

# 토지자원관리를 위한 낙동강 유역의 잠재적 토양유실량 산정

오정학 · 정성관\*

국립산림과학원 산림생태과 · \*경북대학교 조경학과

## Potential Soil Loss Prediction for Land Resource Management in the Nakdong River Basin

Oh, Jeong-Hak · Jung, Sung-Gwan\*

*Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute*

*\*Department of Landscape Architecture, Kyungpook National University*

**ABSTRACT** : The purpose of this study is to analyze the potential soil loss and hazard zone by the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE) for preservation and management of land resources which is the base of ecosystem, and to grasp the relationship between RUSLE factors in the Nakdong River Basin. All thematic maps used in RUSLE are constructed through GIS and spatial analysis method derived from digital topographic maps, detailed soil maps, land-cover maps, and mean annual precipitation of 30 years collected respectively from National Geographic Information Institute, National Institute of Agricultural Science and Technology, and Ministry of Environment. The slope length of LS-factor that takes much times by the study area's wideness was calculated automatically through AML(Arc Macro Language) program developed by Van Remortel *et al.*(2001, 2003). The results are as follows; First, according to the soil loss estimation by the RUSLE, it shows that approximately 82% of the study area have relatively lower possibility of soil loss which is the 1 ton/ha in annual soil loss. While, 9.4% (2,228km<sup>2</sup>) needed intensive and continuous management for soil loss. Because the amount of their annual soil loss was greater than 10 ton/ha that is optimum level suggested by Morgan(1995). For these areas, the author believe that a new approach which can minimize environmental impacts from soil loss through improvement of cultivation process and buffer forest zone should be applied. Second, according to the relationship between the RUSLE factors, topographical(LS-factor) and cover management(C-factor) conditions have a lot of influence on soil loss in case of the Nakdong River Basin. However, because of RUSLE factor's influence that affect to soil loss might be different based on the variety of spatial hierarchy and extent, it is necessary to analyze and evaluate factor's relationship in terms of spatial hierarchy and extent through field observations and further studies.

**Key words** : GIS, Land resource management, Nakdong river basin, RUSLE, Soil loss, Watershed management

### 1. 서론

식생이 자라는 바탕이 되는 토양은 다양한 생태계의 장으로서 뿐만 아니라 산림 및 물순환을 건전하게 유지시켜 주는 기반이 된다고 할 수 있다. 특히, 토양의 표토는 중요한 자원으로 인식되고 있는데, 토양유실의 잠재력이 높은 곳은 수질 악화뿐만 아니라 주변생태계의 변화에도 영향을 미치므로 생태계를 평가하는 중요

한 요소라고 할 수 있다(환경부, 2001).

물론, 자연계에서의 토양은 생성과 침식이 동시에 발생하고 있으나, 자연적으로 발생하는 토양유실 이상의 인위적인 영향으로 인해 가속화된 토양유실은 경제적으로 작물 생산성을 감소시키고, 환경적으로는 수질 및 대기질과 관련된 자연생태계에 있어서 토양의 조절 능력을 저하시킴으로서 여러 문제들을 발생시키게 된다(이환주와 김환기, 2001, Cooper, 2001, 장영률 등, 2002, Arriaga와 Lowery, 2005).

그러나, 지금까지 우리나라에서 토양과 관련된 제도 및 보전 정책들은 토양의 오염원 조사와 오염토양의

Corresponding author : Jung, Sung-Gwan  
Tel : 053-950-5783  
E-mail : sgjung@knu.ac.kr

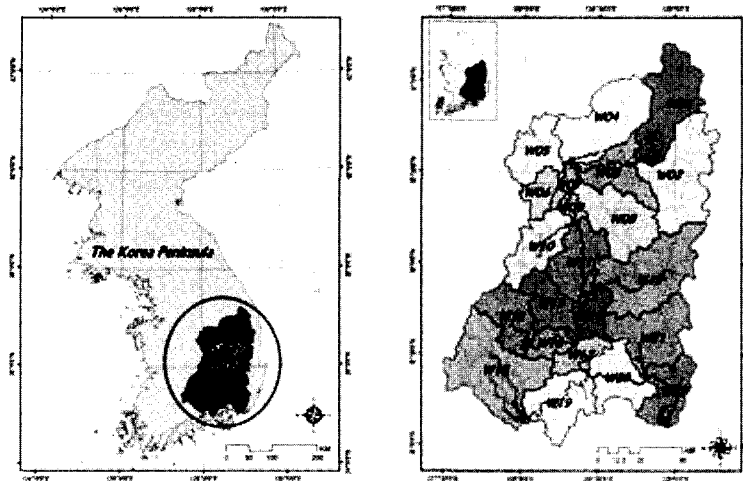


그림 1. Geographical location of the study area

사후처리에 집중되었기 때문에 토양유실 방지를 위한 장치의 필요성이 대두되고 있으며(환경부, 2001), 토양유실의 발생가능성과 정도 및 규모 등을 사전에 예측하고 분석하는 것은 토양을 기반으로 하는 생태계 관리에 있어 상당히 중요한 부분이라 할 수 있다(양인태 등, 2003).

이를 위해 국내·외에서 많은 연구자들이 GIS(Geographic Information System) 및 다양한 예측 공식을 통해 토양유실의 위험도나 정도를 공간적으로 평가하고 있는데, 국외에서는 Ryan 등(2003)이 호주의 효율적인 산림관리를 위한 토지평가방법의 일환으로 토양침식 위험도 평가 체계 구축에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Shi 등(2004)은 중국을 대상으로 유역차원의 토양보전계획을 수립하기 위하여 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)와 GIS기법을 활용하였으며, Fu 등(2005)은 농업지역의 경작형태에 따른 토양유실량과 유출토사량을 RUSLE 모형을 통해 유역단위에서 분석하였다.

우리나라에서도 이규성(1994)이 산림유역에서의 임지의 변화가 토양침식에 미치는 영향을 USLE(Universal Soil Loss Equation) 모형을 통해 분석하였으며, 정영상 등(1999)은 물에 의한 침식을 예측하기 위한 USLE 적용에 있어서 강수인자와 토양인자 및 지피인자 산정과 그 적용성을 검토하였다. 또한, 박경훈(2003)은 금호강 유역을 대상으로 토지이용별 토양침식위험도를 RUSLE 공식을 통해 분석하였고, 이민부 등(2003)은 비접근지역인 북한 회령지역을 대상으로 RS(Remote Sensing) 및 RUSLE 모형을 통해 농경지 변화에 따른 토양유실량을 추정하였다.

