

난류조건에서의 점착성 유사 이군집 응집 모형 적용성 평가

Evaluation of the Two Class Population Balance Equation for Predicting the Bimodal Flocculation of Cohesive Sediments in Turbulent Flow

이 병 준* / Toorman, E.A.**
Lee, Byung Joon / Toorman, E.A.

Abstract

The bimodal flocculation of cohesive sediments in water environments describes the aggregation and breakage process developing a bimodal floc size distribution with dense flocculi and floppy flocs. A two class population balance equation (TCPBE) was tested for simulating the bimodal flocculation by a model-data fitting analysis with two sets of experimental data (low and high turbulent flows) from 1-D flocculation-settling column tests. In contrast to the Single-Class PBE (SCPBE), the TCPBE could simulate interactions between flocculi and flocs and the flocculation mechanism by differential settling in a low turbulent flow. Also, the TCPBE could perform the same quality of simulation as the elaborate Multi-Class PBE (MCPBE), with a small number of floc size classes and differential equations. Thus, the TCPBE was proven to be the simplest model that is capable of simulating the bimodal flocculation of cohesive sediments in water environments and water, wastewater treatment systems.

Keywords : cohesive sediment, flocculi, floc, bimodal, population balance equation

요 지

이군집 응집현상은 수자원환경에서 점착성 유사가 결합-해체의 과정을 통해 응집핵-응집체의 이군집 입자크기분포 (Bimodal Floc Size Distribution)를 형성하는 일련의 과정을 의미한다. 본 연구는 저난류 및 고난류 두 가지 조건에서 수행한 응집-침전관 실험결과를 바탕으로 이군집 응집모형(TCPBE: Two Class Population Balance Equation)의 적용성을 단일군집 응집모형(SCPBE: Single Class Population Balance Equation) 및 다군집 응집모형(MCPBE: Multi Class Population Balance Equation)과 비교·평가하였다. 기존 SCPBE에 비하여, TCPBE는 응집핵-응집체의 상호작용 및 침강속도차에 따른 응집 기작을 모의할 수 있었다. 또한, 3개의 연립미분방정식을 가진 TCPBE는 30개 미분방정식을 가진 다군집 응집모형(MCPBE: Multi Class Population Balance Equation)과 대등한 모의 결과를 나타내었다. 따라서 TCPBE는 이군집 응집현상을 모의 할 수 있는 가장 단순한 모델로 검증되었고, 향후 수자원환경이나 수처리 공정에 다양하게 적용할 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 점착성 유사, 응집핵, 응집체, 이군집, 입자개체군수지식

* 교신저자, 경북대학교 과학기술대학 건설방재공학부 조교수 (e-mail: bjlee@knu.ac.kr, Tel: 82-54-530-1444)

Corresponding Author, Assistant Professor, School of Construction and Environmental Engineering, Kyungpook National University, 2559 Gyeongsang-daero, Sangju, Gyeongbuk 742-711, Korea

** Professor, Hydraulics Lab., KU Leuven, Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Leuven, Belgium

1. 서론

이군집 응집(Bimodal Flocculation)현상은 수자원환경에서 점착성유사(Cohesive Sediments)가 결합-해체의 과정을 통해 응집핵(Flocculi), 응집체(Flocs)의 이군집을 형성하는 일련의 과정을 나타낸다(Manning et al., 2007; van Leussen, 1994). 이군집 응집을 통하여 응집핵, 응집체의 상대분율이 변하며, 두 꼭지점 입자크기분포(Bimodal Floc Size Distribution)를 나타내게 된다. 이군집 응집은 점착성 유사가 풍부한 수자원환경에서 주로 발생하며, 특히, 하구 및 연안이나 강우시 고탁도 지역에서 많이 발생한다(Yuan et al., 2009; Orange et al., 2005, Lee et al., 2014).

이군집 응집은 점토입자의 일, 이차 결합력 차이에 의해 주로 발생한다. 일차 결합은 판상의 점토입자가 분자단위에서 직접 접촉하여 강하게 결합된 형태이고, 이에 반하여 이차 결합은 여러가지 유기 및 무기성분이 약하게 결합되어 있는 형태이다(van Leussen, 1994; Winterwerp and van Kesteren, 2004). 일반적으로 일차 결합은 입자가 강하게 결합된 작고 밀도가 높은 형태의 응집핵을 만들고, 이차 결합은 응집핵들이 다소 느슨하게 결합된 크고 밀도가 낮은 형태의 응집체를 만든다. 점토입자가 일차 결합된 응집핵은 수체의 난류강도에 저항하여 더 이상 크거나 줄어들지 않으나, 응집핵들이 약하게 결합된 응집체는 난류강도에 따라 결합/해체의 과정을 통하여 그 크기가 성장하거나 감소하게 된다. 따라서 점착성 유사 수체 난류 조건에서 일, 이차 결합력에 지배를 받게 되면 응집핵, 응집체 군집 분화에 따른 두 꼭지점 입자크기 분포를 갖게 된다(Manning et al., 2006, 2007).

점착성유사는 발생원에 따라 다양한 크기, 모양, 지질학적 성분을 가진다. 이와 같이 다양한 성분의 점착성 유사는 일, 이차결합력의 차이를 가지며 이군집 응집을 활성화 한다. 예를 들어, 결합력이 강한 점토와 약한 실트질이 혼합된다면, 점토는 서로 결합하여 응집체를 형성하지만 실트질은 결합되지 않고 응집핵으로 남아있게 되어, 이군집 응집에 의한 두 꼭지점 입자크기분포를 나타내게 된다(Li et al., 1993; Li et al., 1999). 수중유기물 역시 일, 이차 결합력의 차이를 발생시키고 이군집 응집을 도모하는 것으로 알려져 있다. 이들 수중유기물은 주로 미생물에 의해 생성된 유기고분자물질로써, 응집핵을 엉기게 하여 큰 응집체를 형성하게 한다(Mietta et al., 2009; Manning and Bass, 2006; Mikkelsen et al., 2006). 일반적으로 점착성 유사 응집체의 크기가 주로 100~200 μm 인데 반하여

유사-유기물 혼합 응집체의 크기가 수천 μm 까지 성장한다는 점을 고려하면, 유기고분자물질 역시 입자의 일, 이차 결합력 차이를 일으키고, 이군집 응집을 도모함을 알 수 있다.

