

취송류의 확산특성에 관한 연구

마 현 호¹⁾, 김 창 제²⁾

A Study on the Wind-Induced Flow in Coastal Area

Hyun-Ho Ma, Chang-Jae Kim

Abstract

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.

The proposed model was confirmed with the following results:

The experiment gives good results in comparison with the numerical analysis, when a structure is placed. The surface flow over the boundary of

1) 한국해양대학교 대학원 해사수송과학과

2) 한국해양대학교 해사수송과학부

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.

제1장 서론

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

따라서 이 연구에서는 취송류를 지배하는 풍속, 풍향, 수심, 지형 등을 고려하여 연안해역에 적용할 수 있는 취송류의 3차원 모델을 제시하고자 한다.

제2장 지배방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식

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

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \\ & = fV - g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \\ & = -fU - g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

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

2.2 경계조건

2.2.1 해면에서의 경계조건

해면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\nu_r \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \tau_{sx} \quad \text{at} \quad z = \bar{\xi} \quad (2.4a)$$

$$\nu_r \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \tau_{sy} \quad \text{at} \quad z = \bar{\xi} \quad (2.4b)$$

식(2.4)에서 τ_{sx} 및 τ_{sy} 는 각각 x 및 y 방향의 해면마찰응력이다.

2.2.2 해저면에서의 경계조건

해저면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\nu_r \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \quad \text{at} \quad z = -h \quad (2.5a)$$

$$\nu_r \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \tau_{by} \quad \text{at} \quad z = -h \quad (2.5b)$$

식(2.5)에서 τ_{bx} 및 τ_{by} 는 각각 x 및 y 방향의 해저면마찰응력이다.

2.2.3 구조물에서의 경계조건

고체 표면의 불투과조건을 고려하면, 구조물 표면에서는 다음식을 만족시켜야 한다.

$$V_n = 0 \quad \text{on the body surface} \quad (2.6)$$

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

제3장 취송류의 수치해석

이 연구에서는 기본적으로 Koutitas and O'Connor(1980)의 수치해석기법을 채용하였으며, Koutitas and O'Connor가 무시한 연직이류향 및 수평점성향을 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 Step법(예를 들면, Koutitas and O'Connor, 1980)을 이용하였다.

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} = L(U) + a_1, \quad \frac{\partial V}{\partial t} = L(V) + a_2 \quad (3.1)$$

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

$$a_1 = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + fV, \quad a_2 = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - fU \quad \text{이다.}$$

유속의 연속성을 고려하여 연산자 L 을 다음과 같이 분할한다.

$$\text{step 1 : } \frac{\partial U^n}{\partial t} = L_1(U^n) + a_3, \quad \text{step 2 : } \frac{\partial U^{n+1}}{\partial t} = L_2(U^{n+1}) \quad (3.2)$$

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

$$L_2 = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_r \frac{\partial}{\partial z} \right) , \quad a_3 = -g \frac{\partial \xi^{n+1,2}}{\partial x} + fV^n \text{ 이다.}$$

식 (3.2)의 좌변을 차분화하면 다음 식과 같이 된다.

$$\text{step 1 : } \frac{\partial U^n}{\partial t} = \frac{(U^d - U^n)}{\Delta t} , \quad \text{step 2 : } \frac{\partial U^{n+1}}{\partial t} = \frac{(U^{n+1} - U^d)}{\Delta t} \quad (3.3)$$

여기서, U^d 는 가상유속이다.

수치계산에 있어서, step 1의 U^n 을 초기조건(또는 known value)으로 해서, 식 (3.3)을 식 (3.2)에 대입해 가상유속 U^d 를 구하고, 구해진 U^d 를 이용해서 step 2의 U^{n+1} 을 구한다.

y방향 유속 V 에 관해서도 동일한 방법으로 해를 구한다.

3.2 공간적 분산화 (연직방향)

식 (3.1)~식 (3.3)에 있어서 연직방향의 분산화에는 유한요소법을 적용하였다. 평균수심 h 에 대해 다음식을 만족시키도록 요소분할을 하였다.

$$\frac{l_{i,j,k}}{h_{i,j}} = \frac{l_{i+1,j,k}}{h_{i+1,j}} \quad (3.4)$$

식 (3.4)에서 i, j 는 각각 x, y 방향 및 k 는 z 방향을 나타내는 첨자이다.

