

# 확산모형에 의한 하구에서의 오염물질이동 예측

## Prediction of Pollutant Transport by Dispersion Model on Estuary

박 영 욱\* · 박 상 현 · 천 만 복(농기공) · 이 봉 훈(농림부) · 권 순 국(서울대)

Park, Yeong Wook · Park, Sang Hyun · Chun, Man Bok · Lee, Bong Hoon · Kwun, Soon Kuk

### Abstract

Environmental impact on a land reclamation project, Hwaong tidal barrier was studied using the dispersion and advection model to predict the influence of polluted water discharged from freshwater reservoir. The simulation results show that the distribution of concentration by influence of polluted water discharged during a tidal cycle appeared to be extinguished at almost all points after two tidal cycle. Peak concentration near the sluice gates is found out to be higher during the spring tide than neap tide. Equi-concentration contour line appeared to distribute a longer according to line of sea dike in spring tide than neap tide. The reason is because influence by currents of northwest direction is a stronger, compared to spring tide and neap tide in the flood tide.

### 1. 서론

일반적으로 방조제의 건설은 담수를 이용할수 있는 광대한 담수호를 조성하여 수자원의 확보 및 홍수위의 적절한 조절로 배수개선 효과를 가져올 것으로 기대된다. 그러나 시화호의 경우에서 나타났듯이 방조제의 건설로 인해 담수호 내부로의 해수유입이 차단되어 수체를 정체시키게 되고, 또한 도시화 산업화에 따라 유역의 오염부하량이 증가하게 되어 담수호의 수질이 급격히 악화되는 경우가 발생할 수 있다. 수질이 악화된 담수를 연안에 방류하게 되면 주변해역에 심각한 환경영향을 미치게 된다. 방조제 건설에 따른 해양환경변화의 추정은 조석계산과 그에 따른 오염물의 확산 이송등에 대한 영향범위의 예측을 통하여 규명할수 있는데, 이를 위해서는 추정결과와 검정과 함께 방조제 건설진후에 대한 조석계산을 실시하여야 한다. 본 연구에서는 수치모형에 의해 계산된 조석계산의 결과를 오염물질의 이송 확산방정식의 입력자료로 사용하여 현재 방조제 공사가 진행 중인 화옹지구에 조성될 담수호가 오염될 경우 배출된 방류수가 외해에 미치는 영향범위를 예측하고자 한다.

### 2. 수치모형

RMA2 모형이 사용하는 지배방정식은 자유수면을 가지는 수심 적분된 2차원 연속방정식과 운동방정식으로 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} h\frac{\partial u}{\partial t} + hu\frac{\partial u}{\partial x} + hv\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho}\left(E_x\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + gh\left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}\right) \\ + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2}(u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2h\omega v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} h\frac{\partial v}{\partial t} + hu\frac{\partial v}{\partial x} + hv\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho}\left(E_x\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + gh\left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y}\right) \\ + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2}(u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \Psi + 2h\omega u \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서  $h$  : 수심,  $u, v$  : 직교좌표계에서의 유속,  $x, y, t$  : 직교좌표와 시간,  $\rho$  : 밀도,  $E_x$  :  $x$  방향의 와점성계수,  $E_y$  :  $y$  방향의 와점성계수,  $g$  : 중력가속도,  $a$  : 바닥면의 높이,  $n$  : Manning의 조도계수,  $\zeta$  : 바람에 의한 전단응력계수,  $V_a$  : 풍속,  $\Psi$  : 풍향,  $\omega$  : 지구의 자전각속도,  $\phi$  : 위도를 나타낸다.

또한 오염물질의 이송확산 해석을 위한 수치모형인 RMA4모형의 지배방정식으로 사용되는 수심 적분된 이송·확산방정식은 다음과 같다.

