

碩士學位論文

개정범용토양손실공식(RUSLE)의  
토양침식인자 추정에 관한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

金 翰 琮

2 0 0 5

碩士學位論文

개정범용토양손실공식(RUSLE)의  
토양침식인자 추정에 관한 연구

指導教授 南正萬



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

金翰琮


2005

# 개정범용토양손실공식(RUSLE)의 토양침식인자 추정에 관한 연구

指導教授 南正萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2005年 12月

 濟州大學校 産業大學院  
제주대학교 중앙도서관  
建設環境工學科 地盤工學 專攻

金翰琮의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2005年 12月

委員 長	印
委 長	印
委 長	印

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

Han-Jong Kim

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirements for the degree of Master of Engineering



This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목 차 .....	i
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	v
Summary .....	vii
I. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구목적 및 방법 .....	3
II. 토사유출량에 대한 기존이론 .....	4
2.1 USLE(Universal Soil Loss Equation) 공식 .....	4
2.2 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation) 공식 .....	12
2.3 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation) 공식 .....	20
2.4 원단위법 공식 .....	23
2.5 각 이론에 대한 비교 .....	24
III. 50년 빈도에 대한 토사유출량 산정 .....	25
3.1 조사지역 특성 .....	25
3.1.1 조사지역 위치 및 구역선정 .....	25
3.1.2 지형현황 .....	26
3.1.3 기상현황 .....	27
3.1.4 식생현황 .....	29
3.2 RUSLE 모형을 이용한 토사유출량 산정 .....	32
3.2.1 정상강우년의 연평균 토사침식량 .....	32
3.2.2 단일호우시(TRB-Transport Research Board)에 의한 토사침식량 .....	38
3.3 원단위법을 이용한 토사유출량 산정 .....	44
3.4 토사유출량 비교 .....	46

IV. 현장강우에 대한 토사량 측정 및 이론적 검토 .....	47
4.1 토사유출량 측정 .....	47
4.1.1 측정방법 .....	47
4.1.2 강우자료 .....	48
4.1.3 유출량 .....	53
4.1.4 토사유출량 .....	58
4.2 현장강우에 대한 강우침식인자 산정 .....	63
4.3 이론식과 측정치의 비교 .....	66
V. 토양침식인자 K에 대한 고찰 .....	67
5.1 입경분포에 따른 K값 변화 .....	69
5.2 투수도와 투수계수 .....	72
5.3 USDA 분류법에 의한 K값 추정 .....	76
VI. 결  론 .....	79
VII. 참고문헌 .....	81



## List of Tables

Table 2.1	Guide to Selection of $S_1$ and $P_1$ .....	7
Table 2.2	Adjustment factors to LS to estimate soil loss on irregular slopes .....	8
Table 2.3	Selected USLE C values for construction, mining and forest lands .....	9
Table 2.4	Selected USLE C values for construction and disturbed lands .....	10
Table 2.5	Selected USLE P factors(after Wischmeier and Smith, 1978) .....	11
Table 2.6	Slope length exponent m .....	16
Table 2.7	$P_b$ , Contouring subfactors for tillage along the contour when slope lengths are less than critical .....	18
Table 2.8	$P_b$ effective, contouring subfactors for tillage along the contour when slope lengths are greater than critical .....	18
Table 2.9	$P_t$ subfactor for terracing with conservation planning .....	18
Table 2.10	Terracing impact on sediment yield .....	19
Table 2.11	$P_{sc}$ subfactor for stripcropping .....	19
Table 2.12	Unit load method in Korea .....	23
Table 2.13	The comparison of each model type .....	24
Table 3.1	Yearly weather .....	27
Table 3.2	Monthly weather .....	28
Table 3.3	Rainfall erosion factor by observation post .....	33
Table 3.4	Soil quality and estimated result of K value .....	35
Table 3.5	Length and slope factors L and S .....	35
Table 3.6	Result of cover management factor .....	36
Table 3.7	Result of support practice factor .....	36
Table 3.8	Average annual soil erosion amount .....	37
Table 3.9	R value of frequency 24 hours duration time design heavy rain in 50 .....	39
Table 3.10	Selected VM values, soil erosion modulator(TRB, 1980) .....	40

Table 3.11 Result of <i>VM</i> , soil erosion modulator .....	42
Table 3.12 Sediment yield (TRB, by single storm) .....	43
Table 3.13 Unit load method in Japan .....	44
Table 3.14 Sediment yield based on unit load method .....	45
Table 3.15 Sediment yield for each method .....	46
Table 4.1 Hourly rainfall on June .....	50
Table 4.2 Hourly rainfall on July .....	51
Table 4.3 Hourly rainfall on August .....	52
Table 4.4 Measured streamflow .....	54
Table 4.5 Calculated streamflow on August 7th .....	55
Table 4.6 Calculated streamflow on August 23th .....	56
Table 4.7 Calculated streamflow on August 24th .....	57
Table 4.8 Estimation for suspended sediment load in I zone .....	62
Table 4.9 Measured sediment yield for each zone .....	62
Table 4.10 Calculated table of R value .....	65
Table 4.11 Comparison with R value .....	65
Table 4.12 Comparison of sediment yield .....	66
Table 5.1 K-value by soil series of whole Korea .....	68
Table 5.2 Sediment size of soil grain .....	69
Table 5.3 Soil permeability data for USDA soil classification .....	72
Table 5.4 Permeability grade and range of modified permeability factors .....	75



## List of Figures

Fig 2.1	Soil erodibility nomograph of Wischmeier et al. (1971) .....	6
Fig 2.2	Example watershed division for MUSLE routing procedures .....	22
Fig 3.1	Investigation region and selection of the zone .....	25
Fig 3.2	Forest type map .....	30
Fig 3.3	Existing plantation map .....	31
Fig 3.4	Isoline map of rainfall runoff factor in Korea .....	34
Fig 4.1	Setup of water level guage .....	47
Fig 4.2	Temporary water storage tank diagram .....	47
Fig 4.3	Precipitation on June .....	48
Fig 4.4	Precipitation on July .....	49
Fig 4.5	Precipitation on August .....	49
Fig 4.6	Water level on August 7th .....	53
Fig 4.7	Water level on August 23th .....	53
Fig 4.8	Water level on August 24th .....	53
Fig 4.9	Triangular weir .....	54
Fig 4.10	Photo of soil losse after rainfall .....	58
Fig 4.11	Measurement of sediment yield in I zone .....	58
Fig 4.12	Piles before rainfall in II·III zone .....	59
Fig 4.13	Piles after rainfall in II·III zone .....	59
Fig 4.14	Pile lengths in II·III zone .....	59
Fig 4.15	Height survey in II zone .....	60
Fig 4.16	Heights in II zone .....	60
Fig 4.17	Height survey in III zone .....	61
Fig 4.18	Heights in III zone .....	61
Fig 5.1	K value versus sand content .....	70

Fig 5.2 K value versus clay content .....	70
Fig 5.3 K value versus silt + vfs content .....	70
Fig 5.4 K value versus soil type content .....	71
Fig 5.5 K value versus permeability .....	72
Fig 5.6 Permeability grade and range of permeability factors in I zone .....	73
Fig 5.7 Permeability grade and range of permeability factors in II zone .....	74
Fig 5.8 Permeability grade and range of permeability factors in III zone .....	74
Fig 5.9 Triangular diagram for calculation of soil erodibility factor .....	76
Fig 5.10 USDA soil classification .....	77
Fig 5.11 Permeability classification by soil property .....	77
Fig 5.12 Triangular diagram of K value considering permeability .....	77
Fig 5.13 Graph for estimation of K value considering permeability .....	78



## Summary

This study presents the range of sediment yield and the ranges 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. The method of the study in detail is as follows.

Various sediment yield estimation equations known in Korea were put together to be reviewed and analyzed for their limits, advantages, disadvantages and application targets. Especially, RUSLE model, which is used mainly in the evaluation of disaster prevention, is reviewed and analyzed in detail. The results of the model were compared with those of the field measurements.

The soil erodibility factor,  $K$ , was analyzed and its characteristics were examined. A new method was proposed for designers to calculate the amount of sediment yield more easily and accurately.

# I. 서 론

## 1.1 연구배경

우리나라의 전 국토에 걸친 개발사업은 주변 여건의 급격한 변화를 초래하여 과거와 동일한 강우와 같은 자연현상에도 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 이루어지는 과정에서 크게 발생되며, 개발지역에서 침식된 토사량은 수질악화에 의한 환경영향 피해를 넘은 토사매물이나 하상변동 등에 의한 물리적인 피해를 줄 수 있다.

이에 대해 토사유출에 따른 피해를 최소화하기 위해서는 개발로 인한 토양노출을 최소화 하거나 노출이 불가피한 토양은 식생조성 등을 통해 토사유출의 원인을 감소시키고 개발지역의 배수를 원활히 함으로서 토양침식의 저감을 위한 조치를 취해야 할 것이다. 이러한 조치를 위해서는 우선적으로 선행되어야 할 것은 토사유출의 정량적으로 모의하여 사방시설의 위치 및 규모를 최적화해야 한다. 또한 상류유역에서 침식되어 유출되는 토사에 대한 정보를 정확히 판단하여 토사유출 저감을 위한 대책을 수립하고 재해영향평가 등 신규개발지에서 발생하는 토사유출량을 보다 정확히 예측할 수 있는 방안이 필요한 실정이다.

현재 토사유출량 산정을 위하여 국내에서는 지금까지 미국에서 개발한 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation)과 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation) 모형이 주로 사용되어 왔다.

그러나 이러한 공식들은 미국의 중동부 지역의 농지의 사용용도에 따라 토사유출량의 변화 및 조절을 주 목적으로 개발된 경험공식으로 연평균 토사유출량 산정에 활용되고 있으며, 또한 입력자료의 수가 적고 적용이 간편하다는 장점이 있지만 단일

호우시의 영향을 반영할 수 없고 통계적인 경험공식이라는 단점이 있다.

이 모형의 각종 독립인자들이 미국의 일부지역에 적합하도록 개발되어 우리나라에서는 적용성이 검증되지 않아 이 모형의 공식을 실제로 적용할 때 설계자의 주관적 판단이 요구되는 경우가 많다. 또한 이 모형은 연평균 또는 그 이상의 장기적인 토사 유출량 산정을 위하여 개발된 식이나 우리나라에서는 개발에 따른 사업기간에 비추어 단기적인 성격을 띠고 있는 단일호우에 의한 토사유출량 산정에 많이 활용되고 있는 실정이다.

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



## 1.2 연구목적 및 방법

본 연구에서는 RUSLE 모형을 이용한 제주지역에 대하여 정상강우년의 연평균 토사유출량과 단일호우에 의한 토사유출량을 적용하여 토사유출량 산정 시 그 범위와 강우에너지 및 유출에 의한 침식에 저항하는 정도에 대한 토양침식인자의 범위를 제시하고 실제 6~8월의 3개월에 걸쳐 대상유역에 시험장치를 설치하여 강우량, 유출량, 토사유출량을 조사하였다. 현장계측을 통해 얻은 실측자료와 모의결과의 비교를 통하여 이 모형의 적용을 검토해 보았다.

본 연구의 목적은 토사유출량 산정에 있어 RUSLE 모형을 이용한 제주지역에 대한 토사유출량 산정 시 그 범위와 토양침식인자에 대한 범위를 제시하고자 하는데 있으며, 이를 위해 토사유출량 산정공식의 검토하고 문제점을 도출한 후 대상유역의 현장계측 결과를 분석하여 지역적 특성이 고려된 특정인자의 범위를 제시하고자 한다. 이에 대한 구체적인 연구방법은 다음과 같다.

국내에 알려진 각종 토사유출량 산정공식의 내용을 정리하고 제한사항, 장·단점 및 적용대상 등 각 모형에 대한 공식의 특성을 분석한 후 각 공식을 비교·분석한다. 특히 재해영향평가에서 주로 사용되고 있는 RUSLE 공식에 대한 심도있는 검토 및 분석을 실시한다. 그리고 실제 현장계측을 통한 결과와 비교해본다.

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. 그리고 대상유역에서의 토사유출 특성을 분석하고 계측결과를 토대로 RUSLE 공식의 특성인자를 산정한 후 토사유출량을 산정하고 기존의 특성인자를 사용한 결과와 비교·분석한다. 또한 대상유역의 현장계측결과로 산정된 특성인자를 정리하고 적용 가능성을 분석하여 기존 알려진 RUSLE 공식의 특성인자에 대한 범위를 추정하여 본다.

## II. 토사유출량에 대한 이론

### 2.1 USLE(Universal Soil Loss Equation) 공식

범용토양손실공식(USLE)은 미국의 Wischmeier와 Smith(1960)에 의해 원래는 농경지에서의 토양손실 예측을 위해 개발되었다. 이 식은 경험적 방법에 의해 개발되었으며, 공식의 이름에서 알 수 있듯이 다른 지역에 대해 범용적으로 적용할 수 있다. 그 후 이 식은 Wischmeier와 Johnson, Cross 등(1971)에 의해 건설현장에 확대 적용되었다. 이 공식은 유역의 기후(강우), 토양, 토지형태, 토지이용 등의 변수를 이용하여 그 대상유역에서의 토양손실량을 추정한다. 또한 USLE공식은 장기간에 걸친 연평균 토양손실량을 추정하기 위한 모형으로서 단기간 예측에서 오차가 커질 수 있는 특성을 가지고 있으며, 경사진 소유역의 토양침식량 추정에 합리적인 방법으로 알려져 있다. USLE공식은 식 (2.1)과 같이 표시된다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

여기서 A는 강우침식도 R(Rainfall Erodibility)의 해당 기간 중 단위면적에서 침식되어 손실되는 토사량(ton/ha), R은 강우인자로서 서로 다른 위치에서의 강우강도, 지속기간, 빈도의 차이를 고려한 값으로 강우의 침식의 포텐셜을 나타내는 계수로서 강우에너지 계수(Rainfall Energy Factor)로 표현됨, K는 토양침식인자(Soil Erodibility Factor), LS는 지형인자 (L = 침식경사면의 길이인자(Slope Length Factor), S = 침식경사면의 경사인자(Slope Steepness Factor)), C는 작물형태, 피복상태 등 경작 종류와 형태에 따른 경작인자(Cover and Management Factor), P는 등고선 경작 등 토양보존대책인자(Supporting Conservation Practice Factor)이다.

## 1) 강우침식도 R

R인자는 정상년 강우의 침식능력을 말한다. USLE는 원래 정상년의 R을 기준으로 토양손실량 A를 추정하도록 개발되었으며 일반적으로 강우입자의 크기와 낙하속도가 강우강도의 증가에 따라 커지므로 강우에너지도 강우강도가 커짐에 따라 증가한다.

토양침식량과 강우인자들간의 상관관계를 제시한 Wischmeier와 Smith(1958)는 다음 식 (2.2)와 같이 두가지 형태로 표현하였다.

$$\begin{aligned} e &= 916 + \log_{10} I & I \leq 3 \text{in/hr} \\ e &= 1074 & I > 3 \text{in/hr} \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서  $e$ 는 강우운동에너지( $\text{ft} \cdot \text{tonsf/acre} \cdot \text{inch}$ )이며,  $I$ 는 호우의 평균강우강도( $\text{inch/hr}$ )이다.  $\text{tonsf}$ 는 강우의 충격력을 의미하며 침식토사량을 질량으로 표현하는  $\text{tons}$ 와는 다르다. 그리고 강우운동에너지를 표현하는 다른 연구결과도 있으나 식 (2.2)가 가장 보편적으로 쓰이고 있다.

또한 토양침식량과 강우인자들간의 상호관계를 검토한 결과 R인자는  $EI_{30\text{max}}$  지수로 알려진 강우에너지와 최대 30분 강우강도의 곱을 100으로 나눈 식 (2.3)으로부터 구한다.

$$R = \frac{(\sum E)I_{30}}{100} \quad (2.3)$$

여기서  $I_{30}$ 은 특정 호우에 대한 최대 30분 강우강도( $\text{in/hr}$ )이며, 분모 100은 수치적 편의를 위한 것으로 큰 의미는 없다. 연평균 강우에너지계수를 추정하기 위해서는 연간 발생하는 모든 강우사상에 대하여  $I_{30}$ 을 구하고 식 (2.3)으로부터 연 강우에너지계수를 구하여야 한다.

## 2) 토양침식인자 K

토양침식인자 K는 토양이 강우에 의한 침식에 대해 저항하는 능력을 나타내는 척도로서, 토양입자 및 분포, 구조, 공극 및 공극크기, 유기물 함량 등에 관련된다.



USLE에서 K은 연중 일정한 값을 나타낸다고 가정하였으며, 각 지역별 K값이 최근에 들어 각종 토양보고서에 나타나고 있으며, K값의 범위는 0.1~0.7(tons/acre/R)이며, 표준단위로는 0.13~0.91(tonnes/ha/R)이다. K값은 그림 2.1과 같은 Wischmeier의 K값 추정도표(1971)를 이용하거나 Wischmeier와 Smith(1965)/Erickson(1977)의 삼각형 도표 및 보정표 등을 이용하여 추정할 수 있다. 이런 도표들은 모두 영미 단위로 되어있다는 점에 유의할 필요가 있다.

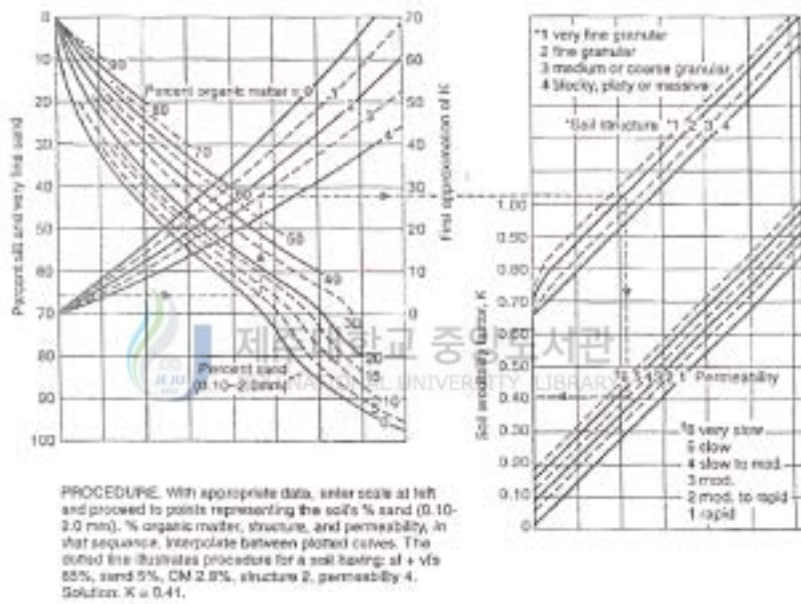


Fig 2.1 Soil erodibility nomograph of Wischmeier et al. (1971)

만약, 실트+극세사의 구성비가 70%이하의 경우 Wischmeier의 K값 추정방법은 식 (2.4)와 같은 관계식으로 표시할 수 있으며, K를 산정하기 위한 S<sub>1</sub>과 P<sub>1</sub>값은 <표 2.1>과 같이 구분된다.

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - OM) + 3.25(S_1 - 2) + 2.5(P_1 - 3)}{100} \quad (2.4)$$

여기서 K의 단위는 A/R 또는 t·acre·hr / 100·acre·ft·t·in로 표시되며, OM은 함유 유기물의 백분율(%), P1은 투수지수(1~6), S1은 토양의 구조지수(1~4)이다, M은 (MS +VFS)의 백분율×(100 - CL)로 표현된다.

