

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 32 卷 第 4 號 1995 年 11 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 32, No. 4, November 1995

## 연안해수유동에 관한 효율적인 수치계산기법

윤범상\*, 노준혁\*, 藤野正隆\*\*, 濱田孝治\*\*

### Effective Simulation Technology for Near Shore Current Flow

by

B. S. Yoon\*, J. H. Rho\*, M. Fujino\*\* and T. Hamada\*\*

#### 요 약

연안해역에서의 해수의 유동을 추정하기 위하여,  $\sigma$  좌표계를 이용한 3차원 해수유동 수치계산 기법을 개발하여, 이를 다양한 해저지형을 가진 정방향의 유체영역 및 인천항부근의 실해역에 적용한 바 있다. 수치해의 수렴성 및 안정성에 있어서 몇가지 제약이 뒤따랐던, 기존의 수치계산기법을 다음과 같은 몇가지 개선을 하여, 수치해의 수렴성 및 안정성을 도모하였다.

- (1) 개방경계조건으로서 무반사 경계조건을 도입하였다.
- (2) 시간의 전개에 있어서, 속도장과 수면변위의 추정시각을 교대로 취하였다.
- (3) 운동방정식중의 이류항의 공간차분을 중앙차분법에서 상류차분법으로 치환하였다.

그 결과, 유체영역내부의 질량 및 운동량보존의 향상이 얻어졌으며, 시간영역에서의 진동이 대부분 억제되었고, 수치해의 수렴성 및 계산정도등에 있어서 괄목할 만한 향상이 얻어졌다.

또한, 개선된 3차원 해수유동 수치계산기법과 동경대학의 3차원 해수유동 수치계산기법 상호간의 유효성을 검증하기 위하여 공동연구를 수행하였다. 물리좌표계를 이용한 동경대학의 해수유동 추정결과와,  $\sigma$  좌표계를 이용한 울산대학교의 해수유동 추정결과를 비교한 결과, 일부 다소간의 차가 생기는 점을 제외하고는 대부분 상당한 일치율을 보이는 유용한 결과를 얻었다.

---

발 표 : 1995년도 대한조선학회 춘계연구발표회('95. 4. 20.)

접수일자 : 1995년 5월 29일, 재접수일자 : 1995년 7월 18일

\* 정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

\*\* 동경대학 공학부 선박해양공학과

## Abstract

The three-dimensional multi-layer computer simulation technology for tidal current developed in the previous study is updated to a new version. Many improvements are achieved by following changes :

(1) No-reflection condition is adopted instead of no-gradient condition as an open boundary condition.

(2) Time marching algorithm is changed so that velocity and pressure(surface movement) might be solved in turn at different time step .

(3) Convection term in equation of motion is estimated by upwind differencing scheme instead of central differencing.

The stability is improved considerably and the steady state is achieved within 2 tidal periods which is about 3 times shorter than that of the old version. Moreover, fluctuations in time disappeared by introducing the new time marching technique.

An application to the real near shore area(near Incheon harbor) is performed by the new version. Simulated results are compared with those by the simulation tool developed in the University of Tokyo. Validity and effectiveness of the two simulation technologies are checked through the comparative research works.

## 1. 서 론

연안해역에서의 해수의 유동을 추정하기 위하여,  $\sigma$  좌표계를 이용한 3차원 해수유동 수치계산기법을 개발하여, 이를 다양한 해저지형을 가진 정방향의 유체영역에 적용한 바 있다[1,2]. 또한, 인천항부근의 연안해역에 적용하여 실험해역에서의 해수의 유동을 추정한 바 있다[3]. 그러나, 기존의 3차원 해수유동 수치계산기법을 실험해역에 적용하는 과정에서, 수치해의 수렴성 및 안정성에 있어서 몇가지 제약이 뒤따른 것이 사실이다. 따라서, 기존의 해수유동 전산모사기법의 실용화 및 효율화과정에서 경계조건과 수치계산기법상 몇가지 개선을 하여, 수치해의 안정성 및 계산정도 등에 있어서 괄목할만한 향상이 얻어졌다. 개선점과 결과를 요약하면, 첫째, 개방경계조건으로서 무반사 조건을 도입함으로써 유체영역내부의 질량 및 운동량 보존의 향상이 얻어졌다. 둘째, 시간의 전개에 있어서 속도장과 수면변위의 추정시각을 교대로 취함으로써, 시간영역에서의 진동이 대부분 억제되었다. 셋째, 운동방정식 중의 이류항(convection term)의 공간차분을 중앙차분법에서 상류(upwind) 차분법으로 치환함으로써, 수치해의 안정도가 획기적으로 향상되었다. 그 결과, 해저지형 및 육지지형의 형상이 복잡한 인천항 부근의 연안해역에 대한 실험역 적용예에서 두주기째부터 거의 정상적인 수치해

가 얻어졌다.

