

Article

새만금 해역에서 연직 1차원 퇴적물 확산모델 검증

이관홍^{1*} · 이희준²

¹인하대학교 해양과학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253
²한국해양연구원 새만금해양환경연구단
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Examination of Vertical 1D Sediment Resuspension and Diffusion Model Using Field Data Collected in the Saemangeum Area

Guan-hong Lee^{1*} and Hee Jun Lee²

¹Department of Oceanography
Inha University, Incheon 402-751, Korea
²Saemangeum Coastal Research Group, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The sediment resuspension and diffusion model is an integral part of a sediment transport and morphologic change model. We examined a vertical one-dimensional sediment resuspension and diffusion model using field data collected at about 10-m depth off the Saemangeum 4th dike. The field data include waves, currents and suspended sediment concentration near the bed for about a day in May, 2007. The suspended sediment concentration obtained from the 1D model overestimated the observation about two orders of magnitude with single grain size and multiple grain sizes. The incorporation of the bed armoring effect, which adjusts the amount of suspended sediment with the available bed sediment, improved the agreement between the model and observation within a factor of two.

Key words : sediment, suspension, diffusion, bed armoring

1. 서 론

2006년에 완공된 새만금 방조제로 인하여 새만금 인근 해역의 환경 변화가 빠르게 발생하고 있다. 방조제 자체로 인한 파랑과 해류와 같은 해수 유동장에 변화가 발생하고 (Lee *et al.* 2008), 퇴적물의 유입의 차단으로 퇴적물 조성 및 지형변화가 지속적으로 나타나고 있다(이 등 2006). 2008년에는 새만금 개발이 2020년까지 지속되는 새만금 내부 개발 구상이 만들어져서, 새만금 해역은 향후에도 지속적으로 변화를 겪을 것으로 예상된다. 이렇게 빠르게 진

행되는 퇴적환경 변화를 파악하고 예측하기 위해서 새만금 환경에 적용 가능한 3차원 퇴적물 이동/지형변화모델의 개발이 시급하다. 3차원 퇴적물 이동/지형변화모델의 개발에 있어서 중요한 요소 가운데 하나는 퇴적물 이동 모델의 해저면 퇴적물 재부유와 확산이라고 할 수 있다.

지난 30년간에 걸쳐 연안 해저경계층에서 퇴적물 이동을 이해하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 해저경계층의 퇴적물 이동작용의 발달을 살펴보면, 해저면 거칠기(bed roughness)의 상세한 기술(Grant and Madsen 1982; Drake *et al.* 1992; Xu and Wright 1995), 파랑과 해류가 존재할 경우 형성되는 해저지형의 발달 및 형태(Nielsen 1992; Wiberg and Harris 1994; Traykovski *et al.* 1999), 잉여해

*Corresponding author. E-mail : ghlee@inha.ac.kr

저진단응력과 퇴적물 연행(sediment entrainment) (Hill *et al.* 1988; Drake and Cacchione 1989; Vincent and Green 1990; Lee *et al.* 2002), 그리고 중성 혹은 성층을 이룬 경우에 대한 난류마감 모델(Madsen and Wikramanayake 1991; McLean 1992; Wiberg 1995) 등을 들 수 있다. 이러한 독립적인 연구들은 파랑과 해류가 공존하는 환경에서 해저경계층 작용을 종합하고, 퇴적물의 재부유 및 연직 방향의 퇴적물 농도를 관측하고 검증하는 연구를 가져왔다(Styles and Glenn 2000; Lee *et al.* 2002; Lee *et al.* 2005). 그러나, 이러한 연구 결과에 대한 검증이 국외에서는 다양하게 진행되고 있으며, 3차원 퇴적물이동모델에 적용되고 있으나(Warner *et al.* 2008) 국내에서는 현장자료를 이용한 검증이 이루어지고 있지 않다.

새만금 해역의 3차원 퇴적물이동/지형변화 모델 개발의 일환으로 퇴적물이동 모델에 적용할 1차원 퇴적물 재부유 및 확산모델을 2007년 5월에 4호 방조제 전면의 10 m 지점에서 관측한 해저경계층 자료를 이용하여 검증하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 1차원 퇴적물 재부유 및 확산모델을 소개하고, 3장은 실험재료 및 환경을 기술한다. 현장자료를 이용하여 모델을 검증한 결과는 4장에서 기술하고, 5장에서는 본 연구 결과에 대한 토론과 결론을 서술한다.