수자원환경에서 이군집 응집이 빈번하게 발생함에도 불구하고, 지금까지의 점착성유사 거동 예측 모델은 하나의 대표 입자 크기만을 고려한 단일군집 응집(Unimodal Flocculation) 모형을 적용하고 있는 실정이다(Winterwerp, 2002; Perianez, 2005; van Rijn, 2007). 이군집 응집 현상을 무시한 채, 단일군집 응집 모형을 적용한다면 점착성 부유사 거동 예측에 큰 오차가 생길 것이다. 예를 들어, 수자원 시스템에서 유사 퇴적량을 정확히 예측할 수 없다면 적절한 준설계획을 세우지 못할 것이고, 퇴적이 환경/생태에 미치는 영향을 적절히 평가할 수 없을 것이다. 이와 같은 단일군집 응집 모형의 단점을 보완하기 위하여, 응집핵과 응집체 이군집을 모델에 포함하고 이군집 응집 현상을 수학적으로 모사할 수 있도록, 이군집 응집모형(TCPBE: Two-Class Population Balance Equation)이 개발되었다(Lee et al., 2011). 본 연구에서는 응집-침전관 실험결과를 바탕으로(van Leussen, 1994), 저난류 그리고 고난류 조건에서 TCPBE의 적용성을 평가하였다. 특히 기존에 범용되던 단일군집 응집모형(SCPBE: Single-Class Population Balance Equation) 및 다군집 응집모형(MCPBE: Multi-Class Population Balance Equation)과 수학적 난이도, 모의결과의 신뢰성 등을 각각도로 비교하여, TCPBE의 수자원 및 수처리 시스템에 대한 향후 적용 가능성에 대한 평가를 수행하였다.

2. 실험방법

난류조건에서의 응집을 포함한 점착성 유사 거동을 모의하기 위한 가장 진보된 방법은 입자의 이류(Advection), 분산(Dispersion)을 포함한 물질이동식에 입자개체군수지식(PBE: Population Balance Equations)을 결합하여 사용하는 방법이다(Fox, 2003; Prat and Ducoste, 2006). 아래의 Eq. (1)은 3차원 흐름에서의 점착성 유사 거동 모의를 위한 수정된 입자개체군수지식을 보여주고 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial n_i}{\partial t} \right] \\ & + \left[\frac{\partial}{\partial x} (u_x n_i) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y n_i) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z n_i) \right] \\ & - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial n_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial n_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial n_i}{\partial z} \right) \right] \\ & = (A_i + B_i) - \frac{\partial (w_{s,i} n_i)}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. (1)에서, $n_i = n(x,y,z,D_i,t)$ 는 입자크기(입경) D_i 를 가진 i 번째 클래스의 개수 농도를 나타내고 ($i=1, 2, \dots, imax; D_1 \leq D_i \leq D_{max}$), x, y, z, t 는 위치 및 시간을 나타낸다. u_x, u_y, u_z 는 x, y, z 방향 유속, D_{tx}, D_{ty}, D_{tz} 는 x, y, z 방향 분산계수, A_i 및 B_i 는 응집(결합 및 해체를 포함)에 의한 입자 개수농도(n_i)의 생성 및 소멸속도를 나타낸다. 그리고 $w_{s,i}$ 는 i 클래스 입자의 침전속도를 의미한다. Eq. (1)에서 좌측 첫 항은 입자 개수농도의 축적, 둘째 항은 이류에 의한 이송, 셋째 항은 분산에 의한 이송을 나타내고, 우측 항은 응집(결합-해체) 및 침전에 의한 입자의 생성, 소멸 속도를 나타내고 있다. 여기서, 응집에 의한 개체군 응집(결합-해체) 속도식은 MCPBE, SCPBE 그리고 TCPBE 응집모형을 적용할 수 있다(Eqs. (2)~(5)). 각 응집 모형에 대한 개념 및 수학적 구성 원리는 아래에 간략히 소개되어 있으며, 자세한 내용은 Lee et al., (2011)에 기술되어 있다.

2.1 응집 모형 (Population Balance Equations)

다군집 응집모형(MCPBE)의 응집체 군집 차분화 방법을 따르면, 상위 응집체 군집은 하위 군집에 비하여 2배 많은 응집핵으로 구성된다(Houslow et al., 1988; Spicer and Pratsinis, 1996) (Fig. 1). 응집체의 크기 증대가 프랙탈 이론(Fractal Theory: $D_i = \delta \cdot (2i-1)^{1/n_f}$, $1 < n_f < 3$ for spherical porous flocs)을 따르는 것으로 가정하고, 수자 원환경에서 발생하는 수 μm 의 응집핵과 수 mm 에 이르는 응집체 크기를 MCPBE로 표현하면 약 30 여개의 응집핵/응집체 군집과 이에 따른 연립 미분방정식을 필요로 한다 (Spicer and Pratsinis, 1996). 최근 컴퓨터 기술발전을 고려하더라도, 2, 3 차원 공간에서의 응집체-응집핵 거동에 관한 30개 연립미분방정식을 풀어내기란 쉽지 않다. MCPBE의 연립미분방정식은 Eq. (2)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} &= (A_i + B_i) \\ A_i &= n_{i-1} \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j+i-1} \alpha \beta_{i,j} n_j + \frac{1}{2} \alpha \beta_{i,i-1} n_{i-1}^2 - n_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j+i} \alpha \beta_{i,j} n_j - n_i \sum_{j=i}^{(max\ i)} \alpha \beta_{i,j} n_j \quad (2) \\ B_i &= -a_i n_i + \sum_{j=i+1}^{(max\ i)} b_{ij} a_j n_j \end{aligned}$$

일반적인 응집 속도식은 경험, 이론 인자 및 식을 포함한다. 응집 속도식에서, 응집효율함수(α collision efficiency factor)는 응집핵 및 응집체간 결합력을 나타내고, 실험 자료에 대한 모델 최적화 매개변수로 주로 사용된다. 충돌빈도함수(β collision frequency function)는 분자확산 (Brownian motion), 난류(fluid shear), 침강속도차(diff-

ferential settling) 응집 기작에 대한 응집핵 및 응집체간 충돌의 빈도를, 그리고 해체속도함수(α_f : breakage kinetic function)는 응집체크기 및 난류정도에 의존하는 응집체 해체 속도식을 표현한다.

단일군집 응집모형(SCPBE)은 모든 접착성 유사가 단일 크기의 응집체로 구성된다고 가정한다(Fig. 1). 응집체 크기는 응집(결합+해체) 속도식에 의거하여 지속적으로 변화하게 된다. SCPBE는 Eqs. (3) and (4)로 표현되며, 시간에 따른 응집체 숫자 농도 및 크기(N_F and D_F)를 추적하게 한다(Winterwerp, 2002; Mietta et al., 2009). SCPBE는 구성이 간단하고 적용이 쉽지만, 응집체를 단일크기로 가정하기 때문에 이군집 응집현상, 침전속도차에 의한 응집 기작을 구현할 수 없다. SCPBE는 오직 수체 난류에 의한 응집현상만을 고려할 수 있다.

$$\frac{dN_F}{dt} = (A_F + B_F) = -\frac{1}{2} \alpha_{FF} \beta_{FF} N_F^2 + a N_F \quad (3)$$

$$D_F = \left(f_s \frac{\rho_s}{c} D_P^{3-n_f} N_F \right)^{-1/n_f} \quad (4)$$

Eqs (3) and (4)에서 N_F 는 응집체 숫자 농도, c 는 응집체 질량 농도, D_F 는 응집체 크기, D_P 는 응집핵 크기, f_s 는 형상계수(구형입자의 경우 $f_s = \pi/6$), 그리고 ρ_s 는 고체(응집핵)의 밀도를 나타낸다.

