

# 토양 침식량과 비점오염량을 산정하기 위한 GIS와 범용토양손실공식(USLE) 연계

## Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion and Non point source load

김병식\* / 홍준범\*\* / 김형수\*\*\* / 심규철\*\*\*\* / 서병하\*\*\*\*\*

Byung Sik, Kim / Jun Bum, Hong / Hung Soo, Kim / Kyou Chul Shim / Hyung Ha, Seoh

### 요 지

우리나라의 경우 재해영향평가 제도가 실시된 이후 모든 재해영향평가에서는 토양침식량을 산정하고 있다. 유역에서 토양침식량을 산정하기 위한 많은 모형들이 있지만, 분포형 모형들은 토양침식의 산정에 많은 비용과 시간을 요구한다. 그래서, 가장 널리 실무에서 쓰이고 있는 모형은 범용토양침식공식(USLE, Universal Soil Equation)이다. USLE은 연 토양 침식량 산정을 위한 경험공식으로, 토양침식은 강우강도, 토양의 종류, 토지 피복과 토지이용, 사면경사와 경사길이, 그리고 토양보전을 위한 시설의 영향을 받는다. 이러한 모든 변수들은 공간적으로 분포되어 있기 때문에, 이러한 변수들을 추정하기 위해 지형정보시스템(GIS)을 사용하면 보다 빠르고 정확한 변수들을 산정 할 수 있다. 또한, 유역에 내리는 강우는 토양침식뿐만 아니라 유기물의 흡착에 따른 비점오염원의 유출을 발생시킨다. 침식토에 흡착된 유기물의 양은 부유의 개념을 도입하여 산정 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지형정보시스템(GIS)과 범용토양손실 공식을 연계하여 태풍루사의 강우에 의한 보정천 유역에서의 토양 침식량과 그와 함께 유출되는 유기질소(Organic N)의 양을 산정하였다.

**핵심용어** : GIS, 범용토양손실 공식(USLE), 토양침식량, 비점오염원

### 1. 서 론

전 국토에 걸친 개발사업장으로부터 발생하는 토사 유출에 의한 인위적 피해를 최소화하기 위해서는 토사 유출 지배인자의 특성은 물론 토사유출량 산정기법 및 토사유출 조절기법에 대한 세밀한 검토가 따라야 한다. 우리나라의 경우 재해영향평가 제도가 실시된 이후 모든 재해영향평가에서는 미국에서 개발된 범용토양손실공식을 사용하여 토사유출량을 산정하고 있다. 범용토양손실공식은 유역의 지형적 특성과 토지 이용 등 유역의 공간적 특성에 의해 토양 침식량을 결정하게 된다. 이러한 공간적 자료를 수작업으로 처리할 경우 많은 시간이 소요되며, 오차가 발생할 가능성이 높아지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 재해영향평가지 토사 침식량 저감대책 수립을 위한 장·단시간 호우에 대한 각종 외국 토사유출량 산정기법 중 세계적으로 많이 활용되고 있는 범용토양손실공식(USLE)을 GIS 기법과 연계함으로써 기존의 수작업에 의한 것 보다 간편하고 일괄적이며 정확하게 토사 침식량을 산정하고자 하였다. 또한, 유역내 유기물로부터 발생하여 침식토사에 흡착되어 배출되는 비점오염원(유기질소)의 양을 산정하고자 하였다.

\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : [hydrokbs@orgio.net](mailto:hydrokbs@orgio.net)

\*\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : [g2031248@inhavision.inha.ac.kr](mailto:g2031248@inhavision.inha.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : [seohyro@inha.ac.kr](mailto:seohyro@inha.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 팀장 · 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단 · E-mail : [skcpj@kict.re.kr](mailto:skcpj@kict.re.kr)

\*\*\*\*\*정회원 · 인하대학교 토목공학과 교수 · E-mail : [seohyro@inha.ac.kr](mailto:seohyro@inha.ac.kr)

## 2. 이론

### 2.1 USLE(Universal Soil Equation)

본 연구에서 이용한 USLE(Wiscmeir and Smith, 1978)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, Y : 강우침식도 R의 해당기간 중 단위 면적당 토사침식량 ( $\frac{\text{tonnes}}{\text{ha}}$ )

