

## 不規則 波群의 特性解析

### Analysis on the Characteristics of the Irregular Wave Group

李哲應\* · 李吉成\*

Cheol Eung Lee\* and Kil Seong Lee\*

**要 旨** : 不規則 波浪이 갖는 중요한 특성 중의 하나인 波群特性을 波浪 연이음概念과 에너지 履歷概念을 이용하여 해석하였다. 일정한 週期和 波高를 가지고 임의로 발생시킨 規則波群에 적용하여 波群에 대한 기초적 특성을 파악한 후, 東海岸에서 관측된 불규칙 파랑의 波群特性을 해석하였다. 不規則 波浪의 波群特性을 정확히 해석하기 위해서는 기존의 스펙트럼 解析뿐만 아니라 波浪 연이음概念 및 에너지 履歷概念을 함께 검토하여야 한다.

**Abstract** □ Wave grouping, which is one of the important characteristics of the irregular wave, is analyzed by the run-length theory and the SIWEH(Smoothed Instantaneous Wave Energy History) theory. After studying the basic properties of the regular wave group synthesized using the harmonic waves, the characteristics of the irregular wave group observed at the East sea is analyzed. It is concluded that for accurate analysis of irregular wave grouping, concepts of run length and SIWEH as well as spectrum analysis should be examined.

#### 1. 緒 論

심해에서 발생한 不規則 波浪이 갖는 중요한 특성 중의 하나가 波群現象이다. 많은 관측자료에서 나타나듯이 불규칙 파랑은 일반적으로 波群化되는 경향을 가지고 있다. 이와 같은 波群과 관련된 많은 공학적 문제들이 제기되기 시작하면서 최근에 관심이 높아지고 있다. 波群特性을 해석하기 위한 여러가지 방법이 제시되었으나 波浪의 不規則性으로 인하여 그에 대한 체계적인 理論定立이 이루어지지 않은 상태에서 몇개의 統計的 解析方法이 사용되어지고 있다.

Goda(1970)는 파군특성에 대한 기초적 연구로 불규칙 파랑속에 내재된 파군의 특성을 해석하기 위하여 波浪의 연이음(run-length)개념과 스펙트럼 尖頭係數(spectral peakedness parameter)를 사용하는 간단한 解析方法을 제시하였다. 후에 Nolte와 Hsu(1972), Ewing(1973)이 포락함수(envelope function)를 이용하는 파랑 연이음 解析法을 제시하였다. 특히 Ewing(1973)은 실제 파랑과 유사하게 스펙트럼의 폭이 좁은

경우에 대하여 파랑의 연이음을 연구하였다. 반면 Funke와 Mansard(1980)는 파랑이 어떻게 波群化 되는지를 정의하기 위하여 시간에 따른 에너지 변화를 나타내는 에너지 履歷(Smoothed Instantaneous Wave Energy History : SIWEH)概念과 파군의 발달 정도를 나타내는 波群係數(Groupiness Factor : GF)를 도입하였다. Kimura(1980)는 파랑 연이음의 確率密度函數를 예측하기 위하여 Markov chain을 사용하였으며, Battjes와 Vledder(1984)가 실측자료를 이용하여 Kimura(1980)이론의 효율성을 언급하였다. 또한 Burcharth(1981)는 해양에서 관측된 스펙트럼과 동일한 스펙트럼을 가지고 실험실내에서 파군을 발생시킨 후 두 결과를 비교하였으며, Rye(1982)는 이전까지의 연구된 모든 방법을 조사한 후, 파군과 관련된 모든 중요한 특징을 分散 스펙트럼으로부터 구할 수 있다고 주장하였다. Bitner-Gregersen과 Gran(1983)은 Hilbert 變換을 이용하는 해석방법을 제시하였는데, 이 방법은 스펙트럼을 이용하지 않고 觀測資料로부터 직접 에너지 傳達過程을 구할 수 있는 방

\*서울대학교 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

법이다. Mase 等(1983)은 동일 스펙트럼하에서 다른 여러 波群形狀에 대한 연구를 Funke와 Mansard(1980)의 SIWEH 이론을 사용하여 해석하였다. 이들은 또 현장 관측자료를 실험자료와 비교하였다. Thompson과 Seelig(1984)는 많은 현장 관측자료와 실험자료에 나타나는 波群特性을 해석하기 위하여 LVTS (Local Variance Time Series) 概念을 도입하였는데, 이것은 시간에 따른 파랑관측 자료에서 임의 시간의 분산이 관측자료 전체의 분산보다 클때 그 파랑을 파군으로 정의하는 개념으로 Funke와 Mansard(1980)의 SIWEH와 유사한 개념이다. Elgar 等(1984, 1985)은 기존의 파랑 연이음개념이 스펙트럼의 폭과 밀접한 관계가 있음을 지적하였고, Mase와 Iwagaki(1984)는 관찰된 波群의 變化特性을 Kimura(1980)의 이론으로 계산된 결과와 비교하였다. Sobey와 Liang(1986)은 Hilbert 變換을 이용하여 波群의 포락함수와 위상특성을 연구하였다. Marson(1988)은 방대한 양의 관측자료를 가지고 여러 연구자들이 제안한 파랑 연이음 개념 및 SIWEH 이론을 이용하여 파군에 대한 특성을 연구하였다. 또한 Hudspeth와 Medina(1988)는 Hilbert 변환을 이용하여 파군의 특성을 나타낼 수 있는 파고제곱함수(squared wave height function)와 局部周波數函數(local frequency function)를 도입하였다. 이들은 또 Hilbert 變換에 의하여 계산된 파고제곱

함수를 Funke와 Mansard(1980)의 SIWEH, Goda (1970)의 波浪 연이음과 비교하였다.

이상의 많은 연구자들이 파군특성을 해석하면서 제시된 결과를 기초로 海洋構造物에 미치는 파군의 영향을 살펴보기 위하여 Table 1에 현재까지의 關聯 研究事例를 정리하였다. Table 1에 의하면 많은 공학적 문제들이 波群과 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다. 특히 防波堤의 安定性, 港灣의 振動現象이나 船舶의 長週期 動搖는 파군과 가깝게 연관되어있기 때문에 波群에 의한 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실측자료를 기초로 불규칙 파랑의 波群特性을 해석하여 波群效果를 고려할 수 있는 기초적 자료로 이용하고자 한다.

