

## GIS를 이용한 토사이송 및 퇴적분포 예측기법 개발 Modelling of Sediment Transportation and Deposition in GIS

손 광 익\*

Son, Kwang Ik

### Abstract

In this study, a two-dimensional model for identifying areas of erosion and deposition over a basin was developed based on the mass balance principle in a distributed model. The program consists of three steps: (a) estimation of soil erosion; (b) determination of flow amount and direction; and (c) estimation of mass balance.

Soil erosion was estimated with USLE. A single-direction (SF) and a multi-direction flow algorithm (MF) were applied to estimate slope length (L). The Maximum Downhill Slope Method (MDS) and the Neighborhood Method (NBH) were used to estimate the slope degree (S). Sediment transport resulting from eroded soil was estimated using Ferro's (1998) and Swift's (2000) sediment delivery ratio (DR).

The model was validated by comparing the predicted sediment yields for three basins with measured data. The developed algorithm showed that Ferro's DR method combined with the MDS and MF produced the best agreement with the dredging records of three agricultural reservoir basins in Korea.

**keywords** : Sediment transportation, Sediment delivery ratio, Erosion and deposition distribution

### 요 지

본 연구에서는 분포형 모형과 셀의 유입, 유출 및 저류량에 대한 질량보존의 법칙을 이용하여 토사의 이송 및 퇴적분포예측기법을 개발하였다. 모형은 (a) 토사침식 예측 (b) 흐름방향 및 유출량 산정 그리고 (c) 토사에 대한 질량보존의 법칙에 따른 셀별 토사이동량 산정의 세 단계로 구성되었다.

토양침식은 범용토양손실공식(USLE)을 활용하였으며 분포형 모형에서의 경사장(L) 산정은 일방향(SF)과 다방향 흐름 알고리즘(MF)을 사용하였다. 경사(S) 산정을 위해서는 Maximum Downhill Slope Method (MDS) and the Neighborhood Method (NBH) 기법을 활용하였고 셀별 토양의 이동은 Ferro 등(1998)과 Swift (2000)의 토사전달률(DR)개념을 적용하였다.

개발된 모형은 시험구역의 실측 토사량과의 비교검토를 통하여 검증하였다. 3개의 농업용 저수지 구역에 적용한 결과, Ferro의 토사전달률 산정공식과 MDS, MF 기법을 이용한 해석이 저수지의 운영기록과 가장 유사한 결과를 제시한다는 사실을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 토사이송, 토사전달률, 토사침식 및 퇴적분포

\* 영남대학교 토목도시환경공학부 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Yeungnam Univ., Gyongsan, Gyungbuk 712-749 Korea  
(e-mail: kison@yu.ac.kr)

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 연구목적

유역으로부터의 토사발생은 식생의 파괴 및 훼손 등 지형학적 변화를 초래할 뿐만 아니라 비점오염원으로써 유역의 자연자원 환경에도 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 인위적인 개발은 물론 자연재해로 인하여 발생되는 토사유출에 의한 피해를 최소화하고 대응책을 수립하기 위해서는 토사유출 및 퇴적에 대한 시공간적 예측이 가능하여야 한다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서는 토사이동에 대한 2차원적 해석이 가능하여야 하며 이를 위해서는 분포형 모형내에서 각 셀별 토사 유출을 모의할 수 있는 토사전달률(DR) 산정기법과 유출 방향을 모의할 수 있는 알고리즘 개발이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 분포형 모형에 적합한 토사전달률 산정기법에 대한 검토와 함께 토사유출 및 퇴적분포를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하여 산악지형이 많은 우리나라 지형에 적합한 토사유출 및 퇴적예측 기법을 제시하고자 한다.

본 연구 결과는 국내에 적합한 토사유출 및 퇴적분포 예측기법을 제시함으로써 침사지 위치 및 규모 등 자연적·인위적 재해에 대한 예방책 마련 등 보다 능동적 대책수립을 가능케 할 것이다. 또한 토사의 발생원 및 퇴적위치의 예측을 가능케 함으로써 유역내 수질 및 생태환경에 영향을 미치는 비점오염원 및 영양공급원으로써의 토사이동에 대한 각종 기초자료를 제공하고 토사유출이 유역에 미치는 각종 환경영향을 최소화 할 수 있는 대책을 수립하는 도구로 활용할 수 있을 것이다.

### 1.2. 연구동향

토사전달률(DR)이란 침식된 물질이 유역에서 가장 가까운 하도에 도달할 수 있는 가능성의 척도로 정의된다(Ferro와 Minacapilli, 1995). Ferro 등(1998)은 전 유역에 대한 유출점에서의 전달률( $DR_w$ )과 임의의 지점에서 가장 가까운 하도로 운반되는 토립자를 각 지형학적 면적에 따라 확률적으로 추정된 전달률( $DR_i$ )의 상관관계에서 유역상수  $\beta$ 와 상관계수  $\alpha$  값을 찾아냈다.  $DR_i$ 를 각 소유역별 이송시간의 경험적 누가빈도분포 함수와 유역면적, 지형학적 단위 수, 경사길이, 경사와의 상관관계로부터 식 (1)과 같이 기술하였다.

$$DR_i = \exp(-\beta t_{p,i}) = \exp\left(-\beta \frac{l_{p,i}}{\sqrt{s_{p,i}}}\right) \quad (1)$$

여기서,  $\beta$  = 유역상수 ( $\beta = \frac{-\ln F_i}{t_{p,i}}$ )

$l_{p,i}$  = 소유역의 길이

$S_{p,i}$  = 소유역의 경사

$F_i$  = 경험적 누가빈도수

$t_{p,i}$  = 이송시간의 비초과 확률변수

계수  $\beta$ 는  $T_h > T_c$  인 경우일 때 모델에서 결정하여 사용할 수 있다고 가정하였으며  $T_h$ 는 유역경사에 의해 발생한 토사의 실제 이송능력,  $T_c$ 는 하천흐름에서의 유사이송 능력이다.

