

해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토 (I)
-RUSLE를 중심으로
Applicability Examination of the RUSLE Sediment Yield Prediction
Equations in Korea

손 광 익*
Son, Kwang Ik

Abstract

Due to the nationwide development, sediment yield has to be estimated to design the sedimentation basin which is used to minimize the effects of construction or disturbing the natural soil condition. But there is no proved equation for the estimation of sediment yield in Korea. Therefore, applicability and the limitation of RUSLE (revised universal sediment loss equation) sediment yield equation is examined for the construction sites, where the rainfall and sediment data are available. General mistakes in estimation of the RUSLE parameters are also discussed. It is found that RUSLE could be applied in Korea as long as the sediment delivery ratio was considered. Appropriate estimation method of sediment delivery ratio are also proposed.

keywords : erosion, sediment yield, sediment delivery ratio, USLE, RUSLE

요 지

개발에 의하여 증가된 토사유출량의 유역외 배출을 최소화하기 위한 침사지 등의 설계에 필요한 검증된 토사유출량 산정기법이 국내에는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 개발된 각종 장·단시간 호우에 대한 외국의 토사유출량 산정 기법들 중 개정범용토양손실공식(RUSLE)의 국내 적용 가능성을 검토하였다. 전국 7개 개발현장에서 실측한 강우 및 토사유출량 자료를 RUSLE공식에 적용, 그 적용범위 및 한계성 등을 검토한 결과 국내 개발지역에 대한 토사생산량 산정기법으로써의 가능성을 확인하였으며 RUSLE공식의 적용시 우리나라에서 많이 범하고 있는 각 인자별 산정 오류에 대해서도 검토하였다. RUSLE공식 적용시 필요한 토사전달률에 대해서도 우리나라에 적합한 두 가지 기법을 제시하였다.

핵심용어 : 토사유출량, 토사전달률, 범용토양손실공식(USLE), RUSLE

* 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam University, 214-1 Dae-Dong, Kyungsan, Kyungpook 712-749 Korea (E-mail : kison@yn.yu.ac.kr)

1. 서론 및 연구목적

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 하나 우리나라의 경우 이러한 토사유출량에 대한 연구는 거의 전무한 상태로 재해영향평가 제도가 실시된 이후 모든 재해영향평가에서는 미국에서 개발된 범용토양손실공식(USLE)을¹⁾ 사용하여 토사유출량을 산정하고 있는 실정이다. 그러나 이 공식은 미국의 중동부 지역에 대한 농지의 사용용도에 따른 토사유출량의 변화 및 조절을 주 목적으로 개발된 경험공식으로 연평균 토사유출량 산정에 활용되고 있으며 공식의 각종 독립인자 및 계수가 미국의 일부지역에 적합하도록 개발되어 우리나라에 대한 적용성이 검증되지 않았다. 범용토양손실공식은 연평균 또는 그 이상의 장기적인 토사유출량 산정을 위하여 개발된 식이나 재해영향평가에서와 같이 현장 특성 및 공사기간에 비추어 단기적인 성격을 띠고 있는 단일호우에 의한 토사유출량 산정에 많이 활용되고 있는 실정이다. 이러한 현실에 비추어 볼 때 우리 실정에 맞는 범용토양손실공식의 인자값 결정기준과 단일호우에 의한 토사유출량 산정기법이 요구되나 이러한 토사유출량 산정기법을 제시하기 위해서는 체계적인 많은 현장자료가 요구되며 이러한 기초자료의 확보를 위해서는 수십년 이상의 장기적인 연구기간이 소요되므로 이와 같은 체계적인 자료가 축적되기 전까지 다소의 오차가 있다하더라도 우리나라에 적용할 수 있는 검증된 산정기법의 개발은 대단히 시급한 과제인 것이다.

따라서 본 연구에서는 재해영향평가시 토사유출량 저감대책 수립을 위한 장·단시간 호우에 대한 각종 외국 토사유출량 산정기법 중 세계적으로 많이 활용되고 있는 범용토양손실공식 계열의 공식에 대한 우리나라에 대한 적용성을 검토하여 우리 실정에 맞는 토사유출량 산정기법을 제시하고자 한다.

