

## 이안제 배후 차폐역에서 포물선형 완경사방정식의 회절효과 Diffraction Effects of Parabolic Mild-Slope Equations in the Shadow Zone behind a Detached Breakwater

김 인 철\*  
In Chul Kim\*

**요 旨** : 본 연구는 *Padé* 근사 또는 *minimax* 근사법으로 파랑진행방향의 허용범위를 확장시킨 포물선형 완경사 방정식의 적용성 및 구조물에 의한 회절파의 비선형성을 고찰하는 데 그 목적이 있으며, 이를 위하여 불투과성의 이안제가 설치된 파랑장에 위 모델을 기본방정식으로 하여 수치계산을 수행한 후, 수리모형 실험치(Watanabe and Maruyama, 1984)와 비교·분석하였다. 그 결과 구조물의 기하학적 차폐경계를 따라 증가된 회절효과 때문에 비선형 모델의 파고치가 선형 모델의 파고치보다 크게 나타나며, 파랑진행 허용범위각을 크게 확장시킨 모델은 파랑진행각이 큰 영역에서는 측방향으로 파랑에너지를 높은 정도로 전파시키나 파수의 근사에 의한 누적된 오차 때문에 전반적으로 파고치가 왜곡되어 나타남을 알 수 있다.

**Abstract** □ The purpose of this study is to observe the applicability of parabolic mild-slope equations allowing relatively large angles of wave propagation based on the use of a *Padé* approximant or *minimax* approximation and also the applicability of the models with nonlinearity of diffracted waves in the shadow zone behind coastal structures. To accomplish these objectives, numerical solutions are obtained from the above parabolic models and are compared with the results from Watanabe and Maruyama's(1984) hydraulic model test on the wave field with an impermeable detached breakwater. From this study, it is found that computed wave heights increase for the nonlinear results in comparison to the linear results due to the increased diffraction effect across the geometric shadow boundary. The model with a larger aperture with respect to the principal direction was found to spread laterally to a much greater degree where spreading angle (diffraction effect) is relatively large, which causes a distortion in the overall results due to the error accumulated by the approximation of wave length.

### 1. 서 론

파랑장을 계산하는 방법은 수심변화에 의한 굴절만을 고려하는 파향선법 및 격자점법이 있으며, 굴절, 회절 및 반사를 동시에 고려할 수 있는 타원형 완경사방정식에 기초한 여러 모델들이 있지만, 복잡한 수심변화에 의한 굴절과 회절에 대하여 계산시간이 적으면서 파고 및 파향을 비교적 정확히 예측할 수 있는 포물선형 완경사방정식이 있다. 그러나 포물선형 완경사방정식을 광역의 적용시에 특히 파향이 크게 나타나는 영역에서는 수치계산 진행방향에 대하여 직각방향으로

광역 격자상에서 진폭의 변화가 심하게 되어 수치결과를 신뢰할 수 없는 단점이 있다.

Radder(1979)는 *splitting matrix*법을 사용해서 타원형 완경사방정식을 포물선형의 방정식으로 변환하여 원형천퇴에 적용한 결과, 실험치와 잘 일치하고 있음을 보여 주었다. 이후 굴절과 회절을 동시에 고려할 수 있는 포물선형 완경사방정식이 주목받게 되었다. 포물선형 완경사방정식은 파의 진행방향과 좌표축이 이루는 각이 작은 경우에 특히 유효하므로 파향선과 파봉선으로 되는 직교 곡선좌표계로서 표시된 포물선형 완경사방정식이 Tsay and Liu(1982) 및 磯部(1986)에 의

\*동서대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Dong Seo University, Pusan 617-716, Korea)

해 제안되었다. 그러나, 수치계산에 있어서는 고정좌표계를 사용하는 것이 편리하므로 平口·丸山(1986)는 Radder(1979)의 식 중에서 파수의  $y$ 방향 성분을 포함시켜 입사파향과 좌표축이 이루는 각도가 큰 경우에도 근사정도가 떨어지지 않는 식을 제안하였고 Kirby(1986 a, b)는  $x$  방향의 파수성분의 근사도를 Padé 근사 또는 minimax 근사법으로 높임으로써 입사각의 적용범위를 확장시켰다.

특히 파랑의 비선형성을 나타내기 위하여 선형과 모델에 편의적으로 비선형 분산관계를 통하여 비선형성을 고려하는 방법(Dingemans *et al.*, 1984)은 사용상 간편한 잇점은 있으나 이론적이지 못한 반면, 선형과 모델에 Stokes파 이론에 기초한 비선형항을 포함시키는 방법(Kirby and Dalrymple, 1983; Liu and Tsay, 1984)이 있다. 이 방법은 이론적인 면은 있으나, Stokes파 이론의 적용범위를 넘어서는 천해영역에서 비현실적인 파고를 예측하는 단점이 있으므로, Kirby and Dalrymple(1986)은 심해역에서 천해역까지 적용할 수 있는 비선형 분산관계식을 선형의 포물선형 기본방정식에 포함시켜 파랑의 비선형성을 고려하였다.

