조류 비대칭성에 의한 점착성 유사의 이동량 수치연구

Numerical study on cohesive sediment flux by tidal asymmetry

손민우*, 김상욱**, 김재현***, 변지선****

Minwoo Son, Sang Ug Kim, Jae Hyun Kim, Ji-sun Byun

요 지

하구부에서의 점착성 유사의 이동량(유사량)은 조류의 비대칭성, 파랑, 하천 흐름, 조류 유속과 수위의 불일치성, 유사특성, 응집현상, 하상 침식율, 바닥지형 등 많은 인자의 영향을 받는다. 본 연구는 이들 인자들이 어떻게 영향을 주는지 살펴보기 위해 점착성 유사의 이동을 모의하는 1DV 모형을 이용하여 수치실험을 실시하고 그 결과를 분석하는 것이 목적이다. 점착성 유사의 실측자료가 부족한 실정과 현상에 대한 원인을 체계적으로 연구하는 방법을 참고하여 이상적인 조류조건을 가정하고 수치모형을 적용하였다. 점착성 유사의 특성을 고려하기 위해 응집현상이 고려되었고 가변적인 한계소류력이 적용되었다. 모의 결과를 통해서 조류의 한 주기 동안 이동하는 점착성 유사량은 가는 비점착성 유사의 이동량에 비해 조류 유속의 왜곡도에 영향을 덜 받을 수 있다는 결론이 도출되었다. 이러한 점은 가변적인 한계소류력에 기인하는 것으로 고려되며, 점착성 유사의 이동량을 연구하는 경우 가변적인 한계소류력이 고려되어야 한다는 점을 알 수 있다. 조류의 유속이 왜곡된 경우 하천으로부터 유하하는 유량이 크지 않은 경우 유사량의 방향이 조류 1 주기의 평균방향과 다를 수 있다는 결론 역시 도출된다. 조류의 수위와 유속 사이의 위상차가 유사량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 위상차가 무시되는 진행파 형태의 조류의 경우 큰 유사량을 나타내지만 약 90°의 위상차를 나타내는 정상파의 경우는 무시할 정도의 유사량이 계산되었다. 위상차가 하구부의 형태에 따라서 결정된다는 점을 생각할 때 자연적 변화, 인위적 공사 등에 따라 하구부의 형태적 변화가 발생하는 경우는 유사량의 변화 역시 고려되어야 한다는 점을 알 수 있다. 이상적인 조건에서 수행된 본 연구의 보다 객관적인 검증을 위해 Ems/Dollard 하구부에서 측정된 수위, 유속, 부유사 농도 자료와 비교하였다. 그 결과 본 연구의 이상적인 조건과 유사한 특성을 나타낸다는 점을 알 수 있었고 본 연구의 결과가 자연에서 나타나는 현상의 특성을 대변할 수 있을 것으로 유추된다.

핵심용어 : 점착성 유사, 유사량, 조류 비대칭성, 응집현상, 침식율, 1DV 유사이동 모형

1. 서론

하구역에서의 유사이동은 지형과 동수역학적 조건 등 여러 인자들의 복잡한 상호작용에 의해 발생하며 다양한 현상에 대한 연구가 수행되어왔다. 이 중 내륙 방향 또는 연안 방향으로의 유사이동을 발생시키는 인자에 대한 연구 역시 큰 중요성을 가진다. 굵은 재료가 우세한 사질 하구역의 특성에 비해 가는 재료가 우세한 점토질 하구역에서의 유사이동은 작은 침강속도, 응집현상 등에 의해 독특한 현상을 나타낸다. 본 연구는 점착성 유사의 이동을 계산하는 1차원수직모형(1 Dimensional Vertical Model, 1DV Model)을 이용하여 조류가 우세한 지역에서 발생할 수 있는 유사량(Flux)의 특징을 살펴보는 것이 목적이다. 이를 위하여 이상적 조건의 다양한 조류의 유속 및 수심변화를 가정하여 수치실험을 수행하고 결과를 분석한다.

