

개발에 따른 합리적인 토양침식량 산정방안 조사연구

서 규우, 송 일준, 임 재영

1. 서론

토양침식량의 산정은 유역의 하류지역에 미치는 직접, 간접적인 피해를 정량적으로 산정함으로써 그에 대한 대비책을 수립하는데 있어 기준을 제시해 준다. 또한 상류지역에서 유실된 토양입자들이 하류의 수질을 악화시키며, 특히 하류의 취수지점에서의 탁도를 증가시켜 그로 인해 취수시설의 취수를 방해하거나 심한 경우에는 취수시설의 매물까지 유발할 수도 있다. 또한 토양침식량의 증가는 하류지역의 지형적인 변화를 초래하여 하류지역의 대규모 수공구조물에 피해를 가하기도 하며 구조물 주위에 퇴적되어 기능적 장애를 초래하기도 한다. 토양침식량의 산정기법들은 이미 몇 가지 국내에 소개되고 있는데 이러한 기법들의 적용에 있어서는 각 지역적인 특성들이 고려되어 있기 때문에 적용에 있어서 주의를 기울여야 한다.

전 국토에 걸친 개발사업으로 인해 주변환경이 급격하게 변화하는 가운데 과거와 동일한 강도의 강우와 같은 자연현상에 대해서도 토사침식이 증가하며 하천의 통수단면의 감소를 유발하고 토사가 하상에 퇴적되어 지형학적인 변화를 초래하게 된다. 이는 홍수위의 증가를 불러올 뿐 아니라 하천의 수질, 주변식생의 피해와 같은 인위적인 재해의 발생도 유발하고 있다. 이에 토양침식에 따른 재해를 최소화하기 위해서는 유역내의 개발행위에 따라 합리적으로 토양침식량을 파악해야 할 필요성이 대두되었다.

2. 국내적용 토양침식량 산정기법 조사

1) 토사침식일반론

토사침식이란 외부의 물리적인 힘에 의해 지표면의 토양구성입자가 원위치를 이탈하는 현상을 총칭하는 말이다. 하지만 외부의 물리적인 힘이 대부분이 강우에 의한 충격에너지가 크므로 여기서는 토사침식에 작용하는 외부의 힘을 강우의 충격력이라 한다. 이러한 강우의 낙하에너지와 지표면에서의 충격에너지로 인해 토양이 원위치에서 이탈되는 현상을 토사침식(Soil erosion)이라고 한다. 이러한 흐름에 실린 유사입자(Sediment particles)는 흐름의 조건이 달라져서 흐름의 에너지가 입자를 충분히 하류로 이송시킬 수 없을 때 바닥에 가라앉는다. 이를 퇴적(Disposition)이라고 한다. 퇴적자가 침식, 연행, 이송, 퇴적 등의 과정을 거치는 현상을 총체적으로 유사현상(Sedimentation)이라고 한다. 이러한 자연적인 침식현상(Geological erosion)과는 달리 농경지나 도시, 도로개발 등으로 인해 토사침식은 더욱 가속화된다. 이를 가속화된 침식(Accelerated erosion)이라 한다. 우리가 중점적으로 다루어야 할 토사침식이 바로 가속화된 침식이라 하겠다(한국수자원학회, 1998).

-
- * 동의대학교 토목공학과 전임강사
 - * 동의대학교 토목공학과 교수
 - * 동의대학교 토목공학과 대학원 석사과정

2) 기존의 국내적용 토양침식량 산정기법 조사

① 비유사량법

비유사량법은 유역의 출구에서 관측된 유사량을 추정하여 유역평균하므로써 비유사량을 구하고, 이를 이용하여 연평균 토사침식량을 추정하는 방법이다. 이는 유역의 침식량과 유사량이 같다고 하는 기본가정을 바탕으로 한다. 우리나라의 비유사량 산정공식은 건설부(1992)에서 제시한 관개용 저수지와 같은 소규모 유역의 비유사량 산정공식이 있다.

② 원단위법

토양침식의 원단위법은 지표의 상태에 따른 단위면적당 유출토사량으로부터 추정하는 것으로 일본의 사방설계기준에 의한 원단위를 많이 사용하고 있다.

