

Eulerian-Lagrangian Analysis(ELA) 模型을 이용한 汚染物質移動 豫測

Prediction of Pollutant Transport using by Eulerian-Lagrangian Analysis(ELA) Model

崔 秉 玉* · 權 純 國**
Choi, Byoung Ok · Kwun, Soon Kuk

Summary

Coastal areas, especially embayments are apt to be polluted easily and many embayments in Korea are already suffering from pollution problems. To manage such pollution, it is strongly needed to develop technique to trace movements of pollution. Such technique covering the embayment affected by the tidal influence, should take account both of the convection and the diffusion motions which cause lots of problems in numerical calculation.

In this study, a Eulerian-Lagrangian Analysis(ELA) model was applied to Young Il bay and tested for its applicability, which was developed by using the Eulerian-Lagrangian Method that reduce the numerical disperison and oscillation by way of solving convection and diffusion terms separately.

Concentration of Chemical Oxygen Demand(COD) and Suspend Solid(SS) of the embayment area were estimated by the model and compared with the observed values and the sound results were obtained. At the same time the diffsion coefficient and decay coefficient for Chemical Oxygen Demand in the Young Il Bay were found as $D_x=D_y=20\text{m}^2/\text{sec}$, $k_d=2.5 \times 10^{-5}/\text{sec}$ respectively, and for Suspend Solid, $D_x=D_y=30\text{m}^2/\text{sec}$, $k_d=5.0 \times 10^{-5}/\text{sec}$

* 서울대학교 大學院

** 서울대학교 農業生命科學大學

키워드 : Eulerian-Lagrangian method,

이류, 확산, 확산계수, 감쇠계수, 해양오염

I. 緒 論

하구를 포함한 淺海域은 영양분이 많아 다양한 생물이 서식하고 있고 양식장 등이 밀집되어 있기 때문에 生態學的으로 매우 중요하다. 그러나 이 지역은 하천으로부터 지속적으로 오염물질이 유입되고, 연근해의 각종 공사로 인해 토사가 발생되며, 잦은 선박사고에 의한 유류 유출로 인해 오염되기 쉬우므로 현재도 오염이 심각한 상태이다. 이러한 오염에 적절히 대처하기 위해서는 수시로 변화하는 오염물질의 분포상황을 정확하게 파악하는 것이 필수적이다.

하구와 같은 천해역은 潮汐現象을 포함한 확산현상을 해석해야 하기 때문에 조석현상이 없는 경우보다 해석이 어렵다. 이류는 Lagrangian 방법으로 풀기 적합하고 확산은 Eulerian 방법으로 풀기 적합하다. 그러나 두가지 방법중 하나의 방법만으로 이류와 확산을 모두 취급하면 많은 오차를 발생시킨다. 따라서 Eulerian-Lagrangian 방법은 두 방법의 장점만을 취한 방법으로 이송방정식을 이류항과 확산항으로 분리해서 이류항은 Lagrangian 방법으로 확산항은 Eulerian 방법으로 해석함으로써 數値擴散과 數値振動을 감소시킬 수 있다.

Eulerian-Lagrangian 방법에 관한 연구를 보면, Holly와 Preissman(1977)¹¹⁾은 이송방정식을 이류부분과 확산부분으로 나누어서 이류부분은 後方特性曲線法으로 확산부분은 FDM을 이용하여 해석하였으며, FEM을 이용한 연구로는 선형보간함수를 취하여 해석한 Neuman(1981)¹²⁾과 Baptista(1984)⁸⁾ 등이 있고, 최근에는 Wang(1988)¹⁵⁾등이 유한요소 격자상에서 특성화방법을 이용하여 해석한 예가 있다. 위의 연구는 이류와 확산을 분할하여 해석하였으나, Douglas와 Russel(1982)¹⁰⁾은 특성곡선방법에 FDM과 FEM을 혼합하여 Eulerian-Lagrangian 이 혼합된 개념의 여러 가지 보간 과정을 이용하여 해석하였다.

Cheng(1984)⁹⁾등은 이류와 확산을 분할하지 않고 해석하였으나, 보간 함수로 2계 Lagrangian 다항식을 이용하였을 때 인위적인 확산이나 진동이 없었다. Sobey(1983)¹³⁾는 이러한 Eulerian-Lagrangian 이송모형과는 달리 이류-확산방정식에 편단(fractional step) 개념을 도입하여 이송방정식을 절편으로 나누어 이류부분은 엄밀해를 적용하여 해를 구하고, 확산부분은 Lagrangian 개념과 같이 이동좌표계를 이용하였다. 본 연구에서 다루게 될 ELA 모형은 이류와 확산을 분리하여 계산하는 방법으로서 Baptista등(1984)⁸⁾에 의해 개발되었다.

본 연구의 목적은 천해역의 오염물질 이동에 축모형인 ELA 모형을 迎日灣에 적용시켜 영일만 해역의 오염물질 분포상태와 입자추적을 통해서 입자가 그리는 궤적을 추적해 봄으로써 ELA 모형의 적용성을 살펴보는데 있다.

본 연구에서 다루게 될 오염물질은 하구를 포함한 灣지역의 유기물 오염 정도를 나타내는데 대표적으로 많이 사용되는 화학적 산소요구량(COD)과 하천으로부터의 유입과 각종 공사로 인해 발생되어 양식장 등에 많은 피해를 주는 것으로 알려진 浮遊固形物(SS)을 대상으로 하였다.

II. Eulerian-Lagrangian 方法에 의한 移流·擴散 現象 解析

1. Eulerian-Lagrangian 方法의 必要性

오염물질의 이동을 적절히 표현하는 물질이송방정식은 이류항의 雙曲線演算자와 확산항의 拋物線 演算자를 동시에 포함하고 있기 때문에 해를 구하는데 어려움이 많다. 특히 이류가 우세한 경우에는 정확한 해를 구하기가 더욱 어렵다. 이러한 문제를 해결하는 방법은 크게 Eulerian 방법, Lagrangian 방법, Eulerian-Lagrangian 방법이 있다.

