

해안구조물 전면의 Stem Wave 특성에 관한 연구

박효봉* · 윤한삼* · 류청로*
*부경대학교 해양공학과

A Study on the Characteristics of the Stem Wave in front of the Coastal Structure

HYO-BONG PARK*, HAN-SAM YOON* AND CHEONG-RO RYU*
*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Stem Wave 연파, Vertical Structure 직립구조물, Nonlinear Combined Refraction-Diffraction model 비선형 굴절-회절모형, Numerical Experiments 수치실험, Stem Wave Height Ratio 연파 파고비, Oblique Incident Wave 경사입사파

ABSTRACT: Numerical experiments have been conducted using the nonlinear combined refraction-diffraction model, in order to analyze the generation characteristics of stem wave, which is formed by the interaction between vertical structure and the oblique incident waves. The results of stem wave are discussed through the stem wave height distribution along/normal vertical structure, under the wide range of incident wave conditions-wave heights, periods, depths, and angles. Under the same wave height and period, the larger the incident wave angle, the higher the stem wave heights. According to the results of wave height distribution, in front of vertical structure, the maximum of stem wave heights occurs in the location bordering the vertical wall. Furthermore, the most significant result is that stem waves occur under the incident angles between 0° and 30°, and the stem wave height ratio has the maximum value, which is approximately 1.85 times the incident wave height when the incident wave angle becomes 23°.

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 해석·평가하는 것이 중요하다. 일반적으로 직립형 구조물 전면의 파고분포 해석시 중요한 인자로는 입사파의 파고, 주기, 입사각, 직립벽의 반사율을 들 수 있다.

구조물 전면에서 파랑의 거동은 입사각에 따라 차이를 보이는데, 특히 구조물에 거의 평행하게 파랑이 입사하는 경우에는 단순 기하학적인 반사현상으로는 해석하기 어려우며, 이때 구조물과 평행하게 진행되는 파랑이 발견된다(Fig. 1). 이러한 파랑을 stem wave라고 하며 음향학 및 광학의 충격파(shock wave) 메카니즘과 유사하여 Mach-reflection 이라고도 한다. 이는 Perroud(1957)가 연직벽을 대상으로 고파의 반사에 관한 수치 실험 과정에서 얻은 결과를 바탕으로 Weigel(1964)가 입사각이 45°보다 작은 경우에 대하여 stem wave의 발생메카니즘을 제안한 바 있다.

Stem wave에 대한 연구로서 Berger et al.(1976)은 직립벽 전면에서 stem wave의 파고변화를 방파제 선단의 우각부에 의해

발생된 전진회절의 파고변화와 연관시켜 연구하였고, Yue and Mei(1980)은 일정수심해역에 존재하는 썩기형 구조물을 대상으로 포물선형 근사 비선형 Schrödinger 방정식을 사용하여 2차 Stokes파의 전진회절을 수치적으로 해석하였다. 그리고 Liu and Yoon(1986)은 수심효과를 고려한 포물선형 모델을 개발하여 불연속적인 수심을 따라 stem wave가 형성된다는 것을 확인하였으며, Yoon and Liu(1989)은 고파를 대상으로 포물선형 근사한 부시네스크 방정식을 이용해 수치 계산하였다.

최근 Hajime et al.(2002)은 불규칙 경사입사파랑에 따른 직립벽 전면에서의 stem wave의 수리 및 수치실험연구를 통해 입사각이 증가하거나 비선형성이 감소함에 따라 유의stem wave파

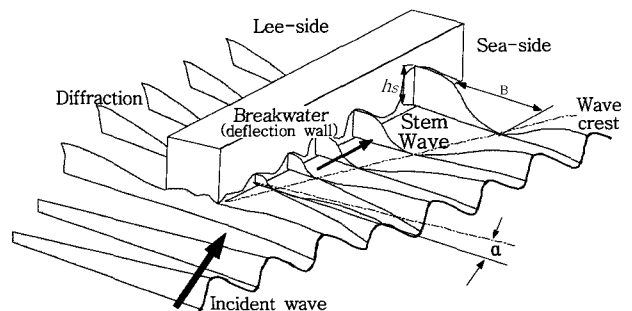


Fig. 1 Schematic representation and definition of stem wave

제1저자 박효봉 연락처: 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6222 hyobong0107@hotmail.net

고는 커지게 됨을 밝혀내고, 이를 stokes 또는 cnoidal wave에서도 동일하게 발생한다고 보고하였으며, 비선형이 강한 쇄파가 발생할 경우에는 stem wave의 감소가 나타난다고 밝혔다.

그러나 이러한 연구 결과에도 불구하고, 실제 구조물 설계시 요구되어지는 구조물 전면에서의 최대파고 산정에 있어 stem wave가 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 연행방향, 법선방향의 stem wave 파고 분포를 입사파고, 주기, 수심 그리고 입사각의 변화에 대해 계산하여 stem wave의 발생메카니즘을 파악함과 아울러, 해안구조물 설계시 stem wave와 같은 비선형성이 강한 2차적 외력조건을 고려하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. Stem Wave의 역학적 특성

Stem wave 현상은 Fig. 1에서와 같이 구조물 배후면 회절(backward diffraction) 현상과 아울러 구조물 전면 회절(forward diffraction) 현상으로 취급되어 연파(聯波)로 불리어지며, 그림에서 α 는 입사파랑과 구조물이 이루는 각도, h_s 는 stem wave height, B는 구조물 벽면의 법선방향으로 형성되는 stem wave의 wave crest width(파봉폭, B)를 나타낸다.

