경사입사파 조건에서 유공벽 전면의 파고분포에 대한 실험 : 규칙파 조건

Experiments of Wave Heights in front of a Perforated Wall under Obliquely Incident Waves: Monochromatic Wave Conditions

이종인* · 김영택**

Lee, Jong In · Kim, Young Taek

Abstract

This study investigates the wave height distributions in front of a perforated wall generated by obliquely incident monochromatic waves through laboratory experiments conducted in a wave basin. Attention is paid to the difference or similarity between a plain wall and a perforated wall. And the investigation is focused on the chamber width and side wall effects of a perforated wall on the propagation characteristics of waves. The main results of this study show that the normalized wave height along a perforated wall is a significant difference compare to a plain wall cases. The side wall in the chamber suppresses the growth of the stem waves.

Keywords: laboratory experiment, perforated wall, side wall, chamber width, monochromatic wave

요 지

본 연구에서는 규칙파를 대상으로 한 경사입사파 내습시 유공벽 전면에서의 파고분포를 파악하기 위해 평면수조를 이용한 수리실험을 수행하였다. 본 연구는 파랑의 전파특성에 있어 무공벽과 유공벽의 차이점과 유사점에 대해 검토하였으며, 특히 유공벽의 유수실 폭과 유수실내 격벽의 효과에 대해 검토하였다. 제체 전면의 상대파고는 유공벽인 경우와 무공벽인 경우에 매우 큰 차이가 있음을 보였으며, 유수실내 격벽은 연파의 발달을 억제시키는 것으로 나타났다.

핵심용어: 수리실험, 유공벽, 격벽, 유수실 폭, 규칙파

1. 서 론

선박의 대형화 등으로 인해 적정 수심 및 충분한 항내 수역의 확보 등을 위해 외곽방파제 및 접안시설이 비교적 수심이 깊은 해역에 건설되는 사례가 증가하고 있으며, 대수심역의 구조물형식은 경제성 등을 감안하여 직립식 구조물이 선호되고 있는 실정이다. 경사식 구조물은 사면에서 내습파의 쇄파를 유도하여 반사파를 저감시키지만 직립식 구조물은 내습파 에너지의 대부분을 반사시킴으로서 구조물 전면에 고파랑이 형성되게 된다. 또한 파랑이 직립식 구조물에 경사지게 입사하게 될 경우에는 연파 발생으로 인해 파고가 증폭되어 월파 발생이 증가하고, 이러한 파고 증폭은 직립식 구조물 저면블록의 안정성 확보에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 반사파와 연파 등을 저감시키기 위해 파랑이 직접 내습하는 부분에 유공부를 설치한 유공형 구조물의 도입이 일반화 되고 있다. 또한 접안시설의 경우에도 선체동요의

저감 등을 위해 반사파 및 연파 등을 저감시키고자 유공형태의 안벽이 도입되고 있다. 이러한 유공방파제 및 유공안벽에 대한 소파특성 등은 일반적으로 파랑이 구조물에 직각으로 입사하는 조건인 2차원 수리실험을 통해 대부분 검토되어 왔다. 직립식 구조물을 대상으로 연파특성에 대한 기존 연구에서 무공형태의 직립벽(plain wall)에 대한 수리실험 및 수치해석 연구는 다수 수행되었지만, 경사입사파 조건에서 직립 유공벽(perforated wall)에 대한 연파특성 연구는 상대적으로 미미한 실정이다.

기존 연구의 대부분은 비월파조건에서 무공형태의 직립벽을 대상으로 규칙파, 불규칙파, 고립파 및 크노이드파 등을 적용하여 수치해석 및 수리실험을 통해 연파특성을 검토하였다(Perroud, 1957; Melville, 1980; Yue and Mei, 1980; Berger and Kohlhase, 1976; Liu and Yoon, 1986; Yoon and Liu, 1989; Mase *et al.*, 2002). 주된 연구내용으로는 파랑과 구조물이 이루는 각에 따른 연파특성, 파랑의 비선형에

*정회원 · 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 부교수 (E-mail : jilee@chonnam.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원 (E-mail : ytkim@kict.re.kr)

다른 연파특성, 그리고 파랑특성에 따른 연파의 발달 등이다. 국내 연구로서 이중인과 윤성범(2006)은 직립구조물을 대상으로 규칙파 조건에서 수리실험과 수치해석을 수행하여 입사각 및 파랑의 비선형성에 따른 연파특성을 검토하였으며, 이중인 등(2008)은 일방향 불규칙파를 대상으로 수리실험 및 수치해석결과를 비교하고, 규칙파 조건의 결과와 비교하여 입사파의 특성에 따른 차이점을 분석하였다. 그리고 유형석 등(2010)은 다방향 불규칙파에 의한 직립벽에서의 연파특성을 실험적으로 검토하였으며, 다방향 불규칙파의 경우는 일방향 불규칙파에 비해 연파의 크기가 작음을 보였다.

