

## 東海港의 副振動 特性(2. 數值計算)

### Characteristics of Harbor Resonance in Donghae Harbor (Part 2. Numerical Calculation)

鄭遠武\* · 鄭景太\*\* · 蔡璋源\*\*\*

Jeong, Weon Mu\* · Jung, Kyung Tae\*\* · Chae, Jang Won\*\*\*

#### Abstract

A numerical model has been used for the prediction of wave agitations in a harbor which are induced by the intrusion and transformation of incident waves. Based on linear wave theory a mild-slope equation has been used. A partial absorbing boundary condition has been used on solid boundary. Functional has been derived following Chen and Mei(1974)'s technique based on Hybrid Element Method which uses finite discretisation in the inner region and analytical solution of Helmholtz equation in the outer region. Final simultaneous equation has been solved using the Gaussian Elimination Method. Helmholtz natural period and second peak period of seiche in Donghae Harbor coincide very well with the results from numerical calculation. Computed amplification factors show good agreement, especially when the reflection coefficient on solid boundary is 0.99, with those of measurements.

#### 要 旨

長週期波의 浸入 · 變形에 의한 港內 水面攪亂 現象을 效果的으로 分析 및 豫測하기 위하여 解析解와 有限要素를 複合的으로 사용한 數值模型을 이용하였다. 基本方程式으로 緩傾斜 方程式을 使用하였으며, 固體 境界面에서는 部分吸收 境界條件을 使用하였다. 防波堤 周邊과 港內 領域은 有限要素로 模型化하고 港外 領域에서는 Helmholtz 方程式의 解析解를 利用하였다. Chen과 Mei(1974)의 方法을 利用하여 境界值 問題의 凡函數를 구한 후 構成되는 最終의인 聯立方程式을 Gauss 消去法으로 푸는 數值模型을 樹立하였다. 現場觀測 資料의 스펙트럼 分析으로 제시된 東海港의 Helmholtz natural period 및 第2 尖頭週期는 數值計算으로 구해진 것과 잘 一致하였다. 港灣構造物에서의 反射率을 變化시키면서 구한 增幅比와 觀測值의 比較 結果 反射係數를 0.99로 했을 때 가장 良好한 一致를 나타내었다.

- \* 正會員 · 先任研究員, 韓國海洋研究所 海洋工學研究部 沿岸工學研究室  
\*\* 非會員 · 責任研究員, 韓國海洋研究所 海洋工學研究部 沿岸工學研究室  
\*\*\* 正會員 · 沿岸工學研究室長, 韓國海洋研究所 海洋工學研究部 沿岸工學研究室

#### 1. 緒 論

港灣副振動 問題는 Miles와 Munk<sup>(1)</sup>가 放射波(radiation wave)의 概念을 최초로 導入, Green 函數를 利用하여 等水深 港灣에서의 副振動을 解析한 이래

Le Méhauté<sup>(2)</sup>, Ippen과 Goda<sup>(3)</sup>, Lee<sup>(4)</sup>, Ünlüata와 Mei<sup>(5)</sup> 등에 의해 계속적으로 理論的 擴張이 이루어져 왔다. 그러나, 上記 理論들은 모두 等水深의 假定에 근거한 것으로서 實際 港灣에의 適用에는 限界가 있다.

Berkhoff<sup>(6)</sup>가 緩傾斜 波動方程式(mild-slope wave equation)을 유도하고 有限要素法을 이용하여 풀 후 그 때까지 주로 一定水深을 대상으로 한 研究에서 變水深을 고려하는 커다란 發展이 이루어졌다. Chen과 Mei<sup>(7)</sup>, Walker와 Brebbia<sup>(8)</sup>는 緩傾斜 方程式의 淺海波 部分에 해당되는 淺海波 方程式의 解를 Berkhoff<sup>(6)</sup>와는 다른 有限要素 數式化를 이용하여 구함으로써 不規則한 水深의 非定形港의 副振動 問題를 解析할 수 있는 效率的인 방법을 제시하였다. Boijj<sup>(9)</sup>는 海底面 摩擦 效果를 고려하였으며, Chen<sup>(10)</sup>은 固體 境界面에서의 에너지 吸收條件과 海底面 摩擦을 포함한 淺海波 方程式을 사용함으로써 數值 模型의 正確性을 向上시켰다. 이후 Behrendt<sup>(11)</sup>, Chen<sup>(12)</sup> 등이 海底面 摩擦을 고려한 緩傾斜 方程式과 固體 境界面에서의 部分吸收 境界條件을 有限要素法으로 푸는 數值模型을 제시하였다.

