

## 境界要素法에 의한 墨湖港의 副振動特性에 관한 研究

Research on the Seiche of the Mukho harbor  
using the Boundary Element Method

李 弘 植\*

Lee, Hong Sik

## Abstract

A numerical simulation using the Boundary Element Method is performed for investigating the seiche in the Mukho harbor. The range of the incident waves period is from 7 seconds to 10 minutes, which these surface waves usually may be found in cases of the swell and the long period storm surges caused by storm winds. It is found that the seiche may be occurred by resonating with the incident waves of which the periods are about 11 seconds and 3 minutes. The numerical method was verified by the hydraulic model experiment data which had performed before. Numerical results for the seiche in the Mukho harbor show good agreements with the field observations, so that this research may be useful to estimate harbor calmness in a harbor and the harbor planning.

## 요 지

墨湖港內 副振動特性을 調査하기 위하여 7초부터 600초 範圍사이의 入射波에 대하여 境界要素法을 이용한 數值計算을 실시 하였다. 또 사용된 數值計算 方法은 既存에 실시 하였던 水理模型實驗 結果를 이용하여 適用성과 妥當성을 檢討하였다. 副振動 調査結果 11초와 3분 程度의 과가 入射 할때, 높은 增幅率이 나타났으며 과거의 觀測報告와도 유사한 結果를 나타냈다. 이로서 本 數值計算 方法은 墨湖港의 靜穩度評價, 港灣計劃등에 有用하게 사용될 수 있다.

## 1. 序 論

外海에 면하고 있는 港에서는 氣壓, 바람, 潮流, 波浪등의 變動에 起因하여 發生된 長週期波가 港內에서 增幅되는 副振動의 現象이 誘發되기 쉽다. 副振動의 增幅이 큰 경우에는 船舶의 被害와 荷役作業의 能率低下를 招來하기 때문에 港內 靜穩度の 評價, 沿岸防災 對策樹立上 副振動의 特性을 調査

하는 것은 매우 重要하다.

本 研究에서는 港灣稼働率의 增大를 위하여 入射條件들에 따른 港內에서 副振動 特性을 把握하고, 대상은 墨湖港으로 한다. 이렇게 하여 今後 墨湖港이 産業 前進基地로서 重要性이 높아지고 港灣의 擴張 및 改良 혹은 港灣計劃의 策定이나 管理時에 對備하여 本 研究에 의한 港內 副振動 特性을 活用할 수 있도록 한다.

副振動의 發生原因은 아직 不明確한 점이 많으나

\* 정회원 · 중앙대학교 건설대학 토목공학과 부교수

接近方法에 따라 分類하면 첫째, 低氣壓 通過시 强風에 의해 長週期波가 形成되거나 혹은 강한 流速으로 부터 發生된 내부파가 항내에서 構造物과의 相互作用에 의해 發生하는 氣象的인 요인. 둘째, 港의 形狀과 外廓 및 接岸施設의 構造形態에 따라 反射率이 높은 경우 항내의 波浪에너지가 減衰되지 않은 狀態에서, 특히 항의 깊숙한 內側 水域에서는 入射波의 共振에 의한 增幅 現象이라는 항의 形狀的인 原因을 들 수 있다. 副振動에 관하여는 從來부터 많은 研究가 行하여져 왔으나 그 중에서 前者의 경우에 대한 한 예로서, 日本의 Nagasaki 항에서 氣壓變動에 의한 長週期波의 發生原因과 副振動의 糾明에 관한 Hibiya 等<sup>(1)</sup>의 研究와, 後者에 대하여는 속도포텐셜 理論을 導入하여 數值計算을 행하는 Lee J.J.<sup>(2)</sup>의 研究가 있다.

本 研究에서는 墨湖港의 副振動 特性의 調査範圍를 7초부터 600초 까지의 週期の 파를 對象으로 각각 2方向에서 入射하는 경우에 대하여 波高增幅率을 구하고, 港內 調査點은 약 170개소의 地點을 包含하는 全水域으로 한다. 한편 研究方法으로서 Lee J.J.가 行하였던 後者의 方法으로 接近하지만, 解析方法은 井島 等<sup>(3)</sup>에 의해 提案되었던 波動函數의 一般解를 이용하여 數值計算을 행하고, 또 數值計算方法에 대하여 既存에 實施하였던 水理模型實驗과 比較 檢討하여 計算方法의 妥當性 및 適用性을 檢證한다. 그다음 墨湖港內의 副振動에 대하여 행한 數值計算 結果를 解析하기로 한다.

## 2. 港內에서의 副振動 理論

그림 1에 나타낸 것과 같이 靜水面上에서 港口의 中央을 座標의 原點을 잡고 南쪽 方向으로 x축, 그것의 直角인 東쪽 方向으로 y축, 鉛直方向으로 z축을 취한다. 港內의 水深은 一定하다고 假定하고 底面의 摩擦은 無視한다. 流體의 性質을 非粘性, 非壓縮性의 完全流體로 假定하고 그 運動을 非回轉性으로 하면 速度포텐셜  $\Phi$ 가 存在하고 式 (1)과 같이 Laplace 방정식을 滿足해야 한다.