한편, 이근상 등(2001), 이환주와 김환기(2001) 및 장

영률 등(2002)은 토양유실예측공식을 적용한 토양유실량 분석과정에서 유역분석에 적용하기 유리하도록 Toxopeus(1996)가 제안한 강우인자와 Desmet와 Govers (1996)가 제안한 식을 이용하여 침식사면을 22.13m의 격자로 변환한 래스터(raster) 기반으로 토양침식인자를 구하기도 하였다.

이와 같이 토양유실 예측 및 환경평가에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있지만, 오늘날 토양유실로 발생되는 환경문제는 일정지역에서의 문제뿐만 아니라 넓은 지역에 걸쳐 광범위하게 일어남에도 불구하고, 지금까지의 연구는 데이터 수집 및 주제도 생성에 대한 공간적·시간적 제약으로 인해 광역적인 지역에서의 연구는 부족한 실정이라 사료된다.

이에 본 연구에서는 낙동강 유역 전체를 대상으로 GIS 및 공간분석기법을 활용하여 분석에 필요한 주제도를 구축한 후, 토양유실량 예측모형인 RUSLE을 이용한 잠재적인 토양유실량을 예측함으로써, 향후 다양한 공간적 범위 및 환경조건에 따른 토양유실방지 및 표토보전에 대해 체계적이고 단계적인 정책을 추진하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 대상지역 및 연구방법

### 1. 연구대상지 개요

본 연구의 공간적 범위인 낙동강 유역은 동경 127°29'26" ~ 129°17'48", 북위 34°59'32" ~ 37°13'19"사이인 남한의 남동부에 위치하며, 대구광역시, 부산광역시 및 울산광역시의 3개 광역시와 강원도, 경상남·북도, 전라남·북도 등 5개 도의 19개 시, 22개 군에 걸쳐 있는 지역이다(그림 1).

표 1. Land-cover types and topographical conditions of each watershed

ID	Watershed name	Area(km <sup>2</sup> )	Land-cover types(km <sup>2</sup> )						Topography	
			Urban	Agriculture	Forest	Grass	Barren	Water	Elevation(m)	Slope(°)
W01	Andong dam	1,628.7	24.3	202.5	1,329.8	6.7	16.0	49.4	548.3	20.6
W02	Imha dam	1,975.8	31.0	297.9	1,572.7	9.1	14.7	50.4	387.5	20.1
W03	Lower andong dam	980.4	34.0	251.7	646.8	8.0	11.2	28.7	209.9	14.9
W04	Naesungcheon	1,816.1	62.3	554.1	1,135.9	15.2	17.7	30.9	320.4	14.9
W05	Yeunggang	914.4	26.1	167.1	691.7	6.2	10.5	12.8	335.4	19.2
W06	Byeongsungcheon	433.1	18.6	149.7	250.6	2.8	3.5	7.9	173.0	12.3
W07	Nakdong-sangju	224.1	7.6	84.9	114.5	1.6	6.1	9.4	133.4	10.9
W08	Wicheon	1,406.0	38.5	357.4	959.2	9.3	8.3	33.3	212.5	15.1
W09	Nakdong-gumi	179.2	4.7	47.7	109.6	0.7	6.7	9.8	147.1	12.1
W10	Gamcheon	1,005.3	37.6	284.7	647.9	7.6	15.0	12.5	280.9	15.5
W11	Nakdong-waegon	1,106.2	82.3	308.9	634.2	12.0	32.3	36.5	150.0	12.7
W12	Geumhogang	2,092.4	178.6	456.3	1,329.2	33.4	34.2	60.7	236.0	14.9
W13	Hoecheon	781.7	20.4	145.7	585.2	5.3	8.4	16.7	348.9	17.9
W14	Nakdong-goryung	548.0	65.3	142.3	290.9	9.3	14.2	26.0	141.8	13.1
W15	Hapcheon dam	928.9	23.8	207.2	658.9	4.3	12.0	22.7	501.6	17.4
W16	Hwanggang	387.2	11.6	90.9	260.5	3.2	5.7	15.3	149.6	15.8
W17	Nakdong-changnyeong	473.3	15.9	140.1	283.1	7.4	5.6	21.2	142.8	15.4
W18	Namgang dam	2,293.4	54.4	452.8	1,685.8	23.6	23.0	53.8	425.6	18.0
W19	Namgang	1,185.1	64.6	369.0	688.9	12.3	9.3	41.0	110.5	14.5
W20	Nakdong-miryang	1,004.7	62.2	379.4	485.3	12.7	18.9	46.2	122.3	13.1
W21	Miryanggang	1,422.3	41.9	302.6	1,012.2	12.7	17.0	35.9	319.2	19.6
W22	Nakdong barrage	915.8	100.5	207.1	510.1	21.0	28.1	49.0	187.6	15.2
Total		23,702.1	1,006.2	5,600.0	15,883.0	224.4	318.4	670.1	292.1	16.4

\*Measurement of all variables was calculated from land-cover map constructed by Ministry of Environment

낙동강 유역 면적은 남한의 약 1/4에 해당하는 23,702.1 km<sup>2</sup>로, 22개의 중권역 및 191개의 표준유역으로 구성<sup>1)</sup>되어 있으며, 주요지천 중 행정구역상 전라북도 및 경상남도의 9개 시·군에 걸쳐 있는 남강댐 유역(W18)이 2,293km<sup>2</sup>(9.7%)로 가장 넓고, 낙동구미 유역(W09)은 179.2 km<sup>2</sup>로 가장 적은 유역 면적을 가지고 있다<표 1>.

낙동강은 인구 약 1,000만 명에게 식수와 공업용수를, 4~9월까지는 주로 농업용수를 공급하는 수자원의 원천이지만, 유역 내 총 인구의 66% 정도가 낙동강 중·상류에 집중되어 있으며, 대구, 구미, 진주 등지에 산업단지가 위치해 있어 수질오염에 그대로 노출되어 있다. 또한 낙동강 본류 연안에 위치한 시·군의 논 면적이 전체 유역 내 논 면적의 49%에 달하여 과도한 시비로 인한 수질오염의 가능성이 농후한 지역이다(이창희 등, 1999).

1) 본 연구에 사용된 유역경계는 한국수자원공사에서 1998년 정보화근로사업의 일환으로 국가지리정보시스템(National Geographic Information System: NGIS)을 활용하여 전국을 대상으로 대권역, 중권역, 표준유역의 단계로 구축한 수자원단위지도(2002년 변경)를 기준으로 하였다.

## 2. 연구의 과정 및 방법

대상지역의 토양조건, 피복조건 및 환경조건 등과 같은 복합적 요소에 의해 지배되는 토양유실량의 정확한 예측은 현재까지의 수준에서 어려운 과제라고 할 수 있어 통계적이고 기본적인 접근방법을 토대로 한 여러 예측공식들이 개발되어 이용되고 있다.

