

波群特性 解析을 위한 理論的 考察

李 哲 應*, 李 吉 成*, 片 宗 根**

1. 서 론

많은 관측자료에서 나타나듯이 심해에서 발생한 파랑은 일반적으로 파군화되는 경향을 가지고 있다. 이와같은 파군과 관련된 많은 공학적 문제들이 제기되기 시작하면서 관심이 높아지고 있다. 따라서 파군의 특성을 해석하기 위한 여러가지 방법이 제시되었으나 파랑의 불규칙성으로 인하여 그에대한 체계적인 이론 정립이 이루어지지 않은 상태에서 몇개의 통계적 해석방법이 사용되어지고 있다. 파군이 여러가지 해양 구조물에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Tab.1에 현재까지의 관련 연구사례를 정리하였다. Tab.1에 의하면 많은 공학적 문제들이 파군과 밀접하게 관련되어 있다는 것을 알 수 있다.

Goda(1970)가 불규칙 파랑속에 내재된 파군의 특성을 해석하기 위하여 파랑의 연이음(run length)개념과 스펙트럼 침투계수(spectral peakedness parameter)를 사용하는 간단한 해석방법을 제시한후로 Ewing(1973), Elgar 등(1984), 그리고 Medina와 Hudspeth(1990) 등이 이 개념을 사용하여 해석하였다. 반면 Funke와 Mansard(1980)는 파랑이 어떻게 파군화 되는지를 정의하기 위하여 시간에 따른 에너지 변화를 나타내는 SIWEH(smoothed instantaneous wave energy history)와 파군의 발달정도를 나타내는 파군계수(groupiness factor)를 도입하였으며, Mase와 Iwagaki(1986) 등에 의하여 현장 관측자료를 해석하는데 이용되었다. 또한 Bitner-Gregersen과 Gran(1983)은 Hilbert변환을 이용하는 해석방법을 제시하였는데, 이 방법은 스펙트럼을 이용하지 않고 관측자료로부터 직접 에너지 전달과정을 구할 수 있는 방법이다. 이와같은 Hilbert변환법을 이용하여 Sobey와 Liang(1986), Hudspeth와 Medina(1988)등이 파군특성을 해석하였다. 이상과 같이 파군의 특성을 해석하는 대부분의 방법들이 스펙트럼이나 파고분포 등과 같은 파랑의 통계적 특성에만 주로 의존하고 있다.

본 연구에서는 해양에서 관측된 파랑의 파군성과 관련된 여러 특징들을 해석할 수 있는 방법들로 파랑의 연이음 개념과 Hilbert변환 기법을 간단히 소개하고, 실제 해양에서 관측된 파랑의 파군특성은 Funke와 Mansard(1980)가 제시한 SIWEH개념을 사용하여 해석하였다.

* 서울大學敎 土木工學科 (Dept. of Civil Eng., Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

** 明知大學敎 土木工學科 (Dept. of Civil Eng., Myong Ji University, Seoul, 120-728, Korea)

Table 1 Coastal phenomenon and engineering problems associated with wave group (Medina and Hudspeth, 1990)

Authors	Coastal phenomenon and engineering problems										
	Set up/down Surf zone dynamics Surf-beat	Harbor resonance	Oscillation and positioning of vessel. Forces on mooring lines	Damages and capsizing of ships	Rubble mound stability	Design of marine structures	Physical modeling	Design wave uncertainties	Internal waves		
Tucker(1950)	○	○									
Ewing(1973)				○							
Goda(1976)				○							
Bowers(1977)	○	○									
Johnson et al.(1978)		○	○		○						
Burcharth(1979)						○					
Kimura(1980)			○								
Rye(1982)	○	○	○	○	○						
Sand(1982a, b)	○	○	○		○	○	○				
Mase & Iwagaki(1986)	○		○		○						
Medina & Hudspeth(1987)								○			
Agnon & Mei(1988)										○	
Bartjes(1988)	○										
Bowers(1988)	○	○	○				○				

