

연구논문

RUSLE 기법을 이용한 경주지역의 토양침식 위험도 평가

오정학* · 유주한** · 김경태*** · 이우성***

국립산림과학원 산림생태연구과*, 동국대학교 조경학과**, 경북대학교 조경학과***

(2011년 3월 15일 접수, 2011년 6월 3일 승인)

Risk Assessment of Soil Erosion in Gyeongju Using RUSLE Method

Jeong-Hak Oh* · Ju-Han You** · Kyung-Tae Kim*** · Woo-Sung Lee***

Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea*

Department of Landscape Architecture, Dongguk University, Gyeongju, Korea**

Department of Landscape Architecture, Kyungpook National University, Daegu, Korea***

(Manuscript received 15 March 2011; accepted 3 June 2011)

Abstract

The purpose of this study is to present the raw data for establishing the plan of top soil conservation in soil environment and preventing the soil loss by establishing the potential amount of soil loss using RUSLE. The results are as follows. To apply the RUSLE model, we calculated the potential amount of soil loss by using 5 factors; rainfall erosion factor(R), topographical factor(LS), soil erosion factor(K), land cover factor(C) and erosion control factor(P). The assessment map of soil loss was drawn up by classifying 5 grades. According to the soil loss estimation by the RUSLE, it showed that approximately 83.9% of the study area had relatively lower possibility of soil loss which was the 1 ton/ha in annual soil loss. Whereas, the 7.0% of the study area was defined as high risk area which was the 10 ton/ha in annual. Therefore, this area was needed that there was environment-friendly construction of farm land, improvement of cultivation environment and so forth. In future, if we will analyze the amount of soil loss of Gyeongju national park and Hyeongsan river watershed, we will offer the help to establishing the conservation plan of soil environment in Gyeongsangbuk-do.

Keywords : soil loss, top soil, land use, soil environment

1. 서론

토양은 농업, 건설업 등과 같은 산업의 원천이며, 산림 및 물순환을 건전하게 유지시키고 식생이 자랄 수 있는 기반이 된다(오정학·정성관, 2005). 또한 토양은 모든 생명의 근원이기 때문에 인간의 생존과 생활에 중요한 자원이라고 할 수 있다. 그러나 우리나라는 토양에 대해 단순한 재료, 기반으로만 인식한 나머지 무분별하게 남용하여 토양환경이 위협한 수준에 이르렀다. 현재 우리나라의 토양환경에 대한 정책은 토양오염에만 치중한 결과, 토양의 유실과 그에 따른 부가적인 피해에 대해서는 집중적인 관리방안이 마련되지 않고 있다.

토양침식은 유역에서의 침전물 증가와 같은 물리적 현상뿐만 아니라 토사와 함께 인, 질소 및 농약과 같은 오염물질이 수계로 유입되어 부영양화와 같은 수질오염의 원인이 된다(고지연 등, 2006). 또한 토지의 생산성을 감소시키며, 부착된 퇴적물과 영양퇴적물은 조류(藻類)와 같은 수생생물의 성장과 확산을 증가시킨다(이길하 등, 2008). 특히 토양환경에서 중요한 상층토양은 흔히 표토라고 하는데 표토는 토층에서 가장 많은 영양분을 함유하고 있어 생물들에게 양분과 물질을 제공해주는 중요한 역할을 한다. 따라서 이러한 표토를 보전하고 유실을 방지하는 것은 토양생태계를 보전하는 것과 일맥상통한다. 그리고 토양침식으로 인해 유실된 토양이 하천, 지류, 농수로 등에 퇴적될 경우 물의 흐름을 막아 홍수를 야기시키고 통수능력을 저하시키며, 앞서 언급한 바와 같이 각종 유기물이 유입되어 수질악화를 발생시킨다.

이러한 토양침식을 방지하고 유실량을 예측하기 위해 다양한 연구가 진행되었는데 산림유역의 토양 유실량 예측(이규성, 1994), 강원도 경사지의 토양 유실 예측(정영상 등, 1999), 금강유역의 토양침식 분석(김주훈 등, 2003), 금호강 유역의 토양침식 위험도 평가(박경훈, 2003), 섬진강유역의 토양침식 분석(김주훈·오덕근, 2004), 전국의 토양유실량 평가를 위한 인자산정(정강호 등, 2004), 낙동강유역의 토양유실량 산정(오정학·정성관, 2005), 금강

유역의 토지이용별 토사유출량 분석(박지상·김진하, 2006), 무심천 유역의 토양유실량 분석(김주훈 등, 2007), 가야산국립공원의 토양침식분석(김영표 등, 2008), 한국의 토양유실량 분석(김주훈 등, 2009) 등 국토의 토양유실량을 체계적이고 객관적으로 분석하여 토양환경과 수환경 등 생태계 보전을 위해 다각적으로 노력하고 있다. 이러한 맥락에서 볼 때 경주시는 경주국립공원, 형산강 등 다양한 생태환경이 위치하고 있음에도 불구하고 현재까지 토양유실량에 대한 연구가 전무하므로 이에 대한 연구가 필요한 지역이라고 판단된다.

따라서 본 연구는 경주시 전체를 대상으로 GIS를 활용하여 토양유실량 분석에 필요한 주제도를 구축한 후 RUSLE 기법을 이용하여 잠재적 토양유실량 및 침식위험도를 예측함으로써 토양유실방지 및 토양환경에서 중요한 표토보전 방안 수립을 위한 기초자료 제공에 그 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 연구대상지

경주시는 경상북도 동남부에 위치하며, 동쪽은 동해, 서쪽은 청도군과 영천시, 남쪽은 울산광역시, 북쪽은 포항시와 접해 있고 동단 129° 31', 서단 128° 58', 남단 35° 39', 북단 36° 04'이다. 경주시 면적은 1,325.0km²이고 행정구역은 4개 읍, 8개 면, 13개 동, 186개 법정리로 구성되어 있으며, 연장거리는 동서간 47.1km, 남북간 45.8km이다. 기후는 평균 기온 13.9℃, 극점최고 35.7℃, 극점최저 -8.6℃, 강수량 788.0mm, 평균상대습도 62.2%, 평균풍속 7.9m/s를 나타낸다(경주시, 2009).

