

점착성 및 비점착성 유사의 밀도성층화에 따른 난류 영향에 대한 수치연구

손민우* · 이관홍 · 이두한¹

(인하대학교 자연과학대학, ¹한국건설기술연구원)

A Numerical Study on Turbulent Damping Effect due to Density Stratification of Cohesive and Noncohesive Sediment. Son, Minwoo*, Guan-hong Lee and Du Han Lee¹ (College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea; ¹Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea)

This numerical study aims to investigate the effect of cohesive sediment on turbulence structure due to density stratification. The transport model for cohesive sediment incorporated with flocculation model has been selected and calculates the concentration, fluid momentum, and turbulence. From the model results, it is known that suspension of sediment decreases turbulence intensity. It is also found that cohesive sediment has a relatively weak effect on turbulence damping compared to noncohesive sediment. The low settling velocity and more suspension of cohesive sediment are considered to be mechanisms of this behavior. Richardson number determined with results of this study quantitatively shows that cohesive sediment causes less stable density stratification condition and, as a result, the turbulence structure is less damped compared to the case of noncohesive sediment.

Key words : cohesive sediment, flocculation model, turbulence, density stratification, richardson number

서 론

흔히 진흙이라고 불리는 점착성 유사(Cohesive Sediment)는 지표면의 거의 모든 곳에 존재한다(Winterwerp and van Kesteren, 2004). 따라서 유사의 이동뿐 아니라 하천, 호소 및 연안지역 등 다양한 환경에서 유수동역학적 측면에 여러 영향을 준다. 점착성 유사는 생화학적 점착력에 의해 작은 알갱이들이 덩어리(Aggregate)를 이루어 부유하는 것이 일반적이다. 부유된 점착성 유사의 덩어리는 플럭(Floc)이라고 불리며 여러 영향에 의해 지속적으로 크기 및 밀도가 변화한다. 이 과정은 응집현상(Flocculation Process)으로 이해되며 난류가 가장 큰 메커

니즘이라는 것이 여러 연구에 의해 알려졌다(예: O'Melia, 1980; McCave, 1984; Stolzenbach and Elimelech, 1994; van Leussen, 1994). 즉 난류에 의해 입자들이 충돌하며 서로 붙게되어 플럭의 크기를 증가시키고, 다시 난류전단력에 의해 플럭이 파괴되어 크기가 감소하는 과정이 서로 경쟁하며 발생하는 것이 점착성 유사의 응집현상인 것이다. 앞서 언급된 것과 같이 응집현상을 통해 플럭은 크기와 밀도의 변화를 경험하며, 그 결과, 침강속도의 변화가 발생하게 된다. 유사의 부유 및 퇴적, 이송 및 확산에 직접적인 영향을 미치는 침강속도의 변화는 모래 등과 같은 비점착성 유사를 비해 점착성 유사의 거동 특성을 복잡하게 만든다. 많은 연구들이 점착성 유사의 응집현상을 이해하기 위해 이루어졌다. 실험실 실험(예: Spicer

* Corresponding author: Tel: 032) 862-2120, Fax: 032) 862-5236, E-mail: minwooson@gmail.com

et al., 1998; Biggs and Lant, 2000; Maggi, 2007)을 통해 난류의 강도에 따른 플럭의 크기 변화율, 응집현상에 영향을 주는 요인들 등이 연구되었고 현장측정(예: Tsai and Hwang, 1995; Milligan, 1996)을 통해서는 실제 자연에 존재하는 플럭의 응집현상을 이해하고자 노력하였다. 실험 및 측정을 통한 관찰과 함께 응집현상을 이론적으로 모형화하는 연구도 이루어졌다. McAnally and Mehta (2000)와 Maggi *et al.* (2007) 등은 흔히 Population Balance Equation 모형이라 불리는 형태의 응집현상 모형을 제안하였다. 이 종류의 모형은 응집현상의 많은 메커니즘을 고려할 수 있고 입경분포를 계산할 수 있는 장점이 있는 반면 닫혀진 계에서 유사의 유입과 유출이 없는 조건에도 질량보존을 만족시키지 못하고 수치비용이 지나치게 큰 이유로 유사이동 모형과 결합되기 힘든 단점이 있다. 응집현상 모형의 또 다른 종류인 Floc Growth Type 모형은 Winterwerp (1998)에 의해 처음 제안되었다. 응집(Aggregation)과 파괴(Breakup 또는 Disaggregation)의 경쟁에 의해 플럭의 크기 변화가 발생한다는 간단한 개념에서 시작하여 Winterwerp (1998)은 두 개의 항을 가지는 상미분 방정식으로 응집현상을 모형화하였다. 이 모형은 유사이동 수치모형과 쉽게 결합될 수 있는 장점이 있는 반면 실제 자연현상과 일치하지 않는 가정을 이용한 단점이 있다. Son and Hsu (2008)은 Winterwerp (1998)이 가정한 고정적인 프랙탈 차원이 자연에 존재하는 플럭이 가지는 성질과 다르다는 연구결과(Khelifa and Hill, 2006)를 참고하여 새로운 Floc Growth Type 모형을 제안하였다. 하지만 실험실 실험과의 비교결과, 두 모형 모두 플럭의 시간적 크기변화를 잘 모사하지 못하였다. Son and Hsu (2009)는 이전의 두 모형이 사용한 플럭이 파괴되는 항복강도가 고정적이라는 가정이 자연현상과 잘 부합하지 않는다고 판단하고 플럭의 크기에 따라 가변적인 플럭 항복강도를 수학적으로 유도하고 이를 이용하여 Floc Growth Type 모형을 새롭게 제안하였다. 이 모형은 플럭의 평형크기 뿐 아니라 플럭의 시간적 크기변화까지 실험실 실험의 결과와 유사하게 계산하였다.

