

산불지역의 유출 및 토양침식 민감도

Sensitivity of Runoff and Soil Erosion in the Burnt Mountains

박상덕* / 신승숙** / 이규송***

Park, Sang Deog / Shin, Seung Sook / Lee, Kyu Song

Abstract

Mountain watersheds are a lot of problems about soil erosion because of frequent wildfire occurrence. Runoff and soil erosion caused by the rain on a hillslope after wildfire are dependent on cover factor. And these has been a decrease by the cover factor recovery following time passage. The present paper defines the dynamic sensitivity of runoff and soil erosion that is the rate of runoff volume and soil erosion weight to rainfall energy and analyzes characteristics of the sensitivity for variation of cover factor. In according to the correlation analysis between other parameters and sensitivities, the sensitivity is the most dependent on the cover factor and the relation is exponential. The sensitivities after wildfire have suitable relation with treatment method for the mitigation of burnt forest and wildfire intensity. It was confirmed that the variation of soil erosion sensitivities come upon the range of stability in 5 years after wildfire.

Keywords : runoff, soil erosion, sensitivity, rainfall energy, cover factor, hillslope, wildfire

요 지

빈번하게 발생하고 있는 산불은 산지유역에 과도한 토사유출 문제를 일으키고 있다. 산불 이후 산지사면에서 강우에 의한 토사유출은 지표식생인자에 의해 지배되며 지표식생은 시간의 경과에 따라 점차 회복되고 이는 토사유출을 저감시킨다. 본 연구에서는 민감도를 강우에너지에 대한 유출 및 토양침식량의 비로 정의하고, 지표인자 변화에 따른 유출 및 토양침식 민감도의 특성을 분석하였다. 그 민감도에 대한 매개변수들의 상관관계를 분석한 결과 지표식생지수와의 상관성이 가장 높았으며 지수함수적인 관계를 나타내었다. 산불이후 경과시간에 따른 민감도는 산불피해복구 대책공법과 산불의 강도 모두 적합한 감소 기울기를 보였다. 산불발생 년도에 따른 토양침식민감도의 변화에서는 산불발생 이후 약 5년이 경과하면 토양침식민감도 변화가 적어 안정적인 범위 이내로 접어드는 것이 확인되었다.

핵심용어 : 유출, 토양침식, 민감도, 강우에너지, 지표인자, 산지사면, 산불

1. 서 론

봄과 가을에 빈번하게 발생하는 산불은 산지환경을

악화시키는 큰 원인이 되고 있다. 산불피해 지역에서 호우가 발생하면 사면의 토양침식이 과도하게 되고 유역의 홍수재해 위험은 더욱 가중될 수 있다. 이는

* 강릉대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangnung National University, Gangneung, 210-702, Korea,
(e-mail: sdpark@kangnung.ac.kr)

** 강릉대학교 토목공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil Engineering, Kangnung National University, Gangneung, 210-702, Korea,
(e-mail: cewsook@hanmail.net)

*** 강릉대학교 생물학과 교수
Professor, Dept. of Biology, Kangnung National University, Gangneung, 210-702, Korea
(e-mail: leeks84@kangnung.ac.kr)

2000년 대규모 산불지역인 강릉 사천에서 2002년 발생한 태풍 루사로 인해 산불이 발생하지 않은 지역에 비해 약 11.3배나 많은 면적에서 산사태가 발생되었으며, 이에 따른 토사유출로 하상을 상승시키고 선상지를 형성하는 등 홍수피해를 가중시킨 것에서도 확인되고 있다(박상덕, 2002). 따라서 산불지역에서 토양침식의 위험도를 평가하고 이를 조절하기 위한 정량적인 연구가 시급하다. 우리나라의 산불지역에서 토사유출에 대한 연구는 1996년 고성 산불지역에서 이규송과 정연숙(1999)이 12m²의 고정구를 설치하여 토사유출량을 조사한 바 있으며, 2000년 대규모 동해안 산불이 발생한 이후 이 지역에서 강우유출 및 토양침식에 대한 조사 연구에 의하면 산불로 인한 토양침식량 증가는 대단히 크며(국립방재연구소, 2000~2003; 박상덕 등, 2002) 이는 식생구조의 발달과 밀접한 관련이 있다(국립방재연구소 2001~2003; 이규송 등 2002). 산불이 산지의 식생을 감소시켜 사면의 토양에 가해지는 강우에너지와 유수의 토양침식 에너지를 증가시키기 때문에 토양침식량이 증가한다(Hibbert, 1985; 1988; Andreu 등, 2001).

산불 이후 산지사면에서 토양침식을 지배하는 인자는 강우인자와 지표인자이다. 또한 산지사면은 시간경과에 따라 식생회복이 이루어짐으로 시계열 자료를 분석하여 토양침식민감도 변화를 파악하는 것은 토양침식에 대한 토양의 안정화 시점을 판단할 수 있게 한다. 사면에서 동일한 침식능이라 하더라도 유출량 및 토양침식량에 차이가 나는 것은 사면이 강우사상에 대해 얼마만큼 민감하게 반응하느냐에 따라 다르다. 따라서 강우에너지에 대한 유출량 및 토양침식량의 비는 토양침식에 작용하는 각각의 매개변수들의 특성에 따라 달라질 것이다. 따라서 본 연구에서는 강우에 따른 산지사면의 유출 및 토양침식 민감도 개념을 정의하고, 산불이 발생된 지역에서 지표인자의 회복에 따른 산지사면의 유출 및 토양침식 민감도 특성을 분석하고자 한다.

2. 유출 및 토양침식 민감도

2.1 강우에너지

강우강도와 강우의 운동에너지 관계에 대한 정보의 시간과 공간에 따른 변화는 토양침식을 예측하는데 있어 상당히 중요하다. 일반적으로 강우입자가 크고, 낙하속도가 빠르면 강우의 운동에너지 값은 커지게 되는데, 이러한 운동에너지는 강우강도와 밀접한 관계가 있다. 강우강도와 운동에너지의 관계에 관한 연구는 수십 년 동안 많은 학자들에 의해 이루어져 왔다. Uijlenhoet와 Stricker(1999)에 의한 떡법칙, Wischmeier와 Smith

(1958, 1978)에 의한 대수함수식, Brown과 Foster(1987)에 의한 지수함수식이 그 대표적인 관계식들이라고 할 수 있다. 경험적인 토양침식량 예측 모델인 USLE에서는 Wischmeier와 Smith의 대수함수식을 사용하였으며, RUSLE에서는 Brown과 Foster의 지수함수식을 적용하였다. 강우강도와 운동에너지와의 관계는 지수함수식이 다른 관계식에 비해서 잘 맞는 것으로 알려져 있으나 모든 지역에 적용할 수 있는 대표식이 될 수는 없다. Van Dijk 등(2002)은 여러 지역에서 연구 조사된 실질적인 자료 중에 신뢰성 있는 데이터를 총괄적으로 분석하여 다음과 같은 일반적인 지수함수의 식을 제시하였다.

$$e_k = 28.3[1 - 0.52\exp(-0.042I)] \quad (1)$$

$$RE = e_k \cdot P \quad (2)$$

여기서 e_k 는 강우의 운동에너지($J/m^2 \cdot mm$), I 는 호우의 평균강우강도(mm/hr), RE 는 총 강우에너지(J/m^2), P 는 총강우량(mm)을 나타낸다.

