

플록의 입경과 밀도에 따른 부유된 미세 미립자의 침전률 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Sedimentation Rate of Suspended Fine Particles under Floc Size and Density

김종우*

Kim, Jong-Woo

Abstract

This paper considers the influence of floc on the sedimentation rate for the cohesive material. The effects of floc density and size changes were also taking into consideration during the experiment. The settling velocity of a discrete floc was measured in a quiescent water column. Floc diameter and density were investigated using a modified Stokes equation with some constants such as water density, viscosity, material density and the floc fractal dimension n_f obtained from the relationship between the floc diameter and the floc settling. The floc diameter of quartz and alumina increased at increasing initial concentrations. The floc size of quartz with increasing $NaCl$ concentration varied between approximately 0.8 μm to 10 μm . Floc density decreased as floc size increased. The floc settling velocity and the floc diameter have a straight line relationship on a logarithm. The floc fractal dimension n_f was 2.65 with increasing of initial concentration and 2.93 with increasing of $NaCl$. The exponent n to predict the settling velocity was proposed and varied from 1 to 1.93.

Key words : floc density, size, floc fractal dimension, sedimentation rate, settling velocity

요 지

본 연구는 점착성 미립자의 침전률에 대한 플록의 영향에 관한 것이다. 연구 진행시 플록 밀도와 입경변화의 영향도 고려하였다. 플록입자의 침전속도는 정지수면에서 측정되었다. 플록 입경과 밀도는 수정된 Stokes 방정식에 유체의 밀도, 입자의 밀도, 점성계수 및 측정된 침전속도와 입경과의 관계식으로부터 얻은 플록 차원을 이용하여 분석되었다. 석영과 알루미늄의 플록지름은 초기농도가 증가함에 따라 증가되었으며, 염도농도의 증가에 따른 석영의 플록된 입경은 0.8~10 μm 이다. 플록밀도는 입경이 증가함에 따라 감소하였다. 플록 침전속도와 입경의 관계는 로그표위에 직선식으로 표현된다. 플록 차원(n_f)은 초기농도가 증가할 경우 2.65이며, 염도가 증가할 때 2.93이다. 침전속도를 예측하기 위한 비례상수(n)는 제시되었으며, 그 범위는 1~1.93이다.

핵심용어 : 플록 밀도, 입경, 플록 차수, 침전률, 침전속도

1. 서 론

침전된 담수호내의 저층 퇴적물은 하천의 오염입자와의 화학작용으로 상수원을 오염시켜 수중생태계를 파괴하는 문제를 야기한다. 부유된 상태로 하천구조물, 항만, 호수, 저수지, 댐 주위 등에 퇴적되는 점착성 미립자는 중력의 가속도와 플록(floc)에 큰 영향을 받는다 (Krishnappan et al., 1999; Fox et al., 2003).

일반적으로 하천에 많이 녹아 부유된 점착성 미립자(montmorillonit, illite, kaolinite)의 입자표면은 음이온을 띠며, 주로 석영과 알루미늄 성분으로 이루어져 있다. 입하뎀 퇴적물과 새만금 퇴적물의 주된 광물질은 석영이다(황사구와

정기영, 2006; 황규남 등, 2008).

점착성 미립자의 침강률에 영향을 주는 인자들은 입자의 구성성분, 입자의 형태, 입자의 플록 밀도, 플록 입경 및 수중에 녹아 있는 이온 등이 있다. 특히 입자간의 응집(flocculation)현상은 점착성 미립자의 크기와 침강속도를 증가시킨다. 그러므로 퇴적된 점착성 미립자의 침강과 이송은 물리-화학적 힘과 플록에 큰 영향을 받는다(van Olphen, 1966). 또한 응집현상은 시공간적으로 점착성 미립자의 침강속도에 매우 큰 영향을 미친다(Mehta와 Parthenlades, 1975). 수중에 침강하는 미립자는 입자간의 침강속도차이, 분자운동 및 난류흐름 때문에 응집현상이 발생되며, 점착성 미립자의 크기에 큰 영향을 미친다(van Leussen, 1994). Kim

*정회원 · 경기대학교 공과대학 토목공학과 시간강사 (E-mail: kimjw0426@nate.com)

과 Stolzenbach(2004)은 점착성 미립자의 침강속도 차이에 따른 입자간의 충돌(collision)과 응집현상에 관해 연구하였다. 플록은 점착성 미립자의 침강속도와 밀도에 큰 영향을 미친다(Khelifa와 Hill, 2006a). 점착성 미립자사이에 끄는 힘은 입자와 입자가 결합하는 플록현상을 발생시킨다(Mihopoulos, 1995). 그러나 플록은 하천에서 증가된 전단응력에 의해 분열된다(van Rijn, 1993). Winterwerp(1998)와 Hawley(1982)는 점착성 미립자의 침강속도와 플록된 입자의 직경에 관한 연구를 하였다. van der Lee(2000)는 Dallard 강어귀의 점착성 미립자의 샘플에 대한 플록의 영향에 관한 연구를 하였다. 강어귀에서 점착성 퇴적물의 침강속도의 변화는 난류흐름에 의한 플록 또는 플록의 분열(breakup)에 의해 발생된다(Winterwerp, 2002). 국내의 경우 김재중(1989)은 직선수로에서 점착성 퇴적물의 특성에 관한 실험연구를 하였다. 또한 황규남 등(2008)은 환형수로에서 새만금 점착성 퇴적물 침식 거동에 관한 연구를 하였다. 그러나 물리·화학적인 인자(입자의 형태, 입자의 크기, 퇴적물의 광물화학적 성질, 수중에 녹아 있는 화학적인 성분 등)로 인한 복잡성 때문에 점착성 미립자의 침식 및 침강거동을 해석하는데 불충분하였다. 특히 하천에 주된 광물질인 석영의 침강률에 대한 플록의 영향에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 점착성 미립자의 주된 광물질과 수중에 녹아 있는 물리·화학적 성분이 플록에 어떤 영향을 미치며, 플록된 점착성 미립자(석영과 알루미나)의 입경변화와 침강속도(석영)에 대한 플록의 영향에 관한 연구를 하였다. 또한 침강속도를 예측할 수 있는 다른 모형과 본 연구에서 제시된 단순모형과의 비교분석을 하였으며, 입자의 침강속도와 입자변화는 CCD-Camera로 측정되었다.