점 k 와 $k+1$ 사이에서 삼각형기저함수를 이용해 U, V, W 및 ν_r 를 다음과 같이 나타낸다(楠田信, 1995; 神谷紀生, 1989).

$$U = N_k \cdot U_k + N_{k+1} \cdot U_{k+1} \quad (3.8a), \quad V = N_k \cdot V_k + N_{k+1} \cdot V_{k+1} \quad (3.5b)$$

$$W = N_k \cdot W_k + N_{k+1} \cdot W_{k+1} \quad (3.8c), \quad \nu_r = N_k \cdot \nu_{r_k} + N_{k+1} \cdot \nu_{r_{k+1}} \quad (3.5d)$$

여기서, N_k 및 N_{k+1} 은 선형의 형상함수로서 다음과 같이 나타낸다.

$$N_k = N_k(z) = \frac{z_{k+1} - z}{z_{k+1} - z_k} = \frac{z_{k+1} - z}{l_k} \quad (3.6a)$$

$$N_{k+1} = N_{k+1}(z) = \frac{z - z_k}{z_{k+1} - z_k} = \frac{z - z_k}{l_k} \quad (3.6b)$$

식 (3.5)을 식 (3.2), (3.3)에 대입하여 k 에서 $k+1$ 구간까지 적분한 결과를 matrix로 표시하면 다음과 같다.

$$[A] \cdot \{U\}^d = \{a\}^n \quad (3.7a), \quad [A] \cdot \{V\}^d = \{b\}^n \quad (3.7b)$$

$$[B] \cdot \{U\}^{n+1} = \{c\}^d \quad (3.7c), \quad [B] \cdot \{V\}^{n+1} = \{d\}^d \quad (3.7d)$$

여기서, $[A]$ 및 $[B]$ 는 2행 2열의 matrix, $\{a\} \sim \{d\}$ 는 2행의 벡터이다.

3.3 공간적 분산화 (수평방향)

식 (3.7)에 있어서, 수평방향의 분산화는 기본적으로 중앙차분법을 사용했다. 식 (3.7)에서 이류항($U \partial U / \partial x$ 등)의 경우, 해의 안정성을 고려하여 다음과 같이 차분화한다(道上正規와 檜谷治, 1989; 高橋亮一와 棚町芳弘, 1993).

$$U_{i,j} \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x} ; U_{i,j} > 0 \quad (3.8)$$

$$U_{i,j} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} ; U_{i,j} < 0$$

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

평균수위변동 $\bar{\xi}$ 의 경우는 다음과 같이 차분화한다.

$$\begin{aligned} \bar{\xi}_{i,j}^{n+1/2} = & \bar{\xi}_{i,j}^{n-1/2} - \left\{ \frac{(U_{i+1,j}^n \cdot h_{i+1,j}^{n-1/2} - U_{i,j}^n \cdot h_{i,j}^{n-1/2})}{\Delta x} \right. \\ & \left. + \frac{(V_{i+1,j}^n \cdot h_{i+1,j}^{n-1/2} - V_{i,j}^n \cdot h_{i,j}^{n-1/2})}{\Delta y} \right\} \Delta t \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.4 수평 및 연직와동점성계수의 설정

일반적으로, 와동점성계수에 관한 이론은 아직 확립되어 있지 않다. 따라서 이 연구에서는 공간스케일에 따라 값이 변하는 富所五郎식(1984)을 채용한다.

즉, 수평와동점성계수는 다음 식을 채용한다.

$$\nu_h = 0.01 \Delta^{4/3} \tag{3.10}$$

여기서, Δ 은 계산격자 스케일이다.

또한, 연직와동점성계수는 다음식을 채용한다.

$$\nu_v = 0.016 \cdot U_* \cdot h \tag{3.11}$$

여기서, $U_* = \sqrt{|\tau_s|/\rho}$, h 는 수심이다.



