

## 포물형 파랑모형을 이용한 수중천퇴상 불규칙파의 수치모의 Numerical Simulation of Irregular Waves Over a Shoal Using Parabolic Wave Model

윤성범\* · 이정욱\*\* · 연영진\*\*\* · 최병호\*\*\*\*

Sung Bum Yoon\*, Jung Wook Lee\*\*, Yeong Jin Yeon\*\*\*, and Byung Ho Choi\*\*\*\*

**요 旨** : 불규칙파의 방향분산과 부분쇄파를 정도 높게 고려하기 위해 광각 포물형 근사식을 이용하는 수치모형이 수립되었다. 이 수치모형은 불규칙파를 여러 개의 단일주기의 규칙파로 분해한 다음, 각 성분파를 동시계산하여 중첩함으로써 합성파고를 구한다. 불규칙파의 부분쇄파를 고려하기 위해 합성파고를 이용하여 쇄파에 의한 에너지 감쇠량을 산정한다. 기존의 불규칙파 수리실험 결과와 비교하여 수립된 수치모형의 정확성을 검사한 바, 비쇄파의 경우 규칙파와 불규칙파 모두에 대해 상당한 정확도가 있음이 확인되었으나, 쇄파 발생 시에는 수치모형의 정도가 크게 저하됨을 발견하였으며, 그 이유에 대한 분석을 제시하였다.

**핵심용어** : 불규칙파, 광각 포물형 근사식, 수치모형, 부분쇄파

**Abstract** □ A numerical model based on the wide-angle parabolic approximation equation is developed for the accurate simulation of the directional spreading and partial breaking of irregular waves. This model disintegrates the irregular waves into a series of monochromatic wave components, and the simultaneous calculations are made for each wave component. Then, the computed wave components are superposed to get the wave height of irregular waves. To consider the partial breaking of irregular waves in the computation the amount of energy dissipation due to breaking is estimated using the superposed wave height. The accuracy of the developed model is tested by comparing the numerical results with the experimental measurements reported earlier. In the case of non-breaking waves a considerable accuracy of the model is observed for both regular and irregular waves. On the contrary it is found that the accuracy is significantly degenerated for the case of breaking waves. Some analyses for the accuracy degeneration are presented.

**Keywords** : irregular waves, wide-angle parabolic approximation equation, numerical model, partial breaking

### 1. 서 론

복잡한 지형을 전파하는 파의 굴절과 회절 현상을 해석할 수 있는 환경사방정식이 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이래 파의 전파변형 해석은 비약적인 발전을 이룩하였다. 타원형식인 환경사방정식의 계산효율을 높이기

위해 Radder(1979)는 파의 반사를 무시한 포물형 근사식을 유도하였으며, Kirby and Dalrymple(1983, 1984) 및 Liu and Tsay(1984) 등은 포물형 근사식에 파의 비선형 효과를 도입하였다. 또한 Booij(1981)는 Padé 근사법을 이용하여 포물형 근사식의 전파방향에 대한 제한을 크게 완화한 광각 포물형 근사식을 제시하였다. 이

\*한양대학교 토목·환경공학과(Department of Civil Environmental Engineering, Hanyang University, 1271 Sa 1-Dong, Ansan, Kyunggi 425-791, Korea)

\*\*한국건설기술연구원 수자원환경연구부(Water Resources & Environmental Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Kyunggi 411-712, Korea)

\*\*\*해양수산부 부산항만건설사무소(Pusan Port Construction Office, Ministry of Maritime and Fisheries, Pusan 601-050, Korea)

\*\*\*\*성균관대학교 토목·환경공학과(Department of Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Kyunggi 440-746, Korea)

포물형 근사식은 Kirby(1984)에 의해 흐름에 의한 파의 굴절과 회절현상을 다룰 수 있는 종합적인 모형식으로 발전되었다.

이러한 파랑 모형식은 단일주기의 규칙파를 대상으로 하므로 불규칙한 실제의 해상상태를 단일주기의 유의파로 단순화하고 규칙파 모형을 이용하여 파의 변형을 예측하여 왔다. 그러나 여러 주기와 전파방향의 파들이 합성된 불규칙파의 변형 거동은 규칙파의 경우와 매우 다르다(Goda, 1985). Vincent and Briggs(1989)은 타원형 천퇴 상의 파랑변형 수리실험을 통하여 규칙파와 불규칙파의 굴절과 회절 특성에 큰 차이가 있음을 보였다. Panchang *et al.*(1990)은 불규칙파를 여러 개의 주기와 방향별 성분파로 분리하고, 각 성분파를 Radder(1979)의 규칙파 포물형 모형으로 해석한 다음, 그 결과를 선형중첩하는 방법으로 수치해에 의한 유의파고를 구하였으며, Vincent and Briggs(1989)의 수리실험에 의한 관측치와 비교함으로써 성분파 중첩법의 유효성을 입증하고자 하였다. 그 결과 미소진폭파의 경우 규칙파와 불규칙파 모두에 대해 성분파 중첩법이 정도 높은 결과를 주는 것으로 판명되었다. 또한 Suh and Dalrymple(1993)은 스펙트럼 모형을 이용하여 Vincent and Briggs(1989)의 불규칙파 실험을 재현하고 실측치와 비교하였다. 그러나 Panchang *et al.*(1990) 및 Suh and Dalrymple(1992)의 수치실험은 쇄파효과를 고려하지 못하므로 입사파고가 큰 경우에 대해서는 그 결과를 제시하지 않았다. 국내에서는 유(1993)가 Yoo and O'Connor(1988)의 굴절·회절 쌍곡형 평균파 모형을 이용하여 쇄파를 포함한 불규칙파를 해석하였으며, 더 나아가 유·김(2000)은 조석의 영향을 고려하여 불규칙파를 해석하였다. 또한 정 등(1996)은 타원형 단순파 모형식을 이용하는 성분파 중첩법을 적용하여 영일만에서의 불규칙파를 계산하고 현장 관측치와 비교하였다.

본 연구에서는 광각 포물형 근사식을 이용하여 개별적인 성분파를 해석하고 그 결과를 중첩하는 종래의 방법을 사용하나, 각 성분파에 대한 계산을 동시에 수행하여 성분파의 합성과 정보를 필요로 하는 쇄파를 고려할 수 있는 수치모형을 수립하였다. 수립된 수치모형을 Vincent and Briggs(1989)의 수중 천퇴 상 파랑의 굴절·회절 및 쇄파 수리실험에 적용하여 불규칙파 수치모형의 적용성 및 정밀도 등을 검토하고, 그 적용한계성을 밝히며, 그 이유 등을 분석하여 향후 수치모형 개선의 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 지배방정식

