韓國海岸·海洋工學會誌
第2卷 제1號, pp.18~27, 1990年 3月

時間依存 緩傾斜方程式을 利用한 港內 波高分布 計算

Computation of Wave Height Distribution Inside a Harbor Using Time-Dependent Mild-Slope Equation

郭文秀*·洪吉杓**·片宗根*
Moon Su Kwak*, Kil Pyo Hong** and Chong Kun Pyun*

要 旨 : 港內 波浪變形의 여러 가지 要因을 종합해서 다룰 수만 있다면 港灣施設의 적절한 配置의 關鍵인 港內 靜穩度 判定에 寄與하는 바가 매우 클 것이다. 本 論文은 時間依存 緩傾斜方程式을 基本方程式으로 하고, 실제 港灣의 反射條件에 적합한 任意反射率 境界條件을 導入하여, 波浪의 屈折, 廻折, 淺水效果 및 反射 등을 모두 考慮할 수 있는 數値模型을 樹立하였다.

本 數値模型을 厚浦港에 適用하여 그 計算結果와 水理模型實驗 및 Takayama 模型의 結果와 比較함으로써 本 模型의 妥當性을 檢討하였다. 水理模型實驗 結果와는 比較的 잘 一致하였고, Takayama 模型(1981)의 結果와도 類似한 結果를 보여주었다. 따라서, 本 數値模型은 港內 靜穩度를 判定함에 있어서 有用하게 쓰일 수 있을 것이다.

Abstract□The calmness inside a harbor plays an important role in the appropriate disposition of harbor structures. However, it is not easy to get the accurate computational results because they are affected by many factors concerning with the wave transformation. Successful solution also depends on determining the boundary values appropriately. This paper presents the numerical model which is able to calculate wave heights inside a harbor. It is based upon the time-dependent mild-slope equation involving wave refraction, diffraction, shoaling effect and reflection. In particular, the arbitrary reflectivity is used at the boundary in order to simulate the real harbor reflection condition.

This numerical model is applied for Hupo-Harbor and its validities are investgated by comparing with experimental values from the hydraulic model test as well as computational results from Takayama's numerical model (1981). It is shown that the model results are in good agreement with results from hydraulic model and Takayama's.

1. 緖 論

일찍이 港灣 周邊에 있어서 波의 屈折, 廻折 및 反射에 대해서 理論的 또는 實驗的인 硏究가 進行되어 왔지만 綜合적인 波高分布 推定은 주로 水理模型實驗에 의지하고 있는 것이 現實이다. 일반적으로 模型의 規模가 크지 않고 現場에서의 基礎資料가 충분할 때는 水理模型實驗에 의해 比較的 信賴性있는 結果를 얻을 수 있다. 그러나, 많은 經費와 時間 및 實驗專門人員이 필요하며 相似法則에 의한 縮尺의 影響, 摩擦抵抗의 調節, 反射 境界面 處理 등에 적지 않은 問題點이 있다.

한편, 최근 大型電子計算機의 急速한 發展과 一般化된 普及의 結果로 數値解析에 의한 波高分布 計算方法이 開發되었으며 이 方法을 이용하여 적은 經費로 短時日內에 各種의 경우에 대하여 迅速히 判斷할 수 있게 되었다. 그러나, 여기에는 適用限界 및 計算時間의 實用性 등의 制限이 있으므로 이러한 점들을 愼重히 考慮한다면 數値解析에 의한 方法은 設計時 港內 波高分布 把握을 위한 매우 有用한 手段이 될 수 있을 것이다.

이러한 數値模型들을 Southgate(1985)의 分類方

*明知大學校 土木工學科(Department of Civil Eng., Myong Ji University, Seoul 120-728 Korea)
**建設部 國立建設試驗所(National Construction Research Institute, Ministry of Construction, Seoul, Korea)

法에 따라 살펴보면 첫째, 時間段階 模型으로 線形化된 波動方程式을 使用하여 每 時間段階마다 水位와 流量을 決定하는 方法으로서 Ito와 Tanimoto (1972), Maruyama(1985), Copeland(1985) 등의 硏究가 있다. 특히 Abbott 등(1978)은 非線型項을 包含하는 Boussinesq 方程式을 利用하여 淺海領域에서의 波浪의 變移特性을 硏究하였으며 근래에는 Rottmann-Söde 등(1985)의 硏究가 있다. 이 模型은 가장 一般的으로 使用되고 있지만 大規模 港灣의 경우 計算時間과 容量의 限界 때문에 困難한 점이 있다.

둘째, 楕圓形 模型으로 Berkhoff가 誘導한 緩傾斜方程式을 基本方程式으로 하며, 基本式이 楕圓形 형태이므로 境界値問題로서 풀어진다. 이러한 模型은 Berkhoff(1972, 1976), Bettess(1976), Booij (1981), Kirby(1984), Rottmann-Söde 등(1985)에 의해 硏究되었으며 多重反射가 일어나는 곳이나 港灣의 共振現像을 模型化하기에 適合하지만 많은 計算量을 필요로 하는 短點이 있다.

세째, 抛物線形 模型은 楕圓形 方程式을 抛物線形 方程式으로 바꾼다음 前進技法을 使用하여 計算量을 短縮하였으나 反射를 考慮하지 못하는 短點이 있다. 이러한 模型은 Radder(1979), Liu(1983) 등이 硏究하였다.

네째, 波向線 模型 또는 屈折 模型으로 波浪이 波向線을 따라 진행한다는 幾何學的 光學理論을 使用하였으며, 計算量이 적기 때문에 大規模의 港灣에 適合한 模型이다. 이러한 模型은 Larsen(1978), Southgate(1985) 등에 의해 硏究되었다. 특히, Southgate는 廻折과 屈折을 考慮한 波向線 模型을 開發하여, 半無限 防波堤와 兩翼防波堤 등에 대해 해석하였는데, 廻折된 波의 에너지源이 防波堤 頭部보다, 防波堤의 遮蔽領域境界(shadow boundary)를 따라 펼쳐진다고 假定하여, 遮蔽領域에 대한 기존 波向線 模型의 難點을 解決하였다.

