

# HSPF와 CE-QUAL-W2 모델의 연계 적용을 이용한 용담댐 저수지 탁수현상의 모델 연구

이혜숙<sup>†</sup> · 정선아 · 박상영 · 이요상

한국수자원공사 수자원연구원

(2007년 11월 8일 접수, 2008년 1월 2일 채택)

## Modeling Study of Turbid Water in the Stratified Reservoir using linkage of HSPF and CE-QUAL-W2

Hye-Suk Yi<sup>†</sup> · Sun-A Jeong · Sang-Young Park · Yo-Sang Lee

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

**ABSTRACT** : An integration study of watershed model(HSPF, Hydrological Simulation program-Fortran) and reservoir water quality model (CE-QUAL-W2) was performed for the evaluation of turbid water management in Yongdam reservoir. The watershed model was calibrated and analyzed for flow and suspended solid concentration variation during rainy period, their results were inputted for reservoir water quality model as time-variable water temperature and turbidity. Results of the watershed model showed a good agreement with the field measurements of flow and suspended solid. Also, results of the reservoir water quality model showed a good agreement with the filed measurements of water balance, water temperature and turbidity using linkage of the watershed model results. Integration of watershed and reservoir model is an important in turbid water management because flow and turbidity in stream and high turbidity layer in reservoir could be predicted and analyzed. In this study, the integration of HSPF and CE-QUAL-W2 was applied for the turbid water management in Yongdam reservoir, where it is evaluated to be applicable and important.

**Key Words** : Yongdam Dam, Turbid Water, HSPF, CE-QUAL-W2, Model Integration

**요약** : 본 연구에서는 용담댐을 대상으로 유역모델 HSPF와 저수지모델 CE-QUAL-W2를 연계 적용함으로써 강우시 저수지로 유입되는 탁수 관리를 위한 방안을 연구하였다. 강우시 저수지 유입하천의 유출량 및 부유사 농도 특성을 분석하기 위하여 유역모델을 적용하여 모델의 재현성을 검토하였으며 유역모델 결과를 저수지모델의 입력자료로 제공하여 저수지모델의 재현성 검토 및 저수지 내 시간에 따른 탁수분포 양상 등을 분석하였다. 유역모델의 유출량 및 부유사 농도의 재현성 검토 결과, 모델 예측값과 실측값이 적절하게 일치하는 것으로 나타났다. 유역모델의 결과를 연계하여 홍수기 저수지의 물수지, 수온 변화 및 탁도를 대상으로 저수지모델의 재현성을 검토한 결과, 탁수에 의한 수온성층의 변화와 탁수층의 위치, 시간에 따른 탁수분포의 변화 양상 등을 실제와 매우 유사하게 모의하였다. 이와 같이 유역모델과 저수지모델의 연계 적용은 발생 가능한 강우에 대하여 저수지로 유입되는 유량 및 탁수발생량을 예측할 수 있으며 탁수층의 위치와 최고 탁도 등 저수지내의 탁수변화 양상을 비교적 쉽고 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있다. 본 연구결과에 의하면 용담댐을 대상으로 집중강우시 HSPF 유역모델과 CE-QUAL-W2 저수지 모델을 연계 적용함으로써 탁수관리 방안으로 활용될 수 있음을 검증하였다.

**주제어** : 용담댐, 탁수, HSPF, CE-QUAL-W2, 모델연계

### 1. 서론

저수지의 탁수현상은 수자원의 관리와 이용적 측면에서 중요한 요인으로 작용한다. 특히, 하절기 집중강우에 의해 유역으로부터 일시에 많은 양의 토사가 저수지로 유입되어 장기간 머무르게 되면 상수원으로서 질 저하뿐만 아니라 생태계에 악영향을 미치게 된다. 또한, 고탁도 유입수는 많은 양의 오염물질을 포함하고 있기 때문에 저수지 부영양화에 결정적인 영향을 미치게 된다. 고탁도 유입수가 저수지 수질 및 생태계에 미치는 영향을 최소화하기

위해서는 탁수의 유입특성과 저수지 내에서의 거동을 예측하고, 이에 따른 적절한 유역대책 및 호내 저감방안 등을 강구해야 한다.

우리나라에서는 임하호, 안동호, 소양호 및 대청호 등에서 탁수 현상이 보고된 바 있으며 이들 저수지를 대상으로 수치 모델을 이용한 탁수 거동 연구가 수행되었다.<sup>1,2)</sup> 저수지모델을 이용하여 탁수 분포 및 거동을 예측하기 위해서는 정확한 경계조건의 입력이 중요하다. 그러나 유입하천수의 수온과 탁도를 연속적으로 측정하여 경계조건을 생산해 내는 것은 시간 및 비용 측면에서 어려움이 따른다. 임하호, 소양호, 대청호 등 일부 저수지의 유입하천에서 실시간 탁수유입감시를 위한 탁도 자동측정장치가 설치되어 운영되고 있지만, 설치와 유지보수에 많은 인력과

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: yihs@kwater.or.kr  
Tel: 042-870-7454

Fax: 042-870-7419

예산이 소요되며 여러 유입하천의 탁수 유입량을 파악하기에는 한계점이 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로서 유역으로부터 유입되는 토사유실량 및 탁수 유입량 산정을 위한 유역모델의 적용이 요구되고 있다. 토사유실량 산정을 위하여 기존에 USLE 모형이 많이 사용되어 왔으나 기상변동이 심한 유역에서는 시간에 따른 변화, 선행강우에 의한 영향 등을 고려할 수 없는 한계점이 있다. 따라서 최근 들어 SWAT, HSPF 등 강우 발생시 유출량 및 부유사 농도를 모의할 수 있는 유역모델을 이용하여 토사유실량 산정 및 탁수발생 특성을 분석하는 연구가 수행되고 있다.<sup>3~5)</sup>

본 연구에서는 강우시 저수지로 유입하는 탁수의 농도를 유역모델 HSPF를 이용하여 예측한 후, 그 결과를 저수지 수리 및 수질모델인 CE-QUAL-W2에 적용함으로써 특정 강우시 저수지에 발생할 수 있는 탁수 현상을 예측하고자 하였다. 유역모델 모의 결과를 저수지모델의 입력자료로 이용하여 저수지 내에 형성된 탁수층의 시공간적 분포를 재현함으로써 탁수 예측에 대한 적용성을 평가하였다. 유역-저수지 통합 모델링 기술을 적용하면 실시간 탁수 유입 및 저수지 거동을 예측할 수 있으며, 유역 내 토지이용 변화에 의한 탁수저감 효과 분석 등에 확대 적용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구는 저수지로 유입되는 탁수의 배제 및 저감 방안 수립을 위한 선행연구로서 수행되었으며, 용담호를 대상으로 유역-저수지모델의 연계 모델링 기법을 적용하여 탁수 현상을 모의하여 실제 발생된 탁수현상과 비교 평가함으로써 탁수관리 방안으로서의 활용성을 검증하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구 대상