포물형 근사식은 파의 반사를 무시할 수 있는 경우에 사용할 수 있는 모형식으로 Radder(1979)에 의해 처음 제시된 후 많은 연구가 진행되었다. Radder(1979)의 포물형 근사식은 파랑의 주진행방향에 대해 비교적 작은 각으로 진행되는 경우에 대해 유도된 식이므로 진행각이 커지면 오차가 증가하여 적용에 제한을 받는다. 다방향 불규칙파에 대한 수치실험 수행 시에는 입사파의 방향분포가  $\pm 45^\circ$  이상의 광각 범위를 포함하여 일반적인 포물형 근사식으로는 정도 높은 해석이 어렵다. 본 연구에서는 Kirby(1986)에 의해 유도된 다음과 같은 광각 포물형 근사식(wide-angle parabolic approximation equation)을 사용한다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} + i(k_o - \beta_1 k)A + \frac{A}{2C_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\sigma_2}{\omega C_g} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + W_b A = 0 \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 각 성분파의 복소 진폭함수,  $k$ 는 파수,  $k_o$ 는 기준 파수로서 파랑 입사지점에서의 횡방향 평균파수이다.  $\omega$ 는 각진동수,  $C$ 는 전파속도,  $C_g$ 는 군속도이며,  $W_b$ 는 쇄파에 의한 에너지 감쇠계수,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 광각 입사파 진행방향의 정밀도를 개선시키기 위한 각도 보정계수이다.

$$\sigma_1 = i \left( \beta_2 - \beta_3 \frac{k_o}{k} \right) + \beta_3 \left( \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2kC_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} \right) \quad (2a)$$

$$\sigma_2 = \frac{\beta_3}{k} \quad (2b)$$

여기서  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 는 각 성분파의 입사각도에 따라 정해지는 계수로 Kirby(1986)에 제시되어 있다.  $\beta_1 = 1, \beta_2 = -0.5, \beta_3 = 0$ 이면 기존의 협각 포물형 근사식을 얻을 수 있으며,  $\beta_1 = 1, \beta_2 = -0.75, \beta_3 = -0.25$ 이면 Pad근사식으로  $|\theta| < 45^\circ$ 의 범위까지 정확성이 유지된다. 본 연구에서는 후자를 선택하여 수치모형을 구성한다. 그러므로  $|\theta| > 45^\circ$ 의 진행파에 대해서는 약간의 오차가 수반되나, 불규칙파의 특성상  $|\theta| > 45^\circ$ 의 성분파 파고는 상대적으로 작은 것이 일반적이다. 또한 단일주기의 규칙파에 대해서는 Kirby and Dalrymple(1986)의 비선형 분산관계식을 적용하여 비선형성을 고려한다.

관측된 2차원 스펙트럼을 주파수와 파향에 대해 분리

하여 각각의 성분파에 대해 쇄파 변형을 모의하게 되면 성분파들의 진폭이 작아 쇄파되지 않고 진행하게 되므로 쇄파를 적절히 재현하지 못하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 계산영역의 모든 점에 대해 각각의 성분파를 계산하고 계산된 성분파의 에너지를 중첩하여 구한 rms파고( $H_{rms}$ )와 대표주기에 대한 쇄파한계파고( $H_{max}$ )를 구한 다음, 불규칙파의 부분쇄파를 모의할 수 있는 다음의 Battjes and Janssen(1978)의 쇄파모형을 이용하여 불규칙파의 쇄파현상을 재현한다.

$$W_b = \frac{\alpha}{8\pi} Q_b \omega_m H_{max}^2 / E \quad (3)$$

여기서  $\omega_m$ 은 rms파고의 각 주파수,  $\alpha$ 는 조정계수로 일반적으로 1을 사용하며,  $Q_b$ 는 불규칙파의 파군 중 쇄파되는 개별파의 비율,  $H_{max}$ 는 Miche type의 쇄파한계파고,  $E$ 는 파의 전체에너지로서 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1-Q_b}{\ln(Q_b)} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^2 \quad (4)$$

$$H_{max} = \gamma_1 k_m^{-1} \tanh(\gamma_2 k_m h / \gamma_1) \quad (5)$$

$$E = H_{rms}^2 / 8 \quad (6)$$

여기서  $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ 는 각각 쇄파한계 파형경사와 쇄파한계 파고수심비를 조정해 주는 계수로 실험을 통해 각각 1.0과 0.8의 값이 권장된다(DHI, 1996).

단일주기 단일방향의 규칙파에 대해서는 부분쇄파가 발생하지 않으므로  $Q_b$ 를 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} Q_b &= 0, & H_{rms} < H_{max} \\ Q_b &= 1, & H_{rms} \geq H_{max} \end{aligned} \quad (7)$$

규칙파의 경우 한 개의 성분파이므로 식 (7)의  $H_{rms}$ 가  $H$ 이며, 파고  $H$ 가  $H_{max}$ 를 초과하지 않는 경우 쇄파가 발생하지 않는다. 그러나 불규칙파는  $H_{rms}$ 가  $H_{max}$ 를 초과하지 않는 경우에도 불규칙파 중 고파랑 통과 시 쇄파가 발생할 수도 있으며 이를 부분쇄파라 한다.

### 3. 수치기법

본 연구에서는 포물형 근사식의 수치기법 중 가장 광범위하게 사용되는 Crank-Nicolson 기법을 이용하여 유한차분화 하였다(윤·이, 1995). Crank-Nicolson 기법은 음해법의 일종으로 무조건적인 안정성과 높은 정확성을

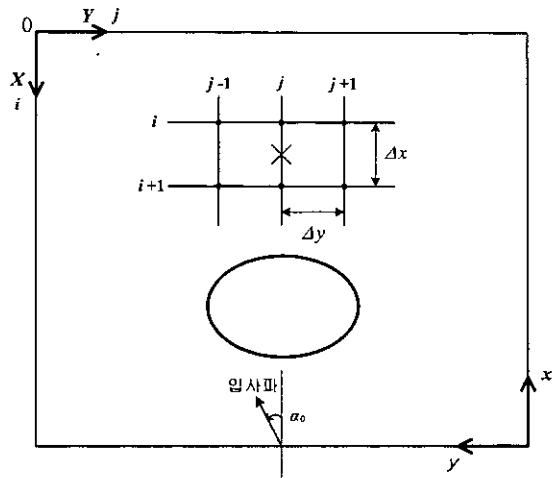


Fig. 1. Coordinate and grid system for computation.

가지며, 3열 주대각 행렬식(tridiagonal matrix)을 주므로 컴퓨터의 기억용량과 계산시간 면에서 매우 경제적이다.

Fig. 1과 같이 파 진행방향으로  $x$ 축을, 그와 직각방향으로  $y$ 축을 각각 설정한 다음, 전 영역에 격자간격  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 의 격자망을 구성한다. 각 격자점마다 수심을 입력시킨다. 입사파는  $y$ 축을 따라 스펙트럼에서 주어진 각 성분파의 파고와 파향으로 주어지며,  $x$ 축과 입사각  $\alpha_0$ 의 각도를 가지고 진행한다.

