韓國水資源學會論文集
第34卷 第3號 · 2001年 6月
pp. 209~216

해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토 (II) -MUSLE를 중심으로

Applicability Examination of the MUSLE Sediment Yield Prediction Equations in Korea

손 광 익*
Son, Kwang Ik

Abstract

Universal Soil Loss Equation(USLE) was developed for the estimation of the annual average soil loss from farm land. But, USLE has been applied in estimation of the sediment yield due to the construction activities in Korea without any calibration for last couple of years. Therefore, applicability and the limitation of the MUSLE(modified USLE), which was developed for the estimation of the sediment yield due to single rainfall event, is examined by application of MUSLE into several construction sites and comparing the estimated sediment yields with the actual ones. It is found that MUSLE could be applied in Korea as long as the concentration time, runoff volume and the peak flow rate are estimated with appropriate methods. Comparisons between the applicability of RUSLE and MUSLE are also carried out.
keywords : sediment yield, concentration time, peak flow rate, RUSLE, MUSLE

요 지

개발 등 인위적 건설활동에 의하여 발생되는 토사유출량을 산정하기 위하여 국내에서는 주로 범용토양손실공식(USLE)을 주로 사용하여 왔으나 이 기법은 연평균 토사생산량을 산정하기 위한 기법으로 개발되었다. 따라서 본 연구에서는 단일호우에 대한 토사유출량 산정을 목적으로 개발된 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 강우자료와 토사유출 실측값이 있는 국내 개발현장에 적용하여 실측치와 계산치를 비교함으로써 그 적용가능성을 확인하였으며 MUSLE 적용시 필요한 첨두유출량과 총유출량 산정기법 중 국내여건에 적합한 산정기법도 제시하였다. 또한 MUSLE 적용 결과와 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 이용한 토사유출량 산정 결과와도 비교하였다.
핵심용어 : 토사유출량, 수정토양손실공식, 도달시간, 첨두유량, 유출총량

* 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

개발 등 인위적 건설활동에 의하여 토양의 원상태가 교란되어 발생하는 토사유출량을 산정하기 위해 국내에서는 주로 범용토양손실공식(USLE)을 적용하여 왔으나 이 기법은 미국의 중동부 지역에 대한 농지의 사용용도에 따른 토사유출량의 변화 및 조절을 주 목적으로 연평균 토사생산량 산정을 위해 개발된 경험공식(Wischmeier와 Smith ; 1965)이다. 그러나 우리나라에서는 재해영향평가 등 유역외 토사유출을 조절하기 위한 재해영향평가 및 대책수립을 위한 설계에 이러한 식을 많이 사용하고 있어 산정 결과에 대한 신뢰성이 빈약한 실정이다. 따라서 재해영향평가 목적에 부합하며 우리 실정에 맞는 단일호우에 의한 토사유출량 산정기법이 요구되나 이러한 산정기법을 제시하기 위해서는 체계적인 많은 현장자료 확보 등 장기적인 연구기간이 소요될 것이다. 이와 같은 체계적인 자료가 축적되어 체계적인 연구결과다 도출되기 전까지 다소의 오차를 수용하더라도 우리나라에 적용할 수 있는 산정기법의 개발은 대단히 시급한 과제인 것이다.

따라서 본 연구에서는 단일호우에 의한 토사유출량 산정기법으로 제안된 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 국내 개발현장에 적용하여 실측치와 비교함으로써 그 적용 가능성을 검토하고자 한다. 또한 그 결과를 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 이용한 토사유출량 산정 결과와도 비교하여 우리 실정에 맞는 토사유출량 산정기법을 제시하고자 한다.

2. 국내·외 연구동향

개발에 의한 유역출구에서의 토사유출량이란 상류에서 발생된 각종 침식중 산사태를 제외한 원인에 의해 생산된 토사가 토사발생 지점으로부터 퇴적 및 이송 등의 과정을 반복하며 유역출구까지 도달한 토사량을 뜻한다.