국내에서는 이 등(1989)이 포물선 환경사방정식을 파향선 좌표계로 해석하는 방법을 연구하였으며 이·이(1990)는 비선형 포물선 환경사방정식인 Liu and Tsay(1984)의 모델 및 Boussinesq 방정식에 기초한 Liu *et al.*(1985)의 모델들을 사용하여 파랑의 비선형성을 고찰하였다. 서(1990)는 허용입사 파향각을 확장한 고차 포물선 환경사방정식을 유도하고 비선형성은 분산관계식을 사용하여 원형 및 타원형 천퇴에 적용시켜 기존의 실험치와 비교, 고찰하였으며, 정 등(1990)은 이 안류가 존재하는 파랑장에 흐름의 효과가 고려된 포물선형 환경사방정식을 적용하여 모델의 타당성을 검토하였다. 그리고 이·이(1994)는 기존의 포물선형 환경사방정식을 개선하여 반사파가 존재하고 수심이 거의 일정한 항내의 정온도 해석에 적용할 수 있는 수치기법을 제시하였다.

위에서 언급한 대부분의 연구들은 파랑진행각이 상대적으로 작게 나타나는 천퇴의 배후영역 및 해안선에 직각방향으로 설치된 돌제의 주변영역 또는 구조물 배후의 회절파가 중첩되지 않는 반무한 방파제의 배후영역에 포물선형 환경사방정식을 적용하여 모델의 타당성을 검토하였다. 그러나 일반적인 해저경사를 가진 실제해역에 존재하는 섬 또는 구조물의 배후영역에서

는 파랑진행각이 크게 나타날 뿐만 아니라 회절파의 중첩으로 인한 파의 비선형성이 나타날 수 있으므로 적용하는 모델의 파랑전파범위 및 회절파의 비선형성에 대하여 검토할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 파랑진행각(회절효과)이 크게 나타나는 불투과성의 이안제가 설치되고 수심이 완만히 변화하는 파랑장에 포물선형 환경사방정식을 적용하여 수치계산을 수행한 후, 기존의 수리모형 실험치(Watanabe and Maruyama, 1984) 및 시간의존 환경사방정식(Maruyama and Kajima, 1985)의 수치해(김, 1990)와 비교함으로써 이안제 배후 회절역에서 포물선형 환경사방정식의 적용성 및 구조물로 인한 회절파의 비선형성에 대하여 고찰하였다.

## 2. 기본 방정식

진행파에 대한 속도 포텐셜을 multiple-scale 확장법에 의해 파랑의 유한진폭성을 고려하고  $x$  방향의 파수성분의 근사도를 minimax법에 의해서 높임으로써 입사각 및 파랑진행방향의 허용범위를 확장시킨 광각 비선형 포물선형 환경사방정식은 다음과 같다(Kirby, 1986b).

$$\begin{aligned}
 C_g A_x + i(\bar{k} - a_0 k) C_g A + \frac{1}{2} (C_g)_x A \\
 + \frac{i}{\sigma} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \right) (C C_g A_y), \\
 - \frac{b_1}{\sigma k} (C C_g A_y)_x + \frac{b_1}{\sigma} \left\{ \frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2k C_g} \right\} (C C_g A_y), \\
 + \frac{i\sigma}{2} k^2 D |A|^2 A + \frac{w}{2} A = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $A$  = 복소수로 표현된 파의 진폭,  $\bar{k} = y$  방향에 대한 평균파수,  $k$  = 파수,  $\sigma$  = 각주파수,  $C$  = 파속,  $C_g$  = 파의 군속도,  $D = (\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh) / 8 \sinh^4 kh$  이며, 에너지 감쇠계수  $w$ 는 쇄파대 외에서는  $w=0$  이고, 쇄파대 내에서는 다음식을 사용하였다.

$$w = \frac{KC_g \left\{ 1 - \left( \frac{\gamma h}{H} \right)^2 \right\}}{h} \quad (2)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $H$ 는 파고,  $K$ 와  $\gamma$ 는 경험적으로 결

**Table 1.** Coefficients of the approximation determined by varying aperture width.

Aperture ( $\theta_a$ )	$a_0$	$a_1$	$b_1$	Remarks
Binomial expansion	1	- 0.5	0	Radder's (1979) linear model
<i>Padé</i> approximant	1	- 0.75	- 0.25	Kirby's (1986) model for wave-current
30°	0.999978391	- 0.775898646	- 0.277321130	
60°	0.998213736	- 0.854229482	- 0.383283081	
80°	0.985273164	- 0.925464479	- 0.550974375	

정되는 상수로 Dally *et al.*(1985)의 모델에서는 각각 0.15, 0.4에 해당하며 쇄파조건은 McCowan(1891)의 식을 사용하였다.

한편  $x$  방향 파수성분 근사정도에 의해 값이 결정되는 계수  $a_0, a_1, b_1$ 은 Fig. 1과 같이 파랑의 주진행방향이 계산영역으로 직각 입사하는 경우에 낮은 차원의 이항전개, *Padé* 근사 그리고 파랑전파방향의 허용범위각( $0 < \theta < \theta_a$ )상에서  $x$  방향 파수성분의 근사로 인하여 발생하는 최대오차를 최소화시키는 minimax 근사법으로 구한 상수값들은 Table 1과 같다(Kirby, 1986b).