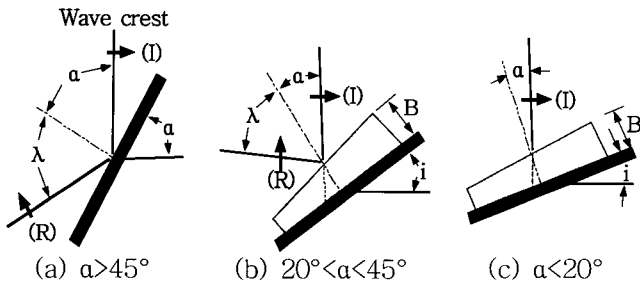


Fig. 2 Reflection patterns of solitary wave(Perroud, 1957) and stem wave

그 특성으로는 Fig. 2에서 stem wave가 (a) 입사각(α , 구조물과 입사파랑이 이루는 각도)이 $\alpha_i > 45^\circ$ 일 때 직립벽에서 입사파와 반사파는 동일한 각도로 중첩되어 전형적인 반사파턴만 나타나 stem wave는 생성되지 않지만, (b) 입사각이 $20^\circ < \alpha < 45^\circ$ 범위 일 경우 직립벽에 수직방향으로 연파의 파봉이 존재하고, 이 stem wave는 벽으로부터 일정한 거리를 두고 입사파와 반사파의 파정이 만나게 된다. 또한 (c) 입사각이 더욱 줄어들어 $\alpha < 20^\circ$ 가 되면 반사파는 사라지게 되고 입사파와 stem wave만이 존재한다. 또한 stem wave는 구조물을 따라 진행하면서 h_s 와 B가 증가하면서 일정한 값에 수렴하게 되는 특성이 있다.

이러한 stem wave는 구조물 전면의 파고를 증가시켜 파압의 증대, 쳐올림 높이의 상승, 월파랑의 증가를 불러올 뿐만 아니라, 구조물 기저부(toe부)의 표사이동을 야기시켜 구조물 블록의 이동 및 안정성에 영향을 미친다. 또한 항내 발생시 항내 정온도 및 안벽에 계류된 선박 동요 등 수위상승으로 인한 해안재해를 유발한다는 점에서 해양공학적으로 중요하다.

3. Stem Wave에 대한 수치실험

3.1 지배방정식

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

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

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 분산관계식으로 각주파수 σ 와 수심 h 의 함수이다. 그러나 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.

이에 Radder(1979)는 경계조건 처리 및 수치계산상의 난점을 해결하기 위해 포물선형 근사식을 제안했다. 포물선형 근사식은 방정식의 형태상 초기치 문제로 넓은 지역에 대한 파랑추정이 가능하나, 지형이 복잡하거나 공간적인 파고 분포가 큰 경우에는 오차가 커지는 경향이 있다. 특히 수치 계산시 파랑진행방향과 좌표축이 일치하지 않고 큰 각도를 이룰 경우 해의 정확도가 저하된다는 한계점을 지니고 있다.

본 연구에서는 Minimax principle를 이용하여 파랑의 주진행 방향에 대해 최대 $\pm 45^\circ$ 까지 적용 가능한 Kirby(1986)의 광각 포물선형 방정식인 식(2)를 기본방정식으로 하였다(Kirby and Dalrymple, 1986). 식(2)는 파-흐름 상호작용을 고려할 수 있는 확장식이지만 본 연구에서는 파랑의 효과만을 고려하여 x, y 방향의 평균유속인 U, V 는 zero로 고려하였다.

$$\begin{aligned} & (C_g + U)A_x - 2\Delta_1 VA_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U)A \\ & + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left(\frac{C_g + U}{\sigma} \right)_x - \Delta_1 \sigma \left(\frac{V}{\sigma} \right)_y \right\} A + i\Delta' \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y \right]_y \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x \right]_x + \left[UV \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y \right]_y \right\} + \frac{i\sigma k^2}{2} D|A|^2 A \quad (2) \\ & + \frac{\omega}{2} A + \frac{-b_1}{k} \left\{ \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{xx} + 2i \left(\sigma V \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right)_x \right\} \\ & + b_1 \beta \left\{ 2i\omega U \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x + 2i\sigma V \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y - 2UV \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{xy} \right. \\ & \left. + \left[(p - V^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right]_{yy} \right\} - \frac{i}{k} b_1 (\omega V)_y + 3(\omega U)_x \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x \\ & - \Delta_2 \left\{ \omega U \left(\frac{A}{\sigma} \right)_x + \frac{1}{2} \omega U_x \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} + ik\omega U (a_0 - 1) \left(\frac{A}{\sigma} \right) = 0 \\ & \beta = \frac{k_x}{k^2} + \frac{(k(p - U^2))_x}{2k^2(p - U^2)} \\ & \Delta_1 = a_1 - b_1, \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1, \quad \Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \end{aligned}$$

여기서 x 는 파랑의 주 진행방향을 나타내며, $p = CC_g$, \bar{k} 는 기준파수로 y 축에 따른 평균파수이다. ω 는 감쇄계수, Kirby(1986)의 최소최대근사에 의해 계수 $a_0 = 0.994733$,

$a_1 = -0.890065$, $b_1 = -0.451641$ 이다. 그리고 비선형항을 포함한 분산관계식 D 는 다음과 같다.

