

연구논문

토양 및 지형 조건에 따른 토양침식 잠재성 분석
- 경상남도 창원군 이방면을 대상으로 -

박인환* · 장갑수** · 이근상*** · 서동조****

경북대학교 농업생명과학대학 조경학과*, 충남발전연구원 환경생태연구부**,
한국수자원공사 수자원연구원***, 서울디지털대학교 컴퓨터공학부****

(2005년 11월 9일 접수, 2005년 12월 27일 승인)

Analysis of Soil Erodibility Potential Depending on
Soil and Topographic Condition

- A Case Study of Ibang-myeon, Changnyeong-gun, Kyungsangnam-do, South Korea-

Park, In-Hwan* · Jang, Gab-Sue** · Lee, Geun-Sang*** · Seo, Dong-Jo****

Dept. of Landscape Architecture, Coll. of Agr. & Life, Kyungpook National University*,
Dept. of Environmental and Ecological Research, Chungnam Development Institute**,
Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation***,
Dept. of Computer Engineering, Seoul Digital University****

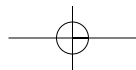
(Manuscript received 9 November 2005; accepted 27 December 2005)

Abstract

Changes in the soil physical property and the topographic condition derived from agricultural activities like as farming activities, land clearance and cutting down resulted in environmental and economic problems including the outflow of nutrient from farms and the water pollution. Several theories on the soil conservation have been developed and reviewed to protect soil erosion in the regions having a high risk of erosion. This study was done using the USLE model developed by Wischmeier and Smith (1978), and model for the slope length and steepness made by Desmet and Govers (1996), and Nearing (1997) to evaluate the potential of the soil erodibility. Therefore, several results were obtained as follows.

First, factors affecting the soil erosion based on the USLE could be extracted to examine the erosion potential in farms. Soil erodibility (K), slope length (L), and slope steepness (S) were used as main factors in the USLE in consideration of the soil, not by the land use or land cover.

Corresponding Author: Jang, Gab-Sue, Dept. of Environmental and Ecological Research, Chungnam Development Institute, 138-42 SangDae-Dong, YuSeong-Gu, DaeJeon 305-313, Korea Tel: 82-42-820-1182 Fax: 82-42-820-1129 E-mail: janggs@cdi.re.kr



Second, the soil erodibility increased in paddy soils where it is low in soil content, and the very fine sandy loam exists. Analysis of the slope length showed that the value of a flat ground was 1, and the maximum value was 9.17 appearing on the steep mountain. Soil erodibility showed positive relationship to a slope.

Third, the potential soil erodibility index (PSEI) showed that it is high in the PSEI of the areas of steep upland and orchard on the slope of mountainous region around Dokjigol mountain, Dunji mountain, and Deummit mountain. And the PSEI in the same land cover was different depending on the slope rather than on the physical properties in soil.

Forth, the analysis of land suitability in soil erosion explained that study area had 3,672.35ha showing the suitable land, 390.88ha for the proper land, and 216.54ha for the unsuitable land. For unsuitable land, 8.71ha and 6.29ha were shown in fallow uplands and single cropping uplands, respectively.

Key words : Soil physical property, Topographic condition, soil erodibility potential, Spatial analysis

1. 서 론

토양침식이란 바람이나 유수에 의해 지각을 이루는 토양에서 토립자가 지표면으로부터 이완, 분리 및 이송되는 일련의 자연적인 과정이다. 토양침식과정은 3가지 큰 주제인 에너지, 저항 그리고 보호로 요약할 수 있다(Hudson, 1997). 토양침식에 영향을 주는 강우유출 에너지가 토립자 표면에 주어질 경우 토양은 다양한 형태의 물리화학적 특성을 가지고 침식 작용에 저항하게 된다. 그러나 토양 자체가 가지고 있는 침식 저항력은 상대적으로 작기 때문에 강우에너지로부터 농경지의 토양을 효과적으로 보호하기 위해서는 식생 등의 피복을 보강해 주는 일련의 노력이 필요하게 된다. 만약, 인간의 인위적 토지이용으로 인해 토양을 덮고 있는 피복이 제거된다면, 그 피복의 특성에 따라 토양 보호능력이 떨어지거나 비록 토양을 보호하더라도 그 재료가 고정되기 전에는 토양이 보호받지 못하므로 강우 등의 외부 에너지에 의해 토양침식이 발생하게 되며, 결국 단위지역 내 토지이용의 변화 및 특성에 따라 토양침식은 농경지 양분유출, 수질오염 등 경제적·환경적 문제점을 야기할 수 있다.

강우나 물의 유출에 의한 토양침식은 농업생산성을 떨어뜨리고 목초지를 손상시키며, 물의 흐름을 방

해하는 등 각종 환경적인 문제를 야기하는데(이환주 등, 2001; 장영률 등, 2002), 특히 경사지 농경지에서는 많은 양의 강우가 단시간에 내려 농경지에 영향을 주기 때문에(현병근 등, 2002), 강수량이 여름철에 집중되어 있는 우리나라 기후에서는 피할 수 없는 고유특성이면서, 경사지 농업활동의 주요 제한점 중 하나로 인식되어 왔다.

일반적으로 흙이 1cm 생성되는데 소요되는 기간은 약 200~300년 걸리지만, 우리나라 경사지 밭토양의 경우 그 1cm 표토가 유실되는데 소요되는 기간은 3~4년 걸리는 것으로 알려져 있다(정필균, 2002). 이와 같이 농경활동, 개간 및 벌목 등 인간활동으로 인해 쉽게 훼손될 수 있는 토양은 복원에 상당한 시간과 어려움이 따르므로 유역 혹은 농업지역의 환경보전 측면에서 침식발생의 잠재하는 지역을 중심으로 그에 대한 보전대책이 요구된다.

