

# GSIS 공간분석을 활용한 토양침식모형의 입력인자 추출에 관한 연구

## The Extraction of Soil Erosion Model Factors Using GIS Spatial Analysis

이환주\* · 김환기\*\*

Lee, Hwan-Ju · Kim, Hwan-Gi

### 요 旨

강우나 물의 유출에 의한 토양침식은 농업 생산성을 떨어뜨리고 목초지를 손상시키며, 물의 흐름을 방해하는 등의 각종 환경적인 문제를 야기시키고 있다. 환경에 대한 관심이 고조되는 시점에서 토양침식이 매우 중요한 위치를 차지하고 있지만 아직은 체계적인 자료의 정리와 분석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 최근 부각되고 있는 GIS를 활용하여 토양침식을 예측하는 모형에 입력되는 인자를 추출하는 기법을 제시하는 것으로 침식모형에는 ANSWER, WEPP, RUSLE 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 GIS 자료와의 연계가 용이하면서 유역에 대한 일반적인 토양침식을 예측할 수 있는 RUSLE 침식모형을 사용하였다. RUSLE 입력인자에는 강우침식인자 R, 토양침식인자 K, 침식사면의 길이인자 L, 침식사면의 경사인자 S, 식생피복인자 C 그리고 경작인자 P로 구성되어 있다. RUSLE 입력인자 중 L과 S인자 추출에 사용되었던 기존의 식은 대부분 농업지역에 적용된 식으로 유역에 적용시 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 GIS 자료를 통해 격자별로 유역에 적용 가능한 수정된 경험식을 활용하였다. 또한 격자형 RUSLE 인자를 유역추출 알고리즘을 이용하여 유역별로 분석함으로써 유역별 RUSLE 인자의 최소값, 최대값, 평균 그리고 표준편차를 계산할 수 있었다.

### ABSTRACT

Soil erosion by outflow of water or rainfall has caused many environmental problems as declining agricultural productivity, damaging pasture and preventing flow of water. As the interest in environment is increasing lately, soil erosion is considered as a serious problem, whereas the systematic regulation and analysis for that have not established yet. This research shows the method of extracting factor entered model which expects soil erosion by GIS. There are several erosion model such as ANSWER, WEPP, RUSLE. The research used RUSLE erosion model which could expect general soil erosion connected easily with GIS data. RUSLE's input factors are composed of rainfall runoff factor(R), soil erodibility factor(K), slope length factor(L), slope steepness factor(S), cover management factor(C) and support practice factor(P). The general equation used to extract L, S factor on the RUSLE to be oriented for agricultural area has some limitation to apply whole watershed. So, on this study we used a revised empirical equation applicable to the watershed by grid on the GIS. Also, we analyzed RUSLE factors by watershed being analyzed with watershed extraction algorithm. Then we could calculate the minimum, maximum, mean and standard deviation of RUSLE factors by watershed.

## 1. 서 론

토지자원을 관리하는 주요목표는 토지를 지속적으로 활용하기 위함이다. 바로 이러한 목표가 토양보존 연구

의 중심을 이루고 있으며 특히 토양침식은 지구상에 존재하는 자원의 기반을 위협하는 중요한 환경문제로 대두되고 있다.<sup>1),2)</sup>

본 연구는 이러한 토양침식과정 및 원인을 고찰하고 토양침식에 영향을 미치는 인자를 GIS 공간분석기법을 활용하여 추출하고자 하였다. 토양침식을 예측하는 모형에는 RUSLE, ANSWERS, WEPP 등 여러 가지가 있

\*전북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

\*\*전북대학교 공과대학 토목환경공학부 교수

으나 본 연구에서는 GIS와 연계가 가능하고 자료유용성이 용이하면서 중규모유역에서 범용적으로 활용가능한 RUSLE 침식모형을 사용하였다.

USLE모형이 경작지의 토양침식을 계산하기 위해 사용되었다면 RUSLE 모형은 유역에 적용하기 위해 수정된 것으로 여러 유역에 대한 실험 분석 결과를 통해 최근까지 많은 유역 경험식이 제시되고 있다. RUSLE는 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 침식사면의 길이인자(L), 침식사면의 경사인자(S), 식생피복인자(C) 그리고 경작인자(S)로 구성되어 있다. 기존에는 토양침식인자를 추정시 개략적인 유역 및 통계자료 그리고 간단한 연산을 이용하였으며 최근에 들어서야 GIS 기법을 활용한 연구들이 나오고 있다. 그러나 GIS를 적용한 토양침식에 측 연구의 대부분이 유역전체를 하나의 동일한 단위공간으로 간주하는 집중형 모형(Lumped Model)으로 구현되고 있어 격자별로 토양침식량을 평가할 수 없다는 한계가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 용담댐 유역을 대상으로 최근 연구에서 제시된 유역 적합 경험식을 활용하여 RUSLE 각각의 인자를 22 m 격자크기의 자료로 구축함으로써 분포형 모형(Distributed Model)에 활용가능하도록 하였다. 또한 각 인자에 적용된 경험식도 국내나 국외사례 중 우리나라 중규모유역에 적합하면서 GIS와의 연계가 가능한 유역 경험식을 조사하여 활용함으로써 인자를 추출하는데 중점을 두었다.

