ORIGINAL ARTICLE

산지형 하천의 토양침식 및 토사유출량 산정

고재욱 · 양성기* · 양원석 · 정우열 · 박철수

제주대학교 토목공학과

Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield in Mountainous Stream

Jae-Wook Ko, Sung-Kee Yang*, Won-Seok Yang, Woo-Yeol Jung, Cheol-Su Park

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

Abstract

Jeju island, which is located along the moving path of typhoon, suffers from flooding and overflow by torrential rain. So abrupt runoff occurring, damages of downstream farm field and shore culturing farms are increasing. In this study, Oaedo stream, one of the mountainous streams on Jeju island, was selected as the basin of study subject and was classified into 3 sub-basins, and after the characteristics of subject basin, the soil erosion amount and the sediment delivery of the stream by land usage distribution were estimated with the use of SATEEC ArcView GIS, the sediment yield amount of 2000 and 2005 was analyzed comparatively. As a result of estimating the sediment yield amount of 2000, the three sub-basins were respectively 12,572.7, 14,080 and 157,761 tons/year. and sediment yield amounts were estimated as 35,172.9, 5,266 and 258,535 tons/year respectively in 2005. The soil erosion and sediment yield amount of 2005 using single storm rainfall were estimated high compared with 2000, but for sub-basin 2, the values rather decreased due to changes in land use, and the land coverage of 2005, since there are many classifications of land usage compared with 2000, enabling to reflect more accurate land usage condition, could deduce appropriate results. It is anticipated that such study results can be utilized as basic data to propose a direction to predict the amount of sediment yield that causes secondary flooding damage and deteriorates water quality within detention pond and grit chamber, and take action against damages in the downstream farm field and shore culturing farms.

Key words : Soil erosion, Sediment, SATEEC, Single storm

1. 서론

최근 과거의 강우기록을 갱신하는 태풍과 돌발적인 집중호우로 인하여 재산, 인명 피해가 점차 증가하고 있다. 제주도는 재해유발 원인인 태풍의 길목에 위치하여 호우로 인한 피해에 민감한 실정이다. 하천은 한라산에서 발원하여 주로 남북으로 유하되는 특성을

가지며, 경사가 급하고 유로길이가 짧은 형상을 보여 유출로 인한 내수침수 또는 외수범람, 부유토사에 의한 피해 등이 증가하고 있다. 또한, 하천의 상류부는 대부분 산림으로 구성되어 있으며 하류부는 주거지역 및 경작지가 밀집되어 있어 상류에서 발생하는 홍수 유출로 인한 하류부의 피해가 증가하고 있으며, 특히 돌발적인 호우로 인한 유출은 부유토사의 침식을 받

Received 20 March, 2013; Revised 7 May, 2013;

Accepted 8 May, 2013

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

생시켜 하천의 흐름을 방해하고, 농경지 및 양식장에 막대한 재산적 피해를 발생시키고 있다.

제주도의 호우 피해에 대한 대책은 하천을 유하하는 유출수를 대상으로 하여 하천정비기본계획이나 저류지 설계만을 중점적으로 시행하였으나, 토사유출에 대한 분석과 예방대책은 부족한 실정이다. 토사유출은 호우유출과 함께 이차적인 홍수 피해를 유발하는 원인으로 작용될 수 있으며 저류지 및 침사지내의 수질악화의 요인이 된다(Jang 등, 2009). 따라서 호우로 인한 각종 피해를 최소화하고 저류시설의 효율적 설계를 위해서는 토사유출량의 해석과 예측이 필요하다. 또한, 토사유출량을 산정한 기존 연구에서는 원단 위법이나 유역의 특정값만을 사용기 때문에 유역특성에 적합한 결과를 도출하기는 어려운 편이다.