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) \exp(-i\sigma t) \quad (2)$$

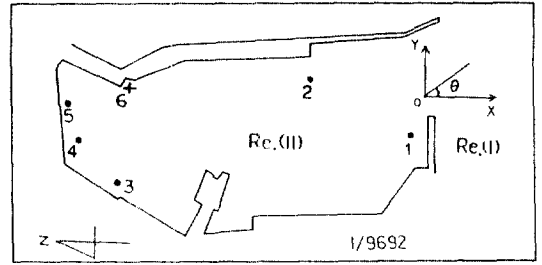


그림 1. 墨湖港의 平面圖 및 座標軸

여기서  $i$ 는 複素數( $\sqrt{-1}$ ),  $\sigma$ 는 角周波數,  $t$ 는 時間,  $\Phi(x, y, z)$ 는 時間과 無關한 速度포텐셜이다. 速度포텐셜의 解를 구하기 위하여 境界條件으로서, 자유표면에 있어서 運動學的 條件(Kinematic condition), 動力學的 條件(dynamic condition)은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \text{ at } z=0 \quad (3)$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} \text{ at } z=0 \quad (4)$$

式 (3), (4)로 부터  $\eta$ 를 소거하면 Cauchy-Poisson 조건의 自由表面 境界條件을 式(5)와 같이 얻는다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \left( \frac{\sigma^2}{g} \right) \Phi = 0 \text{ at } z=0 \quad (5)$$

底面條件은 式(6)으로 나타낼수 있고, 방파제 壁面에서의 고정경계조건은 境界면에 있어서 법선방향의 측을  $n$ 으로 하면 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ at } z=-h \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \text{ on the fixed harbor boundary} \quad (7)$$

위의 境界條件들을 이용하여 速度포텐셜의 解는 다음과 같이 얻어진다.<sup>(4)</sup>

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{H_i \cdot g}{2\sigma} f(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\sigma t} \quad (8)$$

여기서  $H_i$ 는 入射波의 波高( $A_i = H_i/2$ ,  $A_i$ ; 振幅),  $k$ 는

波數,  $h$ 는水深,  $f(x, y)$ 는  $x, y$  方向에 대하여 任意의 角度  $\theta$ 로 運動하는 波動函數 이다. 自由表面 條件式(5)로 부터 波의 分散關係式이 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (9)$$

또 波動函數  $f(x, y)$ 는 다음과 같이 Helmholtz식을 滿足해야 한다.

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} + k^2 f(x, y) = 0 \quad (10)$$

그림 1에 나타낸 것과 같이 港入口로 波가 入射할 경우 領域을 둘로 나누는 것이 解析上 편리하다. 領域(I)은 港入口 前面의 海域이고, 領域(II)는 港内の 海域으로 港入口에서 回折한 波가 進入하는 領域이다.

### 2.1 領域(I)에서의 解析

無限한 外海領域에서 進行해 오는 波는 港口部(港의 入口)에 到達하여, 港口部에서 防波堤의 存在 혹은 入口 遮斷에 의한 反射의 影響을 받는다. 따라서 港口部에서는 波動函數를 다음과 같이 入射, 散亂, 그리고 反射波의 成分으로 나타낼 수 있다.

$$f_1(x, y) = f_i(x, y) + f_s(x, y) + f_r(x, y) \quad (11)$$

한편, 港口部에  $x$ 축과 方向으로 進入하는 波  $f_i(x, y)$ 의 波形을 다음과 같이 表現 하면

$$\eta_i = \frac{H_i}{2} \cos\{k(x \cos \theta + y \sin \theta) + \sigma t\} \quad (12)$$

(단, 여기서  $\eta_i$ 는 靜水面에서 水面의 높이 이다.) 이 波形에 對應하는 入射波의 波動函數는 動力學的 條件 式(4)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$f_i(x, y) = -i \exp\{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \quad (13)$$

또 反射波는,

$$f_r(x, y) = -i \exp\{-ik(x \cos \theta - y \sin \theta)\} \quad (14)$$

散亂波의 波動函數  $f_s(x, y)$ 는 Helmholtz식과 Sommerfeld의 放射條件을 滿足하는 函數로 決定 된다.

$$\nabla^2 f_s(x, y) + k^2 f_s(x, y) = 0 \quad (15)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left( \frac{\partial f_s}{\partial r} - ik f_s \right) = 0 \quad (16)$$

### 2.2 領域(II)에서의 解析

港口部를 進入한 波高는 港內로 傳播되면서 放射 條件에 의해 減衰해 가는 散亂波가 發生한다. 領域(II)인 港內에서의 波動函數  $f_2(x, y)$ 는 Green定理를 이용하여 積分方程式으로 式(17)과 같이 얻어지며, 港内の 任意地點( $x, y$ )에서는 다음과 같이 된다.

$$f_2(x, y) = -\frac{i}{4} \int_s \{f_2(x_i, y_i) \left[ \frac{\partial}{\partial n} (H_0^{(1)}(kr)) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial n} (f_2(x_i, y_i)) (H_0^{(1)}(kr)) \right]\} ds \quad (17)$$

여기서  $H_0^{(1)}(kr)$ 은 0차 제1종 Hankel함수,  $r$ 은 점( $x, y$ )와 ( $x_i, y_i$ )의 距離,  $f_2(x_i, y_i)$ 는 港의 境界線上의 점 ( $x_i, y_i$ )의 값을 나타내고,  $s$ 는 反時計方向의 境界積分의 區間이다.

