

충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성

Temporal and Spatial Characteristics of Sediment Yields from the Chungju Dam Upstream Watershed

김철겸* / 이정은** / 김남원***

Kim, Chul Gyum / Lee, Jeong Eun / Kim, Nam Won

Abstract

A physically based semi-distributed model, SWAT was applied to the Chungju Dam upstream watershed in order to investigate the spatial and temporal characteristics of watershed sediment yields. For this, general features of the SWAT and sediment simulation algorithm within the model were described briefly, and watershed sediment modeling system was constructed after calibration and validation of parameters related to the runoff and sediment. With this modeling system, temporal and spatial variation of soil loss and sediment yields according to watershed scales, land uses, and reaches was analyzed. Sediment yield rates with drainage areas resulted in 0.5~0.6 ton/ha/yr excluding some upstream sub-watersheds and showed around 0.51 ton/ha/yr above the areas of 1,000 km². Annual average soil loss according to land use represented the higher values in upland areas, but relatively lower in paddy and forest areas which were similar to the previous results from other researchers. Among the upstream reaches, Pyeongchanggang and Jucheonggang showed higher sediment yields which was thought to be caused by larger area and higher fraction of upland than other upstream sub-areas. Monthly sediment yields at the main outlet showed same trend with seasonal rainfall distribution, that is, approximately 62% of annual yield was generated during July to August and the amount was about 208 ton/yr. From the results, we could obtain the uniform value of sediment yield rate and could roughly evaluate the effect of soil loss with land uses, and also could analyze the temporal and spatial characteristics of sediment yields from each reach and monthly variation for the Chungju Dam upstream watershed.

keywords : SWAT, Sediment, Soil loss, Chungju Dam

요 지

본 연구에서는 분포형 모델링 기법인 SWAT 모형을 이용하여 유역내의 다양한 물리적 특성을 고려한 공간적인 유사량 해석을 통하여 충주댐 유역에 대한 유사 발생 특성을 살펴보았다. 먼저, SWAT 모형의 특성 및 모형내 유사량 모의방법에 대해서 검토하였으며, 대상유역에 대한 유출과 유사량 관련 보정 및 검증을 통해 유역 유사량 해석을 위한 모델링 시스템을 구축하고, 구축된 시스템을 통하여 유역 규모, 토지이용, 하도구간별, 월별 침식 및 유사량을

* 한국건설기술연구원 수문연구실 선임연구원
Senior Researcher, Hydrology Research Division, Goyangsi, Gyeonggido, 411-712, Korea
(e-mail: cgkim@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수문연구실 연구원
Researcher, Hydrology Research Division, Goyangsi, Gyeonggido, 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수문연구실 책임연구원
Research Fellow, Hydrology Research Division, Goyangsi, Gyeonggido, 411-712, Korea

검토함으로써, 대상유역에 대한 시공간적인 유사 발생 특성을 분석하였다. 상류에서부터 배수면적 크기별로 비유사량을 도시한 결과, 일부 상류 소유역을 제외하고 0.5~0.6 ton/ha/yr의 값을 보였으며, 배수면적이 1,000 km² 이상에서는 약 0.51 ton/ha/yr의 비교적 일정한 값을 나타내었다. 토지이용별 단위면적당 연평균 유사 발생량은 밭에서 가장 크게 나타나고 논과 산림에서 작은 것으로 나타났으며, 기존 연구자들의 결과와 다소 차이는 있지만 경향은 비슷하게 나타났다. 하도구간별로는 상류 소유역 중 유역면적이 상대적으로 크고 밭의 비율이 높은 평창강과 주천강에서의 유사량이 많은 것으로 나타났으며, 월별로는 연 유사량의 62% 정도가 홍수기인 7~8월에 집중되고 있는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 유역면적별 비유사량의 일정한 관계를 도출할 수 있었으며, 토지이용별로 침식 영향을 판단할 수 있는 개략적인 평가를 할 수 있었다. 또한 하도구간별 월별 유사량 비교를 통하여 시공간적인 유사 발생 특성을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : SWAT, 유사, 토양침식, 총주담

1. 서 론

유역에서의 침식 및 유사 발생은 작물의 생산성을 감소시키고, 유역내 작물의 종류를 변경하거나 토지이용상태를 변화시키는 주요한 요인이 되고 있기 때문에, 작물 생산성 감소가 토지이용에 미치는 영향이나 반대로 토지이용에 따른 유실의 영향 등에 관심이 모아지고 있다. 특히 이는 장기적인 측면에서의 토지이용 및 식생의 변화에 따른 유역 유사량의 변화 예측에 중요하다. 따라서 유역 전반에 걸친 물의 이동과 유사량의 시공간적인 거동을 능동적으로 해석하기 위해 과거 집중형 모형에서 최근에는 분포형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(과학기술부, 2007).

과거 30년간의 국내에서의 토양침식 및 유역유사량 해석에 대한 연구 현황을 살펴보면, 초기에는 단순히 USLE 공식을 적용하여 각 인자에 대한 적정값 추정 및 소규모에서의 토양 침식량 산정에 많은 연구가 진행되었으며, 이후 GIS 분석기법 등을 이용하여 각 인자들에 대한 관리/저장/분석 등이 자동화됨에 따라 RUSLE 공식이 많이 적용되고 있는 추세이다. 적용 규모면에서는 경사지나 소규모 필지 단위의 시험포에서 적용성을 검증하고 유사량 모의를 해오던 것에서, 최근에는 중소규모 유역이나 대유역에서의 유사량 해석과 응용 분야에 관심이 모아지고 있다.

토양유실량 산정을 위해 많이 적용되고 있는 USLE 공식들(USLE, RUSLE, MUSLE 등)은 판상, 세류 및 세류간 침식을 모의하는 비교적 작은 규모의 시험포에서 검증되어 개발된 것으로서, 몇 가지 영향인자를 고려하여 간편하게 적용할 수 있는 장점이 있는 반면에 수로 및 구곡에서의 침식을 모의할 수 없고, 퇴적에 대한 고려가 배제되어 있기 때문에, 유역의 침식량이나 구곡침식, 수로내 침식 등의 산정이 곤란하며, 사면침

식이 유역 전체 침식량에 미치는 영향을 산정할 때 많은 주의가 필요하다(행정자치부, 1998). 따라서 유역단위의 적용시에는 유출지점에 따라서 유사전달율의 개념을 도입하여 발생으로부터 하천에 이르기까지의 과정을 모의할 때 퇴적에 의한 영향을 간접적으로 고려하기도 한다.

