

다방향 파랑집중에 의한 쇄파의 파형특성 연구

홍기용⁽¹⁾, 최학선⁽²⁾

Evolution of Surface Profiles of Breaking Waves Generated by Directional Wave Focusing

by
Keyyong Hong⁽¹⁾ and Hak-Sun Choi⁽²⁾

요 약

방향 및 주파수 성분을 포함하는 파랑집중에 의해 다방향 쇄파를 생성하였으며, 등기울기 및 등진폭 스펙트럼 모델을 적용하였다. 생성된 다방향 쇄파는 초기쇄파, 단일쇄파, 다중쇄파로 구분된다. 다방향 쇄파의 특성을 파정 기울기 및 비대칭성으로 정의되는 파형인자들의 함수로 고찰하였다. 또한 파랑집중의 효율성 관점에서 쇄파 파랑특성의 진개를 분석하였다. 파정 전면 기울기 및 연직 비대칭성은 쇄파과정에 영향을 미치는 중요한 인자이나, 파정후면 기울기 및 수평 비대칭성은 쇄파 과정에서 거의 상수 값을 갖는다. 방향 성분의 중첩은 파랑집중의 효율성을 크게 강화하며, 이는 다방향파의 쇄파 특성이 일방향파의 쇄파 특성과 상이함을 나타낸다.

Abstract

Directional breaking waves are generated by the component wave focusing both in direction and frequency based on constant wave steepness and constant wave amplitude spectrum models. The generated breaking waves are classified in the incipient, single and multi breaking waves. The characteristics of directional breaking waves are investigated in terms of surface profile parameters of wave crest steepness and asymmetry. The evolution of breaking wave characteristics is analyzed in a view of focusing efficiency. It shows that the front steepness and vertical asymmetry play an important role in breaking process, while the crest rear steepness and horizontal asymmetry are nearly constant during the process. The superposition of directional components greatly enhances the focusing efficiency and it suggests that characteristics of directional breaking waves may significantly different from uni-directional ones.

Keywords: Breaking wave 쇄파, Directional wave 다방향파, Wave focusing 파랑집중, Wave profile 파형, Wave basin 조파수조

(1) 정희원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부, kyhong@kriso.re.kr

(2) 정희원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부, hschoi@kriso.re.kr

1. 서 론

해양파의 에너지 집중에 의해 발생하는 쇄파는 다양한 해양현상의 원인으로 작용하기 때문에 쇄파의 특성은 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어왔다. 특히, 해양개발의 영역이 심해로 확장되면서 해양개발 구조물 및 장비들이 보다 거친 해양환경에 노출됨에 따라 극한적인 해양환경의 정확한 이해는 해양개발의 안전성과 효율성을 지배하는 중요한 요소가 되고 있으며, 그 중심에 극한 파랑환경인 쇄파의 문제가 위치하고 있다. 또한 쇄파는 해양파의 전파를 나타내는 파랑모델에서 에너지 소산을 일으키는 중요 요소로서, 제3세대 파랑모델 및 파랑 스펙트럼의 개선을 위해서는 쇄파에 기인하는 파랑감쇠 효과의 정량적 해석이 요구되고 있다.

실해역 파는 불규칙성과 다방향성을 특성으로 하며, 일반적으로 서로 다른 방향성과 주파수 특성을 갖는 정형파의 합으로 나타낸다. 서로 다른 성분파의 합성에 의해 에너지가 집중되어 파랑의 기울기가 증가하게 되면, 파형이 더 이상 대칭을 유지하지 못하고 전면의 기울기가 후면에 비해 커지게 되어 쇄파가 발생한다. 따라서 실해역 쇄파의 특성은 주파수 성분의 집중과 방향 성분의 집중을 동시에 구현함으로써 파악될 수 있다.