이군집 응집모형(TCPBE)은 응집핵, 응집체의 두 군집으로 구성되며, 응집핵의 크기는 고정되고 응집체의 크기는 결합/해체의 과정을 통해 성장 혹은 감소한다. 따라서, SCPBE와는 달리, TCPBE는 응집핵, 응집체 간의 상호작용, 즉 이군집 응집현상을 모의할 수 있다. TCPBE에서는 한 개의 응집체가 수용하는 응집핵 숫자(N_C)가 응집체 크기 지표로 사용된다. 응집체가 최소단위인 응집핵으로 해체되는 경우, 응집체 크기 지표 N_C 는 1이 된다. TCPBE의 경우, 응집핵 및 응집체 숫자농도(N_P, N_F) 그리고 응집체 크기 지표(N_C)가 시간, 공간에 대해 변화하는 종속변수가 된다(Fig. 1). 그러므로 TCPBE는 세 개의 종속변수에 대한 연립미분방정식의 형태가 되고, 시간에 따른 (1) 응집핵 개수 농도 (dN_P/dt), (2) 응집체 개수 농도 (dN_F/dt), (3) 응집체 크기 지표 (dN_C/dt) ($N_T = N_C \times N_F$) 변화를 추적하게 된다 (Eq. (5)). 아래첨자 P, F 는 각각 응집핵 및 응집체를 나타내고, k 는 응집체 해체과정에서 생성되는 응집핵 분율을 나타낸다. TCPBE는 응집체 크기 분포의 모멘트 보존 법칙에 의거하여 개발되었으며,

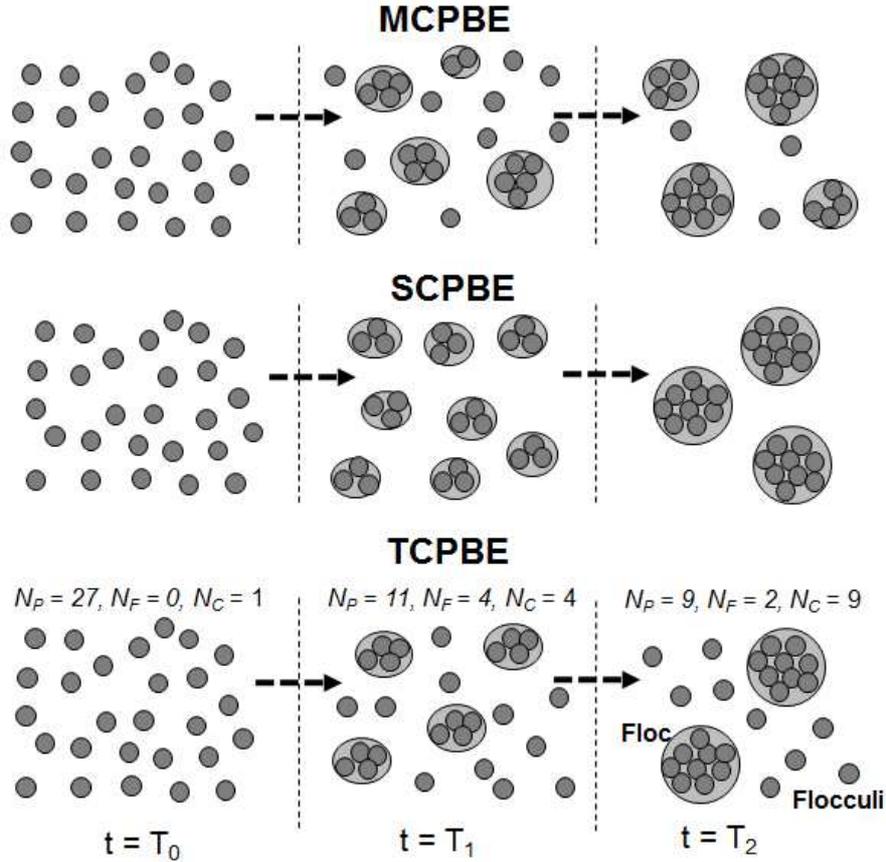


Fig. 1. Flocculation Strategies of the MCPBE, SCPBE and TCPBE, Representing the Time-dependent Change of the Floc Size Distributions (FSDs). NP=the number of flocculi, NF=the number of flocs, and NC=the number of flocculi bound in a floc, used as the floc size index

일련의 개발과정은 Jeong and Choi (2003, 2004, 2005) 자세히 기술되어 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_p}{dt} &= (A_p + B_p) = -\frac{1}{2}\alpha\beta_{pp}N_pN_p\left(\frac{N_c}{N_c-1}\right) - \alpha\beta_{pf}N_pN_f + fN_c a_f N_f \\ \frac{dN_f}{dt} &= (A_f + B_f) = +\frac{1}{2}\alpha\beta_{pp}N_pN_p\left(\frac{1}{N_c-1}\right) - \frac{1}{2}\alpha\beta_{ff}N_fN_f + a_f N_f \\ \frac{dN_f}{dt} &= (A_f + B_f) = +\frac{1}{2}\alpha\beta_{pp}N_pN_p\left(\frac{N_c}{N_c-1}\right) + \alpha\beta_{pf}N_pN_f - fN_c a_f N_f \end{aligned} \quad (5)$$

Table 1은 응집모형(MCPBE, SCPBE, and TCPBE)에 사용되는 결합-해체 커널(Kernel)함수와 이와 관련한 반응속도 상수를 나타내었다. 특이사항은, MCPBE나 TCPBE는 이균집 혹은 다균집간 상호작용을 고려하므로 분자확산, 침전속도차, 난류에 의한 응집현상을 모두 고려할 수 있지만, SCPBE의 경우 난류에 의한 응집만을 고려한다(Winterwerp, 2002). 그리고 응집체 해체의 경우, SCPBE, TCPBE, MCPBE 모두 난류 영향만을 고려한다(Winterwerp, 2002; Maggi, 2005).