Eulerian 방법은 고정좌표계를 사용하기 때

문에 계산이 편리해 널리 이용되고 있다. 그러나 이류가 확산보다 우세한 경우($Pe > 2$, $Pe = u\Delta l/D$)에는 切斷 誤差의 발생으로 數值擴散(numerical dispersion)과 振動(oscillation)이 커져서 해의 정확도가 급격히 떨어진다.⁸⁾

Lagrangian 방법은 유체흐름을 따라 움직이는 이동격자를 사용하여 移流-擴散方程式의 雙曲線 演算子の 陽函數의 취급을 피함으로써 이론적으로 切斷 誤差가 발생하지 않는다. 또한 Peclet number(Pe)가 큰 경우에도 만족스럽게 적용할 수 있지만 변형된 격자 또는 좌표계를 사용해야 하는 어려움이 있다.

Eulerian-Lagrangian 혼합방법은 Eulerian 방법의 단순함과 Lagrangian 방법의 계산력을 결합시킨 것이다. 즉, 이류-확산 방정식을 이류항과 확산항으로 분리하여 이류항의 경우에는 特性法(characteristic methods)을 사용하여 특성곡선을 따르는 농도의 시간에 대한 전미분을 차별화 함으로써 이류방정식의 정보전달의 방향성을 반영하여 주고, 확산항의 경우에는 Eulerian 격자상에서 계산을 함으로써 계산의 편리함을 도모한다.

본 연구의 대상모형인 ELA도 이류항과 확산항을 분리하여 계산하게 되는데 이류항은 Lagrangian 방법인 後進特性曲線法(backward method of characteristics)으로, 확산항은 Galerkin 유한요소법으로 계산을 한다.

2. Eulerian-Lagrangian 방법의 해석과 정

해수나 육수에 있어서 오염물질의 이동은 근본적으로 다음과 같은 物質移送方程式에 의하여 표현된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ h D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right\} + Q \quad \dots (1)$$

여기서, c : 임의의 시간과 위치에서의 오염 물질농도
 u_i : i 방향유속

h : 수심

D_{ij} : 확산계수

Q : 오염원의 生成 혹은 消滅

위의 이류-확산방정식은 대상수역의 경계조건과 초기조건을 적절히 변화시키면 대부분의 경우에 적용이 가능하다. 그러나 이 방정식의 수학적 해석이 어려운 것은 근본적으로 방정식 내에 雙曲線 演算子(hyperbolic operator; 식(1)의 좌변 2항-이류항)와 拋物線 演算子(parabolic operator; 식(1)의 우변 1항-확산항)가 공존하기 때문이며, 이류항이 확산항에 비하여 order의 크기가 최소한 1 이상이고, 또한 실제로도 확산보다 이류가 물질이송을 전적으로 지배하는 경우가 많으므로 수치모형화에 어려움이 있다.

물질이송방정식을 Eulerian-Lagrangian 방법으로 해석하기 위해서는 먼저 방정식을 이류항과 확산항으로 분리해야만 된다. 이류항과 확산항을 분리하기 위하여 지배방정식 우변의 미분을 전개하고 apparent 유속, u_i^* 를 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i^* \frac{\partial c}{\partial x_i} = D_{ij} \frac{\partial^2 c}{\partial x_i \partial x_j} + Q \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서, $u_i^* = u_i - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_j} (h D_{ij})$

(2)식을 시간에 대해 이산화하면

$$\frac{c^n - c^{n-1}}{\Delta t} + [u_i^* \frac{\partial c}{\partial x_i}]_{n-1} = [D_{ij} \frac{\partial^2 c}{\partial x_i \partial x_j}]_n + [Q]_n \quad (3)$$

지배방정식의 線型的인 성질을 이용하여 식(3)을 분리하면 다음과 같다.⁸⁾

이류방정식: $\frac{c^n - c^{n-1}}{\Delta t} + [u_i^* \frac{\partial c}{\partial x_i}]_{n-1} = 0 \quad \dots (4)$

확산방정식: $\frac{c^n - c^{n-1}}{\Delta t} = [D_{ij} \frac{\partial^2 c}{\partial x_i \partial x_j}]_n + [Q]_n \quad (5)$

여기서 보조변수 c' 는 이류만이 발생했다고 가정했을 경우의 농도이다. 각 시간단계에서 식(4)가 陽解法에 의해 먼저 풀리고, 식(5)는 그 후에 陰解法으로 풀린다고 가정하면 식(3)을 분리함으로써 어떠한 오차도 추가로 도입되지 않는다.

ELA 모형에서 이류방정식은 후진특성곡선법(backward method of characteristics)으로 해석한다. 즉, 이류방정식은 apparent 흐름(식(2)의 u^*)에 따르는 농도값이 시간에 관계없이 일정함을 의미하기 때문에 특성곡선에 따라 후진추적하여 이류에 의한 현재의 농도값을 구한다.

확산방정식은 전형적인 Galerkin 유한요소법으로 풀어 해를 구하고 있다. 즉, 가장잔차식을 구성해서 잔차를 최소화하는 해를 구하는데 그 최종 행렬식을 보면 다음식과 같다.

$$M \dot{\alpha} + (B+A)\alpha = P \dots\dots\dots (6)$$

여기서, M : 質量行列

B : 消滅行列

A : 擴散行列

P : 生成·消滅·境界條件과 관련된 列 벡터

α : 미지의 농도값을 나타내는 列 벡터

본 모형에서 시간에 대한 이산화는 陰解法을 이용함으로써 적분시간 간격에 구애받지 않고 무조건적으로 안정적인 결과가 제공되는 後方 Euler 陰解法이 채택되었다.

이류와 확산계산과정을 통해서 구한 각각의 해를 합쳐서 최종적인 해를 구하게 된다.

3. ELA 模型의 構造

ELA 모형은 2차원 부정류에서의 오염물질이동을 예측하는 모형으로 오염물질의 농도값을 계산하는 순서를 보면 Fig. 1과 같다. 그림에서 A~C 과정은 TIDE 모형과 그 전처리 프로그램이 수행하고, a~d 과정은 ELA 모형과 전

처리 프로그램인 TRAGEA, TRAGEB, TRAGEC가 각각 나누어 수행하게 된다. 전처리 프로그램인 TRAGEA는 격자망을 세분화하여 2차 격자망을 발생시키고, TRAGEB는 Renumbering을 실시하며, TRAGEC는 경계를 구분하고 요소와 절점의 관계를 결정하게 된다.