토지이용 면에서 제한인자(limitation factors) 중의 하나인 토양침식 방지를 위해, Neal은 경사와 강우강도에 따른 토양침식 관계식을 최초로 설정하였고, 이 후로 각 요인들을 고려한 다양한 형태의 토양 유실량 예측공식을 개발하였다(최진규 등, 1998). 특히 Wischmeier(1957)는 포장시험 결과로부터 강우인자를 구함에 있어 30분 최대강우강도가 상관성이 높음을 밝혔고, 1956년에는 Musgrave와 Browning 등

의 개념을 조합하여 토양유실예측공식(Universal Soil Loss Equation: USLE)을 개발하였다 (Wischmeier et al., 1978). 우리나라에서는 정필균 등(1983)이 기상청의 전국 69개 측후소 및 관측소의 9년 간 강우자료를 분석하여 강우인자를 추정함으로써 USLE 모델에 적용 가능하도록 강우인자 추정식을 계산하였다. 또한 정영상 등(1999)은 물에 의한 침식을 예측하기 위해 강우 인자와 토양인자 그리고 지피인자 산정과 그 적용성을 검토한 바 있으며, 정강호 등(2004)은 전국 토양유실량을 평가하고 침식 위험지역 분석을 위하여 수치정밀토양도를 활용한 USLE 인자값을 산정한 바 있다. 한편, 이근상 등(2001), 장영률 등(2002) 및 이환주 등(2001)은 토양유실예측공식을 적용한 토양유실량 분석과정에서 유역분석에 적용하기 유리하도록 Toxopeus가 제안한 강우인자와 Desmet과 Govers(1996) 및 Nearing(1997)이 제안한 식을 이용하여 침식사면을 래스터(raster) 기반으로 변환하여 토양침식인자를 구한 바 있다.

이상의 연구에서, 정필균(1983) 및 정강호 등(2004)의 연구는 우리나라 여건에 가장 적합하다고 할 수 있지만, 토양 및 지형조건에 대한 경험치를 인자값으로 적용하였기 때문에 지리정보시스템

(Geographic Information System: GIS)을 활용하여 공간분석을 할 경우 직접 활용이 곤란한 경우가 있으며, 뿐만 아니라 좁은 공간에서의 지형조건을 모두 반영할 수 없어 국지지형에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 정강호 등이 제안한 토양침식성인자와 Desmet · Govers 및 Nearing이 제안한 지형 및 경사인자를 GIS 기반에서 분석함으로써 국지지형 농경지에 대한 토양침식 잠재성을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구를 수행하기 위해 선정된 경남 창녕군 이방면은 46,57km²의 면적을 가지고 있으며, 창녕읍 및 남지읍을 제외하면 관할 읍·면 중 가장 큰 면적을 소유하고 있고, 총 1,373가구 중 약 90.75%인 1,246가구가 농업을 주업(主業)으로 하는 전형적인 농업지역이다(창녕군, 2002; 그림 1). 토지이용 면에서 논은 578ha이고 밭은 657ha이며, 이들 대부분이 낙동강 본류와 인접하여 풍부한 농업용수의 확보가 가능하다. 특히 연중 온난한 기후조건으로 인해 겨울에도

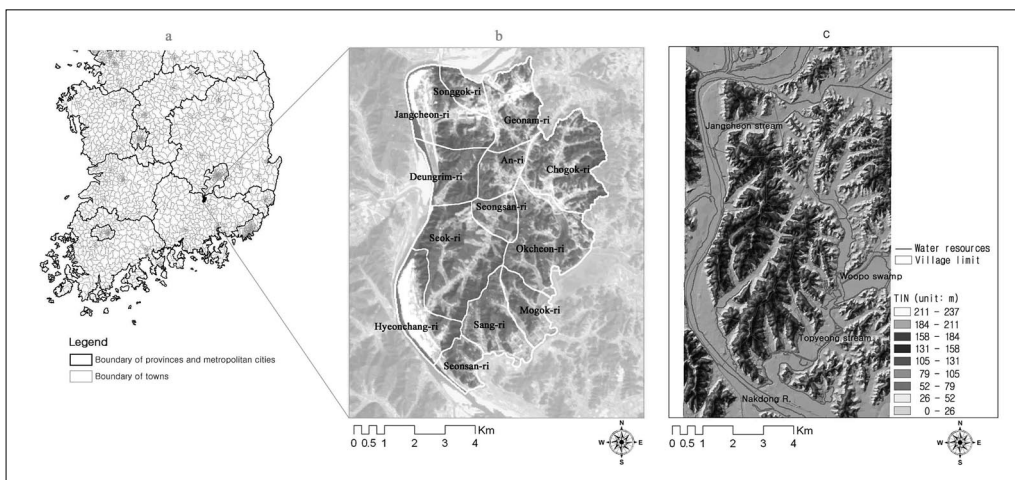


Fig. 1. A geographical map of study area: Ibang-myeon, Changnyeong-gun, Kyungnam province, Korea(a: Administrative district map in Korea; b: Study area with KOMPSAT-1 EOC for background; c: Topographical condition in study area with TIN).

4 환경영향평가 제15권 제1호

소득 작물인 마늘·양파 등이 월동하므로 이모작이 가능하여 다른 지역에 비해 농업경쟁력이 뛰어나다. 하지만 이모작 농업이 성행함에 따라 파종 전과 추수 후 그리고 월동작물 재배 전후의 농경지는 나지상태로 방치되는데, 월동작물을 추수하고 주작물이 파종되기 전에는 장마기가 겹치므로 심각한 토양유실이 발생할 수 있어, 이에 대한 대비책이 요구된다.

2. 수치 토양도

토양도를 활용하여 토양 내 발생 가능한 침식 잠재성과 작물재배 관련 토지이용 적합성을 예측할 수 있다. 토양침식은 USLE 공식을 활용하여 토양 자체의 특성과 지형특성을 종합함으로써 계산할 수 있는데, 광역지역에 대한 토양의 물리적 특성은 토양도를 활용함으로써 손쉽게 평가할 수 있다. 본 연구에서는 농업과학기술원에서 구축한 수치토양도를 활용하여 대상지역 내에서 발생가능한 토양침식에 영향을 미치는 토양물리성 정보를 취득하고자 하였다.

