RUSLE 모형의 산지유역 적용을 위한 지표관리 인자 산정식 제안

Suggestion of Cover-Management Factor Equation for Mountain Area in RUSLE

이종설* · 원진영**

Lee, Jong Seol · Won, Jin Young

Abstract

RUSLE has been widely used for prediction of soil erosion in Korea. As the factors of RUSLE were suggested using observed data in agricultural land of middle-western of United State, verification is essential to apply to domestic mountain area. Cover management factor(C) is one of the most variable factors in time and space. The studies on correlation between NDVI and C factor are in progress abroad. In this study, the relationship equation between percent vegetation cover and C factor was formulated for domestic application, and was calibrated using measured data from experimental watershed. In this research, the relationship equation between percent vegetation cover and NDVI is derived using NDVI extracted from SPOT-5 image and field vegetation data. The equation proposed in this research was more suitable than Drake equation(1997). Also, for suggestion of appropriate relationship between NDVI and C factor, Knijff equation(1999) was selected, and the coefficients of this equation were suggested through the correlation analysis with measured soil erosion data.

Key words : RUSLE, Cover management factor, Percent vegetation cover, NDVI

요 지

현재 국내에서는 토양침식 예측을 위하여 주로 RUSLE 모형을 사용하고 있으나, RUSLE 매개변수들은 미국 농경지역의 관측자료를 이용하여 제안된 것으로서, 국내 산지유역에 적용하기 위해서는 검토가 필요하다. 특히 지표관리 인자는 공간적, 시간적 변동성이 매우 큰 인자로서, 국외에서는 식생피복을 나타내는 지표인 NDVI와 지표관리 인자간의 상관관계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 국내에서는 이에 대한 연구가 미진하다. 따라서 본 연구에서는 식생피복율, 토양침식량 등의 관측자료를 활용하여 NDVI와 지표관리 인자의 관계식을 제안하고자 하였으며, 이를 실제 유역에 적용하여 적용성을 검증하였다. 본 연구에서 식생피복율과 NDVI의 관계식은 SPOT-5 영상으로부터 추출된 NDVI와 현지 식생조사 결과를 이용하여 유도하였으며, 이를 Drake 제안식(1997)과 비교한 결과, 본 연구에서 제안한 식이 Drake 식(1997)보다 더 우수한 결과를 나타내었다. 또한 NDVI와 지표관리 인자의 적정 상관관계식으로 Knijff(1999)가 제안한 관계식을 채택하였으며, 실측 토양침식량을 활용하여 적정 관계상수값을 제시하였다.

핵심용어 : RUSLE, 지표관리 인자, 식생피복율, NDVI

1. 서 론

도시개발, 벌목활동, 산불 등의 환경급변 요인으로 인한 토지상태 변화는 토양의 물리적 특성을 변화시키고, 토양을 교란시킴으로써 토사유출의 피해를 가중시킬 수 있다. 이러한 토사유출의 피해를 경감하기 위해서는 개발 규제 등의 비구조적 대책뿐만 아니라, 토양침식을 억제하거나 하류로의 토사유출을 저감하기 위한 구조적인 방법이 요구된다. 토양침식 저감계획을 수립하기 위해서는 토사유출량의 예측이 선행되어야 한다. 토사유출량을 예측하기 위해 현재 국내 실무에서는 미국에서 개발된 RUSLE(Revised Universal Soil Loss

Equation)를 주로 적용하고 있으나, RUSLE의 매개변수들은 미국 농경지역에서의 관측자료를 이용하여 제시된 것으로 국내 산지유역의 토양침식 예측에 적용하기 위해서는 검토가 필요하다.

RUSLE 매개변수 중 지표관리 인자 C는 공간적, 시간적 변동성이 매우 큰 인자로, RUSLE에서는 기존 토지이용, 수관피복, 지표피복, 지표조도와 지표 수분함량 등 5개의 부인자를 고려하여 산정하도록 하고 있다(Renard et al., 1997). 그러나 실무에서는 자료의 부족으로 이 5개 부인자를 모두 산정하기에는 한계가 있다.