2. 1D 연직 퇴적물 재부유 및 확산모델

부유퇴적물 이동을 지배하는 방정식은 퇴적물 질량 보존에 기초한 이류확산방정식이며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

여기에서 c 는 파랑을 평균한 퇴적물 농도, t 는 시간, u , v 및 w 는 각각 x , y , 그리고 z 방향의 유속, w_s 는 퇴적물의 침강속도, ϵ_{sx} , ϵ_{sy} , 및 ϵ_{sz} 는 각각 x , y , 그리고 z 방향의 난류 확산계수이다. 식 (1)에서 수평구배가 수직구배에 비하여 무척 작다고 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = w_s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2)$$

식 (2)를 적분하고 평균을 취하면, 다음과 같은 정상상태 확산방정식이 얻어진다.

$$w_s c = -\epsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} \quad (3)$$

식 (3)은 시간-평균한 퇴적물 부유가 난류확산에 의한 위방향의 퇴적물 플럭스가 퇴적물 침강에 의한 아랫방향의 플럭스가 평형을 이루는 확산작용이라는 것을 의미한다.

와류확산계수(eddy diffusivity) ϵ_s 에 대한 유체의 와류 점성계수(eddy viscosity) ϵ_m 와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 성층이 존재하지 않는 모래 환경의 해저면 근처에서 그 비율은 1로 알려져 있다(Lee *et al.* 2002). 와류점성계수에 대한 일반적인 가정은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_m = \kappa u_{*cw} z & z \leq \delta_w \\ \epsilon_s &= \epsilon_m = \kappa u_{*c} z & z \geq \delta_w \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 κ 는 von Karman의 상수(~ 0.4)이고, u_{*cw} 는 δ_w 의 두께를 갖는 파랑경계층안의 파랑과 해류의 비선형적인 작용에 기인한 마찰속도이고 u_{*c} 는 파랑경계층 외부에서 평균유속에 기인한 마찰속도이다. 파랑경계층 두께는 $\delta_w = 2\kappa u_{*cw} / \omega$ 로 계산되는데(Grant and Madsen 1986; Glenn and Grant 1987), 여기에서 ω 는 파랑의 주파수이다. 와류점성계수는 식 (4)의 선형관계식 외에도 상수, 이차방정식 등으로 표현할 수 있으나, 선형모델은 식 (3)의 분석해를 구할 수 있고 선형으로 증가하는 와류점성계수 프로파일이 해저경계층에서 관측되었기(Vincent and Downing 1994; Lee *et al.* 2002) 때문에 선택되었다.

2층 Rouse 식은 식 (3)을 식 (4)를 이용하여 적분하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} c_{zi} &= c_{ri} (z/z_r)^{-w_{si}/\kappa u_{*cw}} & z \leq \delta_w \\ c_{zi} &= c_{ri} (\delta_w/z_r)^{-w_{si}/\kappa u_{*cw}} (z/\delta_w)^{-w_{si}/\kappa u_{*c}} & z \geq \delta_w \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 아래첨자 i 는 표층퇴적물의 입경을 나타낸다. 표준고도 z_r 에서 표준농도 c_r 은 Lee *et al.* (2004)를 따라 다음과 같이 계산한다.

$$c_r = 2.58 (\theta_{sf} \cdot u_{*sf} / w_s)^{1.45} \quad (6)$$

여기에서 u_{*sf} 는 표면마찰속도이고 θ_{sf} 는 표면마찰 Shields 계수이다.

3. 실험재료와 환경

본 연구에 사용된 현장자료는 2007년 5월 15일 15:30분부터 5월 16일 4:30분까지 약 1 조석 주기 동안 4호 방조제 전면의 약 10 m 수심의 지점(34° 52' 50.81"N, 126° 27' 28.55"E)에서 TISDOS(Tidal Sediment Dynamics Observation System)로 얻었다(Fig. 1). 이 관측지점은 모래로 구성되어 있던 해저면이 방조제 완공으로 인해 세립 퇴적물이 쌓이면서 표층퇴적물이 세립화되고 있는 지역으