2. 해석 방법

2.1 파랑의 연이음 개념

Goda(1970)에 의하여 처음 도입된 개념으로 통계적 방법에 의하여 파군의 특성을 해석하는 방법이다. 방법자체가 비교적 간단하여 후에 많은 연구자들이 파군의 특성을 해석하는데 사용하였다. 이 파랑의 연이음 개념은 연속적인 불규칙 파랑들이 서로 상관관계를 갖지 않는다는 가정에 기초한다. 시간에 따른 수면변위, η 를 상향 통과법(zero-up-crossing)이나 하향 통과법(zero-down-crossing)으로 파고, H로 변환시킨 뒤, 특별히 정의된 파고 h ($\bar{H}, H_{1/3}, H_{rms}$ 등)보다 큰 파고의 연속적인 수를 파랑의 연이음, ${}_1L_h$ 라 정의하였다. 또한 ${}_2L_h$ 는 지정된 파고 h 를 처음 통과하는 시간과 다음번 다시 통과하는 시간 사이의 전 파고수로 정의하였다. 연속적인 불규칙 파랑속에서 파랑의 연이음을 결정하는 상향 통과법에 의한 자세한 해석방법을 Fig.1에 설명하였다. 즉, ${}_1L_h$ 가 크다는 것은 불규칙 파랑이 형성하는 파군의 크기가 크다는 것을 의미하며, ${}_2L_h$ 가 크다는 것은 파군과 파군사이의 거리가 길다는 것을 의미한다. 그러므로 ${}_1L_h$ 와 ${}_2L_h$ 가 모두 큰 경우에는 파군의 크기는 크지만 그 발생 빈도가 작게된다, 따라서 해양에서 관측된 불규칙 파랑의 파군특성을 파랑의 연이음 개념을 이용하여 해석할 수 있다. 그러나 파랑의 연이음 개념에 의한 해석방법이 파고의 관점에서만 해석한다는 문제점도 내포하고 있다.

2.2 Hilbert 변환법

Bitner-Gregersen과 Gran(1983)은 에너지 스펙트럼을 이용하지 않고 파군의 특성을 해석하는 Hilbert변환법을 제시하였다. 이들은 심해의 불규칙 파랑이 한쪽 방향으로만 전달된다고 가정하여 수면변위, $\eta(x,t)$ 를 다음 식(1)과 같이 표현하였다.

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \epsilon_n) \quad (1)$$

여기서 a_n 은 진폭, k_n 은 파수, σ_n 은 주파수 그리고 ϵ_n 은 위상을 나타낸다. 이때 Hilbert변환을 이용하여 식(1)의 좌변을 변환하면 다음 식(2)와 같다.

$$\hat{\eta}(x,t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta(x,\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

여기서 τ 는 지연시간이다.

에너지 스펙트럼이 시간영역의 값을 주파수 영역으로 변환시켜 구하는 값인데 반하

여, Hilbert변환은 식(2)에 나타낸것 처럼 시간영역에 대한 값을 다시 시간영역의 값으로 변환시켜주는 특성을 가지고 있다. 즉, 식(2)는 응답함수(response function)를 갖는 선형 filter와의 convolution에 해당되는 것이다.

식(1)과 식(2)를 연결시켜 줄 수 있는 복소함수, z 를 다음식(3)과 같이 도입하면,

$$z(x, t) = \eta(x, t) + i \hat{\eta}(x, t) \quad (3)$$

식(3)을 다시 극형식으로 나타내면, 아래 식(4)와 같다.

