

3차원 수리모델을 이용한 한강 상수원구간 지류영향 분석 및 수질오염사고 시나리오 모의

김은정[†] · 박창민 · 나미정 · 박현 · 김복순

서울물연구원 수질연구과

Impact Analysis of Tributaries and Simulation of Water Pollution Accident Scenarios in the Water Source Section of Han River Using 3-D Hydrodynamic Model

Eunjung Kim[†] · Changmin Park · Mijeong Na · Hyeon Park · Bogsoon Kim

Water Quality Research Division, Seoul Water Institute

(Received 23 April 2018, Revised 7 June 2018, Accepted 12 June 2018)

Abstract

The Han River serves as an important water resource for the city of Seoul, Korea and in the neighboring metropolitan areas. From the Paldang dam to the Jamsil submerged weir, the 4 water intake stations that are located for the Seoul metropolitan population were under review in this study. Therefore the water quality management in this section is very important to monitor, analyze and review to rule out any safety concerns. In this study, a 3-D hydrodynamic model, EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code), was applied to the downstream of the Paldang Dam in the Han River, which is about 23 km in length, to determine issues related to water resource management. The 3-D grid was composed of 2,168 horizontal grids and three vertical layers. In this case, the hydrodynamic model was calibrated and verified with an observed average daily water surface elevation, water temperature and flow rate data for 3 years (2013~2015). The developed EFDC model proved to reproduce the hydrodynamics of the Han River well. The composition ratios of the noted incoming flows at the monitored intake stations for 3 years and their flow patterns in the river were analyzed using the validated model. It was found that the flow of the Wangsuk Stream depended on the Paldang dam discharge, and it was noted that the composition ratios of the stream at the intake stations changed accordingly. In a word, the Wangsuk Stream moved mainly along the right bank of the Han River under the condition of a normal dam flow. As can be seen, when the dam discharge rate was low, the incidence of lateral mixing was often seen. The scenario analyses were also conducted to predict the transport of conservative pollutants as in the case of a chemical spill accident. Generally speaking, when scenarios were applied, the arrival time and concentration of pollutants at each intake station was thus predicted.

Key words : 3-D hydrodynamic model, Chemical spill accident, Composition ratios, Han River, Water intake station

1. Introduction

팔당댐에서 잠실수중보까지 약 23 km 한강 본류 구간은 천만 서울시민과 인천 등 수도권 일부 지역 주민의 생활용수 공급원으로서 수질관리의 중요도가 매우 높은 지역이다. 기후변화 및 다양한 환경조건의 변화로 인하여 최근 녹조 발생, 이취미 문제 등 정수처리시설에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 수질문제의 발생 빈도가 높아지고 있는 실정이다. 또한 최근 3년간(2013~2015) 한강 상수원구간에서 유류 유출사고나 산업시설의 화재 등 총 19건의 수질사고가

발생하고 있어, 취수원수 및 정수장에 수질영향은 없어도 유역 오염물질 유출사고로 인한 상수원 수질영향 개연성은 상존하는 상황이다(Seoul Water Institute, 2017).

그동안 국내외에서 심각한 수질오염사고들이 발생한 사례가 있었다. 2014년 1월 미국 웨스트버지니아주에서는 4-메틸사이클로헥산이 수돗물에 유입되어 30만명이 수돗물을 사용하지 못하는 사태가 발생했으며, 2010년 미국 미시건주에서는 유류 819,000 갤런이 칼라마주강으로 유입되는 사고가 발생하였다. 2005년 중국 지린성에서는 벤젠 100톤이 송화강으로 유입되어 수돗물 공급이 5일간 중단되었고, 1986년 스위스 바젤시에서는 화학공장화재로 유독물질 30~40톤이 라인강으로 유입되는 사고가 발생했다(Choi et al., 2014). 우리나라의 경우도 낙동강에서 1991년 구미공단 폐놀 30톤 유출사고, 1994년 유기용제 오염사고, 2008년 김천공단 유화공장 폐놀유출 사고 등이 발생한 사례가 있으며(Mun et al., 2012), 유류 유출사고도 매년 10여건씩

[†] To whom correspondence should be addressed.
ejkim07@seoul.go.kr

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.

발생하고 있다(Jang et al, 2016; Mun et al, 2013).

상수원 구간에서 수질오염사고가 발생할 경우 적절한 대응이 이루어지지 않으면 원수의 수질을 악화시켜 처리과정을 어렵게 하거나 장기 단수 등의 상황을 초래할 수 있다(Park et al., 2012). 따라서 수질오염사고가 일어난 경우 신속한 상황전파와 초기 방제활동이 매우 중요하며, 취·정수장의 효과적인 사전대응을 위해서는 오염사고 물질의 도달 시간, 확산농도, 이동경로 등의 예측이 필요하다.

수체(하천, 호수, 하구, 해양 등)에서 일어나는 다양한 물리, 화학, 생물학적 변화를 수학적으로 표현하고 컴퓨터를 통해 해석하는 수리·수질 모델링 기법은 대상 수체의 현재 상태를 이해하고 장래의 변화를 예측하는데 유용하게 사용되고 있다. 현재까지 한강 상수원 구간에서는 주기적으로 다양한 수질 항목에 대한 모니터링 및 분석이 지속되어오고 있다. 그러나 유입되는 지류 유량 및 팔당댐 방류량과 각각의 수질이 상수원 구간에 대하여 미치는 영향에 대한 과학적인 인과관계의 분석에 있어서 모니터링 자료만으로는 한계가 존재한다. 수리·수질 모델링 기법을 적용하면 시스템분석을 통해 수문, 기상, 수질조건(오염원 조건)에 따른 상수원 구간의 수리·수질 현상의 변화를 설명할 수 있으며, 이를 기반으로 장래의 환경변화에 따른 수질변화의 예측이 가능하게 된다. 또한 오염물질 유출사고가 발생한 경우 오염물질의 도달시간, 확산농도, 이동경로 등의 예측을 통해 방제활동에 도움을 줄 수 있다.

팔당댐 하류 상수원 구간에 대하여 수질모델을 적용한 연구들이 다음과 같이 이루어져 왔다. 팔당댐 하류 본류 구간(팔당댐~한강대교)에 1차원 정적모델 QUAL2E를 적용하여 수질예측 연구를 수행한 사례가 있다(Baek et al., 1995; Han et al., 1995; Kim and Choi, 2006). Baek et al. (1995)은 BOD-DO해석을 통해 유량등급별, 장래하수처리 대안별 수질 예측을 하였으며, Han et al. (1995)은 갈수량, 평수량시 처리시설 증설을 고려한 총질소 및 총인 농도를 예측하였다. Kim and Choi (2006)은 부동류해석 결과를 적용해 QUAL2E모델을 개선하여 DO, BOD 농도를 예측하였다. Ryu et al. (2002)은 한강 하류부(팔당댐~잠실수중보)에 수정 RMA 모델을 적용하여 왕숙천의 수질(BOD) 변화가 잠실 상수원 보호구역의 수질에 미치는 영향을 연구하였다. Seo and Yu (2007)는 팔당댐 하류 구간에 대하여 EFDC 수리 모형과 WASP 수질 모형을 결합하여 적용한 후 정상상태 수질모델링 오차의 원인을 분석하였다. Seo and Song (2007)은 2차원 수질모델을 개발하여 팔당댐~잠실수중보 구간에 대하여 BOD의 혼합거동 해석과 사고유입에 의한 오염물질(BOD) 거동 모의를 수행하였다. Seo et al. (2011)은 열 오염물질의 혼합거동이 분석가능한 2차원 모형을 개발하고 팔당댐~잠실수중보 구간에 대하여 구리하수처리장 방류수에 의한 수온 변화를 모의하였다. 선행 연구들에서는 주로 1차원 정상상태하의 수질예측이나 개발된 2차원 모형을 이용한 특정 조건에서의 수질예측이 이루어졌으며, 장기간 연속적으로 변동하는 조건하에서 상수원 구간의 수리변동이나 취수지점에 대한 지류영향을 분석한

사례는 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 상수원 수질사고와 환경 변화에 따른 취수원에 대한 수질영향예측 및 선제적 대응체제를 지원하기 위하여, 한강 상수원 구간을 대상으로 3차원 수리모델 시스템을 구축하고, 연속적인 기상 및 수리·수문 변동 조건에서 모델의 재현성을 검증하는데 있다. 또한 재현성이 검증된 시스템을 바탕으로 서울시 취수지점(강북, 암사, 풍납, 자양)에 대한 유입지류들의 영향과 흐름 및 혼합 양상을 분석하고자 한다. 마지막으로 오염물질 유출사고를 가정한 시나리오 모의를 수행하여 팔당댐 방류량 조건에 따른 오염물질의 거동 및 취수장에 대한 영향을 분석하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상지역

수도 서울을 관통하는 한강 본류는 팔당호에서 남한강과 북한강이 만나 이루어지며, 팔당댐 하류로 흐르면서 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천 등의 지천들이 유입 되고 김포시에서 임진강과 합류한 후 서해로 흐른다. 한강 본류에는 잠실대교 직하류의 잠실수중보와 김포대교 직하류의 신곡수중보의 대형 구조물이 건설되어 일정 수심을 유지시켜주고 있다.

