

침사지 설계를 위한 토사유출량의 산정방법의 적용성 및 적정 입자직경에 대한 연구

○박 무중

1. 서론

개발사업은 주변 여건의 급격한 변화를 초래하여 과거와 동일한 경우에도 불구하고 심화된 침식이나 퇴적을 유발하게 된다. 국내에서의 토사유출에 대한 연구는 주로 농토목을 중심으로 연구되어 왔으며 한 반도의 지형이 주로 노년기 지형으로 상당히 안정적인 상태인 관계로 이에 대한 관심도 다른 공학분야에 비하여 상대적으로 미미하였다.

최근 실무에서는 유역하류부에 침사지 혹은 저류지-침사지를 겸용으로 설치하여 공사시에 발생하는 토사의 하천유입을 차단하는 토사유입방지 대책을 수립하고 있다. 그러나, 저류지의 규모는 대부분 개발의 목적 및 중요도에 따라서 50년 빈도로 계획하는 반면 토사유출량은 연간토양침식량(일반적으로 USLE 공식적용)을 이용하여 산정하여 설계의 일관성 결여에 따라 설계의 과소 혹은 과대산정의 가능성이 있다

본 연구에서는 USLE 공식을 실제유역에 적용하여 모형의 적용성을 검토하고, 침사지 규모결정을 위하여 단일호우에 의한 토사유출량의 빈도별 적용(USLE 공식의 적용)에 대한 기준을 제시하고자 실제 유역의 자료를 중심으로 분석하고자 한다.

2. 침사지 설계의 절차 및 관련 사항 검토

2.1 침사지의 재원결정절차

토사유출에 의한 문제점을 파악하고 이에 대한 전체적인 설계개념을 선정한 후에는 주로 저류될 토사량(부피)의 결정이 침사지 설계를 위한 중요한 인자가 된다. 여수로의 크기나 둑의 높이는 비교적 기존의 연구 결과가 있으며 설계자에 따른 오차도 크지 않으므로 본 연구에서는 침사지에 저류될 토사량을 결정하기 위한 단계까지만 검토하고자 한다.

2.2 침사지 설계시 고려하여야 할 사항

조사에 의하면 침사지 설계를 위한 적합한 설계빈도와 토사입자의 크기는 해외 혹은 국내에서도 정확하게 정의되어 있지 않다. 이는 침사지는 먼저 침사지의 설계개념을 정립한 후 수행되기 때문이다. 침사지의 설계에 있어 먼저 검토되어야 하는 내용은 다음과 같다.

국립방재연구소 연구관, 공학박사

① 개발에 따른 토사유출 증가 가능성 파악

자연 시스템이 개발에 따라 교란되어 이전의 상태가 유지되지 않을 뿐 아니라 침사지를 설치하지 않는 경우 하류지역 및 하도에 문제 발생가능성이 있는 가를 파악하여 개발이전의 토사유출 상태를 유지하도록 임시/영구 침사지를 계획하여야 한다.

② 침사지 토사유입량의 결정

침사지 설계빈도 결정시 위험도를 고려하여 계산하는 경우는 먼저 정확한 토사유입량이 산정되어야 한다. 즉, 설계빈도에 따라서 침사지를 계획하는 경우 정확한 토사유입량이 산정이 우선되어야 한다. 일반적으로 토사량은 주로 USLE공식을 이용하여 산정하고 있으나, 이 공식의 적용시 각 인자의 값의 변화범위가 최대 100배이상으로 사용자에게 따른 차이가 매우 크므로 이에 대한 정확한 적용이 필요하다.

③ 토사전달률과 포착율의 결정

사면에서의 발생 토사가 퇴적하게 되는 지점까지의 전달비율인 토사전달률(sediment delivery ratio)과 침사지 유입토사량과 유출토사량의 비율인 포착률(trap efficiency)을 각각 100%로 하여 침사지의 규모를 결정하는 경우 과대산정의 위험성이 내재되어 있다. 따라서, 토사입자직경에 따른 토사전달률과 포착률에 대한 영향을 고려하여 침사지 규모를 결정하여야 한다.

