

論 文

# 쌍곡선형 파랑모형을 이용한 해빈류 예측<sup>+</sup>

김 재 중\* · 이 정 만\*\*

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

*J. J. Kim · J. M. Lee*

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

## Abstract

A 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 Birkemeier & Dalrymple'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. The results from our wave model and wave-induced current model show good agreements with the others and also show nonlinear effects around the detached breakwater. The model in this study can be applied in the surf zone considering the friction stresses.

## 1. 서 론

연안에 구조물이 설치된 지역의 해수유동 형태

를 파악하기 위해서는 파랑변형과 해빈류를 계산해야 한다. 이러한 해수유동 형태에 따라 항내의 매몰이나 침식 등의 방제 대책을 수립할 수 있다.

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

\* 정회원, 동아대학교 해양공학과 교수

\*\* 학생회원, 동아대학교 해양공학과 대학원

연안역의 파랑변형을 예측하는 수치모형은 타원형, 포물선형, 그리고 쌍곡형으로 크게 세가지 형태로 구분할 수 있다. 이들 방법 중에 쌍곡형의 수치모형은 파랑변형의 제반요인들을 거의 고려할 수 있고, 특히 구조물에 의한 반사파 취급이 용이하기 때문에 본 연구에서는 Copeland(1985)의 식과 Watanabe와 Maruyama(1984)의 식을 기본 방정식으로 하여 쇄파대 내에서의 에너지 감쇠식을 고려한 수치모형을 개발하였다. 경계처리 문제에 있어서는 임의 반사율 경계, 투과 경계, 무반사성 입사 경계식을 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 측면혼합, 표면 및 저면 마찰을 고려한 수치모델을 구현하였다.

수치모형의 타당성을 확인하기 위해서 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. 환경사방정식에 의한 파랑변형 계산

본 연구에서는 타원형 환경사방정식을 선유량과 수면변위로 표현한 쌍곡형 환경사방정식을 사용하였고, 쇄파대 외에서는 Copeland(1985)가 유도한 식을 쇄파대 내에서는 Watanabe 등(1984)이 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  $\eta$ 를 도입하면 다음과 같은 한쌍의 선형방정식을 유도된다.

- 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)

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

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

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

### 2.2 에너지 감쇠(Energy Dissipation)

Watanabe와 Maruyama(1986)의 쇄파 감쇠식을 고려하면 식(2.2)의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

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

$$F = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left( \frac{\hat{Q}}{Q_r} - 1 \right)} \quad (2.5)$$

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(2.5)에서  $\hat{Q} < Q_r$ 이면  $F = 0$ 으로 설정하여, 쇄파대 내에서도 에너지 감쇠가 발생하지 않고 파랑이 재생될 수 있게 하였다(Mizuguchi, 1980).

### 2.3 수치계산법

기본방정식인 식(2.2)와 식(2.3)을 유한차분법의 하나인 Leap-Frog법으로 차분하였으며, 선유량  $Q_x$ ,  $Q_y$  성분과 수면변위  $\eta$ 를 반격자씩 어긋나게 계산하는 Staggered 격자망을 사용하여 수치 계산하였다. 여기서  $\Delta x$ 는 안충방향의 격자간격,  $\Delta y$ 는 연안방향의 격자간격,  $\Delta t$ 는 계산시간 간격을 나타낸다.

식(2.3)을 위와 같은 격자망 체계로 차분하면 식(2.6)과 같으며, 에너지 감쇠를 고려한 식(2.4)를 차분하면 식(2.7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q_{xi,j}^{m+1} &= Q_{xi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} n_{i,j} C_{i,j}^2 (\eta_{i,j}^m - \eta_{i-1,j}^m) \\ Q_{yi,j}^{m+1} &= Q_{yi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta y} n_{i,j} C_{i,j}^2 (\eta_{i,j}^m - \eta_{i,j-1}^m) \\ \eta_{i,j}^{m+1} &= \eta_{i,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} (Q_{xi+1,j}^{m+1} - Q_{xi,j}^{m+1}) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} \frac{1}{n_{i,j}} (Q_{yi,j+1}^{m+1} - Q_{yi,j}^{m+1}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} Q_{xi,j}^{m+1} &= Q_{xi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} C_{xi,j}^2 (n_{xi,j} \eta_{i,j}^m \\ &\quad - n_{xi-1,j} \eta_{i-1,j}^m) - FQ_{xi,j} \Delta t \\ Q_{yi,j}^{m+1} &= Q_{yi,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} C_{yi,j}^2 (n_{yi,j} \eta_{i,j}^m \\ &\quad - n_{yi,j-1} \eta_{i,j-1}^m) - FQ_{yi,j} \Delta t \\ \eta_{i,j}^{m+1} &= \eta_{i,j}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{xi+1,j}^{m+1} - Q_{xi,j}^{m+1}) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} (Q_{yi,j+1}^{m+1} - Q_{yi,j}^{m+1}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

