

USLE 계열모형의 매개변수 산정에 관한 연구

A Study on the Parameter Assessment of USLE Series

○임재영* · 서규우** · 송일준***

1. 서론

전 국토에 걸친 개발사업으로 인해 주변환경이 급격하게 변화하는 가운데 과거와 동일한 강도의 강우와 같은 자연현상에 대해서도 토사침식이 증가하며 하천의 통수단면의 감소를 유발하고 토사가 하상에 퇴적되어 지형학적인 변화를 초래하게 된다. 토양침식량의 산정은 유역의 하류지역에 미치는 직접, 간접적인 피해를 정량적으로 산정함으로써 그에 대한 대비책을 수립하는데 있어 기준을 제시해 준다.

토양침식량의 산정기법들은 이미 몇 가지 국내에 소개되고 있는데 그 중 대표적으로 가장 많이 사용되고 있는 경험적 모형인 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation)계열모형의 적용에 있어서는 각 지역적인 특성들이 고려되어 있기 때문에 적용에 있어서 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서는 이러한 USLE 계열모형의 적용에 있어서 각 매개변수의 정확한 산정을 위해 각 매개변수의 특성을 분석하고 우리 나라의 개발양상에 적합한 계수의 결정방법의 제안에 그 목적이 있다.

2. USLE 모형의 개요

강우에 의하여 발생하는 토양침식에 대해서 토지이용이 미치는 영향을 예측할 목적으로 개발된 USLE(Universal Soil Loss Equation)모형은 Wischmeier와 Smith(1965, 1978)에 의하여 제안된 이후 설계목적으로 널리 사용되고 있다. 이 모형은 강우에너지, 강우강도, 토양의 침식성, 사면길이, 사면경사도, 토양의 피복상태 및 토양보존대책의 함수로 토양침식을 설명하고 있다. 최초 개발당시에 이 모형은 연평균 토양침식 예측을 목적으로 한 것이었으나, 월 침식 또는 단일 호우에 의한 침식을 추정하기 위하여 그 동안 많은 수정이 이루어졌다. 따라서 예측에서 발생할 수 있는 오차는 장기간 예측보다 단기간 예측에서 커질 수 있다. 이 모형은 경사진 소유역의 토양침식량 추정에 합리적인 방법으로 알려져 있으며, 다음 식 (1)과 같이 매우 간단한 형태로 되어있다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

여기서 A는 단위면적당 평균 토양침식량 (tons/acre/year)으로 그 단위는 R과 K에 적용된 단위에 좌우된다. R은 강우에너지계수 (Rainfall Energy Factor), K는 토양침식계수 (Soil Erodibility Factor), L은 사면길이계수 (Slope Length Factor), S는 사면경사도계수 (Slope Steepness Factor), C는 피복계수 (Cover and Management Factor), P는 토양 보전대책계수 (Supporting Conservation Practice Factor) 이다. 이때 L, S, C, P는 무차원값이다.

* 동의대학교 산업기술개발연구소 전임연구원

** 동의대학교 토목도시공학부 토목공학전공 조교수

*** 동의대학교 토목도시공학부 토목공학전공 교수

3. USLE 계열모형의 매개변수산정을 위한 분석

3.1 강우에너지 계수 R값

건설현장에서와 같은 제한된 지역에 대해서는 TRB에서 추천한 방법을 사용하여 실무에 응용하고 있다. TRB방법은 주로 공사기간이 1년 이하인 경우에 사용하게 되는데 공사기간 중에 발생하는 토사침식방지대책이 1년보다 짧고 공사기간중에 발생하는 토사는 즉시 준설하기 때문에 연평균 R값을 직접 적용하는 것이 무리이기 때문이다. 그래서 단일호우에 의한 설계강우를 도입할 때에는 각 지역에 대하여 확률강우강도식을 이용하여야 한다. 하지만 이 경우 국내에는 아직 뚜렷한 기준이 제시되어 있지 않고, 강우강도식의 선택에 따라 강우강도가 달라지고 이로 인하여 강우의 충격에너지는 상당량의 차이를 보여주게 된다. 다음의 표 1은 부산지역의 강우강도식들이다.

