

論 文

광각 포물형 완경사 방정식에 관한 연구⁺

김 재 중* · 박 정 철**

A Study of Wide-Angle Parabolic Mild Slope Equation

J. J. Kim · J. C. Park

Key Words : 천수변형(shoaling), 회절(refraction), 굴절(diffraction), 에너지 감쇠(energy dissipation), 분리방법(splitting method), 완경사수심(water of varying depth), 완경사방정식(mild slope equation), 유한차분법(FDM)

Abstract

The propagation of water waves over irregular bottom bathymetry and around islands involves many process - shoaling, refraction, energy dissipation and diffraction.

Numerical model in this study is developed with the mild slope equation to investigate wave transformation in water of varying depth and combined waves and a current. The method used is splitting method and minimax approximation. The numerical method used in this study is Crank-Nicolson scheme in the FDM.

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

1. 서 론

섬 주위와 불규칙한 지형을 지나는 파랑은 천수(shoaling), 굴절(refraction), 에너지분산과 회절(diffraction) 등의 복잡한 변화를 거쳐 연안으로 입사하게 된다. 이러한 파랑변형의 현상을 규명하기 위한 수치실험 연구로는 Berkhoff(1972)가 완경

사 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,

⁺ 본 연구는 한국과학재단 지정 동아대학교 지능형 통합항만관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

* 정회원, 동아대학교 해양공학과 교수

** 학생회원, 동아대학교 해양공학과 대학원

1991). 그 후, Panchang 등(1990)은 원래의 타원형 방정식을 PCGM기법을 사용하여 해석하였는데, 기존의 Berkhoff의 환경사 방정식 보다 계산시간을 단축시킨 반면에 복잡한 경계면 처리에 있어서는 곤란하다고 알려져 있다(박, 1996). 한편, 쌍곡형 모델(Copeland 1985, Madsen과 Larsen 1987)은 반사파의 처리가 가능하지만 개방경계처리가 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)과 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 할 수 있는 모델을 제시하였다. 그리고 파랑의 비선형성을 고려하기 위하여 비선형분산방정식을 도입하였으며 파랑과 흐름이 공존하는 해역에서의 파랑변형계산을 위해서 유속을 고려 할 수 있도록 하였다.

2. 지배방정식의 유도

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

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

여기서, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j$

$$\hat{\phi} = (x, y)$$

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 편미분방정식이 된다.

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

여기서,

$$\underline{U} = (U, V)$$

$\Phi(x, y, t)$: 선형파이론에 의한 속도포텐셜

σ : 상대각속도

k : 파수

Kirby(1984)는 파랑과 흐름의 상호작용에 관하여 환경사 영역에서 Stokes 파랑에 대하여 기본방정식을 섭동법(Perturbation method)을 사용하여 유도하였는데 식 (3)과 같다.

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

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 진행된다고 가정하면 분산 관계식은 식 (5)와 같이 정의 할 수 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.

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

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.

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

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

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

윗식에서 $\gamma(x, y)$ 는 계수를 의미하며, 이 방법을 Booi(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 경사가 완만한 경우 파수의 도함수도 작으므로 계수 α 의 x에 대한 미분항이 작다고 가정하여 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 정리 할 수 있으며 따라서 식 (8)은 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

식 (14)를 이항(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 Radder(1979)는 P_1 , P_2 의 계수를 0, 1/2로 결정하였으며 Booij(1981)는 1/4, 3/4로 결정하였고, Radder(1979)는 계수를 0, 1/2로 하여 파랑의 주 진행방향을 각각 43°와 56.5°를 이루며 진행할 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.

