

# 분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구

윤용남\*, ○김용태\*\*, 박무중\*\*\*, 김재형\*\*\*\*

## 1. 서론 및 연구배경

본 연구에서는 최근 국내에서 많이 적용하고 있는 USLE(Universal Soil Loss Equation)공식과 분포형 모형(distributed model)을 이용하여 경기도 지역에 위치한 농업용 저수지 유역의 토양침식량과 저수지로 유입되는 토사량을 예측하였다. 총괄형 모형(lumped model)의 매개변수 산정시 여러 가지 유역특성의 공간적인 이질성을 고려하기 어려웠던 사항을 해결하기 위해 분포형 개념의 모형(distributed model)을 도입하여 총괄형 모형에서 고려하기 어려웠던 매개변수의 공간적인 이질성을 고려하였고, 그리드(grid)를 이용함으로써 셀(cell)에서 인접 셀(cell)로의 유사 추적(sediment routing)도 가능하도록 모형을 구성하였다. 또 분포형 모형을 적용할 때 발생하기 쉬운 그리드 크기에 따른 스케일 영향(scale effects)에 대하여 분석하였으며 유사 추적시 C1이라는 보정계수를 도입하여 저수지 퇴사량 실측자료와 모형 보정을 실시하고 유역 특성인자와의 상관 분석을 실시하여 C1값의 실제 유역 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. USLE공식의 매개변수 추정

USLE공식은 식 (1)과 같이 매개변수들의 단순한 곱으로 이루어져 있어 적용이 상대적으로 용이하다는 장점이 있지만 큰 유역에 적용할 때는 균일한 소구역으로 나누어 적용하는 것이 바람직하다.

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

본 연구에서 적용한 각 매개변수의 산정기법은 다음과 같다.

### 2.1 R (Rainfall Erosion Index : 강우 침식지수)

이 인자는 정상년 강우의 평균 침식 능력을 나타내는 것으로서 연평균 개념으로 사용되며 한 호우사상에 대하여도 여러 가지 연구를 통해 그 값을 구하는 방법이 개발되었지만 USLE공식의 개발 특성상 연평균 값들에 비해 그 신뢰성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 우리 나라에서는 정필관 등(1983)이 기상청 산하 51개 관측소의 6~21년간의 자료를 이용하여 R값( $10^7 J/ha \cdot mm/hr$ )을 계산하였는데, 건설부(1992)에서는 그림 1과 같은 우리 나라 등R선도를 제시한바 있다.

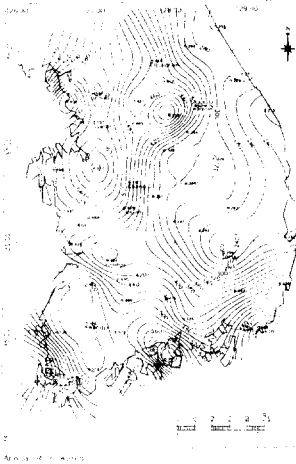


그림 1. 우리 나라 연평균 R값의 분포도(단위 :  $10^7 J/ha \cdot mm/hr$ )

### 2.2 K (Soil Erosivity Factor : 토양 침식인자)

K값의 추정에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있으며 국내에서는 크게 Wischmeier 등(1971)의 추정도표법, Erickson(1977)이 제안한 삼각도표법, 그리고 개략토양도를 이용한 추정법(건설부, 1992)이 많이 이용되고 있는 것으로 조사되었는데 가용 자료의 보유 여부에 따라 적절한 방법을 선택하되 미국에서 제시된 도표나 공식은 영미단위계로 계산되므로 주의하여야 한다. 본 연구에서는 건설부(1992)에서 제시한 개략토양도를 이용하여 K값을 추정하였다.

### 2.3 LS (Length - Slope Factor : 경사면의 길이 - 경사 인자)

적용 지역의 경사길이와 경사도에 따른 토양침식량을 보정하는 무차원 인자로LS인자를 구하는 방법은 다음과 같으며 균일한 사면에 대해 잘 맞는 것으로 알려져 있으므로 불균일한 유역단위에 적용할 때에는 균일한 사면구간으로 나누어 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

#### 1) Wischmeier 등(1965)이 제안한 방법

$$LS = \left( \frac{\ell}{72.6} \right)^m \left( \frac{65.41s^2}{s^2 + 10000} + \frac{4.56s}{\sqrt{s^2 + 10000}} + 0.065 \right) \quad (2)$$

여기서,  $\ell$  = 경사길이(ft),  $s$  = 경사(%), 그리고  $m$  = 경사에 따른 계수 ( $s > 5\%$  : 0.5,  $3.5 < s < 4.5\%$  : 0.4,  $1 < s < 3\%$  : 0.3,  $s < 1\%$  : 0.2)를 나타낸다.

