韓國海岸・海洋工學會誌
第4卷 第3號, pp. 146~155, 1992年 9月

移動境界를 考慮한 有限要素 海水流動模型
A Finite Element Hydrodynamic Model for Moving Boundary Problems

鄭泰成*・金昌式*
Tae Sung Jung* and Chang Shik Kim*

要 旨 : 지금까지 沿岸潮流를 豫測하는 대부분의 有限要素 數値模型은 陸地境界를 固定하여 사용하여 왔으나, 潮間帶가 넓게 발달한 우리나라 西海沿岸에서의 適用은 현실적이지 못하였다. 本 硏究에서는 移動境界(潮間帶)를 고려한 有限要素法에 의한 平面 2次元 海水流動 數値模型을 樹立하였다. 有限要素의 形態로는 3角形을 사용하였으며, 時間積分方法으로는 陽解法을 사용하였다. 수립된 數値模型은 한쪽이 열린 境界와 다른 한쪽에 潮間帶를 갖는 長方形 水路에서 模型의 潮間帶 處理에 대한 特性이 分析되었으며, 全羅南道 海南郡과 珍島郡사이에 위치한 馬路海, 특히 울돌목의 潮流計算에 適用되었다. 모형의 現場 適用으로부터 移動境界 處理를 포함한 數値模型의 妥當性을 立證하였으며, 庫千岩防潮堤의 建設에 따라 潮間帶 領域의 큰 變化를 갖는 마로해에서 潮流分布의 變化와 最大 약 12노트에 달하는 流速을 갖는 울돌목부근에서의 潮流 分布特性을 再現하였다. 本 模型은 有限要素法을 사용함으로써 西, 南海와 같이 海岸線이 복잡한 海域에서 海岸線을 보다 正確하게 表現할 수 있으며, 潮間帶의 變化를 移動境界를 사용함으로써 海岸線附近의 潮流豫測의 正確度를 높일 수 있는 長點이 있다.

Abstract □ It has been conventional to treat the land boundary as a fixed one in numerical modeling of tidal flows, particularly in the finite element scheme. However conventional models using the fixed land boundary result in unrealistic tidal flows in inter-tidal zones which exist over wide coastal area in Korea. In this study, a 2-dimensional hydrodynamic model, using finite element method for moving boundary problems was developed. The performance of the model was tested in a rectangular channel with an open boundary at one end and a moving boundary at the other end. The model was applied to calculate the tidal currents in Maro Hae, located in the southwestern part of Korea where wide tidal flats develop. The behavior of tidal currents in the Uldolmok and near the tidal flats in the study area was satisfactory when compared with the observed data. Variation of tidal currents due to the construction of Kochunam sea-dyke which barrages large area of tidal flat was presented. The results of this study confirm the efficiency of moving boundary treatment in coastal numerical models.

1. 緖 論

長波에 의한 平面 2次元 海水流動에 관한 數値模型은 淺水方程式을 有限差分法으로 解析하여 北海의 暴風海溢을 推算한 Hansen(1956) 이래 海洋에서 長波(특히 潮汐波)에 의한 海水流動의 정확한 理解와 豫測을 目的으로 널리 사용되어 왔다. 長波에 의한 海水流動에 관한 數値模型은 數値計算方法에 따라 크게 有限差分法(Finite difference method)과 有限要素法(Finite element method)으로 나눌 수 있다.

有限差分法은 有限要素法보다 앞서 사용되기 시작하였으며 현재도 가장 널리 사용되고 있다(Leendertse, 1967 ; Flather and Heaps, 1975 ; Falconer, 1984 ; Stelling, 1984). 有限要素法은 任意의 形態(三角形, 四角形 등)의 格子를 사용하므로써 直四角形 格子를 사용하는 有限差分法에 비하여 海岸線이 복잡한 경우 陸地境界를 비교적 정확하게 표현할 수 있는 것으로 알려져 있으며, Connor and Wang(1973) 이

*韓國海洋硏究所 海洋環境工學室(Ocean Environmental Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea)

래로 潮汐計算에 널리 사용되어 왔다(Wang, 1975 ; Kawahara *et al.*, 1982 ; 鄭과 李, 1991). 최근에는 有限差分法의 경우도 境界座標系와 같은 座標變換技法을 導入하여 陸地境界를 정확하게 표현하려는 노력이 경주되고 있다(Spaulding, 1984). 그러나 座標變換技法의 도입은 海水流動 方程式의 座標變換過程에서 새로운 項과 係數의 출현으로 추가적인 계산을 요구하고, 數値模型의 코드화를 복잡하게 한다.

數値模型의 활용측면에서 우리나라 西海岸과 같이 넓은 潮間帶를 갖는 海域에서는 潮間帶를 模型에 포함하여 計算하므로써 固定 陸地境界의 表現에 의한 誤差를 줄여야 한다. 따라서, 潮汐數値模型에 있어서 潮間帶를 適切하게 模擬하기 위한 많은 노력이 있었으며, 비교적 정확하게 시간에 따라 변하는 潮間帶에서의 潮汐現象을 계산하여 왔다(Flather and Heaps, 1975 ; Falconer, 1984). 그러나 潮間帶를 고려한 數値模型들은 대부분 數値解析方法으로 有限差分法을 사용하고 있다. 有限差分法은 數値模型을 코드화하기가 비교적 容易하나 우리나라 西, 南海岸과 같이 複雜한 海岸線을 정확히 표현하기 어려워 이에 따른 誤差를 야기하게 된다. 따라서, 우리나라 서.남해안에서의 海水流動을 정확히 이해하고 예측하기 위해서는 복잡한 海岸線을 정확하게 表現할 수 있는 有限要素法에 潮間帶를 고려한 數値模型의 開發이 必要하다고 하겠다.