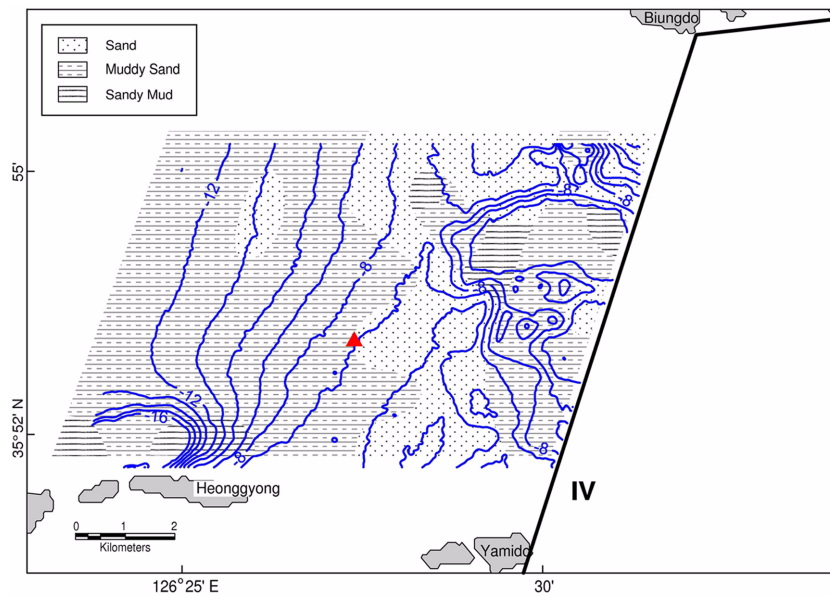


Fig. 1. Bathymetric map of field site. Also shown are surface sediment texture and the location of TISDOS.

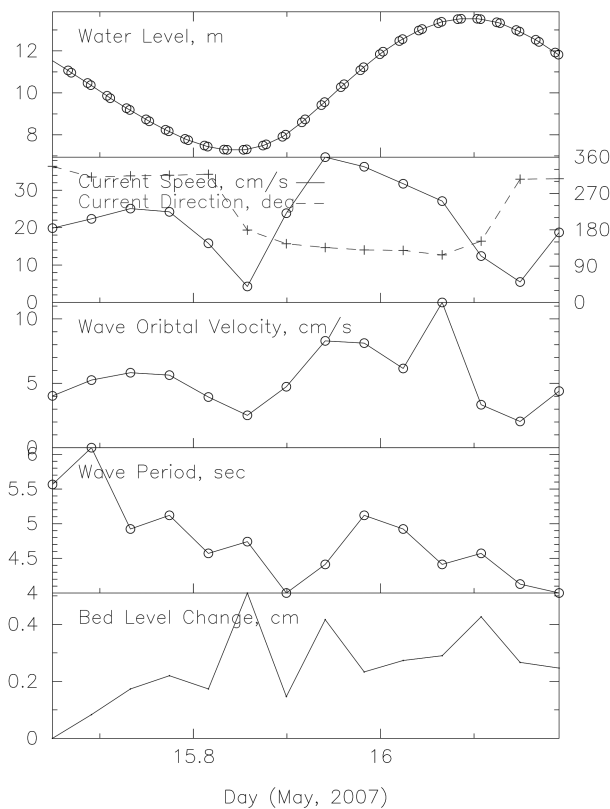


Fig. 2. Environmental conditions during the field experiment on May 15-16, 2007.

로 4호 방조제 전면의 복잡한 지형에 비해 단순한 지형을 이루고 있다(Fig. 1). 관측에 사용된 TISDOS는 해저와 탁도를 측정하는 CTR(Current/Turbidity Recorder), 수심과 해저면 변화를 측정하는 PBR(Pressure/Bed-level Recorder),

Table 1. Size fraction of bed sediment

Sediment size		Percentage
ϕ	Millimeter	
<1.5	>0.35	7.45
1.5-2.0	0.35-0.25	11.23
2.0-2.5	0.25-0.177	7.71
2.5-3.0	0.177-0.125	12.95
3.0-3.5	0.125-0.088	28.55
3.5-4.0	0.088-0.063	22.58
4.0-4.5	0.063-0.044	6.88
4.5-5.0	0.044-0.031	1.67
>5.5	0.031-0.016	0.99

ADV, Data logger 및 계류프레임으로 구성되어 있다. TISDOS 관측자료 가운데 본 연구에 사용된 자료는 해저면으로부터 38 cm 높이에서 ADV로 관측한 유속 및 해저면으로부터 20과 30 cm 높이에서 OBS로 관측한 부유 퇴적물농도이다.

관측 기간 동안의 TISDOS로 관측한 조석, 조류, 파랑, 그리고 해저면 변동을 Fig. 2에 나타냈다. 사리에 해당하는 2007년 5월 15-16일의 조차는 약 6.5 m에 달하여, 수심은 7-13.5m에 달한다. 해저면으로 약 30 cm 높이에서 관측된 조류는 간조에 약 5 cm/s, 창조에 약 40 cm/s, 그리고 낙조에 약 25 cm/s의 유속을 보인다. Fig. 2의 유황 그림은 낙조시 북서향, 창조시 남동향을 보이고 있다. 파랑은 주기가 5-7초이고 궤도속도가 3-10 cm/s로 나타나고 있으며, 전반적으로 파랑에너지는 낮게 나타나고 있다. TISDOS를 계류할 당시 TISDOS 하부 표층에서 얻은 퇴

적물 시료를 분석한 입도자료는 Table 1에 나타냈다. 퇴적물 샘플의 평균입도는 $3.02\phi (=0.123 \text{ mm})$ 이고 표준편차는 3.3으로 분류가 불량하다. Table 1에 나타낸 입도분석 자료는 퇴적물확산모델의 입력 값으로 사용하였다.

