

## 不規則波에 의한 沿岸流의 數值計算 Numerical Simulation of Longshore Current due to Random Sea Waves

權正坤\* · 梁喨模\*\*

Jung Gon Kwon\* and Yun Mo Yang\*\*

**要 旨** : 現地 海岸에서 발생하는 海濱流를 정확히 예측하기 위해서는, 海濱流의 起因力인 多方向不規則波浪에 의해서 발생하는 放射應力(radiation stress)에 대해서 충분히 把握해 둘 필요가 있다. 本研究에서는, 二次元水理實驗에 있어서 單一成分波, 二成分合成波, Bretschneider-光易形의 不規則波를 發生시켜서, 그들의 淺水碎波變形에 따른 傳播特性에 대해서 考察하고, 不規則波의 淺水쇄파變形을 解析할 경우 假定되어지는 3가지 方法, 즉 (1) 波別解析法, (2) 成分波法, (3) 代表波法의 適用性에 대해서 檢討했다. 波別解析法에 대해서는, zero-down cross 法에 의해, 波別解析되어진 不規則波의 傳播特性으로서, 統計波(最大波, 1/3有義波, rms波 등) 및 時系列中の 임의 特定の 個個波의 波高 및 週期の 淺水變化라고 하는 觀點으로부터 檢討했다. 또한, 成分波法에 대해서는 spectrum 解析에 의해, 入力信號인 基本週波數成分波 및 淺水碎波變形에 따라 增加하는 干涉週波數 成分波에 대한 波速 및 波高의 淺水變形이라고 하는 觀點으로부터 그 妥當性에 대해서 檢討했다.

**Abstract** □ To accurately estimate nearshore current in shallow water regions, it is necessary to investigate the irregular wave transformation characteristics and radiation stress produced by random sea waves. This research is to investigate the application of the Individual Wave Analysis Method, the Component Wave Analysis Method and Representative Wave Analysis Method in the shallow water region. These methods were estimated by wave shallowing transformation when the waves propagate from deep water to shallow water region by generating regular waves, two component waves and irregular waves (Bretschneider-Mitsuyasu type). That is, the Individual Wave Analysis Method is to investigate from the viewpoint of shallow water transformation of wave statistical characteristics and their zero-down-crossing waves (wave height period and wave celerity). And the component wave Analysis Method is to investigate from the view point of shallow water transformation of basic frequency component wave and their interference frequency component wave. In addition, this research is to compare the measured mean water level elevation with the calculated one from radiation stress of irregular waves that is assumed in the three methods above.

### 1. 概 說

不規則波浪場에 있어서의 波浪變形的 解析方法을 大別하면, Rayleigh 分布를 各 地點마다 적당한 手法로 修正해가는 波高分布修正法(Collins(1970), 郭(1972), 合田 등(1975)), 碎波후의 波高分布形을 假定해서 쇄파에 의한 不規則波群의 energy 逸散率을 正式化 함으로서, energy 平衡方程式에 의해 波高變化를 구해가는 energy法(Battjes(1978), Thornton 등(1983)), 不規則波의 波別解析되어진 個個波의 波高變化

는 規則波의 波高變化와 동등하다고 假定하여, 個個波의 波高變化의 計算結果를 이용하여 波高變化를 구하는 波別計算法(Mase와 Iwasaki, 1982), mild slope equation에 根據를 둔 不規則波浪場의 計算法(渡邊 등, 1983) 등 몇 가지 方法이 있다. 이들 手法의 타당성은, 주로 結果로서 얻어진 統計量(예를 들면 1/3有義波, 1/10有義波, rms波 등)이 어느 程度 實測結果와 一致하는가로서 檢討되어져 왔으나 이와 같은 理論 中에서는, 個個波의 傳播特性에 關한 物理過程에 대한 詳細한 檢討는 現在 行해져 있지 않다.

\*釜山大學校 環境工學科(Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan, Korea)

\*\*三和技術團(Samwha Engineering Consultants Ltd., Pusan, Korea)

그러나, 淺海域에서는 不規則波動에 의해 平均水位의 變動 및 海浜流가 發生한다. 또한, 不規則波에 의해서 發生하는 海浜流의 기인력은 radiation stress 이고, 最近 이와 같은 不規則 波浪場에 있어서의 radiation stress 의 表現方法도 몇가지 提案되어져 왔다. 또한, 어떠한 計算方法에 의해 波浪變形을 解析하는가에 의해 그 radiation stress의 評價方法도 달라지게 된다.

그러므로, 本 研究에서는 方向分散이 되지 않는 2次元 水槽내에서의 2成分波 및 不規則波에 대한 淺水碎波變形 및 平均水位에 關한 室內 2次元 實驗을 行하여 얻어진 結果로부터 各種 波浪變形手法 및 radiation stress의 表現方法에 대해서 檢討를 더하고, 그들의 豫測精度에 대한 評價를 행하는 것을 主目的으로 한다.

## 2. 2次元 不規則波浪場에서의 radiation stress의 表現方法

波浪의 運動에 따르는 過剩運動量 flux로부터 radiation stress를 다음과 같이 定義(Longuet-Higgins, 1978) 할 수 있다.

$$S_{xx} = \int_{-h}^{\eta} \rho(u_w^2 - w_w^2) dz + 1/2 \rho g \eta^2(t)$$

$$S_{xy} = \int_{-h}^{\eta} \rho(u_w v_w) dz$$

$$S_{yy} = \int_{-h}^{\eta} \rho(v_w^2 - w_w^2) dz + 1/2 \rho g \eta^2(t) \quad (1)$$

여기서, h는 水深,  $\eta$ 는 正弦進行波가 존재하는 경우의 表面波形  $z = \eta$ 이다. 方向分散을 가지지 않는 不規則波의 水位變動은 일반적으로

$$\eta = \sum_{i=1}^N a_i \cos \phi_i \quad (2)$$

$$\phi_i = k_i x - \sigma_i t + \varepsilon_i \quad (3)$$

로서 表現되어진다. 微小振幅波理論을 이용하면 水平 方向 및 鉛直方向의 水粒子速度는 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} u_w &= \sum_{i=1}^N \frac{a_i k_i g}{\sigma_i} \frac{\cosh k_i (h+z)}{\cosh k_i h} \cos \phi_i \\ w_w &= \sum_{i=1}^N \frac{a_i k_i g}{\sigma_i} \frac{\cosh k_i (h+z)}{\cosh k_i h} \sin \phi_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

