

海岸構造物 周邊에서 海岸線變形 豫測模型 實驗 A Shoreline Change Model around Coastal Structures

李宗燮* · 朴一欽*
Jong Sup Lee* and Il Heum Park*

要 旨 : 任意的 海岸構造物 設置에 의한 海岸線變形을 豫測하기 위한 數值模型을 開設하였다. 본 模型은 波浪變形의 計算에 있어서 離岸堤, 突堤 등과 같은 遮蔽構造物과 潛堤 등과 같은 構造物에도 適用할 수 있도록 波浪의 屈折·廻折을 고려한 正常狀態의 緩傾斜方程式과 屈折, 廻折 및 淺水係數 算定에 의한 波向線法을 병용하였다. 任意 構造物에 대한 適用結果, 典型的인 海岸線變形의 計算結果를 보였으며, 沿岸方向의 波高分布에 따라 매우 민감한 反應을 보였다. 본 模型의 現地海岸에의 適用結果, 복잡한 地形과 海岸構造物 周邊에서도 適用이 가능한 것으로 나타났다.

Abstract □ A numerical model is developed to predict the shoreline change by the coastal structures constructed. In order to describe the wave deformation at the shadow zone of the structure, the present model employs the mild-slope equation in steady state and the wave ray method using the coefficients of wave refraction, diffraction and shoaling. In the model results of shoreline changes for the various structures, it showed a qualitative agreement with the findings observed in the field such as tombolo, and the response of this model was found to be very sensitive to the longshore distribution of wave heights. It was also applied to a field area. From the results of the application this model is proved to be useful around the complex coastal structures and bottom topography.

1. 緒 論

自然海濱의 變化는 일반적으로 季節的이며 수년에 걸쳐서 보면 대개 平衡狀態에 있다. 그러나 海岸에 構造物이 건설되거나 河川에 댐이 건설될 경우 漂砂 移動의 平衡狀態가 깨어져 海岸地形의 變化를 초래한다. 따라서 海岸構造物이나 댐의 건설을 計劃할 경우에는 앞으로 일어날 海岸線의 變化를 定量的으로 豫測할 필요가 있다.

海岸線變形模型은 기본적으로 海濱斷面積의 變化量이 海岸線變化量과 線型的인 關係(A-1 特性)에 있다는 假定하에 漂砂의 連續方程式을 유도하여 時間變化에 따른 海岸線의 前進 및 後退值를 계산하는 模型이다. 따라서 海岸線에 따른 全海岸漂砂量의 算定이 중요하다. 全海岸漂砂量은 대개 碎波點에서 energy와 群速度의 곱으로 표현되는 breaking wave energy flux의 海岸方向成分과 비례한다는 經驗式(Eaton, 1951)을 많이 사용하며, 최근에는 碎波方向分布를 고려하는

算定式(Ozasa and Brampton, 1980; Kraus *et al.*, 1981)이 널리 사용되어지고 있다. 朴·李(1989)는 自然狀態의 現地海岸에서 碎波波高의 沿岸方向分布와 sink·source항의 계수치 調整을 통한 海岸線變形 豫測模型의 檢證과 海岸線의 長期豫測을 행한 바 있다.

본 研究에서는 離岸堤, 突堤 및 潛堤 등과 같은 海岸構造物이 설치될 경우 海岸線變形을 豫測하기 위한 數值模型을 확립하고자 한다. 海岸構造物 周邊에서 波浪의 屈折, 廻折을 고려한 波浪變形의 計算과 檢證 계수의 調整에 따른 海岸線變化의 變動樣相에 대한 數值實驗을 행하였다. 그리고 본 模型의 適用性을 검토하기 위하여 現地海岸에 적용하였다.

