

도시유역에 대한 토사유출량 모의기법 적용성 검토

Application of Sediment Yield Estimation Methods for an Urbanized Basin

손 광 익* / 노 진 옥**

Son, Kwang Ik / Roh, Jin Wook

Abstract

Field measured sediment yield from an experimental urbanized basin was compared with the predicted sediment yields with RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), and MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). The experimental basin is 3.1km² in area and fifty six percent of the total area had been urbanized. The hydrological data have been measured with T/M at the outlet of the experimental basin. Runoff from the basin and rainfall depth of the basin were measured every minute. Bed load and suspended load were also measured for a given flow rate. Runoff rating curves and sediment rating curve were developed for the last three years. RUSLE showed scattered prediction results but the average of the prediction values was close to the measured one. Meanwhile, MUSLE showed linear correlation between the measured sediment yield and predicted one with high correlation coefficient. But MUSLE predicts high values than the real one. Therefore, adjustment is necessary to apply MUSLE in estimation of sediment yield from the experimental urbanized basin.

Keywords : Sediment load, Urbanized basin, MUSLE, RUSLE

요 지

국내 도시화 시험유역에 대한 기존 토사유출공식의 적용 가능성을 검토하기 위해 도시 시험유역의 실측자료와 모의기법 적용결과를 비교·분석하였다. 적용된 토사유출량 산정 모의공식으로는 개정범용토양손실공식(RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation), 수정범용토양손실공식(MUSLE - Modified Universal Soil Loss Equation)을 활용하였다. 시험유역은 유역면적 약 3.81 km²로 면적대비 56 % 정도가 도로 및 포장 등으로 도시화가 진행된 도시 시험유역을 선정하여 자동 강우 및 수위계측기를 이용하여 지난 3년간 연속적으로 수문자료를 축적하였다. 또한 계측지점에서의 유출량별 소류사 및 부유사 실측을 통하여 유량-유사량 관계곡선을 개발한 후 호우사상별 유역으로부터의 토사유출량을 산정하였다. 실측된 강우 및 유량 자료를 활용하여 모의한 토사유출량과 실측한 토사유출량을 비교한 결과 RUSLE를 적용한 모의결과가 실측 토사유출량과 근접한 결과를 제시하였으나 상관계수가 낮아 적용에 세심한 주의가 요구됨을 알 수 있었다. 반면, 실제 유출수문곡선을 MUSLE기법에 적용하여 모의한 토사유출량과 실측 토사유출량의 상관관계는 우수한 예측결과를 보였으나 보정계수의 적용이 필요함을 확인하였다.

핵심용어 : 토사유출, 도시화 유역, 수정범용토양손실공식, 개정범용토양손실공식

* 교신저자, 영남대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수

Corresponding Author, 214-1 DaeDong, Gyungbuk 712-749 Rep. of Korea
(e-mail: kison@ynu.ac.kr)

** 영남대학교 대학원 건설시스템공학과 석사

214-1 DaeDong, Gyungbuk 712-749 Rep. of Korea

1. 서 론

최근 인위적 유역 개발 및 도시화에 따른 유역의 특성변화로 인하여 추가적으로 발생하는 토사유출은 저류지에 퇴적되어 저류용량을 감소시켜 도시홍수의 원인이 되기도 한다. 토사와 함께 이동하는 비점오염물질은 배수시스템 내의 수질악화 등 유역의 자연자원 환경에도 많은 악영향을 미치게 된다. 또한 도시화에 따른 침투 유출량의 증대 및 도달시간의 단축은 개발에 따른 이차적 토사유출의 증대와 함께 우수관로 등 배수 구조물내의 토사퇴적을 유발하여 2차적인 도시홍수를 유발하기도 한다.

이렇게 도시유역의 토사유출은 도시홍수 및 배수시설물 관리에 중요한 요소로써 도시유역의 각종 홍수피해를 최소화하기 위해서는 토사발생 규모에 대한 정확한 예측이 요구된다. 그러나 아직 우리나라에서는 체계적으로 개발된 도시유역에 대한 토사유출량 모의기법이 없어 지자체에서는 매년 홍수기 전 각종 배수시설물의 퇴적도를 제거하고 있을 뿐 시공간적인 토사유출량 예측을 통한 배수시설물의 설계 및 관리 등 근본적인 대책을 수립하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 도시시험유역으로부터의 토사유출량 모의기법을 개발하기 위하여 도시화된 시험유역을 선정하여 강우량과 유출량은 물론 토사유출량을 지속적으로 실측하고 있다. 모의기법개발을 위한 첫 단계로 일반적으로 국내 개발유역에 대한 토사유출량 산정에 많이 적용되고 있는 개정범용토양손실공식(RUSLE)과 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 실측된 호우사상에 대하여 적용함으로써 토사유출량을 모의하였다. 그리고 모의결과를 시험유역의 실측자료와 비교·분석함으로써 각 모의기법의 도시화 유역에 대한 적용성을 검토하였다.