RUSLE의 C 인자는 토양침식 저감인자로 정의할 수 있으

*정회원 · 국립방재연구원 복합재난연구실 미래재난팀 시설연구관(E-mail : jlee9609@korea.kr)

**정회원 · 국립방재연구원 복합재난연구실

므로, C 인자와 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI) 등의 식생관련 지표는 음의 상관성을 가진다(De Jong, 1994). 또한 NDVI는 적외선 영역이 식물의 엽록소와 반응할 때 그 반사값이 크다는 점을 이용하는 것으로 특정 지역 식생의 활력도를 표현할 수 있다(김기홍 등, 2011). De Jong(1994)은 이러한 관계에 착안하여 프랑스 Ardeche 지방의 33개 조사구를 대상으로 LANSAT Thematic Mapper 영상을 사용하여 NDVI, LAI와 C 인자의 상관관계를 분석하였고, NDVI와 C 인자의 선형 관계식을 제시하였다. 그러나 이 선형 관계식은 적용상에 한계점을 가지고 있으므로 van der Knijff(1999)등은 NDVI와 C인자의 지수함수 관계식을 제안하였고, 이 식은 현재 국내외에서 RUSLE를 이용한 토양침식량 산정 시 널리 사용되고 있다. Alejandro M. de Asis(2007)등은 식생과 토양 상태를 평가하는데 Linear Spectral Mixture Analysis를 기초로 한 새로운 기법을 제시하여 현장 관측값과 비교하였고, 이를 이용하여 유도한 C 인자를 NDVI를 활용한 C 인자 값과 비교하였다.

국내에서는 김기홍 등(2011)이 2008년 6월 홍천지역을 대상으로 한 NDVI와 현장 식생피복율 V_c 의 상관관계를 제안한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 우리나라의 산지 특성에 맞는 C 인자 산정을 위하여 국내 4개 소유역에서 관측된 V_c , 토양침식량 등의 자료를 활용하여 V_c 와 NDVI의 상관관계 및 NDVI와 C 인자의 상관관계식을 제안하고, 이를 실제 유역에 적용하여 계산된 토양침식량과 관측 토양침식량의 비교를 통해 국내 적용성을 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역 및 관측자료

본 연구에서는 C 인자 산정식 제안을 위해 총 4개 유역을 대상으로 하였고, 각 유역의 특징은 Table 1과 같다. 유역면적은 약 7,920~101,490 m²의 범위를 가지고, 유역의 표고차 및 폭, 길이는 유역면적이 가장 큰 A 유역에서 최대값을 보이고 있으며, 4개의 유역 모두 과거에 환경급변 활동이 존재하였다. A 유역은 1998년과 2000년도에 산불이 발생한 특징을 가지고 있고, 두 번째 B 유역은 2008년 벌목이 이루어졌다. C 유역은 2009년에 벌목이 이루어진 유역으로, 토양이 비옥하여 토심이 비교적 깊고 식생발달이 유리한 입지 조건을 가지고 있으며 비교적 유역의 폭이 좁고 길다.

Fig. 1. Location map of watershed area applied to study

Fig. 2. Schematic diagram of soil erosion plot

D 유역은 2008년과 2009년 두 차례에 걸쳐 산불이 발생하였고, 산불의 영향으로 현재 산지의 식생생장이 빈약하여 나지가 타 유역에 비해 많이 노출되어 있다.

본 연구에서 이용된 관측자료는 V_c , 토양 입도분포 및 유기물함량, 토양침식량 등으로 이는 총 8개의 조사구에서 관측된 자료이다. 조사구는 Fig. 2와 같이 경사면에 길이 10 m, 폭 3 또는 4 m의 경계판을 설치하였고, 이 경사면에서 발생하는 강우유출량 및 토양침식량을 채취하기 위하여 집수구를 설치하였다.