이와 같이 설정된 좌표계에서 식 (1)의 각 항을 Crank-Nicolson 기법을 이용하여 유한차분화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{A_j^i - A_j^{i+1}}{\Delta x} + \frac{i}{2} [(k_0 - \beta_j k_j^i) A_j^i + (k_0 - \beta_j k_j^{i+1}) A_j^{i+1}] \\ & + \frac{1}{4} \left[ \frac{A_j^i}{C_{g_j^i}^i} + \frac{A_j^{i+1}}{C_{g_j^{i+1}}^i} \right] \frac{C_{g_j^i}^i - C_{g_j^{i+1}}^i}{\Delta x} + \frac{\sigma_{j_1}^{i+1/2}}{2\omega} \\ & \left[ \frac{CC_{g_{j+1/2}^i}^i \left( \frac{A_{j+1}^i - A_j^i}{\Delta y} \right) - CC_{g_{j-1/2}^i}^i \left( \frac{A_j^i - A_{j-1}^i}{\Delta y} \right)}{C_{g_j^i}^i \Delta y} \right. \\ & \left. + \frac{CC_{g_{j+1/2}^i}^i \left( \frac{A_{j+1}^i - A_j^i}{\Delta y} \right) - CC_{g_{j-1/2}^i}^i \left( \frac{A_j^i - A_{j-1}^i}{\Delta y} \right)}{C_{g_j^i}^i \Delta y} \right] \\ & + \frac{1}{2} (W_{b_j^i}^i A_j^i + W_{b_j^{i+1}}^i A_j^{i+1}) + \frac{\sigma_{2_j^i} + \sigma_{2_j^{i+1}}}{\omega (C_{g_j^i}^i + C_{g_j^{i+1}}^i)} \\ & \left[ \frac{CC_{g_{j+1/2}^i}^i \left( \frac{A_{j+1}^i - A_j^i}{\Delta y} \right) - CC_{g_{j-1/2}^i}^i \left( \frac{A_j^i - A_{j-1}^i}{\Delta y} \right)}{\Delta x \Delta y} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{CC_{gj+1/2} \left( \frac{A_j^{i+1} - A_j^{i+1}}{\Delta y} \right) - CC_{gj-1/2} \left( \frac{A_j^{i+1} - A_j^{i+1}}{\Delta y} \right)}{\Delta x \Delta y} = 0 \quad (8)$$

식 (8)의 유한차분식은  $A_j^{i+1}$ 가 주어졌을 때  $A_j^i$ 를 구하는 식으로 전술한 바와 같이 3열 주대각 행렬을 주므로 Thomas algorithm(또는 double sweep algorithm)을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있다. 포물형 근사식은 진폭함수를 대상으로 하므로 비교적 큰 격자를 사용할 수 있으나, 불규칙파 중 단주기파의 정도를 높이기 위해서 5 cm의 작은 격자간격을 사용하였으며, 측면 경계 조건으로는 반사조건을 이용하였다.

#### 4. Vincent and Briggs의 수리실험

Vincent and Briggs(1989)은 미육군공병단 산하 해안공학연구소(CERC)의 다방향조파기(DSWG; directional spectral wave generator)를 사용하여 타원형 수중 천퇴 상의 불규칙파 전파변형에 관한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 해저 지형은 Fig. 2에 보인 바와 같이 Berkhoff(1972)의 것과 유사하며, DSWG의 전면에 위치한 폭 6.10 m, 길이 15.24 m의 지역이 관측영역으로 설정되었다. 수중천퇴의 중심은 (6.10 m, 12.19 m)에 위치하며, 관측지역 내에 9개의 파고 관측 단면 [조파기와 나란한 5개소(①, ②, ③, ④, ⑤)와 직각인 4개소(⑥, ⑦, ⑧, ⑨)]를 설정하여 파고를 측정하였다.

타원형 수중 천퇴는 주축 반경 3.96 m, 종축 반경 3.05 m이며 중앙부의 최대 높이는 0.3048 m이다. 수중 천퇴의 경계는 다음 식으로 정의된다.

$$\left( \frac{X'}{3.05} \right)^2 + \left( \frac{Y'}{3.96} \right)^2 = 1 \quad (9)$$

여기서  $X'$ 과  $Y'$ 은 각각 천퇴 중심을 기준으로 한 국부 좌표계이다. 천퇴의 임의 점에서의 높이  $E_s$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$E_s = 0.9144 - 0.7620 \left\{ 1 - \left( \frac{X'}{3.81} \right)^2 - \left( \frac{Y'}{4.95} \right)^2 \right\}^{0.5} \quad (10)$$

모든 실험은 배경수심  $h$ 를 0.4572 m로 하여 수행되었으며, 천퇴 중심부에서의 수심은 0.1524 m이다. 불규칙파의 조파에는 다음의 방향 스펙트럼  $E(f, \theta)$ 가 이용되었다.

$$E(f, \theta) = S(f)D(\theta) \quad (11)$$

여기서  $f$ 는 주파수(=1/T),  $\theta$ 는 파의 진행방향이며,  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼 밀도함수,  $D(\theta)$ 는 방향분포함수(directional spreading function)이다.

Bouws 등(1985)에 의한 TMA(Texel, MARSEN, ARSLOE data sets) 천해파 스펙트럼  $S(f)$ 가 목표 주파수 스펙트럼으로 선정되었으며, 방향분포 함수로는 wrapped normal function(Borgman, 1984)이 사용되었다. TMA 스펙트럼은 다음 식으로 주어진다.

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left\{ -1.25 \left( \frac{f_m}{f} \right)^4 \right\} + (\ln \gamma) \exp \left[ \frac{-(f-f_m)^2}{2\sigma^2 f_m^2} \right] \phi(f, h) \quad (12)$$

여기서 주파수  $f$ 에 대한 스펙트럼 에너지 밀도  $S(f)$ 는 Phillips 상수  $\alpha$ , 첨두 주파수  $f_m$ , 첨두 에너지 항상인자  $\gamma$ , 스펙트럼 폭 매개변수  $\sigma$ , 수심  $h$ 에 의존된다.  $\phi(f, h)$ 는 수심  $h$ 의 효과를 포함하기 위한 계수로서 Hughes (1984)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\phi = 0.5(\omega_h)^2 \quad \text{for } \omega_h < 1 \quad (13a)$$

$$\phi = 1 - 0.5(2 - \omega_h)^2 \quad \text{for } 1 \leq \omega_h \leq 2 \quad (13b)$$

$$\phi = 1 \quad \text{for } \omega_h > 2 \quad (13c)$$

여기서,

$$\omega_h = 2\pi f \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (14)$$

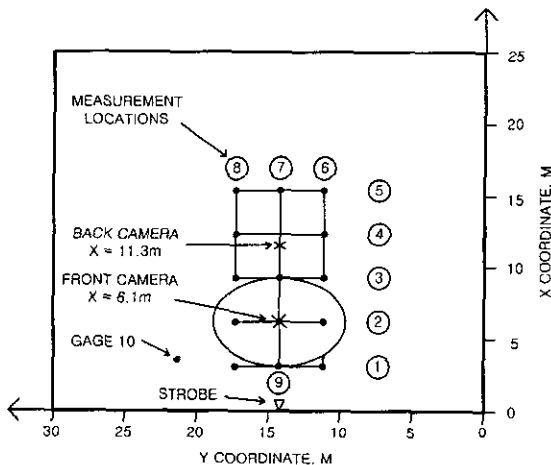


Fig. 2. Location of elliptical shoal and wave height measurement sections (Vincent and Briggs, 1989).

