

<論 文>

灣에 適用되는 淺水方程式의 開放境界條件

Open Boundary Conditions to the Shallow Water Equations in a Coastal Bay

尹 泰 勳* 徐 承 源**
Yoon, Tae Hoon Suh, Seung Won

ABSTRACT

Shallow water equations were applied to the flow in and through the opening to a coastal bay with different open boundary conditions. The open boundaries, shaped like a semi-circle, have various radii. The open boundaries therefore are defined in terms of radius given by multiple of the opening width, $2B$. It was found from numerical experiments that for adequate results proper radius of the boundary is $3B$ or greater and that for radius greater than $3B$ the solutions become stable. For the solution of the shallow water equations a typical Galerkin's finite element method was used.

要 旨

灣內 및 入口部에 대한 흐름해석으로 淺水方程式이 이용되었으며, 開放境界의 位置를 변화시키며 解析하였다. 灣入口로부터의 거리를 변화시키며 설정된 半圓形態의 開放境界에 대한 數値解析結果 적절한 開放境界의 位置는 灣入口의 幅을 $2B$ 라 했을 때 이에 대한 관계로 표현할 수 있고 $3B$ 이상인 경우에서 解는 安定한 狀態로 되어 最適의 開放境界位置는 $3B$ 가 적절할 것으로 판단되었다. 淺水方程式에 대한 數値技法으로는 전형적인 Galerkin 方法에 의한 有限要素法이 적용되었다.

1. 序 論

海洋과 港灣등에 대한 自然水域의 흐름現象은 매우 복잡하며, 특히 港灣이나 于拓工事로 인하여 自然環境의 변화를 초래하기도 한다.

우리 나라에서는 農耕地확보와 用水의 공급을 위한 于拓工事が 꾸준히 진행되고 있으며 이때 最終締切時 締切區間의 漸縮으로 流水斷面이 變化되므로써 潮流運動이 급격히 빨라지고 이에 따른 피해가 상당하다.²¹⁾ 따라서 締切工事의 設計

前に 이런 現象을 豫測하므로써 工費와 時間의 절감을 꾀할 수 있으나 이에 대한 解析은 대체로 미흡하다.

國內에서는 近年에 海水運動에 대한 研究가 활발히 진행되고 있으며, 有限要素法을 利用한 灣內循環現象의 解析,²⁵⁾ 副振動解析²⁶⁾ 그리고 有限差分法을 應用한 동지나해 해석과²⁷⁾ 灣內의 長周期波 解析²⁴⁾ 그리고 潮流에 의한 浮遊砂의 擴散舉動²³⁾에 대한 研究가 이에 속한다.

外國에서는 海水運動에 대한 研究가 상당히 진

* 漢陽大學校 土木工學科 教授

** 韓國科學技術院 研究員

전되어 있는 실정이며, 解析方法의 제안에 局限되었던^{11,14)} 종래의 개념을 탈피하여 近來에는 數値技法의 개발이나^{1,4,6,12,17)} 실제문제의 적용에⁵⁾ 비중을 두고 진행하고 있다.

波動的의 數値解析에 대한 基本方程式으로는 波動을 無渦흐름으로 간주하여 速度퍼텐셜을 이용한 Helmholtz 方程式과 Navier-Stokes 方程式에서 유도된 淺水長波方程式이 대표적이고, 이중 Helmholtz 方程式은 短周期의 表面波 解析에 대해 비교적 많이 應用되나²⁶⁾ 실제 海域의 흐름현상을 解析하는 경우에는 층절점의 수가 많아지게 되고 또한 放射條件을 만족키 어려우므로 Hybrid Element Method^{2,14)}와 같은 여러가지 부수적인 방법이 고려되는 등 어려운 점이 있으며 특히 潮汐과 같은 長周期解析에는 부적절하다.¹⁰⁾

따라서 本 研究에서는 쓰나미나 潮汐과 같은 長周期波動에 대해 靜水壓分布의 가정이 성립되므로 Navier-Stokes의 運動方程式과 連續方程式을 水深方向에 대해 積分을 취한 2차원 淺水方程式을 支配方程式으로 한다. 그리고 數値技法으로는 불규칙한 실제지형에 적용성이 뛰어난 有限要素法을 택하고, 이때 C^0 連續을 만족하는 有限要素로 P_1 要素인 線型三角形要素를 이용하며, 補間函數로는 線型補間函數를 취하여 Galerkin의 加重殘差方法을 適用한다. 時間積分에는 2 단계 陽解法을 利用한다.

本 研究의 궁극적인 目的은 最終縮切에 대한 흐름현상을 上記의 數値技法을 應用하여 解析하는 것이나, 海域에 대한 數値解析時 海洋境界의 境界條件처리가 까다로운 문제로 대두되고 數値解析의 結果 및 解의 安定性에 상당히 영향을 미치므로^{16,20)} 開放境界의 적절한 위치선정과 조건선정에 주안점을 두어 解析하고자 한다. 그러므로써 실제적용시 海洋側의 개방경계에 의해서 外海로 전파되는 영역내의 흐름이 이 境界條件에 의해 구속되어 영역내로 되돌아오는 不合理한 결과를 최소화하며, 또한 이를 배제하기 위하여 外海境界를 대상해역으로부터 충분히 멀리 취하여 완전한 放射境界를 만족하는 開放境界를 취했을 때 필연적으로 수반되는 數値計算의 비경제성을 최소화할 수 있는 바람직한 경계의 설정을 꾀하고자 한다.