4. 결 과

마찰속도 산정

식 (4)에 주어진 선형와류점성모델을 규정하려면, 마찰속도 u^* 를 알아야 한다. 마찰속도를 구하기 위하여 두 가지 방법을 사용하였다 첫째는, 파랑-해류 상호작용을 이용하여 마찰속도를 산정하는 것이다. 파랑-해류상호작용 모델은 해저 근처의 한 지점에서 측정된 유속과 파랑 및 거칠기 요소에 대한 정보를 가지고 마찰속도와 유효거칠기를 예측하여 파랑경계층 상부의 유속 프로파일을 산정하는데 사용된다. 본 논문에서는 GMG(Grant and Madsen 1986; Glenn and Grant 1987) 파랑-해류상호작용모델을 사용하는데, 이 모델은 식 (4)에 주어진 선형와류점성모델을 사용하여 분석해를 갖는다는 장점이 있다. 이 모델은 또한 해저경계층 하부의 파랑과 해류의 상호작용에 기인한 마찰속도(u^*_{cw})를 제공한다. GMG 모델을 적용하는데 있어서 총거칠기요소는 Xu and Wright(1995)를 따라 입자 거칠기(grain roughness), 미세지형 거칠기(bedform roughness), 그리고 퇴적물이동 거칠기(movable bed roughness)의 합으로 산정하였으며, 이에 대한 자세한 기술은 Lee *et al.*(2002)에 주어졌다. GMG모델을 검증하는 마찰속도는 ADV관측자료를 이용하는 총운동에너지방법을 통하여 얻었다. 총운동에너지, E 는 다음과 같이 표현된다.

$$E = (u' + v' + w')/2 \tag{7}$$

여기에서 u' , v' 와 w' 은 각각 수평, 수평횡단 및 수직 방향의 난류를 나타낸다. 총운동에너지방법은 마찰속도와 총운동에너지 사이에 존재하는 $u^* = C_1 E$ 라는 관계를 이용하여 마찰속도를 구한다. C_1 은 0.19로 알려져 있다(Kim *et al.* 2000). 8 Hz로 관측한 ADV 유속 자료에서 난류는 0.3 Hz 하이패스 필터를 사용하여 얻었으며, 이 자료를 식 (7)에 적용하여 마찰속도를 구하였다.

Fig. 3(a)는 총운동에너지방법과 GMG모델로 얻은 u^*_{c} 의 시계열자료를 나타냈고, Fig. 3(b)는 이들 자료의 일대일 대응을 나타냈다. 이 두 결과의 오차백분율[$100 * (u^*_{GMG_c} - u^*_{TKE})/u^*_{TKE}$]은 13%로 양호한 일치를 보이고 있다. GMG모델로 얻은 u^*_{cw} 와 표면마찰속도(u^*_{sf})를 Fig. 3(a)에 나타냈다. u^*_{cw} 는 파랑과 해류의 상호작용에 기인하므로, u^*_{c} 보다 높게 나타나고 있지만, 관측기간 동안 파랑의 세기가 작으므로 현저한 차이는 보이지 않고 있다. 해저면의 퇴적물이 느끼는 표면마찰속도는 퇴적물의 재부유

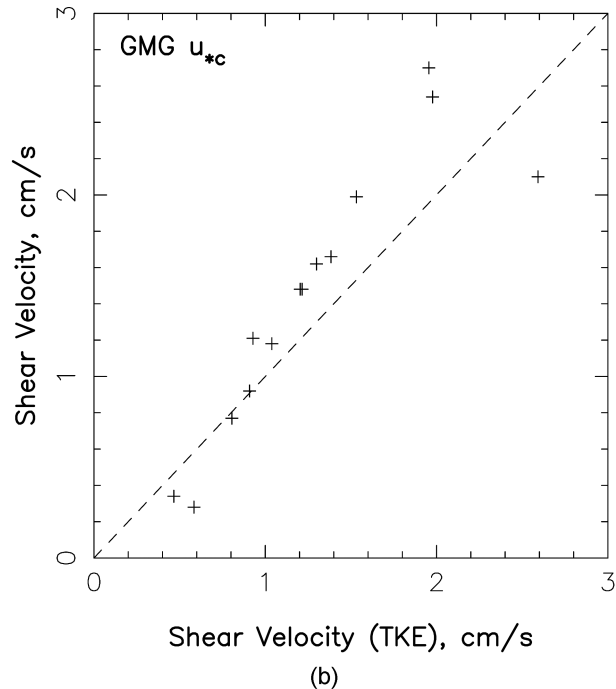
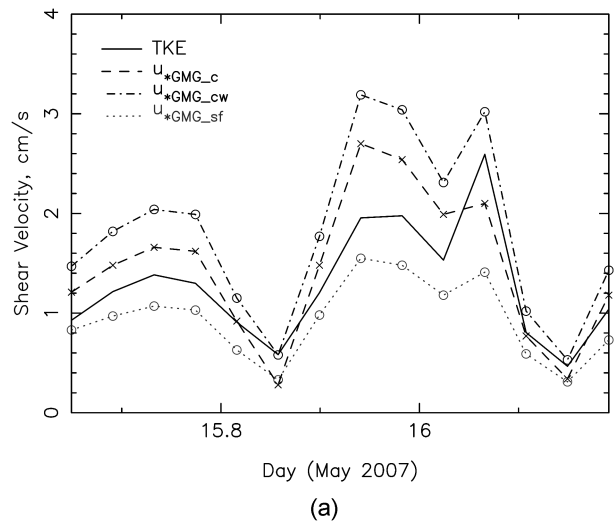


