

분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Sediment Yield Based on a Distributed System Concept

김 응 태* / 윤 용 남** / 박 무 종*** / 유 철 상****

Kim, Ung Tae / Yoon, Yong Nam / Park, Moo Jong / Yoo, Chul Sang

Abstract

The present study is focused on improving the methodology for the determination of parameters involved in USLE(Universal Soil Loss Equation) based on a distributed system concept and investigation of sediment delivery ratio. Generally the distributed system concept consists of grid networks throughout the watershed and sediment can be traced from grid to grid in the direction of the steepest descent. The sediment yield data together with physical data of 10 small irrigation reservoirs in Kyounggi-Do are collected. After the sediment delivery ratio of a grid is defined to be related to the fraction of forested or covered with delivery proofing area of the grid, the proportionality coefficient(C_1) is introduced. The distributed system model is calibrated using the available data for 8 reservoirs and is verified with the data for the remaining 2 reservoirs, and regression analysis is made to express the proportionality coefficient C_1 in terms of watershed physical characteristics. By applying this results the verification of the distributed system model for 2 reservoirs showed a fair result, which justifies the applicability of the proposed method in the present study.

keywords : distributed system concept, sediment delivery ratio, USLE, grid, regression analysis

요 지

본 연구는 분포형 개념에 기초한 USLE(Universal Soil Loss Equation)의 매개변수의 산정방법과 유역에서 발생한 유사전달률을 중심으로 수행되었다. 그리드를 이용한 분포형 개념의 모형은 경사가 가장 급한 방향으로 한 그리드에서 다른 그리드로 유사를 추적할 수 있다. 여기서는 기존에 조사된 경기도 지역에 위치한 10개의 농업용 저수지의 토사유출량과 유역의 물리적인 특성을 수집하여 연구에 이용하였다. 한 그리드의 유사전달률은 그 그리드의 숲이나 토사이동을 방해하는 면적비와 관계가 있다고 정의하고 C_1 이라는 비례상수를 도입하였다. 8개 저수지에 대하여 모형을 보정하고 나머지 2개 저수지에 대하여 검정을 실시하였으며 유역의 물리적인 특성과 C_1 과의 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과를 2개의 저수지 유역에 검정한 바 적절한 결과를 보였으며 본 연구에서 제안한 모형의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 분포형 개념, 유사전달률, USLE, 그리드, 회귀분석

- * 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
Researcher, KICT, Koyangshi 411-712, Korea (E-mail : utkim@kict.re.kr)
- ** 고려대학교 토목환경공학과 교수
Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea
- *** 한서대학교 토목공학과 전임강사
Instructor, Dept. of Civil Eng., Hanseo Univ., Seosan, Chungnam 356-820, Korea
- **** 고려대학교 환경공학과 조교수
Assistant Prof., Dept. of Environmental Eng., Korea Univ., Chungnam 339-700, Korea

1. 서론

자연 유역에서 토양침식을 추정하고 또 유역출구에서의 토사유출량을 추정한다는 것은 실험적으로나 이론적으로는 매우 어려운 일이다. 여러 가지 원인에 의하여 토양침식이 발생하고 또 침식된 토양이 많은 물리적인 원인과 수많은 경로를 통하여 유역 출구에 도달하기 때문에 이러한 현상을 수학적으로 명확히 규명하기는 매우 어렵다. 따라서 여러 가지 실험과 통계적 혹은 수학적 기반으로 많은 경험공식 및 예측모형이 개발되었지만 토양침식량 및 토사유출량 측정의 어려움 및 그 신뢰성의 한계로 인하여 개발된 모형이나 공식에 대한 검증이 어려운 실정이다. 복잡한 모형을 도입한다고 해서 반드시 좋은 결과가 나오는 것은 아니며 반대로 간단한 모형이나 공식을 적용하였다고 해서 신뢰성이 떨어지는 결과가 나오는 것은 아니다. 공식이나 모형마다 개발된 배경이 다르고 또 그에 따른 적용의 한계가 있기 때문에 적용대상이나 적용목적에 따라 사용자의 합리적인 판단이 요구된다.

본 연구에서는 최근 국내에서 많이 사용 중에 있는 USLE가 작은 규모의 균일한 소유역에 적용할 경우 상당히 신뢰성이 있는 결과를 도출해 낸다는 실험결과(Julien과 Marcel, 1987; Kothyari와 Jain, 1997)를 전제로 하여 유역을 일정한 크기의 그리드로 나누어서 USLE의 매개변수를 추정하여 토양침식량을 구하였으며 침식된 토양은 중력의 법칙으로 유수와 함께 유역의 출구로 이동한다는 원리를 이용하여 유역의 연평균 토사유출량을 추정하는 방법에 대하여 연구하고자 한다.

