

論 文
B1-2

쌍곡선형 파랑모형을 이용한 해빈류 예측

이정만*, 김재중**

Prediction of Wave-Induced Current Using Time-Dependent Wave Model

Jung-Maan, Lee* and Jae-Joong, Kim**

Key Words : 해빈류(Wave-Induced Current), 잉여응력(Radiation Stress), 이안제(Detached Breakwater) 에너지감쇠(Energy Dissipation), 수평혼합(Rateral Mixing)

Abstract

Wave-induced current model is developed in our study and this model is composed with wave transform model and current model. Two types of wave model are used in our study, one is Copeland(1985) type which is applied in the offshore region and the other is Watanabe and Maruyama(1984) type which is applied in the surf zone. The depth-integrated and time-averaged governing equation of an unsteady nonlinear form is used in the wave induced current model. Lateral mixing, radiation stresses, surface and bottom stresses are considered in our current model. Copeland's(1985) result is used to calculate radiation stress and Berkmeir & Darlymple's(1976) is used as a surface friction formula. Numerical solutions are obtained by Leendertse scheme and compared with Noda's(1974) experimental results for the uniform slope coastal region test and Nishimura & Maruyama's(1985) experimental results and numerical simulation results for the detached breakwater test. The results from our wave model show good agreement with the others and also show nonlinear effects around the detached breakwater. Wave induced current model is developed in this study and this model shows nonlinear effects around the detached breakwater and can be applied in the surf zone and also consider the friction stresses.

* 동아대학교 대학원
** 동아대학교 교수

1. 서론

연안에 구조물이 설치된 지역의 해수유동 형태를 파악하기 위해서는 파랑변형과 해빈류를 계산해야 한다. 이러한 해수유동 형태에 따라 항내의 매물이나 침식 등의 방제 대책을 수립할 수 있다.

연안역의 파랑변형을 예측하는 수치모형은 타원형, 포물선형, 그리고 쌍곡형으로 크게 세가지 형태로 구분할 수 있다. 이들 방법중 쌍곡형의 수치모형은 파랑변형의 제반요인들을 거의 고려할 수 있고, 특히 구조물에 의한 반사와 취급이 용이하기 때문에 본 연구에서는 Copeland (1985)의 식과 Watanabe와 Maruyama(1984)의 식을 근간으로 하여 쇄파대 내에서의 에너지 감쇠식을 고려한 수치모형을 개발하였다. 경계처리 문제에 있어서는 임의 반사를 경계, 투과 경계, 무반사성 입사경계식을 사용하여 해결하였다.

파랑변형의 계산 결과를 입력자료로 해빈류를 계산하여 해수유동 형태를 파악하였다. 본 연구에서의 해빈류 계산을 위해서 비압축성 유체에 대한 연속방정식과 운동방정식을 한 주기에 대해서 시간평균을 하고 수심에 대해 적분하여 쇄파, 측면혼합, 표면 및 저면마찰을 고려한 수치모델을 구현하였다.

수치모형의 타당성을 확인하기 위해서 임의의 장방형 수조에서 반사와 파형의 시간변화를 검토하고, 타원형 천퇴(elliptic shoal) 주위의 파랑변형을 계산하여 기존의 수치모형 실험결과(Berkhoff, 1982)와 비교하였다. Noda 등(1974)이 개발한 수심해역에서 해빈류를 계산하여 고찰하였으며, 이안제 주위의 파랑변형과 해빈류를 계산하여 기존의 수치, 수치모형 실험결과(Nishimura 등, 1985)와 비교, 고찰하였다.

2. 환경사 방정식에 의한 파랑변형 계산

본 연구에서는 타원형 환경사방정식을 선유량과 수면변위로 표현한 한 쌍의 선형방정식으로 나타낸 쌍곡형 환경사방정식을 사용하였고, 쇄파대 외에서는 Copeland(1985)가 유도한 식을 쇄파

대 내에서는 Watanabe와 Maruyama(1984)가 유도한 식을 사용하였다.

2.1 기본방정식

Booij(1981)는 파랑과 흐름이 상호작용을 하는 식에서 흐름 효과를 무시하면 식(2.1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \phi = 0 \quad (2.1)$$

$\phi(x, y, t)$: 평균해수면에서의 속도포텐셜

식(2.1)에 선유량 벡터 \vec{Q} 와 수면변위 η 를 도입하여 한쌍의 선형방정식을 유도하였다.

- Watanabe와 Maruyama(1984)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \nabla(n\eta) &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{Q} &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

- Copeland(1985)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{Q}'}{\partial t} + CC_g \nabla \eta &= 0 \\ \nabla \vec{Q}' + \frac{C_g}{C} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서, $\vec{Q} = \int_{-h}^0 \nabla \phi dz$, $\vec{Q}' = \int_{-h}^0 f \nabla \phi dz$

$\vec{U} = \nabla \phi = \nabla f \phi$, $\phi = \phi(x, y, t) f(z)$, $C_g = nC$

Copeland(1985)가 유도한 식을 쇄파대 외에서, Watanabe와 Maruyama(1984)가 유도한 식에 에너지 감쇠항을 부가하여 쇄파대 내에서의 파랑변형을 계산하는 기본방정식으로 사용하였다.

2.2 에너지 감쇠항(Energy Dissipation term)

해저면 마찰용력과 쇄파대내에서의 파랑에너지 감쇠효과를 고려하기 위하여 Yoo와 O'Connor(1987)의 마찰 감쇠식과 Watanabe와 Maruyama(1986)의 쇄파 감쇠식을 사용하였다.

