

파랑집중에 의한 다방향 극한파 생성의 효율성에 관한 실험적 연구

홍기용* · 류슈쉐** · 양찬규*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**대련이공대학 해안해양공학국가중점연구실

An Experimental Study on Wave Focusing Efficiency in the Generation of Directional Extreme Waves

KEY-YONG HONG*, SHU-XUE LIU** AND CHAN-KYU YANG*

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China

KEY WORDS: Wave Focusing 파랑집중, Breaking Wave 쇄파, Extreme Wave 극한파, Directional Wave 다방향파, Wave Basin 조파수조

ABSTRACT: Extreme waves are generated in a model basin based on directional wave focusing. The targeted wave field is described by double summation method and it is applied to serpent-type wavemaker system. The extreme crest amplitude at a designed location is obtained by synchronizing the phases and focusing the directions of wave components. Two distinguished spectrums of constant wave amplitude and constant wave steepness are adapted to describe the frequency distribution of component waves. The surface profile of generated wave packets is measured by wave gauge array and the effects of dominant spectral parameters governing extreme wave characteristics are investigated. It is found that frequency bandwidth, center frequency, shape of frequency spectrum and directional range play a significant role in the wave focusing. In particular, the directional effect significantly enhances the wave focusing efficiency.

1. 서 론

극한파는 해양 설치 구조물이나 대양을 운항하는 선박의 안전을 위협하는 가장 직접적인 요소일뿐 아니라 연안역에서 발생하는 다양한 해양현상의 주요 원인으로, 해양개발의 활성화와 심해 설치 구조물이 증가함에 따라 그 파랑 특성에 대한 정확한 이해가 보다 중요해지고 있다. 극한파에 대한 연구는 강한 비선형 특성에 기인하여 이론적, 수치적 접근에 한계가 있으며, 이에 따라 실험적 연구가 활발한 편이다. 실험역 파는 방향성을 특징으로 하며, 극한파는 주파수 성분들의 중첩과 함께 방향성의 중첩에 의해 보다 가혹한 극한파가 생성되므로(홍기용 외, 2002) 방향성을 고려한 극한파의 연구가 필요하다.

극한파는 풍력, 파랑간의 간섭, 또는 천수효과에 의해 생성될 수 있으나, 실험실에서 가장 널리 사용되는 방법은 성분파의 위상과 방향을 조절함으로써 원하는 시간과 지점에서 비정상 극한파를 획득하는 파랑집중 기법이다. Chan and Melville (1988), Skyner et al.(1990) 등은 바람과 바닥 효과를 무시한 2차원 파랑집중기법을 연구한 바 있다. 이들은 주파수 성분파의 합으로 변조된 파랑의 위상을 조절함으로써 쇄파를 시뮬레이션 하였다. Ramberg and Griffin(1987)은 2차원 수조 실험을

통하여 쇄파를 생성한 바 있으며, She et al.(1994)과 Rapp and Melville(1990)은 다양한 실험적 연구들을 통하여 쇄파시 발생하는 에너지 소산 특성을 규명한 바 있다. 쇄파의 3차원적인 특성에 대한 실험적인 연구는 Su(1982), She et al.(1994), Johannessen(1997) 등에 의해 시도되었으며, 단일 주파수 및 다중 주파수 성분에 대해 동일한 방향분포 함수를 사용하여 제한적인 3차원 집중파를 획득하였다. 홍기용 등(2002)은 서펜트형 조파기에 의해 생성되는 다방향 파랑장에 관한 Takayama(1984)의 이론을 적용하여 등기울기 및 등진폭 주파수 스펙트럼의 파랑특성 인자들에 따른 파랑집중 효과를 시뮬레이션 한 바 있다. 본 연구에서는 홍기용 등(2002)의 이론적 연구에 기초하여 모형시험수조에서 다방향 극한파의 재현에 필요한 효과적인 제어기술을 정립하고자 하며, 예측결과를 해석함으로써 방향성의 효과에 기인하는 다방향 극한파의 파랑 특성을 고찰하고자 한다.

2. 다방향 조파수조의 집중파 생성이론

수조내의 일지점(x_b, y_b)에 특정시간 t_b 에 집중되는 다방향 불규칙파의 해수면 상승 η 는 다음과 같은 이중합성 모델에 의해 표현된다(홍기용 외, 2002).