연구지역에 나타난 토양통을 논·밭 토양을 중심으로 살펴보면, 논토양에는 사양질인 강서(Gt), 석전(SE), 고천(Gz)통이 주를 이루었고, 식양질인 용지(Yj)와 비곡(Vg)통이, 미사식양질인 유가(Yu), 규암(Gy), 경산(Gk), 평택(Pt)통이 나타났다. 밭 토양으로는 사질인 낙동(Nd)통이, 사양질인 중동(Jd)과 유원(Yl)통이, 식양질인 반호(Bh)와 용계(Yx)통이 나타났다.

3. 이론적 배경 및 연구방법

1) 이론적 배경

(1) 토양유실예측공식(Universal Soil Loss Equation)

토양침식 위험성은 Wischmeier와 Smith(1978)가 개발한 USLE 모델을 활용하여 분석이 가능하다. Wischmeier와 Smith는 토양침식에 영향을 미치는 요인을 크게 5가지로 나누었고, 지형 및 재배조건에 따라 각 인자별 기여도를 산출함으로써 토양침식량을 추정할 수 있도록 USLE를 개발하였는데, 기본식은 식 1과 같다.

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

A: Annual soil loss (MT ha-1 yr-1)

R: Rainfall and runoff erosivity (MJ mm ha-1yr-1hr-1)

K: Soil erodibility (A/R, MT hr MJ-1 mm-1)

LS: Slope length and steepness (dimensionless)

C: Cover management (dimensionless)

P: Support practice (dimensionless)

단, 본 연구의 대상지역은 그 면적이 비교적 작기 때문에 강우사상별 강우인자(R)는 동일하다고 가정하였다. 또한 대상지역의 경년별 토지이용은 다양하기 때문에 개별 농지별 토지이용을 결정하기에는 어려운 점이 있을 뿐만 아니라 농업활동 전후에 나타나는 나지상태 토양의 침식저항력을 판단하기 위해서는 지표상태를 우선하기보다 토양의 고유특성만을 간주하는 것이 적절하다고 판단된다. 따라서 토지피복인자(C) 및 관리인자(P)를 분석과정에서 제외하고 토양침식성 인자(K) 및 침식사면의 길이(L)·경사인자(S)만을 적용하여 토양침식 잠재성을 평가하였다.

(2) 토양침식 잠재성 인자

① 토양침식성 인자(K)

토양침식성 인자는 토양침식에 영향을 주는 토양의 고유한 특성을 설명하는 인자로서, 토양층의 미사, 모래함량, 토양구조, 유기물 함량, 투수성 등과 관련이 있다. 또한 K값은 일반적으로 0에서 0.7범위의 값을 가지게 되는데 K값이 높을수록 극세사(very fine sand)와 미사(silt)의 함량이 높아 침식 위험이 높음을 의미한다. 그 반대로 극세사와 미사의 함량이 낮아지면 점토(clay)의 함량이 높아지기 때문에 토양구조가 발달하여 토양침식이 적게 일어나게 된다. 또한 토양 내 투수성이 높아지면 발생하는 유거수가 적기 때문에 토양침식도 떨어지게 된다. 정강호 등(2004)은 토양침식성 인자의 산출을 위해 Wischmeier와 Smith(1978)가 제안한 공식에 자갈의 지피효과를 고려하기 위해 Box(1981)가 제안한 공식으로 보정하여 활용한 바 있다(식 2, 식 3).

$$K = [2.1 \times 10^{-4} (12-OM) M^{1.14} + 3.25(S-2) + 2.5(P-3)] / 100 \times [1.0977 \times 10^{-0.0111x}] \quad (2)$$

OM은 유기물 함량(%), S는 토양 구조 부호 값(1~4), P는 토층의 투수 부호 값(1~6), x는 자갈함량(%)을 말한다. 특히 S가 커지면 토양 내 불안정한 결합으로 인해 K값이 증가하고, P가 커지면 투수가 원활하지 않아 K값이 또한 증가하게 된다. M은 토양침식에 영향을 미치는 입자크기의 분율에 따른 곱으로서 식 3을 이용하여 계산할 수 있다.

$$M = (\%0.002mm - 0.1mm) \times (\%sand + \%silt) \quad (3)$$

여기서 M은 토양침식에 영향을 미치는 입자크기의 분율에 따른 곱으로 구할 수 있다.

정강호 등(2004)은 토양침식성 인자 산출을 위해 농업과학기술원에서 제시한 입자 크기별 함량(%), 토양구조 부호, 투수 부호 등을 토양상 별로 정리하였으며, 본 연구에서는 이들 자료를 속성값으로 활용하여 토양통 별 토양침식성 인자값을 계산하였다.

② 침식사면의 길이인자(L)

지형의 기복과 경사를 반영하는 지형인자에는 침식사면의 길이인자(L)와 경사인자(S)로 구성되어 있다. 일반적으로 지형인자는 Wischmeier와 Smith(1978)의 실험결과에서 밝혀진 식 4를 이용하여 받 토양의 경사정도에 따라 지형인자를 산출한 후 경사도별 면적가중치를 적용하여 계산할 수 있다(현병근 등, 2002; 정강호 등, 2004).

$$LS = (L/22)^m \cdot (65.41 \sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065) \quad (4)$$

여기서, L: 경사장(m), θ : 경사도(angle), m: 경사등급

이때, 침식사면의 길이인자라 함은 단위구획 경사 길이인 22.13m에 대한 수평길이의 비를 의미하는데, 레스터 구조의 수치표고모형(Digital Elevation Model: DEM)을 활용하면 침식사면 길이인자는 각 화소의 크기를 22.13m로 하였을 때 그에 따른 사면 길이의 비를 말한다(Bartsch, 1998; 이근상 등, 2001; 이환주 등, 2001). 본 연구에서는 Desmet과 Govers(1996)가 제안한 식 5의 침식사면 길이의 먹지수를 이용하여 식 6과 같이 침식사면 길이인자를 계산하였다.

