

점착성 유사의 이동 모의에 관한 연구 동향



손 민 우 |

인하대학교 연구교수
minwooson@gmail.com

1. 점착성 유사의 특성

국내 수자원 분야에서 흔히 진흙(Mud)이라 불리는 점착성 유사는 점토나 실트 등의 광물질 뿐 아니라 유기물, 물 등의 많은 기타 물질이 혼합되어 이루어진 유사이다. 점착성 유사는 모래나 자갈과 같은 비점착성 유사에 비해 전자기적 점착력에 의한 독특한 특성을 가진다. 가장 고려할 만한 특성은 점착력에 의해 작은 알갱이들이 서로 뭉쳐져서(응집, Aggregation) 크기가 증가하고, 다시 큰 점착성 유사의 덩어리가 여러 현상에 의해 부서져(파괴, Breakup 또는 Disaggregation) 크기가 감소하는 일련의 과정을 지속적으로 거친다는 것이다. 이 과정은 국내에서 응집현상이라 일컬어지지만 좀 더 명확한 정의가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 점착성 유사와 관련된 응집현상은 영어로 Flocculation Process(또는 Flocculation)라 번역되는데, 이 과정은 또 다른 응집현상인 Coagulation과는 다른 양상으로 진행된다. van Olphen(1977)의 정의에 따르면, Coagulation이

화학적 작용에 의해 비가역성이 없는 새로운 물질을 만들어내는 과정인 것에 비해, Flocculation은 순전히 물리적 점착력에 의해서 작은 알갱이들이 서로 붙게 되는 현상으로 물리적 충격 등에 의해 쉽게 분리되는 특성을 가진다. 응집현상의 과정을 통해 점착성 유사는 일차입자(Primary Particle)에 비해 상대적으로 크기가 큰 플럭(Floc)을 형성하며(그림 1 참고), 실제 물 속에 부유하여 이송 및 확산되는 점착성 유사의 대부분은 일차입자의 형태가 아닌 플럭의 형태를 유지한다.

일반적으로 자연상태에서의 일차입자의 크기를 1 내지 6 μm 정도로 가정하고 하구부 등과 같이 유수동역학적 조건이 활발한 지역에서의 플럭의 크기가 $O(10^3)$ μm 로 관찰(Dyer and Manning, 1999; Milligan, 1996)된 것을 고려할 때, 하나의 플럭이 수천 개 이상의 일차입자들로 구성됨을 알 수 있다. 점착성 유사의 응집현상이 중요하게 고려되어야 하는 이유는 이 과정을 통해 플럭이 크기와 밀도를 변

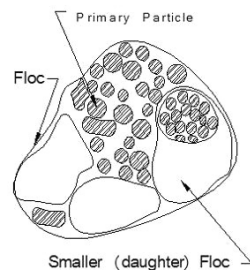


그림 1. 플럭의 모식도

화시키기 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 자연에 존재하는 점착성 유사의 침강속도를 직접적으로 결정하게 된다.

모래 등의 비점착성 유사로 이루어진 하상의 경우에는 한 지점에서의 한계소류력이 일정하다고 가정하는 것이 일반적인 경우이다. 하지만 점착성 유사로 이루어진 경우에는 한계소류력이 침식의 정도에 따라 가변적이라는 사실이 여러 연구에서 나타났다(예: Sanford and Maa, 2001). 그림 1에서 나타나는 것과 같이 하나의 플럭은 입차입자와 크기가 더 작은 플럭들로 이루어져 있다. 하지만 플럭의 내부공간은 입차입자들이 맞닿아 연결되는 구조로 이루어진 것이 아니라 입차입자 사이의 공간이 물로 채워진 경우가 대부분이다. 플럭 내부에 존재하는 물은 한계소류력이 가변적이 되는 점착성 유사의 또 다른 특성을 가지게 한다. 점착성 유사들이 하상에 쌓이고 상위 하상에서의 퇴적이 진행됨에 따라 자중에 의한 압밀(Self-weight Consolidation)이 진행되어 플럭 내부 및 플럭과 플럭 사이의 물은 위층으로 빠져나오게 된다. 그 결과, 하상의 하부로 내려감에 따라 조직이 치밀해지고 밀도가 높아지며 한계소류력 또한 증가하게 된다. 그리고 이에 의해, 하상이 침식될수록 점점 더 높은 한계소류력을 가진 하상이 드러나게 된다.

