

# 數值實驗條件에 따른 海洋波浪特性的 統計的 安定限界

柳 青 魯 · 金 鉉 周

(釜山水產大學 海洋工學科)

(1987년 6월 27일 수리)

## On the Stochastic Stability Criteria for the Analysis and Simulation of Ocean Waves

Cheong-Ro RYU and Hyeon-Ju KIM

Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan,

Nam-Gu, Pusan, 608 Korea

(Accepted June 27, 1987)

Stochastic stability criterias for ocean wave analysis and simulation are studied using the data simulated by the linear superposition method. To clarify the criterias, the effects of the simulation parameters on the variance of stochastic properties of ocean waves are investigated, and the stable conditions of the parameters are estimated through the comparative study on the stochastic properties of simulated waves and well-known ocean waves. The simulation parameters considered are high frequency cut-off, data length, and number and phase angle of component waves. Statistical characteristics analysed are wave height, period and steepness, and the formation of groups of higher waves, resonance periods, steeper higher waves and extreme run-length of the run.

### 序 論

최근, 海洋施設物에 관한 問題의 解析 및 設計에 代表波를 外力으로 導入함에 따라 發生하는 問題點을 糾明, 解決하기 위하여 不規則 外力에 대한 構造物의 應答特性 및 構造物과 波浪의 相互作用에 관한 研究가 활발히 이루어지고 있다<sup>1)~3)</sup>. 不規則 波浪에 의한 外力特性的 變化를 論議하기 위해서는 海洋波浪 特性的 糾明과 그 特性을 再現하는 simulation 技法의 開發이 重要하다.

海洋波浪의 統計的 分布特性的 表現은 波高(H)의 경우 Rayleigh 分布<sup>4),5)</sup>, 週期(T)의 경우 Weibull 分布<sup>6)</sup>, 波形傾斜(S)의 경우 Overvik and Houmb의 分布式<sup>7)</sup>, surf-similarity parameter( $\xi$ )의 경우 Bruun and Günbak의 分布式<sup>1)</sup> 등으로 代表되어 왔다. 최근 捨石構造物의 安定性<sup>1),2)</sup> 및 越波問題<sup>8)</sup>, 浮遊體의

漂流力 및 動搖特性<sup>3)</sup> 등의 論議에 있어 중요한 影響因子로 지적되고 있는 波群에 대한 研究는 주로 高波群에 대해 이루어져 왔으며, 無相關 確率過程論<sup>4)</sup>, 包絡線理論<sup>5),9)</sup>, Markov 過程論<sup>6)</sup> 등에 의해 進行되어 왔다. 또 海洋波浪의 糾明된 統計特性을 만족하는 simulation 技法도 成分波合成法<sup>10)</sup>, 應答函數法<sup>11)</sup>, 位相調節을 고려한 成分波合成法<sup>12)</sup> 등으로 發展되어 왔다. 그러나 上記 어느 simulation 技法을 사용할 경우에도 統計的 分布特性을 만족하기 위한 simulation 條件 내지는 波浪解析의 安定條件에 대한 檢討는 不足한 실정이다. 또 이와 관련한 일부 研究結果<sup>10)~16)</sup>에 있어서도 波高分布나 高波의 波群特性 등 일부 外力因子에 대한 安定條件의 論議에 머물고 있다.

이에 本 研究에서는 不規則波의 simulation 및 解析의 統計的 安定條件을 海洋波浪의 제반 外力因子에

대해 糾明함으로써 海洋波浪의 觀測, 不規則 外力에 의한 構造物의 應答特性 研究 등을 위한 安定된 波浪資料의 simulation 및 解析條件을 밝히고자 한 것이다.

이를 위하여 simulation 條件을 變化시키면서 成分波合成法으로 數值波浪資料를 作成하고, 이 資料를 利用하여 解析條件에 따른 波高, 週期 및 波形傾斜의 分布特性과 高波의 波群特性은 물론 최근 海洋施設物과 波浪과의 相互作用의 解析 等과 관련하여 重要한 影響因子로 알려진 高波의 條件付 共振週期, 急傾斜高波의 波群特性에 대한 統計的 安定限界도 論議하였다.

