大韓環境工學會誌 · 논문
J. of KSEE Vol. 22, No. 7, pp. 1331~1343, 2000.
Journal of Korean Society of Environmental Engineers

GIS를 이용한 동해안 하천유역의 토양유실량과 오염부하량 평가
-사천천을 중심으로-

조재현 · 연제철

관동대학교 건설환경시스템공학부

(2000년 3월 20일 접수, 2000년 4월 28일 채택)

Soil Loss and Pollutant Load Estimation in Sacheon River Watershed using a Geographic Information System

Jae-Heon Cho · Je-Chul Yeon

Department of Environmental Engineering, Kwandong University

ABSTRACT

Through the integration of USLE and GIS, the methodology to estimate the soil loss was developed, and applicated to the Sacheon river in Gangrung. Using GIS, spatial analysis such as watershed boundary determination, flow routing, slope steepness calculation was done. Spatial information from the GIS application was given for each grid. With soil and land use map, information about soil classification and land use was given for each grid too. Based upon these data, thematic maps about the factors of USLE were made. We estimated the soil loss by overlaying the thematic maps. In this manner, we can assess the degree of soil loss for each grid using GIS.

Annual average soil loss of Sacheon river watershed is 1.36 ton/ha/yr. Soil loss in forest, dry field, and paddy field is 0.15 ton/ha/yr, 27.04 ton/ha/yr, 0.78 ton/ha/yr respectively. The area of dry field, which is 4% of total area, is 2.4 km^2. But total soil loss of dry field is 6561 ton/yr, and it occupies 84.9 % of total soil loss eroded in Sacheon river watershed. Comparing with the 11.2 ton/ha/yr of an average soil loss tolerance for cropland, provision for the soil loss in dry field is necessary.

Run-off and water quality of Sacheon river were measured two times in flood season: from July 24, 1998 to July 28 and from September 29 to October 1. As the run-off of the river increased, SS, TN, TP concentrations and pollutant loadings increased. SS, TN, TP loads of Sacheon river discharged during the 2 heavy rains

were 21%, 39%, and 19% of the total pollutant loadings generated in the Sacheon river watershed for one year. We can see that much pollutants are discharged in short period of flood season.

Key Words : USLE, GIS, Soil Loss Tolerance, Pollutant Loading, Run-off

요 약 문

GIS와 USLE를 접목해서 토양유실량을 산정하는 방법론을 개발하여 동해안의 소규모 하천인 강릉 사천천에 적용하였다. GIS를 이용해서 유역의 수계도를 작성하고, 유로추적, 유역면적의 결정 등의 공간분석을 효과적으로 수행할 수 있었다. 토양도와 토지이용도를 이용해서 유역내 토양과 토지이용정보를 일정한 크기의 그리드별로 입력하였고, 공간분석 결과도 그리드별로 저장하였다. 이들 정보에 기초하여 USLE의 각종 인자에 대한 주제도를 생성하였고, 각각의 주제도를 중첩하여 토양유실량을 산출하였다. 이와 같이 GIS를 활용함으로서 지역별로 토지이용 형태별로 토양유실량의 정도를 효과적으로 평가할 수 있었다.

사천천 유역 전체의 평균 토양유실량은 약 1.36ton/ha/yr로 나타났으며, 임야지에서는 0.15 ton/ha/yr, 밭에서는 27.04ton/ha/yr, 논에서는 0.78ton/ha/yr로 산출되었다. 밭은 전체유역면적의 약 4.4%인 2.4km^{2}를 차지하는데 밭에서의 총토양유실량은 약 6561ton/yr로 전체 유실량의 84.9%를 차지하고 있어서 면적에 비해 토양유실량이 많다. 산림지역의 토양침식량은 적은 편에 속하나, 밭에서는 경작지에 대한 토양유실 허용치 11.2ton/ha/yr와 비교하면 밭에서의 토양침식에 대한 대비가 필요함을 알 수 있다.

사천천 하류부에서 98년 7월 24일~28일, 98년 9월 29일~10월 1일 2회의 집중호우시에 유출량과 수질을 실측 조사한 결과, 유출량이 증가함에 따라 SS, TN, TP의 오염물질 농도가 높아지고, 유출오염부하량도 증가하는 경향을 보였다. 따라서 토양유실이 많은 홍수기에 인과 질소의 영양물질의 유출량이 큰 것으로 나타났다. 사천천 유역에서 년간 발생되는 오염부하량 중에서 SS는 21%, TN은 39%, TP는 약 19%가 본 연구에서 조사한 2회의 강우동안에 유출되었다. 따라서 우리 나라의 하천에서는 여름의 홍수기에 단기간에 많은 양의 오염물질이 집중적으로 유출되는 것을 알 수 있다.

주제어 : 일반토양유실량식, 지리정보시스템, 토양유실 허용치, 오염부하량, 유출

1. 서 론

강우에 의해서 발생하는 토양유실은 농경지의 비옥한 표토를 유실시켜 생산성의 저하와 농경지의 황폐화를 초래하고, 유실된 토양입자는 하천이나 호수, 댐 등에 퇴적되어 저수용량의 감소와 수리구조물의 기능을 저하시킨다. 토립자와 함께 유실된 유기물, 제초제, 농약, 화학비료 등은 하천 호수 등 수자원의 수질을 악화시킨다. 또한 토지개발시에는 토지이용의 변화에 따른 토양유실량의 변화가 예상되므로 사전에 토양유실량을 예측하여 대비를 해 둘 필요가 있다.