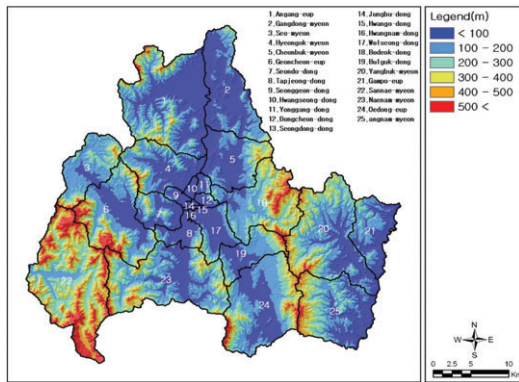
경주시의 지형특성은 Figure 1과 같이 평균고도 199.3m로 해발 100m 이하의 저지대와 100~200m의 구릉성 산지가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 안강읍, 강동면을 비롯하여 기성시가지가 위치하고 있는 황성동, 동천동 등은 100m 이하의 해발고도를 보이는 것으로 나타났으며, 이들 지역과 인접하여 100~200m 사이의 구릉성 산지를 형성하

고 있는 지역은 전체면적의 28.1%인 374.9km²를 차지하는 것으로 분석되었다. 500m 이상의 고지대는 66.9km²로써 전체면적의 5.1%를 차지하고 있으며, 경주시 동쪽에 위치한 동대산맥과 서쪽 산내면의 주사산맥을 따라 분포하였다.

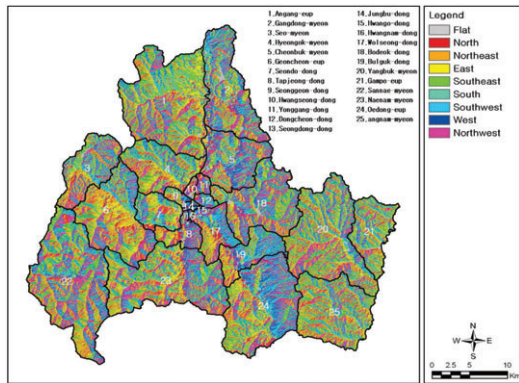
경사방향 분석결과, 가장 넓은 면적을 차지하는

향은 동향으로써 전체면적의 14.7%인 194km²를 차지하였다. 불국동과 외동읍에 넓게 분포하고 있는 남서향은 166.3km²로써 전체면적의 12.5%를 차지하고 있으며, 안강읍과 양북면 등에 주로 분포하고 있는 남동향도 전체면적의 12.5%를 차지하는 것으로 분석되었다. 한편, 평탄지는 15.2km²로써 전체면적의 1.2%에 불과한 것으로 나타나, 경주시가 전체적으로 완만한 경사를 이루는 것으로 분석되었다.

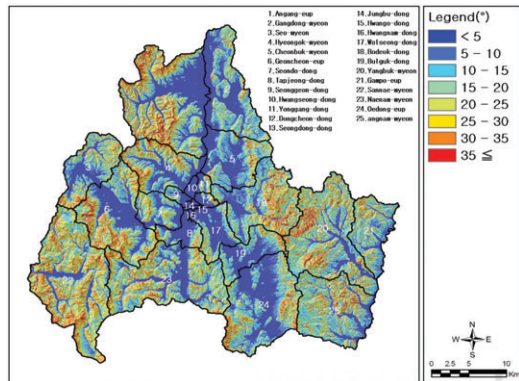
경사도의 경우 5° 이하의 완경사지는 전체면적의 23.9%인 316.1km²를 차지하고 있으며, 기성시가지가 위치한 용강동, 황성동, 황오동 등에 주로 분포하는 것으로 나타났다. 경주시 전역에 고르게 분포하고 있는 낮은 구릉지는 대부분 15~20° 사이의 경사를 보이고 있으며, 면적은 202.9km²로써 전체면적의 15.3%를 차지하는 것으로 분석되었다. 급곡산, 토함산, 단석산 등 35° 이상의 급경사지를 형성하고 있는 지역은 전체면적의 3.2%인 42km²를 차지하는 것으로 나타났다.



Altitude



Aspect



Slope

Figure 1. Topographical characteristics of Gyeongju

2. 연구 및 분석방법

토양유실량 산정 기법 중 하나인 USLE(Universal Soil Loss Equation)는 1960년대 농경구역의 토양 유실 예측을 위해 미국에서 개발된 것으로 범용적 활용이 가능하며, 기후, 토양 토지피복, 토지이용 등의 변수를 이용하여 토양유실량을 추정하는 공식으로서 이를 개선한 것이 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)이다(노진욱, 2008). 이는 USLE가 농경지 중심의 토양유실량 분석기법인 것에 비해 RUSLE는 유역차원에서 분석이 가능하며, USLE보다 많은 현장자료를 추가하여 보완된 기법이기 때문에 범용성이 USLE보다 우수하다(최윤영 · 최정우, 2010; 이근상 등, 2011). RUSLE은 미국농무부에서 개발된 공식으로 USLE와 기본 공식은 같으나 인자별 환경에 맞게 보완된 것이며, 토양 유실량의 오차가 작다는 장점이 있다(임현수, 2005). 그러나 USLE보다 요구되는 자료가 세밀하다는 어려움이 있으며(최윤영 · 최정우, 2010), 경주

시와 같은 중소도시에는 이러한 자료구축이 미흡한 상태이기 때문에 기본 자료를 활용하였다. 본 연구에서 토양유실량(ton/ha/yr)을 예측하기 위한 RUSLE 공식은 다음 식 1과 같다.

$$A = R \times LS \times K \times C \times P \quad (\text{식 1})$$

식 1에서 보면, A는 연평균 토양유실량(ton/ha/yr), R은 강우침식인자, LS는 지형인자, K는 토양 침식인자, C는 토지피복인자, P는 침식조절인자로 구성되어 있다. 강우침식인자(R)는 강우기록자료를 활용하여 강우사상에 대해 강우침식인자를 산정한 후 평균 강우침식인자 값을 구하여 연도별 평균을 산출하는 것이다.