2. 支配方程式

長周期 波動에 기인된 灣入口部 및 灣內外에 대한 흐름解析을 위한 基本方程式은 Navier-Stokes의 運動方程式과 連續方程式을 水深方向에 대해 積分을 취하여 平均流速을 u_i , 平均海水面과 水面과의 變位를 ζ 라 하면 다음과 같은 2차원 淺水方程式이 된다. 이때 연직유속성분과 가속성분은 무시되었으며, 정수압 분포가 성립한다는 가정이 내포되었다. 그리고 해석을 단순화하기 위해 바람의 영향과 지형적인 영향 그리고 바닥마찰에 의한 영향은 무시하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} + g \zeta_{,i} - \nu u_{i,jj} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \{(h + \zeta) u_i\}_{,i} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 t, g, ν 및 h 는 각각 時間, 重力加速度, 渦粘性係數 및 平均水深이다. 위 식에서는 Index Notation이 사용되었고 Einstein의 Summation Convention 法則이 성립된다. i 와 j 는 직교좌표계의 방향을 의미하며 본 경우는 2차원이므로 $i=1, 2$ 그리고 $j=1, 2$ 이다.

3. 有限要素式的 構成

淺水長波의 基本式인 (1), (2)를 有限要素式으로 나타내기 위해 加重函數를 適用하고 補間函數를 基本方程式에 대입하여 近似式을 구성한 후 이들의 內積이 0으로 되는 전형적인 Galerkin 方法을 利用한다. 즉 유속과 수심에 대한 가중함수를 u_i^* 와 ζ^* 라 하고 보간함수를 Φ 라 하면 $u_i, u_i^*, \zeta, \zeta^*$ 는 각각 다음과 같은 근사식으로 표현된다.

$$u_i = \Phi_{\alpha} u_{\alpha i} \dots\dots\dots (3)$$

$$u_i^* = \Phi_{\alpha} u_{\alpha i}^* \dots\dots\dots (4)$$

$$\zeta = \Phi_{\alpha} \zeta_{\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

$$\zeta^* = \Phi_{\alpha} \zeta_{\alpha}^* \dots\dots\dots (6)$$

여기서 $u_{\alpha i}$ 와 ζ_{α} 는 有限要素 중 α 번째 節點에서의 平均流速과 水位를 의미한다.

2차원 淺水方程式에 대하여 有限要素法을 利用하는 경우 補間函數의 선택으로, 流速의 補間에 대해서는 水位의 補間에 비해서 1차 높은 多項式을 적용한 混合補間의 경우가 數值的인 振動을 제거할 수 있는 것으로 이용된 경우도 있

으나¹⁰⁾ 대부분의 경우 유속과 수위에 대해 同一補間函數를 적용하고 있고, 流速과 水位 兩者에 모두 1차 다항식에 의한 P_1 要素를 기본으로 한 보간함수가 일반적이며^{11,22,25)} 混合補間을 사용하지 않으면 안될 이유는 없다. 本 研究에서는 補間函數 Φ_a 로 유속과 수위의 경우에 모두 선형으로 하였다.

有限要素式的 구성은 式(1)과 (2)에 加重函數인 u_i^* 와 ζ^* 를 곱하고 全海域에 대해 적분을 취하면 다음과 같은 加重殘差方程式을 얻을 수 있다.

$$\int_A \left(u_i^* \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) dA + \int_A (u_i^* u_{i,j}) dA + \int_A (u_i^* g \zeta_{,i}) dA + \nu \int_A (u_{i,j}^* u_{i,j}) dA - \nu \int_\Gamma (u_i^* u_{i,n_j}) dS = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$\int_A \left(\zeta^* \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) dA + \int_A [\zeta^* \{ (h + \zeta) u_i \}_{,i}] dA = 0 \dots\dots\dots (8)$$

여기서 式(1)의 2계 편미분인 渦粘性項은 Green의 定理를 이용하여 전개되었고 따라서 式(7)에는 線積分項이 나타났으며, 이때 n_j 는 境界 Γ 에서의 單位垂直方向餘弦을 의미한다.

式(7)과 (8)에 式(3)~(6)을 대입하고 정리하면 有限要素式은 다음과 같이 된다.

$$M_{\alpha\beta} \dot{u}_{\beta i} + C_{\alpha\beta\gamma} u_{\beta j} u_{\gamma i} + P_{\alpha i \beta \gamma} \zeta_{,\beta} + E_{\alpha i \beta j} u_{\beta j} = T_{\alpha i} \dots\dots\dots (9)$$

$$M_{\alpha\beta} \dot{\zeta}_{,\beta} + F_{\alpha i \beta \gamma} (h_{\beta} + \zeta_{,\beta}) u_{\gamma i} + G_{\alpha\beta\gamma i} (h_{\beta} + \zeta_{,\beta}) u_{\gamma i} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

여기서 式(9)와 (10)의 첫째 항의 $\dot{u}_{\beta i}$ 과 $\dot{\zeta}_{,\beta}$ 은 각각 $u_{\beta i}$ 와 $\zeta_{,\beta}$ 의 時間微分을 의미하고 α, β 및 γ 는 有限要素의 節點을 나타내며 계수는 다음과 같다.

