

점착성 유사 이종 응집현상에 관한 수학적 모델 개발 Bimodal Flocculation of Cohesive Sediments: Mathematical Model Development and Validation

이 병 준¹, Erik Toorman²

1 경북대학교 건설방재공학부, 2 Katholieke Universiteit Leuven, Belgium

1. 서 론

이종 응집(Bimodal Flocculation)은 연안·하구에서 점착성 유사가 상호간 결합/해체를 통하여 응집핵(Flocculi)과 응집체(Floc)를 형성하는 일련의 과정을 의미한다. 이종 응집을 통하여 응집핵과 응집체의 상대분율이 변화하며, 두 꼭지점 입자크기분포(Bimodal Floc Size Distribution)를 나타내게 된다. 점착성 유사의 이종 응집은 입자간 결합력의 차이에 의해 발생하며, 하구·연안 수자원 환경에서 많이 발생한다. 하지만, 대부분의 점착성 유사 거동 예측 모델은 이종 응집현상을 고려치 않고, 점착성 유사가 균일한 크기의 응집체를 형성한다고 가정한다. 따라서, 본 연구에서는 하구·연안 수자원 환경에서의 점착성 유사 이종 응집을 모사할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 1차원 침전관 실험 자료를 활용하여 이종 응집 모델을 검증하였다.

2. 모델 개요

본 연구의 이종 응집 모델은 입자 개체군 수지식(Population Balance Equation)에 기반하고 응집핵-응집체 이종 입자구성을 고려하므로 TCPBE(Two-Class Population Balance Equation)로 명명한다(Lee et al., 2011). TCPBE는 하구·연안에서의 유체전단력(G : Shear rate)을 입자 결합/해체의 핵심인자로 가지고, 이에 따른 (1) 응집핵 숫자농도 (dN_P/dt), (2) 응집체 숫자농도 (dN_F/dt), (3) 응집체에 결합된 형태의 응집핵 숫자농도 (dN_T/dt)의 세 개 독립변수에 대한 미분방정식들로 구성된다(Eqn. 1). 미분방정식은 구체적으로 응집핵-응집핵간 결합, 응집핵-응집체간 결합, 응집체-응집체간 결합 및 응집체 해체의 프로세스에 의한 영향을 고려하게 된다. 이에 반하여, 기존 응집모델들은 단순히 점착성 유사를 단일 크기의 응집체로 보고, 응집체-응집체 결합 및 응집체 해체만을 고려하고 있다. TCPBE에서 충돌빈도함수(β : collision frequency function)는 Brownian motion, fluid shear, differential settling에 의한 응집핵 및 응집체간 충돌의 빈도를, 그리고, 해체동역학함수(a_F : breakage kinetic function)는 응집체 해체 동역학을 나타낸다. 응집효율함수(α : collision efficiency factor)는 응집핵 및 응집체간 충돌 후 결합체 유지의 결합력을 나타내고, 실험 자료에 대한 모델 피팅의 매개변수로 주로 사용된다. Eqn (1)에서, 아래첨자 P, F는 각각 응집핵(Flocculi), 응집체(Floc)을 의미한다. N_C 는 한 개의 응집체를 구성하는 응집핵의 개수로서 응집체 크기를 나타낸다. $N_T(=N_C \times N_F)$ 는 응집체를 구성하는 모든 응집핵의 개수를 의미한다. 그리고, f 는 응집체 해체를 통하여 생성되는 응집핵의 분율을 의미한다. 그리고, 본 연구에서 개발된 TCPBE는 1차원 응집·침전관 실험 결과를 활용하여 모델 검증을 수행하였다(van Leussen, 1994).

$$\begin{aligned}
 (agg / break)_{N_P} &= \frac{\partial N_P}{\partial t} = -\frac{1}{2} \alpha_{PP} \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) - \alpha_{PF} \beta_{PF} N_P N_F + f N_C a_F N_F \\
 (agg / break)_{N_F} &= \frac{\partial N_F}{\partial t} = +\frac{1}{2} \alpha_{PP} \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{1}{N_C - 1} \right) - \frac{1}{2} \alpha_{FF} \beta_{FF} N_F N_F + a_F N_F \\
 (agg / break)_{N_T} &= \frac{\partial N_T}{\partial t} = +\frac{1}{2} \alpha_{PP} \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) + \alpha_{PF} \beta_{PF} N_P N_F - f N_C a_F N_F
 \end{aligned}
 \tag{Eqn. 1}$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 0.91, 7.31/s의 유체전단력(G) 조건에서 수행된 응집·침전관 실험 결과 및 이에 상응하는 모사 결과를 보여주고 있다. 0.91/s 유체전단력 조건에서는 응집체가 비교적 균일하게 성장하여 S자 형태의 연직 농도 분포를 보이고, 7.31 /s의 높은 유체전단력 조건에서는 입자의 응집/해체가 활발하게 일어나고 응집핵, 응집체가 일정 비율로 존재하여 선형의 연직 농도분포를 보여준다. Fig.1에서 TCPBE 모사결과는 실험결과에 근접하며, 연직 농도분포 곡선 특성을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 특히, TCPBE는 기존 Single-Class PBE (SCPBE)에 비하여 실험결과에