Renard 등(1993)은 범용토양손실공식(USLE) 중 개발목장이나 삼림과 같은 실험지점 이외의 토양조건에 대한 토사침식량 산정을 위한 기후인자의 수정, 계절적 변화에 대한 토양의 침식성 인자의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 수정과 피복식생인자를 산정하는 새로운 계산과정의 개발 등을 추가, 수정하여 개정범용토양손실공식(RUSLE ; Revised Universal Soil Loss Equation)을 제안하였으며 이 공식은 USLE식의 형태는 계속 유지하고 있다. 이 식은 장기간에 걸친 연평균 토사침식량을 산정하는 식으로 개발되었으므로 하나의 호우 또는 강우사상에 의한 토사침식량 산정시 많은 오차를 유발할 가능성을 내포하고 있다. (USDA, 1997)

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

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

이 개정범용토양손실공식은 농경지나 건설현장과 같이 사면 마루부에서의 판상 및 세류침식에 의한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 기법으로 원칙적으로 단일강우에 의한 침식량을 산정할 수 없다. 따라서 이와 같은 단점을 보완하고자 배수면적이 2.7~4380 acres, 평균 경사 및 사면길이는 0.9%~5.9%, 258~570ft 인 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 (2)로 표현된다.

$$A = 11.8(Q \cdot Q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \qquad (2)$$

여기서 A는 토사유출량(tonnes), Q는 유출량(m^3), Q_p는 첨두유량(m^3/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 몇개의 소유역(유역면적 65km^2 이하)으로 구성되어 있

는 대유역(유역면적 2590km^2 이하)의 경우 유사추적을 통해 토사유출량을 산정할 수 있는 식 (3)을 제안하였다.

$$RA = \sum(A_i \cdot \exp(-\beta T_i \sqrt{d_i})) \quad (3)$$

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

단위도가 없는 유역의 첨두유량과 총유출량을 산정하기 위해서는 유효우량과 홍수도달시간 등을 우선 산정해야 한다. SCS(1972)에 의하여 개발된 유출곡선지수법은 유출자료 없이 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 유역에 대한 유효우량을 산정할 수 있는 방법으로 널리 사용되고 있으며(윤용남, 1986) 총강우량과 유효강우량의 관계는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$P_{eff} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4)$$

여기서 P_{eff}는 직접유출에 해당하는 유효우량(mm), P는 호우별 총 강우량(mm)이며, I_a = 강우초기의 손실(mm)로 통상 I_a = 0.2S, S는 유역의 최대 잠재보류수량과 초기손실수두의 합(mm)이다.

유역의 잠재보류수량을 나타내는 S는 유역의 토양과 토지이용 및 처리상태 등 이른바 수문학적 토양-피복상태의 성격을 대변하는 지수로 유역의 유출능력을 표현하는 유출곡선지수 CN과 식 (5)와 같은 관계가 있다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

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.

$$T_c = 1.67 T_L = 1.67 \frac{L^{0.8} (S+25.4)^{0.7}}{7068.86\ Y^{0.5}} \quad (6)$$

여기서 T_c는 도달시간(hr.), T_L은 지체시간(hr.), L은 하천의 총 연장(m), S는 유출곡선지수기법에서 나타난 지표토층의 최대 잠재저류량(mm), Y는 유역의 평균경사(%)로 일반적으로 경사는 S로 사용하고 있으나 본 연구에서는 지표 토층의 최대 잠재저류량과의 혼돈을 막기 위하여 기호를 달리하였다.

또한 SCS(1972)에서 제안한 첨두시간(T_p)은 식 (7)과 같으며 유효우량에 의한 유역 첨두유출량(Q_p)은 식 (8)과 같다.

$$T_p = T_L + D/2 = \frac{L^{0.8} (S+25.4)^{0.7}}{7068.86\ Y^{0.5}} + D/2 \quad (7)$$

$$Q_p = 0.0001662 \cdot q_p \cdot P_{eff} = 0.0001662 \frac{C \cdot A \cdot P_{eff}}{T_p} \quad (8)$$

여기서 T_p는 첨두시간(hr.), T_L은 지체시간(hr.), D는 유효강우 지속시간(hr.), L은 하천의 총 연장(m), Q_p는 유효우량 P_{eff}(mm)에 의한 유역 첨두유출량(m^3/sec), q_p는 단위유효우량에 의한 유역 첨두유출량(m^3/sec/mm), A는 유역면적(km^2), C는 지형에 따른 계수 (300 ; 평탄한 습지의 경우, 484 ; 수문곡선이 개발된 지역의 평균과 동일한 경우, 600 ; 경사가 가파른 경우) 이다.

