

직립벽을 따른 일방향 불규칙파의 연파실험 Hydraulic Experiments of Stem Waves along a Vertical Wall due to Unidirectional Random Waves

이종인* · 최준우** · 윤성범***

Jong In Lee*, Junwoo Choi** and Sung Bum Yoon***

요 지 : 본 연구에서는 직립벽을 따른 불규칙파의 연파특성을 평면수조를 이용한 수리모형실험과 Kirby and Özkan(1994)에 의해 개발된 REF/DIF S 모형을 이용한 해석결과를 통해 검토하였다. 본 연구에서는 불규칙파에 의한 연파특성, 규칙파 및 불규칙파에 의한 차이점과 유사점을 검토하였다. REF/DIF S 모형에 의한 불규칙파의 연파 해석결과는 수리실험결과와 잘 일치하였다. 제체 전면을 따른 상대파고는 규칙파 및 불규칙파 모두 유사하게 나타났으나, 제체 직각방향의 파고분포 경향은 매우 큰 차이를 보였다.

핵심용어 : 연파, 규칙파 및 불규칙파, 수리실험, REF/DIF S 모형

Abstract : This study investigates the characteristics of stem waves along a vertical wall generated by obliquely incident random waves through laboratory experiments conducted in a wave basin and numerical simulations using REF/DIF S model developed by Kirby and Özkan(1994). The investigation is focused on the effect of random waves on the propagation characteristics of stem waves and the difference or similarity between monochromatic and random waves. The results of REF/DIF S model are compared with laboratory measurements and good agreements are obtained. The relative significant wave height along a wall is almost same with monochromatic condition, but the wave pattern along normal to the wall shows a significant difference.

Keywords : stem waves, monochromatic and random waves, laboratory experiments, REF/DIF S model

1. 서 론

Perroud(1957)는 고립파를 적용한 수리실험으로부터 직립방파제 또는 직립안벽 등과 같은 직립구조물에 파랑이 45° 이하로 경사지게 입사하게 되면 입사파, 반사파 및 연파가 존재함을 밝혔다. 연파특성에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수치해석 및 수리모형실험을 통해 이루어져 왔으며, 규칙파, 고립파, 크노이드파 등을 대상으로 파랑이 구조물을 따라 진행하면서 파고가 증폭되는 현상에 초점을 맞추어 연구되어 왔다(Berger and Kohlhasse, 1976; Melville, 1980; Yue and Mei, 1980; Liu and Yoon, 1986; Yoon and Liu, 1989). 그리고 이·윤(2006), 이 등(2007)은 일정수심

상에서 직립구조물에 의한 연파특성에 대해 규칙파를 대상으로 수리모형실험을 실시하고, 포물형근사식 및 Boussinesq 방정식을 이용한 수치해석결과와 비교 검토하였으며, 수리모형실험 및 수치해석을 통해 기존 연구와 같이 직립구조물을 따른 파고증폭 현상뿐만 아니라 구조물 직각방향의 연파 폭(stem width)에 대해서도 파랑의 입사각 및 비선형성에 따른 변화를 검토하였다.

연파에 대한 기존 연구의 대부분은 일정 주기를 가지는 규칙파, 크노이드파 등을 대상으로 입사각 및 파랑의 비선형성에 의한 연파특성을 주로 검토하였다. 그러나 실 해역의 파랑조건은 불규칙파 특성을 가지며, 이러한 불규칙파를 대상으로 한 연파특성 연구는 Mase 등(2002)의 연구가

*한국건설기술연구원 하천·해양연구실(River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, Korea)

**한양대학교 공학대학 토목환경공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea)

***한양대학교 공학대학 토목환경공학과(Corresponding author: Sung Bum Yoon, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Kyunggi 426-791, Korea, sbyoon@hanyang.ac.kr)

유일하다 할 수 있다. Mase 등(2002)은 일방향 불규칙파를 대상으로 직립벽을 따른 연파특성을 수리모형실험 및 수치해석을 통해 검토하였으며, 일정수심상에서 불규칙파를 적용한 수리모형실험에서는 구조물과 입사파가 이루는 각(β)이 20° 와 30° 인 경우를 대상으로 파고를 계측하였다. Mase 등(2002)의 연구에서는 제체 전면을 따른 불규칙파의 연파특성에 초점을 맞추었고, 제체 직각방향에 대해서는 수리모형실험시 계측을 수행하지 않았다. Mase 등(2002)은 입사각이 증가할수록, 입사파의 비선형성이 작을수록 제체 전면을 따른 연파의 크기는 증가함을 보였으나, 수리실험결과와 수치해석결과가 차이가 나타났다.

본 연구에서는 직립구조물을 따른 연파특성에 대해 일방향 불규칙파를 대상으로 수리모형실험을 실시하고 수치해석을 통해 검토하였으며, 파랑의 입사각에 따른 연파특성의 변화를 위주로 분석하였다. 그리고 본 수리모형실험에서는 Mase 등(2002)이 수행하지 않은 제체 직각방향으로의 파고계측을 수행하고, 수치해석결과와 비교하였다. 이는 규칙파와 불규칙파의 특성이 제체 직각방향에서 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 그리고 본 연구에서 수행한 수리실험 자료의 정확도를 확인하기 위해 Kirby and Özkan(1994)에 의해 개발된 REF/DIF S 모형을 이용하여 실험결과와 비교하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 장비

수리모형실험에 사용된 조파기는 다방향 불규칙파 조파기로서 규칙파, 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파의 조파가 가능한 사형(snake-type) 조파기이다. 조파기 각 구동부에 연결된 조파판 하나의 폭은 0.5 m, 높이는 1.1 m로서 조파기의 전체 폭은 30 m이고, 조파기는 60개의 구동부로 구성되어 있으며, 전기서보모터시스템이다. 조파기는 최대수심 0.7 m, 최대재현파고 0.3 m, 재현주기 0.5 sec~3.0 sec의 성능을 가지고 있다. 그리고 실험에 사용된 평면수조는 길이 42 m, 폭 36 m, 높이 1.05 m이다.

본 실험에 사용된 분석장비는 컴퓨터, 증폭기 및 A/D converter 등으로 구성되어 있으며, 실험과 제원에 따라 생성된 조파신호를 조파기로 송신하고, 파고계로부터 독취된 자료를 주파수 스펙트럼 및 파고 등으로 분석하는 기능을 하는 장치이다. 실험과 설정 및 파고계측에 사용된 파고계는 용량식파고계(모델명 CHT4-60)로서 길이는 60 cm이고, 측정범위는 0~±30 cm이다. 본 실험에서는 16대의 파고계

를 운용하였으며, 위치를 이동하며 반복 측정을 하였다.

2.2 실험영역

직립구조물을 따른 연파특성에 대한 수리모형실험을 위해 전술한 다방향 조파수조 내에 길이 20 m의 직립구조물을 설치하였다. 수리모형실험은 유한한 수조내에서 수행되므로 구조물에 의한 반사파를 적절히 소파시키지 못하면 실험결과의 신뢰도가 저하된다. 따라서 본 실험에서는 조파기 반대편의 수조벽에 1:12 경사의 쇄석을 배치하여 반사파를 제어하였으며, 조파기 후면은 스테인리스 재질의 소파시설을 설치하여 조파기 후면에서 발생하는 파랑을 제어하였다. 그리고 수조의 좌우측면은 스테인리스 재질의 소파시설 및 쇄석을 설치하여 양측벽면에 의한 반사파를 제어하였다(Fig. 1 참조).