R : 강우침식도 ( $\frac{\text{MJ} \cdot \text{mm}}{\text{ha} \cdot \text{hr}}$ )

K : 토양침식성 인자 ( $\frac{\text{tonnes}}{\text{ha} \cdot R}$  또는  $\frac{\text{tonnes} \cdot \text{hr} \cdot \text{year}}{\text{MJ} \cdot \text{mm}}$ )

LS : 지역의 지형학적 특성을 나타내는 무차원 인자

C : 식생 및 피복상태 등 경작 종류와 형태에 따른 무차원 인자

P : 토양보전 대책을 나타내는 무차원 인자

#### 2.1.1 침식능 인자 R의 산정

토사유출량은 강우의 크기 및 형태에 직접적인 영향을 받게 된다. 따라서 강우에 의한 침식능 R의 산정은 매우 중요하다. 연평균 침식능 R을 이용한 토양침식량 산정은 빈도개념이 없으므로 단일호우(50년 재현기간, 24시간 지속강우)에 의한 침식능 R값을 이용한다. 강우강도 에너지의 산정공식은 강우강도 76mm/hr을 경계로 다음과 같이 두 가지 형태로 표현된다.

$$e = 0.119 + 0.0873 \log I \quad I \leq 76 \text{mm/hr} \quad (2)$$

$$e = 0.283 \quad I > 76 \text{mm/hr} \quad (3)$$

여기서, e : 강우운동에너지(MJ/ha/mm)

I : 호우의 평균강우강도(mm/hr), MJ :  $10^6$ joule

호우의 총강우에너지는 다음과 같이 강우운동 에너지에 강우깊이를 곱하여 산정한다.

$$E = e \cdot P'' \quad (4)$$

여기서, E : 강우의 총 에너지( $\frac{\text{MJ}}{\text{ha}}$ )

P'' : 강우의 총깊이(mm)

#### 2.1.2 침투능지수 k의 산정

토양의 침식성이란 강우에너지와 유출에 의한 침식능에 저항하는 토양의 저항도를 나타내며 실험적으로 토양의 침식성은 표준침식밭(standard erosion plot)에서의 단위 강우지수당 토양의 손실량을 나타낸다. 표준침식밭이란 사면의 상하방향으로 경작된 길이 22.1m 사면경사 9%의 휴경지로 이 때의 L, S, C, P는 모두 1.0이 된다. 따라서 K는 다음과 같이 산정된다. 우리나라의 경우 토양층에 따른 대표적 K값을 건설부(1992)와 한국수자원학회(1998)에서 발표한바 있다.

$$K = \frac{\text{측정된 침식량}}{\sum EI_{30}} \quad (5)$$

#### 2.1.3 피복관리인자 C

농경이나 토양의 관리기법이 침식에 미치는 영향을 반영하거나 토양보존 대책 중 토양의 관리가 토양침식

에 미치는 상대적 영향을 비교하기 위하여 피복-관리인자(cover-management factor) C를 사용하고 있다. 이 C인자는 보존대책이 연평균 토양손실량에 어떤 영향을 미치는가 또는 토양손실 잠재능이 건설활동, 농경 활동 또는 토양 관리계획 기간 중 시간적으로 어떻게 분포되는가를 나타내는 것이다.

### 2.1.4 토양보존 대책인자 P의 산정

토양 보존대책인자는 어떤 토양 보존대책을 세운 사면의 상·하 방향 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.

### 2.1.5 LS Factor

토양 손실과 관련된 지형특성 인자는 유역길이, 지표면경사, 유역면적, 기복도 등이 있으며, 통상적으로 유역 사면의 길이(L), 사면의 기울기(S)를 통합하여 하나의 무차원 인자(LS)로 간주하여 토사유출량을 산정한다. 사면경사인자 S는 사면경사가 토양손실에 미치는 영향을 예측하는데 활용된다. LS Factor는 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$LS = (L/22.13)^n \times (0.065 + 0.045S + 0.0065S^2) \quad (6)$$

여기서, n은 사면 경사가 5%이상이면 0.5를 사용하고, 3.5%~4.5%이면 0.4, 1%~3% 이면 0.3, 1%이하면 0.2를 사용한다.

