

## 碎波帶에서의波浪變形에 대한水理模型實驗 A Hydraulic Model Test of Wave Transformation in the Surf Zone

鄭信澤\* · 蔡璋源\* · 鄭遠武\*

Shin Taek Joeng, Jang Won Chae and Weon Mu Jeong

**要 旨** : 不規則 斜面에서의 波浪變形을 分析하기 爲해 枱- 흐름 複合水槽에서 67 種의 規則波에 對한 實驗을 실시하였다. 斜面은 枱角과 Angle을 利用하여 製作하였으며 傾斜는 1/10, 1/20이다. 均一한 傾斜面에서는 碎波水深 指數, 波의 初오름 等은 既存의 실험결과와 큰 差가 없었으나, 深海 波浪傾斜가 작은 경우 이들의 값은 더 작았다. 또, 波의 初오름은 Hunt식과 잘 일치하였으며, 碎波가 發生하는 횡수와의 關係가 있다. 砂洲가 있는 경우, 碎波水深 指數는 기존의 식과 큰 差가 있다. 碎波後의 波高는 Dally 등(1984)의 理論式에 比해 작게 觀측되었다.

**Abstract** □ Sixty seven regular wave tests were performed in a wave-current flume to investigate properties of waves breaking on irregular slope profiles. In these tests, 1/10, 1/20 beach slopes were made using angles and plywoods. A little differences were found in such properties as breaker depth and height indices, runup for plane slopes comparing with other laboratory experiments, however, for smaller deepwater wave steepness, measured breaker height and depth data values were smaller than other formulas. On wave runup agreement was good between experiments and Hunt formula, however, measured data values were influenced by number of breaking. Significant differences were found in breaker depth index for plane and barred slopes. Wave height decay after breaking was found to be smaller than Dally *et al.*'s formula (1984).

### 1. 緒 論

沿岸域에서는 港灣建設, 沿岸域 埋立, 臨海 發電所의 建設, 護岸 築造 等을 통해 새로운 공간자원의 개발 이용이 활발히 이루어지고 있다. 이들과 關聯하여 主要 設計 環境要素인 波浪을 精確히 分析하고 예측 함으로써 개발효과를 極大化하고 부수적인 環境피해 를 最小化할 수 있을 것이다. 특히, 碎波帶內에서의 波浪變形은 沿岸流, 漂砂移動, 海岸線 및 水深變化 等을 초래하므로 이에 對한 研究가 精實히 要求된다.

碎波後의 波浪變形에 對해서는 既存의 波浪 理論 으로는 充分히 說明할 수 없기 때문에 수리모형실험을 많이 利用하고 있다. Horikawa와 Kuo(1966)는 斜面 에서의 波浪變形에 對한 水理模型 實驗을 실시하고 碎波後의 波高에 對한 解析解는 平面上에서는 實驗

值와 잘 일치하나 斜面上에서는 많은 오차를 보였다. Dally 등(1984, 1985)과 Dally(1990)는 斜面上에서의 實驗值에 近접하는 解析解를 求하였다. Battjes(1974)는 碎波帶에서의 波浪變形 研究를 爲해 Similarity parameter를 도입하여 Breaking criterion, breaker type 等을 기술하였고, Thornton 등(1984)은 現場觀測 및 水理模型 實驗 波高資料를 Goda(1975) 또는 Shore protection manual(1984)의 예측치와 比較하였다. 최근, Kamphuis(1991)는 移動床의 底面에서 不規則波 를 利用한 水理模型實驗을 실시하여 기존의 실험치 보다 더 작은 觀측치를 얻었으며, Zelt(1991)는 波의 初오름을 港灣 副振動 問題와 關聯시켜 數值解를 求 하였다.

本 研究에서는 造波水槽를 利用하여 1/10, 1/20 사면에서의 波浪變形에 對한 水理模型實驗을 실시하 여, 碎波後의 波高 및 파의 初오름 等을 經驗式 및

\*韓國海洋研究所 沿岸工學研究室(Coastal Engineerig Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea)

解析解와 비교하였다. 특히, 실제 현상에서 水中防波堤(Submerged breakwater)에 해당하는 砂洲를 斜面上에 설치하여, 砂洲가 없는 均一한 斜面에서의 波浪變形 結果와 比較하였다.