쇄파는 강한 비선형적 특성 때문에 현상의 이론적, 수치적 해석에 한계를 가지며, 이에 따라 실험적 연구가 활발히 수행되어 왔다. 쇄파에 관한 실험적 연구는 주파수 성분파들이 동일한 방향성을 갖는 일방향 쇄파에 대한 연구로부터 시작되었다. Ramberg and Griffin[1987]과 Chan and Melville[1988]은 바람과 바닥 효과를 무시한 이차원 파랑집중기법을 적용하여 단일 쇄파를 생성한 바 있다. 이들은 주파수 성분파의 위상을 조절함으로써 파랑을 변조하여 쇄파를 시뮬레이션 하였다. Rapp and Melville[1990]은 등진폭 스펙트럼을 사용하여 스피링 쇄파와 플러징 쇄파를 재현하고, 쇄파 시 발생하는 에너지 소산 특성을 고찰한 바 있다. Kway et al.[1998]은 등진폭, 등기울기 및 Pierson-Moskowitz 파랑 스펙트럼을 사용하여 쇄파를 생성하고 결과를 서로 비교하였으며, 쇄파의 발달과정에서 주파수 성분들 사이의 에너지 교환 특성을 제시하였다.

방향성을 갖는 실해역 쇄파의 3차원적인 특성

에 대한 실험적인 연구는 Su[1982]에 의해 처음으로 시도되었으며, 다방향 쇄파가 일방향 쇄파와는 구별되는 파랑 변형과 외력 특성을 가지고 있음을 규명하였다. She et al.[1994]은 균일한 방향분포함수를 갖는 단일 주파수 성분파와 동일한 방향분포함수를 갖는 다주파수 성분파의 파형 특성을 방향분포함수를 변수로 하여 분석하였다. 또한 She et al.[1997]은 선행 연구에서와 동일한 경우에 대해 입자영상속도계(particle image velocimetry)를 사용하여 쇄파를 계측하였으며, 다방향 스피링 및 플러징 쇄파를 관측하였다. Johannessen[1997]은 쇄파에서 방향성이 포함될 때, 쇄파가 발생하는 임계 파정 진폭이 현격히 증가함을 실험적으로 규명하였다.

홍기용 등[2002a]은 서펜트형 조파기에 의해 생성되는 다방향 파랑장에 관한 Takayama[1984]의 이론을 적용하여 등기울기 및 등진폭 주파수 스펙트럼의 파랑특성 인자들에 따른 파랑집중 효과를 이론적으로 해석하고, 수치 시뮬레이션을 수행한 바 있다. 또한 홍기용 등[2002b]은 홍기용 등[2002a]의 이론적 연구에 기초하여 쇄파를 모형시험수조에서 재현하고, 파랑집중 효율의 관점에서 계측 결과를 분석한 바 있다.

본 연구는 홍기용 등[2002b]의 실험에서 계측된 결과를 바탕으로 다방향 불규칙파의 집중에 의해 발생하는 쇄파의 파형 특성을 고찰함으로써 방향성을 고려한 실해역 쇄파의 운동학적 특성을 규명하고자 수행되었다.

2. 다방향 쇄파의 생성

수조내의 일지점(x_b, y_b)에 특정시간 t_b 에 집중되는 다방향 불규칙파의 해수면 상승 η 는 다음과 같은 이중 합성 모델에 의해 표현된다(홍기용 등[2002a]).

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

여기서 a_{ij} 는 i 번째 주파수 f_i 와 j 번째 방향 θ_j 의 파랑 성분의 진폭을 나타내며, k 는 파수이다. 또한 N_f 와 N_θ 는 주파수 성분과 방향 성분의 수를 각각 나타낸다. Sand and Mynett

[1987]는 서펜트형 조파기의 운동과 해수면 상승 사이의 관계를 나타내는 전달함수를 구하였으며, 이를 적용하면 (1)식으로 표현되는 다방향 불규칙파를 생성하는데 필요한 조파기 구동신호를 얻을 수 있다.

(1)식을 살펴보면, 다방향 조파수조에서 재현되는 집중파의 특성은 다음의 인자들에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

$$N_f, N_\theta, a_{ij}, f_i(k_i), (x_b, y_b), t_b, h, [-\alpha, \alpha] \quad (2)$$

여기서 h 는 수심을 나타내며, α 는 전체 파랑장의 파향 범위이다. 성분파의 파향 θ_j 는 수조내의 일지점에 파랑을 집중하는 경우를 가정하면 집중점의 위치에 따라 고정되는 값이므로, 집중파의 방향성에 따른 효과는 파향 범위 α 에 의해 대표될 수 있다.