본 연구 결과는 도시유역 배수시스템의 설계 및 유지관리를 위한 기초 자료 제공은 물론 향후 연구방향을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 문헌 조사

강우에 의한 토사발생량 산정을 위한 모의 모형은 적용 편의성, 신뢰성과 국내 활용빈도 등을 고려하여 현재 우리나라에서 비교적 많이 활용되고 있는 개정범용토양손실공식(RUSLE), 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 선정하였다.

2.1 개정범용토양손실공식 (RUSLE)

범용토양손실공식(USLE)과 개정범용토양손실공식

(RUSLE)은 관상침식 및 세류침식에 의한 토사발생량 예측을 위한 공식으로 주로 산지와 나지 또는 개발지역 등 도시화 지역이 아닌 곳에 많이 사용되어 왔다. 단일 호우사상별 농경지나 산림 또는 개발유역으로부터의 토사유출량 산정기법으로 범용토양손실공식(USLE) 및 개정범용토양손실공식(RUSLE)의 국내 적용 가능성은 이미 여러 연구(손광익; 2001a, 조영진; 2004)에서 확인된 바 있으며 사전재해영향평가 등 실무에서도 많이 활용되고 있다. 객관적 분석을 위한 분포형 모형에 필요한 각종 계산인자의 산정기법에 대한 검토 또한 활발하게 이루어져 왔다.

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

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

강우침식도(R) 산정공식은 Eq. (2)와 같다.

$$R = \frac{\sum EI_{30}}{100} \quad (2a)$$

$$E = e \cdot P \quad (2b)$$

$$e = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05 \cdot I)] \quad (2c)$$

여기서, P는 총강우량, I_{30} 은 단일호우의 30분 최대 강우강도이다.

Wischmeier *et al.*(1971)은 토양특성 인자를 이용하여 K값을 산정할 수 있는 도표 및 식을 제안하였으며 Wischmeier 와 Smith(1978)는 실트 함유비가 70% 미만의 경우 K값을 다음과 같이 제안하였다.

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.4} + 3.25 (S1 - 2) + 2.5 (P1 - 3)}{100} \quad (3)$$

여기서, OM : 함유 유기물의 백분율, P1 : 투수지수
S1 : 토양의 구조지수,
M = (%MS + %VFS)(100 - %CL)

CL : 점토 함유백분율(%), MS : 실트 함유백분율(%)
 VFS : 미사 함유백분율(%)

이외에도 2 mm 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.

2.2 수정범용토양손실공식(MUSLE)

개정범용토양손실공식(RUSLE)은 R 값 산정이 복잡하고 토사전달률 산정결과에 대한 검증이 사실상 어려운 실정이며, 농경지나 건설현장과 같이 사면 마루부에서의 판상 및 세류침식에 의한 연평균 토양침식량을 예측하기 위해 개발된 기법이다. 국내의 다양한 호우사상에 적용하여 실측치와 비교한 결과 단일강우에도 적용이 가능한 것으로 알려져 있으나(손광익, 2001a) 기법의 개발 이론적 배경으로는 단일강우에 의한 침식량을 산정할 수 없다. Williams (1975, 1978)는 이와 같은 단점을 보완하고자 배수면적이 2.7~4380 acres, 평균 경사 및 사면길이는 0.9 %~5.9 %, 258~570 ft 인 Nebraska의 Hastings와 Texas의 Reisel 근처 47개 유역의 778개 강우자료를 사용하여 범용토양손실공식의 R계수 대신 토사유출량 지배인자와 유출에너지를 나타내는 인자를 이용하여 토사유출량을 예측하는 수정범용토양손실공식(MUSLE)을 발표하였다.

$$A = 11.8 \cdot (Q \cdot Q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4)$$

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

3. 실측 및 모의결과 비교검토

3.1 도시화 시험유역

본 연구는 도시화 유역으로부터의 토사발생량 산정 기법을 개발하기 위한 전 단계로써 도시유역으로부터의 토사유출량 실측자료와 기존의 여러 모의모형을 이용하여 산정한 예측치를 비교함으로써 각 기법에 대한 적용 가능성을 검토하고자 한다. 시험유역은 도시화된 지역으로 유역이 수문학적으로 동질성을 가지는 유역면적이 크지 않으며 유역 관리가 용이한 유역으로 경상북도 경산시 계양동 일대 약 3.81 km²의 시험유역을 선정하고

2006년 7월 이후 지금까지 계속 운영하고 있다. Fig. 1은 시험유역의 위치와 개황도이다.