## 2.2 토사에 의한 유기질소(Organic N)의 이송

일반적으로 강우가 지표면에 도달하면 일부 오염물질은 용해되며, 남은 오염물질은 유사에 흡착되어 이동한다. 이러한 개념을 이용하면 USLE를 통하여 얻은 침식량 결과와 유사의 운송에 관련된 몇 가지 변수의 관계를 통해서 비점오염원의 배출량을 산출해 낼 수 있다.

### 2.2.1 유사운송비(Sediment Delivery ratio)

유사운송비는 주어진 배수면적에서 유사의 총 침식에 대한 운송된 유사의 비율이다. 유사운송비는 유역의 지형적 특성에 많은 영향을 받기때문에 여러가지의 식들이 제안되고 있으며, 본 연구에서는 Vanoni(1975)가 전 세계의 300개 유역에서 취한 자료에서 유도해 낸 다음의 공식을 사용하였다.

$$DR = 0.42 \times A^{-0.125} \quad (7)$$

여기서, A : 유역면적(mile<sup>2</sup>)

### 2.2.2 유사산출량(Sediment yield)

유사산출량은 유역출구점이나 수로상의 한점에서 측정된 유사의 양을 나타낸다. 따라서 유역 USLE를 이용하여 계산된 유역 전체의 침식량과 유사운송비와의 관계를 통해 유사산출량을 구할 수 있다.

$$SY = (A)(DR) \quad (8)$$

여기서, A : USLE를 이용하여 계산된 총 침식량

DR : 유사운송비

### 2.2.3 부유비(Enrichment ratio)

부유비는 유사 내 오염물의 농도를 본 토양에서 오염물의 농도로 나눈 것이다. 유출된 유사에서 오염물의 함유량은 본 토양(parent soil)의 함유량보다 높게된다. 따라서 부유비(ER)은 언제나 1보다 크게 된다. 또한

ER이 유사운송비의 역수보다 크다면 유역에서 배출되는 오염물의 양이 유역 내 토양에 함유되어 있던 것 보다 많게 되므로 부유비는  $1 < ER < (1/DR)$ 의 범위를 갖는다. 부유비는 아래의 식으로부터 계산이 가능하다.

$$ER = C_r / C_s \quad (9)$$

여기서,  $C_r$  : 유사 1g에 함유된 오염물의 농도

$C_s$  : 원래토양 1g에 포함되어 있는 오염물의 양

### 2.2.4 유기질소(Organic N)의 유출량 계산

유사에 의해 이송되는 유기질소의 양은 유사산출량과 부유비를 이용하여 계산할 수 있다. McElroy et al.(1976)은 유역내에서 발생하는 유기질소의 손실을 계산하기 위한 다음의 식을 제안하였다.

$$ONY = 0.001(SY)(CON)(ER) \quad (10)$$

여기서, ONY : 유역에서 배출되는 유기질소의 양

SY : 유사산출량

ER : 부유비

CON : 표토가 함유하고 있는 유기질소의 양이다.

## 3. 적 용

본 연구에서는 IHP 대표유역인 보청천 유역을 대상으로 설계강우(50년 빈도, 1시간 지속기간)와 태풍루사의 실제 강우자료(2002년 8월 31일 08시~2002년 9월 1일 08시)를 이용하여 토사침식량을 산정, 비교하였다.

### 3.1 강우자료의 분석

본 연구에서는 보은 기상관측소의 강우량자료를 이용하여 지속기간별 재현기간별 강우량을 산정하였으며 또한, 태풍루사의 강우자료(2002년 8월 31일 08시~2002년 9월 1일 08시)를 이용하였다. 식(2)~(4)를 이용해 계산 한 결과, 보은지방의 설계호우에 의한 침식능과 태풍 루사에 의한 침식능은 각각 5871.127(MJ/ha)(mm/hr)/storm, 60877.563(MJ/ha)(mm/hr)/storm로 태풍루사에 의한 호우는 설계강우에 약 10배 이상으로 산정되었다.