2. 플록입자의 밀도와 침강속도

일반적인 점착성 미립자의 크기는 50 μm 이내이며, 실트와 같은 무기성분으로 이루어져 있다. 또한 점착성 퇴적물(cohesive sediment)은 수중에서 이온성분을 띄고 있어 그 특성이 매우 복잡하다. 그러므로 점착성 미립자의 플록현상에 영향을 주는 인자들은 입자의 브라운 운동, 침강하는 미립자의 침강속도차이 및 전단력에 따른 난류운동 등이 있다.

퇴적물의 침강률은 식 (1)같이 다음과 같이 표현된다

(Tambo와 Watanabe, 1979).

$$V_f \sim D_f^n \quad (1)$$

여기서 V_f 는 입자의 침강속도(m/s), n 은 비례상수, D_f 는 플록의 직경(μm)이다.

점착성 미립자의 침강속도에 영향을 주는 플록에 따른 밀도변화($\Delta\rho_f$)에 관한 관계식은 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\Delta\rho_f = (\rho_s - \rho_w) \frac{\sum_{i=1}^k d_i^3}{(\sum_{i=1}^k d_i^{n_f})^{3/n_f}} = (\rho_s - \rho_w) \left[\frac{D_p}{D} \right]^{3-n_f} \quad (2)$$

여기서 ρ_f 는 플록된 입자의 밀도, ρ_s 와 ρ_w 는 각각 미립자의 밀도와 유체의 밀도, d 는 i 차에 해당하는 미립자의 입경, D_p 와 D 는 각각 초기입자의 지름과 플록입경이다. n_f 는 플록의 차원이다. 미립자의 밀도변화에 관계된 식들은 표 1에 나타낸다.

입자에 작용하는 항력과 중력항에 식 (2)를 대입하여 풀면 침강속도는 식 (3)과 같이 나타낸다(Winterwerp, 1998).

$$V_f = \frac{\alpha (\rho_s - \rho_w) g}{18\beta \mu} d^{3-n_f} \frac{D_f^{n_f-1}}{1 + 0.15 Re_p^{0.687}} \quad (3)$$

여기서 α 와 β 는 형상계수, g 는 중력의 가속도, $Re_p (= V_f \cdot D_f) / \nu$ 는 입자 레이놀드 수, μ 와 ν 는 각각 점성계수와 동점성계수이다.

이때 식 (1)과 식 (3)의 관계는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$n = n_f - 1 \quad (4)$$

Stokes 범위 내에 입자 Reynolds 수가 클 경우 ($Re_p \gg 10^3$) 플록에 따른 미립자의 침강속도는 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$V_f \propto \sqrt{d_0^{3-n_f} \frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w} D_f^{n_f-2}} \quad (5)$$

플록미립자의 입경은 Reynolds 수가 매우 작고($Re_p \ll 1$) 미립자가 구형일 경우 식 (6)과 같이 표현된다(Stokes, 1851).

$$D_f^2 = \frac{18\mu H}{(\rho_s - \rho_w) g t} \quad (6)$$

표 1. 비교분석을 위해 사용된 플록에 따른 밀도변화에 관한 모형들

모형	수식	특징
Kranenburg (1994)	$\rho_f - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left(\frac{D_f}{d} \right)^{n_f-3}$	플록 밀도와 입경과의 관계는 로그표위에 완만히 감소하는 직선식으로 나타냄
Hawley (1982)	$\rho_f - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left(\frac{D_f}{d} \right)^{-0.9}$	입경(D_s)의 단위는 μm이며, 로그표위에 플록 밀도와 입경과의 관계는 급격히 감소하는 직선식으로 나타냄
Lau와 Krishnappan (1997)	$\rho_f - \rho_w = \rho_s \exp(-0.02 D_f^{1.85})$	플록 밀도와 입경과의 관계는 로그표위에 나타내며, 완만히 감소하다가 급격히 감소함
Khelifa와 Hill (2006)	$\rho_f - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left(\frac{D_f}{d_{50}} \right)^{n_f-3} \varphi$	균일입자로 이루어질 경우 φ 는 1이며, 로그표위에 나타낸 플록 밀도와 입경과의 관계식은 곡선형 형태로 감소함

