



Applicability of the WASP8 in simulating river microplastic concentration

Kim, Kyungmin^a · Park, Taejin^b · Jeong, Hanseok^{c*}

^aMaster's Course Student, Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

^bResearch Officer, Water Environmental Engineering Research Division, Water Environmental Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^cAssistant Professor, Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

Paper number: 22-092

Received: 6 October 2022; Revised: 27 April 2023; Accepted: 28 April 2023

Abstract

Monitoring river microplastics is a challenging task since it is a time-consuming and high-cost process. The use of a physical model to have a better understanding of river microplastics' behaviors can complement the challenging monitoring process. However, there have been very limited studies on modeling river microplastics. In this study, therefore, we evaluated the applicability of one commonly used river water quality model, i.e., the Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), in simulating the microplastic concentration in the river environment. We simulated the microplastic concentration in the Anyangcheon stream using the WASP's biochemical oxygen demand (BOD) and suspended solid (SS) variables as possible surrogate variables for the microplastics. Simulation analyses indicate that the SS state variable performs better than the BOD state variable to mimic the observed concentrations of microplastics. This is because of the characteristics of each water quality parameter; the BOD variable, a biochemical indicator, is inappropriate for modeling the behaviors of microplastics, which have generally constant biochemical features. In contrast, the SS variable, which has similar physical behaviors, followed the observed patterns of the microplastic concentrations well. To build a more advanced and accurate model for simulating the microplastic concentration, comprehensive and long-term monitoring studies of the river microplastics under different environmental conditions are needed, and the unit of microplastic concentration should be carefully addressed before its modeling application.

Keywords: Microplastic, BOD, SS, Physical model

WASP8 모형의 하천 미세플라스틱 모의 적용성 검토

김경민^a · 박태진^b · 정한석^{c*}

^a서울과학기술대학교 환경공학과 석사과정, ^b국립환경과학원 물환경연구부 물환경공학연구과 연구관, ^c서울과학기술대학교 환경공학과 조교수

요 지

미세플라스틱 분석에는 많은 비용과 인력, 그리고 긴 분석시간이 필요하기 때문에 하천에서의 연속적 미세플라스틱 관측에는 한계가 있다. 이와 같은 한계는 일반적으로 모형의 활용을 통해 보완될 수 있으나, 미세플라스틱의 거동 모의를 위한 모형 연구는 상당히 제한적으로 수행되었다. 따라서, 본 연구에서는 하천 수질 오염원의 거동을 이해하고 예측하는 데 많이 활용되는 물리식 기반 동적 수치모형인 Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)의 미세플라스틱 오염예측에의 적용성을 검토하였다. 이를 위해, 안양천 대상 미세플라스틱 실측자료와 WASP8의 생화학적 산소 요구량(BOD)과 부유물질(SS) 상태변수를 미세플라스틱 대리인자로 이용하여 안양천의 미세플라스틱 농도를 모의하였다. 모의결과, SS를 이용한 미세플라스틱 모의가 BOD를 이용한 모의보다 미세플라스틱 농도 모의에 더 좋은 성능을 나타냈다. 이는 상태변수로 이용한 각 수질인자의 특성에 기인한 것으로 생물화학적 지표인 BOD는 생물화학적으로 매우 안정된 미세플라스틱 모의에 대리인자로 사용하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 반면, 미세플라스틱과 물리적 거동이 유사한 SS의 경우 미세플라스틱의 농도변화 추세를 잘 반영하였다. 향후, 보다 엄밀한 모형을 통한 미세플라스틱 오염 예측을 위해서는 미세플라스틱 재현성 평가를 위한 다양한 환경조건에서의 기초적인 미세플라스틱 조사 연구가 요구되며, 미세플라스틱 입력자료의 단위문제가 해결되어야 한다.

핵심용어: 미세플라스틱, 생화학적 산소 요구량, 부유물질, 물리모형

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-6630

E-mail: hanjeong@seoultech.ac.kr (Jeong, Hanseok)

1. 서론

담수환경에 중요한 환경문제인 하천 내 미세플라스틱의 거동을 이해하는 것은 미세플라스틱 문제 해결에 있어 필수적이다. 이와 같은 문제인식에서 하천 미세플라스틱의 물리적 거동을 규명하기 위해 전세계적으로 다양한 연구들이 수행되고 있다. 물리 실험과 수학적 계산을 통해 수체에서 미세플라스틱의 움직임을 규명하고자 하는 시도가 있었으며(Khatmullina and Isachenko, 2017; Kumar *et al.*, 2021), 하천 지점별 미세플라스틱 샘플링을 통해 밀도, 색상, 크기, 그리고 모양 등에 따른 미세플라스틱의 공간적 분포특성을 분석하는 등의 연구가 이루어졌다(Klein *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2021).

장기간에 걸친 미세플라스틱의 모니터링에는 많은 비용과 인력이 필요하기 때문에 모형의 활용을 통해 담수 중 미세플라스틱 거동 이해를 보완할 수 있다. 실제 미세플라스틱의 거동 예측을 위해서도 지난 수년간 주요한 연구가 이루어진 바 있다(Waldschläger and Schüttrumpf, 2019a; 2019b; 2020). Nizzetto *et al.* (2016)은 영국 템즈강을 대상으로 유역 모델과 유사 방정식을 수정하여 미세플라스틱의 거동 모의를 수행하였으며, Yu *et al.* (2018)은 미국의 해양환경을 대상으로 Regional Ocean Modeling System (ROMS)과 Larval TRANSport Lagrangian Model (LTRANS)을 이용하여 해양의 수리역학적 조건과 해양으로의 미세플라스틱 유출량을 이용해 해양에서의 미세플라스틱의 분포와 양을 모의하였다. Daily and Hoffman (2020)은 Lagrangian Transport Model을 이용하여 미국 이리호(Lake Erie)에서 9가지 종류의 미세플라스틱 분포를 3차원으로 모의하였다.

