

〈論 文〉

河川으로 流入된 汚染物의 流動解析을 위한 動力學的 模型의 開發

A Dynamic Model for the Pollutant Transport Analysis in a River

韓 健 淵*, 金 光 涉**, 朴 在 弘**

HAN Kun Yeun, KIM Gwang Seob and PARK Jae Hong

Abstract □ A dynamic model for the pollutant transport analysis in a river is developed by Preissmann scheme and Lagrangian method considering tidal effects. A generalized Lagrangian model alleviate the numerical difficulties associated with the use of the Eulerian reference frame. Comparing the finite difference and finite element solutions of one-dimensional transport equation, Lagrangian model shows the most stable and accurate results. The flow model is calibrated using the recorded flood data in the downstream of the Han River. The particle paths-of-travel is computed by the model for the various low flow conditions. The model will provide operational informations useful for water quality management in the downstream of the Han River.

요 지 : 하천으로 유입된 오염물의 유동해석을 위하여 Preissmann 기법에 의한 동역학적 해석결과와 조석의 영향을 고려한 Lagrangian 모형을 개발하였다. Lagrangian 해석을 통하여 Eulerian 기법에서의 수치적인 어려움을 경감할 수 있었고 유한요소법이나 유한차분법에 비하여 해석해와 잘 일치하고 있었다. 본 연구 모형은 한강 하류부에 적용하여 실제홍수에 대한 검정을 실시하였다. 다양한 저유량 조건하에서의 오염물의 유동 특성을 제시하였고 주요지류에서 유입된 오염물의 조석에 대한 영향을 검토하였다. 본 연구 모형은 한강에서의 수질관리에 직접적으로 적용할 수 있는 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서 론

하천시스템에서 발생하는 흐름의 동역학적 특성은 하천에서의 혼합 및 세척능력을 평가하는데 기본이 되며 수로내로 유입된 오염물에 대한 수질변화를 평가할 수 있는 중요한 요소가 된다. 이러한 정보는 대상하천이 허용할 수 있는 도시 및 산업폐수량을 산정하고 하수처리장에서 요구되는 처리도를 예측하는 데에도 중요하다. 특히 조석의 영향을 받는 한강에서의 오염물 유동에 관한 동수역학적 특성은 조석의 간만에 의하여 끝없이 변화하여 정

상상태로는 도달하지 못하며, 하천수 유입량의 변동성, 바람에 의한 효과, 강우전선의 이동, 지형의 불규칙성등과 같은 요인에 의하여 관측하거나 분석하기가 매우 어렵다.

그간 하천에서의 수질은 하천의 종단축을 따라 이송방정식을 해석하는 1차원 수치모형을 중심으로 연구되어 왔다. 이들 모형은 시간변동의 고려여부에 따라 정상상태 모형, 유사동역학적 모형, 동역학적 모형등으로 구분될 수 있다. 정상상태 모형은 미국육군공병단의 STEADY(1986), 유사동역학적 모형은 미국환경청의 QUAL2E(1985), 동역학적 모형은 미국수로연구소의 CE-QUAL-RIV1

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수

** 경북대학교 대학원 토목공학과

(1983)등이 그 대표적인 것이다. 그러나, 하천 수질해석을 위한 대부분의 모형이 Eulerian 방법을 기초로 하고 있는데 이 기법은 이송방정식의 수치해를 구하는데 있어 진동, 불안정성, 수치확산등의 수치해석적인 어려움을 겪게 되는데 이는 많은 연구자들에 의하여 연구되어진바 있다.(Gray and Pinder, 1976; Grenney 외, 1978; Gresho and Lee, 1981; Jobson, 1980; Sobey, 1984)

Lagrangian 해석법은 유체입자의 속도와 동일하게 이동하는 이동좌표계를 도입함으로써 Eulerian 방정식에서의 수치적 어려움을 제거하여 안정한 정확해를 구할 수 있어 특정오염물의 수질해석에 대하여 효율적으로 적용될 수 있는 기법이다. Lagrangian 해석기법의 효시는 Fischer (1972)에 의하여 개발되었으며, Sobey(1984)는 Lagrangian 기법을 통하여 수치확산과 해의 진동문제를 효과적으로 제거하였다.

Jobson(1980,1987)은 1차원 운송방정식 해석에 있어 이동좌표계를 도입한 Lagrangian 기법을 적용하여 자연하도에 있어서 다양한 수질오염인자의 운송특성을 해석하였다. Schoellhamer과 Jobson(1986)는 Lagrangian 모형을 수지형하도(dendritic channel) 및 하도망(channel network)에 적용할 수 있도록 개선하였고, McBride와 Rutherford(1984)는 Waipa 강에서 발생한 유제품 방류사고에 대한 수질해석을 실시하였다. Schoellhamer(1988a,b)는 Lagrangian 모형을 QUAL-II 모형과 통합시켰고 부유침전물에 대하여 적용할 수 있도록 확장 발전시켰으며, Schaffranek(1988)는 Potomac 강의 오염물 유동특성을 위하여 Lagrangian 기법을 적용하였다.