$i$  소유역에 해당하는 계수  $\beta_i$ 는 변수  $t_{p,i}$ 의 경험적 누가빈도분포 함수로서 추측할 수 있으며  $DR_i$ 는 침식입자가 가장 가까운 하도로 이송되어질 확률의 척도이다.

$$\beta_i = \frac{-\ln F_i}{t_{p,i}} \quad (2)$$

경험적 누가빈도분포 함수를 사용한 변수  $\beta_i$ 는  $F(\beta_i)$ 에서 0.5의 빈도값을 가지는  $\beta_i$ 의 중앙값인  $\beta^*$ 로서 각 유역의 특성을 나타낼 수 있다. 변수  $1000\alpha\beta^*$ 는 유역면적( $A_w$ )이 커지더라도 0.62의 중앙치를 가진다.

$$\frac{\beta}{\beta^*} = -\frac{\ln(DR_w)}{1000\alpha\beta^*} \quad (3)$$

$DR_w = 5.371A_w^{-0.6953}$  식과  $1000\alpha\beta^*$ 의 중앙치인 0.62를 이용하여 위 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\beta}{\beta^*} = -2.7113 + 1.1214 \ln(A_w) \quad (4)$$

위의 식에서 유역면적  $A_w$ 와  $\beta$ 를 알면  $\beta_i$ 의 경험적 누가빈도분포 함수로서 추정된  $\beta^*$ 의 값을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 Ferro 등(1998)의 DR을 소유역이 아닌 각 셀에서의 이동시간의 함수로 가정하였다.

$$DR_i = \exp\left(-\beta \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{a_i S_i^{0.5}}\right) \quad (5)$$

여기서,  $\beta$  = 유역상수 ( $\beta = \frac{-\ln F_i}{t_i}$ )

$l_{p,i}$  = Cell size or diagonal length  
 $a_i$  =  $i$ 번째 Cell의  $(\lambda_i/s^{0.5})$ 과 중간치 이송시간의 셀이 갖는  $m(\lambda_i/s^{0.5})$ 과의 상관계수  
 $S_i$  =  $i$ 번째 Cell의 경사  
 $F_i$  = 경험적 누가빈도분포 함수  
 $t_i$  = travel time (  $i$ 번째 셀에서 가장 가까운 하도까지의 도달시간(travel time) ; 흐름선상에 존재하는  $m$ 개의 cell을 통과하는 시간을 합한 값)

셀내의 도달시간은 Larension이 제시한 도달시간 공식에서 Manning의 유속이  $S^{1/2}$ 에 비례하는 점에 근거하여 임의의 유역지점에 떨어진 강우입자가 유역출구 지점까지의 흐름경로를 따라서 거리와 경사의 1/2 지수승비를 누가 시킨 것을 도달시간이라고 정의하고 있다(조효섭, 2003).

$$t_{i0} = \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{(S_i)^{1/2}} \quad (6)$$

여기서,  $l_i$  : 격자요소의 흐름길이  
 $S_i$  : 격자요소의 흐름경사  
 $t_{i0}$  : 격자요소의 도달시간

Sun과 McNulty (1998)는 산림조경 개발에 있어서 유사의 이송거리에 기반을 두고 전달률을 계산하였다. 총 유사의 체적을 유사의 평균비중  $1.4g/cm^3$ 을 사용하여 유사의 질량으로 환산하여 사용하였다. 자료의 선택은 Wine Spring유역에서 총 이송 거리에 대한 총 유사의 질량의 함수로 나타냈다( $R^2 = 0.93$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 4$  여기서,  $R^2$ 은 강우침식인자,  $P$ 는 토지 피복인자,  $n$ 은 측정 수) 이러한 관계는 Ketcheson & Megahan에 의해 구축된 많은 자료에서 나타난 것과 같은 관계를 보이고 있다( $R^2 = 0.95$ ,  $P < 0.0001$ ,  $n > 300$ ).

이렇게 주어진 유사의 체적과 질량의 두 관계에서 유사이송의 근사치와 각 셀의 하향경사에 대한 유사의 퇴적을 계산할 수 있다. 다시 말해, 각 셀에서 USLE에 의한 토사유출량을 계산하고 추가적으로 유사의 이송을 계산할 수 있다. 흙의 질량으로부터 유사이송 거리를 계산하여 식(7)로 나타낼 수 있다(Sun과 McNulty, 1995).

$$L = 5.1 + 1.79 * M \quad (7)$$

여기서,  $L$  : 토사발생량이  $M$ 일 때의 최대이송거리(m)  
 $M$  : 셀에서 발생한 토사량(kg)

이 두 과정을 거친 후 침식이 일어나는 각 셀에서 가장 가까운 하도까지의 최소비용거리를 계산하여야 한다. 이렇게 계산된 최소비용거리와 질량이  $M$ 일 때의 최대이송거리와의 관계를 다음의 식으로 나타내었다.

$$M_d = M \times (1 - 0.97 \times D/L) \quad (8)$$

여기서,  $M_d$  : 각 셀에서 가장 가까운 하도망으로 이송된 토사량(tons/acre/yr)  
 $M$  : 셀에서 발생한 토사량(kg)  
 $D$  : 각 셀에서 가장 가까운 하도망까지의 최소비용거리

Swift (2000)는 The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model에 기초를 둔 회귀모형으로 기후와 흙 입자의 구조, 지형학적 특징, 식물군, 지표면의 피복상태 등의 현장조건에 따라 침식율과 토사유출량 및 토사전달 효율에 관한 연구를 수행하였다. 다음 식은 North Carolina 와 Georgia의 산림환경에 적합하게 개발되었다.

$$\begin{aligned}
 DR_e = & 0.9004 - 0.1341(\ln X) - 0.0465(\ln X)^2 \\
 & + 0.00749(\ln X)^3 - 0.0399(\ln Y) \\
 & + 0.0144(\ln Y)^2 + 0.00308(\ln Y)^3
 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $DR_e$  은 토사전달 효율(%),  
 $X$ 는 하도까지의 거리,  
 $Y$ 는 경사도(%). (단,  $X \geq 0$  그리고  $Y \geq 0$ )

### 1.3 연구방법

분포형 모형내에서의 각 셀별 토사발생량 예측을 위해 본 연구에서는 국내에서 가장 보편적으로 활용되고 있는 범용토양손실공식(USLE)을 사용하였다. 침식에 의한 토사발생 후의 토사유출 및 퇴적분포를 예측하기 위한 본 연구에서는 크게 2단계의 연구를 수행하였다. 1 단계에서는 분포형 모형의 각 셀내에서 침식에 의해 발생한 토사가 지형에 따라 다른 셀로 유출되는 유출률을 결정하기 위하여 국내외에서 개발된 기존의 여러 토사(전달률(DR) 산정기법을 실제 유역에 적용한 수치해석학적 결과와 실측한 토사유출량을 비교함으로써 분포형

모형에 적합한 전달률 산정기법의 적용 가능성을 검토하였다. 2단계에서는 각 셀로부터 발생하는 토사 발생량 산정결과와 1단계에서 개발된 토사전달률 산정기법을 연계하여 셀로부터의 토사유출량 및 유출방향을 산정할 수 있는 알고리즘을 개발하고 각 셀에 대한 연속방정식을 적용함으로써 대상유역 전체에 대한 토사유출 및 퇴적분포 산정이 가능한 프로그램을 개발하고자 한다.