본 연구에서는 범용토양유실방정식(USLE, Universal Soil Loss Equation)을 적용한 GIS 기반의 SATEEC (Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control) ArcView GIS를 이용하여 대상유역의 특성과 토지이용분포에 따른 토양침식량과 하천의 유사량을 산정하고 하천 최하류부의 토양유출량을 산정하였다. SATEEC는 GIS를 이용하여 유역의 특성을 셀 단위로 분석하기 때문에 유역특성을 제대로 반영할 수 있으며, 셀 단위 결과를 도출하여 기존 연구에 비해 적합한 토사유출량을 산정할 수 있다(Park 등, 2008; Jang 등, 2009). 이와 같은 연구는 하천재해로 인하여 발생할 수 있는 피해의 정도를 예측하고, 이에 대처할 수 있는 방향을 제시하기 위한 기초 연구이며 해당유역의 토사유출량 산정 및 저감을 위한 계획의 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 자료 및 방법

2.1. 기본이론

USLE는 1960년대에 농경유역에서의 토양손실에 측을 위해서 미국의 Wischmeier와 Smith(1965)에 의해 개발되었다. 이 방정식은 경험적 방법에 의해 개발되었지만 다른 지역에 대해 범용적으로 적용할 수 있다. USLE는 유역의 기후(강우), 토양, 토지피복상태, 토지이용 등의 변수를 이용하여 유역에서의 토양 유실량을 추정한다. 이를 이용하여 추정된 토양 유실량

은 해당 지역에서 강우에 의해 침식되어 하류로 유실되는 토양량으로서 초기 침식량이라 하며, 미국의 경작지와 유럽, 서부 아프리카 등지에서 많이 적용되었다(Guak과 Cho, 2006). USLE에 의해 예상되는 토양 유실은 여섯 가지 형태의 인자에 의해 결정된다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

여기서, A : 연평균 토양 유실량(tons/ha/year)

R : 강우침식인자(J/ha · mm/hr)

K : 토양침식인자(tons/ha/R)

L : 침식사면의 길이인자(경사장인자)

S : 침식사면의 경사인자(경사도인자)

C : 식생피복인자

P : 침식조절인자

단, L, S, C, P 는 무차원이다.

이 식을 개발하기 위하여 Wischmeier와 Smith는 표준밭(unit plot)이라고 하는 길이 22.13m와 9%의 경사를 가진 밭작물의 나지에서 자료를 대규모로 수집하였다. 토양침식인자 K 는 표준밭에서 단위 강우침식인자 R 당 해당 토양의 침식량을 의미하며, 경사길이인자 L 과 경사인자 S 는 같은 조건 하에서 실제 경사에서의 토양 유실량과 표준 밭에서 발생한 유실량의 비율이다. 일반적으로 경사길이인자 L 과 경사인자 S 는 통칭하여 지형인자 LS 라고 표현한다. 식생피복인자 C 와 침식조절인자 P 또한 각각 해당 조건에서의 단위 면적당 유실량과 표준 밭에서 발생한 단위면적당 유실량과의 비율을 나타낸다. USLE의 토양 유실량 A 값은 강우침식인자 R 값을 연평균 값을 이용할 경우 연평균 토양 유실량을 의미하며, 특정 기간의 강우사상을 이용할 경우 해당 강우사상에 의해 발생한 토양 유실량을 의미한다.

USLE는 관상 및 세류침식에서는 침식능이 약해 1 mm 이상의 토립자에 대해서는 적용할 수 없다(Haan, 1994). 토양 보전을 위한 설계에 활용하기 위하여 개발된 USLE는 세류간 그리고 세류침식량 산정을 위해 개발되었으므로 구곡침식, 산사태에 의한 침식량은 물론 하천이나 저수지에서의 침식 또는 퇴적에 의한 침식량의 증감효과를 반영하지 못하므로 USLE를 이

용하여 산정한 특정 유출지점의 토사유출량은 토양생 산지점으로부터 유출지점까지의 전달률을 고려하여야 한다(Lee, 2011).

2.2. 연구방법

본 연구에서는 대상지역으로 선정된 외도천 유역의 토양침식량과 하천의 유사량을 분석하여 출구점 및 주요지점의 토사유출량을 산정하였다.