ELA 모형의 주요 특징을 살펴보면 (1) 오염물의 plume이 유한요소격자에서 충분히게 용해되기 전에 오염원 근처 등, 높은 오염농도 경사를 가진 지역을 모의발생하기 위한 알고리즘을 갖고 있다. (2) 정상상태나 주기적인 속도장에서는 하나의 시간단계, 혹은 한 주기만을 계산해도 되므로 계산시간을 절약할 수 있다. (3) 모형내의 추적알고리즘을 사용하여 입자의 궤적을 추적할 수 있다. (4) 일정한 조건하에서의 수심에 따라 변화하는 농도를 계산할 수 있다.

ELA 모형은 각종 오염물질(COD, BOD, SS, DO, PH 등)의 이동 뿐만 아니라 휘발성물질의

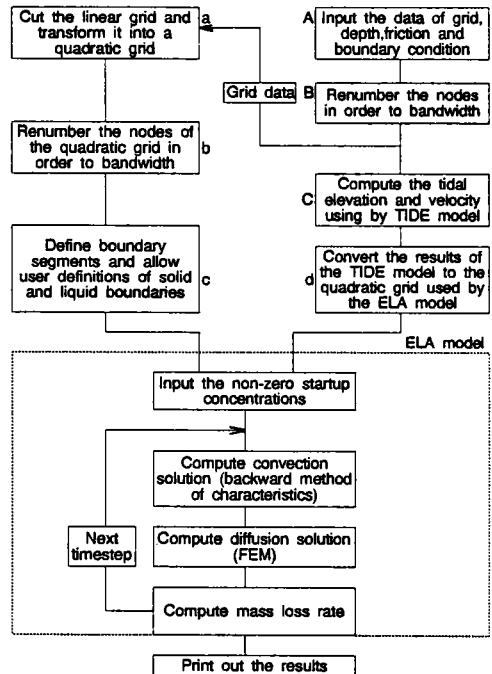


Fig. 1. Flow chart of ELA model

이동, 온수의 열이동 등도 모의발생이 가능하다.

III. 迎日灣에서 ELA 模型의 適用

ELA 모형을 사용해서 오염물질의 이동을 예측하기 위해서는 대상해역의 조위와 조류속에 대한 상세한 정보가 필요하므로 먼저 연구대상 해역인 迎日灣의 조위와 조류속을 발생시켜야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 서울대 農工學科 農業水利研究室에서 개발한 조류예측 유한요소 모형인 TIDE^{1,2)}를 이용하였다. 따라서 TIDE 모형을 이용하여 조위와 조류속을 계산한 다음에 ELA 모형을 사용하여 영일만 해역의 오염물질 분포를 계산하고 粒子追跡을 실시하였다.

본 연구에서 다루게 될 오염물질은 해양에서의 대표적인 유기오염지표인 화학적 산소요구량(COD)과 포항신항의 제4투기장 조성으로 인해 발생하는 浮遊固形物(SS)을 대상으로 하였다.

1. TIDE 模型을 이용한 迎日灣의 潮流 解析

TIDE 모형의 운용을 위해서는 지형의 형상을 표현할 격자망의 구성과 각절점에서의 수심 및 요소별 바닥마찰, 그리고 경계지역에서의 조위 및 하천 유속 등이 요구된다.

가. 格子網 構成

조화유한요소 수치모형인 TIDE 모형을 실제 해역에 적용하기 위해서는 먼저 격자망이 작성되어야 한다. 본 연구에서의 격자망은 격자망을 자동으로 발생시키는 격자망 자동발생프로그램에 의해 Fig. 2와 같이 삼각형으로 요소를 구성하였다.

격자망의 총 절점수는 623개이고 총 요소수는 1079개로 구성되었는데 포항신항을 포함한 灣안쪽 부분을 외해쪽보다 조밀하게 구성하였다. 격자망을 보면 해양쪽 개방경계는 달만갑과 장기갑을 잇는 선으로 정하였고 절점수는 10개이

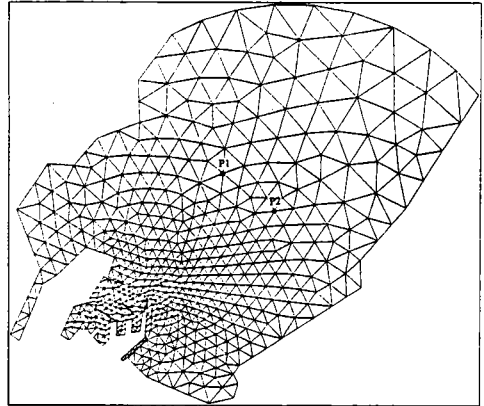


Fig. 2. Diagram of finite element mesh in the Young Il bay

다. 自然境界條件인 하천경계는 형산강 상류 5 km 지점을 선택했고 절점수는 2개이다.

나. 境界條件

TIDE 모형에 입력되는 경계조건은 경계에서의 조위와 유량(혹은 유속)으로 주어지는데 潮位는 필수경계조건으로, 流量은 자연경계조건으로 사용된다. 필수경계조건에 관한 입력자료는 경계요소의 절점번호와 그 점의 조위에 관한 것이다. 조위는 각 경계절점에 대한 해당 분조의 振幅(amplitude)과 位相差(phase shift)로서 입력되며, 해안선과 같은 고정경계에서는 경계면을 통한 유출입이 없는 것으로 한다.

본 연구에서는 4개분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 대해서 적용하였는데 開放境界 절점에서의 각 분조별 조건으로는 정⁶⁾등(1991)이 계산한 등조시선도와 등조차선도로부터 구했다.(Table-1 참조)

또한 자연경계조건으로 형산강 상류경계는 강하구로부터 약 5km 상류에 위치한 연일대교로 정하였고, 유량은 연평균 값인 $17.4m^3/sec$ 를 입력하였다⁷⁾.

다. 절점별 수심

영일만지역의 수심은 만입구 중앙부의 수심이 가장 깊어서 25~30m를 나타내고 만안쪽으로

Table-1. Harmonic constants in the Young II bay

Node No.	Tidal Components							
	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
	H(cm)	K(deg)	H(cm)	K(deg)	H(cm)	K(deg)	H(cm)	K(deg)
69	2.0	156	2.3	179	4.0	25	4.4	360
52	2.3	153	2.4	177	4.2	26	4.4	359
36	2.5	151	2.5	176	4.4	26	4.3	358
23	2.8	149	2.7	175	4.5	26	4.3	357
13	3.0	144	3.0	174	4.6	27	4.2	356
5	5.5	146	4.0	173	4.7	26	4.2	355
1	6.0	149	4.2	172	4.9	26	4.1	354
2	6.5	151	4.4	171	5.1	25	4.1	353
6	7.0	159	4.7	170	5.3	25	4.0	352
14	7.5	164	5.0	169	5.5	25	4.0	351

note H : amplitude

K : phase

갈수록, 그리고 해안쪽으로 갈수록 점차 수심이 얕아진다. 모형에 입력될 절점별 수심은 교통부 수로국에서 발행된 축척 1/30000의 No. 146 해도를 이용하여 읽어 평균해면으로 변환하였다.