본 연구에서는 직립 유공벽에 대한 연파특성을 검토하기 위해 수리실험을 수행하였다. 수리실험은 비쇄파조건의 일정 수심상에서 수행되었으며, 입사파는 규칙파를 대상으로 하였다. 수리실험에서 입사각, 입사파의 주기 및 파고, 직립 유공벽의 유수실 폭 및 유수실 내 격벽의 유무와 형상 등에 따른 제체 전면의 파고분포를 계측하여 그 특성을 비교 분석 하였다. 그리고 직립 유공벽에 대한 파고분포는 직립 무공벽의 실험결과와 비교하여 그 차이점을 검토하였다.

2. 실험시설

2.1 실험시설 및 장비

본 실험에 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 전체폭은 30 m이고, 조파기는 60개의 구동부로 구성되어 있으며, 전기서보피스톤식이다. 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 0.6 m이고, 측정범위는 $0 \sim \pm 30$ cm이며, 본 실험시 16대의 파고계를 운용하였다.

2.2 실험영역

연파특성에 대한 수리실험을 위해 전술한 다방향 조파수조 내에 길이 20 m의 직립 유공벽을 설치하였다. 수리실험은 유한한 수조 내에서 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 좌·우측면은 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 발생한 파랑을 유도하고, 조

Fig. 1 Experimental setup

파기 후면으로부터 발생한 반사파가 실험영역 내에 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.

3. 실험모형 및 실험조건

본 실험에서 사용된 직립 유공벽 모형은 아크릴로 제작하였으며, 모형의 폭(W)과 높이($h_0 + h_c$)는 0.6 m이고, 길이는 20 m이다. 실험은 일정수심상에서 규칙파를 대상으로 수행하였으며, 실험에 적용된 수심(h_0)은 0.45 m로서 정수면으로부터 구조물 상단까지의 여유고(h_c)는 0.15 m이다. 유공부 전체 높이는 0.138 m이고, 정수면으로부터 유공부 상단까지의 거리(S_u)는 0.075 m, 정수면으로부터 유공부 하단까지의 거리(S_l)는 0.063 m이다. 그리고 유수실 폭(C_w)은 0.125 m와 0.250 m를 적용하였으며, 전면 유공벽(front wall)은 $b_1=0.015$ m, $b_2=0.02$ m, $b_3=0.01$ m 및 $b_4=0.03$ m이고, 유공부 구간만을 대상으로 하였을 때 유공율은 약 30.8%이다. 본 연구에서 수행한 대부분의 유공벽 실험에서는 $C_w=0.125$ m를 적용하였다. 그리고 단위함체의 길이(B)는 0.78 m이고 유공벽의 두께(t)는 0.01 m이다(Fig. 2 참조). 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 주기(T_0)는 $T_0=0.9$ sec와 $T_0=1.6$ sec이고, 파고(H_0)는 0.03 m와 0.06 m를 적용하였다. $h_0=0.45$ m 조건에서 $T_0=0.9$ sec인 경우, 선형분산관계식으로부터 계산된 파장(L)은 1.238 m로서 $H_0=0.06$ m인 경우에 $kH_0=0.3045$, $\varepsilon=H_0/h_0=0.1333$ 이다. $T_0=1.6$ sec인 경우에는 $L=2.963$ m이며, $H_0=0.06$ m인 조건에서 $kH_0=0.1272$, $\varepsilon=0.1333$ 이다. 여기서, k 는 입사파의 파수, H_0 는 입사파의 파고이다. 따라서

