

Statistical Analysis of Draupner Wave Data

Do Young Kim^{ID*}

^{*}Hongik University, Sejong, Korea

Draupner 파랑자료의 통계적 해석

김도영^{ID*}

^{*}홍익대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Ocean waves 해양파, Freak wave, New Year wave, Abnormality index 이상지수, Wave statistics 파랑 통계, PCA analysis 주축해석

ABSTRACT: In this paper, the time history of the surface elevation measured at the Draupner platform in the North Sea in 1995 is used to examine the statistical characteristics of the wave data. The wave statistics for 48 surface measurements, which contain three freak wave occurrences, are summarized. The quartiles, boxplots, correlations, and pair plots of 15 variables, along with the abnormality index, are presented. The kurtosis and skewness of the surface elevation are two variables that are highly correlated with the abnormality index, which defines freak waves. Principal coordinate analysis showed that the direction of the changes in the abnormality index agreed with the changes in the kurtosis and skewness. In addition, various wave heights, except the maximum wave height, showed a similar direction for the height changes, and various wave periods showed a similar direction for the period changes. Based on the correlations and PCA analysis, the kurtosis and skewness of the surface profiles are the two most important variables to predict the abnormality index.

1. 서 론

해양에서는 여러 가지 종류의 파도가 발생한다. 해양에서 발생하는 파랑은 선박 및 해양, 해안구조물과 상호 작용을 일으키며 안전한 구조물의 설계와 운영, 보호와 안전관리에 중요한 인자이다. 해양에서 발생하는 대진폭 파랑에 대한 관심과 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 해양에서 발생하는 파도 중에서 일반적으로 예측되는 최대파고의 크기를 넘어서는 매우 높은 파고를 가지는 파도를 Freak wave 또는 Rouge wave(National Ocean Service, 2019)라 한다. 북해에 설치된 Draupner platform에서 1995년 1월 1일에 발생한 ‘New Year Wave’라 부르는 파도는 대표적이고 널리 알려진 Freak wave이다.

Freak wave는 이상지수 AI (Abnormality index)를 이용해 다음과 같이 정의 된다(Kalif et al, 2009).

$$AI = \frac{H}{H_{1/3}} \geq 2 \quad (1)$$

여기서 H 는 파고이고 $H_{1/3}$ 은 유의파고이다. 관측된 Freak wave

중 이상지수가 가장 큰 경우는 North Black Sea에서 발생한 파도로 파고가 10.32m이고 이상지수는 3.91이다(Kalif et al, 2009).

전에는 Freak wave의 발생 확률은 통계적으로 매우 작은 것으로 생각되었으나, 실제 관측된 파랑자료에서는 Freak wave가 많이 발생하고 있다는 것이 알려져 있다(Liu and Pinho, 2004). 북해와 일본 해역에서 실측된 파랑자료를 통해서 파고를 Rayleigh 분포로 가정하는 경우에는 Freak wave 발생확률이 낮게 평가된다는 것을 보여주었다(Stansell, 2004; Mori et al., 2002; Mori, 2004). 그러나 Yura 해역에서 발생한 Freak wave는 파랑자료에 충분한 수의 파도 수를 포함되어 있는 경우 발생확률이 수정 Rayleigh 분포를 사용하여 충분히 예측될 수 있음을 보여주었다(Kim, 2010).

기존의 연구결과는 대부분 파랑자료에 대해서 유의파고, 최대 파고 및 영점상향통과주기 등의 몇 가지 주요한 통계자료위주로 되어 있어 있으며, 통계 특성들이 수치로 제공되어 있지 않고 있다. 이 논문에서는 New Year Wave가 발생한 시점인 1995년 1월 1일부터 1월 20일까지 Draupner platform에서 계측한 48개의 파랑자료를 통계적으로 정리하고 종합적으로 분석하여, 그 결과를 제시하여 Freak wave와 같은 대진폭파랑의 특성을 연구하는 파랑자료를 제공하고자 한다.

Received 25 March 2019, revised 30 April 2019, accepted 13 June 2019

Corresponding author Do Young Kim: +82-44-860-2567, dykim@hongik.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9326-8839

© 2019, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 파랑자료

이 논문에서 사용한 파랑자료는 노르웨이 근처의 북해에 설치된 Draupner platform에서 계측된 파형의 시계열 자료이다. 이 지역에서 1995년 1월 1일에 계측된 파고 25.6m인 파고는 ‘New Year Wave’라고 잘 알려진 대표적인 Freak wave이다. 파형의 계측은 플랫폼 수면 아래로 레이저와 센서가 설치되어 있어 수면과 센서 사이의 순간 거리를 측정한다. 파랑의 계측주파수는 2.1333Hz로, 계측주파수는 최대파고에 크기에 미치는 영향은 크지 않다고 볼 수 있다(Kim, 2013b). 한 개의 파랑계측 자료는 20분 동안 계측된 수면의 높이가 저장되어 있으면 한 개당 2,560개의 데이터가 포함된다. 이 논문에서는 1995년 1월에 발생한 총 48개의 파랑자료를 분석하였다. 각 파랑자료는 최대파고가 8m 이상인 파도가 포함되어 있다. Table 1에 표시한 파랑자료의 구분은 ‘D01_1520’형태로 표시하였고 시간별로 1~48까지 ID 일련번호를 부여하였다. 여기서 처음 두개 숫자는 날짜를 나타내며 마지막 4개의 숫자는 계측 시간을 나타낸다. 따라서 ‘D01_1520’은 1월 15시 20분에 계측된 파랑자료를 의미한다.

