

## SWAT 모델을 이용한 임하·안동 유역의 부유사량 발생량 추정

김정곤<sup>†</sup> · 손경호 · 노준우 · 이상욱

한국수자원공사 수자원연구원

(2008년 9월 22일 접수, 2008년 12월 8일 채택)

### Estimation of Suspended Sediment Load in Imha-Andong Watershed using SWAT Model

Jeongkon Kim<sup>†</sup> · Kyongho Son · Joonwoo Noh · Sanguk Lee

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

**ABSTRACT :** For efficient turbid water management a SWAT model was established for the Imha-Andong watershed where serious turbid water problems have frequently occurred. To evaluate soil loss combined with rainfall runoff process, the analysis focused on comparing the daily runoff discharge and concentration of suspended sediment (SS) using measured data sets. The results of annual SS load analysis for each sub-basin using the calibrated model showed that in the entire target watershed the soil loss ranged from 0.7 to 5.9 tons/ha in year 2005 and from 3.0 to 34.0 tons/ha in year 2003 when the typhoon 'Maemi' severely affected the area. In the future, it is suggest to increase model simulation accuracies supported by a long-term and extensive monitoring to enhance basin-wide suspended sediment estimation and management.

**Key Words :** Turbidity Management, SWAT, Suspended Sediment, Imha-Andong Watershed

**요약 :** 본 연구에서는 고탁수 문제가 자주 발생하는 임하·안동 유역을 대상으로 효율적인 탁수 관리를 위한 유출현황 및 토사 유실평가를 목적으로 SWAT 모델을 구축하였다. 홍수기에 측정된 유량과 부유사 농도를 이용하여 모형의 검·보정을 실시하였다. 검·보정된 SWAT 모형을 이용하여 소유역별 연간 부유사 부하량에 대한 공간 분석결과, 전체 유역 대상으로 2005년에 최저 0.7~5.9 tons/ha에서 태풍 매미에 의해 심한 영향을 받은 2003년에 최고 3.0~34.0 tons/ha의 부하량을 보였다. 향후 유역전체의 효율적인 유사량 추정 및 저감대책마련을 위해서는 장기간에 걸쳐 보다 정확하고 광범위한 모니터링과 이를 활용한 모델의 정도 향상이 수반되어야 할 것이다.

**주제어 :** 탁수관리, SWAT, 부유사, 임하-안동 유역

### 1. 서론

집중 호우로 인하여 발생한 고탁수는 저수지로 유입되어 전도현상을 거치며 전수층으로 확산, 수체 및 방류수의 탁도를 상승시킨다. 저수지내 탁질 물질중 콜로이드 성분은 침전이 어려워, 고탁수 장기화의 문제를 일으키고, 특히 콜로이드성 탁질 물질은 인 등을 포함, 다양한 오염원이 다량으로 유입되어 저수지 부영양화의 원인을 제공할 수도 있으며, 심수층의 산소고갈문제를 야기할 수 있다.<sup>1)</sup> 한편 고탁수 방류는 하류하천의 탁도를 증가시켜 직접적인 민원의 대상이 되고 저수지 방류수를 수원으로 하는 정수장의 정수 비용을 상승시키는 요인이 된다.<sup>2)</sup> 특히 임하유역의 경우 2002년 태풍 루사와 2003년 매미로 인하여 대표적인 탁수피해 대상유역으로 분류되었으며 이러한 현상은 최근 용담댐 및 소양강댐에서도 발생한 바 있다. 한편 임

하유역과 인접한 안동유역의 경우 과거에는 상대적으로 낮은 탁도를 보였으나 최근 2006년에 높은 탁도 발생으로 임하 유역과 마찬가지로 탁수연구 대상지역으로 선정되었다.

먼저 유역에서 발생하여 저수지로 유입되는 탁질 입자에 대한 저감대책을 수립하기 위해서는 유역차원의 탁수저감 대책이 수립되어야 한다. 이를 위해서 유사량 모니터링과 같은 현장조사를 통하여 장기적인 자료 분석이 이루어져야 하고 이와 더불어 집중형 수문모형, 회귀식에 근거한 수문모형, 그리고 분포형 혹은 준 분포형 수문모형 등 다양한 모형들을 이용한 과학적인 분석기법이 필요하다. 이러한 수문모형들은 유역차원의 저감대책 수립 및 평가에 유용하게 사용될 수 있고 이를 활용한 합리적인 예측이 가능하다.

공간적 집중형 모형의 예로 유사운송비(sediment delivery ratio, SDR)는 하나의 유역을 공간적으로 균질한 단위로 보기 때문에 토지이용도와 지형특징을 고려하지 못하는 한계점이 있다. 이에 반하여 Verstraeten and Poesen은<sup>3)</sup> 하천으로의 유사량의 추정에 있어서 유역 인자들(유역면적, 지

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: jkkim@kwat.or.kr  
Tel: 042-870-7470

Fax: 042-870-7489

형, 기후, 식생 분포)을 고려하는 회귀식을 개발하였는데, 이 역시 관계식을 개발된 지역에 국한해서 적용성이 높다는 한계점을 가진다.

