

GIS 및 다시기 RS 자료를 이용한 토양손실량 변화 및 이동경로 추정

권형중* · 박근애* · 김성준**

Estimation of Soil Loss Changes and Sediment Transport Path Using GIS and Multi-Temporal RS data

Hyung-Joong Kwon* · Geun-Ae Park* · Seong-Joon Kim**

요 약

본 연구는 토양손실 추정 모형인 RUSLE를 이용하여 안성천의 평택수위관측소 (건교부)를 중심으로한 유역의 토양손실량 및 유실된 토사의 이동경로를 분석하고자 하였다. 모형의 입력자료로 사용되는 지형정보 자료를 RS와 GIS 기법을 이용하여 구축함으로써 RUSLE 모형의 적용성을 평가하였다. 과거에 비하여 다양한 토지피복 형태가 변화된 안성천 유역(583.9 km²)에 대하여 Landsat MSS 및 TM 위성자료를 이용하여 토지피복 변화에 대한 GIS 입력자료를 구축하였다. 강우자료는 2개의 강우 관측소의 1993년부터 2000년까지의 연평균 강우자료를 surface interpolation을 수행하여 지점강우를 공간강우로서 변환하여 구축하여 토양손실량을 산정하였다. 그 결과 1990년에 비하여 2000년의 토양손실변화는 25.3 km² 줄어든 산림지역의 토양손실량은 3751.2 ton/yr 감소한 반면, 22.5 km² 늘어난 밭지역의 토양손실량은 5395.4 ton/yr 증가하였다. 따라서, 산림지역은 1.1배의 면적감소에 대하여 1.2배의 토양손실량이 감소된 반면, 밭지역은 1.3배의 면적증가에 대하여 4.4배의 토양손실량의 증가를 보여 밭지역이 토양손실량 변화에 민감함을 확인할 수 있었고, 유역 전체의 토양손실량은 5.4 kg/m²/yr 로 증가하였다.

주요어 : 지리정보시스템, 원격탐사, 범용토양손실공식, 수치고도모텔

※본 연구는 2000년도 농림부 농림기술개발사업 연구비로 수행되었음.

※The authors thank RESTEC (Remote Sensing Technology Center of Japan) providing Landsat Images for research purpose.

* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 (Dept. of Rural Engineering, Konkuk University)

** 건국대학교 지역건설환경공학과 (Dept. of Rural Engineering, Konkuk University)

ABSTRACT : The purpose of this study is to estimate temporal soil loss change according to long-term land cover changes using GIS and RS. Revised USLE(Universal Soil Loss Equation) factors were prepared by using point rainfall data, DEM(Digital Elevation Model), soil map and land cover map. During the past two decades, land cover changes were traced by using Landsat MSS and TM data. As a result, forest area in 2000 has decreased 25.3 km² compared with that in 1990. Soil loss has decreased 3751.2 ton/yr. On the other hand, upland area has increased 22.5 km². Soil loss of upland has increased 5395.4 ton/yr. Therefore, soil loss in 2000 increased 6.3 kg/m²/yr compared with that in 1990. This was mainly caused by the increased upland area.

Keywords : GIS, RS, RUSLE, DEM, Landsat TM, MSS

1. 서 론

인간의 개발활동으로 인하여 자연적인 토지피복 및 식생, 토지이용형태의 변화가 일어나고 그로 인하여 과거 1차 생산 중심의 농업지역들이 공업 및 상업이 가미된 도시지역으로 발전하면서 토양손실량 및 그 이동 경로가 변화되고 침투유출이나 도달시간 등과 같은 여러 수문 환경이 변화하고, 환경문제로도 대두되고 있다. 이러한 변화에 따라서 환경기초시설 및 재해방지시설이 건설되고 있으나 세계적으로 범람과 토양손실은 아직까지 중요한 문제로 남아있는 실정이다.

토양손실량을 산정하고 예측하기 위해서는 그 지역의 강우 분포, 토양 종류, 지형 경사 등의 시·공간적인 다양한 인자들에 대한 정확한 정보를 획득하는 일이 선행되어야 하는데, 토지피복 상태의 경년변화를 나타내는 지역의 토양손실량을 예측하고 시·공간적인 토양손실 특성을

파악하기 위해서 모델링 기법이 널리 사용된다.