한편, Southgate가 分類한 模型 外에 Helmholtz 方程式을 Green 函數를 이용한 積分方程式으로 變換하는 方法이 있으며, *Lee(1970)*, *Barailler*와 *Gaillard*(1967) 등에 의해 硏究되었다.

또한, Sommerfeld의 解를 重疊하여 구하는 方法으로 Takayama(1981)의 方法이 있는데, 規則波 뿐만 아니라 不規則波에 대해서도 硏究하였다. Kohlhase 등(1978)은 港內境界에 의한 反射를 考慮하기 위해 거울原理를 使用하였다.

국내에서는 박상길(1982)이 Green 函數를 이용하여 港內 波高分布를 구하였으며, 李尙和(1982)는 廻折과 反射를 각각 計算하여 港內에 대한 波高分布를 구하였다. 그리고, 이종태(1982)는 海岸으로 傳播되어 오는 長週期波에 대한 灣 또는 港內에서의 反應을 解析하기 위하여 2次元 不定流의 解析理論에 根據한 數値模型을 硏究하였다. 최근에는, 海洋硏究所(建設部 1987)에서 雙曲形 緩傾斜方程式을 基本方程式으로 有限差分法을 이용하여 浦項 新港에 대한 波高分布를 구하였으며, 劉東勳 등(1989)이 Copeland 模型을 使用하여 北坪港에 대한 波高分布를 구하였으며, 李海宗(1989)은 Maruyama 模型을 이용하여 厚浦港에 대한 波高分布를 구하였다.

本 方法은 靜穩한 水域에 波가 진행하는 경우를 初期條件으로 하여, 有限差分法에 의해 다음 時間段階의 海를 구해가는 方法으로, 正常狀態의 解를 數値的으로 구하였다. 여기에 流速을 海底로부터 水面까지 積分한 線流量의 形態로 표시되는 時間依存 緩傾斜方程式을 基本方程式으로 使用하였다. 그리고, 실제의 港灣施設의 反射條件을 考慮하기 위하여 任意反射率境界의 計算法을 導入하고, 여기에 필요한 境界面에 대한 入射角을 定義하기 위하여, 波向을 線流量楕圓과 水面變位와의 관계를 이용하여 決定하였다. 특히, 數値計算에 있어서 周邊境界로부터 再反射의 影響을 피하기 위해서는 넓은 計算領域이 必要하게 되지만, 無反射性의 假想境界를 導入하여 넓은 領域을 줄일 수 있게 하였다.

이상과 같은 方法에 의해, 港內에서의 波浪變型을 종합적으로 다룰 수 있는, 즉, 적어도 防波堤에 의한 廻折現像, 水深變化에 의한 屈折現像 및 港內 岸壁에 의한 反射現像 등을 包含하는 數値模型을 樹立하고, 그 計算結果와 水理模型實驗 및 Takayama의 結果를 比較하여, 本 模型의 妥當性을 檢討하였다.

2. 基本方程式

Ito와 Tanimoto(1972)는 長波方程式을 아래와 같이 한쌍의 1階微分方程式으로 나타내고, 有限差分法을 使用하여 數値解를 쉽게 구할 수 있는 數値波

動解析法을 提案하였으며, 水深方向으로 積分된 線形의 運動方程式과 連續方程式을 基本으로 하고 있다.

$$\frac{\partial \vec{R}}{\partial t}+C^2\nabla\eta=0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\nabla\cdot\vec{R}=0 \qquad (1)$$

여기서, $\vec{R}=\int_{-h}^{0}\vec{V}\,dz$ 이고, $\vec{V}=(u, v)$이며, u, v는 x, y 方向의 水平流速이다. 그리고, C는 波速, $\nabla=(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y})$, η는 水面變位이다.

위 方程式의 자세한 誘導過程은 Ito와 Tanimoto(1972), Copeland(1985) 等에 잘 나타나 있다.

그리고, Copeland(1985)는 에너지 保存法則을 基礎로 하는 緩傾斜方程式의 時間依存形態(transient form)를 誘導한 다음 Ito와 Tanimoto(1972)의 方法과 類似한 有限差分法에 의해 쉽게 풀 수 있도록 아래와 같은 한쌍의 1階微分方程式으로 바꾸어 나타내었다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t}+nC^2\nabla\eta=0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{1}{n}\nabla\cdot\vec{Q}=0 \qquad (2)$$

여기서, $\vec{Q}=\int_{-h}^{0}\vec{V}\,F\,dz$ 이고, $F=\cosh\,k(z+h)/\cosh\,kh$ 이다.

한편 Maruyama(1985)는 Berkhoff가 誘導한 楕圓形 緩傾斜方程式을 數値計算이 편리하도록 雙曲形 方程式으로 바꾼 다음 Copeland와 마찬가지로 Ito와 Tanimoto(1971)의 數値波動 解析法과 關聯시켜 改善된 方法을 提案하고, 이들 基礎式을 時間依存 緩傾斜方程式이라 불렀다.

$$\frac{\partial \vec{R}}{\partial t}+C^2\nabla\eta=0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{1}{n}\nabla\cdot n\vec{R}=0 \qquad (3)$$

이 Maruyama의 時間依存 緩傾斜方程式을 본 數値模型의 基本方程式으로 使用하였는데, 式 (2)로 주어진 Copeland의 時間依存 緩傾斜方程式과는 任意變數 定義의 相異함으로 인하여, 그 形態가 약간 다르기 때문에 이들 사이의 關係를 알아보기 위해 두 方程式을 比較하여 보았다.

