



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

碩士學位論文

산지형 하천의 토양침식
및 토사유출량 산정

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

朴 哲 守

2013 年 2 月

산지형 하천의 토양침식 및 토사유출량 산정

指導教授 楊 城 基

朴 哲 守

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2013 年 2 月

朴哲守의 工學碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 産業大學院

2013 年 2 月

Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield In Mountainous Stream

Chul-Su Park

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2013. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of construction & Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차	i
표 목 차	iii
그 립 목 차	iv
Summary	vi
I. 서론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	3
II. 연구의 자료 및 방법	4
1. 연구대상 구역	4
2. 연구의 방법	5
3. 모형의 이론적 배경	6
3.1 USLE의 개요	6
3.2 강우침식인자(R)	7
3.3 토양침식인자(K)	7
3.4 지형특성인자(LS)	8
3.5 식생피복인자(C)	15
3.6 토양보존인자(P)	16
III. SATEEC ArcView GIS 입력자료 분석 및 구축	17
1. 강우침식인자 분석	17
2. 토양침식인자 분석	22
3. 지형인자 분석	26
4. 토지이용변화에 따른 식생피복인자와 작물경작인자	29

4.1 식생피복인자 분석.....	32
4.2 작물경작인자 분석.....	35
IV. SATEEC ArcView GIS 모형의 적용.....	40
1. 입력자료의 비교와 채택.....	40
2. 유사전달률의 적용.....	41
3. 토사유출량 산정.....	44
3.1 2000년도 토사유출량의 산정.....	45
3.2 2005년도 토사유출량의 산정.....	52
3.3 2000년도와 2005년도 토사유출량의 비교.....	59
V. 결론 및 제언.....	60
참고문헌.....	62
감사의 글.....	64

표 목 차

Table III-1. Basin for the study	18
Table III-2. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 50 years)	20
Table III-3. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 80 years)	20
Table III-4. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 100 years)	21
Table III-5. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 200 years)	21
Table III-6. Classification of S1 and P1	23
Table III-7. Soil characteristics and K factor value of each soil type	24
Table III-8. Status of land use in 2000	29
Table III-9. Status of land use in 2005	31
Table III-10. C factor for various land uses	32
Table III-11. P factor for percent slope and practice types	36
Table III-12. Slope analysis of OaeDo stream watershed	37
Table IV-1. Input data of the basin to be studied in 2000	45
Table IV-2. Soil erosion for each Watershed at OaeDo stream in 2000	48
Table IV-3. Sediment Yield for each Watershed at OaeDo stream in 2000	51
Table IV-4. Input data of the basin to be studied in 2005	52
Table IV-5. Soil erosion for each Watershed at OaeDo stream in 2005	55
Table IV-6. Sediment Yield for each Watershed at OaeDo stream in 2005	58
Table IV-7. Soil erosion and sediment yield for each Watershed at OaeDo stream	59

그림 목 차

Fig. II-1. Basin for the study.....	4
Fig. II-2. Flow chart of SATEEC ArcView GIS.....	5
Fig. III-1. K factor using Erickson method at OaeDo stream watershed.....	25
Fig. III-2. K factor using Wischmeier method at OaeDo stream watershed.....	25
Fig. III-3. DEM(Digital Elevation Method) of OaeDo stream watershed.....	26
Fig. III-4. Slope analysis of OaeDo stream watershed.....	27
Fig. III-5. LS factor using Moore & Burch method at OaeDo stream watershed	28
Fig. III-6. R factor using Desmet & Govers method at OaeDo stream watershed	28
Fig. III-7. Analysis map of land use at OaeDo stream watershed in 2000.....	29
Fig. III-8. Analysis map of land use at OaeDo stream watershed in 2005.....	30
Fig. III-9. C factor at OaeDo stream watershed in 2000.....	33
Fig. III-10. C factor at OaeDo stream watershed in 2005.....	34
Fig. III-11. P factor at OaeDo stream watershed in 2000.....	38
Fig. III-12. P factor at OaeDo stream watershed in 2005.....	39
Fig. IV-1. Variable sediment delivery ratio between drainage area and soil type	42
Fig. IV-2. Stream grid and classifiable subwatershed at OaeDo stream watershed	44
Fig. IV-3. Soil erosion at OaeDo stream watershed in 2000.....	46
Fig. IV-4. Soil erosion for subwatershed at OaeDo stream in 2000.....	47
Fig. IV-5. SDR for subwatershed at OaeDo stream in 2000.....	49
Fig. IV-6. Sediment yield for subwatershed at OaeDo stream in 2000.....	50
Fig. IV-7. Soil erosion at OaeDo stream watershed in 2005.....	53
Fig. IV-8. Soil erosion for subwatershed at OaeDo stream in 2005.....	54

Fig. IV-9. SDR for subwatershed at OaeDo stream in 2005..... 56
Fig. IV-10. Sediment yield for subwatershed at OaeDo stream in 2005.....57

Summary

Jeju island, which is located along the moving path of typhoon that heads north, is an island that suffers from flooding and overflow by torrential rain often, and the streams of Jeju island are mountainous streams whose slope is steep and length is short, so with abrupt effluence occurring, damages of downstream farm field and shore culturing farms are increasing.

For countermeasure for torrential rain damages of Jeju island, framework plans for stream maintenance are established or detention ponds are designed emphatically, so analyses and preventive measures of sediment yield are insufficient. Also, in existing studies that estimated sediment yield, only basic unit method or particular value of basin is used, so they are not suitable to deduce value appropriate for basic characteristics.

In this study, Oaedo stream one of the mountainous streams of Jeju island was selected as the basin of study subject and was classified into 3 sub-basins, and after the characteristics of subject basin, the soil erosion amount and the sediment delivery of the stream by land usage distribution were estimated with the use of SATEEC(Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control) ArcView GIS, the sediment yield amount of 2000 and 2005 were analyzed comparatively.

As a result of estimating the sediment yield amount of 2000, the total soil erosion amount was estimated as 601,882 tons/year, and particularly the average soil erosion amount per unit area of sub-basin 2 was found the highest. The sediment yield amounts of the three sub-basins in consideration of sediment delivery ratio were respectively 12,572.7, 14,080 and 157,761 tons/year, and though the sediment yield amount of sub-basin 3 was the most, the sediment yield amount per unit area was found small compared with other basins if the small sediment delivery ratio considered. The total soil erosion amount of 2005 was found to be 950,960 tons/year, and sediment yield amounts were estimated as 35,172.9, 5,266 and 258,535 tons/year

respectively. The soil erosion and sediment yield amount per unit area was highest in sub-basin 1 and the lowest in sub-basin 2.

The soil erosion and sediment yield amount of 2005 using single storm rainfall were estimated high compared with 2005, but for sub-basin 2, the values rather decreased due to change in land usage, and the land coverage of 2005, since there are many classification of land usage compared with 2000, enabling to reflect more accurate land usage condition, could deduce appropriate results.

It is anticipated that such study results can be utilized as basic data to propose direction to predict the amount of sediment yield that causes secondary flooding damage and deteriorates water quality within detention pond and grit chamber, and take action against damages in downstream farm field and shore culturing farms.

I. 서론

1. 연구의 배경

최근 과거의 강우기록을 갱신하는 태풍과 돌발적인 집중호우로 인하여 재산, 인명 피해가 증가하고 있으며, 제주도는 재해유발 원인인 태풍의 길목에 위치하여 호우로 인한 피해에 민감한 실정이다. 제주도의 하천은 한라산에서 발원하여 주로 남북으로 유하되는 특성을 가지며, 경사가 급하고 유로길이가 짧은 형상을 보여 유출로 인한 내수침수 또는 외수범람, 부유토사에 의한 피해 등이 증가하고 있다. 또한, 하천의 상류부는 대부분 산림으로 구성되어 있으며 하류부는 주거지역 및 경작지가 밀집되어 있어 상류에서 발생하는 홍수유출로 인한 하류부의 피해가 증가하고 있으며, 특히 돌발적인 호우로 인한 유출은 부유토사의 침식을 발생시켜 하천의 흐름을 방해하고, 농경지 및 양식장에 막대한 재산적 피해를 발생시키고 있다.

토양침식은 표토층을 이루는 토양에서 토립자가 이완, 분리되어 이송되는 현상으로 에너지, 저항, 보호의 3가지 과정으로 나타낼 수 있다. 강우유출 에너지가 토양에 작용하면 침식작용에 저항하기 위해 저항력을 형성하지만, 토양 자체의 침식 저항력은 상대적으로 미약하므로 토양의 보호를 위한 식생 피복 등 인위적인 노력이 필요하다(Hudson, 1977). 강우 및 유출로 인한 토양침식은 경작지와 목초지를 손상시켜 농업생산성을 떨어뜨리고, 물의 흐름을 방해하는 등 각종 문제점을 야기하며(이 등, 2001), 하천과 저수지 탁수발생에 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다(한국수자원공사, 2004). 과거 토양침식이 미치는 영향은 다른 자연재해에 비해 미비하였고, 농작형태의 변경으로도 쉽게 예방할 수 있었으나, 인구증가로 인한 농업지역의 확대와 도시화에 따른 토지이용의 다변성이 토양 침식 문제를 증가시키고 있다(Renschler 등, 2002).

토양침식에 의한 위협에 대비하고자 다양한 토양보존 대책과 기법이 개발되었

으며 수치해석 모델을 이용한 많은 연구가 있었다. Wischmeier와 Smith(1978)는 USLE(Universal Soil Loss Equation) 모델을 이용하여 강우에 의한 토립자의 이탈 및 운송에 의한 개념을 최초로 제안하였으며 이 후 Renard et.al.(1993)에 의해 강우침식인자, 토양침식인자 등의 매개변수 조건을 포함할 수 있는 RUSLE(Revised USLE)를 제시하였다.

국내에서는 박경훈(2003)이 RUSLE 모델을 이용하여 토사유실량을 예측하고 토양침식인자 K값과 토양성분, 투수성과의 상관관계를 보였으며 김주훈 등(2007)은 FARD2006을 이용하여 강우인자 R을 분석하여 토양유실분포도와 토양유실위험등급도를 작성하였다. 최근에는 RUSLE 모형과 지형공간정보시스템(GIS)를 활용하여 토사유실량 예측에 대한 연구가 진행되고 있으며 한재석과 김주훈(2001), 이근상 등(2004), 박재훈 등(2000) 등은 토사유실량을 산출하기 위하여 RUSLE 모형과 GIS 프로그램을 연계하여 분석하여 강우시 발생한 유사량과의 관련성을 보고하였다. 김영표 등(2008)은 가야산 국립공원의 토양침식에 대해 분석한 바 있으며 이종설과 정재학(2009a, 2009b)은 강원지역의 RUSLE 인자특성에 대하여 분석하여 현장토양과의 오차를 제시하였다. 현재까지 토양침식량 예측과 침식인자에 대한 연구는 주로 하천을 대상으로 하여 실시되고 있어 산림유역의 토양침식에 대한 연구도 필요한 실정이다.

토양침식 산정모형은 SEDD(Sediment Delivery Distributed) 모형, WEPP(The Water Erosion Prediction Project Model) 모형, SATEEC(Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control) 모형 등이 있으나 WEPP 모형, SEDD 모형 등은 매개변수의 수가 많은 이유로 사용이 줄어들고 있다.

2. 연구의 목적

제주도의 호우 피해에 대한 대책은 하천을 유하하는 유출수를 대상으로 하여 하천정비기본계획이나 저류지 설계만을 중점적으로 시행하였으나, 토사유출에 대한 분석과 예방대책은 부족한 실정이다. 토사유출은 호우유출과 함께 이차적인 홍수 피해를 유발하는 원인으로 작용될 수 있으며 저류지 및 침사지내의 수질악화의 요인이 된다. 따라서, 호우로 인한 각종 피해를 최소화하고 저류시설의 효율적 설계를 위해서는 토사유출량의 해석과 예측이 필요하다. 또한, 토사유출량을 산정한 기존 연구에서는 원단위법이나 구역의 특정값만을 사용기 때문에 유역특성에 적합한 결과를 도출하기 힘들다.

본 연구에서는 GIS 기반의 SATEEC(Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control) ArcView GIS를 이용하여 대상구역의 특성과 토지이용분포에 따른 토양침식량과 하천의 유사량을 산정하고 하천 최하류부의 토양유출량을 산정하였다. SATEEC는 GIS를 이용하여 유역의 특성을 셀단위로 분석하기 때문에 유역특성을 제대로 반영할 수 있으며, 셀단위별 결과를 도출하여 기존 연구에 비해 적합한 토사유출량을 산정할 수 있다.

이와 같은 연구는 하천재해로 인하여 발생할 수 있는 피해의 정도를 예측하고, 이에 대처할 수 있는 방향을 제시하기 위한 기초 연구이며 해당구역의 토사유출량 산정 및 저감을 위한 계획의 기초자료로 활용되고자 한다.

II. 연구의 자료 및 방법

1. 연구대상 유역

제주도의 하천은 제주시와 서귀포시를 중심으로 남·북부 지역에 143개의 지방 하천과 소하천을 형성하고 있으며, 이는 유로연장이 짧고 경사가 급하며, 크고 작은 만곡의 형태를 보이는 산지형 하천의 형태를 갖는다.

연구대상 유역은 제주도 북부지역인 제주시를 유과하는 외도천을 대상으로 하였다. 외도천 유역은 하류부를 제외하면 도시화지역이 발달하지 않았으며, 산림과 경작지의 비율이 높아 토립자 특성에 따른 토사유출해석에 적합하다. 대상 하천의 총 연장은 12km이고, 지류인 어시천과 광령천이 해안가 근처에서 합류하며 유로연장은 15.71km, 유역의 총 면적은 75.08km²이다. 총 유역에서 합류부 이전의 외도천 유역을 연구대상 유역으로 선정하였고 면적은 41.42km²이며, 유역의 평균고도는 874.89ELm, 평균 경사는 11.99%이다. 대상 유역의 토지이용현황을 보면 산림이 42.42%로 대부분을 차지하고 있으며, 경작지가 17.49%, 주거지역이 2.05%를 차지하고 있다.



Fig. II-1 Basin for the study

2. 연구의 방법

본 연구에서는 대상지역으로 선정된 외도천 유역의 토양침식량과 하천의 유사량을 분석하여 출구점 및 주요지점의 토사유출량을 산정하였다.

토사유출량 산정은 범용토양유실방정식(USLE, Universal Soil Loss Equation)을 이용하는 SATEEC ArcView GIS를 사용하였다. 입력인자인 강우침식인자(R), 토양침식인자(K), 침식사면의 길이·경사인자(LS), 식생피복인자(C), 경작인자(P)는 강우량자료와 지형자료(DEM, Land Use, Soil Type)를 이용하여 구축하였으며, 2000년과 2005년도의 토지이용 변화를 비교하였다. 또한, 대상유역의 지형자료 검토 결과 세 개의 소유역으로 분할하여 각 소유역에 대한 토사유출량을 비교·검토하였다.

연구내용의 흐름도는 다음 Fig. II-2와 같다.

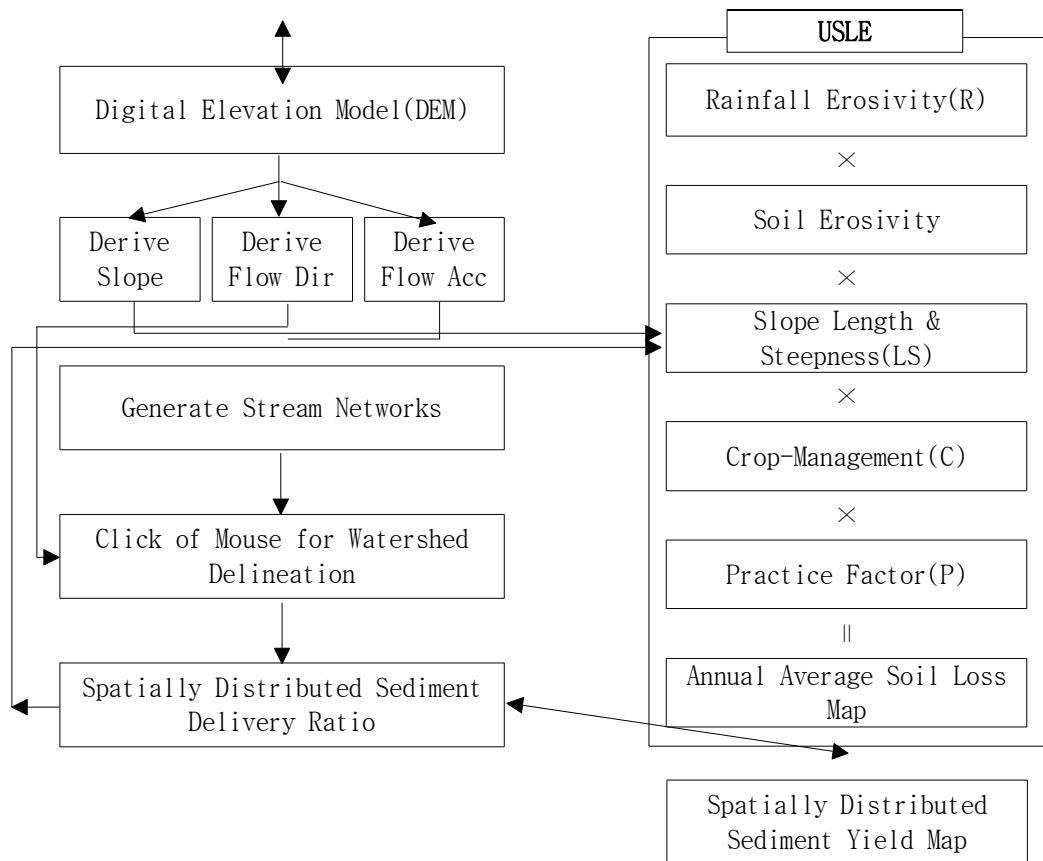


Fig. II-2 Flow chart of SATEEC ArcView GIS

3. 모형의 이론적 배경

3.1 USLE의 개요

범용토양유실방정식(USLE)는 1960년대에 농경구역에서의 토양손실예측을 위해서 미국의 Wischmeier & Smith(1965)에 의해 개발되었다. 이 방정식은 경험적 방법에 의해 개발되었지만 방정식의 이름에서 알 수 있듯이 다른 지역에 대해 범용적으로 적용할 수 있다. USLE는 구역의 기후(강우), 토양, 토지피복상태, 토지이용 등의 변수를 이용하여 구역에서의 토양 유실량을 추정한다. USLE를 이용하여 추정된 토양 유실량은 해당 지역에서 강우에 의해 침식되어 하류로 유실되는 토양량으로써 초기 침식량이라 하며, 미국의 경작지와 유럽, 서부 아프리카 등지에서 많이 적용되었다.