### 海洋波浪의 數值 simulation 및 解析

不規則波浪 研究의 第1단계로서 成分波合成法에 의한 數值實驗을 수행하였다. 不規則 海面의 時空間的 波形을 成分波의 線形重疊으로 생각하면, 1次元 不規則波形  $Z(t)$ 는 式(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$Z(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t + \theta_m) \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 成分波數,  $a_m$ 은 成分波의 振幅,  $f_m$ 은 成分波의 週波數,  $\theta_m$ 은 成分波의 位相이다. 이 1次元 海面모델에 대응하는 不規則波浪의 時系列  $Y(t)$ 는 式(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$Y(t) = Z(n\Delta t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m n\Delta t + \theta_m) \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 step number,  $\Delta t$ 는 時間間隔이다. 한편, 成分波의 振幅  $a_m$ 은 에너지스펙트럼으로부터

다음 式을 사용하여 구할 수 있다.

$$a_m = \sqrt{2 S(f_m) \Delta f_m} \quad (3)$$

여기서  $\Delta f_m$ 은 스펙트럼 分解能이며, 式(2), (3)에서 成分波의 週波數는 Nyquist 條件을 고려하여  $1/2\Delta t$  이하로 하지 않으면 안된다.

本 研究에서는 “充分히 發達한 風波”에 대한 海洋波浪의 에너지스펙트럼 모델로 式(4)와 같이 나타내어지는 Pierson-Moskowitz spectrum<sup>4)</sup>을 導入하였다.

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) \quad (4)$$

여기서,  $g$ 는 重力加速度이고,  $\alpha$ 와  $f_p$ 는 scale parameter 로서 각각 0.0081과 0.1을 導入하였다.

不規則波의 simulation 은 目標 에너지스펙트럼  $S(f)$ 로부터 각 成分波의 週波數別 振幅을 式(3)에 의해 求하고, 각 實驗條件에 따라 약 600波 이상의 波浪資料를 作成하였다. 發生波는 zero-up-crossing 法으로 波別解析하였으며, 이제까지 밝혀진 Table 1 과 같은 海洋波浪의 統計的 特性을 基準으로 하여 각 外力要素의 simulation 條件의 變化에 따른 發生波의 統計的 變化特性과 安定限界를 調査하였다.

### Simulation parameter의 安定限界

#### 1. 影響 parameter

數值實驗에 의한 不規則 發生波의 統計的 特性에 대한 安定性  $R_s$ 는 式(2)로부터 다음 式과 같은 變數 (simulation parameter)들의 函數로 나타낼 수 있다.

$$R_s = f(M, a_m, f_m, N, \Delta t, \theta_m) \quad (5)$$

Table 1. Reference statistic values of mean run-length and individual waves

Wave grouping	$H_C$			$T_R$		$S_C$ and $\bar{H}$		
	$\bar{H}$	$H_{1/3}$	$H_{1/10}$	$(0.8 \sim 1.6)\bar{T}$	$(1 \sim 1.4)\bar{T}$	$\bar{S}$	$S_{1/3}$	$S_{1/10}$
Random process <sup>4)</sup>	1.84	1.15	1.04	3.94	1.25	1.30	1.24	1.13
Observed data	2.54 <sup>4)</sup>	1.42 <sup>4)</sup>	1.35 <sup>10)</sup>					
Individual wave statistics								
Wave height <sup>4)</sup>	$H_{max} = 1.42H_{1/10} = 1.8H_{1/3} = 2.88\bar{H}$							
Wave period <sup>4)</sup>	$T_{max} = T_{1/10} = T_{1/3} = (1.1 \sim 1.3)\bar{T}$							
Wave steepness	$S_{max} = 1.42S_{1/10} = 1.8S_{1/3} = (1.7 \sim 2.38)\bar{S}$							

$S = (H/L)$ , superscript (-) means mean wave, and subscripts indicate as follows: max; maximum wave, 1/10; 1/10 maximum wave, 1/3; significant wave, c; critical wave, and R; specified wave range.

