

연구논문

수질모형을 이용한 수질오염사고의 모의분석

최현구* · 박준형** · 한건연**

K-water 연구원*, 경북대학교 건설환경에너지공학부**

Simulation of Water Pollution Accident with Water Quality Model

Choi, Hyun Gu* · Park, Jun Hyung** · Han, Kun Yeun**

K-water Institute*

Kyungpook national university, School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering**

Abstract

Depending on the change of lifestyle and the improvement of people's living standards and rapid industrialization, urbanization of recent, demand for water is increasing rapidly. So emissions of domestic wastewater and various industrial waste water has increased, and water quality is worsening day by day. Therefore, in order to provide a measure against the occurrence of water pollution accident, this study was tried to simulate water pollution accident. This study simulated 2008 Gimcheon phenol accident using 1,2-D model, and analyze scenario for prevent of water pollution accident. Consequently the developed 1-D model presents high reappearance when compared with 2-D model, and has been able to obtain results in a short simulation run time. This study will contribute to the water pollution incident response prediction system and water quality analysis in the future.

Keywords : Water pollution accident, Water quality model, 1-D model, Simulation, Scenario analysis

I. 서론

1. 연구의 배경과 목적

국내뿐만 아니라 전 세계적으로 산업화를 이루면서 공업단지를 중심으로 크고 작은 수질오염사고들이 발생되고 있다. 2014년 1월 미국 웨스트버지니아

주에서는 4-메틸사이클로헥산이 수돗물에 유입되어 30만명이 수돗물을 사용하지 못하여 공공기관, 학교, 식당 등이 임시휴업하는 사태가 발생했으며, 2010년 미국 미시건주에서는 유류 819,000 갤런이 칼라마주강으로 유입되는 사고가 발생하였다. 2005년 중국 지린성에서는 벤젠 100톤이 송화강으로 유

입되는 되는 등 대규모 수질오염사태가 발생하였고, 1986년 스위스 바젤시에서는 화학공장화재로 유독물질 30~40톤이 라인강으로 유입되는 사고가 발생했다.

국내에서 발생한 수질오염사고는 주로 낙동강에서 발생했으며, 2008년 1-4다이옥산 사고, 김천공단 폐놀유출사고, 2006년 퍼클로레이트 사고, 94년 벤젠과 톨루엔 오염사고, 1991년 폐놀오염사고 등이 대표적인 사례이다. 최근 우리나라에서는 매년 20건의 유류사고와 5건 내 · 외의 화학물질 유출사고가 발생되고 있어 수질오염사고로부터 안전한 국가는 아니며 이에 대한 대비가 필요하다.

2. 연구의 범위

수질오염사고는 예방도 중요하지만 사고가 발생했을 때에 빠른 대처 또한 중요한 요소이다. 사고발생시 신뢰도 높은 수질예측이 가능하게 되면 수질악화를 방지하기 위해 가동보 및 댐과의 연계운영을 통한 희석과 플러싱, 취수장과 정수장의 운영중단 등 다양한 조치를 취할 수 있게 되어 효율적인 방제활동을 수행할 수 있게 된다. 국내의 수질사고를 대비한 예경보시스템을 살펴보면 1986년 스위스의 사고를 계기로 라인강을 공유하는 나라들이 특별위원회를 구성하여 Rhine Alarm System을 구축하였으며 2차원 모형으로 예경보를 수행하고 있다(Mazijk *et al*, 2000). 미국 환경청은 1차원 River Spill 시스템을 개발하여 운영하고 있으며(William, 2005), 국내에서는 국립환경과학원에서 EFDC 모형을 기반으로 수질오염사고대응예측시스템을 구축하여 운영 중에 있다(문현생 등, 2012).

기존 수질사고모의의 경우 1차원 또는 2차원 모형을 이용하여 사고의 모의나 분석에 중점을 두었으나 본 연구에서는 사고의 모의와 더불어 가상의 시나리오를 구성하여 향후에 발생 가능한 사고에 대해 예측을 해보았으며 1, 2차원 모형을 통한 분석으로 각 모형의 우수성에 대해서도 비교해보았다.

3. 연구의 방법

본 연구에서는 1, 2차원 수질모형을 이용하여 수질

오염사고를 모의하고 방제활동을 위한 시나리오분석을 수행하고자 한다. 2008년 김천 폐놀사고 사례조사 보고서(환경부, 2008)에 수록된 폐놀측정값을 이용하였으며, 개발된 1차원 수질해석 모형에 적용하여 반응계수를 시행착오법으로 산정하여 사고를 모의하고 시나리오 분석을 수행하였다. 1차원 모형의 적용성과 재현성을 비교하기 위하여 EFDC 모형을 2차원으로 같은 사상에 적용하였다.

수질오염사고 모의에서 가장 중요한 부분은 오염물질의 도달시간과 확산농도의 신뢰성, 그리고 모의시간을 들 수 있다. 과거에 일어난 수질오염사고를 모의할 경우에는 모의시간이 오래 걸리더라도 도달시간과 확산농도가 정확한 모형을 사용하는 것이 바람직하지만, 실제 사고 발생시 방제작업을 위해서는 모의결과와 적절한 신뢰성과 짧은 모의시간이 보장되어야 한다. 본 연구에서 적용한 1차원 모형과 EFDC 모형을 이용하여 동일한 모의를 수행하였을 경우 각각의 모의시간이 5분과 8시간으로 나타나 방제활동에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다(최현구, 2012).

