

수치모델을 이용한 인공 연안 사주가 있는 해변 단면 변화 연구 Study of Beach Profile Change with a Fixed Artificial Bar Using a Numerical Model

김태림*
Taerim Kim*

요 旨 : 자연 연안 사주와 고정된 인공 연안 사주가 있는 해안에서의 해양 물리 환경 변화에 따른 해변 단면 변화를 수치모델을 통하여 연구하였다. 수치 모델은 준3차원 파랑-흐름-퇴적물 이동모델에 인공 구조물 위에서의 퇴적물 이동에 대한 경계조건을 제안하여 적용하였다. 수치실험 결과 자연 사주의 경우 해수면이나 파고의 변화에 따라 위치를 이동하며 적응을 하였으나 고정된 인공 사주의 경우 사주 후면에 새로운 자연 사주를 형성시키거나 혹은 사주 후면에서 세굴 현상이 발생하기도 하였다. 본 연구는 잠재 설치에 따른 해안 지형 변화를 연구하는데 응용될 수 있다.

핵심용어 : 수치모델, 연안 사주, 퇴적물 이동, 잠재, 고정 인공사주

Abstract □ The changes of beach profile with a natural longshore bar and beach profile with a fixed artificial bar are studied, respectively, using a numerical model. The quasi three dimensional wave-current-sediment transport model is applied with an addition of boundary condition for sediment transport on the artificial structure under water. The study shows that the natural bar adapts itself to the change of coastal physical environment by adjusting its location but the fixed artificial bar causes the formation of a second natural bar seaward of the fixed bar and scouring at the rear of the fixed bar. This study can be applied to work on the change of beach profile with submerged breakwaters.

Keywords : numerical model, longshore bar, sediment transport, submerged breakwater, fixed artificial bar

1. 서 론

해빈 지형의 계절적 변화의 일반적인 형태중의 하나는 겨울철에 나타나는 연안 사주의 발달이다. 주로 태풍 시나 겨울 폭풍 시에 발생하는 연안 사주(longshore bar)는 해안에서 어느 정도 떨어진 수심에서 수중둔덕 형태로 나타나며 이러한 둔덕의 옆은 해안에 평행한 모습을 보이는 경우가 많다.

연안 사주는 해안의 침식을 막는 자연적인 방어 시스템으로 알려져 있다. 즉 큰 파의 내습 시 해안의 전면에서 침식된 모래들은 외해 방향으로 이동하여 퇴적되어 사주를 형성하며 이후 해안으로 전파되는 파랑은 주위 보

다 상대적으로 수심이 얇은 사주 위에서 쇄파 됨으로서 사주가 형성되기 전보다 적은 양의 에너지가 해안의 전면으로 전파되고 해안에서의 침식의 양도 줄어들게 된다. 또한 자연 사주는 파랑의 변화나 해수면의 변화에 적응하여 그 형태와 위치를 변화시킴으로서 효과적으로 해안을 보호하는 것으로 알려져 있으며 형성된 사주는 파고가 작아지면 점차 소멸되는 경향을 보인다. 이(1998)는 시간에 따른 해저면의 변동률을 나타내는 비선형 이류-확산 방정식을 이용하여 수중 둔덕의 이동률에 대한 해석해를 제안하여 관측치와 비교하였으며 수심이 증가할수록 수중 둔덕의 이동률이 지수적으로 감소함을 보였다.

