

직립벽을 따른 연파의 수리 및 수치실험

Hydraulic and Numerical Experiments of Stem Waves along a Vertical Wall

이종인* · 윤성범**

Lee, Jong In · Yoon, Sung Bum

Abstract

This study investigates the characteristics of stem waves along a vertical wall generated by obliquely incident monochromatic waves through laboratory experiments conducted in a wave basin and numerical simulations using parabolic approximation equations. The investigation is focused on the nonlinear effect of incident waves on the propagation characteristics of stem waves. Numerical results are compared with laboratory measurements and good agreements are obtained. The main results of this study show that the normalized stem wave height along the wall decreases and the stem width increases as the angle of incident waves decreases or the nonlinearity of the incident waves increases.

Keywords : stem wave, laboratory experiment, numerical simulation, parabolic approximation equation, monochromatic waves

요 지

본 연구에서는 직립벽을 따른 규칙파의 연파특성을 평면수조를 이용한 수리실험과 포물형근사식을 이용한 수치해석을 통해 검토하였다. 본 연구는 파랑의 비선형성이 연파의 전파특성에 미치는 영향을 검토하는 것으로서 수리실험결과와 수치해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 연구로부터 입사각이 작아지고 입사파의 비선형성이 증가할수록 연파의 파고는 감소하고, 연파의 폭은 증가함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 연파, 수리모형실험, 수치해석, 포물형근사식, 규칙파

1. 서 론

연안개발을 위해 설치되는 구조물의 대부분은 천해역에 건설되고 있으며, 안정하고 경제적인 구조물을 설계하기 위해서는 파랑과 구조물의 상호작용을 해석할 필요가 있다. 직립방파제 또는 직립안벽 등과 같은 구조물은 사석경사제와는 달리 전면에 선박 등을 접안할 수 있는 장점이 있으며, 이러한 직립구조물에 파랑이 경사지게 입사하면 구조물을 따라 진행되는 연파(stem wave)가 발생하게 된다. 따라서, 직립구조물의 마루높이 등의 결정시 연파의 특성을 고려할 필요가 있다.

Perroud(1957)는 직립벽에 대한 고립파의 반사에 대한 실험에서 입사파와 직립벽이 이루는 각도가 45° 보다 작을 때 세 개의 파, 입사파, 반사파 그리고 직립벽을 따라 진행되는 연파가 존재함을 발견하였다. 그리고 고립파(solitary wave)가 진행할 때 발생하는 연파의 폭은 파랑이 진행할수록 커지며, 연파의 높이도 증가하지만 입사파와의 두배보다는 작다는 실험결과가 있으며(Melville, 1980), Yue와 Mei(1980)

는 2차 Stokes파 포물형근사식을 이용하여 일정수심상에서의 연파를 해석하였고, 구조물과 파랑이 이루는 입사각이 20° 보다 작을 때에는 반사파의 영향이 없어지고, 입사파와 연파만 존재함을 밝혔다. Berger와 Kohlhas(1976)는 수리실험을 통해 정현파의 경우에도 연파가 존재하고, 정현파에 의한 연파의 특성도 고립파와 유사하다는 것을 밝혔다. Yoon과 Liu(1989)는 Boussinesq방정식으로부터 포물형근사식을 유도한 후 cnoidal wave를 입사파로 한 연파를 해석하였으며, 파랑의 비선형성의 중요성을 입증하였다. 또한 Liu와 Yoon(1986)은 수심이 급변하는 곳에서도 직립벽에서와 같이 연파가 발생할 수 있음을 보였다.

최근 선박의 대형화 등으로 인해 적정 수심을 확보하기 위해 대수심역에 항만을 건설하는 사례가 증가하고 있으며, 이러한 대수심역에는 건설비의 경감 등을 위해 직립식 방파제의 건설이 선호되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 직립구조물의 마루높이 산정 등과 관련된 분야에 적용될 수 있도록 직립구조물에 의한 연파발생특성을 수리모형실험과 수치해석을 통해 분석하였다. 수리실험은 비쇄파조건의 일정수심

*정회원 · 한국건설기술연구원 수지원연구부 선임연구원(E-mail : jilee@kict.re.kr)

**정회원 · 교신저자 · 한양대학교 토목환경공학과 교수(E-mail : sbyoon@hanyang.ac.kr)

상에서 수행하였으며, 입사파를 규칙파를 대상으로 하였다. 또한 수치해석은 포물형근사식을 이용하여 파랑의 비선형성에 따른 연파특성의 변화를 해석하였으며 수리실험 결과와 비교하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

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, 전기서보모터식이다. 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, 실험파 재원에 따라 생성된 조파신호를 조파기로 송신하고, 파고계로부터 독취된 자료를 주파수 스펙트럼 및 파고 등으로 분석하는 기능을 하는 장치이다. 실험파 설정 및 파고계측에 사용된 파고계는 용량식파고계(모델명 CHT4-60)로서 길이는 0.6 m이고, 측정범위는 $0 \sim \pm 30$ cm이며, 본 실험시 16대의 파고계를 운용

하였다.

2.2 실험영역

직립구조물을 따른 연파특성에 대한 수리실험을 위해 전술한 다방향 조파수조 내에 길이 20 m의 직립구조물을 설치하였다. 수리모형실험은 유한한 수조내에서 수행되므로 구조물에 의한 반사파를 적절히 소파시키지 못하면 실험결과와 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.

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. 그림 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 및 실험조건

본 실험에서 사용된 직립구조물 모형은 아크릴재질로 제작하였으며, 모형의 폭(W)과 높이($h+h_c$)는 0.6 m이며, 길이는 20 m이다. 실험은 일정수심상에서 규칙파를 대상으로 수행하

