산지 소유역에 적합한 MUSLE 유출인자 산정식 개선

An Improvement on Estimation of Runoff Factor Equation for Mountain Area in MUSLE

원진영* · 이종설**

Won, Jin Young · Lee, Jong Seol

Abstract

Williams developed the Modified Universal Soil Loss Equation(MUSLE) by replacing the rainfall energy factor in USLE with runoff energy factor, which was expressed in the function of total runoff volume Q and peak discharge Q_p with the form of $\alpha(Q \cdot Q_p)^\beta$. The coefficients α and β were derived from individual rainfall data of 47 basins and largely depended on the hydrological characteristics of the basins. Therefore, it may occur the inappropriate results when the runoff factor recommended in MUSLE are applied to the basins in Korea without a validation. The purpose of this study is to present the runoff model and the coefficients of the runoff factor which are suitable for mountainous basins in Korea. We used 32 rainfall runoff and sediment yields data measured from 3 small mountainous basins in Korea. In order to achieve our purposes, the total runoff and peak discharge by SCS, Nakayasu, and Clark model were compared with measured data. And the correlation analysis between calculated and measured runoff factor was performed. The results showed that the suitable model for small mountainous basins was Nakayasu model and the range of coefficients α and β was 0.61~6.87 and 0.98~1.02 respectively. And the equation of $5.33(Q \cdot Q_p)^{0.91}$ was suggested as the runoff factor in application of MUSLE to small mountainous basins in Korea. For the purpose of the verification, the runoff factor suggested in this study was applied to another basins to estimate sediment yields, and the results showed that the application of the newly suggested runoff factor was more reasonable than that of the runoff factor suggested by Williams(1975).

Key words : MUSLE, Runoff factor, Total runoff volume, Peak discharge

요 지

MUSLE는 단일 호우사상에 대한 토사유출량을 산정하기 위해 미국 47개 유역의 관측 데이터를 기반으로 Williams(1975)에 의해 개발된 식이다. MUSLE의 여러 인자 중 유출인자는 $\alpha(Q \cdot Q_p)^\beta$ 로 표현되며, 계수 α , β 는 유역의 특성에 따라 많은 차이를 보인다. 따라서, 미국의 관측 데이터로부터 유도된 MUSLE의 유출인자를 국내에 그대로 적용하는 경우 적절한 결과를 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 3개의 국내 산지 소유역에서 관측된 32개의 강우유출 및 토사유출 관측자료를 활용하여 우리나라 실정에 맞는 MUSLE의 유출인자 산정 방법을 제시하고자 한다. Q 와 Q_p 의 적정 산정방법 제안을 위해 SCS, Nakayasu, Clark 유출모형에 의한 강우유출량을 관측값과 비교하였고, 우리나라 산지특성에 맞는 유출인자의 계수 α , β 값을 유도하기 위하여 계산된 유출인자와 관측된 자료로부터 유도된 유출인자의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 산지 소유역에서 Q 와 Q_p 산정에 가장 적절한 강우유출 모형은 Nakayasu 모형으로 나타났고, 유출인자 α 는 유역별로 0.61~6.87 범위의 값을, β 는 0.98~1.02 범위의 값을 갖는 것으로 산정되었으며, 우리나라 산지유역에 적절한 유출인자 산정식 $5.33(Q \cdot Q_p)^{0.91}$ 을 제안하였다. 제안된 유출인자 산정방법을 다른 소유역에 적용하여 관측값과 비교한 결과, MUSLE에서 제시한 값보다 α 는 작게, β 는 크게 산정되었고, 상관계수 0.948, 효율성 계수 0.325로 나타나 본 연구에서 제안한 유출인자 산정방법이 MUSLE에서 제시한 식을 적용하는 것보다 양호한 결과를 보여주는 것으로 나타났다.

