

광각 포물형 완경사 방정식에 관한 연구

박정철*, 김재중**, 김기철**, 이정만*

A Study of Wide-Angle Parabolic Mild Slope Equation

J. C. Park, J. J. Kim, K. C. Kim, J. M. Lee

key words : 분리방법(splitting method), 완경사수심(water of varying depth), 완경사 지형 (slowly varying topography)

Abstract

The propagation of water waves over irregular bottom bathymetry and around islands involves many process.

In this study of numerical model is developed current in water of varying depth. The method used is splitting method and minimax approximation. This numerical method used is Crank-Nicolson scheme.

This model is applied to Vincent shoal and compared with laboratory data. The results agreed well with laboratory data. Current effect is considered in this study. So, the model is used for the estimation of rip current in the slowly varying topography.

1. 이론적 배경

섬 주위와 불규칙한 지형을 지나는 파랑은 천수(shoaling), 굴절(refraction), 에너지분산과 회절(difraction) 등의 복잡한 변화를 거쳐 연안으로 입사하게 된다. 이러한 파랑변형의 현상을 규명하기 위한 수치실험 연구로는 Berkhoff(1972)가 완경사 방정식을 발표한 이후로 획기적 발전을 이루었으며, 이를 기초로 한 다양한 근사 모델들에 대한 연구가 진행되었다.

Ebersole(1985)이 개발한 RCPWAVE는 타원형 근사모델로 복잡한 지형에도 적용할 수 있는 장점이 있으나, 입사각이 큰 경우에 오차가 크며 반사파를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다(박, 1991). 그 후 Panchang 등(1990)은 원래의 타원형 방정식을 PCGM기법을 사용하여 해석 하였는데 기존의 Berkhoff의 완경사 방정식 보다 계산시간을 단축하였다. 그렇지만 복잡한 경계면 처리에 있어서는 곤란하다(박, 1996). 쌍곡형 모델(Copeland 1985, Madsen과 Larsen 1987)은 반사파의 처리가 가능 하지만 개

* 동아대학교 대학원

** 동아대학교 교수

방경제처리가 어렵다는 단점을 가지고 있고, 포물형 모델(Radder 1979, Booij 1981)은 타원형모델과 쌍곡형모델에 비하여 계산량이 적으며 외해에서 연안쪽으로 진행하며 계산하기 때문에 연안에서의 경계조건을 필요치 않은 장점을 가지고 있지만 파랑의 입사각이 큰 경우에는 오차가 발생한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 Berkhoff(1972)의 환경사방정식을 Booij(1981)의 변분이론(Variational principle)을 이용하여 시간의존 쌍곡형 방정식으로 변형하고 분리방법(Splitting method)을 사용하여 포물형 방정식을 유도하였다. 포물형 모델의 취약점인 입사파의 제약조건을 극복을 하기 위하여 Kirby(1986)의 Minimax 근사 기법을 도입하여 파랑의 주 진행방향에 대한 입사각이 광각인 경우에도 해석 할수 있는 모델을 제시 하였다. 그리고 파랑의 비선형성을 고려하기 위하여 비선형분산방정식을 도입하였으며 파랑과 흐름이 공존하는 해역에서의 파랑변형계산을 위해서 유속을 고려 할 있도록 하였다.

2. 지배방정식의 유도

회절과 굴절이 고려된 환경사방정식은 Berkhoff(1972)에 의해 수심이 완만하다는 가정하에 식(1)과 같이 제안되었다.

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

여기서

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial x_2} j$$

$$\Phi = (x_1, x_2)$$

C : 파속

C_g : 군속도

ω : 절대 각속도

식(1)의 환경사 방정식을 Booij(1981)의 변분이론(Variational principle)을 사용하여 흐름의 영향과 시간항을 포함시켜 식(2)와 같은 쌍곡형 편미분방정

식이 된다.