현재 이러한 목적으로 사용되고 있는 모형에는 USLE(Universal Soil Loss Equation), TRB(Transform Research Board), USDA-WEPP (Water Erosion Prediction Project), LISEM (Limurge Soil Erosion Model) 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 과거 농업지역에서 적용하던 USLE 모형을 유역범위에 적용할 수 있도록 개선한 모형인 RUSLE 침식모형을 사용하였다. USLE 모형은 농업지역의 토양손실량을 산정하기 위하여 Wischmeier와 Smith(1965)에 의해 처음 제안되었는데 이 모형이 개발될 당시 강우에 의한 토립자의 이탈 및 운송에 의한 개념을 기초로 하여 강우에 의한 침식성(R)에 보다 많은 연구가 집중되었다.⁹⁾ 이 모형은 경사가 완만하고 사면장이 짧은 지역에서는 활용성이 있으나, 우리나라와 같이 지형이 복잡한 지역에서는 USLE의 단점을 보완한 RUSLE가 적합한 모형이다.

Wischmeier(1971) 등은 토양침식성에 영향을 미치는 요소(토성, 유기물함량, 토양구조, 투수성)로부터 K 값을 정할 수 있는 계산도표(Nomograph)를 제시하였는데 한국 토양에 대한 적용성 검토 결과 타당한 것으로 보고된 바 있으며, Wischmeier(1978)는 LS 값을 산정하기 위하여 계산도표를 만들었다. Curran(1994) 등은 도시에서의 퇴적물 평가를 위하여 USLE를 적용하였으며, Mitasova(1998) 등은 GIS를 이용하여 토양손실 및 퇴적에 대한 다차원적인 모의를 수행하였다. 우(1998)는 GIS를 이용하여 단지개발지의 토양유실량 예측모델을 USLE의 L 인자를 중심으로 연구를 수행하여 토양유실에 영향을 주는 인자 중에서 L 인자를 프로그래밍에 의한 추출을 시도하여 우리나라에 적합한 L 인자를 추출한 바 있으며, 박(2001) 등은 개발지역에서의 토사발생규모에 대한 다양한 토양손실 모형의 적용성 연구하였으며, De Roo(2000)는 USLE 모형에 GIS를 연계하여 토양손실량 및 그 이동경로를 산정하는데 있어서, 기존의 LS 인자와 단위기여지역의 개념을 도입한 LS 인자와의 비교를 통하여 토양 손실량을 비교하고 유실 토양의 이동경로를 추정하였다. 이(2001) 등은 토양침식에 영향을 미치는 인자를 GIS 공간분석기법을 활용하여 추출하고자 하였으며, 박(2001) 등은 실무에서 적용 가능한 모형인 USLE, TRB, MUSLE, SLEMA, Morgan과 Finney 모형을 실 유역에서 토양유실량을 예측 비교하여 모형의 적용성을 검토한 결과 다른 모형에 비해 USLE 모형이 과대산정 된다고 지적하였다.

본 모형의 분포형 입력자료 구축을 위해서 공간적 분포에 있어서 GIS(Geographic Information System)를, 시간적 분포에 있어서 RS(Remote Sensing) 기법을 이용하였다. GIS는 공간적으로 분포되어 있는 유역의 데이터를 저장, 분석, 출력하는데 널리 사용되고 있으며, 특히 GIS의 중첩기능은 분포형 정보를 담고있는 여러 장의 주제도를 중첩하여 처리함으로써 유역의 특성을 분석할 수 있다. 또한 RS는 넓은 지역에 대한 시계열 분석이 용이하다는 장점을 이용하여 GIS와 함께 입력자료 구축을 위하여 많이 사용하고 있다.

본 연구는 안성천의 평택 수위관측소를 출구로 하는 유역에서 수년동안 토지피복 및 토지이용형태의 변화에 따른 토양침식 변화량을 RS 및 GIS 분석기법을 이용하여 산정하고, 토양침식에 지배적인 영향을 미치는 인자를 분석하고자 한다. 나아가 유실된 토양의 이동 경로에 분석하여 GIS와 RS를 이용한 모형의 적용성을 판단하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역의 개요

본 연구의 대상 유역으로는 경기도 안성을 중심으로 평택, 충청남도 천안에 걸쳐있다 (Fig. 1). 이 지역은 과거 20년 동안의 원격탐사 자료가 확보된 지역으로서, 상당부분의 개발 및 산업발전으로 인한 개발 전후의 토지피복 변화를 분석하고 이를 이용하여 토양유실량 변화를 평

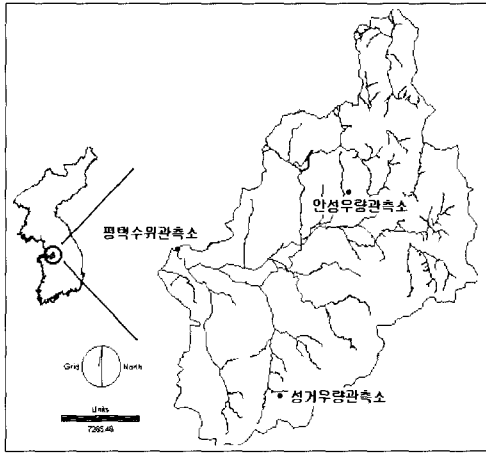


Fig. 1. An-Seong Watershed

가하기가 용이한 곳이다. 이러한 개발로 인하여 산림지역이나 농경지 등의 상당부분이 택지로 전환되는 등 토지이용의 변화가 현저하였다.