③ USLE(범용토양손실공식)

강우에 의해 발생하는 토양침식에 대해서 토지이용이 미치는 영향을 예측할 목적으로 개발된 모형으로 Wischmeier와 Smith(1965, 1978)에 의해 제안된 이후 설계목적으로 널리 사용되고 있다. 이 모형은 강우에너지, 강우강도, 토양의 침식저항도, 사면길이, 사면의 경사도, 토양의 피복상태 및 토양보존대책의 함수로 토양의 침식량을 산정하고 있다. 경사진 소유역의 토양침식량 추정에 합리적인 방법으로 알려져 있고 그 식은 $A=R \times K \times L \times S \times C \times P$ 로 표현되는 매우 간단한 형태이다. 여기서 A는 단위면적당 평균 토양침식량(tons/acre/year)으로 그 단위는 R과 K에 적용된 단위에 좌우된다. R은 강우에너지계수, K는 토양침식계수, L은 사면길이계수, S는 사면경사계수, C는 피복계수, P는 토양보존대책계수이다. 여기서 L, S, C, P는 무차원량(dimensionless)이다.

3) 기존의 토양침식량 산정기법의 적용에 있어서의 문제점

① 비유사량법

일반적으로 비유사량법은 대유역면적에 대하여 적용되며 여기에는 하천의 하상순침식량이 포함되어 있는 경우가 많다. 또한 비유사량에는 세류사량이나 하상의 순퇴적량이 포함되지 않으므로 비유사량을 유역의 토양침식량으로 가정할 경우에는 많은 주의가 필요하며, 비유사량공식을 사용할 경우에도 그 식이 유역의 토지이용도 변화를 반영하고 있는지를 확인해야 한다.

② 원단위법

원단위법은 일본의 지형을 고려한 것으로 사면이나 경사도에 대한 구체적인 언급이 없어 적용에는 문제가 있다. 대략적인 비교검증에 사용할 수는 있어도 지역적인 특성인자가 고려되지 않기 때문에 적용에는 한계가 있다.

③ USLE모형

USLE모형은 미국의 록키산맥 동부의 실험지점에서 합성된 10000년 이상의 기간에 대한 100만 개 이상의 자료를 기초로 만들어진 기법으로 1970년대 미국내 관상침식 및 세류침식의 산정에 많이 활용되면서 이 식은 신뢰도가 높은 공식으로 인정되었으나 미국의 서부지역과 같은 건조기후를 보이는 곳에 적용할 경우 심각한 오차를 유발하기 때문에 적용대상지역에 제약이 있다. 이 공식중에 가장 문제가 되는 것은 강우인자 R이다. 미국 서부지역은 강우강도가 크고 강우지속기간이 짧은 호우와 같은 강우의 발생빈도가 높아 미국의 중부 또는 서부의 강우특성과는 큰 차이를 나타낸다. 또한 건조 및 반건조기후에서의 토양은 바람, 태양 및 토양과 강우간에 영향으로 인한

풍화(weathering)현상이 심해 토양의 침식현상 발생 가능성이 용이하므로 USLE모형을 어느 곳이나 적용하기에는 토양의 침식저항도(Erodibility) K에도 문제가 있다. 또 다른 문제는 USLE는 회귀식을 이용한 기법으로 앞에서 언급한 바와 같이 미국의 일부지역에만 국한된 자료만을 이용하므로써 서부지역의 건조기후나 삼림지대에 대한 동일한 강우사상에 대한 자료를 확보하기 위해서는 오랜 시간을 요할 뿐 만아니라 식물의 성장은 오랜 기간이 걸리기 때문에 자연상태 식생의 영향에 대한 자료를 얻기가 용이하지 않다는 것이다. 회귀식의 또 다른 단점은 수집된 자료들이 제한된 공간과 시간에 대한 자료이므로 장기간 또는 적용범위를 벗어난 회귀식 응용의 결과는 보장되지 못한다. USLE는 농경지나 건설현장과 같이 사면상부에서의 면상 및 세류침식에 대한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 기법으로 하류의 유사량 예측에 기여할 수 있으나 이 기법은 구곡침식, 산사태에 의한 침식량은 물론 하천이나 저수지에서의 침식 또는 퇴적에 의한 침식량의 증감효과를 반영하지 못한다는 사실을 간과해서는 안된다. 또한 입경이 1mm이상인 토립자를 침식 또는 이송하기에는 면상 및 세류침식에 의한 토사침식능은 너무 작기 때문에 USLE는 결국 토립자 입경이 1mm이하인 경우에만 적용이 가능하다. 따라서 구곡이나 골이 형성된 흐름에서 발생하는 면적이 비교적 넓은 유역에 적용할 경우 심각한 오차를 유발하게 된다.

3. 합리적인 토양침식량 산정모형의 제안

1) RUSLE모형의 개요

RUSLE 모형은 Renard 등(1993)이 USLE 모형을 수정한 것으로서 기본식이나 각 매개변수는 USLE모형과 같다. 그러나 이들 사이의 특징적인 차이점은 C값을 보다 상세하게 분류하므로써 USLE모형을 산림조건, 건설현장, 광산활동 등과 같은 부문에도 적용할 수 있도록 한 것이다. 기타 기본적인 계수들은 모두 USLE모형의 것들과 비슷하다.

