

개정범용토양손실공식(RUSLE)의 토양침식인자 추정에 관한 연구

남정만·김한종·김준호*

제주대학교 해양과학부, *제주특별자치도청, **제주대학교 대학원

A Study on the Estimation of Soil Erodibility Factor in Revised Universal Soil Loss Equation

Jung-Man NAM, Han-Jong KIM* and Jun-Ho KIM**

School of Ocean Science, Cheju National University, Jeju Special Self-Governing Province 690-756, Korea
*Jeju Special Self-Governing Province Office, Jeju Special Self-Governing Province 690-700, Korea
**Graduate School, Cheju National University, Jeju Special Self-Governing Province 690-756, Korea

This study presents the range of sediment yield and the range of the soil erodibility factor when sediment yield is estimated for Jeju area by using annual mean sediment yield of normal rainfall year and sediment yield due to a single heavy rainfall with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model. The ranges of specific factors considering the characteristics of the site were presented after the equations for sediment yield estimation were reviewed and the field measurements of the area in study were analyzed.

Key words: sediment yield, soil erodibility factor, universal soil loss equation

서론

우리나라의 전 국토에 걸친 개발사업은 주변 여건의 급격한 변화를 초래하여 과거와 동일한 상수와 같은 지인인상에도 불구하고 더욱 심화된 침식이나 퇴적을 유발시킨다. 이와 같은 토사유출의 급격한 변화는 지형학적 변화를 초래하게 되어 토사유출 증대와 하천의 통수단면 감소를 유발하여 홍수피해를 초래하며, 토양수질과 주변식생의 파괴 등 인위적 재해도 유발하게 된다. 이와 같이 대부분의 토사유출은 자연상태에 있는 피복식생을 제거한 후 개발이 이루어지

는 과정에서 크게 발생되며, 개발지역에서 침식된 토사량은 수질악화에 의한 환경영향 피해를 넘은 토사매물이나 하상변동 등에 의한 물리적인 피해를 줄 수 있다.

이러한 현실에 비추어 볼 때 우리나라 실정에 맞는 범용토양손실공식에 대한 각 특성인자 값을 토사유출량 관측자료가 있는 지역을 대상으로 선정하여 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation)과 비교 분석할 필요가 있을 것으로 판단되며 이를 통하여 특성인자에 대한 적정한 값을 검토하는 것이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 RUSLE 모형을 이용한 제주 지역에 대하여 실제 6~8월의 3개월에 걸쳐 대상유역에 시험장치를 설치하여 강우량, 유출량, 토사유출량을 조사하였다. 현장계측을 통해 얻은 실측자료와 모의결과의 비교를 통하여 이 모형의 적용을 검토해 보았다.

또한 RUSLE 공식의 각 특성인자에 대한 내용을 자세히 검토하여 우리나라에서 적용한 사례를 조사 분석하여 이 공식이 가지고 있는 제한사항 등이 실제 적용시 범위 한도 내에서 제대로 지켜지고 있는지, 또한 미국의 실정에 맞추어 제시된 특성인자가 대상유역에 그대로 적용시 문제점은 없는지 등을 파악하여 본다.

RUSLE 모형을 이용한 토사유출량 산정

연구지역 위치 및 구역선정

본 연구지역은 행정구역상 제주도 남제주군 동부지역에 위치하고 있으며 표고는 약 250~300m 정도에 위치하는 중산간지대에 해당되고 있다.

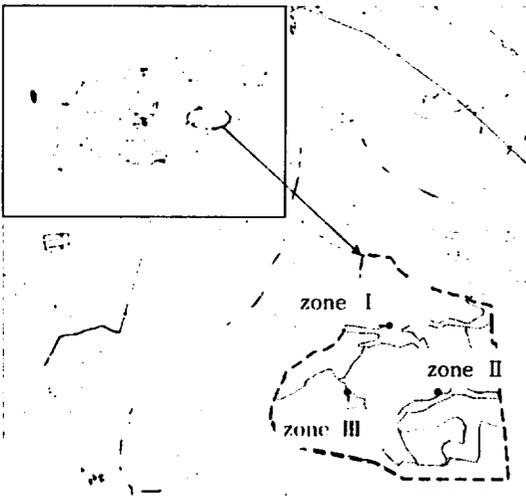


Fig. 1. Investigation region and selection of the zone

본 연구에서는 토사유출량 산정기법에 대한

검증을 위하여 시험대상유역을 실제로 개발이 이루어지는 유역에 설정하여 Fig. 1과 같이 3 구역을 선정하였다.