핵심용어 : MUSLE, 유출인자, 총 유출량, 첨두유량

1. 서 론

산지지역에서의 각종 개발 사업은 토사유출량을 증가시켜 하류 하천의 범람 등의 피해를 유발시키고 있으나, 한국에서

는 국내 관측 자료를 바탕으로 검정된 예측 모형이 없어 외국의 모형을 그대로 적용하고 있는 실정이다. 토사유출량을 산정하기 위해 국내에서는 주로 미국 중동부 지역의 농경지를 대상으로 하여 개발된 RUSLE(Revised Universal Soil

*정회원 · 국립방재연구원 복합재난연구실 미래재난연구팀 연구원(E-mail : wjy30228@korea.kr)
 **정회원 · 국립방재연구원 복합재난연구실 시설연구관

Loss Equation)를 적용하고 있고, 이를 국내 실정에 맞게 하기 위한 여러 연구가 진행되고 있다. 그러나 RUSLE는 연평균 토양침식량을 산정하기 위해 개발된 식으로 원칙적으로는 단일 호우사상에 의한 토사유출량 산정이 어려우므로, 이와 같은 단점을 보완하고자 Williams(1975, 1978)은 RUSLE의 R 인자를 유출인자로 변환하여 단일 호우사상에도 적용 가능한 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)를 개발하였다.

그러나 유출인자 또한 타 인자와 마찬가지로 국내 조건에 적합하도록 관측 자료를 이용하여 수정보완 하는 과정이 필요하지만, 국내에서는 주로 MUSLE를 실제 유역에 적용하여 국내 적용성을 평가하는 연구가 수행되어지고 있다.

손광익(2001)은 MUSLE를 강우자료 및 토사유출 실측값이 존재하는 국내 개발현장에 적용하여 실측치와 계산치를 비교함으로써 그 적용성을 확인하였으며, MUSLE 적용 결과와 RUSLE를 이용한 산정결과를 비교하였다. 또한 손광익 등(2009)은 국내 도시화 시험유역에 대한 RUSLE 및 MUSLE의 적용 가능성을 검토하기 위해 도시 시험유역의 실측자료와 모의기법 적용 결과를 비교분석하였다. 김주훈 등(2004)은 MUSLE의 적용에 있어서 GIS를 이용한 지형자료 분석으로 유출인자를 산정하였다.

이처럼 국내에서는 MUSLE의 국내 적용성 평가에 대한 연구가 주를 이루는데 비하여, 국외에서는 모형의 개선을 목적으로 한 연구가 활발히 진행되고 있다. Charlette 등(1991)은 미국 Sacramento 남동부의 Sierra에 위치한 두 개의 유역을 대상으로 관측된 강우사상별 총 유출량 및 침투 유량, 토사유출량 등을 이용하여 MUSLE 유출인자 산정식을 유도하였다. 또한 Zhang 등(2009)은 GIS 프레임워크에서 통합한 MUSLE 모형을 미국 Iowa Black Hawk County 유역에 적용하여 유역 단위의 토양침식 모델링을 개발하였고, Sadeghi 등(2004)은 이란의 Amameh 유역을 대상으로 관측 자료를 이용하여 MUSLE의 수정 식을 개발하였다. Bonta(2000)는 채굴 표면에서의 토사유출량 산정을 위해 미국 Ohio의 세 개의 시험유역을 대상으로 하여 MUSLE의 유출인자를 수정하여 발표하였다.

MUSLE 매개변수 중 유출인자는 타 인자에 비해 MUSLE의 결과, 즉 토사유출량에 큰 영향을 미치고, MUSLE의 사용성은 수문자료의 정확성에 크게 의존한다. 따라서 본 연구에서는 국내 산지 특성에 맞는 유출인자 산정을 위하여 국내 4개 소유역에서 관측된 강우 유출량, 토사유출량 등의 자료를

활용하여 유출인자 매개변수인 총 유출량 및 침투 유량 산정 기법을 제안하고, 관측 토사유출량과 총 유출량, 침투 유량간의 회귀분석을 통하여 국내 산지에 적합한 유출인자 산정식을 개선하고자 하였다. 개선된 산정방법은 실제 유역에 적용하여 계산된 토사유출량과 관측 토사유출량의 비교를 통해 국내 적용성을 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역 및 관측자료

