

# 점착성 유사의 이동 모형화 및 적용

## Development and application of cohesive sediment transport model

손민우\*, 이관홍\*\*

Minwoo Son, Guan-hong Lee

---

### 요 지

흔히 진흙으로 불리는 점착성 유사는 모래 등의 비점착성 유사와는 다른 특성을 보인다. 가장 큰 특징은 점착력에 의해 서로 엉겨 붙어 큰 덩어리(플럭)를 형성하고 다시 큰 플럭이 파괴되는 과정인 응집현상(Flocculation Process)을 보인다는 것이다. 이 응집현상의 과정을 통해 플럭은 크기 및 밀도를 지속적으로 변화시킨다. 크기 및 밀도의 변화는 플럭의 침강속도를 변화시켜 점착성 유사의 부유, 퇴적, 이송, 확산의 과정에 직접적인 영향을 미친다. 응집현상은 플럭의 침강속도 뿐 아니라 부피농도와 질량농도 사이의 비선형적 관계를 야기하여 흐름 운동량 방정식 유도, 난류의 모형화 등에서도 비점착성 유사와 다른 방향으로 진행된다. 점착성 유사가 우세한 지역의 또 다른 특성은 자기하중에 의한 압밀 현상에 따라 발생하는 가변적인 한계소류력이다. 따라서 점착성 유사의 이동을 모형화 하는 과정에서는 가변적인 침식율의 가정 등을 통해 이에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다. 흐름의 운동량 방정식 및 난류 모형에서는 플럭의 부피 농도와 질량농도가 각 항의 물리적 의미에 부합하도록 개별적으로 선택 및 적용되어야 질량보존의 문제 등으로 발생할 수 있는 계산상의 오류를 배제할 수 있다. 적용 결과, 점착성 유사가 우세한 지역에서 나타나는 높은 부유 및 흐름 정체기에서의 부유사 존재 등의 특성이 점착성 유사 이동을 위한 모형에서 보다 합리적으로 계산된다는 사실이 확인되었다. 그리고 비점착성 유사에 적합한 이동 모형이 점착성이 우세한 지역에 적용될 경우, 상황에 따라 유사량을 과대 및 과소 산정할 수 있다는 결론이 도출되었다. 조류의 영향이 존재하는 하구부의 경우에는 조류의 형태와 비대칭성에 따라 유사량의 차이가 큰 것으로 나타났다. 조류의 형태는 주로 하구부의 지형에 의해 결정되므로 준설, 매립, 확폭 등과 같은 하구부에서의 사업이 진행되는 경우, 유사량 변화에 대한 고려가 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 점착성 유사, 플럭, 응집현상, 한계소류력, 조류, 유사량**

---

### 1. 서론

점착성 유사는 비점착성 유사에 비해 전자기적 점착력에 의한 독특한 특성을 가진다. 가장 중요한 특성은 점착력에 의해 작은 알갱이들이 서로 뭉쳐져서(응집) 크기가 증가하고, 다시 큰 점착성 유사의 덩어리가 여러 현상에 의해 부서져(파괴) 크기가 감소하는 일련의 과정을 지속적으로 거치는 것으로 흔히 응집현상(Flocculation Process 또는 Flocculation)으로 불린다. 응집현상을 통해 점착성 유사는 일차입자에 비해 상대적으로 크기가 큰 플럭(Floc)을 형성하며 실제 물 속에 부유하여 이송 및 확산되는 점착성 유사의 대부분은 일차입자의 형태가 아닌 플럭의 형태를 유지한다. 일반적으로 자연상태의 플럭은 수천 개 이상의 일차입자들로 구성된다. 점착성 유사의 응집현상이 중요하게 고려되어야 하는 이유는 이 과정을 통해 플럭이 크기와 밀도를 변화시키기 때문이다. 유사의 부유와 침강에 직접적인 영향을 미치는 침강속도는 일반적으로 Stokes' Law에 의해 계산되는데 이 식은 유사크기의 제곱 및 유사밀도에 비례한다. 따라서 플럭의 크기와 밀도를 변화시키는 응집현상은 점착성 유사의 침강속도를 직접적으로 결정하게 된다.