### 2. 實驗裝置 및 觀測方法

實驗에 사용된 造波水槽는 韓國海洋研究所의 2次元 波浪- 흐름 複合水槽로서 本 實驗에서는 흐름은 발생시키지 않고 波浪만을 발생시켜 實驗을 실시하였다. 實驗水槽는 全體적으로 水槽本體, 回流시스템, 計測機器 운반기, 給·排水施設 등으로 구성되어 있다. 水槽本體는 길이 53.15 m, 높이 1.25 m, 폭 1.0 m이며, 水槽의 左側 13 m와 右側 7 m 구간은 양측벽이 페인트를 칠한 철판으로 되어있고, 나머지 중앙부분은 양측벽이 강화유리로 되어 있다. 水槽바닥은 페인트를 칠한 鐵板으로 되어 있다. 斜面에서의 波浪變形을 관측하기 위해 Angle과 合板으로 製作된 1/10, 1/20 기울기의 傾斜面을 利用하였다(Fig. 1 참조). 造波機는 Piston형이며 波高計는 沈水 깊이에 따른 電氣 抵抗에 따라 파고를 측정하는 원리를 이용한다. 쇄파가 일어나는 지점의 水深 및 碎波高는, Video Camera를 이용하여 촬영한 후 VCR을 이용하여 結果를 분석하였다.

### 3. 既存 實驗結果 檢討

#### 3.1 碎波指數(Breaker Index)

沿岸 構造物을 設計하거나 漂砂移動을 研究하는 경우, 碎波波高 및 水深을 決定하는 作業이 先行되어야 한다.

碎波水深 指數(Breaker depth index,  $\gamma_b$ )는

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} \tag{1}$$

로 정의된 無次元數이며, 여기서  $H_b$ 는 碎波高,  $h_b$ 는

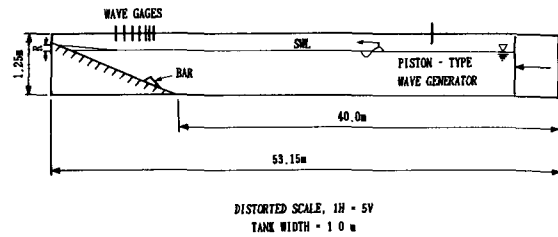


Fig. 1. Sketch of wave tank used in study.

碎波水深이다. 또, 碎波波高 指數(Breaker height index,  $\Omega_b$ )는

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_o} \tag{2}$$

로 定義된 無次元數로서, 여기서  $H_o$ 는 深海波高이다. 이들 無次元數는 無次元 碎波波高를 기술하는데 이용된다. 碎波水深 指數  $\gamma_b$ 는 Weggel, Sunamura, Smith and Kraus 등이 實驗式을 提案하였는데 그 一般的인 형태는 다음과 같다(Smith and Kraus 1990).

$$\gamma_b = C_1 m^{n_1} \left[ \frac{H_o}{L_o} \right]^{n_2} + C_2 \tag{3}$$

위 식에서  $C_1, C_2$ 는 係數,  $n_1, n_2$ 는 指數,  $m$ 은 斜面傾斜, 그리고  $L_o$ 는 深海波長이며, 각 經驗式에 대한 값들은 Table 1과 같다.

碎波波高 指數  $\Omega_b$ 는 Munk, Sunamura, Smith and Kraus 등이 다음과 같은 형태로 實驗式을 제안하였으며, 係數 및 指數( $D_1, D_2, K_1, K_2$ )는 Table 2와 같다(Smith and Kraus 1990).

$$\Omega_b = D_1 m^{K_1} \left[ \frac{H_o}{L_o} \right]^{K_2} + D_2 \tag{4}$$

#### 3.2 碎波形態(Breaker type)

碎波前의 波浪變形 現象에 대해서는 數值模型 등을 통하여 많은 研究가 進行되어 왔으나, 碎波後의 波浪變形은 주로 亂流에 의해 發生하기 때문에 아직

Table 1. Summary of coefficients and exponents for breaker depth index

Source	$C_1$	$n_1$	$C_2$	$n_2$
Weggel (1972)	$6.79 \times \{\exp(-19 m) - 1\}$	0	$1.56 / \{1 + \exp(-19.5 m)\}$	1
Sunamura (1981)	1.1	0.167	0	-0.083
Smith and Kraus (1990)	$5 \times \{\exp(-43 m) - 1\}$	0	$1.12 / \{1 + \exp(-60 m)\}$	1