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2\tanh^2 kh)}{8\sinh^4 kh} \quad (3)$$

또한 기본방정식은 직각좌표계를 기본좌표계로 하여 Crank-Nicholson scheme으로 유한차분하였다. 파랑진행방향으로는 전진차분을, 연안과 평행한 방향으로는 중앙차분하여 계산을 수행하였다. 측면경계조건에 의해 $A_{i+1,j}$ 는 다음의 식 (4)로 계산하며, 전진차분을 적용하였다.

$$\begin{aligned} aA_{i+1,j+1} + bA_{i+1,j} + cA_{i+1,j-1} \\ = dA_{i,j+1} + eA_{i,j} + fA_{i,j-1} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 계수 a, b, c, d, e, f 는 변수로서, 복소수와 비선형항이다. 식 (4)에서 우변항은 전 계산스텝에서 계산한 진폭값으로서, $j=1$ 과 n 에서의 초기 경계조건으로부터 기지값이고, 좌변의 진폭항은 미지값이다. 비선형항은 $A_{i,j}$ 값을 사용하여 1차 근사로 얻은 값을 사용하여 방정식을 $A_{i+1,j}$ 에 관해 풀어 비선형성을 계산하였다(Kirby et al., 1983).

3.2 수치모델 적용성 검토

구축된 모델의 적용성을 검토하기 위해 Fig. 3와 같이 Berkhoff et al.(1982)의 수중 타원형 천퇴(elliptic shoal)를 대상으로 수치실험하였다. 입사파랑조건 및 수치실험수조의 조건은 Table 1과 같다. Fig. 3에서 단면 1~8은 실험치와 계산치의 파고비를 비교하기 위한 것으로 본 연구에서는 단면 5와 7의 계산 결과만을 제시하였다.

Fig. 4은 타원형 천퇴를 대상으로 3-D 파고분포를 계산한 결과를 나타낸 것으로, 타원형 천퇴 배후에는 회절과 굴절에 의해 파랑이 증폭되며 파향선 추적법 해석시 파향선 교차를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5은 단면 5, 7에서의 계산파고비를 Berkhoff et al.(1982)의 실험치와 비교한 것으로, 단면별 파고비의 비교결과 (a)는 실험치와 계산치가 비교적 잘 일치하고 있으며, (b)의 결과는 천퇴 배후영역에서 천퇴로부터 멀어질수록 계산결과가 실험치에 비해 약간 높은 값을 보이는 하나 대체로 일치하는 경향을 나타내었다. 이상의 결과를 통해 본 수치모형은 일반적인 해저지형을 갖는 파랑장에서 발생하는 굴절, 회절, 천수 등 파랑변형현상을 잘 재현할 수 있는 모형으로 판단된다.

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

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

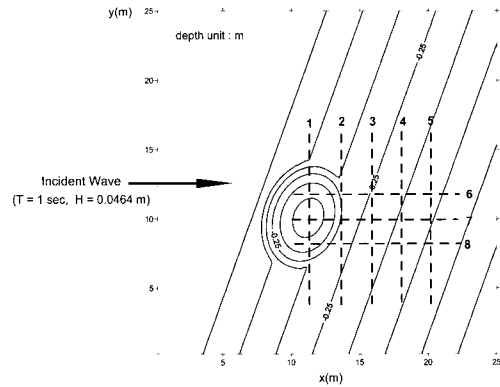


Fig. 3 Bottom contours, computational domain and definition of transect for the comparison with experimental data of Berkhoff et al.(1982)