#### 2) Williams 등(1972)이 제안한 방법

이 방법은 식 (1)에서 제시한 방법과 동일한 개념이며 식 (3)과 같이 8.52라는 계수를 이용하여 식 (2)을 간략화한 것이므로 두 공식 모두 적용시 별 차이가 없다.

$$LS = 8.52 \left( \frac{\ell}{72.6} \right)^M (0.0076 + 0.0053s + 0.00076s^2) \quad (3)$$

여기서,  $\ell$  = 경사길이(ft),  $s$  = 경사(%), 그리고  $M$  = 경사에 따른 계수( $s < 4\%$  : 0.5,  $3 < s < 4\%$  : 0.4,  $s < 3\%$  : 0.3)를 나타낸다.

\* 고려대학교 토목환경공학과 교수  
 \*\* 한국건설기술연구원 수자원환경부 연구원  
 \*\*\* 한서대학교 토목공학과 전임강사  
 \*\*\*\* 고려대학교 토목환경공학과 대학원 박사수료

3) Renard 등(1993)이 제시한 방법

이 방법은 RUSLE공식에서 주로 적용하며 기존의 USLE공식에서 경사인자 산정기법을 수정하여 다음과 같이 표현하였으며 경사길이 15ft이상에서 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03, & \sin \theta < 0.09 \\ S = 10.8 \sin \theta - 0.5, & \sin \theta \geq 0.09 \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 경사각을 의미한다. 경사길이 인자에 대해서도 식 (5)과 같이 약간의 수정을 가하여 식 (4)에서 구해진 S인자와의 곱으로 LS인자를 구할 수 있다.

$$L = \left( \frac{\lambda}{72.6} \right)^m \quad (5)$$

식 (5)에서,  $m = \frac{\beta}{1 + \beta}$ ,  $\beta = \frac{11.16 \sin \theta}{3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$ , 그리고  $\lambda$  = 평면에 투영된 사면의 길이(ft)를 나타낸다.

2.4 C (Cover Factor : 피복인자)

피복인자 C는 농경이나 토양의 관리기법이 침식에 미치는 영향을 반영하는 무차원 인자로서 나대지에서 토양침식량에 대한 임의의 작물이나 토양 덮개조건에서의 토양침식량의 비로 정의된다. 본 연구에서는 작물의 종류와 토지 이용상태에 따라 표 1과 같이 수표면, 도시지역, 숲, 논, 과수원, 밭, 그리고 나대지 등 몇 개의 비슷한 부류로 나누어 교란 정도에 따라 일정 범위의 값을 부여하여 적용하였다.

표 1 전형적인 토지 이용에 따른 C 대표값

Code	토지 이용상태	대표값의 범위	비 고
1	수표면(Water Surface)	0.0	
2	도시지역(Urban)	0.001	교란 정도에 따라
3	숲(Forest)	0.001~0.1	적절한 값
4	논(Rice Field)	0.1~0.2	을 사용할 수 있다.
5	과수원(Orchard)	0.2~0.6	
6	밭(Patch or Farm)	0.1~0.3	
7	나대지(Bare Soil)	1.0	

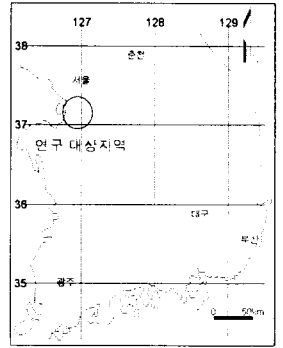
2.5 P (Erosion Control Practice Factor : 토양 보존 대책인자)

토양 보존대책인자 P는 어떤 토양 보존대책을 수립한 사면의 상하방향 경사지로부터의 토양 유실과 아무런 대책도 세우지 않은 사면에 대한 토양 유실량의 비로 정의된다. 이것은 경작, 등경사 경작, 등경사 경작, 농경지의 조도 등의 효과가 토양 침식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 도입된 무차원 인자이다. 이러한 영향을 정량화하기 위하여 Wischmeier 등(1978)에 의해 제안된 바 있는 도표를 이용하여 P인자를 추정하였다.

