

점착성 유사의 침강특성에 관한 연구

최인호·김종우[†]

서일대학교 토목공학과

Study of Settling Properties of Cohesive Sediments

In Ho Choi·Jong Woo Kim[†]

Department of Civil Engineering, Seoil University

(Received : 03 July 2017, Revised: 21 July 2017, Accepted: 21 July 2017)

요약

본 연구의 목적은 난류흐름에서 이온의 영향아래 점착성 유사의 침강특성을 이해하는데 있다. 실험연구는 자유수면을 가지는 소형 환형수조에서 실시하였다. 실험에서 유사 재료로써 실리카(SiO₂)를 사용하였으며, 부유농도는 CCD-Camera로 측정하였다. 실리카의 침강실험은 7g/L의 농도일 경우 다양한 바닥전단응력을 부여해 실시되었다. 바닥전단응력이 증가하게 되면 실리카의 플럭(floc)입자 입경(D)은 pH6.8에서보다 pH4.2와 높은 NaCl 농도에서 더 크다. 실리카의 침강속도(W_s)는 pH4.2에서보다 10g NaCl/L에서 더 높다. 본 연구에서 예측된 농도-시간 곡선은 실제 흐름에서 이온의 영향아래 실측된 농도-시간 곡선과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 침강특성, 이온, 소형 환형수조, 전단응력

Abstract

This paper is to understand the settling properties of cohesive sediments under effects of ions in turbulent flow. The experiments were conducted using a miniature annular flume(mini flume) with a free water surface. Silica was used as sediment of experiment. The suspended concentrations were measured by using a CCD-Camera. Settling of silica(SiO₂) was allowed to occur under various shear stresses in a concentration of 7g/L. At condition of pH 4.2 and high NaCl concentration, the floc size D of silica was larger than D at condition of pH6.8 with the bed shear stress increasing. The settling velocity W_s of silica was higher at condition of 10g NaCl/L than W_s at condition of pH4.2. Comparison of measured concentration-time curves and concentration-time curves calculated by this study showed similar tendency in flow under effects of ions.

Key words : Settling properties, Ions, Miniature annular flume, Shear stress

1. 서 론

부유된 점착성 유사는 표면의 이온성분 때문에 다른 미세 입자와 쉽게 결합한다. 이때 점착성 유사의 결합을 플럭(floc)이라고 부른다. 플럭은 수중에서 붕괴 또는 결합되기 때문에 크기와 밀도가 변화한다. 이러한 일차 입자간 결합된 덩어리인 플럭은 하천, 습지, 호수, 항만, 댐, 연안해역에서 점착성 유사의 침강특성에 중요한 역할을 한다. 플럭 현상의 영향을 받는 점착성 유사의 침강속도는 부유된 미세 입자의 이송(transport), 침강(settling) 및 퇴적(deposition)에 큰 영향을 끼친다. 이와 같은 플럭 현상은 흐름의 물리적 특성과 수중에 녹아 있는 화학적 특성에 따라 좌우되어, 그 현상을 이해하기가 복잡하다. 따라서 물리-화학적 인

자(전단강도, 온도, 유사의 밀도변화, 유사의 플럭크기, 유사의 성질, pH, NaCl 등)의 영향에 대한 규명이 필요하다.

정지수면에서 염도가 증가하는 경우 점착성 유사(montmorillonite, illite, kaolinite)의 침강특성에 관한 연구가 이루어진 바 있는데, 염도 2 ~ 3‰ 범위에서 점착성 유사(montmorillonite, illite)의 응집현상이 발생하는 것으로 나타났다(Whitehouse et al., 1960). Mehta and Parthenlades (1975)은 응집현상이 시공간적으로 점착성 유사의 침강속도에 영향을 크게 미친다는 사실을 밝혀냈다. 플럭은 입자간의 침강속도 차이, 분자운동 및 난류흐름의 영향을 받는다(van Leussen, 1994). Maggi et al. (2007)는 실험을 바탕으로 고령토(Kaolinite)의 플럭크기와 프랙탈 차원이 반비례한다는 사실을 밝혔다. 정지수면 조건하에 CCD-Camera로 측정된 실리카 입경은 염도 증가에 따라 증가하였다(Kim and Nestmann, 2009). 상업용 카메라를 이용하여 고령토(Kaolinite)의 플럭의 크기와 밀도를 측정하였고 플럭의 프

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Seoil University, Korea
E-mail: jwkim@seoil.ac.kr

랙탈 차원을 규명하였다(Son, 2011). 높은 전단응력일 경우 플렉 현상에 따른 고령토(Kaolinite) 입경은 감소하였다(Zhu et al., 2016). Choi and Kim(2014, 2015, 2016)은 점착성 유사의 침식특성과 퇴적특성에 대해 연구하였다. Choo et al. (2017)는 수문학적인 기법으로 부유농도 측정 방법을 밝혔다. 하지만 흐름조건에서 이온 영향에 따른 점착성 유사의 침강특성에 중요하게 고려되어야 할 플렉입자의 크기에 관한 연구는 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구는 점착성 유사의 이송, 침강과 퇴적량을 예측하고 이를 바탕으로 한 대책 마련을 위해 물리-화학적 인자 중 전단력, pH, NaCl을 고려한 점착성 유사의 침강특성에 관한 실험이다. 센서의 교란 없이 CCD-Camera를 이용하여 부유농도를 측정하고 침강속도를 결정하며, 이를 기본자료로 플렉입자를 산정하고자 하였다. 또한 점착성 유사의 주성분인 실리카(SiO₂)의 플렉입자와 침강속도의 관계를 이해하며, 결정된 플렉입자의 크기를 고려한 4개의 모형을 비교분석하여 침강농도 예측에 관하여 분석을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1 연구조건 및 절차