$$M_{\alpha\beta} = \int_A \Phi_\alpha \Phi_\beta dA, \quad C_{\alpha\beta\gamma} = \int_A \Phi_\alpha \Phi_\beta \Phi_\gamma dA, \\ P_{\alpha i \beta \gamma} = g \int_A \Phi_\alpha \Phi_{\beta,i} dA, \quad E_{\alpha i \beta j} = \nu \int_A (\Phi_{\alpha,k} \Phi_{\beta,j,k}) \delta_{ij} dA, \quad T_{\alpha i} = \nu \int_\Gamma u_{i,j} n_j \Phi_\alpha dS, \quad F_{\alpha\beta\gamma i} = \int_A \Phi_\alpha \Phi_{\beta,i} \Phi_{\gamma} dA \quad \text{그리고} \quad G_{\alpha\beta\gamma i} = \int_A \Phi_\alpha \Phi_\beta \Phi_{\gamma,i} dA$$

이때 여기서 δ_{ij} 는 Kronecker의 δ 이다.

式(9)와 (10)은 하나의 要素에 대한 式이므로 전 흐름영역에 대한 해석을 위해 全海域으로 조

합하면 다음과 같은 行列式을 얻는다.

$$M_{\alpha\beta} \dot{V}_\beta + C_{\alpha\beta\gamma} V_\beta V_\gamma + P_{\alpha\beta} Z_\beta + E_{\alpha\beta} V_\beta = T_\alpha \dots (11)$$

$$M_{\alpha\beta} \dot{Z}_\beta + (F_{\alpha\beta\gamma} + G_{\alpha\beta\gamma}) (h_\beta + Z_\beta) V_\gamma = 0 \dots\dots (12)$$

上記式의 係數行列은 式(9)와 (10)의 것을 全領域에 대해 조합한 것이며, \dot{V}_β 와 \dot{Z}_β 역시 u_β 와 ζ_β 를 全領域에 대해 조합한 列벡터이다.

上記式에는 時間微分項 \dot{V}_β 과 \dot{Z}_β 이 포함되어 있으므로 이에 대한 積分이 필요하다. 종래의 많은 解析에서^{11,17,22,25)} 時間積分時 時間方向에 時間點을 설정해서 解析을 진행하는 時間進行法이 사용되었으며, 이 方法은 陰解法과 陽解法으로 구분된다. 일반적으로는 高次多項式을 補間函數로 이용하는 경우에 陰解法이 低次多項式을 이용하는 경우에 陽解法이 널리 이용되고 있고,¹⁰⁾ 領域에 대한 補間函數와 時間의 離散化 사이에 어떤 相關性이 있을지 모르나 아직까지는 명확한 이론이 없다. 本 경우에는 線型補間函數가 사용되었고, 陽解法을 이용하는 것이 陰解法을 이용하는 것에 비해 컴퓨터의 기억용량을 줄일 수 있고 또한 信賴性도 인정되므로¹⁷⁾ 陽解法이 적용되었다.

陽解法이 이용되더라도 式(11)과 (12)의 質量行列(Mass Matrix) $M_{\alpha\beta}$ 를 풀이해야 되므로 計算時間과 기억용량을 줄이기 위해 Lumping 技法을^{11,13,17)} 이용한 2 단계 陽解法으로 2-Step Lax-Wendroff 方法을^{11,22)} 이용하여 式(11)과 (12)를 다음과 같이 변환한다.

$$1 \text{ 단계} : L_{\alpha\beta} Q_\beta^{n+1/2} = M_{\alpha\beta} Q_\beta^n - \frac{\Delta t}{2} X_\beta^n \dots\dots\dots (13)$$

$$2 \text{ 단계} : L_{\alpha\beta} Q_\beta^{n+1} = M_{\alpha\beta} Q_\beta^n - \Delta t X_\beta^{n+1/2} \dots\dots\dots (14)$$

여기서 $L_{\alpha\beta}$ 는 $M_{\alpha\beta}$ 의 Lumped Mass Matrix이며, Q_β 는 式(11)과 (12)의 V_β 와 Z_β 를 조합한 것을, X_β 는 그 이외의 것을 조합한 것을 나타내고, n 은 時間段階를 Δt 는 時間間隔을 의미한다. 이때 時間間隔 Δt 는 다음과 같은 CFL 安定條件에 지배된다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta S}{\sqrt{\xi} \sqrt{gh}} \dots\dots\dots (15)$$

여기서 ΔS 는 要素의 가장 작은 변의 길이이며, ξ 는 條件을 만족시키는 계수로 대부분의 경우^{11,17,22)} 그 값을 2로 취하나 Lynch와 Gray는 安定性을 도모하기 위해 陽解法을 적용할 때

3을 택하여 實驗한 예가 있고, Lumping 技法을 사용했을 때는 1을 취하였다.¹³⁾ 본 경우에는 5의 값으로 2를 취하였다.

