

## 심해 풍파의 3파 상호작용에 대한 실험실 실험

### Laboratory Experiments for Triad Interactions of Deep Water Wind Waves

徐慶德\* · 吳相埜\* · 橋本典明\*\* · 安京模\*\*\* · 朴光淳\*\*\*\*

Kyung Doug Suh\*, Sang Ho Oh\*, Noriaki Hashimoto\*\*,

Kyungmo Ahn\*\*\*, and Kwang Soon Park\*\*\*\*

**要 旨 :** 3파 상호작용은 천수와 또는 유한 수심 풍파의 경우에만 중요한 것으로 알려져 왔다. 파랑 성분간의 에너지 전달에 의한 풍파의 성장 관점에서 볼 때 심해에서 3파 상호작용은 4파 상호작용에 비해 별로 중요하지 않다. 그러나, 심해에서도, 특히 풍파 성장의 초기 단계에서는, 3파 상호작용이 중요할 수 있는데, 이는 3파 상호작용이 쇄파에 결정적인 영향을 미치는 파형경사, 수면 위에서의 공기 흐름의 항력, 선박의 항해 등과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문이다. 본 연구에서는 일련의 실험실 실험 결과를 제시하고, 이에 대한 bispectrum 분석을 통하여 심해 풍파의 3파 상호작용을 고찰한다. 스펙트럼 침두 주파수에서의 bicoherence와 파형경사가 거의 정비례하는 것으로 나타나는데, 이는 파봉이 뾰족하고 파곡이 밋밋한, 경사가 큰 파가 3파 상호작용의 결과임을 나타낸다. Bicoherence 및 파형경사 모두가 파랑 성장의 초기 단계에서는 파령에 따라 증가하다가 파랑이 발달함에 따라 다시 작아진다. 파랑 성장의 초기 단계에서 3파 상호작용에 의하여 발달된 스펙트럼 2차 침두의 에너지가 그 이후에는 4파 상호작용에 의해 주변의 주파수들로 재분배되는 것으로 추측된다.

**핵심용어 :** 이변량스펙트럼, 위상상관, 파랑 상호작용, 파형경사, 풍파

**Abstract** □ The triad interactions have been known to be important only for shoaling waves or finite depth wind waves. In deep water, they are insignificant compared with the quadruplet interactions in respect to the evolution of wind waves due to energy transfer among the wave components. However, the triad interactions may be important even for deep water waves because they may closely be related to the wave steepness, which definitely affects wave breaking, drag of air flow over the sea, or navigation of ships, especially during the early stage of the development of wind waves. This study reports a series of laboratory experiments, whose data are subjected to bispectral analyses to investigate the triad interactions of deep-water wind waves. It is found that the bicoherence at the spectral peak frequency and the wave steepness are almost directly proportional, indicating that the steep waves with peaked crests and flat troughs are resulted from the triad interactions. Both bicoherence and wave steepness increase with the wave age during the early stage of wave generation and then drop off as the waves grow old. It seems that the energy of the secondary spectral peak developed by the triad interactions during the early stage of wave generation is redistributed to the neighboring frequencies by the quadruplet interactions during the later stage.

**Keywords :** bispectra, phase coherence, wave interactions, wave steepness, wind waves

\*서울대학교 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

\*\*일본 운수성 항만기술연구소 수리실험실 (Hydrodynamics Laboratory, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan)

\*\*\*한동대학교 건설도시환경공학부 (School of Construction, Urban, and Environmental Engineering, Handong University, Pohang, Kyungbuk 791-940, Korea)

\*\*\*\*한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

## 1. 서 론

천수파에 대한 3파 상호작용(triad interactions)의 중요성이 몇몇 연구자들에 의해 보고된 바 있다(Elgar and Guza, 1985; Freilich *et al.*, 1990; Ahn, 1993; Elgar *et al.*, 1995). 이들은 천수파의 경우 스펙트럼 침투와 위상이 상관되어 있는 고조파들의 출현을 관측함으로써, 이들이 3파 상호작용의 결과임을 보였다. 한편, 최근에 Young and Eldeberky(1998)는 수심이 거의 일정한 호수에서 관측된 자료를 이용하여 유한 수심에서도 풍파의 3파 상호작용이 유의미함을 보인 바 있다.

심해파에 대해서는 Phillips(1960)가 3파 상호작용에 의한 2차 파랑은 항상 시간에 대해서 그 크기가 제한되어 있고, 그 진폭은 1차 파랑 성분과 비해서 작은 반면에, 4파 상호작용에 의한 3차 파랑은 공명에 의해서 시간에 따라서 선형적으로 증가하여 1차 파랑 성분과 거의 같은 크기로 성장할 수 있다는 사실을 해석해 내었다. 그러므로, 4파 상호작용은 그 강도가 3파 상호작용에 비해서 한 차원 작지만, 공명 작용 때문에 그 역학적 영향이 누적되어 3파 상호작용보다 훨씬 중요하게 된다. 결과적으로, 파랑 성분들 사이의 에너지 전달에 의한 풍파의 성장 관점에서 볼 때에는, 심해에서의 3파 상호작용은 4파 상호작용에 비해서 별로 중요하지 않다.

그러나, 심해에서도, 특히 풍파 성장의 초기 단계에서는, 3파 상호작용이 중요할 수 있는데, 이는 3파 상호작용이 쇄파에 결정적인 영향을 미치는 파형경사, 수면 위에서의 공기 흐름의 항력, 선박의 항해 등과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문이다. 심해에서, 파형경사(파고의 파장에 대한 비가 어떤 값 이상이 되면, 백파(white caps)에 의한 쇄파가 발생한다. Michell(1893)은 심해파의 파형경사의 한계값이 0.142임을 이론적으로 보인 바 있다. 한편, Donelan(1982)은 Ontario 호수에서의 관측 자료를 이용하여 풍파가 충분히 발달된 해면에서의 공기 유동이 덜 발달된 풍파의 경우에 비해서 항력이 작음을 보였다. 동일한 풍속에 대해서도 파령(wave age)에 따라 항력 계수가 2배까지 차이가 날 수 있다. 선박의 항해에 있어서, 파고는 파형경사에 비해 별로 중요하지 않다. 파고가 크더라도 파장 또한 매우 긴 경우에는, 선박이 큰 파랑을 쉽게 타고 넘을 수 있다. 반대로, 작은 파랑이라도 그 경사가 급하면, 선수가 파봉에 위치하고 선미는 그 다음 파봉에 위치하게 되어 문제를 일으킨다. 풍파의 경우 파고가 커지면서 파장도 증

가하는데, 파고보다 더 빠른 속도로 증가한다. 따라서, 파랑이 충분히 성장했을 때보다 바람이 불기 시작하는 초기 단계 동안에 파랑의 경사가 더 커진다. 실제로 Sverdrup and Munk(1947)는 파형경사가 초기 단계 동안에는 파령에 따라서 증가하지만, 파령이 성장하면서 다시 감소하는 것을 보인 바 있다. 3파 상호작용은 이러한 심해 풍파의 파형경사와 밀접한 관계가 있을 것이다.

Bispectrum 분석은 파랑의 상호작용을 검토하기 위해서 많은 연구자들에 의해서 사용되어져 왔다(예로서 Hasselmann *et al.*, 1962; Masuda and Kuo, 1981b). 이 분석법은 3파 상호작용의 크기를 산정하는 데에도 아주 유용하며, 이러한 목적을 위해서 몇몇 분석 기법들이 개발되어 왔다(Haubrich, 1965; Kim and Powers, 1979). 본 연구에서는 다양한 수심, 풍속, 취송거리에 대한 3파 상호작용을 검토하기 위해서 풍동 조파수조에서 실험을 수행하였다. 수조의 길이가 상대적으로 짧기 때문에, 관측된 파랑은 모두 심해 조건에 해당된다. 3파 상호작용의 크기를 정량적으로, 그리고 분산이 아주 작도록 산정하기 위해서 충분한 시간 동안 수조를 따라서 네 지점에서 파랑 관측을 실시하였다. 그런 후에 취득한 파랑 자료에 대해서 bispectrum 분석을 수행하여, 파령 및 기타 변수들에 대한 3파 상호작용의 발달을 고찰하였다.

## 2. 3파 상호작용

비선형 3파 상호작용은 파랑의 주파수와 파수 벡터 사이에 다음과 같은 관계가 있을 때 발생할 수 있다:

$$f_1 \pm f_2 = f_3 \quad (1)$$

$$k_1 \pm k_2 = k_3 \quad (2)$$

여기서  $f_i$ 는 주파수,  $k_i$ 는  $i$ 번째 파랑성분의 파수 벡터이고, 파랑성분 1과 2는 각각 다음의 분산관계식을 만족한다:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3)$$

여기서  $d$ 는 수심,  $\omega = 2\pi f$ 이고,  $k = |k|$ 는 파수 벡터의 절대값이다. 따라서 3파 상호작용을 식 (1)과 (2)를 만족하는 세 파랑 성분 사이의 에너지 전달 과정으로 해석할 수 있다.

파랑성분 1과 2 사이의 합(또는 차) 상호작용으로부터 생성되는 파랑성분 3이 분산관계식( $k_3 = k(f_3)$ )을 만족

시키는 상호작용을 공명 상호작용이라고 하고(Armstrong *et al.*, 1962), 그렇지 않은 경우를 비공명(non-resonant) 상호작용 또는 구속(bound) 상호작용이라고 한다(Hasselmann, 1962). 공명 상호작용에서는 파랑성분 3이 주성분과 1, 2와 같은 크기까지 커질 수 있는 반면에, 비공명 상호작용에서는 파랑성분 3의 진폭이 주성분과의 진폭보다 작게 유지된다. Phillips(1960)는 표면중력파의 경우 공명 상호작용은 파랑이 비분산성인 극천해에서만 발생할 수 있다는 것을 밝혔다. 파랑이 분산성인 천이수심이나 심해에서는 비공명 상호작용만이 발생할 수 있다.

