

Tank 모형을 이용한 동해안 오십천 하구의 유사량 평가에 관한 연구

강상혁,^{1*} 옥용식,² 김상률,³ 지정환^{4**}

¹강원대학교 환경연구소, ²강원대학교 바이오자원환경학과, ³강원대학교 방재전문대학원, ⁴강원대학교 토목환경공학과

A Study on Estimate of Sediment Yield Using Tank Model in Oship River Mouth of East Coast

Sank-Hyeok Kang,^{1*} Yong-Sik Ok,² Sang-Ryul Kim³ and Jeong-Hwan Ji^{4**} (¹Environmental Institute, Kangwon National University, Samcheok, 245-701, Korea, ²Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon, 200-710, Korea, ³Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok, 245-701, Korea, ⁴Department of Civil & Environmental Engineering, Kyungwon University, Seongnam, 461-701, Korea)

Received: 19 September 2011 / Accepted: 23 September 2011
© 2011 The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: A large scale of sediment load delivered from watershed causes substantial waterway damages and water quality degradation. Controlling sediment loading requires the knowledge of the soil erosion and sedimentation. The various factors such as watershed size, slope, climate, land use may affect sediment delivery processes. Traditionally sediment delivery ratio prediction equations have been developed by relating watershed characteristics to measured sediment yield divided by predicted gross erosion. However, sediment prediction equations have been developed for only a few regions because of limited sediment data. Besides, little research has been done on the prediction of sediment delivery ratio for asia monsoon period in mountainous watershed.

METHODS AND RESULTS: In this study Tank model was expanded and applied for estimating sediment yield to Oship River of east coast. The rainfall-runoff in 2006 was

verified using the Tank model and we derived good result between observed and calculated discharge in 2009 at the same conditions. In relation to sediment yield, the sediment delivery rate of 2006 was very high than 2009 regardless of methods for estimating sediment load. It was thought to be affected by heavy rainfall due to the typhoon.

CONCLUSION(s): For estimating sediment volume from watershed, long-term monitoring data on discharge and sediment is needed. This model will be able to apply to predict discharge and sediment yield simultaneously in ungauged area. This approach is more effective and less expensive method than the traditional method which needs a lot of data collection.

Key Words: River mouth, Sediment delivery, Soil erosion

서론

최근 사회적 문제를 야기하는 연안지역의 해안침식은 기후변화, 인위적 영향 그리고 다른 환경적인 변화에 의해 발생되는 하천 토사 공급의 불균형으로부터 발생한다. 이 중에서 집중 호우시에는 유역사면으로부터 토사유입 및 하도 내에서의 토사유송에 의해 하상변동을 일으키거나 그렇지 않은 경우 해안침식의 원인이 되기도 한다. 하천에서의 토사 이송은 특히 해양으로의 지구화학과 탄소순환 측면에서 중요한 역할을 한다. 토사이송은 토사의 속성과 물리학적 파라메타에 의

*교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-33-570-6570; Fax: +82-33-570-6272;
E-mail: kang7231@hanmail.net

**공동교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-31-750-5497; Fax: +82-31-750-5344;
E-mail: jhji@kyungwon.ac.kr

존하는 등 복잡한 과정을 거친다. 기후변화와 더불어 하천 유량과 토사 전달의 변화를 평가하기 위한 연구가 증가하여 왔다. 일부 연구에 의하면 하천에 의한 토사의 전달은 범지구적으로 줄어드는 경향이 있는 것으로 보고되고 있으나(Walling, 1983) 우리나라의 경우 아직 토사유출의 평가를 위한 자료 축적이 부족하여 신뢰성 있는 경향을 도출하기 어려운 실정이다. 하천의 토사는 부유사(suspended load)와 소류사(bed-material load)의 형태로 하천 하류부로 운반된다. 소류사는 유량에 의존하며 관측하는 것은 어려우나 예측하기에는 비교적 쉬운 특징을 지닌다. 이와 같은 분류기준에 의해 몇몇 연구자들은 부유사와 소류사를 고려하여 총유사량을 산정하는 식을 제안하였으며 이들은 각 하천의 사면경사, 하상형태, 그리고 유속에 영향을 고려하고 있다(Colby, 1964; Ackers and White, 1973; Yang, 1984). 아주 드문 경우를 제외하고, 소류사의 양은 전체 유출토사의 10% 미만이며 심지어 1%미만인 경우도 있다고 지적하였다(Colby, 1964; Ackers et al., 1973). 그러나 부유사는 공급원에 영향을 받으며 측정하기는 쉬우나 예측하기는 어려운 특징이 있다.

