



필지 단위 주경사장 산정 및 적용을 통한 범용토양유실공식 지형인자 산정 개선 연구

A Study to Determine the Slope Length and Steepness Factor of Universal Soil Loss Equation with Determining and Adapting Major Slope Length at Field Scale

박윤식^a · 박종윤^b · 장원석^c · 김종건^{d,†}

Park Youn Shik · Park Jong-Yoon · Jang Won Seok · Kim Jonggun

ABSTRACT

Universal Soil Loss Equation (USLE) is to estimate potential soil loss and has benefit in use with its simplicity. The equation is composed of five factors, one of the factors is the slope length and steepness factor (LS factor) that is for topographic property of fields to estimate potential soil loss. Since the USLE was developed, many equations to compute LS was suggested with field measurement. Nowadays the factor is often computed in GIS software with digital elevation model, however it was reported that the factor is very sensitive to the resolution of digital elevation model. In addition, the digital elevation model of high resolution less than 3 meter is required in small field application, however these inputs are not associate with the empirical models' backgrounds since the empirical models were derived in 22.1 meter field measurements. In the study, four equation to compute LS factor and two approaches to determine slope length and steepness were examined, and correction factor was suggested to provide reasonable precision in LS estimations. The correction factor is computed with field area and cell size of digital elevation model, thus the correction factor can be adapted in any USLE-based models using LS factor at field level.

Keywords: GIS; slope length and steepness factor; soil loss; USLE

1. 서 론

토양유실은 강우의 타격 및 지표 유출수에 의해 토양 표면의 토양 입자가 이탈되는 자연적인 현상이며 도시화 등과 같은 토지 이용 조건이 바뀌어 토양 입자의 이탈되는 과정이 인위적으로 바뀔 수도 있다. 토양 유실은 논이나 밭 등과 같은 지역에서는 자원으로서의 가치 손실을 의미하며, 유실된 토양이 하천으로 유입될 때에는 탁도를 증가시킬 뿐만 아니라 유입되는 토양 입자와 함께 이동하는 영양염류 때문에 수질 오염을 야기할 수 있다. 이에 토양유실에 대한 대책을 수립하기에 앞서 현황파악을 위해서, 환경부에서는 2012년에 ‘표토

의 침식 현황 조사에 관한 고시’를 제정하여 시행하고 있으며 (Ministry of Environment, 2012), 이 고시는 범용토양유실공식 (Universal Soil Loss Equation, USLE; Wischmeier and Smith, 1965; Wischmeier and Smith, 1978)에 의해서 토양유실량을 산정하도록 제시하고 있다. 범용토양유실공식은 수년 이상의 장기간에 대한 연평균 토양유실량을 추정할 수 있는 경험적인 모형이며, 토양유실량 예측을 위하여 강우침식능인자 (Rainfall erosivity factor; R factor), 토양침식성인자 (Soil erodibility factor; K factor), 지형인자 (Slope and slope steepness factor; LS factor), 지표피복인자 (Crop and cover management factor; C factor), 보전관리인자 (Conservation practice factor; P factor)의 5개 인자로 구성된다 (Wischmeier and Smith, 1965; Wischmeier and Smith, 1978).

범용토양유실에 적용되는 인자 중에서 지형인자는 대상 지점의 사면 길이와 기울기를 통합하여 산정되는데, 범용토양유실공식의 사용이 증가하면서 기존의 토양유실산정 관계식을 개선한 새로운 지형인자 산정 관계식이 제안되어 왔다. McCool et al. (1987)은 지형인자를 산정할 때 경사도의 임계 조건에 따른 관계식을 도출하여 토양유실을 산정할 수 있는 기법으로 개선한 바 있다. Mitasova et al. (1996)은 지표유출수가 수렴하는 현상을 고려할 수 있도록 경사장 산정 시 상위

^a Associate Professor, Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

^b Researcher, Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute

^c Postdoctoral Research Fellow, The Sustainability Innovation Lab, University of Colorado Boulder

^d Assistant Professor, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6461 Fax: +82-33-259-5560

E-mail: kimjg23@gmail.com

Received: August 26, 2019

Revised: October 21, 2019

Accepted: October 21, 2019

유역의 면적 적용을 시도하였고 이를 통해 기존 기법에서 지나치게 크게 산정되는 경사장의 문제점을 개선할 수 있다고 하였다. Fu and Zhang (2014)은 경사장의 길이가 2, 4, 6, 8, 10 m로 변화할 때 토양유실량의 변화에 대해 분석하였는데, 동일한 강우강도가 주어졌을 때 경사장이 증가할수록 토양유실량이 증가하는 것으로 나타났으며, 경사장과 토양유실량은 지수함수를 통해 산정된다고 하였다. Ghahramani et al. (2012)은 경사진 산림 지역에서 경사장의 영향에 대해 조사하였는데, 유실된 토양 중에서 부유사의 이동이 5~10 m의 짧은 구간에서는 증가하는 것으로 나타났으나, 10 m 이상의 경사지에서는 감소하는 경향을 보인다고 하였으며 이는 표토층에 포함되어 있는 유기물의 축적과 관련이 있다고 하였다. 지형인자의 산정은 컴퓨터 프로그램에서는 수치표고모형 (Digital Elevation Model; DEM)에 의해 주로 산정되는데, 이 때 수치표고모형의 구성단위인 격자의 크기에 따라 산정된 지형인자의 값의 크거나 범위가 달라질 수 있다. Kim et al. (2008)은 수치표고모형의 해상도가 증가할수록 평균 경사도가 증가하는 경향을 보인다고 하였다. Chaubey et al. (2005)은 다양한 격자 크기를 가지는 수치표고모형에 의한 수문 모형의 예측 결과를 비교하였는데, 최대 80% 까지 차이가 발생할 수 있다고 하였으며, Lin et al. (2010) 또한 수치표고모형의 격자 크기가 증가할수록 모형에 의한 결과 차이가 증가한다고 하였다. Panagos et al. (2015)은 유럽 전체 지역에 대해 고해상도 수치표고모형 (해상도 25 m)에 의해 지형인자를 산정할 경우, Bosco et al. (2015)에 의한 해상도 100 m의 수치표고모형에 의한 지형인자보다 지형을 더 잘 반영할 수 있다고 하였다. Koo et al. (2016)은 금강, 낙동강, 섬진강, 영산강, 한강 유역에 대해서 국토지리정보원의 수치지형도를 이용하여 수치표고모형의 해상도에 따른 지형인자 변동성에 대해 평가하였다. 해상도가 5 m인 수치표고모형에 의한 지형인자를 참값으로 가정하고, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 70 m, 100 m 해상도의 수치표고모형에 의한 지형인자를 검토한 결과 30 m 해상도의

수치표고모형이 가장 작은 차이를 보였다고 하였다.

다시 말해, 범용토양유실공식은 토양유실 예측 모형에서 사용이 되고 있는데 수치표고모형 등과 같은 디지털 형식의 자료에 의해 인자가 정의되며, 이 때 자료의 해상도가 모형의 예측 결과에 미치는 영향이 적지 않다. 특히 지형인자의 경우 수치표고모형의 해상도에 따라 경사도 및 경사장이 바뀌게 되는데, 범용토양유실공식은 각 인자의 곱에 의해 토양유실량을 예측하기 때문에 다른 인자가 동일하게 적용이 되더라도 수치표고모형의 해상도에 따라 예측된 토양유실량에 차이가 발생할 수 있다. 따라서 지형인자 산정 과정에서 자료 해상도가 미치는 영향을 파악하고 이에 의한 차이를 최소화할 수 있는 방안 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 지형적인 조건이 상이한 9개의 필지에 대한 지형 정보를 수집한 후에 수치표고모형의 해상도에 따른 지형인자의 변화를 검토하고, 지형인자 산정 시 자료의 해상도가 미치는 영향을 최소화할 수 있는 방안을 검토하였다.