2.2 민감도의 정의

토양침식모델에서의 민감도란 사면경사, 사면길이, 토양의 침식성, 지표식생 등과 같은 주요 입력 변수의 단위 변화에 대한 토양침식, 퇴적, 토사유출 등과 같은 출력 변수들의 변화정도를 의미한다. 민감도 분석은 모델의 입력 매개변수의 값에 상대적으로 변하는 함수 결과의 상대적 크기를 평가한다. 유출 및 토양침식 과정에서의 토사수문학적 매개변수의 민감도 분석이 수행되었다(Nearing 등., 1990). McCuen(1973)는 매개변수들의 민감도 비인 S를 식 (3)과 같이 정의했다.

$$S = \frac{[(O_2 - O_1)/O_{12}]}{[(I_2 - I_1)/I_{12}]} \quad (3)$$

여기서, I_1 과 I_2 는 각각 시스템에 사용되는 입력의 최소치와 최대치이고 I_{12} 는 I_1 과 I_2 의 평균이다. O_1 과 O_2 는 두 입력에 대한 결과이고 O_{12} 는 두 결과의 평균값이다. 매개변수 S는 선형무차원값이다. 이규송 등(2002)은 강우량 및 강우강도에 대한 산지사면의 각 소규모 조사구에서의 유출량과 토양침식량에 대한 회귀직선식의 기울기를 유출 및 토양침식의 민감도라고 정의하였으며, 김석철(2003)은 유역의 2차 재해를 유발할 수 있는 산불지역 사면의 토사유출 위험도를 작성하는데 이 개념을 적용하였다. 그러나 토양침식은 강우강도가 크고, 강우량이 많을수록 용이해지기 때문에, 본 연구에서는 강우

량과 강우강도를 모두 고려할 수 있는 강우에너지 개념을 도입한다. 또한 각각의 강우사상별 유출 및 토양침식량에 대한 민감도와 한 해 동안의 각 소규모 조사구에 회귀식으로 얻어진 민감도 결과를 고려한다. 이러한 유출 및 토양침식 민감도의 개념은 강우에 따른 산지사면의 반응을 해석하는데 있어서 보다 역학적으로 접근하기 위한 한 방법이라고 할 수 있다.

강우에너지가 증가하면 유출이나 토양침식의 잠재적 에너지도 증가하게 된다. 동일한 강우에너지라 하더라도, 산지사면의 식생, 지형, 토질 등의 요인에 따라 유출량이나 토양침식량이 다르게 된다. 즉 강우에 대한 산지사면의 출력인 유출량이나 토양침식량은 사면의 다양한 인자들을 반영하며 강우에 대한 반응함수가 된다. 따라서 이는 식 (4)와 같은 함수관계로 표현할 수 있다.

$$Q \text{ or } Q_s = f(G, R, V_e, S, \text{etc}) \quad (4)$$

여기서 Q 와 Q_s 는 각각 유출량과 토양침식량, G 는 지형인자, R 은 강우인자, V_e 는 식생인자, S 는 토양인자를 나타낸다. 지형인자는 산지사면의 길이, 면적, 경사, 사면의 형상, 사면의 위치 등을 나타내고 강우인자는 강우량, 강우강도, 강우지속기간 등을 의미한다. 식생인자는 식생의 종류, 크기, 피복도 등을 대표하며 토양인자는 토양의 종류, 평균입경, 표토의 심도, 유기물 함유량, 함수량 등을 나타낸다. 유출 및 토양침식이 강우에 의한 지표면 흐름과 지표면 토양에 가해지는 강우의 낙하에너지에 의하여 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 강우인자로서 총 강우에너지를 고려하고 식 (4)의 양변을 총 강우에너지 RE 로 나누면 다음 식 (5)와 같이 된다.

$$\frac{Q}{RE} \text{ or } \frac{Q_s}{RE} = f_1(G, V_e, S) \quad (5)$$

여기서는 Q/RE 와 Q_s/RE 는 각각 강우에너지에 대한 유출량과 토양침식량의 비이다. 식 (4)의 유출량이나 침식량이 동일한 강우조건에 대해서 지형인자인 사면의 면적에 따라 달라지므로 면적의 대소에 따른 영향을 제거하기 위해서 본 연구에서는 단위면적당 유출량과 단위면적당 토양침식량을 사용하고 이를 각각 유출민감도(runoff sensitivity)와 토양침식민감도(soil erosion sensitivity)라고 정의하였으며 다음 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$S_q = \frac{q}{RE} \quad (6)$$

$$S_{qs} = \frac{q_s}{RE} \quad (7)$$

여기서, S_q 는 유출민감도(liter/J), S_{qs} 는 토양침식민감도(g/J), q 는 단위면적당 유출량(liter/m²), q_s 는 단위면적당 토양침식량(g/m²)을 나타내고 강우에너지의 단위는 J/m²이다. 본 연구에서 식 (6)과 (7)로 정의한 유출민감도와 토양침식민감도는 단위면적당 단위강우에너지당 산지사면의 유출과 토양침식 값으로 다양한 지표특성을 갖는 사면의 반응척도라고 할 수 있다.

2.3 지표인자

산불 이후의 산지사면에서 강우에 의한 유출이나 토양침식은 산불에 의한 사면의 지표 변화가 가장 크기 때문에 지표식생인자(cover factor)와의 상호작용에 따른 결과라 할 수 있다. 지표식생인자란 지표의 식생조건을 총체적으로 표현하기 위한 것으로 지표 식생 특성의 대표 값을 나타낸다. 본 연구에서 식 (5)의 매개변수 중에 지표인자만을 한정하여 고려한다면, 그림 1과 같이 표현 할 수 있다. 산지사면의 지표식생인자는 교목이나 관목으로 구성된 地上地表(canopy cover)와 초본이나 지표잔류물 및 식물의 뿌리로 이루어진 地被地表(ground cover)로 구분되며, 이는 강우에 따른 유출과 토양침식과 제어하는 기능을 갖는다. 교목층과 관목층 등으로 이루어진 지상지표는 땅으로 떨어지는 강우의 낙하에너지를 감소시키는 역할을 한다. 낙엽층과 같은 지표잔류물이나 초본층 등의 지피지표는 빗방울이 지표면을 직접적으로 타격하는 것을 막고, 유출 및 토양침식이 저류하는 역할을 한다.

지표의 식생조건이 다양하고 유출이나 토양침식에 절대적인 영향을 미치는 요인이기 때문에 대부분의 토양침식의 연구에서 지표인자를 사용하는 것은 불가피하다. 이러한 지표인자를 정량화하는데 가장 용이한 방법의 하나가 식생 피복도이다. 미국의 USDA-ARS가 방목지의 토양침식 및 토사유출을 예측하기 위해서 개발한 HEM(hillslope erosion model)에서는 지상지표와 지피지표의 피복도를 지표인자로 사용하였다. 여기서 Lane 등은(2001) 토양침식에 있어서 지피지표인자가 지상지표인자보다 더 영향을 준다고 하였다. USLE 모형을 개선한 RUSLE모형에서도 식생에 따른 지상지표와 지피지표를 지표인자에 반영할 수 있도록 하고 있다(USDA-ARS, 2003). 3년의 기간동안 식생구조를 고려하여 식생층 별 키와 식피율을 측정하고 낙엽층의 두께와 뿌리층 양을 측정하여 식생지수를 개발하였으며(Lee,

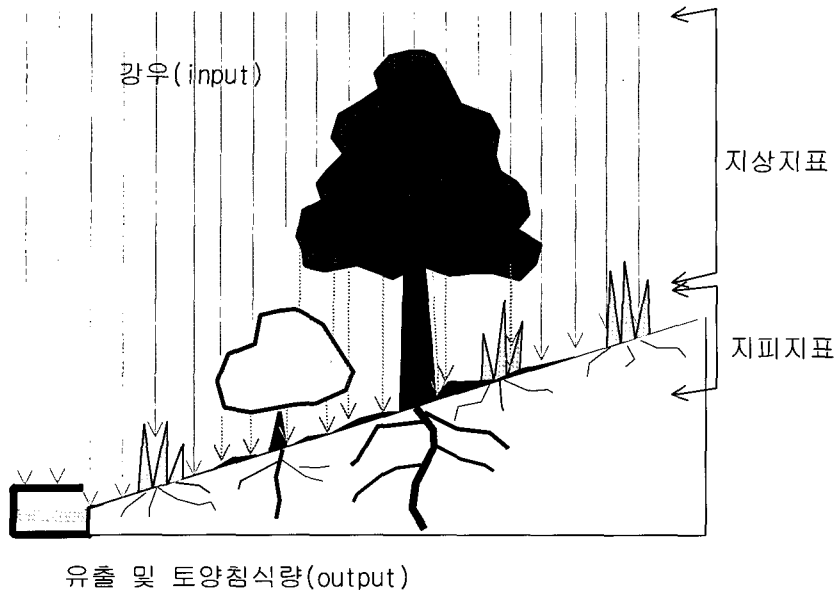


그림 1. 산지사면의 강우에 따른 유출 및 토양침식과정 모식도

2002), 식생지수 중에 상관성이 가장 좋았던 것은 뿌리층을 고려한 식생피복도 지수(Ivcr)였다(국립방재연구소, 2003). 본 연구에서는 식생지수를 개발하는 과정에서 조사된 자료를 기본으로 지상지표의 피복도, 지피지표의 피복도, 전체식생의 피복도를 고려한 지표식생지수 C 를 다음 식 (8)과 같이 제시하고, 이 식에서 각 지수 α , β , γ 는 다음 식 (9)와 같이 제시한다.