V_c 는 조사구 내 살아있는 초본과 목본을 전체 조사구에 수직으로 투영하였을 때 전체 조사구를 덮고 있는 정도를 백분율로 측정하였다. A, B 유역은 2010년 4월~11월에 총 9번의 식생조사가 이루어졌으며, 2011년에는 5월과 7월에 2번의 식생조사가 이루어졌다. C, D 유역은 2010년 7월, 2011년 5월과 7월에 총 3번의 식생조사가 실행되었다.

2.2 적용모형 및 방법

2.2.1 RUSLE 모형

RUSLE는 당초 농경지에서 발생하는 연간 토사유출량을 산

Table 1. Characteristic of watershed area

	A	B	C	D
GPS coordinate	N37°49'48.2" E128°48'28.1"	N37°35'32.5" E128°48'16.4"	N37°23'58.6" E127°19'16.8"	N35°58'40.7" E128°31'13.6"
Area(m ²)	101,490	17,340	7,920	28,240
Elevation(El.m)	55~224	750~810	137~210	159~260
Width(m)	146	105	70	125
Length(m)	695	188	160	260

정하기 위하여 개발된 식으로 국내외로 가장 널리 적용되고 있는 토양침식량 산정 공식이다.

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

여기서, A : 강우침식인자 R 의 해당기간중 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)

RUSLE 매개변수 중 LS 인자와 K 인자는 시간의 경과, 즉 계절 및 기후 변화에 상관 없이 대상 지점에서 일정한 값을 가지므로 이 두 인자의 값을 특성상수로 고려할 수 있다. 그러나 R 인자와 C 인자는 계절 및 고도에 따른 기후 변화에 따라 그 값이 변화하게 된다.

본 연구에서는 토양침식량 계산시 아래 방법을 통하여 각 인자를 산정하였다. 단, 지표면에서의 여러 경작 활동에 따른 토양침식의 비를 의미하는 토양보존대책 인자는 경작지 형태와 경사도에 의해 결정된다. 숲이나 나지의 경우 어떠한 보존활동도 이루어지지 않아 1.0의 값을 적용하므로, 본 연구에서는 대상유역의 토양보존대책 인자의 값으로 1.0을 적용하였다.

R 인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로 다음 식을 이용하여 산정하였다.

$$R = E \cdot I_{30} = \left(\sum e_k \cdot \Delta P \right) \cdot I_{30} \quad (2)$$

$$\log_{10} e_k = 1.08 + 0.136 \log_{10} I \quad (3)$$

여기서, E 는 강우의 총 에너지(MJ/ha), I_{30} 은 30분 최대 강우강도(mm/hr), e_k 는 강우의 단위 운동에너지(MJ/ha/mm), ΔP 는 강우지속 시간간격 당 강우증가량(mm), I 는 강우강도(mm/hr)를 의미한다. 강우의 단위 운동에너지 산정식은 노재경(1984)이 제안한 식을 사용하였다.

LS 인자는 표준조사구 상태에서의 토양침식량에 대한 분석 대상 지역의 토양침식량의 비로, 사면길이 인자 L 과 사면경사 인자 S 의 곱으로 표현된다.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^n \quad (4)$$

여기서, λ 는 사면의 수평길이(m)를 의미한다. m 은 사면길이 먹지수를 의미하고 $m = \beta/(1+\beta)$ 로 표현되며(Foster 등, 1977), β 는 $(\sin \theta / 0.0896) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56]$ 으로 나타낼 수 있다(McCool 등, 1989).

사면경사 인자 S 는 McCool 등(1987)이 제안한 식을 적용하였다.

• 사면길이가 15 ft(약 4.6 m) 이상인 경우

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad \sigma \leq 9\%$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad \sigma > 9\%$$

• 사면길이가 15ft(약 4.6m) 미만인 경우

$$S = 3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.03 \quad (5)$$

여기서, θ 는 사면경사(°), σ 는 사면기울기(%)이다.