Copeland의 式 (2)에 使用된 $\vec{Q}$는 水粒子 速度를 積分한 函數이며 一般的인 物理的 意味가 없이 任意變數로 쓰이고 있다. 만일 水深이 一定하다고 假定하고

$$\vec{V}=\vec{V}_o F$$

$$G=\int_{-h}^{0}F^2dz=\frac{C^2}{2g}\left(1+\frac{2kh}{\sinh\,kh}\right)=\frac{CC_g}{g}=\frac{nC^2}{g}$$

$$J=\int_{-h}^{0}F\,dz=\frac{1}{k}\tanh\,kh=\frac{C^2}{g}$$

(여기서, k는 波數, C는 波速, C_g는 群速度, g는 重力 加速度이다.) 등을 利用하면, 아래와 같은 關係를 얻을 수 있다.

$$\vec{Q}=\vec{V}_o\int_{-h}^{0}F^2dz=\frac{nC^2}{g}\vec{V}_o \qquad (4)$$

한편, Maruyama가 사용하는 $\vec{R}$은

$$\vec{R}=\int_{-h}^{0}\vec{V}dz=\vec{V}_o\int_{-h}^{0}F\,dz=\frac{C^2}{g}\vec{V}_o \qquad (5)$$

이므로, 式 (4)와 (5)로부터

$$\vec{Q}=n\vec{R}$$

이 成立함을 알 수 있다. 물론 이 關係式은 一定 水深에서만 成立하는 式이나 이것을 式 (2)에 代入하면, Maruyama가 提案한 時間依存 緩傾斜方程式으로 바뀌어지게 된다.

Maruyama의 時間依存 緩傾斜方程式은 그 誘導過程이 Copeland의 方法과 相異하며, 그 誘導過程은 Maruyama(1985), 金 鐵(1988), 李海宗(1989) 等에 잘 나타나 있다.

Maruyama는 $\vec{R}$을 線流量의 槪念으로 說明하고 있으나 이를 物理的인 의미가 없는 단순한 任意變數로 看做할 수도 있으므로 Maruyama의 方程式도 역시 Copeland가 誘導한 時間依存 緩傾斜方程式과 마찬가지로 緩慢한 바닥傾斜條件에 따르고, 에너지 保存法則을 滿足하며, 波浪作用이 保存된다고 볼 수 있다.

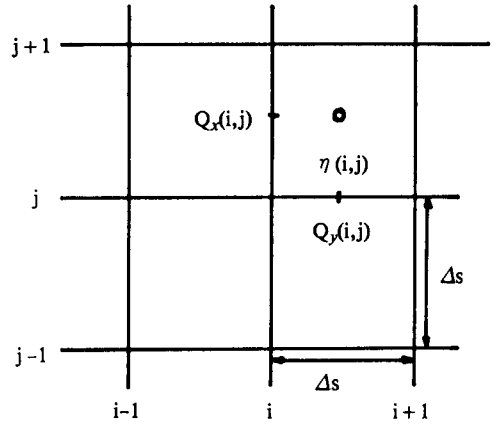

Fig. 1. Staggered mesh scheme.

3. 數値模型

3.1 有限差分式

Maruyama(1985)의 時間依存 緩傾斜方程式을 基本方程式으로 하여 數値解를 쉽게 구할 수 있도록 有限差分法을 使用하였으며, 式 (3)을 Fig. 1과 같은 格子體系를 使用하면 式 (6)과 같은 差分方程式을 얻을 수 있다.

단, 여기에서는 $\vec{R}$을 $\vec{Q}$로 나타내었으며, Copeland의 $\vec{Q}$와는 그 定義가 다르다.

$$\eta(i,j)^{(N-1/2)\Delta t}=\eta(i,j)^{(N-3/2)\Delta t}-\frac{1}{n(i,j)}\frac{\Delta t}{\Delta s}\{n_x(i+1,j)\,Q_x(i+1,j)^{(N-1)\Delta t}-n_x(i,j)Q_x(i,j)^{(N-1)\Delta t}+n_y(i,j+1)Q_y(i,j+1)^{(N-1)\Delta t}-n_y(i,j)Q_y(i,j)^{(N-1)\Delta t}\}$$

$$Q_x(i,j)^{N\Delta t}=Q_x(i,j)^{(N-1)\Delta t}-\frac{\Delta t}{\Delta s}C_x(i,j)^2\{\eta(i,j)^{(N-1/2)\Delta t}-\eta(i-1,j)^{(N-1/2)\Delta t}\}$$

$$Q_y(i,j)^{N\Delta t}=Q_y(i,j)^{(N-1)\Delta t}-\frac{\Delta t}{\Delta s}C_y(i,j)^2\{\eta(i,j)^{(N-1/2)\Delta t}-\eta(i-1,j)^{(N-1/2)\Delta t}\}$$

여기서, $C_x(i,j)$, $n_x(i,j)$는 $Q_x(i,j)$의 계산점에서의 波速 및 n값이며, $C_y(i,j)$, $n_y(i,j)$는 $Q_y(i,j)$의 계산점에서의 波速 및 n값이고, $n(i,j)$는 $\eta(i,j)$의 계산점에서의 n값이다. 그리고, Δt는 計算 時間間隔이며, N은 時間間隔을 나타내는 整數로서 N=0는 初期狀態를 나타내며, 계산은 N=1부터 시작한다.

3.2 初期條件

初期條件은 (N=0)은 다음과 같다.

$i=i_o\sim i_e$

$$\eta(i,j)^{-1/2\Delta t}=a_i\sin\{(i-i_o+1/2)k\Delta x-1/2\sigma\Delta t)$$

$$Q_x(i,j)^o=-a_tC_1\sin\{(i-i_o)k\Delta t\}$$

$$Q_y(i,j)^o=0$$

$i=1\sim i_o-1$

$$\eta(i,j)^{-1/2\Delta t}=Q_x(i,j)^o=Q_y(i,j)^o=0$$

3.3 入射假想境界

數値計算에 있어서 周邊 境界로부터의 再反射波의 影響을 피하기 위해 假想 外海境界를 設定하였다. 이 假想境界 計算을 위한 領域은 一定 水深으로 하고, 間隔 Δx는 일반적은 格子間隔과는 다르게 다음의 관계를 滿足하도록 決定한다.

$$\Delta x=C_1\,\Delta t$$

여기서, C_1은 深海境界 計算領域의 水深에 對應하는 波速이다.