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} a_{ij} \cos [k_i(x - x_b) \cos \theta_j + k_i(y - y_b) \sin \theta_j - 2\pi f_i(t - t_b)] \quad (1)$$

제1저자 홍기용 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7511 kyhong@kriso.re.kr

여기서 a_{ij} 는 i 번째 주파수 f_i 와 j 번째 방향 θ_j 를 갖는 파랑 성분의 진폭을 나타내며, k_i 는 파수이다. 또한 N_f 와 N_θ 는 주파수 성분과 방향 성분의 수를 각각 나타낸다. 사용된 좌표계는 Fig.1과 같다.

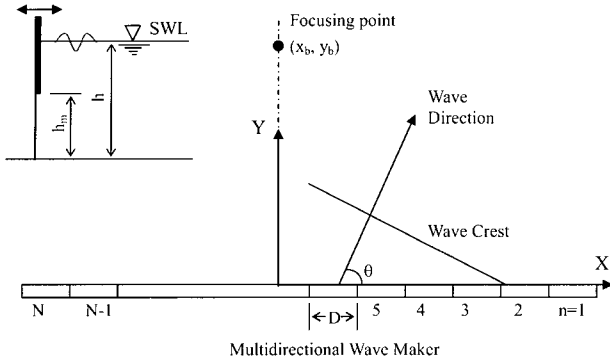


Fig. 1 Coordinates of segmented wavemaker system

선형 다방향 조파이론을 적용하면(Sand and Mynett, 1987), 집중파를 생성하는 n 번째 조파기의 운동 $S(n, t)$ 와 조파기 중립 위치에서의 해수면 상승 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$S(n, t) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_\theta} \frac{a_{ij}}{T(f_i, \theta_j)} \sin[k_i n D \sin \theta_j - (k_i x_b \sin \theta_j + k_i y_b \cos \theta_j) - 2\pi f_i (t - t_b)] \quad (2)$$

여기서 T 는 조파기의 운동과 해수면 상승 간의 전달 함수로서, 피스톤형 조파기의 경우 아래와 같이 주어진다.

$$T(f_i, \theta_j) = \frac{4 \sinh(k_i h) [\sinh k_i h - \sinh k_i h_m]}{\cos \theta [2k_i h + \sinh(2k_i h)]} \quad (3)$$

식(1)과 (2)를 살펴보면, 다방향 조파수조에서 재현되는 집중파의 특성은 다음의 인자들에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

$$N_f, N_\theta, a_{ij}, f_i(k_i), (x_b, y_b), t_b, h, [-\alpha, \alpha] \quad (4)$$

여기서 α 는 집중파의 파향 범위로서 방향분포함수의 경계 값을 나타낸다. 다방향 불규칙파의 특성은 방향분포함수와 주파수 스펙트럼에 의해 정의되므로, 원하는 집중파를 생성하는 일은 상기 인자들의 파랑장에 대한 전달함수 특성을 파악하고, 이에 따라 조파기의 입력신호를 조절함으로써 파랑 집중점에서 스펙트럼 함수들이 원하는 분포를 갖도록 제어하는 작업이다.

효과적인 집중파를 생성하기 위해서는 파랑이 한 지점으로 수렴해야 하므로 서펜트형 조파기의 위치에 따라 집중지점에 수렴하는 입사각을 갖도록 방향분포 함수를 조절해야하며, 따라서 방향분포 함수는 수조의 형상과 집중지점의 위치에 따라 결정된다. 반면에 주파수 스펙트럼은 다양한 분포 함수를 사용