점착성 유사로 이루어진 경우에는 한계소류력이 침식의 정도에 따라 가변적이라는 사실이 여러 연구에서

---

\* 정회원 · 인하대학교 해양과학기술연구소 연구교수 · E-mail : [minwooson@gmail.com](mailto:minwooson@gmail.com)

\*\* 인하대학교 자연과학대학 해양학과 부교수 · E-mail : [ghlee@inha.ac.kr](mailto:ghlee@inha.ac.kr)

나타났다(예: Sanford and Maa, 2001). 하나의 플럭은 입차입자와 크기가 더 작은 플럭들로 이루어져 있다. 하지만 플럭의 내부공간은 일차입자 사이의 공간이 물로 채워진 경우가 대부분으로 점착성 유사들이 하상에 쌓이고 상위 하상에서의 퇴적이 진행됨에 따라 자중에 의한 압밀이 진행되어 플럭 내부 및 플럭 사이의 물은 빠져나오게 된다. 그 결과, 하상의 하부로 갈수록 조직이 치밀해지고 밀도가 높아지며 한계소류력이 증가한다. 그리고 이에 의해, 하상이 침식될수록 점점 더 높은 한계소류력을 가진 하상이 드러나게 된다.

## 2. 점착성 유사 이동의 모형화

### 2.1 응집현상 모형화

플럭 성장 형식의 모형(Floc Growth Flocculation Model, FGM)은 응집현상의 매커니즘 중 크게 응집과 파괴를 고려하고, 이들의 경쟁관계를 식으로 표현하여 시간에 따른 플럭 평균입경의 크기변화를 수식화한 모형으로 닫힌 시스템에서의 질량보존을 이론적으로 완벽히 만족시킬 수 있다. Son and Hsu(2009)는 통계적으로 추론된 가변적인 프랙탈 차원(Fractal Dimension)을 이용하고 플럭의 가변적인 항복강도(Yield Strength)를 유도하여 새로운 FGM을 개발하였다(식 1).

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

이 식에서  $D$ 는 플럭의 평균 입경,  $d$ 와  $\rho_s$ 는 일차입자의 크기 및 밀도,  $c$ 는 플럭(유사)의 질량농도이다.  $F$ 는  $D$ 에 따라 값이 변화하는 프랙탈 차원이며  $G$ 는 소산매개변수(Dissipation Parameter 또는 Shear Rate)로 난류의 강도를 나타내는 지표로 이용된다. 그 외의 기호는 실험적 상수를 의미한다. Son and Hsu(2009)의 FGM은 Mixing Tank에서의 슬러지 응집실험에 적용되어 모의되었는데, 시간에 따른 플럭의 크기 변화를 실험결과와 매우 유사하게 묘사하는 결과를 계산하였다.

### 2.2 점착성 유사 이동 모형화

앞 절에서 살펴본 것과 같이 점착성 유사 이동의 모의를 위해서는 응집현상을 통한 점착성 유사 이동의 덩어리, 즉 플럭의 밀도 및 크기의 지속적인 변화를 계산하고 이에 따른 침강속도의 변화를 예측하는 과정이 필요하다. 응집현상은 흐름의 난류강도에 의해 큰 영향을 받는다는 사실이 많은 연구에 의해 밝혀졌다(예: Stolzenbach and Elimelech, 1994). 따라서 응집현상이 고려된 점착성 유사 이동 수치모형의 개발을 위해서는 난류의 모형화가 필수적으로 포함되어야 한다는 것을 알 수 있다. Son and Hsu(2011a)은 크기와 밀도가 변화하는 점착성 유사 이동의 특성이 고려된 1차원수직 모형(1 Dimensional Vertical Model, 1DV Model)을 위한 유체의 운동량 방정식(식 2), 이송-확산 방정식(식 3), 난류모형(식 4)을 Mixture Theory와  $k-\varepsilon$  모형에 기초하여 제안하였다.

