

海岸線 橫方向의 漂砂移動 豫測模型 Numerical Model for Cross-Shore Sediment Transport

이철응* · 김무현*

Cheol Eung Lee and Moo Hyun Kim

要 旨 : 폭풍해일에 의한 쇄파대내에서의 표사이동을 예측할 수 있는 유한차분 수치모형을 개발하였다. 이동 경계조건을 가지는 비제차 확산방정식을 사용하여 개발된 수치모형은 Kriebel과 Dean(1985)의 수치모형이 가지고 있는 많은 제약성을 해결할 수 있었다. 임의의 초기단면과, 시간에 따른 폭풍해일의 스펙트럼을 이용하여 계산된 수치모형의 결과는 표사량의 보존 및 해안선의 후퇴나 쇄파점의 이동을 잘 나타내 주며, 해석해 및 관측자료 그리고 실험자료와 매우 잘 일치한다. 수치모형과 관련된 제한 변수들의 민감도를 분석하여 수치모형 적용의 편의를 도모하였으며, 해안선 단면을 따른 표사의 입 경변화 효과를 부여할 수 있음을 알았다.

Abstract □ The development of a finite difference model for cross-shore sediment transport prediction in the surf zone due to the storm surge event is presented in this paper. Using the inhomogeneous diffusion equation with moving boundaries, the present numerical model is found to be robust and efficient, and does not possess a number of restrictions imposed in Kriebel and Dean's(1985) numerical model. Our numerical model is validated through comparison with the analytical solution, the data of a large-scale experiment, and the field data of Hurricane Eloise. The present model is able to predict the averaged volumetric erosion rate of a beach due to the time-varying real storm surge hydrographs and satisfies the conservation of sediment between eroded volume in the onshore region and deposited volume in the offshore region. In addition, the present model is able to reasonably predict the recession of a beach with wide berm and dune, and can describe the change of a breaking point by the offshore deposition. From the sensitivity analysis of the present numerical model with various input parameters, it is concluded that the present numerical model is able to analyze the beach change in a reliable manner including the effects of different sizes of sediments.

1. 서 론

폭풍해일(storm surge)이나 파랑에 의하여 발생하는 연안역에서의 표사이동 문제에 대한 정량적, 정성적인 이해는 해안공학자들에게 연안역의 보호 측면에서 필수적이다. 특히 해수욕장의 개발과 관련된 위락 시설이나 마리나(marina) 시설의 건설 등, 각종 연안 자원의 개발과 더불어 이에 대한 많은 연구가 수행되었고 또한 현재에도 연구가 활발히 진행되고 있는 상태이다. 그러나 관련된 변수들이 아직까지도 완전히 규명되지 않은 상태에서, 표사이동을 예측한다는 것은 대단히 어려운 문제이다. 표사이동율(sedi-

ment transport rate)과 관련된 방정식은 일반적으로 두 가지의 해석 방법이 있다. 그 하나는 주로 관측이나 수리모형에 기초를 둔 경험식을 이용하는 전체적 해석방식(global analysis)이고, 다른 하나는 쇄파대내에서의 유속과 관련된 이론식을 사용하는 부분적 해석방식(local analysis, process-based analysis)이다.

전자의 해석방법으로서 Dean(1977)은 미국의 대서양과 멕시코만을 따라 약 500개의 해안선 단면을 조사하여 평형단면식(equilibrium profile)을 제시하였다. 이 평형단면식은 Bruun(1954)이 처음으로 제시한 경험식과 일치한다. 또한 Dean(1991)은 이와 같은 평형단면식을 해안 공학적으로 관심이 많은 여러가지

*텍사스 A&M대학 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, TX77843, USA.)

상수에 적용하였다. Kriebel과 Dean(1985), Kriebel(1986)은 Dean(1977)의 평형단면식과 에너지 소산(energy dissipation)이론을 사용, 표사이동을 예측할 수 있는 유한차분 수치모형을 개발하였다. 이들은 개발된 수치모형을 폭풍해일 Eloise가 통과한 Florida의 Bay County에 적용하여 수치모형과 관련된 제 변수들의 민감도를 분석하였다. Kobayashi(1987)는 표사이동과 관련된 문제를 이론적으로 연구하기 위해, 해안선의 단면을 에러함수(error function) 형태의 단면으로 가정하여 해석해를 유도하였다. 그는 또 표사이동을 방정식을 Kriebel과 Dean(1985)이 사용한 방정식을 이용, 단순화된 표사이동 방정식을 제시함으로써 수치모형의 개발을 용이하게 하였다. Larson과 Kraus(1989)는 쇄파대 부근에서 형성되는 수중둔덕(bar)의 형성과 이동과정을 묘사하기 위해 Kriebel과 Dean(1985)의 수치모형에 방대한 양의 수리모형 실험자료에서 구한 수정된 표사이동 방정식을 도입하여 'SBEACH'라는 수치모형을 개발, 표사이동과 관련된 많은 변수들의 민감도를 조사하였다.

한편 경험식에 의존하여 표사문제를 해석하는 경우와는 다르게 유럽이나 일본에서 주로 많이 연구되는 해석방법이 있다. 이 방법은 Bailard(1981)의 이론식에 기초한 방법으로, 각 지점에서의 표사이동이 직접적으로 쇄파대내에서 파랑변화나 기타 원인에 의하여 유발된 유속변화에 의하여 이루어진다는 이론이다. Roelvink and Broker(1993)는 이와 같은 해석방법을 다음과 같은 3단계의 계산과정으로 구분하였다. 처음 단계가 유속의 변화를 구하는 모형(hydrodynamic module)이고, 두번째 단계가 앞 단계에서 구한 유속을 이용하여 표사이동을 구하는 모형(sediment transport rate module)이다. 그리고 마지막 단계가 표사의 연속방정식을 이용하여 표사의 시간에 따른 이동변화를 예측하는 모형(morphological module)이다. Southgate(1991), Hedegaard 등(1991)이 이와 같은 해석방법으로 수치모형을 수립한 후 수치모형과 관련된 변수들의 민감도를 분석하였다. 따라서 이와 같은 해석방법은 우선적으로 쇄파대 내에서의 유속의 변화를 정확하게 구하여야 한다. 비록 후자의 접근 방법이 좀더 학문적이고, 하상의 형태변동을 예측하는 문제로 접근하기 쉬우나 아직 여러가지 문제점이 남아있어, 실용적인 면에서는 전자의 방법이 더 선호되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 전자의 해석방법을 이용하여 시간에 따른 표사이동을 비교적 정확히 예측할 수 있고, 적용이 간단한 유한차분 수치모형을 개발하고자 한다. 특히 본 모형에서는 시간에 따른 해안선 경계와 쇄파점의 이동을 묘사할 수 있게 수치모형에 이동경계 조건을 도입하였다. 이와 같이 수립된 수치모형을 이용하여 수치모형과 관련된 많은 변수들의 민감도를 분석하여 수치모형 적용의 편의를 도모하고자 한다.

2. 수학적 모형

연안역에서의 대규모 표사유실은 폭풍해일에 의하여 발생되며 이와 같은 표사유실의 대부분은 해안선에서 쇄파점까지의 영역에서 이루어진다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 정의와 좌표계를 사용하였으며, 해안선 방향(alongshore direction)으로는 일정하다고 가정하여 해안선 수직방향으로의 표사이동만을 다루는 문제로 제한하였다. x 축은 평균해수면을 기준으로 해안선 수직방향 좌표계이고 z 는 연직방향 좌표계이다. 초기상태의 해안선 단면은 $z = -h_0(x)$ 로 표시되며, $h_0(x)$ 는 $x > 0$ 영역에서는 양의 값을 가지고 $x < 0$ 영역에서는 음의 값을 갖는다. 폭풍해일에 의하여 유발된 수면의 변화는 S 로 정의되며, 쇄파대내에서 파랑에 의한 수위상승(wave setup)이나 기타의 효과는 모두 S 에 포함시켰다. 이와 같은 수면의 변화에 의하여 유발되는 단면의 시간에 따른 변화는 $h(x,t)$ 로 정의하였다. 계산영역은 $h(x,t) = 0$ 인 해안선에서 $h(x,t) = h_b$ 인 쇄파점까지다. $0 \leq h(x) \leq h_b$ 의 계산영역으로, 쇄파점으로부터 해안선까지의 쇄파대내로 제한이 된다. 그러나 이와 같은 계산영역은 고정된 것이 아니라 시간에 따른 유실 및 퇴적에 의하여 계속 변화하게

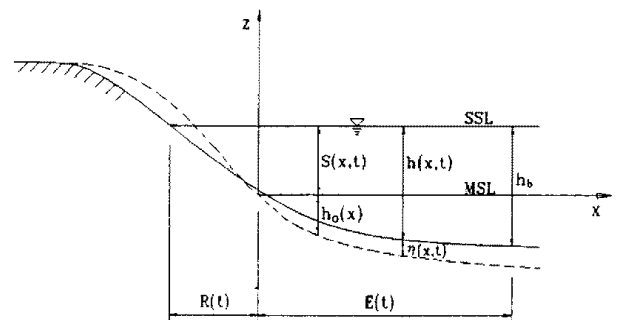


Fig. 1. Configuration of coordinate system and definition (SSL: Storm Surge Level, MSL: Mean Sea Level).

