
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 32 卷 第 1 號 1995 年 2 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 32, No. 1, February 1995

해저지형을 고려한 조류유동의 수치해석

윤범상*, 노준혁*

Numerical Analysis of the Ocean Tidal Current Considering Sea Bottom Topography

by

B. S. Yoon* and J. H. Rho*

요 약

본 연구에서는 복잡한 해저지형을 고려한 조류의 거동을 예측하기 위한 3차원 다층기법을 개발하였다. 복잡한 해저지형을 보다 정확하고 효과적으로 고려하기 위하여 연직방향으로 σ 좌표계를 도입하였다. 시간의 전개에 있어서는 계산상의 오차를 감소시키기 위하여 강한 감쇠효과를 가지는 것으로 알려진 Euler backward scheme을 Leapfrog scheme과 결합하여 사용하였다. 또한, 격자체계로는 해의 안정성을 위하여 교차격자체계를 사용하였다.

본 논문에서는, 계산에로서 다양한 해저지형을 가진 직육면체 유체영역을 설정하여 조류의 연직구조와 조류의 방향에 미치는 해저지형의 효과를 조사하였다.

본 연구에서 제안된, 해저지형을 직접적으로 고려한 3차원 다층기법의 계산결과와 2차원 수심 평균기법에 의한 계산결과를 비교하여, 조류의 크기와 방향은 특히 복잡한 해저지형을 가지는 천수역에서 해저지형에 의하여 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

Abstract

A multi-layer simulation program is developed to estimate the ocean current considering sea bottom geometry. The so-called σ coordinate system is introduced in vertical direction to describe sea bottom topography more accurately and effectively. Leapfrog scheme combined with Euler backward scheme is used to reduce computation error which may be possibly accumulated in time evolution by Leapfrog scheme alone.

발 표 : 1994년도 대한조선학회 춘계연구발표회('94. 4. 23.)

접수일자 : 1994년 6월 24일, 재접수일자: 1994년 11월 28일

* 정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

In this paper, very simple examples of rectangular basins with various bottom geometries were taken and the effect of sea bottom geometry on vertical structure of the ocean tidal current and its direction were investigated. Through comparisons between the present three dimensional calculation in which bottom topography is directly taken into consideration and the two dimensional calculation in which depth average concept is employed, it was found that magnitude of surface current and its direction could be largely affected by the sea bottom topography, particularly in shallow region with complex bottom shape.

1. 서론

한정된 육상자원의 고갈에 따라, 연안해역은 자원의 활용이라는 측면에서뿐만 아니라, 해양환경학적인 측면에서 많은 관심을 필요로 하는 지역이다. 해양자원의 개발이 활발해지고, 해상운송량의 증가로 인하여 연안해역에서의 해난사고로 인한 누유사고의 가능성이 증가되고 있다. 실제로 최근에는, 선박의 충돌이나 좌초로 인한 심각한 문제들이 보고되고 있다. 특히, 누유사고시 누출된 기름은 해양환경에 아주 심각한 영향을 미치게 된다.

해양을 오염시키는 원인들은 많이 있지만 주된 원인은 누출된 기름이고, 누출된 기름은 확산메카니즘에 의하여 오염지역이 확대 될 뿐만 아니라, 조류·파도·바람 등에 의하여 새로운 지역으로 이동을 하게 된다. 누유사고에 의한 해양환경의 피해를 최소화 하기 위해서는 시기적절하고 효과적인 방제대책이 요구되는데, 시간에 따른 누출된 기름의 위치변화, 오염지역의 범위등을 예측하는 작업이 선행되어야 한다. 누출된 기름의 위치는 조석에 의한 조류, 기타 해류, 바람과 파도에 의한 표류를 중첩함으로써 예측할 수가 있다. 오늘날, 바람과 파도에 의하여 유기된 해류등은 측정값, 또는 경험값들이 사용되고 있으며 오직 조류만이 다양한 전산모사기법에 의하여 계산이 되고 있다.

지금까지, 조류모사기법 문제에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔는데, 이 이론들은 대부분 2차원 수심 평균개념에 그 근거를 두고 있다[1-4]. 즉, 유체영역을 수평차원과 비교할 때 무시할 수 있을 정도의 얇은 수심인 얇은 층이라고 가정을 해서 문제를 해결하는 것이다. 이 개념은 누출된 기름의 거동을 예측함에 있어 실용적으로는 유용한 것으로 알려져 있다.

그러나, 연안해역에서 누출된 기름의 거동을 예측함에 있어서는, 해저지형의 복잡성 때문에 특별한 관심이 요구된다. 이는, 해저지형의 형상이 해류의 수

직구조를 변화시키고, 따라서 표층류를 변화시킬 것이기 때문이다.

따라서, 본 논문에서는, 복잡한 해저지형을 효과적으로 고려할 수 있는 σ 좌표계를 이용하여 조류유동에 대한 3차원 수치해석을 시도하였다. 경계조건을 고려한 지배방정식은 유한차분법을 사용하였고, 격자체계는 교차격자체계를 사용하였으며, 시간전개에 있어서는 Euler backward scheme과 결합된 Leapfrog scheme을 사용하였다.

계산예로서는 다양한 해저지형을 가진 정방형의 유체영역을 설정하고, 계산알고리즘을 적용시켜 보았다. 2차원 수심평균기법에 의한 계산결과와 본 연구에서 제안된 3차원 다층기법에 의한 결과비교를 통하여, 본 논문에서 제안된 알고리즘의 효율성과 조류에 대한 해저지형의 효과를 조사하였다.

2. 이론의 정식화

2.1 좌표계

좌표계는 Fig.1 에 표시한 것과 같이 x-y평면이 평균자유표면과 일치하고, z축이 연직상방인 우수좌표계를 사용한다. x-, y-, z- 방향으로의 속도성분은 각각 $u(x,y,z,t)$, $v(x,y,z,t)$, $w(x,y,z,t)$ 로 정의한다. $H(x,y)$ 는 수심을 의미하고, $\eta(x,y,t)$ 는 정수면으로부터 수면의 변위를 의미한다.