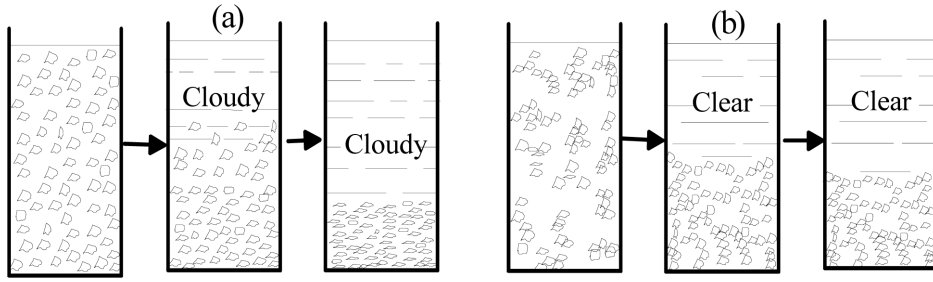


그림 1. (a) 담수와 (b) 염수에서 점착성 미립자의 침강현상

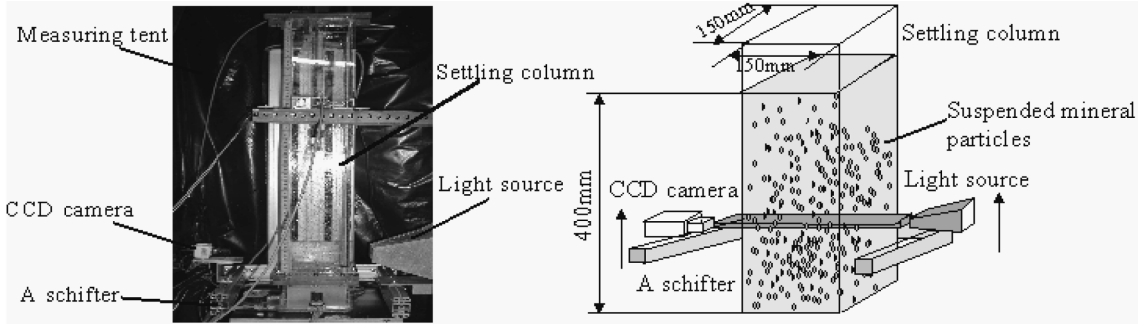


그림 2. 실험장치와 설계 단면도

여기서 H 는 침강높이이며, t_s 는 미립자의 침강시간을 말한다. 또한 입자의 중량백분율(Q)은 식 (7)과 같다.

$$Q = \frac{C(t)}{C_0} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서 $C(t)$ 는 시간에 따른 농도이며, C_0 는 초기농도이다. 그림 1은 담수(fresh water)와 염수(salty water)에서 점착성 미립자의 침강거동에 대해 보여준다. 담수에서 점착성 미립자가 분산되어 침전되는 현상을 나타내는 반면 염수에서 플록형태의 입자들이 침강함을 알 수 있다. 입자표면에 음이온을 띄기 때문에 염분의 Na^+ 이 녹아 있는 염수에서 쉽게 응집현상이 야기되어 입자와 입자가 결합하는 플록이 발생하게 된다.

3. 플록에 관한 실험

3.1 실험방법

임하댐 퇴적물과 새만금 퇴적물의 주된 광물질 성분인 석영과, 하천에 부유되거나 침전되어 있는 광물질 성분 알루미늄을 실험재료로 선택하였다. 플록으로 인한 미립자의 입경 변화와 침강속도 변화는 Charge Coupled Device (CCD) Camera를 이용하여 수행되었으며, 그 기본원리의 자세한 사항은 김중우 등(2005) 및 Kim과 Nestmann (2009)에 설명되어있다. 침강수주에 대한 구조적인 특성은 그림 2와 같으며, 침강수주의 크기는 높이 1000 mm, 가로 150 mm, 세로 150 mm의 plexiglass로 제작되었다. 이때 침강수주의 수면높이는 400 mm이다. 또한 침강수주 외부에서 설치된 이동장치에 의해 CCD-Camera와 빛 장치가 상하로 움직이며, 부유된 농도, 침강속도와 입경변화가 측정되었다. 본 연구에서 사용

된 부유물의 높이는 400 mm이며, 플록밀도, 농도변화, 침강 유속이 215 mm 지점에서 측정되었다. 부유물을 통과하는 빛을 흡수한 미립자들은 CCD-Camera에 의해 회상도로 나타난다. 디지털 카메라로 측정된 영상 이미지 그림은 255개의 선명도로 보여준다. 각각의 농도변화(C_0, C_1, C_2, C_3)에 따라 영상이미지 값이 변화되며, 가장 농도가 낮을 경우 영상 이미지 값은 255인 반면 농도가 가장 높을 경우 0값을 뜻한다. 점착성 미립자는 침강수주에서 회전 모터로 증류수와 함께 균일하도록 부유시킨 후 실험이 실시되었다. 광물성 미립자의 초기농도에 대한 영상이미지를 값으로 나타내어 하천에 부유되는 점착성 퇴적물(석영과 알루미늄)의 플록변화와 플록영향에 따른 침강속도변화에 관한 연구를 하였다.

3.2 실험조건

본 연구는 각기 다른 조건하에서 플록영향을 고려한 침전을 변화에 대한 실험이다. 점착성 미립자의 성분에 따라 초기농도가 1 g/L, 5 g/L 및 20 g/L로 증가될 경우 입경변화를 측정하였다. 표 2와 같이 알루미늄의 초기농도 1 g/L, 5 g/L 및 20 g/L일 경우 증류수의 온도는 각각 16.2°C, 17.1°C, 19.5°C이며, 또한 석영의 초기농도 1 g/L과 20 g/L일 경우 염도가 0.5 g/L, 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L로 증가할 때 입경의 변화를 관측하였다. 이때 각각 석영의 초기농도 1 g/L에 대한 증류수의 온도는 16.8°C, 5 g/L일 경우 18°C, 20 g/L일 때 증류수 온도는 20°C이다. 석영의 초기농도 1 g/L에 염도가 0.5 g/L추가 될 경우 증류수 온도는 16.8°C, 염도농도가 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L로 증가할 경우 각각 증류수의 온도는 17°C, 18.2°C, 18°C였으며, 석영의 초기농도 20 g/L에 염도가 0.5 g/L, 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L로 증가할 경우 증류수 온도는 20°C로 일정했다. 침강속도는 초기농도 1 g/L(16.8°C),