Fig. 2 Model structure

Table 1. Incident wave conditions

Case	Wave period (T_0 , sec)	Wave height (H_0 , m)	Relative water depth (kh_0)	Nonlinearity of incident wave		Incident angle (β)	Water depth (h_0 , m)
				Relative wave height ($\varepsilon=H_0/h_0$)	Wave steepness (kH_0)		
M11	0.9	0.03	2.284	0.0677	0.1522	0° 10° 20° 30° 40°	0.45
M12	0.9	0.06	2.284	0.1333	0.3045		
M21	1.6	0.03	0.954	0.0677	0.0636		
M22	1.6	0.06	0.954	0.1333	0.1272		

실험에 사용된 모형 길이 20 m는 $T_0=0.9$ sec에 대해서는 $16.1L$, $T_0=1.6$ sec에 대해서는 $6.7L$ 에 해당된다. 실험에 적용된 입사파 조건은 실험시 쇄파가 발생하지 않는 조건이며, 구조물과 입사파가 이루는 각(β)은 0°, 10°, 20°, 30°, 40°이다. 수리실험에 사용된 조파기가 사형조파기이므로 경사입사파를 재현할 수 있으나, 입사각이 커질 경우에는 회절파로 인해 실험결과와 정확도가 저하될 수 있어 본 연구에서는 입사파는 조파선에 직각방향의 일방향으로 조파하고 직립 유공벽 모형의 설치각도를 변경시켜 입사각(β)을 조절하였다. 실험에 적용된 입사파 조건을 요약하면 Table 1과 같다. 실험

시 입사파는 Fig. 1의 $x_0=y_0=0$ 인 위치에서, 그리고 구조물이 설치되지 않은 조건에서 진행파 개념으로 설정하였다.

구조물과 경사입사파에 의해 발생하는 연파는 구조물을 따른 방향(x 방향)과 구조물의 직각방향(y 방향)으로 계측을 하였으며, 구조물을 따른 파고는 제체전면에서 0.05 m 떨어진 위치에서 계측하였다. $T_0=0.9$ sec인 경우, 구조물 전면을 따른 파고는 $x=0\sim 6.4$ m 구간은 $\Delta x=0.2$ m 간격, $x=6.4\sim 18.8$ m 구간은 $\Delta x=0.4$ m 간격으로 계측하였으며, $T_0=1.6$ sec인 경우에는 $x=0\sim 18.8$ m 구간을 $\Delta x=0.4$ m 간격으로 계측하였다. 그리고 $T_0=0.9$ sec인 경우에 $x/L=15$ 인 지점, $T_0=1.6$ sec인

Table 2. Wave height measurement conditions

Case	x-direction (along the front wall)		y-direction (normal to the wall)	
			$x/L=6$	$x/L=15$
M11 & M12	$x=0 \text{ m} \sim 6.4 \text{ m}$ ($\Delta x=0.2 \text{ m}$)	$x=6.4 \text{ m} \sim 18.8 \text{ m}$ ($\Delta x=0.4 \text{ m}$)	-	$y=0.2 \text{ m} \sim 6.4 \text{ m}$ ($\Delta y=0.2 \text{ m}$)
M21 & M22	$x=0 \text{ m} \sim 18.8 \text{ m}$ ($\Delta x=0.4 \text{ m}$)		$y=0.2 \text{ m} \sim 6.4 \text{ m}$ ($\Delta y=0.2 \text{ m}$)	-

경우에 $x/L=6$ 인 지점에서 구조물의 직각방향으로 파고를 계측하였다. 구조물 직각방향으로는 $y=0.2 \sim 6.4 \text{ m}$ 까지 $\Delta y=0.2 \text{ m}$ 간격으로 파고를 계측하였다. 실험시 조파시간은 300 sec로서 $T_0=0.9 \text{ sec}$ 인 경우에 약 333파, $T_0=1.6 \text{ sec}$ 인 경우에 약 188파에 해당되며, 파고분석은 후반부 205 sec($T_0=0.9 \text{ sec}$)의 경우에 약 228파, $T_0=1.6 \text{ sec}$ 인 경우에 약 128파) 동안 계측된 자료를 이용하였다. 본 실험에서 수행한 계측조건을 요약하면 Table 2와 같다.

