

突堤 周邊의 海岸地形 變化 豫測模型

Numerical Simulation of Nearshore Morphological Changes near Groins

김태림* · 김창식* · 박광순* · 심재설* · 오병철*

Taerim Kim*, Chang Shik Kim*, Kwang-Soon Park*,

Jae-Seol Shim* and Byung-Cheol Oh*

要 旨 : 해안 구조물인 돌제(groins)의 축조로 인한 해안 지형 변화를 수치모델을 통하여 살펴보았다. 수치모델은 크게 파랑과 흐름을 계산하는 동수력학적 부분과 이로부터 구해진 외력을 이용하여 지형변화를 계산하는 퇴적물 이동부분으로 구성된다. 본 연구에서는 일정한 경사를 갖는 해안에 축조된 한 개의 돌제 및 3개의 돌제 시스템에 수치모델을 적용하여 파랑 및 흐름 양상의 변화로 인한 퇴적물 이동 양상과 150일간에 걸친 해안지형 변화를 계산하였다. 또한 시간에 따른 돌제 통과 퇴적물 이동량 변화도 살펴보았다.

핵심용어 : 돌제, 수치 모델, 지형 변화, 이동률, 우회 퇴적물

Abstract □ Morphological changes around the groin system in the beach are examined using a numerical model. The model consists of two parts: the hydrodynamic model which calculates the transformation of waves and currents, and the sediment transport model which determines sediment transport rates and bottom topographic changes. The numerical model is applied to single-groin and three-groin systems on a typical plane beach. The changes to the beach system due to waves and currents during 150-day simulation near the groins are calculated using sediment transport rate patterns in the domain. The sand by-passing rate patterns around groins are also evaluated.

Keywords : groins, numerical model, morphological changes, transport rate, sand by-passing

1. 서 론

장기적으로 해안선은 변화가 없는 평형 상태를 이루나 이러한 평형 상태에 강물로부터 유입되는 퇴적물 양의 변화나 해안에서의 구조물 건축, 양빈(beach nourishment) 등과 같은 인위적인 영향이 주어지면 해안선의 변화가 발생한다. 즉 연안에 인공 구조물이 축조되면 구조물 주변에서의 원래의 퇴적물 이동 형태가 방해받게 되며 결국 자연적으로는 복구 순환될 수 없는 지형변화가 일어나게 된다. 이러한 현상은 계속적으로 악화되는 경향이 있으며 해안 환경을 유지하는데 있어서 바람직하지 못하다. 예를 들면 돌제(groin)의 축조로 인한 돌제 하부에서의 침식이나 방파제로 인한

툼볼로(tombolos)의 형성, 항구의 매몰, 만수로(inlet)에 축조한 독(jetty) 주변에서의 침식 등이다. 그러므로 해안에서의 물리 현상에 대한 예보 능력을 통하여 자연적 혹은 인위적 요인으로 인한 해안지형의 변화를 예측하는 것은 현재 해안에서 이루어지는 많은 공사와 사업을 계획하는데 있어서 연안 인공 구조물의 주변 자연에 대한 영향을 평가하고 그 충격을 완화하고 인공 구조물의 디자인을 최적화 하는데 있어서 매우 중요하다.

본 논문에서는 수치 모델을, 대표적인 연안 인공 구조물의 하나인 돌제(groin) 주변의 퇴적물 이동에 적용하였다. 현재까지 이러한 인공 구조물 주변의 퇴적물 이동이나 지형 변화에 대한 현장 자료는 거의 전무한

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal & Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box. 29, Seoul 425-600, Korea)

상태이고 또한 실험 자료도 충분치 않으므로 여기서 모델 적용 목적은 정량적인 모델의 조율이나 증명이라기 보다는 정성적인 모델 수행능력을 보려고 하는 것이다.

돌제(groins)라는 것은 해안선에 대해서 수직으로 축조된 인공 구조물로서 해안선을 따라서 이동되는 퇴적물 이동을 차단하기 위한 것이다. 이러한 구조물은 국지적으로 이동되는 퇴적물을 차단해서 모으기 위해서 사용되기도 하며 양빈 사업(beach nourishment)과 같이 손실된 해변의 모래를 복구하기 위하여 인위적으로 보충된 많은 양의 모래가 주변으로 이동, 손실되는 것을 방지하기 위하여 양빈된 해안의 양쪽에 축조하기도 한다. 특히 국부적으로 모래 이동을 차단, 축적을 필요로 할 때에는 하나의 돌제가 아닌 여러개의 돌제를 해안선을 따라 연속적으로 축조함으로써 많은 효과를 보기도 한다. 자연적인 해안선에 있어서 이러한 돌제는 일정한 연안류를 가정할 때 그 구조물에 대해서 흐름의 상부(updrift)에서는 퇴적물의 공급 과잉으로 인한 해안선의 전진(accretion)현상이 일어나고 흐름의 하부(downdrift)에서는 퇴적물의 공급 부족으로 인한 해안선의 후퇴(erosion) 현상이 일어난다. 이러한 돌제의 존재는 연안에서의 파나 연안류와 같은 수력학적인(hydrodynamics) 현상에도 큰 영향을 끼치며 그 주변 환경을 상당한 규모로 변화시킨다. 이때 파랑과 구조물이 어떻게 상호 작용하느냐에 따라 여러 다양한 곳에서 순환류 셀이 생성되며 전혀 예상하지 않은 곳에서 침식 혹은 퇴적 양상이 나타나기도 한다. 그러므로 수치모델을 통하여 돌제 주변의 지형 변화를 정확히 예보하는 것은 연안 공학에 있어서 매우 중요하고 유용한 일이다. Perlin and Dean(1985)는 N차형 수치모델을 개발하였는데 이는 간단한 굴절(refraction) 및 회절(diffraction) 기법을 이용하여 입사파의 각도와 높이의 변화를 조정하고, 이 수력학 수치모델 결과를 바탕으로 연안 퇴적물 이동을 계산, 돌제등 인공 구조물이 있는 해안선의 변화에 적용하였다. 이 모델은 그 동안 사용되어 왔던 1차원 모델을 여러 차원으로 확장한 것이다. Kraus(1994)는 돌제에 반응하는 해안선의 파라미터들을 조사하여 GENESIS 모델에 적용, 사용함으로써 돌제 주변의 해안선 변화를 예측하였다. 이 모델도 또한 파의 굴절과 회절을 고려하나 흐름 효과는 이용되지 않았다. 따라서 이 모델도 앞서 설명한 Perlin and Dean 모델과 마찬가지로 순수하게 파랑만 고려된 퇴적물 이동 모델이다. Badiei et al.(1994)은 돌제와 관