USLE에 의해 예상되는 토양유실은 여섯 가지 형태의 인자에 의해 결정된다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

여기서, A : 연평균 토양 유실량(tons/ha/year)

R : 강우침식인자(J/ha · mm/hr)

K : 토양침식인자(tons/ha/R)

L : 침식사면의 길이인자(경사장인자)

S : 침식사면의 경사인자(경사도인자)

C : 식생피복인자

P : 침식조절인자

단, L, S, C, P 는 무차원이다.

이 식을 개발하기 위하여 Wischmeier & Smith는 표준밭(unit plot)이라고 하는 길이 22.13m와 9%의 경사를 가진 밭작물의 나지에서 자료를 대규모로 수집하였다. 토양침식인자 K 는 표준밭에서 단위 강우침식인자 R 당 해당 토양의 침식

량을 의미하며, 경사길이인자 L과 경사인자 S는 같은 조건하에서 실제 경사에서 토양 유실량과 표준 밭에서 발생한 유실량의 비율이다. 일반적으로 경사길이인자 L과 경사인자 S는 통칭하여 지형인자 LS라고 표현한다. 식생피복인자 C와 침식조절인자 P 또한 각각 해당 조건에서의 단위 면적당 유실량과 표준 밭에서 발생한 단위면적당 유실량과의 비율을 나타낸다.

USLE의 토양 유실량 A값은 강우침식인자 R값을 연평균 값을 이용할 경우 연평균 토양 유실량을 의미하며, 특정 기간의 강우사상을 이용할 경우 해당 강우사상에 의해 발생한 토양 유실량을 의미한다.

USLE는 관상 및 세류침식에서는 침식능이 약해 1mm 이상의 토립자에 대해서는 적용할 수 없다(Haas, 1994). 토양 보전을 위한 설계에 활용하기 위하여 개발된 범용토양손실공식은 세류간 그리고 세류침식량 산정을 위해 개발되었으므로 구곡침식, 산사태에 의한 침식량은 물론 하천이나 저수지에서의 침식 또는 퇴적에 의한 침식량의 증감효과를 반영하지 못한다. 따라서 범용토양손실공식을 이용하여 산정한 특정 유출지점의 토사유출량은 토양생산지점으로부터 유출지점까지의 전달률을 고려하여야 한다.

3.2 강우침식인자(R)

강우침식인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 초기에는 연평균 강우침식인자만을 적용하다가 단일호우 강우침식인자가 추가로 도입되었다. 연평균 강우침식인자는 통상 기존 연구 결과(정 등, 1983)를 사용하게 되며, 단일호우 강우침식인자는 재현기간에 따른 확률 강우량을 이용하여 24시간 동안의 지속적인 강우강도를 사용한다. 일반적으로 단일호우 강우침식인자가 연평균 강우침식인자에 비해 2배 이상 산정되는 경향이 있다.

3.3 토양침식인자(K)

토양침식인자는 다른인자가 모두 동일한 조건에서 더 쉽게 침식이 발생하는 정도를 의미하며 이는 각 토양 특성에 따라 발생한다. 이에 대하여 Wischmeier

& Smith(1965, 1978)는 토양침식을 측정할 단위 구역으로 세분화된 토양에 대하여 침식 지수당 토양 손실률로 정의하였으며 토양 유형은 모래 혹은 점토의 증가에 상관없이 일방적으로 실트가 감소함에 따라 침식이 보다 적게 발생함을 연구하였다.

3.4 지형특성인자(LS)

LS는 지형인자로 경사도(S)와 경사길이(L)이 클수록 유사량이 크게 추정되고 시험지역에서 얻어진 경험적 회귀식에 의해 결정된다. 유역 경사는 일정 구역의 지표면 경사로 보통 수평거리에 대한 고저차의 백분율로 표현하며 유역 길이는 지표 윌류수가 발생되기 시작하는 지점으로부터 경사가 줄어 퇴적이 일어나는 지점까지의 거리이거나 유출이 뚜렷하게 나타나는 형태인 수로나 지류로 합류되는 지점까지로 규정하고 있다. 토양유출량 산정에 있어 지형특성인자의 정확한 산출은 중요한 사항이며 다음과 같은 공식을 사용하여 산정할 수 있다.

1) Wischmeier & Smith(1965)의 방법

Wischmeier & Smith(1965)는 22.13m의 길이와 9%의 경사도를 갖는 표준경사를 기준으로 하여 이때의 지형인자 LS값을 1로 하였다. 그리고 표준 경사와 비교하여 상대적인 경사와 길이의 변화에 의해서 지형인자 값을 구하였다. 경사가 큰 경우는 물이 중첩되고 속도가 증가하기 때문에 침식이 늘어난다. Wischmeier & Smith(1965)는 다음과 같은 지형인자의 산정식을 제안하였다.

$$LS = (\lambda/22.13)^m (65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065)$$

여기서, λ : 경사길이(m)

θ : 경사도(degree)

m : 경사지수

$$= 0.2, \theta < 0.573$$

$$= 0.3, 0.573 \leq \theta < 1.718$$

$$= 0.4, 1.718 \leq \theta < 2.862$$

$$= 0.5, \theta \geq 2.862$$

2) Foster & Wischmeier(1974)의 방법

Foster & Wischmeier(1974)는 경사는 물론이고 평탄지 조차도 경사가 완전히 일정할 수 없다고 생각하였다. 그리고 그들은 복잡한 경사지에서 일정한 경사부분으로 나누어진 한 경사부분에서 경사도와 토성이 균일하다고 가정할 때 지형 인자 LS값을 산정하는 방법을 다음과 같이 유도할 수 있다고 하였다.

$$LS_j = \frac{S_j \cdot (\lambda_j^{m+1} - \lambda_{j-1}^{m+1})}{(\lambda_j - \lambda_{j-1}) \cdot (22.13)^m}$$

여기서, L : j번째 경사장 인자

S_j : j번째 경사도 인자

λ_j : 경사지 최상단으로부터 j번째 하단까지의 거리

m : 경사지수

Foster & Wischmeier(1974)의 방법은 이후에 발전된 GIS와의 접목에 대한 기본적인 개념을 제시하고 있다고 할 수 있다.

3) Moore & Burch(1986)의 방법

Wischmeier & Smith(1965)의 식은 평탄한 경사의 조건하에서 유도되었고, 이 조건 하에서도 상당한 변동이 존재한다. 이러한 모순은 공식을 적용할 때, 특히 판상흐름이 세류로 변하게 될 때와 경사가 변할 때 토양이동구조를 완전히 고려하지 못하는 오류를 나타낸다. 이러한 문제를 개선하기 위해 Moore & Burch(1986)는 Unit Stream Power 이론을 근거로 하여 LS-factor를 물리학적으로 유도하였다.

Yang(1971)은 Unit Stream Power P를 다음 식과 같이 정의하였다.

$$P = \frac{dY}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dY}{dx} = V_x \tan \theta$$

여기서, Y : 바닥에서의 고도

t : 시간

V_x : 세로방향의 유속

θ : 에너지경사선의 각도

좌표계가 회전하여 x 가 토양표면과 평행해지고, 동수경사를 에너지경사와 같은 토양표면의 경사로 대체할 수 있다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = V \sin \theta = Vs$$

여기서, s : $\sin \theta$

Yang(1972)은 자갈과 충적하천상에서 총 유사집중이나 통수능 C_t 는 다음과 같은 형태로 P 와 관련이 있다고 하였다.

$$\log C_t = G + \beta \log(P/\omega - P_{cr}/\omega)$$

여기서, ω : 유사입자의 최종 낙하속도

P_{cr} : 유사입자의 초기운동에 필요한 한계 unit stream power

G, β : ω , 동점성계수, 전단속도 및 하상의 평균입자크기의 복합함수이다.

위식은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$C_t = g(P/\omega - P_{cr}/\omega)^\beta$$

여기서, $G : \log(g)$

Yang(1972)은 P_c/ω 은 g 와 β 에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 '0'이라 할 수 있다고 하였다. 따라서, C_t 는 P 와 거의 비례한다고 할 수 있다.

$$C_t \propto P^\beta$$

단위폭당 정상유량 q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = A(i/b) = Vy$$

여기서, A : 상류의 부분유역면적

V : 등고선 요소를 가로지르는 평균 월류 속도

y : 흐름의 깊이

i : 초과우량

$\log C_t = G + \beta \log(P/\omega - P_c/\omega)$ 를 이에 대입하면

$$P = (Ai/b)(s/y)$$

Manning's 공식으로 평균유속을 정의할 수 있다.

$$qb = Ai = (1/n)s^{1/2}y^{5/3}b$$

또는

$$y = (niA/b s^{1/2})^{3/5}$$

여기서, n : manning's 조도계수로 토양표면의 상태와 관련이 있다.

s : 토양표면의 sin 함수

이를 $P = (Ai/b)(s/y)$ 에 대입하면

$$P = (Ai/b)^{0.4}(s^{1.3}/n^{0.6})$$

유역형상계수 a 는 다음과 같이 정의된다.

$$a = A/bl$$

따라서, $P = (Ai/b)^{0.4}(s^{1.3}/n^{0.6})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = (ali)^{0.4}(s^{1.3}/n^{0.6})$$

초과우량 i , 조도계수 n 이 전유역에 걸쳐 일정하다고 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P \propto (al)^{0.4}s^{1.3}$$

이 식을 $C_t \propto P^\beta$ 에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_t \propto [(al)^{0.4}s^{1.3}]^\beta$$

ρ 는 물의 밀도, I 는 부분 유역으로부터의 총유출체적, Y_s 는 단위면적당 유사량이라고 하면 정상상태에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_s = C_t \rho I$$

따라서,

$$Y_s \propto [(al)^{0.4} s^{1.3}]^\beta$$

따라서, 단위면적당의 토양손실량은 쉽게 정의할 수 있는 세가지 지표인자인 a (유역형상계수), l (경사장 인자) 및 s (경사 인자)에 비례한다고 할 수 있다. 위 식을 기본으로 Moore & Burch(1986)는 LS-factor를 다음과 같이 나타내었다.

$$LS_p = (al/22.13)^{0.4} (s/0.0896)^{1.3}$$

4) McCool et al(1987, 1989)의 방법

McCool et al(1987, 1989)은 실제 및 가상의 강우침식자료들로 부터의 새로운 자료들과 역사적인 재분석을 통하여 경사도인자(S)를 산정하는 새로운 식을 제안 하였다.

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \quad \theta < 5.1428$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5, \quad \theta \geq 5.1428$$

위의 식은 경사장이 15ft(4m)보다 클때만 적용할 수 있는 식이며, 경사장의 크기가 4m보다 작을 때는 다음 식을 사용하여야 한다.

$$S = 3.0(\sin \theta)^{0.5} + 0.56$$

또한, 최근 경작한 토양에 해빙현상이 발생하고 침식이 주로 표면유출에 의하여 발생하는 북서태평양의 봄과 같은 경우 다음식을 사용한다.

$$S = 4.25(\sin \theta)^{0.6}, \quad \theta \geq 5.1428$$

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03, \theta \geq 5.1428$$

Wischmeier & Smith(1965)의 방법에서 경사장인자 L을 산정할 때 이용된 경사장 지수 m을 대신하여 McCool et al.(1989)은 이론적인 분석과 자료보간을 근거로하여 경사장 지수(m)가 세류 및 세류간 침식비와 관련이 있음을 밝히고 경사장인자를 산정하는 기법을 제안하였다.

$$L = (\lambda/22.13)^m$$

$$\text{여기서, } m = \frac{\beta}{\beta+1}$$

$$\beta = \frac{(\sin\theta/0.0896)}{3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56}$$

β : 세류 및 세류간 침식의 비

5) Moore & Wilson(1992)의 방법

Julien & Simons(1985)는 차원해석을 통하여 대부분의 유사이송공식은 다음과 같은 형태로 일반화 할 수 있다고 하였다.

$$q_s = \Phi_2 q^m (\sin\beta)^{n\delta} (1 - \tau_0/\tau)^\epsilon$$

Moore & Wilson(1992)은 위식에서 흐름의 유사이송능(지형인자 LS에 해당)을 나타내는 식을 일반화하였다.

$$T_c^* = (A_s/22.13)^m (\sin\beta/0.0896)^n = LS$$

여기서, A_s : 단위폭당 상류기여면적

위식은 Moore & Burch(1986)의 연구결과와 유사한 형태를 지니며, 연구자에

따라서 위식의 m과 n에 대해서 다양한 값($0.4 \leq m \leq 0.6$, $1.2 \leq n \leq 1.3$)을 제안하였다. Moore & Wilson(1992)은 각각 0.6과 1.3의 값이 RUSLE에 가장 근사한 값을 나타냄을 증명하였다.

6) Desmet & Govers(1996)의 방법

Desmet & Govers(1996)은 Foster & Wischmeier(1974)가 제안한 불규칙 사면에 대한 지형인자 LS를 산정하는 식을 바탕으로 GIS 환경에서 적용시킬 수 있는 방법을 제안하였다. DEM은 지표면을 Grid Cell로서 세분한다. 지형인자를 계산하기 위해서는 각 Grid Cell에 영향을 미치는 유역면적을 알아야 한다. 이러한 유역면적을 일반적으로 기여면적이라 하는데, Desmet & Govers(1996)은 작은 지형적인 기복에서도 유수의 흐름이 변하기 때문에, 지형적으로 복잡한 표면위로 흐르는 유수에서 단일흐름방향 알고리즘의 사용은 한계가 있다고 하였다. 따라서 흐름의 분산성을 구현할 수 있는 다중흐름방향 알고리즘을 적용하여 이러한 한계를 극복하였다. Foster & Wischmeier(1974)가 제안한 식에 기여면적의 개념을 도입하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$LS(i, j) = \frac{(A(i, j) + D^2)^{m+1} - A(i, j)^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} (22.13)^m} S(i, j)$$

여기서, $L(i, j)$: (i, j) 번째 Cell의 경사장인자

$A(i, j)$: (i, j) 번째 Cell이 나누어 받게되는 상류기여면적

D : Cell의 크기

x : $(\sin\theta + \cos\theta)$

3.5 식생피복인자(C)

식생피복인자 C는 경사지의 피복상태, 식생의 종류, 생육정도 등 복합적인 조건에 대한 토양유실량의 영향을 나타내며 특정조건하에서 식생지역의 토양유실량과 나지의 토양유실량과의 비로 정의된다. 일반적으로 식물이 자라지 않는 나

지는 1로 정의하고 산림이 밀집된 지역이나 곡물의 밀도가 높은 지역에서는 0.1 이하로 낮은 값을 가진다. 또한 식물이 많이 존재하는 경우, 강우에 의해 토양이 침식되는 양이 식생피복(vegetable cover)에 의해 많이 감소된다. 이는 식물이 성장하는 경우 식물 잎 등에 의해 강우 에너지를 감소시키고, 식물의 뿌리나 낙엽 등에 의하여 투수능력을 향상시켜 토양을 보호함으로써 토양침식 및 운반을 저지할 수 있는 가장 효과적인 방법이라 할 수 있다.

3.6. 토양보존인자(P)

토양보존인자 P는 어떤 토양보존대책을 세운 사면의 상·하 방향 경사지로부터의 토양보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의한다. 이것은 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위하여 사용되며 일반적으로 도시지역 등 거주지 지역은 1로, 물이나 습지는 0으로 정의한다.

Ⅲ. SATEEC ArcView GIS 입력자료 분석 및 구축

1. 강우침식인자 분석

토양침식량은 강우의 크기 및 형태에 직접적인 영향을 받게 된다. 따라서 강우에 의한 침식능 R의 산정은 대단히 중요하며, 강우침식인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 공식의 개발 초기에는 연평균 강우침식인자만을 적용하였지만 최근에는 단일호우 강우침식인자를 주로 사용한다. 본 연구에서는 두가지의 강우침식인자를 각각 산정하여 토양침식량에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

1.1 연평균 강우침식인자

연평균 강우침식인자는 연평균 강우량에 의한 토양침식에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 통상 기존 연구 결과를 사용하며, 본 연구에서는 「개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I), 국립방재연구소, 1998」의 연평균 강우침식인자를 사용하였다. 이는 기상청 산하 51개소에 대하여 1961 ~ 1981년 동안에 걸쳐 작성된 관측소별 강우침식인자를 산정한 결과로 1981년 이후의 자료를 포함하지 못하였기 때문에 실제 강우의 침식능을 그대로 나타낸다고는 할 수 없다. 하지만 이를 산정하기 위해서는 강우의 시간별 자료가 필요하고 이에 따른 작업의 어려움 때문에 대부분 그대로 사용되고 있다.

본 연구대상 유역은 제주시 기상청 산하에 속하므로 연평균 강우침식인자 R은 제주지역의 390 J/ha · mm/hr를 사용하였다(Table III-1).

Table III-1. Annual rainfall erosivity at rainfall observatory

번호	관측소명	R	자료기간	번호	관측소명	R	자료기간
159	부 산	629	1969~1978	135	추풍령	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
189	서귀포	636	1969~1978	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
187	성산포	445	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	(함 안)	341	1969~1980				

1.2 단일호우 강우침식인자

USLE 적용공식에서 단일호우에 대한 단위면적당 최초 침식량(A)을 산정하기 위한 강우침식도는 연평균 R값을 이용할 수 없으므로 에너지단위의 합($\sum E_i$)과 30분 지속최대강우강도($I_{30(max)}$)을 이용하여 단일호우에 대한 R값을 산정하여야 한다. 단일호우 강우 침식인자는 단일호우에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 단일호우의 재현기간과 지속기간을 결정하는 것이 필요하게 된다.

본 연구에서는 대상유역인 외도천의 하천정비기본계획에식 분석한 확률강우량 자료와 채택한 강우강도식을 사용하였으며, 재현기간은 50년, 80년, 100년, 200년 빈도를 설정하여 지속기간 24시간에 대한 단일호우 강우침식인자를 산정하였다.