시간간격  $\Delta t$ 는 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 안정조건을 만족하도록 다음과 같은 관계로 주어진다(Watanabe 등, 1986).

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_{\max}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (2.8)$$

여기서,  $C_{\max}$ 는 계산 영역내의 파속의 최대치이다.

초기조건은 각 격자점에서의 수면변위와 x 및 y 방향의 선유량 성분들을 모두 0으로 두는 Cold Start 조건으로 계산하였다.

### 2.4 경계조건

#### 2.4.1 임의 반사율 경계

임의의 시간 t에서 반사율이  $K_R$ 인 경계로 파랑이 진행할 때 경계상에서 입사파와 반사파의 합으로 선유량이 나타나게 된다.

- x축과 직각인 경계

$$Q_x^t(x_0, y_0) = A \cdot Q_x^{t-\tau}(x_0 - \Delta x, y_0) \quad (2.9)$$

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

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

- y축과 직각인 경계

$$Q_y^t(x_0, y_0) = B \cdot Q_y^{t-\tau}(x_0, y_0 - \Delta y) \quad (2.10)$$

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(2.9)와 식(2.10)에 반사율  $K_R = 0$ 을 대입하면 된다.

#### 2.4.2 무반사성 입사경계

외해 입사경계 상에서는 심해쪽에서부터 진폭  $a_I$ 를 가진 입사파가 y축과  $\alpha_I$ 의 각을 이루고 입사할 경우 입사경계에서는 입사파뿐만 아니라 계산영역 내부에서 진행하는 파가 있으며 이와 같은 진행파가 y축과 이루는 각을  $\alpha_n$ 이라고 하면 선유량은 다음과 같이 된다.

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

여기서,  $\tau = \Delta x \cdot \cos \alpha_n / C$  (2.11)

측면 입사경계에서는 Maruyama와 Kajima(1985)의 방법과 같이 식(2.12)의 Snell법칙과 미소 진폭파 이론에 의한 천수계수( $K_s$ )와 굴절계수( $K_r$ )를 구하여 파고를 구하고 측면 경계상의 수면변위를 결정하는 식(2.13)을 사용하여 계산하였다(김 등, 1995).

$$\beta = \beta_0 = k \sin \alpha_1 = k_0 \sin \alpha_0 = \text{const.} \quad (2.12)$$

여기서,  $k_0$  : 심해 파수,  $\alpha_0$  : 심해 입사각

$$\eta = a(x) \sin \left( \int_0^x k \sin \alpha_1 dx + \int_0^y k \sin \alpha_1 dy - \sigma t \right) \quad (2.13)$$

따라서 측면에서의 경계조건은 다음과 얻을 수 있다.

$$Q_y^t(x_0, y_0) = Q_y^{t-\tau}(x_0, y_0 + \Delta y) + a C \sin \alpha_1 \sin \left[ \int_0^x \sqrt{k^2 - \beta_0^2} dx + \beta_0 \cdot y_0 - \sigma t \right] - a C \sin \alpha_1 \sin \left[ \int_0^x \sqrt{k^2 - \beta_0^2} dx + \beta_0(y_0 + \Delta y) - \sigma(t - \tau) \right] \quad (2.14)$$

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 타원형 천퇴

Berkhoff 등(1982)의 타원형 천퇴에서 본 연구에서 계산한 결과와 Berkhoff 등의 수리모형 실험결과와 비교·검토하였다. 수심의 형태는 그림 2.1과 같으며 심해파고를 0.0464m, 주기는 1sec., 입사각은 0°이다.