더 근접한 모사결과를 보여주고 있으며, 현재 가장 정확한 응집모델인 Multi-Class PBE(MCPBE)에 상응하는 결과를 보여주고 있다. TCPBE가 3개의 미분방정식을 가지는데 반하여 MCPBE는 30개 가량을 가지는 점을 고려하면, TCPBE의 응집·침전에 대한 모사능력이 뛰어난을 알 수 있다.

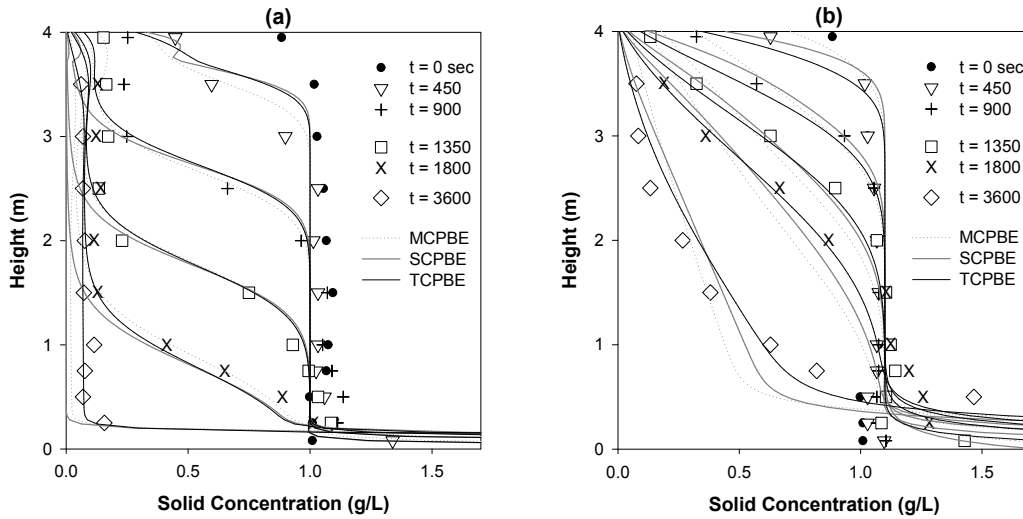
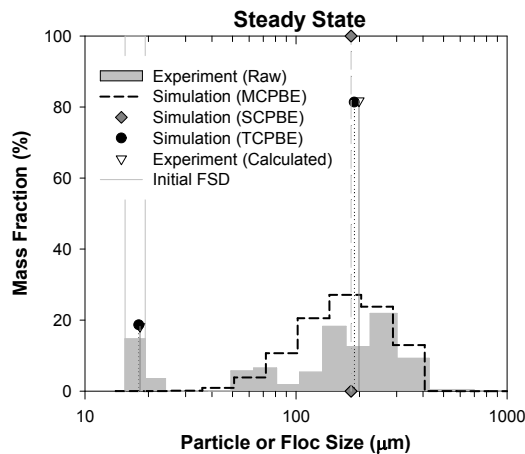


Fig. 1. Solid concentration profiles measured in the settling column test and simulated with the MCPBE, SCPBE, and TCPBE, at the shear rates of (a) 0.91 and (b) 7.31 /s.

유체전단력이 7.31 /s의 실험조건에서 정상상태의 응집핵, 응집체 크기분포와 이에 상응하는 모사결과를 Fig. 2에 나타내었다. SCPBE의 경우 응집체를 동일한 크기로 가정하므로 두꼭지점 입자크기분포 모사가 불가능하지만, TCPBE 및 MCPBE는 두꼭지점 입자크기분포에 대해 모사 가능한 것으로 나타났다. Fig. 2의 실험결과에서 응집핵이 20%, 응집체가 80%의 질량분율을 가지는 것으로 나타난 점을 고려하면, 점착성 유사 거동 예측에 주로 사용되고 있는 SCPBE의 경우 20%의 오차를 가질 것으로 판단된다. 이에 반하여 본 연구에서 개발된 TCPBE의 경우 두꼭지점 입자크기분포 모사가 가능하여, 보다 정확한 점착성 유사 거동 예측이 가능할 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

Lee, B.J., Toorman E., Molz F., Wang J. (2011) A two-class population balance equation yielding bimodal flocculation of marine or estuarine sediments, *Water Research*, 45, 2131–2145.
 van Leussen W. (1994) *Estuarine Macroflocs: Their Role in Fine-Grained Sediment Transport*, PhD Dissertation, Universiteit van Utrecht.