Fig. 1. Experimental Urbanized Basin

3.1.1 시험유역의 지형학적 특성

시험유역의 유역면적은 3.81 km²로 면적대비 56 % 정도가 도로, 주거용 포장 등으로 인한 도시화가 진행된 유역으로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 상류유역(Zone I; 1.34 km²)은 산지이며 중류(Zone II; 0.82 km²)는 나지 형태를 이루고 있으나 도로 등 사회기반 인프라시설만 구축된 상태에서 개발이 중지되어 토사이동의 연속

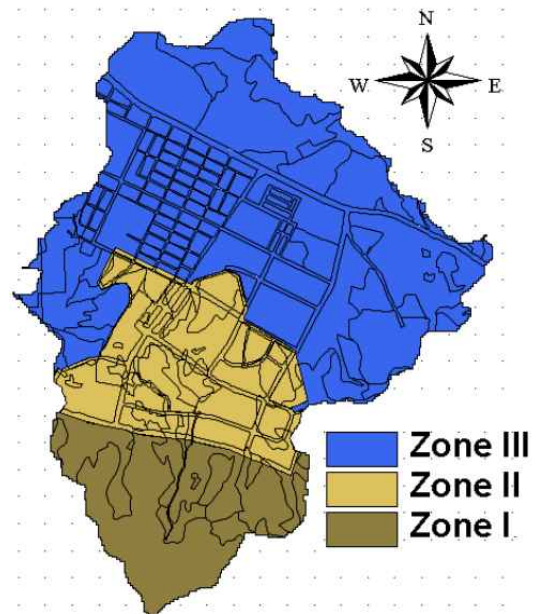


Fig. 2. 3 Sub-basin and Zone No.

성이 단절된 상태이며 하류(Zone III; 1.65 km²)는 이미 도시화된 유역이다. 시험유역의 특성분석을 위한 각종 DEM 자료, 토지이용도, 영상자료 등 현재까지 수집된 자료 분석을 통한 기초적 분석결과는 Table 1과 같다. 사회적 경제여건에 의해 도시화가 중단된 중류유역의 개발이 진행될 경우 향후 도시화에 따른 추가적 유출변화 특성분석에도 적합한 지역으로 판단된다. 유역의 표고는 Fig. 3과 같이 남측이 해발 320 m로 높고 북측이 낮아 유역 유출점은 최북단에 위치하고 있다.

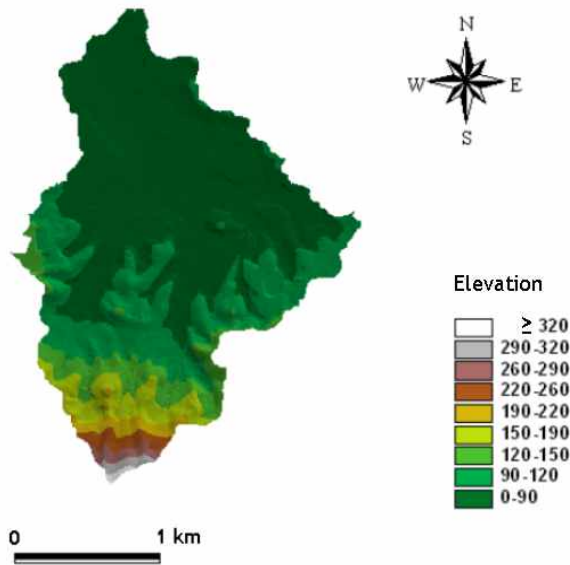


Fig. 3. El. Distribution for Experimental Basin

3.1.2 시험유역의 수문량 및 유사량 실측

시험유역의 유출량 및 유사량 관측은 시험유역의 출구점에서 수행되었으며 2006년 7월 1일 수동으로 수위 및 유속 등에 대한 실측을 시작한 이후 현재까지 지속적인 실측이 이루어지고 있다. 특히 2006년 11월에는 시험유역의 지속적인 유출 및 강우량 계측을 위해서 출구점에 자동 강우계측 및 수위계측 T/M 장치를 설치하였으며, 이 자동 계측장치를 통해 시험유역의 수위, 유량, 강우 등 수문자료를 실시간으로 연속 측정하고 있다. 유역 출구점은 이런 박스 컬버트(3.1 m x 2.1 m x 2ea)이며 하류는 자연하도 형태로 이루어져 있다. 상류 박스 컬버트는 분류식 우수시스템으로 원칙적으로는 우수에 의한 유출만 발생하는 유역특성을 지닌다(Fig. 4참



