

수중보를 고려한 하천에서 보존성 오염물질의 이송특성 분석 - 낙동강을 중심으로 Transportation Modeling of Conservative Pollutant in a River with Weirs - The Nakdong River Case

이정우* · 배순임 · 이동률* · 서동일[†]
Jungwoo Lee* · Sunim Bae · Dong-Ryul Lee* · Dongil Seo[†]

*한국건설기술연구원 · 충남대학교 환경공학과
*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received October 29, 2014; Revised December 4, 2014; Accepted December 16, 2014)

Abstract : The 4major river project has caused changes in flow and water quality patterns in major rivers in Korea including the Nakdong River where several toxicant release accidents have had occurred. Three dimensional hydrodynamic model, the Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), was applied to evaluate the effect of geomorphological change of the river on the advection and dispersion patterns of a conservative toxic pollutant. A hypothetical scenario was developed using historical data by assuming a toxic release from an upstream location. If there is a toxic release at the Gumi Industrial Complex, the toxic material would be detected after 2.22 and 9.83 days at Chilgok and Gangjung weir, respectively, in the new river system. It was estimated that they took at least 12 times longer than those with the river conditions before the project. Effect of relocation of intake towers for Daegu Metro City to upstream of Gumi City was also evaluated using the developed modeling system. It was observed that hydraulic residence time would be increased due to decreased flow rate and thus due to lowered water level. However, peak concentration differences were found to be about 2% lower in both places due to increased dispersion effect after the relocation.

Key Words : Toxic Spill, The Nakdong River, Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), Modelling, The 4 Major River Restoration Project, Intake Tower Relocation

요약 : 4대강 사업에 따른 수중보의 건설로 인해 낙동강을 포함한 우리 나라의 주요 하천들의 물리적 특성에 많은 변화가 있었으며 따라서 오염물질의 이동 특성 또한 변화하였을 것으로 판단된다. 낙동강에서 칠곡보와 강정보를 대상으로 임의의 오염물질 유출 사고에 대비하여 대책을 수립하는데 참고할 수 있도록 3차원 수리·수질모델, Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)을 활용하여 보존성 오염물질의 이동·확산 특성을 분석하였다. 가상적인 시나리오를 구성하며 구미공단에서 독성물질의 유출이 발생하였다고 가정하였을 때 칠곡보 및 강정보 지점에 오염물질이 도달하는 시간은 각각 약 2.22일과 9.83로서 4대강 사업 전에 비해 약 12배 이상 오염물질의 이동 시간이 지연된 것으로 분석되었다. 또한 대구광역시의 취수장을 구미시상류로 이전하였을 경우에 대한 모의 결과, 구미 상류의 유량의 감소에 따른 수위 및 유속의 감소에 의한 확산 현상의 증가로 인해, 독성물질의 하류 도달시간이 증가하는 것으로 나타났으며, 독성물질의 최대 검출 농도는 약 2% 정도 감소되는 것으로 산정되었다.

주제어 : 독성물질 유출, 낙동강, EFDC, 모델링, 4대강 사업, 취수탑 이전

1. 서론

오늘날 하천수의 오염은 증가된 인간 활동에 인한 생활 하수, 공장 폐수, 축산폐수 및 농업용수의 유입 등에 의한 직접적인 원인 및 수체내 수리 구조물의 신축 등에 의한 하천의 흐름 조건의 변화에 의한 영향,¹⁾ 수체내 축적된 퇴적물에 의한 영향,²⁾ 그리고 기후변화 등에 의한 수문학적 인 변동에 의한 유입 유량 및 오염부하량의 변화³⁾ 등에 의한 간접적인 원인 등에 영향을 받고 있다.^{4,5)} 따라서 합리적인 하천 수질 관리계획을 수립하기 위해서는 하천의 수질 변화에 영향을 미치는 중요 요인을 파악하고 제어함으로써 용수원 및 하천의 적정 수질을 유지하는 노력이 필요하다.

BOD, 총인 및 총질소 등 상수원의 일반적인 수질 항목

에 대해서는 지속적인 관측과 예측 등의 노력을 통해 상대적으로 자료가 풍부한 반면, 일시적인 독성물질 사고에 의한 상수원 오염에 대한 자료의 수집이나 관련 연구가 매우 제한적으로 이루어짐에 따라 대응책 또한 미미한 실정이다. 또한 상수원에 독성물질이 유입되는 경우, 측정이나 예측이 적시에 이루어지지 못하여 오염된 상수가 공급되는 경우에 발생하는 문제는 상상의 범위를 넘어설 수도 있다.

