

# 마산만에서의 담수 유입시 오염물의 이송 및 확산 Advection and Diffusion of Pollutant Inflow of Freshwater in Masan Bay

유민욱\* · 김영도\*\* · 류시완\*\*\* · 서일원\*\*\*\*

Yoo, Mim Wook · Kim, Young Do · Lyu, Siwan · Seo, Il Won

## Abstract

An estuary is very important that the seawater and the freshwater meet and they formed wide foreshore and estuarine which is used as the habitat of various living thing and spawning bed of fish. Masan bay is typical closing bay in Korea. It is located 9 km from the open sea and most inside of Jinhae bay. The width of bay entrance is less than 1 km, where the flow velocity is very low. The large scale industrial complex of Masan bay is located in near Masan and Changwon city whose population is about 100 million. Because of low tidal velocity, the pollutants from the land are accumulated, which makes the water quality worse in Masan bay.

The purpose of this study is to analyze the various hydraulic characteristics using RMA-2 model. The advection and diffusion of pollutant is also simulated using RMA-4 model according to the inflow of Changwon-stream and Nam-stream. The hydraulic simulations include the effect of tide which can be characterized by the tide data of Masan bay tide observatory.

**Key Words** : Estuary, RMA-2, RMA-4, Tide

하구는 담수와 해수가 만나 넓은 갯벌과 기수역을 형성하여 각종 생물의 서식지이자 어류의 산란지로 이용되는 생태학적으로 매우 중요한 지역이다. 마산만은 우리나라의 대표적인 폐쇄성 수역으로 진해만의 가장 안쪽에 위치하며 외해로부터 9km 들어와 있으며, 만 입구의 폭이 1 km 미만으로 해류의 이동의 거의 없는 정체성 수역이다. 마산만산은 인근 마산, 창원 지역에 대규모 공단이 위치하며 100만에 이르는 인구로 인해 많은 오염물질이 유입되어 만의 오염을 가중 시키고 있다. 정체성 수역인 마산만의 특성상 유입되는 오염물은 외해로 배출되지 못하고 만 내부에 축적되어 오염을 가중 시키고 있다.

본 연구에서는 마산만 최내측에 위치한 창원천과 남천의 유입시 발생하는 수리적 거동을 2차원 유한요소 모형인 RMA-2모형 이용 모의하고 오염물질의 이송 및 확산을 RMA-4 모형을 이용하여 모의하였다. 또한 마산만 조위관측소의 조위자료를 활용하여 조위의 영향을 반영하였다.

## 1. 서 론

마산만은 특별관리해역으로 지정된지 20년이 지났으나 오염정도는 크게 개선되어지고 있지 않는 실정이다. 마산만은 인근 마산, 창원, 진해 등의 대규모 공단과 100만에 이르는 인구로부터 많은 오염물이 유입되고 있으나 폐쇄성 수역인 마산만의 특성상 유입된 오염물들은 외해로 빠져나가지 못하고 마산만 내부에 축적되어 오염을 가중 시키고 있다. 마산만은 하구의 봉암갯벌이 위치하고 있으며 다양한 어류 등이 서식하고 있는 생태학적으로 매우 가치가 매우 높은 지역으로서 보존과 관리가 필요하다.

본 연구에서는 마산만의 최내측에 위치한 창원천, 남천 그리고 삼호천에서 유입되는 오염물질의 거동과 농도

---

\* 비회원 · 인제대학교 환경공학부 · 석사과정 · E-mail: ooki4@nate.com  
\*\* 정회원 · 인제대학교 환경공학부 · 조교수  
\*\*\* 비회원 · 창원대학교 토목공학과 · 조교수  
\*\*\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템학부 · 교수

분포를 2차원 유한요소 모형인 RMA-2모형과 RMA-4모형으로 마산만의 조위의 영향을 반영하여 모의하였다.