이 3차원 해수유동 수치계산기법과 동경대학의 3차원 해수유동 수치계산기법과의 상호간의 유효성을 검증하기 위하여, 1995년 1월 12일부터 1월 26일까지 동경대학에서 비교계산을 수행하였다. 동일해역·동일가상조건하의 조류 및 취송류에 대하여, 물리좌표계(다층기법)를 이용한 동경대학의 해수유동 추정결과와, 울산대학교의  $\sigma$  좌표계(다층기법)를 이용한 해수유동 추정결과를 비교한 결과, 일부 다소간의 차가 생기는 점을 제외하고는 대부분 상당한 일치력을 보이는 등 유용한 결과가 얻어져 이를 보고하고자 한다.

## 2. 계산기법의 개선

본 연구에 적용된 기본방정식 및 차분방정식과 좌표계는 참고문헌[1], [2]에 상세히 기술되어 있기에 본 논문에서는 생략하기로 하고 개선항목에 국한해 기술하고자 한다.

### 2.1 개방경계조건

기존의 계산기법에서는, 조석에 의한 해면변위가 조화함수의 형태로 부과되는 개방경계면을 제외한 모든 개방경계면에서의 자유표면의 변위가 경계면의

수직방향으로 변화가 없고, 모든 개방경계면에서의 수직방향의 속도변화가 없다는 조건(No-gradient condition)을 부과하였다. 엄밀한 의미에서, 이 경계 조건은 개방경계면을 통한 유체질량의 자유로운 이송을 허용하지 않으며, 시간이 경과함에 따라 질량 및 운동량 보존의 조건을 충족시키지 못하게 된다. 이러한 사실은 수치해의 정확도에 영향을 미칠뿐만 아니라, 수치해의 안정성에도 영향을 미치게 된다. 따라서, 이러한 문제점들을 해결하기 위하여, 조석에 의한 해면의 변위가 조화함수의 형태로 주어지는 개방경계면을 제외한 모든 개방경계면에서의 자유표면의 변위를 추정함에 있어, 다음과 같은 Hino의 무반사 조건을 적용하였다[4,5].

예로서, Fig. 1 에 나타낸 것과 같은 동쪽개방경계면을 생각해 보자. 이 경우, 개방경계면의 왼쪽영역이 계산영역이 된다.

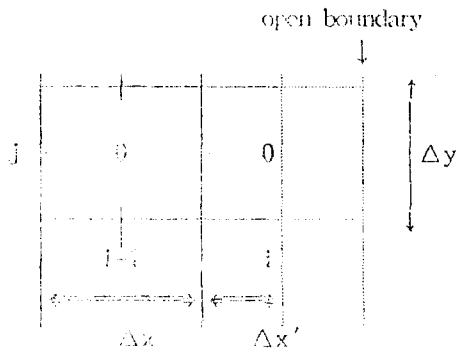


Fig. 1 Grid structure of the east open boundary

만약, 자유표면의 변위를 계산해야 하는 격자점 (i,j)가 계산영역내에 위치하면 자유표면의 변위는 다음의 식으로부터 구한다.

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i,j}^n - \Delta t \left\{ \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{\Delta x} + \frac{V_{i,j+1}^n - V_{i,j}^n}{\Delta y} \right\} \quad (1)$$

$$U_{i,j}^n = \int_{-1}^{\frac{\eta}{H}} u_{i,j}^n H d\sigma \quad (2)$$

$$V_{i,j}^n = \int_{-1}^{\frac{\eta}{H}} v_{i,j}^n H d\sigma$$

여기서,  $\eta$  : 자유표면의 변위  
 $u, v$  : x, y 방향의 속도성분  
 $H$  : 수심

그러나, 자유표면의 변위를 계산해야 하는 격자점 (i,j)가 개방경계면상에 위치하므로 식 (1)의 적용이 불가능하다. 따라서, 개방경계면상의 자유표면의 변위를 가상의 고체경계면에서의 자유표면의 변위의 반으로써 생각함으로써 자유로운 질량이송이 이루어지게 할 수 있다는 개념이다.

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \frac{\eta_{i,j}^*}{2} \quad (3)$$

$$\eta_{i,j}^* = \eta_{i,j}^n - \Delta t \left\{ \frac{-U_{i,j}^n - U_{i,j}^n}{2\Delta x'} + \frac{2V_{i,j+1}^n - 2V_{i,j}^n}{\Delta y} \right\} \quad (4)$$

$$\Delta x' = \sqrt{gH} \cdot \Delta t \quad (5)$$

여기서,  $g$  : 중력가속도

즉, 개방경계면에서 수치적인 반사파를 없애고, 타당한 수면변위를 부과하여 계산영역내의 질량보존을 도모할 수 있다는 의미이다. 여기서, 식(4)의 우변 둘째항은 폐경계면에서의 비침투(No-penetration)조건이 고려되었으며, 식(5)는 조석에 의한 파도가 천해 파로써 간주되었음을 의미한다.