최근에는 발생 유사량 뿐만 아니라 유사 농도 변화의 예측을 위하여 물리적 기반의 수문모형의 적용이 제안되고 있다. 이들 모형들은 지형 조건의 변화에 의해서 결정되는 지표수 방향(flow direction)을 통해서 하천과 연계한 유사 이동을 고려한다. 이는 비록 모형 입력 자료가 가지는 불확실성 및 오류로 인하여 어려움이 있음에도 불구하고 효과적인 탁수관리에 필수적인 강우 사상별, 최적관리기법(Best Management Practices, BMP) 평가 분석이 가능하다는 장점을 가진다. 유역단위의 유사이동을 모의할 수 있는

대표적인 분포형 모형으로는 WEPP모형,<sup>4)</sup> LISEM,<sup>5)</sup> EUROSEM<sup>6)</sup> 등이 있으며, 준분포형 모형으로는 SWAT<sup>7)</sup> 모형이 활용되고 있다. 분포형과 준분포형 모형의 차이점은 분포형은 유역을 격자(grid) 단위로 나누지만 준분포형은 균질한 유역 인자로 구분된 수문반응 단위도를 구성하여 이를 기반으로 모의를 수행한다. SWAT 모형은 동일한 토지이용도와 토양도의 조합으로 구성된 수문반응 단위도(Hydrologic Response Unit, HRU)을 중심으로 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation, Williams and Berndt, 1977) 기법을 통해 산정된 유사발생량을 하도추적과 병행하여 유사농도를 예측하고 총 질소 및 총 인과 같은 수질인자도 함께 모의할 수 있는 장점이 있다.

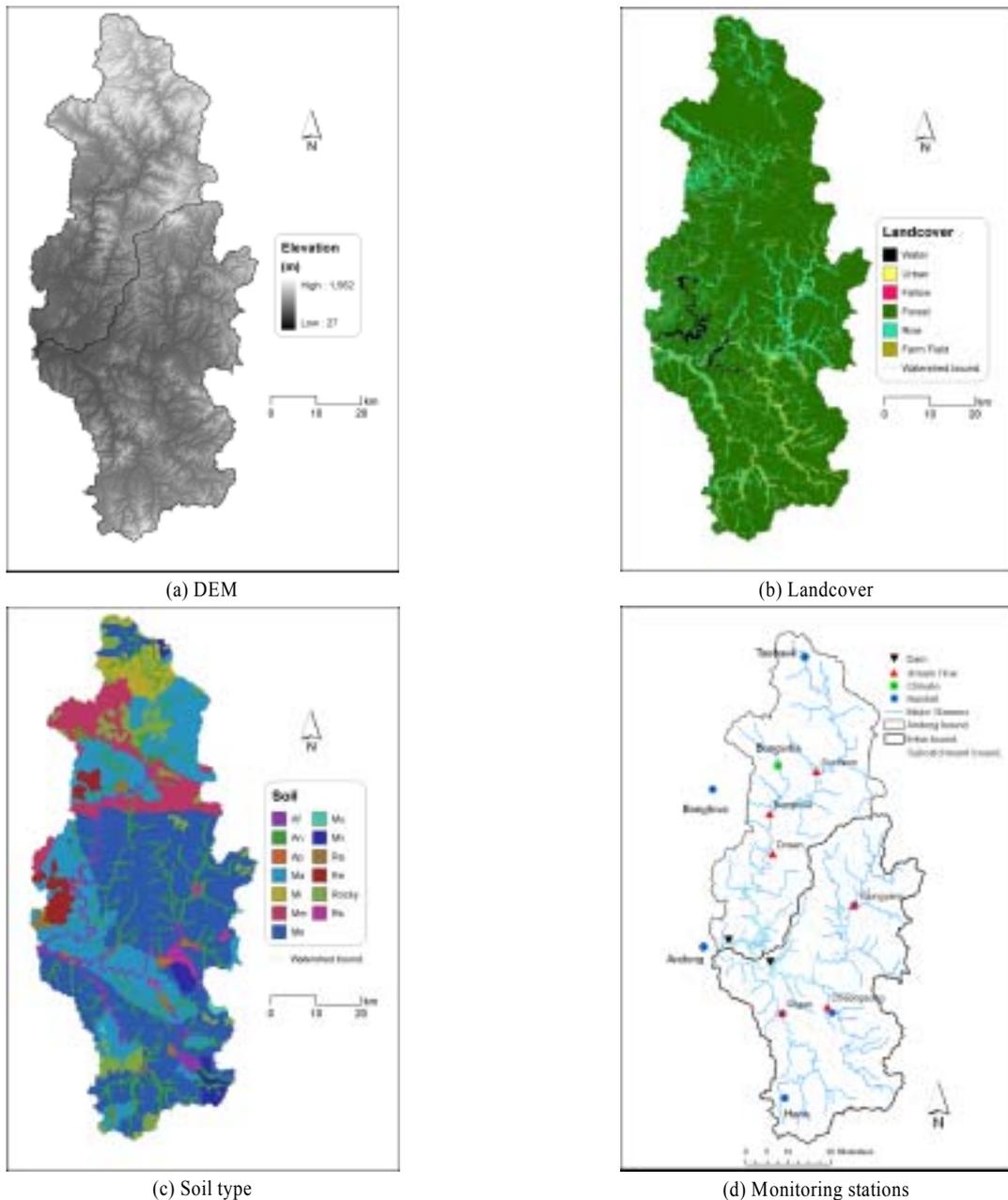


Fig. 1. Spatial distribution of geophysical characteristics in Imha-Andong watershed

현재 임하댐과 안동댐 유역에서는 다목적댐 탁수저감방안 수립사업의 일환으로 현장조사를 통한 유사발생 예상 지역에 부유사농도 측정 및 분석이 실시되었으며, 본 연구에서는 이를 활용하여 임하·안동 유역의 효율적 탁수관리 수립을 위하여 SWAT 모델을 활용하여 유역단위의 탁수 발생량을 예측하고 연간 부유사 발생량 특성을 소유별로 조사하여 향후 대상유역의 토지 이용관리 및 탁수 저감을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구 대상지 및 방법

### 2.1. 대상유역현황

모델의 적용을 위한 입력 자료는 지형자료, 지형자료와 연결된 속성자료, 그리고 기상 및 유역관리에 관련된 자료 등 3가지로 구분된다. 본 연구에서는 ArcView SWAT (AVSWAT version 2000)을 이용하여 Fig. 1에 제시된 것처럼 국가 수자원관리 종합정보 시스템(Water Management Information System, WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>) 으로부터 획득한 30 m 해상도의 DEM, 대분류 토지피복도(1:50,000), 그리고 개략토양도(1:250,000) 등의 공간정보 자료를 활용하였다. DEM은 모의 시간의 효율을 위해 60 m 해상도로 변환하여 사용하였다. 투영 좌표체계는 Transverse-Mercator 범(Bessel 타원체)을 사용하였으며, 매개변수는 한국측지계의 중부 원점값을 적용하였다.