4. 初期 및 境界條件

2次元 淺水方程式으로부터 유도된 式(13), (14)를 풀이하는데는 初期條件과 境界條件의 필수적이며, 初期條件은 이들이 支配方程式을 만족하는 어떠한 형태라도 상관 없으므로 별다른 문제점은 없으나 境界條件은 外的인 強制函數 (Forcing Function)의 폭넓은 변화에 기인되므로 어느 정도 복잡하다.²⁰⁾

海洋의 2次元 淺水方程式을 만족하는 初期條件으로는 流速과 水位 모두 0의 靜止狀態로부터 시작되어 連續方程式과 運動方程式을 만족하는 Cold Start가 보편적으로 이용되고 있으며,^{17,22,25)} Peraire 등은 Cold Start로부터 약 5周期 지나서 初期條件의 영향이 소멸된다고 하였으나¹⁷⁾ 筆者의 경우^{22,25)} 波周期의 약 3周期 지나서부터 初期條件의 영향이 소멸되어 이의 영향은 그다지 크지 않은 것으로 판단된다.

淺水波의 運動場에서 고려될 수 있는 境界로는 水表面, 海底, 側方向의 固定境界 그리고 開放境界이며, 이 중 水表面과 海底境界에 대해서는 基本方程式을 導入할 때 水表面의 바람에 의한 마찰을 무시한 가정과 海底摩擦應力을 무시하므로써 陽의으로 基本方程式에 내포되어 있으나 側方向의 固定境界와 開放境界는 포함되어 있지 않다. 따라서 고려되는 境界는 固定境界와 開放境界이며 이는 다음과 같다.

固定境界는 海岸線이나 港灣의 시설물과 같이 海水의 流出入이 없는 境界를 의미한다. 그러나 側方應力(Lateral Stress)은 海岸線에 연해 있는 側流境界層에서 중요하므로 海岸境界層보다 대부분 큰 격자를 취하는 數値모델에서는 固定境界의 接線流速을 0으로 취할 때 비현실적인 流動場이 유발될 수 있다.²⁰⁾ 따라서 固定境界에서는 No-Slip 條件이 부적절하며, 이 境界를 가로지르는 流出入이 없도록 되는 平行류 조건이 적용되어야 한다. 有限要素法에서 流速 및 水位등은 節點에서만 정의되므로 본 연구에서와 같이 삼각형 요소를 택했을 때 그림 1과 같이 地形

이 불규칙한 固定境界의 B節點에서 接線 및 法線成分의 流速을 표현하기 위한 接線方向의 정의는 節點 B에 인접하는 요소의 接線을 연장한 線인 AC선과 平行的인 선을 接線으로 취한다.¹³⁾

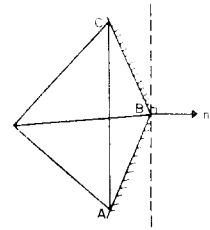


그림 1. 固定境界의 接線 및 法線方向定義

開放境界의 적절한 위치선정은 부연할 것도 없이 計算의 효율을 증진시키고 또한 解의 安定과 結果에 상당한 영향을 미치게 된다.⁹⁾

Peraire 등은 河口에서의 흐름현상을 해석하는데 개방경계인 외해 경계의 선정을 외해로 확장된 경우와 그렇지 않은 경우의 두 가지 상황을 고려하여 해석하였으며,¹⁷⁾ Kasahara 등은 河口部の 밀도성층화에 기인된 密度流의 해석을 위해 외해경계로 수차례의 시도후에 開放境界條件을 도입하였고,⁹⁾ Pearson과 Winter는 일차원 천수파이론이 성립되고 조석의 영향을 받는 流入部의 일부에 대해 적절한 외해경계인 放射境界條件의 설정에 특성곡선방법을 이용하여 해석한 바 있다.¹⁶⁾ 그리고 Orlandi는 개방경계로 Sommerfeld의 放射條件을 택하였고¹⁵⁾ Blumberg 등과 Hebenstreit 등은 이의 수정된 형태를 이용한 바 있다.^{3,8)}

開放境界의 條件으로는 水位와 流速이 정의될 수 있으며, 河川에서는 흐름형태에 따라 이들이 조화되어 上·下流의 경계조건으로 취해지나,^{7,18,19)} 河口나 灣에서는 海洋側의 개방경계 조건으로 접근하는 자연적인 방법으로 潮汐波高의 變化를 時間의 函數로 간주하여 삼각함수로 표현하므로써 長周期波의 周期性을 고려하는 경우가 일반적이다.

5. 模型實驗 및 結果分析

前述한 方法에 의하여 式(13)과 (14)로 표현된 2次元 淺水長波模型을 실제 海域에 적용하

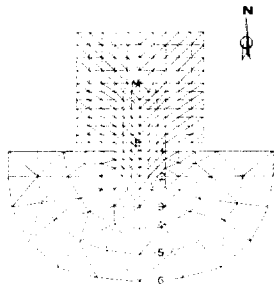


그림 2. 단순화된 矩形灣의 有限要素化

기에 앞서 그림 2와 같은 2.6km×3.0km의 단순화된 矩形灣에 대해 數値實驗을 실시한다. 數値實驗에 앞서 正確解가 알려진 1차원 矩形灣에 적용하였으며 模型의 타당성이 입증된 바 있다. (22,25)

앞의 境界條件에서도 언급한 바와 같이 有限差分法이나 有限要素法을 이용하는 대부분의 海洋에 대한 數値模型에서는 有限한 海域을 대상으로 하므로 理論的으로 無限遠放에서 反射되는 波의 영향이 없도록 되는 完全한 放射條件을 만족시키는 어렵다.