본 연구에서는 한강 본류 구간 중 서울시의 취수장이 존재하는 팔당댐 하류~잠실수중보 구간 22.5 km를 대상으로 하였다(Fig. 1). 이 구간은 서울시 및 수도권 전체 상수원수 공급량의 58%를 차지하는 중요한 상수원으로서 상수원 보호구역으로 지정되어 있다(Seo et al., 2011). 연구대상 구간 내에는 현재 서울시에서 운영하는 취수장 4개(강북, 암사, 풍납, 자양)와 인천, 성남, 수자원 공사 등에서 운영하는 취수장 7개가 위치하고 있다. 2014년 이전에는 서울시의 구 취수장이 운영되었으나 현재는 강북취수장에서 통합운영되고 있다. 서울시 운영 4개 취수장의 2015년 기준 연평균 취수량은 총 $2.986 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{일}$ 로 상수원 구간 전체 취수량 중 약 70%를 차지하고 있다. 또한 팔당댐 하류에서 산곡천, 덕풍천, 궁촌천, 월문천, 홍릉천, 왕숙천, 고덕천, 성내천 순으로 8개의 지천이 본류로 유입되고 있으며, 이 중 왕숙천은 유역면적 276.5 km^2 로 가장 넓은 유역을 가진 지류이다.

2.2 모델구축

2.2.1 모델 개요

본 연구에서 사용된 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)모델은 하천, 호소, 하구, 습지, 해양 등의 다양한 수체에서 환경평가와 관리에 사용되어온 3차원 지표수 수리·수질 모델링 시스템이다(Tetra Tech, 2007). 이 모델은 1988년 Virginia Institute of Marine Science (VIMS)의 John Hamrick에 의해 개발되어, USEPA(미환경청)와 Tetra tech 사에 의해 지속적으로 관리되고 있으며 전 세계적으로 다양한 수체환경에서 적용되어 왔다(Choi et al., 2015). 국내에서는 4대강 본류구간(Jeong et al, 2010; Na et al., 2014), 새만금호(Jeon and Chung, 2012), 팔당호(Jeong et al., 2009), 낙동강 하구(Hur and Park, 2009) 등에서 물 흐름

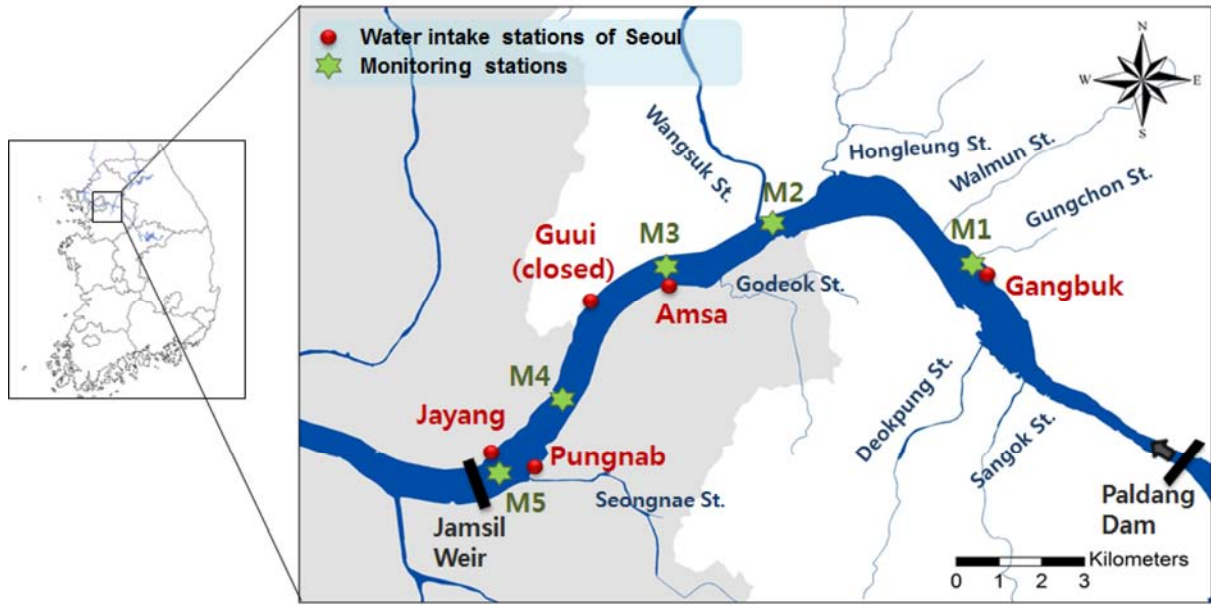


Fig. 1. Location of a study area with monitoring stations.

및 수질특성을 모의하기 위해 적용된 사례가 있다.

EFDC 모델은 수리, 수질모델을 모두 포함하는 full version과 수리모델만으로 이루어진 hydro version이 있으며, Hydro version은 수리모델 만으로 구성되어 WASP과 같은 수질모델과 연계되어 사용할 수 있다. EFDC 모델의 full version은 수리모델, 수질모델, 부유사 이동, 독성물질 모델을 포함하고 있으며, 수체의 이동, 염분 및 온도 모의, 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 부영양화 기작, 독성물질의 이동/반응 등의 모의가 가능하다(Choi et al., 2014). 본 연구에서는 EFDC의 수리모델만을 적용하였으며 미국 DSI사의 EFDC_Explorer 8.1을 사용하였다(Craig, 2016).

EFDC 모델의 지배방정식은 연속방정식(1)과 중, 횡, 수심 방향 운동량 방정식(2~4), 물질이송 방정식(5), 열수지 방정식(6)으로 구성되며 식에 대한 설명은 다음과 같다(Hamrick, 1992; Ji, 2007; NIER, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\zeta) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHv) + \frac{\partial}{\partial z}(mw) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHu) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHuv) + \frac{\partial}{\partial z}(mwu) \\ & - (mf + \nu \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y})Hv \\ & = -m_yH \frac{\partial}{\partial x}(g\zeta + p) - m_y(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x}) \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_\nu \frac{\partial u}{\partial z}) + Q_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHv) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHuv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHv^2) + \frac{\partial}{\partial z}(mwv) \\ & + (mf + \nu \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y})Hu \\ & = -m_xH \frac{\partial}{\partial y}(g\zeta + p) - m_x(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y}) \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_\nu \frac{\partial v}{\partial z}) + Q_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gHb = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHuC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHvC) + \frac{\partial}{\partial z}(mwC) \\ & - \frac{\partial}{\partial z}(mw_{sc}C) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{m_y}{m_x}HK_H \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{m_x}{m_y}HK_H \frac{\partial C}{\partial y}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(m \frac{K_V}{H} \frac{\partial C}{\partial z}) + Q_c \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHT) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHuT) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHvT) + \frac{\partial}{\partial z}(mwT) \\ & = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_\nu \frac{\partial T}{\partial z}) + Q_T \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, u, v 는 curvilinear(곡선직교) 좌표계에서의 x, y 방향 수평 유속(m/s), ω 는 변환된 무차원 연직좌표계에서의 z 방향 유속(m/s), H 는 총 수심($=h + \zeta$)(m), h 와 ζ 는 기준면 하 수심(m)과 기준면에서의 수면변위(m), m_x, m_y 는 곡선좌표계 임의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근(m)($m = m_x m_y$), p 는 압력(Pa), f 는 Coriolis parameter, A_ν 는 수직난류 점성계수(m^2/s), Q_u, Q_v 는 운동량의 source-sink 항($kg \cdot m/s$), ρ, ρ_0 는 실제밀도와 기준밀도(kg/m^3), b 는 부력(m/s^2), C 는 용존 또는 부유물질의 농도(mg/L), K_H, K_V 는 각각 수평, 연직 방향의 난류확산계수(m^2/s), w_{sc} 는 침강속도(m/s), Q_c 는 용존물질의 source-sink 항, T 는 수온($^{\circ}C$), A_ν 는 수직난류 확산계수(m^2/s), Q_T 는 수온의 source-sink 항이다.