그림 2.2는 본 모형에 의한 수치실험 결과로 점선은 선형 분산식을 사용한 결과이고 실선은 Dingeman 등(1984)이 제시한 비선형 분산식을 사용한 결과이다. 다음은 Dingemans 등(1984)이 제시한 비선형 분산식을 나타낸 것이다.

$$\sigma^2 = gk \tanh \left[ kh \left\{ 1 + \frac{ka}{\sinh(kh)} \right\} \right] \quad (2.15)$$

여기서,  $a$  : 파랑의 진폭

선형 분산식을 사용한 결과는 단면 3-5에서와 같이 천퇴 뒷부분에서 실험치와 많이 차이가 있는 것을 볼 수 있으나 비선형 분산식을 사용한 결과는 전 단면에서 비교적 실험치와 유사한 결과를 보이고 있다. 이는 타원형 천퇴 뒷부분이 파랑의 굴절과 회절에 의한 파랑변형이 복잡하게 일어나는 지역이므로 일반적인 선형 분산식을 사용하는 것 보다 비선형 분산식을 사용하는 것이 타당한 것으로 생각된다.

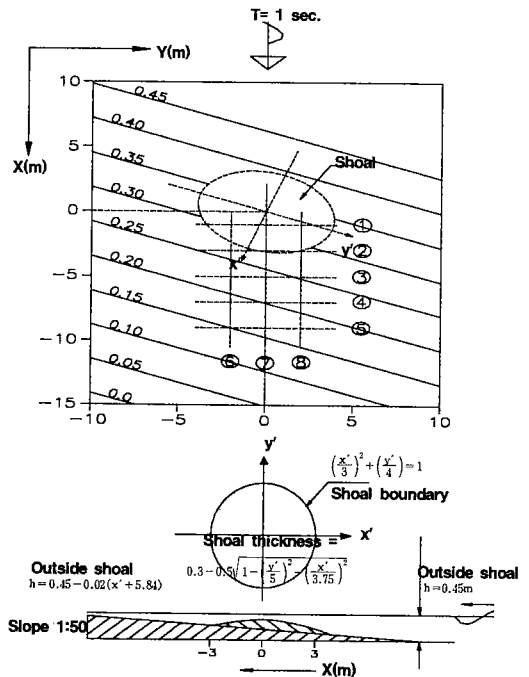


Fig. 2.1 Bottom contours and computational domain for Berkhoff et al.(1982) shoal test

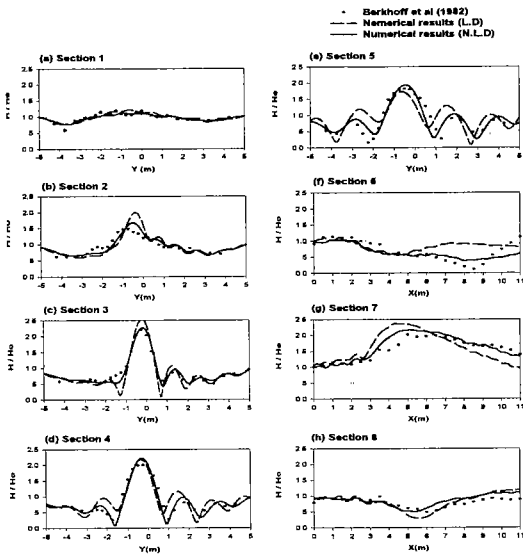


Fig. 2.2 Comparisons between numerical results and observed data for the elliptic shoal case with linear and non-linear dispersion relation

2.5.2 이안제

연안구조물 중에 이안제가 설치되어 있을 경우에 대하여 Watanabe 등(1984)의 수리모형 실험결과와 본 모형에 의한 계산결과를 비교·분석하였다. 이안