2. 국내·외 연구동향

토양침식은 지표류라 칭하는 무한한 넓이를 가진 얇은 흐름형태를 가진 지표면유출과 작은 수로에서의 흐

름, 발이랑을 만드는 과정에서 발생하는 세류(rill), 구곡(gully)이나 하천에서 나타나는 보다 장기적이며 큰 규모의 흐름이 포함된다. 또 이외는 달리 산사태와 같은 토사체 이동형태도 나타난다(SWCS, 1994). 개발에 의한 유역출구에서의 토사유출량이란 위에서 언급한 각종 침식중 산사태를 제외한 원인에 의해 생산된 토사가 토사발생 지점으로부터 퇴적 및 이송 등의 과정을 반복하며 유역출구까지 도달한 토사량을 뜻하며 각종 토사유출량 산정기법은 그 기법이 산정하고 있는 토사발생원, 토립자의 크기 및 토사전달률 등 그 적용 범위가 다양하여 정확한 개발배경을 이해해야만 정확한 토사유출량 산정이 가능하다. 대부분의 토사유출량의 산정모형은 토사유출에 영향을 주는 가장 중요한 인자만을 선택하여 현장과 실험실에서 편측하고 계측한 각종 자료를 토대로 통계적 기법을 이용하여 토사유출량을 예측하는 경험적 산정기법에 속한다. 이 외에도 물리적 산정기법의 개발에 많은 노력이 가해지고 있으며 국내에서는 방재연구소(1998)에서 토사유출의 물리적 화학적 기구특성에 대한 기초적 연구가 수행된 바 있다.

Wischmeier와 Smith(1965)에 의하여 제시된 범용토양손실공식(USLE ; Universal Soil Loss Equation)은 1970년대 미국내 판상침식 및 세류침식의 산정에 많이 활용되면서 신뢰도가 높은 공식으로 인정되었으나 이 식은 연평균 토사침식량을 산정하는 식이며 판상 및 세류침식에서는 침식능이 약해 1mm 이상의 토립자에 대해서는 적용할 수 없다(Haan, 1994). 토양보전을 위한 설계에 활용하기 위하여 개발된 범용토양손실공식은 세류간 그리고 세류침식량 산정을 위해 개발되었으므로 구곡침식, 산사태에 의한 침식량은 물론 하천이나 저수지에서의 침식 또는 퇴적에 의한 침식량의 증감효과를 반영하지 못한다는 사실을 간과해서는 안된다. 따라서 범용토양손실공식을 이용하여 산정한 특정 유출지점의 토사유출량은 토사생산지점으로부터 지점까지의 전달률을 고려하여야 한다. 또한 이 식은 장기간에 걸친 연평균 토사침식량을 산정하는 식으로 개발되었으므로 하나의 호우 또는 강우사상에 의한 토사침식량 산정시 많은 오차를 유발할 수 있어 세심한 주의를 요한다.

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

1) 국내 농업토목분야에서는 soil loss를 '토양유실'이라고 함.

여기서, Y는 강우침식도 R의 해당기간 중 단위 면적 당 토사침식량($\frac{\text{tonnes}}{\text{ha}}$), R은 강우침식도($\frac{\text{MJ} \cdot \text{mm}}{\text{ha} \cdot \text{hr}}$), K는 토양침식성 인자($\frac{\text{tonnes}}{\text{ha} \cdot R}$ 또는 $\frac{\text{tonnes} \cdot \text{hr} \cdot \text{year}}{\text{MJ} \cdot \text{mm}}$), LS는 유역의 지형학적 특성을 나타내는 무차원 인자, C는 식생 및 피복상태 등 경작 종류와 형태에 따른 무차원 인자, P는 토양보전 대책을 나타내는 무차원 인자이다.

USDA(1997)는 개발목장이나 삼림과 같은 실험지점 이외의 토양조건에 대한 토사침식량 산정을 위해서 기후인자의 수정, 계절적 변화에 대한 토양의 침식성 인자의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 수정과 피복식생인자를 산정하는 새로운 계산과정의 개발 등을 추가한 개정범용토양손실공식(RUSLE ; Revised Universal Soil Loss Equation)을 발표하면서 범용토양손실공식을 개정범용토양손실공식으로 대체한다고 발표하였다.

범용토양손실공식은 주로 산림과 농경지의 토사유출량 산정을 중심으로 기술하였으나 건설현장에 대한 기술은 상대적으로 미약한 편이다. 따라서 TRB(1980)에서는 여러연구자들의 보고서를 인용, 범용토양손실공식 기법을 수정하여 고속도로 건설현장의 토사침식량을 산정할 수 있는 공식을 제시하였다.

$$Y = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot VM \quad (2)$$

여기서, R, K, L, S는 범용토양손실공식에 나타나는 인자와 동일하며 VM은 침식조절인자로 범용토양손실공식의 CP에 상응하는 침식조절 무차원 인자이다.

