

산림유역의 土壤流失量 예측을 위한 地理情報시스템의 汎用土壤流失式(USLE)에의 적용¹

李 奎 成²

Application of GIS to the Universal Soil Loss Equation for Quantifying Rainfall Erosion in Forest Watersheds¹

Lee, Kyu Sung²

要 約

토양침식에 영향을 미치는 강우, 토양, 지형, 식생 등을 종합적으로 고려하여 단위면적당 土壤流失량을 예측하는 汎用土壤流失式(Universal Soil Loss Equation)을 地理情報시스템(GIS)에 접목시켰다. 경기도 광릉 임업연구원 시험림을 연구지역으로 선정하여 이곳에서 지난 12년 동안 측정된 시간별 강우자료를 이용하여 降雨因子(R) 값을 산출하였고, 토양도, 지형도, 위성자료 등을 이용하여 USLE 계산에 필요한 다른 인자들의 값을 25×25m²의 격자마다 입력하여 디지털공간정보 데이터베이스를 구축하였다. 각 격자단위로 USLE에 의하여 토양유실량이 계산된 후 그 결과를 종합하여 토양유실의 정도를 공간적으로 살펴볼 수 있는 디지털지도가 산출되었다. GIS에 의한 USLE의 적용은 일정한 테두리 안의 山林流域에서 발생하는 강우에 의한 토양유실량을 추정할 수 있을 뿐만아니라, 주변 지역과 비교하여 토양유실의 위험이 높은 특정지점을 공간적으로 파악할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 접근 방법은 林地轉用, 林道개설, 벌채, 산불 및 병충해에 의한 임지의 변화가 토양침식에 미치는 영향을 효과적으로 분석할 수 있는 도구로 사용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

The Universal Soil Loss Equation (USLE) has been widely used to predict long-term soil loss by incorporating several erosion factors, such as rainfall, soil, topography, and vegetation. This study is aimed to introduce the USLE within geographic information system (GIS) environment. The Kwangneung Experimental Forest located in Kyongki Province was selected for the study area. Initially, twelve years of hourly rainfall records that were collected from 1982 to 1993 were processed to obtain the rainfall factor (R) value for the USLE calculation. Soil survey map and topographic map of the study area were digitized and subsequent input values (K, L, S factors) were derived. The cover type and management factor (C) values were obtained from the classification of Landsat Thematic Mapper (TM) satellite imagery. All these input values were geographically registered over a common map coordinate with 25×25m² ground resolution. The USLE was calculated for every grid location by selecting necessary input values from the digital base maps. Once the USLE was calculated, the resultant soil loss values (A) were represented by both numerical values and map format. Using GIS to run the USLE, it is possible to point out the exact locations where soil loss potential is

¹ 接受 1994年 3月 7日 Received on March 7, 1994.

² 임업연구원 Forestry Research Institute

high. In addition, this approach can be a very effective tool to monitor possible soil loss hazard under the situations of forest changes, such as conversion of forest lands to other uses, forest road construction, timber harvesting, and forest damages caused by fire, insect, and diseases.

Key words : GIS, soil loss, USLE, erosion, sedimentation yield

汎用土壤流失式과 地理情報시스템

緒 論

산림이 제공하는 공익적기능에 대한 사회적 요구가 증가함에 따라, 종전에 定性的으로 인식되어온 이러한 산림의 역할에 관하여 보다 과학적인 평가와 定量化에 관한 연구가 활발히 진행중이다. 전쟁과 무분별한 벌채로 인한 산림의 피해는 심각한 토양침식 문제를 가져왔었으나, 지난 30여년간의 산지녹화사업과 꾸준한 사방사업의 결과로 이젠 산림에서의 토양침식현상은 많이 개선되었다. 성숙한 임지에서의 降雨은 수관층에서 차단되고 낙엽부식층에서 대부분이 흡수되므로 강우에 의한 토사유출은 상당히 억제된다고 할 수 있다. 이제 산림에서의 토양침식문제는 과거에 비하여 많이 개선되었지만, 토양자원의 보전은 임목의 생산성유지 측면에서뿐만 아니라 국토보전이라는 환경적 측면에서 그 중요성이 새삼 강조되고 있는 실정이다. 특히 휴양지, 산업시설 등 임지의 타용도로의 轉用과 그에 수반되는 토양침식현상, 그리고 임도개설, 임목벌채 등 산림사업과정과 병충해 및 산불 등에 의한 산림피해와 결부되는 토양침식현상에 관하여 보다 과학적이고 정량적인 연구가 시급한 현실이다.

