

연구논문

소옥천유역 토양유실 우심지역 선정 및 대책에 관한 연구

정동환* · 김해정** · 이영준* · 홍선화* · 윤조희* · 최희락* · 조홍래**

국립환경과학원 금강물환경연구소*, (주)하이드로코어**

(2012년 6월 2일 접수, 2012년 8월 13일 승인)

A Study on Selection and Measures of the Apprehensive Areas of Soil Loss in the So-ok Stream Watershed

Dong-Hwan Jeong* · Haejung Kim** · Young Joon Lee* · Sunhwa Hong* · Johee Yoon* · Heelak Choi* · Hong-Lae Cho**

Geum-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research*, HydroCore Ltd.*

(Manuscript received 2 June 2012; accepted 13 August 2012)

Abstract

This study aims to find out critical areas of a soil loss and propose feasible measures to reduce the water quality deterioration by a soil lose. As a study area, the So-ok stream catchment locating at the upper area of Daecheong Reservoir is selected and intensive field observation was carried out. RUSLE model is applied to assess the impact of the pollution migration by a soil ross from the critical areas during storms on the water quality of Chusori embayment. As results, total amount of the soil ross assessed against to the critical area on which major type of land use is a orchard for fruits is 54.3 ton/ha/yr and that of an abandoned mine site is about 200 ton/ha/year. In particular as effective measures, a plantation of an appropriate species of fruit trees and an application of ecologic restoration schemes are proposed against to the orchard and the abandoned mine site, respectively.

Keywords : RUSLE model, Soil loss, Land cover, Land use, So-ok stream watershed

1. 서론

우리나라에서 대표적인 인공호수인 대청호는 2010년 대전·충청지역 320만 명이 마시는 상수원으로 이용되고 있다. 대청호에 조류경보제가 도입된 1998년 이래 매년 조류주의보가 발령되고 있으며,

여름철에는 조류발생에 따른 수질문제가 지속적으로 대두되고 있다(금강물환경연구소, 2011a). 조류는 유기물 및 영양염류, 수온·일조량과 같은 유역 환경 조건과 같은 요인이 복합적으로 작용하여 발생되고 있으며(박종근, 2005; 오희목 등, 1995; 신재기 등, 2003), 대청호는 지형적 특성상 길고 완곡부

가 많으며 흐름이 유입량과 방류량에 따라 통제되기 때문에 조류의 공간적 분포는 매년 다르게 나타나고 있다(유순주 등, 2006). 대청호의 유입 지천을 따라 이동하던 오염물질이 만입부 수역으로 유입되어 정체된 물과 만나 혼합 침전되며, 특정시기에 재부상, 용출되고 수온, 일조량, 바람 등 조류성장 최적요건이 갖춰지면 조류가 대발생하는 현상이 일어난다(호소수질연구소, 1993).

추소리 만입부 수역의 상류지역의 소옥천 유역에서 유입되는 영양염류에 의해 조류발생과 부영양화 현상이 심하게 발생되고 있다. 소옥천 유역에서 영양염류 배출부하량의 70% 정도가 비점오염원에 의한 것으로 조사되었으며, 이들 비점오염원 중 토지계 오염원에 가장 많이 배출되는 것으로 나타났다(금강물환경연구소, 2011a, 2011b). 따라서 강우시 토양유실에 의한 영양염류 유입이 대청호 만입부 조류발생과 수질에 커다란 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 이러한 토양유실의 문제점을 인식하고 토양유실량을 평가하는 많은 연구가 수행되었는데 김주훈 등(2009)은 한국의 토양유실량을 산정하고 토양유실 위험 지역을 분석하였으며, 김민경 등(2010)은 기후변화에 따른 강우량 변화 시나리오에 따라 경작지의 유실량을 예측하였다. 박지상과 김건하(2006)는 금강유역, 광동욱과 조기성(2006)은 낙동강 북동쪽의 안동호 유역, 조홍래와 정종철(2005)은 강원도 내린천 유역, 박의정 등(2005)은 영산강 상류지역, 김주훈과 오덕근(2004)은 섬진강 수계인 관촌 유역을 대상으로 토양유실량을 산정한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 조류발생이 심한 정체 지역인 추소리 만입부 수역의 상류 소옥천 유역에서 비점원인원물질로 작용하는 토양유실을 정량적으로 규명하기 위해 위성영상, GIS, RUSLE 모형 등의 도구를 이용하였으며, 소옥천 유역에서 토양유실 영향을 평가하고 유실이 심한 지역을 소유역별로 도출하여 저감 대책을 수립하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구지역

연구 대상지는 소옥천 유역으로 금강수계 내 대청댐유역에 포함되며 소옥천 상류와 소옥천 하류의 표준유역으로 구분된다. 지형적 특징은 남쪽이 높고 북쪽이 낮은 지형으로 최고 고도는 해발 900 m, 최저 고도는 해발 75 m이다. 소옥천 상류 유역은 면적 104.14 km²로 유역 내 소옥천의 지류인 추풍천, 성당천, 서대천, 금산천, 상곡천이 흐른다. 소옥천 하류 유역은 유역 면적 87.42 km²으로 금구천이 소옥천으로 합류되며 대청댐 상류의 금강으로 유입된다. 소옥천 유역은 행정구역상 충청북도 옥천군 옥천읍, 군북면, 군서면과 금산군 추부면, 군북면에 걸쳐있다. 지리적 위치상 상류수계의 오염원과 옥천읍에서 발생하는 도시오염원이 금구천을 통해서 직접 영향을 받기 쉬운 지리적 특성을 지닌다. 환경부 중분류 토지이용도를 이용하여 살펴볼 때, 소옥천 유역의 토지이용은 산림지역이 66.6%로 대부분을 차지하며 논이 11.8%, 밭과 과수원이 11.5%, 시가화지역이 5.7%이다.

2. 연구방법

USLE(Universal Soil Loss Equation) 모형은 농업지역의 토양유실량을 산정하기 위하여 Wischmeier · Smith(1958)가 강우에 의한 토양입자의 이탈 및 운송에 의한 개념을 기초로 처음 제안하였고, 1978년에 수정식을 제안하였다. Agricultural Research Service(1996)는 개발목장이나 산림과 같은 실험지점 이외의 토양조건에 대한 토사침식량 산정을 위해 기후인자의 수정, 계절적 변화에 대한 토양의 침식성 인자의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 수정과 피복 식생인자를 산정하는 새로운 계산과정의 개발 등을 추가한 개정 범용 토양유실 공식(RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation)을 발표하였다. 이 공식은 현재 세계 각지에서 검증을 받아 널리 쓰이는 토양침식 모형 중 하나로 식 1과 같이 표현된다(Agricultural

Research Service, 1996).

