The Journal of the Oceanological Society of Korea
Vol. 21, No. 4, p. 245~258, December 1986.

# 迎日湾과 浦項新港의 海面副振動에 關한 數値實驗†

朴漢一*·鄭鍾律·吳林象
서울大学校 自然科学大学 海洋学科

# Numerical Experiments of the Seiche in Young-il Bay and Pohang New Harbor, Korea

*Han-il Park*, Jong-yul Chung, Im Sang Oh*
Dept. of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151, Korea

**要約**：入射長波에 의해 발생하는 강제 副振動 現象을 밝히기 위한 2次元 數値모델을 개발하여 우리나라 주요 港湾中 副振動이 가장 빈번히 觀測되는 迎日湾과 浦項新港에 적용하였다.

本 研究의 結果는 다음과 같다.

1. 數値모델에 의해 구한 研究 海湾의 固有週期는 迎日湾의 경우 第1固有週期는 約 70分이고, 第2固有週期는 約 25分이며 浦項新港의 경우 第1固有週期는 約 25分이고 第2固有週期는 約 7.5分이다. 이는 理論式, Spectrum分析, 統計調査에 의해 구한 週期와도 잘 일치함이 확인되었다.

2. 迎日湾의 第2固有週期와 浦項新港의 第1固有週期는 거의 같다. 그러므로 迎日湾内로 25分 週期의 長波가 들어올 때 浦項新港内의 海面 副振動은 강하게 增幅될 수 있다.

*Abstract*

A two-dimensional numerical model is developed to investigate the phenomenon of forced seiche caused by the incident long waves. This model is applied to Young-il Bay and Pohang New Harbor, where the seiche is most frequently observed and the damage of the seiche is serious compared with the other harbors in Korea.

Some results on this study are as follows;

1. The natural periods of the first two modes obtained from the present model are about 70 and 25 minutes respectively for Young-il Bay, and about 25 and 7.5 minutes for Pohang New Harbor. These results are well consistent with those obtained by the theoretical formula, the spectral analysis, and the statistical investigation of the recorded data.

2. Since the fundamental natural period of Pohang New Harbor is almost the same as the second natural period of Young-il Bay, the seiche in Pohang New Harbor can be strongly amplified by the Oscillation in Young-il Bay. Therefore, the most strong seiche in Pohang New Harbor can occur when the long wave of about 25-minute period come into Young-il Bay.

## 1. 序　論

湖沼 또는 湾内의 水面이 長週期로 昇降하는 現象인 副振動(Seiche)에 대한 研究는 19世紀 後半에 Foul에 의해 시작되어 20世紀 後半에 그 理論的 体系가 確立되었다(Wilson, 1972). 最近에는 港湾이나 湾에서의 副振動으로 因한 被害와 관련된 연구(Wiegel, 1964)와 大型 電算機를 利用한 数値実験 研究가 主流를 이루고 있다(Hibiya and Kajiura, 1982). 우리나라의 경우는 李(1966), 秋(1974) 等에 의한 統計的 分析法에 의한 연구와 李(1986) 等에 의한 有

†본 연구는 문교부의 기초과학진흥연구(자연종합연구소 : RIBS-ED-85-504) 지원의 일부로 이루어졌음.
*Present Address: Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606, Korea

限要素法을 利用한 副振動 數値모델에 관한 연구가 있다.

湾内에서의 副振動은 주로 気象変動이나 海象変動에 의해 外海에서 발생된 外波가 湾内로 來襲함으로써 발생되는데 특히 外波의 週期가 湾의 固有週期中의 어느 한 週期와 일치하여 共振을 일으킬 경우에는 碇泊中인 船舶이나 港湾構造物에 被害를 誘発시킨다(Lee and Raichlen, 1972).

우리나라의 경우에는 副振動 現象이 浦項新港에서 아주 빈번히 일어나고 있어(秋, 1974) 港湾의 荷役作業이나 船舶의 安全碇泊 등에 커다란 障碍要因으로 지적되고 있다. 따라서 本研究에서는 浦項新港의 副振動 現象을 究明하기 위하여 非線形項과 海底応力을 고려한 2次元의 均質單層(homogeneous and single layer) 모델을 樹立하여 有限差分法으로 演算을 企図했다.

本 研究를 효과적으로 수행하기 위하여 우선 浦項検潮資料에서 副振動이 顯著하게 일어났던 時期의 検潮資料를 統計調査 및 Spectrum 分析에 의하여 副振動의 가장 빈번한 週期와 振幅을 구하고 理論式에 의해 研究海湾의 여러 모드(mode)의 固有週期를 구했다. 다음에 이들 週期의 外波를 本 数値모델의 開放境界밖에 入力시켜 어느 週期에서 가장 増幅率이 큰가를 究明하고, 또한 副振動 発生時의 迎日湾과 浦項新港内의 流速分布와 海面変化狀態도 동시에 究明하는데 그 目的이 있다.

## 2. 研究 海湾 및 資料

迎日湾은 한반도 東海 南部 沿岸에 위치한 湾으로서, 湾口의 幅이 約 10km로 北東쪽으로 완전히 東海에 열려있고 길이는 約 15km 로서 南西쪽으로 湾入되어 있다. 水深은 東海에서부터 迎日湾쪽으로 갑자기 얕아지며 迎日湾内의 平均水深은 21m이고 等深線의 分布는 湾의 形態와 비슷하다. 湾 内側에는 浦項舊港과 浦項新港이 있는데 新港은 外港防波堤와 동쪽 防波堤에 의해 둘러싸여 있다. 港 中央에는 波除堤가 있어서 북쪽의 外港과 남쪽의 内港을 구분

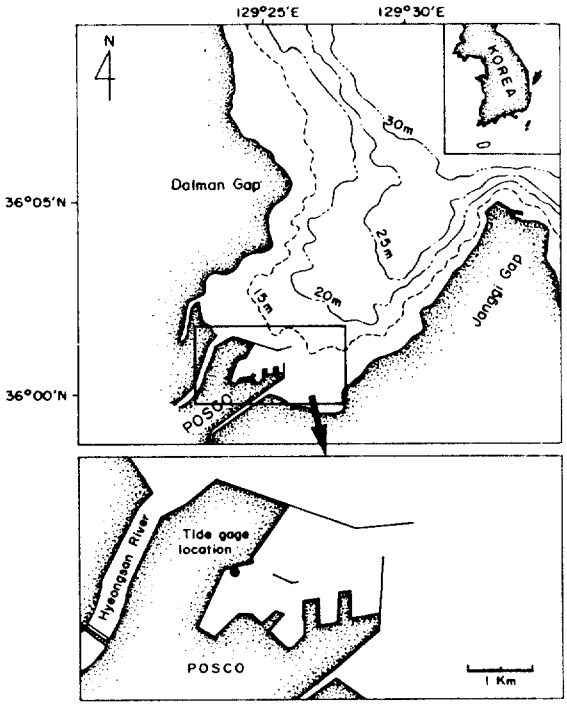


Fig. 1. Study Area: Young-il Bay (upper) & Pohang New Harbor (lower)

하고 있으며 外港의 平均 水深은 16m이고 内港의 平均水深은 12m이다(그림 1).

副振動에 대한 記録은 浦項検潮所 資料에 많이 나타나 있으나 그중 대표적인 몇 경우를 本研究에 利用하였다. 即, 1973~1974年 동안의 検潮資料(秋, 1974)와 1983年 5月 日本 中部西海岸에서 発生한 地震海溢이 밀려왔을 때의 検潮資料 및 1985年 10月 颱風브렌다(Brenda)號가 우리나라 南東沿岸을 通過했을 때의 浦項新港内의 海面資料를 利用하였다.