표 1. 부산지역의 대표적인 확률강우강도식

재현 기간	발표된 연도, 발표자 및 강우강도식		
	이 원환	대표확률강우강도식	양산·물금 재해영향평가서식
	1980년	1993년	1997년
5년	$\frac{455}{\sqrt{t+1.11}}$	$\frac{603.75 + 624.90 \log_{10} T}{t^{0.643} + 5.197}$	$\frac{578.591}{t^{0.564088}}$
10년	$\frac{550}{\sqrt{t+1.28}}$	$\frac{603.75 + 624.90 \log_{10} T}{t^{0.635} + 5.542}$	$\frac{680.306}{t^{0.558471}}$
30년	$\frac{693}{\sqrt{t+1.46}}$	$\frac{603.75 + 624.90 \log_{10} T}{t^{0.622} + 6.204}$	$\frac{791.735}{t^{0.543474}}$
비고		T : 재현기간	

같은 지역에 대해 서로 다른 확률강우강도식을 사용했을 때에 강우에너지계수의 변화를 살펴보면 TRB method를 사용했을 때 다음 그림 1과 같이 차이가 난다. 그림 1과 같이 각 빈도에 대해 최소값과 최대값의 비율이 최소 71.01% ~ 최대 89.03%의 차이를 보여주고 있다. 그렇기 때문에 이 확률강우강도식의 선택에서도 전체 토사유출량의 최소 70%, 최대 90%의 변동이 불가피하다. 이수치는 지역적인 것으로 그 이상일 수도 그 이하일 수도 있지만 전체적으로는 90%전후의 대단히 큰 값이라 하겠다. 따라서 확률강우강도식의 선택은 지역의 강우특성을 반영한 가급적 최근의 강우강도식을 사용하여야 한다. 그러나 Gunn과 Kinzer(1949)의 분석을 기초로 Wischmeier와 Smith(1958)에 의하면, 일반적으로 적용되고 있는 식이 시간당 3inch이하의 경우에 적용되고 3inch이상일 경우에는 강우에너지계수가 1074로 고정되었음을 상기할 필요가 있다. 즉, 3inch이하의 강우는 식에서와 같이 log분포로 되어 있지만 3inch이상의 강우에서는 더 이상 강우에너지가 증가하지 않는다는 것을 의미한다. 이를 나타내면 다음 그림 2와 같이 된다.

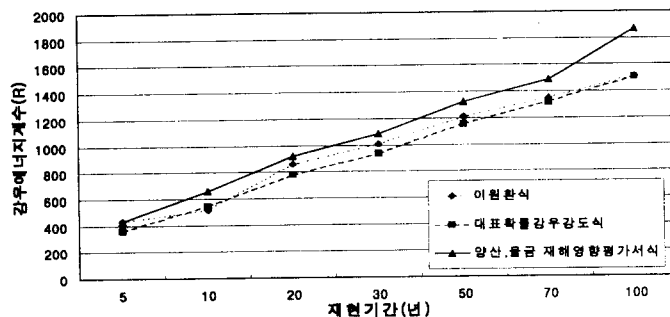


그림 1. 확률강우강도식별 강우에너지계수

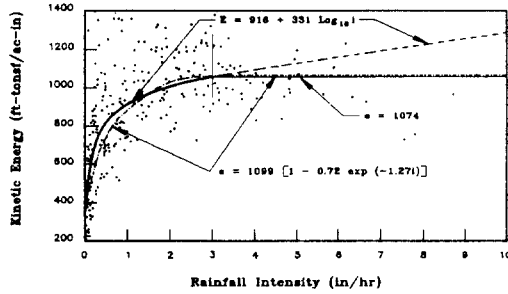


그림 2. 강우강도와 강우에너지와의 관계 (Hirschi 등, 1983)

그림 2에서 보는 바와 같이 강우에너지는 3inch/hr를 기준으로 더 이상의 증가를 하지 않는다. 그렇기 때문에 빈도개념을 도입하였던 TRB Method는 사실상 3inch/hr이상의 강우강도를 가지는 경우에는 사용될 수 없다는 결론에 도달하게 된다. SI unit로 변환하면 대략 76mm/hr의 강우강도를 나타내게 되는데 이는 확률강우강도식 마다 차이는 있지만 대략 10년 이내의 값을 나타내기 때문에 사실상 빈도개념을 이용한 설계강우의 도입은 무리가 따른다.

