산불재해지역의 토사유출량 산정

Estimation of Sediment Yield in a Disaster Area by a Fired Forest

추태호* · 윤현철** · 노현석*** · 고현수****

Choo, Tai Ho · Yoon, Hyeon Cheol · Noh, Hyun Suk · Ko, Hyun Soo

Abstract

As exposure of soil surface arises from completely burned vegetation caused by forest fire, the secondary damage is likely to happen due to sediment runoff during heavy rains. In order to mitigate sediment disaster the various methods have been conducted such as erosion control, forestation project and so on. However, the dangerousness is generally ignored because sediment yield can not be estimated by quantitative analysis in forest fire region as well as neighborhood. In the current study, therefore, the sediment yield and soil loss amount were estimated by using the RUSLE(Revised universal soil loss equation) based on GIS in study area. Also, the potential areas of soil disaster were visually proposed by estimating the soil loss amount each rainfall frequency to apply and implement erosion control project.

Key words : Soil Loss Amount, Sediment Yield, RUSLE(Revised universal soil loss equation), GIS, Forest Fire

요 지

산불로 인한 식생 전소로 토사표면이 노출됨에 따라 집중호우 시 토사유출로 인한 2차적 피해가 발생할 가능성이 높다. 토사재해를 저감하기 위해 사방사업 및 조림사업 등 다양한 방법으로 접근하고 있으나, 산불지역은 물론 인근 지역의 토사유출량이 정량적인 수치로 산정되지 않아 지역주민은 물론 대외적으로 그 위험성을 체감하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 GIS를 활용한 RUSLE(개정범용토양손실공식)를 적용하여 대상지역의 토사유출량과 토양침식량을 산정하였다. 또한 빈도별로 탄력적인 사방사업을 시행하는데 적용할 수 있도록 강우빈도별 토양침식량을 산정하여 토사재해 잠재지역을 시각적으로 제시하였다.

핵심용어 : 토양침식량, 토사유출량, 개정범용토양손실공식, 지형정보시스템, 산불

1. 서 론

울주군은 최근 10년 동안 약 80회의 산불이 발생한 바 있으며, 주된 산불발생원인은 입산자의 실화 때문인 것으로 조사되었다. 2004년부터 2013년까지의 78회 산불중 입산자 실화로 인한 산불은 총 33회로 전체 산불발생원인의 42%를 차지하고 있다. 특히 2013년 3월 9일, 10일 발생한 언양상북 산불은 최근 10년간 총 피해면적의 약 88%를 차지해 근래 최악의 산불피해로 기록되었다.

이러한 산불피해는 화염에 의한 산림 및 주거지 손실 등의 1차적 피해 외에 우수 및 토사유출량 증가와 같은 2차적인

피해를 동반하는 경우가 많다. 우수유출량의 증가는 많은 양의 토사를 이동시키게 되며 이로 인해 산사태 및 토석류 유출과 같은 토사재해가 발생하게 된다. 따라서 2차적 피해로 분류되는 토사재해 저감대책 수립을 위해 산불피해지역의 토사유출량 산정이 필요하다고 판단하였다. 특히 산불복원기간 등을 고려한 사방사업을 위해 빈도별 토양침식량 산정은 필수적이라 사료된다.

최근 연구를 살펴보면, 이창우 등(2004)은 산불 피해 후 토사유출량의 연도별 변화에 대한 연구를 수행하여 조기 복구 중요성을 도출하였고, 김윤미 등(2009)은 산불 후 시간경과에 따라 식생이 복원되면서 변화되는 지표유출수, 토사유

*정회원. 부산대학교 토목공학과 교수(E-mail: thchoo@pusan.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

**부산대학교 토목공학과 박사수료

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Pusan National University

***부산대학교 토목공학과 석사과정

Master Course, Department of Civil Engineering, Pusan National University

****교신저자. 정회원. 부산대학교 토목공학과 박사과정(Tel : +82-51-510-7654, Fax : +82-51-513-9596, E-mail: phoo99@naver.com)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Program, Department of Civil Engineering, Pusan National University