3.4 任意反射率 境界條件 및 透過境界

3.4.1 任意反射率 境界條件

실제의 港灣에 있어서 境界는 각자의 反射特性을 가지고 있고, 港內 波高分布 등을 計算하기 위해서는 反射를 考慮하는 것이 不可避하다. 따라서, 本研究에서도 任意反射率 境界의 計算法을 導入하여 $t=N\Delta t$의 時刻에 있어서 任意反射率 境界에서의 線流量成分 $Q_o^{N\Delta t}$를 아래의 式에 의해 구한다.

$$Q_o^{N\Delta t}=AQ_1^{(N-N_O)\Delta t} \tag{8}$$

여기서, A는

$$A=\frac{1-r}{\{(1+r)^2\sin^2(k\Delta s\sin\beta)+(1-r)^2\cos^2(k\Delta s\sin\beta)\}^{1/2}}$$

이고, N_o는

$$N_o=\frac{1}{\sigma\Delta t}\tan^{-1}\left\{\frac{1+r}{1-r}\tan(k\Delta s\sin\beta)\right\}$$

이다.

단, 式 (8)에서 Q_1은 通常 差分方程式에 의해 Δt 間隔마다 計算되어지고, 그 時間的 變化로부터 N_o 時間間隔 前의 값을 2次 補間法으로 推定하여 구한다. 完全反射인 경우(r=1)는 $Q_o^{N\Delta t}=0$으로 하여 計算한다.

3.4.2 透過境界

計算領域의 側面과 海岸側은 透過境界로 하였다. 透過境界는 無反射性에 의해 r=0인 경우 이므로 式 (8)은 다음과 같이 간단하게 된다.

$$Q_o^{N\Delta t}=Q_1^{(N-N_o)\Delta t} \tag{9}$$

여기서, $N_o=\Delta s\ \sin\beta/C$이고, 여기에서도 Q_1은 위에서 언급한 2次 補間法에 의해 구한다.

3.5 計算의 安定條件

時間間隔 Δt는 計算을 安定하게 遂行하기 위해 다음의 關係를 滿足하도록 設定하여야 한다.

$$\Delta t\leqq\frac{1}{C_{max}}\frac{\Delta s}{\sqrt{2}}$$

여기서, C_{max}는 計算領域의 最大水深에서의 波速이다.

3.6 波向

入射波에 反射波 혹은 廻折波가 重複된 一般의 波浪場에 있어서 波向을 決定하는 것은 매우 어렵다. 그러나, 海濱變形豫測, 構造物의 設計 등에는 波向의 情報가 必要한 경우가 많고, 더우기 任意反射率境界를 計算하기 위해서는, 入射波와 境界面이 이루는 角을 알아야 하는데, 波向을 알아야만 이 入射角을 定義할 수 있다. 그러므로 여기에서는 波向을 Maruyama(1985)의 方法에 따라 定義하고, 그 決定方法에 대해 說明하고저 한다.

線流量 Q_x, Q_y의 時間變化는 波의 重複狀態에서 Fig. 2의 윗 그림에서 나타나듯이 楕圓軌道를 形成한다(單一進行波의 경우는 直線으로 된다). 이 線流量 楕圓의 長軸方向이 주요한 波動成分의 往復 運動方向이 되고 이 方向을 波向으로 看做한다. 그러나,

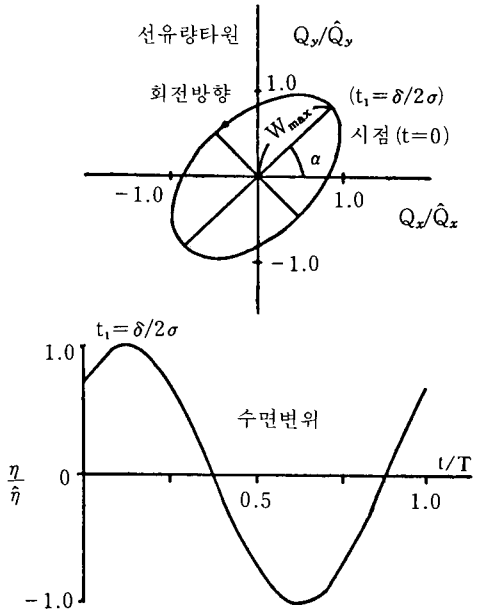

Fig. 2. Time variation of the water surface elevation and eillipse of the vertically-integrated water particle velocity.

長幅方向의 어느 쪽으로 波가 進行하고 있는가가 分明하지 않기 때문에 單純波의 水面變位와 線流量의 關係에서 波向을 類推한다. 즉, 線流量이 最大로 되는 長軸上의 2個의 時核 中에 水面變位 η가 陽으로 되는 時刻(Fig. 2의 t_1에 해당)에 對應하는 長軸上의 點과 x軸이 이루는 方向을 波向 α로 定義한다.