련된 여러 퇴적물 이동 물리 모형실험을 수행하였으며, 돌제가 해안선에서 퇴적 및 침식에 미치는 영향과 그 양상, 다수의 돌제들의 퇴적물 이동 차단 효과, 돌제의 길이와 그 효과 그리고 연안 사주(bar)와 돌제와의 상호 작용에 대해서 연구하였다.

2. 모델 구조 설명

본 논문에서 사용한 수치모델은 파랑과 연안류에 의한 퇴적물 이동 효과를 모두 고려한 모델이며 그 모델의 구조는 Fig. 1과 같다. 즉 모델은 파랑 모델, 흐름 모델, 지형 변화 모델의 세가지 부모모델로 이루어졌으며 그 모델의 수행과정을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 먼저 입력 조건으로 연구 해역에서의 초기 해안 지형과 구조물의 배치가 들어가며, 외해 경계에서의 파랑의 주기, 파고, 파향, 강하구 등에서의 유속 등이 입력된다. 입력된 외해 경계에서의 파랑을 이용하여 파랑 모델(Wave Model)이 연구 해역에서의 파고 파향의 분포를 구하고 각 격자에서의 파랑 응력과 해저면에서의 유속, 응력을 계산한다. 이렇게 구해진 파랑 분포를 이용하여 순환 흐름 모델(Circulation Model)이

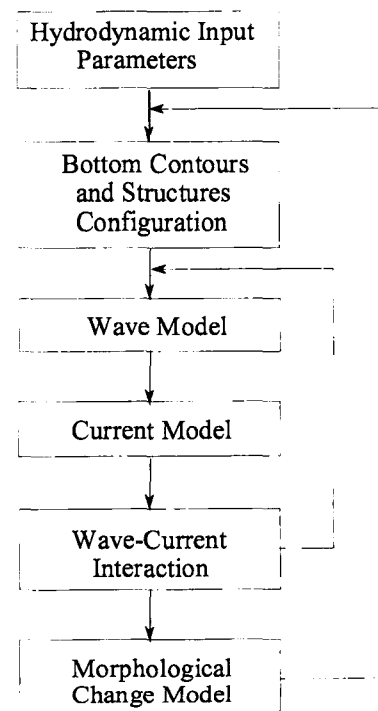


Fig. 1. Structure of nearshore morphodynamic model.

수행되며 수심에 대해서 적분하여 평균한 2차원 유속의 분포와 평균 해수면이 구해지는데, 이때 파랑 응력이 흐름을 일으키는 중요한 힘으로 작용하며 운동량 방정식과 유체 연속 방정식이 사용된다. 해저 마찰력, 이류가속도(advective acceleration), 수평 확산(lateral diffusion) 등이 흐름 모델에서 모두 고려된다. 이 파랑과 흐름은 서로 상호 작용을 하게 되는데, 본 수치모델에서는 파랑 모델과 흐름 모델을 연계하여 반복 사용하여 흐름 모델이 수렴할 때까지 수행함으로써 파랑과 흐름의 상호 작용을 고려하고 있다. 이렇게 하여 구해진 수리역학적 결과들은 해저에서의 퇴적물 이동에 사용되는 응력과 이동 속도를 구하는데 사용되어 결과적으로 퇴적물 이동을 분포를 계산한다. 최종적으로 모델 격자의 각 격자점에서의 퇴적물 이동을 분포로부터 퇴적물 연속 방정식을 이용하여 시간에 따른 해안 지형 변화를 구한다. 이 때 해안 지형의 변화는 그 위의 파랑과 흐름 분포를 변화게 하므로 외해 경계에서의 파랑 조건과 변화된 지형을 입력 조건으로 다시 파랑과 흐름을 계산하여 새로이 해안 지형 변화 부모델에 사용하여야 한다. 이러한 반복을 통하여 정해진 시간 동안의 지형변화를 계산한다.

3. 수치모델 설명

3.1 파랑 모델

Kirby(1984)는 파랑과 흐름이 동시에 존재하는 해역에서 파랑 계산을 위한 완경사 방정식(mild slope equation)을 유도하였다. 이 식을 이용하여 파랑의 천수(shoaling), 굴절, 회절 및 쇄파 등에 의한 파랑의 변형을 계산해 낼 수 있게 되었으며 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{D^2\tilde{\phi}}{Dt^2} + (\nabla_h \cdot \vec{U}) \frac{D\tilde{\phi}}{Dt} - \nabla_h (CC_g \nabla_h \tilde{\phi}) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \tilde{\phi} = -W \frac{D\tilde{\phi}}{Dt} \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, ∇_h 는 수평경사연산자(horizontal gradient operator)로써

$$\nabla_h = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} \quad (2)$$

\hat{i} 와 \hat{j} 는 각각 x 방향(cross-shore)과 y 방향(longshore)에서의 단위 벡터이다. \vec{U} 는 수심 평균한 수평 속도 벡터이고, C 는 파속도, C_g 는 군속도, σ 는 각주파수(angular

frequency), $\tilde{\phi}$ 는 평균 해수면에 있어서의 파랑 성분의 속도 포텐셜이다. 식 (1)의 마지막 항은 에너지 감쇄항으로서 W 는 에너지 감쇄율이다. 이 항은 파가 깨진 후 파의 소멸과 복구의 효과를 다루기 위하여 첨가되었다. 결과적으로 W 는 Dally *et al.*(1984)가 연구한 쇄파에 의한 에너지 감쇄와 연관되어 있다. 이러한 쌍곡형 방정식(hyperbolic equation)은 속도 포텐셜 $\tilde{\phi}$ 이 오직 시간에 있어서 그 위상(phase)에만 종속되고 파랑의 주 방향이 해안선에 대하여 수직인 x 축을 따른다는 가정 하에 다음과 같이 포물선 근사식(parabolic equation)을 얻을 수 있다(Winer, 1988).