하천의 연간 토사부하량은 연중 관측을 통해 직접적으로 구하는 방법과 유사전달 식을 이용하여 구하는 방법으로 나눌 수 있다. 하천에서 직접적으로 구하는 방법은 많은 비용과 노력이 필요하므로 현실적이지 않다. 유사전달식을 이용하는 방법 또한 정확한 유량과 토사의 특성을 필요로 하므로 그 결과에 대한 일관된 보고가 없으며 최적의 유사량식을 선택하는 것 또한 쉽지 않다. 이러한 문제로 인하여 많은 연구자들은 유량과 토사부하, 그리고 배수면적 사이의 연관성에 대해 간단하고 쉬운 방법을 제안하여 왔다. 유역으로부터의 연간 토사부하는 연중 비교적 짧은 기간의 몇 개의 홍수사상 동안에 발생한다고 알려져 있다. 소 유역에서 토사 손실의 75%는 연 중 평균 4개의 강우사상에서 발생한다고 보고한 바 있으며(USDA, 1978) 또 다른 연구에 의하면 연간 토사부하의 50%는 1년 중 4-53일 동안에 유출된다고 하였다 (Markus and Demissie, 2006). 연간토사와 집중호우에 의한 토사부하와의 관계는 하천에서의 토사 모니터링과 연간 토사량을 산정하는데 중요한 대안을 제시한다. 예를 들어, 연간 토사생산과 1년 중 최대 유출량과의 토사량 관계식은 홍수기 중에 토사부하량을 토대로 연간생산량을 추정하는데 근거가 될 수 있다. 그러나 상기에서 제시한 유사량 추정방법은 연간 유량이 장기간 축적된 하천에 대해 구할 수 있으며 유량자료가 확보되지 않은 미계측 유역에 대해서는 현실적으로 적용하기 어렵다. 본 연구는 이러한 유사량 산정의 문제점에 착안하여 Tank모형을 개량한 효율적인 유사량 산정방법을 제시하였다.

재료 및 방법

연구대상지 개요

연구 대상지인 삼척시 오십천은 시가지 중심부는 지방 1급 하천이고 상류는 지방 2급하천으로 구성되어 있다. 유역 면적은 392km²이고 하천 연장은 약 57km이다. 오십천 유역은 전형적

으로 하상경사가 크고 협곡을 이루는 산지하천의 형상을 띄고 있으며, 유로연장이 짧은 편이며 유로의 형상 역시 만곡반경이 심한 만곡유로를 형성하고 있는 지역이다. 이러한 유역의 지형은 집중강우 발생 시 수위가 급증하고 강우종료 후 단시간 내에 수위가 급격히 감소하는 특징을 보인다(Kang, 2009).

분석 및 조사방법

유역에서 생산된 토양 유실량은 하도를 거쳐 하구에 도달한다. 이 경우 중요한 것은 유역에 잠재적으로 분포하는 토사가 얼마만큼 하류로 도달하는 것이다. 유역에서 하천에서의 토사 생산량은 하천 내 유송능력보다 유역의 토양손실에 의한 전달 능력에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(정호영 등, 2002). 유역의 토양침식량 산정을 위한 RUSLE방법 (Renard et al., 1991)은 다음과 같은 식 (1)의 형태로 표시된다.