최근에 해안 침식 방지에 기여하는 이러한 연안 사주

*군산대학교 해양과학기술대학 해양응용공학부(School of Ocean Applied Science & Tech., College of Ocean Science & Tech., Kunsan National University, San 68, Miryong-dong, Kunsan, Chonbuk 573-701, Korea, trkim@kunsan.ac.kr)

의 시스템을 인공적으로 이용하여 해안을 보호 하고자 하는 연구가 진행되고 있으며 그 대표적인 예가 바로 잠제(submerged breakwater)이다. 잠제란 반투과성 혹은 비투과성의 방파제를 수중에 설치하는 것으로서 일반적인 방파제가 해안의 경관을 해치는 것에 반하여 환경 영향이 적고 해안의 공간 활용에 있어서도 바람직하다. 특히 천단고가 상당히 낮아짐에 따라 건설에 따른 비용 절감을 기할 수 있다. 이러한 효용성으로 인하여 그동안 잠제에 대한 많은 연구가 행해져 왔다. Ahrens(1989), Van der Meer and Daemen(1994)은 모형실험을 이용하여 잠제 주변의 파랑장의 거동 특성 해석연구를 시도하였으며 Kobayashi and Wurjanto(1989)는 잠제 주변의 파랑장을 해석(연구)하였다. Losada *et al.*(1996)은 수치모형을 통하여 규칙파군과 잠제된 반투과성 구조물과의 상호작용과 파의 변형에 대하여 연구하였으며 Tefilo *et al.*(1996)은 구형태의 armor stone을 이용하여 잠제와 파력과의 관계를 분석하였다. Losada *et al.*(1996)은 불규칙파의 잠제에 대한 효과를 분석하였으며 수치모형을 통하여 그 결과를 실험치와 비교하였다. 이(1999)는 유한 진폭 천수 방정식을 이용하여 잠제에 의하여 발생하는 반사파, 투과파 등을 고려하여 잠제 주변의 파랑장과 흐름의 특성을 해석하였다. 이 등(2001)은 잠제된 평판 방파제가 해수 교환에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 이러한 연구들은 주로 구조물과 파랑-흐름과의 상호 작용에 대한 연구들로서 이러한 상호 작용들로 인한 잠제 주변의 퇴적물 이동이나 지형 변화에 대해서는 아직 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. SBEACH(Larson and Kraus, 1989)는 수치모형을 이용하여 파랑 변화에 의한 연안 사주의 변화 특성에 대한 연구를 하였다. Van Rijn *et al.*(2003)은 연안 사주가 존재하는 해안에서의 폭풍시와 계절변화에 따른 해빈 단면 변화를 현재 사용되는 여러 수치모형을 이용하여 연구한 후 비교 분석하였다. Dean *et al.*(1997)은 잠제가 설치된 해안에서의 해안선 변화를 모니터링 함으로서 잠제의 역할을 분석하였다. Gonzales *et al.*(1999)은 perch가 있는 해안에서의 해빈 단면을 평형 해빈 단면 개념을 이용하여 설명하였다.

잠제와 같이 자연적인 연안 사주 시스템의 인공적 활용에 있어서 가장 문제가 되는 것은 고정된 상태의 인공적인 연안 사주는 자연적인 상태에서의 연안 사주와 같이 파랑의 변화와 해수면의 변화에 따라 위치와 형태를 변화시키면서 적응하지 못한다는 점에 있으며 이는 이미 건설된 수중 구조물에 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 또

한 자연적인 상태에서는 해안의 전면에서 사주로 이동된 모래가 해상 상태가 안정되면서 다시 해안의 전면으로 돌아오는 경향이 있으나 고정된 인공 사주에서는 일단 사주 뒷면으로 유실된 모래는 다시 해안으로 돌아오기가 어렵다는 것이다. 따라서 잠제와 같은 해안 침식 대책 공법은 단기적으로는 그 효과가 뛰어날 수 있으나 장기적으로 볼 때는 그 효과에 대하여 심각한 고려를 해보아야 할 것이다.

본 연구에서는 기존의 준3차원 파랑-흐름 및 해안 지형 모델을 이용하여 잠제와 같은 구조물 존재 시 퇴적물 이동에 대한 경계조건을 부여한 후 파랑과 해수면의 변화에 따른 자연 상태에서의 연안 사주와 인공 사주 존재 시의 해빈 단면 변화를 2차원 형태로 고찰하였다.

