

토사유출량 산정공식 개발방향에 관한 연구

손 광 익 (영남대학교 토목공학과 교수)

최 계 운 (인천대학교 토목환경시스템공학과 교수)

1. 서론 및 연구목적

2. 국내·외 연구동향

2.1 USLE 및 RUSLE

2.2 TRB(Transport Research Board)

2.3 MUSLE

2.4 유역 유출량 및 침투 유출량

2.5 유사 전달률

2.6 시험유역 관측 및 관리기법

3. 연구범위 및 방법

4. 토사유출량 산정

4.1 현장 선정

4.2 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 이용한 토사유출량 산정

4.3 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 이용한 토사유출량 산정

5. 연구결과 비교검토

참고문헌

1. 서론 및 연구목적

전국토에 걸친 개발사업장으로부터 발생하는 토사유출에 의한 인위적 피해를 최소화하기 위해서는 토사유출 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)을 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 불 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 재해영향평가지 토사유출량 저감대책 수립을 위한 장·단시간 호우에 대한 각종 외국 토사유출량 산정기법 중 세계적으로 많이 활용되고 있는 범용토양손실공식 계열의 개정범용토양손실공식(RUSLE)과 단일호우에 의한 토사유출량 산정기법으로 제안된 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 국내 개발현장에 적용하여 실측치와 비교함으로써 그 적용 가능성과 우리실정에 맞는 토사유출량 산정공식의 개발방향에 대하여 검토하고자 한다.

2. 국내 · 외 연구동향

토양침식은 지표류라 칭하는 무한한 넓이를 가진 얇은 흐름형태를 가진 지표면유출과 작은 수로에서의 흐름, 발이랑을 만드는 과정에서 발생하는 세류(rill), 구곡(gully)이나 하천에서 나타나는 보다 장기적이며 큰 규모의 흐름이 포함된다. 또 이와는 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 적용범위가 다양하여 개발배경을 잘 이해해야만 정확한 토사유출량 산정이 가능하다. 대부분의 토사유출량의 산정모형은 토사유출에 영향을 주는 가장 중요한 인자만을 선택하여 현장과 실험실에서 관측하고 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 이해 및 검토를 목적으로 한 기초적 연구가 수행된 바 있다.

2.1 USLE 및 RUSLE

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 1mm이상의 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.

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

여기서 Y는 강우침식도 R의 해당기간 중 단위 면적당 토사침식량($\frac{\text{tonnes}}{\text{ha}}$), R은 강우침식

도($\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hr}$), K는 토양침식성 인자($\frac{tonnes}{ha \cdot R}$ 또는 $\frac{tonnes \cdot hr \cdot year}{MJ \cdot mm}$), LS는 유역의 지형학적 특성을 나타내는 무차원 인자, C는 식생 및 피복상태 등 경작 종류와 형태에 따른 무차원 인자, P는 토양보전대책을 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 개정 범용토양손실공식(RUSLE ; Revised Universal Soil Loss Equation)을 발표하면서 범용토양손실공식을 개정범용토양손실공식으로 대체한다고 발표하였다.

2.2 TRB(Transport Research Board)

범용토양손실공식은 주로 산림과 농경지의 토사유출량 산정을 중심으로 개발되었으나 건설현장에 대한 기술은 상대적으로 미약한 편이다. 따라서 TRB(1980)에서는 여러연구자들의 보고서를 인용, 범용토양손실공식기법을 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.

2.3 MUSLE

개정범용토양손실공식(RUSLE)은 농경지나 건설현장과 같이 사면 마루부에서의 판상 및 세류침식에 의한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 기법으로 원칙적으로는 단일강우에 의한 침식량을 산정하는데 많은 오차가 동반된다. 따라서 이와 같은 단점을 보완하고자 배수면적이 2.7~4380 acres, 평균 경사 및 사면길이는 0.9%~5.9%, 258~570ft인 Nebraska의 Hastings와 Texas의 Reisel 근처 47개 유역의 778개 강우자료를 사용하여 범용토양손실공식의 R계수 대신 토사유출량 지배인자와 유출에너지를 나타내는 인자를 이용하여 토사유출량을 예측하는 수정범용토양손실공식(MUSLE ; Modified Universal Soil Loss Equation)이 Williams(1975, 1978)에 의하여 발표되었다. 이 공식은 단일 소유역에 적용할 경우 토사전달율이 이미 반영된 식으로 토사유출량의 산정시 전달율을 고려할 필요가 없으며(Haan, 1994) 식

(3)으로 표현된다.

$$A = 11.8(Q \cdot Q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3)$$

여기서 A는 토사유출량(tonnes), Q는 유출량(m³), Q_p는 첨두유량(m³/sec)이며 기타 인자는 범용토양손실공식과 동일하다.

이 식의 유도를 위하여 Williams와 LaSeur(1976)는 유역유출량 산정은 일일강우와 SCS(1972)의 유출곡선지수(Runoff Curve Number ; CN)기법을 이용하였으며 첨두유량은 순간단위수문곡선(Instantaneous Unit Hydrograph)을 이용하여 산정하였다. 또한 몇 개의 소유역(유역면적 65km² 이하)으로 구성되어 있는 대유역(유역면적 2590km² 이하)의 경우 유사추적을 통해 토사유출량을 산정할 수 있는 식 (4)를 제안하였다.

$$RA = \sum (A_i \cdot \exp(-\beta T_i \sqrt{d_i})) \quad (4)$$

여기서, RA는 전유역에 대한 토사유출량, A_i는 소유역의 토사유출량, T_i는 소유역 출구로부터 대유역 출구까지의 도달시간, d_i는 소유역의 토사평균입경, β는 유사추적 계수이다.

2.4 유역 유출량 및 첨두 유출량

단위도가 없는 유역의 첨두유량과 총유출량을 산정하기 위해서는 유효우량과 홍수도달시간 등을 우선 산정해야 하며 SCS(1972)에 의하여 개발된 유출곡선지수법은 유출자료 없이 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 유역에 대한 유효우량을 산정할 수 있는 방법으로 널리 사용되고 있다. (윤용남, 1986)

유역유출량 Q의 산정은 크게 두가지 기법을 사용하였다. 첫째는 SCS(1972)의 유출곡선지수(CN)기법으로부터 유효강우량을 산정하고 유효강우량에 유역면적을 곱하여 유역유출량을 산정하는 기법과 두 번째는 SCS 삼각형 단위수문곡선을 이용하여 유역유출량을 산정하였다. 첨두유량 Q_p의 산정은 세가지 기법을 사용하였다. 첫째는 연구동향에서 소개한 SCS의 식 (11)을 이용하여 첨두유량을 산정하였으며 두 번째는 SCS(1986)의 TR55 기법인 식 (12)를 이용하여 첨두유량(Q_p)을 산정하였다. 세 번째는 SCS 삼각형 단위수문곡선을 이용하여 첨두유량을 산정하였다.

개발지역에서 나타날 수 있는 유역특성을 감안하여 첨두유량의 지배인자인 첨두시간 및 홍수도달시간 산정은 농경지 유역과 2000 에이커 이하의 도시유역에 적용할 수 있는 SCS 지체

시간공식 이외에 Tennessee 유역 급경사(3~10%) 산지를 대상으로 한 Kirpich공식(식 5), 유로 연장 300m 이하인 지표면에 적용 가능한 Kerby공식(식 6), 지표면 흐름이 지배적인 중하류유역(하도경사 < 1/200)에 적합한 Kraven공식(식 7) 및 상류유역(하도경사 > 1/200)에 적합한 Rziha공식(식 8)을 사용하였다. 각 식의 출처는 국립방재연구소(1998) 보고서에 자세히 기술되어 있다.

$$T_c = \frac{3.976 L^{0.77}}{Y^{0.385}} \quad (5)$$

$$T_c = 36.264 \left(\frac{n \cdot L}{Y^{0.5}} \right)^{0.467} \quad (6)$$

$$T_c = 0.444 \frac{L}{Y^{0.515}} \quad (7)$$

$$T_c = 0.833 \frac{L}{Y^{0.6}} \quad (8)$$

여기서 T_c 는 도달시간(min.), L 은 주 유로연장(km), Y 는 경사(m/m), n 은 피복의 조도계수 (포장지역=0.02, 나지=0.3, 삼림=0.8)를 나타낸다. 수문곡선을 유도하기 위해 SCS(1972)는 유역면적이 800헥타르 이하의 소유역인 경우 도달시간(T_c)은 지체시간(T_L)의 1.67배로 다음과 같이 제시하고 있다.

$$T_c = 1.67 T_L = 1.67 \frac{L^{0.8} (S+25.4)^{0.7}}{7068.86 Y^{0.5}} \quad (9)$$

여기서 T_c 는 도달시간(hr.), T_L 은 지체시간(hr.), L 은 하천의 총 연장 (m), S 는 유출곡선지수기법에서 나타난 지표토층의 최대 잠재저류량(mm), Y 는 유역의 평균경사(%)로 일반적으로 경사는 S 로 사용하고 있으나 본 연구에서는 지표 토층의 최대 잠재저류량과의 혼동을 막기 위하여 기호를 달리하였다.