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

이 식에서 A는 연평균 토양유실량(tons/ha/yr)으로 다음의 6가지 인자에 의해 결정이 된다. R은 강우침식인자(107 · J/ha · mm/ha)로 지역별로 상이한 강우강도와 강우지속기간 및 발생빈도를 고려하기 위한 인자로서 지상에 떨어지는 빗방울이 가지는 운동에너지를 연평균 개념으로 나타낸다. 국내에 선행된 여러 연구에서 연평균강우량을 이용하여 R 인자의 값을 추정하는 Toxopeus(1996)에 의한 산정식을 적용하고 있다(김민경 등, 2010; 박지상 · 김건하, 2006; 조홍래 · 정종철, 2005; 박의정 등, 2005). K는 토양침식인자(ton/ha/R)로 사면길이 22.13 m에 9 도의 경사를 가진 나지를 표준 조건으로 하여 이에 대한 상대적인 침식 정도를 나타낸다. L은 지표면 길이에 관계되는 지형인자(무차원)로 지표에서 월류수가 발생되기 시작하는 지점으로부터 경사가 줄어 퇴적이 일어나는 지점까지의 거리 또는 유출이 뚜렷하게 수로나 지류로 합류하는 지점까지의 거리를 나타내며, S는 경사도에 관계되는 지형인자(무차원)로 수평거리에 대한 고저차의 백분율을 나타낸다(조홍래 · 정종철, 2005). C는 식생피복인자(무차원)로 나지 상태에서의 강우로 인한 토양유실량에 대한 작물 혹은 식생 피복 상태에서의 토양유실량의 비로 정의되며, P는 침식조절인자(무차원)로 경작 형태에 따른 토양유실의 비를 나타내는 것으로 토양보존을 위하여 등고선재배(contouring), 등고선대상재배(strip cropping), 계단식재배(terracing) 등의 대책을 강구했을 경우의 토양유실량의 비로 정의된다(윤용남, 2007).

RUSLE 공식을 이용하여 토양유실량을 산정하

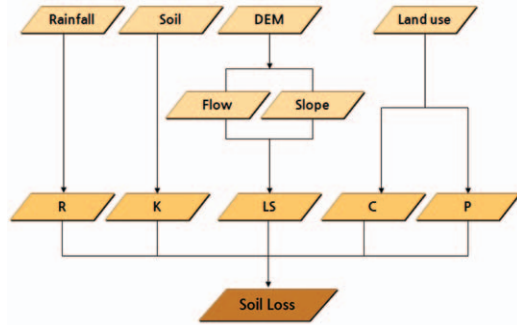


그림 1. RUSLE 모형의 토양유실 개념도

기 위한 각 인자별 값은 강우자료, 지형자료, 토지피복자료, 토양자료를 통해 획득할 수 있다(그림 1). 지형자료의 경우 10 m 공간해상도의 DEM을 이용하였으며, 토지피복자료는 환경부 중분류 토지이용자료와 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 위성영상을 이용하여 추출한 토지피복 자료를 이용하였다. 토양자료는 농업과학기술원에서 제공하는 1:250,000 개략토양도를 이용하였으며, 강우자료는 국가수자원관리 종합정보시스템에 공개된 강우량 정보를 이용하였다. 입력자료와 출처를 표 1에 나타내었다.

연구지역의 변화 및 모형에 입력되는 토지피복자료(Landcover data)를 구축하기 위하여 일본의 METI(Ministry of Economy, Trade and Industry)와 ERSDAC(Earth Remote Sensing Data Analysis Center)에서 제공하는 ASTER 영상(15 m 해상도)을 이용하여 소옥천유역 토지피복도를 작성하였다. 훈련지역 작성 후, 감독분류 방법 중 최대우도법(Maximum Likelihood Classification)을 이용하여 토지피복도를 작성하였다(그림 2). 분석결

표 1. RUSLE 모형 구축을 위한 입력자료

자료명	자료 세부 내용	출처
DEM	10 m × 10 m 해상도	국립지리정보원
토지피복도	중분류 토지이용도	환경부
	ASTER 위성영상	대전옥천, 2011년 3월 27일 영상
토양도	1:250,000 개략토양도	농촌진흥청, 농업과학기술원
강우자료	5개 강우관측소(군북, 대성산, 옥천, 인동, 추부)	국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)

표 2. 소옥천 유역의 토지피복 분류

구분	수역	시가화	도로	논	밭	식생	나대지	채광지	모래톱
면적(km ²)	1.75	3.30	7.81	33.6	14.1	129.0	1.32	0.34	0.16
비율(%)	0.91	1.72	4.08	17.6	7.38	67.4	0.69	0.18	0.09

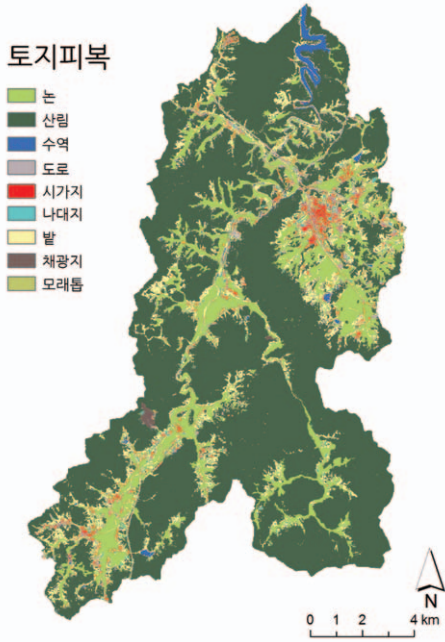


그림 2. 소옥천 유역의 토지피복도

과 소옥천 유역은 식생이 67.4%로 가장 많은 비율을 차지하며, 논과 밭이 각각 17.6%, 7.4%를 차지하며, 나머지 항목들은 5% 미만의 비율로 분포하는 것으로 파악되었다(표 2). 이 때 ASTER 영상을 이용하여 작성된 토지피복도에 대한 정확도 검증은 흑백영상의 경우 1 m 공간해상도를 제공하는 KOMPSAT2(Korean Multi-purpose Satellite 2)의 영상을 이용하여 소옥천 유역에 대하여 수행하였으며, Error Matrix 기법을 이용하여 분류 정확도를 평가한 결과 전체 정확도는 85.0%로 나타났다.