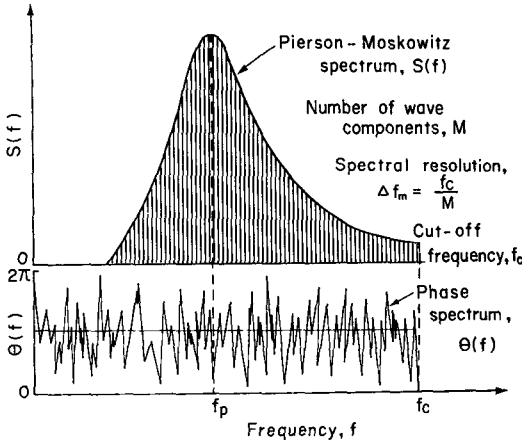


Fig. 1. Schematic diagram of the simulation parameters in introducing model spectrum.

여기서, Fig. 1과 같이 模式的으로 나타낸 스펙트럼 導入條件을 고려하고,  $\Delta t$ 를 現場波浪資料의 解析 時間間隔으로 많이 사용하고 있는 0.5秒로 정하고, 週波數別 位相을 自己相關係數  $r(\theta)$ 로 나타내면,  $S(f)$ ,  $f_m$ 은 모델스펙트럼으로부터 결정되는 變數이므로 다음 식과 같은 影響 parameter를 얻을 수 있다.

$$R_s = f(M, N, r(\theta), f_c) \quad (6)$$

### 2. Cut-off 週波數

式(6)과 같은 影響 parameter 중, 發生波의 統計的 特性에 대한 cut-off 週波數  $f_c$ 의 影響을 檢討하기 위하여 成分波數를 100波로 인정하게 하고, 無相關 不規則 位相을 導入하여 cut-off 週波數를  $0.5f_p$ 에서  $30f_p$ 까지 變化시키며 合成한 600波에 대한 統計的 特性의 變化를 調査하였다.

$f_c$ 의 變化에 대한 發生波의 統計的 特性 變化는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. Table 1의 海洋波浪의 統計的 特性을 基準으로 하면, 統計波의 波高는  $f_c$ 가  $2.5f_p$  이상, 週期和 波形傾斜는  $1.5f_p$  이상에서 安定되며, 高波와 共振週期の 波群現象은  $1.5f_p$  이상, 急傾斜 高波의 波群形成은  $1\sim 4f_p$ 에서 安定되는 傾向을 보였다. 한편,  $10f_p$  이상의 高週波數領域까지를 고려하면 Nyquist 條件과 스펙트럼 分解能의 過大로 分散이 증가하며, 이런 현상이 발생한 경우는 成分波數를 增大시켜야 할 필요가 있다.

### 3. 成分波數

成分波數  $M$ 은 cut-off 週波數와 關連하여 海洋波浪의 simulation과 스펙트럼 解析上 중요한 파라메

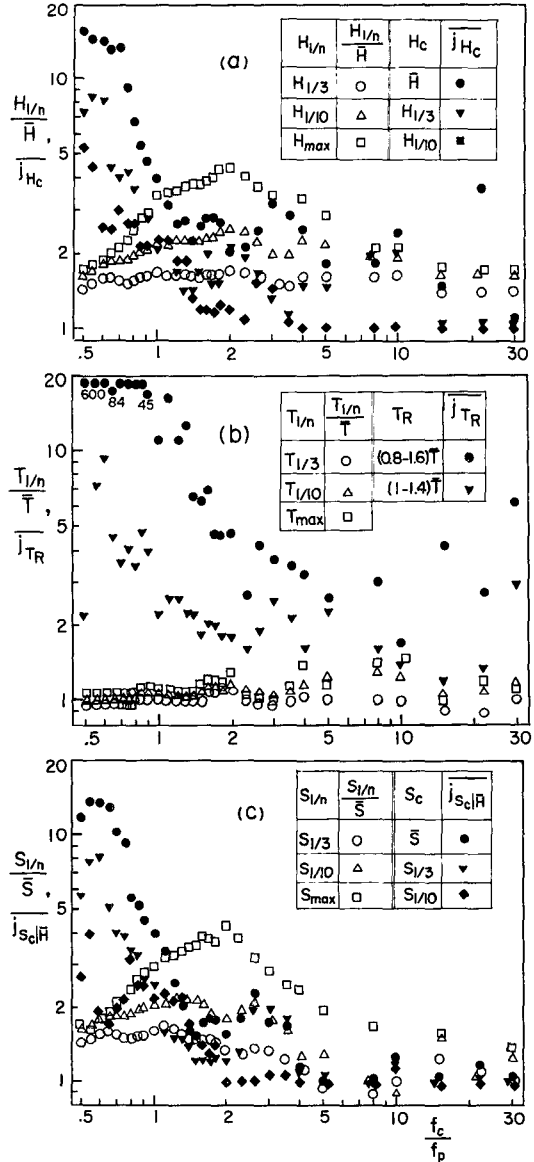


Fig. 2. Statistical variation of simulated wave height(a), period(b) and steepness(c) according to the high frequency cut-off choice.