2.2 기본 방정식

연속방정식과 운동방정식에서 정수압[5], 등밀도 근사를 이용하면 연직방향의 운동방정식은 해석해룰 얻을 수 있으므로, 이를 수평방향 운동방정식에 적용하면, 다음의 기본 방정식들을 얻을 수 있다.

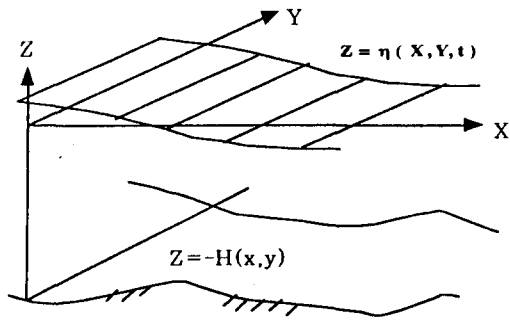


Fig. 1 Coordinate system

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = \quad (1)$$

$$-g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fv + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + K_M \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = \quad (2)$$

$$-g \frac{\partial \eta}{\partial y} - fu + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + K_M \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

여기서,

- A_M, K_M : 수평, 수직방향의 와 동점성계수
- g : 중력가속도
- f : 코리올리 계수 ($= 2\Omega \sin \phi$)
- Ω : 지구 자전 각속도
- ϕ : 위도

미지수가 u, v, w, η 이므로 해를 얻기 위해서는 방정식이 하나 더 필요한데 이는 2.4 절에서 논하기로 한다.

2.3 경계조건

2.3.1. 자유표면

자유표면 $z = \eta(x, y, t)$ 에서는 다음과 같은 두가지 형태의 경계조건이 만족되어야 한다.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho \cdot K_M} (\tau_{ox}, \tau_{oy}) \quad (4)$$

$$w = u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (5)$$

여기서, (τ_{ox}, τ_{oy}) 는 자유표면에 작용하는 바람에 의한 마찰응력을 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\tau_{ox} = \rho_a C_d v_{wx} \sqrt{v_{wx}^2 + v_{wy}^2} \quad (6)$$

$$\tau_{oy} = \rho_a C_d v_{wy} \sqrt{v_{wx}^2 + v_{wy}^2} \quad (7)$$

윗 식에서 ρ_a 는 공기의 밀도, C_d 는 자유표면의 저항 계수, v_{wx}, v_{wy} 는 바람의 속도성분을 의미한다.

2.3.2 해저면

자유표면 경계조건과 같은 형태의 조건이 적용된다.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho \cdot K_M} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (8)$$

$$w = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y} \quad (9)$$

여기서, (τ_{bx}, τ_{by}) 는 해저면에 작용하는 마찰응력을 의미하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{bx} = \gamma \rho u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (10)$$

$$\tau_{by} = \gamma \rho v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (11)$$

윗 식에서 γ 는 해저면에서의 저항계수를 의미하며, (u_b, v_b) 는 해저면에서 가장 가까운 격자점에서의 속도성분을 나타낸다.

2.3.3 폐경계면

비활(No-slip), 비침투(No-penetration)조건이 적용된다.

2.3.4 개방경계면

조석에 의한 해면변위가 입력되며, 경계면에 대한 수직방향 속도변화는 없는 것으로 하였다.

$$\eta = \eta_o \sin \frac{2\pi}{T_o} t \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

윗 식에서 η_0 와 T_0 는 각각 조류의 진폭 및 주기를 나타낸다.

2.4 σ 좌표 변환

기존의 x - y - z 좌표계에서는 복잡한 해저지형을 고려하여 격자를 분할하는 것이 쉽지 않다. 따라서, 자유표면의 변위가 수심에 비하여 아주 작다는 가정을 도입하여, 연직방향으로 σ 좌표를 도입하면, 다음과 같이 새로운 독립변수들이 정의가 된다[7].

$$x^* = x, y^* = y, \sigma = \frac{z}{H}, t^* = t \quad (14)$$

즉, 평균자유표면($z=0$)과 해저면($z=-H$)은 각각 $\sigma = 0$ 과 $\sigma = -1$ 로 변환이 된다.

따라서, σ 좌표계를 적용한 연직방향의 새로운 속도 성분은 다음과 같이 정의되며,

$$W = w - u \sigma \frac{\partial H}{\partial x} - v \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \quad (15)$$

경계조건(5)와 (9)는 다음과 같이 변환된다.

$$W(x^*, y^*, \frac{\eta}{H}, t^*) = u \frac{\partial \eta}{\partial x^*} + v \frac{\partial \eta}{\partial y^*} + \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\eta}{H} \frac{\partial H}{\partial x^*} - v \frac{\eta}{H} \frac{\partial H}{\partial y^*} \quad (16)$$

$$W(x^*, y^*, -1, t^*) = 0 \quad (17)$$

또한, 편의상 모든 별표를 생략하면, 지배방정식은 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{\partial u^2 H}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} + \frac{\partial uW}{\partial \sigma} = fvH - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x \quad (18)$$

$$\frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{\partial uvH}{\partial x} + \frac{\partial v^2 H}{\partial y} + \frac{\partial vW}{\partial \sigma} = -fuH - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y \quad (19)$$

$$\frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} = 0 \quad (20)$$

여기서,

$$F_x = H \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial \sigma} \right) + K_M \frac{1}{H} \frac{\partial^2 u}{\partial \sigma^2} \quad (21)$$

$$F_y = H \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial \sigma} \right) + K_M \frac{1}{H} \frac{\partial^2 v}{\partial \sigma^2} \quad (22)$$

$$\tau_{xx} = A_M \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (23)$$

$$\tau_{xy} = A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (24)$$

$$\tau_{yx} = A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (25)$$

$$\tau_{yy} = A_M \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (26)$$

그런데, 2.2절에서 언급한 바와 같이 해를 얻기 위해서는, 하나의 방정식이 더 필요한데 이는 자유표면 경계조건과 해저면 경계조건을 고려하여 연직방향으로 연속방정식을 적분함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^{\frac{\eta}{H}} uHd\sigma + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-1}^{\frac{\eta}{H}} vHd\sigma = 0 \quad (27)$$

3. 수치 계산 방법

다층 시간영역계산 알고리즘에 대한 전체적인 계

산과정은 Fig.2 와 같다.