식 (1)에 있는 비선형항은 Stokes파 이론에 기초한 진폭분산(amplitude dispersion)에 해당되고, Stokes파 이론의 적용범위를 넘어서는 천해영역에서는 다음과 같이 심해에서 천해영역까지 적용할 수 있는 비선형 분산관계식으로 수정하여 비선형항 대신에 다음 항을 넣는다(Kirby and Dalrymple, 1986).

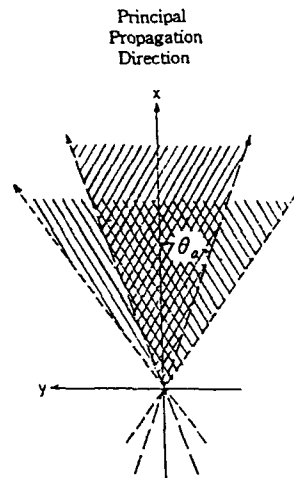
$$\frac{i\sigma}{2} \left\{ (1 + f_1(k|A|)^2 D) \frac{\tanh(kh + f_2 k|A|)}{\tanh kh} - 1 \right\} A \quad (3)$$

여기서,  $f_1 = (\tanh kh)^5$ ,  $f_2 = (kh/\sinh kh)^4$ 이다. 식 (3)은 천해영역에서는 근사적으로 Hedges(1976)의 고립파에 대한 비선형 분산관계식에 해당되며 심해영역에서는  $f_1 = 1, f_2 = 0$ 로 되어 앞에서 기술한 Stokes파의 비선형 분산관계식이 된다.

### 3. 수치계산법

#### 3.1 기본 방정식의 차분화

수치모델의 격자망은  $x$ 축에  $M$ 개의 격자점,  $y$ 축에  $N$ 개의 격자점으로 구성되어있고, 각 격자점( $x_i, y_j$ )는 다



**Fig. 1.** Definition of aperture for parabolic approximations: //// allowed aperture: lowest-order approximation; \\\\ allowed aperture: higher-order approximation (Kirby, 1986b).

음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_i &= (i - 1) \Delta x, & 1 \leq i \leq M \\ y_j &= (j - 1) \Delta y, & 1 \leq j \leq N \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 각각  $x, y$  방향의 격자간격이다.

기본방정식 (1)을  $O(\Delta x^2, \Delta y^2)$ 의 차분화 오차를 가지는 Crank-Nicolson법으로 유한차분한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_j^i A_{j+1}^{i+1} + b_j^i A_j^{i+1} + c_j^i A_{j-1}^{i+1} &= d_j^i A_{j+1}^i + e_j^i A_j^i + f_j^i A_{j-1}^i \\ &\quad - 2(\Delta x) g_j^i(A_j^i, \tilde{A}_j^{i+1}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$a_j^i = \left\{ \frac{i \Delta x}{2(\Delta y)^2} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}^{i+1}}{k_j^{i+1}} \right) - \frac{2b_1}{(\Delta y)^2(k_j^{i+1} + k_j^i)} \right.$$