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \nabla \right] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (U\Phi) \right\} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \Phi = 0 \quad (2)$$

여기서

$$U = (U, V)$$

$\Phi(x_1, x_2, t)$: 선형파이론에 의한 속도포텐셜

σ : 상대각속도

k : 파수

Kirby(1984)는 파랑과 흐름의 상호작용에 관하여 환경사 영역에서 Stokes 파랑에 대하여 기본방정식을 Perturbation method를 사용하여 유도하였는데 식 (3)와 같다.

$$\frac{D^2 \Phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot U) \frac{D\Phi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \Phi + \sigma^2 k^2 D |A|^2 \Phi = 0 \quad (3)$$

여기서,

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \sinh^4 kh} \quad (4)$$

식 (3)에서 5번째 항은 파랑의 비선형성을 고려한 항으로 식 (4)와 같이 정의된다. 만약 파랑이 x방향으로 진행 된다고 가정하면 분산 관계식은 식 (5)과 같이 정의 할수 있으며 포텐셜을 $\Phi(x, y, t) = \phi(x, y) e^{-i\omega t}$ 로 정의하고 시간항과 흐름의 영향을 나누어 식 (3)을 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\sigma = \omega - kU \quad (5)$$

여기서, ω : 절대 각속도

U : 평면에서의 유속

$$\begin{aligned} & \{(CC_g - U^2)\phi_x\}_x \\ & + k^2(CC_g - U^2)\phi + M\phi = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $M\phi$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} M\phi = & \{2\omega kU + i\omega(\nabla \cdot \underline{U}) - \sigma^2 k^2 D|A|^2\}\phi \\ & - (UV\phi_y)_x - (UV\phi_x)_y + \{(CC_g - V^2)\phi_y\}_y \\ & + 2i\omega U \cdot \nabla \phi \end{aligned}$$

식 (6)을 전개하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} & \phi_{xx} + (CC_g - U^2)^{-1}(CC_g - U^2)_x \phi_x \\ & + k^2 \left\{ 1 + \frac{M}{k^2(CC_g - U^2)} \right\} \phi = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

파랑의 주 진행 방향을 x , 그 직각 방향을 y 라 두고 포텐셜 ϕ_m 을 입사파와 반사파의 합으로 표시하면 식 (8)과 같으며, 식 (8)은 식 (9)와 (10)으로 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{\partial \phi_m}{\partial x} \right] + \gamma \phi_m = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi^+}{\partial x} = i\gamma \phi^+ \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi^-}{\partial x} = i\gamma \phi^- \quad (10)$$

윗 식에서 $\gamma(x, y)$ 는 계수를 의미하며, 이 방법을 Booij(1981)의 Splitting method를 이용하면 Helmholtz 방정식은 식 (11)과 같이 변형할 수 있다.

$$\phi_{xx} + \left[k^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \phi = 0 \quad (11)$$

식 (8)에서 $\phi_m = \alpha(x, y)\phi$ 라고 두고 저면 경사

가 완만한 경우 파수의 도함수도 작으므로 계수 α 의 x 에 대한 미분항이 작다고 가정하면 식 (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$\phi_{xx} + \left[\frac{\alpha^2}{\gamma} \right]^{-1} \left[\frac{\alpha^2}{\gamma} \right]_x \phi_x + \gamma^2 \phi = 0 \quad (12)$$

식 (7)을 식 (12)과 비교하면 α 와 γ 는 식 (13)과 (14)로 정리할 수 있으며 따라서 식 (8)은 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = k \left[1 + \frac{M}{k^2(CC_g - U^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\alpha = k^{\frac{1}{2}}(CC_g - U^2)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{M}{k^2(CC_g - U^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k^{\frac{1}{2}}(CC_g - U^2)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{M}{k^2(CC_g - U^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \phi \right\} \\ & = ik^{\frac{3}{2}}(CC_g - U^2)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{M}{k^2(CC_g - U^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \phi \end{aligned} \quad (15)$$

식 (14)를 binomial 전개를 하고 1/4, 3/4을 P_1 , P_2 로 치환하여 표현하면 식 (16)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k^{\frac{1}{2}}(CC_g - U^2)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{P_1 M}{k^2(CC_g - U^2)} \right] \phi \right\} \\ & = ik^{\frac{3}{2}}(CC_g - U^2)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{P_2 M}{k^2(CC_g - U^2)} \right] \phi \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 Booij(1981)는 P_1 , P_2 의 계수를 1/4, 3/4로 결정하였고, Radder(1979)는 계수를 0, 1/2 로하여 파랑의 주 진행방향을 각각 56.5° 와 43° 를 이루며 진행 할 때까지 계산의 정확도를 허용 (Dalrymple & Kirby 1988) 하였다. 만약 파의 주 진행방향을 x 축으로 정의하고 파수를 y 축방향의 한