대상유역인 임하·안동 유역은 안동시 상류, 낙동강 수계의 최상류에 위치한다. 남북 장방향으로 인접한 두 유역 유역의 면적은 각각 1,361 km<sup>2</sup>와 1,584 km<sup>2</sup>로 안동의 면적이 다소 크다. 평균경사는 각각 21.1, 21.9이며, 표준편차는 각각 10.4, 10.5로 두 유역의 특성이 서로 비슷한 것으로 나타났다. 수치 고도의 분포에서도 알 수 있듯 안

**Table 1.** Area Percent of Landcover in Imha and Andong watersheds (Year 2000)

Landuse	Imha		Andong	
	Area(km <sup>2</sup> )	Percentage(%)	Area(km <sup>2</sup> )	Percentage(%)
Urban	18.8	1.4	22.5	1.4
Rice	45.6	3.3	43.8	2.8
Field	159.0	11.6	145.2	9.1
Forest	1,091.3	79.8	1,307.8	82.2
Pasture	5.4	0.4	6.5	0.4
Wetland	6.2	0.5	9.8	0.6
Fallow	8.3	0.6	16.5	1.0
Water	32.9	2.4	38.6	2.4
Total	1,367.5	100.0	1,590.7	100.0

동유역의 경우 대부분 산악지대로 이루어져 있으며, 평균 고도(범위)는 각각 391.6 m(110~1,215 m), 549.0 m(90~1,568 m)를 가지고 있다. 전체적인 토지피복 분석결과는 Table 1에 제시하였으며 두 유역의 가장 넓은 토지피복 분포는 산림지대(임하 : 79.8%, 안동 : 82.2%)로 안동 유역이 유역면적 대비 약 2.5% 정도 임하유역보다 넓게 보유하고 있음을 알 수 있다. 토사유실에 가장 큰 영향을 주는 농경지 비율은 임하유역과 안동유역이 각각 14.9%, 11.9%로 임하유역이 약 3% 더 많이 분포되어 있으며, 시가지 지역 등 기타 토지피복은 유사한 비율을 나타내고 있다. Table 2에는 대상유역의 토양분포를 제시하였으며 임하유역의 경우 Ms(59.2%)가, 안동유역의 경우 Ma(33.5%)의 토양이 가장 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 안동유역에서, 특히 상류 유역에서 좀더 다양하고 고른 토양분포(Mm, Ms 등)를 보이고 있으며 두 유역의 하천 수계를 따라 Af, An, Ms 토양이 분포하고 있다.

**Table 2.** Soil types in Imha-Andong watersheds

Soil type	Soil property description			Area(%)		
	Soil group and phase	Soil type	Hydraulic Conductivity, Ksat(mm/h)	Andong	Imha	Total
Af	Alluvial Soils and Riverwash, Flood Plains	silty clay loam or sand loam	2.3	2.8	4.8	3.9
An	Complex of soils, Narrow Valleys	clay loam or sandy loam	1.2	6.9	12.0	9.6
Ap	Low-Humic Gley and Alluvial Soils, Alluvial Plains	silty clay loam or sand loam	2.3	0.0	0.3	0.2
Ma	Lithosols, Siliceous Crystalline Materials	silty loam or sandy loam	5.3	33.5	16.3	24.3
Mi	Lithosols, Calcareous Materials	silty loam or sandy loam	8.6	6.1	0.0	2.8
Mm	Lithosols, Micaceous and Hard Siliceous Materials	silty loam or sandy loam	7.1	18.1	0.9	9.0
Ms	Lithosols, Sedimentary Materials	silty loam or sandy loam	42.5	15.6	59.2	38.8
Mu	Brown Forest soils and Lithosols, Undifferentiated Materials	silty loam or sandy loam	4.3	0.0	0.7	0.4
Ra	Red-Yellow Podzolic Soil Siliceous Crystalline materials	sandy loam	1.8	1.6	1.3	1.4
Re	Lithosols, Severely Eroded, Siliceous Materials	silty loam or sandy loam	35.1	5.2	0.0	2.4
Rocky	Rock	Rock	0.01	8.2	4.6	6.3
Rs	Lithosols and Red-Yellow Podzolic Soils, Sedimentary Materials	silty loam or sandy loam	7.1	1.8	0.0	0.9

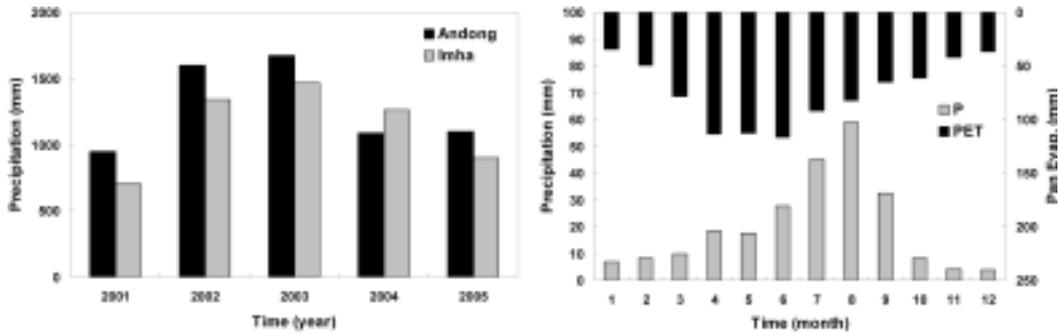


Fig. 2. Precipitation and pan evaporation in Imha-adong watershed from 2001 to 2005. (P = precipitation, PET = pan evaporation measured in Andong weather station)