## 2. 퇴적분포 알고리즘 개발

퇴적분포 예측은 추적기간에 걸친 모든 유입과 유출은 모든 셀에서 동시에 순간적으로 이루어진다는 기본 가정하에서 개발되었다. 즉, 현실적으로 특정 강우사상 기간동안의 토사발생은 시공적 강우특성에 따라 달라지지만 본 연구에서는 전유역에 걸쳐 동시에 토사의 발생과 유출이 이루어진다고 가정하였다. 질량보존의 법칙에 따른 연속방정식(저류방정식) 의하여 한 셀 'i'에 대하여 유입량과 유출량 그리고 저류량에 대한 관계식은 식 (10)과 같다.

$$\Delta S_i = \left( \frac{I_i^+ + I_i^-}{2} - \frac{Q_i^+ + Q_i^-}{2} \right) \Delta t \quad (10)$$

여기서  $\Delta S_i$ : 셀 'i'에서  $\Delta t$  시간동안 저류된 토사량,  
 $I_i^-, I_i^+$ : 추적기간 시점과 종점의 토사유입유량,  
 $Q_i^-, Q_i^+$ : 추적기간 시점과 종점의 토사유출유량

셀 'i'에 대한 추적기간  $\Delta t$  시간동안 토사의 이송이 정류상태라 가정하면  $I_i^+ = I_i^- = I_i$ ,  $Q_i^+ = Q_i^- = Q_i$  이므로 식(10)은 식 (11) 또는 (12)와 같이 된다.

$$\Delta S_i = I_i \Delta t - Q_i \Delta t \quad (11)$$

$$\Delta S_i = YI_i - YO_i \quad (12)$$

여기서,  $YI_i$ : 토사유입량  
 $YO_i$ : 토사유출량

식(13)은 셀 'i'에서 강우에 의한 토사발생량( $Y_i$ ) 중 토사전달률( $DR_i$ )에 따라 유출된 토사유출량( $YO_i$ )과 상류 셀로부터 셀 'i'로 유입되는 토사유입량( $YI_i$ )의 차가 셀 'i'에서의 토사저류량( $\Delta S_i$ )이 된다는 저류 방정식

이다.

따라서 이동 방향에 따른 각 셀의 토사 유출량은 식 (13)과 같이 유도된다.

$$Y_i \times DR_i = YO_i \quad (13)$$

각 셀의 토사유출량을 흐름방향의 누적값( $accYO_i$ )을 계산한 후 각 셀에 유입하는 토사유입량은 다음 식 (14)와 같이 계산한다.

$$accYO_i - YO_i = YI_i \quad (14)$$

이 때 셀의 토사유입량의 부호가 음(-)인 경우는 유입이 없다는 유역의 최상단 경계조건을 고려치 않아 발생한 수치상의 값으로 물리적인 의미가 없는 값이므로 영(zero)로 처리하여 최종적으로 각셀의 실제 토사유입량( $YI_i$ )값을 산정한다. 각 셀의 토사변화량( $\Delta Y_i$ )은 토사유입량과 토사유출량( $YO_i$ )의 차이로 식(15)와 같이 산정된다.

$$YI_i - YO_i = \Delta Y_i \quad (15)$$

식 (15)에서 산정된 결과 음(-)의 값을 나타내는 셀은 침식된 셀이며 양(+)의 값을 나타내는 셀은 퇴적된 셀을 의미한다. 그림 1은 토사의 변화량을 산정하는 arc/info 프로그램 흐름도이다.

## 3. 개발 알고리즘의 현장적용 및 비교검토

### 3.1 토사발생량 산정

토사발생량 산정을 위해 GIS 환경에서 USLE공식을 적용하였다. 지형인자(LS)를 산정하는 기본식은 Wischmeier와 Smith (1965)의 공식 및 McCool 등(1987, 1989)의 공식, Moore와 Wilson (1992)의 공식을 선택하였으며, 경사장의 개념을 이용한 방법과 면적의 개념을 도입한 방법을 적용하였다. 누적경사장과 Wischmeier와 Smith (1965)의 방법 및 McCool 등(1987, 1989)의 방법은 Hickey 등(1994)의 aml을 통하여 구현하였으며, 기여 면적을 산정하는 방법은 현재 가장 많이 사용되고 있는 일방향흐름(SF) 알고리즘과 다방향흐름(MF) 알고리즘 가운데 Quinn 등(1991)의 방법을 선택하여 적용하였다. 경사도 산정기법은 NBH (Neighborhood Method)와 MDS (Maximum Downhill Slope)방법을 사용하였다.