Table 2. Summary of coefficients and exponents for breaker height index

Source	D <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>
Munk (1949)	0.30	0	0	-0.33
Sunamura (1982)	1.0	0.2	0	-0.25
Smith and Kraus (1990)	0.34 + 2.47 m	0	0	-0.3 + 0.88 m

現象 自體에 대한 糾明도 不完全하다. 그러나, 이처럼 복잡한 現象임에도 불구하고 碎波되는 波浪의 形態는 비교적 一定하다.

碎波形態는 해저면 경사 및 파랑경사의 함수로서, 碎波帶 相似係數(Surf similarity parameter)  $\xi_o$ 에 의해 4가지 형태로 구분할 수 있으며 무차원수  $\xi_o$ 는 다음과 같이 정의된다(Battjes 1976).

$$\xi_o = \frac{m}{(H_o/L_o)^{1/2}} \quad (5)$$

砂洲가 없는 均일한 사면에서,  $\xi_o$ 에 의한 碎波形態의 분류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Surging or Collapsing} & \text{ if } \xi_o > 3.3 \\ \text{Plunging} & \text{ if } 0.5 < \xi_o < 3.3 \\ \text{Spilling} & \text{ if } \xi_o < 0.5 \end{aligned} \quad (6)$$

砂洲가 있는 사면에서의 碎波形態는 Smith and Kraus(1990)에 의해 식 (6)과 다른 형태로 표현되었다.

### 3.3 波의 쳐오름(Runup)

波의 쳐오름은 海岸線 附近에서 가장 흔히 觀測되는 現象이다. 이 現象은 波浪이 碎波되기 때문은 물론,

碎波되지 않는 경우도 海岸線이 移動하기 때문에 現象을 糾明하기가 무척 어렵다.

波의 쳐오름(R)은 入射波에 의해 水面위로 상승되는 높이(Fig. 1 참조)로서 해안구조물의 설계시 매우 중요하다. 波의 쳐오름은 Hunt(1959)가 다음과 같은 經驗式으로 표현한 바 있다.

$$\frac{R}{H_o} = 1.27 m \left[ \frac{H_o}{T^2} \right]^{-1/2} \quad (7)$$

여기서, R 및 H<sub>o</sub>는 미터 단위이며, T는 週期이다.

### 3.4 波高 減衰

쇄파대에서 波高 減衰에 대한 식은 Longuet-Higgins and Stewart(1964)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$H = \gamma_b h \quad (8)$$

여기서, H는 쇄파 후의 파고이며, 보통의 경우  $\gamma_b$ 는 0.78을 사용하고 있다. 그러나, Dally(1990), Dally 등(1984, 1985)은 水理學에서의 跳水(Hydraulic jump) 개념을 도입하여 사면에서 쇄파후의 波高를 다음과 같이 나타냈다.

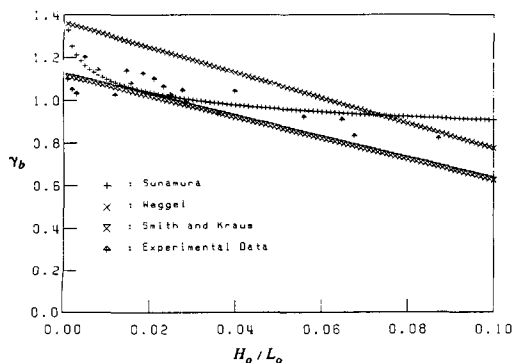


Fig. 2. Comparison of breaker depth index between equation (3) and measurement for 1/10 beach slope.