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

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (5)$$

여기서, m: 침식사면 길이의 먹지수, θ : 경사각

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-jm} + D^2)^{m+1} - A_{ij-jm}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{ij}^m \times 22.13^m} \quad (6)$$

여기서, L_{ij} : 격자에 대한 침식사면의 길이인자, A_{ij-jm} : 격자에 유입되는 상류 기여면적, D: 격자크기, m: 침식사면 길이의 먹지수, $x_{ij} = (|\sin \alpha_{ij}| + |\cos \alpha_{ij}|)$: 흐름방향에 직교하는 등고선 길이, α_{ij} : 격자의 방향

식 6은 경사 및 흐름방향 그리고 대상격자로 유입되는 상부기여면적을 고려함으로써 실제 침식과정을 효과적으로 표현하게 된다. 전체 격자수에 해당하는 면적을 침식사면의 길이로 변환하기 위해 대상격자의 등고길이는 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

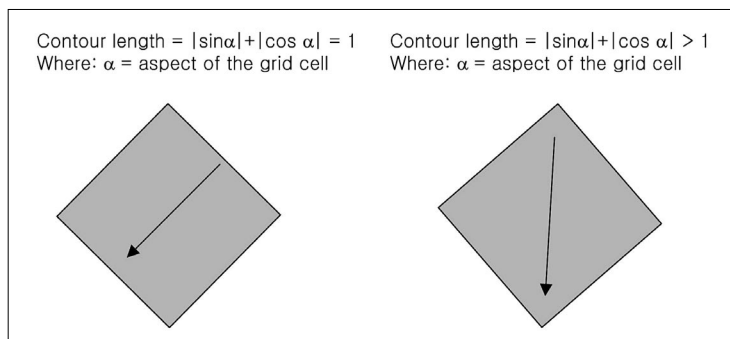


Fig. 2. Contour length according to the grid direction[Source: Hwan-Ju Lee et al., 2001].

본 연구에서는 해상도 22.13m의 DEM 자료로부터 Desmet과 Govers가 제안한 식을 이용하여 침식사면의 길이인자를 자동적으로 계산할 수 있도록 Arc/Info workstation의 AML(Arc Macro Language)을 활용하였다.

③ 침식사면의 경사인자(S)

침식사면의 경사인자는 토양침식에 대한 사면경사의 영향을 나타내는 인자로서 길이인자인 L에 비해 더욱 민감한 특성을 갖는다. 침식사면의 경사를 산정하기 위해 본 연구에서는 Nearing이 제안한 식 7을 활용하였다(Bartsch, 1998; 이근상 등, 2001; 이환주 등, 2001).

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 6.1 \sin \theta)} \quad (7)$$

여기서, θ : 경사각

식 7을 이용하여 해상도 22.13m의 DEM자료로부터 침식사면의 경사인자를 구하고자 Arc/Info workstation의 AML을 활용하였다.

2) 연구방법

본 연구에서는 수치토양도를 활용하여 나지상태에서 잠재적 토양침식성 인자를 계산하였고, 수치지형도에서 구축한 DEM을 이용하여 평가한 침식사면 길이인자와 경사인자를 종합한 잠재 토양침식 지수를 바탕으로 연구지역에 대한 침식잠재성을 분석하였다. 침식잠재성은 표준편차 분류법을 활용함으로써 대상토지에 대한 적합성으로 환산할 수 있는데, 수치지형도의 토지이용현황 자료와 현장조사를 통하여 구해진 토지활용유형에 따라 적합성을 평가하고자 하였다. 그림 3은 토양 및 지형 조건을 활용한 토양침식 잠재성 분석을 위한 흐름도이다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양침식 잠재성

1) 토양침식성 인자

정강호 등(2004)이 구한 K값을 근거로 연구지역

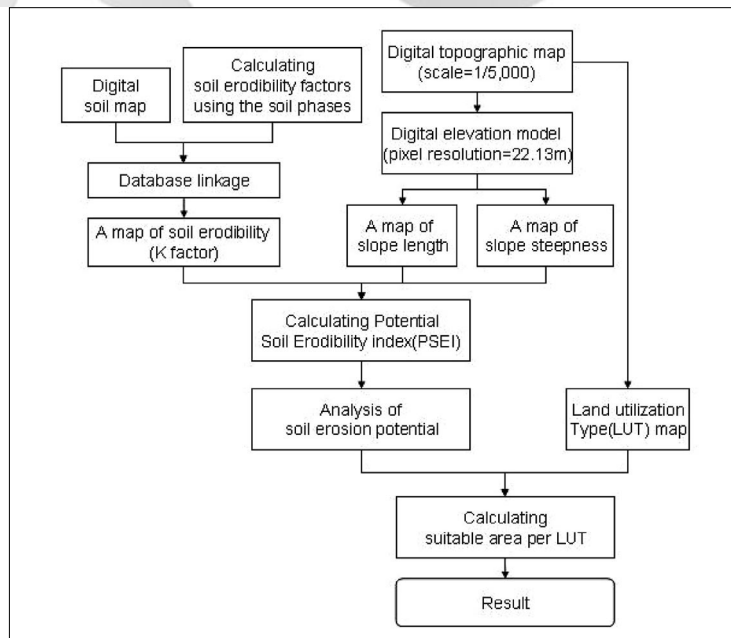


Fig. 3. A flowchart to get soil erosion potential with soil and topographic data.

내 토양상(soil phase)별 K값을 계산하였다. 식양질 논토양인 규암토(Gy), 경산토(GkB) 및 평택토(Pt)에서 K값은 각각 0.547, 0.432, 0.636으로 높게 나타났으나, 식양질 밭토양인 반호토(BIB, BIC, BID), 용계토(YxB)에서의 K값은 0.216과 0.195로 낮게 나타났다.

토양상 별로 제시된 K인자값을 수치토양도와 연계해석하여 대상지역내 토양침식성 인자의 공간적 분포를 그림 4와 같이 얻을 수 있었다. 그 결과 평야지에 분포하며 자갈함량이 낮고 미사질 양토가 많이 분포하는 논토양에서 토양침식성 인자가 높게 나타났다. 대표적 토양으로 평택토(0.636), 유원토(0.627), 석천토(0.620) 등을 들 수 있는데, 이들은 대상지역 내 평탄지 논에 주로 분포하는 토양으로서 나지상태에서 침식잠재성이 높은 것으로 판명되었다. 반면, 유가토(0.167), 대구토(0.132), 반호토(0.216) 등에서는 K값이 매우 낮게 나타났는데, 이들 토양은 혈암지대의 산록곡간 혹은 선상지 부근에서 나타나는 식양질양토로서 토양구조가 발달하여 침식잠재성이 낮은 것으로 판명되었다.