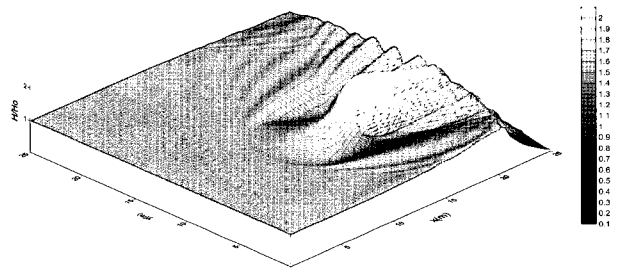


Fig. 4 Wave height distribution for elliptic shoal by the numerical results

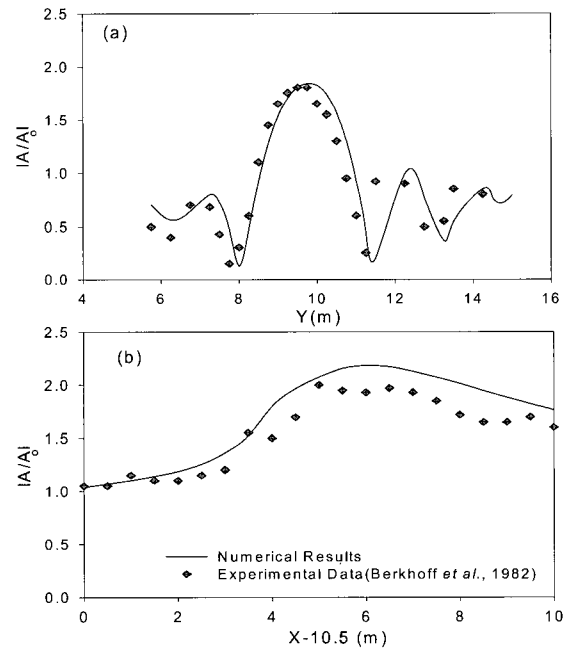


Fig. 5 Comparison of wave amplitude ratios by the numerical and experimental results for elliptic shoal; (a)section4, (b)section7

3.3 직립구조물 적용 조건 및 방법

직립벽 구조물 전면에서의 파랑변형중 회절현상인 stem wave를 입사파의 파고, 주기, 입사각, 구조물 전면의 수심의 변화에 따른 특성을 살펴보기 위해 Table 2에 나타낸 바와 같이 격자간격 5m, 정방형 200×200격자로 수치구조를 생성하고 규칙 파를 대상으로 수치실험을 수행하였다.

실험방법은 파고 H=3m, 주기 T=7sec, 입사각 α=20°, 설치수심 h=15.0m인 실험상태를 기본실험조건으로 설정하고, 각각의 외력인자를 변화시켜가면서 직립벽 구조물 전면에서의 stem wave 특성을 고찰하였다. 또한 파고는 Mische의 쇄파한계식을 고려하여 비쇄파조건을 만족하도록 하였으며, 구조물의 높이는 무월파조건(non- overtopping condition), 구조물 경계조건은 구조물의 법선방향으로 복소수 진폭함수의 변화가 없다고 가정하는 조건(완전반사조건)이며, 방파제의 길이는 입사파장(L)의 12배 이상, 외해경계조건은 x축에서 일정수심 및 입사파랑조건, 측면경계에서는 복소수 진폭함수의 국소적인 진폭의 변화는 없고 단지 위상의 변화만 고려하는 개방경계조건을 설정하였다.

Table 2 Experimental conditions of the numerical model

Conditions and parameters		Values
Wave	Height(H ₀)	3.0m
	Period(T)	7.0sec
	Direction(α)	5~45°
	- Monochromatic wave - Non-breaking condition	
Basin	Domain	1×1km ²
	Grid dimension	200×200
	Grid spacing	Δx = Δy = 5m
	Depth(h)	15.0m
Boundary	Initial	Incident wave cond.
	Lateral	Open boundary cond.

4. 직립구조물 전면의 Stem Wave

직립구조물 전면에서의 stem wave의 발생메카니즘을 살펴보기 위해 입사파랑조건과 구조물 배치조건에 해당하는 입사파랑의 파고, 주기, 입사각, 구조물의 설치수심을 외력인자로 설정하여 각각의 개별 외력인자 변동에 따른 stem wave의 민감도 분석을 수행하였다. 실험결과는 공간분포를 살펴보기 위해 구조물의 연행방향(x'/L) 및 법선방향(y'/L)에 대한 stem wave height(h_s)를 제시하였고, 외력인자인 상대수심(h/L), 파고수심비(H₀/h), 입사파 주기(T/(h/g)^{1/2}), 파랑 입사각(α)의 각각의 변동에 따른 최대 stem wave height(h_{s,max})의 변동특성을 살펴보았다. 여기서, x', y'는 좌표축 x, y를 입사각 α로 회전 변환한 좌표이고, 법선방향에서의 stem wave 분포는 x'/L = 10.45의 임의 위치에서의 수치계산결과를 바탕으로 논의하였다.

4.1 Stem wave의 공간분포 특성

Stem wave의 공간분포를 살펴보기 위해 파랑의 입사각에 따

라 3-D 자유수면 분포도를 나타낸 것이 Fig. 6인데, 입사각은 10°, 20°, 30°에 해당한다. 동일한 입사파랑(파고, 주기 동일)이 입사하는 경우 입사각 변화에 따라 구조물 전면에서의 수면변화가 차이남을 알 수 있으며, 구조물 연행방향에 가깝게 파랑이 진행할 경우인 (a)와 (b)의 경우 wave crest width(B)가 부채꼴 형태를 가지며 증가하는 반면, (c)의 결과에서는 x/L=2부터 B가 일정한 양상을 나타낸다.