$$C = \alpha V_{cc} + \beta V_{gc} + \gamma V_c \quad (8)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (9)$$

여기서, V_{cc} 는 지상지표의 피복도, V_{gc} 는 지피지표의 피복도, V_c 는 전체피복도, α 는 지상지표가 지표식생지수에 기여하는 정도를 나타내는 계수, β 는 지피지표가 지표식생지수에 기여하는 정도를 나타내는 계수, γ 는 총체적인 지표식생피복의 기여도를 반영하는 계수이다. 위의 식에서 전체피복도는 조사구 면적에 대한 전체식생의 투영면적의 비로, 강우가 지표면을 직접 타격하지 않는 면적이라는 개념에서 지표식생지수 C 를 결정하는데 있어서 기여도가 상대적으로 큰 것으로 판단된다. V_{cc} 와, V_{gc} 는 V_c 가 갖는 사면식생인자의 대표성을 식생구조적 측면에서 보완하고자 도입한 것이다. 따라서 본 연구에서 α 와 β 는 동일한 값 0.3으로, γ 는 0.4로 결정한다.

산불 발생이후 경과 년 수가 증가할수록 지표인자가 변화함에 따라 토양침식량이 줄어들며 이는 소규모 조

사구를 대상으로 한 연구에서도 확인되고 있다(국립방재연구소 2001~2003). 산불 이후 산지사면은 갑작스러운 지표교란으로 인해 다량의 토양침식이 발생되나 점차 식생이 회복되고, 표토의 구조가 안정된다. 스페인의 지형적 특성이 다른 두개의 시험구역에서 토사 생산량을 조사한 연구에 따르면, 두 구역에 다소 차이는 있으나, 모두 경과시간에 따라 토사생산량이 현저히 감소하였다(Andreu 2001). 또한 Soto(1997)는 스페인의 임의로 산불을 낸 조사구와 자연발생 산불지역 조사구에서 4년간 누적한 토양침식량의 변화를 분석한 결과 자연적 산불지역에서는 토양침식량이 크지만 시간이 경과함에 따라서 토양침식율의 기울기가 둔해짐을 보였다. 즉 시간경과에 따른 지표인자의 회복은 강우에 의한 토양침식능을 저하시킨다고 할 수 있으며 결과적으로 식 (7)의 토양침식민감도 저하를 초래한다.

3. 소규모 조사구의 토양침식 매개변수

3.1 소규모 조사구의 특성

강원도 동해안지역에서 발생된 산불지역의 토양침식 특성을 파악하기 위해 사면에서 소규모 조사구(plot)를 강원도 동해안 지역 사면에서 2001년에 설치하였으며, 각 조사구에서 강우인자, 지표인자, 토양인자, 지형인자 등과 유출량 및 토양침식량을 조사하였다(국립방재연구소, 2001, 2002, 2003). 본 연구에서는 이 조사 자료를 기본으로 하여 피복인자의 변화에 따른 유출 및 토양침식 민감도의 특성을 분석하고자 한

다. 본 연구에서 사용한 35개 지점의 소규모 조사구에 대한 특성은 표 1에 제시된 것과 같다. 소규모 조사구 설치 이후 각 조사구에서 교목층, 아교목층, 관목층, 초본층, 낙엽층의 피도 및 전체피복도를 매년 조사하였으며, 2003년도에는 6월부터 9월 사이에 직경이 2~5mm인 뿌리층의 피도와 지표식생인자를 조사하였다. 소규모 조사구의 면적은 9.74~74.04m²이고 사면의 기울기는 16~40.5°이다. 산불이후 조사구의 지표조건은 자연복원, 조림복구, 녹화사방 등이다. 여기서 자연복원은 산불이후 방치하여 자연적으로 지표식생이 회복되도록 한 것이고, 조림복구는 산불지역에 피해목을

별목하고 조립한 지역으로서 양양1과 2에는 잣나무를 식재되었고 그 이외의 지역은 소나무가 식재되었다. 녹화사방은 산불지역의 피해목을 별목하고 토양침식을 줄이기 위해서 줄떼사방을 실시한 지역이다. 사천 11은 산불이 발생되지 않은 지역이다. 산불피해의 등급은 그 정도에 따라서 5단계로 구분되며 양양의 조사구는 1972년에 산불이 발생한 이후 식재한 잣나무 숲으로 되어 있다. 이상의 조사구에 대해서 본 연구에서는 산불 이후 토양침식민감도가 산지사면의 처리대책과 산불피해 등급에 따라 어떠한 변화양상을 보이는지 분석한다.

표 1. 소규모 조사구 특성

조사구명	설치년도	면적(m ²)	기울기(°)	산불 발생년도	산불피해 등급	산불대책	자료수
임원1	2001	74.04	17.0	2000	5	자연복원	12
임원2	2001	27.61	22.0	2000	5	자연복원	13
임원3	2001	29.52	23.5	2000	5	자연복원	13
임원4	2001	35.32	29.0	2000	5	자연복원	17
임원5	2001	22.12	25.5	2000	4	자연복원	17
임원6	2001	32.01	29.5	2000	4	자연복원	17
임원7	2001	21.06	20.0	2000	4	자연복원	13
임원8	2001	67.66	16.0	2000	3	자연복원	17
임원9	2001	26.37	27.0	2000	2~3	자연복원	17
임원10	2001	26.45	20.0	2000	2~3	자연복원	12
임원11	2001	20.62	31.0	2000	3	자연복원	17
임원12	2001	18.22	32.0	2000	4	자연복원	12
임원14	2001	30.31	26.0	2000	5	자연복원	17
임원15	2001	43.19	25.0	2000	2	자연복원	17
임원16	2001	26.49	30.5	2000	2	자연복원	15
사천5	2001	27.88	29.0	2000	5	녹화사방	21
사천6	2001	28.73	38.5	2000	5	조림복구	20
사천7	2001	16.37	22.0	2000	5	조림복구	20
사천8	2001	9.74	27.5	2000	5	조림복구	17
사천9	2001	13.05	27.5	2000	5	조림복구	17
사천10	2001	18.57	26.5	2000	5	녹화사방, 조림복구	20
사천11	2001	22.02	24.5	-	1	산불피해 없음	18
사천13	2002	46.16	28.4	1986	5	자연복원	13
사천15	2001	21.38	25.5	1998	5	자연복원	20
사천16	2001	14.90	28.5	1998	5	자연복원	20
사천17	2001	16.72	40.5	1998	5	자연복원	15
사천18	2003	27.19	30.0	2000	5	녹화사방	11
사천19	2003	23.29	35.5	2000	5	산사태 '03년 녹화사방	10
죽왕1	2001	16.78	34.0	1996	5	자연복원	16
죽왕2	2001	13.80	38.0	1996	5	자연복원	16
죽왕3	2001	14.22	32.0	1996	5	자연복원	16
죽왕4	2001	14.86	27.5	1996	5	자연복원	16
양양1	2001	32.14	29.5	1972	5	조림복구	16
양양2	2001	44.81	30.0	1972	5	조림복구	16

3.2 유출 및 토양침식과 강우에너지

본 연구에서 사용한 유출 및 토양침식 자료는 2001년~2003년 6~9월에 측정된 것으로서 이를 발생시킨 강우사상은 강릉, 삼척, 고성, 양양의 소규모 조사구의 부근에서 우량계로 측정하였다. 이 강우사상들의 특성은 표 2에 제시한 것과 같이 강우량은 19~959.0mm이고, 강우지속기간은 11~198hr의 범위에 있으며, 1시간 최대강우강도는 3~113.5mm/hr이다. 강우량이나 강우강도가 증가하면 식 (1)과 (2)에서 알 수 있는 것처럼 총 강우에너지가 증가한다. 그림 2는 각 단일 강우사상에서 산출된 총 강우에너지에 대한 유출량 및 토양침식량과의 관계를 보여주는 것이다. 이는 강우에너지가 증가하면 유출 및 토양침식량이 상대적으로 증가하는 양상을 보인다. 그림 3은 2003년도 사천7, 8, 9번을 예로 나타낸 것이며, 이는 년도별 총 강우에너지의 변화에 따른 유출 및 토양침식량의 변화를 선형적으로 나타낸 것으로서 그 기울기는 식 (6)과 (7)에 구한 평균민감도와 같은 개념이라고 할 수 있다. 여기서 보면 총 강우에너지에 따른 유출량과 토양침식량의 변화가 선형적인