하는 것이 가능하며, 사용하는 주파수 스펙트럼의 종류에 따라 생성된 집중파의 파랑 특성이 달라진다. 파랑집중에 의한 극한파를 생성할 때, 생성파의 효과적인 제어가 가능하기 위해서는 스펙트럼의 특성을 지배하는 각 인자들의 영향을 효과적으로 분석할 수 있도록 상호간의 간섭이 적은 독립적인 인자들을 시험조건으로 선정하고 영향 인자들의 수를 최소화할 수 있는 제어기법의 적용이 바람직하다. Takezawa and Hirayama. (1977)는 주파수 스펙트럼의 형상을 단순화하여 효과적으로 생성파의 특성을 제어할 수 있는 등진폭 스펙트럼(Constant Wave Amplitude Spectrum, 이하 CWAS)과 등기울기 스펙트럼(Constant Wave Steepness Spectrum, 이하 CWSS)의 사용을 2차원 극한파의 생성을 위해 제안하였다. CWAS는 각각의 주파수 성분이 동일한 크기의 파고를 갖는 분포를 의미하며, 각각의 성분파가 동일한 에너지를 보유하므로 집중파의 형성에 각 성분이 동등한 기여를 하게되지만, 고주파 성분의 비선형성이 상대적으로 증가하여 파랑 특성의 제어가 어렵다. CWSS는 모든 성분파들이 동일한 정도의 선형성을 보유하지만, 상대적으로 고주파 성분의 기여도가 작은 단점이 있다. 한편 Kway et al.(1998)은 Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 함께 사용하여 이들 결과들과 비교하였다. 본 연구에서는 CWAS 및 CWSS를 사용하여 극한파를 생성하였으며, 각각의 조파기에 대하여 동일한 주파수 스펙트럼을 사용하였다. 파랑 집중점의 파정진폭을 A_f 라 하면, CWAS에서 성분파의 진폭은

$$a_{ij} = A_f / (N_f N_\theta) \quad (5)$$

가 된다. 반면에 CWSS를 사용할 때, 각 주파수 성분의 진폭이 전 방향에 대해 고르게 분포하는 경우라면, 성분파의 진폭은

$$a_{ij} = A_f \left/ \left(N_\theta k_i \sum_{i=1}^{N_f} \frac{1}{k_i} \right) \right. \quad (6)$$

가 된다.

집중파의 시계열은 주파수 성분의 해상도 δf 에 대해 $T' = 1/\delta f$ 의 주기를 갖고 반복되므로, 파랑집중 시간 t_b 의 변경은 조파기 구동 신호에서 초기값의 변경을 의미할뿐 재현파의 특성과는 무관하다. 따라서 t_b 는 조파판의 초기 구동이 원활하게 이루어질 수 있는 임의의 값을 선택하는 것이 가능하며, 주파수 성분의 수 N_f 는 시계열의 반복주기를 결정한다. 한편 파랑 방향분포의 연속성은 방향 성분의 수 N_θ 값이 충분히 큰 경우에는 오히려 조파판의 폭 및 길이에 좌우된다. 결과적으로 식(4)에 주어진 인자들 중에서 수조의 물리적 형상에 좌우되는 요소들을 제외하면 파랑 집중기법에 의해 생성되는 극한파의 특성을 지배하는 주요 인자들은 주파수 스펙트럼 분포와 연관된 f_i 및 a_{ij} 와 방향성의 크기를 나타내는 α 이다. 여기서 주파수 분포의 영향은 주파수 크기와 관련된 중심주파수 f_c 및 주파수 폭 Δf 의 효과와 주파수 형상과 관련된 주파수 스펙트럼 종류 및 파정진폭 A_f 의 효과로 구분함으로써 보다 용이하게 고찰될 수 있다.

3. 다방향 극한파 생성의 효율성

파랑집중 기법에 의한 극한파의 재현 실험이 해양안전시스템연구소의 해양공학수조에서 수행되었다. 해양공학수조는 30m 길이와 50m의 폭을 갖고 있으며, 조파 시스템은 높이 2m, 폭 0.5m의 조파판 88개로 구성되어 있다. 재현 실험은 Table 1과 같은 파랑 및 수조조건에 대해 수행되었다. 또한 동일한 조건에 대해 축척계수를 적용하여 극한파 파쇄 형태의 변화를 고찰하였다. A_0 는 축척계수가 단위 값인 경우로서 기준 파정진폭을 나타낸다. 파랑 특성은 Fig. 2와 같은 파고계 배열을 이용하여 계측하였다.

