

해안선 변형 예측을 위한 수치모형

최 한 규 / 강원대학교 토목공학과 교수

이 철 응 / 강원대학교 토목공학과 조교수

해안선은 바다와 육지를 연결하는 매우 중요한 역할을 하는 열린 공간이다. 따라서 여러가지 목적으로 많은 시설물들이 건설되었는가 하면, 현재 많은 구조물들이 건설되고 있다. 외국과의 직접적인 무역교류를 위해 대규모항만이 건설되기도 하고, 여가생활을 충족시키기 위한 여러 가지 관광개발이 요구되기도 한다.

이와같은 개발에 따라 새로운 문제로 대두되는 것이 바로 자연환경의 보호이다. 자연환경이 최대한 보존되는 범위내에서 개발이 이루어져야 한다는 개념이 확산되고 있는 이때, 해안선의 변형을 예측하는

것은 바로 해안선에 건설된 또는 건설될 임의의 구조물에 의하여 발생될 환경의 변화를 미리 예측하여 그에 따른 제반대책을 강구하는 것이다.

해안선의 변화를 올바르게 예측하기 위해서는 무엇보다도 관측자료를 이용하여 이와 관련된 요소들을 정확히 이해하여 주변환경과의 관계를 올바르게 정립하여야 한다. 대표적으로 표사와 파랑 또는 해류와 관련된 많은 연구들이 이루어졌다. 또한 해안선의 변형을 정확히 예측하는 것은 그와 관련된 변수들이 다양할 뿐만 아니라 변수들의 상호작용이 복잡하여 현재 활발한 연구가 이

루어지고 있다.

표사의 이동과 관련하여 제시된 이론은 Micro-scale 접근법과 Meso-scale 접근법으로 구분할 수 있다. Micro-scale 접근법은 표사의 이동을 일으키는 외력을 자세히 고려하여 해석하는 방법이고, Meso-scale 접근법은 관측이나 실험 자료를 기초로 단순한 이론을 이용하는 방법이다.

본 연구에서는 Meso-scale 접근법의 대표적인 이론인 해안선모형(One-line model)을 이용하여 해안선 주변의 구조물에 따른 해안선의 변형을 예측할 수 있는 간편한 수치모형을 개발하였다.

먼저 수치모형을 검증하기 위하여 해석해가 존재하는 고립된 방사제와 이안제에 적용하였다. 즉, 주어진 파랑조건 하에서 고립된 방사제의 전면과 후면, 그리고 이안제 배후면에서 나타나는 해안선의 변형특성을 해석해와 비교하였다. 그러나 관측자료와는 비교하지 못하였다.

해안선 모형

해안선 모형의 가장 큰 장점은 장기간의 해안선 변형을 비교적 손쉽게 계산할 수 있다는 데 있다. 따라서 폭풍해일이나 기타 이상조건하에서 단기간에 발생하는 효과는 장기간에 걸쳐 이루어지는 해안선 변형의 기본 경향에 부여된 하나의 부가효과로 고려된다.

또한 수심이 영인 해안선을 주 관심 대상으로 해석하기 때문에 해안선 횡방향으로는 항상 평형상태의 단면(equilibrium profile)을 유지한다. 따라서 해안선 횡방향으로의 단면은 시간에 관계없이 일정한 형태를 유지한다고 가정한다.

표사의 이동, 즉 표사의 유실 및 퇴적을 유발하는 주 원인이 해안선 가까운 영역에서 발생하는 쇄파(breaking wave)라고 생각하기 때문에

해안선 방향 표사이동량(longshore sediment transport rate)은 임의의 한 계수심(critical depth)까지 일정하게 발생된다고 가정한다. 이때 임의의 한계 수심은 해안선 방향으로 표사의 이동이 거의 발생되지 않는 부분의 수심이다.