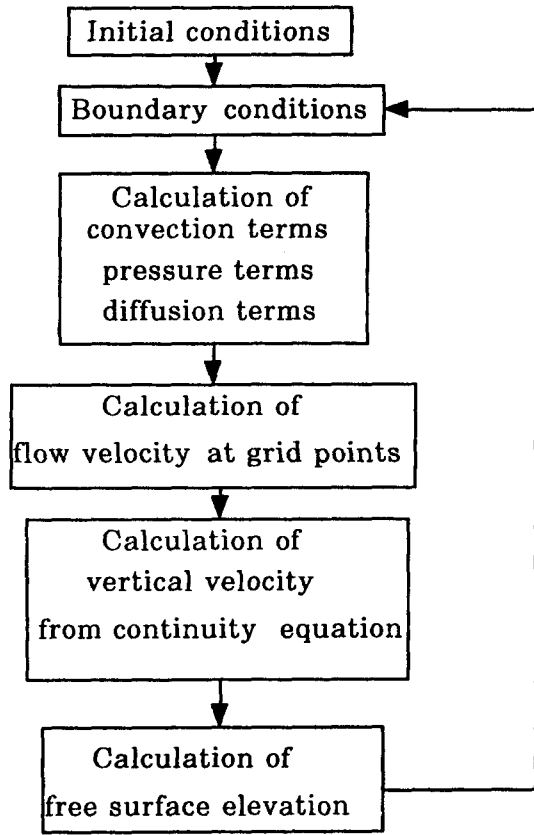


Fig. 2 Computation process

3.1 격자구조

유체영역은 수평면에서는 등간격의 격자를, 연직 방향으로는 NZ개의 규칙적인 간격을 가진 층, 또는 불규칙한 간격을 가진 층으로 분할한다. 격자의 연직 방향구조는 Fig.3에 나타내며, 여기서 기호 o 는 σ_k 에서 정의된 수평방향 속도성분 u, v를 나타낸다. 연직속도성분 W는 인접하는 두개의 연직층의 접촉면에 위치하는 점(그림의 x)에서 정의가 된다.

수평방향으로의 격자구조와 각 속도성분이 정의되는 점들은 Fig.4 에 나타낸 바와 같다.

3.2 시간 차분

시간의 전개에 있어서, 근본적으로는 Leapfrog

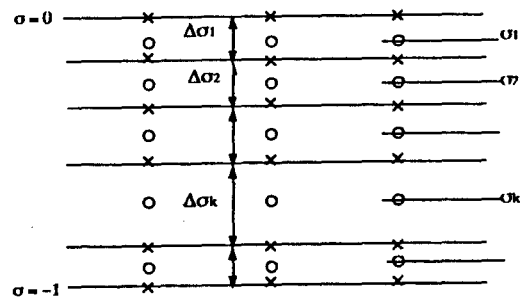


Fig. 3 Vertical grid structure

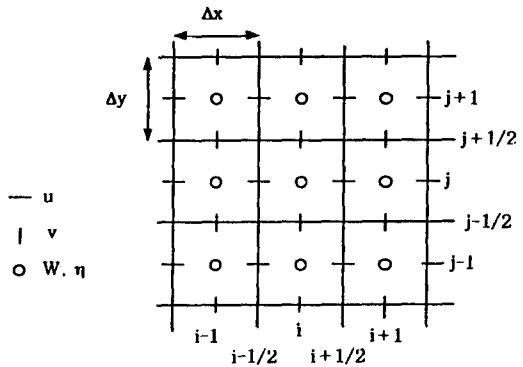


Fig. 4 Horizontal grid structure

scheme을 사용하였다. 그러나, 해의 안정성의 측면에서 Leapfrog scheme이 앞에서 기술한 지배방정식의 모든 항들에 대하여 중립적이라는 것은 주지의 사실이다. 즉, 계산과정을 통하여 일단 오차가 생기면 이는 감쇠되지 않는다. 따라서, 본 계산법에서는 계산상의 오차를 감소시키기 위하여 강한 감쇠효과를 가지는 것으로 알려진 Euler backward scheme을 몇번의 시간단계마다 한번씩 도입하였다.

이를 다시 설명하면,

첫째, (n+1)번째 시간단계에서 중간속도성분들을 다음식에 의하여 계산한다.

$$u_*^{(n+1)} = u^{(n)} + \Delta t F(u^{(n)}, \dots) \tag{28}$$

두번째, (n+1)번째 시간단계에서의 속도를 결정하기 위해서 다음과 같은 근사적인 후방시간차분법을 적용한다.

$$u^{(n+1)} = u^{(n)} + \Delta t F(u_*^{(n+1)}, \dots) \quad (29)$$

3.3 차분 방정식

격자체계로 교차격자체계를 사용하고, Leapfrog scheme을 이용하면 (18), (19)식에 대한 다음과 같은 차분방정식들을 얻을 수가 있다.

$$H_{i+\frac{1}{2},j} \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n+1)} - u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n-1)}}{2\Delta t} = -UA_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} + UC_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} - UY_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} + UD_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n-1)} \quad (30)$$

$$H_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n+1)} - v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n-1)}}{2\Delta t} = -VA_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} - VC_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} - VY_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} + VD_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n-1)} \quad (31)$$

여기서, (30), (31)식의 우측항들은 다음과 같다.