Table 2.1 Guide to Selection of S<sub>1</sub> and P<sub>1</sub>

S <sub>1</sub>	토양의구조	P <sub>1</sub>	투수성	Soil Texture
1	Very fine granular	1	Rapid	Sand
2	Fine granular	2	Moderate to rapid	Loamy sand, Sandy loam
3	Moderate or coarse granular	3	Moderate	Loam, Silt loam
4	Blocky, platy, massive	4	Slow to moderate	Sandy clay loam, Clay loam
		5	Slow	Silty clay loam, Sandy clay
		6	Very slow	Silty clay, Clay

### 3) 지형인자 LS

USLE에서 두가지 지형인자가 고려되고 있다. 하나는 유역 경사면의 길이인자(L)이며, 다른 하나는 유역 경사면의 경사인자(S)이다. 여기서 유역 경사면이란 비교적 균일한 지형특성을 가진 구역을 말하며, 따라서 엄격한 의미에서 USLE공식의 적용은 균일한 지형특성을 가진 비교적 적은 유역에만 가능하다.

L과 S인자는 보통 LS라는 하나의 인자로 간주할 수 있으며, Foster 등(1973) /Wischmeier와 Smith(1978)는 식 (2.5)과 같이 LS인자 산정공식을 제안하였다.

$$LS = \left(\frac{L}{72.5}\right)^m \left(\frac{65.4 S^2}{S^2+10,000} + \frac{4.6 S}{\sqrt{S^2+10,000}} + 0.065\right) \quad (2.5)$$

여기서 L은 경사면의 길이로 ft단위로 표시되며 S는 경사도(%), m은 경사에 따라 변하는 지수로서 S < 1%인 경우 m=0.2, 1 < S < 3%인 경우 m=0.3, 3.5 < S < 4.5%인 경우 m=0.4, S > 5%인 경우 m=0.5의 비율로 나타난다. 만일 경사의 균일한 지역이라도 사면의 흐름은 위보다는 아래가 크기 때문에 토양손실량도 위치에 따라 다르게 되며, <표 2.2>는 이러한 점을 고려하여 한 사면을 위 아래로 등거리로 나누어 각 소구역별 토양손실량(LS값)의 비율을 나타낸다.

이러한 자료는 특히 사면이 오목하거나 볼록한 사면 등 불규칙한 사면을 비교적 균일한 경사의 등거리 소구역으로 나누어 LS값을 산정하는데 이용할 수 있다.

Table 2.2 Adjustment factors to LS to estimate soil loss on irregular slopes

소구역 수	번호	토양손실량 비율		
		m=0.5	m=0.4	m=0.3
2	1	0.35	0.38	0.41
	2	0.65	0.62	0.59
3	1	0.19	0.22	0.24
	2	0.35	0.35	0.35
	3	0.46	0.43	0.41
4	1	0.12	0.14	0.17
	2	0.23	0.24	0.24
	3	0.30	0.29	0.28
	4	0.35	0.33	0.31
5	1	0.09	0.11	0.12
	2	0.16	0.17	0.48
	3	0.21	0.21	0.21
	4	0.25	0.24	0.23
	5	0.28	0.27	0.25

#### 4) 피복-관리인자 C

USLE에서는 농경지나 토양의 침식에 미치는 영향을 반영하거나 토양보존대책 중 토양의 관리가 토양 침식에 미치는 상대적 영향을 비교하기 위하여 피복-관리인자 (Cover and Management Factor) C를 사용하고 있으며, 이 C인자는 보존대책이 연 평균 토양손실량에 어떤 영향을 미치고 또한 토양손실 잠재능이 건설활동, 농경활동 등 토양관리계획 기간 중 시간적으로 어떻게 분포되는가를 나타내고 있다.

C값은 지상 및 토양의 피복, 식물의 뿌리, 잔유물, 지표면 조도, 토양함수율 등 토양 침식에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 USLE에서는 C값을 도표화시켰으며, <표 2.3>는 건설현장, 광산 및 산림지역의 피복상태에 따른 C값과 <표 2.4>와 같이 건설현장 및 토양이 교란된 지역에서의 C값을 나타내고 있다.

Table 2.3 Selected USLE C values for construction, mining and forest lands

Condition	C factor
1. Bare soil conditions	
Undisturbed except scraped	0.66~1.30
Compacted	
Smooth	1.00~1.40
Root raked	0.90~1.20
Disk tillage	
Fresh	1.00
After one rain	0.89
2. Mulch	
Straw	
0.5 tons/ac	0.30
1.0 tons/ac	0.18
2.0 tons/ac	0.09
4.0 tons/ac	0.02
Wood	
0.5 tons/ac	0.90
2.0 tons/ac	0.70
4.0 tons/ac	0.42
6.0 tons/ac	0.22
3. Chemical binders	
Asphalt emulsion, 605 gal/ac	0.14~0.52
Aquatain, Terra-tack	0.67
4. Seedings	
No prepared seedbed	
New planting	0.64
After 60 days	0.54
Prepared seedbed	
New planting	0.40
After 60 days	0.05
5. Undisturbed	
100-75% canopy, 100-90% litter	0.0001~0.001
35-20% canopy, 70-40% litter	0.003~0.009
6. Permanent pasture and brush cover	
0% canopy, 80% ground cover	
Grass	0.013
Weeds	0.043
50% brush, 80% ground cover	
Grass	0.012
7. Mechanically prepared woodland sites	
Burned, 10% cover at ground	
Good soil	0.240
Poor soil	0.360
Burned, 0% cover at ground	
Good soil	0.260
Poor soil	0.450
Disked, 0% cover at ground	
Good soil	0.720
Poor soil	0.940

Table 2.4 Selected USLE C values for construction and disturbed lands

Condition	C factor
1. Bare soil conditions	
Freshly disked to 6-8 in	1.00
After one rain	0.89
Loose to 12 in. smooth	0.90
Loose to 12 in. rough	0.80
Compacted root raked	1.20
Compacted bulldozer across slope	1.20
Same Except root raked across	0.90
Rough irregular tracked all directions	0.90
Seed and fertilize, fresh, unprepared seedbed	0.64
Same except after 6 months	0.54
Seed, fertilize after 12 months	0.38
Undisturbed except scraped	0.66~1.30
Scarified only	0.76~1.31
Sawdust 2 in deep, disked in	0.61
2. Asphalt	
1210 gal/acre	0.01~0.019
605 gal/acre	0.14~0.57
302 gal/acre	0.28~0.60
3. Dust Binder	
605 gal/acre	1.05
1210 gal/acre	0.29~0.78
4. Other chemicals	
Aquatain	0.68
Aerospray 70, 10% cover	0.94
PVA	0.71~0.90
Terra-tack	0.66
5. Seedings	
Temporary, 0 to 60 days	0.40
Temporary, after 60 days	0.05
Permanent, 2 to 60 months	0.05
6. Brush	0.35

5) 토양보존대책인자 P

토양보존대책인자는 어떤 토양보존대책을 세운 사면의 상·하방향 경사지로부터의 토양유실에 대한 보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의된다. P는 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위해서 사용된다. P값은 농경지와 목장지에 대해서만 사용되고 있으나 건설현장과 지표면 교란지역에 대해서도 약간의 주의를 기울이면 사용할 수 있으며, Wischmeier 와 Smith(1978)는 <표 2.5>와 같이 P값을 제시하고 있다.

Table 2.5 Selected USLE P factors(after Wischmeier and Smith, 1978)

1. P Values and slope length limits for contouring					
Land slope Percentage	P Value			Maximum length (ft)	
1 to 2	0.60			400	
3 to 5	0.50			300	
6 to 8	0.50			200	
9 to 12	0.60			120	
13 to 17	0.70			80	
17 to 20	0.80			60	
21 to 25	0.90			50	
2. P Values, maximum strip widths, and slope length limits for contour strip cropping					
Land slope Percentage	P Value			Strip width (ft)	Maximum length (ft)
	A	B	C		
1 to 2	0.30	0.45	0.60	130	800
3 to 5	0.25	0.38	0.50	100	600
6 to 8	0.25	0.38	0.50	100	400
9 to 12	0.30	0.45	0.60	80	240
13 to 17	0.35	0.52	0.70	80	160
17 to 20	0.40	0.60	0.80	60	120
21 to 25	0.45	0.68	0.90	50	100
3. P Value for contour-farmed terraced fields					
Land slope Percentage	Farm planning		Computing sediment yield		
	Contour factor	Stipcrop factor	Graded channels sod outlets	Steep backslope underground outlets	
1 to 2	0.60	0.30	0.12	0.05	
3 to 8	0.50	0.25	0.10	0.05	
9 to 12	0.60	0.30	0.12	0.05	
13 to 17	0.70	0.35	0.14	0.05	
17 to 20	0.80	0.40	0.16	0.06	
21 to 25	0.90	0.45	0.18	0.06	

## 2.2 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation) 공식

USLE은 토양침식을 예측하기 위하여 개발된 식이며, 토양의 사용용도가 토양침식에 미치는 영향을 예측하여 개발계획에 널리 사용되어 온 하나의 상관 관계식이다.

장기간에 걸친 연평균 토사침식량 산정하기 위하여 개발되었지만 계절 또는 단일 호우에 의한 토사침식량 산정을 위하여 수정이 가해졌으나 수정된 기법은 유도과정에서 연평균 토사침식량 산정에 비해 더 큰 표준편차를 내포하고 있다. RUSLE는 USLE에서는 없었던 연구자료의 분석을 추가 보완하였으며, USLE 식의 형태는 그대로 유지하면서 계수산정기법을 수정하고 특수조건을 나타낼 수 있는 항들을 새로이 추가 분석하였으며, 개선된 산정기법인 RUSLE 공식은 USLE와 동일한 식 (2.6)로 나타내고 있다.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.6)$$

여기서 R은 강우/유출 인자로 강우에너지와 유출에 대한 강우단위의 값에 눈 녹음에 의한 유출인자를 더한 값이다.

RUSLE는 USLE와 동일한 식의 형태로 구성되어 있어 필요한 경우 USLE에서 변수값을 그대로 대입·적용할 수 있는 특성이 있으며, 건설현장에 대한 정보가 포함되어 있지는 않으나 Haan(1994)의 결과를 인용, 적용범위를 건설현장에까지 확대 적용할 수 있는 기법을 제시하였다.

### 1) 강우침식도인자 R

토양침식량과 강우인자들간의 상관관계는 USLE에서 검토한 결과 R 계수는 EI<sub>30</sub> 지수로 알려진 강우에너지와 최대 30분 강우강도의 곱을 100으로 나눈값으로 선정하였다(Wischmeier와 Smith, 1958).

한 해에 발생한 각 강우에 대한 EI<sub>30</sub> 값의 총합이 1년을 기본기간으로 하는 EI<sub>30</sub> 값이 되며 RUSLE에서 저류영향을 추가적으로 고려하고 있다는 사실을 제외하면 USLE나 RUSLE의 R은 동일하며, 강우강도 3in/hr를 경계로 강우강도에너지의 산정

공식은 앞에서 언급한 식 (2.2)와 같이 두가지 형태로 표현된다.

RUSLE에서는 미국의 서부지역에 적합한 식으로 식 (2.7)를 사용하고 있으며, Renard 등(1993)은 낮은 강우강도에서도 비교적 좋은 결과를 보이는 이 식을 미국전역에 사용할 것을 권장하고 있다. 또한 호우의 총강우에너지는 식 (2.8)과 같이 강우운동에너지에 강우깊이를 곱하여 산정하고 있다.

$$e = 1099 [1 - 0.72 \exp(-1.27I)] \quad (2.7)$$

$$E = e \cdot P \quad (2.8)$$

여기서  $e$ 는 강우운동에너지(ft · tonsf/acre · inch),  $I$ 는 호우의 평균강우강도(inch/hr)이며,  $E$ 는 강우의 총에너지(ft · tonsf/acre),  $P$ 는 강우의 총깊이(inch)를 나타낸다.

우리나라의 경우 정필균 등(1983)이 기상청 산하 51개 관측소의 '60~'80년대 걸쳐 6~21년의 자료를 이용하여 R값을 산정하였으며, 이를 이용하여 건설부/한국건설기술연구원(1992)에서 우리나라 등R선도를 제시한 바 있다(단위 : J/ha). 이 자료는 비록 비교적 단기간 자료를 이용하여 작성되었지만 우리나라 유일의 R값 자료로 실무에 사용되고 있다.

연평균 R값의 추정에는 과거 강우기록 자료를 가지고 각각의 강우 사상에 대해 R값을 산정하여 그해의 평균 R값을 구하고 이를 다시 연도에 대해 평균하여 구해지므로 건설현장에서 단일호우에 의한 토양손실량 추정에 직접 사용하기는 곤란하다. 그러나 침사지 건설목적에 따라 다르지만 단일호우에 의한 토양손실량을 수용하면서 주기적으로 침사지가 준설·정비되는 경우에는 경제적이므로 이 경우 1년 전체 손실량값의 의미가 적다. 따라서 단일호우에 대한 R값을 추정하여 그에 따른 토양손실량 값을 예측하고 적절한 침사지 설계하는 것이 바람직하며, 더욱이 재해예방 목적으로 설계하는 경우 침사지나 저류지 설계기준이 되는 특정 생기빈도의 설계강우에 의한 R값의 추정이 필요하며, 한 호우사상에 대한 R값의 산정은 표준단위를 사용하면 식 (2.10)과 같다(정필균 등 1983).

$$E = 210 + 89 \log_{10} X \quad (2.9)$$



$$R = \frac{(\sum E)I_{30\max}}{100} (10^7 \text{ Joule/ha} \cdot \text{mm/hr})^{10} \quad (2.10)$$

여기서 E는 주어진 강우강도 X하에서 1cm강우의 운동에너지(m · tonnes/hr/cm)이며, 에너지(강우량(cm) × E)단위는 m · tonnes/hr, 주어진 강우강도 X는 cm/hr이고 I<sub>30max</sub>는 30분 지속 최대 강우강도(cm/hr)로 나뉜다. 최대강우강도는 강우의 침식력(모토양에서 토립자를 분리 이달시키는 능력)을 의미하며, 총강우에너지는 분리이탈된 토립자를 이송시키는 능력을 말한다.

## 2) 토양침식성 인자 K

토양침식성이란 강우에너지와 유출에 의한 침식도에 저항하는 토양의 저항도를 나타내며, 실제로 RUSLE의 경우 토양의 침식성 K는 주어진 토양에 대한 강우와 유출에 의한 충격력의 합으로 표현된다. 실험적으로 토양의 침식성은 계절의 변화, 토양속과 지표면의 압단편에 의한 포화투수 인자들의 영향에 좌우되며, K값의 측정은 표준침식밭(standard erosion plot), 즉 사면의 상하방향으로 경작된 길이 22.1m, 사면경사 9%의 휴경지의 기본 모형을 기준으로 측정되었다(Wischmeier와 Smith, 1978).

토양유실에 영향을 미치는 두가지 중요한 물리적 특성은 투수능력과 토양입자의 구조적인 안정성이다. 투수능력은 입자의 구조적인 안정성에 가장 영향을 받으며, 유기물 함량, 토양조직, 점토광물의 함량과 종류, 토양의 깊이, 지표면의 기복 등도 투수능력에 영향을 미친다. 토양침식성은 앞 절에서 언급한 Wischmeier의 K값 추정도표(1971)나 Wischmeier와 Smith(1965)/Erickson(1977)의 삼각도표 및 보정도표 등을 이용하여 추정할 수 있다.

## 3) 사면길이-사면경사 인자 L · S

지형학적 인자가 침식에 미치는 영향은 세류 및 세류간 침식에 미치는 영향을 반영하고 있는 무차원 인자 L과 S를 이용하여 산정할 수 있다.

사면경사인자 S는 사면경사가 토양손실에 미치는 영향을 예측하는데 활용된다. 사면의 길이가 15ft 이상인 경우에 대하여 USLE의 S 산정기법을 수정하여 식 (2.11)과 식 (2.12)로 표현하였다.

$$S = 10.8\sin\theta + 0.33, \quad \sin\theta < 0.09 \quad (2.11)$$

$$S = 16.8\sin\theta - 0.5, \quad \sin\theta \geq 0.09 \quad (2.12)$$

여기서  $\theta$ 는 사면경사각이다.

사면경사 84%까지 교란된 토양에 대한 S에 대해서도 식 (2.11) 및 식 (2.12)의 적용이 가능하다는 연구결과가 있다. 반면 사면길이가 15ft 미만인 경우 세류작용이 발생하지 않기 때문에 S와 사면경사와의 상관관계는 미약하며 이 경우의 관계식은 식 (2.13)로 알려져 있다.

$$S = 3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56 \quad (2.13)$$

또한 최근 경작한 토양에 해빙현상이 발생하고 침식이 주로 표면유출에 의하여 발생하는 북서태평양의 봄과 같은 경우 S는 식 (2.14)으로 표현된다.

$$S = 4.25(\sin\theta)^{0.6}, \quad \sin\theta \geq 0.09 \quad (2.14)$$

해빙현상이 발생하는 토양이라 할지라도 사면경사가 9%미만이면 식 (2.11)을 적용해야 한다. RUSLE에서의 S산정기법은 USLE에 비해 특히 사면경사 20% 이상의 경우 많은 부분이 개선되었다.

RUSLE에서의 L 산정공식은 USLE에서의 식 (2.15)와 같이 동일하게 유지하고 있으나 내용면에서는 다소 차이가 있다.

$$L = \left(\frac{l}{72.5}\right)^m \quad (2.15)$$

여기서  $l$ 는 ft단위의 평면에 투영된 사면의 길이이며 72.5은 표준침식량의 단위 길이이다. 사면경사길이의 멱지수(exponent)  $m$ 은 식 (2.16)과 같이 세류 및 세류간 침식의 비  $\beta$ 와 관련이 있다.

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (2.16)$$

$$\beta = \frac{11.16 \sin\theta}{3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.5} \quad (2.17)$$

RUSLE에서 토양은 침식가능성이 미약한 토양, 보통인 토양, 강한 토양으로 구분하고 있으며 보통인 경우 식 (2.17)을 이용하여  $\beta_{mod}$ 를 구할 수 있다. 침식가능성이 미약한 토양의  $\beta$ 는  $0.5\beta_{mod}$  이며 침식가능성이 강한 토양의  $\beta$ 는  $2.0\beta_{mod}$  이다. 이 관계는 <표 2.6>에 요약되어 있다.

Table 2.6 Slope length exponent m

경사(%)	민감도에 따른 m값		
	낮음	보통	높음
0.2	0.02	0.04	0.07
0.5	0.04	0.08	0.16
1.0	0.08	0.15	0.26
2.0	0.14	0.24	0.39
3.0	0.18	0.31	0.47
4.0	0.22	0.36	0.53
5.0	0.25	0.40	0.57
6.0	0.28	0.43	0.60
8.0	0.32	0.48	0.65
10.0	0.35	0.52	0.68
12.0	0.37	0.55	0.71
14.0	0.40	0.57	0.72
16.0	0.41	0.59	0.74
20.0	0.44	0.61	0.76
25.0	0.47	0.64	0.78
30.0	0.49	0.66	0.79
40.0	0.52	0.68	0.81
50.0	0.54	0.70	0.82
60.0	0.55	0.71	0.83

#### 4) 피복-관리인자 C

USLE나 RUSLE기법에서 농경이나 토양의 관리기법이 침식에 미치는 영향을 반영하거나 토양보존대책 중 토양의 관리가 토양침식에 미치는 상대적 영향을 비교하기

위하여 피복-관리인자(Cover and Management Factor) C를 사용하고 있다.

C값 산정기법은 크게 두가지 방법으로 나뉜다. 첫째는 현장의 일반적 조건에 대한 C값을 나타내는 도표를 이용한 방법과 침식 관련인자들에 대한 보다 세밀한 기술을 통하여 피복인자 C값을 지배하는 subfactor들의 값들을 산정하여 전체적인 C값을 산정하는 subfactor기법이다. USLE에서는 도표를 이용한 방법을 사용하고 있으며 RUSLE 모형에서는 subfactor기법을 이용하여 C값을 산정하고 있다.