본 연구의 목적은 그동안 토지보전대책수립에 기초적인 도구로서 사용되어왔던 기존의 汎用土壤流失式(Universal Soil Loss Equation-USLE)을 산림유역에 적용함으로써, 토양침식에 영향을 미치는 임지내 각종 인자를 공간적으로 분석하여 보다 과학적인 토양유실량을 예측하고자 하는데 있다. 또한 USLE를 지리정보시스템(GIS)에 접속함으로써 단지 수치적인 토양유실량 추정뿐만 아니라 토양침식에 관한 지리적 분포와 그 경향을 파악하고, 각종 토양침식과 관련된 가상의 산림 변화 상황하에서 발생할 수 있는 토양침식현상을 효과적으로 분석할 수 있는 技法을 제시하고자 하였다.

토양침식의 물리적 현상을 이해하고 토양침식에 영향을 미치는 제반 인자의 특성을 구명하고자 하는 연구는 실험적인 방법을 통하여 꾸준히 시도되어 왔다(禹, 1976:1984). 미국에서는 1940년대 부터 30여년동안 실시되어온 토양침식에 관한 광범위한 실험결과를 종합분석하여 일정 지역을 대상으로 하여 평균적 토양유실량을 예측할 수 있는 汎用土壤流失式(USLE)을 개발하였다(Wischmeier and Smith, 1978). 이 USLE는 미국 전역에서 실시된 장기적인 연구결과를 토대로 개발된 실험식으로, 일정지역의 강우특성, 토양, 지형, 식생, 그리고 토지이용상태 등의 인자를 고려하여 그 지역의 평균적 토양유실량을 예측함으로써 토양침식방지를 위한 대책수립에 주요한 도구로서 미국뿐만 아니라 세계 여러나라에서 유용하게 사용되고있다. 이 공식은 여섯개의 토양 침식 관련인자를 이용하여 토양유실량을 예측하게 되는데,

$$A = R K L S C P \tag{1}$$

여기서 A=토양유실량(tons/ha/year)

R=강우인자
(rainfall and runoff factor)

K=토양受蝕性 계수
(soil erodibility factor)

L=경사면의 길이(slope-length factor)

S=경사인자(slope-steepness factor)

C=토지피복인자
(cover and management factor)

P=토양보전작업인자
(supporting practice factor)

즉 일정지역에서 토양침식에 영향을 미치는 여섯 가지 인자의 값을 적절한 방법으로 구하여 적용함으로써 그 지역에서 발생하는 장기적 토양유실량을 계산할 수 있다. 이 USLE는 토양침식의 문제가 심각한 農地나 裸地를 주 대상으로하여 사용되어 왔고, 우리나라에서도 이 공식을 적용

하고자 한국특성에 알맞은 입력인자의 값을 정량화하는 시도가 있어 왔다(吳 등, 1991; 鄭 등, 1983). 또한 산림의 토사유출 방지기능을 정량화하는 도구로서 이 공식이 적용된바 있다(崔 등, 1992). 물론 지난 1970년대 후반 이 공식이 발표된 후에도 이 공식의 미비점을 개선하여 그 적용범위를 넓히고자 하는 연구가 꾸준히 계속되었으며, 그 결과 최근에는 USLE를 보완한 공식(Revised Universal Soil Loss Equation)이 발표되었고 그 밖에도 토양침식예측을 위한 새로운 모델들이 개발되고 있다(Renard et al., 1991; Laflen et al., 1991). 이러한 토양유실에 측식은 단순히 연구목적으로만 개발된 것이 아니라 광범위한 실험자료를 토대로 한 심층적 연구 분석과 엄밀한 현지검정 등을 통하여 개발된 것으로서 현장에서 실질적으로 사용할 목적으로 개발되었기 때문에, 우리 실정에 맞는 입력인자의 값을 구할 수 있다면 충분한 이용가치를 가지고 있다.

USLE와 같은 수치중심의 모델은 하나의 유역 단위 또는 그와 상응하는 넓은 지역을 대상으로 하여 각각의 입력변수가 그 지역내에서 비교적 동일한 값을 갖게 된다는 가정하에서 적용된다. 즉 특정지역을 대상으로 위의 (1)식을 적용할 경우 강우, 토양, 지형 조건 등의 입력인자가 그 지역내에서 균일한 값을 가진 것으로하여 평균적인 토양유실량을 계산하게 되는 것이다. 토양침식 방지를 위한 보전대책수립에 있어서 전체적인 토양유실량을 추정해 내는 것만큼, 구체적으로 어느 지점에서 토양침식이 어느 정도 심하게 발생하는가를 찾아내는 것 또한 매우 중요한 과제이다. 위의 (1)식에 있어서 여섯개의 입력인자를 살펴보면 넓은 지역을 단일의 대표치로 나타내기에 곤란할만큼 지리적 변이가 다양하다. 예를 들어, 약 10ha의 면적을 가진 유역을 대상으로 위의 식을 적용할 때 그 지역내의 토양분포, 사면 길이, 경사각도 등의 값을 하나의 대표치로 표시하기에는 무리가 있다.