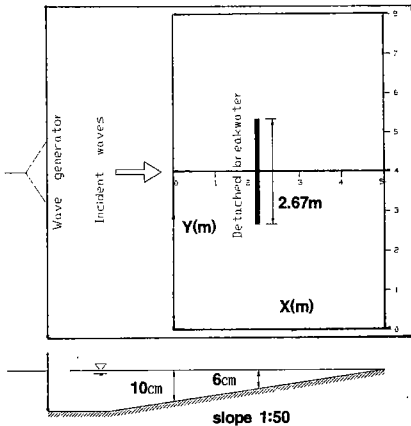


Fig. 2.3 Schematic diagram for a detached breakwater

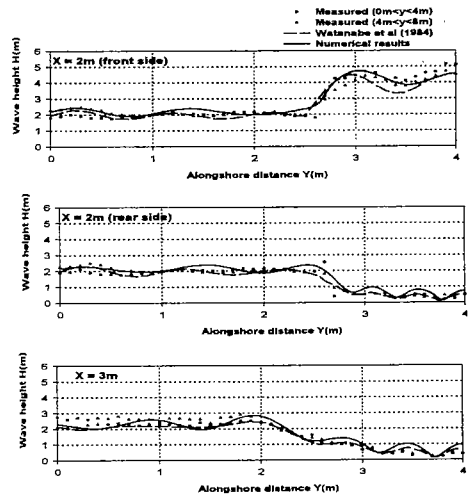


Fig. 2.4 Alongshore distribution of wave height

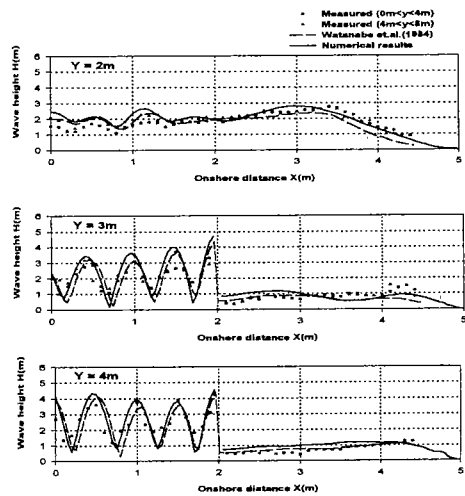


Fig. 2.5 Cross-shore distribution of wave height

제가 설치된 수심의 형태는 그림 2.3과 같으며 수치 계산 조건은 심해파고 2.0cm, 주기 1.2sec., 입사각 0°로 입사하는 조건이다. 공간격자 및 시간간격은 안정조건 식(2.8)을 만족시키도록  $\Delta x = \Delta y = 5\text{cm}$ ,  $\Delta t$ 는 0.02초로 계산하였다.

그림 2.4와 그림 2.5는 진행파가 완전반사되고 정

상상태에 도달했을 때의 파고분포를 나타낸 것이다. 그림 2.4의  $x=2m$ (이안제 전면)에서는 구조물에 의한 반사와 때문에 중복파랑장이 나타나는 곳으로 Watanabe 등(1984)의 수치계산 결과보다 본 모형에서 계산한 결과가 더 양호하게 나타나고 있다. 또한 그림 2.5의  $Y=3m$ 와  $Y=4m$ 에서의 계산 결과 중에 중복 파랑장에 형성되어 있는 곳에서는 본 모형에 의한 계산 결과가 Watanabe 등(1984)이 수치 계산한 결과보다 파봉과 파곡(위상)이 더 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

### 3. 해빈류 모형의 계산

연속방정식 및 운동방정식을 한 주기에 대해 시간평균하고 수심에 대해 수심적분한 형태의 방정식을 사용하였으며, 이 기본 방정식에 잉여응력과 수평혼합, 표면 및 저면에서의 마찰응력을 고려하였다. 수치계산법은 Leendertse방법을 사용하였으며, 본 모형에 의한 계산 결과를 기존의 수치계산 및 수리 모형 실험결과(Nishimura 등, 1985)와 비교·분석하였다.

#### 3.1 기본방정식

평균류에 대한 연속방정식과 운동방정식은 각각 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

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

- y방향의 운동방정식

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

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.

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

$$S_{xy} = S_{yx} = E n \sin \theta \cos \theta$$

$$S_{xx} = \rho g a^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left\{ \frac{2kh}{\sinh 2kh} + \left[ \frac{2kh}{\sinh 2kh} + 1 \right] \cos 2kh \right\}$$

$$S_{xy} = S_{yx} = 0 \quad (3.4)$$

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

##### 3.2.2 중복파랑장에서 선유량과 수면변위로 표현된 잉여응력

Watanabe와 Maruyama(1986)는 다음과 같이 함수로 잉여응력을 유도하였다.

$$\frac{1}{\rho g} S_{xx} = \frac{u_c^2 + u_s^2}{4C^2} \left( 1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) + \Gamma$$

$$\frac{1}{\rho g} S_{yy} = \frac{v_c^2 + v_s^2}{4C^2} \left( 1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) + \Gamma \quad (3.5a)$$

$$\frac{S_{xy}}{\rho g} = \frac{S_{yx}}{\rho g} = \frac{u_c v_c + u_s v_s}{4C^2} \left(1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD}\right)$$

$$\Gamma = \frac{1}{8\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\hat{\eta} \hat{Q}_x \sin(\epsilon_\eta - \epsilon_x)) + \frac{\partial}{\partial y} (\hat{\eta} \hat{Q}_y \sin(\epsilon_\eta - \epsilon_y)) \right\}$$

