연안역에서의 취송류의 3차원 확산특성

마 현 호* · 김 창 제*

A Study on the 3-D Wind-Induecd Flow in Coastal Area

Hyun-Ho Ma* · Chang-Je Kim*
E-mail : hhma@pado.kmaritime.ac.kr

요 약

연안부근의 흐름을 지배하는 요인으로서는 조석에 의한 조류와 바람에 의한 취송류로 크게 분류할 수 있다.

조석 등과 같이 주기가 긴 장파에 의한 연안해역에서의 흐름은, 연안해역의 수평스케일이 연직스케일에 비해 상당히 크기 때문에 연직방향으로 수심 평균한 평면 2차원 흐름으로 평가한다. 그러나, 취송류의 경우, 수심방향의 유속분포는 수면에서 최대이며 수심이 깊어짐에 따라 대수적으로 감소(加藤始 等, 1976; Bains, et al., 1965)하며, 풍속, 풍향, 수심, 지형, 바람의 지속시간 등 그 기구가 복잡하여 연안과 같이 수심과 지형이 크게 변하는 곳에서는 기존의 방법으로 오염물질 확산거리를 해석하면 현상을 과소평가할 가능성이 있으며, 확산방향도 연안해역의 지형적 복잡성 때문에 잘못 평가할 가능성이 있다. 특히 기름과 같은 부유성 오염물질의 이동을 해석하는 경우, 수심방향으로 평균한 평면 2차원흐름으로 해석하면 현상을 과소평가할 가능성이 있다.

이에 본 연구에서는 취송류를 지배하는 풍속, 풍향, 수심, 지형 등을 고려하여 연안해역에 적용할 수 있는 취송류의 3차원 모델을 제시하였다.

Abstract

The analysis of the movement of tidal current has been carried out with an assumption that tidal current is to be a 2-D plane flow in the averaged depth. Insofar as wind-induced flows, however, 3-D analysis has to be applied since wind-induced flows shows the characteristics of logarithmic velocity profile from the water surface to the bottom.

The Vertical distribution of wind-induced flows mostly depends upon the vertical eddy viscosity. For this reason, Ekman's calculation does not have inertia and horizontal viscosity terms. This method of calculation has formed a basis in the study of this field. Application of this model to a region where changes of water depth and geographical features are not prominent does not hinder a higher accuracy. However, a problem of a certain degree may arise if we apply this model to a region where the changes of water depth and geography are prominent such as nearshore zones, for the inertia and horizontal viscosity terms in equation of motion are not included in the Ekman's model.

Therefore, this study has aimed at quantifying the equation of motion with particular attention to the inertia and horizontal viscosity terms in question and, further, proposing a 3-D model which is capable of being applied to nearshore zones.

In order to verify the 3-D characteristics of wind-induced flows due to geographical changes, a model test was performed in the wind flume, as shown in Fig. 4. and Fig. 5.

The applicability of the proposed model to the Port of Ulsan was confirmed with the following results:

1. The experiment gives good results in comparison with the numerical analysis, when a structure is placed. The surface flow over the boundary of the structure is found an inverse flow against the surface.
   Therefore, the proposed model can be used even in the region where a structure is placed or changes of geographical changes are prominent.
2. When the proposed model was applied to the Port of Ulsan where the gradient of water depth was relatively high, it was found that the Vertical distribution of the flow exhibits the characteristics of an inverse flow.

* 한국해양대학교

Ⅰ. 서 론

연안부근의 흐름을 지배하는 요인으로서는 조석에 의한 조류와 바람에 의한 취송류로 크게 분류할 수 있다.

조석 등과 같이 주기가 긴 장파에 의한 연안해역에서의 흐름은, 연안해역의 수평스케일이 연직스케일에 비해 상당히 크기 때문에 연직방향으로 수심 평균한 평면 2차원 흐름으로 평가한다. 그러나, 일반적으로 수평흐름은 수심에 따라 변하며, 특히 기름, 토사 등과 같은 물질확산 또는 해수교환을 예측하는 경우, 수심에 따른 수평흐름을 정확히 평가해야 한다. 취송류의 경우, 수심방향의 유속분포는 수면에서 최대이며 수심이 깊어짐에 따라 대수적으로 감소함(加藤始 等, 1976; Bains, et al., 1965)으로, 특히 기름과 같은 부유성 오염물질의 이동을 해석하는 경우, 수심방향으로 평균한 평면 2차원흐름으로 해석하면 현상을 과소평가할 가능성이 있다.

종래의 취송류에 대한 연구를 살펴보면, Keulegan(1951)은 풍동수로를 이용한 실험에서 Reynolds수가 큰 곳에서의 표면유속은 풍동내의 평균풍속의 약 3.3%이며 파와는 무관계임을 나타냈다.

Ekman은 일정수심에서의 취송류 모델을 제시하였지만 마찰력과 코리올리력만을 고려한 단순한 모델이였으며, Tayfun and Wang(1973)역시 Ekman 이론을 기초로 수심의 영향을 고려한 취송류를 계산하였지만, 해안선의 변화나 구조물의 유무 등 지형의 영향은 고려하지 않았다.

Koutitas and Gousidou-Koutita(1986)도 수심의 영향을 고려한 3차원 취송류 모델을 제안하였지만 그 모델에도 연직유속에 관한 이류항과 수평점성항이 무시되어 있으며, 마찬가지로 지형의 영향은 고려하지 않았다.

취송류는 풍속, 풍향, 수심, 지형, 바람의 지속시간 등 그 기구가 복잡하며, 연안과 같이 수심과 지형이 크게 변하는 곳에서는 기존의 방법으로 오염물질 확산거리를 해석하면 현상을 과소평가할 가능성이 있으며, 확산방향도 연안해역의 지형적 복잡성 때문에 잘못 평가할 가능성이 있다.

이에 본 연구에서는 취송류를 지배하는 풍속, 풍향, 수심, 지형 등을 고려하여 연안해역에 적용할 수 있는 취송류의 3차원 모델을 제시하였다.

풍속 및 풍향은 매 시간별 변화를 입력하여 연속계산이 가능하도록 하였으며, 표면유속의 경우에는 무제한의 수심에서도 해를 구할 수 있도록 하였다.

경계조건의 경우에는 경계면의 모양에 따라 계산을 달리 하여 해의 발산을 방지하였다.

연구에 사용된 취송류의 해석법으로는 수평방향으로는 유한차분법을, 연직방향으로는 유한요소법을 사용하였다.

본 논문은 5장으로 구성되었으며, 제2장에는 지배방정식과 경계조건에 대하여 설명하였으며, 제3장에는 지배방정식을 수치모형화 하였으며, 제4장에는 3장에서 제시한 3차원 취송류의 해석법을 검증하기 위해 일본 톳토리대학의 풍동수로를 사용하여 실험을 행하였으며, 수심의 변화가 심하고 비교적 지형이 복잡한 울산항 부근의 연안해역에 적용하여 실용성을 검증하였다.

Ⅱ 지배방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식

좌표계로서 직교좌표계(x, y, z)를 사용한다. x와 y는 수평축, z은 평균해면을 원점으로 하고 위방향이 양(+)인 연직축, u, v 및 w는 각각 x, y 및 z축 방향의 유속, ξ는 수위변동, h는 평균수심이다.

