

波向線 座標系에 의한 海岸構造物 周邊에서의 波浪變形 模型 Wave Deformation Model in Orthogonal Curvilinear Coordinate System around the Coastal Structure

이동수*·이종섭*·장선덕*

Dong Soo Lee*, Jong Sup Lee* and Sun Duck Chang*

要 旨 : 파랑은 천해역을 진행하면서 천수효과에 의한 굴절 및 구조물에 의한 회절, 흐름의 영향, 반사 등에 의한 변형을 일으킨다.

굴절 및 회절에 의한 파랑변형을 예측하기 위하여 흐름이 고려된 비정상 상태의 Kirby(1986a)의 식을 이용하여 회절이 고려된 기초방정식을 유도하고, 좌표계를 파향선식에 의한 직교곡선 좌표계로 변환한 후 양해법으로 반복계산을 행하여 해를 구하는 수치 모형을 개발하였다.

수치 모형의 적용성을 검토하기 위하여 다음과 같은 조건에서 계산하였으며, 기존의 계산결과 및 실험결과와 비교 검토하였다.

- 1) 일정 수심상에서 원형 천퇴 주변의 파랑변형
 - 2) 사면상에서 타원형 천퇴 주변의 파랑변형
 - 3) 사면상에서 파랑이 입사각을 갖고 입사할 경우 구조물 주변의 파랑변형
- 본 모형의 수치해결을 검토한 결과 기존의 연구결과와 잘 일치하였다.

Abstract □ Wave propagation is changed by the effect of shoaling, current-depth refraction and sheltering etc. To solve these problems, numerous models have been developed.

In the present study, a coordinate system is proposed based on the wave ray equation with the wave number equation including diffraction effects. The governing equation for the study was derived from the mild slope wave equation in non-steady state, including current effects (Kirby, 1986a) and transformed into an orthogonal curvilinear coordinate system on the basis of the wave ray equation. To obtain a numerical solution, an explicit finite difference scheme was used, and solved by the relaxation method.

This model was tested for various cases: Firstly a submerged circular shoal and a constant unit depth. Secondly a submerged elliptic shoal on a slope, and finally a breakwater harbour with obliquely incident waves on a slope.

The model was found to simulate the experimental results and other theoretical results in wave height and wave angle fairly well, and the applicability of the model around an arbitrary shaped coastal structure was also verified. To demonstrate the general usefulness of the present approach, the model is to be applied to a field situation with a complex bed topography.

1. 緒 論

해안구조물의 設計技法 확립, 해양 환경의 變化 예측, 港灣의 개발 등과 관련하여 최근 해양의 종합적인 개발문제가 크게 대두되고 있다.

수치 해석 모델로서는 Berkhoff(1972)의 緩傾斜方程式(mild slope equation)과 伊藤과 谷本

(1971, 1972), 大中, 渡邊과 磯部(1987) 등과 같은 쌍곡형 편미분방정식을 이용하는 것과, 타원형 편미분방정식을 반사파와 진행파로 분해하여 포물선형 편미분 방정식으로 근사하여 해석하는 Radder(1979), Lozano-Liu(1980) 등의 포물형 근사법(P. A. M.)이 있다.

P. A. M. 해석시 해의 정확도를 높이기 위하여

*釜山水産大學 海洋工學科(Department of Ocean Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-023, Korea)

파랑의 진행방향과 좌표축을 일치시켜야만 하는데 Tsay-Liu(1982) 등은 이를 위하여 기본 좌표계를 直交曲線座標系로 변환하여 이 문제점을 해결하려 하였으며 平口, 丸山(1986) 등은 새로운 미분연산자의 정의로 고정좌표계상에서 해석을 시도하였다. 土屋, 山下, 山元(1987) 등은 고차의 廻折項을 고려하여 현지 해안에 적용한 바 있다.

본 연구에서는 임의의 수심장위에 구조물이 배치되어 있을 경우 구조물 배후에서의 파랑변형 문제를 해결하기 위해 흐름이 고려된 Kirby(1986)의 기초 방정식으로부터 새로운 방정식을 유도하여 이것을 特性曲線上에서 해석한다. 유도된 기초방정식은 有限差分法으로 차분화하여 陽解法(explicit method)으로 파랑변형을 계산하고, 그 결과를 伊藤, 谷本(1972), Berkhoff(1982), 磯部(1985)의 실험값 및 Kirby(1988)의 계산값 등과 비교 검증하였다.

2. 基礎方程式의 定式化

2.1 基礎方程式의 誘導

波浪의 屈折, 廻折 및 흐름과의 干涉效果에 의해, 變形되는 現象을 解析하기 위하여 非定常 狀態에서의 緩傾斜라는 假定下에서 Kirby(1986a)에 의한 (1)式을 이용하여 基礎方程式을 誘導한다.

$$\frac{D^2 \Phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot \vec{U}) \frac{D\Phi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \Phi + (\sigma^2 - \omega^2) \Phi = 0 \quad (1)$$

여기서

$$\Phi = \phi e^{-i\omega t}$$

$$\phi = a e^{is}$$

$$\frac{D^2}{Dt^2} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \right) \quad (2)$$