## 2. 토양침식과정과 모형선정

### 2.1 토양침식과정

#### 2.1.1 개요

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.<sup>3)</sup>

#### 2.1.2 분리와 이송 : 강우와 지표흐름

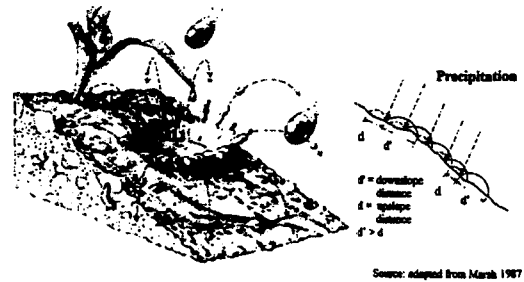


그림 1. 빗방울 : 물리적 침식과정의 근원

토양침식은 토양으로부터의 토립자 분리와 흐르는 물에 의한 입자들의 이송이라는 두가지 분명한 양상으로 구분되어 있다. 토립자의 분리는 빗방울이 지표에 떨어져 충격을 주었을 때 그 근원이 시작된다.

그림 1은 강우 발생으로 인한 토양 공극의 확장과 함께 빗물의 중력과 동역학 에너지의 결과로 토립자가 물과 함께 하류로 흘러가는 것을 보여주고 있다. 즉, 빗방울은 토양분리의 가장 중요한 토양분리 매개체가 된다.<sup>4)</sup>

경사는 강우에 의한 붕괴효과를 평가할 때 중요한 변수가 된다. 경사각의 증가와 함께, 더 많은 토양입자들이 중력의 결과로 상류보다는 하류로 이동하게 된다. 빗방울에 의한 침식은 지표에서 불규칙하게 발생하며 이러한 조건하에서 잎, 뿌리 그리고 바위에 의해 보호를 받는 지역들이 보호받지 않는 지역에 비해 토양침식면에서 많은 차이가 있음이 관측되어진다.<sup>5)</sup>

#### 2.1.3 식생과 인간활동

자연에서 식생이 안정화되었는가 하는 것은 침식이 토지를 바꿀수 있는 속도에 영향을 미치는 중요한 요소가 된다. 식생피복은 농지나 혹은 산림의 수관 아래의 토사이동을 방지하는 중간 매개체로서 중요한 역할을 한다. 결론적으로 어떤 조건하에서 식생의 부재는 토양재료의 빠르고 비중개적인 이동을 촉진하게 된다. 식생의 역할을 물리적인 관점에서 살펴보면, 식생은 차단과정을 통해 강우에 따른 동역학 에너지의 완충지역 역할을 수행하게 된다. 차단은 토양과 빗방울이 접촉하기 전 식물에 의한 강우의 중간매개체 역할로서 표현되어지며 수관, 농작물, 곡물, 심지어 산림정화로부터 잘려져 나온 가지들의 결과로도 발생한다.<sup>6)</sup>

식생피복은 보통 농사주기, 목축 그리고 산림정화와 같은 인위개변적 활동에 의해 영향을 받는다. 농업활동으로 인해 산림이 훼손되면서 침식에 대한 자연적인 보호

벽이 파괴되었다. 또한 여러가지 농업형태들은 토양에 대한 침식경향을 증가시키거나 감소시키는 역할을 할 수 있다는 많은 연구들이 있다.<sup>7)</sup>

## 2.2 침식모형

### 2.2.1 모형 개요

유역에서 토양침식과정을 이해하기 위해 적절한 모형을 선정할 때, 그 모형에 입력되는 자료의 유용성과 축적이 결정적인 요소가 된다. 입력자료가 명확하게 주어지는 경우에 최적의 기능을 수행할 수 있도록 모형을 유도해내야 되며 이러한 모형은 크게 경험적 모형과 결정론적 모형로 나눌 수 있다.

경험적 모형은 개념적 혹은 이론적 배경 없이 경험적인 자료를 통해 유도되며 합리적인 데이터베이스가 구축되어졌을 때 변수들간의 중요한 통계적 관계를 알아내는 것을 기본으로 한다.<sup>2)</sup> 또 다른 모형인 결정론적 모형은 물리적인 관계로부터 얻어진 이론적 배경과 수식을 기본으로 하여 침식과정을 수학적인 관계를 기본으로 설명하며 수치적인 결과물을 산출한다.<sup>8)</sup>

모형을 선정하는 판단 기준으로는 자료의 이용가능성, 사용 목적 그리고 규모등을 충분히 검토하여 선정해야 한다.

### 2.2.2 토양침식모형

#### a) Revised-USLE

RUSLE의 전신은 USLE로서 농업에 활용하기 위해 Wischmeier와 Smith(1965)에 의해 처음 고안된 것으로, 개별 필지에 대한 토양 침식을 계산하고 보존계획의 이용을 기반으로 하여 토양손실에서의 모형변화를 예측할 수 있도록 만들어졌다.

USLE가 '비범용적(non-universal)'이라는 비평적인 연구가 많아 Renard(1991) 등에 의해 RUSLE가 개발되었으며 경험적 자료를 기반으로 하여 RUSLE는 많은 진보를 이루었고 기능이 향상되었다. 농업용도로 USLE가 개발된 반면에, RUSLE는 다양한 시나리오하에서 유역이라는 광범위한 지역에 적용될 수 있게 되었다.<sup>9)</sup>

RUSLE를 사용하는 이유 중 하나는 원격탐측 자료를 효과적으로 조합하여 사용할 수 있다는 것이다. 또한 RUSLE는 GIS와 같은 자료처리시스템에서 필요로 하는 자료의 호환성을 생각할 때 많은 장점을 가지고 있으며 특히 유역에 적용시 GIS와의 통합이 쉽다.<sup>10)</sup>

#### b) ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed

Environmental Response Simulator)

1980년대초 개발되었던 ANSWERS 모형은 토양분리, 이송 그리고 퇴적과정을 평가할 수 있다. ANSWERS 모형은 Huggins와 Monke(1966)가 제시한 지표흐름, 지표하흐름 그리고 하천흐름을 설명하는데 필수적인 몇 개의 하도추적 방정식 뿐만 아니라 토사분리와 이송요소를 포함하는 침식모형을 기반으로 하여 수문학적 모형을 구성하고 있다. 토양 침식성 뿐만 아니라 강우자료, 지속기간, 강우강도는 유역에서도 불균일하므로 분포형인자 모형은 침식과정을 정확하게 설명할 수 있는 모형로 여겨진다.