따라서, 港內의 任意點 ( $x, y$ )가 境界線上의 점( $x_i, y_i$ )에 接近하는 경우에 境界上의  $f_2(x_i, y_i)$ 의 式은 다음과 같이 얻어진다.<sup>(2)</sup>

$$f_2(x, y) = -\frac{i}{2} \int_s \{f_2(x_i, y_i) \left[ \frac{\partial}{\partial n} (H_0^{(1)}(kr')) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial n} (f_2(x_i, y_i)) (H_0^{(1)}(kr')) \right]\} ds \quad (18)$$

$$\text{단, } r' = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

이와같이 散亂波  $f_2(x, y)$ 의 函數를 구했으나, 領域(I)과 領域(II)에서 港口部 線상에 대하여 連續性이 成立해야 하므로 다음과 같은 境界條件을 이용하여 結合시킨다.

$$\text{港口部 線상에서 } f_1(x, y) = f_2(x, y) \quad (19)$$

$$\text{港口部 線상에서 } \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial n} = -\frac{\partial f_2(x, y)}{\partial n} \quad (20)$$

結局, 港内の 波高增幅率은 다음과 같이 얻어진다.

$$KD = |H/H_i| = |f_2(x, y)| \quad (21)$$

### 2.3 離散化 및 數值計算

港内波高에 관한 數值計算 方法을 크게 나누면 波動方程式을 직접 푸는 方法<sup>(5)</sup>, 境界積分法<sup>(2)</sup>, 有限要素法<sup>(6)</sup>, 波向線 追跡法<sup>(7)</sup> 등으로 分類된다. 波動方程式을 差分으로 直接 푸는 方法은 波浪의 傳播狀況을 알 수 있으며, 非線形問題의 應用이 容易한 長點이 있으나 無限 遠方條件의 取扱이 어렵고 定常狀態의 判定에 困難한 點이 있다.

境界積分法은 Green定理의 適用 方式에 따라 二重層密度와 一重層密度를 이용하는 경우가 있는데 前者의 경우가 Lee J.J.<sup>(2)</sup>, 後者の 경우가 Hwang 등의 研究<sup>(8)</sup>이다. 또 有限要素法과 境界積分法에는 각각 長短點이 있으나, 計算對象範圍가 넓은 경우 計算時間(費用)과 入力資料의 容易性에 左右된다. 記憶容量 및 演算回數를 Bettes의 研究<sup>(9)</sup>에 의하면 2次元 問題에서는 한번의 要素數가 77以上 이라면 境界積分法이 有利한 것으로 보고되고 있다. 本 研究에서의 要素數는 入射波의 條件에 따라 差異는 있으나 70~713 程度로 分割하였다. 式(17) 및 (18)을 波長L에 의해 無次元化 하고, 港内境界線에서 節點 間隔은  $\Delta Si = L/10$ 로, 銳敏한 變谷地點에서는  $L/100$ 로 分割하여 (i-1)번째와 (i+1)번째 要素의 中點(mid point)의 座標(j)에 의해 그要素  $\Delta Sj$ 의 값을 代表시켜 數值計算을 實施한다.<sup>(3,10)</sup>

### 3. 水理模型實驗에 의한 計算方法의 檢證<sup>(11,12)</sup>

實驗値와 좋은 一致를 보인 數值計算 結果에도 全水域에서 兩側 結果 사이에 差異가 반드시 發生하는 것으로 想定하고, 그 差異의 程度나 無視 許容範圍 등을 調査하여 本 數值計算이 副振動, 港灣 外廓計劃에 따른 港内波高 計算, 港入口의 位置 및 幅 등의 設計에 使用 되어도 適合한지의 與否를 檢討할 必要가 있겠다. 이러한 意味에서 數值計算 및 實驗의 結果를 對比하여 數值計算이 實際의 港内波高에 관한 適用性과 妥當性의 檢討을 위하여, 多樣한 幅의 港入口를 갖는 一般의 港形을 考案하여 그림 2의 水槽에서 水理模型實驗을 既存에 實施하였다.