실험모형은 조파기 전면으로부터 5 m, 조파기 측면으로부터 3 m 떨어진 위치에서부터 설치하였으며, 조파기 전면으로부터 일정구간은 조파기에 의해 발생된 파랑을 유도하고, 조파기 후면으로부터 발생된 반사파가 실험영역내에 영향을 미치지 못하도록 하기 위해 불투수성 유도판을 설치하였다. Fig. 1은 실험영역 및 모형설치 개념도를 나타낸 것으로서 β 는 구조물과 입사파가 이루는 각이며, 계측지점의 원점(x_0, y_0)은 조파기 전면 5 m, 조파기 측면 3 m에 설정하였다.

2.3 실험모형, 실험조건 및 분석방법

수리모형실험에서 사용된 직립구조물 모형은 아크릴재질로 제작하였으며, 모형의 폭과 높이는 0.6 m이며, 길이는 20 m이다. 실험은 일정수심상에서 일방향 불규칙파를 대상으로 수행하였으며, 실험에 적용된 수심(h)은 0.45 m로서 정수면으로부터 구조물 상단까지의 여유고는 0.15 m이다. 실험시 파랑에 의해 직립구조물이 움직이지 않도록 내부에 쇄석을 채워 중량을 확보하였으며, 구조물 높이 0.6 m와 수심 0.45 m는 연파에 의해 월파가 발생하지 않는 조건이다.

실험에 적용된 입사파의 유의주기(T_s)는 0.9 sec와 1.6 sec이며, 유의파고(H_{s0})는 0.03 m로 동일하다. 수심 0.45 m 조건에서 입사파의 유의주기가 0.9 sec인 경우(CASE 1)에 선형분산관계식으로부터 계산된 유의파의 파장(L_s)은 1.238 m로서 파형경사($k_s H_{s0}$)는 0.1522, 상대유의파고($\epsilon_s = H_{s0}/h$)는 0.0667이다. $T_s = 1.6$ sec인 경우(CASE 2)에는 $L_s = 2.963$ m, $k_s H_{s0} = 0.0636$, $\epsilon_s = 0.0667$ 이다. 여기서, k_s 는 입사파의 유의주기에 해당하는 파수, H_{s0} 는 입사파의 유의파고이다. 따

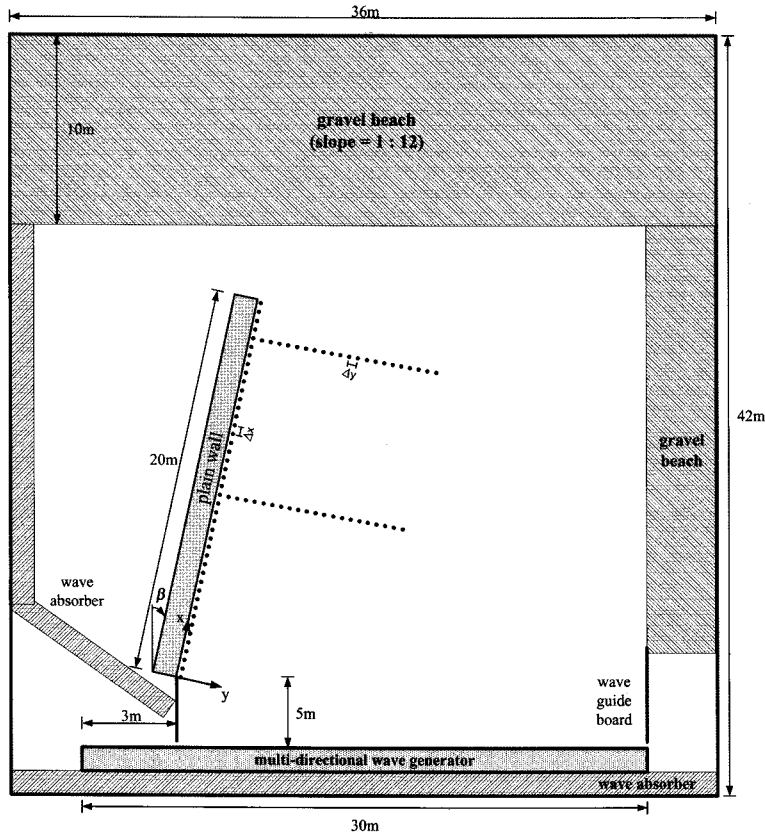


Fig. 1. Experimental setup.

Table 1. Incident wave conditions.

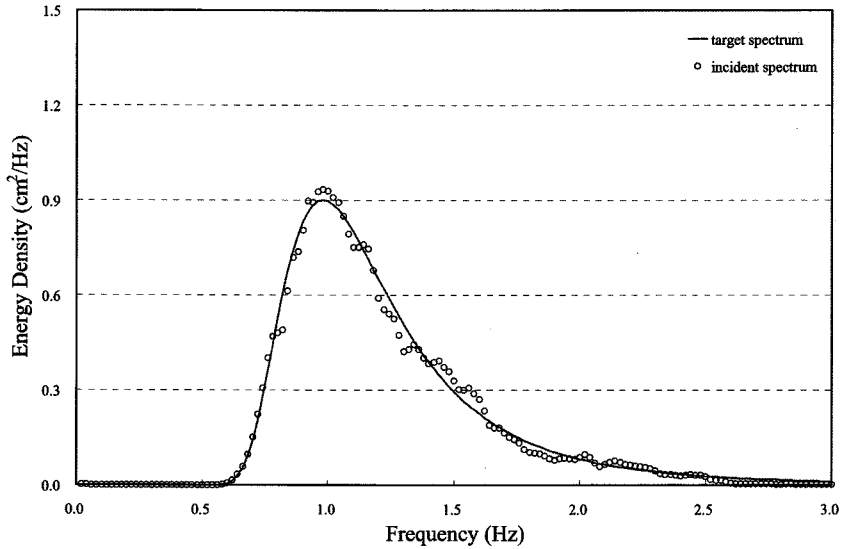
Test No.	Significant wave height of incident wave (H_{s0})	Relative water depth ($k_s h$)	Nonlinearity of incident wave		Incident angle (β)	Water depth (h)
			relative significant wave height ($\epsilon_s = H_{s0}/h$)	wave steepness ($k_s H_{s0}$)		
CASE 1	0.030 m	2.284	0.0667	0.1522	10°	0.45 m
					19°	
					28°	
CASE 2	0.030 m	0.954	0.0667	0.0636	40°	

라서 본 실험에 사용된 모형길이 20 m는 CASE 1의 경우에 $16.1L_s$, CASE 2의 경우에는 $6.7L_s$ 에 해당된다. 실험에 적용된 입사파 조건은 실험시 쇄파가 발생하지 않는 조건이며, 직립구조물과 입사파가 이루는 각(β)은 10°, 19°, 28°, 40°이다. 수리실험에 사용된 조파기가 사형조파기이므로 경사입사파를 재현할 수 있으나, 입사각이 커질 경우에는 회절파로 인해 실험결과의 정확도가 저하될 수 있어 본 실험에서는 입사파는 조파선에 직각방향의 일방향으로 조파하고 직립구조물 모형의 설치각도를 변경시켜 입사각(β)을 조절하였다. 실험에 적용된 입사파 조건을 요약하면 Table 1과 같으며, 입사파는 Fig. 1의 $x=y=0$ 인 위치에서,