2. 응집현상 모형화에 관한 연구

환경 및 수리학 관련분야에서 응집현상의 모형화는 현재까지 크게 두 가지 방향으로 이루어졌다. 첫 번째는 Population Balance Equation(PBE) 형식의 모형이다. 이 종류의 모형은 한 지역에서 존재할 것으로 예상되는 플럭 크기의 최대값과 최소값을 가정한 후(통상 $O(10^0)$ μm 에서 $O(10^3)$ μm), 그 범위

를 많은 Size Class로 나눈다. 이후 각 Class에 포함되는 플럭 개수의 시간적 변화를 계산한다. 계산을 위해서는 주로 4개의 항이 고려된다(식 1 참고).

$$\frac{dn_k}{dt} = G_a(k) - L_a(k) + G_b(k) - L_b(k) \quad (1)$$

이 식에서 n_k 는 k 번째 Class에 포함되는 플럭의 개수, G_a 는 응집에 의한 플럭 개수의 증가, L_a 는 응집에 의한 플럭 개수의 감소, G_b 는 파괴에 의한 플럭 개수의 증가, L_b 는 파괴에 의한 플럭 개수의 감소를 계산하는 항이다. PBE 모형은 매 계산시간마다 다양한 크기의 플럭을 각 Class에 재분포 시키는 간단한 개념에서 개발된 모형으로 Size-classes Flocculation 모형으로도 불린다. 이 모형이 가지는 장단점은 아래에서 정리된다.

▶ PBE 모형의 장점:

- (1) 응집현상의 메커니즘으로 고려될 수 있는 모든 항의 포함 가능
- (2) 플럭의 입경분포를 계산할 수 있어 다양한 크기의 플럭이 가지는 상호간의 영향 고려 가능
- (3) 추계학적 방법론의 도입을 통해 응집현상이 가지는 무작위성 고려 가능

▶ PBE 모형의 단점:

- (1) 수치계산적 비용이 과다
- (2) 플럭이나 유사의 유입 및 유출이 없는 닫힌 시스템 내에서 질량보존이 만족되는 계산 실패
- (3) 지나치게 많은 실험적 매개변수를 포함하며 이들 변수들에 대한 실험자료의 부족으로 인해 보정의 문제 발생

이상에서 언급된 장점으로 인해 유럽 연구진 등이 많은 종류의 PBE 모형을 개발하였고, 이를 슬러지의 처리, 화공학적 반응의 연구 등에 응용하였다(예: Maggi et al., 2007; Verney et al., 2010). 하지만 언급된 단점 중 주로 (1)과 (2)에 기인하여 PBE 모형이 실제 수치해석적 유사이동 모형과 결합되어 만족할만한 성과를 거둔 연구는 보고되지

않고 있다.

두 번째는 플럭 성장 형식의 모형(Floc Growth Flocculation Model, FGM)이다. FGM은 응집현상의 매커니즘 중 크게 응집과 파괴를 고려하고, 이들의 경쟁관계를 식으로 표현하여 시간에 따른 플럭 평균입경의 크기변화를 수식화 한 모형이다. FGM은 PBE 모형에 비해 아주 간단한 식과 적은 수의 매개변수로 응집현상을 모사할 수 있는 장점이 있으며 닫힌 시스템에서의 질량보존을 이론적으로 완벽히 만족시킬 수 있다. 이러한 장점으로 인해 FGM이 유사이동의 수치모형과 결합될 때 수치계산에 따른 오류와 계산시간을 줄일 수 있다. Winterwerp(1998)과 Son and Hsu(2008)가 각각 FGM 모형을 개발하여 Mixing Tank에서의 슬러지 응집실험에 적용하였다. 그 결과, 플럭의 평형 크기는 매개변수 보정을 통해 잘 계산하였지만, 시간에 따른 플럭 크기의 변화 예측에서는 만족할만한 결과를 나타내지 못하였다. Son and Hsu(2009)는 통계적으로 추론된 가변적인 프랙탈 차원(Fractal Dimension)을 이용하고 플럭의 가변적인 항복강도(Yield Strength)를 수학적으로 유도하여 새로운 FGM을 개발하였다(식 2).

