

파-흐름 공존장에서 부유사와 소류사 flux에 의한 지형변화모델

A Bed Level Change Model(SED-FLUX) by Suspended Sediment Flux and Bed Load Flux in Wave-Current Co-existing Fields

이종섭* · 윤은찬** · 박석희***

Lee, Jong Sup · Yoon, Eun Chan · Park, Seok Hee

Abstract

A bed level change model(SED-FLUX) is introduced based on the realistic sediment transport process including bed load and suspended load behaviours at the bottom boundary layer. The model SED-FLUX includes wave module, hydrodynamic module and sediment transport and diffusion module that calculate suspended sediment concentration, net sediment erosion flux(Q_s) and bed load flux. Bed load transport rate is evaluated by the van Rijn's TRANSPOR program which has been verified in wave-current fields. The net sediment erosion flux(Q_s) at the bottom is evaluated as a source/sink term in the numerical sediment diffusion model where the suspended sediment concentration becomes a verification parameter of the Q_s . Bed level change module calculates a bed level change amount($\Delta h_{i,j}$) and updates a bed level. For the model verification the limit depth of the bed load transport is compared with the field experiment data and some formula on the threshold depth for the bed load movement by waves and currents. This model is applied to the beach profile changes by waves, then the model shows a clear erosion and accumulation profile according to the incident wave characteristics. Finally the beach evolution by waves and wave-induced currents behind the offshore breakwater is calculated, where the model shows a tombolo formation in the landward area of the breakwater.

Keywords : *sediment transport, bed level change, wave-current fields*

요 지

저면경계층에서 부유사와 소류사 flux를 포함하는 실제적인 표사이동에 기초한 지형변화모델(SED-FLUX)이 개발되었다. SED-FLUX는 파랑모듈, 동수역학 모듈 및 부유사농도, 순부상 flux(Q_s)와 소류사 flux를 계산하는 표사수송 및 확산모듈을 포함하며, 소류사 flux는 파-흐름 공존장에서 검증된 van Rijn의 TRANSPOR 프로그램에 의해 평가되어진다. 저면에서 순부상 flux Q_s 는 표사확산모듈에서 source/sink 항으로서 평가되어지며, 수심변화모듈은 수심변화량을 계산하고 시간에 따른 bed level의 변화를 계산한다. 모델의 검증을 위하여 표사이동의 이동한계수심은 방사성 동위원소 추적자를 사용한 현장 실험자료와 파와 흐름에 의한 표사이동한계수심에 대한 몇몇 경험식과 비교되었다. 본 모델을 파에 의한 해변 단면변화에 적용한 결과 입사파의 특성에 따른 명확한 침식과 퇴적분포를 나타내었다. 끝으로, 이안제 배후에서 파와 해변류에 의한 수심변화를 계산한 결과 이안제의 배후에서 초기 tombolo의 형성을 보여주었다.

핵심용어 : 표사이동, 수심변화, 파-흐름 공존장

1. 서 론

1980년대부터 많은 연구자들에 의해서 국소표사량에 기초한 수심변화모델이 연구되어져왔다. 그러나 파-흐름 공존장에서 수심변화를 예측하는 것은 여전히 어려운 문제이다. 이러한 어려움에도 불구하고 지난 20여 년간 van Rijn(1984)과 다른 해안공학자들의 연구들에 힘입어 공학적인 목적으로 소류사량과 평형부유사농도에 대한 어느 정도 타당한 값을 얻는 것은 가능하게 되었다. 기존의 수심변화모델은 크게

세 가지로 분류할 수 있다. 첫째는, 전표사량에 기초한 모델이고, 둘째는 부유사의 거동만을 고려한 모델이고 마지막으로 셋째는 부유사의 거동과 소류사 수송을 모두 고려한 것이다. Watanabe 등 (1986)과 MIKE 21(DHI, 1999) 모형이 첫째의 범주에 드는 모형이고, ECOMSED(HydroQual, 2002)와 일반적인 점착성토사 수송모델이 부유사만을 고려한 두 번째 범주에 드는 모형이다. 그리고 Sawaragi 등(1984)의 모형과 CH3D-SED(Spasojevic과 Holly, 1994) 모형은 부유사와 소류사를 모두 고려하는 세 번째 모델의 범주에

*정회원 · 부경대학교 건설공학부 교수(E-mail: jslee@pknu.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 부경대학교 건설공학부 박사과정(E-mail: marineyoon@mail1.pknu.ac.kr)

*** (주)데이텍엔지니어링(E-mail: pooh-jc@hannam.net)

는다.

해빈에서 표사수송기구에 대한 기존의 연구에서 파-흐름 공존장에서는 소류사와 부유사의 수송방향이 아주 다른 것을 알 수 있다. 그리고 부유사와 소류사의 역할은 주어진 입경의 크기와 동수역학 조건에 따라 아주 다르다. 따라서 부유사와 소류사를 고려할 수 있는 범용모델의 개발이 요구되어 진다. 본 논문에서 개발된 SED-FLUX 모형은 van Rijn (1984a, 1984b)의 식으로부터 부유사와 소류사 flux를 계산하는 모델로서 Sawaragi 등(1984)의 모델을 향상시킨 것이다. 모델의 적용성을 확인하기 위하여 해빈단면변화와 이안제 주변의 수심변화를 계산하였다. 그리고 현장조건에서 모델의 민감도를 분석하기 위하여 소류사 수송의 한계수심과 해빈단면변화가 계산되었다.

2. SED-FLUX의 개요

2.1 SED-FLUX 모형의 flow chart

SED-FLUX 모형은 그림 1과 같이 5개의 모듈들로 구성되어 있다. INPUT DATA 모듈에서는 초기수심, 입사파랑, 조석조건 및 모래의 입경 등이 주어지고 표사이동의 외력으로서 파에 의한 진동류로서의 물입자운동 성분과 일정류 성분이 고려될 수 있다. 표사이동에 의한 수심변화는 소류사의 이동과 저면경계층에서 부유사의 거동에 의하여 실시간으로 계산되어진다.

