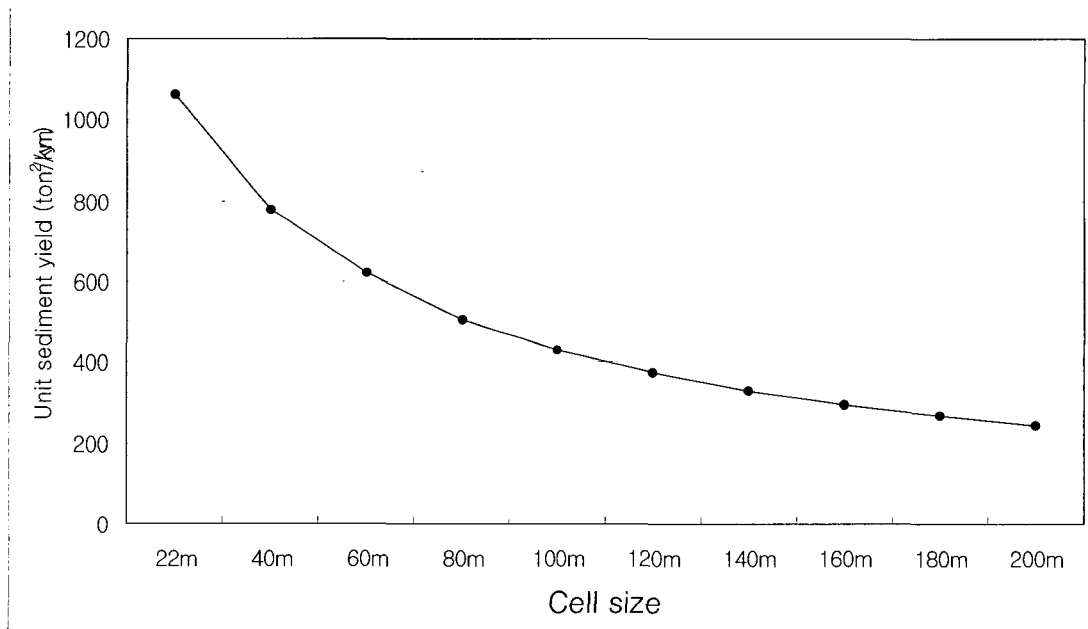
RUSLE 모형으로 계산한 비유사량과 비퇴사량 실측자료에서 얻은 비유사량과의 일치율을 위해 본 연구에서는 RUSLE 모형을 구성하고 있는 각 인자에 적용된 자료의 해상도를 이용하였다.

RUSLE를 구성하고 있는 인자 중 해상도에 영향을 받는 인자로는 지형인자와 경작인자이다. 지형인자는 DEM 해상도에 따라 값이 변하고, 경작인자 역시 DEM에서 추출한 경사가 영향을 준다. 그러나, 경작인자의 범위는 논의 경우 0.1~0.2로 변화의 폭이 매우 작으므로, 본 연구에서는 해상도의 영향평가를 위해 지형인자만을 이용하였다.

먼저, 22m에서 200m까지 20m 간격으로 DEM을 구축한 후 해상도별로 지형인자

를 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. [Figure 7]은 해상도별 평균 비유사량 분포도이다.

[Figure 7]에서 셀크기가 커질수록 즉, 해상도가 작아질수록 비유사량 값은 낮게 나타났다. 이러한 이유는 해상도 영향평가에 활용된 지형인자의 특성이 반영된 것으로 해석된다. 지형의 경사는 수평길이에 대한 표고차로서 표현될 수 있는데, 셀크기가 커짐에 따라 수평길이는 증가하지만 상대적으로 표고차는 일정하므로 경사가 감소하게 되어 지형인자 값이 낮게



[Figure 7] Average Unit Sediment Yield by resolution

나타나게 된다. 결국 지형인자값이 셀크기가 커질수록 낮게 나타나므로 비유사량값도 감소하게 되는 결과를 가져왔다.

<Table 11>은 해상도별 평균 비유사량 분석결과이다.

<Table 11> Analysis result of Average Unit Sediment Yield by resolution

Resolution	Average Unit Sediment Yield
22m	1062.843
40m	777.711
60m	620.694
80m	504.893
100m	431.167
120m	374.016
140m	327.953
150m	310.283
160m	294.545
180m	267.483
200m	243.276

실측한 비퇴사량 자료에서 역계산한 비유사량 값인 314.285($ton/km^2/yr$)과 가장 가까운 해상도는 셀크기 150m로 나타났다. 따라서, 이러한 분석결과를 통해 볼 때 유역의 토양침식량을 추정하기 위해 RUSLE 모형을 활용시 각 인자를 분석하기 위해 활용되는 자료의 해상도 크기는 150m 정도가 적합한 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구는 GIS 환경에서 유역의 토양침

식의 정량적 계산을 위한 연구로서, 보성강댐 유역을 대상으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

강우침식인자(R)는 보성강댐 유역 인근 4개 강우관측소의 연평균 강우량 자료를 이용하여 스플라인 보간법으로 추출할 수 있었으며, 토양침식인자(K)는 1/25,000 정밀도 양도로부터 Erickson의 삼각형 도표를 이용하여 계산할 수 있었다. 특히 토양통별로 제시된 토양침식인자값이 대부분 1/250,000의 개략토양도를 기준으로 하고 있기 때문에, 보다 정확한 토양침식량 계산이 어려웠으나 본 연구에서는 1/25,000 정밀도양도를 이용하여 침식에 대한 토양의 영향을 보다 효과적으로 적용할 수 있었다.