식 (2) 및 식 (4)의 각각의 時系列을 自승하고, 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \eta^2 &= \sum_{i=1}^N a_i^2 \cos^2 \phi_i + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N a_m a_n (\cos(\phi_m - \phi_n) \\ &\quad + \cos(\phi_m + \phi_n)) \\ u^2 &= \sum_{i=1}^N A_i^2 \cos^2 \phi_i + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N A_m A_n (\cos(\phi_m - \phi_n) \\ &\quad + \cos(\phi_m + \phi_n)) \\ W^2 &= \sum_{i=1}^N B_i^2 \sin^2 \phi_i + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N B_m B_n (\cos(\phi_m - \phi_n) \\ &\quad + \cos(\phi_m + \phi_n)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$A_i = -a_i \sigma_i \frac{\cosh k_i (h+z)}{\sinh k_i h}, \quad B_i = -a_i \sigma_i \frac{\sinh k_i (h+z)}{\sinh k_i h} \quad (6)$$

그러므로,  $S_{xx}$ 는 식 (5)를 식 (1)에 대입하여, 時間平均을 취함으로써 다음과 같이 表現(Jen-Men Lo, 1988) 되어진다.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{\rho}{2} \sum_{i=1}^N \frac{a_i^2 \sigma_i^2 h}{\sinh^2 k_i h} + \frac{\rho g}{4} \sum_{i=1}^N a_i^2 \\ &\quad + \rho \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \frac{a_m a_n \sigma_m \sigma_n \sinh(k_m - k_n) h}{(k_m - k_n) \sinh(k_n h) \sinh(k_m h)} \\ &\quad \cos(\phi_m - \phi_n) \\ &\quad + \frac{\rho g}{2} \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N a_m a_n \cos(\phi_m - \phi_n) \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 식 (2) 및 식 (5)를 사용하여, 單一正弦波를 對象으로서, 微小振幅波近似를 행하면,  $S_{xy} = 0$ 이 되고, 一般的인 規則波에 대한 radiation stress로서 다음 식이 얻어진다.

$$S_{xx} = E \left( \frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

$$S_{yy} = E \frac{kh}{\sinh 2kh}, \quad E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (8)$$

이상의 結果로부터, 方向分散을 가지지 않는 不規則波浪場의 radiation stress를 추정하는 方法으로서는 本 研究에서는 다음과 같은 3가지 方法을 假定하였다.

(1) 式 (8)에 根據를 두고 波別解析되어진 個個波의 radiation stress를 구하여 그 出現頻度を 계수로 하는

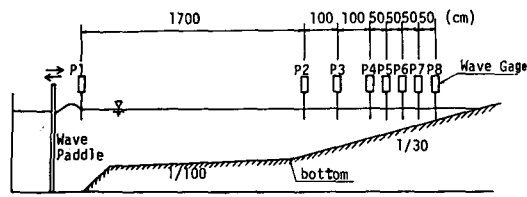


Fig. 1. Outline of experimental apparatus.

加重平均을 행하여 radiation stress를 구하는 방법.

(2) 不規則波浪의 각각의 성분波에 대해서 淺水變形을 행하여, 各地點에 있어서 그들의 성분波에 의한 時系列를 작성하고, 式 (1)에 根據를 두고, 水深 및 時間에 대해서 平均함으로서 radiation stress를 구하는(혹은 式 (7)에 성분波의 振幅을 代入) 方法.

(3) 波別解析法에 의해 구해지는 統計波의 諸元(1/10有義波, 1/3有義波, rms波等)을 사용하여 radiation stress를 구하는 方法.

以下에서는, (1)의 方法을 波別解析法, (2)의 方法을 成分波法, (3)의 方法을 代表波法이라 부른다. 本 研究에서는 不規則波의 2次元淺水碎波變形에 關한 實驗結果에 의해 상기의 3가지의 不規則波浪變形計算算法 및 radiation stress의 表現方法에 대해서 檢討를 行한다.

### 3. 不規則波浪變形에 관한 2次元 水理實驗

#### 3.1 實驗裝置

實驗은 길이 30m, 폭 75 cm, 높이 90 cm의 2次元室內水槽에서 行했다. 이 水槽의 一端에는 피스톤形의 電氣油壓式 不規則波發生裝置가 設置되어져 있다. 波浪測定은, Fig. 1에 표시한 水槽內에 設置한 1/100 및 1/30의 斜面上에서 7~8臺의 容量式波高計를 이용하여 行했다. 測定되어진 水位變動記錄은 14 channel data recorder에 收錄했다.

#### 3.2 實驗方法 및 解析方法

實驗對象波浪은, 1.0 Hz의 單一成分, 몇 가지 종류의 二成分合成波 및 Bretschneider-光易形의 不規則波이다. 二成分合成波에 의한 實驗目的은, 淺水碎波變形에서 어느정도의 週波數成分波間에서의 干涉이 發生하는가에 대한 것을 명백히 파악하기 위해 行한 것이다. 單一成分波 및 二成分波의 造波信號는, 1~2個

의 function generator를 이용하여 작성하였다. Bretschneider-光易形의 不規則波의 造波信號는, 有義波高  $H_{1/3}=10$  cm, 有義週期  $T_{1/3}=1.0$  sec를 parameter 로서 式 (9)에 表示한 Bretschneider-光易形 spectrum을 作成하고, 그것을 기초로 計算되어진 數值 filter를 Personal Computer의 D-A變換裝置를 통과시켜서 analogue의 信號로 했다.

$$S(f) = 0.257H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3}f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (9)$$

測定時間은 約 10~15分으로 하고, 實驗에 있어서는 波浪의 測定狀況의 確認을 위해 pen recorder에 測定值를 出力함과 동시에 14 channel data recorder에 水位變動를 記錄했다. 카세트 tape에 收錄되어진 data는 DR2000에 의해서 AD變換했다. 이때 sampling time은 0.05 sec이었다. 얻어진 digital 時系列은 大型 計算機에 의해 여러가지 統計的 解析을 行했다.

#### 3.3 檢討項目 및 測定되어진 波浪의 諸元

測定되어진 各 Case의 時系列 data에 대해서 zero-down cross法에 의한 波別解析을 行하고, 各 data의 統計諸量, 波高 및 週期の 結合確率分布를 計算했다. Table 1은 各 Case의 水深이 가장 깊은 測定點(P1)에서의 統計諸量이다. Table 1의 GF는 SIWEH에 대한 Grouping Factor를 나타낸 것이다.