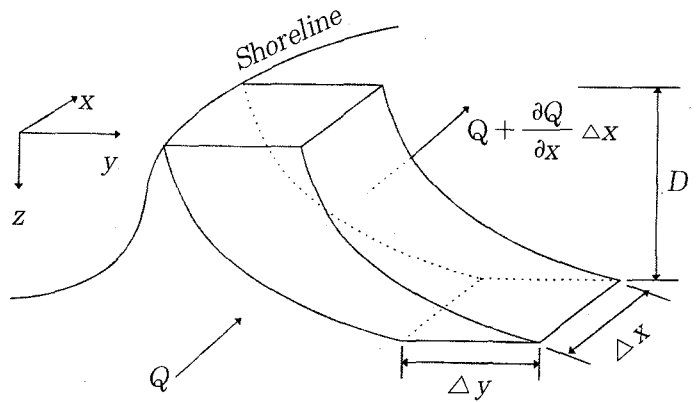
Euler 방법을 이용하여 표사의 이동과 관련된 지배 방정식을 유도하기 위한 지배단면(control section)을 <그림 1>에 나타내었다. 이때 사용된 좌표계로 x 는 해안선 방향, y 는 해안선 횡방향 그리고 z 는 수심 방향이다. <그림 1>의 지배단면에서 표사의 이동과 관련된 표사 보존식은 질량보존 법칙으로부터 다음 식(1)과 같이 구할 수 있다.

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

여기에서 Q 는 해안선 방향으로 표사의 이동량, A 는 해안선 횡방향의 단면적, q 는 해안선에 존재할 수 있는 표사의 입·출력(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 단면적 변화와 같다. 따라서 식 (1)을 이용하여 해안선의 변형과 관련된 지배 방정식을 유도하기 위해서는 표사량 및 단면적을 정의하여야 한다. 먼저 임의의 점에서 단면적의 변화는 다음 식 (2)와 같은 관계에 의하여 해안선의 변화로 나타내어 질 수 있다.

$$\Delta A = \Delta y D \quad (2)$$



<그림 1> 해안선 변형 예측모형의 정의

여기서 D 는 표사의 이동이 거의 없는 한계수심이다. 또한 해안선 방향의 표사 이동량은 파랑 에너지방법 (energy flux method)에 의하여 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$Q = Q_0 \sin 2\alpha_b \quad (3)$$

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

$$Q_0 = \frac{pg}{16} H_{sb}^2 C_{gb} \frac{K}{(p_s - p)\lambda} \quad (4)$$

식 (4)에서 p 는 해수의 밀도, g 는 중력 가속도, H_{sb} 는 유의 쇄파고, C_{gb} 는 쇄파점에서 파랑의 군속도, K 는 무차원화된 경험상수, p_s 는 표사의 밀도 그리고 λ 는 표사의 공극을 나타낸다. 또한 α_c 는 쇄파의 파봉선과 해안선 사이의 각도로 다음 식 (5)로 표시될 수 있다(그림 2).

$$\alpha_b = \alpha_c - \tan^{-1} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (5)$$

여기서 α_c 는 쇄파의 파봉선과 x 축이 이루는 각도를 나타낸다.

그러므로 식 (2), (3) 그리고 식 (5)를 식 (1)에 대입하면 다음 식 (6)을 얻을 수 있다. 이때 식 (5)는 해안선의 경사가 완만하고 각도가 작다고 가정하여 Taylor 전개에 의하여 간략화되었다.

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

여기서 $\epsilon = 2Q_0/D$ 이다.

해안선 모형의 지배 방정식인 식 (6)은 수학적으로 일차원 확산방정식(diffusion equation)과 동일하다. 따라서 초기조건과 경계조건이 주어지면 쉽게 해를 구할 수 있다.

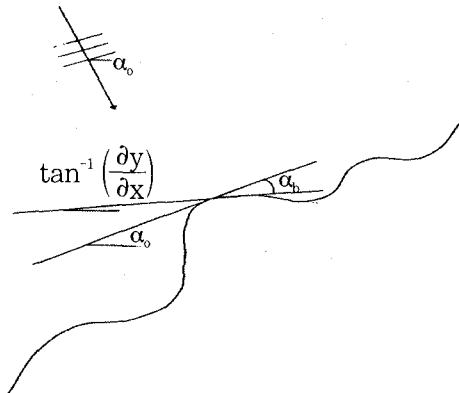
지배 방정식 (6)은 수학적으로

로 쌍곡선 형태(hyperbolic type)의 편미분 방정식이기 때문에 초기조건의 올바른 부여가 무엇보다 중요하다. 예로 경계조건에 의하여 제한된 선 또는 면적내에서의 온도변화나 오염물질의 시간에 따른 농도변화를 해석하는데도 식 (6)과 동일한 형태의 지배 방정식이 이용되고 있다.

