



Improvement of turbid water prediction accuracy using sensor-based monitoring data in Imha Dam reservoir

Kim, Jongmin^a · Lee, Sang Ung^b · Kwon, Siyoon^c · Chung, Se Woong^d · Kim, Young Do^{e*}

^aPh.D Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
^bMaster Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
^cPh.D Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
^dProfessor, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea
^eProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

Paper number: 22-058

Received: 29 August 2022; Revised: 17 October 2022; Accepted: 17 October 2022

Abstract

In Korea, about two-thirds of the precipitation is concentrated in the summer season, so the problem of turbidity in the summer flood season varies from year to year. Concentrated rainfall due to abnormal rainfall and extreme weather is on the rise. The inflow of turbidity caused a sudden increase in turbidity in the water, causing a problem of turbidity in the dam reservoir. In particular, in Korea, where rivers and dam reservoirs are used for most of the annual average water consumption, if turbidity problems are prolonged, social and environmental problems such as agriculture, industry, and aquatic ecosystems in downstream areas will occur. In order to cope with such turbidity prediction, research on turbidity modeling is being actively conducted. Flow rate, water temperature, and SS data are required to model turbid water. To this end, the national measurement network measures turbidity by measuring SS in rivers and dam reservoirs, but there is a limitation in that the data resolution is low due to insufficient facilities. However, there is an unmeasured period depending on each dam and weather conditions. As a sensor for measuring turbidity, there are Optical Backscatter Sensor (OBS) and YSI, and a sensor for measuring SS uses equipment such as Laser In-Situ Scattering and Transmissometry (LISST). However, in the case of such a high-tech sensor, there is a limit due to the stability of the equipment. Therefore, there is an unmeasured period through analysis based on the acquired flow rate, water temperature, SS, and turbidity data, so it is necessary to develop a relational expression to calculate the SS used for the input data. In this study, the AEM3D model used in the Water Resources Corporation SURIAN system was used to improve the accuracy of prediction of turbidity through the turbidity-SS relationship developed based on the measurement data near the dam outlet.

Keywords: Turbidity, SS, LISST-200X, YSI-EXO, AEM3D

센서 기반 모니터링 자료를 활용한 임하댐 저수지 탁수 예측 정확도 개선

김종민^a · 이상웅^b · 권시윤^c · 정세웅^d · 김영도^{e*}

^a명지대학교 토목환경공학과 박사과정, ^b명지대학교 토목환경공학과 석사과정, ^c서울대학교 토목환경공학과 박사후과정,
^d충북대학교 환경공학과 교수, ^e명지대학교 토목환경공학과 교수

요 지

우리나라의 경우 강수량의 2/3 정도가 하절기에 집중되는 강우특성상 해마다 여름철 홍수기의 탁수 문제가 다양하게 발생하고 있다. 이상강우와 기상이변에 의한 집중강우가 증가 추세이며, '02년 태풍 루사, '03년 태풍 매미, '06년 에위니아'부터 20년 마이삭, 하이선 까지 장마와 태풍에 의한 유입량이 급증하는 시기 탁수의 유입으로 수중 탁도가 급상승하며 댐 저수지 내 탁수 문제가 발생하였다. 특히 연 평균 물사용량의 대부분을 하천 및 댐 저수지를 이용하는 우리나라의 경우 탁수 문제가 장기화될 경우 댐 하류 해당 지역 농업, 공업, 수생태 등 사회적, 환경적으로 많은 문제를 발생시킨다. 이러한 탁수 예측을 통한 대응을 위해 탁수 모델링에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 탁수 현황을 모의하기 위해서는 유량, 수온, SS 데이터가 필요하다. 이를 위해 국가측정망에서 하천 및 댐 저수지 내 SS를 측정하여 탁수를 측정 하고 있으나 설비가 미흡하여 데이터 해상도가 낮다는 한계점이 있으며 주요 댐 저수지 내에서는 수자원공사에서 관리하는 자동 측정기기를 활용하여 높은 데이터 해상도를 유지 하고 있으나 댐 별, 기상 조건에 따라 미측정 기간이 존재한다. 탁도를 측정할 위한 센서로는 Optical Backscatter Sensor (OBS), YSI 등이 있으며 SS를 측정하기 위한 센서는 레이저분산측정기(Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, LISST) 등의 장비를 이용하고 있다. 하지만 이런 첨단 센서의 경우 또한 수중에 고정하여 측정하기에는 장비의 안정성 등의 이유로 한계가 있다. 따라서, 취득된 유량, 수온, SS, 탁도 데이터를 기반으로 분석을 통해 미측정 기간이 존재함으로 입력자료에 활용되는 SS를 산정하기 위해 관계식 개발을 필요로한다. 본 연구에서는 댐 방류구 인근 지점 측정 데이터를 기반으로 개발된 탁도-SS 관계식을 통해 수자원 공사 SURIAN 시스템에서 활용되고 있는 AEM3D 모델을 이용하여 탁수 발생 예측 정확도 개선을 하고자 하였다.

