

# 토사유출량 산정기법의 적용 가능성 검토

○박무종\*, 손광익\*\*

## 1. 서론

골프장, 스키장 혹은 공업 및 위탁단지와 같은 대규모 개발사업시에 식생의 변화, 토양 피복상태 및 토지이용 상황의 변화는 주변 여건의 급격한 교란을 초래하여 과거와 동일한 규모의 강우에도 더욱 심화된 침식이나 퇴적을 유발하게 된다. 이와 같은 토사유출의 급격한 변화는 지형학적 변화를 초래하게 되어 하천의 통수단면 감소, 하천시설물 파괴 등을 유발하며 하천수질 악화와 주변식생의 파괴 등과 같은 재해도 초래한다. 토사유출에 의한 피해를 최소화할 수 있는 방안을 수립하기 위해서는 토사 발생량을 파악하여야 하며 이는 토사발생 장소, 시간, 규모 및 이동형태가 먼저 정확히 파악되어야 하나 토사 개개입자의 특성을 분석하여 토사의 거동을 파악하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 각종 연구에 의해 제시된 토사유출량 산정공식을 조사하고 실유역에 적용하여 현장조사에 의한 토사유출량과 비교하였다. 이를 통하여 현재 사용중인 토사유출량 산정공식의 적용 가능성과 실제 개발현장에서의 토사유출발생 범위를 확인하였다.

## 2. 토사유출량 산정공식

대부분의 토사유출량의 산정모형은 표 1에 나타나는 모형종류 중 토사유출에 영향을 주는 가장 중요한 인자만을 선택하여 현장과 실험실에서 관측하고 계측한 각종 자료를 토대로 통계적 기법을 이용하여 토사유출량을 예측하는 경험적 grey-box type에 속한다. 최근 침식 과정에 대한 역학적 이해도가 높아져 white-box 또는 physically-based model의 개발에 많은 노력이 가해지고 있는 실정이다.

모형은 사실적이고 단순해야 하며 모든 계수의 결정은 그 모형의 사용목적에 따라 난이도가 적절해야 한다. 따라서 모든 모형을 구축하기 위해서는 그 목적이 정량적 예측인지 또는 정성적 기술을 요하는 것인지가 결정되어야 할 것이다. 관리자, 계획자, 정책결정자의 경우 단순하나 정책결정에 도움을 줄 수 있는 모형을 원할 것이며 연구자의 경우 시스템의 이해와 시스템을 표현할 수 있는 함수의 개발에 보다 많은 관심을 가질 것이다. 본 연구에서는 연구적인 측면보다는 실무적으로 보다 손쉽게 적용할 수 있는 모형을 중심으로 검토하고자 한다. 침식량 예측은 일년, 하루단위 또는 강우사상에 대한 기간과 평지, 사면과 유역에 따라 달라질 것이다. 이러한 시공간적 조건이 모형에서 기술될 수 있어야 한다. 따라서 사용자는 사용목적 및 적용하고자 하는 조건을 잘 표현하는 적합한 모형을 선정해야 하며 사용목적에 따른 모형은 Screening모형과 Assessment

---

\* 한서대학교 토목공학과 전임강사

\*\* 영남대학교 토목공학과 조교수

모형으로 구분된다. Screening모형은 개념적이고 단순하여 문제지역의 선정이 목적이므로 토사유출량의 예측 규모가 실제치와 유사한 정도의 수준이면 족하다. Assessment모형은 침식방지 기법에 따라 토사유출량의 경중이 가려질 수 있도록 보다 정확한 예측이 요구된다.