된다. 즉 시간에 따라 Fig. 1에 나타난 이동 경계점, $x = -R(t)$ 와 $x = E(t)$ 에 의하여 계산영역이 계속 새롭게 정의된다. 해안선 난변의 변화에 따른 손실을 및 퇴적율을 계산하기 위하여 언직방향의 수심변화, $\eta(x, t)$ 를 다음 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\eta(x, t) = h_o(x) + S(x, t) - h(x, t) \quad (1)$$

여기서 $\eta(x, t)$ 의 값이 양이면 퇴적(deposition)을, 음이면 유실(erosion)을 의미한다. 또한 표사와 관련된 연속방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2)$$

여기서 Q 는 시간평균된 단위폭당 표사이동율을 의미하며, Kobayashi(1987)는 Kriebel과 Dean(1985)이 사용한 표사이동율 방정식과 비교하여, 다음 식 (3)과 같이 간략화된 표사이동율 방정식을 제시하였다.

$$Q = D(h) \frac{\partial h}{\partial x} - K(h), \quad 0 \leq h \leq h_b \quad (3)$$

여기서 D, K 는 각각 폭풍해일이나 파랑 또는 표사의 특성과 관련된 함수들로, 정상상태에서 다음 식 (4), (5)와 같이 기술할 수 있다(Kobayashi, 1987).

$$D(h) = \alpha h^{(1-n)/n} \quad (4)$$

$$K(h) = n\alpha A^{1/n} \quad (5)$$

여기서 α, n 그리고 A 는 Dean(1977)이 제안한 평형 단면식, $h = Ax^{2/3}$,에 기초한 경험상수들이다. 특히 A 는 표사의 침강속도와 직접적인 관련이 있을 뿐 다른 수위변동이나 기타의 외력조건과는 관련이 없음을 알 수 있다. 식 (4), (5)를 Kriebel과 Dean(1985)의 표사이동율 방정식과 비교하여 정리하면 다음 식 (6), (7)을 얻을 수 있다.

$$D(h) = \alpha \sqrt{h} \quad (6)$$

$$K(h) = \frac{2}{3} \alpha A^{3/2} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 알 수 있듯이 표사이동율 방정식은 표사의 특성(K)과 외해에서 주어지는 외력조건(D)에 의존하고 있다. 따라서 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 본 연구의 지배 방정식인 다음 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(h) \frac{\partial h}{\partial x} - K(h) \right] + \frac{\partial S}{\partial t}, \quad 0 \leq h \leq h_b \quad (8)$$

식 (8)을 자세히 살펴보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 식 (6)에서 이미 살펴보았듯이 $D(h)$ 가 수심변화에 대하여 큰 상관관계를 갖지는 않는다. 따라서 폭풍해일의 분포가 시간에 따라 일정하다는 가정하에 식 (8)에 포함되어 있는 $D(h)$ 를 타당한 방법으로 수심과 직접적인 관계가 없는 상수로 정의할 수 있다면, 지배 방정식 (8)은 확산방정식으로 단순화된다. Kobayashi(1987)는 폭풍해일의 스펙트럼을 직사각형분포라 가정하고($\partial S/\partial t = 0$), 함수 $D(h)$ 는 계산영역내의 수심변화의 평균값을 사용한다는 개념으로, 계산영역을 적분하여 다음 식 (9)를 구하였다.

$$D = \frac{2}{3} \alpha \sqrt{h_b} \quad (9)$$

비록 Kobayashi(1987)가 식 (9)를 이용하여 구한 해석해를 제한된 단면에서 실제 관측자료와 대략적으로 비교하였으나, 식 (9)의 타당성은 아직까지 미지수로 남아 있다. 따라서 본 연구에서는 일차적으로 식 (6)을 사용하여 구한 수치결과를 식 (9)를 사용하여 구한 수치결과와 비교하여 그 타당성을 먼저 증명하고자 한다. 만약 Kobayashi(1987)의 방법과 같이 $D(h)$ 를 상수화할 수 있다면 해안선 수직방향의 시간에 따른 표사이동문제는 매우 단순화된 지배 방정식을 사용하여 해석할 수 있다.

식 (4)와 (5)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\sqrt{h}} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + \alpha \sqrt{h} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (10)$$

$$-R(t) \leq x \leq E(t),$$

식 (10)은 2개의 비정상 비선형 편미분방정식으로 수학적인 해석이 거의 불가능하고, 수치적으로도 결코 쉬운 문제는 아니다.

한편 식 (8)이나 식 (10)을 수치적으로 해결하기 위하여 필요한 경계조건으로, 우선 해안선 경계조건은 다음 식 (11)과 같다.

$$h(x) = 0, \quad x = -R(t) \quad (11)$$

그러나 식 (11)을 만족시키는 해안선 경계점, $R(t)$ 는

dune이나 berm의 후퇴(recession)에 따라 계속 변하게 된다. 따라서 해안선의 시간에 따른 후퇴를 묘사할 수 있는 또 다른 경계조건이 다음 식 (12)와 같이 필요하게 된다.

$$Q = -\eta \frac{dR}{dt}, \quad x = -R(t) \quad (12)$$

식 (12)는 해안선에서 유실되는 표사의 균형조건으로부터 유도되었다. 식 (12)는 dune이나 berm으로부터 유실되는 표사량은 외해의 어느 지점에 퇴적이 되어야 한다는 것을 의미한다. 식 (12)에 식 (1)과 식 (3)을 대입하여 정리하면 다음 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$D \frac{\partial h}{\partial x} = K - (h_0 + S) \frac{dR}{dt}, \quad x = -R(t) \quad (13)$$

또한 쇄파점에 부여되는 외해 경계조건은 다음 식 (14)와 같다.

$$h(x) = h_b, \quad x = E(t) \quad (14)$$

여기서 h_b 는 쇄파점에서의 수심으로, 앞의 해안선 경계점이 시간에 따라 변화하는 것처럼 퇴적량의 분포에 의하여 시간에 따라 그 위치가 계속 변하게 된다. 따라서 앞의 해안선 경계조건 부여와 마찬가지로 다음 식 (15)가 필요하게 된다.

$$Q - Q_b = \eta \frac{dE}{dt}, \quad x = E(t) \quad (15)$$

식 (1)과 (3)을 식 (15)에 대입하여 정리하면 다음 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$D \frac{\partial h}{\partial x} = K + Q_b + (h_0 + S - h_b) \frac{dE}{dt}, \quad x = E(t) \quad (16)$$

또한 본 문제의 지배방정식이 비정상 편미분 방정식이기 때문에 다음 식 (17)-(19)와 같은 초기조건이 필요하게 된다.

$$h(x) = h_0 + S, \quad t = 0 \quad (17)$$

$$R(t) = R_0, \quad t = 0 \quad (18)$$

$$E(t) = E_0, \quad t = 0 \quad (19)$$

여기서 R_0 , E_0 는 $t=0$ 인 상태에서 식 (11)과 (14)로

부터 구할 수 있다.

이상과 같이 경계조건과 초기조건이 설정되었다. 따라서 초기조건인 식 (17), (18), (19)와 해안선 경계조건인 식 (11)과 (13) 그리고 쇄파점에 부여된 외해 경계조건인 식 (14)와 (16)을 사용하여 지배방정식 (8)을 수치적으로 해석할 수 있다.