본 유역은 대권역 안성천 유역에 포함되며 평택수위관측소를 기준으로 한 유역을 대상으로 하였으며 유역면적은 582.93 km²이다.

2.2 강우자료

본 연구의 대상유역에는 안성관측소와 성거관측소가 있다. RUSLE의 강우침식능인자 (R)를 산정하기 위하여 사용된 강우자료는 1993년부터 2000년까지의 AWS (Automatic Weather System) 자료를 사용하였다.

2.3 토양도

토양침식성인자 (K)를 구하기 위해 사

용된 토양도는 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 사용하였다 (Fig. 2.).

2.4 DEM

모형의 입력자료들 중에 지형인자를 추출하기 위하여 환경부에서 구축한 1초 (≒27.8m) DEM (Digital Elevation Model) 자료를 사용하였으며, 이 DEM 자료를 30m로 resampling 하였다 (Fig. 3.).

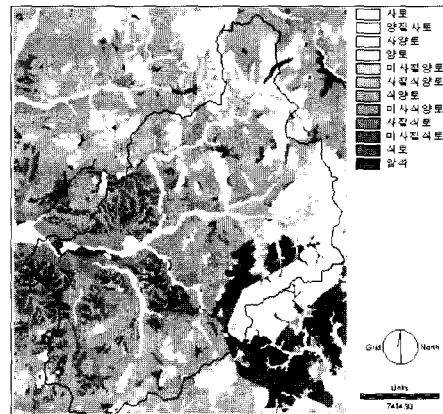


Fig. 2. Soil type map

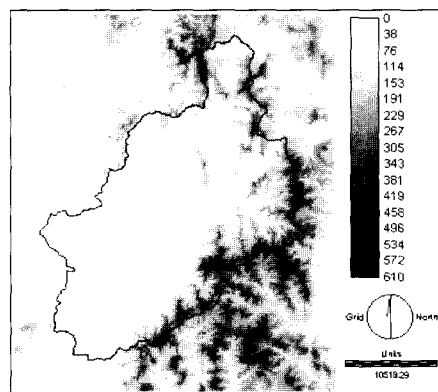


Fig. 3. DEM

2.5 토지피복도

식생피복인자 (C)를 구하기 위해서 인공위성 영상인 Landsat TM 및 MSS 영상으로부터 토지피복도를 추출하였다. 사용된 위성영상은 1983년도에 관측된 Landsat MSS 영상과 1990년 및 2000년도에 관측된 Landsat TM 영상이다. 이러한 영상들을 기하보정과 밴드구성 및 이미지 강조처리와 같은 전처리 과정을 수행한 후 최대우도법 (Maximum Likelihood Method)으로 토지피복분류를 실시하였다.

3. 모형의 적용

3.1 RUSLE 인자의 추출

1) 강우침식능인자 (R)

강우침식능 인자는 강우사상(Storm event) 별 빗방울에 의한 타격에너지와 강우의 운동에너지(Kinetic) 그리고 최대강우강도(Maximum 30-minute rainfall intensity)에 의해 결정되는 인자이며 다음 식으로 정의된다.

$$R = \frac{\sum E I_{30}}{100} \quad (1)$$

여기서, R = 강우침식능인자
 E = 강우에너지 ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{mm}$)
 I_{30} = 30분 최대 강우강도(mm/hr) 이다.

위 식에서 강우침식능인자는 연평균 침식능(Mean annual erosivity:)에 근거하여 계산되며, 이 계산은 강우가 떨어질 때의 힘, 즉 강우의 운동에너지와 30분 동안의 최대 강우강도의 곱으로 정의된다. 우리나라의 평균 R 값은 438인 것으로 조사되었다.

본 연구의 대상구역의 강우 관측소는 안성관측소와 성거관측소가 있으며, 1993년부터 2000년까지의 강우자료로부터 각 관측소의 연평균 강우량을 구한 후, 구역의 평균강우량을 산출하기 위하여 거리가중치의 평균(distance-weighted average)으로서 보간하는 방법인 surface interpolation을 실시하였다. 강우침식능인자를 산출하는 방법은 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 Toxopeus (1998)가 제안한 방정식을 사용하였다.

$$R = 3.85 + 0.35 \times P \quad (2)$$

여기서, R = 강우침식능인자
 P = 연평균 강우량 (mm/yr)이다.