Fig. 2에 2001년부터 2005년까지 임하·안동유역의 연별 강수량 추이와 월별 평균 강수량과 안동기상청에서 측정된 월별 평균 잠재증발량을 나타내었다. 강수량을 비교해 볼 때 2004년을 제외한 모든 기간 동안 안동유역이 임하유역보다 높은 값을 보이며, 2002년과 2003년에는 태풍 ‘루사’와 ‘매미’의 영향이 각각 두드러진다. 월별 강수량은 7, 8월에 잠재 증발량의 경우 4, 5, 6월에 최대값을 보인다.

2.2. SWAT 모델 개요

연속적 준 분포형 모델인 SWAT<sup>7)</sup> 모델은 토양의 물리적 특성, 토지 관리법과 기상조건에 따른 장기간 유역의 물순환 분석과 유사량, 영양염류, 농약 및 박테리아 등의 오염물질의 거동을 평가하기 위하여 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발되었다. 기본 모델 구성은 수문, 토양유실, 영양물질, 그리고 하도추적 등 4개의 submodel이 포함되어 있다. 모델의 입력 자료는 GIS와 공간 정보를 통해 자동으로 구성되는 유역의 일반적인 자료와 토양자료 및 작물 자료가 있고, 수동 입력을 통해 작성되는 기상 하도추적 농업관리 지하수 등의 자료, 그리고 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력 자료는 토양도와 토지 피복도를 중첩시켜 만든 수문반응 단위도(Hydrologic Response Unit, HRU)별 출력 자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과 값으로 구분된다.<sup>8)</sup> SWAT 모델의 물 수지 산정은 저류 방정식에 의해 차단, 지표면 유출, 측면 유출, 침투, 기저 유출, 수로 손실, 증발산 등을 고려하여 일 단위로 물 순환을 산정한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - P_{erc} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서  $SW_t$ 는 최종 토양수분량(mm H<sub>2</sub>O),  $SW_0$ 는 i일의 초기 토양수분량(mm H<sub>2</sub>O), t는 시간(일),  $R_{day}$ 는 i일의 강수량(mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{surf}$ 는 i의 지표유출량(mm H<sub>2</sub>O),  $E_a$ 는 i일의 증발산량(mm H<sub>2</sub>O),  $P_{erc}$ 는 i일의 토양층으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{gw}$ 는 i일의 회귀 수량(mm

H<sub>2</sub>O)이다.

SWAT 모델의 유사량 산정은 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)을 적용하고 있다. MUSLE는 Wischmeier<sup>9)</sup>가 제안한 USLE를 Williams<sup>10)</sup> 및 Williams and Berndt<sup>11)</sup>가 단일 강우에 의한 유역의 토사 유출량 산정을 위하여 수정 보완한 식으로 USLE 식에서 강우 에너지를 유효유량과 침투 유량의 함수인 유출로 대체하여 식 (2)와 같이 정의된다.

$$sed = 11.8(Q_{surf} \times q_p \times area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \quad (2)$$

여기서,  $Q_{surf}$ 와  $q_p$ (m<sup>3</sup>/s)는 각각 유출량과 침투 유량으로 USLE에서 강우에너지를 대체한 항목이다.  $area_{HRU}$ 는 해당 HRU의 면적(ha)이며  $K_{USLE}$ 는 토양침식계수로 다른 인자가 모두 동일한 토양에서 더 쉽게 침식이 발생하는 정도를 나타내므로 각 토양특성에 따라 다르고,  $LS_{USLE}$ 는 지형특성인자로 경사길이와 경사도를 의미하며 특히, 경사길이와 경사도가 클수록 유사량이 크게 추정된다.  $C_{USLE}$ 는 경사지의 피복상태, 식생의 종류, 식생 상태 등 복합적인 조건에 대한 토양 유실량의 영향을 나타내며  $P_{USLE}$ 는 토양보존 인자이다. SWAT 모형의 유사량 산정은 MUSLE를 적용하고 있다.

한편 SWAT 모형은 하천에서의 유사이송을 모의하기 위하여 퇴적(deposition)과 침식(degradation)의 두 과정이 동시에 작용하는 것을 고려하고 있으며 이를 위하여 물의 밀도, 유출률과 표면경사로 정의한 Bagnold<sup>12)</sup>가 제시한 유수력(stream power)을 적용하고 있다.<sup>7)</sup> 하천에서 이송되는 최대 유사농도는 식 (3)과 같이 계산가능하다.

$$CONC_{sed, ch, mx} = C_{sp} \cdot v_{ch, pk}^{spexp} \quad (3)$$

여기서,  $conc_{sed, ch, mx}$ 는 물에 의해 이송되는 최대 유사농도(ton/m<sup>3</sup> or kg/L)를,  $v_{ch, pk}$ 는 침투 유속(m/s)을 나타내며  $c_{sp}$ 와  $spexp$ 는 최대 유사농도를 결정하는 계수와 지수이다. 특히 지수  $spexp$ 는 1~1.5 범위에서 다양한 값을 가지며 Bagnold의 유수력의 경우는 1.5로 하고 있다.<sup>13)</sup>

SWAT 모형에서 퇴적과 침식은 물에 의해 이송되는 최대 유사농도  $conc_{sed, ch, mx}$ 와 각 시간에 따른 하천내 초기 유사농도인  $conc_{sed, ch, i}$ 를 비교하여 결정된다. 만약,  $conc_{sed, ch, mx} > conc_{sed, ch, i}$ 이면 하천내에서 퇴적이 우세하게 발생하는 것으로 정의하며 이 때 유사량은 식 (4)와 같이 정의한다.

