Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 39, No. 6, pp. 439-450 (November, 2023)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2023.39.6.439

3차원 수리 모델을 이용한 영산강 수질오염물질의 수체 내 거동 특성 분석

오혜연[1a] · 김은정[2] · 최정현[1b,†]

[1]이화여자대학교 환경공학과 · [2]서울물연구원 수질연구과

Analysis of Behavior Characteristics of Water Pollutants in Yeongsan River Using 3D Hydraulic Model

Hye Yeon Oh[1a] · Eun Jung Kim[2] · Jung Hyun Choi[1b,†]

[1]*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*
[2]*Water Quality Research Division, Seoul Water Institute*

(Received 28 August 2023, Revised 27 October 2023, Accepted 1 November 2023)

Abstract

The Yeongsan River, a major water resource for Jeollanam-do, that is adjacent to industrial complexes and agricultural areas, is exposed to water pollution. Therefore, it is necessary to investigate the impact of water pollution incidences and prepare response systems for river environment safety for other water resources in the future. Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) was applied to the mainstream of the Yeongsan River where residential, commercial, and agricultural areas are located to analyze the behavior of pollutants conducting the scenario analysis. Considering the pollutants that affected the study area, two pollutants, oil and benzene, with different physical and chemical characteristics were selected for the analysis. As a result of comparing the actual and simulated values of the water elevation, temperature, and flow rate, it was confirmed that the model adequately reproduced the hydraulic characteristics of the Yeongsan River. The oil flow dynamics showed that an increase in flow rate led to reduction in the maximum height of the slick. Notably, the behavior of the oil was predominantly influenced by the wind conditions. In the case of benzene, lower flow scenarios exhibited decreased arrival times and residence times accompanied by an elevation in the maximum concentration levels. From the results of pollutant behavior in the study area, it is feasible to utilize the section of tributary confluence for collection and the weir area for dilution. This study enhances the understanding of the pollutant's behavior with different characteristics and develops effective control systems tailored to the physicochemical attributes of pollutants.

Key words : Chemical spill, Environmental Fluid Dynamics Code Plus (EFDC+), Oil spill, Pollution response, Yeongsan River

[1a] 석사과정(Master Student), hye0529@ewhain.net, https://orcid.org/0000-0002-9483-190X
[2] 연구원(Researcher), ejkim07@seoul.go.kr, https://orcid.org/0000-0001-6316-5003
[1b] Corresponding author, 교수(Professor), jchoi@ewha.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-0884-696X

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

매년 전국 수계에서 크고 작은 수질오염사고가 빈번히 발생하고 있으며 특히 낙동강권역과 영산강권역의 수질오염사고 발생 건수가 해마다 증가하는 추세를 보이고 있다(ME and K-eco, 2022). 일반적으로 수질오염사고란 특정 물질이 자연에서 발생 가능한 양 이상으로 하천, 호소, 해양과 같은 수 환경에 유입되어 수체 내에 물리, 화학적 반응을 발생시키거나 물 환경을 변화시켜 생태계와 인간에 악영향을 초래하는 경우를 의미한다(Lee et al., 2013). 대표적으로 선박 사고, 차량 전복으로 인한 유류 또는 중금속의 유출, 인근 공장으로부터 배출된 화학물질의 유입 등이 이에 해당한다. 국내에서는 낙동강권역에서 1991년 구미공단과 2008년 김천공단에서 발생한 페놀 유출사고와 1994년 발생한 유기용제 오염사고 등 과거 수차례에 걸쳐 오염물질 유출사고가 발생했고(Mun et al., 2012), 이후 낙동강을 대상으로 수질오염사고에 대한 다양한 연구가 수행되어왔다(Jang et al., 2016; Lee et al., 2019).

하천에서 수질오염사고 발생 시 그 피해를 최소화하기 위해서는 적절하고 신속한 방제 작업이 이루어져야 하는데, 여기에는 오염물질의 종류와 특성 및 사고 현장의 여건에 따라 다른 조치가 요구된다. 유류의 경우 확산을 방지하기 위해 포집하여 회수하는 작업이 진행되고, 벤젠과 페놀, 중금속, 농약 등의 경우 수체 내에서 희석시키며, 산성이나 알칼리성 오염물질은 중화처리가 우선적으로 진행된다(K-eco, 2023). 또한 차량 전복 사고와 같은 이유로 오염물질이 하천에 직접 유입되는 경우와 관로를 통해 하천으로 유출되는 경우 등 사고 발생 위치에 따라 임시제방과 오일펜스 등의 설치에 있어서 다른 대처가 요구된다. 따라서, 발생된 수질오염사고의 피해를 최소화하기 위해서는 오염원의 위치와 그로부터 확산되는 오염물질의 종류 및 농도에 따른 도달 시간과 이동경로 등을 과학적으로 분석하여 적절한 방제 작업을 진행하는 것이 필요하다.

영산강의 경우, 영산강 인근의 산단에서 누출된 화학물질이 하천에 영향을 미친 사고가 있었고, 도심 부근의 수계에서 유류가 영산강으로 유출되는 사건이 수차례 발생하였다(Cho, 2017; Heo, 2023). 또한, 산단과 농지로부터 공장 폐수와 농약이 비점오염원으로서 하천에 유출될 위험에 대해 수차례 논의가 되어져왔다(ME, 2023). 그러나 영산강을 대상으로 진행된 수질오염에 관한 연구는 보 구간의 부영양화로 인한 조류 발생 문제와 같은 자연현상에 의한 오염 위주로 진행되어왔으며(Chong et al., 2015; Kim et al., 2020; Shim et al., 2022), 유류, 화학물질, 농약 등 인위적인 사고로 인한 수질오염에 대한 연구는 타 수계에 비해 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 수질오염사고에 따른 영향 예측 및 선제적 대응체계를 마련하기 위해 영산강 수계 중 산단과 농지에 인접한 구간을 대상으로 3차원 수리 · 수질 모델(Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC)를 구축하여 오염물질 유출 사고를 가정한 시나리오 모의를 진행하였다. 수질오염사고는 오염물질의 특성에 따라 그 거동과 대응체계가 달라질 수 있으므로, 물리 · 화학적 특성이 다른 2가지 오염물질을 선정하여 지점별 도달 시간, 체류 시간 및 최고 농도 도달 시간 등을 분석하는 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과는 오염물질의 특성에 따른 수체내 거동 변화를 제시함으로써 오염물질별 적절한 대응체계를 위한 최적의 방안을 도출하는 데 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상지역 및 분석데이터

영산강은 본류 유역 면적이 약 3,455 km^2, 총 길이는 약 129.5 km이며(Son et al., 2013), 전라남도 담양군 용면 용추봉(EL. 560 m)에서 발원하여 담양군, 광주광역시, 나주시, 영암 등지를 지나 영산강 하구둑을 통해 황해로 흐르는 강이다(Shin et al., 2019). 영산강은 전남 일대의 농공업 용수 공급에 중요한 역할을 담당하며, 안정적인 용수 확보를 위해 담양댐, 광주댐, 장성댐, 나주댐 등 4개의 댐이 건설되었으며, 하구에는 황해로부터의 염수 유입을 막기 위한 영산강 하구둑이 건설되었다. 또한 4대강 사업의 일환으로 영산강 수계 내에 승촌보와 죽산보가 건설되었다(Chong et al., 2015).