그러나, 필요한 자료가 집중적이고 취득하는데 어려움이 많아 등급을 나누는 모형으로 일반적으로 사용되며 넓은 유역에 적용될 경우에는 정확도가 떨어지게 된다.<sup>11)</sup>

#### c) WEPP(Water Erosion Prediction Project)

WEPP은 최근 등장한 침식모형으로 미국농무성(USDA)에서 개발하였다. WEPP 모형은 형상(profile), 유역(watershed), 그리드(grid)라는 세가지 모듈로 구성되어 있다. ANSWERS와 같이 WEPP은 수학적 관계를 중요시하는 결정론적 모형이다. 그러나, ANSWERS와 다른 점은 WEPP이 하천과 더불어 하천내부의 침식과정도 고려하여 제시했다는 것이다. WEPP모형은 침식과정을 설명하는 최근의 모형로 ANSWERS와 RUSLE이 수행할 수 없었던 다양한 지형학적 표현이 가능하며 열대지방 유역에 일반적으로 사용된다.<sup>12)</sup>

## 2.3 모형 선정

토양침식을 예측하기 위해서는 연구목적에 충분히 고찰하고 본 연구대상지인 용담댐 유역의 물리적·생물학적인 조건과 가장 잘 부합하는 침식모형을 찾는 것이 중요하며 특히 GIS 관련자료 수집이 가능한 모형을 선정해야 한다.

이러한 점을 고려해 볼 때, 본 연구에서는 유역내의 토양침식잠재성을 평가하기 위한 토양침식모형으로 RUSLE모형을 선정하게 되었다.

비록 WEPP모형이 하천과 더불어 하천내부의 침식을 예측할 수 있고 방목효과도 침식과정내에 포함시킬 수 있다는 장점이 있기는 하지만 본 연구 특성상 WEPP 모형이 GIS 자료를 활용하는데 한계가 있으며 WEPP 모형에 입력되는 특정정보를 유역내에서 취득하기가 상당히 어렵다는 사실도 RUSLE를 선정한 또다른 이유이다.

그리고, ANSWERS모형은 필요한 자료가 엄격하고 너무 방대하며 사전 지향형 토양침식 예측기능을 수행한다는 점에서 본 연구의 목표와는 부합하지 않는다.

### 3. RUSLE 모형인자

RUSLE 침식모형식은 아래와 같다.

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

A : 연평균 토양침식량(t/ha/yr)

R : 강우침식인자(J/ha)

K : 토양침식인자(t/ha/R)

L : 침식사면의 길이인자

S : 침식사면의 경사인자

C : 식생피복인자

P : 경작인자

각각의 인자를 추출하기 위해 적용된 식은 1000 km<sup>2</sup> 이하의 중규모에 적용 가능하거나 GIS와의 연계가 우수 하면서 범용적으로 사용되는 경험식을 적용하였다.

#### 3.1 강우침식인자(R)

강우침식인자는 연평균 강우의 침식능력으로서 강우의 시간적인 분포와 특성으로부터 얻어진다. 강우에 의한 침식률은 총 강우량과 강우강도로 표시되며, 후자가 침식에 더 큰 영향을 미친다. 정필균(1983)<sup>13)</sup>은 기상청 산하 관측소 중 51개소를 택하여 79~81년까지 3년에 걸쳐 강우침식인자를 결정한 바 있으며 이 자료를 기반으로 R 분포도를 작성하였다. 건설기술연구원(1992)<sup>14)</sup> 연구에 의하면 용담댐 인근지역의 평균 R값을 412 J/ha로 제시하고 있다. 강우침식인자의 계산을 위한 경험식은 여러 가지가 있지만 대부분이 특수한 자료를 기반으로 하고 있거나 GSIS 자료와의 연계성 측면에서 한계가 있기 때문에, 본 연구에서는 연평균 강우량으로 강우침식인자를 일반적으로 산정할 수 있는 A. G. Toxopeus(1998)가 제안한 식을 이용하였다.<sup>15)</sup>

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

여기서 P는 연평균 강우량(mm/yr)이다.

#### 3.2 토양침식인자(K)

토양침식인자를 산정하기 위해 Wischmeier와 Smith

(1965)에 의해 삼각형 도표가 제시되었으며 이를 Erickson(1977)이 보완하였고 이로부터 구한 토양침식인자 K는 0.02-0.69 범위의 값을 갖는다.

일반적으로 실트와 미세사의 구성비가 70%이하인 경우 Wischmeier의 K값 추정방법은 아래식으로 표현된다.<sup>15)</sup>

$$100K = 2.0 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (3)$$

M은, (실트와 미세사의 %) × (100 - 점토의 %), a는 유기물함량(%), b는 토양구조코드(1-4), c는 투수등급(1-6)이다.

#### 3.3 침식사면의 길이인자(L)

침식사면의 길이인자는 단위구획 경사길이인 22.13 m에 대한 수평길이의 비를 의미한다. 침식사면의 길이인자를 산정하기 위해 Desmet와 Govers(1996)는 식 (4)을 제안하였다.<sup>16)</sup>

$$\beta = \frac{(\sin \theta / 0.0896)}{(2.96 \times \sin^{0.79} \theta + 0.56)}$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

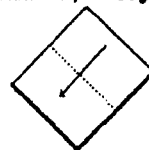
m은 침식사면 길이의 멱지수, θ는 경사각이다.