III. 연구결과 및 고찰

1. RUSLE 모형 인자산정

1) 강우침식인자(R)

강우침식인자를 산정하기 위해 Toxopeus(1996)

표 3. 소옥천 유역의 강우침식인자(R) 및 면적

관측소	연평균강우량 (mm/yr)	R factor	면적(km ²)
군북	1554.5	582.6	19.7
대성산	1507.0	566.0	53.3
옥천	1386.0	523.6	66.0
인동	1319.5	500.3	10.7
추부	1471.0	553.4	41.8

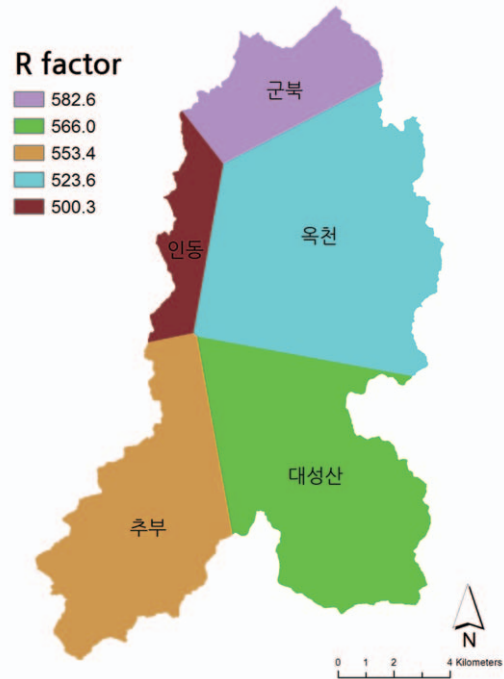


그림 3. 소옥천 유역의 강우침식인자(R)

에서 제시한 경험식을 적용하였다(식 2). 소옥천 유역 내에는 옥천, 추부, 대성산 세 곳의 강우관측소가 있다. 그러나 관측지점에서 측정된 강우자료를 지역으로 확장할 때 흔히 사용되는 Thiessen망을 적용할 경우 일부 지역에서 군북과 인동 관측소의 영향을 받기 때문에 이를 포함한 5곳의 강우자료를 이용하였다. 모든 관측소에서 결측 데이터가 없는 2002년부터 2005년까지 4년간의 연평균강우량을 입력값으로 하여 강우침식인자를 산정하였고 그 값

표 4. 토양통별 토양침식인자 (이환주, 2001; 건설교통부, 1992)

토양통	특 성	K factor	면적(km ²)
Af	충적토, 배수 불량 내지 양호, 미사사양질 내지 사양질	0.39	0.4
An	회색토 및 충적토, 배수 양호 내지 약간 불량, 식양질 내지 사양질	0.31	15.0
Ap	회색토, 충적토 및 적황색토, 배수 불량 내지 양호, 미사식양질 및 식양질	0.32	12.8
Ma	암쇄토 및 적황색토, 산성암, 배수 매우 양호, 식양질 내지 사양질	0.27	20.9
Mm	암쇄토, 변성퇴적암 및 편암, 배수 매우 양호, 식양질 내지 사양질	0.18	100.1
Ra	적황색토, 암쇄토, 회색토 및 퇴적토, 배수 양호 및 약간 불량, 식양질	0.21	40.5
Re	암쇄토, 회색토 및 충적토, 배수 양호 내지 불량, 사양질	0.32	1.6
Rocky	-	0.10	0.3

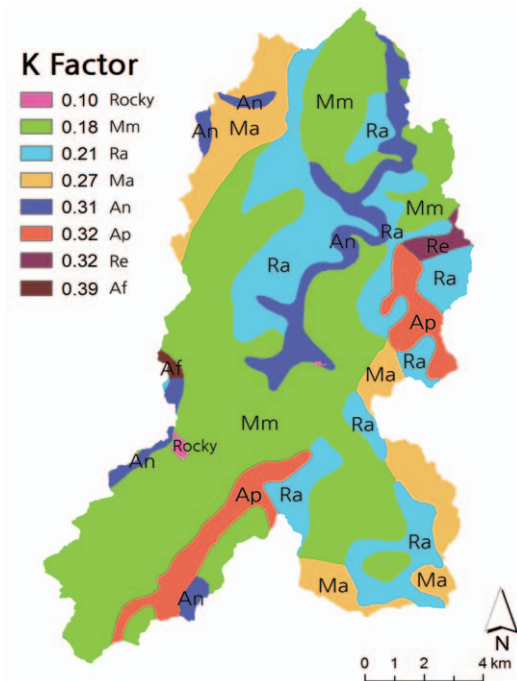


그림 4. 소옥천 유역의 토양침식인자(K)

을 표 3과 그림 3에 나타내었다.

$$R = 38.5 + 0.35 \times P \quad (2)$$

여기서, P는 연평균 강우량(mm/yr)이다.

2) 토양침식인자(K)

토양침식인자를 산정하기 위해 1:250,000 개략 토양도를 이용하였다. 토양통별 토양침식인자는 토양의 입경분포, 유기물함량, 골재함량을 통해 삼각형 도표로부터 산정한 것으로 소옥천 유역에 해당하는 토양통에 대한 K값은 표 4 및 그림 4와 같다 (이환주, 2001; 건설교통부, 1992). 소옥천 유역 내

에 채석장이 존재하는데 토양도를 통해서도 그 특성이 드러나지 않는다. 채석장은 석재·골재 등을 채굴하는 옥외 또는 지표의 작업장을 칭하는데 이 경우 토양이 아닌 암반이 외부로 노출된다. 따라서 채석장의 경우 Rocky의 인자값을 적용하였다.

3) 지형인자(LS)

지형인자를 산정하기 위해 10 m 공간해상도의 DEM을 사용하였다. 지형인자는 침식사면의 길이인자(L) 및 경사인자(S)로 구성되어 있으며 본 연구에서는 침식사면의 길이인자(L)의 산정에는 Desmet와 Govers(1996)의 공식을 적용하였고(식 3, 식 4), 경사인자(S)의 산정에는 Nearing(1997)의 공식을 적용하였다(식 5). 침식사면의 길이인자를 정함에 있어서 상류의 기여 면적은 강우에 의한 토사가 일반적으로 120~150 m 내에서 퇴적되는 것을 감안하여 150 m를 초과하는 경우 150 m로 낮추어 적용하였다(조홍래·정종철, 2005).

$$\beta = \frac{(\sin \theta / 0.0896)}{(2.96 \times \sin^{0.79} \theta + 0.59)} \quad (3)$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

여기서, m은 침식사면 길이의 멱지수, θ 는 경사각이다.

$$L(i, j) = \frac{(A(i, j) + D^2)^{m+1} - A(i, j)^{m+1}}{x_m \cdot D^{m+2} (22.13)^m} \quad (4)$$

여기서, A는 이용 가능한 상류 기여 면적, D는 격자 크기, X는 흐름방향에 직교하는 등고선의 길이이다.

