

산지하천 유역의 토양침식량과 유사유출량 평가

김동필⁺ · 김주훈

한국건설기술연구원 수자원연구소

Estimation of Soil Erosion and Sediment Outflow in the Mountainous River Catchment

DongPhil Kim⁺ · JooHun Kim

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang city, Korea

요 약

유수에 의한 하천 유역과 하천의 토양의 침식, 유송, 퇴적 현상은 빈번하게 발생한다. 이러한 과도한 현상은 수공구조물의 안전위협, 홍수범람 등의 자연재해를 가중시킨다. 토양침식에 따른 토사재해를 방지하기 위해서는 가장 우선적으로 정확한 유사유출량을 예측할 필요가 있다. 이를 위해서는 유역특성에 적합한 모형의 선정, 관련인자의 정량적인 산출, 가용 수문자료의 확보는 매우 중요하다. 따라서, 본 연구의 목적은 실측자료를 확보하고 있는 설마천 시험유역의 강우량, 유출량, 유사량 자료를 이용하여 강우-유출거동에 따른 토양침식량과 유사유출량을 산정하는데 있다. 그리고 유사전달률 분석을 통하여 설마천 시험유역의 유사전달률을 제안하였다. 향후에는 타 유역에도 적용하여 다양한 조건에서의 토양침식량 및 유사유출량 산정방법의 정형화, 유역 특성별 유사전달률 산정 연구를 하고자 한다.

핵심용어 : 설마천 시험유역, 토양침식량, 유사유출량, 유사전달률

Abstract

Soil erosion, transportation, and sedimentation by water flow often occur in a stream. This excessive occurrence threatens the safety of hydraulic structures, and aggravates natural disasters like flood. To prevent soil disaster according to the soil erosion, it is necessary to predict accurate sediment outflow primarily. Besides, it is very important to choose appropriate models by basin characteristics, to estimate accurate quantity of related factors, and to acquire available hydrological data. Therefore, the purpose of this study is to estimate soil erosion amount and sediment amount according to rainfall-runoff by using rainfall, discharge, and sediment in the Seolmacheon experimental catchment. And, it proposed sediment delivery ratio of the Seolmacheon catchment by result of studying sediment delivery ratio. Hereafter, this study will estimate sediment delivery ratio by basin characteristics, and formulate the method of estimating soil erosion and sediment outflow in various conditions by applying the results in other catchments.

keywords : Seolmacheon experimental catchment, soil erosion, sediment outflow, sediment delivery ratio

1. 서론

유수에 의한 하천 유역과 하천의 토양의 침식, 유송, 퇴적 현상은 빈번하게 발생한다. 토양의 침식은 국부적으로 하천제방이나 하천구조물의 안전을 해치며, 농경지의 비옥한 토양을 유실시킨다. 토양의 유송은 수력기계의 마모, 담수어 양식, 수상위락, 상수처리에 문제를 야기시킨다. 또한, 토양의 퇴적은 홍수 시 농경지 매몰, 퇴적에 의한 하상의 상승, 통수 단면적 축소로 홍수범람 규모가 증대되고, 저수지에 퇴적되면 저수지의 저수용량이 감소한다(Korea Institute of Construction Technology(KICT), 1989).

Lee and Chung (2009a, 2009b)의 연구에서 토양침식에 따른 토사재해를 방지하기 위해서는 무엇보다도 가장 우선적으로 정확한 토사유출량을 예측할 필요가 있다고 하였다. 우리나라의 경우 재해영향평가 제도가 실시된 이후 모든 재해영향평가에서는 USLE (Universal Soil Loss Equation) 또는 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)을 적용하여 개발에 따른 토사유출량 변화를 예측하고 그에 따른 저감대책 수립에 활용하였다. 한편, 소방방재청 사전재해영향성검토협의 실무지침서 (2007)에 의하면 ‘토사유출량 산정은 원칙적으로 다음과 같은 RUSLE공식을 사용

⁺ Corresponding author : dpkim@kict.re.kr

하며...'와 같이 언급하고 있으나 실무에서는 간단한 경험식으로 토사유출량을 산정하고 있는 실정이다.

Kim and Kim (2005)은 토양침식의 경우 과거에는 그 중요성을 인식하지 못하였으나, 점차 환경에 대한 관심이 고조되면서 토양보전에 대한 대책 및 연구가 활발히 진행되고 있음을 발표하였다. 특히, 유역규모에서의 각종 환경압력요인으로 야기되고 있는 수환경의 악화를 해결하기 위한 대안으로 우리나라 주요 4대강 중심으로 오염총량관리제, 수변구역의 지정 등과 같은 유역관리정책이 적극적으로 추진되고 있는 상황에서 수환경에 부정적 영향을 미치는 토양침식량에 대한 산정과 산정된 토양 침식량 중에서 어느 정도의 유사량이 관심지역으로 유사가 전달되는지 등에 대한 연구를 통해 향후 이를 저감할 수 있는 방안을 수립하는 등 토양침식 및 유사량에 의한 환경영향을 최소화하기 위한 연구의 필요성이 제기되고 있다.

Kim et al. (2003)에 의하면 토양침식은 지질학적 침식과 사람이나 동물의 활동에 따른 침식으로 크게 구분할 수 있다고 제시하였다. 지질학적 침식은 대다수의 식물들이 성장하기도 좋고, 적절한 균형을 유지할 수 있는 토양침식뿐만 아니라 토양의 형성과정까지 포함한다. 인간에 의한 경작활동과 동물이나 자연적인 사건에 의한 식생의 제거는 침식을 가중시켜 토양의 생산성을 떨어뜨린다.

산지 환경의 변화, 기후변화의 영향에 따른 국부적인 집중호우의 증가는 토사재해의 위험성을 가중시키고 있다. RUSLE는 토양의 침식량을 산정하는 공식으로 관련인자의 정확도 향상을 위한 연구, GIS (Geographic Information System) 기법을 적용한 연구는 활발히 진행되고 있는 상황이다. RUSLE 공식은 유역단위에서 발생 가능한 토양침식량을 산정하는 것이며, 해당 유역출구에서의 유사유출량은 실측자료에 기반하여 산정할 수 있다. 유사유출량을 산정하는 방법은 강우사상별 수 회의 유사량 시료를 채취하여 산정하는 방법이 매우 적절할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 강우에 따른 유출량 및 유사량의 실측자료를 확보하고 있는 산지하천 유역인 설마천 시험유역에 대하여 강우-유출거동에 따른 토양침식량과 유사유출량을 산정하였으며, 유사전달률 분석을 통하여 산지하천 유역인 설마천 시험유역의 유사전달률을 제안하고자 한다.