## 2. 波浪의 연이음概念과 스펙트럼 尖頭係數

Goda(1970)에 의하여 처음 도입된 개념으로 統計的方法에 의하여 波群의 特性을 해석하는 방법이다. 방법 자체가 비교적 간단하여 서론에서 살펴본 바와 같이 후에 많은 研究者들이 波群의 特性을 해석하는데 사용하였다. 이와 같은 파랑의 연이음개념은 연속적인 不規則 波浪들이 서로 相關關係를 갖지 않는다는 Bernoulli process의 기본적인 가정에 기초한다(Fig. 1). 시간, t에 따른 수면변위,  $\eta$ 를 上向通過法(zero-up-

Table 1. Coastal Phenomenon and Engineering Problems associated with wave Groups (Medina and Hudspeth, 1990)

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

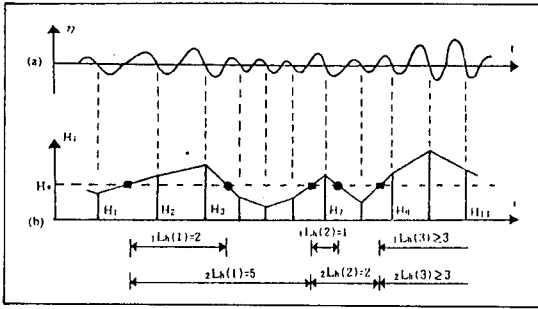


Fig. 1. Representation of Run-Length and Total Run-Length.

crossing)이나 下向通過法(zero-down-crossing)으로 파고,  $H_i$ 의 변화로 변환시킨뒤, 특별히 정의된 波高 (threshold wave height),  $H \cdot (H_{1/10}, H_{1/3}, H_{rms}$  등)보다 큰 파고의 연속적인 수를 波浪의 연이음(run-length),  ${}_1L_h$ 라 정의하였다. 또한 全波浪의 연이음(total run-length),  ${}_2L_h$ 는 지정된 파고  $H$ 를 처음 통과하는 시간과 다음번 다시 통과하는 시간 사이의 全波高數로 정의 하였다.  ${}_1L_h$ 가 크다는 것은 不規則 波浪이 형성하는 波群의 크기가 크다는 것을 의미하며,  ${}_2L_h$ 가 크다는 것은 波群과 波群사이에  $H$ 를 넘지않는 작은 파고가 많다는 것을 나타내므로  ${}_1L_h$ 와  ${}_2L_h$ 가 모두 큰 경우에는  $H$ 를 넘는 파고에 의하여 형성된 波群의 크기는 크지만, 그와 같은 파군이 다시 나타날 가능성이 작게 된다. 따라서 해양에서 관측된 불규칙 파랑의 波群 特性을 파랑의 연이음개념을 이용하여 해석할 수 있다. 그러나 파랑의 연이음 개념에 의한 解析方法이 파고의 관점에서만 해석한다는 문제점도 내포하고 있다. 本 研究에서는 파랑의 연이음개념을 처음으로 도입한 Goda(1970)의 確率論의 方法과 Ewing(1973)의 포락함수 개념을 이용하는 방법에 대하여 파랑 연이음의 근본적인 특성에 대하여 해석하였다.

앞에서 언급하였듯이 Goda(1970)의 波浪의 연이음 개념은 연속적인 不規則 波浪들이 서로 相關關係를 갖지 않는다는 가정하에서 파랑 연이음의 확률분포를 계산 할 수 있다. 먼저 파고  $H_i$ 가 특별히 정의된 波高,  $H$ 보다 클( $H_i > H$ ) 確率을  $p_o$ , 작을 確率을  $q_o (= 1 - p_o)$ 라 할때

$$P_r({}_1L_h = i) = p_o^{i-1} q_o; \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$P_r({}_2L_h = i) = (q_o)(p_o q_o^{i-2}) + (p_o q_o)(p_o q_o^{i-3}) + \dots + (p_o^{i-2} q_o)(p_o)$$

$$= \frac{p_o q_o}{p_o - q_o} (p_o^{i-1} - q_o^{i-1}); \quad i = 2, 3, \dots \quad (2)$$

또한 波浪 연이음,  ${}_1L_h$ 와 全波浪 연이음,  ${}_2L_h$ 의 기대값 및 분산은 각각 다음 式 (3), (4), (5) 그리고 (6)과 같이 된다.

$${}_1L_h = \frac{1}{q_o} \quad (3)$$

$$\sigma^2({}_1L_h) = \frac{p_o}{q_o^2} \quad (4)$$

$${}_2L_h = \frac{1}{p_o} + \frac{1}{q_o} \quad (5)$$

$$\sigma^2({}_2L_h) = \frac{p_o}{q_o^2} + \frac{q_o}{p_o^2} \quad (6)$$

관측자료의 스펙트럼이 Rayleigh분포를 한다고 가정 하면  $p_o = e^{-k^2/2}$ ,  $q_o = 1 - e^{-k^2/2}$ 와 같이 정의된다. 여기서  $k = H \cdot \sqrt{m_o}$ ,  $m_o = \int_0^\infty S(f) df$ 이다. 많은 연구자들에 의하여 이와 같은 確率概念으로 해석한 파랑 연이음의 분포가 관측치로부터 얻은 자료보다 작게 나타난다고 지적되었는데 이는 앞에서 언급한것 처럼 波浪사이의 相關關係가 없다는 가정에 기인한 것이다. 또한 해석하는데 있어서  $H$ 를 어떻게 정의하느냐에 따라서, 즉 研究의 目的 및 對象에 따라  ${}_1L_h$ 와  ${}_2L_h$ 가 변할 수 있어 이에 대한 分析이 先行되어야 한다.

