

## 점착성에 따른 부유 미립자의 플럭밀도에 대한 물리적 특성

최인호·김종우<sup>†</sup>

서일대학교 토목공학과

### Physical Characteristics of Floc Density of Suspended Fine Particles in accordance with the Cohesiveness

In Ho Choi·Jong Woo Kim<sup>†</sup>

Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea

(Received : 12 June 2018, Revised: 16 July 2018, Accepted: 16 July 2018)

#### 요약

본 논문은 점착성 변화에 따른 부유 미립자의 플럭밀도에 대한 물리적 특성을 조사하였다. 플럭밀도에 관한 분석은 바닥전단응력 변화와 이온침가 조건하에 자유수면이 존재하는 소형 환형수조에서 수행되었다. 미립자 실리카는 퇴적물에 영향을 미치는 점토의 주요 광물 성분이기 때문에 이를 실험재료로써 사용하였다. 연구결과로서 플럭밀도는 바닥전단응력, 염분과 pH값의 증가에 의존함을 나타낸다. 플럭밀도는 정지수면상태에서 염분과 플럭입자가 증가함에 따라 감소하는 반면에 바닥전단응력이 증가하면 정반대로 나타난다. 플럭밀도는 바닥전단응력의 범위가 0.0086 ~ 0.0132 N/m<sup>2</sup>이면 pH4.2에서 보다 pH6.8에서 증가하였다.

핵심용어 : 부유 미립자, 플럭밀도, 환형수조, 전단응력

#### Abstract

This paper was examined the physical characteristics of floc density of suspended fine particles with varying cohesiveness. The analysis of floc density was performed in a small annular flume with a free water surface under different bed shear stresses and ion addition. Fine-grained silica was used as model material, as it is the main mineral components of clay that affects sedimentation. It was concluded that floc density depended on increasing the bed shear stress, the salinity and pH value. Floc density decreased with increasing the salinity in still water and floc size, whereas the opposite was true when increasing the bed shear stress. Also, it increased at pH6.8 more than at pH4.2 when increasing the bed shear stress in the range from 0.0086 to 0.0132 N/m<sup>2</sup>.

Key words : Suspended fine particles, Floc density, Annular flume, Shear stress

## 1. 서론

하천, 해안, 항만, 댐, 저수지 및 습지 등에서 이온 성분을 띠는 점착성 유사는 물리-화학적인 인자들의 영향으로 응집된 덩어리(floc)가 된다. 미립자간의 결합된 플럭(floc) 현상은 점착성 유사의 밀도를 변화시켜 여러 인자(이송, 침식, 침강, 퇴적)의 거동에 큰 영향을 준다. Stoke's Law 이론에 의하면 점착성 유사의 침강속도는 유사 자체가 가지는 성질인 플럭크기와 밀도에 의해 결정되므로 부유 미립자의 플럭특성을 이해하는 것이 중요하다. 더욱이 플럭밀도와 입자의 크기를 정확하게 측정할 수만 있다면, 점착성 유사의 거동을 예측하는 모형의 정확도를 증대시킬 수 있다. 지금까지 많은 학자들은 플럭밀도에 관한 연구를 하였다.

점착성 유사의 플럭밀도는 다양한 물리-화학적 인자(pH, 염도, 유기물 함량, 전단응력, 수온, 광물질 구성성분, 입경 분포, 농도 등)와 시간적 변동성에 영향을 받으며 그 특성을 이해하기가 복잡하다. Tambo and Watanabe(1979)는 점착성 유사 중 알루미늄 플럭(aluminium floc)의 밀도를 pH6.5 ~ 8범위에서 측정하였으며, 플럭밀도에 대한 pH 영향을 무시할 만큼 작았다. Gibbs(1985)는 점착성 유사(illite, kaolinite and montmorillonite)의 침강속도, 입경 및 플럭밀도에 관해 연구하였으며, 플럭입경이 증가할수록 플럭밀도는 감소한다고 발표하였다. 고흥토(kaolinite)의 플럭입경이 증가할수록 침강속도는 증가하였다(Kuroda, et al., 2003). 고흥토(kaolinite)는 pH8에서 가장 높은 침전률과 하상밀도를 나타내었다(Zbik et al., 2008). 고흥토(kaolinite)의 침강거동과 플럭입경은 이온과 pH의 영향을 받는다(Nasser and James, 2009). Shen and Maa(2017)는 부유된 고흥토의 플럭 입경분포에 관한 연구를 통해 1차원 예측모형을 개발하

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea  
E-mail: jwkim@seoil.ac.kr

였다. 국내에서는 대부분 하천 하구나 연안에서 채취한 점착성 퇴적물의 특성을 연구하였다(Lee, et al., 2005; Park, 2006; Lim and Son, 2016). Hwang and Yang(2007)은 수돗물 조건에서 고령토(kaolinite)의 퇴적특성에 관한 실험연구를 하였다. Hwang et al. (2008)은 고령토의 퇴적실험을 염수조건하에 환형수조에서 수행하였다. Choi and Kim (2016, 2017)는 증류수 조건에서 염분농도 증가에 따른 점착성 유사의 퇴적과 침강에 관한 연구를 하였다. 플럭밀도에 영향을 주는 점착성 유사의 플럭(floc) 현상은 광범위한 매개변수들의 영향 때문에 아직 완전히 이해되지 않았다. 새만금, 군산연안해역 및 시화호에서 퇴적된 주된 점착성 유사의 실리카이며, 바닥전단응력 변화를 고려한 실리카의 플럭밀도에 관한 연구는 미흡한 상태이다. 그러므로 점착성 유사의 거동에 대한 명확하고 정량적인 해석을 위해서는 플럭밀도에 대한 물리-화학적 인자의 영향에 관한 연구가 요구되기에 이르렀다.