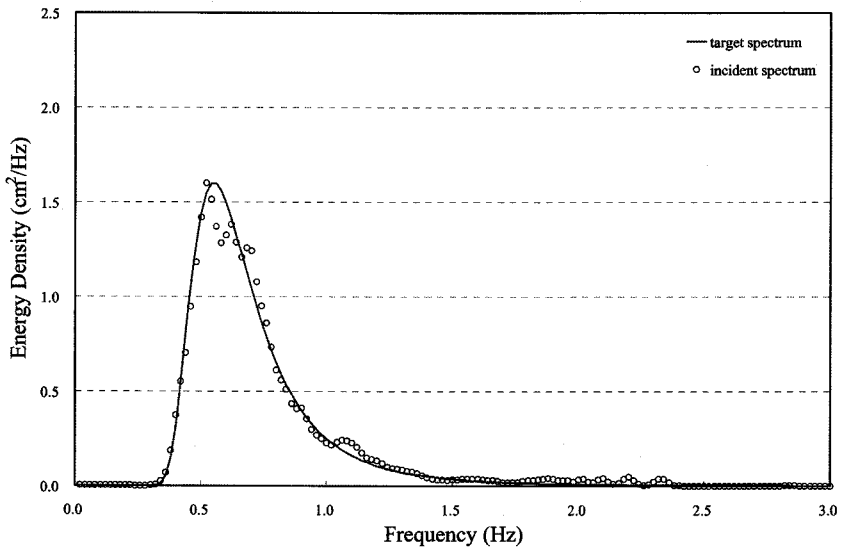
그리고 구조물이 설치되지 않은 조건에서 설정하였다. 직립구조물과 경사입사파에 의해 발생하는 연파는 직립구조물을 따른 방향(x 방향)과 직립구조물의 직각방향(y 방향)으로 계측을 하였으며, 직립구조물을 따른 파고는 체제 전면에서 0.05 m 떨어진 위치에서 계측하였다. CASE 1인 경우, 구조물 전면을 따른 파고는 $x=0\sim 6.4$ m 구간은 0.2 m 간격, $x=6.4\sim 18.8$ m 구간은 0.4 m 간격으로 계측하였으며, CASE 2인 경우에는 $x=0\sim 18.8$ m 구간을 0.4 m 간격으로 계측하였다. 그리고 CASE 1인 경우에는 $x/L_s=2, 6, 15$ 인 지점, CASE 2인 경우에는 $x/L_s=2, 6$ 인 지점에서 구조물과 직각방향으로 파고를 계측하였다. CASE 1인 경우에 $x/$

Table 2. Wave height measurement conditions.

Test No.	x-direction (along the front wall)		y-direction (normal to the wall)		
			$x/L_s=2$	$x/L_s=6$	$x/L_s=15$
CASE 1	$x=0\text{ m}\sim 6.4\text{ m}$ ($\Delta x=0.2\text{ m}$)	$x=6.4\text{ m}\sim 18.8\text{ m}$ ($\Delta x=0.4\text{ m}$)	$y=0.1\text{ m}\sim 6.4\text{ m}$ ($\Delta y=0.1\text{ m}$)	$y=0.1\text{ m}\sim 6.4\text{ m}$ ($\Delta y=0.1\text{ m}$)	$y=0.2\text{ m}\sim 6.4\text{ m}$ ($\Delta y=0.2\text{ m}$)
CASE 2	$x=0\text{ m}\sim 18.8\text{ m}$ ($\Delta x=0.4\text{ m}$)		$y=0.2\text{ m}\sim 6.4\text{ m}$ ($\Delta y=0.2\text{ m}$)	$y=0.2\text{ m}\sim 6.4\text{ m}$ ($\Delta y=0.2\text{ m}$)	-



(a) CASE 1



(b) CASE 2

Fig. 2. Incident wave spectrum.

$L_s=2$ 와 $x/L_s=6$ 인 지점에서는 $y=0.1\sim 6.4\text{ m}$ 까지 0.1 m 간격, $x/L_s=15$ 인 지점에서는 $y=0.2\sim 6.4\text{ m}$ 까지 0.2 m 간격으로 파고를 계측하였다. 또한 CASE 2인 경우에는 $x/L_s=2$ 와 $x/L_s=6$ 인 지점에서 $y=0.2\sim 6.4\text{ m}$ 까지 0.2 m 간격으로 계측하

였다. 실험시 전체 계측시간은 300 sec로서 CASE 1인 경우에 유의주기 기준으로 약 333파, CASE 2인 경우에 유의주기 기준으로 약 188파에 해당되며, 연파특성 검토를 위한 파고는 후반부 205 sec 동안의 계측자료를 이용하여

영점상향교차(zero-upcrossing)법으로 분석하였다. 본 실험에서 수행한 계측조건을 요약하면 Table 2와 같다. 본 실험에서는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용하였으며, Fig. 2는 본 실험에 적용된 목표 스펙트럼 및 입사파 스펙트럼을 비교 도시한 것이다.

3. REF/DIF S 모형

본 연구에서는 연파특성에 관한 수리모형실험으로부터 계측된 자료의 신뢰도를 검토하기 위해 Kirby and Özkan (1994)에 의해 개발된 REF/DIF S 모형을 이용하였으며, 이 모형은 불규칙파의 전파변형을 해석할 수 있는 포물형 모형으로서 파랑의 약비선형효과를 포함한다. REF/DIF S 모형의 지배방정식은 개별파성분(discrete wave component)의 굴절, 회절 및 천수효과를 고려할 수 있다. REF/DIF S 모형에 대한 자세한 내용은 Kirby and Özkan(1994)을 참조할 수 있으며, 본 논문에서는 모형에 대해 간략히 소개하고자 한다. 본 연구에서 검토하는 불규칙파의 연파실험에서는 주변수역에 유속성분이 없기 때문에 지배방정식에서 유속성분과 관련된 항을 제거하고 정리하면 다음과 같다.

$$C_{gn}(A_n)_x + i(\bar{k}_n - a_0 k_n) C_{gn} A_n + \frac{\sigma_n (C_{gn})}{2 \sigma_n} A_n + i \Delta'_n \left[(CC_g)_n \left(\frac{A_n}{\sigma_n} \right)_{y-y} \right] + \frac{w_n}{2} A_n + \alpha A_n - \frac{b_1}{k_n} \left[(CC_g)_n \left(\frac{A_n}{\sigma_n} \right)_{y-yx} \right] + b_1 \beta_n \left[(CC_g)_n \left(\frac{A_n}{\sigma_n} \right)_{y-y} \right] = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$\beta_n = \frac{(k_n)_x}{k_n^2} + \frac{[k_n (CC_g)_n]_x}{2 k_n^2 (CC_g)_n} \quad (2)$$

$$\Delta'_n = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_n}{k_n}$$

식 (1)과 식 (2)에서 A_n 은 n 번째 파랑성분(m th wave component)의 복소진폭, i 는 단위허수, k_n 은 파수, \bar{k}_n 은 입사파 경계를 따라 주어지는 기준파수, C 는 파속, C_g 는 군속도, σ_n 은 각주파수이고, w_n 과 α 는 각각 바닥마찰 및 쇄파에 의한 에너지감쇠항이다. 그리고 a_0 , a_1 및 b_1 은 방향보정계수로서 $a_0=1$, $a_1=0.75$, $b_1=0.25$ 이다. 바닥마찰 및 쇄파에 의한 에너지감쇠항은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$w_n = \frac{2 \sigma_n k_n f |A_n|}{3 \pi \sinh 2 k_n h \sinh k_n h}$$

$$\alpha = \frac{3 \sqrt{\pi} \bar{f} B^3}{4 \gamma^4 h^5} H_{rms}^5 \quad (3)$$

식 (3)에서 h 는 수심, $f=0.01$, \bar{f} 는 첨두주파수(peak frequency), H_{rms} 는 RMS(root mean square) 파고이고, B 와 γ 는 경험 상수로서 REF/DIF S 모형에서는 $B=1$ 및 $\gamma=0.6$ 이 사용되었다.

본 연구에서는 REF/DIF S 모형을 이용한 불규칙파의 연파해석시 격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 0.05$ m를 적용하였으며, 입사파는 수리모형실험시 사용된 주파수 스펙트럼을 31개로 분할하여 설정하였다.