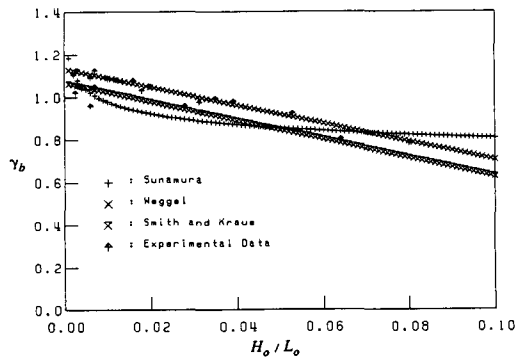


Fig. 3. Comparison of breaker depth index between equation (3) and measurement for 1/20 beach slope.

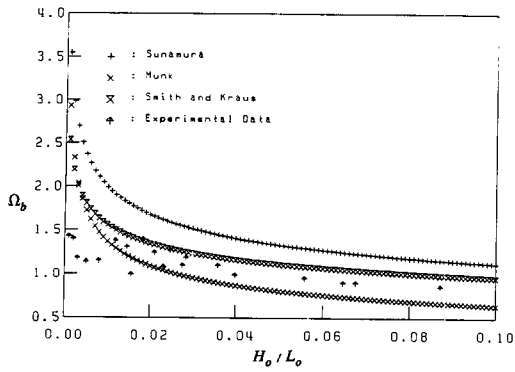


Fig. 4. Comparison of breaker height index between equation (4) and measurement for 1/10 beach slope.

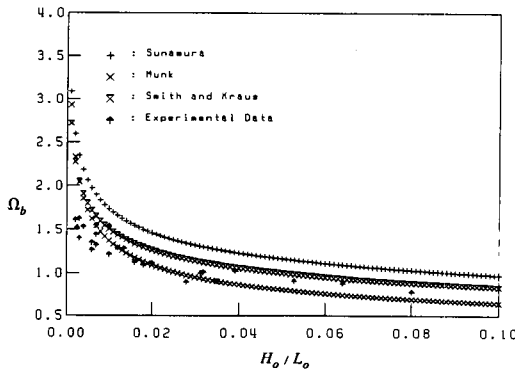


Fig. 5. Comparison of breaker height index between equation (4) and measurement for 1/20 beach slope.

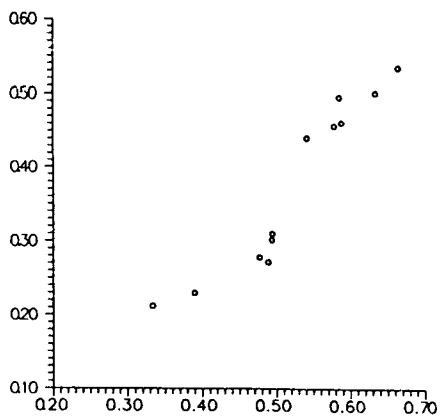
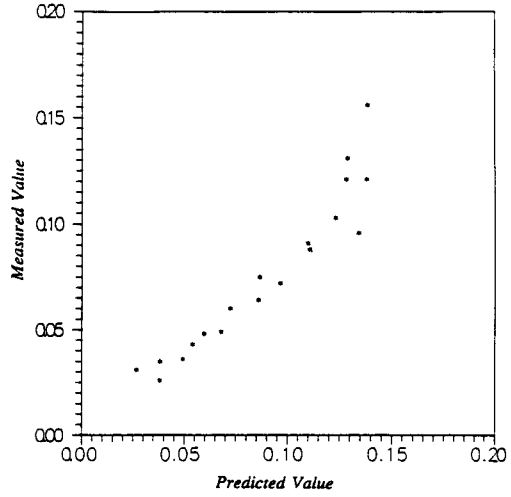
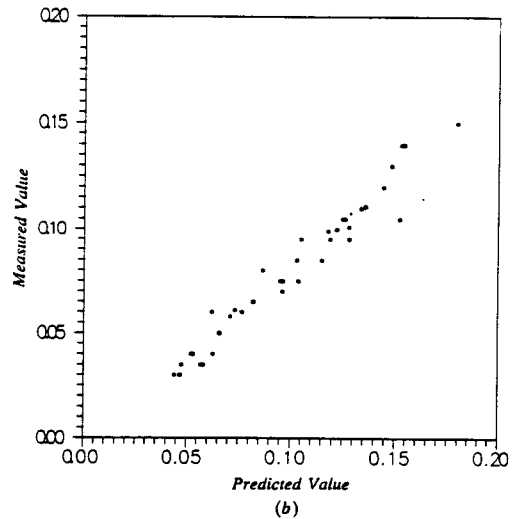


Fig. 6. Breaker depth index for barred profiles.

$$\frac{H}{H_b} = \left[ \left( \frac{h}{h_b} \right)^{[(K/m) - 1/2]} (1 + \alpha) - \alpha \left( \frac{h}{h_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$



(a)



(b)

Fig. 7. Comparison of runup between equation (5) and measurement for 1/10 beach slope.