Fig. 4. Outlet Culvert and T/M Equipments

Table 1. Land-Use Proportions

Land-Use	2007.05		2008.05	
	Area (m ²)	Ratio	Area (m ²)	Ratio
Raw Crop Land	978	0.03 %	981	0.03 %
Special Crop Land	386,526	10.13 %	386,526	10.13 %
Orchard	416,337	10.91 %	416,337	10.91 %
Artificial Green Land	1,256	0.03 %	2,800	0.03 %
Coniferous Forest	699,537	18.33 %	699,537	18.33 %
Latifolious Forest	190,887	5.00 %	190,887	5.00 %
Cemetery	12,396	0.32 %	12,396	0.32 %
General Residence Area	189,109	4.96 %	406,510	10.65 %
High Raised Residence Area	149,656	3.92 %	330,620	8.67 %
Business Area	67,996	1.78 %	136,610	3.58 %
Bare Land	1,123,431	29.45 %	360,490	9.45 %
Road	247,247	6.48 %	529,810	13.89 %
Industrial Facility	9,513	0.25 %	9,513	0.25 %
Treatment	53,669	1.41 %	53,669	1.41 %
Military facility	265,169	6.95 %	265,169	6.95 %
Lake	1,623	0.04 %	13,471	0.04 %
Total	3,815,329	100 %	3,815,329	100 %

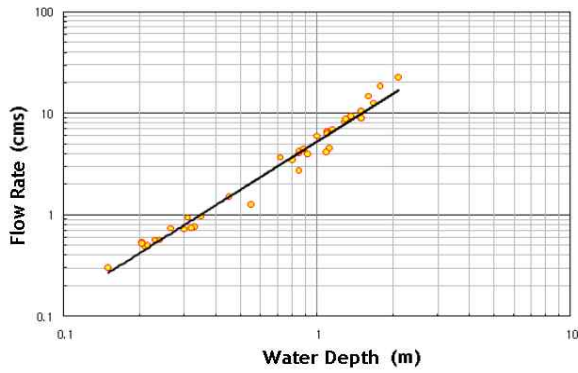


Fig. 5. Water Depth-Runoff Relation

조). 유량 산정은 컬버트 횡단면을 6개 등간격으로 나누고 각 단면별 평균유속과 수심실측을 통해 수위 및 유량을 산정한 후 133개의 실측자료로부터 수위-유량 관계곡선을 개발하였다(Fig. 5 참조).

또한 계측지점에서의 유량별 유사량은 소류사량 및 부유사량으로 나누어 다양한 호우사상 및 유출량에 대하여 실측을 실시하였다. 2007년 자동화 시스템이 안정화된 이후 유출 및 유사량을 측정된 호우사상은 Table 2와 같다. 유사 채취는 수심 약 60 cm를 기준으로 사람이 수로에 직접 들어갈 수 있는 경우와 없는 경우로 나누어 채취방법을 달리하였다. 얇은 수심의 경우 소류사는 wading sampler를 이용하였으며 부유사는 2점법에 따라 채수통을 이용하여 직접 수심별로 채수하였다. 수심이 깊은 경우 부유사는 D-74 채취기로 소류사는 BL-84 채취기를 이용하였다.

소류사의 입도분석을 위하여 채취유사는 24시간 이상 건조 후 중량측정 및 입도분석을 실시하였다(Fig. 6 참조) 유역 출구점에서 실측한 시료별 소류사 입도분포는 전체적으로 유량에 관계없이 0.1 mm부터 10 mm까지 분포하며 평균입경은 1 mm 내외의 모래로 나타났다. 부유사량의 경우 강우시 유출점에서 채취한 유출수의 농도 분석을 통하여 측정시 유출량에 대한 부유사