라. 요소별 해저면마찰

해저면 경계의 요소별 마찰은 모형에 Manning의 마찰계수와 관련된 線型摩擦係數 형태로 입력되는데 매닝의 마찰계수 n값은 바닥에 분포하는 바닥 물질의 종류에 따라 달라지게 된다. 영일만지역의 바닥물질분포를 크게 4개 유형으로 구분하여 각 바닥물질별 매닝계수를 Table-2에 나타냈다.

마. 模型의 補正과 檢證

TIDE 모형을 이용하여 ELA 모형에서 사용

Table-2. Manning coefficient of bottom friction in the Young II bay

soil	n
Mud	0.015
Gravelly Sand, Sand, Muddy Sand	0.017
Gravel	0.020
Rock	0.022

하게 될 조류속을 발생하게 되는데, 이를 위해 먼저 TIDE 모형을 영일만해역에 맞게 보정해야만 된다. 보정은 모형내에서 해저 바닥마찰계수와 관련된 선형마찰계수를 대상으로 하였다.

조류속 실측자료는 1991년에 측정⁷⁾된 자료를 사용하였다. 實測値와 모형의 計算値를 비교하게 될 지점은 Fig. 2의 P1과 P2 지점이고, 기간은 P1 지점에서 1991년 3월 27일 06시~19시 까지이며, P2 지점에서 1991년 3월 25일 06시~19시 까지이다. 보정된 결과를 실측치와 모형계산치를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

또한, 모형을 검증하기 위해서 1991년 7월 17일 06시~19시 까지의 실측 자료를 모형계산치와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

영일만 해역은 조석현상이 그다지 크지 않기 때문에 모형을 보정하는데 어려움이 있으나 결과를 보면 계산치가 대체적으로 실측치와 일치하고 있음을 볼 수 있다.

영일만 해역의 전반적인 潮流速分布를 보이기 위하여 1991년 7월 12일의 유속분포도를 Fig. 5에 나타내었다.

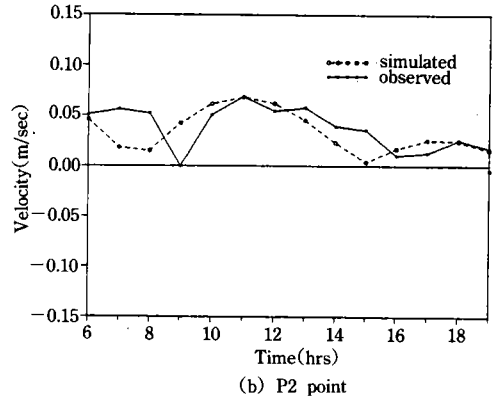
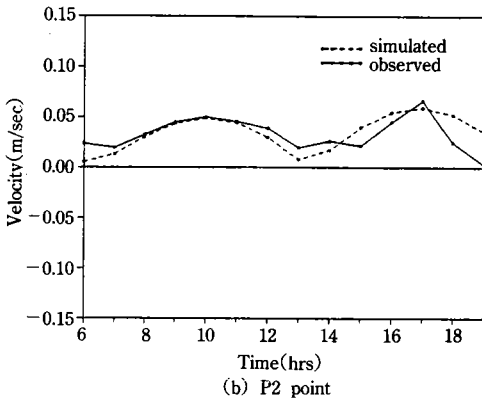
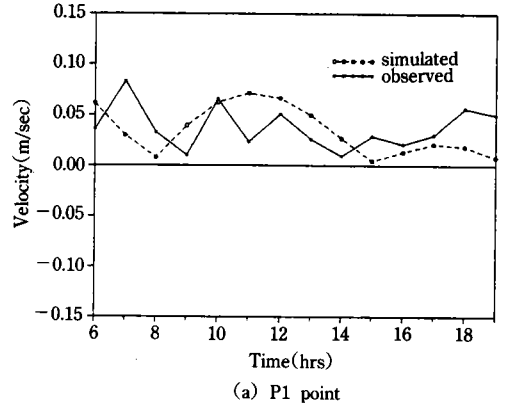
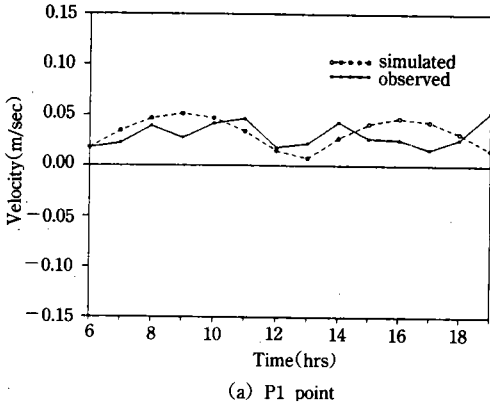


Fig. 3. Comparison of observed and simulated tidal velocity for calibration test

Fig. 4. Comparison of observed and simulated tidal velocity for verification test

2. 迎日灣에서 화학적 산소요구량과 부유고형물의 移流·擴散 解析

본 절에서는 迎日灣 지역의 COD와 SS의 측정결과를 이용하여 ELA 모형을 補正·檢證하여 오염물질의 이동을 예측하여 본다.

가. 화학적 산소요구량(COD)과 부유고형물(SS)의 측정결과

영일만 해역의 환경영향평가의 일환으로 1991년에 계절별로 실시한 COD와 SS의 측정결과⁷⁾를 이용하였다. 측정위치는 Fig. 6과 같다.