침강실험은 소형 환형수조에서 실시하였으며, Choi and Kim(2014, 2015, 2016)는 소형 환형수조에 대한 구조특성과 흐름특성에 관한 내용을 자세히 설명하였다. 소형 환형수조내 수심(h)은 170 mm, 수조 직경(D)은 150 mm, 내측 벽과 외측 벽 사이 통수폭(b)은 60 mm이다. 스테인리스 강판으로 만들어진 회전체 실린더를 환형수조의 중앙에 설치하여 회전체 실린더의 회전으로 외측 벽과 내측 회전체 사이로 흐름을 발생시켰다(Fig. 1). 점착성 유사의 부유농도는 CCD-Camera로 관측하였으며, 회전수조의 바닥으로부터 25 mm 지점에 설치하여 LED(Light Emitting Diode: 발광다이오드) 빛의 강도를 측정하였다. 부유농도 측정방법에 대해서는 Kim and Nestmann(2009)가 자세히 밝히고 있다.

Hwang et al. (2008)이 언급한 새만금, 시화호에서 퇴적물의 주된 광물질인 실리카를 실험재료로 사용했으며, 실리

카 중앙입경(d_{50})은 4.2 μm 이다. 실험 전 증류수에 HCl과 NaOH이온을 섞어 pH를 조절하였으며, 증류수에 염분농도 0 ~ 10g NaCl/L를 섞는다. 즉 실리카의 초기농도 7g/L를 각각 이온(HCl, NaOH) 수에 섞어 20분 동안 균일하게 혼합한다. 혼합 후 우선 pH와 바닥전단력 변화에 따른 농도를 측정하여 플렉입자의 크기 및 침강속도를 측정하였다. 또한 동일한 실리카의 초기농도 7g/L를 NaCl와 혼합된 증류수에 20분 동안 균일하게 섞은 후 이온(NaCl)의 영향아래 바닥전단력 변화에 따른 침강현상에 대해 실험하였다. 이때 염분농도는 0g NaCl/L, 5g NaCl/L 및 10g NaCl/L이며, 바닥전단응력은 0 ~ 0.0132 N/m² 범위이다.

2.2 점착성 유사의 침강 거동

점착성 유사의 침강 거동에 영향을 주는 침강속도(settling velocity)는 측정된 농도로부터 산정할 수 있다. 즉 침강속도(W_s)는 농도분포를 시간과 함께 측정하여 전단응력을 고려한 농도변화로부터 질량보존 법칙에 따라 식(1)과 같이 나타낸다(Krone, 1962).

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

여기서 W_s 는 침강속도(settling velocity), h 는 수심, C 는 저면경계층에서 부유농도, W_d 는 퇴적속도(depositional velocity), P 는 퇴적확률(probability of deposition)이다.

Partheniades(1992)은 퇴적확률(P)을 다음과 같은 함수로 표현하였다.

$$P = 1 - (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^Y e^{-\frac{w^2}{2}} dw = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{Y}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{2}$$

$$Y = 2.04 \log \left[0.25 \left(\frac{\tau_s}{\tau_{c,\min}} - 1 \right) \exp(1.27\tau_{c,\min}) \right] \tag{3}$$

여기서 Y 은 퇴적확률 매개변수, ω 는 가상변수(a dummy variable), τ_s 는 하상전단응력(N/m²), $\tau_{c,\min}$ 는 모든 부유퇴

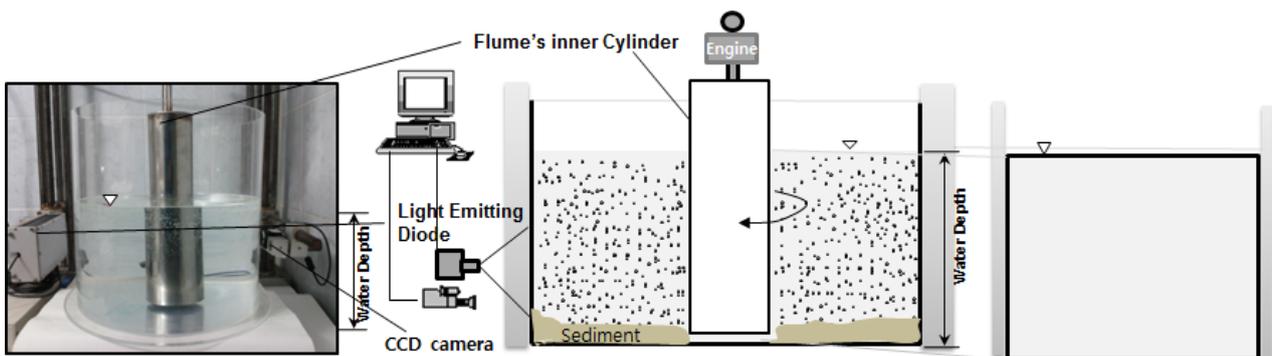


Fig. 1. General view of experimental apparatus.

적물이 퇴적되는 최소전단응력(N/m²)이다.