연구 대상지는 금강 최상류의 용담호 및 유역으로 북위 35°35'~36°00', 동경 127°20'~127°45'의 범위에 위치하고

**Table 1.** Area and landcover of sub-watershed in Yongdam reservoir watershed

| Stream                  | Landcover(km <sup>2</sup> ) |             |       |          |       |       |
|-------------------------|-----------------------------|-------------|-------|----------|-------|-------|
|                         | Forest                      | Agriculture | Paddy | Built-up | Water | Total |
| Juja                    | 48.3                        | 5.7         | 2.4   | 1.0      | 0.1   | 57.5  |
| Jeongja                 | 79.2                        | 10.0        | 6.4   | 1.8      | 0.1   | 97.5  |
| Jinan                   | 19.4                        | 7.4         | 5.1   | 2.6      | 0.1   | 34.6  |
| Guryang                 | 112.0                       | 21.9        | 23.7  | 5.8      | 0.2   | 163.6 |
| Geum river              | 177.7                       | 49.3        | 44.8  | 11.9     | 0.7   | 284.3 |
| Reservoir               | 190.7                       | 36.5        | 13.3  | 6.6      | 36.1  | 283.1 |
| Total(km <sup>2</sup> ) | 627.3                       | 130.8       | 95.7  | 29.7     | 37.3  | 920.6 |
| Ratio(%)                | 68.1                        | 14.2        | 10.4  | 3.2      | 4.1   | 100.0 |

있다. 용담호는 금강 중하류에 홍수피해를 경감시키고 전주 지역 및 댐 하류 지역의 원활한 용수 공급을 위해 건설된 다목적댐 저수지이다. 2001년 12월에 준공 이후 담수가 시작되었고, 주요 유입하천은 금강 본류와 주자천, 정자천, 진안천, 구량천의 다섯 개 지류로 이루어져 있다. 최대 저수용량은 815×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 저수 면적은 37.2 km<sup>2</sup>, 총길이는 38.5 km, 최대 수심은 70 m로 전형적인 인공호의 특징을 가지고 있으며 주자천 유입지류 부근과 댐에서의 발전 방류구의 2개 취수탑에서 유출이 이루어지고 있다. 용담댐 유역은 무주군, 진안군, 장수군을 포함한 충청남도, 전라북도, 경상남도의 경계에 걸쳐있다. 유역 면적은 921 km<sup>2</sup>로 금강 유역면적의 약 9.45%를 점유하고 있으며 대부분이 산지유역과 농업지역으로 각각 68%, 25%를 차지하고 있다(Table 1).

본 연구에서는 2005년 7월에 발생한 탁수현상을 대상으로 하였으며, 모델 적용을 위해 현장 조사를 실시하였다. 대상 지역의 유입하천 5개 지점과 저수지내의 4개 수질 측정지점을 Fig. 1에 나타내었다. 각 지점에서 수온, DO,



**Fig. 1.** Map showing study area and sampling sites.

탁도 등을 YSI-6000을 이용하여 주 1회 조사하였고, 표층부터 0.5~1.0 m 간격으로 수심별 자료를 취득하여 모델 보정자료로 사용하였다.

2.2. 적용 모델 개요

HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran) 유역모델은 복합적인 토지피복특성을 갖는 유역에서 강우에 의해 발생하는 유량과 수질을 모의하기 위하여 미국 환경청(U.S. EPA)과 미국 지질조사기관(USGS)이 개발한 모델이다. 적용모듈로 투수지역(Pervious Land)에서의 수문 및 수질을 모의하는 PERLND 모듈, 불투수지역(Impervious Land)의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND 모듈, 수체내의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES 모듈로 나누어져 있다. 각각의 모듈에는 물의 흐름과 관계된 부분과 토사유출, 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 있다. 그리고 수체의 깊이에 대한 수표면적과 저류되는 수량과의 관계는 변하지 않는다는 가정을 기초로 하고 있다. 유역에서의 물수지 기본식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P + SWI + GWI = ET + SWO + GWO + \Delta S \quad (1)$$

여기서, P는 강우량, SWI는 지표수 유입량, GWI는 지하수 유입량, ET는 증발산량, SWO는 지표수 유출량, GWO는 지하수 유출량, ΔS는 저류 변화량이다.

수체에서의 물수지 기본식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$VOL - VOLS = IVOL + PRSUPY - VOLEV - ROVOL \quad (2)$$

여기서, VOL는 말기유량, VOLS는 초기유량, IVOL는 유입유량, PRSUPY은 수면 위로 직접 떨어지는 강수체적, VOLEV는 수면으로부터 증발체적, ROVOL는 유출유량이다. 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, Sediment, DO, BOD, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, Org-N, PO<sub>4</sub>-P, Org-P, Chl-a 등이 있다.<sup>6)</sup>

CE-QUAL-W2 저수지모델은 미공병단(U.S Army Corps of Engineers)에서 1986년 개발된 횡방향 평균화 2차원 수리 및 수질모델이다.<sup>7)</sup> 이 모델은 하천, 저수지, 하구 또는 이들이 결합된 시스템에 적용되어 왔으나 폭 방향의 수질이

균일하다고 가정하므로 상대적으로 폭이 좁고 수심이 깊으며 길이가 긴 인공호에 가장 적합하다고 알려져 있다. CE-QUAL-W2의 계산 방정식은 크게 운동방정식, 연속방정식, 이류확산방정식, 수표면 고도 방정식, 수압 방정식, 상태방정식의 6개 기본식(식 (3)~(8))으로 이루어져 있으며, 6개의 미지수—자유수표고(η), 압력(P), 횡방향 유속(U), 종방향 유속(W), 구성성분 농도(φ), 그리고 밀도(ρ)—에 대한 6개 방정식의 해는 기본모델구조를 형성한다.

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial BP}{\partial x} + \partial \frac{(BA_x \frac{\partial U}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (4)$$

$$\frac{\partial B\phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \phi}{\partial z})}{\partial z} = q\phi B + S\phi B \quad (5)$$

$$\frac{\partial B\eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UBdz - \int_n^h qBdz \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (7)$$

$$\rho = f(T_w, \phi_{ms}, \phi_{ss}) \quad (8)$$

여기서, U는 x 방향, 횡방향으로 평균화된 유속(m·sec<sup>-1</sup>), W는 z 방향 유속(m·sec<sup>-1</sup>), ρ는 밀도(kg·m<sup>-3</sup>), Ax는 x 방향 운동확산 계수(m<sup>2</sup>·sec<sup>-1</sup>), τ<sub>x</sub>는 수평방향 전단력(m<sup>2</sup>·sec<sup>-1</sup>), q는 유입 또는 유출유량(m<sup>3</sup>·sec<sup>-1</sup>), η는 자유수표면 위치(m), g는 중력가속도(m·sec<sup>-2</sup>), B는 수체의 폭(m), t는 시간(sec), P는 압력(N·m<sup>2</sup>), φ는 물질농도(g·m<sup>-3</sup>), D<sub>x</sub>는 x 방향의 확산 계수(m<sup>2</sup>·sec<sup>-1</sup>), S<sub>φ</sub>는 반응에 의한 유입 또는 유출량(g·m<sup>-3</sup>·sec<sup>-1</sup>), h는 총수심(m)이다.