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

여기서, A는 단위면적당 토양침식량(tonnes/ha), R은 강우침식인자(10⁷J/ha · mm/hr), K는 토양침식인자(tonnes/ha/R), LS는 지형인자(무차원), C는 토양피복인자(무차원), P는 토양보전대책인자(무차원)를 각각 나타낸다. 원래 토양침식량 A는 단위 ha당 구하도록 되어 있으므로 본 고에서는 각 인자를 ha로 계산하여 최종 A값은 단위 km²당 유실량으로 환산하였다(Baban, 2001). 그 밖의 산정은 기존의 방법을 참조하였다 (Yoon et al., 2009; Lee et al., 2008). 부유사는 유역 특성을 반영하므로 현지 관측자료를 토대로 그 유출량을 평가한다. 유량과 부유사의 농도(Suspended Sediment Concentration, SSC)로부터 회기 분석한 유량-유사량 관계식은 월간 또는 연간 유사량을 계산하는데 유용하게 이용되며 다음과 같이 표시된다. 토사관계곡선(Sediment Rating Curve, SRC)은 토사농도 C (g/m³)와 유량 Q (m³/s)로부터 성립된 관계이므로 이는 식(2)의 형태로 표시할 수 있다,

$$C = f(Q) \quad (2)$$

가 되며 물리적인 수식으로 표시하면 토사생산량 Q_s (tons/day)은 식(3)과 같다.

$$Q_s = aQ^b \quad (3)$$

여기서, a와 b는 상수를 나타낸다. 부유사는 보통 0.1-2 mm에 해당되는 입자로 0.1 mm이하인 경우는 유역상류 또는 하도에서 발생되어 바다로 유실되며 2mm이상이 되면 유역 상류에 퇴적되거나 하도에 소류사 형태로 이동한다(Heather et al., 2009). 본 연구에서 다루고자 하는 부유사량(suspended load)은 하구에 퇴적하는 0.1-2범위의 입자를 대상으로 하며 이러한 과정을 거쳐 하구에 도달하는 유사전달율의 평가(Fig. 2)는 하상변화, 하구폐쇄, 항만의 준설량 등을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

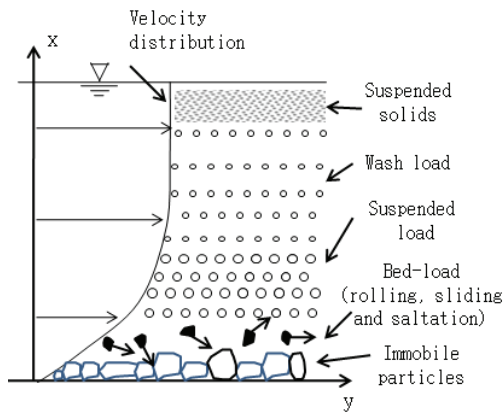


Fig. 1. Sketch of sediment sampling.

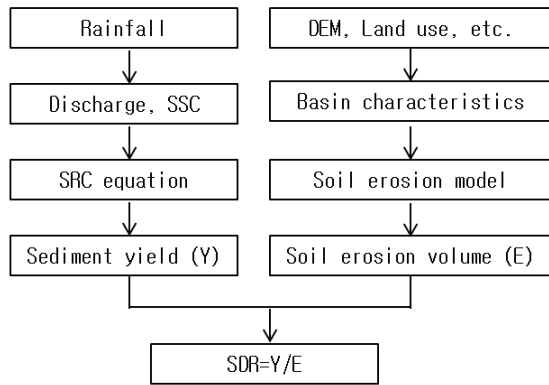


Fig. 2. Description for SDR.

토사유출모형의 개선

기존의 토사유출량 평가는 식(3)에 제시한 바와 같이 SRC를 구한 후 이를 연간 유량으로 적산하여 궁극적으로 토사 부하량을 구하였다. 우리나라와 같이 장마기간 내에 집중강우가 발생하거나 동절기에 유사가 발생하지 않은 기후대에는 많은 오차가 발생한다. 더욱이 우리나라는 유량자료가 대유역을 중심으로 축적되어 있으므로 유량자료가 불충분한 지방하천과 미세측 유역은 기존의 SRC모형은 현실적으로 적용하기 어렵다. 이러한 토사유출량 산정의 한계를 인식하여 본 연구에서는 장기간의 강우 유출량 산정에 주로 이용되는 Tank모형을 확장하여 유량과 토사유출량을 일괄적으로 산정할 수 있도록 개선하였다. 이하 개선된 Tank모형에 대해 간략히 서술한다.