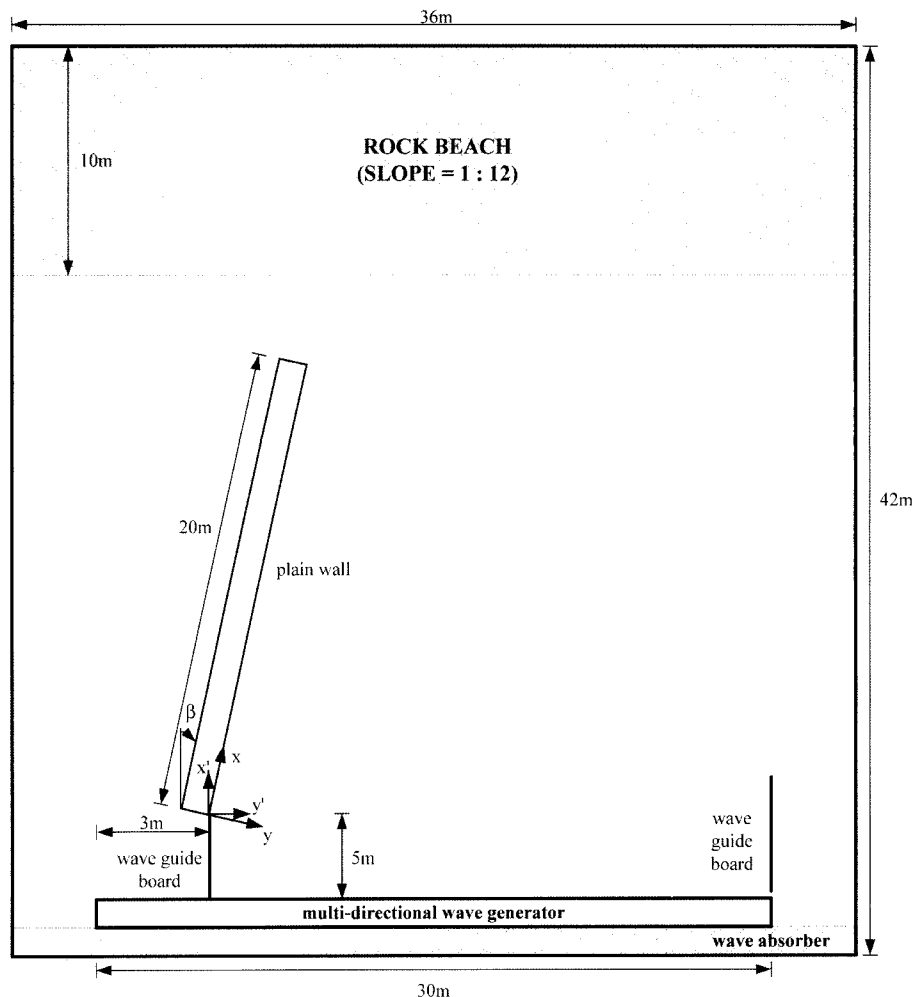


그림 1. 실험영역 및 모형설치 개념도

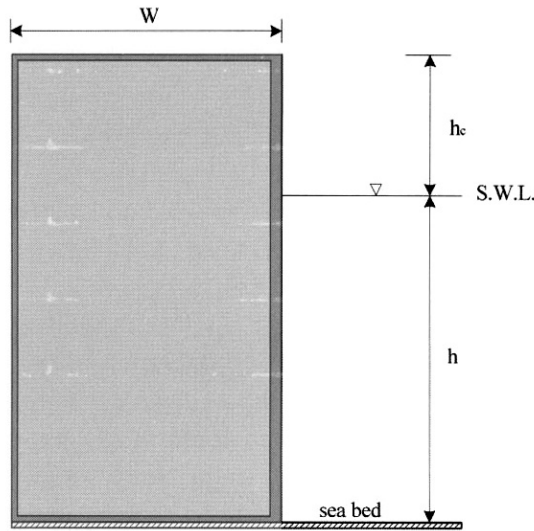


그림 2. 실험모형 단면도

였으며, 실험에 적용된 수심(h)은 0.45 m로서 정수면으로부터 구조물 상단까지의 여유고(h_c)는 0.15 m이다(그림 2 참조). 실험시 파랑에 의해 직립구조물이 움직이지 않도록 내부에 쇠석을 채워 중량을 확보하였으며, 구조물 높이 0.6 m와 수심 0.45 m는 연파에 의해 월파가 발생하지 않는 조건이다.

실험에 적용된 입사파는 주기(T) 0.9 sec인 경우에 파고(H_0)는 0.030 m와 0.061 m, 주기(T) 1.6 sec인 경우에 파고(H_0)는 0.031 m와 0.061 m를 적용하였다. 수심 0.45 m 조건에서 입사파의 주기가 0.9 sec인 경우, 선형분산관계식으로부터 계산된 파장 λ 는 1.238 m로서 $H_0=0.030$ m인 조건에서 파형경사(kA_0)는 0.0762, 상대진폭($\varepsilon=A_0/h$)은 0.0333이며, $H_0=0.061$ m인 경우에는 $kA_0=0.1539$, $\varepsilon=0.0674$ 이다. $T=1.6$ sec인 경우에는 $\lambda=2.963$ m이며, $H_0=0.031$ m인 조건에서는 $kA_0=0.0324$, $\varepsilon=0.0340$ 이고, $H_0=0.061$ m인 조건에서는 $kA_0=0.0646$, $\varepsilon=0.0677$ 이다. 여기서, k 는 입사파의 파수, A_0 는 입사파의 진폭이다. 따라서, 실험에 사용된 모형길이 20 m는 $T=0.9$ sec인 파랑에 대해서는 16.1λ , $T=1.6$ sec에 대해서는 6.7λ 에 해당된다. 실험에서 적용된 입사파 조건은 실험시 쇠파가 발생하지 않는 조건이며, 직립구조물과 입사파가 이루

는 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 연구에서는 입사파는 조파선에 직각 방향의 일방향으로 조파하고 직립구조물 모형의 설치각도를 변경시켜 입사각(β)을 조절하였다. 실험에 적용된 입사파 조건을 요약하면 표 1과 같다. 실험시 입사파는 그림 1의 $x/\lambda=y/\lambda=0$ 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 제체전면에서 0.05 m 떨어진 위치에서 계측하였다. 입사파의 주기가 0.9 sec인 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, 주기가 1.6 sec인 경우에는 $x=0\sim 18.8$ m 구간을 0.4 m 간격으로 계측하였다. 그리고 주기가 0.9 sec인 경우에는 $x/\lambda=2, 6, 15$ 인 지점, 주기가 1.6 sec인 경우에는 $x/\lambda=2, 6$ 인 지점에서 구조물과 직각방향으로 파고를 계측하였다. 주기가 0.9 sec인 경우에 $x/\lambda=2$ 와 $x/\lambda=6$ 인 지점에서는 $y=0.1\sim 6.4$ m까지 0.1 m 간격, $x/\lambda=15$ 인 지점에서는 $y=0.2\sim 6.4$ m까지 0.2 m 간격으로 파고를 계측하였다. 또한 주기가 1.6 sec인 경우에는 $x/\lambda=2$ 와 $x/\lambda=6$ 인 지점에서 $y=0.2\sim 6.4$ m까지 0.2 m 간격으로 계측하였다. 실험시 조파시간은 300 sec로서 $T=0.9$ sec인 경우에 약 333파, $T=1.6$ sec인 경우에 약 188파에 해당되며, 파고분석은 후반부 205 sec($T=0.9$ sec의 경우에 약 228파, $T=1.6$ sec인 경우에 약 128파) 동안 계측된 자료를 이용하였다. 본 실험에서 수행한 계측조건을 요약하면 표 2와 같다.