식(2.2)의 운동방정식에 에너지 감쇠의 총화인 F를 부가하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \nabla \cdot \vec{Q} + F \vec{Q} = 0 \quad (2.4)$$

여기서, $F = F_t + F_d$

F_f 는 해저면의 마찰, F_d 는 쇄파에 의한 에너지 감쇠효과를 나타내며 각각의 식은 다음과 같다.

$$F_f = 2 \frac{4/3\pi}{g} \left(\frac{\sigma}{\sinh kh} \right)^3 C_f \quad (2.5)$$

여기서, C_f : 마찰계수, σ : 각 주파수

$$F_d = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left(\frac{\hat{Q}}{Q_r} - 1 \right)} \quad (2.6)$$

여기서, $\hat{Q} = \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2}$, $Q_r = \gamma \sqrt{gh^3}$

\hat{Q}_x, \hat{Q}_y : 선유량 진폭, $\tan \beta$: 해저경사

$$\alpha_D = 2.5, \gamma = 0.25$$

식(2.6)에서 $\hat{Q} < Q_r$ 이면 $F_d = 0$ 으로 하여 쇄파대 내에서도 에너지 감쇠가 발생하지 않도록 하여 파랑이 재생될 수 있게 하였다(Mizuguchi, 1980).

쇄파 파고는 Goda(1980)의 식(2.7)을 이용하였으며, 파고는 각 격자에서 매 한 주기 계산 후 산정하며 쇄파파고를 계산하는 방법을 사용하였다.

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[1 - \exp \left\{ -1.5\pi \frac{h_b}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{\frac{4}{3}} \theta \right) \right\} \right] \quad (2.7)$$

여기서, H_b : 쇄파파고, L_0 : 심해파장, h_b : 쇄파수심

2.3 수치해석 방법

수치해석을 하기 위해서 기본방정식인 식(2.2)와 식(2.3)을 유한 차분법의 하나인 Leap-Frog법으로 차분하였으며, 이때 그림 2.1과 같이 선유량 Q_x, Q_y 성분과 수면변위 η 를 반격자씩 어긋나게 계산하는 Staggered 격자망을 사용하여 수치해석하였다. 여기서 Δx 는 안충방향의 격자간격, Δy 는 연안방향의 격자간격, Δt 는 계산시간 간격.

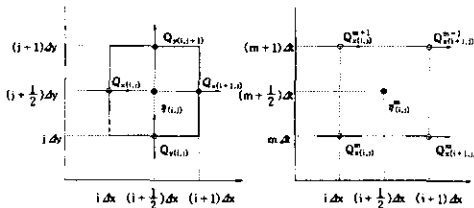


그림 2.1 Staggered mesh scheme

쇄파전의 기본방정식인 식(2.3)을 그림 2.1의 격자

체계로 차분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{xi,j}^{m+1} &= Q_{xi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} n_{i,j} C_{i,j}^2 (\eta_{i,j}^m - \eta_{i-1,j}^m) \\ Q_{yi,j}^{m+1} &= Q_{yi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta y} n_{i,j} C_{i,j}^2 (\eta_{i,j}^m - \eta_{i,j-1}^m) \\ \eta_{i,j}^{m+1} &= \eta_{i,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} (Q_{xi+1,j}^{m+1} - Q_{xi,j}^{m+1}) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} \frac{1}{n_{i,j}} (Q_{yi,j+1}^{m+1} - Q_{yi,j}^{m+1}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

쇄파후의 기본방정식에 에너지 감쇠항을 부가한 식(2.4)를 차분하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q_{xi,j}^{m+1} &= Q_{xi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} C_{xi,j}^2 (n_{xi,j} \eta_{i,j}^m \\ &\quad - n_{xi-1,j} \eta_{i-1,j}^m) - FQ_{xi,j} \Delta t \\ Q_{yi,j}^{m+1} &= Q_{yi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} C_{yi,j}^2 (n_{yi,j} \eta_{i,j}^m \\ &\quad - n_{yi,j-1} \eta_{i,j-1}^m) - FQ_{yi,j} \Delta t \\ \eta_{i,j}^{m+1} &= \eta_{i,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{xi+1,j}^{m+1} - Q_{xi,j}^{m+1}) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} (Q_{yi,j+1}^{m+1} - Q_{yi,j}^{m+1}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

식(2.9)의 에너지 감쇠항 Q_x, Q_y 는 한 계산간격 전의 값을 사용하였으며, 계산시간 간격 Δt 는 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 안정조건을 만족하도록 다음과 같은 관계로 주어진다(Watanabe 등, 1986).

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_{\max}} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (2.10)$$

여기서, C_{\max} 는 계산 영역내의 파속의 최대치

초기조건은 각 격자점에서의 수면변위 η 와 x, y 방향의 선유량 성분 Q_x, Q_y 를 모두 zero로 두었다.

2.4 경계조건

2.4.1 임의 반사율 경계

시간 t 에서 반사율이 K_R 인 경계로 그림 2.2와 같이 파랑이 진행할 때 x 축과 직각인 경계상에서 입사파와 반사파의 중복된 선유량이 나타나게 된다.