본 Tank모형은 유역을 Tank로 세운 것처럼 유량 Tank모형의 유출출공별로 가상칸막이 ABC를 설치한 것으로 가정한다(Fig. 3).

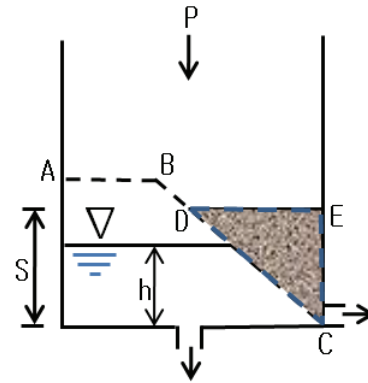


Fig. 3. Tank model estimating for discharge and sediment load.

청천시, 우천시(강우량 R)에 관계없이 Tank에 공급된 부유물질은 가상 막 BC에 퇴적해 가며 퇴적량에 따라 칸막이를 통과하여 하층의 Tank에 공급되나 강우시에는 유출공 C로부터 유출된다. 칸막이 상의 부유퇴적 물질은 Tank 내 수위 h에 따라 침수해 있는 $\triangle CDE$ 의 부분이 유출수와 함께 유출하지만 동일 수위의 경우에도 토사의 퇴적고 S가 수위를 하회하는 경우는 희석되어 퇴적농도는 작아진다. 이와 같은 과정을 계산하기 위한 모형의 기초식은 다음과 같다.

$$h \leq S \quad L = \alpha h \cdot \frac{1}{h} \int_0^h \beta \cdot f(h) dh \quad (4)$$

$$h \geq S \quad L = \alpha h \cdot \frac{1}{h} \int_0^S \beta \cdot f(h) dh \quad (5)$$

$$f(h) = Bh^n \quad (6)$$

여기서, L은 부유사의 유출고(mm), α 는 유량 Tank의 유출계수, β 는 토사 Tank의 유출계수이고 B는 부유사 퇴적고의 환산계수를 의미한다.

이상과 같이 Tank 중에 공급되는 강수와 부유사를 일련의 저류-유출계를 나타내는 기초식과 모형 파라미터로부터 유역에서 유출되는 부유물을 계산한다. 이로부터 집수역의 말단에 있어 토사도달량을 집중적 유출모형으로 계산 가능하게 된다. 본 연구에 적용한 Tank의 연속구조는 직렬 3단으로 하여 공급 토사부하량을 각 단계에 배치하였다. 칸막이 상에 퇴적된 부유물은 순차적으로 하층의 Tank에 침투해 가는 것으로 하면 각 부유물은 그림 1과 같이 도시할 수 있다. 강우시에 상단에서 침투성분이 공급되어 중단 Tank에는 가중된 부분에 대응하며 일정량의 부하유출이 있는 하단은 지하수 침투에 대응한다. 이로부터 부유 토사의 각 발생원에 있어서 현존량의 평가가 어느 정도 가능하다.

결과 및 고찰

잠재적 토양손실량

유역의 토양손실량을 평가하기 위한 GIS자료는 수치표고 모델(DEM), 토양도, 토지이용도 등을 필요로 한다. DEM자료는 환경부에서 제공하는 자료를 이용하였고 토양도는 농업과학기술원의 정밀토양도, 그리고 토지피복도는 국가수자원종합시스템(WAMIS)에서 제공하는 최근 2000년 자료를 이용하였다. 연평균 강우침식인자 R 값은 최근 강우량의 지역적인 큰 편차를 고려하여 오십천이 위치한 삼척시 관할의 최근 평균 강우량(1995-2010)을 이용하였다(Fig. 4). 토양침식인자 K 값은 정밀토양도(1:25,000)를 이용하여 추출하였다(Fig. 5). 사면길이와 경사인자인 LS 값은 DEM을 30×30 m로 격자 분할하여 구하였다(Fig. 6). 토지피복 및 관리인자인 CP 값은 WAMIS에서 제공하는 자료를 이용하였다. 이들 자료로부터 산정된 오십천 유역의 연평균 토사손실량은 872,667 tons/yr로 산정되었다.