3. 수치해석모형

본 연구에서는 연파특성에 관한 수리모형실험으로부터 계측된 자료와의 비교 분석을 위해 포물형근사식을 이용하여 유한차분모형을 구성하였다. 포물형근사식은 파랑이 심해로

표 1. 실험조건

주기 (T)	파장 (λ)	실험안	파고 (H_0)	상대수심 (kh)	비선형성		입사각 (β)	수심 (h)
					상대진폭 ($\varepsilon=A_0/h$)	파형경사 (kA_0)		
0.9 sec	1.238m	CASE 1	0.030m	2.284	0.0333	0.0762	10° 19° 28° 40°	0.45m
		CASE 2	0.061m	2.284	0.0674	0.1539		
1.6 sec	2.963m	CASE 3	0.031m	0.954	0.0340	0.0324		
		CASE 4	0.061m	0.954	0.0677	0.0646		

표 2. 파고 계측구간 및 계측간격

주기 (T)	x 방향 (제체 전면을 따른 방향)		y 방향 (제체 직각방향)		
	$x/\lambda=2$	$x/\lambda=6$	$x/\lambda=2$	$x/\lambda=2$	$x/\lambda=6$
0.9 sec	$x=0\sim 6.4$ m ($\Delta x=0.2$ m)	$x=6.4\sim 18.8$ m ($\Delta x=0.4$ m)	$x=0.1\sim 6.4$ m ($\Delta y=0.1$ m)	$x=0.1\sim 6.4$ m ($\Delta y=0.1$ m)	$x=0.2\sim 6.4$ m ($\Delta y=0.2$ m)
1.6 sec	$x=0\sim 18.8$ m ($\Delta x=0.4$ m)		$y=0.2\sim 6.4$ m ($\Delta y=0.2$ m)	$y=0.2\sim 6.4$ m ($\Delta y=0.2$ m)	-

부터 해안쪽으로 전파되는 동안 수심의 변화가 완만하다고 가정하면 반사파를 무시할 수 있으므로 파랑의 굴절, 천수, 회절현상을 고려할 수 있는 방정식이다. 포물형근사식에서 비선형성을 고려하기 위한 방법은 2가지이다. 첫째는 선형 포물형근사식에 비선형 분산관계식을 이용한 경우(L-N type)이며, 두 번째는 비선형 포물형근사식에 선형 분산관계식을 이용한 경우(N-L type)이다. 본 연구에서는 전술한 2가지 방법과 함께 선형 포물형근사식에 선형 분산관계식을 이용한 경우(L-L type)에 대해서도 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서 이용한 선형 포물형근사식은 식 (1)과 같고, Kirby와 Dalrymple(1983)에 의해 유도된 비선형 포물형근사식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} - i(k - k_0)A + \frac{1}{2kCC_g} \frac{\partial (kCC_g)}{\partial x} A - \frac{i}{2kCC_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(CC_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} - i(k - k_0)A + \frac{1}{2kCC_g} \frac{\partial (kCC_g)}{\partial x} A - \frac{i}{2kCC_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(CC_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{i}{2} K' |A|^2 A = 0 \quad (2)$$

식 (2)의 비선형항에 포함된 K' 은 다음과 같다.

$$K' = k^3 \frac{C \cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)}{C_g 8 \sinh^4(kh)} \quad (3)$$

여기서, i 는 단위허수, A 는 진폭, k 는 파수, k_0 는 기준수심에서의 파수, C 는 전파속도, C_g 는 군속도이며, h 는 수심이다.

전술한 바와 같이 파수의 산정에 사용된 선형 분산관계식은 식 (4)와 같다.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (4)$$

한편 Kirby와 Dalrymple(1986)에 의해 유도된 비선형 분산관계식은 식 (5)와 같다.

$$\omega^2 = gk(1 + f_1 \varepsilon^2 D) \tanh(kh + f_2 \varepsilon) \quad (5)$$

여기서, ω 는 각진동수이며, 식 (5)의 변수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= k|A| \\ f_1 &= \tanh^5(kh) \\ f_2 &= [kh / \sinh(kh)]^4 \\ D &= \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh^4(kh)} \end{aligned} \quad (6)$$

수치해석에 사용된 지배방정식을 정리하면 L-L type(선형 포물형근사식에 선형 분산관계식을 이용한 경우)에는 식 (1)과 식 (4)를, L-N type(선형 포물형근사식에 비선형 분산관계식을 이용한 경우)에는 식 (1)과 식 (5)를, N-L type(비선형 포물형근사식에 선형 분산관계식을 이용한 경우)에 대해서는 식 (2)와 식 (4)를 사용하였다.

포물형근사식 (1) 및 (2)는 수치기법 중 광범위하게 사용되는 Crank-Nicolson법으로 유한차분하여 수치모형을 수립하였다. 음해법의 일종인 Crank-Nicolson법은 무조건적인 안정성과 정확성을 가지며, 3열 주대각행렬을 주므로 계산용량과 계산시간면에서 매우 경제적이다. 3열 주대각행렬은 Thomas

algorithm(또는 double sweep algorithm)을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있다. 그리고 비선형 포물형근사식내의 비선형항은 반복법으로 처리하였다. 수치해석시 바닥 및 벽면에서의 마찰은 무시하였으며, 격자간격은 $\Delta x = \Delta y = \lambda/20$ 을 적용하였다.