3. 연구범위 및 방법

최근 국내 토목분야에서 토사유출량을 산정하는 주목적은 재해영향평가가시 개발지역의 유역의 토사유출을 억제하기 위한 침사지 설계자료로 활용하기 위함이다. 따라서 산정기법의 적용목적 및 적용범위가 침사지 설계를 위한 토사유출량 산정이 가능하거나 많이 활용되는 기법을 선정하여 검토하였다. 최근의 연구동향에서 기술한 바와 같이 연평균토사 유출량 산정을 주 목적으로 개발된 범용토양손실공식이 세계적으로 단일호우에 대한 토사유출량 산정기법으로 많이 사용되자 USDA(1977)에서는 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 발표하면서 단일호우에 대한 토사유출량 산정 가능

성을 조심스럽게 논하였다. 따라서 본 연구에서는 개정 범용토양손실공식을 중심으로 그 적용 가능성을 집중적으로 검토하였다.

이렇게 선정된 기법의 국내 적용성을 검토하기 위해서는 이 기법들을 국내 여러 현장에 적용하여 산정된 토사유출량과 실제 관측된 토사유출량을 비교 검토하여 국내 실정에 적합한 산정기법을 찾고 그 오차에 대한 원인을 분석하였다.

현재까지 개발된 토사유출량 산정기법은 첫째, 세류 및 세류간 침식에 의한 토사유출량과 둘째, 수로 및 구곡내에서 발생하는 침식에 의한 토사유출량 그리고 앞의 두가지 토사유출량을 한꺼번에 산정하는 기법으로 나눌 수 있다. 그러나 세 번째 방법도 일반적으로 첫 번째와 두 번째 방법으로 구분하여 각각에 대한 토사유출량을 산정하여 합산하는 계산 과정을 가지고 있으며 대부분의 경우 이 기법은 복잡한 프로그램을 이용하고 있어 토사유출량 산정시 입력 오류나 출력에 대한 검토가 쉽지 않을뿐 아니라 산정기법의 단순한 수정도 대부분 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 세류 및 세류간 침식에 의한 토사유출량의 산정기법과 수로 및 구곡을 통한 토사의 전달에 대한 각종 산정기법도 검토하였다.

4. 토사유출량 산정

4.1 현장 선정

개발에 의한 단기간의 실제 토사유출량은 1998년 6월 현재 재해영향평가가 완료된 16개 현장 중 수문학적, 토양학적 현장특성 자료가 풍부하고 자료수집 등 접근이 용이한 7개 시험유역을 선정하고 선정된 시험유역에 대한 일정 기간동안의 일 강우자료와 침사지에 퇴적된 토사량을 근거하여 토사유출량을 관측했으며 유사샘플을 채취하여 입도분포 분석을 실시하여 토양 침식성 인자 K의 산정에 활용하였다. 각 현장별 위치와 재해영향평가서상 적용된 인자 결정기준이 표 1에 나타나 있다. 참고로 본 논문에서 선정한 유역은 이미 재해영향평가를 받아 침사지가 설치, 운영되고 있는 현장인 점을 감안하여 현장 및 설계자 등 상세한 정보는 표에 수록하지 않았다.

표 1. 현장별 토사유출량 산정을 위한 인자 결정 기법

유역 특성	A	B	C	D	E	F	G
위치	경북 영천시	경북 김천시	대구시 수성구	경기도 수원시	강원도 평창군	충남 서산시	경기도 여주군
적용공식	USLE, 원단위	USLE 원단위	USLE,TRB, 원단위	USLE,TRB 비유사량, 원단위	USLE	USLE, 원단위	USLE
면적(ha)	21.9	43.6	9.7	76.0	21.7	103.5	103.0
R	건설부 (1992)	건설부 (1992)	건설부 (1992)	건설부 (1992)	건설부 (1992)	TRB (1980)	건설부 (1992)
K	Wischmeier 등.(1971)	Wischmeier 등.(1971)	Wischmeier 등.(1971)	건설부 (1992)	Wischmeier 등.(1971)	Wischmeier 등.(1971)	건설부 (1992)
LS	USDA Handbook 537	USDA Handbook 537	USDA Handbook 537	USDA Handbook 537	Morgan (1979)	USDA Handbook 703	USDA Handbook 537
C	Haan 등 (1994)	명확치 없음	Mayer & Ports(1976)	명확치 없음	Mayer & Ports(1976)	Israelson 등(1980) Haan 등 (1994) WischmeierS mith(1978)	WischmeierS mith(1978)
P	USDA Handbook 537	USDA Handbook 537	USDA Handbook 537	명확치 없음	USDA Handbook 282	USDA Handbook 537	1.0
전달률	고려치않음	고려치않음	고려치않음	고려치않음	고려치않음	고려치않음	Frentte & Julien(1987)