3. 수치모형의 개발

앞 절에서 언급한 수학적 모형을 수치적으로 해석하기 위해 유한차분법을 선택하였다. 차분법은 포물선형의 편미분방정식을 푸는데 많이 사용되고 있는 FTCS(Forward Time Central Space) 차분법과 Crank-Nicolson 차분법을 선택하였다. 두가지 차분법은 모두 $O(\Delta t, (\Delta x)^2)$ 의 정도를 갖는다. 두개의 차분법을 이용한 이유는 양해법과 음해법 사이에서 생길 수 있는 절삭오차(truncation error) 및 계산용량 그리고 계산시간의 단순한 비교를 위해서이지 차분법 사이의 비교를 위함은 아니다.

식 (7)과 (9)를 갖는 지배방정식 (8)을 풀기전에 앞 절에서 언급한 바와 같이 고정경계조건을 이용하여 식 (9)의 타당성을 먼저 검토하고자 한다. 일반적으로 폭풍해일의 스펙트럼은 시간에 따라 변화하나, 이와 같은 경우에도 스펙트럼을 계단식으로 분할하여 각 시간내에서는 직사각형 분포를 한다고 가정하여 해석하기 때문에 폭풍해일의 분포는 직사각형분포로 가정하였다. 지배방정식은 식 (10)이며 FTCS차분법을 사용한 차분식은 다음 식 (20)과 같다.

$$h_j^{n+1} = \frac{\hat{\beta}}{8} \frac{(h_{j+1}^n - h_{j-1}^n)^2}{\sqrt{h_j^n}} + \hat{\beta} \sqrt{h_j^n} (h_{j+1}^n - 2h_j^n + h_{j-1}^n) + h_j^n, \quad -R_0 \leq j \Delta x \leq E_0 \quad (20)$$

여기서 j 는 공간격자간격을, n 은 시간격자간격을 의미하며, $\hat{\beta} = \alpha \Delta t / (\Delta x)^2$ 로서 차분식의 안정조건과 밀접한 관계가 있다. 식 (20)은 Taylor series를 취하면 식 (10)과 일치한다. 또한 식 (20)이 비선형 방정식이기 때문에 안정조건을 해석적으로 구하기가 어려우나, 많은 수치적 검증을 통하여 $\hat{\beta} \leq 1/4$ 인 조건을 만족시키면 해의 불안정이 없는 것으로 밝혀졌다. 경계조건, 식 (13)의 차분식은 다음 식 (21)과 같다.

$$h_j^{n+1} = C_s - \frac{B_s^2}{4A_s} + \frac{(2A_s F_s - B_s)^2}{4A_s}, \quad j\Delta x = -R_o \quad (21)$$

여기서 $A_s = \frac{\hat{\beta}}{8} \frac{1}{\sqrt{h_j^n}}$

$$B_s = \hat{\beta} \sqrt{h_j^n} \left(\frac{1}{4} \frac{h_{j+1}^n}{h_j^n} - 1 \right)$$

$$C_s = \hat{\beta} \sqrt{h_j^n} \left(1 + \frac{1}{8} \frac{h_{j+1}^n}{h_j^n} \right) h_{j+1}^n + (1 - 2\hat{\beta} \sqrt{h_j^n}) h_j^n$$

$$F_s = h_{j+1}^n - \frac{2\Delta x}{\alpha \sqrt{h_j^n}} \left[K - (h_o + S) \frac{dR}{dt} \right]$$

또한 외해 경계조건인 식 (16)의 차분식은 다음 식 (22)와 같다.

$$h_j^{n+1} = C_b - \frac{B_b^2}{4A_b} + \frac{(2A_b F_b - B_b)^2}{4A_b}, \quad j\Delta x = -E_o \quad (22)$$

여기서 $A_b = \frac{\hat{\beta}}{8} \frac{1}{\sqrt{h_j^n}}$

$$B_b = \hat{\beta} \sqrt{h_j^n} \left(\frac{1}{4} \frac{h_{j+1}^n}{h_j^n} - 1 \right)$$

$$C_b = \hat{\beta} \sqrt{h_j^n} \left(1 + \frac{1}{8} \frac{h_{j+1}^n}{h_j^n} \right) h_{j+1}^n + (1 - 2\hat{\beta} \sqrt{h_j^n}) h_j^n$$

$$F_b = h_{j+1}^n + \frac{2\Delta x}{\alpha \sqrt{h_j^n}} \left[K + Q_b + (h_o + S - h_b) \frac{dE}{dt} \right]$$

경계조건의 차분식인 식 (21)과 (22)의 정도는 지배 방정식의 정도와 동일하다($O(\Delta x)^2$). 한편 식 (11)과 (14)의 경계조건은 사용하지 않았는데 이는 이동 경계조건을 부여할 때만 필요하기 때문이다. 즉 고정 경계조건을 사용할 때는 식 (11)과 (14)는 필요하지 않다. 왜냐하면 경계조건인 식 (14)와 (16)를 만족시켜 준다면 부과된 외력에 의하여 발생되어야 하는 시간에 따른 해안선에서의 표사의 유실과 쇄파점에서의 퇴적이 발생되지 않기 때문이다.

한편 식 (7)과 (9)를 사용하면 지배 방정식 (8)은 앞에서 언급한 바와 같이 확산방정식이 된다. 이에 대한 FTCS 차분식은 다음 식 (23)과 같다.

$$h_j^{n+1} = \beta h_{j-1}^n + (1 - 2\beta) h_j^n + \beta h_{j+1}^n, \quad -R(t) < j\Delta x < E(t) \quad (23)$$

여기서 $\beta = D\Delta t / (\Delta x)^2$ 이며, 안정조건은 $\beta \leq 1/2$ 이다. 또한 식 (23)은 Taylor series를 이용하면 식 (8)과 일치함을 보일 수 있다. 이동효과(moving effect)를

가지는 해안선에서의 경계조건은 다음 식 (24), (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_j^{n+1} = o, \quad j\Delta x = -R(t) \quad (24)$$

$$h_j^{n+1} = -\frac{2\beta\Delta x}{D} \left[K - (h_o + S) \frac{dR}{dt} \right] + (1 - 2\beta) h_j^n + 2\beta h_{j+1}^n, \quad j\Delta x = -R(t) \quad (25)$$

또한 쇄파점의 외해 경계조건도 마찬가지로 다음 식 (26)과 (27)처럼 나타낼 수 있다.

$$h_j^{n+1} = h_b, \quad j\Delta x = E(t) \quad (26)$$

$$h_j^{n+1} = \frac{2\beta\Delta x}{D} \left[K + Q_b - (h_o + S - h_b) \frac{dE}{dt} \right] + 2\beta h_{j-1}^n + (1 - 2\beta) h_j^n, \quad j\Delta x = E(t) \quad (27)$$

앞에서 언급하였듯이 식 (25)와 (27)의 정도는 지배 방정식과 마찬가지로 $O((\Delta x)^2)$ 이다. 동일하게 식 (7)과 (9)를 사용한 지배 방정식 (8)을 Crank-Nicolson 차분법으로 나타내면 다음 식 (28)과 같다.

$$A_\sigma h_{j-1}^{n+1} + B_\sigma h_j^{n+1} - C_\sigma h_{j+1}^{n+1} = R_\sigma, \quad -R(t) < j\Delta x < E(t) \quad (28)$$

여기서 $A_\sigma = -\frac{1}{2} \beta$

$$B_\sigma = 1 + \beta$$

$$C_\sigma = -\frac{1}{2} \beta$$

$$R_\sigma = \frac{1}{2} \beta h_{j-1}^n + (1 - \beta) h_j^n + \frac{1}{2} \beta h_{j+1}^n$$

Crank-Nicolson 차분법에 의하여 구성되는 행렬은 삼중대각 행렬로 Thomas Algorithm을 사용하면 쉽게 해결할 수 있다. 본 논문에는 제시하지 않았으나 두 가지의 차분식이 모두 표사의 이동문제를 적절히 묘사하고, 두 차분법사이의 오차는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 Crank-Nicolson 차분법은 하나의 방법으로 제시하는데 그치고 앞으로의 계산 결과는 모두 FTCS 차분법을 이용하여 해석하겠다.