2. 構造物 周邊에서 海岸線變化의 豫測方法

構造物 周邊에서의 海岸線變化의 豫測順序는 우선 地形條件을 설정하고 入射波의 제원을 결정한 후 波 動場을 계산하고 沿岸漂砂를 산정한 후 海岸線變化를

*釜山水產大學校 海洋工學科(Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-023, Korea)

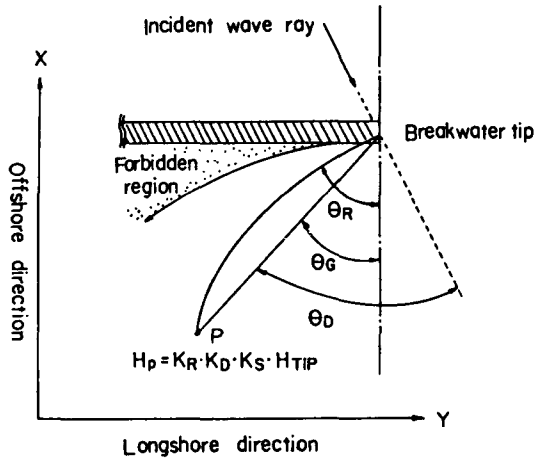


Fig. 1. Definition sketch of wave deformation.

계산한다. 그리고 入射波의 제원이 時間에 따라 변하는 경우에는 다음 入射波의 條件에 의하여 위와 같은 計算을 反復할 需要가 있으며, 海岸線의 變化에 따른 海岸線과 이루는 碎波波向을 보정한 후 沿岸漂砂量을 산정한다.

본 研究에서는 構造物 周邊에서 海岸線變形을 계산하기 위하여 構造物에 의한 波浪의 屈折, 廻折, 淺水變形 및 碎波 등을 고려한 海岸線變形 豫測方法에 대하여 研究하였다.

2.1 波浪變形的 計算方法

海外로부터 海岸으로 入射하는 波의 屈折·廻折變形은 Ebersole(1985)에 의한 定常狀態의 緩傾斜方程式에 의하여 계산하였다. 한편 構造物에 의한 遮蔽領域에서는 Fig.1과 같은 座標係에서 보는 바와 같이 波向線式과 係數算定에 의하여 波向 및 波高를 산정하였다. 우선 構造物 先端에서 식 (1)-(3)과 같은 波向線式으로부터 波의 進行經路를 구하고, 식 (4)와 같이 屈折係數 K_R 을 산정하였다.

$$d\theta/dt = \partial C/\partial y \cdot \cos \theta - \partial C/\partial x \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$dx/dt = C \cos \theta \quad (2)$$

$$dy/dt = C \sin \theta \quad (3)$$

여기서, t 는 時間, C 는 波速, θ 는 波向이다.

$$K_R = \left(\frac{\cos \theta_0}{\sin \theta} \right)^{1/2} = \left[1 + \left\{ 1 - \left(\frac{C}{C_0} \right)^2 \tan^2 \theta_0 \right\}^{-1/4} \right] \quad (4)$$

여기서, 下添字 o 는 入射波의 條件이다.

廻折係數는 半無限防波堤에 대한 Wiegel(1962)의 解인 식 (5)로부터 구하였다.

$$F(r, \alpha) = f(u_1) \exp \{-ikr \cos(\alpha - \alpha_0)\} + g(u_2) \exp \{-ikr \cos(\alpha + \alpha_0)\} \quad (5)$$

여기서,

$$\alpha = \pi/2 - \theta_G, \quad \alpha_0 = \alpha + \theta_D$$

$$u_1 = 2(kr/\pi)^{1/2} \sin \{(\alpha - \alpha_0)/2\},$$

$$u_2 = 2(kr/\pi)^{1/2} \sin \{(\alpha + \alpha_0)/2\},$$

$$f(u_1) = 1/\sqrt{2} \cdot \exp(i\pi/4) \int_{-\infty}^{u_1} \exp(-i\pi\omega^2/2) d\omega,$$

$$f(u_2) = 1/\sqrt{2} \cdot \exp(i\pi/4) \int_{-\infty}^{u_2} \exp(-i\pi\omega^2/2) d\omega,$$

k : 波數, r : 構造物 先端에서 P점까지의 距離

식 (5)로부터 P점의 廻折係數 K_D 는 식 (6)과 같다.

$$K_D = (R^2 + I^2)^{1/2} \quad (6)$$

여기서, R 은 식 (5)의 實數部, I 는 식 (5)의 虛數部이다.