흔히 USLE를 적용할 때 필요한 토양, 지형, 토지이용상태 등에 관한 인자의 값을 지도에서 찾아 입력시키는 것을 고려하면, 도면정보를 포함하는 모든 지리정보를 전산화하여 종합적으로 관리, 분석할 수 있는 지리정보시스템(Geographic Information Systems)은 적합한 도구라 할 수

있다. 이미 항공사진, 인공위성자료, 그리고 필요한 지도정보를 컴퓨터에 입력하여 USLE를 공간적으로 계산함으로써, 전체적인 침식량을 예측하는 것에 추가하여 구체적으로 잠재적 침식정도를 지도의 형태로 나타내는 시도가 있어 왔다(Morgan and Nalepa, 1982; Pelletier, 1985). USLE와 같이 종전에 개발되었던 수치중심의 자원관리 모델들이 그 특성상 지리적인자를 내포하고 있는 만큼 각종 지도정보를 효율적으로 관리할 수 있는 지리정보시스템과 접목될 수 있다면 모델 고유의 목적에 추가하여 보다 실질적인 이용이 가능할 것이다.

研究方法

1) USLE인자의 GIS 입력

범용토양유실식(USLE)을 지리정보시스템에 적용하기 위해서는 우선 USLE에서 요구되는 각 입력인자를 디지털지도의 형태로 변환하여야 한다. 모델적용에 필요한 자료획득의 용이성 등을 고려하여 연구지역은 경기도 광릉 임업연구원 시험림을 대상으로 하였다. 지도자료의 전산입력, 입력된 자료의 변환 및 분석, 그리고 최종 USLE의 계산과 그 결과를 지도의 형태로 나타내는 일련의 지리정보시스템 구축 및 공간분석은 美國 政府에 의해 개발되어 세계적으로 널리 사용되고 있는 Geographical Resources Analysis Support System(GRASS)을 주로 사용하였다(Westervelt, 1992).

먼저 여섯개의 입력인자 중 강우인자(R-factor)의 산출은 시험림에서 1982년 부터 1993년까지 측정된 自記우량자료를 1시간 간격으로 읽은 값을 이용하여 每강우의 운동에너지와 降雨強度에 따라 계산되었다. 토양침식을 일으키는 하나의 강우는 인접강우로 부터 6시간 이상의 無降雨시간이 있어야 하고 일회 강우량의 합이 최소한 12.7mm 이상이 되어야한다(Wischmeier and Smith, 1978). 강우인자(R)의 값은 다음 식에 의하여 계산되는데, i번째 강우마다

$$EI = \sum_{i=1}^n (KE_i \times R_i) / 100 \times MI_i \quad (2)$$

여기서 EI=강우인자값(t/ha)

KE=210.3+89log I(운동에너지)

R=강우량(cm)

I=강우강도(cm/hour)

MI=최대강우강도(cm/hour)

강우인자값(R-值)은 이미 전국 51개 기상측후소에서 얻어진 3년간의 강우기록을 토대로 계산된 기존의 자료중 연구지역에서 가장 근접한 측후소의 강우인자값을 이용할 수도 있으나, 본 연구에서는 광릉시험림에서 장기간(1982-1993) 측정된 강우자료를 이용하여 R-值를 계산하였다. 강우인자값의 12년 평균치는 392로 계산되었으나, 이는 최대강우강도를 보편적으로 사용하는 30분 최대치 대신 1시간 최대치를 사용하였기 때문에 동일한 강우특성을 가진 타지역과 비교하여 다소 낮은 값을 보이고 있다. 이를 보정하기 위하여 鄭 등(1983)이 발표한 전국 51개 측후소의 30분 최대강도를 이용하여 계산한 R-值와 1시간 최대강도를 이용하여 계산한 R-值간의 상관관계를 이용하였다. 그림 1은 1979년 부터 1981년까지 3년에 걸쳐 30분 최대강도와 1시간 최대강도를 이용하여 계산한 두 종류의 R-值간의 관계를 보여주고 있다. 그림 1에서 구해진 상관관계식을 이용하여 광릉의 1시간 최대강도를 사용하여 계산한 R-值를 30분최대강우강도에 기준하여 보정하였다.

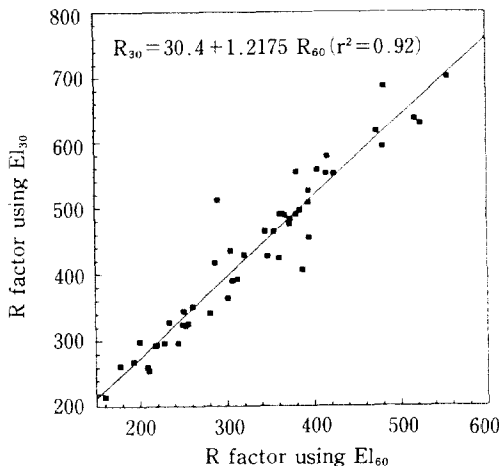


Fig. 1. Relationship between two rainfall factors calculated using 30 minute maximum rainfall intensity and 1 hour maximum rainfall intensity. These rainfall factor values were obtained from the precipitation records collected at 51 weather stations in Korea (data from Chung et al., 1983).