단일호우 강우침식인자는 다음과 같은 식을 이용하여 산출한다.

$$R = \sum EI_{30}$$

$$E = \sum e \cdot \Delta P$$

$$e = 0.029 [1 - 0.72 \exp(-0.05 \cdot I)]$$

여기서, R : 단일호우 강우침식인자 ($10^7 J/ha \cdot mm/hr$)

I_{30} : 설계재현기간의 30분 강우강도 (mm/hr)

E : 강우총에너지 ($10^7 J/ha$)

ΔP : 강우지속시간 구분시 간격당 강우증가량 (mm)

e : 강우운동에너지 ($10^7 J/ha/mm$)

I : 강우강도 (mm/hr)

50년, 80년, 100년, 200년 빈도의 강우침식인자는 각각 $R_{50}=1,188(10^7 J/ha \cdot mm/hr)$, $R_{80}=1,391(10^7 J/ha \cdot mm/hr)$, $R_{100}= 1,493(10^7 J/ha \cdot mm/hr)$, $R_{200}=1,831(10^7 J/ha \cdot mm/hr)$ 로 계산되었다(Table III-2 ~ 5).

Table III-2. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 50 years)

지속시간 (hr)	강우량 (mm)	간격당 강우량 (mm)	시간 간격 (hr)	강우강도 (mm/hr)	강우운동에너지 (10^7 J/ha/mm)	강우총에너지 (10^7 J/ha)
0	0.00					
0.5	59.6	59.63	0.50	119.27	0.0289	1.7262
1	87.7	28.09	0.50	87.73	0.0287	0.8073
2	129.0	41.32	1.00	64.52	0.0282	1.1641
3	161.7	32.69	1.00	53.91	0.0276	0.9019
4	189.8	28.10	1.00	47.46	0.0271	0.7602
6	236.1	46.25	2.00	39.35	0.0261	1.2062
9	283.0	46.87	3.00	31.44	0.0247	1.1561
12	315.4	32.44	3.00	26.28	0.0234	0.7587
15	339.6	24.23	3.00	22.64	0.0223	0.5395
24	387.2	47.62	9.00	16.13	0.0197	0.9371
계	$R_{50} = 1,188$ (10^7 J/ha · mm/hr)					9.9573

Table III-3. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 80 years)

지속시간 (hr)	강우량 (mm)	간격당 강우량 (mm)	시간 간격 (hr)	강우강도 (mm/hr)	강우운동에너지 (10^7 J/ha/mm)	강우총에너지 (10^7 J/ha)
0	0.00					
0.5	63.9	63.94	0.50	127.88	0.0290	1.8520
1	94.2	30.26	0.50	94.20	0.0288	0.8718
2	138.8	44.58	1.00	69.39	0.0283	1.2638
3	174.1	35.31	1.00	58.03	0.0279	0.9833
4	204.5	30.37	1.00	51.11	0.0274	0.8316
6	254.4	49.95	2.00	42.40	0.0265	1.3233
9	305.0	50.60	3.00	33.89	0.0252	1.2734
12	340.1	35.05	3.00	28.34	0.0239	0.8390
15	366.3	26.19	3.00	24.42	0.0228	0.5983
24	417.8	51.54	9.00	17.41	0.0203	1.0441
계	$R_{80} = 1,391$ (10^7 J/ha · mm/hr)					10.8807

Table III-4. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 100 years)

지속시간 (hr)	강우량 (mm)	간격당 강우량 (mm)	시간 간격 (hr)	강우강도 (mm/hr)	강우운동에너지 (10^7 J/ha/mm)	강우총에너지 (10^7 J/ha)
0	0.00					
0.5	66.0	65.97	0.50	131.95	0.0290	1.9113
1	97.3	31.28	0.50	97.26	0.0288	0.9022
2	143.4	46.12	1.00	71.69	0.0284	1.3107
3	179.9	36.54	1.00	59.97	0.0280	1.0217
4	211.4	31.45	1.00	52.84	0.0275	0.8652
6	263.1	51.77	2.00	43.86	0.0267	1.3808
9	315.5	52.35	3.00	35.05	0.0254	1.3288
12	351.8	36.27	3.00	29.31	0.0242	0.8769
15	378.9	27.11	3.00	25.26	0.0231	0.6261
24	432.2	53.35	9.00	18.01	0.0205	1.0945
계	R ₁₀₀ = 1,493 (10^7 J/ha · mm/hr)					11.3183

Table III-5. Estimate of single storm rainfall erosivity(frequency for 200 years)

지속시간 (hr)	강우량 (mm)	간격당 강우량 (mm)	시간 간격 (hr)	강우강도 (mm/hr)	강우운동에너지 (10^7 J/ha/mm)	강우총에너지 (10^7 J/ha)
0	0.00					
0.5	72.2	72.21	0.50	144.42	0.0290	2.0930
1	106.7	34.48	0.50	106.70	0.0289	0.9966
2	157.6	50.95	1.00	78.82	0.0286	1.4569
3	198.1	40.44	1.00	66.03	0.0282	1.1417
4	232.9	34.84	1.00	58.23	0.0279	0.9708
6	290.0	57.07	2.00	48.33	0.0271	1.5488
9	347.8	57.84	3.00	38.65	0.0260	1.5024
12	387.9	40.11	3.00	32.33	0.0249	0.9968
15	418.0	30.01	3.00	27.86	0.0238	0.7146
24	477.1	59.14	9.00	19.88	0.0213	1.2580
계	R ₂₀₀ = 1,831 (10^7 J/ha · mm/hr)					12.6797

2. 토양침식인자 분석

토양의 침식성이란 강우에너지와 유출에 의한 침식능에 저항하는 토양의 저항도를 나타내며 연구적으로 토양의 침식성은 표준침식밭(standard erosion plot)에서의 단위 강우지수당 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 다음과 같이 산정된다.

$$K = \frac{\text{측정된침식량}}{\sum EI_{30}}$$

USDA(1997)는 55개의 중서부 농경지의 자료를 기초로 토양 및 토양 특성인자를 이용하여 K를 산정할 수 있는 도표를 발표하였으며, 해석적 관계식은 다음과 같다.

$$K = 0.1317 \times \left[\frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (S_1 - 2) + 2.5 (P_1 - 3)}{100} \right]$$

또한, M은 입경에 있어 주종을 이루는 토립자와 토사 전체에 대한 비율(fraction)에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, K : 토양침식인자(ton/ha/R)

OM : 유기물 백분율(%)

M : 입경에 있어서 주종을 이루는 토립자와 조사 전체에 대한 비율에 대한 함수

S_1 : 토양구조지수(1 ~ 4)로 구분

P_1 : 투수지수(1 ~ 6)으로 구분

MS : 실트 백분율(%)

VFS : 극세사 백분율(%)

CL : 점토 백분율(%)

K는 토양의 침식성으로 단위는 tons/(acre · unit rainfall index)로 표현된다. OM은 함유 유기물의 백분율, P₁은 투수지수, S₁은 토양의 구조지수를 나타내는 값이며 Table III-6과 같이 분류한다.

Table III-6. Classification of S₁ and P₁

토 양 의 구 조		토 양 의 투 수 성	
S ₁	Soil Structure	P ₁	Permeability
		1	Rapid
1	Very Fine Granular	2	Moderate to Rapid
2	Fine Granular	3	Moderate
3	Moderate or Coarse Granular	4	Slow to Moderate
4	Block, Platy, Massive	5	Slow
		6	Very Slow

CL은 입도분포곡선에서 점토(≤ 0.002 mm)의 백분율, MS는 실트(0.002~0.05 mm)의 백분율, VSF는 매우 고운 모래(0.05~0.1 mm)의 백분율이다.

연구에서는 대상구역의 토질연구결과를 바탕으로 K값을 산정 하여야 하나, 구체적인 토질조사를 시행하는데 어려움이 있다. 따라서, Table III-7의 『개발에 따른 토사유량 산정에 관한 연구(I), 국립방재연구소, 1998』 보고서의 입도 결과를 이용하였으며, 외도천 구역의 30개 토양통에 대하여 Erickson 방법과 Wischmeier 도표에 의한 침식인자 K를 적용하였다.

ArcView GIS를 이용하여 구역의 토양침식인자를 산정한 결과, Erickson 방법에 의한 침식인자 K는 0~0.73ton/ha/R의 분포를 보였으며 면적비에 따른 평균은 0.41ton/ha/R로 나타났다. Wischmeier 도표에 의한 침식인자 K는 0~0.57ton/ha/R로 분석되었으며 평균값은 0.31ton/ha/R로 Erickson 방법에 의한 침식인자가 큰 것으로 나타났다(Fig. III-1, 2).

Table III-7. Soil characteristics and K factor value of each soil type

토양통	입경분포					유기물 함양	K [tonnes/ha/R]	
	자갈	모래	극세사	이토	점토		OM	Erickson
	>2mm	0.1~2.0	0.05~0.1	0.002~0.005	<0.002			
강정	3.3	11.8	2.4	68.6	17.2	1.74	0.68	0.55
구곡	0.0	17.8	5.6	47.8	28.8	3.67	0.37	0.28
구엄	2.7	8.6	1.9	69.7	19.8	2.84	0.55	0.48
구좌	2.6	2.2	1.3	56.7	39.8	20.07	0.38	0.26
군산	0.0	3.0	1.9	65.2	29.9	20.14	0.38	0.26
노로	0.6	6.3	2.6	65.3	25.8	17.17	0.40	0.26
논고	0.0	21.6	2.5	55.0	20.9	19.96	0.40	0.26
논산	22.8	25.6	9.1	37.4	27.9	2.14	0.22	0.23
대원	0.0	41.2	6.2	36.8	15.8	5.02	0.32	0.22
대정	3.8	12.7	6.9	44.2	36.2	6.39	0.32	0.15
동홍	0.0	7.4	1.0	64.7	26.9	2.83	0.49	0.40
무릉	0.0	13.3	0.8	62.9	23.0	1.79	0.60	0.46
민악	1.6	3.8	2.6	63.9	29.7	20.38	0.38	0.26
사라	0.0	30.8	2.4	55.3	11.5	2.52	0.57	0.44
아라	27.8	8.3	2.0	67.3	22.4	11.90	0.22	0.26
애월	5.8	10.0	1.4	72.4	16.2	2.27	0.68	0.54
연곡	0.0	39.0	7.0	40.6	13.4	0.91	0.57	0.41
오라	3.2	6.0	2.0	75.4	16.6	1.97	0.69	0.56
용강	16.5	24.9	3.6	54.1	14.7	1.78	0.35	0.37
우도	0.4	5.2	1.1	48.9	44.8	9.31	0.31	0.06
이도	0.1	7.8	2.7	69.2	20.3	2.12	0.64	0.54
적악	0.0	46.0	4.0	31.6	18.4	15.26	0.28	0.26
제주	9.4	3.3	0.9	74.2	21.6	0.70	0.73	0.57
중문	29.1	12.5	2.6	65.8	19.1	7.91	0.24	0.15
중엄	2.5	2.7	2.4	67.3	27.6	11.27	0.40	0.03
토산	0.0	2.4	0.6	63.0	34.0	25.60	0.36	0.26
평대	0.0	3.6	1.7	67.0	27.7	24.10	0.40	0.26
한경	6.8	7.1	5.9	69.0	18.0	20.17	0.48	0.26
한림	4.3	11.6	3.0	65.8	19.6	10.10	0.46	0.09
흑악	0.0	4.4	3.9	69.7	22.0	25.22	0.44	0.40

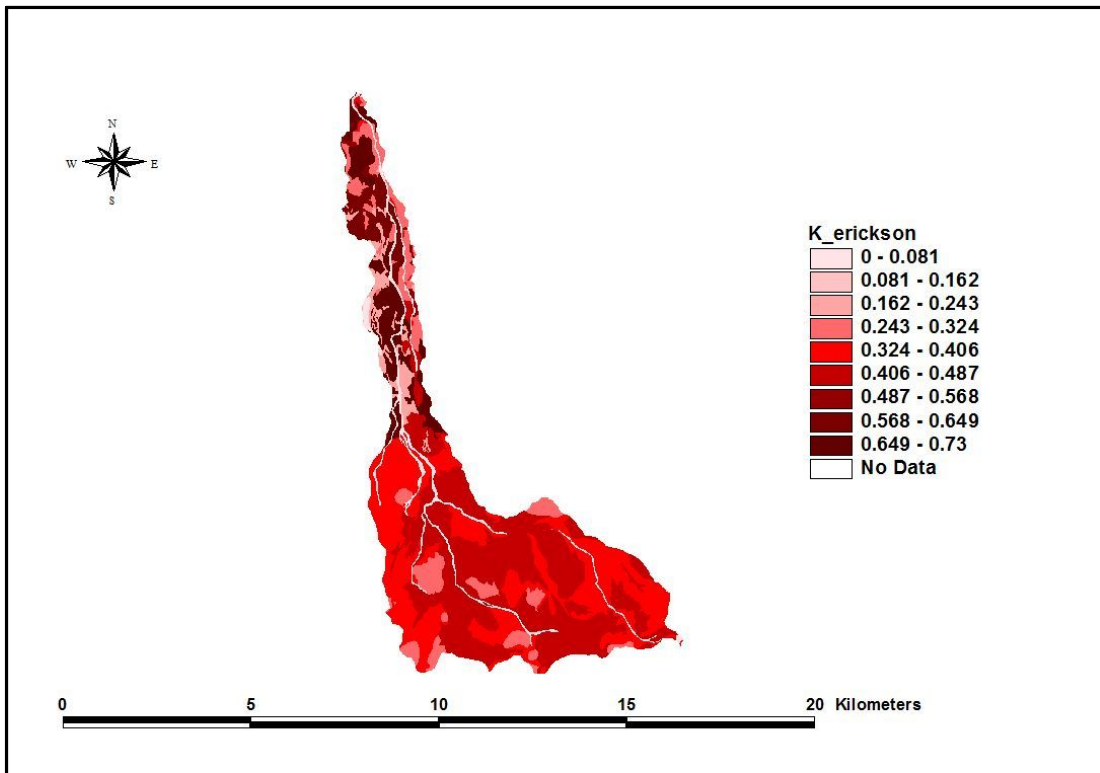


Fig. III-1 K factor using Erickson method at OaeDo stream watershed

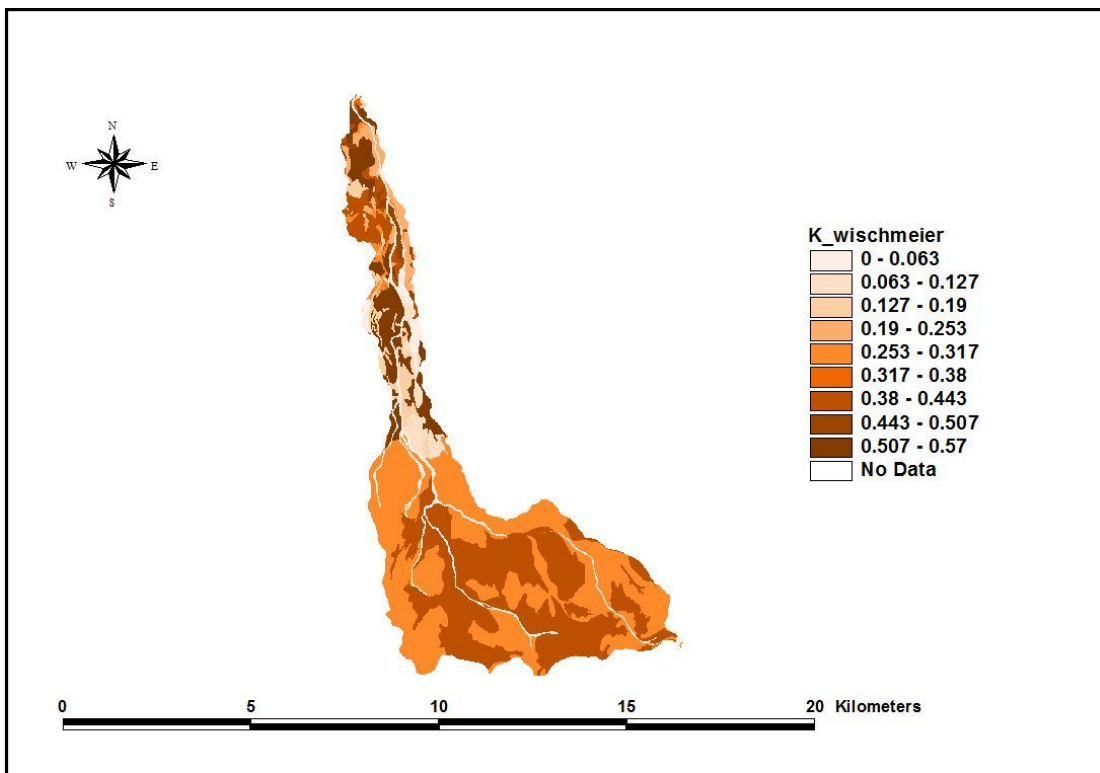


Fig. III-2 K factor using Wischmeier method at OaeDo stream watershed

3. 지형인자 분석

토양 손실과 관련된 지형특성 인자는 유역길이, 지면경사, 유역면적, 기복도 등이 있으며, 유역 사면의 길이(L), 사면의 기울기(S)를 통합하여 하나의 무차원 인자(LS)로 간주하여 토사유출량을 산정한다. USLE에서 경사장 인자(L)과 경사도 인자(S)를 합쳐서 지형인자(LS)라고 표기하며, 경사장 인자(L)은 단일 경사라고 할 수 있는 지형의 길이와 표준 시험포의 길이인 22.13m의 비로 나타낼 수 있고, 경사도 인자(S)는 단일 경사라고 할 수 있는 지형의 경사도와 표준 시험포의 경사도인 9%의 비로 나타내어진다. x경사장과 경사도 인자를 SATEEC ArcView GIS는 DEM을 이용하여 산정하였으며, Moore & Burch(1986)에 의해 제안된 식과 Desmet & Govers(1996)의 식을 이용하였다.

연구대상 유역의 DEM 분석 결과, 표고는 3.25 EL.m에서 1944.02 EL.m의 분포를 보였으며 평균표고는 874.89 EL.m로 나타났다(Fig. III-3).