여기서, 수심 D는 시간적 공간적 평균수심이며, 중 복파에 대한 수립자속도로 다음 식(3.5b)와 같다.

$$\begin{aligned} u_c &= \hat{Q}_x \cos \epsilon_x, & u_s &= \hat{Q}_x \sin \epsilon_x \\ v_c &= \hat{Q}_y \cos \epsilon_y, & v_s &= \hat{Q}_y \sin \epsilon_y \\ \eta_c &= \hat{\eta} \cos \epsilon_\eta, & \eta_s &= \hat{\eta} \sin \epsilon_\eta \end{aligned} \quad (3.5b)$$

### 3.3 수평확산

수평확산에 대한 특별한 정설은 없으나 Longuet-Higgins(1970)는 평평한 해안에서 파가 해안에 직각으로 입사하여 부서질 때의 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, W는 풍속의 크기이며 W<sub>x</sub>, W<sub>y</sub>는 풍속의 x 및 y방향 성분이다. κ는 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<sub>c</sub>는 임계풍속(14knot)이고 계수 κ<sub>1</sub>, κ<sub>2</sub>를 각각 1.1 × 10<sup>-6</sup>, 2.5 × 10<sup>-6</sup>으로 두었다. Pearce(1972)는 이 계수 κ와 실제 풍속을 그림 3.1에서와 같이 비교하였다.

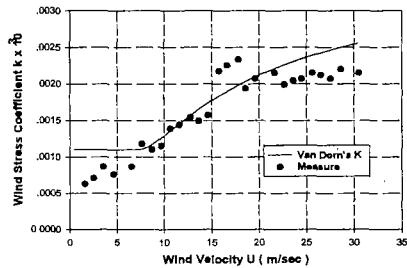


Fig. 3.1 Comparison of Van Dorn wind stress coefficient and experiment data (Pearce, 1972)

### 3.5 수치해석 방법

수치계산법으로 ADI방법의 일종인 Leendertse법을 사용하였으며, 운동방정식을 잉여응력(R), 수평확산(M), 마찰응력(F)를 포함하여 최종적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + R_x - M_x + F_x + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + R_y - M_y + F_y + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} = 0$$

$$(3.10)$$

시간단계  $k\Delta t$ 와  $(k+1/2)\Delta t$ 사이에서는  $U$ 와  $\bar{\eta}$ 는 음해법,  $V$ 에 대해서는 양해법을 사용하고 시간단계  $(k+1/2)\Delta t$ 와  $(k+1)\Delta t$ 사이에는  $V$ 와  $\bar{\eta}$ 는 음해법,  $U$ 에 대해서는 양해법을 사용하였다.

### 3.6 경계조건 및 안정조건

심해 경계조건은 계산영역의 외해에서 평균류 또는 평균수위를 zero로 두었으며, 구조물 경계조건은 경계에 수직한 방향의 유속성분 및 평균수위 경사를 zero로 두었다. 측방경계는 흐름이 존재하는 개경계일 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(김, 1990). 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 3.2와 같은 형태의 Noda 등(1974)에 의해 제안된 수심을 사용하여 표 3.1과 같은 초기조건으로 주기 10초, 차분간격  $\Delta x = \Delta y = 5m$ , 시간간격  $\Delta t$ 는 0.1초로 두었다. 그리고 혼합계수와 마찰계수는 Nishimura 등(1985)이 제안한 각각  $N=0.01$ 과  $C_f=0.01$ 을 사용하였다.

입사과향이  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ 인 Case 1과 Case 2의 계산결과는 각각 그림 3.3과 그림 3.4에 나타내었으며, Case 1과 Case 2의 속도 크기를 비교해 보면 연안에 직각으로 입사할 경우보다 연안에  $30^\circ$  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 빠져나가는 이안류의 형태를 보이고 있다. Case 3의 결과인 그림 3.5는 Case 1의 그림 3.3과 비교해서 해빈류의 유속분포가 높게 나타났다. 그림 3.6은 Case 1과 Case