COD는 영일만지역 전체적으로 연평균 2.0 mg/l로 관측되었다. 계절 별로 보면 봄에 2.6 mg/l로 가장 높고, 가을에 1.0mg/l로 가장 낮다. 구역별로 보면 포항구항 안쪽이 3.2mg/l로

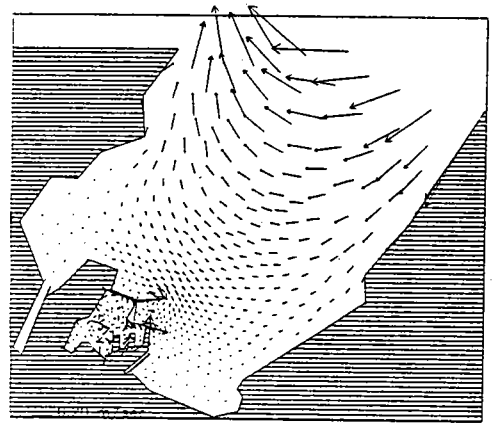


Fig. 5. Diagram of tidal velocity distribution in the Young Il Bay(1991. 7. 12. 00)

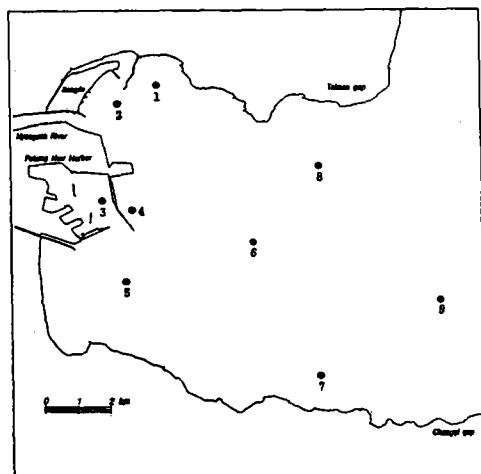


Fig. 6. Location of observation points of COD and SS concentration

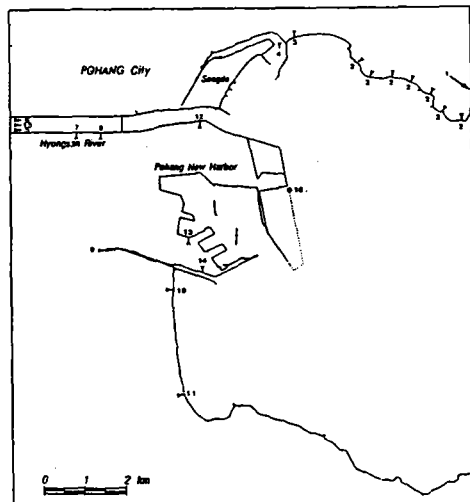


Fig. 7. Location of outlet points of COD source

가장 높고, 형산강 하구와 송도 해수욕장 전면해역이 각각 2.8mg/l와 3.0mg/l로 비교적 높으며, 외해역으로 갈수록 낮아진다.

SS는 영일만 전체적으로 연평균 26.8mg/l로 관측되었고 계절별로는 여름에 35mg/l로 가장 높고, 겨울에 15mg/l로 가장 낮다. 구역별로 보면 포항구항 안쪽이 33mg/l로 가장 높고 외해로 갈수록 약간씩 감소한다.

나. 화학적 산소요구량(COD)의 이유·확산 실험

1) 수치 실험조건

실험에 소요된 총시간은 오염물질이 부하된 때부터 농도의 시간적 변화가 거의 없는 준정상상태(steady state)까지 수행하여 최종시간의 결과를 분석에 이용하였다. 시간간격은 2000 sec로 하였고 총 계산시간은 8×10^6 sec 동안 수행하였다. 초기 농도값은 1.0mg/l로 하였다.

COD의 발생위치는 Fig. 7과 같고 발생량은 Table-3과 같다. 오염원의 발생량을 살펴보면 포항구항과 형산강의 유강교 상류에서 발생하는 양이 현저히 많음을 알 수 있다.

2) 模型의 補正

보정대상은 ELA 모형의 입력자료중에서擴

Table-3. Point sources of COD

No	Rate of source(kg/hr)	Location of points
1	16	Jangryang
2	11	Whanho
3	24	Dooho
4	323	Haksan, Hakjam
5	25	Hyoja
6	8	Sewage treatment plant
7	16	Younil
8	57	Kongdan
9	27	Induek, Munduek, Ochuen
10	80	Joungrim, Samwha, Whasung
11	21	Donghae
12	67	Pochoul 1
13	1	Pochoul 2
14	8	Pochoul 3
15	182	upper of Yukang bridge
16	—	area of waste disposal(No 4)

散係數와 減衰係數로 하였다. 실측치와 비교해서 오차가 가장 작을 때의 값을 구하는 식으로 보정한 결과를 실측치와 모형계산치를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 보정은 계절별로 되어

있는 실측자료중에 1991년 1월 29일과 5월 4일 자료를 사용하여 보정하였다. Fig. 8의 보정결과를 이용하여 실측치와 모형계산치간의 평균 제곱근오차(RMSE)를 구해 본 결과 1월 29일의 $RMSE=0.35$, 5월 4일의 $RMSE=0.47$ 로 나타나 실측치와 모형계산치가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 때의 보정된 확산계수는 $D_x = D_y = 20m^2/sec$ 이고, 감쇠계수는 $k_d = 2.5 \times 10^{-5}/sec$ 로 나타났다.

3) 模型의 檢證

COD에 대해 모형을 검증하기 위해 보정결과를 이용하여 모의계산한 1991년 7월 12일, 10월 5일의 결과를 현장관측치와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

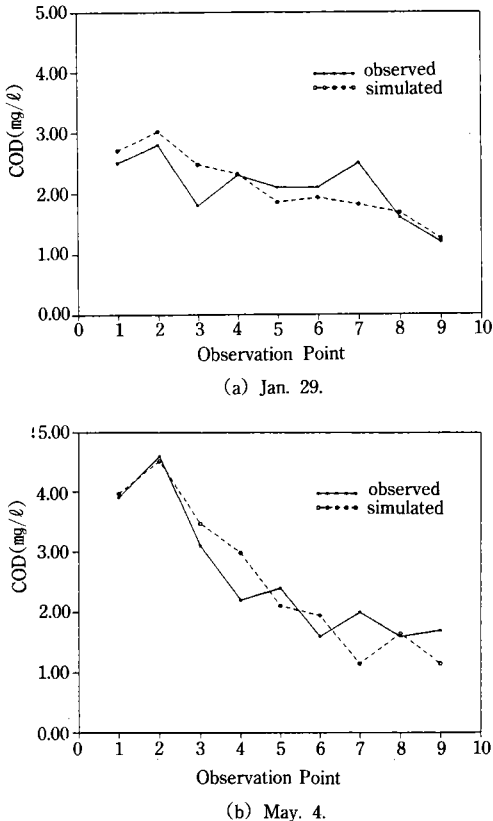


Fig. 8. Comparison of observed and simulated COD concentration for calibration test