격자 평균한 것으로 표현하여 정상상태의 포텐셜을 나타내면 식 (17)과 같다.

$$\phi = \frac{-ig}{2} \left(\frac{A}{\sigma}\right) e^{\int k(x) dx} + C. C. \quad (17)$$

식 (17)를 이용하여 식(16)을 정리하면 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & (C_g + U)A_x + VA_y + i(\bar{k} - k)(C_g + U)A \\ & + \frac{\sigma}{2} \left\{ \left(\frac{C_g + U}{\sigma}\right)_x + \left(\frac{V}{\sigma}\right)_y \right\} A \\ & - \frac{i}{2\sigma} ((p - V^2)A_y)_y - \sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $p = CC_g$

\bar{k} : reference wave number

U, V : x와 y방향의 평균유속

포물형모델의 단점인 입사파의 한계를 극복하기 위하여 식 (18)을 Kirby(1986b)의 Minimax 이론을 도입하여 식 (19)와 같이 유도하였고, 본 연구에서는 식 (19)를 지배방정식으로 하여 파랑변형을 계산하였다.

$$\begin{aligned} & (C_g + U)A_x - 2\Delta_1 VA_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U)A \\ & + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left(\frac{C_g + U}{\sigma}\right)_x - \Delta_1 \sigma \left(\frac{V}{\sigma}\right)_y \right\} A \\ & + i\Delta' \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma}\right)_y \right]_y \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A}{\sigma}\right)_y \right]_x + \left[UV \left(\frac{A}{\sigma}\right)_x \right]_y \right\} \\ & + \frac{i\sigma k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{\omega}{2} A \\ & + \frac{-b_1}{k} \left\{ \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma}\right)_y \right]_{yx} + 2i \left(\sigma V \left(\frac{A}{\sigma}\right)_y \right)_x \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + b_1 \beta \left\{ 2i\omega U \left(\frac{A}{\sigma}\right)_x + 2i\sigma V \left(\frac{A}{\sigma}\right)_y \right. \\ & \left. - 2UV \left(\frac{A}{\sigma}\right)_{xy} + \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma}\right)_y \right]_y \right\} \\ & - \frac{i}{k} b_1 \{ (\omega V)_y + 3(\omega U)_x \} \left(\frac{A}{\sigma}\right)_x \\ & - \Delta_2 \left\{ \omega U \left(\frac{A}{\sigma}\right)_x + \frac{1}{2} \omega U_x \left(\frac{A}{\sigma}\right) \right\} \\ & + ik\omega U (a_0 - 1) \left(\frac{A}{\sigma}\right) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, $p = CC_g$

ω : absolute frequency

σ : intrinsic frequency

\bar{k} : reference wave number

U, V : x와 y방향의 평균유속

$$\beta = \frac{k_x}{k^2} + \frac{k(p - U^2)_x}{2k^2(p - U^2)}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1$$

$$\Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1$$

$$\Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k}$$

그리고 a_0, a_1, b_1 는 Minimax 이론에 의한 계수이고 여기서, 계수가 $a_0 = 1, a_1 = -0.5, b_1 = 0$ 인 경우는 Radder(1979)의 근사식과 동일하게 되고, $a_0 = 1, a_1 = -0.75, b_1 = -0.25$ 인 경우는 Booij(1981)의 근사식이 되며 이를 Pad'e의 근사라고도 한다. 만약에 $a_0 = 0.994733030, a_1 = -0.890064831, b_1 = -0.451640568$ 로 선택하면 입사각의 허용범위가 70° 까지 가능하게 된다.