이러한 통계적인 방법을 이용하여 토양유실량을 산정하는 모형에는 USLE, TRB(Transport Research Board), USDA-WEPP(Water Erosion Prediction Project) 등 여러 가지가 있으나(박무종과 김양수, 2001), 본 연구에서는 Renard 등(1997)이 과거 농업지역에서 적용하던 USLE 모형을 유역에 적용할 수 있도록 개선한 RUSLE 모형을 활용하여 낙동강 유역의 토양유실량(ton/ha/yr)을 예측하였으며, 이를 위한 산출공식은 아래와 같다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

여기서, A : 토양유실량(ton/ha/yr), R : 강우침식인자,

K : 토양침식인자, LS : 지형인자(경사도-경사 길이), C : 식생피복인자, P : 침식조절인자

RUSLE 모형을 많이 사용하는 이유는 계절별 피복조건 및 다양한 침식조절기법의 영향을 고려할 수 있으며, 다른 모형에 비해 토양유실량 산정결과의 신뢰성이 뛰어나기 때문이다. 또한, 원격탐사 자료를 효과적으로 조합하여 사용할 수 있으며, GIS와 같은 자료처리시스템에서 필요로 하는 자료의 호환성을 생각할 때 많은 장점을 가지고 있기 때문이다(국립방재연구소, 1998, Mill-

ward와 Mersey, 1999, 이환주와 김환기, 2001, Fernandez 등, 2003).

낙동강 유역과 같은 광역적 공간규모에서 RUSLE 모형의 적용을 위해서는 강우침식인자를 비롯한 5개 인자에 대한 공간 및 속성자료를 수집하고, 이를 통합적으로 분석하는 데에는 상당한 시간과 노력이 요구된다(박경훈, 2003). 따라서 본 연구에서는 공간모델링과 광역환경의 해석 및 분석을 위해 많이 활용되고 있는 GIS 기법을 활용하여 RUSLE 인자에 대한 주제도를 동일한 해상도(30m×30m resolution)의 래스터 자료로 구축

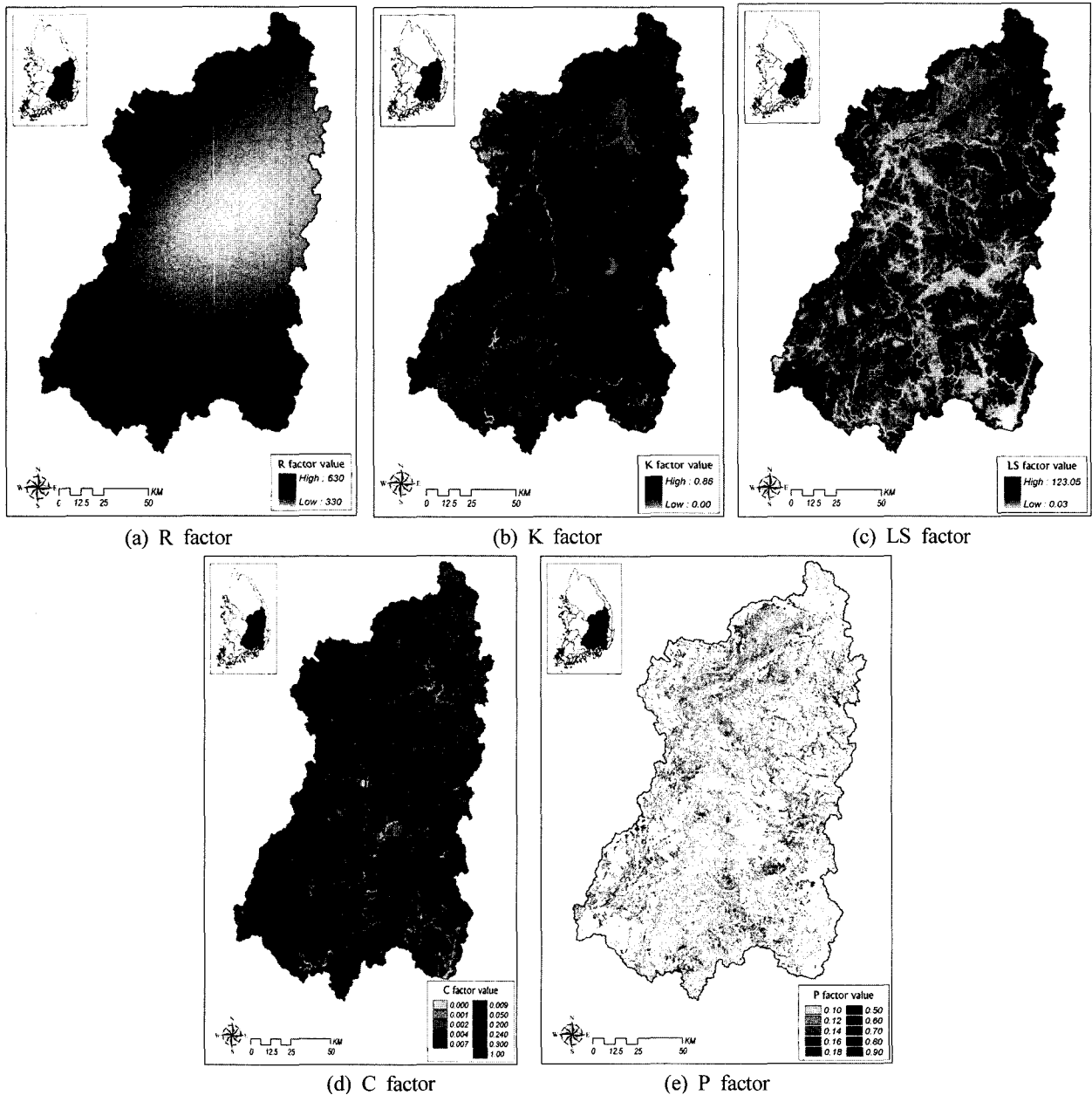


그림 2. Thematic maps of RUSLE factors

하였다. 최종적으로 GRID 모듈의 중첩기능을 응용하여 대상지의 토양유실량을 산정하였으며, 주제도 생성 및 분석, RUSLE의 계산과 결과의 디스플레이를 위한 일련의 과정은 ArcGIS 8.3 프로그램을 사용하였다.