사용한 48개의 파랑자료 중 3개의 파랑자료에 Freak wave가

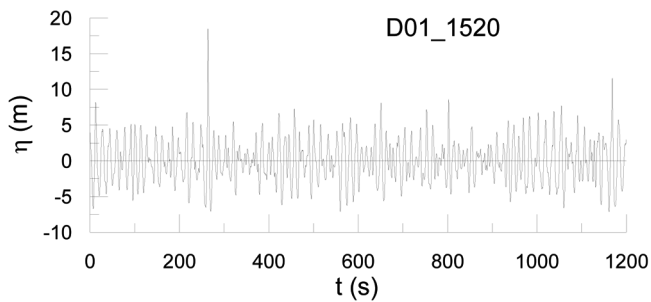


Fig. 1 Time series of surface elevation of D01_1520

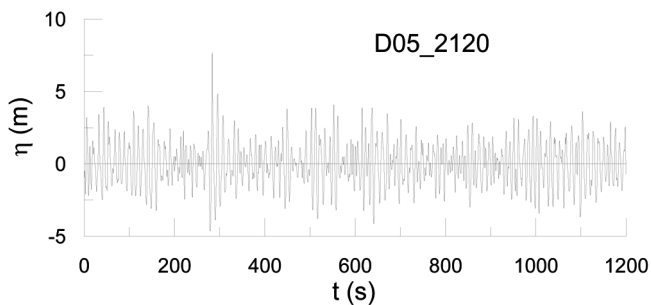


Fig. 2 Time series of surface elevation of D05_2120

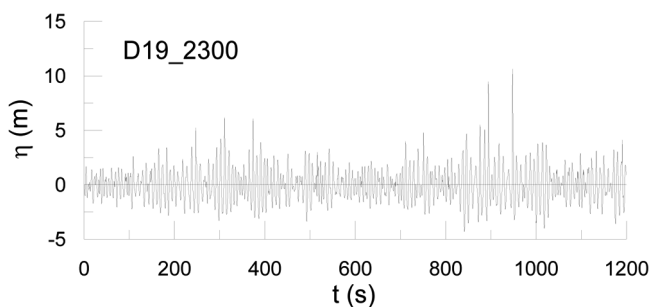


Fig. 3 Time series of surface elevation of D19_2300

포함되어 있다. Fig. 1에 Freak wave가 포함되어 있는 D01_1520, D05_2120, D19_2300 3개의 파형의 시계열 자료를 표시하였다. Fig. 1에는 280초 근방에서 평균파고보다 매우 큰 파고 20m가 넘는 freak wave가 발생하였고, 이 파도는 ‘New Year Wave’라 불리고 있다. Fig. 2에서 280초 근방에서 파고가 10m 이상의 Freak wave, Fig. 3에서 950초 근방에서 파고 10m 이상의 Freak wave가 발생한 것을 볼 수 있다. Fig. 3에서는 짧은 시간 안에 2개의 큰 파도가 발생한 것을 볼 수 있다.

3. 파랑자료의 통계적 특성

주어진 수면의 시계열자료에서 파형의 분산, 비대칭도 및 첨도 등 파형과 관련된 통계치를 계산하였다. 두 개의 연속적인 영점상향지점으로 개별 파랑을 구분하였고 이에 따른 파고 및 주기에 관련된 각종 통계치를 계산하였다. 그리고 FFT(Fast Fourier transform)를 이용하여 파랑스펙트럼을 계산하였고 최종적으로 0.01Hz의 주파수 해상도(Frequency resolution)을 가지도록 평균한 파랑스펙트럼을 사용하여 파랑스펙트럼과 관련된 통계치를 계산하였다. Table 1에 48개 파랑자료에 대한 각종 통계 결과를 표시하였다. Table 2에는 이상 지수(Abnormality index, AI)가 2.0 이상인 Freak wave가 포함된 자료의 계산 결과를 따로 표시하였고 각 기호에 대한 설명이 포함되어 있다.

Table 3에는 각 변수에 대한 사분위(Quartile) 값을 표시했고, Fig. 4에서는 각 변수에 대해서 박스플롯을 작성하였다. Fig. 4에서는 값이 비슷한 변수끼리 모아서 표시를 하였고 종축은 각 변수의 값을 나타낸다. 박스 안의 진한 선은 50% 박스의 위 부분은 75%, 아래 부분은 25%를 나타내며, 위 아래의 표시된 선은 사분위 변위의 1.5배 되는 지점을 표시하고 있다. 각 변수별로 사분위변위(Interquartile range, IQR)의 1.5배를 벗어난 이상치(Outlier)가 존재 한다. 특히 최대파의 경우는 최소가 8.14m이고 최대가 25.58m가 되어, 이상치가 사분위 변위를 초과하는 정도가 가장 심한 것을 볼 수 있다. 이에 반해서 유의파첨도(Significant steepness)와 대역폭(Bandwidth parameter)는 이상치가 가장 적게 나타난다. 이것은 파랑자료가 최대파의 크기가 8m가 넘는 일정 이상의 거친 해상상태에서 측정된 자료인 영향으로 생각된다.