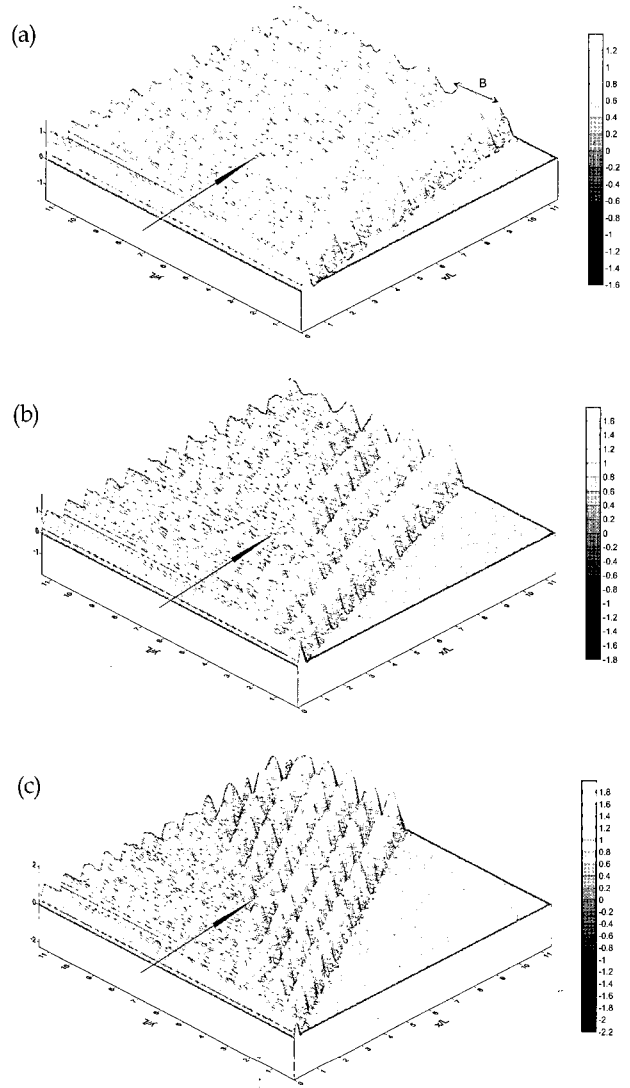


Fig. 6 Perspective wave propagation for inclined breakwater (T=7sec, Ho=3m, h=15m); (a)10deg (b)20 deg (c)30deg

4.2 구조물전면 수심변화의 특성

구조물 전면 수심변화에 따른 h_s분포를 Fig. 7과 같이 나타내었다. 그림은 입사각 α일 때 (a)와 (b)는 각각 구조물의 연행방향 및 법선방향에 대한 h_s를 나타내고, (c)는 수심변화에 따른 h_{s,max}를 나타낸 것이다.

그 결과, 구조물 설치주변의 수심변화에 따라 h_s는 크게 영향

을 받지 않음을 알 수 있고, 구조물 법선방향에 대한 파고비를 나타낸 결과를 보면 구조물 벽면($y'/L=0$)에서 최대파고가 나타나며, 구조물에서 멀어짐에 따라 파고비가 1로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 stem wave가 구조물 벽면을 따라 진행하며 최종적으로 수렴하는 파고는 수심변화에 관계없이 거의 유사하다. 또한 구조물 벽면($y'/L=0$)에서 법선방향으로 형성되는 stem wave의 파봉폭인 B 는 수심이 낮을수록 작아지는 경향을 나타내지만, 그 차이값은 매우 작다. 또한 $h_{s,max}/H_o$ 의 경우 중간역(intermediate water waves)과 심해역(deep water waves)에서 그 변동폭이 크지 않으며, 약 2.0에 근접한 값을 가진다.

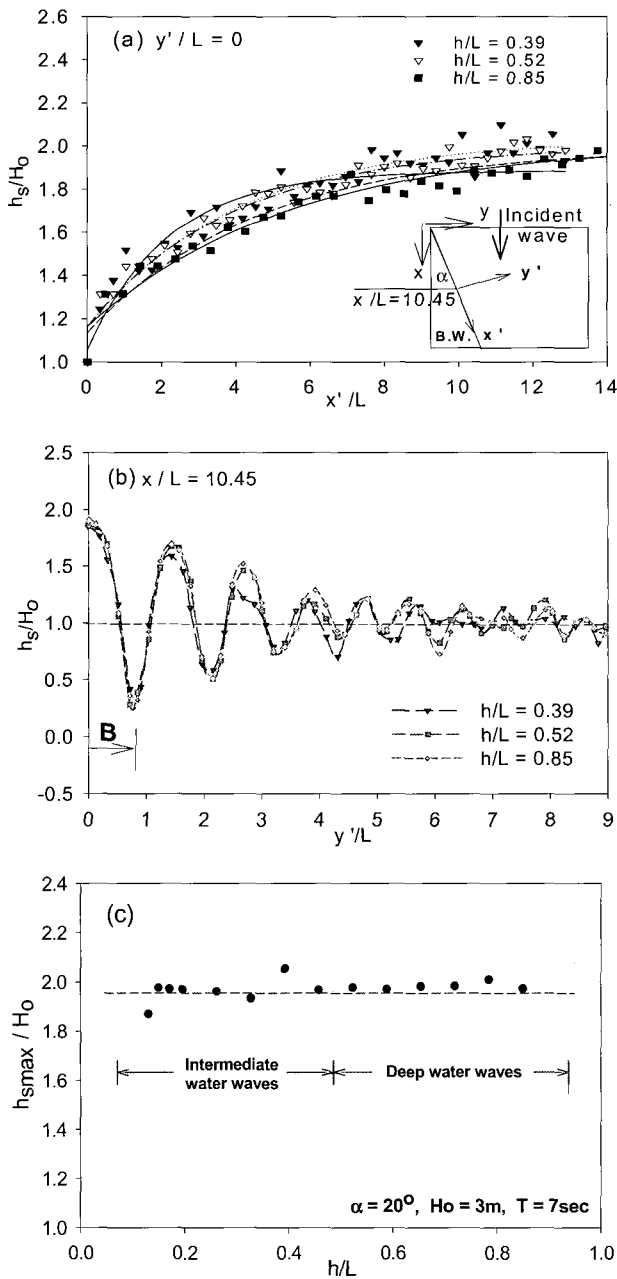


Fig. 7 Normalized wave height of (a)parallel and (b)normal direction and (c)normalized maximum wave heights for various depth