출 및 영양염류 유실의 변화를 연구하였다. 또한 박상덕 등(2011)은 산불사면의 토양침식에 대해 RUSLE, WEPP, SEMMA 모형의 적용성을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 울주군 산불지역의 토사유출량 및 빈도별 토양침식량을 추정하였으며, 추후 토사재해 저감대책 수립 시 저감대책의 종류와 규모결정에 활용 가능하도록 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 RUSLE 모형

토양침식량 산정방법에는 경험적 모형인 범용토양손실공식(USLE) 및 개정범용토양손실공식(RUSLE), 비유사량법, 원단 위법 등이 있으며, WEPP, SEMMA 모형과 같은 물리적 모형도 최근 각광받고 있다. 본 연구에서는 울주군 지역의 토양침식량을 산정하기 위한 토양유실공식으로 개정범용토양손실공식(RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation)을 채택하였다. RUSLE은 1965년 Wischmeier와 Smith에 의해 삼림 또는 농경지에서의 토양침식량을 예측하기 위해 제시된 범용토양손실공식(USLE: Universal Soil Loss Equation)을 수정·보완하여 개발목장이나 건설현장과 같은 토양조건에서의 토양침식량을 산정하기 위해 고안된 식으로, 강우, 토양침식률, 경사길이, 경사도, 식생분포, 경작지 형태 등 여섯 가지 기본인자에 의해 결정된다. 비교적 오래된 경험적 모형이기는 하나 GIS 분석기법의 발전과 더불어 비교적 합리적인 값을 얻을 수 있으며, 물리적 모형과 같이 많은 매개변수가 필요 없어 간편하게 토양침식량을 산정할 수 있는 장점이 있다. 국내외로 널리 이용되고 있는 RUSLE 모형은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, A : 강우침식인자 R 의 해당기간 중 단위면적당 토양 침식량(tonnes/ha), R : 강우침식 인자(MJ/ha-mm/hr), LS : 사면경사길이 인자(무차원), K : 토양침식 인자(tonnes/ha./R), C : 지표관리 인자(무차원), P : 토양보전대책 인자(무차원).

본 연구에서는 토양침식량 계산 시 필요한 인자들을 아래 방법을 통하여 각각 산정하였다. 산정 시 GIS RASTER 분석기법을 적용하였다. R 인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로 연평균과 단일호우로 구분하여 산정하였다. 강우에너지는 토양침식에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 강우빈도에 따른 토양침식량의 변화추이를 파악하기 위해서는 단일호우 강우침식인자 산정이 필수적이다. 따라서 금회 개발한 확률강우강도식으로 빈도별-지속시간별 확률강우량을 산정하였으며, 단일호우 강우침식인자 산정에 적용하였다. 대상 빈도는 9개 빈도(10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 300, 500년)를 채택하였다. 금회 분석결과 박정환 등(2000)의 연평균 강우침식인자는 금회분석 결과의 10년과 20년 빈도 강우 사이에 대응하는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 적용한 단일호우 강우침식인자 산정식은 다음과 같다.

$$R = \Sigma E \cdot I_{30} \quad (2)$$

$$E = \Sigma e \cdot \Delta P \quad (3)$$

$$e = 0.029[1 - 0.72\exp(-0.05 \cdot I)] \quad (4)$$

여기서, R : 단일호우 강우침식인자(10^7 J/ha-mm/hr), I_{30} : 설계 재현기간의 30분 강우강도(mm/hr), E : 강우충에너지(10^7 J/ha), ΔP : 강우지속시간 구분시 간격당 강우증가량(mm), e : 강우운동에너지(10^7 J/ha/mm), I : 강우강도(mm/hr).