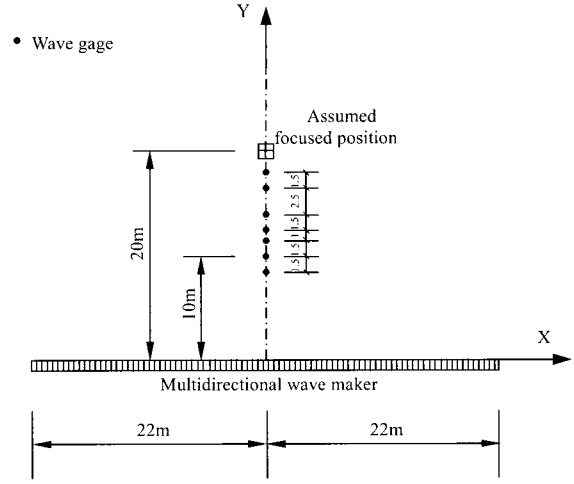
Table 1 Basin and wave parameters for multidirectional wave focusing

CWAS	CWSS	$f_c(\text{Hz}), k_c, a$	Δf (Hz)	$\frac{\Delta f}{f_c}$	A_0 (m)	t_b (s)
A0201		1.00	0.5	0.500	0.6	67
A0202	B0202	4.03	0.7	0.700	1.0	58
		45°				
A0203	B0203	0.80	0.3	0.375	0.6	79
A0204	B0204	2.58	0.5	0.625	1.0	60
A0205	B0205	45°	0.7	0.875	1.4	51
A0206	B0206	0.60	0.3	0.500	1.0	71
A0207		1.45	0.5	0.833	1.4	52
		45°				
A0103	B0103	0.80	0.3	0.375	0.6	79
A0105	B0105	2.58	0.7	0.875	1.4	51
		30°				

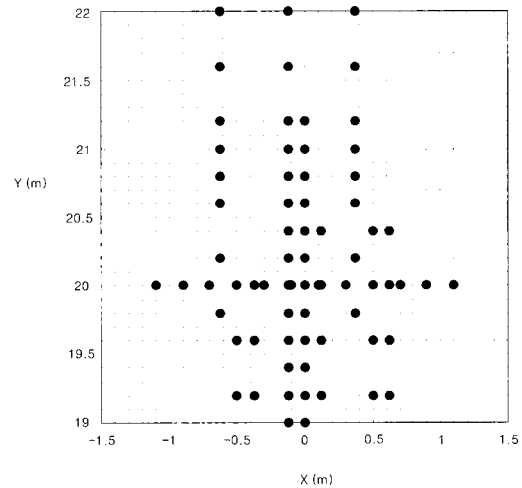
Common parameters:
 $N_f = 29, N_\theta = 200,$
 Assumed focusing point : (0.0m, 20.0m),
 Time interval : $\delta t = 0.05\text{sec},$
 Machine elevation : $h_m = 2.2\text{m},$
 Water depth : $h = 3.4\text{m}$

조파기 구동신호의 생성을 위해 선형 다방향파 조파이론을 사용하여 파랑의 집중점과 집중점에서의 파정진폭을 이론적으로 먼저 계산하였다. 다만, 중첩파의 쇄파 현상을 이론적으로 정확히 추정하는 것은 어려우므로, 실제 수조에서 생성된 중첩파의 파정진폭은 추정치에 도달하기 이전에 쇄파 임계치보다 커질 수 있고, 이런 경우에는 파랑집중점 전면에서 쇄파가 발생한다. 그러나 파랑집중점 이전에 쇄파가 발생하는 경우에도 이후에 지속적인 에너지 집중이 진행되어서 파랑집중점 부근에서 최대 파정진폭의 극한파가 생성됨을 볼 수 있다. 다만, 이 경우에는 쇄파에 의해 파랑의 전파 특성이 달라지므로 파랑집중점의 이론적 예측치와 실험의 계측치가 차이를 보인다. 실험에서는 Table 1에 주어진 조건에 대해 조파판 운동에 대한 축척계수를 사용하여 다중 쇄파가 발생하는 경우, 단일 쇄

파의 경우, 그리고 쇄파가 발생하기 직전의 집중파를 나타내는 초기쇄파(incipient breaking wave)의 경우로 구분하여 고찰하였다.



