

Freak Wave 특성 파악을 위한 파랑관측 자료의 분석

† 신승호* · 홍기용** · 문재승***

*, ** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템기술연구본부 책임연구원

*** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템기술연구본부 연구원

Wave Data Analysis for Investigation of Freak wave Characteristics

† Seung-Ho Shin* · Key-Yong Hong** · Jae-Seung Moon***

*,**,*** Ocean Engineering Research Dept., Maritime & Ocean Engineering Research Institute,
KORDI, Daejeon 305-343, Korea

요약 : 본 연구는 제주도 서측 해역의 현지 파랑관측 자료를 기초로 해양파의 비선형 특성을 조사한 것으로서, 실제 해역에서 Freak wave 예보의 토대를 마련하기 위한 기초 연구이다. 관측된 파랑자료의 비선형 특성을 조사하기 위해 파형의 상하 비대칭성, 전후 비대칭성, 빈도 분포의 첨예도, 파랑 스펙트럼의 대역폭 파라미터 등을 추출하고 이들 자료를 유의파고, 최대파고 등의 파랑 특성치들과의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 제시된 파랑의 비선형 파라미터들은 계측된 파랑 스펙트럼의 전반적인 비선형적 특징을 묘사하긴 하지만, 돌발적 고파랑이라고 할 수 있는 H_{max} 와의 상관은 미약하여 Freak wave의 발생을 단적으로 예측하기에는 부족한 것으로 나타났으나, 스펙트럼의 첨예도를 나타내는 K_t 의 경우는 타 비선형 파라미터에 비해 다소 개선된 상관을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

핵심어 : 파랑관측, 비선형성, 파형의 상하 비대칭성, 파랑의 전후 비대칭성, 빈도분포의 첨예도, 스펙트럼 대역폭

Abstract : This study is carried out the investigation of nonlinear characteristics of the field wave observation data acquired in the western sea area in Jeju island during one year. It is aimed to offer the fundamental data for Freak wave forecasting in real sea. For this, the nonlinear parameters of ocean waves, which are Skewness, Atiltness, Kurtosis and Spectrum band width parameter et al., are introduced, and the parameters are compared and discussed with some characteristic wave components, ie, significant wave height, maximum wave height, and so on. As a results, we know that the parameters describe nonlinear characteristics of observed wave spectrum broadly, are feebly related with occurrence of abnormal maximum wave height, namely freak event, however the Kurtosis, K_t which is a degree of peakness of mode of surface elevation distribution, has better relationship than others.

Key words : Field observation, Nonlinearity, Skewness, Atiltness, Kurtosis, Spectrum band width

1. 서 론

최근 대양에서의 Freak wave 연구를 위해 EU 연합이 진행한 MAX Wave Project에서는 비선형 극한 파랑의 발생 기구에 관한 이론적 해석, 수치 모델링과 함께 현지 관측 및 계측 결과의 분석 등 다양한 접근방식으로의 검토가 이루어졌지만 (Rogue Waves, 2000 ; 2004 등) 아직 그 실체가 명확히 규명되었다고 할 수 없으며, 또한 시간과 비용을 요하는 현지 파랑관측 결과를 분석 대상으로 한 연구는 상대적으로 미미하여 실패역의 해양파를 바탕으로 한 Freak wave의 특성 규명을 위한 노력이 더욱 절실하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 2004년 11월에서 2005년 10월에 걸친 1년간의 제주해역 현지 파랑의 연속관측 결과를 토대로 관측된 수면 변동 데이터의 통계 해석 및 스펙트럼 해석을 수행하여 실패역에서의 불규칙 파랑 특성을 고찰하고, 이를 통해 관측된

해양파의 비선형 특성을 조사하여 Freak wave 특성 분석을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

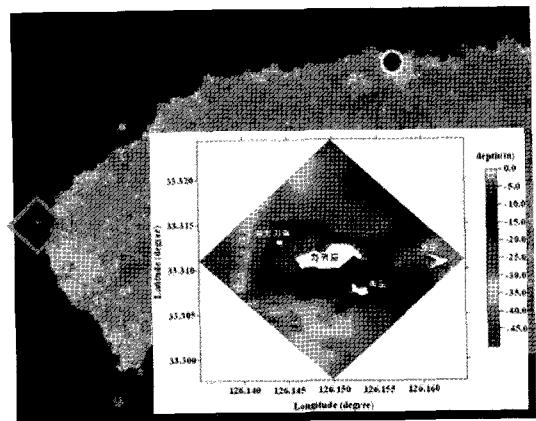


Fig. 1 The site of wave observation

† 교신저자 : 신승호(중신회원), shinsh@moeri.re.kr 042)868-7584

** (중신회원), kyhong@moeri.re.kr 042)868-7511

*** (정회원), jsmoon@moeri.re.kr 042)868-7586

2. 제주 해역 파랑관측의 개요

2.1 관측 해역 및 장비의 개요

1) 관측 해역

류 등(2004), 홍 등(2004)은 한반도 연안 해역에서의 파력발전 적지 선정을 위해 수치해석을 통하여 우리나라 전해역의 파랑에너지 분포 특성을 조사하고 제주도 서쪽 차귀도 전면 해상이 년 평균 파랑에너지 분포가 높은 해역임을 밝혔다.

본 연구에서 다루는 파랑관측 결과는 파력발전 적지의 해양환경 분석을 위해 차귀도 전면해상(N 33°10'43", E126°08'34", Fig. 1)에서 관측된 파랑자료이며, 관측지점의 수심은 약 41m로 차귀도로부터 약 300m 떨어진 해상이다.

2) 계측 장비 및 자료의 취득

파랑의 계측은 경사계 및 가속도계가 내장된 부이식 파고계(Waverider MkIII, Fig. 2)로 이루어졌으며, 샘플링 간격 3.84Hz로 연속 계측하여 30분마다 기본적인 파랑 통계량을 산출하면서 하나의 데이터 셋을 형성하도록 하였다.