지형인자(LS)는 경사길이와 경사도가 토양유실에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로서 표준 밭의 경사길이를 22.13m로 하고 표준경사를 9%로 하였을 때 LS값은 1.0이 되며, 표준경사와 비교하여 상대적인 경사와 길이의 변화에 의해서 LS값이 산출된다(송성태, 2006). 토양침식인자(K)는 강우에 의한 침식에 토양이 저항하는 능력으로서 토양유실에 영향을 주는 중요 물리적 특성은 투수능력과 토양입자의 구조적 안정성이라고 볼 수 있으며, 토양층의 미사, 모래함량, 토양구조, 유기물함량, 투수성 등과 관련된다(박경훈, 2003; 김주훈 등, 2009).

토지피복인자(C)는 토지 피복에 따른 토양유실량의 비율을 나타내는 것으로서 식생종류, 성장상태, 경작형태 등에 의해 좌우되며, 토양피복인자값 비율은 비식생지역인 나지는 1.0으로 높은 값을, 산림 지역 또는 경작지는 0.1 이하의 낮은 값을 가진다(장영률 등, 2002; 김주훈 등, 2003). 침식조절인자(P)는 지표면 상의 경작지 형태에 따른 토양침식비로서 경작지에는 등고선 경작, 등고선 대상경작, 테라스 경작 등의 형태가 있으며, 이들 형태에 따라 침식유형이 달라진다(이근상 등, 2001; 권형중 등, 2002). 세부적인 형태를 살펴보면, 밭과 과수원은 등고선 경작, 경지정리 답은 테라스 경작, 미경지정리 답은 등고선 대상경작으로 나눌 수 있으며, 상향 경사의 토양유실량을 1로 고정했을 때 토양보전농업을 적용하여 감소되는 토양유실량의 비율을 의미

한다(박경훈, 2003).

최종적으로 경주시의 토양유실량 산정은 GRID 모듈의 중첩기법을 활용하였으며, 인자별 주제도 작성, 분석, RUSLE 적용 등은 ArcGIS 9.3을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. RUSLE 모델의 인자

1) 강우침식인자(R)

강우침식인자는 연평균 강우의 침식능력에 의해 획득되는 자료인데 정필균 등(1983)은 강우강도의 자료부족으로 전국 51개 기상관측소에서 1960~1980년대에 걸쳐 측정된 자료를 토대로 지점별로 산출된 R값과 이를 월평균 강우량과 회귀분석을 수행하여 도출된 회귀식 $Y(\text{월평균 R값}) = 0.0378X(\text{월평균 강우량})^{1.4190}$ ($r^2 = 0.78$, $p < 0.01$)을 사용하였다. 강우침식인자를 계산하기 위해 먼저 1990년부터 2001년까지 기상청 및 한국수자원공사의 기상관측소에서 측정한 각 연도별 월평균 강우량을 취득하였다. 다음으로, 한국수자원공사에서 제작한 경주시의 Thiessen망도에 관측지점의 월평균 강우량을 정필균 등(1983)이 제안한 회귀식을 적용하여 최종적인 강우침식인자를 추출하였다(Figure 2).

2) 토양침식인자(K)

토양침식인자의 주제도는 국립방재연구소(1998)에서 제시한 토양통별 K값을 농업과학기술원에서 제작한 수치정밀토양도(1:25,000)의 속성값으로 입력하여 Figure 3과 같이 작성하였다.

Table 1은 경주시의 K값에 따른 점유면적과 비율을 나타낸 것으로서 K값이 높을수록 극세사와 미사 함량이 많아 토양유실량이 많아지며, 반대로 K값이 낮을수록 극세사와 미사 함량이 낮고 점토 함량이 높아 토양유실이 적다는 것을 의미한다. K값이 0.12 이하의 값을 가지는 지역의 면적은 57.5km²로서 전체면적의 약 4.4%를 나타내었으며, 0.12~0.23의 경우 면적 178.8km², 비율 13.5%로 분석되었