4.3 입사파고 변화의 특성

입사파고 변화에 따른 특성을 살펴보기 위해 $h=15m$, 비쇄파 조건을 만족하는 실험조건에서 수치계산을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8이다.

Fig. 8은 구조물의 (a)연행방향 및 (b)법선방향의 파고변화를 해석한 결과로, 연행방향으로는 입사파랑의 파고가 클수록 h_s/H_o 가 작게 나타나고 1.6~2.0의 범위내에서 수렴한다. 또한 법선방향의 경우 입사파고가 클수록 B 가 증가하고, 구조물부근에서 h_s/H_o 가 작고 구조물로부터 멀어질수록 $h_s/H_o=1$ 에 수렴한다. Fig. 8(c)는 입사파고 변화에 따른 $h_{s,max}/H_o$ 의 분포를 나타낸 것으로 입사파고가 커짐에 따라서 $h_{s,max}/H_o$ 가 작아지며, 입사파의 파고변화에 따라서 $h_{s,max}/H_o=1.4\sim 2.0$ 범위를 가진다.

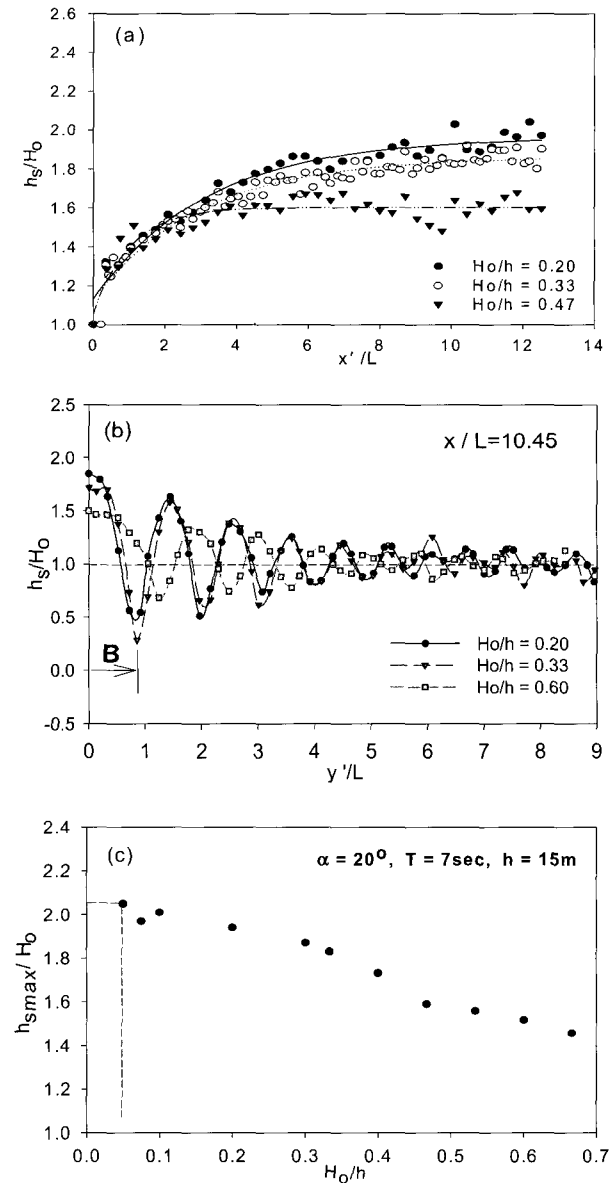


Fig. 8 Normalized wave height of (a)parallel and (b)normal direction and (c) normalized maximum wave heights for various incident wave heights

4.4 입사주기 변화의 특성

Stem wave의 입사파 주기의 영향을 살펴보기 위해 수치실험을 수행하여 얻은 결과가 Fig. 9이다. 그림에서 구조물 (a)연행방향 및 (b)법선방향의 파고분포를 통해 입사파 주기가 길어질수록 구조물 벽면을 따라 발달하는 h_s 가 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 9(b)에서 주기가 증가할수록 가로축 y'/L 가 감소하므로 입사주기에 따른 B 의 변동은 제시되어진 결과그림을 통해서서는 알아보기 힘들 것으로 생각된다.

또한 h_s 가 수렴하는 위치는 입사파 주기조건에 따라 크게 다르게 나타났다. Fig. 9(c)는 입사파랑 주기에 대한 $h_{s,max}/H_o$ 변화를 나타낸 결과로 주기가 커질수록 지수함수적으로 증가하는 경향을 나타내며, $h_{s,max}/H_o \approx 2.0$ 에 수렴함을 알 수 있다.