국내에서 흐름의 동역학적특성을 이용하고 오염물의 유입에 따른 물리, 화학 및 생물학적 반응특성을 Lagrangian 기법에 의하여 해석한 연구는 아직까지 전무한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 하천유역으로 유입된 오염물이 흐름의 동역학적 해석결과에 따라 유동하는 특성을 조석의 영향을 고려하여 일반화한 Lagrangian 기법을 기초로 한 수치모형을 개발하였고, 이를 이용하여 하천에서의 오염입자의 유동특성을 파악하고자함을 그 목적으로 하고 있다. 본 연구의 수질해석 모형은 한강하

류부에 적용하여 주요 지류에서의 오염물 유입에 따른 유동특성이 파악되었다. 한강 하류부에서의 오염물 유동특성의 해석은 대상 하천에서의 사용가능한 수량과 수질에 관한 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

2. 동역학적 수질해석 모형의 개발

2.1 동역학적 흐름특성 해석

부정류 해석의 기본식인 dynamic wave equation 은 (1),(2)식의 연속방정식과 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial (A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_c \right) + L = 0 \quad (2)$$

여기서, x 는 하천의 흐름방향거리, t 는 시간, Q 는 유량, h 는 수위, A 및 A_0 는 각각 흐름의 주단면적과 저류단면적, q 는 측방유출입량, L 은 측방유출입량에 의한 운동량의 변화, S_f 및 S_c 는 각각 마찰경사(friction slope)와 단면확대, 축소에 따른 손실경사(local loss slope)이다.

이제 (1),(2)식의 수치해를 구하기 위해서 유한차분기법중 시간가중치를 도입하여 음해적으로 해석하는 Preissmann 기법 (즉, weighted four-point method)을 적용하면 (3),(4)식과 같은 비선형 방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \theta (Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1} - \bar{q}_i^{j+1} \Delta x_i) \\ & + (1-\theta) (Q_{i+1}^j - Q_i^j - \bar{q}_i^j \Delta x_i) \\ & + 0.5 \Delta x_i / \Delta t [(A+A_0)_i^{j+1} \\ & + (A+A_0)_{i+1}^{j+1} - (A+A_0)_i^j \\ & - (A+A_0)_{i+1}^j] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$0.5 \Delta x_i / \Delta t (Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^j - Q_{i+1}^j)$$

$$\begin{aligned}
 & +\theta[(Q^2/A)_{i+1}^{j+1} - (Q^2/A)_i^{j+1} \\
 & + g\bar{A}_i^{j+1}(h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1} + \Delta x_i \bar{S}_{fi}^{j+1} \\
 & + \Delta x_i \bar{S}_{ei}^{j+1}) + \Delta x_i \bar{L}_i^{j+1}] \quad (4) \\
 & + (1-\theta)[(Q^2/A)_{i+1}^j - (Q^2/A)_i^j \\
 & + g\bar{A}_{i+1}^j(h_{i+1}^j - h_i^j + \Delta x_i \bar{S}_{fi}^j \\
 & + \Delta x_i \bar{S}_{ei}^j) + \Delta x_i \bar{L}_i^j] = 0
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \bar{A}_i &= 0.5(A_i + A_{i+1}) \\
 \bar{B}_i &= 0.5(B_i + B_{i+1}) \\
 \bar{Q}_i &= 0.5(Q_i + Q_{i+1}) \\
 \bar{R}_i &= \bar{A}_i / \bar{B}_i
 \end{aligned}$$

$$\bar{S}_{fi} = \frac{\bar{n}_i^2 |\bar{Q}_i| \bar{Q}_i}{\bar{A}_i^2 \bar{R}_i^{4/3}}$$

$$\bar{S}_{ei} = K_{ei} [(Q/A)_{i+1}^2 - (Q/A)_i^2] / (2g\Delta x_i)$$

$$\bar{q}_i = 0.5(q_i + q_{i+1})$$

(3),(4)식으로 구성되는 비선형 대수방정식의 해를 구하기 위하여 반복 계산법의 하나인 (5)식과 같은 Newton-Raphson 방법을 적용하여 해석하였다.

$$J(x^k)\Delta X = -f(x^k) \quad (5)$$

여기서, $X = (Q_1, h_1, Q_2, h_2, \dots, Q_N, h_N)$ 으로 표시되는 미지의 벡터량, k 는 계산 반복횟수, $J(X^k)$ 는 X^k 값에 대한 편미분치로 구성되는 Jacobian matrix, $f(X^k)$ 는 X^k 값에 대한 비선형방정식, X^k 는 초기가정값, $X^{k+1} = X^k + \Delta X$ 으로써 계산에 의하여 개선된 값을 나타낸다. 초기조건은 (1),(2)식에 있어서 각각 시간 미분항을 '0'으로 놓고 해석하면 하도의 각 지점에서 유량과 수위를 계산할 수 있다. 경계조건은 본 연구에서 한강하류부의 경우 상류단에서는 유량수문곡선, 하류단에서는 조석자료가 적용된바 그 조건식은 각각 (6),(7)식과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{B}_1 &= Q_1^{j+1} - Q(t) = 0 \\
 \frac{\partial \hat{B}_1}{\partial Q_1} &= 1 \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \hat{B}_1}{\partial h_1} &= 0 \\
 \hat{B}_N &= h_N^{j+1} - h'(t) = 0 \\
 \frac{\partial \hat{B}_N}{\partial Q_N} &= 0 \quad (7) \\
 \frac{\partial \hat{B}_N}{\partial h_N} &= 1
 \end{aligned}$$

상, 하류단에서의 경계조건이 도입되면 (3),(4)식의 해는 banded matrix를 형성하고 있기 때문에 우선 non-zero element만 보관하여 그 크기를 줄이며 penta-diagonal형으로 변형시켜 Gauss 소거법에 의하여 효율적으로 그 해를 구할 수 있다.