토양유실량은 Wischmeier 등에 의해 개발된 USLE (Universal Soil Loss Equation)를 이용하여 추정하는 경우가 많다. USLE는 강우, 토양특성, 지형, 경작상태, 토양보전의 5개 인자로 나타내며 면상침식과 세류침식에 의한 경지의 연평균 토양유실량을 추정하는데 널리 이용되고 있다.[1,2]

정필균 등[3]은 전국 측후소의 강우량자료를 분석하여 강우인자(Rainfall erosivity factor)의 값을

산정하였다. 정영상 등[4]은 대지, 저구릉, 구릉, 산악 등 경사지에 분포된 83개의 토양통(Soil series)을 대상으로 토양침식성인자(Soil erodibility factor)의 값을 Wischmeier의 Nomograph[5,6]에서 찾아 그 결과를 보고하였다. 조국광 등[7]은 경사지에서의 경사장(Slope length)과 경사도(Slope steepness)가 토양유실에 미치는 영향을 규명하여 경사인자 방정식을 유도하였다. 신제성 등[8]은 토양보전인자(Conservation practice factor)가 토양유실에 미치는 영향을 보고했다. 김진택 등[9]은 경사지에서 경종에 따른 생육시기별 유출 및 토양유실에 관해 측정 분석하였고, 콩과 목초(Alfalfa)를 대상으로 피복정도에 따른 USLE의 작물 경종계수를 결정하였다. 정필균 등[10]은 경사지에서의 토양보전을 위해 14개 작부체계별 작부인자(Crop management factor)의 값을 산출하였다.

GIS를 이용하면 각종 정보를 공간적으로 쉽게 분석할 수 있기 때문에 USLE를 적용할 때도 GIS의 활용도가 높다. 이규성[11]은 경기도 광릉 임업연구원 시험림을 연구지역으로 하여 USLE와 GIS를 접목하여 토양유실량을 평가하였다. GIS 프로그램은 GRASS(Geographical Resources Analysis Support System)를 사용하였다. 김윤종 등[12]은 GIS를 이용하여 금강유역의 토양유실을 분석하여 그 활용성을 보여주었다. 우창호[13]는 목포시 부주산을 대상으로 LS인자를 자동으로 계산하는 프로그램을 만들었고, 이를 바탕으로 토양유실량의 변화를 추정하고 대상지의 침사지를 조사하여 문제점을 파악하였고, 그 적정 규모를 제시하였다.

토지이용에 따른 비점원오염물질 발생량을 파악하기 위해서 USLE를 쓰기도 한다. 전형섭 등[14]은 비점오염원의 원인지역을 추출하기 위하여 USLE를 사용하였고, GIS를 사용하여 비점오염원의 원인지역을 가시적으로 표현하였다. 김진택 등[15,16]은 농업유역에서의 비점원오염을 효과적으로 해석하기 위하여 GIS와 AGNPS를 결합하여 비점원오염 추정모형을 개발하였다.

Kothyari 등[17]은 GIS를 이용해서 특정 수계의 비유사량을 결정하는 방법론을 개발하였다. 이 연구에서는 대상지역을 동일한 토양침식 특성을 갖는 여러 개의 cell로 분할하였고, 유사전달률(sediment delivery ratio)을 이용해서 각 cell로부터 유역출구까지의 토양침식과정을 추적하였다. McCool 등[18]은 동부워싱톤과 북아이다호를 가로지르는 평야지대의 10년간에 걸친 도랑침식자료를 수집하여, 새로운 경사도 및 경사장인자(LS)의 관계식을 개발하였다.

토양유실량을 예측하는 것은 토양의 생산성을 향상시키기 위한 토양관리법 개선과 농지보전, 토지이용에 따른 토양유실량 추정, 유역의 효과적 관리 등을 위한 것인 만큼, 구체적으로 토양유실이 어느 지역에서 얼마만큼 발생되는가를 예측하는 것이 중요하다. 이러한 점을 고려할 때 USLE의 토양분포, 경사장과 경사도 등의 각 인자 값들은 넓은 지역을 단일값으로 적용하기에는 지리적 변이가 심하여 하나의 대표치로 표시하기에는 무리가 있다. 이와 같이 USLE의 인자 값들은 지리적 인자를 내포하고 있기 때문에 각종 지리정보를 종합적으로 관리할 수 있는 지리정보시스템(GIS : Geographic Information System)의 활용성은 높다. USLE와 GIS의 접목은 단지 수치적인 토양유실량 추정뿐만 아니라 토양침식에 관한 지리적 분포와 경향을 공간적으로 분석할 수 있다.[11]

GIS와 USLE를 접목하여 유역의 토양유실량을 예측하는 것은 단순히 현시점에서의 토양유실량 분석 뿐만 아니라 토지이용상태의 변화에 따른 장래의 토양유실량의 변화를 예측할 수 있다. 개발에 따른 토지의 용도변경 외에도 산림에서의 벌채, 산불 등에 의한 피복상태의 변화에 따른 토양유실량을 공간적으로 예측함으로써 적절한 시기와 장소에 대한 토양보전대책을 수립할 수 있다.

본 연구에서는 GIS를 이용해서 토양유실량을 효과적으로 산정하는 방법론을 개발하였다. 이와 같은 방법을 산림유역이 대부분이고 농경지가 하류부분에 위치해 있는 강릉 사천천에 적용하여 토지이용형태별 토양유실량과 공간적인 분포를 분석하였고, 한계치 이상의 침식이 일어나는 지역을 추출하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 유역의 공간분석과 수치지도의 작성

본 연구의 대상지역은 강릉시 사천면에 위치한 사

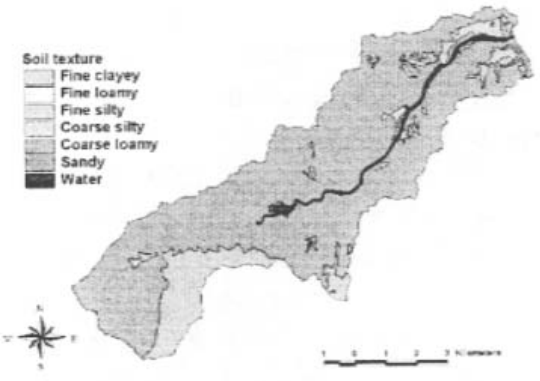

Fig. 1. Soil texture.

Fig. 2. Land use map.

천천 유역이다. 사천천은 동해안에 위치한 하천으로 하천의 연장이 짧고, 경사가 급하며, 폭이 좁은 소규모 하천이다. 사천천 유역의 면적은 56.8km^{2}이며, 유로의 연장은 23.7km이며, 임야지가 약 80%, 농경지가 약 15%로 구성되어 있는 지역이다.