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

이 식에서 D 는 닫힌 시스템 내에 존재하는 플럭의 평균 입경, d 는 일차입자의 크기, ρ_s 는 일차입자의 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 FGM 역시 Mixing Tank에서의 슬러지 응집실험에 적용되어 모의되었는데, 이 FGM은 기존의 모형들과 비교할 때 시간에 따른 플럭의 크기 변화를 실험결과와 매우 유사하게 모사하는

결과를 계산하였다.

3. 점착성 유사이동 수치모형에 관한 연구

점착성 유사의 이동을 위한 많은 수치해석적 연구가 이루어졌다. 하지만 이 중 대부분의 연구는 점착성 유사의 응집현상을 고려하지 않고 플럭이 가는 모래 등의 비점착성 유사에 비해 상대적으로 낮은 밀도와 작은 크기를 가진다는 가정을 통해 이루어졌다. 그 결과, 실제 자연에서는 지속적으로 변화하는 점착성 유사의 크기와 밀도를 고정시키고 수치모의를 수행하는 것이 최근까지의 일반적 경향이 었다(예: Hsu et al., 2007). 이러한 경향의 가장 큰 원인으로 수치모형과 결합이 가능하면서도 정확도가 높은 응집현상 모형의 개발이 활발히 이루어지지 않았다는 점을 고려할 수 있다. 2장에서 살펴본 것과 같이 PBE 모형은 복잡한 수치모형과 결합되기에는 지나치게 수치비용이 비싸며 질량보존을 만족시키지 못하는 단점이 있어 유사이동 모형과 결합되지 못하였다. Winterwerp(1998)이 제안한 FGM은 van der Ham and Winterwerp(2001)의 연구에서 유사이동 모형과 결합하는 시도가 이루어졌으나 응집현상을 고려하지 않고 고정적인 크기와 밀도의 플럭을 가정한 경우보다 좋지 못한 결과를 계산하였다. Winterwerp(1998)의 응집모형이 실측된 결과를 유사하게 모의하지 못하는 점 등을 고려할 때 보다 높은 정확도를 가지는 응집모형이 유사이동 모형과 결합될 때 어떤 결과를 계산하는지를 연구할 필요성이 제시되었다.

앞 장에서 살펴본 것과 같이 점착성 유사의 이동을 모의하기 위해서는 응집현상을 통한 점착성 유사의 덩어리, 즉 플럭의 밀도 및 크기의 지속적인 변화를 계산하고 이에 따른 침강속도의 변화를 예측하는 과정이 필요하다. 응집현상은 흐름의 난류 강도에 의해 큰 영향을 받는다는 사실이 많은 연구에 의해 밝혀졌다(예: O'Melia, 1980; McCave,

1984; van Leussen, 1994, Stolzenbach and Elimelech, 1994). 따라서 응집현상이 고려된 점착성 유사이동 수치모형의 개발을 위해서는 난류의 모형화가 필수적으로 포함되어야 한다는 것을 알 수 있다.

본 기사에서는 Son and Hsu(2011)가 제안한 점착성 유사이동 모형이 간단히 소개된다. Son and Hsu(2011)은 크기와 밀도가 변화하는 점착성 유사의 특성이 고려된 1차원수직모형(1 Dimensional Vertical Model, 1DV Model)을 위한 유체의 운동량 방정식(식 3), 이송-확산 방정식(식 4), 난류모형(식 5)을 Mixture Theory와 $k-\epsilon$ 모형에 기초하여 제안하였다.

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

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

식 3에서 u 와 v 는 x 와 y 방향 유속, ϕ_s 는 일차입자의 부피농도, $\tau^w(= \rho_w(\nu + \nu_t)\partial u/\partial z)$ 는 유체의 응력을 의미한다.

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi_s W_s + \frac{\nu_t + \nu}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \right) \quad (4)$$

식 4의 $\nu_t(= C_u(1-\phi_f)k^2/\epsilon)$ 는 와점성계수(Eddy Viscosity)이다. W_s 는 플럭의 침강속도이며 Stoke's Law에 의해 계산된다.

$$(1-\phi_f) \frac{\partial k}{\partial t} = \nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial(1-\phi_f)k}{\partial z} \right] - (1-\phi_f)\epsilon + (s_s-1)g \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (5a)$$

$$(1-\phi_f) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial(1-\phi_f)\epsilon}{\partial z} \right] - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} (1-\phi_f) + C_{\epsilon 3} \frac{\epsilon}{k} (s_s-1)g \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (5b)$$