$$sed_{dep} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) \cdot V_{ch} \quad (4)$$

반면, 이송되는 최대 유사농도  $conc_{sed, ch, mx}$ 와 각 시간에 따른 하천내 초기 유사농도인  $conc_{sed, ch, i}$ 를 비교하였을 때  $conc_{sed, ch, i} < conc_{sed, ch, mx}$ 의 관계를 만족하면 하천내에서 침식이 우세하게 발생하며 식 (5)에 의거하여 계산된다.

$$sed_{deg} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) \cdot V_{ch} \cdot K_{CH} \cdot C_{CH} \quad (5)$$

여기서,  $V_{ch}$ 는 부피로 나타낸 하천 내 물의 양,  $K_{CH}$ 는 하천 침식피복계수를,  $C_{CH}$ 는 하천피복계수를 나타내며  $sed_{deg}$ 는 이들의 관계에 따라 모의되는 침식 유사량이 된다. 이처럼 SWAT 모형에서 퇴적과 침식, 그리고 각각의 양이 결정되면 하천 내 최종 부유사량은 식 (6)에 근거하여 계산된다.

$$sed_{ch} = sed_{ch, i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (6)$$

여기서 하천내 부유사량  $sed_{ch}$ 은 모의되는 기간의 초기 유사량인  $sed_{ch, i}$ 에서 침전되는 유사량  $sed_{dep}$ 을 제외하고 침식으로 의해 발생하는 유사량  $sed_{deg}$ 을 고려하여 계산된다.

### 3. 모의결과 및 토의

#### 3.1. 모형구축 및 주요매개변수 산정

SWAT 모델에서는 대상유역을 출구점 기준으로 소유역을 분할하고, 이를 다시 토지피복 및 토양종류에 따라 앞서 설명한 다수의 HRU로 구획하여 물순환 및 수질 모의를 실시한다. 본 연구에서는 수위 관측지점인 소천, 봉화, 입하, 영양, 청송, 길안, 도산 지점을 중심으로 54개 소유역(입하 33개, 안동 21개)으로 구분하여 총 1,076개의 HRU를 생성하였다. HRU의 생성시 토지이용 및 토양종류를 모두 이용하여 유역의 현황을 최대한 자세히 반영하였다. 기상 자료는 1999년 1월 1일~2006년 10월 12일까지 8년 동안 관측된 태백, 봉화, 안동 기상청의 최고 및 최저온도, 풍속, 상대 습도, 일사량, 증발량 자료를 이용하였다. 강우는 7개 강우 관측소에서 관측한 자료를 이용하였다. 모의 기간은 1999년도를 워밍업 기간으로 하고, 2000~2004년을 모델의 보정 기간으로, 2005~2006년을 검증기간으로 하였다. 총 6개의 수위 관측지점이 조사되었으며, 각 수위 관측소에서 개발된 수위-유량 곡선을 이용하여 모델 보정을 위한 유량값을 산정하였다. 부유사 농도 측정은 총 3개 지점(입하 : 청송, 영양, 안동 : 도산)에서 2006년 7월 10일부터 26일까지 9개의 강우사상에 대해서 일 최대 11회 실시하였다.<sup>14)</sup>

검·보정 과정에서 모델 변수는 대부분 보정 전단계에서 추정되는 방법을 이용하였는데 유출량에 중요한 변수인 CN (curve number) 값은 한국의 지형적 특성을 고려하여 보고

**Table 3.** Major parameters estimated In SWAT model

Name	Definition	Estimated Parameter Values	
		min	max
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor(days)	0.048	-
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	45	98
epco	Plant uptake compensation factor	0.0	1.0
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0	0.95
GW_DELAY	Groundwater delay(days)	31.0	-
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.2	-
SLOPE	Average slope steepness(m/m)	0.150	0.452
SLSUBBSN	Average slope length(m/m)	0.05	24.39
sol_alb	Moist soil albedo	0.01	0.10
SOL_AWC	Available water capacity(mm/mm soil)	0.07	0.18
sol_k	Soil conductivity (mm/h)	1.26	51.13
sol_z	Soil depth	10.0	1500.0
surlag	Surface runoff lag coefficient	1.0	-
CH_L	Main channel length	0.53	43.32
CH_S	Main channel slope	0.002	0.086
CH_W	Main channel width	5.17	121.45
USLE_K	USLE soil erodibility factor	0.00	0.18
USLE_C	USLE cover and management factor	0.0	1.0
USLE_P	USLE support practice factor	1.0	-

된 값<sup>15,16)</sup>을 토대로 토지이용도 및 토양도 그리고 선행강우의 영향 외에도 각 HRU의 경사효과를 반영, 다음 식을 이용하여 다시 산정하였다.<sup>17)</sup>

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} [1 - 2\exp(-13.86slp)] + CN_2 \quad (7)$$

여기서,  $CN_{2s}$ 는 소유역경사  $slp$ 에 대해서 보정된  $CN$ 값을 의미한다.

DEMs과 하천 수계도를 이용하여 유출의 흐름방향 및 하천의 속성성분 변수들( $Ch\_k2$ ,  $Ch\_W$ ,  $Ch\_L$ ,  $Ch\_S$ )을 추정하였고, 유역의 평균고도 대비 지하수 유출식의 상수인 ALPHA\_BF을 산출하였다. 증발산과 관련된 변수들(ESCO, EPCO)과 지하대수층으로부터의 증발량(GW\_REVP)은 토지 피복도에 따른 상대적 차이를 고려하여 산정하였다. 토양침식 인자는 토지 피복과 토양 특성을 고려하여, USLE\_K, USLE\_C, USLE\_P 등을 보정하였다.<sup>13)</sup> Table 3에 모형의 검·보정에 필요한 주요 매개변수 및 범위를 제시하였다. 전체적인 모형의 검·보정은 주요매개변수를 변경하여 모의값과 측정값의 차이를 최소화시키는 “trial & error” 방식으로 수행하였다.