이에 따라 본 연구는 점착성 유사의 주요 광물 성분인 실리카를 실험재료로써 사용하였다. 플럭밀도를 결정할 경우 CCD-Camera를 이용하여 농도를 측정하고, 이를 기본 자료로 소형 환형수조에서 바닥전단응력과 이온(pH와 NaCl) 첨가에 따른 플럭밀도 변화를 산정하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 플럭밀도의 결정방법

플럭밀도( $\rho_f$ )는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} \quad (1)$$

여기서  $\rho_f$ 는 플럭밀도,  $M_f$ 는 플럭질량,  $V_f$ 는 플럭체적이다. 플럭질량( $M_f$ )은 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M_f = M_p + M_w = M_p + \rho_w(V_f - V_p) = M_p + \rho_w \left( V_f - \frac{M_p}{\rho_p} \right) \quad (2)$$

여기서  $M_p(= \rho_p V_p)$ 은 일차입자 질량,  $M_w(= \rho_w V_w)$ 은 유체 질량,  $V_p$ 와  $V_w$ 는 각각 일차입자 체적과 유체체적이며,  $\rho_p$ 와  $\rho_w$ 는 각각 일차입자 밀도와 유체밀도이다.

구형형태의 입자이면  $V_f$ 와  $V_p$ 는 다음 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현한다.

$$V_f = \frac{\pi}{6} d_f^3 \quad (3)$$

$$V_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (4)$$

여기서  $d_f$ 는 플럭직경,  $d_p$ 는 일차입자의 직경이다.

따라서 플럭밀도( $\rho_f$ )는 다음 식 (5)과 같이 표현한다(Fettweis, 2008).

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} = \frac{M_p + \rho_w \left( V_f - \frac{M_p}{\rho_p} \right)}{V_f} = \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_p} \right) \frac{M_p}{V_f} + \rho_w \quad (5)$$

일반적으로 점착성 미립자사이에 존재하는 공기를 완벽하게 제거한 후 일차입자 밀도를 측정하기란 기술적 어려움이 있다. 본 연구에서는 실리카 밀도  $2,650 \text{ kg/m}^3$ 을 일차입자 밀도로 사용하였으며, 일차입자 크기는  $1 \mu\text{m}$ 로 가정하였다. 점착성 유사인 고령토 일차입자 크기가  $2.18 \mu\text{m}$ 로 측정되었고(Coletta et al., 1997) 또한  $1.2 \mu\text{m}$ 로 제시되었다(Lee, 1995).

플럭밀도를 결정하기 위해서는 플럭크기를 알아야 한다. 플럭크기( $d$ )의 측정방법은 다양하다. 비점착성 미립자일 경우 체 분석법을 사용할 수 있으며, 점착성 유사이면 수중에 있는 플럭된 입자가 쉽게 교란되어 파괴될 수 있으므로 광 산란법, 빛 투과법, 입자센서를 이용한 입자계수기를 통한 간접적인 측정방법, 플럭카메라를 통한 캡처한 확대 이미지방법 등으로 플럭크기를 분석한다. 각 방법마다 장단점을 갖고 있다. 플럭 형태와 다양한 크기, 입자 내 공극 때문에 불규칙한 입자가 형성된다. 부유된 입자 크기를 측정하기 위해서는 고도의 기술이 요구되어 플럭크기를 정확하게 측정하기가 어렵다. 특히 플럭카메라 시스템의 장비로는 실제 플럭크기  $0.1 \sim 50 \mu\text{m}$  범위의 수중에 존재하는 다양한 점착성 입자를 관찰하기가 어렵다.

본 연구에서는 식 (6)과 같은 수정 Stokes' Law에 따라 유체 속에 있는 플럭직경을 산정하였다(Stokes, 1851). 단, Reynolds 수가 매우 작고( $Re_p(= \rho_w W_s d_f / \mu) \ll 1$ ) 미립자를 구형으로 가정하였다.

$$d_f = \left[ \frac{18\mu W_s}{(\rho_s - \rho_w)g} \right]^{0.5} \quad (6)$$

여기서  $d_f$ 는 플럭직경,  $\mu$ 는 점성계수,  $W_s$ 는 침강속도,  $\rho_s$ 는 미립자 밀도,  $\rho_w$ 는 유체밀도,  $g$ 는 중력가속도이다.

플럭입자의 침강속도( $W_s$ )는 침강 분석법으로 결정하였다. Owen(1976)은 오웬침강관(Owen tube)을 이용한 시료 채취를 통해 점착성 유사의 침강속도를 측정하였으나 이 방법은 자연상태에 있는 점착성 유사를 교란시키는 문제점을 나타낸다. 피펫(Pipette)을 사용할 경우 시료를 채취하는 과정에서 수중에 있는 피펫의 흡입력 때문에 플럭입자를 교란시켜 부서지게 하는 문제를 갖고 있다(Gibbs, 1982). 이러한 문제점들을 개선하고 빠른 관측을 수행하고자 CCD-Camera 시스템을 구축하였다. 측정된 농도를 사용하여 점착성 유사의 침강속도(settling velocity)를 산정할 수 있다. 난류흐름이 존재하면 침강속도( $W_s$ )는 시간에 따라 측정된 농도와 퇴적확률( $P$ )을 고려하여 식 (7)과 같이 표현할 수 있다(Krone, 1962).

$$W_s = \frac{dCh}{dt} \frac{1}{C} \frac{1}{P} = \frac{W_d}{(1 - \tau_s / \tau_c)} \quad (7)$$

여기서  $W_s$ 는 침강속도(settling velocity),  $h$ 는 침강수심,  $C$ 는 저면경계층에서 부유농도,  $P$ 는 퇴적확률(probability of deposition),  $\tau_s$ 는 하상전단응력( $N/m^2$ )이며,  $\tau_c$ 는 한계전단응력( $N/m^2$ )이다.

pH 영향을 고려할 때 퇴적확률( $P$ )을 결정하기 위해 필요한 최소전단응력 값은  $0.008 N/m^2$ (Choi and Kim, 2015)를 채택하며, NaCl 영향을 고려할 때 실리카의 최소전단응력 값은  $0.005 N/m^2$ 를 적용하였다. 한계전단응력( $\tau_c$ )은  $0.022 N/m^2$ 를 적용하였다(Choi and Kim, 2016).