2.2 일반화한 Lagrangian 수질해석

본 연구에서는 오염물의 방류에 따른 수질해석을 위하여 하천에서의 동역학적 흐름해석 결과를 기초로 하고, Lagrangian 해석기법에 의하여 오염물의 유동상황을 추적하는 동역학적 수질 모형을 개발하였다. Lagrangian 해석기법에 있어서는 임의의 오염물질의 농도를 변화시키는데 작용하는 관련 요소를 고려하여 개개의 입자를 추적하여 나간다.

하천에서의 오염물의 운송해석을 위한 모형은 (8)식과 같은 1차원 운송방정식의 해를 구함으로써 수행된다.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [E \frac{\partial C}{\partial x}] \quad (8)$$

여기서, C : 농도 U : 평균유속 E : 종확산계수 이 식의 오른쪽의 첫번째 항은 유체이동항으로서 이 항은 수치해에 있어 수치확산(numerical dispersion), 동요(oscillation) 및 불안정성(instabilities)을 일으키게 된다. Lagrangian 기법에서는 이러한 유체이송항은 평균유속 U 로 이동하는 Lagrangian 좌표계를 사용함으로써 제거될 수 있으므로 (8)식의 운송방정식은 (9)식과 같이 기술

된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[E \frac{\partial C}{\partial \xi} \right] \quad (9)$$

여기서, ξ 는 Lagrangian 거리좌표계로서 (10) 식과 같이 정의된다.

$$\xi = x - x_0 - \int_{t_0}^t U dr \quad (10)$$

여기서, x_0 는 시간 t_0 에서의 위치, x 는 시간 t 에서의 위치이다. (9)식을 Δt 시간간격에 대하여 적분하면 (11)식과 같은 유체입자의 농도변화에 대한 일반식을 얻게된다.

$$C(t+\Delta t) = C(t) + \frac{\partial}{\partial \xi} \int_t^{t+\Delta t} E \frac{\partial C}{\partial \xi} dt \quad (11)$$

그림 1은 Lagrangian 해석기법을 도식화 한 것으로 Jobson(1980)이 제안한 알고리즘에 의하면 하천에서 陽의 流速(positive velocity)을 가질 경우에 한하여 농도를 계산할 수 있었으나, 본 연구에서는 陰의 流速(negative velocity)을 가질 경우에 적용할 수 있도록 일반화시켰다.

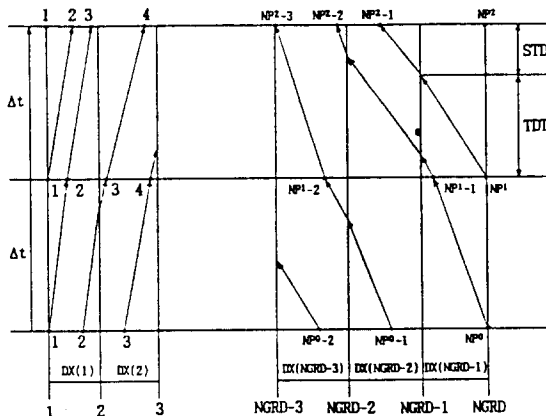


그림 1. Lagrangian 해석기법의 도식화

그림에서 보는 바와 같이 Eulerian 좌표계는 각 지점의 수리특성을 읽어 들이고 해석하고자 하는 지점의 농도와 수리특성을 나타내기 위해서 필요하다. 먼저 $t=0$ 인 초기상태에서 각 격자점에 대한 기지의 농도값을 초기값으로 하여 Δt 이후의 새로운 농도를 계산하며 Δt 이후의 구간은 더 이상 같은 위치에 놓이지 않는다. 각 구간의 새로운 위치는 (10)식에 의하여 정의된 이송경로를 통해 결정된다. 경계조건은 각 시간대에 대하여 흐름조건에 따라 상,하류단에서 새로운 구간이 유입됨으로써 결정된다. 이 새로운 구간은 시간 $t-\Delta t/2$ 에서 $t+\Delta t/2$ 동안 해석구간으로 유입되는 모든 유량을 포함한다. 해석구간을 통하여 이동하는 구간의 체적 및 농도는 지류유입이나 확산효과에 의하여 변화한다. 임의의 구간에 대한 모든 정보 즉, 구간의 길이 방향 위치, 체적, 농도등을 추적하기 위한 기록이 수행된다. 일반적으로 하도내의 전체 구간수는 각 흐름조건에 따라 시간대별로 상이하게 나타날 수도 있다.

해석구간의 하류단에서 조석의 영향으로 인하여 음의 유속을 나타낼 경우에는 하류단 경계는 별도의 해석기법을 필요로 한다. 이러한 경우 陰의 流速으로 해석구간내로 유입되는 구간의 수리학적인 특성 즉, 유속, 단면적, 구간의 체적등은 입력자료로부터 알 수 있으며, 일단 바다로 유입되어 버린 구간의 농도는 더이상 해석구간에 영향을 미치지 못하는 것으로 가정하였다.