④ 토사유출량의 빈도 결정

USLE공식을 이용하여 빈도별 토사유출 산정시 강우침식인자(R) 뿐만 아니라 무차원 유역 관리계수(C) 와 무차원 침식 제어계수(P) 에 대한 월별 보정이 이루어져야 하나 이에 대한 국내에서의 적용성에 대한 연구가 필요하다.

⑤ 설계우수 유출률의 빈도 결정

침사지 소요면적 설계를 위해서는 설계우수 유출률과 소요표면적 부하율만이 지배 인자이며, 설계우수 유출률에 대한 빈도의 정립과 소요표면적 부하율을 결정하기 위한 토사입자 직경의 결정이 선행되어야 한다.

2.2 재해영향평가시의 문제점

① 침사지의 설계를 하수도 혹은 상수도 시설기준에 따르고 있으며 대상입자의 크기가 매우 작고 이에 따라서 침사지의 규모 또한 커지게 된다.

② 침사지의 포착효율을 100%로 설계를 할뿐만 아니라 개발 전에 발생하는 토사유출까지 모두 차단하여 하류하도에의 하상저하의 가능성이 발생할 소지가 있다.

2.3 침사지 소요 설계면적

침사지 소요면적은 설계우수유출률과 소요표면적 부하율의 함수로 정의되며 이에 따라 침사지 소요면적은 유역에서의 설계우수유출률이 결정된후 소요표면적 부하율을 이용하여 계산할 수 있다. 이때, 소요표면적 부하율은 토사입자의 침강속도와 동일하게 정의되며 토사입자의 침강속도는 입자의 직경에 따라 크게 영향을 받는 것으로 조사되었다. 따라서, 기존에 수행된 재해영향 평가서의 빈도별 침투 홍수량과 토사입자 직경별 관계를 이용하여 지역별 침사지 소요면적을 분석하여 침투 홍수량의 빈도별 영향 및 토사입자 직경과의 관계를 분석하였다.

2.4 단일호우에 대한 토사침식량의 산정(USLE의 강우침식인자 R을 중심으로)

건설현장에서의 침사지는 우기시에 주기적으로 준설·정비되는 것으로 계획되므로 단일호우에 의한 토양손실량을 예측하고 적절한 침사지를 설계하는 것이 바람직 하다. 미국 교통연구단(TRB)의 국립합동도로연구프로그램(NCHRP) #70 에 의하면 임의 재현기간의 임의 지속시간 설계호우 사상의 R값 산정을 위해서는 이른바 그 지역의 IDF(강우강도-지속시간-빈도) 자료가 필요하다. 이 자료를 이용하여 R값을 산정하기 위한 기본 가정은 임의 지속시간에 해당하는 최대 호우에는 그 보다 적은 지속시간의 최대 호우를 포함하며, 다시 그 호우에는 더 적은 지속시간의 최대호우를 포함한다는 것이다. 그러나 이러한 가정은 일반적인 수문설계에서 적용되는 가정과는 다른 면을 보이고 있다. 즉, 수문설계시에는 임의 재현기간에 대한 지속기간 총강우량을 산정하고 이를 특정 분포에 적용하여 시간별 강우량으로 분포시키고 이를 강우의 입력자료로 사용하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 강우침식인자 R에 대하여 연평균 강우침식인자와 HUFF분포를 적용하여 산정한 경우와 TRB계산절차에 의한 방법으로 계산하였다.

2.5 위험도의 도입

표 1 공사기간과 빈도에 따른 위험도

위험도 (%)	공사기간 (년)									
	2	3	4	5	6	10	15	20	30	50
20	9.47	13.95	18.43	22.91	27.39	45.32	67.72	90.13	134.94	224.57
15	12.81	18.96	25.11	31.27	37.42	62.03	92.80	123.56	185.09	308.16
10	19.49	28.98	38.47	47.96	57.45	95.41	142.89	190.32	285.24	475.06
5	39.49	58.99	78.48	97.98	117.48	195.46	292.94	390.41	585.37	975.29
2	99.50	149.00	198.49	247.99	297.49	495.48	742.97	990.47	1485.45	2475.42
1	199.50	299.00	398.50	498.00	597.50	995.49	1492.99	1990.48	2985.47	4975.45