Freak wave가 포함된 파랑자료의 파형분포는 정규분포보다는 비정규 분포함수인 Gram-Chalier 분포함수로 잘 표시할 수 있다(Kim, 2013a). Fig. 5에는 파형분포에 대한 정규분포 분위수 대조도(Q-Q plot)를 표시하였다. 수평축은 파형의 높이를 표준화한 값을 나타낸다. 여기서 직선은 완전한 정규분포일 경우를 나타낸다. 이 그림에서 중간 분위에서는 정규분포와 일치해 하나, 수면이 높은 곳과 낮은 곳에서 실제자료가 더 높은 쪽에 위치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 파고가 커질수록 분포가 정규분포에서 벗어나며, 파정과 파저 부근의 파형의 발생 확률이 더 높게 나타나는 것을 의미한다.

Fig. 6에 freak wave가 발생한 파랑자료를 분해능 0.01Hz의 주파수해상도로 계산한 스펙트럼과, 유의파고와 영점상향통과 주기를 2개의 파라미터로 가지는 Modified Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 JONSWAP(Joint North Sea wave project) 스펙트럼과 비교를 하였다. 파랑스펙트럼을 계산할 때 JONSWAP 스펙트럼과 Modified Pierson-Moskowitz 스펙트럼의 면적이 같도록 설정하였