II. 수리 · 수질방정식

1. 수질사고 모의에 관한 기존 연구

수질오염사고에 관한 연구로는 Mazijk(2002)가 Rhine Alarm Model의 예측 정확도를 높이기 위해 라인강에서 직접 추적자 실험을 통해서 모델을 보정하였으며, Bo Zang(2008)은 중국 송화강의 모델도 사고발생 시 측정된 벤젠농도로 모델을 보정하였다. 국내에서는 수질오염사고 발생시 정확한 측정기록이 잘 남지 않아 실제하천에서 추적자를 이용한 오염물질 거동분석이 수행되었다(서일원 등, 2004; 김기철 등, 2009). 최근 국내에서는 EFDC 모형을 통한 분석이 주로 수행되고 있는데 서일원 등(2011)은 추적자 실험의 결과를 모형에 적용하였고, 문현생 등(2012)이 2008년 김천 수질사고를 모의하였으며, 박노석 등(2012)은 대청댐내 가상 오염사고 분석을 수행하였다.

2. 수리 · 수질방정식

(1) 1차원 모형: DyHYD 모형과 DyQUAL 모형

수질오염사고를 모의하기 위해서 1차원 수리수질 해석 모형을 적용하였다. 수질오염사고는 초기대응이 중요하므로 수질모델링에서 소요되는 모의시간이 짧아야 하며, 갈수 · 저수조건, 동적상태의 댐 방류량, 지류 유입량, 보의 운영 등 다양한 하천조건을 반영하면서도 안정적인 모의가 가능하여야 한다. 본 연구에 적용된 1차원 모형은 DyHYD, DyQUAL 모형으로 위의 조건들에 부합하는 모형이다(권나영 등, 2010).

동적 수리해석을 위해서는 FLDWAV 모형을 기반으로 불규칙한 단면과 다양한 흐름조건을 반영할 수 있도록 DyHYD 모형을 개발하여 낙동강에 건설된 보의 영향까지 반영할 수 있으며, 동적 수질해석을 위해서는 CE-QUAL-RIV1을 기반으로 DyHYD 모형의 수리계산을 반영하고 독성물질을 모의할 수 있도록 DyQUAL 모형으로 재구성하였다.

DyHYD 모형의 지배방정식은 확장된 St. Venant 방정식으로 홍수터 및 저류단면의 흐름, 사행하천, 단면축소 · 확대 등을 고려할 수 있다(DeLong, 1986). 확장된 St. Venant 방정식(Fread, 1988)은 식 (1)과 (2)로 표현된다.

$$\frac{\partial(s(A + A_o))}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(sQ)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_c \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, A 는 흐름 단면적이고, A_o 는 저류단면적을 나타내며, g 는 중력가속도를 나타낸다. H 는 수리수심을 나타내며, β 는 운동량 보정계수를 나타내며, s 는 사행계수를 나타낸다. S_f 는 마찰경사를 나타내며, S_c 는 단면 확대 · 축소에 의한 손실경사를 나타낸다.

DyQUAL 모형에 적용된 오염물질의 질량보존방정식은 흐름방정식을 구하는 것과 같은 방법을 사용하여 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(A\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(UA\alpha)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) + q\gamma + S^* \quad (3)$$

여기서, α 는 오염물질의 농도를 나타내며, S^* 는 용출 소멸량을 나타내고, D 는 확산계수를 나타내며, γ 는

측방향 유입수의 농도를 나타낸다.

지배방정식 (3)으로부터 S^* 를 현재 농도의 1차항과 상수항으로 분리한 후, chain rule을 적용한 후 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \alpha}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + \frac{q}{A}(\gamma - \alpha) - K_s \alpha + S \quad (4)$$

$$\bar{u} = U - \left(\frac{\partial D}{\partial x} + \frac{D}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = U - \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{D}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \quad (5)$$

여기서, K_s 는 생화학적 생성소멸률계수, S 는 생화학적 용출소멸량이다. 식 (4)의 좌변(이송항)은 4차의 정도를 가지는 Holly-Preissmann 방법을 사용해서 구한다. 그리고 여기에 우변의 둘째(횡방향 유입항), 셋째(감소항), 넷째항(용출소멸량)을 더한 후에 첫째(확산)항에 대해 음해법을 사용해서 구함으로써 전체적인 계산을 수행하게 된다.

독성물질의 반응기작을 표현하기 위하여 용존 요소와 입자성 요소로 구분하여 모의를 수행하며 복잡한 독성물질의 반응을 일차식으로 식 (6)과 같이 구성하였다.

$$\frac{dc}{dt} = k_d F_d c + k_p F_p c \quad (6)$$

여기서, c 는 독성물질의 농도이며, k_d 와 k_p 는 각각 용존 요소와 입자성 요소의 반응계수를 의미한다. F_d 와 F_p 는 총 독성물질의 용존상태와 입자상태 각각에 대한 분율을 나타내며, F_d 와 F_p 의 합은 1이다.