3파 상호작용은 식 (1)과 (2)를 만족시키는 수많은 파랑 성분의 세 쌍 사이에 발생한다. 그러나 현저한 첨두를 나타내는 스펙트럼의 경우에는 스펙트럼 첨두 성분 ( $f_1=f_2=f_p$ , 여기서  $f_p$ 는 스펙트럼의 첨두 주파수)의 자기상호작용(self interaction)이 중요한 것으로 관측되어져 왔다(예로서 Hasselmann *et al.*, 1962; Masuda and Kuo, 1981b; Elgar and Guza, 1985; Freilich *et al.*, 1990; Ahn, 1993; Elgar *et al.*, 1995; Young and Eldeberky, 1998). 이러한 자기상호작용에 의해 주파수  $2f_p$ 에서 스펙트럼 첨두의 고조파가 발생한다. 한편 복주파수(bifrequency) 평면에서는 ( $f_p, f_p$ ) 점에서 뚜렷한 첨두가 나타나게 된다. 본 연구에서도 스펙트럼 첨두 성분의 자기상호작용에 대하여 주로 고찰한다.

### 3. Bispectrum 분석

Bispectrum 분석은 파랑의 비선형 상호작용을 진단하기 위한 방법으로 자주 사용된다. Bispectrum  $B(f_1, f_2)$ 는 공식적으로 시계열자료의 2차 공분산 함수에 대한 Fourier 변환으로 정의된다(Hasselmann *et al.*, 1962):

$$B(f_1, f_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} S(\tau_1, \tau_2) e^{-i[2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)]} d\tau_1 d\tau_2 \quad (4)$$

$$S(\tau_1, \tau_2) = E[\eta(t)\eta(t+\tau_1)\eta(t+\tau_2)] \quad (5)$$

여기서,  $E[\cdot]$ 는 기대값 또는 평균,  $\eta(t)$ 는 수면변위,  $\tau$ 는 시간지각을 나타낸다. 이산 시계열의 경우에는, bispectrum을 다음과 같이 Fourier 계수들의 곱으로 직접 표현할 수도 있다:

$$B(f_1, f_2) = E[X(f_1)X(f_2)X^*(f_1+f_2)] \quad (6)$$

여기서,  $X(f)$ 는 복소 Fourier 계수를 의미하며 \*는 공액복소수를 나타낸다.

Bispectrum으로부터 그 크기를 무차원화한 양인 bicohe-

rence 및 biphase를 얻을 수 있고, 그 값은 각각 다음 식으로 정의된다(Kim and Powers, 1979):

$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E[|X(f_1)X(f_2)|^2]E[|X(f_1+f_2)|^2]} \quad (7)$$

$$\beta(f_1, f_2) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im} [B(f_1, f_2)]}{\text{Re} [B(f_1, f_2)]} \right\} \quad (8)$$

식 (7)에서, bicoherence는 제곱 형태로 제시되었는데, 이 형태가 bispectrum 분석에서 보다 유용하게 쓰이기 때문이다. Bicoherence는 스펙트럼 성분들 사이의 위상 상관의 척도로 사용되는데, 예를 들어  $b^2=1$ 은 완전상관을 나타내며,  $b^2=0$ 은 위상 상관이 전혀 없음을 의미한다. 식 (7)과 같이 정규화하여 bicoherence를 계산하면, 그 값은 0과 1 사이에서 변화하게 된다. 그러나 만약 Haubrich (1965)와 같은 방법으로 bicoherence를 정규화하면  $b^2$ 은 1보다 커질 수 있다. 따라서, 스펙트럼 성분들 사이의 상대적인 위상상관을 검토하기 위해서는 식 (7)과 같은 정규화가 바람직하다.

한편, 위상상관의 특성은 biphase로부터 파악할 수 있다. Masuda and Kuo(1981a)에 의하면  $\beta$ 가 0이면 파봉이 뾰족하고 파곡이 밋밋한 수평방향으로 대칭인 Stokes 형태의 파를 나타내며,  $\beta$ 가  $-\pi/2$ 에 접근함에 따라 앞쪽으로 치우친 툽니 형태의 파형이 된다. 이러한 특성은 왜도(skewness)  $S_k$ 와 비대칭성(asymmetry)  $A_s$ 로도 나타낼 수 있다:

$$S_k = \frac{\iint \text{Re} [B(f_1, f_2)] df_1 df_2}{(\overline{\eta^2})^{3/2}} \quad (9)$$

$$A_s = \frac{\iint \text{Im} [B(f_1, f_2)] df_1 df_2}{(\overline{\eta^2})^{3/2}} \quad (10)$$

여기서 윗막대(overbar)는 시간에 대한 평균을 나타낸다. 왜도가 양의 값을 가지고 비대칭성을 무시할 만한 경우 Stokes 형태의 파가 되며, 음의 비대칭성을 가지게 되면 앞쪽으로 치우친 파를 나타내게 된다.

### 4. Bispectrum 분석 수치실험

본 연구에서는 MATLAB HOSA(Higher Order Spectral Analysis) toolbox를 사용하여 bispectrum 분석을 수행하였는데, HOSA toolbox에 주어진 bispectrum 계산 함수를 다소 수정하여 사용하였다. Bispectrum의 계산에는 통계적인 불확실성이 개입하기 때문에, HOSA toolbox가 실제의 파랑 자료에 적용이 가능한 지를 검증하기

위해서 수치실험을 실시하였다. Kim and Powers(1979)가 사용하였던 파랑 시계열들이 간편하고 유의미하여, 이들을 재현하여 실험하였고, 이 실험으로 유의미한 고조파 성분이 존재하는 주파수에서 bispectrum의 첨두가 명확하게 나타남을 알 수 있었다. Kim and Powers(1979)에 제시된 과정을 그대로 적용하여 조금씩 다른 세 가지 방법으로 수치모의를 실시하였다. 각 실험에서는, 서로 다른 주파수  $f_1, f_2, f_3$ 를 갖는 정현파들로 이루어진 파랑 시계열을 64개 생성하였는데, 이 시계열은 각각 시간간격 0.5 s의 256개 자료점으로 구성하였다.

첫번째 파랑 시계열  $x^{(1)}(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$x^{(1)}(t) = \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) + \cos(2\pi f_3 t + \theta_3) + \varepsilon(t) \quad (11)$$

여기서  $f_1=30/128 \approx 0.2344$  Hz,  $f_2=45/128 \approx 0.3516$  Hz,  $f_3=75/128 \approx 0.5859$  Hz이고,  $f$ 는 주파수,  $\theta$ 는 위상각,  $\varepsilon(t)$ 는 Gaussian 분포를 따르는 -20 dB의 미소 백색잡음이다. 세 위상각  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 0부터  $2\pi$  사이에서 등분포를 따르는 난수로부터 독립적으로 선택하였고, 세 번째 주파수  $f_3$ 는  $f_1$ 과  $f_2$ 의 합으로 주어졌다. 이러한 주파수들은 모두 leakage 효과를 최소화하기 위해서 신중하게 선택하였다. 만약  $f_1$ 과  $f_2$  사이에 위상상관이 존재한다면, 합 또는 차 상호작용의 결과로  $b^2(f_1, f_2)$ 과  $b^2(f_2-f_1, f_1)$ 의 값이 유의미하게 나타날 것이다. 이 경우의 수치모의에서는 각각의 위상이 독립적으로 결정되었기 때문에 세 파랑 사이에 어떠한 위상상관도 존재하지 않는다. 따라서 bicoherence의 추정치는 거의 0일 것이다.

원래의 파랑 시계열은 tapering을 하거나 시간 영역의 창함수(window function)를 곱하는 등의 자료 수정을 기하지 않고 bicoherence를 계산하였다. 일반적인 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 사용하였고, 이 때 FFT의 길이는 각 시계열의 자료점의 개수와 마찬가지로 256으로 정하였다. 64개 각 시계열의 bicoherence 값을 ensemble averaging하여 최종적인 bicoherence를 구하였다. 시계열  $x^{(1)}(t)$ 에 대하여 계산한 bicoherence 값을 Fig. 1에 제시하였다. 계산된 bicoherence 값들은  $b^2(f_1, f_2)=0.01$ ,  $b^2(f_2-f_1, f_1)=0.03$ 이었고, 이는 세 파랑 성분들 사이에 위상상관이 없음을 증명하는 것이다.

두 번째로 실험한 파랑 시계열  $x^{(2)}(t)$ 는 식 (11)과 동일한 형태를 갖으나 세 번째 파랑의 위상각을  $\theta_3=\theta_1+\theta_2$  (이 때  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 무작위로 선택한다)가 되도록 선택하였다. 이 경우  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  사이에 강한 위상상관이 존재하

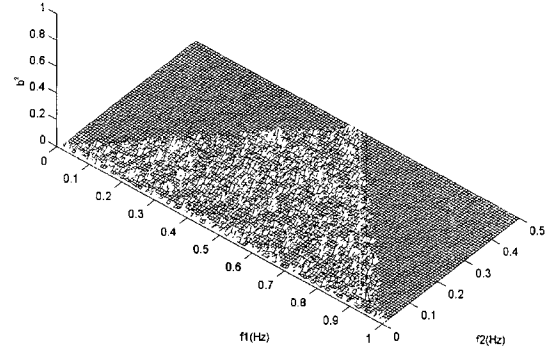


Fig. 1. Bicoherence squared spectrum of test waves  $x^{(1)}(t)$ .