2) 토양침식성인자 (K)

토양침식성인자는 어떤 토양의 고유한 침식성을 정량적으로 나타낸 것으로서 토양침식에 영향을 주는 모든 인자가 동일한 경우 토양특성에 따른 유실량의 차이를 말한다. 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도로서 미국 SCS (1975)에서 제안한 Table 1을 이용하여 K 값을 추출하였다.

Table 1. Soil erodibility factor, K

Texture class	Organic matter content		
	< 0.5%	2%	4%
	K	K	K
Sand	0.05	0.03	0.02
Find sand	0.16	0.14	0.10
Very fine sand	0.42	0.36	0.28
Loamy sand	0.12	0.10	0.08
Loamy fine sand	0.24	0.20	0.16
Loamy very fine sand	0.44	0.38	0.30
Sandy loam	0.27	0.24	0.19
Find sandy loam	0.35	0.30	0.24
Very find sandy loam	0.47	0.41	0.33
Loam	0.38	0.34	0.29
Silt loam	0.48	0.42	0.33
Silt	0.60	0.52	0.42
Sandy clay loam	0.27	0.25	0.21
Clay loam	0.28	0.25	0.21
Silty clay loam	0.37	0.32	0.26
Sandy clay	0.14	0.13	0.12
Silty clay	0.25	0.23	0.19
Clay	0.13-0.29		

* U.S. Soil Conservation Service

3) 지형인자 (LS)

도를 재분류하여 추출하였다.

지형인자는 경사장(L)과 경사도(S)인데, 경사장과 경사도에 따른 단위면적당 예상되는 토양유실의 비를 말하며, 지형인자를 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$LS = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m(0.065 + 0.045S + 0.0065S^2) \quad (3)$$

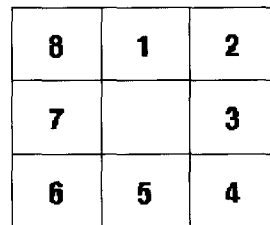


Fig. 4. Flow direction

LS 값을 계산하는 방정식에서 x는 사면장으로서 사용된 DEM 자료의 격자 크기가 30m이므로 USLE 흐름방향도 Fig. 4에 따라 1,3,5,7은 30m이고 2,4,6,8은 42.42m가 되며, 지수 m은 Table 2를 이용하여 경사

Table 2. Recommendation m value

경사도(S) 의 범위	지수 (m)
5% ≤ S	m=0.5
3% ≤ S < 5%	m=0.4
1% ≤ S < 3%	m=0.3
S < 1%	m=0.2

경사도는 DEM 자료를 이용하여 추출할 수 있고, 이렇게 산출된 각각의 레이어를 LS 방정식에 의해서 계산하여 LS 인자를 산출하였다.

4) 식생피복인자 (C)

식생피복인자는 강우, 토양, 지형조건이 동일한 경우에 특정한 식생피복상태에 따른 토양유실량과의 비로서 정의되는데, 지표면 식생의 피복상태, 종류, 생육정도 등의 복합적인 조건에 따른 토양유실량과의 정도를 나타내며, 원격탐사 자료에서 추출한 토지피복도를 재분류하여 추출하였다. 최대우도법에 의한 분류시 Landsat MSS(80m×80m)와 TM(30m×30m) 영상의 해상도 차이로 인하여 분류 항목 개수의 차이를 두었다. 따라서 1983년 영상의 경우는 산림, 도시, 논, 초지, 물로 교사자료를 선택하였으며 1990년과 2000년 영상의

경우는 산림, 도시, 논, 밭, 초지, 물, 모래 지역, 습지로 교사자료를 선택하여 분류하였고, 그 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다.

1983년의 영상에서는 밭과 모래지역 항목은 3개 이상의 픽셀을 포함하는 지역이 영상에 나타나지 않으므로 훈련지역을 획득할 수가 없으므로 밭과 초지 일부지역이 논으로 분류되는 오차가 있으나 유역의 대부분을 차지하는 산림 지역과 가장 많은 변화를 나타내는 도시지역이 토지피복 변화의 경향을 나타내고 있다 (Table 3).

이렇게 분류된 토지피복도를 식생피복인자로 재분류하는데 있어서 미국 토양보존국(1974-1975)이나 Wischmeier와 Smith (1978) 제안한 C 값을 적용하기에는 우리나라의 작물이나 피복상태에는 적합하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 신 (1999)등이 제시한 C 값을 고려하여 논은 0.30, 밭은 0.40, 산림은 0.10, 초지는 0.20,