본 연구에서 유출인자 매개변수 산정 기법 선정 및 유출인자 산정식 개선을 위해 총 4개의 산지 소유역을 대상으로 하였고, 각 유역의 특징 및 관측자료는 국립방재연구원의 보고서를 참고하였다. 표 1은 각 유역의 특징을 나타낸 것이다. 대상 유역은 유역면적이 약 7,920~88,050 m²이고, 모두 평균 경사가 40% 이상인 전형적인 산지 소유역이다. A 유역은 1998년과 2000년도에 산불이 발생하였고 시간의 경과함에 따라 현재 식생이 회복되었으나, C 유역의 경우 2008년과 2009년 2차례 연이어 산불이 발생하여 식생성장이 빈약한 실정이다. B 유역의 경우 2009년에 벌목이 이루어진 유역으로 토양이 비옥하여 토심이 비교적 깊고 식생 발달이 유리한 입지 조건을 가진 지역이다. D 유역의 경우 2009년에 벌목이 이루어졌고 유역의 중하류 지역은 경사가 급한 반면, 상류지역은 비교적 완만한 경사를 가지고 있다.

본 연구에서는 각 유역에서 관측된 강우사상별 강우량, 강우 유출량, 토사 유출량 등의 자료가 이용되었고, 관측된

그림 1. 연구 적용유역 위치

표 1. 유역 특성

	A	B	C	D
위치	N37°49'48.2" E128°48'28.1"	N37°23'58.6" E127°19'16.8"	N35°58'40.7" E128°31'13.6"	N36°42'45.3" E127°41'10.7"
유역 면적(m ²)	88,050	7,920	28,240	32,500
유역 표고(El.m)	55 ~ 224	137 ~ 210	159 ~ 260	272 ~ 410
유역 폭(m)	146	70	125	135
유역 길이(m)	695	160	260	280
유역 평균경사(%)	41.38	50.46	41.07	52.50

강우사상은 총 38개이다. A 유역은 2008년~2011년에 관측된 23개 강우사상이 이용되었고, B 유역과 C 유역, D 유역의 경우 2010년~2011년 동안 각각 5개의 강우사상이 관측되었다.

각 유역에 설치된 강우계, 수위계를 이용하여 강우 발생시 강우량, 강우 유출량을 측정하였고, 유역 하구에 설치된 침사조의 토사를 수거하여 유역 단위의 토사유출량을 측정하였다.

2.2 적용모형 및 방법

2.2.1 MUSLE 모형

RUSLE는 사면 마루부에서의 판상 및 세류침식에 의한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 모형으로, 현재 토양침식량 산정에 많이 이용되고 있지만 원칙적으로 단일 강우에 의한 침식량을 산정할 수 없다는 단점이 있다. 이에 Williams(1975, 1978)은 Nebraska의 Hastings와 Texas의 Reisel 근방 47개 유역의 778개 강우자료를 사용하여 RUSLE의 R 인자 대신 총 유출량 및 침투 유량을 매개변수로 가지는 유출인자를 이용하여 토사유출량을 산정하는 MUSLE를 개발하였다.

$$S = 11.8(Q \cdot Q_p)^{0.56} \cdot LS \cdot K \cdot C \cdot P \quad (1)$$

여기서, S 는 토사유출량(tonnes), Q 는 총 유출량(m^3), Q_p 는 침투 유량(m^3/sec), LS 는 유역의 지형학적 특성을 나타내는 사면경사길이 인자(무차원), K 는 토양침식성 인자($ton/ha/R$), C 는 식생 및 피복상태에 따른 지표관리 인자(무차원), P 는 토양보존대책 R 인자(무차원)를 의미한다. 인자 이외의 타 인자는 RUSLE와 동일하고, 본 연구에서는 이종설 등(2012)이 제시한 산정방법에 따라 LS , K , C 인자 등을 계산하였다. 이종설 등(2012)은 GIS를 이용하여 상류기여면적을 고려한 방법을 이용하여 LS 인자를 산정하였고, K 인자의 경우 각 토양특성을 이용하여 계산하는 방법을 적용하였으며, C 인자는 식생피복율, 토양침식량 등의 관측자료를 활용하여 산정한 NDVI와 지표관리 인자의 관계식을 적용하여 계산하였다. 단, 지표면에서의 여러 경작 활동에 따른 토양침식의 비를 의미하는 토양보존대책 인자 P 는 숲이나 나지의 경우 1.0의 값을 적용하므로 본 연구에서는 대상 유역의 토양보존대책 인자의 값으로 1.0을 적용하였다(이종설 등, 2012).