#### 3.1.1 보은지방 강우강도식 및 침식능(R) 산정

보은지방의 강우 침식능 계산을 위한 강우 강도식을 선정하기 위하여 Talbot 형, Sherman 형, Japanese 형, Semi-Log 형에 대한 테스트를 실시하여 다음 식과 같은 Japanese 형 강우강도식을 채택하였다.

$$\text{강우강도식} : I_{50} = \frac{685.94}{\sqrt{t+0.9591}} - 4.50 \quad (11)$$

보은지방의 재현기간 50년, 지속시간 24시간 설계단일호우에 대한 R은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R &= \Sigma(E \cdot I_{60})/\text{stom} = 79.022 \times 74.30(\text{MJ/ha})(\text{mm/hr})/\text{storm} \\ &= 5871.127(\text{MJ/ha})(\text{mm/hr})/\text{storm} \end{aligned}$$

#### 3.1.2 태풍루사에 의한 강우 침식능(R) 산정

태풍 루사의 재현기간 50년, 지속시간 24시간 설계단일호우에 대한 R은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R &= \Sigma(E \cdot I_{60})/\text{stom} = 160 \times 380.485(\text{MJ/ha})(\text{mm/hr})/\text{storm} \\ &= 60877.563(\text{MJ/ha})(\text{mm/hr})/\text{storm} \end{aligned}$$

### 3.2 GIS을 이용한 USLE 인자의 산정

본 연구에서는 격자크기 30m×30m, 1:25,000인 DEM 자료를 사용하여 경사도(slope), 사면도(aspect)와 같은

유역의 지형적 특성을 분석하였다. GIS를 이용한 USLE 인자의 산정과정은 그림 1과 같다.

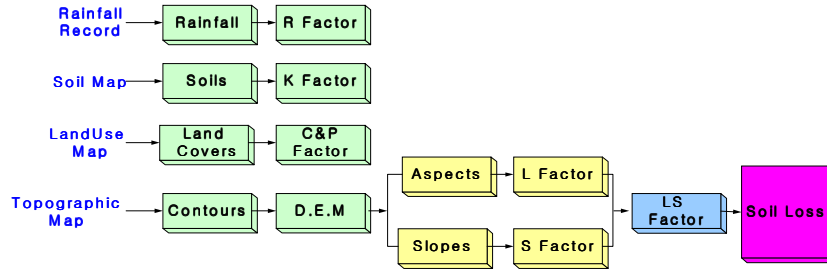


그림 1. GIS와 USLE을 연계한 토양침식량 산정과정

### 3.2.1 침투능지수 k의 산정

본 연구에서는 토양에 대한 침식을 나타내는 지표인 토양침식계수(K)는 Erickson의 삼각도표를 이용하여 건설교통부(1992)의 “댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사·연구(부록), 1992. 11.”에서 제시한 한국 전역의 토양통별 K값을 보정된 유역의 토양도와 비교하여 결정하였다.

### 3.2.2 피복관리인자 C, 토양보존 대책인자 P

표 1을 이용하여 토지피복도로부터 C 값을 산정하였으며, 보정된 유역의 경우 대부분이 산지 유역으로 농업지역의 경우 자연상태가 아닌 교란된 지역으로 보고 P값을 0.03으로 수정하였다.

### 3.2.3 LS 인자

LS 인자를 추출하기 위해서는 유역의 경사도(Slope, %)와 사면도(aspect, m) 자료로부터 추출된 L, S가 필요하며 이때, 식 (6)을 통해 LS 값을 산정하였다. 그림 2는 이를 통해 산정된 LS값을 나타낸 것이다.

### 3.2.4 USLE에 의한 토양침식량 산정 (ton/ha)

식 (1)의 계산을 위해 앞에서 선정된 5가지 인자를 Idrisi32의 image calculator를 이용하여 계산하였다. 그 결과는 그림 3, 4와 같다.

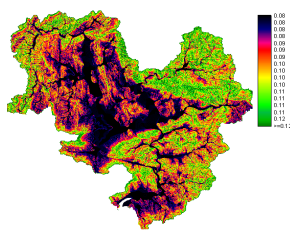


그림 2. LS 인자

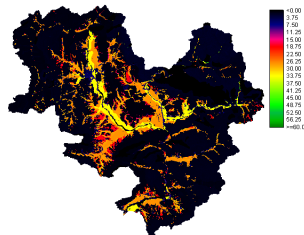


그림 3. 토사침식량(설계강우)

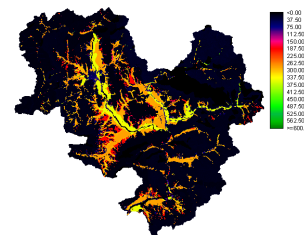


그림 4. 토사침식량(루사)

