

## 潮汐와 바람에 의한 馬山-鎭海灣의 海水流動

鄭泰成\*, 蔡璋源\*\*

### 1. 序論

沿岸海域에서의 흐름은 潮汐에 의한 週期的인 海水面의 昇降作用에 의한 潮流, 바람에 의해 발생되는 水面 摩擦力에 의한 風成流(wind-driven flow), 密度가 다른 하천수 등의 유입에 의한 밀도류 등에 의하여 발생한다. 대부분의 自然水塊에서의 실제 흐름은 이러한 흐름들이 단독으로 발생하는 것이 아니라 동시에 발생하는 複合流(combined flow)이다. 따라서, 연안해역에서의 汚染物質의 移動·擴散은 이러한 복합류에 의하여 발생하므로 복합류의 구조에 대한 精確한 理解, 評價 및 豫測은 沿岸水의 循環 및 汚染物質의 擴散에 관한 자연현상을 精確히 이해하는 데 있어서 반드시 필요하다.

그러나, 지금까지의 馬山-鎭海灣 海水流動에 관한 대부분의 연구는 潮汐運動에 의한 海水流動인 潮流에 관하여 주로 수행되어 왔으며, 바람과 조석 등의 複合外力에 의한 해수유동에 관한 연구는 관측자료와의 검증절차가 없이 계산결과를 제시하여 계산결과의 신뢰성이 확보된 복합류에 대한 연구결과를 제시하지 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 潮流(정태성, 1996)와 風成流(정태성 등, 1994)에 대하여 각각 적용하여 精確성을 입증한 바 있는 3次元  $k-\epsilon$  亂流模型을 활용하여 마산-진해만에서 바람과 조석의 複合作用에 의한 海水流動 現象의 규명을 시도하였다. 數值模型의 복합류에 대한 적용성을 입증하기 위하여 바람의 영향이 없는 개수로 흐름과 바람의 영향이 있는 개수로 흐름에 대한 수리실험자료와 각각 比較檢證을 하여 모형의 精確성을 평가하고, 마산-진해만에서 발생한 조류와 풍성류의 복합 흐름장에 적용하여 現場資料와 比較檢證을 실시하여 模型의 現場 適用性을 입증하였다. 검증된 모형은 季節別 대표 바람과 조석의 複合作用에 의한 마산-진해만의 복합류 해석에 사용되어 바람이 마산-진해만의 海水流動에 미치는 영향을 조사하였다.

### 2. 數值模型

#### 2.1 支配方程式 및 數值解析

복합류 계산을 위하여 사용한 수치모형은 支配方程式으로 다음과 같은 3차원 連續方程式, 運動方程式, 亂流方程式을 사용한다. Reynolds 평균된 3차원 연속방정식과 운동량방정식은 직교좌표계( $x$ 가 북쪽으로,  $y$ 가 동쪽으로,  $z$ 가 해수면에서 바닥으로 증가하는 좌표)에서 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fv = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial u}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} - fu = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial v}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 g \quad (4)$$

\* 한남대학교 토목공학과

\*\* 한국해양연구소 연안공학연구부

여기서,  $(u, v, w) = (x, y, z)$  方向의 流速成分,  $f =$  Coriolis 상수,  $\rho_0 =$  물의 基準密度,  $p =$  壓力,  $(A_H, A_V) =$  水平 및 鉛直 渦粘性係數,  $g =$  重力加速度이다.

식 (2)-(3)의  $A_V$ 를 구하기 위하여  $k-\epsilon$  亂流方程式을 사용하였으며, 상기방정식들은 수심방향으로 正規化된  $\sigma$ -좌표에서 無次元 變數를 사용하여 변환하여 사용하였으며, 直四角形 可變格子에서 有限差分法에 의하여 數值解析되었다. 鉛直 擴散項, 水面傾斜項을 陰解法으로 해석하고, 移送項과 水平 擴散項을 FTCS(Forward Time and Centered Space)법에 의해 해석하였으며, 水面變位  $\eta$ 는 식 (2)와 (3)의 차분식에 分散을 취하여 얻은  $\eta$ 에 관한 2界 橢圓型 差分式을 유도하여 해석한다. 計算 格子體系로는 水平流速  $u, v$ 를 같은 격자점에서 계산하고 水面變位를 그 중간점에서 계산하는 B-형 격자를 사용하였다(정대성, 1996).

