

## RUSLE와 SEDD를 이용한 고랭지 경작지로부터의 토양유실 평가

조홍래\* · 정종철\*\*

### Estimating Soil Loss in Alpine Farmland with RUSLE and SEDD

Hong-Lae Cho\* · Jong-Chul Jeoung\*\*

#### 요 약

본 연구는 고랭지 경작지로부터 발생하는 토양유실을 정량적으로 추정하는 것을 목적으로 한다. 강원도 내린천 유역을 대상으로 고랭지 경작지에서 발생하는 연간토양유실량과 이 토양유실량 중 하천에 도달하는 양을 나타내는 유사량을 추정하였다. 연간토양유실량은 RUSLE 공식을 이용하여 추정하였으며, 유사량은 SEDD 모형을 이용하여 산정하였다.

연구결과 대상지역의 2.6% 면적을 차지하고 있는 밭이 연간 유역 내에서 발생하는 총토양유실량과 유사량에 대하여 각각 10.9% 및 33.12%의 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 고도 400m 이상에 해당하는 고랭지 경작지의 경우 유역 내에서 총 1.74 %의 면적을 차지하고 있으나, 연간 총 토양유실량과 유사량에 대해서는 면적에 비하여 월등히 큰 7.69%와 15%의 기여를 하고 있는 것으로 분석되었다. 이상의 결과로부터 내린천 유역의 밭 경작지 특히, 고랭지 경작지에서의 토양유실과 유사량 발생이 다른 토지용도에 비하여 매우 심하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 고랭지 경작지로부터의 토양유실 방지대책이 시급히 마련되어야 할 것으로 생각된다.

**주요어** : 토양유실, 유사량, 고랭지, GIS, RUSLE, SEDD

**ABSTRACT** : The purpose of this study is to estimate quantitatively soil loss and sediment yield in alpine farmland. For this purpose, Naerinchon watershed in Gangwon province was selected as our study area and total annual soil loss and sediment yield was estimated respectively by the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model and the Sediment

\*서울대학교 환경대학원 박사과정 (dshift1@snu.ac.kr)

\*\*남서울대학교 지리정보시스템공학과 조교수(jcjeoung@nsu.ac.kr)

Delivery Distributed (SEDD) model. The results of this study clearly show that dry field areas have significant impact on the total soil erosion and sediment yield compared with other land use. Dry field areas represent only 2.6% of the total area of the watershed but soil loss and sediment yield account for 10.9% and 33.12% of the total amount respectively. Especially as with alpine farmland, this result is more clearly shown. These areas account for 1.8% of the entire watershed but contribute to 7.7% and 15% of the total soil loss and sediment yield respectively. From the above results, we can know that alpine farmland is important source of soil loss and sediment yield and it is need to prevent and control soil erosion from alpine farmland urgently.

**Keyword** : Soil loss, Sediment yield, Alpine farmland, GIS, RUSLE, SEDD

## 1. 서 론

토양유실은 강우나 바람 등으로 인하여 지표층을 구성하는 토양이 분리, 이송되는 현상을 말한다. 이러한 토양유실은 토양유실 그 자체만으로도 문제가 되지만 이로 인하여 많은 환경적인 문제를 유발하기도 한다. 토양 유실에 의한 문제점으로는 첫째 농경지의 황폐화에 의한 생산성 저하 및 영농 작업수행의 곤란, 둘째 농약 등의 오염물질과 영양물질의 흡착·이동에 따른 하천 및 호소의 오염, 셋째 하천의 통수 능력 및 저수지의 수리적 기능의 저하 등을 지적할 수 있다.

그러나 우리나라에서는 토양유실이 갖는 이러한 문제점에도 불구하고 토양유실에 대한 정확한 평가와 대책이 수립되지 않은 상태에서 토지에 대한 무분별한 이용 및 개발사업이 진행되고 있는 형편이다.

이러한 무방비 상태에서 진행되는 토지 이용으로 인해 발생하는 토양유실의 문제점을 보여주고 있는 사례로 최근 여름철

마다 강원도 지역의 고랭지 경작지로부터 발생하는 토양 유실을 들 수 있다. 고랭지 농업은 그 특성상 지형적으로 높고 경사가 급한 곳에서 수행되기 때문에 토양 유실이 여타 다른 지역에서보다 크게 나타나게 된다. 더욱이 농업에 사용되는 각종 비료와 농약 등으로 인하여 토양 유실에 의한 환경적 피해가 더욱 크게 나타날 수 있으며, 강원도 고랭지 농업 경작지의 위치가 서울의 상수원인 한강 상류에 위치했다는 점에서 그 심각성은 더욱 크다고 할 수 있다.