또한 SCS(1972)에서 제안한 침투시간(T_p)은 식 (10)과 같으며 유효우량에 의한 유역 침투유출량(Q_p)은 식 (11)과 같다.

$$T_p = T_L + D/2 = \frac{L^{0.8} (S+25.4)^{0.7}}{7068.86 Y^{0.5}} + D/2 \quad (10)$$

$$Q_p = 0.0001662 \cdot q_p \cdot P_{eff} = 0.0001662 \frac{C \cdot A \cdot P_{eff}}{T_p} \quad (11)$$

여기서 T_p 는 침투시간(hr.), T_L 은 지체시간(hr.), D 는 유효강우 지속시간(hr.), L 은 하천의 총 연장(m), Q_p 는 유효우량 P_{eff} (mm)에 의한 유역 침투유출량(m^3/sec), q_p 는 단위유효우량에 의한 유역 침투유출량 ($m^3/sec/mm$), A 는 유역면적(km^2), C 는 지형에 따른 계수 (300 ; 평탄한 습지의 경우, 484 ; 수문곡선이 개발된 지역의 평균과 동일한 경우, 600 ; 경사가 가파른 경우) 이다.

유역침투유출량(Q_p) 산정을 위한 또 다른 기법으로 SCS(1986)에서 개발한 TR55기법은 소유역에 대한 수많은 컴퓨터 모델링을 실시하여 얻은 결과로 침투유출량은 식 (12)와 같다.

$$Q_p = q_u \cdot A \cdot P_{24eff} \cdot F_p$$

$$q_u = 0.0004304 \cdot 10^B$$

$$B = C_0 + C_1 \log T_c + C_2 (\log T_c)^2 \quad (12)$$

여기서 Q_p 는 유역침투유출량 (m^3/sec), q_u 는 단위면적, 단위유효우량에 대한 침투유출량, ($m^3/sec/mm/km^2$), A 는 유역면적 (km^2), P_{24eff} 는 24시간 지속시간에 대한 유효우량(mm), F_p 는 저류지와 습지를 고려한 계수(표 2.1참조), T_c 는 도달시간(hr.)으로 0.1부터 10시간 범위로 제한되어 있다. 또한 C_0 , C_1 , C_2 는 계수로서 SCS 강우형태에 따라 표 2.2로부터 구한다.

2.5 유사 전달률

토사침식량 산정에 관한 각종 기법 중 많은 기법은 총 토사침식량을 예측하는 기법이나 PSIAC, (R)USLE 기법은 퇴적을 고려치 않은 모형으로써 토사침식량과 토사유출량사이에는 경우에 따라서 많은 차이가 발생된다. 따라서 이러한 유출점 이전에 퇴적된 유사량을 산정하기 위한 유사전달률이란 개념이 요구된다.

총토사침식량에는 세류침식, 세류간 침식, 구곡침식 및 수로침식이 포함된다. 토양이 불안정한 경우 면상침식과 세류침식이 전체 침식량의 주류를 이루며 세류침식, 세류간 침식은 물론 간헐구곡침식을 통한 유역의 특정 유출지점에 대한 토사생산량을 산정하기 위해서는 토사전달률이 산정되어야 한다. (R)USLE는 면상 및 세류침식에 의한 전체 토사침식량을 산정할 뿐 수로의 인입점등 특정 관심지점까지의 유사이동 및 퇴적형태를 산정하지는 못한다. 따라서 (R)USLE기법과 구곡 및 수로에서의 퇴적 및 침식을 산정할 수 있는 침식과 유사전달률방법 (Gross-erosion sediment delivery method; SCS, 1971)이 개발되었다.

표 2.1 유역내 저류지 및 습지대 분포비에 대한 보정계수(Fp)

Percentage of pond and swamp areas	F _p
0	1.00
0.2	0.97
1.0	0.87
3.0	0.75
5.0	0.72

표 2.2 강우형태에 따른 식 (12)의 C계수

강우형태	I _a /P	C ₀	C ₁	C ₂
I	0.10	2.30550	-0.51429	-0.11750
	0.20	2.23537	-0.50387	-0.08929
	0.25	2.18219	-0.48488	-0.06589
	0.30	2.10624	-0.45695	-0.02835
	0.35	2.00303	-0.40769	0.01983
	0.40	1.87733	-0.32274	0.05754
	0.45	1.76312	-0.15644	0.00453
	0.50	1.67889	-0.06930	0.0
IA	0.10	2.03250	-0.31583	-0.13748
	0.20	1.91978	-0.28215	-0.07020
	0.25	1.83842	-0.25543	-0.02597
	0.30	1.72657	-0.19826	0.02633
	0.50	1.63417	-0.09100	0.0
II	0.10	2.55323	-0.61512	-0.16403
	0.30	2.46532	-0.62257	-0.11657
	0.35	2.41896	-0.61594	-0.08820
	0.40	2.36409	-0.59857	-0.05621
	0.45	2.29238	-0.57005	-0.02281
	0.50	2.20282	-0.51599	-0.01259
III	0.10	2.47317	-0.51848	-0.17083
	0.30	2.39628	-0.51202	-0.13245
	0.35	2.35477	-0.49735	-0.11985
	0.40	2.30726	-0.46541	-0.11094
	0.45	2.24876	-0.41314	-0.11508
	0.50	2.17772	-0.36803	-0.09525

$$Y = \frac{E \cdot (DR)}{W_s} \quad (13)$$

여기서 E는 총 토사침식량이며 Y는 단위면적당 토사 생산량, DR은 토사전달률 그리고 W_s는

유역면적이다.

E는 (R)USLE의 A값과 구곡 및 stream에서의 침식량을 모두 포함하며 유사 이송비는 유역 출구에 도달하는 유사량과 유역내에서 발생된 침식량의 비로서 1이하가 되어야 한다. 그러나 수로 등에서 발생된 침식으로 인한 토사유출량을 포함한 현장실측 자료로부터 DR을 산정한 경우 1보다 큰 값이 나타날 수도 있어 보편적으로 인정되는 DR이나 E를 산정할 수 있는 기법은 아직 없는 실정이나 Wischmeier와 Smith(1978) 및 TRB (1980)에 의해 개략치 산정을 위한 일반적인 가이드 라인이 제시된 바 있으며 본 절에서는 토사전달률의 산정기법에 대하여 검토하였다.

토사전달률의 적용을 위해서는 우선 적용하고자 하는 모형이 퇴적을 모의하고 있느냐 하는 것을 결정해야 한다. 예를 들어 (R)USLE는 퇴적을 모의하지 않으나 CREAMS나 WEPP의 경우 모형자체가 사면과 간헐구곡에서의 퇴적을 모의하고 있기 때문에 (R)USLE의 경우 집중수로 도달하기전 지표면 유출조건에서 발생하는 퇴적을 고려해주어야 한다.

유역면적 또는 표고-길이(relief-length)와 토사전달률간의 단순관계식을 이용하여 전달률을 산정하는 기법으로부터 지표면유출, 침식토사의 토성, 지표면 피복, 경사형태, 기울기, 길이, 표면조도 및 현장별 특이인자등 여러인자들을 고려하여 전달률을 결정하는 기법과 강우모형링 기법에 근거한 기법 등이 있다.

Reed(1978)와 Williams(1975)는 토사침식 발생지로부터 특정지점까지의 도달시간이 토립자의 크기별 토사전달률에 영향을 미친다는 사실을 발견하였다. 0.4mm 토립자의 경우 도달시간이 7.48 시간과 0.76 시간일 경우 전달률은 각각 0.6%와 59%로 큰 차이를 보였다. 따라서 고속도로 건설현장과 같이 도달시간이 비교적 짧은 유역에서의 토사전달률은 커질 것이다.

