

해안선변형 예측을 위한 기초적 연구

최 한 규 / 강원대 교수

이 철 응 / 강원대 강사

서 론

해안역에서 여러 가지 목적에 의하여 건설된 또는 건설될 시설물로 인해 유발되는 해안선의 변형을 올바로 예측하는 문제는 개발에 따른 자연환경을 보존한다는 관점에서 매우 중요하다. 해안선의 변화는 여타의 문제와 마찬가지로 해안역의 주변환경, 즉 바람, 파랑, 해빈류, 수위, 표사의 특성 그리고 주변지역의 형상 및 구조물 배치 현황 등과 밀접한 관련을 갖는다. 즉, 주변환경의 변화에 따라 시·공간적으로 표사의 유실 방지대책이, 항만이나 하구역에서는 표사의 퇴적과 관련된 문제가 주 관심 대상이다. 표사의 유실이나 퇴적과 관련된 예들을 국외는 물론 국내에서도 흔하게 찾아 볼 수 있다. 국외에서는 표사이동과 관련된 연구가 활성화되어, 미국의 와이키키 해수욕장 등과 같은 유수의 해수욕장에는 이

미 표사 유실 방지대책이 설치되었다. 국내에서도 해수욕장의 표사의 유실과 관련된 문제나, 하구나 항만들에서 나타나는 퇴적과 관련된 문제가 많은 곳에서 나타나고 있어 이를 해결하려고 활발히 연구를 진행하고 있다.

일반적으로 표사의 이동과 관련된 문제를 해결하기 위한 접근방법은 다음의 두가지로 구분되고 있다. 하나는 해안선 횡방향으로 폭풍해일과 같은 이상 외력조건하에서 해안선(처음높이)에서 쇄파대까지의 영역에 대한 이안표사의 이동특성을 해석하는 것이고, 다른 하나는 전자의 방법으로 예측하기 어려운 해안선 방향으로 연안표사의 이동특성을 해석하는 것이다. 이안 표사에 대한 연구로는 평형단면(equilibrium profile)과 관련된 반 경험적 이론의 개발(Dean, 1977, 1991)과 시간에 따른 해안선의 침식 및 연안사주와 같은 퇴적을 보다

자세히 해석하려는 많은 수치 모형(Larson과 Kraus, 1989; Lee등, 1996)이 있다. 또한 해안선 방향으로의 연안 표사에 관한 연구는 Pelnard Considere(1956)에 의하여 수립된 수학적 모형을 기초로 많은 해석적·수치적 방법들이 개발되었다(Walton과 Chiu, 1979; Gravens, 1992).

현재 우리나라의 많은 지역에서 해안선의 변형과 관련된 문제가 야기되고 있으나 아직은 이에 대한 해결책이 미약한 실정이다. 본 연구의 목적은 해안선 변형을 유발하는 표사의 유실 및 퇴적과 관련된 물리적 현상의 근본적인 이해를 위해 해석적 방법을 이용하여 해안선의 변형에 대한 기초적 연구를 하고자 한다.

해안선 변형 이론

해안선 변형을 해석하기 위한 접근방법으로 해안선만을

해석하는 One-line 모형과 두 개 이상의 등수심을 해석하는 N-line 모형이다. 각각의 모형마다 많은 장·단점이 있으나, 모형의 수립이 비교적 쉽고 장기간의 해석이 가능한 One-line 모형이 현재 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 사용되는 개념들은 One-line 모형에 그 이론적인 근거를 두고 있다. One-line 이론에서 표사의 이동, 즉 표사의 유실 및 퇴적을 유발하는 주 원인이 해안선 가까운 영역에서 발생되는 쇄파라고 생각하기 때문에 연안표사량은 임의의 한계 수심까지 일정하게 발생된다고 가정한다. 이때 임의의 한계 수심은 해안선 방향으로 표사의 이동이 거의 발생되지 않는 부분의 수심이다.