토사유출량 산정은 USLE를 이용하는 SATEEC ArcView GIS를 사용하였다. 최근에는 USLE의 기존 공식의 형태는 유지하면서 각 인자들의 산정방법을 개선한 수정범용토양손실공식(RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation)이 사용되고 있으나 단지 유역을 대표하는 인자들의 곱으로 결과를 산출하게 되므로 유역 특성을 제대로 반영하기 힘들다. 본 연구에서는 기존의 USLE 공식을 사용하지만 GIS를 기반의 셀 단위 분석을 수행하여 유역특성인자인 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 침식사면의 길이·경사인자(LS), 식생피복인자(C), 경작인자(P)를 강우량자료와 지형자료(DEM, Land Use, Soil Type)를 이용하여 구축하였으며, 2000년과 2005년도의 토지이용 변화를 적용한 결과를 비교하였다. 또한, 대상유역의 지형자료 검토 결과 세 개의 소유역으로 분할하여 각 소유역에 대한 토사유출량을 비교·검토하였다.

2.3. 연구대상지역

제주도의 하천은 제주시와 서귀포시를 중심으로 남·북부 지역에 143개의 지방하천과 소하천을 형성하고 있으며, 이는 유로연장이 짧고 경사가 급하며, 크고 작은 만곡의 형태를 보이는 산지형 하천의 형태를 갖는다.

연구대상 유역은 제주도 북부지역인 제주시를 유과하는 외도천을 대상으로 하였다. 외도천 유역은 하류부를 제외하면 도시화지역이 발달하지 않았으며, 산림과 경작지의 비율이 높아서 토립자 특성에 따른 토사유출해석에 적합하다. 대상 하천의 총 연장은 12 km이고, 지류인 어시천과 광령천이 해안가 근처에서 합류하며 유로연장은 15.71 km, 유역의 총 면적은 75.08 km²이다. 총 유역에서 최종 합류부 이전의 외도천 유역을 연구대상 유역으로 선정하였고 면적은 41.42 km²이며, 유역의 평균고도는 874.89 EL.m, 평균 경사는 11.99%이다. 대상 유역의 토지이용현황을 보면 산림이 42.42%로 대부분을 차지하고 있으며, 경작지가 17.49%, 주거지역이 2.05%를 차지하고 있다.

3. 결 과

3.1. 강우침식인자 분석

토양침식량은 강우의 크기 및 형태에 직접적인 영

Fig. 1. The basin for the study.

향을 받게 된다. 따라서 강우에 의한 침식능 R 의 산정은 대단히 중요하며, 강우침식인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 공식의 개발 초기에는 연평균 강우침식인자만을 적용하였지만 최근에는 단일호우 강우침식인자를 주로 사용한다. 본 연구에서는 두 가지의 강우침식인자를 각각 산정하여 200년도와 2005년도 토사유출량 산정에 적용하였다.

연평균 강우침식인자는 연평균 강우량에 의한 토양 침식에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 통상 기존 연구 결과를 사용하며, 본 연구대상 유역은 제주 기상청 산하에 속하므로 연평균 강우침식인자 R 은 Table 1과 같이 제주지역의 $390 \text{ } 10^7 \text{ J/ha} \cdot \text{mm/hr}$ 를 사용하였다(National Disaster Management Institute, 1998).

Table 1. Annual rainfall erosivity at rainfall observatory

Number	Meteorological observatory	R	Duration(year)
184	Jeju	390	1969~1978
189	Seoguipo	636	1969~1978
187	Sungsanpo	445	1969~1979

단일호우 강우침식인자는 대상유역인 외도천의 하천정비기본계획에서 분석한 확률강우량 의 강우강도식을 사용하였으며, 에너지단위의 합($\sum E_i$)과 30분 지속최대강우강도($I_{30(max)}$)을 추출하여 Table 2와 같이 재현기간 100년 빈도의 지속기간 24시간에 대한 단일호우 강우침식인자인 $R_{100}=1,493 \text{ } 10^7 \text{ J/ha} \cdot \text{mm/hr}$ 를 산정하였다.

3.2. 토양침식인자 분석

토양침식인자 분석에서는 대상유역의 토질연구결과를 바탕으로 K 값을 산정하여야 하나, 전유역의 구체적인 토질조사를 시행하는데 어려움이 있다. 따라서, 『개발에 따른 토사유출 산정에 관한 연구(I), 국립방재연구소, 1998』보고서의 입도 결과를 이용하였으며, 외도천 유역의 30개 토양통에 대하여 Erickson 방법과 Wischmeier 도표에 의한 침식인자 K 를 적용하였다.