경사인자(LS) 계산을 위해 침식사면의 길이인자(L)와 침식사면의 경사인자(S)를 이용하였다. 특히 침식사면의 길이인자는 사면의 경사 및 방향 그리고 관측셀로 유입되는 상부기여면적까지도 고려할 수 있도록 유역추출 알고리즘 기법을 함께 연계하여 적용함으로써 보다 현실적인 토양 침식과정을 반영할 수 있었다.

식생피복인자(C)는 2000년 9월 16일 촬영한 LANDSAT TM영상에서 최대우도법으로 분류한 토지피복도로부터 각 토지피복별 식생피복인자값을 적용하여 최신의 식생피복인자를 추출할 수 있었으며, 또한 토지피복도내의 논과 밭의 영역을 추출한 후 그 영역내의 경사도를 분석함으로써 경작인자를 추출할 수 있었다.

RUSLE 각 인자의 곱으로 계산된 토양침식량은 실측자료가 없기 때문에 정량적으로 제시하기는 어려운 문제점이 있었다. 따라서, 본 연구에서는 보성강댐의 비퇴사량

자료인 $200(m^3/km^2/yr)$ 으로부터 포착률과 단위중량을 고려하여 계산한 비유사량 $314.285(ton/km^2/yr)$ 을 실측 비유사량으로 간주하여, RUSLE 모형으로 계산한 토양침식량에 유사운송비를 곱하여 얻은 비유사량과 상호 비교하였다. 비퇴사량에서 계산한 비유사량과 RUSLE로 계산한 비유사량은 각각 $314.285(ton/km^2/yr)$ 과 $1062.843(ton/km^2/yr)$ 으로 상당한 차이를 보였다. 이러한 차이를 보정하기 위해 RUSLE 인자중 DEM 해상도의 영향을 가장 많이 받는 지형인자에 대해 해상도별 지형인자를 계산하여 토양침식량 계산에 활용한 결과, 셀크기 150m가 보성강 유역의 토양침식량을 정량적으로 추정하기에 가장 적절한 해상도임을 알 수 있었다.

참고문헌

- Da Ouyang, 2001, Modeling Sediment and Phosphorus loading in a small agricultural watershed, Michigan State University Ph.D thesis, Department of Crop and Soil Science, pp. 35-50.
- 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, Vol. 36(4), pp. 235-240.
- Durgin, P.B., 1985, "Burning changes the erodibility of forest soils", Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 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, Vol. 29(1), pp. 157-160.
- Hudson, N., 1977, "Soil Conservation", Cornell University Press, p. 324.
- 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, Vol. 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, Vol 32(5), pp. 1571-1576.
- Morgan, R. P. C., 1981, "Field measurement of splash erosion", International Association of Scientific Hydrology Publication, Publication, No. 133, pp. 378-382.
- Simanton, J.R. and W.E. Emmerich, 1994, Temporal variability in rangeland erosion process, In Variability in Rangeland Water Erosion Process, Madison : Soil Science Society of America, pp. 51-65.
- Singh, A., 1986, Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using LANDSAT, Remote Sensing and Tropical Land Management, Plymouth : John Wiley and Sons Ltd, pp. 237-254.
- Wall, G.J., W.T. Dickinson, R.P. Rudra and D.R. Coote, 1988, "Seasonal soil erodibility variation in southwestern Ontario", Canadian Journal of Soil Science Vol. 68(2), pp. 417-424.
- Wischmeier, W.H., 1971, "A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction sites", Journal of Soil and Water Conser-

- ation Vol. 26, pp. 189-193.
- 신계종, 1999, 지형공간정보체계를 이용한
유역의 토양유실분석, 강원대학교 토목공
학과 박사논문.
- 윤태훈, 1999, 응용수문학, 청문각, pp. 549-553.
- 이근상, 이환주, 임승현, 조기성, 2001, “GSIS
를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의
영향분석”, 대한토목학회 제 21권 4-D호,
pp. 545-554.
- 이환주, 2002, “GSIS 공간분석 기법을 활용
한 토양침식 잠재성 평가에 관한 연구”,
전북대학교 토목공학과 박사논문.
- 정필균, 1983, “토양유실량 예측을 위한 강
우인자의 분석”, 한국토양비료학회지 제
16권 제2호, pp. 112-118.
- 한국건설기술연구원, 1992, 하천유사량 산정
방법의 선정기준 개발, 건기연 89-WR-113
연구보고서.