2. 파랑-흐름 및 퇴적물 이동 수치모형

파랑과 흐름이 동시에 존재하는 해역에서 파랑 계산을 위한 쌍곡형 방정식 형태의 완경사 방정식(Kirby, 1984)은 속도 포텐셜이 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).

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

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 것이다.

쇄파대 내에서는 에너지 플럭스의 변화와 파고의 변화를 연관시키는 경험식을 바탕으로 에너지 감소를 계산하며 쇄파대 내에서의 파랑에너지 감소를 표현하는 간단화된 모델(Dally *et al.*, 1984)을 아래와 같이 사용한다.

$$W = \frac{K}{h} [(E - E_s) C_g] \quad (2)$$

여기서, W 는 에너지 감쇄율이고 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.

연안에서의 흐름 분포는 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).

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \tau_{bx} - \frac{1}{\rho h} \tau_{sx} \\ + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + V \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \tau_{by} - \frac{1}{\rho h} \tau_{sy} \\ + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + V \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uh) + \frac{\partial}{\partial y}(Vh) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

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_{xy} , S_{yy} 는 파의 잉여 운동량 이동에 의한 잉여 응력 성분이다. 이 방정식은 x 와 y 방향의 각각의 운동량 식과 연속 방정식을 각 수피에서 수심에 대해서 적분한 후 시간 평균하여 얻어진 것이다.

계산된 흐름-파랑 분포장은 퇴적물 이동모델의 추진력으로 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).

$$Q = A_{bc}(\tau_m - \tau_{cr})U_c/\rho g + A_{bw}(\tau_m - \tau_{cr})U_w/\rho g \quad (4)$$

이때, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력 가속도, U_c 는 수심에 대해서 적분하여 평균한 파랑에 의한 연안류 속도, U_w 는 바닥에서의 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 의

하여 조절되는 상수이다.

퇴적물 이동은 해저면 경사에 의하여 영향을 받게된다. 경사에서의 중력에 의한 퇴적물 이동 부분에 대한 식은 아래와 같이 Horikawa(1988)에 의하여 제안된 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} q_x &= q_x^i + \epsilon_x |q_x^i| \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= q_y^i + \epsilon_y |q_y^i| \frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, q_x 와 q_y 는 각각 x 와 y 방향의 이동 요소이고, q_x^i 와 q_y^i 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 구하여지며 정해진 시간 동안의 해저 지형의 변화가 계산된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (6)$$

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. 본 수치모델은 실제 자연상태의 크기에서 해빈 단면 변화 실험을 행한 GWK 실험(Dette and Uliczka, 1986) 자료를 이용하여 비교 검증하였다(Kim and Wang, 1996).

3. 수중 인공 구조물에 대한 퇴적물 이동 경계 조건

수중 인공 구조물에 대한 퇴적물 이동에 대한 경계 조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta h &= 0, \text{ if } P_q > A_q \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \text{ if } P_q = A_q \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, P_q (potential q)는 형태는 동일하나 인공 구조물이 고정되지 않고 모래로 이루어져서 실제로 자연 상태와 같이 퇴적물 이동이 발생할 때의 퇴적물 이동률이다. A_q (actual q)는 실제로 고정된 인공구조물에서의 퇴적물 이동률이다. 따라서 A_q 는 P_q 보다 작거나 같게