응집현상을 고려한 점착성 유사 이동 수치모형의 개발은 현재까지 많은 연구자에 의해 이루어지지는 않았다. 이전의 점착성 유사 이동에 관한 많은 수치연구들이 응집현상에 따른 점착성 유사의 크기 및 밀도의 변화를 고려하지 않고, 모래에 비해 작은 유사의 크기와 밀도만을 가정하여 이루어졌다(예: Hsu *et al.*, 2007). 그 이유는 수치모형과 결합이 가능할 정도로 간단하면서도 정확한 응집현상 모형의 개발이 활발히 이루어지지 않았던 점에 기인하는 것으로 판단된다. van der Ham and Winterwerp

(2001)은 Winterwerp (1998)이 제안한 응집현상 모형을 유사이동 수치모형과 결합하여 현장자료에 적용하였지만 응집현상이 고려되지 않은 모형에 비해 더 좋은 결과를 보여주지 못했다. Son and Hsu (2009)에 의해 개발된 Floc Growth Type 모형을 이용하여 Son and Hsu (2011)은 점착성 유사의 이동을 위한 수치모형을 개발하여, 네덜란드 Ems/Dollard 하구부에서 측정된 현장자료와 비교하였다. 기존의 응집현상 모형에 비해 정확도가 높은 Son and Hsu (2009)의 모형이 결합되었을 때 점착성 유사 수치모형은 응집 현상이 고려되지 않은 경우에 비해 Ems/Dollard 하구부에서 관측된 유사의 거동 특성을 보다 잘 모사하였다. Son and Hsu (2011)을 경우를 제외하고는 국내외의 연구에서 응집현상이 정량적으로 고려된 점착성 유사 이동 수치모형이 현장자료에 적용된 경우가 본 연구에서 조사되지 않았다. Krishnappan and Marsalek (2002)에 의해 저류지에서의 점착성 유사 이동이 응집현상에 대한 이해와 결합되어 이루어졌지만 이는 응집현상의 주요 메커니즘인 난류가 모형 자체에서 직접 계산되지 않고 실험실 자료에만 적용되어 현장 적용성에 대해서는 의문이 생긴다.

부유하는 유사의 존재가 흐름특성, 특히 난류에 주는 영향은 널리 알려진 현상이다. 특히 유사의 부유농도에 따른 밀도성층화(Density Stratification)는 온도 및 염도에 의해 발생하는 성층화와 함께 난류에 영향을 주는 가장 중요한 메커니즘 중 하나로 인식된다. Winterwerp (2001)은 1차원연직모형(1 Dimensional Vertical Model, 1DV Model)을 이용하여 점착성 유사에 의한 성층화를 연구하였다. 그 결과, 점착성 유사의 밀도성층화에 의해 난류 구조의 변화가 발생한다는 사실이 발견되었다. Hsu *et al.* (2007) 역시 1DV 모형을 이용하여 유사의 밀도성층화에 따른 난류의 영향을 연구하였다. 그 연구에서 유사에 의한 난류 감소효과(Damping Effect)는 다시 유사의 움직임에 영향을 준다는 결론이 도출되었다. 국내의 경우 양 등(2004), 박 등(2003)의 연구 등에서 밀도성층화에 따른 흐름의 영향을 고찰하였지만 난류에 대한 영향은 분석되지 않았으며 유사에 의한 밀도성층화가 아닌 염수와 온도차에 의한 밀도성층화를 연구한 점에서 본 연구의 목적과 정확히 부합되지는 않는다.

위에서 언급된 것과 같이 Winterwerp (2001)과 Hsu *et al.* (2007)의 연구에서 점착성 유사 밀도성층화를 수치해석적으로 분석되었지만 두 모형 모두에서 응집현상이 고려되지 않았다. 이 경우, 연직 분포에 따라 달라지는 난류에 의한 점착성 유사의 영향이 고려되지 않는 문제점이 있다. 따라서 본 연구는 응집현상이 고려되는 수치모형을

이용하여 점착성 유사 밀도성층화의 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 점착성 유사의 경우 압밀효과 등이 실험실에서 재현되기 어려운 점 등의 기술적인 이유로 실험실 실험 자료가 풍부하지 않다. 그로 인해 Son and Hsu (2010), Xu *et al.* (2010)의 연구와 같이 이상적인 조건을 가정하고 수치해석만으로 물리적 현상을 이해하려는 연구가 빈번하다. 본 연구에서도 이상적인 조건을 이용하여 수치해석을 수행하고, 그 결과만을 분석한다. 단 점착성 유사의 성질과 관련된 매개변수들은 기존의 연구에서 검증된 값을 이용한다.

재료 및 방법

본 연구에서는 Son and Hsu (2009)에 의해 제안된 응집 현상 모형과 Son and Hsu (2011)에 의해 제안된 점착성 유사이동 모형이 이용한 수치모의를 통해 이루어진다. Son and Hsu (2009)와 Son and Hsu (2011)에서 각 모형에 대한 상세한 설명이 제시되므로 본 논문에서는 지배방정식에 대한 간략한 소개만이 이루어진다.

1. 응집현상 모형

Son and Hsu (2009)는 가변적인 프랙탈 차원과 가변적인 플럭의 항복강도를 이용하여 Floc Growth Type 모형을 제안하였다(Eq. (1)).

$$\frac{dD}{dt} = \frac{Gd^\beta}{D} \left[\frac{ck'_A}{3\rho_s} d^{F-3} D^{-F+4-\beta} - \frac{k'_B}{3} \left(\frac{\mu G}{B_1} \right)^q d^{-p+2qF/3} D^{1-\beta+2q(3-F)/3(D-d)^q} \right] \quad (1)$$

여기서 D 는 플럭의 크기, d 는 일차입자(Primary Particle)의 크기, ρ_s 는 일차입자의 밀도, c 는 유사(플럭)의 질량농도, μ 는 물의 점성계수이다. G 는 소산매개변수(Dissipation Parameter 또는 Shear Rate)로 난류의 강도를 나타내는 지표로 이용된다. F 는 D 에 따라 값이 변화하는 프랙탈 차원이며 Eq. (2)에 의해 결정된다. 이외의 기호는 실험상수를 나타낸다. Eq. (1)의 우변 첫 번째 항은 플럭 및 일차입자의 충돌에 의해 발생하는 응집현상으로 플럭 크기의 증가를 의미하며 두 번째 항은 난류진단력에 의해 야기되는 파괴로 플럭의 크기를 감소시키는 항이다.