들녘별로 보면, 모곡들(0.636; 그림 4-a)과 장천들(0.620; 그림 4-b), 거남들(0.547; 그림 4-c)에서 토양침식성 인자값이 높게 나타났다. 이들 지역의 주요 토양은 (미사)사양질계 충적토인 규암토(Gy), 강서토(Gt), 석천토(SE)과 미사질 양토인 평택토(Pt)이 주를 이루며, 주로 분포하는 지역은 하성충적층을 모재로 한 하성평탄지(Gy, Gt, SE)와 하성충적층을 모재로 한 내륙평탄지(Pt)이다. 이들 토양에는 공통적으로 (미)사토가 다량 섞여있어 토양침식 가능성을 높게 하는 것으로 보여진다.

현창과 장천의 제외지에서도 각각 0.377(그림 4-d)과 0.337(그림 4-e)로서 K값이 다소 높게 나타났는데, 이 지역의 토양은 낙동토(Nd)과 중동토(Jd)이 주를 이루었고, 이들 토양 내에는 미사가 다량 포함되어 있으므로 침식가능성이 높았던 것으로 판단된다. 내륙지역인 내동들(그림 4-f)에서는 0.381로서 K값이 상대적으로 높았다. 다만, 석리지구(그림 4-

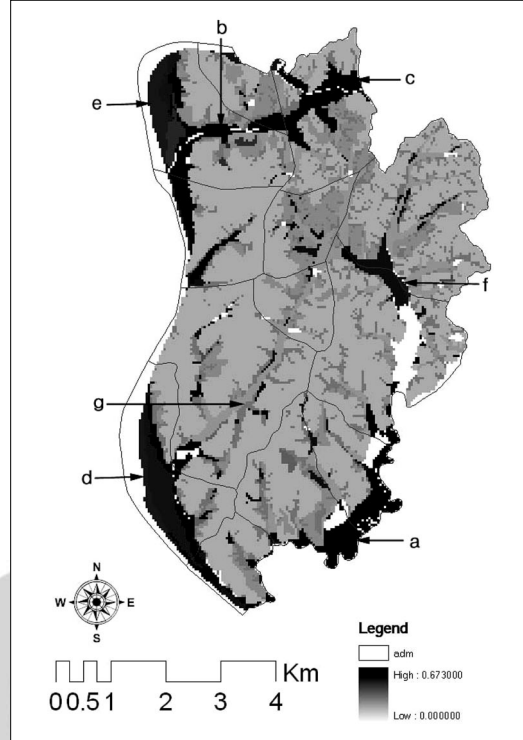


Fig. 4. K-factors derived from the Soil map.

g)와 같은 삼림지역은 0.167로 낮게 나타났는데, 이는 토양 내 유기물 함량이 높아 토양입자간의 결합력이 높기 때문에 토양침식에 저항성을 가지는 것으로 사료되었다.

2) 지형인자

(1) 침식사면의 길이인자

22.13m 해상도의 DEM 자료로부터 Desmet과 Govers가 제안한 식 6을 활용하여 침식사면의 길이인자를 계산하였다. Desmet & Govers의 식은 상류로부터 이송되어 오는 토사의 영향까지도 고려하기 위해, 유역추출 알고리즘에서 흔히 쓰여지는 흐름누적 기법을 활용한 것이다. 또한 상부 격자들의 기여 면적을 침식사면의 길이인자에 반영하기 위한 상부 기여 흐름누적 격자의 개수를 10으로 하였다. 흐름누적 격자수는 Arc/Info GRID 모듈의 흐름누적(Flow accumulation) 함수를 이용하여 계산하였다. 그림

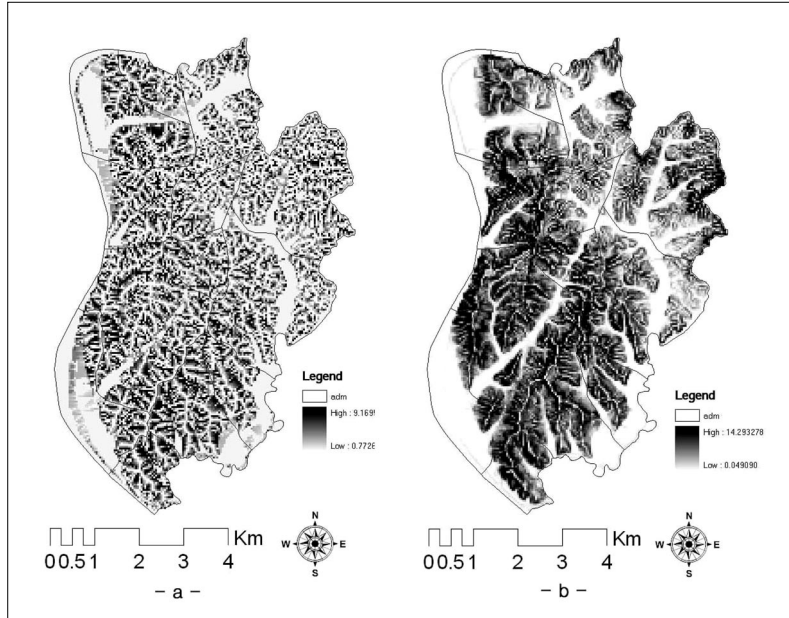


Fig. 5. Topographic factors derived from DEM.(a: A map of slope length; b: A map of slope steepness)

5-a는 침식사면의 길이인자의 공간적 분포를 보여 주고 있다. 그 결과, 평탄지의 L인자값은 1이고, 사면의 경사가 높은 삼림지역에서는 그 값이 최고 9.17까지 나타났다. 반면 삼림의 정상부분과 분수령에 형성된 완경사지역에서는 L인자가 다소 낮게 나타났다. 연구지역의 평균 L인자값은 2.26이며, 표준편차는 1.70이었다.