윗 식은 波高分布에 따른 波浪의 非線形 效果를 포함한 것으로 shoal 뒤에서와 같은 波向集中지역에서 波高의 分布를 計算하기에 적합하다. (2)式을 (1)式에 代入하면 (3)式과 같이 된다.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \vec{U} \cdot \nabla + (\vec{U} \cdot \nabla)^2 \right] \phi e^{-i\omega t} + \nabla \cdot \vec{U} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right.$$

$$\left. + \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi e^{-i\omega t} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) e^{-i\omega t} + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \phi e^{-i\omega t} + (\sigma^2 - \omega^2) \phi e^{-i\omega t} = 0 \quad (3)$$

여기서 定常狀態를 考慮하여 양변을 $e^{-i\omega t}$ 로 나누어 정리하면 (4)式이 얻어진다.

$$-\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) - k^2 CC_g \phi + 2(\sigma^2 - \omega^2) \phi - i\omega (\nabla \cdot \vec{U}) \phi + (\vec{U} \cdot \nabla \phi) [1 - 2i\omega + (\vec{U} \cdot \nabla)] = 0 \quad (4)$$

한편 流速의 空間的인 變化가 작다고 假定하면 윗式에서 $(\vec{U} \cdot \nabla \phi) \cdot (\vec{U} \cdot \nabla)$ 項을 無視할 수가 있다. 따라서 위와 같은 假定下에서 波浪의 屈折, 廻折 및 흐름과의 干涉效果를 考慮한 定常狀態에서의 緩傾斜方程式은 (5)式과 같이 된다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + [k^2 CC_g - 2(\sigma^2 - \omega^2) + i\omega (\nabla \cdot \vec{U})] \phi + (1 - 2i\omega) (\vec{U} \cdot \nabla \phi) = 0 \quad (5)$$

여기서 C : 파속

C_g : 군속도

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

\vec{U} : 유속벡터

$$k = 2\pi/L$$

(5)式에서 $\phi = a e^{is}$ 를 代入하여 微分을 행한 후 實數부분과 虛數부분으로 각각 分離하여 나타내면 다음과 같이 된다.

$$A e^{is} + i B e^{is} = 0 \quad (6)$$

여기서

$$A = \nabla CC_g \cdot \nabla a + CC_g \nabla^2 a - CC_g |\nabla S| + k^2 CC_g a - 2(\sigma^2 - \omega^2) a - 2(\sigma^2 - \omega^2) a - \vec{U} \cdot \nabla a - 2\omega a \vec{U} \cdot \nabla S \quad (7)$$

$$B = 2CC_g \nabla a \cdot \nabla S + a \nabla CC_g \cdot \nabla S + CC_g a \nabla^2 S - U a \cdot \nabla S + 2\omega \vec{U} \cdot a + \omega a \nabla \cdot \vec{U} \quad (8)$$

(7)式의 양변을 $CC_g a$ 로 나누고 (8)式의 양변에 a를 곱한 후 流速이 波速보다 매우 크다고 假定하면 $|\vec{U}^2/CC_g| < 1$ 로 되어 (7)式에서 $-\vec{U} \cdot \nabla a$ 項과 $-2\omega a \vec{U} \cdot \nabla S$ 項을 無視할 수 있다. 이렇게 하여 (7)式과 (8)式을 정리하면 다음 式과 같이 된다

다.

$$\frac{1}{H} (\nabla^2 H + \frac{1}{CCg} \nabla CCg \cdot \nabla H) - |\nabla S| + k^2 - \frac{2(\sigma^2 - \omega^2)}{CCg} = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (H^2 CCg \nabla S) + \nabla \cdot (\omega \vec{U} H^2) - \vec{U} H^2 \cdot \nabla S = 0 \quad (10)$$

여기서

$$\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$$

$$H = 2a$$

$$\sigma^2 = gk \tanh \left[k \left(h + \frac{H}{2} \right) \right]$$

위 식은 屈折, 廻折 및 흐름효과를 考慮한 橢圓型 方程式으로서 定常狀態에서 Ebersole(1985)이 誘導한 式에서 흐름효과가 考慮된 式이다. 여기서 (9) 式은 廻折효과가 考慮된 波數 $|\nabla S|$ 에 關한 式이며 (10) 式은 波의 에너지 保存式을 나타낸다. 한편, 波數의 非回轉性에 關한 (11) 式을 導入하고 ∇S 를 (12) 式과 같이 정의하면 波向(θ)에 關한 (13) 式을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\nabla S) = 0 \quad (11)$$

$$\nabla S = |\nabla S| \cos \theta_i + |\nabla S| \sin \theta_j \quad (12)$$

여기서 첨자 i, j 는 각각 x, y 方向의 단위벡터를 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (|\nabla S| \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial y} (|\nabla S| \cos \theta) = 0 \quad (13)$$

(9) 式과 (10) 式을 다시 정리하면 다음 式과 같다.

$$|\nabla S|^2 = k^2 + \frac{1}{H} (\nabla H^2 + \frac{1}{CCg} \nabla CCg \cdot \nabla H) - \frac{2(\sigma^2 - \omega^2)}{CCg} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (H^2 CCg |\nabla S| \cos \theta) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (H^2 CCg |\nabla S| \sin \theta) \\ & + [\nabla \cdot (\omega \vec{U} H^2) - (\vec{U} H^2 \cdot \nabla S)] = 0 \quad (15) \end{aligned}$$

결국 (13)-(15) 式은 定常狀態下에서 波高變化에

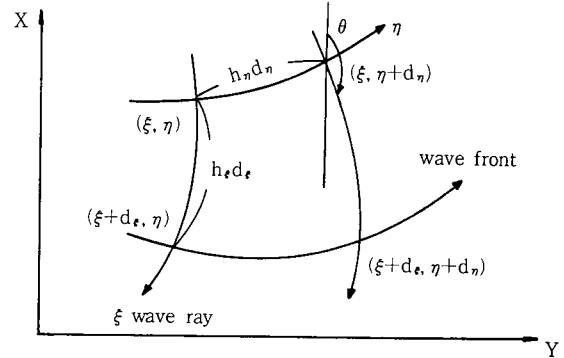


Fig. 1. Definition sketch for orthogonal curvilinear coordinate system.

