

## 潮間帶 模擬를 위한 2차원 有限要素解析 Two-Dimensional Finite Element Analysis for Tidal Flat Simulation

徐承源\* · 朴原慶\*\*

Seung Won Suh\* and Won Kyong Park\*\*

**요 약:** 장파를 모의하는 2차원 유한요소 수동역학모형들은 대부분 고정육지경계를 사용하여 왔으나 우리나라의 서·남해안과 같이 조간대가 넓게 발달한 연안에서는 이동경계의 적용이 필수적이다. 본 연구에서는 이동경계 처리방법에 장파의 파형경사 특성을 고려한 새로운 수치기법을 도입하여 보다 효율적이고 현실적인 이동경계 처리방안을 제시하였다. 수립된 2단계 양해법 유한요소모형은 직선형수로에서 기존의 조간대 처리 연구결과와 비교되었으며 수치적인 안정성이 뛰어난 것으로 나타났다. 조간대가 광범위하게 형성된 천수만에 적용하여 실제해역에 대한 적용성을 입증하였다. 수치실험결과 천수만에서의 해수유동은 낙조시간이 창조시간 보다 긴 비선형성 조류흐름을 나타내며, 만족스럽게 조간대가 처리되었고 최강 창조시부터 고조시까지 지형적 요인에 의한 순환현상이 원산도 후면에서 재현되었다.

**Abstract** □ Two-dimensional finite element hydrodynamic models for long wave simulation usually adopt fixed land boundary. However moving boundary treatment is strongly required in the simulation of tidal flats for west and south coast of Korea. In this study very efficient and realistic moving boundary treatment is applied by considering incident long wave surface slope. Developed STEP-CM (Superior Two-step Explicit Program for Coastal Modeling) shows numerically stable results in comparative study for idealized one-dimensional channel. Real application of the model is done for Chonsu Bay where tidal flats are distributed along the coast. Nonlinear tidal current and tidal flat effects are easily simulated in STEP-CM and resulting circulations are detected around headland of Wonsan Island.

### 1. 서 론

우리나라의 서해안 및 남해안은 도서가 산재해 있고 지형이 복잡하며 조석의 간만의 차가 크게 나타나 연안을 따라 조간대가 폭넓게 형성되어 있다. 이와 같은 실제해역에 조석수치모형을 적용함에 있어 불규칙한 지형 및 수심을 용이하게 표현할 수 있는 유한요소법을 이용한 해석이 폭넓게 이용되고 있다. 그러나 대부분의 유한요소모형들이 코도화의 복잡함으로 고정육지경계를 적용하고 있고, 이동경계의 처리에 있어서 유한차분법을 이용한 해석이 널리 사용되고 있다. 그러나 우리나라와 같이 해안선이 복잡한 해역에서의 모

다 상세한 조류해석을 위해서는 이동경계 처리가 고려된 유한요소모형의 적용이 필수적이다.

장파를 모의하는 2차원 수동역학모형들에 있어서 이동경계를 적절히 모의하기 위해 현재 가장 널리 이용되는 방법은 유한차분법으로 staggered grid system을 이용하여 비교적 정확하게 시간에 따라 변화하는 해수유동현상을 계산하여 왔다(Yeh와 Chou, 1979; Choi, 1980b). 그러나 최근에는 비정규격자망을 이용하여 광역과 협역의 동시성을 만족할 수 있고 불규칙한 지형과 수심의 변화를 용이하게 표현할 수 있는 유한요소법에 이동경계의 처리를 고려하고자 연구가 진

\*군산대학교 공과대학 해양공학과 (Department of Ocean Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Chonbuk, Korea)

\*\*군산대학교 산업대학원 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Chonbuk, Korea)

한요소법에 이동경계의 처리를 고려하고자 연구가 진행되어 왔다. 이와 같은 노력으로 현재 유한요소법에서 이동경계를 처리하기 위해 사용되는 방법은 크게 두 가지로 대별된다. 첫째로 mesh adaptation 알고리즘(Gopalakrishnan와 Tung, 1983; Gopalakrishnan, 1988)을 사용하는 방법과 둘째로 mesh reduction 알고리즘(Kawahara와 Umetsu, 1986; King과 Roig, 1988; Roig와 Evans, 1994; Bates 등, 1995)을 이용하는 방법이 있다. 첫번째 방법은 시간에 따라 변화하는 영역을 격자를 이동시키거나 생성시킴으로써 이동경계의 위치를 비교적 정확하게 표현하지만 계산영역이 변화되므로 매시간단계마다 새로운 계산격자를 구성해야하는 계산상의 비효율성과 수치적으로 불안정할 수 있는 문제를 갖고 있다. 두번째 방법은 고정된 유한요소 격자망에서 육지경계를 그대로 이용하면서 시간에 따라 변화되는 침수선을 이동시키는 적절한 수치적 기법을 통해 모의하는 방법으로 가장 널리 이용되고 있으며, 이는 알고리즘의 간략함과 계산의 효율성 및 안정성, 후처리의 편리함 등 많은 장점을 가지고 있기 때문이다. 그러나 적용되는 수치적 기법과 가정들에 있어서 질량보존이 완전히 만족되지 않는 등 물리적인 뒷받침이 다소 부족함이 문제시되고 있다. Kawahara와 Umetsu(1986)는 하천에서 하천유량의 시간변화에 따라 하천 폭이 변하는 이동경계문제를 격자의 변동 없이 침수와 노출되는 영역을 구별하여 계산하는 방법으로 해결하였으며, 국내에서는 정과 김(1992)이 이와 같은 방법으로 우리나라 남해안의 마로해에 적용하여 발표한 바 있다. King과 Roig(1988)와 Roig와 Evans(1994)는 element volume coefficient를 도입하여 해수면 변위 또는 수심을 임의로 변화시켜가며 노출영역을 처리하는 방법을 제시하였으며 RMA2 모형(King, 1992)에 이를 적용하였다. Bates 등(1995)은 부분적으로 침수된 요소의 계산에서 노출된 절점의 수표면 변위값에 일정한 관계식을 도입하는 방법을 제시하였으며 TELEMAC-2D 모형에 이를 적용하였다. 이동경계 처리에 있어 서로 다른 방법을 적용하고 있는 RMA2 모형과 TELEMAC-2D 모형이 실제하천에 적용되어 비교 연구되었다(Bates 등, 1995). RMA2 모형은 본 연구의 대상영역인 천수만에 적용된 바 있으나(서·박, 1995, 1996) 이동경계를 고려한 해석은 이루어지지 않았다. 또한 천수만에서의 유한요소모형 비교연구성과(서·박, 1996)를 요약하면 시간진행모형이 천수만 내

의 비선형성 조류흐름을 잘 묘사하였으며 민감도 분석 결과 와점성계수에 대해 기존연구에 적용된 모형(서, 1989a, b)은 둔감하였으나 RMA2 모형은 매우 민감하게 작용하였으며 수치적인 안정성이 결여된 결과를 나타내는 등 몇 가지 문제점이 제시된 바 있다.