그러나 강원도 고랭지 농업 지역으로부터의 토양유실에 따른 문제점과 대책에 대한 필요성이 계속해서 제기됨에도 불구하고 아직까지 고랭지 경작지로부터의 토양유실에 대한 과학적인 연구는 수행되고 있지 못한 형편이다.

본 연구는 이러한 현실 배경을 바탕으로 강원도 고랭지 경작지로부터 발생하는 토양유실의 양을 정량적으로 파악하고 이로부터 향후 토양유실 방지 대책에 필요한 시사점을 도출하고자 한다.

## 2. 연구방법 및 자료

### 2.1 RUSLE를 이용한 토양유실량추정

본 연구에서는 토양유실량을 추정하기 위한 모형으로 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 모형을 사용하였다. RUSLE 모형은 총 6개의 인자로 구성되며, 다음 식 (1)과 같이 간단히 표현된다.

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

A : 연평균 토양유실량 (t/ha/year)

R : 강우침식인자 ( $10^7 \cdot J/ha \cdot mm/ha$ )

K : 토양침식인자 (t/ha/R)

L : 사면길이인자 (무차원)

S : 경사인자 (무차원)

C : 식생피복인자 (무차원)

P : 토양보전대책인자 (무차원)

#### 2.1.1 강우침식인자 R

강우침식인자는 다음 식 (2)와 같이 강우가 떨어질 때의 힘(운동에너지)과 30분 동안 최대 강우강도의 곱으로 표현된다 (이환주, 2002).

$$R = \frac{\left( \sum E \right) I_{30max}}{100} \quad (2)$$

여기서 R은 강우침식인자( $10^7 \cdot J \cdot mm/ha \cdot hr$ ), E는 분리·이탈된 토사를 이송시키는 총 강우에너지,  $I_{30max}$ 는 지속시간 30분 최대강우강도(cm/hr)를 나타낸다. 위의 식

(2) 외에 경험적 방법에 의해 강우침식인자를 산정하는 방법이 다수 제시되었으며, 이중 Roose와 Toxopeus가 제시한 경험 공식이 많이 이용되고 있다. Roose와 Toxopeus는 모두 연평균강우량을 이용하여 강우침식인자를 산정하며, 본 연구에서 사용한 Toxopeus에 의한 강우침식인자 산정식은 다음과 같다. 여기서 P는 연평균강우량(mm/yr)을 나타낸다.

$$R = 38.5 + 0.35 \times P \quad (3)$$

#### 2.1.2 토양침식인자 K

토양침식인자 K는 사면길이 22.13m에 5도의 경사를 가진 나지를 표준 조건으로 이에 대한 상대적인 침식정도를 나타낸다 (Morgan, 1986; 송동하, 1999 재인용). 토양침식인자 K는 토양의 모래 및 유기물 함량과 토양구조, 침투성 등과 같은 토양 특성에 따라 결정되며, 한국 건설교통부에서는 개략 토양도에 포함된 각 토양통별 K 값을 계산하여 테이블의 행태로 제시하고 있다.

#### 2.1.3 지형인자 LS

지형인자는 경사장인자 L과 경사도인자 S로 구성된다. 경사장인자 L은 지표에서 월류수가 발생되기 시작하는 지점으로부터 경사가 줄어서 퇴적이 일어나는 지점까지의 거리 또는 유출이 뚜렷하게 수로나 지류로 합류하는 지점까지의 거리를 나타내며, 경사도인자 S는 수평거리에 대한 고저차의 백분율을 나타낸다(허용구, 2002).