II. 연구방법

1. 고해상도 수치표고모형 제작을 위한 연구대상지역 선정

본 연구에서는 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’ (Ministry of Environment, 2012)에 명시된 방법인 범용토양유실공식에 의해 추정된 연평균 토양유실량 (Mg/ha)에 근거하여 현장조사 대상 필지를 선별하였다 (Kongju National University, 2017). 이 현장조사 대상 필지는 전국 상수원보호구역 및 수변구역에 7,000개 이상이며, 이 중에서 연간 토양유실량의 50 Mg/ha 초과 여부, 필지의 면적과 경사도의 다양성, 현장 접근성이 고려되었다. 선정된 필지는 강원도 원주시 부론면 정산리 2 필지 (Site 1, Site 7), 충청북도 옥천군 안남면 화학리 1 필지 (Site 2), 경기도 여주시 강천면 가야리 3필지 (Site 3, Site 4, Site 5), 강원도 정선군 정선읍 덕송리 1 필지 (Site 6),

Table 1 Location of nine fields

Sites	Location	Area (m ²)	Slope (%)
Site 1	Jeongsan-ri, Buron-myeon, Wonju-si, Gangwon-do	293,4	43.43
Site 2	Hwahak-ri, Annam-myeon, Okcheon-gun, Chungcheongbuk-do	338,3	9.90
Site 3	Gaya-ri, Gangcheon-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do	511,5	6.61
Site 4	Gaya-ri, Gangcheon-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do	581,1	7.44
Site 5	Gaya-ri, Gangcheon-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do	612,5	5.20
Site 6	Deoksong-ri, Jeongseon-eup, Jeongseon-gun, Gangwon-do	787,2	30.95
Site 7	Jeongsan-ri, Buron-myeon, Wonju-si, Gangwon-do	1,171,9	25.70
Site 8	Bunje-ri, Hoenam-myeon, Boeun-gun, Chungcheongbuk-do	2,169,0	12.69
Site 9	Deokeun-ri, Sotae-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do	4,079,1	13.01

충청북도 보은군 회남면 분저리 1 필지 (Site 8), 충청북도 충주시 소태면 덕은리 1 필지 (Site 9)로 총 9개 필지이다 (Table 1). 선정된 필지의 면적은 293.4 m² (Site 1)부터 4,079.1 m² (Site 9)까지 다양하도록 하였으며, 경사도 역시 5.20% (Site 5)에서부터 43.43% (Site 1)까지 다양하도록 하였다. 지형인자 산정에는 수치표고모형 자료가 필요한데, 국토지리정보원의 자료는 대상필지의 크기가 작아 이용이 어려운 것으로 판단되었다. 이에 선정된 9개의 대상필지에 대해 휴대용 GPS 장비 (K9-T 기기)에 의해 경위도 및 고도 정보 수집이 이루어졌으며, 각 대상필지의 형상을 결정짓는 지점과 직선상에 있더라도 경사가 변화하는 지점에 대해서 모두 지형 정보를 수집하였다 (Fig. 1). 고해상도 수치표고모형 제작 시 지형 정보에 대한 오차를 최소화할 필요 있기 때문에, 정지측량 시 정밀도가 수평 ±2.5 mm + 1 ppm이고 수직 ±5 mm + 1 ppm인 휴대용 GPS를 이용하여 정지측량을 실시하였다. 각 필지에 대해 GPS 장비에 의해 수집된 지형 정보는 ArcGIS 소프트웨어에서 Triangular irregular network (TIN) 파일로 변환한 뒤, 이를 다시 격자 (Raster) 파일로 변환하여 각 필지에 대한 수치표고모형을 제작하였다.

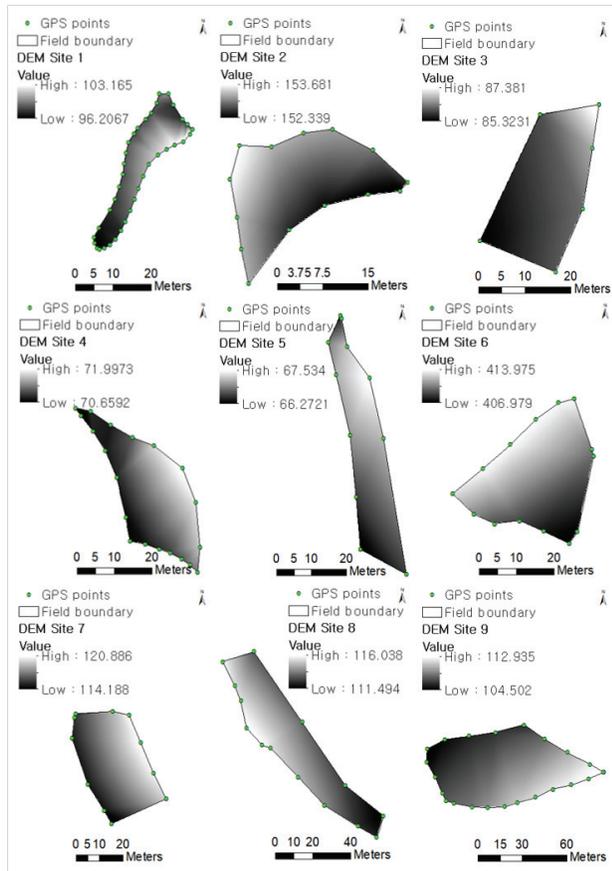


Fig. 1 Measurement topographic information of nine fields

수치표고모형의 해상도에 따른 지형인자 변화량을 보기 위해서 각 필지에 대한 TIN 파일에 의해서 다양한 해상도를 가지는 수치표고모형을 제작하였으며, 이에 최소 0.15 m 해상도에서 3.00 m 해상도까지 0.15 m 간격으로 총 20개의 수치표고모형을 각 필지에 대해서 제작하였다.

2. 지형인자 산정 방법

가. 지형인자 산정식의 선정

지형인자 산정식은 범용토양유실공식이 개발된 이후 현재까지 다양하게 제안되어 왔다 (Griffin et al., 1988; McCool et al., 1989; Moore and Burch, 1986; Moore and Wilson, 1992; Wischmeier and Smith, 1965; Wischmeier and Smith, 1978). 이러한 연구는 연구 대상지역에 대한 토양유실량 측정 결과를 바탕으로 하였기 때문에 국내 여건을 충분히 반영하는지에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 제안된 지형인자 산정식 중에서 ArcGIS 소프트웨어에서 가동이 가능한 식들을 선별하였다. 본 연구에서 적용된 식은 Wischmeier and Smith (1978)(식 1), McCool et al. (1989)(식 2), Moore and Burch (1986)와 Moore and Wilson (1992)(식 3), Griffin et al. (1988)과 Moore and Wilson (1992)(식 4)으로 총 4개이다 (Table 2).