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

위 식에서  $C$  : 오염물질 농도,  $D_x, D_y$  :  $x, y$  방향의 분산계수,  $\sigma$  : 오염물질의 생성 및 소멸,  $k$  : 오염물질의 반응률상수(reaction rate coefficient) 이다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 대상해역의 개요

화옹지구의 방조제 건설은 농업종합개발사업의 일환으로 수행되는 간척지 개발사업으로 공업화와 도시화 등으로 인하여 전용되는 농지조성과 수자원 확보등 농어촌 발전기반을 마련하기 위하여 화성군 일대에 2조 9,810m의 방조제를 축조하고 6,212ha의 간사지를 개발하여 4,482ha의 농지와 1,730ha의 수자원을 확보하기 위한 간척지 종합개발사업이다. '91년에 착공된 방조제는 현재 방조제 연장 9,810m 중 7,520m의 물막이가 진행되었으며, 통수단면적으로 비교하여 보면 약 73%가 정도가 감소한 상태이다. 현재 공사가 진행중인 우정방조제는 2002년 상반기 끝막이를 목표로 공사가 추진 중에 있으며, 약 1450m가 개방구간으로 남아있다.

#### 3.2 격자망 구성 및 바닥지형

본 연구에서의 개방경계는 모델의 목적을 충족시키기 위해서 모델의 해측 경계는 우정방조제 건설후의 조석체계의 변화가 모형의 개방경계에 이르지 않도록 방조제 건설 대상지역에서 충분한 거리를 두고 외해에 설정하였다. 위와 같은 조건을 고려하여 설정된 수치모델의 범위는

북측의 영흥도에서 남측의 가로림, 아산만까지, 서측으로는 자월도 일대까지를 포함하고 있다. 대상해역의 넓이는 대략 55km×44km 정도이다.

대상해역에 대한 격자망의 구성 UTM 좌표계 상에서 사각형 요소와 삼각형 요소를 채택하였다. 모형의 적용을 위한 영역의 격자망은 122×147 = 17934개의 격자로 구성하였다.

또한 모형에 입력되는 격자 지점별 수심은 평균해면으로 부터의 수심이다. 각 격자 지점별 수심은 수로국의 해도 No.306, 307 기준으로 하였으며, 조간대등 해도로부터 독취하기 어려운 지역은 건설부 발행 서해안 간척지 현황도(1975년)를 참고로 하여 작성하였다.

### 3.3 경계조건 및 매개변수 설정

모형의 입력자료중 개방경계조건으로는 경계절점에서의 조위자료나 유량자료등이 필요하다. 모형의 대상해역에 대한 개방경계조건을 설정하기 위하여 화옹지구 연안에서 수집된 조화상수와 황해모델링 결과를 고려하여 10개의 주요 조석 분조를 사용하였다. 그리고 상류측 경계조건으로는 하천 유입량이 고려될 수 있으나 모의발생기간 동안에는 하천으로부터의 유입량이 없어 고려하지 않았다.

본 모형에 적용된 계산시간간격은 수치실험을 통하여 계산시간 간격이 해의 정확도 및 안정성에 영향을 미치지 않는 시간간격인 0.25시간(hour)을 택하였으며 Coriolis항을 고려하기 위한 위도는 37.25°를 사용하였다. 수온은 18 °C, 해수의 밀도는 1026.84 kg/m<sup>3</sup>을 사용하였다.

### 3.4 모형의 검정

모형의 검정은 모형의 적용을 위해 모형의 각종 파라메타를 대상해역의 조건에 맞게 일치시키는 과정으로 모의발생치와 실측치가 가장 잘 일치되었을 때의 파라메타를 추정하기 위하여 실시한다. 이러한 모형의 검정은 후처리과정에서 발생하는 시간별 실측조류속과 모의발생조류속이 가장 잘 일치되었을 때를 취하는 방법으로 수행하였다. 모형의 검정은 '99년 3월에 방조제 개방구간 해역에서 관측된 조류속 자료에 대하여 소조기와 대조기로 구분하여 수행하였다.