대구시는 생활용수의 74%인 111만톤을 낙동강 하천수에서 취수하고 있으므로⁶⁾ 낙동강의 수질은 대구시 상수도 수질에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 한편 대구시 상수도 취수탑 대부분이 대구 인근 지방에 밀집해 있어 상류에 위치한 구미시와 구미공단으로부터 유해물질이 방류될 경우 직접적인 영향을 받을 우려가 있다. 낙동강 1차 폐놀(phenol) 유출 사건은 1991년 3월 14일 경상북도 구미시 구

[†] Corresponding author E-mail: seodi@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6679 Fax: 042-822-5610

포동에 있는 두산전자에서 30톤의 폐놀원액이 낙동강 본류로 유출된 사건이며, 폐놀원액은 3월 14일 밤 10시경부터 다음 날 새벽 6시까지 약 8시간 동안 유출된 바 있다.⁷⁾ 이어서 2004년 다이옥산(dioxane), 2006년 퍼클로레이트(perchlorate), 그리고 2008년 2차 폐놀 유출 사건 등 독성물질 유출사고가 수 차례에 걸쳐 발생한 바 있다.⁸⁾ 위와 같은 사건들은 전국 주요 하천 지점에 자동 측정망이 설치되는 계기를 제공하기도 하였으나 아직까지도 독성물질이 유입될 경우 하류에 미치는 영향을 파악하고 대책을 수립할 수 있게 하는 수질 예측 기술의 적용은 거의 전무하다시피 한 실정이다. 따라서 향후에 발생할 수 있는 수질 사고에 대해 신속하게 대처할 수 있는 방법을 제시할 수 있도록 상류의 수질 사고가 하류에 미치는 영향에 대한 분석이 사전에 이루어지는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 낙동강 구미지역에서부터 대구지역까지를 독성물질 이동·확산 모형의 대상구간으로 보고, 독성물질 수질사고에 따른 구미지역 하류의 독성물질 농도변화에 대해 분석하였다. 또한 안정적인 상수원 확보를 위한 대안으로써 대구시 상수원을 구미공단 상류로 이전하였을 때 발생할 수 있는 독성물질 이동 특성 변화에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 3차원 비정상상태 모델(Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC)을 이용하여 상류에서의 보존성 오염물질 유출이 하류에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 안정적인 상수원 확보를 위해 취수원을 오염원 상류로 이전하였을 경우 독성물질의 농도변화에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다.

2. 연구의 방법

2.1. EFDC 3차원 수리 및 수질 모델

독성물질 유출 사고에 대해 적절하게 대응하기 위해서는

대상지역에 대한 독성물질 이동·확산 모형의 구축 및 활용이 매우 중요하다. 독성물질 이동·확산 모형은 장래 수질사고에 대해 최대 농도, 오염 물질의 도달 시간, 그리고 제거되는데 소요되는 최소 시간 등을 예측하는데 활용될 수 있어 수질사고에 대해 효율적 대처 방법을 수립하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 수질 모델은 물질보전에 근거하여 각 수질 요소간의 상호작용에 의한 물질교환 계산하는 수식으로 구성되어 있으며, 유체의 이송과 확산에 의한 부분은 수리모델 또는 수리동역학 모델을 활용한다. 하천에서의 수질변화는 물의 이동에 직접적인 영향을 받기 때문에 정확한 수리동역학적 해석이 반드시 선행되어야 한다.^{9,10)}

수리모델은 컴퓨터 성능의 발달로 대부분 공간적으로는 3차원, 그리고 시간적으로는 비정상상태 모델의 사용이 점차 증가는 추세에 있다.¹¹⁾ 폭이 좁고 수심이 낮은 하천의 경우 1차원 또는 2차원 수리모델로도 오염물질의 이동특성을 예측할 수 있으나, 수심이 깊고 폭이 넓은 하천에는 3차원 모델을 적용하는 것이 수리학적 특성을 분석하는 데 있어서 정확성을 높일 수 있다. 또한 시간에 따라 변화하는 수리현상을 모의하기 위해서는 비정상상태 모델의 활용이 요구된다. EFDC 모델은 수리, 수질, 부유사 확산, 그리고 독성 모형을 포함하고 있는 3차원 모델이며¹²⁻¹⁴⁾ 해양뿐만 아니라 하천의 수리·수질 연구에 다양하게 적용된 모델로써^{1,15-19)} 본 연구에 적합한 모델로 판단하였다.