본 연구에서는 조건대 처리를 고려하여 2차원 수심적분의 유한요소모형인 STEP-CM(Superior Two-step Explicit Program for Coastal Modeling)을 수립하였다. 조건대 처리를 위해 제시된 방법은 Kawahara와 Umetsu(1986)의 접근방법과 유사하지만 조석 모의시에 장과의 특성을 고려한 파형경사를 계산에 도입함으로써 보다 효율적이고 현실적인 이동경계의 처리방안을 마련하였다. 정립된 모형은 조건대를 갖는 1차원의 장방형수로에 적용하여 정·김(1992)의 결과와의 비교·검토가 이루어졌다. 실제적용은 충남 서해 중부 연안역의 북동쪽에 위치한 천수만에 적용하여 관측자료와 비교·검증되었다.

## 2. 유한요소법을 이용한 수동역학모형

### 2.1 모형의 기본이론

본 모형은 연안의 수동역학해석을 위해 2차원의 수심 평균화된 연속방정식과 운동량방정식을 지배방정식으로 하며 시간에 대해 수치적분하는 시간진행 유한요소모형이다. 시간적분방법으로는 Kawahara(1982)가 제안하였던 양해법의 하나인 2단계 Lax-Wendroff 방법을 이용하며, 질량집중행렬(lumped mass matrix)의 개념을 도입하여 행렬의 계산이 필요치 않은 계산수행의 효율성을 향상시킨 모형이다. 보간함수로는  $C^0$  연속성을 만족하는 선형보간함수를 사용하며 요소의 구성은 3점 3각형 요소를 이용한다.

### 2.2 지배방정식

본 연구에서 적용된 모형의 지배방정식은 3차원 연속방정식과 Navier-Stokes 운동량방정식으로부터 수심방향에 관하여 적분함으로써 유도된다. 고려되어지는 가정으로는 해수의 밀도와 해면에서의 압력은 일정하고 정수압 분포가 성립한다. 이로부터 유도된 2차원의 수심평균화된 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial x} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - f v + \tau_x u = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial y} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f u + \tau_y v = 0 \quad (3)$$

여기서  $H = \eta + h$ 로 표현되고  $\eta$ 는 수표면 변위 [L],  $h$ 는 기준면으로부터 해저면까지의 수심 [L]을 나타낸다.  $u, v$ 는 각각  $x, y$  방향의 수심평균을 취한 평균유속 [L/T],  $t$ 는 시간 [T],  $g$ 는 중력가속도 [L/T<sup>2</sup>],  $\varepsilon$ 는 와점성 계수 [L<sup>2</sup>/T],  $f$ 는 Coriolis 계수 [T<sup>-1</sup>]를 나타내고, 해저마찰응력 [T<sup>-1</sup>]으로서 다음과 같이 표현하고

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{4/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (4)$$

$n$ 은 Manning의 조도계수를 나타낸다. 본 연구에서는 바람에 의한 영향을 고려하지 않는다.

### 2.3 유한요소식

식 (1)~(3)으로 표현된 지배방정식에 3점 3각형 요소를 이용한 Galerkin의 가중잔차방법을 적용하는데 식 (1)~(3)에 포함된 미지치인  $\eta, u, v$ 에 대한 근사해를 공간에 대한 선형보간함수  $\phi_a$ 를 도입하여 식 (4)로 표현한다. 그리고 지배방정식에 대한 가중함수를 식 (5)와 같이 나타내고 식 (4)의 근사해를 지배방정식에 대입하여 생성되는 잔차를 최소화시키기 위해 식 (5)의 가중함수와 잔차와의 내적을 0으로 취하게 된다.

$$\eta = \Phi_a \eta_a \quad (5a)$$

$$u = \Phi_a u_a \quad (5b)$$

$$v = \Phi_a v_a \quad (5c)$$

$$\eta^* = \Phi_a \eta_a^* \quad (6a)$$

$$u^* = \Phi_a u_a^* \quad (6b)$$

$$v^* = \Phi_a v_a^* \quad (6c)$$

여기서  $\eta_a, u_a, v_a$ 는 유한요소중  $a$ 번째 절점에서의 수위와  $x, y$ 방향의 평균유속이며,  $\eta_a^*, u_a^*, v_a^*$ 는  $a$ 번째 절점에 대한 가중함수값을 나타낸다.

따라서 지배방정식에 가중함수  $\eta^*, u^*, v^*$ 를 취하여 적분을 하여 정리하면 식 (6)~(8)과 같은 가중잔차

방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_A \left[ \eta^* \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} \right\} \right] dA = 0 \quad (7)$$

$$\int_A \left[ u^* \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial x} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - f v + \tau_x u \right\} \right] dA = 0 \quad (8)$$

$$\int_A \left[ v^* \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial y} - \varepsilon \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f u + \tau_y v \right\} \right] dA = 0 \quad (9)$$

상기식 (7)~(9)로 구성된 가중잔차식내의 변수들은  $C^0$  연속성을 만족하는 함수로 다음과 같이 근사화 되어진다. 우선 식 (7)~(9)에 포함된 유효전단응력항의 2계 편미분에 대한 적분을 Green 정리를 이용하여 선적분 형태로 바꾸고 식 (5)~(6)로 표현된 근사식을 식 (7)~(9)의 가중잔차식에 대입한 후, 가중함수인  $\eta^*, u^*, v^*$ 의 임의성을 고려하여 전영역에 관하여 조합하면 다음의 유한요소식을 얻게된다(서, 1989a).

$$M_{\alpha\beta} \dot{U}_\beta = X_\beta$$

여기서  $U_\beta$ 는 미지치인  $\eta, u, v$ 를 대표하고 좌변의  $M_{\alpha\beta}$ 는 질량행렬, 우변의  $X_\beta$ 는 시간적분항 이외의 나머지 항들을 대표한다.