많은 연구결과에 따르면 면적과 전달률은 토립자의 크기와 밀접한 관계가 있으며 따라서 TRB(1980)는 그림 2.1과 같이 입경에 따른 두 개의 곡선을 제시하고 있다. 비교적 입경이 굵고 사면이 완만하며 식물이 있는 유로의 경우 아래 곡선(sand에 해당)을 그리고 보다 안전한 설계를 위해서는 위 곡선(clay에 해당)을 이용할 것을 권하고 있다.

수로발달의 정도는 토사의 효과적 이송에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 수로가 잘 형성된 유역의 경우 침식된 토사의 대부분은 그 유역의 유출토사량인 토사생산량으로 나타나나 수로가 발달되지 못한 유역의 경우 많은 토사침식량이 유역내에 퇴적된다. Renfro(1972)는 수로발달의 정도를 산정하는 방법으로 Texas와 Oklahoma 지역의 Red hill에 대한 토사전달률에 대하여 식 (14)와 같이 표고-길이비 (relief - length)를 이용하여 단순관계를 그림 2.2와 같이 연구 발표하였다. 이 같은 관계는 타지역에 활용하고자 할 경우 세심한 주의가 요구된다.

$$\frac{\text{유역내 주수로와 유역유출구의 표고차}}{\text{주수로를 통한 수로길이}} \quad (14)$$

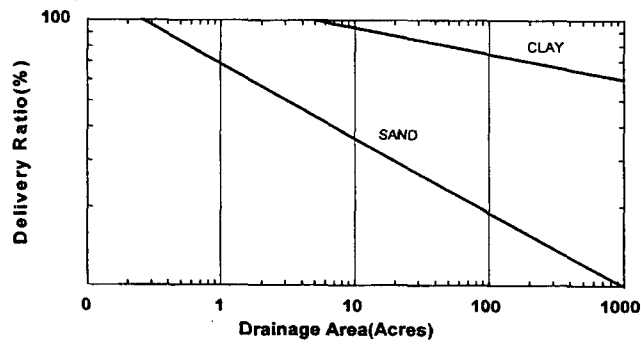


그림 2.1 토성에 따른 유역면적과 토사전달률 상관관계

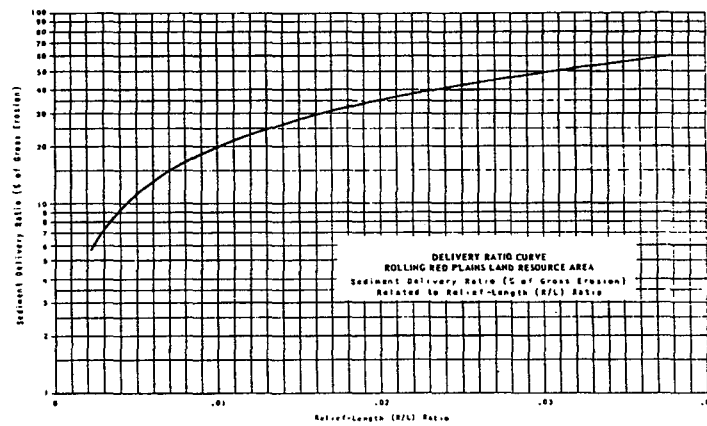


그림 2.2 유역 표고-길이비와 유사전달률간의 상관관계도

유사전달률의 개략적인 산정을 위한 기법으로 Frenette와 Julien(1987)는 유역면적과 전달률 간의 상관관계를 발표하였다. 하지만 허용 범위가 매우 넓으므로 전달률 고려시 신중을 요한다. 일반적으로 유역면적이 증가할수록 유역에서 발생한 토사가 유역외로 유출될 가능성은 감소하게 된다. 따라서 토사전달률은 그림 2.3과 같이 유역면적에 따라 감소하게 된다.

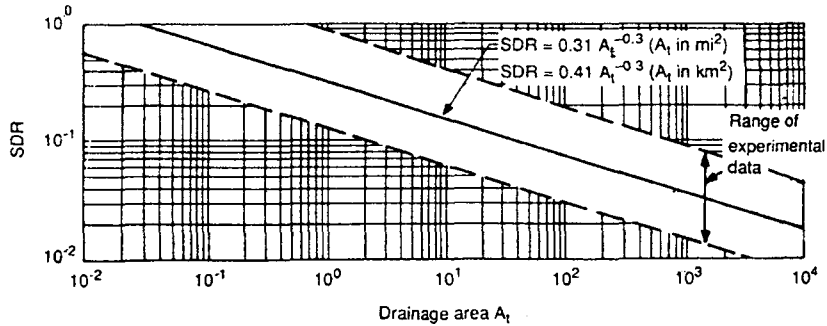


그림 2.3 유역면적에 따른 토사전달률간의 상관관계도

Forest Service는 단일호우에도 적용할 수 있는 토사전달률 산정기법을 개발하였다. 이 기법은 stiff diagram을 이용하며 (1) 사면으로부터 stream까지의 전달거리, (2) 사면형태, (3) 지표면 피복률, (4) 침식토사의 토성, (5) 지표면 유출, (6) 사면기울기, (7) 표면조도를 이용하며 그림 2.4에 나타나 있다. 7가지 인자에 대한 지수를 결정하여 도면에 표시한 후 각 점들을 연결한 페다가형의 면적과 전체사각형의 면적비와 그림 2.5를 이용하여 전달률을 결정한다. 단, 이 기법은 총토사침식량을 산정하는 (R)USLE기법에만 적용해야 한다.

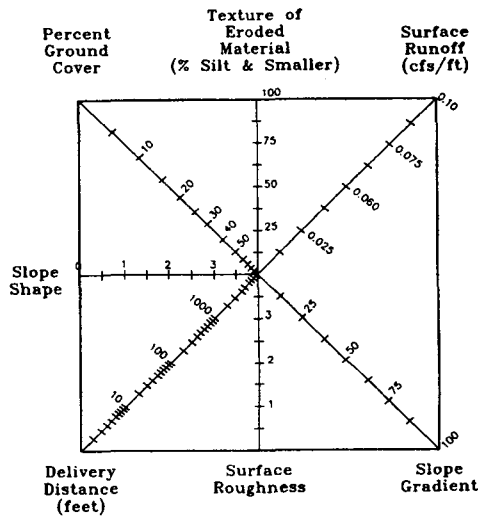


그림 2.4 삼림지수법 다이어그램

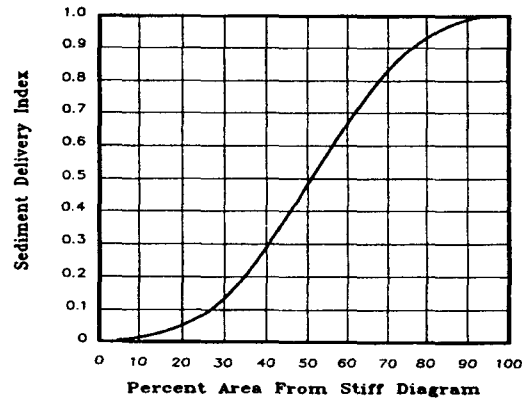


그림 2.5 면적비와 유사전달률간의 상관관계

2.6 시험유역 관측 및 관리기법

토양침식과 지배인자에 대한 자료는 필드나 여러 조건들을 모의한 실험실에서 수집, 검토할 수 있다. 자료수집을 위한 연구나 실험은 필드나 실험실 어디서나 수행할 수 있으나 그 목적에 따라 장소가 선정되어야 할 것이다. 현실적인 자료의 수집이나 검증을 위한 실험을 위해서는 필드에서 연구가 수행되어야 할 것이나 필드에서의 각종 영향인자의 조건은 시공적으로 변화될 뿐만 아니라 인자의 영향을 검토하기 위한 인위적 변경이 곤란하여 침식과정의 이해와 같은 기초적 실험은 실험실에서 수행하는 것이 이상적이다.