표 2. 부유물의 농도에 따른 증류수 온도조건

초기농도(g/L)	부유물에 따른 온도		석영의 초기농도에 따른 염분의 농도변화(g/L)			
	석영	알루미나	0.5	5	10	15
1	16.8°C	16.2°C	16.8°C	17.0°C	18.2°C	18°C
3	22.7°C					
5	18.0°C	17.1°C				
7	20.2°C					
9	16.2°C					
20	20.0°C	19.5°C	20.0°C	20.0°C	20.0°C	20.0°C

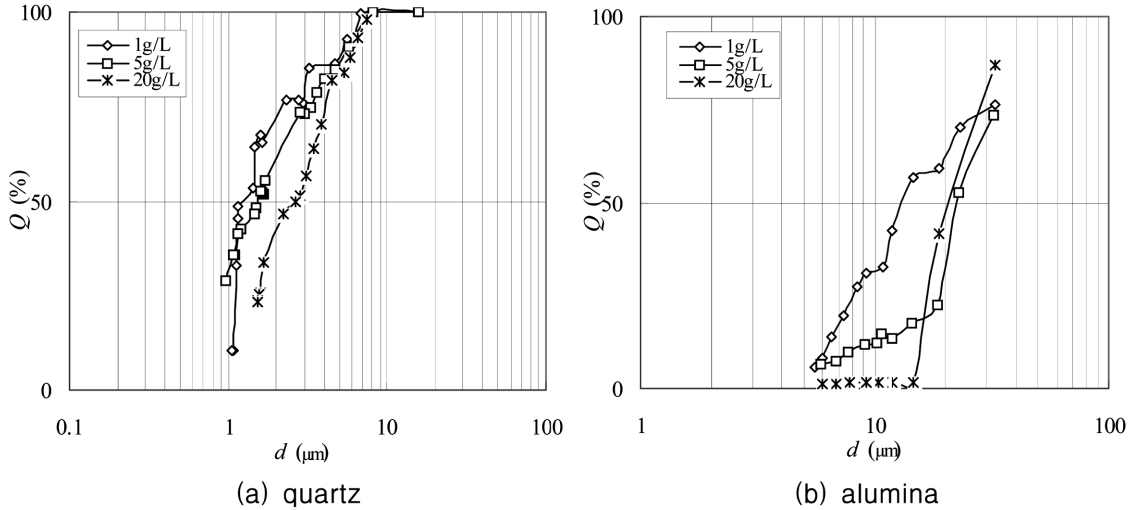


그림 3. 초기농도 증가에 따른 점착성 미립자 (a) 석영과 (b) 알루미나의 입경분포(size distribution)(Q: 무차원 농도백분율 (%), d: 입경)

3 g/L(22.7°C), 5 g/L(18°C), 7 g/L(20.2°C), 9 g/L(16.2°C) 및 20 g/L(20°C)로 증가될 경우 측정되었으며, 정지수면 215 mm 지점에서 관측되었다. 실험결과를 기초로 플록 밀도변화 ($\Delta\rho_f = \rho_f - \rho_w$)는 식 (3)으로 계산되었으며, Reynolds 수가 매우 작고($R_{ep} \ll 1$) 미립자는 구형으로 가정하였다.

4. 실험 결과

4.1 플록으로 인한 입경변화

그림 3은 석영과 알루미나의 초기농도에 따른 플록 입경변화를 나타낸다. 플록입경에 영향을 주는 농도는 CCD 카메라로 측정되었다. 초기농도는 1 g/L, 5 g/L 및 20 g/L로 증가시켰다. 미립자의 입경과 무차원 농도백분율은 각각 식 (6)과 식 (7)로 계산되었다.

석영입경이 초기농도 1 g/L일 경우 1.3 μm , 초기농도 5 g/L일 경우 평균입경이 1.5 μm , 20 g/L일 경우 2.5 μm 로 각각 증가됨을 나타낸다. 이때 초기농도 20 g/L의 평균입경이 초기농도 1 g/L의 입경보다 약 2배 증가되었다. 알루미나의 초기농도 1 g/L일 경우 평균입경이 10.3 μm , 5 g/L일 경우 평균입경이 22 μm , 20 g/L일 경우 20 μm 로 측정되었으며, 초기농도 20 g/L인 알루미나의 평균입경이 초기농도 1 g/L보다 약 1.95배 증가되었다. 이때 알루미나 미립자 직경이 5.9~14.6 μm 범위에서 무차원 농도가 1~1.7에 수렴하는 것은 부유된 미립자가 거의 침전되었기 때문이다. 또한 증류수의 pH 6.5에서 초기농도 증가에 따른 석영의 플록입경(건조시 석영의 평균

입경이 3.5 μm)은 알루미나(건조시 알루미나의 평균입경이 0.7 μm)의 플록입경 보다 작게 나타났다. 예를 들면, 석영의 플록 평균입경의 범위는 1.2~2.8 μm 반면 알루미나의 플록평균입경의 범위는 5.9~20.2 μm 이다(그림 3). 본 실험결과는 광물성입자의 성질에 따라 플록크기가 다른 현상을 나타냄을 보여준다.

