大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第29卷 第3B號 · 2009年 5月
pp. 221 ~ 230

팔당호에 유입된 비보존성 오염물질의 혼합거동

Mixing Characteristics of Nonconservative Pollutants in Paldang Lake

서일원* · 최남정** · 전인옥*** · 송창근****
Seo, Il Won · Choi, Nam Jeong · Jun, In Ok · Song, Chang Geun

Abstract

In Korea, many water intake plants are easily affected by effluents of sewage treatment plants because sewage treatment plants are usually located upstream or nearby the plants of the same riverine area. Furthermore, the inflow of harmful contaminants owing to pollutant spills or transportation accidents of vehicles using the roads and bridges intersecting the river causes significant impact on the management of water intake plants. Paldang lake, the main water intake plants in Korea, is especially exposed to various water pollution accidents, because the drainage basin area is significantly large compared to the water surface area of the lake. Therefore it is necessary to predict the possible pollutant spill in advance and consider measurements in case of water pollution. In this study, water quality prediction was performed in Paldang Lake in Korea durig the dry season using two-dimensional numerical models. In order to represent the cases of pollutant accidents, the difference of pollutant transport patterns with varying injection points was analyzed. Numerical simulations for hydrodynamics of water flow and water quality predictions were performed using RMA-2 and RAM4 respectively. As a result of simulation, the difference of pollutant transport with the injection points was analyzed. As a countermeasure against the pollutant accident, the augmentation of the flow rate is proposed. In comparison with the present state, the rapid dilution and flushing effects on the pollutant cloud could be expected with increase of flow rate. Thus, increase of flow rate can be used for operation of water intake plants in case of pollutant spill accidents.

Keywords : *Paldang Lake, non-conservative pollutant, pollutant spill accident, mixing characteristics, two-dimensional numerical model, RAM4*

요 지

국내 주요 상수 취수원은 동일한 하천 및 호수에 하수 처리장이 위치해 있어 처리 방출수로 인한 악영향을 받게 된다. 또한 하천을 따라 건설된 도로나 교량에서 발생하는 교통사고나 수질 오염사고로 인한 하천 내의 오염물 유입은 취수장 운영에 큰 어려움을 주게 된다. 특히 우리나라 주요 상수원에 해당하는 팔당호의 경우 호수면적에 비해 유역면적이 상당히 크기 때문에 다양한 수질 오염사고에 노출되어 있다. 따라서 사전에 발생 가능한 수질사고를 모의하고 이에 대한 대책을 모색하는 일이 매우 중요하다. 본 연구에서는 팔당호 주변에서 발생할 수 있는 수질 오염사고에 대한 수질모의를 수행하였다. 2차원 수치모형을 이용하여 사고로 유입된 오염물질의 혼합거동을 모의하였고, 팔당호에 위치한 주요 취수장에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해서 2차원 흐름모형인 RMA-2를 이용하여 유속장을 모의하고, 이 결과를 2차원 하천수질 해석모형인 RAM4에 입력하여 오염물질의 시간에 따른 거동을 분석하였다. 갈수기 수질사고 발생시 저감방안으로써 남한강과 북한강의 유량증대에 따른 오염물질의 희석 및 수세 효과에 대해 분석하였다. 분석결과 유량증대에 따라 오염물질의 최대 농도는 더 높아지면서 더 빠르게 이동하는 현상을 관찰할 수 있었다. 따라서 오염물질이 주입된 지점에서의 초기 희석 효과보다는 빨라진 흐름에 의한 수세 효과가 훨씬 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 이를 통해 독성 오염물질로 인한 수질사고 발생시 유량증대에 의한 수세 효과가 취수장 운영에 있어 유리한 대책이 될 수 있음을 확인할 수 있다.

핵심용어 : 팔당호, 비보존성 오염물질, 수질 오염사고, 혼합거동, 2차원 수치모형, RAM4

1. 서 론

우리나라의 수자원 이용현황을 살펴보면 전체 수자원의 90%를 하천과 댐에서 얻고 있다. 따라서 하천에서의 수량 및 수질 관리가 매우 중요하다. 우리나라의 주요한 상수원인 팔당호에서는 2천만 수도권 시민에게 생활용수를 공급하기 위하여 일일 3,400,000 m^3의 상수원수를 취수하고 있다(환경부, 2004). 팔당호의 경우, 호수면적에 비하여 유역면적이

*정회원 · 교신저자 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (E-mail : seoilwon@snu.ac.kr)
**University of Illinois at Urbana-Champaign 박사과정 (E-mail : choi128@uiuc.edu)
***서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석사과정 (E-mail : jioda85@snu.ac.kr)
****정회원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사수료 (E-mail : bay680@snu.ac.kr)

매우 크며, 남한강, 북한강 그리고 경안천이 유입되기 때문에 다양한 오염원으로 부터의 수질오염에 취약한 구조를 가지고 있다. 또한 우발적인 오염물질의 누출 사고는 자주 발생하는 것은 아니나, 일단 이러한 사고가 발생하게 되면 하류의 상수원 등에 심각한 위협을 초래할 수 있으므로 이에 대한 정확한 예측이 필요하다(조성우와 전경수, 2001). 따라서 팔당호에서 발생 가능한 수질사고를 사전에 조사, 분석하고 이에 대한 대책을 세우는 것이 매우 중요한 일이다.

하천에서 오염물질이 유입되어 혼합되는 과정은 크게 두 단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 단계는 근역혼합으로서, 유입되는 오염물질이 가지는 부력과 모멘텀이 혼합 과정에 큰 영향을 미치는 영역이다. 대부분의 하천의 경우, 수심이 상대적으로 작기 때문에 근역에서 수심 방향 혼합이 완료된다. 두 번째 단계는 원역혼합단계로서 근역혼합 후에 부력과 초기 모멘텀의 영향이 감소하면서 하천의 난류와 흐름에 따라 혼합이 진행되는 영역이다. 근역에서의 혼합거동을 살펴보기 위해서는 3차원 이송-확산 방정식이 필요하다. 그러나 수심방향으로 혼합이 완료된 후에는 수심방향 농도 변화는 무시되며 수평 방향과 흐름방향의 농도 변화가 중요해진다. 여기서는 수심 평균된 농도장을 해석하기 위하여 2차원 이송-분산 방정식을 사용할 수 있다. 2차원 하천해석 수치모형 중 국내외에서 많이 사용하고 있는 모델 중 하나는 RMA 모형이다. RMA 모형은 미공병단 수로 실험소(Waterways Experiment Station)의 TABS-2모형을 원형으로 하며, Resource Management Association사의 이름을 따서 명명되었다. 2차원 수질해석 모형인 RMA-4는 2차원 흐름해석모형인 RMA-2와 함께 GUI 지원모형인 SMS와 결합하여 널리 사용되고 있다. RMA 모형은 Gee와 Wilcox(1985)가 흐름 및 오염물 확산 해석에 적용한 이래로 국내외에서 활발하게 적용되어 왔다. 박무종 등(1994)은 한강하류부에서 RMA-4를 사용하여 오염물질의 이송확산 분석을 수행하였고, 김형일 등(1998)은 한강하류부에서 RMA 모형을 적용한 결과 하폭이 넓은 하천에 대한 수치해석 수행 시에는 2차원 모델이 필요함을 입증한 바 있다. 오정선 등(2004)은 사행하천에 RMA-2와 RMA-4 모형을 적용한 결과, 오염원이 최대유속선과 비슷한 경로로 이동하는 경향이 있음을 밝힌 바 있다. RAM4는 국내에서 개발된 2차원 하천 수질해석 프로그램으로서 사행하천에서의 오염물질의 혼합거동을 정확하게 재현하지 못하는 RMA-4의 단점을 보완한 모형이다(서일원, 2008). 또한 RAM4는 수질사고 등에 의해 순간적으로 유입되는 질량 형태의 오염물질을 모의영역의 경계와 내부 격자에 직접 입력할 수 있어서 오염물질의 사고 유입을 모의하는 데에 매우 적합한 모형이다(Lee와 Seo, 2007).