공간분석의 기본이 되는 DEM자료를 구성하기 위해서 먼저 1:25000 수치지도에서 추출된 등고선을 이용하여 TIN을 형성하였다. 형성된 TIN을 ArcView Spatial Analyst를 이용해서 래스터형식의 DEM으로 변환하였다. DEM 정보를 가지고 함몰지역에 의한 오차 발생을 방지하기 위해 인위적인 채움 과정으로 Fill Sinks를 실행하였다. 형성된 지표면 자료를 통하여 각 셀별 경사를 따라 흐름방향과 하천 유로를 추적하고, 흐름의 집적도(Flow Accumulation)를 실행하였다. 50m×50m의 셀 크기와 흐름의 집적도 200셀 이상을 기준으로 수계도를 작성하였다. 유역의 경사도는 ArcView Spatial Analyst의 Derive Slope를 사용하여 분석하였다.

국립지리원의 수치지도는 이미 투영이 이루어진 상태이고, 등고선, 하천, 도로 등의 정보가 레이어의 형태로 입력되어 있다. 따라서 1:25000 수치지도로부터 수치지도작성작업규칙[19]에 따라 정해진 각각의 layer 코드를 이용하여 등고선, 하천 등의 공간자료를 수집하여 ArcView에서 작업 가능한 형태의 주제도(Thematic map)를 작성하였다.

수치토양도는 Scanner를 이용해서 작성하였다. 농촌진흥청의 정밀토양도를 이용하여 각 도엽별로 4개의 기준점을 고정한 후 트레이싱하여 스캔한 다음 벡터자료로 변환하였다. 이렇게 만들어진 벡터자료를 dxf 파일 형태로 변환시킨 후 우리 나라에서 사용하는 TM좌표로 변환하여 ArcView에서 사용하는 shp 파일로 만들었다. 투영원점은 동부원점(38°, 129°)으로 하였다. 이렇게 만들어진 사천천유역의 토양도는 Fig. 1과 같다.

토지이용도는 1:25000 수치지도로부터 layer 코드를 하천, 도로, 논, 밭, 임야, 대지로 분류하여 ArcView에서 작업이 가능한 형태로 변화하여 Polygon화하였다. Fig. 2는 사천천유역의 토지이용도를 나타낸 것이다.

2.2. 토양유실량의 산정

USLE는 Wischmeier와 Smith[6]에 의해 개발되어 주로 농지와 나지에서의 토양유실량 평가에 활용되어왔으나, Dissmeyer 등[20]은 지형, 토양, 토지피복상태 등 각 인자 값을 적절히 선택함으로써 임지 등 농지이외의 토지이용에 대해서도 효과적으로 토사유실량을 추정할 수 있다고 지적한 바 있다.

USLE는 토양의 침식에 영향을 미치는 요소인 강우, 토양의 종류, 지형, 식생, 경작의 형태 등을 고려하여 다음과 같이 표현된다.[21~23]

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

여기서 A = 토양유실량(Soil loss, ton/ha/yr)
R = 강우인자(Rainfall erosivity factor)
K = 토양침식성인자(Soil erodibility factor)
LS = 경사도 및 경사장인자(Slope length and steepness factor)

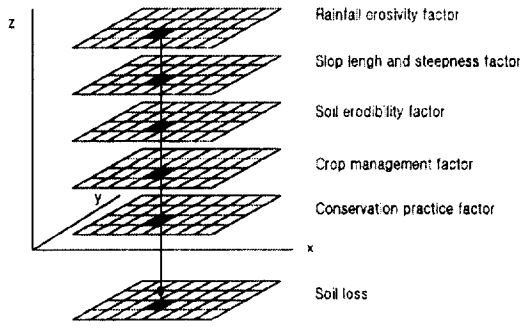

Fig. 3. Soil loss estimation by map overlay.

C = 작부인자(Crop management factor)
P = 토양보전인자(Conservation practice factor)

토양도와 토지이용도를 이용해서 유역내 토양정보와 토지이용정보를 일정한 크기의 그리드별로 입력하였고, 공간분석 결과도 그리드별로 저장하였다. 이들 정보에 기초하여 USLE의 각종 인자에 대한 주제도를 생성하였고, 각각의 주제도를 Fig. 3과 같이 중첩하여 토양유실량을 산출하였다.

지도자료의 변환, 분석, USLE의 계산과 결과를 수치지도의 형태로 나타내기 위한 일련의 과정은 GIS소프트웨어인 ArcView 3.1을 사용하였다.

2.2.1. 강우인자(R-factor)

강우인자는 강우 발생시의 침식능력을 나타내는 것으로 강우의 운동에너지와 30분 최대강우강도(I_{30})에 좌우된다. 강우인자는 강우의 양보다 강도가 중요하다. 연중 강우가 적더라도 짧은 시간동안의 폭우시에는 토양의 침식율이 커져 많은 양의 침식이 일어난다. 강우인자는 Wischmeier와 Smith의 공식[6]에 의하여 산출된다.

$$R = \Sigma(KE \cdot RF/100) \cdot I_{30} \quad (2)$$

여기서 KE = 강우의 운동에너지
= 210.3 + 89 log I
I = 강우강도(cm/hr)
I_{30} = 30분 최대 강우강도(cm/hr) (maximum 30-minute period intensity)
RF = 강우량(cm)

우리 나라의 강우인자는 정필균 등[3]에 의해 전국 51개 기상측후소의 강우자기기록지를 토대로 계산되었다. 전국 각 지역별로 조사년수는 8~21년이나 대부분 10년 정도의 자료를 이용하였다. Table 1은 지역별 강우인자의 값을 나타낸 것이다. 전국 평균 강우인자는 438이며, 동북부지역의 강우인자 값은 200~300으로 낮고, 서부 및 남부지역과 제주도에서는 300~700으로 높다. 이들 강우인자는 SI 단위로 산출된 결과이다. 유역도상에 강우인자 값을 입력한 후 50m×50m 크기의 그리드로 변환하여 강우인자에 관한 주제도를 만들었다.

2.2.2. 토양침식성 인자(K-factor)

토양침식성인자는 토양침식에 영향을 주는 토양의 고유한 특성을 설명하는 인자로써 토양중의 미사(Silt), 모래함량(Sand), 토양구조(Soil structure), 유기물함량(Organic matter content), 투수성(Permeability) 등과 관련이 있다. 토양침식성인자는 계산도표(Nomograph)에 의해서 구할 수도 있고,[5] 다음과 같은 계산식[6]을 이용할 수도 있다.