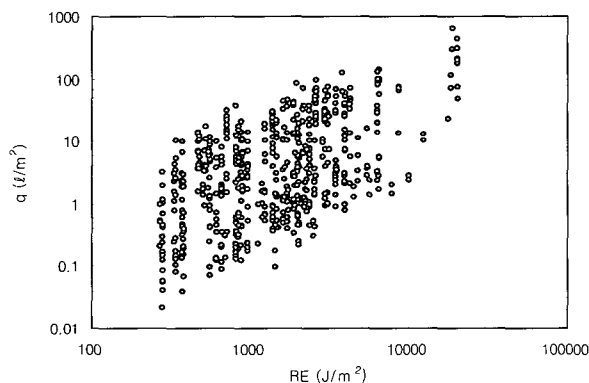
관계에 있음을 보여주며, 상관관계도 상당히 높다. 위에서 정의한 유출 및 토양침식 민감도를 각각의 강우사상에 대한 반응결과로서 고려한다면, 각 매개변수와의 관계를 심도 있게 분석하는 것이 가능하며, 시간 경과에 따른 민감도의 변화를 파악하는 것이 가능하다. 그리고 일정 기간동안 각 소규모 조사구별 유출 및 토양침식 민감도를 고려한다면, 그 기간동안의 사면의 반응척도를 평가할 수 있다.

3.3 민감도와 매개변수들의 상관관계

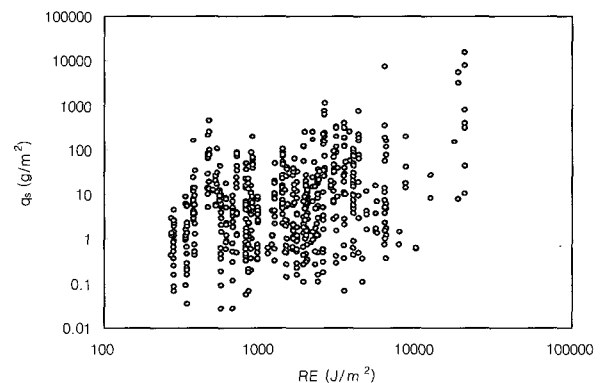
유출 및 토양침식 민감도와 관련된 인자는 강우인자를 제외한 지형인자, 토양인자, 식생인자가 있다. 지형인자로는 사면길이(L)와 사면경사(S)를 고려하였고, 토양인자로는 평균입경(Dm)과 유기물 함량(O)을 고려하였고, 지표식생인자로는 전체식생피복도(Vc), 지표식생지수(C) 그리고 뿌리층을 고려한 식생피복도 지수(Ivcr)을 고려하였다. 표 3에서 유출 및 토양침식민감도와 각 매개변수들과의 상관관계를 보면 다른 인자들에 비해 지표식생인자들과 상관성이 상당히 높다는 사실을 알 수 있다.

표 2. 강우사상의 특성

년도	구분	강우량 (mm)	강우지속기간 (hr)	강우강도 (mm)	
				1시간 최대	평균
2001	최소	25.0	11.0	4.5	2.3
	최대	268.0	65.0	27.0	4.2
	평균	93.7	26.3	15.0	3.5
2002	최소	20.0	28.0	5.5	0.7
	최대	959.0	55.0	113.5	17.4
	평균	262.5	60.0	32.2	4.7
2003	최소	19.0	11.0	3.0	0.7
	최대	578.5	198.0	80.0	11.6
	평균	144.3	44.2	17.5	3.5

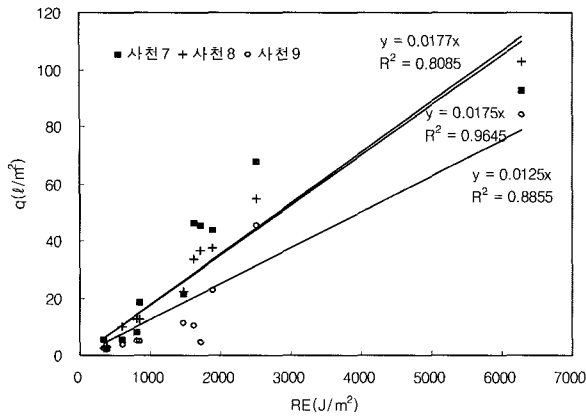


(a) 유출량

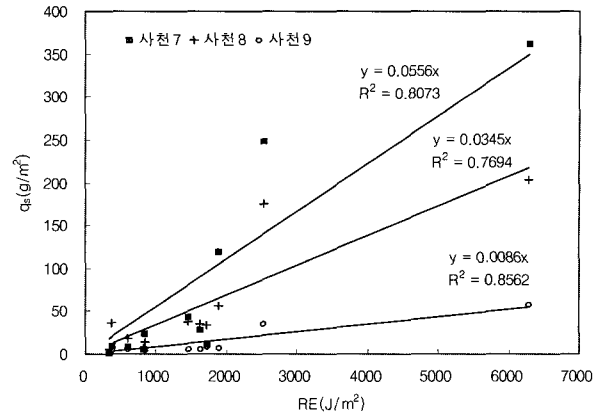


(b) 토양침식량

그림 2. 총 강우에너지에 대한 유출량 및 토양침식량의 관계(2001~2003)



(a) 유출량



(b) 토양침식량

그림 3. 총 강우에너지와 유출량 및 토양침식량의 선형관계(2003)

표 3. 유출 및 토양침식민감도와 매개변수들의 상관계수

	L	S	Dm	O	Vc	C	Ivcr
Sq	-0.007	-0.176	0.215	-0.528	-0.732	-0.733	-0.694
Sqs	-0.050	-0.142	0.171	-0.417	-0.706	-0.717	-0.689

4. 민감도와 지표인자의 관계

4.1 지표인자와 민감도

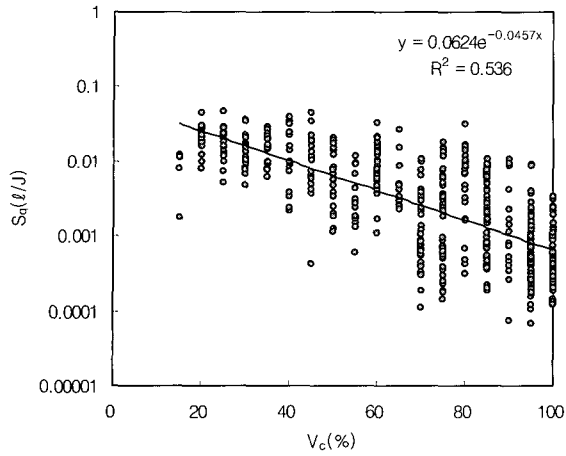
산불이 발생으로 인한 지표식생인자의 갑작스런 변화는 강우에 따른 유출 및 토양침식량의 변화를 가져온다. 산지사면의 식생인자가 증가할수록 유출이나 토양침식량이 감소하기 때문에 유출 및 토양침식의 민감도 또한 감소한다. 상관분석을 통해서 알 수 있듯이 유출 및 토양침식 민감도는 식생피복도, 지표인자, 뿌리층을 고려한 식생피복도지수와 상관성이 높았다. 그림 4는 각 강우사상에 대한 지표식생인자들과 민감도의 관계를 나타낸 것이고, 그림 5는 그림 3과 같은 방법으로 구한 평균 민감도와 지표식생인자들과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 보면 각각의 지표식생인자에 따라 다소 상관성의 차이는 있으나 전반적으로 식생상태가 좋아짐에 따라 반대수지 상의 민감도가 비례적으로 감소한다는 사실을 알 수 있다. 그리고 식생 상태가 비슷하더라도 유출 및 토양침식 민감도는 일정범위 내에서 다르게 나타난다. 이는 강우의 유출에 있어서는 식생인자로 정의된 인자들 이외에도 강우의 초기손실을 좌우할 수 있는 토양의 함수량 조건이나 침투율을 결정할 수 있는 토양의 평균입경, 산지사면의 위치, 사면경사 등이 실질적으로 중요하게 작용하기 때문이다. 각각 식생인자를 나타내는 식생피복도, 지표인자, 식생피복도지수 중에 지표식생지수가 가장 상관성이 좋았고 그 다음이 식생피복

도였다. 식생피복도는 비교적 쉽게 자료를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 식생피복도지수는 식생구조에 따른 각 층의 피복도를 고려하여 얻는 자료로서 예측하는데 많은 노력이 필요하다. 지상지표, 지피지표, 전체 식생피복도를 고려한 지표식생지수는 보다 정밀하면서도 자료 예측이 용이한 장점을 가지고 있어서 활용능력이 가장 좋다.

