

RAM4모형을 이용한 자연하천에서의 확산거동 예측

Prediction of Solute Transport in Natural River Using RAM4

정성태*, 류시완**, 김영도***, 서일원****

Sungtae Jung, Siwan Lyu, Young Do Kim, Il Won Seo

요 지

현재까지 우리나라에서 주로 사용되고 있는 2차원 흐름 해석 모형은 미연방 도로국(U.S. Federal Highway Administration)과 연계하여 Brigham Young University에서 개발된 SMS(Surface-Water Modeling System)모형이다. SMS모형 중 이송 확산 모형으로는 RMA-4가 포함되나 이 모형은 최신 수치기법을 반영하지 못하는 등의 문제점들로 인해 실제 물리적 현상을 모의에 있어서 한계를 가지고 있다. 따라서 물리적 현상에 대한 적절한 모의를 위해 여러 개선과정을 거쳐 RAM4가 개발되었다.

본 연구를 위해 점적분 유사량 측정기(P-61)와 대하천 유속계를 사용하여 대상구간의 SS자료 및 유속의 2차원적 분포를 취득하였고, SMS의 Pre-processing 기능을 이용하여 유한요소망을 구성하였다. 구성된 유한요소망과 흐름모형인 RMA-2를 사용하여 대상구간의 유속장을 모의하였다. 이때 모의된 유속장과 현장에서 취득한 유속분포를 비교하여 RMA-2를 검증하였고, SS자료와 RAM4로 모의된 농도장을 비교하여 RAM4를 검증하였다. 검증된 두 모형을 바탕으로 대상 구간에서 다량의 점오염원이 투입되는 가상의 시나리오를 선정 및 적용하여 오염물 이송 및 확산 거동에 대해 살펴보았다.

본 연구의 대상 하천은 형산강으로써, 유역 내에 경주시와 포항시가 위치하고 이 두 도시를 잇는 산업도로가 형산강 본류 위를 지나고, 또한 두 도시를 관류하고 있어 다른 국가하천과 마찬가지로 지속적이고 안정적인 수질관리가 필요한 하천이다. 모의구간은 형산강 본류 중 No. 68(안강 수위관측소 상류 약 350 m)에서 No. 48(부조 수위관측소 하류 약 200 m)까지로서, 약 4.3 km 구간을 모의 하였다. 모의구간 시점에서 약 0.35 km 지점에 산업도로의 일부분인 강동대교, 0.98 km 지점에 왕신천 유입, 1.35 km 지점에 수중보, 1.8 km 지점에 국당1교, 3.2 km 지점에 국당2교가 위치하며 구간 내에는 만곡 및 사행, 특히 수중보 전·후로 사주가 발달해있어 2차원 흐름 및 이송확산 모의에 적합하다고 판단되었다.

핵심용어 : 이송 및 확산 거동, RMA-2, RAM4, 농도장, 형산강

1. 서론

현재까지 우리나라에서 주로 사용되고 있는 2차원 흐름 해석모형은 미연방 도로국(U.S. Federal Highway Administration)과 연계하여 Brigham Young University에서 개발된 SMS(Surface-Water Modeling System) 모형이다. 그러나 현재 SMS는 최신 수치기법을 반영하지 못하는 등의 문제점들로 인해 실제 물리적 현상의 모의에 있어서 한계를 가지고 있다. 국내 하천의 특성상 사행과 만곡, 하중도 및 함유부를 띄는 복잡한 지형을 가지는 구간이 많고, 취수장 및 하수처리장이 동일한 구간 내에 위치하는 경우도 많다. 하수 처리장에서의 미처리 하수의 방류, 하천을 횡단하는 교량에서의 사고에 따른 순간적인 오염원 주입 등과 같은 여러 사례에 따른 물리적 현상에 대한 적절한 모의가 요구됨에 따라, 여러 개선과정을 통하여 RAM4가 개발되었으나 현재까지 현장실측자료를 활용한 검증이 부족한 상태이다(정성태 등, 2007). 따라서 본 연구에서는 현장에서 직접 취득한 유속 및 SS자료를 바탕으로 RMA-2의 2차원적인 유속모의 결과와 RAM4의 농도모의 결과를 비교하여 RAM4의 적용성 및 실용성을 검증하고자 한다.