그리고 模型의 실제 적용시에는 水位나 流速 등의 관측치를 境界條件으로 취하는 것이 제안되나, 현실적으로 만족할 만한 실측자료 획득에 상당한 어려운 점이 수반되고 이를 이용하더라도 境界位置의 設定은 計算의 效率을 증대시키기 위해 최소한의 海域을 대상으로 하는 것이 바람직하다.

그러므로 本 實驗에서는 다음과 같이 灣入口部の 幅을 2B라 했을 때 外海開放境界를 설정키 위한 最適의 境界位置는 nB에 위치한다고 간주하여 수치실험을 실시한다. 다음의 表 1에 그림 2와 같은 灣에서 外海開放境界의 위치를 6가지로 설정한 경우에 대한 각각의 위치와 節點數, 要素數를 나타냈다.

실제 海域에서의 解析에서는 海底地形의 形態, 波의 周期, 方向, 바람의 영향, 지형적인 영향 등에 따라 흐름상태가 달라지게 되나 本 實驗에서는 실제적용에 앞서 開放境界의 最適位置를 설정하고자 하므로 단순화된 상태로, 波의 周期는 40分의 長周期波를 설정하였으며, 方向도 南一

<表 1> 開放境界의 位置 및 節點·要素數

	開放境界位置 (nB)	節點數	要素數
1	0.0	153	258
2	1.0	180	304
3	2.2	190	326
4	3.0	205	352
5	4.0	218	374
6	5.0	231	398

北 方向으로 즉, 灣의 入口部에 수직되는 방향으로 하였으며, 水深도 解析對象全域을 10m로 일정하게 하였다. 渦粘性係數로는 100m²/s를 취하였다.

初期條件으로는 水位와 流速 모두 0인 靜止狀態로부터 시작하였으며, CFL의 安定條件에 알맞는 時間積分의 간격 Δt로는 12秒를 취하였다. 즉 波의 1周期 計算에는 200번의 反復計算이 필요하며, 初期條件의 영향이 소멸되어 定狀狀態의 波의 흐름현상을 나타내는 것은 3周期가 지나서 부터로 나타났고, 計算은 4周期까지 수행되었다.

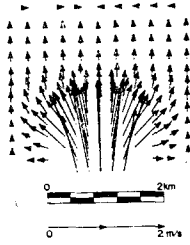
境界條件으로는 固定境界에서 海水의 流出入이 없도록 하고 境界面에서 평행류의 條件을 적용하였으며, 開放境界에서는 다음의 式(16)과 같이 水位를 正弦函數로 적용하였다.

$$\zeta = a \sin(\omega t - \phi) \dots\dots\dots (16)$$

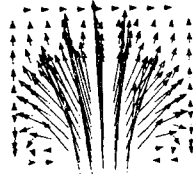
여기서 a는 振幅, ω는 角速度로 2π/T이며, φ는 위상을 의미한다. 本 경우에 진폭으로는 1.0m를 취하였다.

다음의 그림 3~8의 (a), (b)는 표 1과 같은 開放境界가 위치했을 때 定狀狀態에 도달한 후의 시간인 T 및 그로부터 1/4周期 경과한 시간에서의 流速分布를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 경우 1,2를 제외하고는 灣內 흐름상태가 대부분 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 9와 10은 그림 2의 대표적인 지점으로 入口部の E 및 中央部の M節點에서의 定狀狀態 1周期間 時間에 따른 水位 및 流速의 變化상태를 나타낸 것이며, 표 2는 1/4 T와 3/4 T에서의 절점 E 및 M의 計算된 水位와 流速이다. 여기에서도 알 수 있는 바와 같이 경우 1,2를 제외하고는 3~6 경우가 비슷한 양상으로 나

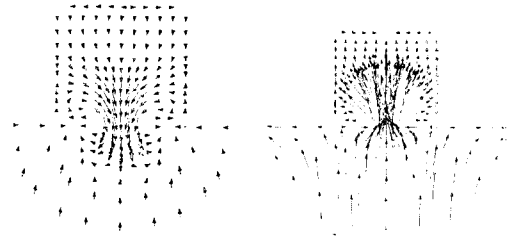


(a)

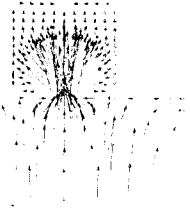


(b)

그림 3. 경우 1의 시간 T 및 $1/4 T$ 때의 유속분포도

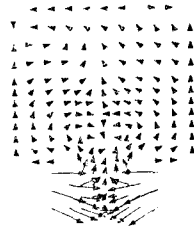


(a)

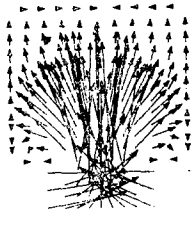


(b)

그림 7. 경우 5의 시간 T 및 $1/4 T$ 때의 유속분포도

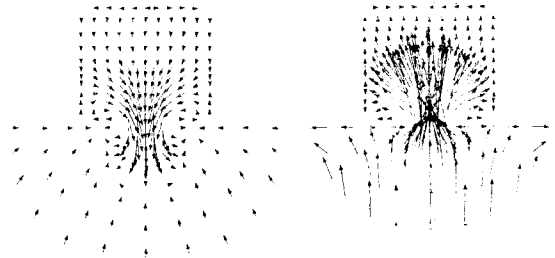


(a)