그리고, 국내에서 수행된 대부분의 연구들은 USLE나 RUSLE를 기반으로 수행되었기 때문에 장기간에 걸친 유역내 강우 특성에 의한 연평균 토양침식량을 산정하는데 활용되고 있으나, 유사 발생과 직접적인 관련이 있는 유출사상에 의한 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다. 이에 대한 보완으로서, Williams and Berndt (1972)는 MUSLE를 개발하여 유출에 의한 유사 발생의 특성을 모의할 수 있도록 하였으나, MUSLE를 이용한 국내 적용의 대부분은 단기 강우사상에 의한 유사량의 추정 정도에 그치고 있어 장기적인 관점에서의 유역내 유출과 유사의 상호 영향 관계 및 유사 발생의 시공간적인 특성 해석에 관한 연구는 미흡한 상황이다.

또한, 국내에서 현재까지 수집되고 있는 유사 및 침식량 관련 관측 자료는 특정 시험유역 및 시험하천에 대한 단기간의 강우사상에 대한 것이 대부분이어서 유역 단위의 장기간에 걸친 자료는 많이 부족한 현실이며, 환경부에서 관측·관리하고 있는 자료들의 대부분도 월 1~4회의 갈수기 및 평수기를 중심으로 한 자료로서 유사량이 아닌 부유물질(SS)을 대상으로 하고 있어 실제 유역에서 발생되어 하천으로 유입되는 유사량에 대한 직접적인 관측자료가 충분하지 않고, 유역단위의 장기간에 걸친 유사량의 변화 경향 등을 파악하기에는 많은 한계를 지니고 있다.

최근 SWAT이나 HSPF 등과 같은 유역 모델링 기법들의 활용도가 높아지고 있지만, 실제 발생에서 하천으로의 배출에 이르는 과정에 대한 모의 방법이 상당수

경험적이고 통계적인 매개변수들을 통해 이루어지고 있음에도 관련 자료의 부족으로 각 매개변수의 추정이나 검증에 대한 충분한 연구가 부족하기 때문에, 부득이 외국에서 제시하는 값을 쓰는 경우가 많고, 따라서 국내 유역 특성을 충분히 반영하지 못하는 문제점이 있다. 아울러, 기존 USLE 공식들을 이용한 연구의 대부분이 각 인자값의 추정이나 소규모 경사지 및 필지에서 토양유실량 산정 등의 연구는 많이 수행되고 있으나, 소하천 유역이나 중규모 이상의 유역으로부터 발생되어 배출되는 유사량에 대한 연구는 여전히 미진한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 분포형 모형의 장점을 이용한 공간적인 유사량 해석 측면에서, MUSLE를 기반으로 유출에 따른 유사발생의 특성을 규명하고자 하며, 이를 위해 분포형 유출 및 비점오염 모델링을 위해 최근 국내외적으로 많이 적용되고 있는 SWAT 모형을 이용하였다. 모형을 통하여 대유역인 충주댐 상류지역에서의 유사량 자료를 공간적으로 확충함으로써, 유역 규모 및 토지이용에 따른 유사량 발생 특성을 검토하고, 유역 유사량 및 비유사량의 시공간적인 특성에 대해서도 살펴보고자 한다.

2. 유역 유사량 산정 방법

2.1 SWAT 모형의 개요

SWAT은 유역규모의 연속모의모형으로서, 일별 간격으로 물, 유사, 영양물질 부하량의 영향을 평가할 수 있도록 개발되었으며(Arnold et al., 1998), 물리적 기반하에 기후, 수문, 토양온도, 식생성장, 영양물질, 농약성분, 토지관리 등에 대한 모의기법을 모두 포함하고 있다.

SWAT에서 유역은 다수의 소유역으로 구분되고 이는 다시 균질한 토지이용, 관리, 토양특성을 갖는 HRU(Hydrologic Response Unit)로 세분된다. 각 HRU에서의 물수지는 눈, 토양층, 얇은 대수층, 깊은 대수층의 4가지 형태로 표현되며, 각 HRU로부터의 유출, 유사, 영양물질, 농약성분에 대한 부하량은 소유역 단위로 합산되고, 이는 다시 하도, 저류지, 저수지 등을 통한 추적 과정을 거쳐 유역 출구까지 이르게 되어 유역 총량으로 계산된다(Jha et al., 2004).

SWAT 모형의 국내 적용은 1990년 후반 이후 김지훈 등(1998), 권명준 등(2003), 김철겸 등(2003), 김남원 등(2004a, 2004b), 김남원과 원유승(2004a, 2004b), 김철겸과 김남원(2004), 유철상 등(2005), 허성구 등(2005), 김남원 등(2006), 김정곤 등(2006a, 2006b), 신현석과 장

두기(2006), 이길성 등(2006), 정은성 등(2006), 문종필과 김태철(2006) 등을 중심으로 국내 유역에 대한 적용성 평가와 함께 유출량 해석 및 수질 모의와 모형의 개선 등에 관한 연구가 진행되어 왔다.

이 중 김지훈 등(1998)과 권명준 등(2003)은 복하천 유역, 허성구 등(2005)은 도암댐 유역, 정은성 등(2006)은 안양천, 문종필과 김태철(2006)은 갑천을 대상으로 하는 소하천 유역에서의 유사 및 수질 모의에 대한 적용이었으며, 나머지 연구들은 주로 유출 해석을 대상으로 하여, 본 연구에서와 같이 대규모 유역에서의 유역 내 여러 관측지점들을 분석 대상으로 한 유사량 모의 및 해석에 관한 연구는 거의 전무하다.

최근 들어, 국내 여러 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용한 유역 유사 및 수질 모델링에 관련된 연구가 많이 진행되고 있지만, 현재까지 학술논문으로 게재된 연구 결과는 많지 않은 상황이다.

2.2 SWAT 모형에서의 유사량 산정

SWAT 모형에서는 Williams and Berndt(1972)가 제안한 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)를 이용하여 강우와 유출에 의한 침식을 모의하고 있으며, 이를 위해 아래 Eq. (1)과 같이 USLE의 강우인자 대신 유출인자를 사용하고 있다. USLE에서는 강우인자가 토립자 이탈에만 이용되는 에너지를 나타내고 있기 때문에 하천지점에서의 유사량을 산정하기 위해서 유사 전달율의 개념이 필요했지만, MUSLE에서는 유출인자가 유사 이탈과 운송에 이용되는 에너지를 모두 나타내고 있기 때문에 이러한 개념이 불필요하게 되었다. 또한 유출은 강우에너지 뿐만 아니라 선행수분조건 함수가 되기 때문에 SWAT에서는 MUSLE의 도입으로 인하여 유사량 예측을 개선하고 유사전달율에 대한 값이 필요없게 되었으며, 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능해지게 되었다.

SWAT에서는 HRU라는 개념을 이용하여 유역을 동일한 토양과 토지이용 특성을 갖는 작은 단위로 구분하고, 이를 기본으로 유출 및 유사와 수질 등을 모의하고 있다.