Fig. 3. (a) Time-series of shear velocity; u^*_{TKE} - solid; $u^*_{GMG_c}$ - dash; $u^*_{GMG_{cw}}$ - dot-dash; $u^*_{GMG_{sf}}$ - dot; (b) One-to-one relationship between u^*_{TKE} and $u^*_{GMG_c}$.

를 결정하는 계수이다. 관측기간 동안 표면마찰속도가 평균입경에 대한 침강속도($w_s=0.84 \text{ cm/s}$)보다 크므로 퇴적물부유가 발생한다는 것을 알 수 있다.

퇴적물 재부유 및 확산

식 (5)에 제시한 2층 Rouse공식에 단일평균입경을 고려한 전형적인 부유퇴적물농도 프로파일은 Fig. 4에 제시하였다. 같은 시간(5월 16일 04:35분)에 해저면에서 20과 30 cm 높이에서 관측한 부유퇴적물 농도 또한 비교를 위

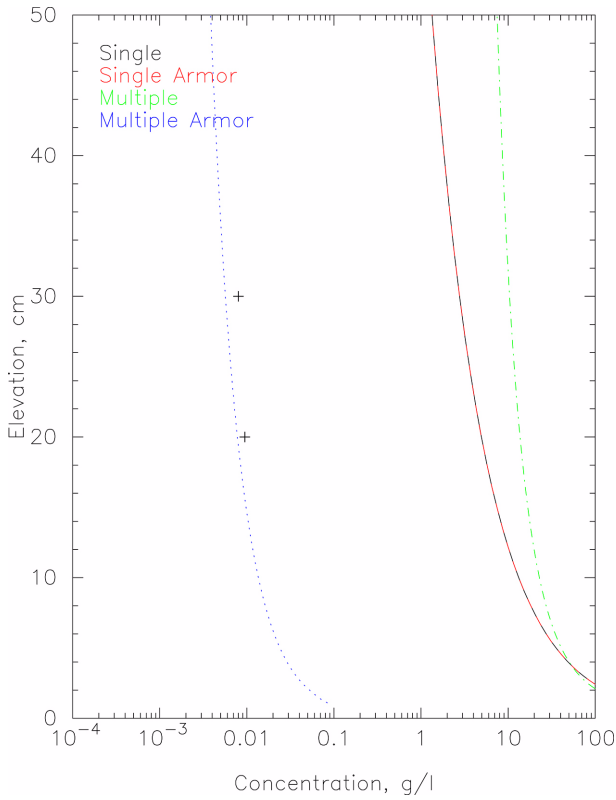


Fig. 4. Observed and modeled sediment concentration profiles.

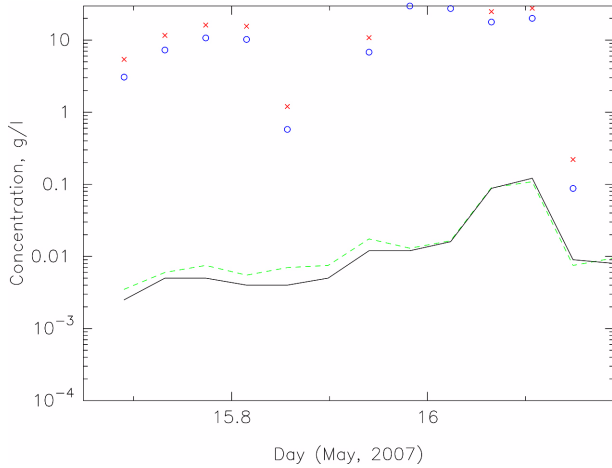


Fig. 5. Time series of observed and model concentration at 20 and 30 cm above the bed (ab hereafter) for the case of single grain size. OBS 20 cm - dotted line; OBS 30 cm - solid line; Model 20 cm - cross; model 30 cm - circle.