상기의 연구들은 담수 미세플라스틱의 최종 출구인 해양과 호소 등을 대상으로 이루어지거나, 미세플라스틱의 분포를 3차원으로 모의하는 등 미세플라스틱의 물리적인 거동을 보다 엄밀하게 해석하기 위해 이루어졌다. 하지만, 미세플라스틱의 거동과 분포를 실제적으로 모형화하기 위해서는 많은 시간과 비용 뿐만 아니라, 미세플라스틱에 대한 보다 향상된 이해가 요구된다. 또한, 자연계에서의 미세플라스틱은 종류, 형상, 밀도 등이 매우 다양하며, 현재 미세플라스틱의 물리적 거동에 대한 온전한 이해가 부족하기 때문에 미세플라스틱의 분포와 물리적 거동을 모의할 수 있는 새로운 모형을 개발하는 데에는 큰 어려움이 있다. 따라서, 새로운 오염물질에 대한 엄밀한 모형화가 어려운 현재와 같은 상황에서는 하천과 호소 등 다양한 물환경과 환경조건, 여러 수질인자들에 대해 충분히 적용성이 검토된 상용모형의 활용이 좋은 대안이 될 수 있다. 특히, 미세플라스틱과 같은 새로운 오염물질을 대상으로한 상용 모형의 시범 적용을 통해 해당 모형의 적용가능성과 한계를 검

토함으로써 새로운 오염물질에 대한 스크리닝(Screening)모형으로의 활용가능성 뿐만 아니라 보다 엄밀한 모형구축을 위해 고려해야할 사항 등을 탐구할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 하천수질 모의에 널리 사용되고 있는 동적 수치모형인 Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)을 활용하여 해당 모형의 미세플라스틱 모의가능성과 한계를 검토하고자 한다. WASP 모형은 전세계적으로 다양한 담수환경을 대상으로 적용되었으며(Carroll *et al.*, 2000; Wool *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2012), 우리나라의 경우에도 Park *et al.* (2013)이 충주호를 대상으로 기후변화에 따른 용존 산소(DO), 총 질소(T-N), 총 인(T-P), 클로로필 a (Chlorophyll a)의 모의에 WASP 모형을 적용한 바 있으나, 미세플라스틱 모의에는 아직까지 적용된 바 없다. WASP 모형을 통한 미세플라스틱 모의를 위해 기존의 여러 연구(Kataoka *et al.*, 2019; Buwono *et al.*, 2021; Sarkar *et al.*, 2019)에서 미세플라스틱과 가장 상관관계가 높은 수질인자로 알려진 생화학적 산소 요구량(BOD)과 수체 내에서의 물리적인 거동이 미세플라스틱과 유사성이 있다고 판단되는 부유물질(SS)을 미세플라스틱 대리변수로 활용하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 WASP8 Advanced Eutrophication Module의 BOD와 SS 상태변수를 대리변수로 활용하여 미세플라스틱 실측자료가 존재하는 안양천을 대상으로 미세플라스틱 농도 모의를 시도하였으며 모의에 사용된 두 상태변수의 모의성능을 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상하천

본 연구의 대상지역은 안양천 본류이다(Fig. 1). 안양천 권역은 국가하천 1개, 지방하천 19개의 총 20개의 법정하천으로 구성되어 있으며, 동경 126° 54' 54"~126° 58' 46", 북위 37° 20' 05"~37° 24' 35" 사이에 위치하고 있다. 안양천 본류의 하천연장은 약 31 km로 주요 유입하천으로는 산본천, 학의천 그리고 목감천 등이 존재한다. 대상 구간 내 하수처리장 2개소, 수질 및 유량측정지점 8개소가 존재하며, 유역의 하류부는 대부분 도시지역으로 많은 인구가 거주하고 있다.

2.2 WASP8 모형의 개요

WASP8 모형은 미국 환경청(US EPA)에서 개발한 동적 수치 모형이다(Wool *et al.*, 2020). 본 모형은 하천, 호소, 저수지 등 여러 수체에서의 경계조건과 시간에 따라, 수온, 염분 등 일반적인 수질지표 뿐만 아니라 영양물질, 독성물질, 열수지 등 다양한 항목의 모의가 가능하다. 또한, 간단한 이론 및 계산



Fig. 1. Anyangcheon stream and its monitoring system for this study. There are two wastewater treatment plants, Bakdal and Seoksu, contributing to the water environment of the Anyangcheon stream

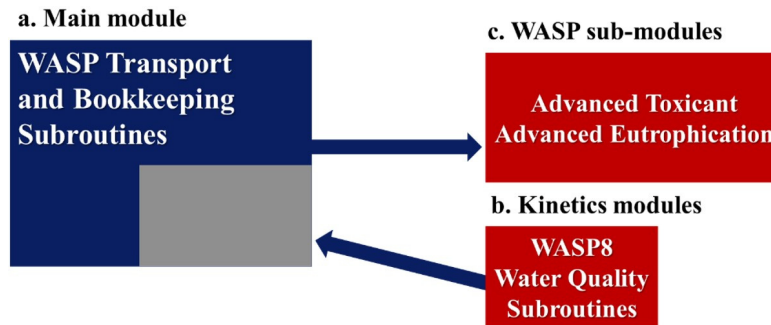


Fig. 2. Water quality analysis simulation program (WASP) structure: selected kinetics modules (b) are linked with the main module (a) to produce problem-specific submodules (c)