土壤受蝕性係數(K-factor)는 토양침식에 영향을 미치는 토양의 고유특성을 설명하는 인자로서 土性, 유기물함량, 透水性 등과 관련이 있다. 토양수식성계수의 산출은 각 토양의 특성에 따라 K-值를 찾을 수 있는 기존의 그래프를 이용할 수도 있고, 다음의 수식에 의하여 직접 구할 수 있다(Wischmeier et al., 1971).

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3) \quad (3)$$

여기서 K=土壤受蝕性계수

M=(%미사+%세사)(100-%점토)

a=유기물 함량(%)

b=토양구조등급

c=토양투수성등급

광릉시험림 지역은 네 종류의 갈색산림토양으로 분류되어있는데 우선 산림토양도를 디지털이저를 이용하여 수치지도로 입력한 후 각 토양형별로 土性, 유기물함량, 투수성 등의 屬性자료가 입력되었다(金 등, 1988). 표 1은 광릉시험림에 분포하는 4종의 산림토양의 특성과 위의 식(3)에 의해 산출된 토양수식성계수(K-值)를 나타낸다.

지형조건이 토양침식에 미치는 영향은 경사면 길이와 사면의 경사각도 두 인자에 의하여 계산된다. 원래 USLE가 농지를 주 대상으로 개발된 까닭에 모델구축을 위한 실험에 적용된 지형조건은 경사가 급한 산림지역에 사용하기에는 그 적용 범위가 미흡하였다. USLE에서 사용되어온 지형인자(LS-factors)를 산출하는 방법을 보다 현실적으로 개선하고자 추가의 실험이 실시되었고, 이 자료를 토대로 종전의 미비점을 보완하여 다음과 같은 수식으로 지형인자를 산출하는 식이 발표되었다(McCool et al., 1993).

$$LS = (\lambda/22.13)^{0.5} (\sin\theta/\sin 5.143^\circ)^{0.6} \quad (4)$$

여기서 LS=지형인자

λ =사면길이(m)

θ =경사도(°)

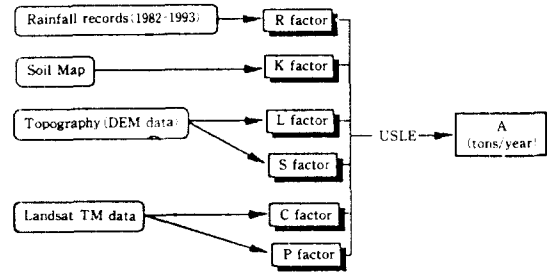
광릉시험림 지역의 지형인자의 값은 25×25m²의 격자로 나누어 해발고도가 입력된 수치지형자료(Digital Elevation Model Data)를 사용하여 산출되었다. 즉 DEM자료로부터 사면길이와 경사자료를 추출해낸 뒤 위의 (4)식을 적용함으로써 USLE에 필요한 지형인자인 LS-值를 산출하였다.

Table 1. Determination of K-factor based on the soil characteristics.

Soil type	%sand	%silt	%clay	%OM	struc.	perm.	K-value
B1	47.0	37.3	15.7	5.02	3	3	0.1748
B2	44.6	38.8	16.6	6.68	3	4	0.1696
B3	45.2	39.5	15.3	7.88	2	4	0.1152
B4	39.6	44.3	16.1	5.92	2	5	0.2000

농지의 경우 재배되는 작물의 종류와 식재방법 등이 토양유실과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 토지피복인자(*C-factor*)가 아주 중요하게 작용되나, 인위적인 간섭이 덜하고 낙엽층 및 하층식생이 발달되어 있는 임지에서의 토지피복인자는 상대적으로 그 값이 미미하다. *Wischmeier* (1978)는 산림에서의 *C-값*은 林冠의 鬱閉度와 낙엽부식층의 두께에 따라 0.0001에서 0.009까지의 값을 제안하였다. 천연림과 인공식재림이 다양하게 분포하고 있는 광릉시험림의 임상을 고려하여 일률적인 *C-값*을 적용하기는 어렵기 때문에, 시험림 지역을 林冠의 울폐도와 임상에 따라 분류하였다. 임상분류는 기존의 임상도를 입력하여 사용하는 방법도 있으나, 전산입력작업에 소요되는 시간과 노력 등을 고려하여 인공위성 영상자료를 이용하여 상대적인 임상분류를 실시하였다. 약 30m의 解像力을 가진 미국사원탐사위성인 *Landsat*에서 얻어진 *Thematic Mapper (TM)* 영상 자료를 *Clustering* 기법을 이용하여 시험림 지역을 활엽수천연림, 성숙인공림, 미성숙인공림, 초지, 나지 등으로 분류한 뒤 각 피복등급별 0.002에서 0.250의 범위 안에서 적절한 *C-값*을 부여하였다. 끝으로 토양보전작업인자(*P-factor*)는 농지에서 토양침식을 저감하기 위하여 등고선재배(*contouring*), 계단식재배(*terracing*) 등이 실시되었을 경우 1보다 작은 *P-값*을 부여하게 되나 본 연구지역은 대상이 임지인 관계로 *P* 인자를 무시하여 1로 처리하였다.