유역의 연평균 토사유출량 및 저수지의 퇴적에 관한 연구는 과거 댐설계를 위해 뱃터정과 김시원(1976), 서승덕 등(1988), 안상진과 이종형(1984), 유시창과 민병형(1975), 그리고 윤용남(1981)에 의해 수행된 바 있는데 근래에 들어 인공위성 및 컴퓨터의 발달 그리고 인공위성영상 처리하는 능력이 눈부시게 발전하면서 각종 수분모형 분야에도 기존의 총괄형 모형(lumped model)을 탈피하여 분포형 모형(distributed model)을 이용하여 유역내에 균질하지 않게 분포되어 있는 유역특성을 고려하려는 노력이 진행중이며 이미 여러 모형들이 사용 중에 있다. 토양침식 및 토사유출 분야에서도 분포형 개념과 USLE를 이용한 토양침식량의 추정 및 토사의 이동에 관한 연구는 많은 사람들에 의해 진행되고 있다. 최근 Kothyari와 Jain(1997)은 ILWIS라는 GIS 소프트웨어와 USLE를 이용하여

인도의 Karso유역의 특정 호우사상에 대한 토양침식량을 추정하여 유역출구로의 유사추적(sediment routing)을 실시한 바 있고, Ferro(1997)는 토사이동에 관한 분포형 개념을 이용한 접근법에 관한 개념적인 연구를 수행한 바 있다. 국내의 경우 이석민(1993)은 ARC/INFO라는 GIS 소프트웨어와 USLE를 이용하여 부여군 금강유역에 대한 토양침식량을 추정하고 유역의 토양유실 위험도를 공간적으로 분석한 바 있다. 그 외에도 몇 건의 연구가 있지만 USLE를 이용하여 단순히 유역의 토양침식량을 구하는 것에 국한되어 있는 것이 대부분이고 토사의 이동을 모의하여 유역출구에서의 토사유출량을 산정에 관한 내용은 거의 없는 실정이다.

2. 연구내용

2.1 대상 유역의 선정

본 연구에서는 모형의 보정과 검증을 위해 농지개발 조합 관리 저수지 중 경기도 지역에 위치한 10개의 저수지를 선정하여 퇴사량 자료 및 각 저수지 유역의 특성(서승덕 등, 1988)을 수집하였다. 그림 1은 각 저수지의 위치를 표시한 것이고 표 1은 10개 저수지 및 이들 저수지 유역의 특성을 요약한 것이다. 표 1에서 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 저수지의 토사포착률(trap efficiency, %)을 곱한 후 단위중량(t/m^3)으로 나누어 구한 것이다(건설부, 1992a).

2.2 그리드를 이용한 USLE의 매개변수 추정

USLE는 $A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ 와 같이 매개변수들의 곱으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 250m크기의 그리드를 이용하여 USLE의 매개변수를 다음과 같이 추정하였다. USLE 매개변수의 추정은 기존의 연구(Wischmeier와 Smith, 1978)에 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 그리드를 사용하여 USLE의 매개변수를 추정하는 부분에 대해서만 서술하였다.

2.2.1 R (Rainfall Erosion Index : 강우침식지수)

R값은 작은 유역일 경우 동일 유역내에서는 공간적으로 거의 변하지 않으므로 등R선도(정필균 등, 1983)

표 1. 연구대상 저수지 및 유역의 특성

특성	저수지	어천 (1)	동방 (2)	덕우 (3)	반월 (4)	충부 (5)	왕송 (6)	낙생 (7)	기흥 (8)	원천 (9)	백운 (10)
지역명		화성	화성	화성	화성	시흥	시흥	용인	용인	수원	시흥
설치년도		1956	1939	1945	1957	1945	1948	1961	1957	1929	1951
유역면적(km ²)		3.80	6.28	8.3	12.20	13.2	15.60	19.5	53.00	9.33	10.20
주하천장(km)		2.3	3.1	4.4	4.3	5.4	5.0	6.4	13.6	5.6	4.9
유역주변장(km)		8.9	10.6	12.6	15.5	15.0	15.6	19.0	34.4	13.5	14.5
수계면도(個/km ²)		1.57	1.27	1.45	0.90	0.76	0.83	0.92	0.77	1.39	0.88
수계밀도(km/km ²)		1.63	1.10	1.67	1.17	1.58	1.13	1.15	1.19	1.50	1.90
형상계수		0.72	0.65	0.43	0.66	0.45	0.62	0.48	0.29	0.30	0.42
비퇴사량(mi/km ² /yr)		3803.0	3810.0	1420.0	1461.8	638.4	1050.4	865.8	138.4	996.0	906.8
포착율(%)		93.0	95.0	92.0	92.0	65.0	93.0	86.0	65.0	95.0	65.0
단위중량(t/m ²)		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
비고		검정	검정	검정	검정	검정	검정	검정	검정	검중	검중



그림 1. 연구대상 저수지의 위치

표 2. 연구대상 저수지 유역의 연평균 R값

(단위 : 10MJ/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

를 이용하여 표 2와 같이 각 저수지 유역별로 구하였다.