Table 1 Draupner wave data statistics

ID	Data	σ	γ	κ	H_0	T_0	$H_{1/3}$	H_s	H_{max}	$T_{H_{max}}$	H_s	T_z	T_p	ν	S_s	γ_J
01	D01_0620	1.922	0.102	2.884	4.80	9.59	7.39	5.33	12.37	10.84	7.69	9.10	11.76	0.404	0.060	2.40
02	D01_0920	1.943	0.196	3.553	4.65	9.20	7.64	5.34	13.63	11.75	7.76	8.81	13.33	0.434	0.064	1.28
03	D01_1420	2.790	0.253	3.132	7.10	11.88	10.85	7.85	16.49	15.05	11.14	10.81	15.38	0.450	0.061	1.57
04	D01_1520	2.983	0.413	4.062	7.12	11.28	11.58	8.20	25.58	12.50	11.92	10.81	15.38	0.475	0.065	1.88
05	D01_1620	3.020	0.217	3.293	7.57	12.58	12.20	8.55	20.46	14.29	12.04	11.53	18.18	0.461	0.058	0.76
06	D01_1720	2.849	0.134	2.929	6.79	11.20	11.10	7.70	15.74	17.80	11.37	10.90	15.38	0.488	0.061	1.66
07	D01_1820	2.991	0.233	2.976	7.83	12.70	11.86	8.70	20.18	15.52	11.96	11.18	15.38	0.481	0.061	1.89
08	D02_0620	1.730	0.162	2.912	4.33	9.43	6.64	4.81	10.52	9.03	6.88	8.83	11.76	0.414	0.057	1.81
09	D04_2340	1.546	0.226	2.999	3.70	7.91	5.95	4.20	9.82	10.17	6.15	7.82	10.53	0.393	0.064	2.39
10	D05_0020	1.666	0.136	2.568	4.34	8.88	6.33	4.71	8.80	8.74	6.62	8.27	11.76	0.384	0.062	1.64
11	D05_0140	1.554	0.087	2.820	3.83	8.31	5.89	4.27	8.85	11.27	6.19	7.83	10.53	0.428	0.065	2.43
12	D05_0320	1.522	0.177	3.067	3.69	8.24	6.08	4.21	8.17	9.45	6.06	7.97	10.53	0.383	0.061	2.31
13	D05_0620	1.783	0.197	2.829	4.47	8.75	6.91	4.94	10.30	10.36	7.12	8.40	11.76	0.403	0.065	1.98
14	D05_0920	1.788	0.138	3.056	4.51	8.94	6.79	4.98	12.41	10.15	7.14	8.06	11.76	0.480	0.070	1.99
15	D05_1220	1.965	0.147	2.863	4.92	9.51	7.60	5.48	12.16	9.08	7.82	8.46	11.76	0.490	0.070	2.50
16	D05_1820	1.832	0.119	2.892	4.43	9.00	7.15	5.01	9.99	10.05	7.31	8.62	11.76	0.428	0.063	2.11
17	D05_2120	1.512	0.144	3.122	3.68	8.55	5.73	4.13	11.59	11.44	6.01	8.15	11.76	0.435	0.058	1.27
18	D05_2220	1.586	0.085	2.797	3.89	8.75	6.21	4.36	9.17	10.01	6.32	8.49	11.76	0.424	0.056	1.45
19	D09_1920	1.576	0.050	3.160	3.96	8.57	6.17	4.41	10.66	9.79	6.28	7.87	9.52	0.399	0.065	3.98
20	D09_2120	1.571	0.079	2.945	3.76	8.22	6.09	4.27	9.94	8.62	6.24	8.09	10.53	0.421	0.061	2.48
21	D09_2240	1.738	0.226	3.702	4.08	8.37	6.91	4.74	11.02	10.40	6.95	8.34	10.53	0.420	0.064	3.20
22	D10_0020	1.982	0.180	2.706	5.04	9.13	7.57	5.54	10.26	10.09	7.91	8.41	11.76	0.451	0.072	2.56
23	D10_0320	2.000	0.073	2.645	4.93	9.41	7.74	5.50	10.28	11.92	7.99	8.84	10.53	0.417	0.066	4.35
24	D10_0620	1.865	0.163	2.981	4.79	9.47	7.09	5.26	12.21	9.49	7.43	8.47	11.76	0.452	0.066	2.20
25	D10_0920	1.696	0.120	2.872	4.15	9.04	6.53	4.62	10.02	11.32	6.76	8.75	11.76	0.414	0.057	1.73
26	D11_1540	1.539	0.136	2.753	3.75	8.70	5.79	4.17	8.24	9.22	6.13	8.20	11.76	0.441	0.058	1.33
27	D11_1620	1.552	0.047	2.984	3.59	8.17	5.94	4.11	8.97	10.86	6.18	8.29	11.76	0.438	0.058	1.36
28	D11_1820	1.694	0.137	3.049	4.22	8.93	6.71	4.72	10.74	11.53	6.75	8.37	10.53	0.435	0.062	2.99
29	D11_2120	1.854	0.145	2.801	4.64	9.20	7.04	5.14	9.79	11.07	7.38	8.66	11.76	0.438	0.063	2.17
30	D12_0020	1.884	0.111	2.902	4.81	10.20	7.36	5.32	10.87	11.65	7.52	8.90	13.33	0.504	0.061	1.18
31	D12_0320	1.566	0.112	2.772	3.94	8.97	5.90	4.30	9.04	10.53	6.23	8.12	11.76	0.480	0.060	1.40
32	D16_1340	1.554	0.017	2.841	3.77	8.35	5.88	4.24	9.41	10.05	6.17	8.12	10.53	0.403	0.060	2.41
33	D16_1500	1.539	0.185	3.193	3.68	8.33	5.97	4.18	8.78	8.88	6.15	8.03	10.53	0.413	0.061	2.39
34	D16_1520	1.552	0.214	3.365	3.76	8.06	5.91	4.23	11.10	10.26	6.17	7.87	10.53	0.413	0.064	2.41
35	D16_1620	1.641	0.123	3.015	4.02	8.13	6.38	4.52	9.63	9.66	6.56	7.84	10.53	0.406	0.068	2.79
36	D16_1820	1.565	0.237	2.846	3.85	8.16	5.97	4.28	8.92	8.30	6.24	7.83	10.53	0.422	0.065	2.47
37	D16_2140	1.514	0.143	2.989	3.66	8.26	5.96	4.13	9.21	9.12	6.04	8.09	11.76	0.427	0.059	1.28
38	D16_2220	1.557	-0.103	2.613	3.86	8.42	5.96	4.27	8.14	10.24	6.18	8.08	11.76	0.436	0.061	1.37
39	D17_2240	1.791	0.221	3.085	4.33	8.59	6.85	4.90	12.01	9.78	7.13	8.11	10.53	0.403	0.069	3.39
40	D18_0320	1.947	0.117	2.761	4.92	9.50	7.61	5.46	11.31	9.71	7.78	8.88	11.76	0.416	0.063	2.46
41	D18_0620	1.692	0.134	2.884	4.01	8.07	6.41	4.52	8.75	10.19	6.74	8.04	11.76	0.433	0.067	1.72
42	D18_0700	1.777	0.142	2.928	4.30	8.53	6.87	4.86	10.09	10.03	7.09	8.25	10.53	0.428	0.067	3.34
43	D18_0840	1.587	0.316	3.210	3.88	8.36	6.14	4.36	9.60	10.33	6.33	7.92	11.76	0.439	0.065	1.46
44	D18_1000	1.593	0.122	2.685	4.10	8.72	6.24	4.50	8.51	8.10	6.35	8.00	11.76	0.412	0.064	1.47
45	D18_1300	1.523	0.110	2.826	3.82	8.68	5.93	4.27	9.23	9.39	6.06	8.19	10.53	0.376	0.058	2.31
46	D19_2300	1.527	0.617	5.286	3.69	7.19	6.10	4.27	13.87	7.98	6.08	6.43	9.52	0.546	0.094	3.71
47	D20_0020	1.811	0.154	2.778	4.59	8.68	6.96	5.06	9.60	9.18	7.19	8.18	9.52	0.351	0.069	5.31
48	D20_0320	1.907	0.241	2.995	4.64	8.65	7.37	5.22	11.06	11.87	7.59	8.23	10.53	0.456	0.072	3.89

Table 2 Summary of wave statistics from data containing freak wave

Description		D01_1520	D05_2120	D19_2300
σ_η	RMS of wave elevation	2.98	1.51	1.53
γ	Skewness of wave elevation	0.41	0.14	0.62
κ	Kurtosis of wave elevation	4.06	3.12	5.29
H_0	Average wave height	7.12	3.68	3.69
T_0	Average zero up-crossing period (time domain)	11.28	8.55	7.19
$H_{1/3}$	Significant wave height (time domain)	11.58	5.73	6.10
H_s	RMS of wave height	8.20	4.13	4.27
H_{max}	Maximum wave height	25.58	11.59	13.87
$T_{H_{max}}$	Wave period of maximum wave height	12.50	11.44	7.98
H_s	Significant wave height (frequency domain)	11.92	6.01	6.08
T_z	Average zero up-crossing period (frequency domain)	10.81	8.15	6.43
T_p	Peak period of wave spectrum	15.38	11.76	9.52
f_p	Peak frequency of wave spectrum	0.065	0.085	0.105
ν	Bandwidth of wave spectrum	0.48	0.44	0.55
S_s	Significant steepness	0.07	0.06	0.09
γ_J	Peak enhancement factor (JONSWAP spectrum)	1.88	1.27	3.71
AI	Abnormality Index = $H_{max}/H_{1/3}$	2.21	2.02	2.27