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})(12-a)+3.25(b-2) +2.5(c-3) \quad (3)$$

여기서 K = 토양침식성인자(Soil erodibility factor)
M = (%미사+%극세사)(100-%점토) (Percent silt+Percent very fine sand)(100-Percent clay)
a = 유기물 함량(Percent organic matter)
b = 토양구조 등급(Soil-Structure code)
c = 토양투수성 등급(Profile-Permeability class)

이 식에서 토양의 물리화학적 특성은 한국의 전토양,[24] 한국의 답토양,[25] 정밀토양도[26]를 이용해서 구할 수 있다. 토양구조(Soil structure) 등급은 1.

Table 1. Rainfall erosivity factors

Location	R-Factor	Location	R-Factor	Location	R-factor
Busan	629	Asan	617	Chungju	328
Chupung yeong	297	Buyeo	483	Namweon	464
Daegu	299	Euiseong	293	Jecheon	344
Gangreung	297	Haman	341	Incheon	406
Gwangju	551	Imsil	435	Suweon	557
Jeju	390	Jangheung	554	Chuncheon	464
Jeonju	364	Milyang	392	Cheongju	490
Mogpo	323	Namhae	701	Deajeon	490
Pohang	261	Seonsan	262	Seosan	489
Seoul	593	Yeongju	326	Daegwan ryeong	269
Ulsan	455	Boeun	351	Ganghwa	687
Yeosu	496	Boryeong	491	Mungyeong	324
Seogwipo	636	Hampyeong	526	Hongcheon	417
Chungmu	508	Inje	294	Icheon	465
Gunsan	429	Jeongeub	552	Weonju	578
Sogcho	255	Sancheong	475	Yangpyeong	427
Jinju	424	Seungju	512	Samcheog	215

극소립상(very fine granular), 2. 소립상(fine granular), 3. 중·대립상(med. or coarse granular), 4. 각괴상·판상(blocky, platy or massive)으로 구분한다. 투수성(permeability) 등급은 1. 매우 빠름(rapid), 2. 빠름(mod. to rapid), 3. 보통(moderate), 4. 약간느림(slow to mod.), 5. 느림(slow), 6. 매우느림(very slow)으로 구분한다.

정영상 등[4]은 우리 나라의 경사지 밭과 임야 토양 83개의 토양통에 대해 K값을 Wischmeier의 nomograph를 이용해서 구했다. 산출된 K값은 최소 0.05에서 최대 0.51로 범위가 비교적 넓었고, 평균 0.27이었다. 토성이 거친 사질토에서는 낮은 값을 보였고, 토성이 미세한 토양에서 높은 값을 보여 본 연구와 유사한 경향을 보였다. 김윤종 등[12]의 금강 유역에 대한 연구에서는 Wischmeier의 nomograph를 이용하였는데, K값의 범위는 0.03~0.54의 범위였다.

본 연구에서는 Wischmeier 등에 의한 식(3)을 적용하여 K값을 산출하였다. 이 K값을 앞서 만들어진 토양도에 입력하고, 이것을 50×50m 크기의 그리드로 변형하여 USLE의 토양침식성인자도를 만들었다.

2.2.3. 경사도 및 경사장인자(LS-factor)

경사도 및 경사장인자는 지형조건이 토양침식에 미치는 영향을 나타내는 인자이며 경사장(Slope length)과 경사도(Slope steepness) 두 인자에 의해서 결정된다. McCool[18]은 다음과 같이 경사도 9% 이상과 이하를 구분하여 경사도 및 경사장 인자를 계산하는 방법을 제안하였다.

$$LS=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{0.5}(10.8\ \sin\theta+0.03)\ :\ s<9\% \tag{4}$$

$$LS=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{0.5}\left(\frac{\sin\theta}{\sin 5.143^{\circ}}\right)^{0.6}\ :\ s\geq 9\% \tag{5}$$

여기서 LS = 경사도 및 경사장 인자(Slope length and slope steepness factor)

λ = 경사장(Slope length, m)

θ = 경사도(Slope angle, degrees)

s = 경사도(Slope steepness, %)

경사장은 지표면 월류수가 발생되기 시작하는 지점부터 경사가 줄어서 퇴적되는 지점이거나 유출

이 뚜렷하게 나타나는 형태인 수로나 지류로 합류되는 지점까지의 거리로 정의된다.[21] 본 연구에서는 Williams[27]의 방법에 따라 경사장을 구하였다. 사각형 유역의 중앙을 하나의 수로가 흐르고 있다고 가정하면, 유역의 폭은 면적을 하천의 길이로 나눈 값과 같다. 또한 수로가 유역의 중앙을 흐르고 있기 때문에 유출이 일어나는 곳까지의 거리는 폭의 반이 된다. 그러므로 다음과 같이 경사장을 구할 수 있다.

$$\lambda = 0.5\ (\frac{A}{L_{ch}}) \quad (6)$$

여기서 λ = 경사장
A = 사각형 유역의 면적
L_{ch} = 하천의 길이

ArcView Spatial Analyst의 Stream Network 기능을 이용해서 수계망을 구성하고 이 수계망에 위의 Williams의 방법을 적용해서 각 지류별 경사장을 계산하였다. 사천천 유역내 각 그리드별 경사도는 경사도분석을 통해 얻어졌다. 이렇게 얻어진 경사장과 경사도를 (4), (5)식에 대입하여 경사장 및 경사도 인자도를 만들었다.

2.2.4. 작부인자(C-factor)

작부인자는 토지의 식물 피복상태를 결정하는 인자이다. 식생은 유출수의 유속을 감소시키고 토양구조를 발달시켜 강우에 의한 침식을 감소시킨다.

정필균 등[10]은 1977년부터 1982년까지의 국내 자료를 토대로 작부체계별로 작부인자 값을 도출한 바 있다. 우리 나라 밭의 작부인자 값은 0.3으로 조사되었다. 이렇게 적용된 작부인자 값을 앞서 만들어진 토지이용도에 입력하였고, 이것을 50×50m 크기의 그리드로 변형하여 USLE의 작부인자도를 만들었다.