Wischmeier and Smith (1978)에 의해 제안된 식 (1)은 범용토양유실공식이 개발될 때 제안된 식으로 현재 환경부의 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’ (Ministry of Environment, 2012)에서 지형인자 사용 시에 제안되고 있는 것으로 경사장 (λ , meter), 경사도 (β , radian), 경사에 따른 변수 (m , 무차원)에 의한 함수로 정의된다. McCool et al. (1989)에 의해 제안된 식 (2)는 식 (1)과 유사하게 경사장과 경사도에 의한 함수로 정의되나, 식 (1)의 경사도에 의해서만 정의되는 m 이 아닌 경사장과 경사도에 의해 정의되는 변수 F 를 사용하고 있으며, 식 (1)의 경우 변수 m 이 결정이 되면 적용되는 식은 동일하나, 식 (2)는 변수 F 와 경사도에 따라서 적용되는 식도 달라진다.

식 (3)은 Moore and Burch (1986)와 Moore and Wilson (1992)에 의해 제안된 경사장 인자 산정식과 경사도인자 산정식을 조합한 것으로 경사장과 경사도에 의한 함수이며, 변수 m 과 n 을 이용한다. 변수 m 은 0.4-0.6의 범위를 가지며, 변수 n 은 1.22-1.3의 범위를 가진다. 식 (4)는 식 (3)과 유사하게 Griffin et al. (1988)과 Moore and Wilson (1992)에 의해 제안된 경사장인자 산정식과 경사도인자 산정식을 조합한 것으로 식 (3)과 식은 동일하나 변수 m 이 식 내에서 지수 및 계수 역할을 한다. 이 식에서 변수 m 의 범위는 0.2-0.6이며, 변수 n 의 범위는 1.0-1.3의 범위를 가진다. 본 연구서는 식 (3)과 식 (4)를 이용하는 데 있어서 변수 m 은 0.4를, 변수 n 은 1.3을 적용하였다 (Hrabalíková and Janeček, 2017).

Table 2 Equations to determine LS factors

No.	Equations	Model parameters
Eq.1	$LS = (\lambda/22.13)^m \times (65.4 \sin^2\beta + 4.5 \sin\beta + 0.0654)$	$\beta > 0.05 : m = 0.5$ $0.03 < \beta \leq 0.05 : m = 0.4$ $0.01 < \beta \leq 0.03 : m = 0.3$ $\beta \leq 0.01 : m = 0.2$
Eq.2	$LS = (\lambda/22.13)^m \times \begin{cases} (10.8 \sin\beta + 0.03), & \text{if } \beta < 0.09 \\ (16.8 \sin\beta - 0.5), & \text{if } \beta \geq 0.09 \\ (3 \sin^{0.8}\beta + 0.56), & \text{if } \lambda < 4.5 \end{cases}$	$m = F/(1+F)$ $\lambda \geq 4.5 : F = \frac{\sin\beta/0.0896}{\sin^{0.8}\beta + 0.56}$ $\lambda < 4.5 : F = 0$
Eq.3	$LS = (\lambda/22.13)^m \times (\sin\beta/0.0896)^n$	-
Eq.4	$LS = (m+1) \times (\lambda/22.13)^m \times (\sin\beta/0.0896)^n$	-

Table 3 Methods summary to determine LS factor

Methods	Equation No.	Determination of LS
M _{1,Cell}	1	1. To designate λ is cell size (CE) of which flow direction is 1, 4, 16, and 64 (flow direction type 1)
M _{2,Cell}	2	2. To designate λ is $\sqrt{2}$ CE of which flow direction is 2, 8, 32, and 128 (flow direction type 2)
M _{3,Cell}	3	3. To determine slopes for each cell
M _{4,Cell}	4	4. To compute LS for each cell
		5. To compute mean LS of all cells in field
M _{1,Major}	1	1. To determine major flow direction
M _{2,Major}	2	2. To determine λ s by flow direction, λ_i is multiplication of CE and the number of cells if flow direction type 1, λ_j is multiplication of $\sqrt{2}$ CE and the number of cells if flow direction type 2
M _{3,Major}	3	3. To compute mean λ
M _{4,Major}	4	4. To determine slopes for each cell and compute mean slope
		5. To compute LS with mean λ and mean slope

지형인자를 산정할 때 GIS 기반의 소프트웨어를 이용할 경우, 이 인자는 격자 형태의 입력자료 (raster file)의 각 격자에 대해 산정이 되며 (Kim et al., 2017; Yu et al., 2017a; Yu et al., 2017b), 이러한 적용은 각 격자를 하나의 필지로 하는 가정이 내제되어 있다. 범용토양유실공식은 22.1 m 길이의 필지에서 유실된 토양을 실측하여 이를 식으로 표현한 경험적 모형이기 때문에 유역에서 발생하는 토양유실량을 예측할 경우에는 이러한 접근 방법이 타당할 수 있지만, 단일 필지에서의 토양유실량을 예측할 경우에는 범용토양유실공식이 개발될 때와 동일하게 필지에 대한 한 개의 지형인자로 결정하는 것이 타당한 접근 방법으로 판단된다. 즉, 범용토양유실공식의 지형인자는 길이 22.1 m의 필지에서 실측된 토양유실량에 근거한 경험식이며, 유역이 아닌 규모가 작은 필지에 범용토양유실공식을 적용할 때에는 매우 작은 유역의 형태와 같이 필지를 세분화하여 지형인자를 산정하는 것보다, 대상 필지의 주경사 방향에 따른 경사장 및 경사도에 의해 지형인자를 결정하는 것이 경험적인 범용토양유실공식의 인자를 산정하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 대상 필지에 대한 지형인자를 결정하는 데 있어 두 가지 접근방법에 대해 검토하였다.

나. 격자 기반의 지형인자 산정 접근 방법

첫 번째 접근 방법은 대상 필지를 매우 작은 격자들로 표현한 뒤에 각각의 격자에 대한 지형인자를 산정한 뒤에 이를 평균하여 대상 필지에 대한 지형인자로 결정하는 것이다. 두 번째 접근 방법은 대상 필지에 대한 전반적인 경사도 및 경사장을 산정한 뒤에 이에 의한 지형인자를 결정하는 것이다. 여기서 대상 필지의 전반적인 경사도는 첫 번째 접근 방법과 유사하게 대상 필지를 세분화하여 각 격자에 대한 경사도를 산정한 뒤 이를 평균하여 결정을 하고, 경사장을 결정할 때에는 대상 필지의 경사 방향을 고려하여 이를 각각의 경사장으로 결정한 뒤에 이 경사장 값들을 평균하여 대상 필지의 경사장으로 결정하는 것이다 (Table 3). 이 두 가지 접근방법 모두 경사장은 경사 방향에 따라 달라질 수 있다. 수치표고모형과 같은 격자 자료를 이용할 때 ArcGIS 소프트웨어에서 경사 방향은 8방향으로 표현이 되는데, 경사 방향이 동, 남, 서, 북인 경우 (수평/수직 방향)에는 각각 1, 4, 16, 64로 표현이 되고 경사 방향이 남동, 남서, 북서, 북동인 경우 (대각선 방향)에는 각각 2, 8, 32, 128로 표현이 된다 (Fig. 2). 따라서 경사장은 경사 방향이 동, 남, 서, 북인 경우에는 격자의 크기이나, 경사

방향이 남동, 남서, 북서, 북동인 경우에는 격자 크기에 $\sqrt{2}$ 의 비율만큼 증가하게 된다.