Fig 2와 같이 ArcView GIS를 이용하여 유역의 토양침식인자를 산정한 결과, Erickson 방법에 의한 침식인자 K 는 $0 \sim 0.73 \text{ ton/ha/R}$ 의 분포를 보였으며 면적비에 따른 평균은 0.41 ton/ha/R 로 나타났다. Wischmeier 도표에 의한 침식인자 K 는 $0 \sim 0.57 \text{ ton/ha/R}$ 로 분석되었으며 평균값은 0.31 ton/ha/R 로 Erickson 방법에 의한 침식인자가 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 100 years)

Rainfall duration (hr)	Rainfall (mm)	Interval rainfall (mm)	Interval time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall kinetic energy (10^7 J/ha/mm)	Total rainfall kinetic energy (10^7 J/ha)
0	0.00					
0.5	66.0	65.97	0.50	131.95	0.0290	1.9113
1	97.3	31.28	0.50	97.26	0.0288	0.9022
2	143.4	46.12	1.00	71.69	0.0284	1.3107
3	179.9	36.54	1.00	59.97	0.0280	1.0217
4	211.4	31.45	1.00	52.84	0.0275	0.8652
6	263.1	51.77	2.00	43.86	0.0267	1.3808
9	315.5	52.35	3.00	35.05	0.0254	1.3288
12	351.8	36.27	3.00	29.31	0.0242	0.8769
15	378.9	27.11	3.00	25.26	0.0231	0.6261
24	432.2	53.35	9.00	18.01	0.0205	1.0945
Total			$R_{100} = 1,493 \text{ } (10^7 \text{ J/ha} \cdot \text{mm/hr})$			11.3183

Fig. 2. K factor using Erickson(left) and Wischmeier(right) method at the basin.

Fig. 3. LS factor using Moore&Burch(left) and Desmet&Govers(right) method at the basin.

3.3. 지형인자 분석

토양 손실과 관련된 지형특성 인자는 유역길이, 지면경사, 유역면적, 기복도 등이 있으며, 유역 사면의 길이(L), 사면의 기울기(S)를 통합하여 하나의 무차원 인자(LS)로 간주하여 토사유출량을 산정한다. USLE에서 경사장 인자(L)와 경사도 인자(S)를 합쳐서 지형인자(LS)라고 표기하며, 경사장 인자(L)는 단일 경사라고 할 수 있는 지형의 길이와 표준 시험포의 길이인 22.13m의 비로 나타낼 수 있고, 경사도 인자(S)는 단일 경사라고 할 수 있는 지형의 경사도와 표준 시험포의 경사도인 9%의 비로 나타내어진다. 경사장과 경사도 인자는 SATEEC ArcView GIS를 이용하여 DEM으로부터 추출하였으며, Moore와 Burch(1986)에 의해 제안된 식과 Desmet과 Govers(1996)의 식을 이용하였다.

Fig. 3과 같이 Moore와 Burch(1986)의 식을 이용하여 분석된 지형인자(LS)는 최대 45.40, 평균 7.84로 분석되었으며, Desmet과 Govers(1996) 공식을 이용하여 산정된 결과는 최대 80.91, 평균 13.05의 값을 나타냈다.

3.4. 토지이용변화에 따른 식생피복인자와 작물경작인자

식생피복인자와 작물경작인자는 토지를 피복하고 있는 식생 또는 작물의 이용 상태에 따라 그 값이 달라지며 0에서 1까지의 값을 가진다. 본 연구에서는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 토지피복자료를 이용하여 2000년과 2005년의 토지피복상태를 고려한 식생피복인자와 작물경작인자를 구하였다.