2.6.1 시험유역 선정기준 조사분석

각 지배인자의 영향을 산정하기 위하여 지배인자의 조건을 변화시켜가며 반복실험을 수행하게 되는데 이러한 실험은 각종 측정이 뒤따르며 이들 측정자료는 측정에서 발생하는 오차가 따르게 된다. 따라서 동일실험 조건하에서도 반복실험을 실시하여 평균치를 결정하게 되는데 이 경우 자료의 편차(variability) 발생은 필연적이며 토양침식과 관련된 자료를 검토해본 결과 이 편차계수(coefficient of variation)는 13~40%에 이르는 것으로 밝혀졌으며 극치는 $\pm 39 \sim \pm 120\%$ 에 이른다. 신뢰도 95%, $\pm 10\%$ 의 정확도를 확보하기 위해서는 세 가지 다른 토양에 대해서 6, 25, 29회의 반복실험이 요구된다. 그러나 일반적으로 수행되는 5~10회 정도의 반복실험만을 수행할 경우 편차계수는 20~30%에 달하게 되며 보다 높은 정밀도가 요구될 경우 30회 이상의 실험이 요구된다. 또한 필드에서의 실험은 실험실에서의 실험보다 그 편차가 커져 세류간 침식실험을 위한 현장실험의 자료의 편차계수는 20~68%에 이르는 것으로 조사되었다.

뿐만 아니라 실험의 시스템 오차가 발생된다. 예를 들면 사면경사의 영향을 실험하기 위하여 낮은 경사도로부터 경사도가 높은 실험까지 점진적으로 경사도를 높여가며 실험할 경우 특정 경사도에서 발생하는 각종 현상은 이전 경사도에서 수행된 실험의 영향을 받게되므로 이와 같은 오차를 방지하기 위해서는 실험순서는 무작위로 수행되어야 한다. 실험 인자가 두 개 이상일 경우 통계기법인 구역 무작위화 실험 (block randomized experiments)을 수행하는 것이 실용적이며 이에 대한 구체적인 설명이나 기술은 본 연구범위를 벗어나므로 여기서는 생략하기로 한다.

2.6.2 시험유역 토사량 관측기법 조사분석

필드측정은 크게 두개의 그룹으로 분류된다. 하나는 비교적 작은 샘플지역이나 침식 plot에 대한 침식량 산정을 위한 측정이 있으며 또 다른 하나는 배수유역과 같이 비교적 넓은 면적에 대한 침식을 평가하는 측정이다.

가. 침식 Plot

(1) Bounded Plot

Bounded plot은 각 plot이 격리되어 있고 각종 조건의 변경이 가능해 영구적인 연구나 실험지점에서 침식지배인자를 연구하는데 쓰인다. plot의 수는 실험의 목적에 따라 달라지나 일반적으로 최소 두 번 이상의 반복실험을 수행할 수 있도록 해야 한다.

일반적으로 침식 plot은 그 규모에 따라 small plot, USLE plot, large plot의 세 가지 유형으로 구별할 수 있다(SWCS, 1994). 작은 plot은 그 면적이 1 m²에 불과한 작은 크기로 세류간 침식 연구에 사용된다.

USLE plot은 세류 및 세류간 침식 연구에 사용되며 표준 plot이라고도 불리며 그 크기는 22.1m(L)x4m(W) 또는 22.1m(L)x1.8m(W)이다. Large plot은 최소한 한 개이상의 자연배수로를 포함하고 있는 소유역으로 unit-source watershed라고도 불리는데 이는 유역 내에 한 종류의 농작물만이 있다는 것을 의미한다.

Large plot을 제외한 나머지 plot의 모든 경계선은 녹슬지 않고 누수가 없는 철판 또는 나무판으로 지표면 150~200mm 위까지 나오도록 하며 어떠한 기후에도 움직이지 않을 정도로 깊이 설치한다. 사면 아래쪽 경계면에는 이송토사를 모을 수 있는 홈통을 만들며 뚜껑도 만들어 빗물이나 plot 외부로부터 토사가 튀어 들어오는 것을 방지한다.

Large plot이나 토사량이 많은 경우 첫 번째 수집함에서 월류된 유출 및 토사는 동일한 량으로 나눌 수 있는 분기장치를 통하여 그중 한 개의 분기수로를 통해 유출되는 유사를 두 번

제 통에 모이도록 장치되어 있으며 개략도는 그림 2.6에 도시되어 있다.

만약 유사농도를 자동으로 측정하는 장치를 설치할 경우 강우발생 동안의 유사농도와 유출량으로부터 적분을 통한 총 유사량을 산정할 수 있다. 자세한 장치 및 설치기법등은 USDA Agricultural Handbook NO. 224에 자세히 기술되어 있다.

Bounded plot 을 통한 유사측정이 가장 정확한 단위면적당 토양손실을 측정할 수 있는 방법이지만 이 방법에도 경계면 철판을 따라 세류가 형성되거나 경계면 외부로부터 유출입될 수 있는 유사가 배제되며 유사수집 수로 등에 침전되는 유사 등 여러 오차가 발생할 소지가 많다. 면적이 1 m^2 인 plot은 침투나 빗방울의 튀김에 의한 침식현상의 관측은 가능하나 지표면 흐름에 의한 침식현상은 관측하기가 곤란하며 세류침식을 연구하기 위해서는 plot이 최소 10m 이상이 되어야 한다. 세류간 침식 연구를 위한 plot의 면적은 0.5 m^2 또는 0.66m^2 이면 가능하다.

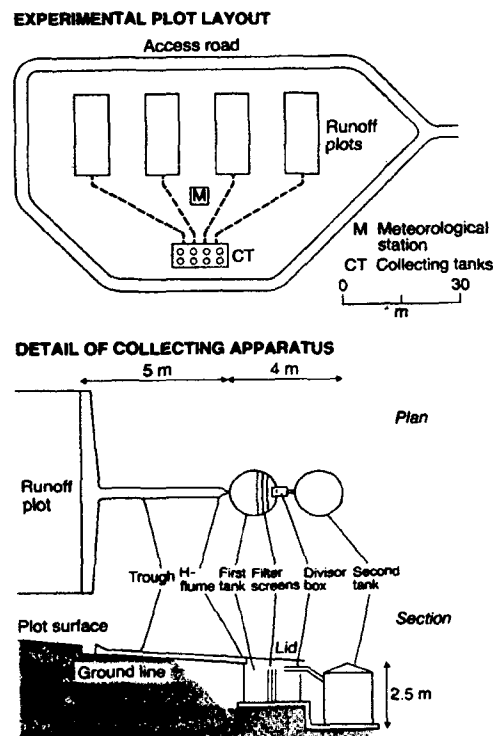


그림 2.6 침식 plot 개략도

(2) Gerlach 홈통

Gerlach는 토사유출량을 산정하는 또 다른 기법으로 뚜껑 달린 $0.5\text{m(L)} \times 0.1\text{m(W)}$ 의 철판 만든 홈통을 개발했다(그림 2.6.2 참조). 홈통 하단부에 배수관을 이용하여 수집병과 연결하였

다. 일반적으로 이 홈통은 두 개 또는 세 개씩 나란히 설치하되 홈통으로 유입되는 유사 및 유출수가 또 다른 홈통으로부터 영향을 받지 않도록 엇갈리게 사면의 기울기가 다른 여러 곳에 설치한다. Gerlach 홈통은 주로 넓은 지역에 걸쳐 많은 지점의 토사유출량의 샘플측정에 적합하다.

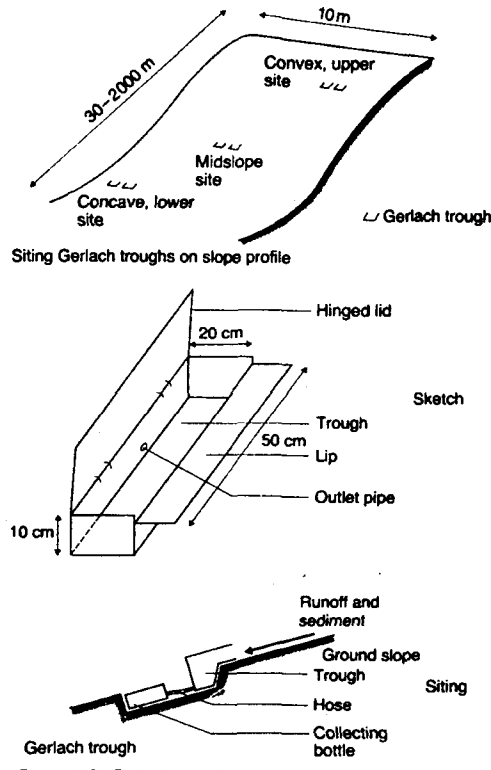


그림 2.7 Gerlach 홈통

(3) 빗방울 침식 측정

침식 plot과 Gerlach 홈통은 빗방울의 튀김, 지표류 및 세류의 복합적 영향으로 인한 침식에 관한 정보를 제공한다면 각각의 흐름이 침식에 미치는 영향을 관측하기 위해 splash board, splash funnel 및 병(bottle)을 이용하여 splash 침식을 측정할 수 있는 장치들이 고안, 개발되었다. 이들은 토양은 지표면 위로 1~2mm 나오도록 설치되어 지표류나 지표류에 의한 유사가 유입되지 않도록 되어있는 반면 튀김에 의한 토립자만이 유입되도록 되어있다. 또 다른 장치로는 splash 컵이 있다. 이 장치는 토사체 덩어리를 컵 가운데 위치하게 한 후 토사체로부터 튀김에 의하여 손실되는 토립자만이 주변 컵으로 떨어지게 되어있다. (그림 2.8참조)