이상으로 여섯가지의 토양유실 관계인자에 대한 도면자료전산화와 각 인자의 적절한 값을 산출함으로써, *USLE*를 지리정보시스템에서 실행시킬 수 있었다. 그림 2는 지리정보시스템에서 *USLE*를 적용하는 일련의 과정을 보여주고 있는데, *USLE*의 계산은 전산입력된 토양도, 지형도, 위성자료 등을 25×25m²의 동일한 격자 크기로 등록하여 각 격자마다 계산에 필요한 인자의 값을 입력된 수치지도에서 읽어 최종 결과인

**Fig. 2.** GIS scheme to process the USLE. Each input factor and resultant soil losses (A) was represented by digital map.

토양유실량(A)를 산출했다. 이렇게 각 격자마다 토양유실량(A)이 계산되어 단위 면적별 토양유실량이 산출되고 각 격자 지점의 A-값을 종합하여 토양유실량의 다소를 공간적으로 비교분석할 수 있는 지도가 만들어졌다.

2) 현지시험자료와의 비교

본 연구지역 내에는 임업연구원에서 설치한 임상과 지형조건을 달리하는 두개의 산림유역시험지가 있어 1979년부터 유역에서 유출되는 계류 및 토사량 등 山水水文에 관한 연구자료가 축적되고 있다(李 등, 1989). 두 개의 시험유역은 약 20년생의 침엽수인공조림지(13.6ha)와 활엽수천연림지(22.0ha)인데 시험지의 하구에 시험댐을 막아 이곳까지 운반되어 침적되는 土砂量을 주기적으로 측정하고 있다. 두 시험유역의 경계 좌표를 입력한 뒤 *USLE*에 의하여 추정된 전 지역의 土壤流失量 중 시험유역 내에서 발생된 A-값만을 추출한 뒤 실지 시험댐에서 측정된 土砂流出量과 비교하였다. 물론 *USLE*에서 추정된 토양유실량은 단지 林地 내에서 강우에 의해 발생하는 面狀 침식(sheet erosion)과 淚溝침식(rill erosion)만을 포함하기 때문에, 강우에 의한 유실량 이외에 구곡침식 및 하천침식에 의하여 발생한 토사량도 함께 포함하는 토사유출량측정자료와는 동일하게