### 2.2 시간의 차분

기존의 계산기법에서는 각 격자점에서의 속도성분과 자유표면의 변위를 같은 시점에서 추정하였다. 시간의 전개에 있어서 이러한 알고리즘을 적용하여 계산을 수행한 결과, 시간영역에 있어서 수치적인 진동이 나타났고, 이 진동은 아주 느리게 소멸됨을 알 수가 있었다. 따라서, 시간영역에서의 진동을 제거하기

위하여, 교차격자체계와 비슷한 개념을 가지는 새로운 알고리즘을 적용하였다. 즉, 속도성분과 자유표면의 변위를 다음식으로부터 계산하였다.

$$V^{n+1} = V^n + \Delta t \cdot F(V^n, \eta^{n+\frac{1}{2}}) \quad (6)$$

$$\eta^{n+\frac{1}{2}} = \eta^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t \cdot G(V^n) \quad (7)$$

속도성분들에 대한 시간의 차분은 Leapfrog scheme과 결합한 Backward scheme을 사용하였고, 자유표면의 변위에 대한 시간의 차분은 Leapfrog scheme을 그대로 사용하였다.

속도와 자유표면변위를 추정하는 시간을 교대로 취함으로써, 시간영역에 있어서의 진동을 대부분 억제하고 수치해의 안정성을 얻을 수 있었다.

### 2.3 공간차분

기존의 방법에서 채택했던, 공간에 대한 중앙차분법은 수치해의 안정성의 측면에서 중립적이라는 것은 주지의 사실이다. 따라서, 기존의 수치계산기법을 실해역에 적용하는 과정에서 나타났던 수치해의 불안정성을 제거하기 위하여 운동방정식 중의 이류항을 중앙차분법에서 상류차분법으로 치환하였다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i &= C \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad : C > 0 \\ &= C \frac{u_i - u_{i+1}}{\Delta x} \quad : C < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

그 결과, 상류차분법의 강력한 감쇠효과로 인하여 수치해의 안정성 및 수렴성이 획기적으로 향상되었다.

### 2.4 계산기법의 개선결과

위에서 기술한 개선점들을 실해역에 적용함으로써, 향상된 계산의 정도를 알아보기 위하여, Fig. 2에 나타낸 바와 같은 계산영역을 택하여 기존의 계산기법과 개선된 계산기법을 이용하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 조건은 참고문헌[3]에서와 같은 조건을 사용하였다. Fig. 2에 나타낸 대표적인 한 위치에서의 자유표면의 변위와 속도성분을 비교한 결과, Fig. 3 - a, b, c에 나타낸 바와 같이, 수치해

의 수렴성 및 안정성이 획기적으로 향상되었음을 알 수가 있다.

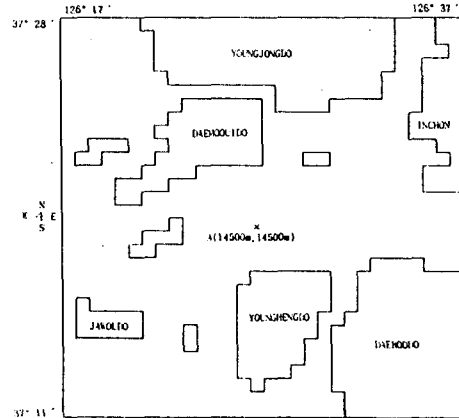


Fig. 2 Computation domain near Incheon harbor (30Km×30Km) (Assumed position where the results are compared)

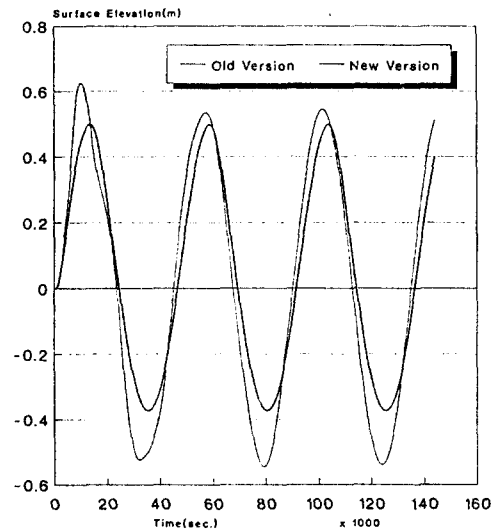


Fig. 3-a Time histories of free surface movement by old and new version (Point A)

### 3. 물리좌표계와 $\sigma$ 좌표계의 비교

개선된 계산기법을 실험역에 적용함에 있어서, 계산을 수행하고자 하는 대상해역의 관측자료의 입수가 어려운 관계로, 동일해역을 대상해역으로 동일한 가상조건하에서 동경대학교의 공동연구를 수행하였다.