그림 4와 그림 5는 초기농도와 염도변화에 따른 석영입경변화를 나타낸다. NaCl의 농도가 0 g/L, 0.5 g/L, 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L로 증가할 경우 입자의 플록영향으로 입경이 증가함을 보인다. 그림 4와 같이 석영의 초기농도 1 g/L에 염도농도 0 g NaCl/L을 첨부할 경우 입경은 1.5 μm , 5 g NaCl/L일 경우 입경은 3.5 μm , 15 g NaCl/L의 염도를 첨부할 경우 입경은 4.5 μm 로 NaCl의 무첨가보다 입경은 약 3배 증가되었다. 또한 20배 증가한 초기농도($C_0=20$ g/L)에서 0 g NaCl/L일 경우 플록입경은 2.5 μm , 5 g NaCl/L일 경우 플록입경은 5.5 μm , 15 g NaCl/L일 경우 플록입경은 7.8 μm 이다. 특히 NaCl의 무첨가보다 15 g NaCl/L일 경우 플록입경은 약 3.1배 증가되었다(그림 5). 이는 음이온을 띄는 입자 표면에 NaCl첨가로 증가된 양이온(Na^+)이 결합되어 입자간의 플록현상을 가속시켜 입경을 증가시키기 때문이다.

4.2 플록으로 인한 밀도변화

그림 6과 그림 7은 플록영향에 따른 밀도변화를 나타낸다. 레이놀드 수가 매우 작고($R_{ep} \ll 1$) 미립자는 구형으로 가정하였으며, 플록차원 n_f 는 침강속도 실험결과로부터 계산되었고,

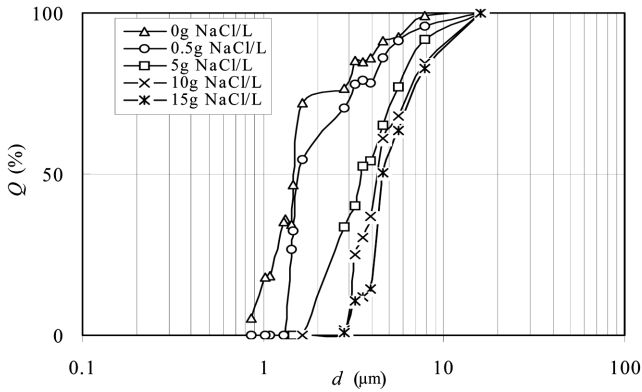


그림 4. 부유된 석영초기농도 1g/L에 증가된 염도농도(0 g NaCl/L, 0.5 g NaCl/L, 5 g NaCl/L, 10 g NaCl/L, 15 g NaCl/L)에 따른 입경분포

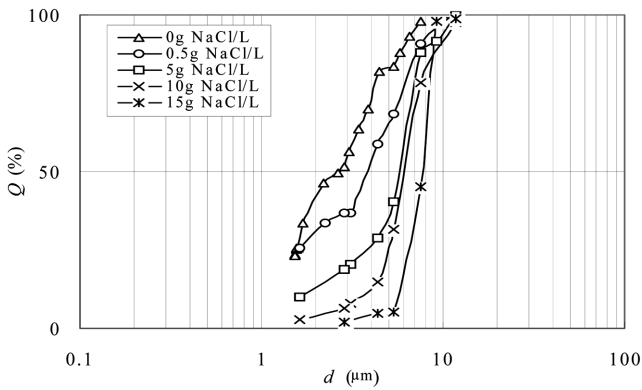


그림 5. 부유된 석영초기농도 20 g/L에 증가된 염도농도(0 g NaCl/L, 0.5 g NaCl/L, 5 g NaCl/L, 10 g NaCl/L, 15 g NaCl/L)에 따른 입경분포

초기농도증가에 따른 플록차원은 2.93이며, 염도가 증가할 경우 플록차원은 2.65이다. 석영의 밀도는 2650 kgm^{-3} 이며, 유체의 밀도는 998.1 kgm^{-3} ($=18^\circ\text{C}$)이다.

그림 6은 하천에 주된 광물질인 석영의 플록형상에 따른 밀도변화를 나타내며, 플록 밀도는 플록 입경의 증가에 따라 감소함을 나타낸다.

이때 석영의 초기농도는 1 g/L, 3 g/L, 5 g/L, 7 g/L, 9 g/L 그리고 20 g/L로 증가할 경우 플록입경과 밀도는 변화되었다. 입경의 범위는 $0.8\sim 9 \mu\text{m}$ 이며, 입경의 증가에 따라 플록 밀도는 감소함을 나타내었다. 유체의 밀도와 플록과의 관계는 실험결과 값과 표 1에 제시된 4개의 플록 모형들과 본 실험값에 의해 얻어진 단순모형과 비교분석 되었으며, 실험결과로 얻어진 밀도와 플록입경과의 관계식은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\Delta\rho_f = \rho_f - \rho_w = K \cdot D_f^{-F} \quad (8)$$

여기서 K 는 독립변수이며, F 는 상수이다. K 는 2150로 측정되었으며, F 는 0.1415일 경우 실험값과 가장 잘 일치한다.