므로,  $(f_1, f_2)$ 에 상당한 bicoherence가 나타날 것이다. 계산된 bicoherence를 Fig. 2에 제시하였는데,  $b^2(f_1, f_2)=1$ 이고,  $b^2(f_2-f_1, f_1)=0.02$ 였다. 이 결과로부터 주파수  $f_3$ 에 해당하는 파랑 성분은 전적으로 주파수  $f_1$ 과  $f_2$  사이의 합 상호작용에 의해서 생성되었음을 알 수 있다.

세 번째로, 시험 파랑  $x^{(3)}(t)$ 를 다음과 같이 나타낸다:

$$x^{(3)}(t) = \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) + 0.5 \cos(2\pi f_3 t + \theta_3) + \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) + \varepsilon(t) \quad (12)$$

여기서  $f_1 \approx 0.2344$  Hz,  $f_2 \approx 0.3516$  Hz,  $f_3=f_1+f_2 \approx 0.5859$  Hz이고, 위상각  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 무작위로 선택하였다. 식 (12)의 우변에서, cosine 함수의 곱의 형태로 표시된 항은 각각  $f_1, f_2$ 의 합과 차 주파수에서의 파랑에 해당하는 두 부분으로 나눌 수 있는데, 주파수  $f_1+f_2$ 에서는 자유파와 합 상호작용에 의한 파랑이 동등하게 파랑 에너지에 기여한다. 반면에 주파수  $f_2-f_1$ 에서의 파랑 에너지는 약간의 잡음에 의한 양을 제외한다면, 오직 차 상호작용으로부터 얻게 된다. 따라서 bicoherence를 계산하면  $b^2(f_1, f_2)=0.5$ 이고,  $b^2(f_2-f_1, f_1)=1$ 일 것으로 예측할 수 있다. 이

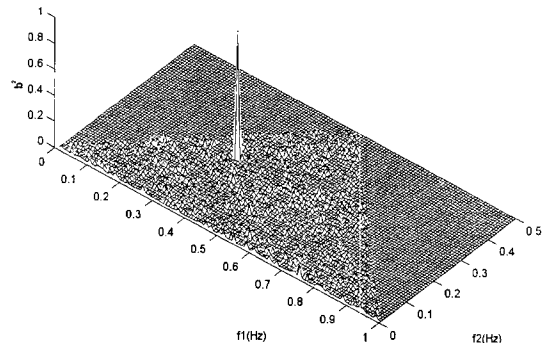


Fig. 2. Bicoherence squared spectrum of test waves  $x^{(2)}(t)$ .

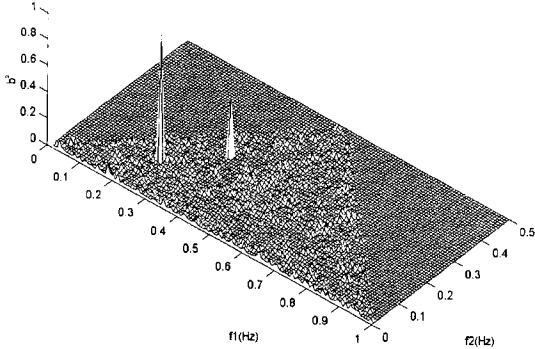


Fig. 3. Bicoherence squared spectrum of test waves  $x^{(3)}(t)$ .

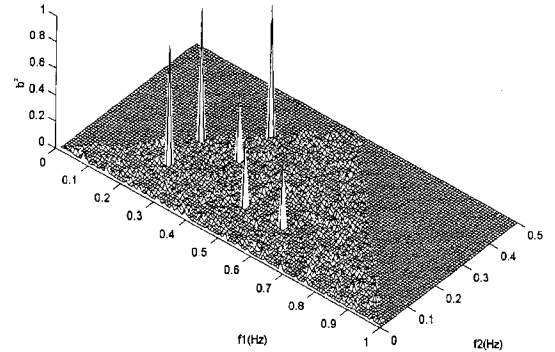


Fig. 4. Bicoherence squared spectrum of test waves  $x^{(4)}(t)$ .

러한 사실은 Fig. 3에서 잘 증명되는데, 여기서 잡음의 영향으로  $b^2(f_1, f_2) = 0.48$ 이고 예측치와 다소의 차이를 보이지만, 대체로 잘 부합하는 것을 알 수 있다.

마지막으로 Ahn(1996)이 사용하였던 시계열을 이용하여 다소 상이한 실험을 수행하였다. 이 시계열은 앞에서 사용한 시계열들보다 좀 더 복잡하지만, 파랑의 상호작용에 관해서 더 흥미로운 정보들을 제공한다. 시험 파랑은 다음 식으로 주어진다:

$$\begin{aligned}
 x^{(4)}(t) = & \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) + \cos(2\pi f_3 t + \theta_3) \\
 & + q_{11} \cos(4\pi f_1 t + 2\theta_1) + q_{22} \cos(4\pi f_2 t + 2\theta_2) \\
 & + 2q_{12} \cos[(2\pi f_1 t + 2\pi f_2 t) + (\theta_1 + \theta_2)] \\
 & + 2r_{12} \cos[(2\pi f_1 t - 2\pi f_2 t) + (\theta_1 - \theta_2)]
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서  $f_1 = 0.2344$  Hz,  $f_2 = 0.3516$  Hz,  $f_3 = f_1 + f_2 = 0.5859$  Hz이고, 위상각  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 마찬가지로 무작위로 선택하였다. 식 (13)에서,  $q_{ij}$ 는  $f_i + f_j$ 에 해당하는 합 상호작용 계수,  $r_{ij}$ 는  $f_i - f_j$ 에 해당하는 차 상호작용 계수이다. 이 수치모의에서는 편의상 이러한 모든 계수들의 값을 0.5로 취하였고, 계산한 bicoherence 값을 Fig. 4에 나타내었다. 모두 여섯 점에서 유의미한 값을 얻었는데,  $b^2(f_1, f_1) = b^2(f_2, f_2) = b^2(f_2, f_1) = 1$ 이고, 이것은 주파수  $2f_1, 2f_2, f_2 - f_1$ 에서의 파랑 성분이 주 파랑 성분과 완전하게 위상상관 관계가 있음을 보여준다. 반면에  $b^2(f_1, f_2) = b^2(2f_2, f_1 - f_2) = b^2(f_1 + f_2, f_1 - f_2) = 0.46$ 이고, 이것은 이들 주파수에 상응하는 파랑이 주 파랑 성분과 부분적으로 위상 상관성이 있음을 나타낸다. 만약 합 또는 차 상호작용의 계수( $q_{ij}$ 와  $r_{ij}$ )를 변경하면 이들 주파수에서의 bicoherence 값도 바뀌게 된다.

이상과 같은 일련의 수치실험을 통해서, MATLAB HOSA toolbox를 이용한 bispectrum의 계산 타당성을 검증하였다. 실험 결과, 이 toolbox가 파랑의 상호작용에

의한 상대적인 위상상관을 정량적으로 평가하는 데에 쓰일 수 있음이 분명해졌다. 따라서 이하에서 실험실 실험을 수행하여 얻은 실제의 파랑 자료를 분석하는 데에도 이를 사용하였다.

## 5. 수리실험

### 5.1 실험장치

실험은 일본 항만기술연구소 수리실험실의 풍동 조파 수조에서 이루어졌다. 실험 수조의 그림을 Figs. 5와 6에 나타내었다. 수조의 전체 길이는 62.3 m, 높이 1.3 m, 폭 1.5 m이다. 실험수조의 양측면은 강화유리로 되어 있고, 윗면은 합판으로 덮여 있다. 이 중에서 풍파를 발생시킬 수 있는 중앙 구간이 28.5 m이고, 하류측의 18 m 구간은 파랑 에너지를 흡수하는 모래-자갈 언덕을 포함하는 쇄파대이며, 상류측의 15.8 m는 50 kW 출력의 모터에 연결된 팬이 돌아가면서 바람을 생성시키는 구간이다. 이 때 바람은 송풍장치 내부에 설치된 유도판, 철망, honeycomb 등을 통과함으로써 수면으로 나올 때에 크기가 균일하게 된다(Fig. 5 참조). 한편 송풍장치 끝 부분에는 상하로 위치 조정이 가능한 수평판이 설치되어서 수심이 달라지는 경우에도 이를 수면에 위치시킬 수 있게 되어 있다. 바람의 크기는 제어실 내의 전자식 제어장치에 의해서 팬의 회전수를 미세하게 조정할 수 있기 때문에 실험이 이루어지는 동안 일정한 바람 조건을 충분히 유지할 수 있다. Figs. 5와 6에 보인 것처럼 이 풍동 조파수조에는 흐름 발생장치도 설치되어 있고, 실제로 흐름이 없는 경우와 있는 경우에 대해서 모두 실험을 수행하였으나, 본 연구에서는 흐름이 없는 경우에 대한 자료만을 분석하는 것으로 한정한다.