단순한 초기조건하에서는 Laplace 변환법 등 여러 가지 방법에 의하여 이미 해석해가 유도된 바 있다. 해안선 변형 문제에서도 만약 수학적 함수로 나타내어 질 수 있는 비교적 간단한 형태의 초기조건이 부여된다면 임의의 경계조건내에서 해석해를 쉽게 구할 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우에는 식 (6)을 풀기 위해서는 유한 차분법이나 유한 요소법 등과 같은 수치적 방법을 이용하여야 한다.

본 연구와 같이 해안선 변화를 예측하는 문제에서 초기조건은 해석하고자 하는 시간의 해안선 형태를 부여하면 된다. 그러나 초기상태의 해안선의 형태는 시시각각으로 변하기 때문에 수학적으로 만족되는 초기상태의 해안선의 부여가 현실적으로 어렵다.

따라서 현재까지 이용되는 대부분의 방법은 해안선에 인위



〈그림 2〉 해안선 변형 예측모형의 쇄파각 정의

적인 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 때문에 구조물 건설 시점을 기준으로 전·후 일정 시간대의 관측자료를 이용하여도 무방하다.

본 연구는 해안선 변형과 관련된 제반 변수들의 물리적 이해를 목적으로 하기 때문에 초기조건을 해석해가 구해질 수 있는 함수로 부여하였다. 한편 경계조건은 실제 무한한 계산 영역을 제한한다든지 구조물이 존재할 경우 구조물 주위의 물리적 특성을 반영하기 위하여 부여되는 것이다.

본 연구에서 사용될 외해 경계조건으로 구조물이 존재하지 않을 경우 파랑의 입사각은 항상 해안선에 수직으로 입사한다. 구조물이 존재하는 경우에는 지배 방정식이 만족하는 범위내에서 임의의 입사각 조건을 부여하였다. 또한 해안선에 구조물이 존재하는 경우에 표사는 구조물을 통과할 수 없다는 구조물 경계 조건도 부여하였다.

수치모형의 개발

해석해는 해안선이 일정하여야 한다는 등의 비교적 단순한 조건하에서만 적용이 가능하다. 따라서 실제 적용하기에는 많은 문제가 발생할 수 있다. 따라서 실제 임의의 해안선 조건에도 적용이 가능한 모형이 필요하다.

본 연구에서는 식 (1)의 표사이동에 관한 지배방정식을 이용하여 임의의 초기 및 경계조건에서도 적용이 가능한 수치모형을 개발하였다. 수치모형은 해석해가 존재하는 단순 해안선에 대하여 우선적으로 개발되었으며, 후에 회절효과가 포함된 복잡한 구조물을 갖는 해안선에 적용할 수 있는 모형으로 확장시켰다.

수치모형은 유한차분법을 이용하여 구성되었으며, 식 (1)을 유한차분모형으로 나타내면 다음 식 (7)과 같이 표현될 수 있다. 이때 시간에 대하여는 전방차분을, 공간에 대하여는 중앙차분을 이용하였다.

$$A_j^{n+1} = A_j^n - \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (Q_{j+1}^n - 2Q_j^n + Q_{j-1}^n) \pm \Delta t q_j^n \quad (7)$$

식 (7)은 $\Delta t/(\Delta x)^2 < 1/2$ 라는 안정조건을 필요로 한다. 한편 경계조건으로 해안선 임

의 위치에서 구조물이 존재하는 경우, 구조물 좌우로 표사의 이동이 없다는 다음 식 (8)을 이용하면 된다.

$$Q_j^n = 0 \quad (8)$$

그 외의 경계조건으로는 임의의 점에서의 표사의 이동량이 동일하다는 식 (9)가 필요하다.