각 HRU별 소유역별 토양유실량은 다음 Eq. (1)과 같이 계산된다(Williams, 1995).

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (1)$$

여기서, sed 는 주어진 날의 유사 발생량(tons), Q_{surf} 는

지표유출량(mm/ha), q_{peak} 는 침투유출율(m^3/sec), $area_{hru}$ 는 HRU 면적(ha), K_{USLE} 는 토양침식성인자, C_{USLE} 는 피복 및 관리인자, P_{USLE} 는 토양보전인자, LS_{USLE} 는 지형인자, $CFRG$ 는 암석인자이다.

이 중에서 지표유출량 Q_{surf} 는 CN 방법에 의해 다음의 Eq. (2)와 같이 계산된다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2)$$

여기서, R_{day} 는 일 강우량(mm), S 는 저류 매개변수(mm)이다.

침투유출율 q_{peak} 는 호우의 침식능력을 나타내며, SWAT에서는 수정합리식을 이용하여 다음의 Eq. (3)과 같이 계산한다.

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (3)$$

여기서, t_{conc} 는 소유역 도달시간(hr), $Area$ 는 소유역 면적(km^2), α_{tc} 는 도달시간 동안 발생하는 일강우의 비율로서, 해당월의 극최대 30분 강우량 값과 난수발생기법 등을 통해 산정된다.

이와 같이 계산된 유실량은 눈 피복과 지표유출에서의 지체효과, 측방 및 지하수 흐름에서의 유사 유입 등을 고려하여 하도로 유입하게 된다.

이때 하도에서는 다음의 Eq. (4)와 같이 침투유속의 합수로서 하도내에서 운송될 수 있는 최대 유사량을 계산한다.

$$conc_{sed, ch, mx} = c_{sp} \cdot v_{ch, pk}^{spxp} \quad (4)$$

여기서, $conc_{sed, ch, mx}$ 는 물에 의해 운송될 수 있는 최대 유사 농도(ton/m^3 or kg/L), c_{sp} 는 사용자에게 정의되는 계수, $v_{ch, pk}$ 는 침투유속(m/s), $spxp$ 는 사용자에게 정의되는 지수이다.

위 식으로 계산되는 최대 유사 농도는 각 모의 간격 시점에서의 하도내 유사 농도 $conc_{sed, ch, i}$ 와 비교되어, 만약 $conc_{sed, ch, i} > conc_{sed, ch, mx}$ 이면 하도 구간에서 퇴적이 지배적으로 발생하며, 그렇지 않은 경우는 침식이 발생하는 것으로 모의되어 하도내로 유사량이 재혼입된다.

퇴적과 침식량이 계산된 후, 하도에서의 최종 유사량

은 다음과 같이 결정된다.

$$sed_{ch} = sed_{ch, i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (5)$$

여기서, sed_{ch} 는 하도에서의 부유사량(tons), $sed_{ch, i}$ 는 하도에서의 시점에서 부유사량(tons), sed_{dep} 는 하도 구간에서의 퇴적 유사량(tons), sed_{deg} 는 하도 구간에서 재혼입되는 유사량(tons)이다.

따라서, 하도 밖으로 운송되는 유사량은 다음과 같이 계산된다.

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (6)$$

여기서, sed_{out} 는 하도 밖으로 운송되는 유사량(tons), sed_{ch} 는 하도에서의 부유사량(tons), V_{out} 는 시간 간격 동안의 유출 체적(m^3), V_{ch} 는 하도 구간에서의 수량(m^3)이다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역 및 입력자료 구축

분석대상지역인 충주댐 상류유역의 면적은 약 6,648 km^2 이고 유로연장은 375 km에 달하며, 3개도(충청북도, 강원도, 경상북도) 13개 시·군으로 구성되어, 전국토의 약 6.7%를 차지하고 있다. 충주호는 만수시 수표면적 86 km^2 로서 충주시, 제천시, 단양군과 인접하고 있으며, 풍수기에는 발전 및 여수로 방류 등에 의해 유입수 체류시간이 짧고, 갈수기에는 유입량의 감소로 인하여 유입수의 체류시간이 길어진다. 또한 2003년 수질조사 자료에 의한 평가 결과 중영양에서 부영양으로 수질이 변화하고 있고, 저수지 유입 유기물 퇴적량이 증가하고 있기 때문에 부영영화 속도가 빨라지는 것으로 나타났다(한국수자원공사, 2003).

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용한 수질 모델링 기법의 적용을 위해 Fig. 1(a)과 같이 환경부에서 관찰하고 있는 수질 측정망을 기준으로 14개의 소유역으로 구분하였다.

Table 1은 각 소유역별 면적 및 유로장과 경사, 토지 이용 현황을 나타낸 것으로 토지이용 비율은 모형으로부터 HRU 재분류를 통해 얻어진 값이며, 나머지 값들도 모형으로부터 구축되어 얻어진 값으로서 실제와는 다소 차이가 있을 수 있다.