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + e^{(2.3 - 6.1 \sin \theta)}} \quad (5)$$

Desmet와 Govers(1996)의 공식 및 Nearing

표 5. 소옥천 유역의 지형인자(LS)

세부 유역	최소값	최대값	평균값	표준편차
소옥천 본류	0.05	19.60	2.85	3.02
금구천	0.05	18.90	1.62	2.36
금산천	0.05	19.36	3.99	3.61
추풍천	0.05	20.27	3.02	3.24
유역 전체	0.05	20.27	2.94	3.22

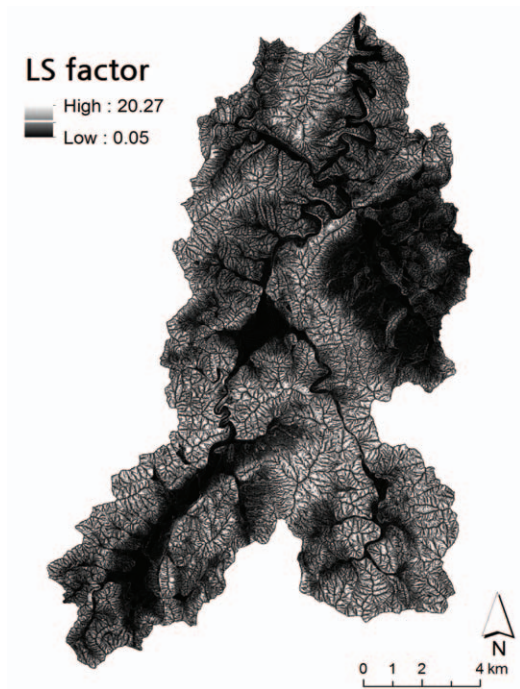


그림 5. 소옥천 유역의 지형인자(LS)

(1997)의 공식을 적용하여 산정한 길이인자와 경사인자의 두 값을 각 격자별로 곱한 LS인자의 통계값을 지류에 따른 세부 유역별로 구분하여 표 5 및 그림 5에 나타내었다. 소옥천 유역 전체에서 LS인자의 평균은 2.92이며, 옥천읍이 위치하는 금구천 유역의 LS인자가 상대적으로 낮은 값인 평균 1.62이고, 고도가 높고 산지가 많은 금산천 유역의 LS인자가 상대적으로 높은 값인 평균 3.99을 나타내었다.

4) 식생피복인자(C)

식생피복인자를 산정하기 위해 2011년 3월 27일자 ASTER영상을 분석한 토지이용도를 이용하였다. 영상에 대한 토지피복 분류는 수역, 시가화지역, 도로, 나대지, 산림, 논, 밭, 채광지와 하천변 모

표 6. 소옥천 유역의 식생피복인자(C) 및 면적

구분	C factor	면적(km ²)	면적(%)
수역	0.0	1.7	0.9
시가화지역	0.002	3.3	1.7
도로	0.0	7.8	4.1
나대지	1.0	1.3	0.7
채광지	1.0	0.3	0.2
산림	0.1	129.0	67.4
논	0.3	33.6	17.6
밭	0.4	14.1	7.4
모래톱	0.2	0.2	0.1

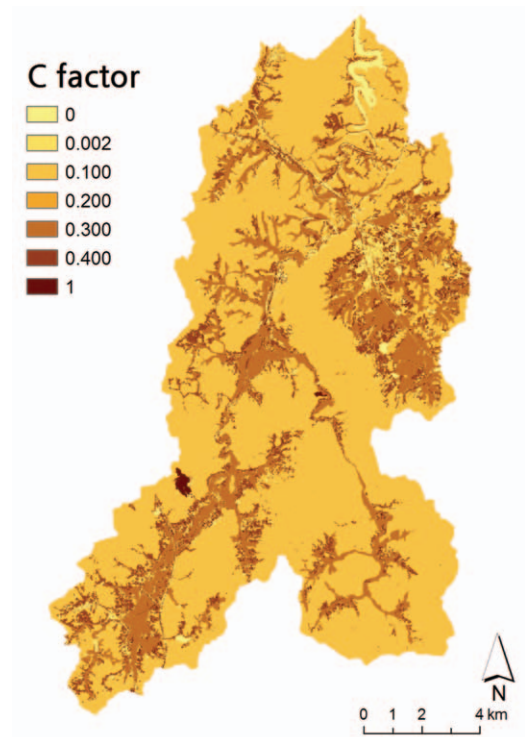


그림 6. 소옥천 유역의 식생피복인자(C)

래톱을 분류항목으로 지정하여 수행하였으며, 분류 결과는 표 6과 같다. 본 연구에서는 환경부 대분류에 준하는 토지이용도에 대해 신계중(1999)이 제안한 이래 여러 연구에서 사용되고 있는 토지이용별 식생피복인자를 기준으로 인자를 적용하였으나 시가화지역의 경우 일부 토양유실이 발생할 수 있다는 점을 고려하여 오정학 등(2011)이 이용한 식생피복인자의 주거지역에 대한 값을 반영하였다. 또한 초지의 경우 겨울철 위성영상으로 뚜렷이 드러나지

않아 분류하지 않았으며 하천변의 모래톱에 대해 초지의 값을 반영하였다. 구체적인 인자값과 지리적 분포는 그림 6에 나타내었다.