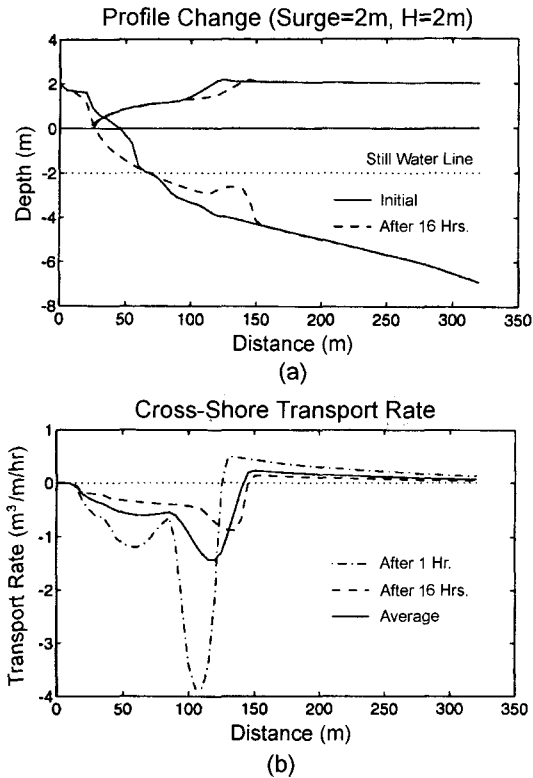


Fig. 1. (a) Initial and quasi-stable profiles in 2 m storm surge and 2 m wave height. (b) Cross-shore transport rate distributions after 1 hour and 16 hours.

되는데 작을 경우에는 수중 인공 구조물 위의 퇴적물이 모두 쓸려서 이동되므로 구조물위에서의 수심 변화는 없다. A_q 와 P_q 가 같은 경우에는 퇴적물 이동 연속 방정식에 의하여 시간에 따라 수심이 변하게 된다.

예를 통하여 위의 경계조건을 구체적으로 살펴보면, Fig. 1(a)는 실선과 같은 초기 단면 수심에서 폭풍해일이 닥쳐서 해수면이 2 m 상승하고 파고가 2 m, 파주기가 6 sec의 파랑이 해안에 수직으로 내습하였을 때 16시간 후의 파고 변화와 해빈 단면 변화를 보여주고 있다. 해안 전면의 상당양의 모래가 침식되고 외해로 이동하여 사주를 형성한 것을 볼 수 있으며 사주 형성에 따라 쇄파 되는 위치도 외해로 이동하였음을 알 수 있다. Fig. 1(b)에서 거리에 따른 퇴적물 이동률의 분포를 보면 사주를 중심으로 사주와 해안선 사이에서는 외해로의 퇴적물 이동이 사주 바깥에서는 그 양은 적지만 외해에서 해안으로의 퇴적물 이동이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 특히 초기인 1 시간 후의 퇴적물 이동에 비하여 16시간 이후에는 그 이동률이 상당히 감소한 것을 볼 수 있으며 이것은 거의 평

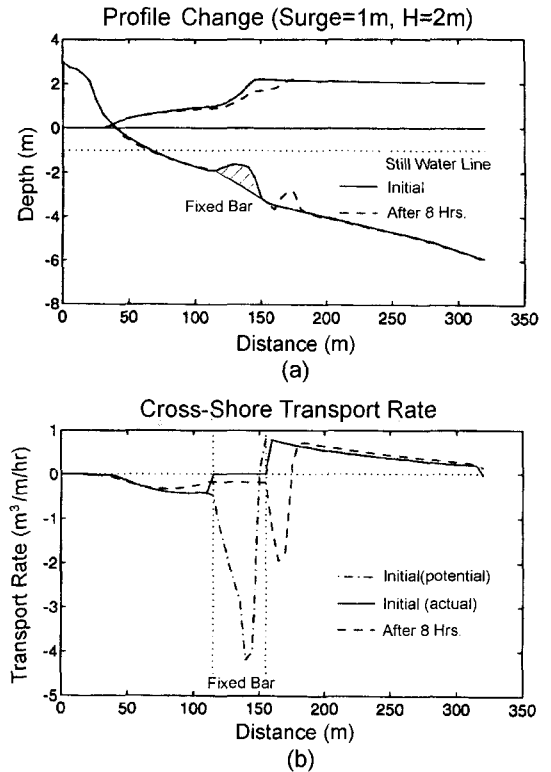


Fig. 2. (a) Profile Change, and (b) Cross-shore transport rate change for fixed bar case in 1 m storm surge and 2 m wave height.