2.2. 연구 대상 지역 및 모형의 물리적 구성

본 연구의 대상지역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 낙동강 본류 중 구미 상류에 위치한 구미보에서부터 대구 하류에 위치한 강정보까지 약 53 km 구간으로 선정하였다. 연구대상지역은 4대강 사업 이후 수중보의 건설로 물의 흐름 특성이 크게 변화된 지역으로써 보의 건설로 인해 (1) 구미보 - 칠곡보 28 km 구간과 (2) 칠곡보 - 강정보 25 km 구간으로 물리적으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 두 개의 구간에

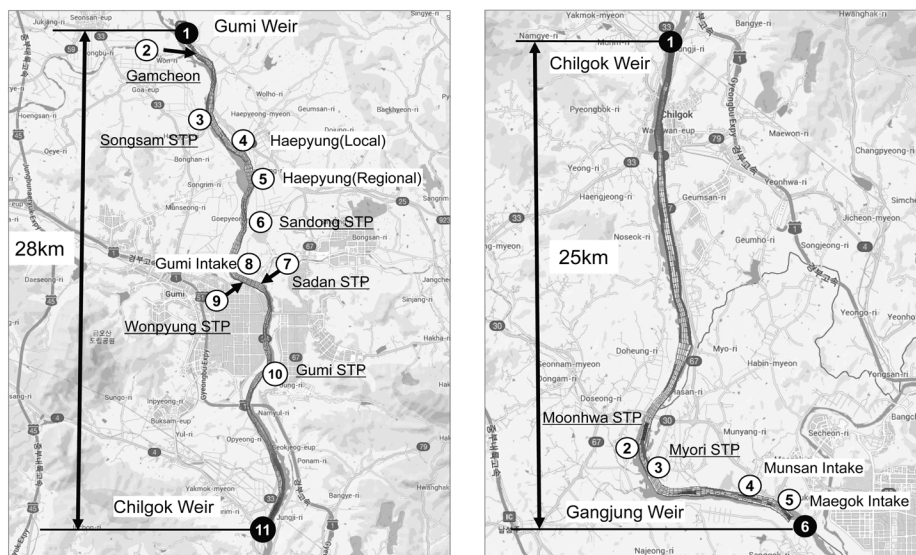


Fig. 1. Locations of major inflow and outflow points and horizontal grids for modeling of this study.

대해 각각의 격자와 경계조건을 구성하였으며, 제 (1) 구간에서의 유출수를 제 (2) 구간에서의 유입수로 이용하여 모델을 구성하였다. 모델 격자의 구성은 하천의 횡방향으로 하천을 따라 5개로 구분하였으며, 제 1구간인 ‘구미보 - 칠곡보’구간은 670개, 제 2구간인 ‘칠곡보 - 강정보’구간은 615개의 수평격자를 구성하였다. 또한 수층별 확산형태를 모의하기 위해 5개의 수직격자로 수층을 나누었다. 수평격자의 종방향 거리에 대한 횡방향 거리의 비(aspect ratio, dx/dy)는 약 0.2로써 종방향 거리가 횡방향 거리에 비해 다소 긴 형태를 갖는다. 구미공단에서의 오염물질 유출사고에 대한 하류에서의 독성물질 확산 형태를 모의하기 위해 구미보에서 유출되는 유량은 변동이 없는 정상상태(steady state)로 가정하였으며, 다른 모든 유입 또는 유출 유량에 대해서도 정상상태를 가정하였다. 모델은 안정화 단계를 제외하고 총 60일간 모의하였다.

2.3. 모델 입력자료 및 시나리오의 구성

연구대상구간 내에 위치한 지천 중 ‘감천’을 제외한 모든 지류의 영향은 그 영향이 미미하다고 판단하여 본 연구에서 제외하였다. 단, 연구대상지역내에 위치한 취수장의 (해평지방, 해평광역, 문산, 매곡 취수장) 취수량과 하수처리장의 (송삼, 산동, 원평, 4단, 구미 하수처리장) 방류량 및 방류수 수질 정보는 환경부의 2012년 상수도 통계²⁰⁾ 및 하수도 통계²¹⁾를 참고 하였다. 오염물질 유출 시 최악의 상황을 고려하기 위해 구미보에서의 방류량은 4대강 사업이 시행되기 전 10년간의 평균 갈수량(63.95 m³/s)을 사용하였다. 감천의 유입 유량은 2010년 갈수량인 1.29 m³/s를 사용하였으며 모의기간동안 유량변동은 없는 것으로 가정하였다.

대구지역은 대부분의 상수원을 ‘문산취수장’과 ‘매곡취수장’에 의존하고 있으며, 상류에서 독성물질 유출 사고가 발생할 경우 상수원이 직접적으로 영향을 받을 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 ‘문산·매곡취수장’을 폐쇄하고, 대신 구미 상류에 위치한 ‘해평(광역)취수장’에서 취수량을 증가시키는 시나리오를 추가하여 분석하였다. 단, 증가된 취수량은 기존 문산·매곡 취수량(6.44 m³/s)에 추가 계획량(1.36 m³/s)을 반영한 것으로서 총 7.8 m³/s 에 해당한다.