또한 Krone(1962)는 전단응력이 한계전단력보다 작을 경우 퇴적확률(*P*)을 다음과 같이 나타낸다.

$$P = \left(1 - \frac{\tau_s}{\tau_c}\right), \tau_s < \tau_c \quad (4)$$

여기서 τ_s 는 하상전단응력(N/m²)이며, τ_c 는 한계전단응력(N/m²)이다.

본 연구에서 pH 영향을 받는 경우 퇴적확률(*P*)을 결정하기 위해 필요한 최소전단응력 값은 0.008N/m²(Choi and Kim, 2015)를 채택하였다. NaCl 영향을 받는 경우 실리카의 최소전단응력 값은 0.005 N/m²을 적용하였으며, 이때 한계전단응력(τ_c)은 0.022 N/m²을 적용하였다(Choi and Kim, 2016). 또한 본 연구에서 퇴적확률(*P*)은 Partheniades 모형을 사용하였다. 그 이유는 Partheniades 모형이 Krone 모형보다 실제 퇴적률(deposition rate)과 잘 일치하기 때문이다(Choi and Kim, 2015).

미립자의 입경(*D*)에 대한 분석방법은 체 분석법, 광 산란법, 침강 분석법 등 여러 방법이 있고 각 방법마다 장단점이 있다. 대부분의 방법은 카메라에서 캡처한 확대 이미지에서 플럭입자를 측정하는 것이다. 하지만 플럭입자의 크기와 유사의 형상 파라미터는 플럭입자 구조의 고유한 불규칙성 때문에 측정하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 비교적 간단한 침강 분석법을 적용하였다. 침강 분석법은 Stokes(1851)법칙에 따라 유사 자체가 갖는 고유의 성질로 가장 중요한 플럭입자의 크기를 결정하는 것이다. 이때 플럭입자의 크기는 Reynolds 수가 매우 작고($Re_p \ll 1$) 미립자가 구형일 경우 식 (5)과 같이 표현된다. 본 연구에서는 지금까지 사용한 침강속도(=h/t)대신 식 (1)에 따라서 농도와 퇴적확률(*P*)에 의해 결정된 침강속도(*W_s*)를 사용하였다.

$$D = \left[\frac{18\mu W_s}{(\rho_s - \rho_w)g} \right]^{0.5} \quad (5)$$

여기서 W_s 는 침강속도, *D*는 미립자 입경, ρ_s 는 미립자 밀도, ρ_w 는 유체 밀도, μ 는 점성계수, *g*는 중력가속도를 뜻한다.

또한 미립자 입경과 관련된 침강속도 경험공식은 다음과 같다(Table 1).

2.3 하상전단응력

Von Kármán(1930)는 수로바닥면이 매끈한 하상일 경우 난류의 유속분포($y \leq 0.2h$)를 식 (6)과 같이 나타냈다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{y \cdot u_*}{\nu}\right) + C_1 \quad (6)$$

여기서 u_* 는 마찰속도, *u*는 유속, *k*는 Kármán 상수(=0.4), y_* 는 하상으로부터 수심, C_1 는 5.5, ν 는 동점성 계수이다.

따라서 하상전단응력(τ_s)은 회전체의 회전수와 관계를 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$\tau_s = a f^b \quad (7)$$

여기서 *a*, *b*는 회전체의 회전수에 영향을 받는 계수와 *f*는 회전체의 초당회전수(s⁻¹)이다.

이때 Choi and Kim(2015)가 제시한 바와 같이 소형 환형수조에서 회전체의 회전수에 영향을 받는 계수 *a*와 *b*는 각각 0.0016과 1.498을 적용하였고, 바닥응력과 회전수의 상관계수 R^2 은 0.99이다.

3. 결 과

3.1 플럭크기의 변화

실리카의 플럭크기는 침강 분석법에 따라 파악했으며, 초기농도 7 g/L이면 수중에 녹아 있는 이온의 영향을 피하기 위해 증류수에서 실험하였다. 이때 전단력 변화는 0 ~ 0.0132 N/m² 범위이다.

Fig. 2는 동일한 초기농도 7 g/L이면 증류수에서 이온(HCl, NaOH, NaCl) 및 흐름변화에 따른 점착성 미립자인 실리카 입경(*D*)의 변화를 나타냈다. Fig. 2a와 같이 실리카 입자의 평균입경(D_m)은 pH6.8일 경우 전단응력이 0 N/m²

Table 1. Formula of settling velocity(*d*: diameter of the primary particles, α, β : coefficients depending on the sphericity of the particles, $Re_p = W_s D / \nu$, *D*: diameter of the particles, n_f : fractal dimension, ν : kinematic viscosity)

No.	Formula	Source
1	$W_s = \frac{\alpha}{18\beta} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} d^{\beta - n_f} \frac{D^{n_f - 1}}{1 + 0.15 Re_p^{0.687}}$	Winterwerp(1998)
2	$W_s = 10 \frac{\nu}{D} \left(\sqrt{1 + 0.01 \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\nu^2} D^3} - 1 \right)$	Zanke(1977)
3	$W_s = \frac{\nu}{D} \left(\sqrt{25 + 1.2 \left(\left(\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\nu^2} \right)^{1/3} D \right)^2} - 5 \right)^{1.5}$	Cheng(1997)
4	$W_s = a D^b$	Kajihara(1971), Lick et al.(1992), Lick and Huang (1993)