(a) along the centerline



(b) around focusing point

Fig. 2 Wave gauge arrangement

조파기에 의해 생성된 파랑성분들이 파랑 집중점에 접근함에 따라 파랑의 집중이 증가되며 주파수 스펙트럼도 또한 목표 스펙트럼에 근사하게 된다. 파랑 집중점을 지나 이로부터 멀어지면 역으로 파랑 성분들의 분리가 발생하며 이에 따라 파랑 집중이 해체되는 과정이 진행된다. Fig. 3과 4는 수조의 중심선을 따라 변화하는 주파수 스펙트럼과 스펙트럼 해수면 상승의 시계열을 각각 보여준다. 주파수 스펙트럼의 형상 변화는 공간적인 위치에 따라 고주파수 성분의 기여도가 급격히 변화함에 기인하는 것으로 나타나며(Fig. 3), 중첩파의 모든 파랑성분들의 과정이 파랑 집중점에서 일치하도록 위상을 제어함으로써 얻어진 해수면 상승의 시계열 특성이 Fig. 4에 잘 나타나 있다.

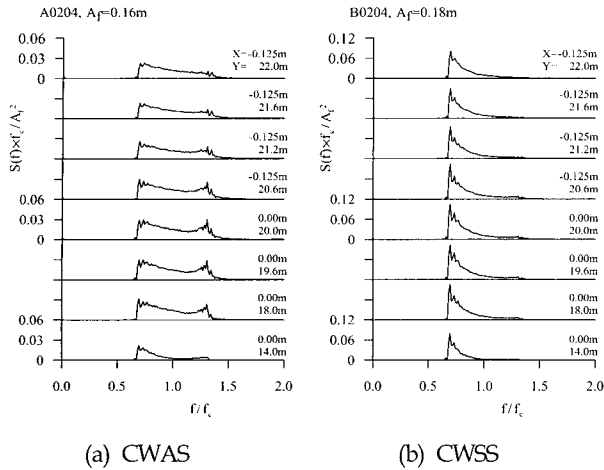


Fig. 3 Frequency spectrums along the center line of wave basin

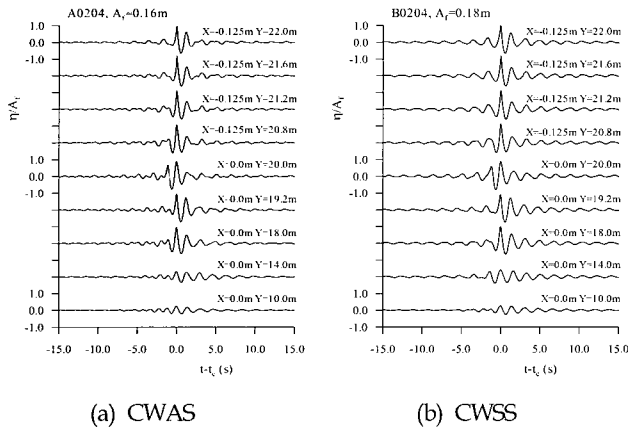
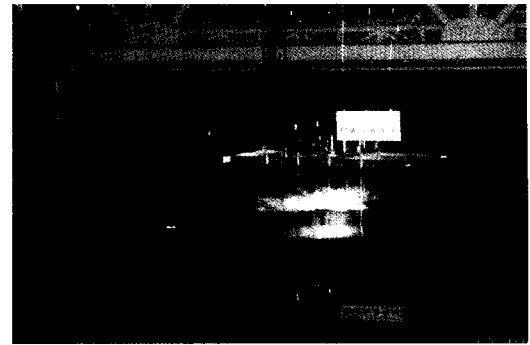


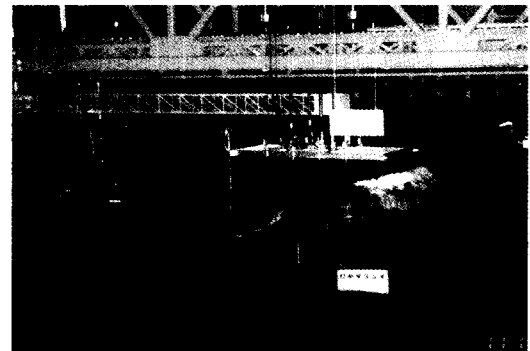
Fig. 4 Time series of wave elevation along the center line of wave basin