2000년의 토지피복은 총 6가지로 분류되며 외도천 유역에서 가장 높은 비율을 차지하는 것은 산림으로, 전체면적의 70%를 차지하며 그 외에 밭이 18%, 초지가 10%를 차지하고 있다. 2005년도 외도천 유역의 토지피복은 총 17가지로 분류되지만, 이 중에서 상업지역과 공공시설지역, 내륙습지가 차지하는 면적 비율은 0.1% 미만이므로 분석에서 제외하고, 총 13가지 분류에 대하여 분석을 시행하였다. 가장 높은 비율을 차지하는 것은 활엽수림으로 전체면적의 48.30%를 차지하며 침엽수림과 혼효림을 포함하는 산림은 67.89%의 분포를 보인다. 기타초지 및 자연초지의 면적은 19.98%를 차지하며, 경작지의 대부분은 과수원으로써 총경작지 면적 9.53% 중 6.59%를 차지하고 있다. 2000년도에 비해 경작지의 규모가 축소되고 초지의 비율이 증가하였으나 산림과 시가지지역의 비율은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 외도천 유역에 대규모 단지조성의 개발이나 시가지지역이 발달되지 않았기 때문이며, 2000년도의 토지피복 분류에서는 2005년도와 다르게 과수원을 분류하지 않았으며 지목상 과수원은 밭에 속한 것으로 판단된다.

3.4.1. 식생피복인자 분석

식생피복인자(C)는 식생의 종류, 식생이 성장하는 상태, 경작형태와 관리요소들의 형태와 관련이 깊다. C 값은 식생이 성장하기 전의 나지화 지역에서는 1.0의 높은 값을 갖지만, 산림화 지역에서는 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 본래 작물의 생육에 따라 또는 토양

유실량의 실측값에 따라 구해야 하지만 이에 대해 검토한 연구가 국내에서는 Jung 등(1984)의 연구를 제외하면 거의 없는 실정이므로 본 연구에서는 Table 3의 Jung 등(1984)에 의해 제시된 토지 피복별 식생피복인자 기준을 적용하였다.

Table 3. C factor for various land uses(Jung et al., 1984)

Forms of cover-management factor(C factor)		C factor
Forest	mixed needle & broad-leaf tree	0.007
Farmland	paddy field	0.350
Pasture	pasture, public garden	0.050
Urban district	low density area	0.002
Bare land	bare land	1.000
water system	lake, reservoir	0.000

Fig. 4와 같이 2000년도 토지피복도를 이용하여 분석된 식생피복인자 C는 평균 0.075의 값을 보였으며 유역의 중·하류부와 최상류에서 경작지로 인하여 높은 값을 나타냈다. 2005년도 토지피복도를 이용하여 분석된 식생피복인자 C는 평균 0.037의 값을 나타냈으며, 2000년도의 토지피복도를 이용한 C값 절반정도의 결과를 보였다. 이는 토지이용변화에 따른 경작지 감소의 결과로 보이며, 증가되는 초지는 식생피복인자 C의 평균값에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.4.2. 작물경작인자 분석

작물경작인자 P는 토양보존대책을 세운 사면의

Fig. 4. C factor at the basin in 2000(left) and 2005(right).

상·하방향 경사지로부터의 토양유실에 대한 보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의된다. 이것은 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위해서 사용된다. 본 연구에서는 Table 4의 Wischmeier와 Smith(1978)에 의해서 제시된 P값을 4가지의 경작방법과 6가지의 경사도에 따라 구분하여 이용하였다. 제주도의 작물재배는 주로 밭은 등고선 재배를 이용하고, 과수원은 계단식 관개방식으로 행해지고 있으므로 이를 적용하여 대상유역의 토지피복에 따른 2000년도와 2005년도의 작물경작인자를 산출하였다.

Table 4. P factor for percent slope and practice types (Wischmeier & Smith, 1978)

Slope(%)	P factor			
	Irrigated terracing	Contour Strip cropping	Contour furrows	Contouring
$0 \leq S \leq 2$	0.10	0.25	0.25	0.50
$2 \leq S \leq 8$	0.10	0.25	0.25	0.50
$8 \leq S \leq 13$	0.12	0.30	0.30	0.60
$13 \leq S \leq 19$	0.16	0.40	0.40	0.80
$19 \leq S \leq 24$	0.18	0.45	0.45	0.90
$24 \leq S$	1.00	1.00	1.00	1.00

Fig. 5와 같이 2000년도 토지피복도를 중첩시킨 결과, 유역 중·하류부의 밭을 중심으로 작물경작인자가 낮게 산정되었고, 유역의 발원점 인근에 형성되어 있는 경작지의 작물경작인자도 낮은 정도를 보였으며, 평균 작물경작인자는 0.95로 나타났다. 2005년도