本 論文에서는 複合要素法(Hybrid Element Method)을 數值解析技法으로 選定하였다. 이는 東海港과 같이 복잡한 形象의 港灣을 對象으로 할 때 境界의 處理에 長點을 지닌 有限要素 模型을 海洋波의 경우 對象領域이 半無限하므로 效率性을 위해 약간 修正한 것이다. 즉, 流體 領域을 직접적인 흥미가 있는 内部 領域과 이를 둘러싼 外部 領域으로 나누고 内部領域만을 有限要素法으로 푸는 複合要素法을 利用하는 것이 計算時間의 短縮이라는 觀點에서 유리하다.

複合要素法은 無限境界面에서의 放射條件의 模型化 技法에 따라 物體로부터 有限한 거리에 直接 또는 修正된 放射 境界條件을 適用하는 방법<sup>(13)</sup>, 波動場을 둘로 분리하여 物體를 포함하는 内部領域은 有限要素로 模型化하고 外部領域은 解析의 固有函數의 級數解로 나타내어 두 領域의 接合面에서 接合條件을 도입하여 問題를 해결하는 방법<sup>(7)</sup>, 波動場을 둘로 분리하되 外部領域에서 解析의 固有函數의 級數解를 使用하는 대신 外部領域을 Green 函數로 나타내는 방법<sup>(14)</sup> 및 外部領域을 無限要素로 模型化하는 方

法<sup>(12)</sup> 등의 4가지 방법으로 分離할 수 있다. 本 論文에서는 外部 領域에서 Helmholtz 方程式의 解析 解를 사용함으로써 수치모델링이 보다 간편한 두 번째 方法을 이용하였다. 通常의으로 外部 領域과 内部 領域의 接合에는 Galerkin 方法을 쓰거나 變分 原理를 이용하는 데 本 論文에서는 Chen과 Mei<sup>(7)</sup>가 제시한 變分 原理를 이용하여 凡函數를 구하였다. 그러나, 基本方程式으로 Chen과 Mei<sup>(7)</sup>의 淺海波 方程式 대신에 緩傾斜 方程式을 사용하여 長·短週 期波를 모두 解析할 수 있게 數值模型의 適用性을 향상시켰다. 그리고, 共振周波數에서의 增幅比를 과 대하게 제시하게 하는 固體 境界面에서의 完全反射 境界條件 대신에 部分吸收 境界條件을 사용하여 模型의 正確性을 向上시켰다. 凡函數의 積分과 聯立 方程式을 푸는 方法은 Chen과 Mei<sup>(7)</sup>와 同一하다.

東海港의 現場觀測 結果 제시된 第1 尖頭週期(Helmholtz natural period) 17.1분과 第2 尖頭週期 5.5분(Part 1 참조)을 數值模型을 이용한 計算値와 比較하였으며, 區分이 不分明하였던 局部的인 尖頭 週期도 數值模型實驗을 통하여 그 特性을 확인하였다. 또한, 科學技術處<sup>(15)</sup>에 제시되었던 反射係數의 變化에 따른 港內 增幅比의 變化도 조사하여 東海港의 경우 反射係數를 0.99로 할 때 가장 觀測値에 接近함을 확인하였다. 그러나, 海底面 摩擦係數와 入射波向의 차이가 尖頭週期나 增幅比에 미치는 影響에 대해서는 고려하지 못하였으며 이에 대해서는 追加的인 研究가 要望된다.

## 2. 有限要素 數值模型

### 2.1 境界值 問題의 數式化

#### 2.1.1 基本方程式

非粘性 및 非壓縮性 流體에서의 非回轉流 假定下에서 速度포텐셜을 정의한다. Miles와 Munk<sup>(1)</sup>의 개념에 의거, 波動場을 入射波  $\phi^i$ 와 港의 存在로 인한 散亂波  $\phi^s$ 로 구분한다. 그림 1에서와 같이 對象領域을 港內 및 港周邊의 領域 A와 그 外側의 領域 R로 구분한다. 완만한 海底面 變化를 갖는 領域 A에서의 微小振幅의 單調 入射波에 대한 水深平均된 波動場은 x-y 直交座標系에서 다음 式으로 표현할 수 있다<sup>(12)</sup>.