지형인자 산정의 첫 번째 접근 방법에서는 격자별로 지형인자가 산정되기 때문에 경사방향이 수평/수직인 경우에는 경사장 λ 를 격자의 크기 (cell size, CE)로, 대각선 방향인 경우에는 $\sqrt{2}CE$ 로 결정하였다. 경사도는 ArcGIS 소프트웨어의 Slope 툴에 의해 각 격자별로 정의하였다. 그리고 각 격자별 공식 (1)-식 (4)에 의해 대상 필지 내 각 격자별 지형인자를 정의한 후에, 이를 평균하여 대상 필지의 지형인자로 결정하였다 (Table 3). Fig. 3은 첫 번째 접근 방법에 의한 지형인자 산정

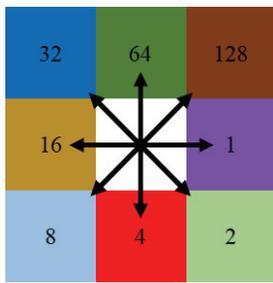


Fig. 2 Flow direction

과정을 보여주는 예시로, Site 1의 수치표고모형 1.5 m 해상도 지도이다 (Fig. 3a). 각 격자의 경사방향을 결정하여 (Fig. 3b) 격자별로 경사장을 CE 또는 $\sqrt{2}CE$ 로 결정하고, 여기에 격자별 경사도와 함께 격자별 지형인자를 산정하였다 (Fig. 3c). 따라서 이 예시에서는 격자의 개수인 129개의 지형인자가 산정되었으며, 이를 평균하여 이 예시에 대한 지형인자로 결정하였다.

다. 주경사장 및 경사도 기반의 지형인자 산정 접근 방법

지형인자 산정의 두 번째 접근 방법은 대상 필지를 대표하는 각각 하나의 경사장 및 경사도를 결정한 뒤에 이를 식 (1) - 식 (4)에 적용하는 것이다. 경사도는 각 격자별 경사도를 결정한 뒤에 이를 평균하여 대상 필지의 경사도로 결정하였다. 대상 필지에 대한 경사장 결정은 대상 필지의 수치표고모형을 이용하여 경사방향 지도를 생성한 뒤에, 경사 방향 최빈값을 결정하고 이 경사 방향에 따른 경사장 값들을 정의한 후, 이를 평균하여 대상 필지의 경사장으로 결정하였다. Fig. 4는 두 번째 접근 방법에 의한 지형인자 산정 과정을 보여주는 예시로, Site 1의 수치표고모형 1.5 m 해상도 지도이다 (Fig. 4a).

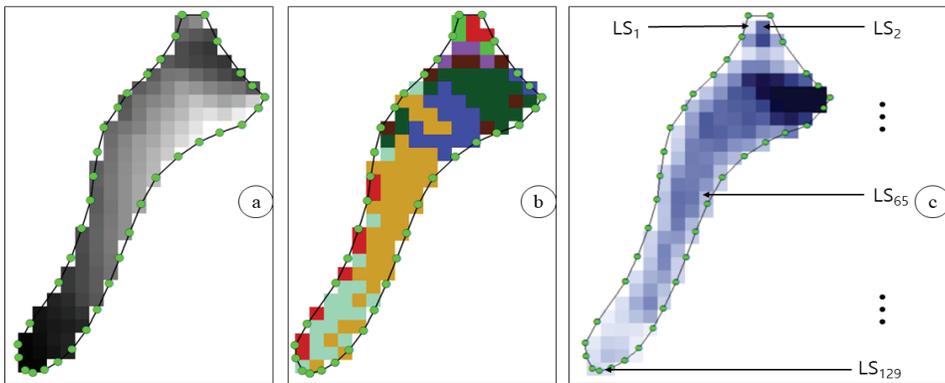


Fig. 3 Determination of LS for each cell

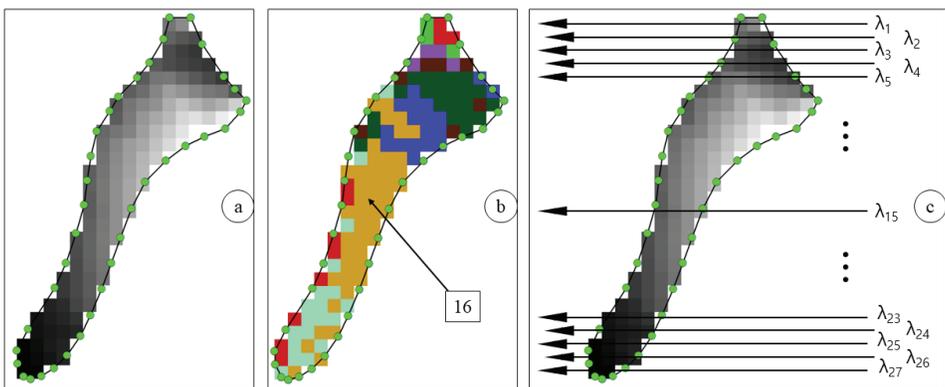


Fig. 4 Determination of λ at small field scale

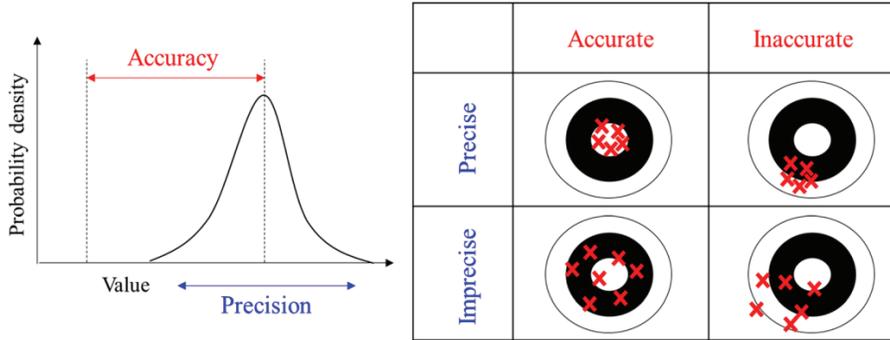


Fig. 5 Evaluation criteria of simulation accuracy and precision (adapted from Kim et al., 2018)

주경사 방향은 16이었으며 (Fig. 4b) 이 방향으로의 경사장은 총 27개 ($\lambda_1 - \lambda_{27}$)가 생성되었고 (Fig. 4c), 이 27개 경사장을 평균하여 Site 1의 수치표고모형 해상도 1.5 m에 대한 경사장으로 결정하였다.

지형인자 산정에 대한 검토에는 9개 필지 (Site 1-Site 9)에 대해서 해상도 0.15 m-3.0 m 까지 20개 수치표고모형이 이용되었으며, 지형인자 산정식 4개(식 (1) - 식 (4))가 지형인자 산정 접근 방법 2개에 적용에 의해 이루어졌다. 각 필지별에 대해서 160개, 총 1,440개의 지형인자가 산정되었으며 이에 대한 지형인자 산정 방법 및 해상도에 의한 영향에 대한 검토가 이루어졌다.