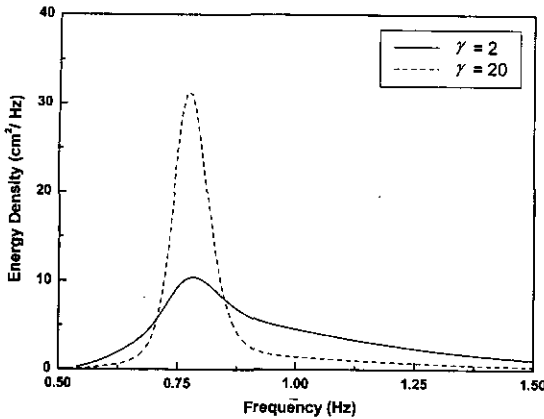


Fig. 3. Target frequency spectrum for V-B experiment (Vincent and Briggs, 1989).

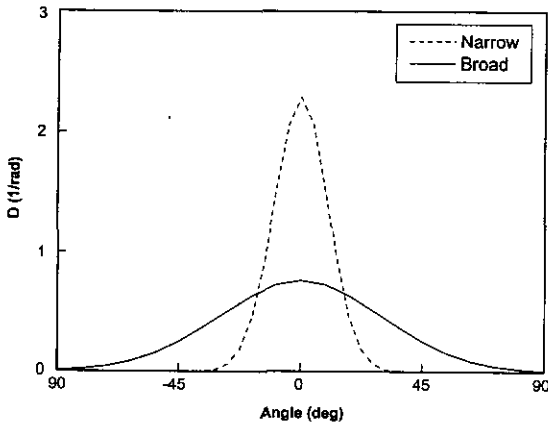


Fig. 4. Directional spreading function for V-B experiment (Vincent and Briggs, 1989).

매개변수  $\gamma$  값으로는 Fig. 3에 제시한 바와 같이 광폭 주파수 스펙트럼을 만들기 위해서는 2가, 그리고 협폭 주파수 스펙트럼의 경우에는 20이 사용되었다. 방향

분산함수  $D(\theta)$ 는 다음 식으로 주어지며, 그 형상은 방향 분산이 좁은 경우( $\sigma_m = 10$ )와 넓은 경우( $\sigma_m = 30$ )에 대해 Fig. 4에 제시한 바와 같다.

$$D(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^J \exp\left[-\frac{(j\sigma_m)^2}{2}\right] \cos j(\theta - \theta_m) \quad (15)$$

여기서  $\theta_m$ (mean wave direction)은  $0^\circ$ 를 사용하며,  $J$ 는 Fourier 급수의 항의 수를 나타낸다. 수치계산에서는  $J$ 의 값으로 20을 사용하였다.

Vincent and Briggs(1989)은 입력파의 방향분산성(directional spreading)에 따라 단일방향(unidirectional) 입사파인 U-series, 좁은 방향분산(narrow-directional)을 가지는 입사파인 N-series 및 넓은 방향분산(broad-directional)을 가지는 입사파인 B-series의 3가지로 나누었으며, 각 3가지 경우에 대해 주기분산성과 비선형성을 변화시켜 실험하고, 기준이 되는 단일주기(monochromatic)의 단일방향(unidirectional) 입사파인 M-series의 결과와 비교함으로써 주기분산성, 방향분산성 및 비선형성이 불규칙파의 굴절과 회절에 미치는 영향을 실험을 통해 분석 하였다.

#### 4.1 비쇄파 실험

먼저 실험도중 쇄파가 전혀 발생되지 않은 미소진폭파의 경우에 대한 실험조건을 정리하면 Table 1과 같다. Fig. 5는 V-B의 실험결과를 Fig. 2의 단면 4를 따라 각 경우의 유의파고를 비교하여 도시한 것으로, 비쇄파의 경우이므로 주기분산성과 방향분산성이 불규칙파의 굴절과 회절에 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있다.

Fig. 5에서 단일주기의 단일방향 입사파인 M2의 경우 타원형 천퇴 후면에서 굴절에 의한 파 에너지의 집중이 가장 강하게 나타났으며, 입력파의 방향분산은 없

Table 1. Input wave condition for non-breaking waves (Vincent and Briggs, 1989)

Input	Case ID	Peak-Period (sec)	Significant Wave Height(cm)	$\alpha$	$\gamma$	$\sigma_m$ (deg)	Freq. Spreading	Remarks
mono-chromatic	M2	1.3	2.54	-	-	-	mono.	non-breaking
uni-directional	U3	1.3	2.54	0.00155	2	0	broad freq.	non-breaking
	U4	1.3	2.54	0.00047	20	0	narrow freq.	non-breaking
narrow-directional	N3	1.3	2.54	0.00155	2	10	broad freq.	non-breaking
	N4	1.3	2.54	0.00047	20	10	narrow freq.	non-breaking
broad-directional	B3	1.3	2.54	0.00155	2	30	broad freq.	non-breaking
	B4	1.3	2.54	0.00047	20	30	narrow freq.	non-breaking

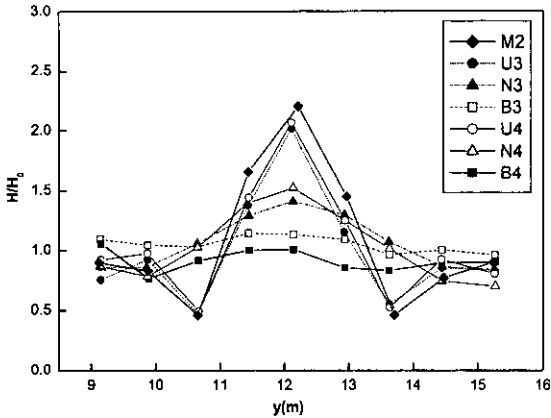


Fig. 5. Measured wave height distribution along section 4 of non-breaking wave experiments (Vincent and Briggs, 1989).

고 주기분산성만 가지는 U3와 U4는 둔덕 위에서 각 성분파의 굴절효과가 각각 상이하여 파 에너지 집중도가 M2보다 약간 감소하였으나 M2의 경우와 큰 차이는 보이지 않는다. 좁은 방향분산성을 가지는 N3와 N4는 파 에너지가 여러 방향으로 분산되어 천퇴로 입사하므로 파 에너지가 집중되는 파교점(caustics, focusing point)이 횡방향으로 어느 정도 분산되어 에너지 집중도가 M2, U3, U4 등에 비해 감소되었다. 넓은 방향분산성을 가지는 B3와 B4는 각 성분파의 파향이 매우 분산되어 천퇴 후면에서의 파에너지 집중이 거의 나타나지 않았다.