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

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.

$$\begin{aligned} & (C_g + U)A_x - 2\Delta_1 VA_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U)A \\ & + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left(\frac{C_g + U}{\sigma} \right)_x - \Delta_1 \sigma \left(\frac{V}{\sigma} \right)_y \right\} A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + i\Delta' \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y \right] \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{yx} + \left[UV \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{xy} \right\} \\ & + \frac{i\sigma k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{\omega}{2} A \\ & + \frac{-b_1}{k} \left\{ \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{yx} + 2i \left(\sigma V \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right)_x \right\} \\ & + b_1 \beta \left\{ 2i\omega U \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x + 2i\sigma V \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y \right. \\ & \left. - 2UV \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{xy} + \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{yx} \right\} \\ & - \frac{i}{k} b_1 \{ (\omega V)_y + 3(\omega U)_x \} \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x \\ & - \Delta_2 \left\{ \omega U \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x + \frac{1}{2} \omega U_x \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\ & + ik\omega U (a_0 - 1) \left(\frac{A}{\sigma} \right) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

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 계수이다. 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 Padé의 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 비선형 분산방정식을 사용하여 파랑의 비선형성을 고려하였다. 비선형 효과를 고려한 분산방정식은 Stokes와 Hedges(1976)의 연구를 들 수 있다. Stokes의 분산방정식 심해파 조건에서 유리하고 Hedges 모델은 천해파 조건에서 유리하며, 각각 식 (20) 및 식 (21)으로 나타내었다.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh + \epsilon) \quad (20)$$

$$\sigma^2 = gk(1 + \epsilon^2 D) \tanh kh \quad (21)$$

여기서, $\epsilon = k |A|$

그 후 Kirby 와 Dalrymple(1986b)은 심해와 천해에서 모두 적용할 수 있는 분산 관계식을 유도했는데 식 (22)와 같다.

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

여기서,

$$f_1 = \tanh^5 kh$$

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

$|A|$: Wave amplitude

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

본 연구에서는 Kirby와 Dalrymple(1986b)이 제안한 천해와 심해에 모두 적용할 수 있는 비선형 분산 방정식을 사용하여 파랑의 비선형 효과를 고려하였으며 식 (22)에서 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 Fig. 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.

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

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

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

여기서, 계수 a, b, c, d, e, f는 변수로 되어 있으며, 복소수와 비선형항이다. 왼쪽에 있는 진폭은 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 내해쪽으로의 경계는 외해쪽에서 계산되어져 오기 때문에 경계조건이 필요 없게 된다.

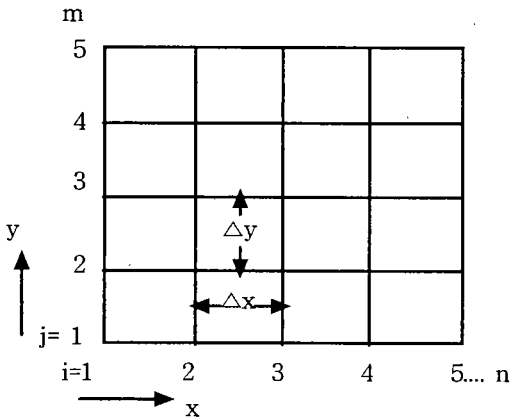


Fig. 1 Definition of coordinate system

5. 모델의 적용 및 결과

모델의 검증을 위하여 Vincent and Briggs(1989)의 천퇴장에서 수리실험 관측치와 본 연구의 계산결과인 선형 모델, 비선형모델의 계산치와 비교하였다.

그리고 파랑변형의 외력 중 하나인 파랑과 흐름이 상호 작용하는 해역에서의 파랑변형을 예측하기 위하여 Arthur(1950)의 이안류(Rip current)를 유속의 입력자료로 사용하여 유속이 있는 경우와 유속이 없는 경우의 파랑변형을 비교하였다.