$$F = \alpha \left(\frac{D}{d} \right)^\beta \quad (2)$$

프랙탈 차원의 나타내는 식에서 $\alpha(=3)$ 와 $\beta(\propto \log_{10}$

(D/d))는 플럭의 특성을 나타내는 상수이며 이들의 보정을 통해 D 가 d 와 같은 경우는 $F=3$, 플럭이 기준이 되는 크기에 도달하면 $F=2$ 의 프랙탈 차원을 가지게 한다. 보다 자세한 설명은 Khelifa and Hill (2006)에서 제시된다.

2. 점착성 유사 이동 모형

흐름의 운동량은 Eq. (3)으로 풀이된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w(1-\phi_s)} \frac{\partial \tau_{xz}^w}{\partial z} + \frac{(s_s-1)\phi_s}{1-\phi_s} g \sin \alpha_s \quad (3a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w(1-\phi_s)} \frac{\partial \tau_{yz}^w}{\partial z} \quad (3b)$$

Eq. (3)에서 u 와 v 는 주흐름 및 주흐름에 직교하는 유속, p 는 압력, ρ_w 는 물의 밀도, s_s 는 일차입자의 수중중량, g 는 중력가속도, α_s 는 하상경사, ϕ_s 는 일차입자의 부피농도(Volumetric Concentration)이다. τ^w 는 유체의 응력으로 Eq. (4)에 의해 계산된다. 좌표축에 관한 설명은 Fig. 1에서 보여진다.

$$\tau^w (= \rho_w (v + v_t) \partial u / \partial z) \quad (4)$$

여기서 v 는 동점성 계수이며 v_t 는 와점성 계수(Eddy Viscosity)로 $k-\epsilon$ closure (Eq. (5))에 의해 계산된다.

$$v_t = C_\mu (1 - \phi_f) k^2 / \epsilon \quad (5)$$

C_μ 는 수치상수이며 ϕ_f 는 플럭의 부피농도이다. 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy, TKE)를 의미하는 $k(=\sqrt{2 \times TKE})$ 와 난류소산율(Turbulent Dissipation

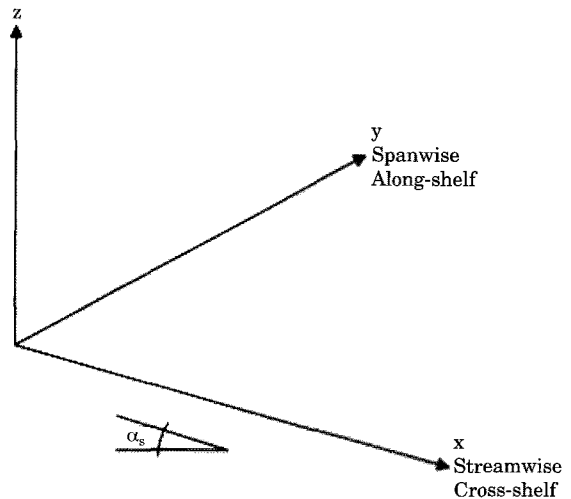


Fig. 1. Coordinate system of Eq. (3).

Rate) ε 은 Eq. (6)으로 계산된다.

$$(1-\phi_f)\frac{\partial k}{\partial t} = v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial(1-\phi_f)k}{\partial z} \right] - (1-\phi_f)\varepsilon + (s_s-1)g \frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (6a)$$

$$(1-\phi_f)\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial(1-\phi_f)\varepsilon}{\partial z} \right] - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} (1-\phi_f) + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} (s_s-1)g \frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (6b)$$

Eq. (6)의 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_c, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}$ 은 수치상수이며 그 값은 Table 1에서 보여진다. Eq. (6)의 우변 마지막 항들은 유사의 밀도성층화에 따른 난류의 감소효과를 의미하는 항이다.

본 연구에서 이용되는 1DV 모형은 유사의 부유를 침강에 의한 이송과 분자운동 및 난류에 의한 확산으로 해석한다(Eq. (7)).

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi_s W_s + \frac{v_t + v}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \right) \quad (7)$$

여기서 W_s 는 플럭의 침강속도이다.

이상의 식들에서 나타나는 것과 Son and Hsu (2011)의 모형은 농도의 개념으로 ϕ_s 와 ϕ_f 두 가지를 각 항에서 달리 이용하고 있다. 이는 크기와 밀도가 지속적으로 변화하는 플럭의 물리적 특성을 고려하기 위한 것으로 $\phi_f = (D/d)^{3-F}$ 의 관계를 가진다. ϕ_s 가 크기 및 농도가 고정적인 일차입자의 부피농도이므로 질량농도 c 에 선형적으로 비례하는 반면, ϕ_f 는 변화하는 D 와 F 로 인해 c 와 선형적인 비례관계에 있지 않다. 이에 대한 자세한 설명은 Son and Hsu (2011)에서 나타난다. 이 연구에 이용된 모형은 1차원수직모형으로 충분히 발달된 흐름을 가정하고, 이를 통

해, 상하류 경계조건을 설정하지 않는다. 바닥면으로부터의 경계조건으로 0.63의 최대압밀농도를 가정하고 한계소류력과 바닥면에 작용하는 흐름의 응력의 비를 이용하여 침식율을 산정하였다.