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

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

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

식 2에서  $u$ 와  $v$ 는  $x$ 와  $y$  방향 유속,  $\phi_s$ 는 일차입자의 부피농도,  $\tau^w (= \rho_w(\nu + \nu_t)\partial u/\partial z)$ 는 유체

의 응력이다. 식 3의  $\nu_t (= C_\mu(1-\phi_f)k^2/\epsilon)$ 는 와점성계수이며  $W_s$ 는 플럭의 침강속도이다.

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

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

식 4에서의  $k$ 와  $\epsilon$ 은 각각 난류운동에너지와 난류소산율이다.  $\phi_f$ 는 플럭의 부피농도로 응집현상에 의해 밀도가 변화하는 점착성 유사의 특성에 의해  $\phi_s$ 와는 다른 값을 가진다. 기존의 유사이동 모형이 하나의 농도개념만을 주로 이용하는 것이 비해 점착성 유사를 위한 Son and Hsu(2011a)의 모형은  $\phi_f$ 와  $\phi_s$  두 가지 개념의 농도를 각 항의 물리적 의미에 따라 선별적으로 이용한다는 사실이 유의할 만하다. 식 2, 3 및 4에서 보이는 기타 변수에 대한 자세한 설명은 Son and Hsu(2011a)에서 보인다. 지배방정식으로 하여 구성된 모형은 Son and Hsu(2009)에 의해 제안된 FGM과 결합되며 가변적인 한계소류력을 고려하기 위해 Sanford and Maa(2001)가 제안한 실험식을 이용하여 바닥면 침식율을 계산한다.

### 3. 모형의 적용

van der Ham et al.(2001)은 점착성 유사가 우세한 Ems/Dollard 하구부에서 유사의 농도 및 난류 특성에 관한 측정을 실시하였다. 측정결과 Ems/Dollard 하구부는 하상으로부터 0.3 m와 0.7 m 떨어진 지점에서의 농도 차이가 크지 않으며 유속이 거의 없는 조건에서도 부유된 유사가 지속적으로 존재하는 특성을 나타내었다. 이러한 점은 비점착성 유사가 일반적으로 나타내는 Rouse 분포 등의 특성과 큰 차이점을 나타내는 것으로 고려된다. 그림 1은 현장측정 및 수치모의의 결과를 도시한 것으로 가장 위쪽의 그림은 수위(점선) 및 수심평균된 측정유속(실선)을, 중간 그림은 하상으로부터 0.3 m 떨어진 위치에서 측정 및 계산된 유사농도, 가장 아래쪽의 그림은 하상으로부터 0.7 m 떨어진 지점에서의 유사농도를 나타낸다. 그림 1에서 실선은 응집현상이 고려된 모형의 결과, 점선은 응집현상이 고려되지 않고, 고정적인 크기와 밀도를 가지는 유사를 가정하여 수행된 모의결과이다. 고정적인 크기와 밀도를 이용한 경우, 점착성 유사의 특성을 나타내기 위해 아주 가늘고( $D=0.09$  mm) 가벼운( $\rho_f=1,300$  kg/m<sup>3</sup>) 유사 가 가정되었다. 두 경우 모두에 가변적인 한계소류력이 이용되었다. 그림 1에서 Ems/Dollard 하구부가 가지는 특성들이 응집현상을 고려한 모형에 의해 보다 잘 계산되는 사실이 확인된다. 특히 0.7 m에서의 결과에서 응집현상이 고려되지 않은 모형의 경우는 Ems/Dollard 하구부에서 나타나는 유사의 충분한 부유를 모사하지 못하며 유속이 약해지는 8시에서 10시, 20시에서 22시 사이의 구간에서 유사 부유하지 않는 것으로 계산하였다. Mehta(1988)는 실험실 실험을 통해 점착성 유사의 침강속도와 유사농도 사이의 상관관계를 연구하였다. 이를 통하여 유사의 농도가 낮은 구간에서는 침강속도와 유사농도의 상관관계가 발견되지 않고(Free Settling Regime) 유사의 농도가 O{10-1} g/l에서 O{100} g/l인 구간에서는 침강속도와 유사농도의 관계가 로그-로그 좌표계에서 4/3의 기울기를 나타내며 비례한다는 사실(Flocculation Regime)을 발견하였다. 그림 2는 Ems/Dollard 하구부에 적용한 1DV 모형이 계산한