K 인자는 최근 경작이 이루어지지 않고 어떠한 보존대책도 시행되지 않은 표준조사구에서 단위 R 에 대한 토양침식량으로 정의되고, 본 연구에서는 Wischmeier 등(1971)이 제시한 방법을 이용하여 산정하였다.

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25(s-2) + 2.5(p-3)}{759} \quad (6)$$

$$M = (\%MS + \%VFS)(100 - \%CL)$$

여기서, OM 은 함유 유기물의 백분율(%), s 와 p 는 각각 토양 구조지수와 투수지수이며, M 은 주종을 이루는 토양입자의 크기 백분율의 곱을 의미한다.

C 인자는 주어진 피복 및 관리상태하에서 발생하는 침식량과 표준조사구의 침식량의 비를 의미한다. RUSLE에서는 피복요인을 세부화한 5개 부요인을 이용하여 C 인자를 산정하도록 제안하고 있으나, 실무에서 적용하기에는 매우 세부적이고 광범위한 지역의 자료 취득이 어렵다. 따라서 국외 여러 연구자들은 C 인자가 식생피복과 연관되어 있는 점에 착안하여 NDVI를 이용하여 C 인자를 산정하는 많은 연구들을 수행한 바 있고, 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 적절한 C 인자 산정식을 제안하고자 한다.

2.2.2 관측 지표관리 인자

2.2.1에서 기술한 바와 같이 LS 인자 및 K 인자는 특정 대상 지점에 대해서는 하나의 특성상수와 같은 값을 가지고 있으나, R 인자 및 C 인자는 계절 및 기상변화에 따라 그 값이 변화하게 된다. 강우사상 별 강우침식 인자 R_{obs} 는 식(2)와 식(3)으로부터 산정할 수 있으며, 관측 지표관리 인자 C_{obs} 는 식(7)과 같이 관측 토양침식량, R_{obs} 인자, LS 인자, K 인자 등을 이용하여 산정할 수 있다.

$$C_{obs} = \frac{A_{obs}}{R_{obs} \cdot LS \cdot K} \quad (7)$$

2.2.3 V_c 와 NDVI의 상관관계를 이용한 C 인자 산정

(1) V_c 와 NDVI 상관관계식

식생은 시간경과에 따라 연속적으로 변화하므로 V_c 와 NDVI의 상관관계를 유도하기 위해서는 이에 상응하는 시간의 NDVI 영상이 요구된다. NDVI는 가시광선 영역과 근적외선 영역의 식생에 대한 반사율에 의한 것으로 태양광선의 입사각, 센서의 촬영각도, 대기의 상태 등에 의해 영향을 받으므로 이에 대한 보정이 필요하다. 이를 위해서는 지상에서 실시된 식생조사에 의한 식생피복도와 위성영상으로부터 추정된 NDVI의 관계를 분석할 필요가 있다.

Drake 등(1997)은 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 영상으로부터 추출한 NDVI와 지상 관측한 V_c 와의 관계식을 식(8)과 같이 제안하였으며, 이 식은 그 적용성이 입증되어 널리 사용되고 있다.

Table 2. Variation of NDVI and V_c (NDMI, 2010)

Basin	Date of observation	Min. NDVI	Max. NDVI	Sub. NDVI	V_c (%)
A	0407-0422	-0.0001	0.5484	0.1248	22.75
	0423-0508	-0.0043	0.7520	0.3266	43.75
	0525-0609	-0.0019	0.9021	0.6637	73.63
	0610-0625	-0.0003	0.8989	0.6898	76.75
	0712-0727	-0.0007	0.9278	0.7119	76.75
	0728-0812	-0.0006	0.9079	0.7081	78.00
	0914-0929	-0.0039	0.8559	0.6550	76.63
	0930-1015	-0.0036	0.8273	0.6029	73.00
	1101-1117	-0.0022	0.6479	0.1806	28.13
B	0407-0422	0.0000	0.3984	0.0032	0.80
	0423-0508	-0.0043	0.4757	0.0509	11.50
	0525-0609	-0.0019	0.7964	0.6434	80.83
	0610-0625	-0.0003	0.8040	0.7075	88.00
	0712-0727	-0.0007	0.8199	0.7487	91.33
	0728-0812	-0.0006	0.8394	0.7666	91.33
	0914-0929	-0.0039	0.7795	0.7247	93.00
	0930-1015	-0.0036	0.7155	0.6316	88.33
	1101-1117	-0.0022	0.3998	0.0065	2.17