과정, 모듈형 프로그램 구조를 바탕으로 사용자의 편의에 따라 다양한 시공간에서의 수질 예측이 가능하다는 장점을 가지고 있다. WASP 모형은 기본적으로 지정된 초기조건과 시간에 따라 각 Segment의 유량과 수질 변수의 농도 계산이 진행되며, 이 과정은 사용자가 지정한 운송조건과 하중, 경계조건 등에 따라 지정된 최소 시간단위에서 반복된다. 또한, 복잡한 수체의 경우 외부 유체역학 입력파일(Hydrodynamic Linkage File)과 연결하여 모의할 수 있다(Wool *et al.*, 2020). WASP8에 적용된 일반적인 물질수지식은 다음과 같다(Eq. (1)).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial U_x C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial U_y C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial U_z C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_L + S_B + S_k \quad (1)$$

여기서, C는 수질 상태변수의 농도(M/L³), t는 시간, U_x, U_y, U_z는 각 3차원 방향으로의 이류 속도(L/T), E_x, E_y, E_z는 각 3차원 방향으로의 수직확산계수(L²/T), S_L는 직접 확산 부하율(M/L³T), S_B는 경계에서의 부하율(M/L³T), S_k는 수질반응에 따른 변형율(M/L³T)이다.

WASP8의 전체적인 구조는 모든 입력자료를 저장하는 메인 모듈과 운반을 수행하는 동역학 모듈, 두개의 부 모듈(Advanced Eutrophication Module, Advanced Toxicant Module)을 포함한다(Fig. 2). 동역학 모듈(b)은 메인 모듈(a)과 연결되어 사용자의 선택에 따라 부 모델(c)을 생성하게 되며, Advanced Eutrophication Module은 용존산소, 생화학적 산소 요구량, 질소, 인, 규소, 식물성 플랑크톤, 부착생물, 대형조류, 부유물질 그리고 박테리아 등의 영양물질을, Advanced Toxicant

Module은 화학물질, 미세화학물질, 부유물질 그리고 용존유기탄소 등의 독성물질을 모의한다. 본 연구에서는 Advanced Eutrophication Module을 활용하여 BOD와 SS, 그리고 미세플라스틱의 농도를 모의하였다.

2.3 모형구축

WASP8 모형의 구축을 위해 유량, 수질, 기상자료, 하도특성이 입력자료로 활용되었다. 유량자료구축을 위해 안양천 및 유입지류의 유량과 하수처리장 방류수량, 하천 유지용수량, 빗물펌프장 방류수, 강수량 자료가 입력되었으며, 수질자료에는 pH, BOD, DO, SS, 수온이 포함되었다. 기상자료로는 광량, 일사량, 기온, 풍속, 이슬점이 입력되었으며, 연구대상하천에서 가장 가까운 기상관측지점인 수원기상대의 기상자료가 사용되었다. 유량자료와 기상자료는 기본적으로 1일 단위의 측정 자료가 입력되었으며, 누락된 날짜가 있는 경우 해당 날짜의 이전 날짜의 값과 이후 날짜의 값의 평균값이 입력되었다. 수질자료의 경우 일주일 단위의 측정 자료가 입력되었다. 대상하천의 지형적, 수문학적 특성을 고려해 하천구간을 32개 Segment로 구분하였으며 하도 특성으로 각 Segment의 길이, 평균 하폭, 기울기, 평균 및 최소 깊이, 조도계수가 입력되었다. 유량과 수질자료는 환경부 물환경정보시스템(ME, 2009)과 서울시 물순환정보 공개시스템(SMG, 2016), 기상자료는 기상청 기상자료개방포털(KMA, 2015), 하도특성은 안양천 하천정비기본계획(MOLIT, 2015)의 내용을 참고하여 입력되었다.

모형 구축과정에 총 여섯 개의 주요 오염원(Point Source, PS)을 경계조건(Boundary)으로 반영하였으며(Fig. 3), 안양천으로 유입되는 세계의 지류하천인 산본천(PS 2), 학의천(PS 3), 목감천(PS 6)과 석수하수처리장으로부터 방류된 하천 유지용수(PS 1), 박달하수처리장 방류수(PS 4), 석수하수처리장 방류수(PS 5)의 유량 및 수질자료가 모형에 입력되었다. 경계조건은 연구대상 수체의 공간적 범위를 구분하기 위한 것으로 WASP 모형 구축 시 Segmentation 과정에서 반드시 지정해주어야 하는 요소이다.

미세플라스틱 오염원으로는 하천에서 대표적인 미세플라스틱 유입원으로 알려진 하수처리장 방류수(Estahbanati and Fahrenfeld, 2016; Mason *et al.*, 2016; Kay *et al.*, 2018)를 반영하였으며, 이에 따라 석수하수처리장으로부터 방류된 하천 유지용수(PS 1), 박달하수처리장 방류수(PS 4), 그리고 석수하수처리장 방류수(PS 5)에 미세플라스틱 실측자료가 입력되었다. 하천 미세플라스틱 분포의 계절적 변동성에 의한 오차를 줄이기 위해 연구대상 기간동안 같은 날짜에 같은 양의 미세

플라스틱이 유입된다고 가정하였으며, 이를 바탕으로 2018년 4월 3일에 실측된 미세플라스틱 값이 초기 경계조건과 오염원 유입 농도로 입력되었다. 이때, 실측된 미세플라스틱 자료 중 하수처리장 방류수와 가장 가까운 지점의 미세플라스틱 값을 하수처리장 방류수의 미세플라스틱 농도로 활용하였으며, 대리 상태변수 활용을 위해 particle/m³ 단위의 미세플라스틱 자료를 mg/L 로 변환하여 입력하였다. 안양천의 7개 측정 미세플라스틱 실측 값은 한강 본류와 지류하천의 총 21개 측정점에서 각 측정당 미세플라스틱을 1회 채취 및 분석한 Park *et al.* (2019) 연구결과를 활용하였다. 해당 연구에서 미세플라스틱 시료의 채취는 만타트롤 네트(Manta Trawl Net)를 이용하여 이루어졌으며, 이후 체걸음과 과산화수소를 이용한 전처리 후 FR-IR (Fourier Transformed Infrared Spectroscopy)과 현미경 검경을 통해 미세플라스틱이 선별되었다(Park *et al.*, 2019).

