

## HSPF를 활용한 임하댐 유역의 탁수 예측모델 구축

이혜숙 · 김정곤<sup>†</sup> · 이상욱  
한국수자원공사 수자원연구원

(2008년 3월 13일 접수, 2008년 7월 8일 채택)

### Development of Turbid Water Prediction Model for the Imha Dam Watershed using HSPF

Hye-Suk Yi · Jeongkon Kim<sup>†</sup> · Sang Uk Lee

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

**ABSTRACT :** A watershed model was constructed using HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran) for predicting flow and suspended solid in the Imha dam watershed. The whole watershed was divided into 33 sub-watersheds in the watershed model, which was calibrated for flow using measured data from 2001 to 2007. The accuracy of watershed model prediction was evaluated using statistical coefficients of  $R_{eff}$ (Nash-Sutcliffe),  $R^2$ (Correlation coefficient) and graphical comparison. Then, the model was calibrated for suspended solid using field data measured during 3 major rainfall events in July 2006, and then validated against data obtained in 2 rainfall events from July to August in 2007. Overall, the model showed good agreements with the field measurements for flow and suspended solid. The watershed model constructed in this study can provide flow and suspended solid entering the Imha reservoir and will be utilized for turbid water management in linkage with reservoir water quality models.

**Key Words :** HSPF, Imha Dam, Turbid Water, Watershed Management

**요약 :** 본 연구에서는 HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran)를 임하댐 유역을 대상으로 적용하여 유출량 및 부유물질 농도 변화를 모의할 수 있는 유역모델을 구축하였다. 먼저, 임하댐 전체 유역에 대하여 총 33개 소유역으로 구분하여 모델을 구성하였으며 현장에서 실측된 7년간의 유출량 및 부유물질 농도 자료를 모델의 보정 및 검증에 수행하였다. 모델의 유출량 재현성 평가를 위하여 그래프 비교를 통한 정성적인 분석과  $R_{eff}$ ,  $R^2$ 의 통계항목을 이용한 정량적인 분석을 수행하였다. 다음으로, 부유물질 농도 보정은 2006년 7월 탁수가 집중적으로 발생하는 시기의 3개 강우사상에 대하여 수행하였으며, 모델의 검증은 2007년도 8~9월에 발생한 2개 강우사상을 대상으로 수행하였다. 모델이 실측된 유출량 및 부유물질 농도를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 구축한 HSPF 유역모델을 이용하여 임하호 유입하천의 유출량 및 부유물질 농도를 모의함으로써 저수지로 유입되는 탁수 발생량을 예측할 수 있으며 유역별 탁수 관리방안 수립 및 저수지 모형과 연계를 통한 저수지의 탁수 관리에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어 :** HSPF, 임하댐, 탁수, 유역관리

### 1. 서론

저수지 수질관리를 위하여 과거에는 수자원 확보 및 분배문제 등의 해결을 위한 노력이 이루어졌다면 최근에는 수질관리, 생태계 등에 미치는 영향에 관심을 기울이고 있으며 특히, 탁수 문제가 중요한 관리항목으로 관심을 모으고 있다. 탁수는 수질악화, 생태계 교란, 정수처리비용 증가 및 시각적인 가치저하 등 수자원의 관리와 이용적 측면에서 중요한 항목이다. 하절기 집중 강우시 유역으로부터 일시에 많은 양의 토사가 저수지로 유입되어 장기간 체류하게 되면 부영양화 발생에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 이때, 탁수 유입은 유역의 경사도, 토양 및 토지피

복특성 등에 영향을 받게 되므로 유역으로부터 유입되는 탁수 발생량을 정량적으로 분석하여 예측하는 방안이 마련되어야 한다.<sup>1~5)</sup>

우리나라에서는 임하호, 안동호, 소양호, 대청호 및 용담호 등에서 고탁수 유입으로 인한 문제점이 나타난 바 있으며 이들 저수지를 대상으로 탁수 거동 연구가 수행된 바 있다.<sup>2,6~8)</sup> 임하호의 경우에 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미에 의한 집중강우로 최고 1,220 NTU까지 탁도가 증가하였으며 전도현상으로 저수지 전층으로 탁수가 확산됨으로써 탁수 문제가 장기화되었다.

이와 같이 집중 강우시 발생하는 탁수 관리를 위하여 다양한 대책이 수립 및 추진되고 있으며 댐 상류 유역에서 유입되는 부유물질 저감을 위하여 정량적인 평가와 최적 유역관리 방안 수립, 저수지로 유입된 이후에 취수탑을 이용한 선택 방류를 이용하는 방안 등이 있다.<sup>1,2)</sup> 유역에서 강

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: jkkim@kwat.or.kr

Tel: 042-870-7470

Fax: 042-870-7419

우시 토사유실로 인한 고탁수 발생은 현장조사, USLE 모형 및 유역모델의 적용 등으로 분석될 수 있다. 현장조사는 인력, 시간 및 비용 등에서 한계점이 있으며 토사유실을 정량화하기에는 제한적인 단점이 있고, USLE 모형은 과거에서부터 많이 적용되어 왔으나 기상변동이 심한 유역에서는 시간에 따른 변화, 선행강우에 의한 유출량 및 토사유실량 모의 등에 미치는 영향을 고려할 수 없는 한계점이 있어 점차 유역모델의 적용성이 확대되고 있다. 또한, 최근에는 유역 모델과 저수지 모델을 연계 적용함으로써 유역-저수지 통합관리 연구가 진행되고 있다.<sup>3~5,9~13)</sup>