A. 유속이 없는 경우

모델의 검증을 위하여 Vincent and Briggs(1989)의 천퇴장에서 파랑변형을 예측하였다. 천퇴장은 수심이 45.72cm로 일정한 해역에 타원형 천퇴가 놓여 있으며 천퇴의 중심수심은 15.24cm이며 Fig. 2와 같다. 초기조건으로 주기 1.3sec, 파고 2.54cm로 두고 수리실험과 동일조건으로 수치계산을 하였다. 격자간격($\Delta x, \Delta y$)은 10cm, 격자수는 251×275로 하여

선형모델과 비선형모델로 나누어 동일한 조건하에서 각 단면별로 수리실험 결과와 비교하였는데, 그 결과는 Fig. 3(a) - 3(e)와 같다. Fig. 3에서 선형, 비선형모델은 전반적으로 수리실험의 결과와 잘 일치함을 나타낸다. 그리고 선형모델과 비선형 모델을 비교해 보면 모든 영역에서 비선형모델이 선형모델보다는 관측치와 더욱 더 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 선형모델보다 비선형모델이 천퇴 주위에서 발생하는 비선형효과를 잘 반영해 주었기 때문이다. Fig. 3(a)는 Fig. 2에서 단면 3에 해당하는 지역으로 외해에서 파랑이 입사하여 천퇴를 통과한 후의 해역이다. 수치계산결과는 선형, 비선형모델 모두 관측치와 유사함을 보이지만 비선형 모델이 관측치와 더 유사하다. Fig. 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 Fig.3(d), Fig.3(e), Fig.3(c)이다. 전반적으로 비선형모델이 선형모델보다 실험치와 유사함을 나타내는 원인으로는 비선형모델이 파랑의 비선형성을 잘 반영하였기 때문이다. 이러한 결과로 볼 때 회절과 굴절의 영향이 강한 해역(Fig. 3(b))에서는 파랑의 비선형성을 고려한 파랑변형 계산이 더욱 타당하다.

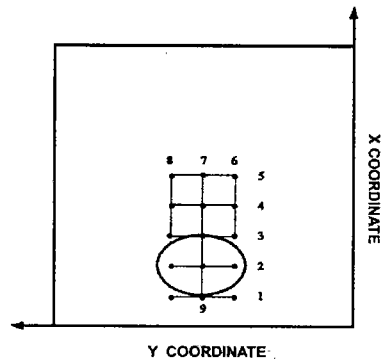
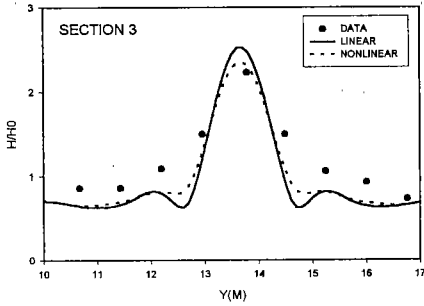
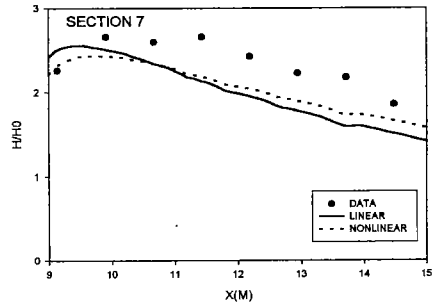


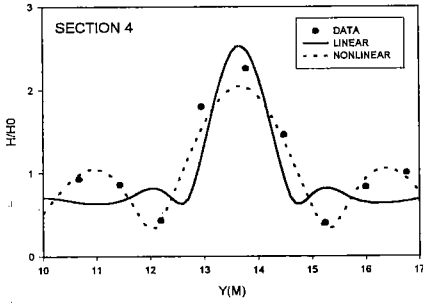
Fig. 2 Experimental setup (Vincent and Briggs, 1989)



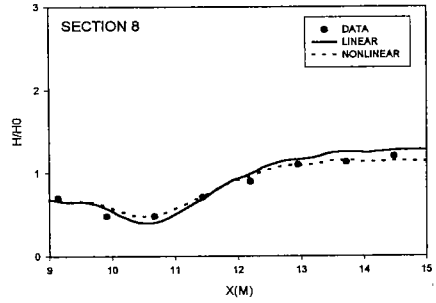
(a)