$$NDVI = 0.0076V_c - 0.0101 \quad (8)$$

국립방재연구원(NDMI; National Disaster Management Institute, 2010)은 본 연구의 대상유역인 A 유역과 B 유역을 대상으로 하여, 시기별 NDVI 변화와 현장 식생조사 값의 변화를 비교하였고 그 결과는 Table 2와 같다. 여기서 NDVI는 2009년 4월~10월의 MODIS 영상을 이용하여 보정한 SPOT-5 영상에서 추출한 값을 나타낸다. SPOT-5 영상의 해상도는 10 m 이므로 대상 유역은 여러 개의 픽셀을 포함하고 있고, 식생여부에 따라 최소, 최대 NDVI 값을 가진다. 위성영상의 NDVI 픽셀 값을 이분법적인 시각으로 해석하면 식(9)과 같이 표현할 수 있으므로, 식(9)에 최소, 최대 NDVI 및 관측 V_c 를 고려하여 대상 유역의 조사시기별 NDVI를 산정할 수 있으며, 그 결과는 다음 식(10)과 같다.

$$V_c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (9)$$

$$NDVI = 0.0086V_c - 0.0297 \quad (10)$$

식(8)과 식(10)을 도식하면 Fig. 3과 같고, 본 연구에서는 토양침식이 관측된 시기의 V_c 로부터 NDVI를 산정하기 위해 두 식을 적용하였다. 산정된 NDVI를 이용하여 C 인자를 계산하였고 이를 C_{obs} 와 비교하여 제안된 식의 적용성을 검토하고자 하였다.

(2) NDVI와 C 인자 상관관계식

NDVI와 RUSLE의 지표관리 인자와의 관계에 대한 연구는 1990년대에서부터 활발히 진행되고 있다. De Jong(1994)은 LANDSAT Thematic Mapper 영상의 NDVI와 C 인자의

Fig. 3. Relationship between V_c and NDVI

Fig. 4. Relationship between NDVI and C factor

관계를 식(11)과 같은 선형식으로 표현하였다.

$$C = 0.431 - 0.805NDVI \quad (11)$$

이 식은 상관계수가 -0.64 정도로 적절하나, 이 식을 사용하여 C 값을 추정하는 경우 일반적으로 과소추정하는 것으로 알려져 있으며, Fig. 4와 같이 0.431 이상의 C 값은 추정할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 van der Knijff 등(1999)은 NDVI 영향을 C 값으로 근사화 할 수 있는 다른 대안을 검토하였고, 몇 가지 연구를 통하여 다음과 같은 지수식을 제안하였다.

$$C = e^{-\alpha(NDVI)/(\beta \cdot NDVI)} \quad (12)$$

여기서, α 와 β 는 NDVI와 C와의 관계곡선 모양을 결정하는 상수로서 일반적으로 β 의 값으로 1.0을 사용한다. van der Knijff 등(1999)은 α 의 값이 2.0일 경우 가장 합리적인 결과를 나타낸다고 제안하며 이탈리아의 토양침식 위험도 평가시 2.0의 값을 적용하였다. Orr 등(2007)은 동부 스페인의 산불

Table 3. Classification of case with coefficient α , β

case	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10	case11	case12	case13	case14	case15
coefficient															
α	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0
β	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0

이후 토양침식 취약성 평가를 위해 2.5의 값을 적용하였으며, 그 외 여러 연구자들은 van der Knijff 등(1999)이 제안한 값인 $\alpha=2.0$, $\beta=1.0$ 을 사용하여 C 값을 산정하고 있다.