본 연구에서는 팔당호 주변에서 발생할 수 있는 수질 오염사고에 대한 수질모의를 수행하였다. 2차원 수치모형을 통하여 사고로 유입된 오염물질의 혼합 거동을 모의하였고, 팔당호에 위치한 주요 취수장에 미치는 영향을 분석하였다. RMA-2를 이용하여 유속장을 모의하고, 이 결과를 RAM4에 입력하여 시·공간에 따른 오염물질의 농도 분포를 분석하였다. 또한 수질사고 발생시 저감방안으로써 남한강과 북한강의 유량 증대에 따른 오염물질의 희석 및 세척 효과를 분석하였다.

2. 수치모형 개요

2.1 RMA-2 모형

본 연구에서는 기존의 하천수리 해석에 가장 빈번히 사용된 모형으로서 다양한 연구를 통해 검증이 잘 이루진 RMA-2를 사용하였다. 흐름모형인 RMA-2는 천수방정식을 지배방정식으로 하는 2차원 유한요소 수치모형으로서 상류흐름(subcritical flow)의 수위와 수평 방향의 2차원 유속 성분을 계산한다. RMA-2의 지배방정식은 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식을 시간에 대하여 적분한 Reynolds 방정식을 다시 수심에 대하여 적분한 천수 방정식으로서, 이는 다음 식 (1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t}+h\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+u\frac{\partial h}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$h\frac{\partial u}{\partial t}+hu\frac{\partial u}{\partial x}+hv\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left(\varepsilon_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\varepsilon_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+gh\left(\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}\right)$$
$$+\frac{n^2 gu}{h^{1/3}}\sqrt{(u^2+v^2)}-\zeta V_a^2\cos\psi-2hwv\sin\phi=0 \tag{2}$$

$$h\frac{\partial v}{\partial t}+hu\frac{\partial v}{\partial x}+hv\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left(\varepsilon_{yx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\varepsilon_{yy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+gh\left(\frac{\partial a}{\partial y}+\frac{\partial h}{\partial y}\right)$$
$$+\frac{n^2 gv}{h^{1/3}}\sqrt{(u^2+v^2)}-\zeta V_a^2\sin\psi+2hwv\sin\phi=0 \tag{3}$$

여기서 ρ는 유체의 밀도, ε은 와점성계수, a는 하상고, g는 중력 가속도, n은 Manning의 조도계수, ζ는 바람에 의한 전단계수, V_a는 풍속, ψ는 풍향, ϕ는 국지 위도, ω는 지구의 회전 각속도를 나타낸다.

RMA-2 모형은 수치기법으로 유한차분법의 일종인 가중잔차 Galerkin 법을 사용하고 있으며, 공간에 대한 적분법으로 Gaussian 적분법, 시간에 대한 적분법으로 비선형 유한차분 근사법을 이용한다. 유한차분법의 형상함수는 유속에 대해서 2차 함수이며, 수위에 대해서는 1차 함수로 혼합보간기법이 적용된다. 해를 구하는 방법으로는 완전 음해법, 반복 계산법으로는 각 시간 단계마다 Newton-Raphson 방법을 사용한다.

본 연구에서 RMA-2를 사용한 것은 기존에 하천수리 해석에 가장 빈번히 사용된 모형이 본 모형이기 때문이다. Gee와 Wilcox(1985), 박무종 등(1994), 오정선 등(2004) 등 많은 연구자들이 본 모형을 사용하여 흐름해석을 수행한 바 있으며 따라서 많은 검증이 이루어졌다는 판단으로 RMA-2를 사용하였다.

2.2 RAM4 모형

본 연구에서 팔당호에 유입된 오염물질의 혼합거동을 분석하기 위해서 2차원 하천수질 해석모형인 RAM4 모형을 사용하였다. RAM4 모형은 21세기 프론티어연구개발사업의 지원으로 개발된 RAMS(River Analysis and Modeling System) 모형의 하천수질 해석모듈이다. 본 연구에서 RMA-4를 사용하지 않고 RAM4를 사용하여 수질해석을 하는 것은 RAM4가 여러 가지 측면에서 RMA-4보다 우수한 기능을 가지고 있기 때문이다. RAM4는 분산과정 해석에 있어서 분산계수 텐서를 반영함으로써 하천의 주흐름이 좌표와 일치하지 않는 영역에서의 오염물질 분산거동 해석에 탁월하다. 따라서

표 1. RAM4와 RMA-4의 비교 (서울대학교, 2004)

항목			RMA-4(SMS)	RAM4(RAMS)
지배방정식			분산계수에 유속장 영향을 포함하지 않음	주흐름 방향변화에 따라 변화하는 텐서형태의 분산계수 사용
모의 기능	주입 조건	주입 지점	절점 및 node string	절점 및 node string
		주입 시간	– 일정농도 연속주입 – 시간에 따라 변하는 농도주입	– 일정농도 연속주입 – 시간에 따라 변하는 농도주입 – 사고유입 등을 고려한 순간주입
		주입 형태	모든 경우 오염물의 주입을 농도로 정의 ($kg/m^3/m$)	– 농도 주입($kg/m^3/m$) – 질량 주입(kg): 지배방정식에 생성·소멸항을 추가하여 계산; 모의영역 내부격자(interior node)에 투입 가능; 순간주입 및 비정상주입
	비보존성 물질모의	1차 감쇠	감쇠계수 사용자 입력	감쇠계수 사용자 입력
		수질 인자	BOD/DO 모의기능이 세분화되어 제공되지 않음	– BOD/DO 연계모의를 보다 자세히 수행 – SS, 수온에 대한 모의 기능 추가 작업 중
계산 기법	수치해석기법		Galerkin법	linear 요소: Petrov-Galerkin법 quadratic 요소: Galerkin법
	모의가능요소		삼각/사각 quadratic 요소	삼각/사각 linear/quadratic 요소
	솔버		프론탈 해법	프론탈 해법

사행이 발달한 국내 하천에 적용하기에 적합한 것으로 보고되고 있다. 또한 수체에 질량형태로 유입되는 오염물질을 농도로 변환하지 않고 직접 입력할 수 있기 때문에 순간적인 오염물질 유입사고를 모의하기에 적합하다(서일원, 2008). 따라서 본 연구와 같이 수질사고로 인한 오염물질의 거동과 이에 따른 영향 검토에 적합하다고 판단된다. RAM4 모형의 특장점 및 RMA-4와의 비교 내용을 표 1에 수록하였다(서울대학교, 2004).

RAM4의 지배방정식은 수심 적분된 2차원 이송-분산 방정식에 감쇠항과 생성항을 포함한 것으로서 다음과 같다.

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(huC)+\frac{\partial}{\partial y}(hvC) = \frac{\partial}{\partial x}\left[h\left(D_{xx}\frac{\partial C}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial C}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[h\left(D_{yx}\frac{\partial C}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial C}{\partial y}\right)\right]+khC+Q \quad (4)$$

여기서 C는 오염물질의 수심평균농도, t는 시간, u, v는 각각 x, y방향의 수심평균 유속, h는 수심, D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}는 분산계수 텐서의 요소들이며 다음의 방정식에 의해 결정된다.

$$D_{xx}=D_L\frac{u^2}{U^2}+D_T\frac{v^2}{U^2} \quad (5a)$$

$$D_{xy}=D_{yx}=(D_L-D_T)\frac{uv}{U^2} \quad (5b)$$

$$D_{yy}=D_T\frac{u^2}{U^2}+D_L\frac{v^2}{U^2} \quad (5c)$$

여기서 U는 합유속 벡터의 크기($\sqrt{u^2+v^2}$)이며 D_L은 종분산계수, D_T는 횡분산계수로서 사용자가 입력하는 값이다. 본 연구에서는 식 (5)를 적용함에 따라 유속장의 변화를 분산항에 포함할 수 있도록 하였다(서일원과 이명은, 2006). k는 비보존성 오염물질의 감쇠계수이며, Q는 생성항으로서 질량형태로 유입되는 오염물질을 직접 입력할 수 있도록 Direc-delta 함수로 표현된다. RAM4에서는 순간적으로 유입되는 질량을 생성함수에 의하여 각각 2차원 공간에서의 선원과 점원 등으로 표시하도록 하였다(서일원과 이명은, 2007).