有限要素法 사용시의 移動境界에 대한 研究를 살펴보면, Lynch and Gray(1980)는 시간에 따라 변화하는 물에 잠기는 領域을 計算領域을 변화시켜 매 計算時間段階마다 새로이 計算格子를 구성하는 방법으로 移動境界問題를 解決하였으며, 河川에서 河川流量의 時間變化에 따라 河川幅이 변하는 移動境界問題를 해결한 Kawahara and Umetsu(1986)는 移動境界를 대부분의 有限差分模型에서 사용하는 方法과 거의 同一하게 計算格子는 그대로 두고 浸水와 露出되는 計算領域을 區別하여 계산하는 방법으로 移動境界問題를 해결하였다.

本 研究에서는 매번 全體格子를 다시 구성할 필요가 없어 計算上 效率的인 Kawahara and Umetsu(1986)에 의해 提案된 移動境界 處理方法을 사용하여 기존의 固定境界에서의 2次元 有限要素 潮汐模型(정과 이, 1991)을 보완하였다. 補完된 2次元 潮汐數値模型은 우리나라 서, 남해안과 같이 복잡한 海岸線과 넓은 潮間帶를 갖는 海域에서 潮位와 潮流의 계산에 적용되어 관측자료와 비교검증되었다. 研究內容은 數値模型의 樹立過程의 紹介 및 潮間帶處理時의 模型의 反應特性을 分析하고, 수립된 모형을 사용하여 全羅南道 珍島近海의 울돌목을 포함한 馬路海에서 陸地境界와 潮間帶를 정확히 表現하여 潮流分布와 庫千岩 防潮堤 建設에 따른 馬路海의 潮流變化를 計算하였다.

2. 數値模型

本 模型은 2次元 長波方程式의 數値解를 有限要素法에 의하여 구하며, 基本方程式과 有限要素式은 다음과 같다.

2.1 基本方程式

長波에 의한 海水流動을 나타내는 2次元 水深積分된 淺水方程式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\eta)+\frac{\partial}{\partial x}(q_x)+\frac{\partial}{\partial y}(q_y)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(q_x)+\frac{\partial}{\partial x}(Uq_x)+\frac{\partial}{\partial y}(Uq_y)= -gH\frac{\partial \eta}{\partial x}+fq_y-\frac{gq_x\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{C^2H^2}+\frac{\partial F_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial F_{yx}}{\partial y} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(q_y)+\frac{\partial}{\partial x}(Vq_x)+\frac{\partial}{\partial y}(Vq_y)= -gH\frac{\partial \eta}{\partial y}-fq_x-\frac{gq_y\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{C^2H^2}+\frac{\partial F_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \tag{3}$$

여기서, t=時間, x, y=直交座標, η=平均海面으로부터 海水面變位, H=總水深(=h+η), q_x, q_y=x, y 方向의 單位幅當 流量, U, V=x, y 方向의 水深平均된 流速, f=코리올리 상수, g=重力加速度, $F_{xx}=E_{xx}(\partial q_x/\partial x)$, $F_{xy}=F_{yx}=E_{xy}(\partial q_x/\partial y+\partial q_y/\partial x)$, $F_{yy}=E_{yy}(\partial q_y/\partial y)$, E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}=運動量 擴散係數, C=Chezy의 海底面 摩擦係數(=$H^{1/6}/n$), n은 Manning의 粗度係數이다.

2.2 有限要素式

위의 식 (1)~(3)을 Galerkin 方法에 의해 有限要素化하여 計算하였으며, 계산 格子形態로는 三角形格子를, 補間函數는 Lumped한 形態를, 計算方法으로는 陽解法을 사용하였다. 有限要素化 過程은 다음과 같

다.

未知數 η, q_x, q_y는 다음과 같이 線形 補間函數에 의하여 表現하였다.

$$\eta=\langle N_iN_jN_k\rangle\begin{bmatrix}\eta_i\\ \eta_j\\ \eta_k\end{bmatrix}=\langle N\rangle\{\eta\} \tag{4}$$

$$q_x=\langle N_iN_jN_k\rangle\begin{bmatrix}q_{xi}\\ q_{xj}\\ q_{xk}\end{bmatrix}=\langle N\rangle\{q_x\} \tag{5}$$

$$q_y=\langle N_iN_jN_k\rangle\begin{bmatrix}q_{yi}\\ q_{yi}\\ q_{yk}\end{bmatrix}=\langle N\rangle\{q_y\} \tag{6}$$

여기서, N은 補間函數(Shape function) 또는 加重函數(Weighting function)로 節點(Node)의 空間座標에 의하여 다음과 같이 定義된다.

$$N_i(x,y)=\frac{(a_i+b_ix+c_iy)}{2\Delta} \tag{7}$$

여기서,

$$\begin{bmatrix}a_i=x_iy_k-x_ky_i\\ b_i=y_j-y_k\\ c_i=x_k-x_j\end{bmatrix}\ \text{Permutations on i, j, k}$$

$$\Delta=\frac{1}{2}\begin{vmatrix}1 & x_i & y_i\\ 1 & x_j & y_j\\ 1 & x_k & y_k\end{vmatrix}\ (=\text{Element area})$$

式 (4)~(7)과 Galerkin 方法(Chung, 1978)을 사용하여 식 (1)~(3)을 有限要素化하면 다음과 같다.

$$\sum_{e=1}^{n}\int_\Delta\langle N\rangle^T[\langle N\rangle\dot{\eta}\}+\langle N_x\rangle\{q_x\}+\langle N_y\rangle\{q_y\}]_e\,dA=0 \tag{8}$$

$$\sum_{e=1}^{n}\int_\Delta(\langle N\rangle^T\Big[\langle N\rangle\{q_x\}+\langle N_x\rangle\Big\{\frac{q_x^2}{H}\Big\}+\langle N_y\rangle\Big\{\frac{q_xq_y}{H}\Big\}+g\langle N\rangle\{H\}\langle N_x\rangle\{\eta\}-f\langle N\rangle\{q_y\}+g\langle N\rangle\Big\{\frac{q_x\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{C^2H^2}\Big\}\Big]+\langle N_x\rangle^T\{F_{xx}\}+\langle N_y\rangle^T\{F_{yx}\})_e\,dA=0 \tag{9}$$

$$\sum_{e=1}^{n}\int_\Delta(\langle N\rangle^T\Big[\langle N\rangle\{q_y\}+\langle N_x\rangle\Big\{\frac{q_xq_y}{H}\Big\}+\langle N_y\rangle\Big\{\frac{q_y^2}{H}\Big\}+g\langle N\rangle\{H\}\langle N_y\rangle\{\eta\}+f\langle N\rangle\{q_x\}+g\langle N\rangle\Big\{\frac{q_y\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{C^2H^2}\Big\}\Big]+\langle N_x\rangle^T\{F_{xy}\}+\langle N_y\rangle^T\{F_{yy}\})_e\,dA=0 \tag{10}$$