4.2 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 이용한 토사유출량 산정

4.2.1 강우침식도(R)

개정범용토양손실공식을 이용하여 예측한 토사유출량을 실제 토사유출량과 비교하기 위해서는 실제 토사유출에 기여한 실 강우에 대한 R값을 우선 산정해야 한다. 연구동향에서도 기술한 바와 같이 범용토양손실공식은 연평균 토사유출량 산정을 목적으로 개발되었으며 이 기법에서 토사유출을 유발하는 강우의 침식도를 나타내는 R은 연평균치를 사용하고 있다. 그러나 국내에서 시행되고 있는 재해영향평가는 개발 등 인류의 각종 산업활동에 의한 인위적인 토사유출을 억제하는 목적을 지니고 있어 최소 일단위로 침사지 관리

가 가능한 현장에서 연평균 R을 사용하여 추가적으로 발생하는 일년간의 토사유출량을 산정하고 침사지 규모를 결정하는 것은 타당치 못한 것으로 판단된다. 따라서 재해영향평가 취지에 부합하는 침사지 규모는 단일호우에 의한 토사유출량을 기준으로 설계하는 것이 타당할 것으로 사료되나 국내외적으로 단일호우의 재현기간과 지속시간에 대한 뚜렷한 선정기준이 없는 실정이다. TRB(1980)에서는 단일호우에 의한 토사유출량 산정을 위하여 지속시간 24시간 강우를 단일호우 자료로 사용하였다. 한편 USDA(1997)에서는 단일호우에 의한 토사유출량을 개정범용토양손실공식을 이용하여 산정할 경우 신중을 기해야 한다고 경고하고 있어 사실상 개정범용토양손실공식이 단일호우에 의한 토사유출량 산정에 적용할 수 있을지는 검증되지 않은 상태이다. 그러나 국내의 경우 대부분의 현장에 범용토

양손실공식을 침사지 설계에 사용하고 있는 현실을 감안하여 개정범용토양손실공식의 적용을 검토하되 R값 산정을 위한 경우에는 TBR에서 제시한 강우지속시간 24시간을 적용하였다.

개정범용토양손실공식의 경우 토사침식량은 모든 인자들의 곱의 형태로 표현되므로 R을 제외한 모든 인자가 동일하다고 간주할 경우 토사생산량은 강우침식도 R에 비례하므로 R의 비교가 바로 토사생산량의 비교로 해석될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 토사유출량을 실측한 기간동안 관측된 모든 일 강우를 지속시간 24시간의 단일 호우사상의 집합으로 간주하여 각 호우사상에 대한 R값(R_{daily})의 총합(R_{total})과 관측기간 중 최대 호우사상에 대한 R값 (R_{max}), 건설부(1992)에서 제시한 연평균 R값(R_{avg}), 지속시간 24시간, 재현기간 30년에 해당하는 단일 호우사상에 대한 R값(R_{30}) 등을 비교 검토하였다.

$$R_{total} = \sum R_{daily} \quad (4)$$

$$R_{max} = \max (R_{daily}) \quad (5)$$

연평균 R값(R_{avg})과 실강우에 대한 1일 최대 R값 (R_{max}) 지속시간 24시간, 재현기간 30년에 해당하는 단일 호우사상에 대한 R값(R_{30}) 및 실강우에 대한 총 R값(R_{total})을 비교한 표 2로부터 7개 현장 중 5개 현장의 경우 재현기간 30년에 해당하는 24시간 지속강우에 의한 R값이 연평균 R값보다 1.13~1.92배 큰 값을 나타내며 나머지 2개 현장은 연평균 R값의 60~80%를 나타내고 있다. 또한 B 현장을 제외한 모든 현장의 경우 재해영향평가서에서 주로 사용하고 있는 연평균