本 研究에서는 관측된 불규칙 파랑자료를 波群特性 解析과 관련지어 분석한다는 의미에서 동해안의 동해항 입구에서 측정된 觀測資料를 해석하였다(Fig. 13 (b)). 먼저 Fig. 2(a)는  $H$ 가  $H_{1/10}(2.08m)$ 에 대한 결과로서 실선이 波浪 연이음의 確率分布이고 점선이 全波浪 연이음의 確率分布이다. Fig. 2(a)에 의하면 파랑의 연이음수가 작을 수록 確率이 크지만 波浪의 연이음수가 약 4이상일 경우에는 確率이 영에 가까워지고 있어 파랑의 연이음수가 4이상 발생되지 않음을 쉽게 알 수 있다. 또한 全波浪 연이음의 確率分布는 전파랑의 연이음 수가 커지면 확률이 커지다가 일정수를 지나면서 점차 감소하고 있다. 이와 같은 경향은  $H$ 를  $H_{1/3}(1.35m)$ ,  $H_{rms}(1.10m)$ 로 하여 계산한 Fig. 2(b), Fig. 2(c)의 結果에서도 동일하게 나타난다. 반면 Fig. 3에 나타난  $H$ 에 따른 波浪 연이음의 確率分布를 살펴보면  $H$ 의 값이 작아짐에 따라 ( $H_{1/10} > H_{1/3}$

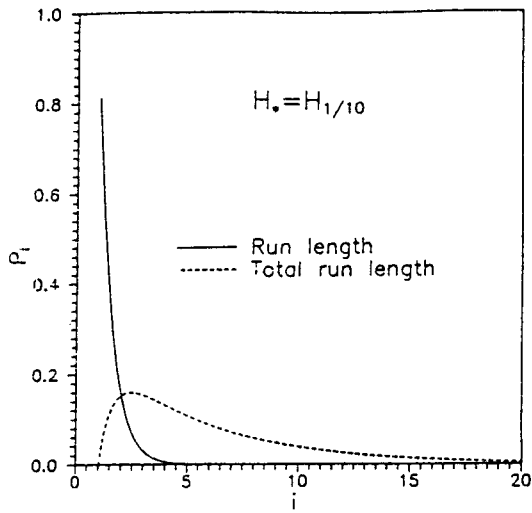


Fig. 2(a). Probability Distribution of Run-Length and Total Run-Length by Goda's Theory ( $H_s = H_{1/10}$ ).

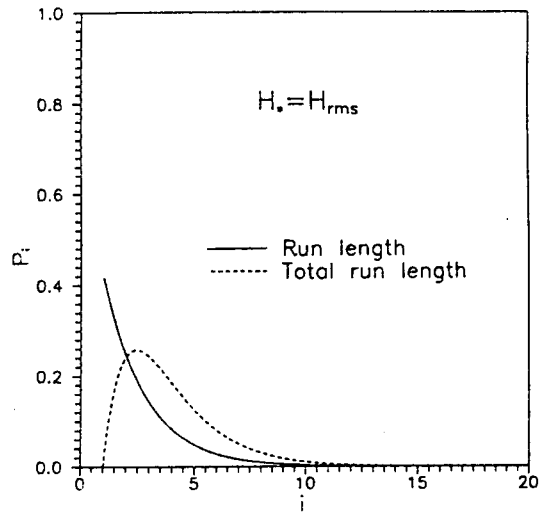


Fig. 2(c). Probability Distribution of Run-Length and Total Run-Length by Goda's Theory ( $H_s = H_{rms}$ ).

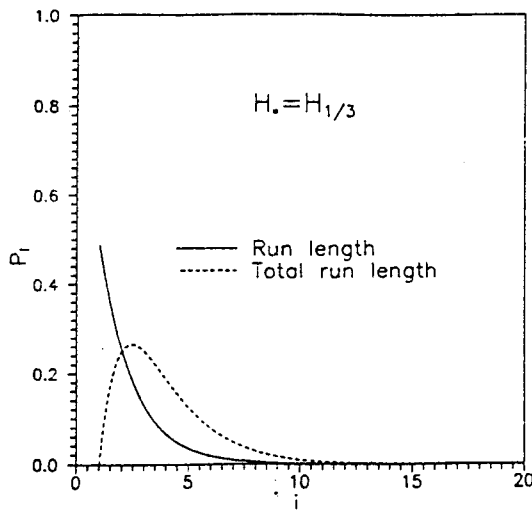


Fig. 2(b). Probability Distribution of Run-Length and Total Run-Length by Goda's Theory ( $H_s = H_{1/3}$ ).

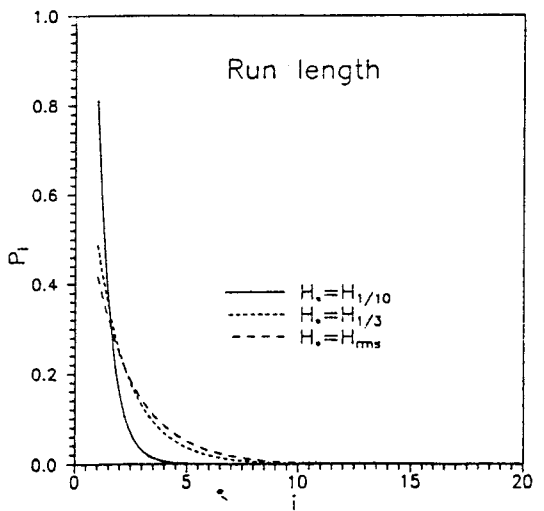


Fig. 3. Probability Distribution of Run-Length with Various Threshold Wave Height  $H_s$ .

$>H_{rms}$ ) 波浪의 연이음 수가 크게 나타나고 있다. 이것은 Fig. 1에서 설명한 기본개념으로부터 쉽게 알 수 있다. 그러나 Fig. 4의 全波浪 연이음의 確率分布에서는  $H_s$  값이 작아짐에 따라 全波浪 연이음의 確率 커지다가 작게 나타나고 있는데 이와 같은 사실도 Fig. 1에 의하여 쉽게 입증된다.

그러나 Goda(1970)의 波浪 연이음에 대한 확률론적 개념에 의한 방법은 앞에서 언급한 바와 같이 불규칙

파랑사이의 相關關係가 없다는 가정에 기초한다. 이것은 넓은 폭(large bandwidth)을 가지는 스펙트럼으로 파랑을 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 실제로 관측된 파랑의 스펙트럼은 비교적 좁은 폭(narrow bandwidth)을 갖는다. 따라서 Ewing(1973)은 Goda(1970)의 이론으로 계산할 수 없는 스펙트럼의 폭이 좁은 경우에 대한 波浪 연이음과 全波浪 연이음의 平均值를 계산할 수 있는 이론을 제시하였다.