Lumped된 形態의 補間函數의 積分은 다음과 같다.

$$\int_\Delta\langle N\rangle^T dA=\frac{\Delta}{3}\begin{Bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{Bmatrix}$$

$$\int_\Delta\langle N\rangle^T\langle N\rangle dA=\frac{\Delta}{12}\begin{bmatrix}2&1&1\\ 1&2&1\\ 1&1&2\end{bmatrix}\cong\frac{\Delta}{3}\begin{bmatrix}1&0&0\\ 0&1&0\\ 0&0&1\end{bmatrix}$$

식 (8)~(10)을 行列式 形態로 나타내면 다음과 같다.

$$[M]\{\dot{\eta}\}=\{F_\eta\} \tag{11}$$

$$[M]\{\dot{q}_x\}=\{F_x\} \tag{12}$$

$$[M]\{\dot{q}_y\}=\{F_y\} \tag{13}$$

식 (11)~(13)은 다음과 같은 時間積分式에 의하여 連續的으로 計算한다.

$$[M]\{\dot{\eta}\}=\{F_\eta(q_n,\ \eta_{n-1/2})\} \tag{14}$$

$$\{\eta\}_{n+1/2}=\{\eta\}_{n-1/2}+\Delta t\{\dot{\eta}\} \tag{15}$$

$$[M_q]\{\dot{q}\}=\{F_q(q_n,\ \eta_{n+1/2})\} \tag{16}$$

$$\{q\}_{n+1}=\{q\}_n+\Delta t\{\dot{q}\} \tag{17}$$

數値計算時 初期條件으로는 流速을 모든 計算領域에서 0으로 주어 계산을 시작하였으며, 陸地境界條件으로는 境界에 垂直成分이 0이 되도록 하였다. 外海境界에서는 매 계산단계마다 海水面 變位를 指定하였다.

2.3 潮間帶 處理

潮間帶 處理에 있어서 浸水(submergence)와 露出(exposure)의 限界를 정확히 정의하는 것은 매우 중요하며, 本 計算에 사용된 方法은 다음과 같다.

1. 計算海域에서 計算節點이 露出되었는지 浸水되었는지를 總水深에 의하여 決定한다. 즉, H≤0이면 露出로 看做하고, H>0이면 浸水된 것으로 看做한다.
2. 計算 有限要素가 浸水되었는지 露出되었는지를

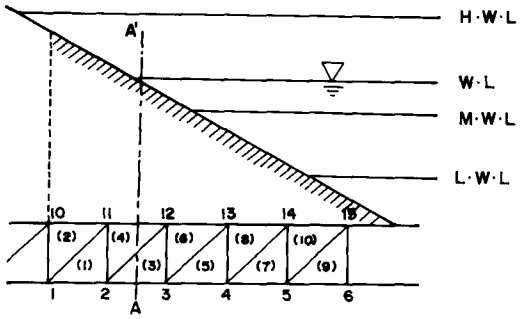

Fig. 1. Schematic illustration of tidal moving boundary.

檢査한다. 본 계산에 있어서 사용된 有限要素는 삼각형으로써 3개의 절점에 대하여 검사하였다. 각 要素의 절점중에 2개 이상이 노출된 경우는 그 要素가 완전히 노출된 것으로 간주하고 계산에서 제외하였다.

3. 어느 要素가 陸地와 海水사이의 境界에 있는지를 결정한다. 計算要素의 절점중에 1절점이 노출되어 있는 경우는 境界위에 놓여 있는 것으로 보아 노출된 1절점에서의 총수심을 0으로, 그要素의 각 절점에서의 流速成分을 0으로 지정하였다. 노출되지 않은 2개의 절점의 海水面 變位는 連續方程式에 의하여 계산된다.

4. 위의 3段階의 過程에 의하여 새로이 計算境界가 정의되며, 새로 정의된 境界 및 境界條件에 대하여 새로운 時間段階에서 계산을 遂行한다.

위의 과정을 예를 들어 說明하면 다음과 같다. Fig. 1과 같은 有限要素 格子網을 생각하자.

가. 현재의 瞬間的인 海水面을 W.L이라 할 때 有限要素 (1)과 (2)는 總水深이 0보다 작기 때문에 計算에서 除外한다(Fig. 1에서 AA'선은 移動境界의 유한요소 격자망에서의 平面상 현재 위치이다.).

나. 격자점 2, 3, 12로 구성된 有限要素 (3)과 격자점 2, 12, 11로 構成된 有限要素 (4)는 計算에 사용된다. 그러나, 2, 3, 11, 12에서의 流速成分을 0으로, 2와 11에서의 海水面 變位를 0으로 지정한다.

다. 완전히 침수되어 있는 要素 (5)~(10)은 완전한 計算에 포함된다.

계산의 안정을 위하여 실제 계산에 있어서 침수와 노출의 한계를 0이 아닌 0에 가까운 값을 사용하였다 (본 연구에서는 10 cm).

3. 模型의 適用

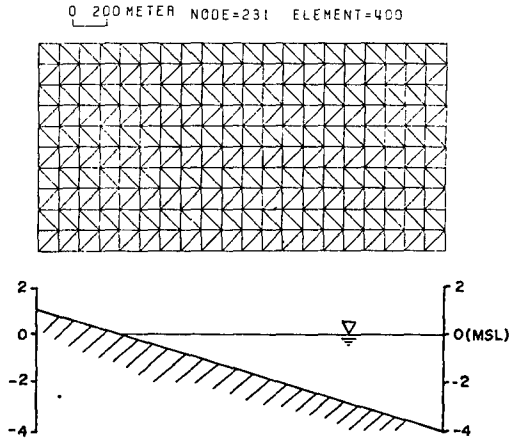

Fig. 2. Finite element grid system for a rectangular channel.