의한 廻折효과와 波浪과 흐름간의 干涉효과를 考慮한 波浪變形에 關한 基礎方程式이 된다.

2.2 波向線 座標系上에서의 基礎方程式

任意構造物 周邊에서의 波動場의 變化를 計算하기 위하여 cartesian 座標系로 된 基礎方程式 (14) 式과 (15) 式을 Fig. 1에 정의된 것과 같은 波向線에 의한 直交曲線座標系로 변환한다. 波浪의 進行方向을 ξ 축, 波浪의 進行方向과 直交하는 方向을 η 축으로 잡으면, ξ 축은 波向線, η 축은 波峯線이 된다.

여기서 h_ξ 및 h_η 는 直交曲線座標系에 각각 ξ 축과 η 축의 scale factor이며 θ 는 x 축과 이루는 波向線의 角度이다.

$\Delta \eta$ 는 進行하는 두 波向線간의 間격이며, $\Delta \xi$ 는 進行하는 波浪의 진행間격이 된다. $\Delta \xi$ 및 $\Delta \eta$ 는 다음 式과 같이 둔다.

$$\begin{aligned} \Delta \xi &= h_\xi \cdot d_\xi \\ \Delta \eta &= h_\eta \cdot d_\eta \quad (16) \end{aligned}$$

여기서 d_ξ 및 d_η 는 임의의 微小量으로 取한다. 波向線을 나타내는 ξ 축은 波數保存則으로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{1}{h} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{1}{h} \frac{1}{|\nabla S|} \frac{\partial |\nabla S|}{\partial \eta} \quad (17)$$

(17) 式에서 廻折효과를 無視하면 $|\nabla S| = k$ 가 되어 일반적인 파수보존칙과 동일한 식이 된다. ξ 축에 따른 直交曲線座標系상의 좌표 (x, y)는 (17)

式과 (18)式으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \xi} (x, y) = (\cos \theta, \sin \theta) \quad (18)$$

基礎方程式 (14)式과 (15)式을 지금까지 정의한 直交曲線座標系로 변환하여 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} |\nabla S|^2 = k^2 + \frac{1}{H} \left\{ \frac{1}{h_\xi h_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{h_\eta}{h_\xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h_\xi}{h_\eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) \right) \right] + \frac{1}{CCg} \left[\left(\frac{1}{h_\xi} \frac{\partial CCg}{\partial \xi} \frac{1}{h_\xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{1}{h_\eta} \frac{\partial CCg}{\partial \eta} \frac{1}{h_\eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) \right] - \frac{2(\sigma^2 - \omega^2)}{CCg} \right\} \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (H^2 CCg |\nabla S| \cos \theta) + \frac{1}{h_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (H^2 CCg |\nabla S| \sin \theta) + \left\{ \frac{1}{h_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\omega H^2 U_\xi) + \frac{1}{h_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (\omega H^2 U_\eta) \right\} - \left[\frac{1}{h_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (H^2 |\nabla S| \cos \theta U_\xi) \right. \\ \left. + \frac{1}{h_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (H^2 |\nabla S| \sin \theta U_\eta) \right] = 0 \quad (20) \end{aligned}$$

즉 (19)式과 (20)式이 파랑과 흐름의 공존장에서 파랑변형을 波向線座標系상에서 計算할 수 있는 直交曲線座標系상의 基礎方程式이 된다.

3. 數值計算 方法

3.1 基礎方程式의 差分化

계산영역을 $\nabla \xi$ 와 $\nabla \eta$ 로 格子網을 구성하여 本論文中에서 유도한 基礎方程式 (17), (19), (20)을 有限差分化한다. 空間差分化에 있어 ξ 方向으로는 前進差分法을, η 方向으로는 中央差分法을 이용한다. 계산하기 위한 格子網의 구성은 Fig. 2와 같다. 有限差分法에 의하여 差分化된 基礎方程式은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |\nabla S|_{ij}^2 = k^2 + \frac{1}{H} \left\{ \frac{1}{h_{\xi ij}^2} \frac{H_{i-1j} - 2H_{ij} + H_{i+1j}}{\Delta \xi_{ij}^2} \right. \\ \left. + \frac{1}{h_{\eta ij}^2} \frac{H_{ij+1} - 2H_{ij} + H_{ij-1}}{\Delta \eta_{ij}^2} \right\} + \frac{1}{(CCg)_{ij}} \left[\frac{1}{h_{\xi ij}^2} \right. \end{aligned}$$

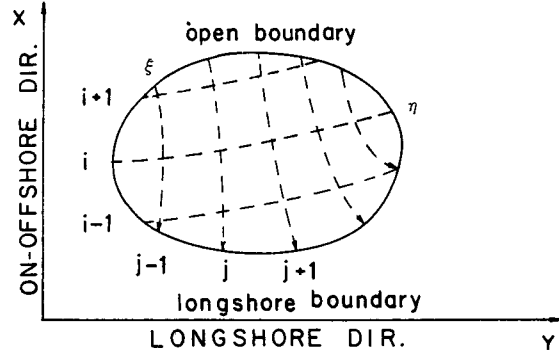


Fig. 2. Finite difference mesh on orthogonal curvilinear coordinate system.