하여 Fig. 4에 나타냈다. 단일평균입경을 고려한 부유퇴적물 농도 시계열 자료는 관측농도에 비하여 O(2-3) 정도 과대평가되었으며, 이는 관측기간에 걸쳐 유사하게 나타나고 있다(Fig. 5). 다중입경을 사용하여 얻은 부유퇴적물 농도 프로파일의 전형적인 예는 Fig. 4에 비교를 위하여

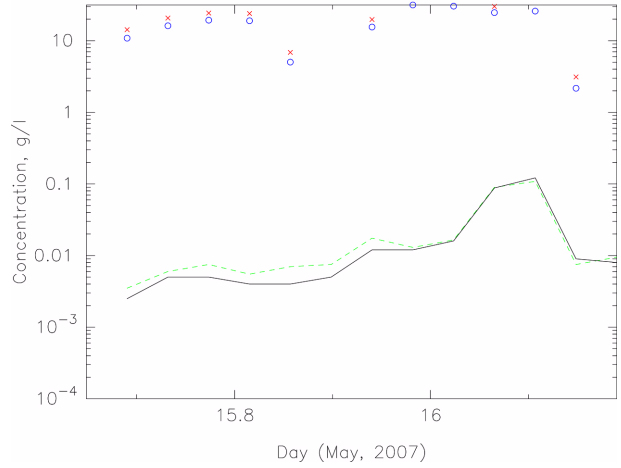


Fig. 6. Time series of observed and model concentration at 20 and 30 cm ab for the case of multiple grain sizes. OBS 20 cm - dotted line; OBS 30 cm - solid line; Model 20 cm - cross; model 30 cm - circle.

제시하였으며, Fig. 6에는 관측기간 동안 OBS 관측지점(해저면에서 20과 30 cm 높이)의 퇴적물농도 시계열 자료를 나타냈다. 여기에서 다중입경이란 Table 1에서 실트와 점토를 하나의 입경으로 고려한 7개 입경을 의미한다. 다중입경의 경우에도 단일평균입경과 마찬가지로 모델의 부유퇴적물 농도는 관측값에 비해 O(2-3) 정도 과대평가되었다.

이상의 결과에서 단일입경이건 다중입경이건 모델값이 과대평가되고 있으므로, bed armoring을 고려하였다. Bed armoring은 각 입경에서 부유한 퇴적물의 양이 해저면에서 유용한 퇴적물 비율을 넘지 않도록 조절하는 것이다. 즉, 식 (5)에 의하여 예측된 각 등급의 퇴적물 농도 합은 해저면의 혼합깊이(mixing depth) 위에서 각 입경별로 유용한 퇴적물의 합과 비교한다. 혼합깊이는 특정 해양환경에 침식 가능한 최대 깊이로 정의되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_m = q_{bl}T/(C_b\lambda) + \delta_b \tag{8}$$

여기에서 δ_m 은 혼합깊이, q_{bl} 은 밀집운반량, $C_b \approx 0.65$ 는 volume concentration, λ 는 연흔 파장, 그리고 T 는 파랑의 주기이다. δ_b 는 배경혼합깊이(background mixing depth)이며, 1 mm로 주어진다(Wiberg *et al.* 1994). 배경혼합깊이는 유속이 너무 약해서 밀집 이동이 발생하지 않지만 미세 퇴적물이 퇴적층에서 침식될 경우에 필요하다. 밀집운반량은 Meyer-Peter and Müller(1948) 공식을 이용하여 계산하였다. 만약 부유퇴적물의 양이 해저면에서 유용한 퇴적물의 양보다 많으면, 그 입경등급에 대한 표준농도를 해저면에서 유용한 양보다 넘지 않도록 조절한다. Fig. 4

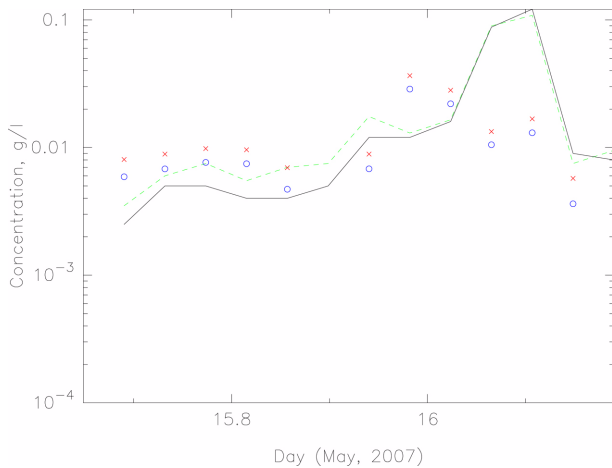


Fig. 7. Time series of observed and model concentration at 20 and 30 cm ab for the case of multiple grain sizes with bed armoring. OBS 20 cm - dotted line; OBS 30 cm - solid line; Model 20 cmm - cross; model 30 cm - circle.