파랑집중에 의해 발생하는 쇄파는 플런징 또는 스펀링의 형태를 효과적으로 보여준다(Fig. 5). 또한 중첩파의 파정진폭이 파랑 집중점에 도달하기 이전에 파쇄 임계치를 상회하는 경우에는 다중 쇄파가 목격되었으며(Fig. 6), 다중 쇄파의 경우에는 흔히 파군의 전면에서 횡방향으로의 파쇄 현상의 전파가 함께 관측되었다(Fig. 7). 쇄파의 형태는 기본적으로 중첩파의 파정진폭 및 기울기에 좌우되며, 이 값들은 성분파들이 중첩되는 물리적 과정, 즉 중첩파의 스펙트럼 인자들의 특성에 따라 결정된다. 아래에서는 각각의 인자들이 파랑집중의 효율성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 파랑집중의 효율성은 여러 가지 서로 다른 관점에서 논의될 수 있으나 쇄파 임계 파정진폭과 파랑의 공간적인 집중도가 중요한 기준이 된다.

집중파의 파정진폭을 동일하게 가정할 때, 상응하는 조파기 구동신호에 의해 생성된 중첩파는 CWSS를 사용하는 경우가 CWAS에 비해 상대적으로 큰 최대 파정진폭을 갖는다(Fig. 8(a),(b)). 특히 주파수 폭이 클수록 두 방법에 의해 얻어지는 최대파 진폭의 차가 크다. 다른 조건이 동일하고, 중심주파



(a)



(b)