형 상태에 근접하고 있음을 보여준다. 이는 사주의 형성으로 인하여 해안선에서의 더 이상의 침식이 크게 발생하지 않는 것을 의미하며 앞서 언급한 자연 상태에서의 사주의 해안 보호 기능을 하고 있다고 볼 수 있다. 다음에는 이와 같이 해안보호의 기능을 수행하고 있는 사주의 역할을 계속 유지하기 위하여 Fig. 1(a)에서 형성된 사주의 형태를 그대로 유지하며 인공구조물로 고정 시켰을 경우이다. 즉 Fig. 2(a)의 빗금친 부분은 자연상태에서 형성된 사주를 구조물로 고정시킨 부분을 나타내며 이 때 파고는 기존의 2m를 유지하되 초기에 2 m 상승하였던 해수면이 1m로 낮아졌을 때의 파고 변화와 해빈 단면 변화를 보여준다. 8시간 후의 해빈 단면 변화를 보면 고정시킨 인공 사주의 후면에 새로운 자연 사주가 형성된 것이 보이며 쇄파의 위치를 보면 새로 형성된 사주 위에서 쇄파가 발생하고 다시 고정시킨 사주 위에서 2차 쇄파가 발생하는 것을 알 수 있다. 인공 사주 존재시의 거리에 따른 퇴적물 이동률의 분포 변화를 살펴보면 해수면이 2 m 상승시에 거의 평형 상태에 접근하였던 사주 주변의 퇴

적물 이동률은 해수면이 1m로 낮아짐에 따라 사주 위에서 상당한 퇴적물 이동을 발생시킬 것이며 이는 P_q 가 매우 크다는 것을 의미한다. 그러나 이미 앞서 언급한 바와 같이 사주를 인공 구조물로 고정시켰기 때문에 초기에는 사주 위에서의 침식이나 퇴적물 이동은 발생하지 않는다. 즉 초기의 A_q 는 없다고 볼 수 있고 대신에 인공 사주 전면에서의 외해방향으로의 퇴적물 이동과 후면에서의 해안방향으로의 퇴적물 이동만이 존재하게 된다. 시간이 지남에 따라 8시간 후의 퇴적물 이동 분포를 보면 사주 전면에서 침식된 퇴적물이 인공 사주를 넘어서(bypass) 사주 후면으로 이동되는 것을 볼 수 있으며 사주 후면에서 외해로의 퇴적물 이동률이 최대로 발생하게된다. 사주 위에서는 식 (7)의 경계조건에서 보는 바와 같이 A_q 에 비하여 P_q 가 크므로 수심 변화는 발생하지 않는다.

3. 자연 사주와 인공 사주 존재시 해빈 단면 변화 비교

인공 사주 주위에서의 퇴적물 이동에 대한 경계 조건

을 설정한 후 해수면과 파고가 변화했을 때 각각에 대한 자연 사주와 인공 사주가 있는 해빈에서의 시간에 따른 해빈 단면 변화를 살펴보았다. Fig. 3(a)는 Fig. 1(a)에서와 같이 해수면 2m 상승하고 2m의 파고가 16시간 동안 계속 지속되어 생성된 자연 사주가 파고는 그대로 유지한 채 해수면이 1m로 낮아졌을 때의 사주의 변화를 보여주고 있다. 실선, 일점쇄선, 그리고 파선은 각각 초기, 4시간 후, 그리고 16시간 후의 해빈 단면을 보여 주고 있다. 4시간 후에는 사주가 전후로 퍼지면서 낮아진 해수면에 따른 새로운 쇄파 지점으로 이동되는 모습을 보여 주고 있으며 16시간 후에는 새로운 쇄파지점으로 초기의 형태를 유지한 채 이동된 사주의 모습을 보여주고 있다. 즉 자연 사주의 경우 새로운 해양 환경에 적응하여 이동함으로써 계속적으로 해안을 보호하는 기능을 하는 것으로 보인다. Fig. 3(b)는 인공 사주의 경우로서 Fig. 3(a)와 마찬가지로 4시간, 16시간후의 해빈 단면 변화를 보여준다. 4시간 후에는 인공 사주 바로 후면에 작은 형태의 자연 사주가 생성되는 모습을 볼 수 있으며 16시간 후에는 새로 형성된 자연 사주가 보다 외해로 이동되면서 성장하는 것