#### 5) 토양보존대책인자 P

토양보존대책인자 P는 USLE에서 언급한 바와 같이 어떤 토양 보존대책을 세운 사면의 상·하방향 경사지로부터의 토양유실에 대한 보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의된다. RUSLE 모형에서는 토양보존대책인자의 종속인자를 도입하여 다음 식 (2.18)과 같이 제시하고 있다.

$$P = P_c P_{st} P_{ter} \quad (2.18)$$

여기서  $P_c$ 는 등고선 종속인자,  $P_{st}$ 는 대상재배인자,  $P_{ter}$ 는 단구인자이다. 이들은 <표 2.7~2.11>에 제시된 바와 같다.

종속인자의 사용을 유추하는 것은 특히 실무에서 복합적인 고려를 할 때 더욱 상세히 P값을 평가하게 함은 물론 등고선에 대한 큰 강우의 영향에 대해 수정할 수 있게 되었다.

Table 2.7 P<sub>b</sub>, Contouring subfactors for tillage along the contour  
when slope lengths are less than critical

Downhill slope	Ridge of orientide roughness height (in)			Critical slope length (ft)
	Low 1~3	Moderate 3~5	Ridge system >5	
0.5	1.0	0.8	0.8	1000+
3.0	0.9	0.5	0.3	630
5.0	0.8	0.5	0.2	323
10.0	0.8	0.6	0.2	125
15.0	1.0	0.6	0.3	78
20.0		0.8	0.4	57
25.0		1.0	0.7	45 <sup>b</sup>
32.0		1.0		30 <sup>b</sup>

Table 2.8 P<sub>b</sub> effective, contouring subfactors for tillage along the contour  
when slope lengths are greater than critical

총사면길이에 대한한계사면 길이 비율	(Unslope P value)/(Slope length sxponent m)												
	0.20			0.40			0.60			0.80			1.00
	0.10	0.50	1.00	0.10	0.50	1.00	0.10	0.50	1.00	0.10	0.50	1.00	All
0.5	0.63	0.72	0.80	0.72	0.79	0.85	0.81	0.86	0.90	0.91	0.93	0.95	1.00
0.6	0.54	0.63	0.71	0.66	0.72	0.78	0.77	0.81	0.86	0.89	0.91	0.93	1.00
0.7	0.46	0.53	0.61	0.59	0.65	0.71	0.73	0.77	0.80	0.86	0.88	0.90	1.00
0.8	0.37	0.43	0.49	0.53	0.57	0.62	0.69	0.71	0.74	0.84	0.86	0.87	1.00
0.9	0.29	0.32	0.35	0.47	0.49	0.51	0.64	0.66	0.68	0.82	0.83	0.84	1.00
1.0	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80	0.80	1.00

Table 2.9 P<sub>t</sub> subfactor for terracing with conservation planning

Horiz. Ter. int (ft)	Closed outlets	Open outlets with percentage grade (%)		
		0.1-0.3	0.4-0.7	> 0.8
< 110	0.5	0.6	0.7	1.0
150	0.7	0.8	0.9	1.0
300	1.0	1.0	1.0	1.0

Table 2.10 Terracing impact on sediment yield

Terrace grade	Delivery subfactor
Closed outlet	0.05
0 (level)	0.10
0.2	0.13
0.4	0.17
0.6	0.29
0.7	0.49
0.8	0.83
0.9	1.0

Table 2.11  $P_{sc}$  subfactor for stripcropping

system	$P_{sc}$ for conservation planning	Impact on sediment delivery from field
Rotation stripcropping		
RC-WSG-M1-M2	0.78	0.53
RS-SSG-RC-SSG	0.91	0.75
RC-RCrt-RCrt-M	10.84	0.65
RC-WSG	0.86	0.71
0.1 Filter	0.91	0.24
Buffer strip	0.67	0.15
Buffer strip	0.75	

주) RC : row crop, WSG : winter small grain, SSG : spring small grain, M1 : 1st year meadow, M2 : 2nd year meadow, C : corn, SB : soybeans, rt : reduced tillage, nt : not till

## 2.3 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation) 공식

USLE는 농경지나 건설현장과 같이 사면 마루부에서의 관상 및 세류침식에 의한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 기법으로 단일강우에 의한 침식량을 산정할 수 없다. 따라서 이와 같은 단점을 보완하고자 Williams와 Berndt(1972)는 MUSLE기법을 제안하였다.

Williams(1976)는 USLE에서 사용한 강우에너지 항인  $EI_{30}$ 지수를 유출에너지 항으로 대체하는 방법으로 균등유역에서는 총괄인자접근기법(Lumped parameter approach)을 비균등유역에서는 유사 전달과정(Sediment routing procedure)를 제안하였다. 총괄인자기법은 전 유역을 하나의 특성인자로 표현한 것이다.

### 1) Lumped Parameter Approach

Williams(1977)과 Williams와 Berndt(1972)은 배수면적이 2.7~4380acres, 평균경사 및 사면길이는 0.9%~5.9%, 258~570ft인 Nebraska의 Hastings와 Texas의 Reisel 근처 유역의 778개 강우자료를 사용하여 USLE의 R계수를 여러 개의 다른 매개변수로 바꾸어 유역의 토사유출량을 예측하는 MUSLE를 개발하였다.

토사유출량을 가장 잘 산정할 수 있는 인자이며 유출에너지를 나타내는 인자로 유출량과 침투유량의 곱인  $Q \cdot q_p$ 를 이용하여 식 (2.19)와 같이 표현하였다.

$$Y = 95(Q \times q_p)^{0.56} \{K\}_a \{LS\}_a \{CP\}_a \quad (2.19)$$

여기서 Y는 단일강우에 의한 토사침식량(tons), Q는 유출체적(acre-feet),  $q_p$ 는 침투유량( $ft^3/sec$ )이며,  $\{K\}_a$ ,  $\{LS\}_a$ ,  $\{CP\}_a$ 는 면적가중치를 이용하여 산정한 유역의 USLE/RUSLE 인자의 평균값이다.

전달률의 정의에 의하여 단일강우의 전달률은 다음 식 (2.20)과 같이 표현된다.

$$D = \frac{95(Q \times q_p)^{0.56}}{R \times \text{area}} \quad (2.20)$$

여기서 Area는 유역의 넓이(acre), R은 단일호우에 대한 침식성(English Unit), Q와  $q_p$ 는 acre-feet와  $ft^3/sec$ 이다.

## 2) Routing Procedure

USLE의 사용은 식 (2.19)에서 주어진 균등한 유역이라는 전제조건이 따라야하나 토사침식 등에 의하여 토양상태가 교란되는 과정 중에 있는 유역은 대부분 이질적인 특성을 보이고 있다는 점이다. 따라서 Williams(1975, 1978)는 다음과 같은 비균등 유역에서의 토사유출량 산정기법을 제안했다.

- (1) 그림 2.2와 같이 몇 개의 균등한 소유역으로 분할하고 각 소구역으로부터 유역 출구까지의 도달시간  $T_{ii}$ 를 결정한다.
- (2) 식 (2.19)을 사용하여 각 소유역별 토사유출량  $Y_{oi}$ 를 결정한다.
- (3) 각 소유역 유출토사의 평균입경  $D_{50}$ 를 결정한다.
- (4) 토사침전율은 소구역으로부터 유역출구까지의 도달시간, 유사량, 입자크기에 비례하는 것으로 가정하여 식 (2.21)과 같이 산정한다.

$$\frac{dY_i}{dt} = -BY_i\sqrt{d_{50i}} \quad (2.21)$$

여기서  $Y_i$ 는 소유역의 출구에서의 토사유출량, B는 전달계수(Routing coefficient),  $d_{50}$ 는 유사 평균입경이다.

식 (2.21)을 적분하면 식 (2.22)로 표현된다.

$$Y_i = Y_{oi}e^{-BT_{ii}\sqrt{d_{50i}}} \quad (2.22)$$

여기서  $Y_{oi}$ 는 소유역 출구에서의 토사침식량이고,  $Y_i$ 는 i 소유역에서 발생한 토사침식량이 유역의 유출구에 도달하는 양이며,  $T_{ii}$ 는 소유역에서 주 유역의 유출구까지의 도달시간이다.



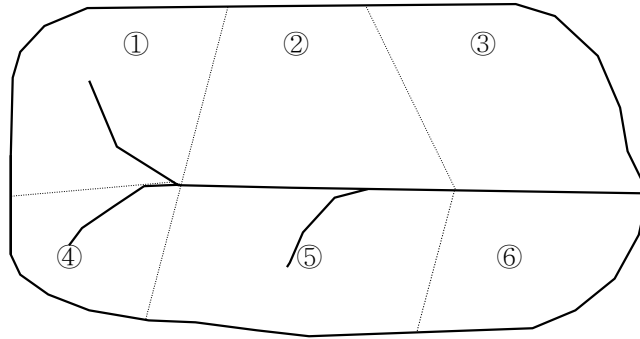


Fig 2.2 Example watershed division for MUSLE routing procedures

(5) 유역전체의 총 토사침식량을 계산하면 다음 식 (2.23)과 같다.

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_{oi} \cdot \exp [-BT_{ti}\sqrt{d_{50}}] \quad (2.23)$$

(6) 전달계수를 식 (2.24)으로부터 산정한다.

$$((Q \times q_p)^{0.56})_{ws} = \sum_{i=1}^n 95(Q_i \times q_{pi})^{0.56} \exp [-BT_{ti}\sqrt{d_{50}}] \quad (2.24)$$

여기서  $(Q \times q_p)_{ws}$ 는 전 유역에 대한 유출에너지 항이다.

Texas, Reisel의 평균경사 2%, 4380 acre의 면적을 가진 유역에 대하여 5개의 강우를 이용하여 검토한 결과, 본 기법이 만족스러운 것으로 검증되었다. 그러나 이 기법은 시간적 유사분포나 유사 입도분포를 예측할 수 없으며 홍수터 침식이나 수로침식 또한 고려되지 않았다는 단점이 있다. 홍수터 침식과 수로침식이 고려된 복잡한 연구 결과가 있기는 하나 검증된 바 없으며 따라서 일반적으로 사용되지도 않고 있다.

### 3) 유사 입도분포

식 (2.24)을 사용하려면, 소유역별 유출토사의  $d_{50}$ 값이 요구된다. Barfield 등(1979)은 큰 입자들은 모두 퇴적된다고 단순히 가정하여 모암의 입조분포로부터 소유역의 유사 입조분포를 산정한 예도 있다.

## 2.4 원단위법 공식

원단위법은 지표의 토지이용도에 따라 토양침식 원단위가 제시되어 있을 경우 사용할 수 있으며, 이는 다양한 토지환경변화를 고려하기 어려운 점이 있다. 따라서 호우에 의한 토양침식량 추정을 위한 경험공식이 Musgrave(1947)에 의하여 다음 식 (2.25)와 같이 제안된 바 있다.

$$E = FR\left(\frac{S}{10}\right)^{1.35}\left(\frac{L}{72.6}\right)^{0.35}\left(\frac{P}{1.25}\right)^{1.75} \quad (2.25)$$

여기서 E는 연간 평균침식량(ton/acre · year), F는 침식성 계수((ton/acre · year), R은 무차원 피복계수, S는 경사(%), L은 사면길이(ft), P는 2년 빈도 30분 지속기간 강우량(in)이다. 아래 <표 2.12>는 국내 원단위표를 나타낸 것이다.

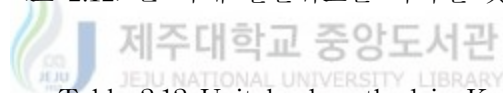


Table 2.12 Unit load method in Korea

지표상태	토사유출량	
	(m <sup>3</sup> /년/ha)	(m <sup>3</sup> /년/km <sup>2</sup> )
나지, 황폐지	200~400	20,000~40,000
배벌지, 초지	15	1,500
택벌지	2	200
보통의 임지	1	100

## 2.5 각 이론에 대한 비교

앞에서 검토한 각종 토사유출량 산정기법의 산정량, 적용범위, 특징 및 적용시 주의사항 등에 대한 비교·분석을 실시한 결과는 <표 2.13>과 같다.

Table 2.13 The comparison of each model type

모 형		특 성	
경험적 산정기법	USLE	산정치	관상, 세류 및 세류간 침식에 의한 장기간 또는 연평균 토사유출량 산정, 유사 $\Phi < 1.0\text{mm}$
		적용범위	사면길이(L) 1000ft 이하의 사면산림/농경지 미국 중부 및 동부지역 (서부의 건조, 반건조지역 제외)
		특징	유역특성이 불균일한 곳에 적용이 가능 피복조건 및 침식조절기법의 영향이 다소간 고려됨.
		주의사항	침식능(R)과 침식성(K)를 아무곳이나 적용하기 곤란. 수로 및 구곡에서의 퇴적모의 못함. 유역면적이 넓을 경우 심각한 오차를 유발. 유출지점에 따라 유사전달률 개념의 도입이 요구됨.
	RUSLE	산정치	세류 및 세류간 침식에 의한 단기 및 중기(월 또는 계절) 또는 연평균 토사유출량 산정 유사 $\Phi < 1.0\text{mm}$
		적용범위	사면길이(L) 1000ft 이하의 사면산림/농경지 미국 전 지역 (서부의 건조, 반건조지역 포함)
		특징	유역특성이 불균일한 곳에 적용이 가능 계절별 피복조건 및 다양한 침식조절기법 영향이 고려됨. 프로그램을 통한 컴퓨터 적용이 용이
		주의사항	수로 및 구곡에서의 퇴적모의 못함. 따라서 유출지점에 따라 유사전달률 개념의 도입이 요구됨. 연평균 토사유출량 산정결과의 신뢰성이 가장 떨어짐.
	MUSLE	산정치	단일호우에 의한 세류 및 세류간 침식토사 유출량 산정 유사 $\Phi < 1.0\text{mm}$
		적용범위	사면길이(L) 1000ft 이하의 사면산림/농경지 미국 중부 및 동부지역 (서부의 건조, 반건조지역 제외)
		특징	USLE와 동일하며 단일호우에 적용
		주의사항	수로 및 구곡에서의 퇴적모의 불가능. 따라서 유출지점에 따라 유사전달률 개념의 도입이 요구됨.
원단위법	산정치	단위면적당 연평균 토사유출량	
	적용범위	경험식이 유도된 유역에 대하여 적용.	
	특징	식의 적용이 단순	
	주의사항	유역의 특성이 다른유역이나 지표면 이용도 변화를 반영하기 어려움.	

### Ⅲ. 50년 빈도에 대한 토사유출량 산정

#### 3.1 조사지역 특성

##### 3.1.1 조사지역 위치 및 구역선정

본 조사지역은 행정구역상 제주도 남제주군 동부지역에 위치하고 있으며 표고는 약 EL. 250~300m 정도에 위치하는 중산간지대(표고 EL. 200~600m)에 해당되고 있다.

본 연구에서는 앞에서 제시하고 있는 토사유출량 산정기법에 대한 검증을 위하여 시험대상유역을 실제로 개발이 이루어지는 유역을 설정하여 그림 3.1과 같이 3구역을 선정하였고, 개발단계에 따라 범용토양공식(RUSLE 공식 : 정상강우년시, 단일호우시), 원단위법 등의 토사유출모형을 적용하여 그 결과를 비교·검토하였다.

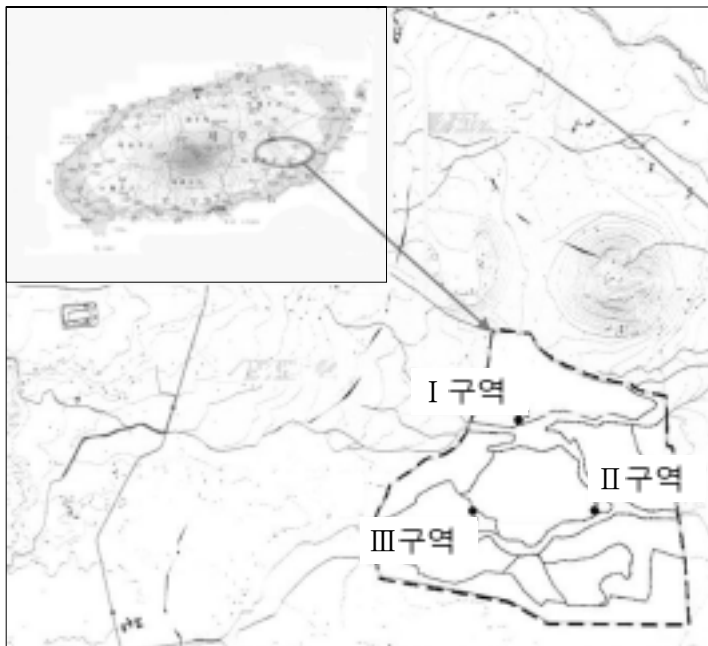


Fig 3.1 Investigation region and selection of the zone

### 3.1.2 지형현황

제주도는 화산체로서 화산지형의 특색을 잘 보여주고 있으며 침식윤회 단계에서 유년기에 해당되어 화산원지형이 많이 보전되어 있다. 본도의 평면도상의 모양은 장축의 길이 73km, 단축의 길이 31km인 타원체이다. 한라산을 정점으로 동서사면은 매우 완만한 경사를 이루나 남북사면은 보다 급한 경사를 이루고 있다.

한라산 정점에서부터 방사상 형태로 낮아지는 제주도 지형형상에 의해 본 시험지역은 제주도 중심부에서 동쪽에 위치하고 있음에 따라 서고-동저의 지형경사를 이루고 있는데 경사 기복이 심한 중산간지대의 특성과는 달리 완만한 경사를 보이고 있다.

또한, 시험지역은 현재 목장(牧場)으로 이용되고 있음에 따라 대부분 초지가 조성되고 있고, 지적경계부를 중심으로 삼나무림이 조성되어 있는 특징을 보인다.

시험지역 내에는 동서방향으로 천미천의 지류가 형성되고 있는데, 하상은 대부분 현무암으로 구성되고 있으면서 쉽게 침투되지 않고, 하천이 비교적 규모가 크에 따라 건기시를 제외하고는 하천유출을 보이고 있다. 천미천은 규모가 매우 큰 하천으로 시험유역 및 주변으로 다수의 지류가 형성되고 있는 것이 특징이다. 또한, 이들 하천을 제외하고는 오름·용암·동굴·습골 등의 특이한 지형형상은 없는 것으로 확인되고, 시험지역 북측 200m 지점에 성불오름의 기생화산이 형성되고 있다.

### 3.1.3 기상현황

본 시험지역이 위치한 제주도는 우리나라 서남쪽 해상에 위치한 섬지역으로 강한 바람이 많고, 일기 변화는 잦으나 해상에 의한 기후특성으로 기온은 대체로 온화하며, 강우량이 많은 다우지대로서 해양성 기후를 나타내고 있다.

최근 10년간의 월별 및 연도별 기상개황은 <표 3.1~2> 나타내었으며, 연평균 기온은 15.5°C이며 연평균 강수량은 1,981.6mm로 대체로 다우현상을 보이고 있다.