Fig. 5 (a) plunging and (b) spilling breaking of directional focusing waves

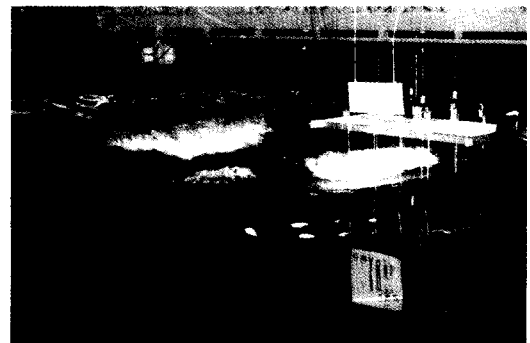


Fig. 6 Successive breakings of a wave packet

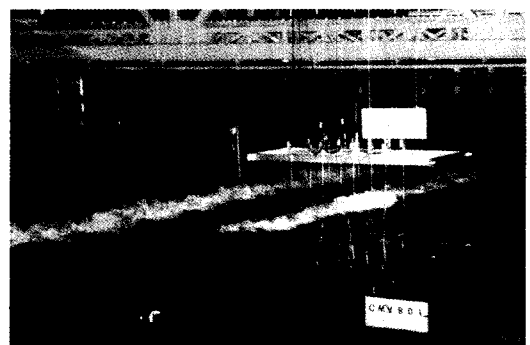


Fig. 7 Transverse propagation of breaking phenomenon

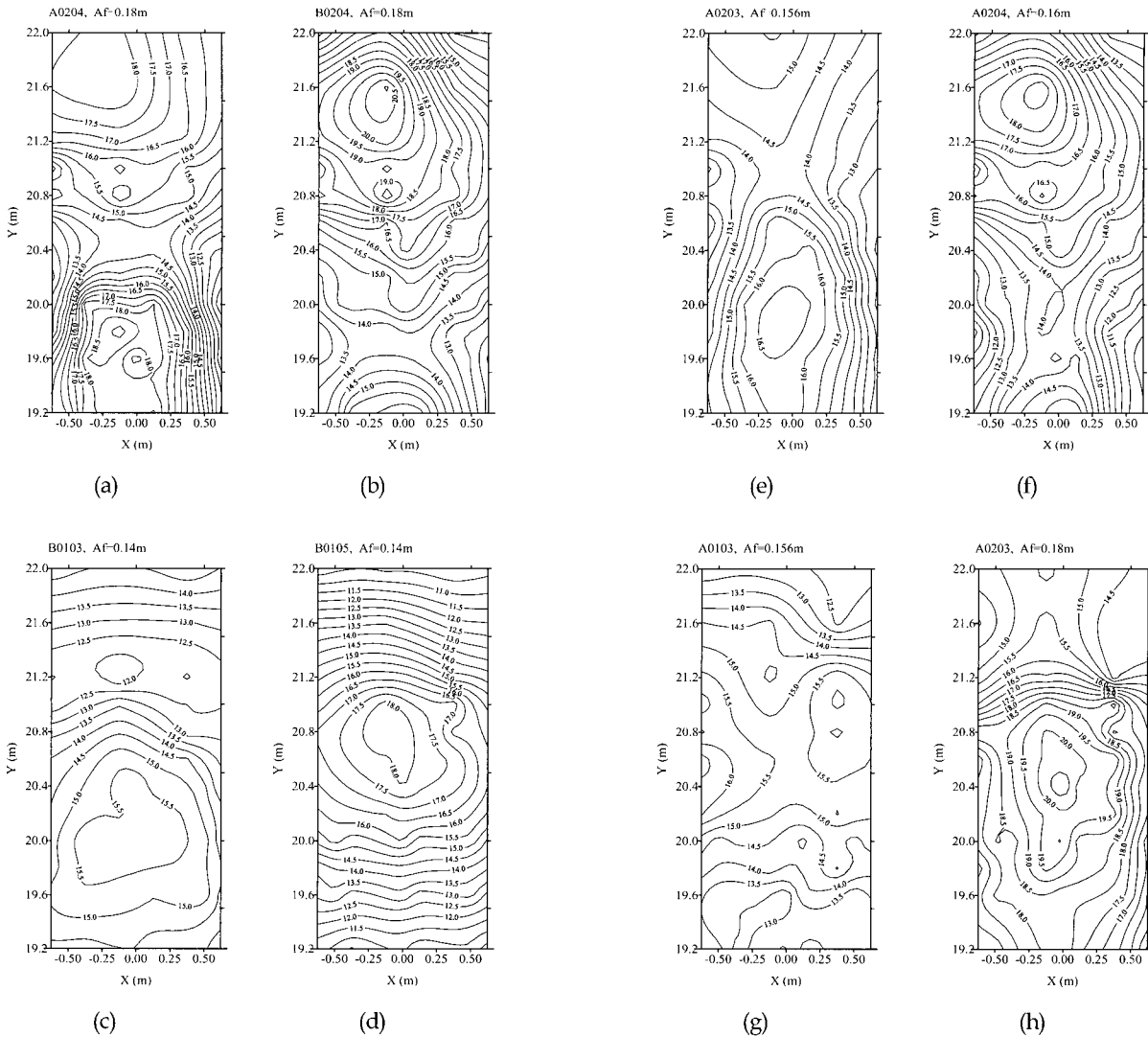


Fig. 8 Distribution of crest wave amplitudes

수 만이 다른 경우에는 작은 중심주파수를 갖는 경우가 극한파의 파정진폭이 커짐을 알 수 있으며(Fig. 8(c),(d)), 이는 상대적으로 선형성이 뛰어나므로 에너지의 소산이 작아 효과적인 파랑집중이 가능하기 때문이다. 주파수 폭 만이 다른 경우(Fig. 8(e),(f))에는 주파수 폭이 큰 경우가 파랑 집중에 보다 효율적이다. 파향 범위가 30°와 45°인 경우를 비교하면, 예상대로 45°의 경우가 훨씬 큰 파정진폭을 생성함을 보여준다(Fig. 8(g),(h)). 이것은 극한파의 생성에서 주파수 중첩과 더불어 방향성의 제어가 중요한 요소임을 의미한다. Fig. 8에서 (a),(b),(g),(h)는 단일 쇄파의 파정진폭 분포이며, (c),(d),(e),(f)는 초기쇄파의 경우이다.

조파판 구동 신호에 대해 축척계수를 적용하여 조파판 피스톤 운동의 크기를 제어함으로써 단일 및 다중 쇄파와 초기쇄파를 생성할 수 있다. 쇄파 직전의 집중파에서 얻어지는 최대 파정진폭이 단일 쇄파가 발생하는 경우에 비해 오히려 큰 경우도 발견된다. 이는 쇄파의 에너지 소산이 순간적으로 발생하기보다는 파랑의 집중이 이루어지는 과정에서 일정기간 동안

지속적으로 발생하기 때문으로 판단된다. 또한 일반적으로 최대 파정진폭의 발생지점은 이론적 계산치 보다 뒤쪽에 형성됨을 보여준다.