그림 6은 본 연구에서 제시한 단순모형과 Krannenburg (1994)의 모형이 석영의 초기농도가 증가함에 따라 실험결과와 잘 일치함을 나타내었지만 Lau와 Krishnappan (1997)의

플록의 입경과 밀도에 따른 부유된 미세 미립자의 침전률 특성에 관한 연구

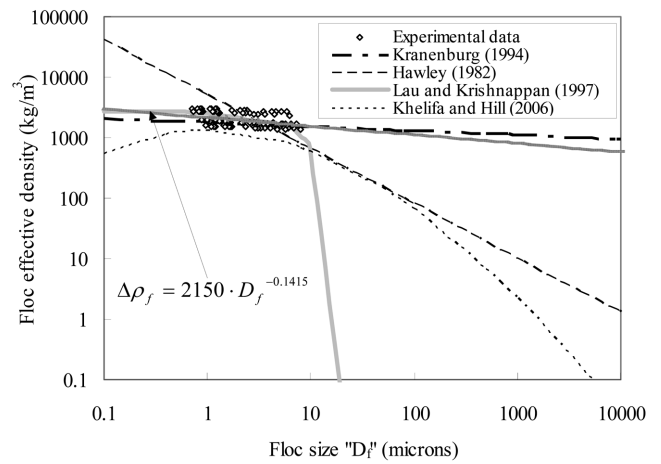


그림 6. 석영의 초기농도 1 g/L, 3 g/L, 5 g/L, 7 g/L, 9 g/L과 20 g/L일 경우 측정된 플록밀도와 Krannenburg (1994), Hawley (1982), Lau와 Krishnappan (1997) 그리고 Khelifa와 Hill (2006) 등에 의해 제시된 모형들과 비교 분석

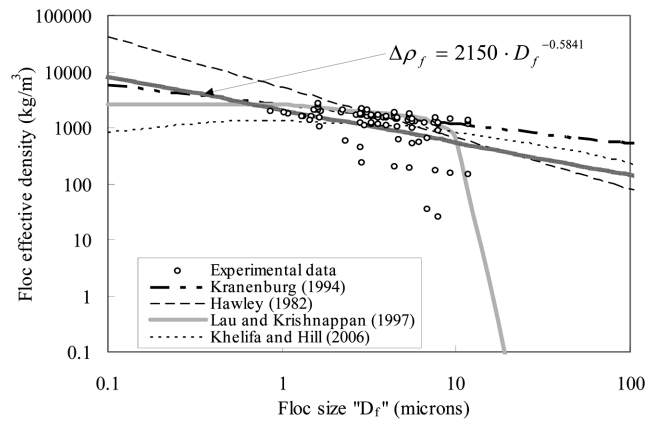


그림 7. 석영의 초기농도 1 g/L과 20 g/L에서 염도농도가 증가될 경우 측정된 플록밀도와 Krannenburg (1994), Hawley (1982), Lau와 Krishnappan (1997) 그리고 Khelifa와 Hill (2006) 등에 의해 제시된 모형들과 비교분석

모형과 Khelifa와 Hill (2006)의 모형과는 불일치함을 알 수 있다. 특히 Lau와 Krishnappan (1997)의 모형은 플록입경 $10 \mu\text{m}$ 부터 갑자기 플록밀도가 감소된다.

그림 7은 염도증가에 따른 석영의 플록밀도 변화에 대해 나타낸다. 이때 플록 입경의 범위는 $0.8\sim 11 \mu\text{m}$ 이며, 플록밀도는 석영입경 증가에 따라 감소함을 나타낸다. Khelifa와 Hill (2006)의 모형과 Lau와 Krishnappan (1997)의 모형은 실험결과 값과 잘 일치하지 않는 반면 Hawley (1982)모형은 약 $5 \mu\text{m}$ 까지 비슷한 모양으로 감소하지만 $5 \mu\text{m}$ 보다 클 경우 차이가 남을 볼 수 있다. 식 (8)로 얻은 값은 본 연구의 실험값과 같이 입경증가에 따라 감소하며, Krannenburg (1994)의 모형보다 더 잘 일치함을 나타낸다. 이때 독립변수 K 는 2150이며, F 는 0.5841이다.

4.3 플록으로 인한 침강속도변화

도시수계는 많은 인간 활동에 의해 염도가 증가될 수 있다. 특히 이온성분을 띄고 있는 하천, 댐, 저수지 등에 부유된

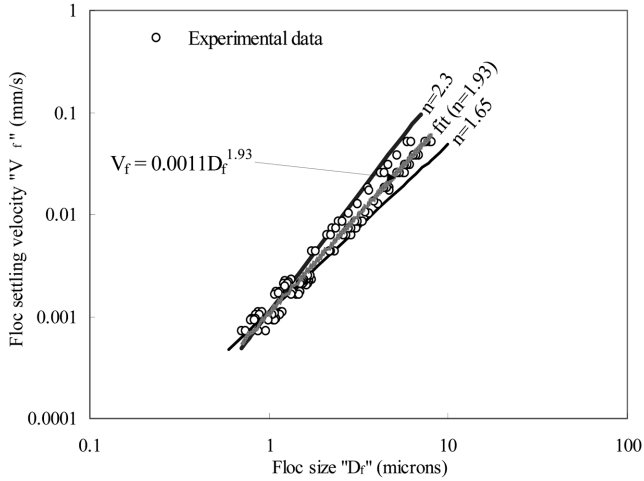


그림 8. 증류수에서 석영의 초기농도가 1 g/L, 3 g/L, 5 g/L, 7 g/L, 9 g/L과 20 g/L로 증가할 경우 측정된 침강속도(V_f)와 플록입경(D_f)과의 관계

광물성입자는 쉽게 염도이온성분과 이온교환이 발생하며, 침강물에 변화를 준다. 그러므로 침강속도는 초기농도와 염도농도 증가에 따라 부유물 수위높이 215 mm 지점에서 측정되었으며, 이때 부유된 수위 높이는 400 mm이다. 점착성 미립자(석영)의 침강속도는 입자의 크기에 큰 영향을 받으며, 플록입자와 염도증가에 따라 증가하였다. 그러므로 초기농도 및 염도농도 증가에 따른 플록입경과 침강속도(V_f)와의 관계식은 식 (9)와 같이 단순모형으로 나타낸다.

$$V_f = C \cdot D_f^n \quad (9)$$

여기서 C 는 독립변수이며, n 은 비례상수이다. 이때 초기농도의 증가에 따른 플록영향으로 변화된 입경과 침강속도는 비례하며, n 의 범위는 1.0~2.3이다.