* 정회원・충남대학교 토목공학과 조교수・E-mail : mson@cnu.ac.kr
** 정회원・강원대학교 토목공학과 조교수・E-mail : sukim70@kangwon.ac.kr
*** 정회원・충남대학교 토목공학과・E-mail : qnrpks88@cnu.ac.kr
**** 정회원・충남대학교 물리천문우주과학부・E-mail : popo3501@cnu.ac.kr

2. 점착성 유사의 이동 모형 개요

2.1 응집현상 모형화

점착성 유사의 응집현상을 고려하기 위해서 Son and Hsu(2009)가 개발한 Floc Growth Type Flocculation 모형이 이용되었다(식 1).

$$\frac{d}{t} = \frac{Gd}{\beta \ln \frac{D}{d} + 1} \left[\frac{ck'}{3\rho_s} d^{F-3} D^{-F+4-\beta} - \frac{k'_B}{3} \left(\frac{\mu G}{B_1} \right)^q d^{-p+2qF/3} D^{1-\beta+2q(3-F)/3(D-d)} \right] \quad (1)$$

식 1에서 D는 플럭(점착성 유사의 덩어리)의 평균 입경, d는 일차입도의 크기 는 일차입자의 밀도, c는 플럭(유사)의 질량농도, F는 플럭의 크기에 따라 가변적인 프랙탈 차원, G는 난류의 강도를 나타내는 지표인 소산매개변수(Dissipation Parameter 또는 Shear Rate)이다. 그 외의 기호는 실험적 상수를 의미한다. 이 모형은 다양한 입경을 가진 플럭의 평균적인 입경을 계산하는 것으로 시간에 따른 플럭 크기의 변화를 합리적으로 모의할 수 있음이 실험값과의 비교를 통해서 도출되었다.

2.2 유사 이동 모형화

유사의 이동을 모의하기 위해 필요한 흐름의 운동량 방정식, 농도의 시간변화를 나타내는 이송-확산 방정식, 난류확산을 고려하기 위한 k-ε 난류모형은 식 2, 3, 4에서 각각 나타난다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w(1-\phi_s)}\frac{\partial \tau_{xz}^w}{\partial z} + \frac{(s_s-1)\phi_s}{1-\phi_s} g \sin\alpha_s \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w(1-\phi_s)}\frac{\partial \tau_{yz}^w}{\partial z} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\phi_s \quad {}_s + \frac{\nu_t + \nu}{\sigma_c}\frac{\partial \phi_s}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$(1-\phi_f)\frac{\partial k}{\partial t} = \nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial (1-\phi_f)k}{\partial z} \right] - (1-\phi_f)\epsilon + (s_s-1) g \frac{\nu_t}{\sigma_c}\frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (4a)$$

$$(1-\phi_f)\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = C_{\epsilon 1}\frac{\epsilon}{k}\nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial (1-\phi_f)\epsilon}{\partial z} \right] - C_{\epsilon 2}\frac{\epsilon^2}{k}(1-\phi_f) + C_{\epsilon 3}\frac{\epsilon}{k}(s_s-1) g \frac{\nu_t}{\sigma_c}\frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (4b)$$

식 2에서 u와 v는 x와 y 방향 유속, 는 일차입자의 부피농도, $\tau^w = \rho_w(\nu+\nu_t)\partial u/\partial z)$는 유체의 응력이다. 식 3의 $\nu_t = C_\mu(1-\phi_f)k^2/\epsilon)$는 와점성계수이며 ϕ_f는 플럭의 부피농도로 응집현상에 의해 밀도가 변화하는 점착성 유사의 특성에 의해 ϕ_s와는 다른 값을 가진다. W_s는 플럭의 침강속도이다. 식 4에서의 k와 ϵ은 각각 난류운동에너지와 난류소산율이다. 이상의 모형에 대한 보다 자

세한 설명은 Son and Hsu (2011a)에서 보여진다.