(2) 침식사면의 경사인자

침식사면의 경사인자를 추출하기 위해 격자크기 22.13m를 갖는 DEM 자료를 Nearing이 제안한 식 7에 적용하여 그림 5-b와 같은 침식사면의 경사인자를 계산할 수 있었다. 침식사면의 경사인자는 사면의 경사와 정(+)의 상관관계를 가지며, 평균이 4.09 그리고 표준편차가 3.48로 나타났다.

(3) 창녕군 이방면의 토양침식 잠재성 분석

토양침식 잠재성 분석을 위해 토양도와 지형도를 활용하여 구한 K, L, S 인자를 서로 곱하였고, 이를 '잠재 토양침식 지수(Potential Soil Erodibility Index: PSEI)'로 명명하였다(그림 6).

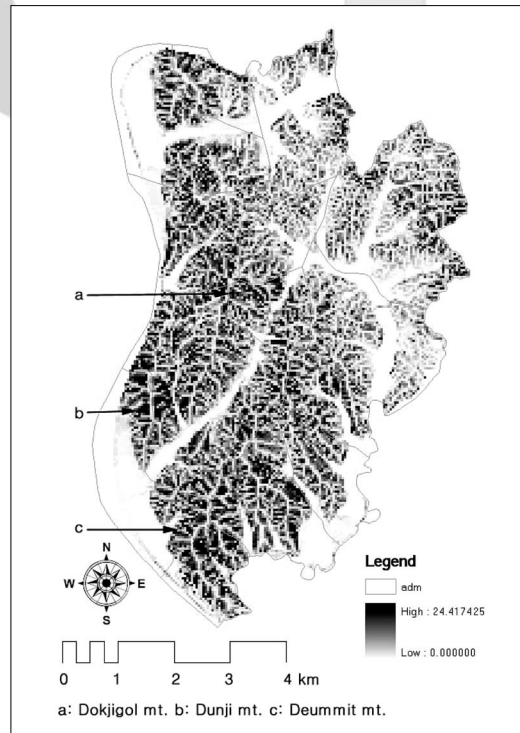


Fig. 6. A map of PSEI.

창녕군 이방면의 평균 PSEI는 1.68이고 표준편차는 1.95인데, 일반적으로 정규분포에 대한 계급분류 방법인 표준편차분류법(standard deviation method)을 활용하여 창녕군 이방면의 PSEI를 분류 하면, PSEI가 3.63(M+1Std. dev.) 이상으로 높게 나타난 지역은 대부분 논을 제외한 경사지 밭과 과수원이며, 특히 독지골산(그림6-a)과 둔지산(그림6-b), 들팘산(그림6-c)을 중심으로 한 삼림지역의 계곡부 경사면에서 높은 값을 보였다. 이를 통하여 동일한 피복에서의 PSEI는 토양의 물리적 특성보다 경사 등 지형기복에 더 민감한 것으로 드러났다. 즉, 토양의 물리적 특성만을 고려하면 논외 토양침식 가능성이 높게 나타난 반면, 논은 경사가 비교적 완만하므로 토양침식에 직접 영향을 주는 에너지원으로서 강우 밖에 없기 때문에 일시적 강우로 논토양이 이탈되기는 쉽지 않다. 반면, 경사지 밭 토양과 삼림에서는 토양의 물리적 특성만으로는 토양침식 가능성이 낮았으나, 강우시 이탈된 토양은 가파른 경사에 의해 높은 운동에너지를 가지기 때문에 논에 비해 상대적으로 PSEI가 높게 나타났던 것으로 보여진다.

토지활용유형별로 토양침식 잠재성을 살펴보면, 과수원(ONor)은 총 282,37ha 중 45,98ha(16.28%)에서 PSEI값이 3.63보다 높아 토지활용유형 중 가장 높은 침식 잠재성을 가지고 있는 것으로 판명되었으며, 휴경밭(UN)과 일모작 밭(US)에서는 각각 25,85ha와 18,20ha의 면적이 3.63보다 높은 것으로 나타났다. 반면, 이모작 밭(UDg/UDo)에서는 44,43ha 중 0,87ha만이 침식잠재성이 높은 지역으로 나타났는데, 이를 통하여 지형조건 뿐만 아니라 농업활동에 있어서도 매우 우수한 농지에서 이모작 농업이 이루어지고 있었음을 알 수 있었다(표 1).

토양침식잠재성은 표준편차분류법으로 PSEI값을 분류함으로써 토양침식 특성을 등급으로 설정할 수 있는데, 농촌진흥청 농업과학기술원에서 우리나라 농지를 5개 계급으로 구분하여 최적지, 적지, 가능지, 저위생산지, 부적지로 명명한 방법을 연구지역에 적용할 수 있다. 따라서, 대상지에서는 PSEI의 평균

Table 1. Area of agricultural regions over 3.68(M+1 Std. dev.) in potential soil erodibility index.

LUT	Total area (ha)	Potentially erodible area(ha)	LUT	Total area (ha)	Potentially erodible area(ha)
Lb	2.57	0.00	UN	186.87	25.85
PN	9.05	1.16	US	208.94	18.20
PS	244.32	1.40	UDg	37.90	0.34
PDg	75.02	0.58	UDo	6.53	0.53
PDo	52.03	0.10	GN	23.23	0.10
PDb	4.45	0.00	GT	44.53	0.68
PDr	3.05	0.00	ON	0.63	0.10
PDf	276.90	2.42	ONor	282.3	45.98

PN: Paddy land in fallow; PS: Paddy land for single crop; PDg: Paddy land for 7 double crop(Rice and Garlic); PDo: Paddy land for double crop(Rice and Onion); PDb: Paddy land for double crop(Rice and Barley); PDr: Paddy land for double crop(Rice and Rye); PDF: Paddy land for double crop but excepted area; UN: Non arable upland; US: Upland for single crop; UDg: Upland for double crop(Garlic in winter); UDo: Upland for double crop(Onion in winter); GN: Greenhouse(in fallow); GT: Greenhouse(Triple crop for a year); ON: Non arable orchard(non arable); ONor: Normal orchard; Lb: Livestock barn.