C 인자와 관련된 식생의 종류 및 성장속도는 지역적 위치 및 기후와 깊은 관계가 있으므로 국내에 적합한 α 와 β 값을 찾아내는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Table 3과 같이 α 와 β 값을 변화시켜 계산된 C_{cal} 값과 관측된 C_{obs} 값을 비교함으로써 국내 산지유역에 적용성이 높은 산정식을 제안하고자 한다.

3. 적용 및 분석결과

본 연구에서는 총 4개의 대상 유역 중 A, B 유역의 관측 자료를 활용하여 국내 산지유역에 적합한 V_c -NDVI 관계식 및 C 인자 산정식을 선정하였고, C, D 유역의 자료를 이용하여 선정된 식을 검증하였다.

C 인자를 산정하기 위해서 우선 Drake 등(1997)이 제안한 식(8)과 본 연구에서 제안한 식(10)을 이용하여 관측된 V_c 로부터 NDVI를 산정하였고, Table 3의 α , β 값의 변화에 따른 각 case에 대해 산정된 NDVI를 식(12)에 적용하여 C 인자 값을 계산하였다. 이와 같이 계산된 C_{cal} 값은 식(7)과 같이 관측된 토양침식량으로 산정된 C_{obs} 값과 비교하였으며, 식(8)에 의한 결과는 Drake, 식(10)에 의한 결과는 NDMI로 표기하였다.

3.1. V_c -NDVI 관계식 선정

V_c 와 NDVI의 적정 관계식 선정을 위해 두 식을 적용하여 계산된 C_{cal} 값과 관측된 C_{obs} 값을 비교하였다. A, B 유역에서 관측된 강우사상별 토양침식량 자료는 총 49개로, A 유역의 경우 2011년 6월~7월, B 유역의 경우 2010년 5월~9월, 2011년 7월에 관측이 이루어졌다.

관측 C_{obs} 값과 case별 계산된 C_{cal} 값의 상관계수는 Fig. 5와 같다. NDVI 산정식에 따른 상관계수는 두 식 모두 0.6 이상으로 적절한 것으로 나타났고, 거의 유사한 상관성을 보였으며, NDMI 식의 case 13($\alpha=3.0$, $\beta=1.0$)의 경우 상관계수가 0.80으로 최대로 나타났다. 또한 α 값이 1.0일 경우 NDMI 식이 Drake 식에 비해 더 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

상관계수 뿐만 아니라 효율성계수는 관계식의 수행성을 판단하는 척도로 많이 활용되며, 본 연구에서는 Nash & Sutcliffe(1989)이 제안한 다음 식을 사용하였다.

$$CE = 1 - \frac{\sum (X_{pred} - X_{obs})^2}{\sum (X_{obs} - X_{mean})^2} \quad (13)$$

Fig. 5. Correlation coefficient by estimation equation

Fig. 6. Efficiency coefficient by estimation equation

여기서, X_{pred} 는 관계식에 의한 예측값, X_{obs} 는 관측값, X_{mean} 은 관측값의 평균값을 의미한다.

효율성계수가 1.0에 가까울수록 관계식의 수행성이 좋은 것을 의미하며, Fig. 6에서 그래프에 표시되지 않은 case는 음의 효율성을 나타내는 경우이다. 두 관계식 모두 효율성계수가 0 이상으로 나타난 경우는 case 1, case 4, case 7, case 14이고, β 의 값이 2.0인 case의 효율성은 매우 좋지 않은 것으로 나타났다. 대부분 β 의 값이 1.0일 때 효율성이 좋은 것으로 나타났으나, α 의 값이 3.0일 때에는 β 의 값이 1.5인 경우에 효율성이 높은 것으로 나타났다. 또한 0.3 이상의 높은 효율성계수를 가지는 case는 NDMI 식의 경우 4개, Drake 식은 2개이며, 최대 효율성계수는 case 1의 NDMI 식에서 나타났다.