$$\begin{aligned} & (C_g \cos \theta + U)A_x + \frac{\sigma}{2} \left(\frac{C_g \cos \theta + U}{\sigma} \right)_x A \\ & + VA_y + \frac{\sigma}{2} \left(\frac{V}{\sigma} \right)_y A \\ & - \frac{i}{2} k C_g (1 - \cos^2 \theta) A - \frac{i}{2} \left[CC_g \left(\frac{A}{\sigma} \right)_y \right] + \frac{W}{2} A = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

이때 U 와 V 는 각각 연안을 가로지르는 x 방향과 해안선을 따르는 y 방향으로의 수평 유속으로써 수심에 대해서 평균한 것이다. A 는 복소수 진폭, θ 는 x 축에 대한 파랑 입사 각도, 아래 첨자 x, y 는 각각 x, y 방향에 대해서 미분한 것이며, 이러한 포물선식 형태의 파랑 방정식은 파랑이 전파되어 가는 방향에 있는 경계 조건들을 필요로 하지 않기 때문에 전 계산역에 대해서 각 격자의 값이 동시에 계산되어질 필요가 없다. 각행(row)의 격자의 값을 계산하는데는 바로 전의 행에 있는 격자의 값만을 필요로 하기 때문에 한 행씩 한 행씩 진행하면서 전체 계산역에 있는 각 격자값을 계산해 낼 수 있다. 따라서 실제 연안에 본 모델을 적용할 때 보통 외해 조건인 첫 번째 행에서의 경계조건만 알면 되며 측면 경계조건은 개방 혹은 폐쇄 경계조건을 사용할 수 있다. 측면 개방 조건인 경우 파랑이 반사 없이 통과하는데 반해서 폐쇄 경계조건인 경우에는 그 경계를 통한 흐름이 없는 것으로 본다. 계산을 수행하는데 있어서 한번에 하나의 격자행만을 계산하기 때문에 하나의 격자행을 계산하기 위해서는 3대각 행렬식(tridiagonal matrix equation)을 통해서 푼다. Crank-Nicolson 유한 차분법을 이용하여 복소수 파진폭(파의 진폭과 위상각)과 파랑의 진행 방향을 계산한다.

3.2 쇄파 및 에너지 감소

쇄파대는 연안에서 퇴적물 이동이 가장 활발한 곳으로 해안으로 진행하여 들어오는 파랑에너지의 대부분이 쇄파대의 좁은 해안에서 부서지고 소멸된다. 이때 발생한 강력한 난류는 상당량의 부유 퇴적물을 발생시키며 이 부유 퇴적물들은 흐름에 의하여 이동된다. 쇄파대 안에서의 흐름 역학은 매우 복잡하며 현재 많은 연구를 하고 있으나 아직도 충분하지 않은 상태이다. 따라서 간단화된 모델을 이 쇄파대 내에서 적용하고 있으며 본 모델에서는 Dally *et al.*(1984)가 연구한 방법을 사용하였다. 이 방법은 에너지 플럭스의 변화와 파고의 변화를 연관시키는 경험식(Dally *et al.*, 1984)을 바탕으로 에너지 감소를 계산하며 쇄파대 내에서의 파랑에너지 감소를 표현하기 위하여 경험적 감쇄 상수가 사용되고 여러 다른 에너지 감쇄를 표현할 수 있어 쇄파 후에 다시 파랑의 재생성도 나타낼 수 있다. 이 방법에서 에너지 감쇄율 W 는 다음과 같이 표현된다.

$$W = \frac{K}{h} [(E - E_s) C_g] \quad (4)$$

여기서 h 는 수심, K 는 경험 상수, E 는 파랑 에너지 밀도, E_s 는 깨어진 파가 안정됨에 따라 얻으려고 하는 안정 파랑 에너지 밀도(stable wave energy density)이다. 즉 일단 파가 깨지기 시작하면 파랑에너지 감쇄율은 그 파에너지 밀도와 그 수심에서 깨어진 파가 안정됨에 따라 얻으려고 하는 안정 파랑 에너지 밀도와와의 차와 비례한다고 가정한다. 이때 각 수심에서의 안정 파랑에너지 E_s 는 Horikawa and Kuo(1966)의 경험식을 이용하여 계산한다.

$$E_s = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma h)^2 \quad (5)$$

여기서 (Γh) 는 일정한 수심 h 에서 깨어진 파가 다시 안정된 파로 변화되었을 때의 안정된 파고를 나타낸다. 상수 K 와 Γ 에 대한 값은 평면 해안을 이용하여 실험한 Horikawa and Kuo의 결과를 이용하여 결정하였다. 이러한 상수들은 해안선의 경사와 외해에서 진행되어 들어오는 파형 경사(wave steepness)정도에 매우 민감한 것으로 나타났으며 자연적인 해안에 대해서는 Dally *et al.*(1984)가 제안한 $k=0.17$ 와 $\Gamma=0.4$ 의 값을 사용하였다.

3.3 흐름 순환 모델

연안에서의 흐름 분포는 Winer(1988)에 의하여 개발된 시간 평균, 수심 적분 2차원 수리역학 모델에 의하여 계산된다. 이 모델은 비압축성(incompressible) 및 균질한(homogeneous) 유체에 대한 운동 방정식을 시간에 대하여 평균하고 수심에 대하여 적분한 식으로 이 흐름 모델은 상호 작용하는 항들을 통하여 파랑 모델과 관련되어 있다. 먼저 파랑 모델은 포물선형 파랑 방정식을 이용하여 파랑 잉여 응력(radiation stress)과 해수 바닥에서의 파랑 입자 궤적속도의 분포를 구한다. 이어서 순환 모델은 수심 평균한 운동 방정식과 연속 방정식을 사용하여 평균 해수면과 평균 유속을 구한다. 이때 앞의 파랑 모델에서 구한 파랑 잉여 응력이 흐름 순환 모델에 대한 추진력으로 사용되며, 그 지배 방정식은 다음과 같다(Ebersole and Dalrymple, 1979).