터로서, 스펙트럼 分解能  $\Delta f_m$ 과는 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 關係가 있다. 한편, 이 成分波數와 關連하여 simulation한 파라미터의 安定성에 대해서는 高波의 波群形成과 關連한 不規則波의 數值實驗에서 Goda<sup>4)</sup>는 60成分波, Burcharth<sup>13)</sup>는 10成分波, Rye<sup>10)</sup>는  $0.02f_p$  이하의 스펙트럼 分解能을 提案하는 등 研究者마다 다른 結果를 提示하고 있다. 이로부터, 本 研究에서는 cut-off 週波數를 發生波의 統計的 特性이 理論值나 實測值에 잘 일치하는  $2.6f_p$ 로 정하

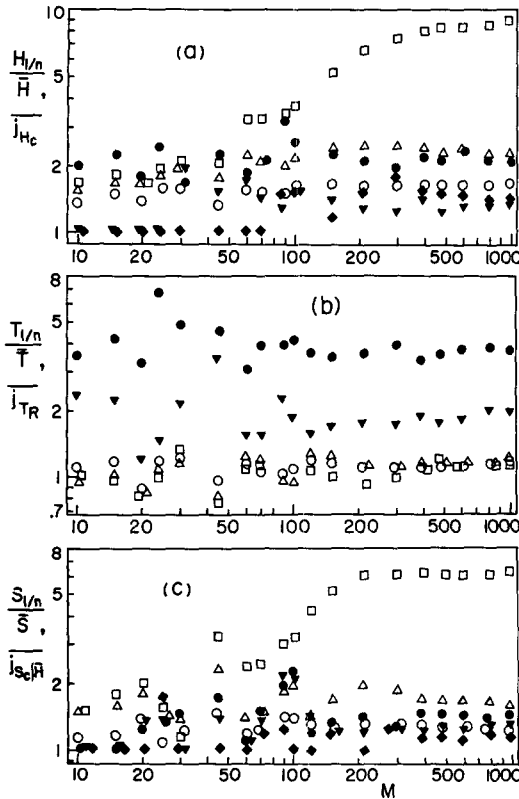


Fig. 3. Statistical variation of simulated wave height (a), period (b) and steepness (c) according to the component wave number. Legends are the same as shown in Fig 2.

고 성분波를 10波에서 1000波로 漸進的으로 변화시키며, 無相關 不規則 位相을 도입하여 合成한 600波에 대한 發生波의 統計的 特性의 變化를 考察하였다.

Fig. 3은 성분波數에 따른 發生波의 統計的 特性의 變化를 나타낸 것이다. 實驗結果를 Table 1을 基準으로 하여 살펴 보면 統計波의 特性은 波高의 경우 100波 이상, 週期和 波形傾斜에 대해서는 200波 이상의 성분波를 合成할 경우 安定되며, 波群特性은 400 내지 600 성분波 이상을 고려할 때 安定된 統計值를 보였다. 또한, 最大波의 波高는 400 성분波, 波形傾斜은 200 성분波 이상에서 安定된 반면, 週期는 성분波數의 影響을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

#### 4. 發生波數

不規則波의 simulation과 解析에서 發生波數  $N$ 은 統計的 不確定性和 관련하여 중요한 파라메터이다. 海洋波浪의 現場觀測은 주로 15~20分 동안 실시되고