다방향 불규칙파의 특성은 방향분포함수와 주파수 스펙트럼에 의해 정의되고, 수조 모형시험에서는 이들 함수들의 특성이 파랑장 전체에 대해 균일하게 나타나도록 제어하는 것이 일반적이지만, 집중파의 경우에는 이들 함수들이 특정 지점에서 원하는 파랑 특성을 갖도록 하는 것이 목적이므로, 이들 함수들의 공간적인 분포를 제어하는 것이 필요하다. 수조에서 파랑집중에 의한 극한파를 생성할 때, 생성파의 효과적인 제어가 가능하기 위해서는 영향 인자들의 특성 분석이 가능하도록 비교적 단순한 형태의 주파수 스펙트럼의 사용이 바람직하다. 본 연구에서는

Takezawa and Hirayama[1976]가 2차원 극한파의 생성을 위해 도입한 등진폭 스펙트럼(Constant Wave Amplitude Spectrum, 이하 CWAS)과 등기울기 스펙트럼(Constant Wave Steepness Spectrum, 이하 CWSS)을 3차원의 경우로 확장하여 적용하였다(홍기용 등[2002b]). 주파수 스펙트럼을 CWAS와 CWSS로 한정할 때 파랑 집중에 영향을 미치는 주파수 스펙트럼의 특성인자는 중심 주파수 f_c , 주파수 폭 Δf , 파정 진폭 A_f 으로 단순화할 수 있다.

3. 쇄파의 파형 특성

쇄파의 발생 여부는 파랑집중의 진행에 따라 증가하는 파기울기의 크기에 좌우되며, 파기울기가 증가함에 따라 나타나는 파형의 비대칭성 정도에 따라 쇄파의 형태가 결정된다. 따라서 쇄파의 역학적 특성은 파기울기 및 파형의 비대칭성에 무엇보다 민감하다.

Kjeldsen et al.[1981]은 쇄파의 파형 특성을 나타내는 파정전면 기울기, 파정후면 기울기, 총기울기, 연직비대칭 계수, 수평비대칭 계수를 다음과 같이 정의하였다(Fig. 1).

$$\text{crest front steepness: } \varepsilon = \frac{2\pi\eta_{\max}}{gT_1T} \quad (3)$$

$$\text{crest rear steepness: } \delta = \frac{2\pi\eta_{\max}}{gT_2T} \quad (4)$$

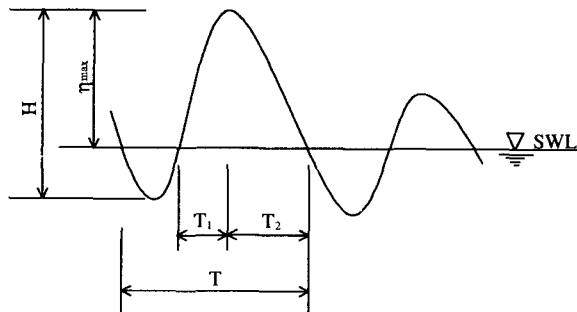


Fig. 1 The definition of wave profile parameters (Kjeldsen et. al.[1981]).

$$\text{total steepness: } \epsilon_T = \frac{2\pi\eta_{\max}}{gT^2} \quad (5)$$

$$\text{vertical asymmetry factor: } \lambda = \frac{T_2}{T_1} \quad (6)$$

$$\text{horizontal asymmetry factor: } \mu = \frac{\eta_{\max}}{H} \quad (7)$$

모형시험 수조에서 파랑 집중에 의한 쇄파의 생성 시 파랑 집중점 및 집중시간에 접근함에 따라 전개되는 파형의 변화를 관찰함으로써 쇄파의 발생과정 및 역학적 특성을 이해할 수 있으며, 또한 이를 통해 효과적인 파랑 집중기법의 정립이 가능하다.

4. 수조시험 및 고찰

파랑집중 기법에 의한 쇄파의 생성은 해양안전시스템연구소의 해양공학수조에서 수행되었다. 해양공학수조는 30m 길이와 50m의 폭을 갖고 있으며, 조파 시스템은 높이 2.0m, 폭 0.5m의 조파판 88개로 구성되어 있다. 쇄파는 수심 3.4m, 조파판 하단과 수조 바닥과의 거리 2.2m 조건에서 생성되었다. 조파신호의 생성을 위해 사용된 주파수 성분의 수는 29개이며, 방향 성분의 수는 200개를 사용하였고, 시간간격은 0.05sec로 하였다. 파랑집중점은 조파기 중앙 전면 20.0m 지점으로 가정하였다.