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-jn} + D^2)^{m+1} - A_{ij-jn}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{ij}^m \times 22.13^m} \quad (4)$$

L<sub>ij</sub>는 격자에 대한 침식사면의 길이인자, A<sub>ij-jn</sub>는 격자에 유입되는 상류 기여면적, D는 격자크기, m은 침식사면 길이의 멱지수, x<sub>ij</sub>는 흐름방향에 직교하는 등고선 길이로 (|sin α<sub>ij</sub>| + |cos α<sub>ij</sub>|), α<sub>ij</sub>는 격자의 방향이다.

식 (4)는 경사 및 흐름방향 그리고 대상격자로 유입되는 상부기여면적을 고려함으로써 실제 침식과정을 효과적으로 표현하게 된다. 전체 격자수에 해당하는 면적은 면적을 침식사면의 길이로 변환하기 위해 대상격자의 등고길이를 그림 2와 같이 분류하였다.

Contour Length = |sin α| + |cos α| = 1 where: α = aspect of the grid cell



Contour Length = |sin α| + |cos α| > 1 where: α = aspect of the grid cell



그림 2. 격자의 방향에 따른 등고길이

침식된 토사는 물과 함께 하류로 이동한다는 점에 착안하여 본 연구에서는 상부기여면적을 산정하기 위해 유역추출알고리즘에서 활용되는 흐름누적격자 방식을 적용하였다.

### 3.4 침식사면의 경사인자(S)

침식사면의 경사인자는 토양침식에 대한 사면경사의 영향을 나타내는 인자로서 길이인자인 L에 비해 더욱 민감한 특성을 갖는다.

침식사면의 경사를 산정하기 위해 본 연구에서는 Nearing(1997)이 제안한 연속방정식을 활용하였다.<sup>16)</sup>

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin \theta)} \quad (5)$$

θ는 경사각이다.

### 3.5 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.

신계종<sup>17)</sup>은 논외의 경우 0.30, 밭은 0.40, 삼림은 0.10, 초지는 0.20 그리고 물이나 시가지지역은 0으로 제시하고 있다.

### 3.6 경작인자(P)

경작인자는 지표면에서의 여러 가지 경작지에 따른 토양침식의 비를 나타낸다. 경작지 형태에는 등고선경작, 등고선대상경작, 테라스경작 등이 있으며 침식을 통제할 수 있는 중요한 요소로 해석되고 있다. 경작인자는 경작지 형태와 더불어 경사에도 영향을 받게 된다. 표 1은 신계종<sup>17)</sup>이 제시한 경작지 형태 및 경사에 따른 경작인

표 1. 경작지형태 및 경사에 따른 경작인자(P)값

경사(%)	등고선	등고선대상	테라스
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 이상	1.00	0.50	0.20

자값을 나타낸 것이다.

## 4. 적용 및 결과

### 4.1 연구 대상지

본 연구 대상지는 금강의 최상류 지방하천 구간으로서 전라북도 장수군과 진안군, 무주군을 포함하고 있는 용담댐 유역을 선정하였다. 용담댐의 유역면적은 930 km<sup>2</sup>로 금강 전체의 약 9.4%를 차지하고 있으며, 유로연장은 68.5 km이다. 금강의 수원은 팔공산이며, 용담댐 유역에 유입되는 주요 지류는 장계천, 진안천 등이다.<sup>14)</sup>

### 4.2 자료 구축 및 응용 S/W

본 연구를 위해 구축한 자료는 표 2와 같고 공간분석을 위해 Arc/Info 8.0을 그리고 토지피복분류를 위해 ENVI 3.1 응용 S/W를 활용하였다. 또한 RUSLE 인자를 자동으로 추출하기 위해 AML(Arc Macro Language)로 프로그래밍하였다.

### 4.3 유역경계 추출

본 연구에서는 용담댐을 유출구로 가정한 유역을 추출하기 위해 1/25,000 DXF 포맷의 수치지도로부터 등고선과 표고 자료를 Arc/Info의 dxfac 명령어를 이용하여 Arc/Info 커버리지로 변환하였다. 변환된 등고와 표고 커버리지로부터 TIN을 구축한 후 다시 22 m 격자크기를 갖는 DEM 자료로 변환하였다. 여기에서, 격자의 크기를 22 m로 결정한 이유는 RUSLE 인자들을 계산하는데 사용되었던 단위 구획의 길이가 22.13 m이기 때문이다.

DEM 자료로부터 유역추출 알고리즘을 활용하여 그림 3과 같은 중규모유역을 추출하였다.

이때 하천추출을 위한 흐름누적 격자수의 경계값은 수자원공사에서 수행한 '수문단위지도사업'으로 구축한 용

표 2. 자료구축

자료명	자료 세부 내용	출처
수치지도	1/25,000	국립지리원
토지피복도	Landsat TM 영상 (30 m × 30 m)	환경부
토양도	1:250,000 개략토양도	수자원공사
강우자료	9개 강우관측소	건설기술연구원
기타자료	인구, 농가현황, 통계자료	수자원공사



그림 3. DEM으로부터 자동추출한 용담댐 유역

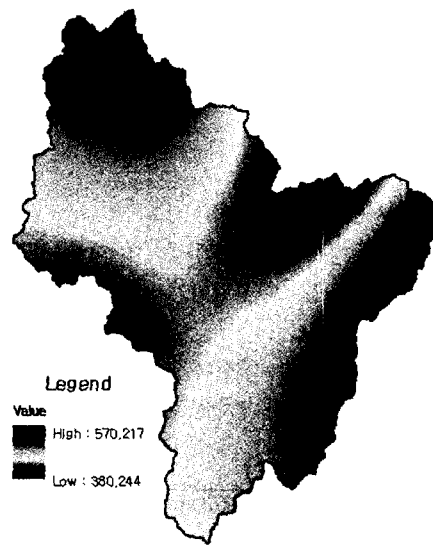


그림 4. 강우침식인자(R)

담댐 중규모유역과의 일치성을 이루기 위해 300,000을 적용하였다.