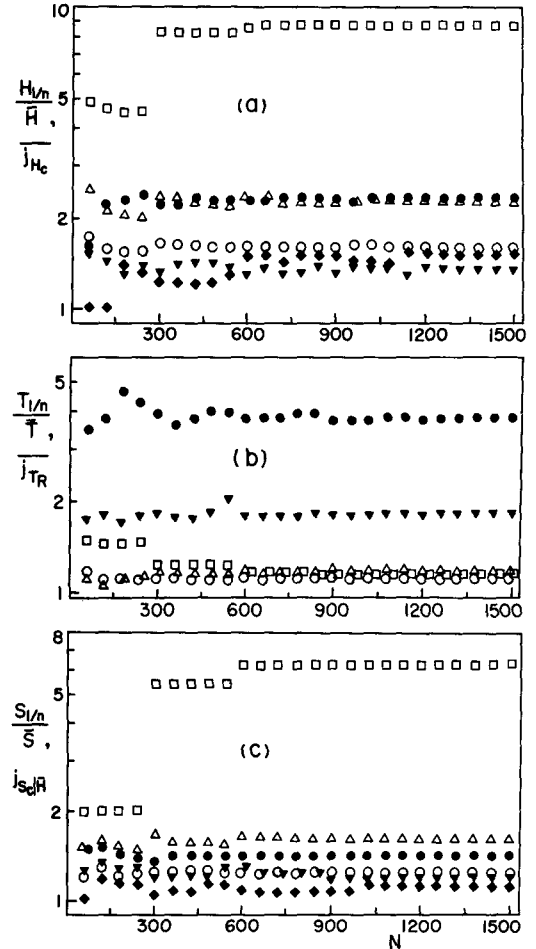


Fig. 4. Statistical variation of simulated wave height (a), period (b) and steepness (c) according to the simulated wave number. Legends are the same as shown in Fig. 2.

있으며, 이는 海洋波浪의 波高, 週期 分布特性을 論議하기에는 充分한 것으로 믿어지나<sup>15)</sup>, 종래 平均 run-length의 實測值<sup>9), 10)</sup>에서 나타나는 심한 分散에서 알 수 있듯이 最大波나 波群의 論議에는 不充分한 것으로 생각된다. 이로부터 本 研究에서는 cut-off 週波數를  $2.6f_p$ , 성분波數를 波群形成이 양호한 600波로 정하고 無相關 不規則 位相을 도입하여 simulation한 후, 發生波數를 變化시키면서 그 統計的 變化特性을 考察하였다.

Fig. 4는 發生波數에 따른 波浪의 統計的 特性의 變化를 나타낸 것이다. 統計波의 特性은 300波 이상, 最大波는 600波 이상을 取할때 安定되었다. 또한 波群形成은 高波의 경우 1200波 이상, 共振週期의 경우 600波 이상, 急傾斜高波의 경우 900波 이상을 取

할때 安定된 統計的 特性을 나타내었다. 이것은 實測에 의해 波群의 統計的 特性을 研究하기 위해서는 現在 實施되고 있는 觀測時間의 4倍 이상이 필요하며, 模型實驗時間도 이러한 效果를 고려하여 決定해야 함을 의미한다.

### 5. 成分波의 位相

최근, 位相스펙트럼이 群波形成에 중요한 影響을 미치는 파라메터로 論議되고 있다<sup>11,12</sup>). 本 研究에서는 波群을 비롯한 不規則波의 統計的 特性에 대한 成分波 位相의 影響을 檢討하기 위해서 cut-off 週波數를  $2.6f_p$ , 成分波數를 600波로 定하고 位相의 自己相關係數  $r(\theta)$ 가 0에서 1까지 變化하는 不規則位相角을 導入하여 simulation 한 1200波에 대한 統計的 特性을 考察하였다.

位相 導入에 따른 發生波 特性의 變化는 Fig. 5와 같다.  $r(\theta)$ 가 증가함에 따라 共振週期의 波群形成은 거의 일정하지만 高波와 急傾斜 高波의 波群形成은 점차 強해짐을 볼 수 있다. 그러나, Table 1과 비교할 때 일반적인 分布特性은 波高의 경우  $r(\theta)$ 가 0.3 이하, 週期의 경우 0.9 이하, 波形傾斜의 경우 0.5 이하에서 만족된다. 또한 波群形成은 高波와 急傾斜 高波의 경우 0.6 이하, 共振週期에 대해서는 0.9 이하의 相關係數를 가지는 位相이 도입될 때 安定된 結果를 나타내었다. 成分波의 位相과 波群形成은 有關하지만 일반적인 分布特性을 왜곡시키기 쉬운 波群現象을 조절하는 파라메터로서는 不適當을 알 수 있다.