본 연구에서는 최근 탁수 문제가 발생되었던 임하댐 유역을 대상으로 HSPF를 적용하여 저수지 탁수 관리를 위한 유역모델의 적용성을 검토하였다. 유역모델을 구축하여 저수지로 유입되는 유출량 및 부유물질 농도를 정량적으로 모의할 수 있는 예측력을 확인함으로써 탁수 관리를 위한 도구로서 유역모델의 활용방안을 제시하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상지역

연구 대상지는 낙동강의 지류인 반변천의 임하호 유역으로 북위 35°35'~36°00', 동경 127°20'~127°45'의 범위에 위치하고 있다(Fig. 1). 유역 전체 면적은 1,367.6 km<sup>2</sup>, 총 저수용량은 595백만 m<sup>3</sup>이다. 주요 유입하천으로는 반변천, 용진천, 길안천 등이 있으며 반변천 유역 면적이 임하호 유역 면적의 63%를 차지하고 있다. 유역의 토지이용 특성은 산림이 79.8%, 농경지는 14.9%가 대부분을 차지하고 있다. 2002년과 2003년에 임하호에는 고탁도가 유입하여 호내 연중 최고탁도가 각각 880 NTU 및 1,220 NTU를 기록함으로써 탁수 문제가 발생하여 유역 및 저수지 탁수 관리 대책수립의 필요성이 대두되었다.<sup>1,2)</sup>

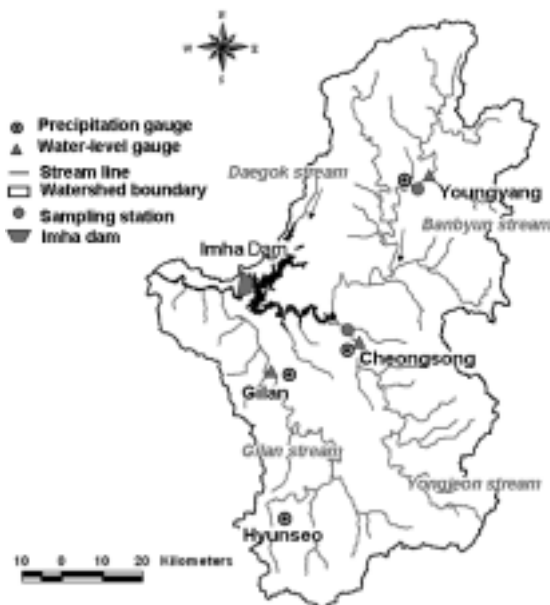


Fig. 1. Map of the study area with sampling sites.

Table 1. Areas and ratios of landcover types in the Imha Dam watershed

	Landcover(km <sup>2</sup> )								
	Urban	Paddy Field	Field	Forest	Grassland	Wetland	Fallow	Water	Total
Area (km <sup>2</sup> )	18.8	45.6	159.0	1091.3	5.5	6.2	8.3	32.9	1367.6
Ratio (%)	1.4	3.3	11.6	79.8	0.4	0.5	0.6	2.4	100.0

### 2.2. 현장 조사 및 분석

유역모델의 유출량 보정 및 검증을 위하여 임하댐 유역의 영양, 청송 수위 관측지점에서 연속적으로 측정되는 수위 변화를 조사하고, 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 유량을 산정하였다. 이 때, 수위값 및 수위-유량 관계곡선식은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 자료를 이용하였다. 그리고, 부유물질 농도 보정 및 검증을 위하여 수위관측지점과 동일한 지점에서 2006년 7월과 2007년 8~9월에 20 mm 이상의 강우에 대하여 각각 3회, 2회 현장 조사를 수행하였다. 시료의 채취는 1회 채수시 횡단방향으로 3~5개 지점에서 채수후 혼합시료로 하였으며 유출 초기 시점부터 유출량 피크시기를 포함하여 종료 시점까지 강우의 특성에 따라 1~6시간 간격으로 연속 측정하여 실험실에서 농도를 측정하였다.

### 2.3. 적용 모델 개요

HSPF는 복합적인 토지피복특성을 갖는 유역에서 강우에 의해 발생하는 유량과 수질을 모의하기 위하여 미국 환경청(U.S. EPA)과 미국 지질조사기관(USGS)이 공동으로 개발한 통합형 모델로 1980년에 최초로 개발되어 지속적인 수정과 확장을 거듭해오고 있다. 적용 모델로는 투수지역의 수문 및 수질을 모의하는 PERLND, 불투수지역의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND, 수체 내의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES로 구성되어 있으며, 각 모듈은 물의 흐름과 관계된 부분, 토사유출 및 영양염류 등 수질과 관계되는 부분으로 구분되어 있다.

유역의 투수층과 불투수층의 수문, 수리 모의에 영향을 주는 요소는 강수, 식물 등에 의한 차단, 지표저류, 증발산, 침투, 지표수 유출, 중간 유출 및 지하수 유출 등이 있다. 각 요소들은 토지피복, 토양, 선행강우 조건 등에 의해 시간에 따라 변화한다. 수체 내 수리 모의는 흐름을 한 방향으로 보며 한 부분의 유입과 여러 방향의 유출 부분으로 구성되어 있으며, 수체의 깊이에 대한 수표면적과 저류되는 수량과의 관계는 변하지 않는다는 가정을 기초로 하고 있다. 유역에서의 물수지 기본식과 수체에서의 물수지 기본식은 각각 식 (1)과 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P + SWI + GWI = ET + SWO + GWO + \Delta S \tag{1}$$

$$VOL - VOLS = IVOL + PRSUPY - VOLEV - ROVOL \tag{2}$$

여기서, P는 강우량, SWI는 지표수 유입량, GWI는 지하수 유입량, ET는 증발산량, SWO는 지표수 유출량, GWO는 지하수 유출량, ΔS는 저류 변화량이며, VOL는 말기체적, VOLS는 초기체적, IVOL는 유입체적, PRSUPY은 수면 위로 직접 떨어지는 강수체적, VOLEV는 수면으로부터 증발체적, ROVOL는 유출체적이다.