$$UA_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} = \frac{1}{\Delta x} [u_{i+1,j,k}^{(n)2} H_{i+1,j} - u_{i,j,k}^{(n)2} H_{i,j}] + \frac{1}{\Delta y} [(uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} - (uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}] + \frac{1}{\Delta \sigma} [(uW)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j} - (uW)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j}] \quad (32)$$

$$VA_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} = \frac{1}{\Delta x} [(uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} - (uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}]$$

$$- (uv)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\Delta y} [v_{i,j+1,k}^{(n)2} H_{i,j+1} - v_{i,j,k}^{(n)2} H_{i,j}] + \frac{1}{\Delta \sigma} [(vW)_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{(n)} H_{i,j+\frac{1}{2}} - (vW)_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^{(n)} H_{i,j+\frac{1}{2}}] \quad (33)$$

$$UC_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} = fv_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j} \quad (34)$$

$$VC_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} = fu_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i,j+\frac{1}{2}} \quad (35)$$

$$UY_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} = gH_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\eta_{i+1,j}^{(n)} - \eta_{i,j}^{(n)}}{\Delta x} \quad (36)$$

$$VY_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} = gH_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\eta_{i,j+1}^{(n)} - \eta_{i,j}^{(n)}}{\Delta y} \quad (37)$$

$$UD_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} = A_M H_{i+\frac{1}{2},j} \cdot \left[\frac{u_{i+\frac{3}{2},j,k}^{(n)} - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} + u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{(n)}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1,k}^{(n)} - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} + u_{i+\frac{1}{2},j-1,k}^{(n)}}{\Delta y^2} + K_M \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k+1}^{(n)} - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} + u_{i+\frac{1}{2},j,k-1}^{(n)}}{\Delta \sigma_k^2} \right] \cdot \frac{1}{H_{i+\frac{1}{2},j}} \quad (38)$$

$$VD_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} = A_M H_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} - 2v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} + v_{i-1,j+\frac{1}{2},k}^{(n)}}{\Delta x^2} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \left. \frac{v_{i,j+\frac{3}{2},k}^{(n)} - 2v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} + v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{(n)}}{\Delta y^2} \right] \\
 & + K_M \frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^{(n)} - 2v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} + v_{i,j+\frac{1}{2},k-1}^{(n)}}{\Delta \sigma_k^2} \\
 & \cdot \frac{1}{H_{i,j+\frac{1}{2}}} \quad (39)
 \end{aligned}$$

즉, 수평방향 속도성분은 차분방정식 (30), (31)으로부터 구하며, 연직방향 속도성분은 연속방정식 (20)의 차분형태인 다음식으로 부터 얻는다.

$$W_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{(n)} = W_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{(n)} \quad (40)$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta x} \left[u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{(n)} H_{i-\frac{1}{2},j} \right] \\
 & - \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta y} \left[v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i,j-\frac{1}{2}} \right]
 \end{aligned}$$

최종적으로 자유표면의 변위는 다음식으로 부터 구한다.

$$\begin{aligned}
 \eta_{i,j}^{(n+1)} = & \eta_{i,j}^{(n-1)} - 2 \Delta t \sum_{k=1}^{NZ} \left(u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{(n)} H_{i+\frac{1}{2},j} \right. \\
 & \left. - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{(n)} H_{i-\frac{1}{2},j} \right) \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta x} \\
 & - 2 \Delta t \sum_{k=1}^{NZ} \left(v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i,j+\frac{1}{2}} \right. \\
 & \left. - v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{(n)} H_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta y} \quad (41)
 \end{aligned}$$

3.4 경계조건

교차격자 체계가 사용되었기 때문에 경계조건을 적용함에 있어서 특별한 주의가 요구되는데, 모든 경계조건들은 유체영역외부의 가상적인 격자점들에 적용한다.

3.4.1 자유표면

다음과 같은 경계조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 u_{i+\frac{1}{2},j,NZ+2}^{(n)} & = u_{i+\frac{1}{2},j,NZ+1}^{(n)} \\
 & + \frac{H_{i+\frac{1}{2},j}}{\rho K_M} (\tau_{\alpha x}^{(n)})_{i+\frac{1}{2},j} \Delta \sigma_{NZ+\frac{3}{2}} \quad (42)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{i,j+\frac{1}{2},NZ+2}^{(n)} & = v_{i,j+\frac{1}{2},NZ+1}^{(n)} \\
 & + \frac{H_{i,j+\frac{1}{2}}}{\rho K_M} (\tau_{\alpha y}^{(n)})_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta \sigma_{NZ+\frac{3}{2}} \quad (43)
 \end{aligned}$$

여기서, k=NZ+2, k=NZ+1은 각각 자유표면경계(정수면) 바로 위와 아래의 격자점을 나타내고, $\tau_{\alpha x}$ 와 $\tau_{\alpha y}$ 는 (6), (7)식에 나타낸 바와 같다.

3.4.2 해저면

자유표면 경계조건과 같이 다음과 같은 경계조건이 만족되어야 한다.

$$W_{i,j,\frac{1}{2}}^{(n)} = 0 \quad (44)$$

$$\begin{aligned}
 u_{i+\frac{1}{2},j,0}^{(n)} & = u_{i+\frac{1}{2},j,1}^{(n)} \\
 & - \frac{H_{i+\frac{1}{2},j}}{\rho K_M} (\tau_{\beta x}^{(n)})_{i+\frac{1}{2},j} \Delta \sigma_{\frac{1}{2}} \quad (45)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{i,j+\frac{1}{2},0}^{(n)} & = v_{i,j+\frac{1}{2},1}^{(n)} \\
 & - \frac{H_{i,j+\frac{1}{2}}}{\rho K_M} (\tau_{\beta y}^{(n)})_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta \sigma_{\frac{1}{2}} \quad (46)
 \end{aligned}$$

여기서, k=1과 k=0은 각각 해저경계면 바로 위와 아래의 격자점을 나타내고, $\tau_{\beta x}$ 와 $\tau_{\beta y}$ 는 (10), (11)식에 나타낸 바와 같다.

3.4.3 폐경계면

Fig.5 에 나타낸 바와 같은 조건들이 각 시간단계에 대하여 적용이 된다.

3.4.4 개방경계면

Fig.6 에 보인바와 같이, 법선방향으로의 속도변화가 없다는 경계조건을 부과한다.