토사유출량 산정

이 모형은 강우에너지, 강우강도, 토양의 침식성, 사면길이, 사면경사도, 토양의 피복상태 및 토양보존대책의 함수로 토양침식을 나타내며 경사진 소유역의 침식량 추정에 합리적인 방법으로 알려져 있다. 다음과 같은 식으로 표시된다.

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

여기서, A : 강우침식도 R 의 해당기간 중 단위면적에서 침식되어 손실되는 토사량

R : 강우침식도인자

K : 토양침식성인자

LS : 무차원 지형인자

(L = 침식사면의 길이인자,

S = 침식사면의 경사인자)

C : 작물형태, 피복상태 등 경작종류와 형태에 따른 경작인자

P : 등고선경작 등 토양보존대책인자

연구기간 중 토사유출에 영향을 주는 호우기간에 대하여 R 값 산정은 다음과 같다.

$$R = \frac{\Sigma(E \cdot I_{30})}{100} \quad (2)$$

여기서, E : 총 강우에너지

I_{30} : 특정호우에 대한 최대 30분 강우강도

Table 1. Calculated table of R value

Time period	Total rainfall (mm)	effective rainfall (mm)	Time (hr)	Average rainfall (mm)	Maximum 30 min intensity (mm)	u (MJ/ha/mm)	$\Sigma E-e \cdot P$	$\Sigma (E \cdot u)$	R (10^7 J/ha · mm/hr)
6/1-2	27.0	15.7	9	3.0	19.0	0.161	2.52	47.82	5
7/13-14	68.0	54.2	15	4.5	29.8	0.176	9.56	284.91	28
7/28-31	329.0	313.5	19	17.3	97.5	0.227	71.20	6,943.15	694
8/7	70.0	56.2	11	6.4	32.5	0.189	10.63	345.44	35
8/19-24	178.0	162.9	42	4.2	58.2	0.174	28.31	1648.49	165

이러한 공식을 이용하여 3개월에 걸쳐서 조사한 강우자료에 대한 R값은 $927 \cdot 10^7$ Joule/ha · mm/hr이다.

Table 2. Comparison with R value

	Average annual rainfall	Single storm	Test period (6-8 months)
10^7 J/ha · mm/hr	636	2,215	927

Table 3. Sediment yield

Zone	Time period	Area (km ²)	R (10^7 J/ha · mm/hr)	K (ton/h a/1)	L.S	C	P	Sediment yield (ton)
I	6/1-2	0.038	5	0.25	1.20	1.00	0.50	2.9
	7/13-14		28					16.0
	7/28-31		694					395.6
	8/7		35					20.0
	8/19-24		165					94.1
II	6/1-2	0.275	5	0.21	1.42	0.99	0.50	20.3
	7/13-14		28					113.7
	7/28-31		694					2,817.1
	8/7		35					142.1
	8/19-24		165					669.8
III	6/1-2	0.146	5	0.22	1.67	0.82	0.50	11.0
	7/13-14		28					61.6
	7/28-31		694					1,526.3
	8/7		35					77.0
	8/19-24		165					362.9

현장강우에 대한 토사량 측정

측정방법

현장계측에서 조사하여야 할 항목은 강우량, 유출량, 토사유출량이다. 여기서 강우량은 현장에 제일 가까운 관측소에서 측정한 자료를 얻어 이용하였고 나머지 항목에 대하여 I 구역에 간이저류조를 두어 직접 측정을 하였다.

저류조는 폭이 3m, 길이 1.8m, 깊이가 1.7m

의 콘크리트로 만들었고 저류조의 월류부는 삼각형 위로 하여 수위를 측정할 수 있도록 수위계를 설치하였다. 이 수위계에서 측정한 값으로 삼각위의 유량공식에 의해 유출량을 구한다.

그리고 토사유출량은 저류조에 쌓인 토사를 강우 전·후의 레벨을 기록하여 체적을 구하고 다시 단위중량을 곱하여 무게를 산출하였다. 그런 후, 다음 시험을 위하여 흙을 걷어내었다. 그리고 토사유출량에서 침전되지 않고 그대로 불과 함께 흘러갔을지도 모를 미세입자에 대한

여 샘플을 떠서 부유사량을 추정하였다.

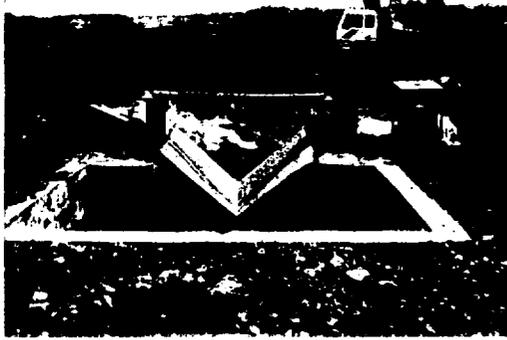


Fig. 2. Setup of water level gauge

수위를 측정함으로써 얻어지게 된다. 수위계는 20mm/hr 속도로 측정하였으며 강우가 발생하는 날에 대하여 24시간 가동하였다. 그 깊과 아래위 깊은 크레프를 얻었으며 다음의 식(4)으로부터 유량을 구하였다.