### 3.2.5 유기질소 유출량 산정에 필요한 변수 산정

유사운송비(Sediment delivery ratio)는 보정된 유역의 면적 475.58km<sup>2</sup>를 183.62mile<sup>2</sup>로 변환하여 식(7)을 적용 DR=0.22의 값을 결정하였다. 이렇게 결정된 유사운송비와 그림 3, 4의 총 침식량을 이용하여 유사산출량(Sediment yield)의 값을 계산하였다. 그러나, 부유비(Enrichment ratio)의 경우 우리나라에서 계산에 필요한 측정자료가 미비하여 부유비의 범위인 1<ER<(1/DR)의 범위에서 그 평균값 2.77을 사용하였다.

### 3.2.6 보청천 유역의 유기질소(Organic N) 농도

보청천 유역의 유기질소의 농도를 토지 이용별 비점원 발생 원단위(kg/km<sup>2</sup>/day)를 사용하여 결정하였다. 결과는 그림 5와 같다.

### 3.3.7 유기질소 유출량

식 (10)을 이용하여 Image calculating를 사용하여 태풍 루사와 설계강우에서의 유기질소의 농도를 계산하였다. 그 결과는 그림 6, 7과 같다.

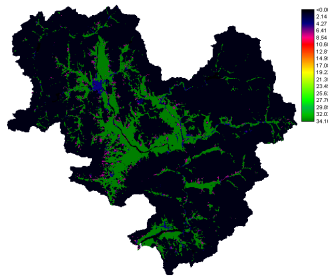


그림 5. 유기질소 농도

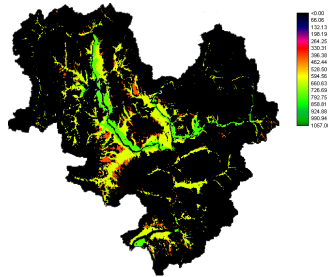


그림 6. ONY(루사)

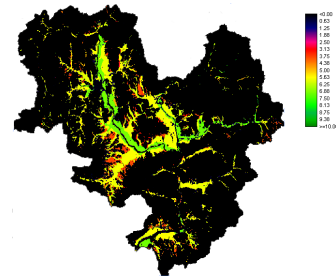


그림 7. ONY(설계강우)

## 4. 결 론

본 연구에서는 USLE과 GIS을 연계하여 설계강우(50년 빈도 1시간 지속기간)와 태풍루사(2002년 8월 31일 08시~2002년 9월 1일 24시)에 의해 발생하는 토사 침식량, 유사산출량 그리고 유사유출량에 포함되어 유출되는 유기 질소량을 산정하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다

- (1) 지금까지와 달리 GIS 격자 자료를 사용함으로써 보다 빠르고 정확하게, 유역 전체내에서의 토사 침식량을 산정 그 분포를 파악할 수 있었다. 특히, 유역내의 하도 주변을 중심으로 토사 침식량이 많음을 확인할 수 있었다.
- (2) 설계강우에 의한 토양 침식량과 토사에 흡착되어 발생할 수 있는 유기물질의 양을 산정하여 태풍루사에 의한 것과 비교해 본 결과 약 10배 이상 증가함을 확인할 수 있었다

## 참 고 문 헌

1. Bill Forbes et. al., 2001, Using GIS to Estimate Soil Loss Rates in Denton County, Texas
2. Da Ouyang, Jon Bartholic, 1997, Predicting Sediment Delivery Ratio in Saginaw bay Watershed, The 22nd National Association of Environmental Professionals Conference Proceedings, pp.659-671
3. Mohan Lal Agrawal, et. al., 2003, Impact Assessment on Soil Erosion due to Highway Construction using GIS, EJGE.
4. Okan Fistikoglu, Nilgun B. Harmancioglu, 2002, Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion, Water Resources Management 16, pp. 447-467
5. P.I.A. Kinnell, 2000, AGNPS-UM : applying the USLE-M within the Agricultural Non-point Source Pollution Model, Environmental Modelling & Software 15, pp. 331-341
6. 박정환 외, 2000, 토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구, 한국수자원학회논문집 33권 제5호, pp. 603-610
7. 손광익, 2001, 해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토(1)-RUSLE를 중심으로, 한국수자원학회논문집 34권 제 3호, pp. 199-207