2.2.2 모델 구성 및 경계조건

연구대상구간(팔당댐 ~ 잠실수중보)을 포함하도록 팔당댐 ~ 청담대교까지 24.9 km 구간에 대하여 수표면 격자망

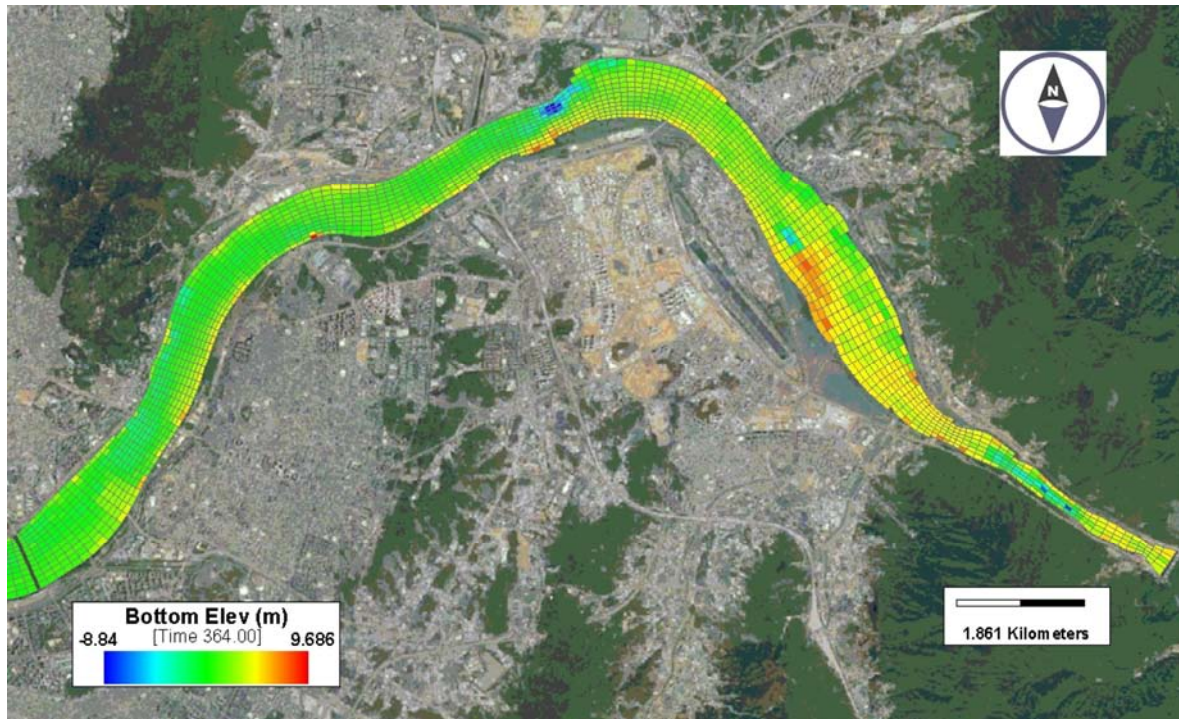


Fig. 2. Horizontal modeling grids and bathymetry for the study area.

을 구축하였으며, 격자망 구성에는 수치격자생성 프로그램 (CVLGrid)(DSI, 2016)을 사용하였다. 2012년 한강 하천단면 측량자료(국토교통부, CAD자료)에서 하천 주수로 경계와 하상고 자료를 추출하였고, 수표면 격자망 구성 후 하상고 자료를 역거리 가중법을 이용하여 공간적으로 내삽(interpolation)함으로써 3차원 격자를 구성하였다. 모델구간 내 하상고의 범위는 -8.8~9.7 m이며 하상단면, 위성사진 자료를 고려하여 총 2,168개의 수평격자를 구성하였고, 수층은 3개의 층으로 구분하였다. 수평방향(x,y)으로는 직교곡선좌표계(curvilinear)를, 수직방향(z)으로는 수심의 변화에 따라 layer의 간격이 변화하는 Sigma stretch 기법이 사용되었다. 하천폭 방향 격자 크기는 39~101 m(평균 68 m), 상하류 방향 격자 크기는 65~195 m(평균 119 m)이다. 본 연구에서 사용된 격자망 구축 결과를 Fig. 2에 제시하였다.

3년간 자료(2013~2015년)로 보정 및 검증을 수행하기 위해서 입력 자료는 4년간(2012~2015년)의 시계열자료를 구축하였다.

기상자료는 모델적용 구간에 인접한 지상기상관측소인 서울관측소의 자료를 이용하였으며 시간별 강우량, 대기압, 기온, 상대습도, 태양반사복사열, 운량, 풍속, 풍향 등의 자료를 입력하였다.

최상류 유입경계조건은 국가수자원관리종합시스템(WAMIS)의 팔당댐 일평균 방류량 자료를 사용하였고, 지천 유입경계조건은 왕숙천, 산곡천, 덕풍천, 궁촌천, 월문천, 흥릉천, 고덕천, 성내천의 8개 지천의 일별 유량을 입력하였다. 왕숙천 유량은 퇴계원 수위표에서의 일유량 산정결과와 구리 및 진진 하수처리장 일평균 방류량 자료를 이용하여 산정하였으며, 기타 지류들의 일유량은 퇴계원 수위표 유량에

대한 유량면적비를 이용하였다. 하류의 개방경계조건은 청담대교 일평균 수위자료를 사용하였다. 하류경계조건 상류에 존재하는 잠실수중보 구조물은 EFDC의 weir 모듈을 사용하고 구조물 표고를 고려하여 적용하였다.

팔당댐 및 유입지천들의 수온은 국가수질측정망 자료를 이용하였다. 취수경계조건인 경우 5개 서울시 취수장(강북, 암사, 구의, 풍납, 자양)과 경기도와 인천시의 7개 취수장(하남, 덕소, 도곡, 토평, 한강, 자양(일산), 풍납(인천))의 일평균 취수량 시계열 자료를 사용하였다. 서울시 취수량 자료는 서울시 상수도사업본부 자료를, 서울시 이외의 취수량 자료는 국토교통부 한강홍수통제소의 자료를 이용하였다. 구의 취수장의 경우 2014년 10월 이후 취수가 중단되었으므로 이전 기간에만 고려하였다.

2.3 지류영향 분석 및 수질오염사고 시나리오

각 취수지점에서 지류들의 혼합비율과 흐름양상을 분석하기 위하여 염료 추적자 분석법(Dye Tracer Analysis)을 사용하였다. 추적자 분석에서는 추적자(염료)의 초기농도가 0 mg/L인 연구대상구간 수체로 팔당댐 방류수와 각 유입 지류로부터 100 mg/L 농도의 추적자가 해당 유량과 함께 연속적으로 유입된다고 가정하였다.

보정 및 검증이 완료된 수리모델 시스템을 이용하여 팔당댐 방류수와 산곡천, 덕풍천, 궁촌천, 월문천, 흥릉천, 왕숙천, 고덕천, 성내천 각 유입(염료 100 mg/L)에 대한 모의를 개별적으로 수행하였다. 서울시 4개 취수지점(강북, 암사, 풍납, 자양)에서 각 모의결과로 산출된 농도의 전체 농도합에 대한 비율을 구하면 전체 수량에 대한 해당 유입원의 조성비를 구할 수 있다. 2013~2015년(3년간) 일별 조

성비 변화 시계열을 구하여 시간적 변화에 따른 각 지류의 혼합 비율 변화를 분석하였다.

재현성이 검증된 수리 모의 시스템을 바탕으로 수질오염 사고 시나리오를 적용하여 용존 오염물질의 거동에 대한 예측을 수행하였다. 수질오염사고 시나리오 적용 시에는 페놀 1톤이 1시간에 걸쳐 사고지점에서 유입되는 것으로 가정하였다. 단, 사고 물질인 페놀은 휘발 등의 자연감소 기작은 없는 보존성 물질로 최악의 상태를 가정하고 유량 조건별(갈수량, 평수량)로 모의한 후 취수지점별 도달시간 및 농도변화를 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1 수리모델 재현성 검토 결과

한강 상수원 구간에 적용된 EFDC 수리모델의 재현성을 검토하기 위하여 모델 보정 및 검증을 수행하였다. 최근 15년간(2001~2015) 기상청 서울 관측소의 강수량 변화를 분석한 결과, 2013년은 1,404 mm로 평균(1,479 mm)에 가까웠으나, 2014년과 2015년은 각각 809와 792 mm로 최근 15년 중 가장 강수량이 적은 시기로 나타났다. 따라서 수문

조건이 다른 2013년(1년)과 2014~2015년(2년)을 각각 보정 및 검증 기간으로 설정하였다.

