

조석의 영향을 받는 하천에서의 오염물 운송특성 해석

Pollutant Transport Analysis in a Tidal River

한 건 연*, 김 광 섭**, 김 상 호**

HAN Kun Yeun, KIM Kwang Seob, KIM Sang Ho

1. 서 론

하천 연안에서는 각종 산업시설의 확충과 인구의 증가에 따라 각종 산업 폐수가 방류되고 있으며 이에 따라 적정수질을 갖춘 용수의 확보가 심각한 사회문제로 대두되고 있다.

하천에서 수질해석을 위해서 얻기 위해서 사용되는 1차원 운송방정식의 안정된 해를 얻기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 유한차분법의 경우에는 이송항에 대하여 Taylor 급수전개에 따라 발생한 수치확산항은 유체이동항이 지배적인 경우에 원래의 확산항보다 크게 나타나는 경우가 있어 해가 진동하는 왜곡된 결과를 제시할 수도 있다. 유한요소법의 경우에는 해석과정의 난해성과 많은 계산시간이 소요되며 이송항이 지배적인 경우에 진동해가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 조석의 영향을 고려한 Lagrangian 추적기법에 의한 수질해석모형이 제시되었으며 이 기법은 유체이송에 따른 이동좌표계를 사용하여 왜곡된 해의 원인이 되는 이송항을 소거하여 정확한 수치해를 계산한다.

하천에서의 오염물의 운송해석을 위한 모형은 (1)식과 같은 1차원 운송방정식의 해를 구함으로서 수행된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (1)$$

이 식의 오른쪽의 첫번째 항은 유체이동항으로서 이 항은 수치해에 있어 확산, 과도계산, 과소계산, 負값의 농도, 동요 및 불안정성을 일으키게 된다. Lagrangian 기법에서는 이러한 유체이송항은 기준좌표계를 이동하여 사용함으로써 제거될 수 있어 운동방정식은 (2)식과 같이 기술된다.

* 경북대학교 토목공학과 부교수

** 경북대 대학원 토목공학과 석사 과정

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D \frac{\partial C}{\partial \xi} \right] \quad (2)$$

여기서 ξ 는 Lagrangian 거리좌표계로서 (3)식과 같이 정의된다.

$$\xi = x - x_0 - \int_{t_0}^t U dt \quad (3)$$

여기서 x_0 는 시간 t_0 에서의 위치, x 는 시간 t 에서의 위치로서 임의의 node에서 ξ 는 zero가 되어야 한다. 그림 1은 Lagrangian 계산과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