전라남도 유역의 주요 용수 공급원인 영산강 유역을 대상으로 오염사고에 대한 시나리오 분석을 진행하고자, 산단과 농지에 인접하여 오염사고가 잦은 극락교부터 나주대교까지의 약 18.1 km의 구간을 최종 연구 대상 지역으로 선정하였다(Fig. 1). 연구 대상 지역에는 황룡강, 대촌천, 지석천, 평동

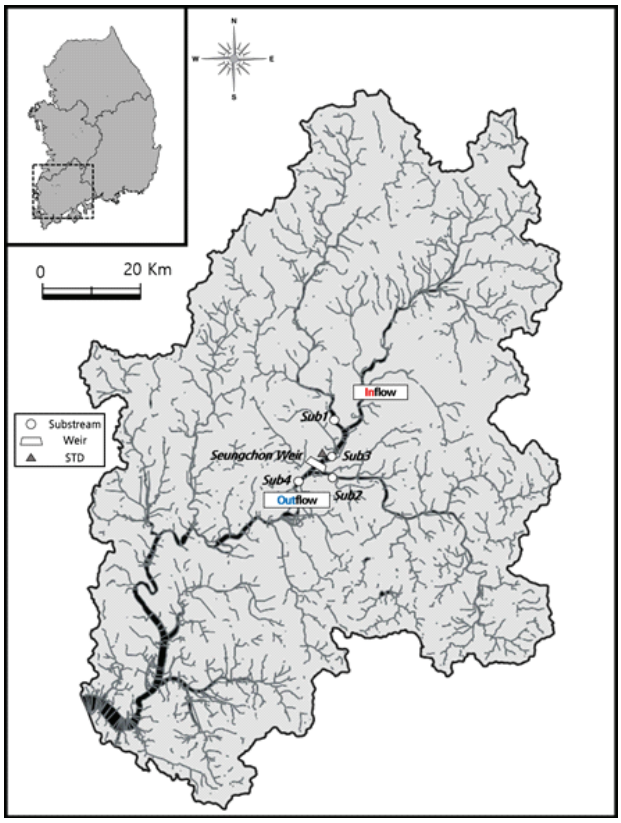


Fig. 1. Study area.

천, 장성천이 주요 지천으로서 본류로 유입되며, 그 외 광주 제2하수처리시설로부터 방류수가 유입된다. 상류에 위치한 광주광역시 광산구 운남대교 풍영정천 부근에서는 2017년 3월 25일과 2023년 5월 6일에 유류 유출사고가 발생하였으며, 당시 오일펜스를 설치하여 유류의 확산을 막고 흡착포를 사용하여 제거하는 식의 대응이 이루어졌다(Cho, 2017; Choi, 2017; Heo, 2023; Yoon, 2023). 이후 수질오염사고 수습 및 위기 대응 역량을 강화 및 점검하고 관계 기관 간의 상호협력체계를 강화하는 명목으로 2019년 8월 29일과 2022년 11월 18일에 영산강유역환경청이 주관하고 광주광역시와 광산소방서, 광주보건환경연구원이 참여한 유류유출 대비 방재훈련이 이루어졌다(ME, 2019; 2022). 또한 연구 대상 지역 상류 부근에 위치한 산단에서 화학물질 누출 사고가 매년 빈번히 발생하고 있어(ME, 2023), 광주광역시에서는 해당 위치에 환경부 주관의 수질 개선 사업을 추진하고 있다(Yu, 2022).

본 연구에서는 환경부에서 운영하는 물환경정보시스템(Water Environment Information System)의 광주 2, 황룡강 5, 평동천, 장성천, 지석천 3, 대촌천, 나주의 2018년부터 2022년까지의 일별 유량 데이터를 사용하였으며 연구대상구간 내에 위치한 광주 제2 하수처리시설의 방류량은 환경부 국립환경과학원의 전국오염원 조사자료 데이터를 활용하였다. 기상 상황은 기상청 기상자료개방포털에서 광주광역시의 평균기온(°C), 강수량(mm), 평균풍속(m/s), 최다풍향(16방위), 평균 상대습도(%), 평균 현지기압(mbar), 합계 일사량(MJ/m^2), 평균 전운량(1/10), 증발량(mm)의 일별 데이터를 제공받아 모델의 입력 조건에 맞게 환산하여 사용하였다.

2.2 모델 구성 및 적용

2.2.1 모델 개요

EFDC는 Virginia Institute of Marine Science (VIMS)와 School of Marine Science of The College of William and Mary의 John M. Hamrick 박사에 의해 최초로 개발되었다. DSI, LLC (DSI)에서는 2000년부터 지속적으로 EFDC를 개선 및 개발하였고, 2016년부터 DSI 버전의 EFDC를 Environmental Fluid Dynamics Code Plus (EFDC+)로 명명하였다.

EFDC+는 지표수 모델링 시스템으로, 오염물질이나 수체 내 영양물질 등 수체를 통한 물질의 이동을 3차원으로 모델링 할 수 있다. EFDC+는 유체역학(hydrodynamic), 수질(water quality), 퇴적물과 화학물질의 이동 등을 모의 할 수 있는 다양한 모듈과 기능을 가지고 있어(Fig. 2) 하천, 호소, 저수지, 습지 및 연안 등 전 세계의 수많은 수체의 환경 평가, 관리 및 규제를 목적으로 사용되고 있다(DSI LLC., 2023).

국내에서 EFDC 모델을 사용해 오염물질 유출 사고를 가정하여 시나리오 모의를 진행한 선행 연구는 다음과 같다. Kim et al. (2018)은 한강 취수원 구간에 페놀이 유출된 상황을 시나리오로 설정하여 유량별 취수 지점 도달 시간과 농도 변화를 분석하였다. Jang et al. (2016)은 낙동강 수계 중 다기능보를 포함한 구간을 대상으로 유류오염 발생 상황을 가정하고 가동보를 통해 오염물질의 이동 시간을 조절하는 시나리오를 모의하였다. Mun et al. (2012)는 구미산업단지에서 발생한 페놀이 낙동강으로 유출되는 상황을 가정하여 보 운영조건을 고려한 취수장 도달 시간과 확산농도를 평가하였다. Hwang et al. (2018)은 EFDC 모델과 Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) 모델을 연계하여 안성천 상류에 위치한 농업용 저수지를 대상으로 시기별 비소 농도 변화를 예측하였다. Lee et al. (2014)는 낙동강 본류를 대상으로 임의의 보존성 독성 물질이 유출됨을 가정하여 도달 시간과 체류 시간을 분석하고 취수원 위치를 오염원 상류로 이동하였을 경우 독성물질의 농도변화에 대한 연구를 진행하였다. Choi et al. (2014)는 1차원 모델인 DyHYD, DyQUAL을 사용해 2008년에 발생한 김천공장 페놀유출 사고에 대한 시나리오 분석을 수행하였으며 그 결과를 EFDC 모델과 비교하여 각 모형의 우수성을 비교하였다. 본 연구에서는 EFDC+ Explorer version 11.5 DSI, 2023)를 사용하였으며, EFDC+의 유체역학 모듈과 Lagrangian Particle Tracking LPT), Dye 등의 기능을 통해 유류와 화학물질 유출로 인한 수질오염사고를 모의하였다.

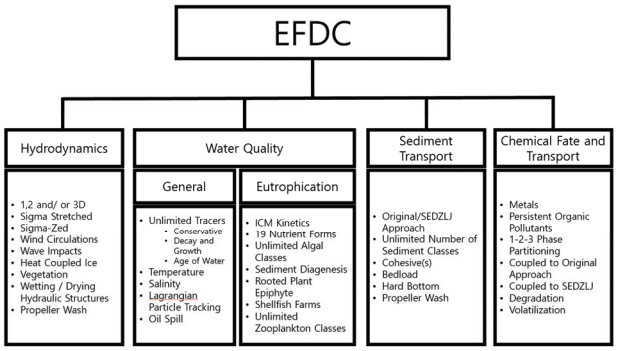


Fig. 2. Primary modules of the EFDC+ model.