표 1 모형의 분류

Type		Description	
Physical		실험실내에 축소 모형을 제작 ; 원형과 축소모형 사이의 상사법칙이 성립된다고 가정된 모델.	
Analogue		기계적, 전기적 시스템을 이용, 전류 흐름 등을 이용, 물의 흐름 등을 계측	
Digital	Physically-Based (Process-based)	질량 및 에너지 보존 법칙 등을 이용 하여 침식과정을 수학 식으로 기술한 모델	
	Stochastic	기존 자료의 통계적 특성을 이용하여 발생시킨 합성자료를 기초로 한 모델로 비교적 관측기간이 짧은 자료만이 유용할 때 타모델의 입력 자료로써 활용됨.	
	Empirical	Black-Box	영향인자 사이의 통계적 상관관계를 규명하는 모델로 단지 영향인자와 결과에 대한 관계만을 규명
		Grey-Box	일부 침식구조에 대해 비교적 자세한 이해가 따른 모델
White-Box		전체 침식구조에 대한 충분한 이해가 따른 모델	

우리는 현재 수분이내의 짧은 시간 동안의 침식과정에 대하여 가장 잘 이해하고 있을 뿐이며 따라서 장기적인 침식량의 산정을 위해서는 연간 침식량의 산정을 통한 경험적 모형의 개발이 요구된다. 또한 침식량을 산정하고자 하는 면적의 규모 및 지형학적 조건에 따라 달라지므로 모형의 적용이 가능한 그 경계 또한 고려되어야 한다.

### 3. 적용성 검토를 위한 토사유출량 산정 모형

물리적 산정기법 모형은 자료의 방대함으로 인하여 실제 적용이 불가능하여 경험적인 모형인 USLE(Universal Soil Loss Equation), RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation), MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation), SLEMA(Soil Loss Estimator for Southern Africa)와 Morgan & Finney 기법을 적용하여 실유역에서의 토양침식량을 산정하였다. 각 모형의 형태와 적용방법은 다음과 같다.

#### 3.1 USLE기법

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

여기서 A = 강우침식능 R의 해당기간 중 단위면적에서 침식되어 손실되는 토사량

R = 호우침식성

K = 토양침식성

LS = 무차원 지형인자 (L=침식사면의 길이인자, S=침식사면의 경사인자)

C = 작물형태, 피복상태 등 경작종류와 형태에 따른 경작인자

P = 등고선경작 등 토양보전 대책인자

### 3.2 RUSLE

RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)는 USLE 를 보완하고 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산할 수 있도록 하였다. 또한 USLE에서는 없었던 연구자료의 분석을 추가 보완하였으나 USLE의 식의 형태는 계속 유지하도록 하였으며 계수 산정기법을 수정하고 특정조건을 나타낼 수 있는 항들을 새로이 추가하였다.

### 3.3 TRB (Transport Research Board)

USLE는 주로 산림과 농경지의 토사유출량 산정을 중심으로 기술하였으나 건설현장에 대한 기술은 상대적으로 미약한 편이다. 따라서 TRB(1980)는 Clyde 등(1980)의 보고서를 인용, USLE 기법을 수정하여 고속도로 건설현장의 토사침식량을 산정할 수 있는 공식을 제시하였다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot VM \quad (2)$$

### 3.4 MUSLE

USLE는 농경지나 건설현장과 같이 사면 마루부에서의 판상 및 세류침식에 의한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 기법으로 단일강우에 의한 침식량을 산정할 수 없다. 따라서 이와 같은 단점을 보완하고자 Williams와 Berndt (1972)는 MUSLE (Modified USLE) 기법을 제안하였다. Williams(1976)는 USLE에서 사용한 강우에너지 항인  $EI_{30}$  지수를 유출에너지 항으로 대체하는 방법으로 균등유역에서는 총괄인자접근기법(lumped parameter approach)을 비균등유역에서는 유사전달과정(sediment routing procedure)를 제안하였다. 총괄인자기법은 전 유역을 하나의 특성인자로 표현한 것이다.

토사유출량을 가장 잘 산정할 수 있는 인자이며 유출에너지를 나타내는 인자로 유출량과 침투유량의 곱인  $Q \cdot q_p$  를 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$Y = 95(Q \times q_p)^{0.56} \{K\}_a \{LS\}_a \{CP\}_a \quad (3)$$

여기서 Y = 단일호우에 의한 토사침식량(tons)

Q = 유출체적 (acre-feet),

$q_p$  = 침투유량(  $ft^3/sec$  )

$\{K\}_a, \{LS\}_a, \{CP\}_a$  = 면적가중치를 이용하여 산정한 유역의 RUSLE 인자의 평균값

### 3.5 SLEMA(Soil Loss Estimator for Southern Africa) 기법

Zimbabwe 의 여러 농장시스템의 침식자료를 이용하여 개발된 기법으로 적절한 토양보전기법을 제시할 수 있는 기법으로 남 Africa 전역에 걸쳐 채택되고 있다.