하천에서 오염물질은 자연분해 작용으로 식 (1)과 같이 1차 반응식을 이용하여 표현하는 것이 일반적인 방법이다:

$$C_t = C_{t_0} e^{-kt} \tag{1}$$

여기서 C_t 는 특정시간에 오염물질의 농도, C_{t_0} 는 오염물질의 초기 농도, 그리고 k 는 오염물질의 분해율이다. 여기서 감소율은 오염물질 자체의 물질적 특성을 나타내기도 하지만, 다른 환경변수(예, 온도 또는 다른 오염물질)에 의해 변하기도 한다. 따라서 지역 및 시간에 따라 k 값은 변할 수 있다. 본 연구의 대상 독성물질인 페놀의 경우 다양한 종류가 존재하며, 일반적으로 페놀의 감소율은 약 0.0-1.0/day로 알려져 있다.^{9,22)} 페놀의 한 종류인 옥틸페놀(Octylphenol)의

경우 반감기가 약 7~50일인 것으로 알려져 있으며,²³⁾ 부유물질이나 토사 등에 흡착되어 혐기성 상태에서는 분해율이 감소하거나 거의 분해가 되지 않는 것으로 알려져 있다.²⁴⁾ 따라서 하천 저니 층에서의 페놀의 농도는 하천수에서 검출되는 페놀의 농도에 비해 높게 나타나는 경우²⁵⁾도 자주 보고된 바 있다. 보다 정확한 연구를 위해서는 연구대상지역에 유출된 페놀의 정확한 성분 및 반응특성을 파악해야 하며, 페놀 유출 사고 시 주변 환경에 대한 이해 또한 필요하다. 그러나 본 연구에서는 1991년 낙동강 페놀유출 사고에 대한 정확한 자료 확보가 불가능함에 따라 1991년 페놀유출 사고를 최대한 단순화하였다. 페놀을 보존성 또는 난분해성으로 간주하여 반응계수를 0으로 가정하였으며, 부유사와의 흡착 또는 하천 저니층과의 상호작용(settling and resuspension) 또한 무시하였다. 따라서 본 연구의 결과는 동일조건인 실제 페놀유출 사건에 비해 검출 농도가 높은 최악의 상태를 가정하고 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 가상적인 상황에서 독성물질이 구미공단에서 8시간 동안 총 30 ton (9.74 × 10⁴ m³/s)이 낙동강 본류로 유입되는 것으로 설정하였다. 독성물질은 100% 원액이 유입되는 것으로 보았으며 페놀의 경우 1.07 × 10⁶ mg/L의 농도에 해당한다.

2.4. EFDC 모델의 보정

모델의 모의 결과는 모델 적용의 적합성을 알아보기 위해 실제 자료와의 비교가 반드시 필요하다. 그러나 낙동강 1차 페놀 유출 당시 연속적인 측정 자료는 존재하지 않음에 따라 본 모델에서 사용한 독성모델의 보정 또는 검증은 불가능하였다. 본 연구에서는 2012년 9월부터 2013년 6월까지의 수위자료를 이용하여 낙동강 주요 지점에 대하여 수위 보정을 실시하였으며, 보정 결과를 본 연구에 활용하였다. 주요 수위 보정 지점 중 칠곡보 지점 및 강정보 지점에서의 수위 보정 결과 mean absolute error (MAE)는 각각 0.27 m와 0.45 m이며 이를 Fig. 2와 3에 각각 나타냈다.

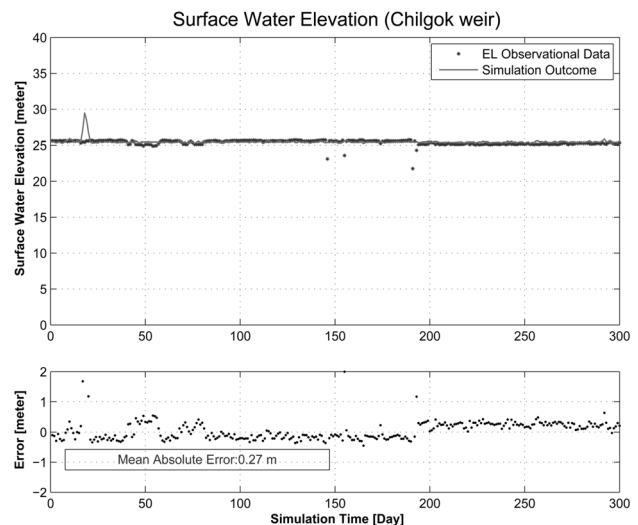


Fig. 2. Water surface elevation calibration result at the ‘Chilgok weir’.