## 3. 基本 方程式

本 数値모델에 사용된 水粒子 運動에 대한 運動方程式은 다음과 같다(그림 2 참조).

$$\frac{Du}{Dt} = fv - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + A_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_h\nabla_h^2 u \qquad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -fu - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + A_v\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_h\nabla_h^2 v \qquad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} \qquad (3)$$

여기서

u, v, w; 各各 x, y, z方向에서의 流速成分

f; 코리올리係数 ($f=2\Omega\sin\phi$, $\Omega$; 地球角速度, $\phi$; 위도)

$\rho$ ; 海水密度

t ; 시간

p ; 압력

g ; 중력가속도

$$\frac{D}{Dt}=\frac{\partial}{\partial t}+u\frac{\partial}{\partial x}+v\frac{\partial}{\partial y}+w\frac{\partial}{\partial z}$$

$$\nabla_h^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

$A_v$, $A_h$; 流体의 垂直, 垂平成分의 渦粘性係数 또한 連續 方程式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0. \tag{4}$$

여기서 垂直方向의 加速度 成分과 코리올리項과 대기압과 表面応力을 무시하고 Z=−h 에서 Z=d까지 Z에 대해 (1)~(4)를 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}=-g(h+d)\frac{\partial h}{\partial x}-\tau_{bx}-(h+d)\cdot\left\{\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial uv}{\partial y}\right\}+A_h\nabla_h^2 q_x \tag{5}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}=-g(h+d)\frac{\partial h}{\partial y}-\tau_{by}-(h+d)\cdot\left\{\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial uv}{\partial x}\right\}+A_h\nabla_h^2 q_y \tag{6}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}=-\frac{\partial q_x}{\partial x}-\frac{\partial q_y}{\partial y} \tag{7}$$

$q_x$와 $q_y$는 各各 x, y方向의 体積流量을 나타내며 다음과 같다.

$$q_x=\int_{-h}^{d}u\,dz,\quad q_y=\int_{-h}^{d}v\,dz$$

또, $\tau_b$는 海底의 마찰응력을 나타내며 $\tau_b=\rho\lambda|\vec{V}|\vec{V}$와 같이 변형된 식으로 사용되었다. 여기서 $\lambda$는 해저 마찰계수이다.

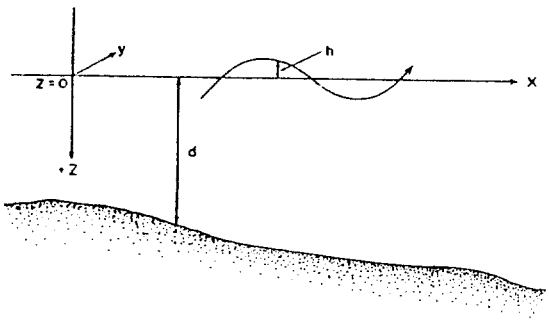


Fig. 2. Definition sketch of the coordinate system.

## 4. 研究海湾 固有週期

### 4.1. 理論式에 依한 方法

湾口가 열린 湾의 1次元 副振動의 固有週期는 다음과 같이 주어진다(Proudman, 1952).

$$T_m=\frac{4L}{S\sqrt{g\cdot\bar{d}}} \tag{8}$$

여기서, L은 湾의 길이, $\bar{d}$는 平均水深이고, 모드수(mode number)인 $m=\frac{S+1}{2}$, S=1, 3, 5, 7, ……. 이것을 浦項新港에 적용하면 浦項新港은 湾의 길이(L)가 約 3300m이고, 平均水深($\bar{d}$)은 12.4m이므로, $T_1$은 約 20分, $T_2$는 約 6.6分이 된다. 또 迎日湾은 湾의 길이(L)가 約 13500m이고, 平均水深($\bar{d}$)은 21.3m 이므로 $T_1$, $T_2$ 및 $T_3$가 各各 62.3分, 20.8分, 12.5分이 된다. 그러나 迎日湾의 境遇는 湾口가 아주 넓어서 湾口補正을 고려해야 한다. 湾口의 幅이 크면 클수록 湾의 固有週期를 增加 시키는 경향이 있으므로 이를 고려하면 週期는 $T_c=T\cdot(1+\varepsilon)$로 된다. 여기서 T는 計算週期이고, 補正係数 $\varepsilon$는 아래와 같다(Wilson, 1972).

$$\varepsilon=\left(\frac{B}{\pi L}\right)\left\{\frac{3}{2}-\gamma-\ln\left(\frac{\pi B}{4L}\right)\right\} \tag{9}$$

여기서 B는 湾의 幅으로서 迎日湾에서는 9500 m이고, $\gamma$는 Euler常数로서 0.5772…이다. 따라서 迎日湾에서 補正係数 $\varepsilon$는 0.3398로 되고, 湾口의 영향이 補正된 週期는 各各 $T_1$=835分, $T_2$=27.5分, $T_3$=6.7分으로 된다.

그러나 湾의 幅方向의 副振動을 고려한 2次元 副振動의 境遇에는 다음과 같다(Proudman, 1952).

$$T_{m,n}=\frac{2}{\sqrt{g\cdot\bar{d}}}\left[\left(\frac{2m-1}{2L}\right)^2+\left(\frac{n}{B}\right)^2\right]^{-1/2} \tag{10}$$

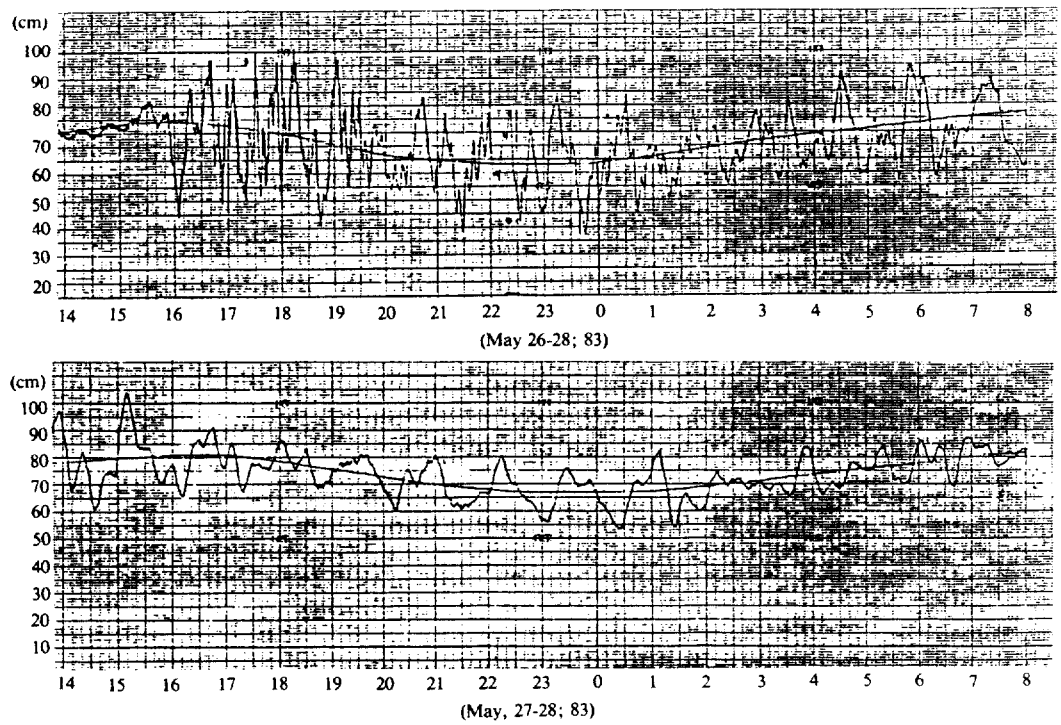


Fig. 3. Tide gage record in Pohang New Harbor

여기서 m은 湾의 길이 方向의 모드수 (mode number)이고, 幅方向은 n이다. n이 1이고 m이 1과 2인 境遇 즉, $T_{1,1}$과 $T_{2,1}$은 各各 20.7分, 15.1分이다. 위의 결과들은 現行 海図에 있는 水深과 海湾의 幅 및 길이를 代入하여 계산하였다.