Table 3.1 Yearly weather

연도		1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	10년간
기 온 (°C)	평균	14.5	14.8	15.5	16.4	15.4	15.3	14.8	15.7	16.5	15.8	15.5
	최고	33.1	33.5	33.7	33.7	32.3	33.4	32.7	31.8	33.7	35.0	35.0
	최저	-4.4	-3.9	-3.1	-3.1	-2.3	-2.9	-5.1	-2.5	-1.7	-4.8	-5.1
강 수 량 (mm)	총량	2,169.8	1,757.9	1,803.0	2,235.9	2,328.0	1,370.0	1,856.5	1,781.5	2,550.5	1,962.5	1,981.6
	10분 최대	16.5	16.0	25.0	22.0	14.5	12.5	21.0	16.5	20.0	25.0	25.0
	1시간 최대	76.0	45.0	44.0	73.0	55.5	27.0	94.0	48.0	69.0	100.5	100.5
	6시간 최대	219.5	107.5	87.5	173.5	106.5	55.0	129.5	90.5	170.0	189.5	219.5
	1일 최대	302.0	151.0	150.0	176.5	164.5	100.5	129.5	114.0	163.5	251.5	302.0
풍 속 (m/s)	평균	3.2	3.1	2.8	3.0	3.1	3.2	3.3	3.1	2.9	3.1	3.1
	최대	15.9	11.4	15.4	14.8	24.0	14.1	12.7	19.9	20.9	14.0	24.0
	(풍향)	NNW	SW	SSE	SSE	SE	SSE	NNW	NNE	NW	S	SSE
상대습도(%)	68	69	65	74	79	76	66	73	77	72	72	

Table 3.2 Monthly weather

구분 \ 월		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
기온 (°C)	평균	5.2	6.1	9.5	13.8	17.7	21.1	25.0	26.5	23.1	18.0	12.3	7.5	15.5
	최고	18.0	20.5	22.5	25.2	30.1	31.3	35.0	33.7	33.3	30.1	25.6	20.2	35.0
	최저	-4.8	-5.1	-2.7	0.1	5.4	11.3	17.1	17.6	10.9	4.4	0.0	-3.7	-5.1
강수량 (mm)	총량	92.1	49.7	133.1	146.2	178.1	225.4	307.9	348.1	218.6	105.8	105.9	71.0	165.1
	10분 최대				11.5	17.0	25.0	21.0	25.0	25.0	10.5			25.0
	1시간 최대				29.5	49.0	47.0	94.0	100.5	72.0	32.0			100.5
	6시간 최대													
	1일 최대	116.0	53.5	62.0	79.0	121.0	135.5	219.5	189.5	152.5	107.5	71.5	84.0	219.5
	1일 최대	113.5	74.0	96.0	139.0	163.0	137.5	302.0	251.5	177.0	151.0	150.0	125.0	302.0
풍속 (m/s)	평균	3.6	3.7	3.6	3.1	2.7	2.4	2.8	2.8	3.0	3.0	3.1	3.2	3.1
	최대	12.7	12.4	13.5	14.0	12.8	12.0	15.9	24.0	20.9	11.5	15.4	11.4	24.0
상대습도(%)		67	64	64	67	73	80	85	81	75	68	69	68	72

우리나라는 중위도 지대에 위치하고 있기 때문에 사계절이 뚜렷한 온대성 기후의 특징을 가지고 있으며, 계절풍의 영향으로 여름에는 온난다습한 기후가 나타나고 겨울에는 한랭건조한 기후가 나타나고 있다.

우리나라의 연평균 강수량은 관측소별로 약 1,000~1,800mm로서 비교적 습윤한 지역에 속한다. 여름에는 계절풍과 양자강 유역에서 발생하여 우리나라로 이동하는 온대성 저기압 및 폭풍우를 수반하는 열대성 저기압인 태풍 등이 보통 6~8월에 집중되어 연강수량의 약 50~60% 정도가 집중되며, 겨울에는 강수량이 매우 낮게 나타나고 있다. 이에 따라 우기와 건기가 뚜렷하게 구별되며, 이와 같은 강수량의 불균등한 분포는 치수 및 이수에 근본적인 문제점을 야기하고 있다.

우리나라 강우의 특성 중 하나로 강수량이 단기간에 집중되는 집중호우를 들 수 있으며 특히, 최근 기상이변에 의해 발생하는 게릴라성 집중호우는 100mm/hr 이상의 강우강도를 발생시키기도 하며, 집중호우의 발생 및 이동을 예측하기가 어렵기 때문에 큰 홍수피해를 유발시키고 있다.

### 3.1.4 식생현황

시험대상지는 표고 245m에서 302m 범위의 평탄지 또는 완경사지인데 대부분의 지역은 오래전부터 목장지로 이용되어 온 곳으로 자연식생은 이미 파괴되어 인위적으로 조성한 초본식생과 조림목이 우점하고 있다. 다만 일부 하천변 등 목초지로 조성할 수 없었던 일부구역은 파괴된 자연식생이 회복되고 있는 과정이나 그 형태는 선형이며 주로 하천변에 제한되고 있다.

시험대상지 주변에는 경작지의 재배식물, 해송 또는 삼나무침엽수인공림, 활엽수자연림, 초지 등으로 구성되어 있는데 자연림의 경우 구성종은 다양하다. 시험대상지 주변에도 자연림은 광범위하게 파괴되어 식생의 인공화의 정도가 심하지만 천미천변에는 자연림이 일부 잔존하거나 회복되고 있다.

시험대상지를 포함한 이 지역의 원식생은 구실잣밤나무, 아왜나무, 생달나무, 가시나무류, 센달나무 등으로 구성된 상록활엽수림일 것으로 추정되며 천미천 등의 잔존림은 지역의 원식생을 나타내고 있다.

시험대상지에는 원식생이 파괴된 후 대부분 초지로 변화하거나 삼나무방풍림으로 조성되어 있어서 원식생에 해당되는 상록활엽수림은 거의 없다. 현재 하천변과 인공림의 임연부에는 자연림이 회복되고 있으며 이 수림의 구성수종인 자귀나무, 팽나무나 예덕나무 등의 낙엽활엽수들은 맹아에 기원한 것이어서 거수목인 경우 거의 없다.



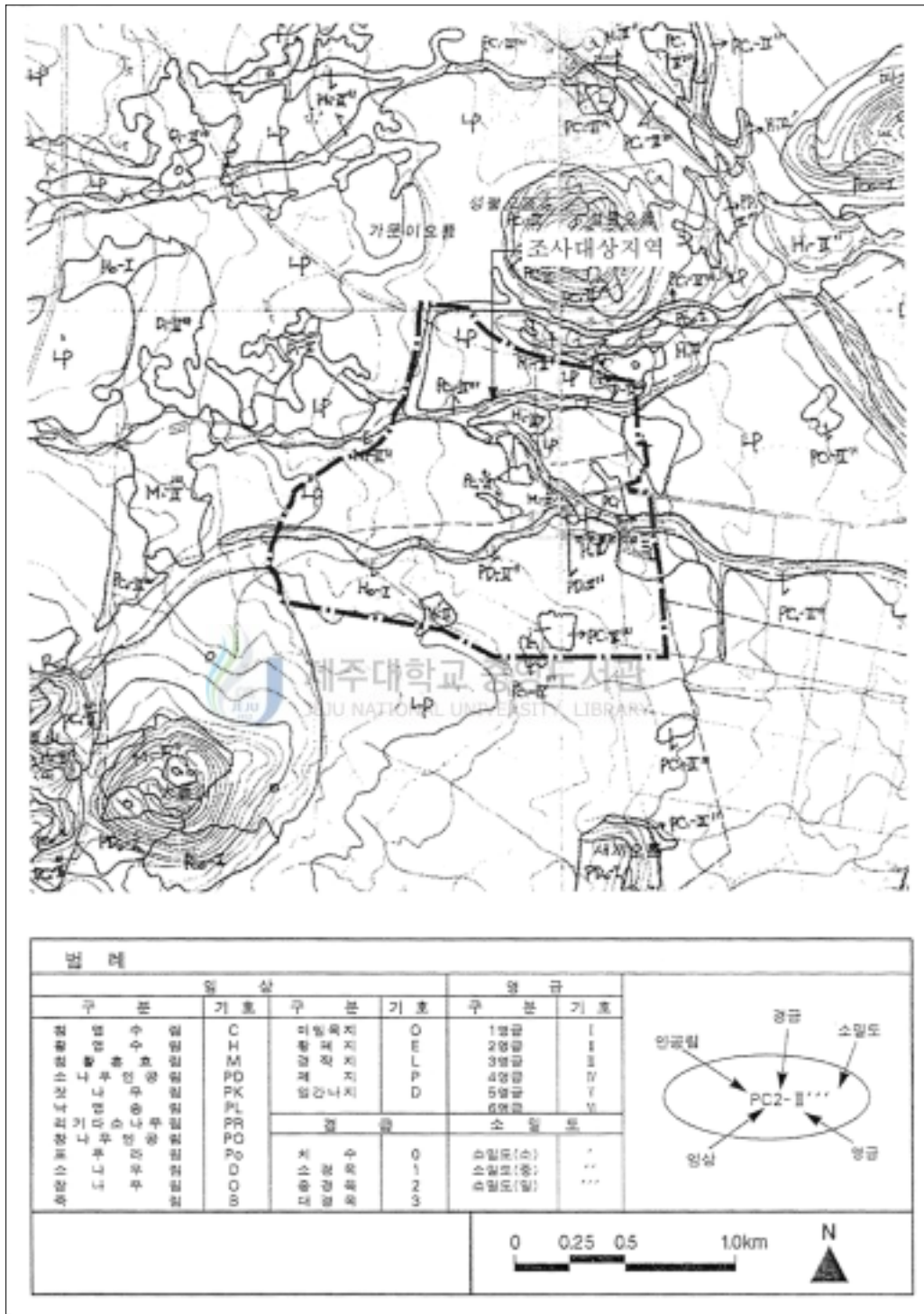


Fig 3.2 Forest type map

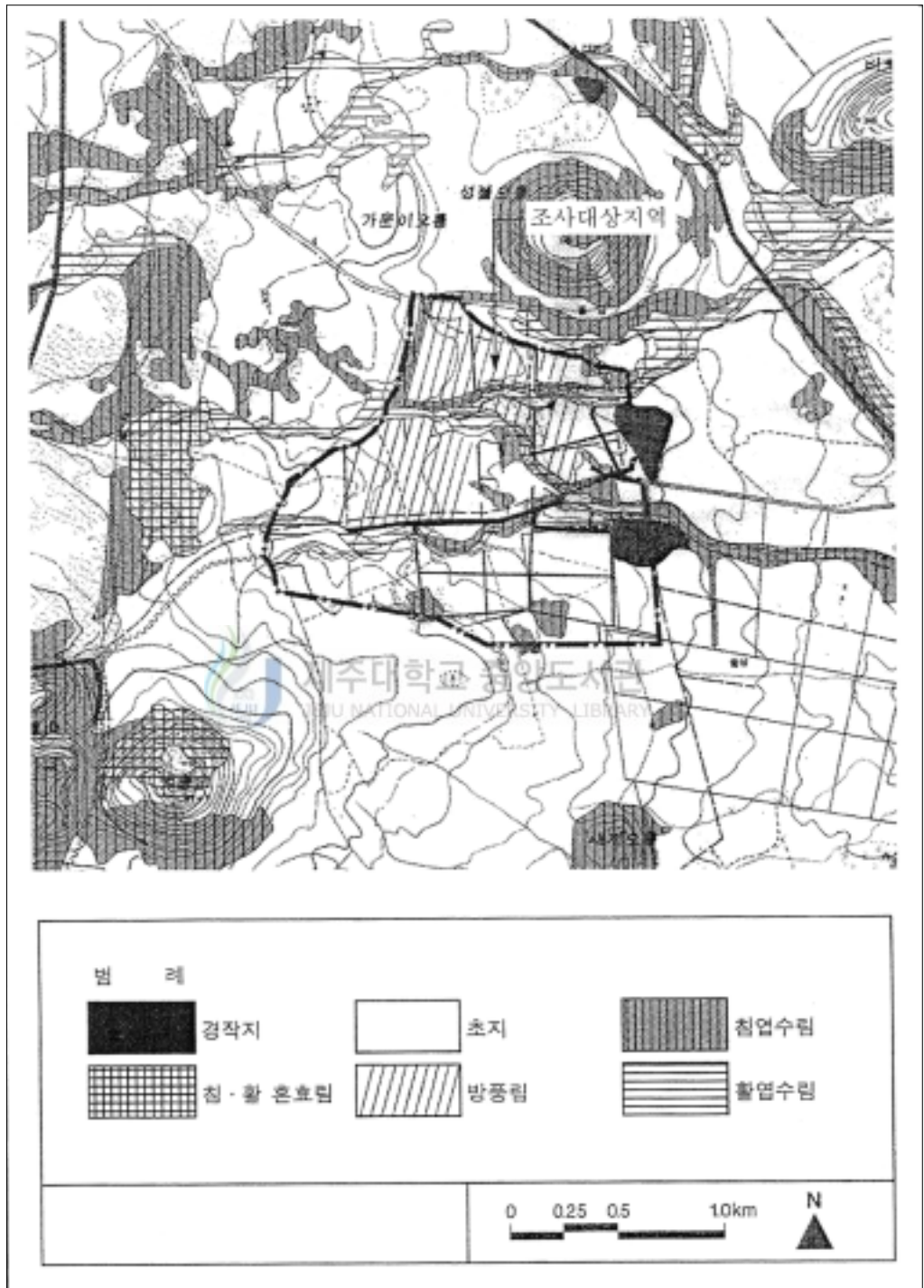


Fig 3.3 Existing plantation map

## 3.2 RUSLE 모형을 이용한 토사유출량 산정

### 3.2.1 정상강우년의 연평균 토사침식량

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

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \text{ (정상강우년의 연평균 토사침식량)}$$

#### 1) 강우침식도인자 (R, $10^7$ Joule/ha · mm/hr)

앞에서 언급한 각 호우사상에 대한 토사유출량을 본 연구에 적용하기 위하여 국내에 알려진 정필균(1983)등이 기상청 산하 51개소에 대하여 1969~1980년 동안에 걸쳐 작성된 관측소별 강우침식인자를 고려하여 <표 3.3>에 산정된  $636(10^7 \text{ Joule/ha} \cdot \text{mm/hr})$ 를 적용하였다. R값의 분포도는 그림 3.4와 같다.

Table 3.3 Rainfall erosion factor by observation post

번호	관측소명	R	자료기간	번호	관측소명	R	자료기간
159	부 산	629	1969-1978	135	추 풍 령	297	1969-1978
143	대 구	209	1969-1978	105	강 룡	297	1969-1978
156	광 주	551	1969-1978	184	제 주	390	1969-1978
146	정 주	364	1969-1978	165	목 포	323	1969-1978
138	포 향	261	1969-1978	108	서 울	593	1969-1978
152	울 산	455	1969-1978	168	여 수	496	1969-1978
<b>189</b>	<b>서귀포</b>	<b>636</b>	<b>1969-1978</b>	162	충 무	508	1969-1979
140	군 산	429	1969-1979	090	속 초	255	1969-1979
192	진 주	424	1969-1979	232	온양(아산)	617	1969-1979
236	부 여	483	1969-1979	278	의 성	293	1969-1979
244	임 실	435	1969-1979	260	장 흥	554	1969-1979
288	밀 양	392	1969-1979	295	남 해	701	1969-1979
279	선 산	262	1969-1979	272	영 주	326	1969-1979
226	보 은	351	1969-1979	235	대천(보령)	491	1969-1979
255	함 평	526	1969-1979	211	인 제	294	1969-1979
245	정주(정읍)	552	1969-1979	289	산 청	475	1969-1979
256	승 주	512	1969-1979	223	충 주	328	1969-1979
247	남 원	464	1969-1979	221	제 천	344	1969-1979
112	인 천	406	1969-1980	119	수 원	557	1969-1980
101	춘 천	464	1969-1980	131	청 주	490	1969-1980
133	대 전	490	1969-1980	129	서 산	489	1969-1980
100	대관령	269	1969-1980	201	강 화	687	1969-1980
273	점촌(문경)	324	1969-1980	212	홍 천	417	1969-1980
203	이 천	465	1969-1980	114	원 주	578	1969-1980
202	양 평	427	1969-1980	214	삼 척	215	1969-1980
폐쇄	(함안)	341	1969-1980				

주) ( )안은 과거 관측소명

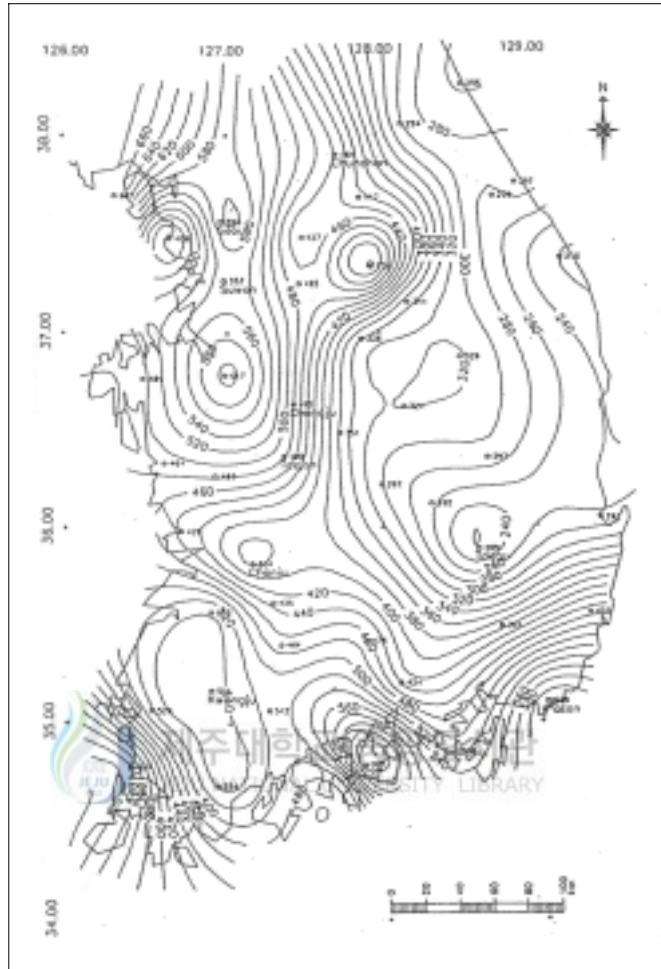


Fig 3.4 Isoline map of rainfall runoff factor in Korea

## 2) 토양침식성인자 (K, tons/acre/R)

본 연구에서는 토양종류에 따라 앞에서 언급한 Wischmeier(1971)의 추정공식에 의한 방법과 미국 국무성(USDA-SCC)에서 제시한 건설현장 및 광산지역에 대한 K값을 참고하였으며, 특히 물리적 특성(토립자 입경분포, 조직, 유기물함량, 수분함량, 투수계수, 밀도, 다짐도 등)은 토양침식성에 절대적인 영향을 주므로 우선 K값 산정에 앞서 시험대상지역에 대하여 개발전, 개발중·후의 토양시료의 입도분석 시험을 하였다. 그리고 그 결과를 이용하여 시험구역의 토성특성과 K값을 산정하였다. 그 결과는 <표 3.4>와 같다.

Table 3.4 Soil quality and estimated result of K value

유역별	개발단계	토립자 종류별 구성비 (%)					유기물함량 (%)	토양구조코드	투수도	K값 입도분석	
		자갈 > 2mm	모래 0.1~2mm	극세사 0.05~0.1mm	실트 0.002~0.05mm	점토 < 0.002mm				tonnes/acre/R	tonnes/hr/R
I	개발전	32	25	10	25	8	3	2	3	0.19	0.25
		57		35		8					
	개발중·후	32	25	10	25	8	3	2	3	0.19	0.25
		57		35		8					
II	개발전	31	18	4	32	15	3	2	3	0.18	0.24
		49		36		15					
	개발중·후	33	21	6	26	14	3	2	3	0.16	0.21
		54		32		14					
III	개발전	25	13	3	40	19	3	2	3	0.21	0.28
		38		43		19					
	개발중·후	35	17	4	30	14	3	2	3	0.17	0.22
		52		34		14					

3) 사면길이-사면경사 인자 (LS, 무차원)

강우에 의한 토양침식은 경사지역의 길이와 경사도에 따라 달라진다. 그러므로 세류와 세류사이 사면의 토양침식에 대한 지형의 효과를 고려하기 위하여 무차원계수 LS를 도입하였으며, 앞에서 언급한바와 같이 McCool(1987, 1993)에 의하여 제시된 식 (2.10), (2.11), (2.14), (2.15), (2.16)을 이용하여 산정하였으며 산정된 인자는 <표 3.5>과 같다.