식 5에서의 k 와 ϵ 은 각각 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)와 난류소산율(Turbulent Dissipation Rate)이다. ϕ_f 는 플럭의 부피농도로 응집현상에 의해 밀도가 변화하는 점착

성 유사의 특성에 의해 ϕ_s 와는 다른 값을 가지게 되며 $\phi_f = \left(\frac{D}{d} \right)^{3-F} \phi_s$ 의 관계를 가진다. 여기서 유의할 점은 ϕ_s 는 유사의 질량농도(c)에 선형적으로 비례하지만 ϕ_f 의 경우는 흐름조건, 유사 특성 등에 기인하여 c 와 선형적으로 비례하지 않다는 것이다. 그리고 기존의 유사이동 모형이 하나의 농도개념만을 주로 이용하는 것이 비해 점착성 유사를 위한 Son and Hsu(2011)의 모형은 ϕ_f 와 ϕ_s 두 가지 개념의 농도를 각 항의 물리적 의미에 따라 선별적으로 이용한다는 사실 역시 유의할 만하다. 식 3, 4 및 5에서 보이는 기타 변수에 대한 자세한 설명은 Son and Hsu(2011)에서 나타나므로 본 기사에서는 생략된다.

식 3, 4 및 5를 지배방정식으로 하여 구성된 모형은 Son and Hsu(2009)에 의해 제안된 FGM과 결합되어 ϕ_f 와 $p_f^{(rho-f)}$ 등의 플럭의 특성을 매시간 간격마다 결정하며 점착성 유사에 가지는 또 다른 특징인 자중에 의한 압밀에 따른 가변적인 한계소류력을 고려하기 위해 Son and Hsu(2011)은 Sanford and Maa(2001)가 제안한 실험식을 이용하여 바닥면 유사의 침식율을 계산한다.

4. 모형의 적용

3장에서 설명된 1DV 모형을 이용하여 Son and Hsu(2011)는 Ems/Dollard 하구부에서 측정된 현장자료에 적용하였고, Son and Hsu(2010)는 이상적인 부정류흐름(12시간 주기의 조류)에 적용하여 모형의 검증 및 점착성 유사의 이동 특성 연구를 수행하였다. 본 장에서는 이 두 연구의 결과를 간단히 살펴본다.

4.1 Ems/Dollard 하구부에서 점착성 유사의 이동

Ems/Dollard 하구부는 주흐름 방향으로 흐름이

충분히 발달되어 있고 상당 구간에 걸쳐 흐름조건이 균질한(Homogeneous) 모습을 나타내어 1DV 모형의 적용에 적합한 흐름 특성을 가진다. 이 하구부의 대부분 하상재료는 점착성을 가지고 있어 점착성 유사의 이동을 연구하기에도 적합하다. van der Ham et al.(2001)은 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 2는 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(\diamond : 실측값, 실선 및 점선 : 계산치), 가장 아래쪽의 그림은 하상으로부터 0.7 m 떨어진 지점에서의 유사농도를 나타낸다.

그림 2에서 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($P^{rho}=1,300$ kg/m³) 유사가

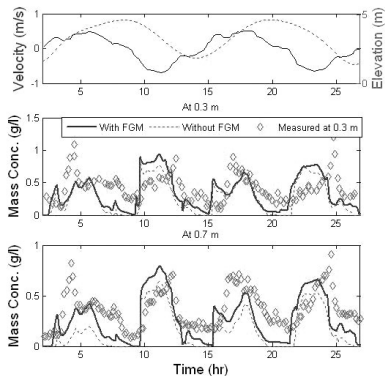


그림 2. 하상 위 0.3 m 및 0.7 m에서의 유사농도 현장 측정 및 수치모의 결과

가정되었다. 두 경우 모두에 가변적인 한계소류력이 이용되었다. 그림 2의 결과를 비교하면 Ems/Dollard 하구부가 가지는 특성들이 응집현상을 고려한 모형에 의해 보다 잘 계산되는 사실이 확인된다. 특히 0.7 m에서의 결과에서 응집현상이 고려되지 않은 모형은 Ems/Dollard 하구부에서 나타나는 유사의 충분한 부유를 모사하지 못하며 유속이 약해지는 8시에서 10시, 20시에서 22시 사이의 구간에서 유사가 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 $O(10^{-4})$ g/l에서 $O(10^0)$ g/l인 구간에서는 침강속도와 유사농도의 관계가 로그-로그 좌표계에서 4/3의 기울기를 나타내며 비례한다는 사실(Flocculation Regime)을 발견하였다. 그림 3은 Ems/Dollard 하구부에 적용한 1DV 모형이 계산한 점착성 유사의 침강속도와 유사농도와의 관계를 도시한 것이다. 그림 3에서도 Mehta(1998)가 보여준 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.