2. 연구대상 유역

본 연구에서는 산지하천 유역에 RUSLE 모형을 적용한 토양침식량과 실측에 기반한 유사유출량 산정평가를 위하여 설마천 시험유역의 유역출구인 전적비교 수위관측소를 대상유역으로 선정하였다. 설마천은 임진강 하구에서 약 46km 상류인 경기도 파주시 적성면 두지리 지점에서 좌안측으로 유입하는 임진강의 제1지류로서 유역면적 18.56km², 유로연장 10.77km로 수계형상은 대체로 수지상 모양을 보여주고 있으며, 본 연구의 대상유역인 설마천 시험유역은 유역의 중류부에 위치한 영국군 전적비교를 출구점으로 하는 산지하천 유역이다(유역면적 8.48km², 유로연장 5.59km, 유역 평균경사 34.01%, 주하도 경사 2.15%). 유역 상류에 마을을 중심으로 농경지가 있으며, 상류와 하류에 군부대가 위치하고 있고, 전반적으로 개발이 많이 이루어지지 않은 유역으로 유역 대부분은 산악지형으로 이루어져 있으며, 유역 동쪽에 감악산이 위치하며, 전형적인 곡류하천의 형태를 보이고 있다(KICT, 2011).

설마천 시험유역은 1995년부터 한국건설기술연구원에서 운영하고 있는 유역으로 매우 작은 산지 유역임에도 우량관측소 6개소, 하천수위관측소 2개소(사방교 수위관측소는 2011년 7월 26일~7월 28일 호우 시 유실), 지하수위관측소 2개소 및 자동기상관측소(AWS) 1개소를 운영하고 있으므로 비교적 많은 관측자료를 확보할 수 있어 향후 다양한 분석이 가능한 유역이다.

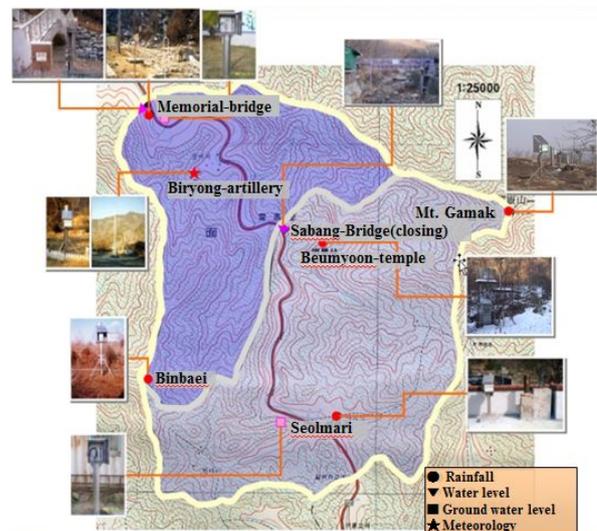


Fig. 1. Map of Seolmacheon experimental catchment

3. 분석 모형

3.1 토양침식량 모형

농업지역의 토양유실량을 산정하기 위하여 Wischmeier and Smith (1965)에 의해 강우에 의한 토립자의 이탈 및 운송에 의한 개념을 기초로 하여 처음으로 USLE 모형이 제안되었다. USDA(United States Department of Agriculture) (1996)는 개발목장이나 삼림과 같은 실험 지점 이외의 토양조건에 대한 토양유실량 산정을 위해 기후인자의 수정, 계절적 변화에 대한 토양의 침식성 인자의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 수정과 피복식생인자를 산정하는 새로운 계산과정의 개발 등을 추가한 개정범용토양손실공식(RUSLE)을 발표하였다.

RUSLE는 모의 강우와 실제 유출 자료 및 침식 이론으로부터 파생된 경험식이며, 광범위한 지역까지 적용할 수 있는 모형으로 식 (1)과 같다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

여기서, A 는 강우-유출 침식성 인자(R)의 해당기간 중 단위면적에서 침식되는 토양유실량(ton/ha), R 은 강우-유출 침식성 인자(rainfall-runoff erosivity factor, $10^7 J \cdot mm/hr$), K 는 토양침식성 인자(soil erosivity factor, ton/ha/R), LS 는 지면특성 인자(slope-length and steepness factor, 무차원), L 은 침식 경사면의 길이, S 는 침식 경사면의 경사, C 는 식생피복 인자(cover management factor, 무차원)이며, P 는 토양보존 인자(support practice factor, 무차원)이다.

본 연구에서는 RUSLE 공식에 적용되는 각각의 인자는 기존 문헌자료를 기반으로 산정하였으며, 공간특성 및 지형인자는 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 산정하였다.

3.1.1 강우-유출 침식성 인자(R)

강우는 침식에 가장 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 강우의 운동에너지는 토립자의 이탈에 관계되며, 강우로 인해 발생한 흩물은 이탈 토립자의 이송에 관계된다. 토립자의 이탈은 빗방울이 모토양에 충돌하여 토립자를 모토양으로부터 튀어나가게 하는 것을 말한다(Jung et al., 1983).

R 인자는 강우사상별 빗방울에 의한 타격에너지와 강우의 운동에너지 그리고 30분 최대 강우강도에 의해 결정되는 인자이다. 연평균 R 값은 건설현장에서

단일 호우에 의한 토양유실량 추정에 직접 사용하기는 곤란하다. 본 연구에서는 미국 교통연구단(TRB) (1980)의 국립합동도로연구프로그램 #70(침사지 설계)에서 제시한 R 값 산정방법을 적용하였다.

3.1.2 공간특성 인자

토양침식도 작성을 위한 기본공간자료는 지형분석을 위한 DEM, 토양이 강우에 의한 침식에 저항하는 능력을 나타내는 K 값을 산정하기 위한 토양도, 그리고 지표면의 피복상태를 나타내는 토지피복도 자료가 필요하다. 이들 기본공간자료 중 지형특성을 분석하기 위한 DEM 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 자료를 이용하였다. 토양의 구성성분, 유기물함량, 토양의 구조, 및 투수성 등 토양 특성을 나타내는 토양도는 농업과학기술원의 정밀토양도(1/25,000) 자료를 이용하였고, 지면피복자료는 Fig. 2와 같이 환경부의 중분류 토지피복도 자료를 이용하였다.

1) 토양침식성 인자(K)

토양유실에 영향을 미치는 중요한 물리적 특성은 투수능력과 토양입자의 구조적인 안정성이다. 투수능력은 입자의 구조적인 안정성에 의해 가장 크게 영향을 받으며, 유기물 함량, 토양조직, 점토광물의 함량과 종류, 토양의 깊이, 지표면의 기복 등도 투수 능력에 영향을 미친다. K 인자는 정밀토양도를 이용하였고, Woo and Kim (1998)의 토양통별 K 값을 적용하였으며, 객토 혹은 개발행위 등에 의한 토양변화는 고려하지 않았다.

2) 사면경사인자(S) 및 사면 길이인자(L)

지형학적 특성을 나타내는 인자는 세류 및 세류간 침식에 미치는 영향을 반영하고 있는 L 과 S 를 이용하여 산정한다. 본 연구에서는 유역 지형특성에 관계되는 인자(LS)는 DEM 자료에 대하여 Remortel et al. (2001)에 의해서 ArcInfo의 AML(Arc Macro Language)로 개발된 LS 인자 산정 프로그램을 사용하여 계산하였다.

3) 식생피복인자(C)

C 인자는 경작의 종류와 식생의 상태 등에 따라서 달라지는 인자로 식생이 성장하기 전의 나대지 지역에서는 약 1.0의 높은 값을 가진다. 그러나 산림이 밀집된 지역이나 곡물의 밀도가 높은 지역에서는 0.1이하의 낮은 값을 갖는다.