그림 2는 조석의 영향이 있는 경우인 陰의 流速(negative velocity)을 가질 경우에 적용할 수 있도록 일반화한 알고리즘을 도식화한 것이다.

조석이 해석구간에 영향을 미칠경우 임의의 해석구간 내에는 구간유속이 陽인 경우와 陰인 경우가 공존하게 된다. 이러한 경우 구간유속의 부호가 변화하는 부분의 처리는 그림 2에 나타난바와 같이 A점에서 유속 $U(k)$ 로 Δt 시간 동안 이동하여 오염입자가 A점에 도달한 경우에 거리 DD1을 구한다. 이동되어온 입자가 α 면에 도달할 경우에는 이동경로를 선형보간으로 시간에 대하여 배분하여 구간 DD1에 위치시키고, β 면에 도달할 경우에는 입자는 거리비로 구간 AO에 위치시킨다. 면 γ 및 δ 에 도달한 입자도 동일한 방법을 적용시켜 해석

타내고 있다.²¹⁾

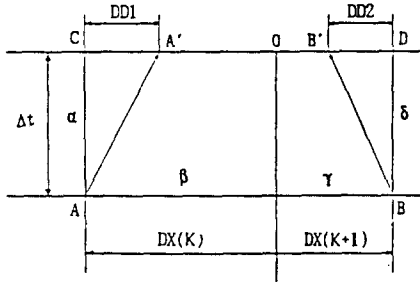


그림 2. 유속변화구간에 대한 해석기법의 도식화

하였다. 본 연구모형은 Fortran-77으로 구성되어 있으며 그림 3은 본 연구모형의 계산 흐름도를 나

3. 동역학적 수질 모형에 의한 수치해의 비교

오염물의 유동해석을 위한 1차원 운송방정식의 안정된 수치해를 얻기 위하여 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔는바, 대부분의 연구는 이송항이 지배적인 경우에 있어서 나타나게 되는 수치해의 불안정성을 개선하는데 있었다. 본 연구모형에 대한 해의 안정성과 정확성을 증명하기 위해 기존의 유한차분법 및 유한요소법과 비교검토하였다. 유한차분법으로는 QUICKEST 기법, MacCormack 기법, Keller Box 기법을 적용하였고, 유한요소법중에서는 선형 기저함수, 2차 기저함수, 3차

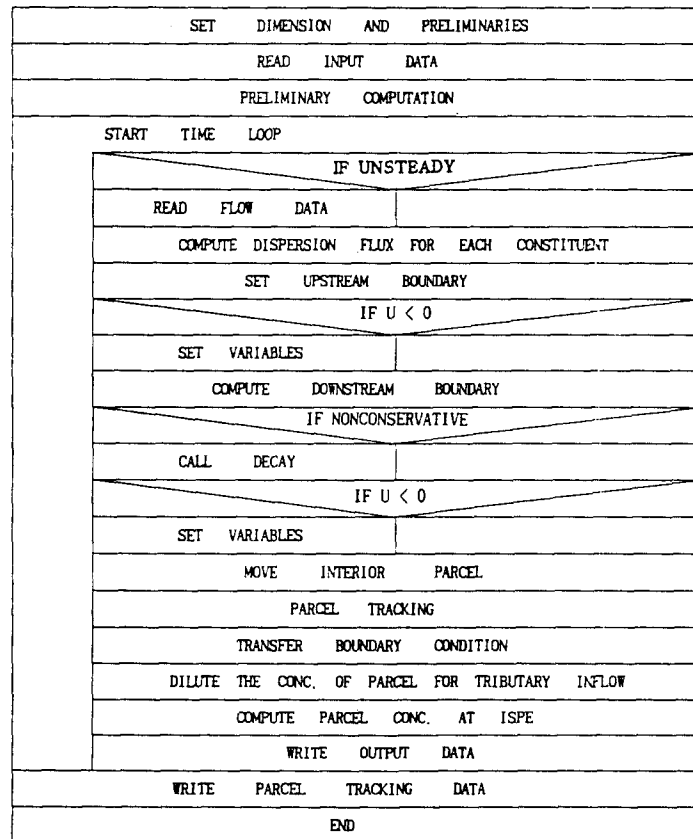


그림 3. 본 연구모형의 계산 흐름도

Hermitian 함수를 이용하여 해석하였다.

3.1 유한차분 해석과의 비교

하천의 오염물 유동특성 해석을 위한 (8)식의 1차원 운송방정식이 다음의 조건을 만족하는 해석해는 (12)식과 같이 나타낼 수 있는바, 본 연구에서는 다양한 수치해석 기법을 적용하여 그 결과를 비교검토 하였다.

$$\begin{aligned} x(x,t=0) &= 0 \quad c(x=0,t) = c_0 \quad c(x=\infty,t) = 0 \\ c(x,t) &= \frac{c_0}{2} \exp\left(\frac{Ux}{E_x}\right) \operatorname{erfc} \frac{x+Ut}{\sqrt{4E_x t}} \\ &+ \frac{c_0}{2} \operatorname{erfc} \frac{x-Ut}{\sqrt{4E_x t}} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, c_0 ; 초기농도 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$

본 연구의 Lagrangian 기법에 의한 계산결과는 모든 흐름조건에 있어 진동, 불안정성, 수치확산 등의 수치적인 어려움이 전혀 나타나지 않고 해석해와 잘 일치하고 있었다.