부유물질은 ARM과 NPS(Donigian and Crawford, 1976) 모델을 기본으로 한 토사생성 및 유실을 고려하여 모의하게 된다. 유역에서는 탈착, 이송, 들뜸, 축적과 흡착을 고려하며, 수체 내에서는 침전물의 이동과 흡착은 토양의 입자 크기에 따라 모래, 실트, 점토로 분류하여 입자의 직경, 침전속도, 밀도, 침전에 대한 한계 전단응력, 들뜸에 대한 한계 전단응력, 침식계수 등을 고려하여 모의한다. 탈착, 이송, 들뜸 현상에 대한 식은 (3)~(5)와 같다.

$$DET = \nabla T60 \times (1.0 - CR) \times SMPF \times KRER \times (RAIN/\nabla T60)^{JER} \quad (3)$$

$$STCAP = \nabla T60 \times KSER((SURS + SURO)/\nabla T60)^{JSER} \quad (4)$$

$$SCRSD = (SURO/(SURS + SURO)) \times \nabla T60 \times KGER \times (SURS + SURO)/\nabla T60^{JGER} \quad (5)$$

여기서, DET는 강우시 탈착되는 토사량, ∇T60은 시간/계산간격, CR은 눈 등에 의해 지표면이 덮혀있는 비율, SMPF는 토양보존인자, KRER는 탈착식의 계수, RAIN는 강우량, JER는 탈착식의 지수이다. STCAP는 탈착된 토사의 이송 능력, KSER는 반응계수, SURS는 지표 저류량, SURO는 지표유출, SCRSD는 들뜸 현상에 의한 토사량, KGER는 들뜸 반응 계수, JGER는 들뜸 반응 지수이다.

그 외, 수질 모의는 불투수 및 투수층의 오염물질의 축적 및 세정에 의하여 지표 유출, 중간 유출, 지하수 유출이 하천으로 유입되며 토사와 흡착된 오염물질, 용존 오염물질로 구분되어 하천에서 반응하게 된다. 수질 모의항목은 수온, SS, DO, BOD, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N, Organic-N, PO<sub>4</sub>-P, Organic-P, Chl-a 등이 있다.<sup>3,14)</sup>

### 2.4. 모델 구축

HSPF 모델을 적용하기 위하여 필요한 입력자료는 지형

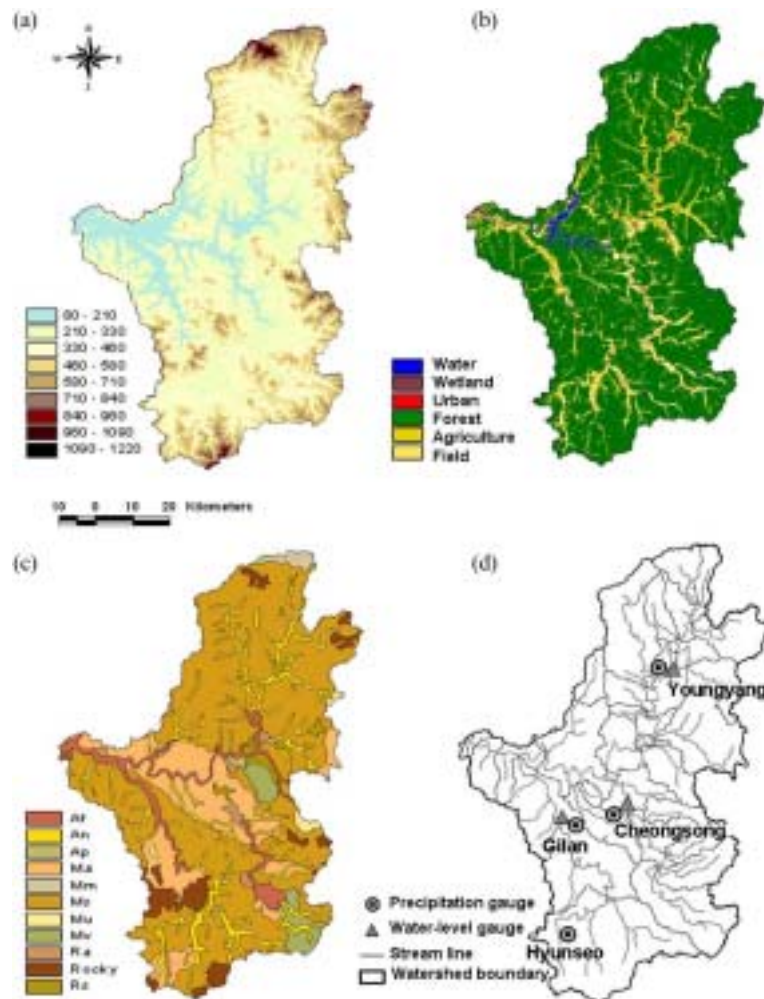


Fig. 2. Input data used for model construction and delineated sub-watersheds: (a) DEM, (b) landcover type distribution, (c) soil type distribution, (d) sub-watersheds.

