

구조물 주변 파·흐름 공존장에서 부유사와 소류사 Flux에 의한 지형변화예측 모델

Bed Level Change Model by The Suspended and Bed Load Flux in Wave-Current Fields Around The Coastal Structures

이종섭¹, 윤은찬²

Jong Sup Lee¹ and Eun Chan Yoon²

1. 서 론

비점착성 토사에 의한 지형변화예측은 오래전부터 많은 해안·해양공학자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 해안부근에서 쇄파로 인하여 발생하는 해변류에 의한 지형변화문제, 연안에서 조류에 의한 지형변화문제, 해안구조물이나 항만건설 등으로 인한 인근해안의 침식·퇴적 및 항만매몰문제 등에 폭넓게 사용될 수 있는 모델의 개발이 현재에도 절실하게 요구되는 과제이다. 점착성토사에 의한 지형변화 예측은 부상·침강 및 이류·확산을 고려한 확산방정식의 수치해석에 의하여 실용적으로 사용될 수 있는 모델들이 많이 존재하지만 비점착성 토사는 그 거동자체가 입자의 정지·소류사이동·부상·부유사이동·침강·정지의 복잡한 거동을 하며, 입자의 거동에 미치는 파동과 흐름의 작용이 각각 다르기 때문에 파·흐름 공존장에서 지형변화를 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 해안에서 파·흐름에 의한 지형변화예측모델은 파·흐름에 의한 국소 표사량의 평가에 의한 渡辺모델(1984), 부유사와 소류사로 나누어 정식화한 Flux모델(樺木等, 1984) 그리고 해안선 변화와 수심변화 모델이 결합한 3D-SHORE 모델(清水等, 1994)이 일본에서는 널리 사용되고 있다. 그밖에 세계적인 범용 모델로는 전체 국소 표사량을 이용하는 MIKE21 Sand Transport Module(DHI, 1999), 부유사를 이류확산방정식을 이용하여 풀어내고 소류

사를 Van Rijn(1984)의 식을 이용하여 풀어내는 CH3D-SED(Spasojevic and Holly, 1994) 모형 그리고 부유사만을 이류확산 방정식을 이용하여 계산하는 ECOMSED(HydroQual, 2002)등이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 Flux 개념에 기초하여 연안구조물 주변에서 조류장 및 파·흐름 공존장에서 폭넓게 적용될 수 있는 지형변화모델 「SED-FLUX」 모델을 소개한다.

2. 기존모델의 문제점 분석

2.1 전체 국소 표사량에 의한 지형변화 예측모델

일반적인 표사의 연속식인 식(1)에 전체 국소 표사량(q_x , q_y)을 사용하여 수심변화를 구하는 모델이다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (1)$$

여기서, q_x 와 q_y 는 공극을 포함하는 전체 국소표사량의 x, y방향 성분으로서 단위는 $m^3/m/s$ 이다. 渡辺모델(1984), MIKE21(1999) 등이 여기에 속한다. MIKE21 모델에서는 Engelund and Hansen의 전체 국소 표사량식 외에 5가지 전체 국소 표사량식에 의하여 평가하여 적절한 식을 사용하는 것으로 되어 있다. 그러나, 부유사는 흐름 방향

1 부경대학교 건설공학부 교수

2 부경대학교 건설공학부 박사과정

으로 이동하고 소류사는 파동 및 흐름 경계층 내에서 이동하기 때문에 파·흐름 공존장에서는 부유사나 소류사의 이동방향이 다르게 된다. 따라서, 이러한 복잡한 표사이동 양상을 간단한 전체 표사량식으로 어느 정도 나타낼 수 있는가에 대한 검토가 필요하다.

2.2 부유사의 평형농도 개념에 의한 지형변화 예측 모델

부유사의 확산방정식에 의하여 저면 근처에서의 표사의 부상 flux와 침강 flux를 평가하여 순부상 flux로부터 수심변화를 구하는 방법으로서 기본적으로는 점성토수송모델과 같은 개념이다. ECOMSED(2002)는 3차원 해수유동모델에 기초를 두고 있으며 여기서 부상 flux E 는 Van Rijn(1984)의 부유사 flux q_s 에 의하여 평가하고 있으며 동시에 저면 근처에서 침강 flux D 는 항상 존재하는 것으로 하여 순부상 flux ($E - D$)에 의하여 수심변화를 계산하고 있다. 그러나, 이 모델에서는 소류사량에 의한 수심변화는 고려하지 않고 있다. 따라서, 미세입자의 경우에는 적용 가능하지만 소류사 이동이 탁월한 조립질의 모래에는 적용이 곤란할 것으로 본다.