일반적으로 횡분산계수는 실험자료에 근거하여 다음과 같이 유도된 경험식을 이용하여 산정한다(Fischer 등, 1979).

$$D_T/hu^*=0.15\sim0.60 \quad (6)$$

여기서 u^*는 전단유속으로서 $u^*=\sqrt{gdS}$ 이다. 2차원 이송-분산방정식의 종분산계수는 Elder(1959)가 제안한 식을 이용하여 산정한다.

$$D_L/hu^*=5.93 \quad (7)$$

RAM4의 지배방정식에 유한요소법을 적용하면 다음과 같다(서일원과 이명은, 2006).

$$\int_\Omega N_j^*\left[\left(\sum_k h_kN_k\right)\frac{\partial\hat{C}}{\partial t}+\left(\sum_k h_kU_kN_k\right)\frac{\partial\hat{C}}{\partial x}+\left(\sum_k h_kV_kN_k\right)\frac{\partial\hat{C}}{\partial y}\right] \quad (8)$$

$$+\int_\Omega\frac{\partial N_i^*}{\partial x}\left[\left(\sum_k h_kN_k\right)\left(D_{xx}\frac{\partial\hat{C}}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial\hat{C}}{\partial y}\right)\right]$$

$$+\frac{\partial N_i^*}{\partial y}\left[\left(\sum_k h_kN_k\right)\left(D_{yx}\frac{\partial\hat{C}}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial\hat{C}}{\partial y}\right)\right]d\Omega=0 \quad (8)$$

여기서 N_k는 형상함수이며, K_k^*는 가중함수이다. 위의 과정에 의해서 생성된 대수방정식을 풀어서 얻어낸 결과값이 모의 결과 $C(x, y, t)$가 된다. RAM4는 유한요소법의 여러 수치기법 중 Galerkin 법을 사용시 발생하는 이송항에 의한 수치해의 불안정성을 보완하기 위하여 SU-PG(Streamwise Upwind Petrov-Galerkin)법을 수치기법으로 사용하였다. 형상함수는 선형형상함수(linear shape function) 및 2차 형상함수(quadratic shape function)를 사용하였고 요소망은 선형 사각요소(bilinear rectangular element), 2차 사각요소(quadratic rectangular element), 선형삼각요소(linear triangular element), 2차 삼각요소(quadratic triangular element)를 사용하였다. 매트릭스 솔버로는 프론탈 해법(frontal solution technique)을 채택하였다. RAM4 모형의 정확성에 대해서는 이명은(2007) 및 이명은과 서일원(2008)이 검증한 바 있다.

3. 대상영역

본 연구의 대상영역은 팔당호로서 서울에서 동쪽으로 약 45 km 떨어진 경기도 남양주시 능내리에 위치하고 있다 (그림 1). 팔당호는 수도권의 상수원수로서 매우 중요한 기능을 맡고 있으며 현재 4개의 취수구(팔당 1~3 및 광주-용인 취수장)에서 상수원수를 취수하고 있다(그림 2). 취수장의 총 취수시설 용량은 9.05×10^6 m^3/day이고, 실제 취수량은 약 3.4×10^6 m^3/day이다. 평수기에는 팔당댐에서 약 200 m^3/s의 물을 지속적으로 하류로 방류하여 한강본류 유지유량을 증대시키고, 수질오염을 저감시키고 있다.

팔당호는 세 개의 하천으로부터 물이 유입되고 있다. 각 유입하천으로부터 유입되는 유량을 살펴보면, 북한강이 전체 유입량의 43.4%, 남한강이 55%, 경안천이 1.6%를 차지하고 있다. 팔당호의 평균 수심은 약 6.5 m로서 비교적 얕은 호수이다. 이에 따라 성층화가 거의 발생하지 않아서 수심에 대한 수온 및 용존산소의 분포가 일정하다. 팔당호로 유입된 물의 체류시간은 약 3~6.7일 정도로서 하천형 호소라고 할 수 있다. 유역면적은 23,800 km^{2}이고 저수량은 244×10^6 m^{3}이며 유입량은 하루에 29.65×10^8 m^3/day이다(환경부, 2005a). 팔당호의 만수면적은 36.5 km^{2}으로서 호소면적에 대한 유역면적의 비율이 약 700이다. 표 2에 수록한 호소면적 대 유역면적비의 값을 살펴보면, 국내외 주요 호수보다 팔당호의 호소면적에 대한 유역면적의 비가 매우 큼을 알 수 있다. 이는 상대적으로 넓은 유역에서 오염물질이 유입된다는 뜻이고 따라서 팔당호가 수질오염 및 수질사고에 매우 취약함을 의미한다.

환경부에서는 팔당호에 수질측정망을 구축하여 팔당호 수질을 지속적으로 모니터링하고 있다. 그림 1에 본 연구의 대상지역에 대한 수질측정망의 위치 및 상하류 경계단, 오염원 유입지점을 나타내었다. 하천수질측정망으로는 삼봉리, 대성리, 강상, 팔당댐 4개 측점, 호소수로는 팔당댐 1, 2, 3, 4, 5의 5개 측점을 운영하고 있다. 조사항목은 수온, DO, BOD, COD, SS, TN, TP, NH_3-N, NO_3-N, 페놀류, 전기전도도, 분원성 대장균군수 등이며 측정 빈도는 월 1회이다 (환경부, 1997). 한강물환경연구소가 팔당댐 수질측정망 중 취수장에 가장 가까운 팔당댐 2 측점에서 조사한 최근 5년간 연평균 수질현황은 표 3과 같다. 또한 팔당호에 위치하고 있는 4개의 취수장(팔당 1, 2, 3 취수장, 광주-용인공동취수장) 위치는 그림 2에 표시하였다. 팔당 1, 2, 3 취수장은 팔당댐 상류 좌안에 모여 있고 광주-용인공동취수장은 경안천 하류의 좌안에 위치해 있다. 현재 팔당 1~3 취수장은

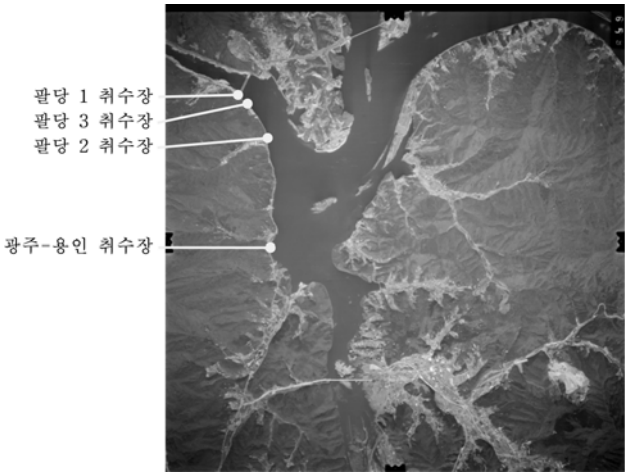


그림 2. 팔당호 내의 취수장 위치

표 2. 국내외 호수의 유역면적/호소면적 비율

호수명	유역면적 (km^2)	호소면적 (km^2)	유역면적/호소 면적 비율
팔당호	23,800	36.5	652
충주호	6,648	97.4	68
대청호	4,134	72.8	57
소양호	2,703	70	39
Biwa호(일본)	3,174	673.9	5
Laguna호(필리핀)	3,820	900	4
Michigan호(미국)	117,845	58,016	2