수리실험에서 입사파는 조파선에 직각으로 조파하고 직립 구조물의 위치를 변경시켜 입사파향을 조절하였으나, 수치해석에서는 직립구조물 위치는 x 축에 나란하게 고정시키고 $x=0$ 을 따른 입사경계에서 경사파를 입사시켜 파랑변형을 해석하였다. 이는 본 연구에서 적용한 수치기법이 사각형 격자를 사용한 유한차분기법이므로 직립구조물 모형이 경사질 경우에는 구조물 경계의 처리가 적절하지 못해 해석결과의 정도가 낮아질 수 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 y 축을 따라 입사파고(H_0)와 입사각(β)이 주어지므로 입사조건인 복소진폭함수 A_0 는 식 (7)을 이용하여 구하였다.

$$A_0(x=0, y) = \frac{H_0}{2} e^{ik_0(\sin\beta)y} \quad (7)$$

그림 1에 도시된 실험영역의 우측경계($y=y_{\max}$)를 따라 파의 천수계수와 Snell법칙을 이용하여 복소진폭함수 A 를 구한 후, 이를 우측 경계조건으로 이용할 수 있으나, 회절현상

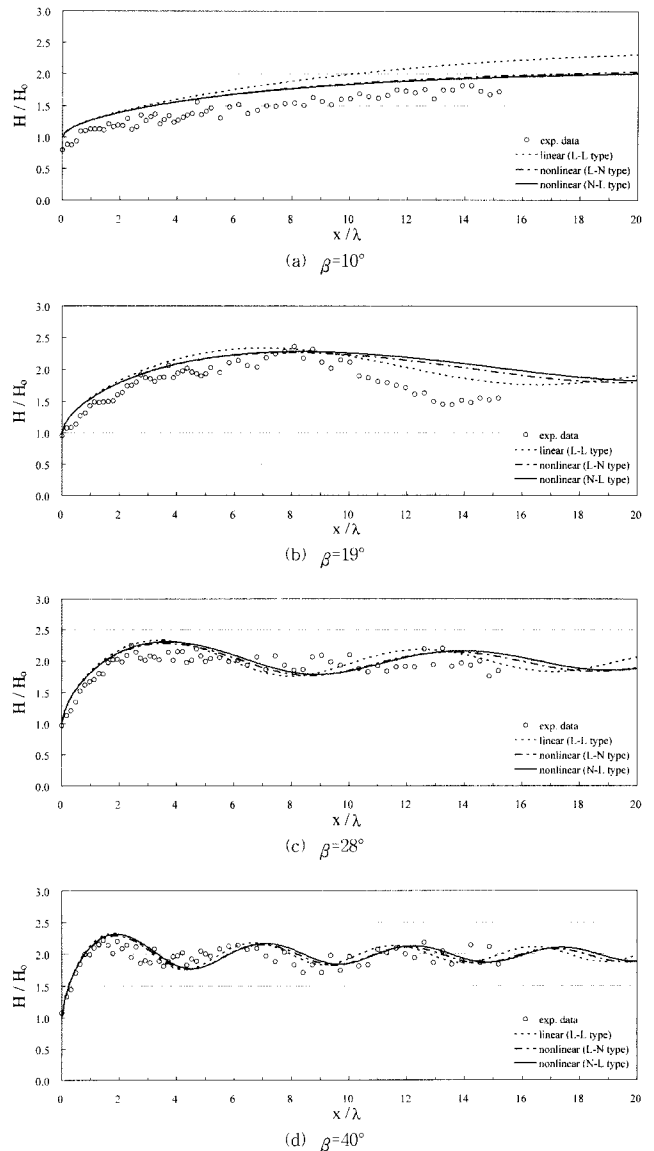


그림 3. 직립벽을 따른(x방향) 상대파고 분포(CASE 1)

등이 고려되지 않아 반사파가 해석영역내부로 전파되어 해를 교란시킬 수 있으므로 우측경계로부터의 교란파가 관심 대상 영역에 영향을 미치지 않도록 측면경계를 충분히 멀리 설정하면 안전하다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 개념을 적용하여 다음과 같은 간단한 반사경계조건을 사용하였으며, 수치해석시 우측경계는 $y_{max}=200\lambda$ 를 적용하였다.

$$\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_{y=0, y=y_{max}} = 0 \quad (8)$$

4. 실험결과 분석

실제 수리모형실험의 계측자료는 표 2에 제시된 바와 같이 방대한 양이므로 여기서는 그 중 일부 대표적인 경우만을 제시하였으며, 전체자료는 보고서에 수록하여 후속 연구자들이 참조할 수 있도록 할 예정이다.

4.1 CASE 1

그림 3은 비선형성이 가장 작은 CASE 1($T=0.9$ sec, $H_0=0.030$ m, $\varepsilon=0.0333$, $kA_0=0.0762$)의 조건에서 제체 전면을 따른(x방향) 상대파고(H/H_0)를 입사각(β)별로 각각 도시

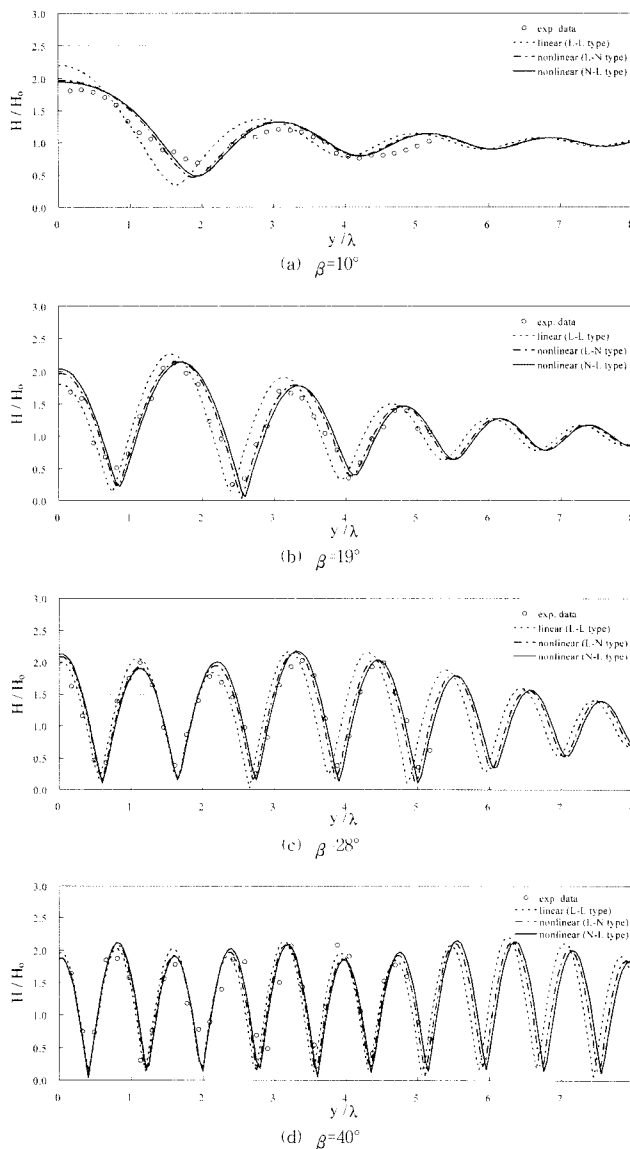


그림 4. 직립벽 직각방향(y방향)을 따른 상대파고 분포(CASE 1, $x/\lambda=15$)