식 (10)과 같이 시간적분이 포함된 방정식을 풀기 위해 양해법인 2단계 Lax-Wendroff 방법을 이용하고 질량집중행렬의 개념을 이용하여 임의의 시간단계  $n$ 과  $n+1$  사이의 시간적분을 취하면 다음과 같은 2단계로 표현된다.

$$L_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1/2} = M_{\alpha\beta} U_\beta^n - \Delta t / 2 X_\beta^n \quad (11)$$

$$L_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1} = M_{\alpha\beta} U_\beta^n - \Delta t X_\beta^{n+1/2} \quad (12)$$

여기서  $\Delta t$ 는 적분하는 시간간격이고  $L_{\alpha\beta}$ 는 질량행렬  $M_{\alpha\beta}$ 의 질량집중행렬을 나타낸다. 이때 시간간격  $\Delta t$ 는 식 (13)의 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 안정조건에 지배된다.

$$\Delta t \geq \frac{\Delta x}{\sqrt{2} g h} \quad (13)$$

여기서  $\Delta x$ 는 유한요소격자의 가장 짧은 변의 길이이다.

### 3. 조간대 처리

#### 3.1 조간대 처리방법

본 연구에서의 조간대 처리는 침수와 노출에 따른 이동경계의 결정에 있어서 조석이 일정한 기울기를 가지고 진행됨에 착안하여 노출된 절점이 다시 침수되는 자연적 현상을 장파인 조석입사파의 파형경사를 계산함으로써 처리하는 수치기법을 도입하였다.

##### 3.1.1 이동경계의 결정

조간대 처리에 있어서 침수와 노출의 경계 및 한계를 정확히 하는 것은 매우 중요하다. 특히 부분적으로 노출된 요소에서의 이동경계 결정은 주요 문제로 나타난다. 본 모형에서 사용된 방법은 다음과 같다.

1) 우선 계산상의 효율을 높이기 위하여 전체대상영역에서 조간대에 있는 요소들을 저장하며, 차후 이 요소들에 대해서만 노출과 침수를 판단한다.

2) 계산영역에서 계산절점이 노출되었는지 침수되었는지를 총수심에 의하여 판단한다. 즉,  $H \leq 0$ 이면 노출로 간주하고,  $H > 0$ 이면 침수된 것으로 간주한다.

3) 계산 유한요소가 침수되었는지 노출되었는지를 조사한다. 본 계산에 있어서 사용된 유한요소는 3점 3각형 요소로써 3개의 절점에 대하여 검사하였다. 각 요소의 절점중에 2개 이상이 노출된 경우는 완전히 노출된 것으로 간주하고 계산에서 제외하였다.

4) 어느 요소가 육지와 해수 사이의 경계에 있는지를 결정한다. 계산요소의 절점중에 1절점만이 노출되어 있는 경우는 노출 절점이 경계위에 놓여 있는 것으로 보아 노출된 1절점에서의 총수심을 0으로, 그 요소의 각절점에서의 유속성분을 0으로 지정하였다. 노출되지 않은 나머지 2개 절점의 수표면 변위는 계산에 포함된다.

5) 상기 과정에 의하여 새로운 계산경계가 정의되며, 새로 정의된 경계 및 경계조건에 대하여 새로운 시간단계에서 계산을 진행한다.

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

##### 3.1.2 재침수 처리

상기 기술된 방법에 따라 노출된 영역이 다시 침수

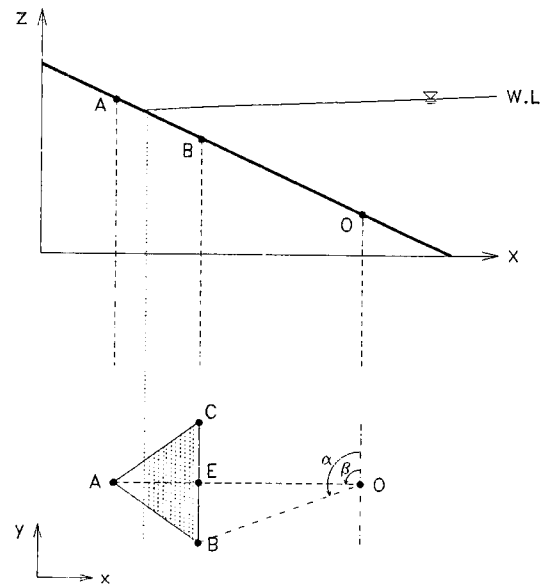


Fig. 1. Schematic illustration of wet treatment.

되는 과정을 기존의 방법들은 부분적으로 노출되어 있는 요소를 계산에 포함시킴으로써 요소 내에서의 수치적인 계산에 의해 처리되도록 하였다. 그러나 이는 노출된 절점에 적용되는 많은 가정으로 인해 수치적인 불안정성을 나타낼 수 있다. 따라서 보다 현실적이고 자연현상에 근접할 수 있는 접근방법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 조석파가 입사할 때 일정한 장파의 기울기를 가지고 들어오고 나가는 것에 착안하여 대상영역에 유출입되는 조석의 기울기를 산정한 후 노출절점에 대한 침수를 계산하였다. 상세한 계산방법은 다음과 같다.

1) 우선 수면의 기울기를 계산하기 위해서 대상영역 내의 노출되지 않는 기준이 되는 절점들을 선정한다 (Fig. 1).

2) 기울기의 계산은 1개의 절점만이 노출된 요소에 적용되며 노출되지 않은 나머지 2개의 절점과 선정된 기준 절점과의 수표면 변위관계로부터 구하여진다. 따라서 2차원적인 해석에 있어서 해수면 기울기의 방향성은 각기 다른 위치의 3절점으로부터 충분히 고려된다. Fig. 1은 기울기가 계산되는 과정을 나타낸다.