점착성 유사의 침강속도와 유사농도와의 관계를 도기한 것이다. 그림 2에서도 Mehta(1998)가 주장 Free Settling Regime과 Flocculation Regime이 구별되어 나타난다는 사실이 발견된다. 이 결과는 Mehta(1998)의 실험결과를 수치해석에 의해 재현한 첫 번째 연구로서 점착성 유사의 이동을 연구할 경우에 유사의 농도에 따라 가변적인 침강속도가 고려되어야 한다는 사실을 확인시킨다.

Son and Hsu(2011b)는 모형을 이상적인 부정류 조건에 적용하여 점착성 유사의 이동량이 가지는 특성을 연구하였다. 그림 3은 한계소류력이 가변적인 점착성 유사 및 한계소류력이 고정적인 비점착성 유사( $D=0.09$  mm,  $\rho_f=1,300$  kg/m<sup>3</sup>)의 이동량과 조류의 비대칭도(Skewness) 사이의 관계를 도기한 것이다. 그림 3를 통해 비점착성 유사(점선)의 경우는 기존에 비점착성 유사를 위해 제안된 Energetics-Based 모형과 유사한 결과를 보이는 것에 비해 점착성 유사는 비대칭도의 영향을 덜 받는 사실이 나타났다. 이를 통해 점착성 유사가 지배적인 환경에서 기존에 개발된 비점착성 유사에 적합한 모형을 적용할 경우 유사량을 과대산정할 가능성이 있음을 제시하였다. 이외에도 Son and Hsu(2011b)의 연구를 통해 조류의 왜곡도와 같은 방향으로 유사량의 방향이 결정된다는 사실과 밀물이 급하게 들어오는 조건에서는 조류 최대속도의 약 10%에 해당하는 하천흐름이 발생하는 경우에 유사량이 균형을 이룬다는 결과가 도출되었다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 점착성 유사의 이동에 대한 연구 동향 및 모의 결과가 설명되었다. 이들 결과를 통해 점착성 유사는 비점착성 유사와 다른 특성을 가지고 있으며 비점착성 유사에 적합한 모형으로 점착성 유사가 우세한 지역에서의 유사이동을 모의할 경우 실제와 다른 결과를 계산할 수 있다는 점을 알 수 있다. 점착성 유사에 대한 연구성과가 국제적으로도 기대 및 필요성에 비해 미진한 면이 많다는 사실을 고려할 때 수공학 분야에서 개척해야 할 분야 중 하나로 판단된다. 특히 대하천 대부분의 하류지역, 대형호소, 서해연안지역에서 점착성 유사가 지배적인 환경이 존재하는 국내 자연환경 및 도시하천에 존재하는 유기물의 이동 역시 점착성 유사에 대한 접근법과 동일한 방향으로 연구가 진행되어야 한다는 점 등을 생각할 때 국내에서의 연구필요성은 증대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 “하구역종합관리시스템개발”의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. Mehta, A.J. (1988). "Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion." In: *Physical Processes in Estuaries*, J. Dronkers and W. van Leussen, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 427 - 445.
2. Sanford, L.P., and Maa, J. P.-Y. (2001). "An unified erosion formulation for fine sediments." *Marine Geology*, Vol. 179, pp. 9-23.
3. 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.
4. 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.
5. Son, M., Hsu, T.JH. (2011b). "Idealized Study on Cohesive Sediment Flux by Tidal Asymmetry." *Environ. Fluid Mech.*, DOI:10.1007/s10652-010-9193-9.
6. Stolzenbach, K.D., Elimelech, M. (1994). "The effect of density on collisions between sinking

particles: implications for particle aggregation in the ocean." *J. Deep Sea Res.*, Vol. I 13, pp. 409-419.