2.2.2 모델 구성

본 연구에서는 연구대상지역에 대한 3차원 격자를 Grid+를 활용하여 구축하였다. Grid+는 DSI에서 개발하여 EFDC와 함께 사용하기에 최적화된 격자 구축 도구(grid building tool)이며 약 3.05 km^2 범위의 연구대상지역에 919개의 수표면 격자와 3층의 수심 방향 layer을 구성하였다. 국토해양부의 영산강 하천 기본계획 보고서의 평면도와 종단면도를 참고하고 하상 자료를 추출 후 bottom elevation을 입력하여 3차원 격자를 구성하였다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)(Fig. 3). 하천 기본계획 보고서 작성 시기(2011년)가 모델의 모의 시기(2019년)와 다소 차이가 있어, 그 사이 진행된 대상지역 하상변화가 모델에 반영되지 못하였다.

모델의 유량은 극락교 지점의 본류 유량과 주요 지류인 황룡강, 대촌천, 지석천, 평동천, 장성천에서 유입하는 유량 및 광주 제2 하수처리시설의 방류량을 모델의 유입 유량으로 적용하였고, 나주대교 지점의 유량을 유출 유량으로 적용하였다. 연구대상지역에 위치한 승촌보는 EFDC+의 Hydraulic

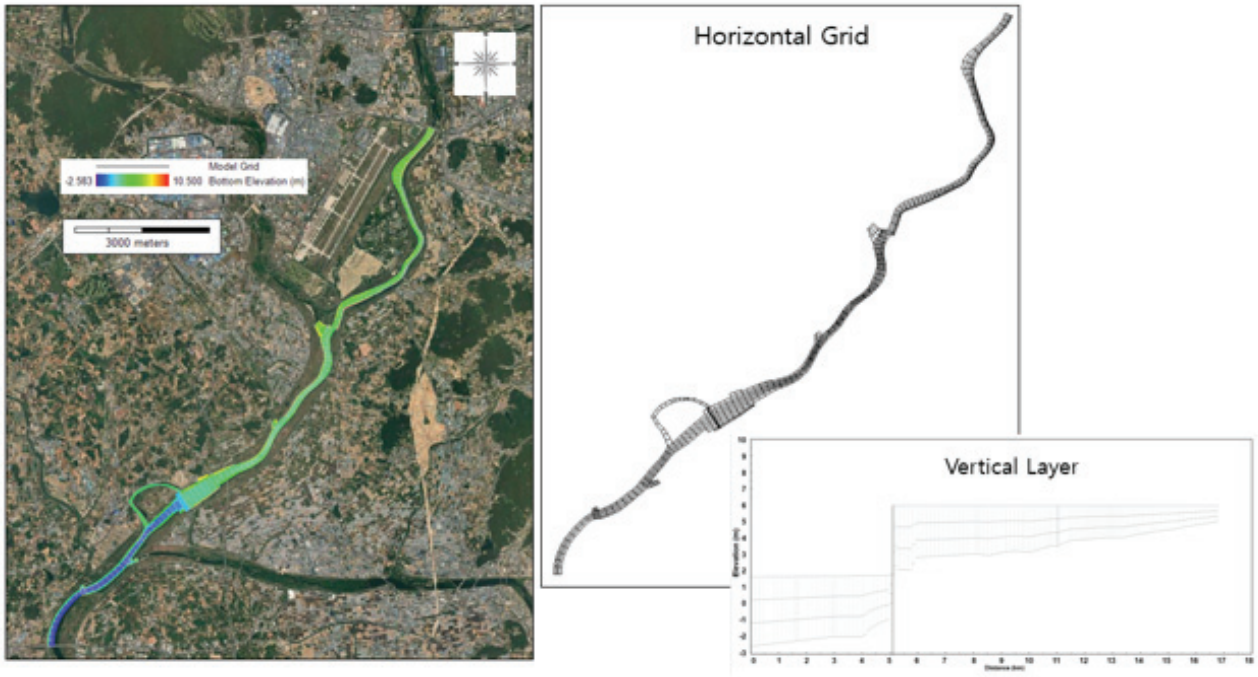


Fig. 3. Modeling grids and bottom elevation of study areal.

Structure Boundary Condition 모듈과 Withdrawal/Return Boundary Condition 모듈을 사용하여 보 설정을 적용하였다. 보 설정은 모의 기간 내에 방류량이 존재하는 가동보와 구하도의 볼랜드식 어도에만 flow가 통과할 수 있도록 설정하였으며, 수위가 고정보 높이 이상으로 높아져 넘어가는 유량이 있는 기간을 고려하여 고정보는 웨어(Broad Crested Weir)로 설정하였다. 승촌보의 주요 제원을 Table 1에 정리하였다. 가동보와 어도의 방류량은 한국수자원공사(K-water)와 환경부 영산강 홍수통제소에서 제공하는 연도별 보 운영 상황과 승촌보 일평균 방류량 데이터를 참고하여 모델의 재현성 평가와 시나리오 모의에 적용하였다.

2.3. 모델의 재현성 평가 및 수질오염사고 모의

구축한 모델의 재현성을 확인하기 위해 승촌보 상류에 위치한 승용교 지점을 대상으로 2019년도 1월부터 12월까지의 수위, 수온, 유량의 일평균 실측값과 모의값을 비교하였다. 재현성 평가가 끝난 모델에 오염물질의 유출이 발생한 상황을 가정하여 오염물질의 거동에 대한 예측을 수행하였다. 유출을 가정한 오염물질은 전라남도 내에서 발생한 오염사고 물질 중 수체 내로 유출되었을 시 물리, 화학적 특성이 다르게 나타나는 두 물질(유류, 벤젠)을 선정하였다. 특히 연구대상지역 상류에 위치한 풍영정천은 유류유출사고의 발생이 잦아 본 연구의 결과가 추후 방제 작업에 도움이 될 것으로 기대한다. 각 시나리오의 모의 시 선정한 오염물질 유출 지점과 분석 지점의 위치는 Fig. 4에 제시하였다.

유류 유출사고 모의는 2019년 영산강유역환경청 수생태관리과에서 주최한 수질오염사고 대응 합동 방제훈련의 상황을 참고하여 연구대상지역 최상류지점에서 오일 탱크로리

Table 1. Seungchon weir hydraulic structure settings

Classification		Specification
Fixed weir	Boundary Type	Broad Crested Weir Cross Section: Rectangle
	Width (m)	332 (166*2)
	Height (EL.m)	7.5
Movable weir	Boundary Type	Withdrawal/Return Sluice Gate
	Width (m)	180
	Height (EL.m)	Sill Elevation: 2.5 Cross Section Height: 5.05
Fish-ladder (By-pass fishway)	Boundary Type	Withdrawal/Return Sluice Gate
	Width (m)	59
	Height (EL.m)	5.5

차량의 전복사고로 내부에 실려있던 중유 약 500 L 가 영산강으로 유입되는 상황을 가정하고 실시하였다(ME, 2019). 본 연구에서는 EFDC+의 oil spill option을 제공하여 유류 모의에 최적화된 LPT 모듈을 활용하여 본류에 유입된 유류오염물질의 확산 및 이동 과정과 승촌보로 인한 정체 구간에서의 거동 등을 확인하고자 하였다. 5년간(2018～2022)의 물리량(수온, 기상조건, 풍속, 풍향, 보 방류량)과 평수량, 갈수량의 평균을 사용하여 수질오염 시나리오를 구성하였으며, 연간 평수량, 갈수량은 일평균 유량값(Q185, Q355)을 사용하여 산정하였다. 모의에 사용한 풍수량과 갈수량의 평균값은 Table 2에 나타냈으며 풍속과 풍향은 5년간 평수량과 갈수량 발생 빈도가 높은 봄철의 평균 풍속(1.62 m/s)과 최빈 풍

Fig. 4. Accident point and analysis point assumed in scenario simulation.

Table 2. Flow rates of normal flow condition and low flow condition assumed in scenario simulation

	Mainstream	Substream 1	Substream 2	Substream 3	Substream 4
Normal flow condition (m^3/s)	10.88	4.86	17.11	0.91	0.77
Low flow condition (m^3/s)	7.06	1.61	2.55	0.31	0.17

향(250)을 사용하였다. 바람의 영향으로 발생하는 표면 흐름이 유류 입자의 거동에 영향을 미치는 정도를 확인하기 위해 'wind drift effect' 고려 유무를 나누어 모의를 진행하였다. 주거지역 인근 수계인 황룡강 합류 구간과 승촌보까지의 유류 도달 시간 및 체류시간을 분석하였다.