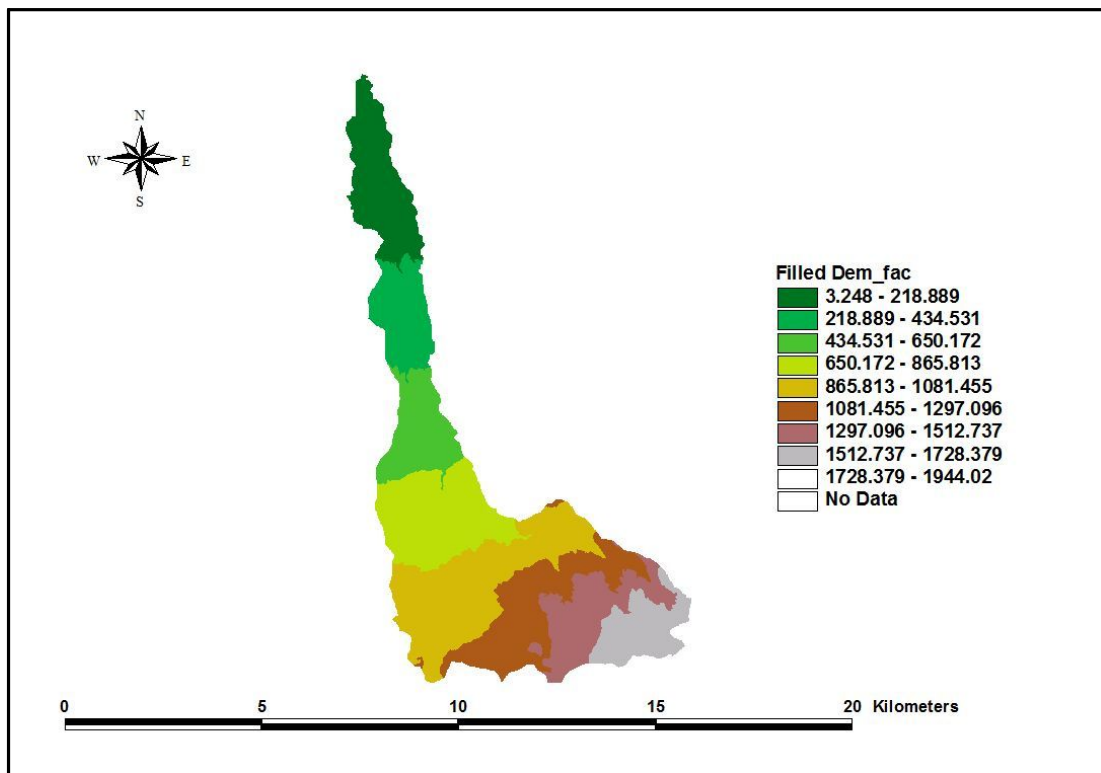


Fig. III-3 DEM(Digital Elevation Method) of OaeDo stream watershed

대상 지역의 경사분포는 하천의 하류부에서 최소 0°의 값을 보이며, 하천을 중심으로 상류부에서는 최대 79.29°의 급경사를 나타냈다. 평균경사는 11.99°로 분석되었으며, 경사분석에 의한 결과는 Fig. III-4와 같다.

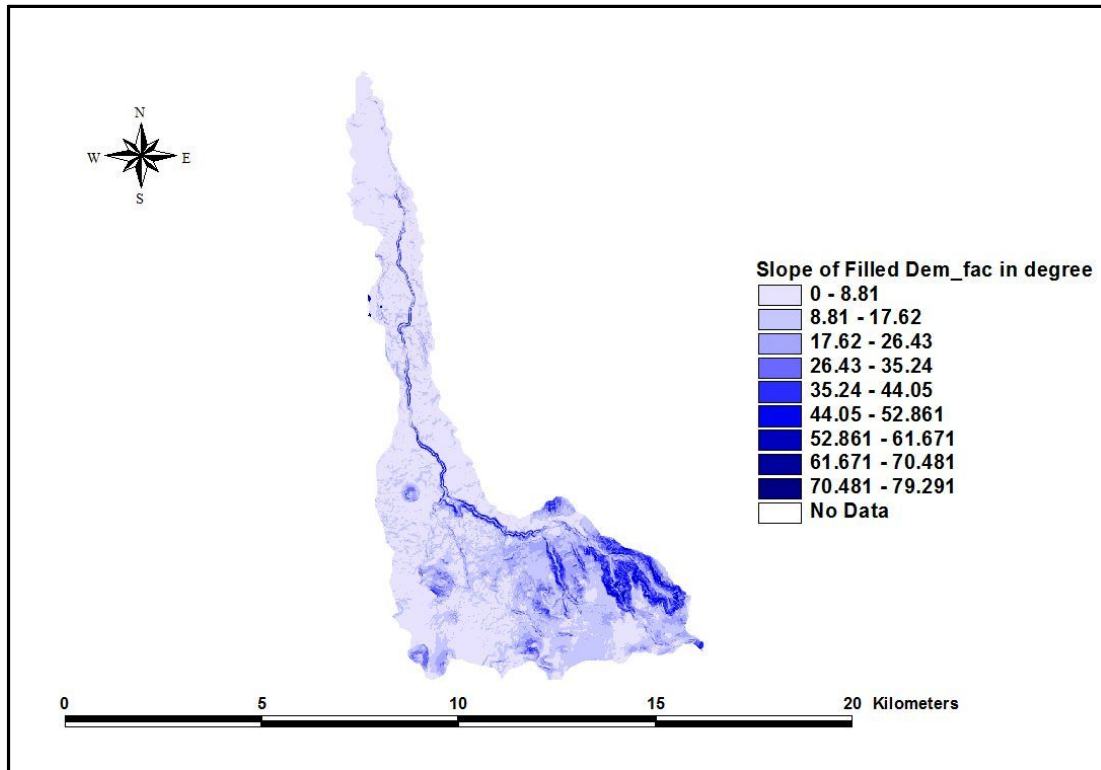


Fig. III-4 Slope analysis of OaeDo stream watershed

상기에서 분석된 표고와 경사분포를 이용하여 유출의 방향성을 파악할 수 있으며 하천의 누적집수량인 Flow Accumulation을 산정할 수 있다.

DEM을 이용하여 LS값을 산정할 때, RUSLE User Guide에 따르면 경사장의 최대 길이는 10.7m(35ft)에서 91.4m(300ft)이며, 최대 경사장은 121m(400ft)라고 제시하였다. 본 연구에서는 유역에서의 최대 경사장을 121m(400ft)라고 가정하여 LS값을 산정하였다.

Moore & Burch(1986)의 식을 이용하여 분석된 지형인자(LS)는 최대 45.40, 평균 7.84로 분석되었으며, Desmet & Govers(1996) 공식을 이용하여 산정된 결과는 최대 80.91, 평균 13.05의 값을 나타냈다(Fig. III-5, 6).

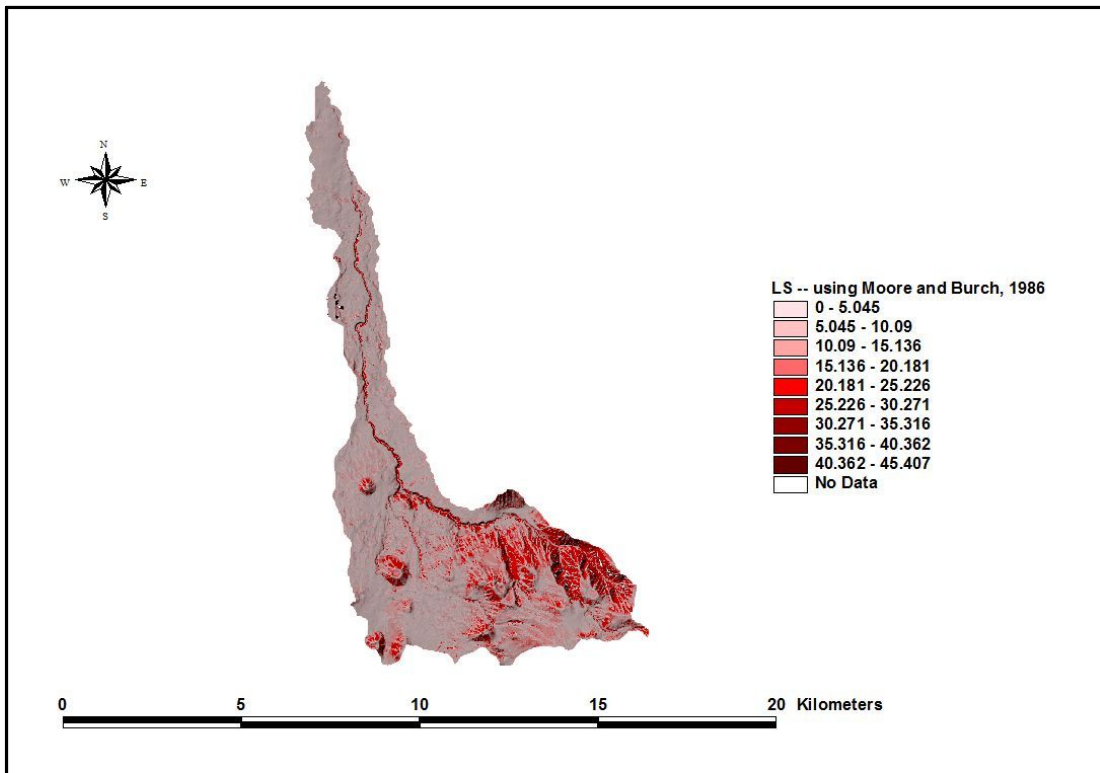


Fig. III-5 LS factor using Moore & Burch method at OaeDo stream watershed

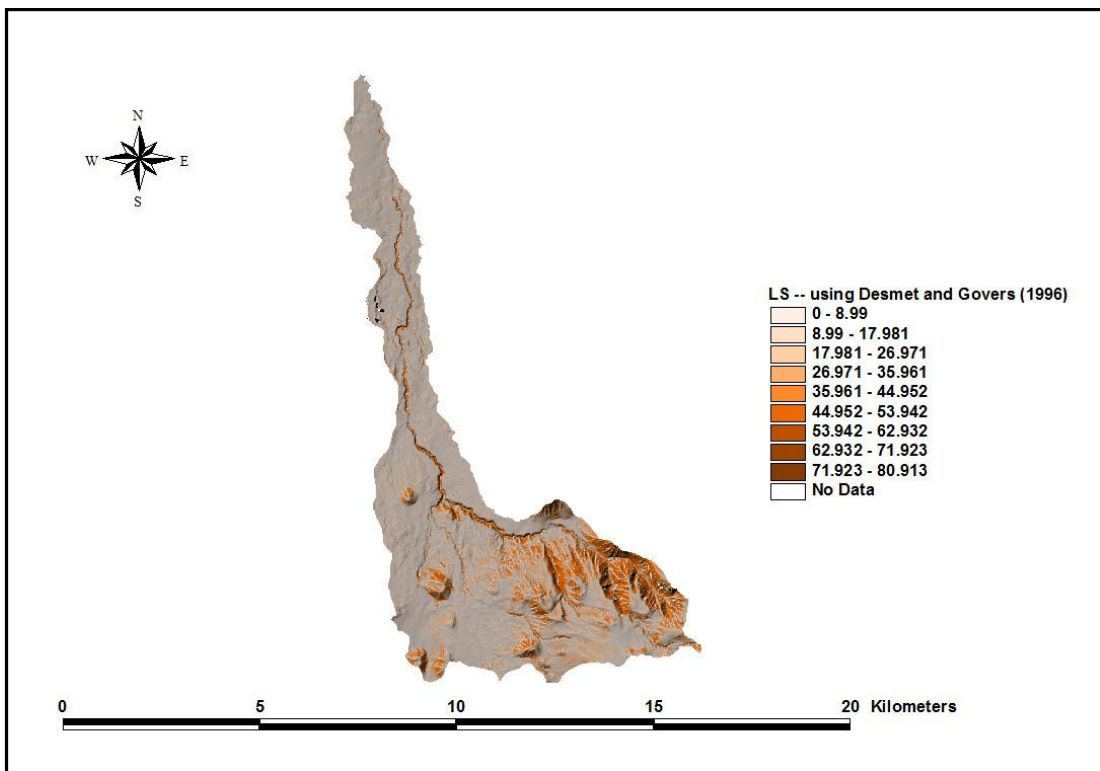


Fig. III-6 R factor using Desmet & Govers method at OaeDo stream watershed

4. 토지이용변화에 따른 식생피복인자와 작물경작인자

식생피복인자와 작물경작인자는 토지를 피복하고 있는 식생 또는 작물의 이용 상태에 따라 그 값이 달라지며 0에서 1까지의 값을 가진다. 본 연구에서는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 토지피복자료를 이용하여 2000년과 2005년의 토지피복상태를 고려한 식생피복인자와 작물경작인자를 구하였다.

2000년의 토지피복은 총 6가지로 분류되며 외도천 유역에서 가장 많은 비율을 차지하는 것은 산림으로, 전체면적의 70%를 차지하며 그 외에 밭이 18%, 초지가 10%를 차지하고 있다(Fig. III-7, Table III-8).

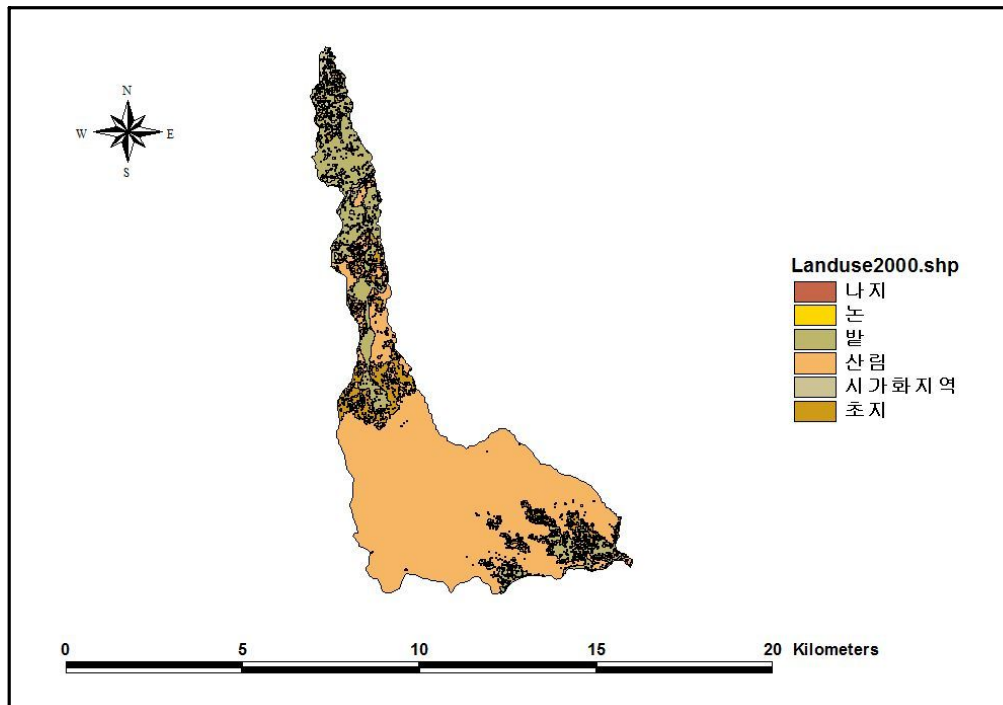


Fig. III-7 Analysis map of land use at OaeDo stream watershed in 2000

Table III-8. Status of land use in 2000

하천명	유역면적	나지	논	밭	산림	시가화지역	초지
외도천	41.42 (km)	0.03	0.04	7.58	28.99	0.82	3.95
	100 (%)	0.07	0.10	18.31	70.00	1.97	9.54

2005년도 외도천 유역의 토지피복은 총 17가지로 분류되지만, 이 중에서 상업지역과 공공시설지역, 내륙습지가 차지하는 면적 비율은 0.1% 미만이므로 분석에서 제외하고, 총 13가지 분류에 대하여 분석을 시행하였다. 가장 많은 비율을 차지하는 것은 활엽수림으로 전체면적의 48.30%를 차지하며 침엽수림과 혼효림을 포함하는 산림은 67.89%의 분포를 보인다. 기타초지 및 자연초지의 면적은 19.98%를 차지하며, 경작지의 대부분은 과수원으로 총경작지 면적 9.53% 중 6.59%를 차지하고 있다(Fig. III-8, Table III-9). 2000년도에 비해 경작지의 규모가 축소되고 초지의 비율이 증가하였으나 산림과 시가지역의 비율은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 외도천 유역에 대규모 단지조성의 개발이나 시가지지역이 발달되지 않았으며, 과수원 등의 분류 기준이 다르기 때문에 나타난 결과라고 판단된다.