III. 결과 및 고찰

1. 지형인자 산정

본 연구의 주된 목적은 지형인자 산정식과 산정식에서 요구하는 경사장 및 경사도의 결정에 따른 지형인자에 대한 검토이다. 일반적으로 모형에 의한 예측값에 대한 평가는 실측값과의 비교에 의해 이루어질 수 있으나, 산정식에 의해 결정되는 지형인자는 실측값이 존재하지 않는다. 즉 산정식을 포함하여 모형에 의한 예측값에 대한 평가는 정확성 (accuracy) 과 정밀성 (precision) 측면에서 평가가 되어야 한다 (Park and Engel, 2014; Park and Engel, 2015, Kim et al., 2018) (Fig. 5).

범용토양유실공식의 각 인자는 각 인자에 대해 현장에서 실측된 값과 비교하여 결정된 것이 아니라, 실측 토양유실량과 예측된 토양유실량에 근거하여 간접적으로 결정된 것이다. 즉, 실측 토양유실량과의 비교를 통해서 각 인자의 대소가 비율적으로 결정되었기 때문에, 강우침식능인자 ($MJ \cdot mm/ha \cdot yr \cdot hr$)와 토양침식성인자 ($Mg \cdot hr/MJ \cdot mm$)는 서로 상쇄되는 단위를 가지며, 지형인자, 지표피복인자, 보전관리인자는 단위가 없다. 이로 미루어볼 때, 특정 인자에 대해서 참값을 정의하는 것은 각각의 인자에 대해 다양한 조건을 반영할

수 있는 다수의 필지가 선정되어야 하는 공간적인 문제와 함께, 범용토양유실을 연단위로 적용하더라도 1년에 1개의 예측 토양유실량이 주어지기 때문에 십수 년 또는 수십 년에 대한 입력자료 수집 및 토양유실량이 실측되어야 하는 시간적인 문제를 가지고 있다. 따라서 현장 조건에 의해 결정된 지형인자의 참값 정의는 현실적으로 어려우며, 예측값이 실측값에 얼마나 근접한지를 의미하는 정확성 평가 역시 어렵다. 그러나 동일한 필지라도 해도 수치표고모형의 해상도에 따라 지형인자의 값의 변화량에 대한 분석은 실측값과의 비교가 아니라, 예측값들에 대한 비교 및 검토만을 요구하기 때문에 예측값들의 산과 정도에 대해 판단하는 정밀성 분석은 충분히 가능하다.

이에 본 연구에서는 지형인자 산정 방법에 대한 평가는 정밀성 측면에서 이루어졌으며, 이를 위해 각 필지에 대해서 수치표고모형의 해상도, 산정식, 주경사장 및 경사도 결정 방법에 따른 지형인자의 표준편차 (Standard deviation, S. D.)와 최대/최소 지형인자의 비 (Ratio, '최대 지형인자' / '최소 지형인자')을 이용하였다. 표준편차는 0에 가까울수록 최대/최소 지형인자의 비는 1에 가까울수록 지형인자 산정식의 정밀성이 높은 것으로 판단하였다.

수치표고모형의 해상도에 따른 지형인자의 변화를 보면, 0.15 m부터 3.00 m로 해상도가 감소할수록 지형인자는 증가하거나 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 6). 격자 기반인 첫 번째 접근 방법과 지형인자 산정식 식 (1)($M_{1,Cell}$), 식 (3)($M_{3,Cell}$), 식 (4)($M_{4,Cell}$)에서는 해상도가 감소할수록 증가하는 경향을 보였으며, 첫 번째 접근방법과 지형인자 산정식 식 (2)($M_{2,Cell}$)와 주경사장 및 경사도 기반인 두 번째 접근 방법에 의한 지형인자는 해상도가 감소할수록 점차 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 9개의 모든 필지에서 관측되었다. 두 번째 접근 방법에 의한 경우 해상도가 감소할수록, 즉 격자의 크기가 증가할수록 필지의 형상을 격자 형태로 표현하는 과정에서 지형 정보가 손실되기 때문인 것으로 판단된다. 특히 식 (2)의 경우 경사장이 4.5 m일 경우에 변수 F는 0으로 정의되며 이어

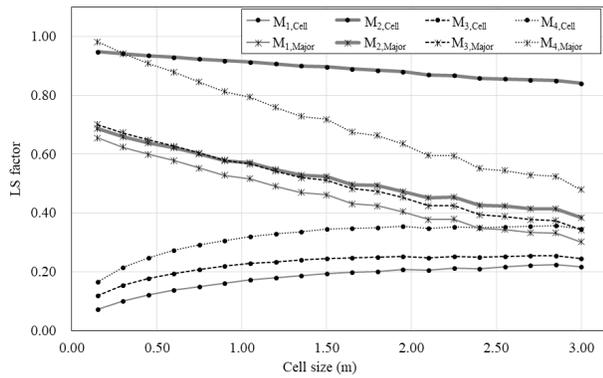


Fig. 6 Variations of LS factors with equations, approaches, and cell size in Site 2

서 변수 m 역시 0으로 정의된다. 그런데 이 변수 m 은 경사장에 대한 항의 지수이기 때문에 경사장의 크기가 4.5 m 이하일 경우에는 경사도에 의한 지형인자로 정의가 되기 때문에 경사장의 조건을 반영한다고 볼 수 없다. 따라서 격자의 크기가 4.5 m이하인 고해상도 자료일 경우에는 격자 기반으로 지형인자 산정 시 적용이 어려울 것으로 판단된다. 따라서 지형인자에 대한 평가에서 $M_{2,Cell}$ 의 결과는 제외하고 판단하였다.

Table 4에서 보이는 바와 같이, 특정 방법에 의한 지형인자에서 최소나 최대 지형인자가 결정되지는 않았으나, 전체적으로 격자를 기반으로 하여 산정된 지형인자가 주경사장을 이용하여 산정된 지형인자보다 작게 산정이 되었다. 이는 지형인자는 경사장과 경사도의 복합적인 영향에 의해 산정이

