

해안구조물 전면의 Stem Wave 특성에 관한 연구

박효봉 · 윤한삼 · 류청로
부경대학교 해양공학과

Effects of Stem Wave on the Vertical Breakwater

HYO-BONG PARK AND HAN-SAM YOON AND CHEONG-RO RYU
Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Stem wave 연파, Vertical wall 직립벽, Parabolic mild slope equation 포물형 완경사 방정식, Nonlinear combined refraction-diffraction model 비선형 굴절-회절 모델, Monochromatic wave 단일성분파, Height ratio 파고비, Incident angle 입사각

ABSTRACT: Based on mild slope equation and parabolic approximation, the forward diffraction of monochromatic waves by a straight breakwater are studied numerically. The characteristics and effects of stem wave along breakwater and the relations between the stem wave and incident wave angle are discussed.

1. 서 론

호안, 안벽, 케이슨 방파제 등과 같은 직립형 구조물 전면에서의 파고분포는 구조물상에 파력으로 작용하여 항내 정온도, 구조물의 안정성 및 표사의 이동특성에 영향을 주므로 이를 정확하게 이해·해석하는 것이 중요하다. 직립형 구조물 전면에서 파고분포를 해석하는데 중요한 인자로는 심해파의 파고 및 파장 그리고 직립벽의 반사율을 들 수 있다. 입사파고와 반사파고의 비로 정의되는 반사율은 일반적으로 1 을 최대값으로 가지며, 복잡한 형태를 가진 자연해안과 항만의 경우에는 입사파, 반사파 그리고 다른 지점에서 반사된 파가 중첩되어 2 이상의 값을 갖기도 한다.

또한, 구조물의 벽면에 파랑의 입사각에 따라 반사율에 상당한 차이를 갖기도 하는데, 특히 구조물에 거의 평행하게 입사하는 경우에는 단순 기하학적인 반사현상과는 다르게 된다(Fig. 1). 이는 Perroud(1957)가 연직벽을 대상으로 고립파의 반사에 관한 수리실험을 수행하는 과정에서 입사각이 45° 보다 작은 경우에 존재함을 밝혔으며, 이를 stem wave(연파, 聯波)라고 하였다. Stem wave는 입사각(α , 구조물과 입사파랑이 이루는 각도)이 $\alpha_i > 45^\circ$ 일 때 직립벽에서 입사파와 반사파는 동일한 각도로 중첩되지만, $20^\circ < \alpha_i < 45^\circ$ 범위내에 입사각이 존재할 때는 직립벽에 수직방향으로 연파의 파봉이 존재하며, 이 연파는 벽으로부터 일정한 거리를 두고 입사파와 반사파의 파정이 만나게 되며, 입사각이 더욱 줄어들어 α_i 가 20° 보다 작게 되면 반사파는 사라지게 되고 입사파와 연파만이 존재한다(Fig. 1).

Stem wave는 구조물을 따라 진행하면서 stem wave 파고(h_s), stem wave 폭(B)이 증가하면서 일정한 값에 수렴하게 되는 특성이 있으며, 이 stem wave는 항내에서 발생하게 되면 항내 정

온도 및 안벽에 계류된 선박 등에 큰 영향을 줄 것으로 생각된다.

이와 같은 stem wave의 특성을 해석하기 위해 많은 연구가 수행되어져 왔다. Melville(1980)은 고립파를 Nielsen(1962), Berger and Kohlhas(1976)은 정현파를 대상으로 하여 stem wave의 특성에 관한 실험을 수행하여 유사한 결과를 얻었다. Yue and Mei(1980)은 일정수심해역에 존재하는 썰기형 구조물을 대상으로 포물선형 근사 비선형 Schrödinger 방정식을 사용하여 2차 스톱스파의 전진회절을 수치적으로 해석하였다. Kirby and Dalrymple(1983), 그리고 Liu and Yoon(1986)은 수심효과를 고려한 포물선형 모델을 개발하여 불연속적인 수심을 따라 stem wave가 형성된다는 것을 확인했다. 또한 Yoon and Liu(1989)은 고립파를 대상으로 포물선형 근사한 부시네스크 방정식을 이용 수치 계산하였다.