單一成分波 및 二成分合成波에 대해서는 spectrum 解析 및 cross-spectrum을 行했다. spectrum 解析으로부터는, 成分波의 基本週波數成分 및 淺水碎波變形에 따라 증가하는 2가지의 基本週波數의 差 및 合의 週波數成分 및 倍週波數成分에 對應하는 振幅을 計算했다. 週波數  $f$ 에 대한 成分波의 振幅  $a$ 는 그 週波數를 포함하고 Power spectrum의 密度가  $1.0 \text{ cm}^2 \text{ sec}$  以上이 되는 週波數帶  $f_1 \sim f_2 (f_1 < f < f_2)$ 를 결정하고, 그 週波數帶에 포함되어진 Power spectrum의 값  $S(f)$ 에 의해 다음과 같이 결정했다.

$$a^2 = 2 \int_{f_1}^{f_2} S(f) df \quad (10)$$

또한, cross-spectrum 解析에 의해 各 成分波의 인접한 測點間에 있어서 傳播速度를 計算했다. cross-spectrum 解析에 의해 얻어진 2測點間의 Phase spectrum은 各 成分波의 位相差를 나타낸다. 그러므로, 週波數  $f$ 에 대한 成分波의 位相差를  $\theta(f) (-\pi < \theta < \pi)$ 라고 하면, 成分波의 傳播速度는  $U(f)$ 는 다음 式에

Table 1. Statistical characteristics of measured waves

Case	Waves	depth(cm)	H <sub>1/3</sub> (cm)	T <sub>1/3</sub> (sec)	H <sub>rms</sub> (cm)	T <sub>rms</sub> (sec)	GF
1	1.0 Hz	53.0	6.83	1.00	5.93	1.01	0.0286
2	1.0 Hz, 0.5 Hz	54.0	10.08	0.997	7.57	1.02	0.218
3	1.0 Hz, 0.6 Hz	53.0	5.13	1.48	4.55	1.68	0.0932
4	1.0 Hz, 0.6 Hz	53.0	5.32	1.51	4.56	1.60	0.116
5	1.0 Hz, 0.65 Hz	53.0	4.40	1.32	3.67	1.52	0.218
6	1.0 Hz, 0.7 Hz	53.0	4.03	1.29	3.09	1.33	0.357
7	1.0 Hz, 0.7 Hz	53.0	6.51	1.26	5.04	1.34	0.346
8	1.0 Hz, 0.8 Hz	53.0	3.56	1.13	2.57	1.12	0.651
9	1.0 Hz, 0.8 Hz	53.0	4.96	1.13	3.59	1.12	0.651
10	irregular waves	54.0	7.27	1.12	5.30	1.08	0.745

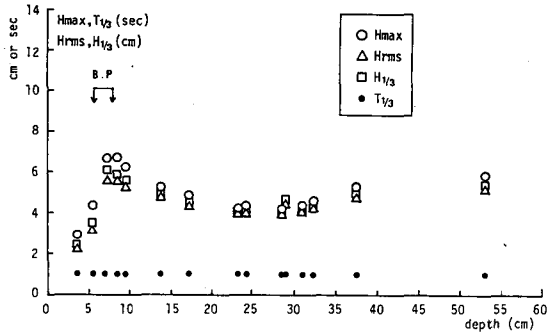


Fig. 2. Shoaling transformation of representative waves (case-1).

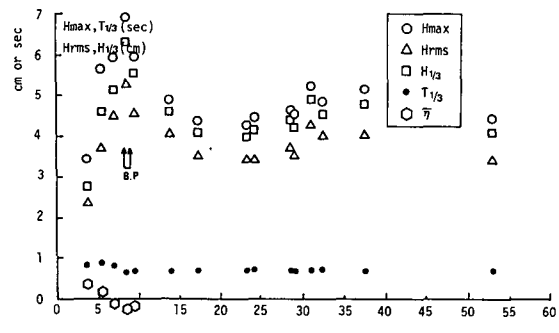


Fig. 3. Shoaling transformation of representative waves (case-5).

의해서 推定되어진다.

$$U(f) = \frac{2\pi f \cdot \Delta l}{\theta(f)} \quad (11)$$

여기서,  $\Delta l$ 은 인접한 2測點間 距離이다. 또한, 各 Case의 時系列 Data를 정렬하여, zero-down cross法에 의해 波別解析으로 決定되어진 個個波를 各 測點의 時系列로서 追跡하여 그 變形을 調査했다.

즉, 本 研究에서 檢討한 事項은 다음과 같다.

(1) zero-down cross法에 의해 波別解析되어진 不規則波의 淺水變形에 대해서는 時系列中の 임의의 特定 個個波 및 統計波의 波高, 週期 및 傳播速度의 變化를 調査함으로써 考察했다.

(2) spectrum 解析되어진 成分波의 淺水變形에 대해서는 基本週波數成分波, 倍週波數成分波 및 合과 差의 週波數成分波의 振幅 및 傳播速度가 淺水쇄파變形에 따라서 어떻게 變化해 가는가를 調査함으로써 考察했다.

(3) 앞에서 論述한 바와 같이 不規則波의 radiation

stress,  $S_{xx}$ 의 表現法은 波別解析法, 成分波法 및 代表波法의 3가지 表現方法이 있다. 本 研究에서는, 實驗 data에 의해 計算한 3가지의  $S_{xx}$ 값으로부터 空間的인  $S_{xx}$ 의 傾斜를 計算하여, 實測되어진 平均水位變動  $\eta$ 의 空間的인 傾斜와의 相關을 調査함으로써, 不規則波의 radiation stress,  $S_{xx}$ 의 表現方法에 대해서 檢討했다.

#### 4. 不規則波의 淺水碎波變形

##### 4.1 波別解析波의 傳播特性和 淺水碎波特性

###### (1) 統計波의 傳播特性

Fig. 2~Fig. 5는 實驗에 의해 測定되어진 波浪의 統計量의 變化를 나타낸 것이다. 각각 1.0 Hz의 單一正弦波(Case-1), 1.0 Hz와 0.65 Hz의 二成分合成波(Case-5), 1.0 Hz와 0.65 Hz의 二成分合成波(Case-9) 및 Bretschneider-光易形의 不規則波(Case-10)의 統計量의 變化이고, 그림중의  $\circ, \triangle, \square$ 는 각각 最大波, rms波, 1/3有義波를,  $\bullet$ 는 1/3有義波週期를 나타낸다.

Fig. 2로부터 1.0 Hz의 單一正弦波는 明確한 쇄파點

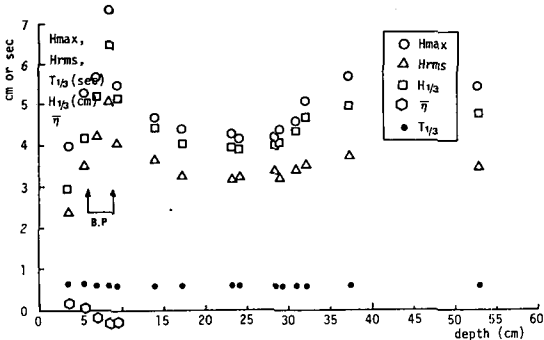


Fig. 4. Shoaling transformation of representative waves (case-9).

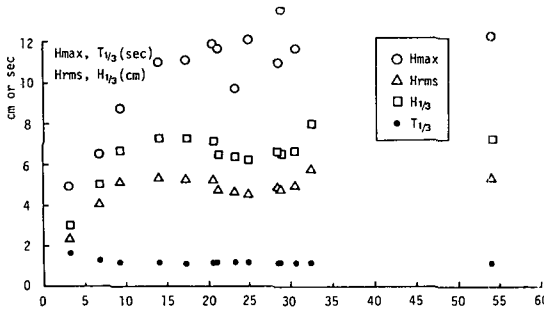


Fig. 5. Shoaling transformation of representative waves (case-10).