入射波 條件은 水槽內에 模型港灣을 設置하기 前에 Flap型의 造波板으로 週期 1.2초의 波를 發生 傳播 시킨 후, 港入口 進入地點인 A, B, C, D, E의 5개 地點에서 5대의 容量式 波高計로 進入波를 同

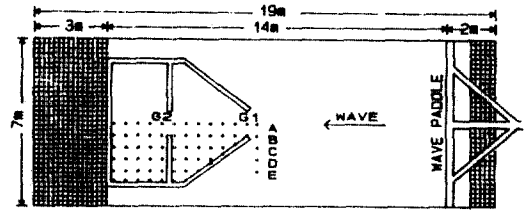


그림 2. 水理模型實驗에 使用된 水槽

表 1 模型港灣의 入口幅

Run No.	Outer gap (G1)	Inner gap (G2)	Run No.	Outer gap (G1)	Inner gap (G2)
1	0.5L	0.5L	16	2.0L	0.5L
2	0.5L	1.0L	17	2.0L	1.0L
3	0.5L	1.5L	18	2.0L	1.5L
4	0.5L	2.0L	19	2.0L	2.0L
5	0.5L	2.5L*	20	2.0L	2.5L*
6	1.0L	0.5L	21	2.5L	0.5L
7	1.0L	1.0L	22	2.5L	1.0L
8	1.0L	1.5L	23	2.5L	1.5L
9	1.0L	2.0L	24	2.5L	2.0L
10	1.0L	2.5L*	25	2.5L	2.5L*
11	1.5L	0.5L	*는 G2가 없는 경우		
12	1.5L	1.0L			
13	1.5L	1.5L			
14	1.5L	2.0L			
15	1.5L	2.5L*			

時에 測定하여 平均 入射波高로서 3.33cm를 구하였다. 또 港内の 波高測定은 6대의 容量式 波高計를 同時에 使用하여 測定 地點을 移動하면서 實施하였고, 測定地點은 그림 2와 같이 50cm의 間隔으로 各 模型別로 61~72 地點에서 測定하였다. 模型港灣에 관하여는 長方形의 水域 入口에는 한쌍의 防波堤에 의해 内港을 形成하고 그 入口幅 G2는 0.5L 부터 2.5L까지 0.5L 間隔으로 넓혔다. 또 同時에 外海 方向으로 防波堤를 延長하여 外港의 入口幅 G1을 같은 方法으로 0.5L부터 2.5L까지 0.5L 間隔으로 넓혔다. 이렇게 하여 内港과 外港의 入口幅 G2, G1의 값을 각각 組合하여 模型港灣을 25種類로 構成하여 각각에 대하여 實驗을 行하였다. 단, 長方形 港灣은

폭이 2.5L이기 때문에 内港의 幅 G2가 2.5L의 경우에는 内防波堤가 없고, 外海를 向하여 兩翼 突堤形 防波堤에 의해 港灣이 形成되는 것이다. 本 實驗의 模型港灣 가운데 Run No.7~10, 12~14, 17~19의 模型은 墨湖港의 外廓 形狀과도 흡사한 점이었다. 25種類의 模型港灣의 入口幅의 條件은 表 1과 같다.

#### 4. 數值計算의 妥當性 檢討와 適用限界<sup>(11,12)</sup>

本 水理模型 實驗은 25種類의 模型港灣을 對象으로 水理實驗을 行하였고, 그 實驗結果를 利用하여 數值計算의 結果 및 特性 등의 檢證에 活用할 수 있도록 한 것이다.

實驗과 同一한 境界條件으로 數值計算을 實施하여 兩側의 比較 結果, 數值計算과 水理模型實驗에 의한 KD는 定性的으로 매우 잘 一致하였다. 그 傾向으로서 港内 波高比 KD가 큰 경우에는 實驗值보다 計算值가 크고 KD값이 작은 경우에는 좋은 一致를 보이고 있으며 計算值가 實驗值 보다 작은 경우는 극히 드물다. 즉 計算值가 큰 地點에서는 實驗值 KD도 커지게 된다. 그림 3과 6의 比較에서도 알 수 있듯이 港入口 幅 G1, G2의 組合에 관한 波高特性으로서 G1 및 G2가 좁아지면 計算值와 實驗值의 差異가 발생하고 있으나 그 變動 特性은 거의 같고, 또 港入口 幅 G1과 G2가 커짐에 따라 計算值와 實驗值의 KD가 잘 一致하고 있다. 25種類의 模型港灣內의 測點數는 약 1800個所인데 實驗值와 計算值에 대한 比較에서 KD가 약 1.5의 限界에서 차이가 발생하는 傾向을 나타냈다. 즉, 計算值의  $KD < 1.5$ 의 範圍에서는 兩側의 結果가 매우 잘 一致 하고 있으며 이와 反對로, 計算值의  $KD > 1.5$ 의 範圍에서는 數值計算의 結果가 模型實驗의 結果 보다 대부분 큰 값을 나타내고 있고 實驗值가 더욱 커지면 計算值와의 差異가 더 커진다. 이 원인중의 하나로서 計算值가 큰 값 혹은 發散하는 곳에서의 實驗值는 물의 표면장력, 점성효과, 마찰저항, 입구에서의 에너지 손실효과, 그리고 實驗波의 條件 등에 따라 실험에서는 큰 파고 발생에 한계가 있기 때문이라고 생각된다. 25 種類의 模型港灣에 대한 實驗 및 數值計算의 結果는 文獻<sup>(11,12)</sup>에서 다루었기 때문에 지면상 그 一部인 Run No. 2, 7, 13, 25의 比較結果를 參考로