그림 8과 같이 초기농도($C_0=1$ g/L, 3 g/L, 5 g/L, 7 g/L, 9 g/L, 20 g/L)가 증가될 경우 입경범위는 0.74 μm ~8 μm 이며, 플록입경의 크기가 증가함에 따라 침강속도는 최소 0.00073 mm/s에서 최대 0.052 mm/s까지 증가됨을 볼 수 있다. 실측치와 n 의 범위 1.0~2.3에서 비교분석하였으며, 실험값과 가장 근접한 n 은 1.93이다. 독립변수(C)는 0.0011이다.

그림 9는 염도증가(0 g/L, 0.5 g/L, 5 g/L, 10 g/L)에 따른 플록입경과 침강속도 변화를 나타내는데, 침강속도가 증가되었다. 입경범위는 0.8~11.75 μm 이며, 침강속도는 0.00063~0.12 mm/s이다. 염도농도 증가에 따른 플록입경과 침강속도와의 관계식에서 독립변수(C)는 0.0011이며, n 은 각각 1.0, 1.65, 1.93일 경우에 실측치와 비교분석하였다. 실험값과 가장 근접한 n 은 1.65이다.

그림 10은 초기농도 및 염도농도 증가에 따른 침강속도와 입경과의 관계를 나타낸다. 또한 침강속도를 예측할 수 있는 다른 모형들과 비교분석을 하였다. 본 연구에서는 플록밀도를 이용하여 침강속도를 계산하였고 실험값과 비교분석하였다. Kranenburg (1994)과 Hawley (1982) 모형에 적용된 석영의 초기입경(d) 값은 3.5 μm 이며, Khelifa와 Hill (2006)의 모형

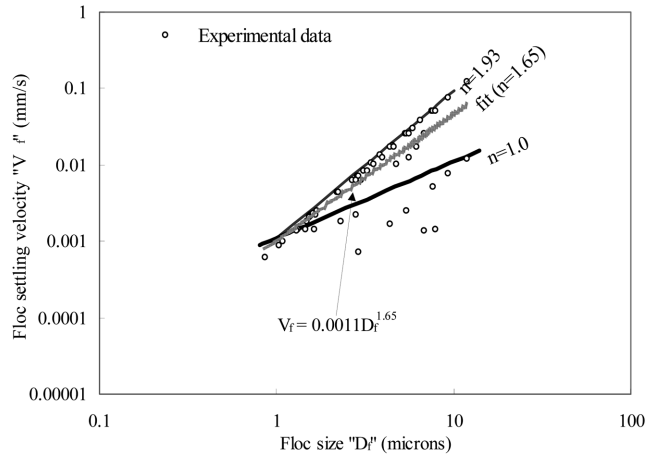


그림 9. 증류수에서 석영의 초기농도 1 g/L과 20 g/L에서 염도가 0 g/L, 0.5 g/L, 5 g/L과 10 g/L로 증가할 경우 측정된 침강속도(V_f)와 플록입경(D_f)과의 관계

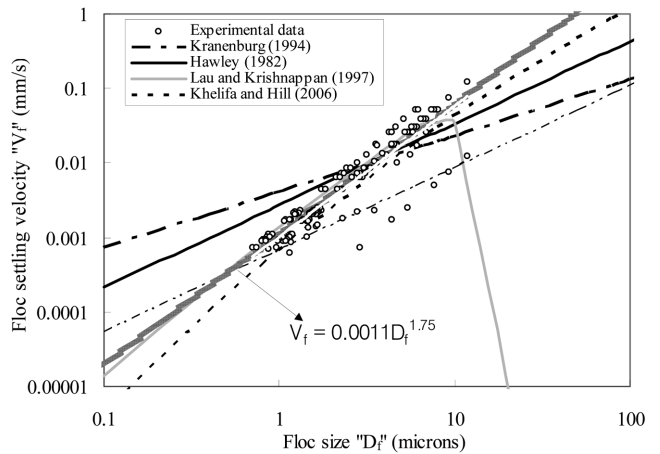


그림 10. 초기농도 증가와 염도증가에 따른 석영의 침강속도와 Kranenburg (1994), Hawley (1982), Lau와 Krishnappan (1997), Khelifa와 Hill (2006) 등에 의해 제시된 모형과의 비교 분석

은 초기입경(d) 대신 평균입경(d_{50})을 적용하였으며, 다른 모형들보다 실험값과 잘 일치하였다. 그러나 본 연구결과로 얻어진 식 (9)로 계산된 침강속도 값이 Khelifa와 Hill (2006)의 모형보다 실험값에 근접함을 나타낸다. 이때 n 은 1.75이며, 독립변수(C)는 0.0011이다. Tambo와 Watanabe(1979)는 n 값이 0.4~1.3범위에 존재하며, Kusuda 등(1981)은 n 값의 범위가 0.8~1.6사이에 존재한다고 발표하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 플록현상이 초기농도 변화와 하천에 녹아 있는 이온(Na^+ , C , OH , H^+)의 첨가하에 점착성 미립자의 침강물에 어떤 영향을 주는가를 관측하였으며, 플록밀도와 침강속도를 예측할 수 있는 모형들과도 비교 분석하였다. 그 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 초기농도가 1 g/L, 5 g/L 및 20 g/L로 증가할 경우 플록 현상이 발생하였으며, 석영입경은 초기농도 1 g/L일 경