4. 결과분석

본 연구에서는 직립벽을 따른 연파에 대해 일방향 불규칙파를 적용하여 수리모형실험을 실시하고, 동일 조건에 대해 REF/DIF S 수치모형을 이용하여 해석한 후 그 결과를 비교하였다.

Fig. 3은 CASE 1($\epsilon_s = 0.0667$, $k_s H_{s0} = 0.1522$) 조건에 대해 체제전면을 따른 방향(x 방향)의 상대유의과고(H_y/H_{s0})를 입사각별로 도시한 것이다. 수리실험결과를 살펴보면, $\beta=10^\circ$ 인 조건을 제외하고는 $H_y/H_{s0} \approx 2$ 근방에서 상대유의과고가 수렴하며, $\beta=10^\circ$ 인 경우에는 상대유의과고가 실험 영역내에서 2 이하로 나타났다. 본 실험의 실험영역내에서 $\beta=10^\circ$ 인 경우에 상대유의과고가 2 이하로 나타난 것은 연파가 충분히 발달하기에는 실험영역이 짧기 때문으로 생각되며, 구조물이 충분히 길다면 $\beta=10^\circ$ 인 경우에도 상대유의과고는 2 내외가 될 것으로 판단된다. 규칙파를 입사파로 한 수리실험결과 및 수치해석결과(이·윤, 2006)와 같이 불규칙파의 경우에도 $H_y/H_{s0} \approx 2$ 에 도달하는 상대 거리는 입사각이 증가할수록 짧아짐을 알 수 있다. REF/DIF S 수치모형을 이용한 해석결과를 살펴보면, $\beta=10^\circ$ 인 경우에는 수리실험결과보다 다소 크게 해석되었으나, 그 이외의 입사각에서는 수리실험결과와 비교적 잘 일치함을 보였다.

Fig. 4는 체제 직각방향(y 방향)의 상대유의과고를 $x=6L_s$ 및 $x=15L_s$ 위치에서 입사각별로 각각 비교 도시한 것이다. 규칙파의 경우와 마찬가지로 $\beta=10^\circ$ 인 경우에 연파 폭이 가장 넓게 나타났으며, 입사각이 증가할수록 연파 폭은 좁아짐을 알 수 있다. 즉, 모든 조건에서 상대유의과고는 체제 전면에서 가장 크게 나타났고, $x=15L_s$ 위치에서 $\beta=10^\circ$ 인 경우에는 $y \approx 2L_s$, $\beta=19^\circ$ 인 경우에는 $y \approx 0.8L_s$, $\beta=28^\circ$ 인

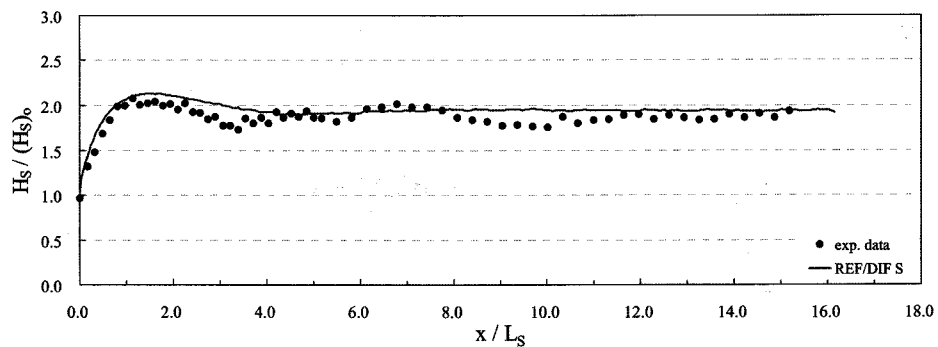
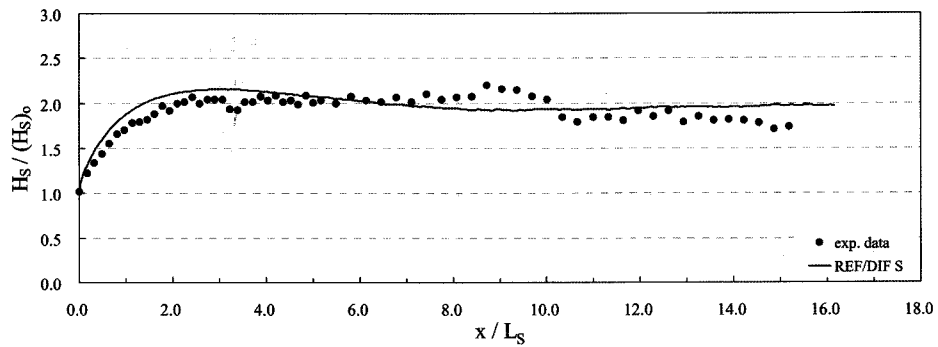
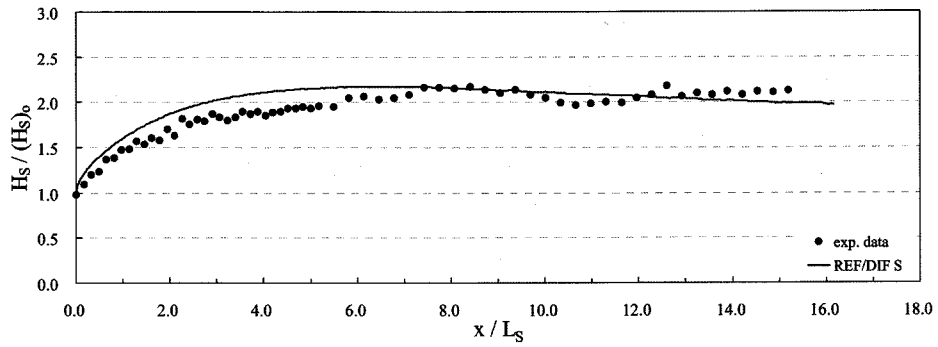
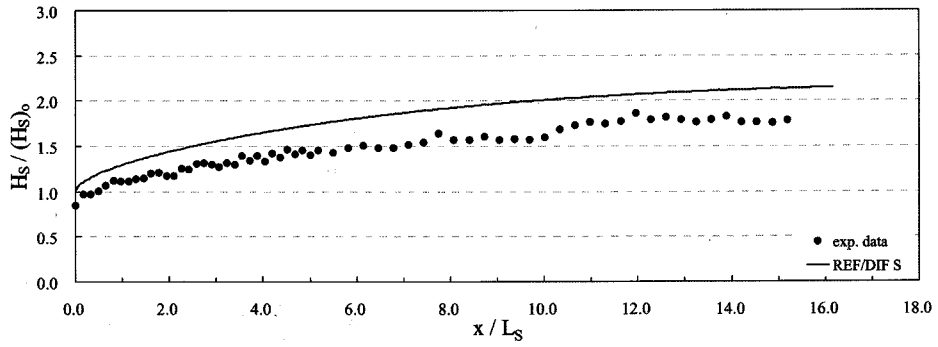
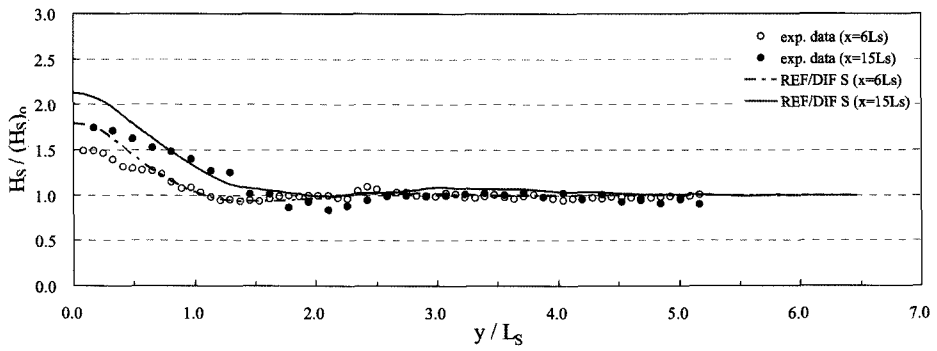
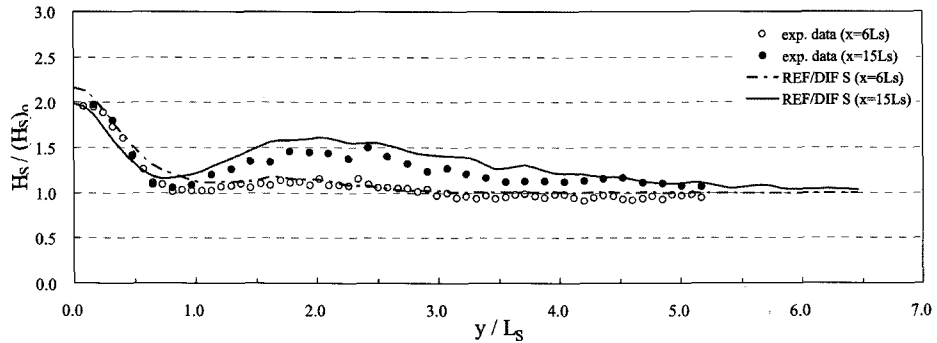