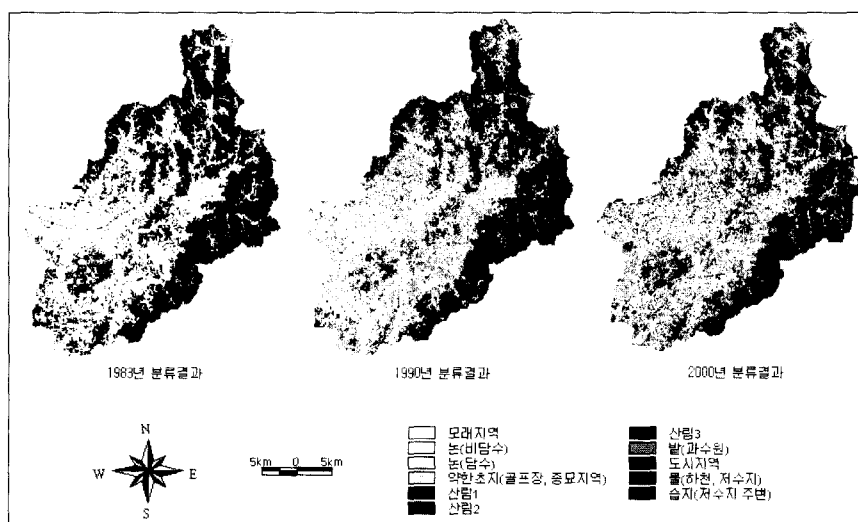


Fig. 5. The result of Land cover classification

Table 3. Land cover changes

분류년도	삼림	도시	논	초지	물	밭	모래지역	총면적
1983년	256.7	4.7	278.0	21.7	6.8	-	-	583.9
1990년	231.2	5.9	187.8	54.41	8.7	74.8	17.1	
2000년	205.9	33.0	202.2	28.9	6.0	97.3	8.7	

수계와 도시지역은 토양손실이 일어나는 요인이 없으므로 0으로 재분류하여 C 값을 추출하였다.

5) 침식조절방법인자 (P)

침식조절방법인자는 어떤 토양 보존대책을 수립한 사면의 상하방향 경사지로부터의 토양 유실과 아무런 대책도 세우지 않은 사면에 대한 토양 유실량의 비로 정의된다. 이 인자는 작물의 등고선 경작, 등경사 경작, 농경지의 조도 등의 효과가 토양침식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 도입된 무차원 인자이다. 이러한 영향을 정량화 하기 위해서는 Wischmeier(1978)가 제안한 도표를 이용하여 P 값을 추정한다.

우리나라의 경우 과수원은 주로 등고선을 따라 경작하므로 등고선 경작, 논은

대부분 계산식의 형태로 경작하므로 테라스공법에 속한다고 보고 DEM의 각 격자의 경사도에 따라서 P 값을 부여하였다. 그리고 산림지역과 같은 토양을 보존하기 위한 특별한 대책을 수립하지 않은 곳에 대해서는 1을 부여하였다.

3.2 토양손실량 산정

연도별 토양침식량의 분석을 위하여 추출된 RUSLE 각 인자인 R, K, L, S, C, P의 각 레이어를 곱하였다. RUSLE의 인자 중에서 R, K, L, S는 고정된 값을 적용하고 C, P는 각 연도별로 원격탐사 자료로부터 추출한 토지피복도를 이용하여 다른 값을 적용하였다.

위의 결과로서 볼 때, 1983년 영상자료는 Landsat MSS(80m×80m)이고 1990년과 2000년도의 영상자료는 Landsat TM(30m×

Table 4. Erosion control practice factor, P

Land Slope (%)	Contouring	Contour Strip cropping and Irrigated Furrows	Terracing
1-2	0.60	0.30	0.12
3-8	0.50	0.25	0.10
9-12	0.60	0.30	0.12
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
21-25	0.90	0.45	0.18

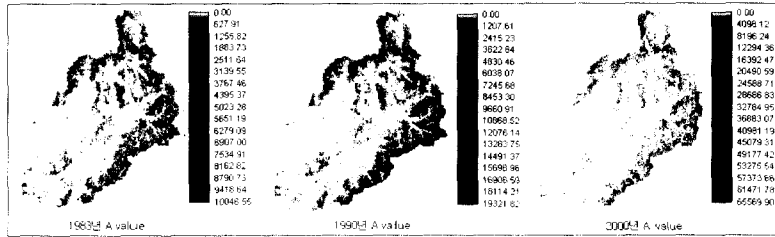


Fig. 6. A value (ton/ha/yr)

Table 5. Soil loss

	토양손실량 (kg/m ² /yr)
1983년	50.9
1990년	51.8
2000년	57.2

30m)이므로 토지피복 분류를 하는 과정에서 해상도의 차이로 인해 Table 3과 같이 분류항목의 차이가 발생하였다. 따라서 1983년 분류결과에서 밭 지역과 모래 지역 및 초지 지역이 다른 항목으로 분류되어 토양 손실량에 주된 영향을 미치는 산림 지역이 다른 연도보다 더 많으나 토양 손실량은 더 적게 산출이 되어 Landsat TM을 사용한 연도와 비교·분석에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