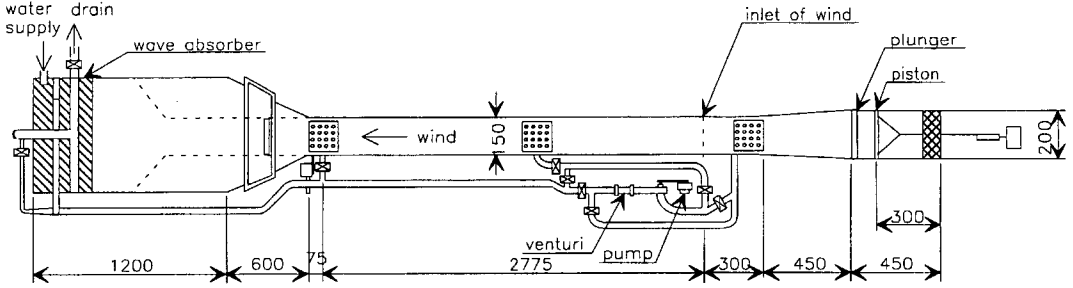


Fig. 5. Plan of wind-wave flume.

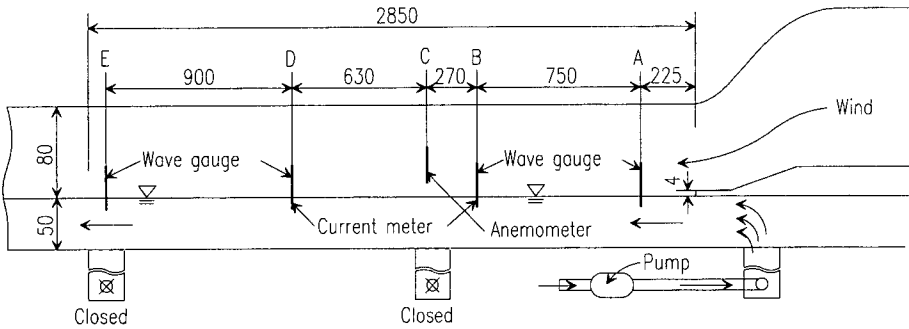


Fig. 6. Illustration of experimental setup.

풍속, 유속 및 수면변위 등을 측정하기 위해서 풍속 계와 전자기식 유속계, 그리고 저항식 파고계를 각각 이용하였고, 이 모든 계측 기기는 KENEK사의 제품을 사용하였다. 그리고, LABTECH NOTEBOOK 소프트웨어를 사용하여 실험자료들을 직접 컴퓨터의 EXCEL 파일에 저장하면서, 동시에 실시간으로 컴퓨터 모니터 상에 자료들을 보여줌으로써 각 측정기로부터 자료들이 올바르게 입력되고 있는지를 바로 확인할 수 있었다.

**5.2 실험과정**

우선 바람을 발생시킨 후, 수면으로부터 5 cm 간격으로 9개의 높이(즉, 5, 10, ..., 45 cm)에 대해서 Fig. 6의 C 위치에서 풍속을 측정하였다. 파고가 커져서 수면변위가 5 cm보다 커질 때는 5 cm 높이에서의 측정은 생략하였다. 각각의 높이에서 60 s 동안 20 Hz로 자료를 얻어서 그 값들을 시간 평균하여 풍속을 결정하였다. 풍속 프로파일,  $v(y)$ 는 다음 식을 사용하여 계산하였다:

$$v(y) = v_{max} + \frac{v_*}{K} \ln\left(\frac{y}{h}\right) \tag{14}$$

여기서  $v_{max}$ 는 수면 위로부터 45 cm 지점에서의 최대풍

속,  $v_*$ 는 진단풍속,  $K$ 는 von Korman 상수,  $y$ 는 수면으로부터 연직 상방으로의 거리,  $h$ 는 가장 높은 위치의 측정점(본 실험에서는 45 cm)이다.  $v_{max}$ 와  $v_*$ 는 측정된 풍속을  $\ln(y/h)/K$ 에 대하여 선형 회귀분석하여 계산하였고, 이 값을 Table 1에 제시하였다. 한 예로 측정 풍속과 그것을 곡선적합시킨 풍속의 프로파일을 Fig. 7에 나타내었다. 파령을 계산하기 위해서  $v_{max}$ 를 사용한 것을 제외하고는, 풍속 프로파일은 본 연구에서는 사용되지 않았다.

다음으로, 바람이 불고 있는 상태에서 네 관측지점 A, B, D, E에 파고계를 설치하여 파랑을 측정하였다. 처음 바람이 불기 시작한 때로부터 충분한 시간이 지난 후에 측정을 실시하였고, 따라서 모든 측정된 파랑은 취송거리가 제한된 파랑이다. 파랑은 50 Hz로 720 s 동안 측정을 하여 총 36,000개의 자료를 수집하였다.

이러한 과정을 수십 및 풍속이 각각 다른 경우에 대하여 반복적으로 수행하였다. 실험은 수심이 각각 50, 40, 30 cm인 경우에 대해서 이루어졌는데, 수심 50 cm에 대해서는 8가지의 서로 다른 풍속조건을, 수심 40 cm와 30 cm의 경우에는 각각 3가지, 2가지의 서로 다른 풍속조건을 실험하였다. 자세한 실험조건을 그와 관련된 여러 파라미터의 계산값과 함께 Table 1에 제시하였다.

**Table 1.** Summary of analyzed data.

$d$ (m)	$v_{max}$ (m/s)	$v^*$ (m/s)	St.	$H_s$ (m)	$a/d$	$f_p$ (Hz)	$\gamma$	$k_p a$	$k_p d$	$C_p/v_{max}$	$b^2(f_p, f_p)$	$\beta(f_p, f_p)$	$S_k$	$A_s$
0.5	3.16	0.182	B	0.004	0.004	5.323	10.551	0.228	57.07	0.093	0.18	-0.068	0.297	-0.045
			D	0.009	0.009	3.729	11.075	0.252	28.01	0.133	0.23	-0.084	0.293	-0.002
			E	0.015	0.015	2.925	6.403	0.258	17.23	0.169	0.18	0.131	0.266	0.002
0.5	4.44	0.199	B	0.010	0.010	4.180	14.285	0.352	35.19	0.084	0.29	-0.005	0.343	-0.029
			D	0.020	0.020	2.797	10.545	0.315	15.76	0.126	0.32	-0.157	0.351	-0.012
			E	0.031	0.031	2.307	12.596	0.332	10.72	0.152	0.31	-0.092	0.298	-0.025
0.5	5.71	0.262	B	0.019	0.019	3.297	17.104	0.416	21.89	0.083	0.41	-0.051	0.395	-0.033
			D	0.034	0.034	2.396	9.056	0.393	11.56	0.114	0.37	-0.139	0.356	-0.035
			E	0.049	0.049	2.009	11.887	0.398	8.13	0.136	0.34	-0.153	0.291	-0.019
0.5	7.12	0.397	B	0.024	0.024	3.006	14.149	0.437	18.20	0.073	0.32	-0.304	0.385	-0.068
			D	0.042	0.042	2.220	10.473	0.417	9.93	0.099	0.42	-0.047	0.398	-0.020
			E	0.064	0.064	1.854	12.300	0.443	6.92	0.118	0.35	-0.077	0.350	-0.021
0.5	8.73	0.479	B	0.031	0.031	2.640	10.417	0.435	14.04	0.068	0.31	-0.062	0.375	-0.062
			D	0.056	0.056	2.054	14.820	0.476	8.50	0.087	0.48	-0.125	0.412	-0.046
			E	0.083	0.083	1.679	9.623	0.471	5.68	0.106	0.45	-0.056	0.360	-0.036
0.5	10.01	0.640	B	0.036	0.036	2.545	12.601	0.470	13.05	0.061	0.38	-0.295	0.417	-0.097
			D	0.068	0.068	1.857	13.109	0.473	6.95	0.084	0.40	-0.130	0.429	-0.075
			E	0.099	0.099	1.638	12.481	0.536	5.41	0.095	0.46	-0.183	0.419	-0.058
0.5	11.77	0.728	B	0.045	0.045	2.313	11.214	0.485	10.78	0.057	0.40	-0.308	0.445	-0.141
			D	0.081	0.081	1.739	10.627	0.493	6.09	0.076	0.43	-0.143	0.459	-0.075
			E	0.125	0.125	1.438	10.020	0.521	4.17	0.092	0.52	-0.121	0.443	-0.062
0.5	12.75	0.892	B	0.049	0.049	2.173	8.224	0.466	9.51	0.057	0.33	-0.254	0.434	-0.123
			D	0.094	0.094	1.652	14.254	0.517	5.50	0.074	0.53	-0.220	0.498	-0.103
			E	0.145	0.145	1.398	14.477	0.571	3.94	0.087	0.52	-0.236	0.503	-0.104
0.4	5.83	0.296	B	0.020	0.025	3.144	13.542	0.398	15.93	0.085	0.32	-0.131	0.375	-0.044
			D	0.036	0.045	2.395	12.873	0.416	9.24	0.112	0.34	-0.056	0.347	-0.008
			E	0.052	0.065	1.961	11.117	0.403	6.20	0.136	0.38	-0.030	0.327	0.001
0.4	8.78	0.505	B	0.032	0.040	2.583	11.111	0.430	10.75	0.068	0.29	-0.121	0.366	-0.045
			D	0.059	0.074	1.988	15.794	0.471	6.37	0.089	0.42	-0.075	0.402	-0.055
			E	0.090	0.113	1.688	16.189	0.519	4.59	0.111	0.50	-0.064	0.400	-0.044
0.4	12.11	0.871	B	0.048	0.060	2.151	8.324	0.448	7.46	0.060	0.35	-0.260	0.449	-0.090
			D	0.088	0.110	1.727	12.102	0.529	4.81	0.075	0.52	-0.200	0.485	-0.099
			E	0.132	0.165	1.459	16.622	0.568	3.44	0.088	0.54	-0.198	0.458	-0.070
0.3	5.91	0.312	B	0.019	0.032	3.154	13.547	0.385	12.02	0.084	0.40	-0.047	0.376	-0.029
			D	0.037	0.062	2.327	13.547	0.405	6.54	0.114	0.38	-0.202	0.338	-0.018
			E	0.054	0.090	1.915	10.497	0.400	4.44	0.138	0.38	-0.166	0.320	-0.005
0.3	9.21	0.605	B	0.033	0.055	2.524	10.039	0.424	7.70	0.067	0.34	-0.185	0.379	-0.068
			D	0.061	0.102	1.913	12.680	0.452	4.43	0.089	0.45	-0.045	0.368	-0.036
			E	0.093	0.155	1.607	10.049	0.487	3.14	0.105	0.49	-0.229	0.383	-0.042