한편, 부이식 파고계로부터 계측된 실시간 수면 변동치 및 30분마다의 파랑 통계량은 주파수 범위 27~40Hz의 무선통신 데이터 전송을 통하여 육상에 설치한 데이터 수신기(Waverider Receiver RX-D)에 실시간으로 기록하였다. 이때 수면에 해당하는 각 데이터 셋은 저장 공간의 절감을 위해 1.28Hz로 기록되어 총 2,305개의 값(30분 계측기록)으로 구성된다.

3) 관측기간 및 유효 데이터

제주 서쪽 해역의 실향역 파랑은 2004년 11월 10일~2005년 10월 18일의 약 11개월에 걸쳐 관측되었으며, 관측기간 중 부이식 파고계의 내부 전원 교체, 고장 및 보수 등을 위한 결측기간 이외에는 연속적으로 데이터를 획득하였다.

1.28Hz 간격으로 이루어진 30분 동안의 데이터는 관측기간 전체에 걸쳐 총 10,996개가 얻어졌으나, 각 데이터 셋의 시계열 계측 값 확인을 통해 신호잡음의 포함 또는 통계량 분석에 필요한 데이터 수에 못 미치는 데이터 셋을 제외시켜 최종적으로 9,989개의 유효 데이터 셋을 확보하였다.

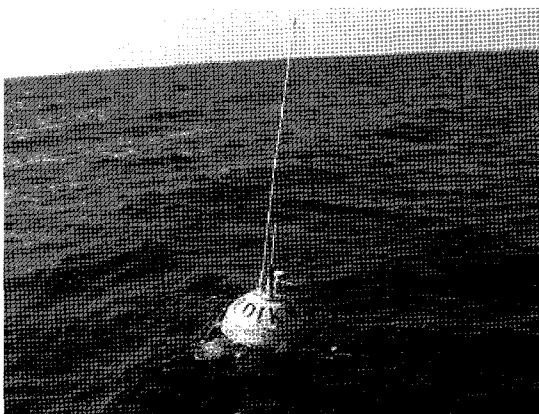


Fig. 2 Waverider MkIII at the site

2.2 파랑관측 자료의 일반적 특징과 분석법

1) 관측된 파랑자료의 일반적 특징

1년간 연속 관측된 자료의 분석을 통해 관측지점의 계절별 유의파고 분포는 동계(12, 1, 2월), 하계(6, 7, 8월), 추계(9, 10, 11월), 춘계(3, 4, 5월)의 순으로 높아 각각의 계절별 평균이 1.49m, 1.03m, 0.93m, 0.90m로 나타났으며, 주기는 5.4~6.5s 정도로 나타났다. 이 같은 유의파고의 계절별 평균파고 분포는 동계에 지속적으로 나타나는 북서 계절풍 및 하계의 태풍 등의 영향이 지배적인 한반도 연안해역의 특성이 잘 나타나 있는 것이라 볼 수 있다. 관측된 파랑자료의 상세 및 분포의 일반적인 특성은 해양수산부(2005)에 기술되어 있다.

2) Zero up cross 법과 스펙트럼 법

파의 역학적 특성 파악을 위해 선형 또는 비선형의 단일파로 다루며 수조 실험 및 수치 해석의 주된 대상이 되는 수면파와는 달리, 해양파는 진폭, 주파수 그리고 전파 방향이 각각 다른 무수한 성분파(선형파)의 선형 중첩으로서 다루게 된다. 따라서 그 방법에 있어서도 통계량 해석 및 스펙트럼 해석이 주를 이루게 되어 실향역에서 관측된 불규칙 파랑 특성은 일반적으로 zero up cross 법 또는 스펙트럼 법에 의해 다루어진다.

수면의 평균선(zero 선)을 기준으로 파형이 파의 꼭대기로부터 산으로 향해 상승하면서 평균선을 횡단하는 시점을 파의 시작으로 하여 해당 관측 기록 내의 개별파를 각각 정의하고, 이를 토대로 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파 주기($T_{1/3}$), 평균파고(H_{mean})와 평균주기(zero up cross period, T_{mean}) 및 최대파고(H_{max})와 최대파 주기(T_{max}) 등의 대표 값을 정의하는 것이 zero up cross 법이다.

Table 1 An example of the extracted wave data sets

No.	$H_{mean}(m)$	$T_{mean}(s)$	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	$H_{max}(m)$	$T_{max}(s)$	$H_s(m)$	$T_z(s)$
...								
5950	1.300	6.559	2.021	7.933	4.340	7.812	2.206	6.550
5951	1.352	6.626	2.060	7.648	3.810	7.812	2.177	6.313
5952	1.416	6.605	2.153	7.760	3.370	7.812	2.325	6.523
5953	1.409	6.566	2.142	7.595	3.370	5.469	2.260	6.265
5954	1.414	6.481	2.254	7.600	3.470	6.250	2.296	6.188
5955	1.414	6.350	2.205	7.297	3.230	7.812	2.376	6.224
5956	1.400	6.088	2.167	6.936	3.270	7.812	2.263	5.954
5957	1.412	6.286	2.192	7.245	3.590	7.812	2.279	6.136
5958	1.574	6.353	2.427	7.330	4.170	7.031	2.557	6.188
5959	1.682	6.426	2.533	7.040	3.920	7.031	2.669	6.087
5960	1.530	6.078	2.413	7.215	3.830	7.812	2.540	5.917
5961	1.331	5.679	2.097	6.905	3.110	7.031	2.256	5.629
...								