2.2 응집체 침강속도식

본 연구에서는 유체-고체간 마찰 및 고농도 침전층에 발생하는 간섭침강(Hindered Settling)을 고려한 응집체 침강속도식을 사용하였다(Eqs. (7) and (8))(Richardson and Zaki, 1954; Toorman, 1999; Winterwerp and van Kesteren, 2004). 경험상수인 프랙탈 상수 (n_f), Richardson-Zaki 상수(a)는 1.7~2.3, 2.5~5.5 범위로 보고된 바 있으므로(Winterwerp and van Kesteren, 2004), 본 연구에서는 대표값인 2.0, 4.0으로 각각 적용하였다.

$$w_{s,i} = \Phi_{HS} \left(\frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p^{3-n_f} \frac{D_i^{n_f-1}}{1 + 0.15Re_i^{0.687}} \right) \quad (6)$$

$$\Phi_{HS} = (1 - \phi)^a \quad (7)$$

Eqs. (6) and (7)에서, ρ_s 는 응집체 고체밀도, ρ_w 는 유체 밀도, g 는 중력가속도, μ 는 유체 점성계수, Φ_{HS} 는 간섭침

Table 1. Aggregation–Breakage Kinetic Kernels of the SCPBE, MCPBE and TCPBE

PBE	Aggregation Kernel	Breakage Kernel
SCPBE	$\beta = \frac{1}{6}(2D_f)^3 G$	$a_i = E_b G \left(\frac{D_i - D_p}{D_p} \right)^p \left(\frac{\mu G}{F_y / D_i^2} \right)^q$
MCPBE	$\beta_{ij} = \beta_{BR,ij} + \beta_{SH,ij} + \beta_{DS,ij}$ $\beta_{BR,ij} = \frac{2kT}{3\mu} \left(\frac{1}{D_i} + \frac{1}{D_j} \right) (D_i + D_j)$	
TCPBE	$\beta_{SH,ij} = \frac{1}{6}(D_i + D_j)^3 G$ $\beta_{DS,ij} = 2\pi D_i^2 w_{s,j} - w_{s,i} $	
Nomenclature	<p>D_i = Diameter of i-th size class D_p, D_f = Diameter of a flocculi / floc N_C = No. of flocculi in a floc ($D_f = N_C^{1/n_f} \cdot D_p$) n_f = Fractal Dimension a = Collision efficiency factor $\beta_{i,j}$ = Collision frequency function between size classes i and j β_{BR} = Collision frequency function by Brownian motion β_{SH} = Collision frequency function by fluid shear β_{DS} = Collision frequency function by discrete settling k = Boltzmann's constant</p>	<p>p, q = Empirical parameters T = Absolute Temperature (K) μ = Absolute viscosity of the fluid $G = (\epsilon/\nu)^{0.5}$ = Shear rate (/s) ϵ = Kinametic energy dissipation rate ν = Kinametic viscosity w_i = Settling velocity of i-th size class a_i = Breakage kinetic function E_b = Efficiency for the breakage process F_y = Yield strength of flocs (10^{-10}Pa) f = Fraction of fragmented flocculi</p>

강 계수, ϕ 응집체 부피농도, Re_i 응집핵/응집체의 레이놀즈 계수를 나타낸다.

2.3 응집 모형 최적화

응집모형(SCPBE, MCPBE, TCPBE)의 적용성은 침전관 실험의 측정값과 모형 계산값 간의 유사성을 계량화하여 비교하였다. 본 연구에 사용된 침전관은 높이 4.25 m, 직경 0.29 m 원통형이고 내부에 격자망 형태의 난류 발생 장치를 가지고 있다. 격자망의 상하운동 속도를 조절하여 유체난류계수 및 속도경사(fluid turbulence parameter: D_z and shear rate: G)를 제어하도록 되어있다. 특히, 유체속도경사(G)는 응집모형의 핵심요소인 응집핵, 응집체 결합/해체 속도를 결정하게 된다. 침전관 실험은 먼저 1,000 mg/L 점착성 유사와 32 psu 해수 혼합물을 침전관에 채우고 아주 강한 난류조건에서 균질화한 후 시작하였고, 이후 난류조건(G)을 0.91 또는 7.31/s로 제어하고 각 시간대 별 그리고 높이별로 고형물 농도와 응집체 크기 분포를 측정하였다. 기 수행된 침전관 실험방법은 van Leussen (1994)에 자세히 기술되어있다.

침침전관 실험에서 두 개의 난류조건($G=0.91$ and 7.31

/s)을 적용하여 연직 농도분포, 응집체 크기 등의 실험값을 도출하였고, 이후 실험값은 응집모형 최적화 및 적용성 평가에 사용하였다. 응집효율계수(a)는 측정값에 대한 최적 계산값을 도출하기 위해 Fitting Parameter로 사용하였다. 본 연구에서는 응집모형(SCPBE, TCPBE, MCPBE)의 서로 다른 난류조건에서의 적용성의 상호 비교를 목표로 하므로, 응집체 해체 상수(E_b), 프랙탈상수(n_f) 등 기타 반응 속도 및 양론 계수들은 기존 연구의 대표값을 사용하였다 (Table 2)(Jackson, 1995; Winterwerp and van Kesteren, 2004; Maggi, 2005). 응집모형 적용성은 측정값과 계산값 사이의 잔차합(SRE: Sum of Residual Errors)으로 정량화하여 평가하였다(Berthouex and Brown, 1994).

$$SRE = \sum_{i=1}^n (error_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_{exp,i} - y_{model,i})^2 \quad (8)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응집체 침강속도식 검증

본 연구에서 적용된 침강속도식 및 상수는 다양한 크기

Table 2. Model Constants for the Low and High Turbulent Conditions

Classification	Symbol	Value	Description
Kinetic and Physicochemical Constants			
Agg/Brk Kinetics (MCPBE TCPBE)	a	Varying	Collision efficiency factor [-]
	E_b	2.0e-4	Efficiency factor for breakage [$s^{0.5}/m$]
	F_y	1.0e-10	Yield strength of flocs [Pa]
	D_C	450	Critical diameter for floc growth [μm]
	f	0.02 0.05	Fraction of fermented microflocs [-]
	p	1.0	Empirical parameter of breakage kinetics
	q	3.0 - n_f	Empirical parameter of breakage kinetics
Fluid Turbulence (Low High)	σ	0.025 0.100	Frequency of the oscillating grid [/s]
	$^a \epsilon$	8.37e-7 5.36e-5	Kinematic energy dissipation rate [m^2/s^3]
	$^a D_{Lz}$	2.67e-5 1.07e-4	Vertical dispersion coefficient [$s^{0.5}/m$]
	$^a G$	0.91 7.31	Shear rate [/s]
Sediment Property (Low High)	c	1.0 1.1	Mass conc. of the tested sediment [g/L]
	$^b N_{PT}$	2.05e+11 2.25e+11	No. conc. of the tested sediment [m^{-3}]
	ρ_s	1800	Density of the tested sediment [kg/m^3]
	D_p	18	Diameter of the tested sediment [μm]
	n_f	2.0	Fractal dimension of flocs [-]
	a	4.0	Exponent of Richardson-Zaki eqn [Pa]
$^a \epsilon = 127 \cdot a_0^3 \cdot \sigma^3$, $D_z = 0.19 \cdot a_0^2 \cdot \sigma$, $G = \sqrt{\epsilon/\nu}$ Where, $a_0 = 0.075$ = amplitude oscillating grid[m] $\nu = 1.10e-6$ = kinematic viscosity [m^2/s],			$^b N_{PT} = c / (0.167 \cdot \pi \cdot D_p^3) / \rho_s$ assuming that a flocculi is spherical.