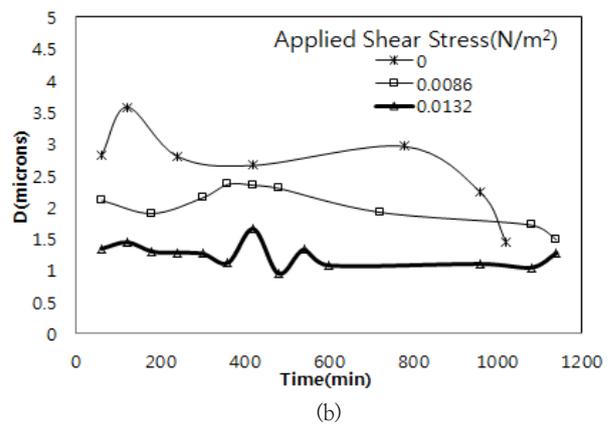
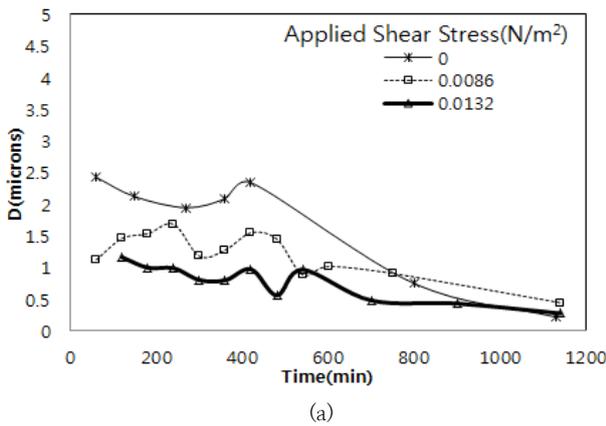


Fig. 2. Floc size of silica when increasing bed shear stress at (a) pH6.8 and (b) pH4.2 in mini flume.

에서 1.65 μm 이었지만 바닥전단응력이 0.0086 N/m^2 와 0.0132 N/m^2 로 증가할 때 평균입경은 각각 1.2 μm 와 0.7 μm 로 감소하였다. 또한 Fig. 2b에 나타난 바와 같이 실리카 입자의 평균입경(D_m)은 pH4.2일 경우 전단응력이 0 N/m^2 에서 2.6 μm 이었지만 바닥전단응력이 0.0086 N/m^2 와 0.0132 N/m^2 로 증가할 때 평균입경은 각각 2.0 μm 와 1.2 μm 로 감소하였다.

이와 같이 수중에 존재하는 실리카 입자는 바닥전단응력 0 ~ 0.0132 N/m^2 범위에서 pH 6.8보다 pH 4.2의 상황에서 플렉입자가 증가한다. 그 이유는 난류흐름에도 불구하고 pH1 ~ 3에서 실리카의 표면전하가 0인 영전하점(PZT: point of zero charge)과 전기이동도가 0인 등전점(IEP: Iso Electric Point, $\zeta=0$)이 발생하여 입자의 전하층이 얇아 입자 사이의 거리가 가까워지므로 쉽게 응집이 발생하기 때문이다.

Fig. 3은 초기농도 7 g/L일 경우 pH6.8에서 이온(NaCl) 변화에 따른 점착성 미립자(실리카)의 입경(D) 변화를 나타냈으며, 바닥전단응력은 0 N/m^2 이다. 염분농도가 0g NaCl/L일 경우 실리카 입자의 평균입경(D_m)은 1.65 μm 인 반면 염분농도가 5g NaCl/L과 10g NaCl/L으로 증가할 경우 실리카 입자의 평균입경(D_m)은 각각 2.0 μm 및 4.3 μm 로 증가하였다. 이때 실리카 입자의 평균입경은

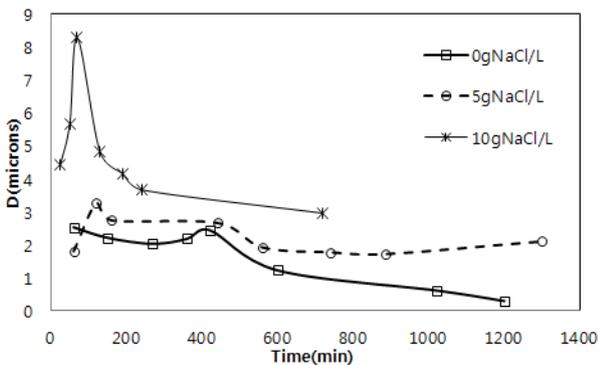


Fig. 3. Floc size of silica when increasing NaCl concentration at pH6.8 in mini flume.

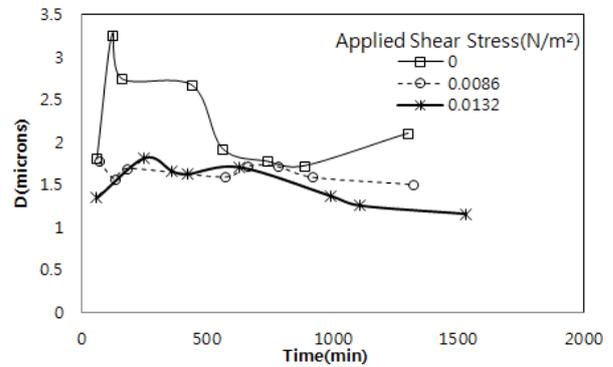


Fig. 4. Floc size of silica when increasing bed shear stress at 5g NaCl/L and pH6.8 in mini flume.

pH4.2일 경우 즉 HCl 첨가 시 최대 3.6 μm 이지만 염분농도 10g NaCl/L에서는 최대 8.3 μm 까지 증가함을 나타낸다.