2) 모형계수별 특성조사

① 강우에너지계수 R

R값은 특징적으로 변화된 것이 지면의 요철(ponding)에 대한 고려를 해줄 수 있다는 것이다. 지면의 요철은 강우의 충격에너지를 상쇄시켜주며 그 적용의 한계치는 1.4% 이내범위이다.

② 토양침식계수 K

K값의 계절적인 변화를 보정할 수 있도록 보정한 것이 특징이다. 그러나 이는 연평균 K에 대한 것으로 단일호우에 대해서는 적용할 수 없다. 또한 표면과 지표하에 있는 잡석(Rock fragment)에 대해서도 보정할 수 있도록 하였다.

③ 사면길이-경사계수 LS

USLE 모형에서의 β 값을 추정하기 위해서 토양의 세류침식에 민감한 정도에 따라 낮음, 보통, 높음으로 토양을 분류하여 보통 정도인 경우에는 USLE에서 산정된 값을 사용하고 높은 경우에는 산정값의 2배를, 낮은 경우에는 산정값의 1/2를 사용한다.

④ 피복계수 C

농경지에 대해서는 선행토지이용, 수관상태, 지표면 피복상태, 지표면 조도, 토양의 함수량과 같은 종속인자를 고려하여 지표의 실제 피복상태를 가급적 많이 고려할 수 있도록 개선하였고 건설

현장이나 광산지역의 경우에는 시간의 경과에 따라서 풍화작용과 재압밀작용력이 작용하여 농경지와 유사하게 만드는 경향이 있다. 그래서 도입된 것이 시간에 대한 종속인자와 밀도에 대한 종속인자이다.(Barfield 등, 1988.) 또한 삼림지역의 피복계수는 인위적으로 교란되지 않은 삼림이나 초지의 피복계수는 USLE 모형에 제시된 것보다 같지만 삼림지역에서의 주요 토양침식의 원인은 토양이 노출된 지역이므로 토양이 물로 습윤상태에 있다가 건조상태에 이르는 과정이 반복되면서 토양은 점점 푸석푸석해져 침식이 더욱더 유발된다. 이러한 것은 기계에 인한 재압밀과는 다른 양상을 보인다. 또한 이들 지역에서는 지표에 있는 수복 등에 의하여 영향을 받아 작은 댐과 같은 일련의 물 웅덩이와 퇴적이 생기거나 침식과 퇴적이 공존하는 일련의 계단이 형성될 수 있다. 이러한 경우에는 토양의 침식이 줄어들게 된다.

⑤ 토양보존대책계수 P

RUSLE 모형에서는 토양보존대책인자에 종속인자를 도입하여 좀 더 세분화시키고 있다. 등고선에 대한 고려와 대상재배에 대한 고려, 그리고 계단효과(단구)에 대한 고려를 하고 있다.

4. 국내 개발현장에 대한 RUSLE모형의 적용

우리 나라에서의 개발양상은 주로 골프장, 스키장을 비롯한 레저시설의 개발과 각종 대규모 공업, 상업, 주거단지의 개발 등 개발행위에 의한 토양유실이 발생하고 있다. 기존의 개발현장에 대해 연토양손실량의 계산을 USLE모형으로 산정하고 있는 바, 본 연구에서는 강원도 춘천시 백양리 일원의 강촌 스키리조트 건설사업장의 일부유역을 적용대상으로 선정하여 RUSLE모형을 적용하고자 한다. 비교검토를 위해 USLE모형에 의한 방법으로도 산정하고 기존의 재해영향평가서의 결과와도 비교검토하였다.

1) USLE의 적용예

USLE에 의한 정상강우년에 의한 공사전과 공사중의 연평균 토양침식량은 표 1과 같다.