핵심용어: 탁도, SS, LISST-200X, YSI-EXO, AEM3D

*Corresponding Author. Tel: +82-31-330-6407
E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Kim, Young Do)

1. 서론

우리나라의 강우 특성이 하절기에 집중되어 있으며 최근 기후변화에 따른 이상강우 및 기상이변에 따라 집중강우가 증가하는 추세며 이로 인해 탁수 발생 및 탁수 장기화 문제가 2020년 소양강댐, 임하댐 등 탁수 발생 우려지역에서 발생하였다. 과거 태풍 ‘02년 루사’, ‘03년 매미’, ‘06년 에위니아’ 이후 탁수 문제에 대해 정부 합동 및 K-water에서 자체적으로 관리를 해왔으나 ‘20년 마이삭, 하이선’ 탁수 문제가 발생하여 기존 탁수 저감대책에 대한 평가 및 개선 방안을 마련할 필요가 있다. 이러한 탁수 저감대책에 대한 평가를 확인하기 위해서는 탁수 예측의 정확도가 중요하며 과거부터 하천 및 호내 탁수 모의에 대하여 많은 연구가 있었다(Kim et al., 2006). (Chung et al., 2007), 또한 기존 국내 탁수 조사 방법은 부유사 채집기를 활용한 집적 계측 기법을 통해 시료를 채취하여 증발법, 여과법을 이용한 수정 아인슈타인법을 통해 총 유사량을 추정하는 식의 점 또는 선 단위의 간헐적으로 진행됨에 따라 탁수 예측을 위한 시계열의 연속자료를 취득하기에는 시간적, 인력적으로 힘든 실정이다. 또한, 지속적인 유사량 관측의 어려움에 따라 유량-부유사 관계곡선을 통해 유량 대비 유사량을 간접적으로 추정하고 있다. 하지만 국내 하천의 경우 홍수기에 따른 하천 수리학적 특성이 변동됨에 따라 주기적인 관계식 재구축이 필요할뿐더러 불확도가 높아 직접 신뢰도가 낮다. 이러한 문제점에 대하여 탁도-SS 관계를 통해 탁수 예측 정확도 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Chung et al., 2011). 국내·외에서 첨단장비를 통한 데이터 취득 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Kwak et al., 2017) (Kim et al., 2012). 특히 국외에서 Mikkelsen and Pejrup (2001)는 LISST-100X를 활용하여 검·보정 및 입경크기를 통한 SSC 산정을 진행하였으며 이외에도 LISST-100X를 활용한 센서 측정 결과와 실험실 여과방법 병행분석을 통해 수중 부유물질의 농도, 입도별 광 감쇄 계수, 분포 등 다양한 분석을 진행하여 탁도 최대 발생기작 원인에 대한 분석을 진행하였다(Haun et al., 2013). 또한 채수를 통한 실험실 분석을 통해 LISST의 적용성을 검토하고 SSC, PSD를 산정(Ehrbar et al., 2017)하는 등 활발히 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 호주 Hydro-Numerics사(www.hydronumerics.com.au)가 ELCOM-CAEDYM 모델을 기반으로 개발한 3차원 수리-수질 동력학 모형 AEM3D (An et al., 2020) 모델을 이용하였다. 기존 탁수 예측을 위해 유량-SS 관계식을 주로 활용하였으나 정확도, 인력적 시간적 효율 증대를 위한 센서 기반 고해상도 데이터 취득을 통해 탁수 발생 모의를 진행하여 정확도 개선에 활용하고자 하였다.

2. 연구 방법

대상지역인 임하댐(Fig. 1)의 경우 과거 태풍 ‘02년 루사’, ‘03년 매미’, ‘06년 에위니아’으로 인해 호내 연중 최고 탁도가 880 NTU에서 1,220 NTU 까지 발생하였으며 최근 ‘20년 마이삭 하이선’으로 인해 최고 탁도 3,000 NTU, 2,800 NTU의 탁수 유입되어 탁수 문제가 크게 발생하였다. 임하댐의 경우 낙동강 지류인 반변천, 36°00′~36°80′, 동경 128°40′~129°20′의 범위에 위치한다. 유역 전체 면적은 1,367.6 km²로 총 저수용량은 595백만 m³, 주요 유입하천으로는 반변천, 용전천, 길안천 등이 있으며 반변천 유역 면적이 임하호 유역 면적의 63%를 차지하고 있다(Yi et al., 2008). 임하댐은 낙동강 중·하류부와 남동 해안지역의 장기적인 용수수급 대책과 홍수피해 방지를 위해 건설된 다목적댐 저수지이다(Yi et al., 2008).