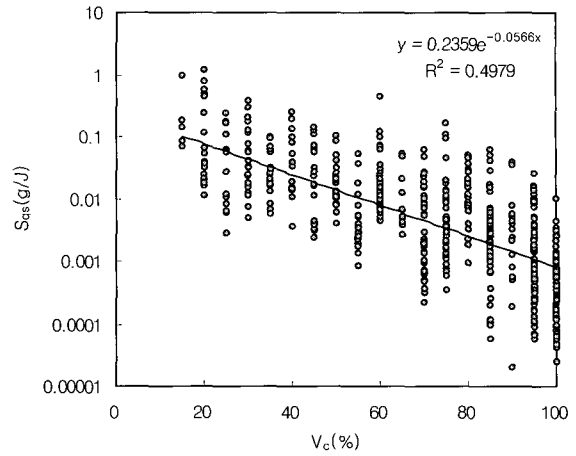
4.2 지표인자 회복에 따른 민감도 변화

4.2.1 산불대책방안의 영향

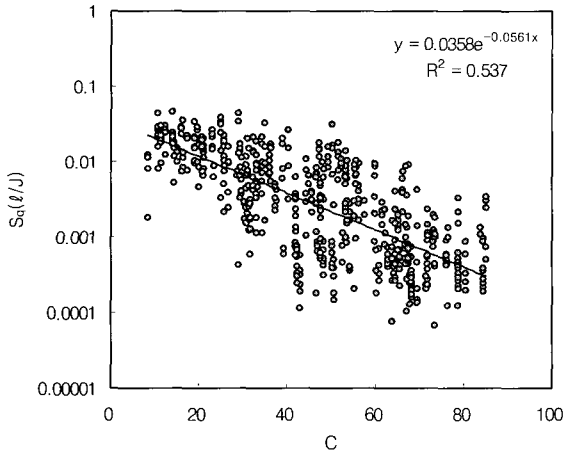
산불지역 산지사면의 자연복원, 조림복구, 녹화사방 등의 대책에 따른 조사기간인 2001년부터 2003년까지 3년 동안의 토양침식민감도의 변화양상을 나타내면 그림 6과 같다. 이 그림에 나타낸 소규모 조사구는 토양 및 지형적인 조건이 비슷하고, 단지 대책방법이 다른 지역이다. 토양침식민감도는 산불이후 경과일수에 따라서 감소하고 있으며 산불대책의 종류에 따라 변화하는 폭이 다르다. 녹화사방지역인 사천 5와 사천 10은 자연복원이나 조림복구에 비하여 토양침식민감도의 초기값이 상대적으로 크며, 민감도가 급격히 감소함을 보여준다. 이는 녹화사방을 수행한 지역은 초기 토양침식 위험지역이라는 사실을 보여주며, 이 지역에 녹화사방 공법이 적절하게 적용되었음을 시사한다. 또한 자연복원보다는 조림복구에 의한 민감도가 더 감소하는 경향도 보여준다. 각각의 지수함수 회귀선에서 종속변수 앞의 숫자에 주목하면, 음에 수치가 크면 클수록 반대수지 상의