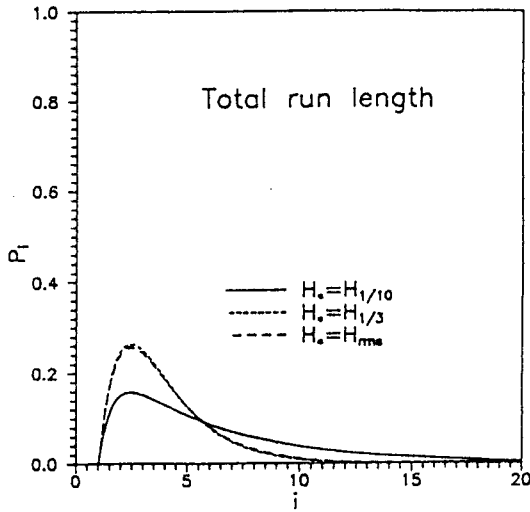


Fig. 4. Probability Distribution of Total Run-Length with Various Threshold Wave Height  $H$ .

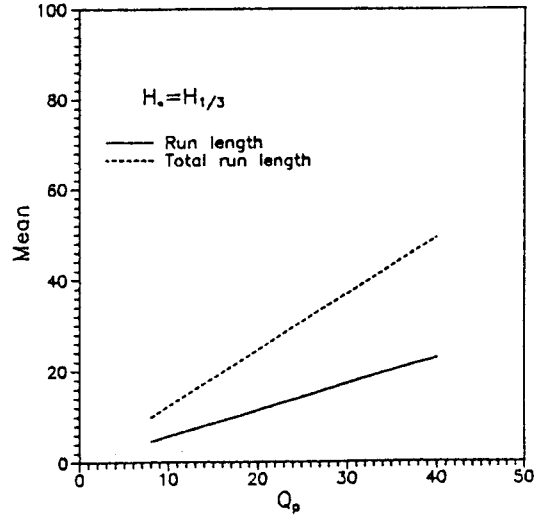


Fig. 5(b). Means of Run-Length and Total Run-Length as a Function of Spectral Peakedness Parameter  $rQ_p$  ( $H_s = H_{1/3}$ ).

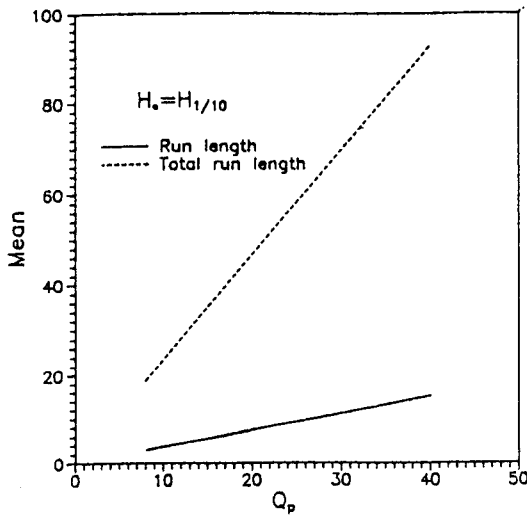


Fig. 5(a). Means of Run-Length and Total Run-Length as a Function of Spectral Peakedness Parameter  $Q_p$  ( $H_s = H_{1/10}$ ).

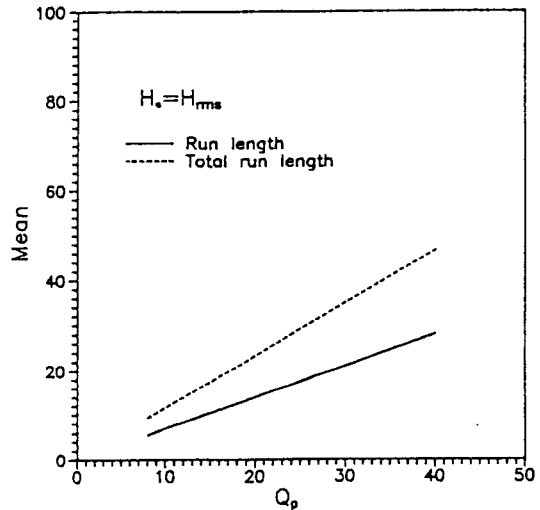


Fig. 5(c). Means of Run-Length and Total Run-Length as a Function of Spectral Peakedness Parameter  $rQ_p$  ( $H_s = H_{rms}$ ).

Ewing(1973)의 理論은 포락함수를 이용하는 방법으로 波浪 연이음과 全波浪 연이음의 기대값은 다음 式 (7), (8)과 같다.

$$\overline{L_h} = \frac{1}{H_s} \sqrt{\frac{m_0 m_2}{2\pi \mu_2}} \quad (7)$$

$$\overline{L_h} = \frac{1}{H_s} \sqrt{\frac{m_0 m_2}{2\pi \mu_2}} e^{H_s^2/2m_0} \quad (8)$$

여기서  $m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$   
 $\mu_2 = (2\pi)^2 \int_0^\infty (f - f_0)^2 S(f) df$

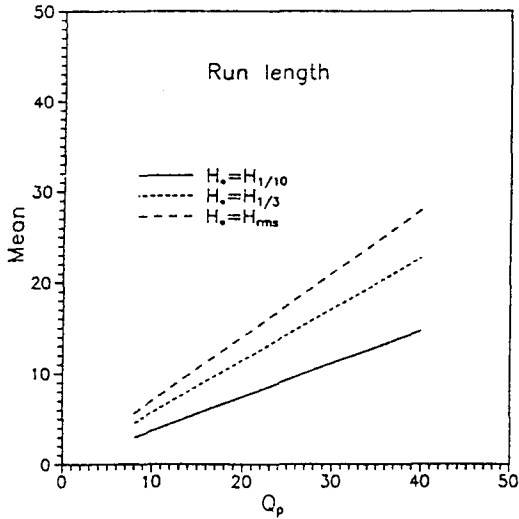


Fig. 6. Mean of Run-Length with Various Threshold Wave Height  $H$ .

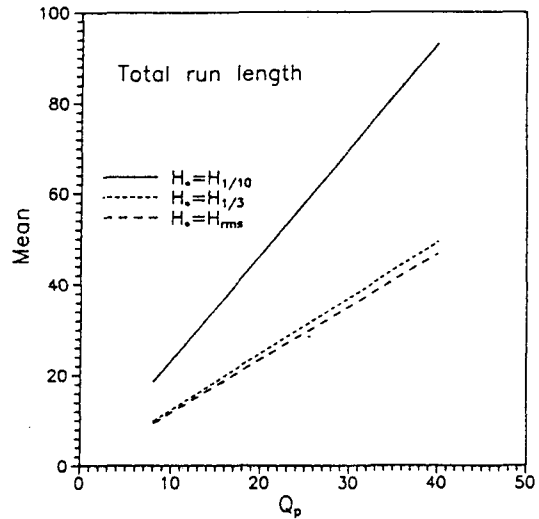


Fig. 7. Mean of Total Run-Length with Various Threshold Wave Height  $H$ .