2.3. 모델 구성 및 적용

HSPF 유역모델을 적용하여 용담호로 유입되는 유입하천의 토사량 분석을 위하여 주요 유입하천을 고려하여 6개 소유역으로 구분하였다. 공간적으로 변화하는 유역내 수문현상 및 토사발생을 모의하기 위하여 30 m×30 m DEM(Digital Elevation Model), 하천도 및 유역도를 사용하여 각 소유역별 면적, 경사도, 평균길이 등의 지형특성자료를 추출하였다. 토지피복특성은 유역내 침투 및 유실 모의를 위한 자료로, 대부분류 토지피복도를 분류한 후에 소유역별로 구분하였다. 유역의 기상현상에 따른 수문 및 유사발생을 정확하게 모의하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 각 소유역별 AWS(Automatic Weather System)에서 측정된 강

우량, 기온, 이슬점온도, 풍속 등의 자료를 이용하였으며 증발량, 일사량은 기상청의 장수 기상관측소 관측자료를 운량은 전주기상대의 관측자료를 이용하였다.<sup>8,9)</sup>

점오염원은 댐수질환경연감의 자료와 오염총량관리계획 수립지침 및 수계오염총량관리지침을 이용하여 산정하였다.<sup>10)</sup> 생활계, 산업계, 축산계의 각 오염원을 행정구역별로 산정한 후 소유역별로 구분하여 모델에 입력하였다. 강우시 저수지로 유입하는 탁도를 CE-QUAL-W2의 경계조건으로 입력하기 위해 SS(Suspended Solid) 농도로 계산되는 HSPF 모델 결과를 탁도로 환산하였다. 2005년 하절기 유입하천에서 실측된 탁도와 SS 농도값을 이용하여 SS-탁도 상관관계식을 도출한 후 탁도로 환산하였으며, 적용된 식은 다음과 같다.

$$TUB = 1.436 \times SS \tag{9}$$

여기서, TUB는 탁도(NTU), SS는 부유사 농도(mg/L)이며, 적용된 관계식의 상관계수( $R^2$ ) 값은 0.995이었다.

CE-QUAL-W2 저수지모델을 용담호에 적용하기 위하여 1:5000 수치지형도 정보를 바탕으로 모델 격자를 구성하였다. 금강본류(branch 1)와 유입 경계부(branch 2~4)로 구분하였고, 수심이 얇은 구량천은 지류(tributary)로 구성하여 경계로 설정하였다(Fig. 2). 모델 격자는 총 121개의 구획(segment)으로 나누고, 수심방향으로는 52개의 수층(layer)으로 구성하였다. 수층은 최저 수심 15 m 구간은 2.5 m로, 나머지는 1 m 간격으로 구분하였다. 기상자료는 저수지 내에 설치된 AWS의 기온, 풍향, 풍속자료를 모델에 입력하였다. AWS에서 측정하지 않는 이슬점온도, 운량은 기상청 전주기상대의 측정 자료를 이용하였으며, 3시간 주기로 입력하였다.<sup>8)</sup>

모의 기간은 탁수발생 이전부터 탁수층이 유입한 후 시

공간적으로 변화 양상을 보이는 시기를 포함한 2005년 6월 30일부터 7월 31일까지를 대상으로 하였다. 초기조건은 2005년 6월 30일에 실측한 연직 수온 및 탁도 자료를 입력하였으며, 경계조건은 유입 유량, 수온 및 탁도의 HSPF의 모의 결과를 입력하였다. 유출 유량은 표층에서 취수하는 제 1 발전 및 제 2 발전 방류구를 설정하여 정확한 유출위치를 고려하였고, 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 시간별 방류량 자료를 적용하였다.<sup>9)</sup>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 탁수발생 현황

용담호의 탁수현상은 2005년 7월 1일부터 7월 4일까지 발생한 집중 강우에 의해 기인하였으며, 이 시기 총 강우량은 유역 평균 315.0 mm, 최고강우강도는 구량천 유역에서 69 mm/hr였다. 총 유입량의 최대값은 2114.4 m<sup>3</sup>/sec 였으며, 탁수 유입과 함께 수위는 10 m 이상 상승하였다(Fig. 3). 연구기간 동안 여수로 방류는 없었으며 평균 22.6 m<sup>3</sup>/sec로 표면 취수하였다. 현장조사 결과를 이용하여 탁수의 시공간적 분포를 탁도의 등고선으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 7월 7일의 조사결과에 의하면 탁도는 저수지의 중류에서 최고 250 NTU 이상의 고탁도를 나타냈으며, 탁수층의 위치는 EL. 232~238 m에 분포하였고, 최고탁수층은 EL. 240 m 부근에서 관찰되었다(Fig. 4(a)). 7월 10~12일에 강우가 발생하였으나 강우량이 작아 어느 정도 탁수가 유입되었지만 이전에 발생한 집중 강우에 의한 영향이 이 시기까지 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 탁도는 빠르게 감소하여 7월 14일에는 댐 부근에서 125 NTU의 최고 탁도를 보였으며, 최고탁수층의 위치는 EL. 240 m로 변동이 없었고 지속적으로 탁도가 감소하는 양상을 보였다(Fig. 4(b)~(c)).

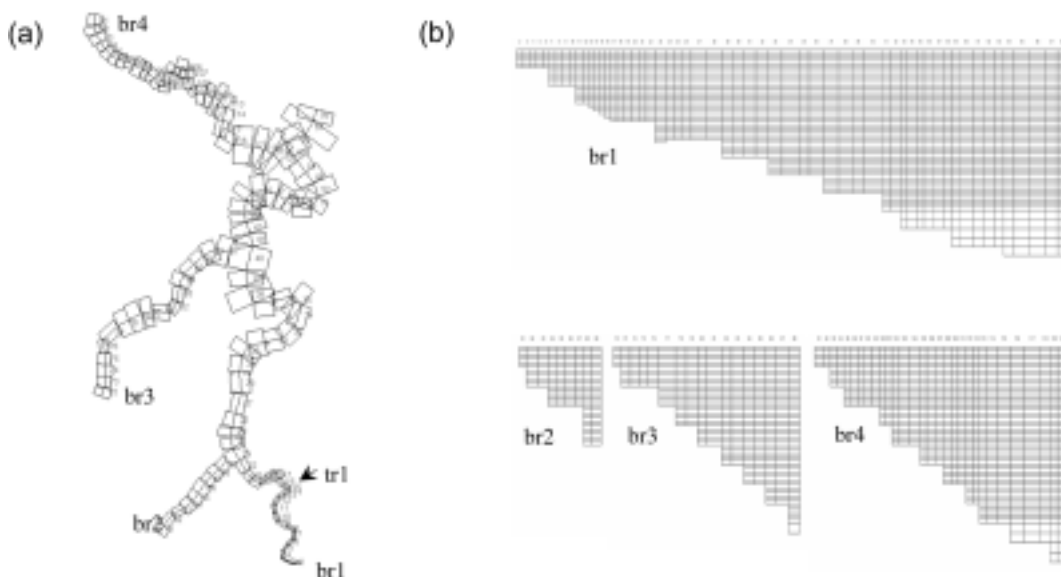


Fig. 2. System segmentation; (a) Top view(x-y), (b) Side view(y-z).