여기서 절점 A, B, C 중 절점 A는 전시간 단계에서 노출된 절점이며, 절점 O는 조석의 기울기 산정을 위한 임의의 reference 절점이다. 윗그림은 조석이 밀려 들어오기 시작하는 현재의 해수면 상태이며 아래 그림

은 평면상의 각 절점의 위치를 나타낸다.

우선 절점 A, B, C, O의 x-y 위치로부터 직선 BC와 AO의 직선방정식을 구하여 교차점 E의 위치를 구한다. 이를 일반적인 식으로 나타내면 식 (14)와 같다.

$$AC : y_1 = ax_1 + b \tag{14a}$$

$$BC : y_2 = a'x_2 + b' \quad (a, a'; \text{기울기}, b, b'; \text{절편값}) \tag{14b}$$

따라서 식 (14)에 표현된 두직선의 교차점 E의 위치는 식 (15)와 같이 결정된다.

$$x_E = -\frac{b - b'}{a - a'}, \quad y_E = -ax_E + b \tag{15}$$

다음 단계로 절점 B, C의 현재상태의 수표면 변위로부터 교차점 E에서의 선형보간된 수표면 변위를 구한다. 절점 B와 C의 수표면 변위차를  $\Delta\eta_{bc} = \eta_c - \eta_b$ 라 하면, 절점거리 BE와 BC로부터 절점 E의 수표면 변위는 식 (16)과 같다.

$$\eta_e = \eta_b \pm \frac{\Delta\eta_{bc} \overline{BE}}{\overline{BC}}, \quad (\alpha < \beta \text{이면 } \oplus, \alpha > \beta \text{이면 } \ominus) \tag{16}$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각  $\overline{BO}$ 와  $\overline{AC}$ 가 x 또는 y축과 이루는 각으로 입위의 정점 E에서의 수표면 변위의 증감을 판단한다.

이로써 선분  $\overline{AEC}$  선상의 비례 관계식으로부터 노출점 A의 수표면 변위 ( $\eta_a$ )가 구해진다. 절점 O와 E의 수표면 변위차를  $\Delta\eta_{oe} = \eta_e - \eta_o$ 라 하면, 절점거리  $\overline{AC}$ 와  $\overline{EC}$ 로부터 최종적인 노출점 A의 수표면 변위는 식 (17)과 같다.

$$\eta_a = \eta_o + \frac{\Delta\eta_{oe} \overline{AO}}{\overline{EO}} \tag{17}$$

3) 상기 과정에 의하여 계산되어진 노출된 절점의 새로운 수표면 변위는 rewet되는 조건 즉, 절점 A의 총수심  $H_a = h_o + \eta_a > 0$ 인 조건을 만족할 때만 최종적으로 입력되어진다.

4) 상기 과정으로부터 새로운 계산영역이 결정되면 다음 시간단계의 계산을 수행한다.

### 3.2 모형의 검증

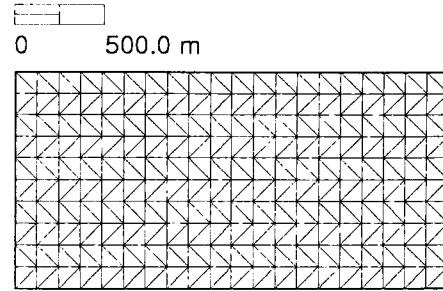


Fig. 2. Finite element idealization of rectangular channel for model tests.

정립된 이동경계에 따른 수치해의 반응을 검토하고 모형의 타당성을 평가하기 위하여 조간대 처리에 대한 기존의 연구성과인 정·김(1992)의 장방형수로에서의 모형결과와 비교를 하였다.

#### 3.2.1 일차원 수로

장방형수로는 Fig. 2와 같이 1.2 km × 2.4 km의 크기의 계산해역 좌측 일부에 조간대를 갖으며 우측경계가 개방된 폐쇄만의 형상이다. 대상영역의 이산화는 격자간격을 120 m, 총절점수와 요소수를 각각 231개 및 400개로 구성하였다. 본 수로에서 장파의 파형경사를 계산하기 위한 기준절점으로 1개의 노출되지 않는 절점을 선정하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 아랫그림은 평균해면을 기준으로한 대상해역의 수심분포를 나타낸다. 이와 같은 수로의 우측개방경계에 진폭 2m, 주기 10,000초의 장파가 전파하는 경우에 대해 수치실험 하였다. 수치실험시 계산시간간격은 10초, Manning의 조도계수는 0.03을 사용하였다. 계산시 Coriolis항은 무시하였으며 노출과 침수의 한계수심으로 10 cm를 사용하였다.

#### 3.2.2 모형의 결과분석

조간대를 갖는 장방형수로에 대한 모형의 적용결과를 특성시간대(고조, 낙조, 저조, 장조시)에서의 계산된 수표면 변위와 그때의 유속벡터도모써 Fig. 3, 4에 나타내었다. 이를 정·김(1992)의 결과와 비교·고찰해보면 다음과 같다. Fig. 3은 와점성계수를 무시하였을 경우의 결과로 정과 김(1992)은 그들의 모형에서 수치적인 불안정성을 와점성계수를 이용하여 처리하였으나 본

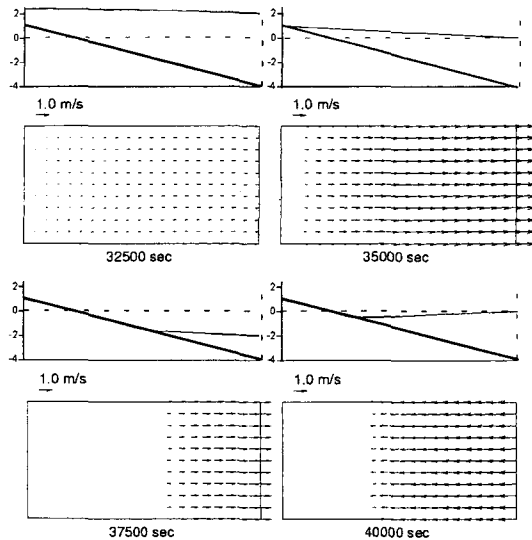


Fig. 3. Currents and water level without eddy viscosity coefficient.