유역첨두유출량(Q_p) 산정을 위한 또 다른 기법으로 SCS(1986)에서 개발한 TR55기법은 소유역에 대한 수많은 컴퓨터 모델링을 실시하여 얻은 결과로 첨두유출량은 식 (9)와 같다.

$$Q_p = q_u \cdot A \cdot P_{24eff} \cdot F_p$$
$$q_u = 0.0004304 \cdot 10^B \quad (9)$$
$$B = C_0 + C_1 \log T_c + C_2 (\log T_c)^2$$

여기서 Q_p는 유역첨두유출량(m^3/sec), q_u는 단위면적, 단위유효우량에 대한 첨두유출량;(m^3/sec/mm/ km^2), A는 유역면적(km^2), P_{24eff}는 24시간 지속시간에 대한 유효우량(mm), F_p는 저류지와 습지를 고려한 계수(표 1참조), T_c는 도달시간(hr.)으로 0.1부터 10시간 범위로 제한되어 있다. 또한 C_0 , C_1 , C_2 는 계수로서 SCS 강우형태에 따라 표 2로부터 구한다.

3. 연구범위 및 방법

최근 국내 토목분야에서 토사유출량을 산정하는 목적은 주로 재해영향평가시 개발지역의 유역외 토사유출을 억제하기 위한 침사지 설계자료로 활용하기 위함

표 1. 유역내 저류지 및 습지대 분포비에 대한 보정계수(F_p)

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. 강우형태에 따른 식 (9)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

이다. 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.

국내 적용성을 검토하기 위해서 실제 관측된 토사유출량 자료가 있는 국내 여러현장에 수정범용토양손실공식을 적용하여 산정된 토사유출량과 실제 관측된 토사유출량을 비교 검토하여 선정된 모든 현장에 가장 적합한 산정기법을 찾고 그 오차에 대한 원인을 분석하였다. 선정된 모든 현장들의 경우 소유역에 해당하여 유사추적은 불필요한 것으로 판단되어 식 (2)를 사용하였다.

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 (8)을 이용하여 첨두유량을 산정하였으며 두 번째는 SCS(1986)의 TR55 기법인 식 (9)를 이용하여 첨두유량(q_{pTR})을 산정하였다. 세 번째는 SCS 삼각형 단위수문곡선을 이용하여 첨두유량을 산정하였다.

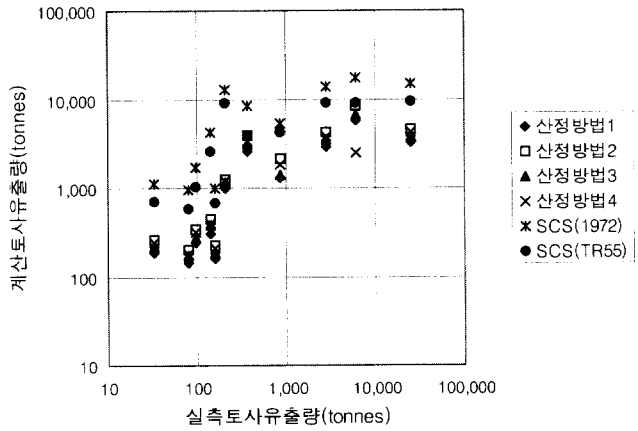
개발지역에서 나타날 수 있는 유역특성을 감안하여 첨두유량의 지배인자인 첨두시간 및 홍수도달시간 산정은 농경지 유역과 2000 에이커 이하의 도시유역에 적용할 수 있는 SCS 지체시간공식 이외에 Tennessee 유역 급경사(3~10%) 산지를 대상으로 한 Kirpich공식(식 10), 유로연장 300m 이하인 지표면에 적용 가능한 Kerby공식(식 11), 지표면 흐름이 지배적인 중하류유역(하도경사 < 1/200)에 적합한 Kraven공식(식 12) 및 상류유역(하도경사 > 1/200)에 적합한 Rziha공식(식 13)과 을 사용하였다. 각 식의 출처는 국립방재연구소(1998) 보고서에 자세히 기술되어 있다.

$$t_c = \frac{3.976\, L^{0.77}}{Y^{0.385}} \tag{10}$$

$$t_c = 36.264 \left(\frac{n \cdot L}{Y^{0.5}} \right)^{0.467} \tag{11}$$

$$t_c = 0.444 \frac{L}{Y^{0.515}} \tag{12}$$

$$t_c = 0.833 \frac{L}{Y^{0.6}} \tag{13}$$



주) 산정방법 1-4 ; Kerby, Kirpich, SCS Lag time, Rizha & Kraven의 도달시간과 SCS 삼각단위도법을 이용한 첨두유량과 유출량 산정을 통한 토사유출량 산정기법

그림 1. MUSLE기법을 이용한 예상 및 실측 토사유출량

여기서 t_c는 도달시간(min.), L은 주 유로연장(km), Y는 경사(m/m), n은 피복의 조도계수 (포장지역=0.02, 나지=0.3, 삼림=0.8)를 나타낸다.