이 α를 潮流楕圓과 같이 取扱하여 구한다. 우선,

$$\begin{aligned}Q_x&=\hat{Q}_x\sin(\varepsilon_x+\sigma t)=u_c\sin\sigma t+u_s\cos\sigma t\\ Q_y&=\hat{Q}_y\sin(\varepsilon_y+\sigma t)=v_c\sin\sigma t+v_s\cos\sigma t\\ \eta&=\hat{\eta}\sin(\varepsilon_\eta+\sigma t)=\eta_c\sin\sigma t+\eta_s\cos\sigma t\end{aligned} \tag{11}$$

로 나타낸다. 여기서 u_c, u_s 등은

$$\begin{aligned}u_c&=\hat{Q}_x\cos\varepsilon_x,\quad u_s=\hat{Q}_x\sin\varepsilon_x\\ v_c&=\hat{Q}_y\cos\varepsilon_y,\quad v_s=\hat{Q}_y\sin\varepsilon_y\\ \eta_c&=\hat{\eta}\cos\varepsilon_\eta,\quad u_s=\hat{\eta}\sin\varepsilon_\eta\end{aligned} \tag{12}$$

이다. 線流量 Q_x, Q_y의 合成線流量을 W로 하면

$$W=[W_1+W_2\cos(2\sigma t-\delta)]^{1/2}$$

$$W_1=\frac{1}{2}(u_c^2+u_s^2+v_c^2+v_s^2)$$

$$W_2=\left[\frac{1}{4}(u_s^2+v_s^2-u_c^2-v_c^2)+(u_cu_s+v_cv_s)^2\right]^{1/2}$$

$$\tan\delta=\frac{2(u_cu_s+v_cv_s)}{(u_s^2+v_s^2-u_c^2-v_c^2)} \tag{13}$$

로 쓸 수 있다.
따라서, W의 最大値는

$$t=\frac{\delta}{2\sigma},\ \frac{\delta+2\pi}{2\sigma} \quad 일때 \quad W_{max}=\sqrt{W_1+W_2}$$

이 되고, 最小値는

$$t=\frac{\delta+\pi}{2\sigma},\ \frac{\delta+3\pi}{2\sigma} \quad 일때 \quad W_{min}=\sqrt{W_1-W_2} \tag{14}$$

로 된다.

合成線流量이 最大로 되는 2個의 時刻 中 $t_1=\delta/(2\sigma)$로 하고 合成線流量이 x軸과 이루는 角을 θ_1으로 하면 式 (11), (14)에 의해

$$W_{max}\cos\theta_1=u_c\sin\sigma t_1+u_s\cos\sigma t_1$$

$$=u_c\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)+u_s\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$W_{max}\sin\theta_1=v_c\sin\sigma t_1+v_s\cos\sigma t_1$$

$$=v_c\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)+v_s\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

의 關係가 成立된다. 따라서, θ_1은

$$\tan\theta_1=\frac{v_c\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)+v_s\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{u_c\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)+u_s\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)} \tag{15}$$

로부터 決定할 수가 있다. 시각 t_1의 水面變位 η_1은 같은 位相에서

$$\eta_1=\eta_c\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)+\eta_s\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \tag{16}$$

로 되기 때문에, 水面變位의 陽陰(+, −)을 考慮해 波向 α를

$$\eta\geqq 0 \text{ 일때}, \quad \alpha=\theta_1$$
$$\eta<0 \text{ 일때}, \quad \alpha=\theta_1+\pi \tag{17}$$

로 決定한다.

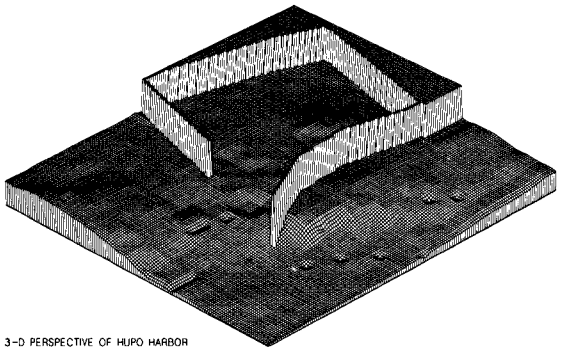

Fig. 3. 3-D perspective of bottom topography around HUPO harbor.

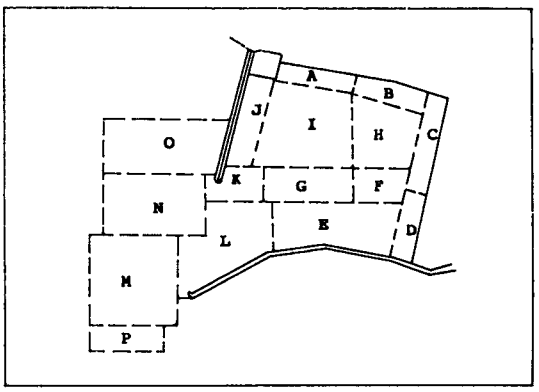

Fig. 4. Division of experimental regions in HUPO habor.

4. 計算結果 및 檢討

4.1 硏究對象 地域

數値模型을 適用한 港灣으로는 慶尙北道 蔚珍郡 平海面 厚浦里에 위치한 厚浦港으로, 港灣의 3次元 地形圖는 Fig. 3과 같다. 本 港灣의 選定이유로는 港灣이 比較的 간단하고, 水理模型實驗 결과가 있기 때문이다(建設部, 1988)

그리고, 數値模型과 水理模型實驗 結果를 比較하기 위하여 Fig. 4와 같이 港內를 區域별로 區分하였다.

4.2 模型의 適用

厚浦港에 대하여 1988年度에 施工이 完成된 狀態(경우 1)와 경우 1의 主防波堤와 副防波堤를 各各

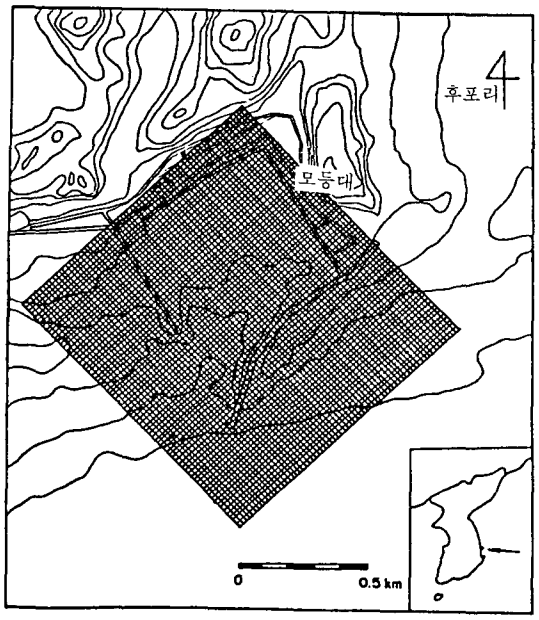

Fig. 5. Meshes of the computational region.