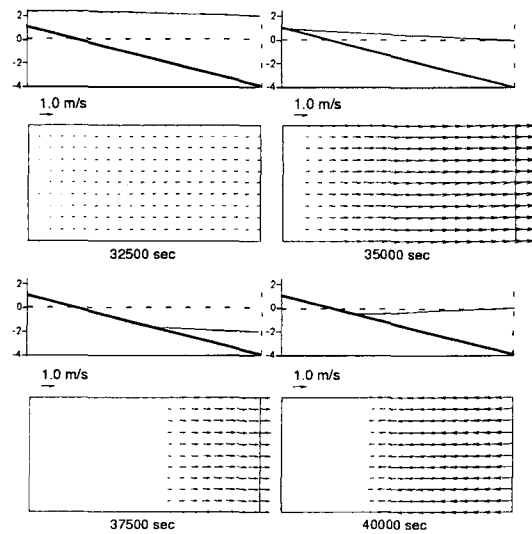


Fig. 4. Currents and water level with eddy viscosity coefficient ( $20 \text{ m}^2/\text{sec}$ ).

모형에서는 이러한 수치적인 조정 없이도 매우 안정적인 결과를 나타냈다. Fig. 4는 와점성계수로  $20 \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 사용하여 계산하였을 때의 결과로 이동경계 부근에서 크게 나타났던 유속은 볼 수 없으며, 전체적으로 폐쇄만 내의 해수유동을 잘 나타내고 있다. 또한 창·낙조시 만내의 수표면 변위를 살펴보면 일정한 기울기를 가지고 들어오고 나가는 현상을 볼 수가 있다.

이상과 같이 조간대 처리를 위해 정립된 본 모형은

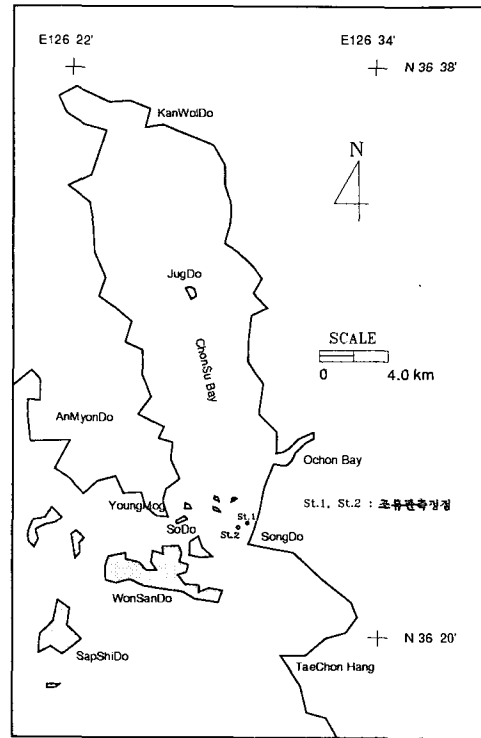


Fig. 5. Index map of Chonsu Bay for model application.

단순해역에 적용한 결과 자연현상에서의 이동경계를 물리적으로 만족스럽게 표현하고 있으며 수치적으로도 안정된 결과를 나타냈다.

#### 4. 천수만에서의 조석에 의한 해수유동

##### 4.1 대상해역

대상해역으로 선정된 천수만은 Fig. 5에 도시한 것과 같이  $126^{\circ} 20'E \sim 126^{\circ} 34'E$ 와  $36^{\circ} 20'N \sim 36^{\circ} 38'N$ 내에 위치하고 있다. 본 해역은 폐쇄만의 형상으로 만 입구부에 크고 작은 섬들이 밀집되어 있고 해저지형의 변화가 심하며, 병목현상이 뚜렷하게 나타나는 특징을 갖고 있다. 또한 대천항 부근 및 만내에 크고 작은 조간대를 포함한다.

대상해역에 대한 유한요소의 이산화는 Fig. 6과 같이 3점 3각형 요소를 이용하였으며, 개방경계로는 안면도 서측 신야리 부근과 비인항 북측을 잇는 선으로 취하였다. 이는 서·박(1995)의 연구에서 조류속 변화가 심하게 나타난 만 입구부로부터 개방경계를 외해로 취함으로써 개방경계에 대한 신뢰성을 높이고자

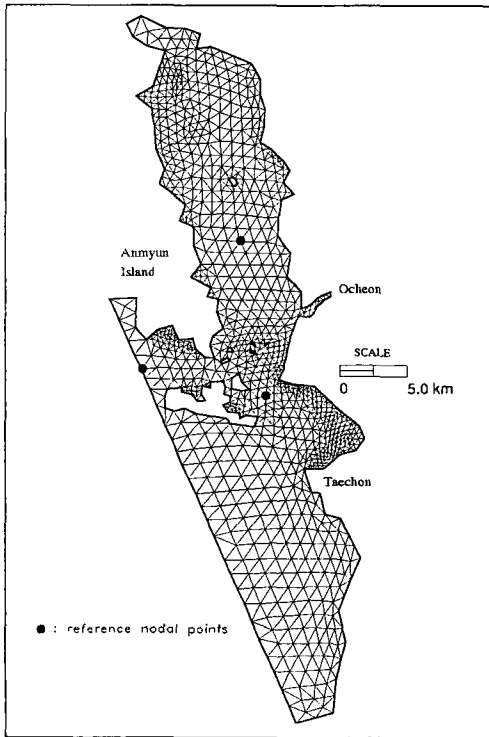


Fig. 6. Finite element meshes for Chonsu Bay.

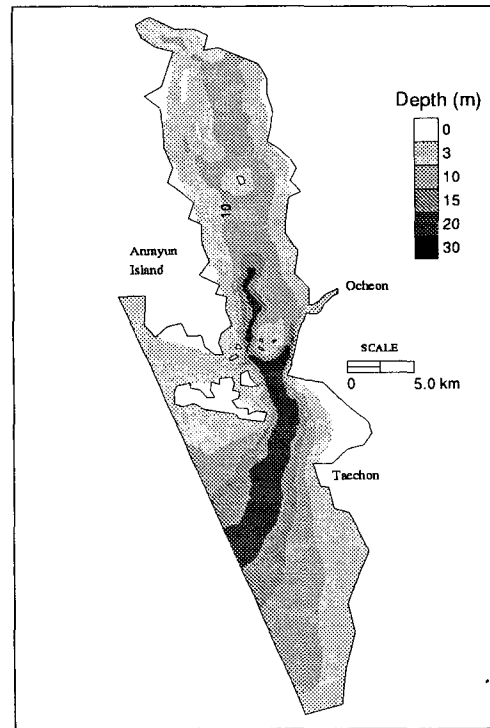


Fig. 7. Contour plot for Chonsu Bay.