3.2 사면길이-사면경사계수 LS값

3.2.1 사면길이-사면경사계수 LS값의 산정시 등경사길이의 크기

사면길이-사면경사계수 LS값은 유역의 지형적인 계수값이므로 상대적으로 다른 매개변수에 비하여 변화가 적은 편이다. 하지만 같은 경사길이에 대해서도 등경사길이를 어떻게 분할하는가에 따라 그 값은 크게 차이가 나게 된다. 다음의 경우는 경사길이를 어떻게 분할하는가에 따라 LS값이 어떻게 다르게 나타나는가를 보여준다. 경사길이를 L=100m로 정의하여 하나의 일괄변수(Lumped Parameter)로 보고 계산한 것과 100m의 경사길이를 10m의 소구역으로 분할하여 합산한 경우의 값 차이를 살펴보았다. 경사는 45%로 하여 일단 등경사길이의 크기에 따른 LS값을 분석하기로 한다. LS값을 산정하는 Wischmeier와 Smith(1978)의 공식을 SI 단위로 바꾸어 나타내면 다음 식 (2)와 같이 된다.

$$LS = \left(\frac{l}{22.1} \right)^m \left(\frac{65.4S^2}{S^2 + 10,000} + \frac{4.56S}{\sqrt{S^2 + 10,000}} + 0.065 \right) \quad (2)$$

여기서, l 은 경사길이(m), S 는 경사도(%)이고, m 은 경사에 따라 변하는 지수이다. m 은 경사에 대한 세류의 민감도이기 때문에 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

먼저 경사길이는 10m, 경사가 45%이기 때문에, $m = \frac{\beta}{1+\beta}$ 에서,

$$\beta = \frac{11.16 \sin \theta}{3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56} = \frac{11.16 \times \sin 24.55}{3.0(\sin 24.55)^{0.8} + 0.56} = 2.225 \text{ 이다. 토양이 세류의 침식에 민감한}$$

토양으로 가정하면, $\beta = \beta \times 2 = 2.225 \times 2 = 4.509$ 가 된다. 그러므로 m 은,

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{4.509}{1+4.509} = 0.818 \text{ 이 되고 LS값은 다음과 같이 산정된다.}$$

$$LS = \left(\frac{100}{22.1} \right)^{0.818} \left(\frac{65.4 \times 45^2}{45^2 + 10,000} + \frac{4.56 \times 45}{\sqrt{45^2 + 10,000}} + 0.065 \right) = 37.66 \text{ 이다.}$$

반면에 100m를 10개의 10m짜리 소구간으로 분할하면 LS값은 5.72가 된다.

개념상으로는 100m를 10등분하여 10m간격으로 토양침식량을 산정하면 LS값 또한 100m의 경사

길이에 대한 값과 10m의 값들을 합한 값과 같아져야 하지만 위에서 본 바와 같이 그렇지 않게 된다.

3.2.2 등경사길이 대 경사도의 변화에 따른 LS값의 민감도

같은 등경사길이에 대해서 경사가 변할수록 LS값의 변화를 살펴보기 위해서 다음과 같은 하나의 단일사면을 가정하였다. 경사길이 100m에 대해 경사도가 0%에서 100%까지 경사도를 변화시켰을 때 경사도에 대한 LS값의 변화민감도를 분석하여 보았다. 50%이하와 이상으로 경사도를 따로 분리하여 나타내 보면 다음 그림 3, 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 3에서 낮은 경사도에 대한 L값의 민감도가 0.02정도가 되었지만 그림 4과 같이 높은 경사도에서는 L값의 민감도가 0.002정도로 상대적으로 높은 경사도가 낮은 경사도에 비해서 경사 변화에 대한 민감도가 낮게 나타났다. 실제로 그림 3에서는 경사도가 극히 낮은 구간인 0~5% 사이 구간은 제외시켰다. 이는 상대적으로 평탄한 지형에서는 경사의 민감도가 상당히 크게 되므로 평탄지에서의 경사에 대해서는 구역의 평균경사값을 사용하는 것보다는 복합경사면으로 계산하여야 함을 알 수 있다. 평균경사값을 사용하게 되면 0~5% 구간에서는 100%이상의 값의 차이를 보이게 된다. 그렇기 때문에 평균경사값을 쓰는 것은 바람직하지 않다. 이는 높은 경사도에서는 상대적으로 낮은 경사도에서보다는 L값이 크게 변화하지만 낮은 경사도에서는 상대적으로 높은 경사도에 비해서 L값이 작게 변화한다.