$$Z = K \cdot X \cdot C \quad (4)$$

여기서, Z= 연평균 토사침식량 (t/ha)

K= 침식성(F)을 알고있는 30m(L)x10m(W), 25° 의 표준필드의 연평균토사침식량 (t/ha)

X= 사면의 기울기와 길이를 혼합시킨 무차원인자

C= 무차원 농작물 관리인자

$$\ln(K) = \ln(E) + a \quad (5)$$

E = 연평균 강우에너지 ( $J/m^2$ )

a = 2.884 - 8.2109 F

b = 0.4681 + 0.7663 F

$$X = L^{0.5} (0.76 + 0.53 s + 0.076 S^2) / 25.65 \quad (6)$$

L = 사면길이 (m)  
S = 사면기울기 (%)

### 3.6 Morgan & Finney 기법

Morgan과 Finney(1984)는 지형학자와 농공학자의 연구결과를 이용하여 USLE와 같은 단순성을 유지하면서 사면과 같은 field규모에 대한 토사침식량 산정모형을 개발하였다. 모형은 물에 의한 침식상과 퇴적상으로 구분하였다. 토양침식은 빗방울의 충격에 의한 토립자의 토사체로부터의 이탈과정과 박리된 토립자의 물에 의한 이송과정으로 구분하였다. 6개의 함수와 15개의 입력자료를 요하는 이 모형의 공식은 아래와 같다.

Water phase

$$E = R(11.9+8.7\log_{10}I) \quad (7)$$

$$Q = R \cdot \exp(-R_c/R_o) \quad (8)$$

where

$$R_c=1000 \cdot MS \cdot BD \cdot RD \cdot (E_i/E_o)^{0.5} \quad (9)$$

$$R_o=R/R_n \quad (10)$$

Sediment phase

$$F=K(E \cdot \exp[-aA])^b \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

$$G=CQ^d \sin(S) \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

E = 빗방울 운동에너지(J/m<sup>2</sup>)

Q = 사면류 총량(mm)

F = 빗방울 충격에 의한 흙입자의 박리량(kg/m<sup>2</sup>)

G = 사면류운송능(kg/m<sup>2</sup>)

지수값 : a = 0.05 ; b = 1.0 ; d = 2.0

## 4. 모형의 적용

### 4.1 현장조사지역

모형의 적용성을 평가하기 위해 조사한 지역은 충청남도 천안시 성남면 용원리 일원에 조성중인 천안 온천관광지 개발사업현장이다. 이 지역은 1단계 부지공사중('98년 현장조사시)이며 2개의 침사지가 설치되어 있으며 토사준설량과 6개의 토질시료를 채취하였다(그림 1, 표 2 참조). 이 지역은 재해영향평가지 토사입자의 비중을 1.6534, 대상입자의 규모를 0.2mm, 홍수량산정은 RRL유출량산정방법을 이용하였다.

침사지 퇴적도양의 입도분포를 이용하여 설계시 적정입자의 직경을 도출하기 위하여 원지반과 토질시료의 입도분포를 그림 2와 같이 도시하였다. 그림 2는 원지반과 침사지 토질시료의 입도분포를 나타낸 것이다. 여기서, 점선은 원지반의 입도분포를 실선은 토질시료의 입도분포를 나타낸 것으로 4번실선은 침사지의 하류측에서 1, 2, 3, 5, 6번은 침사지의 상류측에서 각각 채취한 것이다. 1, 2번 실선(침사지 하류측 채취)이 원지반보다도 가는 입자가 더 많은 것은 침사지내로 유입된 물이 월류하기 전과 홍수가 끝난후 침사지의 물이 서서히 배출되는 동안 완전침전이 이루어지는데 기인한다. 또한 3, 4, 5번 실선(침사지 상류측 채취)은 침사지의 저류효과가 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단된다. 개발현장의 입도분포곡선은 지질학적 특성에 따라 그 형태가 서로 상이하게 나타나며 침사지의 준설량과도 밀접한 상관관계를 나타낸다.