위험도(Risk)라 함은 수공시설물의 설계수명기간(n)과 홍수의 재현기간(T)에 따른 관계로 연속되는 n년 동안에 최소한 한번 T년 빈도 홍수가 발생할 확률을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$R = 1 - [P(F)]^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

따라서, 임시침사지의 경우는 공사기간이 3년인 경우 위험도가 0.1(=10%)인 경우 재현기간 28.98년을 기준으로 설계하는 것이 추천된다. 또한, 영구침사지의 경우는 사업지구의 내구연한 n년에 해당하는 위험도 0.1(=10%)의 재현기간을 기준으로 설계하는 것이 추천된다. 침사지의 설계에 있어서도 먼저 침사지에 포착하고자 하는 토사의 직경이 결정되면 이에 따라 공사기간에 따른 적절한 빈도를 결정하는 것이 추천된다.

3. 실제유역의 적용 및 검토

3.1 토사유출 공식의 실제유역 적용 및 실측자료 비교

토사유출량 산정에는 USLE공식, 비유사량법, 원단위법을 주로 사용하고 있다. 이중 USLE공식이 유역의 토양특성, 피복상태, 강우특성을 포함하고 있기 때문에 설계를 위한 값으로 이용되고, 비유사량법과 원단위법은 주로 비교적인 측면에서 이용되고 있다. 따라서, 먼저 USLE 공식을 적

용하여 경기도 포천군 소흘면 중부 임업시험장 광릉수목원내에 위치한 활엽수림의 실측자료와 비교하였다. 이지역은 임업연구원에서 1982년부터 현재까지 운용하고 있다. 시험구역에서의 실측 토사유출량은 유역출구에서 측정한 것으로 29.5~2,720.0kg/ha·yr(5년평균 735.78 kg/ha·yr)범위를 나타내고 있다. USLE공식에 의한 토사유출량은 이 유역을 5개의 소유역으로 구분하여 계산하고 면적-토사전달률 관계를 적용한 결과 3,872kg/ha·yr 으로 계산되었다. 이는 광릉지역의 5년 평균 토사유출량인 735.78 kg/ha·yr 보다 5.26배 큰 값으로 1개 지점에 대한 비교결과만으로는 적용성을 판단할 수는 없으나 토사전달률을 고려하지 않은 경우의 토사유출량은 15,760kg/ha·yr으로 침사지까지의 토사전달률에 대한 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

표 2 광릉수목원 관측유역특성

유역상태	면적 (ha)	고도 (EL m)	유역경사	암반상태	토양종류	토양두께(cm)			
						A	B	C	합계
울창한 활엽수림	22.0	280~477	0.05~0.35	편마암	모래, 진흙	16.0	31.7	52.0	99.7

표 3 우기별 강수량 및 토사유출량

(단위 :kg/ha·yr)

연도	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	평균	비고
광릉 강수량(mm)	789.4	1,137.5	550.0	731.0	1,103.9	949.2	869.0	1,213.1	622.9		
활엽수림 토사유출량	-	-	32.7	-	2,720.0	572.7	29.5	324.0	-	735.78	
USLE 공식	3,872(유사이송률 0.24, 면적-토사전달률 관계 고려시) 15,760(유사이송률 미고려시)										