따라서 본 연구에서는 입사하는 파랑과 구조물이 이루는 각 즉, 입사각의 변화에 따른 stem wave의 특성을 Kirby and Dalrymple(1994)의 비선형 회절-굴절모델인 REF/DIF 1을 사용하여 해석해보고자 한다.

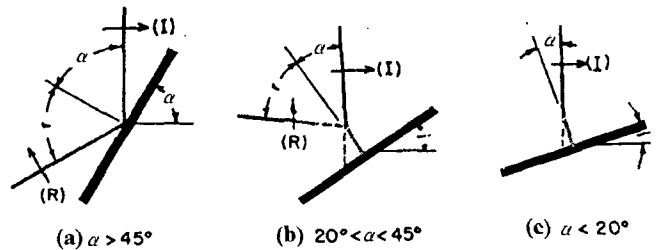


Fig. 1 Reflection patterns of solitary wave(after Perroud, 1957)

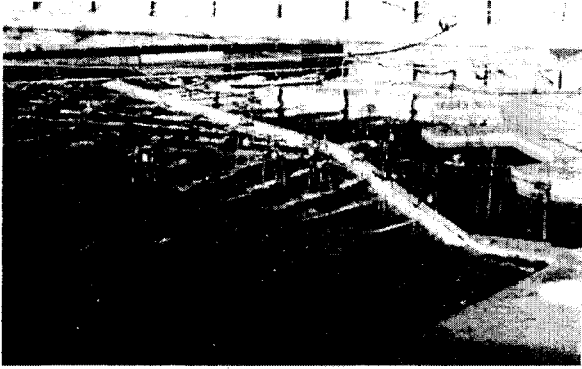


Fig. 2 Snap shot of instantaneous wave surface profile along the vertical breakwater(제주지방해양수산청, 1999)

2. 수치모델

2.1 지배방정식

Berkhoff(1972)는 연직 가중적분 모델에 의해 3차원적 현상을 간단하게 계산할 수 있음을 언급했고, 다음의 회절·굴절을 고려한 환경사 방정식을 제안하였다.

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (1)$$

여기서 $C = \sqrt{(g/k) \tanh kh}$ 는 파속, $C_g = C(1 + 2kh / \sinh 2kh) / 2$ 는 군속도, $h(x, y)$ 은 국지적 수심, g 는 중력가속도이다. 국지적 파수 $k(x, y)$ 는 선형 분산관계식인 식 (2)에서와 같이 각 주파수 σ 와 수심 h 의 함수이다.

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

식 (1)은 타원형 환경사 방정식으로 경계치 문제로 분류되며, 경계조건 처리에 의한 수치계산상의 효율성이 떨어진다는 한계점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 좁은 해역에서만 적용이 가능하여 실제 해역의 적용이 불가능하다. 따라서, Radder(1979)은 경계조건 처리 및 수치계산상의 난점을 해결하기 위해 포물선형 근사식을 제안했다. 포물선형 근사식은 방정식의 형태상으로 초기치 문제로 넓은 지역에 대한 파랑추정이 가능하나, 지형이 복잡하거나 공간적인 파고 분포가 큰 경우에는 오차가 크게 되는 경향이 있다. 특히 수치 계산시 파랑진행방향과 좌표축이 일치하지 않고 큰 각도를 이루게 되면 해의 정확도가 급격히 저하된다는 한계점을 지니고 있다.

이와 같은 한계의 오차를 줄이기 위한 방법으로 Tsay and Liu(1982), Isobe(1986)는 파랑의 주진행방향에 맞추어 계산격자를 정하거나 Kirby(1988)는 비직교좌표계를 채용하였으며, Dalrymple et al.(1989)은 Fourier 변환기법을 사용하여 편미분 방정식인 선형 환경사 방정식을 상미분 방정식으로 바꾸어 해를 구하였다. 그리고 Booij(1981)와 Kirby(1986)는 파랑의 주진행방향에 대해 비교적 큰 각을 갖는 파랑에도 적용이 가능한 광각 포물형 근사식을 제안하였다.

본 연구에서는 최소최대 원리(Minimax principle)를 사용하여 파랑의 주 진행방향에 대해 최대 $\pm 70^\circ$ 까지 적용 가능한 Kirby(1986)의 광각 포물선형 방정식을 기본방정식으로 하였다.