2.2.2 K (Soil Erosivity Factor : 토양침식인자)

1:50,000 개략도양도에 그리드를 중첩하여 그림 2와 같이 그리드 형태로 각 저수지 유역별 개략도양도를 추출한 후 개략도양명을 K값으로 환산하였다(건설부, 1992b).

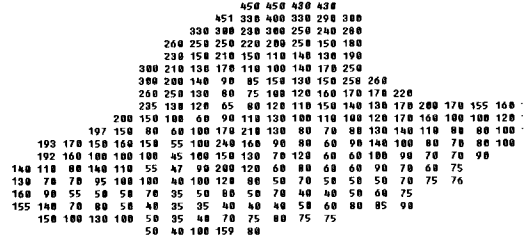
2.2.3 LS (Length - Slope Factor : 경사면의 길이 - 경사 인자)

1:25,000 지형도와 그리드를 중첩하여 유역경계 밖의 고도는 0으로 처리한 격자점의 등고선값을 읽어 그림 3과 같은 유역의 수치고도 및 흐름방향 파악을 위한 3차원 유역도를 얻을 수 있었다. 그리고 각 격자점의 고도와 그림 4와 같은 각 그리드의 흐름방향을 이용하여 그리드 형태의 LS인자를 각 유역별로 구하였다.

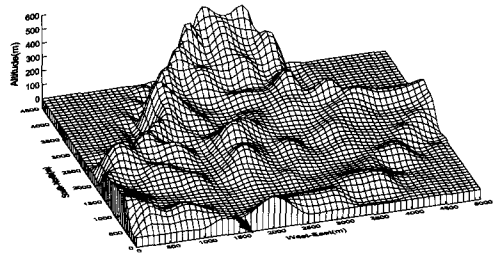
2.2.4 C (Cover Factor : 피복인자)

1:25,000 지형도와 그리드를 중첩하여 각 그리드의

토지이용상태를 추출하여 그림 5와 같은 그리드 형태의 토지이용도를 각 저수지 유역별로 구할 수 있으며 김응태(1998)의 결과를 이용하여 C값으로 환산하였다.



(a) 각 격자점의 고도(m)



(b) 3차원 유역도

그림 3. 각 격자점의 고도(m) 및 3차원 유역도 (반월 저수지 유역)

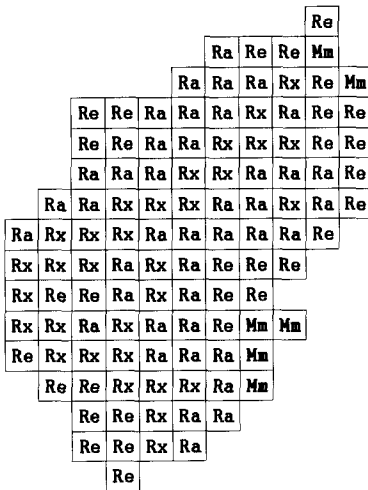


그림 2. K값 추정을 위한 개략도양도 (동방 저수지 유역)

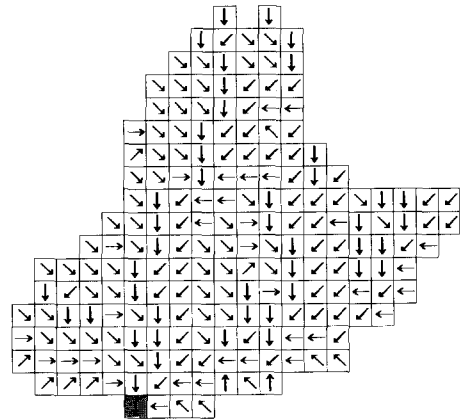


그림 4. 각 그리드에서 침식된 토사의 흐름방향 (반월 저수지 유역)

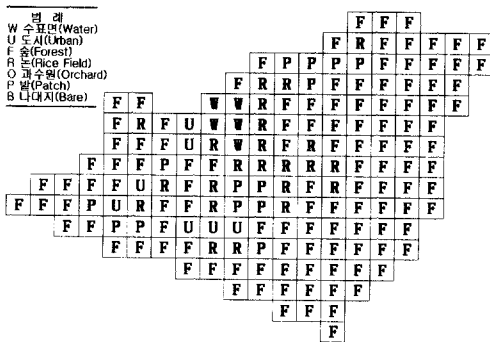


그림 5. C₁값 추정을 위한 토지 이용도 (백운 저수지 유역)