표사의 이동과 관련된 표사 보존식은 질량보존 법칙으로부터 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \pm q \dots\dots(1)$$

여기서 Q 는 연안표사량, A 는 해안선 횡방향의 단면적, q 는 해안선에 존재할 수 있는 표사의 입·출입(sink/source)량 그리고 x , t 는 각각 공간 및 시간을 나타내는 독립변수이다. 만약 표사의 입·출입이 없는 경우에 식 (1)은 다음과

같은 물리적 의미를 갖는다. 즉, 해안선 방향의 공간에 따른 표사량의 변화량은 시간에 따른 해안선 횡방향의 단면적의 변화와 같다. 한편 연안 표사량 및 단면적은 다음과 같이 정의된다.

$$Q = Q_0 \sin 2\alpha_b \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta A = \Delta y D \dots\dots\dots(3)$$

여기서 Q_0 는 연안표사량의 크기를 나타내는 상수로 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$Q_0 = \frac{\rho g}{16} H_{sb}^2 C_{gb} \frac{K}{(\rho_s - \rho)\lambda} \dots\dots(4)$$

여기서 ρ 는 해수의 밀도, g 는 중력 가속도, H_{sb} 는 유의 쇄파고, C_{gb} 는 쇄파점에서 파랑의 군속도, K 는 무차원화된 경험상수, ρ_s 는 표사의 밀도 그리고 λ 는 표사의 공극을 나타낸다. α_b 는 쇄파의 파봉선과 해안선 사이의 각도로 다음 식 (5)로 간단히 표시될 수 있다.

$$\alpha_b = \alpha_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \dots\dots\dots(5)$$

그러므로 식 (2), (3) 그리고 식 (5)를 식 (1)에 대입하면 다음 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial y}{\partial t} \pm q \dots\dots(6)$$

여기서 $\varepsilon = 2Q_0/D$ 이다. One-line 이론의 지배 방정식인 식 (6)은 수학적으로 일차원 확산방정식과 동일하다. 따라서 초기조건과 경계조건이 주어지면 쉽게 해를 구할 수 있다.

본 연구와 같이 해안선 변화를 예측하는 문제에서 초기조건은 해석하고자하는 시간의 해안선 형태를 부여하면 된다. 그러나 초기상태의 해안선의 형태가 시시각각으로 변하기 때문에 수학적으로 만족되는 초기상태의 해안선을 찾기가 현실적으로 어렵다. 따라서 현재까지는 해안선에 인위적인 환경의 변화가 있을 경우, 예로 방파제 등과 같은 임의의 구조물이 건설될 경우, 건설 시작점의 해안선 단면을 관측하여 그 자료를 초기조건으로 부여하는 방법이다. 즉, 구조물 건설 후 시간에 따른 장기간의 해안선의 변형을 예측하는 것이기 때문이다.

본 연구는 해안선 변형과 관련된 제반 변수들의 물리적 이해를 목적으로하기 때문에 초기조건을 해석해가 구해질 수 있는 함수로 부여하였다. 또한 경계조건은 실제 무한한 계산영역을 제한한다든지 구조물이 존재할 경우 구조물 주위의 물리적 특성을 반영하기 위하여 부여되는 것이다. 본 연구에서 사용될 외해 경계조

건으로 구조물이 존재하지 않을 경우 파랑의 입사각은 항상 해안선에 수직으로 입사한다. 구조물이 존재하는 경우에는 지배 방정식이 만족하는 범위 내에서 임의의 입사각 조건을 부여하였다. 또한 해안선에 구조물이 존재하는 경우에 표시하는 구조물을 통과할 수 없다는 구조물 경계조건도 부여하였다.

특정한 초기조건이 주어졌을 때 바로 해석해를 구할 수 있도록 초기조건을 임의의 함수로 가정하여 무한 경계조건에 대한 식 (6)의 일반해는 다음 식 (7)과 같이 구할 수 있다 (Carslaw & Jaeger, 1959). 이때 해안선에서 표시의 입출입은 없다고 가정한다.

$$y(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \epsilon t}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) e^{-(x-\xi)^2/4\epsilon t} d\xi \dots (7)$$

여기서 ξ 는 의사 적분변수 (dummy integration variable)이다. 따라서 초기 해안선 $f(x)$ 가 주어지면 식 (7)을 직접 적분하여 시간에 따른 해안선의 변형을 쉽게 예측할 수 있다.