유체는 점성, 비압축성, 압력은 정수압분포라고 하면 연속방정식과 운동방정식은 각각 식(2.1) 및 식(2.2), (2.3)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = fv - g\frac{\partial \xi}{\partial x} + \nu_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \nu_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -fu - g\frac{\partial \xi}{\partial y} + \nu_h\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \nu_v\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{2.3}$$

여기서, t : 시간,
f : Coriolis 계수,
g : 중력가속도,
ξ : 수위변동,
ν_h, ν_z : 수평, 연직와동점성계수,
ρ : 해수밀도이다.

연속방정식 (2.1)을 $z = -h$에서 ξ까지 적분하고 해면과 해저면의 경계조건(식(2.4), (2.5))을 이용하여 식 (2.6)을 얻는다.

$$-\frac{\partial \xi}{\partial t} - u\frac{\partial \xi}{\partial x} - v\frac{\partial \xi}{\partial y} + w = 0 \quad \text{at} \quad z = \xi \tag{2.4}$$

$$u\frac{\partial h}{\partial x} + v\frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \quad \text{at} \quad z = -h \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\xi + h) + \frac{\partial}{\partial x}\int_{h}^{\xi} u\,dz + \frac{\partial}{\partial y}\int_{h}^{\xi} v\,dz = 0 \tag{2.6}$$

식 (2.6)에 식 (2.7)을 대입하고 이 식을 시간평균하면 식 (2.8)을 얻는다.

$$u = \bar{u} + u' \tag{2.7a}$$

$$v = \bar{v} + v' \tag{2.7b}$$

여기서, $\bar{u}, \bar{v}$ 및 u', v'는 각각 x, y방향의 흐름 및 변동유속이다.

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x}(\bar{\xi} + h)] + \frac{\partial V}{\partial y}(\bar{\xi} + h) = 0 \tag{2.8}$$

여기서, $\bar{\xi}$는 평균수위변동,

$$U = \bar{u} + \frac{1}{h+\bar{\xi}}\overline{\int_{h}^{\xi} u'\,dz},$$
$$V = \bar{v} + \frac{1}{h+\bar{\xi}}\overline{\int_{h}^{\xi} v'\,dz} \text{ 이다.}$$

운동방정식 (식(2.2), (2.3))역시 연속방정식의 경우와 동일하게 $z = -h$에서 ξ까지 적분하고 해면과 해저의 경계조건(식(2.4), (2.5))을 이용하여 식 (2.9)를 얻는다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + W\frac{\partial U}{\partial z} = fV - g\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_h\frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_h\frac{\partial U}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_v\frac{\partial U}{\partial z}\right) \tag{2.9a}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + W\frac{\partial V}{\partial z} = -fU - g\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_h\frac{\partial V}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_h\frac{\partial V}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_v\frac{\partial V}{\partial z}\right) \tag{2.9b}$$

2.2 경계조건

2.2.1 해면에서의 경계조건

해면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\nu_v\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\rho}\tau_{sx} \quad \text{at} \quad z = \bar{\xi} \tag{2.10a}$$

$$\nu_v\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho}\tau_{sy} \quad \text{at} \quad z = \bar{\xi} \tag{2.10b}$$

식(2.10)에서 τ_{sx} 및 τ_{sy}는 각각 x 및 y 방향의 해면마찰응력이다.

바람에 의한 해면마찰응력 $\boldsymbol{\tau}_s$는 다음과 같이 표현된다(예를 들면, Sorensen, 1978).

$$\boldsymbol{\tau}_s = r^2\rho_a \boldsymbol{U}_{10}^2 \tag{2.11}$$

식(2.11)에서 r은 마찰계수($r^2 = 2.5\times10^{-3}$), ρ_a는 대기밀도, $\boldsymbol{U}_{10}$은 해면상 10m의 풍속벡터이다.

2.2.2 해저면에서의 경계조건

해저면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\nu_v\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\rho}\tau_{bx} \quad \text{at} \quad z = -h \tag{2.12a}$$

$$\nu_v\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho}\tau_{by} \quad \text{at} \quad z = -h \tag{2.12b}$$

식(2.12)에서 τ_{bx} 및 τ_{by}는 각각 x 및 y방향의 해저면마찰응력이다.

해저면마찰응력 $\boldsymbol{\tau}_b$는 개수로 흐름에 관한 연구(예를 들면, Dean and Dalrymple, 1984)를 참조하여 식(2.13)와 같이 표현된다.

$$\boldsymbol{\tau}_b = \frac{\rho g}{c^2}\boldsymbol{V}^2 \tag{2.13}$$

여기서, c는 Chezy 계수, $\boldsymbol{V} = (U, V)$이다.

2.2.3 구조물에서의 경계조건

고체 표면의 불투과조건을 고려하면, 구조물 표면

에서는 다음식을 만족시켜야 한다.

$$V_n = 0 \qquad \text{on the body surface} \qquad (2.14)$$

여기서, n : 구조물 표면에서의 수직방향,
V_n : n방향의 유속이다.

Ⅲ 취송류의 수치해석

이 연구에서는 기본적으로 Koutitas and O'Connor (1980)의 수치해석기법을 채용하였으며, Koutitas and O'Connor가 무시한 연직이류항 및 수평점성항을 고려하였다. 수치계산에 있어서 시간적 분산화에는 시간적분법, 공간적 분산화에는 해의 안정성과 계산의 편리성을 고려해 연직방향으로 유한요소법, 수평방향으로 유한차분법을 적용하였다.

3.1 시간적 분산화

운동방정식의 시간적 분산화에는 Fractional Step 법(예를 들면, Koutitas and O'Connor, 1980)을 이용하였다.

즉, 식 (2.2), (2.3)을 연산자 L을 사용하여 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = L(U) + \alpha_1 \qquad (3.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = L(V) + \alpha_2 \qquad (3.2)$$

여기서 ;

$$L = -U\frac{\partial}{\partial x} - V\frac{\partial}{\partial y} - W\frac{\partial}{\partial z} + \nu_h\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_v \frac{\partial}{\partial z}\right),$$

$$\alpha_1 = -g\frac{\partial \xi}{\partial x} + fV,$$

$$\alpha_2 = -g\frac{\partial \xi}{\partial y} - fU \quad \text{이다.}$$

유속의 연속성을 고려하여 연산자 L 을 다음과 같이 분할한다.

$$\text{step 1} : \frac{\partial U^n}{\partial t} = L_1(U^n) + \alpha_3 \qquad (3.3)$$

$$\text{step 2} : \frac{\partial U^{n+1}}{\partial t} = L_2(U^{n+1}) \qquad (3.4)$$

여기서, n 은 시간 step이며,

$$L_1 = -U^n\frac{\partial}{\partial x} - V^n\frac{\partial}{\partial y} - W^n\frac{\partial}{\partial z} + \nu_h\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right),$$

$$L_2 = \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_v \frac{\partial}{\partial z}\right),$$

$$\alpha_3 = -g\frac{\partial \xi^{n+1/2}}{\partial x} + fV^n \quad \text{이다.}$$

식 (3.3) 및 (3.4)의 좌변을 차분화하면 다음 식과 같이 된다.

$$\text{step 1} : \frac{\partial U^n}{\partial t} = \frac{(U^d - U^n)}{\triangle t} \qquad (3.5)$$

$$\text{step 2} : \frac{\partial U^{n+1}}{\partial t} = \frac{(U^{n+1} - U^d)}{\triangle t} \qquad (3.6)$$

여기서, U^d는 가상유속이다.

