

낙동강 실측자료 기반 간편탁도예측모형 Py_STPS의 적용성 검토

이남주¹, 김창성^{2*}

¹경성대학교 토목공학과, ²한국수자원조사기술원 연구개발실

An Applicability Review on Simplified Turbidity Prediction Model Py_STPS Using the Measured Data of the Nakdong River

Namjoo Lee¹, Chang-Sung Kim^{2*}

¹Department of Civil Eng., Kyungshung Univ.

²R&D Division, Korea Institute of Hydrological Survey

요약 이 연구는 낙동강의 금호강 합류부를 대상으로 기존 수문관측소의 수위 자료와 자동수질 관측자료의 탁도 자료의 특성을 분석하고, 이 결과를 이용하여 Py_STPS 모형을 검증하였다. 일평균 탁도자료, 일평균 유량, 일평균수 위 자료를 사용하여 Py_STPS 모형으로 준정상 탁도 모의를 수행하고 검증하였다. 모의 기간(2017.12.10.~2018.02.27.)의 고령 수질 자동측정소의 평균 탁도는 3.0 NTU인데, 계산값의 평균은 1.8 NTU로 예측되었다. 오차의 평균은 1.2 NTU이고, 평균 상대오차는 39%이다. 탁도 예측의 정확도가 낮은 원인으로 탁도 유발 물질의 이동 특성과 단순화된 모형의 한계로 예상된다. 일반적으로 탁도 유발 물질이 수중에 부유 상태로 있고 하천 전반에 걸쳐 탁수가 유동되는 홍수기에는 해당 모형의 정확도가 비교적 높지만, 자연 하천 내의 토사 입자 거동은 흐름의 특성에 따라 침강과 부유하는 특성이 있고 하천 횡단면에 걸쳐 탁도의 공간적 비균질성을 가진 비홍수기의 경우 관측지점의 실측값과 차이를 보일 수밖에 없어 이러한 오차를 갖는 것으로 판단된다. 향후 정확도를 확보하기 위해서는 생성-소멸항 도입이 필요하며, 2차원적 해석을 시도하는 것도 중요해 보인다.

Abstract This study analyzed the characteristics of the water level data of an existing hydrological observatory and the turbidity data of automatic water quality observation data and verified the Py_STPS model using the results at the confluence of the Nakdong and Geumho Rivers. A quasi-steady turbidity simulation was performed and verified by the Py_STPS model using the daily average turbidity data, daily average flow rate, and daily average water level data. The average turbidity of the elderly automatic water quality measurement station during the simulation period (2017.12.10. - 2018.02.27.) was 3.0 NTU, and the average calculated value was predicted to be 1.8 NTU. The average error was 1.2 NTU, and the average relative error was 39%. The model accuracy was relatively high during the flood season when turbidity-inducing substances were suspended in water, and turbid water flowed throughout the river. The soil particles in natural rivers exhibited sedimentation and floating characteristics depending on the flow characteristics and spatial heterogeneity of turbidity over the cross-section of the river. The model results verified for the non-flood season have an error because they inevitably differ from the measured data. Hence, a sink-source term and two-dimensional analysis are needed to secure future accuracy.

Keywords : STPS Model, Turbidity, Sediment, HEC-RAS Model, The Nakdonggang

본 연구는 환경부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음.(과제번호 22DPIW-C153746-04)

*Corresponding Author : Chang-Sung Kim(R&D Division, Korea Institute of Hydrological Survey)

email: csckim@kihs.re.kr

Received December 5, 2022

Revised January 26, 2023

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

탁도는 물의 흐린 정도를 정량적으로 나타낸 지표이다. 탁도는 빛이 수중의 부유물질과 용존 유기물질 등에 의해 흡수되고 산란되는 정도를 측정하여, 부유물질의 양을 간접적으로 추정하는 광학적 방법으로 측정한다. 탁도는 여러 가지 부유물질과 용존물질에 의해 발생하며, 탁도에 영향을 주는 부유입자의 크기는 콜로이드에서 굵은 부유토사까지 다양하다. 하천에서 탁도는 자연적인 조류의 성장, 강우로 인한 침전물의 부유, 인위적인 건설 활동에 의해서 유입되는 미세토양 등에 의해서 발생한다. 고탁도(높은 탁도)는 수중에 유입되는 햇빛을 차단하여 수생태계를 파괴하며, 사람들에게 심미적으로 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

환경부 물환경정보시스템의 수질자동관측망에서 제공되고 있는 탁도 자료는 지점자료로, 이를 활용한 하천 내 탁도 흐름 분석은 불연속적으로 인해 단순 선형 분석이 불가능하여 이송-확산에 대한 전문적인 해석기법이 요구되며, 실측자료와의 비교가 필요하다. 국가 수리수문/수질 관측자료와 연계하여 활용도를 분석하기 위해서는, 수집한 수리수문/수질 측정자료를 활용한 대상 하천의 탁도 이송확산 모의 결과가 요구된다. 하천 탁도 예측(1차원 및 2차원 하천탁도 수치모델링)과 관련된 요소기술을 확보하고, 국내 고유 모델로 확장할 기회를 마련할 필요가 있다.