3. 분포형 모형의 적용

3.1 대상 유역의 선정

본 연구에서는 모형의 보정과 검정을 위해 전국에 분포된 농지개량조합 관리 저수지 중 경기도 지역에 위치한 10개의 저수지를 선정하여 퇴사량 자료 및 각 저수지 유역의 특성 제원(서승덕 등, 1988)을 수집하였다. 그림 2는 연구 대상유역 위치를 표시한 것이고 표 2는 10개 저수지 및 이들 저수지 유역의 특성 제원을 나타낸 것이다. 표 2에서 비퇴사량( $m^3/km^2/yr$ )은 저수지 건설이후 저수지에 퇴적된 토사의 총 퇴적량( $m^3$ )을 저수지 경과년수로 나누어 유역 평균하여 구한 것이고 비유사량( $t/km^2/yr$ )은 비퇴사량에 포착율(%)을 곱한 후 단위증량( $t/m^3$ )으로 나누어 구한 것이다(건설부, 1992).



3.2 그리드 크기에 따른 영향

본 연구에서는 유역 내 여러 가지 특성 인자의 공간적인 분포를 최대한 고려하기 위하여 유역을 일정한 정방형(square)의 그리드(grid)로 나누어 토양침식량을 구하였다. 유역을 그리드(grid)로 나누어 분석을 할 때 그리드의 크기가 유역의 토양침식량 산정에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 분석을 통하여 적절한 그리드 크기를 선정하였다. 분석 대상 유역은 3.1절에서 선정한 저수지 가운데 유역면적이 가장 큰 기흥 저수지 유역으로서 1:25,000 지형도에서 그리드 크기가 100m이고 셀(cell)의 수가 12×12개인 표본

그림 2. 선정된 저수지의 위치

표 2. 경기도 지역의 농업용 저수지 특성 제원

특성	저수지	유역 특성									
		어천 (1)	동방 (2)	먹우 (3)	반월 (4)	충부 (5)	왕송 (6)	낙생 (7)	기흥 (8)	원천 (9)	백운 (10)
지 역	명	화성	화성	화성	화성	시흥	시흥	용인	용인	수원	시흥
실 치	년 도	1956	1939	1945	1957	1945	1948	1961	1957	1929	1951
유 역 면 적	( $km^2$ )	3.80	6.28	8.3	12.20	13.2	15.60	19.5	53.00	9.33	10.20
주 하 천 장	(km)	2.3	3.1	4.4	4.3	5.4	5.0	6.4	13.6	5.6	4.9
유 역 주 변 장	(km)	8.9	10.6	12.6	15.5	15.0	15.6	19.0	34.4	13.5	14.5
수 계 빈 도	( $\text{個}/km^2$ )	1.57	1.27	1.45	0.90	0.76	0.83	0.92	0.77	1.39	0.88
수 계 밀 도	( $km/km^2$ )	1.63	1.10	1.67	1.17	1.58	1.13	1.15	1.19	1.50	1.90
형 상 계 수		0.72	0.65	0.43	0.66	0.45	0.62	0.48	0.29	0.30	0.42
비퇴사량	( $m^3/km^2/yr$ )	3803.0	3810.0	1420.0	1461.8	638.4	1050.4	865.8	138.4	996.0	906.8
포 착 율	(%)	93.0	95.0	92.0	92.0	65.0	93.0	86.0	65.0	95.0	65.0
단 위 증 량	( $t/m^3$ )	1.31	1.31	1.32	1.31	1.32	1.31	1.31	1.31	1.32	1.31
비유사량	( $t/km^2/yr$ )	5359.3	5253.8	2037.4	2081.6	1296.4	1484.0	1318.8	278.9	1384.3	1831.6
비 고		C	C	C	C	C	C	C	C	V	V

화시켜가며 USLE 공식의 매개변수를 구하였다.

1) R

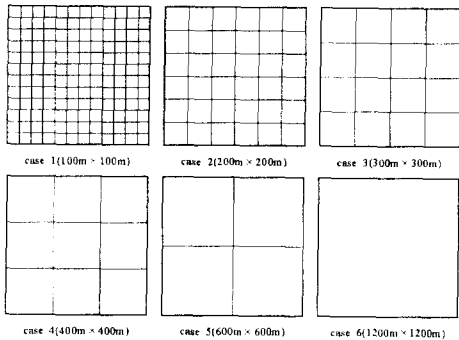
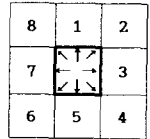
그림 1을 이용하여 기흥 저수지 지점의 연평균 R값을 읽는다. 저수지 유역의 경우 일반적인 유역보다 유역면적이 상대적으로 작으므로 유역내에서는 R값이 공간적으로 변하지 않는다고 보았다.

2) K

1:50,000 개략 도양도에서 각 셀의 토양명을 행렬의 형태로 입력한 후 건설부(1992)에서 제시한 값을 근거로 각 셀의 K값으로 변환하여 분석에 이용하였다.