(2) 2차원 모형: EFDC 모형

EFDC 모형은 초기에 Virginia Institute of Marine Science에서 개발되었으며, 현재는 USEPA와 Tetra Tech, Inc.에 의해 개발 관리되고 있는 3차원 수리동역학모형이다. EFDC 모형의 물리학과 수치계산적 측면은 Blumberg-Mellor 모형과 미공병단의 Chesapeake Bay 모형과 유사하다. EFDC 모형은 가변 밀도 흐름에 대해 수치적으로 정수압 가정을 하며, 자유표면, 그리고 난류 평균의 3차원 운동 방정식의 해를 구한다. 운동방정식에 동력학적으로 연결된 난류 운동에너지, 난류 길이스케일, 염도, 그리고 온도 이송 방정식 또한 함께 풀어진다. 또한 부유물질 또는 용존물질에 대한 Eulerian 이송 전환방정식

도 동시에 해를 구한다. 이송 방정식의 이송항에 대해서는 중앙차분법을 사용하거나 positive definite upwind difference 방법을 사용한다. EFDC 모형은 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 오염원유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동/반응 등에 대한 모의가 가능하다.

EFDC 모형의 3차원 연속방정식과 운동방정식, 정역학 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHf'_0udz)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHf'_0vdz)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHuu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHvu)}{\partial y} + \frac{\partial(mwu)}{\partial z} - \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hv = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} \quad (9)$$

$$-m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} Av \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u$$

$$\frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHuv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHvv)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu = -m_x H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} \quad (10)$$

$$-m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} Av \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -gHb \quad (11)$$

여기서, u, v 는 x, y 방향에서 수평속도성분(m/sec)이고, w 는 변환된 무차원 연직좌표계 z 에서의 연직유속 성분(m/sec)이다. h 는 기준면하 수심(m)이고, ζ 는 기준면에서의 수면변위(m)이며, H 는 전체수심으로 $h + \zeta$ 의 값이다. m_x, m_y 는 곡선좌표계 임의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근이다. Q_u, Q_v 는 Momentum source-sink 항($kg \cdot m/sec$)이고, p 는 압력(Pa)을 나타내며, f 는 Coriolis parameter, A_v 는 수직난류점성계수이다. ρ 는 밀도(kg/m^3), b 는 부력(m/sec^2), g 는 중력가속도

(m/sec^2)이다.

수주내 흡착성 물질의 이송-확산-감쇄 모형은 물속에 용해된 오염원, 물속에 용해된 물질에 흡착되어 있는 오염원, 그리고 부유물질에 흡착된 오염원의 이동을 포함하고 있으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H C_w) + \frac{\partial}{\partial x} (m_x H u C_w) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v C_w) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w C_w) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(m_x m_y \frac{K_v}{H} \frac{\partial C_w}{\partial z} \right) + m_x m_y H \left(\sum_i K_{ds}^i S^i + \sum_j K_{ds}^j S^j \right) \\ & - m_x m_y H \left(\sum_i K_{ds}^i S^i \left(\psi_w \frac{C_w}{\phi} \right) \hat{x}_s^i - \hat{x}_s^i \right) \quad (12) \\ & + \sum_j K_{ds}^j S^j \left(\psi_w \frac{C_w}{\phi} \right) \hat{x}_D^j - \hat{x}_D^j + \gamma C_w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H C_D^j) + \frac{\partial}{\partial x} (m_x H u C_D^j) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v C_D^j) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w C_D^j) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(m_x m_y \frac{A_b}{H} \frac{\partial C_D^j}{\partial z} \right) + m_x m_y H K_{dD}^j D^j \left(\psi_w \frac{C_w}{\phi} \right) \hat{x}_D^j - \hat{x}_D^j \quad (13) \\ & - m_x m_y H K_{dD}^j + \gamma C_D^j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H C_S^i) + \frac{\partial}{\partial x} (m_x H u C_S^i) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v C_S^i) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w C_S^i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(m_x m_y \frac{A_b}{H} \frac{\partial C_S^i}{\partial z} \right) + m_x m_y H K_{dS}^i S^i \left(\psi_w \frac{C_w}{\phi} \right) \hat{x}_S^i - \hat{x}_S^i \quad (14) \\ & - m_x m_y H K_{dS}^i + \gamma C_S^i \end{aligned}$$

여기서, C_w 는 단위 체적당 용존 오염물의 질량이며, x_s 는 단위유사(i) 질량당 흡착된 오염물 질량, x_D 는 단위용존물(j) 질량당 흡착된 오염물의 질량을 의미한다. ϕ 는 공극율이며, ψ_w 는 흡착을 위한 용존 오염물질의 비율이고, K_a 와 K_d 는 각각 오염물의 흡착율과 탈착율을 나타내며, γ 는 선형화된 감쇠계수이다. S, D 는 각각 유사와 오염물질의 농도로 단위체적당 질량으로 나타낸다.

III. 수질사고의 모의

본 연구에서 모의한 2008년 3월 1일 코오롱유화 김천공장 화재로 인한 폐누출 사고의 개요는 다음



Figure 1. Study area and water pollution accident point

과 같다. 화재진압 소방용수를 타고 대광천으로 대략 11kg의 폐놀이가 유출되었으며, 감천으로 유입된 후 다시 낙동강 본류로 유입되어 구미와 대구 지역의 취수장에서 취수를 중단하는 상황이 발생되었다. 이에 다양한 방법으로 유출된 폐놀이를 처리하기 위하여 노력하였으며, 3월 2일 16시에 안동·임하댐에서 플러싱을 위하여 70cms의 추가방류수를 공급하였다.