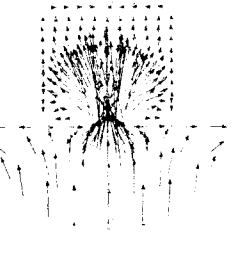


(b)

그림 4. 경우 2의 시간 T 및 $1/4 T$ 때의 유속분포도

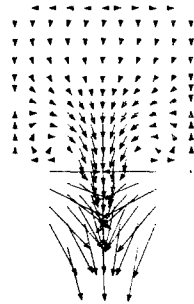


(a)

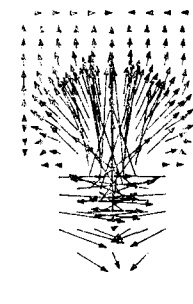


(b)

그림 8. 경우 6의 시간 T 및 $1/4 T$ 때의 유속분포도

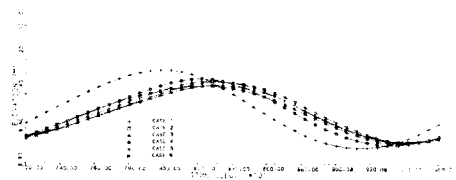


(a)

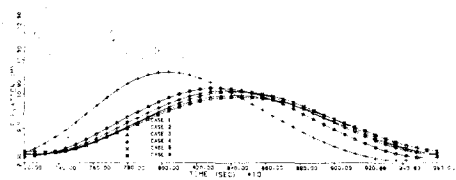


(b)

그림 5. 경우 3의 시간 T 및 $1/4 T$ 때의 유속분포도

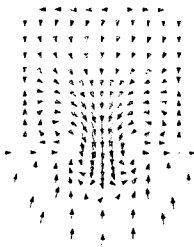


(a)

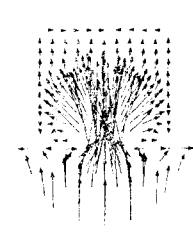


(b)

그림 9. (a) E점과 (b) M점의 시간에 따른 수위의 변화

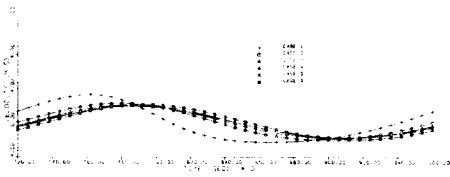


(a)

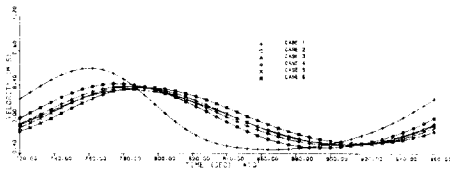


(b)

그림 6. 경우 4의 시간 T 및 $1/4 T$ 때의 유속분포도

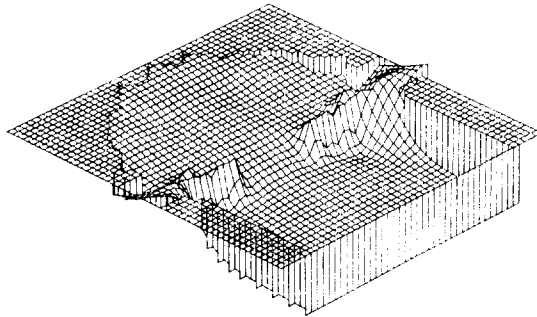


(a)



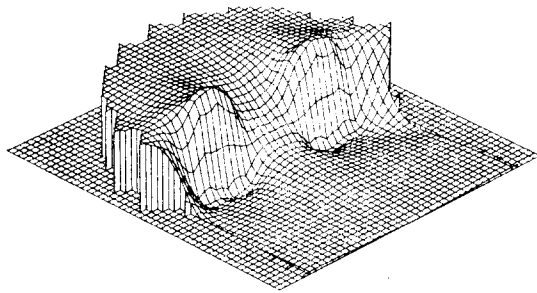
(b)

그림 10. (a) E점과 (b) M점의 시간에 따른 유속의 변화



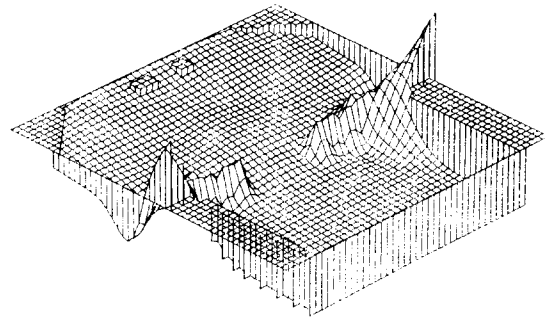
WATER SURFACE HEIGHTS AT TIME T

그림 11. (a) 경우 4의 시간 T일 때 수면상태



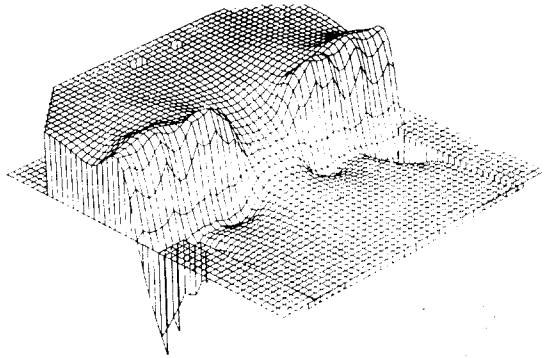
WATER SURFACE HEIGHTS AT TIME T + (1/4)T