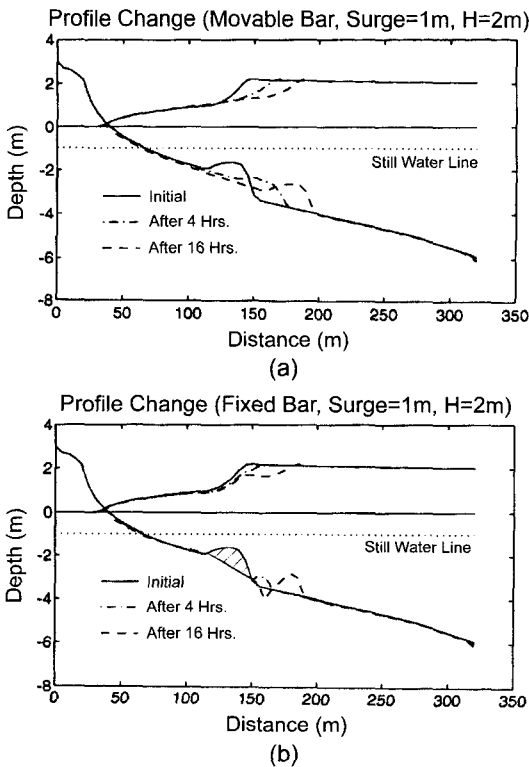


Fig. 3. Profile change for (a) a natural bar, and (b) fixed bar cases in 1m storm surge and 2 m wave height.

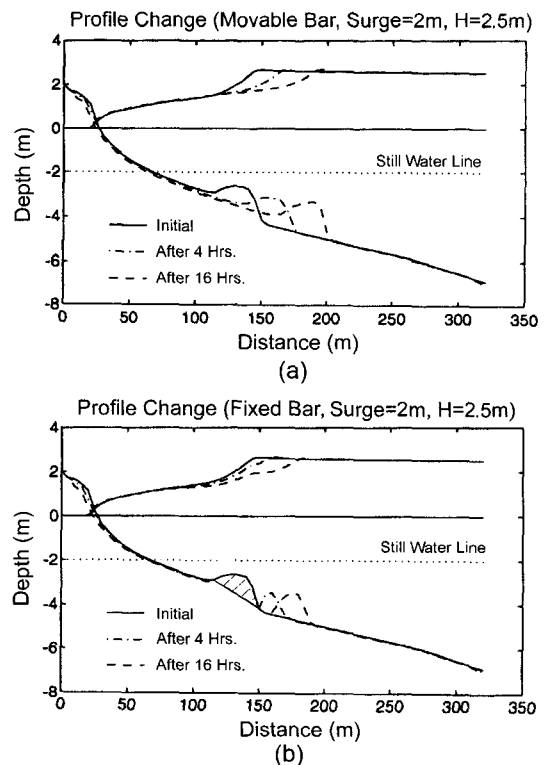


Fig. 4. Profile change for (a) a natural bar, and (b) fixed bar cases in 2 m storm surge and 2.5 m wave height.