두 기관의 수치기법은 각기  $\sigma$  좌표계(UOU)와 물리좌표계(UOT)[6]를 사용하고 있으며, 각 좌표계에 의한 수직층의 분할방법은 Fig. 4 에 보여지고 있다.

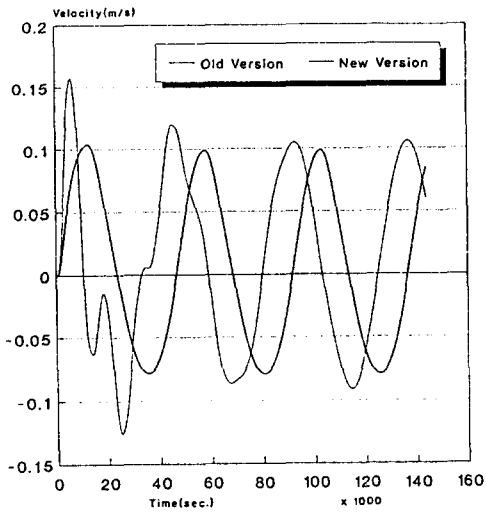


Fig. 3-b Time histories of free surface current u-velocity at point A by old and new version

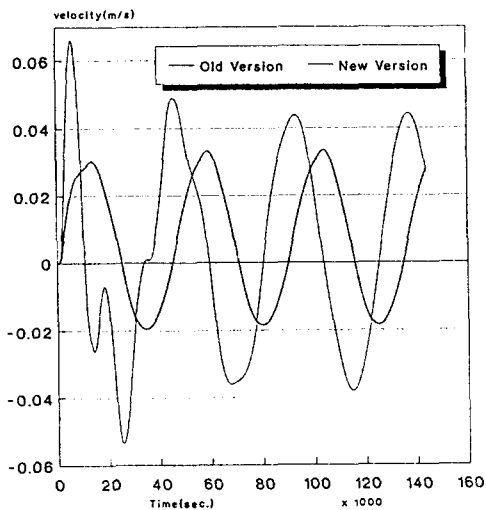


Fig. 3-c Time histories of free surface current v-velocity at point A by old and new version

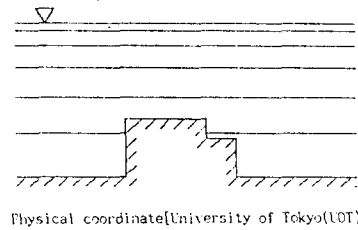
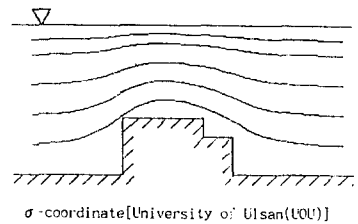


Fig. 4 Layout of vertical layers

### 4. 인천항 부근의 해류유동의 추정

#### 4.1 계산조건

두 수치기법을 실험역에 적용하기 위하여 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 동경 126° 03'에서 동경 126° 37'까지 가로 50Km이고, 북위 37° 00'에서 북위 37° 28'까지 세로 50Km인 영역을 대상해역으로 선정하였다. 수심의 입력은 축척 1:75,000의 수로국 간행 해도 No.306 을 참고하였으며, 각 격자점에서의 수심을 이용하여 계산영역 전체의 조감도를 Fig. 6 에 나타내었다. 각 계산방법에서 수평면은

등간격을 가지는 50×50 개의 격자로서 분할하였고, 각 계산방법에서 연직방향의 좌표는 Table. 1 에 보인 바와 같다.

계산에 사용된 각 계수는 Table. 2 에 나타낸다.

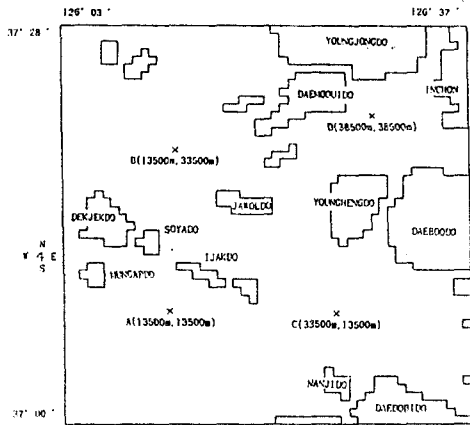


Fig. 5 Computation domain near Incheon harbor(50Km×50Km) (Assumed positions where the results are compared)