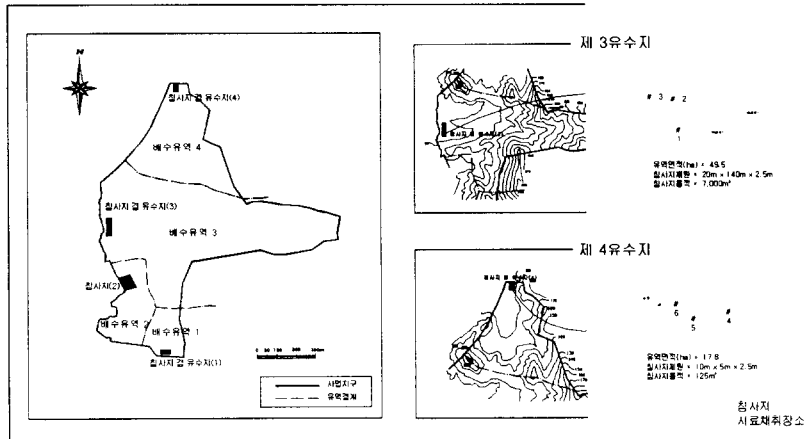


그림 1 현장조사 지역도

표 2 현장에 설치된 침사지 설계제원 및 준설용적(천안 은천관광지 사업현장)

유역이름	제 3유수지	제 4유수지	비고
~'98.7 퇴적토의 퇴적용적(m³)	1500	4.5(15cm)	
'98.8~ 퇴적토의 퇴적용적(m³)	1000	15(30cm)	
설계시 퇴적용적(m³)	514.34	180.86	
연간토양침식량(kg/m²·year)	1.718	1.680	
연간토양침식량(m³/year)	514.34	180.86	
50년 빈도유출총량(m³/sec)	9374	2564	
유역면적(ha)	49.5	17.8	
설계시 침사지제원(m³)	20 x 140 x 2.5	10 x 5 x 2.5	
설계시 침사지용적(m³)	7,000	125	

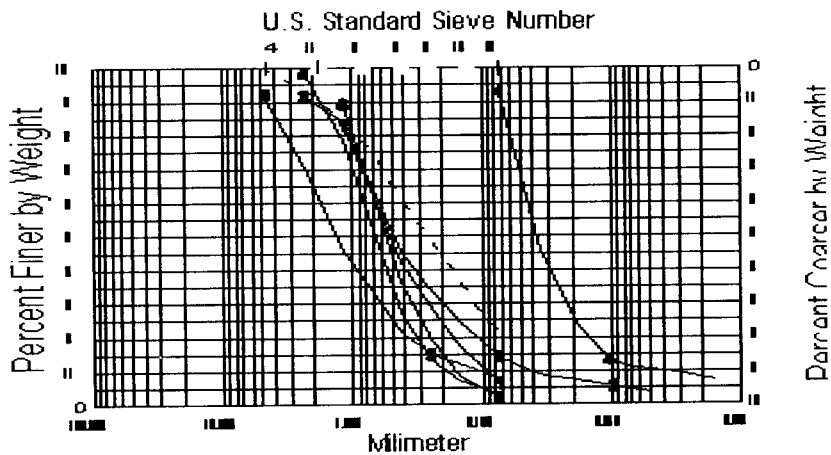


그림 2 시료의 입도분포 곡선(천안 은천관광지 사업현장)

#### 4.2 모형의 적용결과

앞 절에서 언급된 각종 토사유출량 기법을 실유역에 적용한 결과는 다음과 같다. 이때, 토사유출량의 발생빈도는 각 기법의 비교를 위하여 공통적으로 30년으로 하였다.