### 4.2. 觀測資料 分析에 依한 固有週期

1973年, 1974年 2年동안의 浦項港 検潮資料中에서 振幅이 20cm以上인 현저한 副振動에 대해 統計調査한 結果 20~25分 週期에서 가장 頻度数가 컸으며 60~80分 週期가 그 다음을 차지하고 있다(秋, 1974). 그림 3은 1983年 5月 日本 中部 西海岸에서 発生한 地震海溢이 밀려왔을 때의 浦項港 検潮資料를 보여주고 있으며, 그림 4는 이 地震海溢이 왔을 때의 資料와 1985年 10月 颱風 브렌다(Brenda)號가 通過했을 때의 浦項新港内에서 観測한 海面資料를 Blackman-Tukey method를 利用해 구한 에너지 Spectrum分析 結果이다. 두 경우 모두 $f_1$=0.013 (T=76.9分)에서 第1의 에너지 頂点이 나타나고 第2의 頂点은 地震海溢이 왔을 경우 $f_2$=0.42 (T=23.8分), 브렌다(Brenda) 號 颱風이 왔을 경우 $f_2$=0.38 (T=26.3分)에서 各

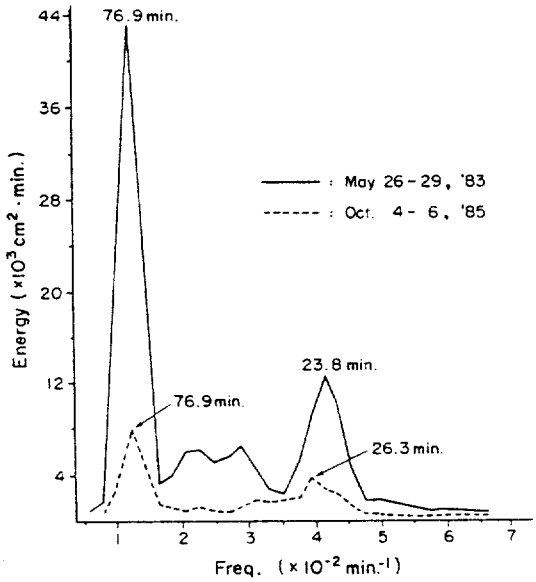


Fig. 4. Energy Spetrum of the Seiches in Pohang New Habor

各 나타난다. 위의 사실들을 고려해 볼때 迎日湾의 第1固有週期는 約 70分이고, 迎日湾의 第2固有週期 및 浦項新港의 第1固有週期는 共히 25分 가까이에 있다고 생각된다.

## 5. 数値 모델

### 5.1. 数値 scheme

本 研究에서 사용할 数値 scheme은 Ahn & Lee (1976)가 사용한 数値 scheme과 類似한 方法으로서 그림 5에서 보여진 空間格子網과 다음과 같은 変形式을 사용하여 앞 基本方程式 (5)~(7)을 有限差分法으로 쓴다.

$$SX = q_x \frac{\Delta t}{\Delta s} = (d+h)u\frac{\Delta t}{\Delta s} \tag{11}$$

$$SY = q_y \frac{\Delta t}{\Delta s} = (d+h)v\frac{\Delta t}{\Delta s} \tag{12}$$

計算의 편의를 위하여 $\Delta s = \Delta x = \Delta y$로 취하였으며 有限差分式에서 時間에 대해서는 前方差分法 (forward difference method)을 空間에 대해서는 中央差分法 (centered difference Method)을 択했다. 또한 그림 5에서 알 수 있는 바와같이 水深 d와 水面変化 h값은 正方格子의 中心에 두고 SX, SY, u, v값은 正方格子 側面의 中間点에 둔다.

위의 SX, SY와 h를 아래와 같은 有限差分式으로 썼다.

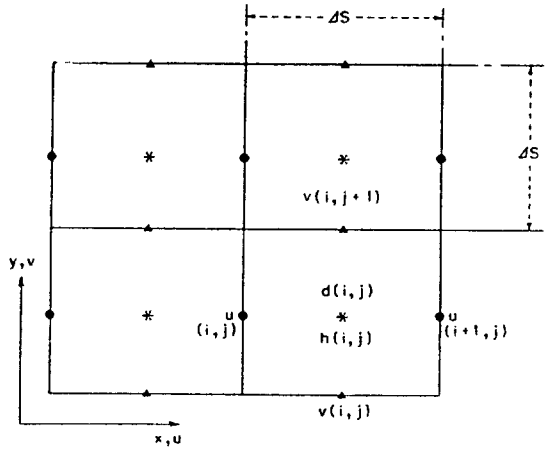


Fig. 5. Spacial grid of the model.

$$SX^{t+1}(i,j) = SX^t(i,j) - \frac{g}{2}\left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right)^2 \{h^t(i,j) + h^t(i-1,j) + 2dx(i,j)\} \cdot \{h^t(i,j) - h^t(i-1,j)\} - \lambda \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} u^t(i,j) \cdot \sqrt{(u^t(i,j))^2 + [\{v^t(i,j) + v^t(i-1,j) + v^t(i-1, j+1) + v^t(i,j+1)\}/4]^2} - AX^t(i,j) \tag{13}$$

$$SY^{t+1}(i,j) = SY^t(i,j) - \frac{g}{2}\left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right)^2 \{h^t(i,j) + h^t(i,j-1) + 2dy(i,j)\} \cdot \{h^t(i,j) - h^t(i,j-1)\} - \lambda \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} v^t(i,j) \cdot \sqrt{[\{u^t(i,j) + u^t(i+1,j) + u^t(i,j-1) + u^t(i+1, j-1)\}/4]^2 + (v^t(i,j))^2} - AY^t(i,j) \tag{14}$$

$$h^{t+1}(i,j) = h^t(i,j) - SX^t(i+1,j) + SX^t(i,j) - SY^t(i,j+1) + SY^t(i,j) \tag{15}$$

위의 有限差分式에서 dx와 dy는 水深 d의 各方向의 이웃하는 두 점의 平均이다. 即, $dx(i,j) = \{d(i-1,j) + d(i,j)\}/2$이다. 앞 (13), (14), (15)식에서 왼쪽 項은 時間 $(t+\Delta t)$에서의 값이고 오른쪽 項은 시간 t에서의 값이다. 또한 AX, AY項은 非線形項으로 다음과 같은 有限差分式으로 된다.

$$AX(i,j) = \frac{1}{8}\left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right)^2 \{h(i,j) + h(i-1,j) + 2dx(i,j)\} [\{u(i+1,j) - u(i-1,j)\} \{u(i+1,j) + 2u(i,j) + u(i-1,j)\} + \{u(i,j+1) + u(i,j)\} \{v(i,j+1) + v(i-1,j+1)\} - \{u(i,j) + u(i,j-1)\} \{v(i,j) + v(i-1,j)\}] \tag{16}$$

$$AY(i,j) = \frac{1}{8}\left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right)^2 \{h(i,j) + h(i,j-1) + 2dy(i,j)\} [\{u(i+1,j) + u(i+1,j-1)\} \{v(i+1,j) + v(i,j)\} - \{u(i,j) + u(i,j-1)\} \{v(i,j) + v(i-1,j)\} + \{v(i,j+1) - v(i,j-1)\} \{v(i,j+1) + 2v(i,j) + v(i,j-1)\}] \tag{17}$$

運動方程式 (5), (7)에 있었던 水平混合項은 위의 有限差分式에서는 포함되지 않고 다음과 같은

平滑過程의 有限差分式에 포함시켰다(Haltiner, 1971 참조).

$$SX(i,j)=(1-4D)\,SX(i,j)+D\{SX(i+1,j)+SX(i,j+1)+SX(i-1,j)+SX(i,j-1)\} \quad (18)$$

$$SY(i,j)=(1-4D)\,SY(i,j)+D\{SY(i+1,j)+SY(i,j+1)+SY(i-1,j)+SY(i,j-1)\} \quad (19)$$

여기서 D는 平滑係数로서 $A_h\cdot\Delta t/(\Delta s)^2$ 의 값과 같다.

平均流速 u, v는 다음과 같이 海底에서 海面까지 平均했다.

$$u(i,j)=\frac{\Delta s}{\Delta t}SX(i,j)/\frac{1}{2}\{h(i,j)+h(i-1,j)+2dx(i,j)\} \quad (20)$$

$$v(i,j)=\frac{\Delta s}{\Delta t}SY(i,j)/\frac{1}{2}\{h(i,j)+h(i,j-1)+2dy(i,j)\} \quad (21)$$

計算에 사용된 常数의 값은 다음과 같다.