3) LS

중력법칙에 의하여 물은 고도가 높은 지점에서 고도가 낮은 인근 지점으로 흐르므로 격자내에서의 유수 이동을 모의하기 위해서 격자의 변방향과 대각선 방향으로 구분하여 LS인자를 구하였다. 즉, 그림 4와 같이 LS값을 구하고자 하는 셀(cell)의 고도와 인근 8개의 셀 고도를 비교하여 고도가 낮은 방향으로 물이 이동한다고 가정하고 총 8개의 방향으로 모의하였다.



4) C

1:25,000 지형도에 격자망을 중첩하여 표 1 그림 4. 흐름과 같이 7가지 형태의 토지 이용상태를 각 방향의 결정셀별로 추출한 후 C값으로 변환하여 사용하였다.

5) P

Wischmeier 등(1978)이 제안한 도표를 기준으로 국내의 경우 밭이나 과수원은 주로 등고선을 따라 경작을 하므로 "contouring", 논은 대부분 계단식의 형태로 경작하므로 "terracing"에 속한다고 보고 각 셀의 경사도에 따라 값을 부여하였다. 그리고 숲이나 나대지 등 토양을 보존하기 위한 특별한 대책을 수립하지 않은 곳에 대해서는 1을 부여하였다.

그림 3. 표본내 그리드의 크기 변화

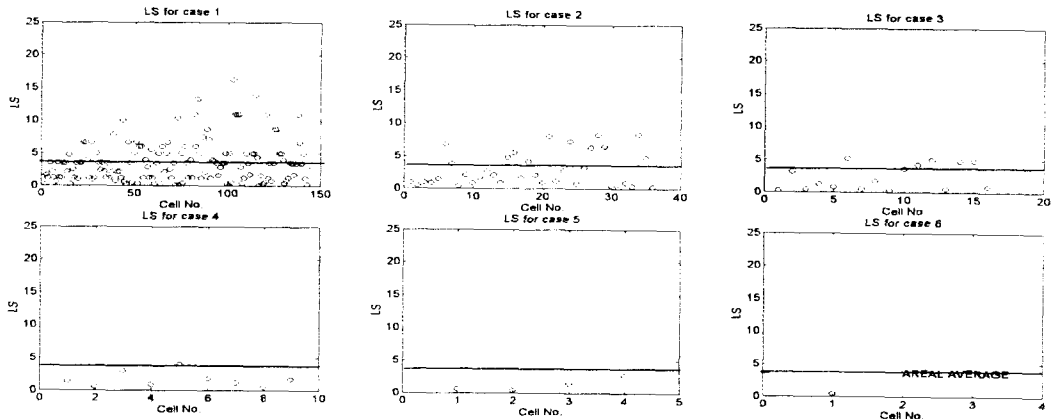


그림 5. 그리드 크기에 따른 LS값 분포 예(sample 2)

3.2.2 그리드 크기에 따른 토양침식량 추정치의 변화

그리드의 크기가 커짐에 따라 K, C, 그리고 P는 대부분 유역 평균을 중심으로 특정한 분포를 보이지 않지만 LS인자는 그리드의 크기가 커짐에 따라 평균값보다 큰 LS값의 분포가 줄어들고 있음을 관찰할 수가 있다. 즉, 그림 5에서 알 수 있듯이 그리드의 크기가 커짐에 따라 평균 LS값보다 큰 값의 빈도가 작아지고 있다. 이는 그리드의 크기가 커짐에 따라 셀 내의 동질성이 감소함으로 인한 현상으로 사료된다. 그리드의 크기가 100m 일 경우(case 1) 셀 내의 토지이용이나 경작상태, 그리고 지형적인 특성이 거의 비슷하다고 가정하고 그리드의 크기가 100m일 때의 토양침식량을 기준으로 각 경우에 대한 비율을 구해 보면 그림 6과 같다.

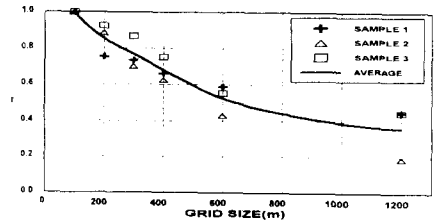


그림 6. 그리드 크기 100m에 대한 토양침식량비(r)