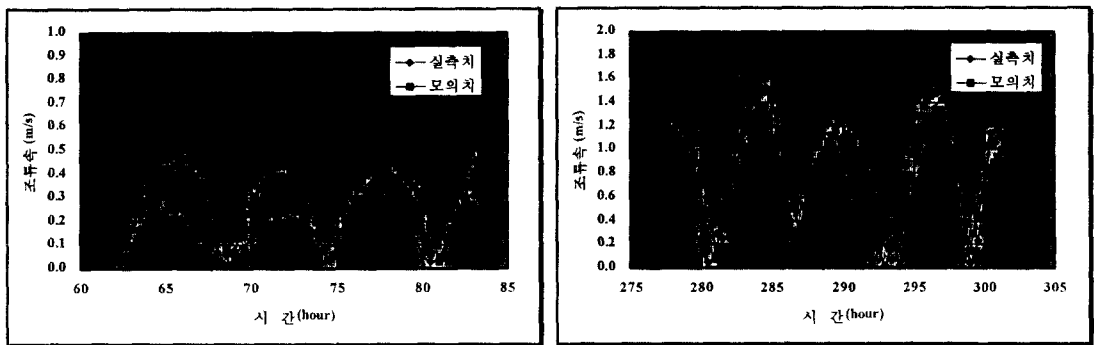


그림1 소조기 및 대조기 실측조류속과 모의발생조류속 비교

Manning의 조도계수에 대한 보정결과 조도계수 n의 값이 0.030일때 실측치와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림1은 방조제 개방구간 부근에서의 소조기 및 대조기에 대한 시간별 실측조류속과 모의발생조류속의 비교결과를 나타낸 것이다. 비교결과 시간별 실측조류속과 모

의 발생 조류 속은 소조기에서는 모의 발생치의 최대 유속이 실측치에 비해서 다소 크게 나타나고 있으나, 대조기에서는 주기성이나 고조 및 저조에서의 최대 유속의 크기나 위상등에서 잘 일치하는 것을 보여주며 아주 유사한 경향을 가지고 거동하는 것으로 나타났다.

#### 4. 배수갑문 방류에 의한 오염물질 이동

##### 4.1 배수갑문을 통한 방류경계조건

배수갑문을 통한 방류량은 권과 나(1986)의 연구결과를 이용하였다. 이들의 실험연구 결과인 방류량은 다음과 같은 공식으로 구할 수 있다.

$$Q = \mu B H_1 \sqrt{2gH_1} \quad (5)$$

여기서  $\mu$ 는 실험으로 결정되는 유량계수이고  $B$ 는 위어의 폭,  $H_1$ 은 상류의 수심이고  $g$ 는 중력가속도이다. 식(5)는 하류수심의 영향을 받지 않는 완전월류인 경우에만 유량을 산정할 수 있는 식이나 권과 나(1986)는 수리모형실험을 통하여 상류와 하류의 수심비인 잠수도( $S=H_2/H_1$ : submergence ratio)에 따른 유량계수의 회귀식을 이용함으로써 잠류(submerged flow)인 경우에도 이용할 수 있도록 하였다. 이들이 제안한 유량계수의 회귀식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu &= 0.35 && : && S \leq 0.8 \\ &0.99 \sim 0.81S && : && 0.8 < S < 1.0 \end{aligned}$$

우정방조제의 배수갑문은 1호 방조제 시점 부근에 위치하며 폭이 10.0m인 갑문 6련이 있다. 갑문의 Sill 표고는 EL.-5.5m이며, 담수호의 홍수위는 EL.+0.4m 이다. 따라서  $H_1$ 은 홍수위인 경우 5.9m가 된다. 잠수도를 구하기 위해서는 방조제 외측의 수위를 알아야 하는데 이를 구하기 위해 배수갑문을 통한 방류량이 없는 조건에서의 조위계산을 수행하였다.

