

조류의 흐름에 의한 오염물질의 거동에 관한 연구

A Study on Behavior of Coastal Pollutant material by Tide Flow

이 혜 진* / 조 용 식**

1. 서 론

수자원은 한번 오염되면 단시간에 원상회복을 하기가 매우 어려워 예방과 오염물 확산방지가 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 그러므로 흐름수역 내에서의 오염물의 거동을 이해하고 예측하는 것이 무엇보다도 중요하며 이를 위해 이송-확산방정식의 해석이 필요하다.

현재까지 이송-확산방정식을 해석하고자 하는 많은 연구가 있었으며, 개선모형은 Eulerian 모형, Lagrangian 모형, Eulerian-Lagrangian 모형으로 구분할 수가 있다. 일반적으로 유한차분법을 사용하는 Eulerian 모형은 고정된 계산격자점들을 이용하므로 계산이 용이하나, 실제 물리적 현상과는 거리가 먼 수치 진동 및 수치분산이 발생하거나 상위, 보간을 취해야 하는 문제점을 안고 있다(이길성과 강주환, 1987). 이는 이송-확산방정식의 해석에 있어서의 문제점은 이송-확산방정식이 쌍곡선형 특성과 포물선형 특성을 동시에 지니고 있다는 것이며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 이송항과 확산항을 분리하여 각각의 특성에 맞는 해석기법을 사용하는 연산자 분리법(split-operator method)이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 이송항과 확산항을 별도로 취급하여 이송항의 해석에는 Lagrangian 기법을, 확산항의 해석에는 Eulerian 기법을 적용하여 해석하는 연산자 분리법인 Eulerian-Lagrangian 방법(ELM)이 널리 이용되고 있다(Cheng 등 1984; Yeh, 1990).

본 연구에서는 2차원 이류-확산 모형을 수립하기 위하여 Komatsu 등(1997)이 제안한 SOWMAC(second-order wave equation) 방법을 이용하여 이송항을 해석한 후, 확산항은 Three-level Locally Implicit 이론(Hobson 등, 1996; 이정규 등, 1997)을 이용한 2차원 확산수치기법을 적용하였다. 또한, 수치모델에 해수 흐름에 따른 유속변화를 고려하고, 조류의 영향의 따른 파고의 변동을 고려하여 실제 지형의 조건과 비슷하게 적용하여 일정한 시간간격으로 오염물질의 거동을 수치모의한다.

2. 지배방정식

농도의 연직변화를 무시할 수 있는 경우 오염물질의 이송-확산은 다음과 같이 수직적분된 2차원 물질보

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea. (e-mail) lhjin@ihanyang.ac.kr

** 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, (e-mail) ysc59@hanyang.ac.kr

존 방정식으로 표현할 수 있다(Falconer, 1991).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x} + \frac{\partial CV}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left[HD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left[HD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + q \quad (1)$$

여기서, C 는 수심평균 물질 농도이고, H 는 총 수심이며, U 와 V 는 각각 공간과 시간에 따라 변화하는 x, y 방향의 유속이다. $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$ 는 수심평균 분산과 난류 확산계수의 x, y 방향 성분이다. 그리고 q 는 source와 sink를 고려한 항이다. 식(1)은 이송과 확산이 별개의 연속적인 과정이라는 가정하에 도입된 연산자 분리법(split operate approach)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

이송항:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x} + \frac{\partial CV}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

확산항:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left[HD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left[HD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + q_c \quad (3)$$

본 연구에서는 이송항은 Komatsu 등(1997)이 제안한 SOWMAC 방법을, 확산항은 Hobson에 의해 제안된 Three-level Locally Implicit 이론 (Hobson 등, 1996; 이정규 등, 1997)을 이용한 ADI기법을 이용하여 2차원 확산수치기법으로 해석한다. 식(2)와 (3)을 차분하면 식(4), (5)와 같다.

$$\begin{aligned} 2(1-\chi)(C_{i-1}^{n+1} - 2C_{i-1}^n + \alpha C_i^n) + 2\chi[C_i^{n+1} - (\alpha+1)C_i^n + \alpha C_{i+1}^n] \\ = \alpha(\alpha+1)\theta(C_{i+1}^{n+1} - 2C_i^{n+1} + C_{i-1}^{n+1}) + \alpha(\alpha+1)(1-\theta)(C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_{i,j}^{n+1} = A(C_{i+2,j}^{n-1} + C_{i,j+2}^{n-1} + C_{i-2,j}^{n-1} + C_{i,j-2}^{n-1}) + B(C_{i+1,j+1}^{n-1} + C_{i-1,j+1}^{n-1} + C_{i+1,j-1}^{n-1} + C_{i-1,j-1}^{n-1}) \\ + E(C_{i+1,j}^{n-1} + C_{i,j+1}^{n-1} + C_{i-1,j}^{n-1} + C_{i,j-1}^{n-1}) + FC_{i,j}^{n-1} \end{aligned} \quad (5)$$