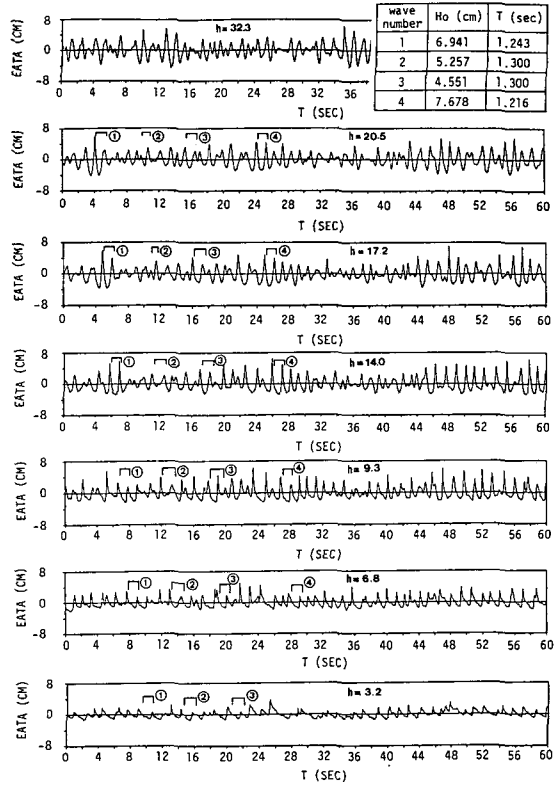


Fig. 6. Time series of irregular waves (case-10).

을 가진다. Fig. 3~Fig. 5로부터 二成分合成波와 Bretschneider-光易形の 不規則波도, 各 統計波의 쇄파點에는 顯著한 差異가 나타나지 않는다. 또한, 各 地點에서의 週期的 統計量은 그다지 큰 變化는 없고, 그림에 나타난 바와 같이  $T_{1/3}$ 가 거의 一定值를 나타내고 있기 때문에 波數가 保存되어진다는 것을 알 수 있다. 이로부터 波別解析되어진 個個波는 獨立的으로 傳播하는 것으로 推定되어진다.

(2) 波別解析波의 傳播特性

Fig. 6은 Bretschneider-光易形の 不規則波(Case-10)를 造波하여, 1m 間隔으로 測定되어진 水位變動의 時系列을 測點마다 比較한 것이다. 이들의 時系列中的 振幅이 比較적 크고 追跡可能한 4波를 抽出해 그 波高 및 波速의 淺水變形의 상태를 표시한 것이 Fig. 7 및 Fig. 8이다. 그림에서 나타난 바와 같이 비교적 큰 波의 波速은 微小振幅波理論과 거의 일치하고, 그 前後의 波는 獨立的으로 傳播해 가고 있는 형태를 나타낸다. 그러나 波高의 淺水쇄파變形에 대해서는 동일한 정도의 波形傾斜를 가진 個個波( $\Delta$ 과  $\circ$ )인 경우에도

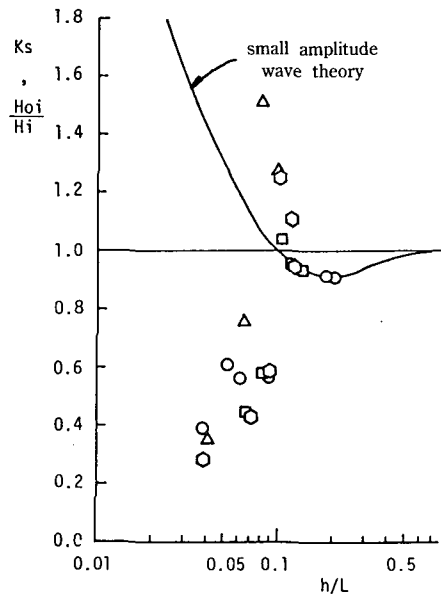


Fig. 7. Wave height transformation by individual waves (case-10).

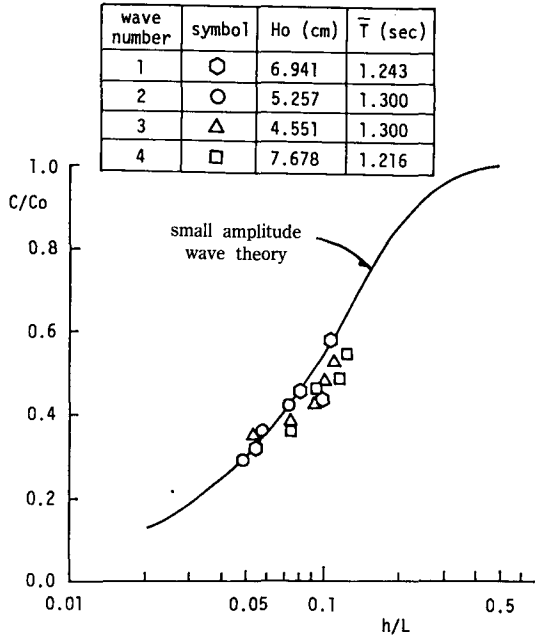


Fig. 8. Wave celerity transformation by individual waves (case-10).

쇄파波高, 쇄파點 및 쇄파形態 등이 다르기 때문에, 波別解析되어진 全個波를 이와같은 方法으로 推定

하는 것은 불가능하다. 그러므로 Mase(1982)에 의해서 提案되어 있는 波別解析되어진 個個波의 淺水變形을 計算함으로써 不規則波全體의 淺水變形을 豫測하는 方法은 어디까지나 하나의 統計的인 方法이고 物理的인 根據는 아직 명확하지 않다. 그러나 MASE에 의해 정리되어진 바와 같이 波別解析되어진 個個波의 淺水變形을 重疊함으로써 推定되어진 統計量的 淺水變形( $H_{rms}$ ,  $H_{1/3}$ )은 충분한 정도로 豫測되어져 더우기 屈折의 影響이 包含되는 不規則波의 變形에 대해서도 그 適用性이 確認(Mase, 1982)되었던 것으로부터 工學的으로 매우 가치있는 解析 方法이라고 思慮되어진다.