반면, 스펙트럼 법에서는 관측 기간 내의 파형 기록으로부터 에너지 밀도 스펙트럼을 구하고, 이를 토대로 파의 에너지 대표치인 0차 모멘트(m_0), 2차 모멘트(m_2) 등을 산출하여 식 (1), (2)와 같이 유의파고(H_s), 평균주기(T_z 또는 T_{02}) 등의 대표 값을 산출하게 되는데, 이는 파 스펙트럼의 정의에 의해

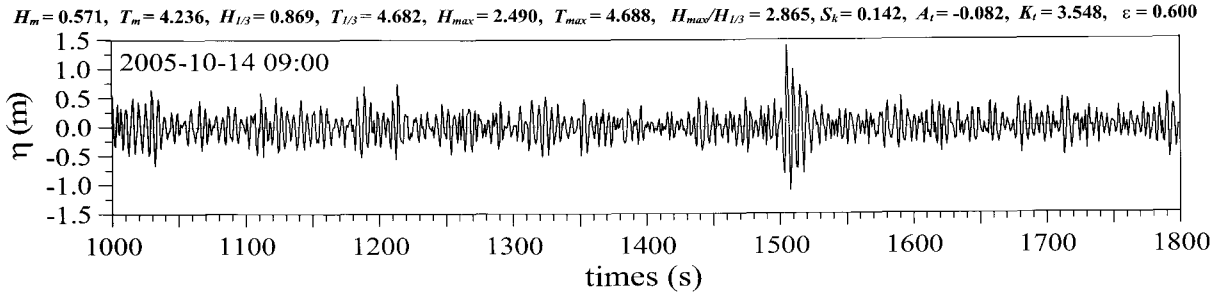


Fig. 3 An example of the Freak wave observed in Jeju coastal sea

m_0 가 파형의 분산에 해당하고, m_2 가 파형의 시간 변화율을 표현하기 때문이다.

$$H_s = \alpha \sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$T_z = \sqrt{m_0/m_2} \quad (2)$$

한편, 식 (1)에서의 α 는 파고의 분포가 Rayleigh 분포를 따른다는 가정 하에 이론적으로 4.004과 일치하게 되어 일반적으로 스펙트럼 법에 의해 유의파고를 산출할 경우 자주 이용되고 있지만, Goda(1985)에서는 3.8을 이용하는 것이 현지 파랑의 실측결과와 잘 대응하고 있음을 지적하여 이론에서 가정하고 있는 수면 및 파고 분포가 실측치와 차이가 있음을 단적으로 보여주고 있다.

또한, 식 (2)는 스펙트럼 모멘트와의 이론적 관계로부터 zero up cross 법으로 산출한 평균주기와 T_{02} 가 서로 일치함을 보임으로써(Longuet-Higgins, 1952) 2차 모멘트 주기 또는 zero up cross 주기로 불리고 있지만, 본 연구의 관측치로부터 산출된 이들 값의 비교(Table 1)에서도 나타난 바와 같이 개별파형으로부터 직접 구한 평균주기(T_{mean}) 보다 작게 나타나는 경향이 있다. 이 원인은 아직 충분히 설명되지 못하였지만, Goda(1985)는 실제 해양에서 관측된 불규칙 파형이 파 스펙트럼 이론에서 가정하고 있는 무수한 미소 성분파의 중첩이 아님에 기인하는 것이라 추정하고 있다.

본 연구에서는 일반적인 파 스펙트럼 이론에 적용되는 기본 가정으로부터 설명하기 어려운 Freak wave의 특성에 대한 논의가 중심이 되므로, zero up cross 법을 통해 각각의 개별파 인자로부터 정의되는 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파 주기($T_{1/3}$), 평균파고(H_{mean}), 평균주기(zero up cross period, T_{mean}) 및 최대 파고(H_{max})와 최대파 주기(T_{max}) 등을 주된 해석 대상으로 하며, 경우에 따라 스펙트럼 법으로부터 정의되는 값을 사용할 때에는 앞서 서술한 약호의 표현으로 혼동을 피하고자 한다.

3. 실해역 파랑관측 자료의 비선형성

무한한 미소진폭 성분파의 선형 중첩으로 가정하는 해양파

의 수면 분포는 정규분포를 이루지만, 실제 파랑관측을 통해 분석한 빈도는 이론적 분포로부터 벗어나게 되며 이는 스펙트럼 이론의 전제가 되는 가정이 엄밀하게는 맞지 않음을 의미한다. Goda(1985)는 이 벗어남이 각 성분파간의 2차 및 3차 비선형 간섭파가 존재하기 때문이라 설명하였다. 실측 파랑기록으로부터 수면의 이론분포로부터 벗어난 정도는 실해역 파랑의 비선형성을 나타내는 하나의 지표가 될 수 있으며 여기서는 수면 파형의 비선형성을 표현하기 위해 다음과 같은 지표들을 도입하였다.

3.1 불규칙 수면파형의 비선형성 지표

수면파형의 비선형성을 표현하는 지표로서는 Ursell수 및 Goda(1983)가 제안한 Π 등이 있지만, 이들은 수면파형의 개념적인 비선형성을 표현한 것으로서 수면 빈도분포의 왜곡에 대한 지표로는 사용하기 어렵다.

실시간 수면 변동의 계측치로부터 수면 빈도분포의 왜곡과 함께 수면파형의 비선형성을 표현하는 지표로서 파의 시계열 측정 데이터로부터 파형의 상하 비대칭성(Skewness, S_k), 전후 비대칭성(Atiltness, A_t)이 있다.

$$S_k = \frac{1}{\eta_{rms}^3} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 \quad (3)$$

$$A_t = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (\eta_n - \bar{\eta})^3}{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (\eta_n - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2}} \quad (4)$$

여기서, η_{rms} 는 수면 변동량의 root mean square, $i=1,2,\dots,N$ 은 수면 변동량의 시계열, η_i 는 시계열의 수면 변동량, $\bar{\eta}$ 는 시계열 수면 변동량의 평균을 나타낸다. 또한 η_n 은 시계열 n번째 수면 변동량과 n+1번째 수면 변동량의 변화율로서 각 계측점의 증분 $\Delta\eta$ 를 계측 시간 간격 Δt 로 나눈 값이며 파형의 경사를 나타내게 된다.

수면파형의 상하 비대칭성을 나타내는 지표인 Skewness는 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 수면파형이 상하 대칭인

경우는 0이 되고, 파꼭보다 파정이 크게 되면 (+), 반대의 경우는 (-)가 되며 실제 해역에서의 파는 대부분의 경우 (+)값을 취한다. 천해역의 경우 쇄파가 시작되는 장소에서는 2.0 이상이 되지만, 쇄파대 외에서는 1.5를 넘는 경우가 드물다 (Goda, 1985). 또한 쇄파가 급격히 일어나는 쇄파대의 중앙부로부터 해안선에 이르기까지는 오히려 감소하는 경향을 나타내게 된다.