2.2.2 유출인자 매개변수

유출인자의 매개변수는 총 유출량 Q 와 침투 유량 Q_p 이다. 현재까지 총 유출량 및 침투유량을 산정하는 여러 방법이 제안되고 있고, 본 연구에서는 제안된 방법 중 관측값과 비교하여 가장 실측에 가깝게 계산되는 산정 방법을 선정하였다.

단위도가 없는 유역의 침투유량과 총 유출량을 산정하기 위해서는 유효우량과 홍수도달시간 등을 산정하여 수문곡선을 유도하거나 경험식을 이용한다.

SCS(1972)에 의하여 개발된 유출곡선지수법은 유출자료 없이 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 유역에 대한 유효우량을 산정할 수 있는 방법으로 널리 사용

되고 있다(윤용남, 1986). SCS(1972)의 유출곡선지수법에 의한 총 강우량과 유효강우량과의 관계식은 다음 식 (2)과 같다.

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

여기서, P_{eff} 는 유효 강우량(mm), P 는 강우사상별 총 강우량(mm), I_a 는 강우의 초기손실(mm), S 는 유역의 최대 잠재보유수량(mm)을 의미한다. I_a 는 차단, 침투, 지면저류 등을 포함하여 와 밀접한 관계가 있으며 유역에서의 실험을 바탕으로 유도된 $I_a = 0.2S$ 의 관계식을 적용하였다.

총 강우량과 유효 강우량간의 표준화된 무차원 유출곡선지수 CN은 최대 잠재보유수량과 식 (3)과 같은 관계가 있다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (3)$$

산지 소유역에 적합한 Q 산정방법을 선정하기 위하여 본 연구에서는 식 (2)와 식 (3)으로 산정된 유효 강우량에 유역면적을 곱하여 Q 를 계산하였다. 또한 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 SCS 삼각단위도법, Nakayasu 합성단위도법, Clark 합성단위도법을 이용하여 직접유출 수문곡선을 산정하고 이 곡선 아래의 면적을 계산하여 산정된 Q 를 관측값과 비교하였다.

침투 유량의 경우 SCS 삼각단위도법, Nakayasu 합성단위도법의 침투 유량 산정공식(이재수, 2006)을 이용하여 계산된 Q_p 와 Clark의 합성단위도법으로 산정된 Q_p 를 관측값과 비교하였다. SCS의 삼각단위도법과 Nakayasu의 합성단위도법의 Q_p 산정식은 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$Q_p = 2.08 \frac{A}{T_R} = 2.08 \frac{A}{D/2 + t_g} \quad (4)$$

$$Q_p = \frac{0.2778 R_o A}{0.3 t_p + t_k} = \frac{0.2778 R_o A}{0.3(0.8 D + t_g) + t_k} \quad (5)$$

여기서, A 는 유역면적(km^2), T_R 는 침투발생시간(hr), D 는 유효 강우량의 지속시간(hr), t_g 는 지체시간(hr)을 의미한다. SCS법에서 t_g 는 도달시간의 0.6배로 나타낼 수 있고, Nakayasu법에서 t_g 는 유로 연장이 15 km 미만일 경우 $0.21 L^{0.7}$ 으로, 15 km 이상일 경우 $0.4 + 0.058L$ 로 나타낼 수

표 2. 적정 매개변수 산정방법

매개변수		적용방법	적용식
도달 시간 t_c	유입시간	Kerby식	$t_o = 36.264 \frac{(L_s \cdot n)^{0.467}}{S^{0.2335}}$
	유하시간	Rziha식	$t_f = 0.833 \frac{L_f}{S^{0.6}}$
저류상수		Sabol식	$K = \frac{t_c}{1.46 - 0.0867L^2/A}$

있다. t_k 는 유량이 Q_p 에서 $0.3Q_p$ 로 감소하는데 걸리는 시간(hr)으로 $0.47(AL)^{0.25}$ 으로 나타낼 수 있다. Clark 합성단위도법은 유역특성을 고려한 시간면적 곡선을 작성하고 이를 선행 저수지 개념으로 추적하여 유출수문곡선을 산정하는 방법으로 주요 매개변수는 도달시간과 저류상수이다. 매개변수 최적화를 위하여 본 연구에서는 여러 산정방법을 실제 유역에 적용하여 가장 적합한 산정방법을 선정하였고, 그 결과는 표 2와 같다. 여기서 L_s 는 지표거리(km), L_f 는 유로연장(km), n 은 조도계수, S 는 유역평균경사, A 는 유역면적(km²)이다.