SWAT 모형 구축을 위해 Fig. 1(a)와 같이 환경부의

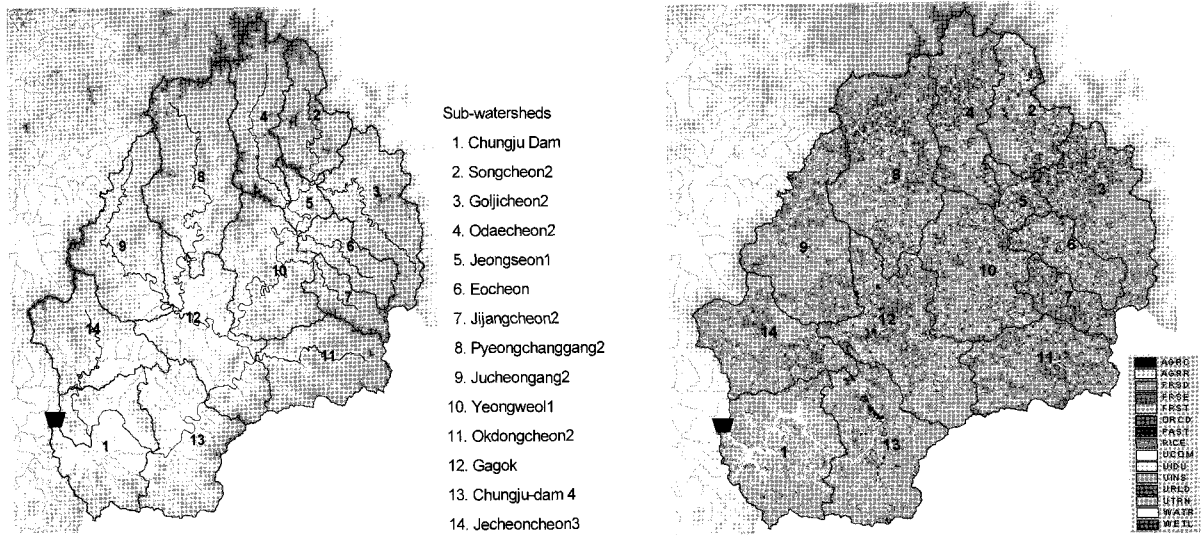


Fig. 1. Sub-watersheds, land use and soil map of the Chungju Dam watershed

Table 1. Area, stream length, slope and land use status of each subwatershed

Sub-watershed	Outlet	Area (km ²)	Stream length (km)	Slope (m/m)	% of land use			
					Forest	Upland	Paddy	Water
1	Chungju Dam	597.7	47.9	0.296	80	10	-	10
2	Songcheon2	349.8	43.9	0.319	83	17	-	-
3	Goljicheon2	535.9	73.9	0.306	92	8	-	-
4	Odaecheon2	450.8	48.7	0.343	94	6	-	-
5	Jeongseon1	115.7	16.1	0.377	89	11	-	-
6	Eocheon	230.0	41.0	0.360	88	12	-	-
7	Jijangcheon2	179.5	27.6	0.367	92	8	-	-
8	Pyeongchanggang2	778.3	82.4	0.307	91	9	-	-
9	Jucheongang2	598.6	78.7	0.274	85	9	6	-
10	Yeongweol1	565.6	77.5	0.383	89	11	-	-
11	Okdongcheon2	483.7	48.8	0.376	95	5	-	-
12	Gagok	670.5	38.1	0.301	89	11	-	-
13	Chungju-dam4	597.5	32.8	0.322	88	8	4	-
14	Jecheoncheon3	482.0	41.6	0.247	82	7	11	-

DEM(100m×100m)과 1/50,000 토지피복도(Fig. 1(b)), 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도(Fig. 1(c)) 등의 GIS 자료를 구축하였으며, 하천생성을 위한 최소배수면적(임계면적)은 5,000 ha로 설정하고, HRU 생성을 위한 토지이용과 토양특성 임계면적 비율은 3%로 설정하여 유역내 14개 소유역에 대해 총 406개의 HRU를 생성하였다. 증발산량 산정을 위해 필요한 일 기상자료는 대관령, 동해, 원주, 영월, 충주, 태백, 제천, 춘양, 영주 등 9개의 기상청 관할 기상관측소와 건교부 기상관측지점을 이용하여 Thiessen망을 구축하고, 각 소유역별 면적 평균한 기상자료를 활용하였으며, 태양복사량 관측 자료가 없거나 결측된 일부 관측소에 대해서는 Angstrom 공식(Allen et al., 1998)을 활용하여 일조시간으로부터 환산하여 적용하였다.

유사량 산정에 필요한 각 인자들의 값 중에서 토양 관련인자는 농업과학기술원에서 구축한 토양 DB의 자료를 활용하였는데(http://asis.rda.go.kr/), 토양침식성인자 K_{USLE} 는 입도분포함량으로부터 Williams(1995)가 제안한 방법을 적용하여 산정하고, 암석인자 $CFRG$ 는 표토의 석력함량을 적용하였다. 피복 및 관리인자 C_{USLE} 는 SWAT에 구축되어 있는 식생 DB를 활용하여 식생별 최소값과 토양표면의 잔류물의 양으로부터 SWAT 모형을 통해 일별로 산정하였다. 토양보전인자 P_{USLE} 는 각 식생별 관리체계를 고려하여 산림에 대해서는 1.0으로 설정하고, 논과 밭에 대해서는 농촌진흥청 농업과학기술원(2005)의 연구결과에 따라 각각 0.08(계단전)과 0.54(등고선재배)의 값을 적용하였다. 지형인자 LS_{USLE} 는 입력된 지형자료의 DEM 분석 결과에 따라 모형으로부터 자동으로 산정되어 적용된다.

모형 적용을 위한 자료 기간은 1988~2001년이며, 모

형내 변수 및 모의 결과의 안정화를 위해 분석 기간은 1991년부터 하였으며, 이 중에서 1991~1995년은 보정 기간으로 설정하고 이후 1996~2001년은 검증 기간으로 설정하였다.

3.2 모형 보정 및 검증

일반적으로 SWAT과 같은 분포형 모형은 유역의 물리적 특성으로부터 매개변수를 추정하기 때문에 모형의 보정이 필요하지 않다. 그러나 유역에서 실측 또는 관측자료로부터 얻을 수 있는 매개변수의 값이 제한적이거나, 구득 가능한 자료가 없는 경우에는 유역 출구점에서 조사된 하천유량자료를 이용하여 모형의 매개변수 보정을 실시한다. 특히 유사관련 매개변수의 경우 다소 경험적이고 불확실도가 매우 크기 때문에 매개변수 보정이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 시행착오법에 의해 단계별 매개변수 변화에 의한 영향을 검토하고, 분할표본절차(split sample procedure) (McCuen, 2003)를 이용하여 보정을 수행하였다.

먼저 전체 물수지 및 수문곡선 형태, 그리고 각 통계치(상관계수, 평균절대오차, 상대평균절대오차, 모형효율)를 검토하여 유출과 관련된 주요 매개변수들을 보정하고, 유출에 대한 보정이 완료된 후에 유사관련 매개변수 보정을 수행하였다.

Fig. 2는 유역 최종 출구점인 충주댐 지점에서의 관측 일유입량 자료와 모형에 의한 모의 유출량을 이용하여 보정한 결과로서, 보정을 통하여 갈수시의 모의값을 개선하고 전반적인 유출 모의곡선 형태를 관측값에 근접하도록 하였다. Fig. 3은 유역 최종 출구점인 충주댐 지점에서의 일 유출자료에 대해 관측치와 모의치를 일대일 그래프상에 나타낸 것이며, Fig. 4는 월 유출자료