한편, 水深變化로 인한 淺水係數 K_S 는 다음 식 (7)로 구한다.

$$K_S = \left\{ \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tanh kh \right\}^{-1/2} \quad (7)$$

여기서, h 는 水深이다.

이상의 方法으로부터 任意點 P에 있어서 波高 H_P 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_P = K_R \cdot K_D \cdot K_S \cdot H_{tip} \quad (8)$$

碎波點은 식 (9)와 같은 經驗式을 사용하여 구하였다.

$$H_o = \gamma h_o$$

여기서 γ 는 0.78로 하였다.

한편, Fig.1에서 보는 바와 같이 構造物 背後에는 屈折波 또는 廻折波가 전파되지 못하는 forbidden region이 존재하게 되는데, 이곳에서의 波高 및 波向값은 주위 값으로부터 補間하여 산정하였다.

2.2 海岸線變形的 計算方法

海岸線變形에 쓰여진 基礎方程式은 漂砂의 連續方程式인 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{1}{D} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \pm q \right) = 0 \quad (10)$$

Table 1. Calculation conditions for various structures.

Structures	Wave conditions			tan β	d ₅₀ (mm)	Boundary condition
	H ₀	T(sec)	α ₀ (deg.)			
Detached breakwater			0.0			
Groin	1.0	5.0	15.0	1/20	0.30	Q(ib) = 0
Circular shoal			0.0			

여기서, x는 海濱幅, y는 沿岸方向의 軸, D는 沿岸漂砂의 移動限界水深, Q는 沿岸漂砂量, q는 漂砂의 sink 또는 source 항이다.

沿岸漂砂量 Q는 沿岸方向의 波高分布를 고려한 다음의 식을 사용한다(Kraus *et al.*(1981)).

$$Q = (H^2 C_g)_b (K_1' \sin 2\alpha_{bs} - K_2' \cos \alpha_{bs} \cdot \partial H_b / \partial y) \quad (11)$$

$$K_1' = K_1 / [16 (\rho_s - \rho) 1.412 (1 - P)^{5/2}] \quad (12)$$

$$K_2' = K_2 / [8 (\rho_s - \rho) 1.412 (1 - P)^{5/2}] \quad (13)$$

여기서, α_{bs}는 碎波点에서 波峰線과 海岸線이 이루는 角, ρ_s는 모래의 密度, ρ는 海水의 密度, P는 모래의 空隙率, K₁, K₂는 經驗的 常數로서 檢證媒介變數(calibration parameters)이다.

沿岸漂砂의 移動限界水深 D는 波의 初으뜸높이와 漂砂移動限界水深(closure depth)의 합으로서 각각 Swart(1974)와 Hallermeier(1983)가 제안한 식을 사용하였으며, 數值計算의 상세한 내용은 朴·李(1989)와 같다.

3. 海岸構造物 周邊에서 模型의 適用結果 및 考察

본 模型의 適用性을 검토하기 위하여, 대표적인 海岸構造物인 離岸堤, 突堤 및 潛堤와 유사한 圓形淺堆(circular shoal)가 존재하는 任意의 海岸을 대상으로 計算을 행하였다. 각 경우에 대한 計算條件은 Table 1과 같으며, 이들 構造物의 配置圖는 Fig.2와 같다.

3.1 離岸堤에 의한 海岸線變形

離岸堤의 제원은 길이 100 m, 폭 10 m로 하였으며, 平均水深 9.5 m에 海안線과 平行으로 설치한 것으로 가정하였다. 入射波浪의 條件과 地形條件은 Table 1에

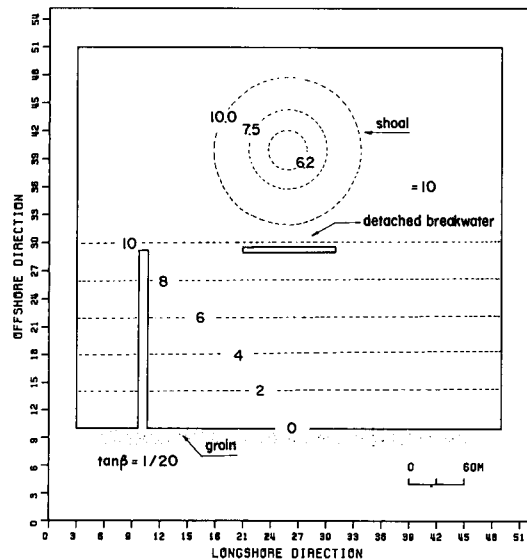


Fig. 2. Arrangement of various structures.