연평균 강우침식인자의 경우 울산기상대에 대하여 박정환 등(2000)이 산정한 연평균 강우침식인자인 $450 \cdot 10^7$ J/ha-mm/hr를 채택하였다.

LS 인자를 결정하는 방법은 사면길이(L)를 이용한 기존의 방법과 GIS에서 LS인자를 계산하는 방법으로 구분된다(Desmet and Govers, 1996). 본 연구에서는 GIS를 이용한 방법을 채택하였으며, 적용된 식은 다음과 같다.

$$LS = (FL \times \text{CellSize} / 22.13)^{0.4} \times (\sin \theta / 0.0896)^{1.3} \quad (5)$$

여기서, FL : Reclassified Flow Accumulation, CellSize : 셀의 크기($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$), θ : 경사각(degree).

K 인자는 토양의 침식성에 따른 토양침식량의 변화를 나타내는 인자로서 토양의 네 가지 특성인 조직, 유기물 함량, 토양의 구조 및 토양의 투수성에 의해 결정되며, 토양침식인자를 산정하는 방법에는 Whlie, Erickson, Wischmeier 방법 등이 있다. 그러나 본 연구에서는 2008년 국립농업과학원에서 토양침식지도 작성 연구(2008. 11, 국립농업과학원) 성과가 발표됨에 따라 본 연구에서는 국립농업과학원(2008)의 성과를 적용하였다. 반면, 한국건설기술연구원(1992) 및 국립농업과학원(2008)의 토양통별 K 값에는 간석소택지, 암석노출지, 암석지, 저수지, 하천범람지 및 하해범람지의 값은 제시되지 않았다. 따라서 본 검토에서는 토양침식인자 K 가 강우에너지와 유출에 의한 침식능에 저항하는 토양의 저항도를 나타낸 것으로써 수계(저수지, 간석지, 하천범람지)나 암석노출지 및 암석지에서는 거의 발생하지 않는 점에 착안하여 이러한 경우 K 값을 '0'으로 가정하여 분석에 적용하였다.

C 인자 산정에는 Wischmeier와 Smith(1978)의 각 범주별 토양피복인자의 값을 적용하였고 1/25,000 축척의 토지이용도를 세분류로 구분하여 토양피복인자 C 를 산정하였다. 특히 산불피해지역 등의 특이지역은 Haan(1994)이 제시한 건설현장, 광산지역, 산림지역에 대한 C 값을 적용토록 하였다.

Fig. 1. Calculation Flow of RUSLE

Fig. 2. K Factor

Fig. 4. C Factor

Fig. 3. LS Factor

Fig. 5. P Factor

P 인자는 어떤 토양 보존대책을 세운 사면의 상하방향 경사지로부터의 토양유실에 대한 보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의된다. 금회 분석 시 밭과 과수원은 주로 등고선을 따라 경작하므로 등고선재배로 분류하였으며, 논은 대부분 계 산불재해지역의 토사유출량 산정

단식으로 경작하기 때문에 테라스 경작으로 분류하였다. 다만 숲이나 나지의 경우 토양을 보전하기 위한 특별한 대책이 수립되지 않았기 때문에 '1'로 가정하여 분석하였다. 토양침식조절인자는 적용상 임의성이 높은 부분이며 지상

Fig. 6. VM Factor

Fig. 7. Soil Erosion

인자, 지표인자, 지하인자 등과 같은 세부인자(subfactor)를 산정하여 곱하여 결정하는 방법이 제시되어 왔으나 이러한 세부인자의 산출을 위한 기초자료가 부족해 적용하기 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 미국 교통연구단(Transportation Research Board, TRB)에서 제시한 토양피복인자(C)와 토양보전대책인자(P)의 곱으로 표현되는 토양침식조절인자(VM)를 적용하는 방법을 채택하였다. 또한 본 연구에서는 산불지역의 토지피복상태를 고려하는 등 국내여건 및 울주군 현지 여건을 반영한 토양피복인자 C 값과 토양보전대책인자 P 값을 적용하였다. 다만, 금회 검토시 적용한 인자들 또한 국내 여건에 따른 적합도 검증이 미흡하고 임의성이 존재하기 때문에