이고,  $f$ 는 스펙트럼의 周波數,  $f_0$ 는 스펙트럼에서 中央의 周波數(central frequency),  $S(f)$ 는 스펙트럼 에너지밀도(spectral energy density)이다. 또한 스펙트럼의 폭을 나타낼 수 있는 변수로 스펙트럼 尖頭係數(spectral peakedness parameter),  $Q_p$ 를 다음 式 (9)와 같이 도입한다.

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \frac{\int_0^\infty f S^2(f) df}{\int_0^\infty S(f) df} \quad (9)$$

이때 만약  $Q_p \geq 8$ 이라고 하면 式 (7), (8)은 다음 式 (10), (11)과 같이 단순화 된다.

$${}_1L_h = \frac{Q_p \sqrt{m_0}}{\sqrt{2H}} \quad (10)$$

$${}_2L_h = \frac{Q_p \sqrt{m_0}}{\sqrt{2H}} e^{H \cdot 2/2(m_0)} \quad (11)$$

式 (10)과 (11)은 스펙트럼의 폭이 좁은 경우에 波浪 연이음과 全波浪 연이음의 기대값을 쉽게 계산 할 수 있도록 Ewing(1973)이 제안한 식으로, 많은 연구자들에 의하여 그 타당성이 입증되었다.

本 研究에서는 波浪 연이음과 全波浪 연이음의 기대값이  $H$  및  $Q_p$ 에 대하여 어떻게 변하는지를 살펴 보기 위하여 해석하였다. 실제 하나의 파랑자료를

선택하여 해석할 경우에는 단지 하나의  $Q_p$ 만이 존재 하나, 스펙트럼의 폭이 波浪 연이음과 全波浪 연이음의 기대값에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 임의로  $Q_p$ 를 8에서 40까지 변화시켜 계산하였다. 먼저 Fig. 5 (a)는  $H$ 가  $H_{1/10}$ 인 경우에  $Q_p$ 를 변화시켜 계산한 경우로 기대하였던 것처럼 線形關係를 나타내주고 있으며, 波浪 연이음의 기대값이 全波浪 연이음의 기대값보다 작게 나타나고 있다.  $H$ 를  $H_{1/3}$ ,  $H_{rms}$ 로 변화시켜 계산한 Fig. 5(b), Fig. 5(c)의 결과에서도 이와 유사한 경향을 보여주고 있다. 한편 Fig. 6은 波浪 연이음의 기대값을  $H$ 의 변화에 따라 나타낸 것으로  $H$ 의 값이 작아짐에 따라 波浪 연이음의 기대값이 커지고 있음을 알 수 있다. 그러나 全波浪 연이음의 기대값을 나타낸 Fig. 7에서는  $H$ 가 작아짐에 따라 全波浪 연이음의 기대값은 작아지고 있다.

### 3. 에너지 履歷(SIWEH)概念과 波群係數

관측된 波浪과 유사한 不規則 波浪을 실험실에서 재현하기 위하여는 어느 특정한 target 스펙트럼을 사용하여야 한다. 그러나 波群의 特性을 해석하기 위하여 실험실에서 여러가지 波群의 형태를 재현할 경우, 스펙트럼 하나만 사용하면 파군의 형성과정이나 파군의 특성에 대한 해석이 곤란하다. 따라서 Funke와 Mansard(1980)는 이와 같은 문제점들을 극복

Table 2. Window Functions

Name	Window Function	
Rectangular	$Q_k(t)=1,$ $=0,$	$ t  \leq M$ $ t  > M$
Bartlett	$Q_k(t)=1 - \frac{ t }{M},$ $=0,$	$ t  \leq M$ $ t  > M$
Hanning	$Q_k(t)=0.5+0.5\cos\left(\frac{\pi t}{M}\right),$ $=0,$	$ t  \leq M$ $ t  > M$
Hamming	$Q_k(t)=0.54+0.46\cos\left(\frac{\pi t}{M}\right),$ $=0,$	$ t  \leq M$ $ t  > M$

하기 위하여 에너지 履歷, SIWEH를 도입하였는데 이는 어느 한 지점에서의 시간에 따른 水面變動을 시간에 따른 에너지 변동으로 변환시켜 나타낸 것이다. 즉, SIWEH는 스펙트럼의 尖頭 周波數에 해당하는 주기상에서 水面變位를 제공하여 평균한 다음, 시간에 따른 에너지 분포를 계산하는 방법으로 다음 式 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 첨두 주파수는 스펙트럼을 평활화 시키는데 따라서 변하기 때문에 이에 대한 주의가 요구된다.

$$E_R(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-T_p/2}^{T_p/2} \eta^2(t+\tau) d\tau \quad (12)$$

여기서  $T_p$ 는 스펙트럼상에서 나타나는 尖頭 周波數의 역수이다.

에너지 이력개념은 다른 연구자들이 이용한 包絡函數(envelope function)와 대응되는 것으로, 포락함수가 매우 거친 경우에는 不規則 波浪속에 내재된 波群의 特性을 명확하게 파악하기 힘들다. 그러나 SIWEH를 사용하면 시간에 따른 波群의 特性變化를 쉽게 파악할 수 있다. 즉, 式 (12)에다 不規則 波浪속에 내재된 長週期波의 成分을 알아보기 위하여 low pass filter를 통과시킨 다음, 移動平均(moving average)하면 다음 式 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q_k(\tau) d\tau \quad (13)$$

여기서 窓門函數(window function),  $Q_k(\tau)$ 는 Table 2와 같은 여러가지 형태를 사용할 수 있으나 Funke와 Mansard(1980)는 아래 式 (14)와 같은 Bartlett 窓門函數를 사용하였다.