쇄파의 생성에는 등진폭 및 등기울기 스펙트럼을 각각 적용하였으며, 쇄파의 특성을 지배하는 주요인자인 주파수 폭, 중심주파수, 파향 범위 및 파정 진폭 조건을 변화시켜 가면서 시험을 수행하였다. 쇄파의 계측에는 용량식 파고계를 사용하였으며, 기포가 발생하기 시작하면 계측이 어려워므로 쇄파가 일정 한계 이상으로 진행된 후에는 정량적 계측이 이루어지지 못하였다. 쇄파 발생과정의 파형 변화는 조파기 전면의 중심축을 따라 설치한 파고계로 계측하였으며, 쇄파 발생 지점 주위에서는 최대 해상도 10cm를 갖는 다수의 파고계를 격자형으로 분포시켜 파형을 계측하였다.

중첩파의 쇄파 조건을 정확히 예측하는 것은 어렵기 때문에, 선형 다방향파 조파이론에 의해 조파신호를 생성할 때 가정된 집중점에 도달하기 전에 쇄파가 발생하는 상황은 고려치 않았으나,

실제로 큰 에너지를 갖는 성분파들의 중첩파는 진행하면서 파고가 급격히 높아져서 파랑집중점에 도달하기 전에 쇄파가 발생한다. 그러나 파랑 집중점 이전에 쇄파가 발생하는 경우에도 이후에 지속적인 에너지 집중이 진행되어서 파랑집중점 부근에서 최대파고의 극한파가 생성됨을 볼 수 있다. 다만, 이 경우에는 쇄파에 의해 파랑의 전파 특성이 달라지므로 파랑집중점의 이론적 예측치와 실험의 계측치가 다소 차이를 보인다. 실험에서는 조파판 운동에 대한 축척계수를 사용하여 다중 쇄파가 발생하는 경우, 단일 쇄파의 경우, 그리고 쇄파가 발생하기 직전의 파랑집중을 나타내는 초기 쇄파(incipient breaking wave)의 경우로 구분하여 고찰하였다.

Fig. 2은 조파기 전면 중심선에 따른 다중 쇄파의 파형 인자 변화를 보여준다. 파정전면 기울기가 파정후면 기울기보다 큰 것을 볼 수 있으며, 다중 쇄파의 수만큼 기울기의 정점이 나타나는 것이 일반적이다. 이 때, 파정전면 기울기 계수의 변화가 보다 현저하며, 상대적으로 파정후면 기울기 계수는 완만한 변화를 보인다. 연직비대칭 계수의 경우는 파정전면 기울기의 변화와 유사한 경향을 보여주나, 파랑집중에 따른 수평비대칭 계수의 변화는 미미한 편이다. 이로부터 다방향 중첩파의 쇄파는 파정전면 기울기와 연직비대칭 계수에 크게 좌우됨을 알 수 있다. Fig. 2(a)에서 전형적으로 보여지는 것처럼 파랑전면 기울기 및 연직비대칭 계수는 파랑집중이 진행되어감에 따라 급격히 증가하다가 파쇄가 발생하면 이러한 특성이 급격히 해체되는 것을 알 수 있다.

집중파의 특성인자들이 동일할 때, Fig. 2(b)와 (d) 및 Fig. 2(c)와 (e)에 보여지는 것처럼 등기울기 스펙트럼 모델의 경우가 등진폭스펙트럼 모델보다 큰 파정 기울기를 발생시키며, 연직 방향의 비대칭성도 증가한다. 이는 동일한 집중파의 파정 진폭을 가정할 때, 전자가 후자에 비해 고주파 성분의 선형성이 우수하고, 저주파수 성분의 파랑 에너지가 커서, 에너지의 소산 없이 파랑의 집중 및 전파가 가능하기 때문이다. Fig. 2(b)와 (f)는 파향범위의 영향을 보여준다. $\alpha=45^\circ$ 인 경우가 30° 일 때보다 파정전면 기울기 및 연직비대칭 계수가 현저하게 크며, 이는 파향범위가 큰 경우에 보다 좁은 지역에 파랑을 분포시키므로 효과적으로 파랑 에너지 집중이 가능하기 때문이