$$z(x, t) = A(x, t) \exp[i\{\psi(x, t) - \sigma_0 t\}] \quad (4)$$

$$A(x, t) = [\eta^2(x, t) + \hat{\eta}^2(x, t)]^{1/2}$$

$$\psi(x, t) = \sigma_0 t + \tan^{-1}[\eta(x, t) / \hat{\eta}(x, t)]$$

여기서 σ_0 는 임의의 주파수이다. 그러므로 식(4)로부터 파군의 특성을 나타내는 포락함수, $A(x, t)$ 를 다음 식(5)로부터 구할 수 있다. 즉, 식(1)과 (2)로부터

$$\eta^2(x, t) = \sum_m \sum_n a_{m,n} \cos(k_m x - \sigma_m t + \epsilon_m) \cos(k_n x - \sigma_n t + \epsilon_n) \quad (5-1)$$

$$\hat{\eta}^2(x, t) = \sum_m \sum_n a_{m,n} \sin(k_m x - \sigma_m t + \epsilon_m) \sin(k_n x - \sigma_n t + \epsilon_n) \quad (5-2)$$

$$A^2(x, t) = \sum_m \sum_n a_{m,n} \cos[(k_m - k_n)x - (\sigma_m - \sigma_n)t + (\epsilon_m - \epsilon_n)] \quad (5-3)$$

마찬가지로 시간에 따른 운동변화나 에너지 변화를 식(1)~(4)를 사용하여 구할 수 있다.

이상과 같은 과정을 거치는 Hilbert변환은 파랑자료로부터 에너지 스펙트럼을 구하지 않고도 파군과 관련된 여러 국부적인 성질을 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 방법에 의하여 실제 해양에서 관측된 자료를 해석하는 대신 간단한 예제를 Fig.2에 나타 내었다.

2.3 SIWEH 개념

SIWEH는 어느한 지점에서의 시간에 따른 수면변동을 시간에 따른 에너지 변동으로 변환시켜 나타낸 것이다. 즉, 스펙트럼의 침두 주파수(f_p)에 해당하는 주기상에서 수면변위를 제공하여 평균한 다음, 시간에 따른 에너지, 분포를 계산하는 방법으로 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-T_p/2}^{T_p/2} \eta^2(t+\tau) d\tau \quad (6)$$

여기서 $T_p = 1/f_p$ 이다. 이 개념은 다른 연구자들이 이용한 포락함수(envelope function)와 대응되는 것으로, 포락함수가 매우 거친 경우에는 불규칙 파랑속에 내재된 파군의 특성을 명확하게 파악하기 힘들다. 그러나 SIWEH를 사용하면 시간에 따른 파군의 특성 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 식(6)에 임의의 가중치, Q_k 를 주어 moving average하면, 다음 식(7)을 얻을 수 있다.

$$E(t)^* = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q_k(\tau) d\tau \quad (7)$$

여기서 window 함수, $Q_k(\tau)$ 는 여러가지 함수를 사용할 수 있으나 Funke와 Mansard(1980)는 아래 식(8)과 같은 Bartlett window를 사용하였다.

$$Q_k(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p, & -T_p \leq \tau \leq T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

따라서 식(8)을 식(7)에 대입하면, 다음 식(9)를 얻을 수 있다.

$$E(t)^* = \frac{1}{T_p} \int_{-T_p}^{T_p} \eta^2(t+\tau) (1-|\tau|/T_p) d\tau, \quad T_p \leq t \leq T_n - T_p \quad (9)$$

여기서 T_n 은 관측자료의 전 시간이다. 이상과 같이 시간에 따른 에너지 분포가 얼마나 균일하고, 얼마나 큰지를 나타낼 수 있는 SIWEH를 계산하였다. 이들은 또한 파군의 발달 정도를 나타낼 수 있는 파군계수, GF(groupiness factor)를 다음 식(10)과 같이 도입하였다.

$$GF = \left[\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \{E(t) - \bar{E}\}^2 dt \right]^{1/2} / \bar{E} \quad (10)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} E(t) dt$$

식(10)은 SIWEH의 표준편차를 나타낸것으로 SIWEH의 변화계수이다. 만약 GF가 0이면 규칙파랑을 의미하게 된다. 따라서 파군계수가 작을수록 일정한 진폭을 가지는 규칙파랑에 가까워 진다.