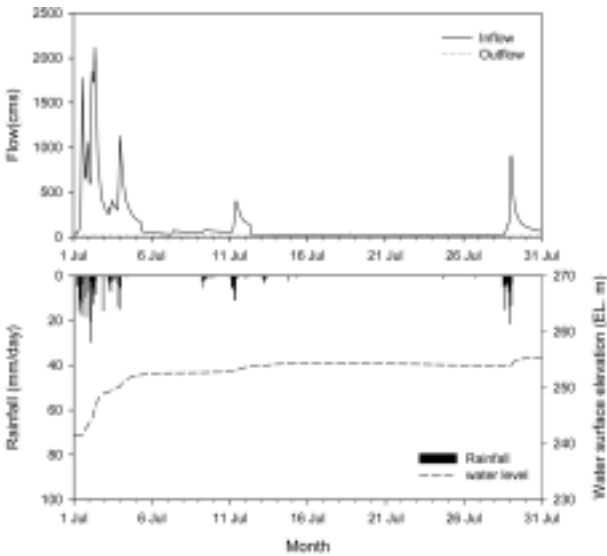


Fig. 3. Rainfall and flow variation during the study period.

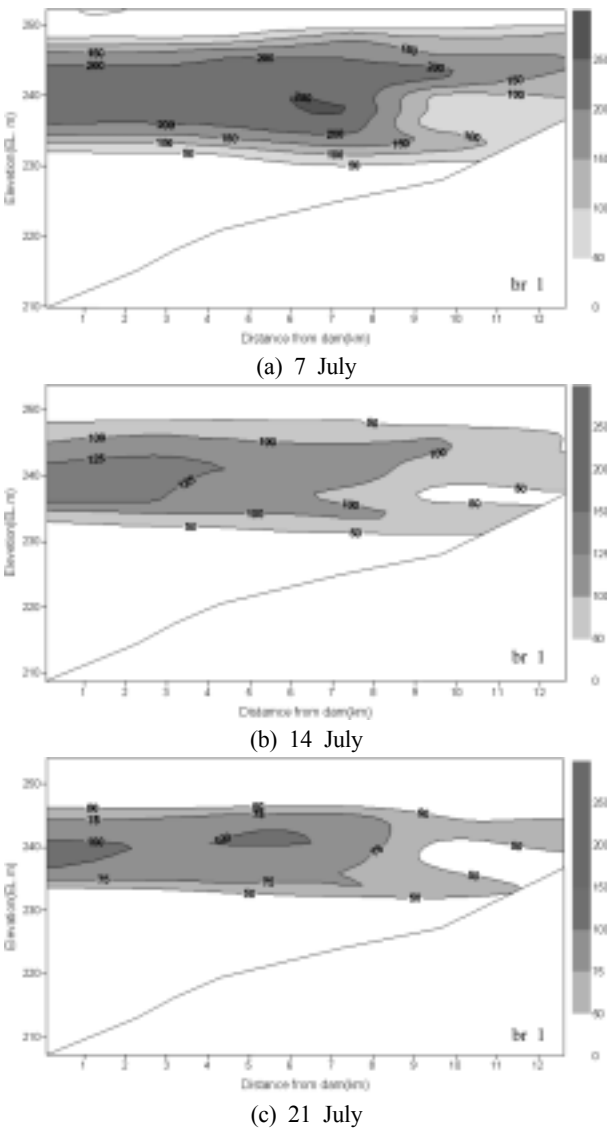


Fig. 4. Spatial and temporal distribution of turbidity of Yongdam Reservoir(2005).

3.2. 유역모델 재현성 검토

용담호 5개 유입 하천에서의 2005년 7~8월의 탁수가 집중적으로 발생하는 시기를 대상으로 유출량과 부유사 농도를 모의하여 유역모델의 재현성을 검토하였다. 이 때, 실측유량은 각 유입하천에서 측정되는 수위값과 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 산정한 값을 이용하였다. 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 과정에서 침투계수, 중간 흐름과 지하수 흐름량 비를 조절하여 침투유량과 기저유량으로 감소되는 시기와 값 등을 조정하였다. 보정에 사용된 주요 매개변수는 투수층 및 불투수층 지표면의 조도계수 등이 있으며 Table 2에 나타내었다.<sup>6,11,12)</sup>

유출량 보정 결과, 대체적으로 실측값이 예측값을 잘 모의하는 것으로 나타났으며 모델의 오차는 상관계수( $R^2$ , Correlation coefficient), RMSE(Root Mean Square Error) 및 RI(Reliability Index)<sup>13)</sup>를 이용하였다. RMSE 및 RI의 계산식은 아래와 같다. RI는 신뢰도 지수로 두 값 사이의 일치성 또는 모델의 적합도(model goodness of fit)를 평가하는 지표이며, 두 값이 완전히 일치하면 1이 되고 차이가 커질수록 값이 증가한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \tag{10}$$

$$RI = \exp\left\{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{O_i}{P_i}\right)^2\right\} \tag{11}$$

여기서,  $O_i$ 는 실측값,  $P_i$ 는 모델 예측값이다.