### 3.3 유사 전달을 계산

유역에서 추정된 토양침식량은 그 전량이 유역 출구를 통해서 빠져나가지는 않으므로 적절한 방법을 통해서 침식된 토사의 유역 출구에 대한 전달율을 고려하여야 저수지나 댐 등으로 유입하는 토사의 양을 예측할 수가 있다. 본 연구에서는 침식된 토사가 유수에 의해 낮은 곳으로 이동한다는 원리와 침식된 토사의 이동을 방해하여 퇴적시키는 요인은 주로 숲이나 울타리 또는 기타 잡목들이라는 가정으로 침식된 토사의 이동을 모의하였다. 그 외에 침식된 토사의 이동에 영향을 미치는 기타 인자들은 C1이라는 보정계수를 사용하여 실측된 저수지 퇴사량 자료와 모형 보정을 통해서 고려하였다.

$$S_i' = \text{AREA}_i \cdot (R_i \cdot K_i \cdot \text{LS}_i \cdot C_i \cdot P_i) \quad (6)$$

식 (6)에서  $R_i$ ,  $K_i$ ,  $\text{LS}_i$ ,  $C_i$ , 그리고  $P_i$ 는 2절에서 소개한 매개변수와 같으며  $\text{AREA}_i$ 는 각 셀의 면적(ha),  $S_i'$ 는 각 셀내에서 발생한 토양침식량(t/yr)을 나타낸다. 각 셀(i)의 유사 전달율(DR<sub>i</sub>)는 앞에서 언급한대로 식 (7)과 같이 각 셀에서 침식된 토사의 전달을 방해하는 인자의 비와 모형 보정계수 C1의 곱으로 정의할 수 있다 (Kothyari 등, 1996).

$$\text{DR}_i = C_1 (1 - \text{FA}_i) \quad (7)$$

C1은 실측치와의 모형 보정을 통해 결정되는 상수로서 본 연구에서 매우 중요한 의미를 가진다. USLE공식에 의해 추정된 토양침식량은 강우나 지표류 그리고 세류에 의한 토양침식량이므로 하상의 세굴이나 퇴적 등을 고려하기 어렵다. 또 침식된 토사가 이동할 때 발생하는 여러 가지 현상 등을 (1-FA<sub>i</sub>)항 하나로 표현하기에는 무리가 따르고 또 하천에서의 토사 이동은 유역에서의 이동과 그 특성이 다르므로 실측치와의 모형 보정을 통해 결정된 C1값은 침식된 토사의 유역 출구로의 복잡한 이동 현상을 일축할 수 있는 중요한 계수이다. 식 (7)에서 DR<sub>i</sub>는 각 셀내의 유사 전달율을 의미하므로 유역 출구에 대한 한 셀의 유사 전달율은 물의 이동경로에 따라 달라질 것이다. 따라서 한 셀에서 침식된 토사가 인접셀로 전달되면서 유역 출구까지 이동하는 동안 퇴적되는 현상 등을 모의하기 위한 유역출구에 대한 각 셀의 유사 전달율은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다(Kothyari 등, 1996).

$$\text{DR}_i' = \text{DR}_i \cdot \text{DR}_{i-1} \cdot \text{DR}_{i-2} \cdots \text{DR}_{i-N} \quad (8)$$

여기서, DR<sub>i</sub>' = 각 셀의 유역출구에 대한 유사 전달율, N = 전체 셀의 개수를 의미한다. 결과적으로 유역에서 발생한 토양침식량중 유역출구에 도달한 토사의 양(S)은 식 (9)와 같이 각 셀의 토양침식량(S')과 유역출구에 대한 각 셀의 유사전달율(DR<sub>i</sub>')의 곱을 합한 것과 같다. 즉,

$$S = \sum_{i=1}^N \text{DR}_i' S_i' \quad (9)$$

따라서 유역 출구에서 측정된 토사의 양과 식 (9)에서 계산된 값과의 오차가 최소일 때 결정된 C1값은 모형의 오차를 최소로 하는 모형 보정계수가 된다.

이와 같은 방법은 Kothyari 등(1996)에 의해 인도의 Karso유역에 적용된 바가 있는데 본 연구에서는 숲의 비율뿐만 아니라 기타 토사의 이동에 영향을 주는 인자를 고려하였고 또 Kothyari 등(1996)이 한 유역에 대한 단기간의 호우사상을 이용하여 모형보정을 실시한 반면 본 연구에서는 각각 다른 여러 유역의 연평균 저수지 실측퇴사량을 이용하여 모형을 보정함으로써 유역의 연평균 토사유출량을 추정하였으며 C1값이 유역의 여러 가지 특성인자와 직접적인 관계가 있을 것이라 판단하여 C1값과 유역 특성인자와의 상관분석을 실시하였으며 그 결과를 이용하여 모형의 적용 가능성을 검토하였다.