$\rho=1\mathrm{gr/cm^3}$, $A_h=10^6\mathrm{cm^2/sec}$,

$g=9.8\times10^2\mathrm{cm/sec^2}$, $\lambda=0.0026$

迎日湾과 浦項新港 두 경우에 대해 위와같은 有限差分式을 利用해 数値実験을 実行했으며 迎日湾의 경우 格子間隔은 $\Delta S=500$m로 했고 浦項新港에서는 보다 자세히 다루기 위해 $\Delta S=75$m로 했다.

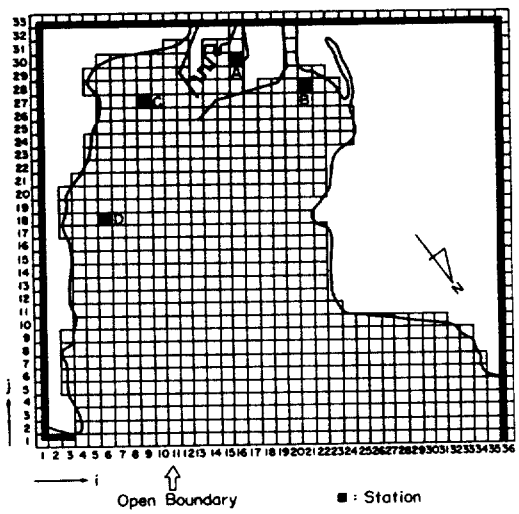


Fig. 6. Finite difference grid scheme and station map for Young-il Bay.

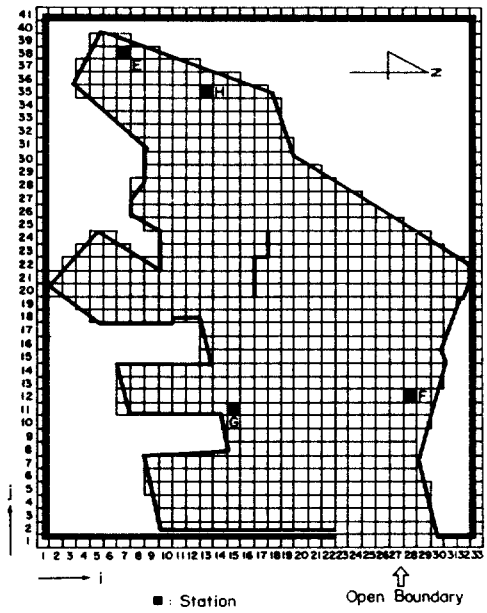


Fig. 7. Finite difference grid scheme and station map for Pohang New Harbor.

全体格子 배열은 그림 6, 7에서와 같이 迎日湾에서는 36×33의 格子網으로, 浦項新港에서는 33×40의 格子網으로 구성했다. 迎日湾 Grid Scheme (Fig. 6)의 開放境界軸인 X軸方向 (i-direction)은 迎日湾 入口의 等深線 (Fig. 1 참조)과 平行하게 잡아 淺海波가 等深線에 垂直으로 進行하도록 했다.

### 5.2. 初期條件 및 境界條件

初期條件으로 처음 계산단계에서는 모든 変数 即, SX, SY, u, v等을 모두 零으로 하였다. 境界條件으로 開放境界에서는 時間에 따른 水面変化 境界條件을 택했다. 이 임의의 강제外波를 준 위치는 格子 Scheme의 開放境界한 格子 바깥쪽에 두었다. Solid境界에서는 Non-Slip 境界條件 即, 境界에 平行하거나 垂直인 速度成分은 零이 되도록 하였다. 이와같은 경계조건을 적용하여 振幅은 10cm로 하고 週期는 迎日湾의 경우 5分 間隔으로 迎日湾의 基本週期 以上의 시간인 90分까지, 浦項新港의 경

우는 2.5分 間隔으로 基本週期 以上의 시간인 40分까지 계산하여 数値모델을 통한 迎日湾과 浦項新港의 固有週期를 찾도록 시도하였다. 迎日湾 및 浦項新港의 防波堤의 실제 幅은 10m 以內로서 数値 scheme의 grid間隔 500m, 75 m에 비해 아주 작으므로 防波堤 幅을 한 grid 間隔으로 취하는 대신 本 모델에서는 실제 現象에 가깝게 하기 위해 線処理化하였다. 即, 防波堤에 해당하는 線에 대해서는 모두 $dx(i,j)=0$, $dy(i,j)=0$으로 두었다.

계산시간의 단축과 모델의 효율을 높이기 위하여 다른 項에 比해서 크기가 작은 水平混合項은 平滑過程으로 대신하여 每 8스텝마다 한번씩만 계산하였으며, 非線形項은 每 4스텝마다 계산하였다. 또 時間間隔 $\Delta t$를 결정하기 위하여 CFL安定條件을 이용하였다 (Roache, 1982). 즉, 迎日湾의 경우는 最大 水深이 36m라 할때 $\Delta t=15$초이고 浦項新港의 경우는 最大 水深이 18m이어서 $\Delta t=3$초가 되었다.

## 6. 結果 및 論議

### 6.1. 迎日湾

検潮資料의 統計分析 및 Spectrum分析에 의해 구한 迎日湾의 第1固有週期는 60~80分이고, 第2固有週期는 20~25分인데 理論式에 의하여 구한 迎日湾의 固有週期는 湾口補正을 하지 않을때 第1固有週期, 第2固有週期는 各各 62.3分, 20.8分이고, 湾口補正을 했을 境遇에는 各各 83.5分과 27.5分이었다.

数値모델에 의해 밝혀진 各 週期에 대한 最大增幅率은 그림 8과 같다. 여기서 最大 增幅率은 入射波의 振幅에 대한 各 定点에서의 副振動의 最大振幅의 比率이며 모든 定点에서 第1의 最大 增幅率은 約 70分 週期에서 나타나고 第2의 最大 增幅率은 約 25分 週期에서 나타난다. 即, 検潮資料의 統計分析과 Spectrum 分析 및 理論式에 의해 구한 고유주기와 모델의 결과로 얻은 迎日湾의 고유주기는 아주 근접한 값임을 알 수 있다. 따라서 모델 결과에서 얻은 70分 週期는 迎日湾의 第1固有週期를 나타내고 약 25분 주기는 第2固有週期를 나타내

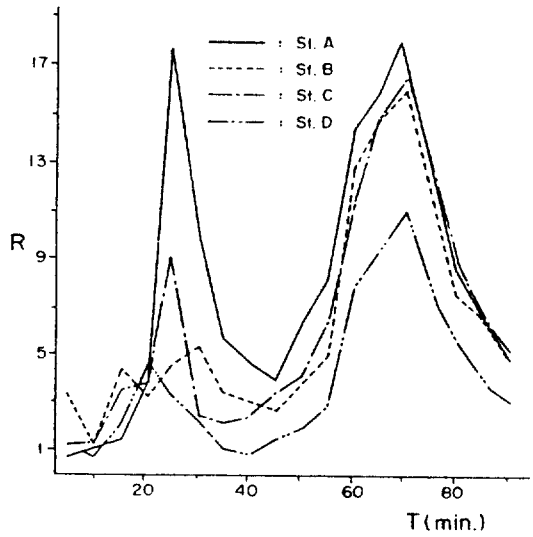


Fig. 8. Calculated maximum amplification factor (R) for each station in Young-il Bay. See Fig. 6 for the locations.

는 것으로 사료된다.