### III. 분석 및 고찰

#### 1. RUSLE 인자별 주제도 작성 및 영향분석

##### 가. R factor

대상지역의 토양유실량 산정을 위한 RUSLE 모형의 인자별 주제도를 생성한 결과는 그림 2와 같다. 먼저, 강우침식인자(R)는 연평균 강우의 침식능력으로 강우의 시간적인 분포와 특성으로부터 얻어지는데, 월평균강우량을 근거로 한 산술평균법, 면적-형태 가중법, Thiessen 다각형법, 면적-고도 가중법 등이 있다(박종영 등, 2000). 이들 방법들 중 기존에는 Thiessen망을 활용하여 강우분포를 추정하였으나, 경계면에서 강우값이 급격히 변화한다는 측면에서 연속적인 강우특성을 효과적으로 반영하지 못한다는 단점을 가지고 있다.

즉, 자연현상에서 강우분포는 특정경계 부분에서 변화하는 형태가 아닌 점진적인 변화양상을 보이므로, 본 연구에서는 연속적인 강우분포 특성을 효과적으로 표현하기 위해 1971년부터 2000년까지 제주도와 울릉도를 제외한 전국 63개 기상관측소에서 측정된 강우자료를 토대로 공간내삽기법을 활용하여 강우분포자료를 구축하였다. 구축된 강우분포자료를 토대로 Toxopeus (1996)가 개발한  $R = 3.85 + 0.35 \times P$ (연평균강우량, mm/yr)를 이용하여 분석에 필요한 R인자를 추출하였다(이근상 등, 2001, 장영률 등, 2002, 김주훈 등, 2003, 이민부 등, 2003).

##### 나. K factor

토양침식인자(K)는 토양이 강우에 의한 유실에 대해 저항하는 능력을 나타내는 인자로서, K값이 높을수록 극세사(very fine sand)와 미사(silt)의 함량이 높음을 의미한다. 반대로 극세사와 미사의 함량이 낮아지면 점토(clay)의 함량이 높아지기 때문에 토양구조가 발달하여 토양유실이 적게 일어나게 된다. 또한 토양 내 투수성이 높아지면 발생하는 유거수가 적기 때문에 토양유실이 떨어지게 된다(장갑수, 2004).

본 연구에서는 국립방재연구소에서 제시한 토양통별 K값을 농업과학기술원에서 제작한 수치정밀토양도(1:25,000)의 속성값으로 입력하여 그림 2(b)와 같이 토양 침식인자에 대한 주제도를 생성하였다.

표 2. The area and proportion of each category of K-factor values

K-value	Area(km <sup>2</sup> )	Rate(%)
0~0.14	1,806.1	7.6
0.15~0.30	14,901.5	62.9
0.30~0.45	5,859.2	24.7
0.45~0.60	1,019.2	4.3
0.60~0.86	116.1	0.5

대상지의 K값에 따른 점유면적과 비율을 살펴보면 <표 2>, 0.14 이하의 값을 가지는 지역이 전체면적의 7.6%에 해당하는 1,806km<sup>2</sup>로 나타났다. 다음으로 0.15~0.30의 범위가 63%(14,902km<sup>2</sup>)로 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 0.60 이상으로 가장 높은 범위에 속하는 지역은 전체면적의 0.5%(116km<sup>2</sup>) 정도에 해당하는 면적분포를 보이는 것으로 나타났다.

유역별로 살펴보면, 낙동강 상류의 안동댐 유역(W01)의 K값이 가장 낮아 토양의 보수력이 가장 높게 나타난 반면, 낙동강 하류에 위치한 낙동밀양(W20), 밀양강(W21) 및 낙동강 하구인 유역(W22)의 경우 K값이 0.3을 넘는 것으로 분석되어 토양유실의 위험성이 상대적으로 높게 나타났다. 향후 이들 지역에 대해서는 현장 조사를 통해 토양개량제 등을 이용한 토양의 입단화를 촉진하여 토양의 투수성과 보수력을 증가시켜 토양유실에 대한 영향을 감소시켜야 할 것으로 판단된다.

##### 다. LS factor

지형인자(LS)는 침식사면의 길이인자(L)와 경사인자(S)가 토양유실에 미치는 영향을 설명하는 인자로서, 래스터 형태의 DEM(Digital Elevation Model)을 활용하면 길이인자는 각 화소의 크기를 22.13m로 하였을 때 그에 따른 사면길이의 비를 말한다(Fu 등, 2005).

본 연구에서는 지형인자 특히 경사길이를 자동적으로 계산하기 위하여 ArcGIS Workstation의 AML(Arc Macro Language) 기능을 활용하였으며, Van Remortel 등(2001, 2003)에 의해 개발된 코드를 적용하여 분석하였다(그림 2(c)). 분석결과를 표 3에서 살펴보면, LS값이 10 이하인 경우가 전체 면적의 70%에 해당하는 16,510km<sup>2</sup>로서 대부분을 차지하고 있으며, 이들 지역의 평균경사도는 12.1°, 경사길이는 63.2m의 완만한 지형조건을 가진 것으로 나타났다. 반면, LS값이 40 이상으로 가장 높은 범주에 해당하는 지역의 경우에는 평균경사도가 32.2°, 경사길이는 493.9m로서 지형적 특성에 따라 토양유실의 위험성이 다른 지역에 비해 상대적으로 높다고 할 수 있다.

표 3. Distribution patterns of LS-factor values

LS-value	Slope steepness(°)	Slope length(m)	Area(km <sup>2</sup> )	Rate(%)
< 10	12.1	63.2	16,510.1	69.6
10~20	25.3	138.8	5,542.3	23.4
20~30	29.3	227.3	1,366.2	5.8
30~40	31.0	336.6	241.6	1.0
40 <	32.2	493.9	41.9	0.2

표 4. C-factor values according to land use types

Land-cover types		C-Value	Area(km <sup>2</sup> )	Rate(%)
Level I	Level II			
Forest	Broad-leaved forest	0.009	3,303.5	13.9
	Coniferous forest	0.004	6,961.6	29.4
	Mixed forest	0.007	5,617.9	23.7
Agriculture	Field	0.240	1,798.8	7.6
	Paddy	0.300	2,899.2	12.2
	Orchard	0.200	633.0	2.7
	House, others	0.000	269.0	1.1
Grass	Natural grass, golf course, others	0.050	224.4	1.0
Urban	Residential area	0.002	574.0	2.4
	Commercial area	0.001	54.0	0.2
	Industrial area	0.000	117.3	0.5
	Traffic area	0.000	260.9	1.1
Barren	Mining area, others	1.000	318.4	1.4
Water	Wetland	0.000	173.0	0.7
	Water	0.000	497.1	2.1