$R^2$ 의 경우에는 주자천에서 0.91, 정자천에서 0.90, 진안천에서 0.83, 구량천에서 0.96 금강 본류에서 0.85로 높은 상관관계를 나타내었다. RMSE의 경우에는 주자천에서 6.89  $m^3/sec$ , 정자천에서 9.61  $m^3/sec$ , 진안천에서 4.30  $m^3/sec$ , 구

Table 2. Main coefficients for runoff simulations using HSPF

| 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    |
| 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          | 0.2     |
| Interflow inflow parameter   | -     | 0.0 ~                | 0.75    |
| The interflow recession parameter  | 1/day | $1.0^{e-30}$ ~ 0.999 | 0.1     |

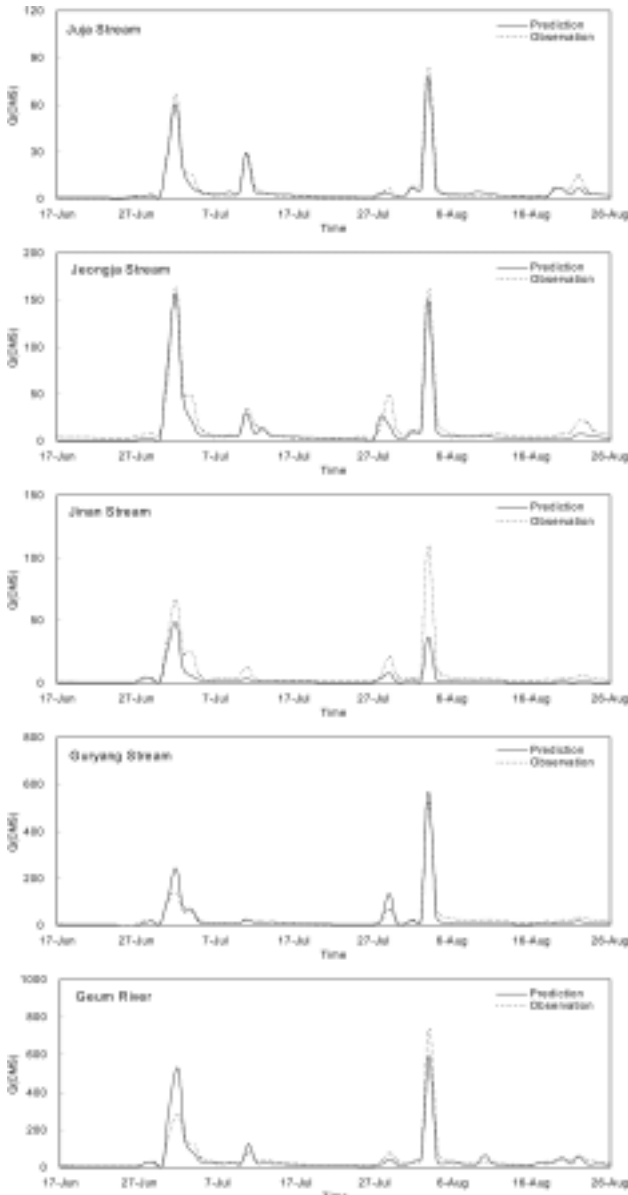


Fig. 5. Runoff calibration results in the Yongdam watershed from July to August 2005.

량천에서 7.22 m<sup>3</sup>/sec, 금강 본류에서 21.00 m<sup>3</sup>/sec으로 나타났으며 RI는 주자천에서 1.52, 정자천에서 1.41, 진안천에서 1.61, 구량천에서 1.39, 금강 본류에서 1.46으로 나타나 유입하천의 유출량을 모의하는데 적합한 것으로 판단하였다.

부유사 농도의 재현성을 검토하기 위하여 2005년도 7~8월에 발생한 강우를 대상으로 모의하였다. 소유역별 측정된 부유물질 농도 변화를 보면, 주자천과 정자천에서는 최대 농도가 308.8 mg/L와 600.0 mg/L로 다른 유역에 비하여 낮은 것으로 나타났으며 진안천, 구량천 및 금강 본류에서는 최대값이 각각 4,522.0 mg/L, 1,294.0 mg/L, 2,700.0 mg/L로 높은 농도의 부유물질이 하천으로 유입되는 것을 알 수 있었다.

부유사 농도의 재현성은 정량적인 평가보다는 시간에 따

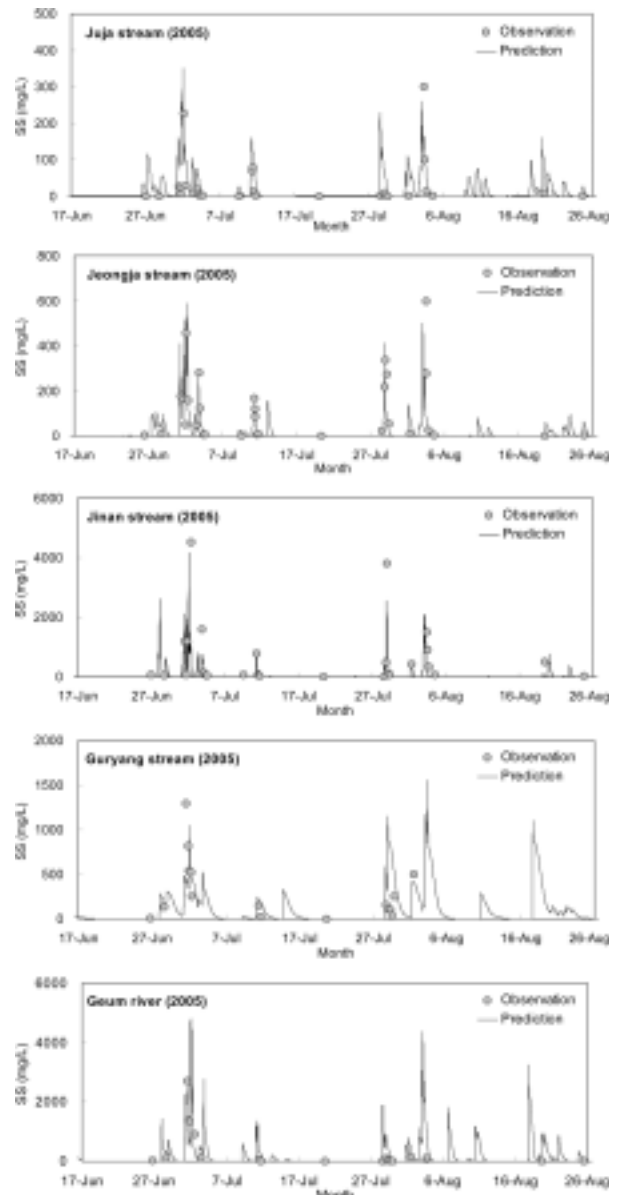


Fig. 6. SS calibration results in the Yongdam watershed from July to August 2005.