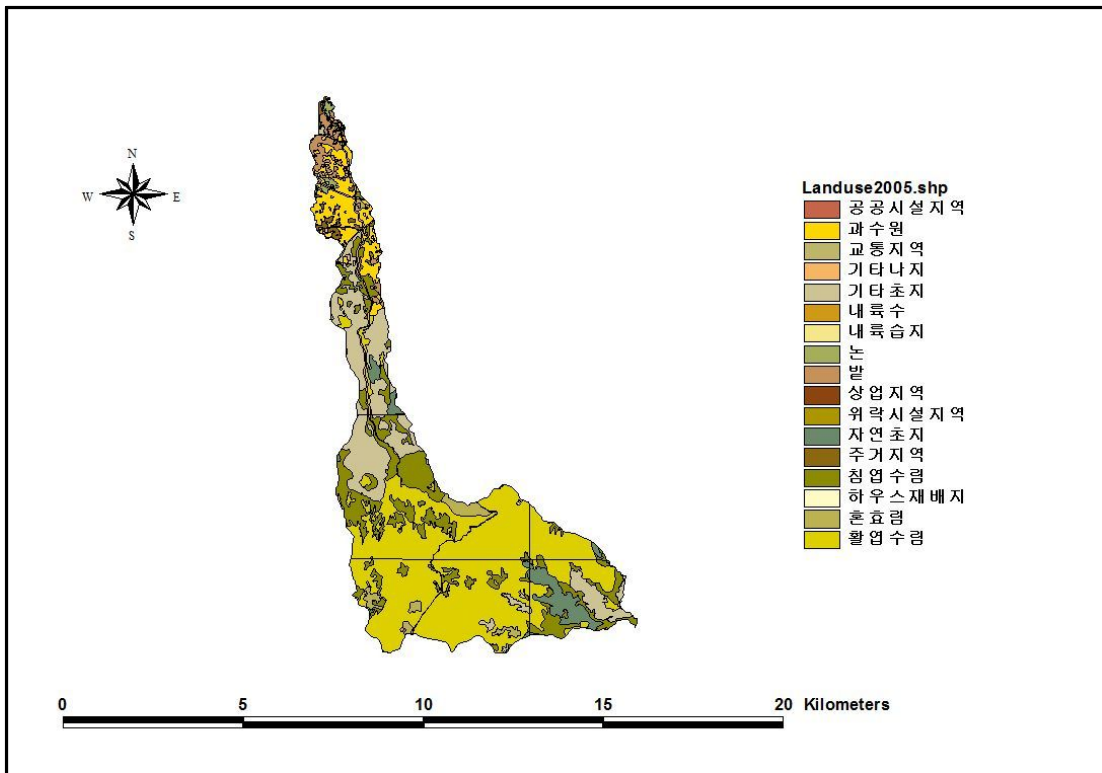


Fig. III-8 Analysis map of land use at OaeDo stream watershed in 2005

Table III-9. Status of land use in 2005

하천명	유역면적	주거지역	위락시설지역	교통지역	논
외도천	41.42 (km)	0.39	0.02	0.16	0.19
	100 (%)	0.94	0.05	0.39	0.45
	밭	하우스재배지	과수원	활엽수림	침엽수림
	0.96	0.07	2.73	20.01	7.18
	2.33	0.17	6.59	48.30	17.33
	혼효림	자연초지	기타초지	기타나지	내륙수
	0.94	1.68	6.59	0.47	0.02
	2.26	4.07	15.91	1.14	0.04

4.1 식생피복인자 분석

식생피복인자(C)는 식생의 종류, 식생이 성장하는 상태, 경작형태와 관리요소들에 의하여 달라진다. C 값의 비율은 식생이 성장하기 전의 나지에서와 같은 지역에서는 약 1.0의 높은 값을 가지는 반면, 산림이 밀집된 지역에서는 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 본래 작물의 생육에 따라 또는 토양유실량의 실측값에 따라 구해야 하지만 이에 대해 검토한 연구가 국내에서는 정 등(1984)의 연구를 제외하면 거의 없는 실정이므로 본 연구에서는 정 등(1984)에 의해 제시된 토지 피복별 식생피복인자 기준을 적용하였다(Table III-10).

Table III-10. C factor for various land uses(Jung et al., 1984)

Forms of cover-management factor(C factor)		C factor
Forest	mixed needle & broad-leaf tree	0.007
Farmland	paddy field	0.350
Pasture	pasture, public garden	0.050
Urban district	low density area	0.002
Bare land	bare land	1.000
water system	lake, reservoir	0.000

토지이용이 산림일 때는 침엽수와 활엽수가 섞인 혼효림의 C factor인 0.007, 시가화지역은 0.002를 사용하였으며, 각각의 토지이용에 따라 지적도상의 지목들을 분류하고 각 지목별로 값을 입력하여 C값을 적용하였다.

2000년도 토지피복도를 이용하여 분석된 식생피복인자 C는 평균 0.075의 값을 보이며 유역의 중·하류부와 최상류에서 경작지로 인하여 높은 값을 보이고 있었다(Fig. III-9).

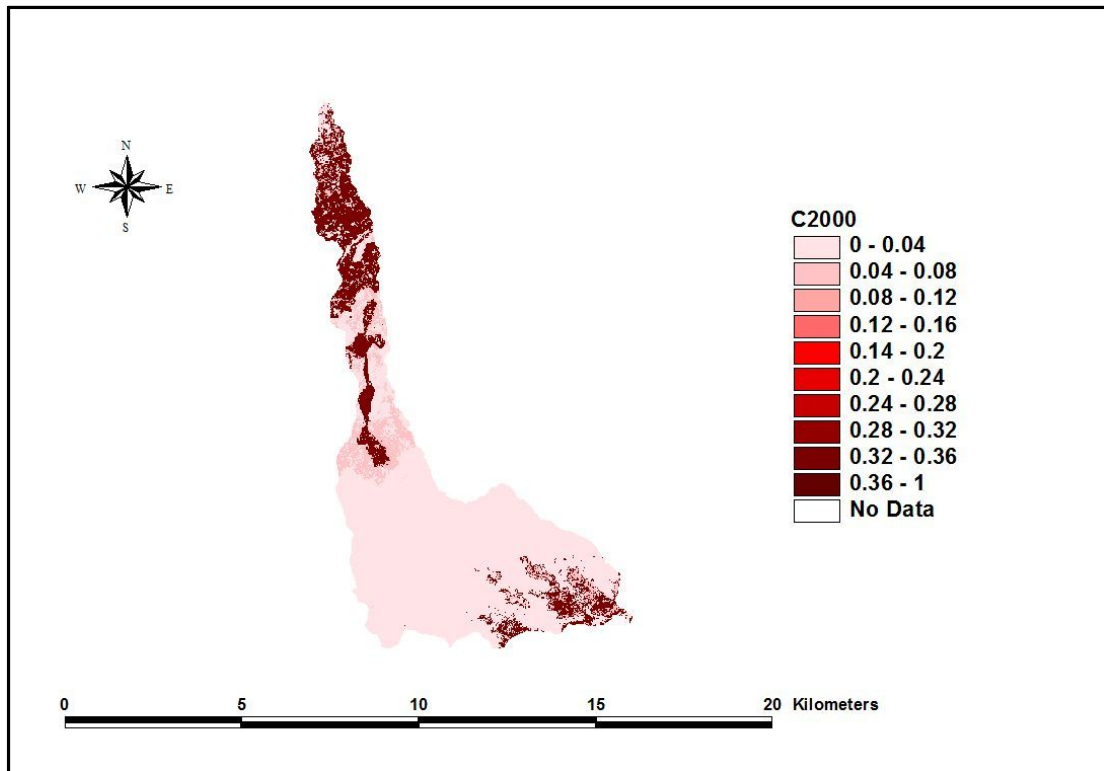


Fig. III-9 C factor at OaeDo stream watershed in 2000

2005년도 토지피복도를 이용하여 분석된 식생피복인자 C는 평균 0.037의 값을 보이며, 2000년도의 토지피복도를 이용한 C값 절반정도의 결과를 보였다. 이는 토지이용변화에 따른 경작지 감소의 결과로 보이며, 증가되는 초지는 식생피복인자 C의 평균값에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 2000년도의 토지피복도에는 최상류부에 경작지가 발달하였으나, 위치상 한라산 고지대에 해당되므로 잘못된 자료인 것으로 판단된다. 또한, 2000년도와 2005년도 토지피복도를 이용한 식생피복인자 C는 토지이용을 구분한 개수의 차이로 인하여 결과의 차이가 크게 나타났으며, 2005년도 토지피복도를 이용했을 때, 보다 세분적인 결과를 얻을 수 있었다(Fig. III-10).

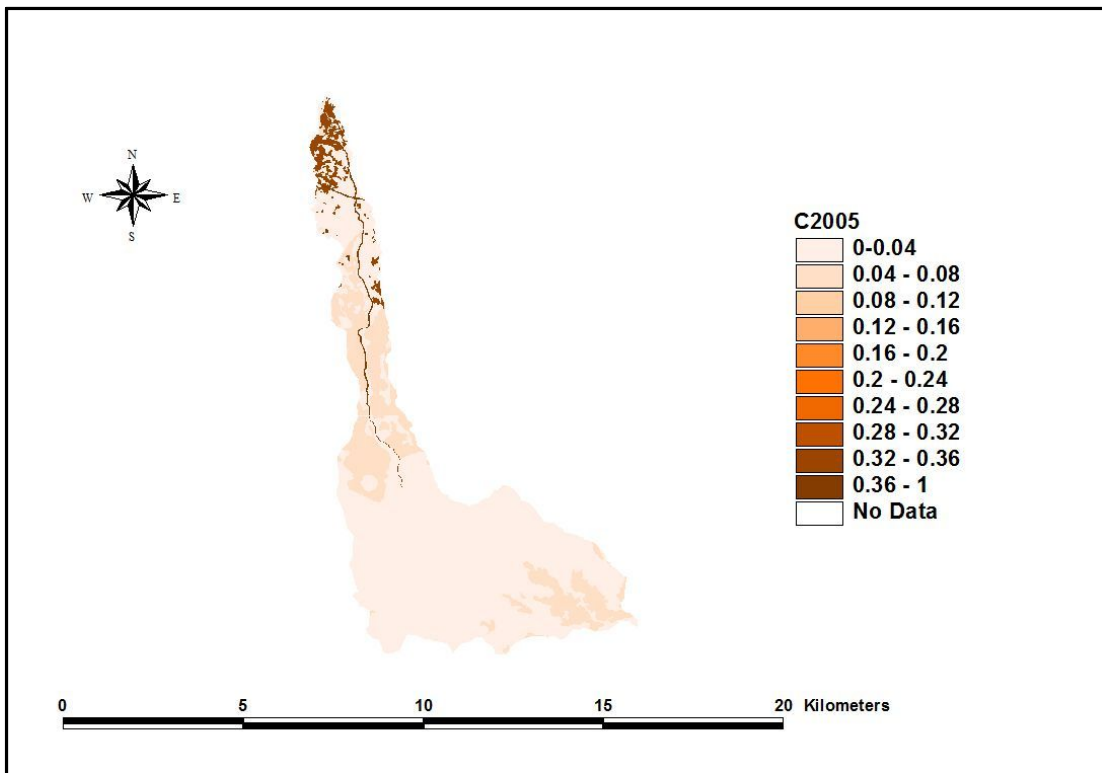


Fig. III-10 C factor at OaeDo stream watershed in 2005

4.2 작물경작인자 분석

작물경작인자 P는 토양보존대책을 세운 사면의 상·하방향 경사지로부터의 토양유실에 대한 보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의된다. 이것은 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 있다.

본 연구에서는 Wischmeier & Smith(1978)에 의해서 제시된 P값을 경작방법과 경사도에 따라 이용하였다. Wischmeier & Smith(1978)는 재배 방식에 따라 4가지로 구분하였으며, Irrigated Terracing은 계단식 관개, Contour Strip Cropping는 등고선 대상재배, Contour Furrows는 등고선 고랑, Contouring는 등고선재배방식을 뜻한다(Table III-11). 제주도의 작물재배는 밭과 과수원이 주를 이루며, 주로 밭의 경작방식은 등고선재배를 이용하고, 과수원은 계단식 관개방식으로 행해지고 있다. 따라서 외도천 유역의 토지피복에 따라 밭과 과수원을 각각 등고선재배방식과 계단식관개방식으로 간주하여 경사도에 따른 작물경작 인자를 산출하였으며, 사용된 토지피복도는 2000년도와 2005년도의 자료를 이용하였다.

Table III-11. P factor for percent slope and practice types(Wischmeier & Smith, 1978)

Practice	Slope(%)	P factor
Irrigated Terracing	$0 \leq S \leq 2$	0.1
	$2 \leq S \leq 8$	0.1
	$8 \leq S \leq 13$	0.12
	$13 \leq S \leq 19$	0.16
	$19 \leq S \leq 24$	0.18
	$24 \leq S$	1
Contour Strip Cropping	$0 \leq S \leq 2$	0.25
	$2 \leq S \leq 8$	0.25
	$8 \leq S \leq 13$	0.3
	$13 \leq S \leq 19$	0.4
	$19 \leq S \leq 24$	0.45
	$24 \leq S$	1
Contour Furrows	$0 \leq S \leq 2$	0.25
	$2 \leq S \leq 8$	0.25
	$8 \leq S \leq 13$	0.3
	$13 \leq S \leq 19$	0.4
	$19 \leq S \leq 24$	0.45
	$24 \leq S$	1
Contouring	$0 \leq S \leq 2$	0.5
	$2 \leq S \leq 8$	0.5
	$8 \leq S \leq 13$	0.6
	$13 \leq S \leq 19$	0.8
	$19 \leq S \leq 24$	0.9
	$24 \leq S$	1

외도천 유역의 DEM을 이용하여 GIS에서 분석된 경사도의 단위는 degree이다. Wischmeier & Smith(1978)가 제시한 Table III-11의 경사도 단위는 %이므로, 단위변환 후 Table III-11에서 구분한 경사에 따른 면적을 계산하였다(Table III-12).

Table III-12. Slope analysis of OaeDo stream watershed

Slope(%)	Slope(°)	Area(km)	Area(%)
0	0	-	-
2	1.15	1.57	3.78
8	4.57	7.55	18.24
13	7.41	8.76	21.16
19	10.76	6.61	15.96
24	13.50	3.88	9.36
45	24.23	8.11	19.58
max	79.29	4.94	11.93
합 계		41.42	100.00

대상 유역의 경사분포는 최소 0°, 최대 79.29°의 값을 보이며, 평균경사는 11.99°로 분석되었다. 유역의 중·하류부를 중심으로 약 5° ~11°의 완경사지대가 전체면적의 55%이상을 차지하며, 외도천 주변과 유역 상류부를 포함하는 24°이상의 급경사지역 또한 30%이상을 차지하고 있어, 산지형 하천의 특성이 뚜렷하게 나타나고 있다.

2000년도의 토지피복도에는 과수원의 분류가 없으며 2005년의 토지피복도와 비교하였을 때, 초지 또는 산림으로 분류된 것으로 판단된다. 하지만 많은 비율을 차지하고 있는 초지와 산림을 과수원으로 가정하기에는 무리가 있으며, 임의적으로 일부 수정하는 것 또한 타당하지 않으므로 원자료를 사용하여 분석을 시행하였다.

6개의 구간으로 구분한 경사분석 결과와 토지피복도를 중첩시켜 작물경작인자 P를 산정하였다. 2000년도 토지피복도를 중첩시킨 결과, 유역 중·하류부의 발을 중심으로 작물경작인자가 낮게 산정되었고, 유역의 발원점 인근에 형성되어 있는 경작지의 작물경작인자도 낮은 정도를 보였으며, 평균 작물경작인자는 0.95로 나타났다(Fig. III-11).

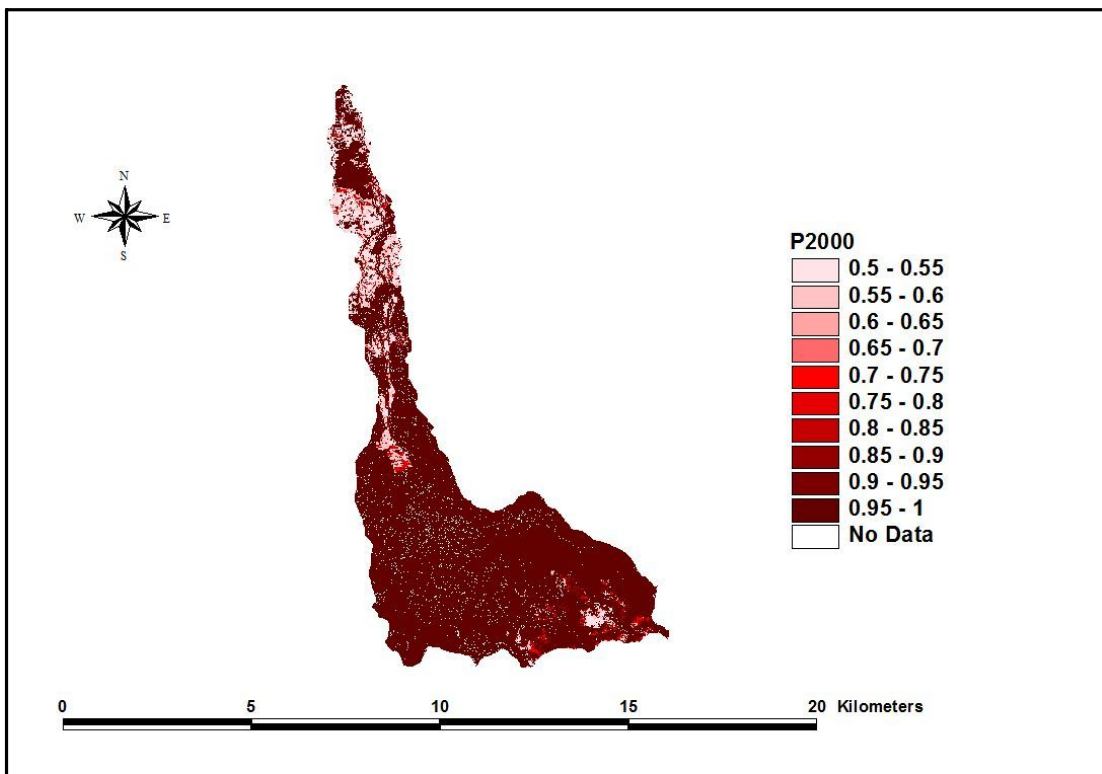


Fig. III-11. P factor at OaeDo stream watershed in 2000

2005년도의 토지피복도에는 과수원이 분류되어 있으며, 상기의 제주도 재배방식을 감안하여 계단식 관계에 해당하는 작물경작인자의 값을 과수원에 적용하여 경사분석 결과와 중첩시켰다.

분석결과 외도천 유역의 하류부와 일부 중류부를 제외하고 중·상류에서는 작물재배가 이루어지지 않은 산림이나 초지의 영향으로 작물경작인자의 값이 크게 나타났으며 평균 0.92의 값을 보였다. 2000년도 토지피복도를 이용한 작물경작인자보다 작게 산정되었으며, 이는 경작지의 감소와 과수원의 분류 차이로 인하여 발생한 것으로 판단된다(Fig. III-12).