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

$$\beta = \frac{k_x}{k^2} + \frac{(k(p - U^2))_x}{2k^2(p - U^2)}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1, \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1, \Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k}$$

여기서 x 는 파랑의 주 진행방향을 나타내며, $p = CC_g$, \bar{k} 는 기준파수로 y 축에 따른 평균파수로 생각할 수 있다. U , V 는 x , y 방향의 평균유속, ω 는 감쇄계수이다. 계수 a_0 , a_1 , b_1 의 값은 Kirby(1986)의 최소최대 근사에 의해 $a_0 = 0.994733$, $a_1 = -0.890065$, $b_1 = -0.451641$ 으로 주어진다. 그리고 비선형항을 포함한 D 는 다음과 같다.

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

2.2 수치차분 및 경계조건

본 연구의 지배방정식인 포물선형 편미분 방정식은 유한 차분식으로 편리하게 풀어진다. 따라서 Fig. 3을 기본좌표계로 하여 지배방정식을 Crank-Nicholson scheme으로 차분했다.

x 는 파의 진행방향, y 는 연안과 평행한 방향이다. 연구대상영역을 Δx 와 Δy 격자크기로 나누어 복소진폭 $A(x, y)$ 를 구한다. 진폭 $A(i, j)$ 의 값은 식 (4)와 같이 전진차분으로 구한다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A_{i+1,j} - A_{i,j}}{\Delta x} \quad (4)$$

본 모델의 지배방정식인 식 (3)은 x 방향으로 전진차분, y 방향으로 중앙차분하여 계산을 수행한다. 주어진 측면경계조건에 의해 $A_{i+1,j}$ 는 다음의 방정식을 통해 계산한다.

$$\begin{aligned} & aA_{i+1,j+1} + bA_{i+1,j} + cA_{i+1,j-1} \\ & = dA_{i,j+1} + eA_{i,j} + fA_{i,j-1} \quad (5) \end{aligned}$$

여기서, 계수 a , b , c , d , e , f 는 변수로서, 복소수와 비선형항이다. 식 (5)에서 우변항은 전 계산스텝에서 계산한 진폭값이고, $j=1$ 과 n 에서의 초기 경계조건으로부터 알 수 있는 값이며, 좌변의 진폭항은 미지값이다. 비선형항은 $A_{i,j}$ 값을 사용

하여 1차 근사로 얻은 값을 사용하여 방정식을 $A_{i+1,j}$ 에 관해 풀어 비선형성을 정확하게 계산하고자 했다(Kirby and Dalrymple, 1983a). 초기경계조건은 $i=1$ 에서 일정수심으로 하여 입사파 조건을 지정해 주었으며, 대상영역 측면 ($j=1$ and n)에서는 완전반사조건과 개방경계조건을 선택적으로 사용할 수 있는데 본 연구에서는 측면경계를 개방경계로 처리하였다.

Conditions and parameters		Values
Wave	Height	0.0464 m
	Period	1.0 sec
Basin	Domain	$25 \times 25 \text{ m}^2$
	Grid dimensions	100×100
	Grid spacing	$\Delta x = \Delta y = 0.25 \text{ m}$
Depth	0.45 ~ 0.1 m	
Bottom Slope	1/50	