수위 및 유량에 대한 모델 검보정을 위해서 각각 국토교통부 '광진교' 수위표 지점의 일평균 수위 자료와 환경부 국가수질측정망 '구의' 지점의 8일 간격 일유량 자료를 이용하였다. 수온에 대한 검보정을 위해서는 환경부 국가수질측정망 '도곡, 구리, 암사, 구의, 잠실' 지점에서의 일평균 수온 자료를 이용하였다. 보정 및 검증에 사용된 각 관측 자료의 관측지점은 Fig. 1에 나타내었다. 구의(광진교) 지점은 수위, 유량, 수온 관측이 모두 이루어지는 지점이다.

모델 재현성의 정량적 평가에는 모의값과 관측값의 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency index)(Nash and Sutcliffe, 1970), R^2 , RMSE(Root Mean Square Error)를 산정하여 활용하였다. 모델 보정시 적용된 주요 계수는 Table 1에 제시하였다. EFDC에서의 수평난류확산계수는 Reynolds 근사(Fischer et al, 1979)에 따라 수평난류동점성계수(AH)에 의해 계산되며, 본 연구에서는 activate horizontal momentum diffusion 옵션을 이용하여 AHO (background horizontal viscosity)와 AHD (Smagorinsky 상수) 값에 의해 수평동점성계수가 유속에 따라 가변되도록 설정하였다. 국립환경과학원의 전기

Table 1. Values of key hydrodynamic model parameters used in this study

Parameters	Description	Unit	Value
Z_0	Bottom roughness height	m	0.01
AHO	Background horizontal momentum and mass diffusivity	m^2/s	0.1
AHD	Dimensionless horizontal momentum diffusivity	-	0.1
AVO	Background kinematic eddy viscosity	m^2/s	1E-5

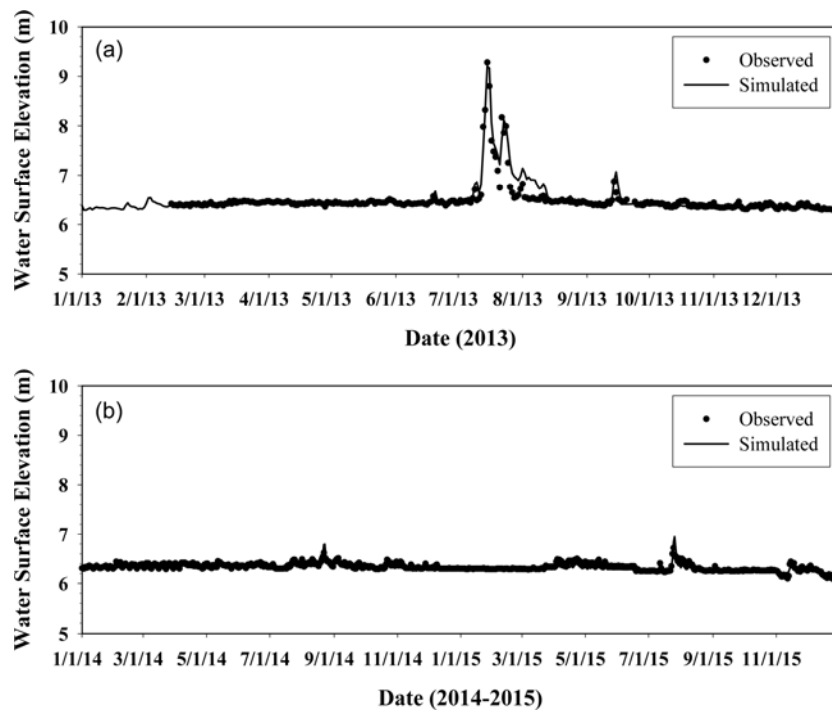


Fig. 3. Comparison of an observed and simulated time series of water surface elevation (a) Calibration result (b) Verification result.

전도도를 이용한 EFDC 추적자 모형 검증에서 낙동강 본류에 대하여 AHO는 0.1 m²/s, AHD는 0.2로 결정된 바 있으며(NIER, 2015), AHD는 일반적으로 0.10~0.20 사이의 값을 가진다고 보고되고 있다(Ji, 2007). 따라서 본 연구에서는 AHO는 0.1 m²/s로 고정하고 수위 보정을 통해 AHD를 0.10으로 선정하였다.

‘광진교’ 지점의 연중 수위변화에 대한 모델 보정 및 검증 결과를 실측값과 함께 Fig. 3에 나타내었다. 모의값은 2013년 연간 일평균 수위변화를 적절히 재현하는 것으로 나타났다. 모의값과 관측값 간의 NSE, R², RMSE는 각각 0.86, 0.89, 0.1 m로 분석되었으며 여름철 집중강우 시 급격

한 수위변화도 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. 2014~2015년의 검증 기간에도 모델은 2년간의 일평균 수위변화를 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났으며, NSE, R², RMSE는 각각 0.52, 0.66, 0.1 m로 분석되었다. 2013년에 비하여 실측치의 수위변동성이 크지 않아 상대적으로 NSE는 다소 낮게 나타났다.

유량에 대한 보정 시 모의값과 관측값 간의 NSE, R², RMSE는 각각 0.88, 0.92, 218.9 m³/s로 분석되었다. 8일 간격 유량자료는 고유량 시기의 유량자료가 부족한 반면에 편차가 크게 나타나서 RMSE 값이 다소 높게 산정되는 결과가 도출되었다. 검증결과도 관측자료의 시계열 변화를 적

Table 2. Statistical analysis of the modeling performance

Item	Station	Calibration			Verification		
		NSE	R ²	RMSE	NSE	R ²	RMSE
W. S. E.	M4	0.86	0.89	0.1 m	0.52	0.66	0.1 m
Flow rate	M4	0.88	0.92	218.9 m ³ /s	0.90	0.97	64.1 m ³ /s
Water Temperature	M1	0.98	0.99	1.1 °C	0.98	0.93	1.1 °C
	M2	0.99	0.99	0.6 °C	0.99	0.91	0.8 °C
	M3	0.98	0.99	1.0 °C	0.99	0.92	1.0 °C
	M4	0.98	0.99	2.2 °C	0.98	0.99	2.1 °C
	M5	0.99	0.99	0.8 °C	0.97	0.92	1.2 °C

※ W. S. E.: Water Surface Elevation

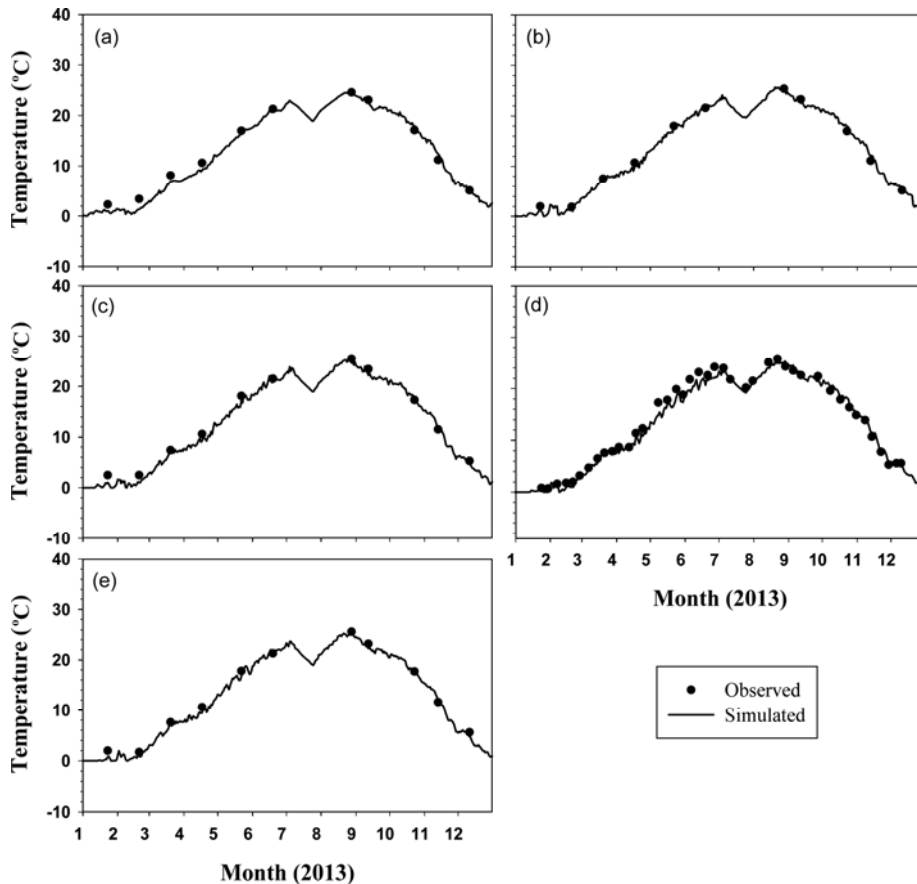


Fig. 4. Comparison of observed and simulated time series of the water temperature for the calibration period (2013); (a) Dogok, (b) Guri, (c) Amsa, (d) Guui, (e) Jamsil.