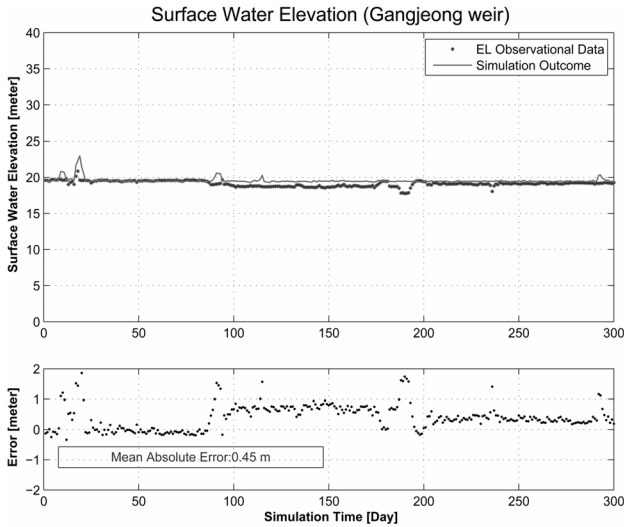


Fig. 3. Water surface elevation calibration result at the 'Gangjeong weir'.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염물질 이동 특성 분석

위와 같은 조건을 이용하여 EFDC 모델을 수행한 결과 2014년 현 상태에서 구미공단에서 비반응성 오염물질의 유출사고가 발생할 경우, 구미공단 직하류에 위치한 칠곡보 지점에 오염물질의 최초 도달시간은 Fig. 4에 나타나 바와 같이 오염물질 유출 후 약 2.22일이 소요되는 것으로 모의되었다. 최대농도(peak concentration)는 유출 후 5.21일에 발생하며 1.563 mg/L로 나타났다. 또한 오염물질은 12.57일 동안 지속적으로 검출되는 것으로 모의되었다(Fig. 4, Table 1). 대구시에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 강정보 지점까지는 최초 유출 후 9.83일 후에 도달하며, 최대농도는 0.374 mg/L이며 유출 후 약 16.06일 후에 발생하는 것으로 모의되었다. 또한 검출 지속시간은 26.3일로 상류에 위치한 칠곡보 지점에서 보다 13.73일 더 오랜 기간 동안 잔류하는 것

Table 1. Toxic concentration differences between before (current) and after the relocation of intake towers

Terms	Chilgok weir			Gangjeong weir		
	Before	After	Difference	Before	After	Difference
Time of arrival (day)	2,22	2,38	0,16	9,83	11,04	1,21
Time to peak concentration (day)	5,21	5,92	0,72	16,06	18,46	2,4
Peak concentration (mg/m ³)	1,563	1,531	-0,032	0,374	0,365	-0,009
Detection duration (day)	12,57	14,66	2,09	26,3	30,54	4,24

으로 모의되었다.

낙동강 1차 폐놀유출 사건 당시 낙동강 본류에서 연속적으로 측정된 폐놀 농도는 존재하지 않으며, 7개 지점(다사, 구미, 칠서, 고령교, 수산, 낙동대교, 구지면)에서의 순간 관측 자료만이 측정된 바 있다.⁹⁾ 이 중 본 연구의 강정보 위치에 해당하는 '다사' 관측소에서는 구미공단에서 폐놀유출 추정 시점인 1991년 3월 14일 22시에서 53.5시간 후인 1991년 3월 17일 03:30분에 0.0035 mg/L로 관측되었다. 또한 유출 시점으로부터 약 5일 후인 3월 19일에는 0.0055 mg/L로 농도가 증가하는 것으로 관측되어 아직 최대농도에 도달하지 않았던 것으로 추정된다. '수산'관측소에서의 실측 자료와 조와 전⁹⁾의 연구결과에서는 '수산'관측소에서의 최대농도가 구미공단에서 폐놀 유출 후 약 5일(120시간) 이후에 나타난다고 보고하였다. 1991년 정부 보도자료에 따르면 폐놀 유출로부터 약 이틀 후인 1991년 3월 16일에 대구시 수돗물에서 폐놀로 인한 악취가 발생하였다고 한다.⁶⁾ 먼저 상기의 연구결과를 토대로 최대 농도의 이송 속도를 계산하면 0.34 m/s를 얻을 수 있다; '폐놀 유출지점부터 수산까지 거리(147 km) / '수산 관측소에서 최대 농도 발생시간(120 h)' = 0.34 m/s. 또한 같은 방법을 사용했을 때 본 연구에서는 최대 농도의 이송 속도는 0.028 m/s이다; '폐놀 유출지점부터 강정보까지 거리(39 km) / '강정보에서 최대 농도 발생시간