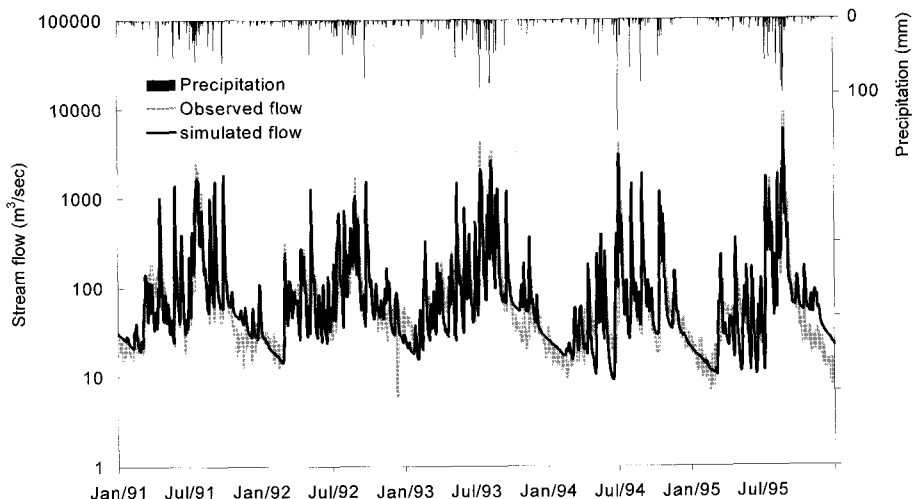


Fig. 2. Calibration result for the stream flows at the main outlet

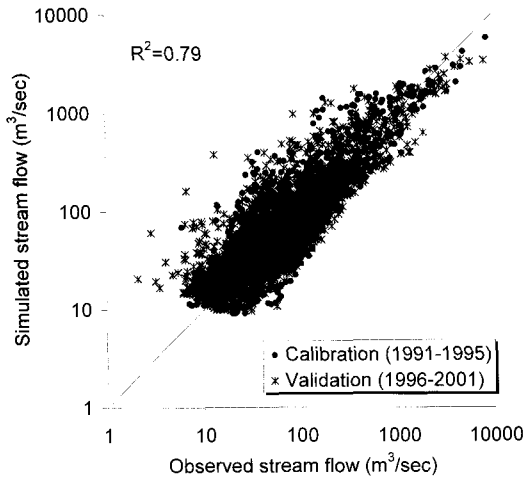


Fig. 3. Comparison of observed and simulated daily stream flows

에 대해 나타낸 것이다. 일 유출 보정 및 검증 결과에 대한 모형 효율은 각각 0.81과 0.77로서 매우 양호한 결과를 보였으며, 월유출에 대한 모형 효율과 상관계수는 각각 0.91과 0.97로서 매우 높은 값을 보여, 장기적인 유출 모의에 있어 매우 안정적인 결과를 제공할 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

유출과 달리 유사 이동은 많은 복잡한 과정을 수반하고, 대부분 경험적인 해석에 의한 수식들에 의해 모의되고 있으며, 관측지에서 포함될 수 있는 오차가 매우 크기 때문에 정량적인 해석에 많은 어려움이 있으며, 이에 따른 관련 매개변수 보정도 쉽지 않다. 또한, 주로 월 1~4회 정도의 간격으로 비연속적인 관측을 하기 때문에 보정을 위한 자료 또한 충분하지 못하며, 관측치의 대부분이 농도 단위이고 이에 따른 관측 유량이 없는 경우가 대부분이라 부득이 모의유량을 활용하여 관측부하량으로 가정하였으며, 모형으로부터의 모의부하량과의 비교를 통하여 보정 및 검증을 수행하였다.

Fig. 5(a)~(d)는 각 지점별 유사량 비교 결과를 나타

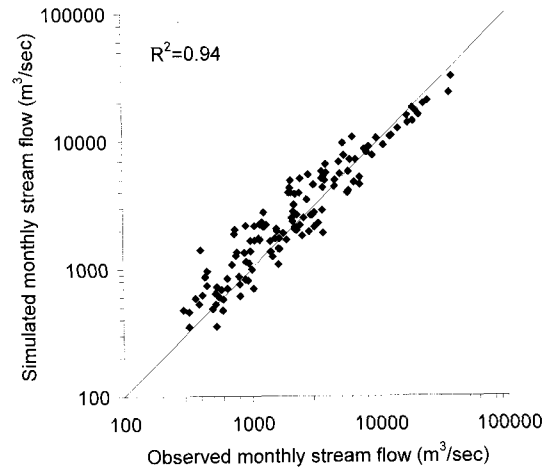
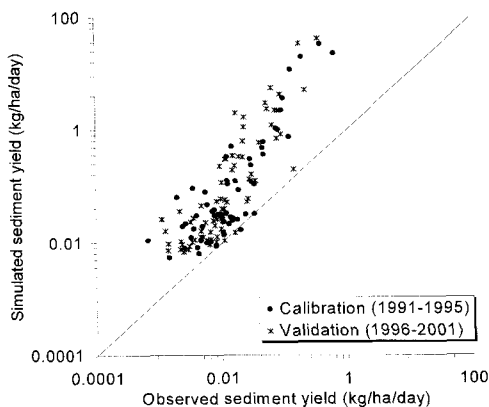


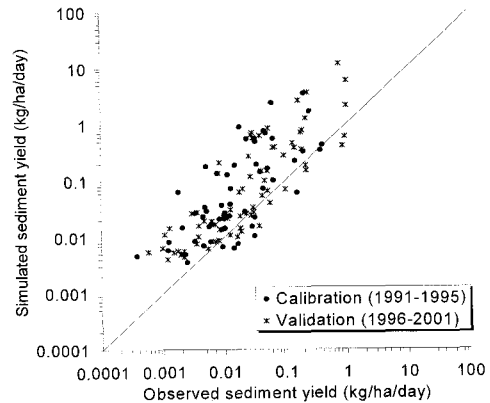
Fig. 4. Comparison of monthly stream flows

낸 것으로서, 하류인 충주댐에서 보다는 중류인 가곡과 영월1, 상류인 골지천2에서 결과가 좋게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 충주댐 지점과 같은 하류인 경우 실제 관측 위치가 하천수라기보다는 호소수에 가깝기 때문에 모형상에서 나타내고 있는 하천수와는 차이가 있을 수 있으며, 그에 따라 모의값이 다소 높은 것으로 판단된다. 반면에 상류측 지점들의 경우 실제 관측 상황과 모형에서 고려하고 있는 하천의 상황이 유사하기 때문에 보다 더 좋은 모의 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 6은 상하류 지점들을 대상으로 검증기간인 1996~2001년 사이의 관측 부하량과 모의 부하량의 변화를 비교한 것으로서, 환경부 월 1~4회 측정값들의 대부분이 비강우시 위주로 수집되고 있기 때문에 관측부하량의 대부분이 낮은 값을 보이고 있으며, 강우시에 모의되는 높은 부하량과의 비교는 곤란하였다. 지점별로는 관측과 모의값 모두 상류인 골지천2 지점에서 보다는 하류인 충주댐 지점에서 상대적으로 높은 부하량을 보이고 있으며, 모의값과 관측값이 일대일로 일치하지는