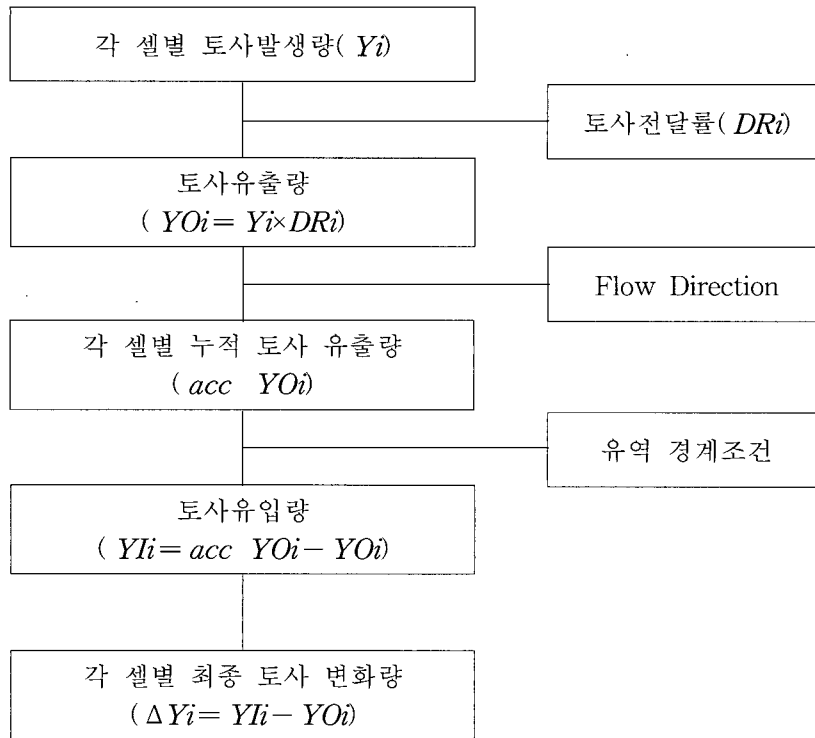


그림 1. 토사유출량 산정 흐름도

### 3.2 토사 퇴적분포 산정

Ferro 등(1998)과 Swift (2000)에 의해 제안된 토사 전달률은 유역이 아니라 셀 단위의 토사전달률을 계산하는 기법으로 분포형 모형에 적합하게 개발되었으며 전절에서 기술한 토사발생량 산정기법과 Ferro 등(1998)과 Swift (2000)의 토사전달률 공식을 준설기록이 있는 농업용 저수지(권이, 송전상, 석계) 유역에 적용하여 실제 준설량과 비교함으로써 그 적용성을 검토하였다.

#### 3.2.1 Ferro 기법 적용

토사가 전달되는 최종지점의 선정에 따라 경사장 등 토사발생량 및 토사전달률이 달라지므로 Ferro 등(1998)의 연구결과를 이용한 토사전달률 산정은 유역의 출구점을 토사유출의 최종 도달점으로 가정하는 경우(Method 1)와 토사발생지점으로부터 가장 가까운 하천을 토사유출의 최종 도달점으로 가정하는 경우(Method 1-1)의 두 가지 해석이 가능하다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 모두 이용하여 해석을 실시하였으나 Method 1-1 기법이 Ferro 등(1998)의 토사전달률 정의에 적합하며 하도 내 토사가 평형을 이룬다고 가정할 경우 하도로 유입되는 토사는 모두 유출되는 물리적 현상과 보다 더 유사하여 본 논문에서는 Method 1-1에 의한 결

과에 대해서만 상세히 기술하였다. 한편, Method 1에 대한 산정결과는 유역으로부터의 총 유출량에 대한 실측치와의 비교 시에만 활용하고 상세한 기술은 생략하였다.

Ferro와 Minacapilli (1995) 및 Ferro 등(1998)의 기법에서는 유역상수( $\beta$ )에 결정이 요구되나 표 1과 같이 각 연구지점에 대한 매개변수 값만을 제시하고 있어 본 연구에서는 계수선정을 위하여 Ferro 등(1998)의 관측자료(표 1 참조)를 이용하여 유역면적과  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 대한 상관관계를 그림 2 및 식(16), (17)과 같이 그림 및 상관관계식의 형태로 유도하였다.

$$\alpha = 0.1412(A_w)^{0.6027} \quad (16)$$

$$\beta = 0.0116A_w^{-0.3516} \quad (17)$$

여기서,  $\alpha$  : 유역의 상관계수

$A_w$  : 유역면적( $\text{km}^2$ )

$\beta$  : 유역상수

비교검토를 위하여 선정된 농업용 저수지유역에 대하여 식(16), (17)을 적용하여 산정된  $\alpha$ ,  $\beta$  값은 표 2와 같다.

표 1. 유역 면적에 따른 각 유역의 특성 인자와  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값

Basin	$A_w(km^2)$	$\mu$	$t_m(m)$	$\alpha(m)$	$\beta^*(m^{-1})$	$\beta$
Casanova	52.3	40	3648.3	2.952	0.00019	0.001358
Celone	85.8	35	2647.3	2.412	0.00025	0.001926
Salsola	43.0	29	2847.6	2.254	0.00024	0.001663
Triolo	53.8	14	2803.8	3.950	0.00023	0.001651
Vulgano	94.0	34	10486.8	9.432	0.00020	0.001561
Ciappetta	10.1	92	633.6	0.420	0.00106	0.005623
Coccarì	9.7	35	779.4	0.626	0.00089	0.004681
Tombino	3.9	31	392.5	0.388	0.00177	0.0075
Valli Cupe	4.9	76	495.9	0.324	0.00142	0.006381
Lordo	12.7	491	353.2	0.37	0.001604	0.008921
Mangiafico	3.22	88	409.5	0.46	0.001304	0.005246
Metramo	19.4	152	356.3	0.34	0.001568	0.009465
Molaro	11.6	370	209.1	0.22	0.002694	0.014709
Pietre Bianche	12.9	551	362.1	0.32	0.001863	0.010394
Salariace	4.1	134	158.1	0.25	0.002636	0.011318
Salito	1.8	50	255.6	0.32	0.001775	0.005983
Salito2	1.0	25	138.3	0.16	0.003219	0.008728
Torbido	2.4	80	328.3	0.32	0.001702	0.006286
Belice D	342.6	293	2598.1	4.01	0.000236	0.002185
Elicona	52.3	81	1525.5	2.83	0.000222	0.001587
Jato	123.0	72	2216.5	2.33	0.000241	0.001954
Mazzarra	109.1	114	1494.3	1.5	0.000419	0.003341
Oreto	108.2	57	1575.8	1.86	0.000373	0.002971
Rosmarino	99.1	97	3056.5	2.17	0.000225	0.00177
Timeto	87.2	136	1025.4	1.15	0.000256	0.001977
Zappulla	139.8	228	1955.1	1.81	0.000340	0.002805

※  $A_w$ : 유역면적,  $\mu$  하천수의 등급,  $t_m$ : 이송시간의 중앙치, 상관계수:  $\alpha$ , 유역상수:  $\beta^*$ (중간치),  $\beta$