2.2.5. 토양보전인자(P-factor)

대상지역의 논은 경사도 5% 미만인 지역에 대부분 분포되어 있고, 경작형태는 주로 계단식 경작(terracing)을 하고 있는 것으로 나타났다. 밭은 등고선 경작(contouring)으로 판단하여 경사정도에 따라 토양보전인자 값을 적용하였다.[28] 그 외의 지역은 토양보전인자를 무시하여 1로 처리하였다. 앞서 만들어진 토지이용도에 토양보전인자값을 입력하고, 50×50m 크기의 그리드로 분할하여 토양보전인자도를 만들었다.

2.3. 유출오염부하량 조사

홍수기에 사천천의 유출오염부하량을 평가하기 위해 사천천 하류부에 위치한 사천교 지점에서 유출량과 수질을 조사하였다. 집중호우가 있었던 98년 7월 24일~28일의 강우와, 98년 9월 29일~10월 1일의 2회 강우 동안 시간대별로 유출량과 SS, TN, TP 등의 수질을 조사하였다. 이 결과로 2회 강우에서 측정된 총오염부하량을 산출하고, 사천천유역에서 발생하는 전체오염부하량과 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공간분석결과

흐름의 집적도가 부여된 셀 정보를 이용하여 50×50m의 셀에 대한 흐름의 집적도가 200셀 이상을 기준으로 작성된 수계도와 유역도는 Fig. 4와 같다. 유역 전체의 면적은 56.8km^{2}로 계산되었다. 유역의 경사도는 ArcView의 공간분석 도구를 이용해서 50×50m의 그리드 별로 전유역에 대해서 계산하였다. 유역의 경사도를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 유역의 평균경사는 13.1°, 임야의 평균 경사도는 15.8°, 밭은 4.3°, 논은 1.8°로 산출되었다.

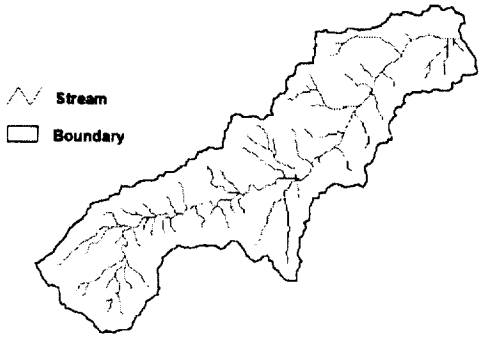

Fig. 4. Sacheon river watershed.

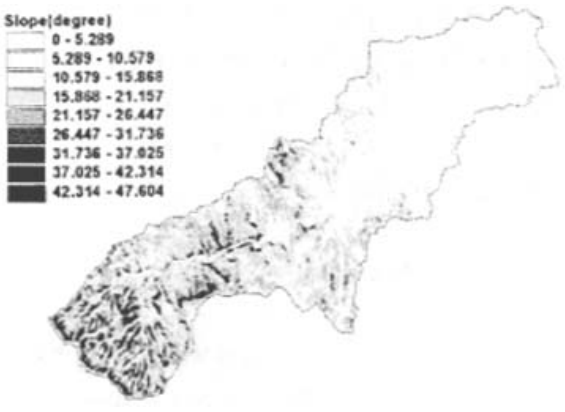

Fig. 5. Digital map of slope steepness.

3.2. 토양유실량 산정

3.2.1. USLE의 각종 인자

사천천 유역의 강우인자 값으로는 정필균 등[3]에 의해 제시된 강릉 지역의 강우인자 값인 297을 사용하였다. 사천천 유역의 토양침식성인자는 Wischmeier 등에 의한 (3)식으로 계산하였고, 계산식에 사용된 각종 인자값과 토양침식성인자는 Table 2에 제시하였다. 계산된 토양침식성인자는 0.027~0.651의 범위에 있다. 토양침식성인자가 높게 산출된 토양은 미사와 세사의 함량이 높다. 투수성이 좋고 미사와 세사의 함량이 적은 토양통에서는 토양침식성인자 값이 적은 것으로 나타났다.

Fig. 6은 본 연구에서 적용된 토양침식성인자의 수치지도이다. 그림에서 짙게 나타난 부분이 토양침식성인자 값이 높은 지역을 의미하며, 이 지역은 주로 경작지에 해당한다. 본 연구의 토양침식성인자는 임야평균이 0.092, 밭평균 0.200, 논평균 0.315였다.

McCool 등[18]의 방법을 이용해서 산출한 경사도 및 경사장 인자(LS-factor)에 관한 수치지도는 Fig. 7과 같다. 경사도 및 경사장 인자 값은 0.059~

Table 2. Calculated K-factor of Sacheon river watershed

Soil series	Silt+very fine sand (%)	Sand(%)	Clay(%)	Organic matter contents (%)	Soil structure code	Profile permeability class	K- factor (Metric units)
Gwangpo	60.2	33.3	6.5	1.55	4	4	0.651
Geumjin	34.7	56.2	9.1	3.91	4	5	0.363
Mui	35.3	59.9	4.8	4.60	3	2	0.220
Bonryang	44.1	50.4	5.5	4.28	3	2	0.291
Bugog	52.3	23.5	24.2	4.03	3	3	0.315
Bugpyeong	33.3	57.4	9.3	4.65	3	2	0.195
Bicheon	36.6	62.6	0.8	0.69	4	1	0.371
Sachon	44.9	43.4	11.7	3.07	4	4	0.422
Sangye	25.8	63.0	11.2	2.95	4	3	0.251
Samgag	27.6	64.5	7.9	2.98	2	1	0.121
Sangju	18.1	71.1	10.8	4.47	3	2	0.102
Seoggye	45.7	37.7	16.6	3.98	3	4	0.337
Yecheon	17.0	68.5	14.5	1.79	4	5	0.260
Odae	43.3	37.0	19.7	7.81	2	1	0.030
Yongho	47.1	31.3	21.6	15.83	4	5	0.027
Weoljeong	42.1	42.3	15.6	8.19	3	2	0.084
Jungdong	38.0	51.6	10.4	4.83	2	2	0.174
Jisan	63.3	18.3	18.4	3.59	4	3	0.474
Hamchang	42.2	46.8	11.0	5.90	3	5	0.304
Hwasu	41.7	39.2	19.1	4.97	4	5	0.349

Fig. 6. K-factor.