**5.3 실험자료 분석**

실험자료의 bispectrum은 MATLAB HOSA toolbox를 이용하여 계산하였다. 각각의 파랑 관측으로부터 얻어진

36,000개의 자료 중에서 처음 35,840개의 자료를 취한 다음, 256개의 자료로 이루어진 세그먼트를 50%씩 중첩시켜 전부 279개의 세그먼트로 나누었다. 그 다음 이

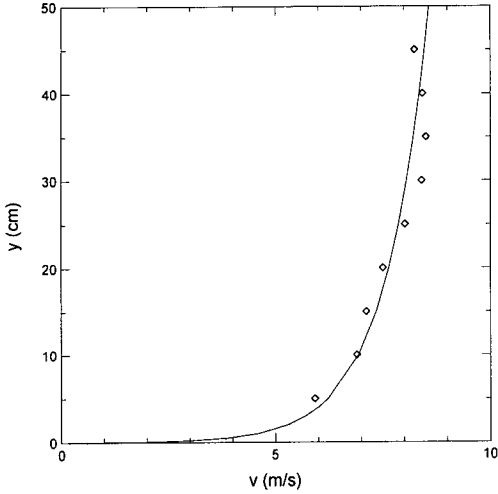


Fig. 7. Measured and curve-fitted wind profile ( $d=50$  cm,  $v_{max}=8.73$  m/s).

각각의 세그먼트에 대해서 식 (6)과 같이 Fourier 상수들의 곱을 계산하여 ensemble averaging하여 bispectrum을 계산하였다. Tapering, windowing, block averaging 등의 평활화 기법은 bias를 증가시키고, 위상 상관을 정확하게 탐지하는 데에는 효과적이지 못하므로(Nikias and Raghuvver, 1987) bispectrum 분석에 적용하지 않았다. 이러한 과정에 의해서 얻은 bispectrum의 분해능은  $\Delta f=0.1953$  Hz이고, 자유도는 372이다. 파랑자료 한 가지를 선택하여 bicoherence를 계산한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 표면도(surface plot)와 등고선도(contour plot)로 각각 제시하였다. 두 그림에서 모두 복주파수 평면 8분의(bifrequency octant) 영역 안의 값만을 그림으로 나타내었고, 또 bicoherence가 0인 경우에 대한 유의수준 95% 이상의 값만을 보였다. Elgar and Guza(1988)에 의하면, 자

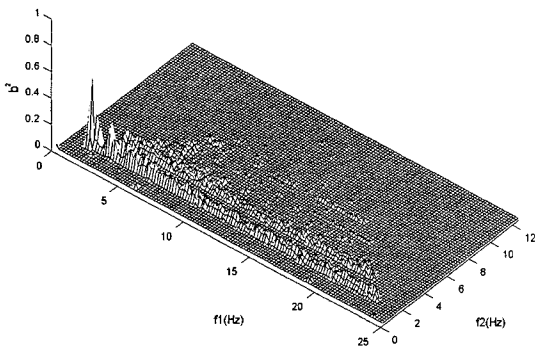


Fig. 8. Surface plot of bicoherence at station E ( $d=40$  cm,  $v_{max}=12.11$  m/s).

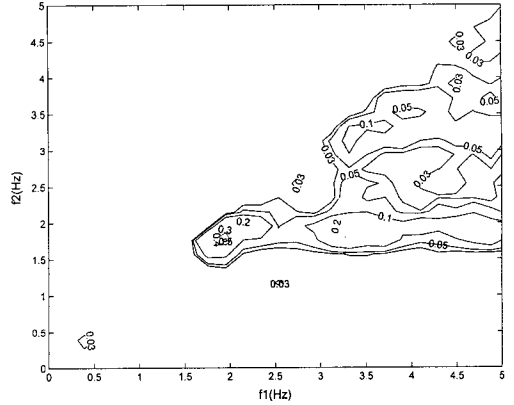


Fig. 9. Contour plot of bicoherence at station E ( $d=40$  cm,  $v_{max}=12.11$  m/s).

유도가 372인 경우에 0.02보다 작은 bicoherence 값은 유의미하지 않은 것으로 간주할 수 있고, 따라서 이보다 작은 값은 그림에 표시하지 않았다.

### 6. 결 과

Figs. 8과 9에 보인 것처럼 계산된 bicoherence 값은 상당히 크며, 이것은 파랑 성분들 사이에 상당한 3파 상호작용이 존재함을 의미한다. 가장 큰 bicoherence 값은  $(f_b, f_b)$ 에서 관측된 0.54이며,  $f_2=f_b$ 와  $f_1 \geq f_b$ 를 만족하는 선을 따라서도 유의미한 bicoherence 값이 계속 이어진다. 이것은 스펙트럼 첨두의 자기상호작용에 더하여, 첨두 주파수와 그보다 더 큰 주파수 사이의 3파 상호작용이 역시 존재함을 암시한다.  $f_2=2f_b$  선을 따라서도 주목할 만한 bicoherence 값이 나타나지만, 첨두 주파수를 따라서 나타나는 값들에 비해서는 그다지 크지 않다. 한편, 스펙트럼 첨두의 자기상호작용은 1차원 주파수 스펙트럼에서도 확연히 나타나는데, Fig. 10을 보면, 주파수  $2f_b$ 에서 뚜렷한 2차 첨두가 나타남을 알 수 있다. 다른 파랑 자료에서도 Fig. 8부터 Fig. 10까지에서 제시한 것과 유사한 결과를 나타낸다.

중력파의 분석에 있어서, 수면에서의 표면장력은 중력에 비해서 상대적으로 작기 때문에 대체로 무시할 수 있다. 그러나, 파랑의 크기가 작을수록, 표면장력의 중요성은 점차 증가한다. 소규모의 실험실 실험에서는 취송거리가 작을 때, 특히 바람의 세기가 상대적으로 작을 때, 표면장력파가 형성되기 쉽다. 표면장력파는 중력파와는 그 거동이 크게 다르기 때문에, 표면장력파의 특



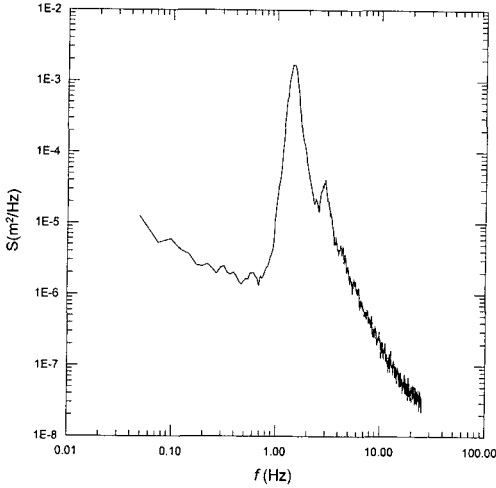


Fig. 10. Power spectrum at station E ( $d=40$  cm,  $v_{max}=12.11$  m/s).

성을 보이는 파랑 자료는 분석에서 제거할 필요가 있다. 중력과 표면장력의 상대적인 중요성을 평가하기 위해서 심해조건에서 다음과 같은 파랑의 분산관계식을 고려한다(Dean and Dalrymple, 1991):

$$C = \sqrt{\frac{g + \frac{Tk^2}{\rho}}{k}} \quad (15)$$

여기서  $C$ 는 파랑의 위상속도,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $T$ 는 표면장력(상온의 물에서 0.074 N/m)이다. 순수한 중력파의 경우에는 표면장력의 효과가 사라지므로 식 (15)는 다음과 같은 형태로 주어진다:

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (16)$$

따라서, 식 (15)와 (16)의 차이로부터  $C$ 에 대한 표면장력의 기여도를 산정할 수 있다.

표면장력파와 중력파를 구분하는 일반적인 기준은 없고, 더구나 표면장력의 효과는 고주파수의 파랑 성분에 대해서 더 크게 된다. 따라서, 본 연구에서는 식 (15)와 (16)의 차이가  $2f_p$ 에서 5%보다 작으면, 그 파랑을 중력파로 간주하였다. 간단한 계산을 통하여 중력파에 대한 기준을  $f_p \leq 2.99$  Hz로 결정하였다. 본 연구에서 수행한 실험의 경우, 모든 실험이 심해 조건( $k_p d \geq \pi$ )을 만족하므로, 이 기준을 모든 파랑 자료에 대해서 적용하는 것이 가능하다. 이 기준에 의하면, 관측점 D와 E에서의 대부분의 파랑자료 및 관측점 B에서의 일부 자료가 중력파의 범주에 포함되었다. 반면에, 관측점 A에서의 모

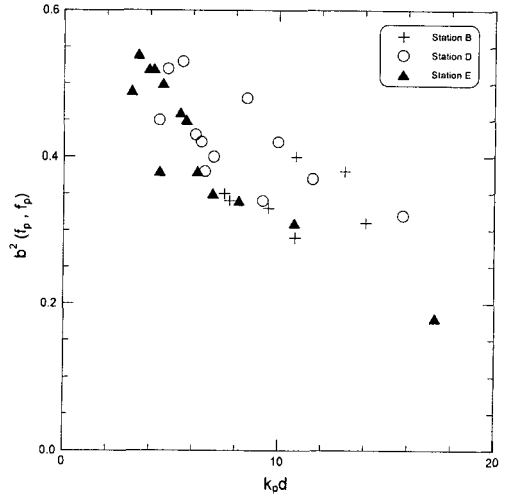


Fig. 11. Values of  $b^2(f_p, f_p)$  as function of relative depth  $k_p d$ .