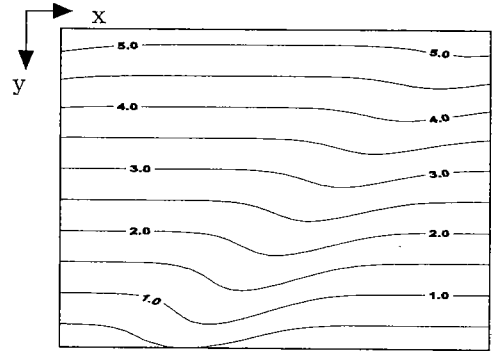


Fig. 3.2 Depths contours for periodic bottom

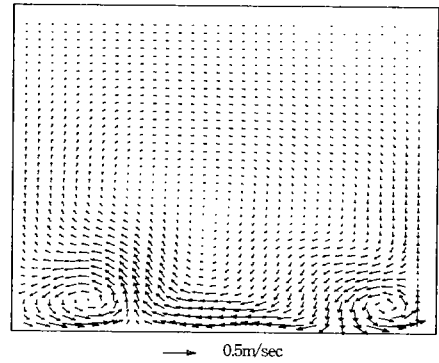


Fig. 3.3 Velocity vectors of wave induced current due to oblique wave attack

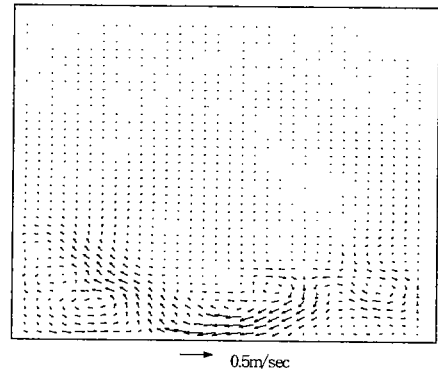


Fig. 3.4 Velocity vectors of wave induced current due to orthogonal wave attack



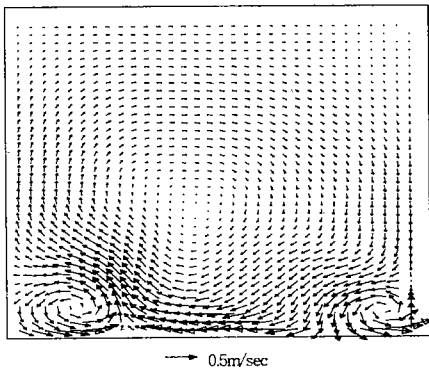
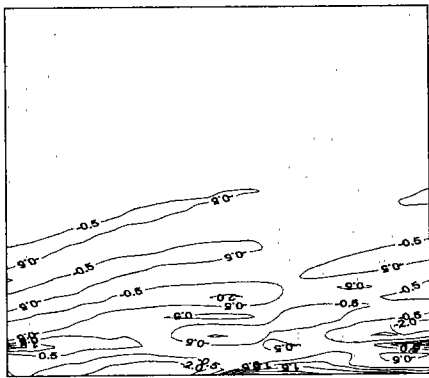
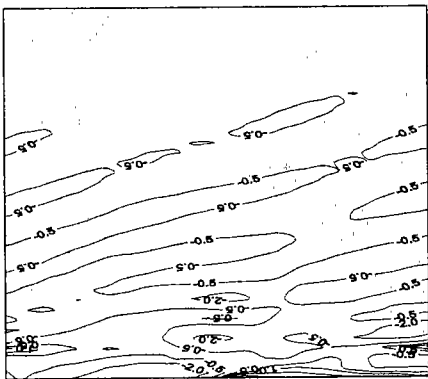


Fig. 3.5 Wave and wind induced current vectors of 25m/sec wind blowing



(a) Case 1



(b) Case 3

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

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 ( $\theta=30^\circ$ )

3이 평균수위를 비교한 것으로 Case 1의 경우보다 Case 3의 평균수위 변화의 폭이 상대적으로 넓게 나타났다.

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 실험결과 보다 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.