Fig. 4 Rainfall erosivity R factor.

Fig. 5. Soil erodibility K factor.

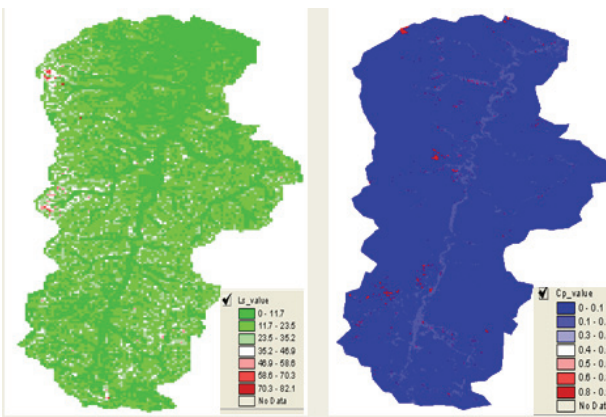


Fig. 6. Topographic LS factor. Fig. 7. Soil conservation CP factor.

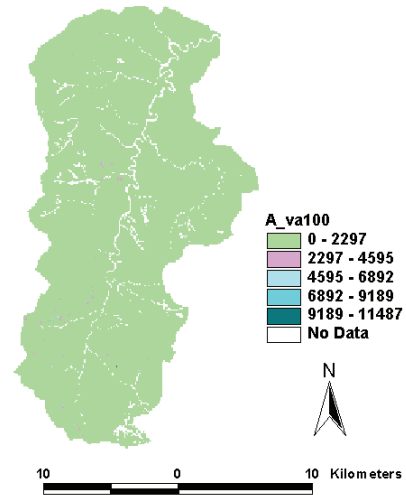


Fig. 8. Annual soil loss A.

토사 유출량의 모형화 및 적용

오십천 유역은 1995년부터 오십천교에서 유량관측을 시행해 왔으나 2002년 태풍 루사로 인해 수위계가 유실되어 결측되었으며 2006년부터는 그 보다 상류인 죽서교에서 유량을 관측하여 왔다. 오십천 유역은 국가 공공기관에서 정기적으로 유사량을 관측하는 지점이 아니므로 2006년 유량의 변동에 따라 유사농도를 예측하여 얻은 계산식은 (7)과 같고 유사량 관계곡선은 Fig. 9와 같다.

$$Q_s = 6.017Q^{1.374} \tag{7}$$

토사는 강우가 발생할 경우는 귀류하고 무 강우일에는 퇴적하게 된다. 이러한 과정을 모형화하면 다음과 같다.

$$L_t = q_{1,t}B_{1,t} + q_{2,t}B_{2,t} \tag{8}$$

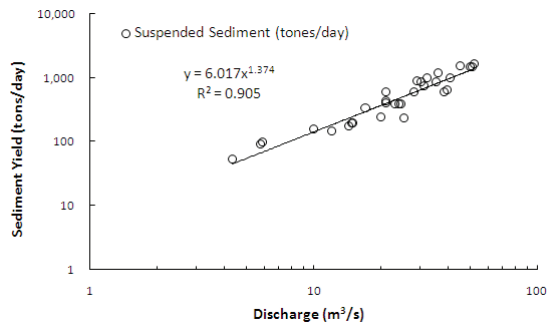


Fig. 9. Sediment rating curve of Oship river in 2006.