일반적으로 경사지역에서는 침식작용이 심하여 미세한 입자가 유실되고, 비교적 거친 입자만 남아서 토양생성이 평지보다 늦어지고 토심이 얇게 된다. 따라서, LS값이 높게 나타난 지역에 도로건설이나 택지개발, 경지정리 등의 개발사업이 시행될 경우, 지형적인 조건을 충분히 반영하여 환경영향평가서에 제시된 절·성토고의 범위 및 고·저의 적정성을 검토한 후, 적절한 사면처리 계획 및 표토 보전대책 등을 수립하여 토양유실을 최소화하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

**라. C factor**

식생피복인자(C)는 토지피복에 따른 토양유실량의 비율로서 정의되는데, 본 연구에서는 경작지 및 식생유형에 따른 영향을 반영하기 위해 환경부에서 제작한 중분류 토지피복지도<sup>2)</sup>를 사용하였으며, 관련문헌을 토대

2) 본 연구에서 사용된 중분류 토지피복지도(1:25,000)는 환경부에서 IRS-1C 위성영상을 이용하여 대분류 분류항목(7개)을 주거지역, 공업지역, 상업지역, 교통지역 등 23개 분류항목으로

로 토지피복별 C값<표 4>을 부여하여 분석에 필요한 주제도를 생성하였다<그림 2(d)>.

분석결과를 살펴보면, C값이 가장 높은 토지피복유형인 나지의 경우는 전체 면적의 1.4%에 해당하는 318 km<sup>2</sup>로 나타났으며, 다음으로 높은 C값을 보이는 밭은 전체면적의 약 12.2%에 해당하는 2,899km<sup>2</sup>의 면적분포를 보이는 것으로 나타났다.

한편, 침식방지 효과가 큰 산림피복의 경우 침엽수림의 C값이 0.004로서 전체면적의 6,962km<sup>2</sup>의 면적을 차지하고 있는 것을 나타냈다. 다음으로 혼효림의 경우 C값이 0.007, 활엽수림의 C값은 0.009로서 각각 23.7%, 13.9%에 해당하는 5,618km<sup>2</sup>, 3,304km<sup>2</sup>의 면적분포를 보이는 것으로 나타났다.

대상지역의 토지피복상태만을 고려하여 살펴보면, 토양침식의 발생가능성이 다른 토지피복상태보다 상대적으로 높은 농경지와 나지 면적이 전체면적의 24.7%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 이들 지역에 대해서는 주변의 토지이용상태와 지형, 강우 등의 다른 인자들을 고려한 토사유출 및 침식방지를 위한 대책수립 및 인근 하천으로의 토사유입을 최대한 차단해야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 또한, 토양침식방지 효과가 높다고 밝혀져 있는 식생의 경우에는 시간과 계절에 따라 생육상태가 달라지기 때문에 토양유실량에도 변화가 발생하게 되므로, 향후에는 계절적 요인을 반영할 수 있는 연구도 함께 이루어질 필요성이 있다.

**마. P factor**

마지막으로, 침식조절인자(P)는 경사별 농경지의 경작형태에 따른 토양침식의 영향을 평가하기 위한 인자로서, 계단식 경작(terracing), 등고선 경작(contouring), 등경사 경작(contour strip cropping) 등의 형태에 따라서 지표의 침식유형이 달라진다(권형중 등, 2002). 우리나라의 경우에는 밭과 과수원은 주로 등고선을 따라 경작하므로 등고선 경작, 논은 대부분 계단식의 형태로 경작하므로 테라스 공법에 속한다고 할 수 있다(이민부 등, 2003). 이러한 기준에 따라 농경지를 경작형태에 따라 분류한 후, 국립방재연구소(1998)에서 제시한 경사도별 P값을 기준으로 분석하였다<표 5, 그림 2(e)>.

침식조절인자의 분석결과를 살펴보면, P값이 0.10으로 가장 작은 지역은 경사도 3~9%에 분포하면서 계단식 경작형태를 보이는 농경지로 가장 높은 면적 점유

세분화한 것으로 5m급의 지상해상도를 가지고 있다(<http://ngis.me.go.kr>).

표 5. P-factor values according to slope and tillage pattern

Slope(%)	Cropland practices	P-value	Area(km <sup>2</sup> )	Rate(%)
1 - 3	Terracing	0.12	610.3	11.4
	Contouring	0.60	179.5	3.4
3 - 9	Terracing	0.10	1133.6	21.3
	Contouring	0.50	500.8	9.4
9 - 13	Terracing	0.12	355.4	6.7
	Contouring	0.60	309.1	5.8
13 - 17	Terracing	0.14	242.8	4.5
	Contouring	0.70	299.5	5.6
17 - 21	Terracing	0.16	173.7	3.3
	Contouring	0.80	273.8	5.1
21 <	Terracing	0.18	383.4	7.2
	Contouring	0.90	869.1	16.3

율(21.3%, 1,133.6km<sup>2</sup>)을 보이는 것으로 나타났다. 반면, 경사도 17~21%에 분포하면서 계단식 경작형태를 보이는 농경지가 전체면적의 약 3.3%(173.7km<sup>2</sup>)로 가장 낮은 면적 점유율을 보이는 것으로 나타났다.

한편, 토양유실의 가능성이 가장 높은 유형인 경사도 21% 이상의 등고선 경작형태를 가지는 농경지의 면적이 869km<sup>2</sup>(16.3%)로서, 2번째로 높은 점유율을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 향후 이들 지역의 경우에는 지형의 형태를 고려한 경작형태의 개선 등을 통해 토양유실에 대한 위험성을 저감시킬 수 있는 방안이 고려될 필요성이 있을 것으로 판단된다.

유역단위로 살펴보면, 안동댐(W01)과 임하댐 유역(W02)은 농경지의 면적율(12.4%, 15.1%)이 상대적으로 낮지만, 토양유실의 잠재적인 위험성을 내포하고 있는