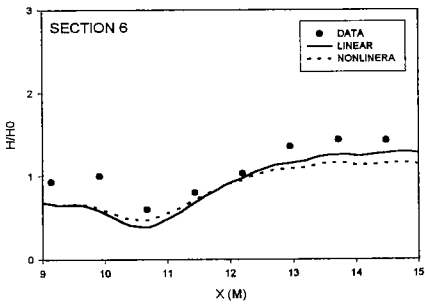
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig. 3 Comparisons between numerical results and experimental data(a~c)

Fig. 3 Comparisons between numerical results and experimental data(d~e)

B. 유속이 있는 경우

유속이 있는 경우 지형도는 식 (26)과 같으며, 유속 분포도는 Arthur(1950)의 실험에서와 같이 식 (27)를 사용하였다. 여기서, U 와 V 는 x 와 y 방향의 유속을 나타내며, Fig. 4는 입력조건으로 사용된 유속의 벡터도이다. 입력조건으로 주기 8sec, 파고 1m이고 격자 간격($\Delta x, \Delta y$)은 5m 하였으며 격자수는 100×100 을 채택하였다. 이상과 같은 조건에서 수심의 변화만 있는 경우에 대하여 파랑변형을 계산한 결과는 Fig. 5와 같다. 그리고 동일한 입력 조건에서 유속이 있는 경우 수치실험결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 5와 Fig. 6은 비선형 분산방정식을 사용하여 계산된 등파고도이다.

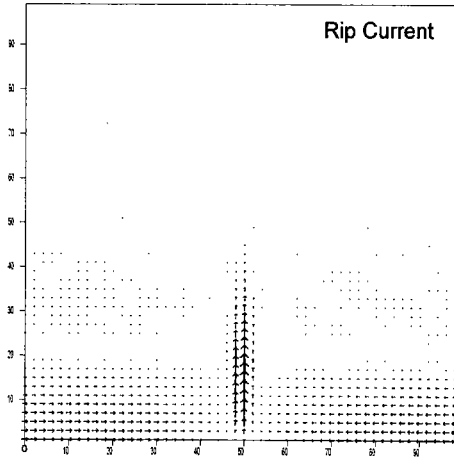


Fig. 4 Current vectors

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

Rip-current

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

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

만약 흐름이 없는 지역이라면 파랑변형은 수심의 변화에 의하여 일어난다. 수치계산에 사용된 수심의 입력자료는 식 (26)에서와 같이 파랑의 진행방향(x축 방향)으로만 수심의 변화가 있으며 연안과 평행한 방향(y축 방향)에서는 동일하다. 따라서 파고변화는 y축 방향으로 수심의 변화가 없기 때문에 파고가 같아야 한다. 그러므로 이러한 지역에서의 Fig. 5에서와 같이 파랑변형은 연안과 평행한 등파고분포를 보이게 된다.

유속을 고려할 경우는 파랑변형의 외력으로는 수심과 유속의 변화이다. 입력조건으로 사용한 유속자료는 Fig. 4에서와 같다. 본 연구에서 사용한 유속의 입력 형태는 측면에서 중앙으로 흐르고 연안쪽 중앙에서는 외해쪽으로 나가는 강한 흐름이 존재하는 이안류(Rip current)이다. 때문에 파랑과 흐름의 상호

작용으로 Fig.4에서와 같이 유속의 형태가 이안류의 형상이므로 연안과 중앙부분에 강한 흐름에 의하여 파랑변형의 계산 결과인 Fig. 6에서와 같이 연안쪽 중앙에서 파랑이 매우 복잡한 현상을 보이고 파고가 집중적으로 높게 나타나고 있다. 본 모델은 이러한 유속변화를 고려하여 파랑변형을 Fig. 6과 같이 예측하였다.