자료, 토지피복도, 토양도 및 기상자료로 구분할 수 있다(Fig. 2). 본 연구에서는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)으로부터 60 m × 60 m DEM, 하천도 및 유역도, 토지피복도 및 토양도를 활용하였다.<sup>15)</sup> 우선, 임하호 유역의 토사량 분석을 위하여 수위관측지점과 주요 하천을 고려하여 총 33개로 구분하였다(Fig. 2(d)). 공간적으로 변화하는 유역내 수문현상 및 토사발생 모의에 필요한 입력자료 구축을 위해 DEM, 하천도 및 유역도를 사용하여 각 소유역별 면적, 경사도, 유역의 평균길이 등 지형특성을 추출하였다. 토지피복특성은 대분류 토지피복도를 소유역별로 구분하여 유역내 침투 및 유출을 모의하였다. 기상자료는 시간별 강우량, 기온, 이슬점온도, 풍속, 운량, 일사량, 증발량 자료가 요구되며 이는 시간별 부유물질 농도변화 모의를 위한 중요한 자료로 사용된다. 시간별 기상자료 구축을 위하여 2001~2007년까지 7년 동안의 대상으로 영양, 청송, 길안, 현서 지점의 자료를 이용하였다.<sup>16)</sup>

2.5. 모델 평가 방법

유출량 보정 및 검증은 위하여 통계적 방법인  $R_{eff}$ (Nash-Sutcliffe efficiency)와  $R^2$ (Correlation coefficient)를 이용하였으며 계산식은 Table 2에 나타내었다.<sup>17)</sup>  $R_{eff}$ 는 모델 예측값과 실측값의 침투 유량 차이에 의해 민감도를 나타내며,  $R^2$ 는 강우에 의한 유출량 반응시간에 민감도를 나타내는 항목으로 각각 다른 특성을 가지는 통계항목을 이용하여 유출량의 보정 및 검증결과를 분석함으로써 모델의 유출량 모의능력을 평가하고자 하였다. 모델 보정 및 검증은 주요 수위 관측지점인 영양, 청송 지점에 대하여 수행하였다. 수위 관측지점에서 측정된 수위를 이용하여 연도별로 개발된 수위-유량곡선식에 의하여 유출량으로 산정하고 이를 모델의 예측 유출량과 비교하였다. 이 때, 산정

된 지점별 유출량에 대한 신뢰도를 분석한 결과가 연도별로 차이를 보이고 있으며 일부 수위가 결측된 시기도 있어 가장 적합한 시기인 2003, 2006년을 선택하여 모델 유출량의 재현성을 평가하여 통계결과를 제시하였다.

부유물질 농도에 대한 모델 보정은 2006년 7월에 발생한 3회의 강우사상을 대상으로 수행하였고, 모델 검증은 2007년 8~9월에 발생한 2회의 강우사상을 대상으로 수행하였다. 모델의 재현성은 시간에 따른 부유물질 농도의 변화에 대한 모의 능력의 평가에 초점을 두었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델의 보정

3.1.1 유출량 보정결과

모델의 유출량 보정은 임하호 유입하천에서 2002~2006년을 대상으로 모델 예측값과 실측값을 비교 분석하였다. 유출량 보정은 강우에 의해 유역으로부터 유입되는 경우, 직접 하천으로 떨어지는 경우, 증발산이나 지하수로 유출되는 경우를 고려하여 전체적인 물수지를 파악하였다. 그리고, 강우시 유역으로부터 하천으로 유입되는 과정에서 지표면 아래로 침투되어 중간 유출 혹은 지하수로 유출되는 과정에서의 침투계수, 중간 흐름과 지하수 흐름량 비등의 값을 조절하여 침투유량과 기저유량으로 감소되는 시기 및 값을 모의하였다. 관련 계수는 투수지역의 침투능, 중간 유출 및 지하수 유출 비율, 투수층 및 불투수층의 지표면 조도계수 등이 있으며 대표적인 유출량 관련 매개계수를 Table 3에 나타내었다.<sup>3,14,18,19)</sup>

모델의 유출량 재현성 평가를 위하여 그래프 비교를 통한 정성적인 분석과  $R_{eff}$ ,  $R^2$ 의 통계항목을 이용한 정량적인 분석을 수행하였다. 영양 및 청송 관측지점에 대한 2006

Table 2. Equations used to Estimate Goodness-of-fit measures

Notation	$R_{eff}$	$R^2$
Equation	$1 - \frac{\sum_i^n (Q_{obs,i} - Q_{pred,i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2}$	$1 - \frac{\left( \sum_i^n Q_{obs,i} \times Q_{pred,i} - n \bar{Q}_{obs} \times \bar{Q}_{pred} \right)^2}{\left( \sum_i^n Q_{obs,i}^2 - n \bar{Q}_{obs}^2 \right) \left( \sum_i^n Q_{pred,i}^2 - n \bar{Q}_{pred}^2 \right)}$

$Q_{obs,i}$  : i시간에 관찰된 유량,  $Q_{pred,i}$  : i시간에 예측된 모형의 유량,  $\bar{Q}_{obs}$  : 실측값의 평균,  $\bar{Q}_{pred}$  : 예측값의 평균, 그리고 n : 실측값 및 예측값 쌍의 개수