이렇게 측정된 침식량은 식 (16)을 이용하여 단위면적당 침식량으로 조정한다.

$$MSR = MS \cdot \exp[0.054D] \quad (16)$$

여기서 MSR = 실제 단위면적당 튀김에 의한 침식량 (g/cm^2)

MS = 측정된 단위면적당 튀김에 의한 침식량 (g/cm^2)

D = 컵 또는 funnel의 직경 (cm)

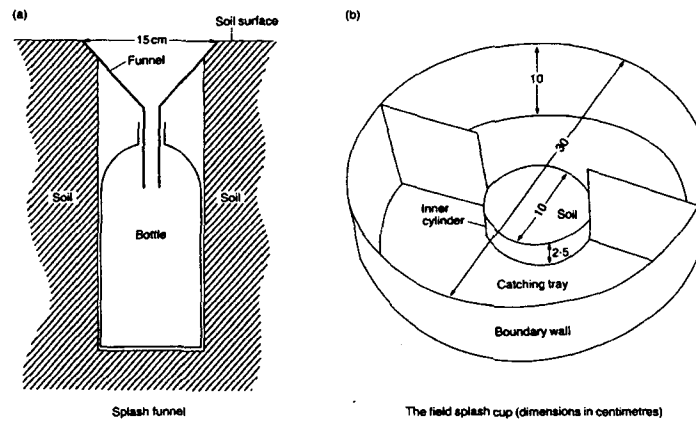


그림 2.8 Splash Funnel

(4) 세류침식 측정

세류침식을 측정할 수 있는 가장 간단한 방법은 사면을 가로질러 20~100m길이로 세류단면을 만든 후 세류의 두 개 지점의 횡단면의 평균치와 이 지점간의 거리를 곱하여 침식량을 산정한다. 그러나 이 방법은 세류내 이송되는 유사에 기여하는 세류간 침식 및 세류의 모서리에서의 침식량을 별도로 구분하고 있어 세류침식을 약 10~30% 정도 과소 산정한다.

나. 유역(Catchments)

유역전체에서 발생하는 유사침식량을 산정하기 위해서는 사면뿐만 아니라 하천에서의 침식량을 알아야 한다. 많은 경우 사면에서 발생된 유사는 사면하부에 퇴적되므로 유역유출 지점에서 관측된 유사량은 유역전체의 토양침식량에 비해 작게 나타난다. 유사의 이동 형태를 관측하기 위해서는 관측지점의 선정이 중요하다. 유역의 유사량 관측기법 중 하나는 유역을 소유역으로 나누고 각 소유역의 유출지점에 자기 유출기록 지점을 설치하고 유사농도를 관측하

여 전체 토사유출량을 산정한다. 각 소유역의 중간경사선(하천과 유역 분계선의 중간지점을 연결한 선: 그림 2.9 참조) 부근에 일정간격 또는 무작위로 사면을 선정하여 무작위 또는 일정간격으로 plot 또는 Gerlach 홈통을 설치하여 토사침식량을 산정하기도 한다.

(1) 저수지 조사

저수지의 토사포착율을 알면 일정 기간동안의 저수지내 퇴적량을 산정하여 저수지의 배수 유역에 대한 토사침식량을 산정할 수 있다. 일정 기간동안의 저수지내 퇴적량은 저수지 하상의 단면을 측량하여 기간내 변화된 하상단면을 비교함으로써 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 많은 저수지의 유사포착율, 저수지 용량산정 등 오차발생 가능성을 내포하고 있으며 이 오차의 범위가 때로는 실제 토사침식량 규모만큼 커지기도 한다.

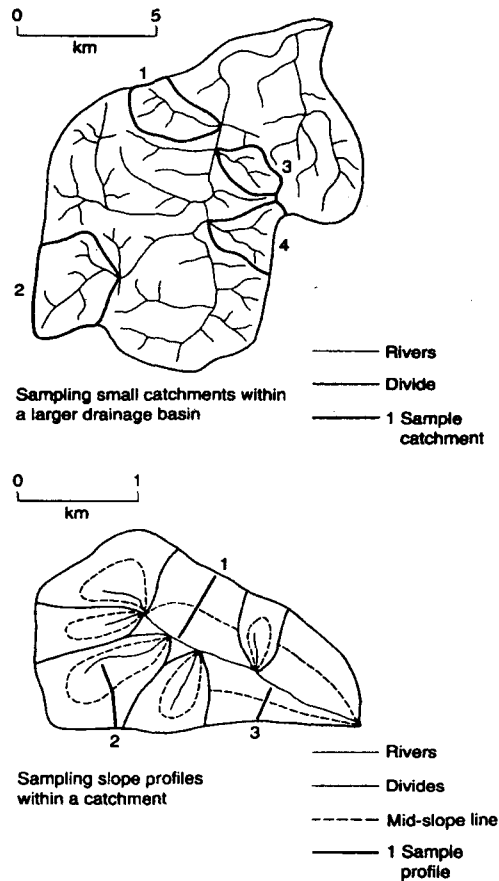


그림 2.9 유사량 샘플링 및 유역분할 예제

(2) 추적자

토양침식을 측정하기 위하여 사용되는 가장 보편적인 추적자는 방사성 동위원소 caesium-137이다. caesium-137은 1950년대부터 1970년대 사이의 핵무기의 대기실험에서 발생된 것으로 이 원소는 지구상 성층권에 머물다 강수와 함께 지표면에 쌓이게 되었으며 그 정도는 강우지역에 따라 다르나 작은 구역에서는 거의 균등한 분포로 쌓였다. 그림 7.5는 caesium-137의 지층깊이별 농도를 나타내는 대표적인 예이다. 깊이가 깊어질수록 caesium-137 농도가 약해지는 것은 땅속에 사는 벌레의 활동에 의한 영향이다. 사면 정상부의 목초지에는 지표면에 caesium-137의 농도가 높으며 경작지에서는 쟁기질에 의하여 토양이 계속 섞여 caesium-137은 균일한 분포를 나타낸다. 급경사면에서는 caesium-137의 농도가 약 40% 감소하게 되는데 이는 심한 침식 때문이다. 사면하부에서는 퇴적의 영향으로 caesium-137의 농도가 증가하는 경향을 보인다. 따라서 caesium-137의 농도분포를 조사하면 공간적 침식 발생태를 알 수 있게 된다.

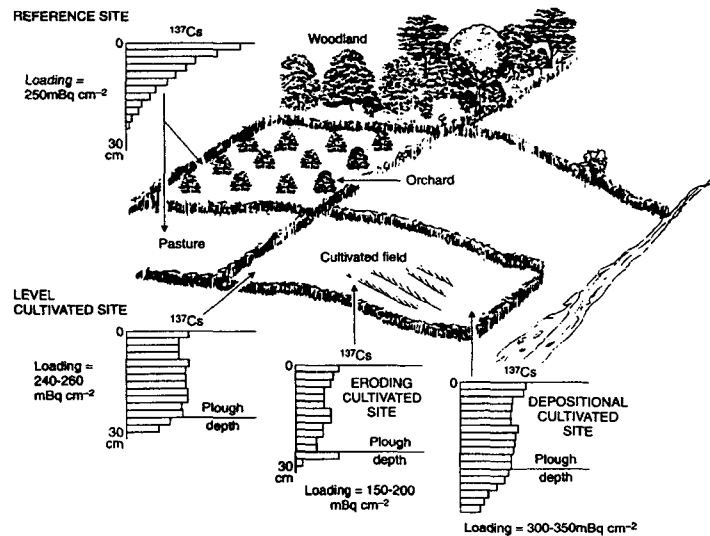


그림 2.10 침식 영향에 의한 방사성 동위원소의 분포 변화

다. 복합실험

최근에는 현장실험과 실험실 시험을 혼합한 기법으로 현장에 인공강우장치를 설치하여 토양침식 인자를 산정하는 기법이 쓰이고 있다. 인공강우 장치는 직사각형 형태의 지붕에 노즐

을 달아 인공강우를 유발시키거나 원점을 중심으로 노즐이 달려있는 회전팔이 3m 정도의 높이에서 회전하며 실험면적에 인공강우를 뿌려 침식을 유발시킨다.