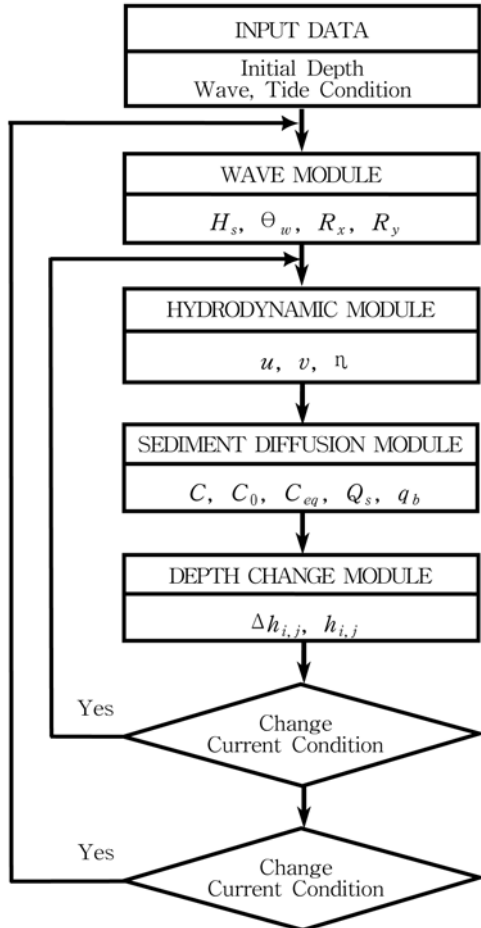


그림 1. SED-FLUX 모형의 흐름도

2.2 수심변화모듈

수심변화모듈은 저면에서 소류사 flux와 순부상 flux를 이용하여 수심변화량($\Delta h_{i,j}$)을 계산하고 저면의 높이를 경신한다. 식 (1)은 저면에서 표사량에 대한 보존방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -Q_s + \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기에서 q_{bx} 와 q_{by} 는 단위 폭당 소류사 플럭스의 x, y방향 성분이며, 는 단위 면적당 저면경계층에서 순부상 flux이며 이것은 침강 flux와 부상 flux의 합으로서 다음과 같이 평가할 수 있으며 수치계산에 있어서는 양해법을 사용하였다.

$$Q_s = -Mw_f \left(\frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right) C_{eq} + Cw_f \quad (2)$$

여기에서 $\tau_b (= \tau_c + \tau_w)$ 는 파와 흐름에 의한 저면전단응력의 합, τ_d 는 퇴적한계저면전단응력, M 은 $O(10^{-1})$ 의 경험적인 상수, C_{eq} 는 이론적으로 구해지는 평형부유사농도, C 는 표사 확산모델에서 계산된 부유사농도 그리고 w_f 는 부유사의 침강 속도이다. 식(2)에서 우변 두 번째 항은 침강 flux를 나타내며, 부상 flux는 침강 flux와 차원을 같게 하기 위하여 침강 속도와 C_{eq} 와의 곱의 형태를 취하였다. 이러한 관계식은 저면경계층에서 부유사 거동에 의한 수심변화를 나타내는 적절한 식으로 평가할 수 있다.

2.3 파랑모듈

파랑모듈은 유의파의 파고, 파향과 radiation stress를 계산한다. 정상상태 스펙트럼 파랑모듈인 STWAVE(Smith 등, 1999)가 계산영역의 파랑변형을 계산하는데 사용되어졌다. STWAVE는 수심에 의한 파의 굴절, 천수변형, 수심과 파형 경사에 의한 쇄파, 회절, 풍파의 성장, 파랑 사이의 상호작용과 성장하는 파랑장에서 에너지의 재분포와 소산을 나타내는 백과효과를 고려할 수 있다. 파향선을 따른 스펙트럼파동의 정상상태 보존에 대한 지배방정식(Jonsson, 1990)은 (3)식과 같이 주어진다.

$$(C_{ga})_{i \partial x_i} \frac{\partial C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E_w}{w_r} = \sum \frac{S}{w_r} \quad (3)$$

여기에서 C_{ga} 는 절대군속도, C_a 는 절대파속, E_w 는 파의 에너지밀도스펙트럼, w_r 은 각주파수 그리고 S 는 파에너지의 source/sink 항이다.

2.4 동수역학모듈

동수역학모듈은 해빈류나 조류를 계산한다. DIVAST (Falconer, 1986; 박일흠 등, 1998) 모형을 수정한 WICU-DIVAST(Wave Induced Current of Depth Integrated Velocity And Sediment Transport) 모형이 동수역학 모듈에 사용되었다. 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 수심적분한 것에 기초한다. 정수압분포와 Boussinesq 근사를 가정하면, 수심적분된 연속방정식과 의 x, y 방향의 운동량 방정식은 식(4)-(6)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_h}{\partial x} + \frac{\partial V_h}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta U^2 h) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta UVh) - fVh + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (5)$$

$$-\frac{\gamma_a \rho_a W_x W_s}{\rho} + F_x - M_x + R_x = 0$$

$$\frac{\partial Vh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVh) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta V^2h) + fUh + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\gamma_a \rho_a W_x W_y}{\rho} + F_y - M_x + R_x = 0 \quad (6)$$

여기에서 β 는 운동량보정계수, U 와 V 는 수심평균유속성분, h 는 전수심, η 는 기준면에서의 수위, ρ_a 는 공기의 밀도, γ 는 대기-유체간 마찰계수, W_x 와 W_y 는 풍속의 x, y 성분이다. F_x 와 F_y 는 저면응력 항, M_x 와 M_y 는 수평확산 항 그리고 R_x 와 R_y 는 radiation stress 항이다. 수치계산은 ADI (Alternating Direction Implicit)법을 사용한다.

2.5 표사확산모듈

2.5.1 순부상 flux Q_s

부유사와 소류사량은 표사확산모듈에서 계산되어지며, 부유사 농도는 표사의 수심적분된 이류-확산방정식인 식(7)을 풀어 얻어진다.

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \left[\frac{\partial CUh}{\partial x} + \frac{\partial CVh}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[hD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + hD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[hD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + hD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] = Q_s \quad (7)$$

여기에서 C 는 수심평균된 부유사의 농도이고 Q_s 는 저면경계층에서의 순부상 flux이다. Q_s 는 식(2)에 나타낸 바와 같이 부상 flux와 침강 flux의 합으로서 계산된다.

2.5.2 소류사 flux q_b

소류사 flux는 van Rijn(1993)의 TRANSPOR 프로그램에 의하여 계산된다. 소류사 flux q_b 와 x, y 방향성분 q_{bx} 와 q_{by} 는 식(8)에 의하여 다음의 형태로 계산되어진다.

$$q_b = 0.25 \gamma \rho_s d_{50} D_*^{-0.3} (\tau'_{b,cw} / \rho)^{0.5} T^{1.5}$$

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

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

여기에서 $T = (\tau'_{b,cw} / \tau'_{b,cr} - 1)$ 는 무차원 저면전단응력, $\tau'_{b,cw}$ 는 유효 저면전단응력, D_* 는 무차원 입경 파라미터 그리고 $\gamma = 1 - (H_s/h)^{0.5}$ 이다. $U_{\delta,R}$ 는 저면경계층의 높이 δ 에서 임의시간 t 에서 파동에 의한 물입자 운동 속도성분, 흐름의 속도성분, 저면경계층에서의 파동에 의한 streaming 속도성분 및 질량수송에 대한 보상류인 return flow 속도성분의 벡터합이다. 그리고 $U_{\delta,x}$ 와 $U_{\delta,y}$ 는 의 x, y 방향 성분이다. 따라서, 식(8)은 파 · 흐름 공존장에서 소류사 flux를 평가하는 식이 된다.