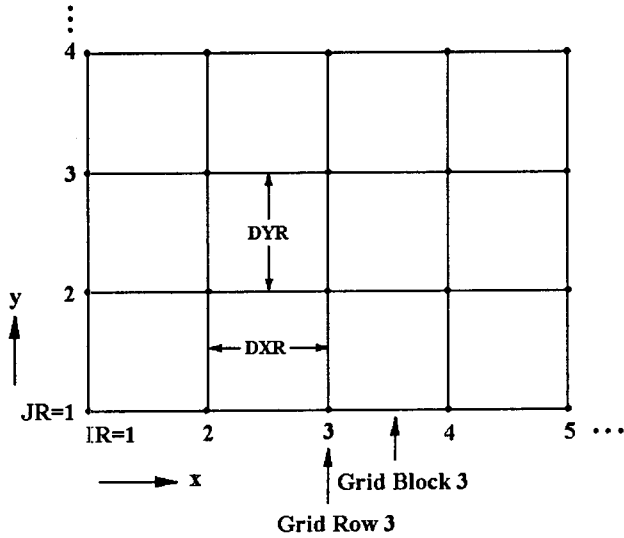


Fig. 3 Definition of coordinate system

2.3 수치모델의 적용성

본 연구에 사용된 모델의 적용성을 검토하기 위해 Berkhoff et al.(1982)의 타원형 천퇴를 대상으로 수치실험하였다. 입사파랑 조건 및 수심조건은 Table 1와 Fig. 4에서처럼 Berkhoff et al.(1982)의 수치실험조건과 동일하게 수행하였다.

Fig. 5은 3-D 파고분포를 계산한 결과를 나타낸 것이고, Fig. 6은 Fig. 4에서의 5, 7단면의 파고비를 Berkhoff et al.(1982)의 실험치와 비교한 것이다. 본 모델의 의한 결과에 의하면 타원형 천퇴 배후에는 회절과 굴절에 의해 파랑이 증폭되며 파향선 추적법으로 해석하면 파향선이 교차하는 결과를 얻게 된다.

Fig. 6에서 (a)는 실험치와 수치 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있으나, (b)의 결과는 천퇴의 배후부분에서 수치결과가 진폭비가 2이상으로 실험치에 비해 높은 값으로 나타났다.

Table 1 Input conditions of the numerical calculation for submerged elliptic shoal

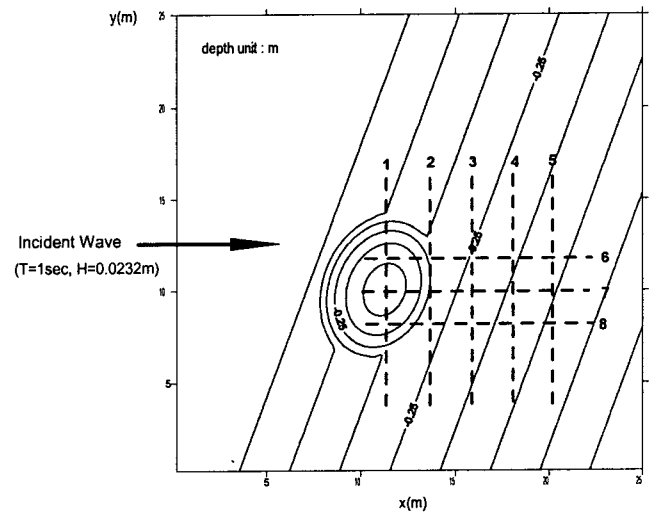


Fig. 4 Bottom contours, computational domain and definition of transect for the comparison with experimental data of Berkhoff et al.(1982)