5) 침식조절인자(P)

침식조절인자(토양보존대책인자)를 산정하기 위하여 환경부의 중분류 토지이용도를 이용하였다. 본 연구에서 ASTER 위성 영상을 이용하여 분류한 토지이용도는 최근 2011년도의 토지이용을 보여준다는 장점이 있지만 겨울철에 촬영된 영상으로 경작지의 정확도가 높지 않은 한계가 있다. 반면 환경

표 7. 소옥천 유역의 침식조절인자(P) 및 면적

경사	테라스 경작(논)		등고선 대상경작(밭, 과수원)	
	P factor	면적(km ²)	P factor	면적(km ²)
0 ~ 7%	0.10	13.2	0.27	4.9
7 ~ 11.3%	0.12	3.6	0.30	3.4
11.3 ~ 17.6%	0.16	2.1	0.40	4.2
17.6 ~ 26.8%	0.18	1.6	0.45	4.8
26.8% 이상	0.20	2.0	0.50	5.3

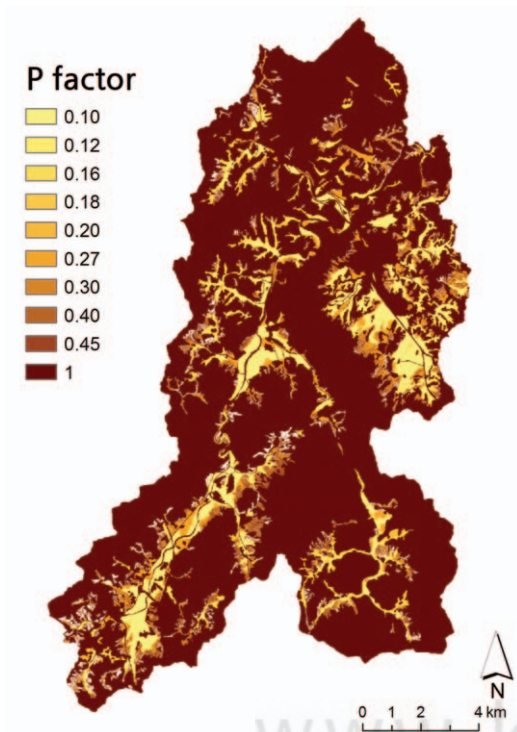


그림 7. 소옥천 유역의 침식조절인자(P)

부의 중분류 토지이용도는 2009년에 갱신된 자료로 경작지가 논, 밭, 과수원, 하우스재배 등 구체적으로 분류되어 있다. 토양보존대책인자는 유형과 경사도에 따라 값이 다르다. 농업과학기술연구소에서 경작 형태와 경사도에 따라 토양보존대책인자를 제시했으며, 대부분의 연구에서 같은 값을 적용하고 있다(신계중, 1999; 장영울 등, 2002; 박경훈, 2003; 이근상 등, 2003; 김주훈 등, 2004; 조홍래 등, 2005; 곽동욱 등, 2006; 박지상 등, 2006). 국내 경작 형태를 감안하면 논, 밭의 경우 지형을 따라 테라스 형태로 입지하며, 밭의 경우 토양 수분 유지를 위해 이랑과 고랑을 등고선과 평행하게 경작하는 것이 일반적이다. 따라서 토양보존을 위한 대책으로 논은 테라스 경작의 보존 대책을 세운 것으로, 밭과 과수원은 등고선 대상 경작의 보존 대책을 세운 것으로 간주하였고 표 7 및 그림 7에 그 값을 나타내었다.

2. RUSLE를 이용한 토양유실량 산정 및 우심지역 선정

앞에서 설명한 RUSLE의 각 인자를 이용하여 소옥천 유역의 토양유실량을 산정하였다. 소옥천 유역의 단위면적당 연간 토양유실량은 36.8 ton/ha/yr이며, 소옥천 유역 전체의 연간 토양유실량은 705,026 ton/yr 이다. 토양유실 등급, 토지이용, 세부 유역과 행정구역에 따른 단위면적당 연간 토양유실량은 다음과 같다.

1) 토양유실 등급 분류

경제협력개발기구(OECD, 2001)에서는 농업의 친환경적 관리를 위한 노력의 일환으로 환경지표를 제안하고 있으며 그 중 토양의 침식과 관련하여 5개의 등급으로 구분하고 있다. 우리나라의 경우 토지이용에 따라 토양 침식 위험성이 양극화되어 있기 때문에 농업과학기술원에서는 경제협력개발기구에서 제안하는 등급 중 가장 침식위험이 작은 등급과 큰 등급을 두 등급으로 나누어 매우 적음부터 매우 심함까지 7 단계로 세분화하였다(곽한강 등, 2005).

본 연구에서는 농업과학기술원에서 제안한 토양

표 8. 소옥천 유역의 토양유실 등급 분포

토양유실량 (ton/ha/yr)	등급 (농업과학 기술원)	등급 (OECD)	면적(ha)	비율(%)
0 ~ 2	매우적음	매우 적음	3,252	17.0
2 ~ 6	적음	(tolerable)	1,866	9.7
6 ~ 11	약간 적음	적음(low)	2,134	11.1
11 ~ 22	보통	보통(moderate)	2,558	13.4
22 ~ 33	약간 심함	심함(high)	2,027	10.6
33 ~ 50	심함	매우 심함	2,340	12.2
50 이상	매우 심함	(severe)	4,969	26.0

표 9. 토지이용별 연간 토양유실량 산정

토지이용	면적(ha)	비율(%)	토양유실량 (ton/ha/yr)
수역	174.7	0.9	0.00
도로	780.7	4.1	0.00
시가화	329.6	1.7	0.14
논	3,362.0	17.6	11.8
밭	1,413.1	7.4	40.5
산림	12,903.0	67.4	45.5
모래톱	16.3	0.1	12.7
나대지	132.2	0.7	102.2
채광지	33.4	0.2	200.1

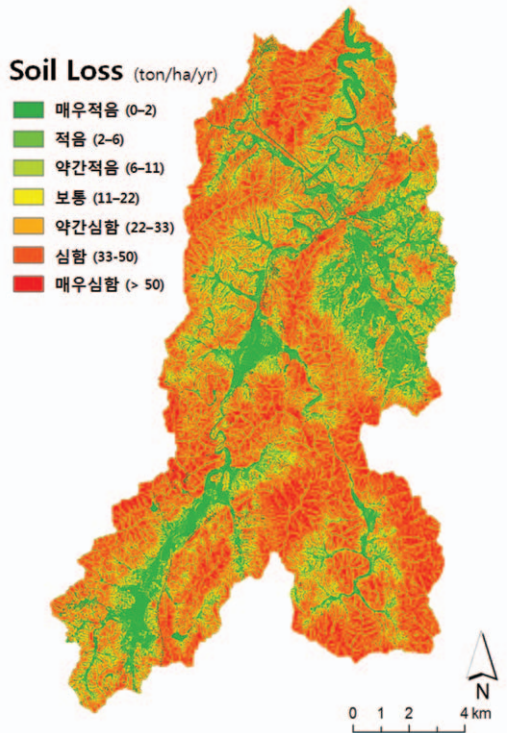


그림 8. 소옥천 유역의 토양유실 등급

유실 등급에 따라 소옥천 유역의 토양유실량을 살펴 보았다(표 8, 그림 8). 일반적인 농경지 토양의 침식 제어 목표치인 11 ton/ha/yr를 초과하는 지역이 전체 면적의 62.2%로 높은 비율을 나타내었으며, 토양유실이 심하게 우려되는 33 ton/ha/yr 이상인 지역이 38.2%인 것으로 나타났다. 이는 소옥천 유역의 토양유실에 대한 대책이 시급히 요구됨을 보여준다.