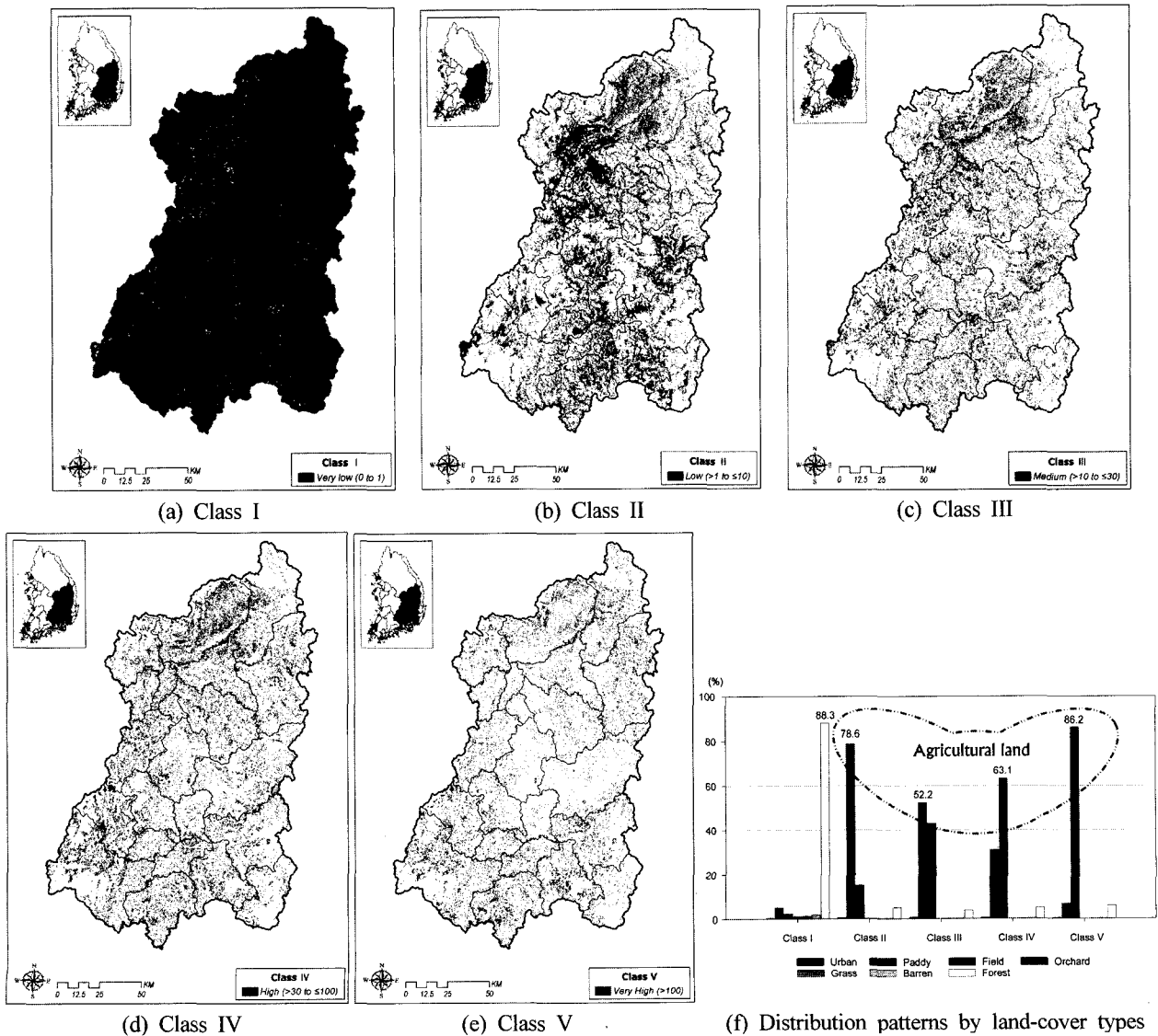


그림 3. Distribution patterns of potential soil loss

표 6. Distribution of the potential soil loss of each category

Category	Soil loss(ton/ha/yr)	Area(km <sup>2</sup> )	Rate(%)
Class I	< 1	19,564.6	82.5
Class II	1 - 10	1,909.1	8.1
Class III	10 - 30	806.4	3.4
Class IV	30 - 100	808.0	3.4
Class V	100 <	614.0	2.6

경사지에 분포하는 농경지(Rattan, 2000)의 비율(86.1%, 72.3%)이 상대적으로 높아 P값이 높게 나왔다. 반면, 다른 유역에 비해 경사가 상대적으로 완만한 낙동구미 유역(W09, 12.1°)과 병성천 유역(W6, 12.3°) 등이 비교적 낮은 P값을 보이는 것으로 분석되었다.

## 2. 낙동강 유역의 잠재적 토양유실량 산정

낙동강 유역에 있어서 토양유실량 예측공식인 RUSLE 적용을 위해 구축된 5개 인자들은 30m×30m의 격자형 자료형태를 가지며, 최종적인 연평균 토양유실량(ton/ha/yr)은 ArcGIS 8.3의 GRID 모듈을 이용하여 산출되었다. 산출된 토양유실량을 시각적인 구분이 용이하도록 표 6 및 그림 3과 같이 5개 등급으로 범주화하여 표현하였다.

토양유실량 분류등급별 분포특성을 살펴보면, 유실량이 1ton/ha/yr 이하로 가장 낮은 Class I은 전체면적의 약 83%에 해당하는 19,565km<sup>2</sup>로 나타났다. 구체적인 토지피복패턴은 그림 3에서 보는 바와 같이 산림지역이 88%, 논·밭 등의 농경지가 8% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다. Class II는 전체면적의 8.1%를 차지하는 1,909km<sup>2</sup>로서, 논이 전체 등급면적의 78% 이상을 차지하는 등 농경지가 94%의 면적분포율을 보이는 것으로 나타났다. Class III은 전체면적의 3.4%에 해당하는 806km<sup>2</sup>로 금호강 유역(W12)을 중심으로 한 낙동강 중류지역에 집중적으로 분포하고 있는 것으로 나타났는데, 토지이용패턴은 논이 50% 이상으로 가장 많은 면적분포를 보이고 있으며, 그 다음으로 밭이 43% 정도를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

다음으로 Class IV는 연평균 토양유실량이 30ton/ha 이상인 지역으로 점유면적은 전체면적의 3.4%에 해당하는 808km<sup>2</sup>로 회천(W13)과 낙동창녕 유역(W17)을 중심으로 한 낙동강 하류지역에 집중적으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 공간적인 토지이용패턴은 63% 정도가 밭으로 구성되어 있고, 31%는 논으로 구성되어 있으며, 대부분이 경사지에 분포하고 있는 것으로 분석되었다. 마지막으로 연평균 토양유실량이 100ton/ha 이상으로 가장 높은 Class V는 전체면적의 약 2.6%에 해당하는 614km<sup>2</sup>로 나타났으며, 이들 지역은 남강댐(W18),

임하댐(W02), 내성천 유역(W04)에 상당량이 분포하고 있는 것으로 분석되었다. 공간적 토지이용패턴은 밭이 86%를 차지하는 것으로 나타났으며, 안동댐 하류 유역(W03)에 집중적으로 분포하는 것으로 분석되었다.