여기서 L_t 는 유출부하량(kg/day), $q_{1,t}$, $q_{2,t}$ 는 각 유출공으로부터의 유출량(m^3/s), $B_{1,t}$, $B_{2,t}$ 는 유역에 퇴적해 있는 토사의 농도(g/m^3)다. 유역에 퇴적해 있는 물질은 강우가 발생하면 유출되지만 무강우시에는 다시 토적된다. 이를 수식으로 나타내면,

$$B_{t+\Delta t} = aQ^b \cdot B_t \cdot \exp(-c \cdot q_t) \tag{9}$$

$$B_{t+\Delta t} = aQ^b \cdot B_t \cdot \exp(d/q_t) \tag{10}$$

식 (9)는 퇴적된 토사가 감소하는 과정을 나타내며 식 (10)은 강우가 정지한 후 시간의 경과와 함께 토사가 증가하는 과정을 나타낸다. 이러한 변화는 여러 가지 인자가 관여하며 확률적으로 적용하기 어렵지만 일반적으로 지수함수적으로 변화하는 것으로 알려져 있다.

Table 1은 본 모형에 적용한 초기농도(g/m^3) B_0 , 토사 감소량 계수 c , 퇴적계수 d 를 제시하고 있다. 모의 계산시 초기농도 B_0 의 값이 클수록 관측값과 계산값이 일치하는 경향이 있었다.

토사유출량 산정을 위한 모형은 오십천에 대해 유량 자료가 양호하게 축적된 2006년과 2009년에 각각 적용하였다. 적용은 2006년 강우자료를 이용하여 모형을 검증하여 검증된 모형을 2009년에 그 적용성을 평가하였다. 2006년의 강우량은 1,682 mm로 이 연간 강우량의 72%는 여름철 장마기간에 내린 것으로 나타났다(Fig. 10). 강우에 따른 관측 유량의 68%가 장마기간에 발생하였고 계산된 유량은 63%로 관측유량과 모의 계산된 유량과의 오차(RMSE, Root Mean Square Error)는 $1.26 m^3/day$ 로 나타났다. 이 기간 내에 기존의 SRC 모형을 이용한 토사유출량은 215,446 tons이었고 이 중 장마기간에 유출된 양은 전체의 82%인 178,349 tons이었다. 또한 Tank모형을 이용한 2006년의 유출량은 205,676 tons이었고 장마기간의 유출량은 전체의 81%인 166,891 tons으로 계산되었다. 2006년에 토사 유출량이 많았던 주된 이유는 같은 해 7월 중순경에 발생한 태풍 3호 에위니아(EWINIAR)에 의한 집중강우 사상(Fig. 12)에 의한 것으로 보여진다. 에위니아에 의해 연 유량의 28%가 단일 강우사상에 의해 유출되었고 이를 토사유출량으로 환산하면 SRC방법으로는 58%가, Tank모형에 의한 방법으로는 51%가 일시에 유출된 것으로 계산되었다. 동일한 방법으로 2009년의 유량을 예측한 결과 관측유량과 유사한 값(RMSE=0.75)을 얻을 수 있었으며 예측된 자료를 이용하여 유사량을 모의 계산 기존의 SRC에 의한 방법보다는 다소 적은 토사 유출곡선을 얻을 수 있었다.

Table 1. Estimated parameters to calculate sediment yield in 2006

Tank stage	B_0	c	d
1st Tank	300	0.1	0.1
	150	0.1	0.1
	80	0.1	0.15
2nd Tank	150	0.1	0.1

한편 토사전달률은 임의 하천 기준점에 강우에 의해 침식 가능한 토양이 실제로 얼마만큼 유사가 이송되었는가를 나타내는 비율을 나타낸다. 이에 대한 구체적인 산정방법은 아직 정립되어 있지 않으나 Fig.2에 제시한 방법으로 계산한 결과 2006년에는 기존의 SRC 방법으로는 24%로 나타났고 Tank 모형을 이용하여 모의 계산된 토사전달률은 23%로 나타났다. 2009년의 경우는 7.27%(SRC방법)와 6.97%(Tank모형 예측)로 각각 계산되었다(Table 3).