여기서,  $\alpha = \frac{K\Gamma^2}{m \left[ \frac{5}{2} - \frac{K}{m} \right]} \left[ \frac{h_b}{H_b} \right]^2$ 이며,

K,  $\Gamma$ 는 상수, h는水深이다.

#### 4. 實驗 結果分析

##### 4.1 碎波指數(Breaker Index)

碎波水深指數  $\gamma_b$ 는 波高 4.2~15.8 cm, 週期 0.8~5 초사이의 規則波에 대해 실험을 실시하여, Fig. 2와

3에 각각 1/10과 1/20의 균일한 사면에서 觀測値와 式 (3)을 圖示하였다. 觀測値는 대부분 既存 式 (3)의 범위안에 존재하나,  $H_0/L_0$ 가 작은 곳에서는 더 작게 나타났다.

同一한 波浪條件下에서 碎波 波高指數  $\Omega_b$ 의 觀測値와 式 (4)를 Fig. 4, 5에 각각 圖示하였다. 觀測値는 碎波 水深指數처럼  $H_0/L_0$ 가 작은 곳에서는 式 (4)보다 더 작게 나타났다.

砂洲가 있는 1/10사면에서 쇄파수심 지수는 기존식 (3)과는 큰 차이가 있으며, 쇄파수심 지수와 碎波帶 相似係數  $\xi_0$ 는 다음과 같은 관계가 있다(Fig. 6 참조).

$$\gamma_b = 1.14587 \xi_0 - 0.223645 \quad (10)$$

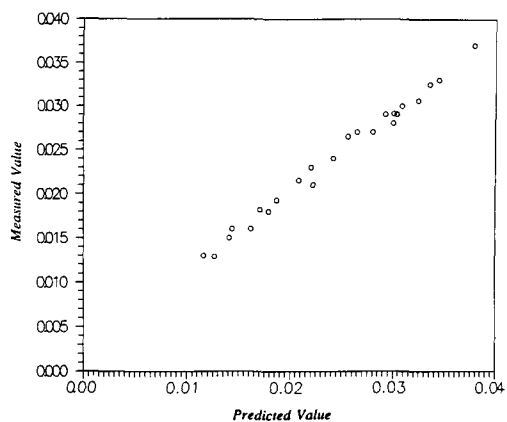


Fig. 8. Comparison of runup between equation (5) and measurement for 1/20 beach slope.