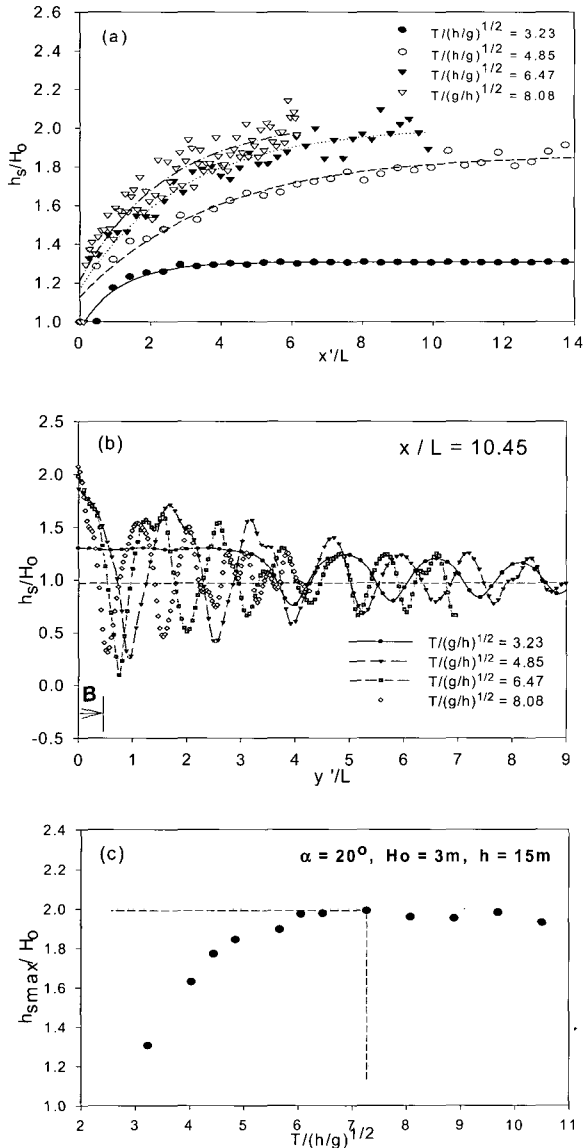


Fig. 9 Normalized wave height of (a)parallel and (b)normal direction and (c) normalized maximum wave heights for various incident wave periods

4.5 입사각 변화의 특성

Fig. 10은 입사각이 다른 입사파랑조건하에서 구조물 전면의 h_s 를 수치실험한 결과를 나타낸다.

그림에서 (a)는 구조물 연행방향에서의 h_s 를 나타낸 것으로 입사각이 증가할수록 h_s/H_o 이 증가하는 경향을 나타내며 일정한 수치에 수렴하지 않고 진동하는 것을 볼 수 있다. 또한 법선방향(b)의 h_s/H_o 분포를 살펴보면 입사각이 커질수록 h_s/H_o 는 증가하고 stem wave 폭인 B 는 감소함을 알 수 있다. 또한 입사각이 $10^\circ \sim 20^\circ$ 인 범위내에서는 stem wave의 $h_{s,max}/H_o$ 가 증가하는 경향을 보였으나, 입사각이 30° 에 근접할수록 완전중복과의 값에 해당하는 2.0에 수렴함을 알 수 있다.

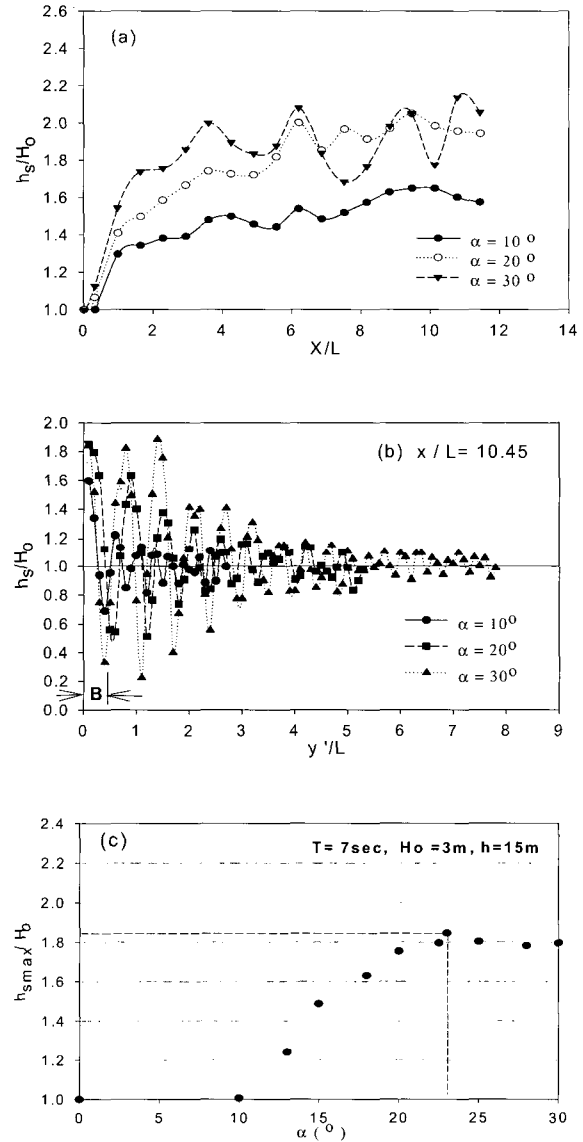


Fig. 10 Normalized wave height of (a)parallel and (b)normal direction and (c) normalized maximum wave heights for various incident wave angles

이상의 결과는 Hajime et al.(2002)가 입사각이 커질수록 stem wave height가 커지고, 파랑입사각이 30°일 때 최대 stem wave height가 나타나지만 비선형성이 커지면 stem wave height가 작아지는 특성을 가진다고 주장한 결과와 유사하다.