다방향 파랑집중에 의한 쇄파의 파형특성 연구

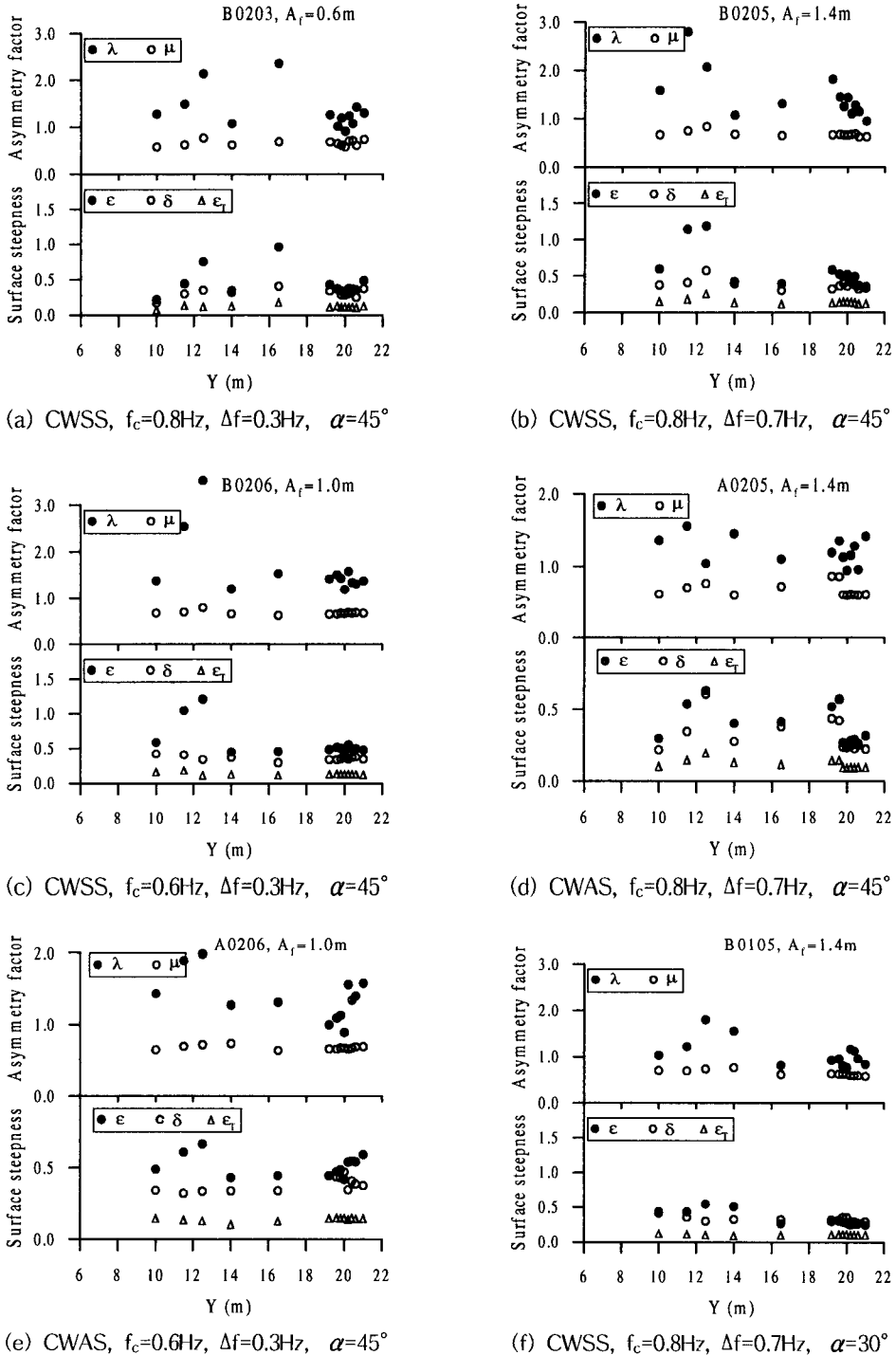
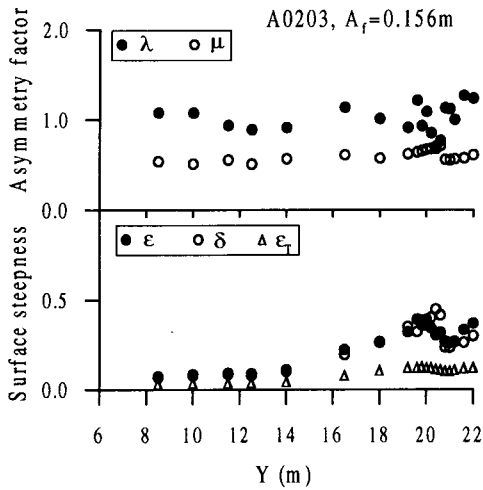
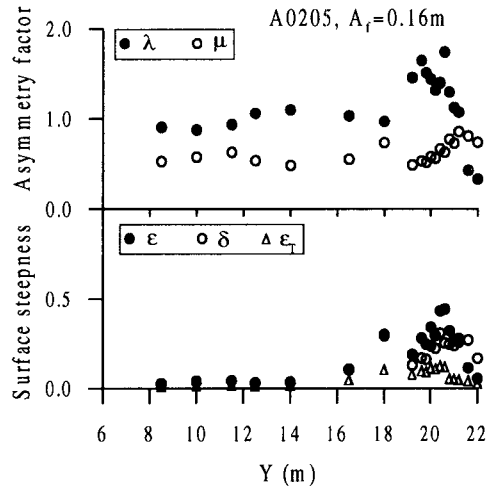