에 단일입경과 다중입경에 bed armoring을 고려하여 얻은 부유퇴적물 농도 프로파일을 나타냈으며, Fig. 7은 다중입경에 bed armoring을 고려한 부유퇴적물 농도의 시계열자료를 나타냈다. Bed armoring을 포함한 모델 결과는 관측값과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

5. 토론 및 결론

3차원 퇴적물이동모델 개발의 일환으로 1D퇴적물 재부유 및 확산 모델을 새만금 4호방조제 전면 약 10 m 수심에서 관측한 현장자료로 검증하였다. 1차원 부유퇴적물 농도를 예측하는데 중요한 요소인 해저경계층 마찰속도 산정은 GMG모델을 이용하였으며 모델결과의 검증은 ADV 자료를 이용하여 산정한 마찰속도를 비교함으로써 이루어졌다. GMG모델값과 산정값의 오차백분율은 13%로 양호한 일치를 보여주었다.

부유퇴적물농도는 단일입경, 다중입경 및 bed armoring을 고려하고 해저면 표준농도 및 2층 Rouse공식을 사용하여 예측하였으며, 그 결과는 OBS로 해저면 20과 30 cm 높이에서 관측한 부유퇴적물농도와 비교하였다. Bed armoring을 고려하지 않았을 때에는 단일입경과 다중입경을 적용한 모델 결과는 모두 관측치보다 O(2-3) 정도 과대평가되었다. 이는 해저면에서 가용한 퇴적물의 양보다 부유한 퇴적물의 양이 높게 나타나는 것에 기인한다. 이러한 현상은 입경이 미세해질수록 강하게 나타나는데, 이는 입자의 침강속도와 관련된 다음과 같은 두 가지 이유로 발생한다. 첫째, 미세한 입경의 낮은 침강속도는 식 (5)의 Rouse 계수($w_s/\sqrt{Ku^*}$)의 값을 감소시키는 것과 관련되어 있

다. 즉, 작은 Rouse계수는 해저면의 퇴적물이 수층으로 쉽게 확산되는 것을 의미한다. 해저면에서 공급되는 퇴적물 양에 제한이 없다면, 점토와 같은 작은 입자의 경우에는 균일한 수직농도분포를 갖게 된다. 결국에는 해저면에서 주어진 전단응력에 침식 가능한 퇴적물보다 많은 양의 퇴적물이 부유하는 과대평가가 이루어진다. 둘째는 작은 입경(혹은 침강속도)이 식 (6)의 표준농도를 증가시키는 효과와 관련되어 있다. 작은 입경의 경우 실제 해저면에 주어진 가용한 퇴적물 보다 많은 표준농도가 계산된다. 이러한 두 가지 이유로 인하여 부유퇴적물의 양은 해저면에서 주어진 전단응력에 가용한 퇴적물의 양 보다 높게 나타난다(Wiberg *et al.* 1994; Lee *et al.* 2002). 그러므로, bed armoring은 주어진 전단응력에 재부유할 수 있는 혼합깊이 내의 퇴적물의 양을 산정하고, 이 퇴적물의 양을 부유한 퇴적물의 양과 비교하여 조절함으로써 부유퇴적물의 양을 과대평가하게 하는 미세퇴적물의 양을 감소시킬 수 있다. Fig. 4와 Fig. 7은 bed armoring을 고려한 모델 결과가 관측치와 일치하고 있는 것을 잘 나타내고 있다. 그러나, bed armoring은 단일 입경의 경우에 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 미세한 입자들이 여러 등급에서 나타나는 누적효과가 단일입경의 경우에는 적기 때문일 것이다.

이상의 결과는 1D 퇴적물 재부유 및 확산모델이 새만금 해역에서 관측한 부유퇴적물 농도를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 보여주었다. 또한, 부유퇴적물농도의 예측은 표준농도의 정확한 예측이 가장 중요한 요소이며, 다중입경과 bed armoring도 중요한 요소임이 밝혀졌다. 특히, 미세입자가 소량으로 존재할 경우에는 다중입경과 bed armoring은 미세입자의 과대평가를 제어할 수 있는 효과적인 방법이다. 이러한 정확도를 갖는 1차원 퇴적물 재부유 및 확산모델을 3차원 퇴적물이동 모델에 적용함으로써 3차원 퇴적물이동모델의 결과 및 지형변화 예측에 정확도를 높일 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 국토해양부과제 “새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(해저지형 및 예측모델링분야)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 이희준, 조형래, 김민지. 2006. 새만금 방조제 축조에 따른 지형 및 입도특성의 변화. *Ocean and Polar Res.*, **28**(3), 293-303.
- Drake, D.E., D.A. Cacchione, and W.D. Grant. 1992. Shear stress and bed roughness estimates for combined wave