$$Q_j^n = Q_k^n \quad (9)$$

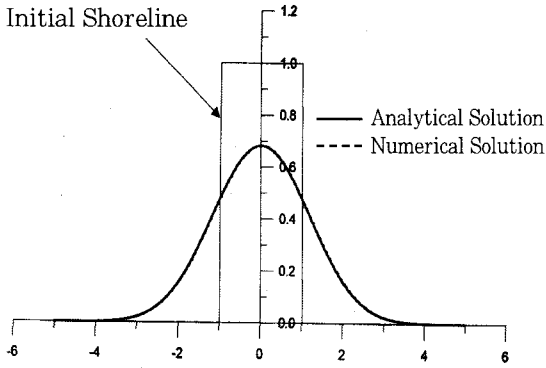
따라서 지배방정식의 차분화된 식 (7)과 경계조건인 차분식인 (8) 및 (9)를 (2)와 (3)과 관련지어 해석하면 된다.

이와 같이 구성된 수치모형을 검증하기 위하여 여러 가지의 단순 해안선에 대하여 우선적으로 적용하였다. 물론 수치해를 해석해와 비교하였다.

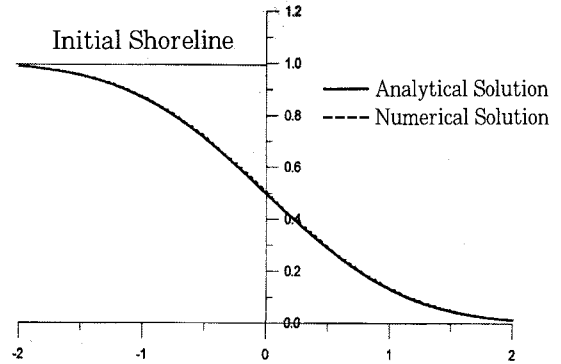
수치모형의 적용

먼저 평행한 해안선에 일정한 크기의 직사각형 모형으로 돌출된 형태의 해안선에 수직으로 입사하는 파랑의 경우에 적용한 결과를 <그림 3>에 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 해석해와 수치해의 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 유사한 퇴적과 침식이 잘 보존되고 있다. 또한 유사한 경우로 <그림 4>에는 반무한으로 돌출된 해안선의 경



〈그림 3〉 해안선 변형 예측모형의 검증
(직사각형 돌출)



〈그림 4〉 해안선 변형 예측모형의 검증
(반무한직사각형 돌출)

우, 〈그림 5〉에는 삼각형 모양으로 유한길이가 돌출된 경우의 적용 결과를 나타내었다. 동일하게 수치해와 해석해가 매우 잘 일치하고 있다.

따라서 해안선에 수직으로 입사하는 경우에는 임의의 초기 해안선에 적용이 가능함을 알 수 있다. 물론 아쉬운 점은 현장 관측 자료가 없어서 실제의 경우와 비교하지 못한 점이다. 따라서 이 경우에 대한 추

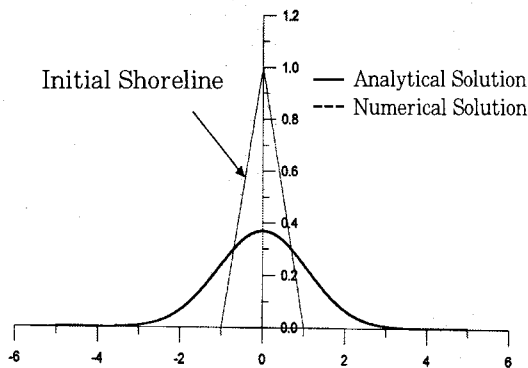
가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

〈그림 6〉은 원형으로 유한길이가 돌출된 해안선에 수직으로 입사하는 경우를 해석한 결과이다. 이 경우는 초기 해안선의 형태를 간단한 수식으로 표현하기가 어려워 해석해를 구하기가 매우 어려운 경우이다. 따라서 수치해의 결과만 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 표시의 침식과 퇴적의 관계가

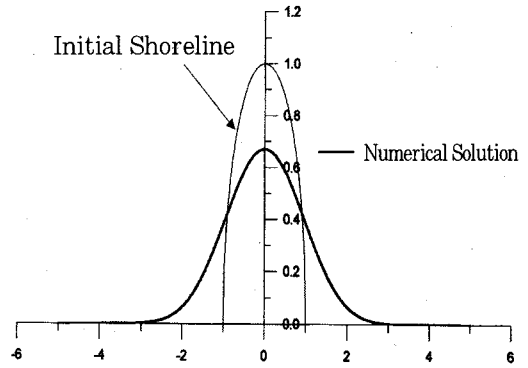
잘 보존되고 있다.