유한차분법의 경우에는 1차원 운송방정식을 Taylor 전개시킴으로써 발생하는 수치확산이 수치해의 불안정성에 직접적 영향을 미친다. 이러한 영향을 감소시키는 근본적인 방법으로는 Taylor 식에서 계산상의 유효차수를 증가시키는 방법이 있다. 수치실험을 위하여 선택된 세가지 기법중 QUICKEST 기법은 유효항을 3차항까지 증가시킨 기법으로 계산결과 유한차분법 중 정확도가 가장 좋은 것으로 나타났다.

3.2 유한요소 해석과의 비교

유한요소법에서도 이송항이 지배적인 경우에 있어서 해가 진동하였으며 계산에 사용된 선형기저함수, 2차기저함수, 3차 Hermitian 함수를 이용한 방법중에서 3차 Hermitian 함수가 가장 정확한 것으로 나타났다. 수치실험결과 유한차분법의 장점은 프로그래밍이 용이하고 계산시간이 빠르며 안정도 해석이 용이하다는 것이다. 그러나, 이송항이 지배적인 경우에 있어서 수치해의 불안정성을 극복

하기에는 문제가 있는 것으로 사료되었다.

유한요소법의 장점으로는 확산항의 영향이 있을 경우에 있어서 해가 정교하다는 것이다. 그러나 많은 계산시간이 소요된다는 것과 유한차분법에 비하여 프로그래밍이 난해하다는 것이며, 이 기법에서도 이송항이 지배적인 경우에 있어서는 심한 진동해를 보이는 단점이 있었다.

본 연구에 사용된 Lagrangian 기법의 계산결과는 해석해에 가장 근접하고 프로그래밍이 용이하였으며, 유한차분법은 제한된 영역에서만 해석해와 일치하고 있었으나 Lagrangian 기법은 모든 경우에서 안정되고 정확한 계산결과를 제시하고 있다. 전 절에서 선정된 QUICKEST 기법과 Hermitian 함수를 이용한 기법을 Lagrangian 기법 및 해석해와 비교한 결과를 그림 4, 5에 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.

4. 한강 하류부에 대한 적용

본 연구에서의 검토대상 하도구간은 팔당 직하류부로부터 경기도 김포군 월곶리 하구부에 이르는 약 98km 구간으로서 남,북한강이 합류된 이후의 본류구간에 해당된다. 1차 지류중에서 비교적 하천 규모가 크게 나타나 홍수류에 영향을 줄 것으로 판단되어 측방향 유입류로 선별 처리된 지류로서는 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천, 곡릉천 등의 5개 지천을 고려하였다. 주요지천으로 부터의 유입량은 안양천, 탄천, 왕숙천은 안양, 성남, 퇴계원 수위표의 자료로 부터 각각 추정하였고 중랑천, 곡릉천의 경우는 신뢰성 있는 자료의 부족으로 세 하천의 강