### 3.4 대상 유역의 적용

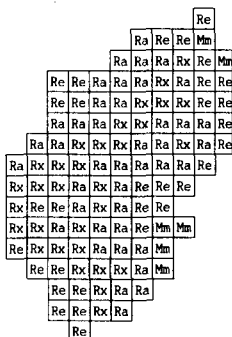
#### 3.4.1 대상 유역의 USLE공식 매개변수 추정

##### 1) R

표 3. 분석 대상 저수지 유역의 연평균 R값 (단위 : 10<sup>7</sup>J/ha · mm/hr)

유역	어천	동방	떡우	반월	충부	왕송	낙생	기흥	원천	백운
R	557	570	560	560	550	560	557	520	560	565

##### 2) K



##### 3) LS

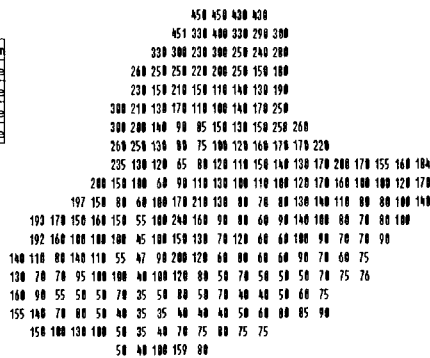


그림 7. K값 추정을 위한 개략 토양도(동방 저수지 유역)

그림 8. LS값 추정을 위한 각 격점의 고도 (m)(반월 저수지 유역)

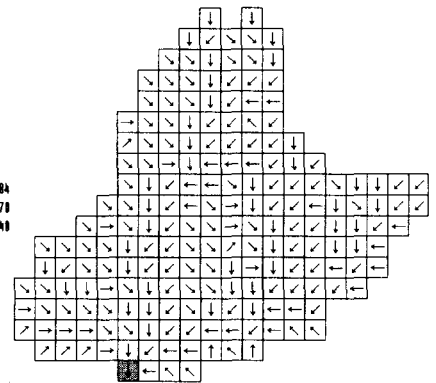


그림 9. 각 셀의 흐름 방향(반월 저수지 유역)

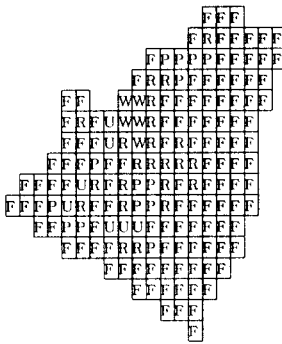


그림 10. C값 추정을 위한 토지 이용도(반월 저수지 유역)

퇴사량과 비교하면 표 5과 같다.

실측치와 예측치간의 오차를 최소로 하는 C1값을 이용하여 구한 저수지 토사유입량 예측치는 실측치와 거의 근사한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 방정식의 최적해를 구하였기 때문에 나온 결과로 사료된다. 이러한 방법으로 8개 저수지 유역(어천, 동방, 맥우, 반월, 중부, 왕송, 낙생 그리고 기흥)에서 모형 보정을 통하여 구해진 C1값과 유역 특성과의 상관관계를 분석하여 그 결과를 원천과 백운 저수지 유역에 적용함으로써 저수지의 연평균 토사 유입량을 예측할 수 있다. 우선 C1값과 표 2에서 제시한 유역의 특성과의 회귀분석을 실시함으로써 표 6과 같이 상관관계를 구하였다.

표 6. 여러 가지 유역특성과 C1과의 상관계수(r) 비교

비 고	유역면적 (x1)	주하천장 (x2)	유역주변장 (x3)	수계빈도 (x4)	수계밀도 (x5)	형상계수 (x6)
상용대수 취함	0.24	0.32	0.33	0.465	0.664	

표 6에서 알 수 있듯이 C1은 한가지 유역특성에만 관계된 것이 아니라 여러 가지 유역특성들과 복합적인 관계가 있다. 그런데 유역면적, 주하천장, 유역주변장은 서로 의존적인 유역특성이므로 유역특성중 C1과 비교적 상관계수가 높다고 판단되는 유역면적과 수계빈도를 이용하여 표 7과 같이 다중회귀분석을 실시하여 C1과의 관계를 살펴보았다. C1과 유역특성과의 다중회귀모형을 지수식의 형태로 표현하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = 1.253 x_1^{-0.035} x_4^{0.035} \quad (11)$$