그림 8에서 최대 증폭율(R)은 定点 위치에 따라 다르지만 기본 주기의 경우는 副振動이 배(antinode)에 가까운 定点 A에서 약 18로서 가장 크다. 이 값은 海底応力을 每 4스텝마다 한번씩만 計算한 結果이나 海底応力 적용빈도가 많으면 많을수록 마찰계수($\lambda$)값이 크면 클수록 最大 增幅率값은 작아졌다. 그러나 固有週期에 대한 全体的인 結果는 달라지지 않았다. 또 다른 特徵的인 現象은 迎日湾에 位置한 定点 B와 C 및 D에서는 迎日湾의 第2 固有週期의 增幅率이 基本固有週期 增幅率의 約 50%에 該當하나 浦項新港内의 位置에 該當하는 定点 A에서는 迎日湾의 第2固有週期 增幅率이 迎日湾 第1固有週期 增幅率과 거의 같은 값을 나타낸다는 것이다. 이러한 事実은 浦項新港의 副振動에 대해 아주 重要한 意味를 나타낸다. 即, 浦項新港의 높은 副振動은 浦項新港의 基本週期가 迎日湾의 第2固有週期와 거의 같은 값을 이루고 있다는 사실에서 비롯되는 것으로 판단된다. 다시 말하면 25分 週期의 入射波는 迎日湾의 第2固有週期에 該當하므로 迎日湾内에서 增幅됨과 동시에 浦項新港의 基本週期에도 該當하므로 浦項新港内에서는 더욱 크게 增

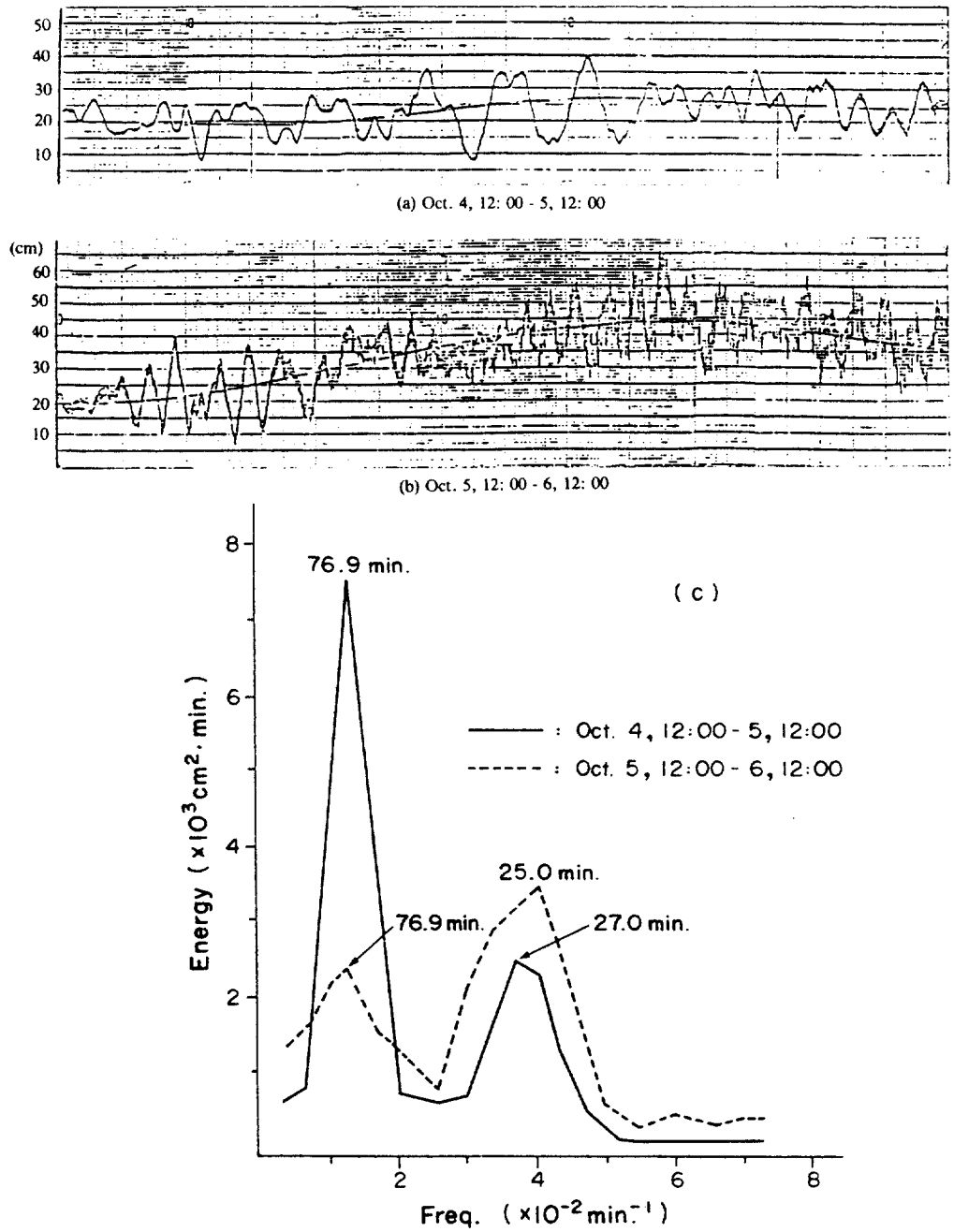


Fig. 9. Observed Sea surface fluctation, (a) and (b) and the associated energy spectra, (c)

幅되는 것이다.

本 研究와 비슷한 結果가 浦項新港內에서 觀測된 1985年 10月 4～6日 副振動 觀測資料의 Spectrum分析結果에서도 나타난다(그림 9). 即, 10月 5日 12時 以前에는 迎日湾의 基本固有週期에 가까운 70分週期의 副振動이 우세하나 12時 以後에는 迎日湾의 第2固有週期 및 浦項新港의 基本固有週期에 가까운 25分 週期나 그 以下의 週期에서 우세하게 存在한다.

그림 10은 研究海湾內의 代表的인 몇 定点에

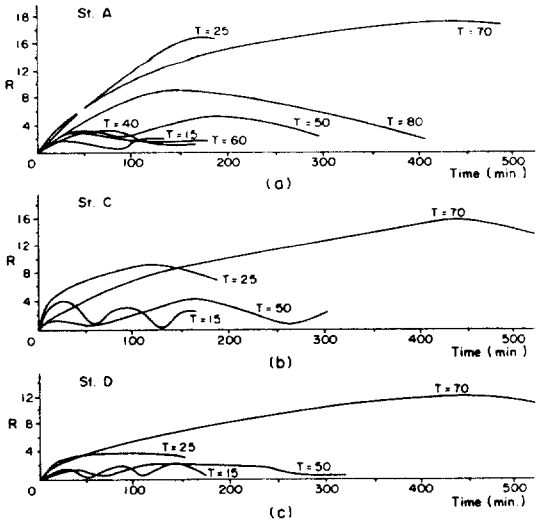


Fig. 10. Positive side of the envelopes of the seiche at each incident wave period.

서의 入射波의 振幅에 대한 副振動의 envelope 中 陽(+)의 部分만을 시간의 함수로 나타낸 것이다. 그림 10의(a)는 浦項新港內의 檢潮所 位置인 定点 A에서 여러 週期 T=15, 25, 40, 50, 60, 70, 80分일때의 결과를 나타낸 것이고, 그림 10의 (b)와 (c)는 各各 定点 C와 D 에서 週期 T= 15, 25, 50, 70分일때의 結果를 비교한 것이다. 모두 第1週期인 70分 週期에서 增幅率이 가장 크며 第2週期인 25分 週期에 다음으로 크다. 여타 週期에서도 增幅이 일어나고 있으나 25分이나 75分週期의 증폭량에는 미치지 못한다. 그림 10에서 주기 5, 15分 등이 波형태로 나타나는데 이것은 本 모델 開放境界條件 고려시 개방경계로 빠져나가는 放射波를 고려하지 않으므로 인한 결점인 것으로 사료된다.