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \tau_{bx} - \frac{1}{\rho h} \tau_{sx} \\ + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + V \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \tau_{by} - \frac{1}{\rho h} \tau_{sy} \\ + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + U \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + \frac{\partial}{\partial y} (Vh) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

이때 t 는 시간, x 와 y 는 수평면에서의 각각의 축이고, U 와 V 는 x 와 y 에 대한 각각의 평균류 성분이고, h 는 수심, $\bar{\eta}$ 는 파랑의 set up/set down에 의한 평균 해수면 변화량, τ_t 는 난류 혼합(turbulent mixing)에 의한 수평 전단 응력(lateral shear stress), τ_{bx} 와 τ_{by} 는 바닥 전단 응력, τ_{sx} 와 τ_{sy} 는 표층 전단 응력, S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} 는 파의 잉여 운동량 이동에 의한 잉여 응력 성분이다. 이 방정식은 x 와 y 방향의 각각의 운동량식과 연속 방정식을 각 수피에서 수심에 대해서 적분한 후 시간 평균하여 얻어진 것이다. 이 흐름 모델은 ADI(Alternating Direction Implicit) 방식을 이용, 행렬식을 풀므로써 구해진다. 파랑과 흐름의 상호 작용을 다루기 위해서는 이 파랑 모델과 흐름 모델을 교대로 번갈아 가며 계산하여야 한다.

3.4 퇴적물 이동 모델

계산된 흐름-파랑 분포장은 퇴적물 이동모델의 추진

력으로 사용되는데, 이렇게 하여 얻어진 퇴적물 이동률의 분포는 퇴적물 연속 방정식을 사용하여 지형 변화를 계산하는데 이용된다. 본 연구에서 퇴적물 이동식은 파랑에 의하여 발생한 흐름의 평균 유속과 저층에서의 파랑 입자의 궤적 속도에 의해서 퇴적물이 이동된다는 에너지의 이동을 근간으로 하는 방법을 사용하고 있다. 즉 전체 이동량 Q 는 다음과 같다(Watanabe *et al.* (1986)).

$$Q = A_{bc}(\tau_m - \tau_{cr})U_c/\rho g + A_{bw}(\tau_m - \tau_{cr})U_w/\rho g \quad (7)$$

이 때, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력 가속도, U_c 는 수심에 대해서 적분하여 평균한 파랑에 의한 연안류 속도, U_w 는 바다에서의 최고 파랑 입자 속도, τ_m 은 파랑과 흐름에 의한 최대 해저 마찰 응력, τ_{cr} 은 파랑과 평균 유속 하에서의 임계 마찰 응력, A_{bc} 와 A_{bw} 는 실험에 의하여 조절되는 상수이다.

퇴적물 이동은 해저면 경사에 의하여 영향을 받게되어 아래 경사($\partial h/\partial x > 0$)의 경우 퇴적물 이동에 대한 저항을 감소시키고, 윗 경사($\partial h/\partial x < 0$)의 경우 그 저항을 증가시킨다. 특히 아래 경사로의 중력에 의한 이동은 모델 수행 있어서 매우 중요한 작용을 하는데, 퇴적물 이동에 의한 해저의 무한한 퇴적물 누적을 막고, 연안의 해저지형이 역학적 평형 상태에 이를 수 있도록 하여 준다. 경사에서의 중력에 의한 퇴적물 이동 부분에 대한 기초적인 식이 Horikawa(1988)에 의하여 다음과 같은 식으로 제안되었다.

$$q_x = q_x' + \varepsilon_x \left| q_x' \right| \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

$$q_y = q_y' + \varepsilon_y \left| q_y' \right| \frac{\partial h}{\partial y}$$

여기서, q_x 와 q_y 는 각각 x 와 y 방향의 이동 요소이고, q_x' 와 q_y' 는 그에 상응하는 수평면에서의 퇴적물 이동률이다. h 는 수심이고, ε 는 경험 상수이다.

해저 지형의 변화는 앞에서 구한 퇴적물 이동률 분포로부터 다음의 퇴적물 연속방정식을 사용하여 구한다. 즉 각 시간 간격마다 각 격자에서의 순간적인 이동률의 분포로부터 각 격자에서의 침식을 혹은 퇴적물이 계산되어 정해진 시간 동안의 해저 지형의 변화가 계산된다. 퇴적물 연속 방정식은 다음과 같이 2 차원식으로 나타내어진다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (9)$$

이렇게 하여 새롭게 구해진 해저 지형은 결과적으로 파랑의 분포와 전파, 쇄파대의 위치, 흐름의 유형을 변형시킨다. 따라서 새로이 계산된 해안 지형에 대한 파랑-흐름의 분포가 다시 계산되어 그로 인한 퇴적물 이동을 구하여야 한다.

현 모델에서 돌제의 존재는 다음과 같은 경계 조건에서 고려되고 있다.

$$q_y(I, J_{groin} + 1) = 0 \quad \text{if } q_y(I, J_{groin} + 1) > 0$$

$$q_y(I, J_{groin} - 1) = 0 \quad \text{if } q_y(I, J_{groin} - 1) < 0 \quad (10)$$

여기에서 q_y 는 y 축 방향의 퇴적물 이동율을, J_{groin} 은 돌제 구조물을 포함하는 모델격자의 J 번째 행을 의미한다.

해안 환경은 계속적으로 변하는 파랑 및 그로 인한 흐름 환경에 노출되어 있기 때문에 정확한 해안선 장기 변화를 수치모델로 재현하기 위해서는 시간적으로 계속 변하는 파랑을 입력 조건으로 주어야 하나 그것은 쉬운 일이 아니다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서는 많은 관측에서 증명되었듯이 해안선에 대해서 수직으로 일어나는 퇴적물 이동은 단기간의 현상으로 외해로의 이동과 해안으로의 이동이 서로 상쇄된다고 보고 장기적으로 볼 때는 해안선 변형에 큰 영향을 주지 못한다고 가정한다. 따라서 장기간에 있어서의 해안선 변화 예측에 있어서는 해안을 따라 흐르는 연안류에 의한 퇴적물 이동만을 고려한다. 본 논문에서도 이러한 전제를 바탕으로 장기간의 해안선 변형을 수치모델로 재현할 때는 파랑 자체에 의한 퇴적물 이동 부분을 수치 모델에서 제거한 후 사용하였다.