Table 3. Calibrated main coefficients for runoff simulations

Definition	Unit	Range	Value
Lower zone nominal soil moisture storage	in	0.01 ~ 100	4 ~ 6.5
The infiltration capacity of the soil	in/hr	0.0001 ~ 100	0.14 ~ 0.16
Parameter which affects the behavior of groundwater recession flow	1/in	0.0 ~	1.0
The basic groundwater recession rate	1/day	0.001 ~ 0.999	0.98
The fraction of groundwater inflow which will enter deep(inactive) groundwater	-	0.0 ~ 1.0	0.1
Manning's n	-	0.001 ~ 1.0	0.1 ~ 0.2
Interflow inflow parameter	-	0.0 ~	0.5 ~ 0.75
The interflow recession parameter	1/day	$1.0e^{-30}$ ~ 0.999	0.3 ~ 0.5

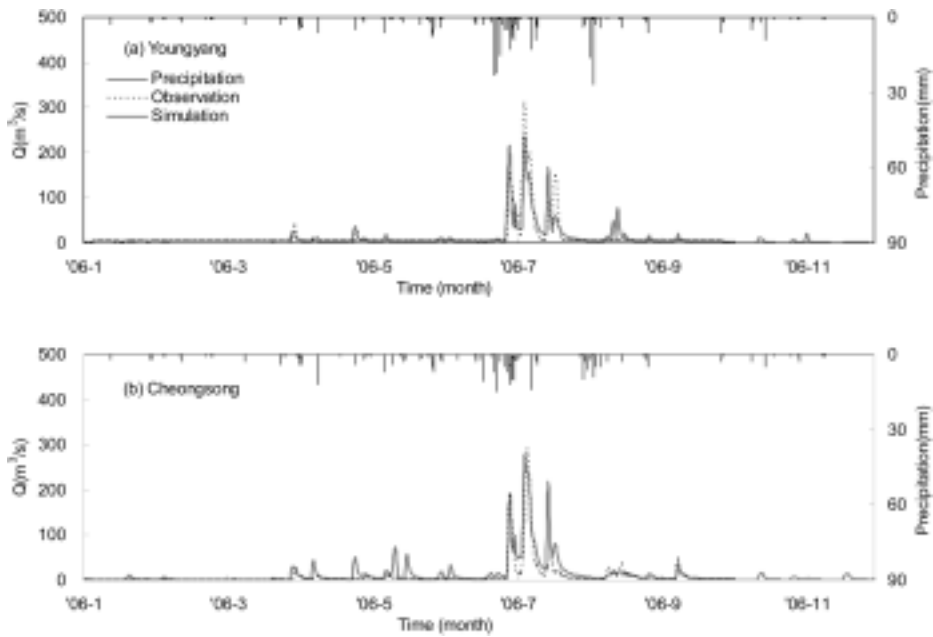


Fig. 3. Calibration results for runoff in year 2006: (a) Youngyang and (b) Cheongsong stations.

년의 관측 및 모의 유량을 Fig. 3에 나타내었다. 유출량 관측지점별로 모델 예측값과 실측값의 상관성 분석 결과를 Table 4에 나타내었으며,  $R_{eff}$  값은 0.69~0.83,  $R^2$  값은

0.77~0.86의 범위를 나타내어 모델이 실측 유량을 잘 모의하는 것으로 판단되었다.

Table 4. Statistical efficiency of calibration results for runoff simulations

Year	Notation	Cheongsong	Youngyang
2003	$R_{eff}$	0.83	0.69
	$R^2$	0.84	0.77
2006	$R_{eff}$	0.83	0.79
	$R^2$	0.83	0.86

### 3.1.2. 부유물질 농도 보정결과

부유물질 농도의 보정은 2006년 7월 탁수가 집중적으로 발생한 시기의 3개 강우사상을 대상으로 측정된 실측값을 이용하였다(Fig. 4). 강우발생에 따른 부유물질 농도 변화를 보면, 영양, 청송 관측지점에서 각각 최대 농도가 3,820.8 mg/L 및 3,027.2 mg/L로 발생하였으며, 최소 농도는 2.4 mg/L 및 1.6 mg/L로 나타나 비강우시 유입하천의 기저농도는 낮게 유지되다가 강우시 유역으로부터 유입되는 오염

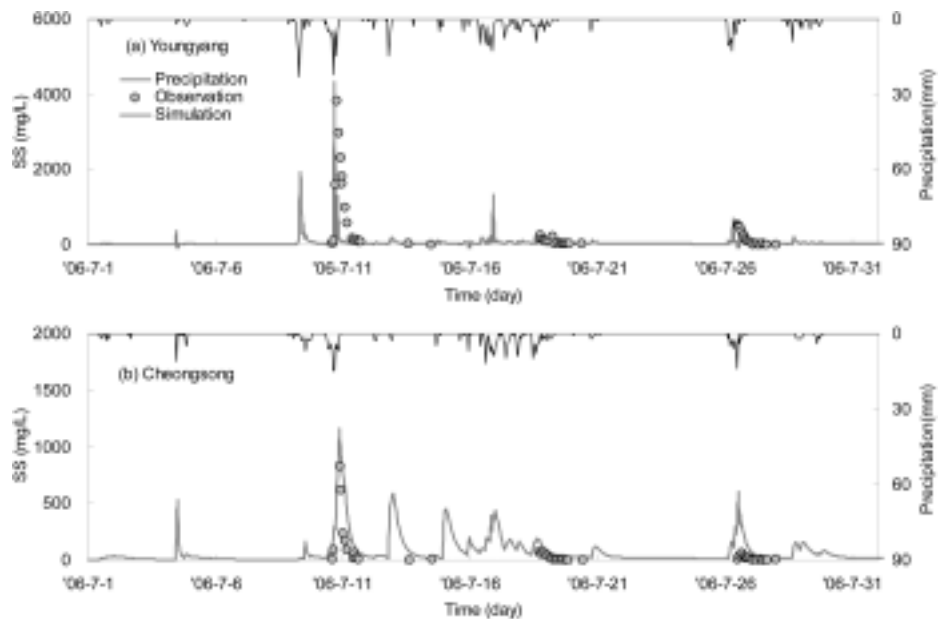


Fig. 4. Calibration results for SS: (a) Youngyang and (b) Cheongsong stations.