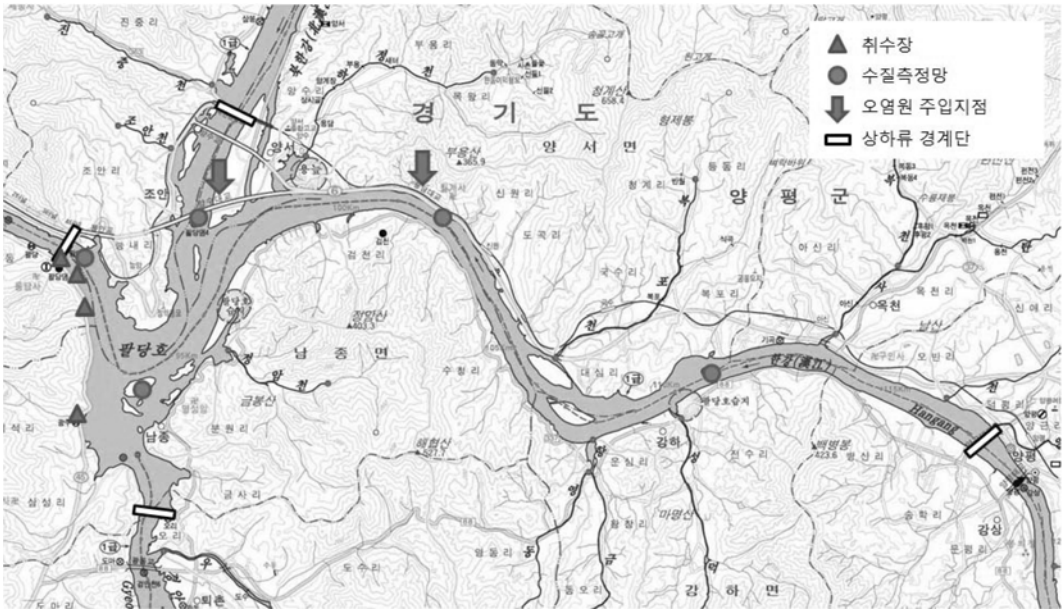


그림 1. 팔당호 주변 지형도

표 3. 팔당댐(팔당댐 2 측점) 수질현황 (환경부 물환경정보시스템, 2009)

연도	수온 (°C)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
2004	13	10.6	1.3	3.7	15.0	2.069	0.054
2005	13	10.7	1.1	3.5	9.5	2.206	0.047
2006	13	11.2	1.2	3.3	11.1	2.190	0.055
2007	13	11.7	1.2	3.5	9.4	2.350	0.051
2008	14	11.4	1.3	3.8	6.4	1.938	0.042

한국수자원공사에서 관리하고 있으며 광주-용인공동취수장은 지자체에서 관리하고 있다.

4. 유속장 모의

4.1 지형격자 구성

모의영역의 남한강 측 상류 경계단은 양평수위표, 북한강 측 상류 경계단은 경기도 남양주시 조안면 진중리 부근, 하류 경계단은 팔당댐으로 설정하였다. 팔당호 대상지역에 대하여 전후처리기인 SMS를 사용하여 격자를 구성하였으며 결과는 그림 3과 같다. 하상 지형자료는 한강수계치수기본계획보고서(건설부, 1992) 및 경안천수계하천정비기본계획보고서(건설교통부, 2001)의 평면도 및 횡단면 자료로부터 취득하였다. 총 절점 수는 4914개이며 총 요소 수는 1634개로서 2차 삼각요소가 356개, 2차 사각요소가 1278개로 구성하였다. 본 격자의 최저 하상고는 1.6 m이며, 최고 하상고는 25 m이다. 최저 하상고는 팔당호 만곡부의 바깥쪽인 좌측으로 치우쳐 나타난다. 경안천 합류점에서 소내섬까지는 다소 낮은 수심을 유지하고 있는데 이는 경안천의 유속과 유량이 작아 퇴적이 활발히 일어나기 때문이라 사료된다.

4.2 RMA-2를 이용한 흐름모의

유속장 모의를 위해 흐름모형인 RMA-2를 적용하였다. 유량에 대한 모의조건으로서 갈수기를 선택하였는데, 이는 오염물질의 사고유입 시 하천 및 호소의 수질에 미치는 영향이 갈수기에 더 심각할 것이라는 판단에 근거한 것이다. RMA-2의 입력 자료인 상·하류 경계단의 수위 및 유량은 하천정비기본계획 보고서의 자료를 이용하였다. 북한강의 갈수기 유량은 한강수계치수기본계획에 제시된 88.0 m^3/s를 입력하였고, 남한강의 갈수기 유량은 107.0 m^3/s로 입력하였다. 경안천의 갈수기 유량은 경안천수계하천정비기본계획의 유황분석 결과를 이용하여 0.56 m^3/s로 결정하였다. 모의 영역의 하류 경계단인 팔당댐 지점에서의 수심은 저수위(low water level)인 25.0 m로 선정하였다. 이상의 흐름모의 경계조건을 그림 3에 나타내었다. RMA-2 모형의 매개변수 중 Manning의 조도계수 n은 0.025를 적용하였고, 와점성계수의 경우 Peclet 컨트롤 모의(Peclet 수=40)를 선택하였다. 계산 시간간격은 0.5 시간으로 설정하였고 핫스타트 기능을 사용하여 비정상상태 모의 수행 후 정상상태 모의를 수행하여 최종 흐름결과를 얻었다.

흐름모의 결과를 그림 4에 도시하였다. 그림 4(a)는 대상영역의 유속분포를 벡터형태로 나타낸 것이다. 북한강, 남한강, 경안천 중 유량이 가장 큰 남한강에서 가장 큰 유속값을 나타냈으며 팔당호 내의 주 흐름방향도 남한강의 흐름방향과 일치하는 것을 알 수 있다. 최대 유속은 0.3 m/s 정도

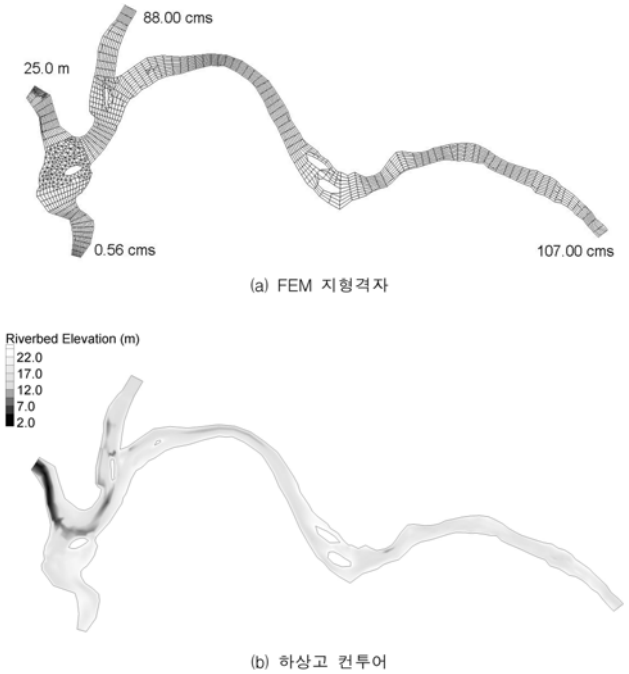


그림 3. FEM 지형격자와 하상고 컨투어

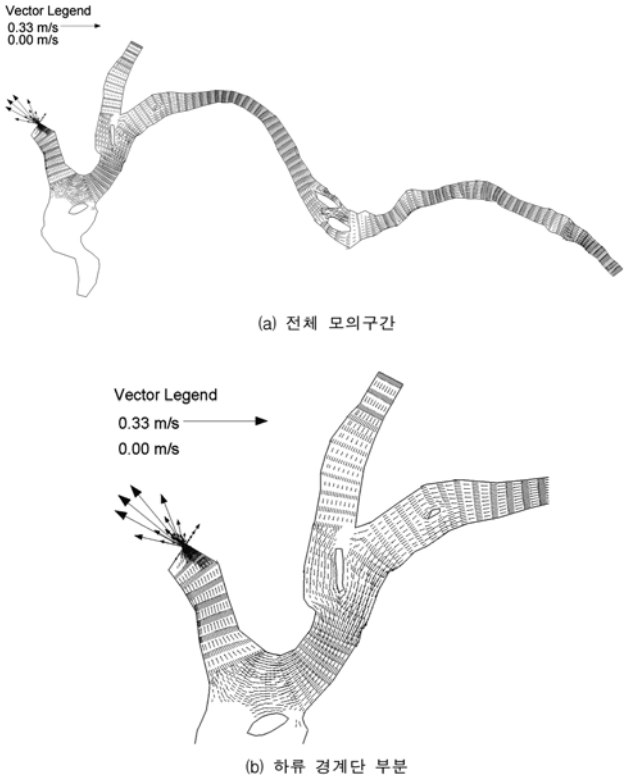


그림 4. 유속장 벡터도

표 4. 경기도 내 유독물 취급업소 현황

구 분	계(개소)	제조업	판매업	보관 및 저장업	운반업	사용업
계	1,506	128	826	37	25	490
팔당 (7개 시 · 군)	92	2	36	5	5	44
팔당외 시 · 군	1,414	126	790	32	20	446