4. 모델 적용 결과

Fig. 2은 1/10의 경사를 갖는 해안선에 위치한 하나의 돌제에 대해서 0.5 m의 파고와 8 sec의 주기를 갖는 입사파가 10°의 각을 갖고 진행하여 들어올 때의 파랑 형태와 연안류의 형성을 수치모델로 계산하여 보여주고 있다. 연안류는 돌제에 의하여 흐름 상부(updrift)에서 외해쪽으로 흐름이 바뀌며, 흐름 하부(downdrift)에서는 돌제 바로 옆에서 외해로부터 해안선쪽으로 흐름을 끌어들이면서 다시 해안선에 평행한

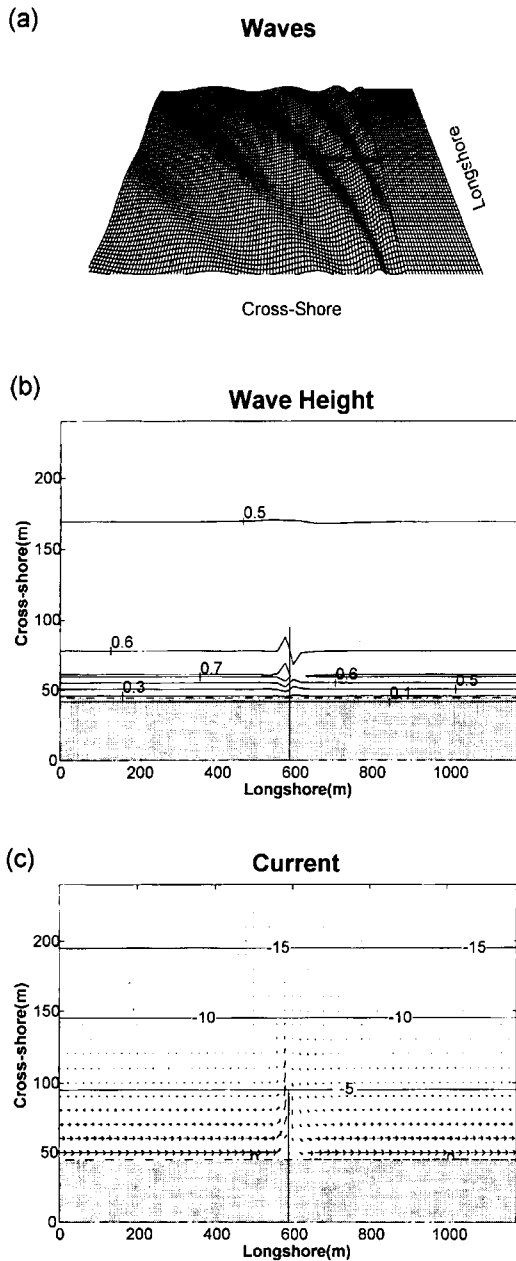


Fig. 2. Wave crests (a), wave height contours (b), and current field (c) on the plain beach with a single groin for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

연안류를 형성하고 있다. Fig. 3(a)와 (b)는 위의 입사 파 조건이 각각 10일과 30일간 지속되었을 때의 해저 지형 변화이다. 10일 후에는 해안선 부분만 제외하고는 그 변화가 적으나 30일 이후에는 돌제 주변의 해안선뿐만 아니라 등심선들도 돌제 상부의 해안선 전진과

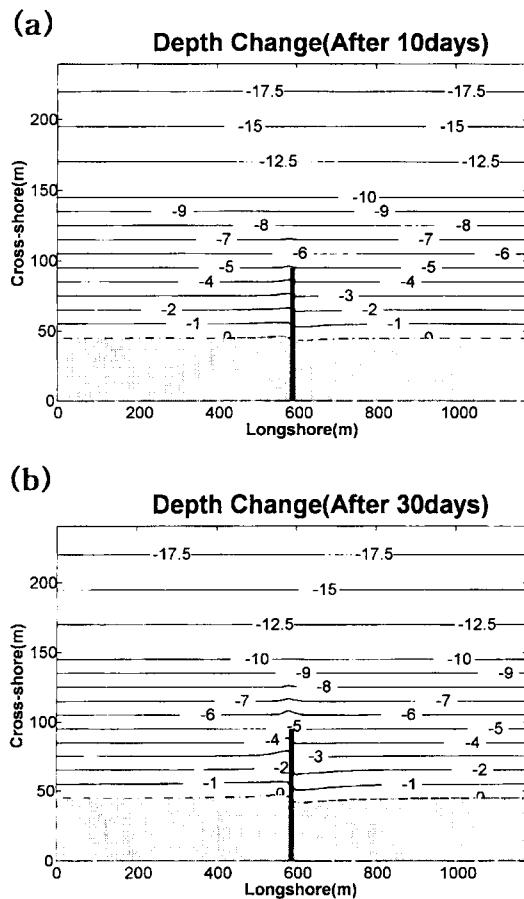


Fig. 3. Depth changes after 10 days (a) and 30 days (b) on the plain beach with a single groin for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

돌제 하부의 해안선 후퇴의 대표적 지형변화가 나타나기 시작한다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각 시간이 130일, 150일 후의 돌제 주변의 해안 지형 변화를 보여 주고 있다. 시간이 감에 따라 현장에서 볼 수 있는 돌제 주변의 지형 변화가 더욱 뚜렷하게 나타나서 150일 후의 경우 돌제 바로 옆의 상부와 하부의 해안선의 전진과 후퇴로 말미암아 10 m 이상의 차이를 보이고 해수면 아래의 지형도 해안선 변화와 보조를 맞추면서 상부에서는 그 등심선이 전진하는 경향이 있고, 돌제 하부에서는 등심선들이 후퇴하는 경향이 있다. 즉 돌제는 해안선을 따르는 지배적인 퇴적물 이동을 차단함으로써 그 차단 상부에서는 퇴적물 과잉에 의한 해안선 전진 현상을 차단 하부에서는 퇴적물 부족으로 인한 해안선 후퇴 현상을 보이는 것이다. 돌제 하부 바로 옆에서는 이안류를 발생시키며 수로를 형성함으로써 가파른 수심 단