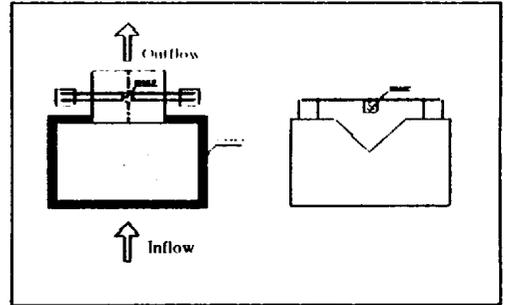


Fig. 3. Temporary water storage tank diagram

유출량

유출량은 저류조의 월류부에 삼각형 위어의

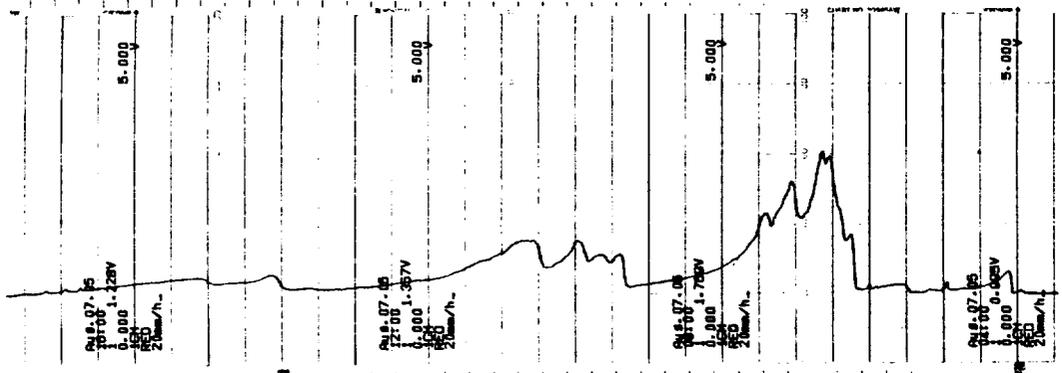


Fig. 4. Water level on August 7th

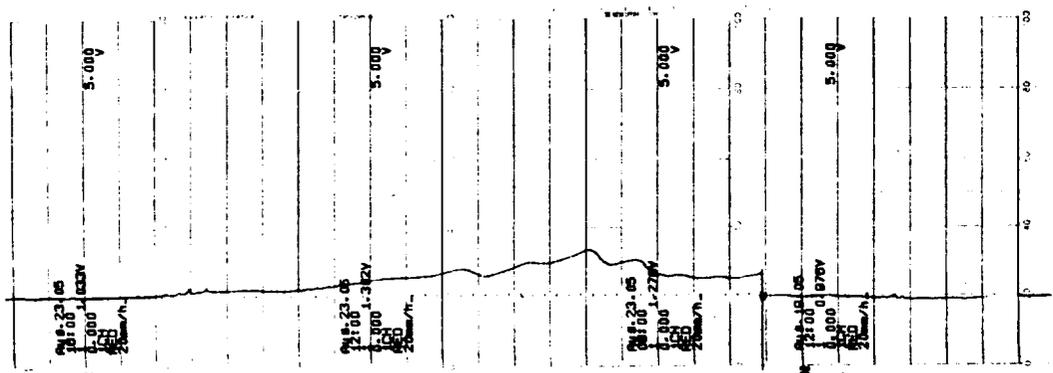


Fig. 5. Water level on August 23th

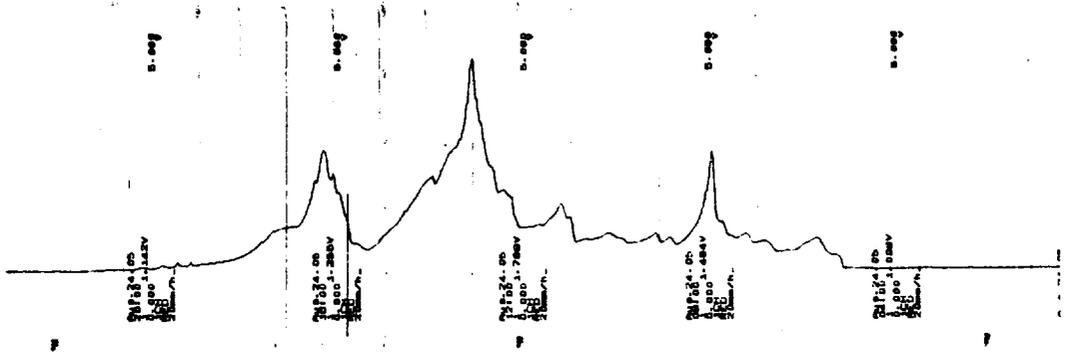


Fig. 6. Water level on August 24th

유량 산정 일반식

$$Q = \frac{8}{15} C \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh}^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