**Table 5.** Calibrated main coefficients for suspended solid simulations

Definition	Unit	Range	Value
Supporting management practice factor	-	0.001~1.0	1.0
Coefficient in the soil detachment equation	-	0.0~	0.1~0.4
Exponent in the soil detachment equation	-	-	1.0~3.0
Fraction by which detached sediment storage decrease	1/day	0.0~1.0	0.001~0.01
Fraction of land surface which is shielded from rainfall erosion	-	0.0~1.0	0.0~1.0
Rate at which sediment enters detached storage from the atmosphere	-	-	1.0
Coefficient in the detached sediment washoff equation	-	0.0~	0.025~1.05
Exponent in the detached sediment washoff equation	-	-	2.0~3.0
Coefficient in the matrix soil scour equation	-	0.0~	0.005~0.08
Exponent in the matrix soil scour equation	-	-	2.0

물질에 의하여 부유물질 농도가 급격히 높아지는 것을 알 수 있었다.

HSPF는 시간간격으로 모의가 가능하므로 최고 농도값과 반응시간 등 모의 경향을 그래프에서 정성적으로 분석하였다. 모델이 부유물질 농도의 경향을 비교적 잘 모의하고 있는 것으로 나타났으며, 특히 강우사상에 따라 최고 농도 모의가 비교적 정확한 것으로 판단되었다. 부유물질 농도 보정에 사용된 주요 매개변수는 Table 5에 나타내었다.<sup>3,14,18,19)</sup>

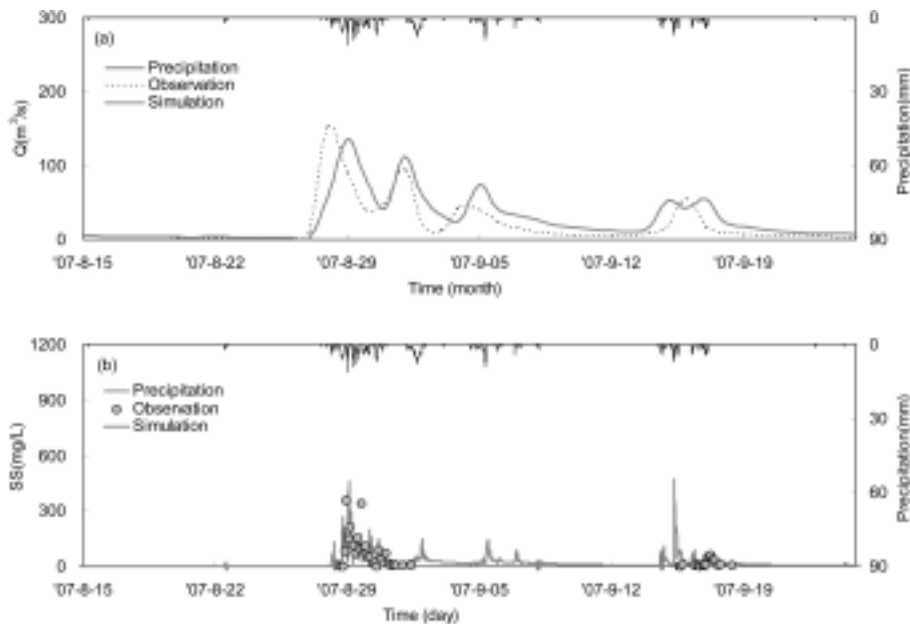
임하댐 유역에서 발생한 2002~2006년까지 연간 강우분포를 살펴보면, 871.1~1,441.1 mm(평균 1,186.1 mm)범위를 나타내었으며, 임하호 탁수 발생 문제가 심각하게 나타난 2002~2003년의 경우에 총 강우량 및 강우일수가 가장 큰 것으로 나타났다(Table 6). 이는 집중 강우 발생시 유역에 축적되어 있는 오염물질이 일시에 하천 및 저수지로 유입됨으로써 탁수 발생의 원인이 되는 것을 간접적으로 나타낸다. 그러므로 강우시 탁수 현상을 정량적으로 모의하여 저수지로 유입되는 탁수 발생량의 사전 예측이 중요하다고 할 수 있다.

**Table 6.** Annual precipitation data in the Imha dam watershed from 2002 to 2006

Factors/Year	2002	2003	2004	2005	2006
Total rainfall(mm)	1327.4	1441.1	1241.4	871.1	1049.7
Maximum(mm/hr)	30.0	28.4	35.1	32.5	21.0
Rainfall day(day)	423.5	520.5	346.5	330.5	423.0

3.2. 유출량 및 부유물질 농도 검증

유출량 및 부유물질 농도에 대하여 보정된 모델을 적용하여 2007년 8~9월에 발생한 2개 강우사상에 대하여 모델의 예측력을 검증하였다. 영양 지점에서 강우사상은 2007년 8월 31일에 강우량이 가장 많았으며 강우량이 67.0 mm/day일 때, 최고 부유물질 농도가 358.4 mg/L로 측정되었다. 2006년 모델 보정을 수행했던 강우사상과 비교해보면, 2006년 7월 10일 강우량이 지점별로 75.5~91.7 mm/day에서 최고 농도 1,577.0~3,820.8 mg/L과 비교해서 상당히 작은 값으로 나타났다.