로서 하류단인 팔당댐 수문에서 발생하였으며, 전 영역에서의 유속은 0.1 m/s 이하로 작게 나타났다. 팔당호 내의 유속을 자세하게 도시한 그림 4(b)에서 살펴보면 수문 근처를 제외하고는 0.02~0.03 m/s 정도의 유속이 발생함을 알 수 있다. 북한강, 남한강, 경안천 중 유입 유량이 가장 작은 경안천의 하류 영역에서는 유속이 0.01 m/s 이하로 나타나 흐름이 정체되는 것으로 밝혀졌다. 대상영역의 수심 분포는 그림 3(b)에 도시한 하상고 분포와 유사하게 나타났으며 최심선은 최저 하상고와 동일하게 팔당호 만곡부의 바깥쪽인 좌측으로 치우쳐 나타난다.

5. 수질모의

팔당 유역에서 낙동강과 같은 대형 수질사고는 현재까지 발생한 바 없다. 그러나 경기도(경기개발연구원, 2008)에서는 지난 2005년 이 후 팔당호를 포함한 경기도 내 주요 하천에서 발생한 수질오염사고가 86건에 달하는 것으로 보고하고 있다. 이 중에서 팔당호 주변 하천에서 발생한 수질오염사고가 58건으로서, 농약유출, 폐수무단방류, 축산폐수 유입 등으로 인한 수질오염 사고는 2005년 19건, 2007년 18건, 2008년 21건 등이다. 팔당호에서 발생한 수질오염사고는 모두 28건으로서, 2005년, 2006년 각각 10건, 2008년 8건 등이다. 팔당호에서 발생한 수질오염사고의 원인별로는 주변 도로에서의 운전부주의로 인한 추락사고가 16건(57%)으로 가장 많고 건설공사현장 작업 부주의에 인한 수질사고가 7건(25%) 등이다. 또한 경기도 내 유독물 취급업소 현황은 표 4와 같다. 유독물 취급업소가 1,506개로 전국대비 26%가 경기도 내에 위치하고 있다. 취급물 중 유해화학물질은 총 546종(수산화나트륨, 과산화수소, 황산, 암모니아, 페놀 등)이며 특정수질 유해물질은 19종(구리, 납, 비소, 페놀류 등)에 달한다.

수질사고 등으로 인해 질량 형태로 하천에 유입되는 비보존성 오염물질의 혼합특성을 분석하기 위하여 팔당호에 위치한 양수대교와 용담대교에서 오염물질을 주입하는 조건으로 RAM4 모의를 수행하였다. 본 수치모의의 목적은 주요 상수원인 팔당호의 발생할 수 있는 수질사고에 대비하여 오염물질의 거동을 분석하고 나아가서 오염물질이 취수장에 미치는 영향을 검토하는 것이기 때문에 오염물질로서 독성이 강한 페놀을 가정하여 주입하였다. 페놀의 경우 낙동강 수질사고 등에서 나타났듯이 독성이 매우 강하기 때문에 우리나라의 경우 음용수 허용기준치가 0.005 mg/L 이하로 규정되어 있다(환경부, 2005b).

5.1 양수대교 수질사고

양수대교는 경기도 남양주시 조안면 조안리와 양평군 양서면 용담리를 연결하는 다리로서 팔당호의 북한강 측에 위치한다. 길이는 2,189 m로서 대형교량에 속하며 1998년에 완공한 폭 19.5 m의 왕복 4차선 도로이다. 규모가 비교적 큰 교량이기 때문에 오염물질 유입 위치에 따라 오염물질의 거동에 차이가 있으리라 판단하여 오염물질 주입지점을 교량의 좌안, 중앙, 우안으로 나누어 모의하였다. RAM4의 모의 조건으로서 종분산계수는 10 m^2/s, 횡분산계수는 1 m^2/s를 입력하였다. 유입되는 페놀의 질량은 10 ton으로 가정하였고, 페놀의 감쇠계수는 0.1 /day로 입력하였다. 이는 국내외 연구에서 제안한 자료를 바탕으로 한 것이다(Arutchelvan 등, 2005; Kumar 등, 2006).

그림 5~7에 각각 양수대교의 좌안, 중앙, 우안에서 유입된 오염물질의 시간에 따른 거동을 도시하였다. 그림 5에서 양수대교 좌안에 주입된 오염물질은 초기(주입 후 24시간)에는 주입된 지점보다도 더 상류 측으로 퍼져나가는 양상을 확인할 수 있다. 이는 북한강의 유속이 매우 작기 때문에 종방향 분산이 이송보다 지배적인 과정으로 작용하기 때문으로

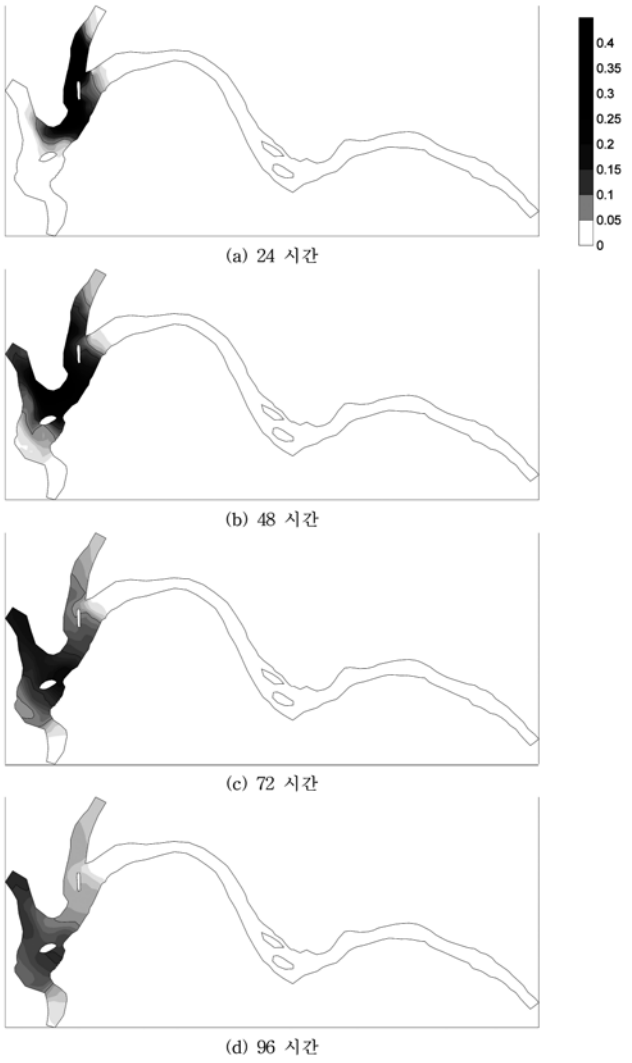


그림 5. 양수대교 좌안 주입시 오염물질 농도장 변화 (농도단위: mg/L)