본 연구의 가장 큰 관심사 중의 하나가 이동경계 조건의 처리이다. 식 (13)과 (16)을 자세히 살펴보면 이동경계점을 찾는 두가지 방법이 있음을 알 수 있다. 그 중 첫째 방법은 식 (13)과 (16)의 좌변을 먼저 구한

후, 우변에 있는 경계점의 시간에 따른 이동율(dR/dt)을 구하는 방법이고, 두번째 방법은 외삽법 등과 같은 임의의 기법을 사용하여 이동율을 구한 후, 좌변의 공간미분항을 차분하여 경계조건을 만족시키는 점을 찾는 방법이다. 일반적으로는 전자의 방법이 많이 사용되고 있으나, 본 연구에서 제시된 경계조건은 전자의 방법을 사용할 수 없게 되어 있다. 왜냐하면 본 문제는 포물선형의 편미분 방정식을 푸는 것이기 때문에 경계점에서의 영향이 계산영역 내부로 전달되어야 한다. 그러나 만약 경계조건에서의 값이 항상 일정하다면 계산영역 내부값의 변화가 없다는 것을 의미한다. 물론 전 시간 단계에서 계산된 값은 다음 시간 단계의 계산을 위해 경계조건으로 부여되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하였다. 이 방법은 외삽법을 이용하여 최초의 단계에서는 초기상태의 해안선 단면의 기울기와 동일한 기울기로 dune의 후퇴가 발생하고 그 후에는 전 시간 단계의 기울기를 이용하여, 다음 시간의 해안선 후퇴를 추정하는 방법이다. 이때 경계점은 해안선과 쇄파점에서의 경계조건인 식 (11), (14)를 만족하는 위치까지 이동되어야 한다.

4. 모형의 검증 및 민감도 분석

지금까지 설명한 바와 같이 유한차분법을 이용하여 폭풍해일이나 파랑에 의하여 유발되는 쇄파대내에서의 표사이동을 예측할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 모형의 검증 및 수치모형에 내재된 제반변수들의 민감도를 분석하기 전에 제 2장에서 언급한 식 (9)의 타당성을 먼저 분석하였다. 본 논문에서 개발된 수치모형에서 표사이동을 방정식은 매우 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 표사이동을 방정식을 이용하여 시간에 따른 표사의 이동현상을 예측하기 때문이다. Fig. 2는 차분식 (20)과 (23)을 이용하여 구한 식 (6)과 (9)의 결과이다. 이때 사용된 해안선 단면은 뚜렷한 dune과 berm을 갖게끔 임의로 구성하였다. dune의 전면 기울기는 1:2이고 berm의 전면 기울기는 1:10으로 하였으며, 평균해수면(MSL)을 기준으로 dune의 높이는 5.2m, berm의 높이는 2.1m이다. 또한 쇄파수심, $h_b=4.6\text{m}$ 이고 표사의 입경과 관련이 있는 $K=0.00043\text{ m}^2/\text{sec}$ 로 전 단면을 통하여 일정하다고 가정하였다. Kriebel(1986)에 의하면 이 K 값은 표사의

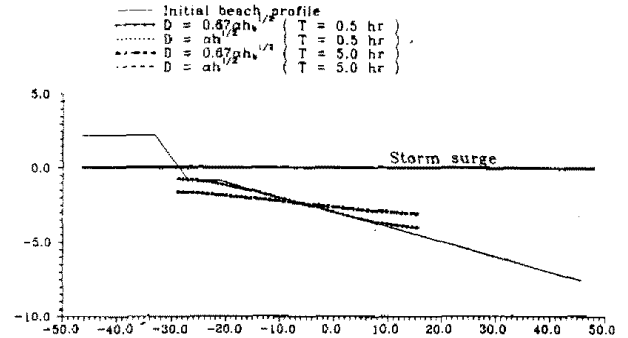


Fig. 2. Comparison with results between $D=\alpha\sqrt{h}$ and $D=2/3\alpha\sqrt{h_b}$ for the sediment transport rate equation $Q=D(\partial h/\partial x)-K$.

평균입경이 0.22 mm에 대응되는 값이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 두 방정식의 결과가 거의 동일하게 나타나고 있어 식 (6)을 간략화시킨 식 (9)의 타당성이 증명되었다. 그러므로 확산방정식을 해석하여 비교적 쉽고 정확하게 쇄파대내에서의 표사이동 문제를 해석할 수 있게 되었다. 또한 식 (9)는 외해 경계조건에 부여되는 쇄파수심과 관련이 있기 때문에 그 크기를 정확하게 부여할 수 있다.

한편 개발된 수치모형의 검증을 위해 Kobayashi (1987)에 의하여 유도된 해석해, Saville (1957)에 의하여 대규모 수조에서 수행된 수리모형실험 자료, 폭풍해일 Eloise와 관련된 현장 관측자료 그리고 기존 수치모형의 결과와 비교하였다. 먼저 Kobayashi(1987)의 해석해는 제 1장에서도 언급하였듯이 수직 dune을 갖는 특수한 경우지만 수치모형의 검증 및 민감도 분석을 위한 자료로 많이 사용된다. Fig. 3은 Kobayashi(1987)의 해석해와 본 수치모형의 시간에 따른 결과를 비교한 것이다. 수치모형에 사용된 자료들은 해석해에서 주어진 자료와 동일한 수치를 사용하였다. $\alpha=0.013\text{ m}^{1.5}/\text{sec}$, $D=0.019\text{ m}^2/\text{sec}$, $K=0.00043\text{ m}^2/\text{sec}$ 그리고 $h_b=4.6\text{m}$ 이며 수치모형의 안정성과 관련된 변수 들로서 $\Delta x=0.3\text{m}$, $\beta=0.45$, $\Delta t=2.132\text{ sec}$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 모형의 결과가 해석해와 매우 잘 일치한다. 특히 dune의 후퇴 크기와 유실에서 퇴적으로 변하는 변곡점까지도 동일하게 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 수치 모형이 올바르게 수립되었다고 생각할 수 있다.

또 다른 수치모형의 검증은 Saville(1957)의 수리모형 자료와의 비교를 통하여 이루어 졌다. Saville (1957)의 수리모형은 대형 수조에서 수행된 실험으로,

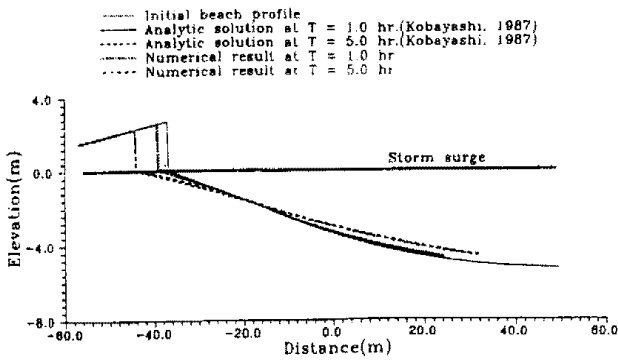


Fig. 3. Comparison of present numerical result with the analytical solution of Kobayashi(1987) with respect to time.

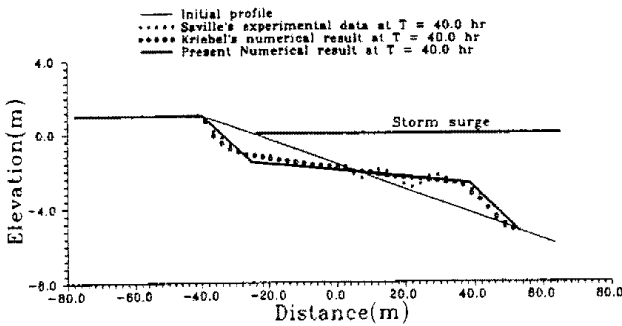


Fig. 4. Comparison of present numerical result with the Saville's(1957) experimental data and the Kriebel's (1986) numerical result.