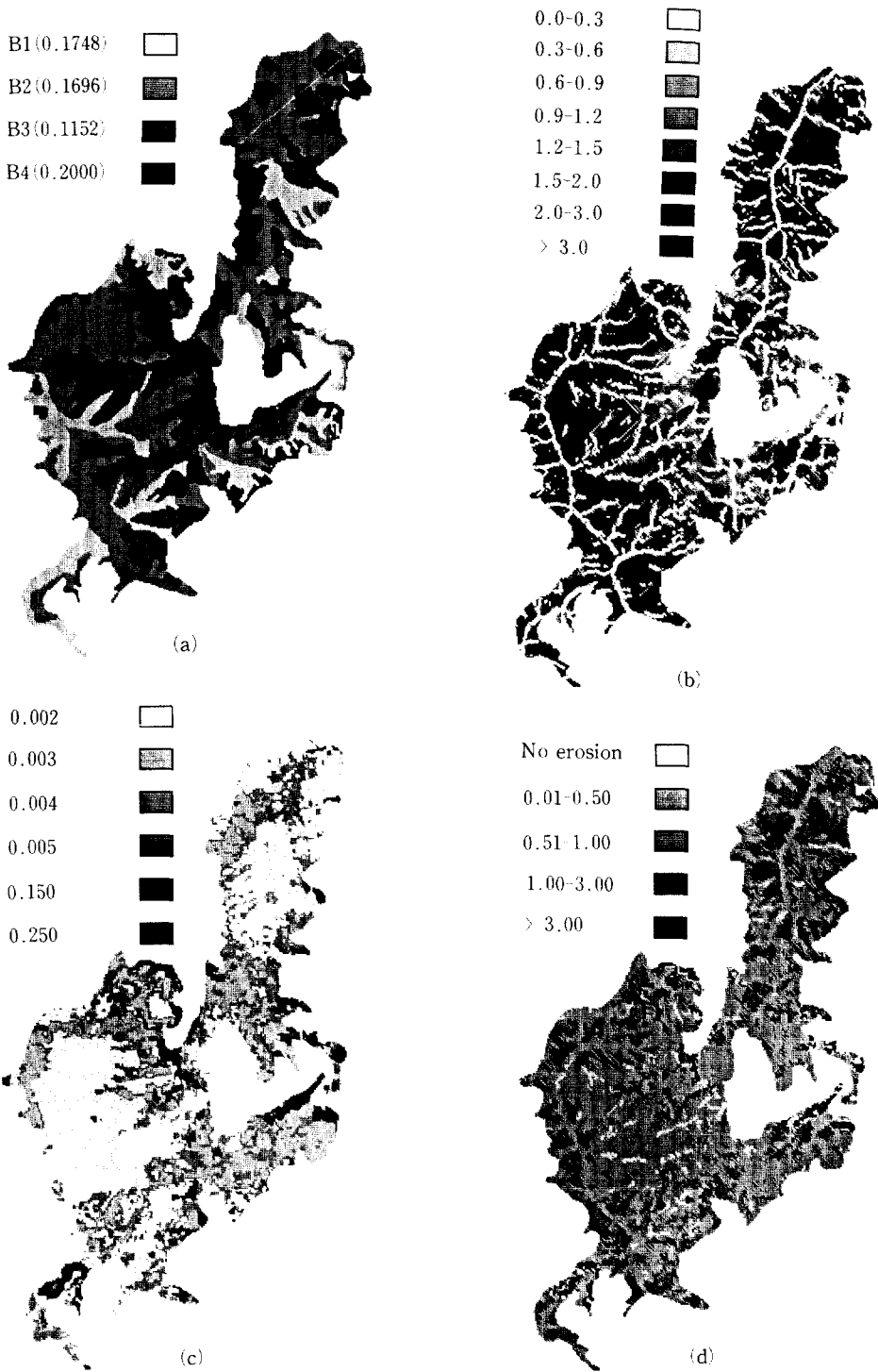


Fig. 3. GIS digital maps showing input values and output map : (a) K-factor derived from soil map, (b) LS-factor calculated using digital elevation model (DEM) data, (c) C-factor derived from the classification result of Landsat TM data, and (d) USLE-calculated soil loss prediction (A)

취급될 수 없다. 다만 이 비교는 강우에 의한 현지 토양유실량과 유역내 전체 浸蝕源을 대표하는 시험측정치와의 관계를 살펴봄으로써, 임상과 지형조건이 상이한 두 산림유역에서의 토양유실량과 그 운반량의 차이를 비교하고자 하였다.

結果 및 考察

1) GIS 공간분석

Fig. 3은 USLE에 사용된 각 입력인자를 나타내는 수치지도와 최종계산 결과로 산출된 토양유실량예측도이다. 암관이 비교적 밀폐되어 있고 낙엽부식층이 발달된 시험림지역의 임분 특성상, 모델에 의하여 예측된 토양유실량은 평균 0.7 ton/ha/year로 토양유실이 아주 미비하다고 할 수 있다. Heimlich and Bills(1984)의 토양침식의 분류기준에 의하면 0.7ton/ha/year는 토양침식이 거의 없는 등급에 해당된다. 물론 그림 3(d)에서 보는 바와 같이 일부 지점에서의 토양유실량은 평균치를 훨씬 초과하여 타지점에 비하여 토양유실의 위험이 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 이 토양유실도의 定性的 판독을 통하여 토양유실이 높게 예측된 지점은 경사가 급하거나, 식생피복이 상대적으로 빈약한 지점임을 관찰할 수 있었다.

USLE 계산에 필요한 여섯개의 토양침식인자들을 정량화 하는 데에는 다소 주관적인 결정이 배제되지 않았고, 따라서 각 인자의 입력치를 결정하는데 보다 객관성을 기할 수 있는 연구가 필요하다. Dissmeyer and Foster(1981)가 지적한 바와 같이 지형, 토양, 토지피복상태 등 각 인자의 값을 적절히 선택하여 적용함으로써 주로 농지나 나지에 사용되고 있는 USLE가 임지에서도 강우에 의한 토사유실량을 추정하는데 효과적일 수 있을 것이다.

지리정보시스템을 사용하여 토양유실량을 예측했을 경우의 장점은 위치에 따라 심한 지리적 變異를 가지고 있는 토양 및 지형인자 등의 값을 세분하여 적용함으로써 특정지점 또는 특정유역내에서의 토양유실량을 보다 합리적으로 계산할 수 있을 뿐 아니라, 토양유실의 위험이 높은 지점을 파악할 수 있고 그 지점의 임상과 지형 등에 적합한 토양보전책을 효과적으로 실행할 수 있다는 점이다.