절히 재현하는 것으로 나타났으며, NSE, R^2 , RMSE는 각각 0.90, 0.97, $64.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 분석되었다.

지점별 수온 보정결과를 관측값과 함께 Fig. 4에 나타내었으며, 모델 결과는 관측값의 연간 시계열 변화를 적절히

재현하는 것으로 나타났다. 지점별로 모의값과 관측값 간의 NSE, R^2 , RMSE는 각각 0.98~0.99, 0.99, $0.6 \sim 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 분석되었다. 검증 결과도 2년간의 수온 시계열 변화를 적절히 재현하는 것으로 나타났으며, 지점별로 NSE, R^2 ,

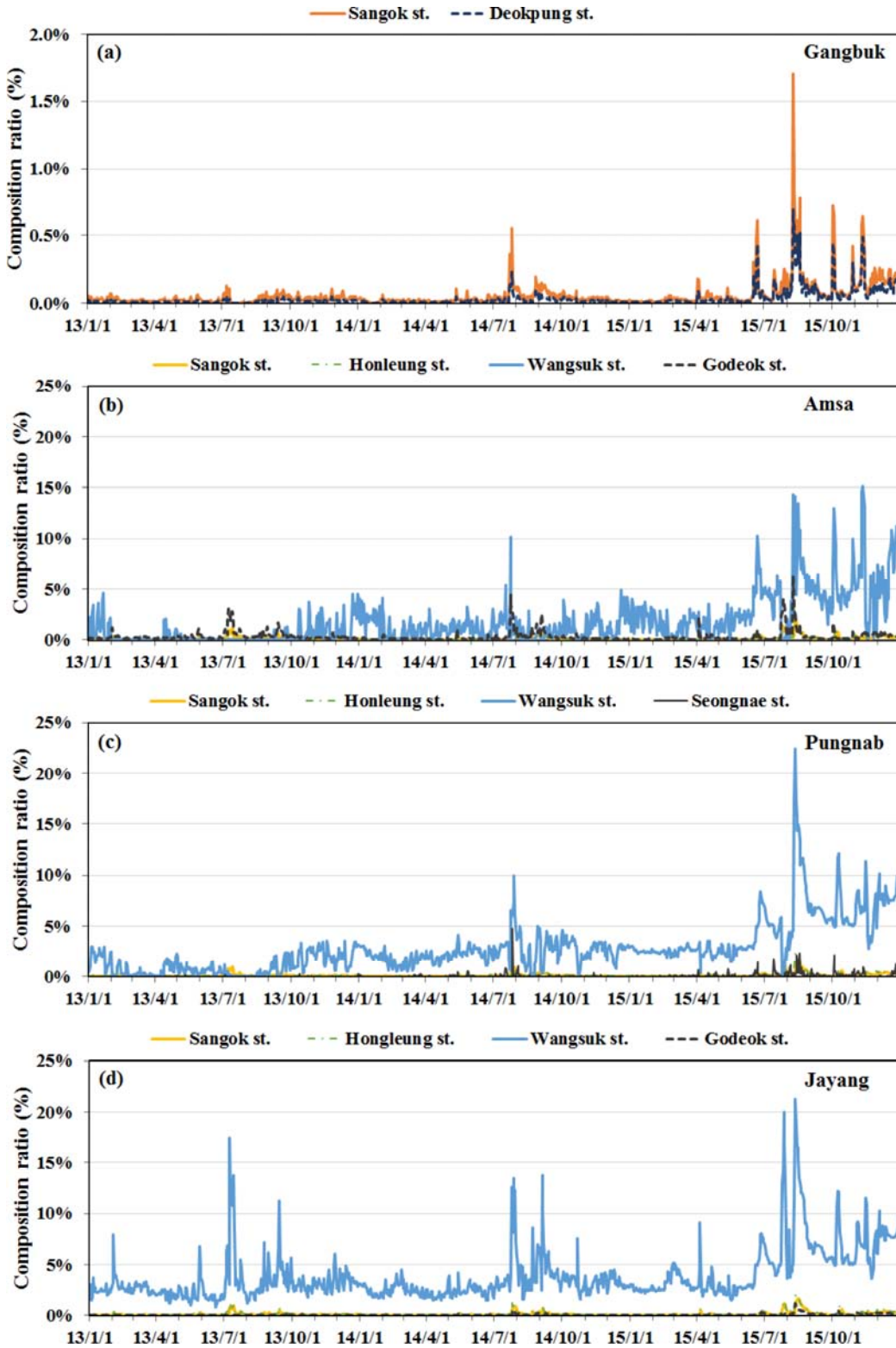


Fig. 5. Daily variations of the composition ratios of tributaries to total amount of water at each water intake station; (a) Gangbuk, (b) Amsa, (c) Pungnab and (d) Jayang intake station.

RMSE는 각각 0.97 ~ 0.99, 0.91 ~ 0.99, 0.8 ~ 2.1 °C로 분석되었다.

보정 및 검증 과정을 통해 한강 상수원 구간에 대하여 구축된 EFDC 수리모형은 연구대상 구간의 수위, 유량, 수온 등 수리현상을 적절히 재현하는 것으로 나타났다.

3.2 취수지점에 대한 지류영향 분석

재현성이 검증된 모델을 이용하여 3년간 서울시 주요 취수지점(강북, 암사, 풍납, 자양)에서 전체 수량에 대한 지천의 혼합비율을 분석하였고 주요지천의 비율을 Fig. 5에 제시하였다.

강북취수장 취수지점에서는 팔당댐 방류량이 취수 유량의 대부분을 차지하고, 지천들(산곡천, 덕풍천)의 영향은 3년간 산곡천에서 최대값이 1.7%로 미미한 것으로 나타났다. 암사취수장의 경우는 왕숙천의 영향이 가장 크고 다음으로 고덕천의 영향이 큰 것으로 나타났다. 왕숙천은 팔당댐 방류량이 가장 적었던 2015년 6월 이후 그 비율이 가장 높게 나타나며 최대 15.2%까지 올라갔다. 고덕천은 암사취수장 가까이 있으며 같은 좌안에 위치하기 때문에 그 영향력이 상대적으로 높아지는 것으로 판단된다. 풍납취수장에서는 암사취수장보다 왕숙천의 비율이 전반적으로 더 높은 경향을 보이며 2015년 6월 이후에 비율이 증가하여 최대 22.4%까지 나타나고 있다. 성내천은 풍납취수장 직하류에 위치하지만, 조건에 따라 상류까지 확산되어 풍납취수장까지 영향을 미치며 특히 2015년에 그 비율이 상대적으로 높아지는 것으로 분석되었다. 우안에 위치하는 자양취수장에서는 좌안에 위치하는 암사, 풍납 취수지점에 비해 전반적으로 왕숙천의 비율이 높았으며, 2013~2014년 중에도 다른 지점에 비해 높게 나타났다. 반면에 다른 지천들의 영향은 상대적으로 작게 나타났다.

지천들 중에서 왕숙천은 유역면적이 가장 넓고 하수종말처리장 방류수가 포함되어 유량이 많아 그 영향도 크게 나타나고 있다. 영향의 정도를 파악하기 위해서 각 취수지점별로 왕숙천 비율의 시계열 변화를 팔당댐 일평균 방류량과 함께 나타내어 비교하였다(Fig. 6). 2013년~2015년 5월까지의 암사취수장과 풍납취수장에서의 비율은 상대적으로

낮고 자양취수장에서의 비율은 높게 나타나고 있다. 특히 팔당댐 방류량이 3개년 중 가장 컸던 2013년에 이런 현상이 더욱 두드러지게 나타났으며, 우안에 위치하는 왕숙천 유입수가 잠실수중보까지 혼합이 잘 되지 않고 우안에 치우쳐 유하한 것으로 판단된다. 2014년은 2013년 대비, 팔당댐 방류량이 감소하여 취수장별로 왕숙천 비율의 차이가 상대적으로 작아지기는 하지만 여전히 암사취수장에서는 비율이 낮게 나타났다. 이를 통해 이 시기에 암사취수장 부근에서는 왕숙천 유입수의 혼합이 적게 이루어지나 잠실수중보 근처에서는 비교적 잘 혼합되는 것으로 판단할 수 있다. 2015년 6월 중순경부터는 팔당댐 방류량이 크게 줄어 7월 중의 강우기를 제외하고는 전 지점에서 왕숙천의 비율이 높아지며 풍납 및 자양취수장의 비율과도 유사해지는 것으로 나타났다. 따라서 팔당댐 방류량 감소 시 암사취수장에서 왕숙천 유입수의 혼합이 보다 잘 이루어지는 것으로 판단된다.