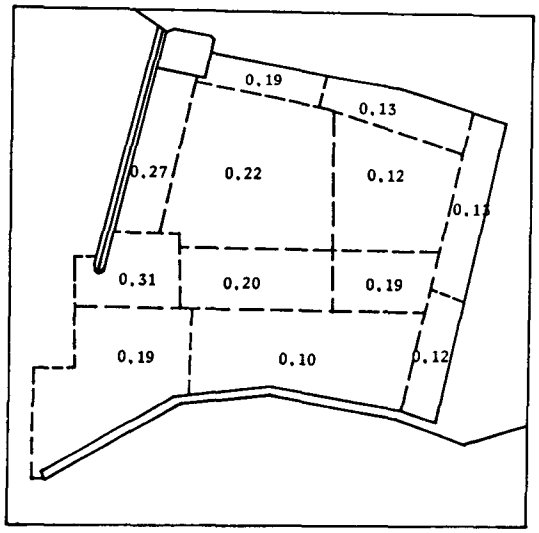

Fig. 6. Divisional distribution of mean wave height ratio (Case 1, Reflectivity 0.5, 0.9).

100 m씩 延長한 경우(경우 2)에 대하여 計算을 하였다. 計算格子 形成은 Fig. 5에 圖示된 바와 같이 SE 波向에 대하여 直角으로 하였으며, 格子間隔(Δs)은 8.33 m인 160×157個의 網으로 構成하였다. 計算時間 間隔(Δt)는 0.25秒이고, 入射波 週期는 14秒, 深海波高는 1 m로 하였다. 그리고, 入射

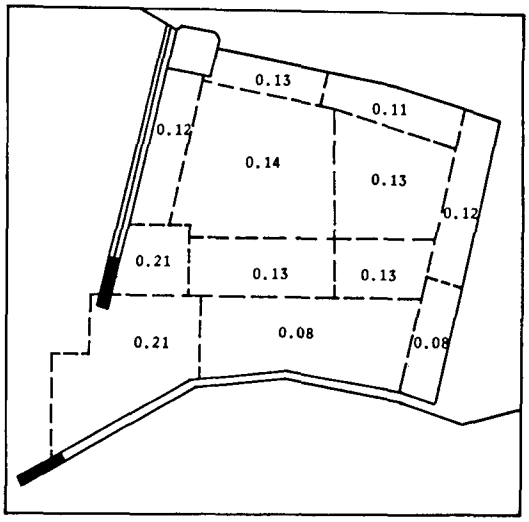

Fig. 7. Divisional distribution of mean wave height ratio (Case 2, Reflectivity 0.5, 0.9).

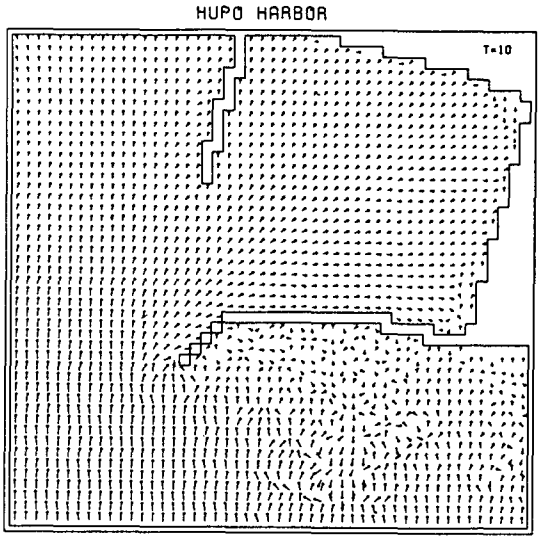

Fig. 8. Distribution of wave direction (T = 10).

假想境界 領域內에서의 水深은 24 m로 하여 計算을 遂行하였다.

4.3 計算結果

本 模型의 計算結果를 區域別 波高比의 平均値로 나타내었으며, Fig. 6, 7에 圖示하였다. 경우 1의 計算結果 중 水理模型實驗 結果와 가장 近接한 結果를 보인 경우의 反射率은 防波堤의 경우 0.5, 岸壁

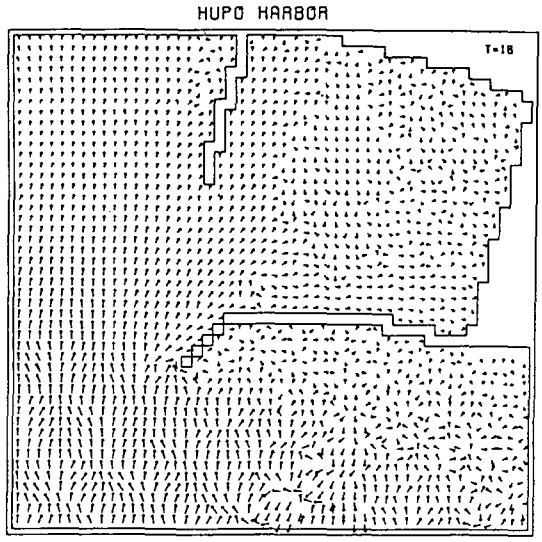

Fig. 9. Distribution of wave direction (T = 18).