하였다. 대상해역을 이산화하는 전처리 과정에 사용된 도구로는 PC용 프로그램인 TRIGRID(Henry and Walters, 1993)와 Workstation에서 작업할 수 있는 유한요소 편집기인 ACE/gredit(Turner and Baptista, 1992)를 이용하였다. 이산화시 총절점수와 요소수는 각각 1,016 및 1,778개로 이산화 하였으며, 구성된 요소의 최소 격자간격은 200m이고 최대는 2,000 m 정도로 요소의 모양은 가급적 정삼각형에 가깝도록 하였다.

#### 4.2 기본입력자료

대상해역의 불규칙한 해저지형을 묘사하기 위하여 교통부 수로국 간행 No. 302와 No. 322 해도로부터 digitizer를 이용하여 수심자료를 얻었으며, 얻어진 수심자료는 TRIGRID의 입력자료로 이용되어 요소의 이

산화시 각 절점에 대해 선형보간 되어진다. 이같이 입력된 수심자료는 평균해면하 수심으로 환산되어 Fig. 7과 같은 등수심도를 나타내고 있으며, 대상해역의 해저지형을 잘 묘사하고 있다.

개방경계에 고려된 조석의 분조는  $M_2$ 와  $S_2$ 이며, 본해역의 조석형태수 $[(K_1+O_1)/(M_2+S_2)]$ 는 0.21로 반일주조가 우세하다. 입력된 각 분조의 진폭 및 위상지체는 과거의 연구성과인 최(1980a) 및 기타 각종 목적으로 측정된 조석의 조화분해 자료를 이용하였으며 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 수치실험시의 계산시간 간격은 CFL 안정조건을 만족하도록 20초를 이용하였으며 개방경계에 취해진 각 분조들에 대해 5주기 이상의 계산수행을 하였다. Coriolis의 영향을 나타내기 위한 대상해역의 평균위도는  $36.5^\circ$ 로 고려하였으며, 해

Table 1. Open boundary tidal forcing (phase degrees are referenced to  $135^\circ E$ ).

Station	Constituents	Location		$M_2$		$S_2$	
		N( $36^\circ$ )	E( $126^\circ$ )	H(cm)	$\chi^\circ$	H(cm)	$\chi^\circ$
	Upper left	26'00"	20'00"	229.4	86.8	89.192.7	130.8
	Lower right	09'30"	30'00"	202.1	86.8		139.4

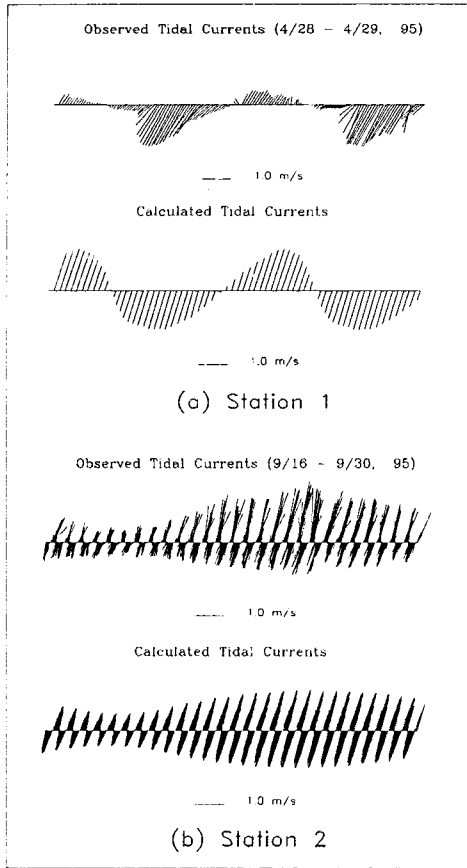


Fig. 8. Comparison of observed and calculated currents at reference points (St. 1 & St. 2 of Fig. 5).

저마찰응력을 나타내는 Manning의 조도계수는 0.03의 값을 입력하였다. 유효전단응력항의 와점성계수는 17.0m<sup>2</sup>/sec의 값을 입력하였다.

수치실험시 조간대 처리를 위한 침수와 노출의 한계는 10cm로 하였으며, 조석의 파형경사를 계산하기 위해 3개의 기준절점들을 선정하였다. 기준절점들의 위치는 Fig. 6에 격자망과 함께 도시되었다.

#### 4.3 수치실험결과 및 분석

실제해역에 적용된 모형의 검증은 Fig. 5와 같이 고정항 부근의 St.1, St.2 정점에서 Aanderra RCM-7 유속계를 사용한 95년 4월(1995. 4.28~29) 및 9월(1995. 9. 16~30)의 단기 및 장기 조류관측자료를 이용하였다. Fig. 8에는 각 정점에서 관측된 조류와 수치실험된 결과를 비교한 것으로 단기조류관측 지점인 St.1에서의 결과는 다소 편향되어 나타나 장기조류관측 결과와

는 비교적 잘 일치하고 있다.

전체해역에 대한 수치실험 결과를 대조시의 저조, 창조, 고조, 낙조 때를 특징적으로 선정하여 Fig. 9에 도시하였으며, Fig. 10에는 조간대를 포함한 주요 관심영역인 만 입구부를 확대하여 도시하였다. 이와 같은 수치실험결과를 요약하면 다음과 같다. 대조시 고정항 기준의 저조시에는 조간대의 대부분이 드러나며 남류성분을 가진 계류상태를 나타내다 전류되어 창조시에는 만내에 1.0m/s 내외, 만 입구에서 1.5m/s 내외의 강한 북류성분을 나타낸다. 최강 창조시 이후 고조전까지 원산도 부근에서 지형적인 headland에 의한 순환현상이 나타나며 고조시에는 미약한 북류성분을 가진 계류상태를 나타낸다. 낙조시에는 만내에 1.0m/s 미만, 만 입구에서 1.5m/s 내외의 남류특성을 이루며 대천항 부근의 조간대가 빠른 속도로 드러난다. 소조시에도 대조시와 마찬가지로 같은 경향을 나타내며, 유속의 크기만 감소된다. 또한 조석의 주기는 12시간 20분 정도로 낙조시간이 6시간 20분, 창조시간이 6시간 정도로 상대적으로 낙조시간이 20분 정도 길게 나타났으며 이는 관측된 조류 및 수로국 간행 조석표와 비교해 볼 때 천수만 내의 조석에 의한 비선형 해수유동특성을 매우 잘 표현하고 있는 것으로 수치 실험되었다.