경사장인자 L을 계산하기 위해 제시된 많은 경험공식 중 최근 GIS 발달과 함께 Desmet과 Govers(1996)가 제안한 다음 공식이 많이 이용되고 있다.

$$L_{i,j} = (m + 1) \left( \frac{U_{i,j-out} + U_{i,j-\epsilon}}{2 \cdot (22.13)} \right)^m \quad (4)$$

여기서  $L_{i,j}$ 는 (i,j)번째 셀이 갖는 L 인자를 나타내며,  $U_{i,j-out}$ ,  $U_{i,j-in}$ 은 각각 (i,j)번째 셀의 출구와 입구에서의 상류 기여면적, m은 경사도에 따른 경사장인자의 지수값을 나타낸다. Fernandze(2003) 등은 Desmet과 Govers가 제안한 식 (4)의 공식을 GIS에서 활용하기 쉽도록 다음과 같이 변경하였다.

$$L_{i,j} = (m + 1) \left( \frac{2 \cdot U_{i,j-in} + b}{2 \cdot 22.13} \right) \quad (5)$$

여기서 b는 래스터 격자의 셀 크기를 나타낸다. 또한 식 (5)에서 상류기여면적을 나타내는  $U_{i,j-in}$ 은 일반적으로 유수의 흐름에서 각 셀에 흘러들어오는 상류셀의 총 개수로 간주할 수 있으며, 각 셀의 유출 및 침투 등의 특성이 동일하다고 가정할 경우  $U_{i,j-in}$ 은 누적셀개수×셀크기로 변환될 수 있다(Fernandze 등, 2003).

불규칙한 지형에 대한 경사도인자를 계산하기 위한 다양한 경험공식이 제안되었으며, 본 연구에서는 급한 경사 지역에 대해 비교적 정확한 값을 산정하는 것으로 알려진 Nearing의 연속방정식을 사용하였다 (Bartsch 등, 2002). Nearing의 연속방정식은 식 (6)과 같으며, 여기서  $\theta$ 는 경사각을 나타낸다.

$$S = -1.5 + \frac{17}{(1 + e^{2.3 - 6.1 \sin(\theta)})} \quad (6)$$

#### 2.1.4 식생피복인자 C

식생피복인자는 나지 조건과 특정 작물이 자라는 조건에서의 토양유실의 비율을 나타내는 것으로 식생에 의한 토양 유실 감소 영향을 반영한 것이다. 식생피복인자 값은 식생이 성장하기 전의 맨땅에서와 같은 조건에서는 1.0의 높은 값을 가지며, 삼림이 밀집된 지역이나 곡물의 밀도가 높은 지역에서는 0.1 이하의 낮은 값을 갖는다(장영률, 2002).

#### 2.1.5 토양보전대책인자 P

토양보전대책인자 P는 경작 형태에 따른 토양유실의 비를 나타낸다. 경작지의 모습은 등고선재배(contour), 등고선대상재배(strip cropping), 계단식(terrace)으로 구분되며, 경작형태와 경사도에 따라 그 값이 다르게 나타난다. 한국 농촌진흥청 농업과학기술연구소에서는 경작형태 및 경사도에 따라 <표 1>과 같이 토양보전대책인자 P 값을 제시하고 있다.

<표 1> 경작형태 및 경사도에 따른 토양보전대책인자 P 값

경사도	등고선	등고선대상	계단식
0 ~ 7 %	0.55	0.27	0.10
~ 11.3 %	0.60	0.30	0.12
~ 17.6 %	0.80	0.40	0.16
~ 26.8 %	0.90	0.45	0.18
26.8 % ~	1.00	0.50	0.20

## 2.2 모델에 의한 유사운송비 추정

RUSLE는 강우에 의한 총 토양유실량을 추정하는 공식으로, 이에 따라 산정된 토양유실량 모두가 실제 하천에 유입되는 것은 아니다. 따라서 유역 내에서 발생한 토양 침식이 하천에 기여하는 정도를 평가하기 위해서는 하천에 도달하기까지 발생하는 퇴적 및 기타 유사의 이송 특성을 반영한 유사운송비(SDR; Sediment Delivery Ratio) 개념이 요구된다. 유사운송비는 단위 면적 당 상류유역에서 유출되어 유역 출구의 한 하천지점을 통과하는 유사량(sediment yield)을 말하며 보통 t/ha/yr 단위로 표시된다(건교부, 1992).

### 2.2.1 유역 평균유사운송비

유사운송비의 가장 정확한 산정은 직접 대상 유역에 대해 실측을 하는 것이나, 이 경우 많은 시간과 노력이 필요하여 대부분의 경우 다양한 유역을 통해 개발된 유사운송비산정공식이 이용된다.