본 연구에서 활용한 3차원 수리-수질 동역학 모델인 Aquatic Ecology Model 3D (AEM3D)는 서호주 대학교 물연구센터 (Center for Water Research, CWR)에서 개발된 Estuary/Lake/Coastal Ocean Model (ELCOM)과 Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM)을 기반으로 호주 HydroNumerics사(www.hydronumerics.com.au)에서 개발되었다(Hodges and Dallimore, 2019). 국내의 다목적댐과 같은 깊은 수심의성층수체에 적합한 범용 3차원 수리-수질 모델로서 수리-수질-생태계의 연동 해석(Coupled modeling)이 가능하다(An et al., 2020). AEM3D의 수리 동력학을 해석하기 위한 지배방정식은 운동량방정식, 연속방정식, 자유수면 방정식, 물질 이송-확산 방정식이 포함된다(An et al., 2020)

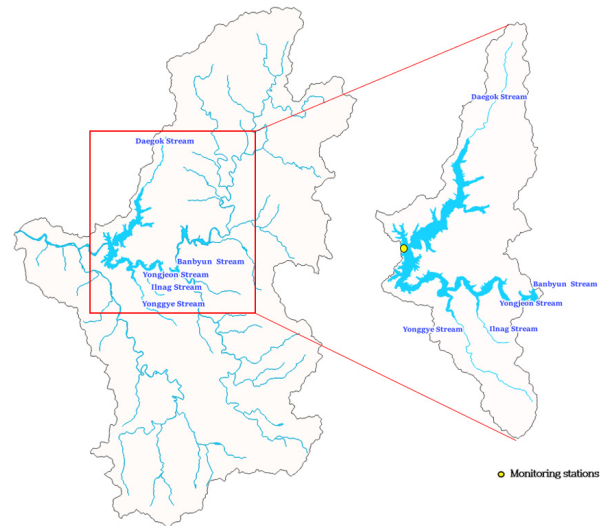


Fig. 1. Location of the study site and monitoring stations (Imha reservoir)

(Table 1).

AEM3D 격자의 경우 K-water에서 활용 중인 SURIAN-AEM3D 내 적용 중인 자료로 제공받아 사용하였다. 임하댐 상류 반변천과 용전천, 대곡천부터 임하댐 축을 대상으로 격자 간격은 수평 방향 100 m, 수직 방향 1 m 간격으로 61개의 수층(layer), 114,834 cell로 구성하였다. 구축된 지형 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 실측 수위-저수용량 관계와의 2020년 실측 수위 비교를 통해 그 신뢰도를 검증하였으며, 평가지표로 NSE (Nash Sutcliffe Efficiency), AME (Absolute Mean Error), RMSE (Root Mean Square Error)를 사용하였다. 평가 결과, NSE=0.934 MAPE=9.13%, RMSE=7.92×10⁶ m³, R²=0.987로 높은 신뢰도를 보였다(Fig. 2).

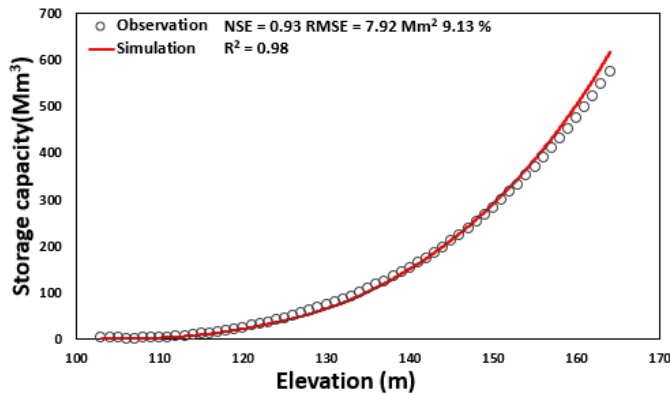
AEM3D 모델의 모의기간은 2020년 1월부터 2020년 12월까지 2020년(366일) 유량, 수위, 수온, 탁도의 실측 자료를 사용하여 모델을 보정 하였다. 초기 수위, 수온, SS는 K-water

물정보포털에서 제공하는 댐 수문자료와 K-water에서 실시간으로 측정되는 일단위의 자동측정망의 수온, 탁도값을 탁도-SS 관계를 이용하여 변환하여 사용하였다. 기상자료는 기상자료개방포털의 안동기상대 시단위 자료를 활용하였으며, 기상 입력자료로는 풍속, 풍향, 기온, 상대습도, 일사량, 기압, 전운량으로 구성된다(Fig. 3). 모델의 경계조건으로는 유입량과 방류량, 수온, SS입경 크기별 농도를 포함하며 유입량의 경우 K-water 물정보포털에서 제공되는 댐 운영자료의 일별 자체유입량을 사용하였다. 방류량은 발전, 수문, 하천유지, 도수로, 여수로를 사용하여 8개의 유출경계조건을 설정하였다.