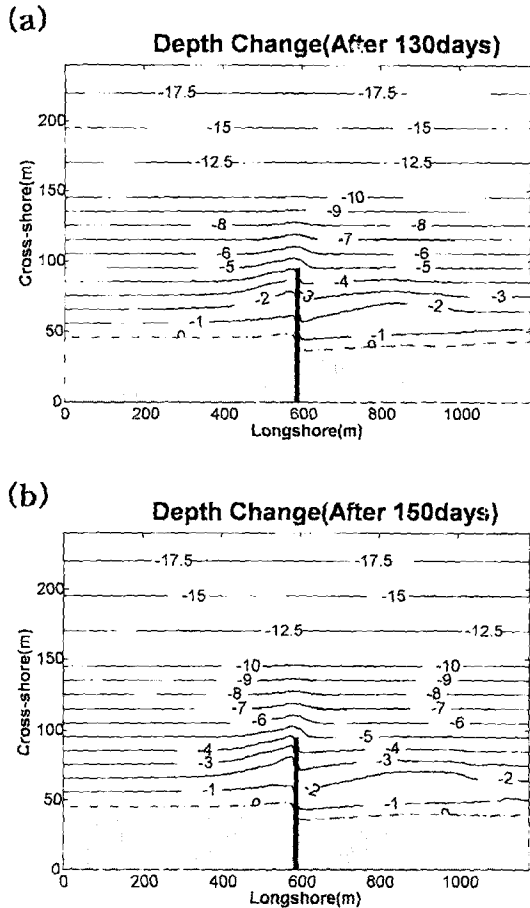


Fig. 4. Depth changes after 130 days (a) and 150 days (b) on the plain beach with a single groin for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

면도를 보인다.

일반적으로 실제 현장에서는 하나의 돌제 보다는 복수의 돌제를 사용함으로써 그 효과를 높인다. Fig. 5는 세 개의 돌제에 대한 파랑과 흐름의 형태를 보여주고 있다. 각각의 돌제 사이의 격실(compartment)에서 흐름셀(current cell)가 발생하여 격실 상부의 돌제 쪽에서는 흐름이 해안 쪽으로 형성되고 하부의 돌제 쪽에서는 외해 쪽으로 흐름이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이에 대한 10일, 30일, 그리고 130일, 150일 후의 수치 모델을 통한 해안 지형 변화를 Fig. 6와 Fig. 7에서 각각 보여주고 있다. 시간이 감에 따라 첫 번째 돌제 상부에서 세 번째 돌제 하부로 감에 따라 해안선이 계단식으로 점차 후퇴되어 가는 것을 볼 수 있고 특히 두 개의 격실 내부에서는 격실 내부의 흐름 셀로 인한 퇴적물 이동으로 인하여 격실 상부에서는 과잉 침식으로

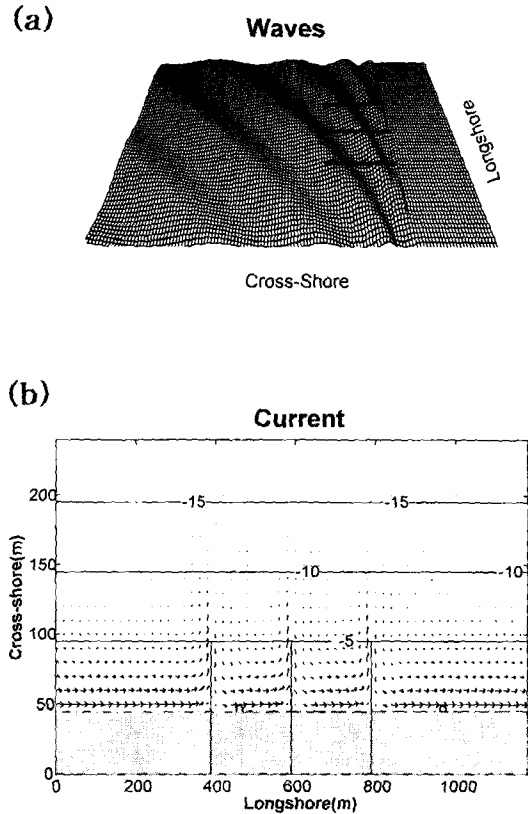


Fig. 5. Wave crests (a) and current Field (b) on the plain beach with three groins for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

인한 해안선 후퇴를, 격실 하부에서는 과잉 퇴적으로 인한 해안선 전진을 볼 수 있다. 등수심선도 격실 상부에서의 후퇴와 하부에서의 전진이라는 양상을 더욱 뚜렷하게 보이고 있다. 150일 후인 경우 첫 번째 돌제 상부와 마지막 세 번째 돌제 하부의 해안선은 10 m 이상의 차이를 보이며 두 격실 내부는 해안선에 있어서는 큰 차이를 보이지 않으나 등수심선은 격실 상부 후퇴와 격실 하부 전진이라는 뚜렷한 양상을 보이고 있다. 현재 현장에서의 돌제 주변의 지형 변화는 그 해안선에 대해서는 돌제 상부의 전진과 돌제 하부의 후퇴라는 정성적인 결과가 많이 발표되었으나 수면 아래의 등수심선의 변화에 대해서는 거의 관측이나 연구가 이루어지지 않았다. 본 수치모델을 통한 연구에서도 그 결과에 대한 정량적인 비교 분석은 아직 시기 상조이며 정성적인 경향에 대한 분석만이 가능한 형편이다. 특히 수면아래의 등수심선의 변화는 정성적인 관측 결과는 부족한 형편이지만 여러 다른 퇴적물 이동과 그