제시되어 있으며, 初期海岸線은 凹凸이 없이 y軸과 平行한 直線으로 하였다.

波浪變形의 計算은 2.1에서 說明한 各 係數에 의한 算定方法에 의하였다. Fig.3은 波浪의 計算결과이다. 離岸堤 背後에서 뚜렷한 廻折現狀을 볼 수 있으며, 碎波線은 離岸堤 背後에서 크게 後退하여 이 부근의 波高가 다른 곳에 비하여 상대적으로 작게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 波浪이 海岸線에 直角으로 入射하므로 離岸堤 中央部를 기준으로 各 값들이 左右對稱인 分布를 하고 있으며, 廻折의 影響範圍 내에서 各 값의 沿岸方向變化가 큰 편이다.

4주 후의 離岸堤 背後에서 海岸線變形을 計算한 結果는 Fig.4와 같다. 離岸堤 背後에서 tombolo가 形成되었으며 沿岸方向의 波高分布를 고려한 常數 K₂가 클수록 海岸線의 前進 및 後退值가 크게 나타나는 結果를 보인다.

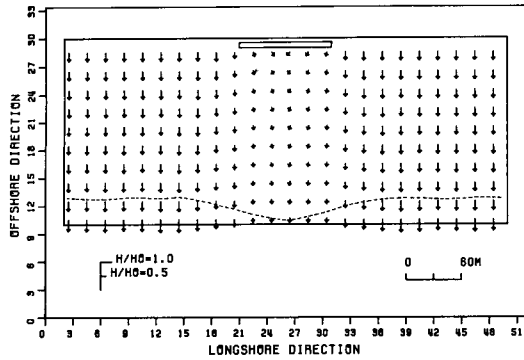


Fig. 3. Calculated results of wave deformation around a detached breakwater. Dotted line denotes breaker line.

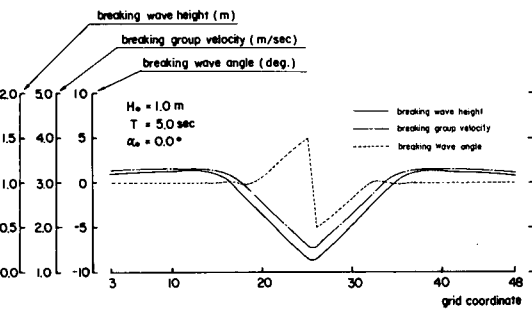


Fig. 4. Computed shoreline changes around a detached breakwater.

3.2 突堤에 의한 海岸線變形

突堤를 설치한 假想海域에서 波浪變形 計算結果는 Fig.5와 같다. 突堤의 碇은 길이 200 m, 폭 10 m이며 不透過境界로 처리하였다. 離岸堤의 경우와 같이 各係數에 의한 波浪變形算定法으로 계산하였으며, 突堤에 의한 反射效果는 고려하지 않았다. 突堤 周邊의 碎波波高, 碎波群速度 및 碎波角의 遮蔽領域인 突堤로부터 약 100 m 정도 떨어진 부근까지 各 값들이

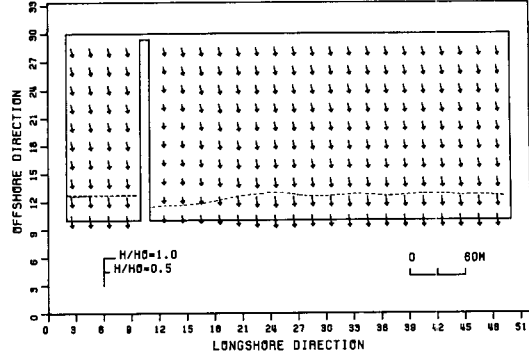


Fig. 5. Calculated results of wave deformation around a groin. Dotted line denotes breaker line.