Figure 1은 독성물질 유출사고의 유역도로서 사고 현장에서 대광천은 약 350 m 떨어져 있으며, 대광천은 약 1.5km를 유하하여 감천과 합류되며, 합류점에서 낙동강 본류까지의 거리는 약 26km이다. 실측지점인 송선대교는 감천과 낙동강의 합류점에서 약 5km 하류이며, 구미광역취수장은 송선대교에서 약 4km 하류, 구미대교는 구미광역취수장에서 약 9km 하류에 위치하고 있다.

독성물질 유출사고를 모의하기 위하여 2008년 모의자료의 유량을 사용하였으며, 송선대교, 구미광역

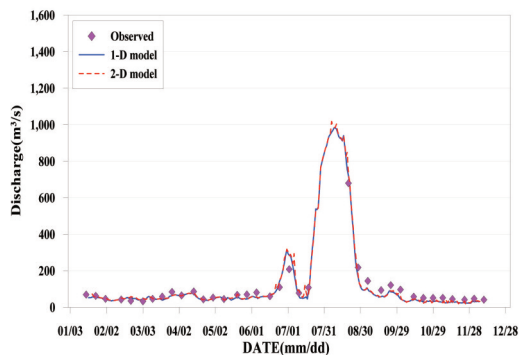
Table 1. Statistics results of discharge calibration by models in relevant area

		Nakbon E	Nakbon F
1-D model	CC	0.981	0.985
	NSEC	0.941	0.962
2-D model	CC	0.981	0.986
	NSEC	0.944	0.957

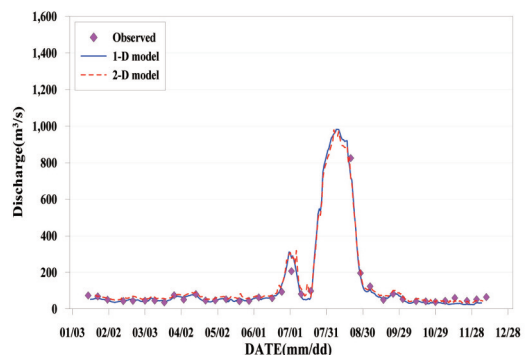
취수장, 구미대교의 실측자료를 이용하여 폐놀이의 반응계수를 시행착오법으로 산출하였다. Figure 2와 Table 1은 대상구간 내에 유량보정 지점으로 물환경연구소의 7일 간격 실측자료와 비교한 자료로 1, 2차원 모형의 유량보정 결과는 비슷하게 산정되었으며 우수한 결과를 보인다.

Figure 3은 사고 모의결과로서 대광천으로 유출된 폐놀이는 약 11kg으로 상당한 양이나 대광천의 차단벽의 설치와 다양한 방재작업으로 인하여 송선대교에서 실측된 최고 농도는 0.04mg/L로 많이 줄어든 양으로 나타났으며, 1차원 모형의 결과는 0.041mg/L로 산정되었고, 2차원 모형의 첨두값은 0.040mg/L로 실제 상황과 비슷하게 모의되었다. 구미광역취수장에서는 0.048mg/L가 최대농도로 실측되었으나 송선대교의 최대농도보다 높게 실측되어 본 모의에서는 최대농도를 쫓아가지 못하였다. 구미대교의 실측자료는 농도가 감소하는 자료만 측정되어 있었다. 실측자료의 증가와 감소하는 경향은 1차원 모형의 결과가 2차원 모형의 결과보다 더 잘 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 각 모형별 모의결과를 실측자료와 비