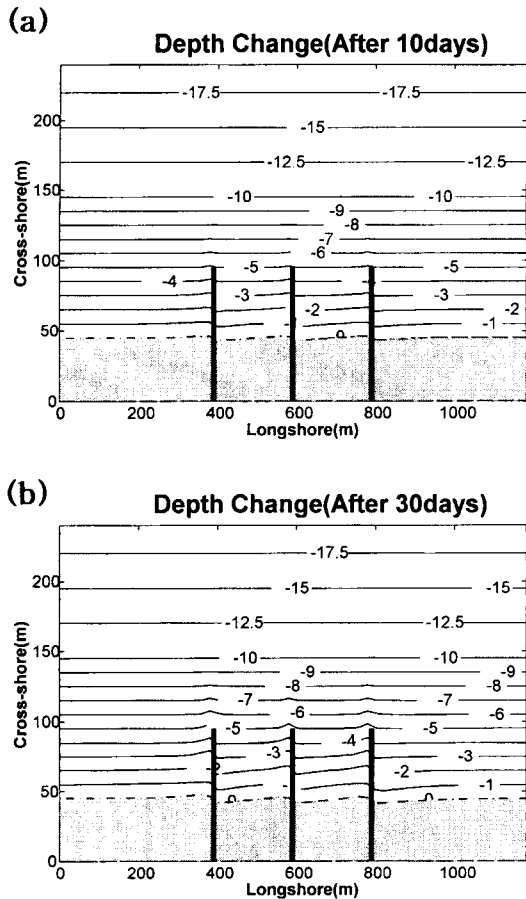


Fig. 6. Depth changes after 10 days (a) and 30 days (b) on the plain beach with three groins for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

해안선 변화의 경향을 살펴볼 때 바람직한 결과라고 볼 수 있다. Fig. 8의 (a)와 (b)는 각각 하나의 돌체와 세 개의 돌체가 해안선에 수직으로 존재시의 150일 동안의 총 퇴적물 이동 백터를 보여주고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 흐름에 의한 퇴적물 이동 기작만을 고려하였기 때문에 그 퇴적물 이동 역시 주로 흐름 백터와 동일한 양상을 보이는 것을 알 수 있으며 결국 돌체 상부에서의 퇴적물 이동량의 점차적인 감소와 돌체 하부에서의 퇴적물 이동량의 점차적인 증가로 인하여 상부에서는 해안선 전진이 하부에서는 해안선 후퇴가 발생할 수 있다. Fig. 9는 돌체 주변에서의 돌체 통과 비율(by-passing rate)을 보여주고 있다. 하나의 돌체에 대해서는 그림 (a)에서 보는 바와 같이 70일까지는 계속적으로 증가하다가 그 이후에 감소하는 것을 볼 수 있으며 세 개의 돌체에 대해서는(Fig. 9(b)) 처음의 두

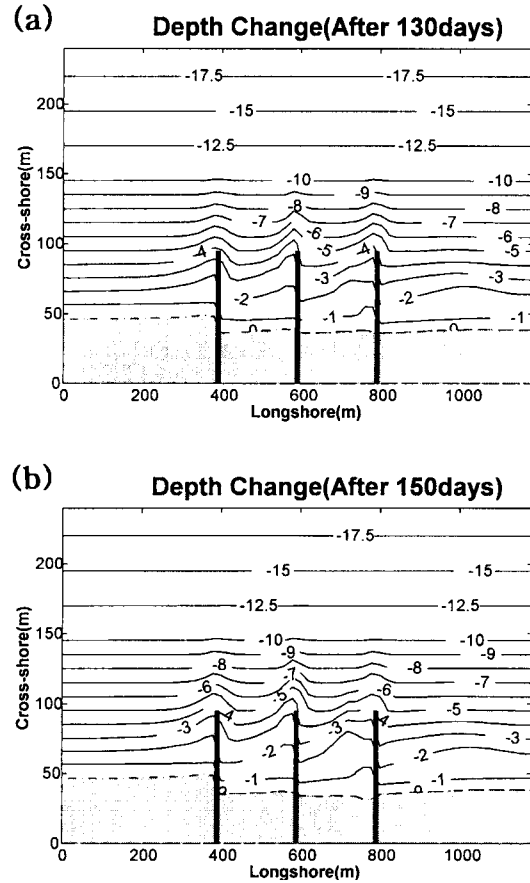


Fig. 7. Depth changes after 130 days (a) and 150 days (b) on the plain beach with three groins for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

돌체를 통과하는 퇴적물 이동은 계속적으로 증가하나 마지막 돌체를 통과하는 퇴적물 이동은 계속 증가하다가 100일 이후에는 하나의 돌체의 예와 마찬가지로 줄어들기 시작한다. 일정한 시간이 흐른 후에 돌체를 통과하는 퇴적물 이동이 줄어드는 현상은 예상하지 못한 현상이며 일반적으로도 알려지지 않은 결과이다. 돌체 주변의 흐름의 형태를 자세히 관찰해 보면 돌체의 하부에서 침식이 진행됨에 따라 흐름셀이 커지게 되며 이로 인하여 강해진 영향이 돌체를 넘어서 이동되는 퇴적물의 이동을 방해하는 것으로 보인다. 현재로서는 이러한 것을 증명할 만한 현장 자료나 실험 자료는 없다.