3.2 침사지 소요 설계면적의 실제유역 적용

침사지 소요면적은 설계우수유출률과 소요표면적 부하율의 함수로 정의되며 이에 따라 침사지 소요면적은 유역에서의 설계우수유출률이 결정된후 소요표면적 부하율을 이용하여 계산할 수 있다. 이때, 소요표면적 부하율은 토사입자의 침강속도와 동일하게 정의되며 토사입자의 침강속도는 입자의 직경에 따라 크게 영향을 받는 것으로 조사되었다. 강원도 춘천시내에 위치한 유역의 빈도별 침투 홍수량과 토사입자 직경별 관계를 이용하여 지역별 침사지 소요면적을 분석하여 침투 홍수량의 빈도별 영향 및 토사입자 직경과의 관계를 분석하였다. 표 5에서 계산된 결과를 보면 침사지의 소요면적은 재현기간이 증가함에 따라 점차 증가하는 추세를 보이고 있으나 토사입자의 직경에 더 큰 변화를 보이고 있다. 즉, 침사지의 소요면적은 토사입자의 직경이 지배적인 인자임을 알 수 있다. 그림 1에서 직경이 0.1mm 이하인 경우를 실제 유역에 적용하여 침사지 소요면적을 계산할 결과 크게 산정되어 시공시에 매우 큰 공사비가 소요될 것으로 판단된다. 대체적으로 재현기간이 50년인 경우는 0.2mm~0.5mm의 토사입자를 침전직경으로 하여 설계하는 것이 경제적인 것으로 판단된다. 실제 유역에서 토사유출 발생사면에서의 입도분포가 유역출구에서 계속적으로 유지되지 않을수 있으므로 홍수시에 침사지에 침전될 토사유출량의 크기에 대한 장기간의 조사가 요구된다.

표 4 강원도 춘천시 남산면 백야리 일원의 유역특성

홍수유출 산정방식			SCS 무차원 단위도법	
면적	2.96km ²	유역경사	51.21%	
유로연장	2.98km	유출지수(CN)	72.39	

표 5 토사입자직경별-빈도별 홍수량에 따른 침사지 소요면적

직경(mm)	1.000	0.500	0.200	0.100	0.074	0.050	0.010	0.005	
침강속도(cm/s)	10.000	5.200	2.100	0.740	0.414	0.170	0.007	0.002	
재현 기간 (년)	침두 홍수량 (cms)	소요면적(m ²)							
2	8.53	85	164	406	1,153	2,060	5,018	123,623	501,765
5	15.21	152	292	724	2,055	3,674	8,947	220,435	894,706
10	20.10	201	387	957	2,716	4,855	1,1824	291,304	1,182,353
20	24.94	249	480	1,188	3,370	6,024	1,4671	361,449	1,467,059
30	27.83	278	535	1,325	3,761	6,722	1,6371	403,333	1,637,059
50	31.56	316	607	1,503	4,265	7,623	1,8565	457,391	1,856,470
80	35.08	351	675	1,670	4,741	8,473	2,0635	508,406	2,063,529
100	36.78	368	707	1,751	4,970	8,884	2,1635	533,044	2,163,529