의 평균 작물경작인자는 0.92의 값을 보여 2000년도 토지피복도를 이용한 작물경작인자보다 작게 산정되었으며, 이는 경작지의 감소와 과수원의 분류 차이로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

4. 고 찰

4.1. 입력자료의 비교와 채택

본 연구에서는 토양침식량 산정을 위하여 강우인자를 비롯한 5개의 입력자료를 구축하였으며 각 입력자료들의 강우자료, 산정공식, 토지피복 변화에 따른 인자들을 산출하였다. 또한, 외도천 유역의 2000년도와 2005년도 기준의 토사유출량을 SATEEC ArcView GIS 모형을 이용하여 산정한 후 결과를 비교하였다. 입력자료 중 강우침식인자는 해당 년도의 강우자료 확보와 확률강우량의 산정에 어려움이 있으므로 과거 연구에서 제시한 값을 사용하였다. 2000년도의 토양침식량 산정에서는 과거 20년간의 강우자료에서 도출한 연평균 강우침식인자 R을 채택하였으며, 2005년도의 토양침식량 산정에서는 대상유역이 속하는 제주 시 기상청의 최근 강우자료를 이용하여 확률강우량과 강우강도식을 유도하고 외도천의 설계빈도인 100년 빈도의 단일호우 강우침식인자 R을 사용하였다. 또한, 해당년도의 토지피복도와 DEM의 경사분포를 고려한 식생피복인자 C와 작물경작인자 P를 도출하여 토양침식 모형에 적용하였다. 연구대상 유역의 토양통 변화는 없을 것으로 판단되므로 토양통에 따른 토

Fig. 5. P factor at the basin in 2000(left) and 2005(right).

양침식인자 K는 동일하게 사용하였으며, K 인자 산정에서 사용된 Erickson 방법과 Wischmeier 도표에 의한 방법 중 실무와 연구에서 널리 사용되고, 비교적 정확한 것으로 알려진 Wischmeier 도표에 의한 방법을 채택하였다. 또한 외도천 유역 내에 대규모 개발이나 단지 조성이 없었던 점을 감안하여 DEM 자료로부터 획득한 지형인자 LS도 동일하게 사용하였으며, 입력 인자 산정에서 사용된 Moore와 Burch(1986)의 식과 Desmet과 Govers의 식 중에서 강우발생시 경사에 따라 이동하는 물의 양에 따른 유입토사의 변화를 고려할 수 있는 Desmet과 Govers(1996)의 방법을 활용하였다.

4.2. 유사전달률의 적용

원 지점에서 침식된 토립자들은 흐름에 연행·이송되어 하류로 유하되지만, 경사가 완만해 지는 곳이나 움푹 파인 지점, 또는 장애물 등에 의해 중간에 퇴적될 수 있다. 이렇게 원 지점에서 침식된 토립자들 중 하류 일정 지점까지 유하되는 입자들의 비를 유사전달률이라 한다. 본 연구에서는 USLE에 의해 산정된 토양침식량에 유사전달률(sediment delivery ratio)개념을 도입하여 유역출구의 토사유출량을 산정하였다. 유사전달률 산정시 외도천 유역을 하천 합류부 및 최종 출구점을 고려하여 세 개의 소유역 1, 2, 3으로 구분하였으며 소유역별 유사전달률 산정 결과, Fig 6과 같이 소유역 1의 SDR은 0.438708, 소유역 2는 0.457996, 소유역 3은 0.300962로 분석되었다.

Fig. 6. SDR for subwatershed at Oaedo stream.

4.3. 토사유출량 산정

토양침식량과 유사전달률을 고려하여 최종 산정지점의 토사유출량을 산정한 결과, Fig. 7과 같이 2000년도의 소유역 1의 토사유출량은 12,573 ton/year이며, 소유역 2는 14,080 ton/year, 소유역 3은 157,761 ton/year로 분석되었다. 소유역 3 유역은 소유역 1, 2 유역에 비해 유역의 면적에서는 20배 이상 크지만 SDR을 고려한 토사유출량은 대략 10배로 산정되어, 유역면적에 비하면 낮은 유출률을 보였으며, 토양침식은 소유역 3 유역의 상류부에서 최대로 발생하지만 낮은 유사전달률을 고려할 때, 하류부로 유출되는 양은 소유역 1, 2 유역의 면적에 비해 미비한 것으로 나타났다. 2005년도의 경우 소유역 1의 토사유출량은 35,173 ton/year이며, 소유역 2는 5,266 ton/year, 소유

Fig. 7. Sediment yield for subwatershed at Oaedo stream in 2000(left) and 2005(right).