추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

전술한 인자들의 곱으로 산불지역은 물론 울주군 전역의 토양침식량을 산정하였다. 토양침식량은 어떤 한 지점에서 유출되는 토사의 양을 나타내는 개념이 아니기 때문에 유사전달률을 계산하여 토사유출량을 산정해야한다. 따라서 산불지역을 반영한 울주군 전 지역단위 토양침식량을 근거로 토사유출과다 발생이 예상되는 지점을 선정하는 과정이 필요하다. 토사유출과다 발생 예상지점 선정시에는 연평균강우침식인자를 적용하였고 OECD 토양유실량 분류기준을 적용하여 심함(High) 단계에 해당하는 22 MT/ha/yr와 유사한 20 MT/ha/yr를 기준으로 채택하였다.

Table 1. Status of the Objected Basin

Division	Inland A	Inland B	Inland C	Inland D	Inland E	Inland F
Basin Area (ha)	1,557.63	3,323.79	5,144.94	13,588.02	6,913.71	12,413.34
Mean Elevation (EL.m)	563.7	707.5	252.36	291.55	183.15	242.19
Standard Code	202101	202105	210101	220101	220102	220103
Division	Inland G	Inland H	Inland I	Inland J	Inland K	
Basin Area (ha)	7,926.12	6,621.03	5,978.97	9,154.44	2,987.82	
Mean Elevation (EL.m)	136.96	64.5	157.68	113.72	59.25	
Standard Code	220104	230101	230102	230103	230201	

Table 2. Status of the Objected Sub-basin

Division	Inland 1	Inland 2	Inland 3	Inland 4	Inland 5	Inland 6
Basin Area (ha)	72.45	300.24	230.67	239.13	292.32	479.25
Mean Elevation (EL.m)	316.81	585.55	129.58	141.39	147.94	719.5
Location	Gong-Am	Sang-Cheon	Song Dae	Hyang-San	Uk-Gok	Ju-Gye

Fig. 8. Location for the Objected Basin

Fig. 9. Location for the Objected Sub-Basin

2.2 연구대상지역

연구대상유역인 울산광역시 울주군 지역은 한반도의 동남단에 위치하며 군 남동측 경계는 바다와 접하고 있으며 서쪽은 태백산맥이 남동으로 종주하여 산림이 발달해 있다. 전체 행정구역 면적은 756.91 km²로 행정구역은 4읍 8면 461리(법정 118리)로 구성된다. 수계는 태화강 및 회야강 수계가 대표적이며 서에서 동으로 유하한다. 토사의 이동은 물과 바람에 의한 영향이 큰데 본 연구에서는 바람에 의한 토사의 이동은 고려하지 않았으며, 강우에 의한 침식만을 고려하였다.

토양침식량 산정의 원활한 분석 및 비교를 위해 유역종합치수계획 등에 활용된 「수자원관리종합시스템」의 표준유역 11개로 구분하였다(Fig. 8). 또한 주요 산정소유역의 토사유출

특성을 파악하기 위하여 1차적으로 전 지역단위 토양침식량을 산정한 후, 토양침식과다지역인 산불지역 및 주요 토사유출량 산정 소유역을 선정하였다(Fig. 9).