본 연구에서는 기존의 다양한 유사운송비 산정공식 중 비교적 우리나라에 적합하다고 평가되는 Boyce의 유사운송비 공식을 이용하였다. Boyce가 제시한 공식은 식 (7)과 같이 표현되며, 여기서 SDR<sub>w</sub>은 유역 평균유사운송비를, A는 유역면적(km<sup>2</sup>)을 나타낸다(장영률, 2002).

$$SDR_w = 0.41 \cdot A^{-0.3} \quad (7)$$

### 2.2.2 개별 격자에서의 유사운송비 산정

Boyce가 제안한 식 (7)은 전체 유역에

대한 평균유사운송비를 나타낸다. 따라서 유역 내 각 지역에서 하천의 유사량에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 이를 개별 단위격자별 유사운송비(SDR<sub>i</sub>)로 변환해야 한다. 유역 내의 각 단위격자에서 발생하는 토양유실량이 하천에 전달되는 비율을 나타내는 SDR<sub>i</sub>에 대한 산정 방법으로는 Ferro와 Minacapilli (1995)가 제안한 공식이 있으며, 그 모습은 다음 식 (8)과 같다.

$$SDR_i = \exp(\beta t_i) \quad (8)$$

$t_i$  = i 번째 셀의 도달시간 (hr)

$\beta$  = 유역 특성 반영계수

위의 식 (8)에서  $t_i$ 는 각 격자에서 강우에 의해 유출이 발생하였을 때 격자로부터 하천까지 유출이 도달하는 시간을 나타내며, 다음 식 (9)와 같이 유출의 흐름 경로와 유출 속도에 의해 계산될 수 있다 (Jain & Kothyari, 2000).

$$t_i = \sum_{i=1}^{N_p} \frac{l_i}{v_i} \quad (9)$$

위의 식 (9)에서  $l_i$ 는 유출의 흐름 경로 안에서 각 셀이 차지하는 흐름 길이를 나타내며, 각 셀의 높이 차에 의한 셀의 측면 또는 대각선 방향의 길이로 계산된다.  $v_i$ 는 각각의 셀에서 유출의 속도(m/s)를 뜻하며, Haan(1994)이 제시한 다음 식 (10)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$v_i = d_i s_i^{1/2} \quad (10)$$

- s<sub>i</sub>: 각 격자의 경사도 (m/m)
- d<sub>i</sub>: 각 셀의 표면 거칠기에 따른 값 (m/s)

식 (10)에 포함된 d<sub>i</sub>에 대해서 Hann(1994)은 지표면의 거칠기 특성에 따라 산림/목초지 0.76, 나대지 3.08, 포장지 6.19 등과 같은 값을 제시하였다.

식 (8)에서 유역의 특성을 나타내는 β는 유역의 지형적 형태에 영향을 받는 인자로 유역 전체에 대한 평균 SDR<sub>w</sub>를 알고 있을 경우 Ferro (1997)가 제시한 다음 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$SDR_w = \frac{\sum_{i=1}^N \exp(-\beta t_i) l_i^{0.5} s_i^2 a_i}{\sum_{i=1}^N l_i^{0.5} s_i^2 a_i} \quad (11)$$

위의 식 (11)에서 β 값은 SDR<sub>w</sub> 및 t<sub>i</sub>, l<sub>i</sub>, s<sub>i</sub>, a<sub>i</sub> 값을 알고 있을 경우 반복적인 최적화 알고리즘에 의해 추정된다. 여기서 s<sub>i</sub>, a<sub>i</sub>는 각 셀의 경사도와 면적을 나타낸다.

### 2.2.3 각 셀에서의 유사량(sediment yield) 산정

앞에서 살펴본 것과 같이 각 셀별 SDR<sub>i</sub>가 계산되면 이를 RUSLE 식으로부터 산정된 토양유실량과 곱하여 각 셀별 유사량을 다음 식 (12)와 같이 산정할 수 있다.

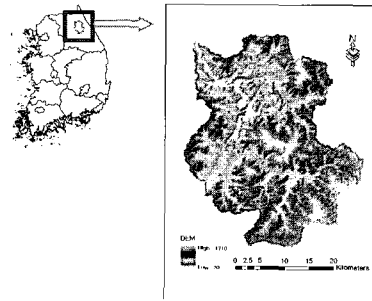
$$Y_i = SDR_i \cdot A_i \cdot a_i \quad (12)$$

여기서 A<sub>i</sub>는 RUSLE 공식에 의해 추정된 단위 면적 당 토양유실량을 나타내며, a<sub>i</sub>는 각 셀의 크기를 나타낸다.