3. 연구범위 및 방법

최근 국내 토목분야에서 토사유출량을 산정하는 주 목적은 재해영향평가시 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(1997)에서는 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 발표하면서 단일호우에 대한 토사유출량 산정 가능성을 조심스럽게 논하였다. 따라서 본 연구에서는 우선 개정범용토양손실공식)을 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. 개정범용토양손실공식(RUSLE)의 경우 각 인자에 대한 검토는 물론 토사전달률에 대한 각종 산정기법을 병행하여 검토하였다.

최근 국내 토목분야에서 토사유출량을 산정하는 목적은 주로 재해영향평가시 개발지역의 유역의 토사유출을 억제하기 위한 침사지 설계자료로 활용하기 위함이다. 따라서 우리 실정에 맞는 토사유출량 산정기법을 제시하기 위해서 산정기법의 적용목적 및 적용범위가 침사지 설계를 위한 토사유출량 산정이 가능한 단일호우에 대한 토사유출량 산정이 가능한 것으로 알려진 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 선정하여 검토하였다. 단일호우에 대한 토사유출량 산정기법으로 개발된 것으로 알려진 MUSLE기법의 경우 USLE기법의 R과 토사전달률 대신 총유출량(Q)와 침두유출량(Q_p)을 이용하여 토사유출량을 산정하므로 침두유출량 산정이 필수적이며 침두유출량 산정을 위해서는 강우강도식, 도달시간과 유출량 자료가 필요하다. 따라서 (Q · Q_p) 인자를 제외한 모든 인자가 동일하다고 간주할 경우 토사유출량은 (Q · Q_p)^{0.56}에 비례하므로 총유출량(Q)과 침두유출량(Q_p)의 산정방법에 따라 토사유출량이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 토사유출량을 실측한 기간동안 관측된 모든 일 강우를 지속시간 24시간의 단일 호우사상의 집합으로 간주하여 각 호우사상에 대한 총유출량(Q)과 침두유출량(Q_p)을 연구동향에서 소개한 각종 기법별로 산정하고 이를 이용하여 토사유출량을 구한 후 실제 토사유출량과 비교하였다.

도달시간 산정은 Kerby, Kraven, Rziha, Kirpich, SCS lag-time공식을 사용하였다. 이 중 Kraven, Rziha 공식은 경사도 1/200을 경계로 그 적용범위가 달라지므로 본 연구에서 채택한 현장의 조건에 따라 두 공식 중 한가지 공식을 선정하여 도달시간을 산정하였으며 따라서 본 연구에서는 이 두가지 공식을 합하여 Rziha & Kraven 공식으로 이룸하였다. 강우강도식은

관측 지점의 재현기간별 24시간 지속강우량이 관측된 최대 일강우와 일치하는 재현기간에 해당하는 강우강도식을 채택하였다. 관측 지점의 재현기간별 강우강도식은 농업기반공사에서 제시하는 식을 이용하였으며 침투유량과 유출량 산정은 수문곡선을 이용하는 SCS 삼각단위도법을 적용하였다. 또한 침투유량과 총유량 산정이 수문곡선법에 비해 단순한 SCS(1972)기법 및 TR55기법(SCS, 1985)도 이용하여 산정하였다.

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 토양침식성 인자 K의 산정에 활용하였다. 각 현장별 위치와 재해영향평가서상 적용된 인자 결정기준이 표 4.1에 나타나 있다. 참고로 본 논문에서 선정한 유역은 이미 재해영향평가를 받아 침사지가 설치, 운영되고 있는 현장인점을 감안하여 현장 및 설계자 등 상세한 정보는 표에 수록하지 않았다.

표 4.1 각 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) Haan등 (1994) Wischmeier Smith(1978)	Wischmeier Smith(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 억제하자는 목적을 지니고 있어 최소 일단위로 침사지 관리가 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 국내 외적으로 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 범용토양손실공식을 침사지 설계에 사용하고 있는 현실을 감안하여 개정범용토양손실공식의 적용을 검토하되 R값 산정을 위한 강우로는 TBR에서 제시한 강우지속기간 24시간을 적용하였다.

$$R = \frac{\sum EI_{30}}{100} \quad (17)$$

여기서 I_{30} 는 특정 호우에 대한 최대 30분 강우강도, E (MJ/ha)는 강우의 총 에너지 (= $e \cdot P$), P는 강우의 총깊이(mm), e는 강우운동에너지(MJ/ha/mm)이다.

강우운동에너지에 대해서는 Foster 등(1981)은 식 (18)을 Brown과 Foster(1987)는 식 (19)와 같이 지역의 강우특성에 적합한 공식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} e &= 0.119 + 0.0873 \log_{10} I & I \leq 76 \text{ mm/hr.} \\ e &= 0.283 & I > 76 \text{ mm/hr.} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 e 는 (MJ/ha/mm), I 는 호우의 평균강우강도(mm/hr.)이다.

Onaga 등(1988)은 일본에 적합한 강우운동에너지공식을 식 (19)와 같이 연구 발표하였다.

$$e = 9.81 + 10.6 \log_{10} I \quad (19)$$

여기서 e 는 (J/m²/mm), I 는 호우의 평균강우강도(mm/hr.)이다.

식 (17)은 Wischmeier와 Smith(1958)의 지표면 및 세류침식은 총운동에너지와 30분 최대강우강도와 관련이 있다는 연구결과를 인용한 식이지만 EI_{30} 이라는 식 중 30분 강우강도에 대한 물리적 의미나 선정 이유가 없는 등 현재도 많은 논란의 대상이 되고 있으며 강우강도와 빗방울의 평균직경은 강우강도에 따라 그리고 강우 발생원인에 따라 달라지므로(Morgan, 1995) 우리나라의 강우특성에 적합한 강우침식도 R 에 대한 연구가 요구된다.

개정범용토양손실공식의 경우 토사침식량은 모든 인자들의 곱의 형태로 표현되므로 R 을 제외한 모든 인자가 동일하다고 간주할 경우 토사생산량은 강우침식도 R 에 비례하므로 R 의 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 R 값(R_{daily})의 총합(R_{total})과 관측기간 중 최대 호우사상에 대한 R 값 (R_{max}), 건설부(1992)에서 제시한 연평균 R 값(R_{avg}), 지속시간 24시간, 재현기간 30년에 해당하는 단일 호우사상에 대한 R 값(R_{30}) 등을 비교 검토하였다.

$$R_{total} = \sum R_{daily} \quad (20)$$

$$R_{max} = \max(R_{daily}) \quad (21)$$

연평균 R 값(R_{avg})과 실강우에 대한 1일 최대 R 값(R_{max}) 지속시간 24시간, 재현기간 30년에 해당하는 단일 호우사상에 대한 R 값(R_{30}) 및 실강우에 대한 총 R 값(R_{total})을 비교한 표 4.2.1로부터 7개 현장 중 5개 현장의 경우 재현기간 30년에 해당하는 24시간 지속강우에 의한 R 값이 연평균 R 값보다 1.13~1.92배 큰 값을 나타내며 나머지 2개 현장은 연평균 R 값의 60~80%를 나타내고 있다. 또한 B 현장을 제외한 모든 현장의 경우 재해영향평가서에서 주로 사용하고 있는 연평균 R 값이 관측된 실강우에 의한 R 값에 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 발생했다. 따라서 우기에 해당하는 1998년 6월부터 8월까지 3개월간 전국에 광범위하게 분포되어 있는 현장에 대한 토사유출량의 관측

결과는 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.