표 3 각 기법에 따른 토사유출량 비교검토 (단위: metric tonnes)

유역	피복 상태	면적 (m <sup>2</sup> )	USLE			TRB			MUSLE			SLEMA	MORGAN
			개발전	개발중	개발후	개발전	개발중	개발후	개발전	개발중	개발후	개발전	개발전
1-A	산림	23239	1.04	725.99	0.62	-	1140.83	-	-	-	-	0.455	0.058
1-B	산림	21791	0.40	280.39	0.24	-	440.62	-	-	-	-	0.186	0.031
1-C	산림	33934	1.51	1.51	1.51	-	1.51	-	0.04	16.22	0.03	0.665	0.084
2-A	논	119833	102.47	2097.28	1.80	-	3295.72	-	-	-	-	0.330	76.27
2-B	산림	22667	0.74	514.65	0.44	-	808.74	-	-	-	-	0.349	0.044
2-C	산림	34750	1.50	1.50	1.50	-	1.50	-	-	-	-	0.744	0.078
2-D	산림	26167	1.12	781.95	0.67	-	1228.78	-	5.59	157.93	0.18	0.581	0.068
3-A	밤나무	53297	14.83	1153.09	0.99	-	1812.00	-	-	-	-	1.044	0.132
3-B	논	117770	40.52	933.00	0.80	-	1466.15	-	-	-	-	0.243	74.96
3-C	밤나무	95000	32.61	2536.66	2.17	-	3986.18	-	-	-	-	1.697	0.209
3-D	산림	12261	0.19	0.19	0.19	-	0.19	-	-	-	-	0.111	0.023
3-E	밤나무	44372	11.42	888.38	0.76	-	1396.03	-	-	-	-	0.633	0.078
3-F	산림	50628	1.20	1.20	1.20	-	1.20	-	13.37	540.31	0.62	0.743	0.138
4-A	산림	56220	13.80	1073.64	0.92	-	1687.15	-	-	-	-	0.678	0.081
4-B	논	47038	12.35	252.86	0.22	-	397.36	-	-	-	-	0.062	29.938
4-C	산림	51467	2.42	1691.33	1.45	-	2657.80	-	-	-	-	1.105	0.136
4-D	산림	21344	0.58	0.58	0.58	-	0.58	-	3.90	193.28	0.20	0.313	0.058
합계			238.71	12934.2	16.08	-	20322.3	-	22.90	907.73	1.03	9.939	182.382

#### 4.3 결과의 고찰

##### 1) 개발상태에 따른 토사유출량 산정방법의 적용성 검토

USLE, TRB, MUSLE, SLEMA, MORGAN 기법을 실유역에 적용하여 토사유출량을 산정하였다. 이 기법들은 경험적 산정기법으로 물리적 산정기법은 자료의 실측자료의 수집 및 지형자료입력의 한계로 인하여 적용이 거의 불가능하다.

실유역에 적용된 각 기법들은 개발전·중·후에 모두 적용가능한 것은 아니며 (R)USLE, MUSLE이 개발상황에 따라 토사유출량의 산정이 가능하다. TRB기법은 특성상 개발중의 토사유출량에 대해서만 산정가능하며 SLEMA기법과 MORGAN & FINNEY기법은 개발전의 토사유출량에 대해서만 적용가능하다. 이러한 면에서 (R)USLE 기법에서 개발된 MUSLE 기법이 실제 개발상황에 따른 토사유출량을 산정하고 대책을 세우는데 유리한 것으로 판단된다.

##### 2) 각 기법에 따른 토사유출량 비교

실유역에 각 토사유출량을 적용한 결과 개발전의 토사유출량은 (R)USLE, MUSLE, SLEMA, MORGAN & FINNEY 기법에 따라 각각 238.71, 22.90, 9.94, 182.38 metric tonnes 인 것으로 나타났다. 각 토사유출량 산정기법에 따라 24배 정도로 큰 차이가 발생하는 것은 토사유출량 산정기법의 오차가 매우 크게 발생하며 적용시 큰 주의가 필요함을 알 수 있다. 표 3에서 각 유역별 토사유출량중 소유역의 토지이용이 논인 경우 다른 피복상태와 비교하여 오차가 더욱 발생하고 있음을 알 수 있다.

개발중의 토사유출량은 전체유역의 경우 (R)USLE, TRB, MUSLE 기법에 따라 각각 12934.2, 20322.3, 907.73 metric tonnes 으로 나타났으며 상대적으로 MUSLE 기법이 작게 산정되었다.