## 2.2 境界條件의 處理

### 2.2.1 流速

- 1) 바닥 경계조건으로 無滑動條件  $u=v=w=0$ 을 사용하였다.
- 2) 바람이 작용하는 경우에 水面 境界條件은 다음과 같다.

$$A_{Vs} \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_x, \tau_y) \quad (5)$$

여기서,  $A_{Vs} =$  水面에서 鉛直 渦粘性係數,  $x, y$  方向의 바람 摩擦應力  $(\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_d W(W_x, W_y)$ ,  $C_d =$  바람의 抗力係數로  $(0.8 + 0.065 W) \times 10^{-3}$  (Wu, 1980),  $\rho_a =$  공기의 밀도,  $W =$  風速,  $W_x, W_y =$  각각  $x, y$  方向의 풍속 성분이다.

### 2.2.2 난류값과 鉛直 渦粘性係數

1) 바닥에서 경계조건으로 난류값에 대하여  $k=0$ 와  $\epsilon=0$ 을 사용하였다. 유속의 바닥 경계조건으로 무활동 조건을 사용시 바닥 경계부근의 境界層을 정확하게 묘사하기 위해서는 많은 수의 격자로 수심을 분할하여 계산하여야 한다. 그러나, 이는 현실적으로 計算時間의 과대한 증가, 數值誤差의 累積 등의 문제가 있어 계산격자 수를 줄여 계산하는 대신에 다음과 같은 벽면함수의 개념을 개수로 흐름의 계산시 도입하였다. 바닥 마찰응력에 의한 난류값을  $k = u_{*b}^2 / 0.3$ 와  $\epsilon = 0.3k^{3/2} / K\Delta z$ 로 표현하면(Koutitas, 1987), 바닥층의 연직 와점성계수  $A_{Vb}$ 는 다음과 같다.

$$A_{Vb} = \sqrt{0.3} K u_{*b} \Delta z \quad (6)$$

여기서,  $u_{*b} =$  바닥 摩擦速度  $(= \sqrt{\tau_b / \rho})$ ,  $\tau_b =$  바닥 마찰응력,  $K =$  von Karman 상수,  $\Delta z =$  바닥에서  $A_{Vb}$  계산 격자점까지의 距離이다.

바닥 마찰응력  $\tau_b = \rho C_d u_b^2$ 와  $u_{*b} = \sqrt{\tau_b / \rho}$ 를 이용하면, 식 (6)은 다음과 같이 표현된다.

$$A_{Vb} = \sqrt{0.3 C_d} K u_b \Delta z \quad (7)$$

여기서,  $C_d =$  항력계수로 바닥부근에서 연직 격자크기와 바닥 粗度에 영향을 받는 값이다.

2) 水面 境界條件은 난류값에 대해 바람이 없는 경우에는  $\partial k / \partial z = 0$ 와  $\partial \epsilon / \partial z = 0$ , 바람이 있는 경우에는  $k = u_{*s}^2 / 0.3$ 과  $\epsilon = 0.3k^{3/2} / l_0$ 이다.  $u_{*s}$ 는 水面에서 摩擦速度로  $\sqrt{\tau_s / \rho}$ ,  $\tau_s =$  바람 마찰응력,  $l_0 =$  수면에서 亂流擴散 특성길이이다.

## 3. 模型의 檢證

상기와 같은 수치모형의 복잡성에 대한 적용성을 평가하기 위하여 1차적으로 바람이 없는 開水路 흐름과 바람과 흐름이 공존하는 開水路 複合流에 대하여 각각 적용하고 수리실험결과와 비교하였다. Tsuruya(1985)가 수리실험한 길이 2850 cm, 폭 150 cm, 깊이 130 cm인 循環水路에 水深 平均流速 23.8 cm/sec, 水深 45 cm로 흐르는 흐름을 數值模擬하기 위하여 길이방향으로 20개, 폭방향으로 7개, 수심방향으로 20개의 등간격 격자를 구성하였다. 計算 時間間隔은 0.2초를 사용하였으며, 準定常 狀態의 결과를 얻기 위하여 총 160초간 계산하여 最終 計算結果를 수리실험자료와 比較分析하였다.

바닥층에서 연직 와점성계수는 식 (7)을 사용하여 계산하였으며, 항력계수  $C_d = 0.0013$ 을 사용하였다.

Fig. 1은 바람이 작용하지 않은 開水路의 下流地點에서 水平流速의 鉛直分布로 計算流速이 水理實驗資料와 거의 일치하는 양호한 計算결과를 보였다. 바람이 없는 개수로 실험과 동일한 諸元을 갖는 수로에 흐름과 반대되는 방향으로 8.1 m/sec의 바람이 水面에 작용하는 경우에 대한 數值實驗을 실시하고 수리실험결과와 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. 바람이 없는 수로에서의 計算결과와 마찬가지로 水路方向 水平流速의 水深分布가 실험치와 잘 일치하는 모습을 보이고 있다. 따라서, 본 모형이 바람의 영향을 제대로 고려하고 있음을 확인할 수 있었다.