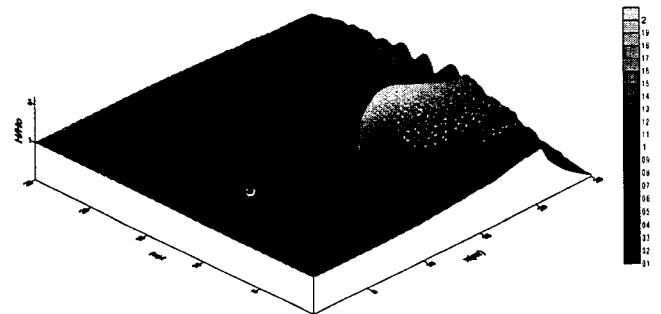


Fig. 5 Wave height distribution for elliptic shoal by the numerical results

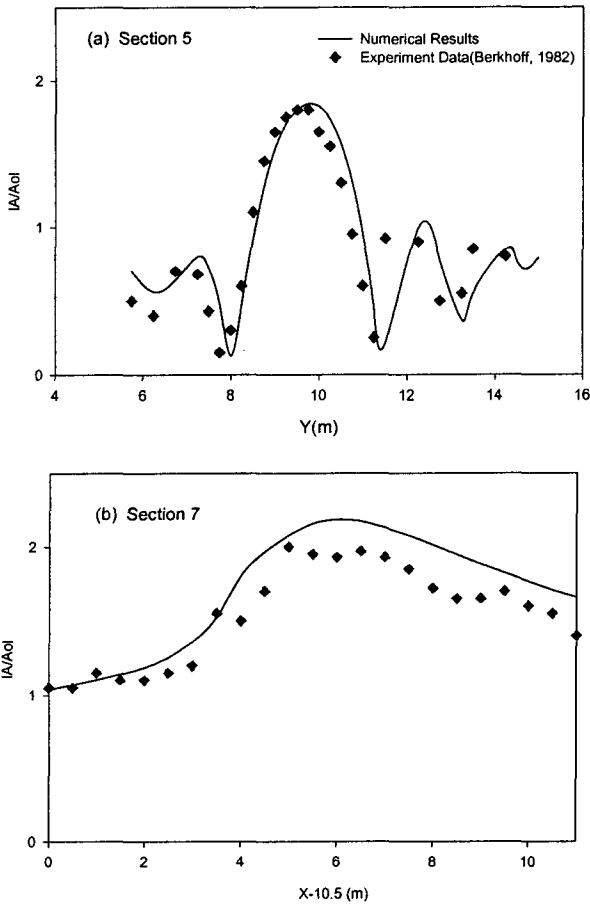


Fig. 6 Comparison of wave amplitude ratios by the numerical(Nonlinear combined refraction-diffraction models) and experimental results for elliptic shoal

3. 직립벽 구조물 전면의 Stem Wave

3.1 수치실험조건 및 방법

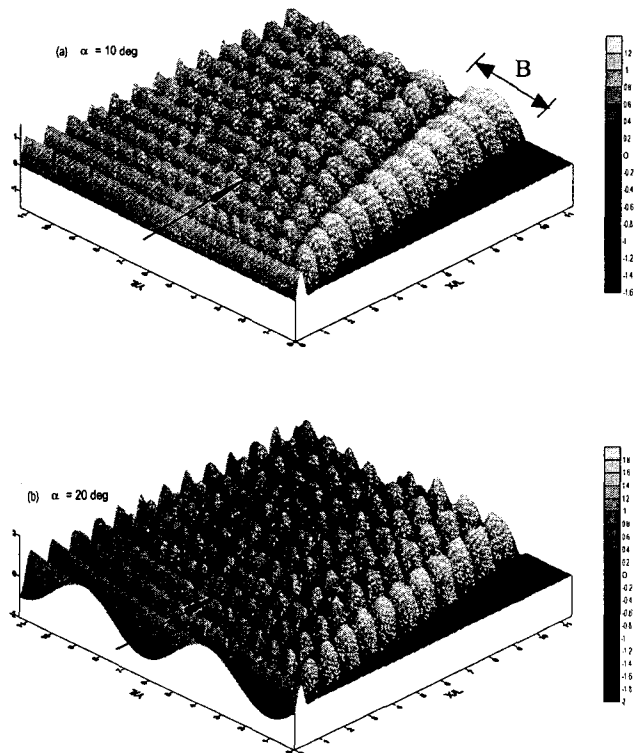
본 연구에서는 직립벽 구조물 전면에서의 파랑변형중의 한 형태인 stem wave를 입사각의 변화에 따른 파고분포를 알아보고자 하는 것이다. 따라서 $h/L=0.2$ 인 해역에서 $T=7\text{ sec}$, $H=3\text{ m}$ 인 규칙파를 대상으로 6개의 입사각(10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 45°)에 대해 수치실험을 수행하였다. 대상영역은 격자간격을 5 m로 하여 200×200 격자로 구성하고, 직립벽 구조물은 파랑의 주 진행방향에 대해 6개의 입사각을 가질 경우에 대해 각각 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental conditions of the numerical model

Conditions and parameters		Values
Wave	Height	3 m
	Period	7 sec
	Direction	10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 45°
		- Monochromatic wave - Non-breaking condition
Basin	Domain	$1 \times 1 \text{ km}^2$
	Grid dimension	200×200
	Grid spacing	$\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$
	Depth	15 m
Boundary	Initial	Incident wave cond.
	Lateral	Open boundary cond.