Table 3.5 Length and slope factors L and S

구분	유역명	사면길이		사면경사 (%)	Sin $\beta$	S	$\beta$	m	L	LS
		(m)	(ft)							
개발전	I	555	1,821	4.44	0.044	0.51	0.61	0.38	3.40	1.44
	II	920	3,018	5.38	0.054	0.61	0.71	0.42	4.79	3.22
	III	597	1,959	4.13	0.041	0.48	0.58	0.37	3.38	1.36
개발중·후	I	221	725	4.31	0.043	0.50	0.60	0.38	2.40	1.20
	II	998	3,274	4.85	0.048	0.55	0.65	0.25	2.59	1.42
	III	800	2,625	3.94	0.039	0.46	0.56	0.36	3.64	1.67

4) 피복관리인자 (C, 무차원)

본 연구에서 산정한 피복관리인자 C는 농경지 0.070, 하천 및 저수지 0.000, 나지 1.000, 불투수지 0.010, 초지 0.100값을 적용하였으며, 피복관리인자 C값은 <표 3.6>과 같이 산정되었다.

Table 3.6 Result of cover management factor

구 분	유역명	총면적 (km <sup>2</sup> )	토지 이용 상태 별 면 적 (km <sup>2</sup> )					평균 C값
			농경지	하천	나지	불투수지	초지	
토지이용상태별 C값			0.070	0.000	1.000	0.010	0.100	
개발 전	I	0.052	-	-	-	-	0.052	0.10
	II	0.133	0.005	-	-	-	0.128	0.10
	III	0.088	-	-	-	0.001	0.087	0.10
개발 중	I	0.038	-	-	0.038	-	-	1.00
	II	0.275	-	-	0.271	-	0.004	0.99
	III	0.146	-	0.005	0.117	-	0.024	0.82
개발 후	I	0.038	-	0.004	-	-	0.034	0.09
	II	0.275	-	0.020	-	0.018	0.237	0.09
	III	0.146	-	0.013	-	0.001	0.132	0.09

5) 토양보존대책인자 (P, 무차원)

본 연구에서는 경사에 따라 Wischmeier와 Smith(1978)가 제안한 <표 2.5>를 이용하여 개발전·중·후를 구분하여 적용하였으며 P값은 <표 3.7>과 같다.

Table 3.7 Result of support practice factor

구 분	유역명	사면경사 (%)	P값
개발 전	I	4.44	0.50
	II	5.38	0.50
	III	4.13	0.50
개발 중·후	I	4.31	0.50
	II	4.85	0.50
	III	3.94	0.50

6) 토사유출량 산정결과

앞에서 분석된 RUSLE공식(정상강우년시)의 각 인자들에 대한 계수를 적용하여 배수유역별, 개발단계별(전·중·후)에 따른 토사유출량을 산정하였으며 그 결과 <표 3.8>와 같다.

Table 3.8 Average annual soil erosion amount

구분	유역명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	R (10 <sup>7</sup> J/ha · mm/hr)	K (ton/ha /R)	LS	C	P	토사유출량	
								(ton/ha /year)	(ton /year)
개발 전	I	0.052	636	0.25	1.44	0.10	0.50	11	57
	II	0.133		0.24	3.22	0.10	0.50	25	333
	III	0.088		0.28	1.36	0.10	0.50	12	106
개발 중	I	0.038		0.25	1.20	1.00	0.50	95	361
	II	0.275		0.21	1.42	0.99	0.50	94	2,582
	III	0.146		0.22	1.67	0.82	0.50	96	1,402
개발 후	I	0.038		0.25	1.20	0.09	0.50	9	34
	II	0.275		0.21	1.42	0.09	0.50	9	235
	III	0.146		0.22	1.67	0.09	0.50	11	161



### 3.2.2 단일호우시(IRB-Transport Research Board)에 의한 토사침식량

이 모형은 공사기간이 단기간이고 개발에 따른 토사유출량에 의한 재해의 위험도 평가를 위해서는 빈도개념도입이 필요하다. 설계강우에 의한 토사침식은 사업지구에 임의의 설계강우가 발생하였을 때 개발중 단계 및 개발후 단계의 토사침식량을 의미하며, 이는 개발지구에 어느 지속기간 동안 단일 최대 호우가 발생할 경우 토사침식량을 파악할 수 있게 한다. 따라서 설계강우의 기본이 되는 강우지속기간, 강우의 시간적 분포가 토사침식량을 좌우하는 중요한 변수가 될 수 있다.

RUSLE공식은 처음 개발 당시에는 연평균 토사침식량을 추정하는데 목적이 있었으나 이후 단일호우와 합성호우에 대한 R값을 단일호우의 총 강우량과 관계시키며 있다. 뿐만 아니라 Wischmeier와 Smith(1975, 1978)는 연평균 R값을 계산하는데 있어서도 단일호우에 대한 값의 종합으로부터 추정한 것이다. 본 연구에서도 설계강우가 단일호우로 발생하였을때의 토사침식량을 추정하였으며, 그 이론 및 산정절차를 살펴보면 다음과 같다.

건설현장에서 단일호우시 적용할 수 있는 토사침식량 공식은 식 (3.1)과 같다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot VM \quad (3.1)$$

여기서 R은 단일호우의 강우침식도이므로 연평균값과 다르고 VM은 C와 P값을 결합한 것이다. 그 외 인자들은 앞에서 설명한 바와 같다.

#### 1) 강우침식인자

앞에서 언급한 바와 같이 연평균 R값은 건설현장에서 단일호우에 의한 토양손실량 추정에 직접 사용하기는 곤란하다. 앞에서 설명한 식 (2.10)과 같이 임의 재현기간의 임의 지속시간 설계호우 사상의 R값 산정을 위해서는 이른바 대상지역의 강우강도, 지속기간, 빈도 자료가 필요하며, R값을 산정하기 위한 기본 가정을 임의 지속시간에 해당하는 최대호우에는 그보다 적은 지속시간의 최대호우를 포함하고 있으며, 다시 그 호우에는 더 적은 지속시간의 최대호우를 포함하고 있다는 사실이다. 또한 토양손

실량과 R값과의 관계는 최대호우의 발생시기 같은 호우특성에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다.(Wischmeier, 1959)

본 연구에서는 50년 빈도의 강우지속기간별 강우량을 이용하여 산정하였으며, 산정한 R값은 <표 3.9>과 같다.

Table 3.9 R value of frequency 24 hours duration time design heavy rain in 50

지속기간 (hr)	강우량 (cm)	간격당강우량 (cm)	시간간격 (hr)	강우강도 (cm/hr)	에너지단위 (m · ton/ha)
계					12,211
0	0.000	0.000	0.0	0.00	-
0.5	9.071	9.071	0.5	18.14	2,921
1	15.455	6.384	0.5	12.77	1,966
2	20.815	5.360	1.0	5.36	1,474
3	24.844	4.030	1.0	4.03	1,064
6	32.173	7.328	3.0	2.44	1,788
12	40.472	8.299	6.0	1.38	1,842
24	46.723	6.251	12.0	0.52	1,156
$R(50\text{년 빈도}) = 12,211 \times 18.14 \div 100 = 2,215 \cdot 10^7 \text{ J/ha} \cdot \text{mm/hr}$					

## 2) 토양침식 조절인자 (VM, 무차원)

침식표면의 특성을 나타내는 값으로서 원 공식의 경작인자 C와 토양보존대책인자 P가 결합된 것이며, 본 연구에서는 Lsraleson(1980)이 제안한 <표 3.10>을 이용하여 VM값을 산정하였으며 <표 3.11>와 같이 산출되었다.

Table 3.10 Selected *VM* values, soil erosion modulator(TRB, 1980)

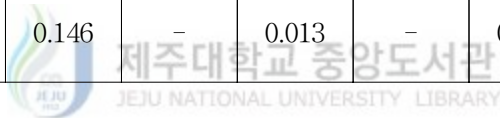
Condition	<i>VM Factor</i>
1. Bare soil conditions	
freshly disked to 6~8 inches	1.00
after one rain	0.89
loose to 12 inches smooth	0.90
loose to 12 inches rough	0.80
compacted bulldozer scraped up and down	1.30
same except root raked	1.20
compacted bulldozer scraped across slope	1.30
same except root raked across	0.90
rough irregular tracked all directions	0.90
seed and fertilize, fresh	0.64
same after six months	0.54
seed, fertilizer, and 12 months chemical	0.38
not tilled algae crusted	0.01
tilled algae crusted	0.02
compacted fill	1.24~1.71
undisturbed except scraped	0.66~1.30
scarified only	0.76~1.31
sawdust 2 inches deep, disked in	0.61
2. Asphalt emulsion on bare soil	
1250 gallons/acre	0.02
1210 gallons/acre	0.01~0.019
605 gallons/acre	0.14~0.57
302 gallons/acre	0.28~0.60
151 gallons/acre	0.65~0.70
3. Dust binder	
605 gallons/acre	1.05
1210 gallons/acre	0.29~0.78

Table 3.10 Selected *VM* values, soil erosion modulator(TRB, 1980), continued

Condition	<i>VM Factor</i>
4. Other chemicals	
1000 lb. fiber Glass Roving with 60~150 gallons asphalt emulsion/acre	0.01~0.05
Aquatain	0.68
Aerospray 70, 10 percent cover	0.94
Curasol AE	0.30~0.48
Petroset SB	0.40~0.66
PVA	0.71~0.90
Terra-Tack	0.66
<sup>b</sup> Wood fiber, 1000 lb/acre fresh (hydromulch)	0.05~0.73
<sup>b</sup> Wood fiber, 1000 lb/acre fresh (hydromulch)	0.01~0.36
<sup>b</sup> Wood fiber, 3500 lb/acre fresh (hydromulch)	0.009~0.10
Portland cement + Latex	
1000 lbs/ac + 605 gals/ac	0.13
1500 lbs/ac + 605 gals/ac	0.006
5. Seedings	
temporary, 0 to 60 days	0.40
temporary, after 60 days	0.05
permanent, 0 to 60 days	0.40
permanent, 2 to 12 months	0.05
permanent, after 12 months	0.01
6. Brush	0.35
7. Excelsior blanket with plastic net	0.04~0.10
8. Mulch (depends on type and amount of mulch and erosion potential)	0.01~1.00

Table 3.11 Result of VM, soil erosion modulator

구 분	유역명	총면적 (km <sup>2</sup> )	토지이용상태별면적 (km <sup>2</sup> )					평균 VM값
			농경지	하천	나지	불투수지	초지	
토지이용상태별 VM값			0.040	0.000	0.800	0.010	0.050	
개 발 전	I	0.052	-	-	-	-	0.052	0.05
	II	0.133	0.005	-	-	-	0.128	0.05
	III	0.088	-	-	-	0.001	0.087	0.05
개 발 중	I	0.038	-	-	0.038	-	-	0.80
	II	0.275	-	-	0.271	-	0.004	0.79
	III	0.146	-	0.005	0.117	-	0.024	0.65
개 발 후	I	0.038	-	0.004	-	-	0.034	0.05
	II	0.275	-	0.020	-	0.018	0.237	0.04
	III	0.146	-	0.013	-	0.001	0.132	0.05



3) 토사유출량 산정

앞에서 분석된 RUSLE공식의 각 인자들에 대한 계수값을 적용하여 배수유역별, 개발단계별(전·중·후)로 산정한 단일호우시(TRB)의 토사유출량은 <표 3.12>와 같다.

Table 3.12 Sediment yield (TRB, by single storm)

구분	유역명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	R (10 <sup>7</sup> J/ha · mm/hr)	K (ton/ha /R)	LS	VM	토사유출량	
							(ton/ha/year)	(ton/storm)
개발 전	I	0.052	2,215	0.25	1.44	0.05	40	208
	II	0.133		0.24	3.22	0.05	86	1,144
	III	0.088		0.28	1.36	0.05	42	370
개발 중	I	0.038		0.25	1.20	0.80	532	2,022
	II	0.275		0.21	1.42	0.79	522	14,350
	III	0.146		0.22	1.67	0.80	529	7,723
개발 후	I	0.038		0.25	1.20	0.05	33	125
	II	0.275		0.21	1.42	0.04	26	727
	III	0.146		0.22	1.67	0.05	41	599

### 3.3 원단위법을 이용한 토사유출량 산정

토사유출의 원단위법은 지표의 상태에 따른 단위면적당 유출토사량으로부터 추정하는 것으로서 <표 3.13>에 제시한 일본의 사방설계 기준에 의한 원단위를 적용하였다.

Table 3.13 Unit load method in Japan

지 표 의 상 태	1ha당 토사유출량(m <sup>3</sup> /년)	두께(mm)
나지, 황폐지 등	200~400	20~40
간벌지, 초지 등	15	1.5
택 별 지	2	0.2
보 통 의 임 지	1	0.1

자료) 中野有(1984). 골프코스의 설계 및 시공, 일본

원단위법에서 <표 3.13>의 원단위 두께는 토양의 침식두께를 나타내는 것으로서 개발단계별 토사유출량의 계산을 위해서는 토사의 단위중량과 공극율이 필요하다.

여기서 퇴적토의 단위중량은 기본의 연구에 의하면 대형 댐의 경우에는 0.9~1.1ton/m<sup>3</sup>이며, 하구둑 유역 및 관개용 저수지의 경우는 1.31ton/m<sup>3</sup> 이다.

한편 본 연구대상지구에서 설치한 침사지는 강우시 유출되는 침식량을 수용하기 위한 것으로서 침사지의 퇴적토 단위중량은 하구둑 및 관개용 저수지의 퇴적토 단위중량인 약 1.31ton/m<sup>3</sup> 보다 클 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 토양의 구성성분도 본 연구에 대한 토질조사에서 사질토 및 점토층으로 나타났다. 따라서 본 계산에서는 침사지의 퇴적토 단위중량은 Lane과 Koelzer(1953)의 경험식에 의한 값을 적용하였다. 또한 개발중의 나지상태에 따른 원단위는 상기표에서 제시하는 값의 중간인 300을 적용하였으며, 계산결과는 다음 <표 3.14>와 같이 산출되었다.

Table 3.14 Sediment yield based on unit load method

구 분	유역명	총면적 (km <sup>2</sup> )	토지이용상태별면적 (km <sup>2</sup> )					토사유출량		퇴적토 단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )
			농경지	하천	나지	불투수지	초지	(m <sup>3</sup> / year)	(ton /year)	
원단위(m <sup>3</sup> /ha/year)			5.0	0.0	300.0	2.0	15.0			
개 발 전	I	0.052	-	-	-	-	0.052	78	111	1.42
	II	0.133	0.005	-	-	-	0.128	195	269	1.38
	III	0.088	-	-	-	0.001	0.087	131	176	1.34
개 발 중	I	0.038	-	-	0.038	-	-	1,140	1,619	1.42
	II	0.275	-	-	0.271	-	0.004	8,136	11,390	1.40
	III	0.146	-	0.005	0.117	-	0.024	3,546	4,929	1.39
개 발 후	I	0.038	-	0.004	-	-	0.034	51	72	1.42
	II	0.275	-	0.020	-	0.018	0.237	359	503	1.40
	III	0.146	-	0.013	-	0.001	0.132	198	275	1.39



### 3.4 토사유출량 비교

본 연구대상지역에서의 토사유출량을 산정하기 위하여 RUSLE공식(정상강우년시, 단일호우시)과 원단위법 등을 사용하였으며, 산정결과는 다음 <표 3.15>과 같다.

Table 3.15 Sediment yield for each method

유역명	산정방법	단위	토사유출량				
			개발전 ①	개발중 ②	② - ①	개발후 ③	③ - ①
I	RUSLE(정상강우년시)	ton/year	57	361	△ 304	34	▼ 23
	RUSLE(단일호우시)	ton/storm	208	2,022	△ 1,814	125	▼ 83
	원단위법	ton/year	111	1,619	△ 1,508	72	▼ 39
II	RUSLE(정상강우년시)	ton/year	333	2,582	△ 2,249	235	▼ 98
	RUSLE(단일호우시)	ton/storm	1,144	14,350	△13,206	727	▼ 417
	원단위법	ton/year	269	11,390	△11,121	503	▼10,887
III	RUSLE(정상강우년시)	ton/year	106	1,402	△ 1,296	161	△ 55
	RUSLE(단일호우시)	ton/storm	370	7,723	△ 7,353	599	△ 229
	원단위법	ton/year	176	4,929	△ 4,753	275	△ 99

일본 사방설계 공식에 의한 토사유출량은 공식의 침식 주요 인자인 강우분포, 토양 조건 및 지형 등에 고려가 없는 반면 RUSLE공식은 실측을 바탕으로 미국에서 개발된 공식으로 정확성과 객관성이 있음을 알 수 있었다.

## IV. 현장강우에 대한 토사량 측정 및 이론적 검토

### 4.1 토사유출량 측정

#### 4.1.1 측정방법

현장계측에서 조사하여야 할 항목은 강수량, 유출량, 토사유출량이다. 여기서 강수량은 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 1.7m의 콘크리트로 만들었고 저류조의 월류부는 삼각형 위어로 하여 수위를 측정할 수 있도록 수위계를 설치하였다. 이 수위계에서 측정한 값으로 삼각위어의 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 물과 함께 흘러갔을지도 모를 미세입자에 대하여 샘플을 떠서 부유사량을 추정하였다.



Fig 4.1 Setup of water level gauge

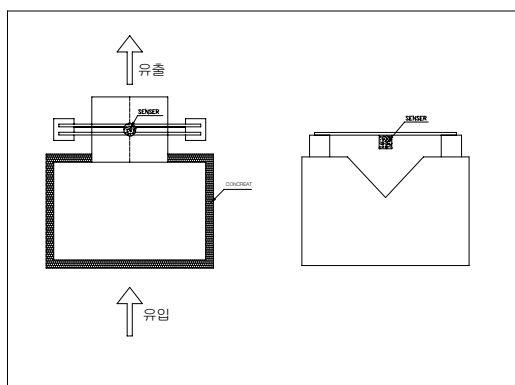


Fig 4.2 Temporary water storage tank diagram

#### 4.1.2 강우자료

강우량은 현장에서 제일 가까운 관측소에서 측정한 강우자료들 중 6월에서 8월까지 3개월에 걸쳐서 기록한 자료를 얻어 이용하였다. 그리고 퇴적에 영향을 미치는 강우량을 좀 더 세부적으로 조사하기 위하여 시간별 강우량을 조사하였다.