주기분산성에 따른 굴절 변화는 M2와 U3 및 U4의 경우를 비교해 본 결과 거의 나타나지 않았으며, 이러한 경향은 N3와 N4 및 B3와 B4의 경우를 비교한 결과에서도 비슷하게 나타났다. 이로부터 불규칙파의 굴절은 파의 주기분산성보다는 방향분산성에 주로 좌우되는 것으로 판단된다.

4.2 쇄파 실험

V-B의 쇄파실험에 사용된 입력파 조건은 Table 2와 같다. Fig. 6은 Table 2의 입력파에 대한 단면 4에서의

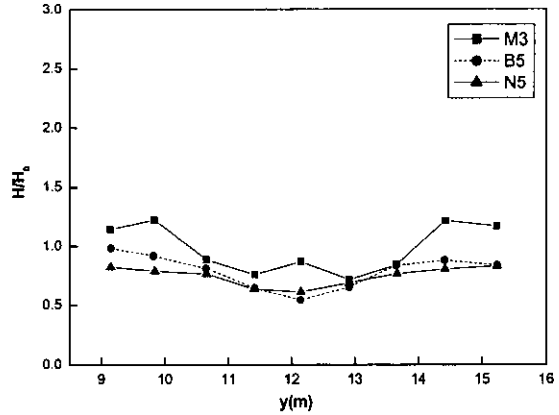


Fig. 6. Measured wave height distribution along section 4 of breaking wave experiments (Vincent and Briggs, 1989).

파고분포를 보여준다.

단일주기의 규칙파인 M3, 좁은 방향분산을 가지는 N5 및 넓은 방향분산을 가지는 B5의 3가지 경우 모두 천퇴의 중심선 부근에서 작은 파고를 나타내고 있는데, 이는 천퇴 상부에서 천수 및 굴절에 의해 파고가 증폭되고 쇄파한계파고를 초과하여 쇄파된 파가 단면 4에 전파된 것으로, 비쇄파 규칙파인 Fig. 5의 M2의 경우와 쇄파영향 하의 M3의 경우를 비교하여 볼 때 격렬한 쇄파가 발생한 것으로 보인다.

5. 수치모형의 적용 및 검토

수치계산을 위해  $0 \leq x \leq 19$  m,  $0 \leq y \leq 25$  m의 영역을 격자간격 0.05 m인 정방형 격자(381×501)로 분할하였으며, 주파수는 V-B실험과 같이 0.52~1.52 Hz의 범위를  $\Delta f = 0.067$  Hz 간격으로 15개의 주파수 성분으로 나누었다. 방향은  $-70^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$  구간을  $\Delta\theta = 6.67^\circ$  간격으로 21개의 방향성분으로 분할하였다. 결과적으로 불규칙파를 총 315개 성분파로 분할하여 계산하였다. 각 성분파의 입사파고는 성분파의 에너지 총합이  $H_{1/16}$ 이 되도록 n 번째 성분파에 대해 다음 식으로 구한다.

Table 2. Input wave condition for breaking waves (Vincent and Briggs, 1989)

Input	Case ID	Peak Period (sec)	Significant Wave Height(cm)	$\alpha$	$\gamma$	$\sigma_m$ (deg)	Freq. Spreading	Remarks
mono.	M3	1.3	13.50	-	-	-	mono.	breaking
narrow-directional	N5	1.3	19.0	0.08650	2	10	broad freq.	breaking
broad-directional	B5	1.3	19.0	0.02620	20	30	narrow freq.	breaking

$$a_n = \sqrt{2E(f_n, \theta_n) \Delta f \Delta \theta} \quad (16)$$

여기서  $f_n$ 과  $\theta_n$ 은 각각  $n$ 번째 성분파의 주파수와 입사 각도를 표시한다.

입사경계 지점에서 입력된 성분파들이 수심의 변화에 의한 파랑 변형을 거쳐 계산 영역의 모든 지점에서 진폭과 방향이 결정되어진다. 파고가 Rayleigh 분포를 따른다고 가정하면 한 격자점( $i, j$ )에서의 유의파고  $H_{1/3}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_{1/3}(i, j) = \sqrt{8 \sum_{n=1}^N |A_{ni,j}|^2} \quad (17)$$

$N$ 은 성분파들의 총 갯수이며  $A_{ni,j}$ 는 격자점( $i, j$ )에서의  $n$ 번째 성분파의 복소진폭을 의미한다.

### 5.1 비선형 실험에의 적용

식 (1)로 주어지는 수치모형의 불규칙파 해석능력을 검토해보기 위해 Table 1에 주어진 입사파 조건을 이용하여 수치계산을 수행하였다. 단일주기 단일방향 입사파인 M2의 경우 Fig. 7에 보인 바와 같이 천퇴 중앙을 지나는 단면 9-7을 따라 V-B의 실측자료(Panchang *et al.*, 1990)와 수치해를 비교한 결과 전반적인 파고분포는 잘 재현되는 것으로 나타났다. 그러나 수치해에서는 천퇴에 의한 파의 반사가 고려되지 않아 천퇴의 전반부( $3\text{ m} < x < 6\text{ m}$ )에서 파고가 약간 작게 나타났다. 입사파의 진폭이 작아 비선형 효과는 크게 나타나지 않았으나 최대 파고점 전단부에서는 비선형모형이 선형모형에 비해 약간 작은 파고를 주며, 최대 파고점 이후에서

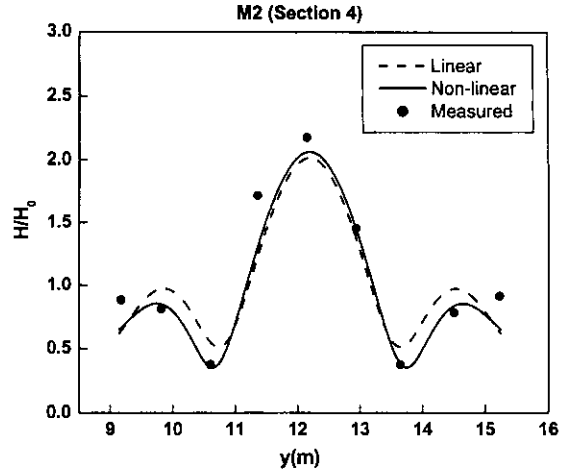


Fig. 8. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for case M2 of V-B experiment.

는 반대현상이 나타난다. 이는 천퇴 상부에서 파고가 증가함에 따라 비선형효과에 의해 파장이 증가하여 굴절 정도가 약해졌기 때문이다. 천퇴 후면의 단면 4를 따른 파고의 횡방향 분포는 Fig. 8에 보인 바와 같이 실측치와 계산치가 상당한 일치를 보이고 있다. Fig. 9는 단면 8을 따른 파고분포의 비교로서 관측치와 실측치가 선형모형에서는 약간의 차이를 보이나 비선형모형에서는 전반적으로 잘 일치하고 있다.