3.2 C 인자 산정식 선정

Fig. 7은 관측값과 계산값의 상관성 및 효율성계수가 가장 높은 case에 대해 NDVI 산정방법별 관측 C_{obs} 와 계산 C_{cal} 의 관계를 도시한 것이다. 효율성이 가장 큰 경우는 NDMI 식을 적용한 case 1($\alpha=1.0$, $\beta=1.0$)로 효율성계수는 0.511로 나타났다.

case 4와 case 14의 Drake 식으로 산정된 결과를 살펴보

Fig. 7. Scatter plot of $C_{cal(NDVI)}$ factor against C_{obs}

면, 관측 C_{obs} 값이 0.1 이상인 경우 오히려 NDMI 식보다 1:1 선에 더 근접한 것을 알 수 있다. 그러나 전체 관측자료의 86%는 관측 C_{obs} 값이 0.1 이하이고, 관측 C_{obs} 값이 0.1 이하인 데이터를 살펴보면 case 4의 경우 NDMI 식에 비해 과소추정을 하며, case 14의 경우 과대추정을 한다. C 값이 0.1이하인 경우는 삼림이 밀집된 지역이나 농작물의 밀도가 높은 지역이라 할 수 있고, NDMI 식은 산지유역에서의 관측자료를 이용하여 제시되어진 식이다. 따라서 Fig. 3과 같이 낮은 식생피복율에서의 NDMI 식은 Drake 식과 차이를 보이지 않으나 식생피복율이 높은 경우 최대 0.08의 차이를 보이고, 이 차이로 인하여 매우 낮은 C 값에 대해 NDMI 식이 Drake 식보다 실측값에 가까운 값을 예측하는 것으로 판단된다.

4. 제안된 C 인자 산정식 검증

국내 산지유역의 식생 및 토양조건에 적합한 V_c 와 NDVI의 관계식은 NDMI 식으로 나타났고, NDVI와 C 인자의 관계식으로 Knijff 식을 선택하여 관계곡선 상수 α , β 변화에 따른 계산 C_{cal} 를 관측 C_{obs} 와 비교한 결과, α , β 값이 모두 1.0일 경우 가장 적절한 것으로 나타났다. 선정된 산정식을 검증하기 위하여 사용된 C, D 유역의 강우사상별 토양침식 관측자료는 총 41개로 2010년 4월~9월, 2011년 5월~7월의 기간에 관측이 실시되었다.

Fig. 8은 본 연구에서 제안된 식들을 이용하여 계산된 토양침식량과 관측 토양침식량을 비교한 것이다. 관측값과 계산값의 상관계수는 0.84로 높게 나타났고, 효율성계수는 0.32로

Fig. 8. Scatter plot of calculated soil erosion against observed soil erosion

나타나, 본 연구를 통해 제안된 식이 국내 산지의 토양침식 예측에 적절한 것으로 판단된다.

그러나 1 kg 이상의 관측 토양침식량에 대해서는 대부분 계산값이 과소추정하고 있는 것을 알 수 있다. 과소추정된 결과는 주로 D 유역의 관측자료로, D 유역은 두 차례의 산불이 발생하여 타 유역에 비해 식생성장이 빈약하고 토양구조 또한 좋지 않은 유역이다. 이러한 식생 및 토양조건은 토양침식량을 가중시키는 요인이 되나, RUSLE에서는 이러한 특성을 반영하는 데에 한계가 있으므로 Fig. 8과 같이 D 유역의 토양침식량이 과소평가 된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 토양침식량 산정시 국내에서 주로 사용하는 RUSLE 모형의 C 인자 산정방법에 대해 검토하고 산지유역 적용에 적절한 산정식을 제안하였다.