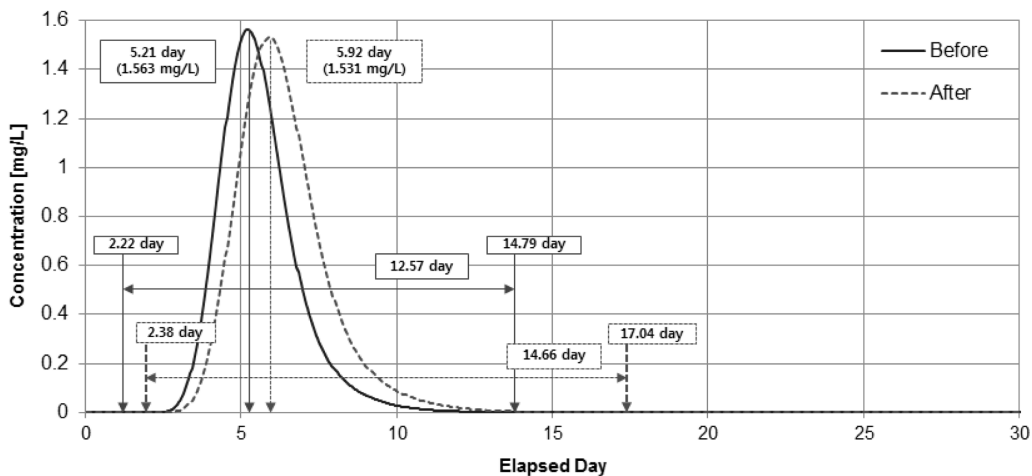


Fig. 4. Transportation patterns of the toxic material at the Chilgok weir.

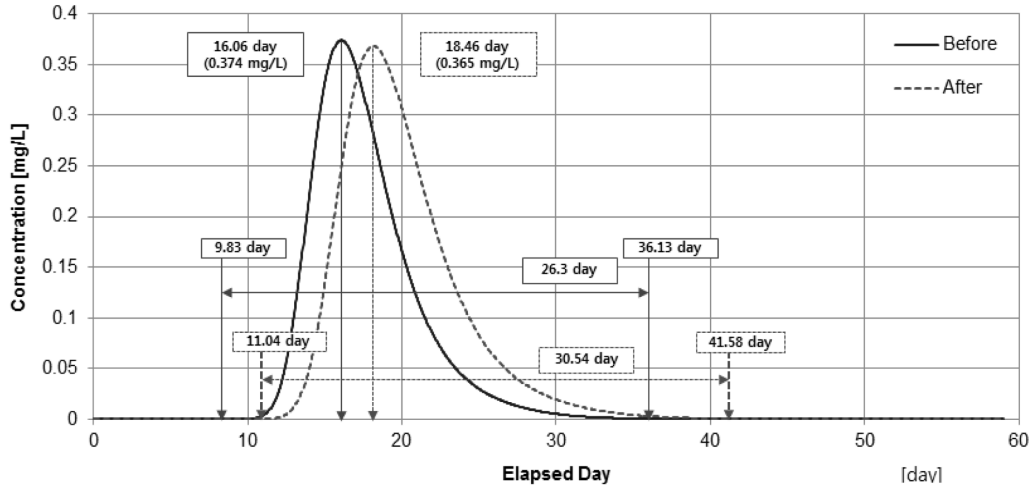


Fig. 5. Transportation patterns of the toxic material at the Gangjung weir.

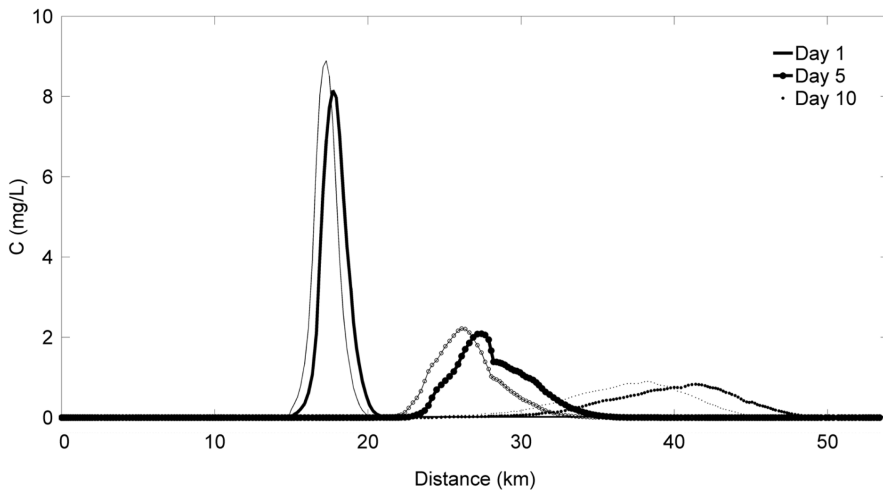


Fig. 6. Laterally and vertically averaged concentrations of the toxic material along the river (Gumi weir at 0 km, toxic release at 14 km, Chilgok weir at 28 km, and Gangjung weir at 54 km). The bold and thin lines (line, circled, and dotted lines) denote the results of the before (current) and after the relocation of intake towers, respectively.