본 연구에서 수행한 경사임사와 내습시 직립 유공벽 전면을 따른 파고분포 실험에서 전면 유공벽은 Fig. 2(c)와 같이 일정하지만, 유수실내 격벽(side wall)은 격벽이 없는 경우, 격벽이 무공벽(plain wall)인 경우와 유공벽(perforated wall)인 경우에 대해 수행하였다(Fig. 2(b) 참조). 격벽이 유공벽인 경우는 Fig. 2(c)의 유공부 제원과 동일하다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 직립 유공벽의 연파특성을 분석하기 위해 입사파의 입사각, 파고 및 주기, 유수실내 격벽의 유무와 격벽의 형식, 유수실 폭의 변화 등에 따른 제체 전면 및 제체

Photo 1. Wave pattern in front of perforated wall

직각방향으로의 파고를 계측하여 비교 분석하였다. 직립 유공벽을 대상으로 계측된 자료는 직립 무공벽의 실험결과와 비교하여 유공벽이 파랑의 에너지 감쇠에 미치는 영향을 분석하였다. Photo 1은 $\beta=30^\circ$ 조건의 유공벽 실험전경을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 M12의 파랑조건에서 $\beta=10^\circ$ 와 30° 에 대해 제체 전면을 따른 상대파고를 무공 직립벽(plain wall)인 경우, 전면벽이 유공벽(perforated wall)인 조건에서 격벽(side wall)

(a) $\beta=10^\circ$ (b) $\beta=30^\circ$ Fig. 3 Relative wave heights along a perforated wall by structure types for M12 & $C_w/L \approx 0.101$

이 없는 경우와 격벽이 존재하는 경우에 대한 결과를 비교 도시한 것이다. 그리고 Fig. 3은 M12 입사파 조건에서 상대유수실효(C_w/L)이 $C_w/L \approx 0.101$ 인 경우의 결과이다. 전면벽이 유공벽이지만 격벽이 없는 경우는 구조물 시점부로부터 $x/L \approx 6$ 까지는 유수실효 효과로 인해 무공벽에 비해 상대

파고가 작게 나타나지만 그 이후부터는 무공벽의 결과와 거의 동일하게 나타났다. 따라서 전면벽이 유공벽이라 할지라도 유수실효내 격벽이 파랑의 발달에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 전면벽이 유공벽이고 격벽이 존재하는 경우에는 입사각이 증가함에 따라 반사파의 증가로 제체 전면의 상대파고

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

(b) $\beta=30^\circ$

Fig. 4 Relative wave heights along a perforated wall by structure types for M22 & $C_w/L \approx 0.042$

(a) M12

(b) M22

Fig. 5 Relative wave heights along a perforated wall by incident angles for without side wall & $C_w=0.125$ m

는 크게 계측되었지만 대부분의 실험계측구간에서 $H/H_0 \leq 1$ 로 나타났으며, 유수실내 격벽이 무공벽인 경우와 유공벽인 경우의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 4는 M22의 입사파를 적용하였을 때의 제체 전면을 따른 상대파고를 비교 도시한 것으로서 전반적인 경향은 M12 입사파 조건의 결과인 Fig. 3과 유사하게 나타났다. 즉, 전면벽이 유공벽이라 하더라도 격벽이 없는 경우는 무공벽인 경우와 상대파고가 거의 동일하게 나타나며, 전면벽이 유공벽인 경우에 격벽의 형상에 따른 차이는 크지 않았다. 전체적으로 입사각이 커짐으로써 상대파고는 증가하였으며, 실험조건 내에서 $H/H_0 \geq 1$ 로 나타났다. 그리고 M12 입사파 조건에서는 구조물 시점으로부터 $x/L \approx 6$ 까지는 격실이 없는 유공벽의 상대파고가 무공벽에 비해 작게 나타났지만, M22 입사파 조건에서는 거의 동일하게 나타났다. M12 입사파 조건에 비해 M22 입사파 조건의 경우에 상대파고가 크게 나타난 것은 M12 입사파 조건의 경우에는 $C_w/L \approx 0.101$ 이지만, M22 입사파 조건의 경우에는 $C_w/L \approx 0.042$ 로서 상대유수실 폭이 작기 때문에 유수실에 의한 에너지감쇠 효과가 상대적으로 미약하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 전면벽이 유공벽이고 격벽이 없는 경우에 대해 입사각에 따른 제체 전면의 상대파고를 도시한 것으로서 입사각이 증가함에 따라 상대파고 또한 증가하며, 상대유수실 폭이 작은 경우가 보다 큰 상대파고 값을 보였다. Fig. 5(a)에서 $\beta=30^\circ$ 의 경우에 $x/L > 12$ 인 구간에서 상대파고가 급격히 낮게 나타남을 볼 수 있는데 이는 실험시 발생한 계측기의 오류인 것으로 판단된다. Fig. 5에 도시한 $\beta=30^\circ$ 까지의 결과만으로도 격벽의 필요성은 확인되었으며, $\beta=40^\circ$ 조건의 결