- and current flows over a rippled bed. *J. Geophys. Res.*, **97**(C2), 2319-2326.
- Drake, D.E. and D.A. Cacchione. 1989. Estimates of the suspended sediment reference concentration (Ca) and resuspension coefficient (o) from near-bottom observations on the California shelf. *Cont. Shelf Res.*, **9**, 51-64.
- Glenn, S.M. and W.D. Grant. 1987. A suspended sediment correction for combined wave and current flows. *J. Geophys. Res.*, **92**, 8244-8246.
- Grant, W.D. and O.S. Madsen. 1982. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *J. Geophys. Res.*, **87**, 469-481.
- Grant, W.D. and O.S. Madsen. 1986. The continental shelf boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **18**, 265-305.
- Hill, P.S., A.R.M. Nowell, and P.A. Jumars. 1988. Flume evaluation of the relationship between suspended sediment concentration and excess boundary shear stress. *J. Geophys. Res.*, **93**, 12499-12509.
- Kim, S.C., C.T. Friedrichs, J.P.-Y. Maa, and L.D. Wright. 2000. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from Acoustic Doppler Velocimeter data. *J. Hydraulic Eng.*, **126**, 399-406.
- Lee, C., D.J. Schwab, and N. Hawley. 2005. Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan. *J. Geophys. Res.*, **110**, 2004JC002326.
- Lee, G., C.T. Friedrichs, and C.E. Vincent. 2002. Examination of diffusion versus advection dominated sediment suspension on the inner shelf under storm and swell conditions, Duck, North Carolina. *J. Geophys. Res.*, **107**, 2001JC000918.
- Lee, G., W.A. Dade, C.T. Friedrichs, and C.E. Vincent. 2004. Examination of reference concentration under waves and currents on the inner shelf. *J. Geophys. Res.*, **109**, 10.1029/2002JC001707.
- Lee, S., H.-J. Lie, K.-M. Song, C.-H. Cho, and E.P. Lim. 2008. Tidal modification and its effect on sluice-gate outflow after completion of the Saemangeum dike. South Korea, *J. Oceanog.*, **64**(5), 763-776.
- Madsen, O.S. and P.N. Wikramanayake. 1991. Simple models for turbulent wave and current bottom boundary layer flow. Contract Report, DRP-91-1, US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg. 150 p.
- McLean, S.R. 1992. On the calculation of suspended load for noncohesive sediments. *J. Geophys. Res.*, **97**, 5759-5770.
- Meyer-Peter, E. and R. Müller. 1948. Formulas for bedload transport. p.39-64. In. *Proc. 2nd meeting Int. Assoc. of hydraulic structures research*, Stockholm, Sweden.
- Nielsen, P. 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. World Scientific, River Edge. 324 p.
- Styles, R. and S.M. Glenn. 2000. Modeling stratified wave and current bottom boundary layers on the continental shelf. *J. Geophys. Res.*, **105**, 24119-24139.
- Traykovski, P., J.D. Irish, A. Hay, and J.F. Lynch. 1999. Geometry, migration, and evolution of wave orbital ripples at LEO-15. *J. Geophys. Res.*, **104**, 1505-1524.
- Vincent, E.C. and A. Downing. 1994. Variability of suspended sand concentrations, transport and eddy diffusivity under non-breaking waves on the shoreface. *Cont. Shelf Res.*, **14**, 223-250.
- Vincent, C.E. and M.O. Green. 1990. Field measurements of the suspended sand concentration profiles and fluxes and of the resuspension coefficient o over a rippled bed. *J. Geophys. Res.*, **95**, 11590-11601.
- Wamer, J.C., C.R. Sherwood, R.P. Signell, C.K. Harris, and H.G. Arango. 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Comp. Geoscience*, **34**, 1284-1306.
- Wiberg, P. 1995. A theoretical investigation of boundary layer flow and bottom shear stress for smooth, transitional, and rough flow under waves. *J. Geophys. Res.*, **100**, 22667-22679.
- Wiberg, P. and C.K. Harris. 1994. Ripple geometry in wave-dominated environments. *J. Geophys. Res.*, **99**, 775-789.
- Wiberg, P.L., D.E. Drake, and D.A. Cacchione. 1994. Sediment suspension and bed armoring during high bottom stress events on the northern California inner continental shelf: Measurements and predictions. *Cont. Shelf Res.*, **14**, 1191-1219.
- Xu, J.P. and L.D. Wright. 1995. Tests of bed roughness models using field data from the Middle Atlantic Bight. *Cont. Shelf Res.*, **15**, 1409-1434.

Received Oct. 20, 2008

Accepted Dec. 1, 2008