- x 축과 직각인 경계

$$Q_x^t(x_0, y_0) = A \cdot Q_x^{t-\tau}(x_0 - \Delta x, y_0) \quad (2.11)$$

여기서, $A = (1 - K_R) / (1 + K_R^2 - 2K_R \cos(2k \Delta x \cos \alpha_0))^{1/2}$

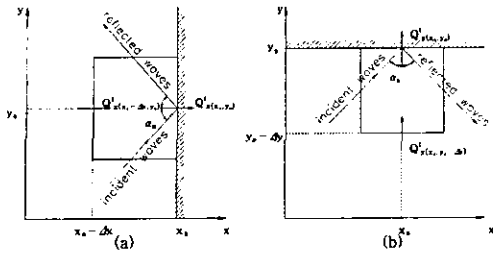


Fig. 2.2 Boundaries with arbitrary reflection

$$\tan \sigma\tau = \frac{1-K_R}{1+K_R} \tan(k\Delta x \cos \alpha_n)$$

- y축과 직각인 경계

$$Q_y^t(x_0, y_0) = B \cdot Q_y^{t-\tau}(x_0, y_0 - \Delta y) \quad (2.12)$$

여기서, $B = (1-K_R) / \{1 + K_R^2 - 2K_R \cos(2k\Delta y \cos \alpha_n)\}^{1/2}$

$$\tan \sigma\tau = \frac{1-K_R}{1+K_R} \tan(k\Delta y \cos \alpha_n)$$

그리고 투과 가상경계에 대해서는 식(2.11)과 식(2.12)에 반사율 $K_R = 0$ 을 대입하면 된다.

2.4.2 무반사성 입사경계

외해 입사경계 상에서는 그림 2.3과 같이 심해측으로부터 진폭 a_1 를 가진 입사파가 y축과 α_1 의 각을 이루고 입사할 경우 입사경계에서는 입사파 뿐만 아니라 계산영역 내부에서 진행하는 파가 있으며 이와 같은 진행파가 y축과 이루는 각을 α_n 이라고 하면 선유량은 다음과 같이 된다.

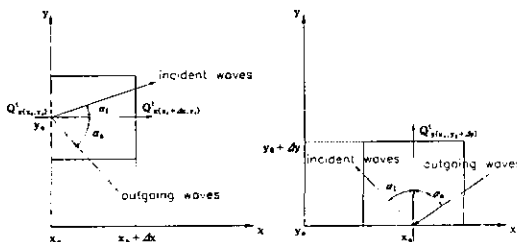


Fig. 2.3 Offshore open boundary

$$Q_x^t(x_0, y_0) = Q_x^{t-\tau}(x_0 + \Delta x, y_0) + a_1 C \cos \alpha_1 \cdot \sin[kx_0 \cos \alpha_1 + ky_0 \sin \alpha_1 - \sigma t] - a_1 C \cos \alpha_1 \cdot \sin[k(x_0 + \Delta x) \cos \alpha_1 + ky_0 \sin \alpha_1 - \sigma(t - \tau)]$$

$$\text{여기서, } \tau = \Delta x \cdot \cos \alpha_n / C \quad (2.13)$$

측면 입사경계 상에서는 Watanabe 등(1986)의 방법과 같이 Snell법칙으로부터 파향과 미소 진폭과 이론에 의한 천수계수(K_s)와 굴절계수(K_r)를 구하여 측면 경계 상의 수면변위를 결정하여 입사되는 것으로 하였다.

$$k \sin \alpha = k_0 \sin \alpha_0 = k_{y0} \quad (2.14)$$

여기서, k_0 : 심해 파수, α_0 : 심해 입사각

$$Q_y^t(x_0, y_0) = Q_y^{t-\tau}(x_0, y_0 + \Delta y) + aC \frac{k_{y0}}{k} \sin \left[\int_0^x \sqrt{k^2 - k_{y0}^2} dx + k_{y0} \cdot y_0 - \sigma t \right] - aC \frac{k_{y0}}{k} \sin \left[\int_0^x \sqrt{k^2 - k_{y0}^2} dx + k_{y0}(y_0 + \Delta y) - \sigma(t - \tau) \right] \quad (2.15)$$

여기서, $\tau = \Delta y \cdot \cos \alpha_n / C$, $a = a_0 \cdot K_s \cdot K_r$

2.5 파랑변형 모형의 검증

2.5.1 장방향 수조

먼저 파랑변형 모형의 반사파 재현특성을 검토하기 위하여 그림 2.4와 같은 모형수조에서 입사파의 파고는 2.0m, 주기는 10sec, 파향은 0° 로 두었으며 반사율을 각각 0.0, 0.5, 1.0으로 설정하여 반사파의 투과여부를 판단하였다.

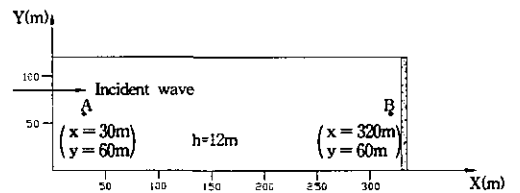


Fig. 2.4 Schematic diagram for rectangular basin

그림 2.5(a)는 반사율이 0.0일 때는 A점과 B점의 수면변위를 나타낸 것으로 투과경계를 정확히 재현하는 것을 볼 수 있다. 그림 2.5(b)는 반사율이 0.5일 때의 결과를 나타낸 것으로 A점의 위상이 정확하게 29초 뒤에 B점에서 일어나고 있다. 반사율이 1.0일 때의 계산결과도 역시 정확하게 2배에 해당하는 중복파가 형성됨을 보여주고 있다. 그리고 입사경계인 A점에서 입사되는 수면변위도 반사파가 도달하여