## 3. 토양유실량 및 비유사량 산정

### 3.1 대상 지역

본 연구는 강원도 인제군, 홍천군에 위치한 내린천 유역을 대상으로 한다. 내린천 유역은 고랭지 채소 재배가 매우 성행한 지역으로 매년 태풍과 같은 집중 호우 시 토양 유실에 의한 피해가 자주 보고되고 있다. 대상 유역의 총 면적은 1,072.78km<sup>2</sup>이며 유역 둘레는 1,865km를 나타내고 있다. [그림 1]은 대상 유역의 고도분포도이다.



[그림 1] 연구 대상지역

### 3.2 RUSLE를 이용한 토양유실량 산정

#### 3.2.1 강우침식인자 (R)

내린천 유역 내에는 건설교통부에서 운영하는 추대 강우관측소와 수자원공사에서 운영하는 귀둔, 현리, 상남, 방동, 창촌 등 총 6개의 강우 관측소가 분포하고 있다. 강우침식인자는 1993년부터 2002년 사이에 이들 각 관측소에서 측정된 강우 자료를 평균하여 산정하였으며, 이때 사용된 계산식은 Toxopeus가 제시한 식 (3)을 적용하였다. 또한 각각의 강우 관측소가

유역 내에서 대표하는 지역을 티센 다각형으로 구성하였으며, 이를 바탕으로 계산된 강우침식인자를 부여하였다. <표 2>는 각 강우 관측소별 연평균 강우량과 이에 따른 강우침식인자의 값을 보여준다.

<표 2> 관측소별 연평균강우량, 강우침식인자

관측소	연평균강우량	강우침식인자
추대	1071.4	413.5
현리	1056.1	408.1
창촌	1294.9	491.7
상남	1357.2	513.5
귀둔	1120.3	430.6
방동	1320.0	500.5

### 3.2.2 토양침식인자 (K)

토양침식인자 K는 농업과학기술연구원 에서 구축한 개략 토양도와 건설기술연구원 에서 제시한 토양통별 K 값을 이용하여 구축하였다. <표 3>은 내린천 유역에 존재하는 토양통과 토양통별 토양침식인자를 나타낸다.

<표 3> 토양통별 토양침식인자

토양통	토양침식인자 K
Ro	0.00
Ra	0.21
Ma	0.27
An	0.31
Mu	0.39

### 3.2.3 지형인자 - 침식사면 길이인자 (L), 침식사면 경사인자 (S)

침식사면의 길이인자 (L)은 30m 크기의

DEM으로부터 Fernandez(2003)이 제안한 식 (5)를 이용하여 산정하였다. Fernandez가 제안한 식 (5)를 적용하는 과정에서 상류 기여면적은 강우에 의한 토사가 일반적으로 120 ~ 150m 내에서 퇴적되는 것을 감안하여 상류 기여 셀의 개수가 5개(30\*5=150)를 초과하는 경우 5개로 기여 셀의 개수를 낮추어 부여하였다.

침식사면의 경사인자 S는 Nearing이 제안한 식 (6)을 이용하여 계산하였다.

### 3.2.4 식생피복인자 (C)

#### (1) 토지피복 분류

식생피복인자 C는 2000년 5월 8일자 Landsat 7의 영상을 대상으로 영상분류를 수행하여 그 값을 부여하였다. 영상에 대한 토지 피복 분류는 수역, 주거지, 나대지, 초지, 산림, 논, 밭을 분류항목으로 지정하여 수행하였으며, 분류 결과는 <표 4>와 같다. 토지피복 분류 결과 연구 대상지역의 토지 피복은 95% 이상 대부분이 산림 지역인 것으로 나타났다. 다음으로는 밭 2.6%, 수역 1% 등의 순으로 산정되었으며, 기타 지역은 분포는 매우 미미한 것으로 나타났다.