$$+ b_1 \beta_j^i \frac{\Delta x}{2(\Delta y)^2} \left\} \cdot \left\{ \frac{(CC_g)_{j+1}^{i+1} + (CC_g)_j^{i+1}}{\sigma} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} b_j^i &= (C_g)_{j+1}^{i+1} + (C_g)_j^{i+1} \{1 + i \Delta x (\bar{k}^{i+1} - a_0 k_j^{i+1})\} \\ &+ \frac{1}{2} \{(C_g)_{j+1}^{i+1} - (C_g)_j^{i+1}\} \\ &+ \left\{ -\frac{i \Delta x}{2(\Delta y)^2} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}^{i+1}}{k_j^{i+1}} \right) + \frac{2b_1}{(\Delta y)^2 (k_j^{i+1} + k_j^i)} \right. \\ &\left. - b_1 \beta_j^i \frac{\Delta x}{2(\Delta y)^2} \right\} \cdot \\ &\left\{ \frac{(CC_g)_{j+1}^{i+1} + 2(CC_g)_j^{i+1} + (CC_g)_{j-1}^{i+1}}{\sigma} \right\} \\ &+ \frac{\Delta x}{2} w_j^{i+1} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} c_j^i &= \left\{ \frac{i \Delta x}{2(\Delta y)^2} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}^{i+1}}{k_j^{i+1}} \right) - \frac{2b_1}{(\Delta y)^2 (k_j^{i+1} + k_j^i)} \right. \\ &\left. + b_1 \beta_j^i \frac{\Delta x}{2(\Delta y)^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{(CC_g)_j^{i+1} + (CC_g)_{j-1}^{i+1}}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} d_j^i &= \left\{ \frac{-i \Delta x}{2(\Delta y)^2} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}^i}{k_j^i} \right) - \frac{2b_1}{(\Delta y)^2 (k_j^{i+1} + k_j^i)} \right. \\ &\left. - b_1 \beta_j^i \frac{\Delta x}{2(\Delta y)^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{(CC_g)_{j+1}^i + (CC_g)_j^i}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} e_j^i &= (C_g)_{j+1}^{i+1} + (C_g)_j^{i+1} \{1 - i \Delta x (\bar{k}^i - a_0 k_j^i)\} \\ &- \frac{1}{2} \{(C_g)_{j+1}^{i+1} - (C_g)_j^{i+1}\} \\ &+ \left\{ \frac{i \Delta x}{2(\Delta y)^2} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}^i}{k_j^i} \right) + \frac{2b_1}{(\Delta y)^2 (k_j^{i+1} + k_j^i)} \right. \\ &\left. + b_1 \beta_j^i \frac{\Delta x}{2(\Delta y)^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{(CC_g)_{j+1}^i + 2(CC_g)_j^i + (CC_g)_{j-1}^i}{\sigma} \right\} \\ &- \frac{\Delta x}{2} w_j^i \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_j^i &= \left\{ -\frac{i \Delta x}{2(\Delta y)^2} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}^i}{k_j^i} \right) - \frac{2b_1}{(\Delta y)^2 (k_j^{i+1} + k_j^i)} \right. \\ &\left. - b_1 \beta_j^i \frac{\Delta x}{2(\Delta y)^2} \right\} \cdot \left\{ \frac{(CC_g)_j^i + (CC_g)_{j-1}^i}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\beta_j^i = \frac{4(k_j^{i+1} - k_j^i)}{\Delta x (k_j^{i+1} + k_j^i)^2} + \frac{2\{(C_g)_{j+1}^{i+1} - (C_g)_j^{i+1}\}}{\Delta x (k_j^{i+1} + k_j^i) \{(C_g)_{j+1}^{i+1} + (C_g)_j^{i+1}\}} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} g_j^i &= \frac{i \sigma_j}{2} \left\{ (1 + f_{1j} k_j^2 |A_j^i, \tilde{A}_j^{i+1}|^2 D_j) \right. \\ &\left. \frac{\tanh(k_j h_j + f_{2j} k_j |A_j^i, \tilde{A}_j^{i+1}|)}{\tanh h_j k_j} - 1 \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의  $g_j^i$ 에 있는  $\sigma_j$ ,  $f_{1j}$ ,  $f_{2j}$ ,  $D_j$ ,  $k_j$  및  $h_j$ 는 식 (5)의  $A_j^i$ 의 계수일 때에는  $i$ 번째 격자점 값을 사용하고  $\tilde{A}_j^{i+1}$ 의 계수일 때에는  $(i+1)$ 번째 격자점 값을 사용하면 된다.  $\tilde{A}_j^{i+1}$ 는 식 (1)의 비선형항에 포함된 미지수를 선형화하는 과정의 중간단계 추정치이다. 차분식 (5)중의 3대각 행렬은 Thomas algorithm을 사용하여 외해에서 해안쪽으로 순차적으로 계산하였으며, 이전 단계로 비선형항에 포함된 미지값  $|\tilde{A}_j^{i+1}|$ 는 처음에 기지값  $|A_j^i|$ 로 근사시켜  $|\tilde{A}_j^{i+1}|$ 를 계산한 다음, 이 값을 비선형항에 적용시켜 최종적인 해를 구하는 two-pass iterative 방법으로 선형화 하였다.

### 3.2 초기 및 경계조건

식 (5)의 수치해를 구하기 위해서는 수심이 일정한 외해경계( $x=0$ )의 초기조건으로서 입사파 조건이 필요하며, 계산영역 내의  $y$ -경계상에 측면경계 조건이 주어져야 한다. 측면경계는 완전 반사경계(계산영역의 대칭성 또는 구조물로 인한 완전반사조건) 및 개방경계(투과경계)를 고려할 수 있는데 완전 반사 경계조건은 식 (14a)로 나타낼 수 있으며, 차분형태는 식 (14b)로 주어진다.

$$\frac{\partial A}{\partial y} \Big|_{y=y_w} = 0 \quad (14a)$$

$$A_{j+1} = A_j + O(\Delta y^2) \quad (14b)$$

여기서  $y_w = (j-1/2) \Delta y$  이며 구조물의 위치를 나타낸다.

개방경계는 계산영역 내의 산란파를 계산영역 밖으로 투과시키기 위하여 개방경계상에서 연안방향( $y$ 방향)에 대하여 국소적인 진폭변화가 없다고 가정한 투과경계 조건을 식 (15a)와 같이 설정하고, 차분식은 식 (15b)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial y} = ikA \sin \theta \quad (15a)$$

$$\frac{A_{j+1}^i - A_j^i}{\Delta y} + O(\Delta y) = ik \sin \theta \left( \frac{A_{j+1}^i + A_j^i}{2} \right), \quad j = 1 \quad \text{또는}$$

$$j = N-1 \tag{15b}$$

여기서  $\theta$ 는  $x$ 축에 대한 파랑진행방향이다. 식 (15a)에 있는 연안방향의 파수성분  $k \sin \theta$ 는 계산 전단계( $i-1$ )의 격자점에서 다음과 같이 계산된다.

$$k \sin \theta = \frac{2i(A_{j+1}^{i-1} - A_j^{i-1})}{\Delta y(A_{j+1}^{i-1} + A_j^{i-1})} \tag{16}$$

위의 경계조건식은 계산영역 내의 산란파를 완전히 투과시키지 못하는 것으로 알려져 있으므로 개방경계를 구조물로부터 가능한 한 멀리 설정하는 것이 바람직하다(Dalrymple and Martin, 1992).