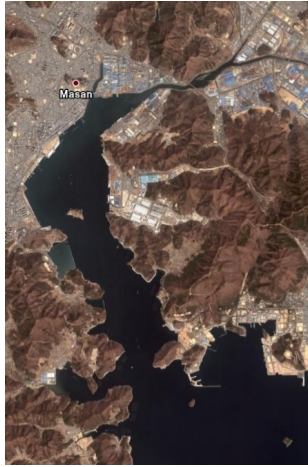


그림 1. 마산만 전경

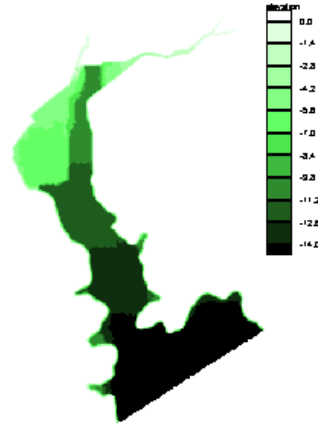


그림 2. 마산만 수심도

## 2. 이론적 배경

하천에서의 흐름거동을 2차원적으로 해석하는 데에는 상용 프로그램인 SMS 모형이 많이 사용되고 있다. SMS 모형은 유한요소법을 사용하는데 유한차분법에 비해 경계처리가 용이한 장점을 가지고 있어 실무에 많이 적용되고 있다. SMS(ECGL, 1995)는 미국 Brigham Young 대학의 ECGL(Engineering Computer Graphic Laboratory)과 미공병단의 WES(Waterway Experiment Station), 그리고 FHWA(Federal Highways Administration) 등에서 개발한 프로그램으로 현재 상용화 되어 있다. SMS는 지표수에 대한 모델링 및 해석을 위한 일종의 전·후처리 시스템으로 모형의 수행을 위한 입력파일의 작성이나 결과해석을 위한 그래픽 가시화작업을 수행한다.

RMA2 모형은 미공병단에서 1973년 처음 개발된 이래로, 하중도를 포함한 하천수로구간의 흐름, 교각 부근의 흐름, 유수단면의 확대 및 축소부를 포함한 하천구간의 흐름 등, 하천, 저수지, 하구의 수리동역학적 해석에 널리 사용되어 왔다. 모형의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 수심적분한 2차원 천수방정식으로 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} h\frac{\partial u}{\partial t} + hu\frac{\partial u}{\partial x} + hv\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho}\left(E_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + gh\left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}\right) \\ + \frac{gun^2}{h^{1/3}}(u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2h\omega v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} h\frac{\partial v}{\partial t} + hu\frac{\partial v}{\partial x} + hv\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho}\left(E_{yx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + gh\left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y}\right) \\ + \frac{gvn^2}{h^{1/3}}(u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \Psi + 2h\omega v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $u, v$ 는 직교좌표계에서의 유속,  $x, y, t$ 는 직교좌표계와 시간,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $E_{xx}$ 는  $x$ 방향평면의 법선 와점성계수,  $E_{yy}$ 는  $y$ 방향평면의 법선 와점성계수,  $E_{xy}$ 는  $x$ 방향평면의 접선 와점성계수,  $E_{yx}$ 는  $y$ 방향평면의 접선 와점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $a$ 는 하상표고,  $n$ 는 Manning의 조도계수,  $\zeta$ 는 바람응

력계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\Psi$ 는 풍향,  $\omega$ 는 지구자전각속도,  $\phi$ 는 위도이다.

RMA4는 SMS의 오염물질 이송확산모형으로서 Norton 등(1973)에 의해 처음 개발되어 WES의 여러 연구자들에 의해 많은 개선이 이루어져 왔다. RMA4 모형은 주어진 격자의 속도장을 정의하기 위하여 RMA2의 수리동역학적인 해를 사용한다. 사용자가 지정한 격자점 입력이 필요한데, 이 격자점 입력은 질량 또는 농도로 정의되며 각 오염물질의 소멸률에 의해서도 정의된다. RMA4의 계산결과는 SMS의 후처리 기능을 사용하여 여러 형태의 그림으로 표시하여 검토할 수 있다.

RMA4 모형은 비압축성 유체에서 보존성 물질의 3차원 이송확산방정식을 수평방향에 대하여 수직적분한 2차원 이송확산방정식을 지배방정식으로 사용하여 다음과 같다.

$$h\left(\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} - D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \sigma + kC\right) = 0 \quad (4)$$

여기서,  $C$ 는 물질의 농도,  $D_x$ 와  $D_y$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 종분산계수,  $\sigma$ 는 물질의 질량 공급원,  $k$ 는 생·학적 반응에 의한 물질의 소멸률을 나타낸다.

### 3. 모형의 적용 및 결과분석

#### 3.1 모형의 적용

오염물질의 농도변화를 예측하기 위한 RMA-4 모형을 위한 유한요소망은 RMA-2 모형에 의한 흐름특성에 관한 것과 동일한 것이 이용되며 창원천, 남천 합류지점부터 마산만 입구 경계지점까지 약 15km 설정하여 계산을 수행하였다. 오염농도변화예측을 위한 RMA-4 모형은 RMA-2모형에서 구한 출력자료를 입력자료로 사용하여 모형이 구성되는데, RMA-2 모형의 경계조건인 유량 자료는 임의로 가정하였으며 하류단 경계조건인 수위자료는 2005년 6월19일 00시부터 동년 동월 21일 23시까지 국립해양조사원 마산만조위관측소에서 측정된 자료를 이용하였다.