2.2.3 유출인자 산정식

RUSLE의 R 인자 대신 사용되는 MUSLE의 유출인자는 $\alpha(Q \cdot Q_p)^\beta$ 로 표현할 수 있고, α 와 β 의 값은 적용 유역의 특성에 따라 변화한다. MUSLE에서는 미국 Texas와 Nebraska에 위치한 18개 유역의 단일 강우관측 자료를 기초로 하여 유도된 계수인 $\alpha=1.18$, $\beta=0.56$ 으로 적용하기를 제안하고 있다. Charlette R. Epifanil et. (1991)은 미국 Sacramento 남동부의 Sierra 산맥에 위치한 두 개의 벌목 유역을 대상으로 강우유출과 토사유출간의 상관분석을 통하여 $\alpha=0.23$, $\beta=0.70$ 의 값을 제시하였다. Bonta(2000)는 미국 Ohio의 세 개의 산지 채굴 유역에서 관측된 강우유출 및 부유사 데이터를 이용하여 β 의 범위를 제안하였다. 지수 β 의 범위는 0.68~1.10으로 MUSLE에서 제안하는 0.56보다는 더 큰 것으로 나타났다. Sadeghi(2004)는 이란의 Amameh 유역의 관측 자료를 이용하여, 이란의 농촌유역에 적합한 유출인자 계수로 $\alpha=1.18$, $\beta=0.081$ 를 제안하였다.

그림 2와 같이 적용 유역의 특성에 따라 $Q \cdot Q_p$ 에 따른 유출인자의 기울기가 매우 상이한 것을 알 수 있으므로, MUSLE에서 제안한 유출인자 산정식을 국내 유역에 검정 없이 그대로 사용하는 경우 많은 오차를 수반할 가능성이 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 강우유출 및 토사유출 관측자료를 활용하여 국내 산지 소유역에 적합한 수정 유출인자 산정식을 제시하였다.

그림 2. 산정방법별 유출인자

3. 유출인자 산정방법 개선

본 연구에서는 총 4개의 대상 유역 중 A, B, C 유역의 관측자료를 활용하여 국내 산지 소유역에 적합한 유출인자 매개변수 산정방법을 선정하였고, Q 및 Q_p 와 토사유출량의 상관관계 분석을 통하여 유출인자 산정식을 유도하였다. 개선된 유출인자 산정방법은 D 유역에 적용하여 검증하였다.

3.1. 유출인자 매개변수 산정방법 선정

유출인자의 매개변수인 Q 및 Q_p 의 적정 산정방법을 선정하기 위하여 실측치와 계산치를 비교하였다. Q 의 경우 유효우량을 유역 면적으로 곱하여 계산하고, SCS, Nakayasu, Clark 모형을 이용하여 계산하였으며, Q_p 의 경우 SCS, Nakayasu, Clark 모형을 이용하여 계산한 후 관측치와 비교하였다.

3.1.1 총 유출량 산정

본 연구에서 적용한 네 가지 방법을 통하여 산정한 와 관측치를 비교한 결과는 그림 3과 같다. 적용한 방법 모두 거의 동일한 값으로 계산되었고, 이는 본 연구의 대상 유역이 소유역이므로 도달시간이 매우 짧고 저류효과가 거의 없기 때문에 산정방법이 총 유출량에 미치는 영향이 매우 미소한 것이라 판단된다. A, B, C 유역 모두 결정계수가 0.940 이상으로 나타나 관측값과 계산값의 상관성이 매우 양호한 것을 확인하였다.

산정방법의 수행성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 상관계수 및 결정계수 외에 효율성 계수를 산정하였다. 효율성 계수는 계산값과 관측값의 일대일 선에 얼마나 근접한가를 나타내는 계수로 본 연구에서는 Nash & Sutcliffe(1989)이 제안한 다음 식을 사용하였다.

$$CE = 1 - \frac{\sum (X_{pred} - X_{obs})^2}{\sum (X_{obs} - X_{mean})^2} \quad (8)$$

여기서, X_{pred} 는 관계식에 의한 예측값, X_{obs} 는 관측값, X_{mean} 은 관측값의 평균값을 의미하고, 효율성 계수가 1.0에 가까울수록 식의 수행성이 양호함을 의미한다.