든 자료는 표면장력파에 해당하였다. 이하의 분석에서는  $f_p \leq 2.99$  Hz를 만족하는 중력파만을 분석의 대상으로 하였고, 따라서 관측점 A에서의 자료는 Table 1에 포함시키지 않았다.

Elgar and Guza(1985)와 Freilich *et al.*(1990)은 천수파에 대해서 외해 방향으로 여러 지점에서 동시에 파랑을 관측하여, 상대수심  $k_p d$ 가 감소함에 따라서  $b^2(f_p, f_p)$ 가 증가함을 보였다. 반면에 Young and Eldeberky (1998)은 호수의 한 지점에서 서로 다른 풍속에 대해서 얻은 파랑자료를 비교하여, 실질적으로 수심이 일정한 풍파의 경우에도 이와 비슷한 경향이 있음을 관측하였다. Fig. 11은 본 실험 자료에 대해서  $b^2(f_p, f_p)$  값을  $k_p d$ 의 함수로 도시한 것이다.  $b^2(f_p, f_p)$ 의 값은 0.18에서 0.54까지 점차적으로 변하며, 천수파의 경우와 마찬가지로  $k_p d$ 가 감소함에 따라서 점차적으로 증가하였다. 그러나 본 실험이 모두 심해 조건에서 이루어져서 수심이 3파 상호작용에 영향을 미치지 않기 때문에, 이 두 변수 사이에 나타나는 함수 관계는 별로 의미가 없다. 따라서 bicoherence 값의 변화는 다른 요소와 관련이 있을 것이다.

서론에서 언급한 바와 같이, 심해 풍파의 3파 상호작용은 파형경사와 밀접한 관련을 가지고 있을 것이다.  $b^2(f_p, f_p)$ 의 값을 파형경사  $k_p a$ 의 함수로 Fig. 12에 도시하였다. 여기서  $a = H_s/2$ 이고,  $H_s$ 는 유의파고이다.  $b^2(f_p, f_p)$ 의 값은  $k_p a$ 와 거의 정비례 관계를 나타내었고, 이는 큰 파형경사가 강한 3파 상호작용에 기인함을 의미하는 것이다.

Sverdrup and Munk(1947) [Kinsman(1965) p.308도

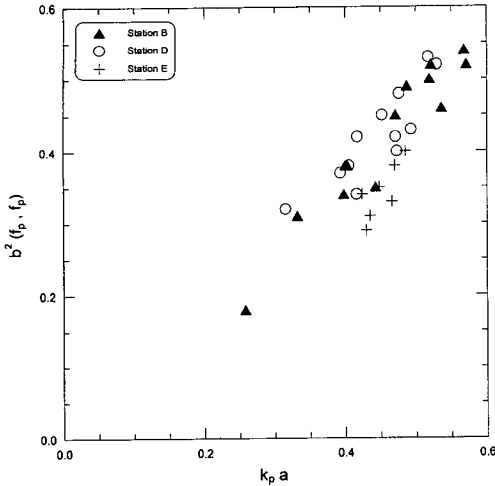


Fig. 12. Values of  $b^2(f_p, f_p)$  as function of wave steepness  $k_p a$ .

참조할 것]은 파형경사가 풍파의 초기 발생 단계에서는 파령에 따라 증가하고, 파령이 더욱 성장할수록 차츰 감소함을 이론적으로 증명하였다. 그들은 또한 현장의 자료를 수집하여 그것을 도시함으로써 이러한 사실을 확증하였고, 또한 파령이 대략 0.4일 때 파형경사가 최대가 됨을 보였다. 반면에 Sverdrup and Munk의 자료에 다른 현장관측 자료를 추가하여 Roll(1949) [Wiegel (1964) p.227도 참조할 것]은 최대 파형경사를 나타내는 파령이 대략 0.1임을 보였다. 본 실험 자료의  $k_p a$ 의 값을 파령  $C_p/v_{max}$ 의 함수로 표현한 것을 Fig. 13에 제시하였는데, 여기서  $C_p$ 는 스펙트럼 첨두의 위상속도이고,  $v_{max}$ 는 수면으로부터 45 cm 높이에서의 최대풍속이다. 이

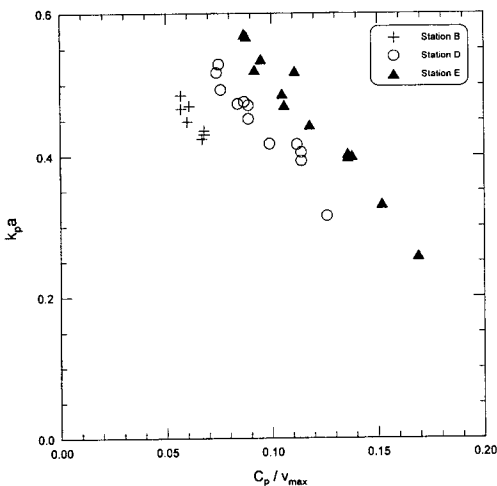


Fig. 13. Values of  $k_p a$  as function of wave age  $C_p/v_{max}$ .

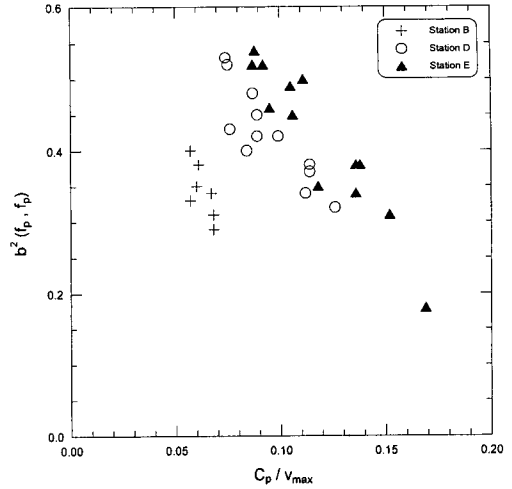


Fig. 14. Values of  $b^2(f_p, f_p)$  as function of wave age  $C_p/v_{max}$ .

그림 역시 Sverdrup and Munk(1947)와 Roll (1949)이 제시한 것과 유사한 경향을 보이는데, Roll(1949)의 결과에 더 가깝게 나타났다.

Fig. 12에서 보듯이  $b^2(f_p, f_p)$ 가  $k_p a$ 에 거의 선형적으로 비례하기 때문에,  $b^2(f_p, f_p)$ 와  $C_p/v_{max}$  사이에도  $k_p a$ 와  $C_p/v_{max}$  사이에서의 유사한 관계가 나타날 것으로 예상할 수 있다. 이러한 추측은  $b^2(f_p, f_p)$ 를  $C_p/v_{max}$ 의 함수로 표시한 Fig. 14에서 확실하게 증명되는데, 여기서 3파 상호작용의 크기는 파령이 증가함에 따라서 커지다가, 파령이 더욱 발달하면서 차츰 감소한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 아직 분명하지 않지만, 3파 상호작용과 4파 상호작용 사이의 시간 규모에 차이가 있기 때문이라는 설명이 가능하다. Phillips(1960)에 의하면, 3파 상호작용은 2차 파랑 성분 순간적으로 에너지를 전달하는 반면에, 4파 상호작용은 훨씬 더 긴 시간 규모로 3차 성분에 에너지를 전달한다. 파랑 발생 초기 단계 동안에는 3파 상호작용에 의해서 상대적으로 큰 제 2차 첨두가 발달하지만, 파령이 더욱 발달함에 따라 4파 상호작용의 에너지 재분배 메커니즘이 보다 지배적으로 되면서 그 영향력은 곧 미약해지는 것으로 보인다.

스펙트럼 성분들 사이의 위상상관의 특성은 biphas  $\beta$ , 왜도  $S_k$ , 비대칭성  $A_s$ 에 의해서 표현될 수 있다. Table 1에서 보인 것처럼  $\beta$ 의 절대값은  $\pi/2$ 보다 훨씬 작고,  $A_s$ 의 크기는  $S_k$ 에 비해서 매우 작는데, 이는 파랑의 형태가 앞쪽으로 거의 치우치지 않았다는 것을 나타낸다. Fig. 15에는  $d=50$  cm이고,  $v_{max}=11.77$  m/s인 경우에 B지점에서 관측된 파랑의 수면 변위의 일부를 도시하였는데, 이

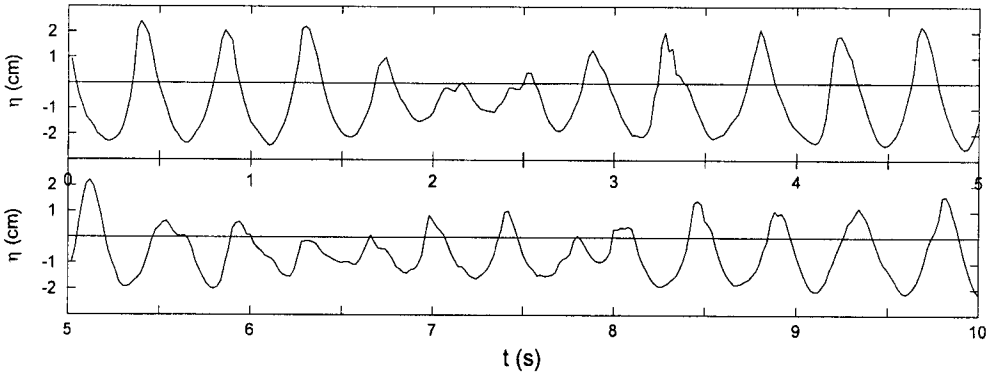


Fig. 15. Measured wave profile at station B ( $d=50$  cm,  $v_{max}=11.77$  m/s).