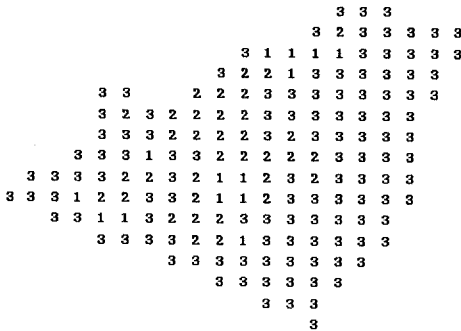


그림 6. 토양 보존대책(백운 저수지 유역)

2.2.5 P (Erosion Control Practice Factor : 토양 보존대책인자)

Wischmeier와 Smith(1978)가 제안한 도표를 이용하여 토지이용에 아무런 대책을 세우지 않은 경우는 1, 계단식 경작의 형태는 2, 그리고 둥고선 경작의 형태는 3을 부여하여 구분한 후 LS 인자를 구하는 프로그램에서 추출한 각 그리드의 경사와 2.2.4절에서 구한 토지이용도를 연계하여 각 그리드의 P값을 구하였다.

3. 유사전달률의 계산

3.1 보정계수 C₁의 도입

유역내에서 발생한 토양침식량은 100 % 모두 출구까지 이동하지는 않으므로 유역에서의 토사유출량은 토양침식량에 대한 유사전달률을 고려하여야 한다. 기존의 하천이나 유역의 유사전달률을 고려하는 방법은 총량개념으로 토사의 성질을 이용하여 경험적으로 유사전달률을 구하는 방법 혹은 단순히 유역면적과의 회

귀분석을 통한 유사전달률을 구하는 방법 등 몇 가지가 있지만(국립방재연구소, 1998) 일반적으로 유역의 경우 하천보다 지형적인 특성 및 피복상태 등이 복잡하기 때문에 더 많은 요소들을 고려하여야 한다.

그러므로 유사전달률을 추정하기 위하여 이론적인 방법보다는 실험적이고 경험적인 방법에 의존하는 경우가 많다. Walling(1983)은 개념적으로 토사의 전달에 관한 문제를 거론하였으나 실제 유역에 적용하기가 어려우므로 본 연구에서는 토사가 유수에 의해 인근 낮은 곳으로 이동한다는 중력법칙과 침식된 토사의 이동을 방해하여 퇴적시키는 요인은 주로 숲이나 울타리 또는 기타 잡목들이라는 가정으로 침식된 토사의 이동을 모의하였고 그 외에 침식된 토사의 이동에 영향을 미치거나 하천내 세굴이나 퇴적에 의한 영향을 고려하기 위해 C₁이라는 보정계수를 도입하여 실측된 저수지 퇴사량 자료와의 모형보정을 실시하였다.

$$S'_i = \text{AREA}_i \cdot (R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i) \quad (1)$$

식 (1)에서 R_i, K_i, LS_i, C_i, 그리고 P_i는 각 그리드의 USLE 매개변수를 나타낸다. 같으며 AREA_i는 각 그리드의 면적(ha), S'_i는 각 그리드 내에서 발생한 토양침식량(t/yr)을 나타낸다. 각 그리드(i)의 유사전달률(DR_i)는 식 (2)와 같이 각 그리드에서 침식된 토사의 전달을 방해하는 인자들을 고려하는 요소들의 면적비와 보정계수 C₁의 곱으로 정의할 수 있다(Kothyari와 Jain, 1997). Kothyari와 Jain(1997)은 FA_i를 그리드내 숲의 비율로 정의하였는데 본 연구에서는 숲뿐만 아니라 울타리, 잔디 등도 침식된 토사의 이동을 방해한다고 판단하여 그리드내 토사의 이동을 방해하는 요소의 면적비로 정의하였다.

$$DR_i = C_1 (1 - FA_i) \quad (2)$$

C₁은 각 저수지의 연평균 퇴사량 실측치를 이용한 모형보정을 통해 결정되는 상수로서 본 연구에서 중요한 의미를 가진다. USLE에 의해 추정된 토양침식량은 강우나 지표류 그리고 세류에 의한 토양침식량만을 고려하므로 하상의 세굴이나 퇴적 등을 고려하기 어렵다. 또 침식된 토사가 이동할 때 발생하는 여러 가지 현상을 (1 - FA_i)항 하나로 표현하기에는 무리가 따

르고 하천에서의 토사이동 및 퇴적은 유역에서의 경우와 그 특성이 다르므로 실측치와의 모형보정을 통해 결정된 C_1 값은 유역에서 침식된 토사가 유역출구로 이동하는 동안의 복잡한 이동현상을 효과적으로 일축할 수 있는 계수이다.