Dawen et al. (2003)은 C 인자와 관련하여 Table 1과 같이 제시하고 있다. 또한 Shin (1999)은 각 토지피복별로 Table 1의 ()값과 같이 일정한 범위의 값을 적용하여 토양유실량을 산정하였다. 본 연구에서는 Dawen et al. (2003)이 제시한 값을 기본으로 하여 토양유실량을 산정하였으며, 각 토지피복 종류 중 forest, farmland, paddy 및 grass land 값은 최소값을 채택하였다.

4) 토양보존인자(P)

P 인자는 어떤 토양보존대책을 세운 경사면의 상·하 방향 경사지로부터의 토양보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의한다. 이 인자는 경작지 형태와 더불어 경사에도 영향을 받게 되며, 토지피복형태별에 따른 P 값을 Dawen et al. (2003)이 제시한 자료를 이용하였다.

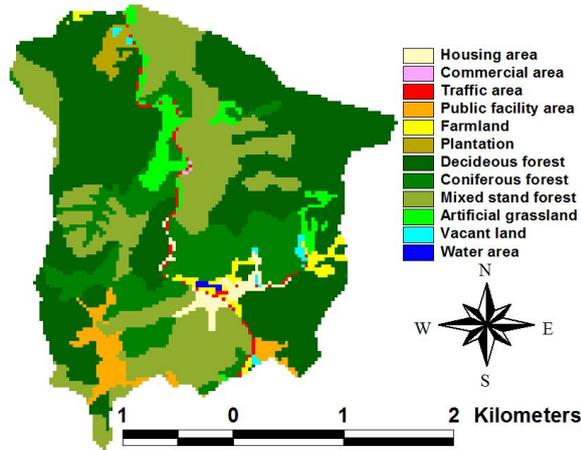


Fig. 2. Map of medium classified land cover (Ministry of Environment)

Table 1. C and P parameter by land cover

land cover	C (Shin, GJ)	P
urban area	0.1	1.0
vacant land	0.35	1.0
forest	0.001~0.01(0.0~0.1)	1.0
farmland	0.5(0.3~0.4)	0.5
paddy	0.1(0.2~0.3)	0.5
grass land	0.08~0.2(0.1~0.2)	1.0
wetland	0.05	1.0
water area	0.01	1.0

3.2 유사유출량 모형

유사유출량을 산정할 수 있는 수정 아인쉬타인 방법은 실측자료를 토대로 하천 단면에서의 총유사량을 추정하는 방법으로서, 하천 총유사량 추정에 관한 미국 지질조사국(USGS)과 개척국(USBR)의 표준적인 방법이다. 수정 아인쉬타인 방법은 원 아인쉬타인 공식을 수정하여 제안된 방법으로 주요 수정사항은 Rouse (1937) 방정식의 z 값 추정 방법 개선, 사립 마찰속도 u_*' , 흐름강도 Ψ_* , 유사 이송강도 Φ_* 계산값 수정 등이며, 그 밖에 하천단면에서의 평균수심 d 와 측정 연직선의 수심의 평균치인 d_v 값을 채택했다는 것이다(KICT, 1990).

수정 아인쉬타인 공식의 근원은 원 아인쉬타인 공식이므로 그 공식을 살펴보면 다음과 같다. 1950년 미국 토양보존국(SCS)에서 충적하천에서의 하천계획 및 설계 목적으로 아인쉬타인에 의해 제안된 방법으로, 소류사(bed load function) 함수라 한다. 아인쉬타인 공식은 소류사 함수로서 유사의 이송강도(transport intensity) Φ_* 와 흐름강도 Ψ_* 는 식 (2)와 같이 아인쉬타인의 소류사 함수식으로 연결된다.

$$\frac{A_*\Phi_*}{1+A_*\Phi_*} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_*\Psi_*}^{B_*\Psi_*-2} e^{-t^2} dt \tag{2}$$

A_* 와 B_* 는 경험적으로 결정되는 실험수로 자료이며, 각 입경에 대한 이송강도 Φ_* 와 흐름강도 Ψ_* 는 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 표시된다.

$$\Phi_* = \frac{i_B q_B}{i_b \gamma_s} \left(\frac{1}{gD^3} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/2} \tag{3}$$

$$\Psi_* = \xi Y \left(\frac{\beta}{\beta_X} \right)^2 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \frac{D_i}{R_b' S} \tag{4}$$

아인쉬타인은 개수로의 유속 u 의 연직분포로 Keulegan (1938)이 제안한 식 (5)와 같은 대수분포식을 이용하였으며, 부유사의 농도 C 의 분포는 식 (6)과 같은 Rouse(1937) 식을 채택하였다.

$$\frac{u}{u_*'} = 5.75 \log (30.2 y / \Delta) \tag{5}$$

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{R_b - y}{y} \frac{a}{R_b - a} \right)^z \tag{6}$$

위의 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 각 입경별 부유사량 qsi 를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 입경 i 의 유사량을 합한 단위폭당 총유사량 qt 는 식 (8)과 같다.

$$qsi = \int_a^{R_b} C u dy \quad (7)$$

$$qt = \sum (i_B q_B + qsi) = \sum i_B q_B [II_1 + I_2 + 1] \quad (8)$$

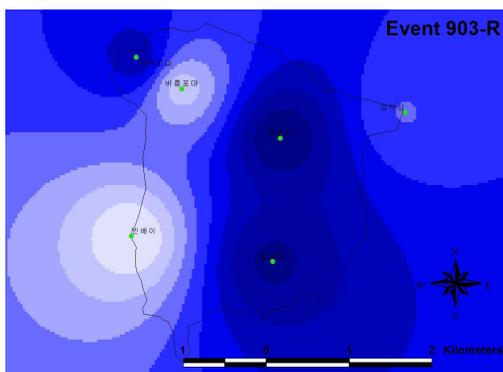
4. 토양침식량 및 유사유출량 분석

4.1 토양침식량 분석

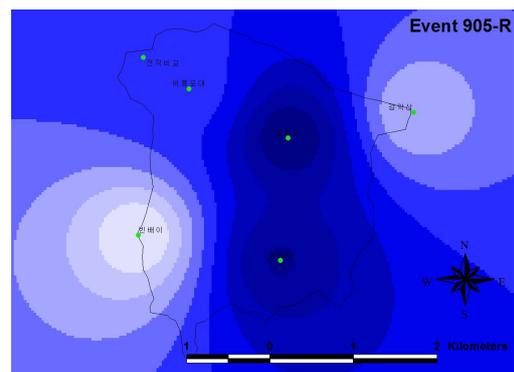
한국건설기술연구원에서 운영하는 설마천 시험유역의 6개 강우량관측소의 2009년 ~ 2010년 4개의 주요 호우사상 자료를 이용하여 Table 2와 같이 R 값을 산정하였으며, 산정된 R 값은 IDW 보간법을 통해 Fig. 3과 같이 공간분포도를 작성하였다.