Table 3 Quartiles of variables

	Min	25 %	50 %	75 %	Max
σ_η	1.512	1.556	1.695	1.890	3.020
γ	-0.103	0.116	0.143	0.201	0.617
κ	2.568	2.825	2.929	3.072	5.286
H_0	3.590	3.828	4.185	4.685	7.830
T_0	7.190	8.345	8.710	9.253	12.700
$H_{1/3}$	5.730	5.970	6.585	7.363	12.200
H_s	4.110	4.270	4.715	5.275	8.700
H_{max}	8.140	9.200	10.175	11.695	25.580
$T_{H_{max}}$	7.980	9.435	10.160	11.283	17.800
H_s	6.010	6.188	6.755	7.538	12.040
T_z	6.430	8.055	8.240	8.683	11.530
T_p	9.520	10.530	11.760	11.760	18.180
ν	0.351	0.413	0.428	0.450	0.546
S_s	0.056	0.061	0.063	0.065	0.094
γ_J	0.760	1.545	2.185	2.485	5.310
AI	1.330	1.458	1.525	1.655	2.270

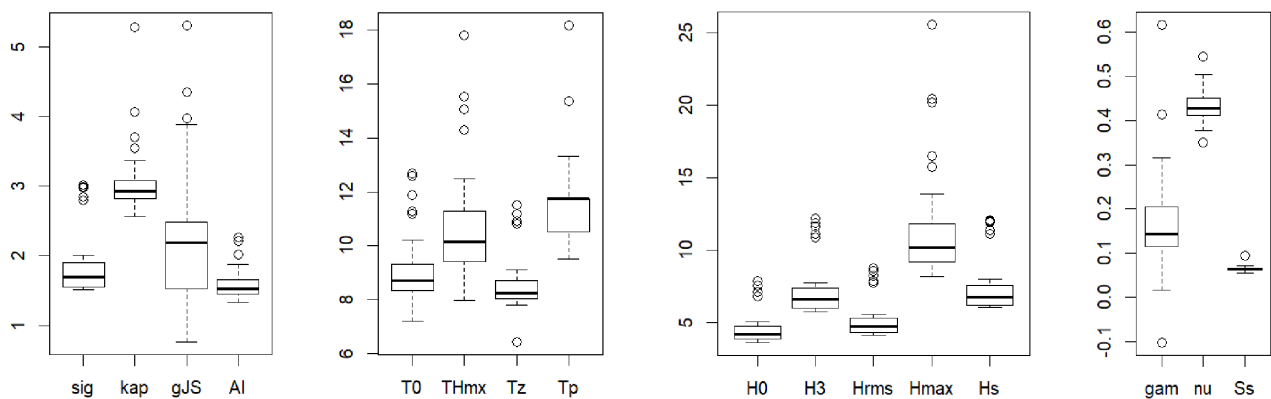


Fig. 4 Boxplots of wave data

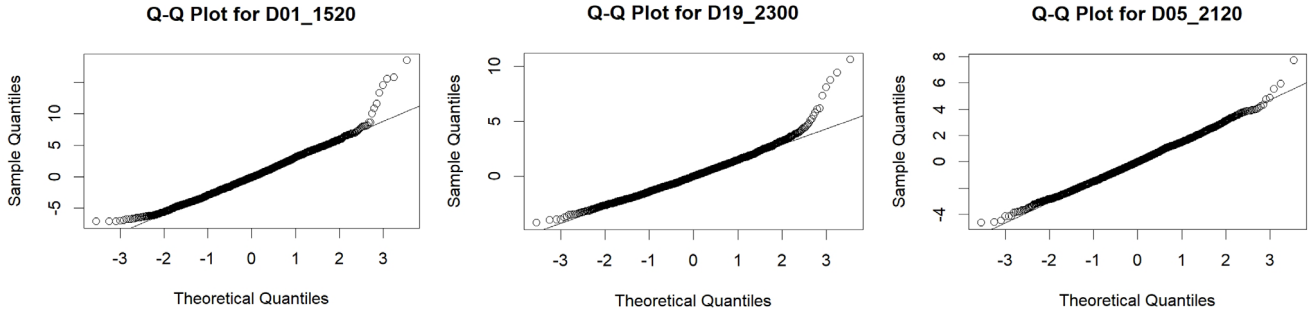


Fig. 5 Q-Q plot of wave elevation distribution from data containing freak wave

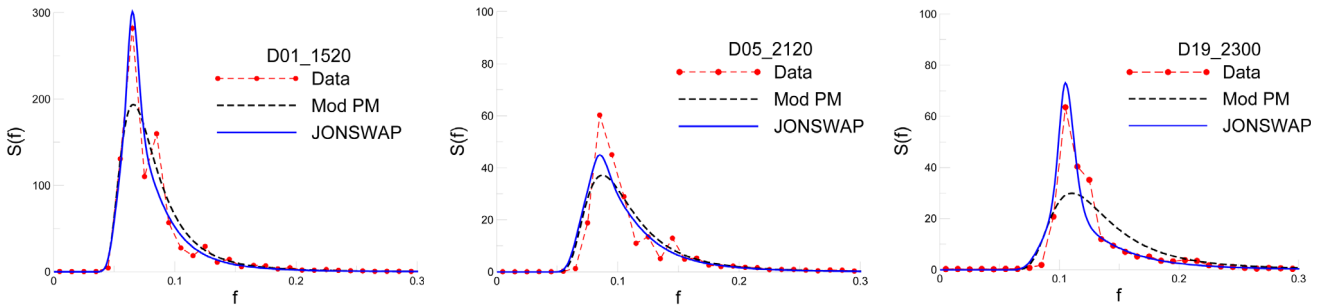


Fig. 6 Wave spectrums from data containing freak wave

고, Peak enhancement facto는 각 1.88, 1.27, 그리고 2.27을 가진다. JONSWAP 스펙트럼이 Modified Pierson-Moskowitz 스펙트럼보다 파랑자료와 더 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 통계변수와 이상지수와의 관계

Table 4에서는 15개의 변수와 이상지수와의 상관관계를 표시하였다. 이상지수와 상관관계가 높은 5개 변수는 큰 순서부터 첨도(Kurtosis, κ), 비대칭도(Skewness, γ), 최대파고(H_{max}), 대역폭(Bandwidth parameter, ν), 유의파첨도(Significant steepness, S_s)

이다. Fig. 7에서는 이상지수와 상관관계가 높은 상위 5개 변수에 대한 Pair plot을 표시하였다. 이 그림에서 첨도, 비대칭도, 최대파고와 이상지수와는 서로 상관관계가 있음을 볼 수 있다. Fig. 8에서는 각종 파고들의 Pair plot을 표시하였다. 최대파고를 제외한 각종 파고들은 서로 상관관계가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서는 각종 파주기에 대한 Pair plot을 표시하였다. 이 그림에서 스펙트럼의 첨두주파수(Peak frequency, T_p)는 주파수분해능 0.01Hz로 평균한 값을 사용했기 때문에 분포가 Categorical data처럼 보이고 있다. 이점을 감안하면 각종 파주기들은 서로 상관관계가 높게 나타나고 있다.