화학물질오염사고 시나리오는 오염물질별 거동 특성을 확인하기 위해 유류의 유출 지점과 동일하게 운남대교에서 탱크로리 차량 전복 사고로 인해 유출이 발생함을 가정하였다. 2018년 전라남도에서 두 차례 발생한 차량 전복 사고로 인한 벤젠 누출 사고 사례를 참고하여 99.9% 농도의 벤젠 640 kg이 1시간 동안 누출됨을 가정하였다. 오염사고 모의에는 Dye 모듈을 통한 염료 추적자 분석법을 사용하였으며, Guo and Cheng (2019) 연구의 오염물질 감쇠계수를 참고하여 본 연구의 모의 기간 동안 벤젠의 분해가 발생하지 않는다고 가정하여 최악의 상황을 고려하였다. 시나리오는 유류 모의와 동일한 물리량(수온, 기상조건, 풍속, 풍향, 보 방류량)을 적

용하고 평수량, 갈수량 조건에 따라 개별 모의하였다. 화학물질 사고 시 크게 영향을 받을 것으로 판단되는 주거지역과 관리지역 인근 지점을 선정하여 최초 도달 시간과 벤젠의 최고 농도 도달 시간 및 최고 농도를 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1 모델 재현성 검토

본 연구에서는 구축한 EFDC 모델의 재현성을 실측값의 변동 폭 대비 모의값의 평균 오차로 예측의 숙련도를 평가하는 지표인 모델의 효율지수 Nash-Sutcliffe Efficiency index (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) (1), 결정계수 R^2 (R-squred) (2), 평균 제곱근 오차 Root Mean Square Error (RMSE) (3), 실측값과 모의값의 평균오차로 예측의 정확도를 나타내는 지표인 평균 절대 오차 Mean Absolute Error (MAE) (4)의 통계지표를 사용하여 평가하였다(Hwang et al., 2018; Kim and Cho, 2021; Kim et al., 2021; Shin et al., 2019).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}}\right)^2 \quad (2)$$

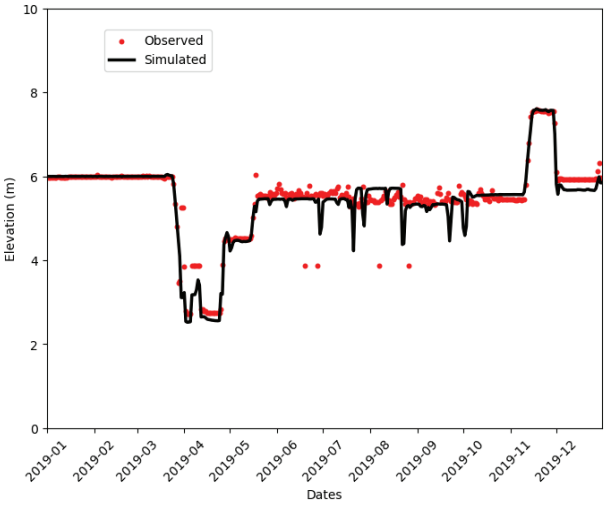
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i| \quad (4)$$

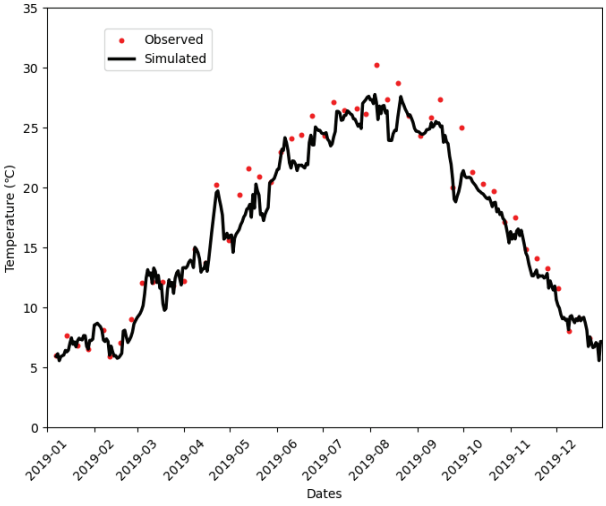
P_i는 모의값, O_i는 관측값, $\overline{P}$는 모의값의 평균, $\overline{O}$은 관측값의 평균이다.

영산강 승촌보와 평동천(Sub 3) 사이에 위치한 교량 승용교를 기준으로 2019년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간의 수위, 유량, 수온 데이터의 실측값과 모의값을 비교하여 진행했다. 실측값은 환경부 물환경정보시스템에서 제공하는 '광산' 지점의 일별 수온 및 유량 관측 자료와 광주광역시(승용교) 일별 수위 관측 자료를 이용하였다.

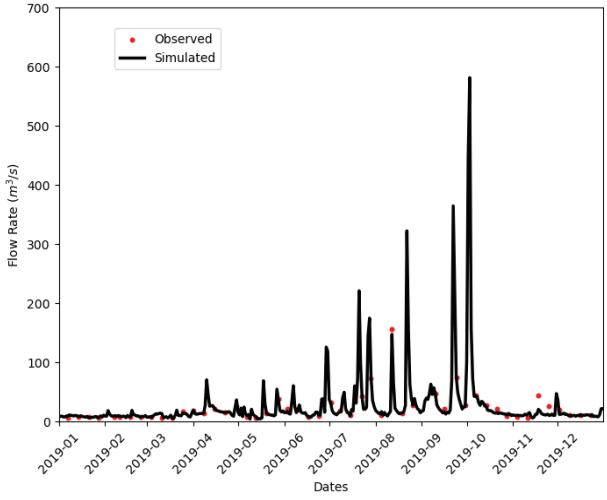
승용교 지점의 연중 수위, 수온, 유량 변화에 대한 모델의 보정 결과를 실측값과 함께 Fig. 5과 Table 3에 나타냈다. 보정 결과 수위의 경우 NSE는 0.87, R^2는 0.85, RMSE는 0.34 m, MAE는 0.19 m로 분석되었으며, 승촌보 방류량에 큰 변동이 있는 2019년 3월부터 5월까지와 11월의 양상을 잘 모의하는 것으로 보아 일부 오차가 있으나 보의 방류량 조절에 따른 급격한 수위 변화를 잘 재현하는 것으로 판단된다. 수



(a) Water surface elevation



(b) Water temperature



(c) Flow rate

Fig. 5. Comparison of Measured and Simulated Values of (a) Water surface elevation, (b) Water temperature, and (c) Flow rate.