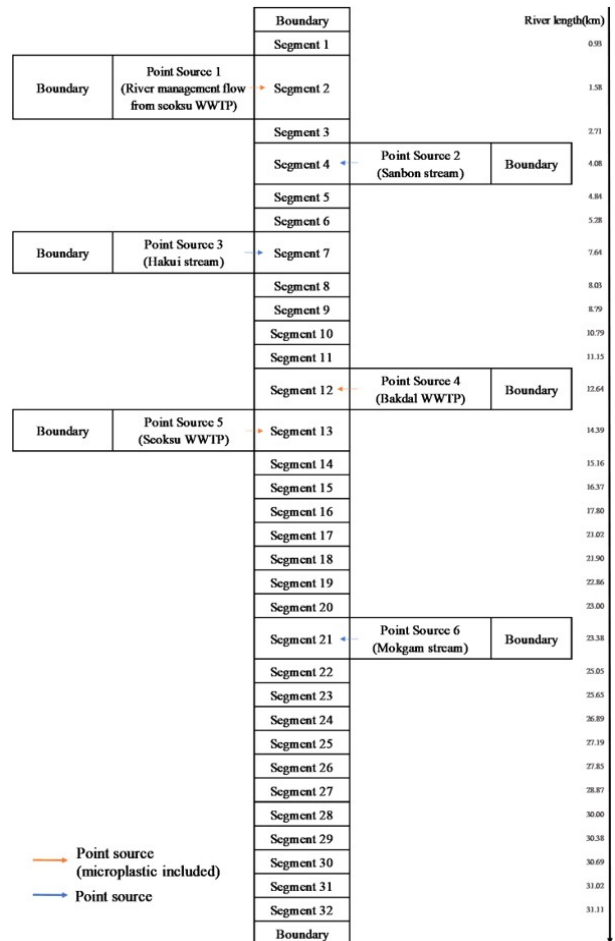


Fig. 3. Boundary conditions and segmentation setup for WASP8 modeling

2.4 모형 검증 및 평가

WASP8 모형은 일단위로 5년간(2016년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지) BOD, SS, 그리고 미세플라스틱 농도를 모의하였다. 초기 매개변수 안정화를 위해 2016년 1월부터 2016년 12월까지는 모형 안정화 기간으로 두어 결과분석에서 제외하였으며, 2017년 1월부터 2018년 12월까지는 보정기간, 2019년 1월부터 2020년 12월까지는 모형의 검증기간으로 하였다. 모형의 보정과 검증은 %Difference 지표를 이용하여 유량, BOD와 SS에 대해 진행되었으며, %Difference의 평가는 Donigan (2000)에서 제시된 %Difference 평가척도에 의해 이루어졌다(Table 1). 모형의 보정은 BOD의 경우 분해속도계수(CBOD Decay Rate Constant), 분해속도 온도보정계수(CBOD Decay Rate Temperature Correction Coefficient), 그리고 유기쇄설물 해체율(Fraction of Detritus Dissolution to CBOD)에 대해 이루어졌으며, SS의 경우 입자속도 계산여부(Solids Option), 입자 크기(Particle Diameter for Solid), 그리고 입자간 임계응집률(Critical Cohesive Sediment Fraction)을

Table 1. Performance evaluation for %difference range (adapted from Donigan, 2000)

Constituent	Very good	Good	Fair
Hydrology / Flow	< 10	10~15	15~25
Water Temperature	< 7	8~12	13~18
Water Quality / Nutrients	< 15	15~25	25~35

Table 2. Calibrated values of reaction coefficients

Parameter	Definition and Unit	Range	Default	Calibrated Value
CBOD	CBOD Decay Rate Constant @20 C (1/day)	0~5.6	0	0.0001
	CBOD Decay Rate Temperature Correction Coefficient	0~1.07	1	1.07
	Fraction of Detritus Dissolution to CBOD	0~1	0	0
SOLID	Solids Option. (0=Uses Input Settling, Deposition, Resuspension Velocity; 1=Uses Settling, Deposition, Resuspension Velocity Calculated from Shear Stress)	0~1	0	0
	Particle Diameter for Solid (mm)	0.004~0.63	0.025	0.03
	Critical Cohesive Sediment Fraction -above Which Bed Acts Cohesively	0~1	0.2	0.2
DISOX	Calculation Reaeration Option (0=Covar; 1=OConnor; 2=Owens; 3=Churchill; 4=Tsvoglou)	0~4	0	0
WTEMP	Coefficient of Bottom Heat Exchange (Watts/m ² °C)	-	0.4	0.4
	Sediment (Ground) Temperature (°C)	-	10	10
Light	Fraction of Solar Radiation Reflected at the Water Surface	0~1	0.06	0.06
	Light Option (1=Uses Input Light; 2=Uses Calculated Diel Light)	1~2	1	1
	Background Light Extinction Coefficient (1/m)	0~1	0	0.1
	Detritus & Solids Light Extinction Multiplier	0~1	0.1	0.2
	DOC Light Extinction Multiplier	0~10	0	0.3

대상으로 하였다. DO에 대해서는 재폭기량 계산에 사용될 방정식(Calculation Reaeration Option), 수온에 있어서는 지면 열 교환계수(Coefficient of Bottom Heat Exchange), 지면 온도(Sediment (Ground) Temperature)가 사용되었다. 빛과 관련해서는 수면 반사율(Fraction of Solar Radiation Reflected at the Water Surface), 입력자료 사용여부(Light Option), 배경광 소광 계수(Background Light Extinction Coefficient), 유기쇄설물 및 부유물질, DOC에 대한 소광 승수(Detritus & Solids, DOC Light Extinction Multiplier)가 사용되었다. 최적의 매개변수를 추정하기 위한 매개변수 보정기법으로는 시행착오법을 이용하였다(Table 2).