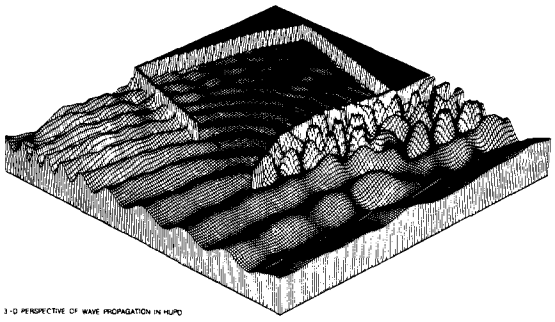

Fig. 10. 3-D Perspective of wave propagation in HUPO harbor (T = 14).

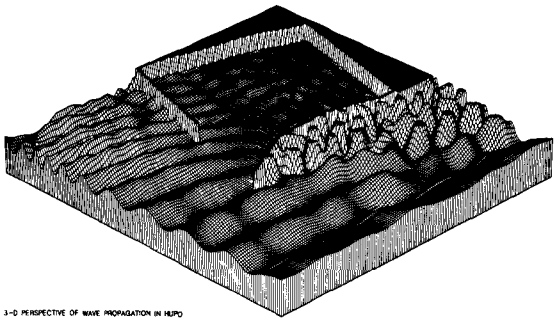

Fig. 11. 3-D Perspective of wave propagation in HUPO harbor (T = 18).

의 경우 0.9일 때이고, 이 때의 反射率을 가지고 경우 2를 計算하였다.

Table 1. Comparision of calculated valus and experimental values (Case 1).

區 域	水理模型實驗		Takayama 模型	李(1988)의 結果	本 模型
	不規則波	規則波			
L	0.31	0.22	0.24	0.35	0.19
K	0.38	0.29	0.18	0.44	0.31
J	0.22	0.15	0.20	0.46	0.27
A	0.22	0.18	0.19	0.56	0.19
B	0.21	0.28	0.15	0.23	0.13
C	0.23	0.16	0.19	0.16	0.13
D	0.19	0.18	0.17	0.40	0.12
E	0.15	0.09	0.14	0.27	0.10
G	0.21	0.34	0.16	0.24	0.20
I	0.22	0.19	0.19	0.37	0.22
H	0.21	0.21	0.16	0.22	0.12
F	0.17	0.18	0.19	0.29	0.19

또한, 10週期일 때와 定常狀態일 때의 波浪의 波向分布圖를 Fig. 8, 9에 나타내었고, 14週期일 때와 定常狀態일 때의 波浪 傳播의 3次元 透視圖를 Fig. 10, 11에 圖示하였다.

앞에서 圖示한, 波浪의 波向分布圖를 살펴보면, 深海에서 傳達된 波浪이 港內로 傳播되면서 水深變化에 의한 屈折現象, 防波堤에 의한 廻折現象이 뚜렷하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 時間이 經過하여 定常狀態에 도달할 즈음에는, 港內 岸壁에 의한 反射波와 港口 進入波가 合成되어, 港口의 中心附近에서 매우 複雜한 모습을 나타내고 있다.

그리고 이러한 波浪의 傳播모습을 立體的으로 나타낸 것이 Fig. 10, 11이다. 먼저 14週期일 때의 모습을 살펴보면 港內에서는 아직 重複波가 생기지 않고 一定한 波浪傳播의 모습을 보여주고 있으며, 正常狀態일 때는 傳播된 播浪이 反射되어 重複波를 이루면서 港口의 中心附近으로 되돌아 나오고 있는 모습을 나타내고 있다.

4.4 他 方法과의 比較 및 檢討

本 數値模型의 計算結果를 他 方法과 比較 및 檢討하기 위하여 경우 1의 結果値는 Table 1에, 경우 2의 結果値는 Table 2에 나타내었다. 여기에서 本 模型의 結果値는 反射率을 防波堤의 경우 0.5, 岸壁의 경우 0.9로 하여 계산한 結果値이다.

먼저 Table 1에서 本 模型과 水理模型實驗의 結果를 比較해 보면 全般的으로 잘 一致함을 볼 수 있

Table 2. Comparision of calculated value and experimental values (case 2)

區 域	水理模型實驗		Takayama 模型	李 (1988) 의 結果	本 模型
	不規則波	規則波			
L	0.24	0.26	0.23	0.32	0.21
K	0.16	0.23	0.12	0.25	0.21
J	0.12	0.07	0.10	0.26	0.12
A	0.14	0.08	0.12	0.33	0.13
B	0.17	0.08	0.11	0.22	0.11
C	0.13	0.11	0.15	0.17	0.12
D	0.13	0.11	0.13	0.33	0.08
E	0.10	0.08	0.11	0.24	0.08
G	0.13	0.19	0.13	0.24	0.13
I	0.12	0.10	0.14	0.28	0.14
H	0.12	0.12	0.14	0.20	0.13
F	0.11	0.13	0.15	0.25	0.13

다. 두 結果 모두 E 領域의 波高比가 比較的 작게 나타나고 있는데, 이것은 入射波가 港入口 部分에서의 廻折에 대하여 遮蔽領域에 해당하기 때문이다. 그리고, 本 模型의 結果에서 J領域의 波高比가 比較的 크게 나타나는 이유는 港入口에서 廻折된 波가 K, J 部分의 防波堤를 타고 곧장 港內로 進入하기 때문인 것 같다. 특히 G領域에서 水理模型實驗 結果가 本 模型의 結果보다 크게 나타나는 이유는 水理模型實驗의 경우 屈折現象이 두드러지게 나타나는데 反하여 본 模型의 경우 그만큼 屈折現象을 再現하지 못하기 때문일 것이다. 이러한 屈折現象에 影響을 주는 水深資料가 實驗에 使用된 것과 本 模型에 使用된 것 사이에 다소 差異가 있다고 判斷된다.