식(4)에서 α 는 Courant수로 $U \frac{\Delta t}{\Delta x}$ 이며, χ 와 θ 는 가중치이다. Komatsu 등(1997)은 χ 와 θ 를 일반적인 상수로 취급하지 않고 차분화 과정에 포함된 절단오차를 최소화하기 위해 Taylor series를 이용하여 α 의 함수로 표현하였다. 식(5)에서 사용된 계수는 다음과 같이 주어진다. 식(5)는 양해법과 음해법의 특성을 절충해서

$$\begin{aligned} A = \frac{K^2}{[1 + (4\alpha + 4)K + (16\alpha - 4\beta)K^2]}, \quad B = \frac{2K^2}{[1 + (4\alpha + 4)K + (16\alpha - 4\beta)K^2]}, \\ E = \frac{K[1 - 4(1 - \alpha)K]}{[1 + (4\alpha + 4)K + (16\alpha - 4\beta)K^2]}, \quad F = \frac{[1 + 4\alpha K + 4(1 - \beta)K^2]}{[1 + (4\alpha + 4)K + (16\alpha - 4\beta)K^2]}, \\ K = 2D\Delta t / (\Delta x)^2 \end{aligned}$$

만든 차분식이다. 2차원 단순 양해법의 경우 $p(i,j)$ 을 구하는 경우 $p(i+1,j), p(i-1,j), p(i,j+1), p(i,j-1)$ 만을 이용하여 확산항을 해석하였다. 하지만 본 연구에서 사용한 2차원 수치기법은 $p(i+2,j), p(i-2,j), p(i,j+2), p(i,j-2), p(i+1,j+1), p(i-1,j+1), p(i+1,j-1), p(i-1,j-1)$ 의 수치격자까지 감안하여, 2차원 해석에서 일어날 수 있는 시간간격의 제약을 완화하였다(이정규와 김광기, 2001).

3. 수치계산 및 적용

본 모형을 검증하기 위해 유속 $U, V=1m/sec$, 확산계수 $D=10m^2/sec$ 를 갖는 2차원 흐름에 대해 수

치계산을 하여 정확해의 결과와 비교하였다. 단위길이 당 질량 $M(kg/m)$ 의 오염물이 $x=0, y=0$ 에 순간적으로 방류되었을 때, 시간 t 가 경과된 후의 농도분포에 대한 정확해는 식(6)와 같다.

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi Dt} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2 + (y-vt)^2}{4Dt}\right] \quad (6)$$