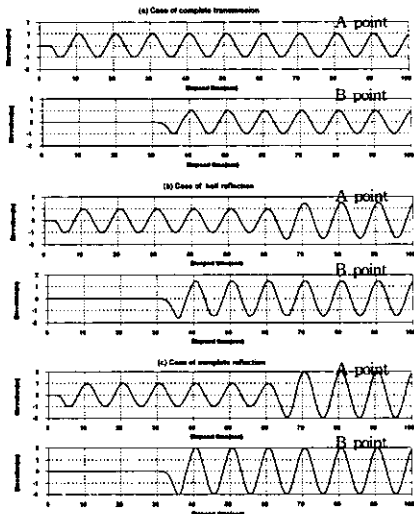


Fig. 2.5 Time-series of surface elevation for Rectangular basin

중복파가 형성된 후에도 일정한 수면형태로 반사파 성분만을 포함하여 입사시키고 있음을 보여 주었다

2.5.2 타원형 천퇴

수치해석 결과를 Berkhoff 등(1982)이 제안한 타원형 수중 천퇴에 대한 수리모형 실험결과와 비교·검토하였다. 수심의 형태는 그림 2.6과 같으며 심해 파고를 0.0464m, 주기 1sec., 입사각 0°로 두었다.

그림 2.7은 본 모형에 의한 수치실험 결과로 점선은 선형 분산관계식을 사용한 결과이고 실선은 비선형 분산 관계식을 사용한 결과이다. 선형 분산식을 사용한 결과(LD)는 천퇴 양측면 부근에서는 실험치보다 대체로 높은 파고비를 나타내며, 파고가 집중되는 위치도 차이가 생긴다. 따라서 그림 2.7로부터 비선형 분산식(NLD)을 고려한 모형실험 결과가 훨씬 양호함을 알 수 있다. 파랑변형은 쇄파대 이후에 파랑의 비선형성이 강해지므로 파랑의 비선형성을 고려하는 것이 필요하다. 식(2.21)은 본 연구에서 사용한 Dingemans 등(1984)이 제시한 비선형 분산식이다.

$$\sigma^2 = gk \tanh \left[kh \left\{ 1 + \frac{ka}{\sinh(kh)} \right\} \right] \quad (2.16)$$

여기서, a : 파랑의 진폭

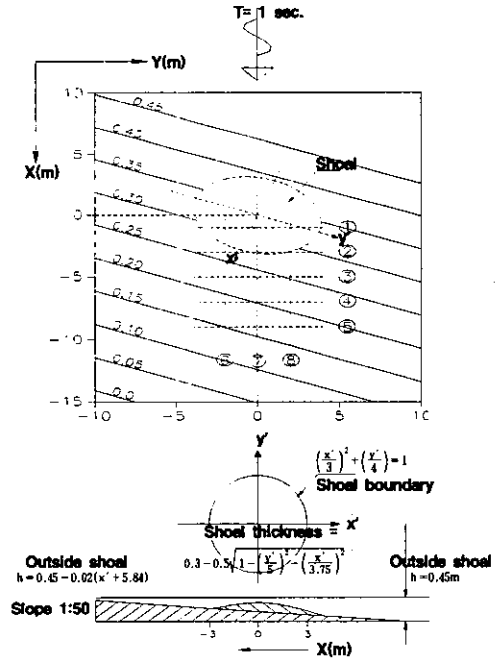


Fig. 2.6 Bottom contours and computational domain for Berkhoff et al.(1982) shoal test

2.5.3 이안제

연안에 이안제가 설치되어 있을 경우의 수치해석한 결과를 Watanabe 등(1984)의 수리모형 실험결과와 비교·분석하였다. 이안제가 설치된 수심의 형태는 그림 2.8과 같으며 수치실험 조건은 심해파고 2.0cm, 주기 1.2sec., 입사각 0°로 입사하는 조건이다. 공간격자 및 시간간격은 안정조건 식(2.17)을 만족시키도록 $\Delta x = \Delta y = 5\text{cm}$, Δt 는 0.02초로 계산하였다.

그림 2.9와 그림 2.10은 진행파가 완전반사되고 난뒤의 파고를 나타낸 것이다. 그림 2.9의 $x=2\text{m}$ 의 이안제 전면 중복파랑장에서는 구조물로 인한 반사파 때문에 수치실험 결과가 수리실험 결과보다 약간 높게 나타나는 부분이 있으나, $x=2\text{m}$ 의 이안제 후면에서는 수치계산 결과가 수리 실험결과와 잘 일치하고 있다. $x=3\text{m}$ 에서는 구조물의 영향을 거의 받지 않는 지역이기 때문에 천수변형의 효과를 뚜렷이 보여주고 있다. 그림 2.10의 $y=3\text{m}, 4\text{m}$ 에서는 구조물로 인한 반사효과 때문에 중복파에 대한 파봉과 파곡이 형성되어 있음을 알 수 있었다.