Table 2. RUSLE R parameter by rainfall gauging station of Seolmacheon experimental catchment

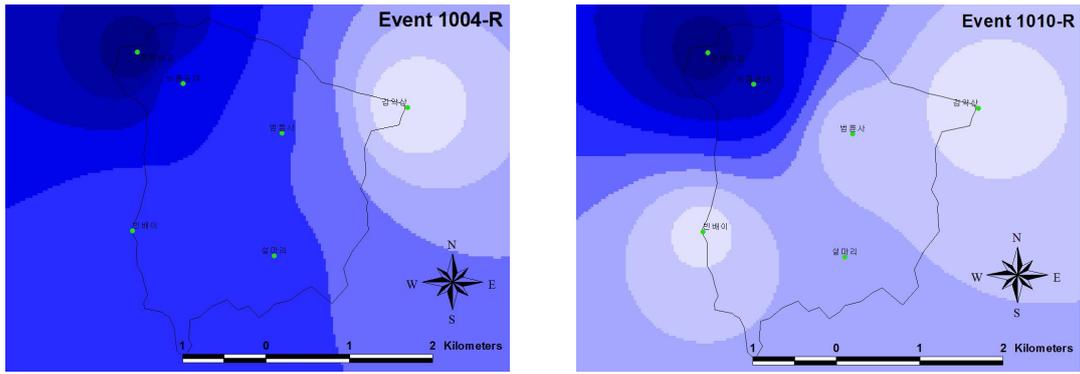
Item	Memorial-bridge (pont rainfall)	Biryong-artillery (pont rainfall)	Binbaei (pont rainfall)	Seolmari (pont rainfall)	Beumyoon-temple (pont rainfall)	Gamak-mountain (pont rainfall)	Memorial Bridge (mean rainfall of catchment)
(a) 2009 07/11 20:40 ~ 07/13 20:10 storm event							
Total rainfall(mm)	85.5	51.0	52.5	89.0	93.0	75.5	76.2
30min max. rainfall(mm)	10.5	6.5	2.5	12.0	12.5	8.5	9.3
R parameter	33.62	10.84	4.19	40.79	43.98	21.76	25.54
(b) 2009 08/11 04:50 ~ 08/15 14:20 storm event							
Total rainfall(mm)	262.5	270.5	250.5	276.0	290.0	252.9	272.7
30min max. rainfall(mm)	20.0	19.5	17.5	21.5	21.0	19.0	19.8
R parameter	235.82	238.85	194.12	269.02	277.01	213.04	243.44
(c) 2010 07/16 07:10 ~ 07/22 18:20 storm event							
Total rainfall(mm)	195.8	185.0	149.5	181.0	183.3	154.5	176.7
30min max. rainfall(mm)	16.2	13.5	16.0	13.5	12.5	10.5	13.5
R parameter	86.58	66.48	60.92	60.41	59.93	38.40	60.87
(d) 2010 08/24 23:50 ~ 08/27 13:50 storm event							
Total rainfall(mm)	151.2	134.0	128.5	139.5	132.2	122.5	133.7
30min max. rainfall(mm)	21.2	22.0	17.0	16.5	17.0	17.5	16.1
R parameter	127.31	114.86	83.49	91.28	85.92	80.74	83.16



(a) 2009 07/11 20:40 ~ 07/13 20:10 storm event



(b) 2009 08/11 04:50 ~ 08/15 14:20 storm event



(c) 2010 07/16 07:10 ~ 07/22 18:20 storm event (d) 2010 08/24 23:50 ~ 08/27 13:50 storm event
 Fig. 3. Spatial distribution of RUSLE R parameter

본 연구에서 산정된 R 값 $4.19(10^7 \text{J/ha}\cdot\text{mm/hr}) \sim 277.01(10^7 \text{J/ha}\cdot\text{mm/hr})$ (산술평균 $105.00(10^7 \text{J/ha}\cdot\text{mm/hr})$) 은 환경부 고시(제2012-124호, 2012.7.18., 제정)의 표토의 침식량 산정방법에서 제시한 R 값 중 본 연구유역과 가장 가까운 동두천 유역의 R 값 $4,976 (\text{MJ}\cdot\text{mm/ha}\cdot\text{yr}\cdot\text{hr})$ 과 비교한 결과 약 20% 정도의 크기를 갖는 값으로 분석되었다.

3.1절의 RUSLE 입력자료 구축을 통하여 얻어진 각 인자값을 식 (1)에 대입하여 토양침식량을 산정한 결과, Table 3과 같이 각 호우사상별로 유역내 총 토양침식량은 $6,623.2\text{ton} \sim 55,346.7\text{ton}$ 이며, 평균 토양침식량은 $7.935\text{ton/ha} \sim 66.310\text{ton/ha}$ 로 산정되었다. 또한,

침식토양의 비중을 2.3으로 가정했을 때 평균 침식깊이는 $0.35\text{mm} \sim 2.88\text{mm}$ 로 산정되었다.

설마천 시험유역의 유역출구인 전적비교 유역평균우량의 총강우량, 30분 최대강우량과 토양침식량과의 결정계수(R^2)는 각각 0.819 및 0.950으로 분석되어, 30분 최대강우량-토양침식량이 총강우량-토양침식량보다 상관성이 높은 것으로 분석되었다(Fig. 4 ~ 5). 또한 30분 최대강우량이 증가함에 따라 토양침식량은 급격하게 증가하는 양상을 보이는 반면, 총강우량과 토양침식량 관계에서는 다소 완만한 기울기를 갖는 것으로 분석되었다.

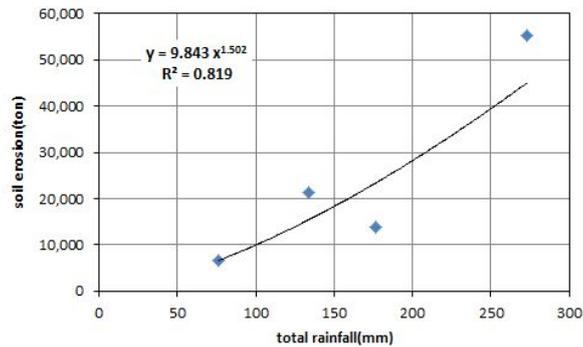


Fig. 4. Relation of total rainfall and soil erosion

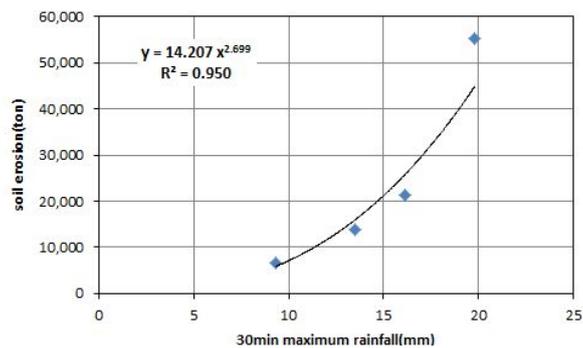


Fig. 5. Relation of 30min maximum rainfall and soil erosion

Table 3. Soil erosion by storm events

Storm event	Total rainfall (mm)	30min maximum rainfall (mm)	Soil erosion			Mean erosion depth (mm)
			Total (ton)	Mean (ton/ha)	Maximum (ton/ha)	
2009 07/11 20:40 ~ 07/13 20:10	76.2	9.3	6,623.2	7.935	1,616.3	0.35
2009 08/11 04:50 ~ 08/15 14:20	272.7	19.8	55,346.7	66.310	11,427.1	2.88
2010 07/16 07:10 ~ 07/22 18:20	176.7	13.5	13,772.1	16.500	2,634.7	0.72
2010 08/24 23:50 ~ 08/27 13:50	133.7	16.1	21,236.5	25.443	3,916.7	1.11