2000년도에는 1990년도의 토지피복분류 결과에서 산림지역이 줄어들고 도시지역이 현저하게 늘어나 토양손실은 줄어들 것으로 예상되었지만 2000년도 영상에서 분류된 논과 밭의 일부 지역이 LS factor가 최대값을 나타내는 지역에서 분류되어

2000년 논 지역의 면적은 1990년에 비하여 14.4km², 밭 지역의 면적은 12.5km²로 증가하였지만 토양 손실량은 각각 1664.4 ton/yr, 5395.4 ton/yr로 과대하게 산출되어 단위면적당 토양손실량은 6.3 kg/m²/yr로 늘어났다. 토양손실량의 변화에 주된 영향을 미치는 토지피복도를 RS data로부터 쉽게 획득할 수 있으나 토양손실량을 모의하는데 있어서 RS data의 활용성을 높이기 위해서는 일관성있는 분류가 먼저 실시되어야 한다고 사료된다.

3.3 유실토양의 이동 경로 추정

GIS를 이용한 USLE의 계산은 매우 간단하게 6개 인자에 대한 맵을 연산하므로

Table 6. Soil loss for each class

Class	Land cover (km ²)		Soil loss (ton/yr)	
	'90	'2000	'90	'2000
Forest	231.2	205.9	23,689.0	19,937.8
Paddy	187.8	202.2	3,818.5	5,482.9
Grass	54.4	28.9	862.2	709.4
Upland crops	74.8	97.3	1,608.0	7,003.4
Sand zone	17.1	8.7	194.2	206.6
Water	8.7	6.0	0.0	0.0
Urban	5.9	33.0	0.0	0.0
Total	583.9	583.9	30,171.9	33,340.1

서 간단하게 계산이 되고, 이런 연산은 대부분의 GIS의 기본적인 기능이다 (De Roo, 1998). 단지 사면장을 계산하는 것만이 GIS의 발전된 기능이라 할 수 있다. Bork와 Hensel (1988)은 넓은 지역에 걸쳐 토양침식량을 산정하기 위하여 GIS USLE를 적용하였지만 이 GIS USLE는 유역범위에서 사용할 수 있도록 개발되지는 않았다. Ferri와 Minacapilli(1995)는 유역으로부터 침식을 예측할 수 있도록 퇴적운반 기간을 USLE에 첨가하였다.

USLE 모형의 모든 인자를 고려할 때, 특히 LS 인자에 있어서 경사장보다 토양손실에 기여하는 지역(contributing area)이 LS 인자를 결정하는 키 포인트이다 (Moore et al., 1993; Desmet and Govers 1996). GIS의 적용에 있어서 이런 요소들이 계산되기 때문에 USLE는 지속적으로 토양손실뿐만 아니라 손실에 의한 퇴사의 이동경로를 추정하는 최적화된 모델로서 개발되고 있다.

LS 인자를 산정하는 과정은 Moore (1993) 등에 의해서 제안되었다.

$$LS = (n+1) \left[\frac{A_s}{22.13} \right] \cdot n \left[\frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^m \quad (4)$$

여기서, LS = 사면장 요소

n = 계수 (0.4)

β = DEM으로부터 추출되는
경사도 (degrees)

m = 계수(1.3)

A_s = 단위기여지역(unit
contributing area) (m^2/m)
이다.

처음 USLE 모형이 개발될 당시 Wischmeier 제안한 LS 인자는 사면장과 경사도(%)의 상관관계를 표준포의 실험에 의해서 만들어진 도표를 이용하여 산정 하였지만 Moore (1993) 가 LS 인자를 산정하기 위해 제안한 식의 가장 중요한 관점은 단위기여지역의 개념을 도입하였다는 것이다. 단위기여지역을 DEM에서 추출하는 방법은 PCRaster Version 2 소프트웨어에서 간단한 조작을 통하여 추출할 수 있지만 그 방법은 다음과 같다.

대상 유역의 DEM에서 흐름방향(Flowdirection)도를 추출하여 하나의 격자에서 유실된 토사가 유출되는 방향을 결정한 후, 이 흐름방향도를 이용하여 흐름누적(Flowaccumulation)도를 추출하여 하나의 격자에 영향을 주는 격자의 개수를 결정한다. 이렇게 계산된 격자의 개수에 한 격자의 면적을 곱한 다음 한 격자의 길이로 나누어 단위기여지역을 추출할 수 있고, DEM으로부터 추출한 단위지역과 경사도 (degree)이용하여 LS 인자를 추출할 수 있다.