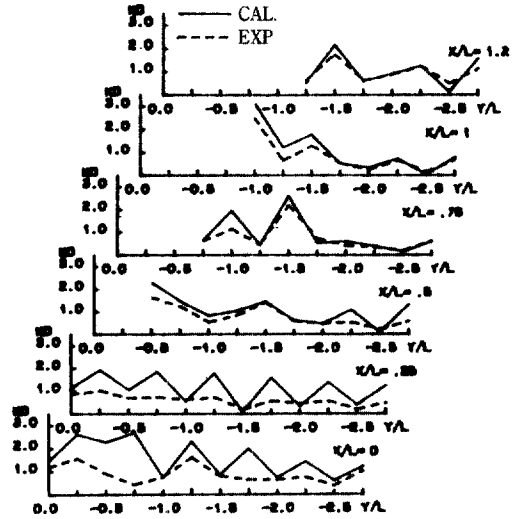


그림 3. Run No. 2의 파고비 분포

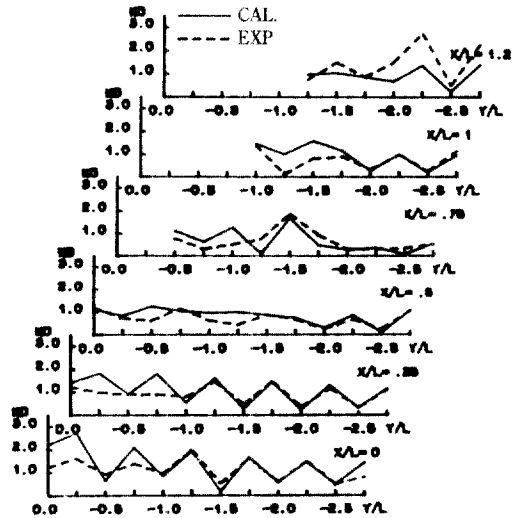


그림 4. Run No. 7의 파고비 분포

그림 3, 4, 5, 6에 나타났다. 이러한 結果로 부터, 數值計算에 의한 港灣副振動의 特性調查, 比較檢討의 利用에 充分하며 迅速하고 容易하게 여러 形態의 港灣形의 比較가 可能하게 된다. 그러나 傾向으로서 는 그림 6의 Run No.13의 경우와 같이 若干 큰 KD를 나타내는 경우가 있는것에 留意할 必要가 있다. 특히 本 水理實驗의 模型港灣중 Run No.13의 경우는 매우 特異한 應答이 나오고 있다. 이러한 경우는 實際 港灣에 대하여 副振動의 計算에서 간혹

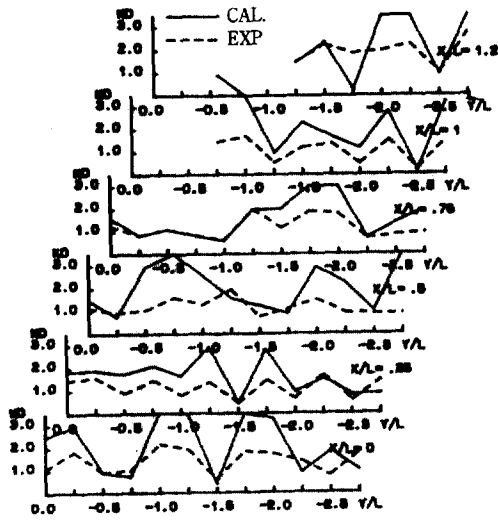


그림 5. Run No. 13의 파고비 분포

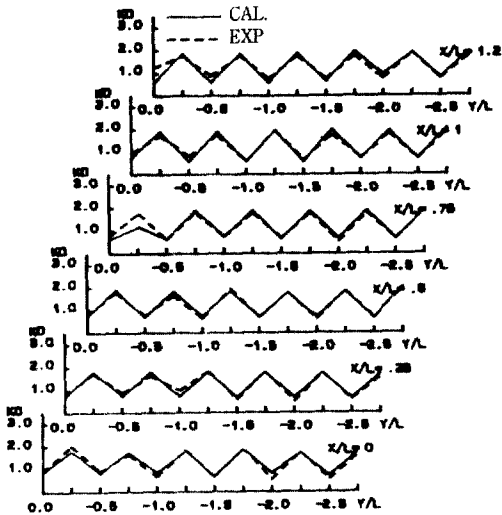


그림 6. Run No. 25의 파고비 분포

나타나는데, 表 1의 Run No.12의 조건과 13을 比較할 때 전혀 豫測하지 못하였던 것이다. 이러한 것들로부터 副振動, 港形, 2重港灣의 港口幅 등의 比較 設計에는 本 數值計算의 方法을 이용 한다면 소위 安全側으로 檢討할 수 있게 되는 것은 明白해진다. 한편 이러한 2重港灣의 경우에도 나타났듯이 港內에서 共振에 의한 높은 波高를 誘發시키는 港形이 있으므로 共振에 의해 高波가 發生하는 港形, 位置 및 그 크기가 數值計算에 의하여 計算 된다.