### 2.2 농도분석

실리카의 초기농도 7 g/L를 각각 이온(HCl, NaOH, NaCl)수에 혼합하여 20분 동안 균일하게 혼합한다. 혼합 후 소형 회전수조의 바닥으로부터 25 mm 지점에 CCD-Camera를 설치하여 바닥전단력 변화에 따른 부유농도를 측정하였다(Kim and Nestmann, 2009). 부유농도는 LED(Light Emitting Diode:발광다이오드) 빛의 강도에 따라 결정되며, 빛의 강도에 따라 만들어진 지수 함수적 관계식은 식 (8)과 같이 표현한다.

$$N = N_0 e^{-k \cdot C} \tag{8}$$

여기서  $N$ 은 측정된 빛의 출구강도,  $N_0$ 와  $k$ 는 독립변수,  $C$ 는 농도이다. 소형 회전수조에서 미립자의 농도범위가 0 ~ 7,000 mg/L이면 상수  $k$ 는 0.28 ~ 1.68이다. 상관계수는 0.97에서 0.99까지 변화하였다(Fig. 1).

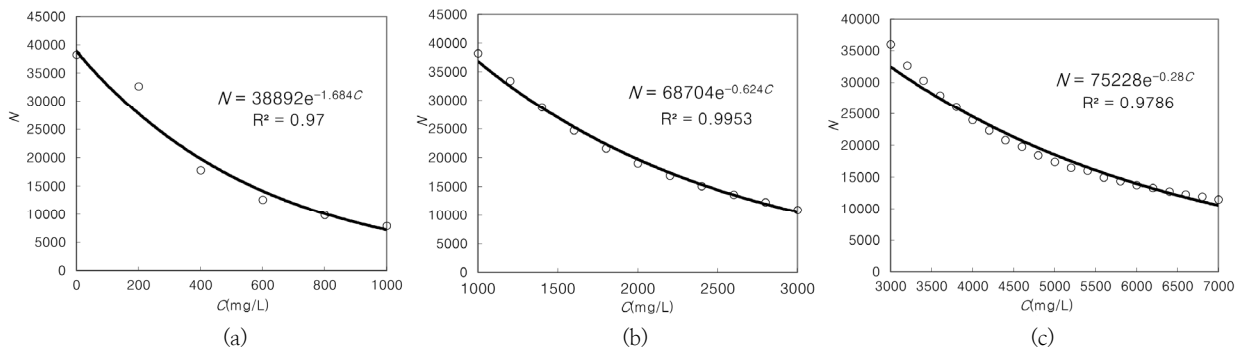


Fig. 1. CCD Camera calibrations for silica with varying light intensity for (a) initial concentrations from 0 to 1,000 mg/L, (b) initial concentrations from 1,000 to 3,000 mg/L and (c) initial concentrations from 3,000 to 7,000 mg/L.

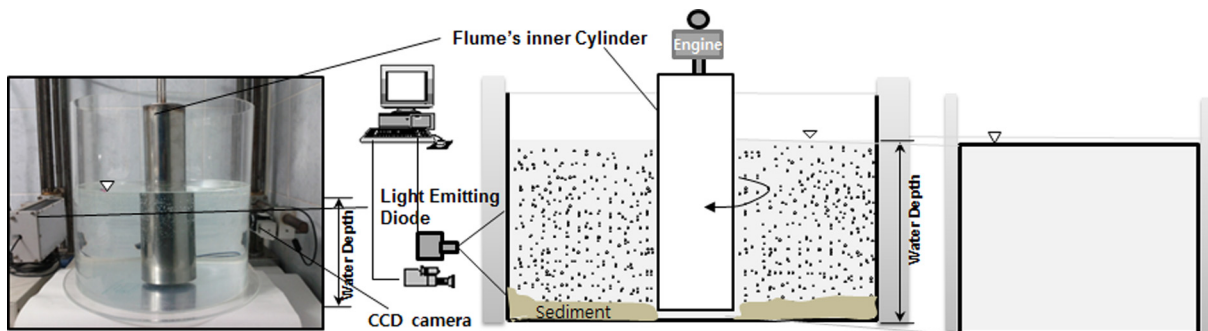


Fig. 2. Simplified sketch of small annular flume.

### 2.3 하상전단응력

난류의 유속분포( $y \leq 0.2h$ )는 수로바닥면이 매끈한 하상일 경우 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며(Von Kármán, 1930), 바닥전단응력( $\tau$ ) 산정에 적용하였다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{y \cdot u_*}{\nu}\right) + C_1 \tag{9}$$

여기서  $u_* (= \sqrt{\tau/\rho_w})$ 는 마찰속도,  $\rho_w$ 는 유체밀도,  $u$ 는 유속,  $k$ 는 Kármán 상수(=0.4),  $y$ 는 하상으로부터 수심,  $C_1$ 는 5.5,  $\nu$ 는 동점성 계수이다.

소형 환형수조 내의 바닥전단응력의 측정방법과 실험절차에 대해서는 Choi and Kim(2015, 2016)가 자세히 밝히고 있다. 수조의 중앙에 스테인리스 강판으로 이루어진 회전체 실린더를 설치하였으며, 실린더의 회전으로 외측 벽과 내측 회전체 사이로 흐름을 발생시켰다(Fig. 2). 수조 수심( $h$ )은 170 mm, 직경( $D$ )은 150 mm, 내측 벽과 외측 벽 사이 통수폭( $b$ )은 60 mm이다.