3. 비선형 분산방정식

현장에서의 파랑의 운동은 외부적 영향으로 비선형 운동을 하고 있다. 그러나 Berkhoff(1979)의 환경사 방정식은 선형파이론에 의하여 개발된 식으로 파랑의 비선형 효과를 표현하지 못한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 비선형분산방정식을 사용하여 파랑의 비선형성을 고려 하였다. 비선형 효과를 고려한 분산방정식은 Stokes의 모델과 Hedges(1976)의 모델이 있는데 Stokes의 분산방정식은 식 (20)과 같으며 심해파 조건에서 유리하고 Hedges 모델은 천해파 조건에서 유리하며, 식 (21)과 같다.

$$\sigma^2 = gk(1 + \varepsilon^2 D) \tanh kh \quad (20)$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh + \varepsilon) \quad (21)$$

여기서, $\varepsilon = k |A|$

Kirby 와 Dalrymple(1986b)은 심해와 천해에서 모두 적용할 수 있는 모델을 개발하였는데 식 (22)와 같다.

$$\sigma^2 = gk(1 + f_1 \varepsilon^2 D) \tanh(kh + f_2 \varepsilon) \quad (22)$$

여기서,

$$f_1 = \tanh^5 kh$$

$$f_2 = [kh / \sinh kh]^4$$

$$\varepsilon = k |A|$$

$|A|$: Wave amplitude

$$D = \frac{\cosh kh + 8 - 2 \tanh^2 kh}{8 \sinh^4 kh}$$

본 연구에서는 Kirby 와 Dalrymple(1986b)이 제안한 천해와 심해에 모두 적용 4 할 수 있는 비선형 분산 방정식을 사용하였으며, 여기서 f_1, f_2 의

계수의 선택으로 선형, Stokes, Hedges의 분산 방정식을 만들 수 있다.

4. 수치차분 및 경계조건

본 연구에서 지배방정식을 차분화 하기 위한 좌표계는 그림 1과 같다. x방향을 파의 진행방향으로 정의하고 y 방향을 연안과 평행한 방향으로 정의하였다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A_{i+1,j} - A_{i,j}}{\Delta x} \quad (23)$$

혼용편미분형태의 차분은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x \partial y} = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{A_{i+1,j+1} - A_{i+1,j-1}}{2\Delta y} - \frac{A_{i,j+1} - A_{i,j-1}}{2\Delta y} \right] \quad (24)$$

위와 같은 차분식을 이용하여 지배방정식을 Crank-Nicolson scheme으로 적용하면 식(25)과 같이 표현된다.

$$aA_{i+1,j+1} + bA_{i+1,j} + cA_{i+1,j-1} = dA_{i,j+1} + eA_{i,j} + fA_{i,j-1} \quad (25)$$

여기서, 계수 a, b, c, d, e, f는 변수로 되어 있으며, 복소수와 비선형항이다. 왼쪽에 있는 진폭은 이 방정식에서 미지의 값이며, 이때 오른쪽에 있는 진폭은 기지값이 되는데, 계산되어져 있거나 초기조건으로부터 알 수 있다. 초기조건으로는 외해에서는 파고, 주기, 파향 등 파의 입사조건을 주었으며 측면 경계조건으로는 Closed Boundary를 조건을 사용하였다. 그리고 내해쪽으로는 경계는 외해쪽에서 계산되어져 오기 때문에 경계조건이 필요 없게 된다.

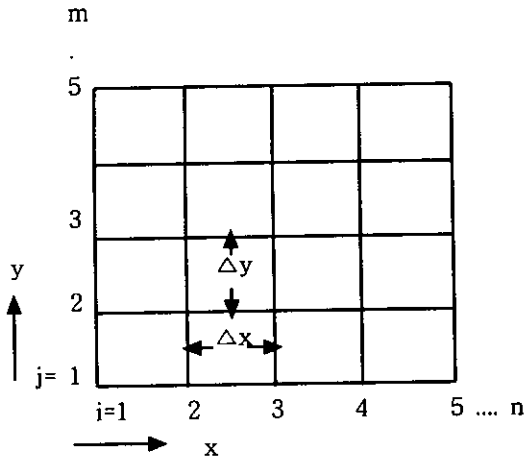


Fig. 1 좌표계의 정의

5. 모델의 적용 및 결과

모델의 검증에 위하여 유속이 없는 경우와 유속이 있는 경우의 수치실험을 하였다. 유속이 없는 경우는 Vincent and Briggs(1989)의 천퇴에서 실험치와 본 연구에서 선형 모델, 비선형모델의 계산치와 비교하였다. 그리고 파랑과 유속이 공존하는 경우의 실험은 Authur(1950)의 실험을 재현하여 비교하였다.