Thomson 식 : $C=0.593$, $\theta=90^\circ$ 일 때

$$Q = 1.4h^{\frac{5}{2}} \quad (4)$$

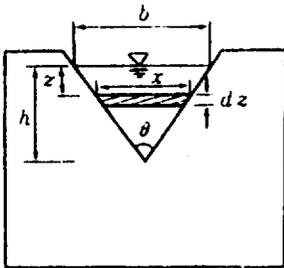


Fig. 7. Triangular weir

뚝을 박아 측정하였다. 그러나 7월말의 집중호우로 말뚝의 일부가 잠기고 뽑히는 일이 있어서 그 뒤로는 레벨측량을 하였다.

그 결과 다음과 같이 측정되었으며 Table 5에 각 구역별, 날짜별로 정리하였다.



Fig. 8. Photo of soil loss after rainfall

Table 4. Measured streamflow

Test result	
08-07	298.69 m ³
08-23	45.05 m ³
08-24	1,143.41 m ³

토사유출량

토사유출량을 측정하기 위해서 I구역은 침진조를 두어 직접 측정을 하였고 II·III구역은 말



Fig. 9. Measurement of sediment yield in zone I

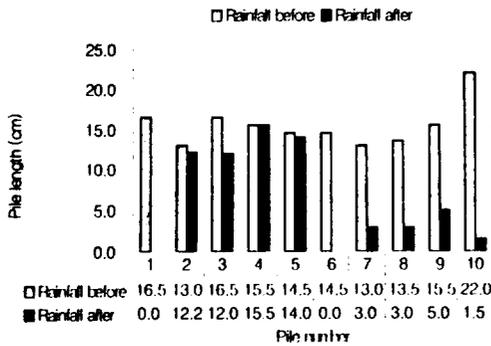


Fig. 10. Pile lengths in zone II-III

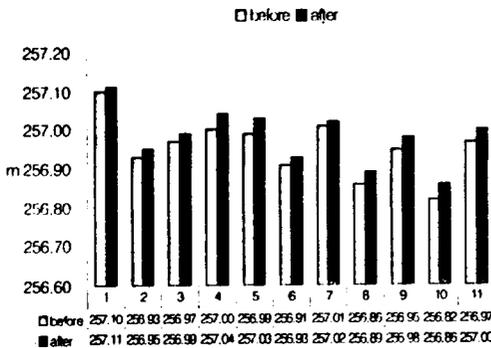


Fig. 11. Heights in zone II

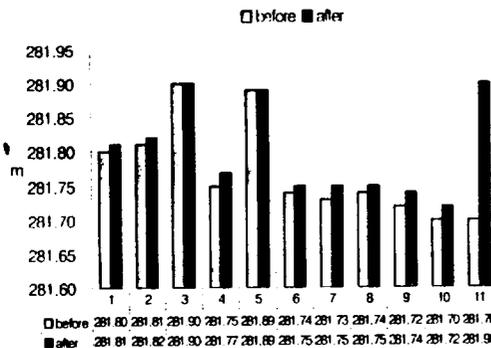


Fig. 12. Heights in zone III

그리고 I구역에서 토사량이 침전되지 않고 그대로 물과 함께 흘러간 미세입자에 대하여 샘플을 떠서 부유사량을 추정하였다. 그 결과 아래의 Table 6과 같다.

Table 5. Measured sediment yield for each zone

Location	I zone		II zone		III zone	
	08-08	08-25	08-01	08-26	08-01	08-26
Date	08-08	08-25	08-01	08-26	08-01	08-26
Area (m ²)	5.40		6.135.30		3.128.84	
Average height (m)	0.67	0.83	0.045	0.026	0.132	0.029
Volume (m ³)	3.62	4.48	276.09	159.52	413.01	90.74
Unit weight (t/m ³)	1.42		1.40		1.39	
Sediment yield (ton)	5.14	6.36	386.52	223.32	574.08	126.12
Suspended load (ton)	1.65	18.39	-	-	-	-
Total (ton)	6.79	24.75	386.52	223.32	574.08	126.12

Table 6. Estimation for suspended sediment load in zone I

Date	Outflow (m ³)	Suspended sediment load (t/m ³)	Suspended sediment load (ton)
08-07	298.69	0.00553	1.65
08-23	45.05	1,188.46	0.01548
08-24	1,143.41		

이론식과 측정치의 비교

위에서 산정한 매개변수를 RUSLE의 토사 유출량 산출식에 대입하여 본 시험대상지를 각 호우별로 토사량을 산출하였다. 그리고 현장에서 직접 측정된 토사량과 비교하였다. 비교 결과 다음과 같다.