### 3.2. 유출량 예측

모델의 예측성에 대한 평가를 위해서 그래픽 추세분석과 통계적 방법인 Nash-Sutcliffe 계수  $R_{eff}$ <sup>18)</sup>와 결정계수  $R^2$  (regression coefficient)를 이용하였다.

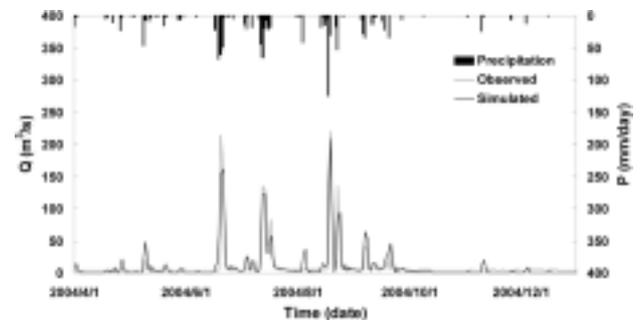
$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{obs,i} - Q_{pred,i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\left( \sum_i^n Q_{obs,i} \times Q_{pred,i} - n \overline{Q_{obs}} \times \overline{Q_{pred}} \right)^2}{\left( \sum_i^n Q_{obs,i}^2 - n \overline{Q_{obs}}^2 \right) \left( \sum_i^n Q_{pred,i}^2 - n \overline{Q_{pred}}^2 \right)} \quad (9)$$

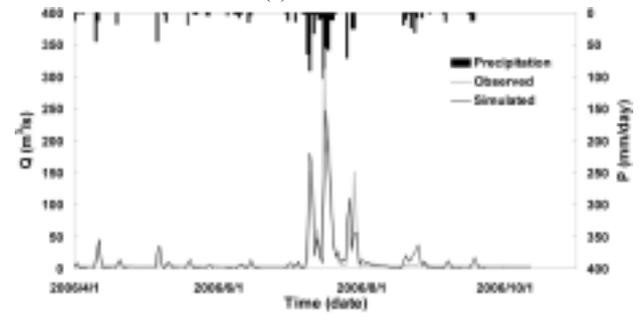
여기서  $Q_{obs,i}$ 는  $i$ 일에 관측된 유량의 값,  $Q_{pred,i}$ 은  $i$ 일에 예측된 모델 유량 값,  $\overline{Q_{obs}}$ 은 평균 관측 값,  $\overline{Q_{pred}}$ 은 평균 모델 예측 값, 그리고  $n$ 은 계산된 기간을 의미한다.  $R_{eff}$ 과  $R^2$ 은 각각 유출량의 침투 유량의 민감도의 크기와 강우 사상에 따른 유출의 반응시간에 민감도의 크기를 나타낸다. 그러므로 위의 두 가지 통계방법을 이용하여 크기와 반응시간에 대한 모델의 유출량 모의능력에 대하여 정량적으로 평가할 수 있다. Table 4에 일별 유출량에 대한 검·보정 결과를 제시하였다. 결과분석을 통해 산정된 통계치를 비교해 보면, 임하 유역에서  $R_{eff}$  및  $R^2$  값이 각각 0.59~0.77 및 0.60~0.79 범위이며, 안동유역에 대해서는  $R_{eff}$  값은 0.53~0.71,  $R^2$  값은 0.54~0.77의 범위를 얻었다.

**Table 4.** Results of calibration and validation for flow

Watershed	Monitoring stations	Periods	Year	$R_{eff}$	$R^2$
Imha	Cheong-song	Calibration	2002	0.60	0.67
			2003	0.59	0.60
		Validation	2006	0.77	0.77
			Young-yang	Calibration	2002
	2003	0.74			0.79
	Validation	2006		0.71	0.73
Andong	Dosan	Calibration	2002	0.60	0.63
			2003	0.53	0.54
		Validation	2006	0.57	0.59
			Socheon	Calibration	2002
	2003	0.71			0.76
	Validation	2006		0.66	0.77



(a) Year 2004



(b) Year 2006

**Fig. 3.** Results of model calibration and validation at Young-yang gauge station.

Fig. 3에 영양 관측지점에 대해 SWAT 모델의 유출량에 대한 보정 및 검증 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 전반적으로 모델의 예측 값은 현장 측정값을 잘 재현하고 있으나 저유량에 대하여 예측성이 다소 떨어지는데 이는 수위-유량 관계곡선식이 홍수기 위주로 작성되어 저유량시 적용성이 다소 떨어지는 것이 주요 원인으로 판단된다.

### 3.3. 부유사 농도 예측

Fig. 4에서는 임하댐 유역의 청송 및 영양 지점과 안동댐 유역의 도산지점에서의 관측 및 모의 부유사 농도를 나타내었다. 본 연구에서 부유사 측정은 강우사상에 따라