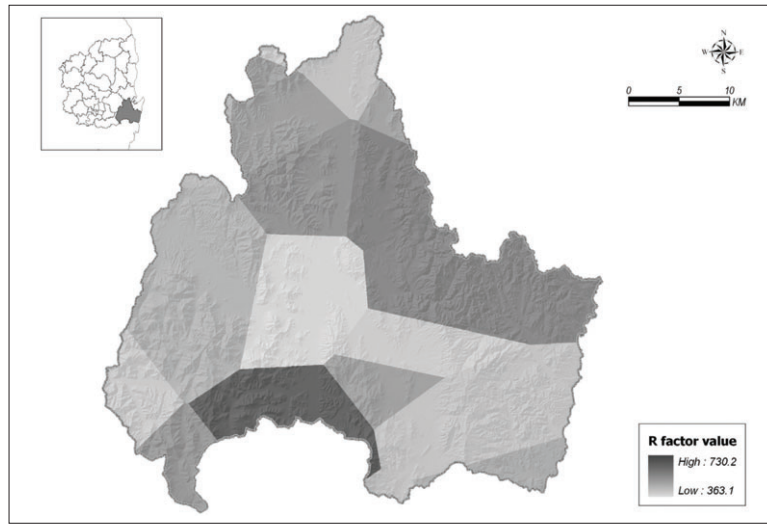


Figure 2. R-factor values of Gyeongju

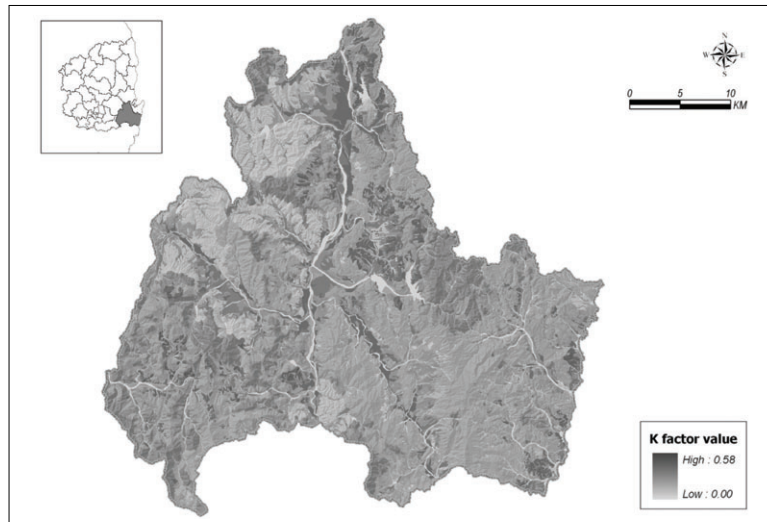


Figure 3. K-factor of Gyeongju

Table 1. Area and rate of K-value

| K-value | Area(km ²) | Rate(%) |
|-----------|------------------------|---------|
| 0~0.12 | 57.5 | 4.4 |
| 0.12~0.23 | 178.8 | 13.5 |
| 0.24~0.35 | 726.3 | 54.9 |
| 0.36~0.46 | 259.8 | 19.6 |
| 0.47~0.58 | 101.1 | 7.6 |

다. 0.24~0.35는 면적 726.3km², 비율 54.9%로 가장 많은 부분을 차지하고 있었다. 0.36~0.46의 경

우 면적 259.8km², 비율 19.6%였으며, 0.47~0.58에서는 면적 101.1km², 비율 7.6%로 나타났다.

3) 지형인자(LS)

본 연구에서는 지형인자 중 경사인자를 자동적으로 계산하기 위하여 ArcGIS Workstation의 AML(Arc Macro Language) 기능을 활용하였으며, van Remotel *et al.*(2001; 2003)에 의해 개발된 코드를 적용하여 분석하였다.

Table 2는 지형인자인 LS값을 나타낸 것으로서

Table 2. Area and rate of LS-value

| LS-value | Area(km ²) | Rate(%) |
|--------------|------------------------|---------|
| LS < 10 | 998.99 | 75.39 |
| 10 ≤ LS < 20 | 266.01 | 20.08 |
| 20 ≤ LS < 30 | 53.79 | 4.06 |
| 30 ≤ LS < 40 | 5.72 | 0.43 |
| 40 ≤ LS | 0.52 | 0.04 |

LS값이 10 이하인 지역이 전체 면적의 75.39%에 해당되는 998.99km²로 나타났으며, LS값이 40 이

상인 지역은 전체 면적의 약 0.04%로 0.52km²의 면적을 가지는 것으로 분석되었다. LS값이 높은 지역은 경사도와 경사길이가 낮은 지역보다 크기 때문에 산지개간, 도로건설, 구조물 설치 등의 개발사업이 이루어질 경우 지형의 형질 변경 최소화, 표토 보전, 토공의 적정성 검토 등 토양유실을 저감할 수 있는 환경영향평가가 이루어져야 할 것으로 생각된다(오정학·정성관, 2005).