한 것이다. 여기서, H 는 제체 전면에서 계측된 파고이다. 그리고 그림 4는 CASE 1 조건에서 제체 직각방향(y방향)의 상대파고를 $x/\lambda=15$ 의 위치에서 입사각별로 각각 도시한 것이다. 그림 3의 결과를 살펴보면 제체 전면을 따라 상대파고가 2 이상까지 증가함을 알 수 있으며, 입사각이 증가할수록 $H/H_0=2$ 에 도달하는 상대거리가 짧음을 알 수 있다. $\beta=10^\circ$ 인 경우에는 $x=16\lambda$ 까지도 상대파고가 2 이하로 나타났으나, β 가 19° 보다 큰 경우 상대파고가 증가하는 거리는 다소 차이가 나지만 전체적으로 $H/H_0=2.3$ 정도의 최대 상대파고가 나타났다. 직립구조물 직각방향의 상대파고를 도시한 그림 4의 결과를 살펴보면, 입사각이 가장 작은 $\beta=10^\circ$ 인 경우에 연파의 폭(stem width)이 가장 넓은 것으로 나타났다. 그러나 입사각이 큰 다른 3가지 경우에 있어서는 연파의 폭이 증가하지 않는 정상적인 중복파 형태를 보였다. 이로부터 입사각이 작아지면 제체 전면을 따른 상대파고는 작아지고 연파의 폭은 증가함을 알 수 있다. 수리실험과 수치해석의 결과를 비교해 보면, 전체적으로 파랑의 비선형성을 고려한 해석결과가 선형 포물형근사식을 해석한 결과보다 수리실험결과와 잘 일치하고 있지만, 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 CASE 1 조건은 파랑의 상대진폭(ε)이 0.0333이고, 파형경사(kA_0)가 0.0762인 경우로서 파랑의 비선

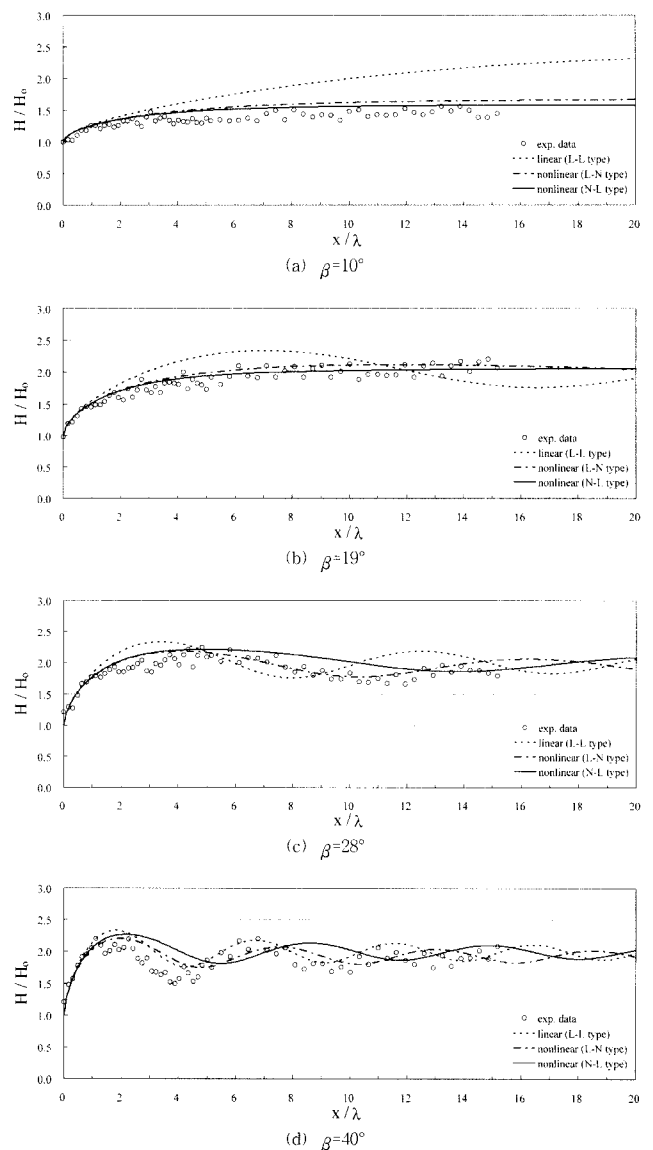


그림 5. 직립벽을 따른(x방향) 상대파고 분포(CASE 2)