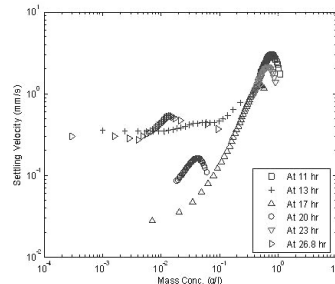


그림 3. Ems/Dollard 하구부에 적용된 모형이 계산한 점착성 유사의 침강속도

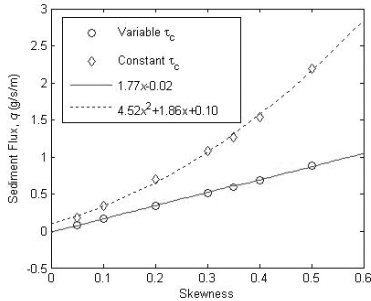


그림 4. 이상적인 부정류 조건에서의 유사량 비교

4.2 이상적 부정류 조건에서 점착성 유사의 이동

Son and Hsu(2010)는 3장에서 설명되고 Ems/Dollard 하구부에 적용된 모형을 이상적인 부정류 조건(12시간 주기의 조류)에 적용하여 점착성 유사의 이동량(Sediment Flux)이 가지는 특성을 연구하였다. 그림 4는 한계소류력이 가변적인 점착성 유사 및 한계소류력이 고정적인 비점착성 유사($D=0.09$ mm, $p_f^{(rho-f)}=1,300$ kg/m³)의 이동량과 조류의 비대칭도(Skewness) 사이의 관계를 도시한 것이다. 그림 4를 통해 비점착성 유사(점선)의 경우는 기존에 비점착성 유사를 위해 제안된 Energetics-Based 모형과 유사한 결과를 보이는 것에 비해 점착성 유사(실선)는 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(2010)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.

5. 맺음말

이 기사에서는 점착성 유사의 이동에 대한 수치 해석적 연구의 동향 및 최신 결과가 소개되었다. 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 현재까지의 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, 서해연안 지역에서 점착성 유사가 지배적인 환경이 존재하는 국내의 자연환경 및 도시하천에 존재하는 유기물의 이동 역시 점착성 유사에 대한 접근법과 동일한 방향으로 연구가 진행되어야 한다는 점 등을 생각할 때 국내에서의 연구필요성은 더욱 높아질 것이다. 지면의 제한으로 모형과 연구결과에 대한 간략한 설명만 제시되었다는 사실을 밝히며, 보다 많은 내용은 본문에서 인용된 문헌들을 참고할 수 있을 것이다. ☺

용어정의

1. 난류소산율(Turbulent Dissipation Rate): 난류운동에너지의 소산율
2. 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy): 난류의 속도요동 속에 존재하는 와와 관련된 단위 무계당 평균운동에너지
3. 부피농도(Volumetric Concentration): 물-유사 혼합물의 단위 부피당 차지하는 입자의 부피
4. 비점착성 유사(Non-cohesive Sediment): 모래나 자갈과 같이 상대적으로 큰 크기의 유사로 점착력이 자중보다 적어 응집현상이 일어나지 않고 개별적인 움직임을 보이는 유사