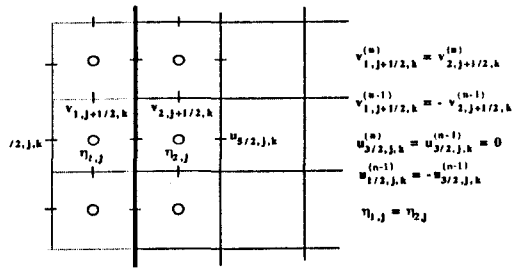


Fig. 5 Boundary conditions at closed boundary

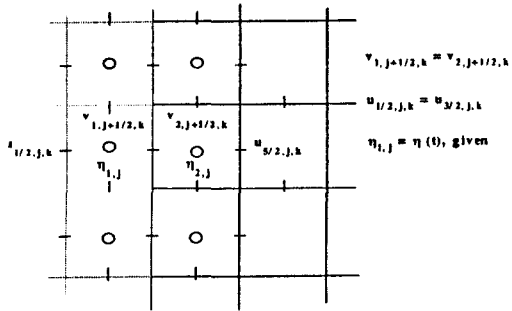


Fig. 6 Boundary conditions at open boundary

4. 적용예

이상의 수치알고리즘의 타당성을 검증하고 조류에 대한 해저지형의 효과를 조사하기 위하여 각각 다른 다섯가지의 해저지형을 가진 정방형의 유체영역에 대한 조류의 수치계산을 수행하였다.

4.1 정방형 유체영역의 형태

Fig.7 은 사용한 계산예를 보인다. 첫번째 경우 (Case I)는 일정한 수심에 대한 것이고, 두번째 (Case II)는 해저지형이 일정한 경사를 가진 경우이며, 세번째(Case III)는 불규칙한 경사를 가진 경우이다. 이 세가지의 해저지형의 형태는 조류속도의 연직 구조에 미치는 해저지형의 효과를 조사하기 위하여 사용하였다. 한편, 네번째의 경우(Case IV)는 비스듬한 경사를 가지는 해저지형이고, 마지막으로 다섯번째 경우(Case V)는 해저언덕과 해저골짜기를 가지는

해저지형의 경우에 대한 것이다. 이 둘은 해저지형이 조류의 방향에 미치는 효과를 조사하기 위하여 사용하였다.

수평면은 중간격을 가지는 20×40개의 격자로서 분할하였고, σ 좌표는 Table.1 에 보인다.

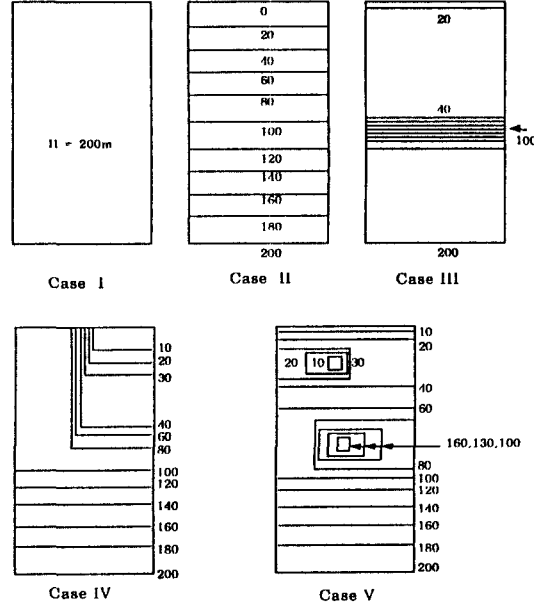


Fig. 7 Rectangular basins with five different bottom topographies

Table. 1 σ coordinates

k	σ _k	k	σ _k
1	-1.05	7	-0.45
2	-0.95	8	-0.35
3	-0.85	9	-0.25
4	-0.75	10	-0.15
5	-0.65	11	-0.05
6	-0.55	12	0.05

4.2 계산조건

계산에 사용된 각 계수는 Table.2 에 나타내었다. 코리올리항은 계산의 편의를 위하여 일단 무시하는 것으로 하였다.

양해법에 대한 C.F.L안정조건으로부터 시간간격

은 다음식과 같은 조건을 만족해야만 한다.

Table 2 Parameters used in calculations

f	0	Coriolis parameter
g	9.8m/sec ²	gravitational acceleration
ρ	1025kg/m ³	sea water density
ρ _a	1.226kg/m ³	air density
NZ	10	No. of vertical layers
Δx, Δy	1km	grid spacing
A _M	100m ² /sec	horizontal eddy viscosity
K _M	0.001m ² /sec	vertical eddy diffusivity
γ	0.0026	bottom friction coefficient
C _d	0.0015	wind friction coefficient
Δt	5.0sec	time interval
U _w , V _w	0	wind velocity
ζ ₀	0.5m	amplitude of input tide
T ₀	12hour	period of input tide

$$\Delta t < \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{2gH_{\max}}} \quad (47)$$

앞의 예들에서 가장 깊은 곳은 수심이 200m이고 수평방향으로의 격자간격을 1000m로 하였으므로, 시간간격이 16초보다 적으면 C.F.L 조건이 만족되나, 시간간격을 5초로 택하여 계산을 수행하였다.

계산의 처음단계에서는, 초기조건으로서 모든 속도 성분들과 자유표면의 변위를 0으로 하고 계산을 수행하였다.

4.3 결과 및 고찰

본 연구에서는 조류의 연직구조와 누출된 기름의 거동에 미치는 해저지형의 효과를 조사하기 위하여 2차원 수심평균 속도성분들을 3차원 다층기법에 의한 속도성분들과 비교하였는데, Fig.8 에 보인 것과 같은 세군데의 위치를 택하여 계산결과를 비교하였다.

첫째로는, 계산의 안정성을 조사하였다. 유체영역 중의(Case I) 점 B에서의 시간에 대한 자유표면의 변위를 Fig.9 에 나타내었고, y방향 속도성분은 Fig.10 에 나타내었는데, 계산이 시작된 후 7-8주기가 지난 후에 만족할 만한 결과가 얻어 지는 것을 알 수가 있다.