(16.06 day)^{*} = 0.028 m/s. 따라서 실측자료와 기존 연구 결과를 산술적으로 비교해보면 4대강 사업 이전에는 구미공단에서 유출된 독성물질이 4대강 사업 이후인 현재보다 최소한 12배 이상 빠르게 하류로 이송되었음을 나타낸다. Seo¹⁾은 4대강 사업으로 인해 강정보의 체류시간은 사업 전에 비하여 월평균 3.66~16.66배 및 연평균 11.60배 증가하였으며, 달성보의 경우 월평균 2.23~9.58배 연평균 6.74배 증가한 것으로 산정된다고 보고한 바 있다. 본 연구는 갈수기의 평균 조건을 대상으로 분석을 실시하고 있으므로 상기한 바와 같은 유속의 변화는 충분히 설득력이 있는 것으로 판단된다.

3.2. 취수위치 이동에 다른 영향 분석

대구지역에 위치한 두 개의 취수장(매곡, 문산취수장)을 구미 상류로 이전하는 경우를 가정하여 동일한 조건의 오염물질 유입 시나리오를 적용한 결과 상류의 유량 감소로 인해 낙동강의 유속이 감소되는 것으로 나타났다. 오염물

질의 이동 특성은 Fig. 4와 5 그리고 Table 1에 나타난 바와 같다. 칠곡보 지점에서는 취수장 이전에 따라 독성물질이 0.16일 또는 3시간 50분가량 늦게 도달하며, 최대농도 발생 시간도 0.71일 또는 약 17시간가량 늦춰지는 것으로 나타났다. 강정보 지점에서도 칠곡보 지점과 같이 취수장 이전으로 인하여 오염물질 도달 시간이 지연되었으며(1.21일 또는 약 29시간), 최대농도 발생시간도 약 2.4일 또는 33시간 30분가량 일 지연되는 것으로 모의되었다. 취수장 이전 시 분류 유량이 줄어들었음에도 불구하고 칠곡보와 강정보 지점에서 최대농도가 소폭 감소하는 것으로 분석되었으며(Table 1), 이는 오염물질 유출 후 하류로 갈수록 체류시간의 증가로 인하여 확산에 의한 영향이 증가하기 때문으로 판단된다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 오염물질 방류 초기 및 방류지점 인근에서는 취수장 이전 후의 농도가 높은 것을 알 수 있다. 그러나 하류로 이동할수록 확산 현상에 의해 최대농도의 차이가 감소되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

독성물질 유출사고가 발생한 바 있는 낙동강 본류, 구미 지역에서 대구지역까지 3차원 수리·수질 모델인 EFDC를 이용하여 1991년 발생한 폐놀유출사고 참고하여 시나리오를 구성하였다. 4대강 사업 후인 현재 지형을 고려하여 모델을 구성하였으며, 4대강 사업 전·후의 수리확산 특성을 비교·분석하고자 하였다. 또한 대구지역에 위치한 매곡 취수장과 문산 취수장을 구미시 상류에 위치한 해평(광역) 취수장으로 이전하는 시나리오를 추가모의 하였다.

구미공단에서 임의의 독성물질이 낙동강 본류로 유출될 경우 결과 독성물질은 칠곡보와 강정보에 각각 2.22일과 9.83일 후 도달하는 것으로 모의되었다. 이는 4대강사업 이전인 1991년에 비해 오염물질의 하류로의 이송이 최소한 12배 가량 지연되는 수준으로 분석된다. 이러한 결과는 신설된 보로 인하여 물의 흐름이 차단되어 하천의 유속이 현저하게 감소하여 따라서 수리학적 체류시간이 증가하였기 때문으로 판단된다. 오염물질의 도달 시간이 지연되는 것은 독성물질 유출 시 대처할 수 있는 시간이 증가되는 것을 의미하며, 본 연구의 가정과는 다르게, 독성 오염물질이 분해되는 물질인 경우 이동 중 자연 분해되는 현상이 증가될 수 있다. 반면 체류시간의 증가는 독성물질의 수체내 지속시간을 증대시키는 악영향을 발생시킬 수도 있으며 퇴적물 등에 흡착되는 경우 장기간 수체내에 머무르면서 수질에 영향을 미칠 수도 있다.

대구시에 상수를 공급하는 취수장을 상류로 이전하는 경우 낙동강 본류의 희석유량 감소로 인하여 독성물질이 유입되는 인근 지역에서는 완충능력이 저하되어 독성물질의 농도가 증가하는 현상이 발생하게 된다. 반면 본 연구에서 구축된 모델을 이용하여 분석한 결과 구미 상류의 유량이 감소함에 따라서 수위 및 유속이 감소하게 되며 이는 독성물질이 유입되는 경우 칠곡보 및 강정보에 도달하는 시간이 각각 0.16일 및 2.4일 지연되는 현상이 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 유속 감소에 따른 희석 효과가 우세해짐에 따라 칠곡보와 강정보 지점에서 오염물질의 최대 농도가 각각 0.2% 및 2% 가량 감소되는 것으로 분석되었다.