Table 4 LS factors by four equations and two approaches

	Stats.	$M_{1,Cell}$	$M_{2,Cell}$	$M_{3,Cell}$	$M_{4,Cell}$	$M_{1,Major}$	$M_{2,Major}$	$M_{3,Major}$	$M_{4,Major}$
Site 1	Min.	0.898	1.336	0.809	1.133	1.745	1.065	1.602	2.242
	Max.	1.807	1.769	1.465	2.051	7.021	3.523	4.590	6.425
	Mean	1.607	1.543	1.337	1.872	3.781	2.032	2.839	3.975
	S. D.	0.224	0.135	0.166	0.232	1.608	0.738	0.914	1.280
	Ratio	2.013	1.323	1.810	1.810	4.024	3.308	2.866	2.866
Site 2	Min.	0.073	0.840	0.120	0.168	0.302	0.385	0.343	0.480
	Max.	0.225	0.947	0.256	0.358	0.655	0.686	0.701	0.982
	Mean	0.181	0.893	0.227	0.318	0.458	0.520	0.506	0.708
	S. D.	0.043	0.033	0.038	0.053	0.107	0.091	0.109	0.152
	Ratio	3.067	1.128	2.132	2.132	2.169	1.783	2.045	2.045
Site 3	Min.	0.059	0.779	0.073	0.103	0.280	0.370	0.278	0.390
	Max.	0.169	0.836	0.174	0.244	0.436	0.545	0.459	0.643
	Mean	0.135	0.809	0.145	0.203	0.358	0.455	0.368	0.515
	S. D.	0.031	0.017	0.027	0.038	0.047	0.052	0.054	0.076
	Ratio	2.874	1.072	2.371	2.371	1.559	1.472	1.649	1.649
Site 4	Min.	0.058	0.799	0.088	0.123	0.295	0.376	0.299	0.419
	Max.	0.183	0.865	0.200	0.280	0.526	0.631	0.552	0.773
	Mean	0.143	0.830	0.171	0.239	0.390	0.483	0.407	0.570
	S. D.	0.036	0.021	0.031	0.044	0.070	0.079	0.079	0.110
	Ratio	3.178	1.083	2.286	2.286	1.786	1.678	1.847	1.847
Site 5	Min.	0.053	0.729	0.055	0.077	0.166	0.218	0.132	0.185
	Max.	0.131	0.791	0.111	0.155	0.290	0.378	0.291	0.408
	Mean	0.110	0.758	0.100	0.140	0.215	0.289	0.203	0.284
	S. D.	0.022	0.020	0.015	0.021	0.039	0.049	0.049	0.069
	Ratio	2.484	1.085	2.020	2.020	1.750	1.735	2.200	2.200
Site 6	Min.	0.483	1.386	0.557	0.779	3.454	2.656	2.757	3.860
	Max.	1.629	1.517	1.463	2.048	5.591	4.274	3.991	5.588
	Mean	1.268	1.451	1.192	1.669	4.411	3.375	3.321	4.649
	S. D.	0.335	0.040	0.260	0.364	0.663	0.494	0.383	0.537
	Ratio	3.370	1.095	2.628	2.628	1.619	1.609	1.448	1.448
Site 7	Min.	0.330	1.283	0.418	0.585	2.909	2.589	2.426	3.396
	Max.	1.135	1.388	1.119	1.567	4.102	3.474	3.165	4.431
	Mean	0.871	1.335	0.902	1.263	3.493	3.035	2.794	3.911
	S. D.	0.234	0.033	0.201	0.281	0.368	0.273	0.228	0.319
	Ratio	3.438	1.082	2.679	2.679	1.410	1.342	1.305	1.305
Site 8	Min.	0.110	0.971	0.173	0.242	0.771	0.780	0.809	1.133
	Max.	0.392	1.032	0.461	0.646	1.222	1.247	1.194	1.672
	Mean	0.297	1.000	0.372	0.520	0.967	0.973	0.980	1.371
	S. D.	0.082	0.020	0.082	0.115	0.138	0.144	0.119	0.166
	Ratio	3.562	1.063	2.671	2.671	1.585	1.599	1.476	1.476
Site 9	Min.	0.121	1.007	0.185	0.259	1.605	1.759	1.475	2.065
	Max.	0.472	1.040	0.544	0.761	1.968	2.213	1.752	2.453
	Mean	0.344	1.023	0.421	0.589	1.773	1.968	1.605	2.247
	S. D.	0.103	0.010	0.103	0.145	0.110	0.137	0.084	0.118
	Ratio	3.909	1.033	2.940	2.940	1.226	1.258	1.188	1.188

되나, 주경사장을 이용할 경우 다수의 격자들에 의한 값이 경사장으로 이용이 되고, 격자 기반으로 할 경우에는 격자의 크기가 경사장으로 이용이 되기 때문에 지형인자가 작게 산정되는 것이다. 따라서 고해상도의 수치표고모형은 길이 22.1 m의 시험포에서의 토양유실량 실측값에 근거하여 개발된 지형인자 산정식에는 적용이 어려울 것으로 판단된다.

그리고 수치표고모형 해상도에 의한 지형인자의 표준편차 (S. D.)와 최대/최소 지형인자의 비 (Ratio)를 볼 때, 표준편차는 8가지 지형인자 산정 방법 중에서 식 (3)을 격자 기반인 첫 번째 접근 방법에 의해 산정했을 경우 ($M_{3,Cell}$)가 Site 9를 제외한 8개 필지에서 최소를 보였다. 최대/최소 지형인자 비는 주경사 기반인 두 번째 접근 방법을 식 (2)에 적용했을 경우 ($M_{2,Major}$)가 5개 필지 (Site 1-5)에서, 동일한 접근 방법을 식 (3)과 식 (4)에 적용했을 경우 ($M_{3,Major}$, $M_{4,Major}$)에 4개 필지 (Site 6-9)에서 최소를 보였다. 즉, 지형인자 예측값 정밀성은 식 (3)이 가장 높은 것으로 나타났다.

2. 지형인자 산정 시 정밀도 향상 방안 검토

본 연구에서는 4개의 지형인자 산정식에 대해서 경사장 및 경사도 적용 방법에 따른 지형인자의 차이에 대해 검토하였다. 고해상도의 수치표고모형을 이용할 경우, 격자 기반인 첫 번째 접근 방법은 길이 22.1 m 시험포에서 측정된 토양유실량에 근거하여 개발된 지형인자 산정 방법과 부합하지 않는 것으로 판단되었다. 그리고 주경사장 및 평균 경사도를 지형인자 산정식에 적용한 결과에서는 식 (3)과 식 (4)가 정밀성이 높은 방법으로 나타났다. 그러나 이 산정식들에 의한 지형인자의 경우에도 수치표고모형의 해상도에 따라 최대 지형인자가 최소 지형인자의 1.305배 (Site 7)에서 2.866배 (Site 1)까지 차이가 발생하였다 (Table 4). 즉, 동일한 필지에 동일한 지형인자 산정식을 적용하더라도 약 30%에서 190%까지 지형인자의 값 차이가 발생할 수 있으며, 이는 각 인자의 곱만으로 토양유실량을 예측하는 범용토양유실공식에 의해 예측되는 토양유실량 값 차이에서도 30%에서 190%까지 차이가 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 이에 수치표고모형의 해상도에 의한 지형인자 차이를 낮추어 지형인자 산정에 있어 정밀성을 높이고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 수치표고모형의 격자 크기가 0.15 m인 고해상도일 때 필지의 모양을 충분히 반영할 수 있다고 가정하고, 0.30 m부터 3.00 m의 해상도를 가지는 수치표고모형을 이용할 경우에도 0.15 m의 해상도를 가지는 수치표고모형을 이용하여 지형인자를 산정할 때와 차이가 적은 지형인자를 산정할 수 있는 방안을 검토하였다.

주경사장 및 경사도에 의해 지형인자를 산정할 경우, 각 필지에 대한 분석에서 수치표고모형의 해상도에 따라 지형인

자가 선형적으로 감소하는 경향을 보이기 때문에 지형인자 산정에 수치표고모형의 해상도가 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 그러나 이 영향의 정도에 대한 판단을 위해서는 추가적인 분석이 필요하였다. 이를 위해 필지의 형상을 가장 잘 반영할 수 있는 수치표고모형 해상도 0.15 m를 이용하여 산정된 지형인자 ($LS_{0.15}$)를 기준으로 하여 다른 해상도에 의한 지형인자 (LS_i)가 수치표고모형의 해상도와 필지의 면적과의 관계를 도식화 하였다 (Fig. 7). 그리고 이 때 각각의 지형인자 비율 ($LS_i / LS_{0.15}$)과 수치표고모형의 해상도에 대한 추세선의 경사도 (Slope of trend line)와 필지와의 상관계수 (Coefficient of correlation)는 0.75로 필지의 면적 역시 지형인자의 산정에 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 따라서 지형인자 산정식 중에 정밀성이 높은 것으로 판단되었던 식 (3)과 식 (4)에 대해서 수치표고모형의 해상도에 의한 차이를 보정할 수 있는 변수를 개발하고자 할 때, 격자의 크기와 필지의 면적에 관한 함수로 표현하고자 하였다.