Table 5. Soil erosion and sediment yield for each Watershed at OaeDo stream

Basin	Area (km ²)	Sediment delivery ratio (SDR)	2000		2005	
			Soil erosion (ton/year)	Sediment yield (ton/year)	Soil erosion (ton/year)	Sediment yield (ton/year)
Sub watershed 1	1.81	0.438708	28,658	12,573	80,174	35,173
Sub watershed 2	1.28	0.457996	30,743	14,080	11,498	5,266
Sub watershed 3	36.85	0.300962	524,190	157,761	859,288	258,535

역 3은 258,535 ton/year로 분석되었다.

Table 5와 같이 2000년도와 2005년도의 토사유출량을 비교하면 소유역 2는 강우침식인자 R의 증가로 인하여 전체적인 토양침식 및 토사유출량이 증가함과 달리 낮아지는 결과를 보였다. 2000년도 토지피복도에서는 소유역 2 유역이 대부분 경작지에 해당하나, 2005년도의 토지피복도에서는 초지 및 산림으로 구분되어 있어 식생피복인자 C의 변화에 의한 것으로 판단된다. 또한, 소유역 1 유역의 토사유출량이 상대적으로 증가된 결과가 나왔으며, 이 역시 토지피복의 변화와 피복종류의 분류 차이에서 발생한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 제주도의 외도천을 대상으로 하여 USLE 기법의 토사유출량 산정 모형인 SATEEC ArcView GIS를 이용한 토양침식량과 토사유출량을 산정하였다. 입력자료인 강우침식인자, 토양침식인자, 지형인자, 토지피복인자, 작물경작인자를 구축하였으며, 하천의 유사전달률을 고려하여 외도천 유역의 토사유출량을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 외도천 유역의 강우침식인자 R은 연평균 강우와 단일호우 자료를 이용하여 산정하였으며, 각각 $390 \times 10^7 \text{J/ha} \cdot \text{mm/hr}$, $1,493 \times 10^7 \text{J/ha} \cdot \text{mm/hr}$ 의 결과를 보였다. 단일호우 강우침식인자는 연평균 강우침식인자와는 달리 확률강우강도식을 이용하므로 보다 큰 값을 갖는다.

2) 연구대상 유역의 토지이용 상태에 따라 2000년도와 2005년도의 토지피복도를 비교하여 식생피복인

자 C와 작물경작인자 P를 산정하였다. 2000년도의 토지피복도는 6가지의 피복 상태로 분류하지만, 2005년의 토지피복도는 17가지로 분류하여 보다 적합한 식생피복인자 C를 적용할 수 있으며, 산정 결과 2005년의 식생피복인자가 2000년도에 비해 절반 정도의 값을 보였다.

3) 정밀토양도를 이용하여 토양침식인자 K를 산정하였으며 DEM자료와 지형도를 이용하여 지형인자 LS를 구하였다. 외도천 유역의 토양통과 지형은 2000년과 2005년 사이에 큰 변화가 없으므로 토사유출량 분석 시 입력인자를 변화시키지 않고 동일하게 적용하였다.

4) 유출흐름에 따라 3개의 소유역으로 구분하여 2000년도와 2005년도의 토사유출량을 모의하였다. 하천의 유사전달률을 고려하였으며 소유역별로 각각 0.438708, 0.457996, 0.300962의 값을 보이고 있어, 상류 유역의 유사전달률이 가장 낮게 산정되었다.