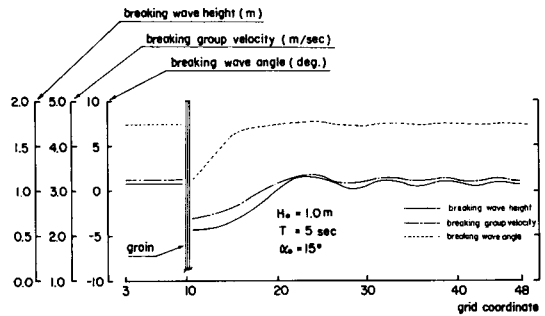


Fig. 6. Computed shoreline changes around a groin.

서서히 增加하는 경향을 보이며, 그 밖의 地域에는 대체로 큰 차가 없다.

3.3 圓形淺堆에 의한 海岸線變形

圓形淺堆가 존재하는 假想海域에서 波浪變形 計算結果는 Fig.7과 같다. 波浪變形은 朴·李(1989)에서와 같이 屈折·廻折을 고려한 緩傾斜方程式으로부터 계산하였다. 計算結果, 淺堆 背後에서 波浪이 集中되는 現狀을 잘 나타내고 있으며, 碎波線이 淺堆 背後에서

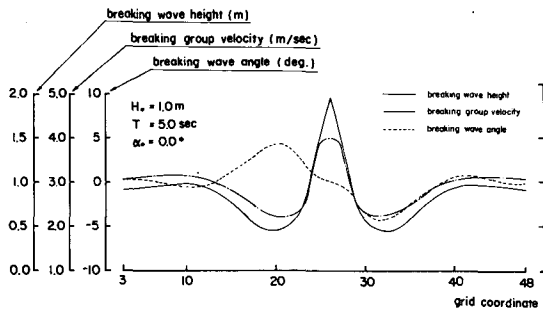
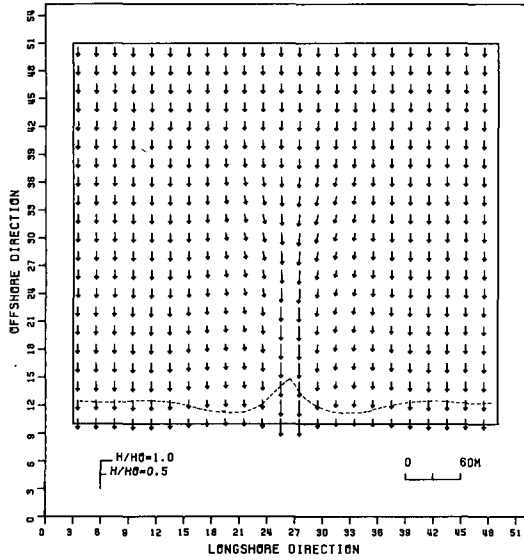


Fig. 7. Calculated results of wave deformation around a circular shoal. Dotted line denotes breaker line.

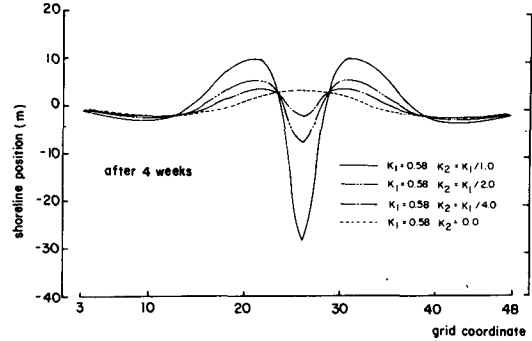
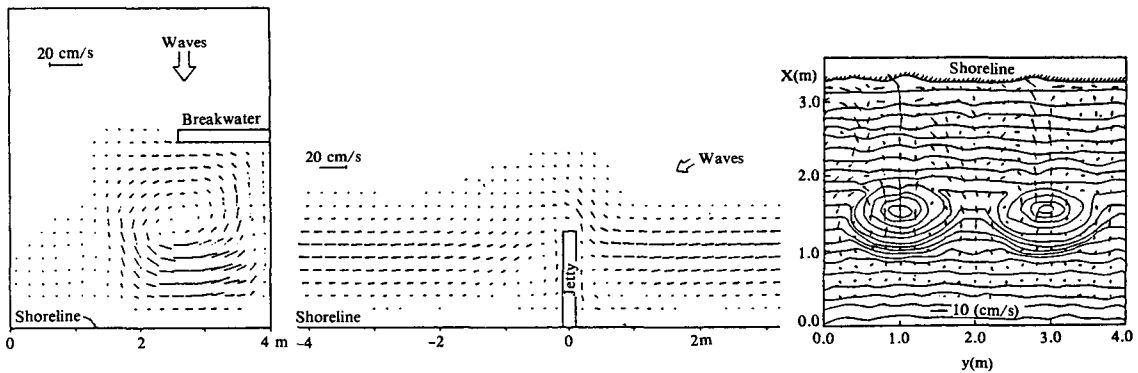