5. 소산매개변수(Dissipation Parameter 또는 Shear Rate): 플럭의 응집현상에 관여하는 난류의 영향을 나타내는 매개변수
6. 응집(Aggregation): 일차입자나 크기가 작은 플럭이 결합하여 플럭의 크기가 증가하는 현상
7. 응집현상(Flocculation Process): 점착성 유사의 응집력과 난류에 의한 힘 등으로 인해 발생하는 응집과 파괴가 연속적으로 나타나 플럭의 크기와 밀도를 변화시키는 과정
8. 일차입자(Primary Particle): 자연상태의 흐름에 존재하는 일반적인 힘으로는 더 작은 단위로 나누어지지 않는 작은 알갱이
9. 점착성 유사(Cohesive Sediment): 진흙입자, 실트, 가는 모래, 유기물 등의 가는 입자들로 구성된 점착성이 존재하는 혼합물
10. 질량농도(Mass Concentration): 물-유사 혼합물의 단위 부피당 차지하는 유사의 질량
11. 침강속도(Settling Velocity): 정지한 물 속에서 자유낙하하는 유사의 종말속도
12. 파괴(Breakup 또는 Disaggregation): 흐름 전단력이나 입자간의 충돌 등으로 인해 플럭이 파괴되고 크기가 감소하는 현상
13. 프랙탈 차원(Fractal Dimension): 자기유사성을 가지는 물체의 내부구조를 나타내는 통계지표이며 이 값을 이용하여 플럭의 밀도 등을 계산
14. 플럭(Floc): 일차입자와 더 작은 혼합체 등이 결합하여 생기는 점착성 유사의 덩어리
15. 플럭의 평형크기(Equilibrium Floc Size): 일정한 농도와 난류강도에서 플럭이 평형상태에 도달하였을 때의 플럭의 크기
16. 플럭의 항복강도(Yield Strength of Floc): 하나의 플럭을 파괴하는 최소의 힘
17. 한계소류력(Critical Shear Stress): 하상 및 바닥의 침식을 발생시키는 최소한의 응력

참고문헌

1. Dyer, K.R., and Manning, A.J. (1999). "Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions." *J. Sea Res.*, Vol. 41, No. 1-2, pp. 87-95.
2. Hsu, T.-J., Traykovski, P.A., Kineke, G.C. (2007). "On modeling boundary layer and gravity-driven fluid mud transport." *J. Geophys. Res.*, DOI:0.1029/2006JC 003719
3. Maggi, F., Mietta, F., Winterwer, J.C. (2007). "Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution suspended cohesive sediment." *J. Hydrology*, Vol. 343, pp. 43-55.
4. McCave, I.N. (1984). "Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean." *Deep Sea Res.*, Vol. 31, No. 4, pp. 329-352.
5. 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.
6. Milligan, T.G. (1996). "In situ particle (floc) size measurements with the benthos plankton silhouette camera." *J. Sea Res.*, Vol. 36, No. 1-2, pp. 93-100.
7. O' Melia, C.R. (1980). "Aquasols: the behaviour of small particles in aquatic systems." *Env. Sci. and Tec.*, Vol. 14, No. 9, pp. 1052-1060.
8. Sanford, L.P., and Maa, J. P.-Y. (2001). "An unified erosion formulation for fine sediments." *Marine Geology*, Vol. 179, pp. 9-23.
9. Son, M., Hsu, T.J. (2008). "Flocculation model of cohesive sediment using variable fractal dimension." *Environ. Fluid Mech.*, Vol. 8, No. 1, pp. 55-71.
10. Son, M., Hsu, T.J. (2009). "The effect of variable yield strength and variable fractal dimension on flocculation of cohesive sediment." *Water Res.*, Vol. 43, pp. 3582-3592.

11. Son, M., Hsu, T.J.H. (2010). "Idealized Study on Cohesive Sediment Flux by Tidal Asymmetry." *Environ. Fluid Mech.*, DOI:10.1007/s10652-010-9193-9.
12. Son, M., and Hsu, T.-J. (2011). "The effects of flocculation and bed erodibility on modeling cohesive sediment resuspension." *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1029/2010JC006352, in press.
13. 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.
14. 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.
15. van der Ham, R., Winterwerp, J.C. (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 Res.*, Vol. 21, pp. 1629-1647.
16. van Leussen, W. (1994). Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. PhD dissertation, University of Utrecht.
17. van Olphen, H. (1977). An introduction to clay colloid chemistry: For clay technologists, geologists, and soil scientists. John Wiley & Sons, New York.
18. Verney, R., Lafite, R., Brun-Cottan, J.C., Le Hir, P. (2010). "Behaviour of a flocculation population during a tidal cycle: Laboratory experiments and numerical modeling." *Continental Shelf Res.*, DOI:10.1016/j.csr.2010.02.005.
19. Winterwerp, J.C. (1998). "A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment." *J. Hydraul. Res.*, Vol. 36, No. 3, pp. 309-326.