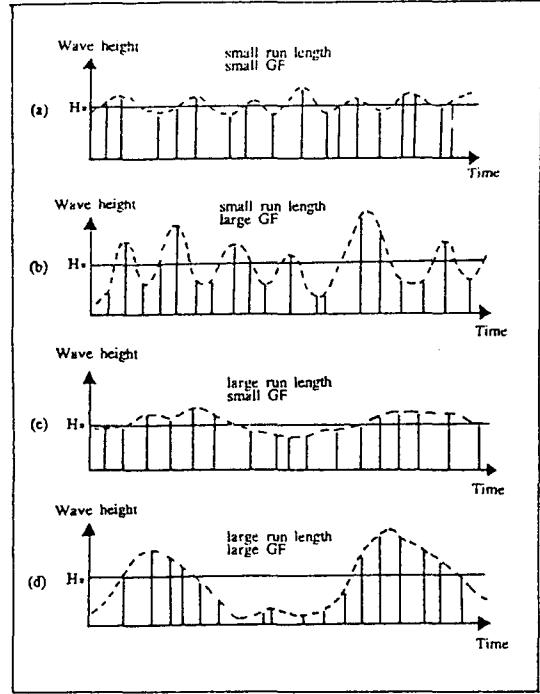


Fig. 8. Sketch of Wave Groups.

$$Q_k(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{T_p}, & -T_p \leq \tau \leq T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

따라서 式 (14)를 式 (13)에 대입하면, 다음 式 (15)를 얻을 수 있다.

$$E_B(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-T_p}^{T_p} \eta^2(t+\tau) \left[1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right] d\tau, \quad T_p \leq t \leq T_n - T_p \quad (15)$$

여기서  $T_n$ 은 파랑 관측 기록의 全時間을 나타낸다.

이상과 같이 시간에 따른 에너지 분포가 얼마나 균일하고, 얼마나 큰지를 나타낼 수 있는 SIWEH를 계산하였다. 특히 本 研究에서는 窓門函數에 따라 그 결과가 달라질 수 있는지에 대한 해석을 위하여 Table 2에 나타난 여러개의 窓門函數를 이용하였다.

이들은 또한 波群의 발달정도를 나타낼 수 있는 波群係數(Groupiness Factor : GF)를 다음 式 (16)과 같이 도입하였다.

$$GF = \frac{\left[ \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (E(t) - \bar{E})^2 dt \right]^{1/2}}{\bar{E}} \quad (16)$$

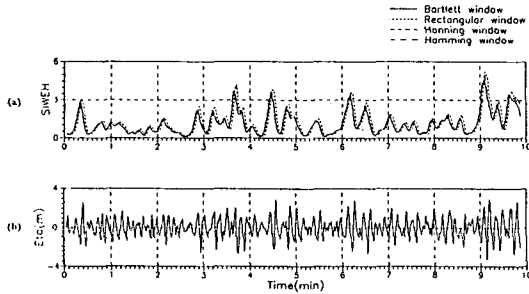


Fig. 9. Comparison of SIWEH with Various Window Functions.

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

式 (16)은 SIWEH의 變化係數이다. 만약 GF가 0이면 正弦波를 의미하게 된다. 따라서 波群係數가 작을수록 일정한 진폭을 가지는 정현파에 가까워진다. Mase 等(1983)은 波群係數가 波高分布 특성 뿐만 아니라 水深과도 관련이 있음을 보였다.

Fig. 8은 파랑의 연이음과 波群係數를 명확히 대비할 수 있도록 나타낸 파군의 형태이다. 즉, 동일한 크기의 波浪 연이음과 波群係數를 갖는다 하여도 波群의 형태가 다르게 형성될 수 있음을 나타내주고 있다. 먼저, Fig. 8(a)의 경우는 파랑의 연이음과 波群係數가 작아 파군이 잘 발달되지 못한 형태이나, Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)와 마찬가지로 파랑의 연이음은 작지만 波群係數가 큰 경우이다. 즉, 고파군과 저파군이 잘 섞여 있는 경우이다. 반면 Fig. 8(c)는 파랑의 연이음은 크지만 파군계수가 작아 Fig. 8(a)처럼 파군이 잘 발달되지 못한 경우이며, Fig. 8(d)는 波群係數가 큰 경우이다. 따라서 波群係數가 크면 波群의 발달이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이와 같이 잘 발달된 파군이라도 그 특성은 Fig. 8(b)와 Fig. 8(d)에서와 같이 다를 수 있다. 즉 하나의 변수만을 사용해서는 波群의 특성을 정확히 해석할 수 없다. 특히 중요한 것은 그 파군의 시간에 따른 변화로, 이것을 정확히 나타낼 수 있는 변수를 도입하여 해석하여야만 한다. 앞에서 언급한 SIWEH가 波群의 시간에 따른 변화를 적절히 나타낼 수 있다고 생각된다.

SIWEH 概念을 이용하여 파군의 특성을 해석하기 전에 Table 2에 나타낸 窓門函數에 대한 敏感度分析을 행하였다(Fig. 9). 이 결과에 의하면 直四角形

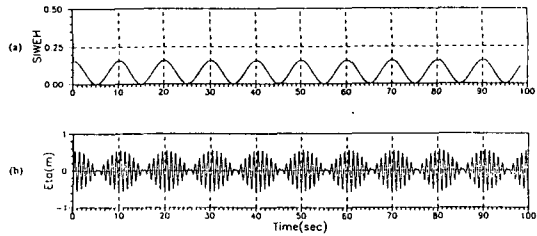


Fig. 10. Wave Record and SIWEH of Regular Wave Group-A.

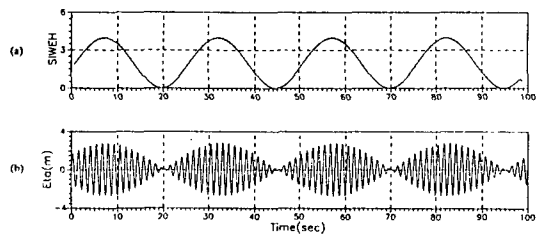


Fig. 11. Wave Record and SIWEH of Regular Wave Group-B.

窓門函數를 제외하고는 결과가 거의 유사하게 나타나고 있다. 이는 SIWEH가 수면변위의 제곱에다 窓門函數를 곱하여 尖頭 周波數에 해당하는 시간상에서 평균하는 방법을 취하기 때문에, 窓門函數의 값이 수면변위의 제곱에 비하여 그 영향이 작아지기 때문이다.

#### 4. 規則波群의 特性

3節에서 정의한 SIWEH와 波群係數에 의한 波群의 특성을 보다 더 잘 이해하기 위하여 線形理論에 의하여 임의로 발생시킨 規則波群에 대하여 그 특성을 검토하였다.