제4장 해수유동의 특성

4.1 풍동수로실험

4.1.1 실험장치

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

4.1.2 풍속측정

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

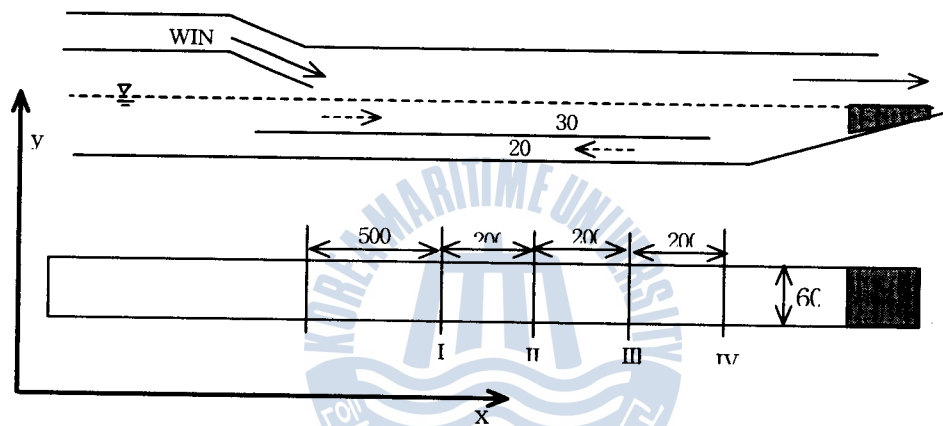


Fig. 1 Schematic Diagram of Laboratory Flume Tests.

4.1.3 유속측정

유속측정은 구조물이 없는 경우와 구조물이 존재하는 경우(Fig. 2)를 구분하여 3차원 유속의 측정이 가능한 전자유속계(KENEK-VMT2-200-08P, 측정오차 - $\pm 2\%/FS$)를 사용하였다.

구조물이 없는 경우의 유속의 측정지점은 풍속의 측정지점과 동일하며, 정지수면 2cm아래부터 바닥까지 2cm간격으로 유속을 측정하였다. 구조물이 존재하는 경우의 유속의 측정지점은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 길이방향으로(25cm간격) 24지점, 폭방향으로는 6지점(10cm간격)이다. 또한, 유속은 풍속과 마찬가지로 송풍 2시간 후에 측정하였다.

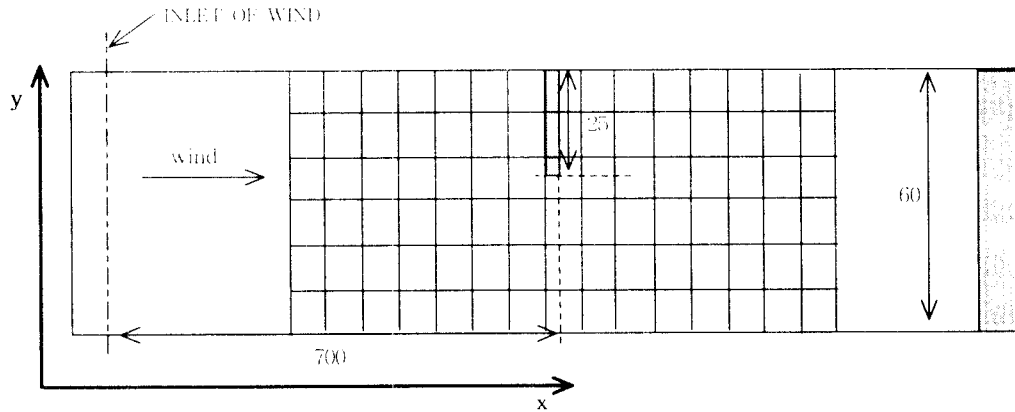


Fig. 7 Schematic Diagram of Measuring Points.

4.2 풍속의 연직분포

풍속은 해(지)표면에서 0이며, 해(지)표면 부근에서 경계층을 형성한 후, 해(지)표면 마찰의 영향이 미치지 않는 고도에서는 거의 일정하다. Fig. 3에 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; 木多忠夫·光易 恒, 1980).