다목적댐에서 고탁도 호소수 우선배제를 수행함에 있어서 동일 수계의 다른 다목적댐 방류량을 통합 운영규칙이 따라 조절함으로써 본류 대하천의 탁도 영향을 일정 수준 이하로 유지할 필요가 있다. 이를 위해서는 대하천 본류의 탁도 영향을 조사분석하고, 평수기의 본류 탁도와 SS와의 상관성을 정량적으로 분석하여야 한다. 이런 분석 자료를 이용하여 하천 탁도 수치모델링을 위한 기본 인자를 도출하고, 조사분석된 자료와 일차원 및 이차원 비정상(time-variant) 수치모형을 사용하여 탁도를 예측할 수 있는 대하천 탁도 예측 시스템을 구축할 필요가 있다.

매우 가는 모래, 실트, 점토와 같은 미립 부유사가 탁도의 대부분을 차지하는 고탁수의 경우, 하천 탁도는 유사이동모형(또는 하상변동모형)을 사용하여 예측하는 것이 물리적으로 타당한 접근 방법이다. 대표적인 1차원 유사이동모형은 HEC-6[1], FLUVIAL 11[2], GSTARS[3], CHARIMA[4], EFDC-1D[5], HEC-RAS[6] 등이 있다. 이런 모형들은 다수의 지배방정식(연속방정식, 운동량방정식, 이송확산방정식)과 보조방정식(유사량공식, 하상구

성모형, 침식퇴적판별모형, 장갑화모형 등)을 복잡한 과정을 통해 계산하는 모형이다. 또한 유사이동모형을 적용하기 위해서는 상당히 방대한 자료(지형, 흐름, 깊이별 하상도 분급 등)를 필요로 하며, 수치모형의 결과를 얻기까지 수 개월 이상의 긴 작업시간이 필요하다. 따라서 단시간의 연산으로 탁도를 예측할 수 있는 모형 개발 및 적용이 필요하다.

유사이동모형의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 유사량공식의 선정, 수치모형 입력자료의 해상도와 정확도이다. 하상변동모형에는 일반적으로 다수의 유사량공식을 탑재하고 있으며, 어떤 공식을 사용하는가에 따라 결과가 수십 배 이상 차이가 나기도 한다.

Bhattacharya et al[7]은 4가지 대표적인 유사량공식(Engelund and Hansen 공식, van Rijn 공식; Bagnold 공식, Ackers and White 공식)에 대한 정확도 비교 결과를 제시한 바 있다. 이들은 다수의 문헌에 제시되어 있는 실험실 자료와 하천 현장측정 자료를 이용하여, 평균백분율오차(average percentage errors)를 문헌별로 제시하였다. 평균백분율오차는 21%~388%의 범위에 있었다. 이 오차는 유사이동모형의 여러 방정식 중 하나에서만 발생하는 오차이며, 다른 방정식에서 발생하는 오차와 입력자료의 불확실성까지 추가되면 이보다 훨씬 큰 오차가 발생할 수 있다.

STPS(Simplified Turbidity Prediction System, Version 1.0)는 2006년 FORTRAN 버전으로 처음 개발된 일차원 간편탁도예측시스템이다[8]. 이 모형의 흐름은 HEC-RAS 모형으로 미리 계산한 낙동강 본류의 각 단면별 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량에 대한 정상류(steady flow) 수리량 자료를 내장하고 있어서, 간편하게 탁도를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 탁도 계산은 상류와 지류의 비정상(unsteady) 유입탁도를 이용하여 비정상적으로 모의한다.

Lee and Heo[9]는 비홍수기에 안동댐과 임하댐의 고탁도 방류수가 낙동강 본류의 탁도에 미치는 영향을 예측하기 위해 STPS 모형을 반변천 합류부 하류의 낙동강 구간에 대한 유하시간 분석 등을 통한 적용성 시험결과를 제시하였다.

2020년에 파이썬으로 언어를 바꾸고 후처리기법도 추가하여 프로그램 등록(STPS 모형 Version 1.0, 코드명: Py_STPS_01.py)을 완료하였다[10]. 준정상류 간편탁도예측모형 Py_STPS는 2020년에 개발되었으며, 낙동강 안동조정지댐 직하류부터 낙동강하굿둑까지의 구간에 대해 적용성을 시험하였다.

낙동강 본류의 상류 탁도와 지류의 탁도 변화가 반영된 3가지 가상적인 모의조건을 사용하여 적용성을 시험하였으나[10], 정량적 검증은 실시하지는 못했다. 따라서, 이 연구에서는 기존 수문관측소의 수위자료와 자동수질관측자료의 탁도자료의 특성을 분석하고, 실측자료 분석결과를 이용하여 Py_STPS를 정량적으로 검증할 목적으로 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 Py_STPS 모형의 지배방정식

하천과 같은 일차원 수로에서 Fig. 1과 같은 dx 길이의 미분요소에 대하여 질량보존법칙(mass conservation equation)을 적용하면 다음과 같다.

$$dV \frac{\partial c}{\partial t} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{m}_{tr} \pm R \quad (1)$$

Where t is the time, c is the concentration, dV is the volume of differential element, \dot{m} is the mass flowrate of water-sediment mixture per unit time, R is the reaction term, and the subscripts in , out , tr denote the inflow, outflow, and tributary boundaries, respectively.