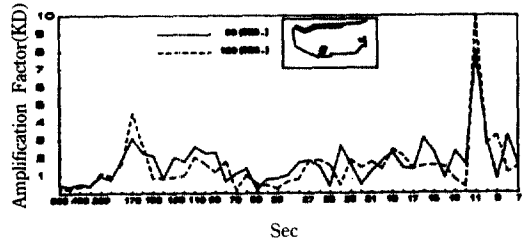


그림 7. Point 10에서의 파고 증폭률

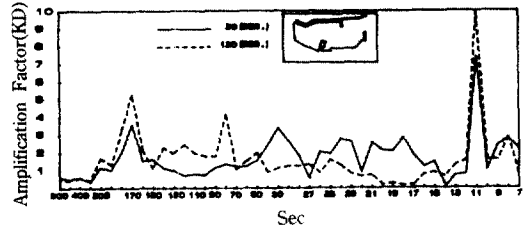


그림 8. Point 2에서의 파고 증폭률

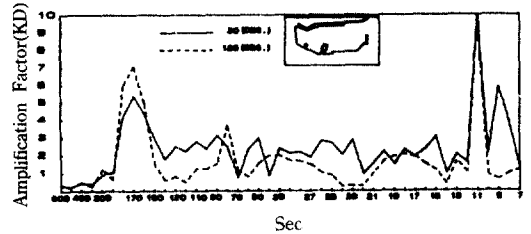


그림 9. Point 3에서의 파고 증폭률

이로서 本 研究의 數值計算에 의한 港內 副振動에 관한 檢討는 한층 더 銳敏하게 나타나고 있기 때문에 매우 效果的이다.

## 5. 數值計算에 의한 墨湖港의 副振動計算結果 및 解析

墨湖港의 平面 形狀은 그림 1에 나타난 것과 같이 港口幅 약 300m, 港口로부터 항의 안쪽 接岸面까지의 水平距離는 약 990m 이며, 港內의 接岸 繫留施設 附近의 水深은 약 7~8m(浚渫 豫定으로 浚渫 후의 豫想 水深), 그 以外의 港內水域의 水深은 現在 10m 前後의 分布로 急激한 水深變化가 없기 때문에 數值計算上에서의 水深은 10m의 一定水深으로 假定하였다. 그림 1에서 ●는 數值計算上 增幅率을 나타낸 位置이고, +는 現地 檢潮所의 位置이다.

入射波의 諸元은 單一波向의 規則波로서 週期는

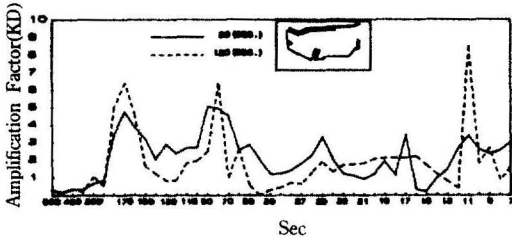


그림 10. Point 4에서의 파고 증폭률

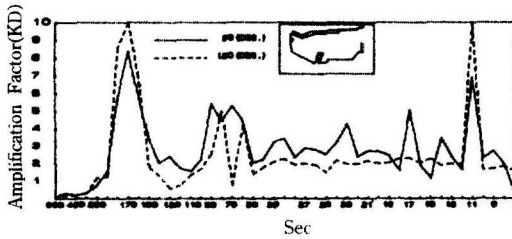


그림 11. Point 5에서의 파고 증폭률

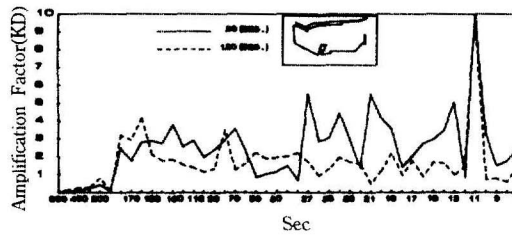


그림 12. Point 6에서의 파고 증폭률

7초부터 30초 까지 매 1초 간격으로 24종류, 30초부터 200초 까지 10초 간격으로 17종류, 200초에서 600초 까지 100초 간격으로 4종류로 채택하여 45종류의 入射波로하고, 入射角은 30°와 120°로서 각각 SSE 및 ENE 方向에 근접하며 여름철과 겨울철에來襲頻도가 높은 入射方向이다. 이로서 각각의 두 方向에 대하여 모두 90종류의 入射波를 대상으로 하였다.

墨湖港內 170개소의 調査點中 일부분인 6개소만 그림 7~12에 나타낸것과 같이 높은 增幅率을 일으키는 進入波는 全般的인 港內水域에서 11초와 170초 程度의 週期の 波로서 나타나고 있으며, 또 그 以外에도 港內의 內側 水域에서는 80초 週期の 波가 높은 增幅率을 나타내고 있다. 특히 그림 10, 11의 경우는 反射性이 강한 岸壁構造로 인하여 增幅率은 다른 곳과 비교하여 相對的으로 높은 增幅率의 傾向을 나타내고 있다.