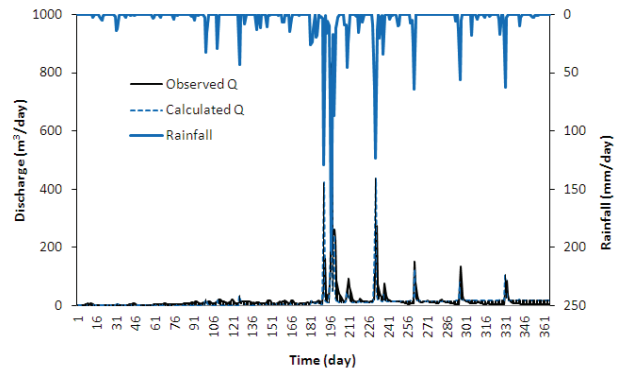


Fig. 10. Observed and calculated discharge in 2006.

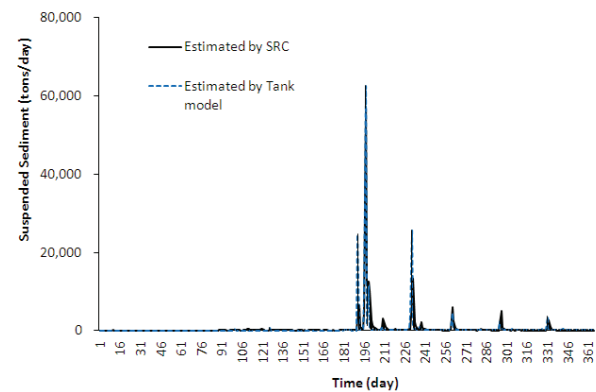


Fig. 11. Relationship between suspended sediment by SRC and Tank model in 2006.

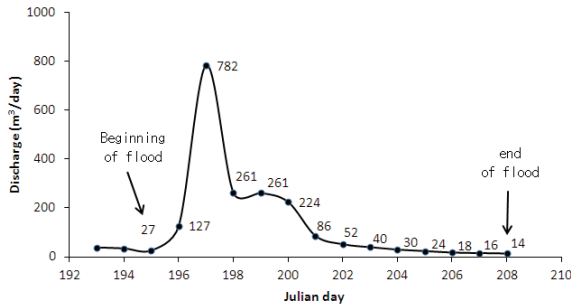


Fig. 12. Extreme single runoff event by torrential rainfall around 10 July, 2006.

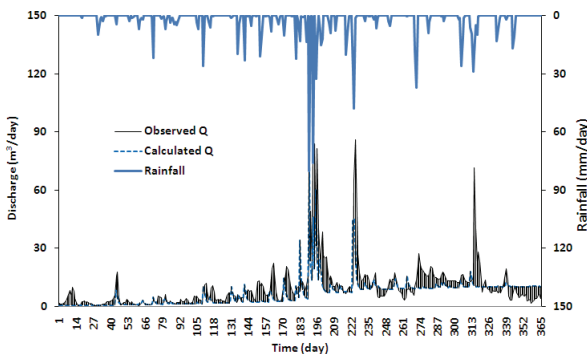


Fig. 13. Observed and calculated discharge in 2009.

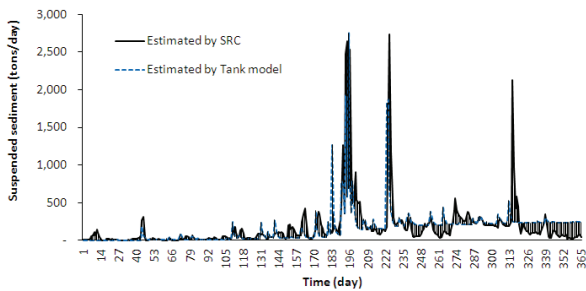


Fig. 14. Relationship between suspended sediment by SRC and Tank model in 2009.