의 응집체에 대한 침강속도 측정값과 예측값을 비교하여 검증하였다. Fig. 2에서 침강속도 측정값이 예측 곡선을 중심으로 퍼져있는데, 이와 같은 응집체 침강속도 불확실성은 응집체의 불균일한 구성에 의해 발생하는 일반적인 현상으로 보고되고 있다(van Leussen, 1994; Winterwerp and van Kesteren, 2004). 전반적으로 침강속도식에 의한 예측값이 측정값과 유사한 경향을 가지므로, 침강속도식 및 상수가 적용 타당한 것으로 판단하였다.

3.2 최적화 결과 비교

주어진 응집모형(SCPBE, MCPBE and TCPBE)과 두 가지 실험조건($G=0.91$ and $7.31/s$)에 대하여 최적화 계수(Fitting Parameter)인 응집효율계수(α)를 변화하며 모의한 경우, 실험값-계산값 사이의 잔차합이 J 또는 U 형태의 곡선을 나타낸다(Fig. 3). J 또는 U 곡선의 최저점, 즉 최소 잔차합에서 최적화 계수가 결정되게 된다. 최적화 계수값은 각 응집모형의 장단점을 비교하기 위한 자료로 활용하였다. 일반적으로, 최적화계수인 응집효율계수가 증가함에 따라 응집체의 크기, 침강속도, 플럭스가 증대되므로, 질량농도곡선이 보다 바닥면으로 접근하게 한다(Fig. 4).

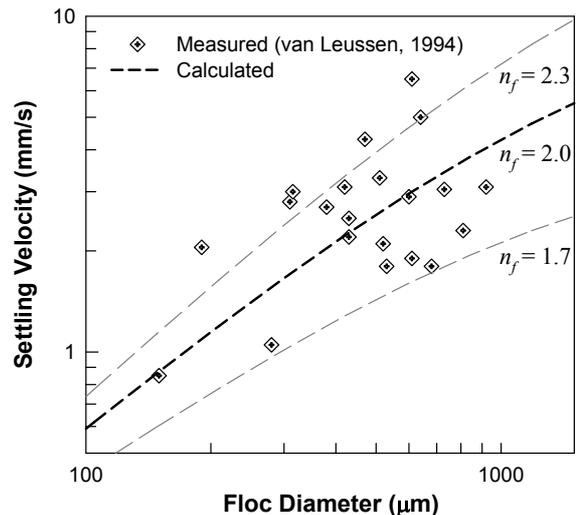


Fig. 2. Floc Diameter Versus Settling Velocity, Measured In Settling Column Tests (diamond symbol) (van Leussen, 1994) and Calculated with the Modified Stokes Equation (dashed line)

주목할 만한 사항은, SCPBE의 경우 낮은 속도경사($G=0.91/s$)에서 비정상적으로 높은 최적화 응집효율계수(α)를

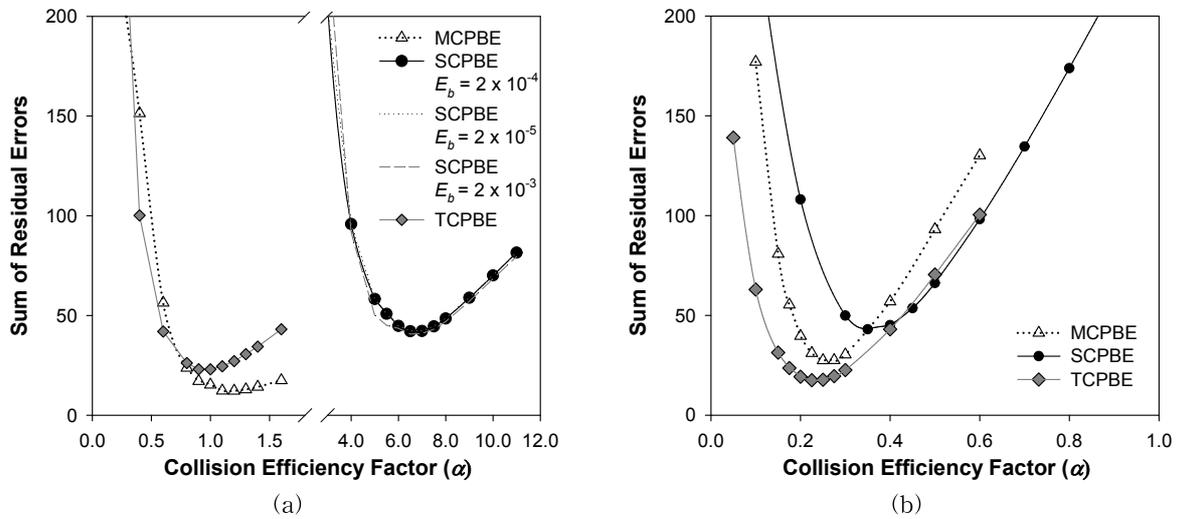


Fig. 3. The Sum of Residual Errors (SREs) Versus Collision Efficiency Factor (α) for Different PBEs. Two Figures Were Obtained for Different Fluid Shear Rates, (a) the Lower Shear Rate (0.91 /s) and (b) the Higher Shear Rate (7.31 /s)