파의 zero up cross시작부터 파정이 통과할 때까지의 시간과 파정이 통과한 후부터 zero down cross까지의 시간에 대한 비를 취하여 이를 파형의 전후방향의 비대칭성(Atiltness)으로 하고 식 (4)로 나타낼 수 있다. A_t 가 (+)인 경우는 전파 방향으로 기울어진 파형, (-)일 경우는 후방으로 기울어진 형태의 파형을 의미한다. 천해역에서 파는 쇄파대로 접근할 경우 파의 전면이 급경사를 이루고 파정이 파의 전면에서 근접하는 전후의 비대칭성을 보이는데 plunging wave 형태의 쇄파는 이러한 전후 비대칭의 극단적인 모습이다.

申(2001)은 1/20의 저면 경사를 설치한 수조 실험에서 통제 파의 비대칭성을 표현하는데 있어서 Skewness 및 Atiltness 적용의 유효성을 확인하고 있다. 실험을 통해 진행하는 파가 수심 약 7.5cm 정도의 쇄파점에 이르기까지 Skewness는 서서히 증가하여 쇄파점에서 1.6의 값을 나타내고 쇄파 후 다시 감소하는 경향을, Atiltness의 경우는 수심 12cm 정도까지는 크게 증가되는 경향을 보이지 않지만 쇄파점에서 급격히 상승하여 4.3에 달하고 있음을 확인하고 있다. 심해에서 통상적인 Atiltness의 값은 0 부근이 된다.

한편, 식 (5)로 표현되는 첨예도는 수면 빈도분포 첨두의 예리한 정도를 나타내는 파라미터로서 정규분포의 경우 3.0의 값을 가지지만, 해양파의 대부분은 3.0보다 큰 값을 가지게 되며 최대치는 6 부근의 값을 이루게 된다.

3.2 불규칙 파랑의 수면파형 비선형성과 Freak wave 지표

Freak wave에 대한 정의는 유의파고와 최대파고의 비, 파정고와 파고의 비 등의 제안이 나오고 있지만 아직 명확히 규정되어있지 못하며, 통상 유의파고 2배 이상의 파고를 가지는 단일파를 그 해석의 출발로 하고 있으며 여기서도 편의상 이를 Freak wave 지표로 삼는다.

본 연구의 관측 자료 가운데에서 Freak wave의 전형적인 모습이 나타난 하나의 예를 Fig. 3에 나타내었다. 유의파고 0.85m의 저파랑 해상 상태에서 2.49m의 돌발적인 파랑이 나타난 경우이며, 이 때 $H_{max}/H_{1/3}$ 는 2.8을 넘고 있다.

Fig. 4은 제주 현지 해상에서 관측된 파랑자료의 유의파고($H_{1/3}$)와 최대파고(H_{max})의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 $H_{max}/H_{1/3}$ 는 대부분 대략 1.5~2.0 이내의 값을 가지고 있음을 알 수 있으나, 2.0을 초과하는 경우가 5.73%(572개/9977개), 2.2를 초과하는 경우가 1.08%(108개) 존재하였다.

Fig. 5는 유의파고의 분포와 $H_{max}/H_{1/3}$ 의 관계를 나타낸

것으로 유의파고의 크기는 $H_{max}/H_{1/3}$ 에 상관관계가 미약함을 알 수 있다. Fig. 5로부터는 저파랑의 조건에서 오히려 $H_{max}/H_{1/3}$ 가 높은 경우가 많은 것 처럼 보이지만, Table 2에 제시한 파고 별로 분류해 보면 $H_{max}/H_{1/3}$ 는 파고의 대소와 상관없이 거의같은 정도의 출현 비가 나타나 동일한 발생확률에 지배받고 있음을 유추할 수 있다. 습田(1973)은 해역에 설치되는 구조물에 대해 혼성 방파제의 설계에 있어서 $H_{max} = 1.8H_{1/3}$, 해양구조물 설계에 있어서는 $H_{max} = 2.0H_{1/3}$ 을 제안하고 있으나 안전성 확보만의 관점에서는 결코 충분하다고 할 수 없음을 시사한다.

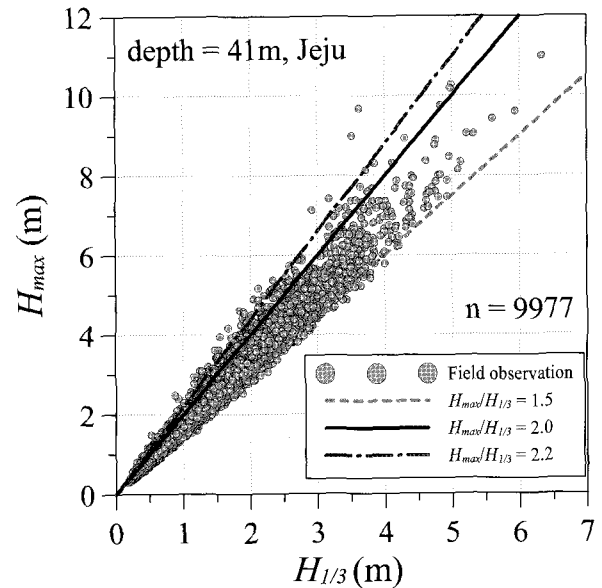


Fig. 4 The relationship between significant wave heights and maximum wave heights