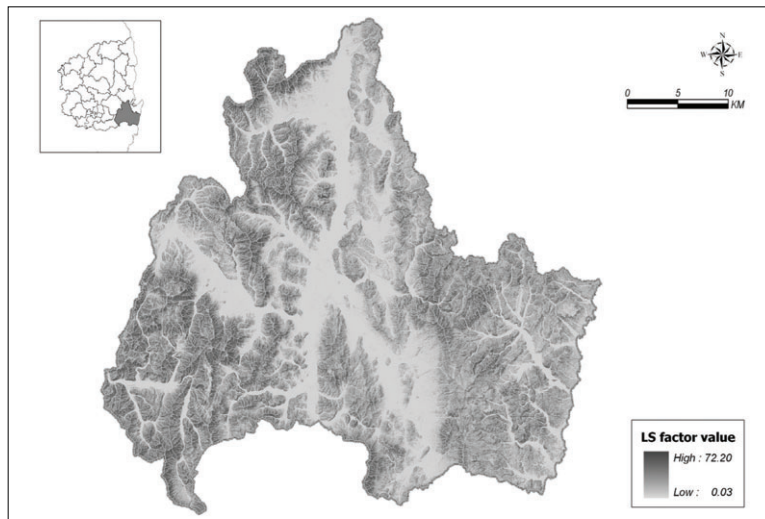


Figure 4. LS-factor of Gyeongju

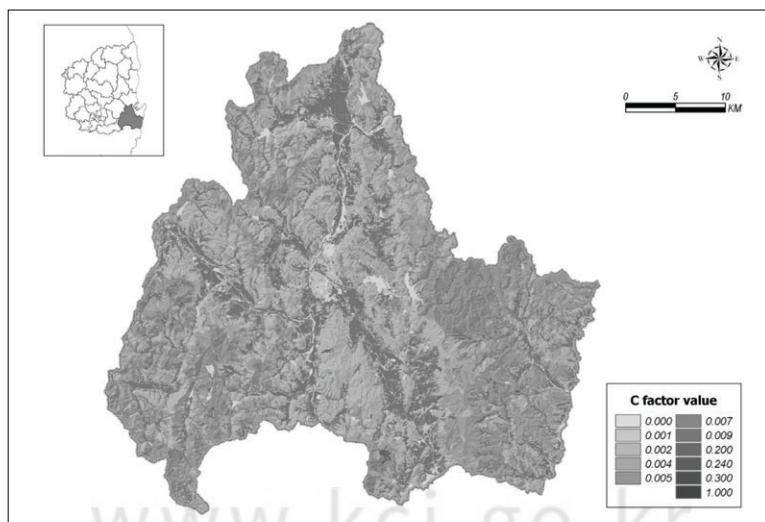


Figure 5. C-factor of Gyeongju

Table 3. Area and rate of C-value

| Land-cover types | | C-value | Area(km ²) | Rate(%) |
|------------------|------------------------------------|---------|------------------------|---------|
| Level I | Level II | | | |
| Forest | Broad-leaved forest | 0,009 | 162,6 | 12,3 |
| | Coniferous forest | 0,004 | 425,5 | 32,1 |
| | Mixed forest | 0,007 | 285,0 | 21,5 |
| Agriculture | Field | 0,240 | 77,2 | 5,8 |
| | Paddy | 0,300 | 200,4 | 15,1 |
| | Orchard | 0,200 | 21,2 | 1,6 |
| | House, others | 0,000 | 8,5 | 0,7 |
| Grass | Natural grass, golf course, others | 0,050 | 25,8 | 1,9 |
| Urban | Residential area | 0,002 | 35,3 | 2,7 |
| | Commercial area | 0,001 | 5,1 | 0,4 |
| | Industrial area | 0,000 | 6,3 | 0,5 |
| | Traffic area | 0,000 | 16,2 | 1,2 |
| Barren | Mining area, others | 1,000 | 24,1 | 1,8 |
| Water | Wetland | 0,000 | 7,7 | 0,6 |
| | Water | 0,000 | 23,9 | 1,8 |

4) 토지피복인자(C)

토지피복인자 주제도는 경작지 및 식생유형에 따른 영향을 반영하기 위하여 환경부에서 제작한 중분류 토지피복도를 사용하였으며, 관련문헌을 토대로 토지피복별 C값을 부여하여 Figure 5를 생성하였다.

Table 3은 토지피복에 따른 C값을 나타낸 것으로서 C값이 가장 높은 나지의 경우 면적이 24.1km²로서 전체 면적의 약 1,8%를 점하고 있었으며, 그 다음이 논으로 전체 면적의 약 15,1%(200.4km²)로 조사되었다. 그 중 나지는 식생이 발달하지 않아 토양이 그대로 지표에 노출된 상태에서 집중호우나 주기적인 지표수의 흐름에 의해 토양이 침식되어 하천 하류나 집수역에 퇴적되어 지형의 변형, 농경지 훼손, 육수생태계 교란 등 환경에 부정적 영향을 미친다. 따라서 나지에 대한 지피식물의 식재, 조림 등의 사업을 통해 토양유실을 방지해야 할 것이다.

논은 집중 강우 시 강우가 도시나 하천으로 직접 유입되지 않고 일시 또는 장기적으로 물을 가둘 수 있는 홍수조절기능과 수자원함유, 기후순화기능 등의 환경공익적 기능을 가지고 있다(고병구 등,

2009). 그러나 논외의 경우 작물 생육기간 동안 침수상태가 유지되기 때문에 토양의 이화학적 변화가 심하며(허봉구 등, 1997), 물에 의해 토양구조가 고정되지 않아 불안정한 상태를 유지하고 있으므로 토양유실과 같은 문제가 발생된다고 할 수 있다. 논과 더불어 밭의 경우 C값이 논보다 작지만 이들 지역은 산지 경사면을 개간하여 경사도가 평지보다 높기 때문에 집중 강우에 의한 토양유실 발생 위험이 높다. 따라서 경주시뿐만 아니라 우리나라 전역의 토양유실 관리체계를 수립하기 위해서는 논과 밭에 대한 토양환경 보전대책이 마련되어야 할 것이다.

토양유실 방지 효과가 있는 C값이 낮은 지역을 살펴보면, 침엽수림의 면적이 425.5km²로서 전체 면적의 약 32,1%를 차지하고 있었으며, 그 다음이 혼효림으로 21,5%(285.0km²)를 나타내었다. 우리나라의 침엽수림은 조림에 의해 많이 형성되어 있는데 경주시의 경우 소나무림이 다수를 차지하고 있다. 이러한 침엽수림은 연중 낙엽이 지지 않기 때문에 잎에 의한 강우의 완충효과가 높으며, 대부분 심근성 수종이기 때문에 근계에 의한 토양 지지력도 우수하다. 그러나 이규성(1994)의 경우 임령이 낮은 전나무, 잣나무 등의 침엽수림은 낮은 임관밀도와 미약한 낙엽 부식층 발달로 인해 참나무류 등