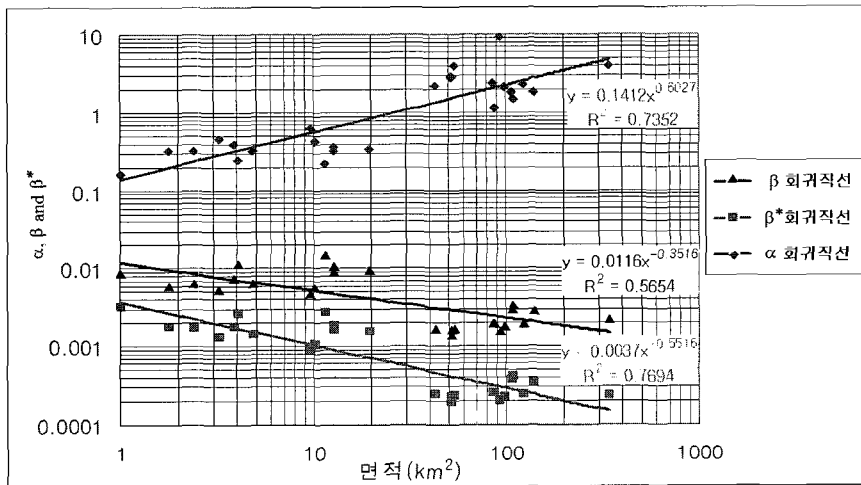


그림 2. 유역면적 (x)과  $\alpha$ ,  $\beta$  및  $\beta^*$ 값 (y)의 상관관계

표 2. 각 유역별  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값

유역	유역면적(km²)	$\alpha$	$\beta$	비고
권이 저수지	6.4	0.432234	0.00676	
송전상 저수지	5.03	0.373826	0.007429	
석계 저수지	5.65	0.400954	0.006135	

그림 3 ~ 5는 Ferro 등(1998)의 토사전달률 계산에 있어 유출된 토사가 가장 가까운 하도에 퇴적된다고 가정한 송전상저수지에 대한 준공이후 1998년까지 30년에 대한 모의해석 결과이다. 그림 3은 토사침식량의 정도 및 분포를 나타낸 것으로 산 능선주변 경사가 가파른 곳을 따라 침식이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 각 셀에서 퇴적이 일어나는 분포를 나타낸 것으로 계곡이나 하도 주위에 퇴적이 발생함을 알 수 있다.

그림 5는 30년 연속으로 발생한 연평균 강우에 의한 송전상 저수지 지역의 토사이동에 따른 지형 고도 변화를 나타낸 것으로 30년 동안 전체적인 지형 변화는 없어 보이지만 그림 내에 원형으로 표시한 부분을 자세히 비교해 보면 침식에 의한 지형변화를 볼 수 있다. 또한 그림으로는 식별이 곤란하나 지역의 유출점 주변의 고도를 수치적으로 비교해 보면 30년간 많은 퇴적이 이루어져 고도가 높아 졌음을 알 수 있다. 이와 같이 유출점에서의 고도가 높아진 현상은 해석 시 유역 외 토사유출을 허용하지 않는다는 가정에 기인한

것으로 판단된다.

### 3.2.2 Swift기법 적용

Swift (2000)의 기법은 토사발생지점으로부터 가장 가까운 하도를 토사유출의 최종 도달점으로 가정하여 개발된 식이므로 식의 기본 이론을 따라 하도를 토사유출의 최종 도달점으로 가정하여(Method 2) 해석을 실시하였다. 그림 6은 송전상 유역의 토사침식량과 그 분포를 나타내고 있으며, 그림 7은 토사퇴적량과 그 분포를 나타내고 있다. 토사전달률 적용 기법에 따른 지형 고도변화의 추세는 그림 3, 4와 그림 6, 7을 비교할 때 분명하나 각 셀에 대한 기법별 적용 우수성에 대한 비교검토는 침식진후에 대한 수치지도가 없어 사실상 곤란한 실정이다. 그러나 그림 3과 6, 그림 4와 7의 침식 및 퇴적 예상치에서 큰 차이를 보이고 있어 전 유역에 대한 토사유출량의 비교를 통해 간접적으로 해석할 수밖에 없으며 이에 대해서는 다음 장에서 상세히 논하였다.

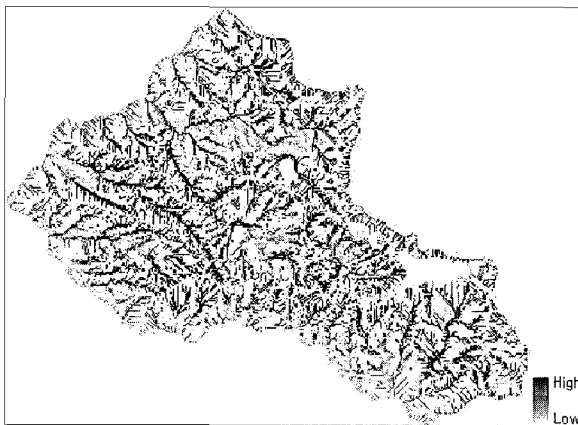


그림 3. Method 1-1에 의한 침식분포도  
(0.85 ~ 0.0 t/year/cell)

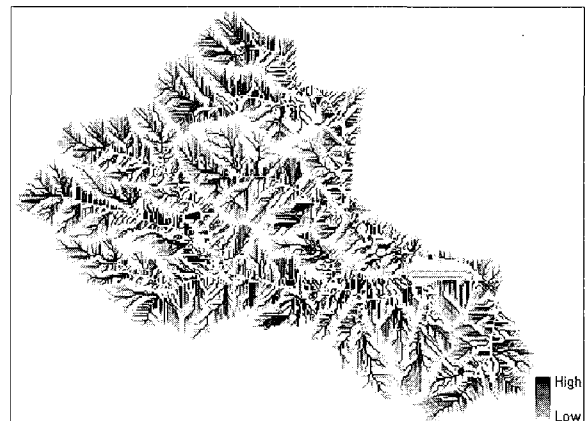


그림 4. Method 1-1에 의한 퇴적분포도  
(10.43 ~ 0.0 t/year/cell)