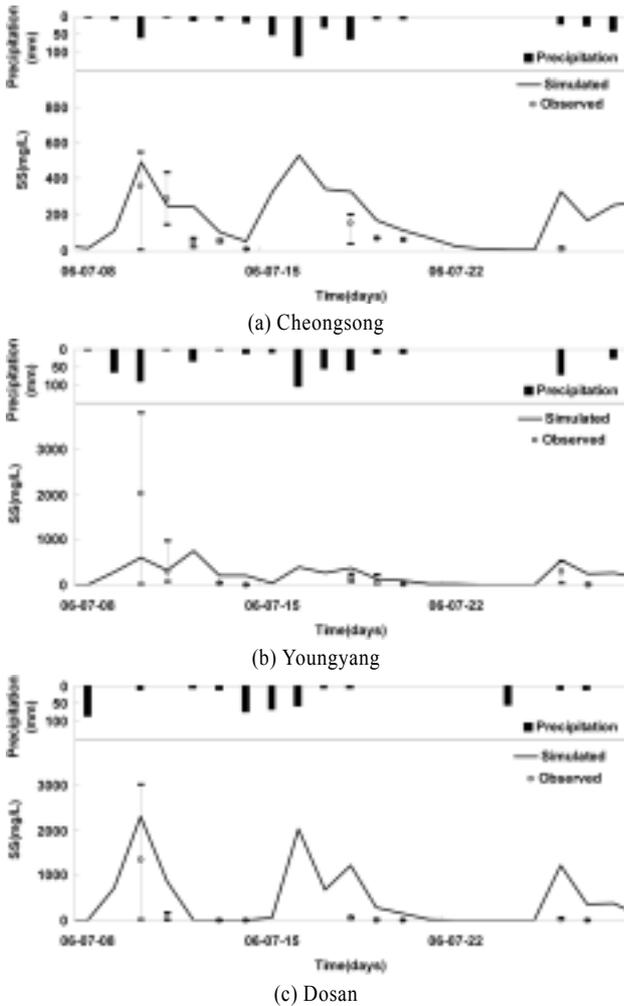


Fig. 4. Comparison of observed and simulated suspended sediment (SS) concentrations.

최대 8회, 최소 1회 시간별 측정이 이루어졌으나 본 연구에서 사용한 SWAT 모델은 일별 모의만 가능하므로 측정된 유량자료를 이용하여 유량비 평균 부유사 농도를 추정하여 모의 값과 비교하였고, 유량자료가 없을 경우 최대 및 최소값으로 나누어 정량적인 비교를 실시하였다. 정확한 부유사 농도 예측에는 많은 어려움이 따르는데, 이는 집중 강우시 발생한 부유사의 경우 현장 접근성이 힘들고 또한 측정된 부유사 농도를 대표적인 값으로 보기 힘들기 때문이다. 또 다른 오차의 가능성은 본 연구에서 활용된 토지 피복도가 최근의 토지 피복도와는 다소 차이가 있고, 2002년 루사 및 2003년 매미 등의 태풍들로 인한 제방유실과 산사태 등으로 사면 불안정성 정보가 정확히 반영되지 못하여 이로 인한 예측효율이 떨어진 것으로 판단된다.

SWAT 모델은 유사발생 지점에서 하천과의 거리를 ‘소유역 평균’으로 계산되기 때문에 이를 개선하여 각 HRU 으로부터 하천까지의 공간적 거리를 고려해서 유사발생량을 추정해야 한다. Lenhart et al.<sup>21)</sup>은 HRU의 공간적 거리를 고려하여 부유사를 예측할 수 있는 수정된 SWAT 모

델 알고리즘이 유사량을 더 높게 예측할 수 있음을 보여주었다. 또한, SWAT 모델은 각 소유역의 강우자료를 가장 근 거리에 강우 관측소 자료를 이용한다. 하지만, 이와 같은 방법은 실제 시공간 강우자료를 잘 반영한다고 보기 어렵고 특히 토사유실의 경우, 강우강도 및 분포에 민감하기 때문에 이에 대한 정확한 반영이 요구된다고 사료된다.

### 3.4. 연간 부유사량 산정

보정한 SWAT 모델을 이용하여 입하·안동 유역의 연간 부유사 부하량 분석을 실시하여 Fig. 5에 제시하였다. 공간 경계는 SWAT 모델에서 결정된 소유역 면적이고 대상 기간은 2002년~2005년까지로 하였다. 2002년에는 전체 소유역을 대상으로 2.8~22.5 tons/ha의 부유사 부하량을 보이며, 입하유역의 경우 길안수위 관측소 하류부분에서 가장 높은 부하량을 보였고 그 다음으로는 임하호, 용전천, 화원천의 순으로 높게 나타났다. 안동유역의 경우 안동호 주변에서 가장 높은 부유사 부하량을 보이며, 다음으로 소천수위 관측소 주변, 황길천 유역에서 높은 값을 보인다. 2003년도에는 입하유역은 전체유역을 대상으로 3~34 tons/ha의 부하량을 보이며 한편 안동유역에서는 2002년과는 달리, 황길천에서는 다소 낮은 부유사 부하량을 보인다. 2004년에는 안동유역의 경우에 안동호 주변을 제외하고는 대부분 낮은 부하량을 보이지만, 입하유역은 상대적으로 높은 부하량을 보인다. 2005년의 경우 2002년과 비슷한 양상을 보이며 다른 기간에 비해 낮은 강우량의 영향으로 0.7~5.9 tons/ha의 다소 낮은 부유사 부하량을 얻었다. 공간적으로는 소천과 길안천 하류 부분의 부하량이 다소 높게 산정되었다.

입하·안동 유역에서는 고탁수가 장기간 지속되면서 2004년부터 현재까지 탁수 유발 원인과 저감대책 마련에 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 2005년에는 입하 유역에서 하절기 동안 용전천과 반변천을 중심으로 소하천별 탁수 현황조사가 이루어 졌다.<sup>19)</sup> 보고서에 따르면, 비슷한 강우조건에도 전체적으로 반변천이 용전천보다 탁수 유발가능성이 높고, 반변천의 경우 동산천, 화원천이, 용전천 지류 중에서는 용전천 본류 하류지점에서 가장 높은 탁수가 관찰되었다. 본 연구의 결과에 따르면, 전반적으로 용전천에서 상대적으로 높은 값을 보인다. 그 까닭은 현장조사의 경우 강우가 집중되는 7월부터 10월 중반에 불규칙적으로 강우사상에 대해서 조사한 값이고, 각 지점에 따라 측정시간이 일정치 않기 때문에 부유사 부하량을 정량화할 수 없어 이들 수집 자료의 대표성이 낮기 때문으로 판단된다. 또한, 기존 연구의 경우는 RUSLE<sup>20)</sup> 모델의 예측 값으로, 현장 측정 부유사농도와 비교되지 않은 결과이기에 본 연구의 결과와 다소 상이한 추정을 한 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 입하·안동 유역의 효율적 탁수관리를 위



Fig. 5. Estimated annual suspended sediment loads.