표 4.2 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

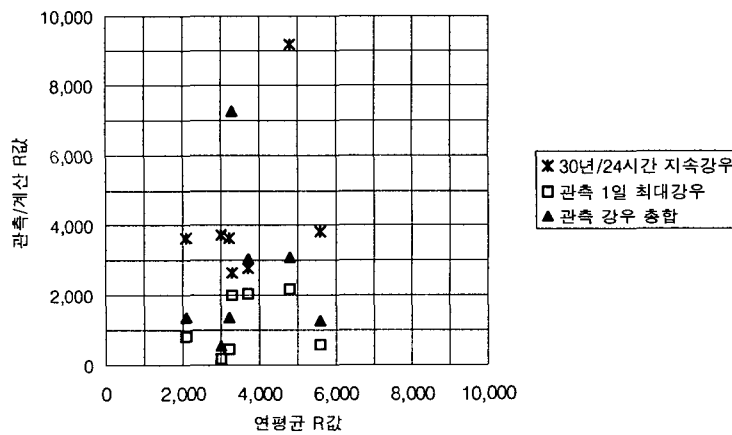


그림 4.1 연평균 R과 관측자료에 의한 R 및 특정강우 (재현기간 30년, 24시간 지속)에 의한 R의 비교도

평가서에서 선정한 연평균 R값과 농어촌진흥공사에서 제시하는 재현기간별 (2, 5, 10, 20, 30년) 확률강우를 이용하여 산정한 R값을 비교하여 현재 실무에서 적용하고 있는 기준을 검토하였다. 그림 4.2의 종축은 재현기간별 24시간 지속 확률강우량에 의한 R값과 평가서상에 나타난 R값과의 비를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실무에서는 약 7년부터 20년 재현기간에 따른 24시간 지속 강우에 해당하는 설계강우를 적용하고 있다는 사실을 알 수 있다.

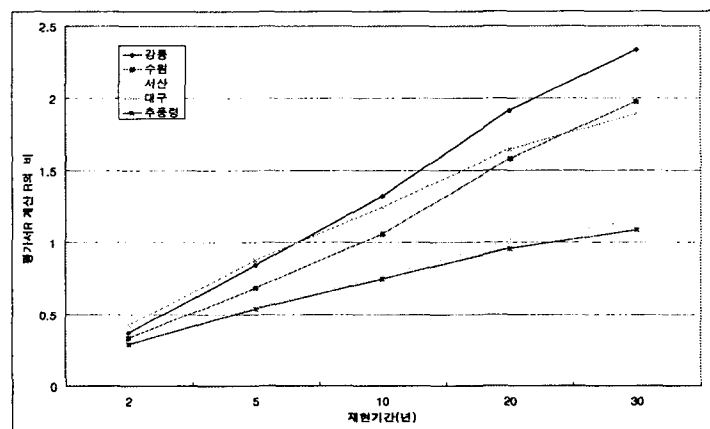


그림 4.2 평가서 R과 재현기간(년)별 계산 R 비교

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 Wischmeier 와 Smith(1978)는 실트 함유비가 70% 미만의 경우 K값을 식 (22)와 같이 제안하였다.

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (S_1 - 2) + 2.5 (P_1 - 3)}{100} \quad (22)$$

여기서 M은 $(\%MS + \%VFS)(100 - \%CL)$ 이며 K의 단위는 A/R 또는 $\frac{\text{tonnes} \cdot \text{hr}}{\text{MJ} \cdot \text{mm}}$ 이다

이외에도 2mm 이상 골재의 함유율이 10% 이하인 경우에 대하여 적합한 K 산정식이나 미국 138개 토양에 대한 K 산정 식 등이 USDA(1997)에 소개되어 있다.

우리나라의 경우 건설부(1992)에서 전국의 토양통별 K값을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 7개 시험유역에 대한 현장의 토양자료를 이용하여 K값을 산정하고 일부 재해영향평가서에서 채택한 건설부(1992)의 K값과 비교하였다.

표 4.3에서 보는 바와 같이 건설부(1992)의 K값과 실측한 현장의 토양입도분포를 토대로 Wischmeier 등(1978)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.

표 4.3 평가서와 계산 K값 비교

유역	A	B	C1	C2	D1	D2	E	F	F1	F2	F3
평가서	0.0220	0.0220	0.0240	0.0230	0.0374	0.0294	0.0224	0.0190	0.0360	0.0355	0.0316
계산치	0.0532	0.0220	0.0198	0.0265	0.0397	0.0384	0.0235	0.0178	0.0360	0.0355	0.0316

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 재해영향평가에서 산정한 LS값과 비교하였다. 식 (23)은 McCool 등(1987)에 의하여 발표된 사면경사 길이 15ft 이상에 대한 경사 인자(S)이며 최근 경작된 토양의 경우 식 (24)를 사용할 것을 USDA(1997)에서는 제안하고 있다.

$$\begin{aligned}
 S &= 10.8\sin\theta + 0.03, & \sin\theta < 0.09 \\
 S &= 16.8\sin\theta - 0.5, & \sin\theta \geq 0.09
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

여기서 θ 는 사면경사각이다.

$$\begin{aligned}
 S &= 10.8\sin\theta + 0.03, & \sin\theta < 0.09 \\
 S &= (\sin\theta / 0.0896)^{0.6}, & \sin\theta \geq 0.09
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

또한 사면길이 인자(L)는 식 (25)와 같다.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \tag{2.2.17} \tag{25}$$

여기서, λ 는 평면에 투영된 사면의 길이(m), m 은 사면경사길이의 멱지수(exponent), β 는 세류 및 세류간 침식의 비이다.

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \tag{26}$$

$$\beta = \frac{11.16 \sin\theta}{3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56} \tag{27}$$

표 4.4에서 보는 바와 같이 대부분의 현장에서 평가서에 나타난 LS값이 본 연구에서 산정한 LS값 보다 작은 값을 나타내고 있다. 본 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 동시에 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 주관이 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 4.5 참조) GIS 기법을 도입한 LS값은 Hickey 등(1994)의 연구결과를 이용하였으며 해석을 위한 격자망은 20m x 20m를, 유역대표 LS값은 전유역의 평균치와 소유역에 대한 최대값과 최소값의 평균값을 적용하였다.

표 4.4 각 현장별 지형학적 유역특성

현장	평가서	본 연구	LS 비	유역면적	유로연장	경사도	유역세로
	LS	LS		(ha)	(m)	(%)	/가로비
	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 4.5에 나타난 바와 같이 본 연구의 LS값과 Hickey 등의 GIS 기법을 이용하여 산정한 LS 값이 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 4.5 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

개정범용토양손실공식을 이용하여 산정한 토사유출량은 엄밀한 의미에서 강우에 의한 토사 생산량이므로 침사지 설계를 위한 토사유출량은 현장의 각종 지형 및 지질학적 여건에 따라 토사전달률을 고려하여야 한다. 표 4.4에서 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 토사생산량을 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 율류한 유출수에 포함된 부유사량 만큼 작을 것이다.

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

또한 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.

4.3 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 이용한 토사유출량 산정

실측토사유출량과 MUSLE를 이용한 계산토사유출량의 관계를 비교해본 결과 총유출량과 침투유출량을 비교적 단순히 계산할 수 있는 SCS(1972)기법이나 TR55(SCS, 1986)기법은 실측치에 비해 큰 토사유출량값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 수문곡선을 이용하여 총유출량과 침투유출량을 산정하는 경우 홍수도달시간 산정기법에 따라 예상 토사유출량이 변하고 있음을 알 수 있다.

표 4.6 Q, Qp 산정기법별 회귀직선식의 기울기와 상관계수

적용기법	Kerby	Kirpich	SCS Lag Time	Rziha & Kraven	TR55	SCS(1972)
상관계수	0.86	0.86	0.84	0.86	0.8	0.79
$y = x^n$ 의 n 값	1.04	1.058	1.064	1.096	1.22	1.291

선정된 7개 현장의 경우 실측치와 계산치의 상관계수는 0.86부터 0.79 사이로 Kerby, Kirpich 및 Rziha & Kraven 공식이 가장 우수하며 n값으로 보면 1에 가까운 Kerby, Kirpich, SCS lag-time 그리고 Rziha & Kraven 공식이 홍수도달시간 산정공식으로 그 적용 가능성이 우수한 것으로 판단된다. 일반적으로 지형학적 조건이 다른 유역에 대하여 동일한 산정공식을 이용하여 적용 가능성을 비교하는 것은 다소 무리가 따르나 표 3의 검토 결과에 따르면 Kerby, Kirpich, SCS lag-time 그리고 Rziha & Kraven 공식들 중 유역 특성에 적합한 산정공식을 선정하여 홍수도달 시간을 산정하는데는 큰 무리가 없어 보이나 예상되는 유역의 토사유출량이 클 경우 n값이 1에 가까운 Kerby나 Kirpich 공식을 이용한 예상 토사유출량과 유역 특성에 적합한 공식을 적용한 토사유출량과의 비교를 통한 안전도 검토가 이루어져야 할 것이다.