4. 토사유출량 산정

선정된 현장은 모두 7개로 "해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토-RUSLE를 중심으로(unpublished)"에 모든 현장에 대한 각종 자료가 자세히 기술되어 있다. 또한 식(2)의 K, L, S, C, 그리고 P인자에 대한 값도 "해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토-RUSLE를 중심으로(unpublished)"의 자료를 그대로 인용하였다.

단일호우에 대한 토사유출량 산정기법으로 개발된 것으로 알려진 MUSLE기법의 경우 USLE기법의 R과 토사전달률 대신 총유출량(Q)와 첨두유출량(Q_p)을 이용하여 토사유출량을 산정하므로 첨두유출량 산정이 필수적이며 첨두유출량 산정을 위해서는 강우강도식, 도달시간과 유출량 자료가 필요하다. 따라서 $(Q \cdot Q_p)$ 인자를 제외한 모든 인자가 동일하다고 간주할 경우 토사유출량은 $(Q \cdot Q_p)^{0.56}$에 비례하므로 총유출량(Q)와 첨두유출량(Q_p)의 산정방법에 따라 토사유출량이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 토사유출량을 실측한 기간동안 관측된 모든 일 강우를 지속시간 24시간의 단일호우사상의 집합으로 간주하여 각 호우사상에 대한 총유출량(Q)와 첨두유출량(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 이름하였다. 강우강도식은 관측 지점의 재현기간별 24시간 지속강우량이 관측된 최대 일강우와 일치하는 재현기간에 해당하는 강우강도식을 채택하였다. 관측 지점의 재현기간별 강우강도식은 농업기반공사에서 제시하는 식을 이용하였으며 첨두유량과 유출량 산정은 수문곡선을 이용하는 SCS 삼각단위도법을 적용하였다. 또한 첨두유량과 총유량 산정이 수문곡선법에 비해 단순한 SCS(1972)기법 및 TR55기법(SCS, 1985)도 이용하여 산정하였다.

그림 1에 나타난 바와 같이 총유출량과 첨두유량을 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 첨두유량을 산정하는 경우 홍수도달시간 산정기법에 따라 예상 토사유출량이 변하고 있음을 알 수 있다. 실측 토사유출량과 산정기법별 예

표 3. Q, Q_p 산정기법별 회귀직선식의 기울기와 상관계수

적용기법	Kerby	Kirpich	SCS Lag Time	Rizha & 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

표 4. 홍수도달시간에 대한 토사유출량의 민감도

홍수도달시간 산정기법	기법별 예상 토사유출량과 전체 예상평균값의 비	기법별 예상 도달시간과 전체 예상평균값의 비
Kerby	0.79	2.64
SCS Lag-T.	0.92	1.34
Kirpich	1.02	0.69
Rizha	1.12	0.23
Kraven	1.15	0.10

상 토사유출량의 지수값에 대한 회귀분석식($y = x^n$)과 이들의 상관계수 값이 표 3에 나타나 있다. n = 1인 경우 실측치와 계산치는 동일한 값을 나타내며 가장 이상적인 산정기법이라 말할 수 있다.

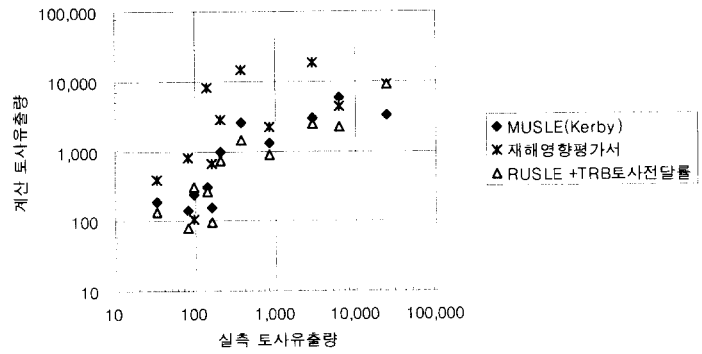
표 3에 나타난 바와 같이 선정된 7개 현장의 경우 실측치와 계산치의 상관계수는 Kerby, Kirpich 및 Rizha & Kraven 공식이 가장 우수하며 n값으로 보면 1에 가까운 Kerby, Kirpich, SCS lag-time 그리고 Rizha & Kraven 공식이 홍수도달시간 산정공식으로 그 적용 가능성이 우수한 것으로 판단된다. 일반적으로 지형학적 조건이 다른 유역에 대하여 동일한 산정공식을 이용하여 적용 가능성을 비교하는 것은 다소 무리가 따르나 표 3의 검토 결과에 따르면 Kerby, Kirpich, SCS lag-time 그리고 Rizha & 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.