Table 4 Correlations of variables

σ	0.27	0.13	0.99	0.94	1.00	1.00	0.89	0.81	1.00	0.94	0.86	0.40	-0.06	-0.15	0.16
0.27	γ	0.81	0.25	0.09	0.29	0.28	0.50	0.04	0.27	0.05	0.13	0.42	0.62	0.15	0.60
0.13	0.81	κ	0.09	-0.05	0.16	0.13	0.47	0.01	0.14	-0.07	0.04	0.47	0.60	0.15	0.78
0.99	0.25	0.09	H_0	0.96	0.99	1.00	0.87	0.79	0.99	0.93	0.85	0.39	-0.06	-0.15	0.14
0.94	0.09	-0.05	0.96	T_0	0.93	0.95	0.79	0.78	0.94	0.96	0.89	0.36	-0.29	-0.30	0.07
1.00	0.29	0.16	0.99	0.93	$H_{1/3}$	1.00	0.89	0.80	1.00	0.94	0.86	0.40	-0.05	-0.15	0.17
1.00	0.28	0.13	1.00	0.95	1.00	H_s	0.89	0.79	1.00	0.94	0.85	0.40	-0.05	-0.15	0.17
0.89	0.50	0.47	0.87	0.79	0.89	0.89	H_{max}	0.64	0.89	0.78	0.75	0.48	0.09	-0.13	0.58
0.81	0.04	0.01	0.79	0.78	0.80	0.79	0.64	$T_{H_{max}}$	0.81	0.83	0.75	0.36	-0.24	-0.23	0.05
1.00	0.27	0.14	0.99	0.94	1.00	1.00	0.89	0.81	H_s	0.94	0.86	0.40	-0.06	-0.15	0.17
0.94	0.05	-0.07	0.93	0.96	0.94	0.94	0.78	0.83	0.94	T_z	0.90	0.25	-0.39	-0.33	0.03
0.86	0.13	0.04	0.85	0.89	0.86	0.85	0.75	0.75	0.86	0.90	T_p	0.44	-0.33	-0.62	0.11
0.40	0.42	0.47	0.39	0.36	0.40	0.40	0.48	0.36	0.40	0.25	0.44	ν	0.39	-0.26	0.40
-0.06	0.62	0.60	-0.06	-0.29	-0.05	-0.05	0.09	-0.24	-0.06	-0.39	-0.33	0.39	S_s	0.55	0.36
-0.15	0.15	0.15	-0.15	-0.30	-0.15	-0.15	-0.13	-0.23	-0.15	-0.33	-0.62	-0.26	0.55	γ_I	0.02
0.16	0.60	0.78	0.14	0.07	0.17	0.17	0.58	0.05	0.17	0.03	0.11	0.40	0.36	0.02	AI