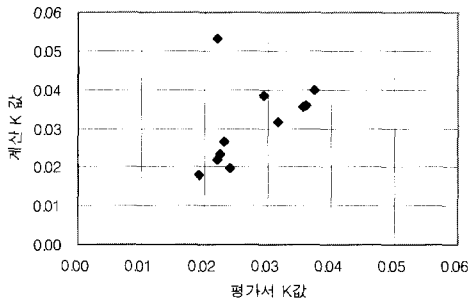
R값이 관측된 실강우에 의한 R값에 비하여 지나치게 크다는 사실도 알 수 있다. 본 연구에서 현장자료를 수집한 1998년도에는 수도권 중랑천 범람 등 각종 호우로 인하여 많은 수해가 발생하였으며 예년에 비해 큰 호우가 발생하였다. 따라서 우기에 해당하는 1998년 6월부터 8월까지 3개월간 전국에 광범위하게 분포되어 있는 현장에 대한 토사유출량의 관측결과는 통계적 개념에 의한 연평균치를 상회할 것으로 판단됨에도 불구하고 연평균 R값에 의한 토사유출량이 관측기간동안의 토사유출량보다 크며 재현기간 30년에 해당하는 24시간 지속강우에 의한 R값이 연평균 R값보다 큰 값을 나타낸다. 이는 외국의 환경문제 대책을 목적으로 하는 침사지 설계지침서에서는 현장의 건설기간에 따라 다소 차이가 있으나 통상 5~10년 빈도 24시간 지속강우에 대하여 설계하는 점을 감안하더라도 통상 재현기간 30년~50년에 해당하는 24시간 지속강우에 의한 R값을 이용하거나 연평균 R값을 이용한 국내의 침사지 설계는 지나치게 과대 설계할 가능성이 대단히 높은 것으로 침사지 설계를 위한 강우의 선정에 대한 체계적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.2.2 토양침식성인자(K) 비교

개정범용토양손실공식에서는 토양의 침식성은 연중 일정한 값을 나타낸다고 가정하였으며 Wischmeier 등(1971)은 토양특성 인자를 이용하여 K값을 산정할 수 있는 도표 및 식을 제안하였으며 Haan(1994)은 토성분류에 따른 K값을 제안하기도 하였다. 우리나라의 경우 건설부(1992)에서 전국의 토양통별 K값을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 7개 시험유역에 대한 현장의 토양자료를 이용하여 K값을 산정하고 일부 재해

표 2. 연평균 R과 관측자료 및 특정강우에 의한 R의 비교

현장	면적 (ha)	강우침식도(R)				(산정 R)/(연평균 R)의 비		
		R_{avg}	R_{total}	R_{30}	R_{max}	$\frac{col.2}{col.1}$	$\frac{col.3}{col.1}$	$\frac{col.4}{col.1}$
		col.1	col.2	col.3	col.4	col.5	col.6	col.7
A	21.9	3200	1360	3624	462	0.43	1.13	0.14
B	43.6	3300	7256	2641	2012	2.20	0.80	0.61
C	3.5	2090	1346	3624	823	0.64	1.73	0.39
D	25.9	5570	1293	3838	584	0.23	0.69	0.10
E	21.7	3000	550	3713	182	0.18	1.24	0.06
F	103.5	3720	3057	2774	2045	0.82	0.75	0.55
G	15	4800	3075	9193	2166	0.64	1.92	0.45
평균	34	3669	2562	4201	1182	0.70	1.15	0.32



(K 단위 : tonnes/ha/R)

그림 1. 평가서 K와 계산 K (Wischmeier 등; 1971)의 비교

영향평가서에서 채택한 건설부(1992)의 K값과 비교하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 건설부(1992)의 K값과 실측한 현장의 토양입도분포를 토대로 Wischmeier 등(1971)의 공식을 이용하여 산정한 K값은 대부분 유사한 결과를 보이고 있으나 1개 현장의 경우 약 2배의 차이를 보이고 있다. 이 현장의 경우 재해영향평가서에서는 전국의 토양통 자료를 이용한 K값을 인용하였으며 본 연구에서는 현장의 시료를 채취 입도분포를 분석한 결과를 Wischmeier 등(1971) 공식을 이용하여 산정하였다. 이와 같이 전국의 토양통 자료를 이용한 K값을 토사유출량 산정에 적용할 경우 실제와 많은 차이가 날 수 있으므로 현장의 입도분석을 통해 산정한 K값과 건설부(1992)의 K값을 비교하여 K값 산정에 보다 신중을 기해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4.2.3 무차원 지형인자(LS) 비교

사면길이와 사면경사 등 지형학적 인자가 침식에 미치는 영향을 반영하고 있는 무차원 인자 L, S는 침식이 실제 발생하는 구간 선정에 대한 정확한 이해와 높은 숙련도가 요구되는 인자로 USDA(1997) 매뉴얼에서도 침식발생구간 및 그 방향선정을 위한 기초적인 숙련도 숙지를 위해 많은 예를 들고 있다. 따라서 본 연구에서는 USDA(1997) 매뉴얼을 충분히 숙지하고 많은 연습을 쌓은 후 침식발생구간 및 그 방향을 선정하여 LS를 산정한 후 기존의 재해영향평가서에서 산정한 LS값과 비교하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 대부분의 현장에서 평가서에 나타난 LS값이 본 연구에서 산정한 LS값 보다 작은 값을 나타내고 있다. 본