5) 2000년도의 토사유출량 산정 결과, 총토양침식량은 $601,882 \text{ ton/year}$ 로 산정되었으며, 유사전달률을 고려했을 때 3개의 소유역은 각각 $12,573 \text{ ton/year}$, $14,080 \text{ ton/year}$, $157,761 \text{ ton/year}$ 의 토사유출량이 발생하였다. 상류 유역의 토사유출량이 가장 크지만, 유역면적은 크고 유사전달률이 작기 때문에 이를 고려하면 타유역에 비해 유출률이 오히려 작게 분석되었다.

6) 2005년도의 토사유출량 산정 결과, 총 토양침식량은 $950,960 \text{ ton/year}$ 로 분석되었으며, 토사유출량은 소유역별로 각각 $35,173 \text{ ton/year}$, $5,266 \text{ ton/year}$, $258,535 \text{ ton/year}$ 로 산정되었다. 소유역 2는 2000년도와는 달리 토사유출량이 낮아졌으며, 소유역 1은 상대적으로 증가된 결과가 나타났다.

7) 토사유출량 분석 시 토지피복의 분류 차이에 따라 다른 결과가 산정되었다. 2000년도의 토지피복도는 2005년도의 토지피복도에 비해 정확도가 떨어지고 분류개수도 적어 적합한 결과를 얻기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 외도천 유역의 토양침식량과 유출량을 산정하였다. 이와 같은 연구는 이차적인 홍수피해를 유발할 수 있으며 저류지 및 침사지내의 수질악화의 요인이 되는 토사유출량을 예측하여 피해에 대처할 수 있는 방향을 제시할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 하지만 토사유출량을 예측하기 위해서는 적합한 입력 자료의 구축이 선행되어야 하며 현장자료 및 계측치와의 비교 및 검증이 필요하다. 현재까지 제주도는 토립자분포 및 식생, 지형 등 기초조사가 부족한 실정이며 특히 토사유출량을 관측한 실측데이터는 전무하다. 따라서 제주도에 적합한 기초현황 조사가 필요하며, 추후 신중하고 면밀한 검토를 위한 실측데이터가 구축되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Desmet, P. J., Govers, G., 1996, Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models and Their Implications for Predicting Ephemeral Gullies, *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 10(3), 311-331.
- Erickson, A. J., 1997, Aids for Estimating Soil Erodibility-K Value Class and Soil Loss Tolerance, U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service Salt Lake City of Utah.
- Guak, D. W., Cho, G. S., 2006, Evaluation of GIS-based Soil Loss Amount in Considering Basin Characteristics, *J. Korean Soc. Surv.*, 24(1), 89-97.
- Haan, C. T., Barfield, B. J., Hayes, J. C., 1994, *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*, San Diego : Academic Press.
- Jang, W. S., Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, I. J., Mun, Y. R., Jun, M. S., Lim, K. J., 2009, Soil Erosion and Sediment Yield Reduction Analysis with Land Use Conversion from Illegal Agricultural Cultivation to Forest in Jawoon-ri, Gangwon using the SATEEC ArcView GIS, *J. Korea Environ. Inst.*, 8(1), 74-95.
- Jung, P. K., Ko, M. H., Um, K. T., 1984, Discussion of Cropping Management Factor for Estimating Soil Loss, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fertilizer*, 18(1), 7-13.
- Lee, S. W., 2011, Application of RUSLE Model in Prediction of Soil Loss at Small Mountainous Area, Ph. M. Dissertation, Yeungnam university, 15-22.
- Ministry of Construction Transportation, 2009, Basic Plan for River Maintenance (Gwangryeong Stream).
- Moore, I., Burch, G., 1986a, Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1294-1298.
- Moore, I., Burch, G., 1986b, Modeling Erosion and Deposition: Topographic Effects, *TRANS OF ASAE*, 29(6), 1624-1640.
- National Disaster Management Institute, 1998, Study on the sediment yield estimation due to land development, 161-235.
- Park, Y. S., Kim, J. G., Heo, S. G., Kim, N. W., Ahn, J. H., Park, J. H., Kim, K. S., Lim, K. J., 2008, Comparison of Soil Loss Estimation using SWAT and SATEEC, *J. Korea Soc. Agric. Eng.*, 50(1), 3-12.
- Water Management Information System, 2000, 2005, <http://www.wamis.go.kr>.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978, Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning, USDA, Agric. Handb., 537.