4.2 成分波의 傳播特性과 淺水變形

(1) 成分波의 變形

Fig. 9~Fig. 12는 Fig. 2~Fig. 5에 표시한 統計波의 淺水變形追跡에 있어서의 비쇄파領域, 쇄파점근점 및 쇄파帶內에 있어서 측정되어진 水位變動으로부터 計算되어진 spectrum이다. Fig. 9는 1.0 Hz의 單一成分波 (Case-1), Fig. 10 및 Fig. 11은 1.0 Hz와 0.65 Hz의 二成分合成波(Case-5) 및 1.0 Hz, 0.8 Hz(Case-9)의 二成分合成波, Fig. 12는 Bretschneider-光易形의 不規

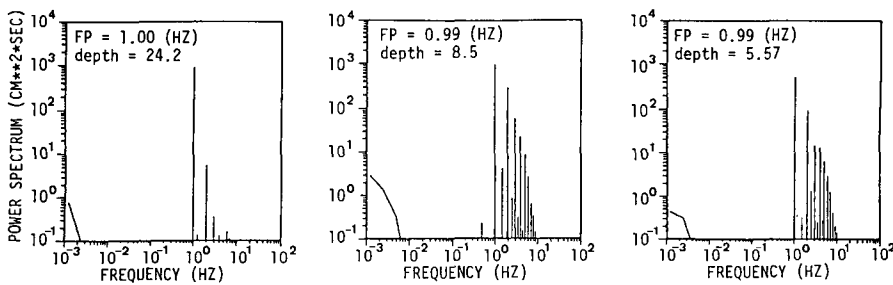


Fig. 9. Power spectrum (case-1).

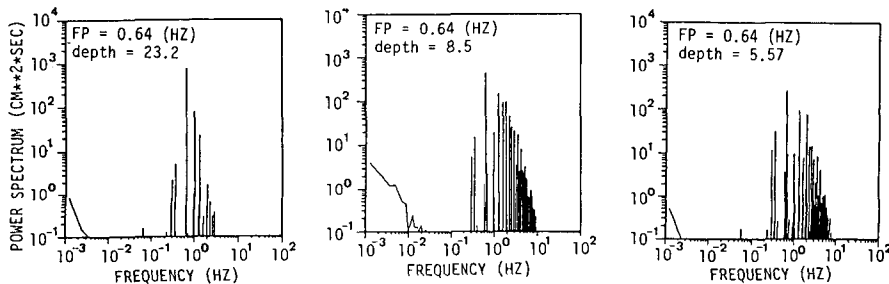


Fig. 10. Power spectrum (case-5).

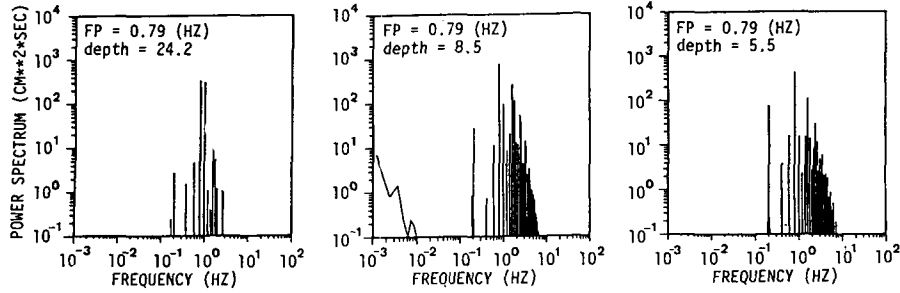


Fig. 11. Power spectrum (case-9).

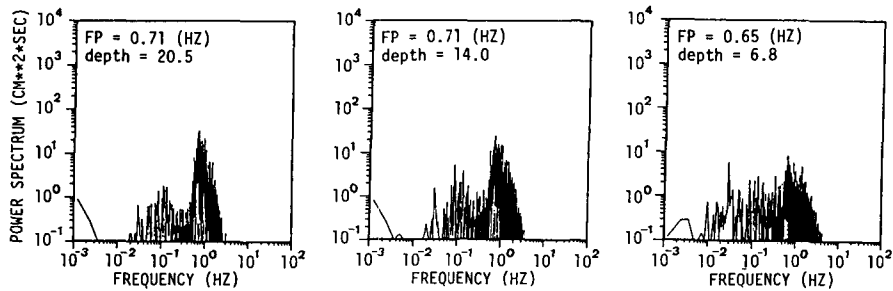


Fig. 12. Power spectrum (case-10).

則波(Case-10)를 造波한 경우의 power spectrum을 나타낸 것이고, 각각의 測定水深은 그림 中에 나타나 있다.

Fig. 13~Fig. 15는 이들의 power spectrum에 있어서의 基本週波數成分波, 倍週波數成分波(Fig. 13~Fig. 15) 및 合과 差의 週波數成分波(Fig. 14~Fig. 15)의 振幅을 式 (10)에 根據를 두고 計算해서 그 淺水變形의 樣相을 나타낸 것이다. 또한 그림 中에는 目測 觀測되어진 쇄파領域과 各 基本週波數成分波에 대한 Ursell數( $U_r = H_{1/3}L_{1/3}^2/d^3$ )도 表示되어 있다. Fig. 13으로부터 명백히 알 수 있는 바와 같이 基本週波數成分波의 振幅은 外見상의 쇄파點보다도 若干 深海中서부터 큰 減衰를 開始하고, 그들의 倍週波數成分波의 振幅은 增加하기 始한다. 이 地點에 對應하는 Ursell數는 約 15~20 以上이다. 또한, 二成分合成波를 造波한 경우에 發生하는 二 基本週波數의 合의 週波數에 對應하는 振幅도 2가지의 基本週波數成分波의 어느 쪽의 일단에 非線形舉動이 나타나면(倍週波數成分波의 振幅이 增大하면) 同時에 增加한다. 그러므로 Ursell數가 15~20 以上の 淺海域이 되면 波浪의 非線形性의 影響으로 基本週波數成分으로부터 高週波數成分에의 energy의 轉이가 일어나고 있는 것으로

推定되어진다. 이 Ursell數(15~20)은 權(1990)에서 행한 spectrum 解析法의 適用限界 Ursell數(15~20)와 거의 一致한다. 그러한 반면 二成分合成波를 造波한 경우에는 2개의 基本週波數의 差의 週波數成分波도 존재하고 그 振幅은 水深이 淺아짐에 따라서 增加한다. 이와같은 週波數의 差의 成分波는 二成分合成波의 포락波形에 기인하는 것이라고 사료된다.