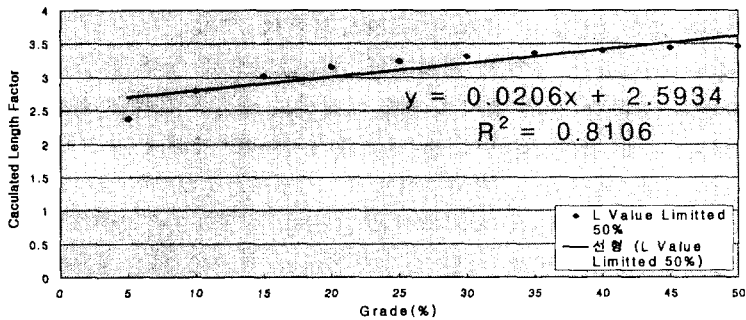


그림 3 경사길이에 대한 경사도변화에 따른 경사길이계수의 민감도 (50%이하)

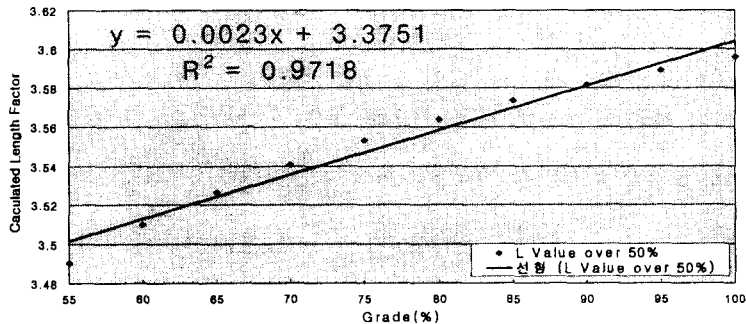


그림 4. 경사길이에 대한 경사도변화에 따른 경사길이계수의 민감도 (50%이상)

3.2.3 복합사면에 대한 경사의 민감도

LS값을 산정할 때에 등경사면으로 구분하는 방법과 같은 지표면상태를 가진 면적으로 구분하는 방법 중 같은 지표면상태를 가진 경우, 지표면상태는 같지만 경사와 경사길이는 다르다. 그렇기 때문에 이러한 경우에는 복합사면으로 인식하여 복합사면에 대한 경사보정계수를 사용하여야 한다.

또한 지형의 전반적인 기복(起伏)에 따라 토양침식량의 산정은 달라진다. 일반적으로는 하향경사가 점차 낮아질 경우(오목한 지형)에는 토양침식량이 감소하고 하향경사가 점차 커질 경우(볼록한 지형)에는 침식량이 증가한다.

1) 총경사 길이가 100m, 등경사간격 50m인 볼록한 지형일 경우(단, 경사는 50m간격으로 10%에서 5%로 5%씩 감소하는 경우)

먼저 총경사길이에 대해 평균경사를 사용한 경우를 생각해 보면

$$S(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n S_n}{n} = \frac{5+10}{2} = 7.5\%, \quad \text{LS값을 } 7.5\% \text{에 대해 산정하여 보면, } m = \frac{\beta}{1+\beta} \text{ 에서}$$

$\beta = \frac{11.16 \sin \theta}{3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56} = \frac{11.16 \times \sin 4.289}{3.0(\sin 4.289)^{0.8} + 0.56} = 0.891$ 이다. 토양이 세류의 침식에 민감한 토양으로 가정하면, $\beta = \beta \times 2 = 0.891 \times 2 = 1.782$ 가 된다.

그러므로 m 은, $m = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{1.782}{1+1.782} = 0.641$ 이 되고 LS값은 다음과 같이 산정된다.

$$LS = \left(\frac{10}{22.1}\right)^{0.641} \left(\frac{65.4 \times 5^2}{5^2 + 10,000} + \frac{4.56 \times 5}{\sqrt{5^2 + 10,000}} + 0.065\right) = 0.72 \text{ 이다.}$$

반면에 평균경사를 사용하지 않은 경우에는 각각의 LS값을 구하여 복합사면경사조정계수를 곱하여 사용한다.

$$SAF_i = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{n^m}$$

여기서, i 는 i 번째 경사이고 i 가 증가할수록 하류측이다. n 은 경사면의 분할된 개수이다.

먼저 50m, 5%의 경사에 대한 β 값은 세류의 침식에 민감하다고 가정하면 위의 과정과 같이 계산하여 1.338이 된다. 그러므로 경사조정계수는 다음과 같이 된다.

$$SAF_1 = \frac{1^{0.572+1} - (1-1)^{0.572+1}}{2^{0.572}} = 0.672 \text{ 이다. } 50\text{m, } 10\% \text{에 대한 경사조정계수도 위의 방법과 같이}$$

계산하면, $SAF_2 = \frac{2^{0.682+1} - (2-1)^{0.682+1}}{2^{0.682}} = 1.377$ 가 된다.