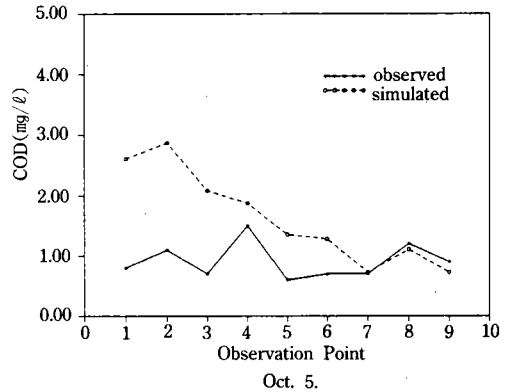
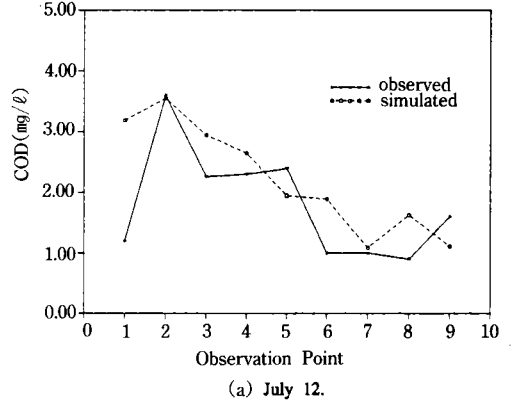


Fig. 9. Comparison of observed and simulated COD concentration for verification test(1991)

수치실험 결과를 보면, 계절별로 여름에 해당하는 1991년 7월 12일은 $RMSE=0.86$ 으로 결과가 비교적 잘 일치하고 있으나, 가을에 해당하는 10월 5일은 측정값이 전체적으로 작은 값을 나타내고 있어 $RMSE=1.02$ 로 큰 값을 보이고 있다. 이는 오염원의 유입변화를 계절별로 충분히 고려하지 않은 것이 원인으로 생각된다.

또한 영일만에서의 전체적인 COD 분포상황을 살펴보기 위해 1991년 7월 12일의 계산결과를 실측치와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다.

다. 浮遊固形物(SS)의 移流·擴散 實驗

1) 수치 실험조건

포항신항의 호안공사중 발생하는 SS는 Fig.

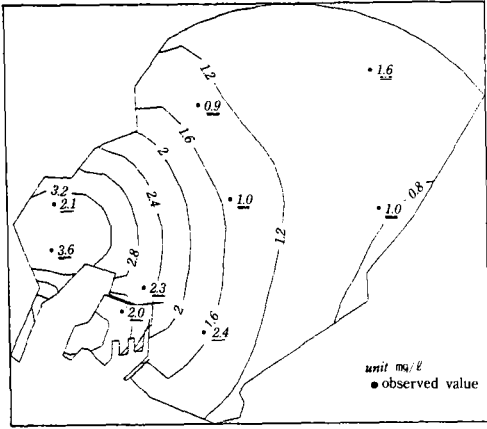


Fig. 10. Distribution of COD concentration (1991. 07. 12 : 00)

11의 A, B, C 세 지점에서 각각 79.9kg/hr로 발생⁷⁾된다. 초기농도 값은 27mg/l로 하였고 계산시간간격은 1000sec로 하여 계산하였다. SS도 COD와 마찬가지로 농도변화가 거의 없는 시간까지 계산을 수행하여 최종시간 결과를 분석에 이용하였다.

2) 模型의 補正

SS에 대한 ELA모형의 보정은 1991년 1월 29일과 5월 4일 자료를 이용하였고, 擴散係數와

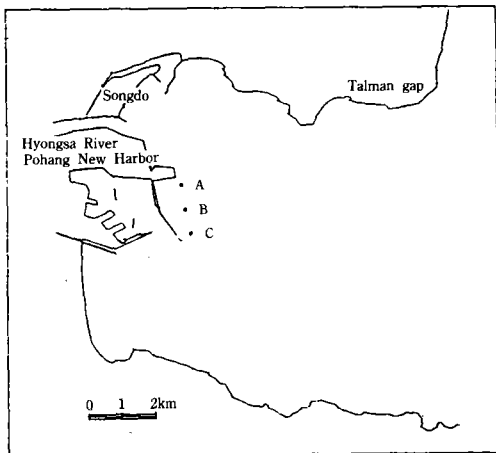


Fig. 11. Location of observation points of SS source during the work of bank protection

減衰係數를 보정대상으로 하였다. 보정결과를 실측치와 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 보정결과를 보면 1월 29일의 RMSE=1.07, 5월 4일의 RMSE=3.12로 알 수 있듯이 실측치와 모형계산치가 잘 일치함을 알 수 있다. 보정한 결과 확산계수는 $D_x=D_y=30m^2/sec$ 이고 감쇠계수는 $k_d=5.0 \times 10^{-5}/sec$ 로 나타났다.

3) 模型의 檢證

보정결과를 1991년 7월 12일과 10월 5일의 SS 측정 농도값을 이용하여 모형을 검증하였다. 검증결과를 Fig. 13에 나타내었는데 결과를 보면 7월 12일의 RMSE=2.52, 10월 5일의 RMSE=4.26으로 실측치와 모형계산치가 잘 일치함을 알 수 있다.

호안공사중에 발생하는 토사로 인한 부유사의

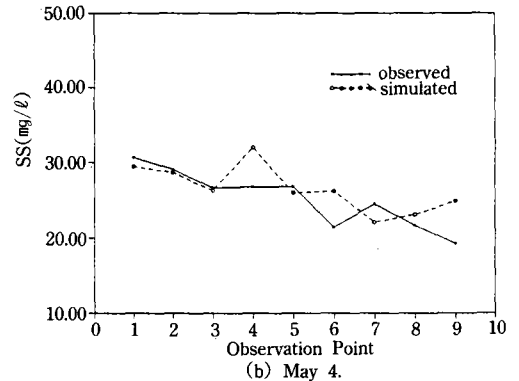
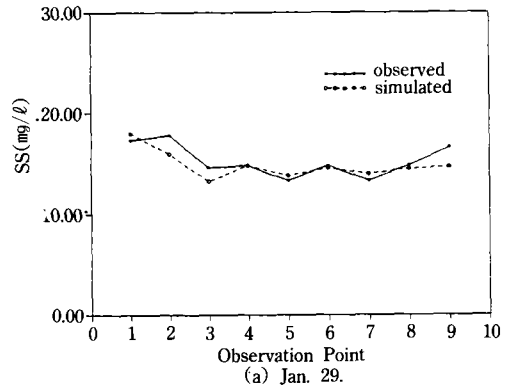