표 10. 소유역별 연간 토양유실량 산정

소유역	면적(ha)	비율(%)	토양유실량 (ton/ha/yr)
소옥천 분류	5,422.3	28.5	35.4
금구천	3,245.5	17.0	21.1
금산천	4,201.3	22.1	49.0
추풍천	6,176.4	32.4	38.3

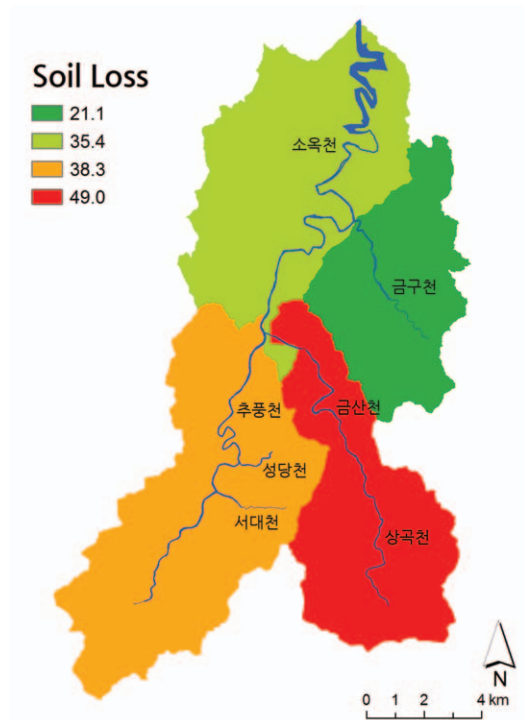


그림 9. 소유역별 연간 토양유실량 현황

2) 토지이용별 연간 토양유실량

토지이용별 단위면적당 연간 토양유실량은 채광지가 200.1 ton/ha/yr로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 나대지가 102.2 ton/ha/yr로 나타났다. 채광지와 나대지의 총 면적은 1% 이하로 넓지 않지만 심각한 토양유실이 발생하는 만큼 집중적인 관리 대책이 요구된다. 다음으로 산림지역이 45.5 ton/ha/yr이고 밭이 40.5 ton/ha/yr으로 나타났는데 이것은 밭의 경우 대상경작으로 토양보전대책이 행해지고 있다고 간주되었으며 상대적으로 경사도가 낮은 지역에 밭이 위치하였기 때문이라고 판단된다(표 9).

3) 소유역별 연간 토양유실량

연간 토양유실량을 소유역별로 살펴보면 상류 유역인 추풍천과 금산천 유역이 상대적으로 유실량이 많으며 옥천읍이 위치하는 금구천 유역은 토양유실이 가장 적다. 이는 추풍천 유역과 금산천 유역은 고도가 높은 지역으로 경사도가 급하며, 이러한 지형적 특성으로 인해 강우량도 상대적으로 높게 나타나기 때문이다(표 10, 그림 9).

4) 행정구역별 연간 토양유실량 및 우심지역

행정구역에 따른 평균 토양유실량을 읍·면과 리 단위로 확인하였다. 소옥천 유역은 옥천군과 금산군에 걸쳐 있으며, 읍·면을 기준으로 금산군 군북면의 단위면적당 연간 토양유실량이 49.7 ton/ha/yr로 가장 높게 산정되며, 저지대의 평탄한 지형에 위

표 11. 행정구역별 연간 토양유실량 및 우심지역

우심지역		면적(ha)	토양유실량 (ton/ha/yr)	
군	면			
옥천	군서	금산2	772.3	49.7
	군북	중약	912.6	50.2
		석호	42.2	48.4
금산	추부	요광1	292.2	52.5
		성당1	442.2	49.5
	군북	서대2	227.7	46.8
		상곡2	610.6	54.3
		산안1	534.3	50.1
		산안2	537.9	49.9
상곡1	608.4	49.4		

치하여 시가지를 형성하고 있는 옥천군 옥천읍의 토양유실량이 21.1 ton/ha/yr으로 가장 적게 산정된다. 행정구역의 가장 작은 단위인 리별로 살펴보면 단위면적당 연간 토양유실량이 가장 높은 우심지역은 금산군 군북면 상곡 2리로 54.3 ton/ha/yr이며, 가장 낮은 지역은 금산군 추부면 마전 4리로 2.7 ton/ha/yr이다. 소옥천 유역에서 단위면적당 연간 토양유실량이 많은 상위 10개의 지역은 46.8 ton/ha/yr 이상의 토양유실이 발생하는 것으로 추정되었다(표 11, 그림 10).

3. 주요 우심지역 토양유실 원인과 대책

토양유실이 발생하는 원인으로 농업활동, 산림개발, 광산채굴, 하천 토양유실, 도로건설 및 도시개발 등이 있으며, 그 외 산림 내 케이블 설치, 점토질 저수지의 배수, 하천을 횡단하는 송전 및 관로, 교량과 터널의 건설 등 다양한 원인에 의해 토양유실이 발생할 수 있다(김익재 등, 2007).