미세플라스틱의 경우 보검정에 사용할 실측자료의 부족으로 인해, 미세플라스틱 실측 날짜(2018년 4월 3일)의 미세플라스틱 관측 값과 모의 값을 하천 지점에 따라 비교하는 방식으로 모의결과가 분석되었다. 미세플라스틱 모의 성능의 평가는 결정계수(R²)를 산출하는 방식을 통해 이루어졌다(Eq. (2)).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$

여기서, y_i 는 관측 값, \hat{y}_i 는 모의 값, \bar{y} 는 관측 값의 평균값, n 은 표본의 개수를 의미한다.

3. 연구결과

3.1 안양천 유량, 생화학적 산소 요구량 및 부유물질 모의결과

안양천 유량과 생화학적 산소요구량, 부유물질 모의결과는 실측값을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 보정기간의 안양천의 평균 관측유량은 6.0 m³/s, 평균 모의유량은 5.7 m³/s였으며, 검정기간의 안양천 평균 관측유량은 6.0 m³/s, 평균 모의유량은 6.1 m³/s로 Donigan (2000)이 제시하는 재현성 평가 기준에 따라 각각 “Good”과 “Very good”으로 평가되었다. 또한, 생화학적 산소 요구량의 경우 보정기간의 연평균 %Difference는 13.5%, 검정기간의 연평균 %Difference는

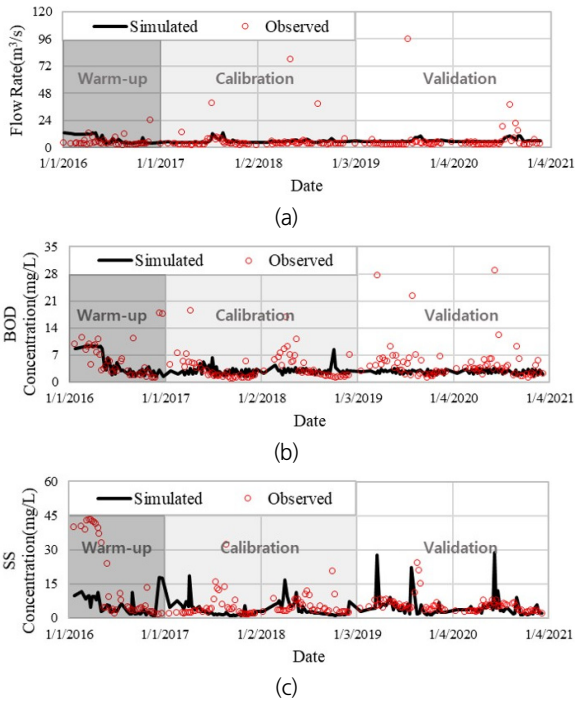


Fig. 4. Comparison of the observed and simulated (a) Flow rate, (b) BOD, and (c) SS during 2016~2020. BOD and SS indicate biochemical oxygen demand, and suspended solids, respectively

Table 3. Model performance evaluation measures for daily streamflow, daily loads of suspended solids, and daily loads of biochemical oxygen demand for the entire simulation period

Simulation phases	Streamflow	Biochemical oxygen demand	Suspended solids
	%Difference	%Difference	%Difference
Calibration (2017~2018)	13.7	13.5	19.9
Validation (2019~2020)	3.0	32.3	14.9

32.3%였으며, 이는 Donigan (2000)이 제시하는 재현성 평가 기준에 따라 각각 “Very good”과 “Fair”로 평가되었다. 부유물질의 경우 보정기간의 연평균 %Difference는 19.9%, 검정기간의 연평균 %Difference는 14.9%로 Donigan (2000)이 제시하는 재현성 평가 기준에 따라 각각 “Good”과 “Very good”으로 평가되었다(Fig. 4, Table 3).

3.2 안양천 미세플라스틱 모의결과

하천 수계내에서 미세플라스틱과 가장 상관관계가 강한 것으로 알려져 있는 BOD와, 물리적 거동이 유사하다고 판단되는 SS를 모형에서의 변수로 이용하고 입력자료를 수정하여 미세플라스틱을 모의하였다. 이는 앞서 BOD와 SS 모의에 대해 검정된 모형에 BOD와 SS 상태변수를 추가하여 본 연구에서 미세플라스틱 오염원으로 설정한 하수처리장 방류수의 미세플라스틱 농도를 입력하여 모의하는 방식으로 이루어졌다. 모형의 미세플라스틱 모의결과는 미세플라스틱 실측자료가 있는 하천구간 7개 지점에 대해, 미세플라스틱 샘플링이 이루어진 날(2018년 4월 3일)의 두 대리변수(BOD와 SS) 모의값들과 실측값들의 비교분석을 통해 해석되었다.