탁도가 매우 높은 고탁수는 미립 부유사(very fine sand, silt, clay)에 의해 발생하며, 수질항목 부유물질량 SS(suspended solid, mg/L) 측정치 역시 대부분 미립 부유사에 기인한다. 고탁수의 탁도와 SS는 선형의 관계를 보이는 경우가 상당히 많으며[11], 따라서 이 연구에서 식 (1)의 농도 c 는 SS미립 부유사의 농도를 의미한다.

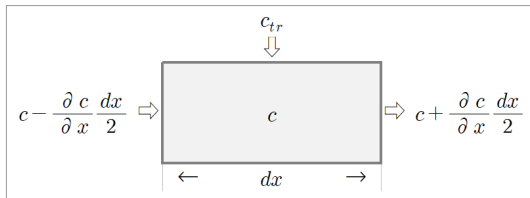


Fig. 1. Concept of one dimensional advection-dispersion equation.

Eq. (1)을 이용하면 Py_STPS 모형의 지배방정식은 다음과 같다[10].

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(Vc)}{\partial x} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{(Q_{tr}c_{tr} + rc + p + s)}{A dx} \quad (2)$$

Where x is the axis along 1-dimensional flow direction, V is the volume of the water-sediment mixture, E is the dispersion coefficient, A is the flow sectional area, Q_{tr} and c_{tr} are the inflow discharge and concentration from tributaries, respectively, r is the decay ratio, p is the sink or source term, and s is the external input or output term of water-sediment mixture.

2.2 Py_STPS 모형의 수치해석

탁도예측을 위한 Py_STPS 모형에서 사용한 수치해석 기법은 베타-포물레이션 유한차분기법[12]이다. 수치모의 시작을 위한 초기조건은 상류 및 지천의 탁도 농도를 사용하여 구하며, 아래의 질량보존식을 사용하였다.

$$c_{i+1}^0 = \frac{Q_i^0 C_i^0 + Q_{tr,i+1}^0 C_{tr,i+1}^0}{Q_{i+1}^0} \quad (3)$$

Where the superscript 0 denotes the initial time step and the subscript i means the grid number, and Q_i is the discharge at i section.

쌍곡선형 편미분방정식의 경우 수치안정성은 아래 식과 같은 CFL수(Courant-Friedrichs-Lewy number)에 지배된다[12].

$$CFL = V \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4)$$

Where CFL is the Courant-Friedrichs-Lewy number, V is the velocity of water-sediment mixture, Δt is the size of the time step, and Δx is the length of the spatial grid.

[10]의 연구에서 시간간격에 따른 Py_STPS 모형의 수치안정성을 검토하였으며, 반변천 합류부 하류의 낙동강 구간에 대해서 하천기본계획 기본단면($\Delta x \geq 420$ m)을 사용할 경우 1200sec 이하인 경우는 안정적인 수치모의 결과를 보여주고 있다. 따라서 이 연구에서도 항상 안정적인 결과를 주는 조건으로 $\Delta t = 600$ s로 선택하여 수치모의하였다.

3. 현장적용을 통한 모형 분석 및 검증

3.1 낙동강 탁도 관측자료 분석

3.1.1 수질자동측정망 및 수위관측소 현황

환경부는 환경정책기본법과 물환경보전법을 토대로, 하천 및 호소 등 수질보전대상 공공수역에 대한 수질현황을 종합적으로 조사하여 수질변화 추세를 파악하고, 주요 정책 사업의 효과를 분석하여 장래 수질보전정책수립을 위한 기초 자료를 확보하기 위하여 물환경측정망을 운영하고 측정망의 자료를 제공하고 있다. 물환경측정망은 8개의 측정망(수질, 자동, 방사성물질, 비점오염물질, 총량, 퇴적물, 생물)과 유량 조사망으로 구성되어 있으며, 환경부 물환경정보시스템(WEIS, Water Environment Information System)은 우리 나라의 물환경과 관련된 물환경측정망의 모든 측정정보를 한 곳에서 제공하고 있다. 이 연구에서 필요한 자료는 수리수문 및 탁도 자료이다. 수리수문 자료는 유량조사망에서 구할 수 있으며, 탁도는 자동측정망에서 선택적으로만 측정하고 있다.

환경부는 환경정책기본법과 물환경보전법에 근거하여, 실시간으로 전국 주요 하천 및 호소의 수질 현황 및 오염도를 측정감시하고 수질오염사고의 조기 발견과 신속한 대응조치를 위해 국가 수질자동측정망을 운영하고 있다. 수질자동관측소에서는 아래와 같이 공통항목 5개와 선택항목 27개를 자동측정하고 있으며, 이 연구의 대상항목인 탁도는 선택항목에 포함되어 있다.