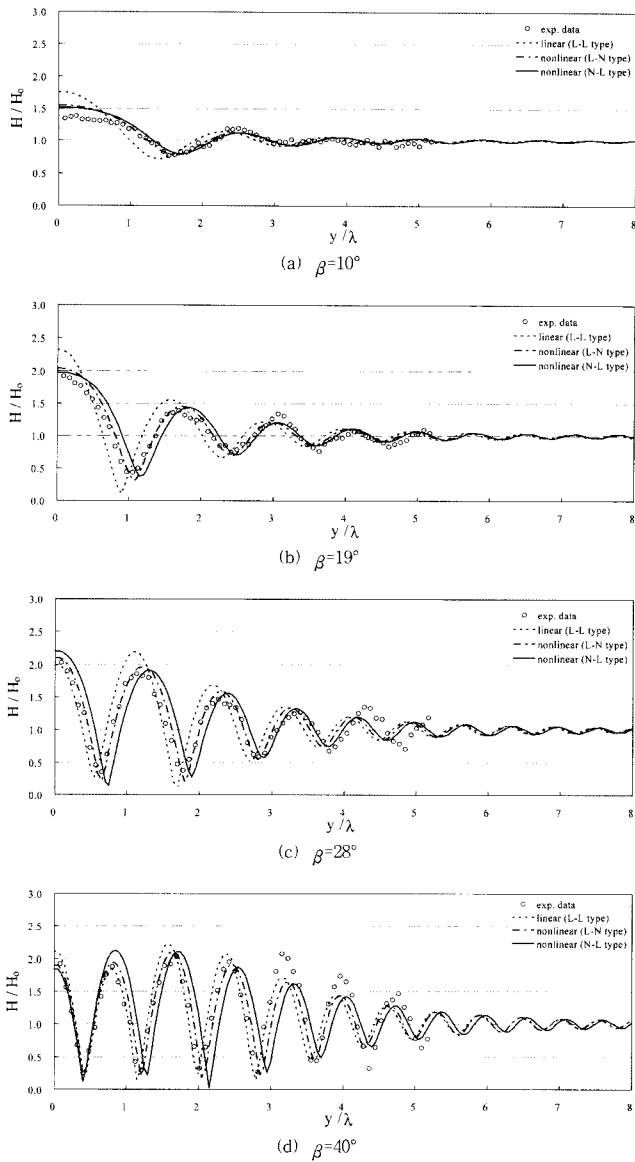


그림 6. 직립벽 직각방향(y방향)을 따른 상대파고 분포(CASE 2, $x/\lambda=6$)

형성이 타 조건에 비해 작기 때문으로 생각된다. 또한, 선형 포물형근사식에 비선형 분산관계식을 적용한 결과(L-N type)와 비선형 포물형근사식에 선형 분산관계식을 적용한 결과(N-L type)의 차이도 크게 나타나지 않았다.

4.2 CASE 2

그림 5는 비선형성이 가장 큰 CASE 2($T=0.9$ sec, $H_0=0.061$ m, $\varepsilon=0.0674$, $kA_0=0.1539$)의 조건에서 제체 전면을 따른(x방향) 상대파고를, 그림 6과 그림 7은 각각 제체 직각방향(y방향)의 상대파고를 $x/\lambda=6$ 및 15의 위치에서 입사각별로 각각 도시한 것이다. 제체 전면을 따른 상대파고를 도시한 그림 5를 살펴보면, 입사각이 증가할수록 상대파고가 증가하며, 최대 상대파고가 나타나는 상대거리가 짧아지는 경향은 CASE 1의 경우와 동일하지만, 입사각이 증가함으로 인해, 즉 파랑의 비선형성이 CASE 1보다 상대적으로 증가하여 제체 전면의 최대 상대파고는 작아짐을 알 수 있다. $\beta=10^\circ$ 인 경우에는 $H/H_0=1.5$, $\beta=19^\circ$ 인 경우에는 $H/H_0=2$ 에서 상대파고가 일정해지며, $\beta=28^\circ$ 와 $\beta=40^\circ$ 인 경우에는 $H/H_0=2$ 를 중심으로 상대파고가 진동함을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7은 제체 직각방향(y방향)의 상대파고를 도시한 것

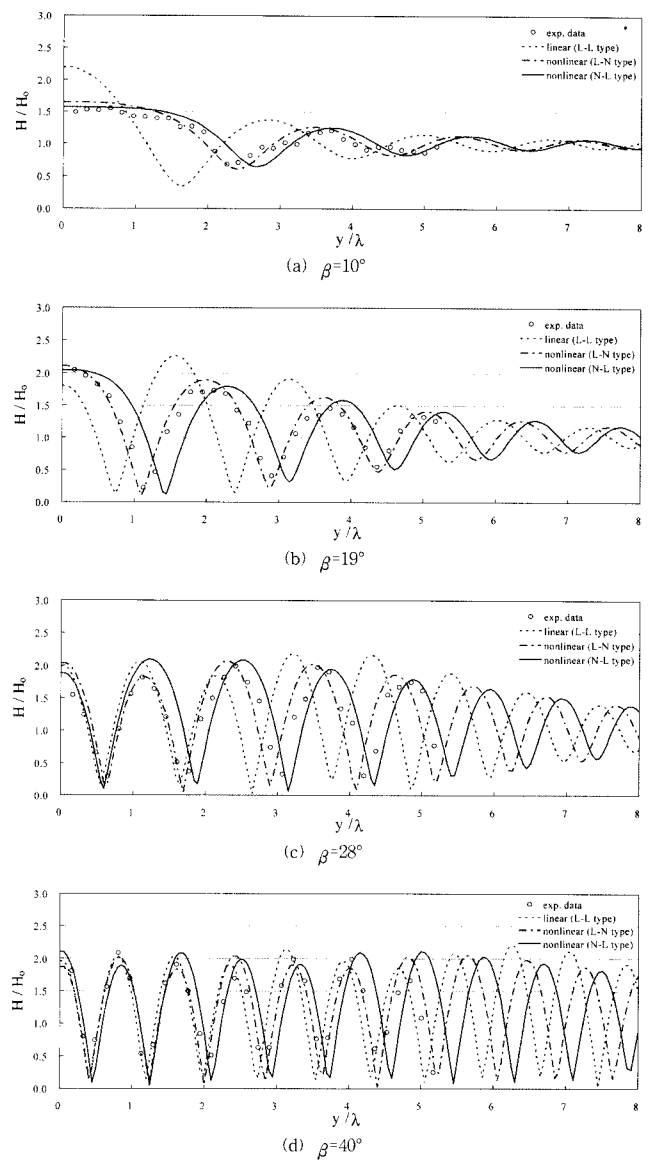


그림 7. 직립벽 직각방향(y방향)을 따른 상대파고 분포(CASE 2, $x/\lambda=15$)

으로서 파랑이 제체를 따라 진행할수록, 또한 입사각이 작아질수록 연파의 폭이 증가하는 것은 CASE 1과 동일하지만, CASE 1보다 파랑의 비선형성이 약 2배 증가함으로 인해 연파의 폭이 상대적으로 넓음을 알 수 있다. 즉, 그림 4와 그림 7에서 $\beta=10^\circ$ 인 경우를 비교해보면 파랑의 비선형성이 증가함으로 인해 제체 전면에서의 상대파고는 낮아지고, 연파의 폭은 증가함을 알 수 있다. CASE 2의 경우에도 파랑의 비선형성을 고려한 해석결과가 선형 포물형근사식으로 해석한 결과보다 수리실험결과와 잘 일치함을 알 수 있으며, 이러한 경향은 CASE 1보다 CASE 2에서 뚜렷하게 나타난다. 이는 CASE 2에서 입사각의 비선형성이 CASE 1보다 크기 때문으로 판단된다. 그리고 수치해석에 의한 상대파고가 수리실험에 의한 상대파고보다 약간 큼을 알 수 있는데 이는 수치해석시 바닥마찰 및 벽면마찰 등에 의한 에너지감쇠를 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 또한, CASE 1과 CASE 2에서 입사각이 증가함으로 인해 제체 전면을 따른 상대파고가 급속히 증가함을 알 수 있으며, 이는 입사각이 커짐으로 인해 입사파와 반사파 사이의 각도가 증가하여 두 파 사이의 비선형성 작용이 감소하기 때문으로 판단된다. 파랑의 비선형성을 고려하는 방법에 따른 차이를 살펴보면, L-