$$\begin{aligned} \frac{(H_{i-1j} - H_{ij})(CCg)_{i-1j} - (CCg)_{ij}}{\Delta \xi_{ij}^2} \\ + \frac{1}{h_{\eta ij}^2} \frac{(H_{ij+1} - H_{ij})(CCg)_{ij+1} - (CCg)_{ij-1}}{4\Delta \eta_{ij}^2} \left. \right\} \\ - \frac{2(\sigma_{ij}^2 - \omega_{ij}^2)}{(CCg)_{ij}} \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{i-1j}^2 = \frac{1}{(CCg)_{i-1j} |\nabla S|_{i-1j} \cos \theta} \left\{ (H^2 CCg |\nabla S| \cos \theta)_{ij} - \left(\frac{h \Delta \xi}{2h \Delta \eta} \right)_{ij} \left[(H^2 CCg |\nabla S| \sin \theta)_{ij+1} \right. \right. \\ \left. \left. - (H^2 CCg |\nabla S| \sin \theta)_{ij-1} \right] \right\} \left[(\omega H^2 U_\xi)_{i-1j} \right. \\ \left. - (\omega H^2 U_\xi)_{ij} + \left(\frac{h \Delta \xi}{2h \Delta \eta} \right)_{ij} \left[(\omega H^2 U_\eta)_{ij+1} \right. \right. \\ \left. \left. - (\omega H^2 U_\eta)_{ij-1} \right] - (H^2 |\nabla S| \cos \theta U_\xi)_{i-1j} \right. \\ \left. - (H^2 |\nabla S| \cos \theta U_\xi)_{ij} + \left(\frac{h \Delta \xi}{2h \Delta \eta} \right)_{ij} \left[(H^2 |\nabla S| \sin \theta U_\eta)_{ij+1} \right. \right. \\ \left. \left. - (H^2 |\nabla S| \sin \theta U_\eta)_{ij-1} \right] \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{i-1j} = \theta_{ij} + \left(\frac{h \Delta \xi}{2h \Delta \eta} \right)_{ij} \cdot \frac{1}{|\nabla S|_{ij}} (|\nabla S|_{ij+1} - |\nabla S|_{ij-1}) \quad (23) \end{aligned}$$

3.2 數值計算方法

直交曲線座標系로 변환한 基礎方程式 (17), (19), (20)을 有限差分法을 이용하여 ξ 축에 대해서는 前進差分을, η 축에 대해서는 中央差分을 각각 取한다. 差分化된 (1)-(3)式을 計算하기 위한 open

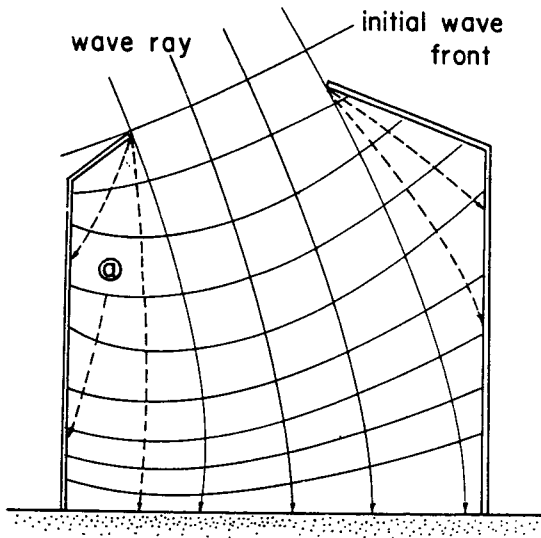


Fig. 3. Configuration of computational grid around the structure.

boundary에서의 入力資料로써 深海波의 波高(H_0), 深海波의 入射波向(θ_0), 周期(T)를 준다.

본 모델에서는 構造物이 배치되지 않은 영역과 구조물 배치영역으로 區分하여 計算을 하며 構造物이 配置된 영역의 前段階까지는 cartesian 座標系上에서 計算하고 構造物背後에서는 波向線에 의한 直交曲線座標系로 計算한다.

우선 open boundary에서 構造物 配置 前까지 計算에 있어 주어진 入力資料를 이용하여 各 格子點에서의 水深(h), 波速(C), 群速度(C_g) 및 波數(k)를 구한 후 Snell의 法則에 의해 初期波向을 구한다. 그리고 初期波高(H)는 淺水係數(K_s)와 屈折係數(K_r)을 考慮하여 구해둔다. 이렇게 구해진 初期值를 이용하여 먼저 $|\nabla S|$ 를 구하고 이것을 이용하여 波向(θ)를 구한 후 波高(H)를 구한다. 이 때 $|\nabla S|$, θ , H 를 4 step씩 前진하면서 計算하여 수렴조건 $|(H_{old} - H_{new})/H_{new}| < 0.005$ 를 만족할 때까지 반복 計算한다.

構造物 背後에서와 같이 波浪의 遮蔽영역에서의 計算은 配置된 構造物 前段階까지의 計算된 값을 이용하여 이것을 入射波高로 잡고 여기에 廻折係數(K_d)를 考慮하여 초기값으로 취한다.