본 연구에서는 형산강에서 취득한 SS자료와 형산강수계 본류 유량측정조사 보고서(건설교통부, 2005)를 바탕으로 RAM4의 적용성 및 실용성을 검증하였다.

2. 지배방정식

- * 정회원 한국수자원공사 수자원연구원 공동연구원 E-mail : jst9711@gmail.com
** 정회원 창원대학교 토목공학과 조교수 E-mail : siwan@changwon.ac.kr
*** 정회원 인제대학교 환경공학과 조교수 E-mail : ydkim@inje.ac.kr
****정회원 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 E-mail : seoilwon@snu.ac.kr

본 모형은 2차원 연속방정식과 2차원 Navier-Stokes의 힘-운동량 방정식에 대한 Reynolds 형태로 표시된다. 수심 평균치를 취한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.1.1)$$

또한, Navier-Stokes 방정식의 점성항에 내부전단응력을 첨가함으로써 Reynolds 방정식을 유도할 수 있고, 방정식을 각 방향요소로 확장하여 수심평균을 취하고, Coriolis항, 지류유입항, 바람응력항을 포함한 후 양변에 ρh 를 곱하여 2차원으로 고려하면 식 (2.1.2)~(2.1.3)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \rho \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_o}{\partial x} \right) + \frac{g}{C^2} u |V| + uq_s - \Omega v h \right) \\ - h \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - h \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - W_x = 0 \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_o}{\partial y} \right) + \frac{g}{C^2} v |V| + vq_s - \Omega v h \right) \\ - h \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - W_y = 0 \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

RMA-2 모형의 수치기법은 가중 잔차 Galerkin법, 공간에 대한 적분은 Gaussian 적분법, 시간에 대한 적분은 비선형 유한차분 근사법을 사용한다. 형상함수는 유속에 대해서 2차 함수이며, 수위에 대해서는 1차함수로 혼합보간기법이 적용된다. 해를 구하는 방법으로는 완전 음해법, 반복 계산법으로는 각 시간 단계마다 Newton-Raphson 방법을 사용한다.(한건연, 2002)

RAM4

반응항과 생성·소멸항을 포함하는 RAM4의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - k h C - Q = 0 \quad (2.2.1)$$

여기서 C는 수심 적분된 농도로서 사용자가 구하고자 하는 값이다. u와 v는 수심적분된 유속이고, h는 수심이다. k는 반응성 오염물질의 감쇄계수이며, Q는 생성 또는 소멸 함수이다. D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}는 각 분산계수 텐서의 요소들로서 다음의 방정식에 의해 결정된다.

$$D_{xx} = D_L \frac{u^2}{U^2} + D_T \frac{v^2}{U^2}, \quad D_{xy} = D_{yx} = (D_L - D_T) \frac{uv}{U^2}, \quad D_{yy} = D_T \frac{u^2}{U^2} + D_L \frac{v^2}{U^2} \quad (2.2.2)$$

여기서 U는 합유속 벡터의 크기($\sqrt{u^2 + v^2}$)이며 DL은 종분산계수, DT는 횡분산계수로 사용자에게 의해 입력된 값으로 정의된다(과학기술부, 2007).