A, B 유역을 대상으로 하여 V_c 와 NDVI의 관계식을 검토한 결과 본 연구에서 제안한 식이 적합한 것으로 나타났다. 산정된 NDVI를 이용하여 C 인자를 계산하기 위해 Knijff 식을 선택하였고, 관계곡선 상수 α , β 변화에 따른 계산 C_{cal} 를 관측 C_{obs} 와 비교한 결과, α , β 값이 모두 1.0일 경우 가장 적절한 것으로 나타났다. 또한 선정된 식을 이용하여 산정된 토양침식량과 강우사상별로 관측된 토양침식량을 비교한 결과, 상관성 및 효율성 계수가 양호하게 산정되어 국내 적용성이 높은 것으로 나타났다.

그러나 식생 및 토양의 조건에 영향을 미칠 수 있는 외부적 요인이 발생한 유역에서는 계산된 토양침식량이 관측된 토양침식량에 비해 과소추정되는 경향이 있다. 따라서 토양침식량을 가중시킬 수 있는 외부적 요인에 대한 영향을 고려하여 산정해야 하고 그에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

또한 본 연구에서는 산지유역의 관측자료를 이용하여 산정식을 검토하고 검증하였으므로, 제안된 식의 적용 범위에 한계가 있다. 따라서 산지유역 뿐만 아니라, 농업지역, 공사지역 등 상이한 토지이용 및 식생피복에 따른 지표관리 인자 산정방법에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이라고 사료된다.

참고문헌

- 국립방재연구원 (2010) 토사유출 시험유역 운영 및 전국 산지의 식생인자 도출, 주요사업 연구보고서.
- 김기홍, 이종철, 정재학, 원상연 (2011) KOMPSAT-2 위성영상을 이용한 정규식생지수와 현장식생 자료의 비교 분석, **한국측량학회지**, 제28권, 제4호, pp. 405-411.
- 노재경 (1984) 강우특성을 이용한 강우에너지 산정에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교.

- Alejandro M. de Asis., Kenji Omasa (2007) Estimation of Vegetation Parameter for Modeling Soil Erosion using Linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM Data, *Journal of Photogrammetry&Remote Sensing*, Vol. 62, pp. 309-324.
- De Jong, S.M.(1994) *Applications of Reflective Remote Sensing for Land Degradation Studies in a Mediterranean Environment*, Ph.D. Thesis, Utrecht University, Utrecht.
- Drake, N.A., Zhang, X., Berkhout, E., Bonifacio, R., Grimes, D., Wainwright, J. and Mulligan, M. (1997) Modeling Soil Erosion at Global and Regional Scales using Remote Sensing and GIS Techniques, *Spatial Analysis for Remote Sensing and GIS*, Edited by P. Atkinson, pp. 241-261.
- Foster, G.R., Meyer, L.D. and Onstad, C.A. (1977) A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates, *Transaction of ASAE*, Vol. 20, pp. 683-687.
- 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.
- McCool, D.K., Brown, L.C. and Foster, G.R. (1987) Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation, *Transaction of ASAE*, Vol. 30, pp. 1387-1396.
- McCool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K. and Meyer, L.D.(1989) Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation, *Transaction of ASAE*, Vol. 32, pp. 1571-1576.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1989) River flow forecasting through conceptual models:part. 1. A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Orr, B.J., S., Alloza, J.A., van Leeuwen, W.J.D., Casady, G.M., Davison, J.E., Wittenberg, L., Malkinson, D., Carmel, Y. and D. G. Neary (2007) *Satellite-Derived Vegetation Dynamics Applied to Post-fire Vulnerability Assessment in Spain*, The 4th International Wildland Fire Convention, Seville, Spain.
- van der Knijff J. M., Jones R.J. A. and L. Montanarella (1999) Soil Erosion Risk in Italy, *EUR 19022 EN*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Whichmeier, W.H.(1971) A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites, *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 26, pp. 189-193.

◎ 논문접수일 : 12년 03월 02일
◎ 심사의뢰일 : 12년 03월 13일
◎ 심사완료일 : 12년 03월 30일