위와 같은 方法에 의하여 樹立된 模型은 1차적으로 直四角形의 한쪽면이 트인 水路에서 移動境界에 따른 模型의 反應을 檢討한 후에 全羅南道 海南郡과 珍島郡사이에 있는 馬路海에 適用하여 模型의 適用性을 立證하였다.

3.1 長方形水路

潮間帶를 考慮한 模型을 樹立하고 現場에 적용하기 以前에 Fig. 2와 같이 1.2 Km×2.4 Km 크기의 計算海域의 一部에 潮間帶를 갖는 한쪽(水路의 右側境界)이 열린 水路에 적용하여 潮間帶의 反應特性을 把握하였다. 計算時 格子間隔은 120m, 총절점수 231개, 총요소수 400개이다. 아랫그림은 平均海面으로 부터의 水路內의 水深分布이다. 平均海面을 기준으로한 수로내의 수심은 외해쪽(右側境界)은 4m , 陸地境界쪽(좌측境界)는 −1m로 하여 一定한 바닥경사로 주었다. 계산시 右側境界로부터 振幅 2m, 週期 10,000초의 潮汐波가 전파하는 경우에 대해 數値實驗을 하였으며, 이 경우 滿潮時 左側境界에서의 水深은 1m, 右側境界에서는 6m가 되어 全體海域이 물에 잠기며, 間潮時 左側境界에서 −3m, 右側境界에서 2m로 全體海域의 60%가 露出된다. 계산시 Coriolis 항은 無視하였으며, 계산시간간격(Δt)은 10초로 平均的으로 Δt동안 Δη=0.8 cm, 移動境界의 水平方向 平均移動距離(Δx)=4.8 m이며, 격자점간의 거리는 120m이다. Manning의

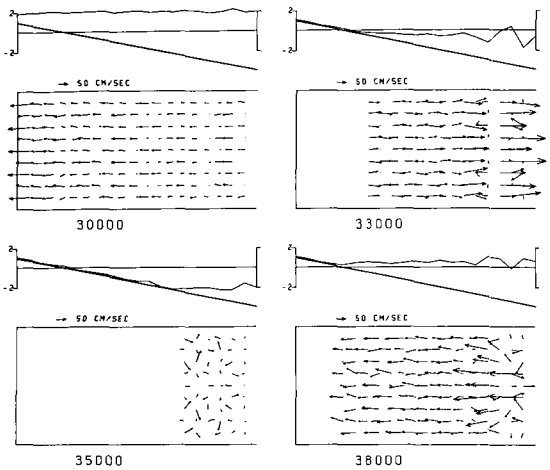

Fig. 3. Currents and water level calculated without eddy coefficient.

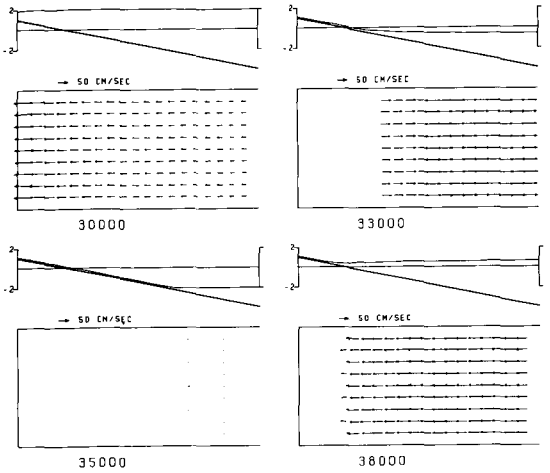

Fig. 4. Currents and water level calculated with eddy coefficient.

粗度係數는 0.03을 사용하였으며, 潮間帶 區分의 限界水深으로 10 cm를 사용하였다.

Figs. 3, 4는 3주기의 豫備計算後의 流速 및 水位分布圖로써 그림하단의 숫자는 計算始作時間(0)으로부터의 經過時間(초)을, 아랫그림은 流速分布를, 윗그림은 平均海面으로부터의 海水面變位(단위 : m)를 나타내며, 그림에서 굵은 실선으로 표시된 것은 수로바닥을 나타낸다. 계산결과의 流速分布圖에서 流速벡타가 도시되지 않은 부분은 潮間帶로 露出된 海域이다.

Fig. 3은 運動量 擴散係數를 無視하였을 경우의 계산결과로 全般的으로 不安定한 모습을 보이며, Fig. 4는 運動量 擴散係數로 20 m^2/sec를 사용하고 2段階陽解法의 每 計算段階마다 潮間帶處理를 고려하여 계산한 결과로 移動境界附近의 약간의 不安定을 제외하고는 전반적으로 安定하였다. 潮間帶區分의 限界水深으로 앞서의 계산에서 사용한 값(10 cm)보다 5배 작은 2 cm를 사용하여 계산한 결과도 Fig. 4의 結果와 비교할 때, 뚜렷한 差異를 발견할 수 없었다. 이 외에 模型의 敏感度 分析中 潮間帶처리를 매 계산시각마다 하지않고 5Δt, 10Δt, 50Δt마다 수행하였는 데, 계산결과는 5Δt와 10Δt마다 潮間帶를 처리한 경우는 안정하였으나 50Δt마다 潮間帶를 處理한 경우는 不安定한 모습을 보여 1주기 계산후에 발산하였다. 安定된 경우의 計算結果들은 Δt마다 潮間帶를 처리한 경우와 비교시 뚜렷한 계산결과의 差異를 보이지 않았다. 5Δt, 10Δt, 50Δt에 대해 각각의 潮間帶處理 時間間隔마다 平均的인 潮位의 變化는 4 cm, 8 cm, 40 cm로 限界水深 2 cm보다 크며, Δx는 각각 24m, 48m, 240 m로 Δx가 格子間隔의 2배에 해당하는 50Δt의 경우에만 발산하였다.