해 유역 모델인 SWAT 모델을 활용하여 댐 상류 유역에서 발생하는 부유사량의 추정에 목적이 있다. 본 연구에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

1) SWAT 모형을 구축하여 홍수기에 측정된 유량과 부유사 농도를 이용하여 모형의 검 · 보정을 실시하였다. 일별 유출량에 대한 검 · 보정 결과를 홍수기와 비홍수기로 나누어 분석하였으며, 홍수기에는 입하 유역에서  $R_{eff}$  및  $R^2$  값이 각각 0.59~0.77 및 0.60~0.79 범위이며, 안동유역에 대해서는 각각 0.53~0.71 및 0.54~0.77의 범위를 얻었다.

2) 검보정된 SWAT 모형을 이용하여 소유역별 연간 부유사 부하량에 대한 공간 분석결과, 전체 유역 대상으로 2005년에 최저 0.7~5.9 tons/ha에서 태풍 매미가 발생한 2003년에 최고 3.0~34.0 tons/ha의 부하량을 보였다. 태풍 매미가 발생한 2003년에 입하 유역에서는 길안 수위 관측소 하류부분에서 가장 높은 부유사가 예측되었고 임하호 주변, 용천천 주변, 화원천 순으로 높은 값을 보인다. 안동유역의 경우 안동호 주변에서 가장 높은 부유사 부하량을 보이며, 다음으로 소천수위 관측소 주변, 황길천 유역에서 높은 값을 보였다.

3) 본 연구에서 구축된 모델은 유역의 전반적인 유출 및 부유사 부하량을 반영하고 있지만, SWAT 모델이 가진 한계점, 예를 들면, HRU의 공간분포 및 시공간적 강우분포 특성 고려, 지질특성 고려 등에 대한 개선 및 갈수기 유출 예측효율 향상 등이 요구된다고 판단된다.

4) 향후 이러한 개선점을 반영한 유역전체의 효율적인 유사량 추정 및 저감대책마련을 위해서는 장기간에 걸쳐 보다 정확하고 광범위한 모니터링과 이를 활용한 모델의 정도 향상이 수반되어야 할 것이다.

### 사 사

이 논문은 한국수자원공사의 연구과제 KIWE-IWMRC-08-06로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. Batuca, D. G. and Jordaan, J. M., Silting and desilting of reservoirs, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands(2000).
2. 한국수자원공사, 입하댐 탁수저감 방안수립 최종보고서 (2004).
3. Verstraeten, G. and Poesen, J., "Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate," *Geomorphology*, **40**, 123~44(2001).
4. Flanagan, D. C., Ascough II, J. C., Nicks, A. D., Nearing, M. A., and Lafle, J. M., Overview of the WEPP erosion prediction model. In USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. USDA. Indiana(1995).
5. de Roo APJ, Wesseling, C. G., and Ritsema, C. J., "LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I Theory, input and output," *Hydrol. Proc.*, **10**(8), 1107~1117(1996).
6. Morgan R. P. C., Quinton, J. N., and Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, G. D., and Styczen, M. E., "The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments," *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 527~44(1998).
7. Arnold, J. G., Williams, A., Srinivasan, R., King, B., and Griggs, A., SWAT, soil and water assessment tool. Temple, TX 76502. ARS, USDA(1994).

8. Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J. G., and Neitsch, S., Arcview Interface for SWAT 2000 User's Guide. (<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swatav2000.pdf>), (2002)
9. Wischmeier, W. H., "Cropping-management factor evaluation for a universal soil loss equation," *Proceedings of the Soil Science Society of America*, **24**, 322~326(1960).
10. Williams, J. R., Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Agricultural Research Service. USDA. ARS-S-40, Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, Preceeding of the sediment yield workshop, pp. 244~252 (1975).
11. Williams, J. R. and Berndt, H.D., "Sediment Yield Prediction based on Watershed Hydrology," *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, **20**(6), 1100~1104(1977).
12. Bagnold, R. A., "Bedload transport in natural rivers," *Water Resour. Res.*, **13**(2), 303~312(1977).
13. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R., Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000(2002).
14. 한국수자원공사, 저수지 연계운영을 통한 탁도관리방안 연구(2차년도), (2006b).
15. 배덕효, 이병주, 정일원, "위성영상 피복 분류에 대한 CN 값 산정(I): - CN값 산정-", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, **36**(6), 985~997(2003).
16. 오경두, 전병호, 양경규, 안원식, 조병호, "도시지역 CN 산정연구," 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, **38**(12), 1009~1020(2005).
17. Williams, J. R., "Chapter 25: The EPIC model," p. 909~1000. In V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications(1995).
18. Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles," *J. Hydrology*, **10**, 282~290(1970).
19. 한국수자원공사, GIS 기반 댐 유역간 토사 유실량 비교 분석 및 시스템 구축(1차년도), (2006a).
20. Renard K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., and Porter, J. P., "RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation," *J. Soil and Water Conservation*, **46**(1), 30~3(1991).
21. Lenhart, T., Rompaey, A. V., Fohrer, A. N., Frede, H. G., and Govers, G., "Considering spatial distribution and deposition of sediment in lumped and semi-distributed models," *Hydrological Processes*, **19**, 785~794(2005).