인 1.68를 기준으로 $-0.27(M-1Std. dev.) \sim 3.63(M+1Std. dev.)$ 구간을 적지(S2)로, $3.63(M+1Std. dev.) \sim 5.58(M+2Std. dev.)$ 구간을 가능지(S3)로, 5.58 이상 지역을 저위생산지(N1)로 정하였다. 단, 최적지(S1)와 부적지(N2)는 나타나지 않았다.

토양침식에 의한 토지 적합성 분석결과, 적지는 3,672.35ha 분포하였고, 가능지는 390,88ha로 나타났다. 저위생산지는 216,54ha 분포하였다(그림 7). 특히, 가능지와 저위생산지는 대상지역의 남단에 형성된 독지골산과 들팘산을 중심으로 대규모로 형성되어 있는데, 이를 통하여 경사가 심한 삼림지역은 침식으로 인해 토지이용 효율이 떨어질 수 있으므로 이에 대비한 토지이용 계획이 필요함을 알 수 있다.

지목별 저위생산지 면적을 살펴보면, 논에서는 거의 존재하지 않았고, 휴경밭(UN)과 일모작밭(US)에서 각각 8,71ha와 6,29ha가 존재하는 것으로 나타났으며, 과수원(ONor)에서 13,12ha로 가장 넓게 분포

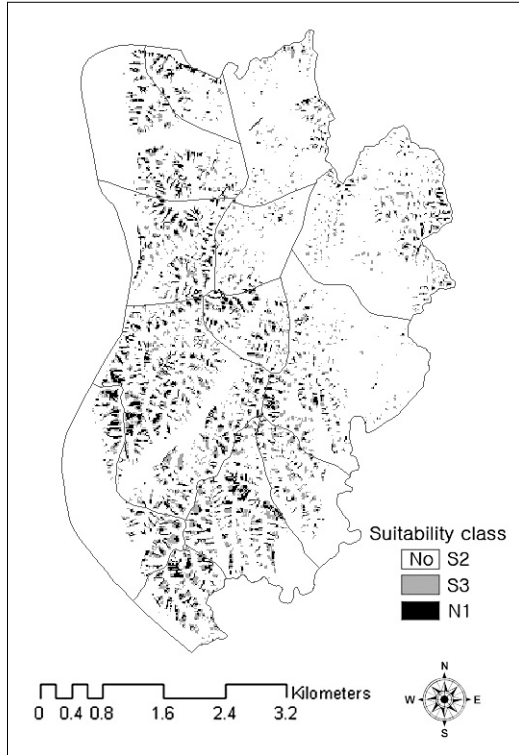


Fig. 7. A map of suitability class derived from the analysis of potential soil erodibility index.

하였다. 과수원의 경우, 삼림지역 내 급경사지를 무리하게 개간함으로써 다른 지목보다도 고지대와 급경사지역에 조성되므로 지형조건이 나빠 침식잠재성도 높아진 것으로 판단되었다(표 2).

반면, 적지는 제외지 논(PDf: 265.5ha), 과수원(ONor: 236.14ha), 일모작밭(US: 190.31ha) 순으로 나타났는데, 제외지 논은 비록 침수의 위험이 상존하지만, 경사가 완만하여 침식잠재성이 낮은 것으로 밝혀졌다. 현재에도 장천리와 현창리 하천변에 형성된 제외지에 침수를 피하여 월동작물을 재배하는 것은 침식·유실로 인한 양분이동이 적고 접근성·관배수가 뛰어난 데 기인한 것으로 생각된다. 과수원에서는 경사 등에 의해 가능지, 저위생산지가 많이 분포하지만, 침식잠재성이 낮은 적지도 많이 분포하는 이유는 삼림 개간시 접근성을 고려하면서 경사가 완만한 지

Table 2. Area of suitable class in each land utilization type. (unit: ha)

LUT(code)	S2	S3	N1
Lb(8)	2.52	0.00	0.00
PN(20)	7.11	0.68	0.48
PS(21)	231.50	0.92	0.48
PDg(22)	72.60	0.48	0.10
PDo(23)	49.17	0.05	0.05
PDb(24)	4.69	0.00	0.00
PDr(25)	3.48	0.00	0.00
PDf(26)	265.67	1.36	1.06
UN(30)	160.25	17.13	8.71
US(31)	190.31	11.91	6.29
UDg(32)	37.27	0.24	0.10
UDo(33)	5.71	0.34	0.19
GN(40)	23.47	0.10	0.00
GT(41)	56.77	0.34	0.34
ON(50)	0.34	0.10	0.00
ONor(51)	236.14	32.86	13.12

역을 중심으로 개발되고 현재까지 운영되어 왔기 때문인 것으로 보여진다.

이상과 같이 토양침식은 토양자체의 물리적 특성 뿐만 아니라 지형조건에 의해서도 좌우되어 지는 토지이용을 위한 인자로서 결국에는 대상지역의 환경문제에까지 깊이 관여하는 주요 인자 중 하나이다. 따라서, 토지의 활용성 검토와 나아가 합리적인 토지이용계획이 가능해지기 위해선 대상지역 내 토양특성 뿐만 아니라 지형특성까지 종합적으로 고려함으로써 토양침식 등 토지이용 제한인자들이 사전에 고려·배제되어야 한다고 생각된다.

IV. 결 론

토양의 물리적 특성과 토양이 이루어 형성하는 지형조건은 농경지에서의 농업활동 뿐만 아니라 제반 토지이용에 적지 않은 영향을 미친다. 특히, 농경활동, 개간 및 벌목 등 인간활동으로 인해 이루어지는 토양침식 문제는 유역 혹은 농업지역의 환경을 더욱 심각하게 하였으며, 따라서 침식발생의 위험도가 높

은 지역에 대한 보전대책이 요구되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 토양 및 지형조건에 따른 침식 잠재성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, USLE 모델에 근거한 농경지의 토양침식 잠재성을 평가하기 위해 GIS 공간분석 기법을 활용함으로써 토양침식성 인자(K), 침식사면의 길이인자(L) 및 침식사면의 경사인자(S)를 효과적으로 분석하는 기법을 제시하였다.