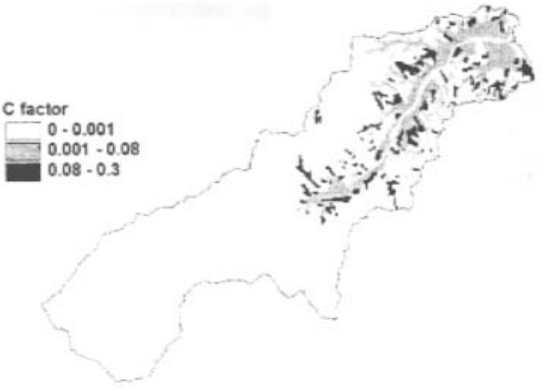

Fig. 8. C-factor.

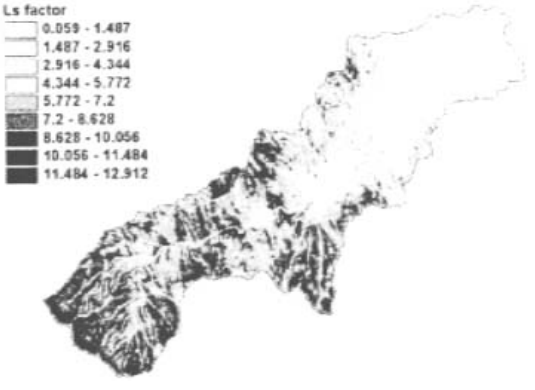

Fig. 7. LS-factor.

Fig. 9. P-factor.

12.91의 범위를 보이고 있고, 경사가 급한 임야나 밭에서 높게 산출되었다.

작부인자의 경우 밭은 0.3을 적용하였고, 논은 0.08를 적용하였다.[29] 유역의 임야는 숲이 울창하여 피도 75~100%로 보고 0.001을 적용하였다. 대지는 농촌지역임을 감안하여 그 값을 0.001로 적용하였다. Fig. 8은 이렇게 적용된 값들을 토지이용도에 적용하여 작부인자의 수치지도를 구축한 것이다.

토양보전인자는 경작방법에 따라 좌우되기 때문에 농지 외의 지역에는 그 값을 무시하여 1로 적용하였다. 대상지역의 논은 계단식 경작으로, 밭은 등고선 경작으로 판단하여 경사정도에 따라 토양보전인자 값을 입력하여 Fig. 9와 같은 토양보전인자의 수치지도를 만들었다. 토양보전인자의 값은 경사도가 높은 지역에서 그 값이 높았다. 그림에서 임야를 제외한다면, 경사가 급한 밭에서 높은 값을 보였다.

3.2.2. 토양유실량

앞에서 설명한 바와 같이 토양유실량을 산출한 결과가 Fig. 10이다. 사천천 유역의 토양유실은 그리드별로 편차가 커서 미량에서부터 최대 192.562 ton/ha/yr까지의 범위를 보였다. 경사가 완만한 임야지에서 미량으로 나타나고, 최대치는 경사가 급한 밭에서 나타났다. 대상유역의 평균토양유실량은 1.36ton/ha/yr이었다.

토지 이용별로 검토하면, 전체 유역면적의 약 80%인 45.5km^{2}를 차지하는 임야지에서의 토양유실은 최대 1.38ton/ha/yr의 범위를 보이며 평균 0.15ton/ha/yr로 산출되었다. 임야지에서의 총토양유실량은 약 695.8ton/yr로 전체 토양유실량 7730ton/yr의 9.0%에 해당해 면적에 비하여 토양유실량이 작다. 이 지역의 임야는 임관밀도가 높고, 성숙한 임목이 많기 때문에 토양유실량이 낮은 것으로 나타났다.

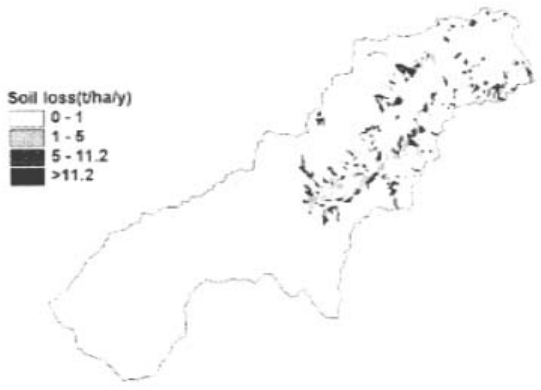

Fig. 10. Soil loss.

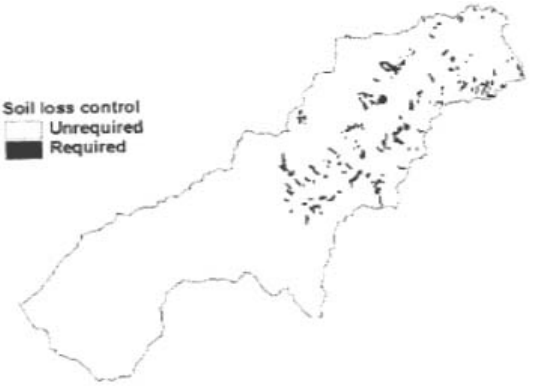

Fig. 11. Areas where soil loss control is required.

이규성[11]은 임업연구원 시험림에 USLE를 적용한 결과 평균 토양유실량을 0.7ton/ha/yr로 산출한 바 있고, 김상욱[30]은 경안천유역에 USLE를 적용하여 임야의 토양유실량을 0.1~2.0ton/ha/yr로 산출하였다.

논의 면적은 6.0km^{2}으로 전체 유역면적의 약 10.6%를 차지하며 토양유실은 최대 9.88ton/ha/yr로 나타났다. 논에서의 평균 토양유실량은 0.78 ton/ha/yr이며, 총토양유실량은 약 470.4ton/yr로 전체 토양유실량의 약 6.1%에 해당하는 양이다. 김상욱[30]의 연구결과는 논의 토양유실량을 0.5~5.0ton/ha/yr로 산출한 바 있다.