3.2 입사각에 따른 Stem wave의 특성

본 연구에서는 입사하는 파랑이 구조물과 이루는 각이 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 45° 인 경우에 대해 실험한 결과의 일부를 Fig. 7~8에서 소개하고 있다. Fig. 7은 입사각이 10° , 20° , 30° 에 해당하는 3-D 자유수면 분포도를 나타낸 것이다. 입사각이 증가함에 따라 파고비가 증가함을 알 수 있다. 그리고 (a), (b)의 결과에서는 구조물을 직각으로 만나는 파봉의 폭(B)가 증가하는 반면, (c)의 결과에서는 $x/L=2$ 부터 B가 일정함을 알 수 있다.



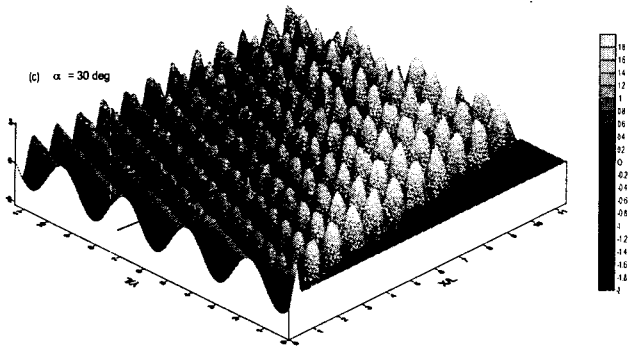


Fig. 7 Instantaneous free-surface distribution for $T=7$ sec, $H=3$ m; (a) $\alpha=10^\circ$, (b) $\alpha=20^\circ$, (c) $\alpha=30^\circ$

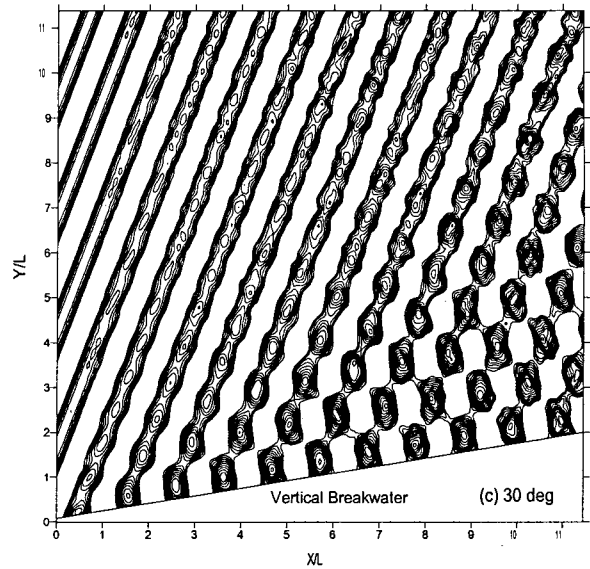


Fig. 8 Contour of instantaneous free-surface elevation for $T=7$ sec, $H=3$ m. The contour increment is 0.2 m.

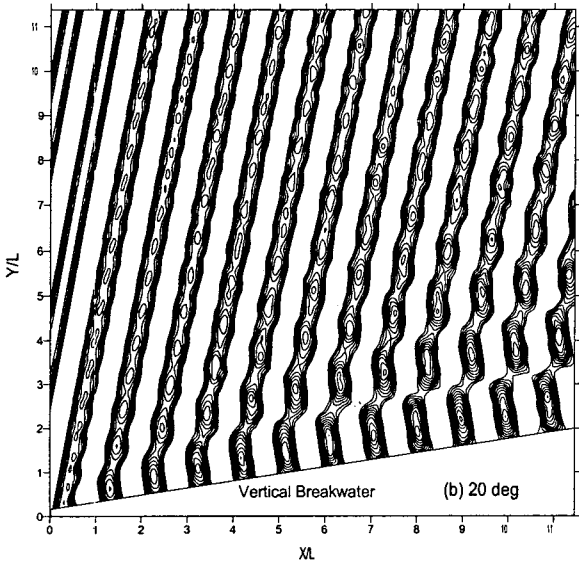
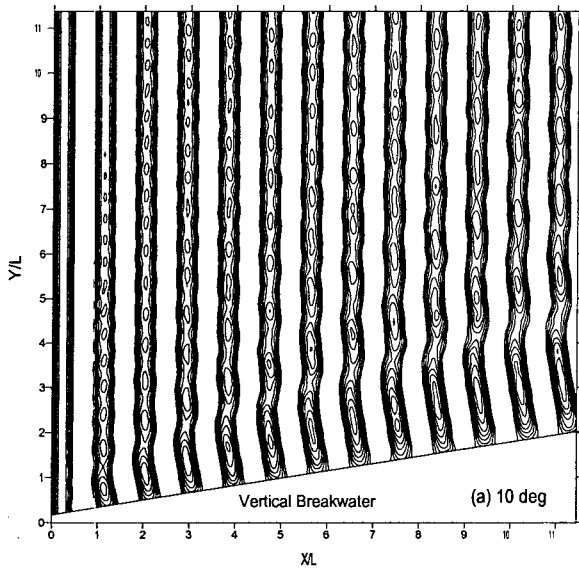