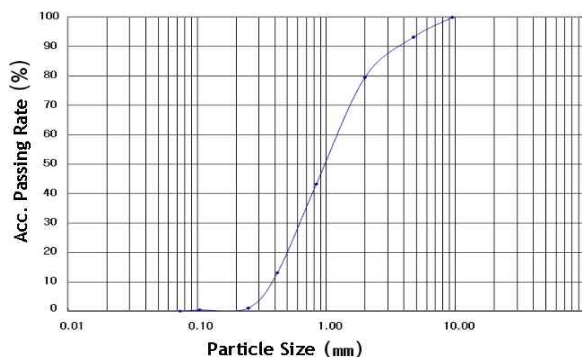


Fig. 6. Particle Size Distribution of Bed Load

Table 2. Events for Runoff and Sediment Load Simulation

	Rainfall	Depth (mm)	Run-off (m3)
2007	6th Aug.	17.0	17643
	7th Aug.	60.5	118452
	8th Aug.	100.5	313645
	5th Sep.	43.0	136808
	6th Sep.	33.0	136815
	14th Sep.	55.5	119522
	15th Sep.	50.5	215414
	16th Sep.	86.5	225107
2008	11th Jan.	29.5	29442
	9th Apr.	32.5	35259
	17th Apr.	9.5	16084
	23th Apr.	8.5	16604
	13th May	20.5	26768
	19th May	16.0	21479
	24th May	5.5	12301
	28th May	39.0	48908
	5th Jun.	25.0	36603
	8th Jun.	10.0	10405
	18th Jun.	63.5	91389
	20th Jun.	12.5	16978
	21th Jun.	9.5	25447

량을 산정하였으며 각 유량별 소류사량과 부유사량 관계는 Fig. 7과 같다.

3.2 RUSLE 적용

RUSLE 및 MUSLE기법에 공통적으로 사용되는 인자로는 지형특성인자인 K, LS와 토지피복 및 식생상태 인자인 C, P가 있다. LS의 산정은 객관성을 유지하기 위하여 GIS 프로그램을 사용하여 산정하였으며 Hickey (1994)의 알고리즘을 이용하였다.

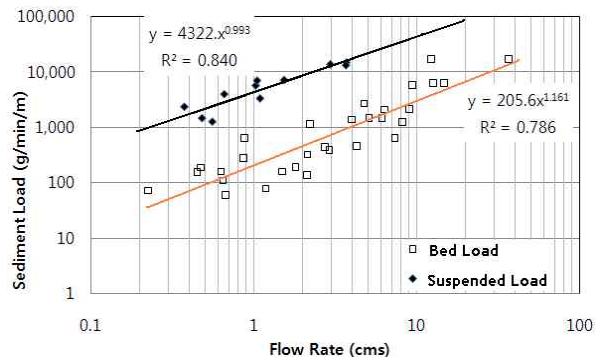


Fig. 7. Runoff-Sediment Load Relation

R값 산정은 Eq. (2)를 사용하였으며 단일호우에 대한 R값 산정은 국립방재연구소(1998) 보고서에 제시된 산정기법을 따랐다.

정밀토양도를 분석한 결과 본 연구에서 선정한 유역은 주를 이루는 토양에 대해서 전국의 토양통 별 K값을 적용하였다. 유역 내에 존재하는 토양통의 종류는 주로 대구 미사질 양토, 경산 미사질 양토, 삼각 사양토, 유가 미사질양토, 석토 양토이며 면적비에 의한 주 토양을 매곡 사양토로 선정하여 유역의 대표 K값을 산정한 결과 $0.0218(\frac{\text{tonnes} \cdot \text{hr}}{\text{MJ} \cdot \text{mm}})$ 의 값을 얻었다.

Hickey (1994)는 ArcInfo Grid환경에서 RUSLE 기법의 지형인자(LS)를 산정할 수 있는 프로그램을 aml을 이용하여 개발하였다. 경사장(L) 산정은 누적경사장의 개념을 적용하였으며 경사도(S) 산정은 Maximum Downhill Slope Method (MDS)을 이용하였다. 누적경사장 이론은 Grid system에서 동일한 경사와 방향을 가진 Cell이 연속되면 하부 Cell의 경사장이 상부 Cell의 경사장보다 크게 나타난다는 개념으로부터 개발되었다. 경사도(S) 산정기법은 Neighborhood Method (NBH), Quadratic Surface Method (QSM), Maximum Slope Method (MSM), Maximum Downhill Slope Method (MDS) 등 여러 가지 방법이 있으며 최근에는 평균치를 이용한 NBH와 경사의 과대평가 없이 국부적인 변화를 잘 표현할 수 있는 방법으로 알려진 MDS를 많이 사용하고 있다. MDS는 Hickey (1994)의 프로그램에서 사용되었으며 산정공식은 다음 식과 같다.

$$S = \frac{\max(Z_j - Z_i) \times 100}{L_c} \quad (5)$$

여기서, L_c = 중심셀과 인접셀의 중심간거리, $Z_i = Z_1 \sim Z_9$ 토지피복상태를 나타내는 인자(C) 값은 토지이용도

에 따라 아래 Table 3과 같이 적용하였다. 토양보존대책을 나타내는 무차원 인자(P)는 토양보존대책을 세운 사면의 상·하 방향 경사지로부터의 토양보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의한다. 이것은 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위해서 사용된다. 일반적으로 도시지역 등 거주지 지역은 1로 정의하고, 물이나 습지등의 지역은 0의 값으로 정의한다. 본 연구에서는 거주지 지역의 경우 1, 물이나 습지 등의 경우 0, 나지의 경우 0.8, 산림의 경우 0.6, 논밭의 경우 0.16을 적용하였다.