GIS 접근방식은 단순히 현시점에서의 상황을 분석하는 측면을 떠나, 임지에서 장차 발생가능한 변화상황을 가정하여 그에 따른 토양침식의 상태를 예측해 볼 수 있다. 휴양지 및 산업용지 개발 등 임지가 다른 용도로의 전용시 발생할 수 있는 토양침식을 예측하고, 그에 따른 주변환경에 미치는 영향을 다각적으로 분석할 수 있다. 또한 임지전용 측면외에도, 임도개설, 벌채, 산림병충해, 산불 등에 의한 산림변화에 따라 달라질 수 있는 토사유실량의 차이를 공간적으로 파악할 수 있을 것이다. 즉 토양침식에 영향을 미치는 지형, 강우, 식생, 토양 등 각종 인자에 인위적 또는 자연적 변형이 가해질 경우 그 변형된 인자의 값을 공간적으로 대체하여 줌으로써 예측되는 토양유실현상을 미리 분석할 기회를 제공한다.

2) 현지시험자료와의 비교

Table 2는 연구지역의 강우자료에서 산출된 연도별 강우인자값(R)과 두개의 산지유역시험구에서 측정된 土砂流出量(Sedimentation Yield) 및 USLE에 의해 추정된 土壤流失量(A)을 비교하고 있다. 먼저 20년생 잣나무와 전나무 임분의 침엽수인공림유역에서는 비교적 임관밀도가 떨어지고 낙엽 부식층의 발달이 미흡한 관계로 USLE에 의하여 추정된 토양유실량(A) 및 유역입구에서 측정된 토사유출량(SY)이 모두 활엽수천연림유역보다 많게 나타났다. 반면에 참나무, 서어나무 등 비교적 성숙한 임목이 밀폐되어 있고 낙엽부식층이 잘 발달되어있는 활엽수천연림유역에서는 토양유실량 및 토양유출량이 미미하게 나타났다.

전술한 바와 같이 USLE에 의해 추정된 A-値은 단지 강우에 의한 면상침식과 누구침식만을 내포하는 반면, 시험유역에서 측정된 토사유출량(Sedimentation Yield)은 A-値에 추가하여 다른 浸蝕源인 구곡침식 및 하천침식 등에 의해 깎여 운반되어진 토사량을 전부 포함하고 있다. 즉 유역입구까지 운반침적된 토사유출량(SY)과 USLE에 의해 예측된 토양유실량(A)와의 관계는 다음의 수식으로 설명할 수 있는데,

$$SY = A \cdot DR_A + E_0 \cdot DR_E \quad (5)$$

여기서 SY=Sedimentation Yield

A=현지강우토사유실량(USLE 예측량)

E_0 =A이외의 침식량(구곡침식, 하천침식등)

Table 2. Comparison between field-measured sedimentation yields (SY) and USLE predicted soil losses (A) in two experimental forest watersheds. (ton/ha/year)

Year	Rainfall (mm)	R-value	Plantation stands		Natural stands	
			A	SY	A	SY
1982	1052	325	1.506	0.042	0.225	0.033
1983	1187	412	1.906	0.000	0.285	0.000
1984	1429	1070	4.954	4.950	0.740	2.720
1985	1651	631	2.924	0.218	0.437	0.573
1986	1306	440	2.040	0.027	0.305	0.030
1987	1762	713	3.302	2.646	0.493	0.324
1988	930	86	0.400	0.002	0.060	0.000
1989	1362	167	0.771	0.100	0.115	0.100
1990	2417	1129	5.230	0.600	0.781	0.300
1991	1094	432	2.000	1.300	0.299	0.800
1992	1282	466	2.157	0.100	0.322	0.000
1993	1304	219	1.016	0.000	0.152	0.000
Average	1398	508	2.351	0.832	0.351	0.407

DR = 운반률 (Delivery Ratio).

연도별 강우인자값을 이용하여 예측된 A-값은 토사유출량(SY)과 대체로 비례하는 경향을 나타내고있고, 특히 1976년 잣나무와 전나무를 식재한 침엽수인공림유역에서는 연도별 A-값이 증가함에 따라 측정된 토사유출량(SY)도 함께 증가하고 있음을 볼 수 있다($r=0.65$). 전체적인 토양유실량 및 토사유출량이 미미하지만 이러한 경향은 천연활엽수림유역에서도 다소 발견된다. 물론 1984년에 비정상적으로 높게 측정된 토사유출량 값을 제외한다면 A와 SY는 서로 비례하는 경향이 있으나, 전체적인 12년 평균치로 보면 의외로 토양유실량(A)이 토사유출량(SY)보다 높게 나타났다. 이는 위의 식(5)에서와 같이 강우에 의하여 유실되는 A의 일부는 임지내에서 중간침적되고 소량만이 계류까지 운반되어 하천침식이나 구곡침식에 의해 발생한 토사와 함께 유역입구까지 운반되어 총유출량 SY를 이루게 되는데, A의 양이 미세할 경우 임지내에서 대부분 중간침적되기 때문에 계류까지 운반되는 부분이 거의 없는 셈이 된다. 따라서 활엽수천연림에서 측정된 토사유출량(SY)은 대부분 현지에서의 면상침식이나 누구침식이라기 보다는 하천침식이나 구곡침식에 의하여 침식된 토사량(E_0)이 운반된 부분임을 추정할 수 있다. 그러므로 USLE에 의하여 추정된 A-값을 직접사용하여 Sedimentation Yield를 추정하는 것은 다소 고려해야 할 부분이며, 이를 위해서는 강우에 의한 면상침식이나 누구침식 이외에 발생하는 하천침식, 구곡침

식 등의 다른 침식원(E_0)과 침식된 토사가 얼마만큼 계류까지 운반되는가 하는 운반률(Delivery Ratio) 등에 관한 연구가 선행되어야 한다.