3. 모형검증 및 적용

3.1 모의구간

형산강 유역은 북위 35° 40' ~ 36° 12' 와 동경 129° 01' ~ 129° 25' 에 위치하고 있으며, 유역면적은 1,139.99 km²이고 경주시 탑정동 대천 합류점에서 하구인 경북 포항시 남구 해도동의 해안선까지 약 36 km 가 국가하천 구간이다(그림 3.1). 본 연구에서는 No. 68(안강 수위관측소 상류 약 350 m)에서 No. 48(부조 수위관측소 하류 약 200 m)까지로서, 약 4.3 km 구간을 모의 하였다. 그림 3.2에 도시한 바와 같이 모의구간 시점에서 약 0.35 km 지점에 강동대교, 0.98 km 지점에 왕신천 유입, 1.35 km 지점에 수중보, 1.8 km 지점에 국당1교, 3.2 km 지점에 국당2교가 위치하며 구간 내에는 만곡 및 사행, 특히 수중보 전·후로 사주가 발달해 있어 2차원 흐름 및 이송확산 모의에 적합하다고 판단되었다.

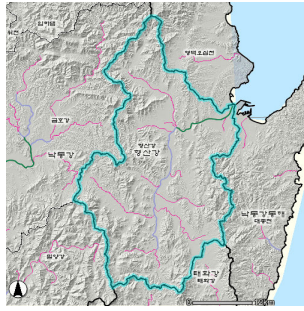


그림 3.1 형산강 유역도
(<http://www.wamis.go.kr>)



그림 3.2 모의구간 위성사진
(<http://www.congnamul.co.kr>)

3.2 유속장 검증

유속검증을 위해 06년 7월 17일 유속측정자료(표 4.1)를 사용하였다. 모의를 위한 유한요소망은 그림 4.1과 같다. 만곡 및 지천유입 등의 모의구간특징을 적절히 표현하기 위해 삼각망과 사각망의 혼합요소망으로서, 삼각요소 127개, 사각요소는 2120개로 총 2247개의 요소와 7029개의 절점으로 구성하였다. 경계조건으로는 상류조건 유량은 675 m³/sec, 왕신천 유입유량은 21.66 m³/sec, 하류조건인 수위는 EL. 2.88m를 사용하였다. 이 때 적절한 수면경사를 표현하기 위해 하류단 수위가 10hr에 걸쳐 EL. 3.4m에서 2.88m로 낮아지는 비정상상태로 모의하였으며 총 모의시간을 30hr로 설정함으로써 수면이 고정된 이후 정상상태가 되도록 하였다. Manning 조도계수는 0.020, Eddy Viscosity는 권장값인 10000을 사용하였다. 국당2교에서의 실측자료(표 4.4)와 모의결과를 비교하여 그림 4.2에 나타내었다. 그림 4.2에서 볼 수 있듯이 실측값과 모의결과는 다소 차이를 보이고 있으나 그 오차와 2차원적인 분포를 보았을 때 모의가 잘 되었음을 보여준다.

표 4.1 Case2 측정 유속

거리 (m)	유속 (m/sec)	거리 (m)	유속 (m/sec)	거리 (m)	유속 (m/sec)
60	0.351	120	1.102	180	1.303
70	0.700	130	1.122	190	1.265
80	0.931	140	1.133	200	1.300
90	1.031	150	1.112	210	1.351
100	1.100	160	1.250	220	1.451
110	1.014	170	1.282		

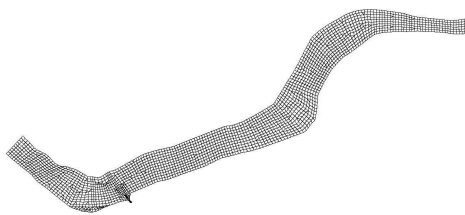


그림 4.1 유한요소망

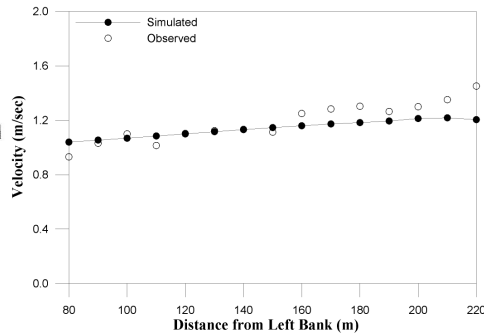


그림 4.2 모의유속 및 실측치 비교

3.3 RAM4 검증 및 적용

농도장 모의를 위해 RMA-2 유속장 모의를 실시하였다. 유속장 모의가 끝난 후 07년 7월 14일(Case : W1)현장에서 취득한 강동대교, 왕신천 및 국당2교에서 취득한 SS자료를 이용하여 RAM4 모형의 검증을 실시하였다.