Fig. 4는 염분농도 5g NaCl/L일 경우 증류수에서 전단응력 변화에 따른 점착성 미립자(실리카) 입경(D)의 변화를 나타냈다. 플렉입자의 평균입경(D_m)은 바닥전단응력이 0 N/m^2 일 경우 2.0 μm 이었지만 바닥전단응력이 0.0086 N/m^2 와 0.0132 N/m^2 로 증가할 때 평균입경(D_m)은 각각 1.5 μm 와 1.3 μm 으로 감소하였다.

3.2 플렉크기에 따른 침강속도와와의 관계

실리카의 침강속도를 측정하기 위해 초기농도 7 g/L일 경우 증류수에서 이온 NaCl과 HCl 및 NaOH를 첨가하였다. 부유농도변화는 식 (1)에 따라 산정되었다.

Fig. 5는 이온 및 바닥전단응력 변화에 따른 퇴적속도와 퇴적확률을 고려한 침강속도를 나타낸다. 즉 pH6.8과 pH4.2 그리고 염분농도 5g NaCl/L와 10g NaCl/L일 경우이며, 바닥전단응력 변화는 0 ~ 0.0132 N/m^2 범위이다. 침강속도와 플렉입자의 크기와 관계는 Table 1의 No. 4의 모형과 같은 관계식으로 나타났다. pH6.8과 pH4.2일 경우 침강속도와 플렉입경과의 관계식 a는 0.001이며, b는 각각 1.9와 2.0이다. 염분농도 0 ~ 10g NaCl/L일 경우 침강속도와

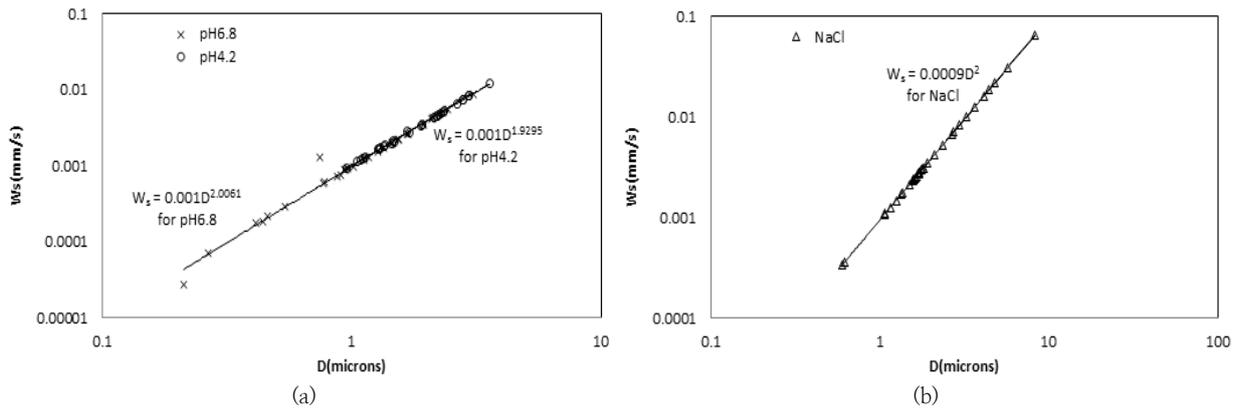


Fig. 5. Settling velocity of silica as a function of floc size at (a) pH and (b) NaCl concentration.

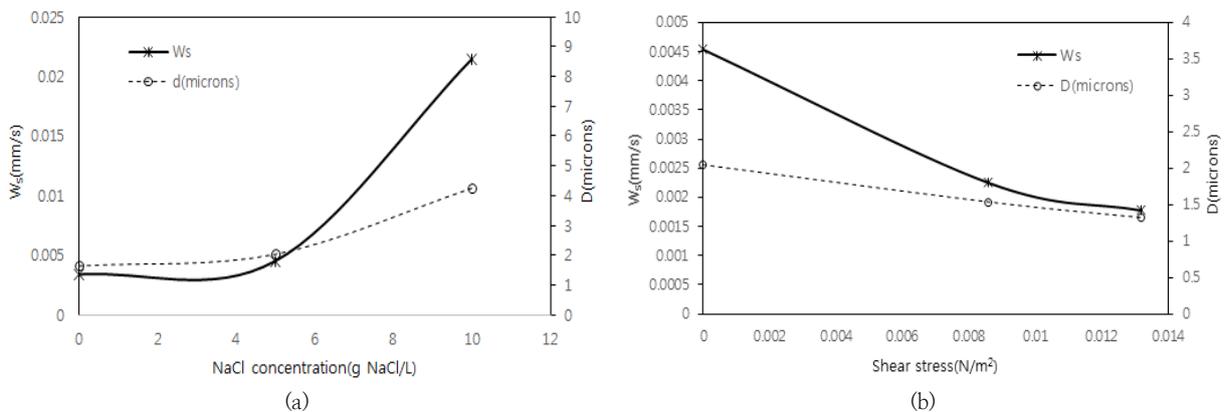


Fig. 6. Settling velocity of silica as a function of floc size when increasing (a) NaCl concentration and (b) bed shear stress at 5g NaCl/L in mini flume.