결과 및 고찰

1. 모의 조건 및 매개변수 결정

본 수치실험은 1.0 m 높이의 계산영역(Domain)을 5 mm 간격의 격자로 구성하여 이루어졌다. 점착성 유사의 응집현상 특성을 나타내는 매개변수들(Eq. (1)과 Eq. (2) 참고)의 값은 Table 2에서 정리되었다. 이 값들은 Son and Hsu (2010), Son and Hsu (2011)의 연구에서 이용된 것으로 Ems/Dollar 하구부 유사의 물리특성을 대표하는 것으로 판단된다. 이들 매개변수 값을 $c=0.5 \text{ kg m}^{-3}$, $G=3 \text{ s}^{-1}$ 의 조건에 적용한 경우에 계산되는 플럭의 평형크기는 약 $440 \mu\text{m}$ 이다. Dyer and Manning (1999), Milligan (1996) 등의 연구에서 관측된 플럭의 최대값이 $D=O(10^2) \mu\text{m}$ 인 것을 고려할 때 현장측정값과 유사하다고 판단된다. 유사의 부유가 발생하지 않고, 그 결과, 밀도성층화에 의해 난류가 영향을 받지 않는 경우의 모의를 위해서는 한계소류력을 침식이 발생하지 않을 정도의 큰 값으로 설정하고 계산을 수행하였다. 정상류의 흐름이 모의되었고 유속은 Eq. (3)의 우변 첫 번째 항인 압력경사의 값을 조절하여 결정되었다.

점착성 유사의 경우는 주로 자기하중에 의한 압밀효과(Self-weight Consolidation)에 의해 한계소류력이 가변적이 된다(Sanford and Maa, 2001). 따라서 본 연구에서는 Son and Hsu (2011)이 Ems/Dollard 하구부의 연구에서 보정한 가변적 한계소류력을 점착성 유사의 모의에서 이용한다. 가변적 한계소류력에 대한 식과 매개변수의 정량적인 값은 Son and Hsu (2011)에서 보여진다. 비점착성 유사의 모의를 위해서는 한계소류력을 0.17 N m^{-2} 으로 고정하였다.

점착성 유사의 경우는 일반적으로 부유가 활발히 발생한다. 하지만 모래와 같은 비점착성 유사의 부유는 상대적으로 약하다. Stokes' Law를 고려할 때 비점착성 유사가 부유되는 정도는 유사크기의 제공에 반비례한다고 가정할 수

Table 1. Values of numerical coefficients for turbulence model.

Coeff.	C_μ	σ_k	σ_ε	σ_c	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$
Value	0.09	1.00	1.30	0.50	1.44	1.92	0.0

Table 2. Values of coefficients for Eqs. (1) and (2).

Coeff.	$d (\mu\text{m})$	$\rho_s (\text{kg m}^{-3})$	k'_A	k'_B	p	q	α	β	B_1
Value	4	2,650	31.5	4.82×10^{-4}	1.0	0.5	3.0	-0.0652	2.63×10^{-14}

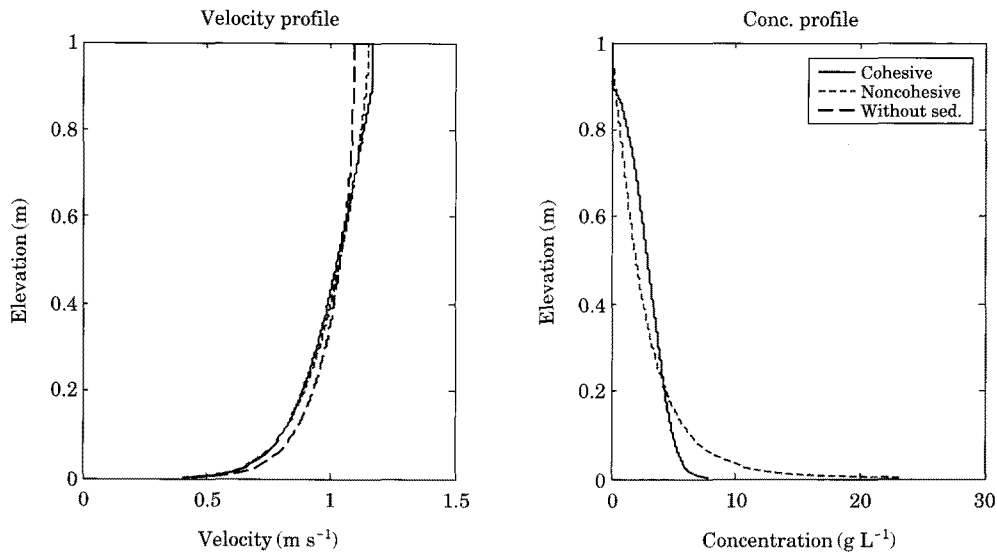


Fig. 2. Vertical profiles of velocity and mass concentration.

있다. 따라서 비점착성 유사의 크기가 매우 작다($D=100\ \mu\text{m}$)는 가정을 이용하여 비점착성 유사에 충분히 부유될 수 있도록 모의를 시행하였다. $100\ \mu\text{m}$ 의 유사는 매우 가는 모래에 해당되며 점착력이 무시될 수 있어 비점착성 유사의 성질을 나타낸다. 비점착성 유사의 비중은 보편적으로 이용되는 값인 $2,650\ \text{kg m}^{-3}$ 으로 가정되었다.

2. 모의 결과 및 분석

적용되는 유속의 수심평균된 값이 $1.0\ \text{m s}^{-1}$ 가 되도록 흐름조건을 결정하였다. 수심평균 유속이 $1.0\ \text{m s}^{-1}$ 인 경우의 레이놀즈수($Re=Uh\nu^{-1}$)는 약 1.0×10^6 으로 난류가 충분히 발달된 상태이다.