Fig.11 은 2차원 수심평균기법에 의한 v속도성분과 3차원 다층기법에 의한 v속도성분의 연직분포를 나타내고 있는데, 세번째 경우의 B, C점에 대한 결

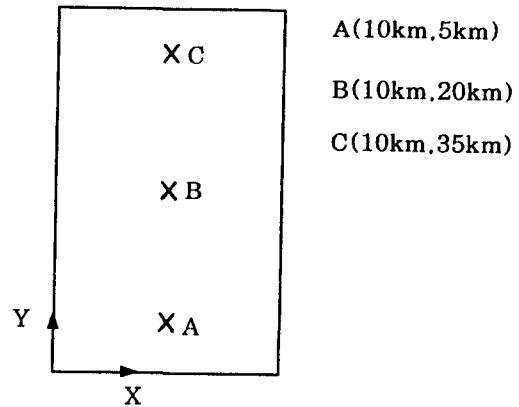


Fig. 8 Assumed positions where the results are compared

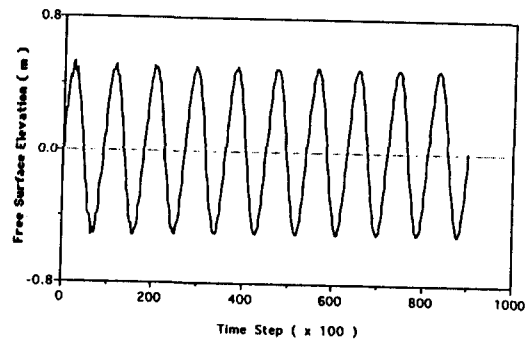


Fig. 9 Time history of free surface movement at point B of rectangular basin with constant depth (Case I)

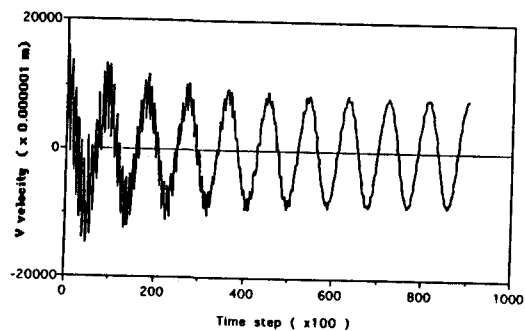


Fig. 10 Time history of V velocity at point B of rectangular basin with constant depth (Case I)

과를 보면 알 수 있듯이, 해저지형이 국부적으로 큰 편차를 가지거나, 수심이 얇은 경우가 아니면 (Fig.11,-B,C), 조류의 연직구조에 대해서 3차원 효과는 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나, 조류자체의 크기에는 꽤 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 3차원 다층기법에 의한 결과가 2차원 수심평균 기법에 의한 결과와 최대 20%정도 편차가 있음을 알 수 있는데, 이는 2차원 수심평균기법에서는 무시된 수직속도 성분보다는 상이한 해저면 마찰의 고려에 더욱 기인하는 것으로 보인다. 즉, 3차원 기법에서는 해저면 마찰이 해저근처에서만 영향이 고려되는 반면, 2차원 기법에서는 이것이 과대평가되기 때문이다.

자유표면의 변위는 Fig.12 에 보인 바와 같이 두 가지 방법에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

세번째 예에 국한하여, 유체영역 곳곳의 연직방향 속도성분들을 Fig.13 에 나타내었는데, 이 계산에서는 수직속도 성분이 무시할 수 있을 정도의 작은 값들이 나왔다.

세번째 예에서 세 점에서 동시에 누유가 발생했다는 가정하에, 기름의 거동을 Fig.14 에 나타내었다.

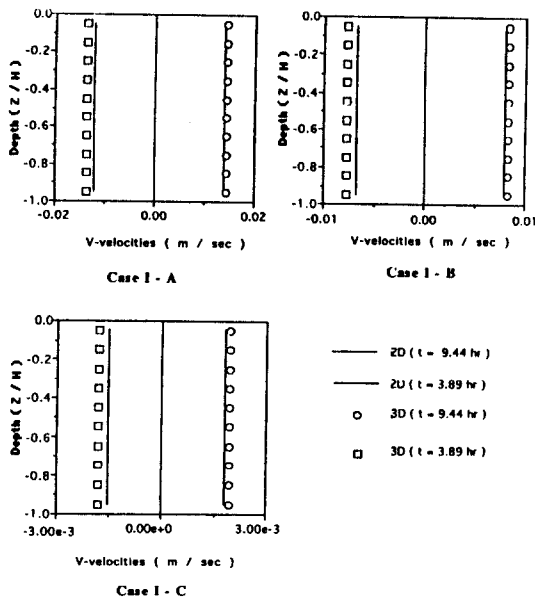


Fig. 11(A) Vertical distribution of V-velocities (Rectangular basin with constant depth)

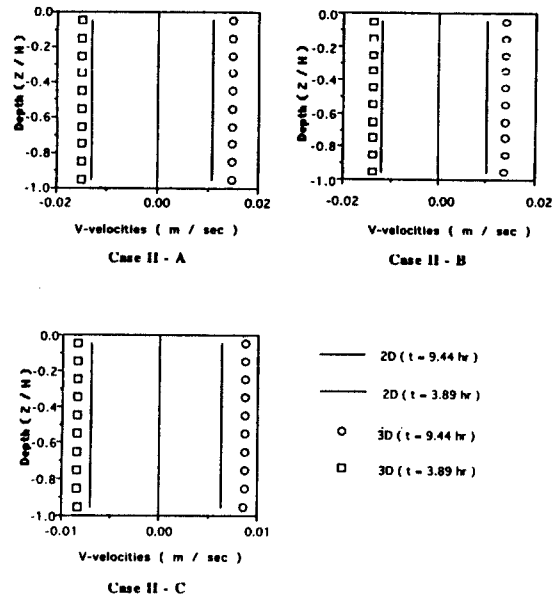


Fig. 11(B) Vertical distribution of V-velocities (Rectangular basin with varying depth of constant slope)