Fig. 8. Computed shoreline changes around a circular shoal.

크게 前進하는 結果를 보여준다. 그리고 淺堆 中央部の 波浪集中 現象으로 最大碎波波高는 入射波의 약 2배, 最少碎波波高는 약 0.5배 정도의 結果를 나타내었으며, 碎波群速度 및 波向도 沿岸方向으로 큰 變化를 나타내었다.

4주 동안의 圓形淺堆 背後에서 海岸線變形을 계산한 結果는 Fig.8과 같다. 沿岸方向의 波高分布를 고려하지 않은 $K_2=0$ 의 경우, 離岸堤 背後에서와 같이 單一 tombolo가 生成되는 結果를 나타내었다. 그러나, K_2 를 고려한 경우 淺堆 中央部の 海岸線은 離岸堤와 달리 海岸線이 後退하는 結果를 나타내고 있으며, 그 周邊에서 雙峰의 tombolo가 形成되는 것을 알 수 있다. 그리고 K_2 가 클수록 海岸線의 增減幅이 커지는 結果를 보였다.

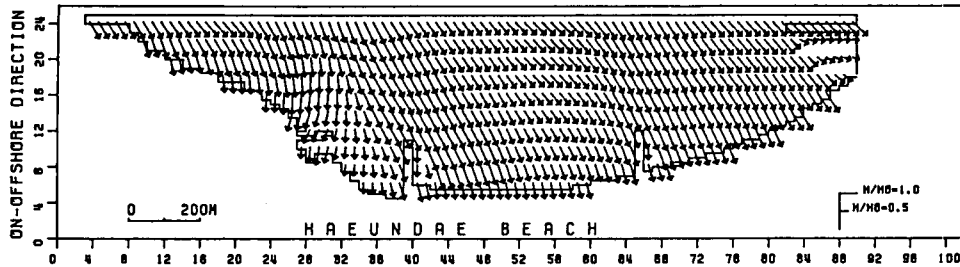


(a) Near a detached breakwater. (Nishimura *et al.*, 1985). (b) Near a groin. (Nishimura *et al.*, 1985). (c) Near two shoals. (Izumiya, 1984)

Fig. 9. Computed nearshore current patterns around various structures.

Table 2. Wave conditions and calibration parameters for shoreline changes in Haeundae beach. (朴·李, 1989)

θ_0	$H_{01/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$	$q_0(m^3/sec \cdot m)$	K_1	K_2
S45°E	0.68	5.7	-1.0×10^{-6}	0.2	0.2

**Fig. 10.** Distribution of wave heights and angles after construction of structures in Haeundae beach.

3.4 考 察

이상에서와 같이 任意的 海岸을 설정하여 海岸構造物 및 複雜한 海底地形을 대표하는 離岸堤, 突堤 및 圓形淺堆 周邊에서의 海岸線變形을 계산하였다. 假想 海域을 대상으로 하였기 때문에 실제 現象을 어느 정도 定量的으로 표현하는 지는 判定하기 어렵다. 그러나 Fig.9의 각 構造物 周邊에서의 海濱循環流(wave-induced current cell)의 패턴으로부터 沿岸方向의 波高分布를 고려하는 常數 K_2 의 影響을 推定할 수 있다.