#### 4.4 RUSLE 인자 추출

##### 4.4.1 강우침식인자(R)

강우침식인자 추출을 위해 표 3과 같은 강우관측소별 연평균 강우자료를 활용하였다. 서하 강우관측소(94년-98년)를 제외한 8개 관측소는 83년부터 97년까지의 강우자료를 정리하여 연평균강우량을 산정하였다. 서하 강우관측소의 경우 강우자료기간이 다른 강우관측소에 비해 짧았으나 공간적 위치 중요도를 감안하여 자료로 활용하였다.

강우분포 추정을 위해 수문학 분야에서 주로 활용되었던 티센망은 경계면에서 강우값이 급격히 변화한다는 점

표 3. 강우관측소별 연평균 강우량(mm/yr)

강우 관측소명	X 좌표	Y 좌표	연평균강우량 (mm/yr)
장수	247229.48	238715.47	1181.5
진안	238180.52	254636.41	1086.7
용담	248105.39	272004.97	1183.8
대불	232862.09	273629.50	1288.4
안성장	259169.03	262764.22	1071.2
원통사	263139.28	258353.50	1372.3
적상	259043.38	270314.59	936.6
백련사	269081.72	262374.41	1549.7
서하	261676.36	237756.58	1399.6

표 4. 강우침식인자(R)의 분석결과

구분	값
최소값	380.244
최대값	570.217
평균	454.755
표준편차	32.412

에서, 연속적인 강우특성을 효과적으로 반영하지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 연속적인 강우분포를 효과적으로 표현하기 위해 스플라인 보간법을 활용하여 격자 크기 22 m로 구성된 강우분포자료를 구축하였다. 구축한 강우분포자료로부터 강우침식인자를 추출하기 위해 Toxopeus가 제안한 식 (2)를 활용하였다.

그림 4는 Toxopeus가 개발한 식을 적용하여 추출한 강우침식인자를 보여주고 있으며 표 4는 강우침식인자의 분석결과를 보여주고 있다.

표 4의 분석결과를 볼 때, 평균 R값이 454.755 J/ha로 건설기술연구원에서 제시한 412 J/ha보다는 약간 높게 평가되었다. 그러나, 건설기술연구원 자료는 용담댐 인근 지역까지 포함한 대표값이라는 점에서 격자별 R값을 추정하기가 어렵다는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서 추출한 R값이 비교적 높게 산정되었지만 격자별로 R값을 추정할 수 있다는 점에서 효용성이 있다고 사료된다.

##### 4.4.2 토양침식인자(K)

토양침식인자 추출을 위해 1/250,000 개략토양도를 활

표 5. 토양통별 토양특성 및 토양침식인자(K)

구분	토양 특성	K값
Af	충적토, 배수불량 내지 양호, 미사 사양질 내지 사양질	0.39
An	회색토 및 충적토, 배수양호내지 약간불량, 식양질 내지 사양질	0.31
Ap	회색토, 충적토 및 적황색토, 배수 불량 내지 양호, 미사식양질 및 식양질	0.32
Ra	적황색토, 암쇄토, 회색토 및 퇴적토, 배수양호 및 약간불량, 식양질	0.21
Re	암쇄토, 회색토 및 충적토, 배수양호 내지 불량, 사양질	0.32
Ma	암쇄토 및 적황색토, 산성암, 배수 매우양호, 식양질 내지 사양질	0.27
Mm	암쇄토, 변성퇴적암 및 편암, 배수 매우양호, 식양질 내지 사양질	0.18
Ms	암쇄토, 퇴적암, 배수매우양호, 사양질 내지 식양질	0.20
Mu	산성갈색 산립토 및 암쇄토, 배수 양호, 식양질 내지 사양질	0.31
Mv	암쇄토, 중성 내지 염기성암, 배수 매우양호, 식양질 내지 사양질	0.35
Rocky		0.10

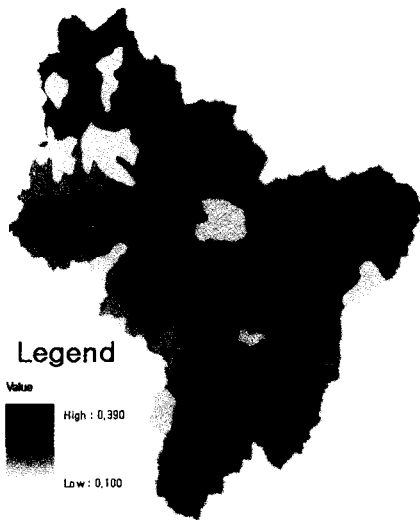


그림 5. 토양침식인자(K)

용하였으며, 먼저 토양통에 해당하는 입경분포, 유기물함량, 골재함량을 ‘토양통 해설서’에서 결정한 후 삼각형도표로부터 토양통별 토양침식인자 K값을 산정하였다.