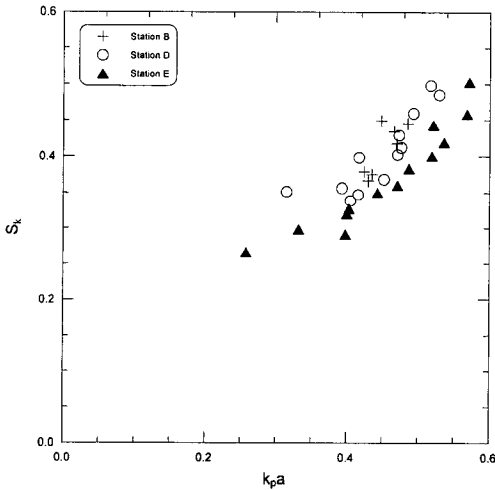


Fig. 16. Values of  $S_k$  as function of wave steepness  $k_p a$ .

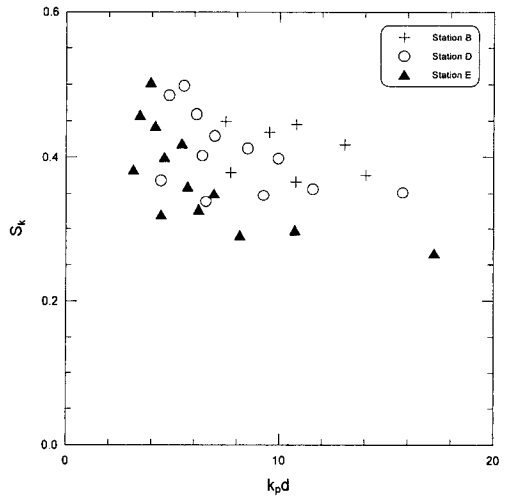


Fig. 17. Values of  $S_k$  as function of relative depth  $k_p d$ .

는 본 실험 중  $b^2(f_p, f_p)$ 와  $A_p$ 의 값이 둘 다 최대가 되는 경우이다. 이 그림은 파랑이 파봉이 뽀족하고 파곡이 평평한 형태이며, 앞으로 치우친 특성은 미약함을 보여준다.

Fig. 16에서는  $S_k$ 의 값을 파형경사  $k_p a$ 의 함수로 제시하였고, 예측한 바대로 거의 정비례하는 관계가 나타났다. 파랑의 경사가 급해질수록, 파봉이 뽀족하고 파곡이 평평한 형태를 가지게 되어 왜도가 증가한다. Fig. 17은  $S_k$ 를 상대수심  $k_p d$ 에 대해서 나타낸 것이다. Young and Eldeberky(1998)는 유한수심 풍파의 경우에  $k_p d$ 가 감소함에 따라서 왜도  $S_k$ 가 급격하게 증가함을 보였다. 이러한 경향은 Fig. 17에서도 보여지지만, 유한수심 풍파의 경우에서처럼 분명하지는 않다. 이것은 본 실험 자료가 모두 심해 조건에 해당하므로, 수심에 의한 영향

이 유의미하지 않다는 사실에 기인한 것으로 보인다. 파랑이 비교적 잘 발달한 E지점에서의 자료만을 고려해 보면, 그 경향은 유한수심 풍파의 경우와 매우 흡사한 경향을 띠게 된다.  $S_k$ 가 파형경사  $k_p a$ 에 거의 정비례하므로,  $S_k$ 와  $C_p/v_{max}$ 의 관계는  $k_p a$ 와  $C_p/v_{max}$  사이의 관계와 유사할 것으로 예상된다. 전자의 관계를 Fig. 18에 나타내었는데, 왜도는 파랑 발생의 초기 단계 동안에 파령에 따라서 증가하지만, 파랑이 더 발달함에 따라서 곧 감소한다.

본 실험에서,  $b^2(f_p, f_p)$ 은 0.18에서 0.54까지 변화하였는데, 이는 Young and Eldeberky(1998)의 유한수심 풍파에서의 값(0.014부터 0.166까지)에 비해서 매우 큰 값이다. 그 한 이유로, 앞서 서술한 바대로, 파랑발달이 너무 초기 단계여서 4파 상호작용이 미처 완전한 영향을

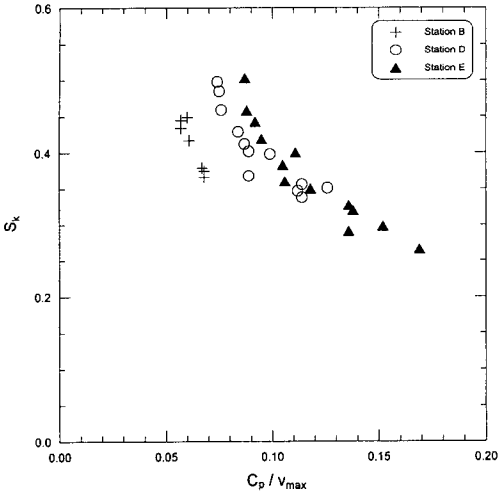


Fig. 18. Values of  $S_k$  as function of wave age  $C_p/v_{max}$ .

미치지 못했을 수 있다. 또 다른 이유로는 현장에서 얻은 자료와 비교해 볼 때, 실험실의 수조에서는 방향 분산이 작고 스펙트럼의 형태가 보다 뾰족해지는 것을 들 수 있다. Masuda and Kuo(1981b)는 아래와 같은 형태의 풍파 스펙트럼에 대해서, 주파수 스펙트럼 형태와 방향 분산이 bispectrum에 미치는 영향을 이론적으로 검토하였다.

$$S(\omega, \theta) = \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right] \gamma \exp\left\{\frac{(\omega/\omega_p - 1)^2}{2\sigma^2}\right\} \cos^p \theta \quad (17)$$

여기서  $\omega \leq \omega_p$  일 때  $\sigma=0.07$ ,  $\omega > \omega_p$  일 때 0.09이고,  $\gamma$ 는 스펙트럼의 뾰족한 정도를 나타내는 지수,  $\theta$ 는 파랑의 방향,  $p$ 는 방향 분산성을 나타낸다. 그들은 bispectrum의 크기가  $\gamma$ 에 따라서는 매우 느리게 증가하지만,  $p$ 에 대해서는 선형적으로 증가함을 보였다. 따라서 bispectrum의 크기는 스펙트럼의 형태보다는 방향 분산성에 주로 의존하게 된다.

Fig. 19에  $b^2(f_p, f_p)$ 의 값을 첨두향상계수(peak enhancement factor)  $\gamma$ 의 함수로 나타내었다. 본 실험에서는,  $\gamma$ 의 값이 현장 자료에 비해서 매우 크다. 성장단계에 있는 풍파(예를 들어, JONSWAP 스펙트럼)에 대한 전형적인  $\gamma$  값은 3.3이고, 완전히 발달한 풍파의 경우는 1.0이다. Fig. 19 역시 Masuda and Kuo(1981b)의 이론적인 결과와 상응하여,  $\gamma$ 에 따라서  $b^2(f_p, f_p)$ 이 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 20에는 파령  $C_p/v_{max}$ 에 따른  $\gamma$ 의 변화를 나타내었는데, 자료가 크게 흩어져 있기는 하지만, 대략적으로 파령 성장의 초기 단계에서는 파령에 따

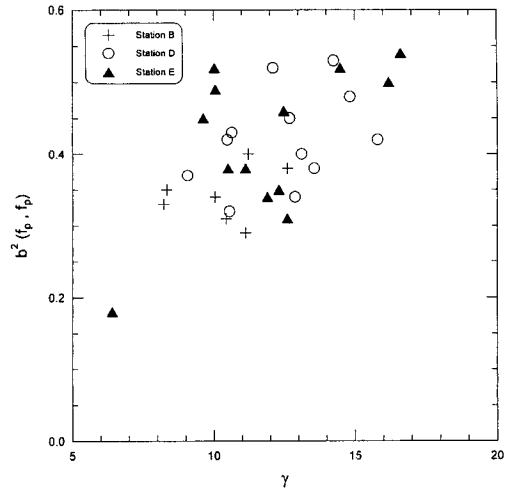


Fig. 19. Values of  $b^2(f_p, f_p)$  as function of peak enhancement factor  $\gamma$ .

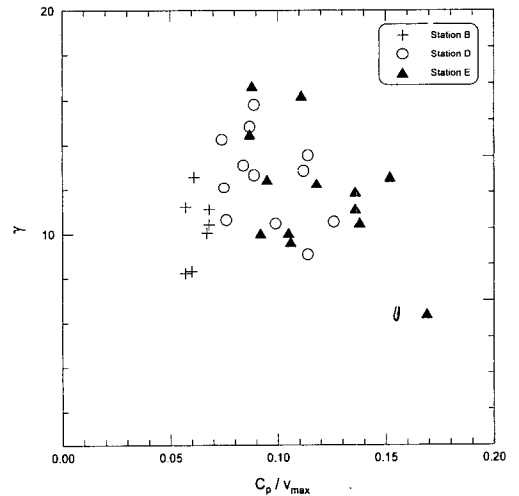


Fig. 20. Values of  $\gamma$  as function of wave age  $C_p/v_{max}$ .