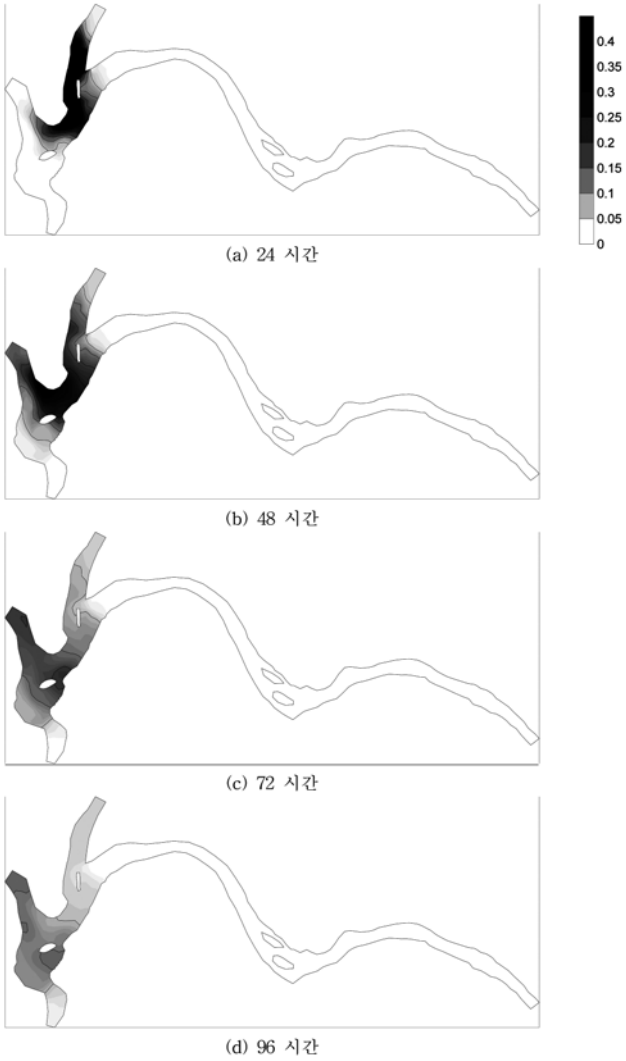


그림 6. 양수대교 중앙 주입시 오염물질 농도장 변화 (농도단위: mg/L)

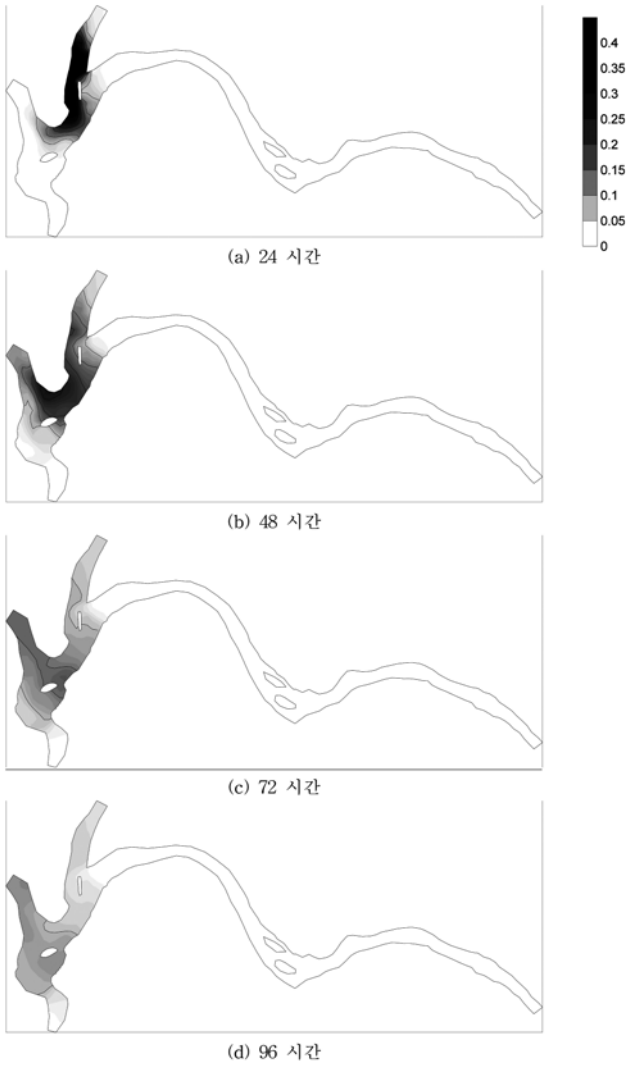


그림 7. 양수대교 우안 주입시 오염물질 농도장 변화 (농도단위: mg/L)

사료된다. 이 후 오염물질의 오염운은 대체적으로 이송에 의하여 하류로 이동하는 것을 알 수 있다. 좌안 주입의 경우 오염운이 다소 좌측으로 치우쳐서 이동하나, 대체적으로 최심선을 좇아서 이동하고 있다.

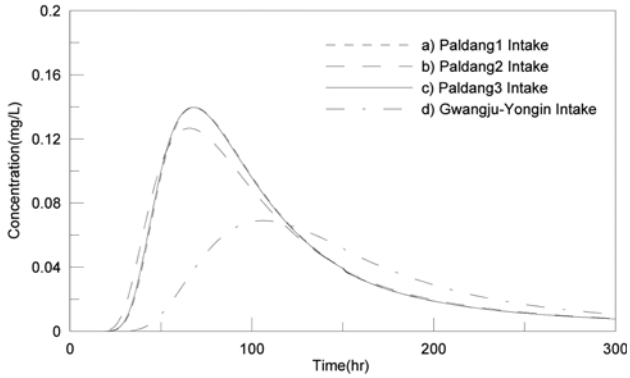
그림 6~7에서 오염물질 주입 위치 차이에 따라 오염운이 흘러 내려가는 시간이나 양상은 크게 다르지 않으나 우안주입의 경우에 오염물질이 팔당호의 우안 쪽으로 치우쳐서 진행하는 것을 관찰할 수 있다. 이에 따라 양수대교 우안에서 발생하는 수질사고가 중앙이나 좌안에서 발생하는 수질사고보다는 팔당호 좌안에 위치하고 있는 취수장들에 영향을 작게 미칠 것으로 예상할 수 있다.

주입 위치에 따른 오염물질 거동에 대한 정량적인 비교를 그림 8에 제시하였다. 이 그림은 양수대교의 좌안, 중앙, 우안에 주입된 오염물질(페놀)이 이송-분산 및 감쇠 과정을 거쳐서 혼합된 후, 팔당호 좌안에 위치한 4개의 취수장에 도달했을 때 나타나는 농도를 시간에 따라 도시한 것이다. 전술하였듯이 우안 주입이 좌안 및 중앙 주입의 경우보다 취수장에 미치는 영향이 작음을 확인할 수 있다. 팔당 1~3 취수장의 최대 농도값이 좌안 및 중앙 주입의 경우 0.14~0.15 mg/L으로 나타난 반면 우안 주입의 경우 0.12 mg/L으로 작게 나타났다. 광주-용인 취수장의 경우 경안천 하구부에 가깝게 위치하고 있기 때문에 농도가 0.05~0.07 mg/L으로 다른 취수장에 비해 작게 나타난다. 그림 8의 농도-시간 그래프에서 발견할 수 있는 중요한 사실은 첨두 농도에 이르는 상승곡선은 비교적 가파르게 증가하는 반면 하강곡선은 매우 완만하게 감소하여 긴 꼬리를 형성하고 있다는 것이다. 이에 따라 오염물질(페놀) 농도가 주입 후 300시간(12.5일) 경과 후에도 0.01 mg/L 이상을 유지하고 있다. 이는 페놀에 대한 음용수 기준인 0.005 mg/L을 초과하는 것으로 만약 실제로 페놀이 팔당호(양수대교)에 유입되었을 경우 상당한 기일이 경과되어야 음용수 기준 이하로 떨어짐을 의미한다.