그림 11은 迎日湾의 第2固有週期인 25分 週期와 第1週期인 70分 週期와 또 이 두 週期사이에 있는 50分 週期일때의 순간 해면 변화를 나타내고 있다. 特徵的인 것은 25分 週期일때 浦項新港內 해면변화곡선의 稠密度가 다른 주기에 비해 상대적으로 아주 큰 것을 알 수 있다. 이 주기는 浦項新港의 第1固有週期와 迎日湾의 第2固有週期가 거의 一致하므로 浦項新港內의 增幅정도가 큼을 말해준다. 即, 約 25分 週期의 入射波가 迎日湾內로 들어올때 浦項新港內의 에너지密度가 최대로 크게 된다. 또한 迎日湾의 第2固有週期(約 25分)와 第1固有週期(約 70分)의 副振動의 마디(node)가 共히 湾의 開放境界가까이에 存在하며 迎日湾의 第2週期인 25分 週期에서는 副振動의 마디가 湾中央에 하나 더 存在한다. 이러한 사실은 副

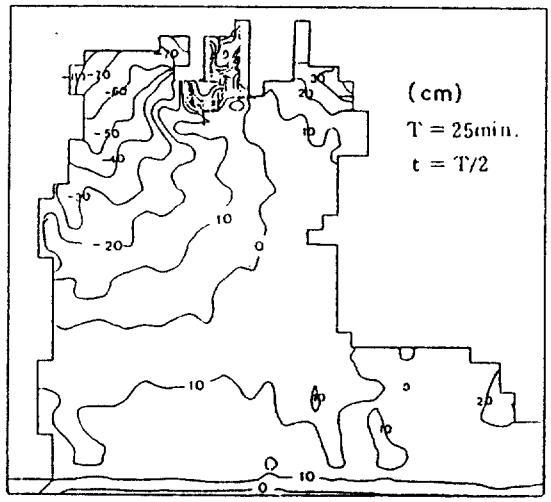


Fig. 11. Instantaneous water surface contour obtained from the model experiments. The period of the incoming wave is 25 minutes which is the second natrual period of Young-il Bay and almost the same as the fundamental natural period of Pohang New Harbor.

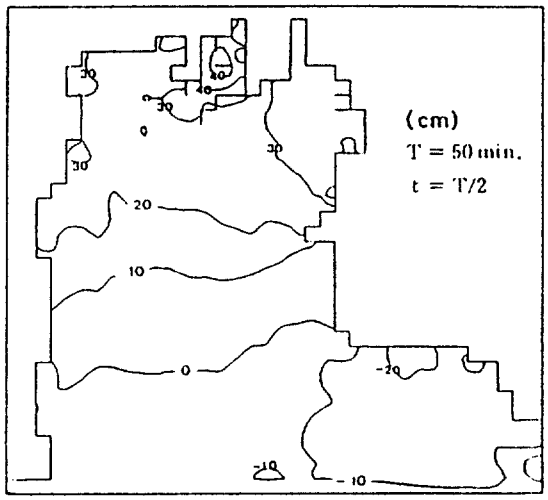


Fig. 11. (Continued)

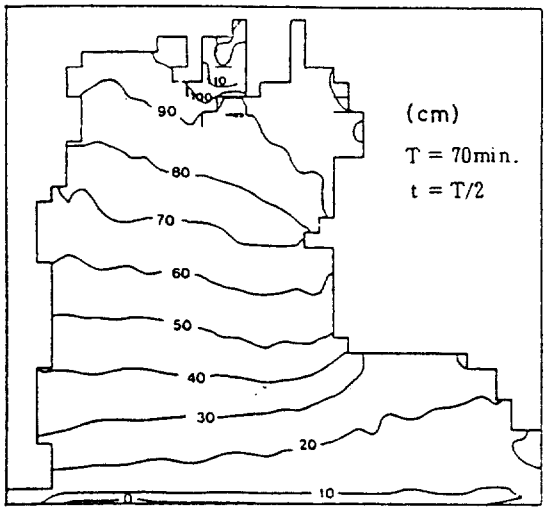


Fig. 11. (Continued). The 70 minutes is the fundamental natural period of Young-il Bay.

振動의 基本性質과 잘 일치한다. 한편 70分과 50分 週期일때는 海面等高線이 幅方向과 평행하나, 25分 週期일때는 湾안쪽에서 湾길이 方向과 平行하며 副振動의 마디(node)가 浦項新港 入口 가까이에 存在하는 重要한 사실을 나타낸다. 이와같이 迎日湾의 第2固有週期에 該當하는 25分 週期의 副振動이 存在할때, 이 副振動의 마디(node)가 浦項新港 入口 가까이에 存在하는 사실과 잘 일치되고 있다. 그림 11은 그 例로서 여러 時間帶에서 선택된 하나의 경우이지만 다른 時間帶에서도 類似한 결과가 나타났다.

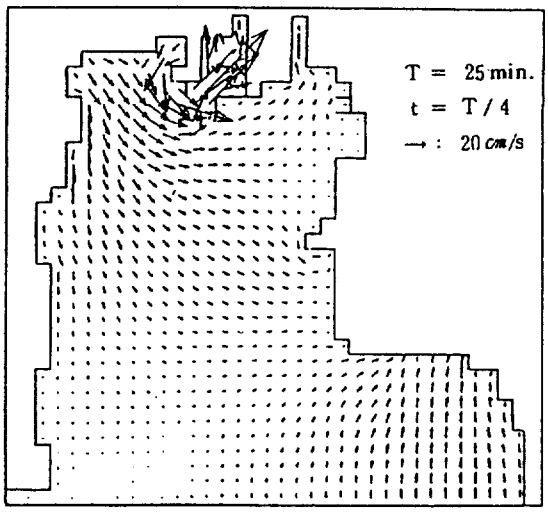


Fig. 12. Instantaneous velocity vector field obtained from the model experments. The period of incoming wave is 25 minutes which is the second natural period of Young-il Bay and almost the same as the fundamental natural period of Pohang New Harbor.

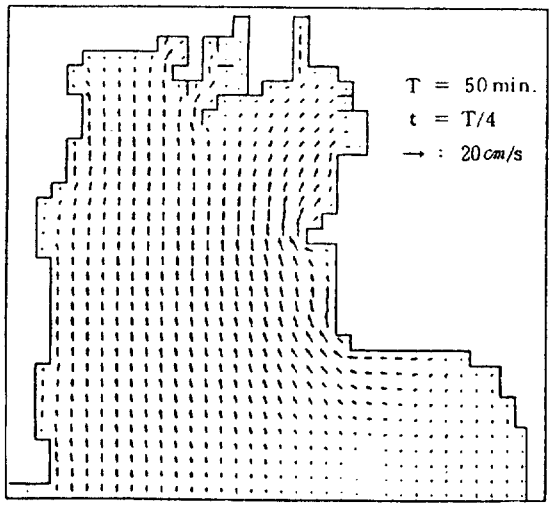


Fig. 12. (Continued).

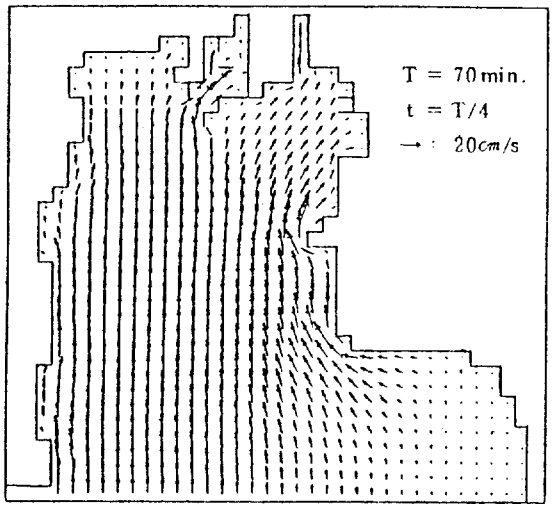


Fig. 12. (Continued). The 70 minutes is the fundamental natural period.

그림 12도 그림 11과 마찬가지로 25分, 50分, 70分 週期일때의 迎日湾内의 순간속도분포를 나타낸 것으로 50分, 70分 週期에 비해 25分 週期일때 浦項新港内의 流速크기가 아주 크다. 이러한 사실도 영일만의 고유주기중의 하나인

25分帶 週期와 浦項新港의 第1固有週期가 거의 같은 사실에서 비롯되는 것으로 판단된다.

### 6.2. 浦項新港

迎日湾의 가장 안쪽에 位置한 浦項新港에서는 迎日湾内에서 存在하는 波의 에너지가 港入口를 통해 전달됨으로써 港内 副振動이 발생하며, 이 副振動은 浦項新港의 地形的인 요소 即, 湾의 水深, 幅, 길이, 境界條件 等에 의해 결정된 固有週期로 存在한다.