한편, Morgan(1995)은 토양유실량 10ton/ha/yr을 농업 전문가들이 관심을 가져야 할 적정수준이라고 주장하였다. 이를 기준으로 낙동강 유역의 토양유실량과 비교하면, 그 이상인 지역이 2,228.4km<sup>2</sup>이고, 토지이용패턴은 논이 25%, 밭이 49%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

유역별로 살펴보면, 연평균 토양유실량이 10ton/ha 이상인 지역의 면적율이 가장 낮은 유역은 낙동강 하구 연 유역(W22)으로 5.5%의 값을 보이는 것으로 나타나 토양유실에 대한 잠재적 위험도가 다른 유역에 비해 낮게 나타났다. 이와는 반대로 내성천 유역(W04)은 연평균 토양유실량이 10ton/ha 이상인 지역의 면적율이 14.3%로 토양유실의 잠재적 위험도가 비교적 높게 나타났으며, 다음으로 합천댐(W15), 낙동밀양(W20), 남강(W19), 감천 유역(W10)이 11% 정도의 비율을 가지는 것으로 나타났다.

이들 지역에 대해서는 향후 현장검증 작업을 토대로 한 작부체계의 변경, 수변 식생대의 조성 및 친환경적 농업정책 등을 통해 토양유실에 따른 지역생태계의 환경영향을 최소화할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 그 예로서, 토양유실의 가능성이 높은 밭과 과수원 등에서는 초생재배를 통하여 지표면을 나지로 방지하는 것이 아니라 콩과식물, 사료식물 등의 지피식물을 식재함으로써 지표면에서 발생할 수 있는 토양유실을 저감시킬 뿐만 아니라 주변경관과의 개선효과도 예상할 수 있다(장갑수, 2004).

## 3. 토양유실량에 대한 인자들의 영향평가

다음으로, 낙동강 유역에 있어서 RUSLE 인자들(R, K, LS, C, P-factor)이 토양유실량에 미치는 상대적인 영향을 파악하기 위해 22개 중권역별로 산출된 각 인자별 평균값을 토대로 Person의 상관분석을 실시하였다 <표 7>.

상관분석결과를 살펴보면, RUSLE에 의한 잠재적 토양유실량과 식생피복인자(C)와는 부(-)적인 상관관계를 보였으며, 침식조절인자(P)와는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 반면, 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 지형인자(LS)와는 유의수준 0.05 이내에서 정(+)적인 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 지형인자와 식생피복인자가 토양유실에 있어 중요한 인자로 작용하는 것으로 분석되었다<그림 4>.



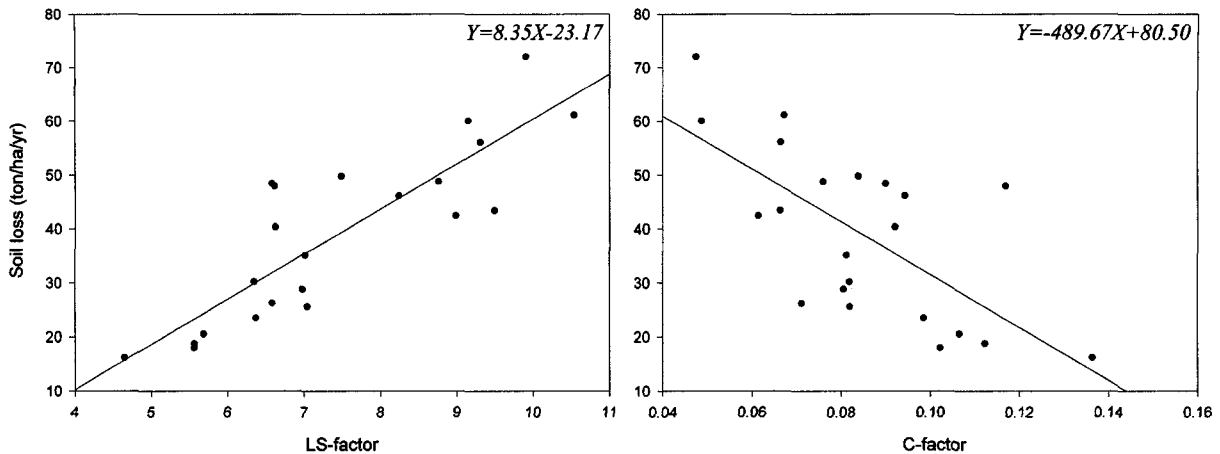


그림 4. Relationship between potential soil loss and RUSLE factors

표 7. Correlation coefficient between the potential soil loss and RUSLE factors

Factor	R	K	LS	C	P
Soil loss	0.468*	0.676**	0.851**	-0.679**	-0.105

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

이러한 측면을 고려해 볼 때, 농경지, 도시지역, 산림 등 토지이용 패턴에 따른 적절한 침식조절기법의 선택과 지형인자 등의 다른 인자들을 함께 고려한 토사유출 및 유실방지에 대한 대책을 수립하여야 할 것이다. 예를 들면, 농업지역에서는 농경지의 토양내에 축적된 비료 등의 화학물질이 토사와 함께 인근 하천으로 직접 유입되는 것을 방지하기 위한 적정 폭의 수변구역 설정을 필요성이 있다고 사료된다. 또한, 공간적 범위에 따라 토양유실에 미치는 인자의 영향정도가 달라질 수 있으므로 향후에는 다른 대권역 및 중권역과 표준유역에 확대·적용하여 공간적 위계 뿐만 아니라 지역의 환경특성에 부합하는 영향인자의 관련성을 파악하는 연구도 병행되어야 할 것이다.

#### IV. 결론

본 연구는 생태계의 기반이라고 할 수 있는 토지자원의 보전 및 관리를 위해 낙동강 유역을 대상으로 RUSLE 모형을 이용하여 잠재적인 토양유실량과 유역별 토양유실 위험도 및 인자간 상호관련성을 분석하였으며, 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저, RUSLE 모형의 5개 인자들에 대한 주제도는 기상청의 기상관측데이터와 1:25,000 축척의 수치지형도, 수치정밀토양도, 토지피복지도 194도엽을 GIS 및

공간분석기법을 활용하여 구축하였으며, 대상지역의 광역성으로 인해 상당한 시간이 소요되는 지형인자의 경사길이는 AML 프로그램을 활용하여 자동적으로 계산하였다. 구축된 주제도는 토양유실량 분석에 있어 인자별 영향정도를 파악할 수 있을 뿐 아니라, 국토계획 및 도시계획 등 각종 공간계획을 수립함에 있어 공통주제도로 매우 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