## 3. 결 과

### 3.1 pH 영향

Fig. 3 ~ Fig. 5는 pH와 바닥전단응력에 따른 플럭스 변화율을 도시한 것이다. 수중에 녹아 있는 이온의 영향을 피하기 위해 증류수를 사용하였으며, 초기 농도는 7 g/L이다.

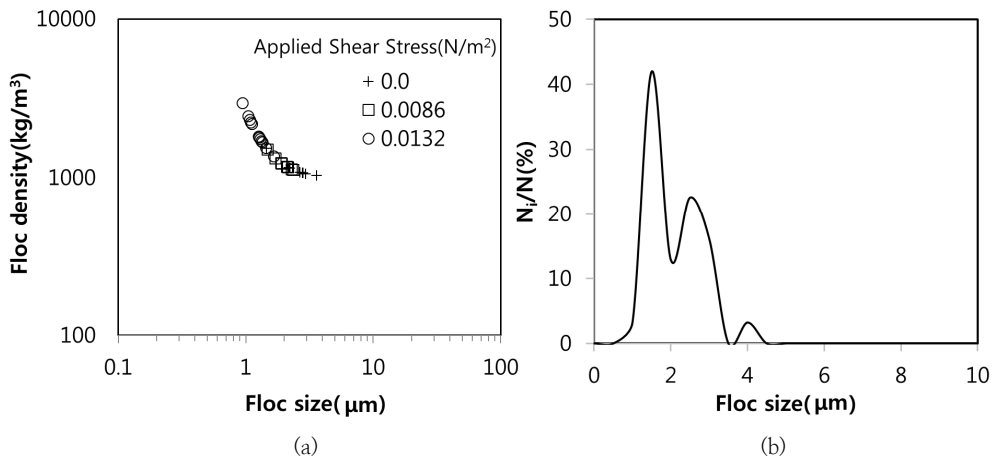


Fig. 3. (a) Floc density and (b) size distribution of silica when increasing bed shear stress at pH4.2.

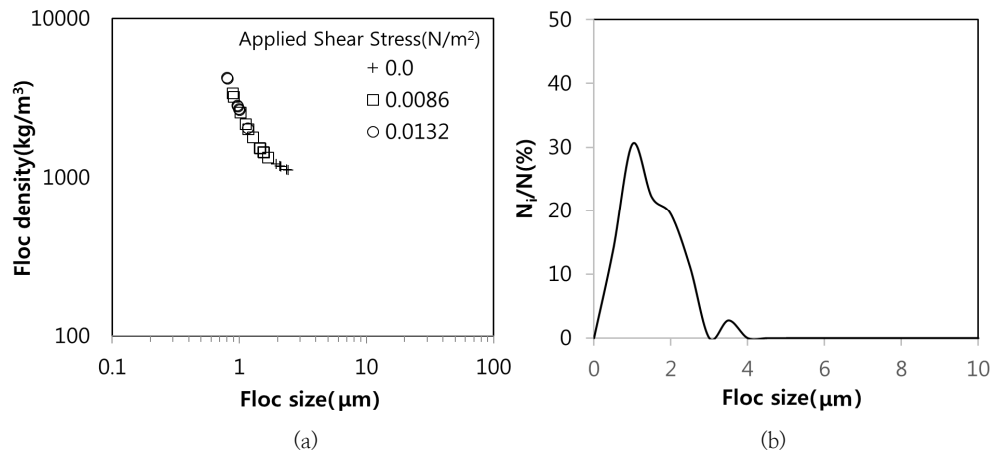


Fig. 4. (a) Floc density and (b) size distribution of silica when increasing bed shear stress at pH6.8.

플럭입경이  $0.7 \mu\text{m}$  이상에서 바닥전단응력 변화는  $0 \sim 0.0132 \text{ N/m}^2$  범위이다.

Fig. 3a는 pH4.2 상황에서 바닥전단응력 변화에 따른 플럭밀도 변화를 나타낸다. 바닥전단응력  $0 \text{ N/m}^2$ 와  $0.0086 \text{ N/m}^2$  상황에서 평균 플럭밀도는 각각  $1,138.1 \text{ kg/m}^3$ 과  $1,226.3 \text{ kg/m}^3$ 이며, 바닥전단응력  $0.0133 \text{ N/m}^2$ 로 증가할 경우 평균 플럭밀도는  $1,975.2 \text{ kg/m}^3$ 이다. pH4.2이면 플럭밀도는 바닥전단응력이 증가할수록 증가하였으며, 부유된 실리카의 입경분포는  $1.5 \mu\text{m}$ 에서 높게 나타난다(Fig. 3b).

Fig. 4a는 pH6.8 상황에서 바닥전단응력에 따른 플럭밀도 변화를 나타낸다. 바닥전단응력  $0 \text{ N/m}^2$ 와  $0.0086 \text{ N/m}^2$ 일 경우 평균 플럭밀도는 각각  $1,162.8 \text{ kg/m}^3$ 과  $1,662 \text{ kg/m}^3$ 이며, 바닥전단응력  $0.0133 \text{ N/m}^2$ 로 증가하게 되면 평균 플럭밀도는  $3,075.8 \text{ kg/m}^3$ 로 증가하였다. Fig. 4b는 증류수와 pH6.8에서 실리카 미립자 입경분포를 나타냈으며, 부유된 실리카 입자는 입경  $1.0 \mu\text{m}$ 를 중심으로 분포한다.