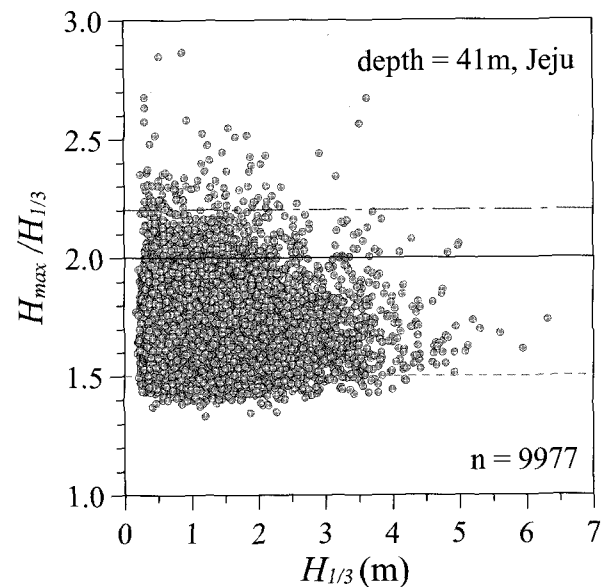


Fig. 5 The relationship between $H_{max}/H_{1/3}$ and $H_{1/3}$

Table 2 The number of $H_{max}/H_{1/3}$ by significant wave heights

	N	$2.0 \leq H_{max}/H_{1/3}$	$2.2 \leq H_{max}/H_{1/3}$
$H_{1/3} < 1.0$	4763	279 (5.86%)	58 (1.22%)
$1.0 \leq H_{1/3} < 2.0$	3613	203 (5.62%)	35 (0.97%)
$2.0 \leq H_{1/3} < 3.0$	1218	62 (5.09%)	12 (0.99%)
$3.0 \leq H_{1/3} < 4.0$	317	23 (7.26%)	3 (0.95%)
$H_{1/3} < 4.0$	66	5 (7.58%)	0 (0.00%)
Total	9977	572 (5.73%)	108 (1.08%)

한편, 식 (3)~(4)로 표현되는 수면 변동의 비선형 파라미터와 $H_{max}/H_{1/3}$ 의 관계는 Fig. 6~Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 S_k 는 Skewness, A_t 는 Atiltness를 나타낸다.

파형의 상하 방향 왜곡 정도를 나타내는 Skewness(Fig. 6)는 수면의 빈도분포에서는 좌우의 대칭 정도를 표현하게 되며, 완전한 대칭일 경우 0가 되지만 실험실에서는 파정부:파곡부가 대개 6 : 4 정도의 비율을 이루게 된다. 제주 현지에서 관측된 Skewness는 0 부근의 값이지만 파고의 고저에 무관하게 파정이 약간 높은 경우가 대부분이다.

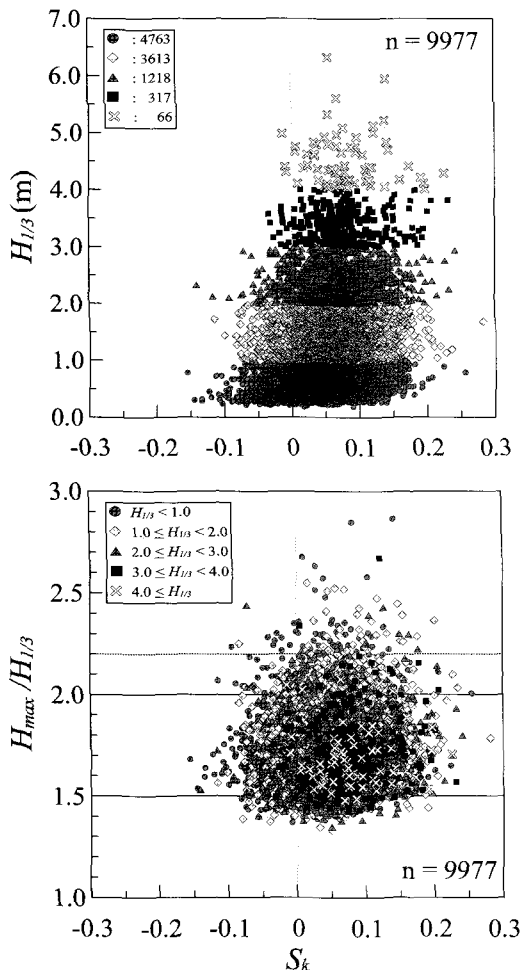


Fig. 6 The relationship between S_k and $H_{1/3}$ (upper), $H_{max}/H_{1/3}$ (lower)

파형의 기울어짐 정도를 나타내는 Atiltness(Fig. 7)는 수심의 영향을 받지 않는 심해역에서는 통상 0 부근에 나타나게 되는데 그림에서의 전후의 미미한 편향은 바람의 영향을 받는 실험역 파랑의 특성이 나타난 것으로 추정된다.

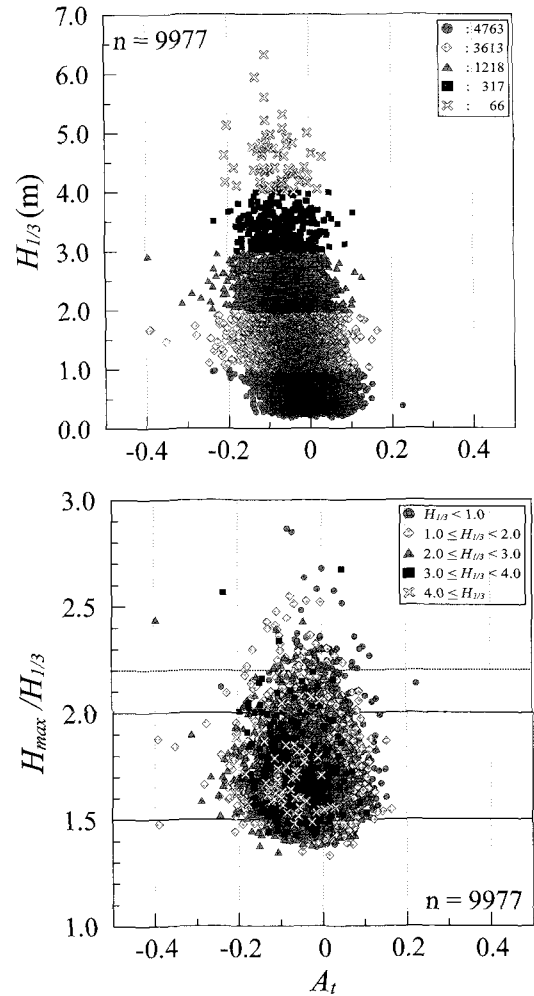


Fig. 7 The relationship between A_t and $H_{1/3}$ (upper), $H_{max}/H_{1/3}$ (lower)

3.2 스펙트럼 파라미터와 Freak wave 지표

ϵ 는 식 (6)으로 표현되는 주파수 스펙트럼의 대역폭 (spectrum band width)을 나타내는 파라미터이며, 식에서 m_4 는 파 스펙트럼의 4차 모멘트이다.

$$\epsilon = [1 - m_2^2 / (m_0 m_4)]^{1/2} \quad (6)$$

식 (6)으로 나타낸 파 스펙트럼의 대역폭 파라미터는 $0 < \epsilon < 1$ 의 값을 나타내게 되는데, Fig. 8에 제시한 본 관측 결과에서는 대부분 0.5 이상 0.9 이하의 범위에서 나타남을 알 수 있다. 이는 해양파의 고주파수대역이 f^{-5} 에 비례하는 것이 대부분이므로 ϵ 이 1에 접근한 형태로 나타나는 것으로 설명할 수 있다(Goda, 1985).