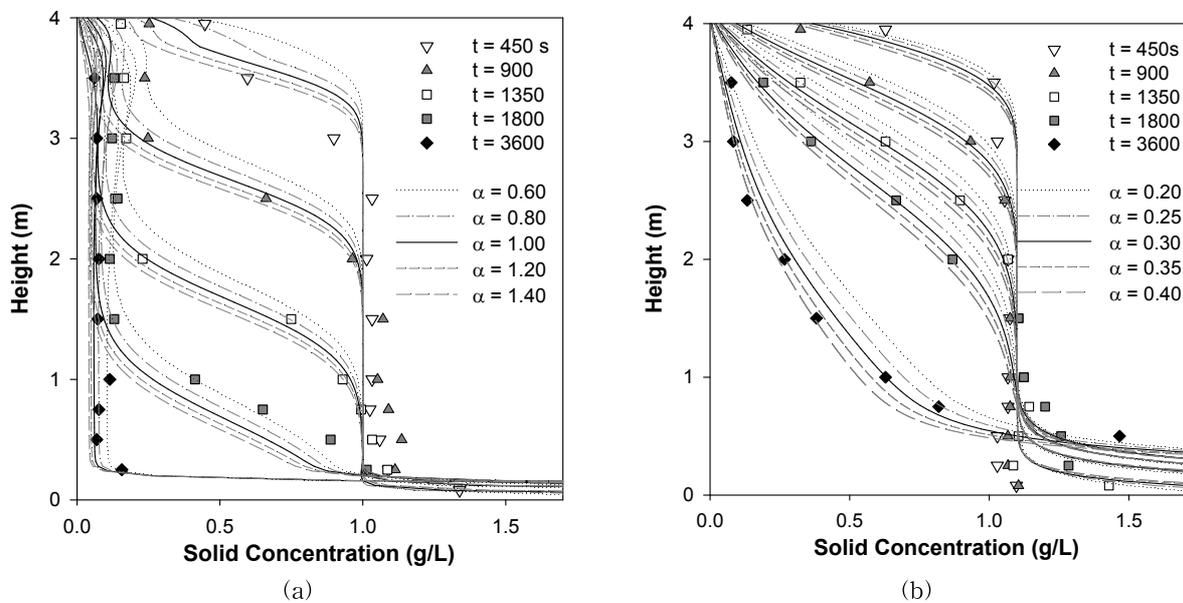


Fig. 4. Sensitivity analyses with Respect to the Collision Efficiency Factor (α). Symbols Represent Measured Solid Concentration Profiles. Lines Represent Simulated Profiles with the TCPBE for Different Collision Efficiency Factors (a). Two Figures Were Obtained for Different Fluid Shear Rates, (a) the Lower Shear Rate (0.91 /s) and (b) the Higher Shear Rate (7.31 /s)

가지는 것으로 나타났다. 최적화 조건에서 SCPBE의 응집효율계수가 정상값 범위인 1을 훨씬 넘어 6.5로 나타났다(Elimelech et al., 1995). 이와 같은 비정상적 결과는 SCPBE의 적용 한계를 나타낸 것으로 사료된다. SCPBE는 낮은 속도경사 조건에서 주로 발행하는 침강속도차 응집현상, 즉 큰 응집체가 침강하면서 작은 응집체/응집핵을 포집하는 현상을 고려하지 않고 난류에 의한 응집현상

만을 고려하기 때문인 것으로 판단된다(Stolzenbach and Elimelech, 1994; Elimelech, 1995). 본 연구에서 SCPBE의 경우 침강속도차 응집현상을 고려할 수 없으므로, 그에 대한 부족분을 보완하기 위하여 응집효율계수가 비정상적인 값으로 증대되었으리라 사료된다.

연안 및 하구역 등 자연적 수환경에서는 지속적인 물 흐름이 있으므로 유체난류에 의한 응집이 침강속도차 응

집을 무시할 만큼 큰 것으로 알려져 있다(Winterwerp and van Kesteren, 2004; Stolzenbach and Elimelech, 1994). 하지만, 조수의 정조기나 정체수역의 경우 유체의 속도경사(G)가 0.5~2.1/s 범위로 매우 낮아지므로 침강속도차 응집이 충분히 발생할 수 있을 것으로 판단된다(van Leussen, 1994). 벨기에 연안 및 하구역의 정조시 유체속도경사(G)의 실제 측정된 최소값은 값은 2.0/s 정도로 나타났다(Maggi, 2009). 또한, 상하수 처리 공정의 침전지의 경우 난류를 배제하고 침강을 도모하므로, 침강속도차 응집을 무시할 수 없을 것이다. 이와 같은 자연계 혹은 공정의 정류조건에서는, 침강속도차 응집을 무시한 채 난류 응집만을 고려할 수 있는 SCPBE의 사용은 부적절 할 것으로 사료된다.

3.3 응집모형(SCPBE, TCPBE, MCPBE) 비교

Fig. 5는 침전관 높이에 따른 질량농도 분포곡선에 대한 최적화 모의 계산값과 실험값을 나타내고 있다. 낮은 속도경사($G=0.91/s$)에서의 질량농도는 수체 표면에 잔류농도로 인한 꼬리를 가지는 S자 형태의 분포곡선을 가진다. 그러나, 높은 속도경사($G=7.31/s$)에 대해서는 S자 형태가 다소 완화되어 있음을 확인할 수 있다. 높은 속도경사의 경우 응집(결합-해체)이 활발하고 응집체의 크기분포가 넓을 뿐 아니라 난류에 의한 부유(Suspension)작용에 더 큰 영향을 받게 된다. 이에 따라 다양한 응집체가 높이에 따라 크기별로 정렬되고 선형의 질량농도곡선을 가지게 된다. Fig. 6은 최적화 모의 결과로써 정상상태에

서의 응집핵/응집체 크기의 높이별 분포를 나타내고 있다. 낮은 속도경사에서는 수표면 근처(높이 4m 지점)를 제외하고는 높이와 상관없이 응집체 크기가 좁은 영역에 고착됨을 볼 수 있다. 하지만, 높은 속도경사에서는 높이가 낮아질수록 응집체 크기가 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 높은 속도경사는 결합-해체를 보다 활성화하므로, 넓은 응집체 크기분포를 가지게 하고 침강속도 및 부유정도의 차이에 의한 크기별 정렬(Size Sorting)현상을 도모하게 된다.

낮은 속도경사에서는 모든 응집모형의 최적화 계산값이 대체로 측정값에 근접하였다. 하지만, MCPBE 및 TCPBE가 SCPBE에 비하여 수표면-슬러지층 간 잔류농도를 보다 명확히 모사할 수 있었다. SCPBE의 경우 수표면-슬러지층 간 잔류농도가 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이에 반해, MCPBE, TCPBE의 경우 결합-해체의 과정을 통해 바닥면으로 침강하는 응집체와 잔류하게 되는 응집핵을 분리하여 모사하므로 수표면-슬러지층 간 잔류농도를 보다 명확히 모사하고 있다. 낮은 속도경사 조건과 달리, 높은 속도경사 조건의 질량농도곡선은 앞서 언급한 크기별 정렬 현상에 의하여 슬러지층 계면을 형성하지 않고 선형을 나타냄을 알 수 있다. 높은 속도경사 조건에서도, 미묘한 차이이긴 하지만, MCPBE 및 TCPBE가 SCPBE에 비하여 측정값에 보다 가까운 계산값을 나타내었다.