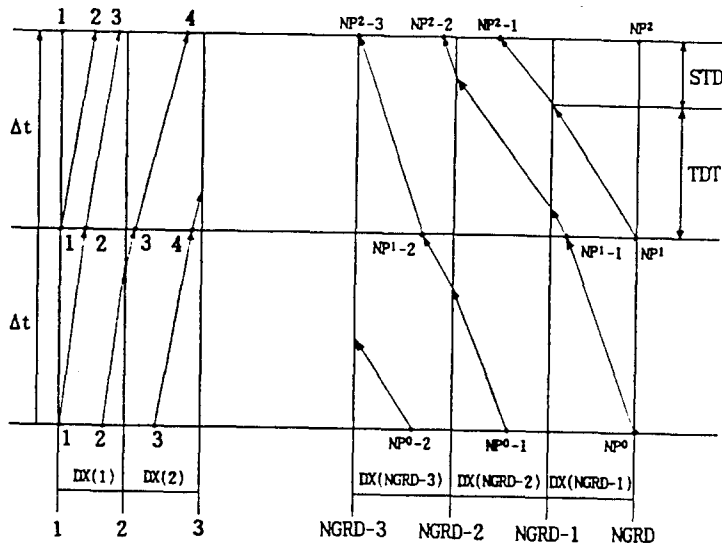


그림 1. Lagrangian 기법의 도식화

2. 1차원 이송방정식의 수치해

오염물의 유동해석을 위한 1차원 운송방정식의 안정된 수치해를 얻기 위하여 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔는바, 대부분의 연구은 이송항이 지배적인 경우에 있어서 나타나게 되는 수치해의 불안정성을 개선하는데 있었다. 본 연구 모형에 대한 해의 안정성과 정확성을 증명하기 위해 기존의 유한차분법 및 유한요소법과 비교 검토하였다. 유한차분법으로서는 QUICKEST 기법, MacCormack 기법, Keller Box 기법을 적용하였고, 유한요소법중에서는 선형 기저함수, 2차 기저함수, 3차 Hermitian 함수를 이용하여 해석하였다.

본 연구의 Lagrangian 기법에 의한 계산결과는 모든 흐름조건에 있어 진동, 불안정성, 수치확산등의 수치적인 어려움이 전혀 나타나지 않고 해석해와 잘 일치하고 있었다. 그림에서 C_r 과 D 는 각각 Courant 수와 확산계수를 나타낸다. 유한차분법의 경우에는 1차원 운송방정식을 Taylor 전개시킴으로서 발생하는 수치분산항이 수치해의 불안정성에 직접적 영향을 미친다. 이러한 영향을 감소시키는 근본적인 방법으로는 Taylor 식에서 계산상의 유효차수를 증가시키는 방법이 있다. 수치실험을 위하여 선택된 세가지 기법중 QUICKEST기법은 유효항을 3차항까지 증가시킨 기법으로 계산결과 유한차분법 중 정확도가 가장 좋은 것으로 나타났다.

유한요소법에서도 이송항이 지배적인 경우에 있어서 해가 진동하였으며 계산에 사용된 세가지 기법 즉, 선형기저함수, 2차기저함수, 3차 Hermitian 함수를 이용한 방법중에서 3차 Hermitian 함수가 가장 정확한 것으로 나타났다.

QUICKEST기법과 Hermitian 함수를 이용한 기법을 Lagrangian 기법 및 해석해와 비교한 결과를 그림 2-3에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 확산항이 없는 유체이동항만이 존재하는 경우 Lagrangian 기법만이 해석해와 일치하고 있었고, 확산항이 증가됨에 따라 Lagrangian, QUICKEST, Hermitian 모두가 동일한 계산결과를 나타냈다. 따라서, 실제 자연하천 흐름에 있어 유체이동항의 영향이 크게 나타나는 것을 고려할때 Lagrangian 기법은 Eulerian 기법과는 달리 운송방정식에서 유체이송항을 포함하지 않게 되어 수치해석상의 수치확산 및 불안정성이 극복될 수 있어 시간변동성을 갖는 오염물의 방류와 누출에 따른 유동해석이 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