유역면적, 주하천장, 그리고 유역주변장은 C1값과 음의 상관관계를 보였으며 수계빈도, 수계밀도, 그리고 형상계수 등은 C1값과 양의 상관관계를 보이는 것을 알 수 있다. 유역 특성과 C1과의 단순 및 다중회귀분석을 통해 구해진 원천, 백운 저수지 유역의 C1값과 USLE공식으로 구한 각 셀의 토양침식량을 흐름방향으로 유사 추적을 실시한 결과 표 8과 같이 저수지의 연평균 토사유입량을 예측할 수 있었다. 표 8에서 보는 바와 같이 분포형 개념을 바탕으로 한 USLE공식과 유사 추적모형을 이용하여 예측한 저수지의 토사 유입량은 실측치와 10~140% 내외의 오차를

4) C(W:Water,U:Urban,F:Forest,R:Rice Field,O:Orchard,P:Patch,B:Bare Soil)  
5) P

LS 인자를 구하는 프로그램에서 추출한 각 셀의 경사와 4)에서 구한 토지 이용도, 그리고 표 2를 이용하여 각 셀의 P값을 구하였다.

### 3.4.2 모형의 보정과 유사 전달율

USLE공식으로 추정된 각 유역의 유효 토사유출량을 이용하여 절대 오차를 최소화하는 C1값을 수치적으로 계산할 수 있다. USLE공식으로 추정된 토양침식량으로 유사추적을 실시한 오차가 최소화된 최적 예측치와 각 저수지에서 측정된 연평균

연평균 토양침식량은 각 셀의 토양침식량

표 4. USLE공식으로 추정된 각 유역의 토양침식량

유역명	연평균 토양침식량 (t/year)	연평균 비침식량 (t/km <sup>2</sup> /year)
어 천	41897.1	11025.5
동 방	40510.6	6450.7
맥 우	31344.9	3776.5
반 월	103981.1	8523.0
중 부	48207.0	3656.6
왕 송	44931.4	2880.2
낙 생	82341.4	4222.6
기 흥	117137.3	2210.1
원 천	25010.3	2680.6
백 운	77213.2	7564.9

표 5. 실측치와 예측치의 비교

유역명	실측퇴사량 (t/yr)	최적예측치 (t/yr)	절대오차 (t/yr)	상대오차 (%)	최적C1값
어 천	20365.3	20370.3	5.0	0.02	1.210
동 방	32993.9	32970.7	23.2	0.07	1.199
맥 우	16910.4	16949.3	38.9	0.23	1.177
반 월	25395.5	25413.1	17.6	0.07	1.145
중 부	17112.5	17191.3	78.8	0.46	1.139
왕 송	23150.4	23223.3	72.8	0.31	1.122
낙 생	25716.6	25863.5	146.9	0.57	1.116
기 흥	14781.7	14742.6	39.1	0.26	1.088

주) 절대오차 (t/yr) = | 예측치 - 실측치 |

$$\text{상대오차(\%)} = \frac{(\text{예측치} - \text{실측치})}{\text{실측치}} \times 100$$

표 7. 유역특성과 C1의 다중회귀 분석 결과

$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$r_{v1}$	$r_{v1}$	$R^2$
0.098	-0.035	0.035	-0.968	0.883	0.962

표 8. 원천, 백운 저수지 유역의 실측치와 예측치 비교

유역	회귀식	C1 ~ x1	C1 ~ x2	C1 ~ x3	C1 ~ x4	다중회귀	
원천	C1	1.163	1.139	1.160	1.190	1.172	
	예측치(t/yr)	22458.9	16407.2	21593.6	31992.6	25269.7	
	실측치(t/yr)						12874.0
	절대오차(t/yr)	9584.9	3533.2	8719.6	19118.6	12395.7	
	상대오차(%)	74.5	27.4	67.7	148.5	96.3	
백운	C1	1.158	1.148	1.153	1.130	1.150	
	예측치(t/yr)	20449.7	19293.4	19863.5	17366.5	19519.5	
	실측치(t/yr)						18682.0
	절대오차(t/yr)	1767.7	611.4	1181.5	1315.5	837.5	
	상대오차(%)	9.5	3.3	6.3	-7.0	4.5	

주) 실측퇴사량 : 표 2에서 비유사량(t/km<sup>2</sup>/yr) × 유역면적(km<sup>2</sup>)

보였다. 일반적으로 토양 침식이나 유사 분야의 예측에 있어서 100% 이상의 오차는 흔히 있는 경우인데, 그 이유는 여러 가지가 있겠지만 자연적인 침식현상 자체가 복잡하고도 예측이 어렵고 또 인간의 활동 즉 골재 채취, 개발 사업 등에 의한 변수 외적인 요인이 결과에 영향을 미치기 때문이다.

#### 4. 결론

지금까지 수행한 각 항목별 분석을 요약·결론하면 다음과 같다.