3. 부유사와 소류사 Flux에 의한 지형변화 예측모델의 개요

權木 等(1984)은 부유사와 소류사로 나누어 정식화한 Flux 모델을 제안하였다. 모델의 기본방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -Q_s + \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

여기서, Q_s 는 저면경계층에서의 순부상 flux로서 다음식과 같이 평가하였다.

$$Q_s = (1-r)C_0 w_f \left(1 - \frac{u_*}{w_f} \right) + C w_f \quad (3)$$

여기서, $u_* > w_f$ 이면 $r=0$, $u_* < w_f$ 이면 $r=1$ 이다. 이것은 저면경계층을 기준으로하여 부유사와 소류사의 거동을 고려한 수심변화의 개념으로서 표사수송역학적으로 타당한 것으로 평가되고 있다. 표사량식에 대해서 그동안 많은 식들이 제안되어 왔고 특히, Van Rijn(1990)은 파

흐름 공존장에서 부유사 flux 및 소류사 flux의 평가에 있어서 상당한 객관성을 지닌 식들을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 Van Rijn(1993)의 연구결과에 의하여 순부상 flux Q_s 및 소류사 flux q_b 를 다음과 같이 정식화하였다.

3.1 순부상 flux Q_s 의 평가

순부상 flux Q_s 는 부상 flux E 와 침강 flux D 의 net 값으로서 평가되며 부상 flux는 아래와 같이 주어진다.

$$E = -Mw_f \left(\frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right) C_{eq} \quad (4)$$

여기에서, τ_b 는 저면전단응력이고, τ_d 는 퇴적에 대한 한계전단응력이다. M 은 경험적인 상수로서 $O(10^{-1})$ 의 크기를 가진다. 그리고 C_{eq} 는 평형부유사 농도로서 흐름에 의한 부유사 flux와 파에 의한 부유사 flux의 합성치에 의하여 계산된 농도값이다.

침강 flux D 는 항상 존재하는 것으로 가정하여 다음식과 같이 평가된다.

$$D = w_f C \quad (5)$$

여기에서, C 는 부유사확산계산에 의한 부유사농도이다.

3.2 소류사 flux의 평가

소류사량 q_b 의 x , y 방향 성분은 Van Rijn(1993)의 TRANSPOR program에 근거하여 계산하였다. 소류사량 q_b 와 소류사 flux의 x , y 방향 성분은 다음 식들로서 계산된다.

$$q_b = 0.25 \gamma \rho_s d_{50} D_s^{-0.3} R_t \quad (6)$$

$$q_{bx} = \left(\sum U_{\delta, x} / U_{\delta, R} \right) q_b \quad (7)$$

$$q_{by} = \left(\sum U_{\delta, y} / U_{\delta, R} \right) q_b \quad (8)$$

여기서, $R_t = (\tau'_{b, cw} / \rho)^{0.5} (\tau'_{b, cw} / \tau_{b, cr} - 1)^{1.5}$ 이고, $\gamma = 1 - (H_s / h)^{0.5}$ 으로 주어지며 H_s 는 유의 파의 파고, h 는 수심을 나타낸다. 한편, $U_{\delta, R}$ 은 저면경계층의 높이 δ 에서 임의시간 t 에 있어서 파동에 의한 비대칭 물입자운동 속도성분, 흐름의 속도성분, 저면경계층에서의 파동에 의한 streaming 속도성분 및 질량수송에 대한 보상류인 return flow의 속도성분의 벡터합이다. 그리고

$\sum U_{\delta,x}$ 는 상기속도성분의 x 방향 성분을
 $\sum U_{\delta,y}$ 는 y방향 성분의 값이다.

3.3 모델의 Flow chart

Fig.1은 「SED-FLUX」 모델의 flow chart를 보여준다. 모델은 크게 파랑변형모델, 동수역학 모듈, sediment의 확산모델, 수심변화모듈로 구성된다.