Fig. 3과 같이 構造物前段에서 새로운 波向線을 발생시킬 필요가 있을 경우에는 호이겐스의 原理에 의하여 波向線을 추가한다. 前進하는 方向의 格子點

의 結晶은 波向線 方向으로의 scale factor h_r 를 $|\nabla S|$ 의 逆數를 取함으로써 구할 수 있으며 scale factor h_n 는 두 波向線간의 間격 $\Delta\eta$ 를 구한 후 주어진 값 d_n 로 나누어서 구한다. 波向(θ)는 (21)式을 이용하여 구하고, 다시 구해진 θ 와 (18)式을 이용하여 格子點의 위치를 구한다. 構造物 背後의 모든 格子點을 이렇게 한 단계씩 前진하여 구하고 그때마다 水深(h), 位相速度(C), 群速度(C_g)를 구해둔다. 초기 파고값은 구조물 前段부의 파고를 入射波高로 하여 다시 淺水係數(K_s) 및 屈折係數(K_r) 등을 考慮하여 計算한 값을 이용한다.

이렇게 하여 정해진 波向線座標의 초기값들을 이용하여 $|\nabla S|$, θ , H 를 수렴조건을 만족할 때까지 반복하면서 計算해나간다. 計算 도중 Fig. 3에서와 같이 波向線 間격이 너무 넓게 될 경우에는 그림 중의 a와 같이 새로운 波向線을 內插하여 추가한다.

4. 結果 및 考察

屈折 및 廻折에 의한 波浪의 變形을 豫測하기 위하여 圓型 shoal 및 橢圓型 shoal 그리고 任意의 構造物 주위에 적용하였다.

數值計算 결과는 圓型 shoal의 경우 伊藤과 谷本(1972)의 實驗結果와 比較 檢討하였으며 橢圓型 shoal의 경우는 Berkhoff *et al.* (1982)의 實驗結果 및 Kirby and Dalrymple(1984)의 計算結果와 比較 檢討하였다.

임의의 구조물 주위에서의 計算結果는 磯部(1985)의 實驗結果 및 Kirby(1988)의 計算結果와 서로 比較 檢討하였다.

4.1 圓型 shoal

一定한 水深場에 圓型 shoal이 있는 경우 進行하는 波浪은 shoal 뒷면에서 集中現象을 보이게 된다. 伊藤과 谷本(1972)은 이러한 現象에 의한 波高의 平面積인 分布를 解析하기 위하여 數值 波動 解析法을 開發하였으며 이것의 檢證을 위해 水理模型實驗을 행하였다.

본 모델을 直交座標系에서 計算하여 伊藤과 谷本이 행한 實驗結果와 比較하였다.

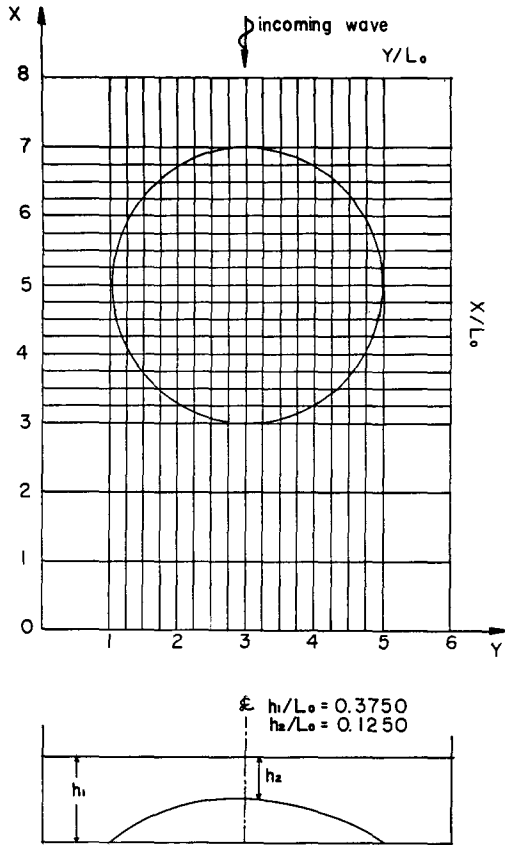


Fig. 4. Configuration of a circular shoal and computational mesh.

水理模型實驗에 사용된 제원을 Fig. 4에 나타냈다. 計算條件은 다음과 같다.

- 수심 (h_1) = 15 cm
- 수심 (h_2) = 5 cm
- 입사파의 파고 (H_0) = 1 cm
- 파장 (L_0) = 40 cm
- 주기 (T) = 0.51095 sec
- 파향 : Y 축에 직각방향
- 차분간격 ($\Delta X = \Delta Y$) = 10 cm

數值計算結果를 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 shoal 위를 進行하는 波浪은 正弦波型으로 볼 수 없을 정도로 變化하였으며 shoal 뒤에서 入射波高의 2배에 달하는 값이 나타난다. 대체로 實驗結果와 一致하나 $X/L_0=2$ 에서는 實驗값보다 약간 작은 값으로 나타나고 있다.