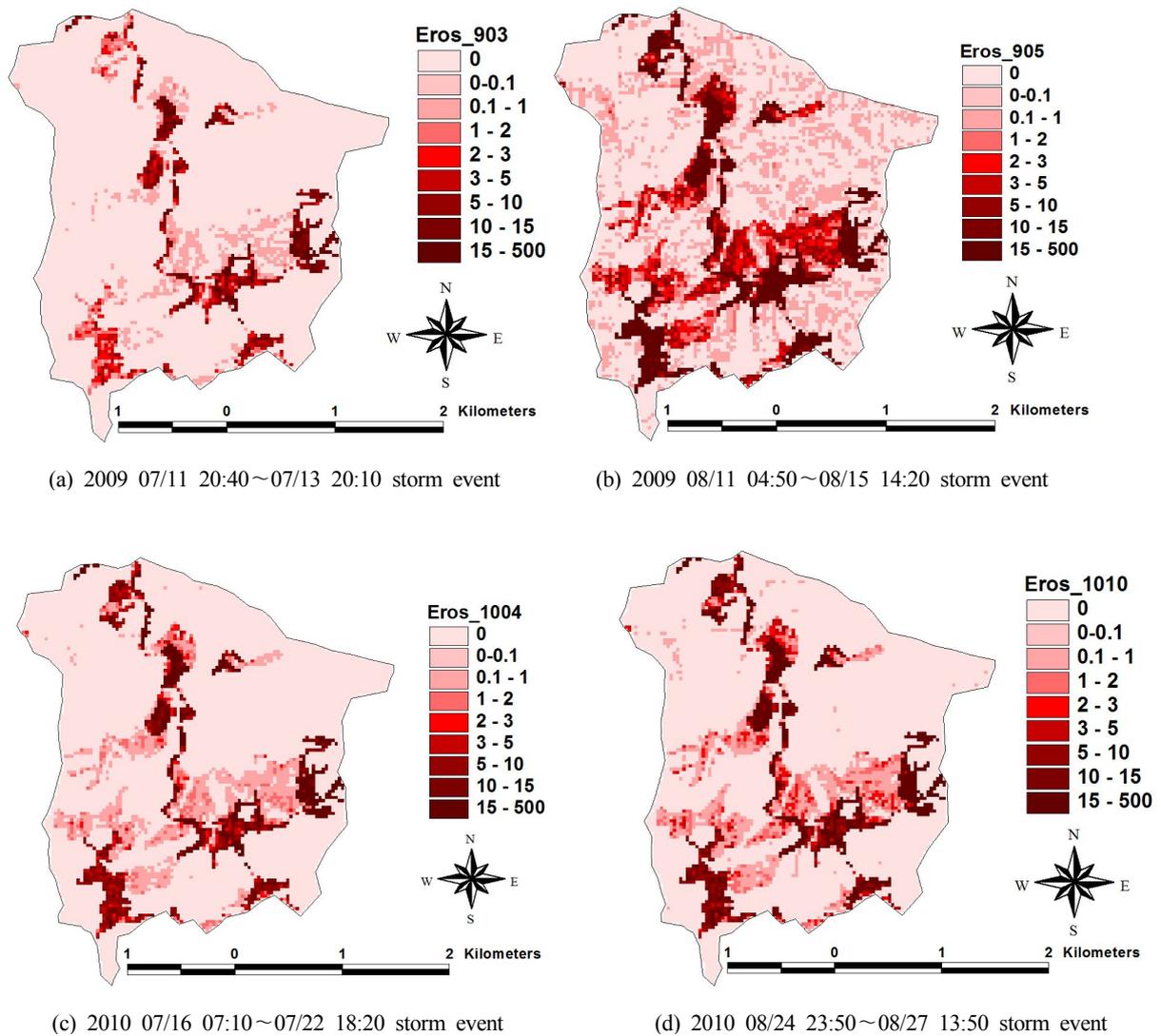


Fig. 6. Map of soil erosion distribution(Seolmacheon experimental catchment)

4.2 유사유출량 분석

유사유출량 분석을 위한 자료는 설마천 시험유역 유역출구인 전적비교 수위관측소에서 2009년~2010년 홍수기간 동안 실측한 부유사 시료를 실험실 분석을

통하여 부유사농도 및 부유사량을 산정하였으며, 홍수기 전·후로 채취한 하상토의 입경분석을 통하여 하상재료 분포값을 얻었다. 그리고 분석자료를 수정 아인쉬타인 공식의 입력자료로 이용하여 Table 4와 같

이 총유사량 0.1ton/day~14,123.3ton/day을 산정하였으며, 부유사농도와 총유사농도 비는 약 5.76배, 부유사량과 총유사량비는 약 4.92배의 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

유사량 측정 대상지역은 통상 모래하천에서 이루어지나, 설마천 시험유역과 같은 산지하천은 모래 이상의 자갈과 암석 등의 유사유출이 이루어지고 있으며, 특히 유사입경 16.0mm 이상을 갖는 하상재료들이

산재해 있는 상황이다. 수정 아인쉬타인 공식의 입력 자료 한계값인 16.0mm 이상의 입경분포는 8.0mm~16.0mm(번호 8)로 간주하여 하상재료 분포값(%)를 결정하였다. 수정 아인쉬타인 방법을 적용한 총유사량 산정은 설마천 시험유역과 같은 산지하천 유역에 적용하기에는 부분적인 한계는 있으나, 비교적 유역의 유사 유출 거동을 잘 반영하고 있으므로 매우 유용한 방법이 될 수 있다(Kim, 2011).

Table 4. Analysis result of suspended load and total sediment load(Seolmacheon experimental catchment, Memorial-bridge, 2009~2010)