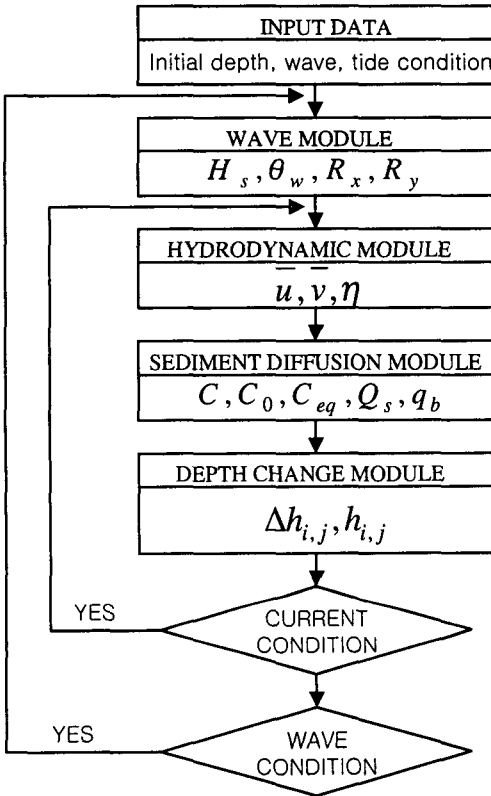


Fig. 1. Flow chart of SED-FLUX model.

모델의 계산순서를 간략하게 기술하면 초기지형과 파와 조석의 조건이 input data로 주어지고, 파랑변형모델 STWAVE(USACE, 1999)를 이용하여 유의파고와 파향 및 radiation stress의 x, y성분을 계산하게 된다. 동수역학 모듈인 DIVAST(Falconer, 1986)에서는 파랑변형모델에서 계산된 radiation stress를 고려하여 각 격자점에서 수심평균 유속과 수위를 계산하게 된다.

Sediment의 확산모델에서는 부유사농도 C, 기준점 농도 C₀, 부유사의 평형농도 C_{eq}, 저면경계층에서의 순부상 flux Q_s 그리고 소류사량 q_b를 계산하게 된다. 그리고 수심변화모듈에서는

수심변화량 Δh_{i,j}와 변화된 수심 h_{i,j}를 계산하게 된다. 한편, 동수역학 모듈은 변화하는 흐름 조건에 따라 real time으로 계산되어지고 파랑조건이 변화하게 되면 파랑변형을 다시 계산하는 형태로 모델이 구성된다.

4. 수치모형의 적용결과

수치모형을 단순한 일정사면의 해안과 대표적인 연안구조물인 이안제가 존재하는 경우에 적용하여 모델의 적용성을 검토하였다.

4.1 계산조건 및 입력파라미터

Table 1은 수치계산의 주요 입력파라미터를 나타낸다. Case I 과 Case II는 모두 1/20경사를 갖는 일정사면하에서 동일한 파랑조건을 가지며, 총계산시간은 Case I 과 Case II에서 모두 5일간 수치시물레이션을 수행하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각 Case의 초기지형도를 나타내고 Case II는 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 수심 5m 지점에 이안제가 설치된 경우이다. 두 경우에 모두 저면의 d₅₀ = 500 μm이다.

Table 1. Input data of each experiment

	H _s	T	tan β	T _{total}
Case I	1.0m	6.0s	1/20	5 day
Case II	1.0m	5.4s	1/20	5 day

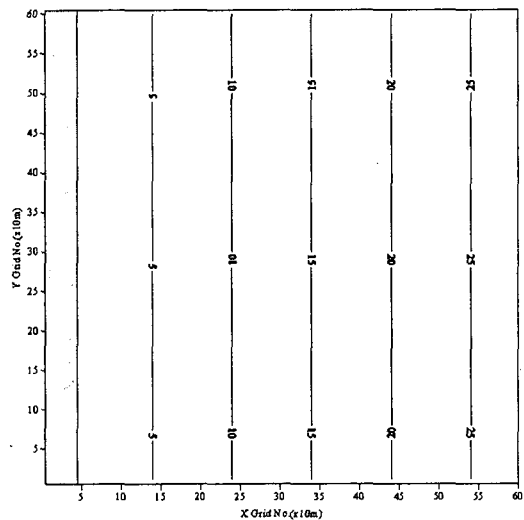


Fig. 2. Initial Topography of Case I.