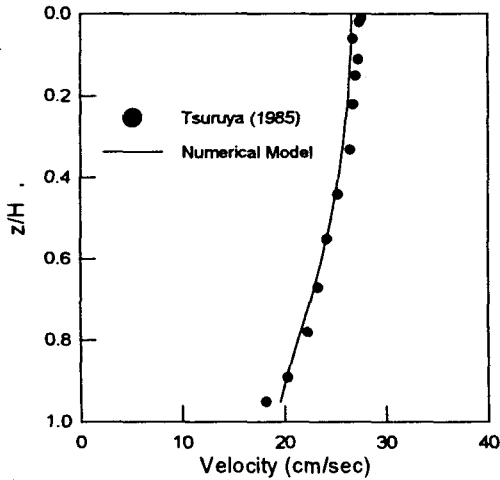


Fig. 1. Velocity profile (w/o wind)

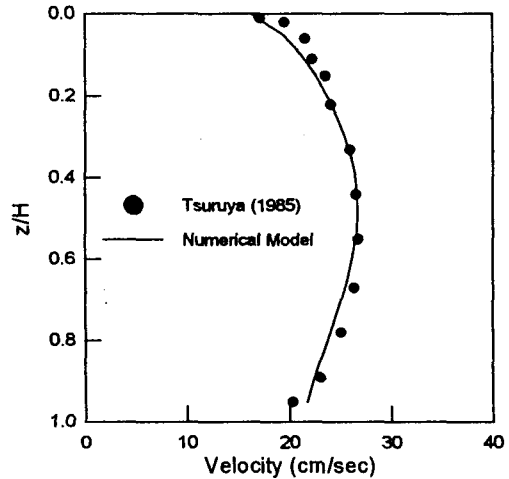


Fig. 2. Velocity profile (with wind)

#### 4. 馬山-鎮海灣의 複合流 計算

##### 4.1 模型의 樹立 및 檢證

마산-진해만 해역을 最小 250 m, 最大 500 m인 水平 格子網을 구성하고(Fig. 3), 鉛直 格子間隔은 모든 水平 格子點에서 10개층으로 均等分割( $\Delta\sigma=0.1$ )하였으며, 計算時間間隔은 20 sec를 사용하였다. 開境界에서는 5개 主要潮汐의 合成潮汐에 의한 水面變位를 부여하였으며, 數值的으로 안정적인 計算결과를 얻기 위하여 조석 2주기(1일)의 豫備計算을 실시하였다.