경계조건은 표 4.6과 같고, 유한요소망은 그림 4.7과 같고, W1과 W2에 각각 사용된 node 수는 5,577개 및 6,642개, element수는 1,735개 및 2,179개이다. 케이스별로 적절한 수면경사를 표현하기 위해 하류단 수위를 10hr에 걸쳐 천천히 낮아지는 비정상상태로 모의하였다.

총 모의시간을 30hr로 설정하여 10hr이후 수위가 고정된 후 충분한 정상상태에 도달하게 하였으며 RAM4 모의를 위한 유속장은 최종 30hr 시간대의 유속장을 사용하였다.

표 4.6 Case별 경계조건

Case	유입유량(CMS)	왕신천 유량(CMS)	수위(EL.m)
W1	71	2.98	2.64 → 1.04

CMS = m³/sec

RAM4 모의를 위해 W1, W2의 두 가지 케이스로서 RMA-2 유속모의를 실시하였고, 유속장은 그림 4.15와 같다. 현장에서 취득한 부유사 농도를 바탕으로 중·횡방향 확산계수를 설정하고, 연속적인 농도 주입조건으로 RAM4 모의를 실시하였고 그림 4.17에서 농도장을 표현하였다. 두 경우 모두 2차원적인 분포를 보여주며 그림 4.19과 같이 다소 오차는 있으나 실측값의 범위와 근사한 값과 그 분포를 보여주고 있다.