이를 확인하기 위하여 팔당댐 방류량 변화에 따른 왕숙천의 흐름변화 패턴을 추적자 모의 결과를 이용하여 분석하였으며 Fig. 7에 제시하였다. 팔당댐 방류량은 강우 및 상류댐 방류량 변화에 따라 변동성이 크며 전체 변동범위를 대표할 수 있는 값을 구하기 위하여 과거 10년간의 팔당댐 일평균 방류량에 대하여 유허분석을 수행하였다. 그 결과 갈수량(Q355)과 평수량(Q185)에 해당하는 값을 각각 79 m³/s와 174 m³/s로 산정하였다. 팔당댐 방류량이 평수량에 가까운 175 m³/s였던 시기에는 우안에서 유입되는 왕숙천이 하천 폭 방향으로 잘 확산되지 않고 우안쪽을 따라서 흐르므로 좌안에 위치하는 암사취수장과 풍납취수장에는 영향을 적게 미치며 우안에 위치하는 자양취수장에는 상대적으로 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다(Fig. 7(a)). 반면에 팔당댐 방류량이 79 m³/s(갈수량)인 시기에는 왕숙천 유입 후 수평방향으로 확산이 잘 이루어져 암사취수장과 풍납취수장까지 영향을 크게 미치는 것으로 나타났다(Fig. 7(b)). 본 연구에서의 흐름분석은 지천 유입량과 팔당댐방류량이 일 변화하는 조건에서 이루어진 것이므로, 실시간 유량 조건에 따라 흐름양상은 달라질 수 있으나 전체적인 경향성은 유사하게 나타날 것이라 판단된다.

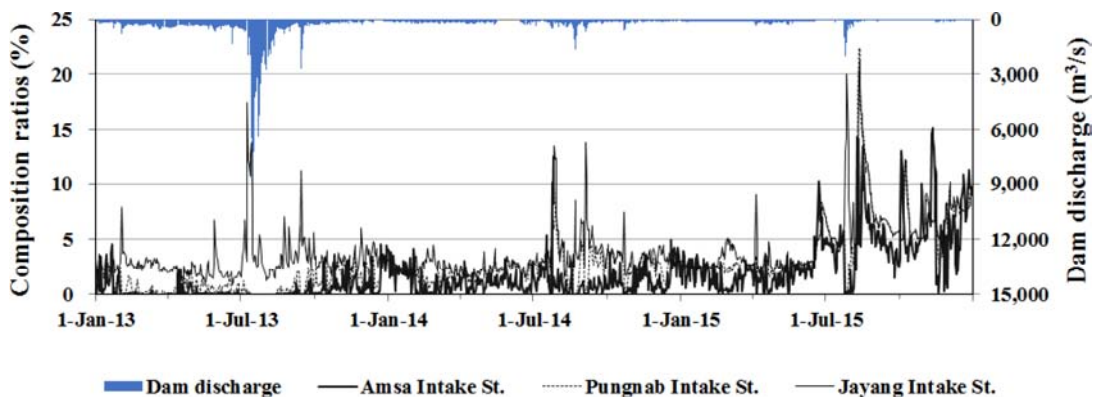


Fig. 6. Comparison of the composition ratios of the Wangsuk Stream to the total amount of water at three water intake stations from 2013 to 2015.

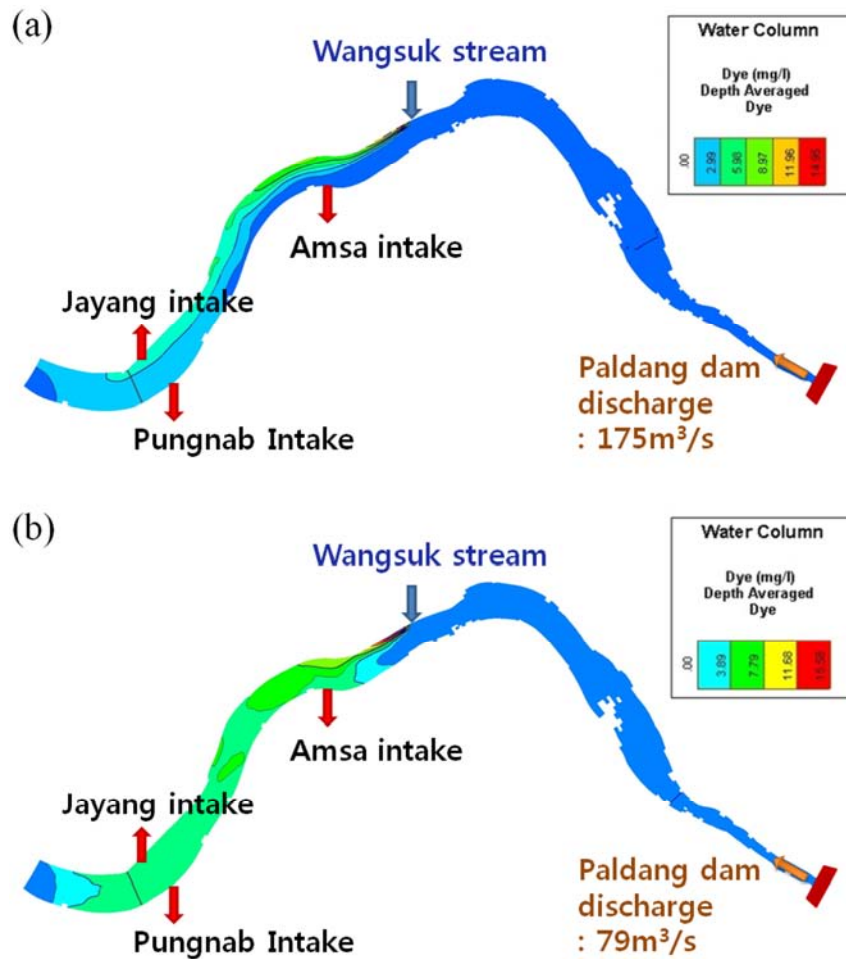


Fig. 7. Flow changes of the Wangsuk stream at different conditions of dam discharges
(a) Paldang dam discharge of 175 m³/s, (b) Paldang dam discharge of 79 m³/s.

왕숙천의 흐름은 팔당댐 방류량뿐만 아니라 다른 지천의 유량조건에 따라서도 달라질 가능성은 있지만, 팔당댐 방류량과 왕숙천 유량이 본류 흐름의 대부분을 차지하기 때문에 팔당댐 방류량이 왕숙천 흐름을 결정하는 주요인이 될 것이라 생각된다. 팔당댐 방류량이 적은 시기에는 왕숙천 유입 후 본류와의 혼합이 잘 이루어져 암사취수장에 대한 영향력이 커질 수 있으므로 취수지점의 수질관리를 위해서는 이러한 현상의 고려가 중요할 것으로 판단된다.

3.3 수질오염사고 시나리오 분석

수질오염사고 시나리오 모의에 사용된 유량 조건은 앞서 팔당댐 일평균 방류량을 이용하여 산정된 갈수량과 평수량 조건으로 각각 설정하였다. 지천들의 유량은 최근 3년간(2013~2015) 갈수량 및 평수량 시기의 유량값들을 평균하여 설정하였다. 취수량은 각 취수장별로 2015년 취수량을 평균한 값을 사용하였으며, 풍향 및 풍속은 과거 3년(2013~2015) 동안 가장 빈도가 높았던 서풍 및 평균풍속 3.18 m/s로 설정하였다.

수질오염사고는 1시간 동안 폐놀 1톤이 유입된 상황을 가정하였으며, 과거 오염사고가 발생한 사례가 있는 지천 중 왕숙천, 흥릉천에서 사고가 발생하여 본류로 유입되는

것으로 시나리오를 설정하였다. 각각에 대하여 갈수량과 평수량 조건에서 취수지점별로 폐놀의 최초 도달시간, 최고농도 및 도달시간, 지속시간을 분석하였다. 최초 도달 및 종료 조건은 폐놀 먹는물 법정수질 기준치인 0.005 mg/L 이상으로 하였다.