Fig. 5는 pH4.2와 pH6.8 상황에서 바닥전단응력 변화에 따른 평균 플럭밀도 변화를 나타낸다. 플럭밀도는 바닥전단

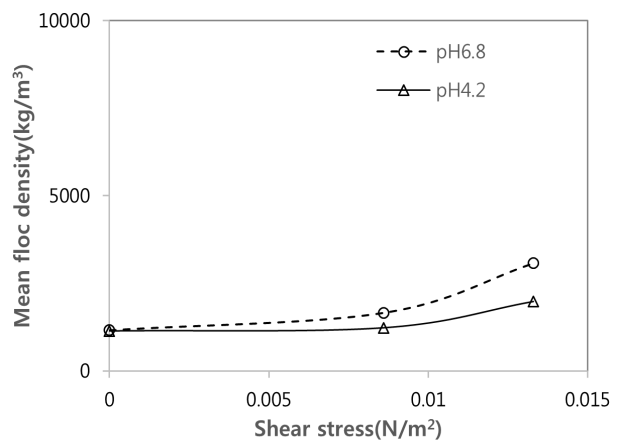


Fig. 5. Mean floc density of silica when increasing bed shear stress at pH6.8 and pH4.2.

응력이 증가할수록 점차적으로 증가하였으며, pH4.2 조건보다 pH6.8 조건에서 높게 나타난다.

Fig. 6은 pH6.8과 pH4.2 조건에서 플럭입자의 평균입경과 평균 침강속도 변화에 따른 평균 플럭밀도를 나타낸다. 플럭입경과 침강속도가 증가할수록 플럭밀도는 감소하였

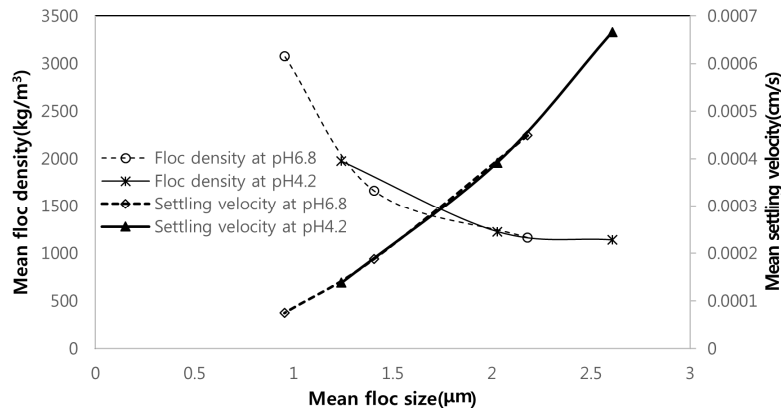


Fig. 6. Mean floc density of silica when increasing mean floc size and settling velocity at pH6.8 and pH4.2.

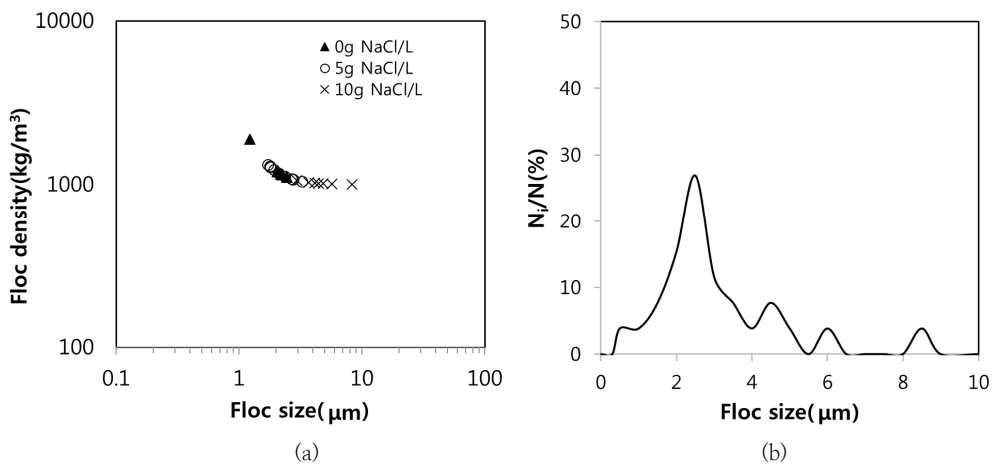


Fig. 7. (a) Floc density and (b) size distribution of silica with three NaCl concentrations of 0 g/L, 5 g/L and 10 g/L at bed shear stress of 0 N/m<sup>2</sup>.

다. pH6.8 상황과 바닥전단응력 0 N/m<sup>2</sup> 조건에서 플러입자의 평균입경이 2.18 μm이면 평균 플러밀도는 1,162.8 kg/m<sup>3</sup>이다. 동일한 pH 조건하에 바닥전단응력 0.0132 N/m<sup>2</sup> 상황에서 부유미립자의 평균입경이 0.95 μm이면 평균 플러밀도는 3,075.8 kg/m<sup>3</sup>로 증가하였다. pH4.2 조건하에 바닥전단응력 0 N/m<sup>2</sup>이면 플러입자의 평균입경은 2.6 μm이고 평균 플러밀도는 1,138.1 kg/m<sup>3</sup>이다. 또한 바닥전단응력 0.0132 N/m<sup>2</sup> 상황에서 부유미립자의 평균입경이 1.2 μm이면 평균 플러밀도가 1,975.2 kg/m<sup>3</sup>로 증가하였다. 플러입경이 증가함에 따라 침강속도가 증가하였다.

### 3.2 NaCl 영향

Fig. 7a와 Fig. 8a는 염분농도와 바닥전단응력에 따른 플러밀도 변화를 나타낸다. 플러입경은 0.7 ~ 9 μm 범위 내에 존재한다. 염분농도증가에 따른 입경분포와 플러밀도 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 바닥전단응력 0 N/m<sup>2</sup> 조건에서 염분농도 0 g NaCl/L이면 실리카의 평균밀도는 1,268.23 kg/m<sup>3</sup>이다. 염분농도 5 g NaCl/L에서 평균밀도는 1,187.74 kg/m<sup>3</sup>이며, 10 g NaCl/L으로 증가하면 실리카의 평균밀도는 1,021.71 kg/m<sup>3</sup>이다. 실리카 입자는 입경

2.5 μm을 중심으로 분포한다(Fig. 7b). 염분농도가 증가할수록 플러밀도는 감소하였다.