식 (5)는 수치표고모형의 해상도와 대상 필지의 면적에 의한 지형인자 차이를 줄이는 보정계수 산정식으로, 함수의 계수와 상수는 수치표고모형 해상도 0.15 m에 의한 지형인자와 다른 해상도를 가지는 수치표고모형에 의한 지형인자와 비교 하면서 시산법 (try and error method)에 의해 결정된 것이다. 이 식 (5)의 보정계수 (C)는 대상필지의 면적 (A, ha)과 격자의 크기 (CE, m)에 의해 정의가 되며, 이 보정계수는 식 (3)과 식 (4)에서 변형된 형태인 식 (6)과 식 (7)로 적용이 가능하다.

Table 5는 주경사장 및 평균 경사도를 식 (3)과 식 (4)가 보정계수 산정식에 의해 변환된 식 (6)과 식 (7)에 적용되어 각 필지에 대해 산정된 지형인자 결과이다. 수치표고모형의 해상도에 따른 지형인자의 표준편차 (S. D.)가 식 (6)은 0.012-0.305이고 식 (7)은 0.017-0.427이었으며, 최대/최소 지형인자의 비 (Ratio)가 식 (6)은 1.028-1.275이고 식 (7)은

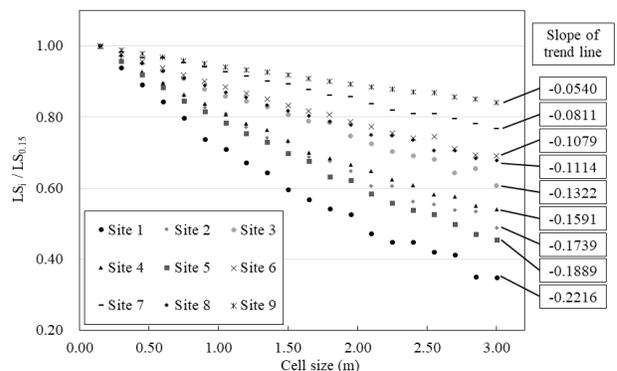


Fig. 7 Ratios of LS_i (computed with DEM resolution 0.15 to 3.00 m) to $LS_{0.15}$ (computed with DEM resolution 0.15 m) with $M_{3,Major}$

1.028-1.275였다. 보정계수가 적용이 되지 않은 식 (3)에 의한 9개 필지에 대한 지형인자의 평균 표준편차와 최대/최소 지형인자 비는 각각 0.224와 1.780이었는데, 보정계수가 적용된 식 (6)에 의한 지형인자의 평균 표준편차와 최대/최소 지형인자 비는 각각 0.106과 1.178로 정밀성이 크게 향상되었다. 더욱이 Table 4에서 $M_{2,Cell}$ 을 제외하고 모든 지형인자 표준편차의 평균과 최대/최소 지형인자 비의 평균이 각각 0.212와 2.158이었으며, 이는 각 인자의 곱에 의해 토양유실량을 예측하는 범용토양유실공식의 특성으로 볼 때, 해상도의 차이로만 예측된 토양유실량의 차이가 최소값을 기준으로 할 때 평균적으로 200% 이상으로 크게 예측될 수 있음을 의미한다. 그러나 이에 비해 식 (6)에 의한 경우에는 이 차이가 평균적으로 20% 미만으로 낮아질 수 있음을 의미한다.

$$C = (0.0541 \log(A) - 0.0132) \times CE + 0.99213 \quad (5)$$

$$LS = (\lambda/22.13)^m \times (\sin\beta/0.0896)^n \times (1/C) \quad (6)$$

$$LS = (m+1) \times (\lambda/22.13)^m \times (\sin\beta/0.0896)^n \times (1/C) \quad (7)$$

IV. 결 론

현재 환경부의 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’에서는 범용토양유실공식에 의해서 토양유실량을 추정하도록 하고 있다. 이 공식은 토양유실량을 추정하기 위한 것으로 강우, 지표피복상태, 지형 등의 특성을 고려하는 인자들로부터 구성되어 있다. 본 연구에서는 이 인자 중에서 토양유실량을 추정하기 위한 대상 지점의 지형 조건을 반영하기 위한 인자 산정 방법에 대해 검토하였다. 유역에 대한 지형인자를 산정할 경우에는 수치표고모형의 격자가 단일 필지로 간주되는 가정을 내재하고 있다. 그러나 범용토양유실공식은 필지에서 측정된 토양유실량을 근거로 하여 개발된 경험식이므로 단일 필지에 대한 지형인자를 산정할 경우에는 필지에 대한 수치표고모형의 각 격자에 대한 지형인자 산정이 아니라, 지형인자를 산정하기 위한 대상 필지의 대표 경사장 및 경사도를 산정하여 지형인자 산정식에 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 더욱이 지형인자는 수치표고모형의 해상도에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치표고모형의 해상도를 달리 하면서, 환경부의 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’에서 제안하고 있는 지형인자 산정식을 포함하여 4개의 산정식과 대상 필지의 경사장 및 경사도 결정 방법 2가지의 조합에 의한 총 8개의

Table 5 LS factors with the adjusting factors

Sites	Stats.	$M_{3,Major,Cor}$	$M_{4,Major,Cor}$	Sites	Stats.	$M_{3,Major,Cor}$	$M_{4,Major,Cor}$
Site 1	Min.	3,841	5,377	Site 6	Min.	4,117	5,763
	Max.	4,773	6,683		Max.	5,106	7,148
	Mean	4,188	5,863		Mean	4,449	6,229
	S. D.	0,255	0,357		S. D.	0,305	0,427
	Ratio	1,243	1,243		Ratio	1,240	1,240
Site 2	Min.	0,711	0,996	Site 7	Min.	3,254	4,555
	Max.	0,867	1,213		Max.	4,013	5,618
	Mean	0,750	1,050		Mean	3,575	5,005
	S. D.	0,047	0,065		S. D.	0,237	0,332
	Ratio	1,219	1,219		Ratio	1,233	1,233
Site 3	Min.	0,475	0,665	Site 8	Min.	1,126	1,577
	Max.	0,606	0,848		Max.	1,221	1,710
	Mean	0,520	0,728		Mean	1,163	1,628
	S. D.	0,040	0,056		S. D.	0,025	0,035
	Ratio	1,275	1,275		Ratio	1,084	1,084
Site 4	Min.	0,540	0,756	Site 9	Min.	1,777	2,488
	Max.	0,609	0,853		Max.	1,827	2,558
	Mean	0,561	0,785		Mean	1,794	2,512
	S. D.	0,018	0,025		S. D.	0,018	0,025
	Ratio	1,128	1,128		Ratio	1,028	1,028
Site 5	Min.	0,261	0,365				
	Max.	0,301	0,421				
	Mean	0,275	0,385				
	S. D.	0,012	0,017				
	Ratio	1,154	1,154				

지형인자 산정 방법에 따른 지형인자에 대해 검토하였다.