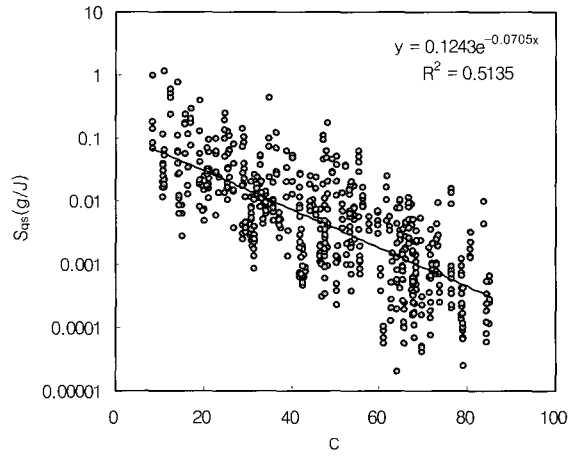
(a) 전체식생피복도와 유출민감도



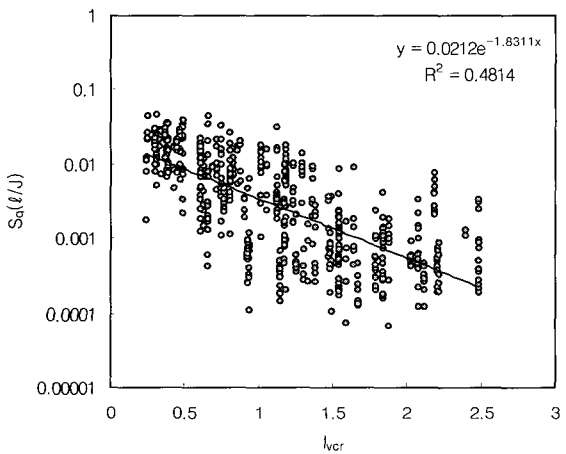
(b) 전체식생피복도와 토양침식민감도



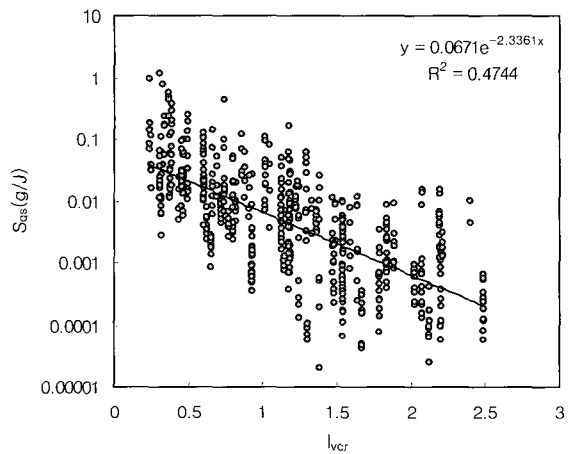
(c) 지표식생지수와 유출민감도



(d) 지표식생지수와 토양침식민감도

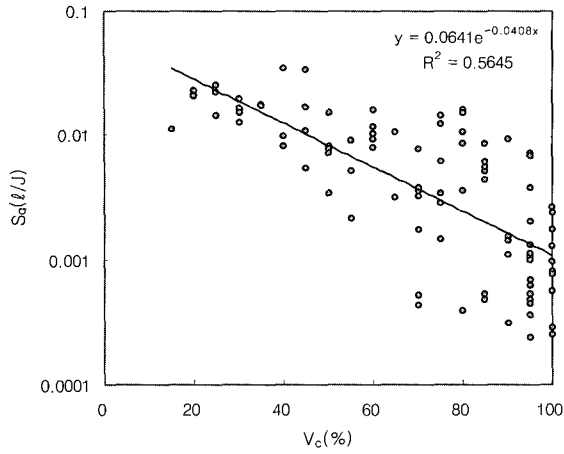


(e) 식생피복도지수와 유출민감도

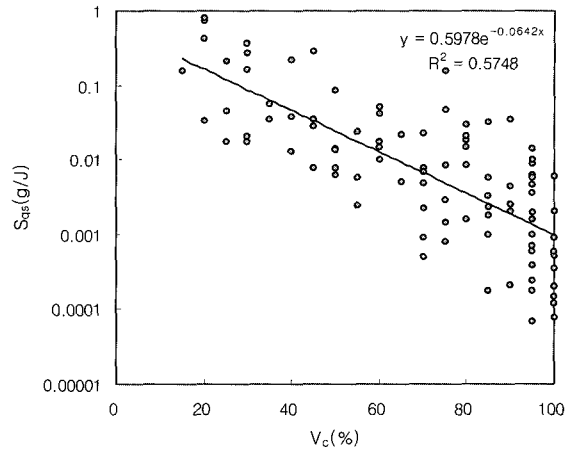


(f) 식생피복도지수와 토양침식민감도

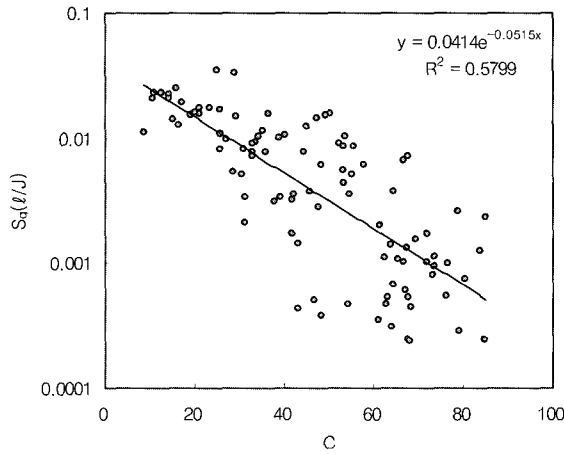
그림 4. 지표식생인자들과 민감도의 관계(각 경우사상에 대한 경우)



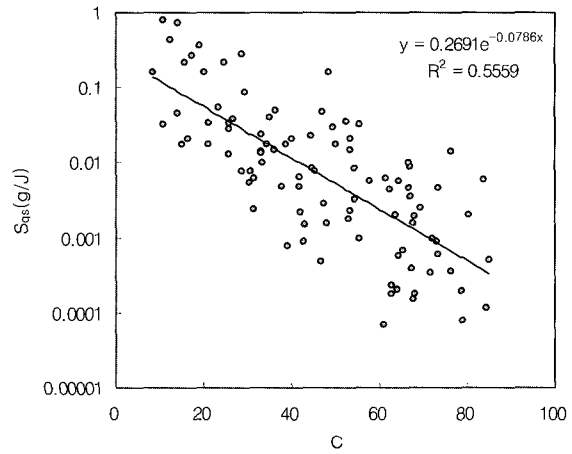
(a) 전체식생피복도와 유출민감도



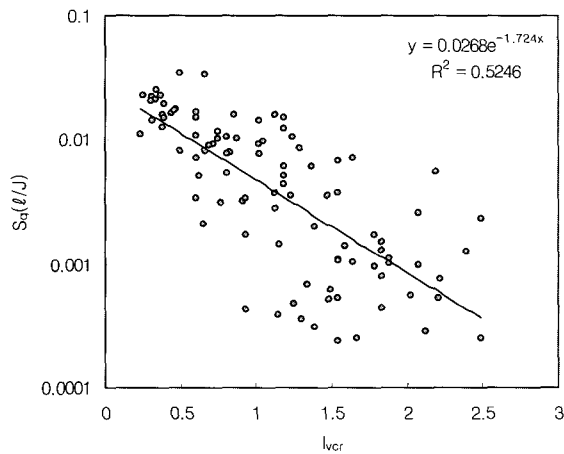
(b) 전체식생피복도와 토양침식민감도



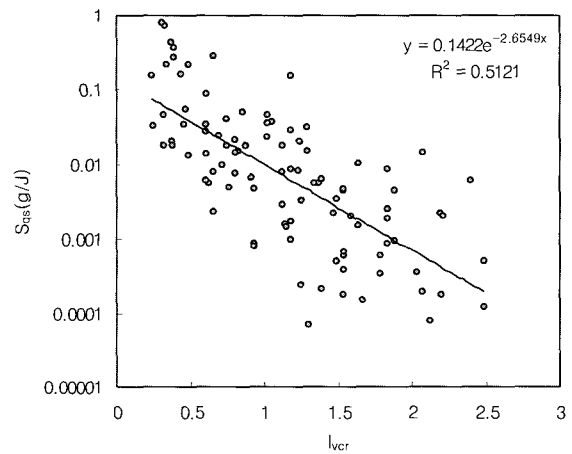
(c) 지표식생지수와 유출민감도



(d) 지표식생지수와 토양침식민감도



(e) 식생피복도지수와 유출민감도



(f) 식생피복도지수와 토양침식민감도

그림 5. 지표식생인자들과 민감도의 관계(선형관계 평균민감도)

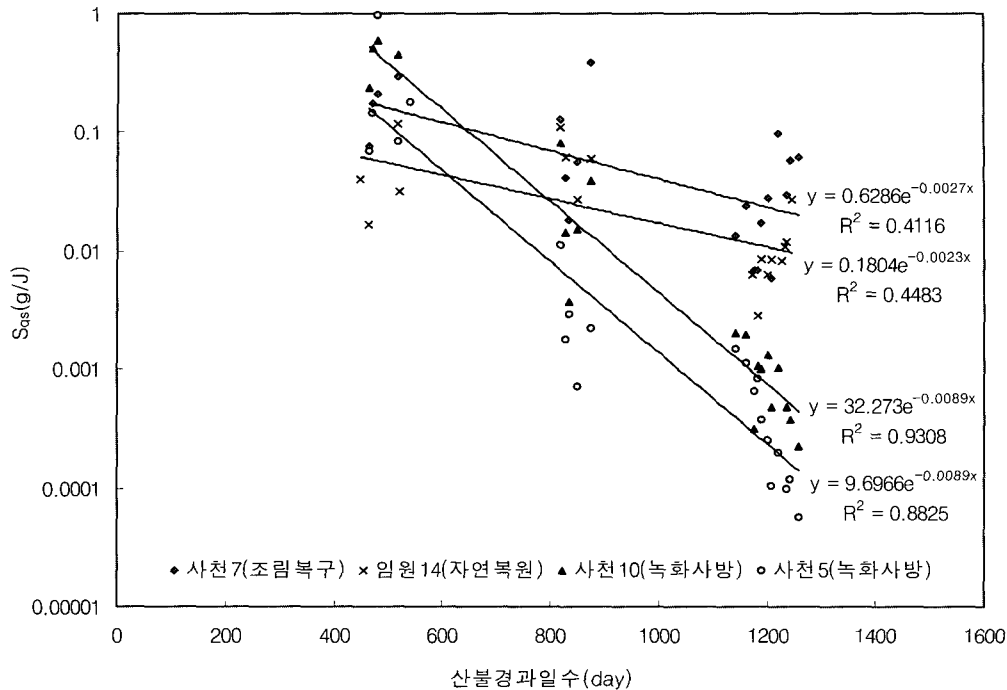


그림 6. 산불이후 대책방안에 따른 토양침식민감도의 변화

직선 기울기가 급하다는 것을 의미한다. 이는 토양침식 민감도가 급속도로 감소한다는 것을 뜻하며, 이는 토양 침식에 가장 영향을 미치는 지표인자의 회복이 빠르게 이루어진다는 사실을 내포한다. 한해를 기준으로 여름 집중 호우의 특성을 가진 영동지역에서 특히 초여름(6월경)보다는 늦여름(8월말~9월초)에 큰 강우가 발생하는 지역임에도 불구하고 녹화사방 공법에서 급격히 민감도가 감소하는 경향을 보이는 것은 초본층이 늦여름에 이르러 극상을 이루며, 수많은 잔뿌리층이 많은 양의 유출수를 저류하게 하여 토사가 침식되거나 유출되는 것을 막아주기 때문이다. 산불 발생 이후 각각의 대책 방법에 따라 토양침식에 대한 민감도의 감소 속도에는 차이가 있으나, 시일이 경과함에 따라 사면이 안정화되고, 지표식생이 점차적으로 회복됨을 알 수 있다.