을 볼 수 있다. 이때 새롭게 형성되는 자연 사주는 해안의 전면에서 침식된 후 인공 사주를 넘어서 이동된 모래와 사주 후면에서 침식된 모래 그리고 쇄파 지점의 외해에서 해안 쪽으로 이동된 모래들로 형성된 것이다. 이때 주목할 것은 사주 후면의 바닥에서 발생하는 세굴 현상이다. 즉 해수면 변화로 인하여 쇄파 지점이 인공 사주의 후면으로 이동할 경우 심각한 세굴 현상을 보일 가능성이 있음을 알 수 있다. Fig. 4(a)는 Fig. 1(a)에서와 같이 자연 사주가 형성된 후 해수면은 동일하나 파고가 2.5m로 높아졌을 때의 자연 사주와 인공 사주가 존재하는 해빈 단면의 변화를 보여준다. Fig. 4(a)는 파고가 2.5 m로 높아졌을 때의 4시간 후 그리고 16시간 후의 자연 사주가 있는 해빈 단면 변화인데 Fig. 3(a)와 마찬가지로 파고의 증가로 인한 새로운 쇄파 지점으로 자연 사주가 이동되는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(b)의 경우에는 Fig. 3(b)의 경우와 마찬가지로 인공 사주 후면에 새로운 자연 사주가 형성되어 그 크기가 커지면서 새로운 쇄파 지점으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 이때 해안 전면에서 침식된 모래가 인공 사주를 넘어서 사주 후면으로 이동되게 되는데 이렇게 이동된 모래는 파고가 다시 낮아졌을 때 해안 전면으로 이동될 수 없으며 해안선 보호 측면에서는 완전히 유실된 모래로 고려하여야 할 것이다.

4. 결론 및 제언

준3차원 파랑-흐름-퇴적물 이동 모델을 해수면 아래의 인공 구조물에서의 퇴적물 이동에 대한 경계 조건을 제한한 후 연안 사주를 인공 구조물로 고정 시켰을 때와 자연 사주의 경우 해수면 혹은 파고와 같이 해안의 물리 환경이 변했을 경우의 해빈 단면 변화를 보았다. 자연 사주의 경우 해수면이 낮아질 경우 혹은 파고가 높아질 경우 새로운 쇄파 지점으로 사주의 위치를 변화시키면서 적용하는 것으로 나타났으나 고정된 인공 사주의 경우 인공 사주 후면에 새로운 자연 사주를 형성하는 것으로 나타났다. 이 때 쇄파 지점이 인공 사주의 후면으로 이동됨에 따라 사주 후면에 세굴 현상이 발생하였으며 해안 전면에서 유실된 모래가 인공 사주 후면으로 이동되어 퇴적됨으로서 자연 사주와는 달리 해안으로의 복귀가 어려운 모래의 완전 유실이 발생한 것으로 보인다.

위의 수치 모형 실험은 아직 실험 자료나 혹은 현장 관측 자료와 비교하지는 못하였으나 해안 보호의 목적으로 잠제와 같은 구조물을 건설하였을 경우의 해빈 단면 변

화를 예측하는데 적용 할 수 있다. 특히 위의 수치 모형 실험을 바탕으로 잠제를 건설 할 경우의 문제점들을 살펴보면,

첫째, 자연 연안 사주의 해안 보호 시스템을 이용한 잠제는 고정된 구조물이 갖는 제한적 조건으로 인하여 자연 사주와는 달리 해안 물리환경의 변화에 적응하기 어려운 점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 여러 환경에 적용할 수 있도록 잠제의 폭을 확장시키는 방안이 있을 수 있으나 이는 천단고의 감소에 따른 비용의 절감이라는 잠제의 장점과 상충되는 점으로서 자세한 비용 분석이 필요할 것이다. 특히 서해안은 물론 동해안 남해안에서의 조석 변화도 무시하지 못할 정도로 크므로 이에 대한 고려도 하여야 할 것이다.