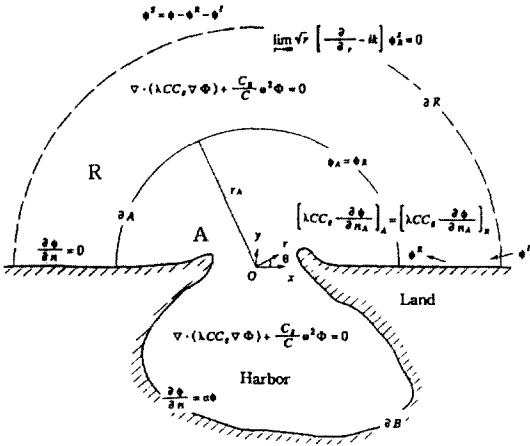


그림 1. 직선 해안선을 가진 港灣에서의 境界値 問題

$$\nabla \cdot (\lambda C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j}$ ,  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$ 는  $x$ ,  $y$ 方向 單位 벡터,  $C_g$ 는 群速度,  $C$ 는 波速,  $\omega$ 는 角周波數, 그리고  $\phi(x, y)$ 는 2次元 空間 速度포텐셜 函數이다. 위 식에서 群速度  $C_g$ 와 波速  $C$ 는 각각 다음 식과 같이 水深  $h(x, y)$ 와 波數  $k$ 의 函數로 주어진다.

$$C_g = \frac{C}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \quad (2)$$

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (3)$$

$\lambda$ 는 海底面의 摩擦에 의한 에너지 損失 效果를 나타내며 다음 식으로 표시가 가능하다.

$$\lambda = \frac{1}{1 + i \frac{\beta a_0}{h \sinh kh} e^{i - \pi/4}} \quad (4)$$

上記 式에서  $\beta$ 는 無次元의 空間 海底面 摩擦係數,  $a_0$ 는 入射波의 振幅을 나타낸다.

### 2.1.2 部分吸收 境界條件

構造物, 海岸 境界 等에서는 波의 完全 吸收가 일어나기 어려우므로 Mei와 Chen<sup>(16)</sup>, Rottmann과 Zielke<sup>(17)</sup>, Chen<sup>(10,12)</sup> 等이 사용한 바 있는 部分吸收 境界條件을 導入하였다. 긴 直線 形態의 海岸線에

入射하는 淺海波에 대해서는 準經驗的으로 複素數 反射係數  $K_r$ 을 導入하여 다음과 같이 海岸線을 따른 에너지의 部分吸收를 나타낼 수 있다<sup>(16)</sup>.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \alpha \phi \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 領域  $A$ 의 外向 單位垂直벡터이며  $\alpha$ 는 다음과 같다.

$$\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (6)$$

反射係數  $K_r$ 은 波浪의 周波數와 振幅, 海岸線이나 防波堤의 形態 및 空隙率에 따라 變한다.

### 2.1.3 遠海域 入射波

그림 1에 제시된 直線 海岸線의 경우에 遠海域  $R$ 에서  $\partial A$ 를 통과하는 入射 速度포텐셜은 다음과 같이 Jacobi-Anger의 級數展開 形態로 표시할 수 있다.

$$\phi^i = -\frac{iga_0}{\omega} \left[ (1 + K_r) \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) (\cos n\theta^i \cos n\theta) + (1 - K_r) \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) (\sin n\theta^i \sin n\theta) \right] \quad (7)$$

여기서,  $\theta^i$ 는 入射波向이며,  $\epsilon_n$ 은 Newman 係數로서  $n=0$ 인 경우에는 1이며 그 외에는 2가 된다. 만일 境界가 完全 反射( $K_r=1.0$ )이면 上記 式은 다음과 같이 간단해진다.

$$\phi^i = -\frac{2iga_0}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) \cos n\theta^i \cos n\theta \quad (8)$$

### 2.1.4 遠海域 散亂波

遠海域  $R$ 에서 水深  $h$ 를 一定한 것으로 假定하면 散亂波의 支配 方程式은 Helmholtz 方程式이 된다. 따라서, 遠海域에서의 散亂波 포텐셜은 Helmholtz 方程式의 解析解로 나타낼 수 있다. 그 중 無限遠方  $\partial R$ 에서의 放射 境界條件을 만족하는 解析解를 선택하면 다음과 같이 표시된다.

$$\phi^s = -\frac{iga_0}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_A)} (\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (9)$$

여기서,  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ 은 決定해야 할 未知係數들이며,  $r_A$ 는