른 부유사 농도의 정성적인 평가에 초점을 두었다. 이는 부유사 농도는 유출량과는 달리 인위적인 요인에 의한 영향을 많이 받기 때문에 정량적으로 평가하기에는 한계가 있기 때문이다. 모델 보정 결과, 모델 예측값이 실측값의 경향을 대체적으로 잘 모의하고 있는 것으로 나타났으며 강우사상에 따라 최고 농도 모의가 대체적으로 정확한 것으로 판단되었다(Fig. 6). 부유사 농도의 보정에 사용된 주요 매개변수는 Table 3에 나타내었다.<sup>6,11,12)</sup>

### 3.3. 저수지모델 재현성 검토

탁수현상의 재현을 위해 CE-QUAL-W2 모델의 보정은 탁수층의 생성위치와 연직 탁도 분포 상의 최고 탁도를 기준으로 실시하였다. 모델 보정에 적용된 주요 매개변수는 Table 4와 같다. 오염물질의 이송과 확산에 관련된 주요

**Table 3.** Main coefficients for suspended solid simulations using HSPF

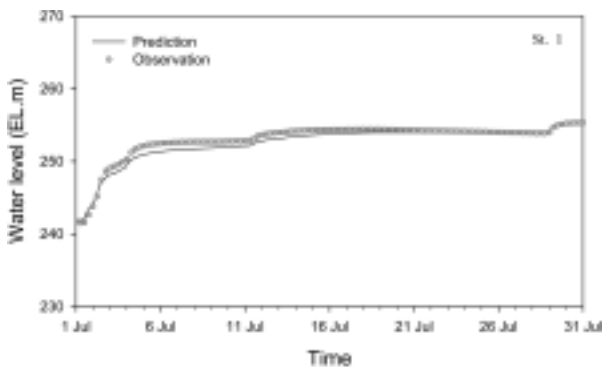
| Definition   | Unit  | Range     | Value       |
|--|-------|-----------|-------------|
| Supporting management practice factor                              | -     | 0.001~1.0 | 1.0         |
| Coefficient in the soil detachment equation                        | -     | 0.0~      | 0.02~0.08   |
| Exponent in the soil detachment equation                           | -     | -         | 2.0~3.0     |
| Fraction by which detached sediment storage decrease               | 1/day | 0.0~1.0   | 0.02        |
| Fraction of land surface which is shielded from rainfall erosion   | -     | 0.0~1.0   | 0.0         |
| Rate at which sediment enters detached storage from the atmosphere | -     | -         | 0.0         |
| Coefficient in the detached sediment washoff equation              | -     | 0.0~      | 0.003~0.5   |
| Exponent in the detached sediment washoff equation                 | -     | -         | 2.0         |
| Coefficient in the matrix soil scour equation                      | -     | 0.0-      | 0.003~0.084 |
| Exponent in the matrix soil scour equation                         | -     | -         | 2.0         |

**Table 4.** Hydrodynamic and water quality parameters for CE-QUAL-W2

| Coefficient                                 | Unit                      | Range       | Value           |
|---|---------------------------|-------------|-----------------|
| Horizontal eddy viscosity                   | m <sup>2</sup> /sec       | 1           | 1               |
| Horizontal eddy diffusivity                 | m <sup>2</sup> /sec       | 1           | 1               |
| Coefficient of bottom heat exchange         | W · m <sup>-2</sup> · sec | 0.3         | 0.3             |
| Wind-sheltering coefficient                 | -                         | 0~1         | 1               |
| Chezy coefficient                           | m <sup>1/2</sup> /sec     | 70          | 70              |
| Sediment temperature                        | °C                        | -           | 8               |
| Light extinction coefficient                | m <sup>-1</sup>           | 0.25 - 0.45 | various in time |
| 0 order decay rate of generic constituent   | day <sup>-1</sup>         | -           | 0               |
| 1st order decay rate of generic constituent | day <sup>-1</sup>         | -           | 0.05            |
| Settling rate of generic constituent        | m · day <sup>-1</sup>     | -           | 0.2             |

수리 매개변수 등은 초기값(Default)을 적용하였고,<sup>7)</sup> 연직 수온분포에 영향을 미치는 광소멸계수(Light extinction coefficient)는 저수지에서 측정된 투명도를 바탕으로 계산하여 시간에 따라 변화되는 값을 적용하였다.

저수지모델의 재현성은 물수지, 수온 변화 및 탁도에 대하여 검토하였다. 물수지는 수위 변화에 대한 모델 예측값



**Fig. 7.** Model validation result of water level.

과 실측값을 비교한 결과, 예측 수위와 실측 수위의 차이가 0.5 m 이내로 비교적 정확한 일치를 보였다(RMSE = 0.41 m). 특히, 7월 2일과 같이 수위가 급격히 상승하는 시기의 수위 변화를 잘 재현하는 것으로 나타나, 홍수기 저수지의 수문현상을 모의하는데 적합한 것으로 판단하였다(Fig. 7).

Fig. 8은 수온 모의 결과로 탁수 유입 이후 7월 7일에서 7월 21일까지 약 1주 간격으로 측정된 실측 수온을 모델 예측값과 비교하였다. 초기조건으로 적용된 6월 30일의 연직수온 분포는 뚜렷한 수온성층 현상을 보였으며, 저수지 상층인 EL. 232~238 m에 수온약층이 형성되었다. 그러나 집중강우에 의한 고탁도 유입수가 같은 밀도를 가진 수층으로 유입하면서 수온약층이 파괴되어 분리되는 양상을 보였고 EL. 232~250 m 구간은 일정한 수온을 나타내었다. 탁수 유입에 의한 이러한 연직 수온 분포 변화를 모델이 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났으며, 댐 앞 지점인 St. 1과 중류인 St. 2 및 St. 3, 상류인 St. 4에서의 결과 모두 높은 일치성을 보였다. 연직 수온 분포에 대한 모델의 오차 정도를 R<sup>2</sup>, RMSE 및 RI를 적용하여 재현력을 비교한 결과(Table 5), R<sup>2</sup>는 0.872~0.993의 범위로 높은 상관관계를 보였으며, RMSE도 최소 0.89°C, 최대 1.78°C로서 작은 오차범위를 보였다. RI를 계산한 결과도 1.03~1.05의 범위로 모델 적합도가 매우 높은 것으로 나타났다.

수심별 탁도 분포 모의 결과는 Fig. 9에 나타내었으며, 모의 결과 탁수층의 생성위치와 최고 탁도 등을 모델이 적절하게 재현하는 것을 알 수 있다. 탁수층은 EL. 230~250 m 구간에 위치하였으며, 모델 결과도 비교적 정확하게 일치하였다. 단, 탁수 유입 직후인 7월 7일 EL. 235 m 부근에서 모델이 실제 탁도 보다 높게 예측되어 RMSE가 50 NTU 이상으로 나타났으나(Table 5), 탁수층이 안정화되기 시작한 7월 14일 이후에는 전 수층에서 비교적 높은 재현성을 보였다. 모델의 오차 정도는 R<sup>2</sup>는 0.661~0.974의 범