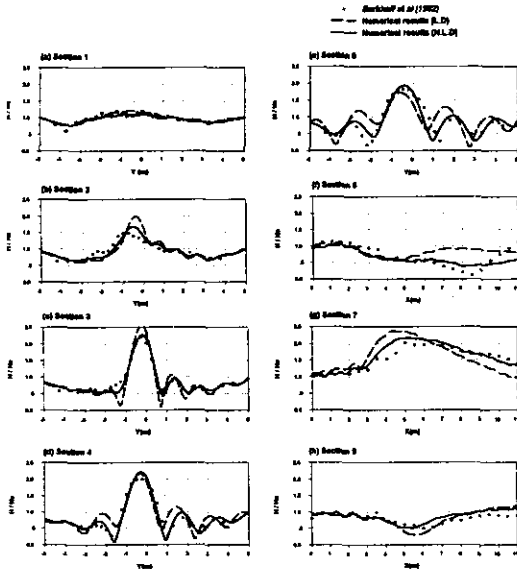


Fig. 2.7 Comparisons between numerical results and observed data for the elliptic shoal case with linear and non-linear dispersion relation

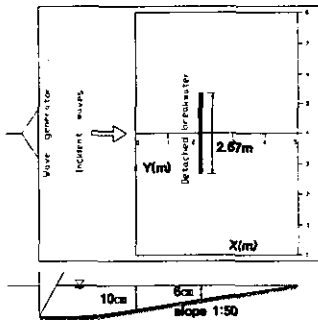


Fig.2.8 Schematic diagram for a detached breakwater

3. 해빈류 모델의 계산

연속방정식 및 운동방정식을 한 주기에 대해 시간평균하고 수심에 대해 수심적분한 형태의 방정식을 잉여응력과 수평혼합, 표면 및 저면에서의 마찰응력을 고려하여 유도하고 Leendertse방법으로 차분하여 수치 해석적인 해를 구하여 기존의 수치 및 수리모형 실험결과(Nishimura, 1985)와 비교·분석하였다.

3.1 기본방정식

평균류에 대한 연속방정식과 운동방정식은 각각

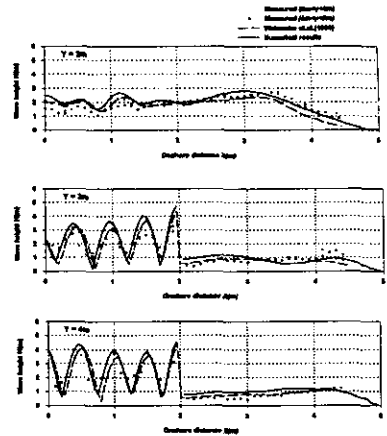


Fig. 2.9 Cross-shore distribution of wave height

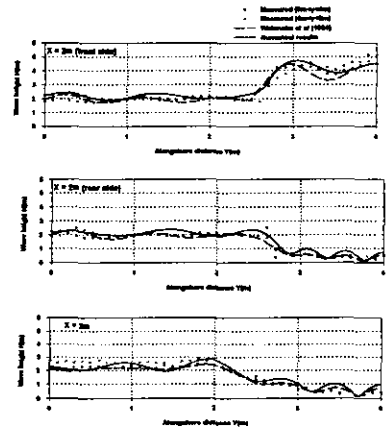


Fig. 2.10 Alongshore distribution of wave height

다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UD) + \frac{\partial}{\partial y}(VD) \quad (3.1)$$

여기서, $D = h + \bar{\eta}$

- x방향의 운동방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(UD) + \frac{\partial}{\partial x}(U^2D) + \frac{\partial}{\partial y}(UVD) = -gD \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_x}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \bar{\tau}_{bx} - \bar{\tau}_{sx} \right] \quad (3.2a)$$

- y방향의 운동방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(VD) + \frac{\partial}{\partial x}(UVD) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2D) = -gD \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_y}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \bar{\tau}_{by} - \bar{\tau}_{sy} \right] \quad (3.2b)$$

여기서, 파향선 방향의 수직응력 S_{xx} , 파봉선에 평행한 방향의 수직응력 S_{yy} , 그리고 전단응력인 S_{xy} , S_{yx} 의 성분을 나타낸다.

3.2 잉여응력

3.2.1 단일진행파와 완전중복파의 잉여응력

Longuet-Higgins와 Stewart(1964)는 다음과 같이 단일 진행파에 대한 잉여응력을 식(3.3), 완전중복파에 대해서는 식(3.4)와 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= E \left\{ n(\cos^2 \theta + 1) - \frac{1}{2} \right\} \\ S_{xx} &= E \left\{ n(\sin^2 \theta + 1) - \frac{1}{2} \right\} \\ S_{xy} &= S_{yx} = E n \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \rho g a^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \\ S_{yy} &= \frac{1}{2} \rho g a^2 \left\{ \frac{2kh}{\sinh 2kh} + \left[\frac{2kh}{\sinh 2kh} + 1 \right] \cos 2kh \right\} \\ S_{xy} &= S_{yx} = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

여기서, $E = \frac{\rho g a^2}{2}$, C_g : 군속도, C : 파속

3.2.2 중복파랑장에서 선유량과 수면변위로 표현된 잉여응력

Copeland(1985)는 다음과 같이 선유량 Q , 수면변위 η 의 함수로 잉여응력을 유도하였다.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \overline{Q_x^2} \cdot A - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right)^2 \cdot B \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Q_x \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \cdot E \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ Q_y \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \cdot E \right\} + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \\ S_{yy} &= \overline{Q_y^2} \cdot A - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right)^2 \cdot B \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Q_x \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \cdot E \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ Q_y \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \cdot E \right\} + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \\ S_{xy} &= S_{yx} = \overline{Q_x Q_y} \cdot A \end{aligned} \quad (3.5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \frac{\rho k}{4 \sinh^2 kh} (\sinh 2kh + 2kh) \\ B &= \frac{\rho}{4k \sinh^2 kh} (\sinh 2kh - 2kh) \\ E &= \frac{\rho h}{4 \sinh^2 kh} \left(\frac{1}{2kh} \sinh 2kh - \cosh 2kh \right) \end{aligned}$$