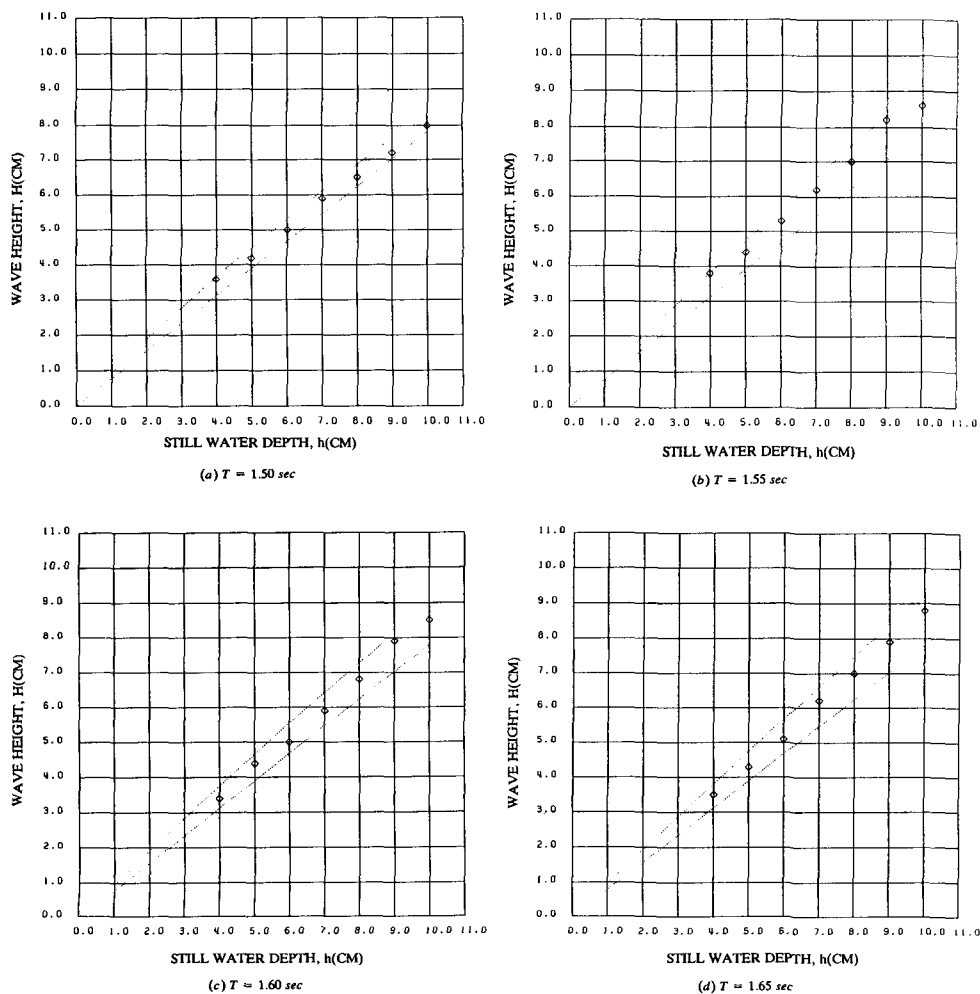


Fig. 9. Comparison of wave height between equation (6) and measurement for 1/20 beach slope.

#### 4.2 碎波形態

觀測된 자료를 분석한 결과, 1/10, 1/20 기울기의 균일한 사면에서 모두 Spilling type과 Plunging type의 쇄파가 발생하였다. 따라서, 파랑조건이 일정한 경우, 사면경사가 증가할 수록 Spilling, Plunging, 그리고 Collapsing type의 순으로 쇄파가 발생한다. 이러한 현상은 파고 및 斜面傾斜가 일정한 경우 주기가 증가할 때도 발생한다.

#### 4.3 波의 처오름

觀測된 波의 처오름(R)과 식 (7)을 Fig. 7, 8에 각각 圖示하였다. Fig. 7(a)는 1/10 사면에서 쇄파가 한번 발생하는 경우이며, Fig. 7(b)는 1/10 斜面의 前面에 砂洲를 설치하여 쇄파가 두번 발생하는 경우이다. 관측치가 예측치에 비해 작게 나타나는 것을 볼 수 있다.

#### 4.4 波高 減衰

1/20 사면에서 觀測된 波高와 식 (9)를 Fig. 9에 圖示하였다. 전반적으로 관측치가 예측치에 비해 작으며 식 (8)의  $\gamma_0$ 를 0.78로 하는 경우보다는 크게 나타난다.

### 5. 結論 및 討議

幅이 一定한 實驗水槽의 底面에 설치된 1/10, 1/20 기울기의 斜面(Fig. 1 參照)에서, 67 종류의 波浪條件에 대하여 碎波水深 및 波의 처오름 등을 觀測하였다. 사주가 없는 균일한 사면의 경우, 碎波高 및 碎波水深은 經驗式과 잘 일치하나,  $H_0/L_0$ 가 작은 경우에는 작게 나타난다(Fig. 2~5 參照). 그러나, 砂洲가 있는 경우 碎波水深 指數는 既存式과 큰 차이를 보이며(Fig. 6 參照), 식 (10)과 같은 관계가 있다. 이 砂洲는 실제 현상에서 水中 防波堤에 해당하므로 사주의 형태 및 再形成(Reforming)을 고려한 碎波研究가 필요하다.