그림 11. (b) 경우 4의 시간 1/4 T일 때 수면상태



WATER SURFACE HEIGHTS AT TIME T

그림 12. (a) 경우 5의 시간 T일 때 수면상태



WATER SURFACE HEIGHTS AT TIME T + (1/4)T

그림 12. (b) 경우 5의 시간 1/4 T일 때 수면상태

타났으며, 4와 5의 경우는 수위와 유속이 모두 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

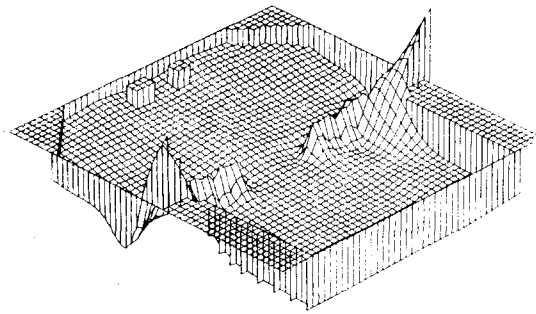
그림 11~13에 시간 T 및 그로부터 1/4 T 경과된 시간에서의 開放境界位置로 선정한 4~6 경우의 水面변화를 3차원적으로 도시하였고, 이는 대상 灣의 東北方 10 km 地點 30° 상방에서 관측한 결과에 대한 그림으로써 全領域에 대한 水面의 상태가 거의 일치됨을 알 수 있다.

따라서 이상에서 알 수 있는 바와 같이 만 입구로부터 3B 이상 설정된 개방경계에서 동일조건인 波가 境界조건으로 주어졌을 때 흐름상황이 거의 일치되므로 開放境界의 位置로는 灣入口로부터 3B 정도이면 충분한 것으로 판단된다.

그러나 模型實驗은 실제항만의 적용에 앞서 제한적으로 周期 40分인 長周期波와 단순화된 灣에 대해서 고려되었고 이를 통하여 실제 적용도 시사될 수 있으리라 사료되나, 실제항만의 潮汐周期等에 대해서는 앞으로의 계속된 研究가

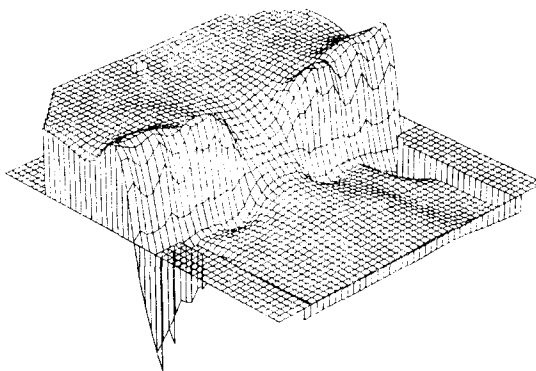
〈表 2〉 時間 $1/4 T$ 와 $3/4 T$ 에서의 節點 E 및 M 의 計算된 水位와 流速

節 點	開放境界	時 間 $1/4 T$		時 間 $3/4 T$	
		水 位 (m)	流 速 (m/s)	水 位 (m)	流 速 (m/s)
E	1	10.846	2.705	9.224	-1.789
	2	10.438	2.250	9.415	-1.912
	3	10.223	1.946	9.519	-1.722
	4	10.328	2.113	9.491	-1.774
	5	10.313	2.091	9.473	-1.779
	6	10.309	2.115	9.455	-1.792
M	1	11.202	0.470	9.378	-0.288
	2	10.385	0.401	9.868	-0.324
	3	10.213	0.347	10.096	-0.293
	4	10.361	0.384	10.062	-0.303
	5	10.324	0.382	10.031	-0.302
	6	10.295	0.373	10.060	-0.284



WATER SURFACE HEIGHTS AT TIME T

그림 13. (a) 경우 6의 시간 T 일 때 수면상태



WATER SURFACE HEIGHTS AT TIME $T + (1/4)T$

그림 13. (b) 경우 6의 시간 $1/4 T$ 일 때 수면상태

제안된다.

6. 要約 및 結論

長周期波動의 영향을 받는 港灣이나 海洋에 대한 水理解析을 위해 數值技法으로 전형적인 Galerkin 方法을 이용한 有限要素法이 적용되었다.

기존의 문헌검토에서는 나타난 바와 같이 外海의 開放境界의 위치선정에 대한 명확한 解析이 미흡하므로 本 數值模型을 이용한 實驗에서는 실제 海域에의 적용에 앞서 數值計算의 效率을 높이며 安定性을 도모하고자 적절한 開放境界의 위치로 灣入口로부터 外海로 開口部の 幅 $2B$ 에 대한 nB 거리를 취했을 때의 6가지 경우를 고려하여 解析하였으며 實驗結果 n 이 3 이상인 경우에는 제반 흐름상태가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 n 이 3 정도인 경우가 最良의 해양경계 위치로 선정될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 本 實驗을 통하여 얻어진 결과를 실제 海域에 적용하여 潮汐에 대한 관측자료 등과의 比較檢定이 수반된다면 海洋解析에 대한 重要 外海開放境界를 일반화된 형태로 표현할 수 있어 計算의 效率을 증진시키고 安定性을 提高시킬 수 있을 것으로 기대된다.