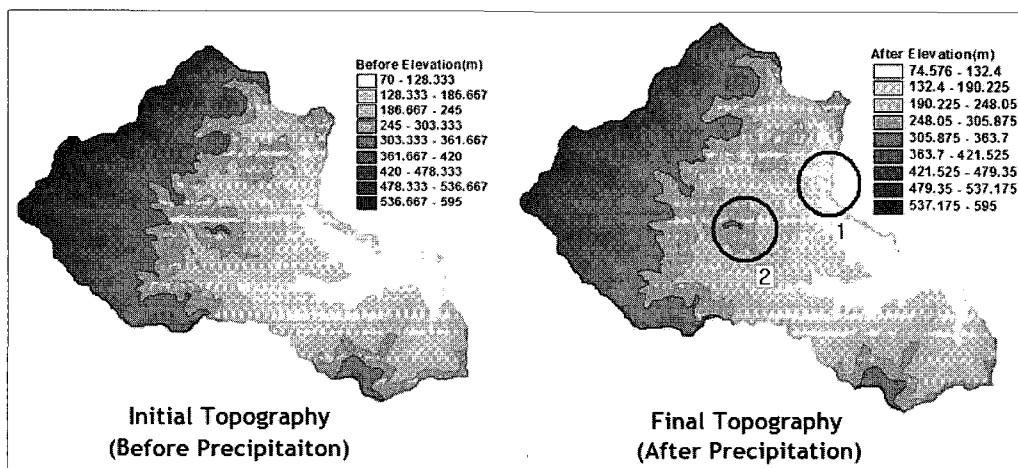


그림 5. 연구기간 전후의 지형변화도(송전상 저수지)

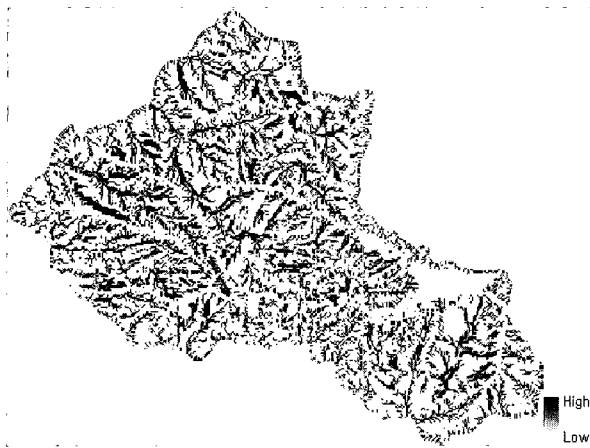


그림 6. Method 2에 의한 침식분포도  
(0.46 ~ 0.0 t/year/cell)



그림 7. Method 2에 의한 퇴적분포도  
(5.81 ~ 0.0 t/year/cell)

### 3.3 비교 검토

국내의 3개 농업용 저수지 유역을 대상으로 본 연구에서 개발된 모형을 이용하여 유역의 침식과 퇴적분포 그리고 총 토사유출량을 산정하고 현장조사 결과 및 현장 실측치와 비교 검토하였다.

유역의 침식과 퇴적분포예측에 대한 검토는 연구기간 전후에 대한 수치지도가 존재할 경우 정량적 분석이 가능하나 대상유역의 수치지도는 1999년 제작된 지도를 2002년 수치지도화 한 것으로 연구기간에 걸쳐 수정 보완된 대상유역의 수치지도가 없는 상태이다. 따라서 정량적인 비교검토가 불가능하여 모형에 의한 침식 및 퇴적이 심하게 발생한 것으로 예측된 지점에 대한 현장조사를 통하여 정성적인 검토를 실시하였다. 송전상 저수지의 경우 그림 5에 나타나는 바와 같이 1과 2 지역에서 심한 침식이 예상되고 있으며 현장 조사결과 두 지역 모두 심한 침식현상을 겪고 있는 것으로 확인되었다.

그림 5의 1 지역의 경우, 상류에는 침한 침식현상이 그림 8과 같이 나타나고 있었으며 하류측에는 그림 9와 같이 사방댐이 설치되어 있어 상류지역에 심한 침식현

상이 지속적으로 발생하는 지역임을 간접적으로 입증하고 있다. 또한 2 지역의 경우(그림 10 참조) 노천광산이 있는 곳으로 이곳 역시 심한 침식현상이 일어나고 있음을 현장조사를 통해 확인할 수 있었다.

그림 11은 30년 연속으로 발생한 연평균 강우에 의한 권이저수지에 유역의 토사이동에 따른 지형 고도변화를 나타낸 그림이다. 3 지역의 경우 우측 고지대의 폭이 좁아진 그림상의 변화를 통해 침식이 일어나고 있음을 알 수 있고 현장조사 결과 그림 12와 같이 3 지역 상류측에는 심한 침식현상이 발생하고 있음을 확인하였으며 그림 13과 같이 침식현장 하류부에 설치된 사방댐을 통해 침식현상이 장기적으로 발생하고 있다는 사실을 간접적으로 확인하였다. 4지역의 경우 저수로 폭이 좁아진 현상을 통해 퇴적이 발생하고 있음을 예측할 수 있으며 그림 14와 같이 해당 현장의 실제 퇴적현상 확인 등을 통하여 본 연구 결과에 대하여 정성적으로 검증하였다.

석계저수지의 경우도 침식과 퇴적현상이 예측되는 현장을 답사한 결과 연구결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었으나 본 논문에는 수록하지 않았다.



그림 8. 1 지역 상류의 침식현상

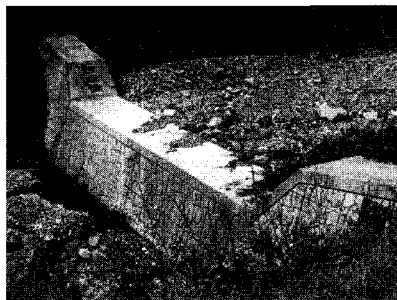


그림 9. 1지역 하류의 사방댐



그림 10. 2 지역 침식현장



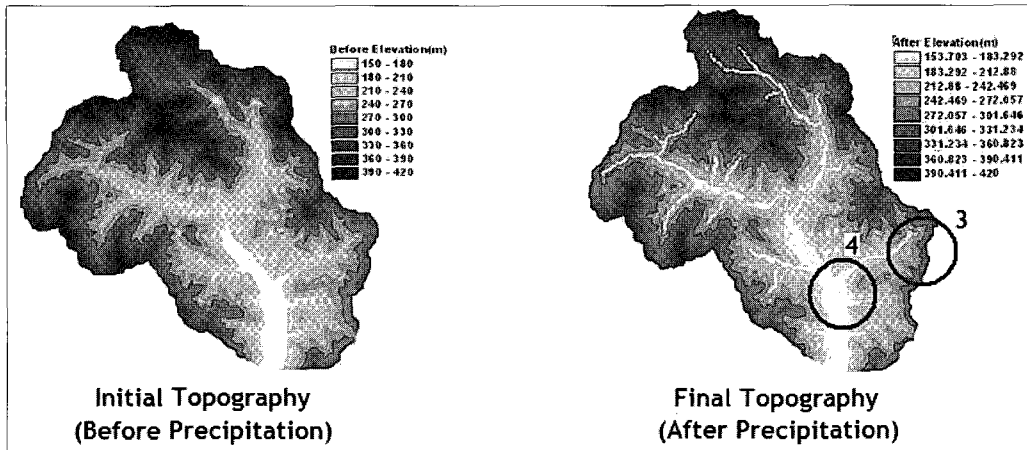


그림 11. 연구기간 전후의 지형변화도(권이 저수지)