가. 유속이 없는 경우

모델의 검증에 위하여 Vincent and Briggs(1989)의 천퇴장에서 파랑변형을 예측하였다. 천퇴장은 45.72cm로 일정한 해역에 타원형 천퇴가 놓여있으며 천퇴의 중심수심은 15.24cm이며 그림 2와 같다. 파의 초기조건으로 주기 1.3sec, 파고 2.54cm로 두고 수치실험과 동일조건으로 수치모형실험을 하였다. 격자간격($\Delta x, \Delta y$)은 10cm, 격자수는 251×275로 하여 선형모델과 비선형모델로 나누어 동일한 조건하에서 각 단면 별로 수치실험 결과와 비교하였는데, 그 결과는 그림 3(a) - 3(e)와 같다.

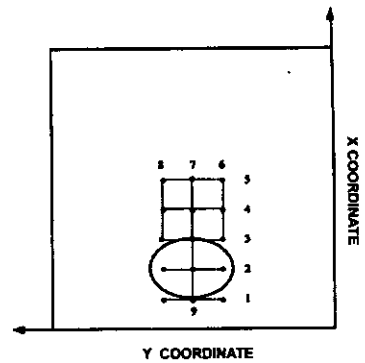
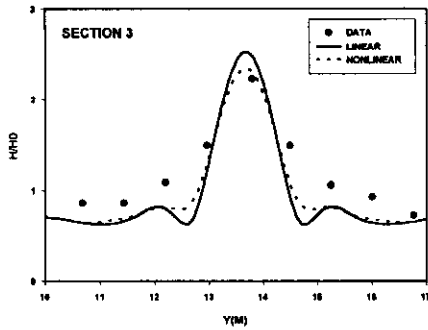


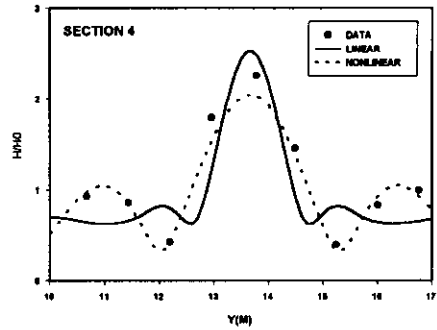
Fig. 2 Vincent and Briggs의 천퇴도

그림 3에서 선형, 비선형모델은 전반적으로 수치실험의 결과와 잘 일치함을 나타낸다. 그리고 선형모델과 비선형 모델을 비교해 보면 모든 영역에서 비선형모델이 선형모델 보다는 관측치와 더욱 더 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 선형모델보다 비선형모델이 천퇴 주위에서 발생하는 비선형효과를 잘 반영해 주었기 때문이다. 그림 3(a)는 그림 2에서 단면 3에 해당하는 지역으로 외해에서 파랑이 입사하여 천퇴를 통과한 후의 해역이다. 수치계산 결과는 선형, 비선형모델 모두 관측치와 유사함을 보이지만 비선형 모델이 관측치와 더 유사하다. 그림 3(b)는 단면 4의 지역으로 파랑이 천퇴를 통과하여 회절과 굴절의 영향이 강하게 나타나는 곳이다. 선형모델의 계산결과도 실험치와 비교적 유사함을 보이지만 파랑의 비선형성을 고려한 비선형모델이 실험치와 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

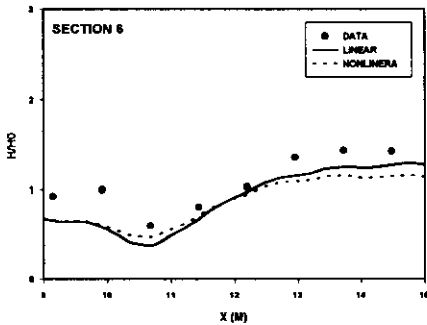
연안과 수직인 방향에서 천퇴를 중심으로 한 단면과 천퇴중심에서 좌측 그리고 우측에서의 계산결과는 각각 그림3(d), 그림3(e), 그림3(c)이다. 전반적으로는 비선형모델이 선형모델보다는 실험치와 유사함을 나타내는 원인으로 비선형모델이 파랑의 비선형성을 잘 반영하였기 때문이다. 이러한 결과로 볼 때 회절과 굴절의 영향이 강한 해역(그림 3(b))에서는 파랑의 비선형성을 고려한 파랑변형 계산이 더욱 타당하다.