우 1.3 μm 에서 초기농도 20 g/L일 경우 2.5 μm 로 약 2배 증가함을 볼 수 있었다. 알루미늄은 초기농도 1 g/L일 경우 평균입경이 10.3 μm 에서 초기농도 20 g/L일 경우 20 μm 로 약 1.95배 증가되었다. 또한 석영은 초기농도 1 g/L에 염도농도 0 g NaCl/L을 첨부할 경우 입경은 1.5 μm , 5 g NaCl/L일 경우 입경은 3.5 μm , 15 g NaCl/L의 염도를 첨부할 경우 입경은 4.5 μm 로 NaCl의 무첨가보다 입경이 3배 증가되었다. 이는 음이온을 띠는 입자표면에 NaCl첨가로 증가된 양이온(Na^+)이 결합되어 입자간의 플록현상을 가속시키기 때문이다.

- 2) 석영의 초기농도는 1 g/L, 3 g/L, 5 g/L, 7 g/L, 9 g/L 그리고 20 g/L로 증가될 경우 또한 염도를 첨가할 경우 플록 입경에 대한 플록밀도가 감소하였다. 본 연구에서 플록입경변화에 따른 밀도변화 예측을 위한 단순모형에서 독립변수 K 가 2150, F 가 0.14-0.6범위에 존재할 경우 다른 모형들보다 실험값과 가장 잘 일치한다.
- 3) 초기농도($C_0=1$ g/L, 3 g/L, 5 g/L, 7 g/L, 9 g/L, 20 g/L)가 증가할 경우 플록입경범위는 0.74 μm ~8 μm 이며, 플록된 입경의 크기가 증가함에 따라 침강속도는 최소 0.00073 mm/s에서 최대 0.052 mm/s까지 증가되었다. 침강속도를 예측하기 위해 실험 결과 값으로부터 얻은 모형의 n 은 1.75이며, 독립변수(C)는 0.0011이다.

참고문헌

김재중 (1989) 점성토의 침식 및 퇴적에 관한 실험적 연구, 박사학위논문, 서울대학교.
 김중우, 윤세의, 이종태 (2005) 점착성 퇴적물의 침전 특성 분석. **한국수자원학회논문집**, 제38권, 제2호, pp. 133-142.
 황규남, 김현민, 안익장 (2008) 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 실험적 연구. **한국수자원학회논문집**, 제41권, 제5호, pp. 473-482.
 황사구, 정기영 (2006) 안동 임하댐 유역의 지질과 임하호 고탁수의 원인. **자원환경지질**, 제39권, 제6호, pp. 771-786.
 Fox, J.M., Hill, P.S., Milligan, T.G., Ogston, A.S. and Boldrin, A. (2003) Floc Fraction in the Waters of the Po River Prodelta. Accepted for publication in *Continental Shelf Res.*
 Hawley, N. (1982) Settling Velocity Distribution of Natural Aggregates. *J. Geophys. Res.* Vol. 87(C12), pp. 9489-9498.
 Khelifa, A. and Hill, P.S. (2006a) Models for effective density and settling velocity of flocs. *J. Hydraul. Res.* Vol. 44(3), pp. 390-401.

Kim, A.S. and Stolzenbach, K.D. (2004) Aggregate formation and collision efficiency in differential settling. *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 271, pp. 110-119.
 Kim, J.W. and Nestmann, F. (2009) Settling behavior of fine-grained materials in flocs. *J. Hydraul. Res.* Vol. 47(4), pp. 492-502.
 Kranenburg, G. (1994) The Fractal Structure of Cohesive Sediment Aggregates. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* Vol. 39, pp. 451-460.
 Krishnappan, B.G., Marsalek, J., Watt, W.E. and Anderson, B.C. (1999) Seasonal Size Distributions of Suspended Sediments in a Stormwater Management Pond. *Water Sci. Technol.* 39(2), pp. 127-134.
 Lau, Y.L. and Krishnappan, B.G. (1997). *Measurement of Size Distribution of Settling Flocs*. NWRI Publication No. 97-223, National Water Research Institute, Environment Canada, CCIW, Burlington, Ontario, Canada.
 Mehta, A.J. and Parthenlades, E. (1975) An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. *J. Hydraul. Res.* 13(4), pp. 361-381.
 Mihopoulos, J. (1995) Wechselwirkung Flockenbildung – Flockenabtrennung unter Berücksichtigung der Durchströmungsmuster in Sedimentations- und Flotationsbecken. Mitt. Inst. für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 72.
 Stokes, G.G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Trans. Cambridge Philosophical Society* 9(8), pp. 287-298.
 Tambo, N. and Watanabe, Y. (1979) Physical Aspect of Flocculation Process-I. Fundamental Treatise. *Water Res.* Vol. 13, pp. 429-439.
 van Der Lee, W.T.B. (2000) *The settling of mud flocs in the Dollard estuary*. Ph. D. Thesis, University Utrecht, The Netherlands.
 van Leussen, W. (1994) *Estuarine macro flocs and their role in fine-grained sediment transport*. Ph. D. Thesis, University Utrecht, The Netherlands.
 van Olphen H. (1966) *An introduction to clay colloid chemistry*. Interscience Publishers, New York.
 van Rijn, L.C. (1993) *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries seas and oceans*. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
 Winterwerp, J.C. (1998) A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *J. Hydraul. Res.* 36(3), 309-326.
 Winterwerp, J.C. (2002) On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Res.* Vol. 22, pp. 1339-1360.

© 논문접수일 : 09년 07월 10일
 © 심사의뢰일 : 09년 07월 14일
 © 심사완료일 : 09년 07월 24일