한편 이안제 등과 같은 투과성 구조물이 존재하는 파랑장에 포물선형 환경사 방정식을 적용하는 경우에는 구조물의 투과경계로서 다음과 같이 설정한다.

$$A' = K_T A \tag{17}$$

여기서  $K_T$  = 투과율,  $A$  = 구조물로 입사하는 복소수로 표현된 파의 진폭,  $A'$  = 구조물에서 투과되는 복소수로 표현된 파의 진폭이다.

#### 4. 모델의 적용 및 결과 분석

포물선형 환경사방정식의 이안제 배후 회절역에 대한 적용성 및 구조물로 인한 회절파의 비선형성을 검토하기 위하여 Watanabe and Maruyama(1984)의 실험자료 및 기존의 시간의존 환경사방정식의 계산결과(김, 1990)와 비교하였다. 평면수로의 형태는 Fig. 2와 같으며 해저지형은 1/50의 경사로 평행 등심선을 가지며, 대안거리 3.0 m, 수심 6 cm의 위치에 길이 2.67 m의 불투과성 이안제가 해안선과 평행하게 설치된 모형이다.

실험조건은 입사파에 대한 심해파 파고 2.0 cm, 주기 1.2 s의 규칙파가 해안선에 직각으로 입사하는 조건이다. 경계조건은 이안제의 중심을 자르는 선에서는 파랑장의 대칭성에 대한 완전반사경계, 그 외 경계에서는 투과경계로 하였으며 이안제의 구조물 경계에서는 불투과경계( $K_T=0$ )를 적용하였다. 그리고 계산 격자간격은 외해측 파장의 1/10에 해당되는  $\Delta x = \Delta y = 10$  cm로 하였다.

##### 4.1 파랑전파 범위에 대한 검토

Padé 근사로 파랑의 전파범위를 확장시킨 Kirby

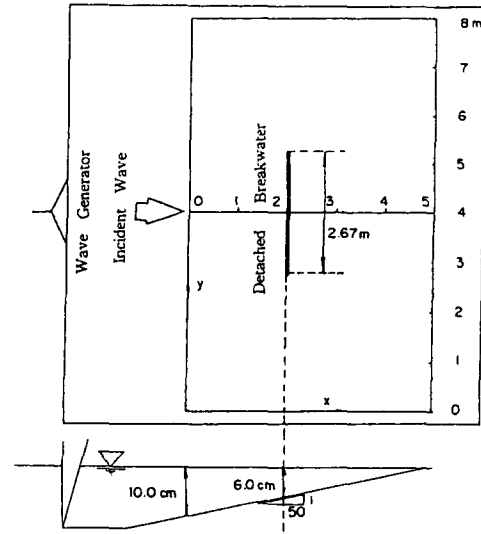


Fig. 2. Experimental setup and coordinates (Watanabe and Maruyama, 1984).

(1986a)의 광각 포물선형 환경사방정식(WPME)과 Radder(1979)의 포물선형 환경사방정식(PME)을 사용하여 이안제 배후 회절역의 파고치를 실험치와 비교한 결과는 Figs. 3 및 4이다. 이안제의 길이가 설치지점에서 파장의 3배에 해당되므로 구조물 양단으로부터 회절된 파는 이안제의 배후 회절역에서 중첩되어 이안제를 가로지르는 중심선을 따라 대칭적인 파고분포를 갖게되므로 그 중심선을 따라 가상구조물 경계조건(완전반사경계)을 사용하여 대칭의 한쪽 영역만 계산하면 된다. 그 결과 Fig. 3에서 보듯이 실제 구조물을 따라 stem파가 존재하는 계산결과(Yue and Mei, 1980)와 정성적으로 비슷하게 가상구조물 경계상을 중심으로 이안제에서  $x$  방향으로 거리가 증가할수록 파고가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 구조물 차폐역에서 회절효과를 보면 Radder(1979)의 포물선형 환경사방정식의 계산결과에서는 회절파가 전혀 나타나지 않는 광범위한 차폐역이 존재하며 이안제로부터  $0^\circ < \alpha < 40^\circ$  영역에서는 회절파가 제대로 전파되지 못함을 보여주는 반면에, 광각 포물선형 환경사방정식의 계산 결과치는  $0^\circ < \alpha < 25^\circ$  영역에서는 실험치보다 작은 파고를 보이나 전반적으로 실험치와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 광각모델이 Radder(1979)의 모델보다 파랑에너지를 측방향( $y$ 방향)으로 보다 광범위하게 전파시키고 있음을 보여주는 결과이다.