## 5. 결 론

조석파와 같은 장파의 파형경사 특성을 이용한 유한요소법에서의 조간대 처리방법을 제안하였으며 이를 2차원 유한요소모형에 적용하였다. 수립된 모형의 검토를 위해 조간대 처리에 대한 기존의 연구성과인 정·김(1992)의 장방형수로에서의 모형결과와 비교하였다. 비교결과 본 모형은 수치적인 조정 없이도 매우 안정적인 결과를 나타내었으며, 이동경계 부근에서도 안정적인 결과를 보였다. 또한 본 모형을 실제해역인 천수만에 적용하여 현장 적용성을 입증하였다.

수치실험결과 천수만 내의 해수유동은 대조시 만입구부에서의 최강 창·낙조류속이 약 1.5m/sec 정도로 강하게 나타나며, 낙조시간이 창조시간보다 20분 정도 긴 비선형성 조류흐름을 나타낸다. 원산도 부근의 조간대에서는 최강 창조시부터 고조전까지 지형적인 요인에 의한 순환현상이 재현되었다.

본 모형에서 사용한 조간대 처리기법은 전체행렬식을 변화시키지 않으며, 조간대가 새 침수되는 자연현



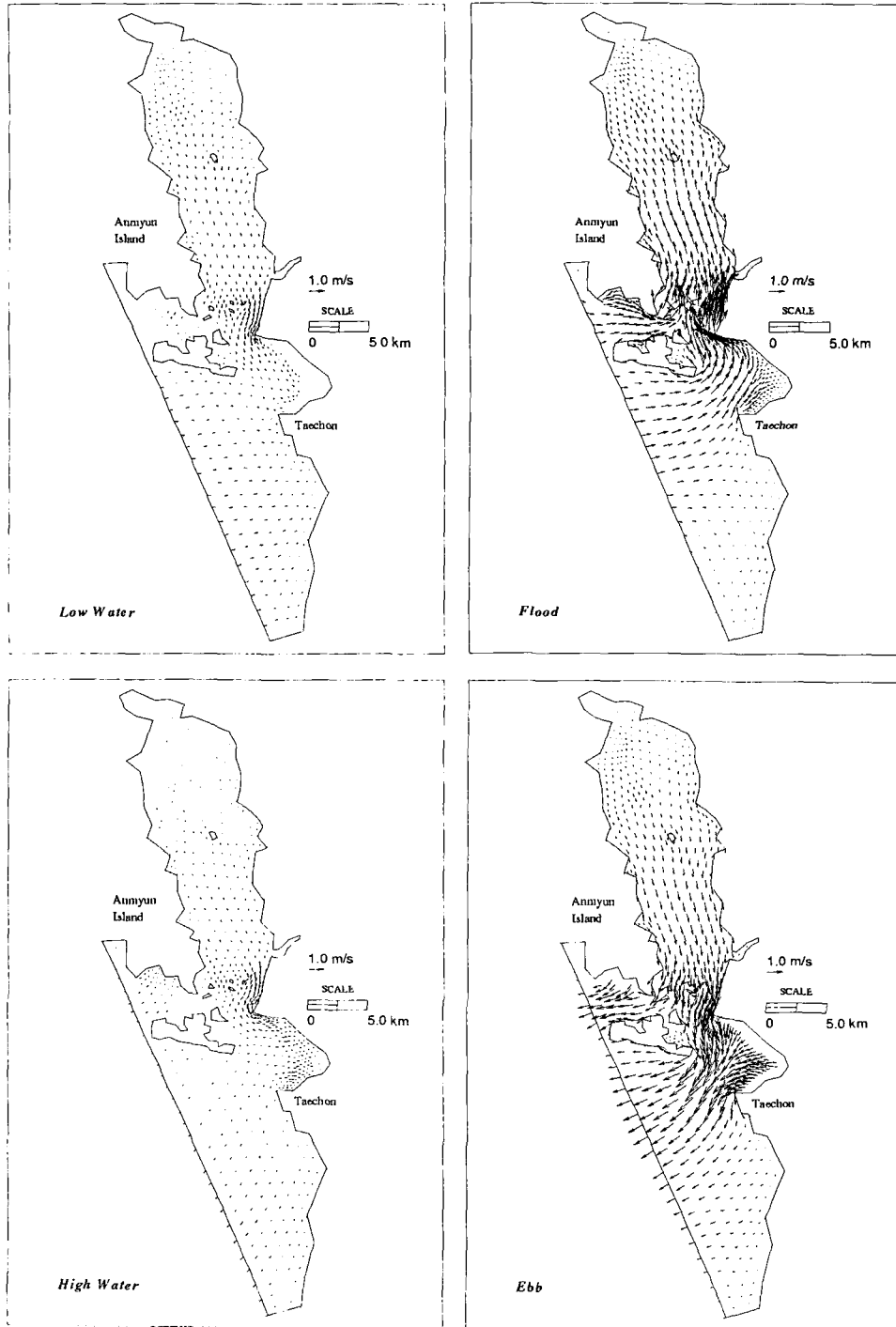


Fig. 9. Computed tidal current of Chonsu Bay during spring tide.

상을 장파인 조석입사파의 파형경사를 계산하여 처리함으로써 한층 효율적이고 현실적인 이동성계의 처리

방안으로 인식되며 수치실험결과 매우 안정적인 결과를 나타냈다.