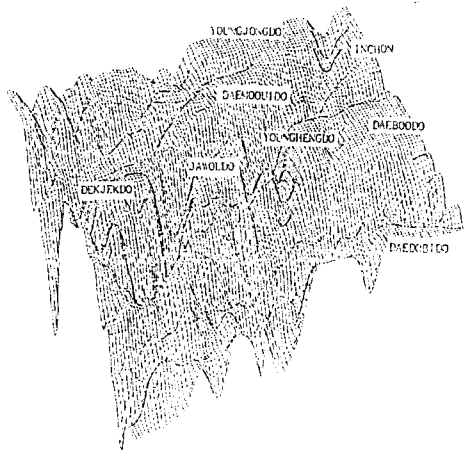


Fig. 6 Three dimensional geography of computation domain (near shore area of Incheon harbor)

4.2 조석에 의한 해류유동(Case 1)

조석을 고려하기 위하여, 서쪽경계면에서의 조석

에 의한 해면상승을 식 (9)와 같은 조화함수의 형태로 부과하였다.

Table 1 Vertical coordinate

	UOU( $\sigma$ -coordinate)	UOT(Physical coordinate)
1	-0.05	1m
2	-0.15	3m
3	-0.3	7m
4	-0.5	15m
5	-0.7	31m
6	-0.9	63m

Table 2 Various constants used in the calculations.

$g$	9.8	$\frac{m}{s^2}$	acceleration of gravity
$\rho$	1025	$kg/m^3$	density of water
$A_M$	100	$m^2/s$	horizontal eddy viscosity
$K_M$	0.001	$m^2/s$	vertical eddy viscosity
$\gamma$	0.0026		sea bottom friction coefficient
$\Delta t$	2	sec	time interval
$\eta_0$	0.5	m	amplitude of tidal forcing
$T_0$	12.5	hours	tidal period
$\rho_a$	1.226	$kg/m^3$	density of air
$c_d$	0.0015		wind drag coefficient
$v_{wx}$	10.0	$\frac{m}{s}$	wind velocity in x
$v_{wy}$	0	$\frac{m}{s}$	wind velocity in y
$\Delta x = \Delta y$	1.0	km	grid spacing
layer	6		No. of vertical layer

$$\eta = \eta_0 \sin 2\pi \frac{t}{T_0} \tag{9}$$

윗식에서,  $\eta_0$ 와  $T_0$ 는 각각 조류의 진폭 및 주기를 나타낸다.

조석에 의한 해류의 유동을 추정하기 위하여, Fig. 5 에 나타낸 점 C 에서 시간영역에서의 자유표면의 변위를 Fig. 7 에 나타내었다. 또한, 두 계산기법에 의한 점 C 에서의 시간영역에서의 표층류의 속도변화를 Fig. 8 에 나타내었다. 두 계산기법에 의한 결과가 약간의 차이는 있으나, 두 기법 공히 수치해의 안정성이나 수렴성은 상당히 만족할 만한 거동을 보이고 있음을 알 수가 있다. 두 계산기법에 의한 수치해의 차이는 각기 다른 좌표계의 사용에 따른 차이라 할 수 있는데, 특히 물리좌표계(UOT)의 경우 중심을 수정해야 하므로 천수역에서는 오차가 크게 나타날 수 있다.

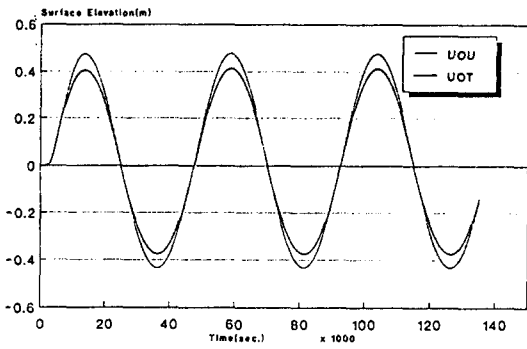


Fig. 7 Time histories of free surface movement at point C (Case 1)

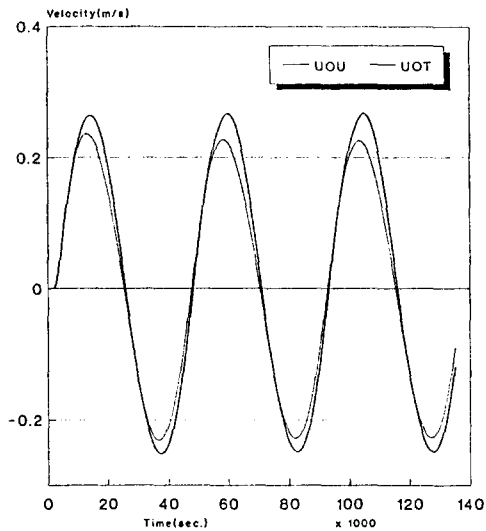


Fig. 8-a Time histories of surface current u-velocity at point C (Case 1)