3. 적용 및 분석결과

3.1 토양침식량 산정

본 연구에서는 11개의 표준유역(울주군관내)과 6개의 소유역으로 구분하여 연평균강우침식인자를 적용한 토양침식량을 산정하였다. 산정결과 표준유역에서는 비토양침식량이 9.46~25.69 MT/ha/yr의 범위에서 산정되었고, 토사유출과다발생 예상소유역에서는 35.23~112.74 MT/ha/yr의 범위에서 비

Table 3. Soil Erosion of the Objected Basin

Division	Inland A	Inland B	Inland C	Inland D	Inland E	Inland F
Total Erosion (1,000MT/yr)	34.51	85.37	89.59	245.57	87.55	211.51
Erosion (MT/ha/yr)	22.15	25.69	17.41	18.07	12.66	17.04
Standard Code	202101	202105	210101	220101	220102	220103
Division	Inland G	Inland H	Inland I	Inland J	Inland K	
Total Erosion (1,000MT/yr)	139.43	62.64	94.67	137.35	28.37	
Erosion (MT/ha/yr)	17.59	9.46	15.83	15.00	9.49	
Standard Code	220104	230101	230102	230103	230201	

Table 4. Soil Erosion of the Objected Sub-basin

Division	Inland 1	Inland 2	Inland 3	Inland 4	Inland 5	Inland 6
Total Erosion (1,000MT/yr)	8.17	27.66	14.16	9.36	11.9	16.88
Erosion (MT/ha/yr)	112.74	92.13	61.4	39.12	40.72	35.23
Location	Gong-Am	Sang-Cheon	Song Dae	Hyang-San	Uk-Gok	Ju-Gye

Table 5. Sediment Yield of the Objected Sub-basin

Division		Inland 1	Inland 2	Inland 3	Inland 4	Inland 5	Inland 6
Basin Area (ha)		72.5	300.2	230.7	239.1	292.3	479.3
Erosion (ton/yr)		5,632.91	19,343.43	10,263.70	6,730.37	8,266.04	11,724.58
SDR (%)		28.94	20.25	34.24	34.32	22.84	20.82
Unit weight (ton/m ³)		1.45	1.43	1.38	1.39	1.44	1.44
Sedim-ent	(m ³ /yr)	1,630.16	3,917.41	3,514.51	2,309.90	1,887.77	2,441.64
Yield	(ton/yr)	2,363.73	5,601.89	4,850.02	3,210.77	2,718.39	3,515.96
Erosion (ton/ha/yr)		32.63	18.66	21.03	13.43	9.3	7.34
Location		Gong-Am	Sang-Cheon	Song Dae	Hyang-San	Uk-Gok	Ju-Gye

토양침식량이 전반적으로 높게 산정되었다.

3.2 토사유출량 산정

본 연구에서는 전술한 6개의 토사유출과다 예상지역을 대상으로 토사유출량을 산정하였다. 토사유출량은 일반적으로 토사유출량에 대한 토양침식량의 비인 유사전달률(Sediment Delivery Ratio, SDR)에 의해 추정한다. 산정유역에 적합한 유사전달률 산정은 실측에 의해 이루어져야 바람직하나 본 연구에서는 미국 교통연구단(TBR, 1980)에서 제시한 유역면적과 유사전달률의 관계를 이용하여 토사유출량을 산정하며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$Y = 107.03X^{-0.0964} : \text{Clay} \quad (6)$$

$$Y = 52.94X^{-0.2776} : \text{Sand} \quad (7)$$

결정된 유사전달률을 각 소유역별 토양을 구성하는 Clay와 Sand의 구성비로 가중평균 적용하여 각 소유역의 토사유출량을 산정하였다. 또한 산정된 토사유출량에 Lane & Koelzer (1953)의 퇴적토의 단위중량 경험공식을 적용하여 체적단위(m³/yr)의 토사유출량으로 환산하였다.

$$\gamma_s = 0.82(P+2)^{0.13} \quad (8)$$

여기서, γ_s : 퇴적토의 단위중량(t/m³), P : 입경 0.05 mm 이상 모래의 구성비(%).