結 語

지난 20여년동안 일정지역의 토양유실량예측을 위하여 널리 사용되어온 범용토양유실식(USLE)을 지리정보시스템을 이용하여 산림유역에 적용해 봄으로써, 기존의 수치중심의 예측모형을 공간적으로 활용할 수 있는 기법을 보여주었다. 즉, 단순히 단위면적당 연평균토양유실량이란 숫자만을 제공하는 것보다는 지리적위치에 따라 상이한 토양침식영향인자를 디지털 지도로 표시하여 그 지리적 변이를 유지함으로써, 특정지점마다 토양유실의 정도를 예측할 수 있는 공간적인 모델로 발전시킬 수 있었다. 비록 연구지역의 임분특성상 예측된 토양유실량은 미미하였지만, 장차 발생가능한 임지개발, 임도, 벌채, 병충해 및 산불에 의한 산림피해 등에 따른 토양유실량의 변화를 효과적으로 추정함으로써 적절한 시기에 그 임지조건에 알맞은 토양보전대책을 수립할 수 있을 것이다.

謝 辭

본 연구에 사용된 자료수집 및 USLE에 관한 문헌고찰에 도움을 주시고, 연구진행에 많은 조언을 해주신 임업연구원 산림환경부 윤호중, 김

경하 두분께 깊은 감사를 포함합니다.

引用 文 獻

1. 김태훈·정진현·구교상·김규현·차순형·김준섭·이충화·구창덕, 1988. 산림토양분류에 관한 연구. 임시연보, 37 : 19-34.
2. 오세진·정필균·김영호, 1991. 경사지 토양의 토양관리에 따른 토양유실방지. 농업시험장 논문집, 33(3) : 68-72.
3. 우보명, 1976. 토양침식에 작용하는 몇가지 요인의 영향에 관한 연구. 한국임학회지, 29 : 54-101.
4. 우보명, 1984. Integrated analytical study in runoff rate and soil loss measurement experiments from forest land in Korea. 서울대 농학연구, 9(1) : 11-18.
5. 이종학·김태훈·이원규·최 경·이천용·주진순, 1989. 산림의 유출조절에 관한 연구, 임시연보, 38 : 98-111.
6. 정영상·신제성·신용화, 1976. 야산개발지의 토양침식에 관하여, 한국토양비료학회지, 9(1) : 9-16.
7. 정필균·고문환·임정남·엄기태·최대웅, 1983. 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석. 한국토양비료학회지, 16(2) : 112-118.
8. 최 경·윤호중·이홍섭·김재현, 1992. 산림의 공익적기능의 계량화 연구(II), 과기처 특정연구보고서, 임업연구원, p. 85-119.
9. Dissmeyer, G.E. and G.R. Foster, 1981. Estimating the cover management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions. Journal of Soil and Water Conservation 36(4) : 235-240.
10. Heimlich, R.E. and N.L. Bills, 1984. An improved soil erosion classification for conservation policy. Journal of Soil and Water Conservation, 39(4) : 261-266.
11. Laflen, J.M., L.J. Lane, and G.R. Foster, 1991. WEPP-a new generation of erosion prediction technology. Journal of Soil and Water Conservation, 46(1) : 34-38.
12. McCool, D.K., G.O. George, M. Freckleton, C.L. Douglas, Jr., and R.I. Papendick, 1993. Topographic effect on erosion from cropland in the northwestern wheat region. Transactions of the ASAE, 36(3) : 771-775.
13. Morgan K.M. and R. Nalepa, 1982. Application of aerial photographic and computer analysis to the USLE for areawide erosion studies. Journal of Soil and Water Conservation, 37(6) : 347-350.
14. Pelletier, R.E., 1985. Evaluating nonpoint pollution using remotely sensed data in soil erosion models. Journal of Soil and Water Conservation, 40(4) : 332-335.
15. Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, and J.P. Porter, 1991. RUSLE-revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, 46(1) : 30-33.
16. Westervilt, J. 1991. GRASS User's Manual. U. S. Army CERL, Champaign, IL., USA, 515pp.
17. Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross, 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, 26(5) : 189-193.
18. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537, USDA, Washington D.C. 58pp.