- 공통항목(5개): 수온, pH, DO, 전기전도도, TOC
- 선택항목(27개): 탁도, Chl-a, TN, TP, NH3-N, NO3-N, PO4-P, VOCs(9종 10개), 페놀, 중금속(Cu, Zn, Pb, Cd), 생물감시항목(물벼룩, 조류, 미생물, 황산화미생물, 발광박테리아)

전국의 국가 수질자동관측소 설치현황(WEIS webpage [13])은 Table 1과 같다.

Table 1. Installation status of National Automatic Water Quality Observatory

Division	Hangang	Nakdong-gang	Geumgang	Yeongsan-gang
Rivers	22	24	10	6
Lakes	1	0	3	4
Subtotal sum	23	24	13	10
Total sum	70			

3.1.2 탁도유동해석모형 검증 대상구간 선정

이 연구는 모형의 개발단계에 있으므로, 준정상류 및 부정류 탁도유동해석모형의 검보정, 지류유입탁도 역추적 모델링, 탁도 내부반응항 모델링을 위해서는 분류와 지류의 탁도 측정자료가 존재하는 가급적 짧은 구간으로 대상영역을 선정하는 것이 바람직하다. 또한 다기능으로

인한 지류의 영향이 가급적 발생하지 않아야 탁도 변화 특성을 보다 정확하게 모형화할 수 있다.

반면천 합류점 하류의 낙동강 본류에서 제1지류에 수질자동측정소가 위치하는 지점은 광암천(구미 수질자동측정소)과 금호강(강창 수질자동측정소)이 있다. 광암천에는 수위관측소가 없어서 부정류 유량을 결정하기 어려운 단점이 있다. 따라서 금호강을 포함하는 성주대교 수위표 지점에서 달성보까지의 본류 구간을 탁도 측정자료와 수위 및 유량 관측자료 수집분석 대상구간(Fig. 2 참조)으로 선정하였다. 이 구간에 위치한 수질자동측정소, 수위관측소, 다기능부의 하천기본계획의 단면번호는 Table 2와 같다.

Table 2. Section number of the measurement data analysis target point

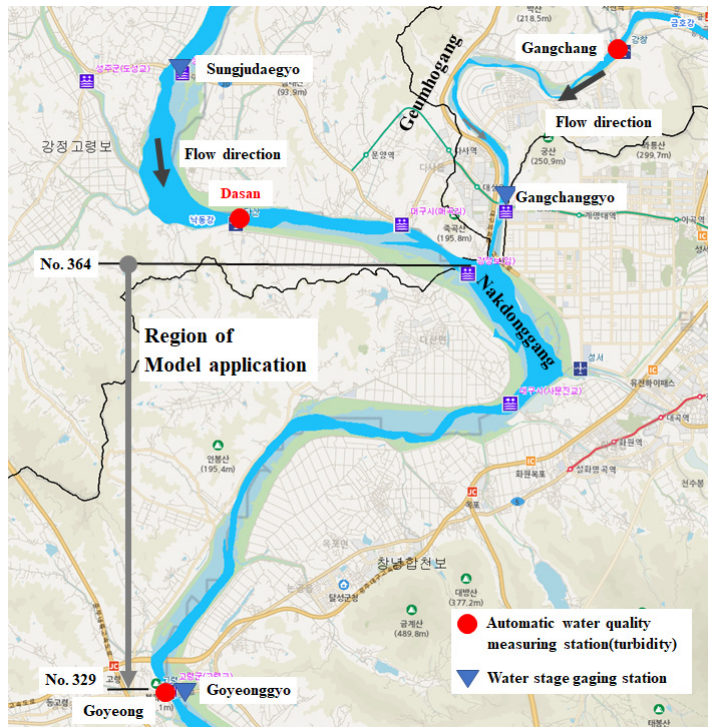
Main point	Section number
Seongjugun(Seongjudaegyo) guaging station	384
Dasan automatic water quality measuring station	374 ~ 375
Gangjeonggylyeong-weir	364.268
Geumhogang junction	363 ~ 364
Goryeonggun(Goryeonggyo) guaging station	329.47
Goryeong automatic water quality measuring station	
Dalseong-weir	322.295

3.2 1차원 준정상류 탁도유동해석모형 검증

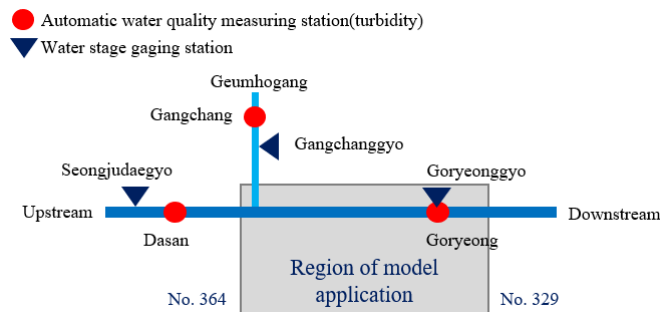
3.2.1 모형 검증 적용구간 및 모델링 자료 구축

1차원 준정상류 탁도유동해석모형 Py_STPS 검증(실측자료 비교)을 위한 수치모형 적용구간은 Fig. 2와 같다. HEC-RAS 모델링을 위한 낙동강 단면 자료는 2017년 하천측량 자료를 사용하였으며, 안정적인 수치모델링을 위해 교량 단면과 인라인구조물(inline structure) 단면은 제거하고 기본단면만 사용하였다. 모형 적용구간의 하천기본계획 단면은 금호강 합류점 직상류에 위치한 No. 364 단면에서 고령교 직하류의 No. 329 단면까지 36개 단면이며, 모델링 구간의 하천길이는 17.61 km이다.