3. 모형의 적용 및 결과 분석

3.1 조류 유속 왜곡도의 영향

조류의 유속 왜곡도(Skewness)에 따른 영향을 살펴보기 위해 다양한 왜곡도의 유속을 적용하여 단위시간 단위폭당 유사량($= \frac{1}{\quad}\int_0^h c \bullet udzdt$)을 계산하였다(표 1 참고). 그림 1은 조류 유속 왜곡도와 조류 1주기당 평균된 유사량의 관계를 보여준다. 그림 중 원은 가변적인 한계소류력 조건과 응집현상이 고려된 경우(점착성 유사의 조건), 별표는 응집현상이 무시된 조건(제한적 점착성 유사의 조건), 마름모는 응집현상과 가변적 한계소류력이 모두 무시된 조건(가는 비점착성 유상의 조건)의 결과를 각각 보여준다. 그림 1을 통해 점착성 유사의 성질이 강한 경우가 조류의 왜곡도에 더욱 민감한 결과를 보이며 매우 가는 비점착성 유사의 경우는 왜곡도에 매우 선형적인 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 모든 경우의 유사량에서 나타나듯이 유사가 진행되는 방향은 조류의 왜곡도와 동일하다는 사실도 확인된다. 그림 2는 왜곡도가 0.35인 조건에서 ($U_{stokes} = 0.5\cos(2\pi t/T) + 0.862\cos(4\pi t/T) + \text{mean current}$) 하천으로부터의 주흐름 조건과 q의 상관관계를 나타낸다. 이로부터 q가 하천 주흐름과 선형적인 관계를 가지고 있다는 사실을 알 수 있으며 조류의 왜곡도와 함께 q에 큰 영향을 준다는 점이 확인된다.

3.2 조류 유속과 수위 위상차의 영향

조류의 유속 및 수위가 가지는 위상차가 점착성 유사의 이동량에 미치는 영향을 살펴보기 위해 진행파, 정상파, 조합파 형태의 조류 조건이 가정되어(그림 3) 수치실험을 수행하고 결과를 표 2에서 정리하였다. 진행파와 조합파 형태의 조류조건에서 고려할만한 수준의 유사량이 발생한 것에 비해 정상파 형태의 경우는 유사량의 0에 가까운 값을 나타내었다. 이를 통해서 자연적 또는 인위적 조건에 의해 하구역의 형태적 변화가 발생하여 조류의 조건이 진행파에서 정상파 형태로 바뀌게 되는 경우는 연안 쪽으로 유출되는 유사의 감소를, 정상파에서 진행파로 변화하는 경우는 연안 방향 유사량의 증가를 고려하는 과정이 필요하다는 사실을 확인하였다.

4. 결론

본 연구를 통해서 하구역 조류가 우세한 조건에서의 점착성 유사의 이동량은 유사한 크기 비점착성 유사의 이동량과 다른 양상을 나타낼 수 있다는 사실이 수치모의 결과로 도출되었다. 조류의 유속과 수위의 위상차는 하구역의 평면형 특성에 의해 나타난다. 하구역이 상류로 이동하며 급격히 하폭이 감소하는 지역에서 주로 나타나는 정상파 형태의 조류조건에서는 연안으로 유출되는 유사량이 크게 감소한다는 수치모의 결과를 고려할 때 하구역의 형태적 변화를 야기할 수 있는 방파제 공사 등이 수행될 경우 변화하는 유사특성에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 조류의 특성 뿐 아니라 하천에서 유출되는 한 방향 주흐름 역시 하구역 유사의 크기와 방향을 결정하는 매우 중요한 인자라는 사실도 나타났다. 본 연구의 보다 자세한 내용은 Son and Hsu (2011b)에서 나타난다.

감 사 의 글

본 연구는 한국연구재단 “점착성 유사의 이동 모형 개발”과 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원

(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Son, M., and Hsu, T.-J. (2009). "The effect of variable yield strength and variable fractal dimension on flocculation of cohesive sediment." Water Res., Vol. 43(14), pp. 3582-3592.
2. Son, M., and Hsu, T.-J. (2011a). "The effects of flocculation and bed erodibility on modeling cohesive sediment resuspension." *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1029/2010JC006352.
3. Son, M., Hsu, T.-J. (2011b). "Idealized Study on Cohesive Sediment Flux by Tidal Asymmetry." *Environ. Fluid Mech.*, DOI:10.1007/s10652-010-9193-9.