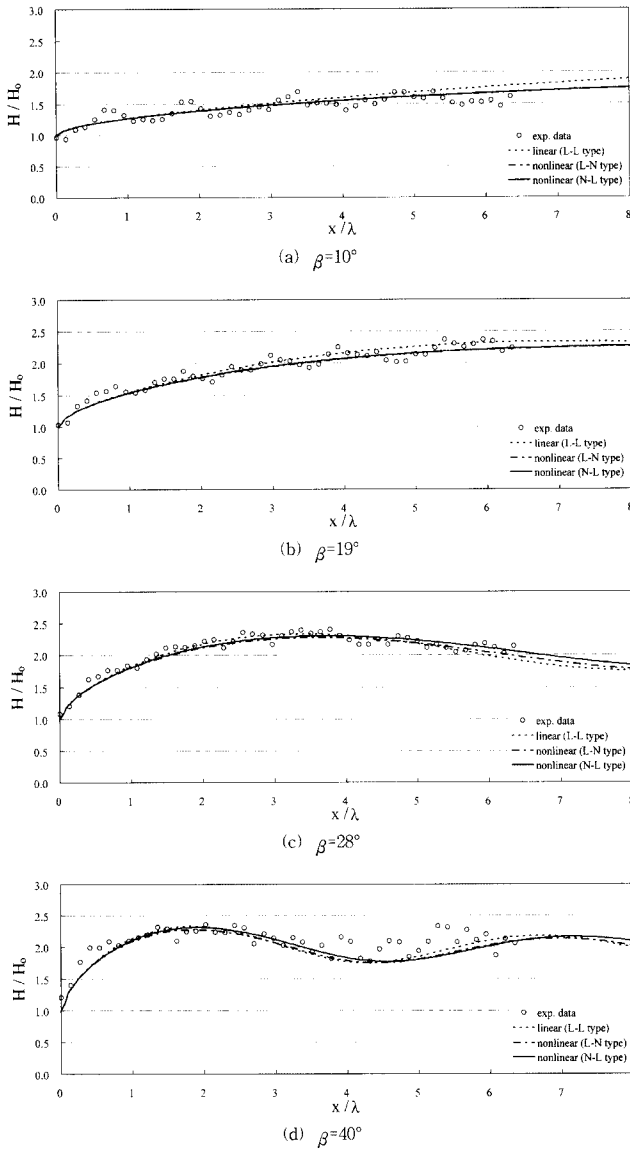


그림 8. 직립벽을 따른(x방향) 상대파고 분포(CASE 4)

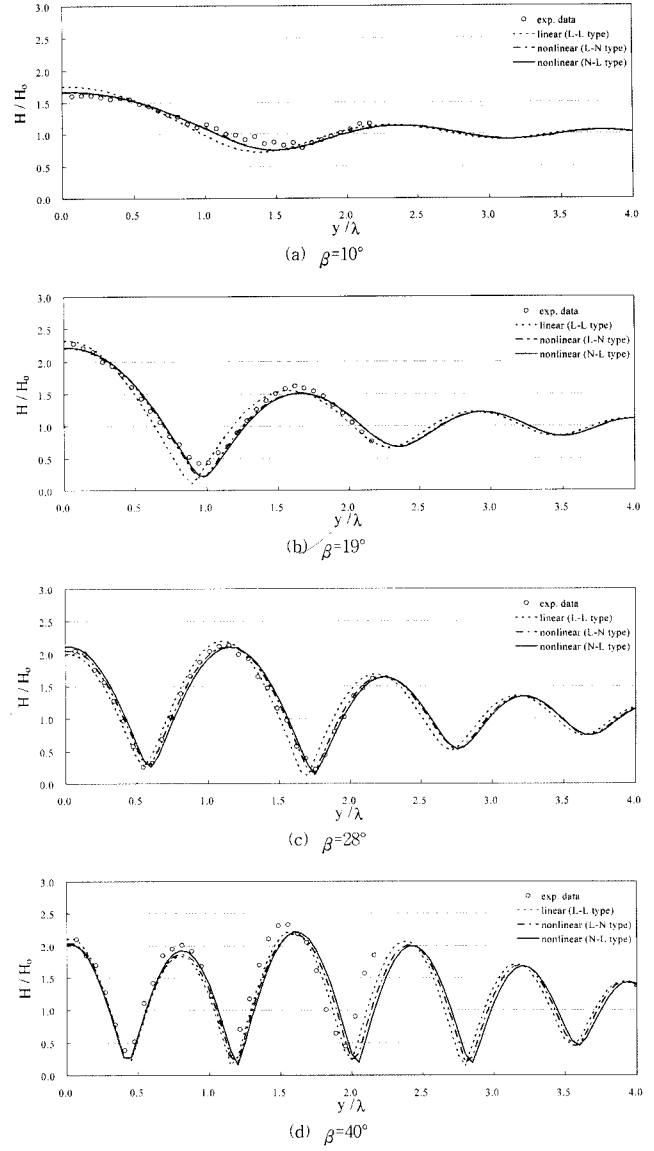


그림 9. 직립벽 직각방향(y방향)을 따른 상대파고 분포(CASE 4, $x/\lambda=6$)

N type의 경우가 N-L type의 경우보다 실험결과와 보다 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 적용한 Kirby와 Dalrymple(1983)의 비선형 포물형근사식이 실제로 다 파랑의 비선형성을 더 크게 해석한다는 것을 의미한다.