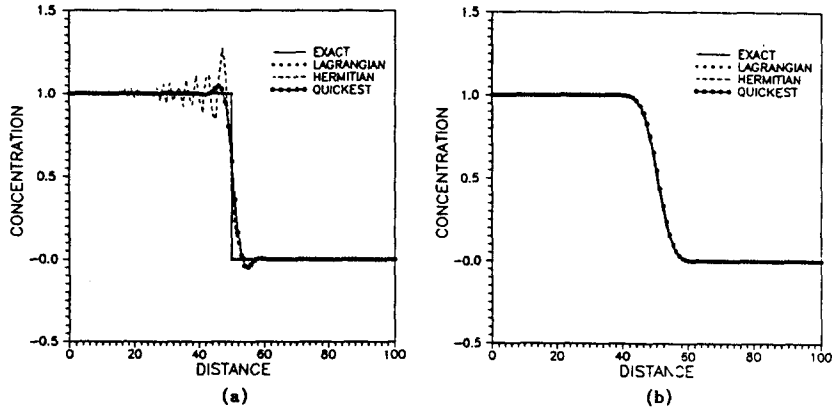


그림 4. 선정된 각 기법들과 해석해의 비교
(a) $Cr=0.5, E=0.0$ (b) $Cr=0.5, E=0.25$

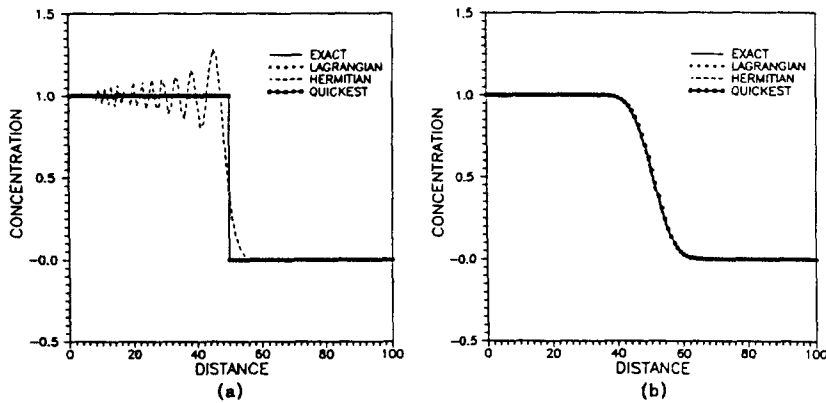


그림 5. 선정된 각 기법들과 해석해의 비교
(a) $Cr=1.0, E=0.0$, (b) $Cr=0.1, E=0.25$

우양상 및 유역 특성이 이들 유역들과 유사하다고 보아 세 하천의 수위자료와 유역면적비에 의하여 유출수문곡선을 하였다.^{(17), (18), (19)} 하류경계조건으로서 하구 조위자료는 해당 홍수기간의 인천항의 조위기록을 이용하였으며, 하구가 위치한 월곶리에서의 조위는 이로부터 조고비와 조시차를 고려하여 환산 추정하였다.^{(21), (22), (23)}

적용대상 홍수는 1990년 6월 23일~27일간의 홍수자료를 활용하였다. 홍수파의 해석을 위한 하도단면수는 102개가 사용되어⁽⁶⁾ 단면간의 평균거리 Δx 는 약 0.8km 이며 평균하도 경사는 약 1/12000 이었다. 계산상의 시간가중치 θ 는 0.6, Δt

는 평균적으로 1시간이 사용되었고, 조도계수 n 는 기존의 연구결과 및 자료로부터 0.023-0.028의 범위에서 사용하였다.^{(22), (23)}

그림 6,7은 6월 홍수에 대한 상류단의 유량수문곡선과 하류단의 조위곡선을 나타내고 있고 그림 8은 인도교 지점에서의 계산치와 실측치를 비교하여 도시한 것으로서 본 연구모형은 실제 홍수를 잘 재현해 주고 있음을 입증할 수 있었다.

댐으로부터 방류량과 조석영향에 따라 하천 시스템에서의 오염물의 운송 및 세척특성이 제시될 수 있는 바 이는 중립적으로 부유하는 보존성 물질(neutrally buoyant conservative-type substances)

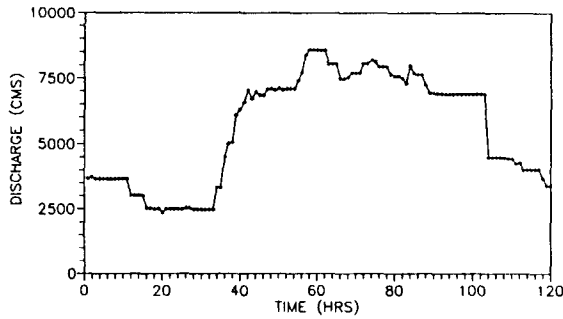


그림 6. 상류단의 유량수문곡선

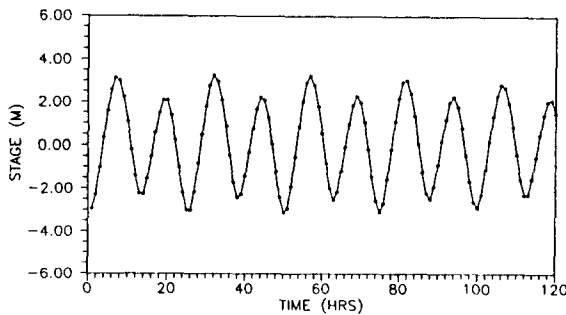


그림 7. 하류단의 조위곡선

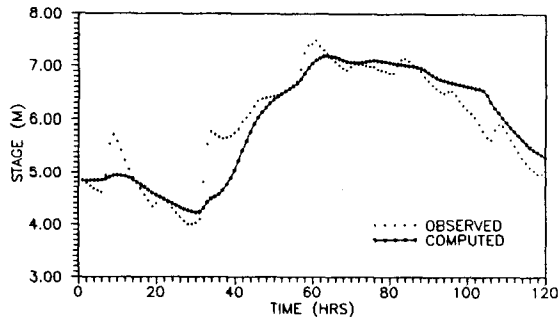


그림 8. 인도교 지점에서의 계산치와 실측치의 비교

의 이동을 추적함으로써 얻을 수 있다. 즉, 화학오염물등 예기치 못한 지류로부터의 오염물 방류사고시의 오염물의 유하시간을 파악하기 위해서, 각 지류별로 유입된 오염물의 이동을 관찰하여 수로내 임의의 지점 사이에서 유하시간에 관한 자료를 제시할 수 있다. 그림 9는 6월 홍수에 있어 유입오염물의 이동시간에 대한 하도구간에서의 위치를 도시한 것이다.

유하시간도는 팔당, 왕숙천, 탄천, 중랑천 및 안양천에서 동시에 유입된 대상 오염입자가 주어진

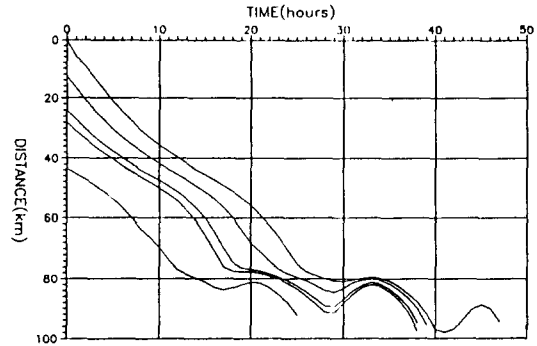


그림 9. 오염물 유동특성 해석(1990년 6월 홍수)

유량 및 조위변동의 경계조건하에서 어떻게 하도내에서 반응하며 이동하는가를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 6월 홍수의 경우 4개 지류에서 유입된 오염물의 하구부 도달시간은 대략적으로 각각 40시간, 38.5시간, 38시간, 26.5시간으로 나타났는데, 이 값은 홍수시의 자료이므로 유하시간이 비교적 짧게 나타났고 상류부에 미치는 조석의 영향도 그다지 크게 나타나지 않았다.