표 1. 적용 유속 조건 및 유사량

Skewness	q(g/s/m)	Depth-Averaged Velocity(T: 12 hours)
0.00	0.000	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$
0.05	0.078	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.0118\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$
0.10	0.166	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.0118\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$
0.20	0.335	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.0478\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$
0.30	0.506	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.0730\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$
0.35	0.592	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.0862\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$
0.40	0.692	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.1000\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$
0.50	0.885	$U_{stokes} = 0.5\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 0.1300\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right)$

표 2. 조류 유속과 수위의 위상차에 따른 유사량

Wave Type	Progressive	Standing	Combination
Phase Difference	0°	90°	45°
q (g/s/m)	-0.3852	0.0086	-0.1856

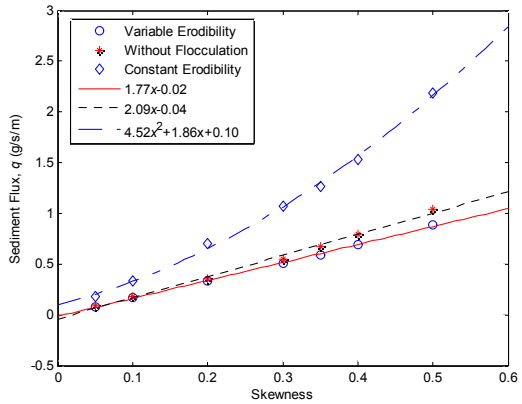

그림 1. 조류의 왜곡도와 유사량(*q*)의 관계

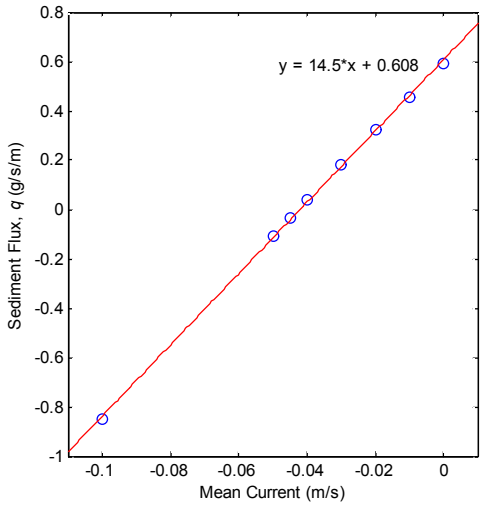

그림 2. 하천 주흐름과 유사량(*q*)의 관계

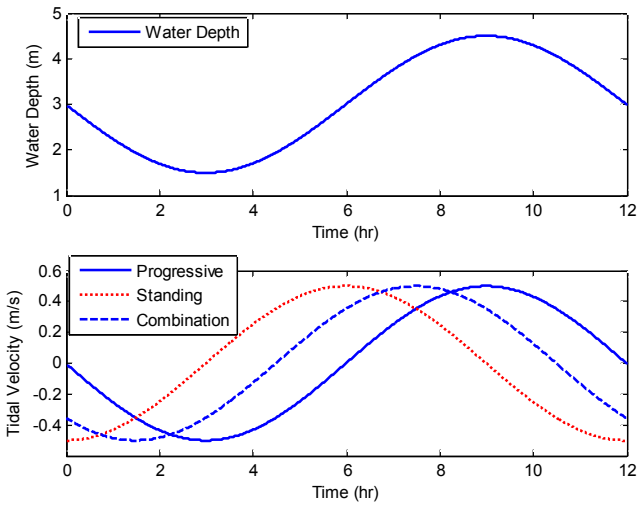

그림 3. 수치실험을 위해 이용된 조류 유속과 수위의 위상차