Table 3. Modeling performance review through statistical analysis

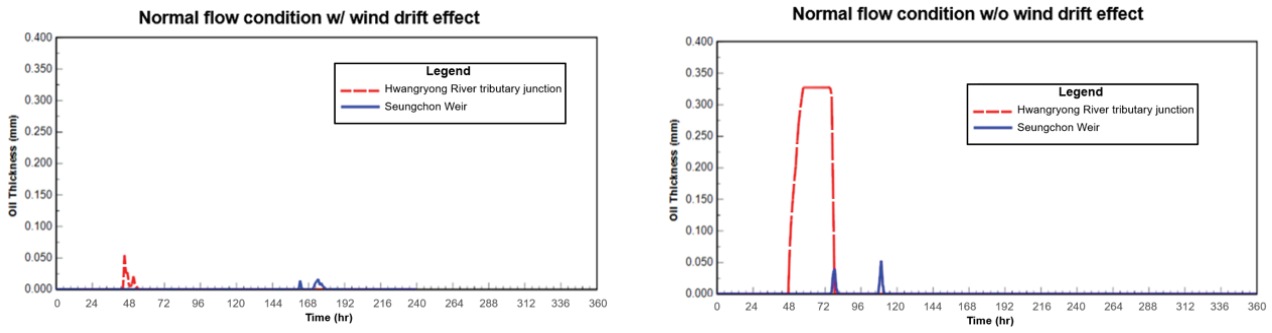
	NSE	R^2	RMSE	MAE
Water Surface Elevation (m)	0.87	0.85	0.34	0.19
Water Temperature (°C)	0.96	0.97	1.5	1.11
Flow Rate (m^3/s)	0.96	0.96	5.17	3.01

온의 보정 결과 여름철 모의값이 실측값보다 약 1.5°C 낮게 나타났으나 NSE는 0.96, R^2는 0.97, RMSE는 1.5°C, MAE는 1.11°C로 분석되었다. 모의한 승용교 지점의 수온 값을 승용교 상류 유입원(광주 2, 황룡강 5, 평동천)의 실측 수온 및 '광주'의 기온 자료과 비교한 결과, 유입원의 수온 변동에 따른 온도 변화와 해당 지점의 계절에 따른 수온의 변화 또한 잘 재현하는 것으로 판단된다. 유량의 NSE는 0.96, R^2는 0.96, RMSE는 5.17 m^3/s, MAE는 3.01 m^3/s로 분석되었다. 7월부터 9월까지 여름철 수체의 유량 변화가 활발한 시기의 승용교 유량 실측 자료가 부족한 상황이나 모의값과 실측값 간의 통계분석 결과 유량 변동을 적절히 재현하는 것으로 판단된다.

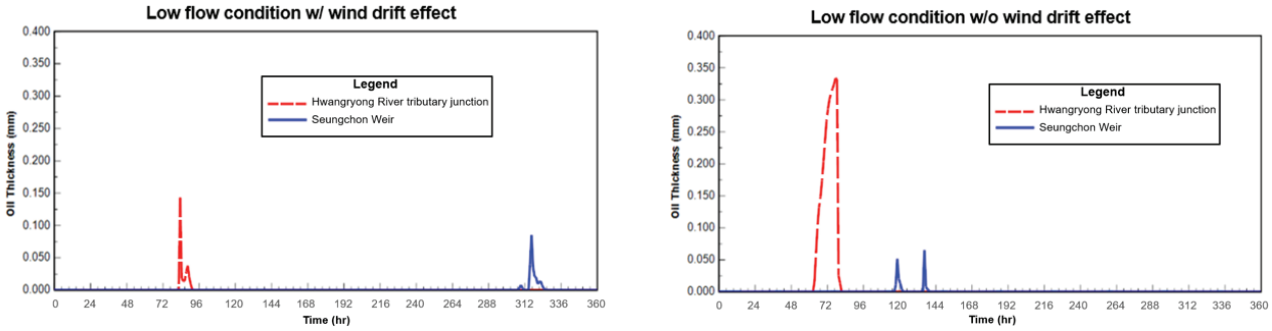
3.2 유류 유출사고 시나리오 모의결과 및 분석

유류 사고 모의 시 가정한 유류의 종류는 방제훈련과 동일하게 벙커 A로, 유류의 밀도(density)는 중유의 밀도인 950 kg/m^3으로 설정하였다. 모델 본류의 시작 지점인 극락교에서 8월 29일 14시경에 본류 유입 유량과 함께 1시간 동안 유류가 유입되도록 하였다. 영산강의 주요 지류인 황룡강의 유입으로 본류 유량이 증가하는 황룡강 합류전 지점과 다기능보로 인한 유량 조절과 정체가 발생하는 승촌보 지점에서 최초 도달시간과 유막의 최대 두께 및 최대 두께 도달시간을 분석하였다. 최초 도달 시간의 기준은 유흡착제를 이용한 방제가 가능해지는 조건인 유막 두께 0.05 mm 이상(K-eco, 2017)으로 하였다.

유량 조건(평수량, 갈수량)에 따라 모의한 결과, 평수량 조건에서 바람이 유류의 거동에 미치는 영향(wind drift effect)을 고려하여 모의 시, 황룡강 합류 지점에 최초 도달까지 31시간이 소요되었고 유막의 최고 두께는 0.05 mm 였으며 이후 물리적 방제가 불가능한 기준 이하로 감소하였다. 승촌보 지점에서 유막의 두께는 모의 기간 내내 기준 이하로 모의되었다. Wind drift effect을 고려하지 않은 모의에서 황룡강 합류 지점 최초 도달시간은 34시간, 최대 두께는 0.32 mm, 최대 두께 도달시간은 43시간이었으며, 승촌보 최초 도달시간은 95시간으로 최초 도달시기에 유막이 최대 두께 0.05 mm로 나타난 후 점차 감소하였다. 갈수량 조건에서 모의한 결과, wind drift effect을 고려하였을 시 황룡강 합류 지점까지 최초 도달시간은 68시간, 최대 두께 0.14 mm의 도달시간은 69시간이었다. 승촌보까지는 301시간, 최대 두께는 0.09 mm, 최대 두께 도달시간은 302시간이었다. Wind drift effect을 고려하지 않고 모의 시, 황룡강 합류지점 최초 도달시간은 50시간, 최대 두께는 0.33 mm, 최대 두께 도달시간은 63시간이었다. 승촌보 최초 도달시간은 104시간, 최대 두께 0.07 mm의 도달시간은 122시간이었다. (Fig. 6, Table 4)



(a) Normal flow condition



(b) Low flow condition

Fig. 6. Changes in the thickness of the oil layer after the oil spill accident in Yeongsan River. (a) Normal flow condition, (b) Low flow condition.

Table 4. Oil spill accident simulation results

Site	Terms	Normal flow condition		Low flow condition	
		W/o wind drift effect	W/ wind drift effect	W/o wind drift effect	W/ wind drift effect
Hwangryong River tributary junction	First arrival time (hr)	34	31	50	68
	Arrival time of peak (hr)	43	31	63	69
	Peak oil thickness (mm)	0.32	0.05	0.33	0.14
Seungchon Weir	First arrival time (hr)	95	-	104	301
	Arrival time of peak (hr)	95	-	122	302
	Peak oil thickness (mm)	0.05	0.02	0.07	0.09

모의 결과 평수량 조건에서 갈수량보다 상류 유입 유량과 보 방류량이 많아 지점별 최초 도달시간 및 최대 두께 도달 시간이 빠르게 나타났으나 최대 두께는 얇게 나타났는데, 이는 수체와 섞이지 않고 수체 위에서 거동하는 유류의 특성상 유량이 증가함에 따라 넓어진 수표면 위로 확산되어 두께가 감소하였기 때문으로 보인다. 또한 평수량 조건에서는 wind drift effect을 고려한 모의가 고려하지 않은 모의보다 합류 지점의 도달시간이 빨랐고 최대 두께는 얇아 이후 구간에서는 방제가 불가능한 범위로 감소하였다. 갈수량 조건에서는 wind drift effect을 고려한 모의에서 지류 합류 지점과 승촌보 지점까지의 도달시간이 길었고 최대 두께 또한 낮게 나타났다. 평수량과 갈수량 시기에 wind drift effect을 고려하지 않은 두 모의 결과는 지점별 도달 시간에 큰 차이가 있으나 최대 두께는 유사하게 나타난 반면, wind drift effect을 고려한 두 결과에서 최대 두께는 전혀 다른 값을 나타내었다. 또한, Fig. 7에 나타난 바와 같이 wind drift effect을 고려한 모의에서 고려하지 않은 모의보다 입자가 뭉치고 수평방향으로 확산된 정도가 덜하며 하천의 중앙이 아닌 측면에 위치하는 경향을 확인할 수 있었다. 연구의 결과로부터 연구대상지역은 유류의 확산에 있어서 유량보다 바람의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었다. 또한 유류의 입자(particle)을 함께 확인하였을 때 황룡강 합류 전, 승촌보 상류, 장성천 합류 부근에서 유류 입자가 정체하거나 잔류하였으며(Fig. 8) 유막의 두께가 0.05 mm 이상으로 나타남을 확인할 수 있어, 해당 지점들은 실제 유류 유출사고 발생 시 방제 작업이 수행되기 적합한 조건을 갖추었음을 확인하였다.