(a) Nakbon E point



(b) Nakbon F point

Figure 2. Discharge calibration in relevant area

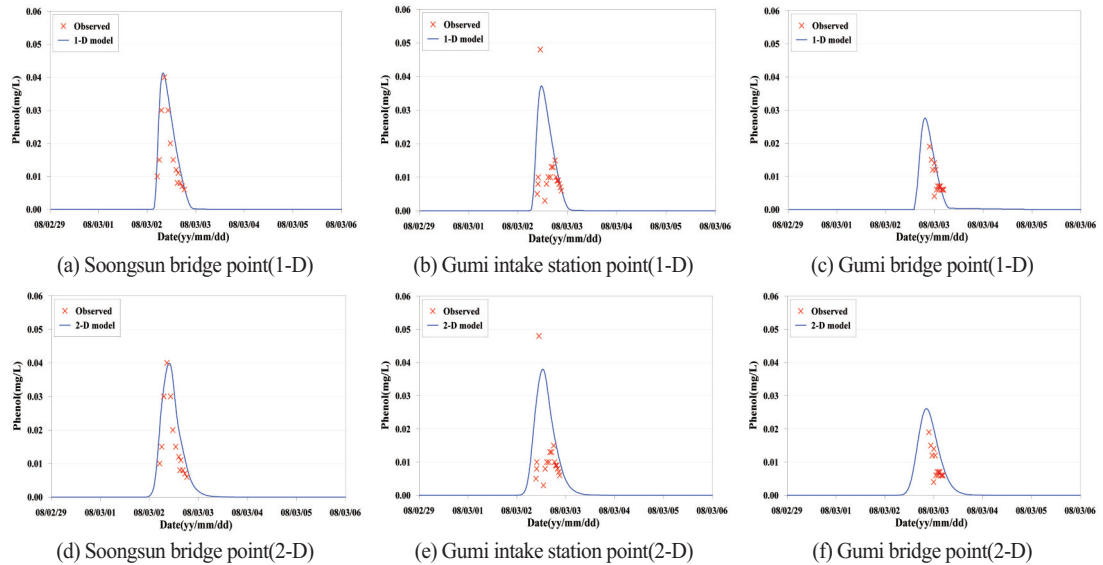


Figure 3. Results of accident reappearance by models

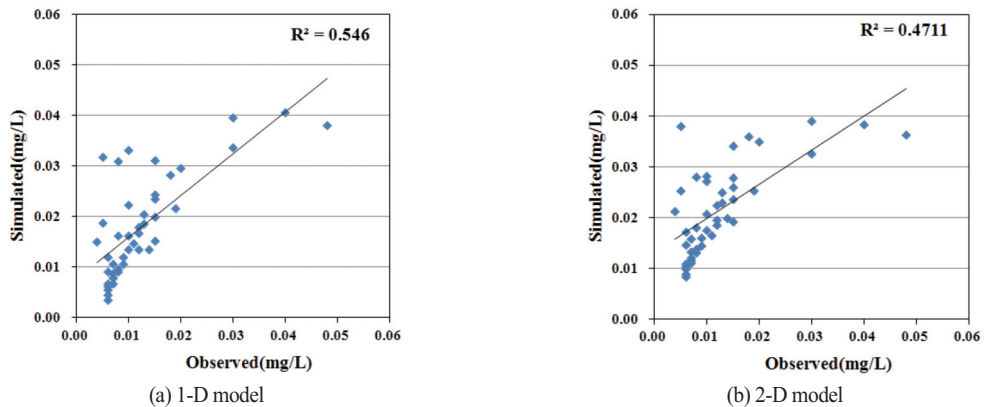


Figure 4. Suitability results of toxic by models

Table 2. Statistics results of toxic calibration by models in relevant area

	1-D model	2-D model
CC	0.739	0.686
NSEC	0.036	-0.614
RMSE	0.0088	0.0114

교환 자료로 1차원 모형의 결과가 2차원 모형에 비해 상관도가 높은 것을 알 수 있다. Table 2는 결과의 통계치로 구미광역취수장 지점의 실측자료와 모의자료가 상이하여 효율계수는 많이 낮게 산정되었지만 1차원 모형이 2차원 모형의 결과값보다 높게 산정되었다. 또한 평균제곱근 오차도 1차원 모형이 작게 산정

되어 재현성이 높은 것으로 사료된다.

IV. 수질사고 시나리오 분석

수질사고의 모의 외에 세 가지 시나리오를 더 구성하여 모의를 하였다. 유출사고를 그대로 재현한 모의는 오염물질의 반응계수를 추정하는 과정으로 사용되었으며 다른 시나리오와 비교하는 목적으로 시나리오 1을 사용하였다. 시나리오 2는 안동·임하댐의 추가방류를 사고 발생시간에 수행한 것으로 가정하여 플러싱 영향을 분석하였으며, 시나리오 3은 두 번째 시나리오에서 방류량을 2배로 늘려 모의하였다.