비교분석 결과, BOD를 이용한 모의결과보다 SS를 이용한 모의결과가 전반적으로 미세플라스틱 농도변화의 추세를 더 잘 반영하는 것으로 나타났다(Fig. 5). BOD를 이용한 미세플라스틱 모의결과 미세플라스틱 모의값의 범위는 106.6~220.2 mg/L으로 나타났고, SS를 이용한 미세플라스틱 모의결과 미세플라스틱 모의값의 범위는 1.5~94.4 mg/L으로 나타났다. 또한, 두 모의결과 모두 하천 하류 지점에서 미세플라스틱 농도가 서서히 감소하는 것으로 관찰되었다. BOD를 이용한 결과에서 미세플라스틱의 농도는 미세플라스틱 유입 직후(Segment 2) 가장 높았다가 하수처리장 방류수 유입 후인 Segment 14(약 15 km 지점)에서 미약하게 증가 후 하류로 갈수록 감소하였다. SS를 이용한 결과에서 미세플라스틱 농도는 미세플라스틱 유입 직후(Segment 2) 약간 증가하였다가 감소하였고 하수처리장 방류수 유입 후인 Segment 14(약 15 km 지점)에서 가장 높았다가 다시 감소하였다. 특히, BOD를 이용한 모의결과는 외부 유량의 유입에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 산본천이 유입되는 Segment 4(약 4 km 지점), 학의천이 유입되는 Segment 7(약 7 km 지점)과 목감천이 유입되는 Segment 21(약 23 km 지점), 하수처리장 방류수 유입지점인 Segment 12-13(약 14 km 지점)에서 즉각적으로 미세플라스틱 농도가 감소하는 것이 관찰되었다.

BOD 및 SS를 이용한 미세플라스틱 모의값과 미세플라스틱 관측값의 회귀분석을 실시하여 결정계수(R²)를 산정하였

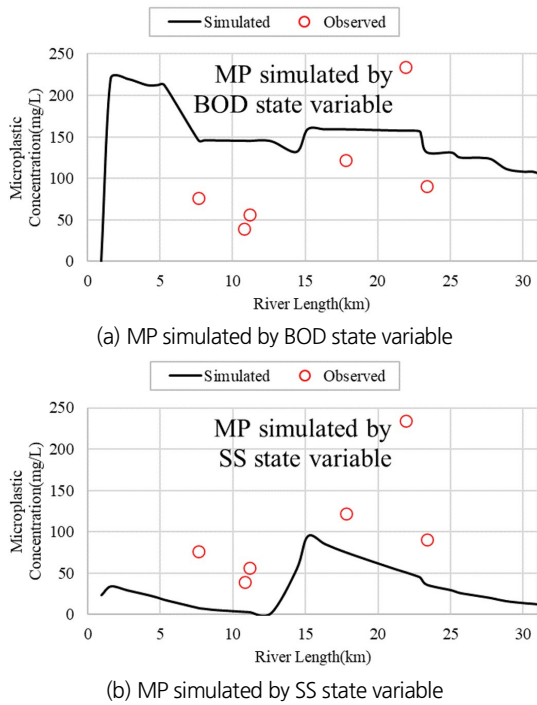


Fig. 5. Comparison of the observed and simulated microplastics in Anyangcheon stream. MP, BOD, and SS indicate microplastic, biochemical oxygen demand, and suspended solids, respectively

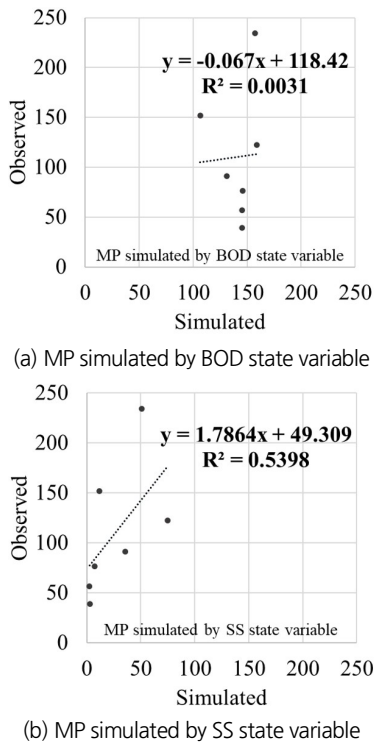


Fig. 6. Coefficient of determination between observed and simulated microplastics. MP, BOD, and SS indicate microplastic, biochemical oxygen demand, and suspended solids, respectively

다. BOD를 이용한 미세플라스틱 모의 결과에서는 0.00의 매우 낮은 결정계수가 관찰되었으며, SS를 이용한 미세플라스틱 모의결과의 결정계수는 0.54였다(Fig. 6). 이 결과를 통해 BOD 상태변수를 이용한 모의보다 SS 상태변수를 이용한 모의가 미세플라스틱의 모의에 더 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