4. 결 론

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

- 1) Berkhoff 등의 타원형 천퇴 뒷부분에서 비선형 분산식을 사용하는 것이 파랑의 굴절과 회절을 잘

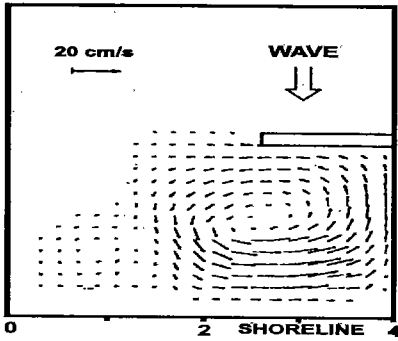


Fig. 3.7 Computed circulation behind a detached breakwater(Nishimura, Maruyama and Sakurai, 1985)

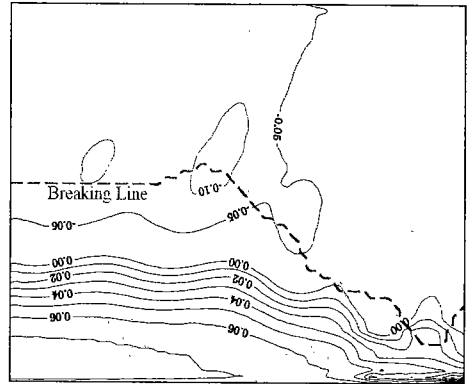


Fig. 3.10 Computed elevation of mean water behind a detached breakwater

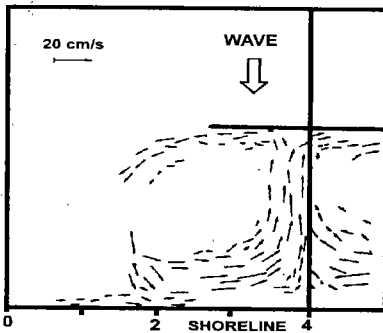


Fig. 3.8 Observed circulation behind a detached breakwater(Nishimura, Maruyama and Sakurai, 1985)

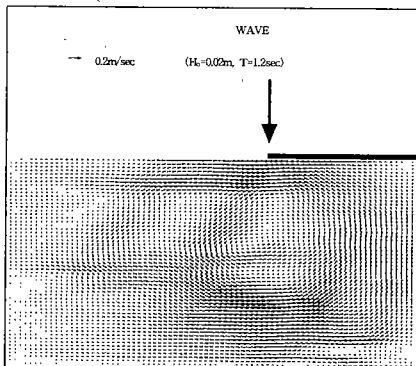


Fig. 3.9 Computed circulation behind a detached breakwater

반영하여 수리실험 결과와 잘 일치하는 것을 보여주었다. 또한 이안제에서의 결과는 기존의 수치계산 결과보다 본 모형의 계산결과가 파랑의 위상이 더욱 잘 일치하는 것을 보여주었다.

2) 이안제가 설치된 해역에서의 연안류 수치계산 결과를 수리모형 실험결과와 비교했을 때 파랑의 비선형성을 고려하는 것이 이안제 배후의 회전 흐름을 잘 재현하여 주었다.

3) 등심선이 평행한 지역에서 입사파의 방향에 따라서 해빈류의 형태가 달라지는 것을 보여 주었으며 본 모형에 저면마찰 뿐만 아니라 바람에 의한 에너지 감쇠를 고려함으로써 바람에 의해 발생하는 해빈류의 증가효과도 고려할 수 있는 모델을 구현하였다.

### 참고문헌

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Booij, N., "Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current", Rep. 81-1, Dept. of Civil Eng., Delft University of Technology, 1981.
  - 4) 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.
  - 5) Deguchi, I., "A Basic Study on the Sediment Transport and Beach Topography Change", Ph.D. Thesis, University of Osaka, 1984.
  - 6) 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.
  - 7) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart, "Radiation Stresses in Water Waves a Physical Discussion with Application", Deep Sea Res., Vol. 11, 1964.
  - 8) Longuet-Higgins, M.S., "Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves", J. of Geophy. Res., Vol.75, No.1, 1970, pp.6790-6801.
  - 9) Mizuguchi, M., "A Heuristic Model of Wave Height Distribution in Surf Zone", Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1980, pp.278-289.
  - 10) Neumann, J.N., "Diffraction of Water Waves", Appl. Mechanics Review, 1977, pp.1-7.
  - 11) Nishimura H., K. Maruyama and T. Sakurai, "On the Numerical Computation of Nearshore Currents", Coastal Eng. in Japan, Vol.28, 1985, pp.137-145.
  - 12) 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.
  - 13) 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.
  - 14) 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).
  - 15) 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).
  - 16) 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.
  - 17) 김인철, "연안역 구조물 주위에서의 파랑과 해빈류의 수치모형에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 1990.
  - 18) 김인철, 편종근, "시간의존형 환경사방정식을 이용한 파랑변형 수치모형의 측방입사경계상의 처리", 한국해안·해양공학회, 제7권 제2호, 1995, pp.141-147.