3.3 빈도별 토양침식량 산정

연평균 강우침식인자를 적용한 토사유출 위험도 평가를 보

Fig. 10. Using Soil Erosion D/B

Fig. 11. 30Year Frequency Soil Erosion Map(Example)

완하기 위해 9개 빈도(10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 300, 500년) 단일호우 침식인자를 적용하여 토양침식량을 산정하였다. 연평균 강우침식인자를 적용하여 토양침식량을 산정한 경우, 특정시기에 공사가 진행되는 개발사업은 추정치의 오차가 커질 수 있기 때문에 실무에서는 단일호우 침식인자를 적용한 결과를 채택하고 있다. 또한 빈도별 토양침식량 산정결과를 행정기관에 제공할 경우, 빈도별 토양침식량 주제도의 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 RUSLE 모형을 이용하여 연평균 토양침식량, 빈도별 토양침식량 및 토사유출량(산불지역을 포함한 토사유출과다 예상지역)을 산정하여 제시하였다.

- 1) 울주군 관내 표준유역의 비토양침식량은 25.69~9.46 MT/ha/yr 범위로 추정되었으며 202101(운문댐)과 202105(밀

양땀)유역이 토양침식량이 높은 지역으로 추정되었다.

- 2) 연평균강우침식인자를 적용한 전 지역단위 토양침식량 추정결과를 바탕으로 총 6개소의 토사유출과다 예상지역을 선정하였으며, 송대리 산불지역, 향산리 산불지역을 포함한 6개소 모두 비토양침식량이 OECD 토양유실량 분류기준상 심함(high)에 해당하는 22MT/ha/yr를 상회하는 것으로 나타났다.
- 3) 토양침식량 산정결과를 바탕으로 실제 저감대책에 적용할 수 있도록 6개의 소유역을 대상으로 토사유출량을 산정하여 그 결과를 제시하였다.
- 4) 2013년 발생한 연양·상북 산불피해지역인 송대리, 향산리 일대는 연간 약 4,850 ton과 3,210 ton의 토사유출량 발생이 예상되며 이에 적합한 저감대책을 수립해야 할 것으로 판단된다.
- 5) 연평균 강우침식인자를 적용한 토사유출 위험도 평가를 보완하기 위해 9개 빈도(10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 300, 500년) 단일호우 침식인자를 적용하여 토양침식량을 산정하였다. 본 연구결과를 관계기관 및 지자체에 GIS data 형식으로 제공할 경우 토사재해 방재분야 활용성 증대를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 BK21+사업에 의하여 지원되었습니다.

References

Lee, J.S. and Won, J.Y. (2012) Suggestion of Cover-Management Factor Equation for Mountain Area in RUSLE, *Journal of*

- Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 79-85.
- Lee, C.W., Lee, C.Y., Kim, J.H., Youn, H.J., and Choi, K. (2004) Characteristics of Soil Erosion in Forest Fire Area at Kosung, Kangwondo, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 93, No. 3, pp. 198-204.
- Kim, Y.M. (2009) *Influence of Vegetation Recovery on Runoff, Sediment Yield, and Nutrient Losses Following a Forest Fire in Samcheok*, Master's Thesis, University of Kangwon, Chuncheon, Korea.
- Park, S.D. and Shin, S.S. (2011) Applying Evaluation of Soil Erosion Models for Burnt Hillslopes - RUSLE, WEPP and SEMMA, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 3-B, pp. 221-232.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE), U.S. Department of Agriculture, Washington.
- USDA (1975) Sediment sources, yields, and delivery ratios, National Engineering Handbook, Section 3, Sedimentation.
- USDA (1997) Predicting soil erosion by water : A Guide to conservation, planning with the RUSLE, Agriculture Handbook, No.703.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1965) Predicting rainfall erosion, losses from cropland east of the Rocky mountains, US Department of Agriculture Handbook, No. 282.
- Whichmeier, W.H. (1971) A Soil Erodibility Nomograph for Farmland, and Construction Sites, *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 26, pp. 189-193.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion, losses - A guide to conservation planning, USDA, Agriculture Handbook, No. 537.

© Received November 21, 2013

© Revised November 21, 2013

© Accepted December 16, 2013