Table 7에서 보는 바와 같이 I구역은 8월에 31.54톤, II구역은 7월 386.52톤, 8월 223.32톤, III구역은 7월 574.08톤, 8월 126.12톤의 토사유출량이 발생하였다. 토사유출산정공식에 의해 계산되어진 이론치와 비교해 본 결과 II구역의 7월은 약 7.6배 정도이고 나머지는 2.77~3.80배 정도의 산출량이 발생하였다.

Table 7. Comparison of sediment yield

Zone	Time period	Sediment yield (ton)		Comparison	
		calculation	Actual measurement		
I	6/1-2	2.9	-	-	
	7/13-14	16.0	-	-	
	7/28-31	395.6	-	-	
	8/7	20.0	6.79	2.94	
	8/19-24	94.1	24.75	3.80	
II	6/1-2	20.3	-	-	
	7/13-14	113.7	2,930.8	386.52	7.58
	7/28-31	2,817.1			
	8/7	142.1	811.8	223.32	3.64
	8/19-24	669.8			
III	6/1-2	11.0	-	-	
	7/13-14	61.6	1,587.9	574.08	2.77
	7/28-31	1,526.3			
	8/7	77.0	439.9	126.12	3.49
	8/19-24	362.9			

토양침식인자 K에 대한 고찰

입경분포에 따른 K값 변화

K값은 Wischmeier의 K값 추정도표(1971)를 이용하거나 Wischmeier와 Smith(1965)/Erickson(1977)의 삼각형 도표 및 보정표 등을 이용하여 추정할 수 있다.

Wischmeier의 K값 추정도표를 이용하여 K값을 얻기 위해서는 입경분포(%), 유기물함량(%), 토양구조, 투수도가 필요로 한다.

먼저, 입경분포는 토립자의 종류별로 다음과 같이 자갈(>2mm), 모래(0.1~2mm), 극세사(0.05~0.1mm), 실트(0.002~0.05mm), 점토(<0.002mm)로 나누게 된다.

Table 8. Sediment size of soil grain

Classification	Particle size range (mm)
Gravel	>2
Sand	0.1~2
Very fine sand	0.05~0.1
Silt	0.002~0.05
Clay	<0.002

그러나 Wischmeier의 삼각도표와 K값 추정식에서는 자갈(>2mm)을 제외시키고 있다. 그런데 실제 모래(직경 2mm까지) 이상의 입자들이 차지하는 비율을 무시하지 못하기 때문에 자갈도 모두 모래로 간주하여 구성비를 산정할 수 있을 것이다.

다음의 그래프(Fig. 13, 14, 15)는 각 종류별 구성비를 조금씩 변화를 줬을 때의 K값 변화를 보여주고 있다.

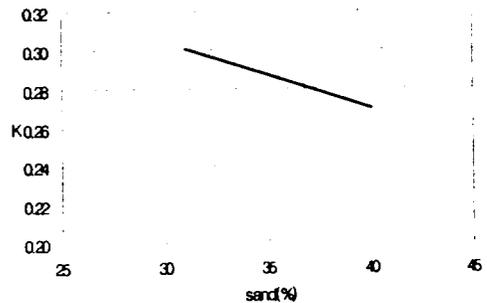


Fig. 13. K value versus sand content

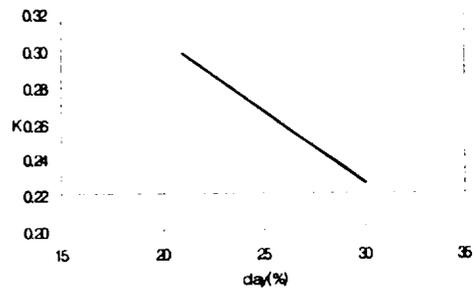


Fig. 14. K value versus clay content

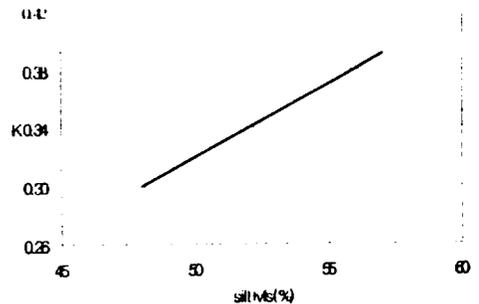


Fig. 15. K value versus silt + vfs content

세 구성비의 비율을 변화시킨 결과 모래와 점토는 비율을 증가시켰을 때는 K값이 감소하는 모습을 보였는데 반해 실트와 극세사의 비율을 증가시켰더니 K값은 증가하였다. 변화의 폭을 보면 모래보다 점토가 두 배 정도의 감소폭을 보였고 실트와 극세사의 증가폭은 점토의 감소폭과 비슷한 경향을 보였다.