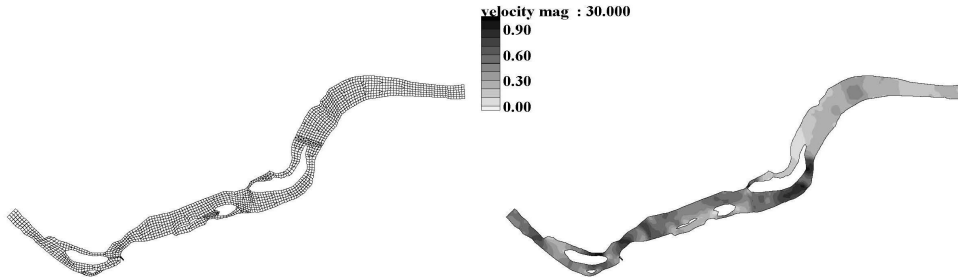


그림 4.13 W1 유한요소망



그림 4.15 W1 유속장

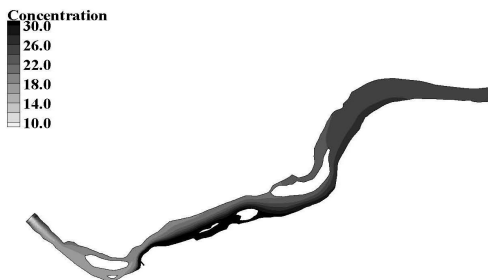


그림 4.17 W1 농도장

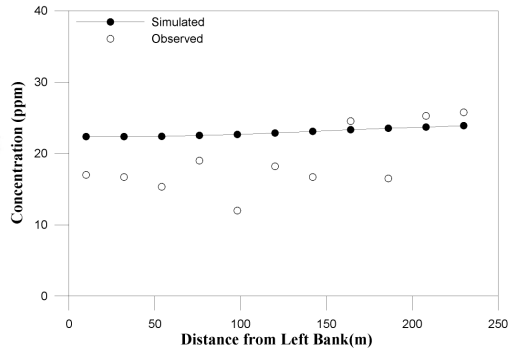


그림 4.19 W1 실측값과 모의결과 비교

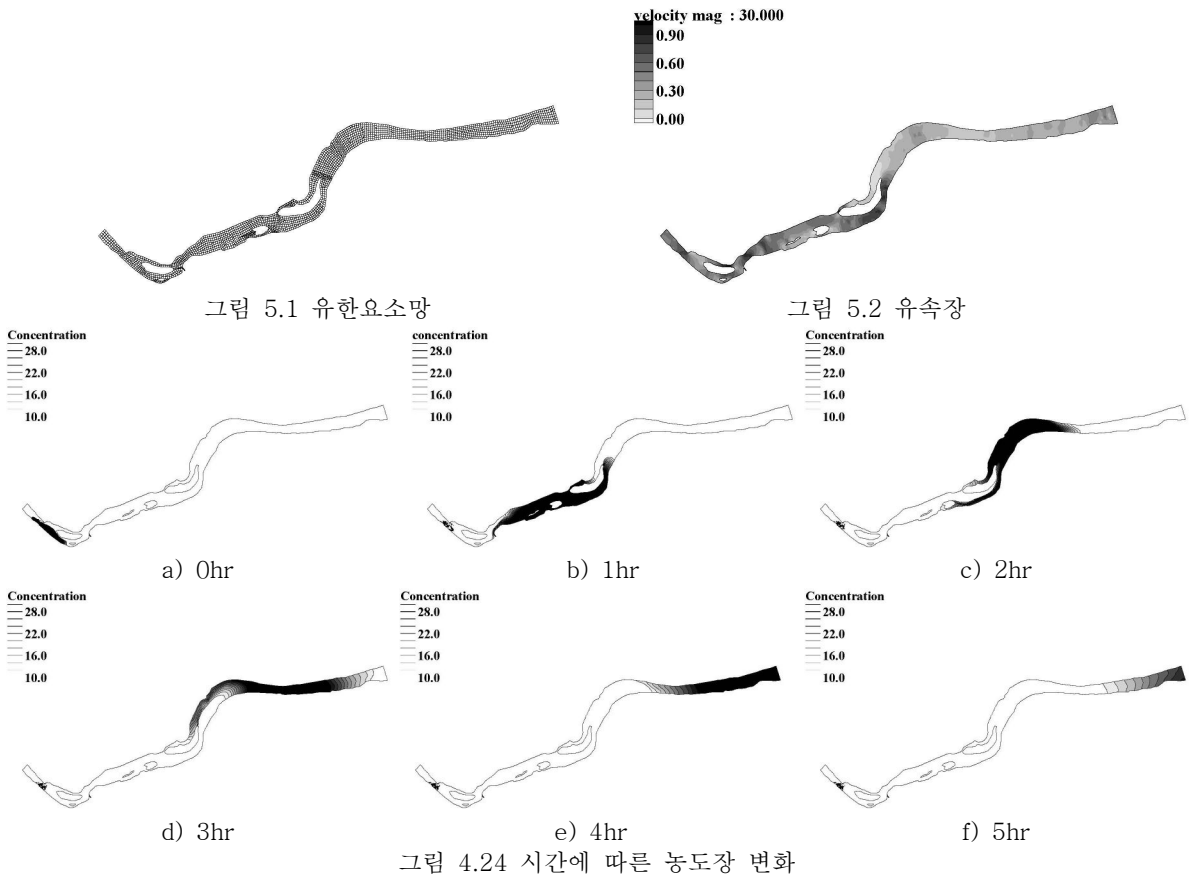
4. 확산거동 예측

본 연구에서는 가상의 시나리오로 강동대교에서 사고로 인한 오염원의 순간적인 주입 시 인근 취수장에 미치는 영향을 알아보았다.