Fig. 12. Comparison of observed and simulated SS concentration for calibration test

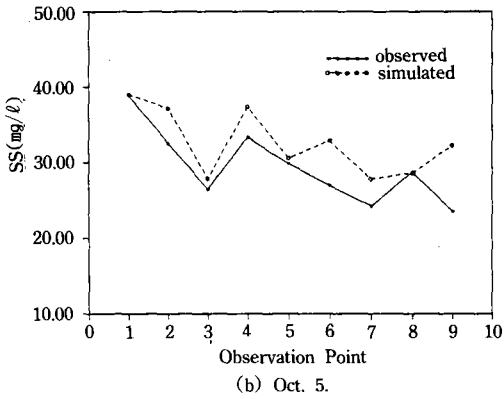
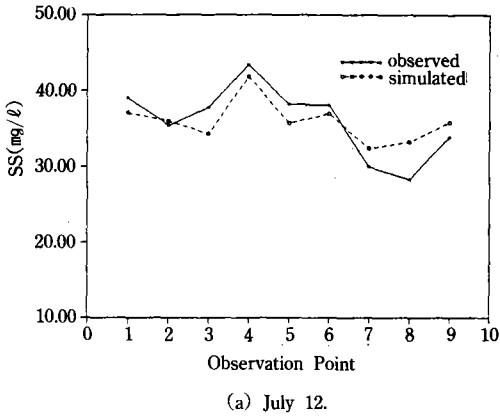


Fig. 13. Comparison of observed and simulated SS concentration for verification test

발생분포를 살펴보기 위해 1월 29일의 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 SS의 분포상황을 보면 0.04~0.44mg/l 사이의 값을 나타내고 있는데, 실제해역의 SS 농도값과 비교해 볼때 값이 미소하기 때문에 호안공사로 인한 SS의 증가치가 해역에 미치는 영향은 별로 크지 않음을 알 수 있다.

3. 粒子 移動經路 追跡

ELA 모형은 개개의 粒子軌跡을 추적할 수 있는 추적 알고리즘을 제공하고 있다. 추적 시작위치와 초기시간, 계산간격을 지정해주면 그 위치에 있는 하나의 입자가 그리는 이동경로를 추적 알고리즘을 통해 알 수 있다.

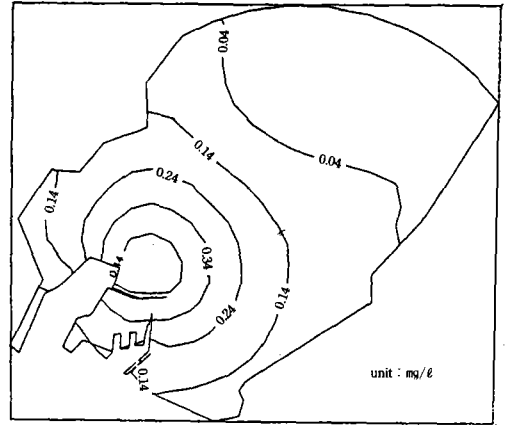
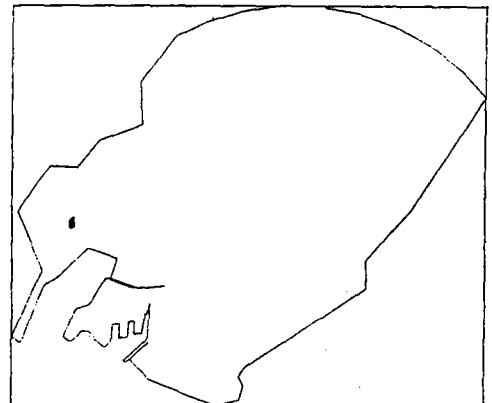
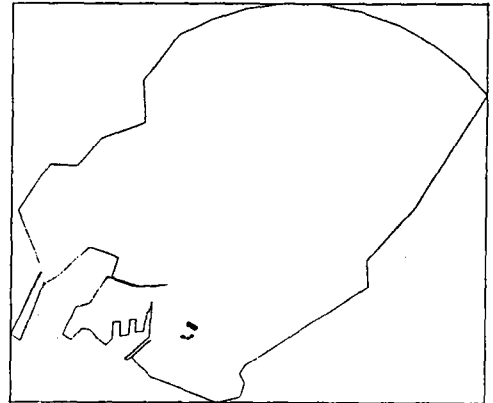


Fig. 14. Distribution of SS concentration (1991. 1. 30. 07)



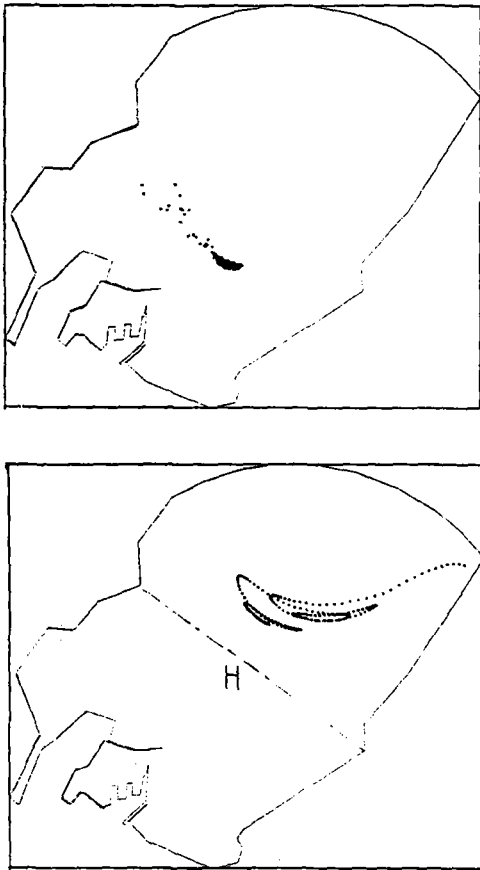


Fig. 15. Trajectories of mass pathline

입자의 이동경로를 추적함으로써 입자가 그리는 궤적을 알 수 있고 이를 통해서 추적하는 입자가 임의의 지역에 계속 머물 것인지 또는 의해로 배출될 것인지를 예측할 수 있다.