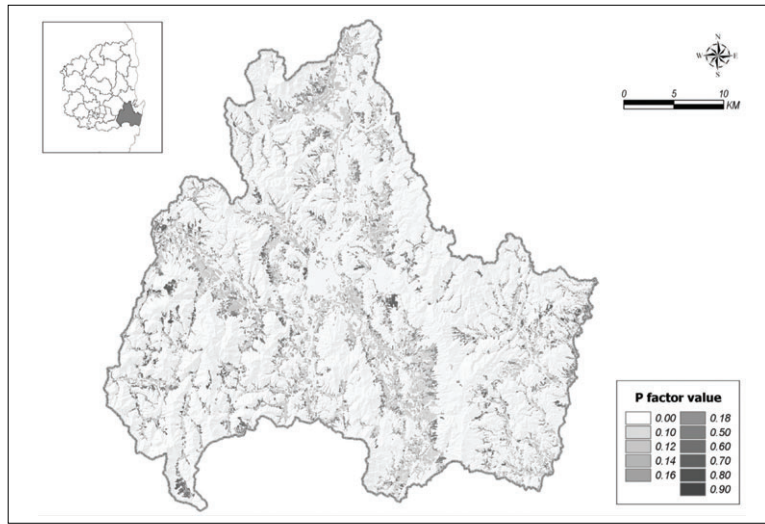


Figure 6. P-factor of Gyeongju

Table 4. Area and rate of P-value

| Slope(%) | Cropland practices | P-value | Area(km ²) | Rate(%) |
|----------|--------------------|---------|------------------------|---------|
| 0~3 | Terracing | 0.12 | 96.8 | 7.3 |
| | Contouring | 0.60 | 19.0 | 1.4 |
| 3~9 | Terracing | 0.10 | 59.0 | 4.5 |
| | Contouring | 0.50 | 23.6 | 1.8 |
| 9~13 | Terracing | 0.12 | 14.5 | 1.1 |
| | Contouring | 0.60 | 13.3 | 1.0 |
| 13~17 | Terracing | 0.14 | 9.7 | 0.7 |
| | Contouring | 0.70 | 11.1 | 0.8 |
| 17~21 | Terracing | 0.16 | 6.9 | 0.5 |
| | Contouring | 0.80 | 9.1 | 0.7 |
| 21 < | Terracing | 0.18 | 13.5 | 1.0 |
| | Contouring | 0.90 | 22.3 | 1.7 |

과 같은 활엽수림보다 토양유실이 많다고 하였다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 현재 밀생된 침엽수림의 임분을 적절하게 관리할 필요성이 있는데 리기다소나무림의 경우 간벌, 가지치기와 같은 산림사업이 행해진 지역은 미시행 지역보다 토양환경 개선에 유리하다(박재현, 2004)고 보고하였다. 따라서 경주시의 토양유실 방지를 위해서는 기존의 침엽수림을 방지하기보다 적절한 환경 개선을 통해 하층 식생의 발달을 도모하고 생태적 천이가 발생되도록 산림정책이 병행된다면 건전한 산림생태계가 유지될 수 있을 것으로 기대된다.

5) 침식조절인자(P)

침식조절인자는 농경지의 경작형태를 분류하여 Table 4와 같이 유형별로 P값을 부여한 후 환경부에서 제작한 중분류 토지피복도를 사용하여 Figure 6과 같은 주제도를 제작하였다.

Table 4는 경사도와 그에 따른 침식조절인자별 특성을 나타낸 것으로서 P값이 가장 작은 0.10의 경우 경사도는 3~9%, 면적이 59.0km²이고 전체 면적의 약 4.5%를 점하고 있었으며, 형태는 테라스 경작형으로 분석되었다. 반대로 P값이 가장 큰 0.90의 경우 경사도가 20% 이상으로 면적은

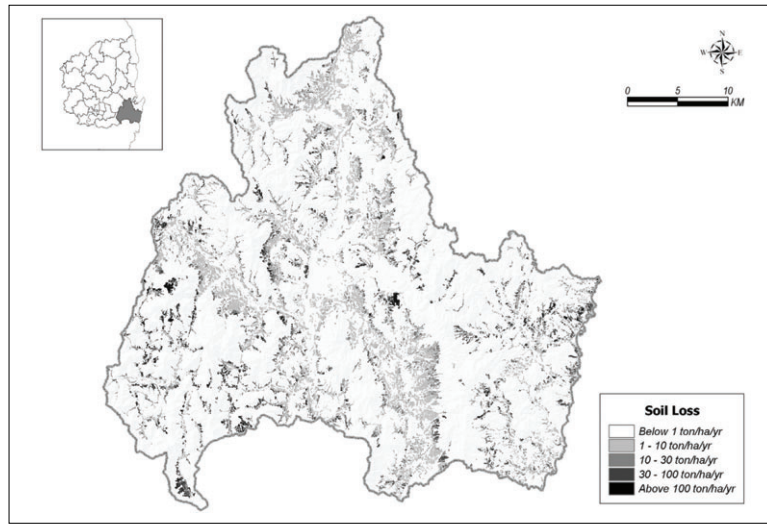


Figure 7. Distribution patterns of potential soil loss in Gyeongju

22.3km²이고 전체 면적의 약 1.7%를 차지하는 것으로 나타났고 등고선 경작형이다. 이러한 지역은 경사도가 높기 때문에 향후 토양유실이 발생될 가능성 또한 높다고 할 수 있다. 따라서 토양유실 방지하고 억제하기 위해서는 지형형태와 부합되는 경작지 조성, 형질변경 최소화, 환경친화적 농지 정리 등을 통해 토양유실을 저감할 수 있는 방안이 필요하다.

2. 토양침식 위험도 평가

경주시의 토양유실량 산정에 필요한 RUSLE를 적용하기 위해 강우침식인자(R), 지형인자(LS), 토양침식인자(K), 토지피복인자(C), 침식조절인자(P) 등 5개 인자를 이용하여 Figure 7과 같이 잠재적 토양유실량을 도출하였다.