**Fig. 5.** Model validation results at Youngyang station: (a) runoff and (b) SS.

영양 지점에서의 유출량 및 부유물질 농도에 대한 검증 결과, 모델의 예측값이 실측값을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 유출량 모의 결과에서 모델 예측값이 실측값을 대체적으로 잘 따르고 있는 반면에, 일부 모델 예측값이 과소 혹은 과대평가 된 것을 알 수 있었다. 이는 수위-유량 관계곡선식에 의하여 산정된 유출량을 이용함으로써 관계식이 발생한 강우사상에 의한 유출 특성을 반영하기 어려운 경우가 나타날 수 있다. 또한, 모델 입력자료로 사용되는 강우량과 수위 관측 지점에서 발생하는 강우의 국지적인 차이가 발생하여 나타나는 오차로 판단된다.

부유물질 농도에 대한 모의 결과는 모델 예측값이 실측값의 경향을 비교적 잘 따르는 것으로 나타났으나 9월 강우사상에서는 차이를 나타내었다. 이는 모델 보정이 수행된 시기의 강우사상 특성과 검증을 수행한 시기의 강우사상 특성이 다르기 때문에 하천으로 유입되는 부유물질 농도값 혹은 피크시기에 오차가 나타난 것으로 판단된다. 또한, 2007년도에는 2006년도와 유사한 강우사상에 비해 부유물질 농도의 최대값이 월등히 작은 것으로 나타났는데 보정 과정이 침투 농도에 초점을 맞추어 수행되었기 때문에, 검증 결과에는 다소 오차를 보이는 것으로 판단된다. 이는 다양한 강우사상에 대한 자료의 축적과 이 자료를 활용한 모델 매개변수의 재산정을 통하여 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 임하댐 유입량 및 부유물질 농도 예측

유출량 및 부유물질 농도에 대한 보정과 검증을 수행한 모델을 이용하여 2007년에 임하댐 유역으로부터 저수지로의 전체 유입량과 부유물질 농도 변화에 대한 예측을 실시하였다. 유입량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)

에서 제공되는 임하댐 전체 유입량과 비교하였으며, 부유물질 농도는 유입지점에서 측정된 부유물질 농도가 없으므로 주요 유입지류의 자동탁도측정지점인 광덕교 지점의 실시간 탁도값을 부유물질 농도로 환산<sup>6)</sup>하여 비교하였으며, 적용된 식은 다음과 같다.

$$SS = 1.022 \times TUB \tag{6}$$

여기서, TUB는 탁도(NTU), SS는 부유사 농도(mg/L)이며, 적용된 관계식의 상관계수(R<sup>2</sup>) 값은 0.965이었다.

유입량의 경우, 모델 예측값이 실제 유입량을 잘 모의하는 것으로 나타났으며 일부 오차는 상류 지점을 대상으로 유출량 보정 및 검증이 수행됨으로써 하류 구간에서 하천으로 유출되는 특성이 상류와 다르기 때문에 오차가 발생할 수 있다. 또한, 저수지 유입량이 방류량, 수위 및 저수용량에 의해 산정되기 때문에 지형자료, 강우량 등의 입력자료에 의해 계산되는 모델 결과와 일부 오차가 나타날 수 있다. 부유물질 농도의 경우, 반응시간, 침투시기 등 주요 경향을 비교적 잘 따르는 것으로 나타났다. 하지만 모델의 경우 입력자료의 신뢰도, 보정 및 검증 과정에서 매개변수의 결정 등 불확실성을 내포하고 있기 때문에, 장기간의 실측값과의 비교 분석을 통한 모델 결과의 정확성 향상을 위하여 향후 유량 및 부유물질 농도 관측을 지속적으로 수행하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 유역모델인 HSPF를 임하호 유역을 대상으로 적용하여 유출량 및 부유물질 농도 변화를 모의하여 모델의 재현성을 검토함으로써 탁수 발생 특성을 정량적

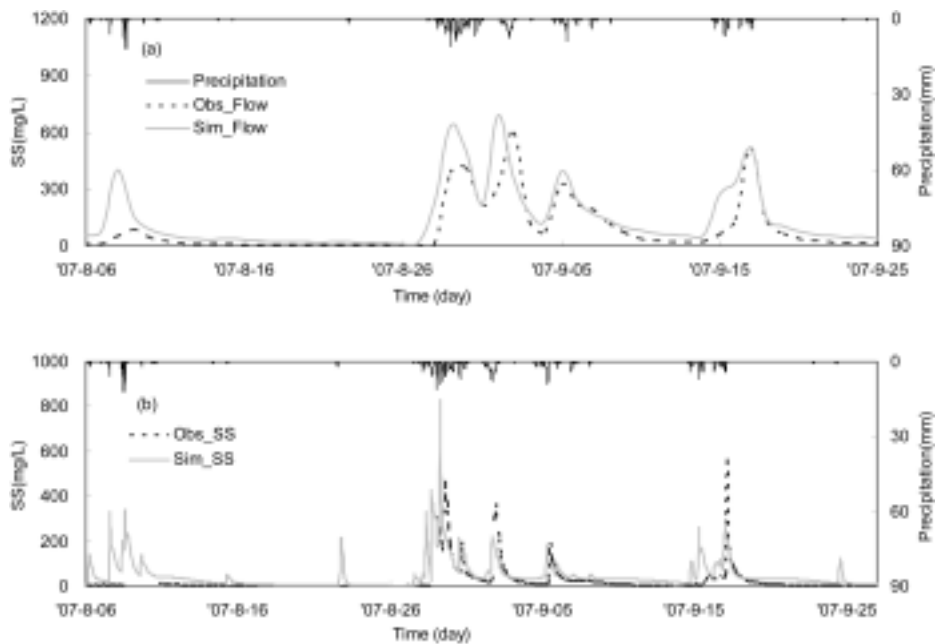


Fig. 6. Comparison of observed and simulated (a) flow rate and (b) SS concentration at mouth of Imha reservoir.