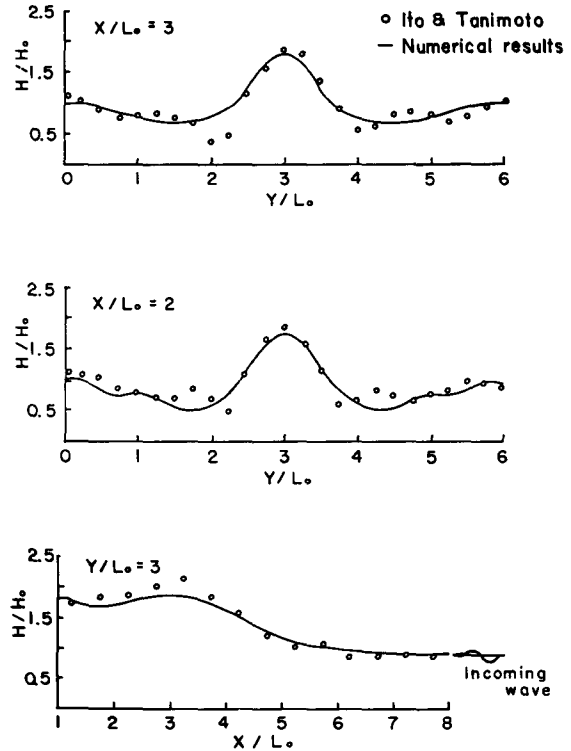


Fig. 5. Comparison of the present model results and those of Ito and Tanimoto.

4.2 橢圓型 shoal

Berkhoff *et al.* (1982)은 複雜한 海底地形을 進行하는 規則波의 變形을 분석하고 拋物線型 方程式의 模型을 檢證하기 위해 Fig. 6에 나타낸 것과 같은 實驗을 하였다.

Kirby and Dalrymple (1984) 등은 非線形 拋物線型 方程式을 誘導하여 計算하였으며, 본 模型의 檢證을 위해 위의 實驗資料 및 계산값들과 수치計算結果를 比較하였다.

경사 1/50인 斜面上위에 橢圓型 shoal 이 설치되어 있으며 입사경계면에서의 水深 및 波高, 波向은 一定하다. 計算條件은 다음과 같다.

- 입사파의 파고 (H_0) = 0.0464 m
- 파장 (L_0) = 1.56 m
- 주기 (T) = 1.0 sec
- 파향 : Y 축에 직각방향
- 차분간격 ($\Delta X = \Delta Y$) = 0.5 m

본 模型에 의하여 計算된 結果를 Fig. 6에서 정의

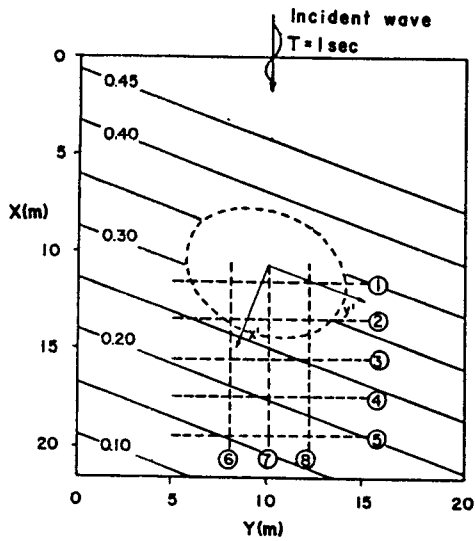


Fig. 6. Topography and computation domain for experiment of Berkhoff *et al.* (1982).

한 斷面別로 Fig. 7에 나타냈다. 파랑의 全般的인 變形은 實驗結果 및 Berkhoff *et al.* (1982) 등의 計算結果와 거의 一致하는 양상을 보이고 있으나 shoal 周圍의 複雜한 波浪變形에 대해서는 미세한 변화까지 나타내는 데는 어려운 점이 있다. 이것은 본 모델에서는 非線形 效果를 考慮하지 않았기 때문이다. 그러나 실제 海岸에 適用할 경우 충분히 이용 가능할 것으로 생각된다.

4.3 任意的 沿岸 構造物

沿岸에 配置한 임의의 構造物 周圍에서는 遮蔽效果에 따라 강한 廻折現象이 나타나게 된다. 이에 대한 波浪 變形을 計算하였다.

이의 妥當性을 檢討하기 위해 磯部(1985)의 실험 제원을 이용하여 計算하고 計算結果를 그의 實驗값과 Kirby(1988)의 計算結果와 서로 比較하였다.