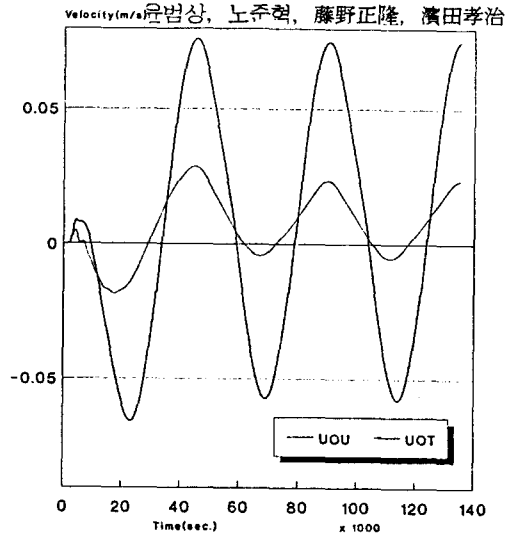


Fig. 8-b Time histories of surface current v-velocity at point C (Case 1)

#### 4.3 바람에 의한 해류유동(Case 2)

바람에 의한 해류의 유동을 추정하기 위하여, 10 m/s의 풍속을 가진 서풍이 일정하게 분다고 가정하였다. 바람에 의한 취송류의 유동을 추정하기 위하여, Fig. 5 에 나타낸 점 C 에서 시간영역에서의 자유표면의 변위를 Fig. 9 에 나타내었다. 또한, 점 C 에서의 시간영역에서의 표층류의 속도변화를 Fig. 10 에 나타내었다. 조석에 의한 경우와 마찬가지로, 두 계산기법에 의한 결과가 약간의 차이는 있으나, 수치해의 안정성이나 수렴성은 매우 좋다고 판단된다.

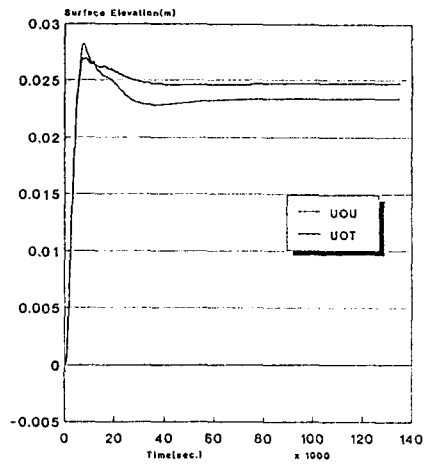


Fig. 9 Time histories of free surface movement at point C (Case 2)

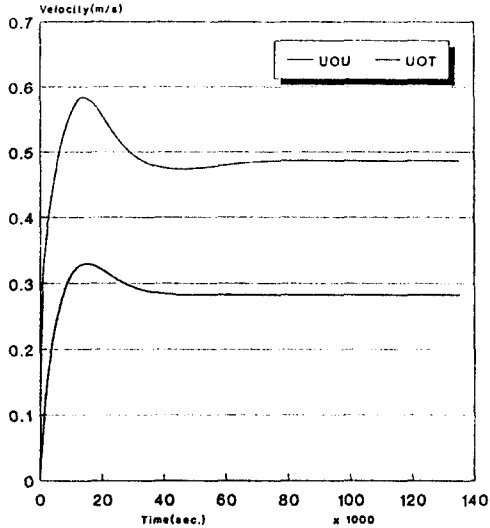


Fig. 10-a Time histories of surface current u-velocity at point C (Case 2)

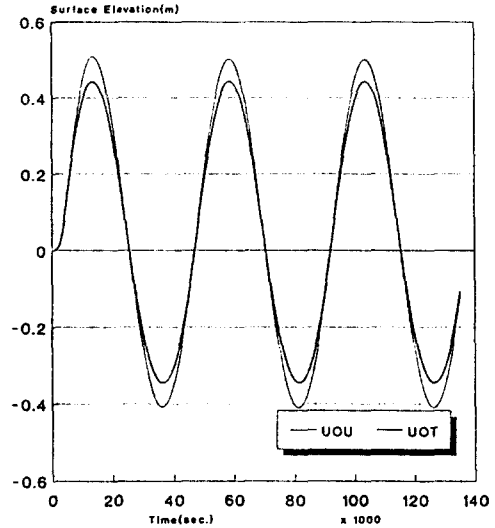


Fig. 11 Time histories of free surface movement at point C (Case 3)