식 (2)에서 DR_i 는 각 그리드내의 유사전달률을 의미하며 유역출구에 대한 한 그리드의 유사전달률은 유수의 이동경로에 따라 달라진다. 따라서 한 그리드에서 침식된 토사가 인접 그리드로 전달되면서 유역 출구까지 이동하는 동안 퇴적되는 현상 등을 모의하기 위하여 유역출구에 대한 각 그리드의 유사전달률은 식 (3)과 같이 경로에 따라 각 그리드가 누적된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} DR_i' &= DR_i \cdot DR_{i-1} \cdot DR_{i-2} \cdot \dots \cdot DR_{i-N} \\ &= C_1(1-FA_i) \cdot C_1(1-FA_{i-1}) \cdot \\ &\quad C_1(1-FA_{i-2}) \cdot \dots \cdot C_1(1-FA_{i-N}) \\ &= C_1^{N+1} \cdot (1-FA_i) \cdot (1-FA_{i-1}) \cdot \\ &\quad (1-FA_{i-2}) \cdot \dots \cdot (1-FA_{i-N}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, DR_i' = 각 그리드의 유역출구에 대한 유사전달률, N = 경로내 그리드의 개수를 의미한다. 결과적으로 유역에서 발생한 토양침식량 중 유역출구에 도달한 토사의 양(S)은 식 (4)와 같이 각 그리드의 토양침식량(S_i')과 유역출구에 대한 각 그리드의 유사전달률(DR_i')의 곱을 합한 것과 같다.

$$S = \sum_{i=1}^N DR_i' S_i' \quad (4)$$

식 (4)를 전개하면 유역내 분포한 그리드의 수와 같은 개수의 N 차 다항식의 합으로 표현되는데 유역출구에서 측정된 토사유출량과 식 (4)에서 계산된 값과의 오차가 최소일 때 결정된 C_1 값은 모형의 오차를 최소화하는 보정계수가 된다. 이와 같은 방법은 Kothyari와 Jain(1997)에 의해 인도의 Karso유역에 적용된 바가 있는데 이들은 한 유역에 대한 단기간의 홍수 호우상과 유역출구에서의 실측유출량을 이용하여 모형보정을 실시한 반면 본 연구에서는 각기 다른 여러 유역의

연평균 강우침식지수와 저수지 실측퇴사량을 이용하여 모형을 보정하였는데 이러한 연평균 개념의 적용은 USLE의 근본취지를 충분히 반영하는 것이다.

또 유역의 연평균 토사유출량과 C_1 값이 유역의 여러 가지 물리적인 특성인자와 직접적인 관계가 있을 것이라 판단하여 C_1 값과 유역의 물리적인 특성인자와의 회귀분석을 실시하여 실제 유역에의 적용 가능성을 검토하였다.

3.2 모형의 보정

USLE로 추정된 각 유역의 연평균 토양침식량은 유역내 각 그리드의 토양침식량을 더한 것과 같으며 그 값은 표 3과 같다. 표 3에 나타난 각 유역의 토양침식량은 250m 그리드를 이용하여 배개변수를 추정하였으므로 'scale effect'(Julien과 Marcel, 1987; Wolock과 Price, 1994; Zhang과 Montgomery, 1994)를 고려하기 위하여 김용태(1998)의 연구결과를 이용하여 그리드의 크기가 100m 일 때의 값으로 조정하여 모형보정을 실시하였다.

3.3.1절에서 설명한 대로 각 그리드의 토양침식량은 식 (1)의 S_i' 가 되고 각 그리드의 FA_i 와 그리드의 흐름 방향으로부터 추적된 경로를 이용하면 식 (3)을 적용하여 각 그리드의 DR_i' 를 구할 수 있다. 표 1의 실측퇴사량과 식 (4)에서 구한 유역의 토사유출량을 이용하여 이들 오차를 최소화하는 C_1 값을 수치적으로 계산할 수 있으며 그 결과는 그림 7과 같다.

USLE로 추정된 연평균 토양침식량을 이용하여 유사추적을 실시한 결과 오차가 최소화된 최적 계산치와

표 3. USLE로 추정된 각 유역의 토양침식량

유역명	연평균 토양침식량 (t/yr)	연평균 비침식량 (t/km ² /yr)
어 천	41897.1	11025.5
동 방	40510.6	6450.7
떡 우	31344.9	3776.5
반 월	103981.1	8523.0
충 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