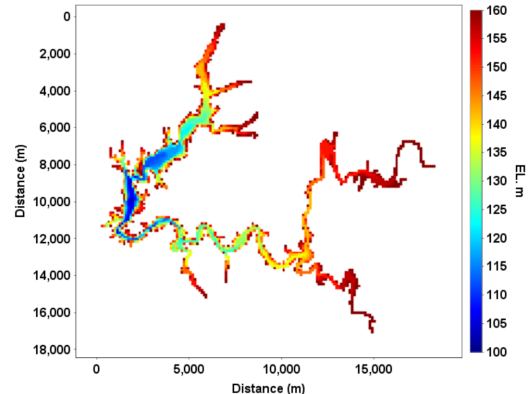
유입 수온은 K-water 실시간 자동측정망의 일별 수온 데이터를 사용하였으며, 결측치는 유량, 대기 기온, 이슬점 온도를 사용하여 개발한 다중 회귀식을 적용하였다(Eqs. (1)~(3)). 여기서, T_{air}는 기온(°C), T_{dew}는 이슬점 온도(°C), Q는 유량(m³/s)이다. AEM3D 내 적용한 수온 보정 매개변수는 Table

Table 1. Hydrodynamic equations in AEM3D

Variable	Equation
X-direction momentum equation	$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_h \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + f_v$
Y-direction momentum equation	$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho' dz \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_h \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - f_u$
Z-direction momentum equation (Hydrostatic pressure assumption)	$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$
Continuity equation	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$
Free-surface equation	$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{h_0}^\eta u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{h_0}^\eta v dz \right] = 0$
Transport equation	$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_h \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_h \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_v \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + S_c$



(a) Comparison of simulated reservoir level and observed capacity curves



(b) Numerical grid system in Dae-cheong reservoir

Fig. 2. Measured and simulated water level-storage curves and model grids

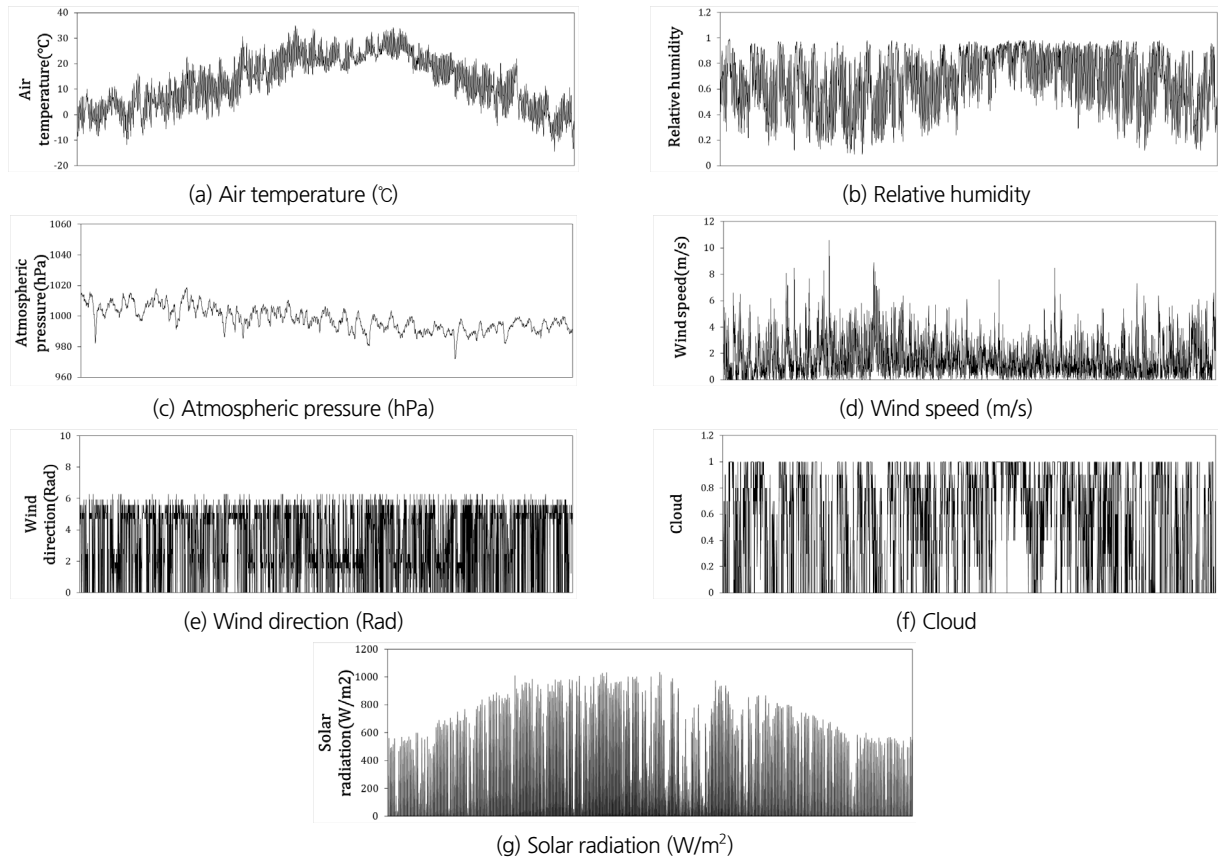


Fig. 3. Weather time series data

Table 2. Imha Dam water temperature correction parameters

Keyword	Description (unit)	This study
SEDIMENT_REFLECTIVITY	light reflectance in sediment (-)	0.9
SURF_HEAT_TRANSF_COEFF	light absorption rate between atmosphere and water surface (-)	0.0013
MEAN_ALBEDO	mean albedo of the water (-)	0.08
MIXING_COEFF_CN	wind stirring coefficient (-)	1.33
MIXING_COEFF_CC	convective coefficient (-)	0.2
DEFAULT_PAR_EXTINCTION	light extinction coefficient for PAR (/m)	0.4

2와 같다.