Fig. 8a는 염분농도 5 g NaCl/L 상황에서 바닥전단응력 증가에 따른 플러밀도 변화를 제시하였다. 염분농도 5 g NaCl/L 조건이면 바닥전단응력 0 N/m<sup>2</sup>에서 평균밀도는 1,187.74 kg/m<sup>3</sup>, 바닥전단응력 0.0086 N/m<sup>2</sup>에서 1,566.4 kg/m<sup>3</sup>이며, 바닥전단응력 0.0132 N/m<sup>2</sup>로 증가하면 평균밀도는 1,569.67 kg/m<sup>3</sup>이다. 입경분포는 2 μm에서 높게 나타난다(Fig. 8b). 바닥전단응력이 증가할수록 플러밀도가 증가하였음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 염분농도와 플러입자의 평균입경 및 평균 침강속도에 따른 실리카 평균 플러밀도를 나타낸다. 염분농도가 변화할 경우 플러밀도는 플러입경과 침강속도가 증가할수록 감소하였다. 바닥전단응력 0 N/m<sup>2</sup>와 염분농도 0 g NaCl/L 조건에서 플러입자의 평균입경 1.68 μm이면 평균 침강속도는 0.000375 cm/s이다. 염분농도 5 g NaCl/L 조건에서 부유미립자의 평균입경이 2.04 μm이면 평균 침강속도는 0.0005 cm/s이다. 염분농도 10 g NaCl/L 상황에서 부유미립자의 평균입경은 4.25 μm로 증가하였으며, 평균 침강속도는 0.0025 cm/s로 증가하였다.

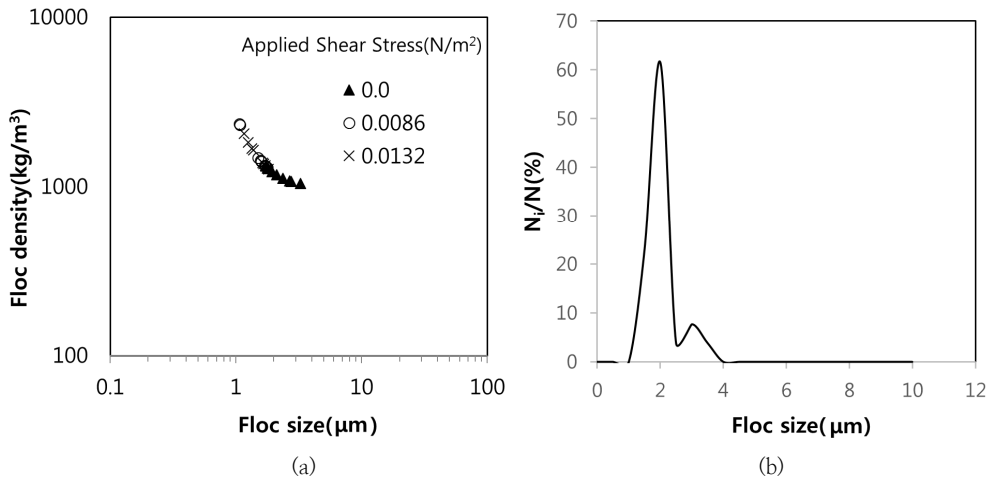


Fig. 8. (a) Floc density and (b) size distribution of silica when increasing bed shear stress at a NaCl concentration of 5 g/L.

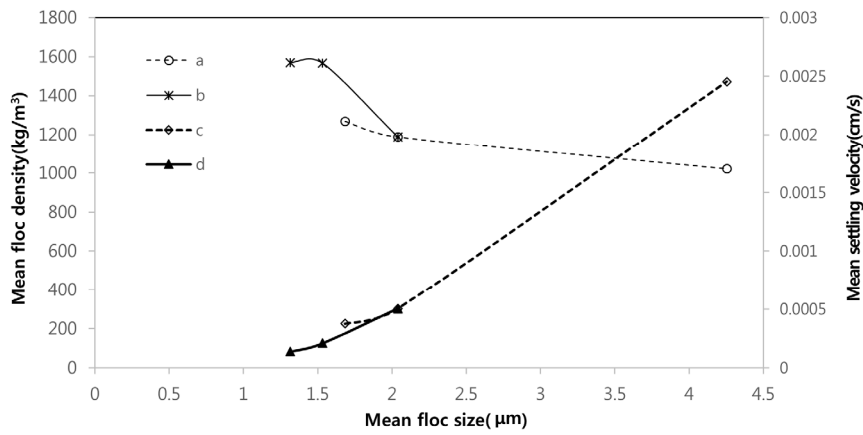


Fig. 9. Mean floc density and settling velocity of silica when increasing floc size. (a) Floc density with three NaCl concentrations of 0 g/L, 5 g/L and 10 g/L, (b) Floc density at a NaCl concentration of 5 g/L with increasing bed shear stress, (c) Settling velocity with three NaCl concentrations of 0 g/L, 5 g/L and 10 g/L, (d) Settling velocity at a NaCl concentration of 5 g/L with increasing bed shear stress.

염분농도 5 g NaCl/L와 바닥전단응력 0 N/m<sup>2</sup> 조건에서 플럭입자의 평균입경이 2.04 μm와 평균 침강속도가 0.0005 cm/s일 때 평균 플럭밀도는 1,187.74 kg/m<sup>3</sup>이다. 동일한 염분농도 조건과 바닥전단응력 0.0086 N/m<sup>2</sup>에서 플럭입자의 평균입경이 1.53 μm와 평균 침강속도가 0.00021 cm/s일 때 평균 플럭밀도는 1,566.4 kg/m<sup>3</sup>이다. 바닥전단응력 0.0132 N/m<sup>2</sup>에서 플럭입자의 평균입경이 1.31 μm와 평균 침강속도가 0.00014 cm/s일 때 평균 플럭밀도는 1,569.6 kg/m<sup>3</sup>로 증가하였다(Fig. 9).