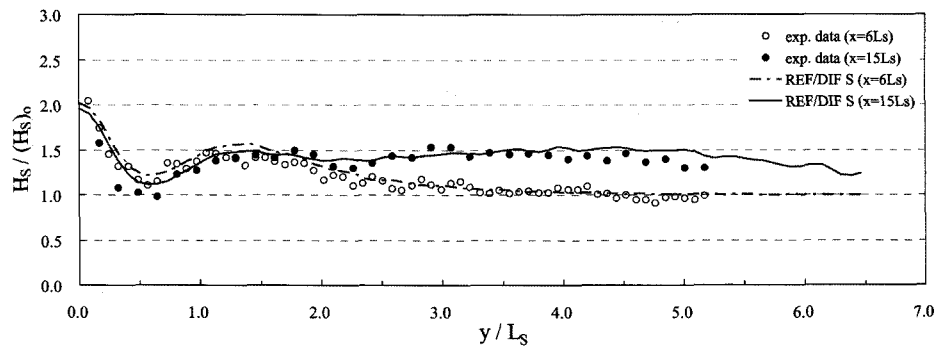
Fig. 3. Comparison of measured data and REF/DIF S model results along the wall for CASE 1.



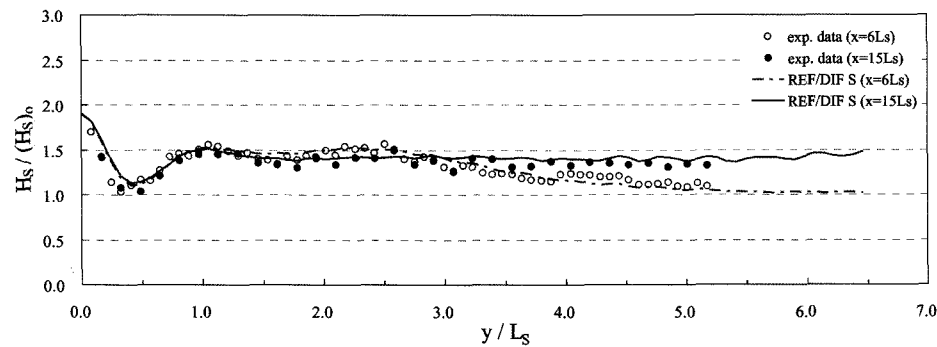
(a) $\beta = 10^\circ$



(b) $\beta = 19^\circ$



(c) $\beta = 28^\circ$



(d) $\beta = 40^\circ$

Fig. 4. Comparison of measured data and REF/DIF S model results along normal to the wall for CASE 1.

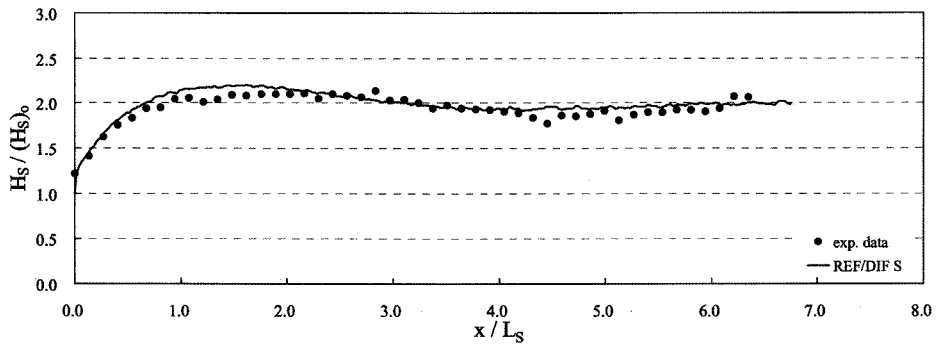
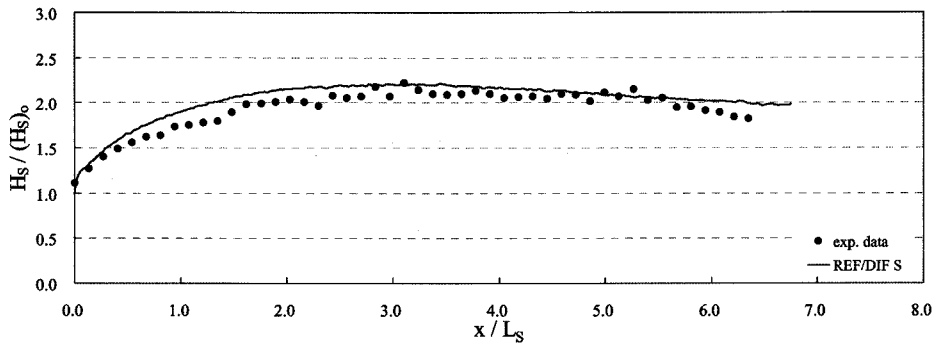
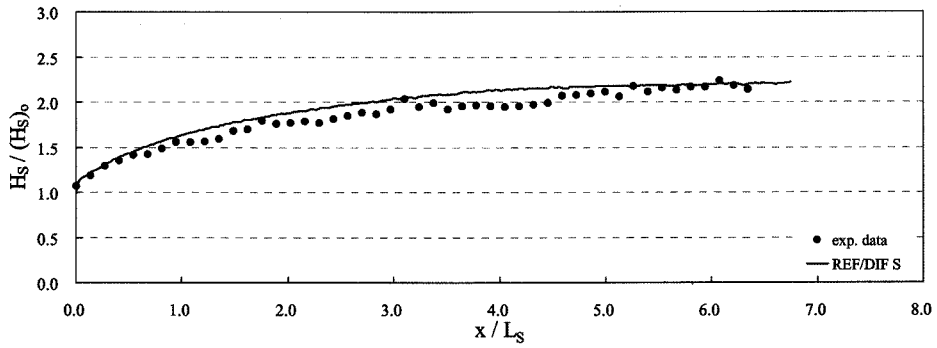
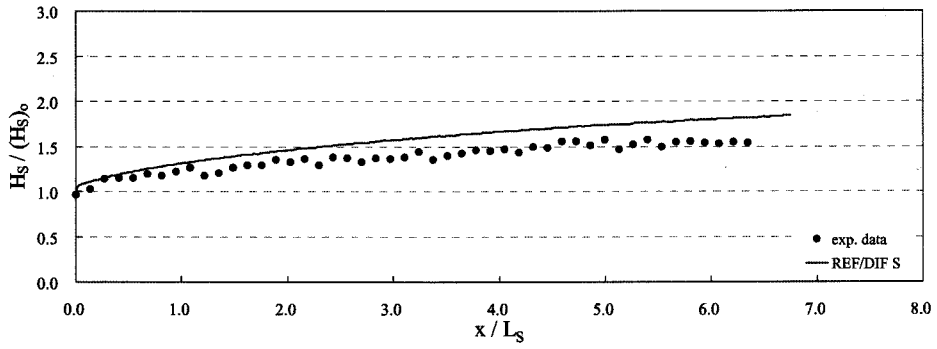


Fig. 5. Comparison of measured data and REF/DIF S model results along the wall for CASE 2.