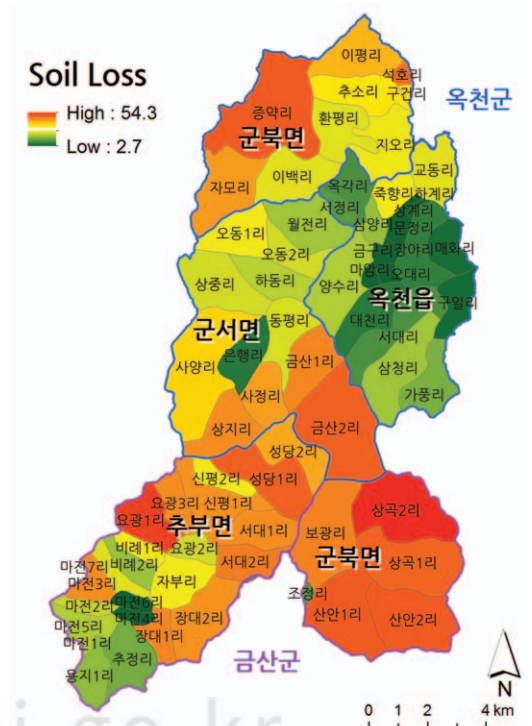
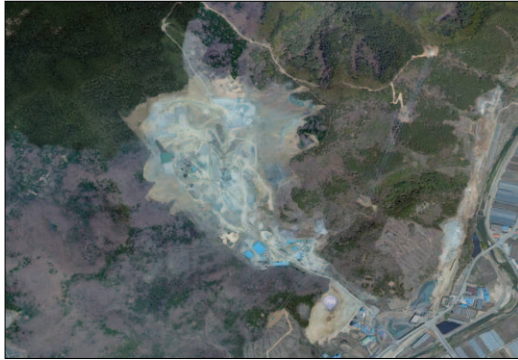


그림 10. 행정구역별 연간 토양유실량 분포



(a) 채석장 주변 전경



(b) 채석장 내 노출된 토사

그림 11. 금산군 신평리의 채석장 항공사진(DAUM)



(a) 옥천군 군북면 중약리



(b) 금산군 군북면 상곡리

그림 12. 산림지역 내 경작지 항공사진(DAUM)

소옥천 유역에서 단위면적당 연간 가장 많은 토양유실이 예상되는 토지이용은 채광지이다. 위성영상과 항공사진을 통해 채광지에서 적절한 토양유실 방지 대책이 없이 노천채광을 하는 것을 확인할 수 있다(그림 11). 광산에서 유실되는 토양을 줄이기 위해서는 등고선의 경사를 최대한 완만하고 짧게 하며 식생대나 수로 또는 개울 등의 토사를 저류할 수 있는 시설을 마련하는 것이 바람직하다.

소옥천 유역 농경지의 경우 우리나라에서 토양유실의 주된 문제가 되는 해발고도 400 m 이상의 고랭지 경작지는 많지 않지만 산림을 개간한 경작지가 많은 편이다. 단위면적당 토양유실이 아주 높은 옥천군 군북면 중약리와 금산군 군북면 상곡리의 토지이용을 살펴보면 산림 곳곳이 경작지로 전용되었으며, 특히 경작지가 식생여과대 없이 바로 하천과 연결되는 곳이 많다(그림 12). 본 연구에서는 논

은 계단식 재배로 토양보전대책을 세운 것으로, 밭과 과수원은 등고선 대상경작 방식으로 토양보전대책을 세운 것으로 간주하였으나, 항공사진으로 확인한 결과 대부분 대상경작이 이루어지지 않는 것으로 판단되었다.

농경지에 적용할 수 있는 토양보존 방법 중 가장 쉬운 것은 경작의 방향을 등고선과 나란히 되도록 하는 등고선 대상경작을 하는 것이며 이것은 등고선과 직각 방향의 상하 경작에 비해 토양유실을 절반 정도 줄이는 것으로 나타났다. 그리고 등고선 대상경작과 경작지를 풀 등으로 덮어주는 부초(grass mulch)를 함께 시행할 경우 상하 경작에 비해 14%까지 토양유실이 감소한다(곽한강 2005). 좀 더 적극적인 방법으로는 초생대(vegetation filter strip)를 조성하면 하천으로 유실되는 상당량의 토양을 포집할 수 있다(곽한강 2005). 초생대는 각종 점원,



(a) 금산군 추부면 성당리(리조트)



(b) 옥천군 군서면 금산리(하천시설)

그림 13. 산림지역 내 개발지 항공사진(DAUM)

비점오염원의 처리 및 토양유실을 방지하기 위해 도로나 하천가에 조성하는 식생대를 말한다(김영진 등, 2007). 이계준 등(2005)의 연구에서는 대관령 고랭지 경작지를 대상으로 초생대를 조성하는 실험을 통해 호밀과 옥수수를 이용하여 등고선과 나란히 또는 경사와 같은 방향으로 식재할 경우 나지와 비교하여 토양유실량을 얼마나 감소시키는지 파악하였다. 그 결과 호밀 초생대를 등고선과 나란히 조성한 것이 옥수수의 경우보다 토양유실 방지 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 대상 재배에 비하여 경사 재배이지만 호밀 초생대를 조성한 경우 토양유실량이 더 적었다. 이는 경작 방식보다 초생대의 효과가 크다는 것을 보여준다.

또한 산림지역 내 개발지 역시 토양유실을 증가시키는데, 토양유실량이 많은 금산군 추부면 성당리에는 리조트가 위치해 있음을 확인했으며, 옥천군 군서면 금산리에는 금산천과 상곡천 주변으로 야영장과 피어장 등 유흥시설과 자연휴양림이 있는 것을 확인하였다(그림 13). 개발지를 설계할 때 사면 발생지역에는 수림을 최대한 조성하고, 시설에서 발생하는 탁류를 저류시설을 거쳐 배출하는 등의 적극적인 토양유실 방지 대책을 반영해야 한다. 사면 발생지역에는 보존 수림을 최대한 이용하고, 시설에서 발생하는 부유물질을 저류시설을 거쳐 배출하는 등의 적극적인 토양유실 방지 대책이 필요하다.

소옥천 유역 산림지역은 나대지에 비해 식생피복

인자 값이 10%정도로 작게 적용되었으나 임도와 급경사 등 지형인자에 의해 단위면적당 토양유실량(45 ton/ha/yr)이 비교적 크게 발생하는 것으로 나타났다. 임도 건설 시에는 주변 경사도에 따라 토양 침식 정도를 파악한 후 경로가 결정되어야 하며, 폐도로는 친환경적으로 유지·보수 하거나 이용하지 않을 경우 폐쇄하는 것도 고려할 수 있다. 급경사지에는 뿌리가 튼튼한 식생을 재배하여 토양을 잘 보존할 수 있도록 해야 한다.