한편, 토사전달률은 ‘유역면적과 토사전달률의 관계’(USDA; 1979, Vanoni; 1975)와 ‘표고-길이비와 토사전달률의 관계’(Williams and Brendt’s, 1972)의 3가지 기법으로 토사전달률을 산정하였다. ‘주 흐름하도의 경사(SLP)’는 도시화 유역의 특성을 고려하여 우수관로의 주 흐름 하도에 대한 표고-길이비를 적용하였다. 토사전달률은 전체 유역을 단일 유역으로 가정한 경우 (SDR_T)와 토지이용 변화에 따라 세 개 소유역(Zone I ; 상류, 산림지역, Zone II ; 중류 개발지역, Zone III ; 하류, 도시지역)으로 나누고 각 유역별로 토사전달률을 산정한 후 면적가중치를 이용하여 전 유역에 대한 대표치(SDR_B)를 산정하였다. 그 결과, 전체유역을 단일유역으로 가정한 토사전달률이 소유역으로 나누어 산정한 토사전달률보다 작았으며 적용 기법에 따라 최대 5배의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 개발지역의 토지이용 변화가 많았던 2007년, 2008년의 토사전달률을 비교하기 위하여 소유역별 토사전달률에 면적가중치를 적용한 결과 개발이 완료된 후, 도시화가 진행되면서 토사전달률은 감소하는 일반적인 경향과 일치하는 것으로 나타났다(Table 4 참조). 본 연구에서는 Williams & Bernet’s (1972)의 토사전달률 산정결과를

Table 3. Land Cover Condition Index (C)

Land Use	c-value	Land Use	c-value
Readjusted Crop Land	0.64	Port	0.2
Raw Crop Land	0.6	Industrial Facility	0.2
Special Crop Land	0.4	Industrial bare land	0.2
House Cultivated Land	0.012	Bare land	1
Other Cultivated Land	0	Electricity Generation	0.2
Orchard	0.012	Treatment	0
Natural Green Land	0.043	Military facility	0
Artificial Green Land	0.012	Public Land	0
Coniferous Forest	0.003	Fishery	0
Latifolious Forest	0.003	Mine Area	0

Table 4. Sediment Delivery Ratios

SDR Factor	Researcher	SDR_T	SDR_B	
			2007	2008
Area	USDA (1979)	49 %	56.6 %	53.8 %
	Vanoni (1975)	40 %	46.9 %	44.5 %
El. & Slope	Williams & Bernet's (1972)	10 %	15. 2%	12.0 %

활용하였으나 토사전달률에 대한 보다 추가적 연구가 요구됨을 알 수 있다.

3.3 MUSLE 적용

수정범용토양손실공식(MUSLE)은 Eq. (2)에 나타나 바와 같이 유출체적 및 침투 유량(Q, Q_p) 이외의 기타 인자 $K \cdot LS \cdot CP$ 는 RUSLE공식과 동일하다. 따라서 MUSLE 기법 적용 시 유출체적 및 침투 유량(Q, Q_p)은 선택호우에 대한 실측 침투유량과 총유출량을 적용하였다. Fig. 8은 2007년 9월14일부터 9월17일까지 실측한 시험구역 강우량 및 유출수위곡선 예를 보여주고 있다. 시간대별 실측 수위를 수위-유량관계곡선(Fig. 5 참조)을 이용하여 시간대별 유량곡선으로 변환한 후 호우사상별 침투유량(Q_p)과 총 유출량(Q)을 산정하였다.

3.4 비교 검토

앞 절에서 기술한 바와 같이 지난 3년간 시험구역의 유량 및 수위 실측자료와 유출수문곡선을 이용하여 RUSLE, MUSLE 모의기법에 의한 토사유출량을 산정하였다. 또한 유량-유사량 관계곡선으로부터 산정된 실제 토사유출량과 모의결과를 비교함으로써 각 기법의 적용 타당성 및 가능성을 검토하였다(Fig. 9 참조).