3.3 수평확산

수평확산에 대한 특별한 정설은 없으나 Longuet-Higgins(1970)은 평평한 해안에서 파가 해안에 직각으로 입사하여 부서질때의 정상속도 분포를 얻을 수 있는 공식을 세웠으며 여기서 수평확산계수는 Nishimura(1985)의 연구를 참고로 하여 다음과 같이 두었다.

$$\epsilon = \frac{N}{s} \sqrt{g(h + \eta)^3} \quad (3.6)$$

여기서, $N=0.01$, s =평균구배

3.4 표면 및 저면마찰응력

저면 마찰응력은 Sawaragi 등(1984)이 미소진폭 파 이론에 근거를 두고 저면에서의 연안류는 평균유속 성분의 반정도 기여한다고 하는 Deguchi(1984)의 실측결과를 이용하여 파와 흐름에 의한 저면에서의 유속성분을 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\tau_{bj} = \rho C_f F_b^2 \quad j = 1, 2 \quad (3.7)$$

$$F_b = u'_{\max} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} (\bar{U} \cos \theta + \bar{V} \sin \theta) \right\} + \frac{(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)}{4}$$

$$u'_{\max} = \frac{\pi H}{T \sinh k(h + \eta)}$$

표면에서의 마찰응력은 Birkemeier와 Dalrymple(1976)이 사용한 식을 적용하였다.

$$\overline{\tau_{sx}} = \rho \kappa |W| W_x, \quad \overline{\tau_{sy}} = \rho \kappa |W| W_y \quad (3.8)$$

여기서, W 는 풍속의 크기이며 W_x , W_y 는 풍속의 x 및 y 방향 성분이다. κ 는 바람 응력계수로서 Van Dorn(1953)이 다음과 같이 풍속에 관한 함수로 정의한 식(3.9)를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \kappa &= \kappa_1 & W < W_c \\ \kappa &= \kappa_1 + \kappa_2 \left(1 - \frac{W_c}{W} \right)^2 & W \geq W_c \end{aligned} \quad (3.9)$$

W_c 는 임계풍속(14knot)이고 계수 κ_1, κ_2 를 각각 1.1×10^{-6} , 2.5×10^{-6} 으로 두었다. Pearce(1972)는 이 계수 κ 와 실제 풍속을 그림 3.1에서와 같이 비교하였다.

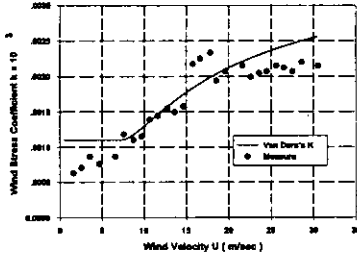


Fig. 3.1 Comparison of Van Dorp wind stress coefficient and experiment data(Pearce, 1972)

3.5 수치해석 방법

수치계산법으로 ADI방법의 일종인 Leendertse법을 사용하였으며, 운동방정식을 잉여용력(R), 수평 확산(M), 마찰용력(F)을 포함하여 최종적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + R_x - M_x + F_x + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + R_y - M_y + F_y + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

시간단계 $k\Delta t$ 와 $(k+1/2)\Delta t$ 사이에서는 U와 $\bar{\eta}$ 를 음해법, V에 대해서는 양해법을 사용하고 시간단계 $(k+1/2)\Delta t$ 와 $(k+1)\Delta t$ 사이에는 V와 $\bar{\eta}$ 를 음해법, U에 대해서는 양해법을 사용하였다.

3.6 경계조건 및 안정조건

삼해 경계조건은 계산영역의 외해에서 평균류 또는 평균수위를 zero로 두었으며, 구조물 경계조건은 경계에 수직한 방향의 유속성분 및 평균수위 경사를 zero로 두었다. 측방경계는 흐름이 존재하는 개 경계일 경우 경계의 좌우의 유속을 같이 두는 Neumann(1977) 형태의 경계조건을 사용하였다. 해안선 경계조건은 어느 일정한 한계수심을 정하여 이 수심에 대응하는 등심선을 가정하고 등심선을 따라 고정 구조물 경계조건을 사용하였다. 또한 차분계산의 안정조건은 식 (2.16)을 사용하였다.

3.7 해빈류 모형의 적용

3.7.1 등심선이 평행한 경우 해빈류 모형의 적용

해빈류 모형의 적용은 그림 3.2과 같은 형태의 Noda 등(1974)에 의해 제안된 수심을 사용하여 표 3.1과 같은 초기조건으로 주기 10초, 차분간격 $\Delta x = \Delta y = 5m$, 시간간격 Δt 를 0.1초로 두었다. 그리고 혼합계수와 마찰계수는 Nishimura 등(1985)이 제안한 각각 $N=0.01$ 과 $C_f=0.01$ 을 사용하였다.