Item	Discharge (m ³ /s)	Suspended concentration (ppm)	Suspended load (ton/day)	Total sediment concentration (ppm)	Total sediment load (ton/day)	Item	Discharge (m ³ /s)	Suspended concentration (ppm)	Suspended load (ton/day)	Total sediment concentration (ppm)	Total sediment load (ton/day)
SSD09-01	0.235	13.0	0.3	16.1	0.3	SSD10-01	0.862	51.0	3.8	104.4	7.8
SSD09-02	0.875	281.0	21.2	525.6	39.7	SSD10-02	1.169	36.0	3.6	66.9	6.8
SSD09-03	1.736	1,058.0	158.7	1,883.5	282.5	SSD10-03	1.169	18.0	1.8	14.0	3.8
SSD09-04	25.425	515.0	1,131.3	2,424.7	5,326.5	SSD10-04	1.135	13.0	1.3	280.8	3.0
SSD09-05	0.998	8.0	0.7	185.0	15.9	SSD10-05	0.112	14.0	0.1	69.7	0.1
SSD09-06	3.392	121.0	35.5	512.3	150.1	SSD10-06	0.696	128.0	7.7	403.3	16.9
SSD09-07	7.081	157.0	96.1	780.9	477.8	SSD10-07	1.438	42.0	5.2	433.7	8.7
SSD09-08	11.630	126.0	126.6	1,218.8	1,224.7	SSD10-08	4.693	178.0	72.2	1262.6	163.5
SSD09-09	12.740	56.0	61.6	1,275.1	1,403.6	SSD10-09	5.443	125.0	58.8	5.5	204.0
SSD09-10	9.552	17.0	14.0	800.2	660.3	SSD10-10	8.770	187.0	141.7	21.3	956.6
SSD09-11	7.702	13.0	8.7	973.4	647.7	SSD10-11	4.279	16.0	5.9	1,601.8	56.3
SSD09-12	7.314	109.0	68.9	1,016.7	642.4	SSD10-12	2.606	13.0	2.9	2,257.2	14.4
SSD09-13	8.009	23.0	15.9	701.2	485.2	SSD10-13	1.813	5.0	0.8	37.2	4.1
SSD09-14	13.761	237.0	281.8	1,583.9	1,883.2	SSD10-14	1.323	6.0	0.7	30.4	2.3
SSD09-15	19.711	124.0	211.2	1,226.3	2,088.5	SSD10-15	0.466	5.0	0.2	152.2	0.2
SSD09-16	16.338	40.0	56.5	1,568.0	2,213.3	SSD10-16	0.958	8.0	0.7	63.8	2.4
SSD09-17	0.705	22.0	1.3	126.0	7.7	SSD10-17	1.085	2.0	0.2	26.5	2.0
SSD09-18	1.961	211.0	35.8	685.1	116.1	SSD10-18	1.044	1.0	0.1	20.1	1.6
SSD09-19	8.419	274.0	199.3	1,044.5	759.7	SSD10-19	10.227	210.0	185.6	29.1	1,415.4
SSD09-20	52.280	1,334.0	6,025.7	3,126.7	14,123.3	SSD10-20	16.099	114.0	158.6	17.5	3,139.7
SSD09-21	45.238	662.0	2,587.5	2,436.4	9,522.6	SSD10-21	28.003	419.0	1,013.8	2,942.9	7,120.4
SSD09-22	46.563	626.0	2,518.4	2,439.2	9,813.0	SSD10-22	20.215	76.0	132.7	2,429.3	4,242.9
SSD09-23	23.370	157.0	317.0	1,995.9	4,030.1	SSD10-23	13.135	19.0	21.6	1,846.1	2,095.1
SSD09-24	11.412	51.0	50.3	1,088.9	1,073.6	SSD10-24	8.163	7.0	4.9	901.2	635.6
SSD09-25	8.040	26.0	18.1	712.0	494.6	Sum		7,970.0	15,835.1	45,913.0	77,867.6
SSD09-26	5.936	16.0	8.2	549.0	281.5	Ratio of compare suspended load with total sediment load(%)				576.1%	491.7%

유사유출량 분석을 위한 1차 선결조건으로 호우사상별 유량-총유사량 및 유량-부유사량 관계식을 개발하여야 하나, Table 5에서 보는 바와 같이 호우사상별 유사유출량 측정성과가 2개~10개 범위로 매우 적어 2009년의 26개 및 2010년의 24개, 총 50개 측정성과 중 유량-총유사량 관계곡선식은 경향성에서 벗어난 7개를 제외한 43개 측정성과(유량-부유사량 관계곡선식은 4개를 제외한 46개 측정성과)를 이용하여 Table 6~7 및 Fig. 7~8과 같이 유량규모별 구간분리를 통하여 각각 3개의 관계곡선식을 개발하였다. 유량-총유사량 및 유량-부유사량 관계곡선의 결정계수(R^2 0.905~0.985 및 0.873~0.985)이므로 측정성과와 매우

상관성이 높은 것으로 분석되었다.

호우사상은 총 9개이나 호우사상별 유사유출량 측정성과를 다수 확보한 2009년의 07/11 20:40~07/13 20:10, 08/11 04:50~08/15 14:20 2개의 호우사상과, 2010년의 07/16 07:10~07/22 18:20, 08/24 23:50~08/27 13:50 2개의 호우사상을 채택하여 분석에 활용하였다. 개발된 유량-총유사량 및 유량-부유사량 관계곡선식을 주요 4개 호우사상에 적용하여 Table 8과 같이 총유사량 434.3ton~3,912.3ton, 부유사량 294.7ton~2,702.7ton을 산정하였다. 여기서 유사유출량이라 함은 총유사량을 말한다.

Table 5. Status of sediment outflow measurement

2009year			2010year		
Storm event	Measurement (number)	Remark	Storm event	Measurement (number)	Remark
07/09 02:00~07/11 20:30	4	-	07/02 05:00~07/09 22:10	4	-
07/11 20:40~07/13 20:10	7	Choice	07/16 07:10~07/22 18:20	6	Choice
07/13 20:20~07/16 02:00	5	-	07/22 18:30~07/27 19:30	4	-
08/11 04:50~08/15 14:20	10	Choice	08/05 15:00~08/10 03:50	2	-
			08/12 12:40~08/13 04:20	2	-
			08/24 23:50~08/27 13:50	6	Choice
	26			24	

Table 6. Relation curve formula of Discharge-total sediment load

coverage	Relation curve formula of Discharge-total sediment load	R^2	Remark
$Q \leq 20.900$	$S_T = 5.526 Q^{2.189}$	0.951	Extrapolation possibility until threshold runoff(225m ³ /s)
$20.900 < Q \leq 46.500$	$S_T = 168.920 Q^{1.064}$	0.905	
$Q > 46.500$	$S_T = 0.182 Q^{2.844}$	0.985	

- Q : discharge(m³/s), S_T : total sediment load(ton/day)

Table 7. Relation curve formula of Discharge-suspended load

coverage	Relation curve formula of Discharge-suspended load	R^2	Remark
$Q \leq 20.900$	$S_S = 4.930 Q^{2.061}$	0.873	Extrapolation possibility until threshold runoff(225m ³ /s)
$20.900 < Q \leq 46.500$	$S_S = 57.298 Q^{1.254}$	0.966	
$Q > 46.500$	$S_S = 0.008 Q^{3.565}$	0.985	

- Q : discharge(m³/s), S_S : suspended load(ton/day)