표 5는 본 연구대상지에 나타난 토양통별 토양특성과

표 6. 토양침식인자(K)의 분석결과

구분	값
최소값	0.100
최대값	0.390
평균	0.247
표준편차	0.053

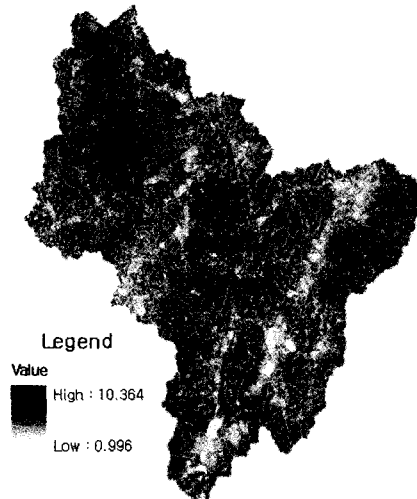


그림 6. 침식사면의 길이인자(L)

표 7. 침식사면의 길이인자(L)의 분석결과

구분	값
최소값	0.996
최대값	10.364
평균	3.282
표준편차	2.242

토양침식인자 K값을 보여주고 있다.

그림 5는 토양침식인자를 보여주고 있으며 표 6은 토양침식인자에 대한 분석결과를 보여주고 있다.

#### 4.4.3 침식사면의 길이인자(L)

침식사면의 길이인자를 추출하기 위해 격자 크기 22 m를 갖는 DEM 자료를 활용하였으며, 침식사면의 길이인자를 구하기 위한 식으로는 흐름경사와 함께 방향까지도 함께 고려한 Desmet & Govers(1996)가 제안한 식(4)를 이용하였다.

또한 상부격자들의 기여면적을 침식사면의 길이인자에 반영하기 위한 상부기여 흐름누적격자의 갯수는 10으로 하였다. 흐름누적 격자수는 Arc/Info GRID 모듈의 FlowAccumulation 함수를 이용하여 계산하였다.

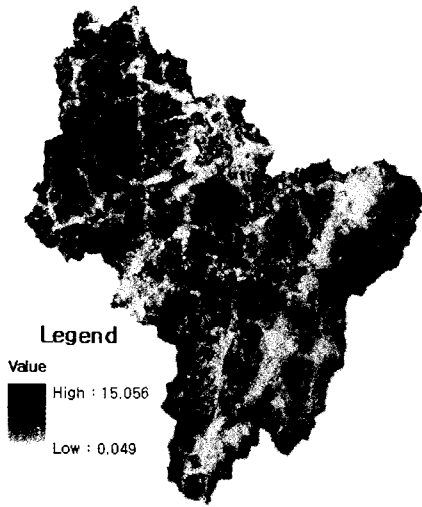


그림 7. 침식사면의 경사인자(S)

표 8. 침식사면의 경사인자(S)의 분석결과

구분	값
최소값	0.049
최대값	15.056
평균	4.251
표준편차	3.451

표 9. 토지피복별 식생피복인자(C)값

토지 피복	논	밭	산림	초지	시가화 지역	수계
C 값	0.30	0.40	0.10	0.20	0	0

그림 6은 침식사면의 길이인자를 보여주고 있으며 표 7은 침식사면의 길이인자에 대한 분석결과를 보여주고 있다.

#### 4.4.4 침식사면의 경사인자(S)

침식사면의 경사인자를 추출하기 위해 격자크기 22 m 를 갖는 DEM 자료를 활용하였으며, 침식사면의 경사인자를 구하기 위한 식으로는 Nearing(1997)이 제안한 식(5)를 이용하였다.

그림 7은 침식사면의 경사인자를 보여주고 있으며 표 8은 침식사면의 경사인자에 대한 분석결과를 보여주고 있다.

#### 4.4.5 식생피복인자(C)

본 연구에서는 신계중<sup>15)</sup>이 제시한 토지피복별 C값을 활용하였다.

표 9는 토지피복별 식생피복인자값을 나타낸 것이다.

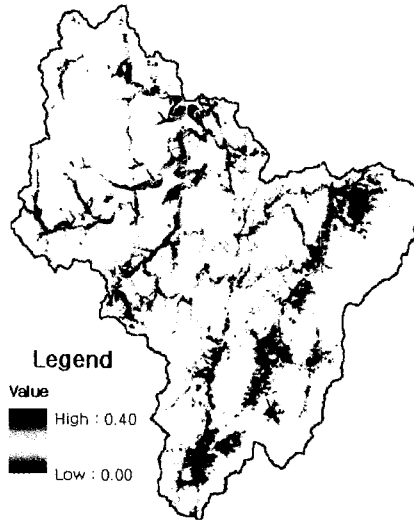


그림 8. 식생피복인자(C)

표 10. 식생피복인자(C)의 분석결과

구분	값
최소값	0.000
최대값	0.400
평균	0.125
표준편차	0.069

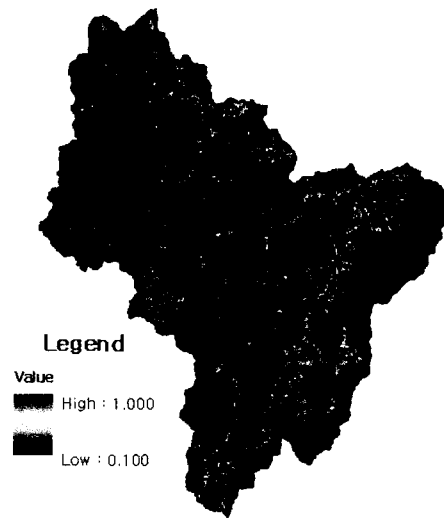


그림 9. 경작인자(P)

먼저, ENVI 프로그램을 이용하여 Landsat TM 영상으로부터 최대우도법으로 토지피복도를 추출하였으며 각 토지피복별로 C 값을 부여하였다. 그림 8은 분석한 식생



표 11. 경작인자(P)의 분석결과

구분	값
최소값	0.100
최대값	1.000
평균	0.902
표준편차	0.274

피복인자(C)를 보여주고 있으며 표 10은 식생피복인자의 분석결과를 보여주고 있다.