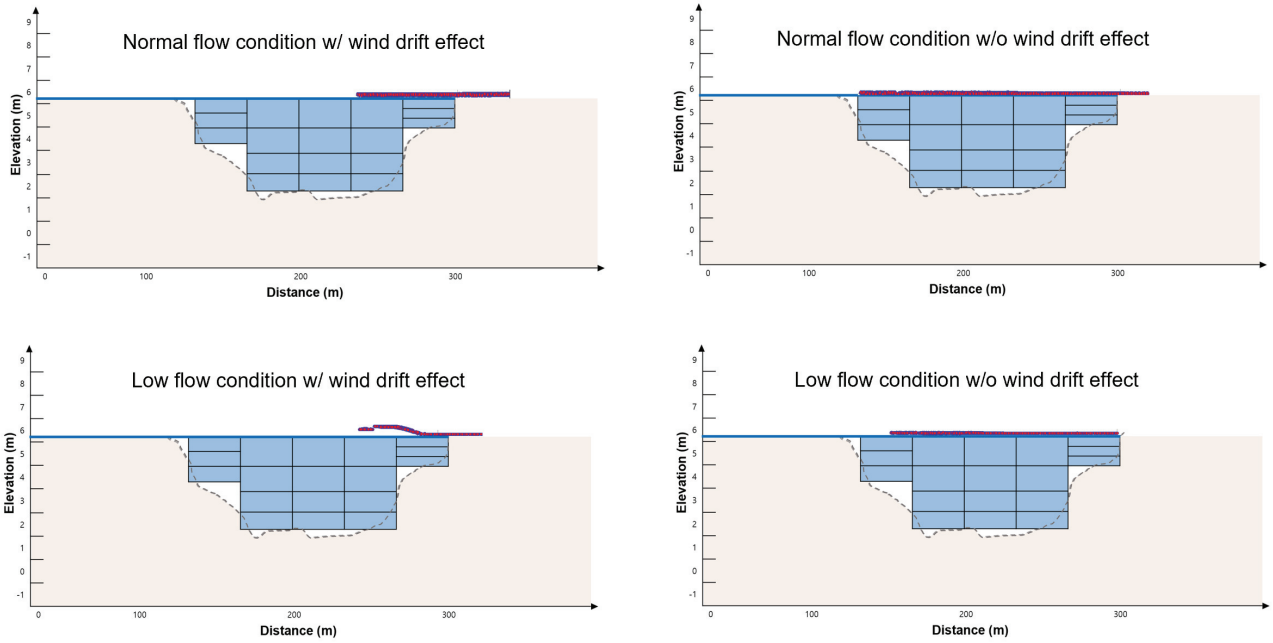
특히 황룡강 합류 전 구간은 수질오염방제정보시스템에서 안내 및 권장하는 유량이 증가하기 전 유류의 확산을 막을 수 있는 위치이자 국립환경과학원에서 방제에 댐·보를 고려하여 방제 시나리오를 분석할 수 있는 환경에 해당되므로, 확산되기 전에 빠르게 수거해야 되는 유류의 특성상 오일펜스를 설치하여 오염물질을 처리하기 용이한 구간임을 알 수 있었다. 황룡강 합류 후부터 승촌보 지점까지는 상류보다 유속이 빠르고 하폭이 넓어 처리에 어려움이 있을 것으로 예상되나 다기능보의 기능을 사용하여 수위와 방류량을 조절해 유류 방제작업 시간을 확보할 수 있을 것으로 판단된다(Mun et al., 2013).

3.3 화학물질 유출사고 시나리오 모의결과 및 분석

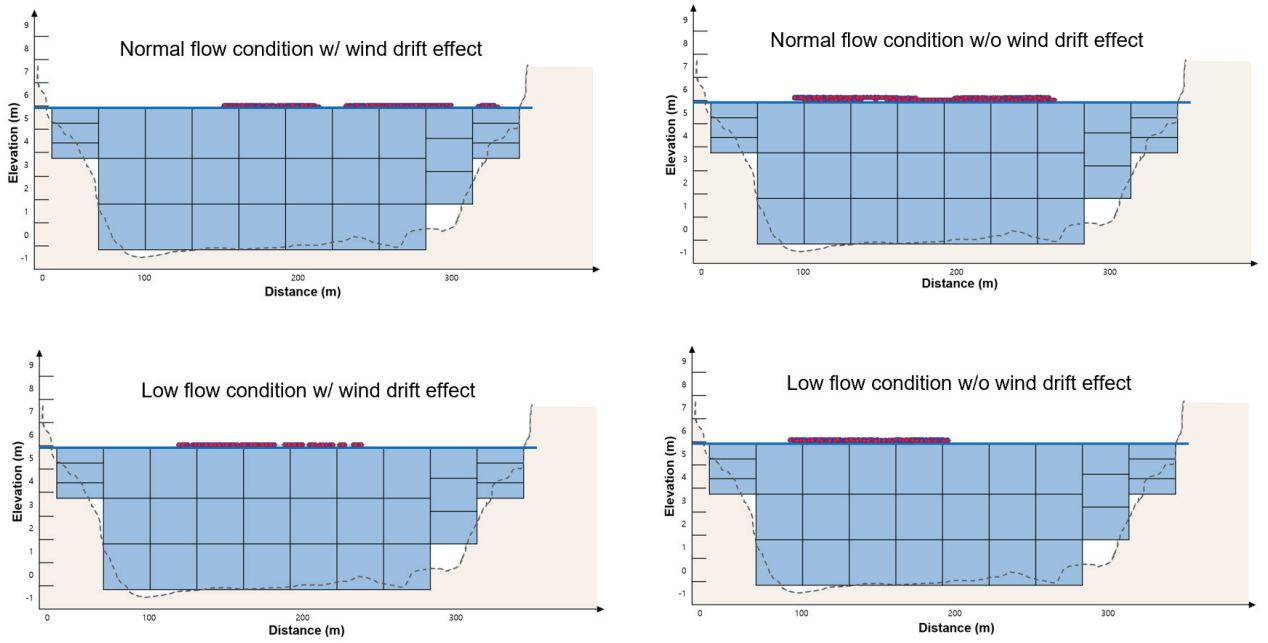
유출된 화학물질은 전라남도 지역에 차량 전복 사고가 발생한 사례가 있는 벤젠으로 가정하여 진행하였다. 화학물질 누출의 위험과 선례가 있는 산단 근처이자 상류 주거지역 인근에 위치한 황룡강 합류 전 지점(Site 1)과 하류 주거지역과 보전관리지역, 농림지역 인근인 승촌보 상류(Site 2)와 하류(Site 3) 지점을 대상으로 최초 도달 시간과 최고 농도 및 최고 농도 도달 시간, 체류시간을 분석하였다. 최초 도달 시간과 체류시간의 기준은 벤젠의 하천 수질환경기준이자 농업용수 수질환경기준인 0.01 mg/L 이상으로 설정하였다. 이때, 화학오염물질 유출사고 발생 시 희석을 위해 보 방류량을 늘려 농도를 낮추는 대응이 이루어질 상황을 가정하여 어도 수문을 닫고 가동보를 완전 개방한 상황에서 모의하였다.