3. 해빈단면변화

지형변화모델에 있어서 가장 어려운 문제의 하나는 침식형

또는 퇴적형 단면의 재현에 있다고 할 수 있다. SED-FLUX 모형의 해빈단면변화 검증을 위해서 일정한 경사(1/20)를 가지는 평행해빈에서 수치실험이 수행되었다. 모델의 결과는 수리모형실험과 Sunamura-Hori-kawa(Sunamura와 Horikawa, 1974)의 침식/퇴적 분포의 판별식과 비교되었다. 표 1은 수치모형과 수리모형실험의 계산 및 실험조건을 나타내며 수치모형실험은 원형의 조건을 사용하였고 수리모형실험은 1/36의 축척을 가진다. 그림 2는 수치모형의 초기지형을 나타내며, 그림 3은 중앙단면(Y=30)에서의 수치모형의 결과를 나타낸다. 그림 3에서 모델의 결과는 입사파랑조건에 따른 침식과 퇴적분포를 잘 재현함을 볼 수 있다.

Sunamura-Horikawa의 해빈단면에 대한 판별식은 식(9)와 같다.

$$\frac{H_0}{L_0} = C_s (\tan \beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \quad (9)$$

여기에서 H_0 와 L_0 는 심해파의 파고와 파장, $\tan \beta$ 는 저면경사, d 는 중앙입경 그리고 C_s 는 상수로서 해빈단면은 $C_s < 4$ 이면, 퇴적형이고, $4 \leq C_s \leq 8$ 이면 천이형 그리고 $8 < C_s$ 이면 침식형 단면으로 분류된다. 표 2는 수치계산 결과와 수리모형 실험 결과 및 단면변형 판별식을 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과 본 모델 결과는 실제적인 해빈단면의 변화특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

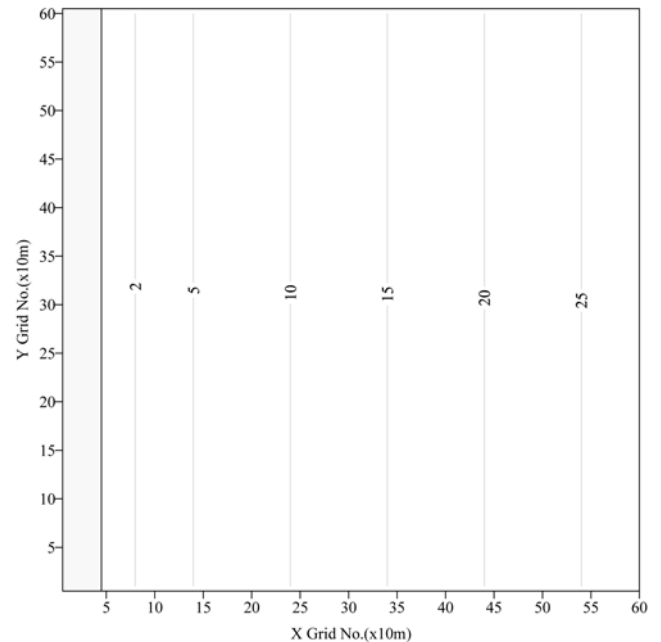
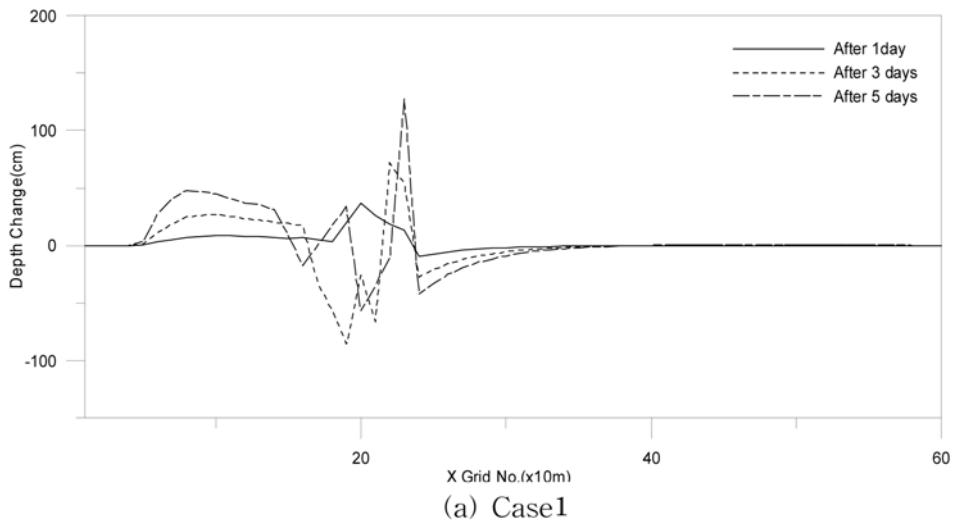


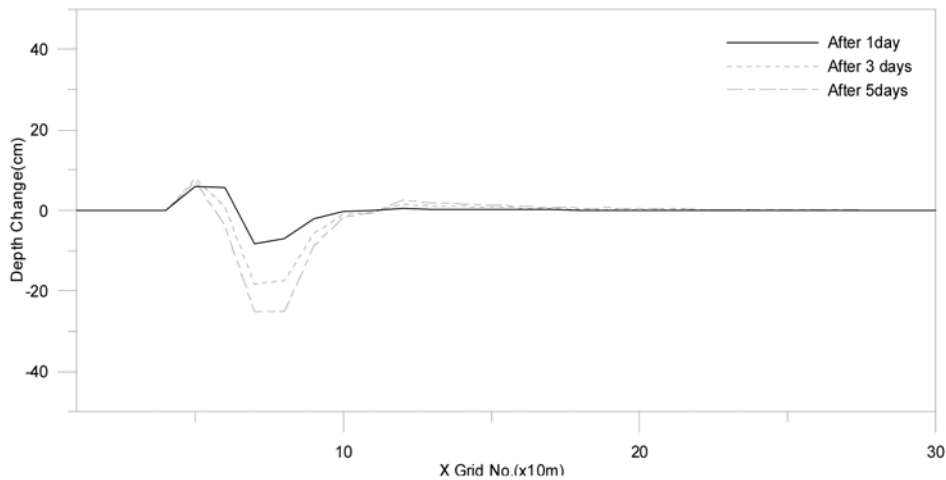
그림 2. 해빈단면변화 수치계산의 초기지형

표 1. 해빈단면변화 수치계산과 수리모형실험의 실험조건

| Test Case | | H_s (m) | T_s (sec) | H_0/L_0 | d_{50} (mm) | Profile | Scale |
|------------------------|--------|-----------|-------------|-----------|---------------|--------------|-----------|
| Numerical model | Case 1 | 4.50 | 9.00 | 0.036 | 0.2 | erosion | Prototype |
| | Case 2 | 1.12 | 7.00 | 0.014 | 0.2 | accumulation | |
| Movable bed experiment | Case 1 | 0.125 | 1.50 | 0.036 | 0.2 | erosion | 1 : 36 |
| | Case 2 | 0.031 | 1.20 | 0.014 | 0.2 | accumulation | |