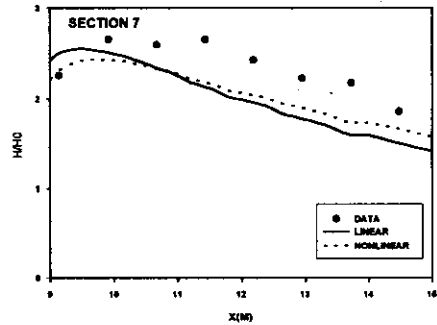
(a)



(b)



(e)



(d)

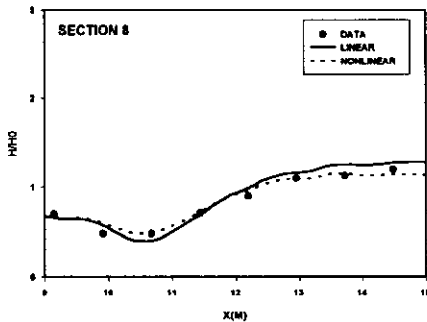


Fig. 3 관측치와 수치실험결과 비교

B. 유속이 있는 경우

유속이 있는 경우의 지형도는 식 (26)과 같으며, 유속 분포도는 Auther(1950)의 실험에서와 같이 식 (27)를 사용하였다. 여기서 U 와 V 는 x 와 y 방향의 유속을 나타내며, 그림 4는 입력조건으로 사용

$$h = 0.02x \quad (26)$$

한 유속에 대한 벡터도이다. 수치실험에서 사용한 입사파는 주기 8sec, 파고 1m로 하였다. 그리고 격자 간격은 $\Delta x, \Delta y$ 를 동일하게 5m로 하였고 격자 수는 100×100 이다. 이상과 같은 조건을 사용하여 수심의 변화만 있는 경우에 대하여 비선형모델을 사용하여 계산한 결과는 그림 5와 같다. 그리고 동일한 입력조건에서 유속이 있는 경우에 혼성모델로 수치실험한 결과는 그림 6과 같다. 그림 5와 6은 등 파고도이다.

Rip-current

$$U = 0.02295x' e^{-(x'/76.2)^2/2} e^{-(y/7.62)^2/2}$$

$$V = -0.2188[2 - (x'/76.2)^2] e^{-(x'/76.2)^2/2} \text{erf}(y/76.22) \text{sign}(y) \quad (27)$$