- 1) USLE공식의 매개변수는 미국의 농경지를 대상으로 산정되었으므로 국내 유역에 적용할 때에는 단위에 대한 올바른 이해가 필요하고 적용의 한계성에 대한 적용자의 적절한 판단이 요구된다.
- 2) 상대적으로 규모가 큰 유역에 총괄형 모형(Lumped Model)을 적용할 때는 유역 특성의 공간적인 분포를 고려하기 어려우므로 분포형 개념의 모형(Distributed Model)을 이용하여 매개변수들의 공간적인 분포를 충분히 고려해야 할 것으로 사료된다.
- 3) 분포형 개념의 모형을 적용할 때 주로 그리드(grid)를 이용하여 분석을 하는데 그리드의 크기는 모형의 결과에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다.
- 4) USLE공식이 구곡이나 하천의 침식 등을 고려하지 못하고 침식된 토사의 이동 및 퇴적현상을 모의하지 못하는 점을 보완하기 위하여 C1이라는 보정계수를 사용하여 한 셀에서 손실된 토사는 고도가 낮은 인접 셀로 이동한다는 조건과 셀 내에서 토사의 이동을 방해하는 요소의 면적의 비는 유사 전달율과 밀접한 관계가 있다는 조건을 이용하여 한 셀에서 인접 셀로의 토사 이동을 모의하였는데 8개 유역의 퇴사량 자료를 이용하여 모형을 보정하고 그 결과 얻어진 C1과 유역특성간의 관계를 이용하여 2개의 유역에 적용한 결과 모형의 적용가능성을 확인할 수 있었다.
- 5) C1이라는 계수와 유역 특성과의 상관분석을 통해 유역면적, 주하천장, 그리고 유역주변장 등은 유사 전달율과 음(-)의 상관관계가 있고, 수계밀도, 수계비도, 그리고 형상계수는 양(+)의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이것은 침식된 토사의 이동 경로가 많아질수록 침식된 토사가 이동 중에 퇴적될 확률이 높아지고 반대로 이동 경로가 줄어들고 이동 조건이 좋아질수록 중간에 퇴적될 확률이 낮아진다는 자연 현상을 적절히 반영하는 결과로 사료된다.
- 6) C1값은 유역특성에 따라 범위가 다른 값을 가질 수 있으며 같은 유역이라 할 지라도 특정 호우사상에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 한 유역에 대해 여러 개의 호우사상을 적용할 것인지 여러 유역에 대해 연평균 개념으로 적용할 것인지에 따라 적절한 모형 보정으로 C1값을 추정하여야 한다.

#### 5. 참고문헌

건설부(1992). "댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사·연구."

국립방재연구소(1998). "개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I)."

김웅태(1999). "분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구." 고려대학교 토목환경공학과 석사학위논문.

서승덕, 임홍익, 천만복, 윤경덕(1988). "유역의 지상적 요인과 저수지 비퇴사량과의 관계분석." 한국농공학회지, 제30권, 제4호, pp. 45-61.

이석민(1993). "지리정보시스템(GIS)를 이용한 금강유역의 토양유실 분석." 연세대학교 지질학과 석사학위논문.

정필관, 고문환, 임정남, 임기태, 최대웅(1983). "토양 유실량 예측을 위한 강우인자의 분석." 한국토양비료학회지, 제16권, 제2호, pp. 112-118.

한국수자원학회(1998). "개발사업으로 인한 토양 손실량 예측 및 침사지 설계." 제 6 회 수공학 워크샵.

Aronica, G. & Ferro, V. (1997). "Rainfall erosivity over the Calabrian region." Hydrol. Sci. J. 42(1), pp.35-48.

Ferro, V. (1997). "Further remarks on a distributed approach to sediment delivery." Hydrol. Sci. J. 42(5), pp.633-647.

Goldman, S.J., et al. (1986). Erosion and Sediment Control Handbook, McGraw-Hill Book Company.

Julien, P.Y. & Marcel Frenette (1987). "Macroscale analysis of upland erosion." Hydrol. Sci. J. 32(3), pp.347-358.

Kothyari, U.C. & Jain, S.K. (1997). "Sediment yield estimation using GIS." Hydrol. Sci. J. 42(6), pp.833-843.

TRB(1980). Design of sedimentation basin, National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice #70, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.

Williams, R. & Berndt, H.D. (1972). "Sediment yield computed with universal equation." J. Hydraul. Engng. Div. ASCE 98(HY12), pp.2087-2098.

Wolock, D.M. & Price, C.V. (1994). "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model." Water Resour. Res., 30(11), pp.3041-3052.

Zhang, W. & Montgomery, D.R. (1994). "Digital elevation model grid size, land landscape representation." Water Resour. Res., 30(4), pp.1019-1028.