Fig. 9는 구조물 전면에서 stem wave의 파고비를 입사각 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 45° 에 대해 단면적으로 나타낸 것이다. 여기서 입사각이 $10^\circ \sim 30^\circ$ 까지는 stem wave가 잘 재현되고 있음을 알 수 있으나, 45° 인 경우에는 수치계산의 경계상의 문제로 인해 파고비가 2이상의 값으로 발산함을 알 수 있다. 본 수치실험의 경우에는 수심의 영향, 구조물과 해저사면의 마찰력을 고려하지 않았기 때문에 파고비가 실제 현상에 비해 크게 나타나고 있는 것으로 판단된다.

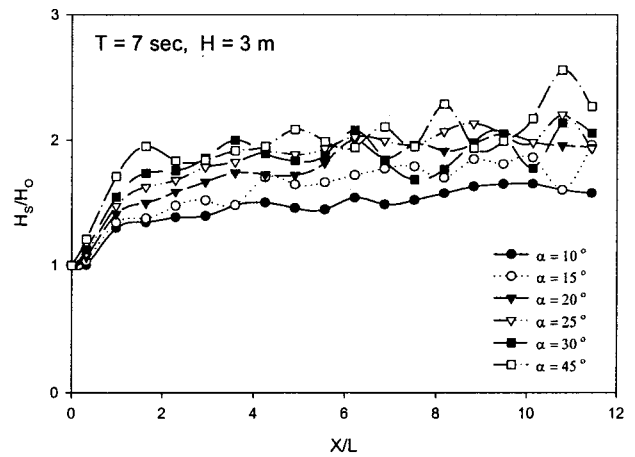


Fig. 9 Normalized maximum wave height along vertical wall for different incident wave angles

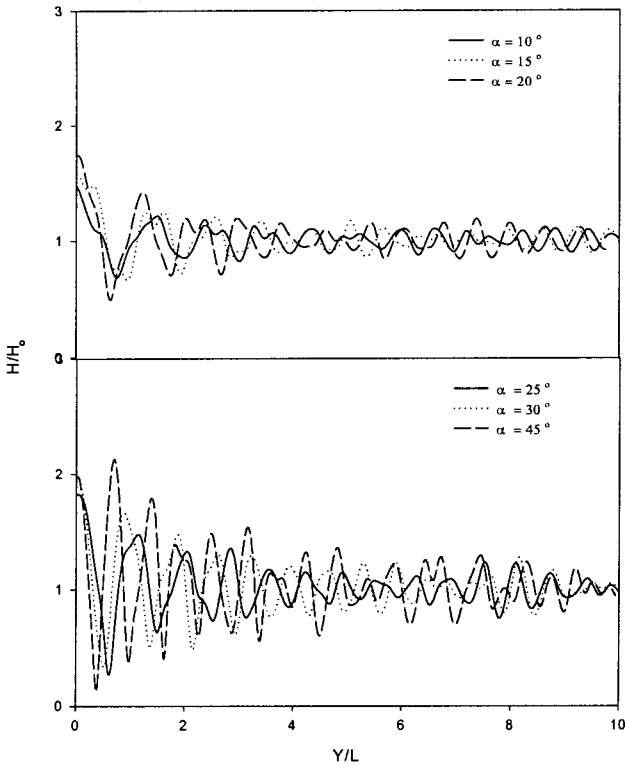


Fig. 10 Normalized wave height ratio perpendicular to vertical wall ($x/L=5.23$) for different incident wave angles