수치계산에 있어서, step 1의 U^n을 초기조건(또는 known value)으로 하고, 식 (3.5)를 식 (3.3)에 대입해서 가상유속 U^d를 구한다. 또한, step 2의 식 (3.6)을 식 (3.4)에 대입하여 U^{n+1}을 구한다(Fig. 5 참조). y방향 유속 V에 관해서도 동일한 방법으로 해를 구한다.

3.2 공간적 분산화 (연직방향)

식 (3.1)~식 (3.6)에 있어서 연직방향의 분산화에는 유한요소법을 적용하였다.

평균수심 h 에 대해 다음식을 만족시키도록 요소분할을 하였다(Fig. 1 참조).

Fig. 1 Horizontal and vertical Staggered Grids.

$$\frac{l_{i,j,k}}{h_{i,j}} = \frac{l_{i+1,j,k}}{h_{i+1,j}} \qquad (3.7)$$

식 (3.7)에서 i, j는 각각 x, y 방향 및 k는 z 방향을 나타내는 첨자이다. 또한 Fig. 3에서 H는 $h+\xi$, N은 형상함수이다.

절점 k와 k+1 사이에서 삼각형기저함수를 이용해 U, V, W 및 ν_v를 다음과 같이 나타낸다(楠田信, 1995; 神谷紀生, 1989).

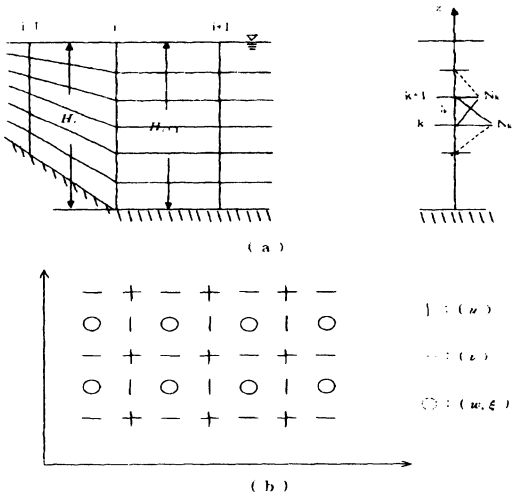

Fig.1 Horzontal and vertical staggered Grids.

$$U = N_k \cdot U_k + N_{k+1} \cdot U_{k+1} \tag{3.8a}$$

$$V = N_k \cdot V_k + N_{k+1} \cdot V_{k+1} \tag{3.8b}$$

$$W = N_k \cdot W_k + N_{k+1} \cdot W_{k+1} \tag{3.8c}$$

$$\nu_v = N_k \cdot \nu_{v_k} + N_{k+1} \cdot \nu_{v_{k+1}} \tag{3.8d}$$

여기서, N_k 및 N_{k+1}은 앞에서 설명한 바와 같이 선형의 형상함수이며 다음과 같이 나타낸다.

$$N_k = N_k(z) = \frac{z_{k+1} - z}{z_{k+1} - z_k} = \frac{z_{k+1} - z}{l_k} \tag{3.9a}$$

$$N_{k+1} = N_{k+1}(z) = \frac{z - z_k}{z_{k+1} - z_k} = \frac{z - z_k}{l_k} \tag{3.9b}$$

식 (3.8)을 식 (3.3) ~ (3.6)에 대입하여 k에서 k+1구간까지 적분한 결과를 matrix로 표시하면 다음과 같다.

$$[A] \cdot \{U\}^{n+1} = \{a\}^n \tag{3.10a}$$

$$[A] \cdot \{V\}^{n+1} = \{b\}^n \tag{3.10b}$$

$$[B] \cdot \{U\}^{n+1} = \{c\}^n \tag{3.10c}$$

$$[B] \cdot \{V\}^{n+1} = \{d\}^n \tag{3.10d}$$

여기서, $[A]$ 및 $[B]$ 는 2행 2열의 matrix, $\{a\}$~$\{d\}$는 2행의 벡터이며, 각각은 다음과 같이 정의된다(Koutitas and O'Connor, 1980).

$$A_{\alpha\beta} = \int_{l_k} \frac{N_\alpha N_\beta}{\Delta t}\, dz \tag{3.11}$$

$$B_{\alpha\beta} = \int_{l_k} \left\{ \frac{N_\alpha N_\beta}{\Delta t}\, dz + N_\gamma \nu_{v\gamma} \frac{\partial N_\alpha}{\partial z} \frac{\partial N_\beta}{\partial z} \right\} dz - \left(N_\alpha N_\gamma \nu_{v\gamma} \frac{\partial N_\beta}{\partial t} \right)_{l_k} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned} a_\alpha = \int_{l_k} \Bigg[& \frac{N_\alpha N_\gamma U_\gamma^n}{\Delta t} + N_\alpha \Bigg\{ - N_\gamma U_\gamma^n \frac{\partial (N_\gamma U_\gamma^n)}{\partial x} \\ & - N_\gamma V_\gamma^n \frac{\partial (N_\gamma U_\gamma^n)}{\partial y} - N_\gamma W_\gamma^n \frac{\partial (N_\gamma U_\gamma^n)}{\partial z} \\ & + \nu_h \left(\frac{\partial^2 (N_\gamma U_\gamma^n)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (N_\gamma U_\gamma^n)}{\partial y^2} \right) - g \frac{\partial \xi^{n+1/2}}{\partial x} \Bigg\} \Bigg] dz \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned} b_\alpha = \int_{l_k} \Bigg[& \frac{N_\alpha N_\gamma V_\gamma^n}{\Delta t} + N_\alpha \Bigg\{ - N_\gamma U_\gamma^n \frac{\partial (N_\gamma V_\gamma^n)}{\partial x} \\ & - N_\gamma V_\gamma^n \frac{\partial (N_\gamma V_\gamma^n)}{\partial y} - N_\gamma W_\gamma^n \frac{\partial (N_\gamma V_\gamma^n)}{\partial z} \\ & + \nu_h \left(\frac{\partial^2 (N_\gamma V_\gamma^n)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (N_\gamma V_\gamma^n)}{\partial y^2} \right) - g \frac{\partial \xi^{n+1/2}}{\partial y} \Bigg\} \Bigg] dz \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$c_\alpha = \int_{l_k} \frac{N_\alpha N_\gamma}{\partial t} U_\gamma^d\, dz \tag{3.15}$$

$$d_\alpha = \int_{l_k} \frac{N_\alpha N_\gamma}{\partial t} V_\gamma^d\, dz \tag{3.16}$$

여기서, α=k 또는 k+1 , β=k 또는 k+1 , γ= k 또는 k+1이다.