해안선 형태에 따른 해석해

이미 임의의 초기조건 $f(x)$ 를 이용하여 일반해를 구하였

다. 따라서 초기조건을 실제로 부여하여 식 (7)로 부터 무한 경계조건에 대한 해석해를 구하고자 한다. 부여된 경계조건 및 초기 해안선 형태는 모두 5가지로 이 중 4가지는 해안선에 구조물이 존재하지 않는 경우이며, 나머지 한가지는 해안선은 일정하나 해안선의 임의의 위치에 구조물이 존재하는 경우이다.

먼저 x 축과 평행한 해안선의 임의 위치, $-a$ 에서 a 까지 크기 y_0 가 돌출된 직사각형 해안선이 존재하는 경우의 해석해는 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x, t) = \frac{1}{2} y_0 \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{a-x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a+x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) \right\} \dots (8)$$

실제 이와 같은 경우는 하구 부근에서 발생할 수 있다. 즉, 내륙지방의 하천에서 유입된 표시들에 의하여 퇴적된 부분이 파랑의 작용에 의하여 시간에 따라 어떻게 이동되는가를 해석할 때 본 경우가 적합하다고 생각된다.

두 번째로 외해에서 파랑이 수직으로 입사하는 경우, 해안선의 임의 위치부터 크기 y_0 가 반 무한의 영역에 돌출된 해안선이 존재한다고 생각하자. 만약 반 무한 영역의 시작점을

원점이라고 생각하면 다음과 같은 해석해를 식 (7)로 부터 얻을 수 있다.

$$y(x, t) = \frac{1}{2} y_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) \dots (9)$$

본 경우는 비교적 일정한 해안선이 유지되다가 지형적인 변화로 인해 갑자기 변하는 해안선의 변형 예측에 이용될 수 있다. 실제 이와 같은 지형들이 많은 곳에 현존하고 있다.

세 번째로 해안선의 임의의 위치에 크기 y_0 가 돌출된 삼각형 해안선이 존재하는 경우에 대한 해석해이다.

$$y(x, t) = \frac{y_0}{2a} \left\{ (a-x) \operatorname{erf}\left(\frac{a-x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) + (a+x) \operatorname{erf}\left(\frac{a+x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) - 2x \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) + 2\sqrt{\frac{\epsilon t}{\pi}} \left[e^{-(xa)^2/4\epsilon t} + e^{-(x-a)^2/4\epsilon t} - 2e^{-x^2/4\epsilon t} \right] \right\} \dots (10)$$

하구부분이나 날카로운 Cusp형 해안선에 적용이 가능하다고 생각된다.

네 번째는 부분적인 돌출이나 단편 형태의 해안선과는 달리 정현함수 형태로 일정하게 돌출이 반복되는 형태의 해안선에 대하여 해석한다. 해석해는 다음 식 (11)과 같다.

$$y(x, t) = A \cos \alpha x e^{s^2 t} \dots (11)$$

여기서 $\sigma = 2\pi/l$ 이며, l 은 Cusp의 간격이다. 만약 폭풍해일 등과 같은 대규모 파랑이 해안선에 내습하면 비록 단기간이지만 해안선에는 많은 변형이 발생된다. 이와 같은 변형은 평상시 파랑에 의하여 원래의 평형상태의 조건으로 되돌아 가고자 한다. 폭풍해일이 내습한 후의 해안선이 대부분 본 경우와 같이 일정하게 돌출이 반복되는 형상을 나타내게 된다. 따라서 폭풍해일이 내습된 후 평상시 파랑에 의한 해안선의 변형 과정 예측에 본 모형이 기초적 자료로 이용될 수 있다.