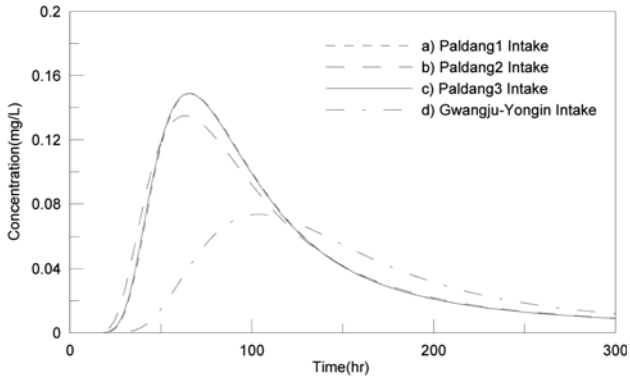
5.2 용담대교 수질사고

용담대교는 남한강 하류인 경기도 양평군 양수리에서 신원리에 걸쳐 있는 길이 2,380 m, 폭 10.75 m의 2차선 교량이다. 1997년에 개통되었으며 교량 폭이 좁고 차량통행이 많기 때문에 수질사고가 일어날 수 있는 확률이 높다. 오염물질 운반차량이 용담대교를 지나다가 팔당호 아래로 추락할 경우 남한강 및 팔당호의 수질이 악화될 것으로 예상된다. 양수대교와 마찬가지로 비보존성 오염물질인 페놀이 10 ton 투입되었을 경우를 가정하였으며 감쇠계수는 0.1 /day, 종·횡방향 분산계수는 각각 10 m^2/s와 1 m^2/s를 입력하였다.

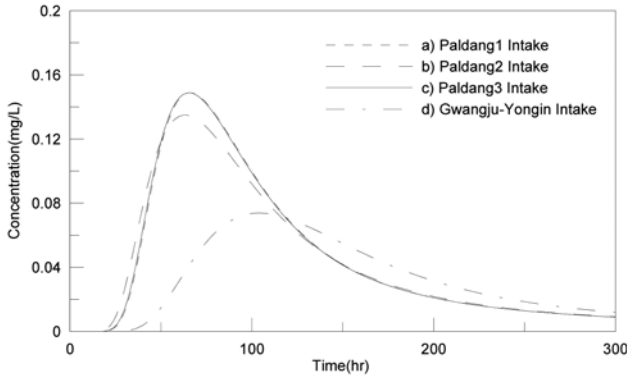
용담대교의 수질사고에 관한 모의 결과를 그림 9에 나타내었다. 이 경우에도 오염물질의 오염운은 팔당호의 최심선



(a) 좌안 주입시

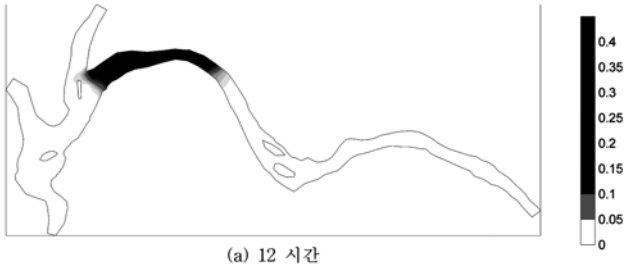


(b) 중앙 주입시

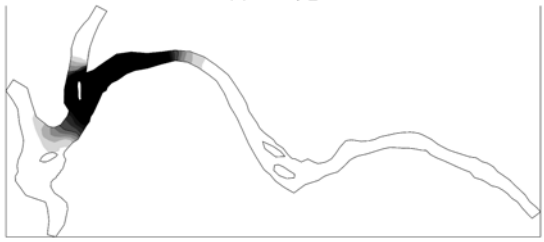


(c) 우안 주입시

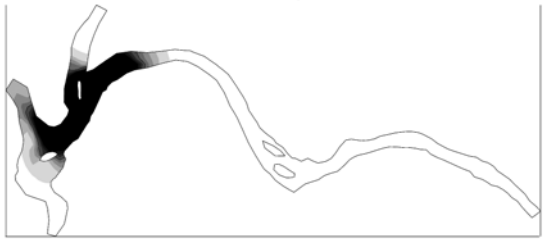
그림 8. 양수대교 case의 농도-시간 그래프



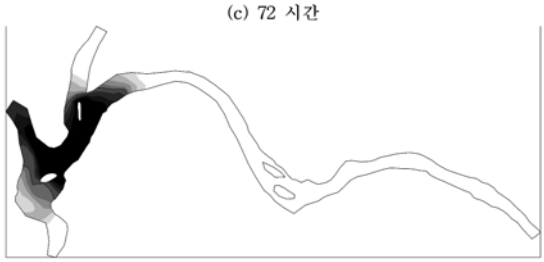
(a) 12 시간



(b) 48 시간



(c) 72 시간



(d) 96 시간

그림 9. 용담대교 오염물질 농도장 변화 (농도단위: mg/L)

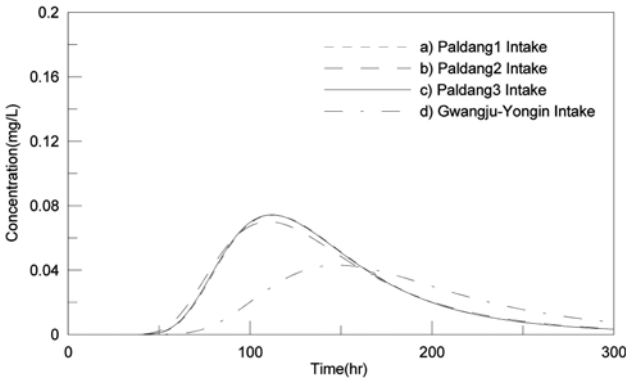
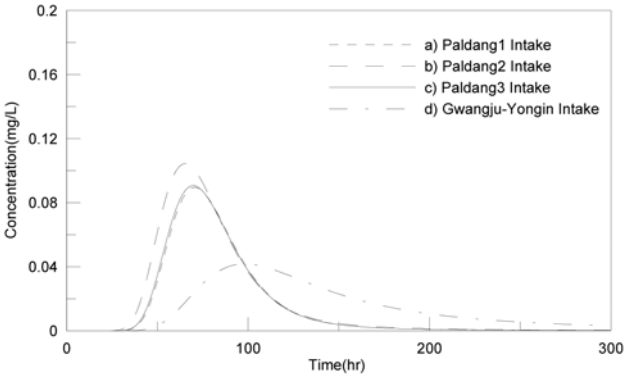


그림 10. 용담대교 case의 농도-시간 그래프 (현상태)

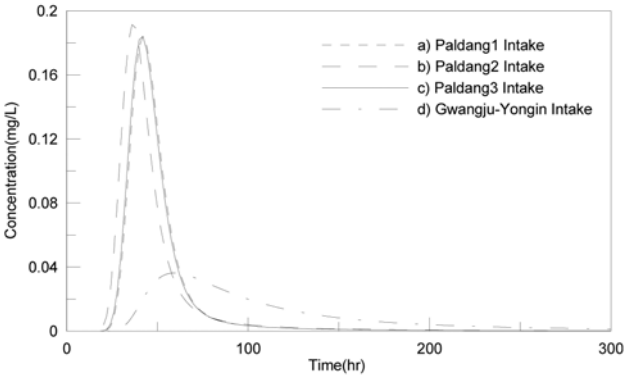
을 좇아서 이동하는 경향이 있다. 팔당호에 위치한 4개의 취수장에서 시간에 따른 오염물질의 농도변화를 그림 10에 도시하였다. 팔당 1~3 취수장은 팔당호 하류의 좌안에 위치한 취수장으로서 각 취수장 사이의 거리가 1 km내에 있어 농도변화가 비슷하게 나타나고 있다. 오염운의 최고 농도는 0.08 mg/L 정도이며 약 120시간(5일) 후에 도달한다. 광주-용인 공동취수장은 경안천 하류부의 정체수역에 위치하고 있으며 팔당호 내 다른 부분보다 유속이 낮아 오염운이 늦게 도달하고 있다. 시간에 따른 농도 곡선을 살펴보면 최고 농도는 약 0.04 mg/L이고 약 150시간 후에 도달할 것이라 예상할 수 있다. 시간이 길어짐에 따라 질량 감소의 영향으로 최고 농도 또한 나머지 3개의 취수장보다 낮게 나타난다.

용담대교 수질사고의 경우 하천 유량증대로 인한 희석(dilution) 및 수세(flushing) 효과를 알아보기 위하여 북한강과 남한강의 유량을 400 m^3/s로 증가시켜 오염운의 거동이 어떻게 변하는지 살펴보았다. 북한강과 남한강의 유량을 증가시켜 RMA-2를 모의한 결과, 북한강 유량증대의 경우 북한강의 유속이, 남한강 유량증대의 경우 남한강의 유속이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 유속의 증가는 오염원의 이동을 가속시켜 수세 효과를 가져오는 것으로 판단된다.