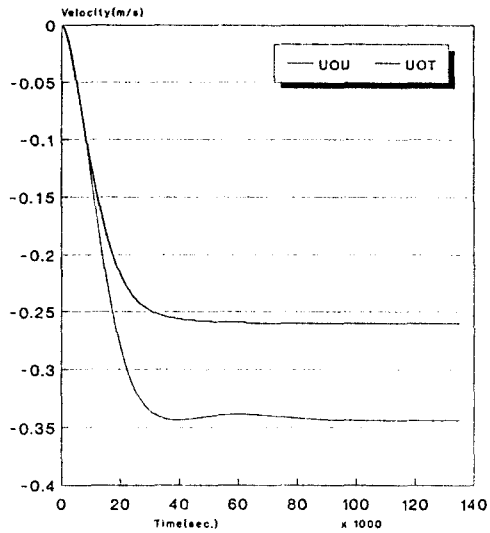


Fig. 10-b Time histories of surface current v-velocity at point C (Case 2)

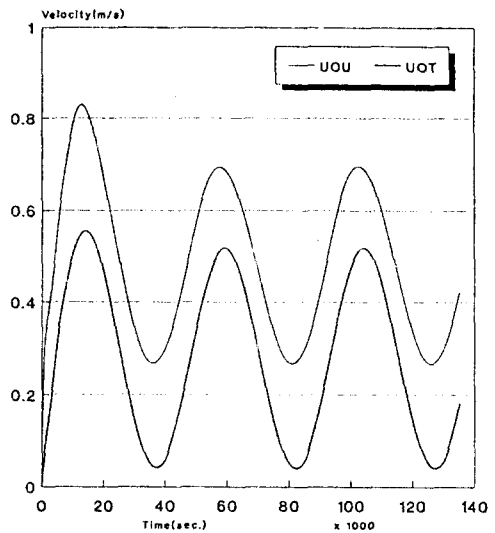


Fig. 12-a Time histories of surface current u-velocity at point C (Case 3)

4.4 조석 및 바람에 의한 해류유동(Case 3)

조석과 바람이 동시에 작용하는 경우의 비교를 위한 예로써, Fig. 5 에 나타낸 점 C 에서 자유표면 변위와 표층유속을 각각 Fig. 11, 12 에 나타내었다.

조석 및 바람에 의한 해류유동의 경우, 조석만에 의한 해류유동의 결과와 바람만에 의한 해류유동결과를 단지 중첩하는것이 아니라는 사실을 알수가 있다.

계산결과의 한 예로써, Fig. 13-a, b 에 표층류



속도장을 Fig. 13-c 에 깊이방향 평균속도장을 보인다. Fig. 13-b 와 Fig. 13-c 의 비교로부터 조류의 표면속도성분이 바람에 의하여 상당히 많은 영향을 받음을 알 수가 있다.

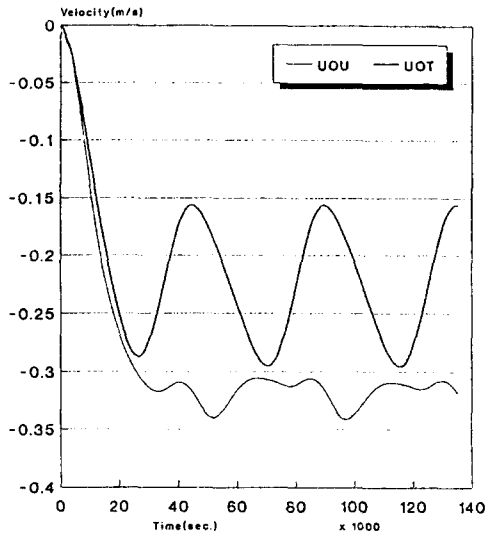


Fig. 12-b Time histories of surface current v-velocity at point C (Case 3)

### 5. 기상오염원 거동

$\sigma$  좌표계를 이용한 계산기법(UOU)을 이용하여 Fig. 5 에 나타낸 네 위치에서 동시에 누유가 발생했다는 가정하에 기름의 거동을 Fig. 14 에 나타내었다. 기상조건은 상기 4-3절의 경우를 따랐다. 이 경우 누출된 기름은 해수와 같은 속도로 이동한다고 가정하여 기름의 거동을 추정하였다. 점 A, B, C, D 의 경우에는 각각 누유가 시작된후, 약 42시간, 약 9 시간 30분, 약 17시간 후에 누출된 기름이 육지에도

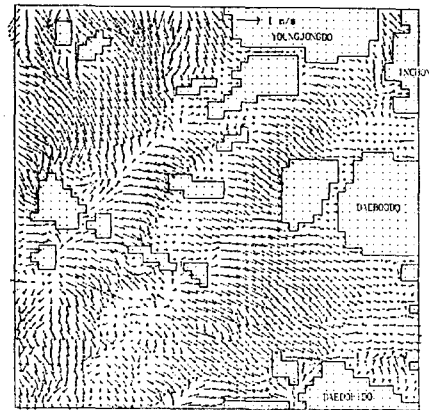


Fig. 13-b Surface current vector field at  $t = 0.75 T_0$  (Case 3, UOU)