마지막으로 해안선의 임의 위치에 구조물이 존재하면서 임의의 입사각을 가지고 내습하는 경우에 대하여 해석하겠다. 수학적 모형을 간단히 하기 위하여 방파제/이안제가 원점에 존재한다고 생각하자. 이 경우에는 앞의 경우들과는 달리 구조물이 위치하는 점에서

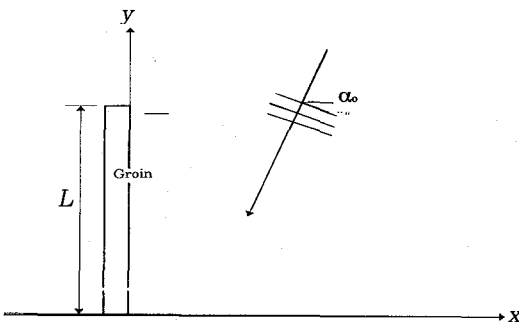


Fig. 1 Definition sketch for the case of a groin

의 경계조건이 올바르게 수립되어야 한다. 이안제(groin/jetty)양단에서의 표사이동 특성을 묘사하기 위한 경계조건은 Fig.1로 부터 다음 식 (12)와 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \tan \alpha_0, \quad x=0 \dots (12)$$

$$y = 0, \quad x \rightarrow \infty \dots (13)$$

식 (12)는 이안제 양단에서의 표사이동의 교류가 없다는 조건하에 구할 수 있다. 따라서 표사의 입·출입이 없다는 가정하에 Laplace 변환을 이용하여 풀면 이안제 우단에서의 표사이동을 예측할 수 있는 다음 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$y(x, t) = 2 \tan \alpha_0 \left\{ \sqrt{\frac{et}{\pi}} e^{-x^2/4et} - \frac{x}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{et}}\right) \right\} \dots (14)$$

식 (14)는 $t > 0, x \geq 0$ 인 영역에서 임의의 입사각에 대한 해석이 가능하다.

한편 주어진 입사조건과 구조물 조건하에서 얼마의 시간 후에 좌단으로 표사이동(bypassing)이 발생

되는가 하는 문제도 중요한 관심사항 중의 하나이다. 퇴적된 표사가 이안제의 끝단 L 에 도달되는 시간을 t_1 이라 하면 표사가 좌단으로 이동되는 시간은 식 (14)로 부터 다음 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$t_1 = \frac{\pi L^2}{4e \tan^2 \alpha_0} \dots (15)$$

현재 많은 해수욕장이 표사의 유실 문제로 큰 어려움을 겪고 있다. 이에 대한 해결 방안으로 해안선을 따라 일정 간격으로 이안제(groin/jetty)를 배치하곤 한다. 또한 해안선 부근에 방파제나 이안제를 설치할 경우 그 길이를 얼마로 할 것인가 하는 문제 등이 본 모형과 관련된 문제들이다. 따라서 본 경우는 이와 관련된 기초적 연구로 매우 유용하게 이용될 수 있다.

결과 및 분석

여러가지의 초기조건 및 경계조건에 따른 해석해를 이용하여 해안선의 시간에 따른 변형 특성을 해석하였다. 이때 해석해에는 결정되어야 할 많은 변수들이 내포되어 있을 뿐만 아니라 본 연구가 해안선 변형과 관련된 기초적 연구이기 때문에 해석해를 무차원화시켰다.

먼저 해안선에 구조물이 존재하지 않는 경우, 일정한 해안선의 임의 위치에 유한길이 가 돌출된 직사각형 해안선이 존재하는 경우에 대한 해석이다. 계산 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 무한 영역에의 적용이 가능하나 본 문제에서는 무한영역의 결과가 아무런 의미를 갖지 않으므로 유한 길이까지만 계산하였다. Fig. 2에서 시간이 지남에 따라 직사각형으로 돌출된 해안선은 원래의 평행한 해안선으로 접근하려고 변형되며, 상대적으로 초기에 많은 변형이 발생되고 있다는 사실을 알 수 있다. 이는 물리적으로 많은 시간이 지나면 해안선이 평형상태에 근접되었다는 사실을 의미하는 것이다. 또한 공간적으로는 돌출된 부분에서 거리가 멀어짐에 따라 그 영향은 현저히 감소되고 있으며, 형태는 원점을 중심으로 서로 대칭이다. 또한