Fig. 2는 수치모의에 의해 계산된 유속과 플럭 질량농도(c)의 연직분포를 보여준다. 실선, 점선, 굵은 점선은 각각 점착성 유사, 비점착성 유사, 유사에 없는 경우의 결과이다. 유속의 경우 모두 같은 수심평균유속($1.0\ \text{m s}^{-1}$)을 가지지만 연직분포에서는 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 특히 유사에 없는 경우는 다른 두 경우에 비해 보다 급한 유속의 연직변화를 계산하였다. 농도의 경우는 점착성 유사와 비점착성 유사에 확연히 다른 모습을 보여준다. 비점착성 유사의 경우에는 모래 등이 부유에서 전형적으로 나타나는 Rouse Profile의 형태를 나타낸다. 하지만 점착성 유사의 경우는 좀더 강한 부유가 이루어진다는 사실이 확인된다. 두 경우 모두에서 수심평균된 농도는 약 $2.9\ \text{g L}^{-1}$ 로 바닥으로부터 침식된 유사의 양은 거의 유사하다고 생각할 수 있지만 연직분포의 형태는

차이를 나타내는 것이다. 이러한 결과의 가장 큰 이유는 침강속도의 차이를 생각할 수 있다. 수치모의 결과로 계산된 점착성 유사의 침강속도는 Fig. 3에서 도시되었다. 그림에서 나타나는 것과 같이 점착성 유사의 덩어리인 플럭은 난류 강도 및 농도 차이 등으로 인해 같은 시간이라도 연직위치에 따라 다른 밀도와 크기를 가지며, 이로 인하여, 침강속도도 변화하게 된다. 본 연구에서 가정된 $100\ \mu\text{m}$ 입경과 2.65 상대비중의 비점착성 유사의 침강속도를 Stokes' Law로 계산하면 약 $9\ \text{mm s}^{-1}$ 이다. Fig. 3에서 나타나듯이 점착성 유사(플럭)가 대부분의 경우에 비점착성 유사보다 큰 입경을 나타내지만 낮은 밀도로 인해 더 낮은 침강속도($4\ \text{mm s}^{-1}$ 이하)를 가진다. 플럭의 낮은 침강속도는 유사한 유수동역학적 조건에서도 보다 강한 부유를 야기한다. 그 결과, Fig. 2에서 나타나듯이, 점착성 유사에 좀더 강하게 부유하는 결과가 계산된다.

밀도성층화의 정도를 나타내는 값으로는 Richardson 수(Ri)가 널리 이용된다(Eq. (8)). Richardson 수는 밀도성층화에 따른 안정성과 유체전단력에 따른 불안정성의 비율을 의미하며 양의 값일 때는 밀도성층화에 따라 안정된 상태를, 음의 값을 가질 때는 불안정한 상태를 의미한다. 일반적으로 Richardson 수가 0.25보다 낮은 경우는 난류가 강한 조건으로 볼 수 있다(Dyer, 1997).

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (8)$$

여기서 ρ 는 물과 유사에 혼합된 상태의 밀도이다.

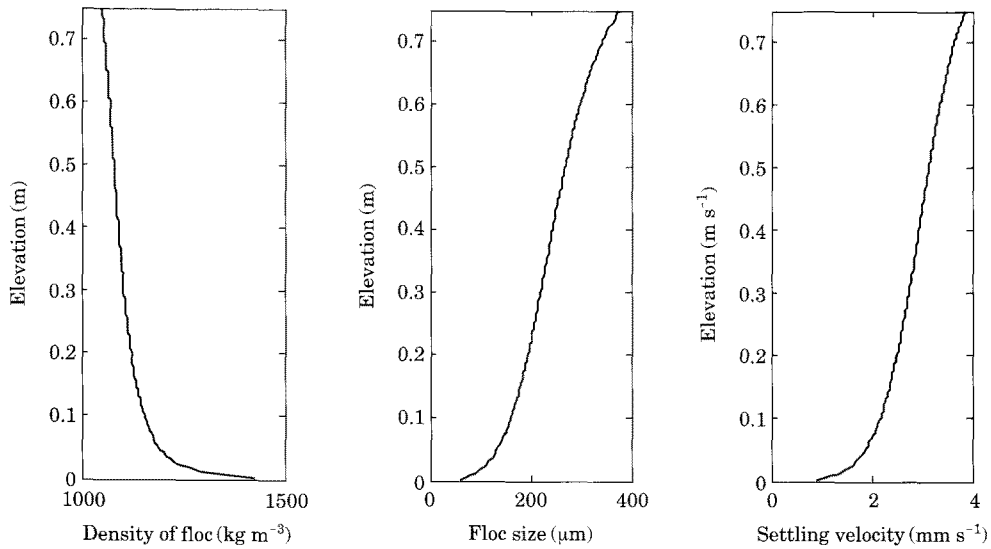


Fig. 3. Vertical profiles of density, size, and resulting settling velocity of floc.

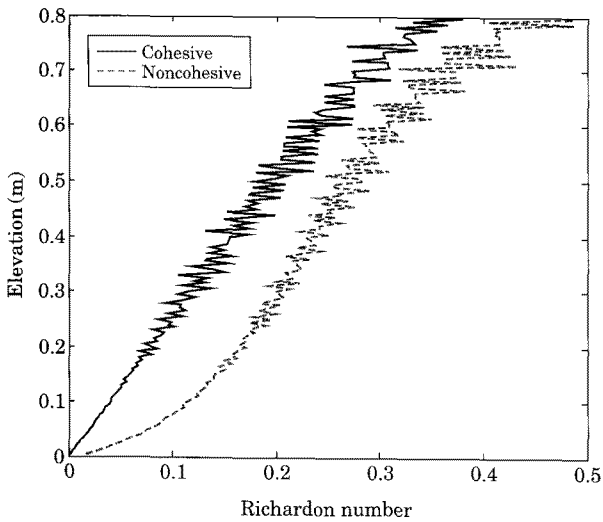


Fig. 4. Richardson numbers calculated by numerical models.