조석에 의한 오염물의 유동특성을 파악하기 위하여 상류단 유량조건을 각각 저유량인 1000CMS (case1), 2000CMS(case2), 3000CMS(case3)로 하였고, 하류단의 조위조건을 인천항에서의 약최고만조위를 최고조위의 진폭(4.65 m)으로 하여 조고비를 고려한 월곶리에서의 조위를 구한후, 인천에서의 비조화성분조위와 같은 크기의 조고를 월곶리에서의 기상조위로 보아 그림 10에서와 같이 고극조위를 추산하였다. 이때 조위곡선의 형태는 M_2 , S_2 , O_1 , K_1 등의 4분조로부터 '합성하여 약최고 조위를 보여주는 시점을 중심으로 2주기 간의 조위곡선형이 홍수추적기간 중에 지속적으로 반복되는 것으로 보았으며, 기상조위의 성분만큼 천문조위로부터 전체적으로 상향조정 하였다.^{20), 24)}

그림 11,12,13은 case1, case2, case3 조건하에서의 오염물의 유동상황을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주요 지류에서의 오염물이 하구부로 유동되어 가는 과정이 유량변동에 따라 뚜렷하게 그 차이가 나타남을 알 수 있었다. Case1의 조건하에서는 최상류단에서의 오염입자가 하구부를 통하여 제거되는데 112 시간이었으나 case2와

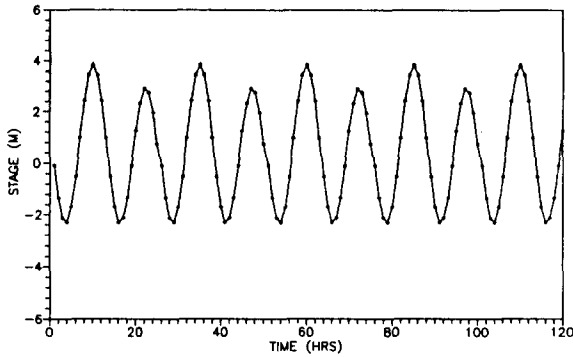


그림 10. 하류단의 조위조건

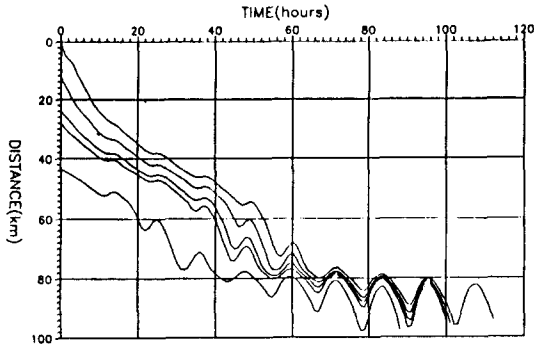


그림 11. 오염물의 유동특성 해석(case1, 1000CMS)

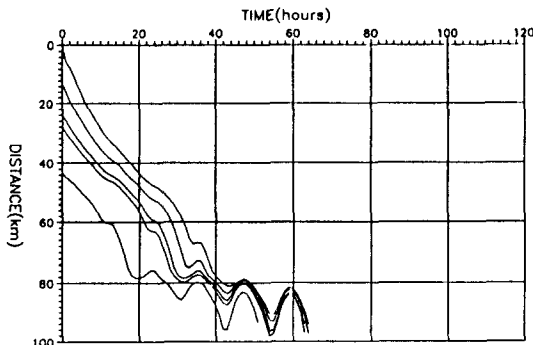


그림 12. 오염물의 유동특성 해석(case2, 2000CMS)

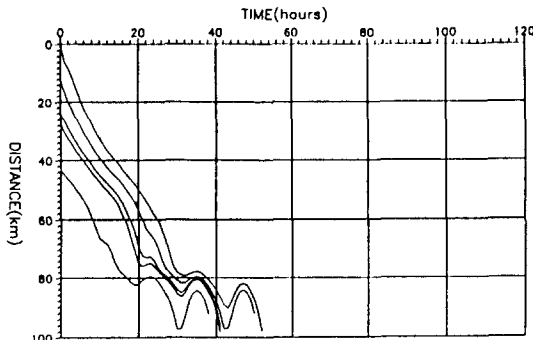


그림 13. 오염물의 유동특성 해석(case3, 3000CMS)

case3의 경우는 각각 64 시간 및 52 시간으로 나타나 조석의 효과가 오염입자 이동에 큰 영향을 미치고 있었다. Case 1에서 계산기간동안 주입된 어떤 입자도 대상하도에서 제거되지 못하였으며 왕숙천, 탄천, 중랑천등에서 유입된 입자는 실제로 거의 100여 시간 동안에 완전히 제거되지 못하고 하구부 근처에 그대로 남아 있음을 알 수 있었다. 본 연구결과는 저유량시의 한강하류부에서 전반적인 오염물의 1차원적 유동특성만을 연구한 것으로서 다양한 저유량 조건에 대한 정량적인 세척능력의 산정, 오염물의 감쇠특성 및 2차원적인 유동특성등은 앞으로 이 유역에 대한 실측자료를 수집하고 검증해 나감으로써 계속 연구될 예정이다.