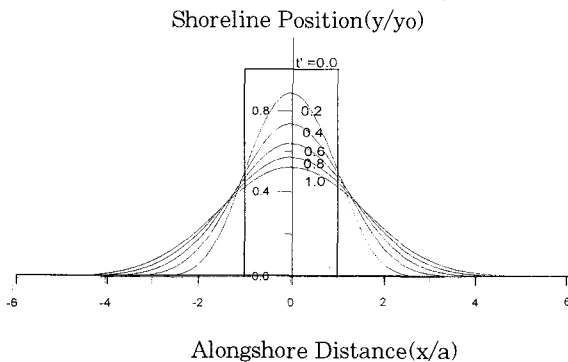


Fig. 2 Shoreline evolution of initially rectangular beach fill exposed to wave arriving normal to shore at time $t' = et/a^2$

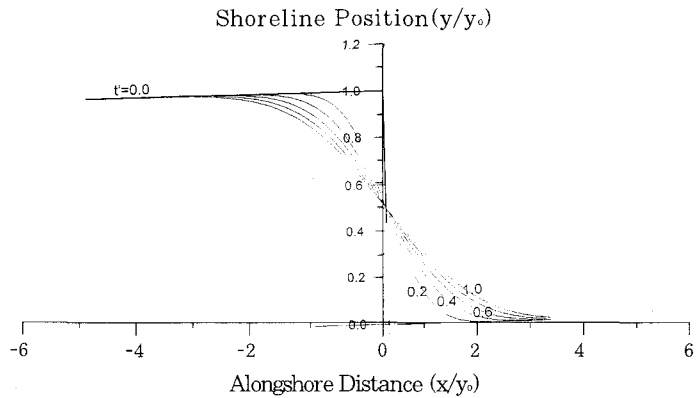


Fig. 3 Shoreline evolution of a semi-infinite rectangular beach at time $t' = a/y_0$.

표사의 유실과 퇴적이 서로 보존되면서 변형되고 있다. 이와 같은 사실은 이미 지배 방정식에 내포되어 있지만 수치적 계산과정에서 아무런 문제가 발생되지 않았다는 사실을 직접적으로 나타내주는 결과이다. 따라서 무차원화된 변수들에 포함된 상수들이 해석하고자 하는 조건에 맞게 결정되면 Fig. 2을 이용하여 쉽게 시·공간에 따른 해안선 변형을 직접 예측할 수 있다.

외해에서 파랑이 수직으로 입사하는 경우, 해안선의 임의 위치부터 크기 y_0 가 반 무한의 영역에 돌출된 해안선이 존재한다고 생각하자. 이 경우에는 해안선 방향과 해안선 횡방향의 공간 변수들을 모두 돌출 크기 y_0 를 이용하여 무차원화시켰다. 계산 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 시·공간적인 특성은 앞의 결과 Fig. 2와 전반적으로 유사하다. 그러나 시간에 관계없이 변형되는 해안선은 항상 $y_0/2$ 점을 지난다.

해안선의 임의 위치에 크기 y_0 가 돌출된 삼각형 해안선에 대한 해석이다. 무차원화된 변수는 유한길이가 돌출된 직사각형 해안선의 경우와 동일하다. 원점을 중심으로 계산된 결과를 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 2와 달리 돌출된 부분의 면적이 작아서 해안선 횡방향으로의 이동폭이 크게 나타나고 있으며, Fig. 2보다 상대적

으로 단시간내에 평형상태로 접근되고 있다. 본 경우에서도 유실되는 부분의 면적과 퇴적되는 부분의 면적이 일치하고 있다. 즉 표사의 보존조건을 잘 만족시키고 있다.

폭풍해일이 내습한 후의 해안선이 평상시 파랑하에서 어떻게 이동되는가를 기초적으로 살펴보기 위하여 해안선을 따라 이동특성을 해석하였다. 해안선 횡방향과 해안선 방향으로는 Cusp의 길이 l 로 무차원화시켰다. 계산 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 비교적 짧은 시간내에 해안선이 빠르게 평형상태로 접근되고 있다는 사실을 그림으로부터 쉽게 알 수 있다. 본 결과를 이용하면 Cusp의 길이에 따른 해안선의 변형 특성을 쉽게 해석할 수 있다.