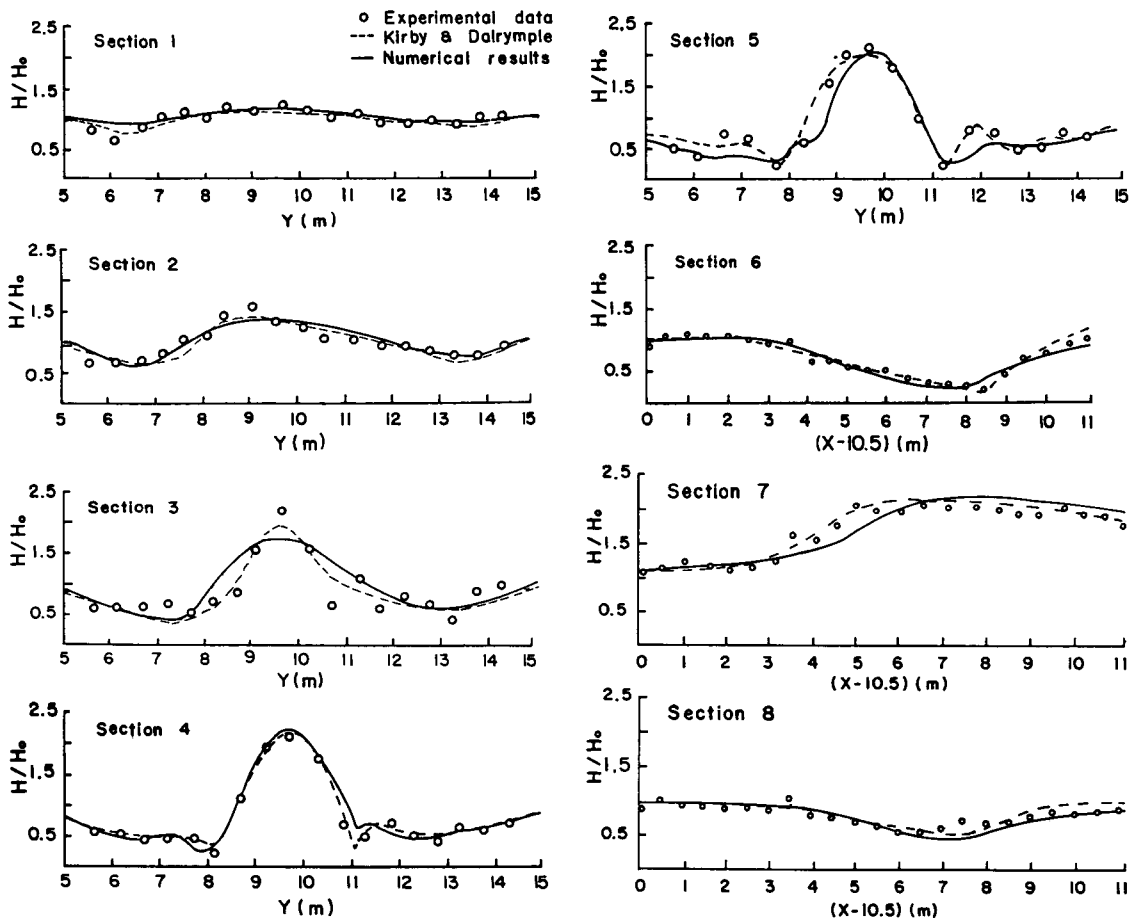


Fig. 7. Comparison of the present model results and experimental data by Berkhoff *et al.*

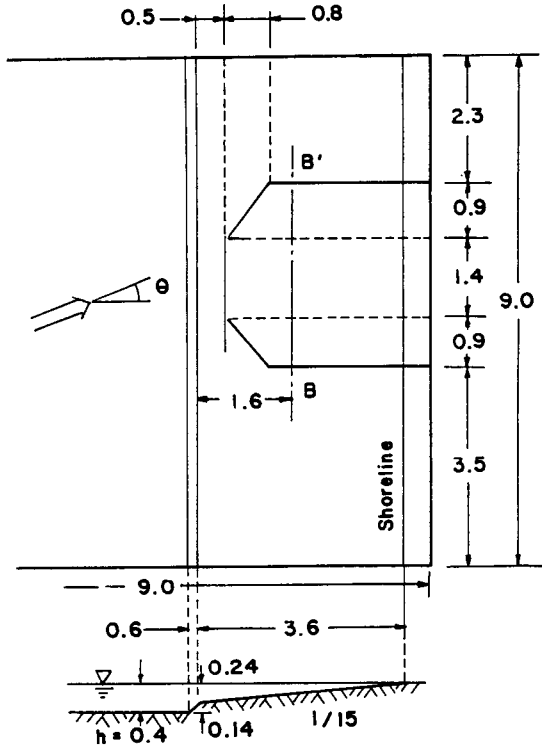


Fig. 8. Basin configuration for experiments of Isobe; lengths in m.

磯部の 實驗裝置는 Fig. 8과 같다. 사용된 主要 入力資料 및 計算 條件은 다음과 같다.

입사파의 파고 (H_0) = 9.1 cm

주기 (T) = 0.83 sec

파향 (θ) = 18°

計算時 d_e 및 d_n 는 微小量으로 본 모델의 計算에 서는 계산의 편의를 위해 0.5로 각각 주었다. 구조물 선단부 전면에서의 入射波高는 cartesian 座標系 상에서 계산된 波高를 이용하였으며 그 다음 단계는 廻折係數를 주어 初期波高를 이용하였다.

碎波波高는 $H=0.78 h_0$ 로 주어 계산하였다. 計算 結果를 Fig. 9에 나타내었다. 任意的 構造物 내에서의 계산된 結果는 全般的으로 잘 나타났으나 磯部에 의한 實驗結果는 조금 다르게 계산된 것을 알 수 있다. 본 모델에 非線形 效果를 考慮한다면 이러한 것은 해결될 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 모델로써 任意的 水深場위에 構造物이 配置되어 있을 경우 그 周圍의 波浪變形을 程度높게 計算할 수 있

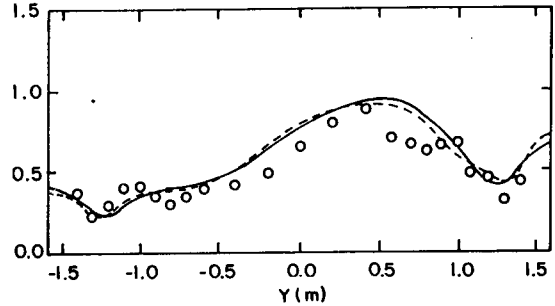


Fig. 9. Wave height on transect B-B' for experiment of Isobe: (---) calculated by Kirby; (—) by present model.