비교적 자세한 관측이 이루어졌다. 따라서 모형의 축척에 의한 왜곡이나 기타 모형실험에서 나타날 수 있는 제 현상에 대한 걱정이 없는 자료라고 판단된다. 계산을 위해 사용된 변수들로서 $\alpha=0.013 \text{ m}^{1.5}/\text{sec}$, $D=0.018 \text{ m}^2/\text{sec}$, $K=0.0043 \text{ m}^2/\text{sec}$, $h_b=4.267\text{m}$, $\Delta x=0.3\text{m}$ 그리고 $\beta=0.45$ 이다. 또한 dune 전면의 기울기는 매우 완만한 1:15이다. Fig. 4에 Saville(1957)의 실험자료 및 Kriebel(1986)의 수치결과 그리고 본 수치모형의 결과를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 본 수치모형의 결과가 Saville(1957)의 실험자료 및 Kriebel(1986)의 수치결과와 매우 잘 일치하고 있다. 해안선의 후퇴나 유실에서 퇴적으로 변하는 변곡점의 위치가 잘 일치하고 있다. 그러나 Kriebel(1986)의 수치결과와 약간의 차이를 보이는 것은 수치모형의 차이라 생각된다. Kriebel(1986)은 x 축을 따른 해안선의 수심변화를 직접 구하는 대신, 해안선 부근에 임의로 설정된 기준선의 x 축을 따라 수심을 등간격으로 분할하여, 기준선에서의 거리변화를 구하

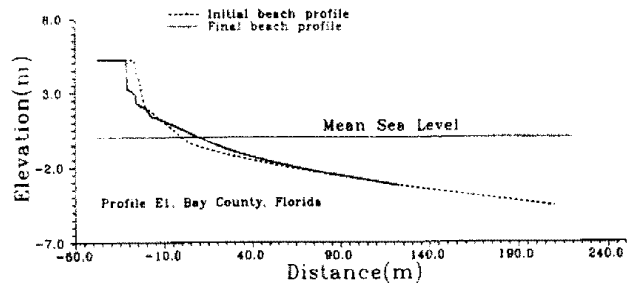


Fig. 5. Evolution of the beach profile change for the representative beach profile(E1) of Bay County in Florida.

는 방법을 사용하였다. 이와 같은 방법은 초기단면에 폭이 큰 berm이나 기타 단면의 중간에 굴곡에 의한 이중치(double value)가 발생하면 해석할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 또한 Kriebel(1986)의 수치모형은 Dean(1977)의 평형조건식을 사용하였기 때문에 계산영역이 해안선에서 쇄파점까지가 아니고, dune의 전면 기울기와 평형조건식이 만나는 점에서 쇄파점까지의 영역이다. 따라서 해안선에서의 유실을 묘사하기 위해서는 다른 처리기법이 필요하다. 그리고 Kriebel과 Dean(1985), Kriebel(1986)의 논문에서는 이동경계조건을 어떻게 처리했는지 자세히 언급되어 있지 않아 이 부분에 대한 직접적인 비교를 할 수 없었다. 그러나 우리의 생각은 Kriebel과 Dean(1985)의 수치모형이 더 많은 제약점을 가지고 있다고 생각된다. 왜냐하면 그들의 수치모형은 반드시 평형조건식을 먼저 구한 후, 그 평형조건식과 만나는 점을 일일이 구해야만 하고 수치모형자체에서 해안선 경계조건을 직접적으로 만족시켜주지 못하기 때문이다.

마지막으로 폭풍해일 Eloise가 통과한 미국의 Florida 해안의 대표단면(representative profile)에 본 수치모형을 적용하였다. Kriebel과 Dean(1985)도 그들의 수치모형을 Florida 해안에 적용한 바 있다. 두 모형의 계산결과와 관측자료(Chiu, 1977)를 Table 1에 나타내었다. 계산은 dune의 기울기, 해안선 단면의 기울기, 그리고 Fig. 6에 나타낸 폭풍해일의 최대 크기에 변화를 주어, 모두 10가지에 대하여 수행되었다. 사용된 변수들은 $\alpha=0.013 \text{ m}^{1.5}/\text{sec}$, $D=0.019 \text{ m}^2/\text{sec}$, $K=0.00043 \text{ m}^2/\text{sec}$ 그리고 $h_b=4.6\text{m}$ 이며 $\Delta x=0.3\text{m}$, $\beta=0.45$ 이다. Table 1에서 볼 수 있듯이 단면의 기울기가 완만해질 수록, 폭풍 해일의 크기가 작을 수록 묘사의 유실량은 작게 나타나고 있다. 또한 본 연구의

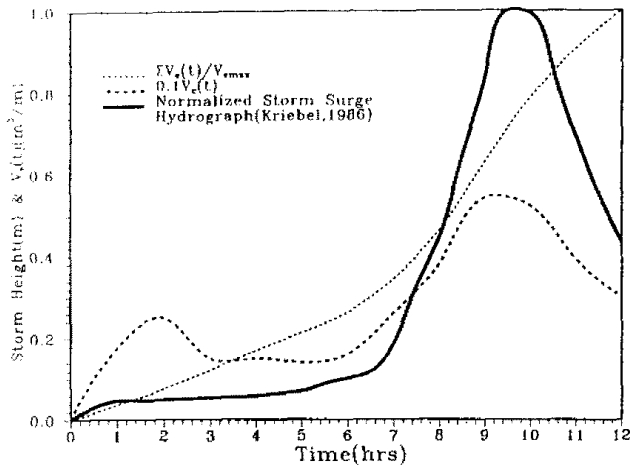


Fig. 6. Volumetric and cumulative erosion for the representative beach profile(E1) of Bay County in Florida with respect to the estimated time-varying storm surge.

결과가 Kriebel과 Dean(1985)의 결과보다 관측자료와 더 근사한 값을 나타내고 있다. 이는 Kriebel과 Dean(1985)의 수치모형은 앞에서 서술한 바와 같이 해안선 부근의 유실을 포함시키기 위하여 도입한 임의의 처리기법으로 부터 발생하는 차이라고 생각된다. 그러나 두 수치모형 모두 최대의 유실(E7)과 최소의 유실(E6)이 동일한 조건에서 발생되고 있다. 또한 Fig. 6에 나타난 폭풍해일 통과한 후의 해안선 단면의 형태를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 폭풍해일이 증가하면서는 주로 dune이나 해안선의 후퇴를 가져오고, 폭풍해일이 감소하면서는 dune이나 해안선의 후퇴는 발생되지 않고 평형단면을 찾아가는 경향을 나타내고 있다. 그러나 단면의 변화를 관측한

자료가 없어서 단면의 직접적인 비교는 하지 못하였다.

한편 폭풍해일이 발생한 장소의 관측된 수위자료를 이용하여 그 폭풍해일의 시간변화에 대한 스펙트럼을 추정할 수 있다(Fig. 6). 따라서 시간에 따른 폭풍해일이 해안선 부근에서 어느 정도의 표사유실을 유발하는지에 대한 연구도 대단한 관심사항이다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 연구로 실제 관측된 수위자료에서 추정된 폭풍해일을 적용하여, 본 수치모형의 시간에 따른 표사유실의 예측능력을 살펴보았으며 적용결과를 Fig. 6에 나타내었다. 적용단면은 Table 1에서 E1에 해당한다. 폭풍해일의 전체 발생시간은 12시간이며, 시간에 따른 폭풍해일의 스펙트럼을 0.5시간 간격의 계단식으로 분할한 뒤, 전 단계의 폭풍해일에 의하여 유발된 표사이동의 결과는 다음 단계의 계산을 위한 수심 자료로 이용된다. 이때 각각의 단계에서의 이동 경계조건은 전 단계의 계산결과를 이용하여 새롭게 정의되어야 한다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 처음 6시간까지의 유실율을 제외하고는 폭풍해일의 크기 증가량에 따라 표사의 유실율이 같은 비율로 증가하고 있다. 그러나 처음 6시간내의 유실율은 다른 형태를 가지고 나타나고 있다. 이는 폭풍해일이 존재하지 않는 최초의 단면이 비록 그 크기가 작지만 폭풍해일에 의하여 상대적으로 많이 유실된 것으로 판단된다. 그 후에는 단면의 기울기가 완만해져서 비록 동일한 크기의 폭풍해일이나 그 보다 약간 큰 폭풍해일에도 비교적 안정적인 단면의 형태를 나타내다가, 그 안정적인 단면의 기울기에 영향을 줄 수 있는 큰 폭풍해일이 도달되면 다시 표사의 유실이

Table 1. Averaged erosion volume of the present numerical model and Kriebel and Dean's(1985)

Case	Beach Slope	Dune Slope	Peak Surge(m)	Volume Eroded(m ³ /m)	
				Present model	Kriebel & Dean's model
E1	1 : 10	1 : 2	3.2	32.24	30.1
E2	1 : 10	1 : 4	3.2	29.81	29.9
E3	1 : 13	1 : 2	3.2	27.24	26.1
E4	1 : 13	1 : 4	3.2	25.53	25.8
E5	1 : 15	1 : 2	3.2	24.62	24.1
E6	1 : 15	1 : 4	3.2	23.38	24.1
E7	1 : 10	1 : 2	3.5	33.24	38.4
E8	1 : 10	1 : 4	3.5	30.78	37.9
E9	1 : 15	1 : 2	3.5	26.54	30.9
E10	1 : 15	1 : 4	3.5	24.22	31.1