과는 추후 불규칙파 조건의 결과와 비교시 제시할 예정이다. Fig. 6은 전면벽이 유공벽이고 격벽이 무공벽인 단면에 대한 입사각에 따른 실험결과로서 입사각이 증가하고 상대유수실 폭이 작은 경우에 상대파고가 증가하는 것은 Fig. 5의 경향과 동일하지만 상대파고 값의 크기는 큰 차이를 보인다. 전면벽이 유공벽이고 격벽이 있는 경우에는 유공부와 유수실에 의한 에너지 감쇠효과로 제체 전면의 파고는 비교적 작게 나타났다. 파랑발달이 어느 정도 이루어져 제체 전면을 따른 상대파고의 변화가 크지 않은 유공벽 전면구간에서 M12 입사파의 경우에 $\beta \leq 20^\circ$ 인 조건에서 $H/H_0 \leq 0.5$, $30^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$ 인 조건에서 $H/H_0 = 1.0 \sim 1.2$ 로 계측되었으며, M22 입사파의 경우에는 M12인 조건에 비해 상대유수실 폭이 작기 때문에 실험조건내에서 $H/H_0 = 1.0 \sim 1.7$ 의 범위로 나타났다. 전술한 바와 같이 유수실내 격벽은 파랑의 증폭을 저감시키는데 큰 역할을 함을 다시한번 확인할 수 있다.

최근 국내에서 수행된 방파제 및 안벽에 대한 설계사례를 살펴보면, 구조물 건설수심이 비교적 깊어짐에 따라 경제성 등을 감안하여 경사제보다는 직립제를 선호하고 있으며, 내습파의 대부분을 반사시키는 무공형 직립구조물의 단점을 보완하기 위해 유공형 직립구조물의 채택이 증가하고 있다. 이러한 유공형 직립구조물의 설계사례에서 유수실내 격벽을 유공형으로 채택하였지만, 격벽을 Fig. 2(b)와 같은 다열 slit 형태로 설계하는 것이 아니라 하나의 큰 사각형 형태로 설계하는 사례를 종종 확인할 수 있다. 이러한 경우에는 격벽이 없는 조건과 유사하기 때문에 경사입사파 내습시 유공형 직립구조물의 채택에 따른 연파저감 효과는 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구결과에서 나타난 바와 같이 경

Fig. 6 Relative wave heights along a perforated wall by incident angles for with plain side wall & $C_w=0.125$ m

(a) M11 & M12

(b) M21 & M22

Fig. 7 Relative wave heights along a perforated wall by structure types and incident wave heights for $\beta=10^\circ$ & $C_w=0.125$ m

사입사파에 의한 파랑증폭을 저감시키기 위해 유공형 직립 구조물을 채택하는 경우에 격벽은 반드시 필요하며, 격벽의 형태는 무공형 또는 다열 slit 형태로 설계되어야 한다.

Fig. 7은 $C_w=0.125$ m인 유공벽 조건에서 $\beta=10^\circ$ 인 경우에 대해 입사파고의 변화에 따른 제체 전면의 상대파고를 비교 도시한 것이다. M11과 M12인 경우에 입사파의 비선형성은 각각 $kH_0=0.1522$ 와 $kH_0=0.3045$ 이며, M21과 M22인 경우에는 각각 $kH_0=0.0636$ 과 $kH_0=0.1272$ 이다. Fig. 7(a)를 살펴보면 무공벽과 격벽이 없는 유공벽의 경우에 비선형성이 큰 입사파 조건에서 상대파고가 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 기존 연구결과에서와 같이 비선형성이 클수록 제체 전면을 따른 파랑의 증폭은 감소하는 반면에 제체 직각방향으로의 연파의 폭은 증가하는 결과와 동일한 결과이다(Yoon and Liu, 1989; 이종인과 윤성범, 2006; 이종인 등, 2008). 격벽이 있는 유공벽의 경우에는 본 실험조건 내에서 파랑의 비선형성에 따른 큰 차이는 보이지 않았으나 비선형성이 작은 경우에 상대파고가 다소 작게 나타나는 경향을 보였다. 유공케이슨에 대한 2차원 실험에서 파랑의 비선형성이 큰 경우가 반사계수가 작게 나타나는 것이 일반적인 경향인 것에 반해 다소 상반되는 경향을 보인 것이다(한국건설기술연구원, 2000). 따라서 현재 다양한 상대수심조건과 비선형성 조건의 체계적인 유공벽 실험이 진행중이므로 파랑의 비선형효과는 추후 상세히 검토하고자 한다. Fig. 7(b)는 M21과 M22 입사파 조건의 결과로서 M11과 M12에 비해 파랑의 비선형성이 작기 때문에 비선형성에 따른 차이는 거의 나타나지 않았으며, 또한 파장이 상대적으로 길기 때문에 본 실험에 적용된 모형의 연장으로는 연파의 발달이 충분하지 않