4.2.2 산불피해강도의 영향

산불은 피해의 정도에 따라 크게 5등급은 구분한다. 산불피해를 받지 않은 지역을 1등급, 불길의 높이가 낮아 지면의 초본과 관목만 피해를 본 지역을 2등급, 불길의 높이가 수관에 이르지 않았으나 산불 발생 후 수관부의 잎이 열해 피해로 지표면으로 떨어지는 지역을 3등급, 불길의 높이가 다소 높지만 수관층에 이르지 못하고 산불 발생 후 수관층의 모든 잎이 지표면으로 떨어지고 그 결과 모든 수관층의 소나무가 사망한 지역을 4등급, 불길이 수관층까지 번져 모든 수관층이 피해를

받아 사망한 다음 재생이 이루어지고 있는 지역을 5등급으로 나눈다. 산불피해 등급은 지표화(2), 약수간화(3), 강수간화(4), 수관화(5) 순으로 피해의 정도가 큼을 의미한다. 산불의 피해 등급에 따라 토사침식 민감도가 어떻게 변하는지를 보기위해 그림 7에 제시하였다. 소규모 조사구 임원 9, 14, 15지역은 산불 이후 방치한 지역이고, 지형조건이 비슷하다. 이 그림의 결과를 보면, 초기 토양침식 위험은 약수간화와 수관화 지역에 비해 지표화가 지역이 적음을 보여주고, 민감도의 기울기는 임원 15번, 임원 9번, 임원 14번 순서로 작아짐을 알 수 있다. 이는 산불 피해의 정도가 클수록 산지사면이 안정화되고, 식생이 회복하는데 더 오랜 시일이 필요하다는 것을 의미한다. 또한 산불피해가 클수록 토사유출이 상대적으로 크다.

4.2.3 산불발생 경과시간에 따른 변화

산불발생 이전의 비교적 적었던 토양침식량에 도달하기 위해서는, 몇 년의 회복 기간을 가져야하는지를 판단하기 위해 산불발생 일수에 따른 토양침식민감도의 변화를 나타내면 그림 8과 같다. 산불이후 시간이 경과하면 교란되었던 토양은 안정화 되고, 식생은 회복하여 토양침식민감도는 현저하게 줄어든다. 산불경과 년 수와 토양침식민감도의 관계는 지수 함수 관계를 보여주고 있다. 그림 4.(a)의 식생피복도(Vc)와 민감도의 관계도에서 비교적 안정된 피복상태인 피복도 70%인 경우에

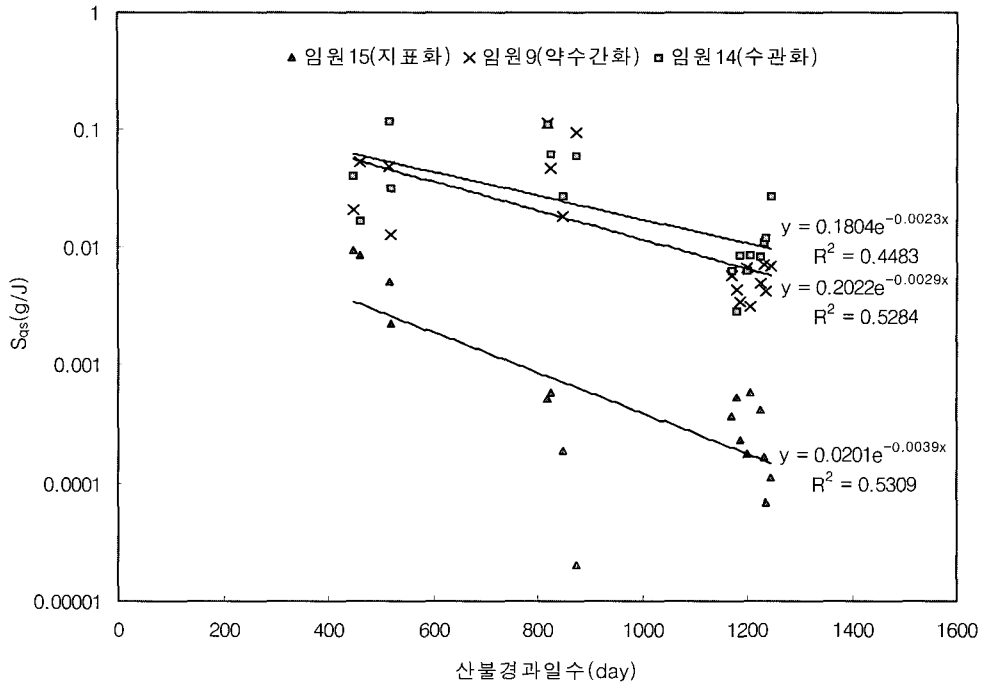


그림 7. 산불 피해정도에 따른 토양침식민감도의 변화

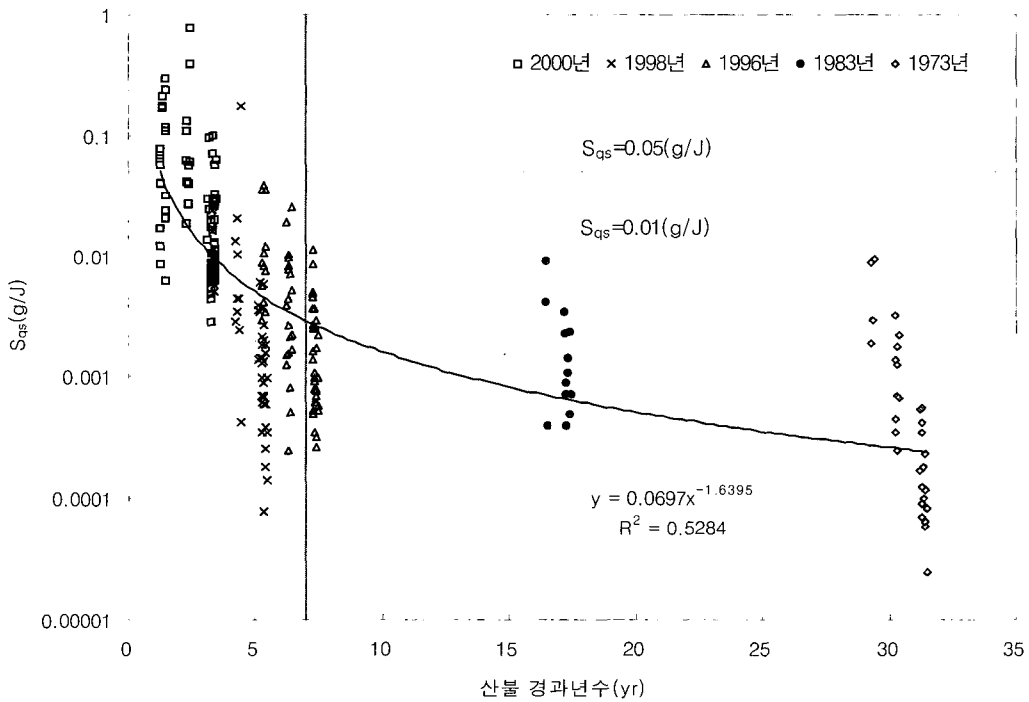


그림 8. 산불발생 경과년수와 토양침식민감도

토양침식민감도는 대략 0.0045(g/J)의 값이다. 이 수치는 그림 8의 관계곡선식에서 산불 경과 년 수 5년을 의미한다. 또한 산불 발생 경과 5년을 의미하는 세로 점선과 만나는 가로 점선의 토양침식민감도 0.05(g/J)

의 한계선은 이 시점에서 토양침식이 현저히 감소한다는 것을 알 수 있다. 2003년을 기준으로 1998년도에 발생한 산불 지역의 토양침식이 사면 안정화 단계에 접어들었음을 의미한다. 즉 산불이후 5년 정도의 시일

이 지나면, 토양침식의 측면에서는 어느 정도 토양안정 및 식생회복이 자생적으로 이루어진다는 사실을 알 수 있다. 각각의 조사구들이 2002년 태풍 루사의 1시간 최대강우강도 100mm/hr 이상의 강우를 경험하였 으면서도 산불경과 7년 이상의 식생을 가진 조사구에서 최대 0.01의 민감도를 넘지 않았다는 사실을 그림 8의 가로실선과 세로 실선을 보고 알 수 있다. 이 민감도 값은 안정화된 산지사면에서의 최대 토양침식민감도의 한계값을 의미한다.