플러크기의 입경과의 관계식 a 는 0.0009이며, b 는 2.0이다. 실리카의 침강속도는 동일한 초기농도 7 g/L과 HCl(=pH 4.2)이온의 영향아래 최대 0.012 mm/s인 반면 NaCl(=10g NaCl/L)이온의 영향아래 최대 0.064 mm/s이다. 즉 실리카의 초기농도 7g/L일 경우 NaCl(=10g NaCl/L)이 HCl(=pH 4.2)이온 보다 5배 이상 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 6a는 염분농도 0 ~ 10g NaCl/L일 경우 침강속도와 플러크입자의 크기를 나타낸다. 염분농도 0g NaCl/L일 경우 플러크입자의 평균입경(D_m)은 1.65 μ m이며, 이때 평균침강속도는 0.0034mm/s이다. 염분농도 5g NaCl/L으로 증가할 경우 플러크입자의 평균입경(D_m)은 2.0 μ m이며, 이때 평균 침강속도는 0.0045 mm/s로 증가하였다. 또한 염분농도 10g NaCl/L 증가할 경우 플러크입자의 평균입경(D_m)은 4.5 μ m이며, 평균침강속도도 0.021 mm/s로 증가하였다. 즉 염분농도가 10g NaCl/L로 증가할 경우 염분농도 0g NaCl/L보다 평균침강속도는 6.17배 증가하였음을 볼 수 있다.

Fig. 6b는 염분농도 5g NaCl/L일 경우 바닥전단응력 변화에 따른 침강속도와 플러크크기를 나타낸다. 바닥전단응력 0 N/m²일 경우 평균침강속도는 0.0045 mm/s이고 플러크입자의 평균입경(D_m)은 2.0 μ m이다. 바닥전단응력이 0.0086 N/m²으로 증가할 경우 평균침강속도는 0.0022

mm/s이고 플러크입자의 평균입경은 1.5 μ m로 감소하였다. 또한 바닥전단응력 0.0132 N/m²일 경우 평균침강속도는 0.0018 mm/s이고 플러크입자의 평균입경(D_m)은 1.32 μ m로 점점 더 감소하였다. 바닥전단응력 0 N/m²일 경우 평균 침강속도는 바닥전단응력 0.0132 N/m²일 보다 2.5배 크다.

3.3 플러크기를 고려한 예측농도와 실측농도

플러크기를 고려한 모형(Table 1)들을 적용한 예측농도와 바닥전단응력과 이온변화에 따른 실리카의 실측농도와 비교하였다. 실리카의 부유농도는 pH6.8과 pH4.2 그리고 5g NaCl/L일 경우 바닥전단응력 0.0086N/m²와 0.0132 N/m²에서 측정이 이루어졌다(Table 2). Fig. 7과 같이 수중에 존재하는 실리카 입자가 동일한 난류흐름일 경우 pH 6.8보다 pH 4.2에서 HCl 영향을 크게 받아 플러크현상이 발생한다. 또한 pH4.2와 5g NaCl/L일 경우 시간-농도곡선이 빠르게 감소하였다. 즉 난류흐름일 경우 수중에서 음이온을 띠는 실리카 입자는 증가되는 Na^+ 와 Cl^- 의 이온교환으로 쉽게 플러크현상을 일으킨다.

플러크기에 영향을 받는 침강속도는 Winterwerp(1998), Cheng(1997), Zanke(1977) 및 Kajihara(1971)와 Lick and Huang (1993)가 제시한 경험공식을 사용하였다(Table 1).

Table 2. Summary of experimental conditions(C_0 : initial concentration, h: water depth)

Run No.	Type of test	C_0 (g/L)	Temp. (°C)	τ_s (N/m^2)	pH	NaCl(g/L)	h(m)
N1	Settling	7	21.0	0.0086	6.8	0	0.17
N2	Settling	7	19.8	0.0086	4.2	0	0.17
N3	Settling	7	21.4	0.0086	6.8	5	0.17
N4	Settling	7	20.5	0.0132	6.8	0	0.17
N5	Settling	7	20.0	0.0132	4.2	0	0.17
N6	Settling	7	19.0	0.0132	6.8	5	0.17