따라서 K값에 영향을 주는 토입자는 0.1mm 이하의 입경을 가진 토입자의 구성비가 K값을 좌우하리라고 사료된다.

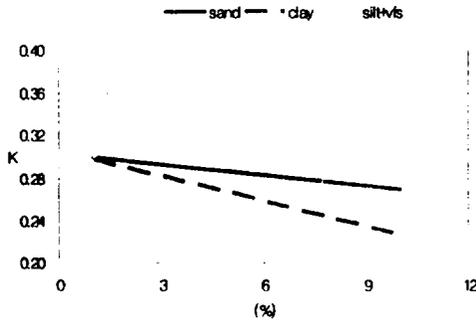


Fig. 16. K value versus soil type content

투수도와 투수계수

Fig. 17에서 보이는 것처럼 투수도가 높을수록 K값은 증가한다. 투수도는 1에서 6까지의 등급을 두어 산정하는데 투수계수와 직접적으로 관계가 있다. 아래의 Table 9는 토양분류에 의한 토양 투수성 등급표이다.

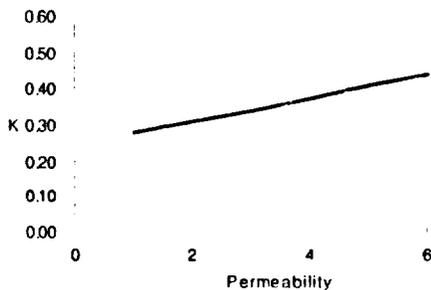


Fig. 17. K value versus permeability

Table 9. Soil permeability data for USDA soil classification

Texture	Permeability class(a)	Saturated hydraulic conductivity		Hydrologic soil group(b)
		in/hr	cm/sec	
silty clay, clay	6	<0.04	<2.8×10 ⁻⁵	D
silty clay loam sandy clay	5	0.04-0.08	2.8×10 ⁻⁵ ~5.6×10 ⁻⁵	C-D
sandy clay loam dry loam	4	0.08-0.20	5.6×10 ⁻⁵ ~1.4×10 ⁻⁴	C
loam silt loam	3	0.20-0.80	1.4×10 ⁻⁴ ~5.6×10 ⁻⁴	B
loamy sand sandy loam	2	0.80-2.40	5.6×10 ⁻⁴ ~1.7×10 ⁻³	A
sand	1	>2.40	>1.7×10 ⁻³	A+

(a) Soil Conservation Service National Soil Handbook (SCS, 1983)
(b) Soil Conservation Service National Engineering Handbook (SCS, 1972, 1984)

Table 9에서와 같이 투수계수의 값에 따라 투수성 등급을 정하게 된다. 따라서 각 시험구역에 적용하면

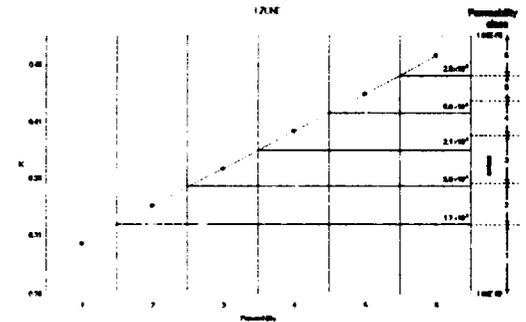


Fig. 18. Permeability grade and range of permeability factors in zone I

Fig. 18과 같이 각 등급에 따른 해당 투수계수를 산출해 보았다. 그래프에서 보이는 것처럼 거의 비슷하게 들어 맞으나 일부에서 약간의 차이를 보이고 있다.

다른 구역에서도 이와 같은 방법으로 산출한 결과 위와 같은 양상을 보이고 있어 Table 10과 같이 투수계수를 약간 수정해야 한다고 사료된다.