### 6. 最長 run-length

海洋波浪의 最長 run-length는 極限外力條件의 논의시 극단적인 衝擊力 또는 漂流力 등과 관련하여 중요한 外力因子라 할 수 있다. 現場觀測報告에 의

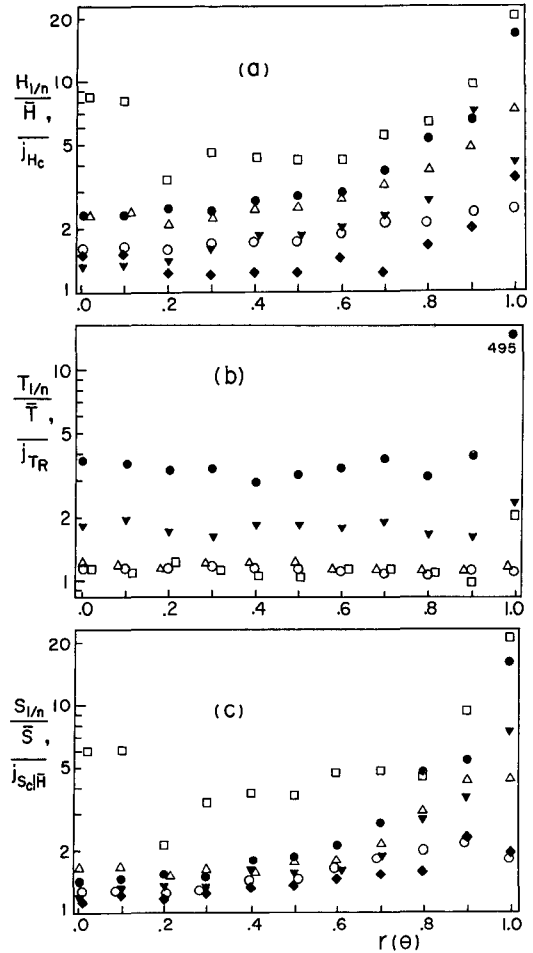


Fig. 5. Statistical variation of simulated wave height(a), period(b) and steepness(c) according to the autocorrelation coefficient of phase angles. Legends are the same as shown in Fig. 2.

하면 有義波高를 기준으로 한 高波의 最長 run-length는 4~6으로 나타났<sup>11,10</sup>).

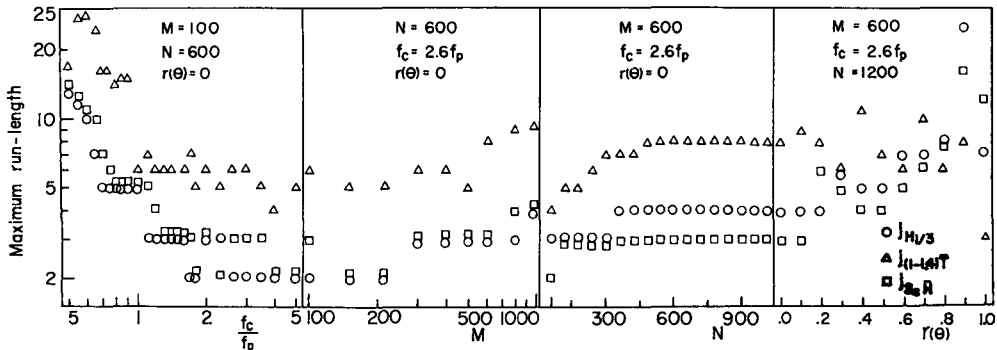


Fig. 6. Relations between the maximum run-length and simulation conditions.

이 最長 run-length는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 cut-off 週波數가 커짐에 따라 작아지고, 成分波數와 發生波數에 비례하여 커지는 樣相을 보였다. 또한, 最長 run-length를 적절히 合成하기 위해서는 300成分波 이상을 導入해야 하고, 해석시 統計的 安定性을 確保하기 위해서는 500 이상을 取해야 함을 알 수 있다. 位相導入에 따른 最長 run-length의 變動을 살펴보면, 波高와 波形傾斜의 경우 位相의 相關係數가 증가함에 따라 증가하였지만 週期에 대해서는 감소하였다. 따라서 不規則 外力으로서 最長 run-length가 중요한 경우에는 不規則波의 simulation에 있어 이러한 變化特性에 대한 충분한 注意가 필요하다.