5. 결 론

(1) 하천으로 유입된 오염물의 유동해석을 위하여 Preissmann기법에 의한 동역학적 해석과 Lagrangian방법에 의한 해석모형을 개발하였다. 본 연구모형은 상,하류단의 다양한 경계조건에 대하여 오염물의 유동해석을 실시할 수 있도록 구성 하였는바, 해석구간 하류부의 조석의 영향에 대하여도 처리할 수 있도록 일반화된 Lagrangian 알고리즘으로 제시하였다.

(2) 하천에서 수질해석을 위해서 사용되는 1차원 운송방정식의 수치해를 산정하는 유한차분법과 유한요소법들을 비교검토한 결과, Lagrangian 기법은 Eulerian 기법에 비하여 수치진동 및 발산을 야기하지 않았고 해석해에 잘 일치하였으며 수학적 안정성도 우수한 것으로 나타났다.

(3) 한강 하류부의 팔당댐-월곶리간의 구간에 적용하여 본 연구모형의 적용성을 입증하였다. 실제 홍수에 대한 계산결과는 당시의 실측치와 비교하여 일치하고 있었다. 다양한 저유량 조건하에서의 오염물의 유동 특성을 제시하였고 주요지류에서 유입된 오염물의 조석에 대한 영향을 검토하였다.

감사의 글

이 논문은 1993년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비(지방대 육성)에 의하여 연구되었으며 지원

기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bedford, K.W., Sykes, R.M., and Libicki, C. (1983), "Dynamic advective water quality model for rivers", J. of Env. Eng., ASCE, 109(3), 535-554.
2. Brown, R.T., and Barnwell. T.O. (1985), "Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E", EPA/600-3-85/065, US Environmental Protection Agency.
3. Fisher, H.B.(1972), "A Lagrangian method for predicting pollutant dispersion in Bolinas Lagoon", USGS Prof. Paper 582-B.
4. Gray, W.G. and Pinder, G.F.(1976), "An analysis of the numerical solution of the transport equation", Water Resources Research, 12(3), 547-555.
5. Grenney, W.J., Teuscher, M.C., and Dixon, L.S.(1978), "Charateristics of the solution algorithms for QUAL-II river model", J. of WPCF, 50(1), 151-157.
6. Gresho, P.M., and Lee, R.L.(1981), "Don't suppress wiggles - They're telling you something", Comput. Fluids, 9(2), 223-253.
7. Jobson, H.E.(1980), "Temperature and solution-transport simulation in flow using a Lagrangian reference frame", USGS, WRI 81-2.
8. Jobson, H.E.(1987), "Lagrangian model for nitrogen kinetics in Chattahoochee river", J. of Env. Eng, ASCE, 113(2), 223-242.
9. Martin, J.L.(1986), "Simplified, steady-state temperature and dissolved oxygen model : users guide", Instruction Report E-86-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
10. McBride, G.B., and Rutherford, J.C.(1984), "Accurate modeling of river pollutant transport", J. of Env. Eng., ASCE, 110(4), 808-827.
11. Schaffranek, R.W.(1988), "A flow model for assessing the tidal Potomac river", Applying Hydraulic Research, 531-545
12. Scheollhamer, D.H. and Jobson, H.E.(1986), "Programmers manual for a one dimensional Lagrangian transport model", USGS WRI 86-4144, 1-25.
13. Scheollhamer, D.H.(1988), "Lagrangian transport modeling with QUAL II kinetics", J. of Env. Eng., ASCE, 114(2), 368-381.
14. Scheollhamer, D.H.(1988), "Two-dimensional Lagrangian simulation of suspended sediment", J. of Hyd. Eng., ASCE, 114(10), 1192-1209.
15. Sobey, R.J.(1984), "Numerical alternatives in transient stream response", J. of Hyd. Eng., ASCE, 110(6), 749-772.
16. 건설부 (1989), 한강하류 연안개발계획 보고서, 서울지방국토관리청
17. 건설부 (1990), 한강홍수예경보, 한강홍수통제소
18. 건설부 (1990), 홍수량측정보고서, 한강홍수통제소
19. 건설부 (1990), 한국수문조사년보
20. 건설부 (1991), "한강수계 유출 프로그램 개선방안", 한강홍수통제소, 483-524
21. 김광섭 (1993), "자연하천에서 오염물 운송특성 해석을 위한 Lagrangian모형의 개발", 경북대학교 공학석사 학위논문, 1-100.
22. 박상덕 (1989), "홍수파의 영향을 고려한 하상변동 예측모형", 연세대학교 공학박사 학위논문, 1-86.
23. 이종태, 한건연, 서병하(1993), "한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향 검토", 한국수문학회논문집 26(2), 67-77.
24. 수로국 (1990), 조석표.

(접수 : 7.5)