RUSLE 모형에 의한 토양유실량 분석결과를 살펴보면, 토양유실량 1ton/ha/yr 이하로 유실의 위험도가 낮은 지역은 전체 대상지역의 82% 이상을 차지하는 것으로 나타났으며, 대부분 산림 또는 불투수성 포장재로 피복된 도시지역으로 나타났다. 이에 반해, 토양유실량이 10ton/ha/yr 이상으로 토양보전대책이 요구되는 지역은 전체 대상지의 9.4%(2,228.4km<sup>2</sup>)로 대부분 논·밭 등의 농경지에 해당하는 것으로 분석되었다. 특히, 토양유실량이 100ton/ha/yr 이상으로 토양유실의 위험성이 매우 높은 지역은 발농사 중심의 농경지가 차지하는 것으로 나타나, 향후 철저한 현장조사를 토대로 급경사지 또는 하천에 인접하여 분포하는 지역에 대해서는 경작방법의 개선, 친환경농업의 적용 및 완충수립대의 조성 등과 같은 대책을 통해 토양유실에 따른 환경영향을 최소화할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

유역별 토양유실 위험도를 평가한 결과에 따르면, 내성천(W04), 합천댐(W15), 낙동밀양(W20), 남강 유역(W19) 등에서 연평균 토양유실량 10ton/ha 이상인 지역의 면적율이 11% 이상으로 잠재적 위험도가 비교적 높게 나타났다. 이들 지역에 있어서는 토양유실로 야기될 수 있는 토양자체의 생산력 감소뿐만 아니라 하류부의 수질 악화, 홍수·침수 유발 및 서식지 소멸 등과 같은 생태계의 부정적인 영향을 최소화할 수 있는 계획수립을 위해 주기적인 모니터링을 수행할 필요성이 있다고

판단된다.

RUSLE 인자별 관련성을 분석한 결과, 낙동강 유역을 대상으로 한 토양유실량 분석에서는 지형적인 요소(LS) 및 나지 및 농경지와 같은 토지피복 요소(C)가 토양유실에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 공간적 범위에 따라 토양유실에 미치는 인자의 영향정도가 달라질 수 있으므로 향후에는 다양한 범위의 유역에 확대·적용하여 공간적 위계에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

향후, 본 연구에서 분석된 토양유실의 잠재적 위험도가 높은 지역에 대해 현장조사를 통한 정확한 검증 및 사후평가가 이루어진다면, 경지정리, 도로건설 및 택지개발 등 각종 개발사업으로 야기될 수 있는 인위적인 환경변화를 사전에 예측하여 장·단기적인 토지자원관리대책을 수립하는데 있어 기초자료로서 그 활용가능성이 높을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 국립방재연구소, 1998, 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I)
2. 권형중, 박근애, 김성준, 2002, GIS 및 다시기 RS자료를 이용한 토양손실량 변화 및 이동경로 추정, 한국GIS학회지 10(1) : 139-152
3. 김주훈, 김경탁, 연구방, 2003, GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석, 한국지리정보학회지 6(2) : 22-32
4. 박경훈, 2003, GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식위험도 평가, 한국지리정보학회지 6(4) : 24-36
5. 박무중, 김양수, 2001, 개발지역에서의 토사발생규모와 모형의 적용성 연구, 한국수자원학회지 34(1) : 3-17
6. 박종영, 이정식, 이재준, 전병국, 2000, 중소하천유역에서 유역평균강우량 산정방법의 비교, 대한토목학회 학술발표회 논문집(III) 87-90
7. 양인태, 박재훈, 천기선, 2003, 산불발생지역에서의 토양유실량에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지 11(2) : 11-16
8. 이규성, 1994, 산림유역의 토양유실량 예측을 위한 지리정보시스템의 범용토양유실식(USLE)에의 적용, 한국임학회지 83(3) : 322-330
9. 이근상, 이환주, 임승현, 조기성, 2001, GIS를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의 영향분석, 대한토목학회지 21(4-D) : 545-554
10. 이민부, 김남신, 강철성, 신근하, 최한성, 한옥, 2003, 북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식 추정, 한국지역지리학회지 9(3) : 373-384
11. 이창희, 이병국, 최지용, 김은정, 1999, 물자원의 효율적 이용을 위한 유역 관리 방안: 낙동강 수계 관리를 중심으로, 한국환경정책평가연구원
12. 이환주, 김환기, 2001, GIS 공간분석을 활용한 토양침식모형의 입력인자 추출에 관한 연구, 한국측량학회지 19(1) : 27-37
13. 장갑수, 2004, 지속가능한 농촌경관자원 관리를 위한 토지평가, 경북대학교 박사학위논문
14. 장영률, 이근상, 조기성, 2002, GIS 기반에서 토양침식의 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구, 한국GIS학회지 10(2) : 301-316
15. 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의, 1999, 강원도 경사지 토양유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수인자와 토양침식성인자의 검토, 한국토양비료학회지 32(1) : 31-38
16. 환경부, 2001, 표토보전 및 침식(유실)방지 대책에 관한 연구
17. Arriaga, F.J. and B. Lowery, 2005, Spatial distribution of carbon over and eroded landscape in southwest Wisconsin, Soil and Tillage Research 81(2) : 155-162
18. Cooper, T., 2001. Soil science lecture notes: USLE and soil erosion, University of Minnesota
19. Desmet, P.J.J. and G. Govers, 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) : 427-433
20. Fernandez, C., J.Q. Wu, D.K. McCool, and C.O. Stökle, 2003, Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD, Journal of Soil and Water Conservation 58(3) : 128-136
21. Fu, G., S. Chen, and D. K. McCool, 2005, Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS, Soil and Tillage Research(In press)
22. Millward, A.A. and J.E. Mersey, 1999, Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed, CATENA 38(2) : 109-129
23. Morgan, R.P.C., 1995, Soil Erosion and Conservation, Longman
24. Rattan, L., 2000, Integrated watershed management in the global ecosystem, CRC Press, New York, USA
25. Renard, K. G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder, 1997, Predicting Soil Erosion by

- Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE), USDA-Agriculture Handbook, No. 703
26. Ryan, P.J., S. Murphy, and N.J. McKenzie, 2003, Assessing soil erosion hazard for Australian forest management, Forest and Wood Products Research and Development Corporation
  27. Shi, Z.H., C.F. Cai, S.W. Ding, T.W. Wang, and T.L. Chow, 2004, Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in Three Gorge Area of China, CATENA 55(1) : 33-48
  28. Toxopeus, A.G., 1996, ISM: An Interactive Spatial and Temporal Modelling System as a Tool in Ecosystem Management, Ph.D. Thesis, ITC
  29. Van Remortel, R.D., M. Hamilton, and R. Hickey, 2001, Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of DEM elevation data, Cartography 30(1) : 27-35
  30. Van Remortel, R.D., R.W. Maichl, and R.J. Hickey, 2003, Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation model data using C++ executable, Computers and Geosciences 30(9-10) : 1043-1053