경우에는 $y \approx 0.6L_s$, $\beta = 40^\circ$ 인 경우에는 $y \approx 0.5L_s$ 위치에서 가장 낮은 상대유의파고를 보였다. 그리고 $\beta = 10^\circ$ 인 경우에는 $x = 6L_s$ 및 $x = 15L_s$ 위치에서의 상대유의파고가 제체 전면에서 다소 차이가 남을 알 수 있지만, 입사각이 증가할수록 위치에 따른 차이는 크지 않았다. 이는 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 입사각이 증가하면 최대 상대유의파고에 도달하는 상대거리가 짧아지고, 상대유의파고가 거의 일정하기 때문이다. $\beta = 10^\circ$ 인 경우에는 수치해석결과와 수리실험결과가 제체 전면에서 다소 차이를 보이지만, 그 이외의 입사각에서는 수리실험결과와 잘 일치하고 있다. REF/DIF S 모형은 성분파 중첩모형 이지만 불규칙파의 전파특성을 적절히 재현하고 있음을 의미한다.

CASE 2($\epsilon_s = 0.0667$, $k_s H_{s0} = 0.0636$)는 CASE 1에 비해 상대유의파고는 동일하지만 파형경사가 상대적으로 작은 경우로서 Fig. 5는 CASE 2 조건에 대해 제체전면을 따른 방향의 상대유의파고를 입사각별로 도시한 것이다. CASE 2의 경우에는 입사각의 유의주기가 CASE 1보다 길기 때문에 실험영역내에서 제체전면을 따른 연파가 충분히 발달하지 못한 것으로 판단되지만, 수리실험결과와 수치해석결과 모두 CASE 1의 결과와 유사한 경향을 보였다. REF/DIF S 모형에 의한 수치해석결과는 CASE 1과 마찬가지로 $\beta = 10^\circ$ 인 경우에 수리실험결과보다 크게 나타났으며, CASE 1보다 파랑의 상대전파거리(x/L_s)가 짧고 파형경사가 작음으로 인해 그 차이는 상대적으로 작게 나타났다. 이는 REF/DIF S 모형이 선형모형으로서 파랑의 비선형성이 증가하면 상대적으로 오차가 커질 수 있음을 의미한다.

Fig. 6은 제체 직각방향의 상대유의파고를 $x = 2L_s$ 및 $x = 6L_s$ 위치에서 입사각별로 각각 도시한 것이다. 전반적으로 수리실험결과와 수치해석결과가 비교적 잘 일치하고 있으며, CASE 1의 경우와는 달리 $\beta = 10^\circ$ 조건에서 수리실험결과와 큰 차이를 보이지 않는 것은 파랑의 상대전파거리가 짧고 비선형성이 작기 때문으로 판단된다. CASE 1 및 CASE 2의 수리실험결과에서 연파의 폭은 파랑경사의 크기에 관계없이 유사하게 나타났으나, 본 연구에서는 2개의 파랑조건을 대상으로 하였기 때문에 추가적인 검토가 요구된다. 제체 직각방향의 상대유의파고를 살펴보면 CASE 1과 CASE 2 조건 모두 본 실험조건상에서 입사각(β)이 28° 보다 큰 경우에 $H_s/H_{s0} \approx 1.5$ 에 접근함을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 이-윤(2006)에서 검토한 규칙파 해석결과 중 CASE 1과 동일한 파고 및 주기를 가지는 조건($H_0 = 0.03$ m, $kh = 2.284$)의 수리실험결과 및 수치해석결과를

불규칙파 조건의 결과와 비교 도시한 것이다. 제체전면을 따른 상대파고분포를 입사각별로 도시한 Fig. 7을 살펴보면, $\beta = 19^\circ$ 인 경우의 일부구간을 제외하고는 규칙파에 의한 상대파고와 불규칙파에 의한 상대유의파고가 거의 일치함을 알 수 있다. 즉, 제체 전면을 따라 증폭되는 정도는 규칙파와 불규칙파간의 차이는 크지 않음을 의미한다. $\beta = 19^\circ$ 를 제외하고는 규칙파 및 불규칙파 조건의 결과가 유사한 점으로 미루어 $\beta = 19^\circ$ 의 규칙파에 대한 실험결과에서 $x/L > 10$ 인 범위의 실험결과에 다소의 오차가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 제체 직각방향으로의 수리실험결과 및 수치해석결과를 비교 도시한 것이다. 규칙파의 경우에는 입사각이 증가할수록 증폭과 현상이 명확하게 나타나지만, 불규칙파의 경우에는 이러한 증폭과 현상은 나타나지 않았다. 불규칙파의 경우에는 서로 다른 주기 및 파고 성분들이 중첩되어 파고분포가 평활화되기 때문으로 생각되며, 이러한 결과를 미루어 볼 때 구조물 전면에서의 파랑분포 해석에는 불규칙파를 해석할 수 있는 수치모형의 적용이 요구된다 할 수 있다. 그리고 제체 전면으로부터 상대파고가 낮게 나타나는 최초 위치까지의 거리, 즉 연파 폭은 규칙파와 불규칙파 모두 동일한 위치에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 규칙파를 대상으로 한 포물형모형의 해석결과는 이-윤(2006)에서 검토한 선형 포물형근사식에 비선형 분산관계식을 적용한 모형(L-N type)의 결과이다.

Mase 등(2002)은 일방향 불규칙파를 적용하여 직립구조물을 따른 연파실험을 수행하였고, 파고계측은 제체를 따라서만 수행하였다. 그러나 Fig. 7과 Fig. 8로부터 규칙파와 불규칙파의 특성은 제체전면(x 방향)이 아닌, 제체 직각방향(y 방향)에서 큰 차이가 남을 알 수 있었으며, 이는 Mase 등(2002)의 연구와의 차이점이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 일방향 불규칙파를 대상으로 직립구조물에 의한 연파특성에 대해 수치모형실험을 실시하고, 불규칙파의 전파변형을 해석할 수 있는 수치모형을 이용하여 동일 조건에 대해 해석한 후 그 결과를 비교하였다. 그리고 규칙파와 불규칙파에 의한 연파특성을 비교 검토하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 파랑이 직립구조물에 경사지게 입사할 때 구조물을 따라 진행할수록 파고는 증가하고, 일정거리 이상을 진행