평수량 조건 모의 시, 유출 후 황룡강 합류 전 지점의 최초 도달 시간과 최고 농도 도달 시간은 5시간과 8시간 30분이 소요되었으며 최고 농도는 2.54 mg/L, 해당 지점에서 벤젠의 농도가 다시 0.01 mg/L 미만으로 감소하기까지 걸린 시간은 13시간 40분, 전체 체류시간은 8시간 40분으로 나타났다. 승촌보 구간은 상류와 하류로 나눠서 모의하였다. 유출 후 승촌보 상류에 처음 도달하기까지 10시간 20분이 소요되었고 최고 농도 1.05 mg/L에 도달하기까지 14시간 40분이 소요되었다. 20시간 30분 후부터 승촌보 상류 지점의 벤젠 농도가 0.01 mg/L 미만으로 돌아왔으며 전체 체류시간은 9시간 50분이었다. 승촌보 하류 지점의 최초 도달 시간은 유출 후 13시간 20분이었으며 최고 농도 0.66 mg/L에 도달하기까지 19시간 20분이 소요되었다. 33시간 후 농도가 0.01 mg/L 미만으로 감소하였으며 전체 체류시간은 19시간 40분으로 나타났다.

갈수량 모의 시, 황룡강 합류 전 지점 최초 도달 시간은 6시간, 최고 농도 도달 시간은 10시간 20분, 최고농도는 3.04 mg/L로 농도가 감소하여 다시 0.01 mg/L 미만이 되는 시간은 16시간 30분이었고 전체 체류시간은 10시간 30분이었다. 승촌보 상류의 최초 도달 시간은 13시간 10분, 최고 농도 0.93 mg/L에 도달하기까지는 18시간 30분이 소요되었으며, 다시 0.01 mg/L 미만으로 감소하기까지는 25시간 30분이 소요되었고 전체 체류시간은 12시간 40분으로 나타났다. 승촌보 하류에 도달하기까지 19시간 40분이 소요되었고, 최고 농도는 0.65 mg/L로 이에 도달하기까지는 29시간이 소요되었



(a) Hwangryong River tributary junction



(b) Seungchon Weir

Fig. 7. Oil Behavior at arrival time under Normal and Low Flow Conditions at (a) Hwangryong River tributary junction, (b) Seungchon Weir.

다. 다시 0.01 mg/L 미만으로 감소하기까지 45시간 40분이 걸렸고 총 체류시간은 26시간으로 나타났다. (Table 5)

갈수량은 평수량에 비해 유량이 적어 유속이 느린 대신 도달시간 전까지 화학물질의 확산이 진행되어 최고 농도가 낮게 나타날 것으로 예상하였으나, 갈수량 조건의 유량이 평수량 조건에 비해 훨씬 낮았기 때문에 황룡강이 합류하기 전 지점까지 오염물질의 희석이 충분히 진행되지 못해 최고 농도가 평수량의 최고 농도보다 더 높게 나타난 것으로 보인다. 이후 황룡강을 비롯한 지류로부터 유량이 유입된 후인 승촌보 상류와 하류 지점에서는 예상대로 갈수량이 평수량에 비해 도달 시간이 늦고 오랜 체류시간이 확인되었으며, 승촌보 하류 지점에서 평수량과 갈수량 조건의 농도 차이가 크지 않은 이유는 보 운영 상황을 동일하게 가정해서 보를 통과하며 두 조건의 방류량 및 유속의 차이가 감소하였기 때

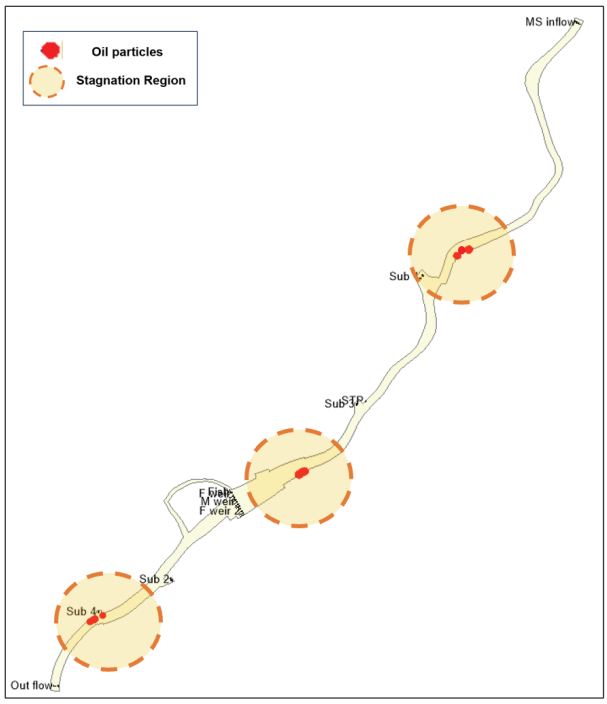


Fig. 8. Oil particle stagnation point in the study area.

Table 5. Chemical spill accident simulation results

Site	Normal flow condition			Low flow condition		
	Site 1	Site 2	Site 3	Site 1	Site 2	Site 3
First arrival time	5 hr	10 hr 20 min	13 hr 20 min	6 hr	13 hr 10 min	19 hr 40 min
Arrival time of peak	8 hr 30 min	14 hr 40 min	19 hr 20 min	10 hr 20 min	18 hr 30 min	29 hr
Peak concentration (mg/L)	2.54	1.05	0.66	3.04	0.93	0.65
Duration time	8 hr 40 min	9 hr 50 min	19 hr 40 min	10 hr 30 min	12 hr 20 min	26 hr

문으로 판단된다. 또한 거리가 가까운 승촌보 상류와 하류의 최초 도달시간에 차이가 큰 이유는 벤젠에 오염된 수체가 승촌보 상류에 잔류하며 가동보를 통해 유량이 일정하게 방류되기 때문에 승촌보 하류에서 기준 농도인 0.01 mg/L 이상이 되기까지 필요한 시간이 늘어나는 것으로 판단된다.

승촌보 중앙에 위치한 가동보에 유량이 집중되어 보 양끝단의 고정보 부근에 일부 오염물이 잔류함을 확인하였다. 해당 구간은 유량의 순환이 적기 때문에 오염물이 하천 수질환경기준 이하로 희석되기까지 오랜 시간이 소요되어 실제 화학물질 유출 사고가 발생할 경우 물리, 화학적인 방제가 추가적으로 이루어질 필요가 있다고 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 수질 오염원의 종류에 따른 거동 특성을 분석하기 위해 영산강 유역 중 오염사고가 잦은 구간의 수계를 대상으로 EFDC 모델을 이용하여 수리 모델을 구축하였다. 구축한 모델의 재현성을 평가하기 위해 연구대상지역의 중심이자 승촌보 상류에 위치한 승용교 지점을 대상으로 모의값의 정확도를 확인하였다. 2019년도에 실제 승용교 지점에서 관측한 수위, 수온, 유량의 데이터와 모의 결과값을 통계지표 NSE, R^2, RMSE, MAE를 사용하여 평가하였다. NSE, R^2, RMSE, MAE는 수위, 수온, 유량에서 모두 양호한 값이 나타났으며, 보의 방류량 조절로 인한 수위 및 유량의 변동과 계절과 날씨에 따른 수온의 변화를 적절하게 재현하였다.

유류 오염사고 시나리오 모의 결과, 유출된 유류의 거동은 유량과 바람의 영향을 크게 받았다. 유량이 적을수록 이동시간이 길어 도달 시간이 늦고 체류하는 시간이 길었다. Wind drift effect를 고려한 모의 결과와 고려하지 않은 모의 결과를 비교하였을 때, 유류의 확산 및 거동에는 수체의 유량보다 바람의 영향을 크게 받음을 확인할 수 있었다. 또한 모의 시 유류 입자가 정체하는 황룡강 합류 지점, 승촌보, 장성천 합류 지점에서 방제 작업이 수행될 수 있을 것으로 판단하였다. 화학물질 모의 시 벤젠의 분해속도가 낮아 보존성 물질로 가정하고 모의를 진행하였다. 이는 화학물질 사고가 발생할 경우 최악의 상황을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 화학물질의 특성에 따라 제한된 의미가 있기에 추후 사고 대상 물질에 따른 이화학적 특성을 고려하는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 화학물질 오염사고 모의 결과, 지류 합류 전까지 갈수량에서 평수량보다 유하 시간이 느리고 오염물질의 농도가 높게 모의되었으나 지류 합류 후부터 유량의 증가로 오염물질의 확산이 활발히 진행되어 갈수량이 평수량 조건보다 낮은 농도로 모의되었다. 승촌보 이후 지점부터는 다기능보의 기능으로 인해 평수량과 갈수량 조건 간의 유량 및 유속 차이가 감소하여 비슷한 농도로 모의되었다.