이상에서는 해안선에 구조물이 존재하지 않으면서 파랑이 수직으로 입사하는 경우에 국한하여 여러 가지 초기 해안선의 시간에 따른 변형특성을 해석하였다. 그러나 실제 해안선에는 많은 구조물들이 존재하고 또한 이와 같은 구조물들이 해안선의 변형을 유발하는데 가장 많은 영향을 준다. 따라서 해안선의 임의 위치에 구조물이 존재하면서 임의의 입사각을 가지고 내습하는 경우에 대하여 해석하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해

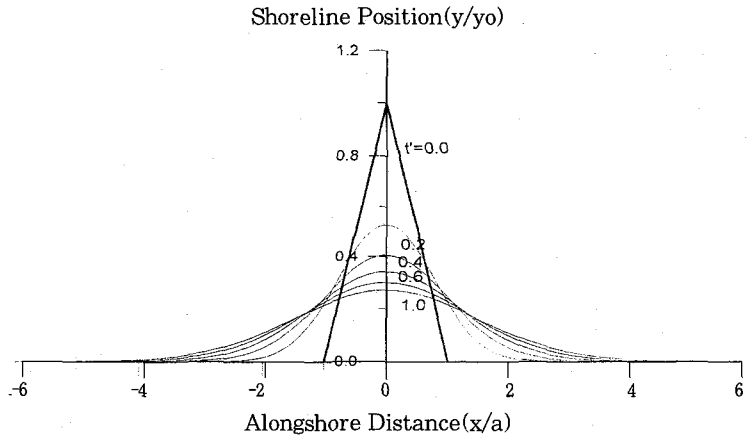


Fig. 4 Shoreline evolution of initially triangular beach fill exposed to wave arriving normal to shore at time $t = et/a$.

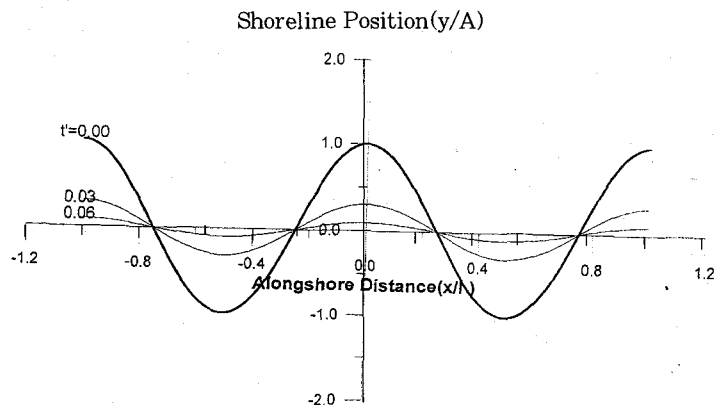


Fig. 5 Shoreline evolution of initially cosine-shaped beach at time $t = \epsilon t \rho$.

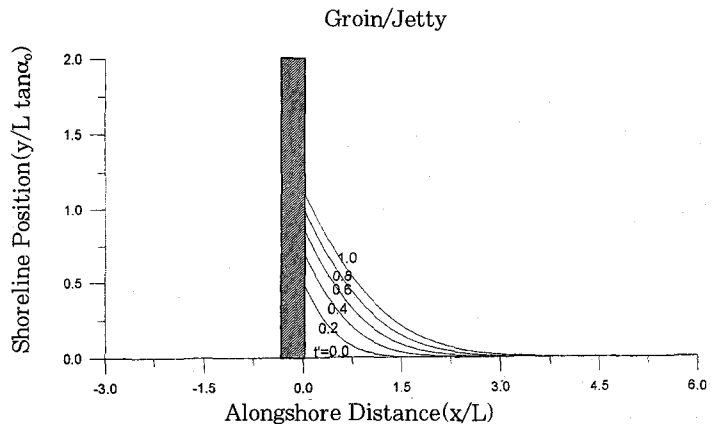


Fig. 6 Shoreline evolution uplift of groin which is totally blocking the transport of sand alongshore at time $t = \epsilon t L$.