또한 局所的으로 增幅率이 높아지게 되는 대상의 進入波의 週期는  $T=20\text{초}\sim 80\text{초}$  사이에서도 나타나고 있는데 이것은 swell에 속하는 週期가 比較的인 進入波가 港內水域 및 繫留地點 전반에서 共振을 誘發시킬 수 있는 可能性이 높고, 그 중에서도 특히 25초 前後의 週期를 갖는 入射波에 留意할 必要가 있다. Point 6은 現地의 檢潮所의 位置와 同一한 地點이다.

각 進入波의 週期別로 應答 結果를 보면 全體 港內 水域의 應答形態와 비슷한 增幅率을 취하고 있다. 그러나 그 곳에서도  $T=170\text{초}$ 을 前後로  $T=2\text{分}\sim 3\text{分}$  範圍에서 높은 增幅率을 보이고 있다. 이 地點에서는 複雜한 形狀이나 構造物이 存在하지 않는 곳으로 進入된 波의 遮斷 效果가 거의 없는 곳으로 全體 港內水域의 增幅率 變動 現象을 代表하여 반영하기에 適合한 位置로 생각된다.

6개소의 調査點중 가장 구석에 위치하고 있는 Point 5에서는 振幅이 比較的인 높게 나타났다. 이곳은 港의 구석에 위치하고 높은 反射性 壁面의 影響을 받고 있으며, 동시에 港의 바깥쪽보다 안쪽에서 副振動에 의한 海面의 昇降이 높게 일어나는 現象이기 때문으로 보인다. 뿐만아니라 Point 5 부근의 岸壁은 形狀의 上 V字形을 취하고 있기 때문에 波浪에너지의 集中 效果가 크게 作用하고 있기 때문이다.

Point 3의 지점은 突堤形의 接岸施設이 設置되어 있기 때문에 回折과 壁面의 反射影響이 강하게 作用하고 있고 이 地點 附近에서도 약 3분대의 固有振動 週期の 出現性이 豫測되고 있다. Point 3에서의 增幅率은 檢潮所 地點에서의 結果와도 類似하게 나타나고 있다. 따라서 墨湖港의 固有振動 週期는 長週期波의 範圍에서는 2.7分에서 3分사이로 推定이 되며 港入口 附近인 Point 1에서의 結果도 이와 비슷한 樣相을 보이고 있다.

한편, 入射角에 따라 比較하면 30°와 120°에 대하여 應答特性은 비슷하게 나타나고 있고, 突堤形 接岸施設을 中心으로 하여 안쪽의 波高比가 港의 바깥쪽보다는 全般的으로 큰값을 나타내고 있다. 이러한 傾向은 入射 週期가 길수록 더욱 더 잘 나타나고 있다.

또한 두 入射角 別로 增幅率을 比較해 보면 30°

입사각의 경우가 더 높게 나타나고 있는데, 20초~30초 範圍의 週期の 入射波는 더욱 더 현저하게 나타나고 있다.

이러한 分析 結果의 綜合的인 檢討를 하면, 墨湖港의 副振動 發生은 颱風시 11초 前後 週期の 入射波 및 低氣壓 通過나 氣壓變動에 따른 強風에 의해 長週期波가 發生하여 그 週期가 약 3분의 範圍에 속하는 波일 때 副振動이 發生할 可能性이 높은 것으로 豫想된다. 颱風의 경우 높은 波浪이 來襲할 때 그 週期가 대체로 10초 前後 사이에 속하고 있다. 그러나 그 以上の 週期가 來襲하는 것은 低氣壓이 長時間 持續되는 경우나 혹은 中心氣壓이 대단히 낮은 颱風의 경우로 보인다. 이때는 副振動의 振幅이 커지고 船舶, 港灣施設 等の 被害가 클 것으로 보인다.

## 6. 結 論

既存의 現地觀測 結果에 의하면 墨湖港에서는 過去 여러차례 副振動이 發生한 것으로 報告되고 있다. (13) 보고서에 의하면 1985년 10월에는 78cm, 1987년 2월에는 약 1m 정도로 되어 있다. 원인으로는 低氣壓 通過와 颱風에 의한 것으로 報告 되고 있다. 그때의 昇降週期는 15초~數分帶로 알려지고 있다. 本 研究에서는 7초 부터 600초 까지의 範圍에서 副振動을 解析 하였으나 增幅率이 현저히 높아지는 範圍는 약 11초와 3분의 長週期波 條件으로서 거의 유사한 結果를 보이고 있다.

따라서 本 數值計算方法은 실제의 港灣에 있어서 副振動의 發生 豫測에 適合한 手段으로서 사용될 수 있다고 생각한다. 한편, 本 研究에서 사용된 計算方法에 대하여 增幅率의 定量的인 評價에 관하여는, 실제의 水深이 항내에서 急激한 變化를 하고 있는 경우나, 海底傾斜가 큰 경우에는 水深의 差異에 따른 誤差가 發生하기 때문에 특히 規模가 작은 港灣이나 漁港을 對象으로 할 경우에는 改善해야 할 問題點은 남아 있다.