왕숙천 하류에서 폐놀유출사고가 발생하여 한강 본류로 유입된 경우 팔당댐 방류량이 평수량일 때 유속이 빨라지므로 저수량일 때 보다 폐놀 도달시간은 빨라지고 지속시간은 짧아진다. 평수량 조건일 때 암사취수장에 11시간 후 최초로 도달하기 시작하며 15시간 후 최대농도에 도달하였다. 갈수량 조건일 때는 17시간 후 최초로 도달하기 시작해서 34시간 후 최대농도에 도달하였다(Table 3). 그러나 갈수량 조건일 때는 평수량 조건에 비하여 암사취수장에서 농도가 높게 나타나는 반면에, 풍납 및 자양취수장에서의 농도는 평수량 수준일 때 더 높게 나타났다. 앞서 지천 혼합비율 및 거동분석에서 분석한 바와 같이 팔당댐 방류량이 적을 때는 하천 횡방향 확산이 잘 이루어져 우안에서 유입된 왕숙천이 좌안에 있는 암사취수장에 영향을 크게 미치며, 평수량 수준의 방류량에서는 주로 우안을 따라 이동하기 때문에 좌안의 암사취수장에 대한 영향력이 작아져 이런 현상이 나타나는 것으로 판단된다. 또한 갈수량 조건

Table 3. The simulation results of chemical spill accidents under low and normal flow conditions

Chemical spill site	Terms	Low flow condition (Q355)			Normal flow condition (Q185)		
		Amsa	Pungnab	Jayang	Amsa	Pungnab	Jayang
Wangsuk stream	First arrival time (hr)	17	99	119	11	47	48
	Arrival time of peak (hr)	34	163	172	15	56	63
	Peak concentration (mg/L)	0.2	0.06	0.05	0.04	0.08	0.10
	Duration time (hr)	63	153	140	9	48	36
Hongleung stream	First arrival time (hr)	38	133	146	20	54	58
	Arrival time of peak (hr)	64	197	200	27	75	75
	Peak concentration (mg/L)	0.10	0.05	0.05	0.16	0.07	0.08
	Duration time (hr)	94	158	146	26	44	45

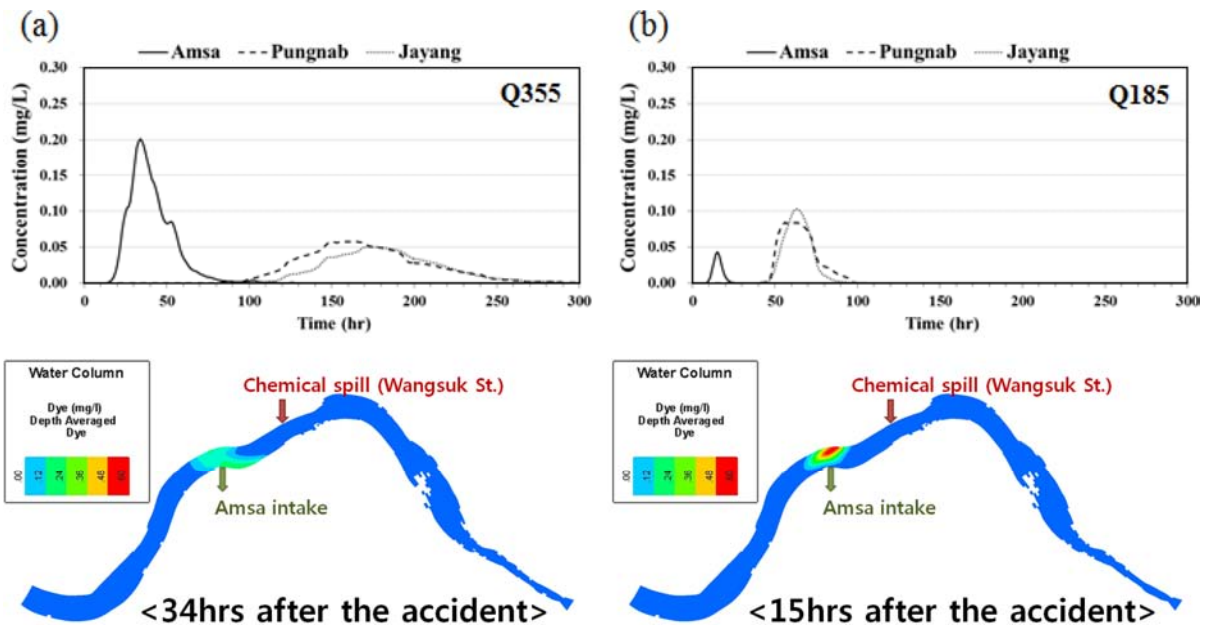


Fig. 8. Spatio-temporal variations of pollutant concentration after a chemical spill accident of the Wangsuk stream under (a) low flow condition and (b) normal flow condition.

에서는 오염물질이 하류로 이동하면서 하천 흐름방향과 횡 방향으로 확산이 커져 잠실수중보 근처의 자양 및 풍납취수장에서는 평수량 조건에서 보다 최대 농도가 낮게 나타나며, 평수량 조건에서는 상대적으로 확산이 덜 이루어져 최대 농도가 더 높게 나타나는 것으로 보인다(Fig. 8).

왕숙천보다 상류에서 유입되는 홍릉천 하류에서 폐놀유출사고가 일어난 경우, 평수량 조건에서 암사취수장에 대한 최초 도달시간은 20시간, 최대농도 도달시간은 27시간, 갈수량 조건에서는 최초 도달시간이 38시간, 최대농도 도달시간은 64시간으로 나타났다(Table 2). 홍릉천은 왕숙천처럼 우안에서 유입되는 하천이지만 홍릉천 하류에서 폐놀이 유입될 경우 암사취수장에서의 농도는 왕숙천과는 달리 평수량 조건에서 더 높게 나타났다(Fig. 9). 이는 홍릉천 유입점에서 암사취수장까지의 거리는 왕숙천 유입점에서의 거리보다 더 멀리 떨어져 있기 때문에, 평수량 조건에서 홍릉천으로부터 유입된 폐놀의 오염원이 우안을 따라 이동다가 암사취수장에 이르기 전에 횡방향 확산이 이루어지기

때문인 것으로 판단된다. 즉, 갈수량과 평수량 조건에서 모두 암사취수장 도달 이전에 횡방향 확산이 이루어지며, 평수량 조건에서는 상대적으로 오염원이 덜 퍼져서 이동하기 때문에 최대 농도가 높게 나타나고 있다.

모델에서 설정된 수평난류확산계수가 증가하게 되면 횡방향 유속변화에는 큰 영향을 주지 못하나 오염물질의 횡방향 혼합이 증가하여 농도경사가 감소할 수 있다(NIER, 2015). 따라서 수평난류확산계수의 설정 값에 따라 오염사고 모의 시 도달 시간과 최고 농도에도 변화가 있을 수 있다. 현장 추적자 실험을 통한 수평난류확산계수에 대한 검증이 이루어진다면 좀 더 정확한 모의가 가능해질 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 한강 취수원에 대한 지류와 오염사고의 영향을 분석하기 위해서 팔당댐 ~ 잠실수중보 구간에 3차원

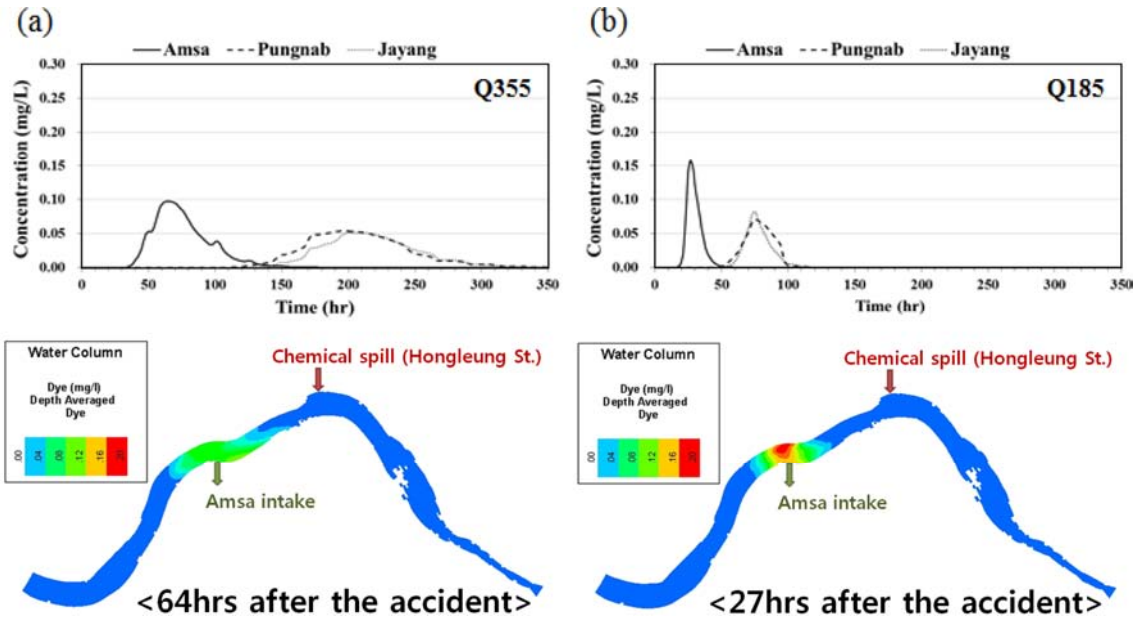


Fig. 9. Spatio-temporal variations of pollutant concentration after the chemical spill accident of the Hongleung stream under (a) low flow condition and (b) normal flow condition.