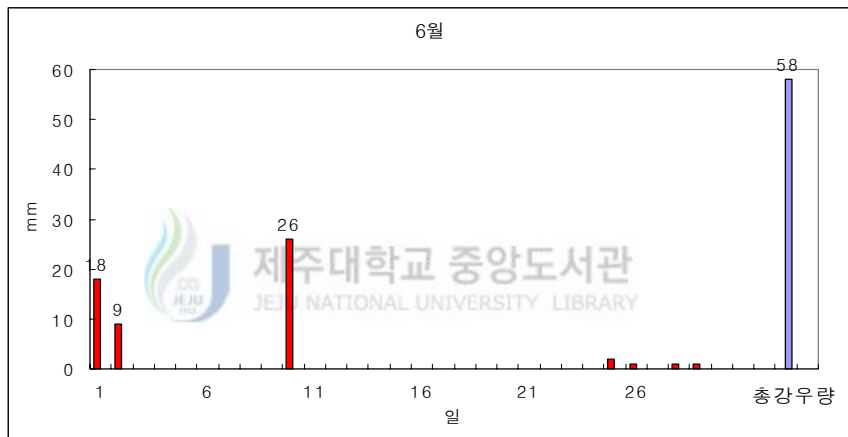


Fig 4.3 Precipitation on June

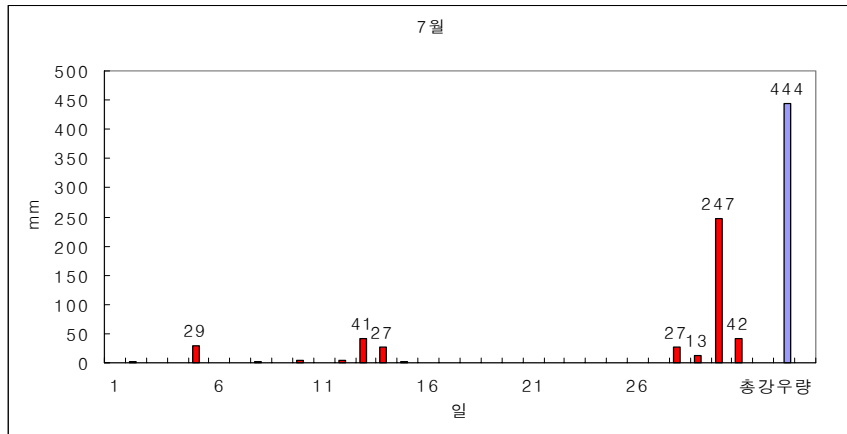


Fig 4.4 Precipitation on July

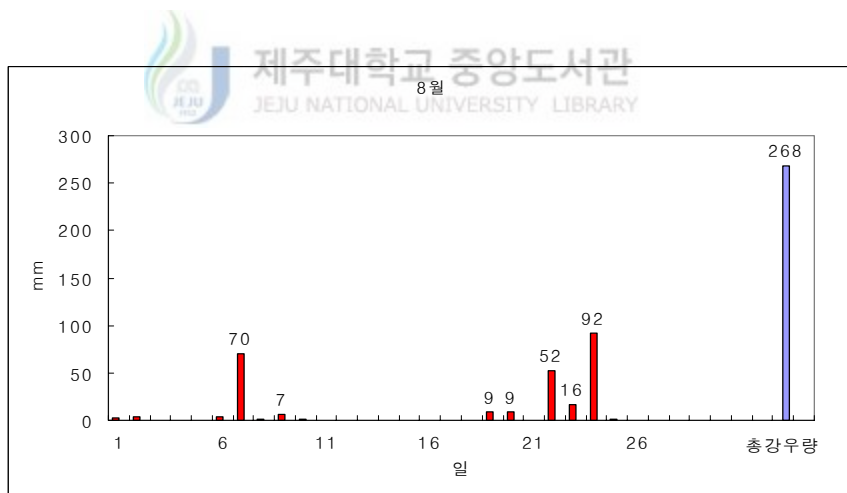


Fig 4.5 Precipitation on August

Table 4.1 Hourly rainfall on June

구분	시 간	단위	날씨	시 간												계	비 고
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
일 자				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
6월	1일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.0	
	2일	mm		1.0	-	2.0	1.0	2.0	1.0	1.0	-	-	-	14.0	4.0	9.0	
	3일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	4일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	5일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	6일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	7일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	8일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	9일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	10일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	4.0	7.0	26.0	
	11일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	12일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	13일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	14일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	

구분	시 간	단위	날씨	시 간												계	비 고
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
일 자				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
6월	15일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	16일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	17일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	18일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	19일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	20일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	21일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	22일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	23일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	24일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	25일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	
	26일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	1.0	1.0	
	27일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	28일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	
	29일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	1.0	
	30일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	

Table 4.2 Hourly rainfall on July

구분	시 간	단위	날씨	시 간												계	비 고	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
일 자				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
7월	1일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0		
	2일	mm		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3.0		
	3일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0		
	4일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0		
	5일	mm		1.0	1.0	-	-	-	-	4.0	7.0	2.0	8.0	-	1.0	29.0		
	6일	mm		-	-	-	-	-	-	-	4.0	-	-	-	-	0.0		
	7일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0		
	8일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0		
	9일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	1.0	1.0		
	10일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	3.0	5.0		
	11일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0		
	12일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0		
	13일	mm		1.0	9.0	9.0	22.0	-	-	-	-	-	-	2.0	1.0	1.0	41.0	
	14일	mm		1.0	-	1.0	3.0	2.0	1.0	-	-	1.0	6.0	8.0	2.0	1.0	27.0	

구분	시 간	단위	날씨	시 간												계	비 고
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
일 자				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
7월	15일	mm		1.0	1.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0	
	16일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	17일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	18일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	19일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	20일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	21일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	22일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	23일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	24일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	25일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	26일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	27일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	28일	mm		-	-	1.0	-	-	-	10.0	14.0	1.0	1.0	-	-	27.0	
	29일	mm		-	-	-	-	2.0	-	1.0	1.0	2.0	-	7.0	-	13.0	
	30일	mm		-	-	-	-	18.0	37.0	24.0	-	5.0	39.0	72.0	52.0	247.0	
	31일	mm		38.0	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42.0

Table 4.3 Hourly rainfall on August

구분	시 간	단위	날씨	시 간												계	비 고
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
일 자				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
8월	1일	mm		-	-	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	
	2일	mm		1.0	-	-	-	1.0	2.0	-	-	-	-	-	-	4.0	
	3일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	4일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	5일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	6일	mm		-	3.0	-	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	4.0	
	7일	mm		-	-	1.0	4.0	6.0	1.0	10.0	24.0	-	10.0	9.0	3.0	70.0	
	8일	mm		-	-	1.0	-	-	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	
	9일	mm		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	7.0	
	10일	mm		-	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	
	11일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	12일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	13일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	14일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	

구분	시 간	단위	날씨	시 간												계	비 고
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
일 자				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
8월	15일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	16일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	17일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	18일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	19일	mm		1.0	1.0	2.0	-	-	-	1.0	-	1.0	2.0	-	1.0	9.0	
	20일	mm		1.0	3.0	2.0	-	1.0	1.0	-	-	-	-	-	-	9.0	
	21일	mm		-	-	-	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	0.0	
	22일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.0	
	23일	mm		1.0	-	3.0	-	-	-	2.0	6.0	8.0	18.0	13.0	5.0	16.0	
	24일	mm		1.0	-	-	1.0	-	2.0	3.0	2.0	6.0	1.0	3.0	4.0	92.0	
	25일	mm		8.0	43.0	1.0	1.0	16.0	1.0	-	-	-	-	-	-	1.0	
	26일	mm		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0.0	
	27일	mm		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0.0	
	28일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	29일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	30일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
	31일	mm		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	

### 4.1.3 유출량

유출량은 저류조의 월류부에 삼각형 위어의 수위를 측정함으로서 얻어지게 된다. 수위계는 20mm/hr 속도로 측정하였으며 강우가 발생하는 날에 대하여 24시간 가동하였다. 그 결과 아래와 같은 그래프를 얻었으며 다음의 식 (4.2)으로부터 유량을 구하였다.

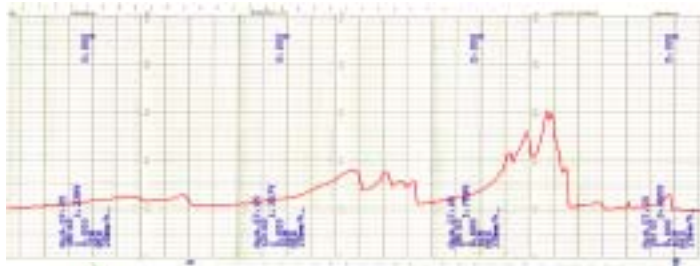


Fig 4.6 Water level on August 7th

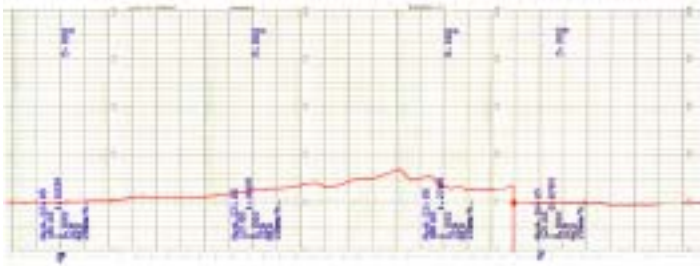


Fig 4.7 Water level on August 23th

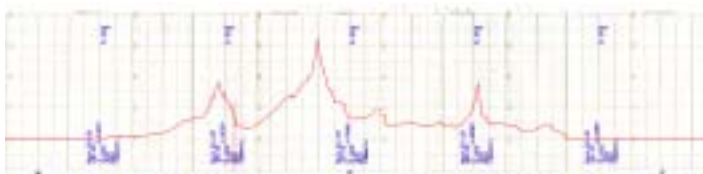


Fig 4.8 Water level on August 24th



(1) 유량 산정 일반식

$$\therefore Q = \frac{8}{15} C \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh}^{\frac{5}{2}} \quad (4.1)$$

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

$$\therefore Q = 1.4 h^{\frac{5}{2}} \quad (4.2)$$

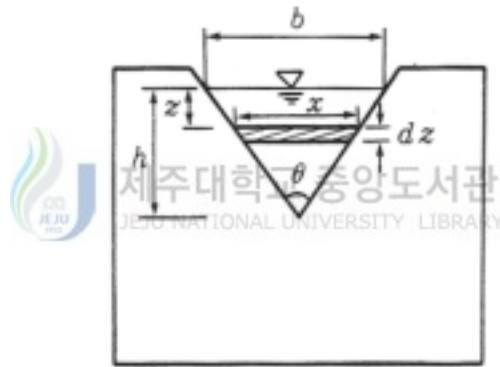


Fig 4.9 Triangular weir

Table 4.4 Measured streamflow

유량 측정 결과	
8월 7일	298.69 m <sup>3</sup>
8월 23일	45.05 m <sup>3</sup>
8월 24일	1,143.41 m <sup>3</sup>

Table 4.5 Calculated streamflow on August 7th

날짜	시	분	s	h	Q <sub>1</sub>	ΣQ	
			길이(mm)	높이(cm)	유량(m <sup>3</sup> /s)	누적유량(m <sup>3</sup> )	
8. 07	4	0	0.0	0.00	0.00000	0.000	
		10	0.0	0.00	0.00000	0.000	
		20	0.0	0.00	0.00000	0.000	
		30	6.0	5.63	0.00105	0.630	
		40	3.0	2.81	0.00019	0.742	
	5	50	2.0	1.88	0.00007	0.782	
		0	1.0	0.94	0.00001	0.789	
		10	1.0	0.94	0.00001	0.797	
		20	1.0	0.94	0.00001	0.804	
		30	0.5	0.47	0.00000	0.805	
	6	40	0.0	0.00	0.00000	0.805	
		50	2.0	1.88	0.00007	0.845	
		0	2.5	2.34	0.00012	0.916	
		10	2.0	1.88	0.00007	0.956	
		20	1.5	1.41	0.00003	0.976	
	7	30	1.0	0.94	0.00001	0.983	
		40	16.0	15.00	0.01220	8.303	
		50	35.0	32.81	0.08634	60.109	
		∴	∴	∴	∴	∴	
		∴	∴	∴	∴	∴	
	15	15	50	4.0	3.75	0.00038	296.278
			0	3.0	2.81	0.00019	296.389
			10	3.5	3.28	0.00027	296.553
			20	4.0	3.75	0.00038	296.782
			30	5.0	4.69	0.00067	297.181
			40	4.5	4.22	0.00051	297.488
			50	4.5	4.22	0.00051	297.796
		16	0	4.0	3.75	0.00038	298.024
			10	4.0	3.75	0.00038	298.253
			20	3.5	3.28	0.00027	298.417
			30	3.0	2.81	0.00019	298.528
	17	40	2.5	2.34	0.00012	298.599	
		50	2.0	1.88	0.00007	298.639	
		0	1.8	1.69	0.00005	298.670	
		10	1.0	0.94	0.00001	298.678	
		20	1.0	0.94	0.00001	298.685	
	18	30	1.0	0.94	0.00001	298.692	
		40	0.5	0.47	0.00000	298.693	
		50	0.5	0.47	0.00000	298.694	
	18	0	0.0	0.00	0.00000	298.694	

Table 4.6 Calculated streamflow on August 23th

날짜	시	분	s	h	Q <sub>1</sub>	ΣQ
			길이(mm)	높이(cm)	유량(m <sup>3</sup> /s)	누적유량(m <sup>3</sup> )
8. 23	7	0		0.00	0.00000	0
		10	6.5	6.09	0.00128	0.770
		20	5.5	5.16	0.00085	1.277
		30	5.0	4.69	0.00067	1.677
		40	5.0	4.69	0.00067	2.076
	8	50	5.0	4.69	0.00067	2.476
		0	5.0	4.69	0.00067	2.876
		10	5.5	5.16	0.00085	3.383
		20	6.0	5.63	0.00105	4.013
		30	6.0	5.63	0.00105	4.643
	9	40	7.0	6.56	0.00154	5.570
		50	10.0	9.38	0.00377	7.831
		0	10.0	9.38	0.00377	10.091
		10	9.0	8.44	0.00290	11.828
		20	9.5	8.91	0.00331	13.817
	∴	30	13.0	12.19	0.00726	18.172
		40	13.0	12.19	0.00726	22.528
		50	12.0	11.25	0.00594	26.094
		∴	∴	∴	∴	∴
	13	50	4.0	3.75	0.00038	44.320
		0	3.5	3.28	0.00027	44.484
		10	3.0	2.81	0.00019	44.595
		20	2.5	2.34	0.00012	44.666
		30	2.0	1.88	0.00007	44.706
		40	2.0	1.88	0.00007	44.747
		50	1.5	1.41	0.00003	44.766
	14	0	1.8	1.69	0.00005	44.797
		10	2.0	1.88	0.00007	44.838
		20	2.0	1.88	0.00007	44.878
		30	2.0	1.88	0.00007	44.919
		40	2.0	1.88	0.00007	44.959
	15	50	2.0	1.88	0.00007	44.999
		0	1.5	1.41	0.00003	45.019
		10	1.5	1.41	0.00003	45.039
		20	1.0	0.94	0.00001	45.046
		30	0.7	0.66	0.00000	45.049
	16	40	0.3	0.28	0.00000	45.049
		50	0.0	0.00	0.00000	45.049
		0	0.0	0.00	0.00000	45.049

Table 4.7 Calculated streamflow on August 24th

날짜	시	분	s	h	Q <sub>1</sub>	ΣQ
			길이(mm)	높이(cm)	유량(m <sup>3</sup> /s)	누적유량(m <sup>3</sup> )
8. 24	5	0	0.0	0.00	0.00000	0.000
		10	0.0	0.00	0.00000	0.000
		20	0.0	0.00	0.00000	0.000
		30	0.0	0.00	0.00000	0.000
		40	2.0	1.88	0.00007	0.040
	50	4.0	3.75	0.00038	0.269	
	6	0	5.5	5.16	0.00085	0.776
		10	9.0	8.44	0.00290	2.513
		20	8.5	7.97	0.00251	4.019
		30	7.5	7.03	0.00184	5.120
		40	6.0	5.63	0.00105	5.751
	50	5.5	5.16	0.00085	6.258	
	7	0	5.0	4.69	0.00067	6.657
		10	6.0	5.63	0.00105	7.288
		20	8.5	7.97	0.00251	8.794
		30	8.0	7.50	0.00216	10.088
		40	9.5	8.91	0.00331	12.076
	50	10.0	9.38	0.00377	14.336	
	∴	∴	∴	∴	∴	∴
	17	0	27.0	25.31	0.04513	1110.086
		10	19.0	17.81	0.01875	1121.334
		20	13.5	12.66	0.00798	1126.121
		30	13.0	12.19	0.00726	1130.477
		40	13.0	12.19	0.00726	1134.833
	50	12.0	11.25	0.00594	1138.399	
	18	0	10.0	9.38	0.00377	1140.659
		10	8.0	7.50	0.00216	1141.953
		20	6.0	5.63	0.00105	1142.583
		30	4.5	4.22	0.00051	1142.891
		40	3.5	3.28	0.00027	1143.054
	50	3.0	2.81	0.00019	1143.166	
	19	0	2.5	2.34	0.00012	1143.236
		10	2.0	1.88	0.00007	1143.277
		20	2.0	1.88	0.00007	1143.317
		30	2.0	1.88	0.00007	1143.358
		40	2.0	1.88	0.00007	1143.398
	50	1.0	0.94	0.00001	1143.405	
	20	0	1.0	0.94	0.00001	1143.412
		10		0.00	0.00000	1143.412

#### 4.1.4 토사유출량

토사유출량을 측정하기 위해서 I 구역은 침전조를 두어 직접 측정을 하였고 II·III 구역은 말뚝을 박아 측정하였다. 그러나 7월말의 집중호우로 말뚝의 일부가 잠기고 뽑히는 일이 있어서 그 뒤로는 레벨측량을 하였다.

그 결과 다음과 같이 측정되었으며 <표 4.9>에 각 구역별, 날짜별로 정리하였다.