5. 고 찰

본 연구에서는 산불 이후 식생분포가 다르게 형성된 산지사면지역에 소규모 조사구를 대상으로 실측한 유출량과 토양침식량의 데이터를 가지고 강우인자, 지형인자, 토양인자, 및 식생인자와의 상관관계를 분석하였다. 산지사면을 대상으로 RUSLE 모형을 적용하고 평가한 사례에서 식생지수 C값의 산정이 난해하며, 모형을 이용하여 추정된 토사유출량과 실측토사유출량과 차이가 크다 (신승숙 2002). 현재 산불발생이 빈번한 우리나라에서 산지사면을 대상으로 토양침식 예측모형을 개발하는 것이 시급한 일이다. 그러나 이들 매개변수의 단순 다중회귀분석을 통해서 경험적인 모형을 개발하는 것은 한계가 있으므로, 역학적인 접근 방법이 가미되어야 한다. 그러한 이유로 본 연구에서는 유출 및 토양침식 민감도의 역학적인 개념을 정의하였고, 산불로 인해 식생인자가 갑자기 변한 산지사면에서의 지표식생인자와 토양침식민감도의 관계를 분석하였다. 유출 및 토양침식 민감도의 개념은 단지 산불 산지사면에 대해서만 적용할 수 있는 개념이 아니며, 토사유출을 예측하기 위한 모든 사면에서 적용 가능할 것으로 판단된다. 이 개념은 우리나라 산지사면의 토양침식 예측모형을 개발하는데 있어서, 역학적인 기본 개념으로 적용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 산정된 지표인자는 각 지표의 피복조건을 고려하여 얻어진 것으로서 그 추정과정에 대해 위성영상 자료를 활용하는 등의 연구가 이루어져야 한다.

본 연구의 토양침식민감도는 RUSLE 식 (10)에서 우변의 강우에너지로 토양침식량을 나눈 식 (11)과 근본적으로는 같다고 할 수 있다.

$$A = RKLSCP \quad (10)$$

$$\frac{A}{R} = KLSCP \quad (11)$$

여기서 A는 단위면적당 토양침식량, R은 강우에너지계수, K는 토양침식계수, L은 사면길이계수, S는 사면경사도계수, C는 피복인자, P는 토양대책인자이다. 여기서 K는 강우에너지와 유출에 의해 발생된 토양의 저항력의 척도라고 할 수 있다. 식 (11)은 토양침식민감도인 좌변이 여러 인자들에 의해 좌우될 수 있는 것을 나타내고 있으나 산불지역에 대한 본 연구에서는 사면의 길이와는 상관성이 거의 없는 것으로 판단된다. 그러나 식 (11)에 사용된 L인자가 무차원계수이므로 K를 포함한 추후 연구가 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 강우에너지에 대한 유출 및 토양침식량의 비로 정의된 유출 및 토양침식 민감도의 개념을 정립하여, 지표식생인자 변화에 따른 유출 및 토양침식 민감도의 특성을 분석하였다. 산불이후 식생 회복 및 대책방안에 따라 다양한 지표식생인자를 가진 34개의 소규모 조사구를 대상으로 유출 및 토양침식 민감도와 각각의 매개변수들과 상관관계를 분석한 결과 지표식생지수와의 상관관계가 가장 좋았으며, 지수함수적인 관계를 보였다. 위의 관계를 바탕으로 산불 이후 대책방안에 따른 토양침식민감도의 기울기 변화, 산불 피해정도에 따른 토양침식민감도의 변화 그리고 산불발생 연도에 따른 토양침식민감도의 변화를 파악할 수 있었다.

산불 이후 대책방안에 따른 토양침식민감도는 녹화 사방 공법이 다른 공법에 비해 단시일 내에 식생회복이 빠르므로 초기 토양침식 발생 위험 지대에 단기대책으로 활용할 수 있는 효과적인 방안임을 보였다. 산불 피해정도에 따른 토양침식민감도에서는 같은 지형적인 조건의 사면이라 하더라도 피해 등급이 크면 클수록 초기 유출 및 토양침식량이 많으며, 식생회복 속도도 비교적 느릴 것이라는 예측을 분석 결과로 파악할 수 있었다. 그리고 산불발생 연도에 따른 토양침식 민감도의 변화에서 전체식생회복도 70%의 토양침식민감도 값이 0.0045(g/J)인 경우 산불 발생년수는 5년 이었고, 현재 하계 감소하던 토양침식민감도의 기울기가 둔해지는 시점도 이 시점으로 이후로는 토양침식민감도가 0.5(g/J)를 넘지 않았다. 그리고 산불발생 7년 이후 토양침식민감도의 한계값은 0.01(g/J)이었다. 다양한 강우에너지를 갖는 각각의 강우사상에 대한 절대적 한계 토양침식민감도 수치는 허용 범위의 토양침식량의 한계값을 제시해주는 것이다.

본 연구에서 정의한 유출 및 토양침식 민감도는 산불로 인해 지표상태가 급격히 변화한 산지사면에서의

토양침식 과정에 있어서 지표식생 회복의 기여도가 가장 크다는 사실을 알 수 있었고, 토양침식 및 예측 모델을 개발하기 위한 변수로서의 가치를 평가하였다

감사의 글

본 논문은 2001년에서 2003년까지 산지토사유출에 관한 연구를 수행하는 과정에서 얻어진 연구 결과로서 연구 지원을 아끼지 않은 국립방재연구소에 감사드립니다.

참고 문헌

국립방재연구소 (2001). 강원도 산불지역 재해의 저감 대책 수립. pp. 185-226.

국립방재연구소 (2002). 산불로 가중되는 재해요인 저감대책. pp. 65-94.

국립방재연구소 (2003). 산지지역 우수 및 토사유출량 관측 및 저감대책 수립. pp.29-91.

김석철 (2003). 산불피해지역에서 재생된 식생이 토사유출에 미치는 영향. 석사학위논문, 강릉대학교, pp. 37-60.

박상덕 (2002). "강원 강릉지역 호우피해 조사.", 2002 태풍 루사 피해 현장조사 보고서, 국립방재연구소, pp. 6-34.

박상덕, 신승숙, 심관섭 (2002). "산불지역 토사유출에 대한 와지의 기능에 관한 연구." 방재연구논문집, 방재연구, 국립방재연구소, 제4권 제1호, pp. 121-130.

신승숙 (2002). 산지유역의 토사유출에 관한 연구. 석사학위논문, 강릉대학교. pp.21-61.

Andreu, V., Imeson, A.C. and Rubio, J.L. (2001). "Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest." *CATENA44*. Elsevier Science B.V., pp. 80-82.

Brown, L.C. and Foster, G.R. (1987). "Storm erosivity using idealized intensity distributions". *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers* 30, pp. 379-386.

Hibbert, A.R. (1985). "Storm runoff and sediment production after wildfire in Chaparral." *In Hydrology and Water Resources in Arizona and*

the Southwest, AWRA: Las Vegas, NV; pp. 31-42.

Lane, L.J., Nicholls, M.H., Levick, L.R., Kidwell, M.P. (2001). A simulation model for erosion and sediment yield at the hillslope scale. In: Harmon, R.S., Doe, w.w.III, *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 201-237.

Lee, K.S., Park, S.D., Kim, S.C., Shin, S.S., Park, S.D., Lee, J.S. & Yoon, Y.H. (2002). "Effects of vegetation regenerated after forest on the soil erosion in the east coastal region, Korea." *Proceedings of the VIII INTECOL*, Seoul, Korea, pp. 161.

McCuen RH (1973). "The role of sensitivity analysis in hydraulic modeling". *Journal of Hydrlogy* 18. pp. 37-53.

Nearing MA, Deer-Ascough L, Laflen JM (1990). "Sensitivity of the WEPP hillslope version soil erosion model". *Transactions of the American Association of Agricultural Engineers* 33. pp. 839-849.

Soto, Benedicto and Diax-Fierros, Francisco (1998). "Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model." *CATENA31*. Elsevier Science B.V., pp. 267-268.

Van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A. and Rosewell, C.J. (2002). "Rainfall intensity-Kinetic energy relationships." *Journal of Hydrology*. Elsevier Science B.V., pp. 1-23.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1958). Rainfall energy and its relation to soil loss. *Transactions of the American Geophysical Union* 39, pp. 285-291.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978). *Prediction Rainfall Erosion Losses*. Agricultural Handbook 537, Science and Education Administration, USDA, Washington, DC 58.

(논문번호:04-109/접수:2004.12.01/심사완료:2004.12.28)