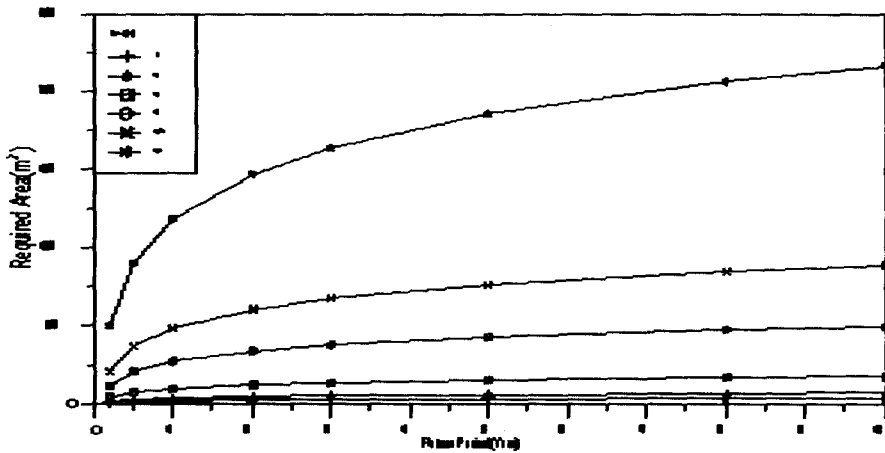


그림 1 토사입자 직경별-빈도별 홍수량에 따른 침사지 소요면적

3.3 강우침식인자 R의 실제유역 적용

강원도 춘천시 일원에서 강우침식인자 R을 재현기간별 강우의 지속시간별로 계산한 결과는 그림 2와 그림 3과 같다. EI₃₀ 이라는 지수는 운동에너지(E)와 최대 30분 강우강도(I₃₀)와 관련이 있다는 가정하에 출발되어 이에 대한 선정 이유가 없는 등 현재도 논란의 대상이 되고 있다. 그러나, 현단계에서 토사유출량의 빈도개념을 도입하기 위하여 USLE공식의 강우침식인자 R을 실제 유역에 적용하여 계산하여 비교하였다. HUFF 분포를 적용하여 각 강우지속시간별-빈도별 강우침식인자 R은 TRB 계산절차에 의한 강우침식인자 R에 비하여 전체적으로 작게 산정되었으며 이는 R을 산정하기 위한 강우강도의 산정방법이 다른데 기인한다. 이 지역의 연평균 강우침식인자는

464 $10^7 \text{Joule/ha} \cdot \text{mm/hr}$ (정필균, 1983) 으로 강우지속시간이 12시간 이하이거나 빈도가 50년 이하인 경우는 연평균 강우침식인자보다 작은 경향을 보이고 있다. 또한, 강우의 지속시간과 빈도가 커질수록 강우침식인자도 점차 증가하는 특성을 나타내고 있다. 따라서, 단일호우에 대한 토양침식량의 결정을 위하여 적합한 강우침식인자를 선정하여 적용하는 것이 요구된다.

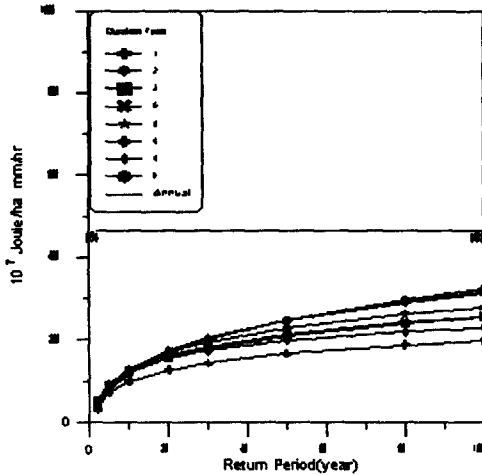


그림 2 HUFF 분포를 적용하여 산정한 강우지속기간별-빈도별 강우침식인자 R

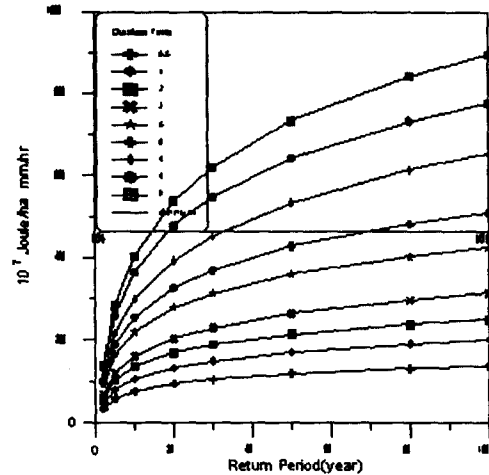


그림 3 TRB 계산절차를 이용하여 산정한 강우지속기간별-빈도별 강우침식인자 R

4. 결론

- 1) USLE 공식을 광능지역에 적용하여 본 결과 토사유출량 관측자료보다 상당히 크게 산정되었으며 모형의 적용에 있어 세심한 주의가 필요하다. 또한, 토사전달률에 대한 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 2) 토사의 입자직경은 기존 재해영향평가서에서 주로 선정되었던 #200체의 0.074mm 는 과대설계의 가능성이 있으며, 0.2mm 혹은 0.25mm 정도가 적합한 것으로 판단된다.
- 3) 토사유출량의 산정은 침사지의 관리가 각 호우사상별로 계획되고 있으므로 단일호우에 대하여 설계하는 것이 추천되며 검토결과 연평균 토사유출량이 50년빈도 토사유출량보다 크게 나타난 것으로 보아 침사지의 경제적인 설계를 위하여 단일호우에 대해 설계하는 것이 효율적이다.
- 4) 위험도 개념을 도입하여 공사기간에 따라 위험도 5~10%내에서 결정하는 적합한 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. National Cooperative Highway Research Program(19880), Synthesis of Highway Practice #70(Design of Sedimentation Basin), Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
2. USDA(1997. 1). "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE)"