Fig 4.10 Photo of soil losse after rainfall



Fig 4.11 Measurement of sediment yield in I zone



Fig 4.12 Piles before rainfall in II·III zone



Fig 4.13 Piles after rainfall in II·III zone

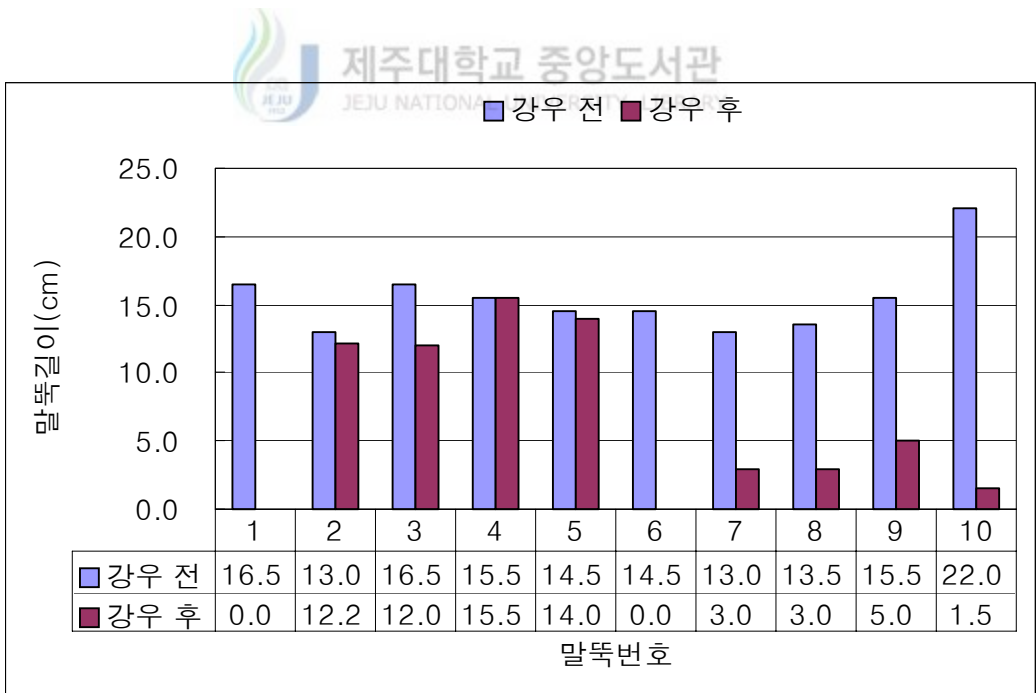


Fig 4.14 Pile lengths in II·III zone

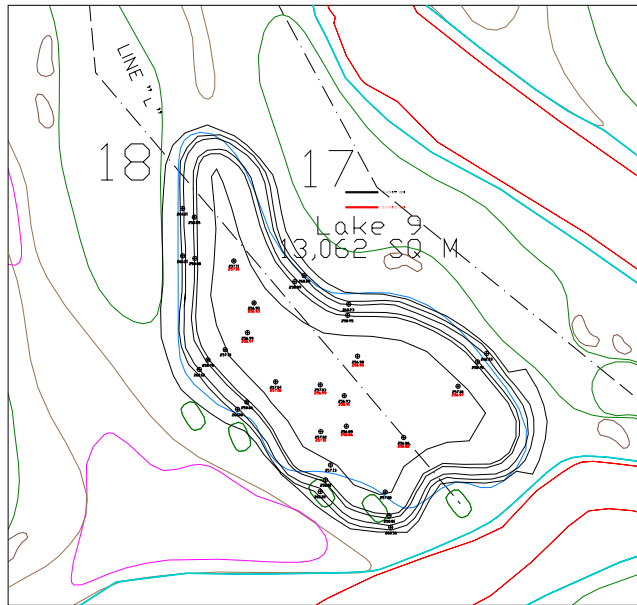


Fig 4.15 Height survey in II zone

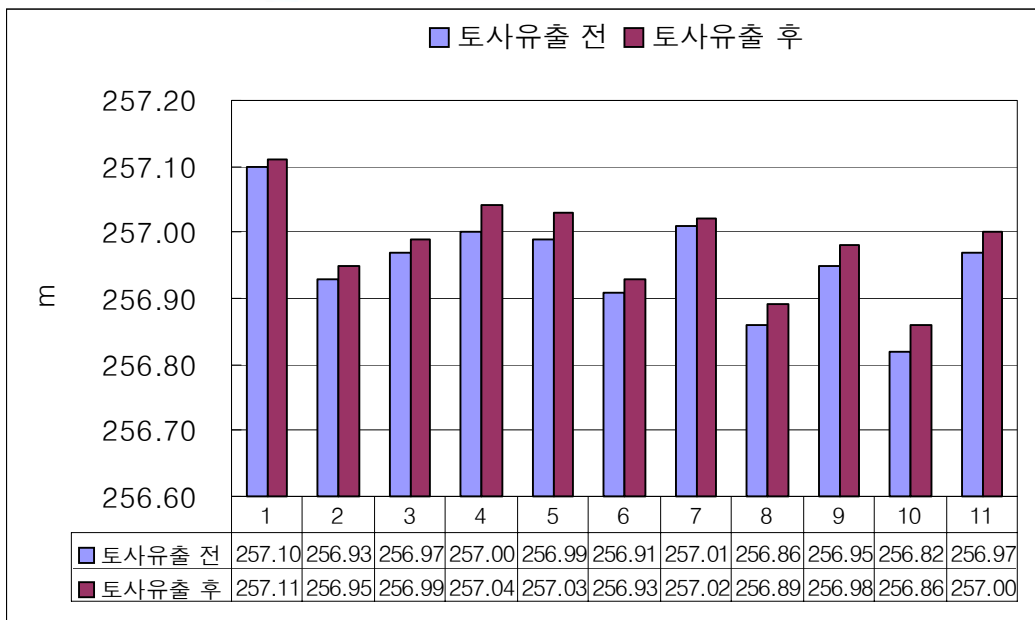


Fig 4.16 Heights in II zone

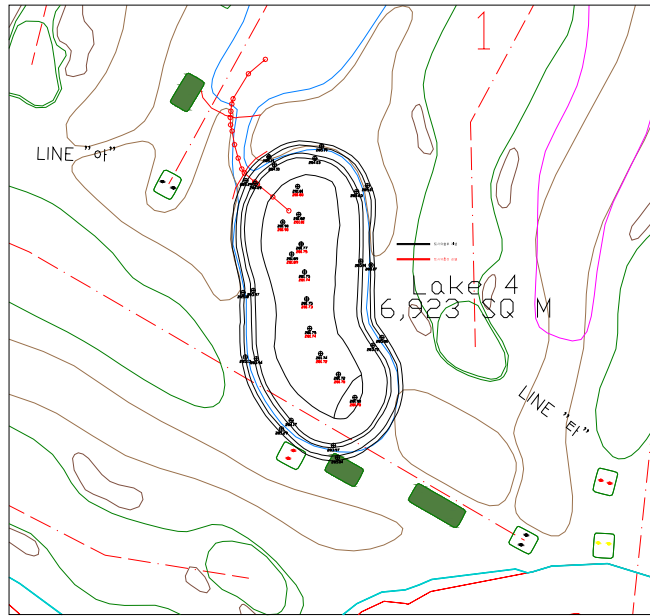


Fig 4.17 Height survey in III zone

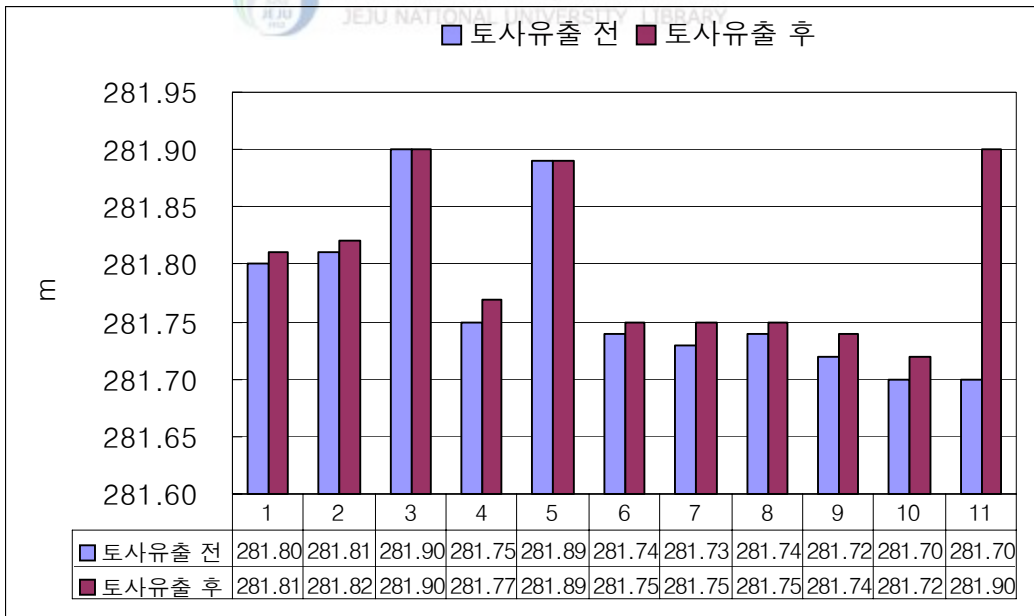


Fig 4.18 Heights in III zone



그리고 I 구역에서 토사량이 침전되지 않고 그대로 물과 함께 흘러간 미세입자에 대하여 샘플을 떠서 부유사량을 추정하였다.

그 결과 아래의 <표 4.8>과 같다.

Table 4.8 Estimation for suspended sediment load in I zone

측정날짜	유출량 (m <sup>3</sup> )		부유사량 a (t/m <sup>3</sup> )	부유사량 b (ton)
08월 07일	298.69		0.00553	1.65
08월 23일	45.05	1,188.46	0.01548	18.39
08월 24일	1,143.41			

Table 4.9 Measured sediment yield for each zone

구역명	I 구역		II 구역		III 구역	
	8월 8일	8월 25일	8월 1일	8월 26일	8월 1일	8월 26일
면적 (m <sup>2</sup> )	5.40		6,135.30		3,128.84	
평균높이(m)	0.67	0.83	0.045	0.026	0.132	0.029
체적 (m <sup>3</sup> )	3.62	4.48	276.09	159.52	413.01	90.74
단위중량(t/m <sup>3</sup> )	1.42		1.40		1.39	
토사량(ton)	5.14	6.36	386.52	223.32	574.08	126.12
부유사량(ton)	1.65	18.39	-	-	-	-
총량(ton)	6.79	24.75	386.52	223.32	574.08	126.12

#### 4.2 현장강우에 대한 강우침식인자 산정

강우침식도(R) 값은 TRB(1980)에서 사용하는 단일호우에 의한 지속시간 24시간 강우와 연평균 R과 3개월 간의 실제 강우를 이용하여 산정한 값을 비교해 보았다. R 값은 일반적으로  $I_{30}$  지수로 알려진 강우에너지와 최대 30분 강우강도의 곱을 100으로 나눈 값이 쓰이고 있다. 76mm/hr를 경계로 강우에너지의 산정공식은 식 (4.3)과 같이 두 가지 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} e &= 0.119 + 0.0873 \log_{10} I & I \leq 76 \text{ mm/hr} \\ e &= 0.283 & I > 76 \text{ mm/hr} \end{aligned} \quad (4.3)$$

여기서  $e$ 는 강우운동에너지(MJ/ha/mm)이며  $I$ 는 호우의 평균강우강도(mm/hr)이다. MJ는  $1 \times 10^6$  joule을 나타낸다. 그리고 호우의 총강우에너지는 식 (4.4)와 같이 강우운동에너지에 강우깊이를 곱하여 산정한다.

$$E = e \cdot P \quad (4.4)$$

$P$ 는 강우의 총깊이(mm)를 나타낸다.

그리고,  $EI_{30}$  지수를 이용한 R인자는 식 (4.5)와 같이 계산된다.

$$R = \frac{\Sigma(E \cdot I_{30})}{100} \quad (4.5)$$

여기서  $I_{30}$  은 특정 호우에 대한 최대 30분 강우강도이다. 그리고 단위환산을 위해서 10을 곱한다.

그런데, 지상에 도달한 강우량 중 일부는 흙의 표면을 통하여 침투하고, 그 초과분은 흙의 표면으로 흘러 유출을 형성하게 되는데 이와 같이 강우량으로부터 침투에 의한 손실을 뺀 값을 유효강우량이라 하며, 산정방법으로는 ①일정비 법(Constant fraction method, 유출계수), ②일정 손실율 법(Constant loss rate method,  $\Phi$ -지표법( $\Phi$ -index method), W-지표법(W-index method)), ③초기 손실-일정 손실율 법(Initial loss-constant rate method), ④침투곡선법(Infiltration curve method, Horton의 침투능곡선 등), ⑤미국 자연자원보존국(Natural Resources Conservation Service, NRCS)의 유출곡선지수법 등 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 NRCS의 유출곡선지수법을 적용하였다.

NRCS의 방법에서는 총강우량과 실제 유출에 기여하는 유효강우량과의 관계를 아래와 같은 식으로 나타내었다. 아래 식에서 강우시점으로부터 어떤 시간까지 내린 누가우량 P로 인한 직접 유출량(또는 유효강우량), Q는 P와 S의 함수이며 P가 증가함에 따라 커지고, S가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 어떤 유역의 최대 잠재보유수량(potential maximum retention) S는 유역이 최대 보유할 수 있는 수분량을 표시하는 것으로서 침투 및 지류능력을 대표하며 유역의 직접 유출능력을 지배한다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4.6)$$

여기서,  $I_a=0.2S$ 로 가정하면 위의 식은 다음과 같이 변형된다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (4.7)$$

여기서,  $P$  : 호우별 총강우량(mm)

$I_a$  : 강우의 초기손실(mm)

$S$  : 유역의 최대 잠재보유수량과 초기손실의 합(mm)

$Q$  : 유효강우량(mm)

NRCS에 의하면 직접 유출능력을 표시하는 유출곡선지수(runoff curve number) CN은 S와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (4.8)$$

따라서, 유역의 직접 유출능력을 표시하는 유역평균 CN값이 결정되면 위의 식에 의해 S가 계산되고 이 값을 식에 P와 함께 대입함으로써 누가유효강우량 Q를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 CN=95로 설정하였다.

Table 4.10 Calculated table of R value

호우기간	총강우량 (mm)	유효우량 (mm)	시간 (hr)	평균강우량 (mm/hr)	30분 최대 강우량 (mm)	e (MJ/ha/mm)	ΣE=e·P	Σ(E·I <sub>30</sub> )	R (10 <sup>7</sup> 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	1,648.49	165

이러한 공식을 이용하여 3개월에 걸쳐서 조사한 강우자료에 대한 R값은 927 10<sup>7</sup>Joule/ha·mm/hr이다.

Table 4.11 Comparison with R value

	연평균	50년 빈도 24hr 지속	실제강우(6-8월)
10 <sup>7</sup> Joule/ha·mm/hr	636	2,215	927

#### 4.3 이론식과 측정치의 비교

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

Table 4.12 Comparison of sediment yield

구역명	호우기간	구역면적 (km <sup>2</sup> )	R (10 <sup>7</sup> J/ha· mm/hr)	K (ton/ha/R)	LS	C	P	토사유출량		비교	
								계산치 ton	실측치 ton		
I 구역	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	6.79	2.94	
	8/19-24		165					94.1	24.75	3.80	
II 구역	6/1-2	0.275	5	0.21	1.42	0.99	0.50	20.3	-	-	
	7/13-14		28					113.7	2,930.8	386.52	7.58
	7/28-31		694					2,817.1			
	8/7		35					142.1	811.8	223.32	3.64
	8/19-24		165					669.8			
III 구역	6/1-2	0.146	5	0.22	1.67	0.82	0.50	11.0	-	-	
	7/13-14		28					61.6	1,587.9	574.08	2.77
	7/28-31		694					1,526.3			
	8/7		35					77.0	439.9	126.12	3.49
	8/19-24		165					362.9			

표에서 보는 바와 같이 I 구역은 8월에 31.54톤, II 구역은 7월 386.52톤, 8월 223.32톤, III 구역은 7월 574.08톤, 8월 126.12톤의 토사유출량이 발생하였다. 토사유출산정공식에 의해 계산되어진 이론치와 비교해본 결과 II 구역의 7월은 약 7.6배 정도이고 나머지는 2.77~3.80배 정도의 산출량이 발생하였다.

## V. 토양침식인자 K에 대한 고찰

토양의 침식성이란 강우에너지와 유출에 의한 침식능에 저항하는 토양의 저항도를 나타내며 실제로 RUSLE의 경우 토양의 침식성 K는 주어진 토양에 대한 강우와 유출에 의한 충격력의 합으로 표현된다. 실험적으로 토양의 침식성은 표준침식밭 (standard erosion plot)에서의 단위 강우지수 토양의 손실량을 나타낸다. 표준침식밭이란 사면의 상하방향으로 경작된 길이 22.1m, 사면경사 9%의 휴경지로 이때의 L, S, C, P는 모두 1.0이 된다. 따라서 K는 다음 식과 같이 표현된다.

$$K = \frac{\text{측정된 침식량}}{\Sigma EI_{30}}$$

오늘날까지 K에 관한 많은 연구가 이루어 졌으며 USLE에서는 K가 연중 일정한 값을 나타낸다고 가정하였으며 각 지역별 K값이 최근에 들어 각종 토양관련 보고서에 나타나고 있으며 Wischmeier 등(1971)은 55개의 중서부 농경지의 자료를 기초로 그림 2.1과 같이 5가지의 토양 및 토양특성인자를 이용하여 K를 산정할 수 있는 도표를 발표하였다.

우리나라의 경우 한국수자원학회(1998)에서 전국의 토양통별 K값을 <표 5.1>과 같이 발표한 바 있다.

Table 5.1 K-value by soil series of whole Korea

번호	토양통	입경분포(%)					유기물 함량 O.M.	K (t/ha/R)	
		자갈 gravel < 2mm	모래 sand 0.1-2.0	극세사 vfs 0.05-0.1	이토 silt 0.002-0.05	점토 clay < 0.002		Erickson 방법	Wisch- meier 도표
1	가 곡	0.0	7.4	4.6	58.5	29.5	2.24	0.55	0.39
2	가 천	0.5	47.6	14.7	29.1	8.6	2.31	0.39	0.34
3	가 파	0.0	82.5	2.1	13.0	2.4	2.59	0.20	0.11
4	가 포	0.0	38.0	4.0	37.9	20.1	3.91	0.32	0.23
5	각 화	10.4	31.9	3.7	36.9	27.5	4.00	0.29	0.18
6	갈 곡	0.0	52.9	9.2	37.1	0.8	1.10	0.54	0.45
7	갈 전	0.0	13.2	13.5	54.6	18.7	2.03	0.62	0.51
8	감 곡	0.0	34.3	10.0	38.1	17.6	1.74	0.46	0.36
9	감 산	15.0	15.9	2.2	52.0	29.9	9.93	0.39	0.06
10	감 천	7.4	27.1	20.6	34.3	18.0	3.96	0.40	0.30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
366	화 봉	7.0	66.0	15.9	15.0	3.1	0.70	0.44	0.27
367	화 산	0.0	10.0	1.7	52.8	35.5	2.98	0.44	0.28
368	화 수	4.8	46.2	6.6	38.2	9.0	1.69	0.48	0.35
369	화 순	0.0	18.5	8.2	54.4	18.9	2.62	0.51	0.44
370	황 룡	4.4	65.8	15.4	13.4	5.4	0.24	0.47	0.26
371	회 곡	3.9	35.2	4.5	34.1	26.2	2.28	0.40	0.23
372	효 천	1.6	18.6	5.2	50.6	25.6	2.80	0.45	0.34
373	흑 석	0.0	21.2	19.6	43.5	15.7	1.66	0.62	0.51
374	흑 악	0.0	4.4	3.9	69.7	22.0	25.22	0.44	0.40
375	홍 평	0.0	62.7	6.9	18.6	11.8	1.78	0.26	0.19

## 5.1 입경분포에 따른 K값 변화

K값은 그림 2.1과 같은 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. 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 그래프는 각 종류별 구성비를 조금씩 변화를 줬을 때의 K값 변화를 보여주고 있다.

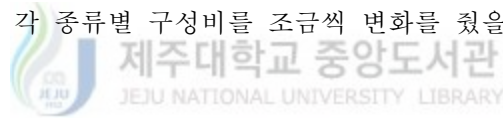


Table 5.2 Sediment size of soil grain

토립자의 종류	입경범위(mm)
자갈(gravel)	>2
모래(sand)	0.1-2
극세사(very fine sand)	0.05-0.1
실트(silt)	0.002-0.05
점토(clay)	<0.002



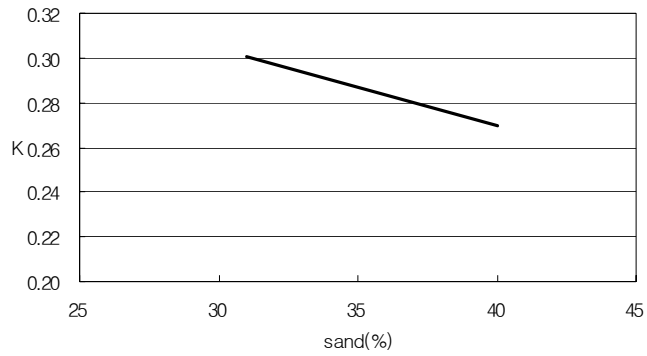


Fig 5.1 K value versus sand content

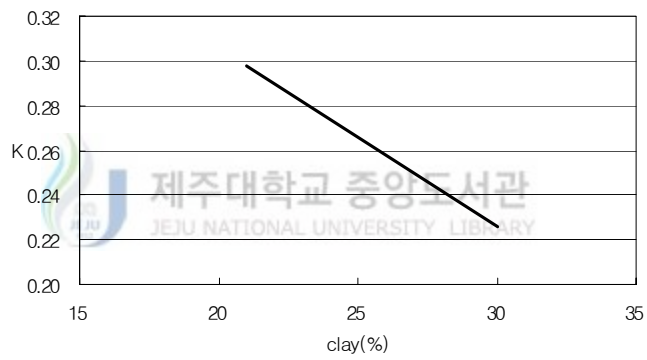


Fig 5.2 K value versus clay content

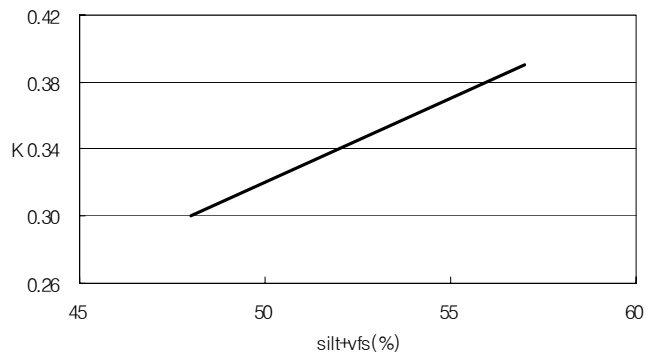


Fig 5.3 K value versus silt + vfs content

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.