첨두시간 및 홍수도달시간이 토사유출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 7개 현장에 대하여 30년 빈도 24시간 지속강우자료와 5가지 기법에 의하여 산정한 홍수도달시간을 수문곡선법에 적용하여 산정한 토사유출량을 산정한 후 각 기법별 도달시간과 5가지 기법에 의하여 산정한 도달시간의 평균치와 비교하였으며 각 기법별 토사유출량도 전체 평균치와 비교하여 각 기법별 홍수도달시간에 대한 토사유출량의 민감도를 분석하였다.

도달시간이 길어지면 첨두유출량이 감소하여 토사유출량이 감소할 것이라는 논리적 예상대로 도달시간과 토사유출량은 역비례관계가 있음이 표 4에 나타나 있다. 그러나 Kerby와 Kraven식과 같이 도달시간이 약 26배 차이가 나더라도 토사유출량은 1.5배 정도 밖에 차이가 나지 않아 토사유출량의 도달시간에 대한 민감도가 그리 높지 않음을 알 수 있다.

RUSLE공식과 MUSLE공식의 적용 가능성을 동시에 비교하기 위하여 본 연구에서 가장 우수한 기법으로 나타난 Kerby의 홍수도달시간과 SCS 삼각수문곡선법을 이용한 수정범용토양손실공식(MUSLE)에 의한 예상치와 "해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토-RUSLE를 중심으로(unpublished)"에서 가장 우수한 것으로 나타난 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 2에 나타난 바와 같이 토사전달률을 고려한 개정범용토양손실공식(RUSLE)과 Kerby의 홍수도달시간 및 SCS 삼각수문곡선법을 이용한 수정범용토양손실공식(MUSLE)은 비슷한 예측결과를 보이고 있으며 표 5에 나타난 바와 같이 상관계수나 회귀식



(토사유출량 단위 : tonnes)

그림 2. 산정기법에 따른 계산 및 실측 토사유출량의 비교

표 5. 산정기법별 회귀직선식의 기울기와 상관계수

적용기법	MUSLE (Kerby 홍수도달시간 및 SCS수문곡선법)	RUSLE (TRB토사전달률 고려)
상관계수	0.86	0.86
$y = x^n$ 의 지수 n값	1.04	1.04

($y = x^n$)의 n 값이 모두 동일하게 나타나 본 연구에서 선정한 7개 현장에 대해서는 두 기법 다 우수한 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 첨두유량 산정방법에 따라 결과에 많은 차이를 보이는 문제가 있으나 재해영향평가의 경우 유역의 수문특성분석시 통상 유역의 유출량과 첨두유량을 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 첨두유량을 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

외국의 토사유출량 산정기법의 우리나라에 대한 적용성을 검토하기 위해 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 국내 현장에 적용하여 실측치와 비교함으로써 각종 토사생산량 산정기법의 적용범위 및 한계성을 검토하였다. 총유출량과 첨두유량 산정에 필요한 홍수도달시간은 토사유출량의 도달시간에 대한 민감도가 그리 높지 않음을 알 수 있었으며 홍수도달시간 산정공식으로는 Kerby, Kirpich, SCS lag-time 그리고 Rizha & Kraven 공식들 중 유역 특성에 적합한 산정공식을 선정하되 예상되는 유역의 토사유출량이 클 경우 Kerby나 Kirpich 공식을 이용하한 예상 토사유출량과의 비교를 통한 안전도 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

또한 총유출량 및 첨두유량 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 첨두유량을 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 연구가 뒤따라야 할 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

국립방재연구소 (1998). 방재조절지의 설계지침 개발 (I), 행정자치부.

윤용남 (1986). 공업수문학. 청문각

손광익 (2001) "해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토-RUSLE를 중심으로." 한국수자원학회논문집, 제34권 3호, pp. 199~207.

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

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.

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.

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." *Proceedings, American Society of Civil engineers Conference. Verification of mathematical and physical models in hydraulic Engineering,* pp. 662~670. American Society of Civil Engineers, New York.

Williams J.R., and W.V. LaSeur (1976). "Water yield model using SCS curve numbers." *J. Hydraulic Div. Amer. Soc. Civil Eng.,* 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-yield workshop,* ARS-S-40, U.S. Dept. of Agriculture Sedimentation Lab., Oxford, Miss.

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

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

(논문번호:00-051/접수:2000.08.03/심사완료:2001.05.03)