본 연구의 결과로 미루어볼 때 다음과 같은 특이성이 발견되었다. 첫째, 유역에 대한 지형인자 산정 방법을 필지에 적용할 경우에는 각 격자에 의한 경사장이 정의되기 때문에 비교적 작게 산정이 되었다. 더욱이, 22.1 m의 길이를 가지는 필지의 전반적인 경사장을 근거로 개발된 경험식을 3 m 이내의 작은 격자를 가지는 고해상도 수치표고모형에 적용하는 것은 범용토양유실공식에 의한 토양유실량 예측 방법에 부합하지 않는 것으로 판단된다. 두 번째 특이성은 수치표고모형의 해상도와 산정된 지형인자에는 선형적인 증감 변화가 있다는 것이다. 이는 동일한 지형인자 산정식을 적용하더라도 입력자료의 해상도에 따라 예측된 토양유실량에 차이가 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

따라서 지형인자 산정에 대한 신뢰성을 높일 수 있는 검토가 필요하며 이는 지형인자 산정식에 대한 정확성 및 정밀성 측면에서 검토되어야 한다. 그러나 지형인자는 실측이 어렵기 때문에 지형인자 산정식에 대한 정확성 검토는 제한되기 때문에, 본 연구에서는 지형인자 산정에 대한 정밀성 증대 방안을 제시하였다. 그리고 이 지형인자 산정식에 대한 정밀성 향상은 대상 필지의 면적과 수치표고모형의 해상도에 대한 함수로 표현될 수 있도록 하였다. 따라서 본 연구에서 검토된 지형인자 산정식과 정밀성 증대를 위한 보정계수 산정식은 규모가 작은 단일 필지를 방문하여 필지에 대한 지형 정보를 수집하는 ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고시’의 현장조사뿐만 아니라, ArcGIS 등과 같은 지리정보시스템 소프트웨어 기반의 수문 모형에서 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제안된 지형인자 산정식은 면적이 작은 단일 필지에 대한 분석을 근거로 하고 있기 때문에 단일 필지에 대한 적용만이 타당할 것으로 보이며, 유역 단위 연구 등에서는 각 격자를 하나의 필지로 하는 가정이 내포되어 있는 격자 단위 지형인자 산정 방법이 범용토양유실공식의 개발 근거와 부합할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “표토보전관리기술개발사업”의 “영상자료 및 해석모형 기반의 표토환경 변화 예측 기술 개발(2019002820001-1485016179)”로 지원받은 과제임.

REFERENCES

1. Bosco, C., de Rigo, D., Dewitte, O., Poesen, J., and P. Panagos, 2015. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15: 225-245. doi:10.5194/nhess-15-225-2015.
2. Chaubey, I., A. S. Cotter, T. A. Costello, and T. S. Soerens, 2005. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes* 19(3): 621-628. doi: 10.1002/hyp.5607.
3. Fu, X., and L. Zhang, 2014. Impact of slope length on soil erosion on sloping farmland with crop in red soil hilly region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 30(5): 91-98. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.012.
4. Ghahramani, A., I. Yoshiharu, and S. M. Mudd, 2012. Field experiments constraining the probability distribution of particle travel distances during natural rainstorms on different slope gradients. *Earth Surface Process and Landforms* 37(5): 473-485. doi:10.1002/esp.2253.
5. Griffin, M. L., D. B. Beasley, J. J. Fletcher, and G. R. Foster, 1988. Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units. *Journal of Soil and Water Conservation* 43: 326-331.
6. Hrabalíková, M., and M. Janeček, 2017. Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall. *Soil and Water Research* 12: 69-77. doi:10.17221/222/2015-SWR.
7. Kim, J., Y. S. Park, N. W. Kim, I. M. Chung, W. S. Jang, J. H. Park, J. P. Moon, and K. J. Lim, 2008. Development and evaluation of SWAT topographic feature extraction error (STOPFEE) fix module from low resolution DEM. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(4): 488-498 (in Korean).
8. Kim, J., J. Yang, K. J. Lim, S. C. Kim, G. Lee, S. Hwang, N. Yu, and Y. S. Park, 2017. A study to define area of concern for potential soil loss in Geumgang watershed by KORSLE-based GIS model. *Journal of Soil Groundwater Environment* 22(6): 29-36. doi:10.7857/JSGE.2017.22.6.029 (in Korean).
9. Kim, J., Lim, K. J., and Y. S. Park, 2018. Evaluation of regression models of LOADEST and Eight-Parameter Model for nitrogen load estimations. *Water, Air, and Soil Pollution* 229: 179. doi:10.1007/s11270-018-3844-8.
10. Kongju National University, 2017. Development of Topsoil Erosion Model for Korea. Yesan-gun: Republic of Korea.
11. Koo, J. Y., Yoon, D. S., Lee, D. J., Han, J. H., Jung, Y., Yang, J. E., and K. J. Lim, 2016. Effect of DEM resolution

- in USLE LS factor. *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(1): 89-97. doi:1015681/KSWE.2016.32.1.89 (in Korean).
12. Lin, S., C. Jing, V. Chaplot, X. Yu, Z. Zhang, N. Moore, and J. Wu, 2010. Effect of DEM resolution on SWAT outputs of runoff, sediment and nutrients. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* 7(4): 4411-4435. doi: 10.5194/hessd-7-4411-2010.
 13. McCool, D. K., L. C. Brown, G. R. Foster, C. K. Mutchler, and L. D. Meyer, 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE* 30: 1387-1396. doi:10.13031/2013.30576.
 14. McCool, D. K., G. R. Foster, C. K. Mutchler, and L. D. Meyer, 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE* 32: 1571-1576. doi:10.13031/2013.31192.
 15. Ministry of Environment, 2012. A bulletin on the survey of the erosion of topsoil. Sejong-si: Ministry of Environment.
 16. Mitasova, H., J. Hofierka, M. Zlocha, and R. L. Iverson, 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science* 10(5): 629-641. doi:10.1080/026937996137918.
 17. Moore, I. D., and G. J. Burch, 1986. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1294-1298. doi:10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x.
 18. Moore, I. D., and J. P. Wilson, 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47: 423-428.
 19. Panagos, P., Borrelli, P., and K. Meusburger, 2015. A new European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences* 5: 117-126. doi:10.3390/geosciences5020117.
 20. Park, Y. S., and B. A. Engel, 2014. Use of pollutant load regression models with various sampling frequencies for annual load estimation. *Water* 6: 1685-1697. doi:10.3390/w6061685.
 21. Park, Y. S., and B. A. Engel, 2015. Analysis for regression model behavior by sampling strategy for annual pollutant load estimation. *Journal of Environmental Quality* 44(6): 1843-1851. doi:10.2134/jeq2015.03.0137.
 22. Wischmeier, W. H., and D. D. Smith, 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation Handbook No.282. Agricultural Research Service U. S. Department of Agriculture.
 23. Wischmeier, W. H., and D. D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning Handbook No.537. U. S. Department of Agriculture.
 24. Yu, N. Y., D. J. Lee, J. H. Han, K. J. Lim, J. Kim, K. H. Kim, S. Kim, E. S. Kim, and Y. S. Park, 2017a. Development of ArcGIS-based model to estimate monthly potential soil loss. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(1): 21-30. doi:10.5389/KSAE.2017.59.1.021 (in Korean).
 25. Yu, N. Y., M. H. Shin, J. Kim, and Y. S. Park, 2017b. Application of ArcGIS-based model developed to estimate monthly potential soil loss. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(5): 109-126. doi:10.5389/KSAE.2017.59.5.109 (in Korean).