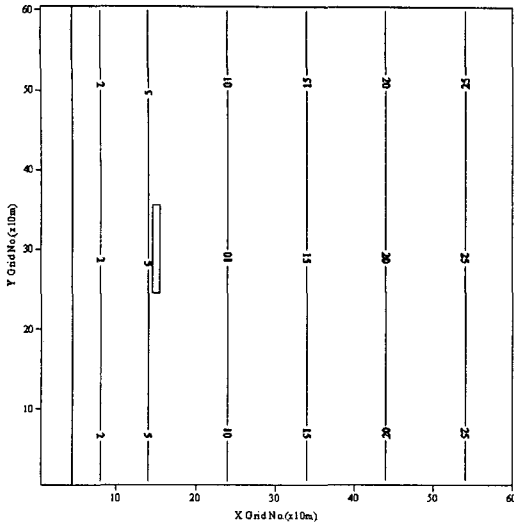


Fig. 3. Initial Topography of Case II .

4.2 수치계산결과

1) Case I

Fig. 4는 Case I의 경우에 해안과 직각방향으로 유입하는 파랑조건하에서 5일간의 시뮬레이션을 수행한 후에 영역의 중앙단면(Y=35)의 수심변화량을 나타낸다. 전체적인 단면의 형태는 해안부근에서는 퇴적이 일어나고 쇄파대 부근에서는 침식이 일어나는 퇴적형 단면변화의 형태를 보인다. 이러한 지형변화 양상은 파랑만이 존재하는 경우에는 해안방향으로 진행되는 소류사의 성분이 탁월하고 흐름에 의한 부유사이동이 거의 없는 경우에 나타나는 일반적인 현상을 반영하는 것으로서 본 수치 모형이 이러한 파랑에 의한 지형변화를 잘 재현함

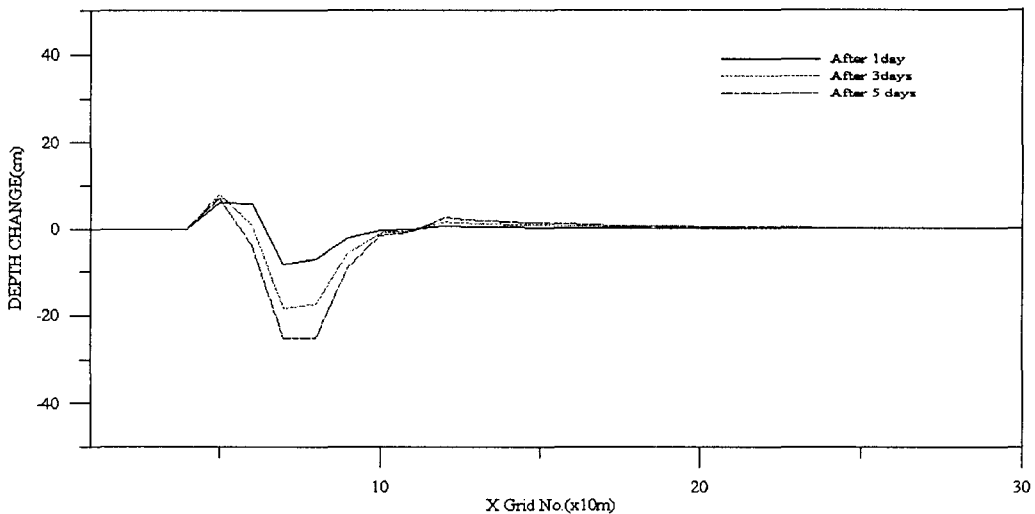


Fig. 4. Depth profile change in Case I .

을 볼 수 있다.

2) Case II

Fig. 5는 해안에 직각방향의 파가 입사하는 조건에서 이안제가 존재하는 경우에 해빈류의 패턴을 나타내며 Fig. 6은 지형변화예측결과를 보여준다.

Fig. 6의 계산결과에서 구조물의 영향을 받지 않는 곳에서는 Case I에서 나타난 것과 동일한 단면의 분포를 보이고, 이안제의 배후에서는 해빈류와 파랑의 영향으로 이안제 배후에서 퇴적이 증대되는 것을 보여준다. 이는 일반적인 이안제의 존재로 인하여 나타나는 지형변화 양상인 tombolo 지형을 형성하는 과정을 잘 나타내어 주는 결과이다.