(a) Case1



(a) Case2

그림 3. 중앙단면에서의 수치시뮬레이션 결과

표 2. 파랑장에서 해빈단면변형모형 검증 결과

| Case | H_s (m) | T_s (sec) | H_0/L_0 | d_{50} (mm) | Sunamura-Horikawa | Movable bed Experiment | SED-FLUX |
|--------|-----------|-------------|-----------|---------------|-------------------|------------------------|--------------|
| Case 1 | 4.50 | 9.00 | 0.036 | 0.2 | erosion | erosion | erosion |
| Case 2 | 1.12 | 7.00 | 0.014 | 0.2 | accumulation | accumulation | accumulation |

4. 이안제 주변의 수심변화

지형변화모델의 연안방향 수심변화를 검토하기 위하여 일정사면(1/20)의 평행해빈에 이안제가 존재하는 경우에 파와 흐름에 의한 지형변화의 수치계산을 수행하였다. 입사파의 조건은 유의파고 1.0 m, 주기 6 sec 이었다. 전체 5일간 수치계산을 수행하였고, 해저퇴적물의 중앙입경은 500 μ m 이었다. 그림 4는 수치계산의 초기지형을 보여주고, 그림 5는 해빈류와 5일후의 지형변화 양상의 계산결과를 나타낸다. 그림 5의 수심변화량 분포에서 이안제 배후에 퇴적이 발생하는 일반적인 초기 tombolo 지형의 형성기구를 잘 보여주고 있다.

5. 소류사이동의 한계수심

5.1 소류사이동에 대한 현장실험

동해의 봉길해빈에서 표사의 경로를 조사하기 위하여 방사

성 동위원소를 이용한 추적자 실험이 수행되었다(최병중 등, 2004). 또한 표사이동의 외력을 평가하기 위하여 실험기간 동안에 파랑과 조류관측이 수행되었다.

5.1.1 파랑과 조류관측 결과

방사성추적자 실험기간 동안에 추적자의 수송경로에 영향을 미치는 파랑과 조류를 관측하였다. 파랑과 조류관측점의 위치는 그림 6에 주어져 있다. 파랑관측은 2003년도 3월부터 6월까지 ADCP를 수심 35 m 지점에 설치하였다. 그림 7은 관측된 파랑자료의 시계열을 나타낸다. 표 3은 이러한 시계열 자료로부터 얻어진 대표적인 파랑조건이다. 또한, 조류관측은 ACM-8M 전자유속계를 이용하여 17일간 관측이 수행되었으며 그림 8은 대조기와 소조기에 관측된 조류의 분산도를 나타낸다. 소조기에는 최강유속은 약 30.5 cm/s, 평균유속은 11.4 cm/s로 나타났으며 유향은 주로 NNE 방향이었다. 반면에, 대조기에는 최강유속은 약 39.2 cm/s, 평균유속은 약 29.3 cm/s로 나타났고 흐름의 주방향은 NNE-SSW

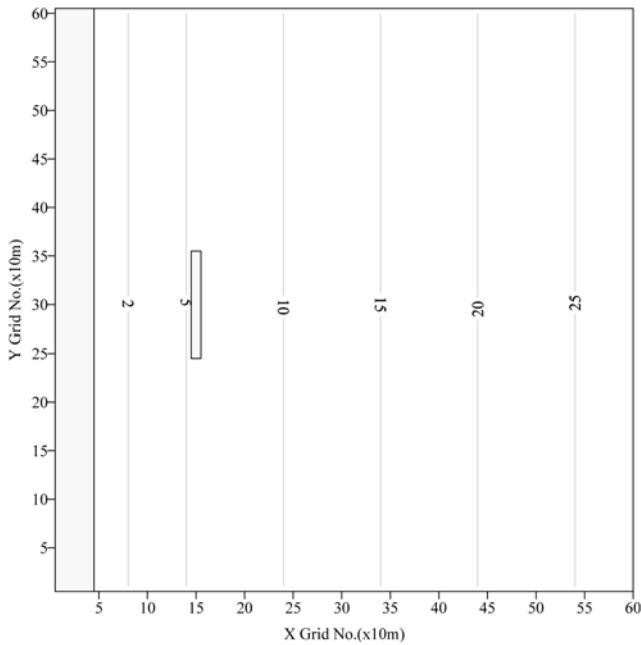


그림 4. 이안제가 존재하는 경우에 초기지형

방향이였다.

5.1.2 방사성동위원소 추적자 실험

동해에 위치한 봉길해빈의 표사이동을 이해하기 위하여 Lagrangian 해석 관점에서 방사성추적자 실험이 수행되었다. 이를 위하여 원자로에서 중성자 조사를 통하여 방사화되는 소량의 Iridium을 포함하는 표지모래를 사용하였다. 표지모래는 산화물 제조법으로 제조되었으며, 비중이 2.65인 실험현지의 소류사와 유사한 비중(≒2.6)을 갖도록 하였다. 추적자의 투입위치는 표 4와 그림 6에 주어진 것과 같다. 그리고 추적자의 평균입경은 $500 \mu\text{m}$ 로서 이것은 현지의 평균입경 $322 \mu\text{m}$ 보다 큰 입경이다. 실험자료의 해석은 실제적인 확산패턴과 방사성 추적자의 자연적인 감쇄의 효과를 반영하였추적은 초기 투입 후 3회에 걸쳐 수행되었다. 그림 9는 추적결과를 보여준다. 첫 번째 추적에서 주 경로는 주로