碎波形態는 파고 및 사면경사가 일정한 경우 주기가 증가할 수록 Spilling, Plunging, 그리고 Collapsing type의 순으로 쇄파가 발생한다.

처오름의 경우 본 實驗結果가 經驗式보다 작게 나타나며(Fig. 7, 8 參照), 쇄파횟수와도 관계가 있다.

쇄파대 내에서의 波高減衰 結果는 Dally 등(1984)의 결과보다는 작게 관측되었다. 본 實驗은 기울기 1/10, 1/20 斜面에 국한하였으나 여러 종류의 斜面에 대하여 實驗을 擴張하고, 실제 현상에 가까운 불규칙파에 대한 연구가 필요하다.

### 謝 辭

本 研究는 韓國海洋研究所의 1990年度 基本研究費에 의해서 遂行한 研究結果이다. 實驗준비를 위해 수고해주신 실험실원 여러분께 謝意를 表한다.

### 參考文獻

- Basco, D.R., 1985. A qualitative description of wave breaking, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **111**(2): 171-188.
- Battjes, J.A., 1974. Surf similarity, *Proceedings of 14th Conference of Coastal Engineering, ASCE*, 466-480.
- Battjes, J.A., and M.J.F. Stive, 1984. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, *Proceedings of 19th Conference of Coastal Engineering, ASCE*, 649-660.
- Brevik, V., and B. Aas, 1980. Flume experiment on waves and currents. I. Rippled bed, *Coastal Engineering, Amsterdam, Netherlands*, **3**: 149-177.
- Dally, W.R., 1990. Random breaking waves: A closed-form solution for planar beaches, *Coastal Engineering, Amsterdam, Netherlands*, **14**: 233-263.
- Dally, W.R., R.G. Dean, and R.A. Dalrymple, 1984. Modeling wave transformation in the surf zone, *Miscellaneous Paper CERC-84-8, US Army Corps of Engineer WES, Vicksburg, Mississippi*.
- Dally, W.R., R.G. Dean, and R.A. Dalrymple, 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *Journal of Geophysical Research*, **90**(C6): 11917-11927.
- Galvin, C.J., 1972. Wave breaking in shallow water, *Waves on beaches and resulting sediment transport*, R.E. Meyer, ed., Academic Press, New York, 413-456.
- Goda, Y., 1975. Irregular wave deformation in the surf zone, *Coastal Engineering in Japan*, **18**: 13-26.
- Hansen, J.B., 1990. Periodic waves on the surf zone: Analysis of experimental data, *Coastal Engineering, Amsterdam, Netherlands*, **14**: 19-41.
- Horikawa, K., and C.T. Kuo, 1966. A study on wave transformation inside surf zone, *Proceedings of 10th Conference of Coastal Engineering, ASCE*, 217-233.
- Izumiya, T. and M. Isobe, 1986. Breaking criterion on non-uniform sloping beach, *Proceedings of 20th Conference of Coastal Engineering, ASCE*, 318-327.
- Kamphuis, J.W., 1991. Incipient wave breaking, *Coastal Engineering, Amsterdam, Netherlands*, **15**: 185-203.

- Longuet-Higgins, M.S., and R.W. Stewart, 1964. Radiation stresses in water waves; A physical discussion, with application, Deep-Sea Research, Oxford, England, **11** (4): 529-562.
- Riedel, H.P., and A.P. Byrne, 1986. Random breaking waves, Proceedings of 20th Conference of Coastal Engineering, *ASCE*, 903-908.
- Sakai, S., and N. Gobayashi, 1990. Breaking condition of shoaling waves on opposing current, *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **116** (2): 302-306.
- Smith E.R., and N.C. Kraus, 1990. Laboratory study on macro-features of wave breaking over bars and artificial reefs, Technical Report CERC-90-12, US Army Engineer WES, Vicksburg, Mississippi.
- Smith E.R., and N.C. Kraus, 1991. Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **117**(4): 307-325.
- Thornton, E.B., C.S. Wu, and R.T. Guza, 1984. Breaking wave design criteria, Proceedings of 19th Conference of Coastal Engineering, *ASCE*, 31-41.
- Zelt, J.A., 1991. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves, *Coastal Engineering*, Amsterdam, Netherlands, **15**: 205-246.