그림 11은 두 가지 유량증대 시나리오에 대한 4개 취수장에서의 농도-시간 그래프이다. 그림 11(a)는 북한강 유량증대, 그림 11(b)는 남한강 유량증대에 관한 수치모의 결과로서, 유량증대 전에 비하여 오염물질의 최대 농도는 더 높아지면서 더 빨리 이동하는 현상을 관찰할 수 있다. 하천의 흐름이 빨라지면서 오염운을 빠르게 배제시키는 수세 효과를 나타내고 있다. 북한강 유량증대의 경우, 유량을 증가시키기 전



(a) 북한강 유량증가



(b) 남한강 유량증가

그림 11. 용담대교 case의 농도-시간 그래프 (유량증대시)

에는 팔당 2 취수장에서의 최대 농도가 0.08 mg/L이었던 것에 비해 최대 농도가 0.11 mg/L로 증가하고, 도달시간도 약 2일 정도 빨라짐을 알 수 있다. 남한강 유량증대의 경우는 더욱더 큰 변화를 보이고 있는데 이는 남한강의 위치한 용담대교에 주입된 오염물질이 남한강 유량증대의 영향을 직접적으로 받기 때문이다. 이에 따라 팔당 2 취수장에서의 최대 농도의 도달시간이 유량증대 전에 비하여 3일 가량 빨라지고, 최대 농도도 0.18 mg/L까지 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 오염물질이 빠르게 이동함에 따라 분산 효과 및 질량 감소가 상대적으로 작게 나타나기 때문이다. 따라서 주입된 지점 근역에서의 초기 희석 효과보다는 빨라진 흐름에 의한 수세 효과가 훨씬 더 크게 나타나는 것으로 판단된다. 그림 11(b)에서 주목할 점은 농도 곡선의 상승부와 하강부가 비교적 가파르게 증가 및 감소한다는 사실이다. 이에 따라 오염물질(페놀) 농도가 주입 후 100시간(4일) 경과 후에 음용수 기준인 0.005 mg/L 이하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 페놀 등 독성 오염물질의 수질사고 발생시 유량증대에 의한 수세 효과가 취수장 운영에 매우 유리한 대책이 될 수 있음을 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 2차원 흐름모형인 RMA-2를 이용하여 팔당호의 갈수기 흐름조건에 대한 흐름모의를 수행한 후, 2차원 수질모형인 RAM4를 이용하여 다양한 수질오염 사고에 대해 모의하였다. 갈수기 수질사고 등으로 인해 질량 형태로 하천에 유입되는 비보존성 오염물질의 혼합특성 분석을 위해 양수대교와 용담대교에서 오염물질이 순간적으로 질량 주입되는 수질사고를 가정하여 이에 대한 모의를 수행하였다. 양수대교의 경우 교량의 좌안, 중앙, 우안에서 10 ton의 페놀을 주입하여 모의함으로써 오염물질 유입 위치에 따른 오염물질 거동의 차이를 분석하였다. 분석결과 좌안 및 중앙 주입의 경우 팔당 1~3 취수장의 최대 농도값이 0.14~0.15 mg/L인 반면 우안 주입의 경우 0.12 mg/L로 나타나, 좌안 및 중앙 주입이 우안 주입에 비해 팔당호 내 취수장에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 첨두 농도 이후 하강곡선이 매우 완만하게 감소하면서 긴 꼬리를 형성하고 있어서 12.5일이 경과 후에도 페놀의 농도가 0.01 mg/L 이상을 유지하고 있음을 볼 수 있었다. 따라서 실제로 오염물질이 팔당호에 유입되었을 경우 수질이 회복되기 위해서 상당한 기일이 필요함을 예측할 수 있었다.

용담대교 수질사고 수치모의에서는 수질사고 저감방안으로 북한강과 남한강 유량 증대에 따른 오염물질의 희석 및 수세 효과에 대해 살펴보았다. 북한강과 남한강 유량을 갈수기 유량의 3.7~4.5배 증대시켜 수치모의를 수행한 결과, 유량증대 전에 비하여 오염물질의 최고 농도는 더 높아지면서 더 빨리 이동함을 볼 수 있었다. 특히 남한강 유량 증대의 경우 팔당 2 취수장에서의 최대 농도의 도달시간이 유량 증대 전에 비하여 3일 가량 빨라지고, 최대 농도는 2배 정도 높아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 주입 지점 근역에서의 초기농도 희석 효과보다는 빨라진 유속에 의한 수세 효과가 훨씬 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 농도 곡선의 하강부가 유량 증대 전에 비하여 급격히 감소하여 오염물질(페놀) 농도가 주입 후 4일 경과 후에 음용수 기준인 0.005 mg/L 이하로 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이는 팔당호 내 수질사고 발생시 유량증대에 의한 수세 효과가 취수장 운영에 유리한 대안이 될 수 있음을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제명: RAMS 적용) 및 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부(2001) **경안천수계하천정비기본계획보고서**.

건설교통부(1992) **한강수계치수기본계획(하천정비기본계획)**.

경기개발연구원(2008) **팔당호 수질사고 예경보 시스템 개발에 관한 기초연구**.

김형일, 이종설, 허준행, 조원철(1998) 한강하류부에서의 오염물질의 거동 특성 연구. **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제31권 제1호, pp. 85-93.

박무종, 김중훈, 윤용남(1994) RMA-4에 의한 한강하류부에서의 오염물 확산 이송 특성연구. **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 89-92.

서울대학교(2004) **하천흐름 및 하상변동 해석기술 개발 1단계 최종보고서**, 21세기 프론티어연구개발사업.

서일원(2008) **RAMS 적용**. 21세기 프론티어연구개발사업.

서일원, 이명은(2006) 유속장을 고려한 분산텐서를 포함한 2차원

이송-분산모형의 개발. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권 제2B호, pp. 171-178.
서일원, 이명은(2007) 하천 오염확산 수치해석에서 생성항을 이용한 순간주입 모의. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제1B호, pp. 1-8.
오정선, 서일원, 김영한(2004) 사행하천에서 오염물질의 2차원 거동특성 해석. **한국수자원학회 논문집**, 제37권 제12호, pp. 979-992.
이명은(2007) **오염물질 이동 해석을 위한 2차원 유한요소모형**, 박사학위논문, 서울대학교.
이명은, 서일원(2008) 순간 유입된 오염물질의 혼합 모의 시 질량 오차 산정. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권 제5B호, pp. 475-483.
조성우, 전경수(2001) 사고에 의하여 자연하천으로 방류된 비보존성 오염물질의 종확산. **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권 제4호, pp. 289-301.
환경부(1997) **수질종합관리 및 수질감시 기술: 수질감시 시스템 구축(시스템을 중심으로)**, 서울대학교.
환경부(2004) **2003 상수도통계**.
환경부(2005a) **2004 하수도통계**.
환경부(2005b) **환경백서**.
환경부 물환경정보시스템(2009) http://water.nier.go.kr/weis.
Arutchelvan, V., Kanakasabai, V., Elangovan, R., Nagarajan, S. and Muralikrishnan, V. (2006) Kinetics of high strength phenol degradation using Bacillus brevis. *Journal of Hazardous Materials*, B129, pp. 216-222.
Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1967) *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York.
Gee, D.M. and Wilcox, D.B. (1985) Use of a Two-Dimensional flow model to quantify aquatic habitat. *Proceedings of the ASCE Special Conference on Computer Applications in Water Resources,* Buffalo, New York.
Kumar, A., Kumar, S., and Kumar S. (2005) Biodegradation kinetics of phenol and catechol using pseudomonas. *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 22, pp. 151-159.
Lee, M.E. and Seo, I.W. (2007) Analysis of pollutant transport in the han river with tidal current using a 2D finite element model. *Journal of Hydro-environment Research*, IAHR, Vol. 1, No. 1, pp. 30-42.

(접수일: 2008.9.18/심사일: 2008.11.16/심사완료일: 2009.3.15)