표 1. USLE에 의한 토양침식량 산정

유역	구분	유역면적 (ha)	R (10 ⁷ J/ha·mm/hr)	K (tonnes/h a/R)	LS	C		P	토양침식량 (tonnes/ha/year)			
						공사전	공사중		공사전	공사중		
소구역1'	1	0.388	464	0.17	23.443	0.003	0.153	1	5.547	282.919		
	2	1.341			22.982	0.003		1	5.438	277.361		
	3	1.634			30.284	0.003		1	7.167	365.492		
	4	0.621			35.278	0.003		1	8.348	425.761		
소구역2'	1	0.542			49.168	0.003		1	11.635	593.391		
	2	0.380			38.990	0.003		1	9.227	470.557		
	3	0.67			39.106	0.003		1	9.254	471.955		
소구역3'	1	0.597			20.762	0.003		1	4.913	250.564		
	2	0.915			43.169	0.003		1	10.215	520.985		
	3	0.456			48.540	0.003		1	11.486	585.810		
	4	1.081			19.609	0.003		1	4.640	236.653		
소구역4'		0.407			20.884	0.003		1	4.942	252.041		
소구역5'	1	0.537			35.365	0.003		1	8.369	426.805		
	2	0.963			28.386	0.003		1	6.717	342.578		
	3	0.527			37.958	0.003		1	8.982	458.107		
	4	0.188			13.350	0.003		1	3.159	161.117		
소구역6'		0.706			6.943	0.003		1	1.643	83.791		
계											121.684	6205.889

참고로 (주) 옥성의 재해영향평가서에서는 USLE 모형의 산정결과 공사전, 중 A=2.51, 13.07이다.

2) RUSLE모형에 의한 산정

① R값 산정

$$R=464 (10^7J/ha \cdot mm/hr)$$

② K값 산정

앞서 계산한 USLE의 K값에서 계절적인 분포를 고려하여 K값을 산정한다. 그러나 원칙으로는 15일단위 R계수에 대한 백분율을 사용해야 하지만 여기서는 춘천기상대의 연강우량 대비 월별 강우량 백분율을 사용한다. $K=0.17(\text{tons/acre/R})$ - normal condition value, $R= 464(\text{ft} \cdot \text{tonsf} \cdot \text{in/acre} \cdot \text{hr} \cdot \text{year})$

$$\frac{K_{\max}}{K_{\text{nom}}} = 8.60 - 0.019R = 8.6 - 0.019 \times 273 = 3.413, K_{\max} = 3.413 \times 0.130 = 0.444$$

$$\frac{K_{\min}}{K_{\text{nom}}} = 3.0 - 0.005R = 3.0 - 0.005 \times 273 = 1.635, K_{\min} = \frac{K_{\max}}{1.635} = \frac{0.444}{1.635} = 0.272$$

$$t_{\max} = 196.5\text{일}, t_{\min} = 15\text{일}, K_{\text{avg}} = \frac{41.962}{100} = 0.42 (\text{tons/acre/R}) = 0.672(\text{tonnes/ha/R})$$

현재 사용한 식이 미국의 지역적인 영향을 고려한것이라 산정된 값에 큰 차이가 난다. 본 연구에서 일반적인 조건에서의 K값을 채택한다.

③ LS값의 산정

$$LS = \left(\frac{l}{22.1} \right)^m \left(\frac{65.4S^2}{S^2 + 10,000} + \frac{4.6S}{\sqrt{S^2 + 10,000}} + 0.065 \right) - \text{공사전, 공사중 LS값 변동없음}$$

④ C, P값의 산정

사면이 산림지역이므로 나지율을 10% 나무의 뿌리의 영향을 60%로 가정하여 쓰면 종속인자 $1 = 0.005$, 산림지역이 모두 훼손되지 않았으므로 90% 피복율과 (10%나지) 10ft (3m) 수관고를 형성한다고 가정하면 종속인자 $2 = 1 - F_c e^{-0.1H} = 1 - 0.9 \times e^{-0.1(10)} = 0.669$, 함몰지형이 있다고

보면 종속인자 $3 = 0.8$, 계단이 지역에 걸쳐 30% 형성되었다고 본다면 종속인자 $4 = 0.72$, 그러므로 C 값은 $0.005 \times 0.669 \times 0.8 \times 0.72 = 0.002$ 이다.

⑤ P값의 산정

특별한 대책이 없으므로 $P=1$ 이다.

⑥ RUSLE 모형에 의한 정상강우년에 의한 연평균 토양침식량

표 2. RUSLE에 의한 토양침식량 산정

구분	R ($10^7J/ha \cdot mm/hr$)	K (tonnes/ha/R)	LS	C	P	토양침식량 (tonnes/ha/year)	연간침식량 (tonnes/year)
공사전	464	0.17	유역별	0.002	1	81.123	969.42
공사중	464	0.17	유역별	0.152	1	6165.327	73675.658

5. RUSLE모형의 적용시 고려사항 및 결론

RUSLE는 근본적으로 USLE를 보완하기 위해 수집된 자료를 바탕으로 발전된 모형이므로 USLE의 문제점을 내포하고 있다. 먼저 RUSLE의 근본적인 차이점이었던 K값의 계절적 변화에 대한 고려를 할 수 있으나 어디까지나 미국의 강우사상을 반영하고 있어 우리 나라에 적용하기에는 문제가 있다. K값이 미국의 경우에는 봄철 해빙기에 집중적으로 증가하게 되는데 이것은 우리