有限領域의 半徑이다. 直線 海岸線을 가진 半無限 領域에서는 海岸線에서 完全 反射를 假定하면 散亂 波의 解析解를 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$\phi^S = -\frac{iga_0}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_A)} \alpha_n \cos n\theta \quad (10)$$

## 2.2 有限要素 近似

### 2.2.1 凡函數

變分法の 理論에 의거, 境界值 問題는 관련된 凡 函數  $F(\phi)$ 가  $\delta F(\phi)=0$ 을 만족시키는 條件을 구하는 문제로 轉換하여 풀 수 있다. 이러한 問題에 대한 關聯 凡函數는 複素 變分(complex variation)  $\delta\phi$ 에 의해 支配方程式을 加重 積分하고 Green의 第1 等式(Green's first identity)과 發散 定理(divergence theorem)를 導入하며 境界條件을 線積分 또는 面積分에 代入함으로써 구할 수 있다. 計算領域을 近 海域 A와 遠海域 R로 區分하고 遠海域의 速度포텐셜을 解析解로 표시한 후 變分原理를 適用하면 上記의 境界值 問題는 다음과 같은 凡函數를 最小化 하는 問題로 歸着된다<sup>(18)</sup>.

$$\begin{aligned} F(\phi) = & \iint_A \frac{1}{2} [\lambda CC_g (\nabla\phi)^2 - \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi^2] \quad I_1 \\ & + \int_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda CC_g \phi^S \frac{\partial \phi^S}{\partial n_A} \quad I_2 \\ & - \int_{\partial B} \frac{1}{2} CC_g \alpha \phi^2 \quad I_3 \\ & - \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi \frac{\partial \phi^S}{\partial n_A} \quad I_4 \\ & - \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} \quad I_5 \\ & + \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi^I \frac{\partial \phi^S}{\partial n_A} \quad I_6 \\ & - \int_{\partial A} \lambda CC_g \phi^I \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} \quad I_7 \quad (11) \end{aligned}$$

여기서,  $I_1$ 은 支配方程式에 관련된 項,  $I_3$ 은 境界面에서의 에너지 吸收를 나타내는 항이며, 기타 項들은 近海域 A와 遠海域 R의 境界面  $\partial A$ 에서의 境界條件에 관계되는 項이다.

### 2.2.2 有限要素 近似

流體領域 A를 適當한 形態의 有限要素로 分割하

면 各 要素內의 速度포텐셜  $\phi$ 는 各 要素의 節點포텐셜  $\{\phi^i\}$ 와 形象函數  $\{N^i\}$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \{N^i\}^T \{\phi^i\} \quad (12)$$

여기서,  $\{N^i\}$ 는 節點 i에서 節點포텐셜  $\phi^i$ 의 未知數를 가진 形象函數이며,  $\{N^i\}^T$ 는 이의 轉置行列(transpose)을 나타낸다. 이를 式 (11)의 凡函數에 代入한 후 各 節點포텐셜  $\phi^i$ 와 遠海域의 散亂波에 대한 解析解에 포함되어 있는 未知의 係數  $\alpha_n$ 에 대해 最小化하면 다음과 같은 線形 代數方程式을 얻을 수 있다<sup>(18)</sup>.

$$[K]\{\psi\} = \{Q\} \quad (13)$$

여기서,  $[K]$ 는 凡函數를 나타내는 式 (11)에서  $I_1 \sim I_4$ 의 積分에 관련되며,  $\{Q\}$ 는  $I_5$ 와  $I_6$ 에 관련된다.  $\{\psi\}$ 는 節點포텐셜과 遠海域 散亂波의 未知係數  $\alpha_n$ 이 포함된 벡터이다. 上記 式은 N개의 未知數에 대한 N개의 線形 聯立 代數方程式으로 本 研究에서는 그 解를 구하는데 通常적인 方法인 Gauss 消去法을 이용하였다.

有限要素法에 의한 계산의 正確度는 波長, 境界 形象 및 問題의 特性 등에 따라 다르다. 要素의 크기는 最短波長 및 最小 曲率半徑보다 작아야 할 것이다. Chen과 Mei<sup>(7)</sup>는 數值實驗結果에 근거하여 3節點 三角形 有限要素를 사용하는 경우 要素의 한 변의 길이가 入射波長의 0.1배보다 작아야 한다는 基準을 提示하였다.