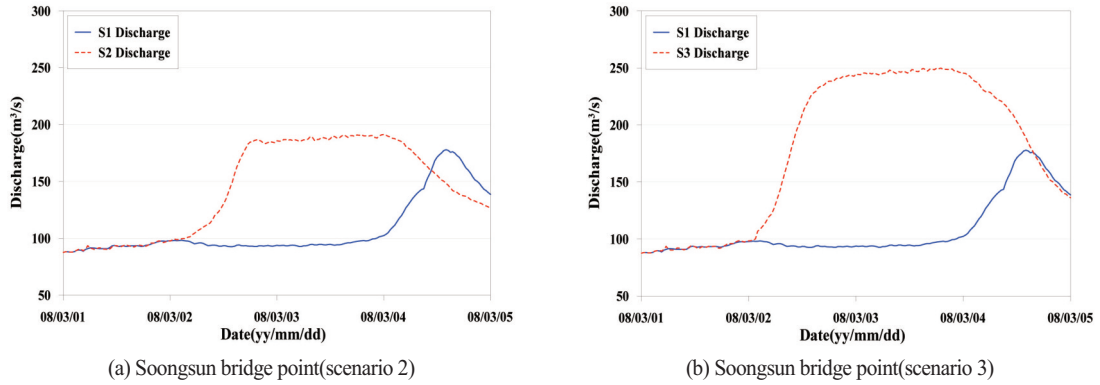


Figure 5. Comparison of discharge by toxic spill scenario

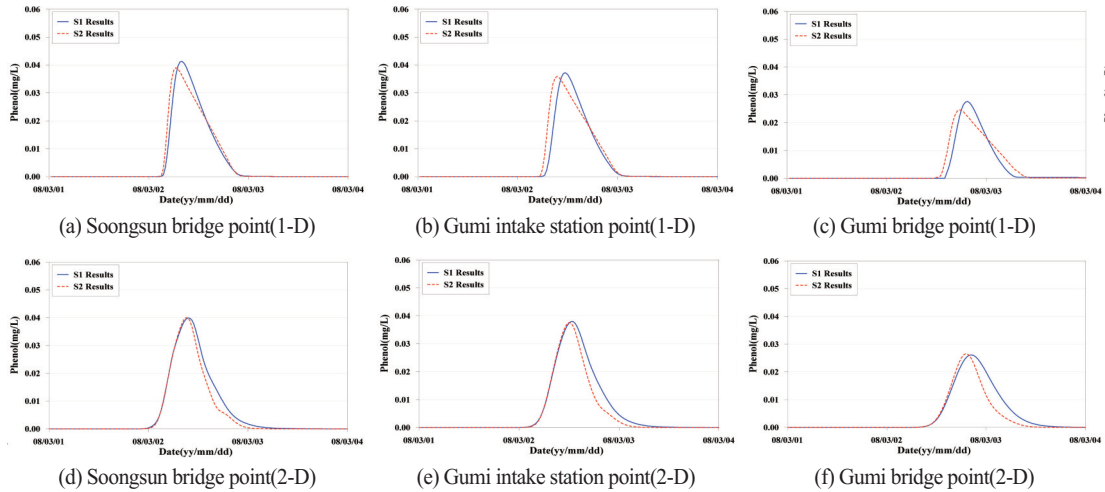


Figure 6. Scenario 2 of toxic spill

시나리오 4는 모든 조건을 시나리오 1과 동일하게 유지하고 현재의 하천 지형과 보를 반영한 모의를 수행하였다. Figure 5에 시나리오 2와 3의 유량조건을 도시하였다.

Figure 6에서 시나리오 2의 결과를 시나리오 1의 결과와 비교하였다. 시나리오 1에서 3월 2일 16시에 공급된 추가방류수의 침투는 송선대교 지점에 대략 3월 4일 13시 경에 도달하였다(Figure 6(a)). 송선대교 지점에서 독성물질은 3월 2일 6시부터 17시까지의 실측자료가 존재하며, 최대농도는 8시 30분에 발생하여 추가방류수가 송선대교 지점에서는 별다른 영향을 끼치지 못했으며, 송선대교 하류지역에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

이에 시나리오 2에서는 추가방류수의 유하시간을

고려하여 유출사고가 발생한 직후인 3월 1일 3시 반에 안동·임하댐에서 추가방류가 이루어지는 상황을 가정하였다. 모의결과 추가방류수의 침투는 송선대교 지점에서 3월 2일 17시 경에 도달하여 Figure 6(a), (d)와 같이 독성물질의 감소시에만 영향을 주는 것으로 나타났다. 송선대교와 인접한 구미광역취수장도 송선대교와 유사한 결과를 나타내었으며, 구미대교 지점에서는 추가방류수로 인하여 독성물질의 침투가 실제 사고 보다 빨리 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 사고 시간에 안동댐과 임하댐에서 70cms의 추가방류량을 방류하더라도 구미지역의 독성물질 침투량을 낮추는 것은 어려울 것으로 판단되나, 구미하류부에 위치하는 대구지역에서는 플러싱의 영향을 받을 수 있을 것이다.

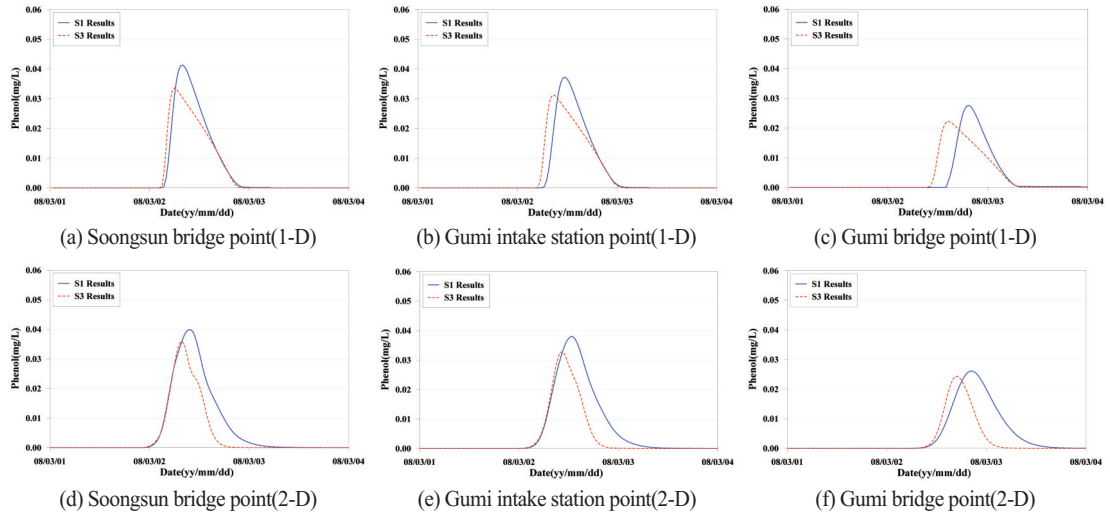


Figure 7. Scenario 3 of toxic spill

시나리오 2의 경우에서 사고 발생 시간에 추가방류를 실시했지만 승선대교와 구미광역취수장의 침두를 낮추지는 못하여 추가방류량을 2배로 늘려 140cms를 방류하는 조건으로 시나리오 3을 수행하였다. 시나리오 3에서도 시나리오 2와 같이 사고 발생시간에 추가방류량을 방류하는 조건으로 수행하였으며, 결과는 Figure 7에 나타내었다. Figure 7(a)의 승선대교 지점의 유량을 살펴보면 추가방류수의 침두는 3월 2일 14시 30분경에 도달하는 것으로 나타났으며, 유량의 침두가 도달하기 전에 유량이 상승하는 영향으로 독성물질의 침두를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