요소 k에 대해 step 1 ($\frac{\partial U^n}{\partial t} = \frac{U^d - U^n}{\Delta t}$)을 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{l_k} N_k \frac{U^d}{\Delta t}\, dz = \int_{l_k} N_k \frac{U^n}{\Delta t}\, dz \\ & + \int_{l_k} N_k \left(- U^n \frac{\partial U^n}{\partial x} - V^n \frac{\partial V^n}{\partial y} \right) dz + \\ & \int_{l_k} N_k \left(- W_n \frac{\partial U^n}{\partial z} \right) dz - \int_{l_k} \frac{\partial N_k}{\partial z} \nu_z \frac{\partial U^n}{\partial z}\, dz \\ & + \int_{l_k} N_k \left(- g \frac{\partial \xi^{n+1/2}}{\partial x} \right) dz \end{aligned} \tag{3.17}$$

식 (3.17)은 식 (3.18)과 같이 된다.

$$\int_{l_k} N_k \frac{U_k N_k + U_{k+1} N_{k+1}}{\triangle t} dz = \int_{l_k} \frac{N_k N_k}{\triangle t} dz \cdot U_k^j + \int_{l_k} \frac{N_k N_{k+1}}{\triangle t} dz \cdot U_{k+1}^j \quad (3.18a)$$

$$\int_{l_k} N_{k+1} \frac{U_k N_k + U_{k+1} N_{k+1}}{\triangle t} dz = \int_{l_k} \frac{N_k N_{k+1}}{\triangle t} dz \cdot U_k^j + \int_{l_k} \frac{N_{k+1} N_{k+1}}{\triangle t} dz \cdot U_{k+1}^j \quad (3.18b)$$

식 (3.10)을 요소 k에 대해 matrix로 표현하면 식 (3.19)이 된다(戸川隼人, 1995).

$$\begin{bmatrix} A_k A_k & A_k A_{k+1} \\ A_k A_{k+1} & A_{k+1} A_{k+1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_k^j \\ U_{k+1}^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_k \\ a_{k+1} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

식 (3.19)를 참조하여 식 (3.18)을 matrix로 표현하면 식 (3.20)이 된다.

$$\begin{bmatrix} \int_{l_k} \frac{N_k N_k}{\triangle t} & \int_{l_k} \frac{N_k N_{k+1}}{\triangle t} \\ \int_{l_k} \frac{N_k N_{k+1}}{\triangle t} & \int_{l_k} \frac{N_{k+1} N_{k+1}}{\triangle t} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_k^j \\ U_{k+1}^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_{l_k} N_k(\cdots) dz \\ \int_{l_k} N_{k+1}(\cdots) dz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_k \\ a_{k+1} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

3.3 공간적 분산화 (수평방향)

식 (3.10)에 있어서, 수평방향의 분산화는 기본적으로 중앙차분법을 사용했다. 식 (3.10)에서 이류항 ($U\partial U/\partial x$ 등)의 경우, 해의 안정성을 고려하여 다음과 같이 차분화한다(道上正規와 榊谷治, 1989; 高橋亮一와 棚町芳弘, 1993).

$$U_{i,j} \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\triangle x} \quad ; \quad U_{i,j} > 0$$
$$U_{i,j} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\triangle x} \quad ; \quad U_{i,j} < 0 \quad (3.21)$$

$V\partial U/\partial y$, $U\partial V/\partial x$, $V\partial V/\partial y$의 경우에도 동일한 방법으로 차분화하였다.

평균수위변동 ζ의 경우 연속방정식(2.8)을 다음과 같이 차분화한다.

$$\overline{\zeta_{i,j}^{n+1/2}} = \overline{\zeta_{i,j}^{n-1/2}} - \left\{ \frac{(U_{i+1,j}^n \cdot h_{i+1,j}^{n-1/2} - U_{i,j}^n \cdot h_{i,j}^{n-1/2})}{\triangle x} + \frac{(V_{i+1,j}^n \cdot h_{i+1,j}^{n-1/2} - V_{i,j}^n \cdot h_{i,j}^{n-1/2})}{\triangle y} \right\} \triangle t \quad (3.22)$$

계산의 안정성을 위해 격자간격과 계산시간간격과의 비 $\triangle x/\triangle t$는 다음 식을 만족시키도록 설정되었다 (Rahman, 1988; Dean and Dalrymple, 1984).

$$\frac{\triangle x}{\triangle t} > \{\sqrt{gh} + |V|\} \quad (3.23)$$

여기서, $|V|$는 수평유속의 크기를 나타낸다.

3.4 경계의 취급

3.4.1 해면 및 해저면경계

해면 및 해저면경계는 식 (2.11) 및 식 (2.13)을 적용시키며, 해저구배가 1/20이상일 경우에는 격자점의 상·하·좌·우의 수심을 평균하여 그 지점의 수심으로 한다.

3.4.2 구조물경계 또는 해안경계

구조물과 바다 또는 육지와 바다를 각각 '0'과 '1'로 표시하고 '0'이 인식된 구조물 또는 육지는 계산에서 제외시킨다.

경계의 형상이 복잡한 경우, 취송류의 유속변화가 크기 때문에 Fig. 2와 같이 경계의 형상을 정의하여 계산에 적용시켰다.

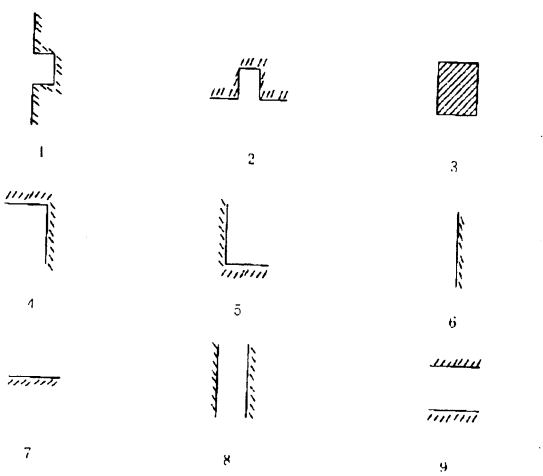

Fig. 2 Boundary Condition

3.5 수치계산 알고리즘

지금까지 설명한 수치해석기법의 수치계산과정을 약술하면 다음과 같다(Fig. 3 참조).

(1) 계산조건과 환경조건을 설정한다. 즉 계산조건에는 격자수, 격자간격, 총계산시간, 계산시간간격, 연직방향의 분할수 등이며, 환경조건에는 마찰계수, 수심, 풍향, 풍속등이 있다.
(2) 평균수위변동 $\bar{\zeta}$ 및 유속 U, V, W을 초기화한다.
(3) 해면마찰응력을 계산한다.
(4) 해저면마찰응력을 계산한다.
(5) step 1에서 가상유속 U^{n}, V^{n}를 계산한다.
(6) step 2에서 유속 U^{n+1}, V^{n+1}을 계산한다.
(7)~(8) 경계조건을 고려하여 평균수위변동을 계산한다.
(9) 유속의 연속성을 만족시키도록 유속 U, V를 이용하여 W를 계산한다.