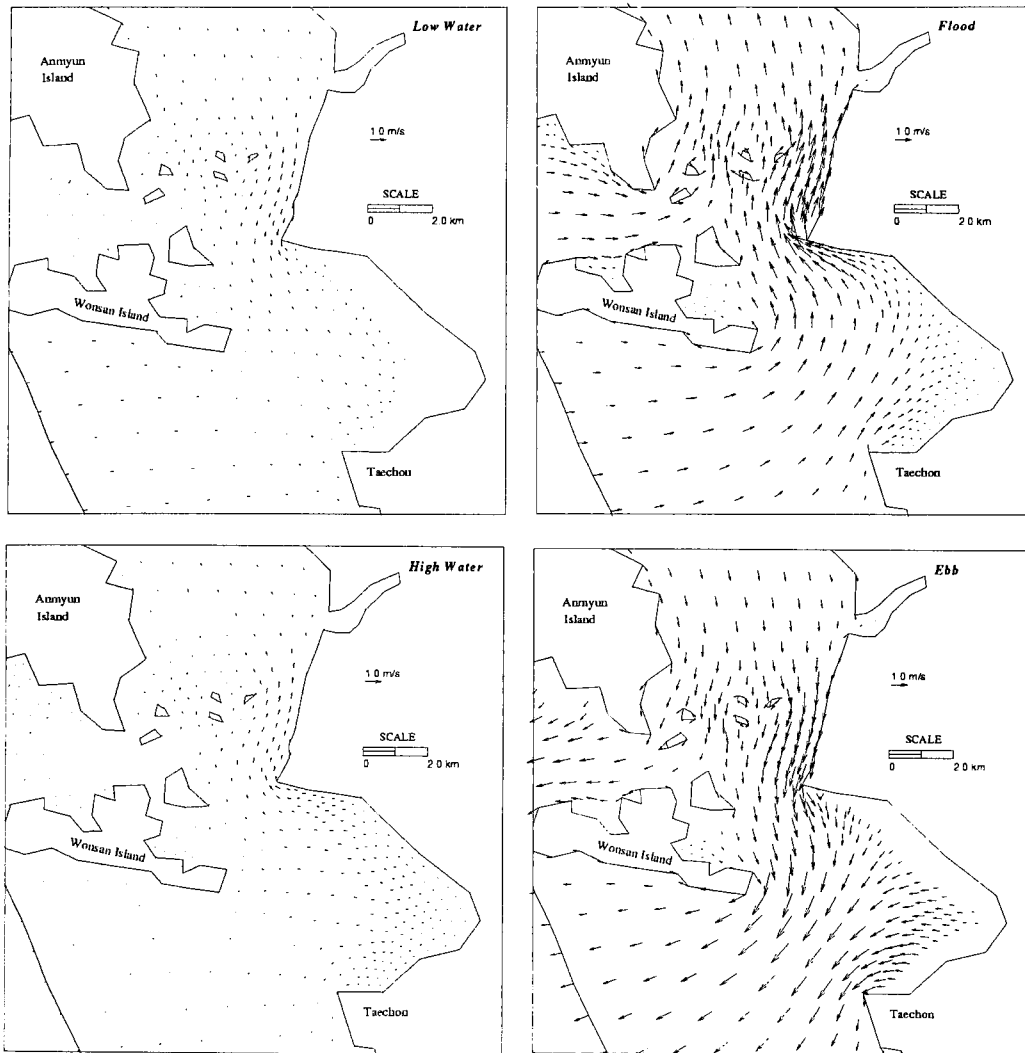


Fig. 10. Computed tidal current for entrance region of Chonsu Bay during spring tide.

## 6. 참고문헌

- 서승원, 신응배, 윤태훈 1989a. 방사효과를 고려한 개방경계조건, 대한토목학회논문집, 9(2): 63-71.
- 서승원, 윤태훈, 1989b. 오차해석에 의한 해양방사경계조건 비교, 한국수문학회지, 22(3): 315-322.
- 서승원, 박원경, 1995. RMA-2 모형을 이용한 천수만의 조류해석, 군산대학교 해양개발연구, 7(1): 15-23.
- 서승원, 박원경, 1996. 천수만에서의 상세조류해석을 위한 유한요소모형, 군산대학교 해양개발연구, 8(1): 47-58.
- 정태성, 김창식, 1992. 이동경계를 고려한 유한요소 천수유동모형. 한국해양안 · 해양공학회지, 4(3): 146~155.
- Choi, B.H., 1980a. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, KORDI Report 80-02.
- Choi, B.H., 1980b. Tidal computations for Incheon Bay, *J. of the Oceanological Society of Korea*, 15(2): 112-122.
- Bates, P.D. et al., 1995. Initial comparison of two two-dimensional finite element codes for river flood simulation, *Proc. Instn. Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy*, 112: 238-248.
- Gopalakrishnan, T.C. and Tung, C.C., 1980. Run-up of non-breaking waves: A finite element approach, *Coastal Engineering*, 4: 3-22.
- Gopalakrishnan, T.C. and Tung, C.C., 1983. Numerical analysis of a moving boundary problem in coastal hydrodynamics, *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, 3:

- 179-200.
- Gopalakrishnan, T.C., 1988. Comparison of fixed and moving boundary models for coastal circulation, *Computational Methods in Flow Analysis*, 1: 587-593.
- Henry, R.F. and Walters, R.A., 1993. Geometrically based, automatic generator for irregular triangular network, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 9: 555-566.
- Kawahara, M. et al., 1982. Selective lumping finite element methods for shallow water flow, *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, 2: 89-112.
- Kawahara, M. and Umetsu, T., 1986. Finite element method for moving boundary problems in river flow, *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, 6: 365-386.
- King, I.P. and Roig, L.C., 1988. Two-dimensional finite element models for flood plains and tidal flats, *Computational Methods in Flow Analysis*, 2: 711-718.
- King, I.P., 1992. User's Manual for RMA Model.
- Roig, L.C. and Evans, R.A., 1994. Environmental modeling of coastal wetlands, *Estuarine and Coastal Modeling III*, ASCE, 522-535.
- Turner, P.J. and Baptista, A.M., 1992. ACE/gredit user's manual, Oregon Graduate Institute of Science and Technology.
- Yeh, G.T. and Chou, F.K., 1979. Moving boundary numerical surge model, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Div. ASCE*, 105(WW3), 247-263.