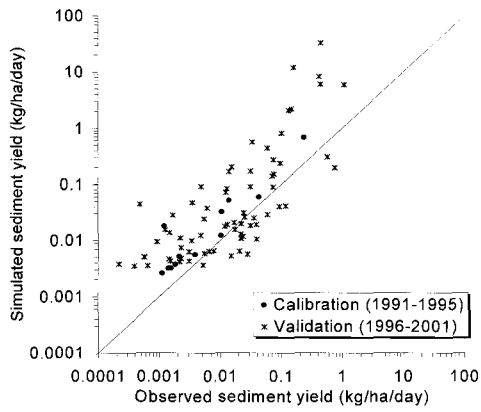


(a) Chungju Dam

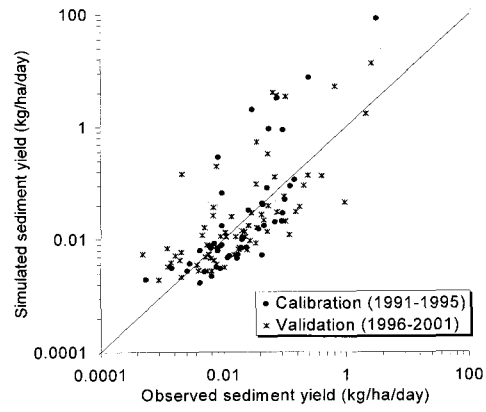


(b) Gagok

Fig. 5. Comparison of sediment yields at each sub-watershed

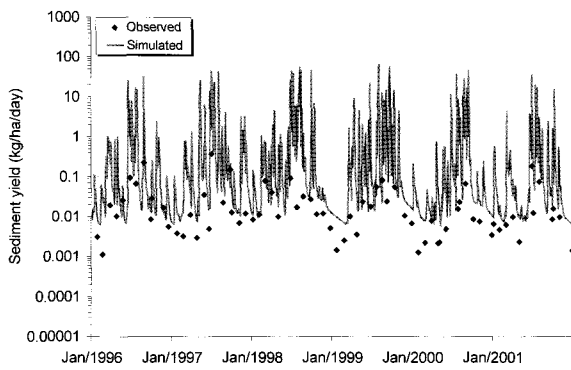


(c) Yeongweol1

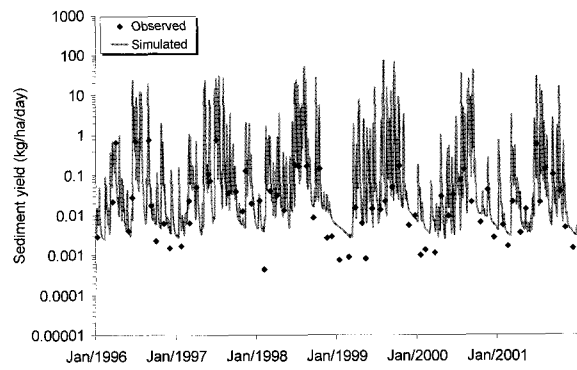


(d) Goljicheon2

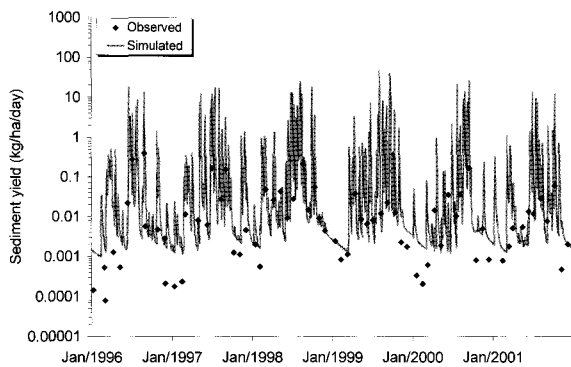
Fig. 5. Comparison of sediment yields at each sub-watershed(continued)



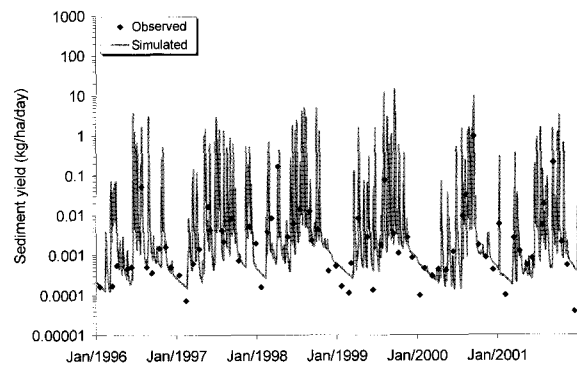
(a) Chungju Dam



(b) Gagok



(c) Yeongweol1



(d) Goljicheon2

Fig. 6. Observed and simulated daily sediment yields

않지만, 그 변화 경향은 비슷한 것으로 나타났다.

4. 유역 유사 발생 특성

SWAT 모형은 준분포형 모형으로서 모형 구동을 위해 많은 입력자료와 매개변수를 요구하고 있기 때문에 모형의 구축에 많은 시간이 걸리고, 유역의 물리적 특성을 제대로 구축하지 못할 경우 오히려 집중형 모형보다 모의 결과의 신뢰성이 떨어질 수 있기 때문에, 초보자 또는 비전문가가 적용하기에 쉽지 않다. 그러나 이

러한 분포형 모형은 유역내 물리적 특성의 변화, 즉 토지이용 및 식생의 변화, 여러 토지관리방법의 변화 등에 따라 유역의 수문현상을 능동적으로 모의할 수 있으며, 유역 전반에 걸친 물의 이동과 유사 및 오염물질의 시공간적인 거동을 해석할 수 있는 장점이 있기 때문에 과거 집중형 모형에서 최근에는 분포형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서, 본 연구에서도 이러한 장점을 이용하여 유역 규모 및 토지이용에 따른 유역 유사량 발생 특성, 그리

고 하도구간별, 월별 유사량을 검토함으로써 대상유역에 대한 유사량의 시공간적인 분포 특성을 살펴보았다.

4.1 유역 규모에 따른 유사량 특성

유역 규모, 즉 배수면적에 따른 유사량을 검토하기 위해, 대상유역인 충주댐 유역의 각 하도구간별 모의된 유사량을 이용하여 상류에서부터 배수면적 크기별로 비유사량(유사량/배수면적)의 특성을 검토하였다. 아래의 Fig. 7에서 그래프 안의 숫자는 소유역 하도구간 번호를 나타내는 것으로 일부 상류 소유역의 자료를 제외할 경우 대략 0.5~0.6 ton/ha/yr 사이의 값을 보이고 있으며, 배수면적 1,000 km² 이상인 경우에는 약 0.51 ton/ha/yr 정도의 비교적 일정한 경향을 나타내었다. 이 값은 대상유역인 충주댐 유역에서의 유사량을 추정할 수 있는 특성치가 될 수 있으며, 좀 더 유역을 세분화하여 보다 많은 배수면적별 비유사량 자료를 비교하고, 또한 여러 다른 유역에 대해서도 이와 같은 관계를 파악해 나간다면, 각 유역별 비유사량 특성을 평가하는데 좋은 지표가 될 수 있을 것으로 생각된다.