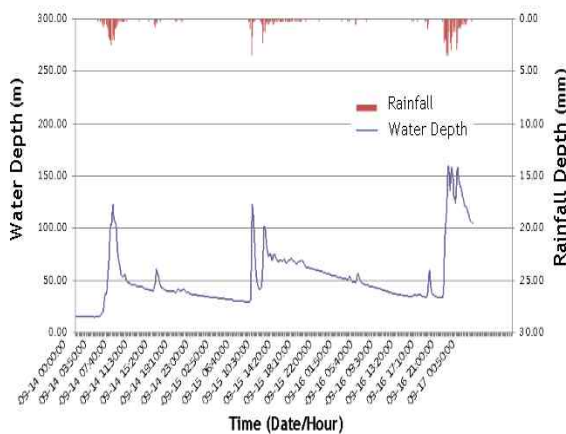


Fig. 8. Rainfall-Runoff Curves for 2007/9/14-9/17

각 호우사상별 토사유출량은 실측한 유출수문곡선과 유량-유사량 관계곡선을 이용하였다. 10분 단위 지속시간 별 평균 수위로부터 산정된 평균 유량과 유량-유사량 관계곡선을 이용하여 10분간 총 토사유출량을 산정하였다. 또한 각 10분 단위의 토사유출량을 총 호우기간에 대하여 누적함으로써 단일 호우에 의한 총 토사유출량을 산정하였으며 이를 실측 토사유출량으로 정의하였다.

각 호우사상에 대하여 RUSLE와 MUSLE 모의기법을 이용한 모의결과와 유량-유사량으로부터 산정된 실측치를 종축과 횡축에 분산형 형태로 표현하였다(Fig. 9 참조). 모의기법이 실측치와 완전하게 일치한다면 두 변수에 대한 회귀직선은 원점을 통과하며 기울기가 1이 되고 결정계수도 1.0이 되어야 할 것이다. 도표에 나타나는 바와 같이 두 변수간의 상관관계를 원점을 통과하는 회귀직선식으로 표현한 결과 MUSLE 기법을 적용한 경우 회귀직선식의 결정계수는 약 0.903이며 기울기는 5.065임을 알 수 있다. 그래프를 검토해 보면 원점을 지나는 직선의 관계로 가정할 수 있음을 알 수 있고 결정계수 또한 0.903으로 비교적 우수하다. 따라서 MUSLE 모의기법을 이용할 경우 도시구역에 대한 토사유출량 산정이 가능한 것으로 판단된다. 다만 기울기가 5.065로 나타나 실제보다 5배 정도 과다하게 모의하고 있어 이에 대한 보정이 요구된다.

RUSLE 기법의 경우 원점을 통과하는 직선의 형태로 회귀직선식을 가정할 경우 기울기는 약 2.2 배 정도로 실측치보다 2배정도 과다하게 산정함을 알 수 있다. 또한 회귀직선식의 결정계수는 0.579로 RUSLE의 적용성에 대한 신뢰도가 높지 않음을 알 수 있다.

도시구역의 경우 토사이동이 포장 및 기타 도로 구조물에 의해 차단되며 배수관로내의 퇴적 가능성 등 토사의 연속적 이동이 불가능한 특성을 나타낸다. 이러한