Fig. 2의 농도분포에서도 나타나듯이 점착성 유사는 비점착성 유사에 비해 연직위치에 따른 농도의 차이가 크지 않다. 이 점은 물-유사 혼합물 밀도의 연직경사($\partial\rho/\partial z$)가 작은 것을 의미하며 비점착성 유사에 비해 상대적으로 불안정한 성층구조를 가진다는 것을 의미한다. 이러한 결론은 Fig. 4를 통해서 정량적으로 확인된다. Fig. 4는 본 연구에서 결정된 농도와 유속에 의해 계산된 Richardson 수이다. 거의 모든 연직분포상에서 점착성 유사의 Richardson 수는 비점착성 유사의 경우에 비해 낮은 값을 가진다. 즉 보다 불안정한 성층의 구조를 가지며 더

강한 난류조건을 형성할 것으로 판단할 수 있다. Richardson 수가 수표면에 가까워질수록 증가하고 안정된 조건을 나타내는 것은, 밀도의 연직 농도경사가 증가하는 것에 기인하는 것이 아니라, Eq. 7의 분모에서 보이는 유속의 연직경사가 감소하기 때문으로 이해된다. Fig. 4에서 보이는 Richardson 수의 요동(Fluctuation)은 격자를 이용해서 불연속적으로 계산되는 수치모형의 특성에 따라 수치적으로 나타난 결과일 뿐 밀도성층화의 정도가 수표면에 가까워질수록 요동을 나타낸다고 생각되지는 않으며 보다 조밀한 계산격자를 이용할수록 감소된다.

Fig. 5는 TKE와 난류에 의한 레이놀즈 응력을 도시한 것이다. 실선과 점선으로 도시된 유사 존재하는 경우가 굵은 실선으로 나타난 유사 없는 경우보다 더 약화된 난류의 특성을 가진다는 사실을 확인할 수 있다. 즉 유사에 의한 난류 감소효과가 명확히 드러나는 결과이다. Fig. 5에서 주목할 만한 또 다른 결과는 점착성 유사에 의한 난류 감소효과가 비점착성 유사에 비해 작다는 점이다. 이 사실 역시 비점착성 유사에 비해 낮은 침강속도와, 그로 인한, 보다 강한 부유에 기인하는 것으로 이해할 수 있다. 밀도성층화에 의해 안정된 흐름의 경우는 연직 방향의 와를 감소시키는 역할을 한다. 난류의 에너지가 되는 와의 생성을 억제하는 밀도성층화가 비점착성 유사에 비해 약한 점착성 유사에 비해 보다 강한 난류를 유지한다. 이렇게 유지된 강한 난류는 다시 유사에 의한 부유 발생시키는 메커니즘으로 작용한다는 점에서 유사와 난류와의 관계는 구르는 눈덩이 효과(Snowball Effect)로 이해될 수 있다.

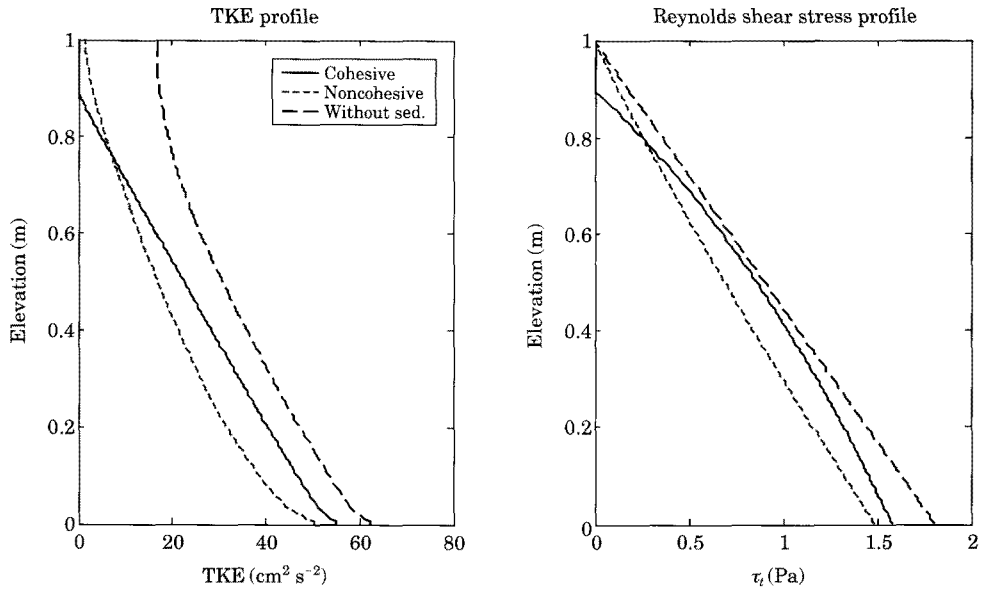


Fig. 5. TKE and Reynolds shear stress calculated by numerical models.

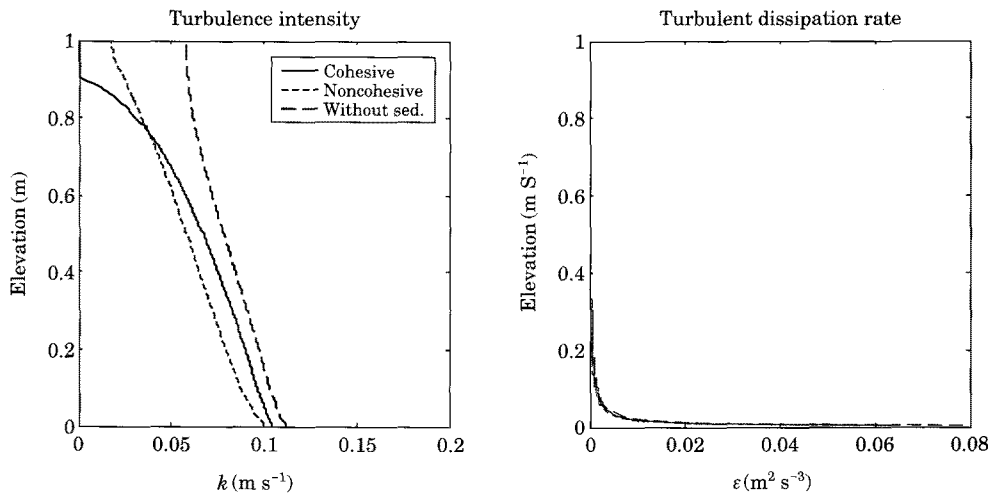


Fig. 6. k and ϵ calculated by numerical models.