Figs. 10과 11은 입력파가 방향분산성은 없고 주기분산성만 가지는 U3와 U4의 경우에 대해 계산파고와 실측파고를 비교한 것으로, 단일주기 규칙파인 M2의 경

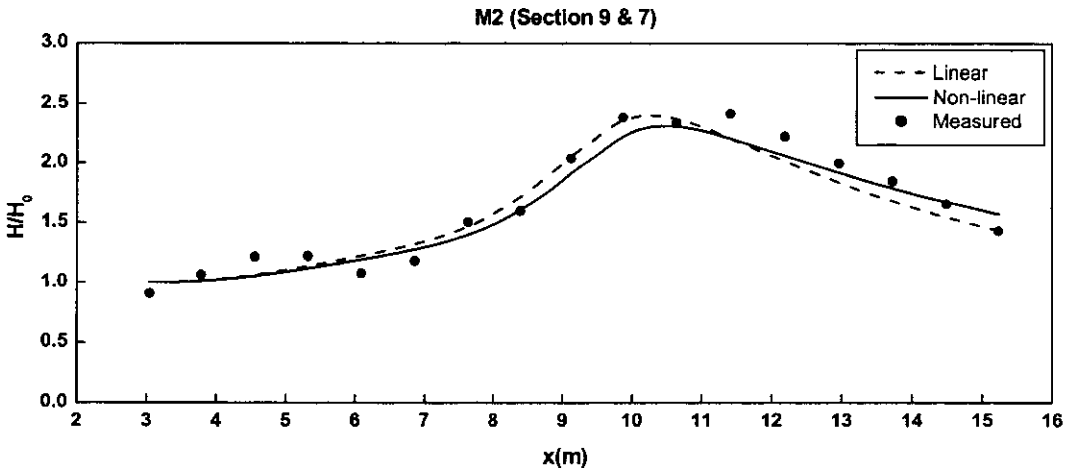


Fig. 7. Comparison of calculated and measured wave height distributions along sections 9 & 7 for case M2 of V-B experiment.

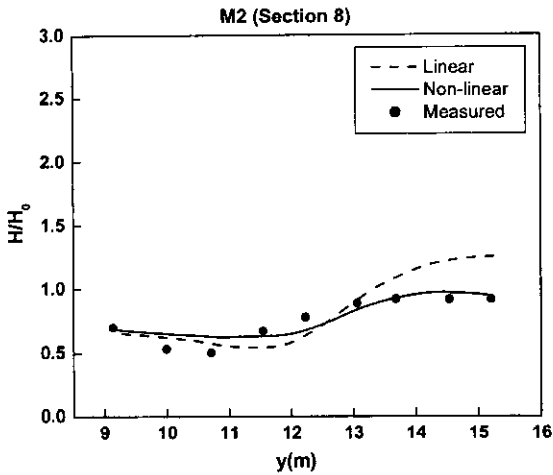


Fig. 9. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 8 for case M2 of V-B experiment.

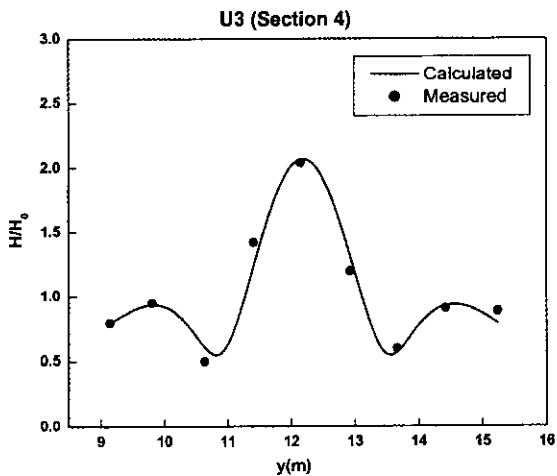


Fig. 10. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for case U3 of V-B experiment.

우와 거의 비슷한 파고분포를 보여 주기분산성이 불규칙파의 변형에 미치는 영향은 V-B의 실험조건에서는 미약한 것으로 판단된다. 그러나 수심분포가 완만하고 넓은 지역에 걸쳐 수심변화가 있는 실제 해역에서는 주기분산성도 파의 굴절·회절에 큰 영향을 줄 수 있을 것이다.

Fig. 12는 방향분산성이 약간 존재하는 경우인 N3(넓은 주기분산)와 N4(좁은 주기분산)에 대해 파고를 비교한 것으로 입력파의 방향분산성에 의해 천퇴 중앙부 후

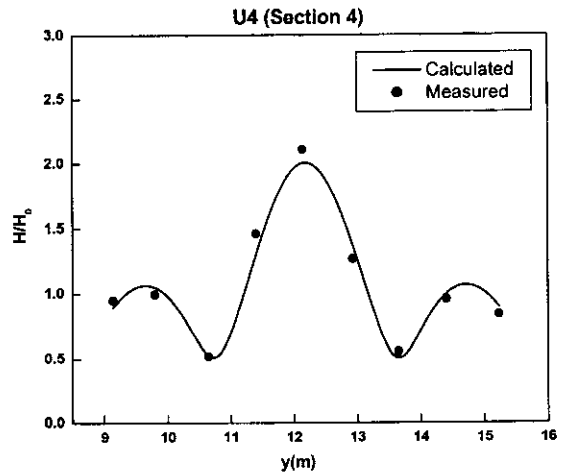


Fig. 11. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for case U4 of V-B experiment.

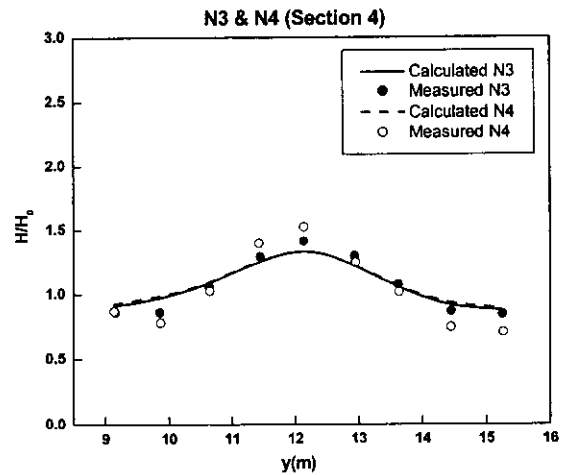


Fig. 12. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for cases N3 & N4 of V-B experiment.

면에서의 파에너지 집중이 방향분산성이 없는 M2, U3 및 U4의 경우에 비해 현저히 약화되었다. 실측치에서는 좁은 주기분산대를 가지는 N4의 경우가 넓은 주기분산대를 가지는 N3의 경우보다 에너지 집중이 크게 나타났다, 계산치에서는 이러한 주기분산성의 효과가 거의 나타나지 않았다.