본 연구의 결과로부터 수체내 오염사고 발생 시 대상 물질의 이화학적 특성을 반영한 대응체계를 마련해야 함을 알 수 있었다. 유류와 같이 수면에 분리되어 이동하는 오염물질의 경우 다기능보를 이용하여 방제에 필요한 시간을 확보하는 것과, 벤젠과 같은 특성을 지닌 화학물질의 경우 유하 속도와 방류량을 조절하여 수체 내 농도를 감소시키는 것이 최적의 대응체계 수립에 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한 오염사고 다발 지역인 풍영정천 부근에서 유류 유출 시 지류가 합류하기 전의 정체 구간을 방제에 용이하게 이용할 수 있을 것으로 판단하였다. 다만 이를 유류오염물질 방제에 적용시 유량과 기상 조건에 따른 유류 입자 거동 특성 차이와 다기능보를 이용한 방제 작업에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2018R1A6A1A08025520)

References

Cho, Y. J. (2017). *Gwangju, Pungyeongjeongcheon oil spill accident 'quick initial response'*, field News, http://www.fieldnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=424 (accessed 2017, March 26). [Korean Literature]

Choi, H. G., Park, J. H., and Yeun, H. K. (2014). Simulation of water pollution accident with water quality model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(3), 177-186. [Korean Literature]

Choi, Y. G. (2017). *Gwangju, Pungyeongjeongcheon rapid response to water pollution accidents*, Daehan News, http://www.dhns.co.kr/news/articleView.html?idxno=167980 (accessed 2017, March 26). [Korean Literature]

Chong, S., Yi, H. S., Hwang, H. S., and Kim, H. J. (2015). Modeling the flushing effect of multi-purpose weir operation on algae removal in Yeongsan river, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(10), 563-572. [Korean Literature]

DSI LLC. (2023). *EFDC+ Theory, Version 11.*, Published by DSI LLC, Edmonds WA. Available at https://www.eemodelingsystem.com/wp-content/Download/Documentation/EFDC_Theory_Document_Ver_11.pdf

Guo, G. and Cheng, G. (2019). Mathematical modelling and application for simulation of water pollution accidents, *Process Safety and Environmental Protection*, 127, 189-196.

Heo, K. W. (2023). *'Oil spill' in Pungyeongjeongcheon, Gwangsan-gu, Gwangju… Inflow into the river by heavy rain,* The Namdo Ilbo, https://www.namdonews.com/news/articleView.html?idxno=723542 (accessed 2023, May 6). [Korean Literature]

Hwang, S., Shin, S. B., Song, J. H., Yoon, K. S., and Kang, M. S. (2018). Simulating arsenic concentration changes in small agricultrual reservoir using EFDC-WASP linkage model, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 60(5), 29-40. [Korean Literature]

Jang, J., Jong, J., Mun, H., Kim, K., and Seo, I. (2016). Mixing analysis of oil spilled into the river by GPS-equipped drifter experiment and numerical modeling, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(3), 243-252. [Korean Literature]

Kim, E., Park, C., Na, M., Park, H., and Kim, B. (2018). Impact analysis of tributaries and simulation of water pollution accident scenarios in the water source section of Han river using 3-D hydrodynamic model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(4), 363-374. [Korean Literature]

Kim, J. W. and Cho, Y. G. (2021). A study on the short-term water quality change in the lower Yeongsan river, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 24 (2), 72-79. [Korean Literature]

Kim, J., Kim, J., and Seo, D. (2020). Effect of major pollution sources on algal blooms in the Seungchon weir and Juksan weir in the Yeongsan river using EFDC, *Journal of Korea Water Resources Association*, 53(5), 369-381. [Korean Literature]

Kim, J., Kim, M., and Cho, Y. (2021). Assessment of relationship between sediment-discharge based on rainfall characteristic using SWAT model, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 26(6), 118-129 [Korean Literature]

Korea Environment Corporation (K-eco). (2017). *Revision of self-control guidebook for efficient response to water pollution accidents*, Water Pollution Control Team, 88. [Korean Literature]

Korea Environment Corporation(K-eco). (2023). *My Water*, https://www.water.or.kr/kor/menu/sub.do?menuId=16_183_186_188 (accessed Aug. 2023).

Lee, H. S., Lee, J. M., Han, E. J., and Kim, Y. D. (2019). A study on the validation of hydraulic model using lagrangian GPS floater, *Journal of Korea Water Resources Association*, 52(12), 1047-1055. [Korean Literature]

Lee, J. K., Kim, T. O., and Jung, Y. J. (2013). Analysis of domestic water pollution accident and response management, *Journal of Wetlands Research,* 15(4), 529-534. [Korean Literature]

Lee, J., Bae, S., Lee, D. R., and Seo, D. (2014). Transportation modeling of conservative pollutant in a river with weirs - The Nakdong river case, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(12), 821-827. [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME). (2019). *Youngsan river environmental management office, Oil spill response training implementation*, Youngsanriver Environmental Management Office Aquatic Ecology Management Department press release (2019. Aug. 29). [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME). (2022). *Youngsan river environmental management office, Conducting collaborative training for water quality pollution incidents - Examination of interagency cooperation system and strengthening incident response capabilities among relevant organizations*, Youngsanriver Environmental Management Office Aquatic Ecology Management Department press release (2022. Nov. 17). [Korean Literature]

Ministry of Environment and, Korea Environment Corporation (ME and K-eco). (2022). *2021 Annual report on water pollution accidents and responses*, 11-1480000-001505-10, Ministry of Environment and, Korea Environment Corporation, 3-15. [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME). (2023). *Comprehensive chemical information system*, https://icis.me.go.kr/pageLink.do (accessed Aug. 2023)

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2011). *Yeongsan river(upstream) river master plan Report*, 1-1611425-000017-01, Iksan Construction and Management Administration. [Korean Literature]

Mun, H. S., Jang, J. H., Ryu, I. G., and Kim, J. Y. (2012). Development of web based realtime water pollution accident response management system in rivers, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(2), 145-150. [Korean Literature]

Mun, H. Y., Kang, T. G., Lee, S. W., Na, E. H., Lee, H., Park, S. Y., Jang, J. H., and Jong, J. H. (2013). *Transport and scenario modeling of oil spill in the Nakdong river*, National Institue of Environmental Research. [Korean Literature]

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

Shim, S. H., Kim, Y. H., Lee, H. W., Kim, M., and Choi, J. H. (2022). Comparison of Chlorophyll-a prediction and analysis of influential factors in Yeongsan river using machine learning and deep learning, *Journal of Korean Society on Water Environmen*t, 38(6), 292-305. [Korean Literature]

Shin, C. M., Kim, D., and Song, Y. (2019). Analysis of hydraulic characteristics of Yeongsan river and estuary using EFDC model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(6), 580-588. [Korean Literature]

Son, M. S., Park, J. H., Lim, C. H., Kim, S. K., and Lim, B. J. (2013). Seasonal change of phytoplankton community and water quality in Yeongsan river watershed, *Korean Journal of Environmental Biology*, 31(2), 105-112. [Korean Literature]

Yoon, J. C. (2023). *The Namdo Ilbo*, https://www.namdonews.com/news/articleView.html?idxno=723550 (2023. Aug. 29).

Yu, S. B. (2022). *Gwangju Dream*, http://www.gjdream.com (2023. Aug. 29).