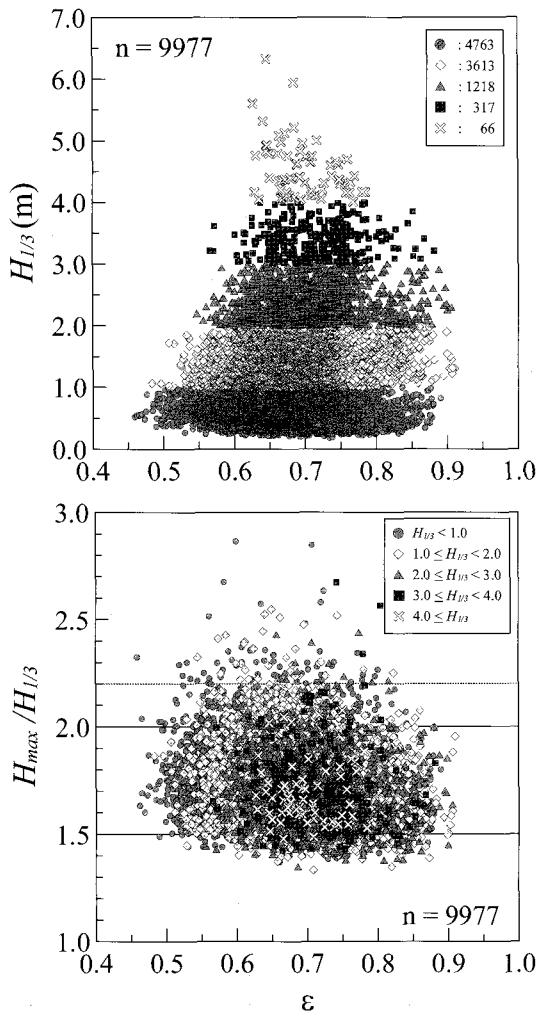


Fig. 8 The relationship between bandwidth parameter of wave spectrum and $H_{1/3}$ (upper), $H_{max}/H_{1/3}$ (lower)

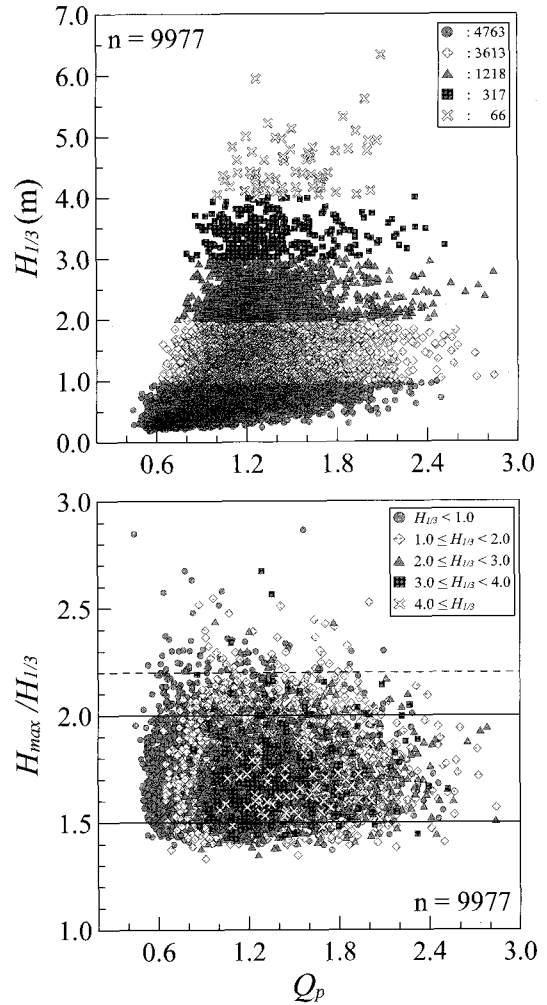


Fig. 10 The relationship between spectrum peakness parameter and $H_{1/3}$ (upper), $H_{max}/H_{1/3}$ (lower)

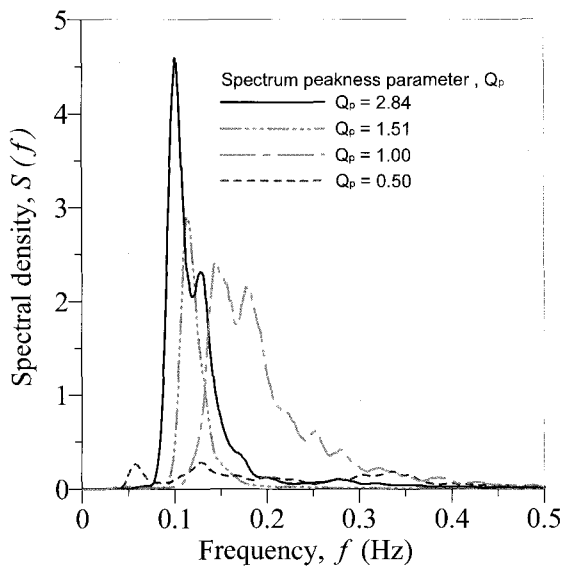


Fig. 9 The shapes of wave spectrum by Q_p

관측된 파 스펙트럼의 형상으로 표현할 수 있는 비선형 지표에는 Goda(1977)의 spectrum peakness parameter (Q_p)도 있다. Q_p 는 주파수 스펙트럼 첨두의 예리한 정도를 나타내는 지표로서 식 (7)과 같이 정의된다.

$$Q_p = \frac{1}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df \quad (7)$$

Fig. 9은 Q_p 가 표현하는 주파수 스펙트럼 형상을 단적으로 보여주는 것으로서 Q_p 가 클수록 스펙트럼의 첨두가 예리하고 작을수록 스펙트럼의 대역폭이 넓다. 제주 현지 파랑의 스펙트럼 첨두 형상 값은 0.4~3.0 정도의 분포를 가지고 있음을 Fig. 9로부터 알 수 있다.