각 構造物에 대한 海濱流 패턴으로부터 類推되는 沿岸方向의 波高分布를 고려하는 常數 K_2 의 效果를 살펴보면 다음과 같다. 離岸堤의 경우 K_2 가 고려되지 않은 energy flux 만으로 海岸線變形을 계산한 것은 tombolo의 形成을 잘 설명하고 있으나 離岸流 附近의 강한 流速을 고려하지 못하여 海岸線의 增減量이 다소 過少評價되는 結果를 나타내는 것 같다. 그러므로 K_2 를 어느 정도 평가하는 것이 現象을 잘 설명하는 結果를 나타낼 것으로 생각된다. 突堤의 경우 K_2 를 고려하지 않으면 廻折에 의한 海濱循環流의 效果를 전혀 고려하지 못하므로 이에 의한 計算誤差가 크게 나타날 것으로 생각된다. 따라서 檢證을 통한 實測値와 計算値의 比較로부터 K_2 를 고려하는 方法이 타당할 것으로 생각된다. 그리고 圓形淺堆의 경우 K_2 를 전혀 고려하지 않고 계산한 結果는 離岸堤와 비슷하게 單一 tombolo가 形成되는 結果를 나타내었다. 그러나 Fig.9의 (c)에서 보는 바와 같이 淺堆의 中央部를 기준으로 2개의 海濱循環流가 발생하므로 K_2 가 고려된 2개의 tombolo가 생성되는 結果가 現象을 보다 더 잘 표현할 것으로

생각된다.

模型을 現地에 適用할 경우, 특히 構造物 혹은 複雜한 海底地形으로 波高의 空間的 分布가 크게 나타나는 海域에서, 단순히 energy flux만으로 計算하는 것은 海濱流의 影響을 過少評價하거나 고려하지 못하는 結果를 초래하므로 이를 고려하는 것이 現象을 잘 나타낼 것으로 판단되며, 일반적인 각 常數의 값은 簡單化된 假定の 結果로써 구해졌으므로 檢證을 통하여 이들 常數를 구하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4. 模型의 現地適用 例

4.1 對象海岸

본 模型을 現地에 적용한 海雲臺 海濱은 평균길이 1.67 km, 海濱幅 30-60 m, 平均海底傾斜 1/15인 海岸으로서 우리나라에서 가장 유명한 海水浴場의 하나이다. 최근 海濱幅이 減少하는 등 海濱浸蝕이 加速化되어가고 있는 狀態에 있으며, 이에 대한 防止對策의 樹立이 시급한 실정이다. 본 研究에서는 對策工法의 한 例로서 假想的 突堤 및 離岸堤 形式의 構造物을 設置한 경우 海雲臺 海濱의 海岸線變形을 豫測하고자 한다. Table 2는 自然海濱에서 海雲臺 海濱의 海岸線變形 計算條件을 나타낸다.

4.2 海岸線變形의 豫測結果

海雲臺 海濱에 突堤 및 離岸堤 形式의 構造物을 設置한 후의 波浪變形 計算結果는 Fig.10과 같다. 計算方法은 全計算領域을 먼저 波浪의 屈折·廻折模型

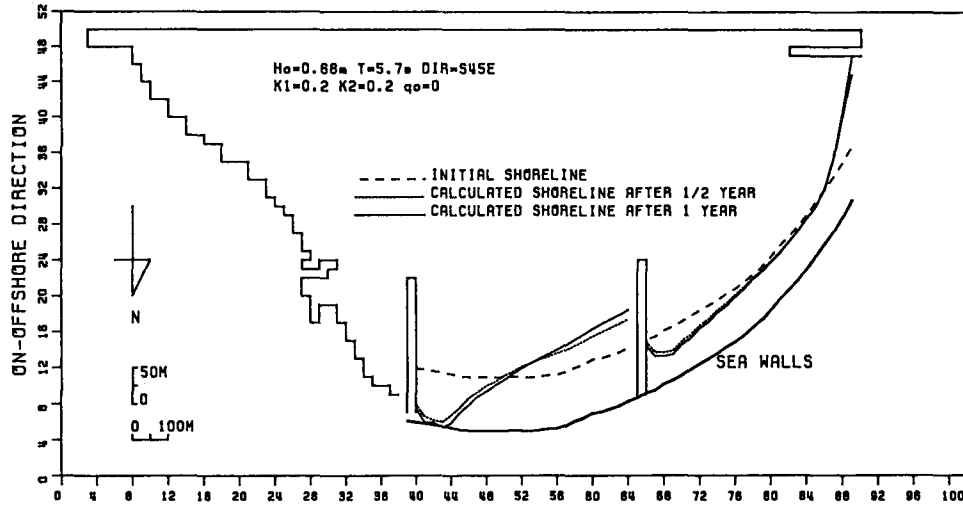


Fig. 11. Predicted shoreline changes after construction of structures in Haeundae beach.