## 3. 數值模型의 適用

東海港의 長週期 副振動의 港內 增幅現象을 豫測하기 위해 解析解와 有限要素를 複合의으로 이용한 數值模型을 적용하여 現場觀測 結果와 比較·分析 함으로서 本 數值模型의 適用性을 확인하고 이를 토대로 東海港 副振動의 Helmholtz natural period, 第2 尖頭週期 및 局部的인 尖頭週期를 제시하였다.

그림 2는 對象海域의 有限要素網으로 총 4,983개의 線形 三角形 要素와 2,656개의 節點으로 構成되었다. 節點間의 距離는 대부분 60 m를 유지시켰으나 防波堤 附近에서는 要素網의 部分的인 修正으로 인하여 이를 약간 초과하는 부분도 있었다. 그러나,

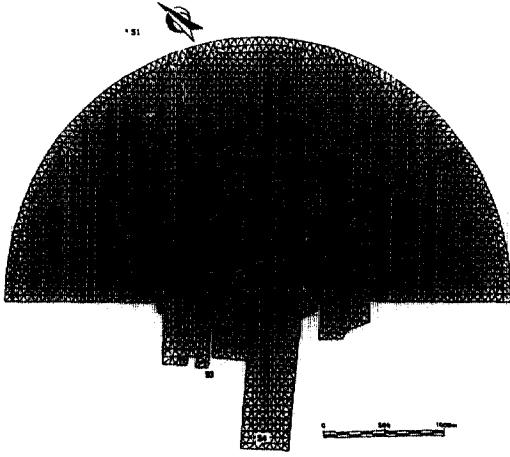


그림 2. 東海港에 대한 有限要素網圖

이는 본 논문에서 취급한 波中 週期가 가장 짧은 파인 週期 60초인 波의 波長이 대략 700 m인 점을 감안하면 충분한 것으로 判斷되었다. 한편, 그림 2에 표시된 S1~S4는 Part 1에 제시된 現場觀測 定點의 位置를 나타낸다.

本 數值模型의 樹立 및 檢證에 대해서는 鄭遠武<sup>(18)</sup> 및 科學技術處<sup>(15,19)</sup>에 자세히 제시되어 있으므로 詳細한 內容은 생략하였다. 한편, 이 模型은 固體 境界에서의 反射率에 대해 尖頭週期에서의 增幅比의 反應이 매우 민감하게 나타났으므로<sup>(18)</sup> 完全開放 直 四角形 模型港灣에 대해 固體 境界面에서의 反射率을 變化시키면서 Ippen과 Goda<sup>(9)</sup>의 解析解와 有限 要素 模型에 의한 數值計算을 比較 檢討한 結果 解析解와 良好한 일치를 나타내었다<sup>(15)</sup>.

數值模型에 의한 計算은, 먼저 觀測 結果의 分析에서 나타난 東海港의 尖頭週期를 찾기 위하여 일정한 간격으로 週期를 增加시키면서 實施하였다. 數值計算은 週期 60초에서 1,200초까지 10초 간격으로 海岸線에 대해 垂直으로 入射하는 경우에 대해 實施되었으며 그 結果를 그림 3에 圖示하였다. 短週期波 觀測 結果에서는 副振動 觀測期間中の 代表 波向의 범위가 data cases 1, 8 및 13에 대하여 각각 N5.2°W~N39.6°E, N16.2°E~N80°E 및 N39.7°~N75.5°E가 되는 것으로 나타난 바 있다(Part 1 參照). 그러나, 週期가 10초 前後인 短週期波와 週期가 1~20분인 長週期波의 波向이 일치한다고 보기는

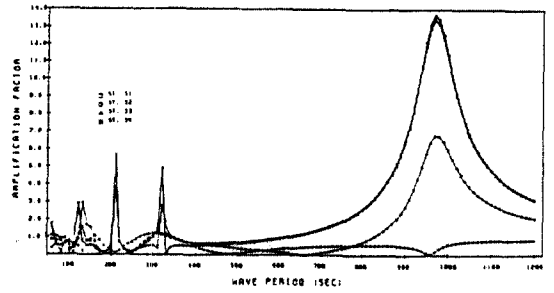


그림 3. 觀測定點 S1~S4에서 여러가지 週期에 대해 계산된 增幅比 反應曲線

어렵다. 따라서, 入射波向의 차이가 增幅比에 어느 정도 影響을 미칠 것으로는 생각되었으나 尖頭週期의 計算에는 큰 影響을 미치지 않을 것으로 사료되어 모든 週期에 대해 海岸線에 대해 垂直 入射(N54.0°E)하는 것으로 假定하였다. 또한, 本 計算에서는 外海에서의 入射波 振幅을 모두 0.5 m로 假定하였으며, 反射率은 尖頭週期의 計算에는 거의 影響을 미치지 않으므로 모든 固體 境界에서 1.0으로 假定하였다. 한편, 海底面 摩擦係數는 精確한 算定이 어려워 全體 領域에 대해 모두  $\beta=0.0$ 으로 하였다.