용전천 :

$$T = 0.7320 T_{air} + 0.0360 T_{dew} - 0.0250 Q + 4.8494 \quad (1)$$

반변천 :

$$T = 0.7477 T_{air} + 0.0269 T_{dew} - 0.0093 Q + 5.7182 \quad (2)$$

대곡천 :

$$T = -0.4506 T_{air} + 0.5154 T_{dew} + 0.0398 Q + 5.2422 \quad (3)$$

탁수 모의를 위한 입력자료의 경우 유입 TSS 자료의 경우 실측자료가 없음을 따라 측정자료를 바탕으로 산정한 유량과 TSS관계식을 통해 산정하여 이용하였다. 댐내 탁도는 K-water 실시간 자동측정망(K-water) 일자료를 사용하여 기존에 연구된 사례를 참고하여 탁도-SS 관계식(Yi *et al.*, 2008) (Eq. (5))을 이용하여 사용하였다. 고탁수 및 저탁수에 따른 탁도-SS 관계식이 달라짐에 따라 다항목 측정 장비 YSI-EXO와 레이저 부유사농도 및 입도 분포 측정 장비 LISST-200X를 활용하여 임하댐 유입부 인근 지점에서 시간 동기화를 위해 1초 빈도로 연직 방향으로 측정 진행하였다(Fig. 4). 센서 기반탁



Available Sensors	Temperature, Electric Conductivity, Dissolved Oxygen, pH, Turbidity, Chlorophyll-a, BGA, PC
Operating Environment	Temperature :-5 to 50°C Depth : 0 to 250 m
Length	71.10 cm
Diameter	7.62 cm
Weight	3.60 kg

(a) YSI-EXO Specification



Measurement frequency	1s
Depth Rating	600 m
Range (Sediment Size) Range (Concentration)	1.0-500µm 0.5-700 mg/l (particle-size dependent)
Length	63.9 cm
Diameter	10.03cm
Weight	5.4 kg

(b) LISST-200X Specification



(c) Boat utilization instrumentation

Fig. 4. Equipment specifications and measurement methods

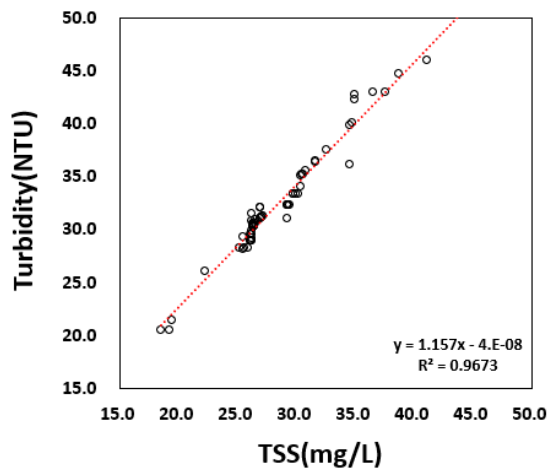


Fig. 5. Correlation between turbidity-SS

수 예측 모의 정확도 개선 여부 확인을 위해 측정된 자료를 토대로 SS, 탁도 결과의 상관 관계(Fig. 5)를 통해 추가로 50 NTU 이하의 관계식을 산정 및 모델에 적용하여 기존 탁수 모의 결과와 비교하고자 하였다(Eq. (4)). 기존 문헌조사를 통한 탁수 모의는 Case1으로 계측 데이터를 추가로 이용한 모의는 Case 2로 지정하였으며 적용한 매개변수는 Table 3와 같다.

$$\text{Turbidity} < 50 : \text{Turbidity} = \text{SS} \times 1.157 \quad (4)$$

$$\text{Turbidity} > 50 : \text{SS} = \text{Turbidity} \times 1.022 \quad (5)$$

Table 3. Imha Dam water temperature correction parameters

Parameter	Case 1			Case 2		
	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3
Diameter (μm)	1	5	10	1	5	10
Density (kg/m^3)	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Partition (%)	30	50	20	20	60	20
Settling velocity (m/s)	7.46×10^{-6}	3.68×10^{-5}	1.69×10^{-6}	7.46×10^{-6}	3.68×10^{-5}	1.69×10^{-6}
Light attenuation coefficient	0.07	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05

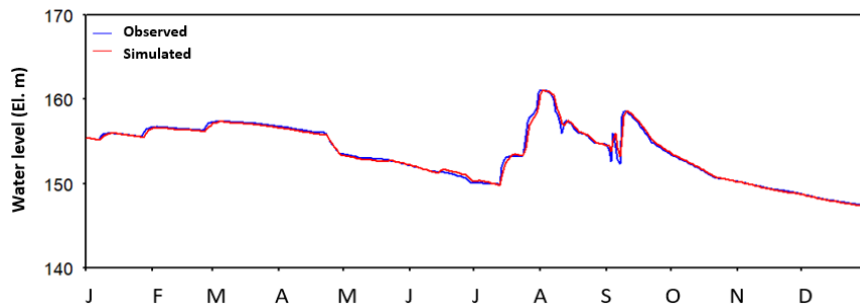


Fig. 6. 2020 Imha Dam observation and simulation reservoir water level comparison