### 結 論

成分波合成法에 의한 海洋波浪의 數值 simulation 資料를 利用하여 海洋波浪의 統計的 安定性을 保障하기 위한 不規則波의 simulation과 解析 條件의 安定限界는 다음과 같이 要約할 수 있다.

- 1) cut-off 週波數는 統計波 特性에 대하여  $1.5f_p$  이상, 波群形成에 대하여  $1.5f_p \sim 4f_p$ , 2) 成分波數는 統計波 特性에 대하여 200波 이상, 波群形成에 대하여 600波 이상, 最大波 出現에 대하여 400波 이상, 3) 發生波數는 統計波 特性에 대하여 300波 이상, 波群形成은 1200波 이상, 最大波 出現은 600波 이상을 고려할 때 安定된 波浪資料를 얻을 수 있다. 4) 成分波 位相의 경우, 位相의 自己相關係數가 커질수록 波群形成은 대체로 강해졌으며 統計波 特性은 0.3 이하, 波群形成은 0.6 이하의 相關係數를 가지는 位相을 도입할 때 安定된다. 5) 最長 run-length는 cut-off 週波數  $f_c$ 가 증가할수록 작아지고, 成分波數가 증가할수록 커지며, 각각  $f_c < 2.3f_p$ ,  $M=500$  波 이상을 취할 때 統計值는 安定된다.

### 文 獻

- 1) 柳青魯. 1984. 捨石防波堤의 水理學的 最適設計에 關する 基礎的 研究. 大阪大學 工學部 土木工學科 博士學位論文. p. 165.
- 2) Johnson, R. R., E. P. D. Mansard and J. Ploeg. 1979. Effects of wave grouping on breakwater stability. Proc. 16th Conf. Coastal Eng. ASCE. 2228—2243.
- 3) Mansard, E. P. D. and B. D. Pratte. 1982. Moored ship response in irregular waves. Proc. 18th Conf. Coastal Eng. ASCE. 2621—2640.
- 4) Goda, Y. 1985. Random seas and designs of marine structures. p.323. Univ. of Tokyo Press, Japan.
- 5) Longuet-Higgins, M. S. 1952. On the statistical distributions of the heights of sea waves. Jour. Mar. Res. 9(3), 245—266.
- 6) 木村 晃. 1982. 不規則波의 連의 統計學的 特性とその 應用. 1982年度 水工學에 關する 夏期 研修會 講義集. 82-B-8.
- 7) Overvik, T. and O. G. Houmb. 1977. A note on the distribution of wave steepness. Div. Port Ocean Eng. The Norwegian Institute of Tech. Rep. 11.
- 8) Ewing, J. A. 1973. Mean length of runs of high waves. Jour. Geophys. Res. 78(12), 1933—1936.
- 9) Nolte, K. G. and F. Hsu. 1973. Statistics of ocean wave groups. Proc. 4th OTC. No. 1688.
- 10) Rye, H. 1982. Ocean wave groups. The Norwegian Report UR-82-1. p.214. The Norwegian Inst. of Tech.
- 11) Kimura, A. 1976. Random wave simulation in a laboratory wave tank. Proc. 15th Conf. Coastal Eng. ASCE. 368—387.
- 12) Funke, E. R. and E. P. D. Mansard. 1979. On the synthesis of realistic sea state in a laboratory flume. Tech. Report. LTR-HY-66. National Res. Council. Hydraulics Lab. Canada.
- 13) Burcharth, H. F. 1980. A comparison of nature waves and model waves with special reference to wave grouping. Proc. 17th Conf. Coastal Eng. ASCE. 2993—3009.
- 14) Josep, R. M., J. Aguilar and J.J. Diez. 1985. Distortions associated with random sea simulators. Jour. Waterw., Port, Coast. Ocean Eng. ASCE. 111(4), 603—628.
- 15) Miguel, A. C. and L. A. Gimenez-Curto. 1985. Distribution of maximum wave height. Jour. Waterw., Port, Coastal. and Ocean Eng. ASCE. 3(1), 134—138.
- 16) Nolte, K. G. and F.H. Hsu. 1979. Statistics of larger waves in a sea state. Jour. Waterw., Port, Coastal and Ocean Eng. ASCE. 105(4), 389—404.