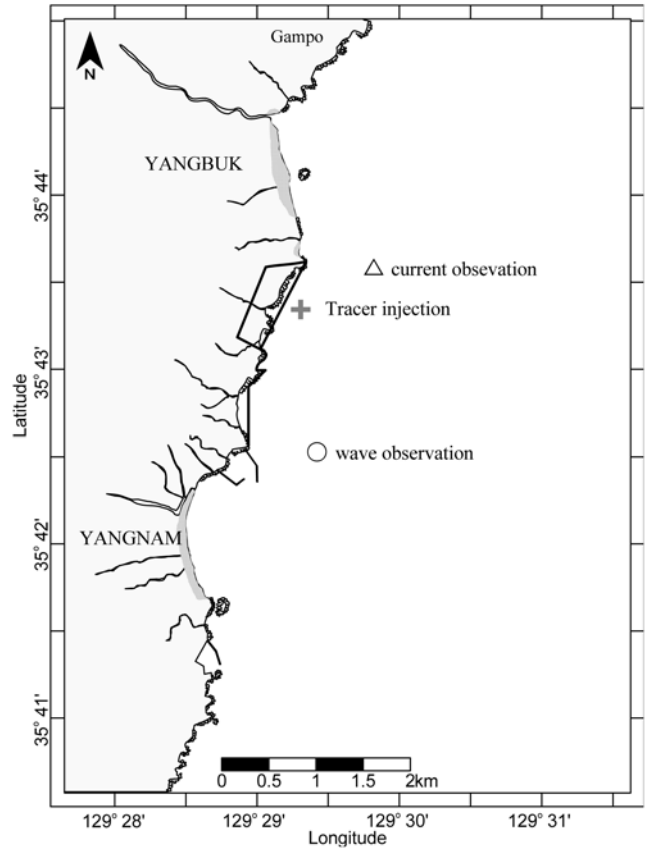


그림 6. 파랑관측, 조류관측 및 방사성추적자 투입 위치

SSW 방향이었고 추적자는 남쪽으로 약 100 m, 동쪽으로 약 50 m 거리까지 이동하였다. 두 번째 추적의 경우 이동경로는 첫 번째와 유사하지만 북쪽으로는 이동이 증가되었다. 세 번째 추적에서는 추적자는 남쪽으로 크게 확산된 것을 볼 수 있다.

추적자의 입경이 현지 소류사의 입경보다 크어도 불구하고 추적자는 뚜렷하게 이동하는 것을 볼 수 있었다. 파와 조류관측 자료를 고려해 본다면 추적자의 이동은 주로 흐름에 중첩된 파의 운동에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이것은

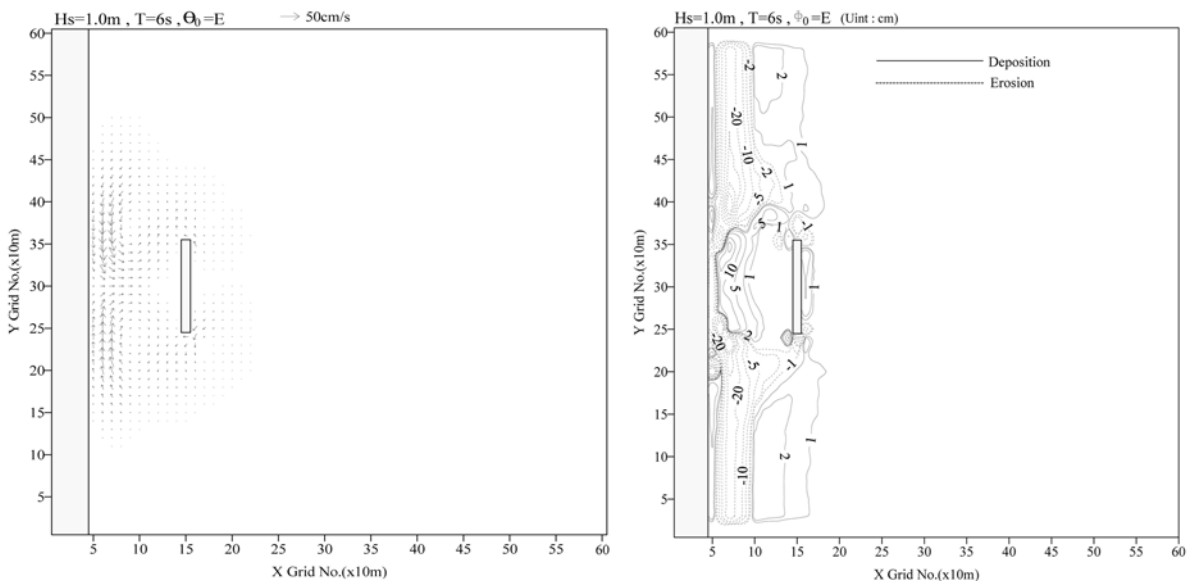


그림 5. 이안제 배후에서 해빈류와 5일 후의 수심변화량

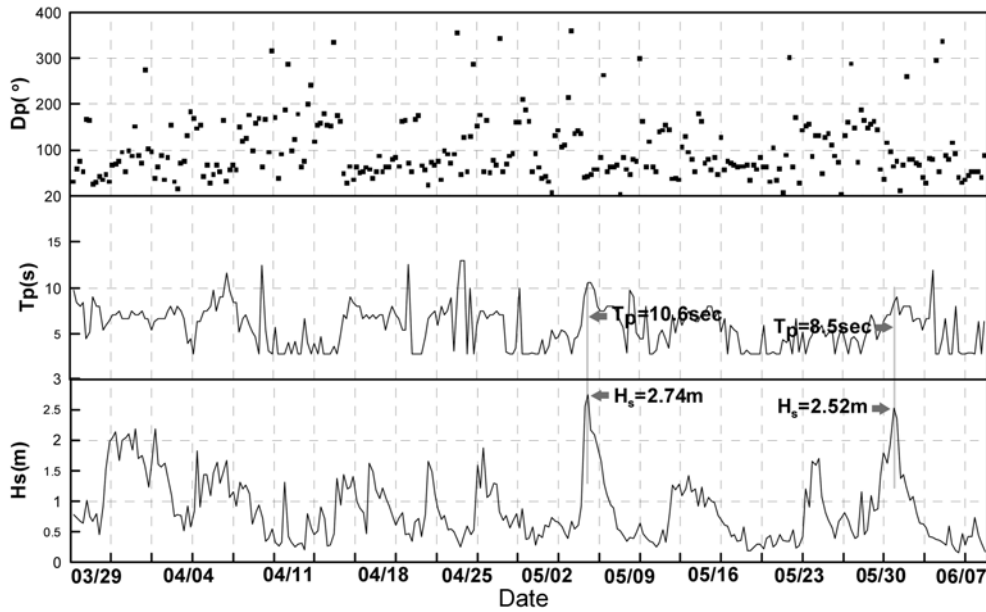


그림 7. 동해 봉길리 해안에서 ADCP에 의해 관측된 파랑의 시계열 곡선

표 3. 관측된 파랑자료로부터 구해진 대표적인 파랑조건

| | H _s (m) | T _p (sec) | θ(degree) | Latitude | Longitude | Water Depth |
|---------|--------------------|----------------------|-----------|----------------|----------------|-------------|
| Maximum | 2.76 | 10.6 | 50 | 35° 42'46.6" N | 129°29'52.0" E | 35m |
| | 2.52 | 8.5 | 30 | | | |
| Average | 0.88 | 6.4 | 45 | | | |