3. 규칙파군의 특성

2.3절에서 정의한 SIWEH와 파군계수에 의한 파군의 특성을 보다 더 잘 이해하기

위하여 선형이론에 의하여 임의로 발생시킨 규칙파군에 대하여 그 특성을 검토한다.

Fig.3(b)에 나타낸 규칙파군은 파군성을 명확히 나타내기 위하여 임의로 선택된 두 개의 주파수 $f_1=0.80(\text{Hz})$, $f_2=0.76(\text{Hz})$ 와 진폭 $a_1=a_2=0.4\text{m}$ 에 대한 것으로, 파군의 형태는 고파군과 고파군 사이의 간격이 길어 고파군이 비교적 긴 시간동안 유지되고 있다. 시간에 따른 에너지 변화를 나타낸 Fig.3(a)의 SIWEH도 고파군의 파군특성에 따라 비교적 완만한 변화를 보여주고 있으며 파군계수가 0.68로 기대하였던것 처럼 파군성이 강하게 나타나고 있다. 파군의 발달정도를 나타내는 파군계수는 고파군의 유지시간과 고파군사이의 시간 간격이 길 수록 크게 나타난다. 또한 본 경우와 같이 수심이 일정한 경우에는 SIWEH의 크기가 고파군의 크기에 비례하여 나타나게 된다.

4. 불규칙 파군의 특성

3절에서 살펴본 규칙파군의 특성해석에 사용되었던 SIWEH와 파군계수를 이용하여 다음의 불규칙 파군의 특성을 해석한다.

Fig.4(b)는 규칙파군을 선형중첩하여 얻은 불규칙 파군이다. 이에대한 SIWEH의 변화를 나타낸 Fig.4(a)를 살펴보면, 어느 하나의 큰 진폭변화에 대한 SIWEH의 변화도 크게 나타나고 있다. 이와같은 이유는 규칙파군의 고파군의 변화는 일정한 비율로 증가하고 감소하나 불규칙 파군에서는 매우 복잡하게 고파군과 저파군이 함께 발생하기 때문이다. 즉 규칙파군의 저파군에서는 에너지가 거의 없는 대신에 불규칙 파군의 저파군에서는 일정 에너지를 보유하고 있다가 순간적으로 큰 진폭의 변화가 발생하면 그 영향이 함께 나타나는것으로 생각된다. 또한 Fig.4에 대한 파군계수는 0.39로 앞의 규칙파군과 비교하여 파군의 활동이 많이 둔화되었다. 이는 파랑이 일정한 비율의 크기로 계속 발달하기 때문에 고파군과 저파군사이의 차이가 크지 않다는 것을 의미한다. Fig.5(b)는 1991년 8월 26일 해양연구소에서 wave rider를 이용, 동해향에서 수십 km떨어진 심해에서 측정한 현장 관측자료로 Fig.5(b)의 수면변위만 가지고는 불규칙 파군의 파군성이 어느정도인지 파악하기 어려우나 Fig.5(a)의 SIWEH를 살펴보면 고파군이 강하게 나타나는 시간대를 쉽게 알 수 있다. 즉 대략 40sec~100sec 사이에 큰 고파군이 세번 형성되고 있음을 알 수 있다. 따라서 앞의 Fig.4에 비하여 파군계수가 0.47로 파군성이 더 크게 나타나고 있다.

5. 참고 문헌

Bitner-Gregersen, E.M. and S.Gran, "Local properties of sea waves derived from a wave record", Applied Ocean Res., Vol.5, No.4, pp.210-214, 1983.

Elgar, S., R.T. Guza and R.J. Seymour, "Groups of waves in shallow water", J. of Geophy. Res., Vol.87, No.C3, pp.3623-3634, 1984.