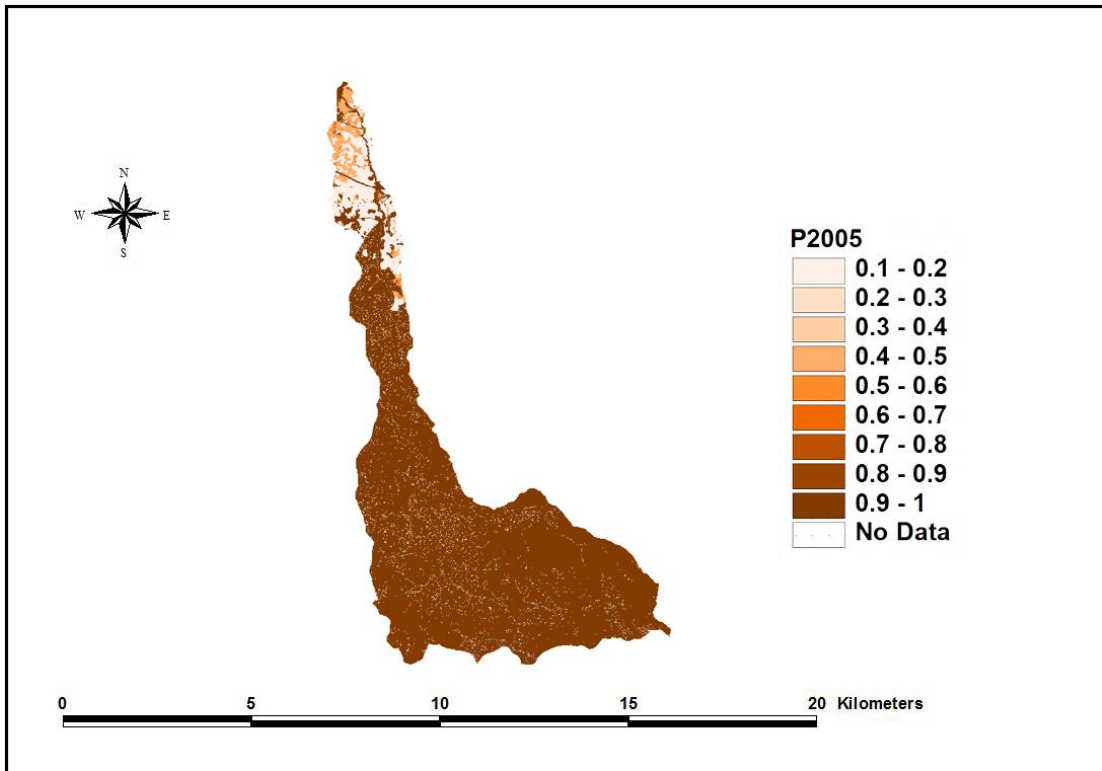


Fig. III-12. P factor at OaeDo stream watershed in 2005

IV. SATEEC ArcView GIS 모형의 적용

1. 입력자료의 비교와 채택

본 연구에서는 토양침식량 산정을 위하여 강우인자를 비롯한 5개의 입력자료를 구축하였으며 각 입력자료들의 강우자료, 산정공식, 토지피복 변화에 따른 인자들을 산출하였다. 또한, 외도천 유역의 2000년도와 2005년도 기준의 토사유출량을 SATEEC ArcView GIS 모형을 이용하여 산정한 후 결과를 비교하였다. 입력자료 중 강우침식인자는 해당 년도의 강우자료 확보와 확률강우량의 산정에 어려움이 있으므로 과거 연구에서 제시한 값을 사용하였다.

2000년도의 토양침식량 산정에서는 과거 20년간의 강우자료에서 도출한 연평균 강우침식인자 R을 채택하였으며, 2000년도 토지피복도를 중첩시켜 산출한 식생피복인자 C와 작물경작인자 P를 사용하였다.

2005년도의 토양침식량 산정에서는 대상유역이 속하는 제주시 기상청의 최근 강우자료를 이용하여 확률강우량과 강우강도식을 유도하고 50년, 80년, 100년, 200년 빈도중 하천의 설계빈도인 100년 빈도의 단일호우 강우침식인자 R을 사용하였다. 또한, 2005년도 토지피복도와 DEM의 경사분포를 고려한 식생피복인자 C와 작물경작인자 P를 도출하여 토양침식 모형에 적용하였다.

연구대상 유역의 토양통 변화는 없을 것으로 판단되므로 토양통에 따른 토양 침식인자 K는 동일하게 사용하였으며, K 인자 산정에서 사용된 Erickson 방법과 Wischmeier 도표에 의한 방법 중 실무와 연구에서 널리 사용되고, 비교적 정확한 것으로 알려진 Wischmeier 도표에 의한 방법을 채택하였다.

또한, 외도천 유역내에 대규모 개발이나 단지 조성이 없었던 점을 감안하여 DEM 자료로부터 획득한 지형인자 LS도 동일하게 사용하였으며, 입력인자 산정에서 사용된 Moore & Burch(1986)의 식과 Desmet & Govers(1996) 중 강우발생시 경사에 따라 이동하는 물의 양에 따른 유입토사의 변화를 고려할 수 있는 Desmet & Govers(1996)의 방법을 활용하였다.

2. 유사전달률의 적용

원 지점에서 침식된 토립자들은 흐름에 연행·이송되어 하류로 유하되지만, 경사가 완만해 지는 곳이나 움푹 파인 지점, 또는 장애물 등에 의해 중간에 퇴적될 수 있다. 이렇게 원 지점에서 침식된 토입자들 중 하류 일정 지점까지 유하되는 입자들의 비를 유사전달률이라 한다. 본 연구에서는 USLE에 의해 산정된 토양 침식량에 유사전달률(sediment delivery ratio) 개념을 도입하여 유역출구의 토사 유출량을 산정하였다.

유사량은 보통 총 토양 유실에 대한 유사량의 비로 정의되는 유달률을 통해 산정될 수 있으며, 다음식과 같이 나타낼 수 있다(Yin et al., 2005).

$$SDR = \frac{S_y}{T}$$

여기서, S_y 는 최종 유출구 혹은 임의 지점에서의 유사량이며 T는 유역의 총 토양 유실량이다. 유달률은 유역의 크기 및 형상, 강우 패턴, 직접 유출량, 침투 유량, 토지이용도, 작물, 경사, 토양 입자 등과 같은 유역의 물리적 인자의 영향을 받는다. 또한, 하천 수로는 생산된 토사의 이동로이므로 하천 밀도가 높으면 같은 유역의 낮은 하천밀도에 비해 유사전달률은 높고 급경사지는 평탄한 완경사 유역보다 유사전달률은 크다고 볼 수 있다. 이러한 모든 자연 요소를 고려하는 유달률을 식으로 정의한다는 것은 거의 불가능하다. 하지만, 복잡한 유사전달의 과정에도 불구하고 이를 범용적으로 적용하고자 하는 노력도 지속적으로 연구되어 왔다. 이에, 몇가지 인자를 고려한 경험적인 다음과 같은 식이 많은 연구자들에 의해 개발되었으며, 널리 알려진 것 중 하나가 유달률과 유역의 크기의 관계로 표현된 SDR 곡선이다.(USDA, 1972).

$$SDR = 0.4724AREA^{-0.125} \quad (\text{Vanoni, 1975})$$

$$SDR = 0.3750AREA^{-0.2382} \quad (\text{Boyce, 1975})$$

$$SDR = 0.5656AREA^{-0.11} \quad (\text{USDA SCS, 1972})$$

그리고 Williams 등(1977)에 의해 유역의 평균 경사도를 고려하여 유달률을 산정하는 방법이 제안되었다.

$$SDR = 0.627SLOPE^{0.403} \quad (\text{Williams et al., 1977})$$

또한, 미국 교통연구단(TRB)에서는 유역면적과 관계를 토립자의 크기에 따라 제시한 Fig. IV-1을 적용하여 산정하는 방법을 제시하였다.

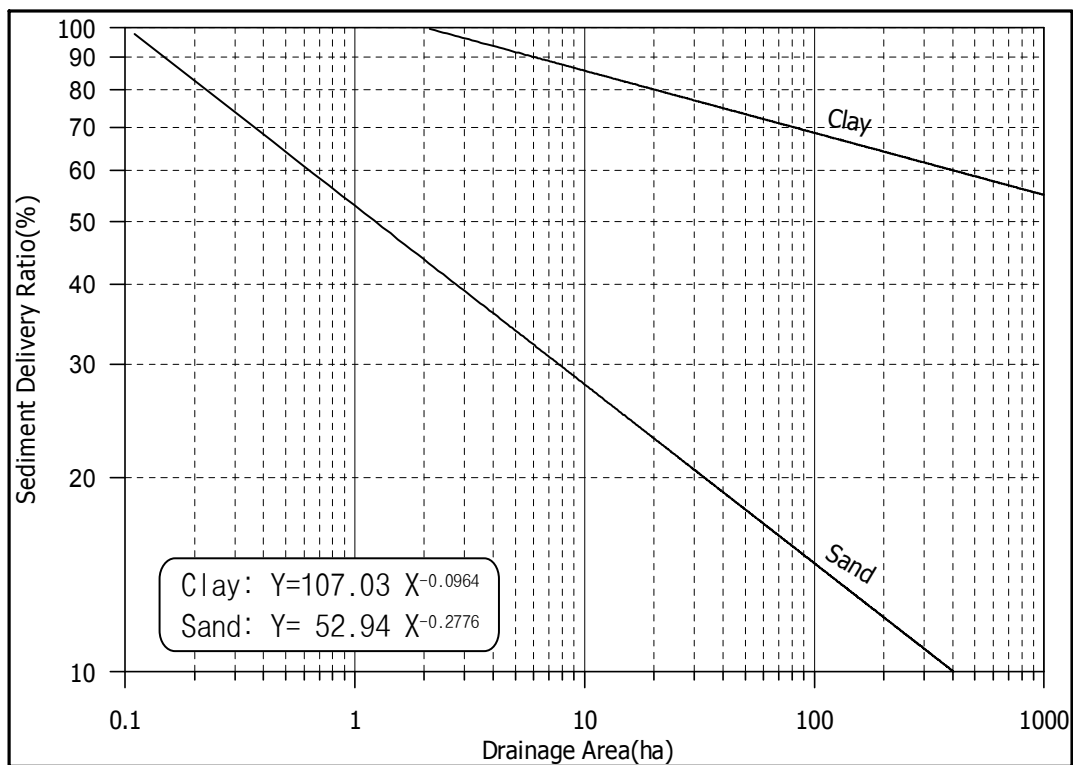


Fig. IV-1. Variable sediment delivery ratio between drainage area and soil type

SATEEC ArcView GIS 모형은 유달률 공식이 성립된 수계지역을 사용하는 공간적으로 분포된 유달률 맵을 계산할 수 있다. 유달률 맵에서 최소 셀 값은 총 SUB 수계의 유달률 값을 나타내며, 유달률 맵의 각 그리드 셀 값은 각각의 셀이 수계 유출구의 생성됨으로서 유달률 값을 나타낸다. 또한 Acc. Final Soil Loss for Subwatershed theme에서의 셀 값은 수계가 각각의 셀을 수계 유출구로 지정하게 됨으로서 총 토양유실의 총합을 나타내게 된다. 따라서 최종 Sediment Yield 맵은 Acc. Final Soil Loss for Subwatershed와 유달률에 계산될 수계지역의 셀 수를 곱한 것이며, Sediment Yield 맵의 셀 값은 각각의 셀을 각각의 수계로 이동되는 유사량의 총합을 의미한다.

이러한 유달률을 이용하여 최종 유출구나 임의 지점에서의 유사량을 모의할 수 있으며 본 연구에서는 Vanoni(1975)의 경험식을 이용하여 외도천 유역의 유달률을 산정하였다.

3. 토사유출량 산정

외도천 유역의 토사유출량을 산정하기 위해 DEM 자료를 이용한 경사 및 경사향을 분석하여 하천망의 유출흐름을 확인하였다. 하천의 하류부에서는 인근 하천과의 거리가 매우 가까워 유역의 폭이 급격하게 줄어드는 형상을 보이며, 이곳에서 유출의 흐름이 단절되는 것을 확인하였다. 따라서 외도천 유역을 세 개의 소유역으로 구분하여 토사유출량을 산정하였으며, 소유역은 하류로부터 각각 SubWatershed 1,2,3 으로 정하였다. SubWatershed 1은 외도천 유역의 최종 유출부이며 외도의 시가지와 경작지가 주를 이루고 있고, SubWatershed 2와 3은 외도천 우측에서 유하하는 어시천과의 거리가 불과 10m도 되지 않은 구간으로, 과거에 어시천으로 유입되는 유로를 막은 흔적이 있으며, 이 구간의 전·후를 SubWatershed 2와 3으로 구분하였다.

외도천 유역의 유로 흐름과 소유역의 구분은 Fig. IV-2와 같으며, 상기에서 구분한 과거자료와 최근자료를 이용하여 각 소유별 토양침식량을 산정하고 유사전달률을 고려한 산정지점의 토양유출량을 산정하였다.

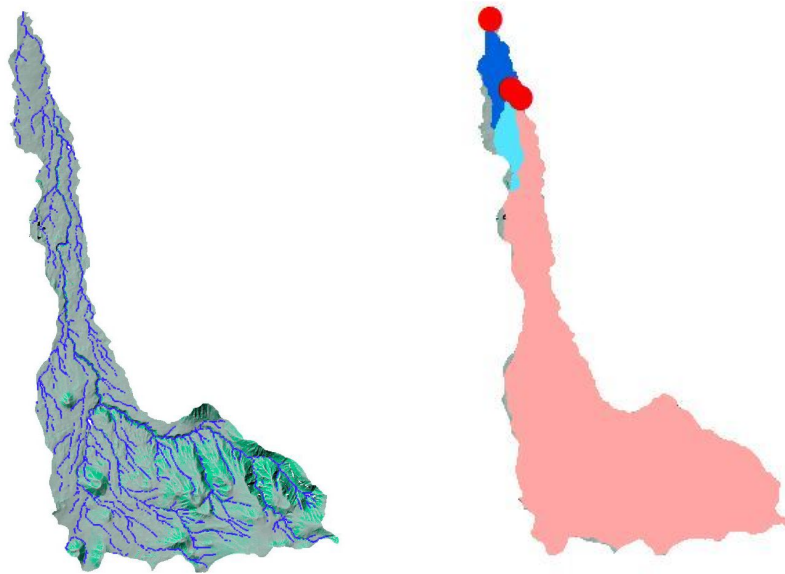


Fig. IV-2. Stream grid and classifiable subwatershed at OaeDo stream watershed

3.1 2000년도 토사유출량의 산정

외도천 지역의 2000년도 토사유출량 산정에서 사용된 입력인자들은 다음 Table IV-1과 같다.

Table IV-1. Input data of the basin to be studied in 2000

입력인자	방법 및 채택
강우침식인자(R)	국립방재연구소에서 과거 1969~1978년의 제주기상청 강우자료를 이용하여 도출한 연평균인자 사용
토양침식인자(K)	1:25,000 정밀토양도를 토양통별로 구분하고 국립방재연구소에서 제시한 Wischmeier 도표법에 의한 방법 채택
지형인자(LS)	1:5,000 지형도의 DEM 자료를 이용하여 GIS 분석, Desmet & Govers(1996)의 식을 사용하여 LS 산정
식생피복인자(C)	2000년도의 1:25,000 토지피복도를 이용하였으며, 정 등(1984)이 제시한 토지피복별 식생피복인자를 적용
작물경작인자(P)	1:5,000 지형도와 2000년도의 토지피복도를 이용하여 피복별 경사를 분석한 후 Wischmeier & Smith(1978)가 제시한 작물경작인자 적용

외도천 유역의 총토양침식량은 601,882ton/year이고, 단위면적당 토양침식량은 최대 31,167ton/ha/year로 산정되었으며 단위면적당 토양침식량의 평균은 151ton/ha/year로 분석되었다. 토양침식은 경작지를 중심으로 하는 일부 하류부와 유역 중류부의 하천 주변에서 크게 나타났으며, 유역의 최상류부의 경작지에서 최대로 발생하고 있다(Fig. IV-3).

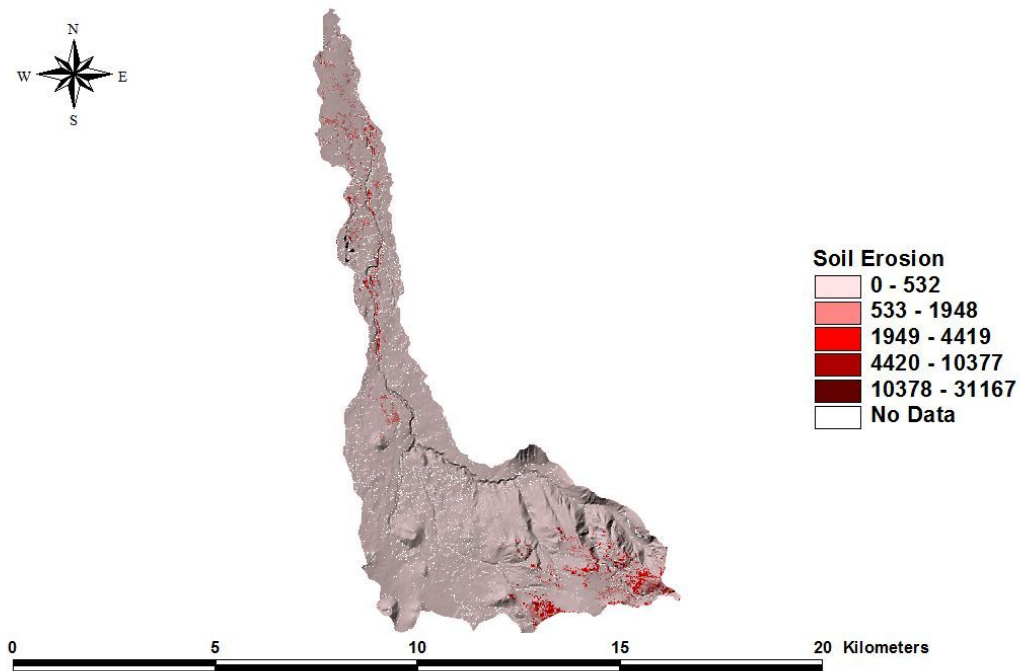


Fig. IV-3. Soil erosion at OaeDo stream watershed in 2000

소유역별 토양침식량을 산정한 결과, SubWatershed 1의 총토양침식량은 28,658.4 ton/year 이고, 단위면적당 토양침식량은 최대 5,422ton/ha/year로 산정되었으며, 단위면적당 평균토양침식량은 161ton/ha/year로 분석되었다. SubWatershed 2의 총토양침식량은 30,742.6ton/year이고, 단위면적당 최대 토양침식량과 평균토양침식량은 각각 13,077ton/ha/year 과 250.73ton/ha/year로 산정되었다. 대상유역의 상류인 SubWatershed 3의 총토양침식량은 524,190ton/year로 분석되었으며, 단위면적당 토양침식량은 최대 31,167ton/ha/year, 평균토양침식량은 147.88ton/ha/year로 나타났다. SubWatershed 3은 유역면적이 가장 크기 때문에 총토양침식량은 다른 두 유역에 비해 많지만, 단위면적당 평균토양침식량은 가장 작은 결과를 보였다. 이는 유역의 토지피복에서 산림이 차지하는 비중이 크기 때문이며, 식생피복인자 C가 상대적으로 작은 값을 가진다(Fig. IV-4, Table IV-2).