Fig. 2 The variation of wave profile parameters along the centerline in multi breaking waves.

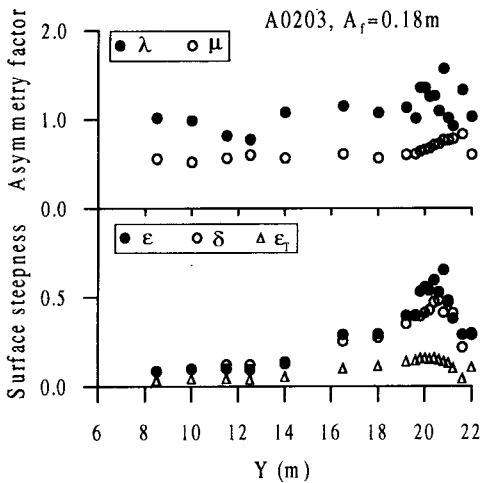


(a) CWAS, $f_c=0.8\text{Hz}$, $\Delta f=0.3\text{Hz}$, $\alpha=45^\circ$

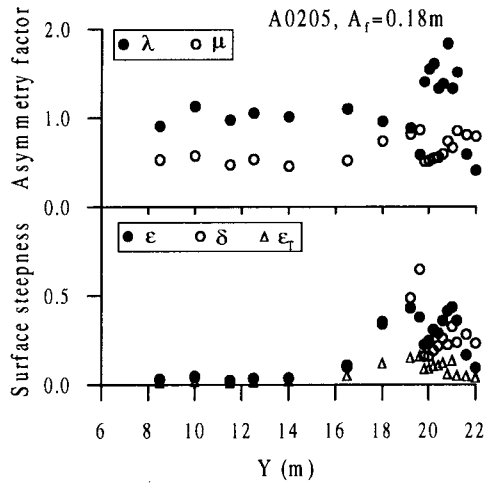


(b) CWAS, $f_c=0.8\text{Hz}$, $\Delta f=0.7\text{Hz}$, $\alpha=45^\circ$

Fig. 3 The variation of wave profile parameters along the centerline in incipient breaking waves.



(a) CWAS, $f_c=0.8\text{Hz}$, $\Delta f=0.3\text{Hz}$, $\alpha=45^\circ$



(b) CWAS, $f_c=0.8\text{Hz}$, $\Delta f=0.7\text{Hz}$, $\alpha=45^\circ$

Fig. 4 The variation of wave profile parameters along the centerline in single breaking waves

다. 이 결과는 방향성을 포함하는 다방향 쇄파의 파형 특성이 일방향 쇄파와는 상이함을 보여준다.

Fig. 3와 Fig. 4는 초기 쇄파와 단일 쇄파의 경우를 각각 보여준다. 이들 경우들은 파랑 집중점

에 도달하기 전까지는 계수 값들의 변화가 매우 완만하지만, 파랑 집중점에 부근에서는 다중 쇄파와 마찬가지로 파기울기 및 비대칭성이 증가하는 경향을 뚜렷이 보여준다. 파랑 집중점 부근에서 단일 쇄파가 초기 쇄파보다 보다 큰 파정기

울기와 비대칭 계수 값을 보여주며, 변화 또한 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 다만, 두 경우 모두에서 다중 쇄파와 같은 급격한 계수 값들의 증감은 나타나지 않는다.