浦項新港内에 선택한 4個 定点(E, F, G 와 H, 그림 6 참조)에 대해 数値모델로 구한 海面副振動을 이용하여 各 週期에서의 최대 증폭율을 그림 13에 나타내었다. 最大 増幅은 약25分 週期에서 일어나고 約 7.5分 週期에서 그 다음 증폭이 일어난다. 이 두 週期는 浦項新港의 第1 및 第2固有週期에 해당되는 것으로 판단된다. 한편, 4 1 절에서 検潮資料分析과 理論式에 의해 구한 浦項新港의 第 1 固有週期는 20~25分, 第2固有週期는 約 7分임을 고려할때, 本 모델 結果는 서로 近接된 값임을 알 수 있다. 第2週期의 増幅率은 定点의 위치에 따라 달라지는데 4個 定点에서의 第2 固有週期의 増幅率은 基本固有週期값의 約 40%에 해당된다.

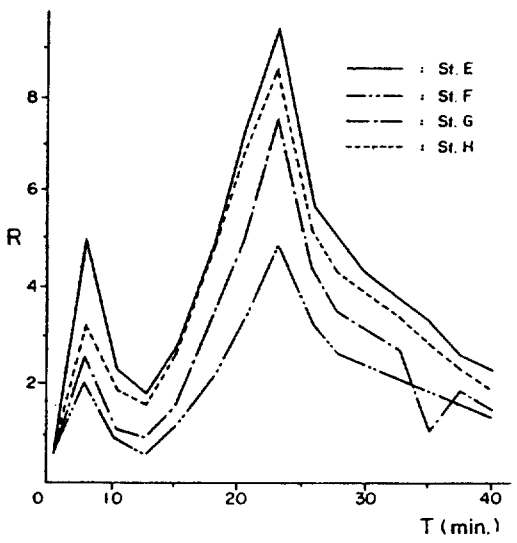


Fig. 13. Calculated maximum amplification factor (R) for each station in Pohang New Harbor. See Fig. 7 for the locations.

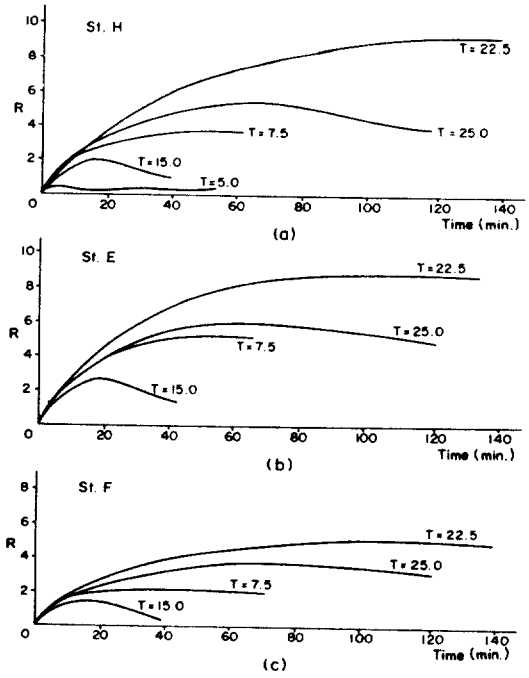


Fig. 14. The positive side of the envelopes of the seiche at each incident wave period.

그림 14는 앞 그림 10에서 迎日湾에 대해 論했던 방법과 마찬가지로 浦項新港内 代表的인 몇 定点에서의 入射波의 振幅에 대한 副振動의 envelope中 陽(+)의 部分만을 시간의 함수로 나타낸 것이다. 그림 14(a)은 浦項検潮所의 위치와 가까운 定点 H에서 5, 7.5, 10, 15, 22.5, 25分週期일때의 결과이고 그림 14(b)와 (c)는 定点 E, F에서 7.5, 15, 22.5, 25分 週期일때의 결과이다. 3 境遇 모두 浦項新港의 第1固有週期는 約 22.5分 가까이에 第2固有 週期는 約 7.5分 가까이에 있음을 알 수 있다.

그림 15는 基本固有週期 및 第2 固有週期에 가까운 22.5分, 7.5分 週期일때의 순간 해면변화를 나타내고 있다. 두 固有週期 모두 副振動의 마디(node)가 港의 入口 가까이에 存在하고 第2固有週期일때는 마디가 港 中央 波除堤 가까이에 하나 더 存在하며 海面等高線은 대체로 港의 幅方向과 平行하다.

그림 16은 第1固有週期 및 第2固有 週期일때의 港内의 순간 流速分布를 나타내며 第1固

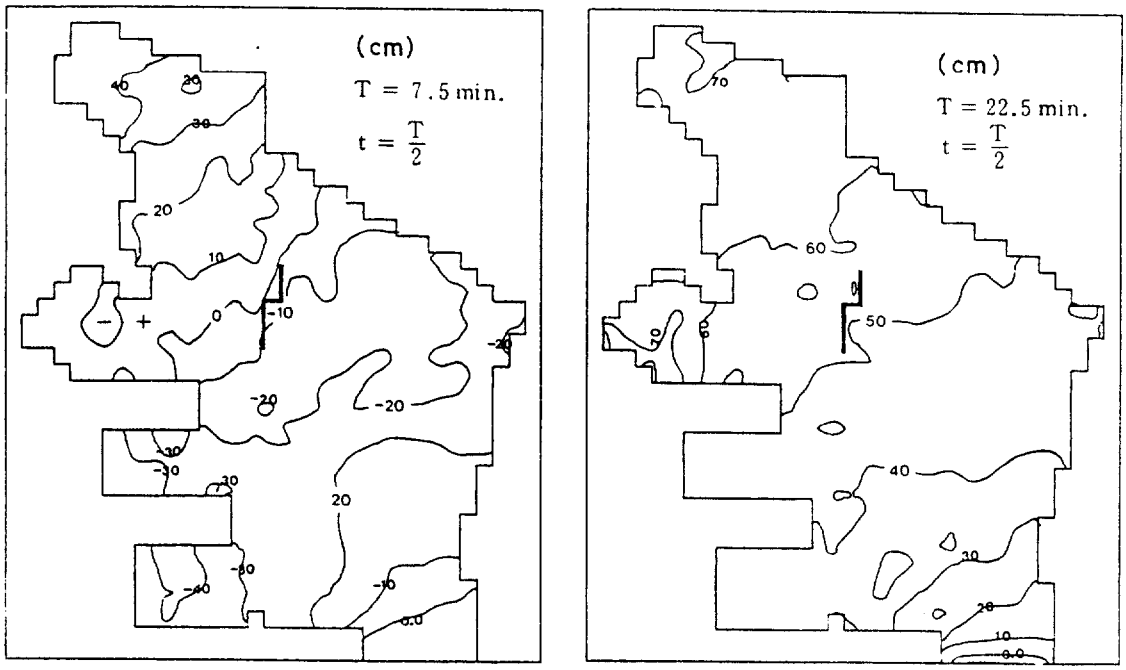


Fig. 15. Instantaneous water surface contour obtained from the model experiments for Pohang New Harbor. The periods are 7.5 and 22.5 minutes which are respectively the second and fundamental natural period of Pohang New Harbor.