의 호우사상과는 다른 양상이다. 봄철 해빙기에 의한 유출의 증대가 큰 반면 우리의 경우에는 여름철 집중호우로 인한 침식이 대부분이므로 이에 대한 자료가 축적이 된 후 새로운 관계식이 모색되어야 할 것이다. 또한 표면의 잡석(Rock fragment)에 대한 고려는 현재로는 별로 하지 않고 있지만 이 또한 고려해야 할 것이다. 물론 변화에 대한 민감도는 아직 정확히 검증되지는 않았지만 K값추정도표에서 2등급이상은 차이가 나지 않는 것 같다. 그리고 (R)USLE가 미국의 주요 농경지의 연평균침식량을 산정하기 위하여 개발된 기법이므로 지면의 요철에 대한 보정R값은 경사 1.4%미만에 대해서만 고려할 수 있다. 또한 R계수에서 단일호우(single storm)에 대해 적용하기에는 (R)USEL은 한계가 있어 보인다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 MUSLE 모형이 제시되어 있다. 차후 검토후에 적극적으로 사용해야 할 것으로 판단된다.

피복인자 C의 경우에는 피복상태에 대해 더욱 자세히 분류하고 있으나 우리의 개발양상과는 다른 농경지에서의 피복인자에 대한 언급이 지배적이다. 그렇기 때문에 일반적인 농경지나 목축지에서의 C값의 결정을 위해서는 RUSLE가 더욱더 정확한 토양침식량을 산정하는데 주요하지만 일반적인 건설현장이나 삼림지에서는 적용에 어려움이 있다. 주의해서 쓴다면 적용할 수 없는 것은 아니지만 적용의 경계가 애매하므로 미국의 경우 일반적으로는 RUSLE와 USLE가 혼용되어 쓰이고 있다. 차후로 농경지나 일반적인 목축지에서 적용가능하도록 하려면 먼저 일반적인 우리나라 식생에 대한 조사가 선행되어야 한다. 작물의 수관고, 작물의 부패속도, 작물의 성장기간에 따른 수관피복율등 식생의 전반에 대한 조사가 선행되어야 신뢰성있는 RUSLE 적용값을 기대할 수 있다. 토양보존대책인자 P의 경우에도 현재 사용되고 있는 값들은 경사가 25%~32%를 초과할 경우에는 모든 토양보존대책을 수립하더라도 토양침식량에 있어서 그 결과가 반영되지 못함에도 불구하고 값이 산정되고 있다. 이러한 것은 적용에 있어 산출된 값의 신뢰성을 기대할 수 없다. 현재 산정되고 있는 P값의 경우 토양보존대책이라기보다는 유사전달율을 감소시키는 역할을 하는 대책이라 하겠다. 이러한 보존대책을 토양침식량에 반영한다는 것은 무리가 있다. 토양침식을 줄이는 것이라기보다는 토사가 이송되는 것을 방지하고 퇴적을 촉진시키는 것이기 때문이다. 이러한 유사전달율개념이 반영되어 개발된 프로그램이 USDA-SCS의 RUSLE version 1.06이다. 이 프로그램에서는 토양침식량과 더불어 유사전달율을 고려해 하류에 도달하는 토사량을 구할 수 있다. 하지만 이 프로그램은 SI단위계가 아닌 영미단위계이므로 프로그램을 수행할 때에는 주의를 요한다. 특히 앞서 언급한 K값산정에 있어서 계절적 변화에 대한 수정식이 미국의 기후양상을 고려한 것이기 때문에 적용에는 한계가 있다. 궁극적으로는 우리의 지형과 개발여건에 맞는 산정방법이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

1. “강촌 스키리조트 건설사업 재해영향평가서”, (주) 육성, 1998. 2.
2. 정필균, 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅, “토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석”, 토양비료 학회지, vol.16, No.2,1983.
3. “제6회 수공학학술회 교재”, 한국수자원학회, 1998. 2.
4. C. T. Hann, B. J. Barfield, J. C. Hayes, “Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchment”, Academic press, 1994, pp. 238-310.
5. Goldman, S. J., “Erosion and Sediment Control Handbook”, McGraw-Hill Book Co., 1980.
6. R. P. C. Morgan, “Soil Erosion”, Longman, 1979.
7. “Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning With Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)”, USDA-ARS, Agriculture Handbook No.703.
8. Williams, J. R. (1976). Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. In “Proceedings, Erosion and Solid Matter transport in Inland Water Symposium,” IAHS No.122, pp 168-179.