LS 레이어는 침식 취약 가능지구를 판단하는데 사용되며 LS 인자를 사용하여 개발된 USLE는 넓은 면적의 유역 범위에서의 사용이 가능하여 졌다. 하지만 USLE가 결코 정확한 퇴적량을 예측하는 것이 아니라는 것은 반드시 인식하여야 한다. 특별히 계곡의 바닥에서는 가끔씩 과대한 LS 값이 계산되어지고 심각한 퇴적이 일어날 수 있다. 또한, USLE는 세류 침식을 예측하기 위한 모형이므로 일시적으로 많은 양의 유출이 발생하는 협곡이나 계곡 침식은 예측하기가 곤란하다.

Moore (1992, 1993) 등은 대상지구의

DEM을 이용하여 작성되는 토양침식취약 지구를 판단하기 위해 사용되는 적절한 지수들을 제안하였다.

1) 습윤지수 (Wetness Index)

습윤지수는 토양수분 함유량의 공간적인 패턴을 판단하는 자료로서 사용되며 (Beven and Kirkby, 1979) 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\text{Wetness} = \ln \frac{A_s}{S} \quad (5)$$

여기서, A_s = 단위기여지역(m^2/m)
 S = 경사도 (m/m)($\tan \beta=S$) 이다.

안성천 유역에서의 습윤 지수 분포를 나타낸 결과 DEM에서 주위의 고도보다 현저하게 낮은 부분, 즉 계곡의 하상부분은 높은 습윤 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 습윤 지수는 유역의 하천 경로를 규명하는데 사용될 수 있고 co-Kriging과 같은 공간 보간법에 사용되는 점 자료, 즉 토양수분측정지점과 함께 변수로서 사용되기도 한다.

2) 하천강도지수(Stream power index)

하천강도지수는 집중 유출에 의한 침식을 나타내는 몇 개의 지수들 중에 가장 기본이 되는 것이다 (Moore, 1992).

$$\Omega = A_s \cdot S \quad (6)$$

여기서, Ω = 하천강도 (stream power)

A_s = 단위기여지역(m^2/m)

S = 경사도 (m/m)($\tan \beta=S$) 이다.

하천강도지수는 토양종류 및 토지이용 (K and C factor)과 결합하여 하천유출에 의한 토양손실 위험을 나타내는 훌륭한 지표가 될 수 있다.

3) 퇴적운송능지수 (Sediment transport capacity index)

Moore (1992) 등은 유역의 경사를 고려하여 손실된 토사의 거동을 판단할 수 있는 지수를 개발하였으며 이 지수의 의미하는 바는 하천 강도 지수와 매우 비슷하다고 할 수 있다.

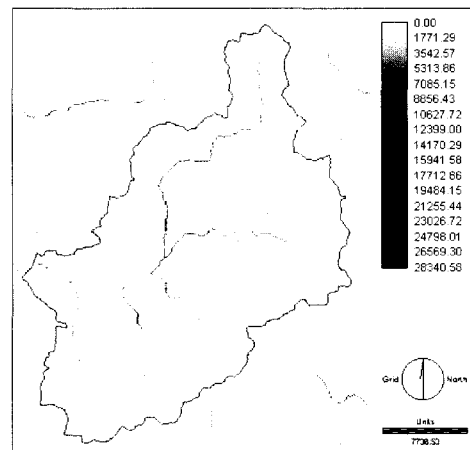


Fig. 7. Sediment transport capacity index

$$\tau = \left[\frac{A_s}{22.13} \right]^{0.6} \cdot \left[\frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (7)$$

여기서, τ = 퇴적운송능지수
 A_s = 단위기여지역(m^2/m)
 β = 경사도 (degrees).

주향 및 흐름 방향, 공간 배수 방향 등은 공간적인 요소가 포함되지 않는다면 활용성 있는 자료가 되지 못할 것이다. 밭에서의 일반적인 유출 및 토사의 이동 방향과 그 경로는 경작하는 방향에 따라 변화된다. 이것은 토양 거칠기, 경작 방향, 지형적인 흐름 방향 이 세 가지에 의존한다. 따라서 경작 형태와 같은 농업적인 요인이 표면 유출의 유형을 결정한다는 것을 의미한다. 유출 및 토양손실 평가는 여러 모델에서 다르게 계산될 수 있고, 따라서 GIS에 의해 계산되어진 최적화된 배수 유형으로서 토양손실 모의가 수행되어야 한다고 사료된다.