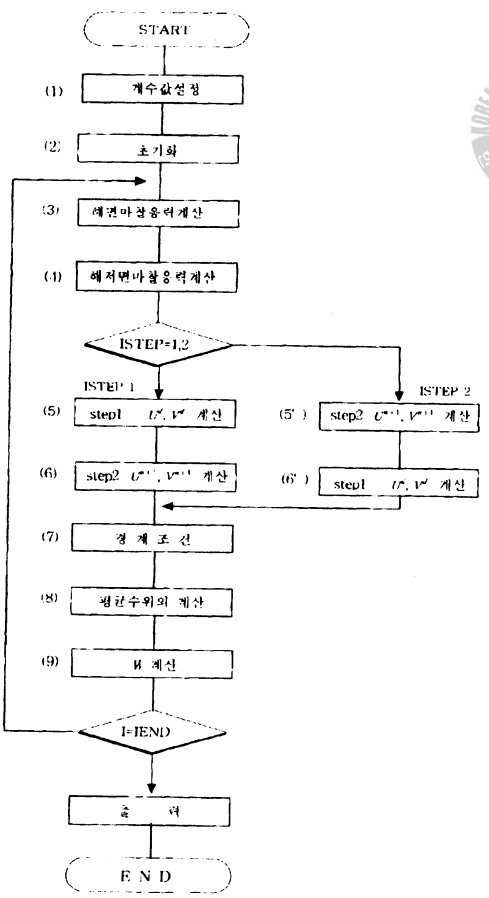

Fig. 3 Flow Chart

Ⅳ 해수유동의 특성

4.1 풍동수로실험

4.1.1 실험장치

실험은 일본 톳토리대학의 풍동수로를 사용하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 수로의 전장은 20m, 좌단 바람의 출구에서 우단 소파장치까지의 길이는 15m, 폭은 60cm, 깊이는 90cm이다. 천정은 탈착이 가능한 폭 60cm, 높이 40cm의 뚜껑을 바람의 출구에서 소파장치까지 덮었으며, 바닥에는 폭 60cm, 높이 20cm의 철판을 바람의 출구 1m전부터 소파장치 3m전까지 설치하여 반류를 순환시켰다. 또한 수심을 30cm로 일정하게 하였다.

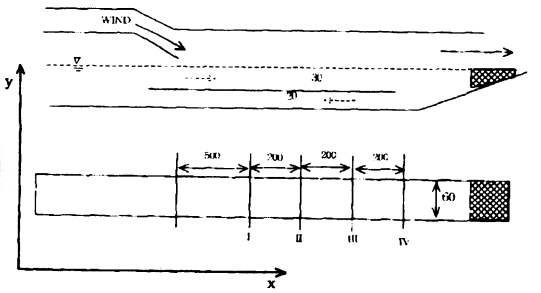

Fig. 4 Schematic Diagram of Laboratory Flume Tests.

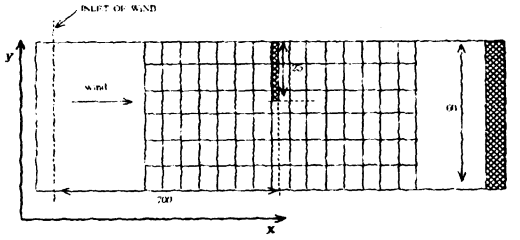

Fig. 5 Schematic Diagram of Measuring Points.

4.1.2 풍속측정

풍속측정은 0.4~60 m/s 까지 측정이 가능한 직경 16mm의 프로펠러식 풍속센서(TESTO No. 0635.9540, 측정오차 - ±0.2m/s 계측치의 1%)를 이용하였다. Fig. 6에서 측정지점은 I, II, III, IV의 4지점이며, 각 지점마다 정지수면을 기준으로 수면 상 2~50cm까지 2cm간격으로 2분간의 평균풍속을 송풍 2시간 후에 측정하였다.

4.1.3 유속측정

유속측정은 구조물이 없는 경우와 Fig. 5와 같이 폭방향으로 길이 25 cm의 구조물이 존재하는 경우를 구분하여 3차원 유속의 측정이 가능한 전자유속계 (KENEK-VMT2-200-08P , 측정오차 - ±2%/FS)를 사용하였다.

구조물이 없는 경우의 유속의 측정지점은 풍속의 측정지점과 동일하며, 정지수면 2cm아래부터 바닥까지 2cm간격으로 유속을 측정하였다. 구조물이 존재하는 경우의 유속의 측정지점은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 길이방향으로(25cm간격) 24지점, 폭방향으로는 6지점(10cm간격)이다.

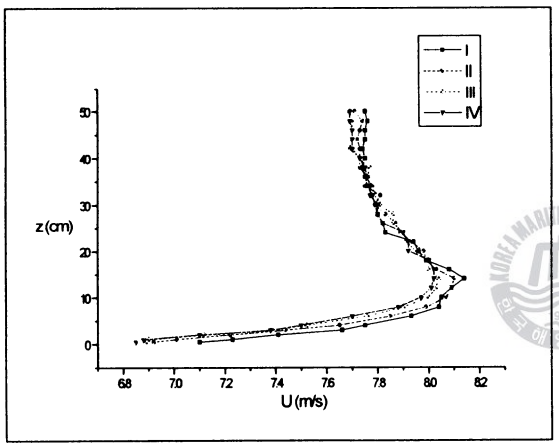

Fig. 6 Distribution of Wind Velocity.

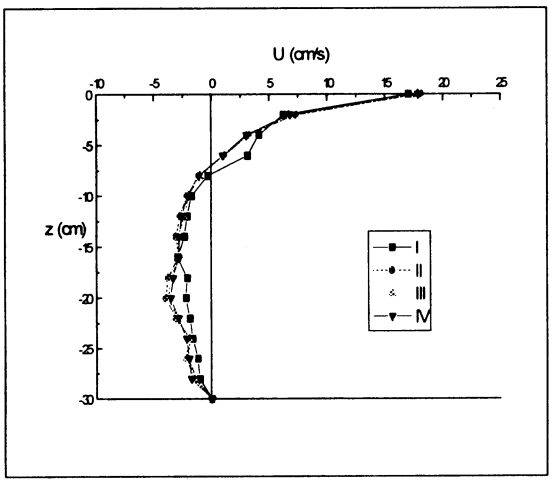

Fig. 7 Vertical Distribution of Measured Velocities.

4.2 풍속의 연직분포

풍속은 해(지)표면에서의 0이며, 해(지)표면 부근에서 경계층을 형성한 후, 해(지)표면 마찰의 영향이 미치지 않는 고도에서는 거의 일정하다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 I, II, III, IV 모든 지점에서, 수면상 약 10cm 높이까지의 풍속분포(기울기 약 5.79)는 Prandtl의 대수법칙을 따른다(野田 稔, 1996; 本多忠夫・光易 恒, 1980).

4.3 유속의 연직분포

유속은 풍속과 마찬가지로 송풍 2시간 후에 측정하였다.

Fig. 7는 I, II, III, IV의 4지점에서의 유속으로, 횡축은 유속, 종축은 수면하 깊이, 바람은 그림의 왼쪽에서 불며, ■는 I지점, ●는 II지점, ▲는 III지점, ▼는 IV지점을 나타낸다.

그림을 보면 I지점의 유속은 다른 지점과 다른 분포를 하고 있는데, 이는 송풍구와 너무 가까운 지점이라 충분히 발달된 바람의 영향을 받지 못한 것으로 생각되어진다. 나머지 3지점(II, III, IV)은 거의 동일하며 양호한 분포를 하고 있다.

Fig. 8, 9, 10, 11은 각 지점(I, II, III, IV)에서의 연직유속분포의 실험치(원)와 계산치(실선)를 비교한 그림이다.

Fig. 8~11 중 계산치를 보면 동일한 바람의 전단력하에서 수평방향으로 유속이 증가함을 알 수 있는데, 이는 수면에 작용하는 바람의 전단력의 영향보다는 관성력의 영향이 큰 것으로 생각되어진다.