墨湖港의 경우 港內水深이 거의 一定하다고 가정하였으나 항내 깊숙히 位置한 Point 5의 부근에서는 水深이 比較的의 얇다. 이 때문에 定量的인 값의 평가에는 실제로 差異가 있을 것으로 判斷된다. 실제로 本 計算의 結果대로 增幅率로 인하여 그 많음의

波高가 上昇한다고 보기는 어렵다. 그 이유는 計算上에 있어서 水深을 平均水深으로 하였고 非減衰, 反射壁面으로 假定하였기 때문이다. 즉, Point 5 부근에서 水深은 7~8m로 가정하였으므로 가령 1m의 進入波高에 대하여  $KD=10$  이상이라면 10m 이상의 波高는 存在하지 않고 이미 碎波로 變하여 많은 에너지가 減衰해 버렸음을 알 수 있다. 그러나 增幅率의 絕對值에 관하여 誤差가 發生하더라도 各共振 週期間의 增幅率의 相對的인 대소 관계는 해석이 가능하다. 더구나 水理模型實驗 結果에서 밝혀졌듯이 水理模型 實驗結果가 큰 增幅率( $KD$ 가 1.5 이상)이 나타날 때는 數值計算上에서는 더욱 더 相對的으로 커진 몇배의 銳敏한 增幅率을 보이고 있기 때문에 실제적인 港內 增幅率이 커지는 것을 定性的으로 잘 提示해 주고 있다. 이로서 港灣計劃時 本 數值計算 方法을 이용하여 安全側으로 設計할 수 있고(14), 副振動으로 인한 沿岸防災의 豫報, 警報에도 迅速히 活用될 수 있기 때문에 實用的인 것으로 생각된다.

한편 數值計算上에서 問題가 되는 점에 대하여는 今後 改善해 나아갈 豫定으로 있으며, 그 예로 外海에 突出한 防波堤의 回折效果는 고려할 수 있으나, 港口部에서 에너지 損失 效果, 防波堤의 消波 機能에 따른 消波 效果, 水深 變化등에 대하여 高次共振 Mode, 入射波의 波高 等에 이르기까지의 課題를 들 수 있다. 앞으로 副振動 增幅의 定量的인 絕對評價를 위하여 理論을 면밀히 檢討해야 할 必要가 있다.

## 謝 辭

이 논문은 1990년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 본 연구를 지원해 주신 한국학술진흥재단에 감사 드립니다.

## 參 考 文 獻

1. Hibiy, T., Kajiura, K., "Origin of the Abiki phenomenon in Nagasaki bay", *J. Oceano. Soc. Japan*, Vol.38, No.3, 1982, pp.172-182
2. Lee, J.J., "Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry", *J. F. Mech.*, Vol.45, 1971,



pp.375-394

3. 井島武士, 周宗仁, 湯村やす, 田淵幹修, “任意形状の透過および不透防波堤による波の散乱と波力”, 第20回海岸工学講演會論文集, 1973, pp.79-87
4. Le Mehaute, B., “An introduction to hydrodynamics & water waves”, Springer-Verlag, 1976, p.217
5. 伊藤喜行, 谷本勝利, “新しい方法による波動の数値計算”, 港灣研究所報告11, Vol.10-2, 1971, pp.97-120
6. 坂井藤一, 月岡康一, “波動解析への有限要素法の適用”, 第22回海岸工学講演會論文集. 1975, pp.97-101
7. Larsen, J., “A Harbor theory for wind-generated waves based on ray method”, *J.F.Mech.*, Vol.87, 1978, pp.143-158
8. Hwang, L.S., Tuck, E.O., “On the oscillations of harbours of arbitrary shape”, *J.F.Mech.*, Vol.42, 1970, pp.447-464
9. Bettles, P., “Operation counts for boundary integral and finite elements methods”, *Int. J. Numerical Method in Engg.*, Vol.15, 1981, pp.306-308
10. Lee, H.S., “Numerical simulation about diffracted waves in the vicinity of artificial island”, *Int. Sym. Ocean Space Utilization*, Vol.I, 1985.5, Springer-Verlag Press, pp.205-212
11. Lee, H.S., Kubo, M., Takezawa, M., “Wave height distribution in the coupled harbor”, *Water Forum '86*, ASCE, 1986.8., Vol.1, pp.771-778
12. 久寶雅史, 竹澤三雄, 李弘植, “内外二重港口をもつ港形の計劃に關する研究”, 第33回海岸工学講演會論文集, 1986, pp.640-644
13. 秋教昇, “韓國沿岸에서 發生한 暴風 地震海溢現象에 對하여”, 交通部 水路局, 1987
14. Lee, H.S., “Wave height distribution for harbor planning by layout of breakwater”, *4th Proc. PACON '90*, Vol 2, 1990, pp.257-264

(接受: 1992. 2. 13)