한편 지금까지의 결과는 해안선에 구조물이 존재하지 않는 단순한 경우였다. 그러나 실제 문제는 대부분의 해안선에 구조물이 존재할 뿐만 아니라 설치에 따른 해안선의 변형을 예측하는 문제이다. 따라서 해안선에 구조물이 존재하는 경우에 대한 수치모형의 검증 결과에 대하여 살펴보아야 한다.

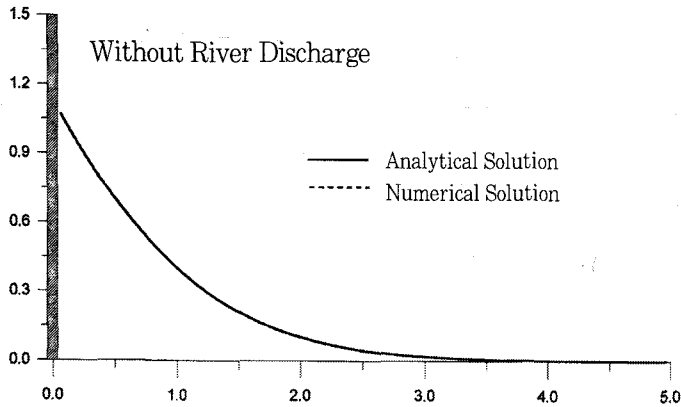
먼저 〈그림 7〉은 해안선 임



〈그림 5〉 해안선 변형 예측모형의 검증
(삼각형 돌출)



〈그림 6〉 해안선 변형 예측모형의 검증
(원형 돌출)



〈그림 7〉 해안선 변형 예측모형의 검증(고립된 방사제 전면)

의의 점에 구조물이 존재하면 서 쇄파점에서 파랑이 임의의 입사각을 갖는 경우에 대한 적용 결과이다. 〈그림 7〉은 구조물에 의해 발생하는 회절영역을 해석하지 않은 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 해석해와 수치해가 매우 잘 일치하고 있다.

따라서 본 연구에서 개발된 수치모형은 회절이 포함되지 않은 경우, 즉 구조물 전면에서의 표사이동에 대한 해석이 가능함을 알 수 있다.

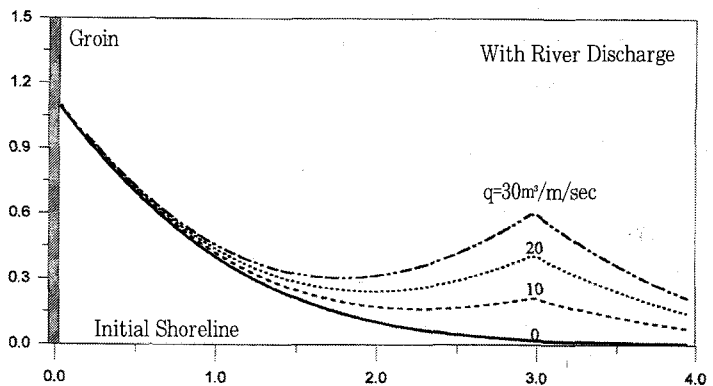
한편 지금까지는 식 (1)의 지배방정식의 우변에 존재하는 표사의 유입이 없다는 가정하에 적용된 결과이다. 그러나 해안선 임의의 점이 내륙에서 유입되는 하천과 만나는 경우가 많이 존재한다. 그와 같은 경우에는 하천에서 유입되는 표사량을 고려해야만 한다.