##### 3) 각 기법에 따른 토사유출량과 실측치 검토

각 기법에 의한 30년 빈도 토사유출량을 실측치와 비교하였다. 실유역내에는 3, 4 소유역의 출구점에 설치된 침사지가 있으며 부지정리를 위하여 정지작업이 진행되어 개발중의 조건으로 분류하여 '98년 8월중에 퇴적된 토사유출량을 조사하였다. '98년 8월중 이 지역에 내린 강우량은

800mm 이상으로 토사가 발생할 수 있는 충분한 조건으로 판단된다. SLEMA와 Morgan & Finney 기법은 개발중의 토사발생 특성을 고려할 수 없어 개발전의 토사유출량만을 산정하였다.

소유역 3에 위치한 침사지에 퇴적된 실측 토사유출량은 1400 metric tonnes이며 USLE, TRB, MUSLE 기법에 의한 토사유출량은 각각 5512.52, 8661.75, 540.31 metric tonnes 이다. 소유역 4에서는 침사지내 실측토사유출량이 21 metric tonnes 이며 USLE, TRB, MUSLE 기법에 의한 토사유출량은 각각 3018.41, 4742.89, 193.28 metric tonnes 이다. 실측치와 계산된 토사유출량은 (R)USLE, TRB 기법은 과대산정이 되었으며, MUSLE 기법은 비교적 근사한 결과를 보이고 있다. 토사유출량의 산정결과는 침사지 규모와 밀접한 상관이 있으며 기존에 주로 사용되던 (R)USLE 기법에 비하여 MUSLE 기법이 실측자료와 더 근사한 결과를 보임을 알 수 있다.

표 4 토사유출량 비교 (단위: metric tonnes)

소유역	세유역	침사지내 8월중 m <sup>2</sup>	실측 토사유출량 tons	USLE	TRB	MUSLE
III	A			1153.09	1812.00	-
	B			933.00	1466.15	-
	C			2536.66	3986.18	-
	D			0.19	0.19	-
	E			888.38	1396.03	-
	F			1.20	1.20	540.31
	침사지	1000*	1400**	합계 5511.32	합계 8660.55	합계 540.31
IV	A			1073.64	1687.15	-
	B			252.86	397.36	-
	C			1691.33	2657.80	-
	D			0.58	0.58	193.28
	침사지	15*	21**	합계 8529.15	합계 13402.86	합계 193.28

## 5. 결론

현장에서의 토사유출량과 각종 기법에 의한 토사유출량을 산정한 결과를 비교한 결과 (R)USLE, TRB 기법에 의한 토사유출량은 상당히 과대산정되는 것으로 나타났다. 이는 토사유출량이 많은 불확실성과 복잡한 발생기구에 기인하며 장기간의 연구와 실측자료의 분석이 요구된다. 1개의 실유역에 대해서만 분석된 결과이나 MUSLE 기법이 상대적으로 실측치와 유사한 결과를 나타냈다. 따라서, 연평균 토사유출량의 산정을 위해 주로 적용되는 (R)USLE 기법의 적용을 위해서는 신중한 주의가 필요한 것으로 나타났다.

MUSLE기법은 단일호우에 대한 토사유출량을 산정할 수 있도록 (R)USLE를 수정한 것으로 실제 개발시 발생할 토사를 고려하는 경우 연평균 토사유출량이 아닌 단일호우에 대한 토사유출량을 산정하고 이에 대하여 침사지를 설계하는 것이 최적설계를 위해 적합한 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- Elwell, H.A.(1978), "Modeling soil loss in Southern Africa", Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 23, pp.117-127.
- Haan, C.T., B.J.Barfield, and J.C. Hayes(1994), "Design Hydrology and sedimentology for small catchment", Academic press.
- Morgan R.P.C.(1994), "European soil erosion model: an up-date on its structure and research base", In R.J. Rickson(ed.), Conserving soil resources: European perspectives, Wallingford, CAB international, pp.286-299
- Morgan R.P.C. and D.D.V. Morgan, and J.J. Finney(1984), "A predictive model for the assessment of soil erosion risk", Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 30, pp.245-253
- TRB(1980), "Design of sedimentation basins", National Cooperative highway Research Program Synthesis of Highway Practice #70, Transport Research Board