Fig. 10(c)는 입사각 변화에 따른 구조물 전면에서의 $h_{s,max}/H_o$ 를 나타낸 것으로 stem wave가 존재하는 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ 의 입사각 범위 내에서 $\alpha = 23^\circ$ 일 때 최대 값 약 1.85를 갖는다. 이는 상술한 입사각의 파고변화에 따른 $h_{s,max}/H_o$ 의 범위인 1.4~2.0에 포함된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 광각 포물선형 환경사 방정식 모델을 이용하여 직립형 구조물 전면에서의 연행방향, 법선방향으로의 stem wave 파고분포를 입사파고, 주기, 수심 그리고 입사각의 변화에 따른 stem wave 발생메카니즘을 논의하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구조물 전면에서 최대 stem wave height는 수심의 변화에 관계없이 유사하며, 입사파고가 커질수록 작아지는 특성을 보이지만 1.4~2.0의 범위를 가진다. 또한 입사주기와 입사각이 커질수록 지수함수적으로 커지는 특성을 나타내는데 대체로 2.0에 수렴하는 경향을 나타내었다. 구조물의 법선방향의 최대파고분포를 살펴본 결과, 구조물의 벽면과 접한 부분에서 최대 stem wave height가 발생하고 구조물로부터 멀어질수록 작아진다.

(2) Stem wave width(B)는 수심에 무관하게 일정한 결과치를 나타내었으며, 입사파고가 커질수록 커지고, 반대로 입사각이 커질수록 작아지는 경향을 나타내었다.

(3) Stem wave가 존재하는 입사각 범위인 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ 에서, 본 실험결과 입사각 $\alpha = 23^\circ$ 일 때 최대 stem wave height가 되는 것으로 나타났으며, 이때 입사파고에 대한 최대 stem wave height의 비는 1.4~2.0 범위내에 존재함을 알 수 있었다.

본 연구에서 적용된 모형은 weakly nonlinear model로서 실제 해양파랑을 완전히 재현하기에는 한계가 많다. 따라서 이에 대한 수치해석적 검증과정이 필요하고 기존 선형모형과의 비교, 비선형성의 크기에 따른 stem wave의 영향특성을 분석하기 위한 연구가 필요할 것으로 생각되어진다. 또한 실제해역의 파랑은 불규칙적이고 방향분산적인 특성을 가지고 있으므로, 규칙파가 아닌 주기·방향분산파랑인 불규칙파랑을 대상으로 한 구조물 전면에서의 stem wave 특성에 대한 연구 및 흐름장이 존재하는 파랑·흐름 공존장에서의 stem wave 거동특성에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

Berger, V. and Kohlhase, S. (1976). "Mach-reflection as a Diffraction Problem", Proc. 25th Conf. Coastal Eng., ASCE, 1, pp 796-814.

Berkhoff, J.C.W. (1972). "Computation of Combined refraction-diffraction", Proc. 13th Conf. Coastal eng., ASCE 1, pp 471-490.

Berkhoff, J.C. Booy, N. and Radder, A.C. (1982). "Verification of Numerical Wave Propagation Models for Simple Harmonic Linear Water Waves", Coastal Eng., Vol 6, pp 168-177.

Hajime, M., Tetsu, M., Masatoshi, Y. and Toshikazu, K. (2002). "Stem Wave along Vertical Wall due to Random Wave Incidence", Coastal Eng., Vol 44, pp 339-350.

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., Vol 136, pp 453-466.

Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1986). "An Approximate Model for Nonlinear Dispersion in Monochromatic Wave Propagation Models", Coastal Eng., Vol 9, pp 545-561.

Kirby, J.T. (1986). "Rational Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves", Coastal Eng., Vol 10, pp 355-378.

Liu, P.L.-F. and Yoon, S.B. (1986). "Stem Wave along a Depth Discontinuity", J. Geophys. Res., Vol 91(C3), pp 3979-3982.

Perroud, P.H. (1957). The Solitary Wave Reflection along a Straight Vertical Wall at Oblique Incident. Ph.D. Thesis, Univ. Calif., Berkeley, Inst. Eng. Res., Tech. Rept. No. 99-3.

Radder, A.C. (1979). "On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation", J. Fluid Mech. Vol 95, pp 159-176.

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

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.

Yue, D.K.P. and Mei, C.C. (1980). "Forward Diffraction of Stokes Waves by a Thin Wedge", J. Fluid Mech., Vol 99, pp 33-52.

2003년 7월 29일 원고 접수

2003년 10월 9일 수정본 채택