Fig. 10(b)는 두개의 周波數  $f_1=1.10$  Hz,  $f_2=1.00$  Hz와 振幅  $a_1=a_2=0.2$ m인 경우에 대한 規則波群을 나타낸 것이다. 이때  $f_1, f_2, a_1, a_2$ 는 어떤 규칙이 있어 정한 것이 아니라 波群特性을 최대한 뚜렷이 나타낼 수 있도록 선택하였다. 이 경우는 고파군과 고파군 사이의 시간간격이 짧아 고파군이 반복적으로 나타나고 있다. Fig. 10(a)에 나타낸 SIWEH에서도 시간에 따른 波浪 에너지가 급격하게 형성되고 있다. 또한 波群係數는 1.32로 비교적 波群性이 강함을 알 수 있다. Fig. 10의 경우와는 파군의 성격이 다른 規則



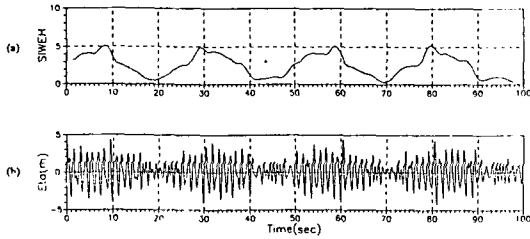


Fig. 12. Wave Record and SIWEH of Synthesized Irregular Wave Group.

波群을 Fig. 11(b)에 나타내었다. Fig. 11(b)에 나타낸 規則波群은  $f_1=0.80$  Hz,  $f_2=0.76$  Hz와 振幅  $a_1=a_2=1.0$ m로 선택하였다. 따라서 파군의 형태는 Fig. 10(b)와는 다르게 고파군과 고파군 사이의 간격이 길어, 고파군이 비교적 긴 시간동안 유지되고 있다. 시간에 따른 에너지변화를 나타낸 Fig. 11(a)의 SIWEH도 高波群의 波群特性에 따라 비교적 완만한 변화를 보여주고 있으며 波群係數가 1.42로 Fig. 10의 경우보다 波群性이 더 강하게 나타난다. 따라서 波群의 發達程度를 나타내는 波群係數는 고파군의 持續時間과 고파군사이의 시간간격이 길 수록 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 본 경우와 같이 고정된 지점에서 시간에 따른 수위변화를 가지고 해석하는 경우에는 SIWEH의 크기가 고파군의 크기에 비례하여 나타나게 된다. 그러므로 이와 같은 規則波群에서 나타난 SIWEH와 波群係數의 특성을 해양에서 관측된 不規則波群에도 적용할 수 있다고 생각된다.

5. 不規則波群의 特性

4節에서 살펴본 規則波群의 특성해석에 사용되었던 SIWEH와 波群係數를 이용하여 다음의 不規則波群의 特性을 해석하였다.

Fig. 12(b)는 4절에서 나타낸 規則波群 Fig. 10와 Fig. 11을 동일시간에 해당하는 두 수면변위를 단순히 더하여 얻은 不規則波群이다. 이에 대한 SIWEH의 변화를 나타낸 Fig. 12(a)를 살펴보면, 어느 하나의 큰 振幅變化에 대한 SIWEH의 변화도 크게 나타나고 있다. 이와 같은 이유는 規則波群에서 高波群의 변화는 일정한 비율로 증가하고 감소하나 不規則 波群에서는 매우 복잡하게 高波群과 低波群이 함께 발생하기 때문이다. 즉, 規則波群의 低波群에서는 에너지가 거의

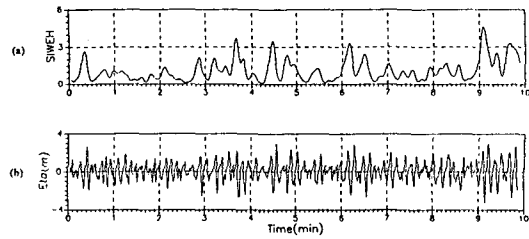


Fig. 13. Wave Record and SIWEH of Observed Irregular Wave Group-A.

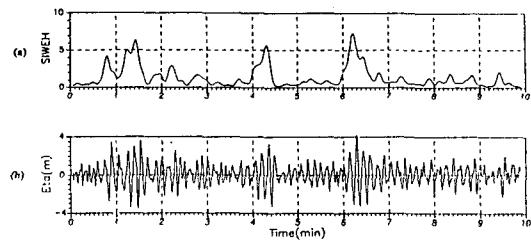


Fig. 14. Wave Record and SIWEH of Observed Irregular Wave Group-B.

없는 대신에 不規則波群의 低波群에서는 일정 에너지를 보유하고 있다가 순간적으로 큰 振幅의 변화가 발생하면 그 영향이 함께 나타나는 것으로 생각된다. 또한 Fig. 12에 대한 波群係數는 1.01로 앞의 規則波群과 비교하여 波群의 활동이 많이 둔화되었다. 이는 波浪이 매우 불규칙하게 발달하기 때문에 상대적으로 高波群과 低波群사이의 차이가 크지 않다는 것을 의미한다. Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)는 1992년 3월 海洋研究所에서 wave rider를 이용, 東海港 入口에서 심해 쪽으로 약 2 km 떨어진 지점에서 측정한 현장 觀測資料의 일부분이다. Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)의 水面變位만 가지고는 不規則波群의 파군성이 어느 정도인지 파악하기 어려우나 Fig. 13(a)와 Fig. 14(a)의 SIWEH를 살펴보면 高波群이 강하게 나타나는 시간대를 쉽게 알 수 있으며, 波群의 發達程度를 나타내는 波群係數도 Fig. 13이 0.76, Fig. 14가 1.12로 대비되고 있다.

이상과 같이 SIWEH와 波群係數를 이용하여 規則波群과 不規則波群에 대한 波群特性을 해석하였다. 또한 현재까지 波浪 觀測資料를 해석하는데 가장 많이 사용되고 있는 스펙트럼 해석도 병행하였다. 이의 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. 이의 결과를 자세히 살펴보면 스펙트럼의 형태가 매우 유사하게

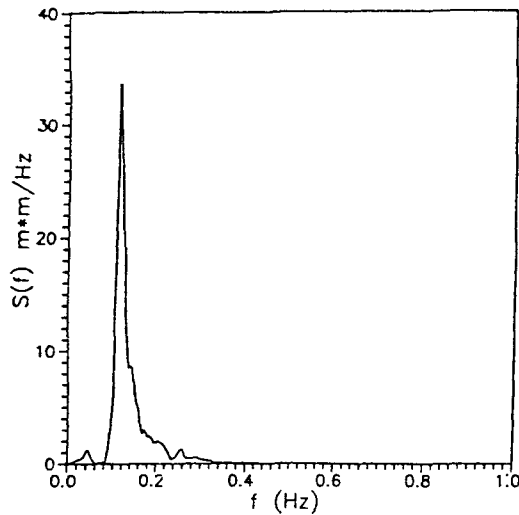


Fig. 15. Spectrum of Observed Wave Record-A.