5. 결 론

수치모형을 현장에서 간단하면서도 뚜렷한 지형 변

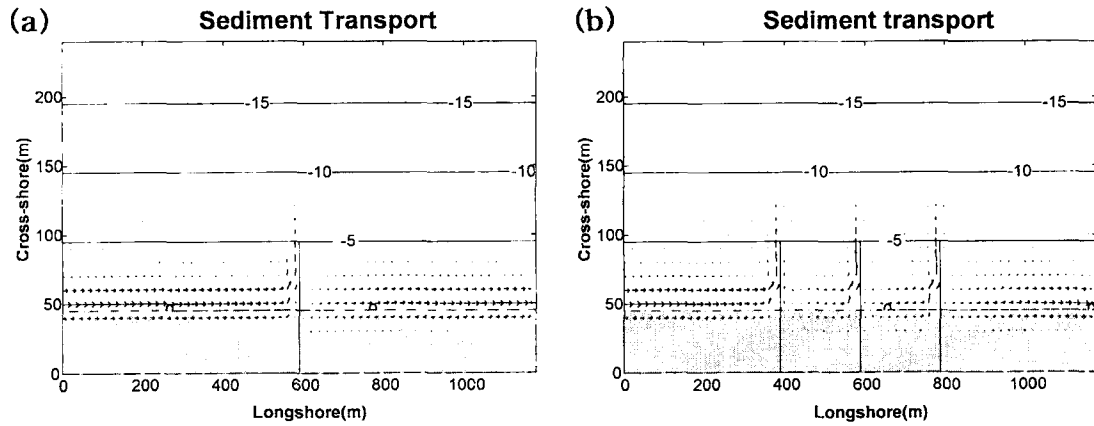


Fig. 8. Calculated total sediment transport field after 150 days for single groin (a) and three groins (b) on the plain beach for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

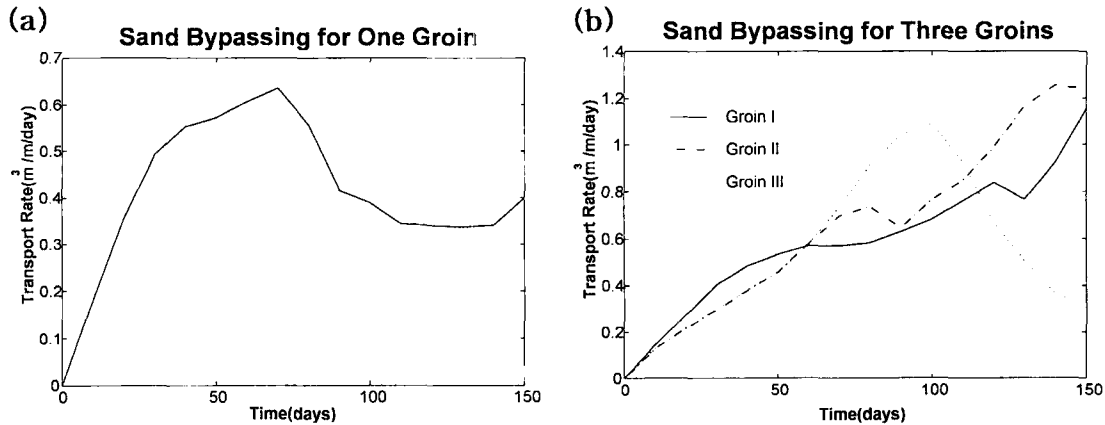


Fig. 9. Sand bypassing transport rate for single groin (a) and three groins (b) on the plain beach with three groins for 0.5 m, 8 s, and 10 degree incident waves.

화를 보이는 돌제 주변 해안에 적용하였다. 일정한 경사를 갖는 해안에 하나의 돌제 및 세 개의 돌제가 축조되었을 때의 해안선 및 돌제 주변의 등수심선 변화와 퇴적물 이동 벡터 돌제를 통과하는 퇴적물 이동을 등을 각각 살펴보았는데 현장 자료 및 실험 자료와의 부족으로 정량적인 비교는 이루어지지 못했으나 정성적으로 돌제 상부의 해안선 전진과 돌제 하부에서의 해안선 후퇴라는 일반적인 형태를 수치 모델로 잘 보여 주었다.

앞으로 돌제 경우 외에도 방파제와 만수로의 독과 같은 해안의 여러 다른 인공 구조물에 대해서도 수치모델을 적용하여 그 수행 결과를 연구할 필요가 있으며, 아직도 퇴적물 이동 모델은 밝혀지지 않은 여러 퇴적물 이동 기작을 경험상수를 통하여 표현하고 있는데 이러

한 상수값은 여러 실험치와 현장 자료와의 비교, 검토를 통하여 결정되고 검증되어야 하는 것으로써 앞으로 더욱 많은 실험과 현장 조사가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1997년 해양연구소 연구정책지원사업 PE00626의 일환으로 이루어졌음을 밝힙니다.

참고문헌

Badici, P., Kamphuis, J.W. and Hamilton, D.G., 1994. Physical experiments on the effects of groins on shore morphology, *Book of Abstracts of the 24th Coastal*

- Eng. Conf.*, ASCE, Vol. 2, pp. 516-517.
- Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1984. A model for breaker decay on beaches, *Proc. 19th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, Houston, pp. 82-98.
- Ebersole, B.A. and Dalrymple, R.A., 1979. A numerical model for nearshore circulation including convective accelerations and lateral mixing, *Ocean Engineering Report No. 21*, Dept. of Civil Eng., Univ. of Delaware, Newark, Delaware.
- Horikawa, K. and Kuo, C.T., 1966. A study of wave transformation inside the surf zone, *Proc. 10th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, Tokyo, pp. 217-233.
- Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, *J. Geophys. Res.*, **89**(C1), pp. 745-747.
- Kraus, N.C., Hanson, H. and Blomgren, S.H., 1994., Modern functional design of groin systems, *Book of Abstracts of the 24th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, Vol. 2, pp. 204-205.
- McCowan, J., 1894. On the highest wave of permanent type, *Philos. Mag. J. Sci.*, Vol. 38.
- Nadaoka K., Yagi H. and Kamata H., 1991. A simple quasi-3-D model of suspended sediment transport in a nonequilibrium state, *Coastal Eng.*, **15**, pp. 459-474.
- Perlin, M. and Dean, R.G., 1985. 3-D model of bathymetric response to structures, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, **111**(2), pp. 153-170.
- Watanabe, A., Maruyama K., Shimizu T. and Sakakiyama T., 1986. Numerical prediction model of three-dimensional beach deformation around structure, *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 29, pp. 179-194.
- Winer, H.S., 1988. Numerical modeling of wave-induced currents using a parabolic wave equation, Ph.D. Dissertation, Coastal and Oceanographic Engrg. Dept., Univ. of Florida. UFL/COEL/TR-080.