효율성 계수 또한 산정방법에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 평균적으로 A 유역의 경우 0.136, B 유역의 경우 0.970, C 유역의 경우 0.448로 나타났고, 세 유역의 전체 효율성 계수는 0.251로 적은 자료 수에 비하여 비교적 높은 효율성을 보이는 것으로 나타났다.

3.1.2 첨두 유량 Q_p 산정

본 연구에서는 SCS, Clark, Nakayasu 모형을 이용하여 계산된 Q_p 와 관측 Q_p 를 비교하였고 그 결과는 그림 4와 같다.

A 유역의 경우 Clark모형과 Nakayasu모형의 상관계수가 0.800 이상으로 높게 나타났으나, 효율성 계수는 Clark모형이 음수로 나타났고, Nakayasu모형은 0.566으로 매우 높게 나타났다. B 유역의 경우 Clark모형과 Nakayasu모형의 상관계수

(a) A 유역 적용결과

(b) B 유역 적용결과

(c) C 유역 적용결과

(d) 전체 유역 적용결과

그림 3. 유역별 총 유출량 산정 결과

(a) A 유역 적용결과

(b) B 유역 적용결과

(c) C 유역 적용결과

(d) 전체 유역 적용결과

그림 4. 유역별 첨두 유량 산정 결과

가 각각 0.954, 0.903으로 양호하게 나타났으나, 효율성 계수의 경우 Clark모형이 0.856으로 매우 높게 나타났고, Nakayasu모형은 -0.838로 다소 낮게 산정되었다. C 유역의 경우 SCS식의 상관관계수가 0.998, Clark모형이 0.779, Nakayasu모형이 0.998로 산정되어 SCS모형과 Nakayasu모형이 매우 상관성이 높은 것으로 나타났고, 효율성 계수 또한 Nakayasu모형이 0.623으로 타 방법에 비해 매우 높게 나타났다. 세 유역에 가장 적합한 하나의 방법을 선정하기 위하여 전체 데이터를 이용하여 분석한 결과 SCS모형은 전체 데이터의 약 44%가 관측 Q_p 에 비하여 과소산정 하는 것으로 나타났고, Clark모형은 약 87%의 데이터가 과대산정 하는 것으로 나타났으며, Nakayasu모형은 상관계수 0.732, 효율성 계수 0.470으로 상당히 좋은 결과를 나타냈다.

3.2 관측자료를 활용한 유출인자 산정식 계수 유도

토사유출량은 여러 인자의 복합적인 영향으로 인해 그 크기가 변화하지만, 본 연구는 유출인자와 토사유출량간의 관계 유도를 목적으로 한다. 따라서 식 (6), 식(7)과 같이 유출인자 외의 기타인자 LS , K , C 의 곱을 강우사상에 따른 하나의 상수 X 로 표현하여 유출인자 매개변수인 Q 와 Q_p 를 독립변수로, Y/X 를 종속변수로 나타내어 관계를 분석하였다. 분석 시 Y , Q , Q_p 는 현장 관측값을 이용하였고, X 는 이종설 등(2012)이 제시한 방법을 적용하였다.

$$Y = \alpha(Q \cdot Q_p)^\beta \cdot X \quad (6)$$

$$\ln(Y/X) = \ln(\alpha) + \beta \ln(Q \cdot Q_p) \quad (7)$$

미국의 관측자료를 바탕으로 MUSLE에서 제안하는 유출인자 계수 α , β 는 각각 11.8, 0.56이다. A 유역의 관측자료를 적용한 결과 α 는 6.87, β 는 1.02로 나타났고 B 유역의 경우 α 는 5.56, β 는 1.04로 나타났으며, C 유역의 경우 α 는

표 3. 유역에 따른 유출인자 산정 결과

유역	유출인자 산정식	R^2
A	$6.87(Q \cdot Q_p)^{1.02}$	0.78
B	$5.56(Q \cdot Q_p)^{1.04}$	0.80
C	$0.61(Q \cdot Q_p)^{0.98}$	0.82
전체	$5.33(Q \cdot Q_p)^{0.91}$	0.75