아 무공 직립벽의 경우에도 최대 상대파고가 1.5 정도로 나타났다. M21과 M22 조건은 상대적으로 비선형성이 작기 때문에 연파가 충분히 발달할 수 있는 연장이라면 H/H_0 는 2 이상 될 것으로 판단된다.

Fig. 8은 $\beta=0^\circ$ 인 경우에 대한 제체 전면의 상대파고를 도시한 것으로서 격벽이 있는 유공벽의 경우가 격벽이 없는 경우보다 상대파고가 작게 나타남을 알 수 있다. Fig. 8(a)에서 M12의 경우에 격벽이 있는 유공벽은 구조물 시점으로부터 일정거리 이상 진행하면 유수실에서의 에너지감쇠로 인해 $H/H_0 \leq 0.1$ 에 수렴하며, 격벽이 없는 경우에는 $H/H_0 \approx 1$ 로 나타나 유수실에 의한 에너지감쇠가 거의 없는 것으로 나타났다. 입사파의 파장이 상대적으로 긴 M22 조건의 결과인 Fig. 8(b)에서 격벽이 있는 유공벽 전면의 상대파고는 $H/H_0 \approx 0.6$ 으로 나타났으며, 이는 M12 조건에 비해 상대유수실 폭 (C_w/L)이 좁기 때문에 에너지감쇠가 상대적으로 미약하기 때문이다. 그리고 격벽이 없는 경우에는 $H/H_0 \approx 1$ 로 예측되어 소파효과가 없는 것으로 나타났다. 전술한 바와 같이 유수실 내 격벽은 경사입사파 내습시 유공 구조물의 소파효과 증대에 영향이 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

전체적으로 제체 전면을 따른(x방향) 상대파고 분포를 살펴보면 상대파고가 주기적으로 진동하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 파랑의 비선형효과에 의한 고차 조화성분의 발생이 주요 원인인 것으로 판단되며, 자세한 내용은 이종인 등(2007)을 참조할 수 있다.

Fig. 9는 상대유수실 폭이 $C_w/L \approx 0.101$ 인 조건에서 M12의 입사파를 적용하였을 경우에 대한 제체 직각방향의 상대파고를 입사각별로 도시한 것이다. 유수실내 격벽이 없는 유

(a) M12

(b) M22

Fig. 8 Relative wave heights along a perforated wall by structure types for $\beta=0^\circ$ & $C_w=0.125$ m

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

(b) $\beta=30^\circ$

Fig. 9 Relative wave heights normal to a perforated wall by structure types at $x/L=15$ for M12 & $C_w/L \approx 0.101$

공벽의 경우는 무공벽의 결과에 비해 상대파고는 약간 작게 나타나지만 전체적으로 유사한 경향을 보이고, 입사각이 증가할수록 그 차이는 크게 나타났으며, 어느 정도의 위상차이는 있지만 무공벽과 같이 중복파가 뚜렷이 형성됨을 볼 수 있다. 전면벽이 유공벽이고 격벽이 있는 경우는 전면벽이 무

공벽인 경우와는 달리 체체 전면에서의 상대파고가 낮게 나타남을 볼 수 있으며, 체체로부터 약 1파장($y/L \approx 1$) 이후부터 $H/H_0 \geq 1$ 이고 중복파가 형성이 되지만 그 크기는 무공벽에 비해 작음을 알 수 있다. 체체 전면의 상대파고가 작은 것은 근교부의 안정성 확보에 유리하며, 선박이 접안하는 안