RUSLE공식과 MUSLE공식의 적용 가능성을 동시에 비교하기 위하여 본 연구에서 가장 우수한 기법으로 나타난 Kerby의 홍수도달시간과 SCS 삼각수문곡선법을 이용한 수정범용토양손실공식(MUSLE)에 의한 예상치와 TRB 토사전달률을 고려한 개정범용토양손실공식(RUSLE)에 의한 예상치를 실측치에 대하여 도시하고 동시에 회귀분석을 실시하였다. 또한 현재 국내 재해영향평가서에서 산정한 예상 토사유출량도 동시에 도시하여 비교하였다.

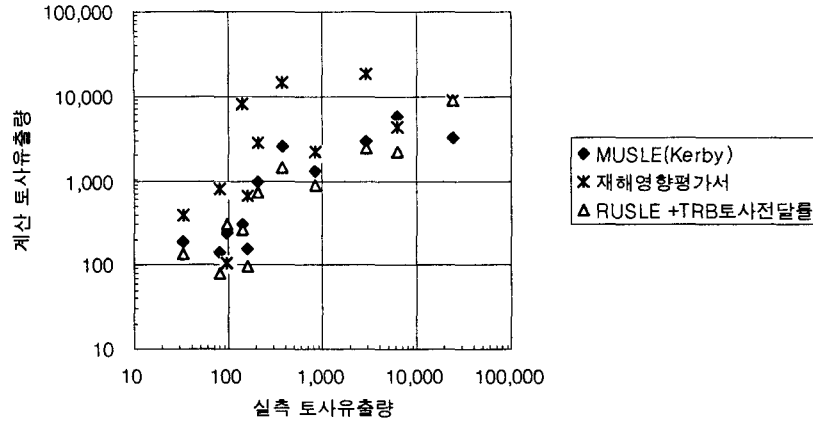


그림 4.3 산정기법에 따른 계산 및 실측 토사유출량의 비교
(토사유출량 단위 : tonnes)

그림 4.3에 나타난 바와 같이 토사전달률을 고려한 개정범용토양손실공식(RUSLE)과 Kerby의 홍수도달시간 및 SCS 삼각수문곡선법을 이용한 수정범용토양손실공식(MUSLE)은 비슷한 예측결과를 보이고 있으며 상관계수와 회귀식($y = x^n$)의 n 값이 두 공식 모두 동일하게 0.86과 1.04로 나타나 본 연구에서 선정한 7개 현장에 대해서는 적용 가능성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 현재까지 국내 재해영향평가서에서 제시한 산정기법은 토사전달률을 대부분 무시하고 있어 실측 토사유출량에 비해 지나치게 과다한 토사유출량을 예측하고 있음도 그림으로부터 알 수 있다. 수정범용토양손실공식을 통한 토사유출량 산정기법은 강우에 의한 유출량 및 침투유량 산정방법에 따라 결과에 많은 차이를 보이는 문제가 있으나 재해영향평가의 경우 유역의 수문특성분석시 통상 유역의 유출량과 침투유량을 산정하므로 토사전달률을 고려할 필요가 없다는 점과 강우침식도(R)를 산정할 필요가 없다는 이점이 있다. 그러나 개정범용토양손실공식의 경우 설계 강우침식도(R)는 한번만 산정해도 되며 공사중 지형변화는 LS 인자에 반영되므로 수정범용토양손실공식과 같이 공사중 지형변화에 따라 유출량 및 침투유량을 재계산해야 하는 번거로움이 없다는 장점이 있다. 그러나 B 현장의 경우 개정범용토양손실공식과 수정토양손실공식에 의한 예상 토사유출량에 상당한 차이를 보이고 있어 우리나라에 적합한 토양손실공식이 확립되기 전까지 개정범용토양손실공식과 수정범용토양손실공식을 동시에 산정·비교하여 기술자의 감각에 따라 각종 재해 방지대책을 수립해야 할 것이다.

5. 연구결과 비교검토

외국의 토사유출량 산정기법중 개정범용토양손실공식(RUSLE)의 우리나라에 대한 적용 예를 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 있음을 알 수 있었다. 그러나 현재까지 국내 재해영향평가서에서 제시한 산정기법은 토사전달률을 대부분 무시하고 있어 실측 토사유출량에 비해 지나치게 과다한 토사유출량을 예측하였음을 알 수 있었다. 또한 우리나라에 적합한 토사전달률의 산정기법으로 TRB(1980)기법을 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 심도있는 연구와 우리나라 강우특성에 적합한 강우에너지 산정공식의 개발이 필요하다.

수정범용토양손실공식(MUSLE)을 국내 현장에 적용하여 실측치와 비교함으로써 일반적으로 국내에서 많이 사용되어 오던 개정범용토양손실공식에 대한 간접적 검토를 수행하였다. 수정범용토양손실공식 산정시 필요한 홍수도달시간 산정공식으로는 Kerby, Kirpich, SCS lag-time 그리고 Rziha & Kraven 공식들 중 유역 특성에 적합한 산정공식을 선정하되 예상되는 유역의 토사유출량이 클 경우 Kerby나 Kirpich 공식을 이용한 예상 토사유출량과의 비교를 통한 안전도 검토가 이루어져야 할 것이며 총유출량 및 침투유량 산정은 단순한 식보다 수문곡선법을 이용한 비교적 정밀한 기법을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

계산치와 실측치의 비교 결과 개정범용토양손실공식에 비해 토사전달률을 고려할 필요가 없다는 점과 강우침식도(R)를 산정할 필요가 없다는 이점이 있는 수정범용토양손실공식을 통한 토사유출량 산정기법의 국내 적용 가능성을 확인하였다. 토사전달률을 고려한 개정범용토양손실공식을 동시에 비교한 결과 두 공식이 모두 유사한 예측결과를 보이고 있어 공사중 지형변화가 LS 인자에 반영되어 수정범용토양손실공식과 같이 공사중 지형변화에 따라 유출량 및 침투유량을 계산해야 하는 번거로움이 없는 개정범용토양손실공식의 국내 적용 또한 가능한 것으로 확인하였으나 현장의 특성에 따라 개정범용토양손실공식과 수정토양손실공식에 의한 예상 토사유출량에 상당한 차이를 보이는 경우가 확인되어 현장 특성에 따른 인자

산정 등 더 많은 학술적 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

- 건설부 (1992). 댐설계를 위한 유역단위 비유수량 조사연구.
- 국립방재연구소 (1998). 토사의 물리적 화학적 성질 및 이동특성 조사분석 및 해외토사유출 산정기법. 행정자치부.
- 국립방재연구소 (1998). 방재조절지의 설계지침 개발(I). 행정자치부.
- 윤용남 (1986). 공업수문학. 청문각
- Frentte, M., and Julien, P.Y. (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., Barfield, B.J., and Hayes, J.C. (1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchment*. Academic Press.
- Hickey, R., Smith, A., and Jankowski, P. (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 Ports, M.A. (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., Foster, G.R., Wessies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. (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.
- SCS (1972). Hydrology, Sect. 4, Soil Conservation Service National Engineering Handbook, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, DC.
- SCS (1986). "Urban hydrology for small watersheds." *Technical Release No. 55*, Soil Conservation Service, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, DC.
- 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*.

- Williams, J.R. (1978). "A sediment yield routing model." *Proc., ASCE Conf. Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering*, pp. 662-670.
- Williams, J.R., and LaSeur, W.V. (1976). "Water yield model using SCS curve numbers." *J. Hydraulic Div., ASCE., Vol. 102, No. HY9*, pp. 1241-1253.
- Williams, J.R. (1975). "Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor," *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources: Proceedings of the Sediment-Tield Workshop, ARS-S-40*, U.S. Dept. of Agriculture Sedimentation Lab., Oxford, Miss.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). "Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains." *Agricultural Handbook No. 282*, Agricultural Research Service, US. Dep. Agric.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning." *Agricultural Handbook. No. 537*, US. Dep. Agric.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., and Cross, B.V. (1971). "A soil erodibility nomograph for farmland and sconstruction site." *J. Soil Water Conserv., Vol. 26*, pp. 189-193.