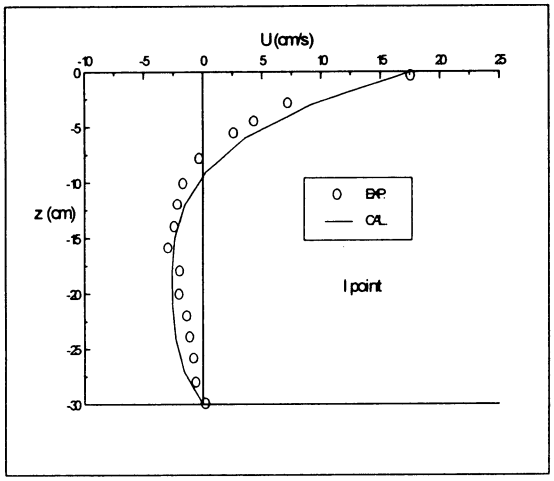

Fig.8 Comparison of Measured and Calculated Velocity (I Point).

4.4 유속의 공간분포

4.4.1 구조물이 존재하는 경우

Fig. 12는 Fig. 5과 같이 수로내에 구조물을 설치하였을 경우의 유속 및 유향을 나타낸 그림이다. Fig. 13는 본 연구에서 제시한 방법에 의한 계산치이며, Fig. 14은 관성항과 수평점성항을 생략한 Ekman 방법에 의한 계산치이다.

Fig. 12에서 구조물 배후의 표층흐름은 순류의 역방향 흐름을 하고 있으며 본 연구에서 제시한 방법에 의한 계산치(Fig. 13)와 잘 일치하고 있다. 그러나 관성항과 수평점성항을 생략한 Ekman 방법에 의한 계산치(Fig. 14)는 구조물 배후에서 다른 흐름을 하고 있는데, 이는 관성항과 수평점성항의 영향이라 할 수 있다.

Table. 1 Input Data for Hydrodynamic Model

계 산 영 역	20cm×10cm , 60×6개
수 심	30cm
풍 속	U_{10}= 7.7m/s
풍 향	W
총계산시간	6 6 시 간
Time step ($\triangle t$)	5 초

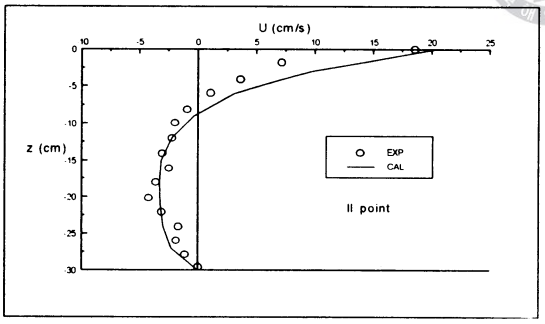

Fig.9 Comparison of Measured and Calculated Velocity (II Point).

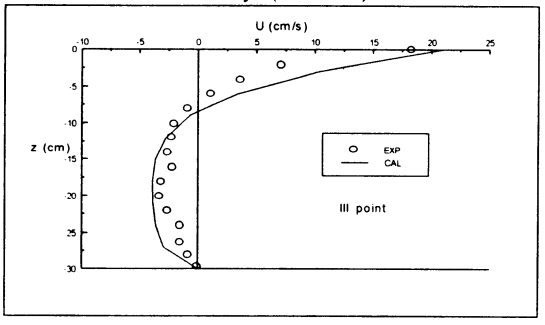

Fig.10 Comparison of Measured and Calculated Velocity (III Point).

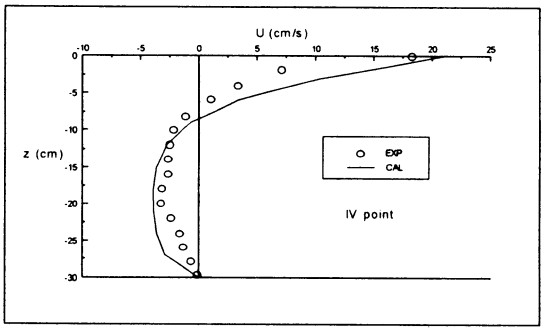

Fig. 11 Comparison of Measured and Calculated Velocity (IV Point).

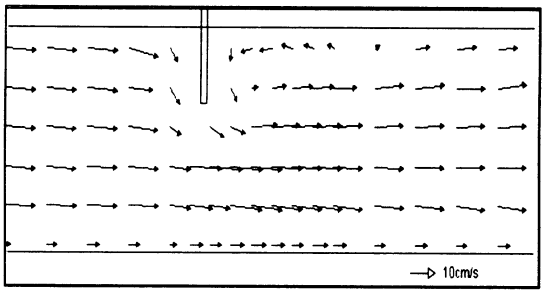

Fig. 12 Surface Velocity (Laboratory).

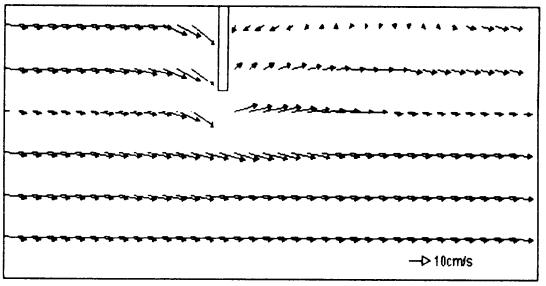

Fig. 13 Surface Velocity (by This Paper)

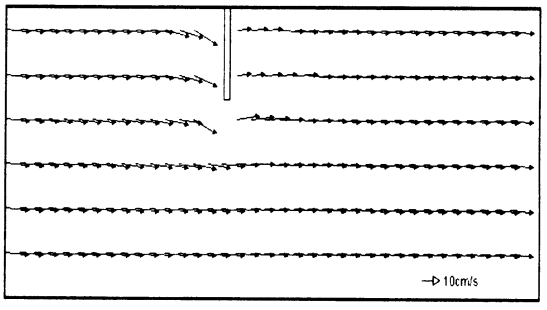

Fig. 14 Surface Velocity (by Ekman's Model).

4.4.2 실해역 적용 (울산만)

본 연구에서 제시한 수치계산법의 실용성을 검증하기 위해 수심 및 지형적 변화가 심한 울산만을 대상으로 계산을 하였다.

Table 2은 울산만을 대상으로 계산한 취송류의 계산조건이다.

Table. 2 Input Data for Wind-Induced Flows Model (Ulsan Bay)

계 산 영 역	225m×225m , 51×60개
수 심	해 도 (NO. 119)
풍 속	U_{10}= 4.3~10.8m/s
풍 향	NNE ~ SW
총계산시간	7 2 시 간
Time step ($\triangle t$)	3 초

계산영역은 당원리에서 미포항까지 울산만을 포함한 연안해역이며, 사용된 격자는 Fig. 16과 같이 동서방향과 남북방향으로 각각 225m의 등방격자이며, 격자의 수는 51×60개로 하였다.

계산에 이용한 풍향자료는 Fig. 15에 나타내었으며, 풍속(U_{10})은 임의의 값 4.3~10.8m/s로 하였다.

계산시간간격($\triangle t$)은 3초로 하였으며, 총 계산시간은 72시간이다.

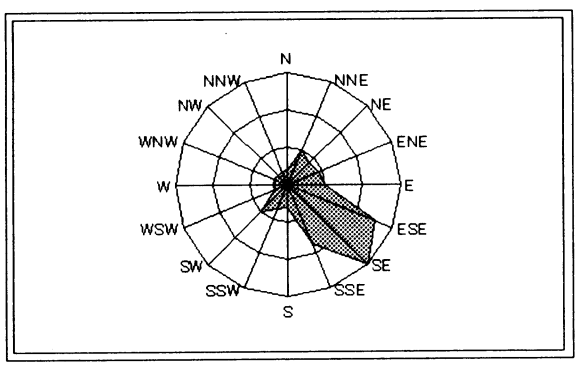

Fig. 15 Distribution of Wind Direction.