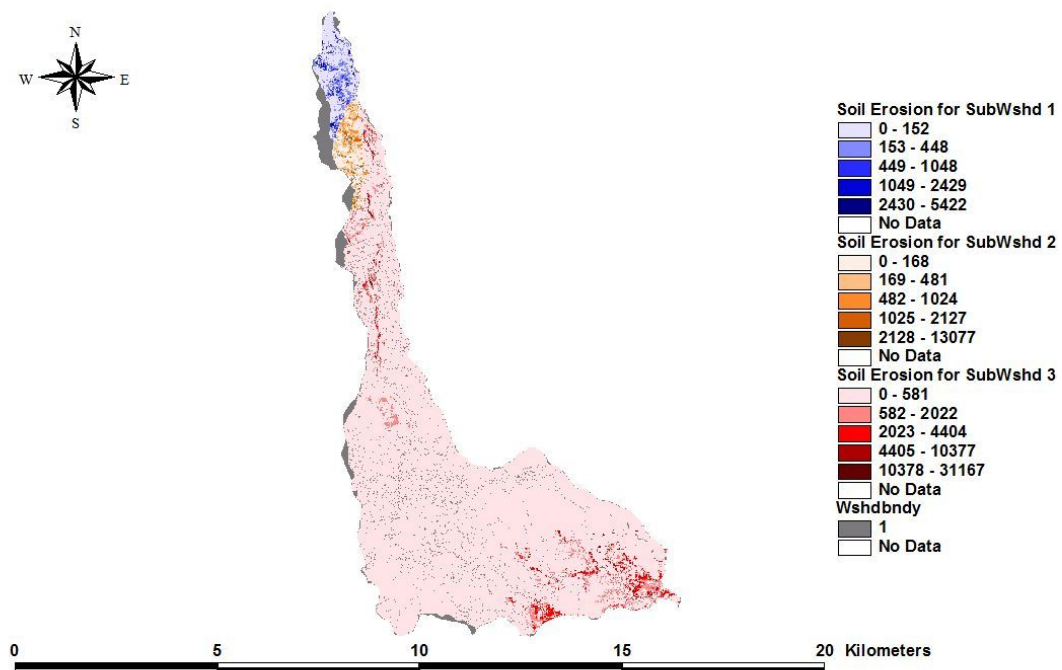


Fig. IV-4. Soil erosion for subwatershed at OaeDo stream in 2000

Table IV-2. Soil erosion for each Watershed at OaeDo stream in 2000

유역	면적 (km ²)	총토양침식량 (ton/year)	단위면적당 최대 토양침식량 (ton/ha/year)	단위면적당 평균토양침식량 (ton/ha/year)
SubWatershed 1	1.81	28,658.4	5,422	161
SubWatershed 2	1.28	30,742.6	13,077	250.73
SubWatershed 3	36.85	524,190.0	31,167	147.88

소유역별 유사전달률 산정 결과, Fig. IV-5과 같이 SubWatershed 1의 SDR은 0.438708, SubWatershed 2는 0.457996, SubWatershed 3은 0.300962로 분석되었다. SubWatershed 1의 SDR과 SubWatershed 2의 SDR은 비슷한 결과값을 보이는 반면, SubWatershed 3의 SDR은 가장 낮은 결과를 보였으며, 이는 유역의 최상류와 산정지점과의 거리차이로 인한 것으로 판단된다.

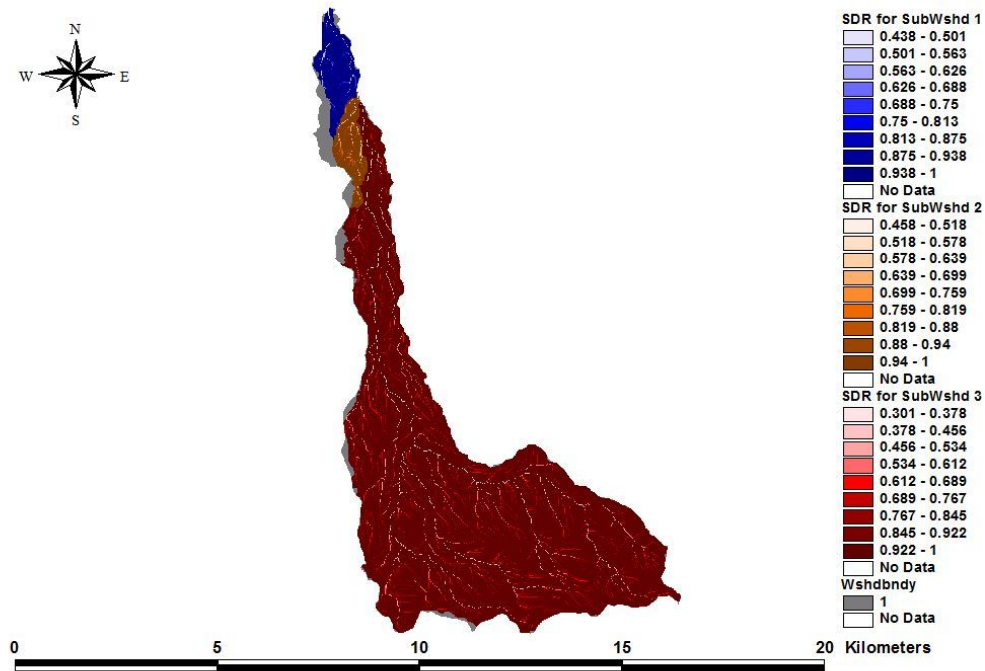


Fig. IV-5. SDR for subwatershed at OaeDo stream in 2000

토양침식량과 유사전달률을 고려하여 최종 산정지점의 토사유출량을 산정한 결과, SubWatershed 1의 토사유출량은 12,572.7ton/year이며, SubWatershed 2는 14,080ton/year, SubWatershed 3은 157,761ton/year로 분석되었다. SubWatershed 3 유역은 SubWatershed 1, 2 유역에 비해 유역의 면적에서는 20배 이상 크지만 SDR을 고려한 토사유출량은 대략 10배로 산정되어, 유역면적에 비하면 낮은 유출률을 보였으며, 토양침식은 SubWatershed 3 유역의 상류부에서 최대로 발생하지만 낮은 유사전달률을 고려할 때, 하류부로 유출되는 양은 SubWatershed 1, 2 유역의 면적에 비해 미비한 것으로 나타났다.

Table IV-3은 Table IV-2에서 산정된 토양침식량과 유사전달률을 곱하여 산정 지점까지 도달하는 토사유출량을 나타냈으며, Fig. IV-6은 SATEEC ArcView GIS 모형의 토사유출량 산정결과를 도식적으로 보여주고 있다.

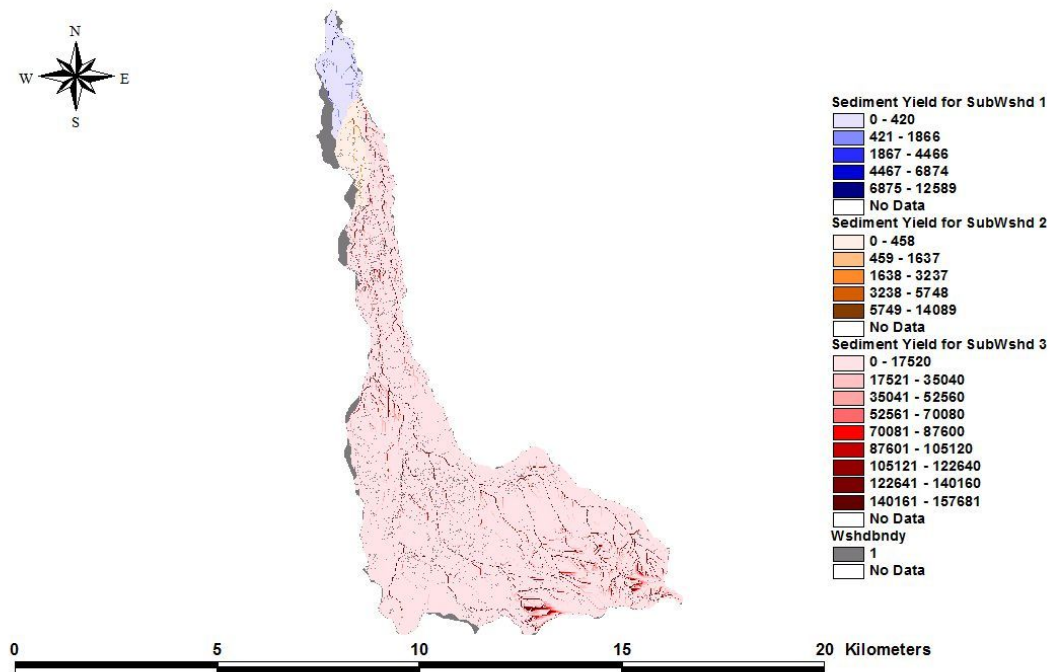


Fig. IV-6. Sediment yield for subwatershed at OaeDo stream in 2000

Table IV-3. Sediment Yield for each Watershed at OaeDo stream in 2000

구역	면적 (km ²)	총토양침식량 (ton/year)	유사전달률(SDR)	토사유출량 (ton/year)
SubWatershed 1	1.81	28,658.4	0.438708	12,572.7
SubWatershed 2	1.28	30,742.6	0.457996	14,080.0
SubWatershed 3	36.85	524,190.0	0.300962	157,761.0

3.2 2005년도의 토사유출량 산정

지형인자 LS와 토양침식인자 K는 과거와 큰 차이를 보이지 않을 것으로 판단하여 동일하게 사용하였으며 이를 제외한 인자들은 최근까지의 강우자료, 토지피복도 등을 이용하여 다음 Table IV-4와 같이 채택하였다.

Table IV-4. Input data of the basin to be studied in 2005

입력인자	방법 및 채택
강우침식인자(R)	1961~2007 제주시 기상청의 강우자료를 이용하여 확률강우강도식을 유도하고 100년 빈도의 단일호우 강우침식인자 산출
토양침식인자(K)	1:25,000 정밀토양도를 토양통별로 구분하고 국립방재연구소에서 제시한 Wischmeier 도표법에 의한 방법 채택
지형인자(LS)	1:5,000 지형도의 DEM 자료를 이용하여 GIS 분석, Desmet & Govers(1996)의 식을 사용하여 LS 산정
식생피복인자(C)	2005년도의 1:25,000 토지피복도를 이용하였으며, 정 등(1984)이 제시한 토지피복별 식생피복인자를 적용
작물경작인자(P)	1:5,000 지형도와 2005년도의 토지피복도를 이용하여 피복별 경사를 분석한 후 Wischmeier & Smith(1978)가 제시한 작물경작인자 적용

연구대상 유역의 토양침식량 분석 결과, 총토양침식량은 950,960ton/year이고, 단위면적당 토양침식량은 최대 169,302ton/ha/year로 산정되었으며 단위면적당 평균토양침식량은 238.99ton/ha/year로 분석되었다. 토양침식은 경작지를 중심으로 하는 일부 하류부와 유역 중류부의 하천과 오름 주변에서 크게 나타났으며, 유역의 최상류부의 산림에서 최대로 발생하고 있다(Fig. IV-7).

2000년도의 토양침식량 결과와 비교하면 토양침식량이 전체적으로 높게 분석되었으며, GIS 분석 그리드에서도 토양침식의 양상을 뚜렷하게 알 수 있다. 2005년도의 토양침식량 분석에서는 단일호우 강우침식인자를 사용하였기 때문에 단일호우 강우침식인자를 사용했던 기존방법에 비해 전체적인 결과값이 높게 산정되는 것이 사실이지만, 체계적인 토지피복의 분류에 의해 토양침식의 토지이용별 분별성이 뚜렷하게 나타난 것 또한 확인할 수 있었다.

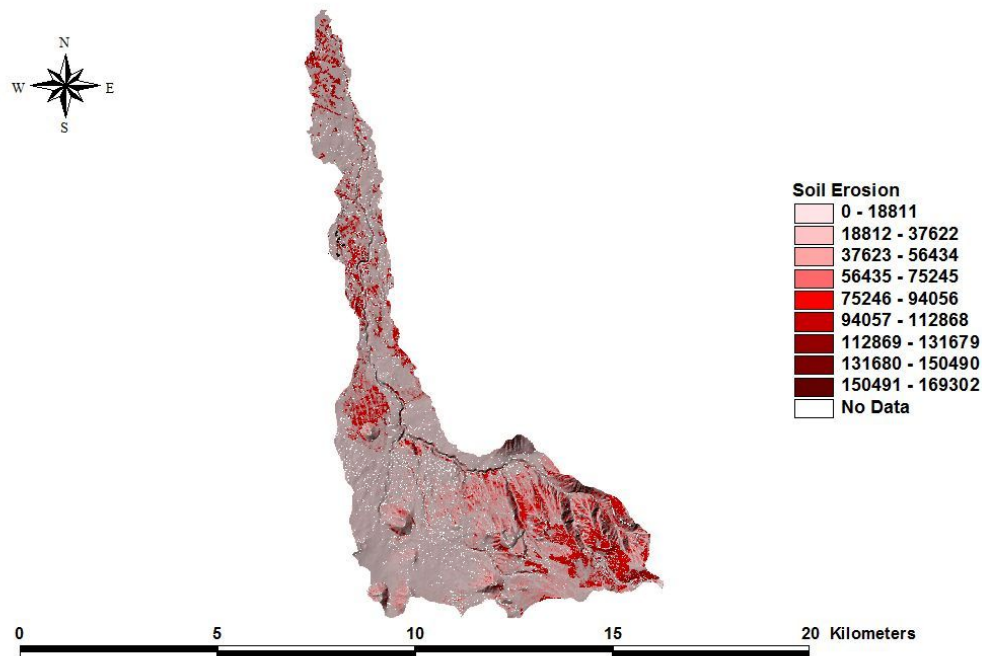


Fig. IV-7. Soil erosion at OaeDo stream watershed in 2005

소유역별 토양침식량을 산정한 결과, SubWatershed 1의 총토양침식량은 80,174 ton/year 이고, 단위면적당 평균토양침식량은 453.83ton/ha/year로 분석되었다. SubWatershed 2의 총토양침식량은 11,497.96ton/year, 단위면적당 평균토양침식량은 93.83ton/ha/year이며, 연구대상 유역의 상류인 SubWatershed 3의 총토양침식량은 859,288ton/year, 단위면적당 평균토양침식량은 237.90ton/ha/year로 나타났다. 소유역별 토양침식량 계산에서 Cell 단위의 오류로 인하여 단위면적당 토양침식량의 최대값이 과다하게 산정되었으며, 여러 방법을 통해서도 이 오류를 해결할 수가 없어, 추후 오류 해결을 통한 결과값을 제시해야 할 것으로 보인다.

2000년도의 토양침식량과 마찬가지로 SubWatershed 3은 유역면적이 가장 크기 때문에 총토양침식량은 다른 두 유역에 비해 많으나, 단위면적당 평균토양침식량에서는 2000년도의 결과와는 다르게 나타났다. SubWatershed 2의 경우 SubWatershed 1, 3에 비해 낮은 토양침식량의 결과가 나왔으며, 이는 2000년도와 2005년도 토지이용과 피복의 분류차이에서 나온 결과로 판단된다(Table IV-5, Fig. IV-8).

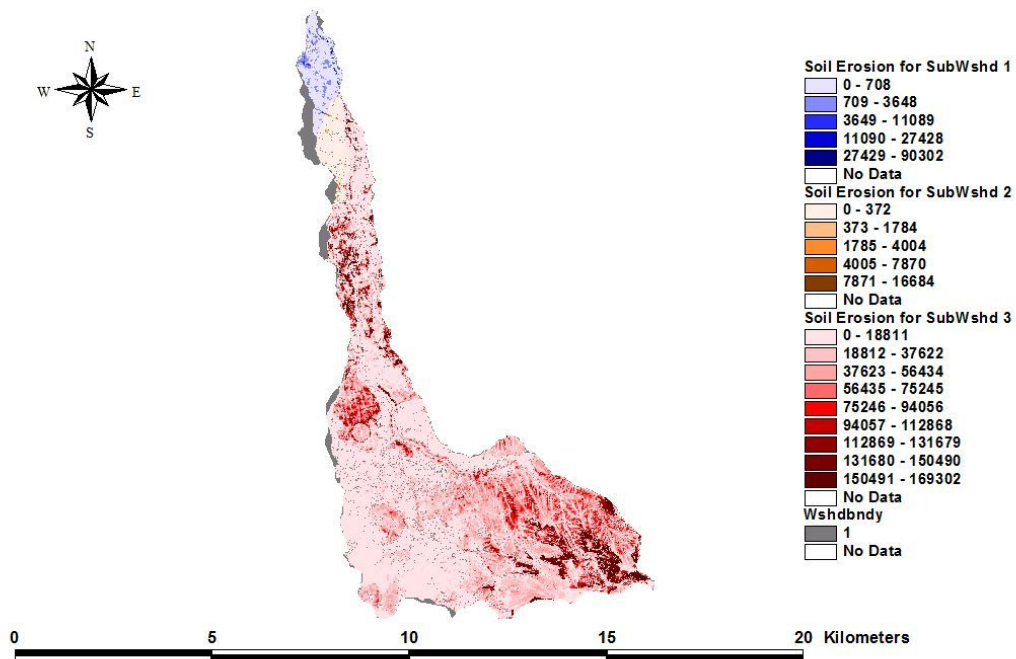


Fig. IV-8. Soil erosion for subwatershed at OaeDo stream in 2005

Table IV-5. Soil erosion for each Watershed at OaeDo stream in 2005

유역	면적 (km ²)	총토양침식량 (ton/year)	단위면적당 최대 토양침식량 (ton/ha/year)	단위면적당 평균토양침식량 (ton/ha/year)
SubWatershed 1	1.81	80,174	-	453.83
SubWatershed 2	1.28	11,498	-	93.83
SubWatershed 3	36.85	859,288	-	237.90

유사전달률은 DEM 자료와 지형자료를 이용한 유역 면적에 대한 함수이므로, 앞서 분석된 결과와 동일하다. 모델링에서 cell 단위의 하천망 선택에 따라 미세한 차이가 발생할 수는 있으며, 본 연구에서는 2005년도의 토사유출량 산정을 위한 SDR은 2000년도에서 분석한 결과와 동일하게 적용하였다.