탁도유동해석모형 검증을 위한 적용기간은 2017.12.10. 일부터 2018.02.27.일까지 80일을 대상으로 하였다. 검증에 사용한 측정자료는 이 기간에 측정된 단산, 강창, 고령 수질자동측정소의 일평균 탁도로 Fig. 3과 같다. 측정된 일평균 탁도의 최소값은 0.6 NTU(강창 수질자동측정소)이고, 최대값은 5.1 NTU(강창 수질자동측정소)이다. 하천 수리량 계산(HEC-RAS 모형 사용)을 위해 상류



(a) Site map



(b) Schematic diagram

Fig. 2. Sections for turbidity flow analysis model test and correction

경계조건으로는 성주군(성주대교)와 대구시(강창교) 수위 관측소의 일평균 유량을 사용하였으며, Fig. 4와 같다. 일유량의 최소값은 $8.56 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, 최대값은 $121.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 하루 경계조건으로는 고령군(고령교) 수위관측소의 일평균 수위를 사용하였으며, Fig. 5와 같다. 일수위의 최소값은 El. 13.48 m 이고, 최대값은 El. 13.61 m 이다.

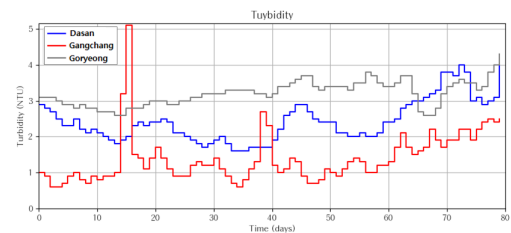


Fig. 3. Daily average turbidity for verification (2017.12.10.~2018.02.27.)

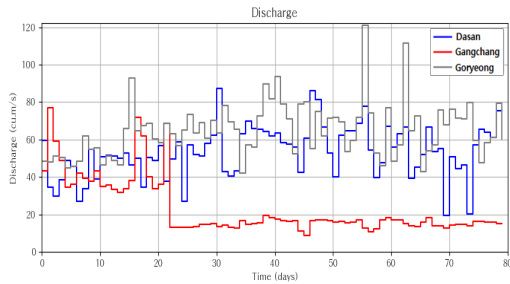


Fig. 4. Daily average flowrate (2017.12.10.~2018.02.27.; HEC-RAS modeling)

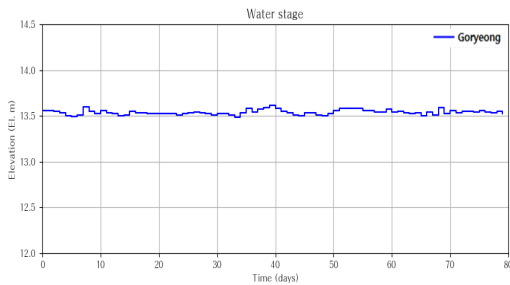


Fig. 5. Daily average water level (2017.12.10.~2018.02.27.; HEC-RAS modeling)

3.2.2 탁도유동해석모형(Py_STPS) 검증 결과

Fig. 3의 다산과 강창 수질자동측정점의 일평균 탁도 자료, Fig. 4의 성주군(성주대교)과 대구시(강창교) 수위 관측소의 일평균 유량, Fig. 5의 고령군(고령교) 수위관측소의 일평균 수위 자료를 사용한 준정상 탁도모의 결과를 10일 간격으로 도시하면 Fig. 6과 같다.

Table 3은 준정상 탁도유동해석 모델링의 탁도 예측 오차와 상대오차를 정리한 것이다. 모의기간(2017.12.10. ~2018.02.27.)의 고령 수질자동측정소의 평균 탁도는 3.0 NTU인데, 계산값의 평균은 1.8 NTU로 예측되었다. 오차의 평균은 1.2 NTU이고, 평균상대오차는 39%이다. Py_STPS 모형에서 발생한 오차는 Bhattacharya et al[7]이 제시한 유사량공식의 평균백분율오차는 21%~388%와 비교할 때 상당히 양호한 결과라고 볼 수 있다.