1차원 모형의 결과를 살펴보면 독성물질의 침두값이 0.041mg/L에서 0.034mg/L로 약 17% 감소하였으며, 침두 발생시간이 3월 2일 8시에서 6시로 2시간가량 단축되었다. 2차원 모형의 결과는 침두값이 0.040mg/L에서 0.036mg/L로 약 10% 감소하였으며, 침두 발생시간 역시 3월 2일 9시에서 7시 30분으로 1시간 반 가량 단축시켜 플러싱과 희석 효과가 시나리오 2에 비해 우수한 것을 확인할 수 있었다. 구미광역취수장 지점의 변화를 살펴보면 1차원 모형에서 3월 2일 11시 30분에 침두값이 0.037mg/L로 모의되었던 시나리오 1의 결과가, 8시 30분에 0.031mg/L으로 모의되어 침두시간은 3시간 단축되었으며, 침

두값은 약 16% 감소되었다. 2차원 모형의 결과는 시나리오 1의 결과에서 독성물질의 침두값이 0.037mg/L로 3월 2일 12시 경에 발생했지만, 시나리오 3의 결과에서는 10시 경에 0.033mg/L의 침두값이 발생하였다. 구미대교 지점에서 1차원 모형 결과의 변화를 살펴보면 3월 2일 19시 30분의 0.027mg/L의 침두값이 14시 30분에 0.022mg/L로 감소하였으며, 2차원 모형의 결과는 19시 30분경에 0.026mg/L의 침두값이 16시 경에 0.023mg/L로 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 8은 시나리오 1의 결과와 보 건설 후에 사고가 발생한 것으로 가정한 시나리오 4의 결과를 비교한 것이다. 시나리오 4의 결과는 보 건설과 하상준설로 인한 유속의 저하를 잘 반영하고 있다. 유속의 감소로 인하여 독성물질의 침두농도가 늦게 발생하며, 감소에 걸리는 시간 또한 오래 걸리는 것으로 나타났다. 그러나 각 지점에서 독성물질의 총량은 유지하는 것으로 판단된다.

Figure 9는 보 건설 전·후의 독성물질 전파 양상을 비교하였다. Figure 9(a), (b), (c), (d)는 시나리오 1의 결과로 각각 3월 2일 8시, 3월 3일 0시와 3월 3일 12시의 결과이며, (e), (f), (g), (h)는 같은 시간의 시나리오 4의 결과를 도시하여 보 건설 전·후의 상황을 비교하였다. 시나리오 1의 결과는 0.04mg/L

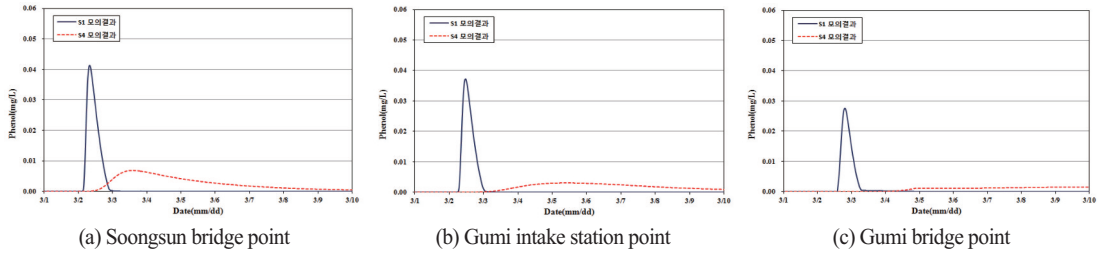


Figure 8. Scenario 4 of toxic spill(1-D model)