IV. 결론

대청호 상류에 위치한 소옥천 유역에서 강우에 따라 비점오염원에 의해 유입되는 오염물질의 영향을 받아 추소리 만입부 수역은 조류가 상시 발생하고 있다. 그러나 이 수역에서 오염물질은 수계로 유입되는 순간부터 물리, 화학, 생물학적인 작용에 대한 해석과 수체에 체류하는 시간 또는 유하거리에 따른 오염원의 공간적 분포 등을 파악하기 어렵기 때문에 RUSLE 모형을 이용하여 소옥천 유역 상류 지역에서 유출되는 토양유실량 및 우려지역을 파악하여 그 대책을 제시하였다. RUSLE 모형을 적용하여 소옥천 유역 상류지역에서 토지이용에 따른 토양유출 우려지역, 즉 침식가능 지역을 도출하였는데, 토양유실량이 가장 큰 지역은 금산군 군북면 상곡2리의 경작지로서 610.6 ha에서 54.3 ton/ha/yr 토양유실이 일어나는 것으로 추정되었다. 또한 토

지이용면에서 연간 토양유실량이 가장 큰 곳은 채광지로서 33.4 ha에서 약 200 ton/ha/yr의 토양유실이 발생하는 것으로 추정되었다. 경작지에서의 토양유실 방지를 위해서는 초생재배 등 토양을 피복하는 방법, 채광지 등의 지역에서 토양유실을 방지하기 위해서는 경사진 산비탈에 잘 견디는 나무 식재 등 식생 복원을 실시하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 따라서, 소옥천 유역에서의 적절한 유역관리를 위해서는 장기적으로 건기 및 우기시 수질 모니터링을 실시하고, 비점오염원 기여도를 고려하여 하천 및 호소유역의 오염물질 유출량을 예측·평가하는 유역모델을 활용하여 소옥천 유역에서 소유역별 오염물질 유입의 저감효과를 정확하게 판단하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- 건설교통부, 1992, 댐설계를 위한 유역단위 비유수량 조사연구.
- 곽동욱, 조기성, 2006, 유역특성을 고려한 GIS 기반 토양침식량 평가, 한국측량학회지, 24(1), 89-97.
- 곽한강, 2005, 전국 토양 침식 위험성 평가, 농업진흥청 농업과학기술원.
- 금강물환경연구소, 2011a, 2010년 대청호 및 보령호 조류예보제 운영보고서.
- 금강물환경연구소, 2011b, 대청호 및 보령호 수질관리를 위한 조류발생 억제방안 연구.
- 김민경, 허승오, 권순익, 2010, 우리나라 강우량 변화 시나리오에 따른 밭토양의 토양유실량 변화 예측, 한국토양비료학회지, 43(6), 789-792.
- 김영진, 남경필, 유찬, Tammo, S., 2007, 축산폐수 처리용 초생대의 인 제거효율에 관한 연구, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 782-785.
- 김익재, 이병국, 최지용, 한대호, 2007, 수생태계 보호를 위한 토사관리 방안, 한국환경정책·평가연구원
- www.kci.go.kr
- 토양유실위험 지역 분석, 한국GIS학회지, 17(3), 261-268.
- 김주훈, 오덕근, 2004, 빈도별 R인자에 의한 토양 침식 위험지역 분석, 한국지리정보학회지, 7(2), 47-56.
- 박경훈, 2003, GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금강 유역의 토양침식위험도 평가, 한국지리정보학회지, 6(4), 24-36.
- 박의정, 김철, 김윤환, 2005, RUSLE와 MUSLE를 이용한 토사유출량 비교분석, 대한토목학회 학술대회 논문초록집, 315-318.
- 박종근, 2005, 대청호의 남조세균 수화발달 특성, 한국환경생물학회지, 23(3), 304-314.
- 박지상, 김건하, 2006, RUSLE 모델을 이용한 금강 유역의 토지 이용별 토사유출량 추정, 한국물환경학회지, 22(4), 619-625.
- 신계중, 1999, 지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실 분석, 강원대학교 박사학위논문.
- 신재기, 김동섭, 이혜근, 맹승진, 황순진, 2003, 옥천천(만) 유역 하천과 만입부의 수환경 평가, 한국하천호수학회지, 36(2), 181-190.
- 오정학, 유주한, 김경태, 이우성, 2011, RUSLE 기법을 이용한 경주지역의 토양침식 위험도 평가, 환경영향평가, 20(3), 313-324.
- 오정학, 정성관, 2005, 토지자원관리를 위한 낙동강 유역의 잠재적 토양유실량 산정, 농촌계획, 11(2), 9-19.
- 오희목, 김도한, 1995, 대청호의 남조류 수화발생에 대한 단기간적 예측, 한국육수학회지, 28, 127-135.
- 유순주, 황종연, 채민희, 김상용, 2006, 대청호 유속에 다른 조류이동 영향, 한국물환경학회지, 22(5), 887-894.
- 윤용남, 2007, 수문학의 기초와 응용, 경기도: 청문각
- 이계준, 박철수, 이정태, 장용선, 진용익, 황선용, 2005, 고랭지 무재배지에서 호밀과 옥수수 초생대 설치에 의한 토양유실 경감 효과, 한국자원식물학회지, 12, 125-125.

- 이근상, 장영률, 조기성, 2003, 토양침식량 산정에서 토양도 축척에 따른 적정 해상도 분석에 관한 연구, 한국지리정보학회지, 6(3), 1-10.
- 이환주, 김환기, 2001, GIS 공간분석을 활용한 토양침식 모형의 입력인자 추출에 관한 연구, 한국측량학회지, 19(1), 27-37.
- 장영률, 이근상, 조기성, 2002, GIS 기반에서 토양침식의 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구, 한국GIS학회지, 10(2), 301-316.
- 조홍래, 정종철, 2005, RUSLE와 SEDD를 이용한 고랭지 경작지로부터의 토양유실 평가, 한국GIS학회지, 13(1), 79-90.
- 호소수질연구소, 1993, 호소 만입부에서의 조류 대량증식 제어기술 개발(III), 국립환경과학원.
- Agricultural Research Service, 1996, Preceeding soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE), US Department of Agriculture.
- Desmet, P. and Govers, G., 1996, A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, Journal of Soil and Water Conservation, 51(5), 427-433.
- Nearing, M.A., 1997, A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss, Journal of Soil Science Society of America, 61(3), 917-919.
- OECD, 2001, Environmental indicators for agriculture. Vol.3: Soil quality, 197-226, Paris.
- Toxopeus, A.G., 1996, ISA: An ineractive spatial and temporal modeling system as a tool in ecosystem management, Ph.D. Thesis, ITC.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1958, Rainfall energy and its relationship to soil loss, Trans. Am. Geophys. Union, 39, 285-291.

최종원고채택 12. 08. 20