이상과 같은 계산결과로 볼 때, 潮間帶處理를 매번 수행하는 것보다는 Δx가 格子間隔을 超過하지 않는 範圍內에서 潮間帶를 處理하는 것이 效率的으로 判斷된다.

3.2 馬路海의 潮流計算

위의 과정을 거쳐 수립된 潮間帶를 고려한 数値模型은 울돌목을 포함하는 마로해에서의 潮汐에 의한 海水流動의 糾明 및 庫千岩 防潮堤의 建設로 인한 海水流動의 變化를 推定하기 위하여 사용되었다. 本 研究에서는 防潮堤建設에 따른 研究海域에서의 潮流變化의 分布를 파악하는 동시에 防潮堤 建設로 인한 潮間帶영역 및 潮間帶에서의 조류변화를 규명하고자 한다.

Fig. 5는 潮汐計算을 위해 構成된 有限要素 格子網으로 最小 格子間隔은 울돌목에서 150m, 最大 格子間隔은 계산해역의 남측 開境界附近에서 1,200m이며, 總要素數는 2186개, 總節點數는 1,337개이다. 計算領域內의 水深分布(Fig. 6)를 보면, 中心水路는 計算領域의 南側境界의 右側에서 시작하여 상마도 南側에서 分岐되어 右側水路는 고천암 防潮堤에 連結되며, 西

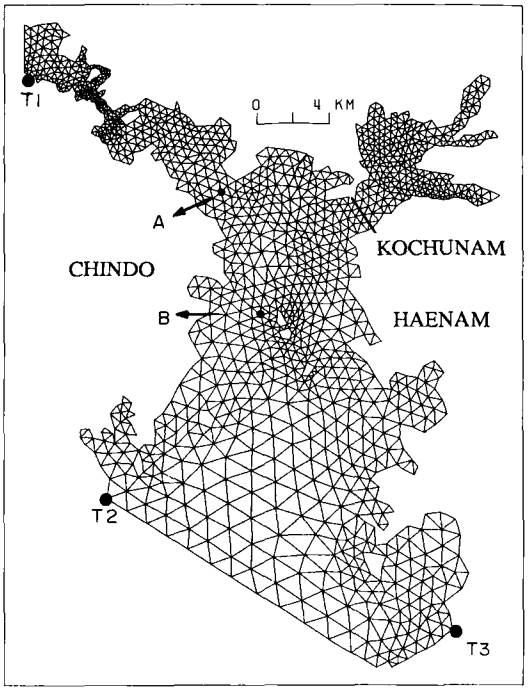

Fig. 5. Finite element grid system for Maro Hae and Uldolmok.

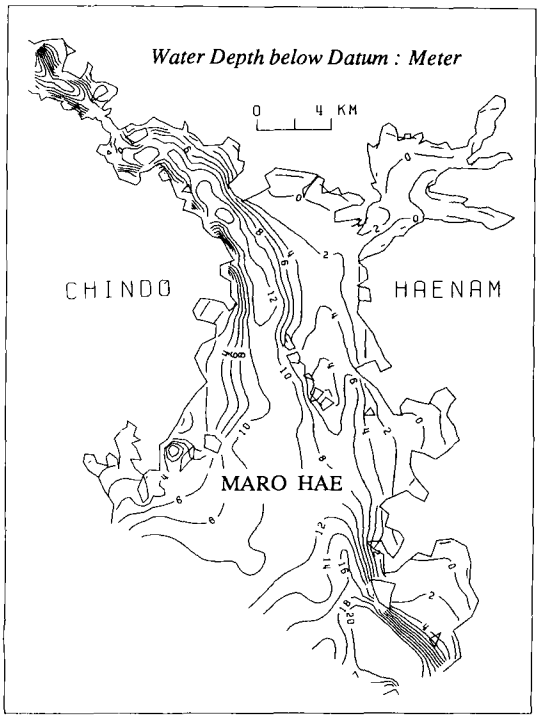

Fig. 6. Bathymetry for Maro Hae and Uldolmok.

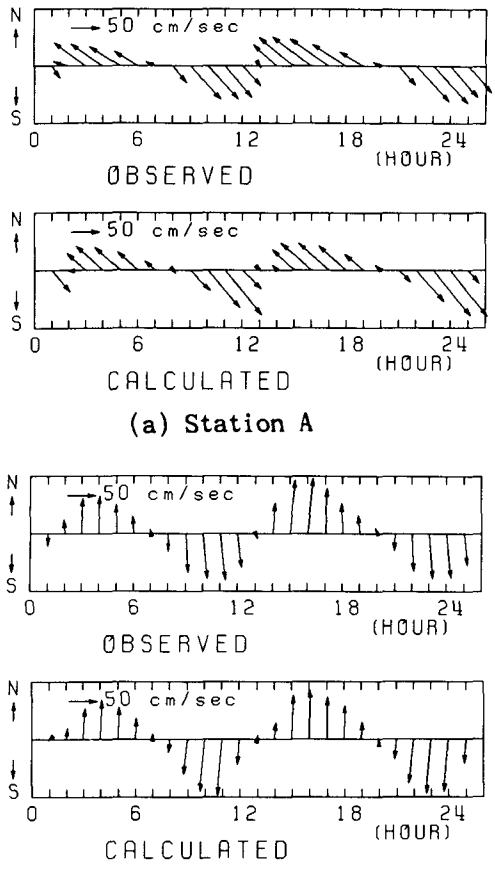

Fig. 7. Comparison of observed and calculated currents during spring tide.

側水路는 계산영역의 北西側境界에 위치한 울돌목(명량수도)으로 연결된다. 數値模型의 계산시간간격은 計算安定條件(CFL 條件)을 滿足하도록 8초가 사용되었으며, Manning 의 粗度係數 0.03, 水平 運動量 擴散係數 50 m^2/sec가 사용되었다. 계산시 潮間帶處理는 3Δt마다 수행하였다.