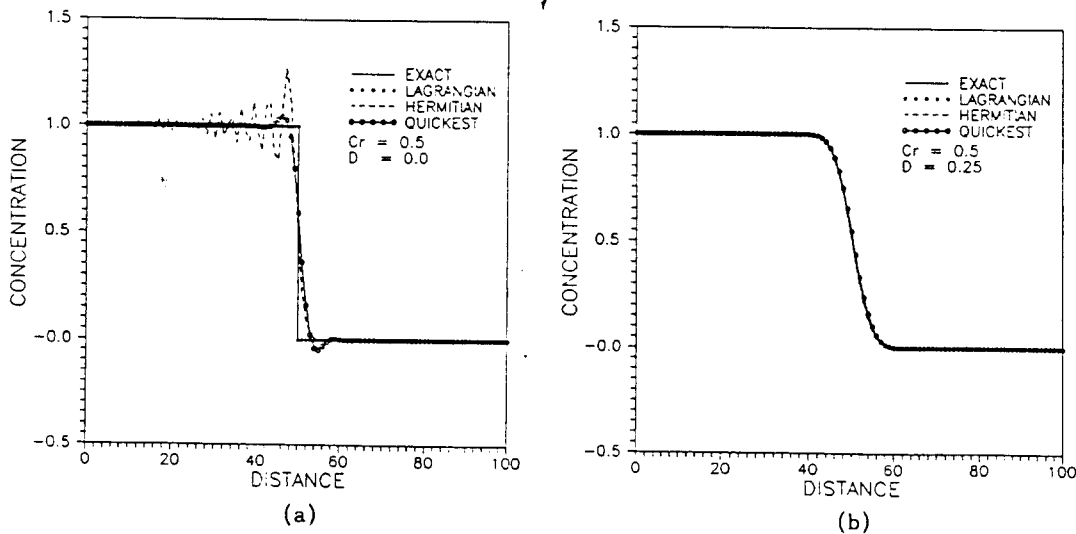


그림 2. 선정된 각 기법들과 해석해의 비교

3. 실제 유역에 대한 적용

본 연구 모형의 적용성을 검토하기 위하여 균일하도에서 임의의 시간간격 τ 동안에 유입된 오염물의 영향에 대하여 수치실험을 실시하였다. (4)식은 이 경우에 대한 해석해를 나타내고 있다.

$$c(x,t) = \frac{c_0}{2} \exp\left(\frac{-Kx}{U}\right) \left[\operatorname{erf} \frac{x - U(t - \tau)(1 - \nu)}{\sqrt{4Ex}} - \operatorname{erf} \frac{x - Ut(1 + \nu)}{\sqrt{4Ex}} \right] \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \nu = \frac{KE_x}{U^2} \quad \operatorname{erf}(p) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^p e^{-\eta^2} d\eta \quad (5)$$

하도의 선정은 50 km 구간에 대하여 하폭 200m 의 직사각형 수로를 구성하고 조도계수 $n = 0.03$, 수로경사 0.0002 로 설정하였다. 확산계수는 McQuivey & Keefcr 의 식을 사용하였다. 그림 3에서와 같이 18 시간 동안 1 ppm의 농도로 급격히 하도구간내에 유입된 경우에 대하여 Lagrangian 기법에 의한 계산결과는 그림에서 보는 바와 같이 해석해와 잘 일치됨을 확인할 수 있다. 그림 4는 91년 7월 홍수(91.7.17-19)에 대하여 한강 하류부 유역에 본 연구 모형을 적용한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구 모형은 각 지점에서 유입된 오염물의 유동 상황을 합리적으로 나타내고 있었고 본 하천으로 유입된 각종 오염물의 유동해석에 적용성이 큰 것으로 사료되었다.