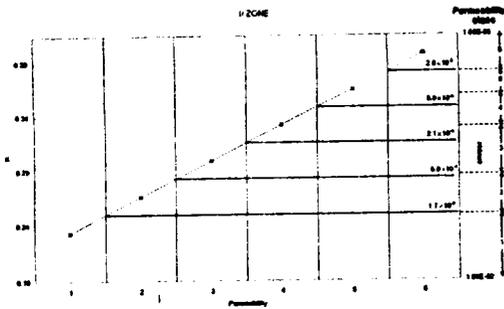


Fig. 19. Permeability grade and range of permeability factors in zone II

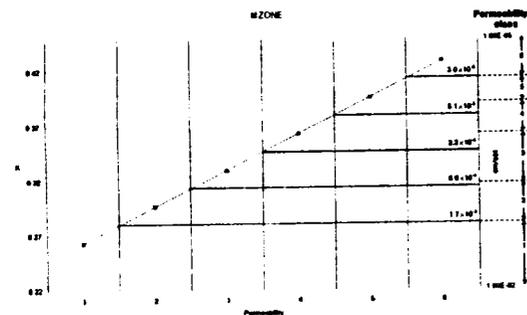


Fig. 20. Permeability grade and range of permeability factors in zone III

Table 10. Permeability class and range of modified permeability factors

Permeability class	Previous Permeability factors (cm/sec)	Modified Permeability factors (cm/sec)
6	$< 2.8 \times 10^{-5}$	$< 2.8 \times 10^{-5}$
5	$2.8 \times 10^{-5} \sim 5.6 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5} \sim 8.0 \times 10^{-5}$
4	$5.6 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4}$
3	$1.4 \times 10^{-4} \sim 5.6 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4} \sim 5.9 \times 10^{-4}$
2	$5.6 \times 10^{-4} \sim 1.7 \cdot 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4} \sim 1.7 \cdot 10^{-3}$
1	$> 1.7 \times 10^{-3}$	$> 1.7 \times 10^{-3}$

USDA 분류법에 의한 K값 추정

Erickson의 K값 추정 삼각형 도표를 이용하여 K값을 산정하는 방법은 모래, 실트, 점토 이렇게 세 개의 토립자의 구성비로 분류하여 K값을 구하게 된다. 이 세 개의 구성비만으로 K값

을 구하기 때문에 아주 손쉽게 추정할 수 있으나 그 신뢰성은 다소 떨어진다.

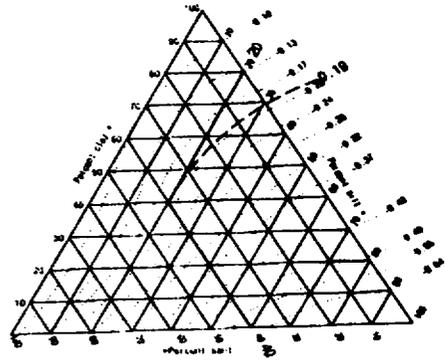


Fig. 21. Triangular diagram for calculation of soil erodibility factor

USDA(미국 농무성)에서는 토양을 Fig. 22와 같이 12가지의 흙으로 분류하였다. 그리고 이 흙은 Table 11과 같이 토성에 따라 투수성을 유추할 수 있다. 그 결과 Fig. 23과 같이 방향별로 갈수록 투수도가 높아지는 걸 알 수 있다.

Table 11. Guide to Selection of S_1 and P_1

S_1	Structure	P_1	Permeability	Soil Texture (Rawls et al., 1982)
1	Very fine granular	1	Rapid	Sand
2	Fine granular	2	Moderate to rapid	Loamy sand, Sandy loam
3	Moderate	3	Moderate	Loam, Silt loam
4	or coarse granular	4	Slow to moderate	Sandy clay loam, Clay loam
	Blocky, platy, massive	5	Slow	Silty clay loam, Sandy clay
		6	Very slow	Silty clay, Clay

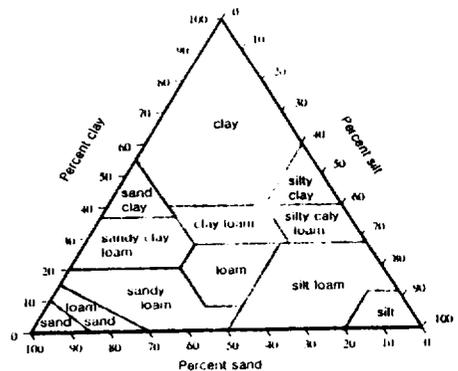


Fig. 22. USDA soil classification

결론

본 연구에서는 RUSLE 모형을 이용한 제주 지역에 대하여 실제 6~8월의 3개월에 대한 토사유출량을 적용하여 토사유출량 산정시 그 범위와 토양침식인자의 범위를 제시하고자 하였다. 그리고 토양침식인자 K에 대해 분석하고 특징을 구명하여 설계자가 보다 쉽고 정확하게 토사유출량을 산정할 수 있도록 새로운 방법을 다음과 같이 제시해 보았다.