신 과 홍(2006)은 Benjamin and Feir(1967)에 의해 이론 및 실험으로 증명된 균일 Stokes파의 불안정성과 파의 비선형 거동을 비선형 슈레딩거 방정식을 통하여 고찰하고 비선형 파랑 집중 현상으로 인한 Freak wave 출현을 모사한 바 있다. Side band effect라고도 불리는 이러한 비선형 거동은 반송파와 측

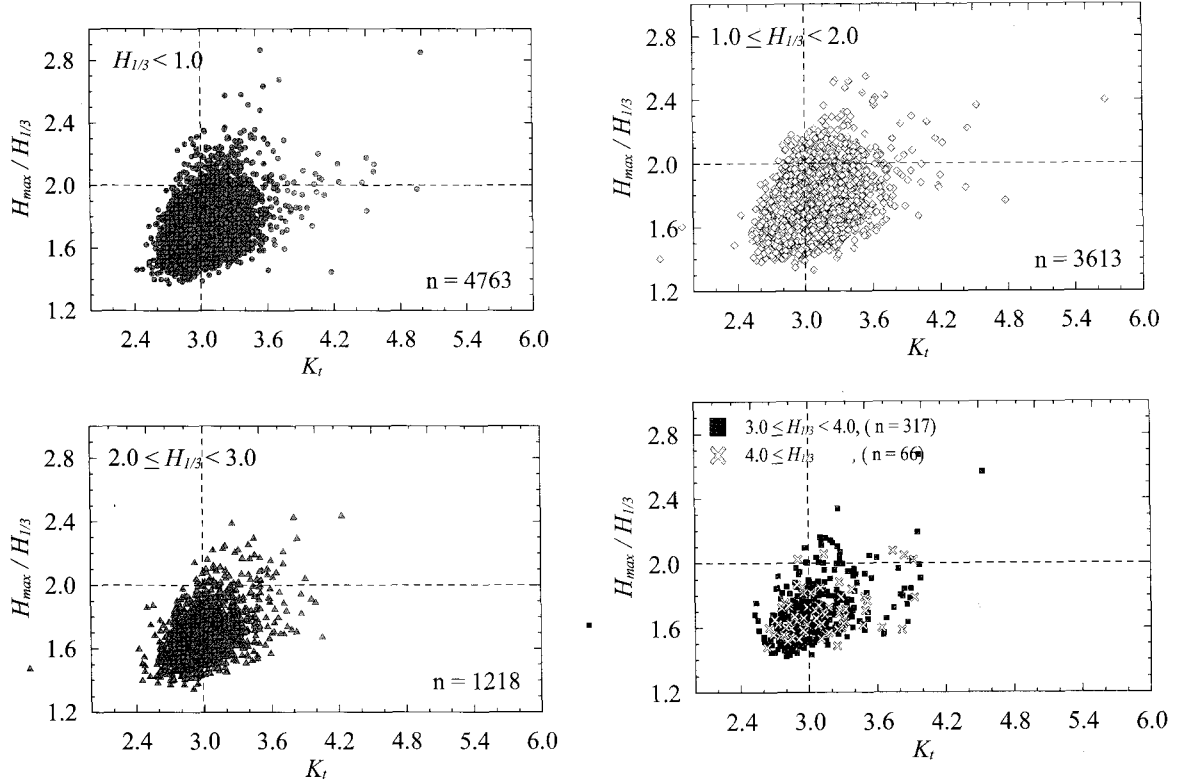


Fig. 11 The relationships between Kurtosis of distribution of surface elevation and $H_{max}/H_{1/3}$

대역파의 비선형 상호작용을 토대로 해석되는 것이므로 주로 협대역(narrow band) 파랑 스펙트럼에서 일어날 수 있는 것이다. 그러나 Fig. 10의 하단 그림에서 알 수 있는 바와 같이 $H_{max}/H_{1/3}$ 와는 상관성이 미약하여 협대역 스펙트럼에 기초한 Benjamin-Feir 불안정 만으로는 실제역 Freak wave를 모두 설명할 수 없음을 미루어 짐작할 수 있다.

3.3 수면 빈도분포의 첨예도와 Freak wave 지표

앞 절에서 살펴본 수면 변동의 비선형 파라미터 S_k , A_t 및 파의 주파수 스펙트럼 형상을 토대로 한 비선형 파라미터 ε , Q_p 등은 계측된 파랑 스펙트럼의 전반적인 비선형적 특징을 묘사하긴 하지만, 해당 관측 기간 동안 나타나는 돌발적 고파랑이라고 할 수 있는 H_{max} 와의 상관성은 미약하여 Fig. 6~10에 나타난 바와 같이 $H_{max}/H_{1/3}$ 과의 낮은 상관관계를 나타내고 있어 Freak wave 발생과의 연관을 추출하기에는 부족함이 많았다.