영일만 해역에서 내곳에 걸쳐 입자추적을 실시해 보았는데 Fig. 15을 보면 (a) 지점과 (b) 지점에서는 입자의 이동이 아주 미소했고, (c) 지점에는 우측으로 이동하다 역시 이동이 미소하게 되었으며, (d) 지점은 좌우를 이동하다 우측 의해로 빠져나갔다. 따라서 실험에 의하면 오염물질은 H선 밖에 버려야 灣 안쪽에 머물지 않고 쉽게 의해로 빠져나감을 알 수 있다.

IV. 結 論

하구를 포함한 천해역은 生態學적으로 매우 중요한 지역임에도 불구하고 현재도 오염상태가 문제가 되고 있으며 미래에는 더욱 심각해질 것으로 예상된다. 이러한 천해역은 조석현상을 포함하기 때문에 Eulerian 방법이나 Lagrangian 방법만으로 物質移送方程式을 해석할 경우 誤差가 심해 한계성이 있으므로 이류향과 확산향을 분리하여 이류향은 Eulerian 방법으로 확산향은 Lagrangian 방법으로 각각 해를 구함으로써 오차를 현저히 감소시키는 Eulerian-Lagrangian 방법이 적합하다.

본 연구의 목적은 TIDE 모형으로 부터 조위와 조류속을 입력받아, Eulerian-Lagrangian 방법을 사용한 Eulerian-Lagrangian Analysis(ELA) 모형을 迎日灣內的 COD와 SS에 대해 적용시켜 봄으로써 ELA 모형의 오염물질이동 豫測能力 즉, 適用性을 살펴보는 데 있다.

지금까지의 연구내용 및 결과를 간추려보면 다음과 같다.

1. ELA 모형을 이용하여 迎日灣에서의 COD와 SS의 오염물질이동을 예측하여 보았던 바 모형계산치가 실측치와 잘 일치하므로 본 모형이 조석현상이 있는 천해역의 오염물질이동을 매우 정확히 예측할 수 있는 능력이 있음을 알 수 있었다.

2. 조화유한요소 수치모형(TIDE)으로 線型 摩擦係數 값을 보정하여 영일만 해역의 조위와 조류속을 계산하였는데 현장측정값과 잘 일치하므로 TIDE 모형의 潮流速豫測能力이 뛰어나고, ELA 모형에 조위와 조류속의 입력자료를 제공하는데 적합한 모형임을 알 수 있었다.

3. COD의 오염원에 대한 迎日灣內的 COD 농도 분포를 계산하였고 실측치에 대한 보정과 검증을 실시한 결과 영일만내의 COD에 대한 확산계수 값인 $D_x = D_y = 20 \text{m}^2/\text{sec}$ 와 1차 감쇠계수 값, $k_d = 2.5 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 를 얻었다. 이 값을

이용하여 계산한 영일만내의 COD 분포는 영산강 하구인 포항구항쪽이 오염원이 많아 농도가 비교적 높고 외해로 갈수록 放射狀으로 감소하였다.

4. 영일만내의 SS에 대한 擴散係數와 減衰係數를 구한 결과 $D_x = D_y = 30m^2/sec$, $k_d = 5.0 \times 10^{-5}/sec$ 로 나타났다. 이 값을 이용하여 포항신항 제4투기장 조성시 발생하는 SS 농도분포 상태를 구해본 결과 농도값은 $0.04 \sim 0.44mg/l$ 로 영향이 그렇게 크지 않았다.

5. 영일만내의 여러 곳에서 粒子追跡을 실시해 보았는데, 灣 안쪽일수록 이동이 미소하였고 외해쪽으로 일정거리 이상이 되어야 쉽게 이동되어 외해로 빠져 나감을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

- 권순국 · 고덕구 · 조국광 · 김준현, 1991, 유한요소법을 이용한 해수유동(I), 한국농공학회지, 33(4), pp. 73-83.
- 권순국 · 고덕구 · 조국광 · 김준현, 1992, 유한요소법을 이용한 해수유동(II), 한국농공학회지, 34(2), pp. 73-84.
- 서승원, 1990, 오염예측을 위한 수송모형의 비교, 군산대학교 해양개발연구, Vol(2) No. 1, pp. 121-130.
- 서승원, 1992, 방조제 축조로 인한 부유사 확산, 군산대학교 해양개발연구, Vol(4) No. 1, pp. 115-130.
- 서일원 · 김대근, 1993, 이송방정식에 대한 Eulerian-Lagrangian Method의 거동해석, 수공학 연구 발표회 논문집, 35, pp.151-157.
- 정태성 · 이종찬, 1991, 동해남부지역의 조석계산, 한국해양 · 해양공학회지, 3(1), pp. 29-37.
- 포항종합제철주식회사, 1992, 포항제철소 제 4 투기장 조성 수치모형실험보고서
- Baptista, A. E., E. E. Adams & K. D. Stolzenbach, 1984, Eulerian-Lagrangian Analysis of Pollutant Transport in Shallow Water, R296, Ralph M. Parsons Lab., MIT, Cambridge, MA.
- Cheng, R. T., V. Casulli & S. N. Miford, 1984, Eulerian-Lagrangian Solution of the Convection-Dispersion Equation in Natural Coordinates, Water Resources Research, Vol. 20, No. 7, pp.944-952.
- Douglas, J. & R. F. Russel, 1982, Numerical Methods for Convection Dominated Diffusion Problems Based on Combining the Method of Characteristics with Finite Element or Finite Difference Procedures, SIAM J. Num. Anal., Vol. 19, No. 5
- Holly, F. M. & A. Pressiman, 1977, Accurate Calculation of Transport in Two Dimension, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 103, No. 11, pp. 1259-1277.
- Neuman, S. P., 1981, A Eulerian-Lagrangian Numerical Scheme for the Dispersion Convection Equation using Conjugate Space-Time Grids, J. of Computational Physics, Vol. 41, pp. 270-294.
- Sobey R. J., 1983, Fractional Step Algorithm for Estuarine Mass Transport, Int. J. Num. Methods Fluids, Vol. 3, pp. 567-581.
- Wang, J. D., S. V. Cofer-Shabica and J. C. Fatt, 1988, Finite Element Characteristic Advection Model, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 9, pp. 1098-1144.