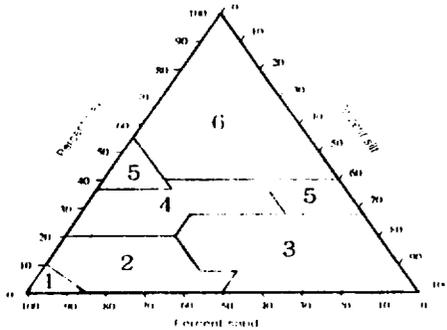


Fig. 23. Permeability classification by soil property

이에 착안하여 USDA에 의한 토성분류 도표를 Erickson의 K값 추정 삼각형 도표에다가 적용시켜보았다. 그 결과 Fig. 24와 같은 투수성을 적용시킨 새로운 K값 추정 도표를 얻을 수 있었다. 그리고 보다 쉽게 K값을 찾기 위하여 Fig. 25와 같이 사각형 도표로 다시 만들었다.

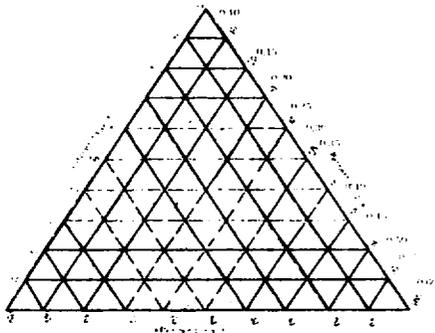


Fig. 24. Triangular diagram of K value considering permeability

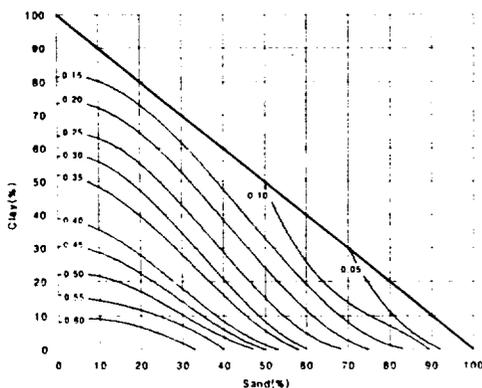


Fig. 25. Graph for estimation of K value considering permeability

- 1) 현장강우에 대한 모의시험과 2개 구역의 저류지 토사량을 실측한 결과 I구역은 8월에 31.54톤, II구역은 7월 386.52톤, 8월 223.32톤, III구역은 7월 574.08톤, 8월 126.12톤의 토사유출량이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 RUSLE 공식을 이용하여 얻은 값과 약 4배의 차이를 보이고 있다.
- 2) 토립자의 각 구성비를 증가시켜본 결과 모래와 점토는 비율을 증가시켰을 때는 K값이 감소하는 모습을 보였는데 반해 실트와 극세사의 비율을 증가시켰더니 K값 역시 증가하였다. 변화의 폭을 보면 모래보다 점토가 두 배정도의 감소폭을 보였고 실트와 극세사의 증가폭은 점토의 감소폭과 비슷한 경향을 보였다.
- 3) 토양침식인자 K 산정시 투수도를 선정하기 위한 투수계수의 범위는 종전의 투수계수에서 균일한 범위를 가지겠끔 일부 수정해야 할 것으로 판단되었다.
- 4) 본 연구에서는 Erickson의 K값 추정 방법을 보완하기 위하여 USDA에 의한 토성을 분류하고 이에 투수성을 가미하여 새로운 K값 추정 도표를 제시하였다. 이 새로운 도표는 Wischmeier 도표의 값보다 높으나 종전의 Erickson에 의한 방법보다

다소 낮은 값을 보여 둘 사이의 절충한 값을 보이고 있다.

참고 문헌

강옥륜. 2004. 산지토사유출량 산정공식의 특성인자 결정에 관한 연구. 연세대학교 석사 학위논문. pp. 5-26.

김동희·손광익. 2000. RUSLE를 중심으로 한 토사유출량 산정방법에 관한 연구. 대한토목학회 논문집 20(7). pp. 195-198.

우효섭·김창완. 1998. 제6회 수공학워샵 교재. 한국수자원학회. pp. 11-23.

박무중. 1998. 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(1). 국립방재연구소. pp. 161-226.

서규우·송일준·임재영. 1998. 개발에 따른 합리적인 토양침식량 산정방안 조사연구. 98년 한국수자원학회 학술발표회 논문집. pp. 341-346.

C.T. Hann, B.J. Barfield and J.C. Hayes. 1994. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. pp. 238-310.

Goldman, S.J.. 1980. Erosion and Sediment Control Handbook. McGraw-Hill Book Co.

Wischmeier W.H., C.B. Johnson and B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction site. J. Soil Water Conserv., 26: pp. 189-193.