여기서 週波數의 差의 成分을 가지는 水位變動이 어떠한 機構로서 發生하는가에 대해서 考察한다. Fig. 14와 Fig. 15는 Fig. 13에 表示한 二成分合成波를 造波한 경우에 測定되어진 水位變動의 時系列과 그 들을  $f=0.4$  Hz 및  $f=0.25$  Hz 이상의 週波數成分을 數值 filter로서 cut-off(그림 中의 點線)한 경우에 있어서 時系列을 나타낸 것이다. 또한 그림 中의  $\diamond$ 表示는 測定되어진 水位變動을 zero-down cross法으로서 波別解析하여, 그 個個波의 平均水位를 移動平均하여 연결한 것이다. 그림으로부터 명백히 나타낸 바와 같이 波群(포락波形)의 週期에 對應한 長週期의 水位變動이 發生하고, 그것은 波別解析 되어진 個個波의 平均水位變動과 거의 一致한다. 이와 같이 長週期의 水位變動이 自由長波로서 傳播할 것인가, 그렇지 않으면, 波群에 拘束되어서 個個波의 平均水位

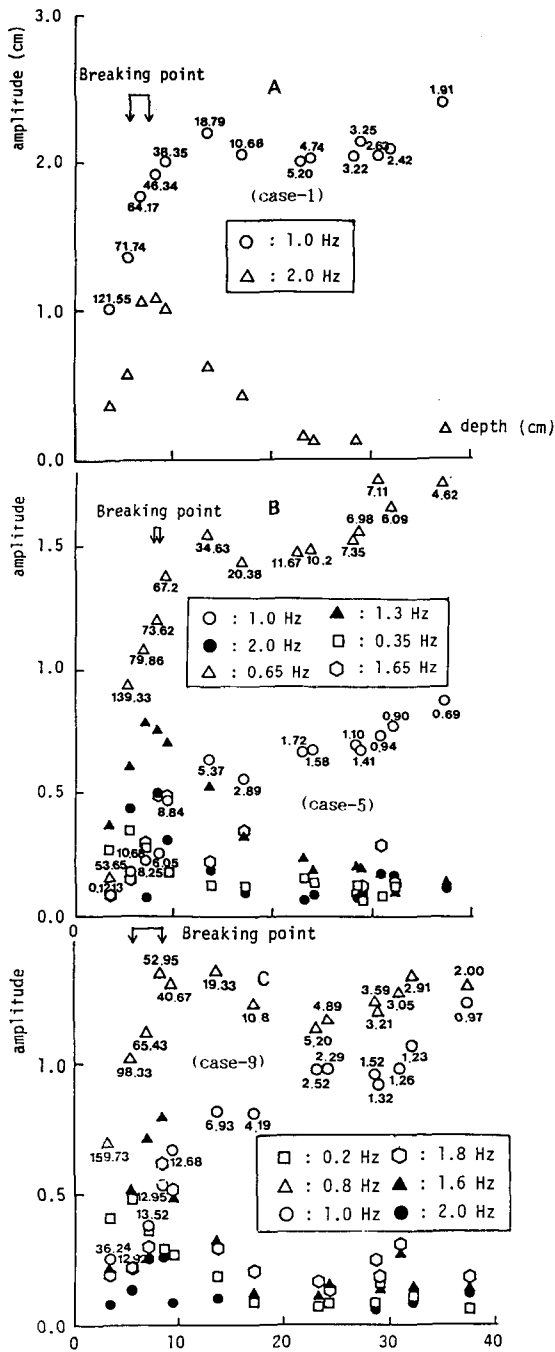


Fig. 13. Amplitude transformation of basic frequency and their interference frequency component wave.

變動으로서 발생 할 것인가에 대해서는 다음에 언급할 성분파의 傳播特性에서 論議한다.

(2) 成分波의 傳播特性

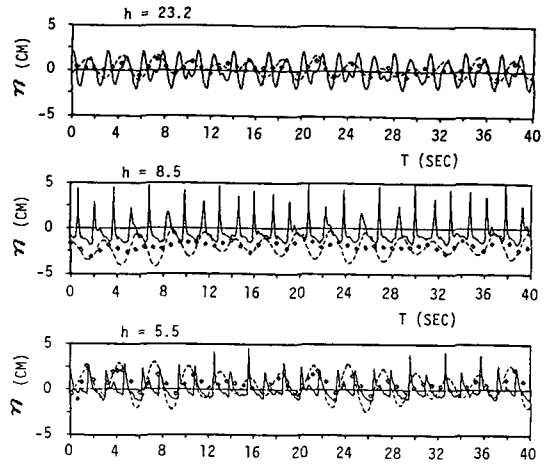


Fig. 14. Time series of two-component waves (case-5).

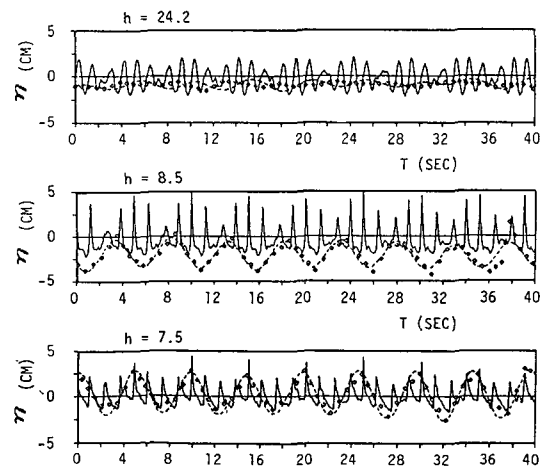


Fig. 15. Time series of two-component waves (case-9).

인접한 2측점간에 있어서 측정되어진 水位變動의 cross spectrum 解析結果로부터 얻어진 Phase lag에 根據를 두고 각 成分波의 傳播特性에 대해서 고찰하기로 한다.

Fig. 16은 식 (11)에 의해 計算되어진 Case-1, 5, 9에 대응하는 單一成分波 및 二成分合成波의 基本週波數 成分波와 差의 週波數成分波(그림중의 □표시)의 傳播速度를 나타낸 것이다. 그림 중에는 微小振幅波의 分散關係式으로부터 計算되어진 波速과  $\sqrt{gh}$ 로서 주어진 線形長波의 波速을 각각 실선으로, 또한 2개의 基本週波數成分波에 의해 형성되어진 群波의 傳播速度도 동시에 표시되어져 있다. 이들 그림으로부터 각각의 基本週波數成分은 각각의 波速으로 독립적으



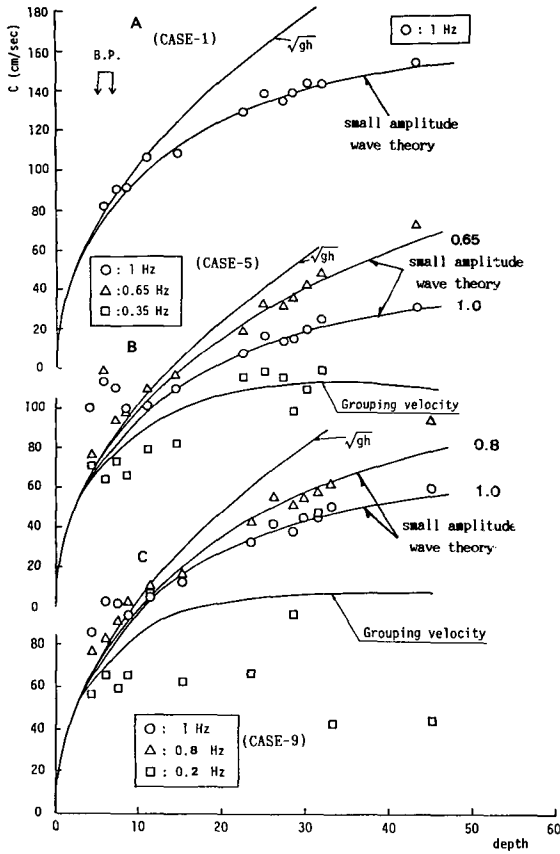


Fig. 16. Shoaling transformation of wave celerity.