그림 3을 살펴보면 港入口 및 港內에서 모두 週期 970초(16.2분)에서 共振이 發生하는 것으로 나타나 觀測資料의 分析結果 Helmholtz natural period로 제시된 17.1분과 거의 비슷하며, 港內 定點 S3와 S4에서 共振이 出現한 320초(5.3분) 역시 觀測資料의 分析에서 제시된 5.5분과 거의 一致하였다. 이 외에도 210초(3.5분), 130초(2.2분) 및 120초(2.0분)에서 局部的인 共振이 出現하였는데 이들도 觀測結果에서 제시된 週期和 유사하다(Part 1 參照).

數值計算 結果 제시된 970, 320 및 210초의 3개 尖頭週期에 대해 計算된 等增幅比線圖를 그림 4~6에 제시하였다. 먼저, Helmholtz natural period에 대한 그림 4를 살펴보면 入射境界 附近에서 마디(node)가, 그리고 港內 가장 안쪽에서 북(anti-node)이 나타나서 觀測된 尖頭週期和 마찬가지로 Merian 公式로 구한 尖頭週期와는 큰 차이를 보이고 있다. 港外 定點에서 週期 960초 부근의 增幅比가 크게 감소하는데 이는 Helmholtz natural period에서의 마디가 그 부근에 위치하기 때문으로 생각된다. 第2 尖頭週期에 대한 그림 5의 경우 마디가 港의 中央

RESONANT AMPLIFICATION AROUND DONGHAE HARBOUR

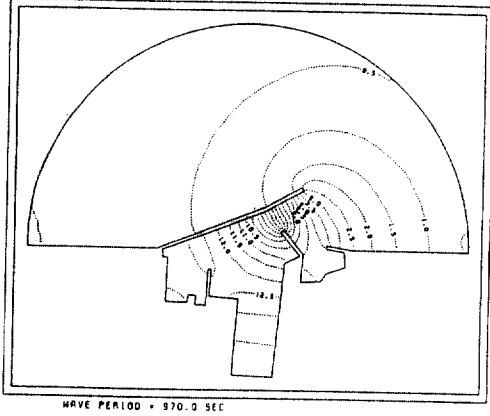


그림 4. 東海港의 第1 尖頭週期(970 sec)에 대해 계산된 等增幅比線圖

RESONANT AMPLIFICATION AROUND DONGHAE HARBOUR

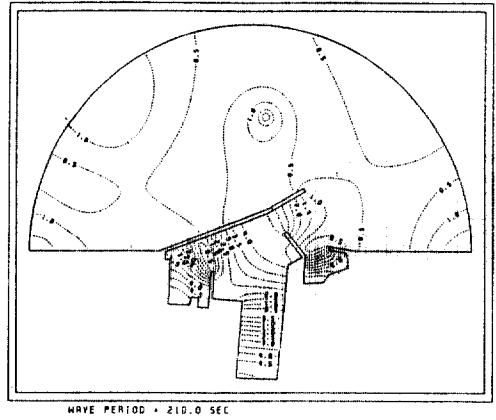


그림 6. 東海港의 局部的인 尖頭週期(210 sec)에 대해 계산된 等增幅比線圖

RESONANT AMPLIFICATION AROUND DONGHAE HARBOUR

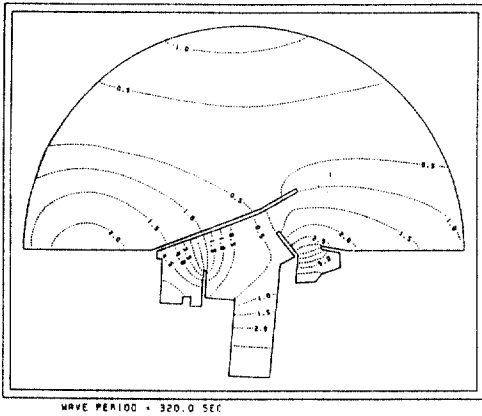


그림 5. 東海港의 第2 尖頭週期(320 sec)에 대해 계산된 等增幅比線圖

部에서 생기고 있는데 이는 港入口에서 거의 3/4 波長이 걸쳐지는 것으로 볼 수 있으므로 이 週期와 一致하는 약 5.5분이 東海港의 第2 尖頭週期인 것으로 생각된다. 週期 210초에 대한 그림 6의 경우 마다가 北港 및 南港의 入口에서 생기므로 이는 이들의 局部的인 尖頭週期인 것으로 생각된다.