Fig. 13은 입력파의 방향분산이 넓은 범위에 걸쳐 있는 B3(넓은 주기분산)와 B4(좁은 주기분산)에 대한 파고분포를 나타낸 것으로, 주기분산 효과는 거의 보이지 않고, 강한 방향분산성에 의해 각 성분파의 에너지 집



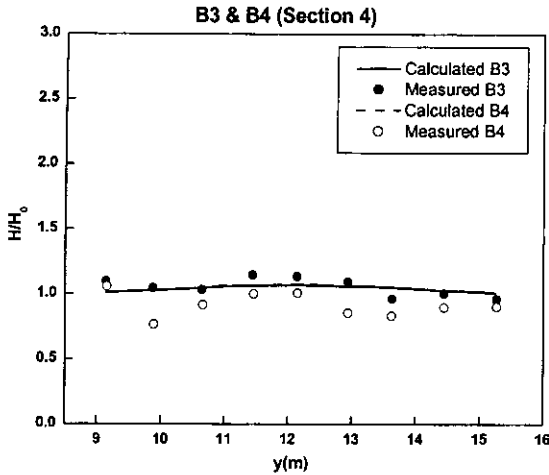


Fig. 13. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for cases B3 & B4 of V-B experiment.

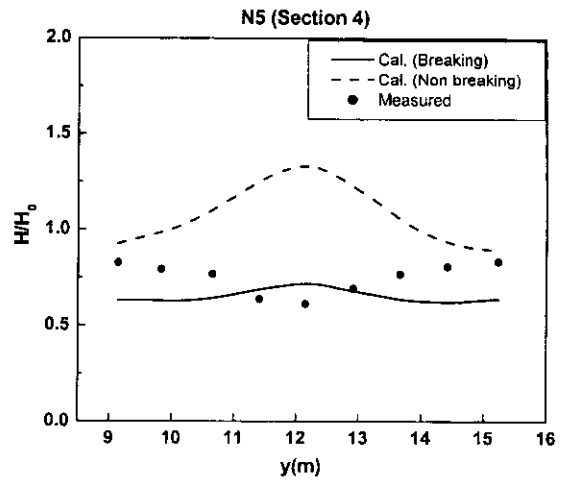


Fig. 15. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for case N5 of V-B experiment.

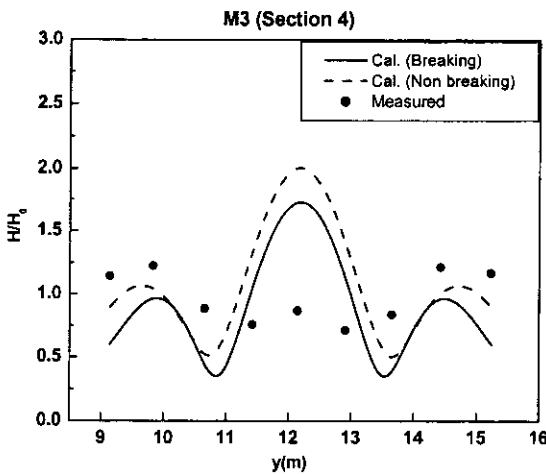


Fig. 14. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for case M3 of V-B experiment.

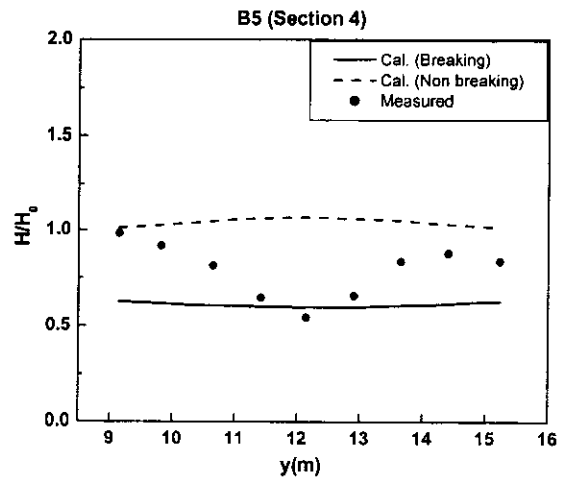


Fig. 16. Comparison of calculated and measured wave height distributions along section 4 for case B5 of V-B experiment.

중위치가 횡방향으로 고르게 분포되어 마치 천퇴가 없는 평탄한 해역을 전파하는 것처럼 파고가 거의 일정하다.

### 5.2 쇄파 실험에의 적용

본 연구의 선형 수치모형에 Battjes and Janssen(1978)의 쇄파모형을 이용하여 V-B의 쇄파 실험을 수치모의하고 계산치와 실측치의 파고를 Figs. 14~16에 비교하여 제시하였다. 쇄파를 무시하고 계산한 파고분포를 같이 제시하여 수치모형에서 고려한 쇄파효과를 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였다. Battjes and Janssen(1978)의

쇄파모형은 1차원 수조의 실험결과를 이용하여 그 타당성이 입증되었으나, 2차원 전파 시에도 적용이 가능한지는 아직 밝혀지지 않았다.

Fig. 14는 규칙파인 M3의 경우에 대해 계산파고와 실측파고를 단면 4를 따라 비교·도시한 것으로 수치모형에 의한 파고가 천퇴의 중심부 배후에서 매우 크게 나타났으며, 천퇴의 양쪽 끝 배후에서는 반대로 실측치가 더 크게 나타나 수치모형에 사용된 쇄파모형에 대한 신뢰성이 매우 낮게 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 15 및 Fig. 16에 보인 바와 같이 불규칙파인 N5와 B5

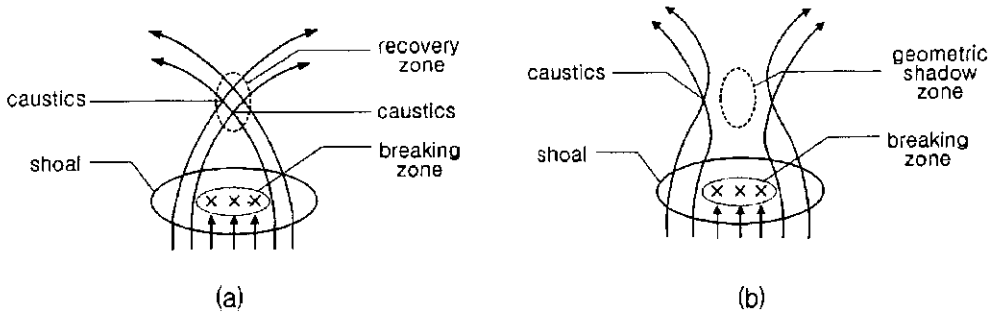


Fig. 17. Schematic representation of wave breaking and refraction pattern over a shoal; (a) formation of numerical recovery zone (b) formation of physical geometric shadow zone.

의 경우에 대해서도 그대로 나타났다. 특히 Fig. 15에 보인 N5의 경우에는 실측치와 계산치가 서로 정반대의 경향을 보이고 있다. 또한 수치계산 결과에서 쇄파를 고려한 경우와 이를 무시한 경우를 비교해 보면 전반적인 파고분포의 경향은 서로 비슷한 상태에서 쇄파를 고려한 경우의 파고가 약간 감소했을 뿐이다.