Table 3.1 Cases of wave induced current simulation

Variable	Case 1	Case 2	Case 3
Incident wave height	$H_0=0.5m$	$H_0=0.5m$	$H_0=0.5m$
Incident wave direction	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$
wind velocity (wind direction)	0	0	25m/sec ($\theta=30^\circ$)

Case 1과 입사파향이 0° 인 Case 2의 계산결과는 각각 그림 3.3와 그림 3.4에 나타내었다. Case 1과 Case 2의 속도 크기를 비교해 보면 연안에 직각으로 입사할 경우보다 연안에 30° 방향으로 입사하는 경우에 해빈류가 크게 나타났다. 그리고 Case 1은 해빈류의 순환양상을 잘 보이고 있으나 Case 2는 해빈류의 순환양상은 보이지 않고 외해에서 연안으로 유속이 나타나다가 외해로 빠져 나가는 이안류의 형태를 보이고 있다. Case 3의 해빈류 유속분포를 나타낸 것은 그림 3.5와 같다. 그림 3.5는 Case 1의 그림 3.3과 비교해서 해빈류의 유속분포가 높게 나타났다. 그림 3.6은 Case 1과 Case 3이 평균수위를 비교한 것으로 Case 1의 경우보다 Case 3의 평균수위 변화의 폭이 상대적으로 넓게 나타났다.

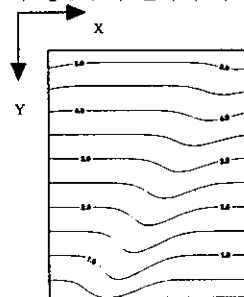


Fig. 3.2 Depths contours for periodic bottom

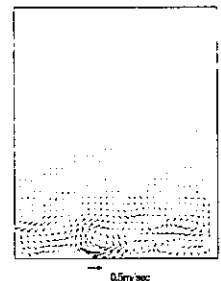


Fig. 3.3 Velocity vectors of wave Induced current due to oblique wave attack

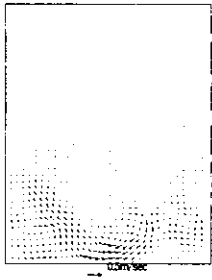


Fig. 3.4 Velocity vectors of wave induced current due to orthogonal wave attack

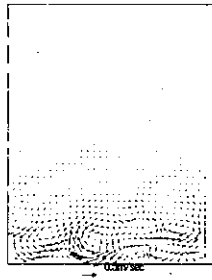
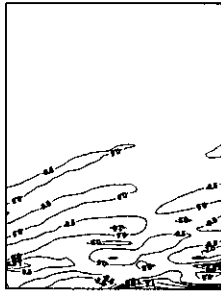
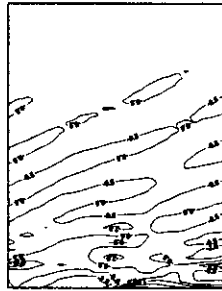


Fig. 3.5 Wave and wind induced current vectors of 25m/sec wind blowing



(a) Case 1



(b) Case 3

Fig. 3.6 Comparison of mean water level Case 1 with Case 3

3.7.2 이안제에 대한 해빈류 모형의 적용

그림 2.8과 같은 지형에서 계산한 파랑변형 모형의 계산결과를 입력자료로 하여 이안제 주변에서의 해빈류 모형을 적용하였다. 수치 계산된 결과를 검증하기 위해 Nishimura 등(1985)의 수치 및 수리모형 실험결과인 그림 3.7과 그림 3.8을 비교하였다. Nishimura 등이 수치계산시 사용한 혼합계수와 마찰계수가 모두 0.01이었으므로 본 모형에서도 같은 값을 사용하여 계산한 결과는 그림 3.9이다. 그림 3.7과 그림 3.9를 비교해 보면 전반적인 순환형태와 위치는 양호한 결과를 보이고 있다. 그림 3.8과 그림 3.9를 비교해 보면 이안제로 흐르는 유속분포가 수리모형 실험결과보다 약간 작은 값으로 넓게 분포하고 있다. 그러나 대체로 양호한 결과를 보이고 있다. 그림 3.10은 평균수위의 분포를 나타낸 것으로 쇄파대 외측은 평균수위의 하강이 일어나고 쇄파선(점선)으로부터 해안선까지는 평균수위의 상승이 일어나고 있는 것을 볼 수 있다.

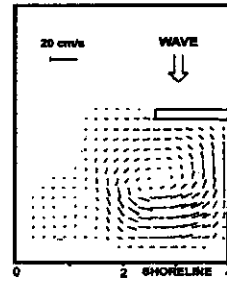


Fig. 3.7 Computed circulation behind a detached breakwater (Nishimura, Maruyama and Sakurai, 1985)

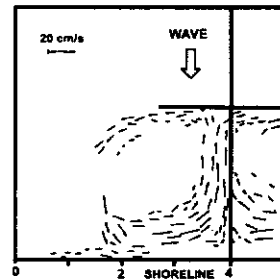


Fig. 3.8 Observed circulation behind a detached breakwater (Nishimura, Maruyama and Sakurai, 1985)