Py_STPS 모형에서 발생한 오차는 탁도 유발물질의 이동 특성과 단순화된 모델링의 한계로 판단된다. 일반적으로 탁도 유발 물질이 수중에 부유상태로 있고 하천 전반에 걸쳐 탁도가 유동되는 홍수기에는 해당 모형의 정확도가 비교적 높지만, 자연 하천 내의 토사 입자 거동은 흐름의 특성에 따라 침강과 부유하는 특성이 있고 하천 횡단면에 걸쳐 탁도의 공간적 비균질성을 가진 비홍

수기의 경우 관측지점의 실측값과 차이가 생긴다. 향후 모형의 적용성을 개선하기 위해서는 하천 상황에 맞는 Eq. (2)의 r (the decay ratio), p (the sink or source term), s (the external input or output term of water-sediment mixture)를 적절히 반영할 수 있는 관계식 도입이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구

이 연구는 기존 수문관측소의 수위자료와 자동수질관측자료의 탁도자료의 특성을 분석하고, 실측자료 분석결과를 이용하여 Py_STPS를 정량적으로 검증할 목적으로 수행하였다.

다산과 강창 수질자동측정점의 일평균 탁도자료와 성주군(성주대교)과 대구시(강창교) 수위관측소의 일평균 유량, 고령군(고령교) 수위관측소의 일평균 수위 자료를 사용하여 Py_STPS 모형으로 준정상 탁도모의를 수행하였다.

모의기간(2017.12.10.~ 2018.02.27.)의 고령 수질자동측정소의 평균 탁도는 3.0 NTU인데, 계산값의 평균은 1.8 NTU로 예측되었다. 오차의 평균은 1.2 NTU이고, 평균 상대오차는 39%로 나타났다. Py_STPS 모형에서 발생한 오차는 Bhattacharya et al[7]이 제시한 유사량공식의 평균백분율오차는 21%~388%와 비교할 때 상당히 양호한 결과라고 볼 수 있다. 해당 오차의 원인은 탁도 유발물질의 특성에 의한 것과 모델링의 단순화에 기인한 것으로 추정된다. 탁도를 유발하는 물질이 수중에 부유상태로 있는 경우에는 정확도가 상당히 높지만, 토사입자의 경우는 흐름의 특성에 따라 침강과 부유하는 특성이 있으며 동일한 하천 단면에서도 공간별로 차이가 상당히 발생할 수 있다.

향후 Py_STPS 모형의 정확도를 개선하기 위해서는 생성소멸항(유사이동을 고려한 내부반응항) 도입이 필요하며, 2차원적 해석을 시도하는 것도 중요해 보인다. 또한, HEC-RAS 모형의 경우 홍수기 하천수위 변동을 모의하는데 주로 사용이 되고 있어, 향후 연구에서는 부정류 모델링을 통한 홍수기 모의자료를 추가적으로 획득하여 STPS의 적용성을 향상시키는 연구 등이 필요하다고 판단된다.