그리고, 本 模型과 Takayama 模型의 結果를 比較해 보면 K, J領域에서 다소 差異를 보이고 있으나 全體的으로 類似한 結果를 보여주고 있다. 또한 李海宗 模型의 結果는 反射率을 完全反射인 1로 하여 計算하였기 때문에 計算結果가 全體的으로 크게 나타나고, 특히 岸壁이 서로 맞닿는 구석진 곳에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 이에 반해, 실제 港灣의 反射條件을 考慮할 수 있는 任意反射率 境界條件을 適用하고, 여기에 필요한 波向을 適合하게 決定하여 計算을 遂行하였기 때문에 計算結果가 實驗値에 가까워진 것으로 생각된다.

Table 2를 檢討해 보면, 波高比가 全般的으로 낮아진 것으로 보아 防波堤의 延長效果가 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 結 論

Maruyama의 時間依存 緩傾斜方程式을 基本方程式으로 하고, 任意反射率境界 計算法을 適用한 本 數値模型의 計算結果는 水理模型實驗 結果와 잘 一致함을 보여주었으며, Takayama 模型과도 類似한 結果를 나타내었다.

本 數値模型을 外海에 接해 있어 港口進入波가 港內 靜穩度에 심한 影響을 주는 比較的 規模가 작고 多重反射가 생기는 港灣에 適用하면 매우 效果的일 것이다. 本 模型의 長點은 正常狀態에 있어서 波高分布를 구하는 것 뿐만 아니라 그 適程에 있는 波浪의 傳波를 把握할 수 있어 어느 時刻에 있어서의 波向 및 波浪 傳播의 3次元 透視圖 등을 나타낼 수 있는 것이다. 앞으로 碎波 후의 變形까지도 考慮한다면 더욱 應用範圍가 넓어지리라 생각된다.

參考文獻

Abbott, M.B., Petersen, H.M. and Skovgaard, O., 1978. On the numerical modelling of short waves in shallow water. *J. Hyd. Res.*, **16**(3), 173-204.

Barailler, L. and Gaillard, P., 1967. Evaluation recente des modeles mathematiques d'agitation due a la houle. Calcul de la Diffraction en Profondeur Non Uniforme, La Houille Blanche, **8**: 861-869.

Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th ICCE, ASCE: 471-490.

Berkhoff, J.C.W., 1976. Mathematical models for simple harmonic linear water waves-Wave diffraction and refraction, Delft Hydraulics Laboratory, Holland, Publication No. 163.

Bettes, P. and Bettes, J.A., 1976. Wave. A finite-element program for solving the wave equation, Computer Report No. 81, Dept. of Civil Eng., Univ. College of Wales, Swansea, U.K.

Booij, N., 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current, Delft Univ. of Technology, Dept. of Civil. Eng., Report No. 81-1.

Copeland, G.J.M., 1985. A practical alternative to the mild slope equation, Coastal Eng., **9**: 125-149.

Ito, Y. and Tanimoto, K., 1971. A new method of numerical analysis of wave propagation-Application to wave height distribution along breakwater, Rep. of the Port and Harbour Res. Ins., **10**(2): 97-120.

Ito, Y. and Tanimoto, K., 1972. A method of numerical analysis of wave propagation-Application of wave dif-

fraction and refraction, Proc. 13th., ICCE, ASCE, **1**: 503-522.

Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, *J. Geoph. Res.*, **89**(1): 745-747.

Kohlhase, S., Daemrich, K.-F., Berger, U., Tautenhain, E. and Berkhardt, O., 1978. A numerical approach for the deformation of the wave height distribution in a harbour, Proc. 16th, ICCE, ASCE: 664-676.

Larsen, J., 1978. A harbour theory for wind-generated waves based on ray methods, *J. of Fluid Mechanics,* **87**(1): 143-158.

Lee, J.J., 1970. Wave induced oscillation in harbours of arbitrary geometry, *J. of Fluid Mechanics,* **15**(2): 375-394.

Liu, P.L.-F., 1983, Wave-current interactions on a slowly varying topography, *J. of Fluid Mechanics,* **88**(c7): 4421-4426.

Liu, P.L.-F. and Tsay, T.-K., 1983. On weak reflection of water waves, *J. of Fluid Mechanics,* **131**: 59-71.

Maruyama, K. and Kajima, R., 1985. Two-dimensional wave calculation method based on unsteady mild slope equations, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan, Rep., No. 384041.

Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water wave propagation, *J. of Fluid Mechanics,* **95**(1): 159-176.

Rottmann-Sode, W., Schaper, H. and Zielke, W., 1985. Two numerical wave models for harbours, BHRA, England: 285-293.

Southgate, H., 1985. A harbour ray model of wave refraction-diffraction, JWPCO, ASCE, **111**(1): 29-43.

Takayama, T., 1981. Wave diffraction and wave height distribution inside a harbor, Technical Note of the Port and Harbour Res. Ins. Ministry of Transport, Japan, No. 367.

郭文秀, 1989. 時間依存 緩傾斜方程式을 利用한 港內 波高分布 計算, 明知大學校, 碩士學位論文.

建設部, 1987. 浦項新港 波浪調査 및 모델實驗用役 報告書.

建設部 國立建設試驗所, 1988. 厚浦港水理模型實驗報告書.

金 鐵, 1988. 短期海濱變形의 數値豫測模型, 서울大學校 博士學位論文.

박상길, 1982. 港內의 波高分布에 關한 硏究, 釜山大學校 碩士學位論文.

劉東勳, 李錫祐, 金泰仁, 金崇慶, 1989. 北坪港에 關한 波浪數値 모델링(WAMOI) 適用, 港灣, 韓國港灣協會, **13** (3) : 34-43.

李尙和, 1982. 港內 波의 變形에 關한 數値解析, 서울大學校 碩士學位論文.

이종태, 1982. 港內의 長週期波 解析을 위한 2次元 不定流의 數學的 模型開發에 關한 硏究, 延世大學校 博士學位論文.

李海宗, 1988. 港內 波高分布에 關한 硏究, 明知大學校 碩士學位論文.