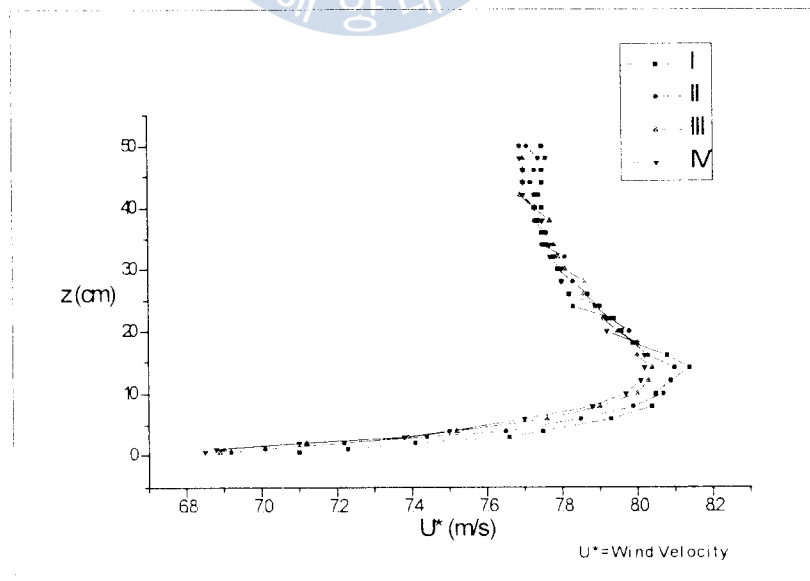


Fig. 3 Vertical Distribution of Wind Velocity.

4.3 유속의 연직분포

실험결과와 비교하기 위해 이 연구에서 제안한 방법에 의한 수치계산을 하였다. Fig. 4는 I, II, III, IV의 4지점에서 유속으로, 횡축은 유속, 종축은 수면하 깊이, 바람은 그림의 왼쪽에서 불며, ■는 I지점, ●는 II지점, ▲는 III지점, ▼는 IV지점을 나타낸다.

Fig. 4에서, I지점을 제외한 다른 지점들은 거의 동일한 유속분포를 보이나, I지점의 유속은 다른지점과 비교하여 해면부근에서 빠르고 해저부근에서 느리다. 이것은 I지점이 송풍구와 너무 가깝기 때문에 유속이 충분히 발달하지 못하였을 것으로 추찰된다.

Fig. 5, 6은 각 지점(II, III)에서의 연직유속분포의 실험값(원)과 계산값(실선)을 비교한 그림이다.

비록 제한된 실험조건이었지만 실험결과는 계산결과와 비교적 잘 일치하며 이 연구에서 제안한 방법의 타당성이 입증된다.

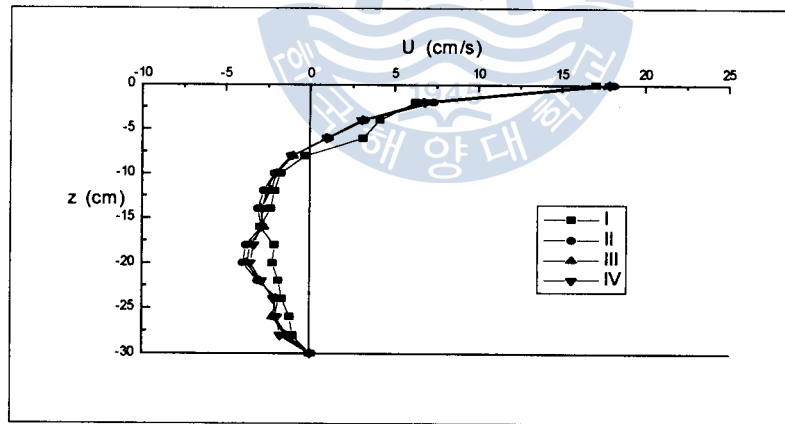


Fig. 4 Vertical Distribution of Measured Velocities.