參考文獻

- 1) Beardsley, R.C. and Haidrocel, D.B., "Model Studies of the Wind Driven Transient Circulation in the Middle Atlantic Bight Part 1: Adiabatic boundary Conditions," J. of Physical Oceanography, Vol.11, 355~375, 1981.
- 2) Behrendt, L., "A Finite Element Model for Water Wave Diffraction Including Boundary Absorption and Bottom Friction," Series Paper No. 37 of Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 1985.
- 3) Blumberg, A.F. and Kantha, L.H., "Open Boundary Condition for Circulation Model," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.111, No. 2, 237~255, 1985.
- 4) Davis, A.M., "On Formulating a Three-Dimensional Hydrodynamic Sea Model With an Arbitrary Variation of Vertical Eddy Viscosity," J. of Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 22, 187~211, 1980.
- 5) Falconer, R.A., Wolanski, E. and Mardapitta, L., "Modeling Circulation in an Island's Wake," J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.112, No. 2, 234~254, 1986.
- 6) Galpin, P.F. and Raithby, G.D., "Treatment of non-Linearities in the Numerical Solution of the Incompressible Navier-Stokes Equations," Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 6, 409~426, 1986.
- 7) Garcia, R. and Kahawita, R.A., "Numerical Solution of the St. Venant Equations with the MacCormack Finite Difference Scheme," Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 6, 259~274, 1986.
- 8) Hebenstreit, G.T., Bernard, E.N. and Vastano, A. C., "Application of Improved Numerical Techniques to the Tsunami Response of Island Systems," J. of Physacal Oceanography, Vol.10, 1134~1140, 1980.
- 9) Kasahara, K., Hara, H. and Kawahara, M., "Two-Step Explicit Finite Element Method for Two-Layer Flow Analysis," Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 4, 931~947, 1984.
- 10) Kawahara, M., "水環境における流れ解析," 數理科學, No. 236, 日本中央大學, 35~45, 1983.
- 11) Kawahara, M. et al., "Selective Lumping Finite Element Methods for Shallow Water Flow, Int. J. Num. Fluids, Vol. 2., 89~112, 1982.
- 12) Lee, J.H.W., Li, D.W. and Choi, "Simulation of Tidal Circulation in a Coastal Bay: A Comparative Case Study," Proceedings of 21st IAHR Congress, 75~80, 1985.
- 13) Lynch, D.R. and Gray, W.G. "A Wave Equation Model for Finite Element Tidal Computations," Computers and Fluids, Vol. 7, 207~228, 1979.
- 14) Mei, C.C. and Chen, H.S., "A Hybrid Element Method for Steady Linearized Free-Surface Flows," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.10, 1153~1175, 1976.
- 15) Orlanski, I., "A Simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flow," J. of Computational Physics, Vol. 21, 251~269, 1970.
- 16) Pearson. C.E. and Winter, D.F., "On Tidal Motion in a Stratified Inlet with Particular Reference to Boundary Conditions," J. of Physical Oceanography, Vol.14, 1307~1314, 1984.
- 17) Peraire, J., Zienkiewicz, O.C. and Morgan, K., "Shallow Water Problem: A General Explicit Formulation," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 22, 547~574, 1986.
- 18) Verboom, G.K., Stelling, G.S. and Officier, M.J., "Boundary Conditions for the Shallow Water Equations," in Engineering Applications of Computational Hydraulics Vol.1, Eds. Abbott, M.B. and Cunge, J.A., Pitman Press, 1982.
- 19) Vreugdenhil. C.B. and Booij, N., "Numerical Outflow Boundary Conditions for the Shallow-Water Equations," Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 5, 393~397, 1985.
- 20) Walters, R.A., "Experiences with the Application of the Finite Element Method to the Solution of the Shallow Water Equations," Proceedings of the 1st National US Army Corps of Engineers, 158~171, 1981.
- 21) 干拓工學, 韓國農村環境開發研究所.
- 22) 徐承源·朴定應·尹泰勳, "흐름斷面의急變化에 의한循環의數值模型," 大韓土木學會論文集, 第3卷 第4號, 21~31, 1983.
- 23) 李正圭, "潮流에 의한浮遊砂濃度の擴散舉動에

- 關한 研究,” 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1985.
- 24) 이종태, “항내의 장주기파 해석을 위한 2차원 부정류의 수학적 모형개발에 관한 연구,” 연세대학교 대학원 박사학위 논문, 1982.
- 25) 尹泰勳, “有限要素法에 의한 港灣에서의 土砂移送推定模型,” 大韓土木學會論文集 第2卷 第2號, 19~28, 1982.
- 26) 海洋研究所, “港灣副振動 解析을 위한 基礎研究,” 1986.
- 27) 최병호, “동지나해의 토사이동경로,” 대한토목학회논문집, 제3권 제4호, 83~93, 1983.