로 傳播하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 (b)와 (c)에서 나타난 2成分합성파에 있어서는 외견상의 쇄파 대내에서의  $f=1.0$  Hz의 성분파에 대한 波速이  $\sqrt{gh}$ 보다 크게 나타난다. 이것은 이 領域에서의 coherence가 低下하고, phase lag의 決定에 큰 誤差가 包含되었기 때문이라 思慮되어진다. 또한 그림 (c)의 표시로서 표시한 2개의 基本週波數의 差의 週波數를 가지는 波動的 傳播速度는 매우 山란적이고 長波의 波速보다 훨씬 작은 傳播速度를 나타낸다. 이것은 差의 週波數를 가지는 波動的 傳播速度는 波群의 傳播速度, 즉 群速度로서 傳播되는 것으로 예측되어지지만, 群速度와 상이한 값을 나타내고 있다. 그러므로 이와같이 低週波數(長週期)의 水位變動의 傳播速度에 대해서는 本 研究에서 사용한 波速決定方法으로는 정도 높게 얻을 수 없다는 것을 알게 되었고, 이 점에 대해서는 今後 研究해 나갈 예정이다.

### 4.3 不規則波의 傳播特性으로 고찰한 波別解析波와 成分波法의 妥當姓

以上에서 고찰한 結果로부터 不規則波의 淺水碎波變形解析을 할 경우의 問題點에 대해서 정리하면 다음과 같다. 먼저, 2成分波의 傳播特性으로부터 水深(쇄파, 비쇄파)에 불구하고, 각각의 基本週波數成分波는 각각의 波速으로 독립적으로 傳播하고 있다는 것을 알았다. 이것으로부터 不規則波의 淺水碎波變形에 대해서는 그것을 構成하는 成分波를 獨立적으로 淺水變形시켜서 重疊하는 方法이 妥當하다고 사려되지만, 그 合成成分波의 碎波조건, 碎波 후의 energy 逸散 등에 대해서는 반드시 單一成分波에 대해서 취해온 方法은 適用할 수 없다는 것을 알았다. 그러므로 合成成分波의 淺水碎波變形에 대해서는 앞으로 더욱 檢討해 나갈 필요가 있다.

그러한 반면, 波別解析되어진 個個波에 대해서는 그들이 전부 獨立하게 傳播하는가에 대한 것은 實驗적으로 확인할 수 없었고, 追跡 가능한 몇개의 個個波의 傳播速度도 반드시 分散關係式으로부터 구해지는 波速과는 一致하지 않기 때문에, 個個波의 物理的인 의미는 명백히 할 수가 없었다. 그러나 中래부터 지적되어져 온 것과 같이 波別解析法은 統計波에 대한 일련의 統計解析手法으로서 충분히 價値가 있는 方法이다.

### 5. 平均水位變動으로부터 고찰한 radiation stress의 表現方法

2次元 水槽에서 淺水碎波變形의 波浪에 의해 發生하는 平均水位變動量  $\bar{\eta}$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \cdot \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \quad (12)$$

여기에서는 외견상의 쇄파帶內에 있어서 앞서 考察한 3가지 方法으로서 推定되어진  $S_{xx}$ 의 on-off shore 方向傾斜(式 (12) 右邊)와 실측되어진 平均水位의 on-off shore 方向傾斜(式 (12) 左邊)의 相關關係를 考察함으로써 각각의 表現方法의 타당성을 검토했다. 단, (1) 波別解析法으로서 計算하는 경우는 각각의 지점에서 측정되어진 水位變動을 波別解析(zero-down cross法) 함으로서 구해지는 波高와 週期の 結合確率分布를,

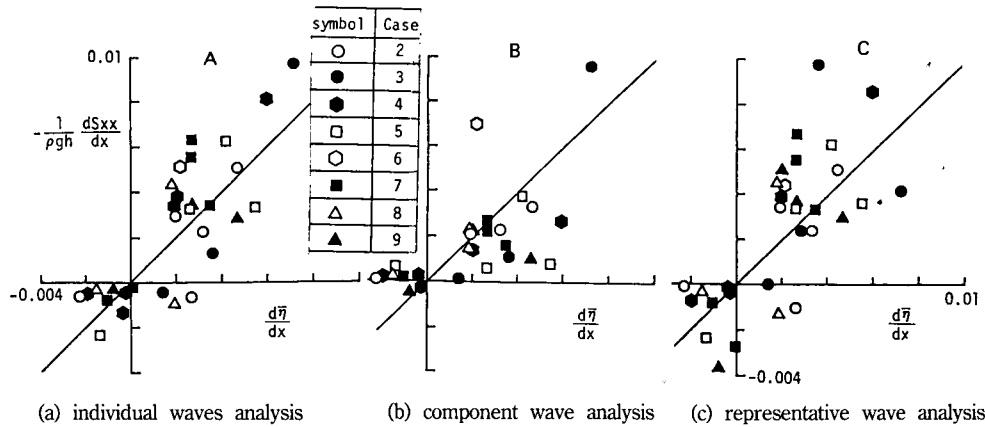


Fig. 17. Relation between measured  $\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x}$  and calculated  $\frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x}$

(2)의 성분법으로서 計算하는 경우는 實測되어진 水位變動으로부터 성분波의 振幅을, (3)의 代表波法에서는 波別解析되어진 個個波의 rms波高와 rms週期를 이용하여  $S_{xx}$ 를 추정(權, 1991)했다.