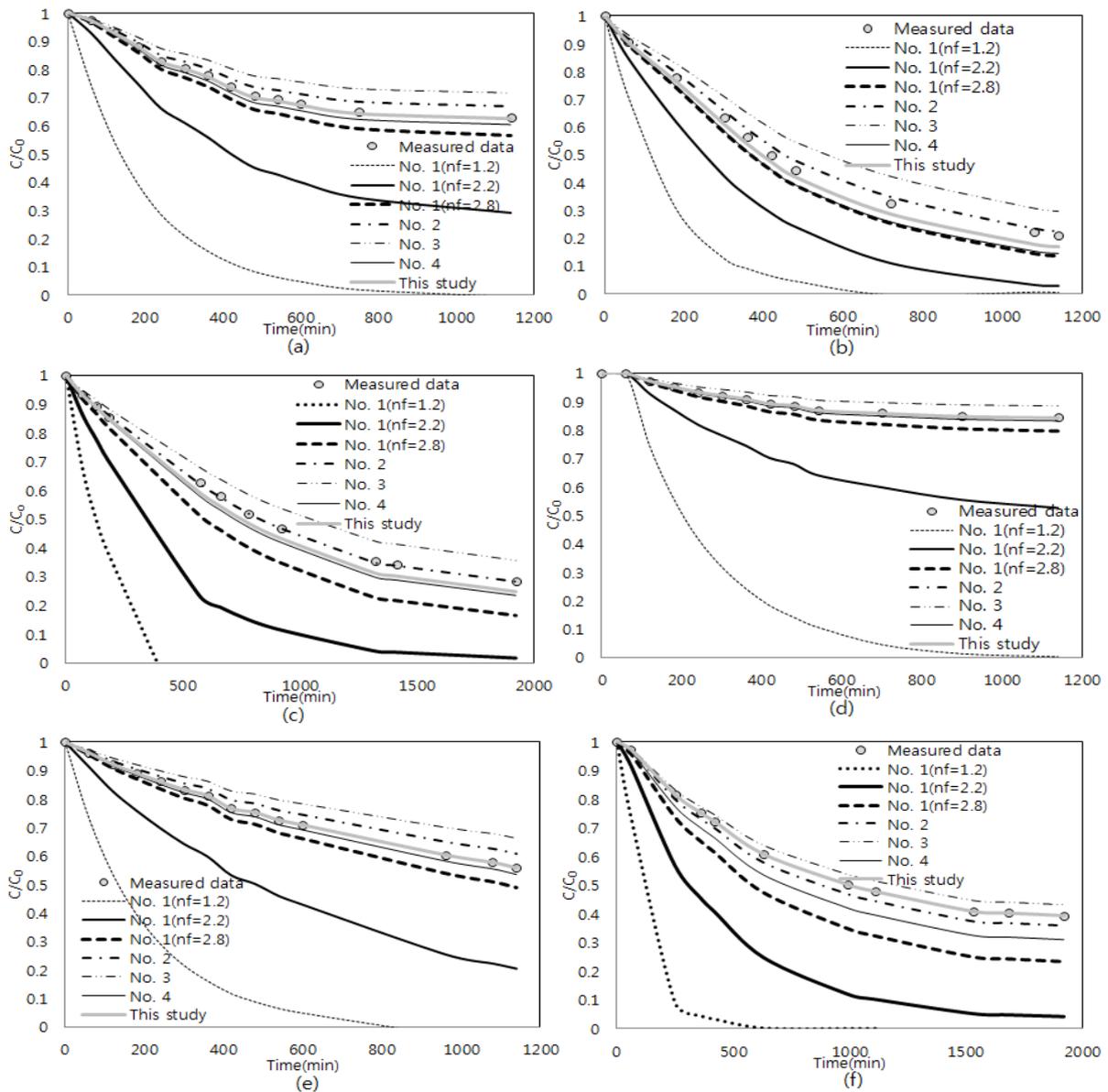


Fig. 7. Measured and calculated concentration-time curves during settling for (a) N1, (b) N2, (c) N3, (d) N4, (e) N5 and (f) N6.

예측농도(C)는 앞서 언급한 다양한 경험공식인 침강속도 (W)와 퇴적속도와 퇴적확률(P)을 고려한 식 (1)을 사용하였으며, 질량보존의 법칙에 따라 차분법에 따라 산정되었다.

Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 Winterwerp(1998)의 경험 공식은 플럭크기 뿐만 아니라 프렉탈 차원(=nf)에 영향을

받으며, Cheng(1997), Zanke(1977) 및 Kajihara(1971)와 Lick and Huang (1993)가 제시한 경험공식들은 플럭크기에 영향을 크게 받는다. 여기서 플럭크기는 침강 분석법에 의해 연구되었으며, 침강속도(=h/t) 대신 식 (1)에 따라 농도에 의해 산정된 침강속도를 적용하였다. 일반적으로 농도

예측에 사용되는 Cheng(1997)의 공식을 적용할 경우 예측 농도는 실측치 농도와 큰 차이를 나타낸다. Zanke(1977)의 공식을 적용한 예측농도는 N1, N5 및 N6일 경우 약간의 차이는 보이지만 N2, N3 및 N4에서 실측치 농도와 비슷한 경향을 나타낸다. Kajihara(1971)와 Lick and Huang (1993)가 제시한 공식을 적용할 경우 예측농도는 N6을 제외하고 실측치와 비슷한 경향을 나타낸다.

또한 Winterwerp(1998)의 경험공식은 입자입자(=d)와 프랙탈 차원(=n_f)에 영향을 받으며, 이때 초기입경은 입도 분포의 중앙입경을 사용하였다. 프랙탈 차원 n_f가 1보다 작을 경우 실측치 농도와 큰 차이를 나타내지만 n_f가 증가할수록 실측치 농도에 근접한 값을 보인다. 특히 본 연구에서 퇴적속도와 Partheniades(1992)의 퇴적확률(P)을 고려한 예측농도는 N3을 제외하고는 실측치 농도와 가장 근접한 부유농도분포를 보이며, 비슷한 경향을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구는 소형 환형수조에서 바닥전단응력 변화와 이온(NaCl, HCl, NaOH) 영향을 고려하여 점착성 유사(실리카)의 침강특성에 영향을 주는 플럭입자, 플럭입자와 침강속도와 관계, 예측농도와 실측농도변화 등에 관한 실험을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실리카(SiO₂) 입경은 정지수면에서 뿐만 아니라 난류 흐름에서도 HCl와 NaCl의 영향을 받는다. 하지만 바닥전단응력이 증가할 경우 난류흐름으로 말미암아 플럭입자는 분열되며, 입자의 크기는 감소함을 나타낸다. 특히 바닥전단응력이 증가함에도 불구하고 pH4.2조건에서보다 10g NaCl/L조건에서 플럭입자가 크게 나타난다.