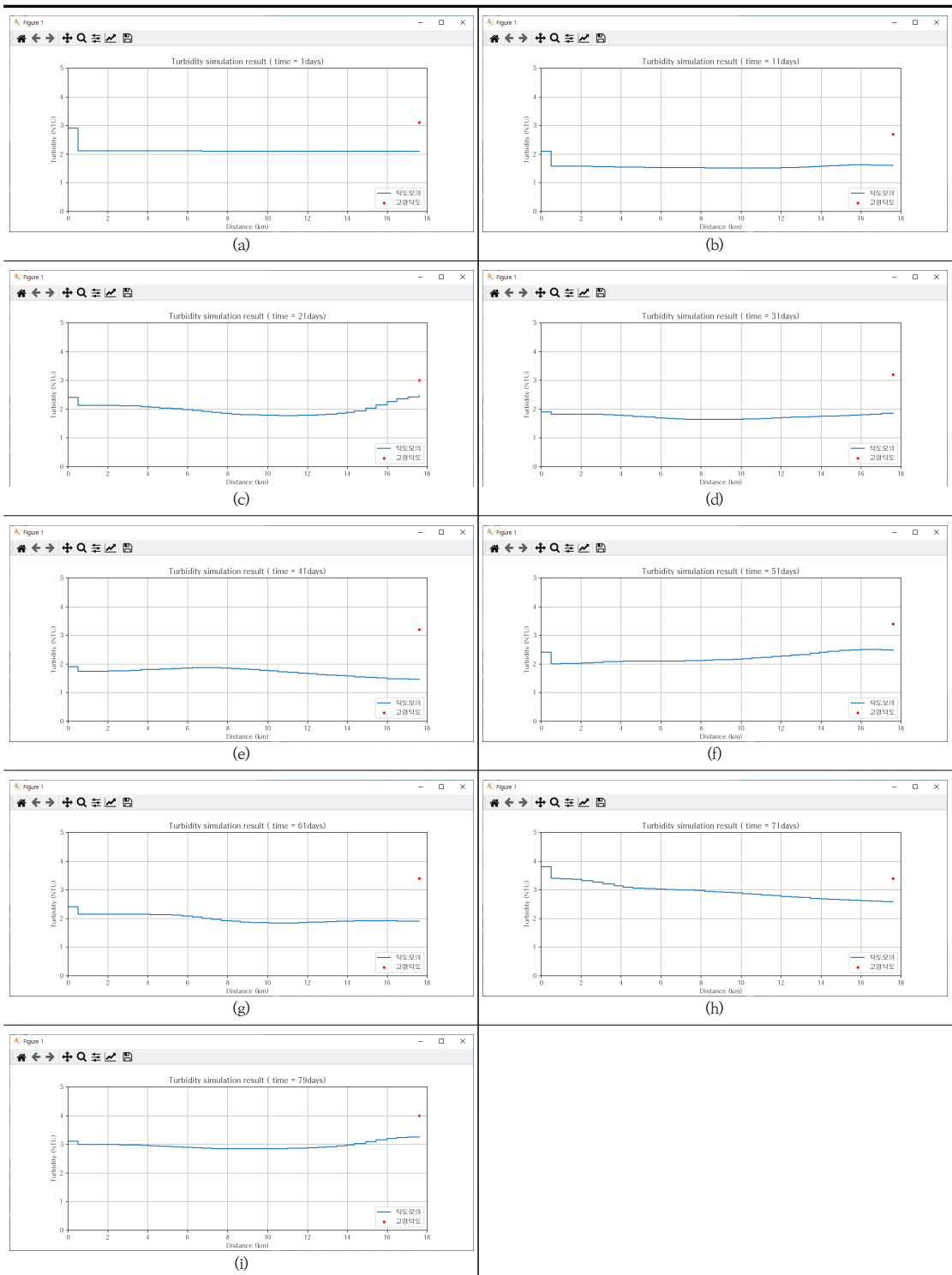


Fig. 6. Results of quasi-steady turbidity simulation using the STPS model

(a) $t = 1$ days (b) $t = 11$ days (c) $t = 21$ days (d) $t = 31$ days (e) $t = 41$ days (f) $t = 51$ days (g) $t = 61$ days (h) $t = 71$ days (i) $t = 79$ days

Table 3. Turbidity prediction error and relative error in quasi-steady modeling

Date	Measured	Computed	Error	Relative error	Date	Measured	Computed	Error	Relative error
2017-12-10	3.1	2.1	1.0	32%	2018-01-19	3.2	1.5	1.7	53%
2017-12-11	3.1	2.1	1.0	32%	2018-01-20	3.4	1.5	1.9	57%
2017-12-12	3.1	2.1	1.0	32%	2018-01-21	3.4	1.5	1.9	56%
2017-12-13	3.0	2.1	0.9	30%	2018-01-22	3.5	1.6	1.9	55%
2017-12-14	2.9	2.1	0.8	28%	2018-01-23	3.6	1.7	1.9	53%
2017-12-15	2.9	2.1	0.8	28%	2018-01-24	3.7	1.8	1.9	52%
2017-12-16	2.8	1.9	0.9	31%	2018-01-25	3.7	1.8	1.9	51%
2017-12-17	2.9	1.7	1.2	40%	2018-01-26	3.4	1.8	1.6	46%
2017-12-18	2.8	1.5	1.3	45%	2018-01-27	3.3	2.0	1.3	40%
2017-12-19	2.8	1.4	1.4	49%	2018-01-28	3.4	2.2	1.2	35%
2017-12-20	2.7	1.5	1.2	45%	2018-01-29	3.4	2.4	1.0	30%
2017-12-21	2.7	1.6	1.1	41%	2018-01-30	3.4	2.5	0.9	27%
2017-12-22	2.7	1.6	1.1	41%	2018-01-31	3.4	2.5	0.9	27%
2017-12-23	2.6	1.6	1.0	40%	2018-02-01	3.3	2.4	0.9	28%
2017-12-24	2.6	1.5	1.1	41%	2018-02-02	3.5	2.2	1.3	36%
2017-12-25	2.8	1.5	1.3	45%	2018-02-03	3.5	2.1	1.4	39%
2017-12-26	2.8	1.5	1.3	45%	2018-02-04	3.8	2.1	1.7	46%
2017-12-27	2.8	1.5	1.3	45%	2018-02-05	3.7	2.0	1.7	46%
2017-12-28	2.9	1.6	1.3	46%	2018-02-06	3.5	1.9	1.6	44%
2017-12-29	3.0	1.9	1.1	37%	2018-02-07	3.4	1.9	1.5	44%
2017-12-30	3.0	2.4	0.6	20%	2018-02-08	3.4	1.9	1.5	44%
2017-12-31	3.0	2.5	0.5	18%	2018-02-09	3.5	1.9	1.6	46%
2018-01-01	2.9	2.1	0.8	29%	2018-02-10	3.7	1.9	1.8	48%
2018-01-02	2.9	1.9	1.0	35%	2018-02-11	3.7	1.9	1.8	49%
2018-01-03	3.0	1.8	1.2	39%	2018-02-12	3.2	1.9	1.3	41%
2018-01-04	3.0	1.8	1.2	39%	2018-02-13	2.7	1.9	0.8	30%
2018-01-05	3.1	1.9	1.2	38%	2018-02-14	2.6	2.0	0.6	24%
2018-01-06	3.1	2.0	1.1	36%	2018-02-15	2.6	2.1	0.5	18%
2018-01-07	3.2	2.0	1.2	38%	2018-02-16	2.8	2.2	0.6	20%
2018-01-08	3.2	2.0	1.2	39%	2018-02-17	3.2	2.4	0.8	25%
2018-01-09	3.2	1.9	1.3	39%	2018-02-18	3.4	2.5	0.9	28%
2018-01-10	3.2	1.9	1.3	42%	2018-02-19	3.5	2.6	0.9	27%
2018-01-11	3.3	1.8	1.5	45%	2018-02-20	3.6	2.6	1.0	27%
2018-01-12	3.3	1.8	1.5	46%	2018-02-21	3.5	2.7	0.8	24%
2018-01-13	3.3	1.7	1.6	48%	2018-02-22	3.5	2.7	0.8	23%
2018-01-14	3.3	1.7	1.6	49%	2018-02-23	3.3	2.8	0.5	15%
2018-01-15	3.3	1.7	1.6	49%	2018-02-24	3.4	2.9	0.5	14%
2018-01-16	3.2	1.7	1.5	46%	2018-02-25	3.8	3.1	0.7	19%
2018-01-17	3.2	1.7	1.5	46%	2018-02-26	4.0	3.2	0.8	20%
2018-01-18	3.1	1.6	1.5	48%	2018-02-27	4.3	3.3	1.0	24%
					Mean	3.0	1.8	1.2	39%