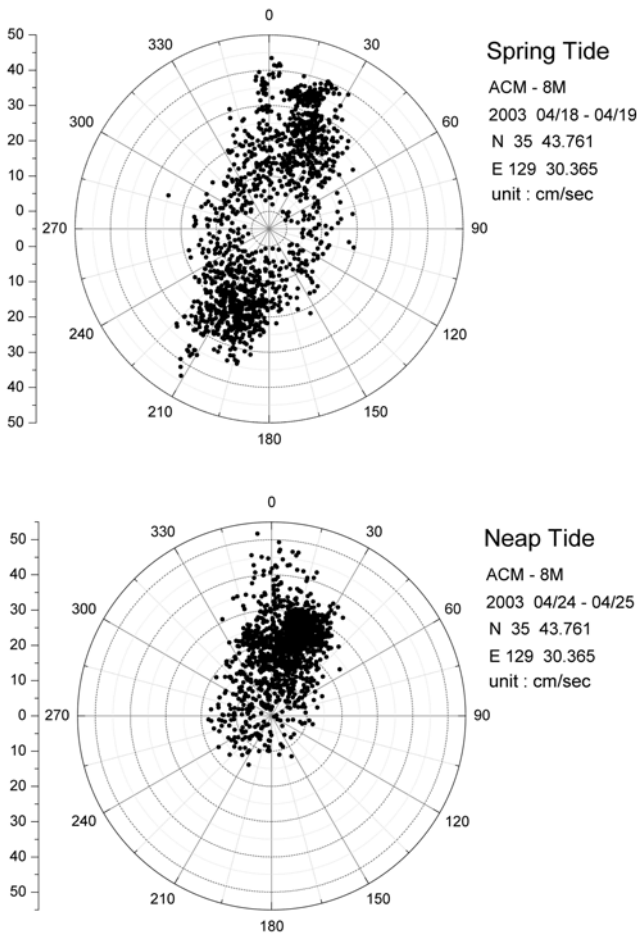


그림 8. 동해 봉길리 해빈에서 대조기와 소조기의 조류분산도

대조기에 주 흐름방향은 NNE-SSW 방향이 거의 같은 크기인 반면에 파의 입사방향은 폭풍시에 거의 NE 방향이었기

때문이다. 그러므로 추적지는 아마도 NNE 방향보다는 SSW 방향으로 크게 이동하였을 것으로 사료된다.

5.2 경험식에 의한 소류사수송 한계수심

관측된 파와 흐름 자료를 이용한 소류사 수송의 한계수심이 Horikawa-Watanabe의 전면이동한계수심과 van Rijn의 초기이동한계수심에 의하여 검증되었다. 표 3의 파랑조건과 조사대상현지의 평균입경($d_{50}=322 \mu\text{m}$)과 방사성 추적자의 평균입경($d_{50}=500 \mu\text{m}$)이 해석에 사용되었으며, 흐름 조건의 경우 대조기와 소조기의 최강유속이 사용되었다. Horikawa-Watanabe의 식에서는 단지 파랑조건만을 고려하였지만 van Rijn의 식에서는 파와 흐름을 동시에 고려하여 계산하였다.

5.2.1 Horikawa-Watanabe의 전면이동 한계수심

Horikawa와 Watanabe(1967)는 수많은 수리실험을 통하여 저면에서 모래가 전면적으로 이동하는 한계수심에 대한 방정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{H_0}{L_0} = \alpha \left(\frac{d}{L_0}\right)^n \left(\sin \frac{2\pi h_i}{L}\right) \left(\frac{H_0}{H}\right) \quad (10)$$

여기에서 h_i 는 전면이동 한계수심이고, d 는 중앙입경이다. 표 5는 전면이동한계수심의 결과를 나타내고 폭풍조건하에서 추적자 실험결과와 유사한 수심을 나타낸다.

5.2.2 van Rijn의 초기이동 한계수심

van Rijn(1993)은 파-흐름 공존장에서 한계파고(H_{cr})와의 관계를 이용하여 초기이동의 한계수심을 제안하였다. 식(11)에서 H_{cr} 은 주어진 파랑조건에서 수심의 함수로 주어진다.

표 4. 추적자 투입위치와 추적일시

| Date | Injection Point | Water Depth | Tracking | | |
|--------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | 1st | 2nd | 3rd |
| 3rd May 2003 | 35° 43' 21.09" N 129° 29' 25.0.0" E | 15m | 10th May | 21st May | 4th June |

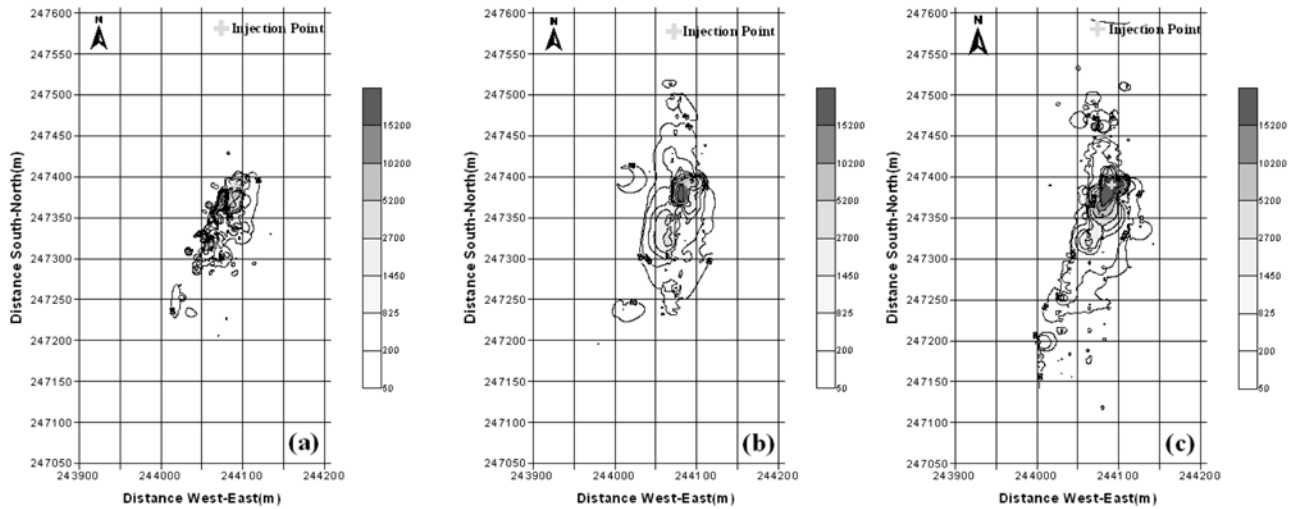


그림 9. 방사성 추적자 추적결과

표 5. Horikawa-Watanabe의 전면이동 한계수심 계산결과

| Case | H _S (m) | T _P (sec) | d ₅₀ (mm) | h _i (m) |
|--------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| Case 1 | 2.74 | 10.6 | 0.322 | 21.03 |
| | 2.74 | 10.6 | 0.500 | 14.72 |
| Case 2 | 2.52 | 8.5 | 0.322 | 18.03 |
| | 2.52 | 8.5 | 0.500 | 13.52 |
| Case 3 | 0.88 | 6.4 | 0.322 | 5.11 |
| | 0.88 | 6.4 | 0.500 | 3.83 |