으로 波高, 波向 등을 계산한 후, 構造物에 의한 遮蔽 領域에서는 각 係數에 의한 算定方法으로 계산하였다.

이상의 外力算定結果로부터 1/2년 및 1년 후의 海岸線變形을 豫測한 結果는 Fig.11과 같다. 계산결과, 동쪽 突堤와 중앙 突堤 사이의 海岸線은 동쪽 突堤 우측의 遮蔽領域 近方에서 海岸線이 거의 岸壁까지 浸蝕하는 結果를 보이고 있으며 중앙 突堤쪽으로 많은 모래가 堆積하고 있는 樣相을 나타내고 있다. 그리고 중앙 突堤와 離岸堤形式의 構造物 사이의 海岸線은 비교적 沿岸漂砂의 制御가 잘 되어 심각한 海岸線의 變化量은 보이지 않고 어느 정도 安定된 海濱의 形態를 보이고 있다. 그러나 보다 長期間의 豫測을 행할 경우에는, 構造物을 bypassing하는 漂砂量을 고려하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

5. 結論 및 討議

본 研究의 主要 結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) 任意의 海岸에 離岸堤, 突堤 및 圓形淺堆를 設置한 경우에 본 模型을 適用한 結果, 각 構造物의 特徵에 따른 典型的인 海岸線變形의 計算結果를 보여주었으며, 沿岸漂砂量式에서 沿岸方向의 波高分布를 고려하는 常數 K_2 값에 따라 매우 민감한 反應을 나타내었다.
- 2) 構造物 혹은 地形的인 影響으로 波浪의 空間變化가 클 경우 단순히 energy flux 만으로 海岸線變形

計算하는 것은 海濱流의 影響을 나타내지 못하는 結果를 초래하므로 이를 고려하여 計算하는 것이 바람직하다.

3) 現地 海岸에 假想的 突堤와 離岸堤 形式의 構造物을 設置하여 계산한 結果, 構造物 設置 前後의 海岸線變化가 뚜렷이 나타났으며, 構造物 背後에서 典型的인 海岸線變化의 樣相을 잘 나타내었다.

참고문헌

Eaton, R.O., 1951. Littoral processes on sandy coasts, *Proc. 1st Conf. Coastal Eng.*, 140-154.
 Ebersole, B.A., 1985. Refraction-diffraction model for linear water waves, *J. of Port, Harbor, Coastal and Ocean Eng.*, 3(6): 939-953.
 Hallermeier, R.J., 1983. Sand transport limit in coastal structure design, *Proc. Coastal Structures '83*, ASCE, 253-277.
 Izumiya, T., 1984. A Study on waves and wave-induced nearshore current in the surf zone, Doctoral Thesis, Univ. Tokyo, 203 p. (in Japanese).
 Kraus, N.C., et al., 1981. One-line model development and simulation for Oarai beach, NERC Report No. 15, 155-192.
 Nishimura, H., K. Maruyama and Sakurai, T., 1985. On the numerical computation of nearshore currents, *Coastal Eng. in Japan*, 28: 137-145.
 Ozasa, H. and Brampton, A.H., 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls, *Coastal Eng.*, 4(1): 47-64.

Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Hydraulic Laboratory Publication, p. 131.

Weigel, R.L., 1962. Diffraction of waves by semi-infinite

breakwater, *J. of Hydraulic Div., Proc. ASCE* **88**(HY1): 27-44.

朴一欽·李宗燮, 1989. 海雲臺 海濱의 海岸線變形 豫測模型, 韓國海岸·海洋工學會誌, 1(1) : 50-62.