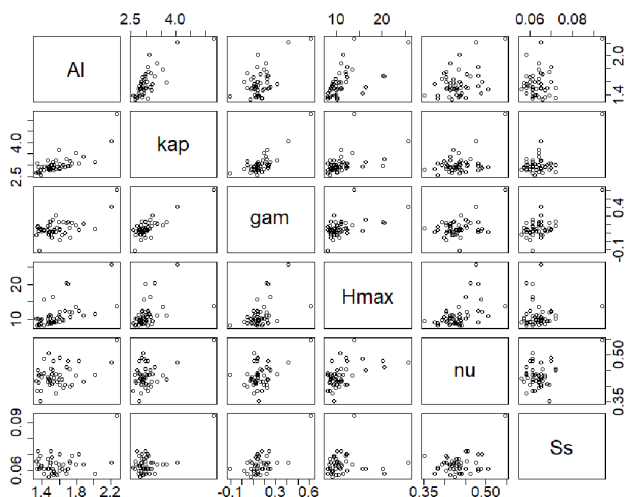


Fig. 7 Pair plots of AI and 5 highly correlated variables with AI

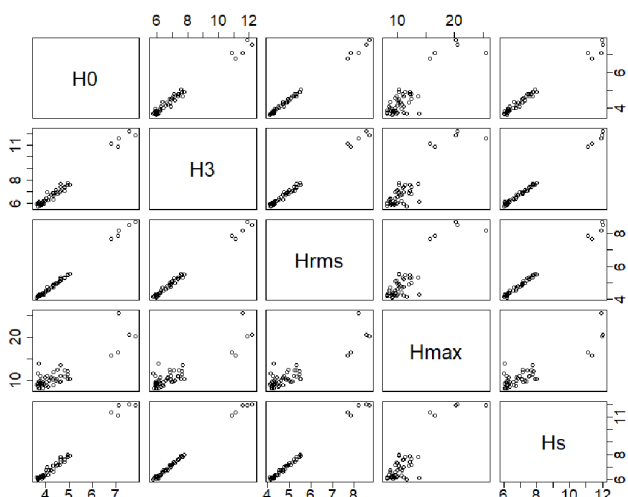


Fig. 8 Pair plots of various wave heights

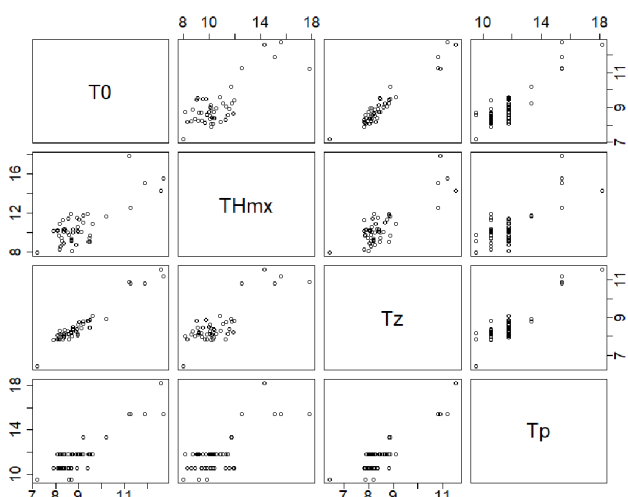


Fig. 9 Pair plots of various wave periods

변수들과 이상지수와의 관계를 심층적으로 분석하기 위해서 주축해석(PCA, Principal coordinate analysis)방법을 사용하기로 한다. 이것은 차원이 높은 데이터를 차원이 낮은 2차원적 표현