MCPBE 및 TCPBE 모두 수표면-슬러지층 간 잔류농도 침전관 깊이에 따른 응집핵-응집체의 두께지점 크기

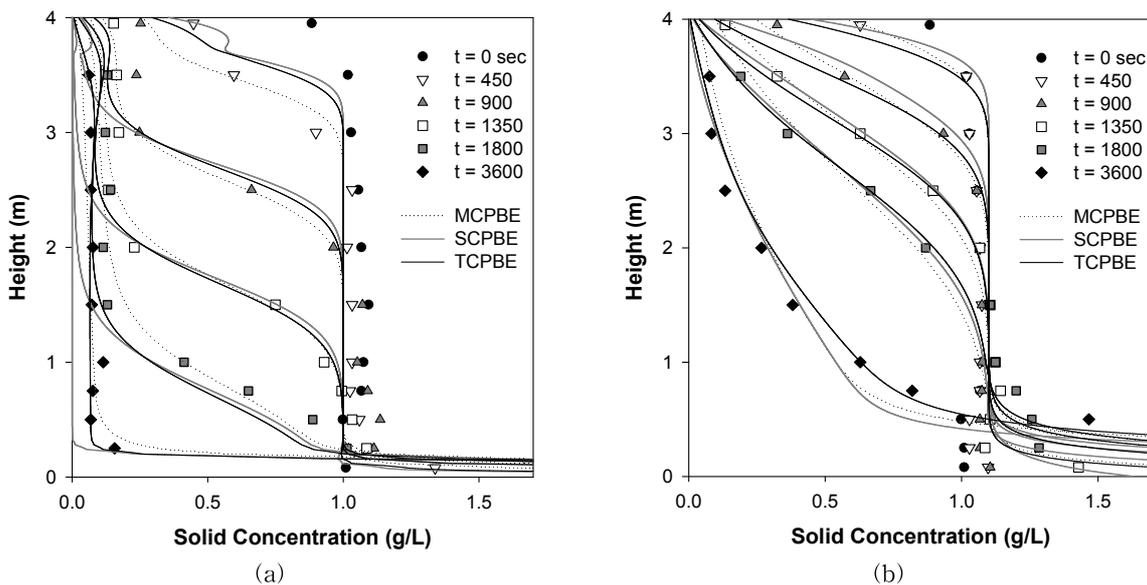


Fig. 5. Measured Solid Concentration Profiles (symbols) and Best Fit Profiles Simulated with the MCPBE, SCPBE, and TCPBE (lines) for Different Fluid Shear Rates, (a) the Lower Shear Rate (0.91 /s) and (b) the Higher Shear Rate (7.31 /s) (Lee et al., 2011)

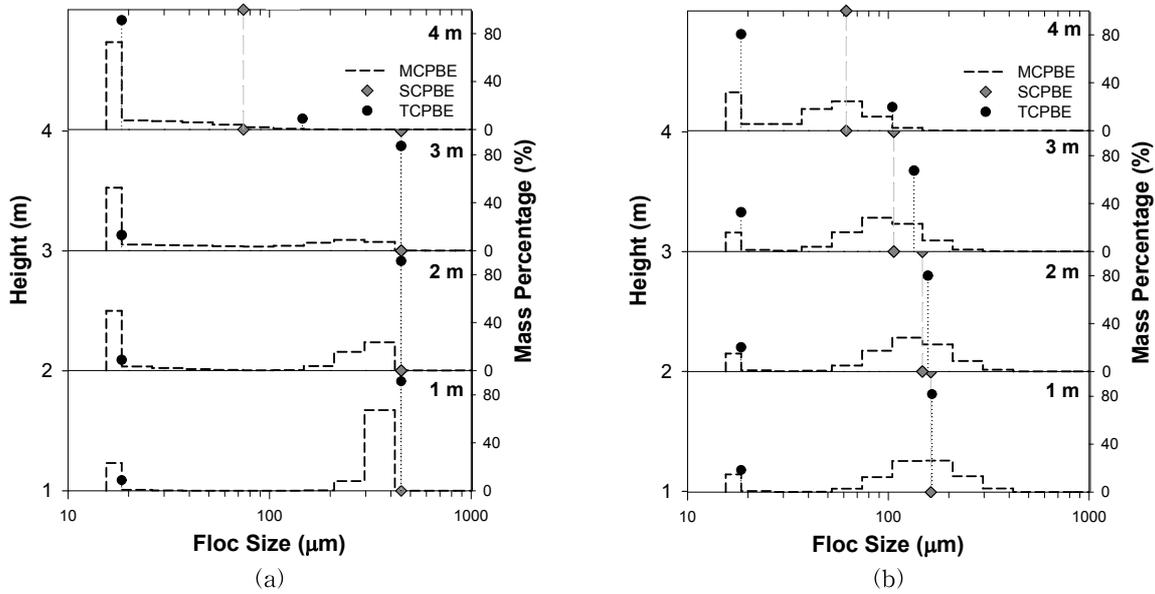


Fig. 6. Simulated Floc Size Distributions (FSDs) at Different Water Heights at $t=1,800$ sec. The FSDs were Simulated with the MCPBE, SCPBE, and TCPBE for Different Fluid Shear Rates, (a) the Lower Shear Rate (0.91 /s) and (b) the Higher Shear Rate (7.31 /s) (Lee et al., 2011)

분포를 잘 모사할 수 있었다. 하지만, MCPBE가 30개의 응집체군과 이에 따른 미분방정식을 필요로 하지만, TCPBE는 단 3개의 응집체군과 미분방정식을 필요로 한다. 따라서, TCPBE는 수학적 혹은 전산모사의 난이도가 낮다는 큰 장점을 가지게 된다. SCPBE는 두 개의 미분방정식만을 가지지만, 응집핵-응집체 상호작용에 의한 두 꼭지점 크기분포 그리고 수표면-슬러지층 간 잔류농도를 모사할 수 없다. 또한, SCPBE가 침강속도차 응집현상을 모사할 수 없음은 수자원환경이나 수처리 공정에서 발생할 수 있는 정류조건에서의 응집을 적절히 모사할 수 없음은 큰 약점이 될 수 있다.

4. 결 론

이군집 응집모형(TCPBE)은 연안 및 하구역 등 수자원 환경 및 수처리 공정에서 발생할 수 있는 응집핵-응집체 이군집 응집현상을 모사할 수 있는 가장 단순한 모델임을 입증하였다. TCPBE는 단일군집 응집모형(SCPBE)에 비하여 진일보하여 응집핵-응집체 이군집 간 상호작용을 모사할 수 있다. 예를 들어, 상류에서 발생하여 하류로 이동한 점토입자(응집핵)들이 하구에서 응집체를 형성하는데, TCPBE가 이들 응집핵-응집체의 상호작용 및 거동을 파악할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이다. 또한 TCPBE는 다군집 응집모형(MCPBE)에 비하여 수학

적, 수치해석적 난이도가 낮으므로, 시공간적으로 크고 복잡한 수자원 혹은 수처리 시스템의 응집핵-응집체 거동 모의에 효율적으로 적용할 수 있으리라 판단된다. 이와 더불어, TCPBE는 이해하기 쉽고 단순하여, 사용자가 쉽게 여타 생물학적, 물리화학적 공정을 쉽게 도입할 수 있으리라 판단된다. 예를 들어, 무기체와 유기체간 상호작용을 TCPBE 응집모형에 쉽게 도입할 수 있으리라 판단된다. TCPBE는 향후 연구자가 각자의 관심분야에 따라 다양한 공정을 도입할 수 있는 응집모형의 원형으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

본 연구에서 TCPBE의 적용 가능성을 입증하였으나, 응집체의 결합/해체 동역학에 대한 면밀한 연구가 여전히 필요한 실정이다. 이를 위하여, 응집 매개변수에 대한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)이나 다양한 응집 실험장치를 활용한 응집체 결합-해체의 동역학을 면밀히 관찰할 필요가 있을 것이다. IT 기술 발전과 더불어 입자계체군수 지식(PBE) 기반 응집 모형의 수자원환경 및 수처리공정에 대한 적용이 증대될 것으로 판단되므로, 향후 실험을 통한 응집모형 검증 그리고 매개변수의 민감도 분석에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구

구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No: NRF-2014R1A1A2055622).