4. 고찰

상용 물리모형인 WASP8과 수질 상태변수를 이용한 미세플라스틱 모의는 각 상태변수의 특성을 반영하였다. SS는 이전의 선행연구에서 미세플라스틱과 상대적으로 약한 상관관계를 가졌으나(Kataoka *et al.*, 2019; Buwono *et al.*, 2021; Sarkar *et al.*, 2019), BOD를 상태변수로 이용한 모의보다 미세플라스틱 농도 변화추세를 더 잘 반영하였다. 이는 미세플라스틱의 다음과 같은 물리적 특성에 기인한 것으로 판단된다. BOD는 생물화학적 지표로 온도 변화 등 외부 요인에 따른 농도 변화가 심하다. 이와 달리, 미세플라스틱은 하천 내에서 물리화학적으로 형태가 거의 변하지 않고 일정하게 존재한다(Cózar *et al.*, 2014). 따라서 화학적으로 농도가 변화하는 BOD를 상태변수로 이용한 미세플라스틱 모의에는 한계가 존재할 수 있다. 이와 같은 이유로, 대리 상태변수와 물리식 기반의 수치모형을 이용한 미세플라스틱 농도 예측에는 생물화학적 유형의 상태변수를 고려하는 것보다 SS 등과 같이 생물화학적 반응에 덜 민감한 유형의 상태변수에 기반한 모의가 더 적합할 수 있다. 이는 다수의 연구에서도 밝힌 바와 같이(Nizzetto *et al.*, 2016; Waldschläger *et al.*, 2022), 미세플라스틱의 수체에서의 거동이 부유물질과 유사한 측면이 많은 것에 기인하는 것으로, 향후 미세플라스틱의 수체 내 분포와 거동의 모형화가 상용 모형의 유사(流沙)거동을 모형화하는 방법에서 출발할 수도 있음을 시사한다. 또한, WASP를 하천에서의 미세플라스틱 농도와 그 변화를 추정하기 위한 스크리닝 모형으로 활용할 수 있는 가능성을 일부 확인하였다. 본 연구에서 WASP의 미세플라스틱 모의 성능이 Moriasi *et al.* (2015) 등 수문-수질 모델링에 일반적으로 활용되는 모형 성능 평가 지표나 다른 시간규모에 있어 본 연구결과와 달리 평가될 수도 있다. 하지만, 본 연구결과는 입력자료의 부족 등의 제한상황으로 인해 엄밀한 모형구성이 어렵거나, 불필요한 상황에서 현재의 WASP 모형을 활용해 특정 유량조건에 따른 하천의 미세플라스틱 농도를 추정할 수 있다는 가능성을 보여주었다.

본 연구를 통해 보다 엄밀하고 향상된 담수 미세플라스틱

농도 모의를 위한 개선사항이 도출되었다. 첫째, 미세플라스틱 농도 모의에서 단위변환에 대한 고려가 필요하다. 일반적인 미세플라스틱 조사 연구에서는 미세플라스틱의 농도를 $\text{particle}/\text{m}^3$ 으로 표현하는 데 반해, 수질지표의 경우 mg/L 단위를 사용한다. 미세플라스틱 농도에서의 particle 이 mg 으로 표현되기 위해서는 각 입자의 밀도를 알아야 하나, 조사된 모든 미세플라스틱 입자의 밀도를 알아내어 단위변환을 하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나, 대표적인 수질지표인 부유물질 역시 입자 크기와 상관없이 mg/L 단위로 표현됨을 고려하였을 때, 미세플라스틱의 크기가 일정 수준 이하라면 오염물질로서 미세플라스틱 농도를 mg/L 단위로 표현하는 것이 가능할 수 있을 것이라 생각된다. 둘째, 보다 정확한 모형 구축을 위해서 더 많은 미세플라스틱 실측자료가 필요하며 다양한 미세플라스틱 오염원이 고려되어야 한다. 현재 미세플라스틱 예측 재현성 평가를 위한 실측자료가 매우 부족한 상황이며, 모형을 통한 미세플라스틱 모의를 위해서는 다양한 환경조건에서의 장기간의 연속적인 하천 미세플라스틱 모니터링 자료가 필요하다. 또한, 본 연구에서는 하수처리장 방류수 외 다른 미세플라스틱 유입원을 고려하지 않았는데, 미세플라스틱은 하수처리장 방류수 뿐만 아니라 강우시 비점오염유출 등 다른 오염원을 통해서도 하천으로 유입될 수 있으므로 모형 구축단계에 더욱 다양한 미세플라스틱 오염원을 반영할 수 있어야 한다.

5. 결론

새로운 모형 개발이 어려운 담수환경에서의 미세플라스틱 거동 예측에 있어 상용 하천수질모형인 WASP8의 적용성을 검토하기 위해 WASP8 모형의 BOD와 SS 상태변수를 대리인자로 활용하여 안양천의 미세플라스틱 농도를 모의하였다. 모의 결과, WASP8을 이용한 미세플라스틱 모의가 일정부분 가능한 것으로 나타났으며, BOD를 상태변수로 이용했을 때 보다 SS를 상태변수로 이용했을 때 미세플라스틱 농도변화 추세를 더 잘 반영하였다. 이에 따라 모형을 통한 미세플라스틱 모의에 기개발된 수질모형의 제한적 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 하지만, 미세플라스틱 모의 값을 보정 및 검증하는 데에 이용할 수 있는 미세플라스틱 실측 값이 매우 부족한 실정이므로 모형의 엄밀한 재현성 평가가 어려우며, 기존 수질인자와 미세플라스틱 단위의 불일치로 인한 정확한 미세플라스틱 농도 모의가 어렵다는 제한사항도 함께 도출되었다. 따라서, 보다 정확한 미세플라스틱 모의를 위해서는 다양한 유황 등을 포

함하는 환경 조건에서의 연속적인 미세플라스틱 모니터링 및 모델링 연구가 반드시 필요하며, 미세플라스틱의 거동을 잘 반영할 수 있는 수정된 물리모형의 개발을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 녹색융합기술인재양성특성화대학원사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Buwono, R., Risjani, Y., and Soegianto, A. (2021). "Distribution of microplastic in relation to water quality parameters in the Brantas River, East Java, Indonesia." *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 24, pp. 172-178.
- Carroll, R.W.H., Warwick, J.J., Heim, K.J., Bonzongo, J.C., Miller, J.R., and Lyons, W.B. (2000). "Simulation of mercury transport and fate in the Carson River, Nevada." *Ecological Modelling*, Vol. 125, pp. 255-278.
- Chen, C., Lung, W., Li, S., and Lin, C. (2012). "Technical challenges with BOD/DO modeling of rivers in Taiwan." *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 3-8.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, Á.T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M.L., and Carlos, M.D. (2014). "Plastic debris in the open ocean." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 111, No. 28, pp. 10239-10244.
- Daily, J., and Hoffman, M.J. (2020). "Modeling the three-dimensional transport and distribution of multiple microplastic polymer types in Lake Erie." *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 154, 111024.
- Donigan, A.S.Jr. (2000). *Lecture #19. Calibration and verification issues*. HSPF Training Workshop Handbook and CD, Slide #L19-22, U.S. EPA, Washington D.C., U.S.
- Estahbanati, S., and Fahrenfeld, N.L. (2016). "Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water." *Chemosphere*, Vol. 162, pp. 277-284.
- Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K., and Hinata, H. (2019). "Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan." *Environmental Pollution*, Vol. 244, pp. 958-965.