Table 2. Summary of calculated discharge and sediment yield

	Discharge(m ³ /year)		RMSE (m ³ /day)	Sediment yield(tons/year)		
	Observed	Calculated		Soil erosion	Sediment yield	Calculated yield
2006	6,844	6,018	1.26	872,667	215,446	205,676
2009	3,577	2,926	0.75	872,667	63,413	60,814

Table 3. SDR of annual and rainy season

Year	Season	Soil erosion (tons/year)	SDR(%)	
			SRC model	Tank model
2006	annual	872,667	24.69	23.57
	rainy season		20.44	19.12
2009	annual	872,667	7.27	6.97
	rainy season		3.81	3.65

요약

본 연구에서는 유량 및 유사량 자료가 부족한 미계측 유역에 대해 Tank모형을 확장하여 궁극적으로 유사량을 평가하는 방법을 제시하였다. 적용 유역은 동해안 타 유역에 비해 유량자료가 확보되어 있는 오십천을 대상으로 집중호우기의 토사유출 특징과 하천의 토사유달률을 구하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 1) 실측에 의한 유사량의 산정에 있어서는 먼저 유사량 관계식(sediment rating curve)의 개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 유량 산정지점에 대해 유량과 병행하여 유사량 관계식을 다음과 같이 구하였다. 오십천 유량-유사량 관계식 : $Q_s = 6.017Q^{1.374}$

2) Tank모형을 적용하여 2006년 강우유출량을 산정한 결과 관측값과 유사한 값(RMSE=1.26 m³/day)을 얻을 수 있었다. 3) 대상지역의 2006년과 2009년의 연평균 토사전달율을 비교한 결과 태풍에 따른 집중강우가 있었던 2006년의 토사전달율이 평년의 2009년에 비해 현저하게 높았는데 이는 급격한 강우유출량의 증가에 따른 것이라 보인다. 4) 개량된 Tank모형에 의한 유량 및 토사유출량은 기존의 SRC방법과 비교했을 경우 유사한 경향을 보였으며 이는 향후 유량과 유사량 자료가 부족한 유역에 대해 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

Ackers, P., White, W. R., 1973. Sediment transport: New approach and analysis, *J. Hydraul. Eng.* 99, 2041-2060.

Baban, S. M. J., 2001. Modelling soil erosion in tropical environments using remote sensing and geographical information systems, *Hydrol. Sci. J. des Sci. Hydrol.* 46(2), 191-198.

Boyce, R. C., 1975. Sediment routing with sediment delivery ratios. In present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, *ARS-S-40*, USDA-ARS.

Colby, B. R., 1964. Practical computation of bed material discharge, *J. Hydraul. divis. ASCE.* 90, 217-246.

- Heather, L., Kanesa, M. D., Zoe, N., 2009. Sorting out sediment grain size and plastic pollution. *Hands-on Oceanography*. 22(4), 244-250.
- Kang, S. H., 2009. The application of integrated urban inundation model in Republic of Korea, *Hydrol. Process*. 23, 1642-1649.
- Kim, C. W., Kim, H. S., Yu, K. K., Woo, H. S., 1993. Development of methods for estimating sediment yield rate(II) - development of method-, *Korean Soci. Civil Engi.* 13(1), 131-140.
- Klaghofer, E., Summer, W., Villeneuve, J. P., 1992. Some remarks on the determination of the sediment delivery ratio, Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, *Proc. Cheng Symp. IAHS*. 209, 113-118.
- Lee, M. B., Kim, N. S., Jin, S. Z. and Kim, H. D., 2008. A study on the soil erosion by landuse in the Imjin River basin DMZ of central Korea, *Korean Geogra. Soci.* 43(3), 263-275.
- Markus, M., Demissie M., 2006. Predictability of Annual Sediment Loads Based on Flood Events, *J. Hydrol. Engi. ASCE*. 11(4), 354-361.
- Renard, K. G., Foster, G.R., Weesies, G.A. and Porter, J. P. 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation, *J. Soil Water Conser.* 46(1), 30-33.
- Walling D. E., 1983. The sediment delivery problem, *J. Hydrol.* 65, 209-237.
- Yang, C. T., 1984. Unit stream power equation for gravel, *J. Hydraul. divi. ASCE*. 110, 1783-1797.
- Yoon, K. S., Kim, C. W., Woo, H., 2009. Application of RUSLE for erosion estimation of construction sites in coastal catchments, *J. Coastal Res.* 56, 1696-1700.