따라서 이와 같은 경우에 본 연구에서 개발된 수치모형의 결과가 어떻게 거동하는지를 살펴보기 위하여 하천에서의 표사의 유입이 있는 경우에도 해석하였다. 해석결과를 〈그림 8〉에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 표사의 유입이 존재하는 지점의 좌우에 해안선이 임의의 크기로 돌출되게 나타나고 있어, 하천에서 표사

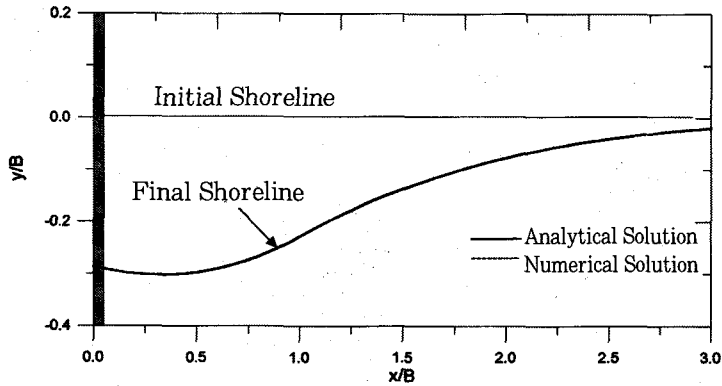
의 유입이 일정하게 진행되는 경우도 본 연구에서 개발된 수치모형으로 잘 예측할 수 있다는 사실을 확인 할 수 있다. 예측결과를 실제 관측치와 비교하지 못하여 정량적이지 못하다고 생각된다.

지금까지는 해안선에 임의의 구조물이 존재하더라도 회절영역에 대한 해석은 하지 못하였다. 따라서 회절영역에 대한 해석을 수행하기 위하여 회절영역에서 쇄파점의 입사각을 변화시켜 계산을 수행하였다. 그 결과를 〈그림 9〉에 제시하였다. 본 경우에도 해석해와 수치해가 잘 일치하고 있다.

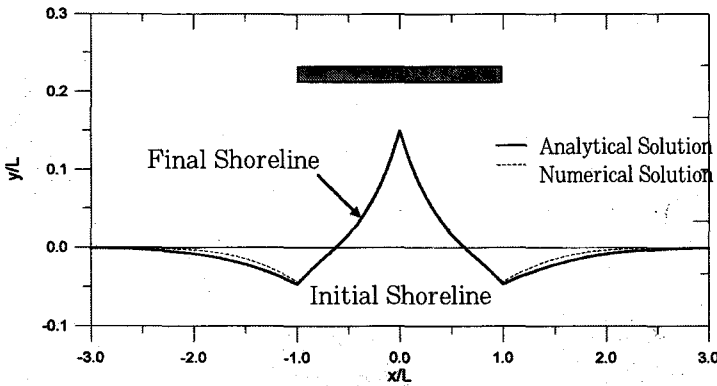
따라서 본 수치모형을 회절영역에 적용하여도 별 무리가 없다고 생각된다. 좀 더 정확한 예측 여부를 확인하기 위하여 이안제가 존재하는 경우에 대해서 수치적으로 입사하는 경우에 대



〈그림 8〉 해안선 변형 예측모형의 검증(하구부근의 고립된 방사제전면)



〈그림 9〉 해안선 변형 예측모형의 검증(고립된 방사제 후면)



〈그림 10〉 해안선 변형 예측모형의 검증(이안제)

하여 적용하여 보았다. 그 결과를 〈그림 10〉에 제시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 최대 퇴적량과 최대 침식량 및 그 발생점의 위치 등이 해석해와 매우 잘 일치하고 있다. 단지 침식 부분에서 약간의 차이를 보이고 있을 뿐이다.

결론

해안선 모형의 표사량과 방

정식과 표사보존식을 이용하여 임의의 초기조건과 경계조건에 따른 해안선 변형을 예측할 수 있는 유한차분수치모형을 개발하였다.

개발된 수치모형은 해안선에 구조물이 존재하지 않는 경우는 물론, 임의의 입사각을 가지는 파랑이 복잡한 구조물이 존재하는 해안선에 입사하는 경우에도 적용이 가능하다는 사실을 확인 할 수 있었다. 특

히 하구부분에서 하천을 통하여 유입되는 표사량을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 회절효과를 고려할 수도 있었다.

수치모형의 결과를 해석해와 비교하는 단계를 지나 실험자료나 관측자료와의 비교를 통하여 수치모형을 보완하는 작업이 앞으로 필요하다. ㉠