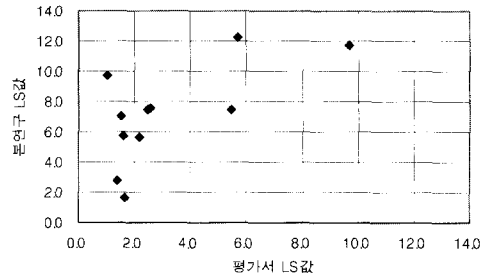


그림 2. 재해영향평가서의 LS와 본 연구의 LS 비교

연구와 재해영향평가서상의 오차범위가 전체적으로 비교적 큰 것으로 판단되어 이에 대한 검토를 위하여 각 현장에 대한 지형학적 유역특성을 정리하고 본 연구에서 구한 LS값과 평가서상의 LS값의 비와 지형학적 유역특성 인자와의 상관관계를 표 3에 나타난 바와 같이 비교하였다. 그 결과 미약하기는 하나 유역면적 및 유역 경사도와 LS값 비 사이에 선형 관계가 있다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 유역이 커지면 커질수록 또한 경사가 급하면 급할수록 LS 산정에 엔지니어의 주관에 개입될 소지가 크다는 일반적인 결론을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 산정한 LS값의 신뢰도 분석을 위하여 본 연구에서 제시한 LS값과 재해영향평가서에서 제시하고 있는 LS값의 차이가 큰 1개 현장에 대해서는 GIS기법을 도입하여 LS값을 산정하여 재해영향평가서 및 본 연구의 LS값과 비교하여 보았다.(표 4 참조) GIS 기법을 도입한 LS값은 Hickey 등(1994)의 연구결과를 이용하였으며 해석을 위한 격자망은 20m × 20m를, 유역대표 LS값은 전유역의 평균치와 소유역에 대한 최대값과 최소값의 평균값을 적용하였다.

표 4에 나타난 바와 같이 본 연구의 LS값과 Hickey 등의 GIS 기법을 이용하여 산정한 LS값이 유사하다는 사실로부터 본 연구에서 산정한 LS값에 대한 신뢰도와 자료의 일관성을 위하여 본 연구에서 산정한 결과치를 LS값을 이용하여 모든 분석을 수행하였다. 향후 연구과제로 도상검토를 통해 유사한 흐름의 방향과 토사생산에 영향을 미치는 구간의 거리 및 경사도를 나타내는 구역의 설정 등 설계자의 주관적 견해가 반영될 소지가 많은 LS값의 보다 객관적이고 정확한 대표값 산정을 위해서는 GIS 기법 도입에 대한 연구가 요구된다.

표 3. 각 현장별 지형학적 유역특성

현장	평가서	본 연구	LS 비	유역면적 (ha)	유로연장 (m)	경사도 (%)	유역세로/가로비
	LS	LS					
	col.1	col.2	col.2/col.1	col.4	col.5	col.6	col.7
A	5.68	12.27	2.16	21.88	435	9.0	2.0
B	5.47	7.52	1.37	43.56	1200	19.6	1.0
C1	1.51	7.01	4.65	34.5	920	17.2	2.0
C2	1.04	9.74	9.36	62.5	1060	32.8	1.0
D1	1.38	2.75	1.99	25.72	829	6.2	3.0
D2	1.68	1.68	1.00	30.14	776	8.4	1.0
E	9.67	11.76	1.22	21.7	1917	27.5	0.2
F	2.47	7.52	3.04	103.5	1200	3.3	1.0
G1	1.61	5.74	3.56	15	448	25.3	0.5
G2	22.58	7.60	0.34	45	1110	7.7	2.0
G3	2.17	5.66	2.61	43	1200	7.9	2.0