밭은 전체유역면적의 약 4.4%인 2.4km^{2}를 차지하고 있다. 밭에서의 토양유실은 최대 192.56ton/ha/yr, 평균 27.04ton/ha/yr이다. 경작지에 대한 토양침식 허용치[31] 11.2ton/ha/yr와 비교하면 전반적으로 이 지역의 밭에서의 토양침식량이 많음을 알 수 있다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 밭 면적의 66.2%에 해당하는 1.6km^{2}에서는 토양침식에 대한 대비가 필요하다. 토양침식허용치보다 높은 밭지역과 토양침식허용치보다 낮은 밭지역을 비교하면, 토양침식허용치보다 높은 지역에서는 경사도와 토양침식성인자가 높은 것으로 나타난다. 밭에서의 총토양유실량은 6561ton/yr으로 전체 유실량의 84.9%를 차지하고 있어서 면적에 비해 토양유실량이 많다. 김상욱[30]의 연구결과는 밭의 토양유실량을 3.0~10.0ton/ha/yr의 범위로 산출한 바 있다. 본 연구지역인 사천천유역의 밭은 경사가 비교적 급한 지역이기 때문에 토양유실량이 타지역에 비해 많은 것으로 나타났다.

3.2.3. 오염부하량

조사기간인 98년 7월 24일~28일 동안 사천천유역에 내린 강우량이 308.0mm, 98년 9월 29일~10월 1일 동안의 강우량이 220.5mm로 집중호우가 있었다. Table 3은 89년부터 98년까지 10년간의 강릉지방 월별 평균강우량 자료이다. Table 3에서 보듯이 본 연구의 2회 조사기간 동안의 강우량은 이 지역 년평균강우량의 35.7%에 해당할 만큼 많은 비가 집중적으로 내린 것이다. Table 4는 2회의 집중호우시의 시간대별 유출량과 SS, TN, TP 등의 수질조사 결과이다. 표에서 보듯이 강우강도가 높았던 7월 26일에 유출량이 가장 많았고, SS, TN, TP의 오염물질 농도도 가장 큰 것으로 나타났다. 대체로 유출량이 증가함에 따라 유출오염부하량도 증가하는 경향을 보였다. Table 5는 Table 4의 유출량과 수질을 가지고 curve-fitting을 통해 2회 강우의 총오염부하량을 산출한 결과이다. Table 6은 사천천유역에서의 발생오염부하량을 인구, 가축, 그리고 임야, 논, 밭, 대지 등의 토지이용별로 구분하여 산출한 것이다. 인구와 가축은 발생오염부하량의 원단위[32]를 적용하였고, 토지의 경우에 TN과 TP는 한국환경기술개발원[33]의 원단위를 적용하였고, SS는 본 연구에서 산출된 토양유실량을 적용하였다. Table 5와 Table 6을 비교하면 사천천유역에서 발생된 오염부하량 중에서 SS는 21%, TN은 39%, TP는 약 19%가 본 연구에서 조사한 2회의 강우동안에 유출되었다. 따라서 동해안의 하천에서는 여름의 홍수기에 단기간에 많은 양의 오염물질이 집중적으로 유출되는 것을 알 수 있다.

Table 3. Monthly mean precipitation in Sacheon river watershed

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	total
Precipitation	91.4	67.3	84.5	61.9	90.0	145.2	225.7	272.7	181.3	107.1	91.8	62.6	1481.3

Table 4. Run-off and water quality of the 2 heavy rains in flood season

Date	Time	Run-off (m^3/sec)	Suspended solids (mg/L)	Total Nitrogen (mg/L)	Total Phosphorus (mg/L)
Jul. 25, 1998	13:20	23.54	8.0	0.57	0.072
	17:20	38.80	26.8	0.61	0.082
Jul. 26	11:50	121.75	438.0	2.52	0.303
Jul. 27	09:30	49.19	34.6	0.932	0.065
	13:20	39.93	28.8	0.937	0.059
	16:30	35.60	21.0	1.02	0.056
Jul. 28	10:50	53.62	25.0	0.78	0.054
Sep. 29	17:30	4.63	3.5	1.78	0.025
Sep. 30	10:30	36.80	29.3	1.22	0.104
	13:00	41.09	80.8	1.31	0.112
	15:30	60.78	151.0	1.64	0.153
	16:50	62.60	152.0	1.692	0.203
Oct. 1	12:00	55.68	33.5	1.258	0.059
	15:00	43.51	26.0	1.11	0.052

Table 5. Pollutant load of the 2 heavy rains in flood season

Date	Suspended solids(ton)	Total Nitrogen(ton)	Total Phosphorus(ton)
July 24~28 1998	1140.7	19.7	2.0
Sep. 29~Oct. 1 1998	620.0	11.7	0.9
total	1760.7	31.4	2.9

Table 6. Pollutant load generated in Sacheon river watershed

Pollutant source	Suspended solids (ton/year)	Total Nitrogen (ton/year)	Total Phosphorus (ton/year)
Population	21.1	2.6	0.5
Domestic animal	523.7	17.4	11.1
Land use	7730.1	59.6	3.9
Total	8274.9	79.6	15.6

4. 결 론

동해안의 소규모하천인 사천천에 GIS를 이용해서 토양유실량을 평가한 결과는 다음과 같다.

1) 사천천유역 전체의 평균 토양유실량은 약 1.36ton/ha/yr로 나타났으며, 임야지에서는 0.15ton/ha/yr, 밭에서는 27.04ton/ha/yr, 논에서는 0.78ton/ha/yr로 산출되었다. 산림지역의 토양침식량은 적은 편에 속하나, 밭에

서는 경작지에 대한 토양침식 허용치 11.2 ton/ha/yr와 비교하면 토양침식량이 많다.

2) 전체 유역면적의 약 80%인 임야지에서의 총 토양유실량은 695.8ton/yr로 전체 토양유실량 7730.1ton/yr의 9.0%에 해당해 면적에 비하여 토양유실량이 적다.

3) 전체 유역면적의 약 11%를 차지하는 논에서의 총토양유실량은 약 470.4ton/yr로 전체 토양유실량의 약 6.1%에 해당하는 양이다.

4) 밭은 전체 유역면적의 약 4%인 2.4km^{2}를 차지하고 있다. 밭에서의 총토양유실량은 약 6561ton/yr으로 전체 유실량의 84.9%를 차지하고 있어서 면적에 비해 토양유실량이 많다.