앞서 산정된 결과와 같이 SubWatershed 1의 SDR은 0.438708, SubWatershed 2는 0.457996, SubWatershed 3은 0.300962로 분석되었다(Fig. IV-9).

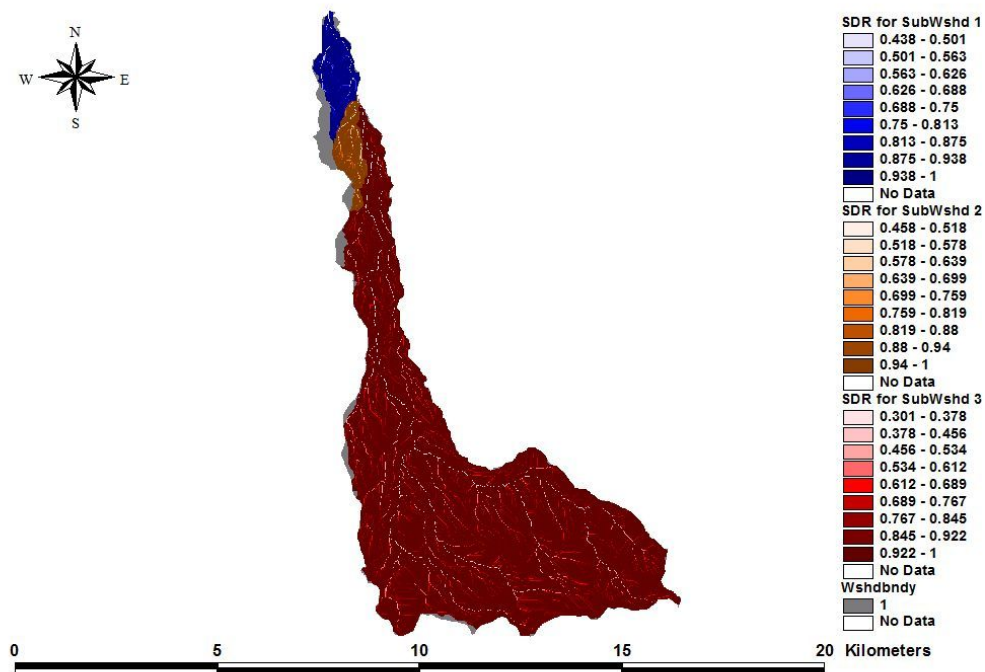


Fig. IV-9. SDR for subwatershed at OaeDo stream in 2005

토양침식량과 유사전달률을 고려하여 최종 산정지점의 토사유출량을 산정한 결과, SubWatershed 1의 토사유출량은 351,72.9ton/year이며, SubWatershed 2는 5,266.02ton/year, SubWatershed 3은 258,535ton/year로 분석되었다.

2000년도와 2005년도의 토사유출량을 비교하면 SubWatershed 2는 강우침식인자 R의 증가로 인하여 전체적인 토양침식 및 토사유출량이 증가함과는 달리 낮아지는 결과를 보였다. 2000년도 토지피복도에서는 SubWatershed 2 영역이 대부분 경작지에 해당하나, 2005년도의 토지피복도에서는 초지 및 산림으로 구분되어 있어 식생피복인자 C의 변화에 의한 것으로 판단된다. 또한, SubWatershed 1 영역의 토사유출량이 상대적으로 증가된 결과가 나왔는데, 이 역시 토지피복의 변화와 피복종류의 분류 차이에서 발생한 것으로 사료된다.

Table IV-6는 Table IV-5에서 산정된 토양침식량과 유사전달률을 곱하여 산정 지점까지 도달하는 토사유출량을 나타냈으며, Fig. IV-10은 SATEEC ArcView GIS 모형의 토사유출량 산정결과를 도식적으로 보여주고 있다.

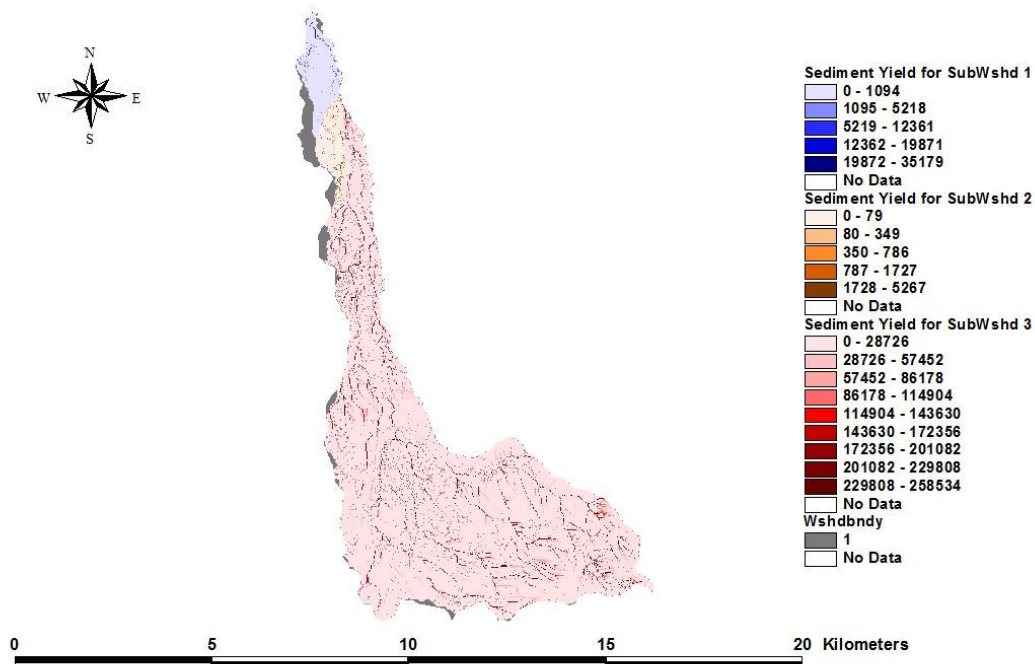


Fig. IV-10. Sediment yield for subwatershed at OaeDo stream in 2005

Table IV-6. Sediment yield for each Watershed at OaeDo stream in 2005

구역	면적 (km ²)	총토양침식량 (ton/year)	유사전달률(SDR)	토사유출량 (ton/year)
SubWatershed 1	1.81	80,174	0.438708	35,172.9
SubWatershed 2	1.28	11,498	0.457996	5,266.02
SubWatershed 3	36.85	859,288	0.300962	258,535

3.3 2000년도와 2005년도 토사유출량의 비교

본 연구에서는 SATEEC ArcView GIS 모형을 이용하여 외도천 유역의 토양 침식량과 유사전달률을 고려하여 유출지점의 토사유출량을 산정하였다. 그 결과 2000년도의 토양침식량과 유출량이 전체적으로 높게 산정되었으며, 이는 강우침식인자 R의 영향이 큰 것으로 분석되었다. 과거에 사용되던 연평균 강우침식인자는 390J/ha • mm/hr에 불과하지만, 최근에 사용되는 단일호우 강우침식인자는 1,493J/ha • mm/hr를 사용하여 결과에 큰 차이를 보였다. 또한, 소유역별 토사유출을 비교하면 토지피복의 차이에 의한 영향이 가장 큰 것으로 분석되었으며, 2000년도의 토지피복도는 2005년도의 토지피복도에 비해 정확도가 떨어지고 구분되는 개수도 적어서 적합한 결과를 얻기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.

각 소유역별 토양침식량과 토사유출량의 비교는 다음 Table IV-7과 같다.

Table IV-7. Soil erosion and sediment yield for each Watershed at OaeDo stream

유역	면적 (km ²)	유사전달률 (SDR)	2000년도		2005년도	
			총토양침식량 (ton/year)	토사유출량 (ton/year)	총토양침식량 (ton/year)	토사유출량 (ton/year)
Sub Watershed 1	1.81	0.438708	28,658.4	12,572.7	80,174	35,172.9
Sub Watershed 2	1.28	0.457996	30,742.6	14,080.0	11,498	5,266.02
Sub Watershed 3	36.85	0.300962	524,190.0	157,761.0	859,288	258,535

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 제주도의 외도천을 대상으로 하여 USLE 기법의 토사유출량 산정 모형인 SATEEC ArcView GIS를 이용한 토양침식량과 토사유출량을 산정하였다. 입력자료인 강우침식인자, 토양침식인자, 지형인자, 토지피복인자, 작물경작인자를 구축하였으며, 하천의 유사전달률을 고려하여 외도천 유역의 토사유출량을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 외도천 유역의 강우침식인자 R은 연평균 강우와 단일호우 자료를 이용하여 산정하였으며, 각각 $390\text{J/ha} \cdot \text{mm/hr}$, $1,493\text{J/ha} \cdot \text{mm/hr}$ 의 결과를 보였다. 단일호우 강우침식인자는 과거(1969~1978)의 강우자료만을 이용한 연평균 강우침식인자와는 달리, 확률강우의 강우강도식을 이용하여 현재까지의 강우사상을 반영할 수 있다.

2. 연구대상 유역의 토지이용 상태에 따라 2000년도와 2005년도의 토지피복도를 비교하여 식생피복인자 C와 작물경작인자 P를 산정하였다. 2000년도의 토지피복도는 6가지의 피복상태로 분류하지만, 2005년의 토지피복도는 17가지로 분류하여 보다 적합한 식생피복인자 C를 적용할 수 있으며, 산정 결과 2005년의 식생피복인자가 2000년도에 비해 1/2 정도로 작은 값을 보였다.

3. 정밀토양도를 이용하여 토양침식인자 K를 산정하였으며 DEM자료와 지형도를 이용하여 지형인자 LS를 구하였다. 외도천 유역의 토양통과 지형은 큰 변화가 없으므로 토사유출량 분석시 입력인자를 변화시키지 않고 동일하게 적용하였다.

4. 유출흐름에 따라 3개의 소유역으로 구분하여 2000년도와 2005년도의 토사유출량을 모의하였다. 하천의 유사전달률을 고려하였으며 소유역별로 각각

0.438708, 0.457996, 0.300962의 값을 보이고 있어, 상류 유역의 SDR이 가장 낮게 산정되었다.

5. 2000년도의 토사유출량 산정 결과, 총토양침식량은 601,882ton/year로 산정되었으며, 유사전달률을 고려했을 때 3개의 소유역은 각각 12,572.7ton/year, 14,080ton/year, 157,761ton/year의 토사유출량이 발생하였다. 상류 유역의 토사유출량이 가장 크지만, 유역면적은 크고 유사전달률이 작기 때문에 이를 고려하면 타유역에 비해 유출량이 오히려 작게 분석되었다.

6. 2005년도의 토사유출량 산정 결과, 총 토양침식량은 950,960ton/year로 분석되었으며, 토사유출량은 소유역별로 각각 35,172.9ton/year, 5,266ton/year, 258,535ton/year로 산정되었다. 중류소유역은 2000년도와는 달리 토사유출량이 낮아졌으며, 하류소유역은 상대적으로 증가된 결과가 나타났다.

7. 토사유출량은 강우침식인자 R의 영향이 가장 큰 것으로 분석되었으며, 토지피복의 차이에 의해서도 다른 결과가 산정되었다. 또한, 2000년도의 토지피복도는 2005년도의 토지피복도에 비해 정확도가 떨어지고 분류개수도 적어 적합한 결과를 얻기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 외도천 유역의 토양침식량과 유출량을 산정하였다. 전술하였듯이 이와 같은 연구는 이차적인 홍수피해를 유발할 수 있으며 저류지 및 침사지 내의 수질악화의 요인이 되는 토사유출량을 예측하여 피해에 대처할 수 있는 방향을 제시할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

또한, 토사유출량을 예측하기 위해서는 적합한 입력자료의 구축이 선행되어야 하므로 제주도의 현상태에 맞는 기초조사가 필요하며, 신중하고 면밀한 검토를 위한 실측데이터와의 비교·분석이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 한국수자원학회, 2009, 하천설계기준·해설
- 국립방재연구소, 1998, 개발에 따른 토사유출량 산정연구, pp. 161-235
- 제주도·한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 보고서, pp.186-201
- 한국수자원공사, 2004, 임하댐 탁수저감방안 수립
- 제주도, 1997, 중산간지역 종합조사
- 제주시, 2009, 광령천 외 12개 하천기본계획수립 보고서
- 우효섭, 2001, 하천수리학, 청문각, pp. 843-844
- 양희경, 2001, 지형 및 인위적 변수에 의한 산지 하천의 분류, 서울대학교 박사학위논문, pp. 35-53
- 김규호, 이찬주, 이두한, 우효섭, 2004, 지형인자를 이용한 하천분류 체계의 적용성 검토, 한국수자원학회 제37권 제1호, pp. 1-11
- 정정화, 1995, 정밀토양도 토양통의 수문학적 분류
- 김경탁, 2003, 정밀토양도에 이용한 CN 산정에 대한 제안, 한국수자원학회지 제 36권 4호, pp. 45-53.
- 이상원, 2011, 산지소유역의 토사유실량 예측을 위한 RUSLE 모형의 적용, 영남대학교 대학원 석사학위논문, pp.15-22
- 최재완, 2011 WEPP 모형을 이용한 강우패턴 및 경사에 따른 유출 및 토사 유출 평가, 강원대학교 대학원 석사학위논문, pp.29-42
- 김경욱, 2010, 기후변화에 따른 우이천 유역의 유출량 산정에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문, pp.56-84
- 노진욱, 도시화유역의 토사유출량 산정에 관한 연구, 2009, 영남대학교 석사학위논문, pp.15-23
- 정필균, 고문환, 엄기태, 1984, 토양유실량 예측을 위한 작부인자검토, 한국토양학회지 18권 제1호, pp. 7-13
- 이근상, 이길하, 박진혁, 2007, 접근성과 하천공간 범위를 고려한 GIS 기반 토사유실 위험지역 선정, 대한토목학회논문집 제27권 제6D호, pp. 783-789

- 장원석, 박윤식, 김종건, 김익재, 문유리, 전만식, 임경재, 2009, SATEEC ArcView GIS를 이용한 홍천군 자운리 유역 임의 경작지의 산림 환원에 따른 토양유실 및 유사저감 분석, 환경정책연구 제 8권 제1호, pp. 74-95
- 광동욱, 조기성, 2006, 유역특성을 고려한 GIS 기반 토양침식량 평가, 한국측량학회지 제24권 제1호, pp. 89-97
- 박윤식, 김종건, 허성구, 김남원, 안재훈, 박준호, 김기성, 임경재, 2008, SWAT과 SATEEC 모형을 이용한 토양유실량 비교, 한국농공학회논문집 제 50권 제1호, pp3-12
- 이환주, 김환기, 2001, GIS 공간분석을 활용한 토양침식모형의 입력인자 추출에 관한 연구, 한국측량학회지 한국측량학회 제 19권 제 1호, pp. 27-37
- Renschler. C.S. and J. Harbor, 2002, Soil erosion assessment tools from point to regional scales ... the rule of geomorphologists in land management research and implementation, Geomorphology, Vol. 47, pp. 189-209
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D, 1978, Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning, USDA, Agriculture Handbook NO.537
- Hudson, N., 1997, A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss, Soil Science Society of America Journal 61(3), pp. 917-919

감사의 글

전문대학 졸업 후 고향인 제주도를 떠나 12여년 동안 타지에서의 직장생활로 정신없이 살아오면서도 배움에 대한 부족함을 채우지 못하여 매일 아쉬워하다가 15년만에 학점은행제로 학사학위를 취득하여 대학원진학, 이제 졸업을 목전에 두어 솔직히 눈물이 날정도로 감개가 무량합니다. 돌이켜 보면 대학원 시절동안의 시간이 참 빠르게 지나가 아쉬움도 많지만 그래도 교수님들, 여러 원우들과 함께했던 시간들이 제게는 너무도 소중한 시간이었습니다.

본 논문이 완성되기까지 여러 차례 검토하고 세심한 지도와 격려를 아끼시지 않으신 양성기 지도교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 논문심사 과정에서 바쁘신 가운데도 세심하게 검토하여 주신 제주발전연구원 박원배 박사님, 김상진 교수님께도 고마운 말씀을 드립니다.

지난 2여년간 토목환경공학분야에 대하여 강의하여 주신 수자원분야 양성기 교수님, 해안 및 항만공학 김남형 교수님, 측량 및 GIS 이병걸 교수님, 토목구조 김상진 교수님, 철근콘크리트공학 박상렬 교수님께도 다시한번 고마운 말씀을 드립니다.

또한 본 논문이 완성되기까지 많은 시간과 노력을 함께 해준 수리학 연구실 연구원 특히 정우열님, 양원석님께도 깊은 감사를 드립니다.

돌이켜 보면, 배움의 길을 걸기에 직장인이 시간적 한계를 극복하고 학업에 정진한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니었습니다만, 많은 업무에도 불평불만 없이 성실하고 책임감 있게 감리업무를 수행해준 이승민님, 조선희님께도 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 이 작은 결실이 맺어지기까지 힘과 용기를 주신 형님, 형수님과 장인, 장모님 그리고 내색하지 않고 묵묵히 뒷바라지해준 사랑하는 나의 아내 고지영, 사랑하는 딸 주은, 하은에게 이 논문으로 보답하고자 합니다.

2012년 12월

박철수 배상