Ewing, J.A., "Mean length of runs of high waves", J. of Geophy. Res., Vol.78, No.12, pp.1933-1936, 1973.

Funke, E.R. and E.P.D. Mansard, "On the synthesis of realistic sea states", Proc. 17th ICCE, pp.2974-2991, 1980.

Goda, Y., Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, Rep. of Port Harbor Res. Ins., Vol.9, No.3, 1970.

Hudspeth, R.T. and J.R. Medina, "Wave groups analyses by Hilbert transform", Proc. 21st ICCE, pp.884-898, 1988.

Mase, H. and Y. Iwagaki, "Wave groups analysis of natural wind waves based on modulational instability theory", Coastal Eng., Vol.10, pp.341-354, 1986.

Medina, J.R. and R.T. Hudspeth, "A review of the analyses of ocean wave groups", Coastal Eng., Vol.14, pp.515-542, 1990.

Sobey, R.J. and H-B. Liang, "Complex envelope identification of wave groups", Proc. 20th ICCE, pp.753-765, 1986.

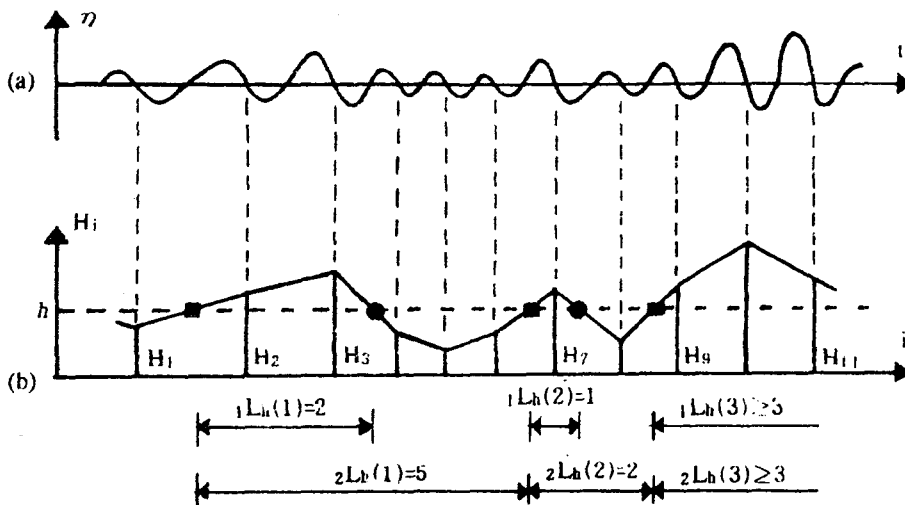


Fig. 1 Representation of wave record and run length

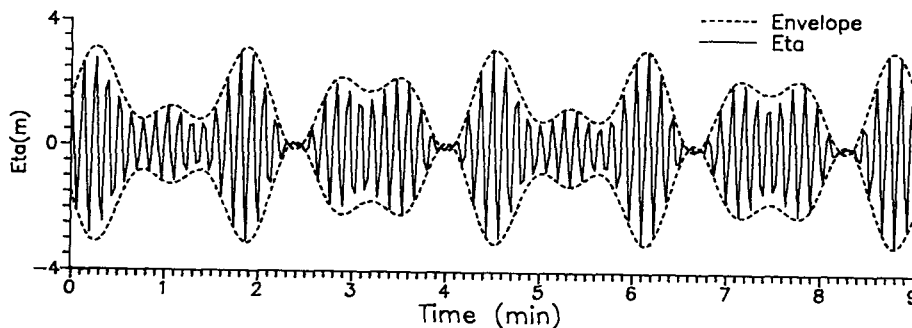


Fig. 2 Envelope function of wave group by Hilbert transform

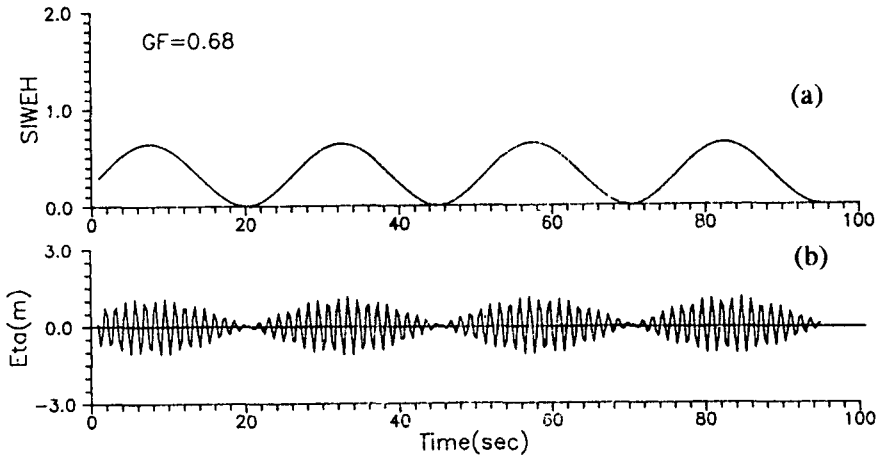


Fig. 3 Regular wave group and SIWEH

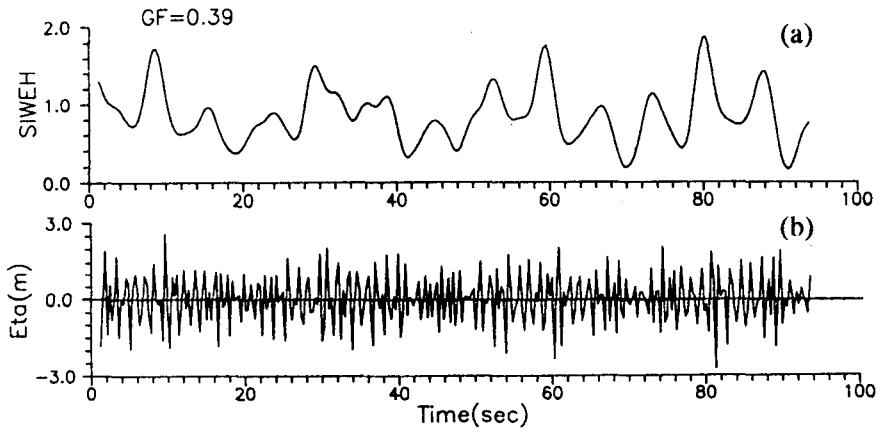


Fig. 4 Irregular wave group and SIWEH(case 1)

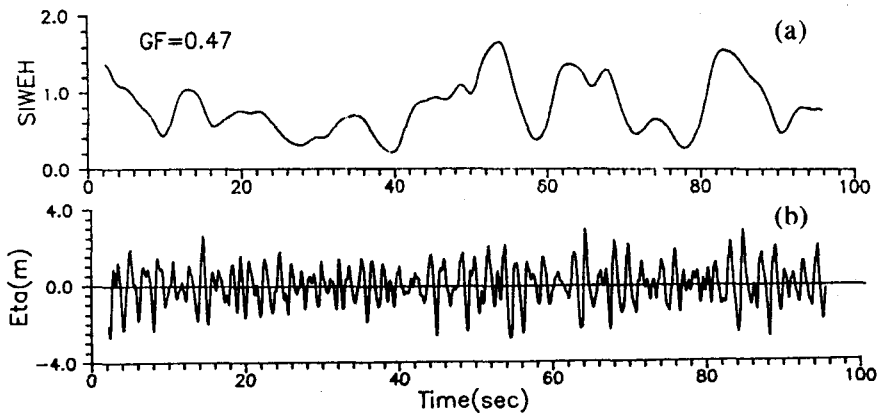


Fig. 5 Irregular wave group and SIWEH(case 2)