Fig. 10 Relative wave heights normal to a perforated wall by structure types at $x/L=6$ for M22 & $C_w/L \approx 0.042$

Fig. 11 Relative wave heights normal to a perforated wall by incident angles for with plain side wall & $C_w=0.125$ m

벽의 경우에는 접안된 선체의 동요가 줄어들 수 있는 유리한 조건이 된다. Fig. 10은 상대유수실 폭이 $C_w/L \approx 0.042$ 인 조건에서 M22의 입사파를 적용하였을 경우로서 상대파고의 분포는 Fig. 9와 동일한 경향이지만 단면형상별 차이점을 보다 명확하게 알 수 있다. M22 조건의 경우에는 M12 조건

에 비해 상대유수실 폭이 작기 때문에 제체 전면의 상대파고는 M12 조건에 비해 크게 계측되었다.

Fig. 11은 전면벽이 유공벽이고 격벽이 무공벽인 단면에 대한 제체 직각방향으로의 계측결과로서 M12와 M22 파랑 조건을 적용하여 각각 $x/L=15$ 와 $x/L=6$ 위치에서 상대파고를

(a) M11 and M12 at $x/L=15$

(b) M21 and M22 at $x/L=6$

Fig. 12 Relative wave heights normal to a perforated wall by structure types and incident wave heights for $\beta=10^\circ$ & $C_w=0.125$ m

(a) M12 at $x/L=15$

(b) M22 at $x/L=6$

Fig. 13 Relative wave heights normal to a perforated wall by structure types for $\beta=0^\circ$ & $C_w=0.125$ m

도시한 것이다. 전체적으로 입사각이 증가함에 따라 반사와 증대로 인해 제체 전면에서의 상대파고가 크게 나타나는 일반적인 경향을 보이고 있다.

Fig. 12는 입사파의 비선형성에 따른 상대파고를 제체 직

각방향으로 도시한 것으로서 전체적인 경향은 제체 전면을 따른 상대파고를 도시한 Fig. 7과 같다. 전면벽이 무공벽인 경우와 전면벽이 유공벽이고 격벽이 없는 경우는 비선형성이 큰 조건에서 연파의 폭은 상대적으로 넓고, 상대파고는

(a) M12

(b) M22

Fig. 14 Relative wave heights along a perforated wall by chamber width and incident angle for without side wall

(a) M12 at $x/L=15$

(b) M22 at $x/L=6$

Fig. 15 Relative wave heights normal to a perforated wall by chamber width and incident angle for without side wall

작게 예측되었다. 그리고 전면벽이 유공벽이고 격벽이 존재하는 경우는 Fig. 7의 결과와 마찬가지로 비선형성이 작은 경우가 큰 경우에 비해 상대파고가 작게 예측되었으며, 이에 대해서는 추후 검토하고자 한다.

Fig. 13은 $\beta=0^\circ$ 인 경우에 대한 제체 전면의 상대파고를 도시한 것으로서 전면벽이 유공벽이고 격벽이 없는 경우는 $y/L \leq 1.5$ 까지 $H/H_0 \approx 0.8 \sim 1.0$ 범위를 보이며, 격벽이 무공벽인 경우는 구조물 전면으로부터 $y/L \leq 1.5$ 까지 $H/H_0 \leq 1$ 로 나타나 유수실내 격벽에 의한 에너지감쇠를 확인할 수 있다. 격벽이 없는 조건에 비해 격벽이 존재하는 경우에 제체 전면 상대파고가 작게 분포함으로서 혼성제 근고부의 안정성 및 활용측면에서 유리하게 작용하게 될 것이다.