3. 실험 결과

임하댐 물수지 재현성 평가를 위한 2020년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 총 366일의 실측 수위 및 모델 예측수위를 비교하기 위해 2020년 실측 수위 및 모의 수위를 시계열로 나타 내었다(Fig. 6). 물수지 모의 결과 비교는 모형구축의 정확성을 판단하는 기준이 되며, 구축된 지형자료와 모의에 사용되는 유량에 의해 좌우된다(Ahn *et al.*, 2013). 비교한 결과 NSE는 0.934, RMSE는 0.79 m, MAPE는 0.93%으로 관측 수위와 비교하였을 때 수위를 적절히 재현하였다.

탁수의 시공간적 분포의 정확도 개선을 위해서는 수온성층의 재현이 매우 중요하며 수온 연직 분포를 재현성을 확인하고자 2020년 수온 실측, 모의 값을 비교하여 나타내었다(Fig. 7).

수온 연직 분포의 경우 봄부터 표층 수온이 상승하며 성층 현상이 발생한다. 특히 여름철의 경우 높은 기온으로 인해 성층화 현상이 가장 크게 나타나는 모습으로 표층 수온약층 심층으로 구분할 수 있으며 이런 성층 현상은 탁수에 큰 영향을 끼친다. 특히 일반적으로 겨울철의 경우 표층부터 심층까지 일정한 수온 분포를 나타내지만 2020년의 경우 11월까지 성층 현상이 발생한 것으로 나타났다. 수온 모의 수심별 비교 결과 NSE는 0.80~0.99, 수온예측오차도 RMSE가 0.53~2.78°C, MAPE는 4.14~18.47% 범위로 9월부터 11월까지의 표층 수온의 경우 전반적으로 높게 산정되어 계절별 약간의 차이를 보이거나 전반적으로 대부분의 기간에 높은 예측 성능을 보여

모델은 적절히 보정된 것으로 판단된다.

SS 모의 재현성 확인하기 위해 댐 앞 지점의 실측값 및 모의 값의 수심별 SS 농도 분포를 기존 문헌 조사를 통한 관계식을 사용하였을 때(Fig. 8(a))와 센서 기반 현장 계측을 통한 50 NTU 이하의 관계식을 산정하여 적용한 결과(Fig. 8(b))로 비교하여 나타내었다.

SS 농도의 수심별 분포의 재현성을 확인하기 위해 Case 1, 2의 댐 앞 지점의 실측한 수심별 탁도와 모의값의 적합성과 오차 분석결과 Case 1의 경우 RMSE는 0.81~149.30 NTU의 오차범위를 보였으며 Case 2에서는 RMSE는 0.78~133.71 NTU의 오차범위를 보다. Case 1, 2 모두 9월에서 RMSE 149.30 NTU, 133.71 NTU로 높게 나타 났으나 9월의 최고탁도를 감안하였을 때 경향은 유사하게 나타난 것으로 판단된다. 두 Case 결과에 대해서 Case 1의 경우 최고 탁도 기간인 9월을 제외한 나머지 기간에서는 실측 탁도와 비교시 과대산정 되는 경향을 보였으며, 반대로 Case 2의 경우 전반적으로 실측 탁도값의 경향성을 잘 반영하였으나 최고 탁도 기간인 9월에서 실측에 비해 과소 산정된 결과를 보였다. 하지만 전체적으로 오차 범위나 경향성을 보았을 때 센서 기반 직접 계측 데이터를 활용하여 탁수 예측 정확도가 개선된 것으로 판단된다.