둘째, 토양침식성 인자 분석결과, 평야지에 분포하면서 자갈함량이 낮고 미사질 양토가 많이 분포하는 논토양에서 토양침식성 인자가 높게 나타났다. 대표적인 예로 평택토(0.636), 유원토(0.627), 석천토(0.620)등을 들 수 있는데, 이들은 대상지역 내 평탄지 눈에 주로 분포하는 토양으로서 나지상태에서 침식잠재성이 높은 것으로 판명되었다. 반면, 유가토(0.167), 대구토(0.132), 반호토(BI: 0.216) 등에서는 K 값이 매우 낮게 나타났는데, 이들 토양은 혈암지대의 산록곡간 혹은 선상지 부근에서 나타나는 식양질양토로서 토양구조가 발달하여 침식잠재성이 낮은 것으로 판명되었다. 침식사면의 길이인자 분석 결과, 평탄지에서의 L인자값은 1이고, 사면의 경사가 높은 삼림지역에서는 그 값이 최고 9.17까지 나타났다. 침식사면의 경사인자에서는 사면의 경사와 정의 상관을 가지며, 평균이 4.09 표준편차가 3.48로 나타났다.

셋째, 창녕군 이방면의 PSEI 분석에서 PSEI가 높게 나타난 지역은 대부분 눈을 제외한 경사지 밭과 과수원이며, 특히 이방면 남쪽에 형성되어 있는 독지골산, 둔지산 및 듄밀산을 중심으로 한 삼림지역의 계곡부 경사면에서 높은 값을 보였다. 그 결과, 동일한 피복 하에서의 PSEI는 토양의 물리적 특성보다 경사 등 지형기복에 더 민감한 것으로 드러났다.

넷째, 토양침식에 의한 토지 적합성 분석결과, 적지는 3,672.35ha 분포하였고, 가능지는 390.88ha로 나타났으며, 저위생산지는 216.54ha 분포하였다. 저위생산지의 경우, 눈에서는 거의 존재하지 않았고, 휴경밭(UN)과 일모작밭(US)에서 각각 8.71ha와 6.29ha가 존재하는 것으로 나타났으며, 과수원

(ONor)에서 13.12ha로 가장 넓게 분포하였다. 과수원의 경우, 삼림지역 내 급경사지를 무리하게 개간함으로써 다른 지목보다도 고지대와 급경사지역에 조성되므로 지형조건이 나빠 침식잠재성도 높아진 것으로 판단되었다. 적지는 제외지 눈(PDf: 265.ha), 과수원(ONor: 236.14ha), 일모작밭(US: 190.31ha) 순으로 나타났는데, 제외지 눈은 비록 침수의 위험이 상존하지만, 경사가 완만하여 침식잠재성이 낮은 것으로 밝혀졌다.

잠재 토양침식 지수를 활용한 토양침식 잠재성 평가는 토지이용과 무관하게 토양 자체가 가지는 고유 특성을 바탕으로 토양침식을 평가한다는 점에서 기존의 토양침식량 산정방식과 구별되며, 토양 위 토지이용이 쉽게 변할 수 있는 현재의 농경지 여건상 토지이용의 기반인 토양자체의 상대적 토양침식정도를 구명하는 것만으로도 의의가 있다고 사료된다.

하지만, 잠재토양침식지수만으로는 토지이용을 반영한 연간 토양유실량을 정량화 할 수 없고 따라서 본 지수가 침식과 관련된 절대적 척도가 아니라는 점에서 한계가 있다. 다만, 본 지수는 농경지의 경년변화가 심하고 대표되는 토지이용 자료를 확보하기 어려운 시점에서 토양 자체의 토양침식 가능성을 평가할 수 있는 상대적 척도로서 활용될 수 있다고 여겨지며, 아울러 시계열 토지이용자료를 종합하여 대표적 토지이용자료를 확보한다면 대상지의 토양침식량을 정량화하는데 더욱 유용하게 활용될 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

- 이근상, 이환주, 임승현, 조기성, 2001, GIS를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의 영향분석, 대한토목학회논문집, 21(4D), 545-554.
- 이환주, 김환기(2001), GIS 공간분석을 활용한 토양침식모형의 입력인자 추출에 관한 연구, 한국측량학회지, 19(1), 27-37.
- 장영률, 이근상, 조기성, 2002, GIS 기반에서 토양

- 침식의 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구, 한국GIS학회지, 10(2), 301-316.
- 정강호, 김원태, 허승오, 하상건, 정필균, 정영상, 2004, 수치 정밀토양도에 기초한 전국 토양 유실량의 평가를 위한 USLE/RUSLE 인자의 산정, 한국토양비료학회, 37(4), 199-206.
- 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의, 1999, 강원도 경사지 토양유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수인자와 토양침식성 인자의 검토, 한국토양비료학회지, 32(1), 31-38.
- 정필균, 1983, 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석, 한국토양비료학회지, 16(2), 112-118.
- 정필균, 2002, 경사지 침식방지 대책, 경사지 토양 보전 및 관리대책 심포지움, 농업과학기술원: pp. 103~113.
- 창녕군, 2002, 창녕군 통계연보.
- 최진규, 구자웅, 손재권, 1998, 토양유실량예측공식 USLE 적용과 단위변환, 한국토양비료학회지 31(3): 301-308.
- 현병근, 김무성, 엄기철, 강기경, 윤홍배, 서명철, 성기석, 2002, USLE 모형과 대체법을 이용한 밭농사의 토양유실 저감기능 계량화 평가, 한국토양비료학회, 35(6), 361-371.
- Bartsch, K. P., 1998, Modeling soil loss to determine water erosion risk at Camp Williams national guard base", UTAH, UTAH state university, 1-57.
- Box, Jr. J. E. 1981, The effect of surface slaty fragment on soil erosionby water. Soil Sci. Soc. Am. J., 43, 111-116.
- 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.
- Hudson, N., 1997, Soil conservation, Cornell university press, 320-325.
- Nearing, M. A., 1997, A single continuous function for slope steepness influence on soil loss, Soil science society of America journal 61, 917-919.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, 1978, Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning, U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.