스펙트럼 分析에 의해 제시된 Helmholtz natural period 1,024초와 數值模型으로 計算된 第1 尖頭週期 970초에 대해 3個 定點에서의 增幅比를 계산한 結果를 港外 定點에서의 海水位 振幅으로 無次元化한 값을 표 1에 제시하였다. 觀測에서 제시된 週期와 數值計算을 실시한 週期를 약간 다르게 취한 理由는 數值模型으로 計算한 尖頭週期가 觀測値와 다르기는 하나 모든 數值模型이 觀測値와 精確하게 一致하는

표 1. 港外 定點의 Helmholtz natural period에서의 海水位 振幅으로 無次元化된 港內 3個 定點에서의 觀測 및 計算된 增幅比의 比較

定點	無次元化된 副振動 增幅比						
	觀測 結果		數值計算 結果				
	週期(秒)	平均增幅比	週期(秒)	$K_r=1.00$	$K_r=0.99$	$K_r=0.98$	$K_r=0.95$
S2	1,024.0	6.00	970.0	6.80	4.55	3.42	1.95
S3	1,024.0	10.03	970.0	13.72	9.19	6.87	3.87
S4	1,024.0	10.03	970.0	13.44	8.99	6.74	3.79

결과를 제시할 수는 없는 점을 감안하면 共振이 일어나는 週期에 대해서 增幅比를 비교하는 것이 보다 合理的이라고 생각되었기 때문이다.

표 1에서 觀測된 增幅比는 Part 1에 제시되었던 data set 1, 8 및 13의 平均值이다. 이를 살펴보면 固體 境界面에서 完全 反射를 假定할 경우 실제보다 약간 과장된 결과를 豫測할 可能性이 있음을 알 수 있다. 鄭遠武<sup>(18)</sup>에 따르면 水理模型實驗 結果와의 比較時 反射率을 0.99로 했을 경우 兩者가 가장 接近하였으며 이는 표 1에서 알 수 있듯이 本 研究와 같은 現場觀測資料 分析 結果와의 比較에서도 同一한 것으로 나타났다. 표 1에 따르면 反射係數가 약간만 變化해도 無次元화된 增幅比가 크게 변화하고 있다. 本 論文에서 反射係數를 定義하는 방법은 短週期波 數值模型에서 사용되는 것과는 다르므로 반사계수에 대한 민감도도 큰 차이를 보이게 된다. 또한, 本 反射係數의 定義는 前述한 바와 같이 科學技術處<sup>(15)</sup>에서 反射率 敏感度 試驗을 통하여 그 適用性을 확인한 바 있다.

#### 4. 結論 및 討議

本 論文에서는 長週期 副振動의 港内 增幅現象을 豫測하기 위해 解析解와 有限要素를 複合적으로 이용한 數值模型에 대해 연구하였다. 基本方程式으로 海底面 摩擦을 고려한 緩傾斜 方程式을 사용하였으며, 固體 境界面에서는 部分吸收 境界條件을 사용하였다. 計算領域의 縮小를 위하여 防波堤 周邊과 港内 領域은 有限要素로 模型化하고 港外 領域에서는 Helmholtz 方程式의 解析解를 이용하였다.

또한, 東海港에 數值模型을 적용하여 現場觀測 結果와 比較·分析함으로써 東海港 副振動의 Helmholtz natural period 및 第2 尖頭週期를 제시하였다. 本 論文의 主要 結論 및 討議 事項은 다음과 같다.

1. 觀測資料의 分析에서 제시된 東海港의 Helmholtz natural period 및 第2 尖頭週期인 17.1분 및 5.5분과 數值計算에 의한 結果인 16.2분 및 5.3분이 상당히 잘 一致하여 本 數值模型의 適用性이 立證되었다.

2. 觀測資料에서 部分的으로 出現한 2분 前後의

尖頭週期는 數值計算 結果 東海港의 局部的인 尖頭週期인 것으로 나타났다.