Measured data: 23.3-30.1 m³/m

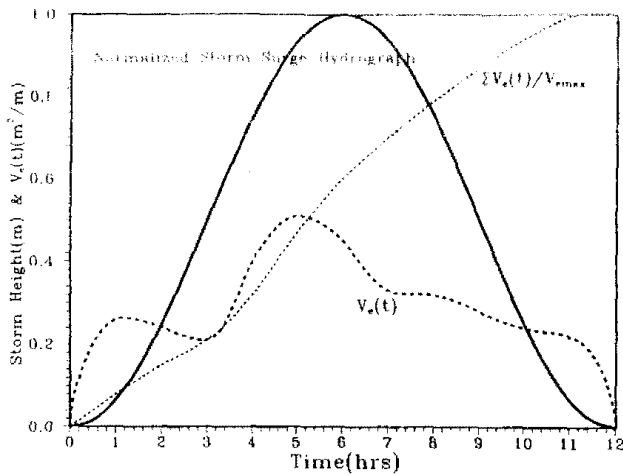


Fig. 7. Volumetric and cumulative erosion for the representative beach profile(E1) of Bay County in Florida with respect to the idealized sine-squared time-varying storm surge.

발생되는 것으로 생각된다. 또한 최대의 표사유실은 최대의 폭풍해일 이전에 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 현상이 폭풍해일의 형태 (왼쪽으로 왜곡)에 의하여 발생하는게 아닌가 하여, Fig. 7에 나타난 정현함수 형태의 폭풍해일을 가지고 다시 한번 확인하여 보았다. 이때 단면은 동일하게 E1 단면이며, 폭풍의 크기와 진행시간도 동일하게 부여하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Fig. 6에서 나타나던 현상들이 동일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

이상에서와 같이 쇄파대내에서 폭풍해일이나 파랑에 의하여 발생하는 표사의 이동 예측을 위해 본 연구에서 개발한 수치모형의 검증은 여러 각도의 자료들과 비교하여 수행되었다. 비교 결과에 의하면 본 수치모형은 dune의 후퇴, 쇄파점의 이동을 만족스럽게 묘사하고 있다. 따라서 이후에서는 전술한 바와 같이 수치모형에 내재되어 있으면서 결과에 중요한 영향을 미치는 변수들의 민감도를 분석하겠다. 이와 같은 변수들은 주로 표사이동을 방정식과 외해 경계 조건과 관련된 변수들로, 다음과 같은 세개의 변수(K , D , Q_0)를 선택하였다. 적용단면은 dune의 후퇴가 명확하게 나타나고, 해석해가 존재하는 Kobayashi(1987)의 단면을 선택하였다.

먼저 변수 K 는 식 (5)와 (7)에서 알 수 있듯이, 직접적으로 표사의 특성과 관련이 있다. 많은 수치 실험을 수행하였지만 그 차이가 두드러지게 나타나는 대표적인 적용결과만 선택하여 Fig. 8에 나타내었다.

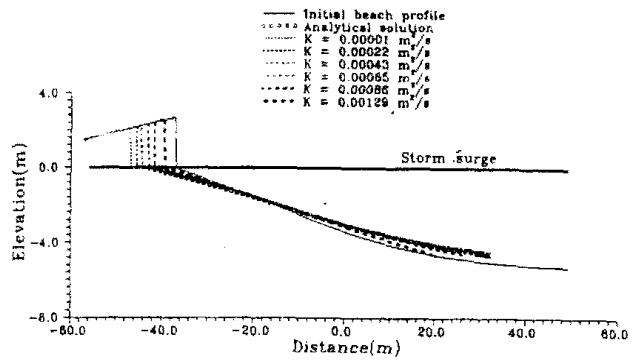


Fig. 8. Sensitivity analysis of K values for the sediment transport rate equation, $Q = D(\partial h / \partial x) - K$.

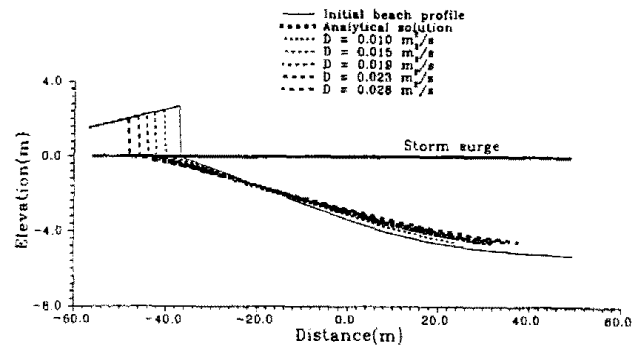


Fig. 9. Sensitivity analysis of D values for the sediment transport rate equation, $Q = D(\partial h / \partial x) - K$.

Fig. 8에 나타난 결과는 3.4m의 직사각형 폭풍해일이 동일하게 5시간동안 내습할 때의 결과이며, K 이외의 다른 변수들은 일정하게 부여하였다. Fig. 8을 잘 살펴보면 매우 중요한 사실을 발견할 수 있다. 즉 K 값이 클 수록 dune의 후퇴가 작게 나타나고 있다. K 가 크다는 것은 표사의 침강속도가 크다는 것을 의미하기 때문에 직접적으로 표사의 입경이 크다는 것을 의미한다. 표사의 입경이 클 수록 외력에 대한 표사 사이의 저항력이 커져 평형단면의 기울기가 급해진다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며, 본 연구에서 나타난 결과도 이와 같은 사실과 일치하고 있다. 따라서 x 축을 따라 표사의 입경으로 부터 구한 K 의 값을 다르게 부여하면, 단면의 위치에 따라 다르게 분포되어 있는 표사의 입경변화에 대한 효과를 해석할 수 있게 된다. 지금까지 많은 연구자들에 의하여 이에 대한 연구의 필요성이 제시된 바가 있다.

표사 이동을 방정식과 관련된 다른 중요한 변수인 D 에 대한 민감도 분석이다. 앞의 변수 K 의 민감도 분석에서와 동일한 방법으로 수치실험을 수행하였다.

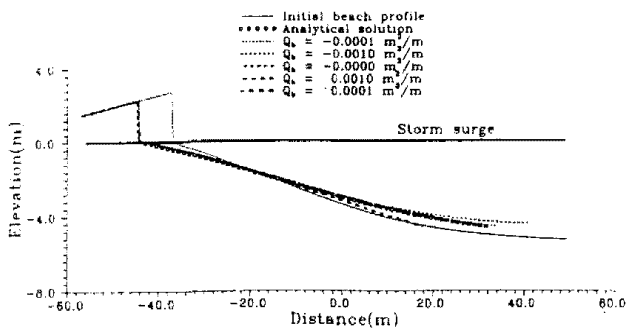


Fig. 10. Sensitivity analysis of Q_b values for the sediment transport rate at the offshore boundary.

제 2장의 식 (4), (6), 그리고 (9)에서 알 수 있듯이 변수 D 는 수심, 특히 본 연구에서는 쇄파수심과 직접적으로 관련이 있다. 대표적인 적용 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 쉽게 알 수 있는 사실은 D 가 클 수록 dune의 후퇴가 많이 일어난다는 것이다. 이것은 앞의 K 에 대한 결과와는 정반대의 결과이나, 식 (3)에 의해 그 결과를 쉽게 예측할 수 있다. 이에 대한 정확한 물리적인 의미를 부여하기는 어려우나, 다음과 같이 생각할 수 있다. D 가 크다는 것은 식 (9)로부터 쇄파수심이 크다는 것을 의미한다. 이는 동일한 조건의 외력에 대하여 더 큰 계산영역이 요구된다는 것을 의미하기도 하며, 결과적으로 많은 양의 퇴적이 넓은 영역에 걸쳐서 이루어지게 된다. 표사의 연속 조건을 만족시키기 위해, 유실되는 부분에서 보다 많은 유실을 요구하는 것으로 생각된다. 한편으로는 자연에서 발생하는 쇄파점의 시간에 따른 변화, 즉 입사파의 파형경사나 쇄파형태에 따라 변하는 쇄파수심을 시간의 함수로 부여할 수 있다는 가능성 또한 엿볼 수 있다.