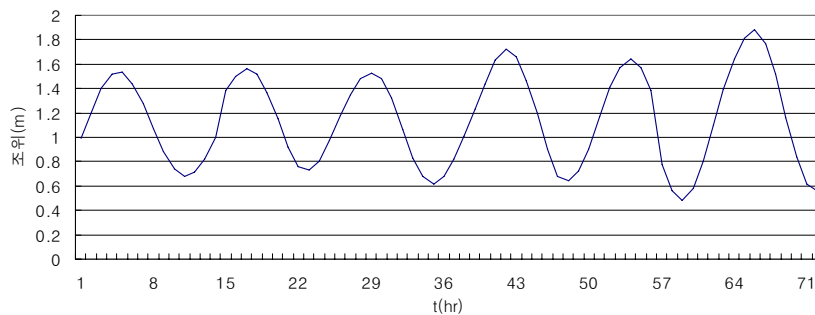


그림 3. 2005년 6월 19일 마산만 조위

#### 3.2 오염물질 거동 및 분석

본 연구에서는 총 72시간 동안 오염물질의 거동을 모의 하였으며 그림 4의 Case-1, 2, 3은 각각 0.8일, 2일, 2.8일 후의 오염물질의 농도 분포를 나타낸 것이다.

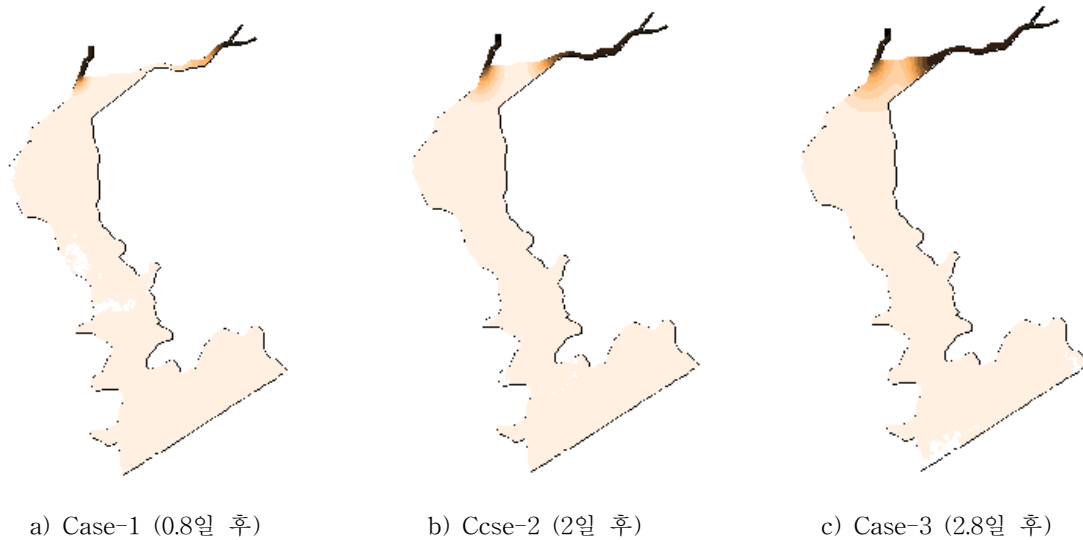


그림 4. 시간에 따른 오염물질 농도 분포

마산만으로 유입된 창원천과 남천의 오염물질은 모의시간인 72시간이 다되어서야 약 5km를 이동하여 삼호천 합류지점까지 이동하였고 삼호천에서 유입된 오염물질은 72시간 동안 하구근처에서 크게 이동하지 못하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 마산만 최내측에 위치한 창원천과 남천의 유입시 발생하는 수리적 거동을 2차원 유한요소 모형인 RMA-2모형 이용 모의하고 오염물질의 이송 및 확산을 RMA-4 모형을 이용하여 모의하였다. 창원천 28 CMS, 남천 35 CMS, 삼호천 40 CMS로 유입 유량을 가정하였고 동일한 농도로 가정하여 마산만조위관측소의 조위관측자료를 반영, 총 72시간 동안 오염물질의 이송 및 확산 과정을 모의한 결과 최내측에서 유입되는 창원천과 남천은 72시간 동안 약 5 km를 이동하였고 삼호천에서 유입된 오염물질은 하구에서 크게 이동하지 못 하였다. 정체성 수역인 마산만의 특성상 유입된 오염물질은 만의 내부에서 원활한 이송 및 확산을 하지 못하였고 이는 오염물질이 만의 내부에 축적되는 것으로 판단되어진다. 또한 조위에 의해 오염물질의 미세한 역류도 발생함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정기초 연구비 지원(과제번호:R01-2006-000-11027-0; 과제명: 연안수질환경개선을 위한 하천-해양 통합 해석기술 개발)으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 이남주, 박재현, 김영도, 류시완 (2006), "SMS를 이용한 서낙동강의 2차원 흐름 및 확산거동 연구" 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집
2. 이남주, 김영도, 권재현, 신찬기 (2007), "수문운영에 따른 서낙동강 수질변화에 관한 이차원 수치모의" 대한상하수도학회 논문집
3. 김정민, 최홍운, 이연길, 박성천 (2005), "SMS모델에 의한 오염물질 이송특성 연구" 대한토목학회 정기학술대회 논문집
4. 송창근, 서일원, 이명은 (2007), "한강 하류부에서의 조석에 의한 역류 및 확산" 한국수자원학회 학술발표회 논문집