Fig. 18~23는 총 계산시간 중 48시간후의 결과로서 이때의 풍속(U_{10})은 9.3m/s이며 풍향은 SE이다.

Fig. 18는 표층유속을 나타낸 그림으로 수심 및 지형에 따라 약 20~54cm/s의 분포를 하고 있으며, 주로 수심이 얕고 협소한 지형에서 빠른 유속을 나타내고 있다.

Fig. 19~21는 각각 수면하 30cm, 50cm, 100cm에서의 유속을 나타낸 그림으로, 수심이 깊어질수록 유향이 점점 시계반대 방향으로 변하고 있는데, 이는 전시간 즉, 46시간, 47시간에서의 유향 및 유속의 영향으로, 취송류의 연직분포의 형성에는 시간이 소요됨을 알 수 있다.

Fig. 23은 수심방향의 평균유속을 나타낸 그림으로 수심이 급격히 변하는 지역에서 큰 유향의 변화를 보이고 있으며, 해저면부근의 유속(Fig. 22)은 표면유속과 거의 반대방향으로 흐르고 있으나 수심이 얕고 지형의 변화가 심한 곳에서는 다른 유향의 분포를 보이고 있다.

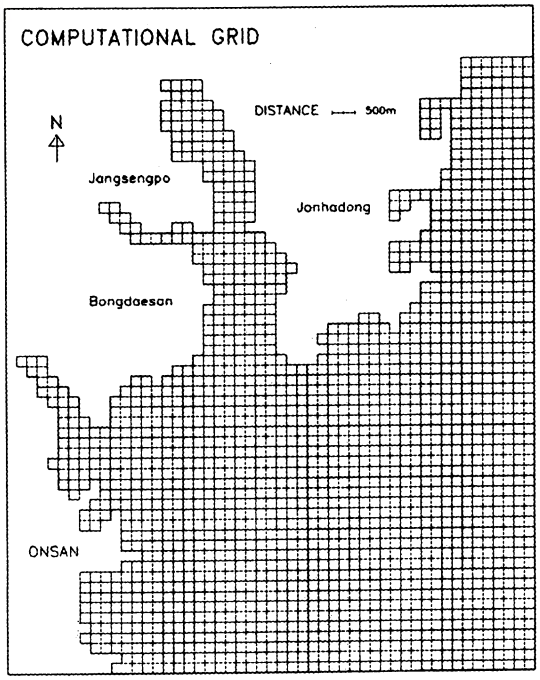

Fig. 16 Map of The Computational Grid.

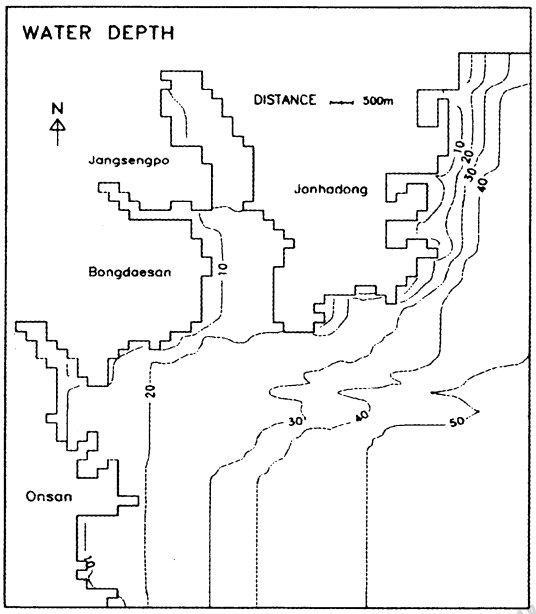

Fig. 17 Water depth of the study area.

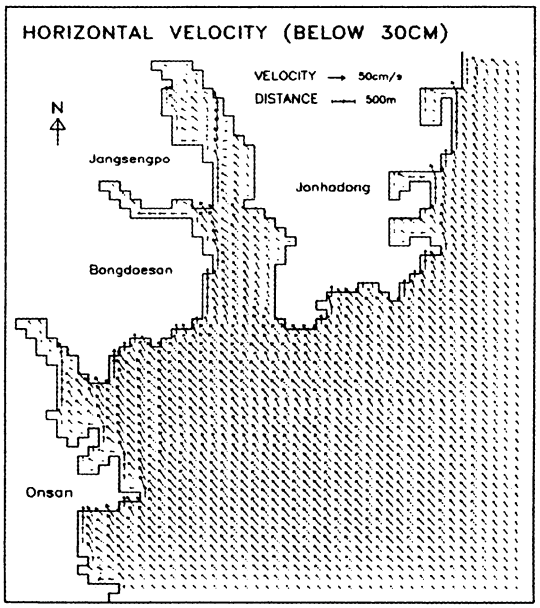

Fig. 19 Predicted Horizontal Velocity (below 30cm)

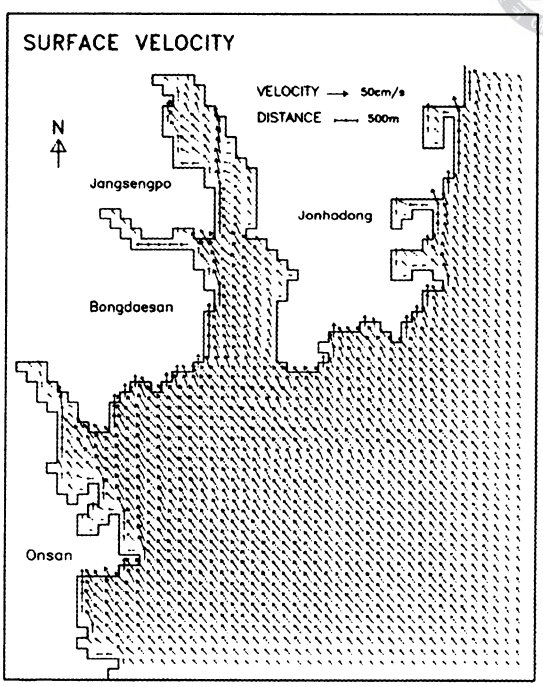

Fig. 18 Predicted Surface Velocity

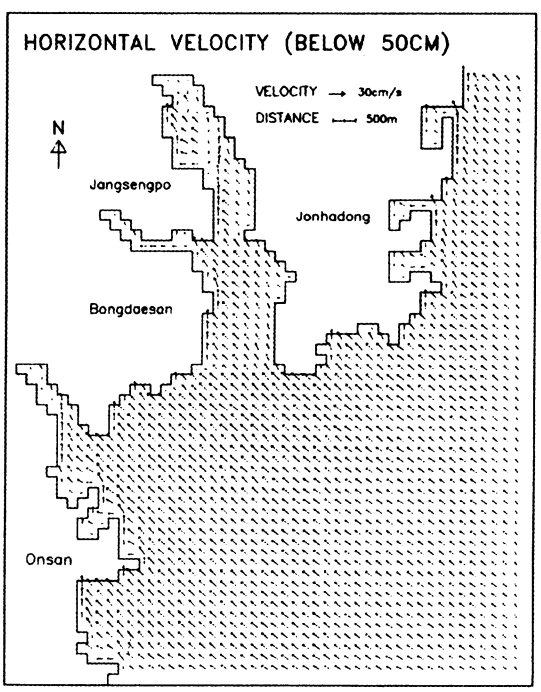

Fig. 20 Predicted Horizontal Velocity (below 50cm)