4. 결 론

파랑집중기법을 다방향파에 적용하여 조파수조에서 다방향 극한파를 생성함으로써 다방향파의 집중 효율에 영향을 미치는 파랑인자들을 분석하였으며, 방향성을 고려한 극한파의 파랑특성을 고찰하였다. 이로부터 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 다방향파의 집중에서 효율성을 지배하는 주요 파랑인자는 주파수 스펙트럼의 중심주파수, 주파수 폭 및 스펙트럼의 형상특성과 방향성의 집중도를 나타내는 파향범위 등이다.
- 2) 동일한 조건에서는 등기울기 스펙트럼이 등진폭 스펙트럼에 비해 파랑 집중에 효과적이며, 집중파의 최대 파정진폭의 크기가 크다.
- 3) 파랑집중에서 방향성의 정도를 나타내는 파향범위는 파랑집

중의 효율성을 크게 좌우하며, 방향성이 클수록 파랑집중에 유리하다. 이는 방향성을 고려한 파랑집중이 주파수 중첩에만 의존하는 일방향 파랑집중에 비해 극한파 생성에 효과적임을 의미한다.

- 4) 작은 중심주파수를 갖는 경우가 상대적으로 선형성이 뛰어나서 에너지의 소산이 작기 때문에 집중파의 생성에 유리하며, 주파수 폭이 클 때, 파랑집중이 보다 효과적이다.

파랑 집중에 의한 극한파는 파의 집중이 진행될수록 비선형성이 증가하므로 선형파 이론에 근거한 파랑집중의 예측치는 정확성에 한계를 갖는다. 그러므로 원하는 극한파를 수조에서 정확히 재현하여 파랑특성을 올바르게 파악하려면 파랑의 비선형성에 대한 고려와 쇄파에 기인하는 에너지 소산 특성에 대한 이해가 선행되어야 하며, 향후 이에 대한 연구가 기대된다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 시행한 기본연구사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 홍기용, 류슈웨이, 홍석원, (2002). "다방향 극한파 생성의 이론적 연구", 대한조선학회논문집, 제39권, 제1호, pp 38-48.
- Chan, E.S. and Melville, W.K. (1988). "Deep water plunging wave pressures on a vertical plane wall", Proc. of the Royal Society, A417, pp 95-131.
- Johannessen, T.B. (1997). The effect of directionality on the nonlinear behavior of extreme transient ocean waves, Ph.D. thesis, University of London.
- Kway, H.L., Loh, Y.S. and Chan, E.S. (1998). "Laboratory study of deep-water breaking waves", Ocean Eng., Vol 25, No 8, pp 657-676.
- Ramberg, S.E. and Griffin, O.M. (1987). "Laboratory study of steep and breaking deep water waves", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol 113, pp 493-506.
- Rapp, R.J. and Melville, W.K. (1990). "Laboratory measurements of deep-water breaking waves", Transactions Philosophical of the Royal Society of London, A331, pp 735-800.
- Sand, S.E. and Mynett, A.E. (1987). "Directional wave generation and analysis", Proc. IAHR Seminar - Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins, Lausanne, Switzerland, pp 209-235.
- She, K., Greated, C.A., and Eason, W.J. (1994). "Experimental study of three-dimensional wave breaking", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol 120, pp 20-36.
- Skyner, D.J., Gray, C., and Greated, C.A. (1990). "A comparison of time-stepping numerical predictions with whole-field flow measurement in breaking waves", Water Wave Kinematics, pp 491-508.
- Takayama, T. (1984). "Theory of oblique waves generated by serpent type wave-maker", Coastal Engineering in Japan, Vol 27, pp 1-19.
- Takezawa, S. and Hirayama, T. (1976). "Advanced experimental techniques for testing ship models in transient water waves: Part II: The controlled transient water waves for using in ship motion tests", Proc. of 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, pp 37-54.

2002년 8월 24일 원고 접수

2002년 10월 7일 최종 수정본 채택