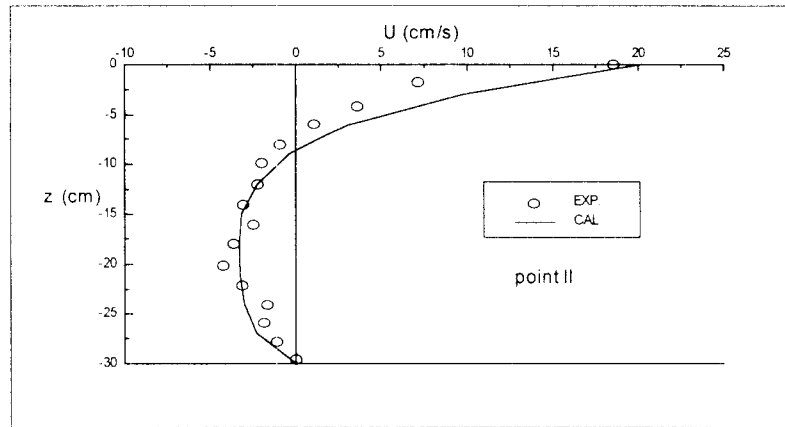


Fig. 5 Comparison Between Measured and Calculated Velocities(Point II).

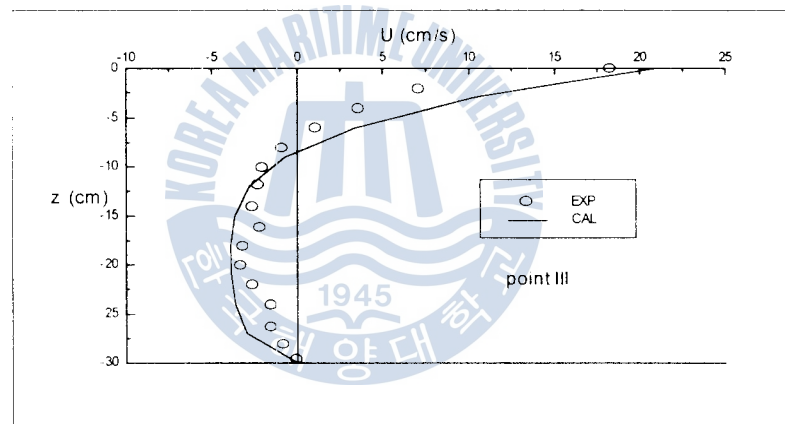


Fig. 6 Comparison Between Measured and Calculated Velocities(Point III).

4.4 유속의 공간분포

4.4.1 구조물이 존재하는 경우

Fig. 7는 Fig. 2과 같이 수로내에 구조물을 설치하였을 경우의 유속 및 유향을 나타낸 실험값이다. Fig. 8는 본 연구에서 제시한 방법에 의한 계산값이며, Fig. 9은 관성항과 수평직성항을 생략한 Ekman 방법에 의한 계산값이다.

Fig. 7에서 구조물 배후의 표층흐름은 순류의 역방향 흐름을 하고 있으며 본 연구에서 제시한 방법에 의한 계산값(Fig. 8)과 잘 일치하고 있다. 그러나 Ekman

방법에 의한 계산결과(Fig. 9)는 구조물 배후 등에서 실험결과와 다른 특성을 보인다. 즉, 구조물 배후에서의 흐름은 역류현상을 뚜렷하게 나타내지만(Fig. 8) 계산결과(Fig. 9)는 순류현상을 나타낸다. 구조물이 존재하거나 지형이 복잡한 경우, 이 연구에서 제안한 방법이 탁월한 효과를 나타냄을 알 수 있다.

제5장 결론

연안과 같이 수심과 지형적 변화가 심한 지역에서의 취송류의 특성을 연구하였다. 풍동수로를 이용하여 취송류의 특성을 고찰하여 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.