3.3 이온 영향을 고려한 회귀분석

Fig. 10은 일차입자 크기가 0.5, 1, 1.2 μm일 경우 플럭 밀도를 보여준다. 이와 같은 결과를 통해 실리카 밀도는 플럭크기에 반비례한다는 사실과 일차입자가 증가할수록 증가한다는 사실을 알 수 있다. 실리카 밀도는 일차입자의 크기와 상관없이 플럭크기가 증가함에 따라 감소하는 결과를 나타낸다.

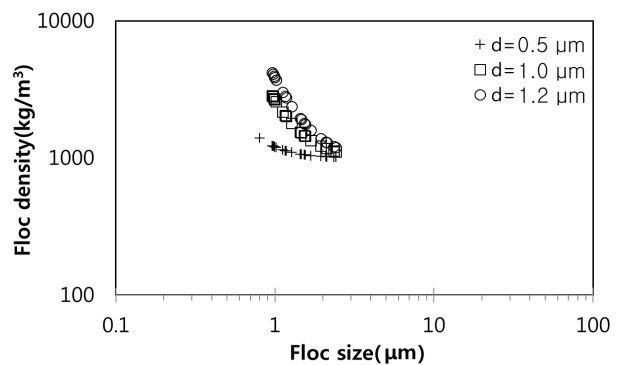


Fig. 10. Floc density of silica when increasing primary particle.

Fig. 11은 플럭밀도와 플럭크기에 대해 회귀분석을 보여준다. 플럭밀도에 대한 회귀분석식은 플럭크기에 영향을 크게 받는다. 이와 같은 사실은 바닥전단응력변화에 따른 pH와 염분(NaCl) 영향이 존재할 경우 회귀분석 결과를 나타낸 식을 통해서도 확인할 수 있었으며, 실리카 밀도는 플럭

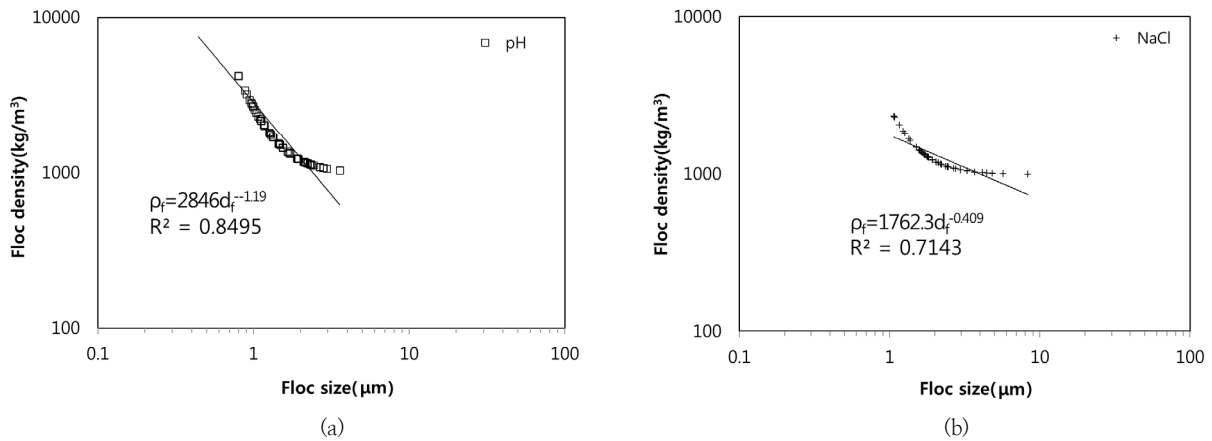


Fig. 11. Results of regression analyses. (a) Floc density of silica under pH value, (b) Floc density of silica when increasing the concentration of NaCl.

크기와 밀접한 연관성을 가지는 것으로 판단되었다.

Fig. 11에 나타난 바와 같이 pH 영향에 따른 회귀분석식 ( $\rho_f = 2846d_f^{-1.19}$ )의 지수는 1.19이고 염도 영향을 고려한 회귀분석식 ( $\rho_f = 1762.3d_f^{-0.409}$ )의 지수는 0.4이다. 즉 플러크 크기가 작을수록 플러크밀도는 증가하며, 반대로 플러크 크기가 증가할수록 밀도는 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 실리카 밀도가 플러크 크기와 큰 상관성을 가지고 있다는 사실을 의미한다. 실리카의 플러크밀도는 플러크입경 3  $\mu\text{m}$ 로부터 거의 일정하다는 사실을 추론할 수 있다(Fig. 11b).

#### 4. 결 론

본 연구는 소형 환형수조에서 부유농도를 측정하였으며, 이를 기본 자료로 하여 바닥전단응력과 이온수의 변화에 따른 실리카의 플러크밀도를 결정하는 것이 목적이다. 실험재료로써 새만금과 시화호에서 퇴적된 점착성 유사의 주된 무기질인 실리카를 사용하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 증류수에 HCl과 NaOH 이온을 섞어 pH 변화를 주었다. 바닥전단응력이 0  $\text{N/m}^2$  조건이면 플러크밀도는 pH4.2에서 보다 pH6.8에서 약간 크며, 바닥전단응력이 증가할수록 플러크밀도가 점점 증가하였다. 이때 pH6.8과 pH4.2 조건에서 실리카 입자는 각각 입경 1.0  $\mu\text{m}$ 와 1.5  $\mu\text{m}$ 을 중심으로 분포한다.