표 4. 산정기법 및 산정기관에 따른 B 현장의 LS 비교

	재해영향 평가서	본 연구	GIS	
			cell 평균치	소유역내 최대·최소값의 평균치
LS값	4.4	12.3	10.9	12.7

4.2.4 토사생산량 및 토사전달률

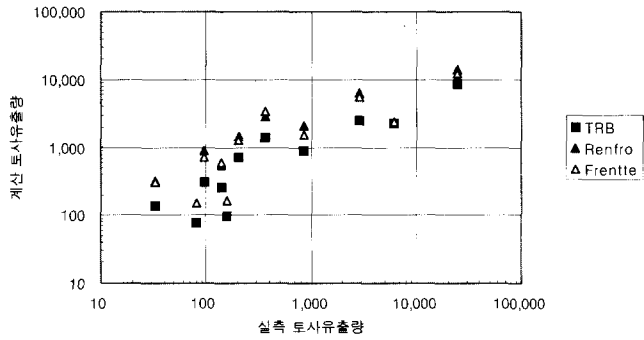
개정비용토양손실공식을 이용하여 산정한 토사유출량은 엄밀한 의미에서 강우에 의한 토사생산량이라고 침사지 설계를 위한 토사유출량은 현장의 각종 지형 및 지질학적 여건에 따라 토사전달률을 고려하여야 한다. 표 1에서 나타난 바와 같이 국내의 재해영향평가에서는 이와 같은 개념을 이해하고 도입한 예가 거의 없어 관련기관이나 관계자들의 많은 자문 및 교육이 절실한 것으로 판단된다. 토사전달률 산정에 대한 국내자료는 전무한 상태이며 외국의 경우 유역면적과 전달률의 상관관계를 연구한 Frenette와 Julien(1987)이외에 TRB(1980)에서 토성과 유역면적과의 관계를 발표하였으며 Renfro(1972)는 Texas와 Oklahoma 지역의 Red hill에 대한 토사전달률에 대하여 유역표고-길이의 비 즉, 유역경사와 토사전달률간의 단순관계를 연구하였다. 국내에서는 국립방재연구소(1998)에서 토사전달률에 대한 외국의 연구동향에 대해서 종합적으로 검토한 바 있다.

본 연구에서는 토사유출량을 실측한 기간동안 관측된 모든 일 강우를 지속시간 24시간의 단일 호우사상의 집합으로 간주하여 각 호우사상에 대한 토사생산량

을 산정한 후 유역의 유출점까지의 토사전달률을 고려한 토사유출량의 총합과 관측기간에 대한 실측치와 비교하였다. 또한 Frenette와 Julien(1987), TRB(1980), 그리고 Renfro(1972)에 의한 토사전달률 산정기법에 관한 연구결과를 적용하여 검토하였으며 이상의 기법으로부터 산정된 토사전달률과 토사생산량으로부터 토사유출량을 산정하여 관측된 토사유출량과 비교하여 국내 적용 가능성이 높은 토사전달률 산정기법을 선정하였다.

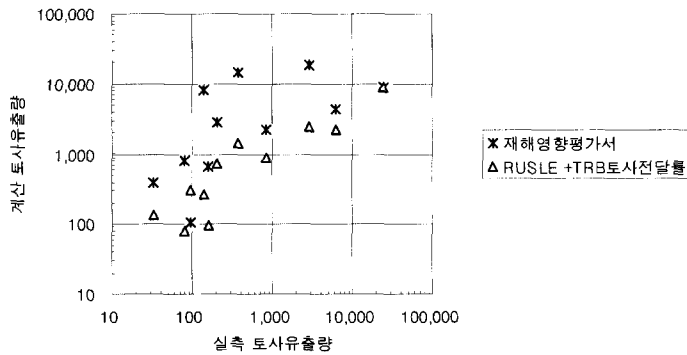
현장의 유출점을 통과하는 토사유출량 실측은 일정기간 동안 침사지에 퇴적된 토사량의 누가 체적을 실측하고 비중을 측정하여 그 중량을 산정하는 방법을 택하였다. 따라서 실측된 토사유출량은 실제 토사유출량 보다 호우 기간 중 침사지를 월류한 유출수에 포함된 부유사량 만큼 작을 것이다.

그림 3에 나타나는 바와 같이 Renfro(1972)기법, TRB(1980), 그리고 Frenette와 Julien(1987)에 의한 토사전달률을 고려한 토사유출량과 실제 토사유출량을 비교한 결과는 모두 비슷한 결과를 보여주고 있으나 TRB(1980)기법이 다소 우수한 결과를 보여주고 있다. 각 현장에 대한 Renfro(1972)기법, TRB(1980), 그리고 Frenette와 Julien (1987)기법에 의한 토사전달률의



(토사유출량 단위 : tonnes)

그림 3. 토사전달률을 고려한 토사유출량과 실측 토사유출량의 비교



(토사유출량 단위 : tonnes)

그림 4. 산정기법에 따른 계산 토사유출량과 실측 토사유출량의 비교

평균은 0.59, 0.31, 0.57이며 그 범위는 0.54-0.6, 0.2-0.6, 0.41-0.72로 나타났다.