그렇게 해서 복합사면(볼록한 지형)에 대한 LS값은 다음과 같은 표 2로 정리할 수 있다.

표 2. 복합사면(볼록한 지형)에 대한 LS값의 산정과정

Slope segment	Slope Percentage	m	θ (°)	Uniform Slope LS	SAF	Segment LS (Column5×Column6)
1	5	0.572	5.71	0.36	0.672	0.242
2	10	0.682	8.53	1.24	1.377	1.707
						$\Sigma=1.949$

따라서 $LS = \frac{\Sigma}{n} = \frac{1.949}{2} = 0.975$ 이다.

2) 총경사 길이가 100m, 등경사간격 50m인 오목한 지형일 경우(경사는 50m간격으로 5%씩 증가)

1)의 경우와 마찬가지로 두 경사에 대한 평균경사값은 7.5%이다. 이에 대한 LS값은 0.72로 구해졌다. 오목한 지형이므로 $i=1$ 이 상류경사인 10%가 된다. $S = 10\%$ 일 때 m 은 0.682이다. 그러므로 경사조정계수는 다음과 같이 된다.

$$SAF_1 = \frac{1^{0.682+1} - (1-1)^{0.682+1}}{2^{0.682}} = 0.623 \text{ 이다.}$$

두 번째로 S = 5% 인 사면의 경사보정계수는 다음과 같다.

$$SAF_2 = \frac{2^{0.572+1} - (2-1)^{0.572+1}}{2^{0.572}} = 1.327 \text{ 이 된다.}$$

오목한 지형에 대한 LS값은 다음과 같은 표 3으로 정리할 수 있다,

표 3. 복합사면(오목한 지형)에 대한 LS값

Slope segment	Slope Percentage	m	θ (°)	Uniform Slope LS	SAF	Segment LS (Col.5×Col.6)
1	10	0.682	8.53	1.24	0.623	0.773
2	5	0.572	5.71	0.36	1.327	0.478
						$\Sigma = 1.251$

따라서 $LS = \frac{\Sigma}{n} = \frac{1.251}{2} = 0.626$ 이 된다.

위에서 분석한 3가지 경우에 대한 LS값을 정리하면 표 4와 같다.

표 4. 3가지 경우에 대한 LS값 산정결과

	평균경사값	불룩한 지형	오목한 지형
LS값	0.72	0.975	0.626

4. 결론

합리적인 토양침식량 산정을 위한 USLE 계열모형의 매개변수 산정에 대해 각 매개변수별로 특성을 정리하면 다음과 같다. 빈도개념을 도입한 TRB method로 구한 단일설계강우에 의한 강우침식에너지계수를 비교한 결과, 연평균 강우침식에너지계수는 대략 7~8년 빈도로 분석되었으며 단일설계강우에 대한 강우침식에너지계수는 강우에너지가 76.2 mm/hr를 전후로 증가하지 않기 때문에 적용이 곤란하다. 사면경사길이계수 LS의 경우 같은 경사길이를 놓고 등경사길이를 짧게 여러 번 분할한 경우와 등경사길이를 일괄적으로 적용한 경우 그 값이 큰 차이를 보여주었다. 등경사길이를 놓고 경사를 변화시켰을 경우 경사가 급한 경우(50~100%) 경사에 대한 민감도는 낮은 경사도(0~50%)보다는 작은 것으로 분석되었다. 지형의 형태(凹凸)에 따라 침식량이 달라지기 때문에 평균 경사를 사용해서 LS값을 구하는 것은 곤란하며 복합경사계수를 사용해야함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 서규우, 송일준, 임재영 (1998). "개발에 따른 합리적인 토양침식량 산정방안 조사연구." '98년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 341-346.
2. 정필균외 4인(1983). "토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석." 토양비료학회지, Vol.16, No.2.
3. 한국수자원학회 (1998). "개발사업으로 인한 토양손실량 예측 및 침사지 설계." 제6회 수공학위탁
4. Goldman, S. J., Erosion and Sediment Control Handbook, McGraw-Hill Book Co., 1980.
5. Hann, C. T., Barfield, B. J., Hayes, J. C. (1994). "Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchment." Academic press, pp. 238-310.
6. Morgan, R. P. C. (1979). "Soil Erosion", Longman.
7. TRB (1980). "Design of sedimentation basins," National cooperative highway program synthesis of highway practice 70, Transportation Research Board.