(2) 염분농도증가에 따른 입자분포와 플러크밀도 변화를 제시하였으며, 바닥전단응력이 0  $\text{N/m}^2$  조건에서 실리카의 평균밀도는 염분농도 5 g NaCl/L와 10 g NaCl/L 조건보다 염분농도 0 g NaCl/L 조건에서 높게 나타난다. 이때 실리카의 입경분포는 2.5  $\mu\text{m}$ 에서 높게 나타난다. 염분농도가 증가할수록 플러크밀도는 감소하였다. 염분농도 5 g NaCl/L 상황에서 바닥전단응력 0.0086  $\text{N/m}^2$ 와 0.0133  $\text{N/m}^2$  조건보다 바닥전단응력이 0  $\text{N/m}^2$ 에서 평균밀도가 낮게 나타난다. 바닥전단응력이 증가할수록 플러크밀도는 증가하였다.

(3) pH 영향을 받은 밀도에 대한 회귀분석식의 지수가 염

도의 영향을 고려한 회귀분석식의 지수보다 높게 나타났으며, 플러크크기에 영향을 받는다. 즉 플러크크기가 작을수록 밀도는 증가하며, 반대로 플러크크기가 증가할수록 밀도는 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 실리카의 밀도가 플러크 크기와 큰 상관성을 가지고 있다는 사실을 의미하며, 플러크밀도는 염분 영향이 pH 영향보다 작게 나타난다.

따라서 플러크밀도의 물리적인 특성이 점착성 유사의 동적 거동을 예측하는 시스템 개발에 영향을 줄 것으로 판단된다. 하지만 좀 더 명확한 점착성 유사의 수질변동 및 동적 거동해석을 위해서는 기타 물리-화학적 인자(유기물 함량, 전단응력, 수온, 광물질 구성성분, 입경분포, 농도 등)의 영향에 대한 지속적인 연구가 이루어질 필요가 있다고 본다.

#### 감사의 글

이 논문은 2018년 서일대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구함.

#### References

Choi, IH and Kim, JW (2015). Depositional behavior of fine-grained particles with varying cohesiveness. *J. of Korean Society Hazard Mitigation*, 15(4), pp. 251–259. [Korean Literature] <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.4.251>

Choi, IH and Kim, JW (2016). A study on effects of salinity on deposition and erosion of cohesive sediments. *J. of Korean Society Hazard Mitigation*, 16(5), pp. 317–324. [Korean Literature] <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.5.317>

Choi, IH and Kim, JW (2017). Study of settling properties of cohesive sediments. *J. of Wetlands Research*. 19(3), pp. 303–310. [Korean Literature] DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.3.303>

Coletta, TF, Bruell, CJ, Ryan DK and Inyang, HI (1997). Cation-enhanced solutions for the electrokinetic removal

- of Pb from kaolinite. *ASCE J. of Environment* 123(2), pp.1227-1233.
- Fettweis, M (2008). Uncertainty of excess density and settling velocity of mud flocs derived from in situ measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78, pp. 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.01.007>
- Gibbs, RJ (1982). Floc stability during Coulter counter size analysis. *J. of Sediment Petrology*. 52, pp. 657-660.
- Gibbs, RJ (1985). Settling velocity, diameter, and density for flocs of illite, kaolinite, and montmorillonite. *J. of Sedimentary Research*, 55(1), pp. 65 - 68. <https://doi.org/10.1306/212F860C-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Hwang, KN, Kim, NH and Lee, YH (2008). The laboratory study on estimation of depositional properties of kaolinite sediments on saltwater condition. *J. of Korea Water Resources Association*, 41(9), pp. 863-872. [Korean Literature] DIO:10.3741/JKWRA.2008.41.9.863
- Hwang, KN and Yang, SH (2007). A laboratory study on depositional properties of kaolinite sediments. *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 27(6b), pp.676-687. [Korean Literature].
- Kim, JW and Nestmann, F (2009). Settling behavior of fine-grained materials in flocs. *J. Hydraul. Res.* 47(4), pp. 492-502. <https://doi.org/10.1080/00221686.2009.9522025>
- Krone, RB (1962). *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*. Final Rep., Hydr. Engr. Lab. and Sanitary Engr. Res. Lab., Univ. of California, Berkeley, June.
- Kuroda, Y, Nakaishi, K and Adachi, Y (2003). Settling velocity and structure of kaolinite floc in sodium chloride solution. *Clay Science*, 12, pp. 103-107. <https://doi.org/10.11362/jcssjclayscience1960.12.103>
- Lee, SC (1995). *Response of mud shore profiles to waves*. PhD thesis, University of Florida, May.
- Lee, YJ, Lee, SH, Hwang, KN and Ryu, HR (2005). A study on settling properties of cohesive sediments in Shihwa lake. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 19(4), pp. 42-48. [Korean Literature]
- Lim, BG and Son, MW (2016). Study on applicability of fractal theory to cohesive sediment in small rivers. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 49(10), pp. 887-901. [Korean Literature] DIO:10.3741/JKWRA.2016.49.10.887
- Nasser, MS and James, AE (2009). The effect of electrolyte concentration and pH on the flocculation and rheological behaviour of kaolinite suspensions. *J. of Engineering Science and Technology*, 4(4), pp. 430-446.
- Owen, MW (1976). Determination of the settling velocities of cohesive muds. *Hydraulic Research Station*, Wallingford, Report, IT, 161, pp.1-8.
- Park, JW (2006). *A study on depositional properties of muddy cohesive sediments from Kwangyang bay*. M.S, dissertation, Chonbuk National University, Jeonju, R. of Korea. [Korean Literature]
- Shen, X and Maa, JP-Y (2017). Floc size distributions of suspended kaolinite in an advection transport dominated tank: measurements and modeling. *Ocean Dynamics*, 67(11), pp. 1495-1510.
- Stokes, GG (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 characteristics of flocs-I. The floc density function and aluminium floc. *Water Research*, 13, pp. 409-419. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90033-2](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90033-2)
- Von Kármán, T (1930). *Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz*. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Fachgruppe 1(Mathematik), 5, pp. 58-76. [German Literature]
- Zbik, MS, Smart, RSC and Morris, GE (2008). Kaolinite flocculation structure. *J. of colloid and interface science*, 328(1), pp. 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.08.063>