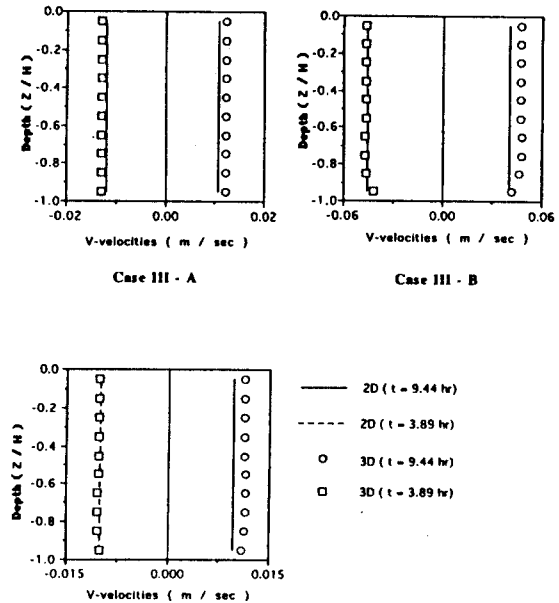


Fig. 11(C) Vertical distribution of V-velocities (Rectangular basin with varying depth of irregular slope)

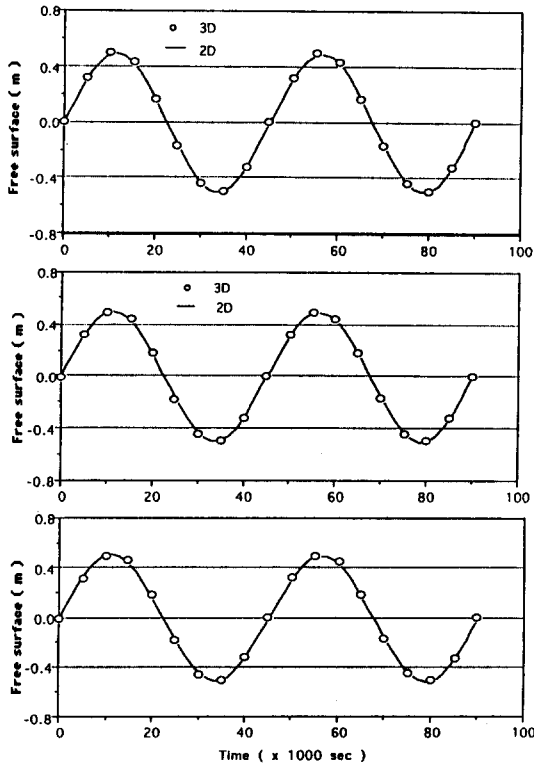


Fig. 12 Time histories of free surface movements (Case III, A,B,C from top)

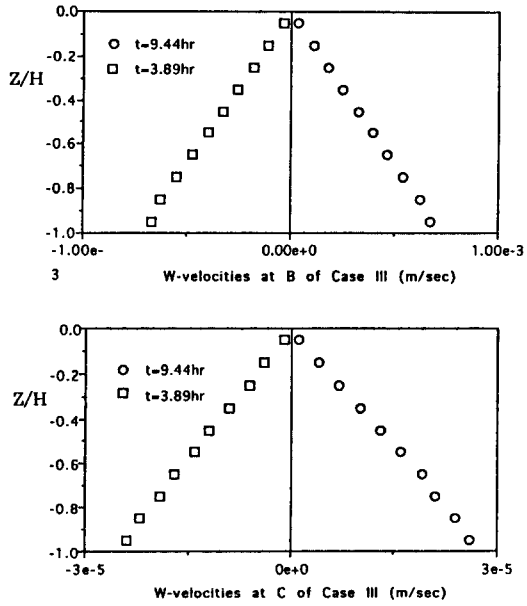


Fig. 13 W velocity distribution at B,C of case III (W = 0 at point A)

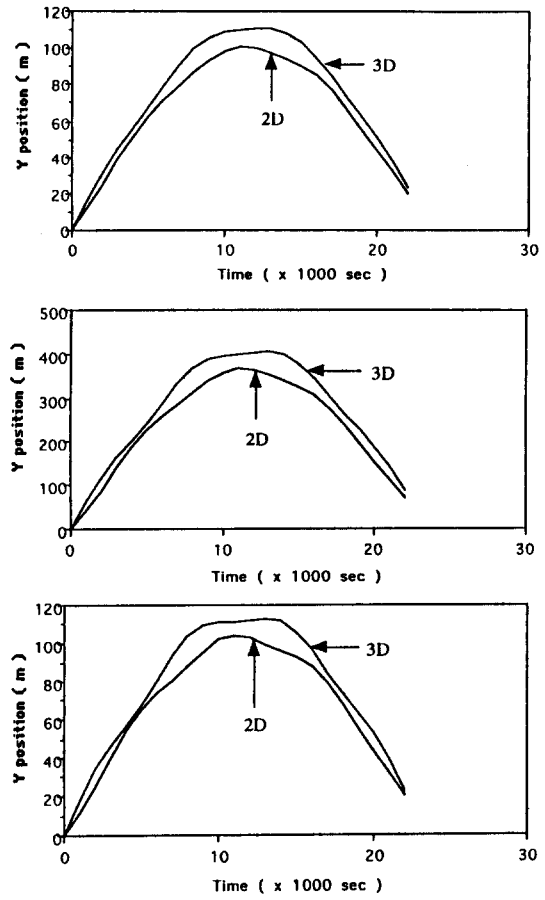


Fig. 14 Time histories of oil movements (Case III, A,B,C from top)

3차원 기법의 경우에는 조류의 표면속도가 사용된 반면, 2차원 기법의 경우에는 수심평균 조류속도성분이 사용되었다. 계산결과는 누유가 발생한 후 6시간 동안의 기름의 변위로 한정하였는데, 최대 20%정도의 편차가 발생함을 알 수가 있었다.

네번째, 다섯번째 예에 대한 두 계산방법사이의 조류의 방향을 Fig.15 와 Fig.16 에 비교하여 나타내었는데 비스듬한 경사를 가진 수심의 경우와 해저 골짜기의 근처에서는 큰 편차가 없고, 해저언덕 근처에서는 큰 편차가 나타남을 알 수가 있었다.