계산의 수행결과로 얻어진 조위를 이용하여 잠수도를 결정하고 유량계수의 회귀식을 이용하여 호측이 홍수위인 경우에 대한 방류량을 결정하였다. 각 조석 주기별 방류경계조건은 그림2에서와 같다.

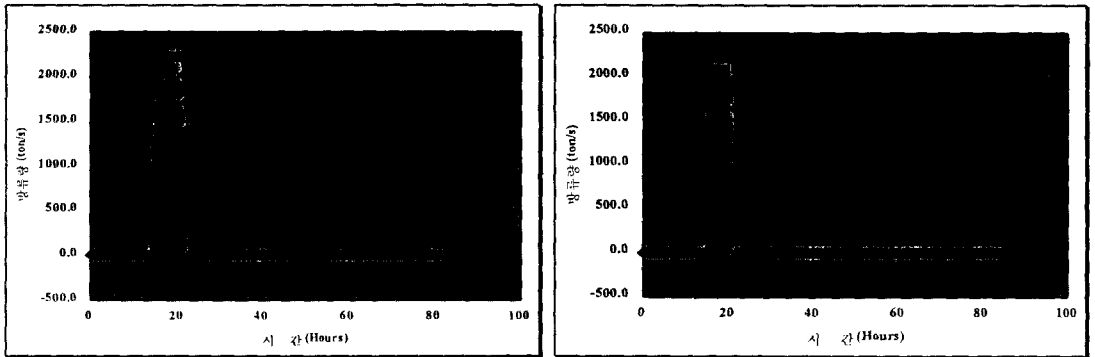


그림2 소조기 및 대조기 시간별 방류량

##### 4.2 배수갑문을 통한 방류시의 흐름

방조제 건설후 배수갑문을 통한 담수의 영향범위를 산정하기 위해서 먼저 배수갑문 방류에 따른 유동장을 계산하였다. 본 연구에서는 소조기와 대조기에 대해서 담수호측이 홍수위이고

방조제 외해측의 조위가 담수호측보다 낮은 경우에 대해서 배수갑문 방류경계조건에 따라 유량을 방류하는 것으로 하였다. 그림3은 대조기 배수갑문을 통하여 방류가 이루어지는 시간에서의 대표적인 유동장을 도시한 것이다. 배수갑문에서 방류량이 없을 경우 낙조시 조류의 흐름은 방조제 건설전에는 방조제 개방구간에서 방조제 내부에서 외부로의 유량의 방출로 인하여 남서방향으로 빠르게 흐르는 것으로 나타났으나, 방조제 건설후에는 건설전에 비하여 다소 감소하여 방조제 노선과 나란하게 북서방향으로 흐르는 것으로 나타났다. 그리고 배수갑문에서의 방류량이 있을 경우는 저조시로 다가감에 따라 단위시간당 방류량이 증가하기 때문에 최대 방류유속 또한 점차 크게 나타났다. 창조시의 조류의 흐름은 낙조시와 반대의 경향을 나타냈다. 방조제 외해에서는 방조제 건설전후에 있어서 유속이나 유향에서 큰 차이를 나타내지는 않았다.



<저조시>

<창조시>

그림3 배수갑문 개방에 따른 대조기 조위분포 및 유속장

#### 4.3 RMA4 모형의 매개변수

##### 1) 분산계수

난류에 의한 확산(turbulent diffusion) 및 전단류(shear flow)에 의한 분산(dispersion)항은 유속과 농도의 시간평균과 공간평균과정에서 도입되는 항으로, 이러한 혼합과정은 분산계수를 도입하여 처리하며 물질의 혼합과정에서 중요한 역할을 담당하는 인자이다. 따라서 정확한 분산계수를 입력하는 문제는 모형의 정확도와 직결된 문제이지만, 실제로는 분산계수에 대한 관측자료가 없기 때문에 변수추정에 의존하여 입력하는 경우가 대부분이다. 본 연구의 대상지구인 화옹지구 역시 관측된 분산계수의 자료가 없으므로 문헌연구를 통한 추정작업을 통하여 분산계수를 결정하였다. Fischer 등(1979)은 하구에서의 1차원 종방향분산계수를 정리하였는데 일반적으로 약  $100 \sim 300 \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 값이 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 연구의 대상유역은 하천이나 하구와는 달리 연안이므로 주된 흐름방향이 존재하지 않으므로 종방향 및 횡방향 분산계수를 공히  $200 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 하였다.