<표 4> 토지피복분류 결과

Class	Cell Number	Percent (%)
water	12,692	1.06
residential	427	0.04
barren	1,852	0.16
grass	6,109	0.51
forest	1,132,851	95.04
paddy	7,044	0.59
dry field	31,058	2.61

**(2) 식생피복인자**

식생피복인자는 토지피복분류를 기준으로 각 분류 항목에 따라 값을 부여하였다. 논과 밭을 제외한 토지 피복의 경우에는 일년 동안 그 특성이 변하지 않는다고 가정하여 수역 0, 주거지 0.01, 나대지 1, 산림 0.03, 초지 0.1 값을 부여하였으며, 논과 밭의 경우에는 계절에 따라 식생 상태가 매우 큰 차이를 보이므로 각 계절별 C 인자에 강우에너지를 가중치로 하여 그 값을 산정하였다. 고랭지 채소의 경우 4월 중순부터 10월 중순까지가 그 재배 시기임을 감안하여 연평균 인자 산정 시 5월부터 9월 사이에는 여름철의 C 값을 사용하였으며, 논외의 경우에는 각 생육 시기에 따라 다른 C 값을 부여하여 사용하였다. 논과 밭의 식생피복인자 계산 과정에 사용된 생육시기 구분과 각 시기별 강우량 및 C 값은 다음 <표 5>, <표 6>과 같다.

<표 5> 밭의 식생피복인자 산정

달	강우량	C	E 가중
1,2,12	66.3	0.30	0.03
3,4	94.4	0.26	0.03
5,6,7,8,9	947.2	0.21	0.14
10,11	95.4	0.26	0.03
연평균			0.23

<표 6> 논외의 식생피복인자 산정

달	강우량	C	E 가중
1, 2	47.0	0.34	0.03
3, 4, 5	183.8	0.20	0.03
6	131.2	0.10	0.01
7~9.20	690.0	0.01	0.01
9.21~12	151.2	0.34	0.05
연평균			0.13

이로부터 밭의 경우에는 연평균 C 값으로 0.23이 계산되었으며, 논외의 경우에는 이보다 작은 0.13으로 산정되었다.

**3.2.5 토양보전대책인자 (P)**

논과 밭에 대하여 경사도와 재배 방법에 따라 농업과학기술연구원에서 제시한 <표 1>의 토양보전대책인자 값을 부여하였다. 논과 밭이 아닌 경우에는 토양보전대책이 없는 것으로 간주하여 P 값으로 1.0을 부여하였다. 대상구역의 토양보전대책인자 평균값은 0.98의 높은 값으로 산정되었는데, 이것은 내린천 구역의 대부분 지역이 산림으로 구성되어 있기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

**3.3 SEDD를 이용한 비유사량 산정**

**3.3.1 유역 평균유사운송비 (SDRW)**

대상 구역의 평균 유사운송비를 Boyce가 제시한 식 (7)에 유역면적 1,072.78 km<sup>2</sup>를 대입하여 산정하였다. 이렇게 추정된 유역 평균 SDR<sub>w</sub>은 0.05로 나타났다. 즉, 유역 내에서 발생한 토양유실량 중 총 5%가 하천에 도달하는 것으로 추정된 것이다.

$$SDR_w = 0.41 \cdot A^{-0.3}$$

$$= 0.41 \cdot 1,072.78^{-0.3} = 0.05$$

**3.3.2 Flow velocity 산정**

식 (10)을 이용하여 각 셀을 통과하는 유출 속도를 계산하였다. 이때 각 셀의 표



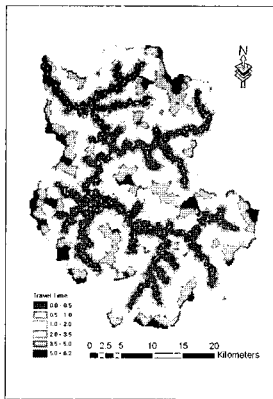
면 거칠기에 따른  $d_i$  인자 값은 Hann(1994)이 제시한 값을 참조하여 <표 7>과 같이 부여하였다. 이로부터 계산된 유역 내에서 최대 흐름 속도는 6.59 m/s로 나타났으며, 평균은 0.54 m/s로 산정되었다.