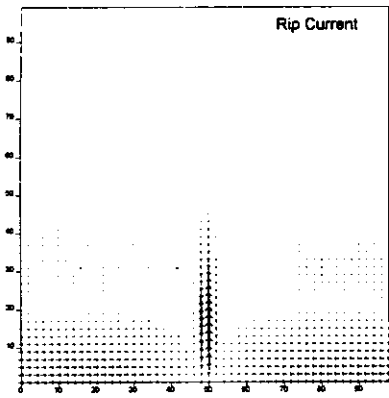


Fig. 4 유속의 벡터도

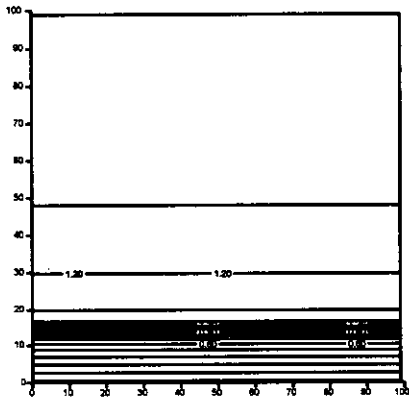


Fig. 5 유속 없는 경우의 등파고도

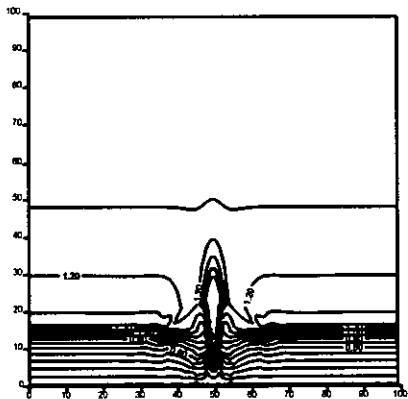


Fig. 6 유속을 고려한 등파고도

그림 5에서와 같이 유속을 고려하지 않은 경우의 파랑변형은 수심의 변화에 의해서만 파랑변형이 일어난다. 수심의 입력자료(식 (26))는 연안과 평행한 곳에서는 동일하다. 때문에 등파고도가 연안과 평행하게 나타난다. 유속을 고려한 경우에는 연안쪽에서는 파랑이 매우 복잡한 현상을 보이고 있는데, 이는 파랑장에서 유속 변화는 그림4와 식(27)에서와 같이 연안에서는 유속의 변화가 상당히 복잡한 현상을 보이고 있다. 그러므로 그림 6에서 유속을 고려한 파랑변형 계산에서는 유속 변화 상당히 복잡하기 때문에 연안에서의 등파고도가 복잡하게 나타난 것으로 판단되며, 본 모델은 유속이 존재하는 해역에서의 파랑변형을 잘 재현하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 파랑의 변형을 예측하기 위하여 유속을 고려한 포물형 환경사 방정식을 사용하였으며, 모델의 검증을 위하여 타원형 천퇴에서의 실험치와 비교 하였고, 흐름이 존재하는 곳에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포물형 모델이 가지는 입사파의 제약을 Minimax 이론을 사용하여 입사각을 확장하였다.
2. 포물형 방정식을 선형과 비선형모델로 수치실험한 결과 관측치와 유사한 결과를 얻었다. 파랑변형의 전반적인 경향을 파악 하고자 한다면 선형 모델로도 가능하지만 파랑의 비선형성이 강한 해역이나 정확한 해석을 요구하는 해역에서는 선형 모델 보다는 비선형 모델을 적용하여 파랑변형을 예측하는 것이 타당하다.
3. 유속이 존재하는 해역에서의 파랑변형 계산은 유속변화에 의한 파랑변형현상을 잘 표현하고 있다. 그러므로 본 모델은 파랑변형을 예측하고자 하는 대상해역이 유속의 변화가 있는 경우 유속의 변화를 고려한 파랑변형예측도 가능하다.

참고문헌

1. Auther, R. S., 'Refraction of Shallow Water Wave: The Combined Effect of Currents and Underwater Topography', Trans. AGU, 31, pp.539-552, 1950
2. Berkhoff J. C. W., 'Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves Diffraction and Refraction', Publ, 163, Delft Hydraulic Laboratory, 1976.
3. Berkhoff J. C. W., 'Computation of combined refraction-diffraction', Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Vancouver. 1972.
4. Booij N., 'Gravity Waves on Water With Non-uniform Depth and Current', Doctoral Dissertation, Technical University of Delft, the Netherlands, 1981.
5. Dalrymple R. A and J. T. Kirby, 'Models for Very Wide-Angle Water Waves and Wave Diffraction', J. of Fluid Mech. Vol. 192, pp. 33-50, 1988.
6. Ebersole B. A., 'Refraction-Diffraction Model for Linear Water Waves', J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp.939-953, 1985.
7. Kirby J. T., 'A Note on Linear Surface Wave-Current Interaction Over Slowly Varying Topography', J. of Geophysical Research, Vol. 89, pp.745-747, 1984.
8. Kirby J. T., 'Rational Approximations in The Parabolic Equation Method for Water Waves', Coastal Engineering, Vol. 10, pp355-378., 1986b
9. Panchang V. G., G. Wei, B. R. Pearce, and M. J. Briggs, 'Numerical Simulation of Irregular Wave Propagation Over Shoal', J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 3, pp.324-340, 1990.
10. Radder A. C., 'On the Parabolic Equation Method for Water-Wave Propagation', J. of Fluid of Mech., Vol. 95 part 1. pp159-176, 1979.
11. Vincent, C. L., Briggs, M. J., 'Refraction-Diffraction of Irregular Waves Over a Mound', J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp.269-284, 1989.
12. 김재중, 박정철, 'PCGM 기법을 사용한 환경사 방정식의 해법', 동아대학교 해양자원연구소, 제 9권, pp.27-34. 1996.
13. 박정철, '해안선 변형에 대한 수치모델 연구', 동아대학교 대학원, 1991.
14. 박정철, 한건모, 김재중, '해안선 변형 예측에 대한 수치모델 연구', 한국해양공학회, 제7권, 1호, 1993.

본 연구는 한국과학재단 지정 동아대학교 지
통형 통합항만관리 연구센터의 지원에 의한
것입니다.