0.61, β 는 0.98로 나타났다. A, B 유역의 α 값은 유사하게 나온 반면 C 유역은 A, B 유역보다 0.6배 작게 산정되었고, 이는 그림 5의 (a)에서와 같이 타 유역에 비해 C 유역에서 동일한 강우유출 $Q \cdot Q_p$ 에 대한 유출인자의 값이 작은 것을 의미한다. 그림 5의 (b)를 살펴보면 동일한 $Q \cdot Q_p$ 에 대한 토사유출량이 세 유역 모두 유사한 분포를 보이므로, C 유역의 유출인자가 작게 산정된 이유는 유출인자 외 기타인자의 곱 X 에 의한 것으로 판단된다. LS , C , K 인자 중 C 유역의 LS 인자가 A 유역의 1.2배, B 유역의 2.7배인 것으로 나타났고, K 인자의 경우 A 유역의 1.5배, B 유역의 1.3배인 것으로 나타나 이로 인해 유출인자가 타 유역에 비해 작게 산정된 것으로 판단된다.

식의 기울기를 나타내는 β 는 0.98~1.04로 유사하게 나타났고, MUSLE가 제안한 0.56보다는 크게 산정되었다. 이는 미국의 농촌 유역에 비해 국내 산지 유역의 $Q \cdot Q_p$ 에 대한 유출인자의 변화율이 크다는 것을 의미한다. 세 유역의 관측자료를 모두 이용하여 상관관계를 분석해 본 결과 α 는 5.33, β 는 0.91로 산정되었고 이에 대한 결정계수는 0.75로 나타나 비교적 양호한 상관성을 보임을 알 수 있다.

4. 제안된 유출인자 산정방법 검증

관측값을 이용하여 제안된 Q 및 Q_p 산정방법과 유출인자 산정식을 검증하기 위하여, D 유역을 대상으로 실측 토사유출량과 계산된 토사유출량을 비교하였다.

(a) $Q \cdot Q_p$ 에 대한 유출인자

(b) $Q \cdot Q_p$ 에 대한 토사유출량

그림 5. $Q \cdot Q_p$ 에 대한 유출인자 및 토사유출량 관계

그림 6. 관측 토사유출량과 계산 토사유출량

검증에 사용된 강우사상은 총 5개로 2010년 8월과 2011년 5월, 6월, 7월에 관측되었으며, 총 강우량은 33 mm~428.5 mm로 다양하다. 각 강우사상에 대해 가장 상관성 및 효율성이 좋은 Nakayasu모형을 이용하여 Q , Q_p 를 산정하였다. 산정된 Q 와 Q_p 는 3.2에서 전체 데이터를 이용하여 유도한 유출인자 산정식에 대입하여 각 강우사상별 유출인자를 산정하였다. 그 외 인자는 전술한 바와 같이 이중설 등 (2012)이 제안한 방법을 이용하여 산정하였다.

그림 6은 본 연구에서 제안된 방법과 MUSLE에서 제시한 식을 이용하여 계산된 토사유출량을 관측 토사유출량과 비교한 것이다. MUSLE에서 제안한 식을 이용하여 계산된 토사유출량과 관측 토사유출량의 상관계수는 0.918, 효율성 계수는 0.196으로 나타났고, 본 연구에서 제안된 식의 경우 상관계수 0.948, 효율성 계수 0.325로 나타났다. 이와 같이 본 연구를 통해 제안된 유출인자 산정방법이 MUSLE에서 제시한 식을 적용하는 것 보다 양호한 결과를 보이므로 국내 산지 소유역의 토사유출량 예측에 적절할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 토사유출량 산정시 사용되는 MUSLE의 유출인자를 국내 산지 소유역 조건에 적합하도록 하기 위하여 관측자료를 이용하여 개선하였다.