- van der Ham, R., Fontijn, H.L., Kranenburg, C., Winterwerp, J.C. (2001). "Turbulent exchange of fine sediments in a tidal channel in the Ems/Dollard estuary. Part I. Turbulence measurements." *Continental Shelf Res.*, Vol. 21, pp. 1605-1628.

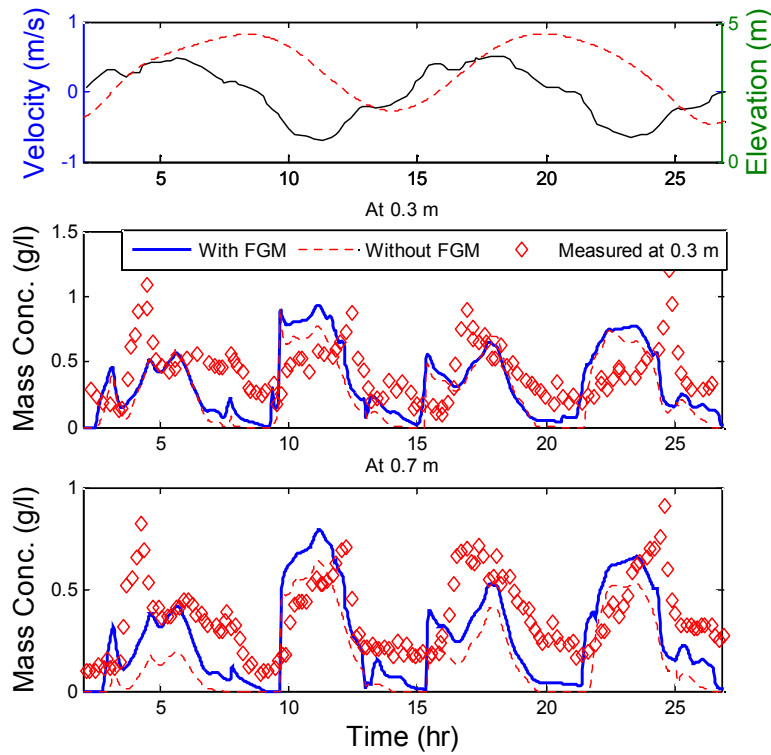


그림 1. 하상 위 0.3 m 및 0.7 m에서의 유사농도 현장측정 및 수치모의 결과

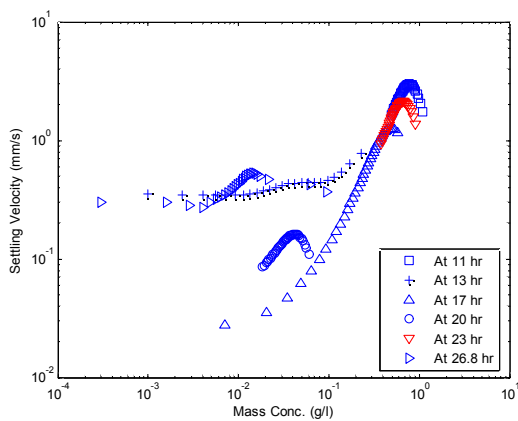


그림 2. Ems/Dollard 하구부에 적용된 모형이 계산한 점착성 유사의 침강속도

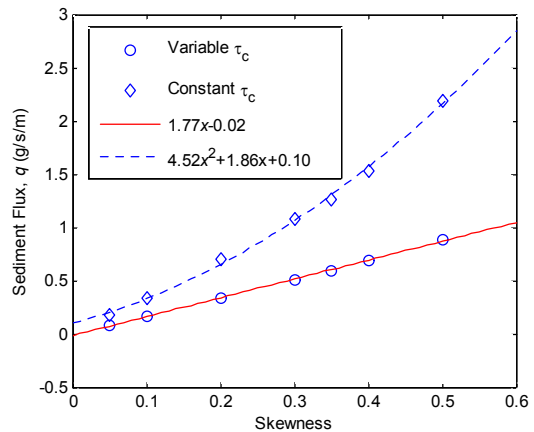


그림 3. 이상적인 부정류 조건에서의 유사량 비교