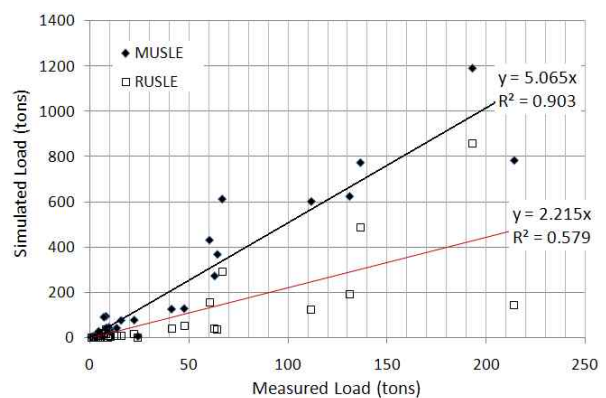


Fig. 9. Measured and Simulated Sediment Load Comparison

지표면의 물리적 유출특성 때문에 RUSLE 및 MUSLE 기법을 적용하여 산정한 도시화 유역으로부터의 토사유출 예측량은 실제 토사유출량에 비해 크게 산정될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 선정된 도시화 시험유역의 경우 토사유출의 연속성 결여에 의한 보정이 필요하며 경산유역의 경우 RUSLE기법은 0.55, MUSLE는 0.2 정도로 판단된다. 그러나 이 보정계수는 배수관로내에서의 토사퇴적이 없다는 가정 하에 산정된 결과로 관로내 퇴적을 고려할 경우 실측치와 모의결과의 오차는 더욱 줄어들 것이다. 뿐만 아니라 타 도시유역에서의 보정계수 산정을 위해서는 더 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시유역에 적용 가능한 토사유출량 모의기법을 검토하기 위하여 도시화 시험유역을 통해 수집된 실측자료와 현재 국내에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 RUSLE와 MUSLE 모의기법들을 비교하였으며 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- 1) 도시화가 진행중인 시험유역을 선정하고 2007년부터 각종 수문자료의 자동 실측을 통하여 시험유역 출구점에서의 수위-유량관계곡선 및 유량-유사량 관계곡선을 개발하였다. 또한 실측 유사량과 국내에서 보편적으로 많이 활용되고 있는 토사유출량 모의기법(RUSLE, MUSLE)에 의한 모의결과를 비교함으로써 각 기법의 적용 가능성을 검토하였다.
- 2) MUSLE 모의기법의 경산유역에 대한 적용이 가능한 것으로 판단되나 경산유역의 경우 약 0.2 정도의 보정이 필요한 것으로 확인되었다. 이와 같은 보정계수의 적용이 필요한 이유는 토사의 연속적이동이 불가능한 도시유역 특성에 기인한 것으로 사료된다.
- 3) RUSLE 모의기법은 MUSLE에 비해 신뢰도가 낮은 것으로 판단된다. 토사전달률은 산정기법에 따라 약 5배의 차이가 발생하였으며 경산 시험유역의 경우 Williams과 Brendt (1972)에 의한 토사전달률 산정기법이 실측치와 가장 유사한 결과를 제시함을 확인하였다. 그러나 여전히 앞에서 기술한 토사이동의 불연속성에 의해 0.55 정도의 보정이 요구됨을 알 수 있었다. 단, 이러한 보정계수는 배수시스템을 통한 토사퇴적이 없을 경우에 대한 값으로 배수시스템내의 토사퇴적에 대한 추가적 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심 기술연구개발 사업(03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구 성과입니다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1992). 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사 연구, 건설부
- 국립방재연구소 (1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 대한 연구. 방재연구소, NIDP-97-04,
- 김규원 (2000). 개발지역에서의 토사유출량 산정기법 선정에 대한 연구, 석사학위논문, 영남대학교 토목공학과
- 손광익 (2001). “해외토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토(I)-RUSLE를 중심으로.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제3호, pp. 199-207.
- 손광익 (2001). “해외토사유출량 산정공식의 국내적용성 검토(I)-MUSLE를 중심으로,” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제3호, pp. 209-216.
- 조영진 (2004). 분포형 모형을 이용한 토사의 유출 및 퇴적분포 예측모형 개발, 석사학위논문, 영남대학교 토목공학과
- 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.
- McNulty, S.G., L.W. Swift, Jr., J. Hays, and A. Clingenpeel. (1995). *Predicting watershed erosion production and over-land sediment transport using a GIS*. Proceedings of Conference XXVI: International Erosion Control Association. USDA Forest Service, Coweeta Hydrologic Laboratory 999 Coweeta Lab Road Otto, NC 28763. pp. 395-406.
- Moore, I.D. and Wilson, John P. (1992). “Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation ; Simplified method of estimation.” *J. Soil and Water Conservation*. 47, 5, pp 423-428.
- Neitsch,S.L., Arnold,J.G., Kiniry,J.R., Williams,J.R., and King, K.W. (2002), “Soil and Water Assessment Tool Theoretical Document(Version 2000)”.
- Quinn & Beaven (1991). “The prediction of hill slope flow paths for distributed hydrological modelling

- using Digital Terrain Models.” *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 59–79.
- Soil Conservation Service (1972). Hydrology In National Engineering, HandBook, SCS.
- 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.
- Vanoni (1975). *Sedimentation Engineering*. ASCE Manuals and reports on Engineering practice #54.
- Wischmeier W.H., and D.D. Smith (1978). “Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning.” US. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 537.
- Wischmeier W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross (1971). “A soil erodibility nomograph for farmland and construction site.” *J. Soil Water Conserv.*, Vol. 26, pp. 189–193.
- Williams J.R. (1978). “A sediment yield routing model.” *In 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. (1975). “Sediment routing for agricultural watersheds.” *Water Resources Bul.* Vol. 11, No. 5, pp. 965–974.
- Williams, J. R. and A.D. Brendt (1972). “Sediment yield computed with Universal Equation.” *Proc. Am. Soc. Civil. Eng.* 98(HY12), pp. 2087–2098.

논문번호: 09-070	접수: 2009.06.23
수정일자: 2009.07.22/07.28	심사완료: 2009.07.28