4.4.6 경작인자(P)

경작인자 P값은 경작지 형태에 따라 분류하는 것으로 본 연구대상지역의 경작지 형태는 논의 경우는 테라스방식을 밭의 경우는 등고선대상방식으로 나타났다. 경작인자를 추출하기 위해 먼저, DEM 자료로부터 격자형 경사자료를 추출하였고 토지피복도와와의 중첩을 통해 토지피복별 경사도를 계산한 후 표 1의 경작지형태 및 경사에 따른 경작인자값을 적용하였다.

그림 9는 경작인자를 보여주고 있으며 표 11은 경작인자에 대한 분석결과를 보여주고 있다.

4.5 유역별 RUSLE 인자 추출

4.5.1 추출방법

각 유역별 RUSLE 인자를 추출하기 위해, 먼저 유역 추출알고리즘으로 추출된 유역 커버리지를 그리드로 변환하였으며 각 유역별 RUSLE 인자의 최소값, 최대값, 평균 그리고 표준편차를 산정하기 위해 Arc/Info GRID 모듈의 ZONALSTATS 명령어를 이용하였다. 변환된 유역 그리드를 ZONAL 그리드로 지정하고 이것을 기준으로 4.4에서 추출한 각각의 RUSLE 인자를 해당유역별로 분석하여 유역별 RUSLE 인자의 최소값, 최대값, 평균

표 12. 유역별 강우침식인자(R)의 분석결과

유역명	유역별 강우침식인자(R)			
	최소값	최대값	평균	표준편차
금강분류1	427.679	467.582	444.701	8.683
금강분류2	420.101	509.652	440.114	18.186
금강분류3	395.063	474.149	438.669	17.552
주자천	463.184	517.631	493.055	12.400
정자천	413.844	481.207	446.423	15.277
진안천	409.302	440.386	426.432	6.098
구양천	380.243	570.217	453.048	49.353
장계천	439.924	529.467	480.304	19.800

표 13. 유역별 토양침식인자(K)의 분석결과

유역명	유역별 토양침식인자(K)			
	최소값	최대값	평균	표준편차
금강분류1	0.100	0.320	0.266	0.050
금강분류2	0.100	0.310	0.256	0.049
금강분류3	0.100	0.320	0.264	0.045
주자천	0.100	0.390	0.253	0.063
정자천	0.100	0.350	0.203	0.069
진안천	0.100	0.320	0.229	0.059
구양천	0.100	0.320	0.251	0.055
장계천	0.100	0.390	0.266	0.052

그리고 표준편차를 산정할 수 있었다.

4.5.2 유역별 RUSLE 인자 추출 결과분석

표 12는 유역별 강우침식인자인 R의 분석결과이다. 표 12에서와 같이 진안천유역의 평균값이 가장 낮게 나타났으며 주자천유역이 가장 높게 나타났다. 이것은 진안천유역내의 연평균강우량이 가장 작고 주자천유역이 가장 높다는 것을 의미한다. 또한 진안천유역의 표준편차값이 가장 낮게 나타났으며 구양천유역이 가장 높게 나타났다. 이것은 진안천유역내의 연평균강우분포 변화가 가장

표 14. 유역별 침식사면의 길이인자(L)의 분석결과

유역명	유역별 침식사면의 길이인자(L)			
	최소값	최대값	평균	표준편차
금강분류1	0.995	10.155	3.257	2.068
금강분류2	0.995	10.133	3.323	2.247
금강분류3	0.995	10.111	3.084	2.112
주자천	0.995	10.364	3.392	2.406
정자천	0.995	10.251	3.435	2.415
진안천	0.995	10.111	3.047	2.111
구양천	0.995	10.298	3.325	2.279
장계천	0.995	10.155	3.236	2.099

표 15. 유역별 침식사면의 경사인자(S)의 분석결과

유역명	유역별 침식사면의 경사인자(S)			
	최소값	최대값	평균	표준편차
금강분류1	0.049	14.590	3.312	2.745
금강분류2	0.049	14.791	4.286	3.332
금강분류3	0.049	14.757	3.650	3.285
주자천	0.049	15.056	5.317	3.798
정자천	0.049	14.823	5.382	3.762
진안천	0.049	14.823	3.581	3.184
구양천	0.049	14.879	4.342	3.462
장계천	0.049	14.791	3.428	2.896

표 16. 유역별 식생피복인자(C)의 분석결과

유역별 식생피복인자(C)				
유역명	최소값	최대값	평균	표준편차
금강분류1	0.000	0.400	0.132	0.074
금강분류2	0.000	0.400	0.120	0.062
금강분류3	0.000	0.400	0.134	0.085
주자천	0.000	0.400	0.117	0.059
정자천	0.000	0.400	0.117	0.058
진안천	0.000	0.400	0.127	0.068
구양천	0.000	0.400	0.126	0.068
장계천	0.000	0.400	0.128	0.071

표 17. 유역별 경작인자(P)의 분석결과

유역별 경작인자(P)				
유역명	최소값	최대값	평균	표준편차
금강분류1	0.000	1.000	0.875	0.305
금강분류2	0.000	1.000	0.920	0.249
금강분류3	0.000	1.000	0.863	0.310
주자천	0.000	1.000	0.932	0.230
정자천	0.000	1.000	0.925	0.242
진안천	0.000	1.000	0.897	0.281
구양천	0.000	1.000	0.897	0.281
장계천	0.000	1.000	0.889	0.291

작고 구양천유역내의 연평균강우분포 변화가 가장 심하다는 것을 의미한다.

표 13은 유역별 토양침식인자인 K의 분석결과이다. 표 13에서와 같이 대부분의 유역이 유사한 평균값과 표준편차값을 나타냈으며 이것은 각 유역내에 분포하고 있는 토양특성들을 볼 때 토양침식성이 유사한 토양들이 고루 분포하고 있음을 의미한다.