### 6. 쇄파모형의 부정확성에 대한 분석

쇄파효과를 고려한 수치해를 살펴보면 Fig. 17(a)에 보인 바와 같이 천퇴 정상부의 얕은 수심에 의해 발생된 쇄파현상이 천퇴 배후지역으로 진행하면서 수심이 다시 증가하여 쇄파에 의한 에너지 감쇠가 미약해지고, 천퇴 좌우의 날개 쪽으로 입사한 파랑이 굴절되어 단면 4 부근에서 파고점(caustics)을 형성하여 회복대(recovery zone)가 발달되므로 파고가 다시 증가한다. 포물형 모형에서는 파고점에서 회절현상이 고려되므로 파고가 무한대로 커지지는 않는다. 이러한 현상은 전 등(2001)의 환경사 방정식을 이용한 천퇴에서의 쇄파 수치모의에서도 나타난 바와 같이 실제 물리현상이 아닌 수치적인 현상이며 수치실험에 의한 관측치에서는 나타나지 않는다.

이러한 분석을 토대로 천퇴상에서 굴절, 회절 및 쇄파가 복합적으로 발생하는 경우의 파향선 추적에 의한 굴절도를 개념적으로 그려보면 Fig. 17(b)와 같이 나타낼 수 있다. 쇄파는 물 입자의 속도가 파의 전파속도보다 커서 파봉의 물 덩어리가 파봉 전면의 수면으로 젖(jet)을 형성하며 떨어지는 현상임을 상기하면, 수표면에서 발생한 파 진행방향의 강한 흐름이 천퇴의 양 날개 쪽에서 굴절되어 들어오는 파를 다시 외곽으로 굴절시켜, 천퇴 중앙부의 배후에는 회복대 대신 지형음영대(geometric shadow zone)가 발생하여 파고가 작아지

고, 반대로 파향선이 교차하는 양쪽의 파고점 부근에서는 파고가 증가하는 것으로 추론이 가능하다.

그러므로 본 연구에서 수립된 포물형 수치모형을 비롯한 기존의 각종 수치모형에서 공통적으로 나타나는 수치적 파 회복대를 억제시키기 위해 실제 물리현상에 기초한 새로운 개념의 지배방정식 개발이 필수적이다.

### 7. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 광각 포물형 근사식을 이용하고 각 성분파를 동시에 계산하여 다주기·다방향 불규칙파의 전파변형과 쇄파변형을 수치모의하기 위한 포물형 파랑 모형을 수립하였다. 수립된 수치모형을 이용하여 타원형 천퇴 위를 전파하는 규칙파와 불규칙파의 전파변형을 수치모의하고 기존의 수리실험에 의한 관측치와 비교함으로써 수치모형의 정확성과 적용성을 검토하였으며, 성분파 계산법에 따른 불규칙파 해석의 필요성을 확인하였다.

불규칙파 전파 변형실험을 통해 불규칙파 전파 특성이 단일주기·단일방향의 규칙파와 크게 다르며, 이 주된 차이가 방향분산성에 의해 발생하고 주기분산 효과는 상대적으로 미약함을 알 수 있었다. 또한 이 실험을 통해 본 연구의 포물형 근사 수치모형으로도 불규칙파를 정도 높게 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

불규칙파 쇄파변형 실험을 통해 기존의 쇄파모형은 여러 연구에서 밝혀진 바와 같이 적용성에 제한이 있는 것으로 나타났다. 이는 1방향 진행파에 대해 개발된 쇄파모형을 2차원 굴절·회절 문제에 적용하여 파의 진행 방향이 고려되지 못한 이유도 있겠으나, 쇄파 수치모형의 부정확성은 주로 쇄파대 배후에서 실제 물리현상과 관련이 없는 수치적인 파 회복대가 발생하기 때문인 것으로 판단되며, 실제 물리현상을 보다 충실히 설

명하기 위한 쇄파대와 그 배후지역에서의 새로운 파 굴절 역학구조가 제안되었다.

향후 체계적인 3차원 수리실험을 실시하여 천퇴 상 파의 쇄파변형에 관한 역학구조를 정확히 이해하고, 이를 고려할 수 있는 새로운 지배방정식을 개발하고, 이에 기초한 수치모형을 수립할 예정이다.

### 참고문헌

- 유동훈, 1993. 천해에서 불규칙파의 변이, 한국해양·해양공학회지, **5**(3): 212-220.
- 유동훈, 김지웅, 2000. 경기만 조석 조건에서의 파랑변이, 한국해양·해양공학회지, **17**(2): 87-95.
- 윤성범, 이종인, 1995. 비선형 분산효과가 파의 굴절 및 회절에 미치는 영향, 한양대학교 환경과학논문집, **16**: 83-94
- 전인석, 황연호, 오병철, 심재설, 2001. 독도 해역의 파랑전파 특성, 대한토목학회논문집, **21**(1-B): 63-73.
- 정신택, 채장원, 이동영, 1996. 영일만의 불규칙파 모형, 한국해양·해양공학회지, **8**(2): 146-150.
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and setup due to breaking of random waves, *Proc. 16th Intl. Conf. on Coastal Engineering*, Hamburg, pp. 569-587.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. of the 13th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 471-490.
- Booij, N., 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current, Report No. 81-1, *Communication on Hydraulics*, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Borgman, L.E., 1984. Directional spectrum estimation for the  $S_w$  gages, Technical Report, Coastal Engrg. Res. Center, Vicksburg, p. 104.
- Bouws, E., Güther, H., Rosenthal, W. and Vincent, C.L., 1985. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water, part I - Spectral form, *J. Geophysical Res.*, **90**(C1), pp. 975-986.
- DHI, 1996. *MIKE 21 User Guide and Reference Manual*, Danish Hydraulic Institute.
- Goda, Y., 1985. *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Univ. of Tokyo Press, Japan.
- Huges, S.A., 1984. *The TMA shallow-water spectrum description and applications*, Tech. Report CERC-84-7, Coastal Engrg. Res. Center, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, *J. Geophysical Res.*, **89**, pp. 745-747.
- Kirby, J.T., 1986. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves, *J. Geophysical Res.*, **91**(C1), pp. 933-952.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1983. A parabolic equation for combined refraction and diffraction of Stokes waves by mildly varying topography, *J. Fluid Mech.*, **136**, pp. 453-466.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1984. Verification of a parabolic equation for propagation of weakly-nonlinear waves, *Coastal Engrg.*, **8**, pp. 219-232.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1986. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models, *Coastal Engineering*, **9**, pp. 78-93.
- Liu, P.L.-F. and Tsay, T.-K., 1984. Refraction-diffraction model for weakly nonlinear water waves, *J. Fluid Mech.*, **141**, pp. 265-274.
- Panchang, V.G., Wei, G., Pearce, B.R. and Briggs, M.J., 1990. Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **116**(3), pp. 324-340.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation, *J. Fluid Mech.*, **95**, pp. 159-176.
- Suh, K.D. and Dalrymple, R.A., 1993. Application of angular spectrum model to simulation of irregular wave propagation, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **119**(5), pp. 505-520.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J., 1989. Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **115**(2), pp. 269-284.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1988. Diffraction of waves in caustics, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **114**(6), pp. 715-731.