마지막으로 민감도 분석을 위하여 선택된 변수는 외해 경계조건에서 나타나는 Q_b 로서 외해 경계조건에서의 표사이동율을 나타내는 변수이다. Kobayashi (1987)의 해석에서와 같이 $Q_b > 0$ 이면 외해 경계조건에서의 유실을 의미하고, 그 반대로 $Q_b < 0$ 면 퇴적을 의미 한다. 이에 대한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 dune의 후퇴에는 전혀 영향을 미치지 못하고, 단지 퇴적이 이루어지는 부분의 퇴적분포에 적지 않은 영향을 주고 있다. 그 값의 차이에 따라, 표사의 유실과 퇴적이 균형을 이루지 못하는 전혀 예상치 못한 결과가 생길 수 있다. 그러나 이 변수를, 폭풍해일의 통과 후에 발생하는 표사의 회

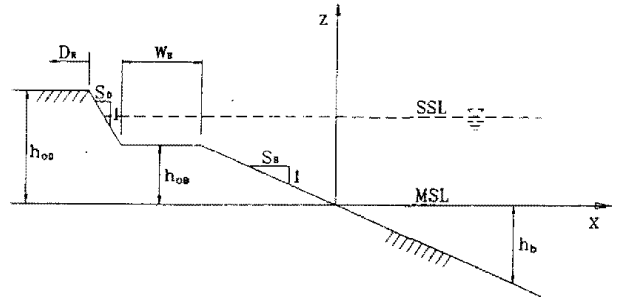


Fig. 11. Definition of numerical beach.

복효과(recovery effect)나 쇄파점에서의 수중둔덕의 생성 및 발달과정과 연계시킬 수 있는 방법을 찾는 것도 하나의 커다란 관심사항이다.

이상의 수치모형과 관련된 제 변수들의 민감도 분석에서 알 수 있었듯이, 수치모형에 필요한 변수 값의 선택에는 항상 주의하여야 하며 그 물리적인 의미를 함께 생각하여야 한다.

5. 모형의 적용

이미 앞절에서 다각도로 수치모형의 검증이 완료 되었으며, 또한 수치모형과 관련된 제변수들의 민감도를 분석하였다. 따라서 본 절에서는 개발된 수치모형의 적용에 대하여 언급하겠다. 실제 해안선 단면에 바로 수치모형을 적용하기 전에, 먼저 임의의 dune과 berm을 갖도록 구성된 수치단면에 적용하여 해안선 단면의 특성에 따라 나타날 수 있는 여러가지 특성들을 검토한 후, 실제 관측자료가 있는 불규칙한 해안선 단면에 적용하여 본 수치모형의 적용성을 확인하고자 한다.

Fig. 11은 뚜렷한 berm과 dune이 존재하도록 구성된 수치해안으로, 임의의 dune의 높이(h_{0D})와 berm의 높이(h_{0B})와 폭(W_B), dune이나 berm 전면의 기울기들 (S_D, S_B) 그리고 쇄파수심(h_b)을 임의로 부여할 수 있게 구성하였다. 또한 dune의 후퇴 크기(D_R)를 계산할 수 있다. Table 2-3에 berm의 폭과 berm 전면의 기울기 변화에 대한 결과를 나타내었다. 이때 dune 전면의 기울기는 1:2로 하였다. 또한 $K=0.00043 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 표사의 입경이 0.22 mm에 대응되는 값을, $D=0.019 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 쇄파수심 $h_b=4.6\text{m}$ 에 해당되는 값을 사용하였다. Table 2는 3m의 직사각형 폭풍해일에 대한 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 berm의 폭이 길수록,

Table 2. Dune recession (D_R) by the rectangular hydrograph $S=3m$, after 10 hours Unit: m

Slope, S_B	Berm Width, $W_B(m)$		
	12	18	24
1:8	10.5	8.4	6.9
1:10	9.3	7.5	6.0
1:12	8.5	6.7	5.5

Table 3. Dune recession (D_R) by the sine-squared hydrograph Peak=3m, after 10 hours Unit: m

Slope, S_B	Berm Width, $W_B(m)$		
	12	18	24
1:8	9.9	3.9	-2.1
1:10	7.8	1.8	-4.2
1:12	6.7	0.7	-4.7

berm 전면의 기울기가 완만할 수록, dune의 후퇴는 작게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 이미 많은 연구자들에 의하여도 확인된 바 있다.

한편 폭풍해일의 형태에 의한 영향을 살펴보기 위하여 Table 3에 정현함수(sine-squared)형태의 폭풍해일이 내습하였을 때 발생하는 dune의 후퇴 크기를 계산하였다. Table 2와 비교하여 dune의 후퇴가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 동일한 기울기에 대하여 berm의 폭이 길수록 dune의 후퇴는 현저히 감소하고 있다. 그러나 표사의 유실량은 그와 반대로 나타나고 있다. 예로 Table 2의 $W_B=12m$, $S_B=8$ 에 대한 총 표사의 유실량은 $45.82 m^3/m$ 인데 반하여, Table 3의 동일한 경우에 대한 표사의 유실량은 $55.63 m^3/m$ 로 그 크기에 차이를 보이고 있다. 이는 직사각형 분포의 폭풍해일로 가정하여 해석하면 dune의 후퇴 크기는 과대 계산하는 반면, 표사의 유실량은 과소 계산한다는 의미이다. 즉, 직사각형 분포의 폭풍해일로 가정하여 해석하면, 시간에 따른 내부 수심의 변화효과를 정확하게 고려할 수 없다는 의미이다. 폭풍해일이 처음부터 최대치까지 증가하는 구간에서는 dune의 후퇴가 주로 발생되고, 그 이후 해일의 크기가 감소하는 구간에서는 주로 표사의 재 분포와 관련된 유실이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 직사각형 분포인 경우에는 최초로 폭풍해일이 갑자기 일정 크기까지 증가된 후, 해일이 끝날 때까지 계속됨으로써 이와 같은 현상을 올바르게 반영하지 못하게 된다.

한편 실제 해안을 구성하고 있는 표사는 그 입경 분포가 다르다. 일반적으로 해안선 부근의 표사입경이 외해의 표사입경보다 커서, 해안선 부근의 평형단면의 기울기가 외해영역의 기울기보다 급하다고 알려져 있다(Larson, 1991). 많은 연구자들에 의하여 이에 대한 연구의 필요성이 제시된 바 있으나 아직까지 이렇다 할 연구가 제시되지 못하고 있다. 따라서 본

연구에서는 이에 대한 기초적인 연구로 표사의 이동률 방정식에서 표사의 특성과 관련된 계수, K ,를 단면에 따라 다르게 부여하는 방법으로 입경분포의 영향을 살펴보았으며, 계산결과를 Fig. 12에 나타내었다. 초기단면은 berm의 폭, $W_B=12m$ 이고, 쇄파수심, $h_b=4.6m$, 계수, $D=0.019 m^2/sec$ 이며, 3m의 직사각형 폭풍해일을 가정하였다. 표사의 입경과 직접적으로 관련이 있는 K 는 dune 이외의 영역에서는 표사입경 0.22 mm에 해당하는 $0.00043 m^2/sec$ 로, 그리고 dune의 영역에서는 표사입경 0.44 mm에 해당하는 $0.00086 m^2/sec$ 으로 부여하였다. 폭풍해일의 조건은 앞에서 언급한 크기로 5시간과 10시간의 두 경우를 부여하였다. 또한 계산된 결과는 전 영역에서 0.22 mm의 표사입경이 분포되었다고 가정된 경우와 비교되었다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 동일한 폭풍해일 조건임에도 불구하고 입경이 다르게 분포된 경우(dune의 입경이 더 큼)에서 적은 dune의 후퇴가 발생되고 있다. 이와 같은 결과는 입경이 클 수록 dune의 후퇴와 유실량이 적게 일어난다는 기존의 결과(Larson, 1991; Work & Dean, 1991)와 일치하고 있는 것이다. 따라서 순수한 유실모형(erosion model)인 본 모형을 이용하면 해안선의 단면을 따른 입경변화의 효과를 쉽게 고려할 수 있다고 생각된다. 그러나 계산영역 내부에서의 표사 입경분포에 대한 영향은 아직까지 더 연구되어야 할 과제라고 생각된다.