Fig. 14와 Fig. 15는 전면벽이 유공벽이고 격벽이 없는 단면조건에서 유수실폭에 따른 상대파고를 도시한 것이다. 제체 전면뿐만 아니라 제체 직각방향으로의 상대파고는 상대유수실 폭이 넓은 조건에서 낮게 나타남을 알 수 있다. 기존의 유공벽에 대한 2차원 실험결과에 따르면 규칙파의 경우에는 $C_w/L \approx 0.25$ 에 최적의 소파성능을 보이는 것으로 제시되어 있다. Fig. 14와 Fig. 15에서 $C_w/L \approx 0.202$ 인 경우가 $C_w/L \approx 0.101$ 인 경우에 비해 상대파고가 작게 나타남으로서 2차원 실험결과와 부합됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

직립 무공벽에 대해서는 다수의 연구자들에 의해 연파특성이 검토되었으나 직립 유공벽인 경우는 상대적으로 미흡한 실정이며, 유공벽에 대한 연구는 구조물에 직각으로 입사하는 조건인 2차원 실험으로 유공벽의 소파특성을 검토한 연구가 대부분이었다. 본 연구에서는 직립 유공벽을 대상으로 경사입사와 내습시 연파특성을 검토하였으며, 전면벽이 유공벽인 조건에서 유수실내 격벽의 유무와 격벽의 형상에 따른 수리실험을 수행하고, 전면벽이 무공벽인 조건과 비교하였다. 본 실험결과는 수치모형을 이용한 해석의 검증자료로 활용될 수 있기를 기대하며, 본 연구로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 방파제 및 안벽 등과 같은 항만구조물 설계시 유공형 구조물을 적용하는 주된 이유중의 하나는 유수실에서의 에너지 소파효과를 이용하여 반사파를 저감시키기 위함이며, 직각 입사뿐만 아니라 경사입사와 조건에서도 유공형 구조물에 의한 소파효과를 확인할 수 있었다.
2. 경사입사와 내습시, 무공벽과는 달리 유공벽의 경우에는 제체 전면에서 낮은 상대파고가 분포함을 알 수 있었으며, 본 연구에서 수행한 실험과 조건내에서 상대유수실 폭 $C_w/L \approx 0.101$ 인 경우는 $H/H_0 \leq 1$, $C_w/L \approx 0.042$ 인 경우는 $H/H_0 \leq 1.6$ 범위로 제체 전면의 파고가 분포하였다.
3. 제체 직각 방향의 상대파고 또한 무공벽인 경우와는 달리 제체 전면에서 낮은 상대파고를 보였다. 제체 전면의 파고

가 낮게 형성된다는 것은 직립 구조물의 저면에 위치하는 근고부의 안정성 확보와 접안되어 있는 선체의 동요가 저감될 수 있다는 측면 등에서 유리하게 작용하게 된다.

4. 유공형 구조물인 경우에 유수실내 격벽의 존재가 파랑발달의 저감에 중요함을 보였으며, 유수실내 격벽은 무공벽 또는 다열 slit 형태의 유공벽을 적용하는 것이 소파효과 증대에 유리함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 지원과제인 “기후변화 대응 항만설계기준 개선 방안연구(1단계)” 과제의 성과임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양과학기술진흥원의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 유형석, 김규환, 정의진(2010) 다방향 불규칙파에 의한 직립벽 주위의 연파특성. **한국해양과학기술학회 논문집**, 한국해양과학기술학회, 제22권 제6호, pp.429-436.
- 이종인, 김영택, 윤성범(2007) Boussinesq방정식을 이용한 규칙파의 연파해석. **한국해양과학기술학회 논문집**, 한국해양과학기술학회, 제19권 제5호, pp.446-456.
- 이종인, 윤성범(2006) 직립벽을 따른 연파의 수리 및 수치실험. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권 제4B호, pp.405-412.
- 이종인, 최준우, 윤성범(2008) 직립벽을 따른 일방향 불규칙파의 연파실험. **한국해양과학기술학회 논문집**, 한국해양과학기술학회, 제20권 제1호, pp.49-61.
- Berger, V. and Kohlhase, S. (1976) Mach-reflection as a diffraction problem. *Proc. 15th Conf. Coastal Eng., ASCE*, Vol. 1, pp.796-814.
- Liu, P.L.-F. and Yoon, S.B. (1986) Stem waves along depth discontinuity. *J. Geophy. Res.*, Vol. 91, No. C3, pp. 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 Mech.*, Vol. 98. pp.258-297.
- Perroud, P.H. (1957). *Solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence*. Univ. of California-Berkely 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 Eng.*, ASCE, Vol. 111(5), pp.635-648.
- Yue, D.K.P. and Mei, C.C. (1980). Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 99, pp.33-52.

(접수일: 2012.5.2/심사일: 2012.6.6/심사완료일: 2012.6.29.)