<표 7> 유출속도 추정을 위해 부여한  $d_i$  값

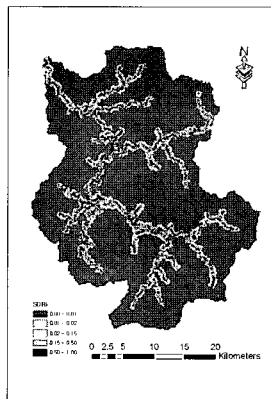
Surface	$D_i$ (m/s)
Forest, paddy	0.76
Grass	2.13
Dry Field	2.62
Residential, Barren	3.08
Water	6.19

### 3.3.3 도달시간 산정

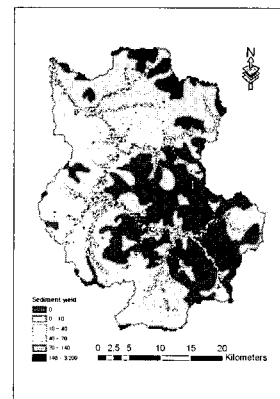
각 셀에서 하천까지 지표수가 도달하는 시간은 식 (9)에 의해 [그림 2]와 같이 산정되었다. 유역 내에서 발생한 유출은 평균적으로 2시간 이내에 하천에 도달하는 것으로 추정되었으며, 가장 오래 걸릴 경우 약 8시간 정도가 필요한 것으로 나타났다.



[그림 2] 도달시간 분포도



[그림 3] 셀별 유사운송비



[그림 4] 유사량 분포도

### 3.3.4 각 셀별 유사운송비 산정

평균유사운송비( $SDR_w$ ) 0.05와 각 셀별 도달시간, 경사도, 흐름길이, 면적 등을 식 (11)에 대입한 후 시행착오법에 의하여 유역의 특성치를 나타내는  $\beta$  값을 11.468로 계산하였다. 이렇게 계산된  $\beta$  11.468 및 도달시간을 이용하여 각 셀에 대한 유사운송비  $SDR_i$ 를 식 (8)에 의해 산정하였으며, 계산된 대상유역에서의 각 셀별 유사운송비 분포는 [그림 3]과 같다.

### 3.3.5 Sediment yield

앞에서 산정한  $SDR_i$ 를 이용하여 각 셀에서 연간 하천에 유입되는 유사량을 식 (12)를 이용하여 추정하였다. 각 셀별 유사량 추정결과는 [그림 4]와 같다. 대상유역에서 일년 동안 평균적으로 단위 면적당 6.57 t/ha/yr의 양이 하천에 유입되는 것으로 산정되었으며, 하천에 가까이 위치할 수록 이 값이 커지는 것으로 분석되었다.

## 4. 분석결과 및 고찰

### 4.1 토지피복별 토양유실량 평가

토지피복별 RUSLE 공식의 각 인자와 토양유실량을 정리하면 <표 8>과 같다. 토지용도별 연간 토양유실량은 나대지가 연간 822.84 t/ha/yr로 단위 면적 당 가장 큰 토양유실이 발생하는 것으로 나타났다. 나대지의 경우에는 식생피복인자 값을 1로 부여한 것이 단위 면적 당 가장 큰 토양유실량을 나타내게 한 요인으로 생각된다. 두 번째로는 밭이 296.88 t/ha/yr로 단위 면적 당 큰 토양유실이 발생하는 것으로 산정되었으며, 초지(87.16), 산림(65.01), 논(21.15), 주거지(15.33)의 순으로 분석되었다. 이러한 단위 면적 당 토양유실량에 각 토지용도가 유역 내에서 차지하고 있는 면적을 곱하여 유역에서 각 토지용도별 연간 총토양유실량을 산정하면 산림 6,624,584 t/yr, 밭 834,232, 나대지 140,705, 초지 49,071, 논 13,514, 주거지 597의 순으로 토양유실이 발생하는 것으로 분석되었다.

### 4.2 토지피복별 유사량 평가

발생한 토양유실량이 유역 하천에 미치는 영향을 나타내는 유사운송비와 유사량 결과를 토지용도별로 정리하면 <표 9>와 같다. 유역 내에서 발생한 토양유실이 하천까지 도달하는 비율을 나타내는 유사운송비(SDR)의 경우 주거지 0.62, 초지 0.39, 밭 0.29, 논 0.22, 나대지 0.14, 산림 0.05의

순으로 산정되었다.