라서  $\gamma$ 가 증가하고, 파령이 발달함에 따라 차츰 감소하는 것을 볼 수 있다. Figs. 19와 20으로부터 실험 자료의 bicoherence가 큰 것이 부분적으로는 초기 파령의 주파수 스펙트럼 형태가 뾰족한 데에 기인한다고 할 수 있다.

전술한 바와 같이,  $b^2(f_p, f_p)$ 이 크게 나타나는 또 다른 원인은 방향 분산성이며, 이것이 스펙트럼 형태의 영향보다 더욱 중요하다. Masuda and Kuo(1981b)는 방향 분산성이 작을수록 bispectrum의 크기가 증가함을 이론적으로 보였다. 불행히도, 본 실험에서는 방향 분산을 측정하지 않았다. 하지만, 일차원 실험실 수조의 경우, 현장관측 자료에 비해서 방향 분산이 매우 작을 것으

로 생각된다. 또한, 실험실 수조 내에서도 파령이 커질 수록 방향 분산이 커질 것이다. 그러므로 Fig. 14에 나타난 바와 같이 파령의 증가에 따른  $b^2(f_p, f_p)$ 의 감소는 부분적으로 파령의 증가에 따라 방향 분산성이 커지기 때문일 것이다.

Goda(1983)는 코스타리카의 Caldera 항에서 기록된 너울의 스펙트럼을 Hamada(1965)의 이론을 사용하여 선형 부분과 2차 상호작용 부분으로 분해하였다. Hamada(1965)의 이론과 비교하기 위해서는, 분해능이 높은 방향 스펙트럼 혹은 스펙트럼이 아주 작은 방향 분산성(예를 들어, 멀리 전파된 너울, 또는 해변에서의 천수파)을 가진다는 가정이 필요하게 된다. 본 실험에서는 방향성과 관련한 자료는 전혀 없으며, 따라서 Hamada(1965)의 이론과 비교하지 못하였다.

### 7. 결 론

실험실의 풍동 조파수조에서 측정된 파랑 자료에 대해서 bispectrum 분석을 실시하여 심해 풍파의 3파 상호작용을 연구하였다. 파랑 자료의 bispectrum 추정치의 분산을 줄이기 위해서 충분히 큰 자유도를 얻을 수 있도록 파랑 관측 시간을 길게 유지하였다. 관측된 자료 중 충분히 성장하여 중력파의 특성을 보이는 파랑 자료만을 분석에 포함하였다.

$b^2(f_p, f_p)$ ,  $k_p a$ ,  $S_k$  중에서 어떠한 둘 사이에는 거의 정비례하는 관계가 성립하며, 이들 모두가 파랑 발생의 초기 단계 동안에는 파령에 따라 증가하다가, 파랑이 더욱 성장하게 되면 다시 감소한다는 것을 보였다. 후자의 관계에 대해서는 Sverdrup and Munk(1947)와 Roll(1949)이 파형경사와 파령 사이에 이러한 관계가 있음을 보인 바 있다. 그러므로, 본 연구의 결과로부터, 풍파 발생의 초기 단계 동안에 파봉이 뾰족하고 파곡이 밋밋한, 경사가 급한 파랑이 형성되는 것은 3파 상호작용에 기인한다고 결론지을 수 있다.

풍파 발생의 초기 단계에  $b^2(f_p, f_p)$ 의 값이 큰 것은 현장 자료에 비해서 스펙트럼의 형태가 뾰족하고, 방향 분산이 작다는 사실과 관련이 있을 것이다. 한편, 파령에 따라서  $b^2(f_p, f_p)$ 이 감소하는 것은 파랑 성분들 간에 에너지를 재분배하는 역할을 하는 4파 상호작용의 영향과 관련이 있을 것이다. 3파 상호작용과 4파 상호작용의 상대적인 중요성을 검토하기 위해서는 trispectrum 분석과 같은 다른 진단 방법을 사용해야 할 것이다(Elgar et al., 1995).

3파 상호작용은 천수파 또는 유한수심 풍파에 대해서만 그 중요성이 알려져 왔다. 본 연구에서는 심해 풍파에 대해서도, 특히 파랑 성장의 초기 단계에서, 3파 상호작용이 역시 중요함을 보였다. 파랑이 더욱 성장하면서, 스펙트럼의 침두로부터 2차 고조파( $2f_p$ )로 파랑 에너지의 전달이 계속될 것이며, 이것은 다시 4파 상호작용에 의해서 주변의 주파수대로 재분배될 것이다. 이러한 과정은 또한 고주파수대 스펙트럼 꼬리(tail) 부분의 에너지를 높이는 데에도 영향을 미칠 것이다. 4파 상호작용이 어떻게  $2f_p$  근처에서 구속파의 에너지를 분산시키는 지에 대해서는 더 연구가 필요할 것이다.

### 사 사

본 연구는 한국해양연구소의 위탁으로 서울대학교 공학연구소(과제번호 99-027)에서 수행한 ‘풍동조파계 실험 정밀 분석 천해파 연구 및 국지파 산출’ 과제의 결과 중 일부분을 정리한 것이다.

### 참고문헌

- Ahn, K., 1993. Nonlinear analysis of waves in finite water depth, PhD thesis, Univ. of Florida, Gainesville, 61pp.
- Ahn, K., 1996. The digital simulation of non-linear random waves, *Proc. 25th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, Orlando, FL, pp. 657-667.
- Armstrong, J.A., Bloembergen, N., Ducing, J. and Pershan, P.S., 1962. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric, *Phys. Rev.*, **127**, pp. 1918-1939.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific, 353pp.
- Donelan, M.A., 1982. The dependence of the aerodynamics drag coefficient on wave parameters, *Proc. 1st Int. Conf. on Meteorological and Air/Sea Interaction of Coastal Zone*, Amer. Meteor. Soc., Boston, pp. 381-387.
- Elgar, S. and Guza, R.T., 1985. Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves, *J. Fluid Mech.*, **161**, pp. 425-448.
- Elgar, S. and Guza, R.T., 1988. Statistics of bicoherence, *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, **36**(10), pp. 1667-1668.
- Elgar, S., Herbers, T.H.C., Chandran, V. and Guza, R.T., 1995. Higher-order spectral analysis of nonlinear ocean surface gravity waves, *J. Geophys. Res.*, **100**, pp. 4977-4983.
- Freilich, M.H., Guza, R.T. and Elgar, S., 1990. Observations of nonlinear effects in directional spectra of shoaling surface

- gravity waves, *J. Geophys. Res.*, **95**, pp. 9645-9656.
- Goda, Y., 1983. Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell, *Rep. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol. 22, No. 1, pp. 3-41.
- Hamada, T., 1965. The secondary interactions of surface waves, *Rep. No. 10*, Port and Harbour Tech. Res. Inst., Yokosuka, Japan, pp. 1-28.
- Hasselmann, K., 1962. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum: 1. General theory, *J. Fluid Mech.*, **12**, pp. 481-500.
- Hasselmann, K., Munk, W. and MacDonald, G., 1962. Bispectra of ocean waves, *Proc. Symp. on Time Series Analysis*, John Wiley, New York, pp. 125-139.
- Haubrich, R.A., 1965. Earth noise, 5 to 500 millicycles per second, *J. Geophys. Res.*, **70**, pp. 1415-1427.
- Kim, Y.C. and Powers, E.J., 1979. Digital bispectral analysis and its applications to nonlinear wave interactions, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-7**(2), pp. 120-131.
- Kinsman, B., 1965. *Wind Waves, Their Generation and Propagation on the Ocean Surface*, Prentice-Hall, New Jersey, 676pp.
- Masuda, A. and Kuo, Y.-Y., 1981a. A note on the imaginary part of bispectra, *Deep Sea Res.*, **28A**(3), pp. 213-222.
- Masuda, A. and Kuo, Y.-Y., 1981b. Bispectra for the surface displacement of random gravity waves in deep water, *Deep Sea Res.*, **28A**(3), pp. 223-237.
- Michell, J.H., 1893. On the highest waves in water, *Philosophical Magazine, 5th Series*, **36**, pp. 430-437.
- Nikias, C.L. and Raghuvver, M.R., 1987. Bispectrum estimation: A digital signal processing framework, *Proc. IEEE*, **75**(7), pp. 869-891.
- Phillips, O.M., 1960. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 1. The elementary interactions, *J. Fluid Mech.*, **9**, pp. 193-217.
- Roll, H.U., 1949. ber die ausbreitung der meereswellen unter der wirkung des windes (auf grund von messungen im wattenmeer), *Deut. Hydrograph. Z.*, **2**(6), pp. 268-280.
- Sverdrup, H.U. and Munk, W.H., 1947. Wind, sea and swell: theory of relations for forecasting, U.S. Navy Hydrographic Office Pub. No. 601, 44pp.
- Wiegel, R.L., 1964. *Oceanographical Engineering*, Prentice-Hall, New Jersey, 532pp.
- Young, I.R. and Eldeberky, Y., 1998. Observations of triad coupling of finite depth wind waves, *Coastal Engrg.*, **33**, pp. 137-154.

---

Received March 20, 2000

Accepted April 15, 2000