Fig. 5를 통해서 Fig. 3에서 도시된 플럭의 크기 변화도 이해될 수 있다. Eq. (1)에서 나타나듯이 응집현상은 응집과 파괴가 경쟁하면서 플럭의 크기를 결정한다. 응집의 경우는 난류의 강도를 의미하는 G 에 선형적으로 비례하지만 파괴는 G^{1+q} 에 비례한다. q 가 양의 값(본 연구에서는 0.5)을 가진다는 사실을 고려할 때 난류에 의해 파괴가 받는 영향이 응집에 비해 더 크다는 사실을 알 수 있다. Fig. 5의 TKE 결과에서 보듯 하상에서 멀어질수록 난류에너지는 약해지며 이는 플럭의 파괴를 야기하는 메커니즘을 약화시켜 플럭 크기의 증가를 발생시킨다. 응집

이 농도(c)에도 영향을 받으며, 본 연구의 결과, 하상으로 멀어질수록 농도가 감소하지만 난류강도의 감소에 비해 그 정도가 크지 않은 것으로 고려된다(Fig. 2 참고).

Fig. 6은 k 와 ϵ 의 분포를 나타낸다. 그림을 통해 확연히 드러나듯이 ϵ 은 유사 존재 여부 및 유사 종류에 큰 영향을 받지 않는다. 반면 k 는 비점착성 유사 경우에 가장 작은 값을 보이며 유사 존재하지 않아 밀도성층화가 발생하지 않는 경우에 가장 크다. 이러한 k 와 ϵ 사이에서 나타나는 차이점은 난류 생성과 소산의 물리적 메커니즘을 고려할 때 이해된다. 난류는 가장 큰 와로부

터 에너지를 공급받아 점점 더 작은 와로 전파시켜 나가는 과정이다. 그리고 점점 작아지는 와는 난류의 최소규모인 Kolmogrov Scale에 도달함에 따라 유체의 점성 등에 의해 소산된다. 즉 난류의 생성은 에너지를 공급 받는 흐름의 조건에 따라 결정되지만 난류의 소산은 유체의 특성에 의해 결정되는 것이다. 유사의 부유 여부와 부유 모수에 따라 와의 생성과 연계되는 흐름의 특성은 바뀌지만 유체가 가지는 점성은, Fluid Mud와 같이 유사의 농도가 아주 높은 경우를 제외하고는, 변화하는 것으로 고려되지 않는다. 따라서 난류의 생성을 의미하는 k 는 실험 조건에 따라 서로 다른 값을 보이는 반면 ε 은 모든 실험 조건에서 유사한 값으로 계산되었다. Fig. 6에서 보이는 ε 의 결과에서 난류의 소산이 Kolmogrov Scale에서 주로 발생한다는 가설 역시 확인할 수 있다. ε 은 하상에 아주 가까워질 때 급격히 증가하는 모습을 보인다. 이를 통해 하상에 가까워질 때 난류가 소산되는 정도가 급격히 증가한다는 사실을 알 수 있다. 하상의 근처에 도달할 수록 등방성을 가지는 와의 크기가 감소해 점점 Kolmogrov Scale에 도달할 것이 예상되며 유체의 점성이 와의 움직임을 억제하는 효과가 증가할 것이라는 사실을 유추할 수 있다. 따라서 Fig. 6을 통해 난류의 소산은 와의 특성이 Kolmogrov Scale 근처에서 주로 이루어진다는 가설을 이해할 수 있다.

3. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 수치모의를 통해 점착성 유사가 난류에 미치는 영향을 연구하는 것이 목적이다. 이를 위하여 응집 현상 모형과 결합되어 크기와 밀도가 지속적으로 변화하는 점착성 유사의 특성을 고려할 수 있으면서도 유사농도, 유체의 운동량 및 난류에 대한 계산이 가능한 유사이동 모형이 선택되었다. 유사이동 모형은 점착성 유사, 비점착성 유사, 유사 존재하지 않는 조건에 적용되었다.

본 연구를 통해 유사의 부유가 난류의 강도를 약화시킨다는 것을 확인하였다. 그리고 난류 감소효과를 발생시키는 원인으로는 연직위치에 따른 농도 차이에 의한 밀도성층화가 고려되었다. 같은 양의 유사 부유하더라도 점착성 유사 비점착성 유사에 비해 상대적으로 낮은 난류 감소효과를 가진다는 점 역시 발견되었다. 이러한 현상의 원인을 파악하기 위해 Richardson 수를 이용하여 정량적으로 밀도성층화의 정도를 계산하였다. 그 결과, 점착성 유사 비점착성 유사에 비해 덜 안정적인 흐름 조건을 야기한다는 점이 밝혀졌다. 입경 100 μm 의 매우 가는 모래에 비해서도 아주 작은 침강속도를 가지는 것

으로 계산된 점착성 유사 같은 유수동역학적 조건에서 보다 강한 부유 특성을 나타내었다. 이러한 부유 특성은 밀도성층화를 약화시켜 상대적으로 난류의 강도를 유지시키며, 유지된 난류의 강도는 다시 수표면 쪽으로의 부유를 지속시킬 것으로 예상된다. 따라서 점착성 유사 지배적인 환경에서의 지형 변화 등을 예측할 경우, 난류의 감소가 비점착성 유사의 경우보다 약하게 발생한다는 점과 이에 따라 보다 활발한 유사 확산이 일어날 수 있다는 사실이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