표 6. van Rijn의 초기이동한계수심 계산결과

| Case | H _S (m) | T _P (sec) | d ₅₀ (mm) | h _i (m) | | |
|--------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------|----------|
| | | | | U=0cm/s | U=30cm/s | U=40cm/s |
| Case 1 | 2.74 | 10.6 | 0.322 | 42.00 | 50.87 | 69.23 |
| | 2.74 | 10.6 | 0.500 | 39.06 | 48.34 | 71.56 |
| Case 2 | 2.52 | 8.5 | 0.322 | 34.13 | 41.16 | 54.58 |
| | 2.52 | 8.5 | 0.500 | 33.04 | 39.88 | 57.67 |
| Case 3 | 0.88 | 6.4 | 0.322 | 15.27 | 20.26 | 33.10 |
| | 0.88 | 6.4 | 0.500 | 14.28 | 19.12 | 27.59 |

$$H_{cr} = \frac{1}{\pi} \hat{U}_{\delta,cr} T \sinh(2\pi h/L) \quad (11)$$

여기에서 $\hat{U}_{\delta,cr}$ 은 저면에서 수립자속도의 최대진폭이다.

표 6은 초기이동한계수심의 결과를 보여준다. 현장자료와 비교해본다면, van Rijn의 식은 파와 파-흐름 조건에 모두

충분한 수심을 보여준다. 그러나 Horikawa-Watanabe식과 van Rijn의 식을 비교하는 것은 각각의 이동상태가 다르기 때문에 서로를 비교하는 것은 무의미하다.

5.3 지형변화 모델의 민감도

수치모델에서 지형변화가 어느 정도 수심까지 일어날 것인가를 검증하는 것은 모델의 민감도 분석에 있어서 매우 중요한 사항의 하나이다. 본 연구에서는 모델의 민감도분석을 위해서 일정사면(1/20)의 평행해빈에서 수치실험을 수행한 후 5.2절의 표사이동의 한계수심과 비교하였다. 민감도분석에 사용된 계산조건은 표 7과 같다.

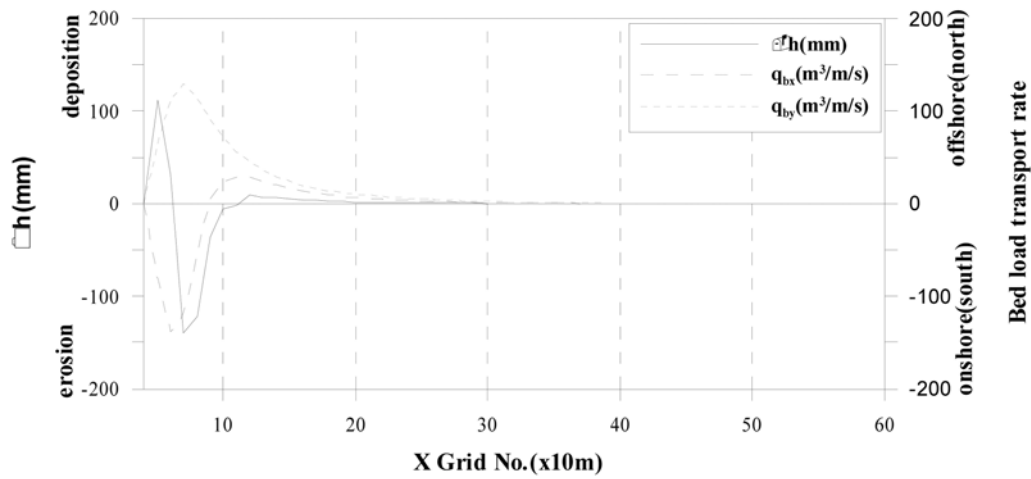
그림 10은 중앙단면에서(Y=30) 수심변화량과 소류사 flux를 나타낸다. Case 1에서 수심변화와 소류사 flux는 외해 방향으로 430 m 거리인 수심 21.49 m 지점까지 나타났다. 여기에서 모델의 결과는 van Rijn의 초기이동한계수심 19.12 m와 매우 유사함을 볼 수 있다. 그리고 Case 2에서 수치모델의 결과는 23.49 m로 나타났고 이때 van Rijn의 결과는 20.26 m 이었다. 이상의 결과로부터 파-흐름 공존장에서 모델의 결과는 van Rijn의 초기이동한계수심과 유사한 것을 볼 수 있었고, 따라서 모델의 민감도는 매우 양호한 것으로 보인다.

6. 결 론

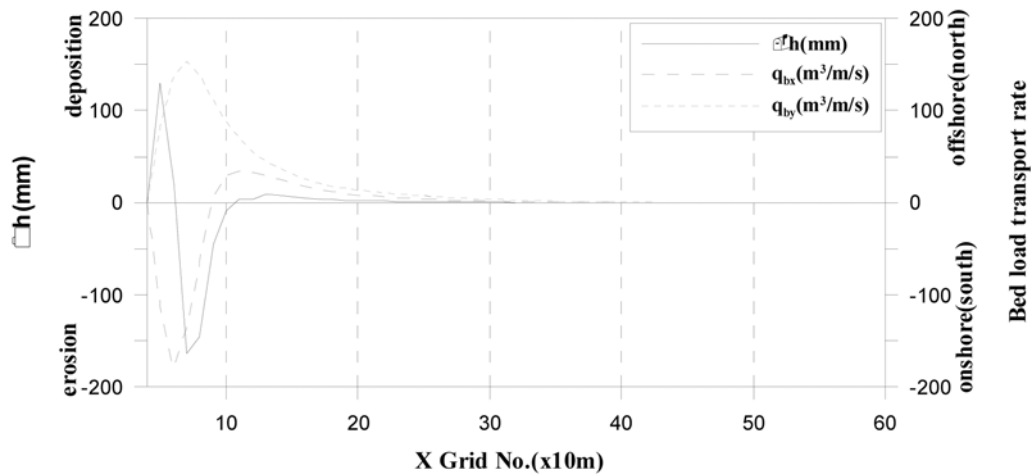
본 연구에서는 저면경계층에서 소류사와 부유사 거동을 포함하는 실제적인 표사수송과정에 기초한 수심변화모델(SED-