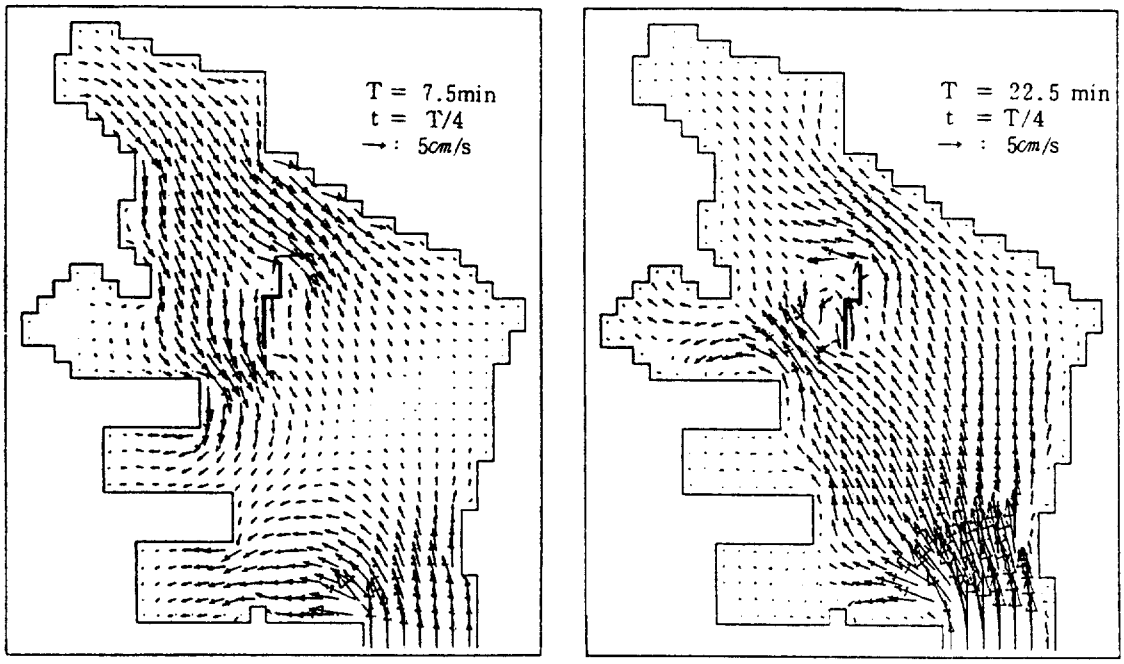


Fig. 16. Instantaneous velocity vector field obtained from the model experiments for Pohang New Harbor. The 7.5 minutes is the second natural period of Pohang New Harbor. The 22.5 minutes is the fundamental natural period of Pohang New Harbor.

有週期일때는 流速이 港入口에서 가장 크고 第2固有週期일때는 波除堤옆과 港入口에서 流速이 가장 크다. 이러한 結果는 本 数値모델의 有意性을 증명함은 물론 副振動의 基本性質을 잘 나타내는 것이다.

## 7. 結 論

本 研究에서는 湾 또는 湾内로 들어오는 長週期 外波에 의해 発生하는 強制 副振動 現象을 밝히기 위해서 有限差分法을 利用한 2次元 数値모델을 開発하였다. 또 이를 우리나라 主要港中에서 副振動 現象이 가장 頻煩히 発生하여 副振動의 被害가 가장 큰 浦項新港과 迎日湾에 適用하였다.

本 数値모델의 結果에 의하면 迎日湾의 第1固有週期 및 第2固有週期는 各各 約 70分, 25分이고, 浦項新港은 第1, 第2固有週期가 約 22.5分, 7.5分임이 밝혀졌는데 이 값들은 迎日湾과 浦項新港의 検潮資料의 統計調査와 Spectrum分析 및 理論的 公式에 의해 구한 固有週期값과 잘 一致한다. 特徴的인 것은 迎日湾의 第2固有週期와 浦項新港의 第1固有週期가 一致한다는 사실이다. 모델에서 얻어진 迎日湾과 浦項新港의 海面変化 및 流速分布는 副振動의 基本性質과 잘 一致했으며 迎日湾内로 25分 週期의 入射波가 들어올 때 浦項新港内의 海面増幅과 流速이 가장 컸다. 그 理由는 25分 週期가 迎日湾의 第2固有週期에 해당될 뿐더러 浦項新港의 第1固有週期에 가깝기 때문에 25分 週期의 入射波는 迎日湾内에서 増幅과 同時에 浦項新港内에서 다시 増幅되기 때문이다.

海面 副振動 現象이 迎日湾에서 強하게 発生하는 또다른 理由는 迎日湾의 地形的인 형태가 한쪽이 東海에 완전히 열린 直四角形에 가까운 형태로 되어 있어 東海에서 気象変動에 의해 発生한 外波가 湾内로 쉽게 來襲할 수 있고 또한 水深이 迎日湾 入口에서 갑자기 얕아짐으로 인해 湾内로 들어오는 外波가 迎日湾 入口에서 shoaling効果에 의해 増幅되어 들어옴으로써 迎日湾 및 浦項新港内에서 副振動이 쉽게 일어나는 것으로 思料된다. 위와 같은 사실을 고려할 때 浦項新港은 潮差가 작고 潮流가 微弱해서 상당히 좋은 港湾條件을 갖추고 있으나 迎日湾과 浦項新港内에 강한 副振動이 頻煩히 또한 강하게 発生함으로써 港湾의 好條件을 악화시킨 것으로 사료된다.

## 謝 辞

本 研究에 많은 資料를 주신 교통부 水路局 동해출장소의 秋教昇 소장님께 깊은 감사를 드립니다. 本 研究는 文教部 學術研究費에서 一部가 보조되었읍니다.

## 参考文献

李相龍 1986. 港湾 副振動 解析을 위한 基礎 研究 韓国科学技術院 海洋研究所 研究報告, BSPE, 00069-110-2.

李錫祐. 1966. 韓国 沿岸의 海面 副振動, 水路年報, 110-140.

秋教昇, 1974. 浦項港의 海面副振動 現象, 水路年報, 3-10.

国立地理院, 1983. 우리나라 精密水準網에 관한 研究

Ahn, H.S. and S.W. Lee. 1976. A numerical experiment on tidal currents in Asan Bay. J. Oceanol. Soc. Korea, 11: 18-24.

Carrier, G.F., R.P. Shaw, and M. Miyata. 1971. The response of narrow mouthed harbors in a straight coastline to periodic incident waves. J. Applied Mech., 38: 335-344.

Choi, J.K. 1984. Time varying friction model for the Keum River Esturay. Master Thesis, Seoul National Univ.

Defant, A. 1961. Physical Oceanography, Vol. II, Pergamon Press, 142-244.

Haltiner, G.T. 1971. Numerical weather prediction. John Willey and Son, Inc., 157 pp.

Hibiya, T. and K. Kajiura. 1982. Origin of the Abiki (a kind of seiche) pheonomenon in Nagasaki Bay. J. Oceanogr. Soc. Japan, 38: 72-82.

Hwang, L.S. and E.O. Tuck. 1970. On the oscillations of harbors of arbitray shape. J. Fluid Mech., 42: 447-464.

Lee, J.J. 1971. Wave-induced oscillation in harbors of arbitrary geometry. J. Fluid Mech., 45: 375-394.

Lee, J.J. and F. Raichlen. 1972. Oscillations in harbors with connected basins. J. Waterways, Harbors and Coastal Engrg. Div., ASCE, 98: 311-332.

Le Mehaute, B. 1961. Theory of wave agitation in a harbor. J. Hydraulics Div., ASCE, 87 (HY2): 31-50.

Miles, J. and W. Munk. 1962. Harbor paradox. J. Waterways and Harbors Div., ASCE, 87 (WW3): 111-130.

Miles, J.W. 1974. Harbor seiching. Univ. of California, La Jolla, California.

Minoru, O., Y. Yuko, and N. Kiyoshi. 1983. ABIKI, the large seiche in the west coast of Kyushu. Rep. of Hydrogr. Res. (Japan), No. 18.

Neumann, G. and W.J. Pierson. 1966. Principles of physical oceanography. Prentice-Hall Inc., 290-297, 362-369.

Olsen, K. and L.S. Hwang. 1971. Oscillation in a bay of arbitray shape and variable depth. J. Geophs. Res., 76 (21): 5048-5064

Proudman, J. 1953. Dynamical oceanography. John Wiley and Sons, Inc., New York, 219-246.

Raichlen, F. 1966. Harbor resonance. Estuary and Coastline Hydrodynamics. Mcgraw-Hill Book Co., 281-340.

Reid, R.O. and B.R. Bodine. 1968. Numerical model for storm surges in Galveston Bay. J. Waterways and Harbors Div., ASCE, 94 (WW1): 35-57.

Roache, P.J. 1982. Computational fluid dynamics. Hermosa Pub. 466 pp.

Wiegel, R.L. 1964. Oceanographical engineering. Prentice-Hall, 115-124.

Wilson, B.W. 1970. Tsunami-responses of San Pedro Bay and Shelf, Calif. J. Waterways, Harbors and Coastal Engrg. Div., ASCE, 97 (WW2): 239-258.

Wilson, B.W. 1972. Seiches. Advances in hydroscience Vol. B, Academic Press, 1-94.

*Received November 3, 1986*
*Accepted November 17, 1986*