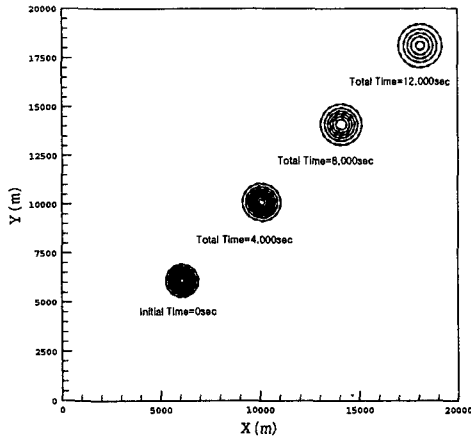


그림 1. 시간에 따른 농도분포

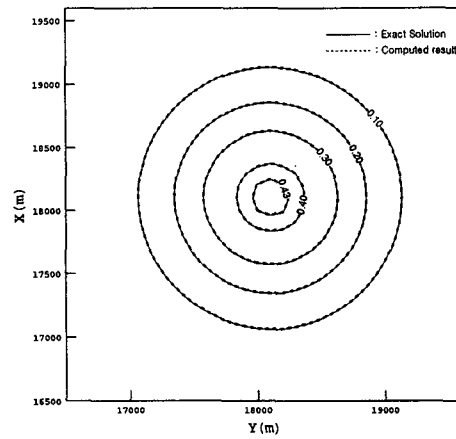


그림 2. 12000 sec 경과후

그림 1은 유속분포가 일정한 경우 순간오염원에 대한 이송확산방정식의 해석결과로 총 계산시간 4000 sec, 8000 sec, 12000 sec에 따라 정확해와 수치해결 등농도선으로 나타낸다. 그림 2는 총 계산시간 1200 sec가 지난후의 농도를 나타낸 것이다. 그림 2에 나타난 것과 같이 총 계산시간 12000 sec에서의 정확해와 수치해는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 실제 현상에 적용해 보기 위해 부산 신항만 건설시의 환경에 적용하여 수치모의를 하였다. 본 수치모의에서는 좀 더 실제상황과 같게 하기 위하여 변동유속장과 reaction항인 sink와 source항을 고려하였다. 유속값은 이동경계조건을 적용한 천수방정식을 수치계산하여 조석을 모의해서 얻었다. 확산계수는 $10m^2/sec$ 라고 가정하였다. 오염물은 그림 3과 같이 투하하였다. 그림 4는 해수의 유속벡터와 오염물을 투하하여 14hr이 경과한 오염물질의 거동에 대한 수치모의 결과이다.

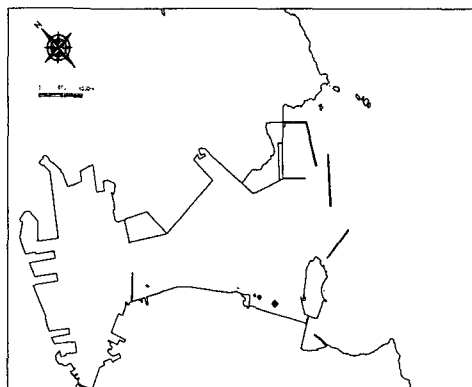


그림 3. 오염물 투하지점

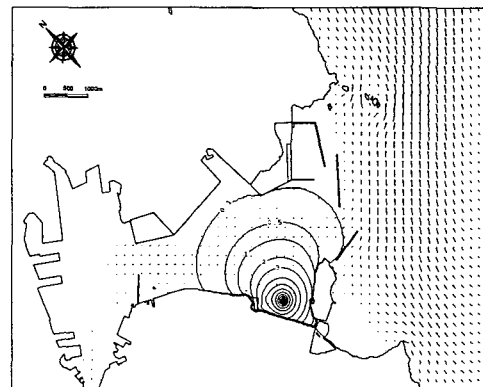


그림 4. 오염물 투하한 후 14hr 경과시

4. 결 론

본 연구에서는 연산자 분리기법에 의하여 이송항은 SOWMAC 방법을 이용하였고, 확산항은 Three-level Locally Implicit 이론을 이용하여 이송-확산방정식을 해석하였다. 본 모형과 정확해를 비교한 결과 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 본 연구에서의 수치모형을 실제지형에 적용하여 오염물의 거동을 재현해 보았다. 앞으로 이 결과를 실제 사례와 비교하여 문제점을 분석하고 모형을 수정하여 수자원오염의 예방과 오염물의 거동에 따른 확산방지대책의 수립하여 연안환경의 오염평가 및 사후관리기술에 실용화한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(한양대학교 해안공학연구실)으로 수행되었기에 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- 이길성, 강주환, (1987). "대류분산모형에 관한 유한차분근사의 특성." **대한토목학회논문집**, 제7권, 제4호, pp. 147-157.
- 이정규, 강창구 이종인, (1997). "연산자 분리기법에 의한 1차원 이송-확산방정식의 수치모형." **한국수자원학회논문집**, Vol. 30, pp. 143-154.
- 이정규, 김광기, (2001). "2차원 수치모형을 이용한 오염물질의 거동해석." **대한토목학회논문집**, 제22권, 제 5-B호, pp. 639-648.
- Cheng, R.T., Vicenzo, C. and Milford, S.N., (1984). "Eulerian-Lagrangian solution of convection-dispersion equation in natural coordinates." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 944-952.
- Falconer, R.A., (1991). "Review of modeling flow and pollutant transport processes in hydraulic basins." *Proc. of 1st Int. Conf. Water Quality Modelings in the Inland Environ., BHRA, Fluid Engineering*, Bournemouth, Paper J1, pp. 322-344.
- Hobson, J.M., Wood, N., and Mason, P.J., (1996). "A new finite-difference Diffusion Scheme." *J. of Computational physics*, Vol. 125, pp. 16-25.
- Holly, F.M. and Preissmann, A., (1977). "Accurate calculation of transport in two-dimensional." *J. of Hydraulic Division*, Vol. 103, No. 11, pp. 1259-1277.
- Komatsu T., Ohgushi K. and Asai K., (1997). "Refined numerical scheme for advective transport in diffusion simulation." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(1), pp. 41-50.
- Yeh, G.T., (1990). "A Lagrangian-Eulerian method with zoomable hidden fine-mesh approach to solving advection-dispersion equations." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 6, pp.1133-1144.