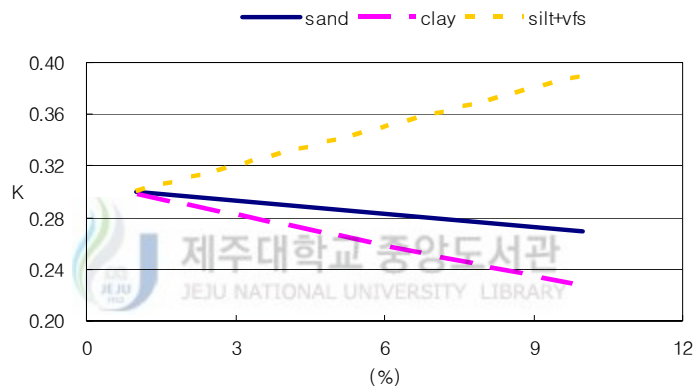


Fig 5.4 K value versus soil type content

## 5.2 투수도와 투수계수

아래의 그래프에서 보이는 것처럼 투수도가 높을수록 K값은 증가한다. 투수도는 1에서 6까지의 등급을 두어 산정하는데 투수계수와 직접적으로 관계가 있다. 아래의 <표 5.3>는 토양분류에 의한 토양 투수성 등급표이다.

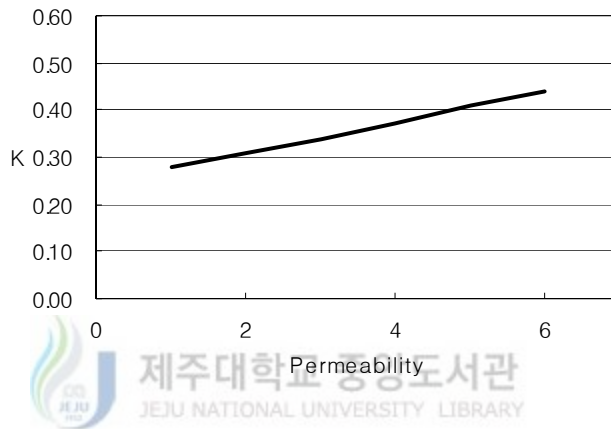


Fig 5.5 K value versus permeability

Table 5.3 Soil permeability data for USDA soil classification

구 조	투수성 등급 (a)	포화 투수계수		수문학적 토양 등급 (b)
		in/hr	cm/sec	
silty clay, clay	6	< 0.04	< $2.8 \times 10^{-5}$	D
silty clay loam sandy clay	5	0.04~0.08	$2.8 \times 10^{-5}$ ~ $5.6 \times 10^{-5}$	C~D
sandy clay loam clay loam	4	0.08~0.20	$5.6 \times 10^{-5}$ ~ $1.4 \times 10^{-4}$	C
loam, silt loam	3	0.20~0.80	$1.4 \times 10^{-4}$ ~ $5.6 \times 10^{-4}$	B
loamy sand sandy loam	2	0.80~2.40	$5.6 \times 10^{-4}$ ~ $1.7 \times 10^{-3}$	A
sand	1	> 2.40	> $1.7 \times 10^{-3}$	A+

(a) Soil Conservation Service National Soil Handbook (SCS, 1983)

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

<표 5.3>에서와 같이 투수계수의 값에 따라 투수성 등급을 정하게 된다. 따라서 각 시험구역에 적용하면

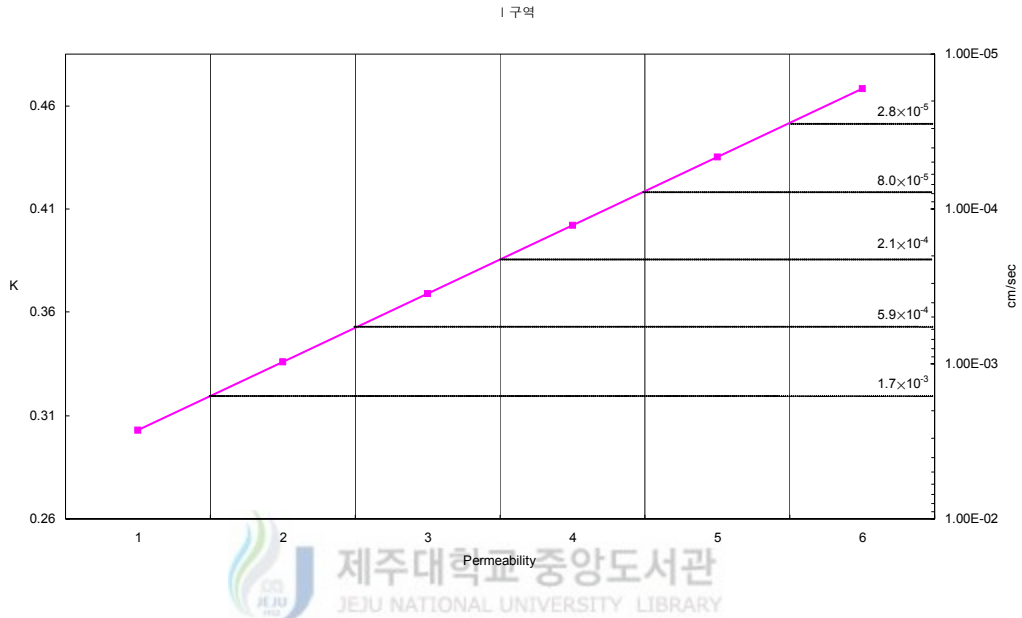


Fig 5.6 Permeability grade and range of permeability factors in I zone

위의 그래프와 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 투수계수를 약간 수정해야 한다고 사료된다.

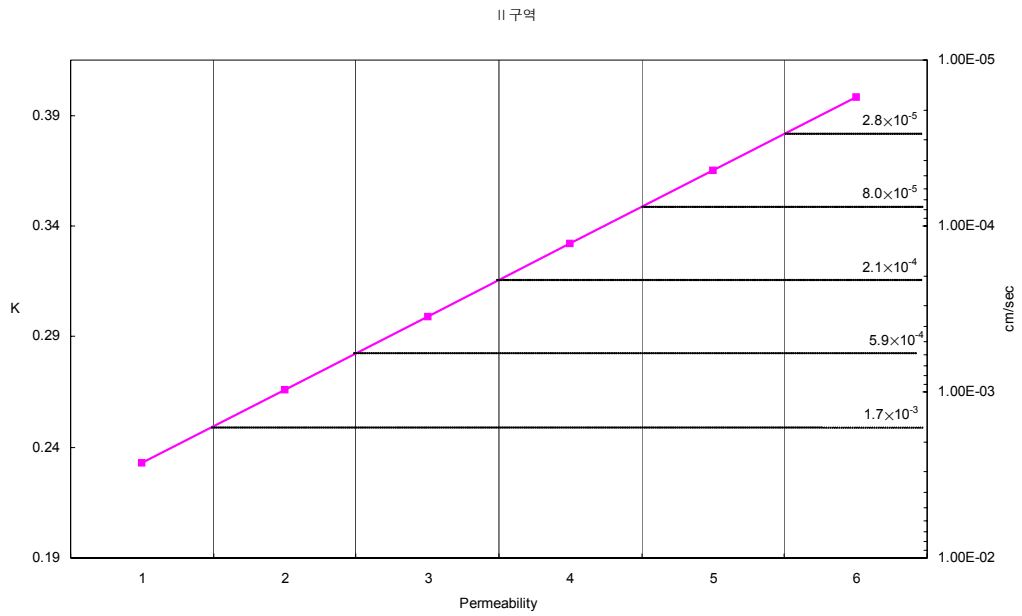


Fig 5.7 Permeability grade and range of permeability factors in II zone

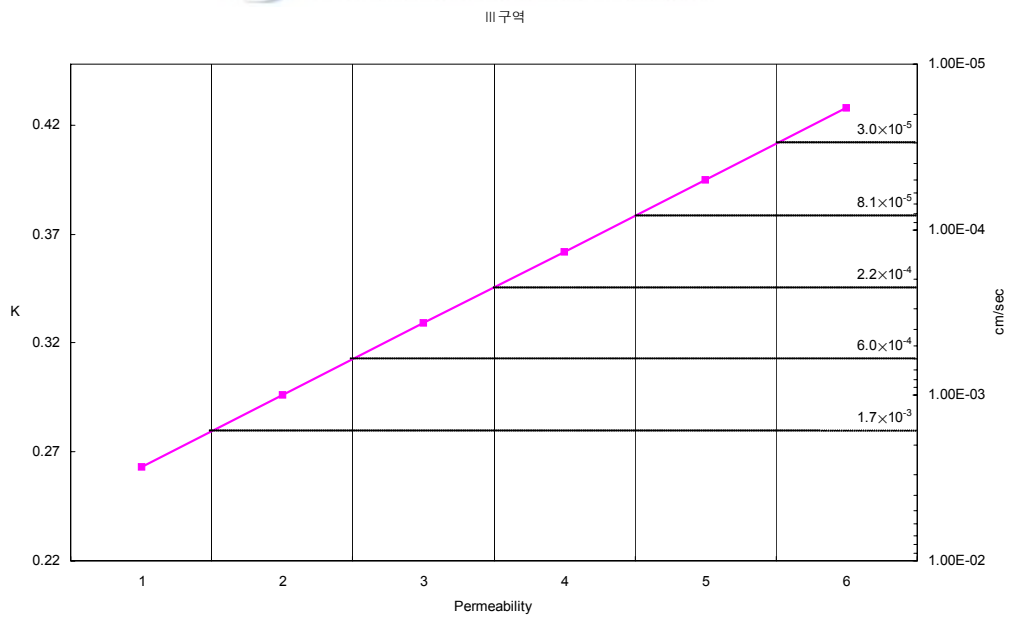


Fig 5.8 Permeability grade and range of permeability factors in III zone

Table 5.4 Permeability grade and range of modified permeability factors

투수성 등급	종전 투수계수(cm/sec)	수정 투수계수(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	$5.6 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-3}$
1	$> 1.7 \times 10^{-3}$	$> 1.7 \times 10^{-3}$

### 5.3 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 K값을 구하기 때문에 아주 손쉽게 추정할 수 있으나 그 신뢰성은 다소 떨어진다.

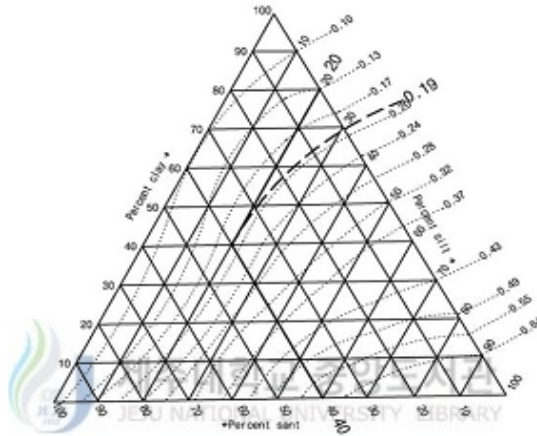


Fig 5.9 Triangular diagram for calculation of soil erodibility factor

USDA(미국 농무성)에서는 토양을 그림 5.10과 같이 12가지의 흠으로 분류하였다. 그리고 이 흠은 <표 2.1>과 같이 토성에 따라 투수성을 유추할 수 있다. 그 결과 그림 5.11과 같이 ↗방향으로 갈수록 투수도가 높아지는 걸 알 수 있다.

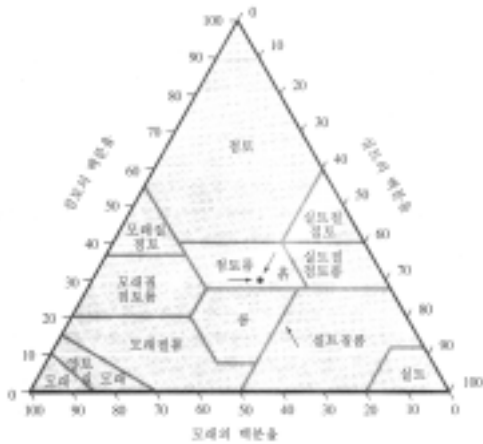


Fig 5.10 USDA soil classification



Fig 5.11 Permeability classification by soil property

이에 착안하여 USDA에 의한 토성분류 도표를 Erickson의 K값 추정 삼각형 도표에다가 적용시켜보았다. 그 결과 그림 5.12과 같은 투수성을 적용시킨 새로운 K값 추정 도표를 얻을 수 있었다. 그리고 보다 쉽게 K값을 찾기 위하여 그림 5.13와 같이 사각형 도표로 다시 만들었다.

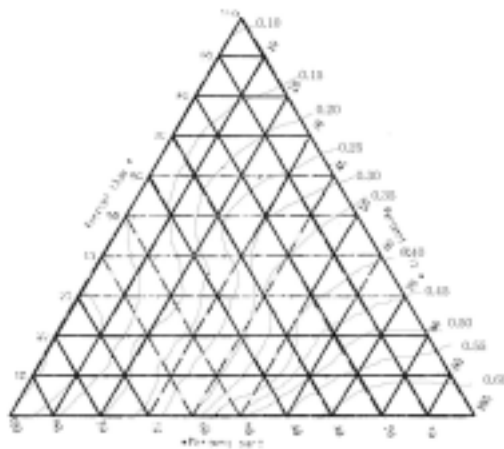


Fig 5.12 Triangular diagram of K value considering permeability



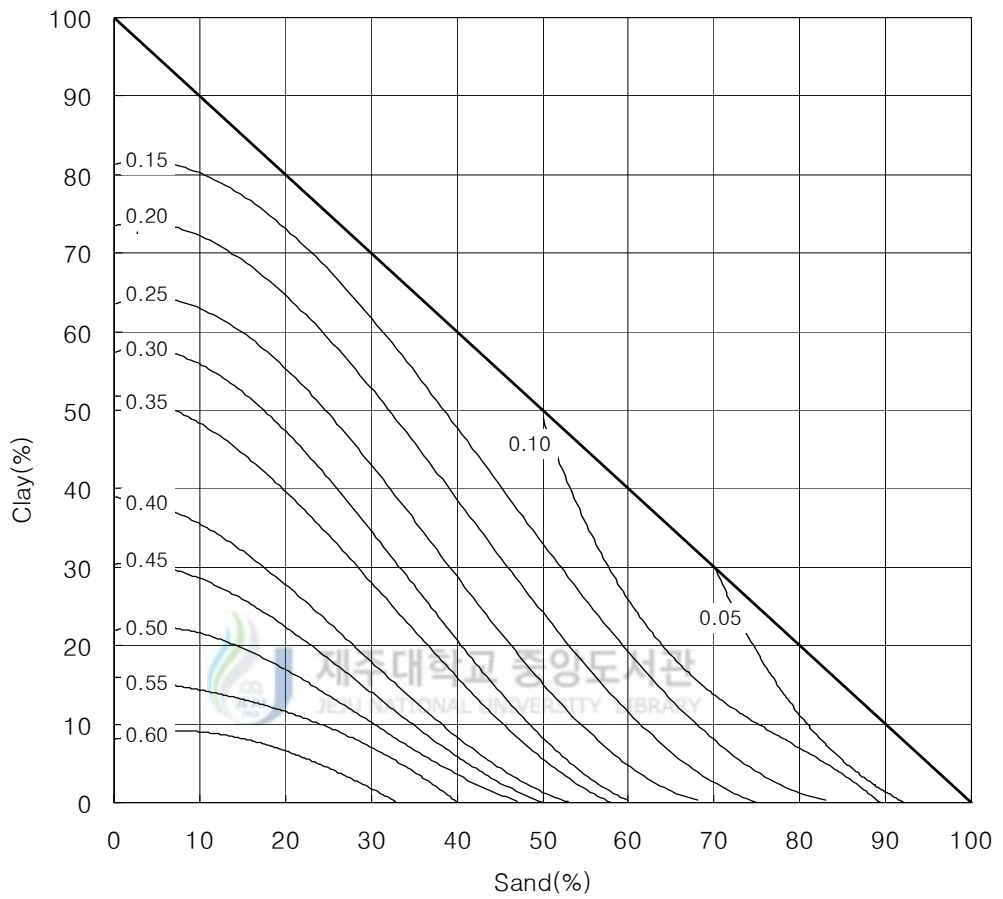


Fig 5.13 Graph for estimation of K value considering permeability

## VI. 결 론

본 연구에서는 RUSLE 모형을 이용한 제주지역에 대하여 정상강우년의 연평균 토사유출량과 단일호우에 의한 토사유출량을 적용하여 토사유출량 산정시 그 범위와 토양침식인자의 범위를 제시하고자 하였으며, 이를 위해 국내에 알려진 각종 토사유출량 산정방법에 대한 특성을 비교, 분석하여 제주지역에 대한 토사유출량을 산정하였다. 그리고 토양침식인자 K에 대해 분석하고 특징을 구명하여 설계자가 보다 쉽고 정확하게 토사유출량을 산정 할 수 있도록 새로운 방법을 다음과 같이 제시해 보았다.

1. 토사유출량을 조사하기 위하여 대상지역 3구역을 선정하여 RUSLE공식(정상강우년시, 단일호우시)과 원단위법 등을 사용하여 개발단계별로 산정하였다. 그 결과 단일호우시 RUSLE공식에 의한 방법이 제일 크게 산출되었다.
2. 현장강우에 대한 모의시험과 2개 구역의 저류지 토사량을 실측한 결과 I 구역은 8월에 31.54톤, II 구역은 7월 386.52톤, 8월 223.32톤, III 구역은 7월 574.08톤, 8월 126.12톤의 토사유출량이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 RUSLE 공식을 이용하여 얻은 값과 약 4배의 차이를 보이고 있다.
3. 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.
4. 토양침식인자 K 산정시 투수도를 선정하기 위한 투수계수의 범위는 종전의 투수계수에서 균일한 범위를 가지겠끔 일부 수정해야 할 것으로 판단되었다.

5. 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.



## VII. 참고문헌

- 강옥륜, 2004, 산지토사유출량 산정공식의 특성인자 결정에 관한 연구, pp.5~26
- 국립방재연구소, 행정자치부, 1998, 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I), pp.161~226
- 김동희, 손광익, 2000, RUSLE를 중심으로 한 토사유출량 산정방법에 관한 연구, p. 사단법인 한국수자원학회, 1998, 제6회 수공학위탁 교재, pp.11~23
- 서규우, 송일준, 임재영, 1998, 개발에 따른 합리적인 토양침식량 산정방안 조사연구, 98년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.341~346
- 신계중, 2000, 직접유출량 산정을 위한 GSIS 기법의 적용, p.
- 안중수, 2002, Musle 기법에 의한 단일 강우사상의 토사 유출량 산정, pp.8~23
- 윤용남, 1986, 하천유량, 유출, 수문학적 홍수추적, pp.186~362
- 임재영, 서규우, 송일준, 송무효, 2000, USLE 계열모형의 매개변수 산정에 관한 연구, p.
- 정필균, 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅, 1983, 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석, 토양비료학회지, Vol.16, No.2.
- 제주리조트주식회사, 2005, 재해영향평가서, 360 pp.
- 한국토지공사, 2003, 발안지방산업단지 임시저류지침사지 토사유입량실측연구, pp. 13~28
- 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., Vol.26, 189-193

## 감사의 글

본 논문이 나오기까지 용기와 격려, 지도를 아끼지 않으신 남정만 교수님께 먼저 깊은 감사를 드리며, 논문심사의 수고를 아끼지 않으신 김상진 교수님, 이병걸 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 제가 학문에 전념할 수 있도록 지도해주신 양성기 교수님, 박상렬 교수님께도 감사드립니다.

또한 공직생활과 함께한 학문이기에 그동안 어려움도 많았지만 진학의 길을 걷게 인도해 주시고 조언해 주신 김동오님, 바쁜 업무추진과정에서도 시간을 배려해 주시고 격려해주신 김석고 사무관님, 우리부서 박재홍님께 감사와 고마움을 드립니다. 그리고 귀중한 시간을 쪼개어 실험자료 등 항상 옆에서 챙겨주시고 도와주신 김준호님께 이 지면을 빌어 다시 한번 감사드립니다.



제주대학교 중앙도서관

끝으로 어려운 여건에서도 항상 맑고 밝은 미소로 내조를 아끼지 않았던 아내 희숙에게 모든 영광을 돌리며, 그동안 아빠로서 잘해주지 못하고 항상 미안하게 생각하고 있는 사랑하는 아들 성준, 범준에게도 이 기쁨을 함께 나누고자 합니다.