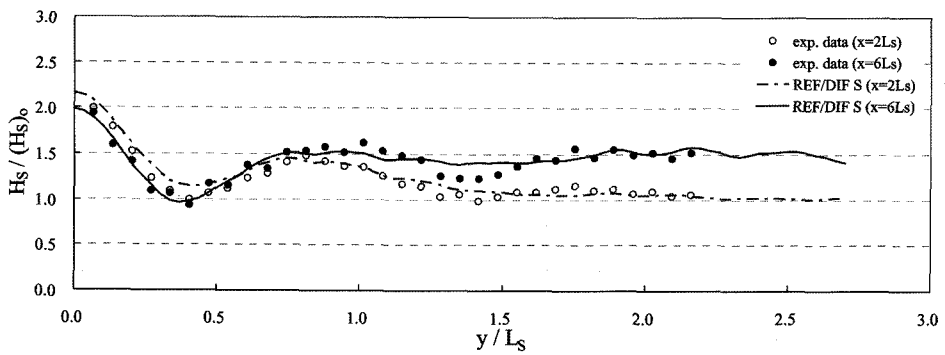
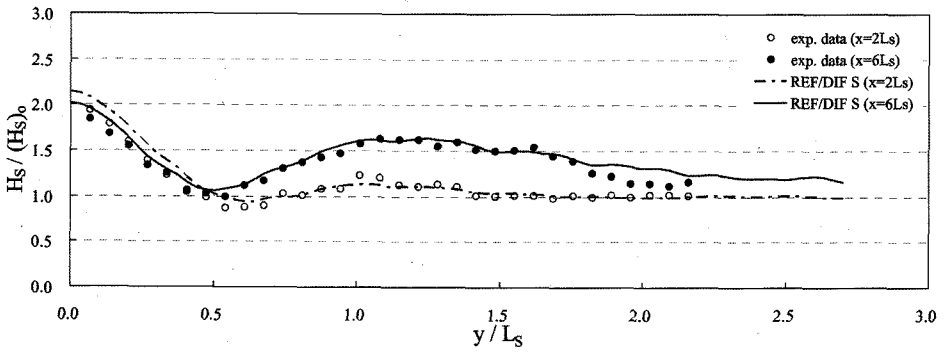
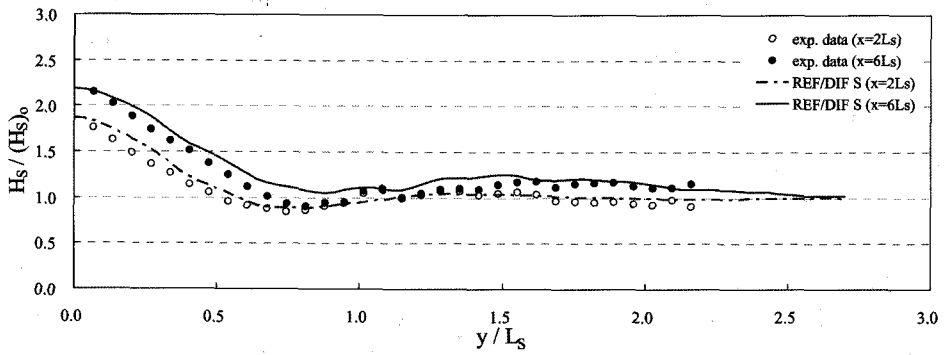
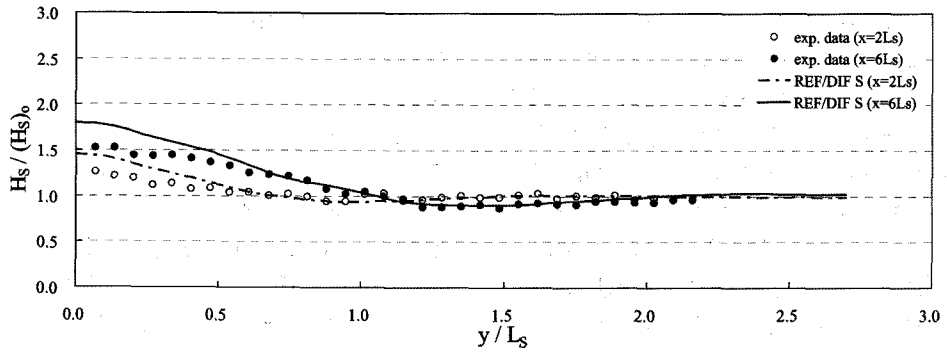


Fig. 6. Comparison of measured data and REF/DIF S model results along normal to the wall for CASE 2.

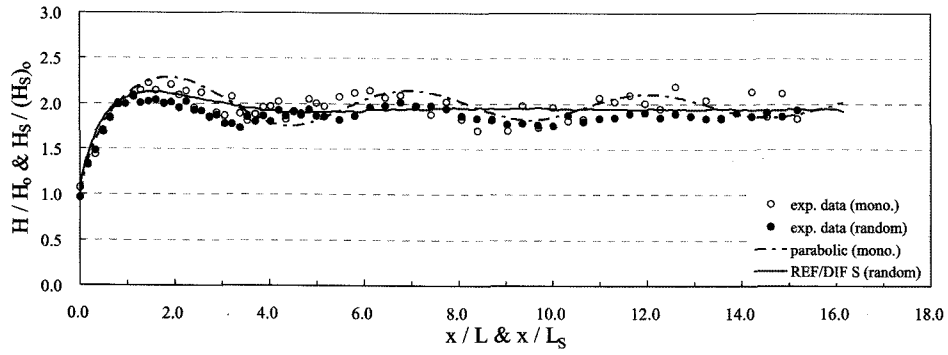
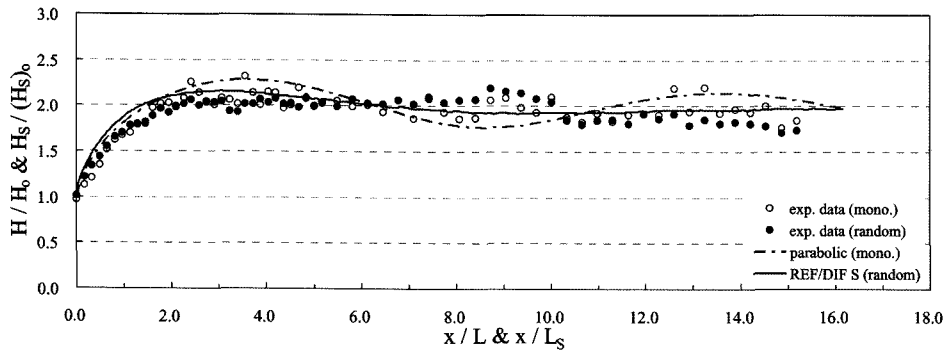
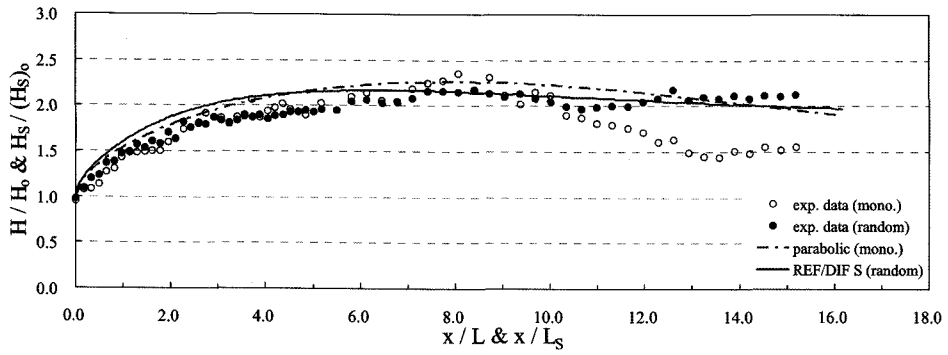
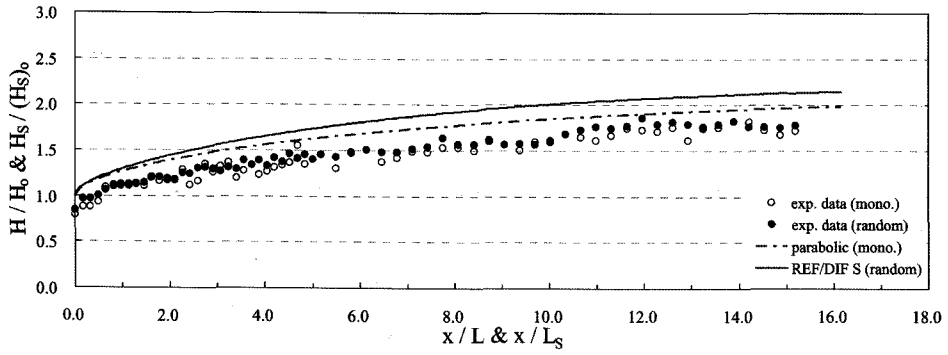


Fig. 7. Comparison of monochromatic and random waves along the wall for CASE 1.