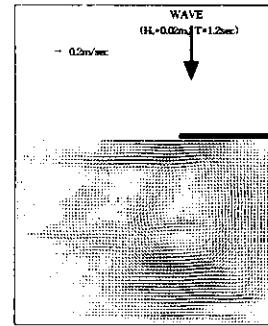


Fig. 3.9 Computed circulation behind a detached breakwater

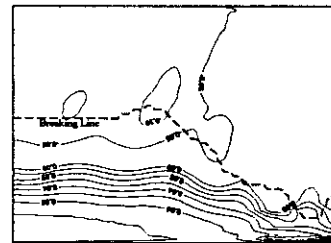


Fig. 3.10 Computed elevation of mean water behind a detached breakwater

4. 결 론

파랑변형 모형 및 해빈류 모형의 수치 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 장방형 수치모의 수조를 설정하여 본 모형이 반사파를 완벽히 재현할 수 있음을 보여주었다.
- 2) Berkhoff 등의 타원형 천퇴에서 수치 실험한 결과 파랑변형 계산시 파의 비선형성을 고려한 식이 파의 비선형성을 고려하지 않았을 때 보다 수치모형 실험결과와 비교했을 때 보다 정확한 결과를 보여 주었다. 이는 쇄파대 이후에서는 파의 선형성보다 비선형성이 매우 커지기 때문이다.
- 3) 이안제가 설치된 해역에서의 수치실험 결과 또한 수리모형 실험결과와 비교했을 때 파랑의 비선형성을 고려하는 것이 이안제 배후의 회전 흐름을 잘 재현하여 주었다.
- 4) 등심선이 평행한 지역에서 입사파의 방향에 따라서 해빈류의 형태가 달라지는 것을 보여 주었으며 본 모형에 저면마찰 뿐만아니라 바람에 의한 에너지 감쇠를 고려함으로써 바람에 의해 발생하는 해빈류의 증가효과도 고려할 수 있는 모델을 구현하였다.

참고문헌

1. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction-Diffraction", Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1972, pp.470-471.
2. Berkhoff, J.C.W., N. Booij, and A.C. Radder, "Verification of Numerical Wave Propagation Models for Simple Harmonic Linear Water Waves", Coastal Eng., Amsterdam, Netherlands, Vol.6, 1982, pp.255-279.
3. Birkemeier, W.A. and R.A. Dalrymple, "Numerical Models for the Prediction of Wave Set-up and Nearshore Circulation", Ocean Eng. Rep. No.3, University Delaware, Dept. of Civil Eng., 1976.
4. Booij, N., "Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current", Rep. 81-1, Dept. of Civil Eng., Delft University of Technology, 1981.
5. Copeland, G.J.M., "Numerical Model for the Propagation of Short Gravity Waves and the Resulting Circulation around Nearshore Structures", Ph.D. Thesis, University of Liverpool, 1985.
6. Deguchi, I., "A Basic Study on the Sediment Transport and Beach Topography Change", Ph.D. Thesis, University of Osaka, 1984.
7. Dingemans, M.W., Stive, M.J.F., Kuik, A.J., Radder, A.C. and Booij, N., "Field and Laboratory Verification of the Wave Propagation Model CREDIZ", Proc. 19th Inter. Conf. Coastal Eng., 1984, pp.1178-1191.
8. Goda, Y., "Randoms Seas and Design of Maritime Strucyures", Univ. of Tokyo Press., 1985.
9. Liu, P.L-F., and T.-K. Tsay, "Numerical Prediction of Wave Transformation", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol.111, No.5, Sep., 1985, pp.843-855.
10. Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart, "Radiation Stresses in Water Waves a Physical Discussion with Application", Deep Sea Res., Vol. 11, 1964.
11. Longuet-Higgins, M.S., "Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves", J. of Geophy. Res., Vol.75, No.1, 1970, pp.6790-6801.
12. Mizuguchi, M., "A Heuristic Model of Wave Height Distribution in Surf Zone", Proc. 17th Coastal Eng., Conf., ASCE, 1980, pp.278-289.
13. Neumann, J.N., "Diffraction of Water Waves", Appl. Mechanics Review, 1977, pp.1-7.
14. Nishimura H., K. Maruyama and T. Sakurai,

- "On the Numerical Computation of Nearshore Currents", Coastal Eng. in Japan, Vol.28, 1985, pp.137-145.
15. Noda, E.K., C.J. Sonu, V.C. Rupert and J.I. Collins, "Nearshore Circulations under Sea Breeze Conditions and Wave-Current Interaction in the Surf Zone", Rep. No.TC-149-4, Terta Tech. Inc., Pasadena, Calif., 1974.
 16. Pearce, B.R., "Numerical Calculation of the Response of Coastal Waters to Storm Systems with Application to Hurricane Camille of August 17-22, 1969", College of Eng., University of Florida, Tec. Re. 12, August, 1972, 149 p.
 17. Radder, A.C., "On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation", J. of Fluid Mechanics, Vol.95, 1979.
 18. Sawaragi, T., J.S. Lee and I. Deguchi, " A Study on the Wave Induced Current and the Change of Topography Around Estuary", Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, 1984, pp.411-415(in Japanese).
 19. Yoo, D., and O'Connor, B.A., "Bed Friction Model of Wave-Current Interacted Flow", Proc. Coastal Hydrodynamics, ASCE, 1987, pp.93-106.
 20. Watanabe, A. and K. Maruyama, "Numerical Analysis of Combined Refraction, Diffraction and Breaking", Proc. 31st Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, 1984, pp.103-107(in Japanese).
 21. Watanabe, A. and K. Maruyama, "Numerical Modeling of Nearshore Wave Field under Combined Refraction and Diffraction and Breaking", Coastal Eng. in Japan, Vol.29, 1986, pp.19-39.
 22. 김철, "단기해빈변형의 수치예측모형, 박사학위논문, 서울대학교, 1989,2.
 23. 김인철, "연안역 구조물 주위에서의 파랑과 해빈류의 수치모형에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 1990,8.
 24. 김인철, 편종근, "시간의존형 환경사방정식을 이용한 파랑변형 수치모형의 측방입사경계상의 처리", 한국해안·해양공학회, 제7권 제2호, 1995, pp.141-147.
 25. 이정만, 김재중, 박정철, "파랑에 의한 연안류의 수치모델에 관한 연구", 한국해양공학회, 게재 중
- 본 연구는 한국과학재단 지정 동아대학교 지능형 통합항만관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.