유출인자는 Q 와 Q_p 를 매개변수로 가지며, 본 연구에서는 실무에서 주로 사용되는 산정방법들을 이용하여 Q , Q_p 를 산정한 결과, Nakayasu모형을 이용하여 Q 및 Q_p 를 산정하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 또한 Q , Q_p 와 토사유출량 및 기타인자의 상관관계를 분석하여 유출인자 산정식을 유도하였다. 제안된 Q , Q_p 산정방법과 유출인자 산정식을 이용하여 실제 유역에 적용한 결과, 상관성 및 효율성 면에서 MUSLE에서 제시한 식의 적용결과에 비해 더 양호한 결과를 보였으므로 본 연구에서 제안한 유출인자 산정방법

이 산지 소유역의 토사유출량 산정시 적용 가능할 것으로 판단된다.

그러나 MUSLE에서 유출인자 이외의 LS , K , C 인자는 RUSLE와 동일하게 산정함에 문제가 발생할 수 있다. 토양침식 인자 K 는 단위 강우침식 인자 R 에 대한 토양침식량으로 정의되므로, R 대신 유출인자를 적용하는 MUSLE를 수정 없이 그대로 적용 가능한 지에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

또한 유출인자 산정식 유도에 이용된 토사유출 관측자료는 0.2~2080.5 kg으로 범위가 넓은 반면, 검증에 사용된 토사유출 관측자료는 1.2~21.6 kg이므로 많은 토사유출량이 발생했을 경우 본 연구에서 제안한 유출인자 산정 방법의 적용성을 검증할 수 없다. 따라서 더 많은 관측자료를 이용하여 토사유출량 전 범위에 걸친 검증이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구는 산지 소유역을 대상으로 범위를 국한하여 유출인자 산정방법 개선방안을 제시하였으므로, 농업지역, 도시지역 등 토양환경이 다른 경우에 대한 연구도 추가적으로 수행되어야 한다고 사료된다.

참고문헌

- 박상덕, 이규송, 손광익, 이효상, 김문모, 권현한 (2011) 개발에 따른 토사유출변화 실험분석 및 시험유역 운영, 연구보고서, 국립방재연구원.
- 김주훈, 정승권 (2004) 지형 자료를 이용한 MUSLE의 유출에너지 인자 산정, 대한토목학회지, 제24권, 제2B호, pp. 95-102.
- 손광익 (2001) 해외 토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토(II)-MUSLE를 중심으로, 한국수자원학회지, 제34권, 제3호, pp. 209-216.
- 손광익, 노진욱 (2009) 도시유역에 대한 토사유출량 모의기법 적용성 검토, 한국수자원학회지, 제42권, 제9호, pp. 737-745.
- 윤용남 (1986) 공업수문학, 청문각.
- 이재수 (2006) 수문학, 구미서관.
- 이중철, 원진영 (2012) RUSLE 모형의 산지유역 적용을 위한 지표관리 인자 산정식 제안, 한국방재학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 79-85.
- Bonta, J.V. (2000) Runoff-Energy Factors for MUSLE Sediment-Yield Model for Surface Mines, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 162-181.
- Charlette R. Epifanio, Michael J. Singer, Xiaohong Huang (1991) Hydrologic Impacts of Oak Harvesting and Evaluation of the Modified Universal Soil Loss Equation, *JUSDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-126*, pp. 221-224.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1989) River flow forecasting through conceptual models:part. 1. A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- SCS (1972) Hydrology, Sect. 4, *Soil Conservation Service National Engineering Handbook*, U.S. Dept. of Agriculture Washington, DC.
- Sadeghi S.H. (2004) Application of MUSLE in Prediction of Sediment Yield in Iranian Conditions, *International Soil Conservation Organization Conference-Brisbane*, pp. 1-4.
- Williams J.R. (1978) A sediment yield routing model, *In Proceedings, American Society of Civil Engineers Conference. Verification*

tion of mathematical and physical models in hydraulic Engineering, pp. 662-670. American Society of Civil Engineers, New York.

Williams J.R. (1975) Sediment routing for agricultural watersheds, *Water Resources Bul.*, Vol. 11, pp. 965-974.

Zhang Y., Degroote J., Wolter C. and Sugumaran, R.(2009) Modified Universal Soil Loss Equation into a GIS Framework to

Assess Soil Erosion Risk, *Land Degradation & Development*, Vol. 20, pp. 84-91.

◎ 논문접수일 : 2012년 07월 19일

◎ 심사의뢰일 : 2012년 07월 23일

◎ 심사완료일 : 2012년 10월 15일