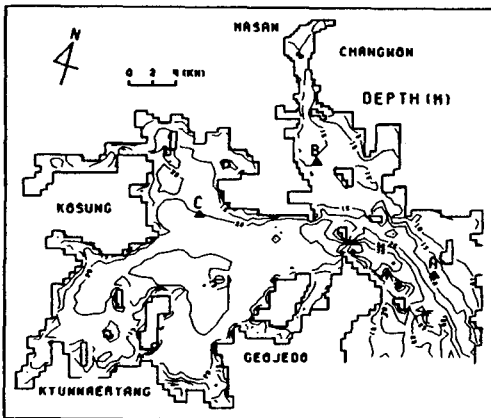


Fig. 3 Depth profile of study area

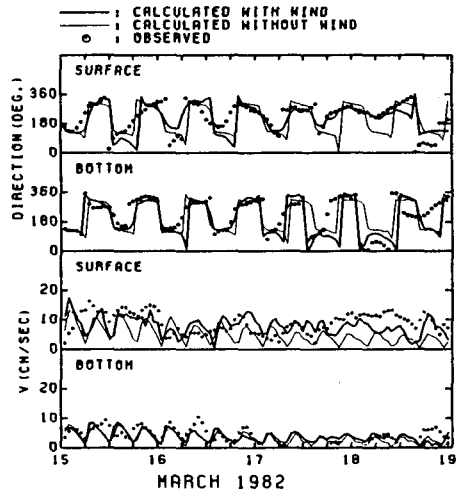


Fig. 4 Time series of currents at Station C

마산-진해만 潮流에 관한 3次元 模型(정태성, 1996)을 활용하여 長期間 潮流計算을 실시하고 1982년의 長期 流速 觀測資料(박필성 등, 1992)와 비교하였다. Fig. 4는 정점 C의 上層과 下層에서 1982년 3월 10-18일(大潮期에서 小潮期까지)의 유속 관측자료와 조석만을 고려하여 수치모형에 의해 계산한 결과를 비교한 것으로 海水面의 昇降이 커서 조류의 속도가 강한 大潮期에는 計算流速이 觀測流速과 크기와 방향이 전반적으로 잘 일치하는 결과를 보이고 있으나, 조류의 속도가 상대적으로 약한 中潮期에서 小潮期의 계산결과는 表層 觀測流速과 計算流速이 서로 많은 차이를 보이고 있다. 이는 조류이외의 다른 外力이 마산-진해만의 海水流動에 영향을 미치고 있음을 의미한다. 따라서, 바람이 마산-진해만의 해수유동에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 1982년 3월에 정점 W에서 매시간 관측한 바람자료를 Wu(1980)의 摩擦應力 算定式에 의하여 水面 摩擦應力으로 변환하여 水面 境界條件으로 부여하였다. 바람을 고려하여 계산한 결과(Fig. 4)에 의하면, 조석만을 고려한 계산결과(가는 실선)가 관측치와 많은 차이를 보이는 것에 비하여 바람과 조석의 영향을 함께 고려한 계산결과(굵은 실선)는 바람을 고려함으로써 計算流速의 크기와 방향이 觀測流速에 보다 근접하는 결과를 보였다.

#### 4.2 冬, 夏季 代表 바람과 조석에 의한 해수유동

위와 같이 개수로에서 수리실험자료와의 比較檢證을 통하여 수립된 수치모형이 마산-진해만의 조석과 바람에 의한 복합류를 비교적 정확하게 재현하여 模型의 現場 適用性이 입증됨에 따라 마산-진해만에 있어서 동, 하계 대표적인 平均 最大風速이 마산-진해만의 해수유동에 미치는 영향을 조사하였다. 1985-1990년에 馬山測候所에서 관측한 자료를 분석한 결과(이찬원 등, 1991)에 의하면, 풍향별 바람 발생율은 북북서풍이 동계에, 남남동풍이 하계에 가장 널리 발생하며, 風向別 最大風速은 북북서풍은 평균 10.6 m/sec, 남남동풍은 평균 11.0 m/sec였다. 따라서, 북북서풍이 10.6 m/sec로 부는 경우와 남남동풍이 11.0 m/sec로 부는 경우에 대한 수치실험을 小潮期에 실시하였다.

수치실험 결과에 의하면, 겨울철의 대표바람인 북북서풍에 의하여 灣內 表層에서는 오염된 해수가 외해로 유출되고 저층에서는 깨끗한 외해수의 유입이 촉진되었다. 여름철의 대표바람인 남남동풍은 만내 오염된 表層 海水는 외해로 빠져나가는 것을 저지하여 灣內에 表層 海水를 축적하였으며, 表層 海水의 下降作用에 의하여 오염된 표층 해수가 저층으로 유입하는 데 기여하여 夏季 貧酸素 水塊形成에 기여하는 것으로 나타났다.

#### 5. 結論 및 討議

마산-진해만에서의 바람과 조석의 複合作用에 의한 해수유동 현상의 규명을 시도하였다. 바람이 미치는 영향분석에 앞서 실시한 검증과정에서 數值模型은 바람과 조석에 의한 複合流에 대해 개수로에서 실험결과와 마산-진해만에서 관측한 潮流와 風成流의 복합 흐름장을 비교적 정확히 재현하였다. 본 연구에서 수립된 복합 흐름장에 관한 3차원 수치모형은 複合 外力에 의하여 발생하는 연안해역의 해수순환을 보다 정확히 이해하는 데 활용되어 연안해역에서 각종 오염물질의 移動・擴散 過程을 보다 명확하게 규명하는 데 기여할 것이다.

#### 參考文獻

- 박필성 등(1992). "진해만 해양관측 자료집(I) -'82-'83년도 조류, 조석 및 기상 관측자료." 한국해양연구소.
- 이찬원 등(1991). "진해만 일원 오염실태 조사보고서," 환경처.
- 정태성(1996). "마산-진해만 조류에 관한 3차원 수치모형." *대한토목학회 논문집*, 제16권 제II-1호, pp. 63-72.
- 정태성, 이길성, 오병철(1994). "풍성류 계산을 위한 연직 와점성계수 산정방법의 비교평가." *한국해안・해양공학회지*, 제6권 제3호, pp. 205-215.
- Koutitas, C. (1987). "Three-dimensional model of coastal circulation: an engineering viewpoint." *Three-Dimensional Coastal Models*, AGU, pp. 107-123.
- Tsuruya, H. (1985). "Turbulent structure of currents under the action of wind shear." *J. of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 23-43.
- Wu, J. (1980). "Wind stress coefficient over sea surface near neutral condition - a revisit." *J. of Phys. Oceano.*, 10(5), pp. 727-740.