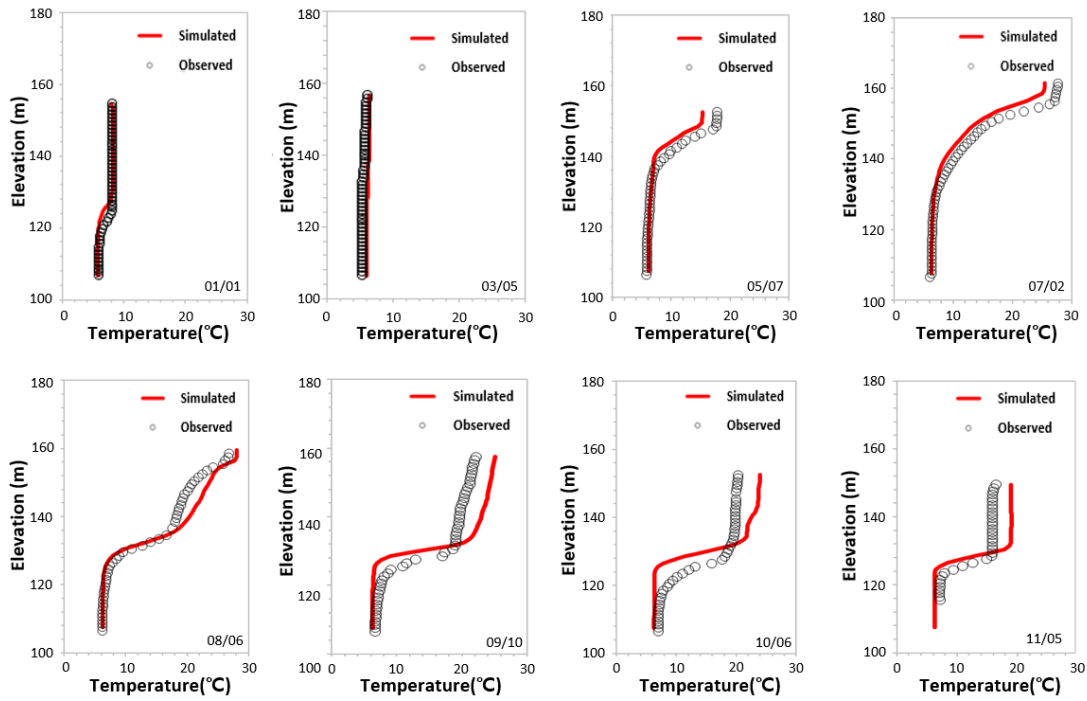
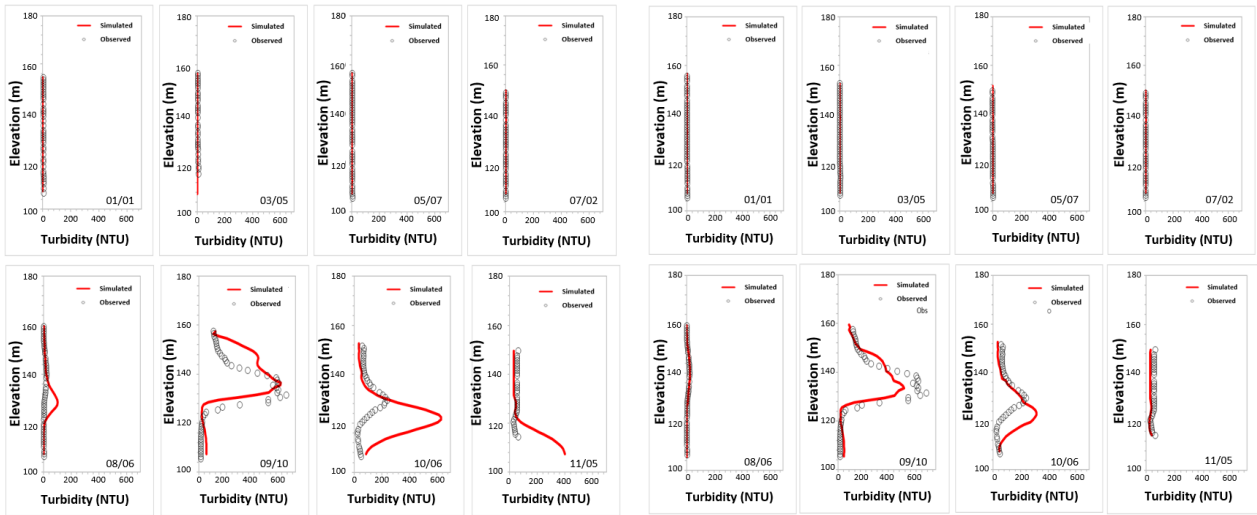


Fig. 7. 2020 Imha Dam observation and simulation water temperature comparison



(a) Case 1

(b) Case 2

Fig. 8. Comparison of 2020 Imha Dam observation and simulation turbidity

4. 결론

본 연구는 최근 이상강우에 의한 기후변화에 따른 탁수 문제의 증대로 기존, 추후 탁수 저감 대책의 효능 및 검증을 필요로 함에 따라 탁수 예측 정확도 개선을 목적으로 진행하였다. 기존 탁수 예측 모의를 위한 SS 입력자료 구축의 경우 지속적

인 유사량 관측의 한계로 인해 Q-SS 관계를 통해 유량 대비 유사량을 간접으로 추정하여 진행되어왔으나 불확도가 높기 때문에 탁수 예측 신뢰도가 낮다. 이 외에 현장 조사를 이용하여 채수를 통해 수체 내 입경 크기, 입경 크기별 비율 등 분석을 통해 탁도-SS 관계식 산정을 진행하고 있으나 해당 방법의 경우 많은 비용, 시간적, 인력이 소요된다. 이에 따라 본 연구에서