위와 같은 결과들로부터, 크기와 방향을 포함하는 조류에 대한 더욱 정확한 정보를 알기 위해서, 특히 연안역에서는 해저지형을 고려해야 할 필요성이 강하게 요구된다 할 수 있다.

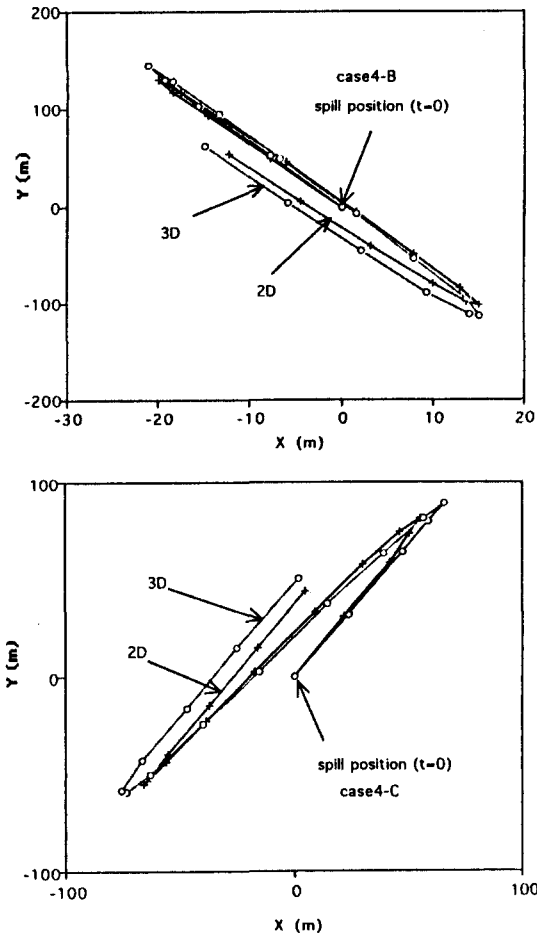


Fig. 15 Trajectories of oil slick movements during 13 hours by tidal current

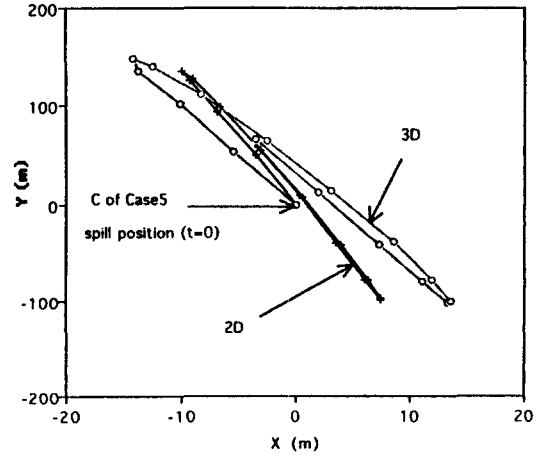
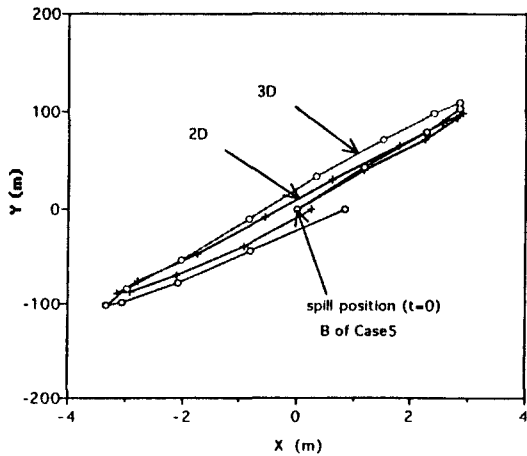


Fig. 16 Trajectories of oil slick movements during 13 hours by tidal current (Caseb V)

5. 결론

본 연구에서는 조류의 거동을 예측하기 위한 3차원 다층기법이 개발되었는데, 본 연구에서 제안된 수치계산법은 다음과 같은 특성들을 가지고 있다.

- 1) 복잡한 해저지형을 더욱 정확하고 효과적으로 나타내기 위하여 σ 좌표계가 도입되었다.
- 2) 시간의 전개에 있어서, Euler backward scheme과 혼합한 Leapfrog scheme이 사용되었다.
- 3) 해의 안정성을 위하여 교차격자체계가 사용되었다.

본 연구에서 제안된 수치계산법의 타당성을 검증하고, 조류의 연직구조에 미치는 해저지형의 효과를 조사하기 위하여 2차원 수심평균기법에 의한 결과와 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- 1) 장주기를 가지는 조류의 연직구조는 해저지형에 의해서 거의 영향을 받지 않는다.
- 2) 조류속도의 크기는 해저지형에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 2차원 수심평균기법에 의한 결과가 20%정도 작게 평가되었는데, 이는 해저면의 마찰을 다루는 차이에 주로 기인하는 것이라 사료된다.
- 3) 조류의 방향은 특히 천수역의 해저언덕근처의 지역에서, 해저지형에 의해 크게 영향을 받는다. 3차원 계산법은 해저언덕의 근처지역에서 조류모사에 특히 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] D.Y.Lee, *A numerical model for the movement of spilled oil*, Msc Thesis, Seoul National University, 1993.
- [2] B.H.Choi, "A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea", *KORDI Report*, 80-02, 1980.
- [3] Dronkers, J.J, *Tidal Computation in Rivers and Coastal Waters*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.
- [4] T. Horie, S. Sato and K. Murakami, "Boundary Treatment on Tidal Com putation", *Seventeenth Congress of the International Association for Hydraulic Research*, Vol.2, 1977.
- [5] Bryan. K., "A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean", *Journ. Computational Physics*, Vol.4, No.3, 1969.
- [6] Fujino, M. and Tabeta, S., "Numerical Simulation of Tidal Currents by means of Multi-level Model", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.170, 1991.
- [7] Phillips, N.A., "A Coordinate System Having Some Special Advantage for Numerical Forecasting", *Journ. Meteorol.* Vol.14, 1957.