안선 방향으로서는 이안제의 길이 L 을 이용하여 무차원화시켰으며, 횡방향으로는 이안제의 길이 뿐만 아니라 파랑의 입사각을 가지고 무차원화시켰다. 임의의 입사각을 가지고 해안선으로 진행되는 파랑은 표사를 입사각의 방향으로 이동시켜 표사가 이안제의 주변에 퇴적된다는 사실을 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 표사의 이동현상은 많은 양의 표사가 퇴적되어 결국은 표사가 이안제 끝단을 통과(bypassing)해 이안제의 다른쪽으로 이동된다. 실제 이와 같은 예측들이 항만 주변의 방파제나 해수욕장의 이안제 설계시 수행되고 있다. 이때 주 관심을 가지고 해석되는 사항이 방파제나 이안제가 건설된 후 얼마의 시간 후에 표사의 통과가 발생되느냐 하는 통과 시작 시간의 예측과 통과되는 표사량의 예측이다.

결 론

해석적 방법을 이용하여 해안선 변형을 유발하는 표사의 유실 및 퇴적과 관련된 물리적 현상의 근본적인 이해를 위해 해석적 방법을 이용하여 해안선의 변형특성을 해석하였다. 모두 5가지의 초기 해안선 형태에 대하여 해석하였다. 이 중 4가지는 해안선에 구조물

이 존재하지 않는 경우로, 유한길이가 돌출된 직사각형 해안선, 반 무한길이가 돌출된 직사각형 해안선, 유한길이가 돌출된 삼각형 해안선 그리고 정현함수 형태의 해안선이다. 또한 나머지 한가지는 해안선은 일정하나 그 해안선의 임의의 위치에 구조물이 존재하는 경우이다. 각각의 경우에 대한 해석해를 직접 유도하여 무차원화하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

구조물이 존재하지 않는 임의 형태의 해안선에 수직으로 쇄파 파랑에 의해 초기 해안선은 상대적으로 초기에 많은 변형이 발생되고 있다. 이는 물리적으로 많은 시간이 지나면 해안선이 평형상태에 근접되었다는 사실을 의미하는 것이다. 또한 공간적으로는 돌출된 부분에서 거리가 멀어짐에 따라 그 영향은 현저히 감소되고 있으며, 변형 형태는 서로 대칭이다.

한편 표사이동 문제에서 중요한 표사의 유실과 퇴적사이의 보존관계가 각각의 경우에 모두 잘 만족되었다. 이와 같은 사실은 수치적 계산 과정에서 아무런 문제가 발생되지 않았다는 사실을 직접적으로 나타내주는 결과이다. 따라서 무차원화된 변수들에 포함된 상수들, 해안선의 형태 및 표사의 특성 그리고 외력조건 등이

해석하고자 하는 조건에 맞게 결정되면 쉽게 시·공간에 따른 해안선 변형을 정량적으로 직접 예측할 수 있다.

구조물이 존재하는 해안선에 임의의 입사각을 갖고 내습하는 파랑에 의해 발생될 수 있는 구조물 주변의 해안선 변형 특성도 해석하였다. 해석 결과 임의의 각도를 가지고 내습하는 파랑은 입사 방향으로 표사를 이동시켜 이안제 주변에 많은 퇴적과 유실을 유발시킨다. 이와 같은 표사의 이동현상은 많은 관측에 의하여 확인되었다. 또한 시간이 진행됨에 따라 이안제 주변에 많은 양의 표사가 퇴적되어 결국은 표사가 이안제 끝단을 통과해 이안제의 다른쪽으로 이동된다는 사실도 유추할 수 있었다. 이때 주 관심을 가지고 해석되는 사항이 방파제나 이안제가 건설된 후 얼마의 시간 후에 표사의 통과가 발생되느냐 하는 통과 시작시간의 예측과 통과되는 표사량의 예측이다. 실제 이와 같은 예측들이 항만 주변의 방파제나 해수욕장의 이안제 설계시 수행되고 있다.

비록 본 연구가 실제 구조물의 설계에 이용되기 위해서는 보완되어야 할 사항들을 내포하고 있지만, 표사이동 현상의 수학적·물리적인 이해에는 많은 도움을 주리라 생각된다. \square