으로 분석하기 위한 활용성을 검토하였다.

유역모델의 유출량 및 부유물질 농도의 보정 결과, 모델 예측값이 실측값을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 모델의 유출량 보정 및 검증에 위하여 그래프 비교를 통한 정성적인 분석과  $R_{eff}$ ,  $R^2$ 의 통계항목을 이용하여 정량적인 분석을 수행하였으며  $R_{eff}$  값은 0.69~0.83,  $R^2$  값은 0.77~0.86의 범위를 나타내어 모델 예측값이 실측값을 잘 모의하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 부유물질 농도의 보정은 2006년 7월 탁수가 집중적으로 발생하는 시기의 3개 강우사상에 대하여 수행하였으며 모델 예측값이 실측값을 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다.

모델의 유출량 및 부유물질 농도 예측력을 검토하기 위하여 2007년 8~9월에 발생한 2개 강우사상에 대하여 모델 예측값과 실측값을 비교하여 모델의 검증을 수행한 결과 모델이 실측값을 비교적 잘 예측하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 저수지 유입 지점에 대하여 전체 유입량과 부유물질 농도 변화를 모의하여 실측값과 비교함으로써 저수지의 탁수 발생 및 거동을 분석하기 위한 저수지 모델의 입력 자료로서의 활용성을 확인하였다. 하지만 추가적인 지점에 대한 검증이 수행되어 다양한 강우의 특성을 반영할 수 있도록 보완이 필요할 것으로 판단되었다.

이와 같이 본 연구에서는 HSPF 유역모델을 적용하여 임하호 유입하천의 유출량 및 부유물질 농도를 모의함으로써 저수지로 유입되는 탁수 발생량을 예측할 수 있었으며 향후 저수지 탁수 발생 예측 및 관리방안 수립을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 한국수자원공사의 연구과제 KIWE-WRE-07-14로 수행되었습니다. 본 연구를 위해 탁수모니터링을 수행해 주신 안동대학교 김영훈 교수님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 한국수자원공사, 임하댐 탁수 저감 방안수립 최종보고서 (2004a).
2. 한국수자원공사, 저수지 연계운영을 통한 탁도관리방안 연구(2007).
3. Albek, M., Ögütveren, Ü. B., and Albek, E., "Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed(Turkey) with HSPF," *J. Hydrol.*, **285**, 260~271(2004).
4. 박윤식, 김종진, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재, "임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가," *한국물환경학회지*, **23**(4), 467~473(2007).
5. 임상준, Kwvin M. Brannan, Saied Mostaghimi, 조재필, "HSPF와 SWAT 모형을 이용한 산림유역의 유출 및 유

- 사량 추정," *한국농촌계획학회지*, **9**(4), 59~64(2003).
6. 이상욱, 김정곤, 노준우, 고익환, "CE-QUAL-W2 모델을 이용한 임하호 선택배제시설의 효과분석," *한국물환경학회지*, **23**(2), 228~235(2007).
7. 정세웅, "성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원모델링," *대한환경공학학회지*, **26**(9), 970~978(2004).
8. 김윤희, 김법철, 최광순, 서동일, "2차원 수리 수질모델(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링," *대한상하수도학회지*, **15**(1), 40~49(2001).
9. 임상준, Kwvin M. Brannan, Saied Mostaghimi, 조재필, "HSPF와 SWAT 모형을 이용한 산림유역의 유출 및 유사량 추정," *한국농촌계획학회지*, **9**(4), 59~64(2003).
10. 이혜숙, 정선아, 박상영, 이요상, "HSPF와 CE-QUAL-W2 모델의 연계 적용을 이용한 용담댐 저수지 탁수현상의 모델 연구," *대한환경공학학회지*, **30**(1), 69~78(2008).
11. Newham L. T. H., Letcher R. A., Jakeman A. J., and Kobayashi T., "A framework for integrated hydrologic, sediment and nutrient export modelling for catchment-scale management," *Ecological modelling*, **19**, 1029~1038(2004).
12. Ribarova I., Ninov P., and Cooper D., "Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria," *Ecological modelling*, **211**, 241~246(2008).
13. Xu Z., Godrej A. N., and Grizzard T., J., "The hydrological calibration and validation of a complexly-linked watershed-reservoir model for the Occoquan watershed, Virginia," *J. Hydrol.*, **345**, 167~183(2007).
14. Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Donigian, A. S., Johanson, R. C., Hydrological Simulation Program-FORTRAN User's Manual for Release 12, U.S. Environmental Protection agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA(1993).
15. 국가수자원관리종합정보시스템 홈페이지, <http://www.wamis.go.kr>(2007).
16. 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>(2007).
17. Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles," *J. Hydrol.*, **10**(3), 282~290(1970).
18. Shrestha, S., Babel, M. S., Gupta, A. D., and Kazama, F., "Evaluation of annualized nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal," *Environmental Modelling & Software*, **21**(7), 961~975(2006).
19. Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A. J., "A review of erosion and sediment transport models," *Environmental Modelling & Software*, **18**, 761~799(2003).