### 4.3 고령지경작지에서의 토양유실 평가

고령지 경작지와 일반 경작지에서의 토양유실량, 유사운송비, 유사량 결과를 정리하면 <표 10>과 같다. 본 연구에서는 고도가 400m 이상인 지역을 고령지 경작지로 간주하였다. <표 10>에서 확인할 수 있는 것과 같이 고령지 경작지의 경우 단위 면적 당 토양유실량이 고도 400m 이하의 일반 경작지에서의 258.46 t/ha/yr에 비하여 큰 316.46 t/ha/yr 값으로 분석되었다. 이것은 고도 400m 이상 지역에서의 지형인자가 큰 영향을 미친 결과라 판단된다. 전체 토양유실량에서도 고령지 지역은 유역 내에서 차지하고 있는 면적 비율 1.74%에 비하여 월등히 큰 7.69%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

유사운송비에 있어서는 고도 400m 이하의 일반 밭이 0.41로 고령지 경작지에서의 0.23에 비하여 큰 값을 나타냈다. 이것은 고도 400m 이하의 일반 밭 지역이 고령지 경작지에 비하여 비교적 하천에 가깝게 위치하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 유사운송비의 영향으로 유사량의 경우 고령지 경작지역이 400m 이하의 경작지에서 산정된 113.23 t/ha/yr 값보다 작은 69.80 t/ha/yr 값을 보여주었다. 유역에서 일년 동안 발생하는 총유사량에 대해서는 고령지 경작지가 18%, 400m 이하의 일반 밭이 15%의 기여를 하고 있는 것으로 분석되었으며, 고령지 경작지가 유역에서 차지하고 있는 면적 1.74%를 고려할 때 매우 높은 기여를 하고 있음을 확인할 수 있다.

<표 9> 토지용도별 유사운송비 및 유사량

Land use	SDR	Sediment yield		
		t/ha/yr	total (t/yr)	%
water	0.00	0.00	0.00	0.00
residential	0.62	10.68	418.08	0.06
barren	0.14	65.16	11,119.33	1.56
grass	0.39	31.20	17,560.11	2.46
forest	0.05	4.39	446,876.35	62.50
paddy	0.22	3.48	2,222.35	0.31
dry field	0.29	84.27	236,823.70	33.12

<표 10> 고랭지 경작지에서의 토양유실량, 유사운송비, 유사량

Height	Area		Soil loss			SDR	Sediment yield		
	km <sup>2</sup>	%	(t/ha/yr)	(t/yr)	%		(t/ha/yr)	(t/yr)	%
< 400	9.48	0.88	258.40	245,051	3.20	0.41	113.23	107,381	15.02
>400 (고랭지)	18.62	1.74	316.46	589,194	7.69	0.23	69.80	129,963	18.18

% 항목은 밭 경작지만이 아니라 전체 유역에 대한 비율을 나타낸다.

## 참고문헌

- 건교부, 1992, 댐 건설을 위한 유역단위 비유사량 조사·연구.
- 송동하, 1999, “일일 오염 부하량 예측을 위한 분포형 유역 모형 개발”, 서울대학교 환경대학원 박사학위 논문.
- 장영률, 이근상, 조기성, 2002, “GIS 기반에서 토양침식의 정량화를 위한 해상도 결정에 관한 연구”, 한국 GIS 학회지, 제10권 제2호, pp.301-316.
- 이환주, 2002, “GIS 공간분석 기법을 활용한 토양침식 잠재성 평가에 관한 연구”, 전북대학교 박사학위 논문.
- 허용구, 2002, “GIS를 이용한 토양유실량 추정 System의 개발 및 적용”, 서울대학교 석사학위 논문.
- Bartsch, K.P., Miegroet, H.V., Boettinger, J., Dobrowolski, J.P., 2002, Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams Utah, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 57, No. 1, pp.29-37.
- Desmet, P.J.J., Govers, G., 1996, A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 51, No. 5, pp.427-433.
- Fernandez, C., Wu, J. Q., McCool, D. K., Stockle, C. O., 2003, Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 58, No. 3, pp.128-136.
- Ferro, V., Minacapilli, M., 1995, Sediment delivery processes at basin scale, Hydrological Sciences Journal, Vol. 40, No. 6, pp.703-717

Ferro, V., 1997, Further remarks on a distributed approach to sediment delivery, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42, No. 5, pp.633-647.

Hann, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C., 1994, *Design Hydrology and Sedimentology for*

*Small Catchments*, Academic Press.

Jain, M.K, Kothyari, U.C, 2000, Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 5, pp.771-786.