Table 5는 토양유실량을 5개의 토양침식 위험도

평가등급으로 구분한 것이다. Class I의 경우 유실량이 1ton/ha/yr 이하로 가장 낮은 지역이며, 전체 면적의 약 83.9%에 해당되는 1,110.0km²를 나타내었다. Class II는 유실량이 1~10ton/ha/yr로 전체 면적의 약 9.1%이고 120.2km²로 분석되었으며, Class III은 전체 면적의 약 2.8%, 면적 36.7km²로 확인되었다. Class IV의 경우 전체 면적의 2.4%, 면적은 31.8km²였다. 연간 유실량이 100ton 이상인 Class V는 전체 면적의 1.8%, 면적은 23.8km²로 나타났다. 토양유실 추정값이 연간 10ton 이상이면 관심을 가져야 하는 수준인데(Morgan, 1995) 경주시의 경우 그 이상 지역이 전체 면적의 약 7.0% (92.3km²)로 조사되었다. 이러한 수치는 추정값이기 때문에 해당 지역에 대한 정밀 현장조사, 장기 모니터링 작업을 통해 토양유실의 잠재적 위험도를 저감할 수 있도록 해야 할 것이다.

Table 5. Distribution of the potential soil loss of each category

| Category | Soil loss(ton/ha/yr) | Area(km ²) | Rate(%) |
|-----------|----------------------|------------------------|---------|
| Class I | < 1 | 1,110.2 | 83.9 |
| Class II | 1 ~ 10 | 120.2 | 9.1 |
| Class III | 10 ~ 30 | 36.7 | 2.8 |
| Class IV | 30 ~ 100 | 31.8 | 2.4 |
| Class V | 100 ≤ | 23.8 | 1.8 |

IV. 결론

본 연구는 경상북도 동남부에 위치한 경주시를 대상으로 토양침식 위험도를 산정하기 위해 RUSLE 기법을 적용하여 토양환경 보전 대책 수립을 위한 기초 자료 제공에 그 목적이 있다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

RUSLE 기법 적용을 위해 강우침식인자(R), 지형인자(LS), 토양침식인자(K), 토지피복인자(C), 침식조절인자(P) 등 5개 인자를 활용하여 잠재적 토양유실량을 산정하였다.

강우침식인자(R)는 1990년부터 2001년까지 기상청 및 한국수자원공사의 기상관측소에서 측정된 각 연도별 월평균 강우량을 취득한 후 한국수자원공사에서 제작한 경주시의 Thiessen망도에 관측지점의 월평균 강우량을 회귀식에 적용하여 최종적인 강우침식인자를 추출하였다. 지형인자(LS)의 경우 LS값이 10 이하인 지역이 전체 면적의 75.39%에 해당되는 998.99km²로 나타났으며, LS값이 40 이상인 지역은 전체 면적의 약 0.04%로 0.52km²의 면적을 가지는 것으로 분석되었다. 따라서 LS값이 높은 지역은 경사도와 경사길이가 다른 지역에 비해 크기 때문에 각종 개발사업 시 토양보전대책 수립과 환경영향평가에 의한 토양 및 표토유실 저감방안이 논의되어야 할 것이다.

토양침식인자(K)의 경우 K값이 0.12 이하의 값을 가지는 지역의 면적은 57.5km²로서 전체면적의 약 4.4%를 나타내었으며, 0.12~0.23의 경우 면적 178.8km², 비율 13.5%, 0.24~0.35는 면적 726.3km², 비율 54.9%로 가장 많은 부분을 차지하고 있었다. 0.36~0.46의 경우 면적 259.8km², 비율 19.6%였으며, 0.47~0.58에서는 면적 101.1km², 비율 7.6%로 나타났다. 이러한 토양침식인자는 강우에 의한 침식에 토양이 저항하는 능력으로서 토양유실에 영향을 주는 중요 물리적 특성은 투수능력과 토양입자의 구조적 안정성이라 할 수 있다.

토지피복인자(C)의 경우 C값이 가장 높은 나지의 경우 면적이 24.1km²로서 전체 면적의 약 1.8%를 점하고 있었으며, 그 다음이 논으로 전체 면적의 약

15.1%로서 면적은 200.4km²이다. C값이 낮은 지역을 살펴보면, 침엽수림의 면적이 425.5km²로서 전체 면적의 약 32.1%를 차지하고 있었으며, 그 다음이 혼효림으로 면적 285.0km², 비율 21.5%를 나타내었다. 따라서 나지의 경우 지피식물의 식재, 조림 등의 사업을 통해 토양유실을 방지해야 할 것이며, 침엽수림의 적절한 환경개선을 통해 하층 식생을 발달을 도모하고 생태적 천이가 발생되도록 해야 할 것으로 생각된다.

침식조절인자(P)의 경우 P값이 가장 작은 0.10의 경우 경사도는 3~9%, 면적이 59.0km²이고 전체 면적의 약 4.5%를 점하고 있었으며, 형태는 테라스 경작형으로 분석되었다. P값이 가장 큰 0.90의 경우 경사도가 20% 이상으로 면적은 22.3km²이며, 전체 면적의 약 1.7%를 차지하는 것으로 분석되었고 등고선 경작형으로 나타났다. 따라서 토양유실 방지하고 억제하기 위해서는 지형형태와 부합되는 경작지 조성, 형질변경 최소화를 해야 할 것이다.

RUSLE 모델을 적용한 결과, Class I의 경우 유실량이 1ton/ha/yr 이하로 가장 낮은 지역이며, 전체 면적의 약 83.9%에 해당되는 1,110.0km²를 나타내었다. Class II는 유실량이 1~10ton/ha/yr로 전체 면적의 약 9.1%이고 120.2km²로 분석되었으며, Class III은 전체 면적의 약 2.8%, 면적 36.7km²로 확인되었다. Class IV의 경우 전체 면적의 2.4%, 면적은 31.8km²였다. 연간 유실량이 100ton 이상인 Class V는 전체 면적의 1.8%, 면적은 23.8km²로 나타났다. 토양유실 추정값이 10ton 이상인 지역은 전체 면적의 약 7.0%(92.3km²)로 나타나 앞으로 현장조사와 그에 따른 농지의 환경친화적 조성, 경작환경 개선 등이 요구된다.