계산시 外力으로는 5個分潮(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)의 합성조석이 使用되어 전체조석의 약 95%를 대표하며, 開境界에서의 각 分潮의 振幅과 位相은 海洋研究所(1986)의 觀測資料(T_1)와 T_2, T_3에서 관측한 潮汐資料(관측기간 : 1990. 11. 11～1990. 12. 14)의 調和分析結果(海洋研究所, 1991)가 이용되었다.

模型適用은 두 가지의 現場狀況에 대하여 遂行되었다. Fig. 5 우상단의 굵은 실선으로 표시된 위치에

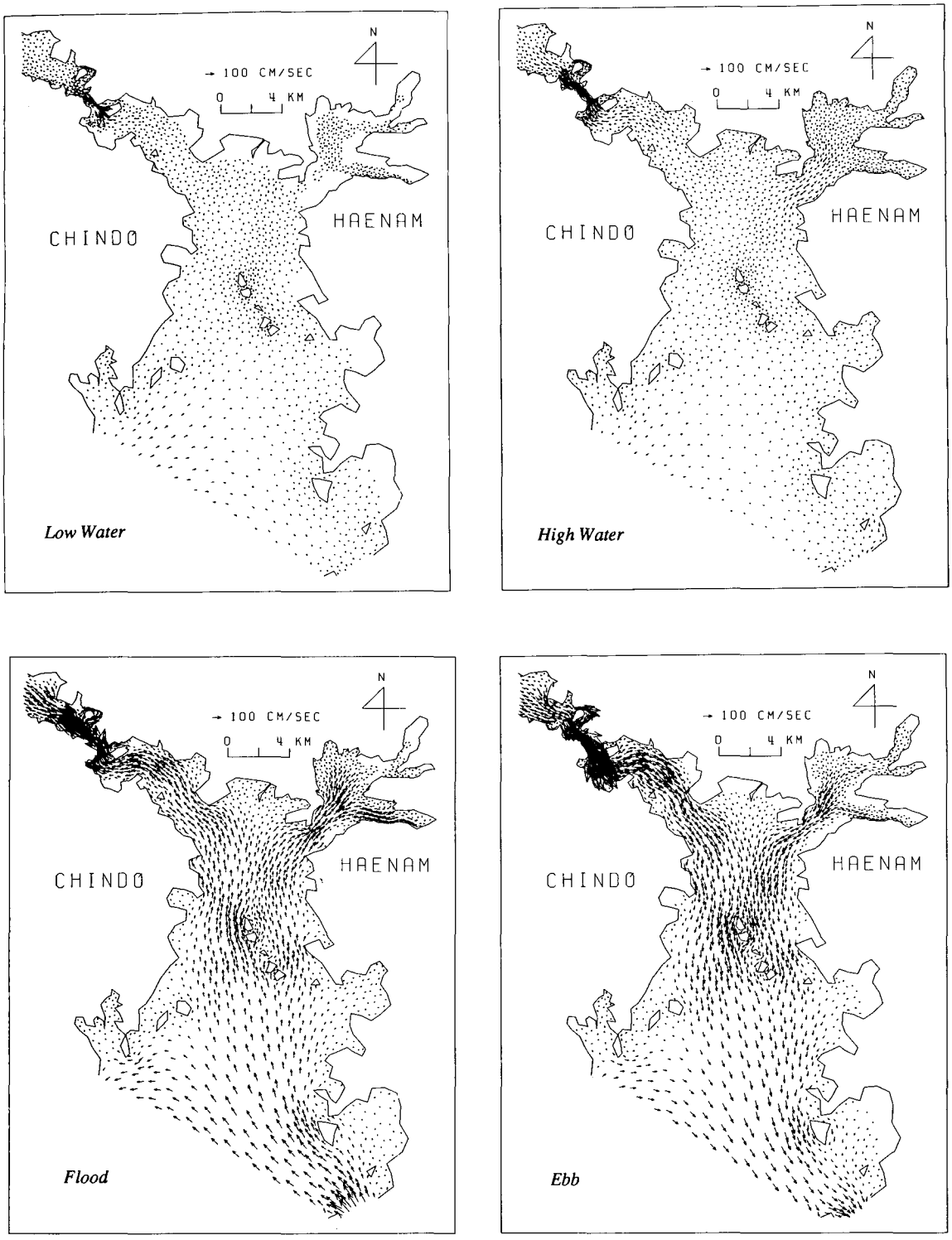

Fig. 8. Tidal current distribution of Maro Hae during spring tide before construction of the sea-dyke.