5. 요약 및 결론

파 · 흐름 공존장에서 적용가능한 비점착성 토사에 의한 지형변화예측모델의 개발에 있어서 기존 모델의 장단점을 분석하고 소류사와 부유사 flux에 의한 지형변화예측 모델 「SED-FLUX」에 대하여 기술하고, 수치모형의 적용성을 검토하기 위해서 단순한 일정사면의 해안과 대표적인 해안구조물인 이안제가 존재하는 경우에 대하여 파랑 및 파에 의한 해빈류에 의한 지형변화를 계산하였다. 본 모델은 파랑과 해빈류에 의한 쇄파대의 지형변화양상을 잘 나타내었다. 그 밖에 하천류와 같은 단순조건 및 쇄파대 바깥에서 파동을 고려한 조류장 및 해류장에서도 폭넓게 적용할 수 있었다.

참고문헌

- 渡辺晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榑出勉 (1984). 構造物設置に伴う 3次元 海浜変形数値豫測モデル. 第31回 海岸工学講演會論文集, 406-410.
- 榑木亨, 李宗燮, 出口一郎 (1984). 河口周辺の海浜流及び地形変化モデルに関する研究. 第31回 海岸工学講演會論文集, 377- 381.
- 清水琢三, 態谷隆宏, 三村信男, 渡辺晃 (1994). 汀線変化お考慮した 3次元 海浜変形長期豫測モデル. 海岸工学論文集, 41, 406-410.
- DHI(1999). MIKE21 Sand Transport Module : Current and Waves Scientific Documentation.
- HydroQual(2002). A Primer for ECOMSED Ver 1.3 Manual. HydroQual, Inc., One Lethbridge Plaza Mahwah, N.J, 32-48.
- Falconer, R. A.(1986). A Two-Dimensional mathematical model study of the nitrate levels in an inland natural basin. Proc. Inter. Conf. Water Quality Modelling in the Inland Natural Environ, BHRA, Fluid Engineering, Bournemouth, Paper J1, 325-344.
- Spasojevic, M. and Holly, F.M.(1994). Three Dimensional numerical simulation of mobile bed hydrodynamics, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Van Rijn, L. C.(1993). Principles of Sediment Transport in River, Estuaries and Coastal Seas. AQUA Publications.
- Van Rijn, L. C.(1984a). Sediment Transport Part 1 : Bed Load Transport. J. Hydraulic Eng., ASCE, 10, 1431-1456.
- Van Rijn, L. C.(1984b). Sediment Transport Part 2 : Suspended Load Transport. J. Hydraulic Eng., ASCE, 10, 1613-1641.

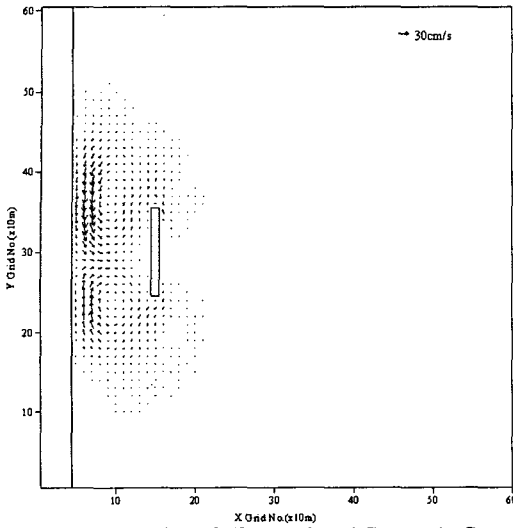


Fig. 5. Distribution of Wave Induced Current in Case II.

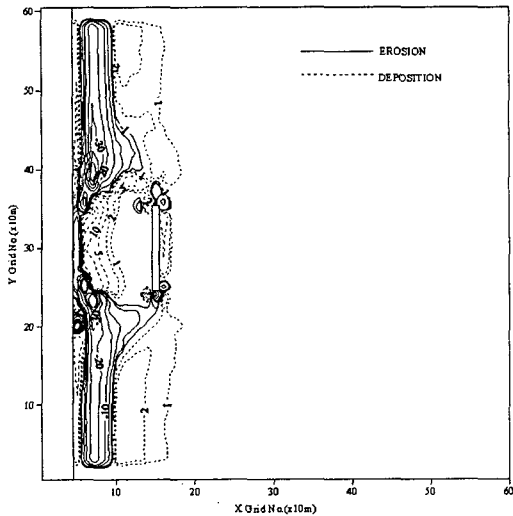


Fig. 6. Bed level change Distribution in Case II.