##### 2) 반응률 상수

모형의 반응률상수는 흐름조건 및 수역의 정체정도, 수온등에 의해 다양한 값을 가지게 된

다(조건에 따라 0에서 0.3정도의 값을 가지는 것으로 알려짐). 하지만 화왕지구 해역의 반응률 상수를 구할만한 자료를 구할수 없어 본 연구에서는 서(1996)이 시화호 COD의 반응률 상수로 제안한  $0.005\text{day}^{-1}$ 를 사용하고자 하는데, 이 값은 외해에 개방되어 있는 순환이 자유로운 해역에 적용하기에는 다소 작은 값으로 판단되나 모의시간이 짧고 안정적으로 계산하기 위하여 이 값을 채택하였다.

#### 4.4 오염물질의 영향범위

RMA2 모형에서 구한 유동장을 이용하여 RMA4 모형에 의하여 배수갑문 방류에 따른 오염물질의 이송확산 범위를 예측하였다. 배수갑문을 통한 오염물질의 방류는 담수호측으로부터 COD  $6.0\text{mg/l}$ 의 담수가 COD  $3.0\text{mg/l}$ 의 해역에 배출되는 경우 방조제 외측의 주변해역에 미치는 영향 범위를 계산하였다.

그림4는 담수호는 홍수위를 유지하면서 소조기와 대조기에 방류하는 경우 시간에 따른 지점별 농도장의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보면 각 지점에서의 첨두농도는 소조기 보다는 대조기에서 더 높은 결과를 나타내고 있다. 그리고 각 지점별 농도의 분포를 보면 배수갑문 가까운 지점은 첨두농도가 발생한 이후 차차 농도가 하강하는 형태를 보이고 있으나, 배수갑문으로부터 멀어지는 지점에서는 시간의 추이에 따라 농도장의 확산으로 인하여 농도가 서서히 증가했다가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 배수갑문 바로 전면인 A 지점에서는 첨두농도가 발생한 이후 급격하게 농도가 감소 하나 B와 C 지점은 첨두농도가 발생한 이후 두번째 낙조시 농도가 다시 다소 증가했다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 것은 지체된 농도가 조류의 흐름에 따라 유동하면서 발생하는 것으로 보인다. 또한 그림에서 보면 한 조석주기 동안 방류된 담수의 영향으로 인한 농도의 분포는 거의 모든 지점에서 2주기를 지나면서는 거의 소멸하는 것으로 나타났다. 한편 그림5는 대조기시 홍수위를 유지하면서 방류하는 경우에 농도장을 도시한 것이다. 그림에서 보면 대조기에서는 반타원형으로 농도가 이송확산되어 가고 있는 것으로 나타났다. 배수갑문 방류에 따른 오염물질이 이송확산 되어 가는 형태를 보면 고농도선은 배수갑문 전면에서만 좁게 분포하고 있으나, 저농도선은 점차 확산되어 가면서 넓게 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한 방류가 끝난 후에 분산과정에 의해 농도장이 점차 확산되어 가며 반응과정을 통해 오염물질이 희석되어 가고 있는 것을 알 수 있다.