는 센서 기반 현장 계측 장비인 YSI-EXO, LISST-200X를 활용하여 현장 조사를 진행하였으며 탁도와 SS 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터를 이용하여 기존 50 NTU 이상에서의 관계식 외에 50 NTU 이하의 관계식을 산정하여 탁수 예측 모의를 진행하여 기존 모델(Case 1)과 비교하였다. 탁수 예측을 위해서는 수위, 수온 모의의 재현성이 중요하며 선행되어야 함에 따라 모의를 진행하였으며 수위의 경우 수위 관측 수위와 비교시 NSE는 0.934, RMSE는 0.79 m, MAPE는 0.93%로 물수지를 적절히 재현한 것으로 판단 되었다. 수온의 경우 NSE는 0.80~0.99, 수온예측오차도 RMSE가 0.53~2.78°C, MAPE는 4.14~18.47% 범위로 9월~11월의 경우 표층 수온이 전반적으로 높게 산정되었으나 수온 성층현상을 적절히 재현되었다고 판단된다. 고탁수, 저탁수 별 탁도-SS 관계식의 효율을 확인하기 위해 문헌조사를 통한 50 NTU 이상 시 탁도-SS 관계식만을 사용한 Case 1로 50 NTU 이하/이상 시 각각 탁도-SS 관계식을 사용한 Case 2로 탁수 모의를 진행하여 비교하였다. 그 결과 Case 1의 경우 RMSE는 0.81~149.30 NTU, Case 2의 경우 RMSE는 0.78~133.71 NTU의 오차범위를 보였다. 9월의 경우 관측 최고 탁도가 600 NTU 이상으로 나타남에 따라 모의 결과와의 오차가 크게 나타났으나 최고 탁도 값이나 경향은 유사하게 나타났다. 하지만 Case 1의 경우 그 외의 탁수가 발생한 8월, 11월의 경우 예측 탁도 값이 과대 산정된 결과를 보였다. 이에 비해 Case 2의 경우 최고 탁도 기간인 9월의 경우 약간의 과소 산정된 결과를 보였으나 연직 탁수 분포 경향이 더 유사하게 나타났으며 Case 1에서 과대 산정된 8월, 10월의 경우도 보다 정확한 탁수 분포를 나타내었다. 이는 고탁수 기간과 저탁수 기간을 기준으로 탁도-SS 관계식을 적용함에 따라 보다 정확한 유입 입력자료 값을 산정 가능함에 따라 탁수 예측 정확도가 개선 된 것으로 판단된다. 따라서, 비강우/강우 시 주기적인 유입부 및 유출부, 호내 등 센서 기반 직접 계측을 통한 탁도, TSS, 입경크기, 입자 크기 별 분율 데이터 취득이 추후 탁수 예측의 정확도 개선에 도움될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원(2021003030002)에 의해 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahn, S.R., Kim, S.H., Yoon, S.W. and Kim, S.J. (2013). "Evaluation of suspended solids and eutrophication in Chungju Lake using CE-QUAL-W2." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 11, pp. 1115-1128.
- An, I.K., Park, H.S., Chung, S.W., Ryu, I.G., and Choi, J.K. (2020). "Analysis of organic carbon cycle and mass balance in Daecheong reservoir using three-dimensional hydrodynamic and water quality model." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36, No. 4, pp. 284-299.
- Chung, S.W., Lee, H.S., Yoon, S.W., Ye, L., Lee, J.H., and Choo, C.O. (2007). "Characterization of physical properties of turbid flow in the Daecheong reservoir watershed during floods." *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 23, No. 6, pp. 934-944.
- Chung, S.W., Lee, J.H., Lee, H.S., and Maeng, S.J. (2011). "Uncertainty of discharge-SS relationship used for turbid flow modeling." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 991-1000.
- Ehrbar, D., Schmockler, L., Vetsch, D.F., Boes, R.M. and Doering, M. (2017). "Measuring suspended sediments in periglacial reservoirs using water samples, laser in-situ scattering and transmissometry and acoustic Doppler current profiler." *International Journal of River Basin Management*, Vol. 15, No. 4, pp. 413-431.
- Haun, S., Kjærås, H., Løvfjall, S. and Olse, N.R.B. (2013). "Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir." *Journal of Hydrology*, Vol. 479, pp. 180-188.
- Hodges, B., and Dallimore, C. (2019). *Aquatic ecosystem model: AEMBD v1.0 user manual*. HydroNumerics, Victoria, Australia.
- Kim, T.W., Kim, Y.D., and Yi, Y.-K. (2012). "A study on field experiment and numerical modeling for efficiency analysis of selective withdrawal in Imha reservoir." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. B32, No. 2B, pp. 113-121.
- Kim, W.G., Jung, K.S., and Yi, Y.K. (2006). "The variation of water temperature and turbidity of stream flows entering Imha reservoir." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 39, No. 1, pp. 13-20.
- Kwak, S.H., Lee, K.S., Cho, H.I., Seo, Y.J., and Lyu, S.W. (2017). "Field measurement of suspended material distribution at the river confluence." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 467-474.
- Mikkelsen, O. and Pejrup, M. (2001) "The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and

settling velocity.” *An International Journal of Marine Geology*,
Vol. 20, pp. 187-195.

Yi, H.S., Kim, J.K., and Lee, S.U. (2008). “Development of turbid

water prediction model for the Imha Dam watershed using
HSPF.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*,
Vol. 30, No. 8, pp. 760-767.