이상의 비교적 단순한 수치단면에서의 적용에서 많은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 아직까지 매우 불규칙한 실제 단면에서의 적용성에 대한 문제가 남아 있다. 따라서 본 연구에서는 폭풍해일 Eloise가 통과한 Florida의 Walton County에 있는 실제 단면(R-41)에 적용하여 본 수치모형의 적용성을 확인할 수 있었다. 초기 단면의 형태는 Fig. 13에 나타낸 것과 같으며, 폭풍해일의 스펙트럼은 Eloise가 통과할 당시 관측된

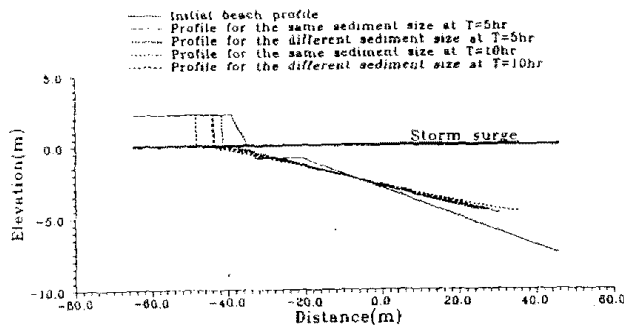


Fig. 12. Evolution of compound and homogeneous beaches.

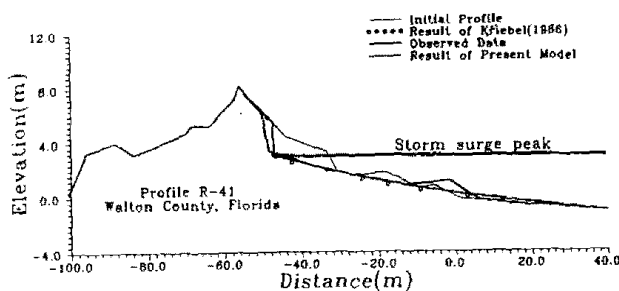


Fig. 13. Comparison of the present post-storm profile with the observed data and the result of Kriebel's (1986) for the beach (R-41) of Walton County in Florida.

수위자료를 이용하여 추정된 Fig. 6과 같다. 폭풍해일의 최대치는 약 2.8m이고 지속시간은 대략 12시간이다. 또한 사용된 표사의 평균입경은 0.262 mm이다. 따라서 $K=0.00038 \text{ m}^2/\text{sec}$ 이며, 쇄파수심은 4.6m로 $D=0.010 \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다. 계산된 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 비록 약간의 dune 후퇴에 대한 차이는 있으나, 그 외의 전체적인 표사의 이동형태 등, 본 모형의 수치 결과가 관측된 자료와 매우 잘 일치하고 있다. 특히 본 모형에 의하여 계산된 유실량은 $40.11 \text{ m}^3/\text{m}$, Kriebel(1986)에 의하여 계산된 유실량은 $37.16 \text{ m}^3/\text{m}$ 으로 관측된 표사 유실량, $39.48 \text{ m}^3/\text{m}$ 와 매우 잘 일치하고 있다. 또한 기존의 Kriebel (1986)의 계산결과와도 약간의 차이를 갖지만 비교적 잘 일치한다고 판단된다. 따라서 실제 단면에서의 적용에서 나타날 수 있는 기존의 수치모형 및 관측치와의 불일치에 대한 우려는 없는 것으로 판단된다.

6. 결 론

폭풍해일이나 파랑에 의한 쇄파대내에서의 표사이

동을 예측할 수 있는 유한차분 수치 모형이 개발되었다. dune이나 berm의 후퇴와 퇴적에 의한 쇄파점의 이동은 초기 단면, 폭풍해일이나 파랑에 의한 외력, 쇄파점의 수심 그리고 표사이동을 방정식과 관련된 변수들로 나타내었다. 표사이동을 방정식 (3)과 관련된 함수, D 는 식 (6)과 같이 직접적인 수심의 함수로 정의되어 표사이동을 예측하기 위한 문제는 이동경계 조건을 가지는 2계의 비정상, 비선형 편미분 방정식을 풀어야 하는 매우 복잡한 문제로 인식되어 왔다. 그러나 식 (9)의 타당성 부여로 이와 같은 문제를 이동경계조건을 가지는 확산방정식을 해석하는 문제로 단순화시켜, 쉽고 정확하게 표사문제를 해석할 수 있는 기반을 마련 하였다.

본 연구에서 개발된 수치모형의 검증은 Kobayashi (1987)의 해석해, Saville(1957)이 대형수조에서 수행한 수치모형 실험자료, 폭풍해일 Eloise에 대한 현장 관측자료 그리고 기존의 Kriebel과 Dean(1985)의 수치모형 결과와의 비교에서 만족스럽게 이루어졌다. 본 연구에서 개발된 수치모형은 Kriebel과 Dean(1985)의 수치모형이 가지고 있는 제약성, 예로 거의 모든 해안선 단면이 가지고 있는 berm의 처리문제, 해안선에서 발생하는 표사유실을 처리하는 문제, 계산영역 내부의 기울기 변화에 의하여 발생하는 이중치 처리 기법의 문제, 계산영역을 정의하기 위해서 반드시 평형 단면식을 먼저 구하여야 하는 문제, 해안선에서의 완벽한 경계조건의 부여에 대한 문제등을 해결 하였다. 또한 실제 시간에 따라 변하는 폭풍해일의 스펙트럼에 의한 해안선에서의 유실량을 정확히 예측할 수 있다. 수치모형의 올바른 사용을 위하여 수행된 수치모형과 관련된 변수(K , D , Q_b)들의 민감도 분석에서 몇가지의 중요한 사실을 알 수 있었다. 표사의 특성과 관련된 계수, K 의 값을 단면에 따라 다르게 분포시키면, 각 단면에서의 표사 입경변화 효과를 고려할 수 있다고 생각된다. 또한 계수 D 와 관련된 쇄파수심을 시간의 함수, $h_b(t)$ 로 부여하는 문제 그리고 Q_b 를 폭풍해일의 통과후 발생하는 표사의 회복효과(recovery effect)나 수중둔덕의 형성과 발달과정과 관련지어 생각할 수 있음을 알았다.

앞으로 더 연구되어야 할 문제로, 불규칙한 실제 단면에서의 적용성과, 민감도 분석에서 제시된 표사입경의 변화가 dune후퇴에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 검토가 우선 적으로 수행되어야 한다. 한편 제

1장에서 언급한 표사이동율을 직접적으로 유체의 유속과 관련지어 해석하는 방법과의 관련 여부에 대한 해석도 상호접근 방법에 대한 이해를 위해서 필요하다.

참고문헌

- Bailard, J.A., 1981. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, *Journal of Geophysical Research*, **86**(11), pp. 10938-10954.
- Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles, Technical Memorandum No. 44, Beach Erosion Board, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg.
- Chiu, T.Y., 1977. Beach and dune response to hurricane Eloise of September 1975, *Coastal Sediment '77*, pp. 116-134.
- Dean, R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts, Technical Report No. 12, Ocean Engineering Program, Department of Civil Engineering, University of Delaware.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications, *Journal of Coastal Research*, **7**(1), pp. 53-84.
- Hedegaard, I.B., Diegaard, R. and Fredsoe, J., 1991. On-shore/offshore sediment transport and morphological modeling of coastal profiles, *Coastal Sediment '91*, pp. 643-657.
- Larson, M. and Kraus, N.C., 1989. SBEACH: Numerical model to simulate storm induced beach change. Technical Report CERC-89-9, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg.
- Larson, M., 1991. Equilibrium profile of a beach with varying grain size, *Coastal Sediment '91*, pp. 905-919.
- Kobayashi, N., 1987. Analytical solution for dune erosion by storms, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, **113**(4), pp. 401-418.
- Kriebel, D.L., 1986. Verification study of a dune erosion model, *Shore and Beach*, **54**(3), pp. 13-21.
- Kriebel, D.L. and Dean, R.G., 1985. Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion, *Coastal Engineering*, **9**, pp. 221-245.
- Roelvink, J.A. and Broker, I., 1993. Cross-shore profile models, *Coastal Engineering*, **21**, pp. 163-191.
- Saville, T., 1957. Scale effects in two dimensional beach studies, *Transactions from the 7th General Meeting of the International Association of Hydraulic Research*, **1**, pp. A3-1-A3-10.
- Southgate, H.N., 1991. Beach profile modeling: Flume data comparisons and sensitivity tests, *Coastal Sediment '91*, pp. 1829-1841.
- Work, P.A. and Dean, R.G., 1991. Effect of varying sediment size on equilibrium beach profiles, *Coastal Sediment '91*, pp. 890-904.