- Kay, P., Hiscoe, R., Moberlay, I., Bajic, L., and McKenna, N. (2018). "Wastewater treatment plants as a source of microplastics in river catchments." *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, pp. 20264-20267.
- Khatmullina, L., and Isachenko, I. (2017). "Settling velocity of microplastic particles of regular shapes." *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 114, pp. 871-880.
- Klein, S., Worch, E., and Knepper, T.P. (2015). "Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-main area in Germany." *Environmental Science & Technology*, Vol. 49, No. 10, pp. 6070-6076.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2015). Korea, accessed 29 September 2022, <<https://data.kma.go.kr/>>.
- Kumar, R., Sharma, P., Verma, A., Jha, P.K., Singh, P., Gupta, P.K., Chandra, R and Prasad, P.V.V. (2021). "Effect of physical characteristics and hydrodynamic conditions on transport and deposition of microplastics in riverine ecosystem." *Water*, Vol. 13, No. 19, pp. 2710-2730.
- Mason, S.A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., Fink, P., Papazissimos, D., and Rogers, D.L. (2016). "Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent." *Environmental Pollution*, Vol. 218, pp. 1045-1054.
- Ministry of Environment (ME) (2009). Korea, accessed 29 September 2022, <<https://water.nier.go.kr/>>.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2015). *The basic river maintenance plan for Anyangcheon*. Publication No. 11-1613168-000050-01, pp. 54-131.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). "Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria." *Transactions of the ASABE*, Vol. 58, pp. 1763-1785.
- Nizzetto, L., Bussi, G., Futter, M.N., Butterfield, D., and Whitehead, P.G. (2016). "A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments." *Environmental Science: Processes & Impacts*, Vol. 18, No. 8, pp. 1050-1059.
- Park, J.Y., Park, G.A., and Kim, S.J. (2013). "Assessment of future climate change impact on water quality of Chungju Lake, South Korea, Using WASP coupled with SWAT." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 49, pp. 1225-1238.
- Park, T., Lee, S., Lee, M., Lee, J., Lee, S., and Zoh, K. (2019). "Occurrence of microplastics in the Han River and riverine fish in South Korea." *Science of the Total Environment*, Vol. 708, No. 15, 134535.
- Sarkar, D.J., Sarkar, S.D., Das, B.K., Manna, R.K., Behera, B.K., and Samanta, S. (2019). "Spatial distribution of meso and microplastics in the sediments of river Ganga at eastern India." *Science of the Total Environment*, Vol. 694, No. 1, 133712.
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2016). Korea, accessed 29 September 2022, <<http://swo.seoul.go.kr/>>.
- Singh, N., Mondal, A., Bagri, A., Tiwari, E., Khandelwal, N., Monikh, F.A., and Darbha, G.K. (2021). "Characteristics and spatial distribution of microplastics in the lower Ganga River water and sediment." *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 163, 111960.
- Waldschläger, K., Bruckner, M.Z.M., Almroth, B.C., Hackney, C.R., Adyel, T.M., Alimi, O.S., Belontz, S.L., Cowger, W., Doyle, D., Gray, A., Kane, I., Kooi, M., Kramer, M., Lechthaler, S., Michie, L., Nordam, T., Pohl, F., Russell, C., Thit, A., Umar, W., Valero, D., Varrani, A., Warriar, A.K., Woodall, L.C., and Wu, N. (2022). "Learning from natural sediments to tackle microplastics challenges: A multidisciplinary perspective." *Earth-Science Reviews*, Vol. 228, 104021.
- Waldschläger, K., and Schüttrumpf, H. (2019a). "Erosion behavior of different microplastic particles in comparison to natural sediments." *Environmental Science & Technology*, Vol. 53, pp. 13219-13227.
- Waldschläger, K., and Schüttrumpf, H. (2019b). "Effects of particle properties on the settling and rise velocities of microplastics in freshwater under laboratory conditions." *Environmental Science & Technology*, Vol. 53, pp. 1958-1966.
- Waldschläger, K., and Schüttrumpf, H. (2020). "Infiltration behavior of microplastic particles with different densities, sizes, and shapes—from glass spheres to natural sediments." *Environmental Science & Technology*, Vol. 54, pp. 9366-9373.
- Wool, T., Ambrose, Jr. R.B., Martin, J.L., and Comer, A. (2020). "WASP 8: The next generation in the 50- year evolution of USEPA's water quality model." *Water*, Vol. 12, No. 5, pp. 1398-1431.
- Wool, T.A., Davie, S.R., and Rodriguez, H.N. (2003). "Development of three dimensional hydrodynamic and water quality model to support total maximum daily load decision process for the Neuse River Estuary, North Carolina." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, pp. 295-306.
- Yu, X., Ladewig, S., Bao, S., Toline, C.A., Whitmire, S., and Chow, A.T. (2018). Occurrence and distribution of microplastics at selected coastal sites along the southeastern United States. *Science of the Total Environment*, Vol. 613-614, pp. 298-305.