을 것으로 보인다.

5. 結 論

不規則한 水深場위에 任意的 構造物 등이 配置되어 있을 경우 構造物 周圍의 波浪變形을 豫測하기 위한 基礎方程式을 誘導하여 波向線方程式에 따라 直交曲線座標系로 變換하였다. 變換된 기초방정식은 有限差分法을 이용하여 差分化하였다.

본 모델의 檢證을 위하여 다음과 같은 경우에 대해 各各 數值計算하였다.

- 1) 一定한 水深場위에 설치된 圓形 shoal
- 2) 傾斜面상에 설치된 橢圓形 shoal에 入射角을 가지고 波浪이 進行할 경우
- 3) 水深이 變化하는 淺海에 任意的 構造物이 配置되어 있고 이곳을 入射角을 갖고 波浪이 進行할 경우, 數值計算 結果는 既存의 實驗資料 및 計算값들과 比較하여 檢證하였다.

本 모델로써 數值計算한 結果들은 대체로 程度 높게 계산되었으며 특히 直交曲線座標系로 變換하여 構造物 背後의 波浪變形을 계산한 結果는 非線形 效果를 考慮한 Kirby(1988)의 계산값과 잘 一致하였다.

실제 海岸에 본 모델을 適用할 경우 넓은 海域을 대상으로 하므로 보다 유용한 계산값을 기대할 수 있을 것이다. 본 모델로써 앞으로 남겨진 흐름과 碎波를 모두 포함하는 파 흐름 공존장에서의 파랑변형에 적용할 수 있도록 開發하는 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 기초과학연구비의 지원에 의하여 이루어졌음.

참고문헌

- Abbott, B.B., Petersen, H.M. and Skovgaard, O., 1978. On the numerical modeling of short waves in shallow water wave, *J. Hyd. Res.*, 16, 3: 173-204.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*: 471-490.
- Berkhoff, J.C.W., Booij, N. and Radder, A.C., 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple linear waves, *Coastal Eng.*, Vol. 16: 255-279.
- Berkhoff, J.C.W., 1976. Mathematical models for simple harmonic linear water waves, *Delft Hyd. Lab.*, No. 163, 112.
- Berkhoff, J.C.W., 1982. Refraction and diffraction of water waves: wave deformation by a shoal, Rept. W. 154-VIII, Delft Hydraulics Laboratory.
- Booij, N., 1981. Gravity waves on water with nonuniform depth and current, Delft University of Tech., *Dept. Civil Eng.*, Report No. 81-1.
- Chen, H.S. and Mei, C.C., 1974. Oscillation and wave force in a man made harbor in the open sea, *Proc. 10th Symp. Naval Hydroyna*. Cambridge, Mass.: 573-596.
- Ebersole, B.A., 1985. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, *J. Geophys.*, Vol. 89, No. C1: 745-747.
- Kirby, J.T., 1986a. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves, *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 91, NO. C1: 933-952.
- Kirby, J.T., 1986b. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves, *Coastal Eng.*, Vol. 10: 355-378.
- Kirby, J.T., 1988. Parabolic wave computations in non-orthogonal coordinate systems, Vol. No. 6: 673-685.
- Lee, J.J., 1971. Wave-induced oscillations in harbor of arbitrary shape, *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, Part 2: 375-394.
- Lozano, C.J. and Liu, D.L.-F., 1980. Refraction-diffraction model for linear surface water waves, *J. Fluid Mech.*, 705-720.
- Mei, C.C., 1978. Numerical methods in water wave diffraction and radiation, *Annual Rev. Fluid Mech.*, 10: 393-413.
- Peregrine, D.H., 1967. Long waves on beach, *J. Fluid Mech.*: Vol. 27, Part 4: 815-827.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation, *J. Fluid Mech.*, Vol. 95: 159-176.
- Tsay, T.K. and Liu, P.L., 1982. Numerical solution of water-wave refraction and diffraction programs in the parabolic approximation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87: 7932-7940.
- 伊藤喜行, 谷本勝利, 1971. 數値波動解析法とその應用—構造物周遊—, 第18回海講論文集, 67-70.
- 伊藤喜行, 谷本勝利, 1972. 波向線交差領域での波の屈折 數値波動解析法の應用(2)—, 第19回海講論文集, 325-329.
- 渡邊晃, 丸山康樹, 1984. 屈折・廻折・碎波減衰を含む波浪場の數値解法, 第31回海講論文集, 103-107.
- 磯部雅彦, 1985. 波向線座標における放物型 方程式を用いた屈折・廻折計算法, 第32回海講論文集, 95-99.
- 磯部雅彦, 1986. 放物型 方程式を用いた不規則波の屈折・廻折・碎波變形の計算法, 第33回海講論文集, 134-138.
- 平口博丸, 丸山康樹, 1986. 斜め入射波に対する放物型 方程式の適用性の擴張, 第33回海講論文集, 114-118.
- 土屋義人, 山下隆男, 山元淳史, 1987. 放物型 屈折・廻折方程式の數値計算法と現地海岸への適用, 第34回海講論文集, 96-100.
- 大中晋, 渡邊晃, 磯部雅彦, 1987. 波・流れ共存場に擴張した非定常緩勾配方程式による波動場の數値計算, 第34回海講論文集, 91-95.