그림 12. 3 지역 주변 침식현장

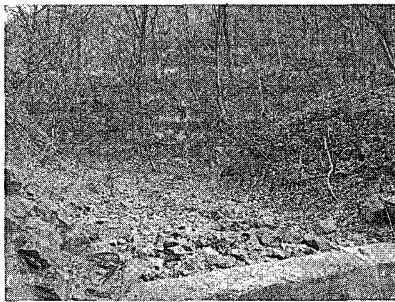


그림 13. 3 지역 하류부의 사방댐

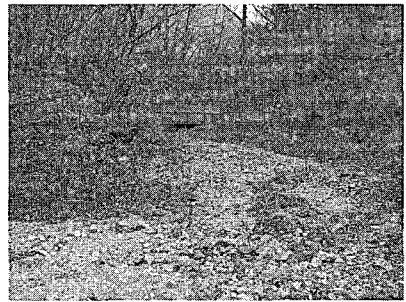


그림 14. 4 지역 퇴적현장

유역으로부터의 총 토사유출량 산정기법에 대한 검토는 준설기록이 있는 유역에 대하여 범용토양손실공식을 이용하여 산정된 예측치와 준설량을 비교함으로써 이루어 졌다. 범용토양손실공식의 변수 중 경사장(L)의 경우 Quinn 등(1991)의 방법을 이용한 다방향 흐름알고리즘(MF)과 GIS 명령어를 통한 일방향 알고리즘(SF)을, 경사도(S)의 산정은 MDS와 NBH기법을, 토사전달률은 Ferro 등(1998)과 Swift (2000)의 기법을 각각 조합하여 적용하였다. 각각의 조합기법에 따라 유역으로부터 발생할 것으로 예상되는 총 토사유출량을 산정한 후 저수지의 준설량과 비교하였다. 그림 15의 Method 1은 Ferro 등(1998)의 토사전달률식을 적용하고 유출토사가 유역의 최종 출구점인 저수지에 모두 퇴적되는 것으로 가정하여 토사유출량을 산정한 방법이다. Method 1-1은 Ferro 등(1998)의 전달률을 적용하였으나 유출토사는 가장 가까운 하도에 퇴적되며 하도에 퇴적된 토사는 100% 유역 출구점으로 이동되는 것으로 가정하여 토사유출량을 산정한 기법이다. Method 2는 Swift (2000)의 토사전달률을 적용하여 토사유출량을 산정한 기법이다.

경사장 산정에 있어서는 경사도 산정기법의 조합에 관계없이 SF기법이 MF기법에 비해 과대한 예측치를

나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 NBH기법을 적용하여 경사도를 산정할 경우 그 편차는 더욱 커짐을 알 수 있다.

Method 1은 권이저수지를 제외하면 예상 토사유출량이 준설량보다 작게 나타나는 경향을 보이고 있을 뿐 아니라 토사전달률의 개념과 물리적 현상을 반영치 못한 기법으로 재해영향 평가 등 안전도를 고려할 경우 실무에서 적용하기에 적합하지 못한 것으로 판단된다. 일반적으로 Method 1-1의 경우 Method 1보다 큰 토사유출량을 예측하고 있으며 그 값은 실제 준설량보다 다소 크게 나타나고 있다. Method 2의 경우 Method 1-1에 비해 작은 토사유출량을 산정하고 있으며 경사장 및 경사도 산정기법에 관계없이 실제 준설량과의 편차는 제일 작으나 준설량보다 작은 토사유출량을 예측하는 경우도 있어 침사지 설계 등을 위한 해석시 주의가 필요할 것으로 사료된다. 특히 본 연구에서는 저수지의 토사포착률이 100%라는 가정하에 준설량과 예상 토사유출량을 비교하여 산정기법의 적용성을 검토하였으나 실제의 저수지 토사포착률은 100%이하이므로 실제 토사유출량은 최소한 준설량과 같거나 크다. 따라서 Method 2의 경우 실제에 비해 과소한 토사유출량을 산정할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

이상의 비교검토 결과, 본 연구에서 실시한 각종 조합에 따른 토사유출량의 산정기법 중 실제와 가장 흡사한 토사의 이송현상 및 이론을 내포하고 있는 기법은

다방향 알고리즘과 MDS기법 그리고 Ferro 등(1998)의 토사전달률을 조합한 기법이 세 저수지의 토사유출량 및 분포 산정에 가장 적합한 것으로 나타났다.

표 3. 산정기법별 각 유역에 대한 예측 토사유출량 값

산정기법			예측 토사유출량(m <sup>3</sup> )		
토사전달률	경사도	경사장	송전상	권이	석계
Method 1	MDS	MF	41643	63258	50919
		SF	54124	95751	69729
	NBH	MF	45904	103334	45571
		SF	105889	266820	73599
Method 1-1	MDS	MF	62274	78921	65728
		SF	79024	96213	87545
	NBH	MF	87288	105302	147681
		SF	136550	251770	224557
Method 2	MDS	MF	51944	56083	55840
		SF	65099	65128	73319
	NBH	MF	49807	49394	106834
		SF	106705	111383	154293
준설량(m <sup>3</sup> )			60000	42000	55000