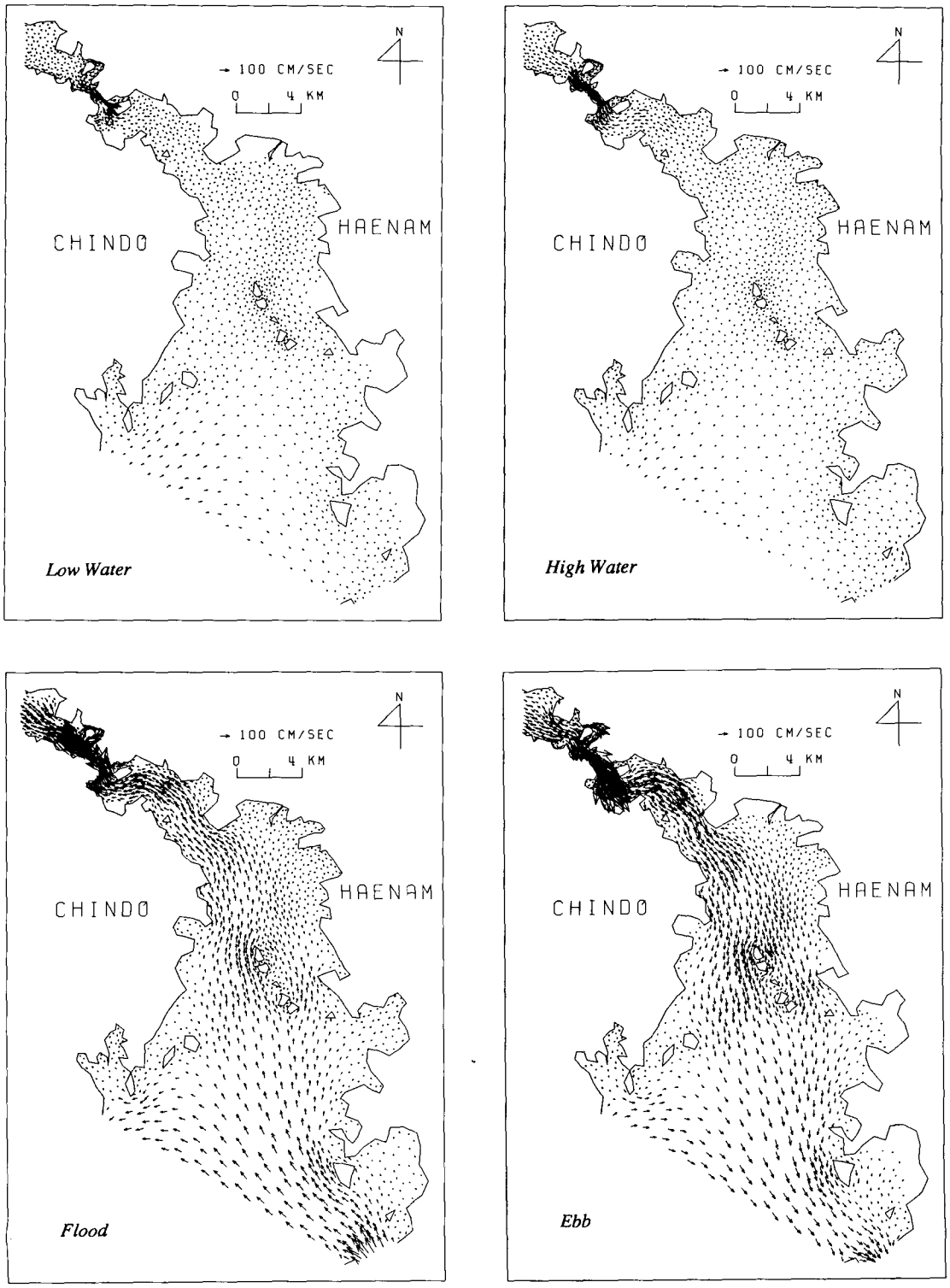

Fig. 9. Tidal current distribution of Maro Hae during spring tide after construction of the sea-dyke.

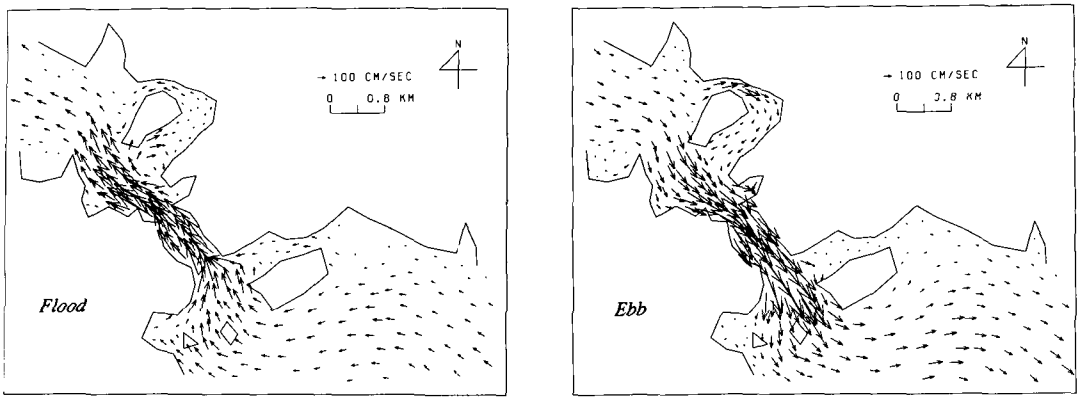

Fig. 10. Tidal current distribution near Uldolmok during spring tide.

庫千岩 防潮堤를 建設하기 前과 後에 대하여 遂行되었으며, 庫千岩 防潮堤는 1985～1888의 4개년에 걸쳐 完成된 총 길이 1,874m의 干拓農地 開發計劃의 一環으로 실시된 全羅南道 海南郡 소재의 防潮堤로, 流域面積은 18,130 ha이다(農業振興公社, 1985).

Fig. 7은 RCM-7 流速計를 사용하여 大潮期에 中層에서 觀測한 A, B(Fig. 5) 지점에서의 觀測値(해양연구소, 1991)와 數値模型에 의하여 계산된 결과를 비교한 것으로 計算値가 流速과 流向 모두 觀測値와 잘 일치하고 있다.

Fig. 8은 庫千岩 防潮堤 建設前, Fig. 9는 防潮堤 建設後의 大潮期 漲潮, 落潮, 高潮, 低潮時의 流速分布圖이다. Fig. 8에 의하면 低潮時 防潮堤 북서측 해역이 大部分 露出되고, 高潮時 全海域이 물에 잠긴다. 이러한 潮時에 따른 潮間帶 分布는 Fig. 6의 水深分布와 一致하며, 移動境界附近에서 流速場의 어떤 不安定性이 나타나지 않아 數値模型은 安定的으로 潮間帶를 處理하였다. 防潮堤 建設前, 後의 結果를 比較하여 보면, 방조제 建設에 의한 흐름의 遮斷으로 防潮堤 附近에서 流速과 流向이 急激히 變化하였음을 알 수 있다. Fig. 9의 고조시와 저조시의 결과를 보면, 대부분의 해역이 憩流에 도달하였을 때에도 울돌목에서는 강한 慣性力에 의하여 憩流에 도달하지 못하고 강한 조류가 흐르고 있다. Fig. 10은 防潮堤 建設後의 울돌목부근을 擴大圖示한 流速分布圖로 數値模型이 最大 5.8 m/sec(珍島連陸橋 남측수로에서 낙조시)의 강한 流速을 재현함으로써, 관측치(韓國海洋研究所, 1986)와 일치하는 양호한 결과를 보였다. 계산결과에