Fig. 10은 $x/L=5.23$ 인 위치에서 구조물의 법선 방향을 따라 파고비를 나타낸 결과를 나타낸 것으로 구조물 위치($x=0$)에서 최대파고가 나타나며, 구조물에서 멀어짐에 따라 파고비가 1로 수렴하는 것을 알 수 있다. 구조물상에서 입사각이 커짐에 따라 파고비는 증가하고, stem wave 폭인 B 는 감소함을 알 수 있다.

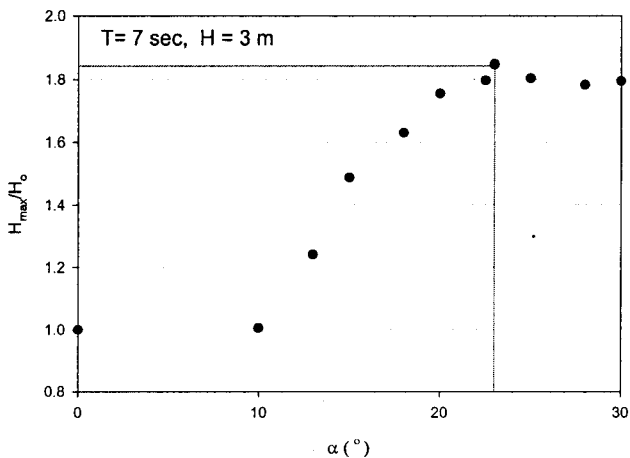


Fig. 11 Normalized maximum wave height along for different

incident wave angles

Fig. 11은 각각의 입사각에 대한 구조물 전면에서의 최대파고비를 나타낸 것으로 stem wave가 존재하는 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ 의 입사각 범위 내에서 $\alpha = 23^\circ$ 일 때 최대값을 갖는다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 회절-굴절 모델을 이용하여 직립형 구조물 전면에서의 입사각에 따른 stem wave특성에 대한 수치실험을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 입사파랑조건 하에 stem wave 파고는 입사각이 커질수록 전체파고분포가 커지며, 구조물 전면에서 구조물의 연행방향, 법선방향의 최대파고분포를 살펴본 결과 구조물의 벽면과 접한 부분에서 최대파고가 발생함을 알 수 있었다. 위의 결과는 Nielsen(1962), Liu and Yoon(1986)의 연구결과와 동일하며, 포물선형 환경사 방정식을 지배방정식으로 하는 REF/DIF로도 stem wave가 재현됨을 알 수 있었다.

(2) Stem wave가 존재하는 입사각 범위인 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ 중에서 본 실험결과 $\alpha = 23^\circ$ 일 때 최대파고가 되는 것으로 나타났으며, 최대파고비는 약 1.85배에 해당한다.

본 연구수행을 통해 실제해역의 파랑은 불규칙적이고 방향분산적인 특성을 가지고 있으므로, 규칙파가 아닌 불규칙파·방향분산파랑을 대상으로 한 구조물 전면에서의 stem wave 특성에 대한 추가 연구가 필요함이 요구되어진다.

참 고 문 헌

Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A.(1984). "Wave diffraction due to areas of energy dissipation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 110, pp 67~79.

Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A.(1984). "Verification of a parabolic equation for propagation of weakly-nonlinear waves", Coastal Engineering, Vol. 8, pp 219~232.

Berger, Udo and Kohlhasse, Sören(1976). "Mach-reflection as a diffraction problem", Proc. 25th Conf. Coastal Eng., ASCE, 1, pp 796~814.

Mei, C. C.(1983). "The applied dynamics of ocean surface waves", John Wiley & Sons, New York, p 740.

Wiegel, R. L.(1964). "Oceanographical Engineering", Prentice Hall, p 532.

Yoon, S. B. and Liu, P. L.-F.(1989). "Stem waves along breakwater", J. Waterway Port Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 115, No. 5, pp 635~648.