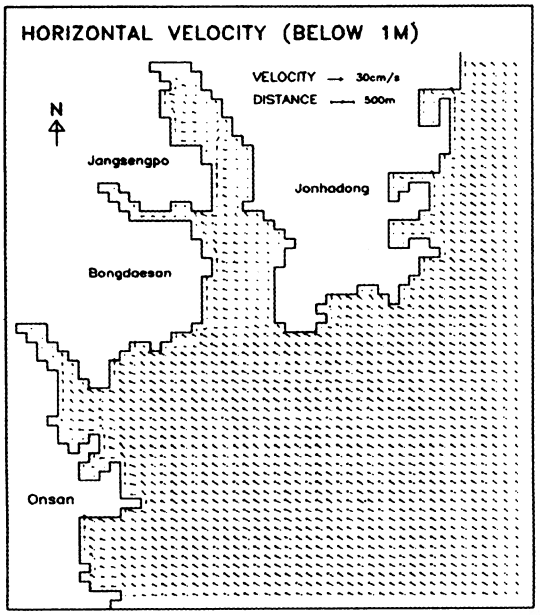

Fig. 21 Predicted Horizontal Velocity (below 1m)

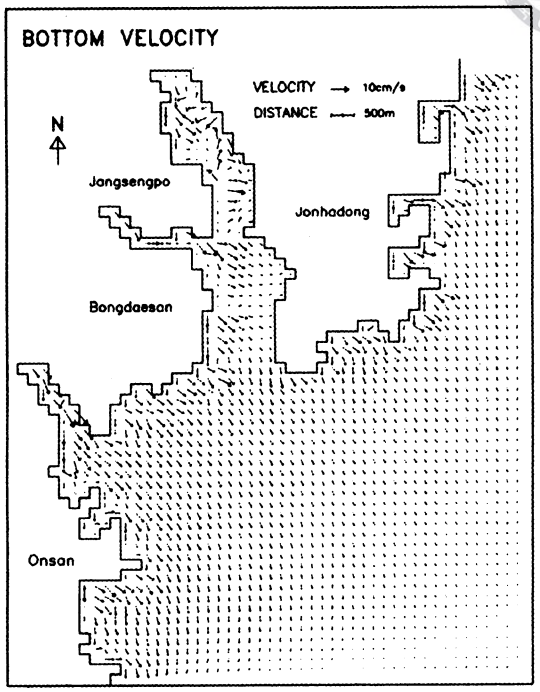

Fig. 22 Predicted Bottom Velocity.

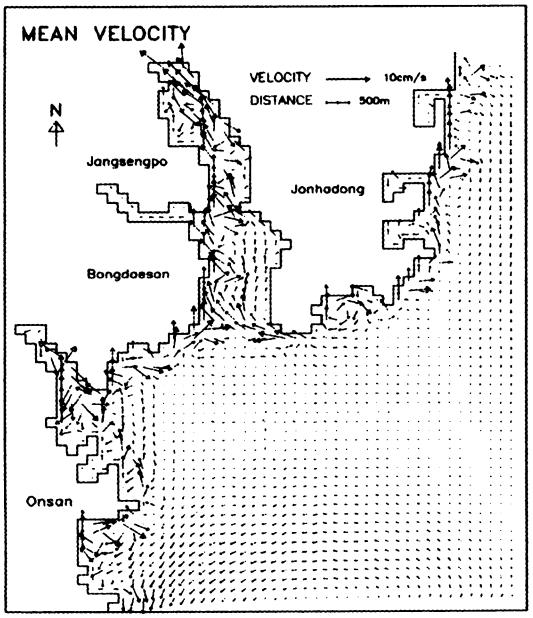

Fig. 23 Predicted Mean Velocity.

V 결 론

연안과 같이 수심과 지형적 변화가 심한 지역에서의 취송류의 특성을 연구하였다.

본 연구에서 제시한 수치해석법의 검증을 위해 풍동수로를 이용하여 실험을 하였으며, 울산항을 대상으로 실용성을 검증하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 취송류의 연직분포는 대수분포를 나타낸다.

2. 취송류의 계산결과는 실험결과와 잘 일치한다. 즉, 표층부근에서의 취송류의 방향은 풍향과 동일방향이며 해저부근에서의 방향은 풍향과 반대방향으로 계산결과는 이러한 현상을 잘 나타낸다.

3. 구조물이 존재하는 경우, 구조물 배후의 표층흐름은 순류의 역방향흐름으로 계산결과와 잘 일치하며, 구조물이 존재하거나 지형이 복잡한 경우, 이 연구에서 제안한 수치해석기법을 적용할 수 있다.

4. 지형 및 수심의 변화가 심한 울산만을 대상으로 이 연구에서 제안한 수치해석기법을 적용시킨 결과 순류의 방향과 상당히 다른 유향특성을 나타낸다.

참 고 문 헌

- Bains, W. D. and D. J. Knapp : Wind driven water currents. J. Hyd. Div. A.S.C.E., 91, pp. 205～221, 1965
- Dean, R. G. · Dalrymple, R. A. : Water wave mechanics for engineers and scientists, Prentice-Hall, Inc., pp. 146～152, 1984.
- Keulegan, G. H. : Wind tides in small closed channels. J. Res. Nat. Bur. Stand., 46, pp. 358～381, 1951
- Koutitas, C · Gousidou-Koutita, M. : A Comparative study of three mathematical models for wind-cenerated circulation in coastal areas. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Cosatal Engineering, pp. 127～138, 1986.
- Koutitas, C. · O'Connor, B., : Modeling three-dimensional wind-induced flows. ASCE, J. Hydraul. Div., 106, pp. 1843～1865, 1980.
- M. A. Tayfun & H. Wang : Monte Carlo simulation of oil slick movements, Journal of The Waterways Harbors and Coastal Engineering Division, pp. 309 ～ 324, 1973.
- Rahman, M. : Topics in engineering - The hydrodynamics of waves and Tides, with applications-, Computational Mechanics Publications Southampton UK and Boston USA, pp. 229～231, 1988.
- Sorensen, R. M. : Basic coastal engineering, pp. 113～115, 1978.
- 加藤始・鶴谷廣 ・・土肥後滿・宮崎 豊 : 流れの中の風波についての實驗的 研究(第2報), 港灣技術研究所報告, 第15券, 第4号, pp. 3～48, 1976.
- 楠田 信・阿部信男・吉澤立之 : 有限要素法入門, 森北出版社 pp. 46～57, 1995.
- 神谷紀生 : 有限要素法と境界要素法, サイエンス社, pp. 51～66, 1989.
- 戸川隼人 : 有限要素法へのガイド, サイエンス社, pp 52～90, 1995.
- 道上正規・槍谷治 : 渦動粘性係數および湖のスケールの吹送流に及ぼす影響, 日本土木學會論文集, 第405号, pp. 185～194, 1989.
- 高橋亮 ・・棚町芳弘 : 差分法, 培風館, pp. 53～61, 1993.
- 野田 堯 : 底層構造物を對象とした風洞實驗における氣流特性の再現に關する實驗的考察, 鳥取大學, pp. 6～7, 1996.
- 本多忠夫・光易 恒 : 水面に及ぼす風の作用に關する實驗的研究, 海岸工學講演會論文集, 第27回, pp. 91, 1980.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교