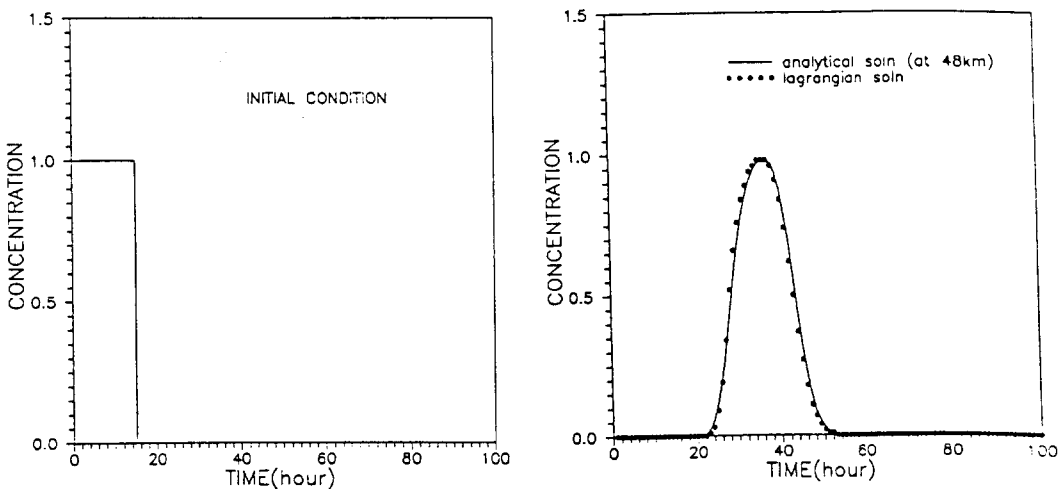


그림 3. 균일 하도에 대한 적용

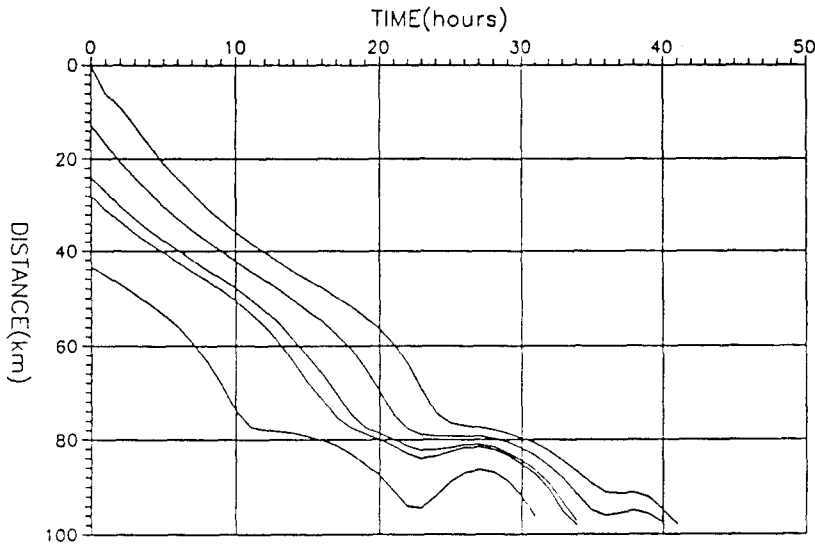


그림 4. 한강 하류부에 대한 적용

4. 결론

하천에서 수질해석을 위해서 사용되는 1차원 운송방정식의 수치해를 산정하는 각종 기법들을 비교 검토한 결과 Lagrangian 기법은 Eulerian 기법 보다 수치진동 및 발산을 야기하지 않았고 해석해에 잘 일치하였으며, 이에 따라 수학적 안정성도 가장 우수한 것으로 나타났다. 하천으로 유입되는 독성오염물의 다양한 거동을 수식으로 제시하였고 이를 기초로 상, 하류단의 다양한 경계조건에 대하여 오염물의 유동해석을 실시할 수 있도록 구성하였다. 특히 해석구간에서의 조석의 영향에 대하여도 처리할 수 있도록 일반화된 Lagrangian 알고리즘을 개발하였다. 본 연구모형은 다양한 상, 하류부의 유량조건에 따라 오염물의 농도변화 및 유하시간등을 계산할 수 있도록 구성하였으므로 오염물 배출에 따른 하천 수질관리 대책수립에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- 1) Jobson, H.E. (1987), "Lagrangian model for nitrogen kinetics in Chattahoochee river", J. of Env. Eng. ASCE 113(2), 223-242.
- 2) McBride, G.B., and Rutherford, J.C. (1984), "Accurate modeling of river pollutant transport", J. of Env. Eng., ASCE, 110(4), 808-827.
- 3) Scheollhamer, D.H. (1988), "Two-dimensional Lagrangian simulation of suspended sediment", J. of Hyd. Eng., 114(10), 1192-1209.
- 4) Shen, H.T. and Yapa, P.D. (1988), "Oil slick transport in rivers" J. of Hyd. Eng., ASCE, 114(5), 529-543.
- 5) Shen, H.T., Yapa, P.D. and Zhang, B., "A simulation model for chemical spill in rivers" Proc. of IAHR 25th Congress, Technical Session D, 219-226.