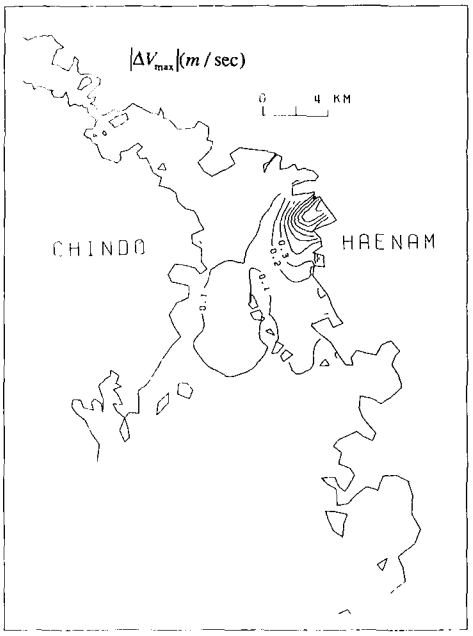

Fig. 11. Variation of tidal currents due to construction of the sea-dyke.

의하면, 珍島連陸橋 아래에서의 最强潮流는 漲潮流 약 4.0 m/sec, 落潮流 약 4.5 m/sec로 落潮流가 약간 우세하였다. Fig. 11은 防潮堤 建設前, 後 最强流速의 變化을 도시한 것으로 방조제에 의한 수로의 차단에 의한 영향이 방조제로부터 약 10 Km 떨어진 상마도 서측해역까지 流速을 10 cm/sec 이상 변화시켰음을 나타낸다.

4. 結論 및 討議

潮間帶를 처리할 수 있는 有限要素法을 數値計算方法으로 사용하는 2次元 海水流動 數値模型을 수립하였으며, 수립된 模型의 潮間帶 處理特性을 直四角形水路에서 調査하고, 最强流速이 약 5.8 m/sec에 달하는 울돌목을 포함하는 馬路海에서의 潮流計算에 適用하여 모형의 現場 適用性을 立證하였으며, 馬路海의 潮流分布를 庫千岩 防潮堤 建設前, 後에 대하여 調査하였다.

研究結果에 의하면 本 模型에서 사용한 潮間帶 處理技法은 計算海域內의 潮間帶를 비교적 잘 再現하였으며, 潮間帶 처리를 매 계산단계마다 행하는 것보다 潮間帶處理의 時間間隔동안 移動境界의 水平移動距離가 水平格子의 크기를 超過하지 않는 範圍內에서 適當한 間隔을 選擇하여 處理하는 것이 效率的이었다. 수립된 模型에 의하여 계산된 바에 의하면 珍島連陸橋에서의 潮流는 最大 4.5 m/sec이며, 落潮流가 漲潮流보다 약간 강한 것으로 나타났다. 또한 고천암 防潮堤 建設은 馬路海의 全般的인 潮流分布에 影響을 미쳐 약 10 Km 떨어진 해역까지 10 cm/sec 이상의 最强潮流를 變化시킨 것으로 나타났다.

本 研究에서는 有限要素法에 의해 발생되는 全體係行列을 變化시키지 않고 비교적 간단하게 潮間帶를 處理하였다. 이러한 方法은 대체적으로 安定된 結果를 보였으나 移動境界附近에서 약간의 不安定한 모습을 보였다. 따라서, 사용한 方法과는 다른 全體 係行列의 크기를 매 計算時間段階마다 再構成하여 潮間帶를 처리하는 方法과의 比較研究도 보다 安定的이고 正確한 潮間帶 處理技法의 導入을 위하여 必要하다고 하겠다.

謝 辭

本 研究는 韓國海洋研究所의 1991年度 基本研究費에 의하여 수행된 研究結果의 一部이며, 現場調査 및 資料整理에 도움을 주신 韓國海洋研究所의 김상익, 이종찬, 박영길, 박승준 氏에게 謝意를 표한다.

參考文獻

農業振興公社, 1985. 해남지구간척지종합개발사업 환경영향평가서.

鄭泰成, 李種贊, 1991. 동해남부해역의 조석계산, 한국해안·해양공학회지, 제 3권 제 4호: 29-37.

韓國海洋研究所, 1986. 한국해역 종합 해양자원도 작성연구, 해양연구소 BSPG 00030-119-7.

韓國海洋研究所, 1991. 해남지구 간척사업에 따른 해태양식어업권 소멸보상조사 보고서, 해양연구소 BSPI 00120-380-3.

Chung, T.J., 1978. Finite element analysis in fluid dynamics, McGraw-Hill, Inc.

Connor, J.J. and Wang, J.D., 1973. Finite-element modeling of two-dimensional hydrodynamic circulation, TR No. 172, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resources and Hydrodynamics, Dept. of Civil Eng., M.I.T.

Falconer, R.A., 1984. Temperature distributions in tidal flow field, *J. of Env. Eng.*, 110: 1099-1177.

Flather, R.A. and Heaps, N.S., 1975. Tidal computaions for Morecambe Bay, *Geophy. J.R. Astro. Soc.*, 42: 489-517.

Hasen, W., 1956. Theorie zur Berechnung des Wasserstan des und der Stromungen in Randmeeren nebst Anwedungen, Tellus, **8**: 287-300.

Kawahara, M., Hirano, H., Tsubota, K. and Inagaki, K., 1982. Selective lumping finite element method for shallow water flow, Int. *J. for Numer. Meth. in Fluids*, 2: 89-112.

Kawahara, M. and Umetsu, T., 1986. Finite element method for moving boundary problems in river flow, Int. *J. for Numer. Meth. in Fluids*, 6: 365-386.

Leendertse, J.J., 1967. Aspects of a computaional model for long period water-wave propagation, The Rand Corporation.

Lynch, D.R. and Gray, W.G., 1980. Finite element simulation of flow in deforming regions, *J. of Comp. Phys.*, 36: 135-153.

Spaulding, M.L., 1984. A vertically averaged circulation model using boundary-fitted coordinate, *J. of Phys. Oceano.*, 14: 973-982.

Stelling, G.S., 1984. On the construction of computaional methods for shallow water flow problems, Rijkswaterstatt Communications, The Hague, 226p.