Acknowledgment

본 연구는 한국건설기술연구원 2014년 주요사업(2014-0214)의 연구비로 수행되었으며 이에 감사합니다.

KSEE

References

1. Seo, D., Kim, M. and Ahn, J. H., "Prediction of Chlorophyll-a Changes due to Weir Constructions in the Nakdong River

Using EFDC-WASP Modelling," *Environ. Eng. Res.*, **17**(2), 90~95(2012).

2. Seo, D. I. and Canale, R. P., "Sediment Characteristics and Total Phosphorus Kinetics in Shagawa Lake," *J. Environ. Eng., ASCE*, **125**(4), 346~350(1999).

3. Han, Y. and Seo, D. "Application of LID Methods for Sustainable Management of Small Urban Stream Using SWMM," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 691~697(2014).

4. Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J. and Lammers, R. B., "Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth," *Science*, **289**, 284~288(2000).

5. Billen, G., Garnier, J., Ficht, A. and Cun, C., "Modeling the response of water quality in the Seine River estuary to human activity in its watershed over the last 50 years," *Estuaries*, **24**, 977~993(2001).

6. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, The feasibility study of the relocation of drinking water intake towers from the Nakdong River, p. 665(2008).

7. Choi, M. O., "A Case Study of Environmental Policy Formation : A Focus on the Phenol Spills in Nakdong River of 1991 and 2008," *GRI Rev.*, **15**(1), 91~112(2013).

8. Korea Development Institute, Drinking water resource projects in Kyeongbuk and Daegu, pp. 474(2011).

9. Cho, S. W. and Jun, K. S., "Dispersion of Nonconservative Contaminants Accidentally Released into Natural Streams," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **34**(4), 289~301(2001).

10. Yoon, J. S., Shin, C. K. and Hwang, D. J., "Diffusive Estimation of the Conservative Contaminant in River Estuary," *J. Environ. Sanitary Eng.*, **23**(3), 47~57(2008).

11. Lee, J. and Lee, J., "Introduction to river/estuary/ocean circulation models," *Magazine Kor. Water Resour. Assoc. - Water Future*, **46**(11), 73~82(2013).

12. Hamrick, J. M., Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects, Virginia Institute of Marine Science, School of Marine Science, College of William and Mary, pp. 126(1992).

13. Ji, Z. G., Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries, Wiley-Interscience, pp. 704(2008).

14. Wu, G. and Xu, Z., "Prediction of algal blooming using EFDC model: Case study in the Daoxiang Lake," *Ecol. Model.*, **222**(6), 1245~1252(2011).

15. Park, K., Jung, H. S., Kim, H. S. and Ahn, S. M., "Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea," *Mar. Environ. Res.*, **60**(2), 171~193(2005).

16. Kim, S. J., Seo, D. I. and Ahn, K. H., "Estimation of Proper EFDC Parameters to Improve the Reproducibility of Thermal Stratification in Korea Reservoir," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **44**(9), 741~751(2011).

17. Seo, D., Sigdel, R., Kwon, K. H. and Lee, Y. S., "3-D hydrodynamic modeling of Yongdam Lake, Korea using EFDC," *Desalination Water Treat.*, **19**(1), 1~7(2010).

18. Seo, D. and Kim, M., "Application of EFDC and WASP7 in series for Water Quality Modeling of the Yongdam Dam, Korea," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **44**(6), 439~448(2011).

19. Seo, D. and Song, Y., "Application of 3-D Hydrodynamics and Water Quality Model of the Youngsan River, Korea," *Desalination Water Treat.*, **11**, 1~9(2014).
20. Ministry of Environment, 2012 statistics of water works, (2013).
21. Ministry of Environment, 2012 statistics of sewerage(2013).
22. Cho, S. W. and Jun, K. S., "Numerical simulation of the 1991 Nakdong River phenol accident," *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **33**(1), 673~678(2000).
23. Błędzka, D., Grylik, D. and Miller, J. S., "photolytic degradation of 4-tert-octylphenol in aqueous solution," *Environ. Protect. Eng.*, **35**(3), 235~247(2009).
24. Johnson, A. C., White, C., Bhardwaj, L. and Jürgens, M. D., "Potential for octylphenol to biodegrade in some english rivers," *Environ. Toxicol. Chem.*, **19**(10), 2486~2492(2000).
25. Ying, G.-G., Williams, B. and Kookana, R., "Environmental fate of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates-a review," *Environ. Int.*, **28**(3), 215~226(2002).