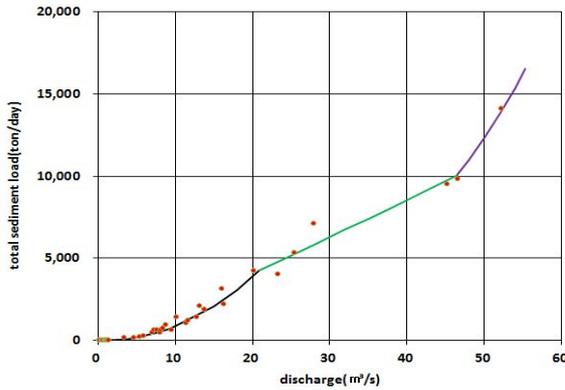


Fig. 7. Relation curve of Discharge-total sediment load

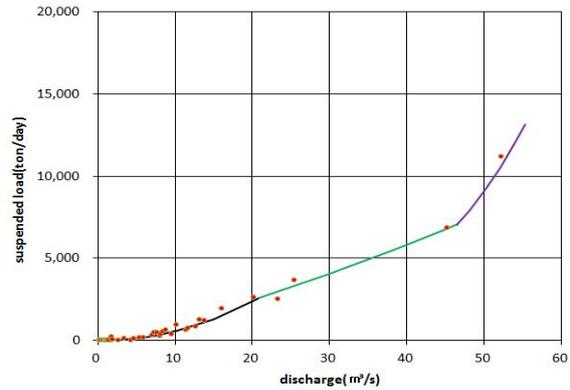


Fig. 8. Relation curve of Discharge-suspended load

Table 8. Analysis result of sediment outflow

Storm event	2009				2010				
	Total sediment load		Suspended load		Total sediment load		Suspended load		
	Total (ton)	Mean (ton/ha)	Total (ton)	Mean (ton/ha)	Total (ton)	Mean (ton/ha)	Total (ton)	Mean (ton/ha)	
07/11 20:40 ~ 07/13 20:10	434.3	0.512	294.7	0.348	07/16 07:10 ~ 07/22 18:20	907.1	1.070	602.3	0.710
08/11 04:50 ~ 08/15 14:20	3,912.3	4.614	2,702.7	3.187	08/24 23:50 ~ 08/27 13:50	1,372.8	1.619	883.9	1.042

4.3 유사전달률 분석

RUSLE 공식 적용을 통해 산정된 토양침식량은 유역단위에서 발생 가능한 토양침식량을 산정한 값으로 유사유출량과는 다르다. 즉, 강우에너지의 크기와 유역 공간특성에 의해 발생된 토양침식량이 유역의 표면과 하천을 따라 유하하다가 얼마만큼 차단되고 하천으로 유입하게 되는지를 알 수 있게 하는 유사전달률(SDR; Sediment Delivery Ratio)를 고려하여 유사유출량으로 변환이 가능하다(Lee, et al., 2012).

유사전달률은 지표면의 경사, 토양의 입도분포와 밀도, 토지이용 상태, 지형적인 조건, 유량 등에 의해 결정되는 것으로서 침식량의 75% 정도는 침식지역 근방에서 바로 지체된다(Forest Service, 1965; Williams and Berndt, 1972). Hadley and Shown (1976)은 여러 소유역(0.5km²~5.2km²)에서의 침식유사의 입자의 이송량이 30% 정도라고 발표하였으며, Wade and Heany (1978)는 미국의 농업 지역의 105개 유역에서의 유사전달률은 1%~38%에 이른다고 발표한 바 있으며, USDA (1972), Vanoni (1975), Boyce (1975) 등은

Table 9와 같이 유사전달률 공식을 제안하였다.

앞서 기술한 발표내용과 공식을 설마천 시험유역에 적용한 결과는 Table 10과 같다. Forest Service (1965) 및 Williams and Berndt (1972)가 제시한 유사전달률 25% 이내의 결과를 보이나 그 차이가 매우 크게 나타나고 있다. Hadley and Shown (1976)이 제시한 소유역(0.5~5.2km²)에서의 침식유사의 입자 이송량 30% 이내에는 포함되나 그 차이가 매우 크게 나타나고 있으며, 설마천 시험유역의 유역면적 8.48km²과 다소 차이를 보이는 상황이다. 그리고, Wade and Heany (1978)가 제시한 유사전달률 1%~38%의 범위에는 포함되나 그 차이 또한 매우 크며, 설마천 시험유역은 산지하천 유역이므로 유역의 지형적인 특성을 달리한다.

또한 USDA (1972), Vanoni (1975), Boyce (1975) 등이 제안한 유사전달률 공식을 이용하여 모의 유사유출량을 산정한 결과 관측 유사유출량과 318%~692% 범위의 많은 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 4.2절의 유사유출량 분석결과를 고려하여 산지하천 유역인 설마천 시험유역의 유사전달률 0.067을 제안하고자 한다.

Table 9. Calculation of sediment delivery ratio(USDA, Vanoni, Boyce formula)

Method	Formula	Catchment area(km ²)	SDR
USDA(1972)	$SDR = 0.5656 A^{-0.110}$	8.48	0.447
Vanoni(1975)	$SDR = 0.4724 A^{-0.125}$	8.48	0.362
Boyce(1975)	$SDR = 0.3750 A^{-0.238}$	8.48	0.225

Table 10. Analysis result of sediment delivery ratio

Item		Storm event(2009)		Storm event(2010)	
		07/11 20:40 ~ 07/13 20:10	08/11 04:50 ~ 08/15 14:20	07/16 07:10 ~ 07/22 18:20	08/24 23:50 ~ 08/27 13:50
Soil erosion	Total(ton)	6,623.2	55,346.7	13,772.1	21,236.5
	Mean(ton/ha)	7.935	66.310	16.500	25.443
Sediment outflow (observed)	Total(ton)	434.3	3,912.3	907.1	1,372.5
	Mean(ton/ha)	0.512	4.614	1.070	1.619
Forest Service(1965) and Williams and Berndt(1972) ¹⁾	Total(ton)	1,655.8	13,836.7	3,443.0	5,309.1
	Mean(ton/ha)	1.953	16.317	4.060	6.261
Hadley and Shown(1976) ²⁾	Total(ton)	1,987.0	16,604.0	4,131.6	6,371.0
	Mean(ton/ha)	2.343	19.580	4.872	7.513
Wade and Heany(1978) ³⁾	Total(ton)	66.2~2,563.2	553.5~21,419.1	137.7~5,329.8	212.4~8,218.5
	Mean(ton/ha)	0.078~3.023	0.653~25.258	0.162~6.285	0.250~9.692
USDA(1972) SDR(=0.447)	Total(ton)	2,960.6	24,739.9	6,156.1	9,492.7
	Mean(ton/ha)	3.491	29.174	7.260	11.194
Vanoni(1975) SDR(=0.362)	Total(ton)	2,397.6	20,035.5	4,985.5	7,687.6
	Mean(ton/ha)	2.827	23.627	5.879	9.066
Boyce(1975) SDR(=0.225)	Total(ton)	1,490.2	12,453.0	3,098.7	4,778.2
	Mean(ton/ha)	1.757	14.685	3.654	5.635
Proposal of this research SDR(=0.067)	Total(ton)	443.8	3,708.2	922.7	1,422.8
	Mean(ton/ha)	0.523	4.373	1.088	1.678

1) Forest Service(1965) and Williams and Berndt(1972) : sediment delivery ratio 25% application

2) Hadley and Shown(1976) : sediment delivery ratio 30% application

3) Wade and Heany(1978) : sediment delivery ratio 1%~38% application

5. 결론

본 연구에서는 설마천 시험유역의 2009년~2010년의 4개의 주요 호우사상을 중심으로 RUSLE 모형을 이용하여 유역의 토양침식량을 산정하였으며, 실측자료에 기반한 부유사량, 하상토 시료 분석자료를 수정 아인쉬타인 공식에 적용하고 유량-총유사량 및 유량-부유사량 관계식을 이용하여 관측 유사유출량을 산정하였다. 그리고 관측 유사유출량과 연구자의 발표내용 및 공식을 적용한 유사유출량과 비교·검토하여 유사전달률을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 토양침식량 산정을 위한 입력자료 구축 시 지형학적인자는 GIS기법을 이용하여 산출하였으며,

그 이외의 인자는 문헌자료를 토대로 유역특성에 적합한 인자값을 적용하였다. 그 결과 주요 4개 호우사상에 대한 토양침식량(총 6,623.2ton~55,346.6ton, 평균 7.935ton/ha~66.310ton/ha)과 토양침식깊이(평균 0.35mm~2.88mm)를 산정할 수 있었다.