2) 바닥전단응력 0 N/m²일 경우 플럭입자의 최대 침강속도는 pH4.2조건에서 0.012 mm/s이고 10g NaCl/L조건에서는 0.064 mm/s이며, 10g NaCl/L조건일 경우 pH4.2 조건에서보다 5배 이상 증가한다. 따라서 점착성 유사의 침강특성에 영향을 주는 침강속도는 HCl보다 증가된 NaCl의 영향을 더 받으며, 빠르게 침전된다.

3) 흐름변화에 따른 이온의 영향아래 4개의 모형에 의해 산정된 예측농도와 실측농도를 비교하였다. 이때 농도로 결정된 침강속도를 적용하여 Stokes' Law으로 플럭입자의 크기를 산정하였으며 4개의 모형에 적용하였다. 그 결과 4개의 모형 모두 실측농도와 비슷한 경향을 보였지만 모형 No.3(Cheng 모형)을 제외한 모형 No. 2 및 No. 4와 본 연구에서 예측된 농도-시간곡선이 실측된 농도-시간 곡선과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 특히 No. 1의 모형은 플럭크기와 프랙탈 차원(=n_f)의 영향을 크게 받고 있음을 나타낸다. 따라서 본 연구의 간단한 방식에 따라 결정된 플럭입자를 모형들에 적용한다면 쉽게 점착성 유사의 침강거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 침강실험에 따른 간단한 평가기법은 수질변동과 점착성 유사의 동적거동 예측시스템 개발에 활용될 수

있을 것이다. 좀 더 명확한 해석과 예측시스템 입력자료 구축을 위해서는 기타 인자(유사입자의 형태, 유사의 광학적 인 성질, 밀도변화, 온도, 유속 등)에 대한 지속적인 연구가 이루어질 필요가 있다고 본다.

사 사

이 논문은 2017년 서일대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구함.

References

- Cheng, NS (1997). A simplified settling velocity formula for sediment particle. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2), 149-152.
- Choi, IH and Kim, JW (2014). Experimental study on erosional behaviour of fine-grained sediments. *J. of Korean Society Hazard Mitigation*, 14(3), pp. 863-872. [Korean Literature]
- 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]
- 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]
- Choo, TH, Kim, YH, Park BS, Kwon, JW and Cho, HM (2017). Proposal for estimation method of the suspended solid concentration in EIA. *J. of Wetlands Research*, 19(1), pp. 30-36. [Korean Literature]
- Hwang, KN, Kim, HM and Ahn, IJ (2008). A laboratory study on erosional properties of fine cohesive sediments from Saemankeum artificial lake. *J. of Korea Water Resources Association*, 41(5), pp. 473-482. [Korean Literature]
- Kajihara, M (1971). Settling velocity and porosity of large suspended particle. *J. of the Oceanographical Society of Japan*, 27(4), pp. 158-162.
- Kim, JW and Nestmann, F (2009). Settling behavior of fine-grained materials in flocs. *J. Hydraul. Res.* 47(4), pp. 492-502.
- 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.
- Lick, W and Huang, H (1993). Flocculation and the physical properties of flocs. *In: Coastal and Estuarine Studies* 42, Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, 21-39. American Geophysical Union.
- Lick, W, Lick, J and Ziegler, CK (1992). Flocculation and its effect on the vertical transport of fine-grained sediments.

- Hydrobiologia, 235/236(1), pp. 1 – 16.
- Maggi, F, Mietta, F and Winterwer, JC (2007). Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution suspended cohesive sediment. *J. Hydrology* 343, pp. 43 – 55.
- Mehta, AJ and Partheniades, E (1975). An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. *J. of Hydraulic Research* 13(4), pp. 361–381.
- Partheniades, E (1992). Estuarine sediment dynamics and shoaling processes. In: Herbick, J. (ed), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, 3, pp. 985–1071.
- Son, M (2011). Measurement of settling velocity, size and density and analysis of fractal dimension of cohesive sediment. *Korean J. Limnol.*, 44(1), pp. 58–65. [Korean Literature]
- 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.
- Van Leussen, W (1994). *Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport*. Ph.D. Thesis, University Utrecht.
- 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]
- Whitehouse, UG, Jeffrey LM and Debbrecht JD (1960). Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters. In: A. Swineford (ED.) *Clays and Clay Minerals*, 7th, Washington DC, 195. Pergamon Press, New York, pp. 1–79.
- Winterwerp, JC (1998). A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *J. Hydraul. Res.* 36(3), 309–326.
- Zanke, U (1977). *Berechnung der Sinkgeschwindigkeit von sediment*. Band 46 der Reihe Mitteilungen des Franzius – Instituts fuer Wasserbau und Kuensteningenieurwesen der TU Hannover. [German Literature]
- Zhu, Z, Wang, H, Yu, J and Dou, J (2016). On the kaolinite floc size at the steady state of flocculation in a turbulent flow. PLoS ONE 11(2): e0148895. doi:10.1371/journal.pone.0148895.