5) 밭 면적의 66.2%에 해당하는 1.6km^{2}에서는 경사가 급하고 식생피복 상태가 빈약하여 토양유실량 허용 기준치를 초과하고 있기 때문에 토양침식에 대한 대비가 필요하다.

6) GIS를 이용한 공간분석을 통해 수작업에서의 복잡한 문제점을 해결하고 유역특성인자의 추출을 자동화할 수 있다. GIS를 이용해서 토양유실량을 평가할 때는 단순한 수치적인 평가뿐만 아니라 토양유실량의 지리적 공간적인 변이도 쉽게 분석할 수 있다.

7) 사천천 하류부에서 98년 7월 24일~28일, 98년 9월 29일~10월 1일 2회의 집중호우시에 유출량과 수질을 실측 조사한 결과 유출량이 증가함에 따라 SS, TN, TP의 오염물질 농도가 높아지고, 유출오염부하량도 증가하는 경향을 보였다. 따라서 토양유실이 많은 여름철 홍수기에 인과 질소의 영양물질의 유출량이 큰 것으로 나타났다.

8) 사천천유역에서 년간 발생되는 오염부하량 중에서 SS는 21%, TN은 39%, TP는 약 19%가 본 연구에서 조사한 2회의 강우동안에 유출되었다. 따라서 동해안의 하천에서는 여름의 홍수기에 많은 양의 오염물질이 단기간에 집중적으로 유출되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Wischmeier, W. H., "Use and Misuse of the Universal Soil Loss Equation," *Journal of Soil and Water Conservation*, **31**(1), 5~9(1976).
2. 최진규, 구자웅, 손재권, "토양유실량공식 USLE 적용과 단위변환," 한국토양비료학회지, **31**(3), 301~308(1998).
3. 정필균, 고문환, 임정남, 엄기태, 최대웅, "토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석," 한국토양비료학회지, **16**(2), 112~118(1983).
4. 정영상, 신제성, 신용화, "경사지 토양의 침식성 인자에 관하여," 한국토양비료학회지, **9**(2), 109~115(1976).
5. Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., and Cross, B. V., "A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites," *Journal of Soil and Water Conservation*, **26**(5), 189~193(1971).
6. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning, Agriculture Handbook No. 537, USDA, Washington D.C (1978).
7. 조국광, 박성우, "경사지에서의 토양유실-지형인자를 중심으로," 한국농공학회지, **23**(2), 54~60(1981).
8. 신제성, 고문환, 토양보전인자 규명시험(토양유실방지에 관한 시험), 농시시험연구보고, pp. 209~229(1979).
9. 김진택, 박승우, "경사지의 경종에 따른 유출 및 토양유실에 관한 연구," 한국농공학회지, **36**(1), 73~82(1994).
10. 정필균, 고문환, 엄기태, "토양유실량 예측을 위한 작부인자 검토," 한국토양비료학회지, **18**(1), 7~13(1985).
11. 이규성, "산림유역의 토양유실량 예측을 위한 지리정보 시스템의 USLE에의 적용," 한국임학회지, **83**(3), 322~330(1994).
12. 김윤종, 김원영, 유일현, 이석민, 민경덕, "금강유역 토양유실분석을 위한 GIS 응용연구," 한국 GIS학회, **2**(2), 165~174(1994).
13. 우창호, GIS를 이용한 단지개발지의 토양유실량 예측모델에 관한 연구-USLEL인자를 중심

으로, 경희대학교 박사학위논문(1998).
14. 전형섭, 김태근, 조기성, 김환기, "GIS를 이용한 비점오염의 원인지역 추출에 관한 연구," 대한환경공학회지, **18**(4), 451~463(1996).
15. 김진택, 박승우, "농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용(Ⅰ)-모형의 구성," 한국농공학회지, **39**(1), 41~47(1997).
16. 김진택, 박승우, "농업비점원오염모형을 위한 GIS 호환모형의 개발 및 적용(Ⅱ)-AGNPS모형의 수정," 한국농공학회지, **39**(2), 53~61(1997).
17. Kothyari, U. C., Jain, S. K., "Sediment Yield Estimation using GIS," *Hydrological Sciences Journal*, **42**(6), 833~843(1997).
18. McCool, D. K., George, G. O., Freckleton, M., Douglas, C. L. Jr., Papendick, R. I., "Topographic Effect on Erosion from Cropland in the Northwestern Wheat Region," *Transactions of the ASAE*, **36**(3), 771~775(1993).
19. 국립지리원, 수치지도 작성작업 규칙(1995).
20. Dissmeyer, G. E., Foster, G. R., "Estimating the Cover Management Factor(C) in the Universal Soil Loss Equation for Forest Conditions," *Journal of Soil and Water Conservation*, **36**(4), 235~240(1981).
21. Beasley, R. P., Erosion and sediment pollution control, The Iowa state university press(1972).
22. Donahue, Roy L. Miller, Raymond W., Shickluna, John C., Soil : An introduction to soil and plant growth, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey(1983).
23. Morgan, R. P. C., Soil Erosion and Conservation, Longman Scientitic & Technical(1986).
24. 농촌진흥청, 한국의 전토양(1986).
25. 농촌진흥청, 한국의 답토양(1984).
26. 농업기술연구소, 정밀토양도(1990).
27. Williams, J. R., Berndt, H. D., "Sediment Yield Computed with Universal Equation," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **98**(12), 2087~2098(1972).
28. Dunne et al., Water in Environmental Planning, W. H. Freman(1978).
29. Jung, Pil-Kyun, "Soil Erosion Prevention Function of Agricultural Practices," *OECD Agricultural Environmentl Workshop*, March (1999).
30. 김상욱, 토지이용변화에 따른 경안천유역 토양유실에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문(1995).
31. Heimilich, R. E. and Bills, N. L., "An Improved Soil Erosion Classification for Conservation Policy," *Journal of Soil and Water Conservation*, **39**(4), 261~266(1984).
32. 환경처, 수질보전 장기종합계획수립 종합보고서(1992).
33. 한국환경기술개발원, 비점오염원 조사연구사업 보고서(1995).