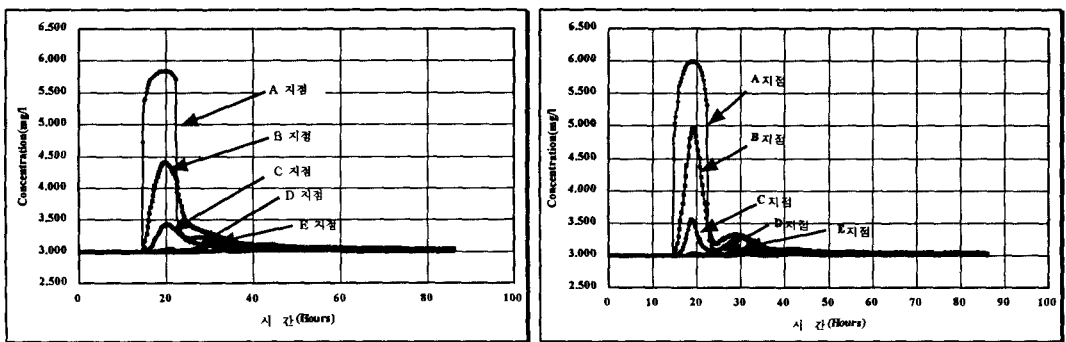
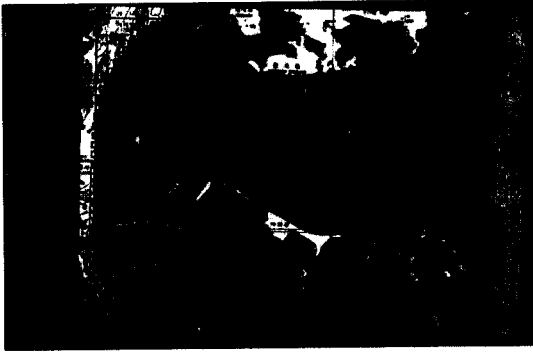


그림4 소조기 및 대조기 지점별 시간에 따른 농도변화



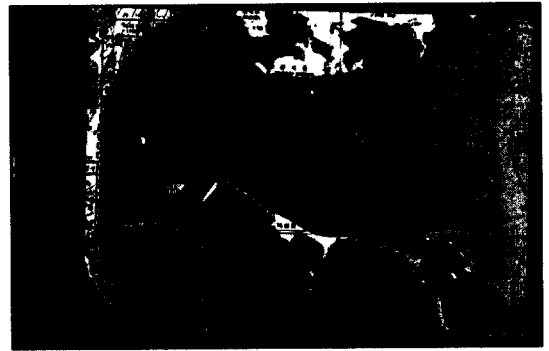
< 0.5시간 후 >



< 4.5시간 후 >



< 7.5시간 후 >



< 10.5시간 후 >

그림5 배수갑문 방류에 따른 오염물 농도분포

## 5. 요약 및 결론

화옹지구에 2차원 유한요소모형을 적용하여 배수갑문을 통하여 오염된 담수를 방류했을 경우에 인근해역에서의 오염물질의 확산범위와 추이를 예측하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 다음과 같다.

1) 조석 주기별 최대 확산 농도장을 나타내는 시간이 소조기가 약 21.5시간, 대조기가 약 18.75시간으로 나타나 조석 주기중 대조기의 확산 및 회석속도가 빠른 것으로 나타났다.

2) 각 지점에서의 침투농도는 소조기 보다는 대조기에서 더 높은 결과를 나타내고 있다. 그리고 각 지점별 농도의 분포를 보면 침투농도가 발생한 이후 시간이 경과하면 차차 농도가 하강하는 형태를 보이고 있다.

3) 대조기는 소조기에 비하여 오염물질의 농도선이 방조제 노선 방향으로 더 길게 분포하는 것으로 나타났다. 이는 대조기가 소조기에 비하여 창낙조시 북서방향의 조류흐름에 의한 영향을 더 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

4) 오염물질이 이송확산 되어 가는 형태를 보면 고농도선은 배수갑문 전면에서만 좁게 분포하고 있으나, 저농도선은 점차 확산되어 가면서 넓게 분포되는 것으로 나타났다.