본 연구는 경주시 전체를 대상으로 토양유실량 산정을 실시하였기에 광역적인 결과만을 제시하는 한계점을 가지고 있다. 따라서, 향후 경주국립공원, 형산강 유역 등 세부적이고 미시적인 분석을 통해 토양유실량을 분석한다면 경주시와 더불어 경상북도 동남부의 토양유실에 대한 저감대책과 토양환경보전대책을 수립하는데 유리할 것으로 생각된다.

또한 RUSLE와 USLE간의 결과 비교 및 RUSLE와 기타 예측방법과 상호 비교 연구가 이루어진다면 보다 정확하고 우수한 예측모형이 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 고병구, 강기경, 홍석영, 이덕배, 김민경, 서명철, 김건엽, 박광래, 이정택, 2009, 용인시의 토지이용면적과 지표면 온도 변화를 이용한 환경보전 기능 변동 계량화, 한국환경농학회지, 28(1), 1-8.
- 고지연, 이재생, 정기열, 윤을수, 최영대, 김춘식, 박성태, 김복진, 2006, USLE 및 GIS, RS를 이용한 서낙동강 유역 농경지 토양침식 위험도 평가, 한국토양비료학회지, 39(3), 173-183.
- 경주시, 2009, 경주시통계연보, 경주시.
- 국립방재연구소, 1998, 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I), 국립방재연구소.
- 권형중, 박근애, 김성준, 2002, GIS 및 다시기 RS 자료를 이용한 토양손실량 변화 및 이동경로 추정, 한국GIS학회지, 10(1), 139-152.
- 김영표, 이관희, 송성태, 2008, 가야산국립공원의 토양침식지역 분석, 한국산림휴양학회지, 12(3), 1-11.
- 김주훈, 김경탁, 연구방, 2003, GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석, 한국지리정보학회지, 6(2), 22-32.
- 김주훈, 오덕근, 2004, 빈도별 R인자에 의한 토양침식 위험지역 분석, 한국지리정보학회지, 7(2), 47-56.
- 김주훈, 이충대, 김경탁, 최윤석, 2007, WAMIS 토지피복도를 활용한 토양유실량 분석-무심천 유역을 대상으로-, 한국지리정보학회지, 10(4), 122-131.
- 김주훈, 김경탁, 이효정, 2009, 한국토양유실량 및 토양유실위험 지역 분석, 한국GIS학회지, 17(3), 261-268.
- 노진운, 2008, 도시화유역의 토사유출량 산정에 관한 연구, 영남대학교 대학원 석사학위논문.
- 박경훈, 2003, GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식위험도 평가, 한국지리정보학회지, 6(4), 24-36.
- 박재현, 2004, 리기다소나무림 임분에서 숲가꾸기가 토양의 물리성 및 산림의 수질정화기능에 미치는 영향에 관한 연구(I), 한국임학회지, 93(1), 1-9.
- 박지상, 김건하, 2006, RUSLE 모델을 이용한 금강유역의 토지이용별 토사유출량 추정, 한국물환경학회지, 22(4), 619-625.
- 송성태, 2006, GIS 및 RUSLE 모형을 이용한 가야산국립공원의 토양침식 위험지역 연구, 대구대학교 대학원 석사학위논문.
- 오정학, 정성관, 2005, 토지자원관리를 위한 낙동강유역의 잠재적 토양유실량 산정, 농촌계획, 11(2), 9-19.
- 이규성, 1994, 산림유역의 토양유실량 예측을 위한 지리정보시스템의 범용토양유실식(USLE)에의 적용, 한국임학회지, 83(3), 322-330.
- 이근상, 이환주, 임승현, 조기성, 2001, GIS를 활용한 토양침식모형에서 지형인자의 영향분석, 대한토목학회논문집, 21(4-D), 545-554.
- 이근상, 최연웅, 박진혁, 2011, GIS를 이용한 댐 저수지의 흙탕물 발생 가능성 비교 평가, 한국지리정보학회지, 14(1), 94-106.
- 이길하, 이근상, 조홍연, 2008, 기후변화에 따른 임하댐 유역의 GIS 기반 토양침식 추정, 대한토목학회논문집 28(3D), 423-429.
- 임현수, 2005, RUSLE와 GIS를 이용한 복하천 유역의 토양유실량 산정 및 잠정 위험 지구 선정, 충남대학교 대학원 석사학위논문.
- 장영률, 이근상, 조기성, 2002, GIS기반에서 토양침식의 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구, 한국GIS학회지, 10(2), 301-316.
- 정강호, 김원태, 허승오, 하상건, 정필균, 정영상,

- 2004, 수치정밀토양도에 기초한 전국 토양유실량의 평가를 위한 USLE/RUSLE 인자의 산정, 한국토양비료학회지, 37(4), 199-206.
- 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의, 1999, 강원도 경사지 토양유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수인자와 토양침식성인자의 검토, 한국토양비료학회지, 32(1), 31-38.
- 정필균, 고문환, 임정남, 김기태, 최대웅, 1983, 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석, 한국토양비료학회지, 16(2), 112-118.
- 최윤영, 최정우, 2010, 토지이용변화에 따른 유사량 특성분석을 위한 SWAT 모형의 적용, 한국수처리학회지, 18(1), 59-72.
- 허봉구, 임상규, 김유학, 이계엽, 1997, 우리나라 논 토양 유형별 이화학적 특성, 한국토양비료학회지, 30(1), 62-66.
- Morgan, R.P.C., 1995, Soil Erosion and Conservation, Longman, London.
- van Remortel, R.D., M.E. 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.
- van Remortel, R.D., R.D. Maichle, and R.J. Hickey, 2003, Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using C++ executable, Computers and Geoscience, 30(9-10), 1043-1053.

최종원고채택 11. 06. 09