**Table 5.** Comparison of model error between observed and simulated value

| Station | Time   | Temperature    |      |      | Turbidity      |       |      |
|---------|--------|----------------|------|------|----------------|-------|------|
|         |        | R <sup>2</sup> | RMSE | RI   | R <sup>2</sup> | RMSE  | RI   |
| St. 1   | 7 JUL  | 0.987          | 1.41 | 1.05 | 0.862          | 51.26 | 2.21 |
|         | 14 JUL | 0.992          | 1.10 | 1.04 | 0.958          | 28.09 | 2.11 |
|         | 21 JUL | 0.985          | 1.31 | 1.04 | 0.956          | 22.21 | 1.70 |
| St. 2   | 7 JUL  | 0.993          | 1.05 | 1.04 | 0.849          | 67.47 | 2.00 |
|         | 14 JUL | 0.993          | 0.89 | 1.03 | 0.974          | 41.24 | 1.79 |
|         | 21 JUL | 0.983          | 1.35 | 1.04 | 0.933          | 20.26 | 1.53 |
| St. 3   | 7 JUL  | 0.981          | 1.44 | 1.05 | 0.875          | 54.67 | 1.54 |
|         | 14 JUL | 0.985          | 1.26 | 1.04 | 0.840          | 52.74 | 1.40 |
|         | 21 JUL | 0.971          | 1.67 | 1.05 | 0.713          | 39.75 | 1.48 |
| St. 4   | 7 JUL  | 0.872          | 1.78 | 1.04 | 0.661          | 80.10 | 1.37 |
|         | 14 JUL | 0.959          | 1.23 | 1.03 | 0.797          | 20.18 | 1.24 |
|         | 21 JUL | 0.939          | 1.67 | 1.04 | 0.583          | 23.91 | 1.34 |

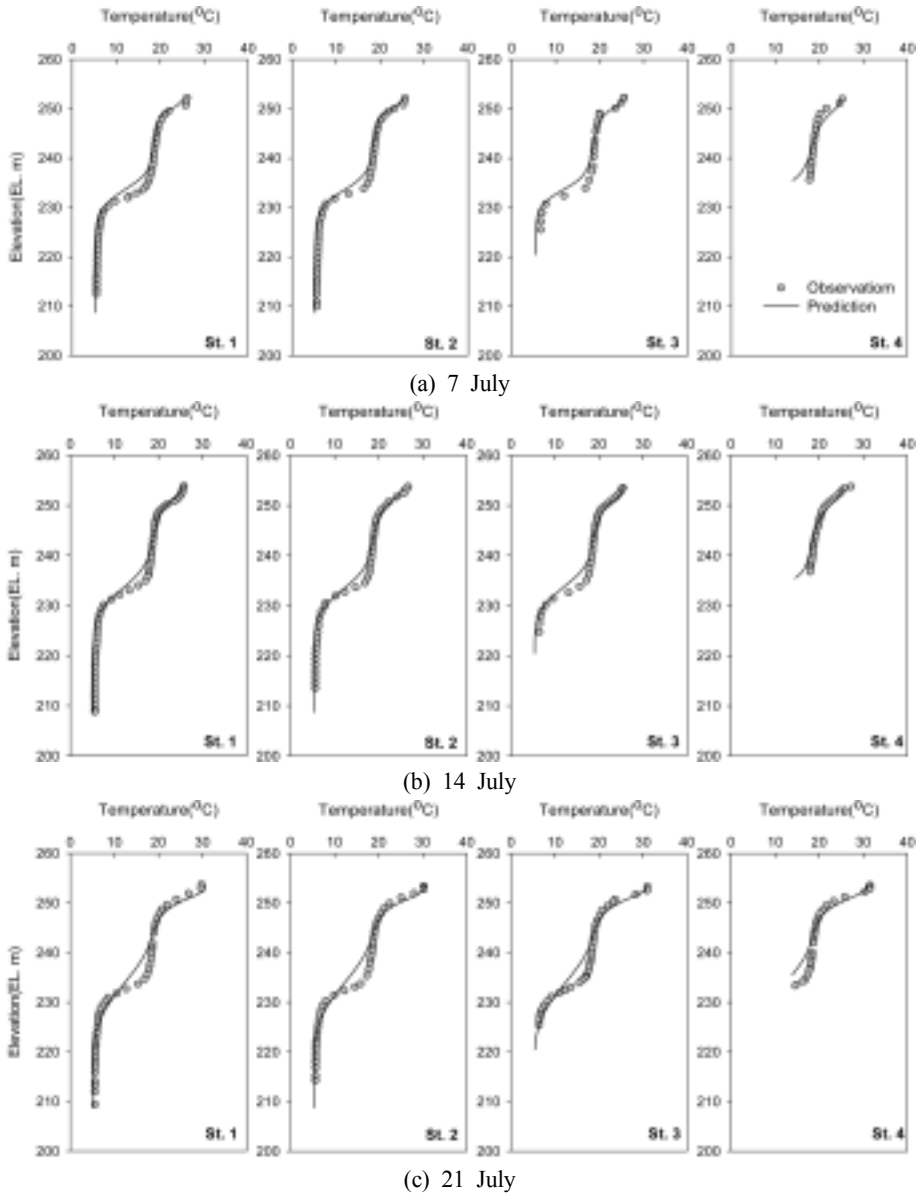


Fig. 8. Model calibration results of water temperature.

위로 수온 예측 결과 보다 낮았지만, 경계조건을 실측치가 아닌 HSPF 모델 결과를 적용한 점을 고려할 때 비교적 양호한 수준인 것으로 판단된다. RI는 최소 1.24, 최대 2.21로 탁수 유입초기에 적합도가 낮게 나타났으나, 탁수 유입이 안정된 이후에는 평균 1.57로 적합도가 신뢰할 수 있는 수준으로 나타났다. 상하류 방향의 공간적인 분포 예측은 저수지 중상류인 St. 3과 St. 4에서 재현성이 비교적 낮게 나타났는데, 이는 횡방향 평균화된 모델이 수심이 낮고 유속의 변화폭이 큰 유입부의 수리 현상과 복잡한 지형 등을 모의하는데 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, CE-QUAL-W2 모형은 저수지 전체 수체에 대해 일정한 침강속도를 가정하여 계산하기 때문에 저수지 구간 별로 다르게 나타날 수 있는 탁수 입자의 침강속도를 고려하지 않은 점도 오차의 원인이 될 수 있는 것으로 판단된다.

수온 및 탁도의 모델 결과를 종합하여 볼 때, 탁수층의 생성 위치 및 최고 농도 예측 등의 모델 정확도가 비교적 높아 유역모델과 저수지모델을 연계한 탁수예측 방법의 적용성이 높게 평가되었다. 특히, 수층별 탁도 분포와 시간에 따른 탁도의 감소 양상 등을 실제와 유사하게 예측하는 것으로 나타나 본 연구에 적용된 유역-저수지 통합 모델링 기술은 저수지 관리 및 운영측면에서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유역모델 HSPF와 저수지모델인 CE-QUAL-W2를 결합하여 용담댐을 대상으로 적용함으로써 특정 강우시 저수지에 발생한 탁수현상 분석을 위한 방안으로 적용성을 검증 및 평가하였다.