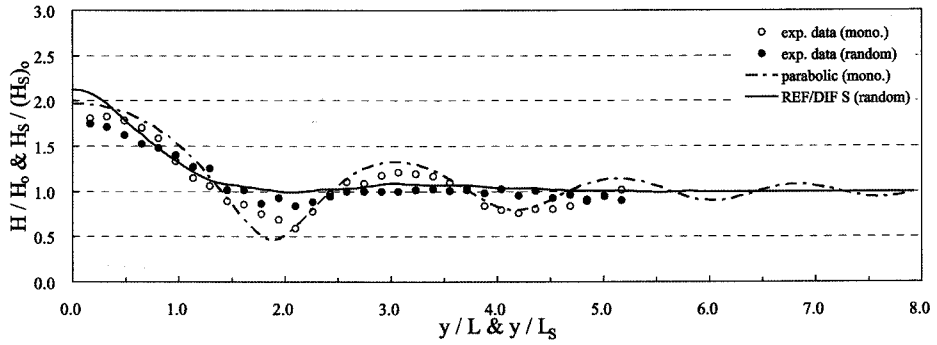
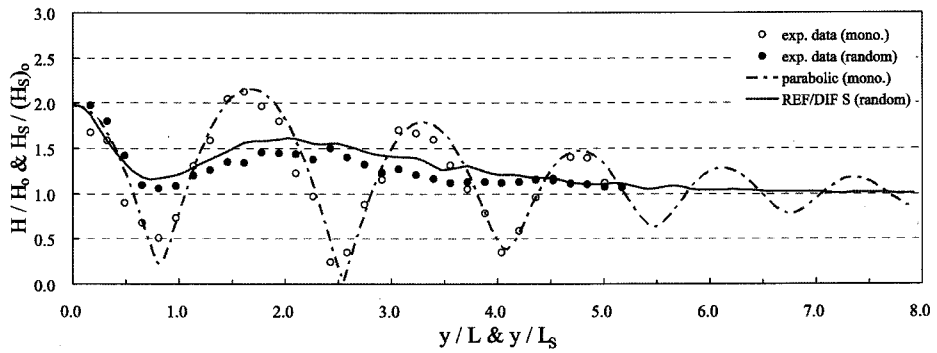
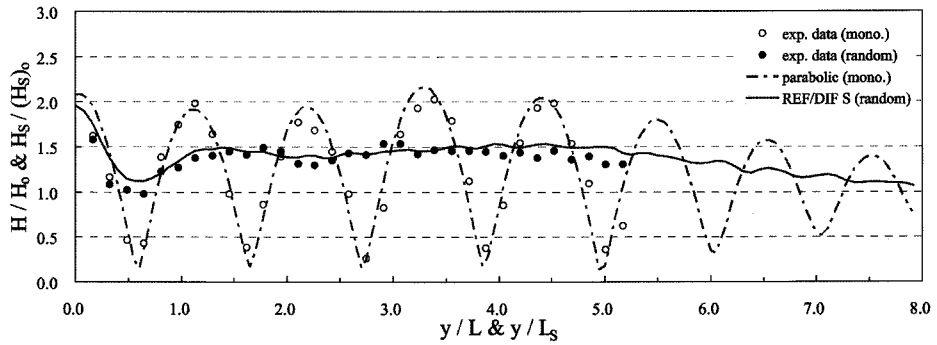
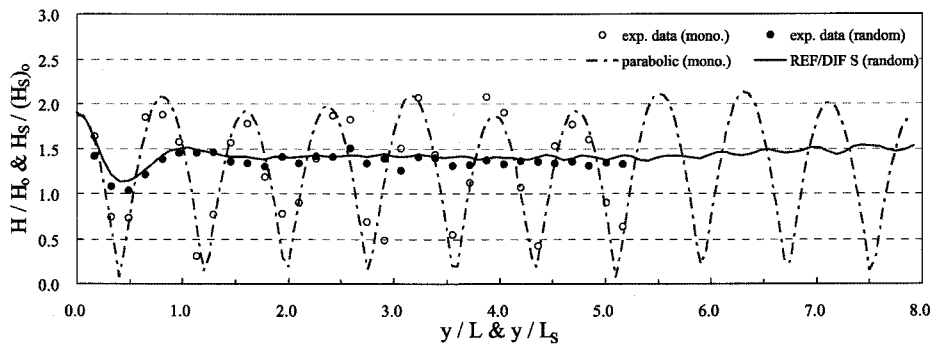
(a) $\beta = 10^\circ$ (b) $\beta = 19^\circ$ (c) $\beta = 28^\circ$ (d) $\beta = 40^\circ$

Fig. 8. Comparison of monochromatic and random waves along normal to the wall for CASE 1.

하면 파고는 거의 일정해지는 현상은 규칙파 및 불규칙파 모두 동일하게 나타났다. 또한 제체 전면을 따라 증폭되는 정도는 규칙파와 불규칙파간의 차이는 크지 않았다.

(2) 제체 직각방향으로의 파고분포는 규칙파 및 불규칙파의 결과가 큰 차이를 보였지만, 연파의 폭은 동일함을 알 수 있었다. 불규칙파의 경우에 제체 직각방향으로의 상대 유의파고는 입사각이 증가할수록 크게 나타났으며, 본 실험조건에서 $\beta > 28^\circ$ 인 경우에는 $H_s/H_{s0} \approx 1.5$ 에 접근함을 알 수 있었다.

(3) REF/DIF S 모형에 의한 해석결과와 수리모형실험 결과를 비교했을 때 비교적 좋은 일치율을 보였으며, 이에 본 연구에서 수행한 수리실험결과는 충분한 정확도를 가진다고 판단된다.

본 연구의 실험자료는 향후 새로운 파랑전파모형이 개발될 때 정밀도를 검토하는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 또한 파랑의 비선형성이 큰 경우에 대한 추가적인 수리실험이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 이종인, 김영택, 윤성범 (2007). Boussinesq방정식을 이용한 규칙파의 연파해석. 한국해양-해양공학회지, 19(5), 446-456.
- 이종인, 윤성범 (2006). 직립벽을 따른 연파의 수리 및 수치실험. 대한토목학회논문집, 26(4B), 405-412.
- Berger, V. and Kohlhasse, S. (1976). Mach-reflection as a diffraction problem. Proc. 15th Conf. Coastal Engineering, ASCE, Vol. 1, 796-814.
- Kirby, J.T. and Özkan, H.T. (1994). Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions, REF/DIF S (Version 1.1), Documentation and User's Manual. CACR Report No. 94-04, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
- Liu, P.L.-F. and Yoon, S.B. (1986). Stem waves along depth discontinuity. J. of Geophysical Research, 91(C3), 3979-3982.
- Mase, H., Memita, T., Yuhi, M., and Kitano, T. (2002). Stem waves along vertical wall due to random wave incidence. Coastal Engineering, 44, 339-350.
- Melville, W.K. (1980). On the Mach reflection of solitary wave. J. of Fluid Mechanics, 98, 258-297.
- Perroud, P.H. (1957). Solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence. Univ. of California-Berkeley IRE Technical Report 99-3.
- Yoon, S.B. and Liu, P.L.-F. (1989). Stem waves along breakwater. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 111(5), 635-648.
- Yue, D.K.P. and Mei, C.C. (1980). Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge. J. of Fluid Mechanics, 99, 33-52.

Received October 5, 2007

Accepted January 28, 2008