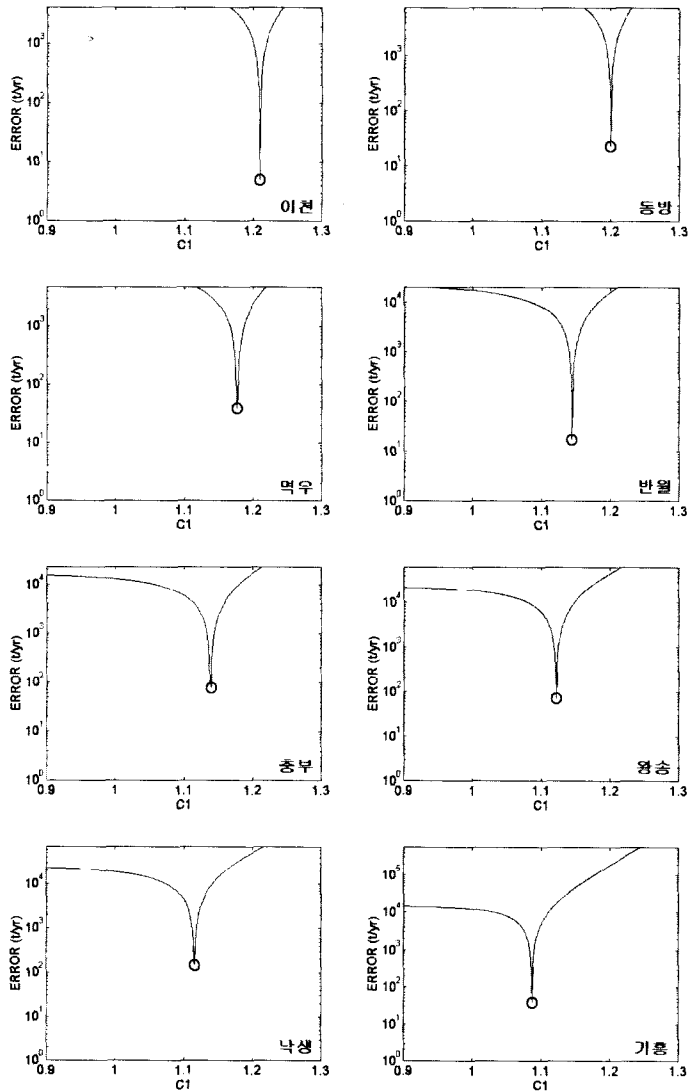


그림 7. 모형보정을 통한 각 유역의 최적 C1값 추정

각 저수지에서 실측된 연평균 퇴사량과 비교하면 표 4와 같다.

수치적으로 구한 저수지의 토사유입량 계산치는 실측치와 거의 근사한 값을 나타내는 것을 알 수 있는데 이것은 식 (4)와 같은 방정식과 실측치와의 오차가 최소가 되는 최적해를 구하여 나온 결과이기 때문이다. 이러한 방법으로 8개 저수지 유역(어천, 동방, 맥우, 반월, 창부, 왕송, 낙생 그리고 기룡)에서 실측치와의 오차를 최소화하는 모형보정을 통하여 구해진 C1값과

유역특성과의 상관관계를 분석하여 그 결과를 원천과 백운 저수지 유역에 적용함으로써 이들 저수지의 연평균 토사유입량을 예측할 수 있다. 우선 C1값과 표 1에서 제시한 각 유역의 물리적인 특성(유역면적, 주하천장, 유역주변장, 수계빈도, 수계밀도, 그리고 형상계수)과의 단순회귀분석을 실시하여 표 5와 같이 상관계수를 구하였다.

표 5에서 알 수 있듯이 C1은 한 가지 유역특성에만 관계된 것이 아니라 여러 가지 유역특성들과 복합적인

표 4. 실측치와 계산치의 비교

유역명	실측퇴사량 (t/yr)	최적계산치 (t/yr)	절대오차 (t/yr)	상대오차 (%)	최적 C ₁ 값
어 천	20365.3	20370.3	5.0	0.02	1.210
동 방	32993.9	32970.7	23.2	-0.07	1.199
떡 우	16910.4	16949.3	38.9	0.23	1.177
반 월	25395.5	25413.1	17.6	0.07	1.145
충 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) = | 계산치 - 실측치 |
 상대오차(%) = $\frac{(\text{계산치} - \text{실측치})}{\text{실측치}} \times 100$

표 5. 여러 가지 유역특성과 C₁과의 상관계수 비교

비 고	유역특성	유역면적 (x ₁)	주하천장 (x ₂)	유역주변장 (x ₃)	수계빈도 (x ₄)	수계밀도 (x ₅)	형상계수 (x ₆)
	상관계수	-0.968	-0.924	-0.939	0.883	0.465	0.664