(2) 유사유출량 산정은 실측자료인 부유사량, 하상토 분석자료를 기반으로 수정 아인쉬타인 공식을 적용하여 각 시료별 총유사량 0.1ton/day~14,123.3ton/day을 산정하였다. 그리고, 유량-총유사량 및 유량-부유사량 관계곡선식을 개발하여 4개 호우사상의 총유사량 434.3ton~3,912.3ton과 부유사량 294.7ton~2,702.7ton을 산정하

였다.

- (3) 설마천 시험유역의 4개의 주요 호우사상에 대한 토양침식량과 유사유출량의 산정결과를 토대로 기존에 제안된 발표내용과 공식을 적용하여 유사전달률을 분석한 결과 관측 유사유출량이 과소하게 평가되는 것으로 분석되었다.
- (4) 따라서, 산지하천 유역인 설마천 시험유역은 기존에 제안된 발표내용과 공식을 적용한 유사전달률 결과와 다른 과소한 값인 유사전달률 0.067값을 제안하고자 한다.

향후에는 설마천 시험유역뿐만 아니라 타 계측 유역에도 적용하여 다양한 조건에서의 토양침식량 및 유사유출량 산정방법의 정형화, 국내 산지하천 유역에 적합한 유사전달률 산정 연구를 하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(사업명: 산지하천 유역의 홍수예측을 위한 수문조사) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Boyce, RC (1975). *Sediment routing with sediment delivery ratios. in: present and prospective technology for ARS*, USDA, Washington, DC.

Dawen Yang, Shinjiro Kanae, Taikan Oki, Toshio Koike and Katumi Musiake (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes, *Hydrological Processes*, 17, pp. 2913-2928.

Forest Service. (1965). *Notes on sedimentation activities*, United States Bureau of Reclamation, Denver, CO, U.S.A.

Hadley, RF, Shown, LM (1976). Relation of erosion to sediment yield, *Proceedings Third Federal Inter-agency Sedimentation Conference*, Denver, CO, U.S.A, Water Resources Council, Washington, DC, pp 1-132 ~ 1-139.

Jung, PG, Ko, MH, Lim, JN, Kim, KT, Choi, DW (1983). Analysis of rainfall factor for soil erosion prediction, *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 16(2), pp. 112-118. [Korean Literature]

Keulegan, GH (1938). Laws of turbulent flows in open channel, *Journal of Research*, U.S. Bureau of Standards, Research Paper RP1151, 21.

Kim, DP (2011). Assessment of total sediment discharge calculation of the Seolmacheon experimental catchment, *Proceeding of the 2011 conference of the Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2018-2021. [Korean Literature]

Kim, KH, Kim, JS, Kim, JS, Ma, HS, Park, IB, Park, JH, Lee, HH, Jang, IS, Jung, YH, Choi, HT (2003). *The Newest Hydrology*, Dongwha Technology. [Korean Literature]

Kim, KT, Kim, JH (2005). Analysis of soil erosion hazard zone by cropland, *J. of Wetlands Research*, 7(1), pp. 107-117. [Korean Literature]

Korea Institute of Construction Technology (KICT). (1989). *Development of a Guideline for the Selection of Sediment Transport Formulas*, KICT 89-WR-113. Korea Institute of Construction Technology. [Korean Literature]

Korea Institute of Construction Technology (KICT). (1990). *Test and Application of the Modified Einstein Procedure to Rivers in Korea - Estimation of Total Sediment Discharge -*, KICT 90-WR-112. Korea Institute of Construction Technology. [Korean Literature]

Korea Institute of Construction Technology (KICT). (2011). *Hydrological Survey for Flood Forecasting of the Mountainous River Basin*, KICT 2011-069. Korea Institute of Construction Technology. [Korean Literature]

Lee, JH, Shim, EJ, Lee, YG, Kim, TW (2012). A study on the estimation of soil erosion quantity using USLE in the upper region of Mankyong river basin, *J. of Wetlands Research*, 14(3), pp. 317-328. [Korean Literature]

Lee, JS, Chung, JH (2009a). Characteristics analysis for RUSLE factors based on measured data of Gangwon experimental watershed (I). *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 9(6), pp. 111-117. [Korean Literature]

Lee, JS, Chung, JH (2009b). Characteristics analysis for RUSLE factors based on measured data of Gangwon experimental watershed (II). *J. of*

- Korean Society of Hazard Mitigation*, 9(6), pp. 119-124. [Korean Literature]
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2007). *Pre-Disaster Impact Review Consultation Practice Guidelines*, National Emergency Management Agency. [Korean Literature]
- Remortel, VR, Hamilton, M, and Hickey, R (2001). Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of DEM elevation data, *Cartography*, 30(1), pp. 27-35.
- Rouse, H (1937). Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence, transactions, *ASCE*, 110, pp. 1965.
- Shin, GJ (1999). *The soil erosion analysis using GIS in watershed*, Ph.D. Dissertation, Gangwon University. [Korean Literature]
- TRB (1980). *Design of Sedimentation Basins*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice #70, Transport Research Board.
- USDA (1972). *Sediment Source, Yields, and Delivery Ratios*, National Engineering Handbook, Section 3 Sediment.
- USDA (1996). *Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning with the RUSLE*, Agriculture Handbook #703.
- Vanoni, VA (1975). *Sediment engineering, manual and report No. 54*, American Society of Civil Engineers, New York, NT.
- Wade, JC, Heany, EO (1978). Measurement of sediment control impact on agriculture, *Water Resources*, 14, pp. 1-8.
- Williams, JR, Berndt, HD (1972). Sediment yield computed with universal equation, *J. of Hydraulics Division*, ASCE, 98(HY12), Proceeding Paper 9426, pp. 2087-2098.
- Wischmeier, WH, Smith, DD (1965). *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky mountains*, U.S. Dep. Agric., Agricultural Research Service, Agricultural Handbook, No. 537.
- Woo, HS, Kim, CH (1998). *Soil erosion prediction and grit chamber design by development project*, teaching materials for the sixth water engineer workshop, Korea Water Resources Association, pp. I -10 ~ I -19. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2013년 09월 16일
- 심사의뢰일 : 2013년 09월 25일
- 심사완료일 : 2014년 02월 04일