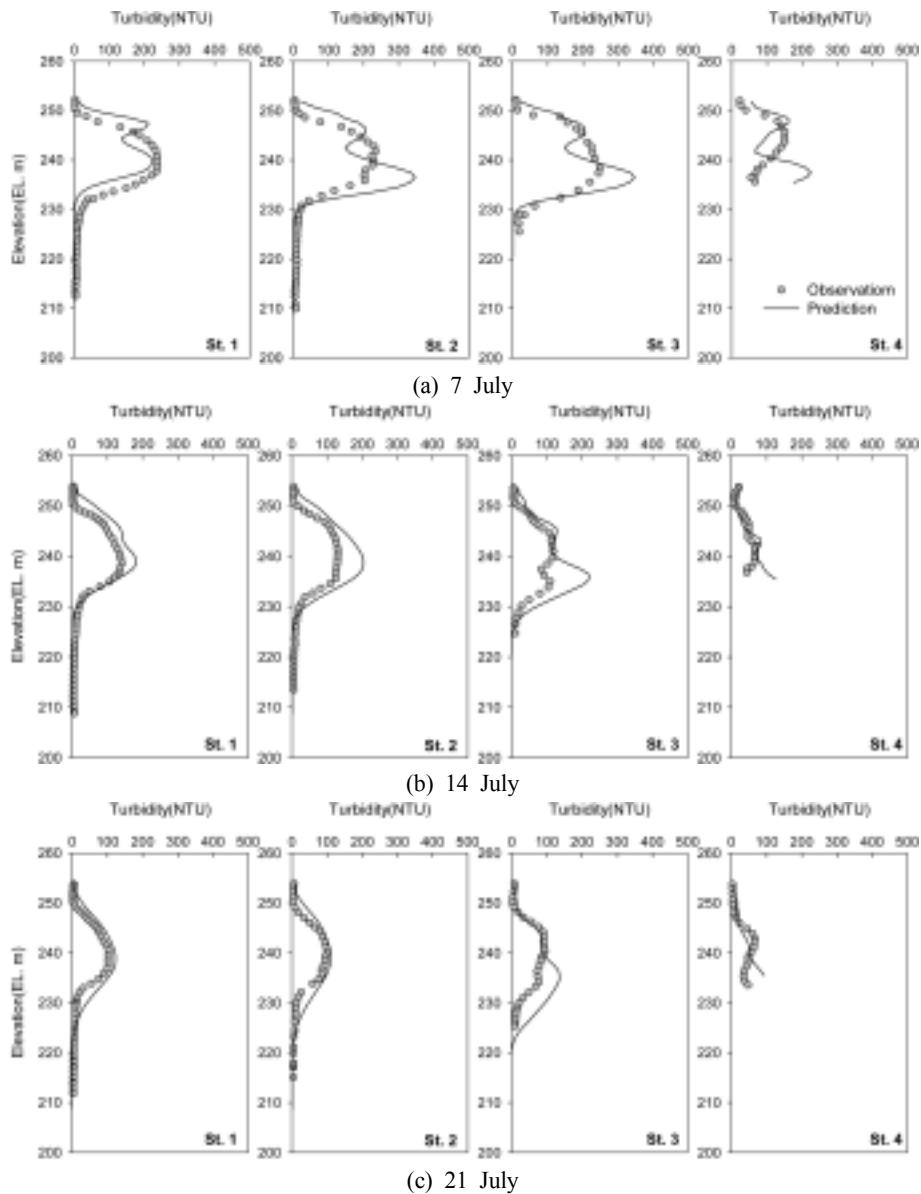


Fig. 9. Model calibration results of turbidity.

유역모델의 유량 및 부유사 농도의 모의는 용담댐 저수지의 5개 유입하천에서 2005년 7~8월을 대상으로 수행하였다. 유량의 재현성은  $R^2$ , RMSE 및 RI의 통계값을 이용하여 평가하였으며 부유사 농도의 재현성은 정성적인 방법으로 평가하였다. 유량의 경우, 모델 예측값이 실측값을 대체적으로 잘 모의하는 것으로 나타났으며 토지피복특성이 비교적 단일하고 유역면적이 작은 주자천과 정자천에서 가장 높은 상관성을 나타내었다. 부유물질 농도 모의 결과, 모델 예측값이 실측값을 대체적으로 잘 모의하는 것으로 나타났으며 강우사상에 따라 최고 농도 모의가 대체적으로 정확한 것으로 판단되었다.

유역모델과 저수지모델을 연계 적용하여 홍수기의 저수지 물수지, 수온 변화 및 탁도에 대하여 저수지모델의 재현성을 검토한 결과, 탁수 유입에 의한 수온성층의 변화와 탁수층의 위치, 시간에 따른 탁수분포의 변화 양상 등을

실제와 매우 유사하게 모의하였다. 단, 탁수 유입 초기에 일부 구간에서 모델이 최고 탁도를 높게 예측하는 문제점이 있었고, 저수지 유입부 지점(St. 4)에서 예측력이 비교적 낮은 한계점이 나타나기도 하였다. 하지만, 유역모델과 저수지모델을 연계 적용함으로써 장래에 발생 가능한 경우에 대하여 탁수층의 위치와 최고 탁도 등을 비교적 쉽고 정확하게 예측할 수 있는 장점을 확인할 수 있었다. 이와 같이 용담댐을 대상으로 HSPF 유역모델 결과를 CE-QUAL-W2 저수지모델의 입력자료로 활용하여 집중강우에 의한 탁수 발생을 예측하고 저수지내 탁수거동을 분석함으로써 저수지 탁수관리방안으로써 활용성을 검증하였다.

### 참고 문헌

1. 정세웅, “성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포

- 특성 및 연직 2차원모델링,” 대한환경공학회지, **26**(9), 970~978(2004).
2. 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일, “2차원 수리 수질모델 (CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링,” 대한상하수도학회지, **15**(1), 40~49(2001).
  3. 허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재, “고랭지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가,” 한국농촌계획학회지, **11**(4), 67~74(2005).
  4. 박윤식, 김중건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재, “임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가,” 한국물환경학회지, **23**(4), 467~473(2007).
  5. 임상준, Kwvin M. Brannan, Saied Mostaghimi, 조재필, “HSPF와 SWAT 모형을 이용한 산림유역의 유출 및 유사량 추정,” 한국농촌계획학회지, **9**(4), 59~64(2003).
  6. Bicknel, 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).
  7. Cole, T.M. and Wells, S.A., CE-QUAL-W2: A two dimensional, Laterally averaged, Hydrodynamic and Water quality Model, Version 3.2 user's manual. Instructional report EL-95-1, U.S Army Corps of Engineer, Vicksburg, MS(2005).
  8. 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>.
  9. 국가수자원관리종합정보시스템 홈페이지, <http://www.wamis.go.kr>.
  10. 한국수자원공사, 댐수질환경연감(2006).
  11. Albek, M., Ögütveren, Ü. B. and Albek, E., “Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed(Turkey) with HSPF,” *J. Hydrol.*, **285**, 260~271(2004).
  12. 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).
  13. Leggete, R.W. and Williams, L.R., “A reliability index for models,” *Ecol. Model.*, **68**, 21~32(1981).