Acknowledgments

본 연구는 환경부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음.(과제번호 22DPIW-C153746-04)

References

- [1] W. A. Thomas, A. L. Prasuhn, "Mathematical modeling of scour and deposition", *Journal of the Hydraulics Division*, Vol.103, No.8, pp.851-863, Aug. 1977.
DOI: <https://doi.org/10.1061/YCEAJ.0004805>
- [2] H. H. Chang, "Mathematical model for erodible channels", *Journal of the Hydraulics Division*, Vol.108, No.5, pp.678-689, May. 1982.
DOI: <https://doi.org/10.1061/YCEAJ.0005864>
- [3] C. T. Yang, A. Molinas, B. Wu, "Sediment transport in the Yellow River", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.122, No.5, pp. 237-244, May. 1996.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:5\(237\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:5(237))
- [4] F. M. Holly, J. C. Yang, P. Schovarz, J. Scheefer, S. H. Hsu, R. Einhellig, CHARIMA—Numerical Simulation of Unsteady Water and Sediment Movement in Multiply Connected Networks of Mobile-Bed Channels, Iowa Institute of Hydraulic Research Report, The University of Iowa, No. 343, 1990.
- [5] J. M. Hamrick, T. Tech, E. J. Hayter, EFDC1D: A One Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for River and Stream Networks, Model Theory, and Users Guide, Technical Report, U.S. EPA National Exposure Research Laboratory, Athens, GA and U.S. EPA Office of Science and Technology, Washington, DC, 2001.
- [6] Hydrologic Engineering Center, Sediment Transport, User's Manual, HEC-RAS, Version 6.0., 2020.
- [7] B. Bhattacharya, R. K. Price, D. P. Solomatine, "Machine learning approach to modeling sediment transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.133, No.4, pp.440-450, Apr. 2007.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:4\(440\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:4(440))
- [8] National Institute of Environmental Research, Study on the Evaluation of Turbidity Projections in Nakdong River Basin, NIER, No.2006-49-831, 2006.
- [9] N. J. Lee, S. N. Heo, "Development of STPS for Turbidity Prediction along the Nakdong River Due to Very Fine Soil", *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, Vol.15, No.3, pp.11-21, Sep. 2007.
- [10] N. J. Lee, S. Choi, C. S. Kim, "Applicability Test of STPS for HEC-RAS-based Turbidity Prediction Model in the Nagdonggang", *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol.8, No.4, pp.245-252. Dec. 2021.

DOI: <https://doi.org/10.17820/eri.2021.8.4.245>

- [11] S. W. Chung, J. H. Lee, H. S. Lee, S. J. Maeng, "Uncertainty of Discharge-SS Relationship Used for Turbid Flow Modeling", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.44, No.12, pp.991-1000. Dec. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWR.2011.44.12.991>
- [12] K. A. Hoffmann, S. T. Chiang, Computational fluid dynamics, vol. 1, 4th edn, Engineering Education Systems, Wichita, KS, 2000.
- [13] National Institute of Environmental Research. Water Environment Information System[Internet]. National Institute of Environmental Research, c2017~2018 [cited 2017 December 10 to 2018 February 27]. Available from: http://water.nier.go.kr/web/contents/contentView/?MENU_NO=63 (accessed Nov. 30. 2011)

이 남 주(Namjoo Lee)

[중신회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 경성대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

수리학, 수문학, 수자원공학, 하천공학

김 창 성(Chang-Sung Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2009년 7월 ~ 2014년 6월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2015년 8월 ~ 현재 : 한국수자원조사기술원 선임연구원

<관심분야>

수리학, 하천공학, 수자원공학