수리모델 시스템을 구축하였다.

연속적인 기상 및 수리·수문 변동조건에서 수리모델의 재현성을 검증하기 위하여, 2013~2015년 3년간의 수위, 유량, 수온 관측 자료를 이용하여 모델 보정 및 검증을 수행하였다. 보정 결과 모의값과 관측값간 NSE, R^2 , RMSE의 평균은 각각 수위 0.86, 0.89, 0.1 m, 유량 0.88, 0.92, 218.9 m^3/s , 수온 0.98, 0.99, 1.1 $^{\circ}C$ 였으며, 검증 결과 모의값과 관측값간 NSE, R^2 , RMSE의 평균은 수위 0.52, 0.66, 0.1 m, 유량 0.90, 0.97, 82.9 m^3/s , 수온 0.98, 0.93, 1.2 $^{\circ}C$ 를 나타내어 적용된 3차원 수리모델은 관측값의 시계열 변화를 적절하게 재현하는 것으로 판단되었다.

재현성이 검증된 모델을 이용하여 상수원 구간으로 유입되는 8개 지천의 취수장(강북, 암사, 풍납, 자양)별 혼합비율의 3년간 변화를 분석하였다. 취수량 중 팔당댐 방류량을 제외하면 왕숙천의 비율이 가장 높아 하류 풍납취수장에 유입되는 왕숙천의 유량 비율은 일시적으로 최대 22.4%까지 차지하는 것으로 나타났다.

각 취수지점에 대한 왕숙천 혼합비율은 시기별로 변화폭이 컸으나 전반적으로 구간 최하류 우안에 위치한 자양취수장에서 가장 크게 나타났으며, 가뭄으로 팔당댐 방류량이 크게 감소한 시기(2015년)에는 좌안에 위치한 암사 및 풍납취수장에서도 자양취수장과 유사한 수준으로 왕숙천 유량 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 팔당댐 방류량 기준으로 평수량 시기에는 왕숙천이 주로 우안을 따라 이동하여 좌안 취수장에 대한 영향이 적으나, 갈수량 시기에는 수평 확산이 잘 이루어져 하류의 모든 취수장에 영향을 크게 미치는 것이 확인되었다.

수질오염사고 시나리오 모의 결과, 유입된 오염물질의 이동은 유입지점과 팔당댐 방류량 조건에 따라 다양하게 변화하였다. 각 취수장별로 최초도달시간, 최대농도 및 도달시

간, 지속시간 분석이 가능하였다.

본 연구결과는 수질오염사고 시 취수장에 대한 오염물질 이동 및 확산 영향 예측에 활용할 수 있으며, 한강 분류상수원 구간의 수리 특성 분석을 통해 수질관리 문제 발생 시 원인 분석 및 해결방안 마련에 유용할 것으로 판단된다. 나아가 향후 수질 및 조류예측 모델로 확장하여 한강 상수원 구간의 과학적 수질관리에 효율적인 도구로 활용될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 서울물연구원의 “상수원 수질예측시스템 구축 및 최적 활용방안” 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Baek, K. W., Kim, S. H., Han, K. Y., and Song, J. W. (1995). Water Quality Analysis by QUAL2E for the Downstream of the Han River, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 15(2), 451-461. [Korean Literature]
- Choi, H. G., Park, J. H., and Han, K. Y. (2014). Simulation of Water Pollution Accident with Water Quality Model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(3), 177-186. [Korean Literature]
- Choi, J. K., Min, J. H., and Kim, D. W. (2015). Three-dimensional Algal Dynamics Modeling Study in Lake Euiam Based on Limited Monitoring Data, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(2), 181-195. [Korean Literature]
- Craig, P. M. (2016). *User's Manual for EFDC_Explorer 8.1*, Dynamic Solutions-International LLC., Edmonds, WA, 1-391.
- Dynamic Solutions International (DSI). (2016). *CVLGrid 1.1*

- Users Guide*, Dynamic Solutions-International LLC., Edmonds, WA, 1-121.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic press, Inc., New York.
- Hamrick, J. M. (1992). *A Three Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects*, Special Report 317, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA. 1-63.
- Han, K. Y., Song, J. W., Kim, S. H., and Baek, K. W. (1995). T-N and T-P Simulations in the Downstream of the Han River, *Journal of Korean Water Resources Association*, 28(4), 137-146. [Korean Literature]
- Hur, Y. T. and Park, J. H. (2009). Assessment of EFDC Model for Hydrodynamic Analysis in the Nakdong River, *Water Engineering Research*, 42(4), 309-317.
- Jang, J. H., Jong, J. H., Mun, H. S., Kim, K. H., and Seo, I. W. (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]
- Jeon, J. H. and Chung, S. W. (2012). A Sensitivity Analysis on Numerical Grid Size of a Three-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Model (EFDC) for the Saemangeum Reservoir, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(1), 26-37. [Korean Literature]
- Jeong H. J., Hwang W. T., Kim E. H., and Han M. H. (2009) Radiological Risk Assessment for an Urban Area: Focusing on a Drinking Water Contamination, *Annals of Nuclear Energy*, 36, 1313-1318.
- Jeong, S. M., Yeon, K. S., Hur, Y. T., and Oh, K. R. (2010). Salinity Intrusion Characteristics Analysis Using EFDC Model in the Downstream of Geum River, *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 934-939.
- Ji, Z. G. (2007). *Hydrodynamics and Water Quality*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 13-112.
- Kim, S. H. and Choi, H. S. (2006). Improvement of QUAL2E Model Using Nonuniform Flow Analysis, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(6), 1144-1150. [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. S., 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*, NIER-RP2013-299, National Institute of Environmental Research, 1-30. [Korean Literature]
- Na, E. H., Shin, C. M., Park, L. J., Kim, D. G., and Kim, K. H. (2014). A Study on the Operational Forecasting of the Nakdong River Flow with A Combined Watershed and Waterbody Mode, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(1), 16-24. [Korean Literature]
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part 1 - A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2013). *Transport and Scenario Modeling of Oil Spill in the Nakdong River*, NIER-RP2013-299, National Institute of Environmental Research, 1-38. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2015). *Development and Application of Validation Technique for Advection-Diffusion of Dissolved Pollutants Using Tracer Experiments(II)*, NIER-SP2015-272, National Institute of Environmental Research, 1-222. [Korean Literature]
- Park, N. S., Kim, S. S., Chong, S. A., Kim, J. O., Kim, D. H., and Kang, M. S. (2012). Modelling the Dispersion Behavior of Conservative Pollutants within Daechung Dam Using EFDC-Hydro, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 26(5), 705-712. [Korean Literature]
- Ryu, M. J., Park, C. B., Koo, J. Y., Cho, Y. M., and Cho, H. M. (2002). Analysis to the Affect of Wangsukchon Using Modified RMA Model, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 24(8), 1405-1413. [Korean Literature]
- Seo, D. I. and Yu, H. N. (2007). Error Analysis of QUAL2E Water Quality Model using EFDC-Hydro and WASP7.2 - A Case Study of the Lower Han River, *Proceedings of the 2007 Fall Co-conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, 123-129. [Korean Literature]
- Seo, I. W., Choi, H. J., and Song, C. G. (2011). Horizontal 2-D Finite Element Model for Analysis of Mixing Transport of Heat Pollutant, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 31(6B), 507~514. [Korean Literature]
- Seo, I. W. and Song, C. G. (2007). Simulation of Transport of BOD at the Han River Using 2-D Advection Dispersion Model, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 27(6B), 573-581. [Korean Literature]
- Seoul Water Institute. (2017). *Seoul Water 2016*, 51-6110000-001288-10, Seoul Water Institute, 8-41. [Korean Literature]
- Tetra Tech, Inc. (2007). *The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation Volume I: Hydrodynamics and Mass Transport*, Tetra Tech, Inc. Fairfax, VA. 1-231.