3. 固體境界面에서의 反射係數를 0.99로 했을 때 現場觀測 및 數值計算으로 구해진 港内 定點에서의 無次元화된 增幅比가 가장 잘 一致하였다.

4. 固體 境界面에서 部分吸收 境界條件을 사용함으로써 尖頭週期에서의 增幅比를 상당히 정확하게 예측하여 本 數值模型의 妥當性이 확인되었으나 港灣構造物의 種類(岸壁, 消波施設 等)나 自然 海濱 등에 대해 適切한 反射係數의 選定은 3次元 水槽에서의 水理模型實驗 結果 等에 따라야 할 것으로 판단된다.

5. 海底面 摩擦係數에 대해서는 精確한 算定이 어려워서 모두 0으로 하였으나 港入口의 急縮小 등을 고려하기 위해서는 앞으로 이에 대한 詳細한 研究가 요망된다.

#### 謝 辭

本 論文은 科學技術處에서 施行한 特定研究開發 事業인 “항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(II)”의 研究 結果의 一部입니다.

#### 參 考 文 獻

1. Miles, J. and W. Munk., “Harbor paradox”, *J. of the Waterways and Harbor Division, ASCE*, Vol. 87, No. WW3, 1961.
2. Le Méhauté, B., “Discussion of the paper ‘Harbor Ppradox’ by J. Miles and W. Munk”, *J. of the Waterways and Harbor Division, ASCE*, Vol. 88, No. WW2, 1962.
3. Ippen, A.T. and Y. Goda, “Wave induced oscillations in harbor: The solution for a rectangular harbor connected to the open-sea”, Report No. 59, Hydrodynamic Laboratory, M.I.T., 1963.
4. Lee, J.J., “Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape”, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1969.
5. Ünluata, U. and C.C. Mei, “Long wave excitation in harbors: An analytical study”, Report No. 171, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resources and Hydrodynamics, M.I.T., 1973.
6. Berkhoff, J.C.W., “Computation of combined ref-

- raction and diffraction", *Proc. 13th Conf. on Coastal Engineering*, 1972.
7. Chen, H.S. and C.C. Mei, "Oscillations and wave forces in an offshore harbor", Ralph M. Parsons Lab., Report No. 190, M.I.T., 1974.
  8. Walker, S. and C.A. Brebbia, "Harbor resonance problems using finite elements", *Advances in Water Resources*, Vol. 1, No. 4, 1978.
  9. Booij, N., "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", Delft University of Tech., Dep. Civil Eng., Report No. 81-1, 1981.
  10. Chen, H.S., "Hybrid element modelling of harbor resonance", *4th Intern. Conf. on Applied Numerical Modelling*, 1984.
  11. Behrendt, L., "A finite element model for water wave diffraction including boundary absorption and bottom friction", Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Series Paper No. 37, 1985, pp. 188.
  12. Chen, H.S., "Infinite elements for water wave radiation and scattering", *Intern. J. for Numerical Methods for Fluids*, Vol. 11, 1990, pp. 555-569.
  13. Huang, M.C., J.W. Leonard and R.T. Hudspeth, "Wave interference effects by finite element method", *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, ASCE, Vol. 111, No. 1, 1985, pp. 1-17.
  14. Zienkiewicz, O.C., D.W. Kelly and P. Bettess, "The coupling of the finite element method and boundary solution procedures", *Intern. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, 1977, pp. 355-375.
  15. 科學技術處, "항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(II)", 韓國海洋研究所, BSPG 00153-481-2, 1992, pp. 183.
  16. Mei, C.C. and H.S. Chen, "Hybrid-element method for water wave", *Proceeding of Symposium on Modeling Techniques*, San Fransisco, 1975.
  17. Rottman, W. and W. Zielke, "FEM-analysis of combined diffraction and refraction in harbors, including partially-reflecting boundaries", *Proc. Intern. Conf. Coastal and Port Engineering in Developing Countries*, Colombo, Vol. 2, 1983, pp. 1319-1329.
  18. 鄭遠武, "複合要素法에 의한 港內 波浪 侵入·變形 研究", 明知大學校 大學院 土木工學科, 工學碩士學位論文, 1991, pp. 169.
  19. 科學技術處, "항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(I)", 韓國海洋研究所, BSPG 00135-373-2, 1991, pp. 194.

(接受 : 93. 2. 15)