나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 동일 형태의 스펙트럼하에서도 시간에 따른 SIWEH의 變化特性이 매우 다르게 나타나고 있다. 그러므로 파랑 觀測資料를 해석하는데 있어서 단지 스펙트럼 해석만으로 그 파랑의 특성을 결정하여서는 않되며, 그 파랑이 어느 정도 波群化되는지를 나타내 줄 수 있는 SIWEH개념이나 2節에서 해석한 파랑의 연이음 개념을 함께 도입하여 해석하여야 한다.

## 6. 結 論

波浪 연이음概念과 에너지 履歷概念을 이용하여 不規則 波浪의 파군특성 解析에서 얻은 結論은 다음과 같다. 동일한 형태의 스펙트럼하에서도 불규칙 파랑에 의하여 형성되는 波群의 형태는 다르게 나타날 수 있으며, 파랑 연이음개념은 불규칙 파랑의 波群特性을 대략적으로 나타낼 수 있지만 정확한 해석은 불가능하다. 스펙트럼의 폭이 좁은 경우에는 波浪 연이음과 全波浪 연이음의 平均值는 스펙트럼 尖頭係數에 비례함을 알 수 있다. 한편 에너지 履歷概念을 사용하여 해석하면 불규칙 파랑에 의하여 형성되는 波群의 시간에 따른 크기와 持續時間 등의 變化特性을 쉽게 파악할 수 있으며 波群係數를 도입함으로써 파군의 發達程度를 정량적으로 나타낼 수 있다. 그러나 窓門函數에 따른 에너지의 크기 차이는 거의 없었다.

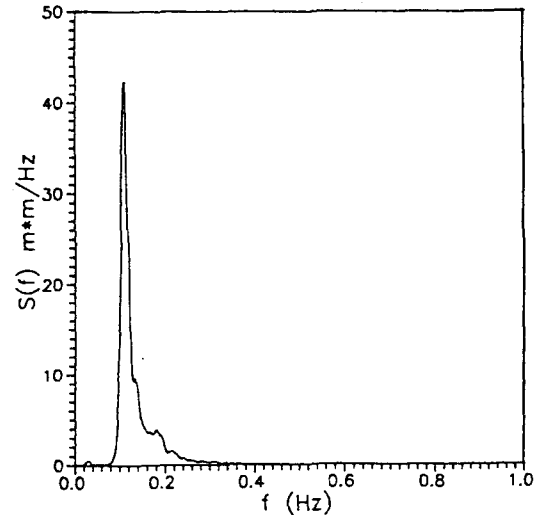


Fig. 16. Spectrum of Observed Wave Record-B.

이상의 결과를 종합적으로 정리하면 불규칙 파랑의 波群特性을 정확히 해석하기 위해서는 기존의 스펙트럼해석 뿐만 아니라 파랑 연이음개념, 에너지 이력개념의 방법을 종합적으로 해석하여야 한다.

이상의 결과외에도 앞으로 해결해야될 問題點으로는 週期에 대한 연이음 개념의 도입 및 不規則 波浪 사이의 相關關係를 고려한 연이음이론에 대한 解析과 水深變化效果를 고려한 파군의 傳播過程을 나타낼 수 있는 模型의 수립이 필요하다.

## 參考文獻

- Battjes, J.A. and Vledder, G.Ph. van, 1984. Verification of Kimura's theory for wave group statistics. *Proc. 19th ICCE*, pp.642-648.
- Bitner-Gregersen, E.M. and Gran, S., 1983. Local properties of sea waves derived from a wave record. *Applied Ocean Res.* 5(4), pp.210-214.
- Burcharth, H.F., 1981. A comparison of nature waves and model waves with special reference to wave grouping. *Coastal Eng.* 4, pp.303-318.
- Elgar, S., R.T. Guza and Seymour, R.J., 1984. Groups of waves in shallow water. *J. Geophys. Res.*, 89, No.C3, pp.3623-3634.
- Elgar, S., Guza, R.T. and Seymour, R.J., 1985. Wave group statistics from numerical simulation of a random sea. *Applied Ocean Res.* 7(2), pp.93-96.
- Ewing, J.A., 1973. Mean length of runs of high waves. *J. Geophys. Res.* 78(12), pp.1933-1936.
- Funke, E.R. and Mansard, E.P.D., 1980. On the synthesis of realistic sea states. *Proc. 17th ICCE*, pp.2974-2991.

- Goda, Y., 1970. Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation. *Rep. Port Harbor Res. Inst.*, Vol.9, No.3.
- Hudspeth, R.T. and Medina, J.R., 1988. Wave group analysis by Hilbert transform. *Proc. 21st ICCE*, pp.884-898.
- Kimura, A., 1980. Statistical properties of random wave groups. *Proc. 17th ICCE*, pp.2955-2973.
- Marson, A., 1988. Wave groups on wave records measured along Spanish shores. *Proc. 21st ICCE*, pp.204-218.
- Mase, H. and Iwagaki, Y., 1984. An analysis of wave data for wave grouping. *Coastal Eng. in Japan*, 27, pp. 83-96.
- Mase, H., Kita, N. and Iwagaki, Y., 1983. Random wave simulation considering wave groups. *Coastal Eng. in Japan*, 26, pp.61-75.
- Medina, J.R. and Hudspeth, R.T., 1990. A review of the analysis of ocean wave groups. *Coastal Eng.*, 14, pp. 515-542.
- Nolte, K.G. and Hsu, F.H., 1972. Statistics of ocean wave group. *Proc. 4th OTC*, No.1688, pp.139-146.
- Rye, H., 1974. Wave group formulation among storm waves. *Proc. 14th ICCE*, pp.164-183.
- Rye, H., 1982. Ocean wave groups. Dept. Marine Tech., Norway Inst. Tech., Rep. No. UR-82-18.
- Sobey, R.J. and Liang, H-B., 1986. Complex envelope identification of wave groups. *Proc. 20th ICCE*, pp.752-765.
- Thompson, E.F. and Seelig, W.N., 1984. High wave grouping in shallow water. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 110(2), pp.139-157.