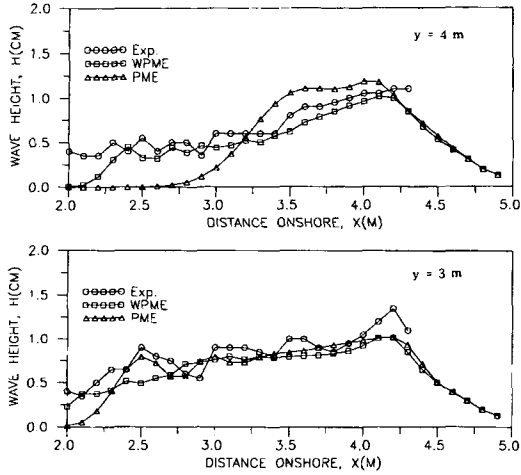


Fig. 3. Cross-shore comparison of results by the parabolic mild slope equations with experimental data.

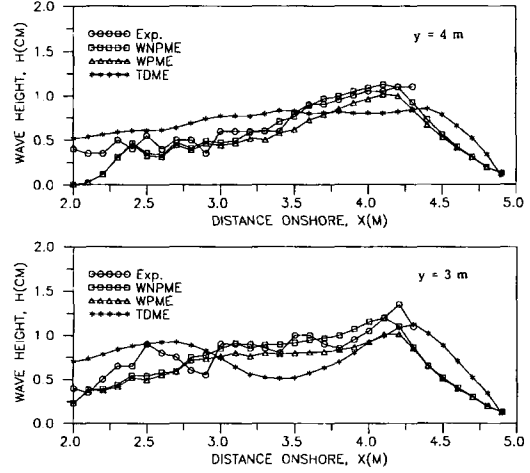


Fig. 5. Cross-shore comparison of results by the wide-angle nonlinear parabolic equation and the time-dependent mild slope equation with experimental data.

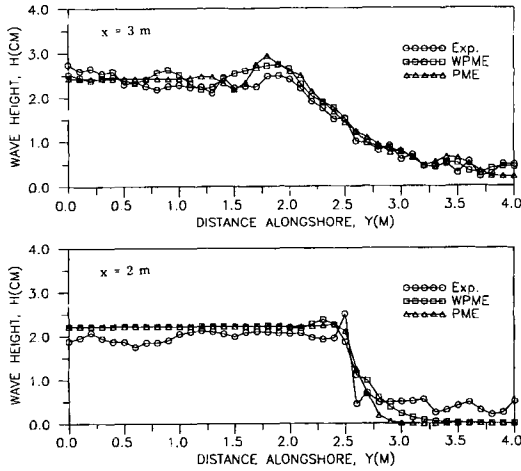


Fig. 4. Alongshore comparison of results by the parabolic mild slope equations with experimental data.

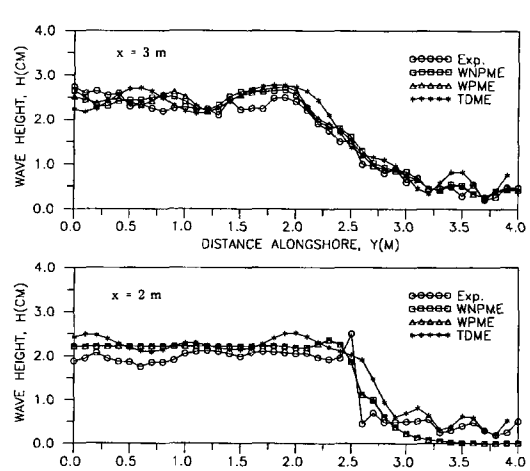


Fig. 6. Alongshore comparison of results by the wide-angle nonlinear parabolic equation and the time-dependent mild slope equation with experimental data.

4.2 회절파의 비선형성에 대한 검토

이안제 배후에서 중첩된 회절파 및 기하학적 차폐경계(geometric shadow boundary)에서 생기는 회절파의 비선형성을 검토하기 위하여 앞에서 기술한 것과 동일한 조건으로 Stokes파의 적용범위를 넘어서는 천해영역까지 적용가능한 식 (1)의 광각 비선형 포물선형 환경사방정식(WNPME)과 광각 예측의 정확도에 있어서 타원형 환경사방정식에 상당하는 시간의존 환경사방정식(TDME)에 투과경계조건으로 Watanabe and Maruyama(1984)의 식을 사용하여 적용시킨 결과는 Figs. 5 및 6이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시간의존 환경사방정식의 경우에는 이안제 배후의 파의 진행각이 비교

적 큰 영역에서는 전반적으로 실험치에 비해 약간 높게 예측되며 해안선 방향으로 갈수록 오히려 실험치보다 낮게 예측되는 결과를 보이고, 해안선의 투과경계에서 완전히 투과되지 못한 반사파 때문에 파고가 전반적으로 크게 변동하는 현상도 볼 수 있다. 그리고 광각 포물선형 환경사방정식의 비선형과 선형방정식의 계산결과를 비교해 보면, 일반적으로 굴절된 파가 중첩되어 파고가 증대되는 천퇴배후에서는 굴절파의 중첩으로 인한 비선형성 때문에 비선형 방정식의 파고가 선형방정식보다 낮게 예측되어 더 정확한 결과를 주지만 (Kirby and Dalrymple, 1984), 회절파가 중첩되는 이안제 배후