4.2 토지이용에 따른 유사 발생 특성

Fig. 8과 Table 2는 모형에 의해 1991~2001년의 기간 동안 각 토지이용별 단위면적당 연평균 유사 발생량을 계산한 결과로서, 김상민 등(2003)의 연구 결과를 참

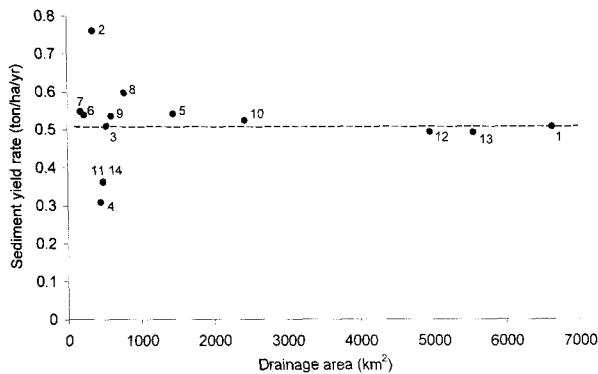


Fig. 7. Sediment yield rates with drainage areas

고하여 기존의 다른 연구자들의 결과와 비교한 것이다. 이은정 등(2006)은 새만금 유역을 대상으로, 김상민 등(2003)은 아산만 유역을 대상으로, 김주훈 등(2003)은 무심천 유역을 대상으로, 현병근 등(2002)은 전국 밭 토양을 대상으로, 김상욱(1995)은 경안천 유역을 대상으로, 구분경(1988)은 의암호 유역을 대상으로 각 토지이용별 발생량을 산정한 바 있다.

각 지역별 지형 및 토양, 식생 특성, 그리고 기후적인 특성 등으로 인하여 연구자별로 서로 다른 값을 나타내긴 하지만 대체적인 경향은 비슷한 것으로 나타났으며, 토지이용별로는 밭에서의 발생량이 가장 크고, 다음은 논과 산림에서의 발생량이 작은 것으로 나타났다. 즉, 밭에서의 토양 침식이 가장 많이 발생하고 있으며, 산림지나 논에서의 침식은 상대적으로 심각하지 않음을 간접적으로 파악할 수 있다. 이는 토지이용별 침식영향을 평가하는 개략적인 기준을 제시해 줄 수 있으며, 향후 다양한 토지관리기법 및 침식조절기법 등에 따른 영향을 평가함으로써, 유역의 유사량 및 비점오염 모의를 통한 오염총량관리에 활용될 수 있을 것이다.

4.3 하도구간별, 월별 유사량 특성

충주댐 상류로부터의 유입 유사량의 발생 원인 지역을 파악하기 위하여 1991~2001년에 대해 모형으로부터 추정된 각 하도구간별 유사량을 비교해 보았다. 여기서

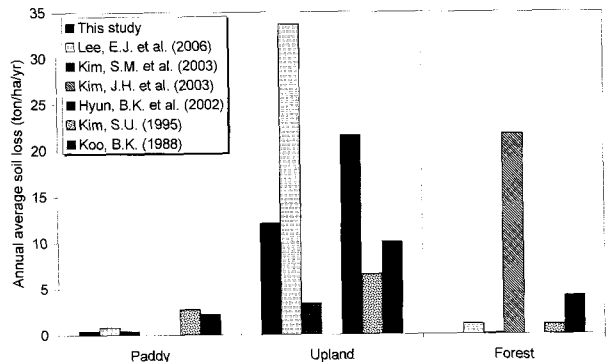


Fig. 8. Annual average soil loss according to land use

Table 2. Annual average soil loss according to land use

Research	Annual average soil loss (ton/ha/yr)			Watershed
	Paddy	Upland	Forest	
This study	0.44	12.13	0.04~0.06	Chungju Dam
Lee E.J. et al.(2006)	0.8	33.7	1.1	Saemangeum
Kim, S.M. et al.(2003)*	0.14~0.72	0.50~6.29	0.02~0.29	Asanman
Kim, J.H. et al.(2003)	-	-	21.694	Musimcheon
Hyun, B.K. et al.(2002)	-	21.6	-	Uplands
Kim, S.U.(1995)*	0.5~5.0	3.0~10.0	0.1~2.0	Gyeongancheon
Koo, B.K.(1988)*	2.28	10.06	4.22	Euamho

* Source : Kim, S.M. et al.(2003)

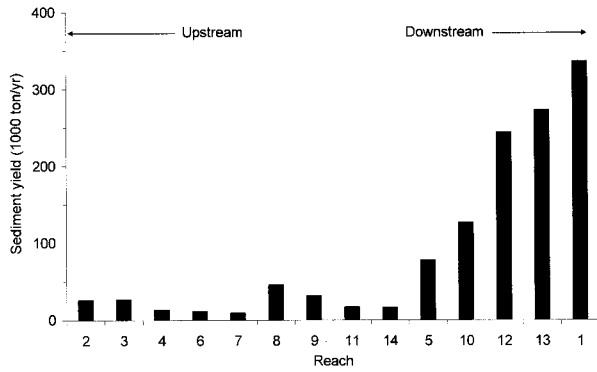


Fig. 9. Average annual sediment yield at each reach

의 하도구간은 해당 하도구간의 상류유역을 모두 포함하는 것으로서, 충주댐이 위치한 1번이 대상유역 전체에 대한 결과를 나타내고 있음을 의미한다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 상류지역인 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 14번 소유역에서의 유사량이 작게 나타나고 있으며, 이 중에서 8번과 9번 소유역에서의 유사량이 상대적으로 많은 것으로 나타나는데 이는 유역면적이 다른 상류 소유역들보다 크고 앞서 검토한 바와 같이 유실량이 많이 발생하는 밭의 비율이 높기 때문인 것으로 판단된다. 하류측에서는 상류로부터의 영향을 받아 5번→10번→12번→13번→1번 하도에서의 유사량이 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 1991~2001년 동안 유역 최종 출구점인 충주댐 지점에서의 유사량의 월별 분포를 나타낸 것으로, 월별 강우 분포에 따라 유사량도 홍수기인 7~8월에 집중되고 있으며, 댐으로 유입되는 연 유사량의 약 62%가 이 시기에 발생하며 그 양은 약 208 ton/yr 정도로 추정되었다.

5. 요약 및 결론

유역에서의 물에 의한 토양 침식 및 유사량은 침식과 퇴적 등의 복잡하고 광범위한 과정을 거쳐 발생하기 때문에 이에 대한 정량적인 해석에 많은 어려움이 있다. 특히 SWAT에서의 유사량 해석 알고리즘은 경험적인 매개변수를 많이 포함하고 있고, 현장에서 관측되는 유사량 자료 또한 불확실성이 높기 때문에, 현재로서는 SWAT 모형의 적용을 통해 정량적인 예측보다는 정성적인 예측에 초점을 맞출 수밖에 없으며, 현재 활용되고 있는 대부분의 토양 침식 및 유사량 모델링 기법들 역시 비슷한 한계를 지니고 있다.