강동대교는 경상북도 경주시 강동면 오금리에 위치하며 포항과 경주간 산업도로로서 교통량이 많을 뿐 아니라 과속하는 지점이기도 하고, 또한 도로의 선형이 만곡형으로 건설되어 있어서 유량, 유속 및 각종 측정 작업 시 상당한 주의를 요하는 지점이다. 강동대교 만곡부분인 형산강 본류 좌안에서 사고로 인한 순간적인 오염물 유입을 설정하여 RAM4를 모의하였다.

취수장까지 오염물의 이송 및 확산을 알아보기 위해 모의구간 범위를 약 2.4 km 확대하였고, 경계조건은 W1의 경계조건을 사용하였다. 그림 5.1 ~ 5.2는 모의구간에 대한 유한요소망 및 유속장을 나타내었다. 모의구간을 특성을 적절히 표현하기 위해 삼각망과 사각망을 각각 238개, 1936개로써 총 2174개의 혼합요소망으로 구성하였으며, 절점수는 7000개이다. 기저농도는 0 ppm, 주입농도는 10,000 ppm으로 설정하였고, 취수장에서 10 ppm 이하로 내려왔을 때 시나리오가 종료된 것으로 가정하였다.

그림 4.23에 시간에 따른 농도장의 변화를 나타내었다. 취수장과 강동대교의 거리가 길어 오염원이 취수장까지 도달하기 전에 횡단면 전체로 확산이 일어나는 것을 확인 할 수 있으며, 2차원적인 거동은 오염물 주입이후 유폭하면서 왕신천 부근에서 전단면에 걸쳐 횡혼합이 완료되는 것을 볼 수 있었고, 오염원이 취수장을 지나고 다시 10 ppm 이하로 돌아오기 까지 걸리는 시간은 약 6hr로 모의되었다.



5. 요약 및 결론

본 논문에서는 형산강분류 약 4.3km에 적용하여 2차원 흐름을 분석하고 현장에서 취득한 유속자료로써 모형을 검증하였다. 검증된 2차원 유속자료 및 지형자료를 이용하여 2차원 이송-확산 모형인 RAM4를 모의하였고, 현장에서 취득한 SS자료로써 모형을 검증하였다.

가상의 시나리오를 설정하여 순간적인 오염원 주입 및 지속적인 오염원 유입에 대한 오염원 거동특성을 살펴으로써 인근 취수장에 미치는 영향을 알아보았다. 순간적인 오염원의 유입 시 모의구간을 빠져나가는 데 약 8hr가 소요되었다. 사주가 위치하는 지점에서 우안측은 흐름의 주수로 역할을 하여 오염원이 빨리 빠져나감을 보이지만 좌안측은 흐름이 느려 오염원이 길게 늘어지는 것을 볼 수 있었다. 이는 오염원이 좁은 곳에서 지체함을 보여주고, 사주로 인한 국부적인 수질 문제가 야기 될 수 있음을 보여준다. 또한 수중보를 기점으로 오염원이 전단면으로 확산되는 것을 볼 수 있었다. 이는 수중보가 흐름뿐만이 아니라 수질에도 지배적인 영향을 끼치는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 수심 적분된 2차원적인 유속 및 수질을 모의하고, 현장에서 직접 취득한 실측 자료와 비교함으로써 모형의 검증을 수행하였다. 그 결과 절대적인 수치에는 다소 차이가 있지만 모의결과가 실측 자료의 2차원적인 분포를 비교적 잘 표현하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건설교통부(2006). 낙동·형산강수계(대송 등 4개소) 유량측정조사 보고서.
2. 과학기술부(2007). 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업-RAMS 개발 2단계 최종보고서.
3. 정성태, 류시완, 김영도, 서일원(2007). 오염물 이송 및 확산에 거동 해석모형의 특성비교연구. 한국수자원학회 학술발표회 논문집
4. 한건연(2002). 2차원 지표수흐름 해석(SMS를 중심으로). 수자원학회. 제 10회 수공학WORKSHOP