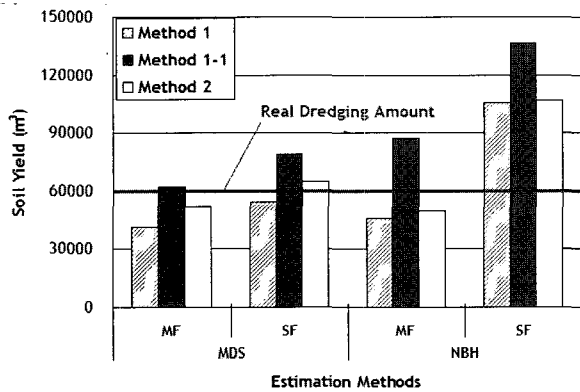


그림 15a. 산정기법별 예측토사발생량 비교 (송전상 저수지 유역)

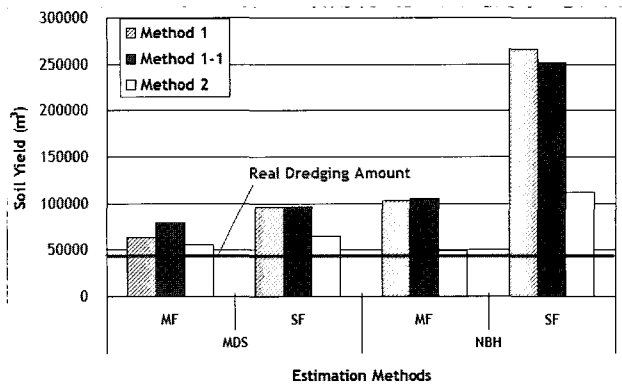


그림 15b. 산정기법별 예측토사발생량 비교 (권이 저수지 유역)

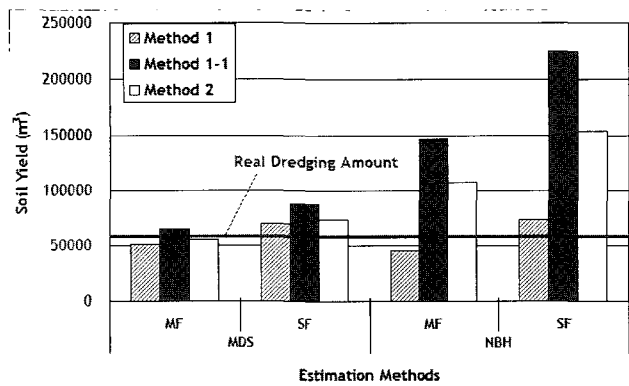


그림 15c. 산정기법별 예측토사발생량 비교 (석계 저수지 유역)

#### 4. 결 론

유역의 토사유출량 산정 및 유역 내 토사 침식 및 퇴적분포 예측을 위한 알고리즘을 개발하였으며 각종 운영기록이 있는 세 개의 농업용저수지 유역을 선정하여 연구결과에 대한 비교검토를 실시하였다.

유역으로부터의 총 토사유출량 예측에 대한 산정기법 검토결과 유출토사는 가장 가까운 하도에 퇴적되며 하도에 퇴적된 토사는 100% 유역 출구점으로 이동한다는 가정 하에 토사유출량을 산정한 method 1-1의 경우 Method 1보다 큰 토사유출량을 예측하고 있으며 그 값은 실제 준설량보다 다소 크게 나타나고 있다. Method 2의 경우 경사장 및 경사도 산정기법에 관계없이 예측편차는 가장 작으며 실제와 근사한 예측치를 제시하고 있으나 침사지 설계 등 방재관련 설계의 경우 과도한 설계치를 제시할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

유역으로부터의 토사유출량에 대해서는 SF 기법이 MF 기법에 비해 항상 과대한 예측결과를 제시하고 있었으며 NBH 기법이 MDS 기법에 비해 큰 값을 산정한다는 사실을 알 수 있다. 준설량과의 단순 비교에 있어서는 MDS 및 MF 기법을 이용한 산정결과가 현장의 실측결과와 가장 유사하게 예측하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 모형을 세 개 유역에 적용하여 심한 침식과 퇴적이 예상되는 지점에 대한 현장조사를 실시한 결과 개발 알고리즘의 침식 및 퇴적분포 예측능력을 정성적으로 확인하였다.

적용된 두 개의 토사전달률 산정기법 모두 침식 및 퇴적분포를 정성적으로 잘 예측하였다. Swift (2000) 기법의 경우 경사장 및 경사도 산정기법에 관계없이 비교적 일정한 예상치를 제시하였으나 준설량보다 작은 값을 예측하는 경우가 있는 반면 Ferro 등(1998)의 기법은 보다 안전한 설계치를 제시하는 것으로 판단되나 일반적인 결론을 위해서는 더 많은 유역에 대한 검증이 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지역대학우수과학자 연구비 지원사업(과제번호 R05-2002-000-00766-0)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

조효섭 (2003). GIS를 이용한 등시간도 작성의 평가, 한국수자원학회 논문집, 제 36권 6호, pp. 925-936.

- Ferro, V., and Minacapilli, M. (1995). "Sediment delivery processes at basin scale." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 40, No. 6, pp. 703-717.
- Ferro, V., Porto, P., and Tusa, G. (1998). "Testing a distributed approach for modelling sediment delivery." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 43, No. 3, pp. 425-442.
- Hickey, R, A. Smith, and P. Jankowski (1994). "Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID: Computers." *Environment and Urban Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 365-380.
- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mutchler, C.K., and Meyer, L.D. (1987). "Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation." *Transactions of the ASAE*, Vol.30(5): Sep.-Oct., pp. 1387-1396.
- McCool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K., and Meyer, L.D. (1989). "Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation." *Transactions of the ASAE*, Vol.32(5): Sep.-Oct., pp. 1571-1576.
- Moore, I.D., and Wilson, J.P. (1992). "Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation." *J. Soil and Water Cons.* 47(5), pp. 423-428.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using Digital Terrain Models." *Hydrological Processes*, Vol 5, pp 59-79.
- Sun, G., and McNulty, S.G. (1998). Modeling soil erosion and transport on forest landscape, *Southern Global Change Program USDA Forest Service* 1509 Varsity Dr. Raleigh, NC 27606. pp. 189-198.
- Swift, L.W. Jr. (2000). Equation to dissipate sediment from a grid cell downslope. *USDA Forest Service*
- Wischmeier W.H., and Smith, D.D. (1965). Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains. US. Dep. Agric., Agricultural Research service. *Agricultural Handbook*. No. 282
- (논문번호:04-64/집수:2004.06.22/심사완료:2005.02.22)