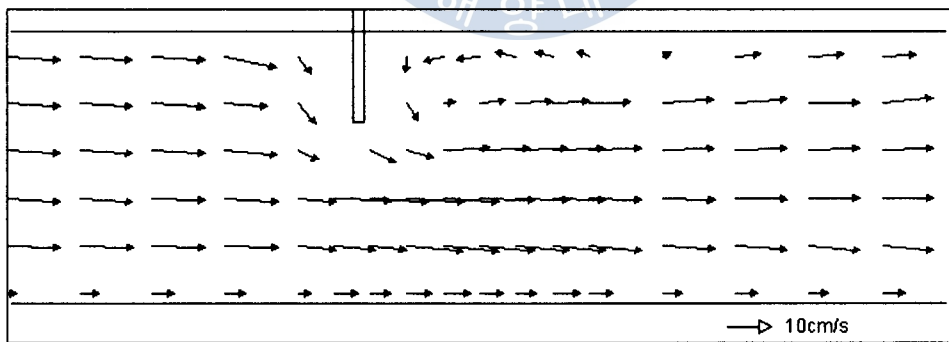


Fig. 7 Surface Velocities (Experiment).

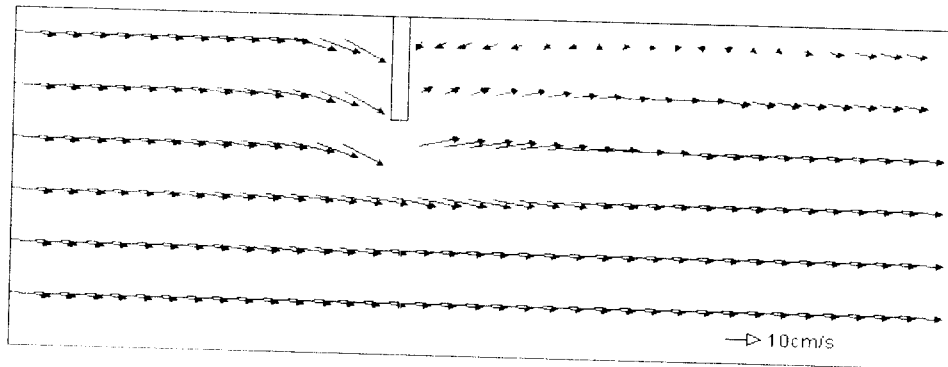


Fig. 8 Surface Velocities (by This Study).

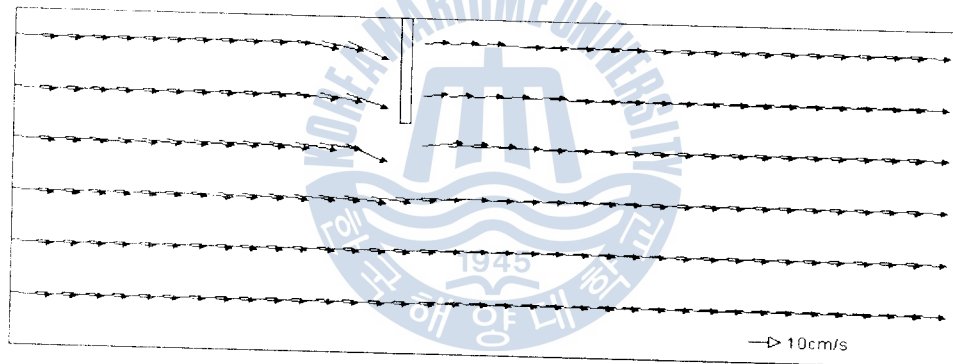


Fig. 9 Surface Velocities (by Ekman's Model).

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-generated circulation in coastal areas. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Coastal 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・鶴谷廣一・土肥後満・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巻, 第4号, pp. 3~48, 1976.
- 楠田 信・阿部信男・吉澤宣之 : 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・檜谷治 : 渦動粘性係数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.
- 高橋亮一・棚町芳弘 : 差分法, 培風館, pp. 53~61, 1993.
- 富所五郎 : 閉鎖性水域における風成流の水理に関する基礎的研究, 京都大學學位論文, 1984.
- 野田 埜 : 底層構造物を対象とした風洞實驗における氣流特性の再現に関する實驗的考察, 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関する實驗的研究, 海岸工學講演會論文集, 第27回, pp. 91, 1980.