연직비대칭 계수는 쇄파가 본격적으로 진행되기 이전의 대부분의 영역에서 1.0에 근사하며, 급격한 증가를 보이는 쇄파 영역에서는 편차가 매우 심하며, 극심한 쇄파의 경우에는 2.0 이상의 값을 갖기도 한다. 반면에 수평비대칭 계수는 대부분의 영역에서 0.5 내외의 안정된 값을 보여준다. 다만, 다방향 조파수조에서 파형 인자들의 정량적 값들을 정확히 계측하는 것은 현재의 계측 기법으로는 지난한 일이므로, 계측기술의 불확실성에 따르는 오차가 이들 값에 포함되어 있으며, 향후 이에 대한 개선이 과제로 남는다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 쇄파는 파랑집중에 의해 파정의 기울기와 파형의 비대칭성이 증가할 때 발생하며, 특히 파정전면 기울기 및 연직비대칭 계수 값의 크기와 밀접히 연관되어 있다.
- (2) 등기울기 스펙트럼 모델이 등진폭 스펙트럼 모델에 비해 파형 인자의 변화가 현저하며, 이는 등기울기 스펙트럼 모델이 파랑 집중에 효율적임을 의미한다.
- (3) 파향 범위에 따라 쇄파 특성이 크게 다르게 나타나며, 방향성을 고려한 파랑집중이 쇄파 생성에 보다 효과적이다. 이 결과는 다방향 쇄파의 파형 특성이 일방향 쇄파와는 크게 구별됨을 의미한다.
- (4) 쇄파의 수평비대칭 계수와 파정후면 기울기는 파랑집중의 진행과정에서 안정적으로 일정한 값을 유지하며, 특히 수평비대칭 계수의 값은 0.5에 근사한다. 연직비대칭 계수와 파정전면 기울기는 파랑집중의 진행에 따라 급격한 증감을 나타내며, 연직비대칭 계수의 값은 쇄파 이전 영역에서는 1.0에 근사하고, 쇄파 영역에서는 2.0을 기준으로 큰 편차를 나타낸다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 시행한 기본연구사업의 연구결과중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 홍기용 · 류슈체 · 양찬규, 2002b, “파랑집중에 의한 다방향 극한파 생성의 효율성에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지(인쇄중).
- [2] 홍기용 · 류슈체 · 홍석원, 2002a, “다방향 극한파 생성의 이론적 연구”, 대한조선학회논문집, 제 39권 제1호, 38~48.
- [3] Chan, E.S. and Melville, W.K., 1988, “Deep water plunging wave pressures on a vertical plane wall”, *Proc. of the Royal Society*, A417, 95~131.
- [4] Johannessen, T.B., 1997, “The effect of directionality on the nonlinear behavior of extreme transient ocean waves”, Ph.D thesis, University of London.
- [5] Kjeldsen, S.P., Lystad, M. and Myrhaug, D., 1981, “Forecast of breaking waves on the Norwegian continental shelf”, Project report, Norwegian Meteorological Institute and Norwegian Hydrodynamic Laboratory, Trondheim, Norway.
- [6] Kway, H.L., Loh, Y.S. and Chan, E.S., 1998, “Laboratory study of deep-water breaking waves”, *Ocean Engineering*, Vol. 25, No. 8, 657~676.
- [7] Ramberg, S.E. and Griffin, O.M., 1987, “Laboratory study of steep and breaking deep water waves”, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 113, 493~506.
- [8] Rapp, R.J. and Melville, W.K., 1990, “Laboratory study of steep and breaking waves”, *Transactions Philosophical of the Royal Society of London*, A331, 735~800.
- [9] 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, 209~235.
- [10] She, K., Greated, C.A. and Easson, W.J., 1994, "Experimental study of three-dimensional breaking waves", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 120, 20~36.
- [11] She, K., Greated, C.A. and Easson, W.J., 1997, "Experimental study of three-dimensional breaking wave kinematics", *Applied Ocean Research*, Vol. 19, 329~343.
- [12] Su, M.Y., 1982, "Three dimensional deep water waves", *J. Fluid Mech.*, Vol. 124, 73~108.
- [13] Takayama, T., 1984, "Theory of oblique waves generated by serpent type wave-maker", *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 27, 1~19.
- [14] Takezawa, S. and Hirayama, T., 1976, "Advanced experimental techniques for testing ship models in transient water waves: Part II. The collected transient water waves for using in ship motion tests", *Proc. of 11th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 37~54.