표 14는 유역별 침식사면의 길이인자 L의 분석결과이다. 표 14에서와 같이 정자천유역이 가장 높은 평균값을 보였으며 대부분의 유역이 전체적으로 비슷한 평균값을 보였다. 다만 표준편차값이 상당히 높게 나타났으며, 이것은 각 유역내의 지형변화가 크다는 것을 의미한다.

표 15는 유역별 침식사면의 경사인자 S의 분석결과이다. 표 15에서와 같이, 금강분류1유역이 가장 낮은 평균값을 그리고 정자천유역이 가장 높은 평균값을 나타냈다. 또한 각각의 표준편차값이 상당히 크게 나타났는데 이것은 각 유역내의 경사변화가 심하다는 것을 의미한다.

표 16은 유역별 식생피복인자 C의 분석결과이다. 표 16에서와 같이 각 유역에 대한 평균 값이 대부분 1보다 약간 큰 값을 보였으며 표준편차값도 비교적 큰 변화를

보이지 않았다. 이것은 용담댐의 식생피복중 산림이 차지하는 비율이 전체피복의 약 85.21%로 매우 높기 때문이다.

표 17은 유역별 경작인자 P의 분석결과이다. 표 17에서와 같이 금강분류3유역이 가장 낮은 평균값을 나타냈으며, 이것은 금강분류3유역이 다른 유역에 비해 논과 밭이 많이 분포하고 있기 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구는 GIS 공간분석기법을 활용한 토양침식모형 입력인자 추출에 관한 연구로서 용담댐 유역을 연구대상지로 선정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용담댐 유역 인근 9개 강우관측소의 연평균 강우량 자료를 선정하여, 연속적인 강우특성을 효과적으로 반영하기 위해 스플라인 보간법을 수행함으로써 강우침식인자 R을 격자별로 추출할 수 있었다.

2. 침식사면의 길이인자 L과 경사인자 S의 곱인 지형인자 LS를 사면경사만으로 추출했던 기존의 연구와는 달리, 본 연구에서는 L과 S를 별도로 추출하였으며 특히 L은 사면의 경사 및 방향 그리고 관측셀로 유입되는 상부기여면적까지도 GIS 기법으로 분석하여 경험식에 적용할 수 있도록 하였다.

3. 최근 촬영한 Landsat TM영상에서 최대우도법으로 분류한 토지피복도로부터 각 토지피복별 식생피복인자값을 적용하여 분포형태에 활용가능한 식생피복인자 C를 추출함으로써 C인자의 최신성을 고려할 수 있었다. 또한 토지피복도내의 논과 밭의 영역을 추출한 후 그 영역내의 경사도를 분석함으로써 격자형 경작인자 P를 추출할 수 있었다.

4. GIS 공간분석기법으로 분석한 RUSLE 인자를 침식모형의 입력인자로 활용함으로써 보다 객관적이고 정확한 침식모델링을 수행할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있었다.

## 참고문헌

1. Miller, G. T., "Sustaining the Earth, Belmont, California", Environmental Science, Wadsworth Publishing Company, 1993, p. 478.
2. Morgan, R. P. C., "Soil Erosion and Conservation", Addison Wesley Longman Limited, 1995, p. 198.

3. Hudson, N., "Soil Conservation", Cornell University Press, 1977, p. 324.
4. Morgan, R. P. C., "Field measurement of splash erosion", International Association of Scientific Hydrology Publication, Publication No. 133, 1981, pp. 378-382.
5. Desmet, P. J. J. and G. Govers, "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), 1996a, pp. 427-433.
6. Ondro, W. J., L. Couto and D. R. Betters, "The status and practice of forestry in Brazil in the early 1990s", The Forest Chronicle 71(1), 1995, pp. 106-119.
7. Gilley, J. E., S. C. Finkner, R. G. Spomer and L. N. Mielke., "Runoff and erosion as affected by crop residue", Transactions of the American Association of Agricultural Engineers 29(1), 1986a, pp. 157-160.
8. Barfield, B. J., C. T. Haan and D. E. Storm, "Why model ?", Proceedings of the CREAMS/GLEAMS Symposium, Athens, Georgia, September 28-29, 1989, pp. 3-8.
9. Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, P. J. Porter, "RUSLE : Revised universal soil loss equation", Journal of Soil and Water Conservation 46(1), 1991, pp. 30-33.
10. Hickey, R., A. Smith and P. Jankowski, "Slope length calculation from a DEM within ARC/INFO grid", Computers, Environment and Urban Systems 18(5), 1994, pp. 365-380.
11. Beasley, D. B., L. F. Huggins and E. F. Huggins and E. J. Monke, "ANSWERS : A model for watershed planning", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 23(4), 1980, pp. 938-944.
12. Laflen, J. M., L. J. Land and G. R. Foster, "WEPP : A new generation of erosion prediction technology", Journal of Soil and Water Conservation 46(1), 1991, pp. 34-38.
13. 정필균, 고문환, 임정남, 임기태, 최대웅, "토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석", 한국토양비료학회지, 제 16권 제 2호, pp. 112-118, 1983
14. 건설기술연구원, "댐설계를 위한 유역단위 비유수량 조사·연구", 1992. 11., pp. 163-167.
15. Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool and D. C. Yoder, "Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation", U.S. Department of Agriculture, Handbook No. 703, 1997, p. 404.
16. Kevin P. Bartsch, "Modelling Soil Loss to determine water erosion risk at Camp Williams national guard base", UTAH, UTAH state university, 1998.
17. 신계중, "지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실분석", 강원대학교 대학원 토목공학과 박사논문, 1999. 8, p. 31.