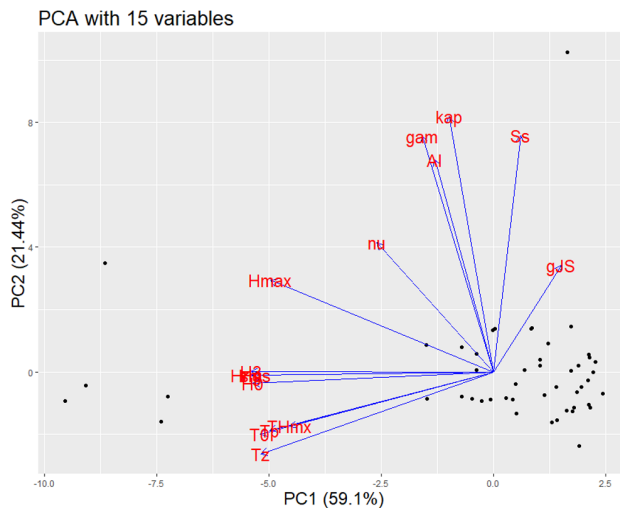


Fig. 10 PCA with 15 variables

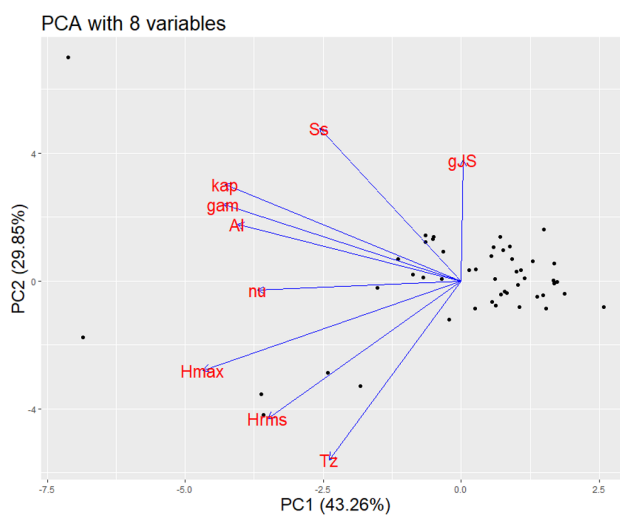


Fig. 11 PCA with 8 variables

을 하고, 1번째 주축은 데이터가 사상변환 행렬의 가장 크기가 큰 고유벡터에 해당하는 고유벡터 방향이 된다. 따라서 이 축은 데이터의 변화가 가장 잘 감지되는 축이 된다. Fig. 10에서는 처음 2개의 주축(Principal coordinate)상에서 48개의 데이터를 점으로 표시하였고, 15개의 변수와 이상지수의 변화 방향과 크기를 나타내는 고유벡터를 표시하였다. 주축해석에는 통계해석 프로그램 R(James et al, 2015)을 사용하였다. 1번 주축에서 전체 변화량 중 59.1%의 변화량을 2번 주축에서 21.44%의 변화량을 감지할 수 있으며, 처음 2개의 주축에서 80.5%의 변화량을 감지할 수 있다. 15개의 변수 중 파고와 관련된 변수는 최대파고를 제외하고는 대부분 비슷한 방향의 고유벡터를 가지고 있으며, 파주기와 관련된 변수들은 서로 비슷한 방향의 고유벡터를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 이상지수의 변화의 방향은 침도 k 와 비대침도 γ 변화와 가장 비슷한 방향의 벡터를 가지는 것을 볼 수 있다. 유의파침도와 대역폭이 그 다음으로 이상지수의 방향과 비슷한 방향을 보이고 있다. 최대파고는 이상지수의 상관관계가 파침도와 대역폭보다는 높지만 변화 방향은 덜 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 11에서는 8개의 변수와 이상지수의 변화

를 나타내는 고유벡터를 표시하였다. 15개의 변수를 사용한 것과 방향이 약간 다르지만 전체적으로 Fig. 10과 비슷한 결과를 보이고 있다. 상관계수와 주축해석을 종합하면 이상지수의 예측에는 첨도 κ 와 비대칭도 γ 가 가장 중요한 변수임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 Draupner platform에서 계측된 48개의 파랑자료를 분석하고, 주요 15개 변수들의 통계치를 계산하여 제시하였다. 그리고 각 변수들의 사분위 값, 박스플롯, 상관계수와 Pair plot을 제시하였다. 최대파고는 이상치(Outlier)가 사분위변위를 초과하는 정도가 가장 심한 것을 볼 수 있었다. 파형의 분포는 정규분포에서 벗어나는 것을 볼 수 있었으며, JONSWAP 스펙트럼이 파랑계측자료와 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. Freak wave를 정의하는 이상지수와 15개의 변수와의 연관성을 살펴보았다. 파형의 첨도와 비대칭도가 이상지수와 가장 상관관계가 높으며, 다음으로 상관관계가 높은 변수는 최대파고, 스펙트럼의 대역폭, 유의파첨도 순이다. 주축해석을 통해 첨도와 비대칭도의 변화율의 방향이 이상지수의 변화율의 방향과 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다. 각종 파고들의 변화율의 방향이 서로 비슷하며, 각종 주기들의 변화율도 방향이 서로 비슷한 것을 볼 수 있었다. 상관계수와 주축해석을 종합하면 Freak wave의 예측에는 첨도 κ 와 비대칭도 γ 가 가장 중요한 변수이다. 이 논문에서 제시한 결과들은 향후 Freak wave 특성 연구와, Freak wave 예측 모델을 구축하고 검증할 수 있는 자료로 쓰일 수 있을 것이다.

후 기

The author would like to thank Dr. Sverre K. Haver of Statoil for kindly providing the Draupner wave data.

References

- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., 2015. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Kalif, C., Pleinovsky, E., Slunyaev, A., 2009. Rogue Waves in the Ocean. Springer, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88419-4>
- Kim D., 2010 An Analysis of Statistical Characteristics of Nonlinear Ocean Waves. Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, 13(2), 112-120.
- Kim, D., 2013a. On the Statistical Characteristics of the New Year Wave. Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(1), 102-108. <https://doi.org/10.5574/KSOE.2013.27.1.102>
- Kim, D., 2013b. The Effect of Sampling Rate on Statistical Properties of Extreme Waves. Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, 16(1), 36-41. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2013.16.1.36>
- Liu, P.C., Pinho, U.F., 2004. Freak Waves-more Frequent than Rare!. Annales Geophysicae, European Geosciences Union, 22(5), 1839-1842.
- Mori, N., Paul, C.L., Yasuda, T., 2002. Analysis of Freak Wave Measurements in the Sea of Japan. Ocean Engineering, 29(11), 1399-1414. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00073-7)
- Mori, N., 2004. Occurrence Probability of a Freak Wave in a Nonlinear Wave Field. Ocean Engineering, 31(2), 165-175. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(03\)00119-7](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00119-7)
- National Ocean Service, 2019. What is a Rogue Wave? <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/roguewaves.html>> [Accessed 21 Mar. 2019].
- Stansell, P., 2004. Distributions of Extreme Wave, Crest and Trough Heights Measured in the North Sea. Ocean Engineering, 32(8-9), 1015-1036. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.10.016>