References

- Berthouex, P., and Brown, L. (1994). "Statistics for Environmental Engineers." Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Elimelech, M., Gregory, X.J.J., and Williams, R.A. (1995). "Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation." Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, USA
- Fox, R. (2003). "Computational models for turbulent reacting flows." Cambridge UK, Cambridge University Press.
- Hounslow, M., Ryall, R., and Marshall, V. (1988). "A discretized population balance for nucleation, growth, and aggregation." *AiChE Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 1821-1832.
- Jackson, G. (1995). "Comparing observed changes in particle size spectra with those predicted using coagulation theory." *Deep-Sea Research II*, Vol. 42, No. 1, pp. 159-184.
- Jeong, J., and Choi, M. (2003). "A simple bimodal model for the evolution of non-spherical particles undergoing nucleation, coagulation and coalescence." *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, pp. 965-976.
- Jeong, J., and Choi, M. (2004). "A bimodal moment model for the simulation of particle growth." *Journal of Aerosol Science*, Vol. 35, pp. 1071-1090.
- Jeong, J., and Choi, M. (2005). "A bimodal particle dynamics model considering coagulation, coalescence and surface growth, and its application to the growth of titania aggregates." *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 281, pp. 351-359.
- Lee, B., Toorman, E., Molz, F., and Wang, J. (2011). "A two-class population balance equation yielding bimodal flocculation of marine or estuarine sediments." *Water Research*, Vol. 45, No. 5, pp. 2131-2145.
- Lee, B., Toorman, E., and Fettweis, M. (2014). "Multi-modal particle size distributions of fine-grained sediments: mathematical modeling and field investigation." *Ocean Dynamics*, Vol. 64, No. 3, pp. 2131-2145.
- Li, B., Eisma, D., Xie, Q., Kalf, J., Li, Y., and Xia, X. (1999). "Concentration, clay mineral composition and Coulter counter size distribution of suspended sediment in the turbidity maximum of the Jiaojiang river estuary, Zhejiang, China." *Journal of Sea Research*, Vol. 42, pp. 105-116.
- Li, Y., Wolanski, E., and Xie, Q. (1993). "Coagulation and settling of suspended sediment in the Jiaojiang river estuary, China." *Journal of Coastal Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 390-402.
- Maggi, F. (2005). "Flocculation Dynamics of Cohesive Sediment." PhD Dissertation, Technische Universiteit Delft, the Netherlands.
- Maggi, F. (2009). "Biological flocculation of suspended particles in nutrient-rich aqueous ecosystems." *Journal of Hydrology*, Vol. 376, pp. 116-125.
- Manning, A., and Bass, S. (2006). "Variability in cohesive sediment settling fluxes: Observations under different estuarine tidal conditions." *Marine Geology*, Vol. 235, pp. 177-192.
- Manning, A., Bass, S., and Dyer, K. (2006). "Floc properties in the turbidity maximum of a mesotidal estuary during neap and spring tidal conditions." *Marine Geology*, Vol. 235, pp. 193-211.
- Manning, A., Friend, P., Prowse, N., and Amos, C. (2007). "Estuarine mud flocculation properties determined using an annular mini-flume and the LabSFLOC system." *Continental Shelf Research*, Vol. 27, pp. 1080-1095.
- Mietta, F., Chassagne, C., and Winterwerp, J. (2009). "Influence of shear rate, organic matter content, pH and salinity on mud flocculation." *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 336, pp. 134-141.
- Mikkelsen, O., Hill, P., and Milligan, T. (2006). "Single-grain, microfloc and macrofloc volume variations observed with a LISST-100 and a digital floc camera." *Journal of Sea Research*, Vol. 55, pp. 87-102.
- Orange, D., Garcia-Garcia, A., Lorenson, T., Nittrouer, C., Milligan, T., and Miserocchi, S. (2005). "Shallow gas and flood deposition on the Po Delta." *Marine Geology*, Vol. 222-223, pp. 159-177.
- Perianez, R. (2005). "Modelling the transport of suspended particulate matter by the Rhone River plume

- (France). Implications for pollutant dispersion." *Environmental Pollution*, Vol. 133, pp. 351-364.
- Prat, O., and Ducoste, J. (2006). "Modeling spatial distribution of floc size in turbulent processes using the quadrature method of moment and computational fluid dynamics." *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, pp. 685-697.
- Richardson, J., and Zaki, W. (1954). "Sedimentation and fluidisation, Part I." *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, Vol. 2, pp. 35-53.
- Spicer, P., and Pratsinis, S. (1996). "Coagulation-fragmentation: universal steady state particle size distribution." *AiChE Journal*, Vol. 42, p. 1612.
- Stolzenbach K., and Elimelech, M. (1994) "The effect of particle density on collisions between sinking particles -implications for particle aggregation in the ocean." *Deep-sea research. Part 1. Oceanographic research papers*, Vol. 41, No. 3, pp. 469-483.
- Toorman, E. (1999). "Sedimentation and self-weight consolidation: constitutive equations and numerical modelling." *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, pp. 709-726.
- Van Leussen, W. (1994). "Estuarine Macroflocs : Their role in fine-grained sediment transport." Universiteit van Utrecht, the Netherlands.
- Van Rijn, L. (2007). "Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves II: Suspended Transport." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 668-689.
- Winterwerp, J. (2002). "On the flocculation and settling velocity of estuarine mud." *Continental Shelf Research*, Vol. 22, pp. 1339-1360.
- Winterwerp, J., and Van Kesteren, W. (2004). "Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment." Amsterdam, The Netherlands, Elsevier B.V.
- Yuan, Y., Wei, H., Zhao, L., and Cao, Y. (2009). "Implications of intermittent turbulent bursts for sediment resuspension in a coastal bottom boundary layer: A field study in the western Yellow Sea, China." *Marine Geology*, Vol. 263, pp. 87-96.

<p>paper number : 15-004 Received : 15 January 2015 Revised : 16 February 2015 Accepted : 16 February 2015</p>