관계가 있다. 유역면적, 주하천장, 그리고 유역주변장은 C₁값과 음의 상관관계를 보였으며 수계빈도, 수계밀도, 그리고 형상계수 등은 C₁값과 양의 상관관계를 보이는 것을 알 수 있다. 유역면적, 주하천장, 그리고 유역주변장이 C₁값과 음의 상관관계를 가지는 이유는 이 값들이 커지면 일반적으로 토사의 이동경로가 길어지기 때문이다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 토사의 이동 경로의 수가 증가함에 따라 이동경로의 수가 C₁값의 역승으로 대입되므로 경로의 수가 적을 때보다 각 그리드의 유사전달률은 역승으로 감소하게 되므로 중간에 퇴적될 확률이 커진다는 것을 의미하는 것이다. 반대로 수계빈도, 수계밀도, 그리고 형상계수 등은 C₁값과 양의 상관관계를 보이는데 이것은 이들 값이 커지면 토사의 이동조건을 좋게 하여 토사가 유역출구로 이동할 수 있는 확률을 높게 한다는 것을 의미한다. 특히 수계빈도의 경우 수계밀도보다 C₁값과 강한 양의 상관관계를 보이는 이유는 수계밀도가 유로의 연장에 관계되는 인자인데 비해서 수계빈도는 유로의 수에 관계되기 때문이다. 즉, 단위면적내에 유로의 수가 많을수록 토사의 이동조건이 좋아진다는 것을 의미한다.

유역면적, 주하천장, 유역주변장은 서로 독립적인 유역특성이 아니므로 유역특성 중 C₁과 비교적 상관계수가 높고 서로 독립적이라고 판단되는 유역면적과 수계

빈도를 이용하여 식(5)와 같이 C₁과의 다중회귀분석을 실시하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (5)$$

여기서, x_k는 독립변수, y는 종속변수, k는 표본집단의 수, β_k는 회귀식의 계수, 그리고 ε는 잔차를 나타낸다. 두 개의 독립적인 유역특성 유역면적(x₁)와 수계빈도(x₄) 그리고 종속변수 C₁에 상용대수를 취하여 다중회귀분석을 실시한 결과 표 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

C₁과 유역특성과의 다중회귀모형을 지수식의 형태로 표현하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = 1.253 x_1^{-0.035} x_4^{0.035} \quad (6)$$

표 6. 유역특성과 C₁의 다중회귀분석 결과

β ₀	β ₁	β ₂	r _{yx₁}	r _{yx₄}	R
0.098	-0.035	0.035	-0.968	0.883	0.981

주) r_{yx} : 종속변수와 각 독립변수와의 상관계수

R : 종속변수와 모든 독립변수와의 상관계수

3.3 모형의 적용 및 고찰

유역특성과 C_1 과의 단순 및 다중회귀분석을 통해 구해진 원천, 백운 저수지 유역의 C_1 값과 USLE로 구한 각 그리드의 토양침식량을 유수 흐름방향으로 유사추적을 실시한 결과 표 7과 같이 저수지로의 연평균 토사유입량을 예측하였다. 표 7에서 알 수 있듯이 C_1 과의 회귀분석결과에 따라 다른 예측값을 보이고 있는데 다중회귀분석에 따른 C_1 값을 통한 예측값이 단순회귀분석에 의한 예측값보다 신뢰성이 있을 것으로 사료된다.

분포형 개념을 바탕으로 한 USLE와 유사 추적모형을 이용하여 예측한 저수지의 토사유입량은 실측치와 -10~140% 내외의 오차를 보였는데 일반적으로 토양 침식이나 유사분야의 예측에 있어서 100% 이상의 오차는 흔히 있는 경우이다. 그 이유는 여러 가지가 있겠지만 저수지 퇴사량 측정의 오차, 또 골재 채취, 개발 사업 등 인간의 활동에 의한 외적인 요인이 결과에 영향을 미치기 때문이다. 분포형 개념을 이용하여 유역의 토양침식량을 추정할 경우 토양침식량의 공간적인 분포를 알 수 있으므로 많은 토양침식이 예측되는 지역에 적절한 토양 보존대책을 세울 수 있을 것이다.

4. 결 론

현재 국내에서 많이 적용하고 있는 USLE는 소규모 유역의 연평균 토양침식량을 추정하기 위해 개발되었음에도 불구하고 간혹 무리한 적용으로 추정치의 신뢰도가 떨어지는 경우가 있다. 본 연구에서는 이러한 제약을 충분히 고려하기 위하여 적절한 크기를 가진 그

리드를 이용하여 USLE의 매개변수와 유역의 토양침식량을 추정하였으며 각 그리드의 유사전달률 개념과 침식된 토사의 이동경로를 고려하여 유역출구 통해 배출되는 연평균 토사의 양을 추정하였다. 또 유사추적시 C_1 이라는 보정계수를 도입하여 계산치와 실측퇴사량 자료와 모형보정을 실시하고 유역 특성인자와의 회귀분석을 실시하여 C_1 값의 실제 유역 적용가능성을 검토하였는데 요약· 결론하면 다음과 같다.