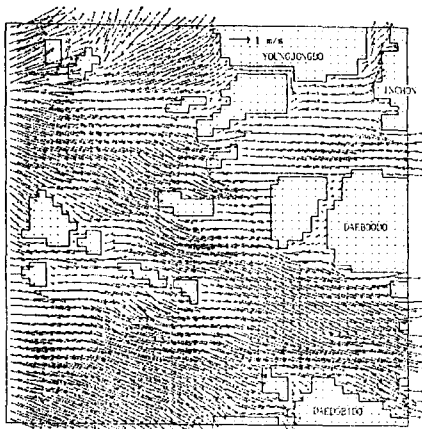


Fig. 13-a Surface current vector field at  $t = 0.25 T_0$  (Case 3, UOU)

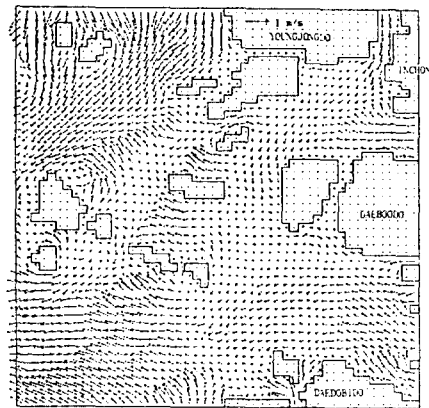


Fig. 13-c Current vector field using mean velocity at  $t = 0.75 T_0$  (Case 3, UOU)

달하였고, 점 C의 경우에는 약 24시간 30분 후에 누유된 기름이 계산영역밖으로 이동하였다. 기름의 변위는 조류보다는 취송류에 의하여 보다 많은 영향을 받으며, 기름의 거동이 바람의 방향과 정확하게 일치하지는 않고, 해저지형뿐만 아니라 육지지형의 형상에 의해서도 크게 영향을 받음을 알 수가 있다.

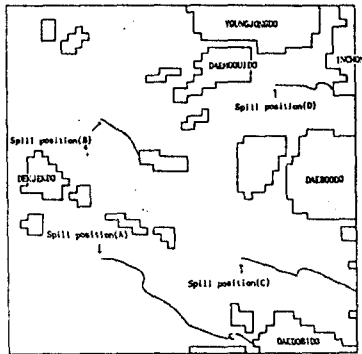


Fig. 14 Trajectories of oil slick movement during 4 period by surface current at real sea

### 6. 결론

본 연구에서는, 기존의 3차원 해수유동 수치계산 기법의 개선을 통하여 수치해의 수렴성 및 안정성측면에서 획기적인 향상을 보았다.

개선된 계산기법과 동경대학의 계산기법 상호간의 유효성을 검증하기 위하여 인천항 부근의 연안해역에 적용한 결과, 만족스러운 결과를 얻었으며 두 기법 공히 매우 안정적인 사실이 입증되었다.

연안해역에 누출된 기름의 거동을 지배하는 표층류를 추정함에 있어 해저지형의 영향이 무시될 수 없다는 사실과 취송류가 해저지형뿐만 아니라 육지지형의 형상에 의해서도 크게 영향을 받고, 특히 천수역에서 조석과 바람사이의 연성효과가 작지 않다는 사실을 확인하였다.

### 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학연구센터 지원으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] Yoon, B. S. and Rho, J. H., " Numerical analysis of the ocean tidal current considering sea bottom topography " , *Journ. Society of Naval Architects in Korea*, Vol.32, No.1, 1995.
- [2] Yoon, B. S. and Rho, J. H., " Development of computer simulation technology of near shore oil spreading " , *Report of AFERC, POSTECH*, 1993.
- [3] Rho, J. H. and Yoon, B. S. , " Numerical computation of near shore surface flows due to tide and wind " , *Journ. Society of Naval Architects in Korea*, Vol.32, No.2, 1995.
- [4] Hino, M. , " Extremely simple calculation scheme for no-reflection wave condition on open boundary " , *Report of the Department of Civil Engineering, University of Tokyo*, 1987.
- [5] Yoon, B. S. and Rho, J. H., " Effective 3-D computer simulation technology of tide and wind induced currents - real sea applications. " , *Report of AFERC, POSTECH*, 1994.
- [6] S. Tabeta and M. Fujino , " Numerical simulation of tidal currents by means of multi-level model " , *Journ. Society of Naval Architects in Japan*, Vol. 170(1991).