그림 4로부터 재해영향평가서에서 예측한 토사유출량은 실제에 비해 과다 산정되고 있다는 사실을 알 수 있으며 일반적으로 현재까지의 재해영향 평가서에서 예측한 토사유출량보다 본 연구에서 제시한 토사유출량이 실측치에 훨씬 가깝다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 현상의 가장 큰 이유로는 토사 전달률의 고려 유무와 LS 인자 산정에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구의 토사유출량 산정기법에 의하면 토사유출이 작은 현장에서는 실제보다 큰 유출량을 예측하고 있으나 상대적으로 토사유출량이 큰 현장에서는 실제보다 작은 토사유출량을 예측하고 있다는 사실을 알 수 있으나 이와 같은 현상의 원인으로 토사전달률을 생각할

수 있으나 현재까지의 자료만으로는 단정하기 어려우며 좀더 많은 연구가 요구된다. 참고로 토사전달률을 고려한 계산 토사유출량과 실측 토사유출량과의 통계적 상관관계는 회귀식 $y = x^{1.04}$, 상관계수는 0.86으로 분석되었다.

5. 연구결과 비교검토

외국의 토사유출량 산정기법중 개정범용토양손실공식(RUSLE)의 우리나라에 대한 적용성을 검토한 본 연구를 통해 각종 토사생산량 산정기법의 적용범위 및 한계성을 검토하였다. 토사전달률을 고려한 개정범용토양손실공식 그리고 국내 재해영향평가서에서 제시한 예상 토사유출량을 동시에 비교하여 개정범용토양손실공식이 비교적 실측치와 가까운 예측결과를 보이고 있

음을 알 수 있었다. 그러나 현재까지 국내 재해영향평가서에서 제시한 산정기법은 토사전달률을 대부분 무시하고 있어 실측 토사유출량에 비해 지나치게 과다한 토사유출량을 예측하였음을 알 수 있었다. 또한 TRB(1980)기법을 우리나라에 적합한 토사전달률의 산정기법으로 제안하였다.

RUSLE공식의 적용시 사용되는 LS값은 도상검토를 통해 유사한 흐름의 방향과 토사생산에 영향을 미치는 구간의 거리 및 경사도를 나타내는 구역의 설정 등 설계자의 주관적 견해가 반영될 소지가 많아 LS값의 보다 정확한 대표값 산정을 위해서는 GIS와 같은 기법을 도입하여 LS값을 산정할 수 있는 보다 객관적인 기법에 대한 연구가 요구된다.

현장에 대한 토사유출량의 관측 및 비교검토 결과 통상 재현기간 30년~50년에 해당하는 24시간 지속강우에 의한 R값을 이용하거나 연평균 R값을 이용한 토사유출량 산정은 침사지를 과대 설계할 가능성이 대단히 높은 것으로 나타나 침사지 설계를 위한 강우의 선정에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 지원(과제번호103241)에 의하여 수행되었으며 관련기관에 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

국립방재연구소 (1998). 토사의 물리적 화학적 성질 및 이동특성 조사분석 및 해외토사유출 산정기법, 행정자치부.

건설부 (1992). 댐설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구

Frenette, M., and P.Y. Julien (1987). "Computer modelling of soil erosion and sediment yield from large watershed." *Int. J. Sediment Re.*, Vol.2, Nov., pp. 39~68

Haan, C.T., B.J. Barfield, and J.C. Hayes (1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchment*, Academic press.

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.

Meyer L.D., and M.A. Ports (1976). "Prediction and control of urban erosion and sedimentation", *National symposium on urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment control*, Univ. of Kentucky, Lexington, Kentucky, July 26-29

Morgan R.P.C. (1979). "Soil Erosion". Longman

Renard K.G., G.R. Foster, G.A. Wessies, D.K. McCool, and D.C. Yoder (1993). *Predicting soil erosion by water - A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE*. U.S. ARS Publication.

Renfro, G.W. (1972). "Use of erosion equations and sediment-delivery ratios for predicting sediment yield." *Proc., Sediment-Yield Workshop*, Oxford, Miss., Nov.28-30, pp. 33~45

SWCS (1994). *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society.

TRB (1980). *Design of sedimentation basins*. National Cooperative highway Research Program Synthesis of Highway Practice #70, Transport Research Board.

USDA (1997). *Predicting soil erosion by water : A Guide to conservation planning with the RUSE*. Agriculture Handbook #703.

Wischmeier W.H., and D.D. Smith (1965). *Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains*. US. Dep. Agric., Agricultural Research service. Agricultural Handbook. No. 282.

Wischmeier W.H., and D.D. Smith (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. US. Dep. Agric., Agricultural Handbook. No. 537.

Wischmeier W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross (1971). "A soil erodibility nomograph for farmland and sconstruction site." *J. Soil Water Conserv.*, Vol.26, pp. 189~193

(논문번호:00-050/접수:2000.08.03/심사완료:2001.05.03)