Fig. 17은 각각 (1)~(3)의 方法에 의해 구해진  $S_{xx}$ 의 空間的인 傾斜에 (-1)을 곱한 것(式 (12) 右邊)을 橫軸에, 實測되어진  $\eta$ 의 空間的인 傾斜(式 (12) 右邊)를 縱軸으로 취하고, 그들의 相關을 나타낸 것이다. 또한 그림 中の symbol은 Table 1에 Case No.와 일치한다. 여기서 radiation stress의 傾斜를 計算함에 있어서, 平均水位의 變動  $\bar{\eta}$ 는 水深에 비해서 작은 것으로 간주하여  $h + \bar{\eta} \cong h$ 로서 計算하였다. 또한, 성분波의 振幅으로서  $S_{xx}$ 를 계산할 경우에 있어서는 基本週波數 및 倍週波數의 성분波의 振幅을 고려했다. Fig. 17을 보면 波高와 週期の 結合確率分布로부터 추정된  $S_{xx}$ 를 사용한 Fig. (a)가 가장 상관이 높고 실제의 平均水位變動傾斜와 비교적 잘 일치하고 있다. 성분波의 振幅을 이용한 경우의 Fig. (b)는 振幅으로서 차와 합을 週波數成分을 고려하고 있지 않기 때문에,  $S_{xx}$ 의 傾斜는 實測의  $\bar{\eta}$ 의 勾配를 過小評價하고 있다. 이것은 淺水變形에 따라서 增加하는 基本週波數이외의 週波數成分을 고려하면 實測되어진  $\bar{\eta}$ 의 傾斜에 가까워진다고 豫測되어지지만, 淺水碎波變形에 따른 週波數間의 energy 移行에 대해서 해명되어져 있지 않은 現단계에서는 실제의 不規則波浪의 淺水碎波變形에 대해서 성분波法에 의해 radiation stress 및  $\bar{\eta}$ 의 變化를 예측하는 것은 곤란하다. 또한 rms 統計波에

의해 計算되어진  $S_{xx}$ 를 이용한 경우의 Fig. (c)을 보면, 성분波法의 경우 Fig. (b) 보다는 상관이 높지만 전체적인 分散이 크다. 그러므로, 本 研究에서 행한 實驗에서는 不規則波의 平均적인 radiation stress의 表現方法으로서는 波高와 週期の 結合確率分布로부터 求한 radiation stress로서 表現하는 것이 妥當하다고 結論 지어진다.

### 6. 結 論

本 研究에서는, 2次元水理實驗에 있어서, 單一成分波, 二成分合成波, Bretschneider-光易形의 不規則波를 發生시켜서, 그들의 淺水碎波變形에 따른 傳播特性에 대해서 考察하고, 不規則波의 淺水碎波變形을 解析할 경우 假定되어지는 3가지 方法, 즉, (1) 波別解析法, (2) 成分波法 및 (3) 代表波法の 適用姓에 대해서 檢討했다. 波別解析法에 대해서는, zero-down cross法에 의해 波別解析 되어진 不規則波의 傳播特性으로서, 統計波(最大波, 1/3有義波, rms波 등) 및 時系列 中の 임의 특정의 個個波의 波高, 週期 및 傳播速度의 淺水變化에 의한 變化라고 하는 관점으로 부터 檢討했다. 또한, 成分波法에 대해서는 spectrum 解析에 의해, 入力信號인 基本週波數成分波 및 淺水碎波變形에 따라 增加하는 干涉週波數成分波에 대한 波速, 波高의 淺水變形이라고 하는 관점으로 부터 그 妥當姓에 대해서 檢討했다.

또한, 上記의 3가지의 方法에서 推定되어진 不規

則波의 radiation stress를 實測되어진 平均水位變動  $\bar{\eta}$ 와 比較檢討 하였고, 本 研究에서 얻은 중요한 結果를 綜合하면 다음과 같다.

(1) zero-down cross 法에 의해서 波別解析 되어진 波浪의 統計波(1/3有義波 및 rms波)의 變形을 調査한 結果, 有義波의 週期는 水深變化에 대해서 거의 一定值를 나타내므로 波數가 보존되어져 波別解析 되어진 個個波가 獨立的으로 傳播되고 있는 것으로 推定되어진다. 그러나 特定の 個個波를 각 測定點에서 追跡한 結果, 그 波速은 반드시 微小振幅波理論의 分散關係式으로부터 얻어진 波速과는 一致하지 않는다는 것을 알았다. 그러므로 統計波의 工學的 價値를 생각하면 그것을 構成하는 個個波에 대한 物理的인 意味에 대해서 今後 더욱 檢討할 必要가 있다고 示唆되어진다.

(2) spectrum 解析에 의해 얻어진 成分波의 傳播特性에 관해서는 造波信號로서 基本週波數成分波는 각각의 波速으로 傳播하고 있다는 것을 알았다. 그러나 各 成分波의 碎波條件, 週波數間의 energy 移行 등에 대해서는 반드시 單一成分波와 同一하게 取扱할 수 없다는 것도 알았다. 그러므로 成分波 重疊으로서 淺水碎波變形豫測을 행하기 위해서는 그와 같은 問題點에 대해서 상세히 檢討할 必要가 있다.

(3) 本 研究의 實驗으로부터 얻은 data에 대해서, (1) 波別解析法, (2) 成分波法 및 (3) 代表波法에 의해 各 測定點의 radiation stress,  $S_{rr}$ 를 計算하고, 그들의 空間的인 傾斜와 實測되어진 平均水位變動  $\bar{\eta}$ 의 空間的인 傾斜의 相關性을 調査했다. 그 結果 波高와 週期の 結合確率分布로부터 radiation stress를 推定하는 波別解析法이 比較的 양호한 一致를 나타냈다. 그러

므로, 本 研究로부터, 不規則波의 平均的인 radiation stress의 推定方法으로서, 波高와 週期の 結合確率分布로부터 推定하는 것이 妥當하다고 結論 지을 수 있다.

## 謝 辭

本 論文은 1991年度 韓國學術振興財團 學術研究造成費(地方大學 育成 新進課題)에 의해서 研究되었음을 밝히고 上記 財團에 謝意를 表한다.

## 參考文獻

- Battjes, J.A. and Jonssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., pp. 569-587.
- Collins, J.I., 1970. Probabilities of breaking wave characteristics, Proc. 12th Coastal Eng. conf., pp. 399-414.
- Lo, Jen-Men, 1988. Dynamic wave setup, Proc. 21st Coastal Eng. Conf., pp. 999-1010.
- Mase, H. and Iwagaki, Y., 1983. wave height distribution and wave grouping in surf zone, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., pp. 58-76.
- Thornton, E.B. and Guza, R.T., 1983. Transform of wave height distribution, *Jour. Geophys. Res.*, **88**(C10), pp. 5929-5938.
- 郭金棟, 郭秀吉, 1972. 風波による碎波の波高減衰と波高の確率分布, 日本土木學會 第 19回 海洋工學 講演會 論文集, pp. 399-442.
- 合田良實, 1975. 淺海域による波浪 碎波變形, 日本 港灣技術研究所報告, **14**(3), pp. 59-106.
- 渡邊晃, 泉宮尊司, 中野秀樹, 1983. 非定常緩勾配方程式による不規則波 淺水變形解析, 日本土木學會 第 35回 海岸工學講演會論文集, pp. 173-177.
- 權正坤, 1990. 不規則波浪의 系統的 取扱手法, 韓國海岸·海洋工學會誌, **2**(2), pp. 83-95.
- 權正坤, 1991. 不規則波浪에 의한 沿岸流의 數值計算, 韓國海岸·海洋工學會誌, **3**(1), pp. 54-64.