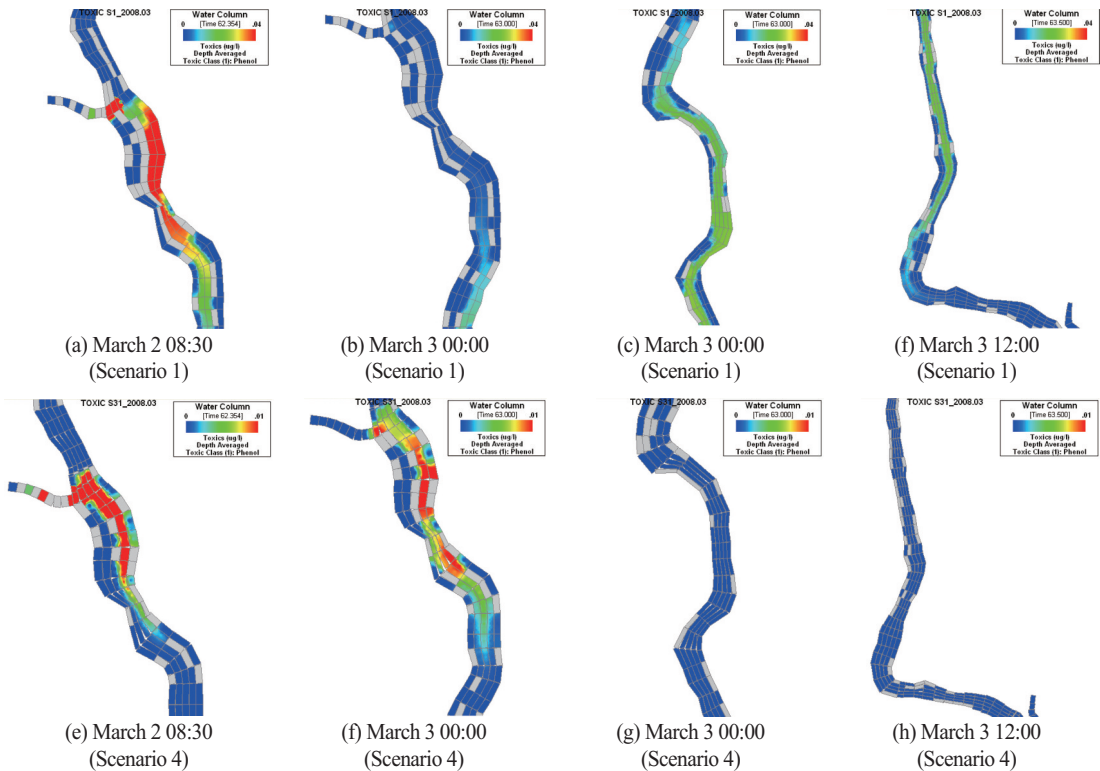


Figure 9. Scenario 4 of toxic spill(2-D model)

를 최대값으로, 시나리오 4의 결과에서는 0.01mg/L를 최대값으로 도시하였다.

Figure 9(a)는 송선대교에서 독성물질이 침투값을 나타내는 시간이며, (b)와 (c)는 같은 시간에 위치를 다르게 한 것으로 독성물질이 구미대교를 지나가고 있으며, 12시간이 경과한 (d)에서는 백천 합류부까지 전파되고 있는 것을 확인할 수 있다. 보 건설 후의 상황인 Figure 9(e)에서는 유속이 느려져 구미보까지 독성물질이 확산되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 침투값이 구미보 직하류와 송선대교 사이에 머무르는 것으로 나타났다. (f)에서는 독성물질이 송선대교

를 지나가는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 1차원 모형을 이용하여 독성물질 오염사고를 모의하고 이를 바탕으로 시나리오 분석을 수행하였다. 개발된 1차원 모형은 2차원 모형인 EFDC 모형과 비교하였을 때 재현성이 높은 것으로 판단되며 모의 수행시간이 1분미만으로 빠른 모의 결과를 획득할 수 있어 신속한 방재활동에 도움을 줄 수 있을 것이다. 또한 낙동강에 8개 보가 신설된 후

에도 보의 영향을 지형으로만 인식할 수 있는 EFDC 모형에 비해 보의 수위영향 까지 분석할 수 있어 활용성도 높을 것으로 사료된다.

향후 독성물질 뿐만 아니라 수질·조류 분석에서도 활용할 수 있으며, 보와 댐을 연계하는 시나리오 분석을 통해 국내에서 운영 중인 수질오염사고대응 예측시스템의 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2011, 실험을 통한 수질오염물질의 이송 및 확산 모의검증 기법 개발 및 적용.
- 권나영, 최현구, 유재정, 한건연, 2010, 동적수질해석모형의 개발과 낙동강에의 개발과 낙동강에의 적용, 한국수자원학회논문집, 43(3), 283-294.
- 김기철, 이종석, 2009, 하천에서 추적자를 이용한 오염물질 거동 분석, 한국콘텐츠학회논문지, 9(1), pp. 400-406.
- 문현생, 장주형, 류인구, 김주영, 2012, Web 기반의 실시간 수질오염사고대응예측시스템 개발, 한국방재학회논문집, 12(2), 145-150.
- 박노석, 김성수, 정선아, 김종오, 김도환, 강문선, 2012, EFDC를 이용한 대청댐내 보존성 오염물질 확산 모델링에 관한 연구, 상하수도학회논문지, 26(5), 705-712.
- 서일원, 백경오, 전태명, 이두현, 정성희, 2004, 자연하천의 2차원 확산해석을 위한 추적자 실험방법 개발 및 적용, 수자원의 지속적 확보 가능기술 개발 사업단 연구보고서.
- 최현구, 2012, 자료기반 해석과 물리적 모형을 연계한 실시간 하천수질예측 시스템 구축, 박사학위논문, 경북대학교.
- 환경부, 2008, 김천 폐놀사고 사례조사 보고서.
- Bo Zhang, 2008, A Study of GIS-SD Based Temporal-Spatial Modeling of Water Quality in Water Pollution Accidents, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B2, Beijing.
- Delong, L. L., 1986, Extension of the unsteady one-dimensional open-channel flow equations for the flow simulation in meandering channels with flood plains. Hydrologic Sciences, United States Geological Survey Water-Supply, Paper 2220, December, 101-105.
- Fread, D. L., 1988, The NWS DAMBRK model: theoretical background/user documentation. Office of Hydrology, National Weather Service NWS, Md.
- Mazijk A. Wan, 2002, Modelling the effects of groyne fields on the transport of dissolved matter within the Rhine Alarm-Model, J. of Hydrology 264, 213-229.
- Mazijk, A.van, Gils, J.A.G. van, and Weitbrecht, V., 2000, Analyse und Evaluierung der 2-D-Module Zur Berechnung des Stofftransportes in der Window-Version des RHEINALARMMODELLS in Theorie und Praxis, Report no. II-16.
- Samuels, William B., 2005, Using the River Spill model for Sourcewater Protection, AWWA Source Water Protection Symposium.