또한, RUSLE의 개발로 인하여 포장단위에서 유역단위의 토양손실 모의가 가능하게 되었지만 유역전체의 연평균 토양손실량 뿐만 아니라 유실토양의 거동에 대한 알고리즘을 개발하여 강우사상에 대하여 유역 출구에서의 정량화된 토양손실량을 예측할 수 있는 모형의 개발이 이루어져야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 모형의 입력자료는 GIS를 이용하여 지형정보자료를 구축하였으며, 위성영상자료인 Landsat TM과 MSS 영상을 이용

하여 RS 기법을 이용한 토지피복분류를 실시하였다. 1983년 영상의 분류결과와 2000년 영상의 분류결과는 현저한 차이를 나타내었는데 산림지역은 50.8km² 감소, 도시지역은 28.3km² 증가, 논 지역은 75.8km² 감소한 것으로 나타났다. 물 지역은 0.8km² 감소를 보이는데 이는 저수지의 저수량의 차이라고 판단되며, 밭과 모래지역은 TM (30m×30m)과 MSS (80m×80m) 영상의 해상도 차이로 인하여 1983년 영상에서는 분류가 되지 않았다.

2. R 인자를 구축하기 위한 유역평균강우량을 산정하는데 있어서 산술평균법이나 티센법과 같은 지점강우에 의한 평균강우가 아닌 거리가중평균법(distance-weighted average)으로서 보간하는 방법인 surface interpolation을 실시하여 공간강우로서 유역평균강우량을 산정하였다. 따라서 티센법을 이용하여 추출한 강우친식인자의 경계면에서 발생했던 과대오차를 최소화하여 보다 현실성을 고려하였다.

3. 1983년의 Landsat MSS 영상은 저 해상도의 영상이므로 밭 지역이 분류가 되지 않았지만, 1990년과 2000년 영상에서 분류한 밭 지역의 면적과 토양손실량을 비교하여 보면 다른 분류 항목에 비하여 밭 지역이 토양손실량에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 안성천 유역과 같이 밭 지역이 산림지역 내에 산재에 있는 유역에서는 보다 고 해상도의 영상으로서 정확한

밭 지역의 분류가 먼저 수행되어야 한다고 판단된다.

4. 우리나라와 같이 복잡한 토지이용과 지형에서 GIS 및 RS를 이용하여 RUSLE 토양손실량을 예측하는 연구는 정량적으로 검증되지 못한 상태이다. 실제 토양손실량은 지형인자 즉, L과 S 값에 따라 크게 변화할 수 있으므로 관측자료를 이용한 인자들의 적절한 보정이 필요하다고 판단된다.
5. 토양손실량을 산정하는데 있어서 분포형 침식모델링을 수행하기 위하여 GIS 공간분석기법을 이용하고 시간적인 분석을 위해서 RS 분석기법을 적용하여 그 활용성을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 박무종, 김양수, 2001, 개발지역에서의 토사발생규모와 모형의 적용성 연구, 한국수자원학회논문집, 34(1): 3-18.
2. 이근상, 류성곤, 김지은, 장영률, 2001, GIS 공간분석기법을 활용한 토양침식 잠재성 평가, 한국 GIS 학회 학술대회 논문집, 59-73.
3. Bork, H. R. and Hensel, H. 1998, Computer-aided construction of soil erosion and deposition maps, Geol. Jahr., A104: 357-371.
4. De Roo, A. P. J., 2000, Modelling runoff and sediment transport in catchment using GIS, In Hydrological Applications of GIS, (eds) Gurnell, A. M. and Montgomery, D. R., 2000, John Wiley and Sons, 85-101.
5. Desmet, P. J. J. and Govers, G., 1996, A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, J. of Soil and Water Conservation, 515: 427-433.
6. Ferri, V. and Minacapilli, M., 1995, Sediment delivery processes at the basin scale, Hydrol. Sci. J., 40: 703-717.
7. Jensen, J. R., 2000, Remote Sensing of the Environment, Prentice Hall.
8. Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. C., 1980, Soil Erosion, John Wiley and Sons.
9. Ludwig, B., Daroussin, J., King, D. and Souchere, V., 1996, Using GIS to predict concentrated flow erosion in cultivated catchments, IAHS Publ., 235: 429-436.
10. Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A. and Peterson, G. A., 1992, Terrain analysis for soil-specific crop management, In Soil Specific Crop Management: A Workshop on Research and Development Issues, Minnesota Extension Service, Univ. of Minnesota (Agriculture), Minneapolis, 23.
11. Moore, I. D., Turner, A. K., Wilson, J. P., Jenson, S. K. and Band, L. E., 1993, Gis and land-surface-subsurface process modeling, Environmental modeling with GIS, 213-230.
12. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1965, Predicting rainfall Erosion Losses from Cropland East of Rocky Mountain, USDA Agr. Handbook, 282.
13. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1971, A Soil Erodibility Nomograph for

- Farmland and Construction Sites, *J. of Soil and Water Conservation*, 26: 189-193.
14. Wischmeier, W. H., 1976, Use and Misuse of The Universal Soil Loss Equation, *J. of soil and Water Conservation*, 31(1): 5-9.
15. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1978, Predicting rainfall erosion losses, *USDA Agriculture Handbook*, 537.