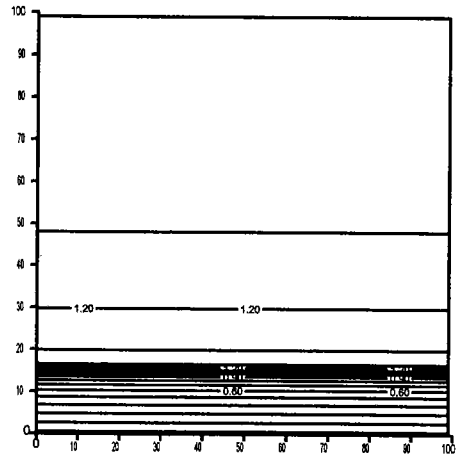


Fig. 5 Contour lines of wave height (without current)

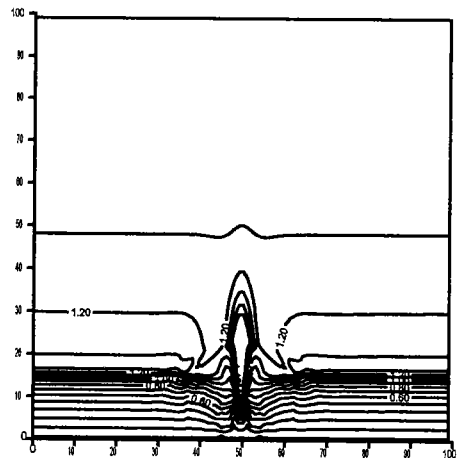


Fig. 6 Contour lines of wave height (with current)

6. 결 론

본 연구에서는 파랑변형을 예측하기 위하여 유속을 고려한 포물형 환경사 방정식을 사용하였으며, 모델의 검증을 위하여 타원형 천퇴에서의 실험치와 비교하였고, 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 모델보다는 비선형 모델을 적용하여 파랑변형을 예측하는 것이 타당하다.
- 3) 유속이 존재하는 해역에 적용한 결과 유속의 변화에 따른 파랑변형 현상을 확인 할 수 있었다. 따라서, 본 모형은 흐름의 영향이 지배적인 해역에서의 파랑과 흐름이 상호작용에 의한 파랑변형을 잘 예측 할 것이라고 판단된다.

참고문헌

- 1) Arthur, R. S. (1950), "Refraction of Shallow Water Wave: The Combined Effect of Currents and Underwater Topography", Trans. AGU, 31, pp.539-552.
- 2) Berkhoff J. C. W. (1976), "Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves Diffraction and Refraction", Publ, 163, Delft Hydraulic Laboratory
- 3) Berkhoff J. C. W. (1972), "Computation of Combined Refraction-diffraction", Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Vancouver.
- 4) Booij N. (1981), "Gravity Waves on Water

with Non-uniform Depth and Current", Doctoral Dissertation, Technical University of Delft, the Netherlands

- 5) Dalrymple R. A. and J. T. Kirby (1988), "Models for Very Wide-Angle Water Waves and Wave Diffraction", J. of Fluid Mech. Vol. 192, pp. 33-50.
- 6) Ebersole B. A. (1985), "Refraction-Diffraction Model for Linear Water Waves", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp.939-953.
- 7) Kirby J. T. (1984), "A Note on Linear Surface Wave-Current Interaction over slowly varying Topography", J. of Geophysical Research, Vol. 89, pp.745-747.
- 8) Kirby J. T. (1986b), "Rational Approximations in The Parabolic Equation Method for Water Waves", Coastal Engineering, Vol. 10, pp.355-378.
- 9) Panchang V. G., G. Wei, B. R. Pearce, and M. J. Briggs (1990), "Numerical Simulation of Irregular Wave Propagation over Shoal", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 3, pp.324-340.
- 10) Radder A. C. (1979) "On the Parabolic Equation Method for Water-Wave Propagation", J. of Fluid of Mech., Vol. 95 part 1. pp.159-176.
- 11) Vincent, C. L., Briggs, M. J. (1989), "Refraction-Diffraction of Irregular Waves over a Mound", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp.269-284.
- 12) 김재중, 박정철 (1996) "PCGM 기법을 사용한 환경사 방정식의 해법", 동아대학교 해양자원연구소, 제9권, pp.27-34.
- 13) 박정철, (1991), "해안선 변형에 대한 수치모델 연구", 동아대학교 대학원