본 연구에서는 분포형 모델링 기법인 SWAT 모형을 이용하여 유역내의 다양한 물리적 특성을 고려한 공간적인 유사량 해석을 통하여 충주댐 유역에 대한 유사

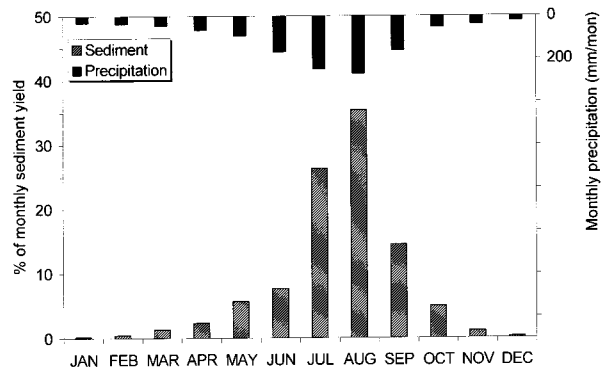


Fig. 10. Monthly average sediment yield

발생 특성을 살펴보았다.

먼저, SWAT 모형의 특성 및 모형내 유사량 모의 방법에 대해서 검토하였으며, 대상유역에 대한 보정 및 검증을 통해 유역 유사량 해석을 위한 모델링 시스템을 구축하였다.

구축된 시스템을 통하여 유역 규모 및 토지이용에 따른 비유사량 및 침식량을 산정하여 검토함으로써, 유역면적별 비유사량의 일정한 관계를 도출할 수 있었으며, 토지이용별로 침식영향을 판단할 수 있는 개략적인 평가를 할 수 있었다. 또한, 하도구간별 유사량을 비교 검토함으로써, 충주댐 상류의 소유역별 유사 발생 정도를 파악하고, 월별 분포를 파악함으로써 시공간적인 유사 발생 특성을 분석할 수 있었다.

이상의 연구 결과는 향후 대상유역을 확장하여 여러 유역에 대해 유사량 해석에 대한 연구 결과를 확보하고, 각 유역별 유사량 발생의 특징 및 토지관리기법이나 침식조절기법 등에 대한 영향을 평가함으로써, 유역의 유사량 및 비점오염 모의를 통한 오염총량관리에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 3단계 연구비(과제번호 2-2-3) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 과학기술부 (2007). 21세기 프론티어연구개발사업 : 수자원의 지속적 확보기술개발사업, 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 한국건설기술연구원.
- 구본경 (1988). 유역내 토지이용상태가 수질에 미치는 영향에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교.
- 권명준, 권순국, 홍성구 (2003). "농촌유역 하천의 수질

- 예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제45권, 제2호, pp. 116-125.
- 김남원, 원유승 (2004a). “SWAT-SWMM 결합모형의 개발 : (I) 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제7호, pp. 589-598.
- 김남원, 원유승 (2004b). “SWAT-SWMM 결합모형의 개발 : (II) 모형의 특징 및 평가.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제7호, pp. 599-612.
- 김남원, 이병주, 이정은 (2006). “SWAT을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 833-844.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 : (I) 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 : (II) 모형의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 509-515.
- 김상민, 박승우, 강문성 (2003). “GIS와 USLE를 이용한 아산만 유입 유사량 추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 1059-1068.
- 김상욱 (1995). 토지이용변화에 따른 경안천 유역 토양 유실에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교.
- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006a). “갑천 유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 및 다 지점 검·보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 867-880.
- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006b). “SWAT 모델을 이용한 갑천유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 881-890.
- 김주훈, 김경탁, 연구방 (2003). “GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석.” **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제6권, 제2호, pp. 22-32.
- 김지훈, 홍성구, 권순국 (1998). “지리정보시스템을 이용한 SWAT 모형의 적용.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제40권, 제4호, pp. 67-76.
- 김철겸, 김남원 (2004). “산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 737-744.
- 김철겸, 김현준, 장철희, 김남원 (2003). “Runoff estimation from two mid-size watersheds using SWAT model.” **Water Engineering Research**, 한국수자원학회, 제4권, 제4호, pp. 193-202.
- 농촌진흥청 농업과학기술원 (2005). 비점오염원 관리와 국토 보전을 위한 전국 토양침식 위험성 평가.
- 문종필, 김태철 (2006). “갑천유역의 영양염류 유달부하량 산정을 위한 SWAT2000 모형의 적용성 평가.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제48권, 제6호, pp. 89-100.
- 신현석, 강두기 (2006). “SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 227-240.
- 유철상, 김경준, 김남원 (2005). “SWAT 모형의 적용을 위한 적정 강우계밀도의 추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 415-425.
- 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006). “SWAT 모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지유량 산정 방안.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 703-716.
- 이은정, 조영경, 박승우, 김학관 (2006). “작부체계를 고려한 새만금유역의 토양유실량 추정.” **한국농공학회 논문집**, 한국농공학회, 제48권, 제6호, pp. 101-112.
- 정은성, 이길성, 신문주 (2006). “SWAT 모형과 EMC 산정결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질 특성.” **수질보전**, 한국물환경학회, 제22권, 제4호, 648-657.
- 한국수자원공사 (2003). 충주댐 관리연보.
- 행정자치부 (1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구 (I), NIDP-97-04 연구보고서, 국립방재연구소.
- 허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재 (2005). “고령지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가.” **농촌계획**, 한국농촌계획학회, 제11권, 제4호, pp. 67-74.
- 현병근, 김무성, 엄기철, 강기경, 윤홍배, 서명철, 성기석 (2002). “USLE모형과 대체법을 이용한 밭농사의 토양유실 저감기능 계량화 평가.” **한토비지**, 한국토양비료학회, 제35권, 제6호, pp. 361-371.
- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)*. Food and Agric. Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Arnold, J.G., Sirinivasan R., Muttiah R.S., and Williams J.R. (1998). “Large area hydrologic

- modeling and assessment, Part I: Model development." *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Jha M., Gassman P.W., Secchi S., Gu R., and Arnold J. (2004). "Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions." *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, Vol. 40, No. 3, pp. 811~825.
- McCuen R.H. (2003). *Modeling hydrologic change: statistical methods*. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers.
- Williams, J.R. (1995). "Chapter 25: The EPIC model, pp. 909-1000" in V. P. S Singh (ed.) *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications.
- Williams, J.R., and Berndt H.D. (1972). "Sediment yield computed with universal equation." *Journal of the Hydraulics Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 98, pp. 2087-2098.

(논문번호:07-88/접수:2007.09.03/심사완료:2007.10.24)