표 7. 수치모델의 민감도분석에 사용된 계산조건

| Case | H _S (m) | T _P (sec) | d ₅₀ (mm) | U(m/s) | Bottom slope | Run time | h _i (m) van Rijn |
|--------|--------------------|----------------------|----------------------|--------|--------------|----------|-----------------------------|
| Case 1 | 0.88 | 6.4 | 0.322 | 0.30 | 1/20 | 1 day | 19.12 |
| Case 2 | 0.88 | 6.4 | 0.500 | 0.30 | 1/20 | 1 day | 20.26 |



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 10. 수치모델의 민감도 분석에서 1일 후의 수심변화량과 소류사 flux

FLUX)을 개발하였다. 모델 SED-FLUX는 5개의 모듈로 구성되어 있다. 파랑 모듈에서는 STWAVE 모델을 이용하여 유의파의 파고와 파향 및 radiation stress를 계산한다. 동수역학 모듈에서는 해빈류나 조류 등을 계산하며 DIVAST 모형을 수정한 WICU-DIVAST가 동수역학 모듈에서 사용되었다. 표사확산 모듈은 순부상 flux Q_s 와 소류사 flux q_b 를 계산한다. 순부상 flux Q_s 는 저면경계층에서 침강 flux와 부상 flux의 합으로서 계산된다. 한편, 소류사 flux는 van Rijn의 TRANSPOR 프로그램에 의해서 계산되어진다.

파랑장에서 SED-FLUX 모델의 검증을 위해서 일정한 저면경사를 가지는 평행해빈에서 해빈단면변형 수치실험이 수행되었으며 모델의 결과는 수리모형실험의 결과 및 Sunamura-Horikawa의 해빈단면의 침식/퇴적 판별식과 비교한 결과 입사파랑조건에 따른 해빈단면의 침식과 퇴적 특성을 잘 재현하였다.

파-흐름 공존장에서 모델의 검증을 위해서 이안제가 존재하는 일정사면의 해빈에서 수치실험이 수행되었다. 모델의 결과는 이안제 배후에서 초기 tombolo 형성을 잘 나타내었다.

수심변화모델의 민감도 분석을 위해서 동해의 봉길해안에서 방사성 추적자 실험이 파랑관측 및 조류관측과 동시에 수행되었다. 관측된 파랑조건은 최대 파고가 2.76 m, 탁월파향은 NE 였다. 대조기 최대유속은 약 40 cm/s, 조류의 주축은 NNE-SSW이었다. 반면에, 소조기에는 최대유속이 30 cm/s

이고 유향은 주로 NNE로 해류성분에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 파와 흐름관측결과를 고려해 본다면 추적자는 흐름에 중첩된 파운동에 크게 영향을 받는 것으로 보였다. 이러한 파와 흐름자료를 사용하여 소류사 이동의 한계수심을 계산하여 Horikawa-Watanabe의 전면이동한계수심과 van Rijn의 초기이동한계수심과 비교하였다. 현장실험자료와 비교하였을 때 van Rijn의 식은 파와 파-흐름 조건에서 모두 충분한 수심을 나타냄을 보여주었다. 모델의 민감도 분석을 위해서 단순한 직선상 평행해안에서 수치실험을 수행하여 수심변화의 한계수심을 이동한계수심 평가식에 의한 값과 비교하였다. 본 모델의 결과는 파-흐름 공존장에서 van Rijn의 초기이동한계수심과 유사하게 나타나 모델의 민감도는 매우 양호한 것으로 사료된다.

SED-FLUX 모델은 파, 흐름 및 바람과 같은 다양한 외력 조건에 의한 소류사와 부유사의 거동을 고려한 장단기 지형변화를 계산할 수 있을 것으로 본다. 앞으로 해안선의 변화까지도 고려한 지형변화의 예측이 가능하면 조석의 변화도 고려할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주)의 “월성원자력발전소 인근 해안 침퇴적 영향조사”의 일환으로 이루어졌으며 이에 관계

자 제위에게 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 박일흠, 이종섭, 이문옥(1998) 저항물체 배후의 이차원 후류에 관한 대격자 수치모형. *한국해양해양공학회지*, 한국해양·해양공학회, 제10권 2호, pp. 83-92.
- 최병중, 정성희, 김종범, 이종섭(2004) 방사성동위원소 추적자를 이용한 표사이동 추적실험. *한국해양해양공학회지*, 한국해양해양공학회, 제16권 3호, pp. 162-170.
- DHI (1999) *MIKE21 Sand Transport Module : Current and Waves Scientific Documentation*.
- Jonsson, I.G. (1990) *Wave-current interactions*, John Wiley & Sons Inc., LeMehaute and D. M. Hanes ed., New York.
- Horikawa, K. and Watanabe, A. (1967) A Study on the sand movement due to wave action. *Coastal engineering, Japan*, 10, pp. 39-57.
- HydroQual (2002) *A Primer for ECOMSED ver 1.3 Manual*, HydroQual Inc., One Lethbridge Plaza Mahwah, N.J., pp. 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, J1, pp. 325-344.
- Sawaragi, T., Lee, J.S., and Deguchi, I. (1984) A study on the near-shore current and bed level change model around the estuaries. *Proc. 31st Conf. Coastal Engineering, Japan*, pp. 411-415.
- Smith, J.M., Resio, D.T., and Zundel, A.K. (1999) *STWAVE : Steady State Spectral Wave Model; Report 1 : User's manual for STWAVE version 2.0*, U.S. Army Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Spasojevic, M. and Holly, F.M. (1994) *Three Dimensional numerical simulation of mobile bed hydrodynamics*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Sunamura, T. and Horikawa, K. (1974) Two-Dimensional Beach Transformation due to Waves. *Int. Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, Copenhagen, Denmark, pp. 920-938.
- van Rijn, L.C. (1993) *Principles of Sediment Transport in River, Estuaries and Coastal Seas*. AQUA Publications, Amsterdam, Netherlands.
- van Rijn, L.C. (1984a) Sediment Transport Part 1 : Bed Load Transport. *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, 10, pp. 1431-1456.
- van Rijn, L.C. (1984b) Sediment Transport Part 2 : Suspended Load Transport. *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, 10, pp. 1613-1641.
- Watanabe, A., Maruyama, K., Shimizu, T. and Sakakiyama, T. (1986). Numerical Prediction model of three dimensional beach deformation around a structure. *Coastal engineering, Japan*, 29, pp. 179-194.

(접수일: 2005.10.25/심사일:2006.2.20/심사완료일:2006.2.20)