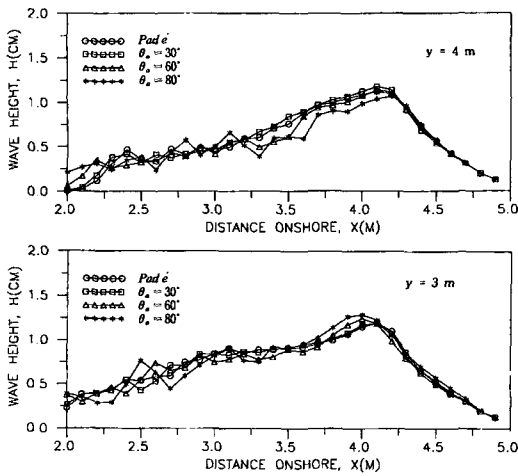


Fig. 7. Cross-shore comparison of minimax approximation ( $\theta_a = 30^\circ, 60^\circ$  and  $80^\circ$ ) with Padé approximant.

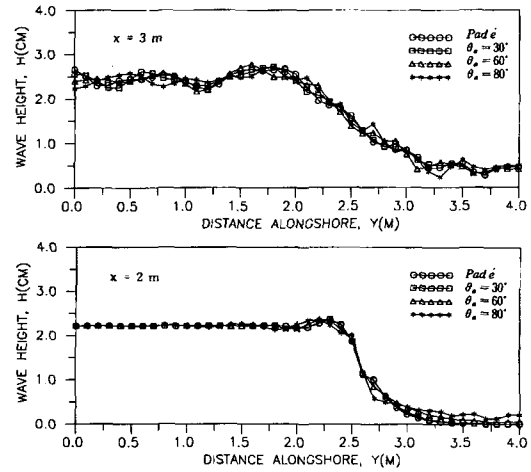


Fig. 8. Alongshore comparison of minimax approximation ( $\theta_a = 30^\circ, 60^\circ$  and  $80^\circ$ ) with Padé approximant.

영역에서는 회절파의 중첩으로 인한 비선형 방정식의 결과가 오히려 크게 예측되어 실험치에 더 근접한 결과를 보여주고 있다. 이는 중첩된 회절파의 비선형성보다 기하학적 차폐경계에서 생기는 파의 불연속성으로 인한 비선형성이 더 탁월하여 비선형 방정식의 회절효과를 증대시킨 결과라 판단된다.

### 4.3 파랑전파의 허용범위각에 대한 검토

Minimax 근사법으로 파랑진행방향을 확장시킴으로써 생기는 모델의 정확도를 알아보기 위하여, 미리 지정된 허용범위각  $\theta_a = 30^\circ, 60^\circ$  및  $80^\circ$ 에 대한 계수  $a_0, a_1$  과  $b_1$ 의 상수값은 Table 1에 나타나 있다. 이 값을 식 (1)에 적용하여 Padé 근사 모델과 비교하였다. Figs. 7 및 8은 이 결과를 나타낸 것으로  $\theta_a = 30^\circ$ 인 경우는 Padé 근사모델의 결과와 전체적으로 거의 일치하고 있음을 보여주며,  $\theta_a = 60^\circ$ 인 경우는 국소적으로 파랑진행각이 큰 영역에서 Padé 근사 모델보다 약간 높은 파고값을 보여주나 전반적으로 일치하고 있다.  $\theta_a = 80^\circ$ 인 경우는 파랑진행각이 큰 영역에서 Padé 근사 모델보다 실험치(Figs. 5 및 6)에 더 근접하는 파고값을 보이나 파랑진행 허용범위각을 많이 확장시킴으로써 생기는 x방향 파수의 근사에 대한 누적된 오차 때문에 전반적으로 왜곡된 파고치를 보여준다.

## 5. 결 론

이안제 배후 회절역에 대한 포물선형 환경사방정식

의 적용성 및 구조물로 인한 회절파의 비선형성을 검토하기 위하여 일정한 경사면에 불투과성의 이안제가 설치된 파랑장에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Radder(1979)의 포물선형 환경사방정식의 계산결과에서는 이안제 배후에서 회절파가 전혀 나타나지 않는 비교적 광범위한 차폐역이 존재하며, 광각 포물선형 환경사방정식의 계산결과치는 이안제로부터  $0^\circ < \alpha < 25^\circ$  영역에서는 실험치보다 작은 파고를 보이나 그 밖의 영역에서는 실험치에 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

2) 광각 비선형 포물선형 환경사방정식의 계산결과를 시간의존 환경사방정식의 계산결과와 비교해 보면, 시간의존 환경사방정식은 수학적인 관점에서 타원형 환경사방정식에 상당하는 모델이나 해안선의 투과경계에서 완전히 투과하지 못한 반사파 때문에 파고치의 큰 변동현상을 볼 수 있으므로 구조물로 인한 반사파가 존재하지 않고 회절파가 중첩되는 이안제 배후에서는 광각 비선형 포물선형 환경사방정식의 계산치가 전반적으로 더 정확한 결과를 가져다 주고 있음을 알 수 있다.