둘째, 방파제는 해양의 에너지뿐만 아니라 퇴적물 이동도 완전히 차단하나 잠제의 경우는 부분적으로만 차단할 뿐이다. 특히 퇴적물의 경우 경사면을 따라 잠제 후면으로 이동된 모래는 다시 역경사를 따라 잠제를 넘어서 해안으로 돌아오기는 힘들 것으로 보이며 이는 자연적인 해안의 관점에서는 완전 유실된 모래로 보아야 할 것이다. 따라서 차후 이러한 문제가 발생하였을 경우에는 준설 등 인공적인 방법으로 유실된 모래를 해안으로 복귀시키는 방안을 마련하여야 할 것이다.

이러한 문제점에도 불구하고 잠제는 아직 비용의 잇점과 환경적인 측면의 장점으로 인하여 많은 관심과 연구가 행하여지고 있다. 이를 현장에 직접 적용하기 위해서는 수치 모형 실험을 병행하여 그 특성과 장단점을 살펴야 할 것이며 직접 현장에도 시험 테스트를 하는 것이 바람직 할 것이다. 또한 본 연구 논문에서 행한 2차원 수치 모형 실험을 3차원으로 확대 적용하는 것도 필요할 것이다.

참고문헌

- 이정렬, 한상우, 2001. 잠제 주변에서 발생하는 순환류에 대한 실험적 연구, 한국해양해양공학회지, **13**(2): 109-121.
- 이철웅, 1998. 수중둔덕의 이동을 예측을 위한 해석해, 한국해양해양공학회지, **10**(4): 165-173.
- 이철웅, 1999. 잠제 주변의 파랑장 해석, 한국해양해양공학회지, **11**(2): 95-106.
- Ahrens, J.P., 1989. Stability of reef breakwaters, *J. Waterway, Port. Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **115**(2), pp. 221-234.
- 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.
- Dean, R.G., Renjie Chen, and Albert E. Browder, 1997. Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA. *Coastal Engineering* **29**: 291-315.
- Dette, H.H. and Uliczka, K., 1986. *Seegangserzeugte wechselwirkung zwischen vorland und vorstrand und kustenschutzbauwerk*, Technischer Bericht SFB 205/TPA6, University Hannover.
- 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.
- Gonzales, M., Medina, R., and Losada, M.A., 1999. Equilibrium beach profile model for perched beaches, *Coastal Engineering*, **36**: 343-357.
- 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.
- Kim, T.R. and Wang, H., 1996. Numerical Modeling of Near-shore Morphological Changes under Current-Wave Field, *Proc. 25th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, Orlando, pp. 3830-3845.
- Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, *J. Geophys. Res.*, **89**(c1), pp. 745-747.
- Kobayashi, N. and Wurjanto, A., 1989. Wave transmission over submerged breakwaters, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **115**(5), pp. 662-680.
- Larson, M. and Kraus, M.C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1: empirical foundation and model development, *Technical Report CERC-98-9*, US Army Engineering, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Losada I.J., Silva R., and Losada M.A., 1996. 3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, **28**, pp. 229-248.
- Losada I.J., Silva R. and Losada, 1996. Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, **28**, pp. 249-266.
- Gonzales M., Medina R., and Losada M.A., 1999. Equilibrium beach profile model for perched beaches, *Coastal Engineering*, **36**, pp. 343-357.
- Teofilo Monge Rufin Jr, Norimi Mizutani, and Koichiro Iwata, 1996. Estimation method of stable weight of spherical armor unit of a submerged wide-crown breakwater, *Coastal Engineering*, **28**, pp. 229-248.
- Van der Meer, J.W. and Daemen, F.R., 1994. Stability and wave transmission at low-crested rubble mound structures, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **120**(1), pp. 1-19.
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., and Sierra, J.P., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sand beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models, *Coastal Engineering*, **47**, pp. 295-327.
- Watanabe, A., Maruyama, K., Shimizu, T. and Sakakiyama, T., 1986. Numerical Prediction Model of three-dimensional beach deformation around structure, *Coastal Eng. in Japan*, **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 Engineering Department, University of Florida. UFL/COEL/TR-080.

Received December 26, 2002

Accepted February 14, 2003