본 절에서는 식 (5)로 표현되는 관측된 시계열 파랑 자료로부터 수면 빈도분포 첨두의 예리한 정도를 나타내는 첨예도(K_t)를 도입하여 $H_{max}/H_{1/3}$ 의 관계를 조사하였다.

$$K_t = \frac{1}{\eta_{rms}^4} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^4 \quad (5)$$

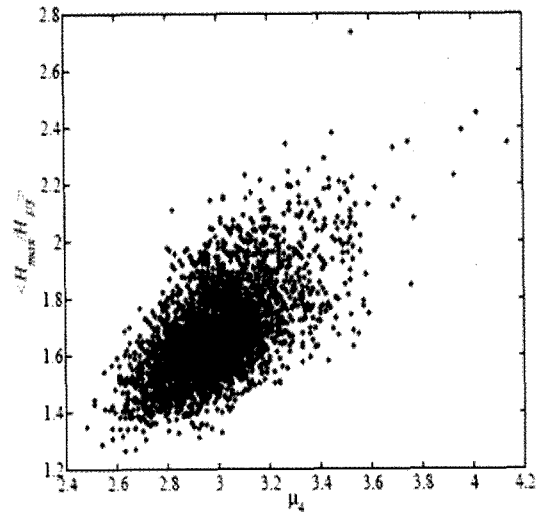


Fig. 12 The relationships between $H_{max}/H_{1/3}$ and μ_4 (Mori and Janssen, 2005)

K_t 는 수면 변위의 시계열 자료로부터 산출한 통계적 분포에서 최빈수(最頻數, mode) 첨두의 예리한 정도를 나타내는 지표의 하나이다. 정규분포의 경우 K_t 는 3.0이지만, 해파의 경우 대부분은 3.0보다 큰 값을 가지게 되며 쇄파대 내에서는 10.0을 넘는 경우도 있다.

Fig. 11에 제시한 바와 같이 제주 서측 해역에서 관측된 파랑자료에 대한 스펙트럼의 첨예도 파라미터 K_t 는 전반적으로

2.4~5.0의 범위에 존재하고, 1m 간격으로 분류한 파고의 크기에 대해 모두 같은 정도인 약 0.6의 기울기를 나타내어 타 비선형 파라미터에 비해 다소 개선된 상관을 보여주고 있음을 알 수 있다.

Janssen(2003)은 Freak wave 발생의 지표로서 파의 비선형성과 분산성을 토대로 추출한 Benjamin-Feir Index(BFI)를 제안하고 있으며, Mori and Janssen(2005)는 이론적인 수면의 4차 모멘트로 산정한 스펙트럼의 첨예도 μ_4 (Fig. 12)과 BFI의 물리적 동일성을 제시하면서 Freak wave 출현 확률의 예측 가능성을 제시하였다.

본 연구에서 관측 파랑자료를 토대로 산출한 K_f 는 스펙트럼첨예도의 표현이라는 점에서 근본적으로 μ_4 와 동일시 할 수 있는 파라미터로서, 제주 해역의 파랑관측 결과로부터 K_f 의 중요성을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 제주해역 현지 파랑의 1년간 연속관측 결과를 토대로 실험해역에서의 불규칙 파랑 특성을 고찰하고 이를 통해 관측된 해양파의 비선형 특성을 조사하여 Freak wave 예측을 위한 기초자료를 제공하고자 하고자 실측 파랑기록으로부터 파형의 상하 비대칭성(S_k), 전후 비대칭성(A_1) 그리고 반도분포의 첨예도(K_f) 및 스펙트럼 대역폭 파라미터(ϵ)를 추출하여 분석하였다.

그 결과 제시된 파랑의 비선형 파라미터들은 계측된 파랑 스펙트럼의 전반적인 비선형적 특징을 묘사하긴 하지만, 돌발적 고파랑이라고 할 수 있는 H_{max} 와의 상관은 미약하여 Freak wave의 발생을 단적으로 예측하기에는 부족한 것으로 나타났으나, 스펙트럼의 첨예도를 나타내는 K_f 의 경우는 타 비선형 파라미터에 비해 다소 개선된 상관을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 기본연구사업인 “기상 재난파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발”과 해양수산부의 지원으로 수행된 “파력발전 실용화 기술개발”의 연구 결과 중 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] 류황진, 홍기용, 신승호, 송무석, 김도영 (2004), “SWAN 모델을 이용한 제주해역 장기 파랑분포 특성 연구”, 한국해양환경공학회지, 제7권, 제3호, pp. 137-145.
- [2] 신승호, 홍기용 (2006), “대양에서의 거대파랑 출현 특성과 발생 기구에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제 30권 제3호, pp. 181-187.
- [3] 홍기용, 류황진, 신승호, 홍석원 (2004), “파력발전 적지 선정을 위한 제주 해역 파랑에너지 분포특성 연구”, 한국해양공학회지, 제18권, 제6호, pp. 8-15.
- [4] 해양수산부 (2005), “파력에너지 실용화 기술개발 - 제1단계 연구보고서”, 한국해양연구원, UCM01060-05062, Chpt. 3, Sec. 4, pp. 181-223.
- [5] 合田良實: (1973), “防波堤の設計波壓に關する研究”, 港灣技術研究所報告, 12(3), pp. 31-69.
- [6] 合田良實: (1983), “波浪의 非線形性とその記述パラメータ”, 第30回 海岸工學 講演會 論文集, 土木學會, pp.39-43.
- [7] 申承鎬: (2001), “沖合構造物背後の海浜變形機構とそのモデル化に關する研究”, 九州大學學位論文, p. 187.
- [8] Benjamin, T. B. and Feir, J. E. (1967), “The disintegration of wave trains on the deep water”, J. Fluid Mech., Vol. 27, pp. 417-430.
- [9] Goda, Y. (1977), “Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation”, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 9, No. 3, pp. 3-57.
- [10] Goda, Y. (1985), “Random Seas and Design of Maritime Structure”, Univ. of Tokyo Press, p. 323.
- [11] Janssen, P. (2003), “Nonlinear four-wave interactions and freak waves”, Jour. Phys. Oceanogr. 33(4), pp. 2001-2018.
- [12] Longuet-Higgins, M. S. (1952), “On the statistical distributions of the heights of sea waves”, Jour. Marine Res., Vol. IX, No. 3, pp. 245-266.
- [13] Mori, N. and Janssen, P. (2005), “On Kurtosis and Occurrence Probability of Freak Waves”, Submitted to Jour. Phys. Oceanogr.
- [14] Rogue Waves (2000), Brest, France 29-30 Nov. 2000, <http://www.ifremer.fr/metocean/conferences/wk.htm>.
- [15] Rogue Waves (2004), Brest, France 20-22 Oct. 2004, <http://www.ifremer.fr/web-com/stw2004/rw/>.

원고접수일 : 2006년 12월 28일

원고채택일 : 2007년 7월 9일