3) 광각 비선형 포물선형 환경사방정식과 선형방정식의 계산결과를 보면 회절파가 중첩되는 이안제 배후에서는 구조물의 기하학적 차폐경계에서 생기는 파의 불연속성으로 인한 비선형성이 파의 중첩으로 인한 비선형성보다 더 탁월하여 비선형 방정식의 파고치가 선형방정식의 결과보다 높게 나타남을 알 수 있다.

4) Minimax 근사법으로 파랑진행 허용범위각을 크게 확장시킬수록 파랑진행각이 큰 영역에서는 파랑 에너지가 측방향으로 많이 전파되고 있음을 볼 수 있으나, 전반적인 파고치는  $x$ 방향 파수의 근사에 대한 누적된 오차 때문에 왜곡되게 나타나는 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 1995년도 동서대학교 학술조성연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 김인철, 1990. 연안역 구조물 주위에서의 파랑과 해빈류의 수치모형에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- 서승남, 1990. 포물선 근사식에 의한 천해파 산정모델, 한국해양·해양공학회지, 2(3): 134-142.
- 이동수, 이종섭, 장선덕, 1989. 파향선 좌표계에 의한 해안 구조물 주변에서의 파랑변형모형, 한국해양·해양공학회지, 1(1): 22-30.
- 이정규, 이종인, 1990. 파의 굴절 및 회절에 미치는 비선형 효과에 대한 수치 해석, 한국해양·해양공학회지, 2(1): 51-57.
- 이정렬, 이동영, 1994. 포물선형 수치기법에 의한 항내 정온도 모델의 개발, 한국해양·해양공학회 1994년도 정기학술강연회 발표논문 초록집, pp. 58-61.
- 정신택, 채장원, 안수환, 정원무, 1990. 포물선방정식을 이용한 파의 굴절, 회절 현상, 한국해양·해양공학회지, 2(1): 28-33.
- Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *J. Geophys. Res.*, 90(6), pp. 11917-11927.
- Dalrymple, R.A. and Martin, P.A., 1992. Perfect boundary condition for parabolic water-wave models, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 437, pp. 41-54.
- Dingemans, M.W., Stive, M.J.F. Kuik, A.J., Radder, A.C. and Booij, N., 1984. Field and laboratory verification of the wave propagation model CREDIZ, *Proc. 19th Coastal Eng. Conf.*, pp. 1178-1191.
- Hedges, T.S., 1976. An empirical modification to linear wave theory, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 61(2), pp. 575-579.
- Kirby, J.T., 1986a. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves, *J. Geophys. Res.*, 91(C1), pp.933-952.
- Kirby, J.T., 1986b. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves, *Coastal Eng.*, 10, pp. 355-378.
- Kirby, J.T., and Dalrymple, R.A., 1983. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography, *J. Fluid Mech.*, 136, pp. 453-466.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1985. Modifications to a propagation model for the combined refraction-diffraction of Stokes waves, shallow water, large angle and breaking wave effects, *Univ. of Florida, Coastal and Oceanographical Eng.*, UFL/COEL-85/001.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1986. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models, *Coastal Eng.*, 19, pp. 545-561.
- Liu, P.L.-F. and Tsay, T.-K., 1984. Refraction-diffraction model for weakly nonlinear water waves, *J. Fluid Mech.*, 141, pp. 265-274.
- Liu, P.L.-F., Yoon, S.B. and Kirby, J.T., 1985. Nonlinear refraction-diffraction of waves in shallow water, *J. Fluid Mech.*, 153, pp. 185-201.
- Maruyama, K. and Kajima, R., 1985. Two dimensional wave calculation method based on unsteady mild slope method, *Rep. Electric Central Res. Inst.*, 384041 (in Japanese).
- McCowan, J., 1891. On the solitary wave, *Philosophical Magazine, 5th Series*, 32(134), pp. 45-48.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water wave propagation, *J. Fluid Mech.*, 95, pp. 159-176.
- Tsay, T.-K. and Liu, P.L.-F., 1982. Numerical solution of water-wave refraction and diffraction problems in parabolic approximation, *J. Geophys. Res.*, 87(C10), pp. 7932-7940.
- Yue, D.K-P. and Mei, C.C., 1980. Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge, *J. Fluid Mech.*, 99, pp. 33-52.
- Watanabe A. and Maruyama, K., 1984. Numerical analysis of combined refraction, diffraction and breaking, *Proc. 31st Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE*, pp. 103-107 (in Japanese).
- 磯部雅彦, 1986. 波向線座標における放物型方程式を用いた屈折・回折の計算法, 第 33回海岸工学講演會論文集, pp. 95-99.
- 平口博丸・丸山康樹, 1986. 斜め入射波に對する放物型方程式の適用性の擴張, 第 33回海岸工学講演會論文集, pp. 114-118.