- 1) 상대적으로 규모가 큰 유역에 총괄형 모형 (lumped model)을 적용할 때는 유역특성인자의 공간적인 분포를 고려하기 어려우므로 분포형 모형 (distributed model)을 이용하여 매개변수들의 공간적인 분포를 충분히 고려해야 할 것으로 보인다.
- 2) 침식된 토사의 이동은 유역의 여러 가지 특성과 밀접한 관계가 있는데 여기서는 C_1 이라는 보정계수와 유역특성과의 상관분석을 통해 유역면적, 주하천장, 그리고 유역주변장 등은 유사 전달률과 음(-)의 상관관계가 있고, 수계밀도, 수계반도, 그리고 형상계수는 양(+)의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이것은 침식된 토사의 이동경로가 많아질수록 침식된 토사가 이동 중에 퇴적될 확률이 높아지고 반대로 토사의 이동경로가 줄어들고 이동조건이 좋아질수록 중간에 퇴적될 확률이 낮아진다는 자연현상을 적절히 반영하는 결과로 사료된다.
- 3) USLE는 구곡이나 하천의 침식 등을 고려하지 못하고 침식된 토사의 이동 및 퇴적현상을 모의하지 못하는 점을 보완하기 위하여 C_1 이라는 보정계수를 사용하였는데 한 그리드에서 손실된 토사는 고도가 낮은

표 7. 원천, 백운 저수지 유역의 실측치와 예측치 비교

유역	비 고	$C_1 \sim x_1$	$C_1 \sim x_2$	$C_1 \sim x_3$	$C_1 \sim x_4$	다중회귀
원천	C_1	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	C_1	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/km²/yr) × 유역면적(km²)

인접 그리드로 이동한다는 조건과 그리드 내에서 토사의 이동을 방해하는 요소의 면적의 비는 유사전달률과 밀접한 관계가 있다는 조건을 이용하여 한 그리드에서 인접 그리드로의 토사이동을 모의한 결과 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

4) C_i 값은 유역특성에 따라 범위가 다른 값을 가질 수 있으며 같은 유역이라 할지라도 특정 호우사상에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 한 유역에 대해 여러 개의 호우사상을 적용할 것인지 여러 유역에 대해 연평균 개념으로 적용할 것인지에 따라 적절한 모형보정으로 C_i 값을 추정하여야 할 것으로 사료된다.

마지막으로, 본 연구에서 사용된 유사전달률 개념을 국내 유역에 적합한 토사유출량 추정모형의 일부로 발전시키기 위해서는 유역별로 보다 많은 지점의 신뢰도 있는 실측자료와의 모형보정을 실시하여야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

건설부 (1992a). 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량의 조사·연구. pp. 74~80.

건설부 (1992b). 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량의 조사·연구(부록). pp. 325~331.

국립방재연구소 (1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(1). 행정자치부.

김용태 (1998). 분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 고려대학교, pp. 56~64.

류희정, 김시원 (1976). "저수지의 퇴사에 관한 연구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제9권, 제2호, pp. 67~75.

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

안상진, 이종형 (1984). "저수지 퇴사량과 유역인자와의 상관." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제17권, 제2호, pp. 107~112.

유시창, 민병형 (1975). "저수지의 퇴사에 관한 연구 -진양지구를 중심으로." 한국농공학회지, 한국농공학회, 제17권, 제3호, pp. 46~53.

윤용남 (1981). "관개용 저수지의 연평균 퇴사량과 저수 용량 감소율의 산정." 대한토목학회지, 대한토목학회, 제1권, 제1호, pp. 69~76.

이석민 (1993). 지리정보시스템(GIS)를 이용한 금강 유역의 토양유실 분석. 석사학위논문, 연세대학교.

정필균, 고문환, 임정남, 임기태, 최대웅 (1983). "토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석." 한국토양비료학회지, 한국토양비료학회, 제16권, 제2호, pp. 112~118.

Ferro, V. (1997). "Further remarks on a distributed approach to sediment delivery." *Hydrological Science Journal*, Vol. 42, No. 5, pp. 633~647.

Julien, P.Y. and Marcel F. (1987). "Macroscale analysis of upland erosion." *Hydrological Science Journal*, Vol. 32, No. 3, pp. 347~358.

Kothyari, U.C. and Jain, S.K. (1997). "Sediment yield estimation using GIS." *Hydrological Science Journal*, Vol. 42, No. 6, pp. 833~843.

Walling, D.E. (1983). "The sediment delivery problem." *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 65, pp. 209~237.

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). "Predicting Rainfall Erosion Losses : A Guide to conservation planning." USDA., Agricultural Handbook No. 537.

Wolock, D.M. and Price, C.V. (1994). "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 3041~3052.

Zhang, W. and Montgomery, D.R. (1994). "Digital elevation model grid size, landscape representation." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 1019~1028.

(논문번호:00-046/접수:2000.07.16/심사완료:2001.03.15)