4.3 CASE 4

다음은 CASE 2와 입사파고는 동일하나 주기가 긴 CASE 4($T=1.6$ sec, $H_0=0.061$ m, $\varepsilon=0.0677$, $kA_0=0.0646$)의 경우인 바, CASE 2에 비해 상대진폭 ε 은 동일하지만 파형경사 kA_0 는 작으며, CASE 1에 비해서는 상대진폭 ε 은 약 2배이지만 파형경사 kA_0 는 거의 같은 경우이다. 그러므로 비선형성을 표시하는 상대진폭 ε 과 파형경사 kA_0 중에서 어느 것이 입사파의 비선형성을 더 잘 나타내는 parameter인지를 판단할 수 있는 경우이다. 그림 8은 제체 전면을 따른(x방향) 상대파고를, 그림 9는 제체 직각방향(방향)의 상대파고를 $x/\lambda=6$ 의 위치에서 입사각별로 각각 도시한 것이다. 제체 전면을 따라 파랑이 진행하면서 상대파고가 증폭되고, 입사각이 증가할수록 최대 상대파고에 도달하는 상대거리가 짧아지는 경향이 파형경사 kA_0 가 같은 CASE 1의 결과와 동일하며, 최대 상대파고의 크기 또한 동일지점에서 유사하게 나타났

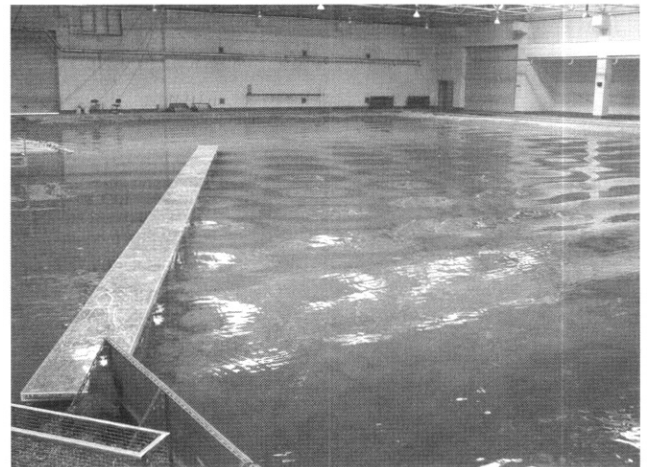


사진 1. 연파 실험장면(I)

다(그림 8 참조). 제체 직각방향(방향)에 대한 실험결과인 그림 9를 살펴보면, 입사각이 작아질수록 연파의 폭은 증가하고, 입사각이 커질수록 반사파가 증가하여 제체 직각방향으로의 파고변화가 커짐을 알 수 있다. 이들 결과를 상대진폭 ε 은 동일하지만 파형경사 kA_0 는 더 큰 CASE 2의 경우와 비교해보면 CASE 4의 경우가 비선형성이 훨씬 작게 나타

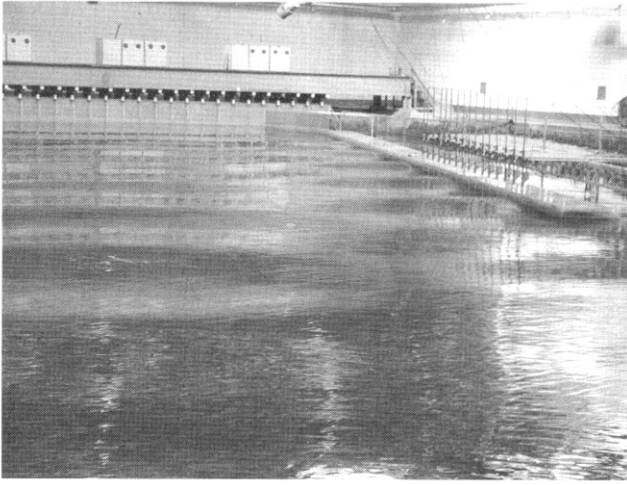


사진 2. 연파 실험장면(II)

난 것을 알 수 있다. 이로부터 파의 비선형성을 표시하는 parameter는 파형경사 kA_0 가 더 적절함을 알 수 있다.

본 논문에서는 지면제약으로 CASE 3의 해석결과를 수록하지 않았지만, CASE 3의 조건은 파형경사 kA_0 가 4가지 경우중에서 가장 작아 파랑의 비선형성이 거의 나타나지 않았다. 사진 1과 사진 2는 연파 실험장면으로서 제체 전면에서의 증복과 발생 및 연파발생 장면을 잘 보여주고 있다.

5. 결 론

경사지게 입사한 파랑이 직립구조물을 따라 진행하면서 파고의 증폭으로 인해 월파랑이 증대되는 것은 직립방파제 또는 직립안벽의 마루높이 결정에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 직립구조물에 파랑이 경사지게 입사하는 경우에 발생하는 연파특성을 수리모형실험과 포물형근사식을 이용한 수치해석으로 고찰하였으며, 수치해석에서는 파랑의 비선형성의 고려에 따른 변화를 검토하였다. 본 연구의 실험 자료는 향후 국내 연구진에 의해 새로운 파랑전파모형이 개발될 때 정밀도 검사의 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 실험은 실험자료의 외국 의존을 탈피하고자 하는 노력의 일환으로 수행되었으며, 앞으로도 국내 연구진에 의해 기본적인 실험이 지속적으로 수행되기를 기대한다. 본 연구로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 직립구조물에 파랑이 경사지게 입사할 경우, 구조물을 따라 파랑이 진행할수록 파고는 증가하나, 일정거리 이상을 진행하면 파고는 거의 일정해진다.

2. 파랑의 비선형성이 증가할수록 제체 전면을 따른 파고의 증폭은 감소하고 제체 직각방향으로의 연파의 폭은 증가한다.
3. 이러한 경향은 입사파와 구조물이 이루는 각이 작을수록 명확하게 나타난다.
4. 수리실험결과와 수치해석결과의 비교에서 파랑의 비선형성을 고려한 수치해석결과가 실험결과와 더 잘 일치함을 알 수 있었고, 비선형성을 고려하는 방법에 따른 차이도 나타났다. 즉, 선형 포물형근사식에 비선형 분산관계식을 적용하는 방법이 비선형 포물형근사식에 선형 분산관계식을 적용하는 방법보다 파랑의 비선형성을 보다 더 잘 나타냄을 알 수 있었다.
5. 상대파고와 파형경사 중에서 파형경사가 파의 비선형성을 더 적절히 표시해 주는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2004-214-D00178).

참고문헌

- Berger, V. and Kohlhase, S. (1976) Mach-reflection as a diffraction problem. *Proc. 15th Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 1, pp. 796-814.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1983) A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. *J. of 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. 78-93.
- Liu, P.L.-F. and Yoon, S.B. (1986) Stem waves along depth discontinuity, *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, No. C3, pp. 3979-3982.
- 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: 2006.1.11/심사일: 2006.3.8/심사완료일: 2006.4.7)