소규모 실험실 실험에서 점착성 유사로 구성된 바닥 가지는 압밀효과를 재현하기 힘든 점 등과 같이 점착성 유사의 경우 실험실 실험이 쉽지 않다. 현장측정을 통해서 다양한 조건의 재현 및 고해상도의 측정이 힘들다. 이러한 이유로 점착성 유사에 관한 본 연구는 수치해석적인 방법을 통해 이루어졌다. 정확도에 큰 비중을 두지 않는 학문적 연구에서 수치기법에 따른 오차는 무시할 수 있다. 하지만 수치해석을 위해 이용되는 지배방정식(이론적 물리모형)을 유도되는 과정에서는 많은 가정이 이루어지며 실험적으로 결정되어야 할 상수를 많이 포함한다는 사실은 상기할 필요가 있다. 즉, 본 연구에서 제시되는 내용은 물리실험이나 현장측정을 통해서 검증되어야 할 필요가 있다는 점이 결론에서 지적된다. 이를 위해서는 교란을 최소화하며 수중에 부유하는 플러의 크기와 밀도를 측정하는 방법, 축소규모 모형실험에서의 압밀 효과 재현, 점착성 유사 농도가 높아 Fluid Mud를 형성하는 하상 근처에서의 난류 측정 등 실험 및 측정과 관련된 기술적 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 “하구역종합관리시스템개발”의 일환으로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

박성은, 김동선, 이충일, 황재동, 윤종휘, 조규대. 2003. 성층화된 수로에서 3차원 Hill에 의한 유속장 변동. 한국해양환경안전학회지 9(2): 73-77.
 양경수, 박찬욱, 이승수. 2004. 구 후류에 미치는 유동장 밀도성층화 영향 전산 해석. 대한기계학회논문집B 28(5): 553-559.
 Biggs, C.A. and P.A. Lant. 2000. Floc rupture and turbulence: a framework for analysis. Chemical Engineering

- Science* **59**: 2521-2534.
- Dyer, K.R. 1997. Estuaries: A Physical Introduction, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd., England.
- Hsu, T.-J., P.A. Traykovski and G.C. Kineke. 2007. On modeling boundary layer and gravity-driven fluid mud transport. *Journal of Geophysical Research* DOI:0.1029/2006 JC003719.
- Khelifa, A. and P.S. Hill. 2006. Models for effective density and settling velocity of flocs. *Journal of Hydraulic Research* **44**(3): 390-401.
- Krishnappan, B.G. and J. Marsalek. 2002. Modelling of flocculation and transport of cohesive sediment from an on-stream stormwater detention pond. *Water Research* **36**: 3849-3859.
- Maggi, F., F. Mietta and J.C. Winterwerp. 2007. Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution suspended cohesive sediment. *Journal of Hydrology* **343**: 43-55.
- McAnally, W.H. and A.J. Mehta. 2000. Aggregation rate of fine sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* **126**: 883-892.
- McCave, I.N. 1984. Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean. *Deep Sea Research* **31**(4): 329-352.
- Mehta, A.J. and Y. Li. 1997. A PC-based short course on fine-grained sediment transport engineering. Coastal and Oceanography Eng. Dept., University of Florida.
- Milligan, T.G. 1996. In situ particle (floc) size measurements with the benthos plankton silhouette camera. *Journal of Sea Research* **36**(1-2): 93-100.
- O'Melia, C.R. 1980. Aquasols: the behaviour of small particles in aquatic systems. *Environmental Science and Technology* **14**(9): 1052-1060.
- Sanford, L.P. and J.P.-Y. Maa. 2001. An unified erosion formulation for fine sediments. *Marine Geology* **179**: 9-23.
- Son, M. and T.-J. Hsu. 2008. Flocculation model of cohesive sediment using variable fractal dimension. *Environmental Fluid Mechanics* **8**(1): 55-71.
- Son, M. and T.-J. Hsu. 2009. The effect of variable yield strength and variable fractal dimension on flocculation of cohesive sediment. *Water Research* **43**: 3582-3592.
- Son, M. and T.-J. Hsu. 2010. Idealized study on cohesive sediment flux by tidal asymmetry. *Environmental Fluid Mechanics* DOI:10.1007/s10652-010-9193-9.
- Son, M. and T.-J. Hsu. 2011. The effects of flocculation and bed erodibility on modeling cohesive sediment resuspension. *Journal of Geophysical Research* **116**(C03021) DOI:10.1029/2010JC 006352.
- Spicer, P.T., S.E. Pratsinis, J. Raper, R. Amal, G. Bushell and G. Meesters. 1998. Effect of shear schedule on particle size, density, and structure during flocculation in stirred tanks. *Powder Technology* **97**: 26-34.
- Sternberg, R.W. 1968. Friction factor in tidal channels with differing bed roughness. *Journal of Marine Geology* **6**: 243-260.
- Stolzenbach, K.D. and M. Elimelech. 1994. The effect of density on collisions between sinking particles: implications for particle aggregation in the ocean. *Journal of Deep Sea Research I* **13**: 409-419.
- Tsai, C.H. and S.C. Hwang. 1995. Flocculation of sediment from the Tanshui River estuary. *Marine Freshwater Research* **46**: 383-392.
- van der Ham R. and J.C. Winterwerp. 2001. Turbulent exchange of fine sediments in a tidal channel in the Ems/Dollard estuary. Part II. Analysis with a 1DV numerical model. *Continental Shelf Research* **21**: 1629-1647.
- van Leussen, W. 1994. Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. PhD dissertation, University of Utrecht.
- Winterwerp, J.C. 1998. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research* **36**(3): 309-326.
- Winterwerp, J.C. 2001. Stratification effects by cohesive and noncohesive sediment. *Journal of Geophysical Research* **106**(C10): 22559-22574.
- Winterwerp, J.C. and W.G.M. van Kesteren. 2004. Introduction to the Physics of Cohesive Sediments in the Marine Environment. Elsevier, NewYork.
- Xu, F., D.-P. Wang and N. Riemer. 2010. An idealized model study of flocculation on sediment trapping in an estuarine turbidity maximum. *Continental Shelf Research* **30**: 1314-1323.

(Manuscript received 27 January 2011,
Revision accepted 8 March 2011)